

原子力規制庁 御中

平成25年度高経年化技術評価高度化事業
(経年プラントの総合的な安全評価体系の整備)

成果報告書

< 第3分冊 >

平成26年3月

MRI株式会社三菱総合研究所

本報告書は、原子力規制庁の委託業務により、三菱総合研究所が、北海道大学、東北大学、長岡技術科学大学、東京大学、東京工業大学、名古屋大学、福井大学、京都大学、大阪大学、首都大学東京、福島工業高等専門学校、早稲田大学、立命館大学、発電設備技術検査協会、原子力安全システム研究所及び日本核燃料開発との連携により作成し、原子力規制庁へ納品したものです。

したがって、本資料の公開、複製、転載、引用等には、原子力規制庁の承認が必要です。

目 次

1 序論	1-1
1.1 事業目的	1-1
1.2 事業項目	1-1
1.3 事業遂行体制	1-1
1.4 実施スケジュール.....	1-2
1.5 事業概要	1-2
2 技術情報基盤の整備.....	2-1
2.1 経年プラントの安全評価の体系化及び安全評価手法開発に関する調査研究.....	2-1
2.1.1 システム安全の体系化.....	2-2
2.1.2 経年プラント安全評価手法整備.....	2-102
2.1.3 安全評価指標.....	2-155
2.1.4 燃料安全体系化.....	2-210
2.1.5 漏えい評価の基準化.....	2-232
2.2 機器の機能劣化に基づくシステム安全評価に関する調査研究.....	2-368
2.2.1 コンクリート建屋・システム安全.....	2-368
2.2.2 ケーブル・システム安全.....	2-380
2.3 システム安全評価に資する知識ベース構築.....	2-393
2.3.1 知識ベースシステムの機能要件実現に係る調査研究.....	2-393
(1) データベース・知識ベース構築.....	2-393
(2) システム安全評価データ共有・活用手法.....	2-407
2.3.2 プロアクティブ潜在事象評価.....	2-429
3 経年劣化事象に係る安全基盤研究の実施.....	3-1
3.1 炉内構造物の経年劣化に係る評価手法の高度化.....	3-1
3.1.1 中性子照射材の破壊強度予測法の検討.....	3-7
3.1.2 中性子照射材の破壊評価法に検討.....	3-131
3.2 疲労に伴う圧力バウンダリの構造健全性評価と劣化対策の高度化.....	3-186
3.2.1 疲労健全性評価グランドデザイン構築.....	3-186
3.2.2 環境疲労メカニズム解明と評価手法高度化.....	3-300
3.2.3 疲労割れ非破壊評価の高信頼化.....	3-318
3.2.4 熱疲労評価手法の高度化.....	3-606
3.3 電気・計装システムの長期健全性評価に係る調査研究.....	3-832
3.3.1 原子力発電所低圧ケーブルの非破壊劣化診断法の選定と適用可能性の検証..	3-834

3.3.2	原子力発電所に布設されたケーブルの高温・高放射線環境下での絶縁機能低下メカニズムの解明.....	3-1010
3.4	コンクリート構造物の長期健全性評価に係る調査研究.....	3-1085
3.4.1	コンクリート構造物の複合劣化メカニズム解明と長期健全性評価手法の高度化.....	3-1085
3.4.2	放射線照射を伴うコンクリート構造物の長期健全性評価手法の検討.....	3-1224
4	事業進捗の管理と成果総括に係る活動の実施.....	4-1
4.1	実施概要.....	4-1
4.2	事業遂行スキームの構築.....	4-1
4.2.1	採択研究テーマと実施項目.....	4-1
4.2.2	研究進捗管理・取りまとめのための会議体の設置.....	4-3
4.3	国際連携・国際情報発信に係る活動.....	4-6
4.3.1	はじめに.....	4-6
4.3.2	国際会議の開催.....	4-6
4.3.3	議事進行ならびに概要.....	4-8
4.3.4	IAEA との連携、情報収集.....	4-10
4.4	総括検討会の開催・運営.....	4-12
4.4.1	はじめに.....	4-12
4.4.2	開催概要.....	4-12
4.4.3	議論の概要および確認・決定事項.....	4-14
4.5	まとめ.....	4-15
5	結論.....	5-1

謝辞

3.3 電気・計装システムの長期健全性評価に係る調査研究

原子力プラントで使用されているケーブルは、高圧ケーブル、低圧ケーブル、同軸ケーブルに大別される。ケーブルの代表的な構造は、導体、絶縁体、介在、テープ及びシースにより構成されている。このうち絶縁体は架橋ポリエチレン、EP ゴム、シリコーンゴム等の高分子材料から成り、これによりケーブルの絶縁機能が維持されている。高分子材料の絶縁体は通常運転時の熱・放射線環境において酸化等により徐々に経年劣化が進行することが知られており、特に高経年化したケーブルについては状態の監視が必要である。

事故時に原子炉を安全に停止するために必要な機能（「止める」、「冷やす」、「閉じ込める」）を有する機器に電力を供給する機能や機器の監視・制御信号を伝達する機能を有するケーブルのうち、供用期間末期において LOCA 等の設計想定事故環境に晒された場合においてもその機能が維持されることが要求されているケーブルを「安全系ケーブル」と呼ぶ。例としては、原子炉冷却システムに電力を供給するケーブル、原子炉の状態を計測するケーブルが挙げられる。

安全系ケーブルは、格納容器外にも多量に布設されているが、環境の厳しさや重要度を考慮したときに、最も注目すべき対象と考えられる格納容器内に布設されている安全系ケーブルは、1本あたりの長さは数10メートル程度、200～300本程度あり総延長は数キロメートルになり、トレイ上または金属管内に布設されている。布設環境は炉型、プラント、布設箇所等により異なるが、格納容器内の最高温度は、概ね35～55℃程度、最高線量率は10～100mGy/h程度である。

日本においては、安全系ケーブルはIEEE規格をベースに策定された電気学会技術報告II部第139号「原子力発電所用電線・ケーブルの環境試験方法ならびに耐延焼性試験方法に関する推奨案」（以下、「電気学会推奨案」という。）に基づき、実ケーブルを用いた型式試験により前述の機能が維持できることの確認（環境認定試験。以下、「EQ試験」）が行われている。EQ試験では、まず、通常運転時の60℃程度の熱および0.5Gy/h程度の放射線による劣化を加速試験により付与（以下、「事前劣化試験」という。）する。その後、冷却材喪失事故（LOCA）等の設計想定事故環境に晒し、判定試験により健全性を判定する。

供用期間中においては、一般的に、安全系ケーブルは他のケーブルと同様に定期的な絶縁抵抗測定等により絶縁性能の確認を行っている。しかしながら、設計想定事象に晒された場合においても機能維持が可能であること（EQ状態が有効であること）については、EQ試験において健全性を確認することをもって担保するという考え方に基づいており、供用開始後に継続的な確認は行われていないのが実情である。

我々が提案する劣化位置標定手法（BIS法：広帯域インピーダンス分光法）がケーブル全長に亘って劣化位置の検出ができ、かつ劣化メカニズムの解明が進みBIS信号と劣化度の関係を明確にすることにより、劣化度の特定が可能な非破壊診断手法として確立された場合、安全系ケーブルが供用期間中に設計想定事象に晒された場合においても機能維持が可

能であることを確認する（以下、「Condition-based EQ」という。）手法としての活用が想定される。即ち、安全系ケーブルに対し、供用開始後から継続的に BIS 法を用いた劣化診断を実施して劣化トレンドを管理し、そのケーブルが合格した EQ 試験における事前劣化試験後（設計想定事故を模擬した試験を実施する前）に相当する劣化度（認定劣化度）に対し、余裕があることを確認する。トレンド管理により劣化が進行し、認定劣化度に近づいた場合、予防保全として取替え等の対策を講ずることができる。これらにより、安全系ケーブルの電力供給または制御信号伝達機能の信頼性を維持・向上することができ、即ち、当該ケーブルに接続されている設計想定事故時に機能することが必要な機器を含めた「止める」、「冷やす」、「閉じ込める」ためのシステム全体の信頼性向上に寄与することができる。

3.3.1 原子力発電所低圧ケーブルの非破壊劣化診断法の選定と適用可能性の検証

(1) 研究背景

2011年3月の震災では、商用運転中であった原子力発電所に重大な事故が生じた。高経年化が進んだ原子力発電所において、今回のような不測の事態に際しても安全な停止ができなくてはならない。今後原子力発電所が運転されるためには、上記に必要な全ての機器が通常時は勿論事故時に機能を維持できることの保証が必要となる。この視点に立ったとき、電力の供給、プラント状態の情報伝達や制御系を担い、安全運転と安全な停止の要となるケーブルをはじめとした電気設備の状態を常に監視・診断することは重要である。

原子力発電所でプラント状態の情報伝達や制御系に使用されている低圧ケーブルの状態監視のために、現在適用が検討されている手法としては、打鍵の押し込み深さに対する荷重の勾配を測定するインデントermモジュラス法があるが、運転中の診断は不可能であることや、劣化部での直接診断が必要であるといった理由により、現実に行われているのは絶縁抵抗測定のみである。以上のような状況より、運転中にもケーブルの端末部から全長にわたっての非破壊で劣化部の位置標定が可能な診断法の開発が急務である。

経済協力開発機構(OECD)から報告された「Research Efforts Related to Wire System Ageing in NEA Member Countries [NEA/CSNI/R(2004)12]」では、3つの共同研究を推奨している。その一つに、布設されたケーブルの全長に亘って探索が可能でかつ、現在の状態が把握できる、電氣的診断法や状態監視方法の開発研究がある。これには、先進的な電気技術・光学技術・超音波技術・宇宙技術などを活用して実機プラントに適用できるようにすべきであると提言している。

(2) 研究目的

原子力発電所構内に新規に布設される、あるいは既に布設されている安全系ケーブルに関して、布設時における損傷や長期使用における劣化状況を監視・診断する手法としての広帯域インピーダンス分光法(以下BIS法と略す)の適用性を検証し、非破壊劣化診断法として安全規制への反映を図る。

(3) 研究内容

ケーブルの複素インピーダンスは、絶縁体の誘電率に負に、体積抵抗率に正に依存する。したがって、絶縁体が劣化すると、複素インピーダンスは減少する。BIS法は、一般に周波数領域反射(Frequency Domain Reflectometry, FDR)法と呼ばれる手法の一種であり、種々の周波数の電圧または電磁波をケーブルに入射し、その電磁波がケーブル中の特性インピーダンスの変化した箇所から反射する信号を測定する。得られた入射電磁波と反射電磁波の電力比の周波数スペクトルを高速フーリエ逆変換(IFFT)により時間スペクトルに変換し、絶縁体内での電気信号の速度を乗じてケーブル上の距離の関数とすることで劣化位置を標

定する。印加する電圧または電磁波強度は低いので、ケーブルに試験による劣化が生じることのない非破壊的な手法である。

平成 18 年度～22 年度にわたった第 1 期において、ケーブル全体にわたり熱・放射線を同時に与え劣化させたケーブル絶縁体、部分的に物理的損傷、あるいは熱・放射線を同時に与えて劣化させたケーブル絶縁体について、BIS 法により劣化度評価および劣化位置標定の可能性を確認した。それを受けた、第 2 期の初年度である平成 23 年度では、実ケーブル布設環境におけるケーブル劣化位置標定の準備として、布設環境を模擬したモックアップの作成、未劣化ケーブルをモックアップに設置した状態でのリファレンスデータを測定した。さらに、測定周波数域の高周波数化およびケーブル接続部改良が、劣化位置標定感度の向上に効果があることを確認した。平成 24 年度は、原子力プラントでの実使用ケーブルの劣化を模擬した熱・放射線同時劣化を施した難燃エチレンプロピレンゴム (EPDM) 絶縁ケーブルを使用し、BIS 法による実布設環境におけるケーブルの劣化位置標定の可能性を検証した。また、ケーブル絶縁体の局所高温位置標定により、温度による特性インピーダンスの変化が誘電率の変化のみに起因するのであれば、本手法は、僅か 0.1% の特性インピーダンスの変化があれば、劣化位置を検出する能力があることになる。

今年度は、本手法の実布設環境における適用性の検証のために、熱・放射線同時劣化中におけるケーブルの劣化位置標定を試み、破断伸び値による劣化度測定との比較により、本手法の劣化位置標定感度を検証する。さらに、ケーブルの一部に歪みが生じている状態において、歪み箇所の位置標定の可能性についても検証する。歪み箇所が検出できることにより、布設時のケーブルへの損傷が把握できるため、本手法における歪み位置標定は本事業にとって重要な意味を持つ。

(4) 期待される成果

実プラント布設ケーブルに対する非破壊ケーブル劣化診断法として本手法が適用可能かを判断する。検出可能な絶縁体の劣化度合いを確認し、より高感度化に向けた対策を講じる。また、局所的な高温箇所および歪み箇所の位置標定が可能となれば、ケーブル自体の温度監視や保全・点検時の損傷の有無とともに、布設されたケーブルの周辺の機器の監視にも、本手法が適用できる。また、特性インピーダンスがどの程度変化する劣化まで、本 BIS 法が検出できるかが明確になる。これにより、高経年化プラントや稼働中プラントの総合的なシステム安全性向上に大いに寄与ができる。

(5) 実施方法

実プラントにおける運用中布設ケーブルの劣化位置標定を模擬するために、熱・放射線同時照射中に測定を行う。照射施設布設時と照射中との劣化位置標定波形の比較や差スペクトルにより、劣化位置を推定する。また、照射中に恒温槽の温度を下げ、加熱による影響を測定し、得られたピークが劣化によるものか、温度上昇によるものかを検証する。ま

た、クランプによる歪みを付与することにより、BIS法の局所歪み位置標定の可能性を検証する。さらに、引っ張り破断伸び値の結果と合わせ、全ての成果をもとに、実プラント布設ケーブルに対しての本手法の非破壊ケーブル劣化診断法としての妥当性を評価する。

(6) 実施体制

図 3.3.1-1 に示す通り、早大が全面的に実験を遂行するが、試料供給等には日立金属が、放射線照射においては JAEA が、機械特性試験においてはコベルコ科研が協力する。

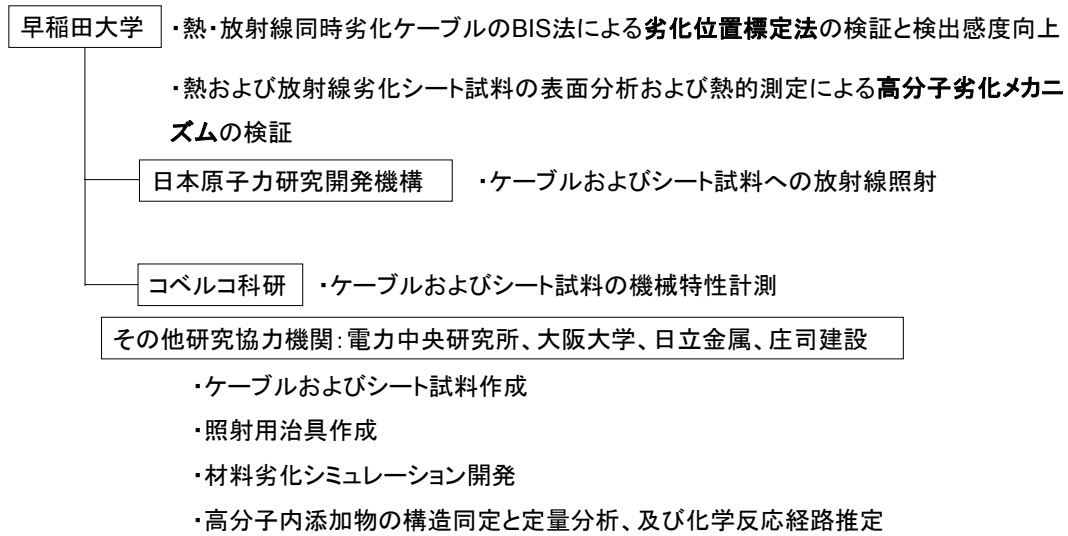


図 3.3.1-1 研究体制

(7) 実施内容

今年度は、運用中の原子力発電所内において布設されたケーブルを模擬するために、放射線照射施設にケーブルを設置して熱・放射線同時劣化中に BIS 法による劣化位置標定の可能性を検証する。また、局所的に歪みを施し、BIS 法による局所歪み箇所の位置標定も試みる。以上により、BIS 法の劣化位置検出感度を明確にするとともに、BIS 法の非破壊劣化診断法としての実プラントへの適用性を検証する。全ての成果をもとに、実プラント布設ケーブルに対する本手法のケーブル劣化診断法としての能力を検証する。

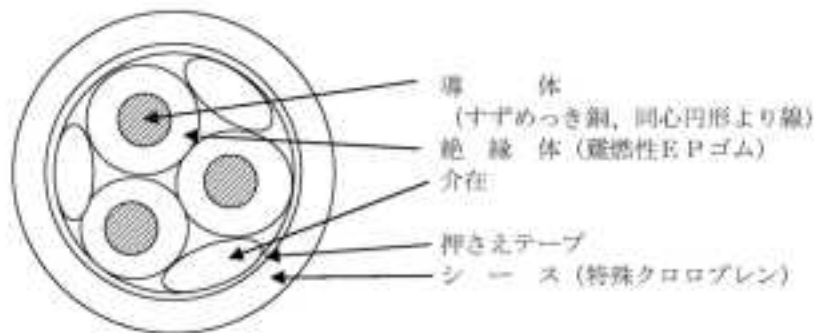
(8) 試験

今年度実施した内容を以下に示す。

1) 熱・放射線同時劣化中におけるケーブルの劣化位置標定

(a) 供試ケーブルの形状と基礎特性

測定に供試したケーブル形状と基礎特性を図 3.3.1-2 に示す。



導体		絶縁体 厚さ (mm)	シース 厚さ (mm)	仕上り 外径 (約) (mm)	最大 導体抵抗 (20℃) (Ω/km)	試験 電圧 (V/1分)	最小 絶縁抵抗 (20℃) (MΩ・km)	概算 質量 (kg/km)
公称 断面積 (mm ²)	構成 (本/mm)							
3.5	7/0.8	0.8	1.5	12.5	5.52	1 500	500	245

図 3.3.1-2 供試ケーブル形状

(b) 部分劣化ケーブルの劣化位置標定手法

部分劣化ケーブルとして使用するケーブルは、ケーブル長約 50 m の 3 芯難燃 EPDM 絶縁ケーブルである。部分劣化条件は、劣化温度 120℃、線量率 0.5 kGy/h で総線量 22 kGy～823 kGy である。この 823kGy の照射量は JNES の「原子力プラントのケーブル経年変化評価技術調査研究に関する最終報告書(JNES-SS-0903)」中に記載されている等価損傷線量データの重ね合わせ手法により、破断伸びが約 230%となるように設定する。劣化は ⁶⁰Co-γ 線照射室内に設置した恒温槽内で長さ約 40 cm にわたり施す。部分劣化ケーブルの劣化位

置標定は、加熱温度 120℃時放射線同時照射中、加熱温度 50℃時放射線照射中にケーブルを照射室に布設した状態で、ケーブル両端からネットワークアナライザ (E5061B, Agilent) により測定する。BIS 法は、一般に FDR 法と呼ばれる手法の一種であり、種々の周波数の電圧または電磁波をケーブルに入射し、その電磁波がケーブル中の特性インピーダンスの変化した箇所から反射する信号を測定する。ケーブルの特性インピーダンスは、絶縁体の誘電率に負に、体積抵抗率に正に依存する。したがって、絶縁体が劣化すると、特性インピーダンスは減少する。得られた入射電磁波と反射電磁波の電力比の周波数スペクトルを IFFT により時間スペクトルに変換し、絶縁体内での電気信号の速度を乗じてケーブル上の距離の関数とすることで劣化位置を標定する。本測定で使用した 3 芯ケーブルにおける測定では、3 芯のうち 2 芯を選択して一回の測定に供するので、1 本のケーブルについては、計 3 通りの組み合わせについて、測定周波数域 1.0MHz～1.5GHz まで 100MHz 毎に最高周波数を増加させてデータを取得する。その際、測定端とは反対側の 2 端子間は開放している。

部分劣化ケーブル絶縁材料については劣化前後に破断伸びを測定する。この測定のために、BIS 測定用ケーブルと同じケーブルで長さ約 30 cm のケーブルを 5 本用意し、1 本は未劣化時に、残り 4 本については、BIS 測定用ケーブルと同じ恒温槽で γ 線を約 133、239、453、823 kGy 照射後に各絶縁体を芯線から外し、一軸方向に延伸し破断時の伸びを測定する。

(c) 部分劣化ケーブルの劣化位置標定結果

図 3.3.1-3 に長さ 30 cm のケーブルの引っ張り破断伸びの計算値と測定値を示す。図より、いずれの色の絶縁体も約 823kGy の照射により、ACA 管理値 230%より強く劣化している。

図 3.3.1-4～図 3.3.1-123 に熱・放射線同時劣化中における難燃 EPDM 絶縁ケーブルの劣化位置標定結果を示す。なお、全ての図において、(i)に未劣化時と劣化時の波形を、(ii)に劣化時から未劣化時の波形を引いた差分波形をそれぞれ示している。まず、未照射時において、照射予定位置付近に他の位置より比較的大きなピークが確認できる。これは、照射室内の恒温槽にケーブルを設置する際、恒温槽の側面から引き出したケーブルが遮蔽壁に沿って大きく湾曲していることによるものと推定される。これについては、本章後半の歪み位置測定の結果についての項で述べるが、本診断法では、絶縁体の劣化に起因する特性インピーダンス変化だけでなく、物理的な静電容量の変化による特性インピーダンスの変化も検出可能である。20m 付近におけるピークは、全ての照射中測定データにおいて確認できる。つまり、本測定条件では、絶縁体の劣化と物理的な静電容量の変化の両者に起因する特性インピーダンス変化によるピークが検出される。後者の静電容量によるピーク強度は、未劣化時との差分を取ることで打ち消されるはずである。22kGy 照射時の差分スペクトルにおいては、一部の測定周波数域において 20m 付近に小さなピークを確認でき、97kGy 以上では、測定端子の組合せによる差は見られるが、いずれかの組合せにおいて測

定最高周波数が 200MHz～1.0GHz においてほぼピークが確認できる。このピーク強度は、1.0GHz 以上の測定周波数域においては確認できない。照射量の増加とともに、ピークが確認できる測定最高周波数は増加し、239kGy 以上の照射量では 1.5GHz の測定周波数においても確認できる。この照射量は約 400～450%の破断伸びの相当していることより、本測定手法の全ての測定周波数域においては、400%より低い破断伸びを示す劣化度を検出可能であると推定できる。この破断伸び値は ACA の管理値よりもはるかに軽度の劣化度に相当する。さらには、測定周波数域の制限はあるが、前述の通りに 97kGy 照射時において既にピークが確認できており、これは、約 500%の破断伸びに相当する劣化度であり、絶縁材料としてはその特性は十分保持した状態である。以上より、本測定手法は ACA 管理値よりもはるかに軽度に劣化した位置の検出が可能である。

図 3.3.1-124～図 3.3.1-138 に 22kGy 照射時の加熱温度 50℃と 120℃における難燃 EPDM 絶縁ケーブルの劣化位置標定データの未劣化時との差分スペクトルの比較を示す。照射を付与している 20m 付近にピークが確認できる測定周波数域においては、そのピーク強度は 120℃の方が大きいことがわかる。つまり測定時の温度を下げるとピーク強度は減少している。これは、24 年度の成果として報告したが、高分子の誘電率は温度によって増加あるいは減少し、この変化による特性インピーダンスの変化を本診断法は検出している。絶縁体は劣化していないので、昇温時に増加したピーク強度は、再度室温になれば元の強度まで減少する。本測定においても 22kGy 照射時において、測定時の温度を下げた時に、ピーク強度も下がった事実は、この時点で測定されたピーク強度には前述の曲げの影響とこの温度の影響の両者が含まれていることを示している。

(d) まとめ

長さ約 50 m の難燃 EPDM 絶縁ケーブルに局所的に熱・放射線同時劣化を施し、劣化中において BIS 法により劣化位置標定を試み、本診断法の劣化位置検出感度を検証した。

- (1) 劣化中のケーブル設置状態が変化しない条件では、本 BIS 法は、JNES の劣化指標値よりもはるかに軽度の劣化の位置を検出することができる。
- (2) 照射量が少ない時に検出されたピークは、温度による誘電率変化と物理的な静電容量変化に起因している。

2) ケーブル局所歪み箇所の標定

(a) はじめに

一般家庭や工場において、電気機器などに電力や制御信号を送るために、多くの高分子で絶縁されたケーブルや電線が使われている。ケーブルが機器に挟まれたり、押しつぶされたりして局所的な歪みが生じると、絶縁破壊やそれにとまなう停電や機器の故障に繋がる可能性がある。したがって、ケーブルの歪み監視は重要である。

一般に送電ケーブルの長さは非常に長い、工場内や屋内での配線等に用いられるケーブルには、100m以下の長さのものが多く、数10mの長さのケーブルにおいて歪みの生じている箇所を非破壊で正確に推定することができれば、非常に有意義である。

これまでも、ケーブルの診断法として、例えば、光ファイバを用いた手法が提案されている^{1, 2, 3, 4}。この手法では、診断対象ケーブルに沿って光ファイバを配置する必要があり、新規布設ケーブルに対しては適用できるが、既存ケーブルに対しての適用は困難である。

このような視点から、我々は、周波数領域反射測定(FDR)と高速フーリエ逆変換(IFFT)を原理とした非破壊ケーブル劣化位置標定法に注目し、現在までに、シースや絶縁体の剥離といった物理的損傷箇所⁵、 γ 線照射による劣化箇所^{5, 6, 7, 8, 9}、貫通水トリーを模擬した浸水部¹⁰の位置標定が可能なことを報告してきた。さらに、長さ32mの同軸ケーブルについて、長さ2.5cmの微小区間における5°Cという僅かな温度上昇部位を極めて明瞭に位置標定できることを報告した^{11, 12, 13}。また、もしケーブルの特性インピーダンスが誘電率の温度変

¹ 千野孝・石原勇人・天野一夫:「光ファイバ型温度センサを用いたケーブル線路故障点探査方法の検討ーケーブル部への適用の可能性ー」, 電学論B, Vol. 112, No. 7, pp. 578-584 (1992)

² 西本俊雄・小見山日出男・宮原務・館野文則・山之内宏・岩崎智磨:「光ファイバを用いた外傷検知線入り66kV CV海底ケーブルの開発」, 電学論B, Vol. 112, No. 10, pp. 921-926 (1992)

³ 滝波直樹・千野孝・吉田昭太郎・三浦功・渡辺和夫・天野一夫:「光ファイバ分布型温度センサによるケーブル故障点標定方法の開発」, 電学論B, Vol. 113, No. 5, pp. 535-542 (1993)

⁴ 李東輪・王道洪・高木伸之・渡辺貞司・加藤彬:「光ファイバを用いた送配電線路における故障点標定の一方法」, 電学論B, Vol. 121, No. 6, pp. 729-734 (2001)

⁵ 大木義路・平井直志:「広帯域インピーダンススペクトルのフーリエ解析によるケーブル劣化位置標定の可能性」, 電学論A, Vol. 132, No. 2, pp. 122-128 (2012)

⁶ N. Hirai, T. Yamada, and Y. Ohki: "Comparison of Broadband Impedance Spectroscopy and Time Domain Reflectometry for Locating Cable Degradation", Proceedings of 2012 IEEE International Conference on Condition Monitoring and Diagnosis, Bali, pp. 229-232 (2012)

⁷ T. Yamada, N. Hirai, and Y. Ohki: "Improvement in Sensitivity of Broadband Impedance Spectroscopy for Locating Degradation in Cable Insulation by Ascending the Measurement Frequency", Proceedings of 2012 IEEE International Conference on Condition Monitoring and Diagnosis, Bali, pp. 677-680 (2012)

⁸ Y. Ohki, N. Hirai, T. Minakawa, and T. Okamoto: "The Status Quo of Japanese Research on Assurance of Cable Integrity in Nuclear Power Plants", Third International Conference on Nuclear Power Plant Life Management, IAEA-CN-194-076, Salt Lake City (2012)

⁹ Y. Ohki, N. Hirai, T. Yamamoto, and T. Minakawa: "Improvement of Inspection and Maintenance Procedures of Polymeric Cable Insulation Used in Nuclear Power Plants in Japan", CIGRE Session 44, Paris, D1-109 (2012)

¹⁰ Y. Ohki, T. Yamada, and N. Hirai: "Diagnosis of Cable Aging by Broadband Impedance Spectroscopy", 2011 Annual Report, IEEE Conference on Electrical Insulation and Dielectric Phenomena, Cancun, pp. 24-27 (2011)

¹¹ Y. Ohki, T. Yamada, and N. Hirai: "Precise Location of the Excessive Temperature Points in Polymer Insulated Cables", IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation, Vol. 20, No. 6, pp. 2099-2106 (2013)

¹² 山田貴之・平井直志・大木義路・熊谷進:「周波数領域反射法によるケーブルの異常温度箇所の位置標定」, 電気学会誘電・絶縁材料研究会資料, DEI-13-035, pp. 39-44 (2013)

化にのみ依存するならば、この 5°C の温度上昇は特性インピーダンスを 0.1%変化させているに過ぎないと見積もられる。よって、本手法の感度は非常に高い可能性があることを報告した^{11, 12, 13}。難燃エチレンプロピレンゴム (EPDM) 絶縁 3 芯ケーブルを試料として、長さ 1.0cm に亘り歪みが与えられている場合、その箇所を本手法により正確に標定できることを示す。

(b) 実験手法

測定ケーブルは前項と同じ難燃 EPDM 絶縁 3 芯ケーブルであり、長さは 30m である。ケーブルに歪みを与える手法としては、幅約 1cm のクランプでケーブルを挟んでケーブルの径を縮めるように押しつぶした。

本診断法は、種々の周波数の電磁波をケーブルに入射し、その電磁波がケーブル中の特性インピーダンスの変化した箇所から反射する信号を測定する。ケーブルの特性インピーダンスは、絶縁体の誘電率やケーブルの静電容量に負に依存する。後述するが、絶縁体の密度が上がれば、誘電率は上昇する¹⁴。また、平行 2 線導体間の距離が縮むとき、静電容量は増大する。したがって、圧縮は、ケーブル等の静電容量を大きくする筈であり、特性インピーダンスを低下させることになる。

上記の特性インピーダンスの低下により生じた反射電磁波と入射電磁波の電力比の周波数スペクトルを測定し、これを IFFT により時間スペクトルに変換した上で、絶縁体内での電磁波の速度を乗じれば、ケーブル上の距離の関数として歪み箇所が標定できる。

本研究用に内蔵ソフトウェアを改良したネットワーク・アナライザ (E5061B, Agilent) の測定端子に、3 芯ケーブルの 3 本の導体の内の任意の 2 本の導体を接続し、反対側の 2 導体間は開放し、ケーブル等の一部に歪みを加えた状態で位置標定を行った。この際、周波数域 1.0MHz~1.5GHz に亘り最高周波数を 100MHz ずつ増加して 801 点測定し、IFFT を行った。なお、ネットワーク・アナライザへの接続に際しては、わに口端子を用いた。

(c) 実験結果

全長 30m の 3 芯ケーブルの端より 3.5m の位置を、幅約 1cm のクランプで挟みケーブルの径の両側から圧縮し、12.5mm の外径が 9.0mm 程度になるまで潰した。この状態で、1.0MHz~1.5GHz に亘り 100MHz ずつ最高周波数を増加させて電力比を取得し位置標定を行った。その結果を図 3.3.1-139~図 3.3.1-153 に示す。測定端子の組合せによる差はあるが、測定最高周波数が 200MHz 以上で歪み箇所にピークが現れ、測定周波数域の高周波数化につれて明瞭になっていく。測定端子の組合せの中では、赤と白の絶縁体の芯線の組合せにおいて、ピークが明瞭に検出できている。

¹³ Y. Ohki, N. Hirai, T. Yamada, and S. Kumagai: "Highly Sensitive Location Method of an Abnormal Temperature Point in a Cable by Frequency Domain Reflectometry", Proceedings of 2013 IEEE International Conference on Solid Dielectrics, Bologna, pp. 117-120 (2013)

¹⁴ 大木義路:「誘電体物性」, 培風館, pp. 85-86 (2002)

さらに、クランプを外して、外見上はケーブル外径がクランプで挟む前の径に戻った状態で、1.0MHz～1.5GHzに亘り100MHzずつ最高周波数を増加させて電力比を取得し位置標定を行った結果を図3.3.1-154～図3.3.1-168に示す。クランプを外した後においても、赤と白の絶縁体の芯線の組合せにおいて、測定最高周波数域が1.1GHz以上で、クランプで挟んでいた位置に明瞭にピークを確認できる。

(d) 考察

3芯ケーブルの内、測定に使用した2本の導体を平行2線無限長ケーブルの導体と見なせば、特性インピーダンス Z_0 は式(1)により近似できる^{15, 16}。

$$Z_0 = \sqrt{\frac{L}{C}} = \frac{1}{\pi} \cdot \sqrt{\frac{\mu}{\epsilon}} \cdot \log_e \left(\frac{D}{r} \right) \quad (1)$$

ここで、両導体の半径を r 、導体中心間の距離を D とした。3芯ケーブルの内、測定に使用した2本間のケーブルについて、0.1%の Z_0 の変化量に相当するケーブル導体中心間距離 D の減少率は、式(1)より約0.12%と計算できる。すなわち2本の導体間の元の D が、本測定で使用した3芯ケーブルの4.0mm(導体半径1.2mm、絶縁体厚さ0.8mm)のときには、 D がわずか5 μ m程度の変化をすれば標定可能となる。図3.3.1-154～図3.3.1-168においては局所的に歪みを与えたあとにクランプを外した後での測定時に約5 μ mを上廻る D のずれが残っていたものと考えられる。

(e) まとめ

長さ30mの難燃エチレンプロピレンゴム絶縁3芯ケーブルを用いて歪み箇所の位置標定をFDR法とIFFTを原理とした診断法により行った。

(1) 本手法においては、測定周波数域が1.0～200MHzと比較的低くても、歪みを与えられる前のケーブルのスペクトルが既知であれば、そのスペクトルとの差分を取ることで、長さ30mの3芯ケーブルに与えた幅1cm程の歪みの位置を標定できることがわかった。

(2) 本診断法では、測定最高周波数を増加させると測定分解能と感度が向上する。

¹⁵喜安善一・斉藤伸自：「電気回路」，朝倉書店，pp. 181-183 (1996)

¹⁶ Brian C. Wadell: "Transmission Line Design Handbook", Artech House, pp. 45-69 (1991)

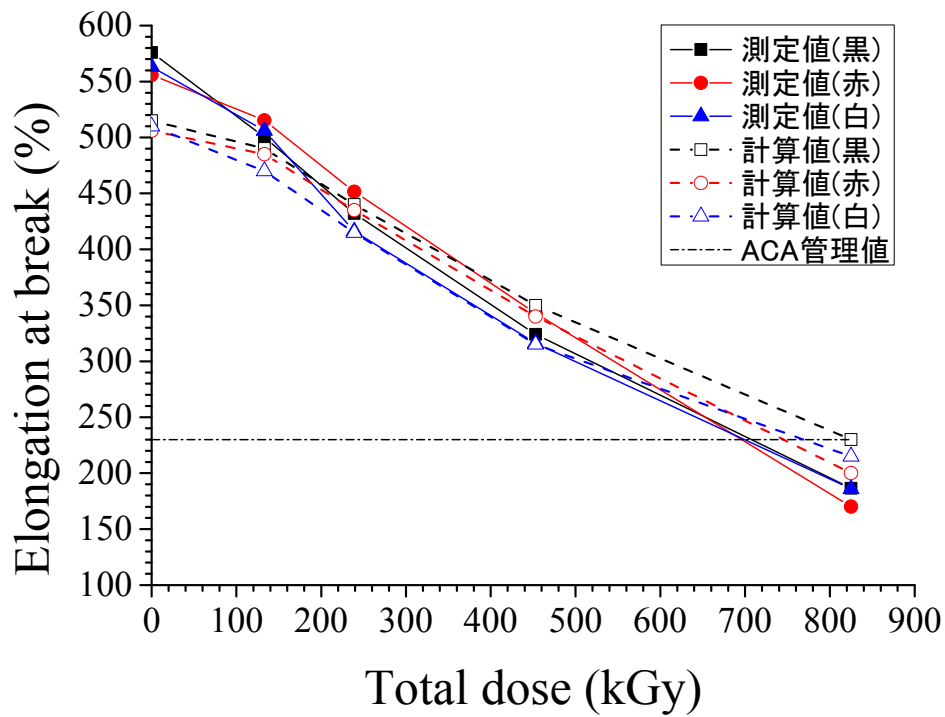
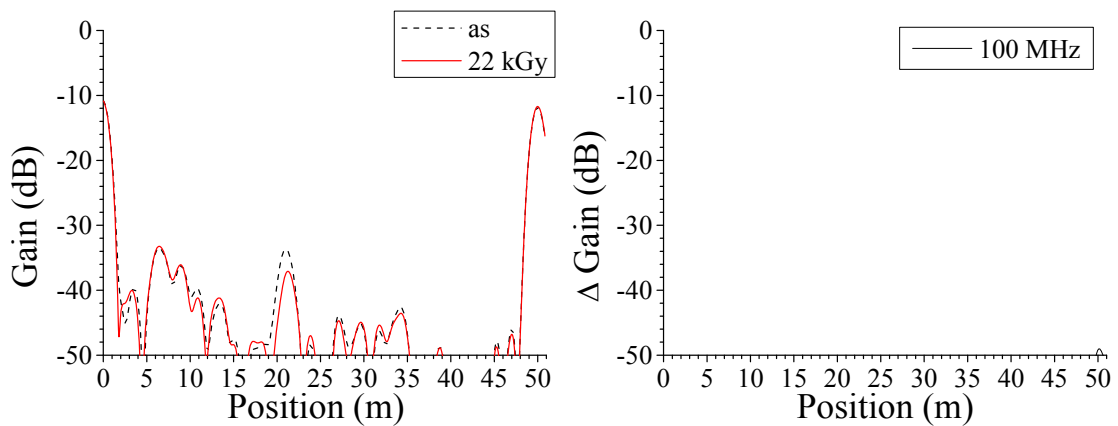


図 3.3.1-3 難燃 EPDM 絶縁ケーブルの引っ張り破断伸びの計算値と測定値

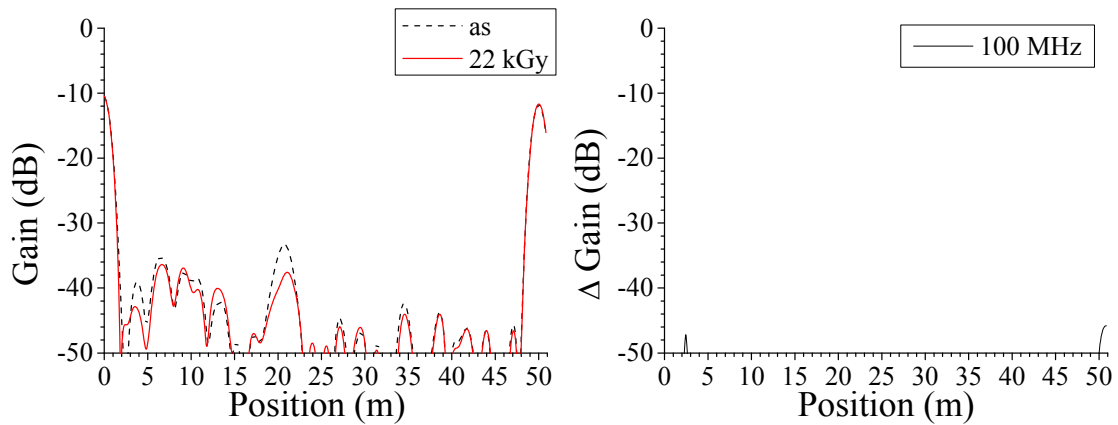
凡例中の色は絶縁体の色を示す。



(i)位置標定結果

(ii) 差分

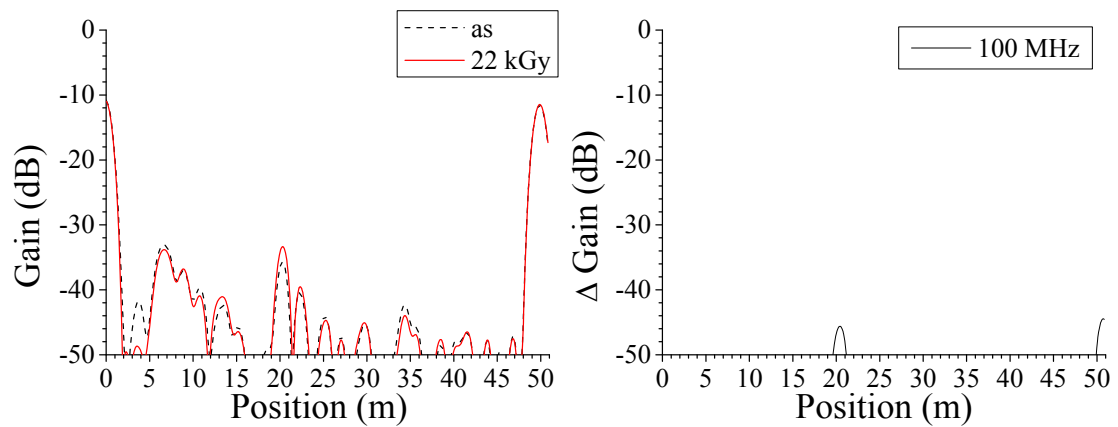
(a)測定端子：黒－赤



(i)位置標定結果

(ii) 差分

(b)測定端子：黒－白

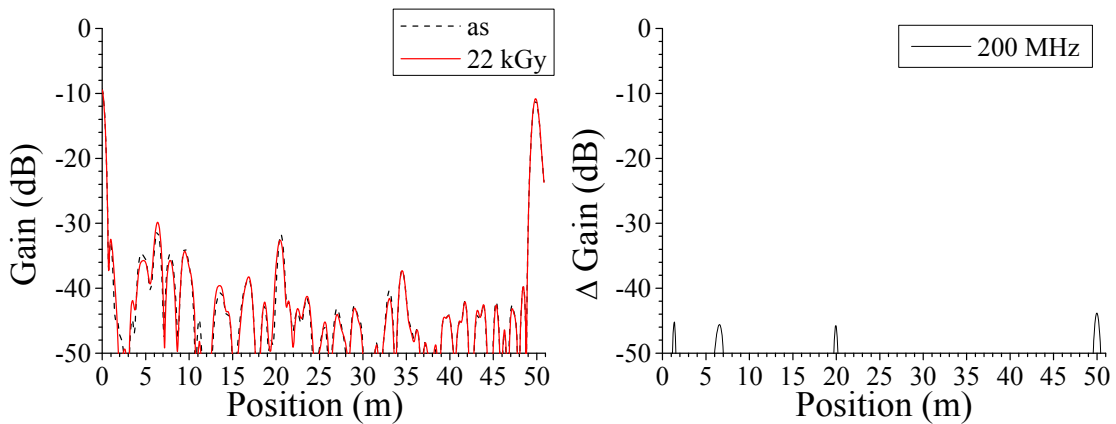


(i)位置標定結果

(ii) 差分

(c)測定端子：赤－白

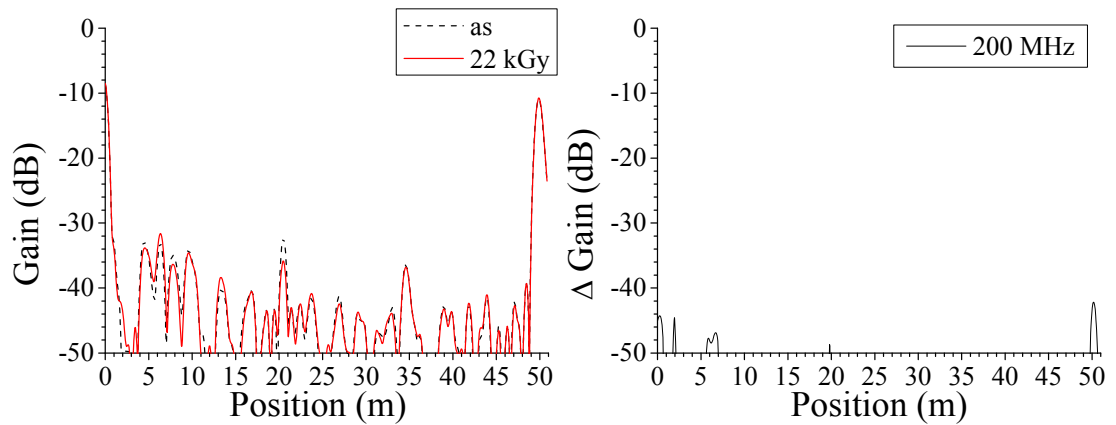
図3.3.1-4 BIS法による難燃EPDM絶縁ケーブル劣化位置標定結果:120℃、0.5kGy/h、44h、測定端－劣化部：20m、測定条件：熱・放射線同時劣化中、測定周波数域：1～100MHz、測定反対側端子：開放



(i)位置標定結果

(ii) 差分

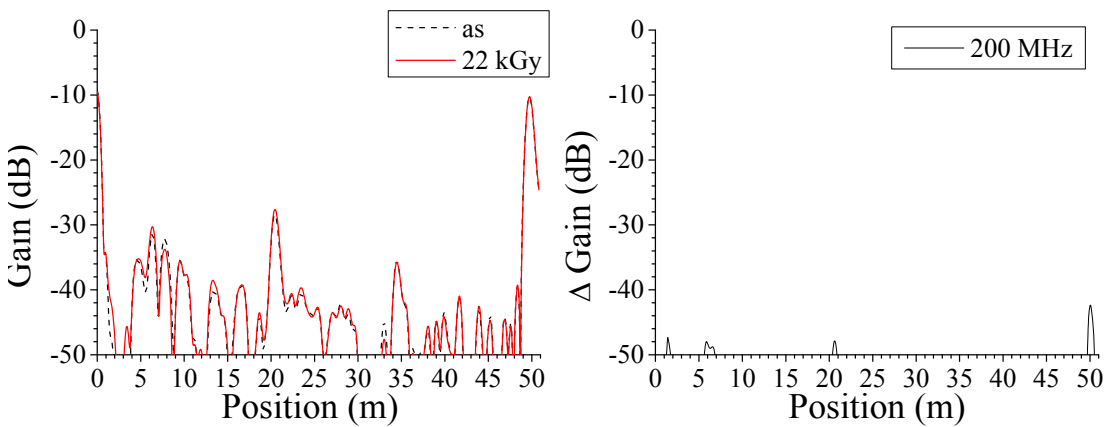
(a) 測定端子：黒－赤



(i)位置標定結果

(ii) 差分

(b) 測定端子：黒－白



(i)位置標定結果

(ii) 差分

(c) 測定端子：赤－白

図3.3.1-5 BIS法による難燃EPDM絶縁ケーブル劣化位置標定結果:120°C、0.5kGy/h、44h、測定端－劣化部：20m、測定条件：熱・放射線同時劣化中、測定周波数域：1～200MHz、測定反対側端子：開放

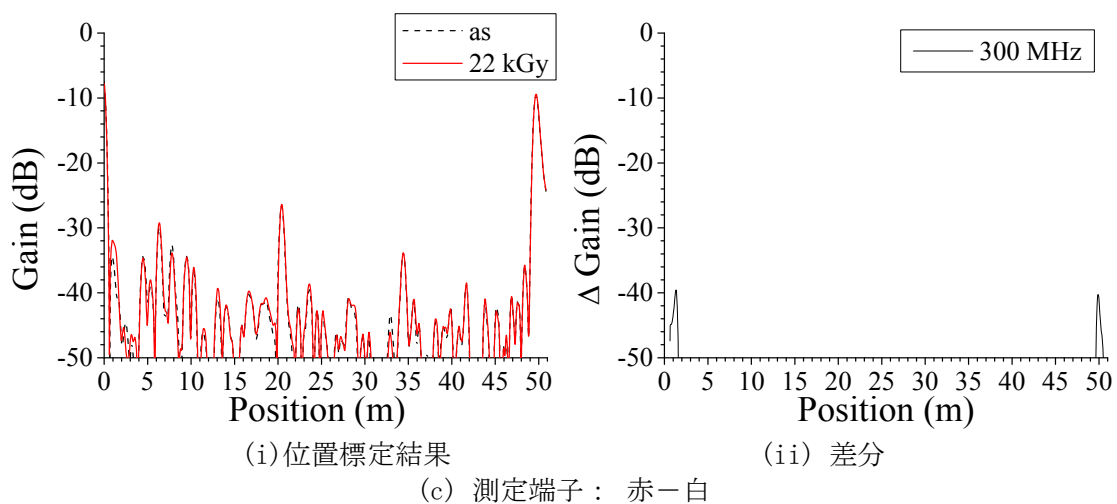
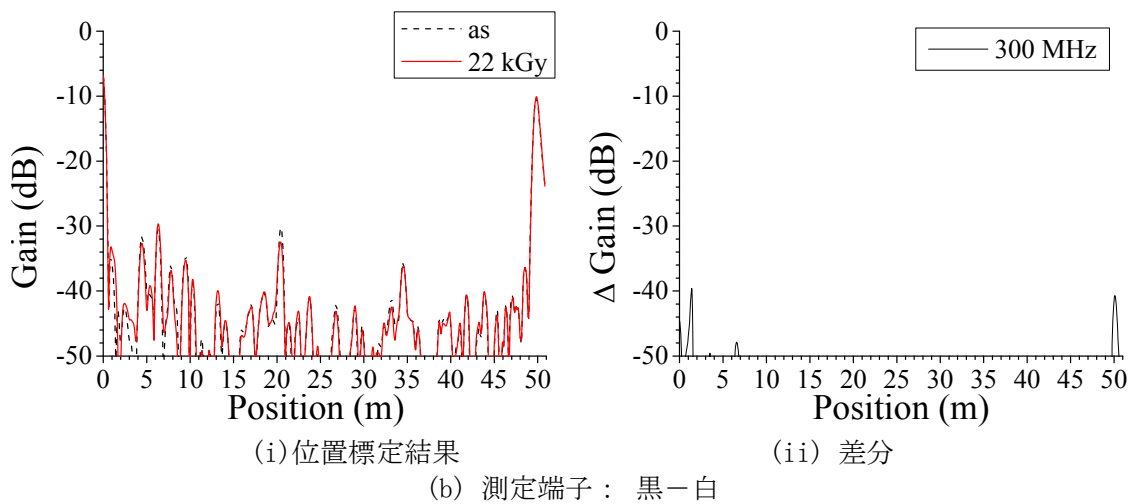
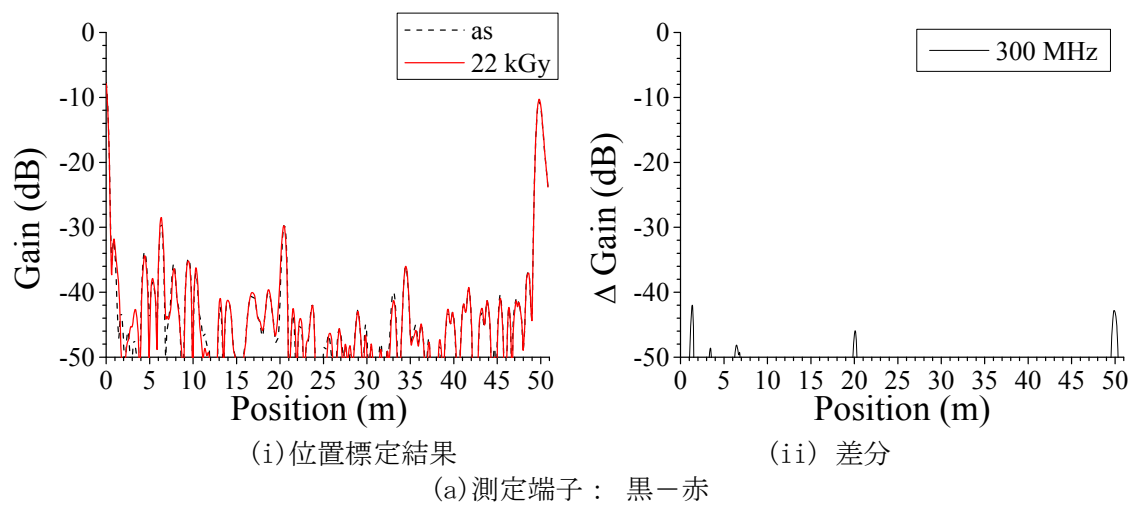
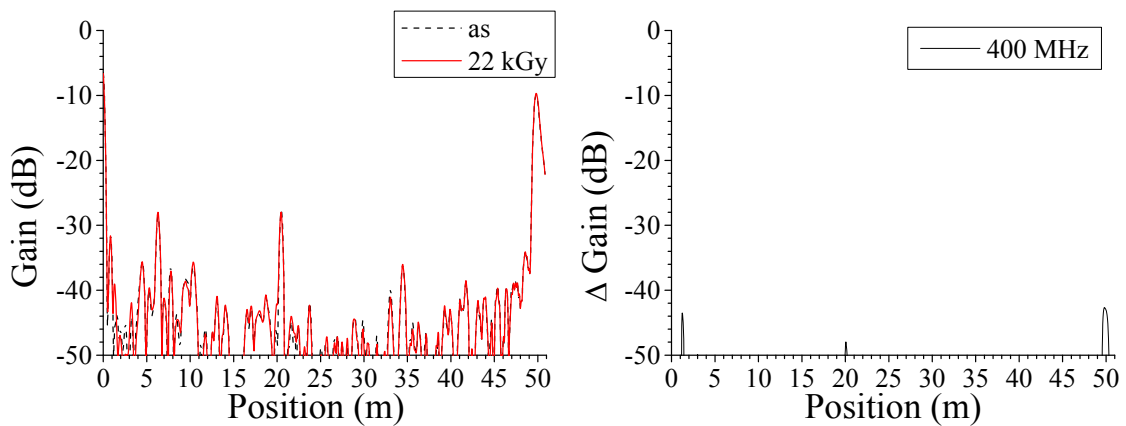


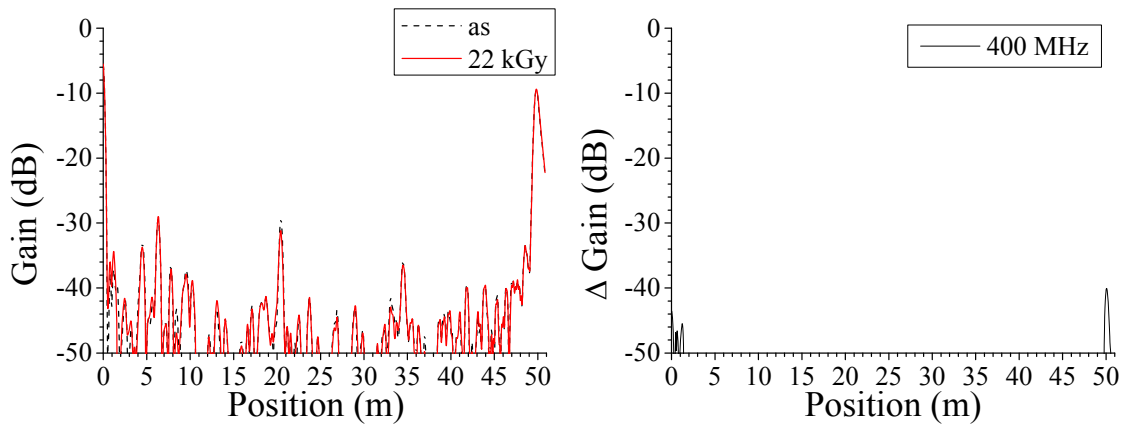
図3.3.1-6 BIS法による難燃EPDM絶縁ケーブル劣化位置標定結果:120°C、0.5kGy/h、44h、測定端—劣化部：20m、測定条件：熱・放射線同時劣化中、測定周波数域：1～300MHz、測定反対側端子：開放



(i)位置標定結果

(ii) 差分

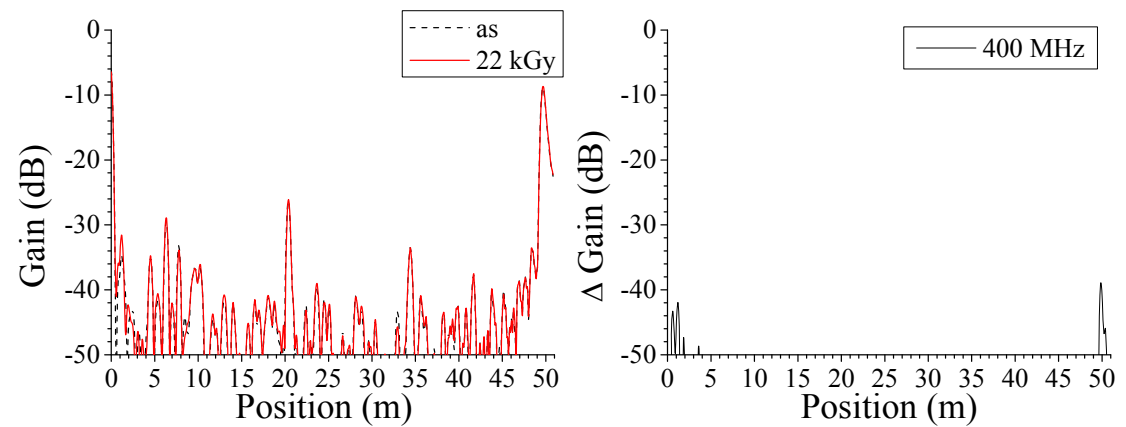
(a)測定端子：黒-赤



(i)位置標定結果

(ii) 差分

(b)測定端子：黒-白

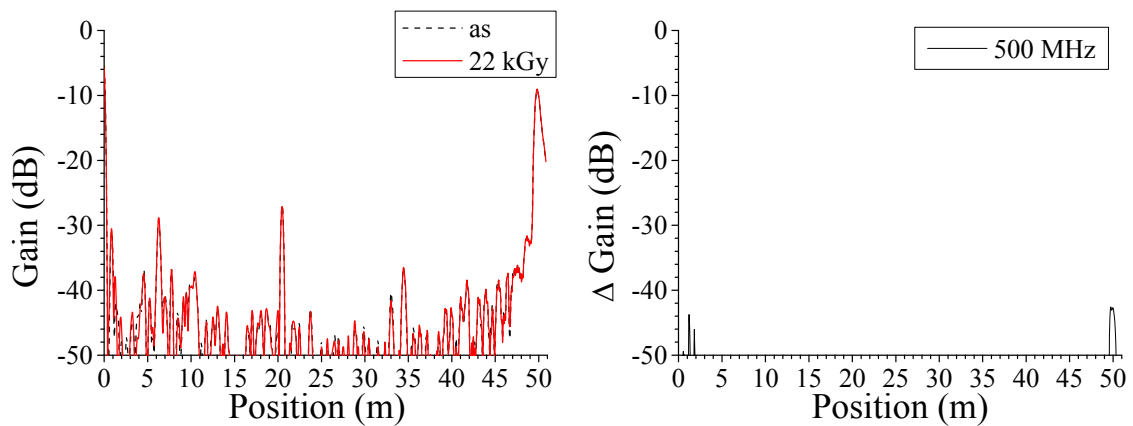


(i)位置標定結果

(ii) 差分

(c)測定端子：赤-白

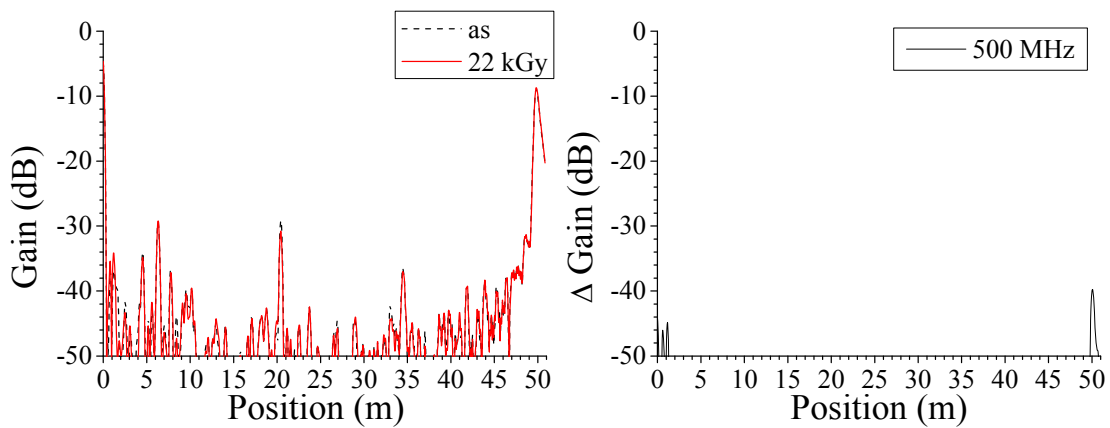
図3.3.1-7 BIS法による難燃EPDM絶縁ケーブル劣化位置標定結果:120°C、0.5kGy/h、44h、測定端-劣化部：20m、測定条件：熱・放射線同時劣化中、測定周波数域：1~400MHz、測定反対側端子：開放



(i)位置標定結果

(ii) 差分

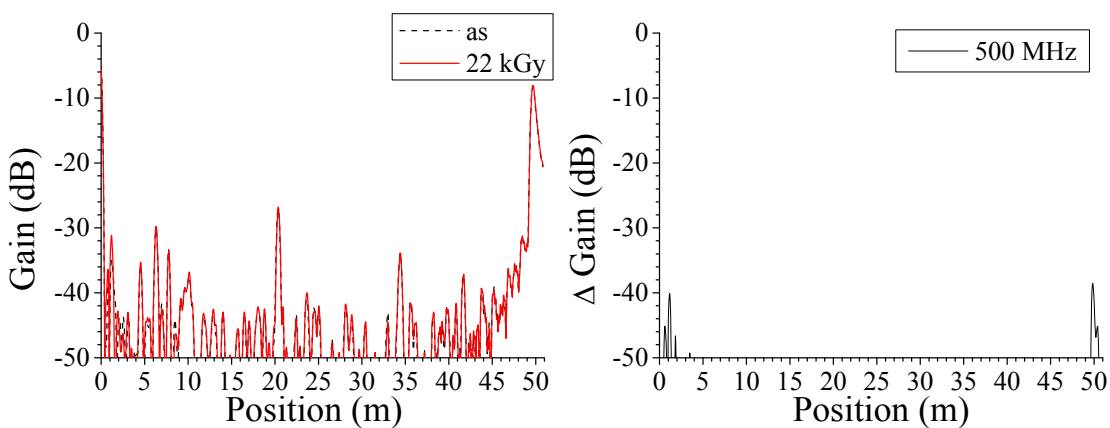
(a)測定端子：黒－赤



(i)位置標定結果

(ii) 差分

(b)測定端子：黒－白



(i)位置標定結果

(ii) 差分

(c)測定端子：赤－白

図3.3.1-8 BIS法による難燃EPDM絶縁ケーブル劣化位置標定結果:120℃、0.5kGy/h、44h、測定端－劣化部：20m、測定条件：熱・放射線同時劣化中、測定周波数域：1～500MHz、測定反対側端子：開放

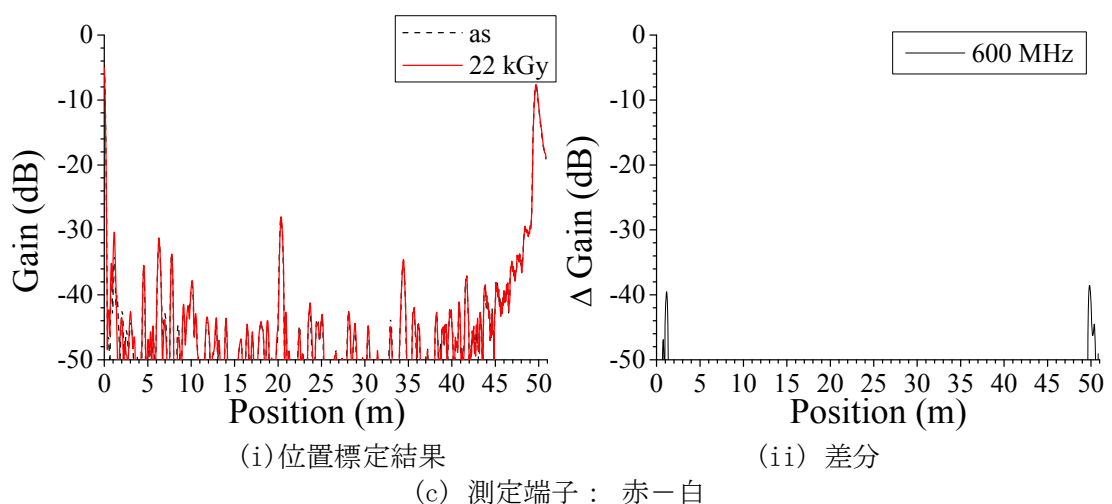
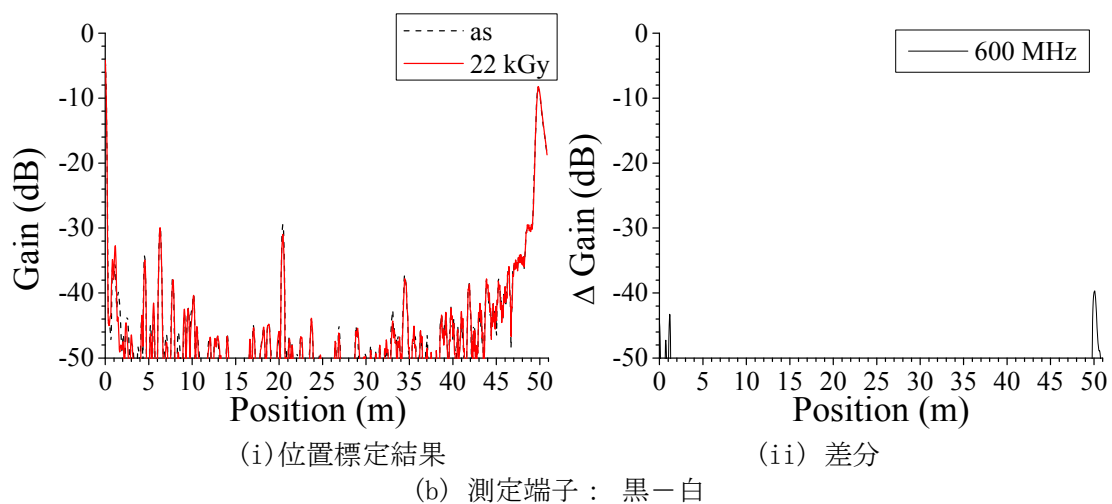
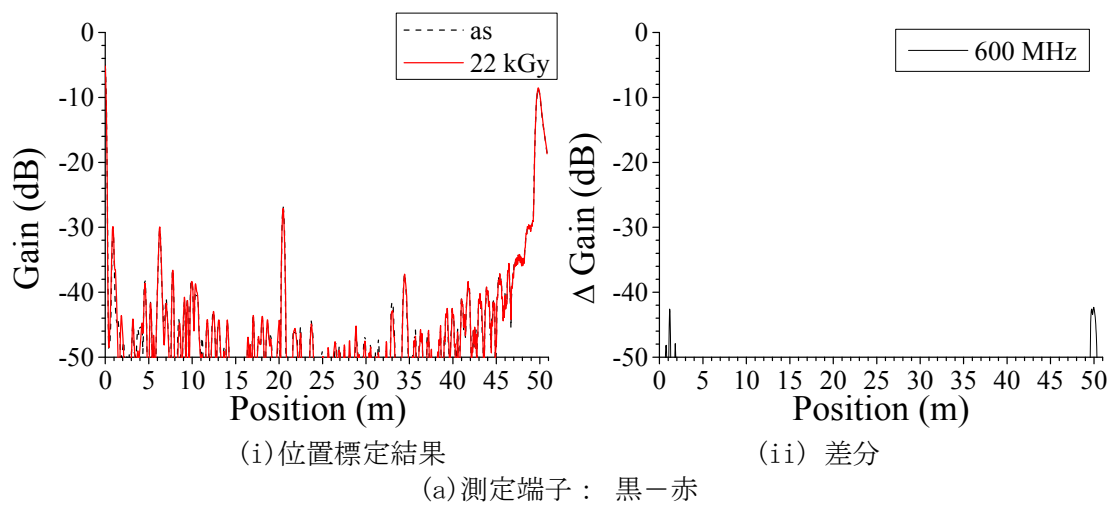
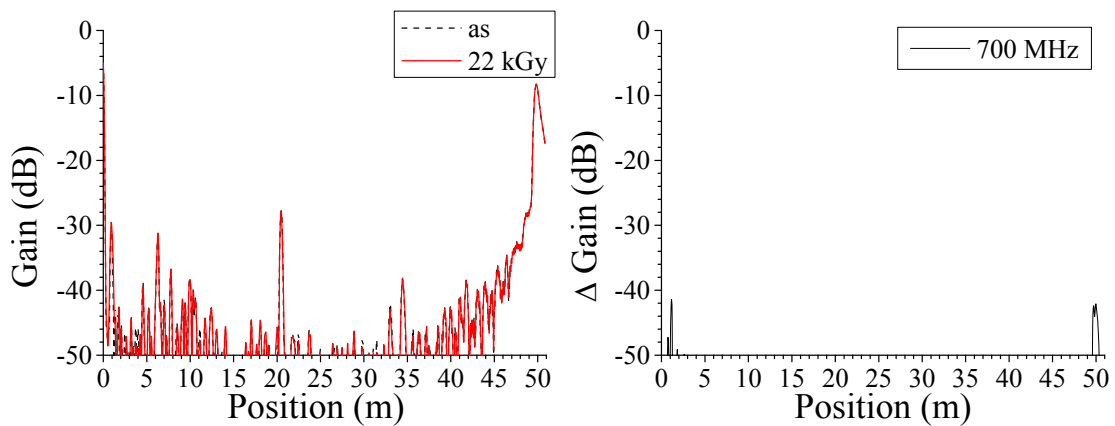


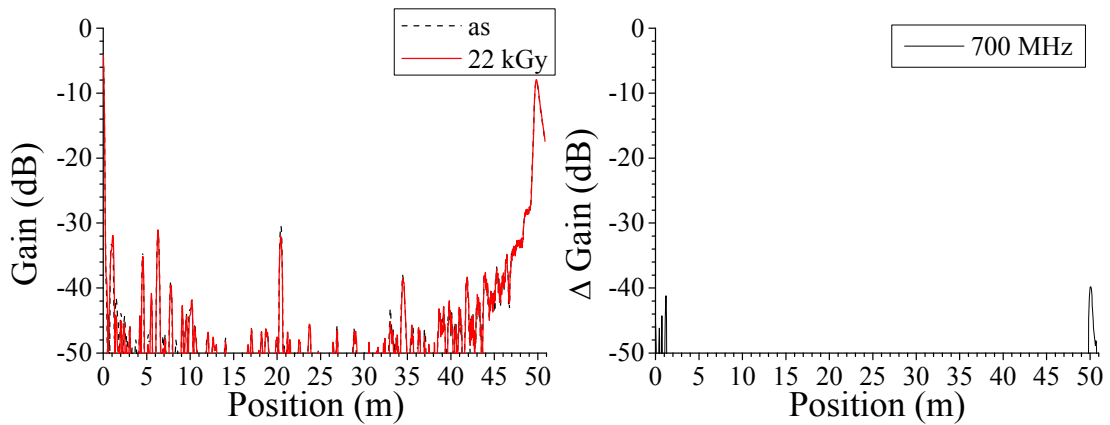
図3.3.1-9 BIS法による難燃EPDM絶縁ケーブル劣化位置標定結果:120°C、0.5kGy/h、44h、測定端－劣化部：20m、測定条件：熱・放射線同時劣化中、測定周波数域：1～600MHz、測定反対側端子：開放



(i)位置標定結果

(ii) 差分

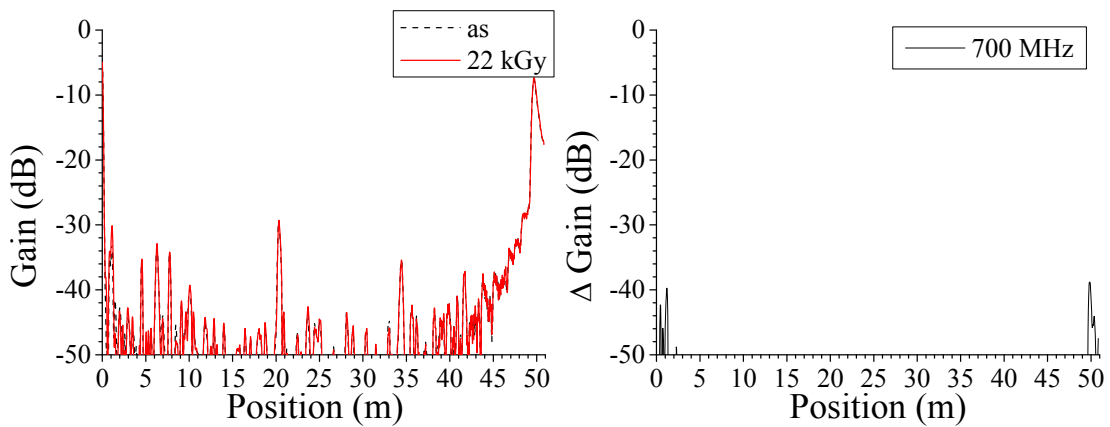
(a)測定端子：黒－赤



(i)位置標定結果

(ii) 差分

(b)測定端子：黒－白

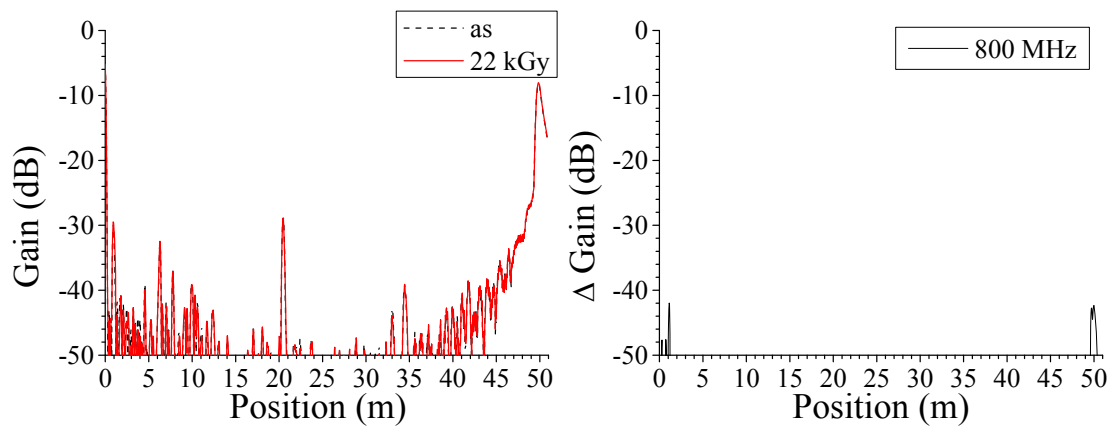


(i)位置標定結果

(ii) 差分

(c)測定端子：赤－白

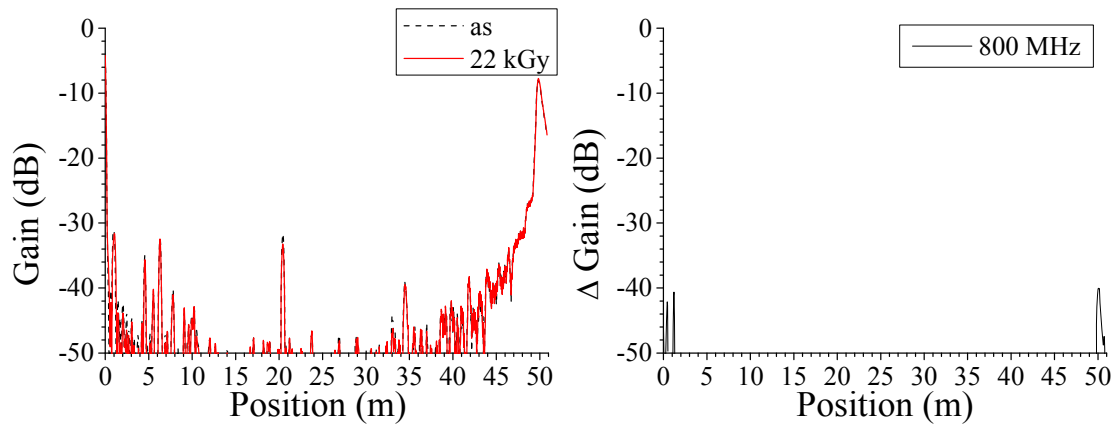
図 3.3.1-10 BIS 法による難燃 EPDM 絶縁ケーブル劣化位置標定結果：120℃、0.5kGy/h、44h、測定端－劣化部：20m、測定条件：熱・放射線同時劣化中、測定周波数域：1～700MHz、測定反対側端子：開放



(i)位置標定結果

(ii) 差分

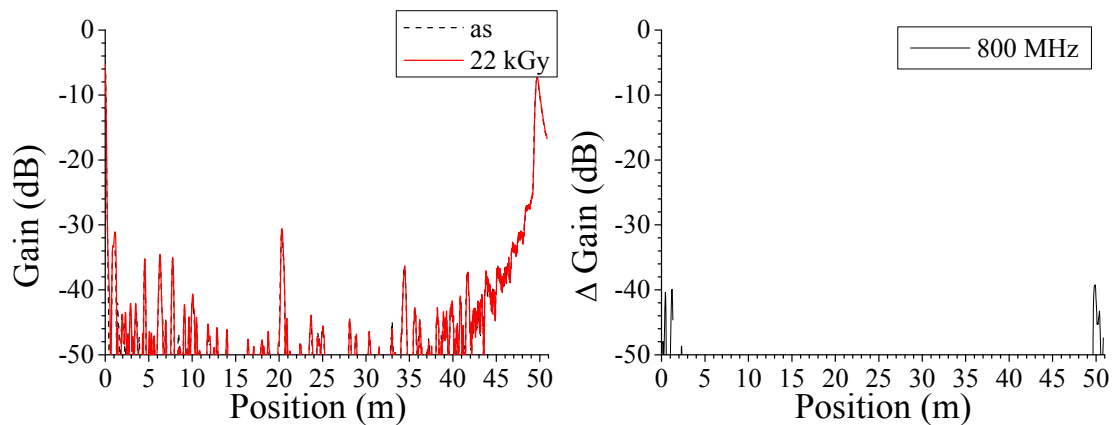
(a)測定端子：黒－赤



(i)位置標定結果

(ii) 差分

(b)測定端子：黒－白

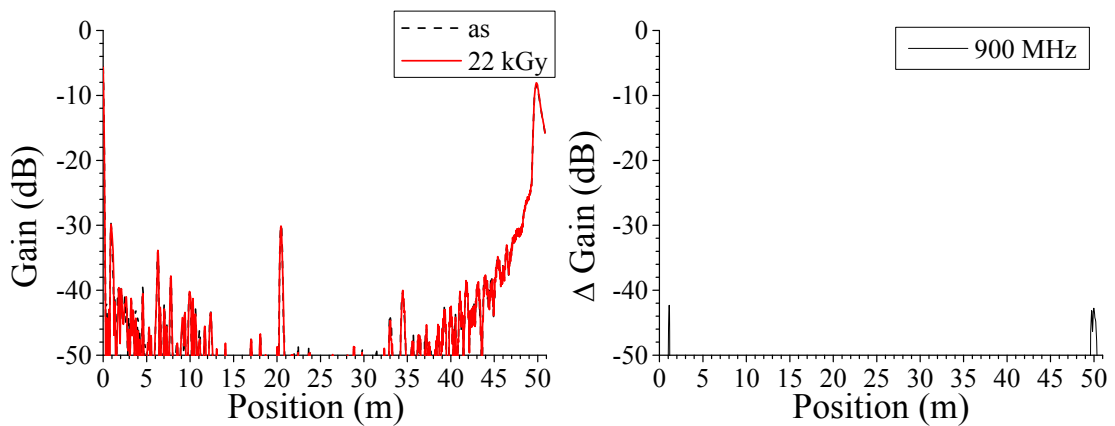


(i)位置標定結果

(ii) 差分

(c)測定端子：赤－白

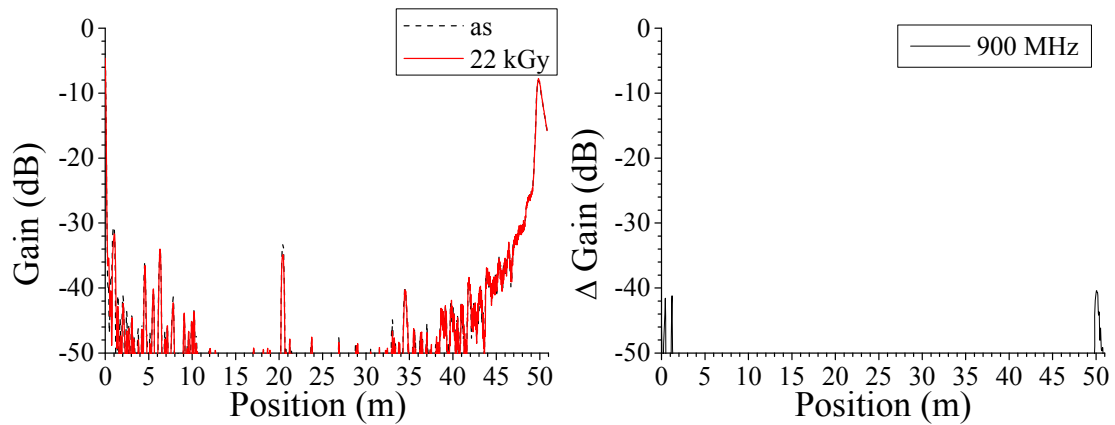
図 3. 3. 1-11 BIS 法による難燃 EPDM 絶縁ケーブル劣化位置標定結果：120℃、0. 5kGy/h、44h、測定端－劣化部：20m、測定条件：熱・放射線同時劣化中、測定周波数域：1～800MHz、測定反対側端子：開放



(i)位置標定結果

(ii) 差分

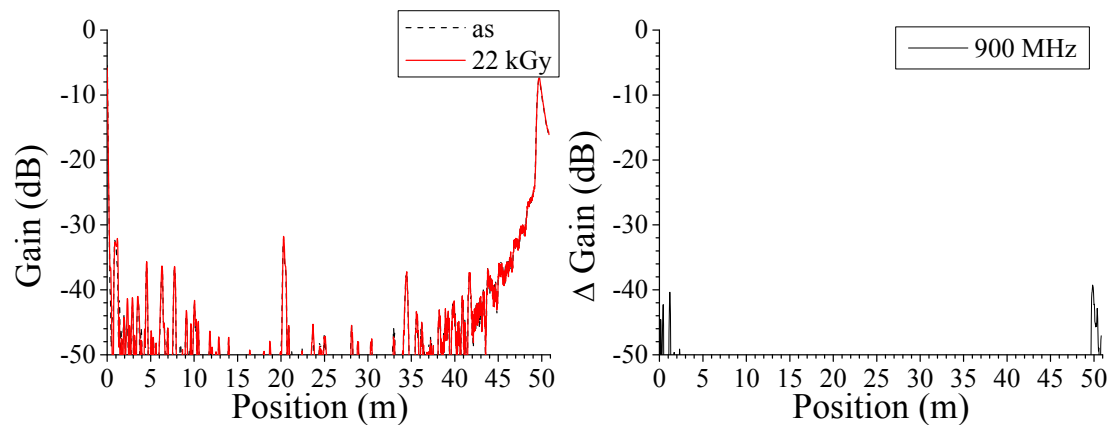
(a) 測定端子：黒－赤



(i)位置標定結果

(ii) 差分

(b) 測定端子：黒－白

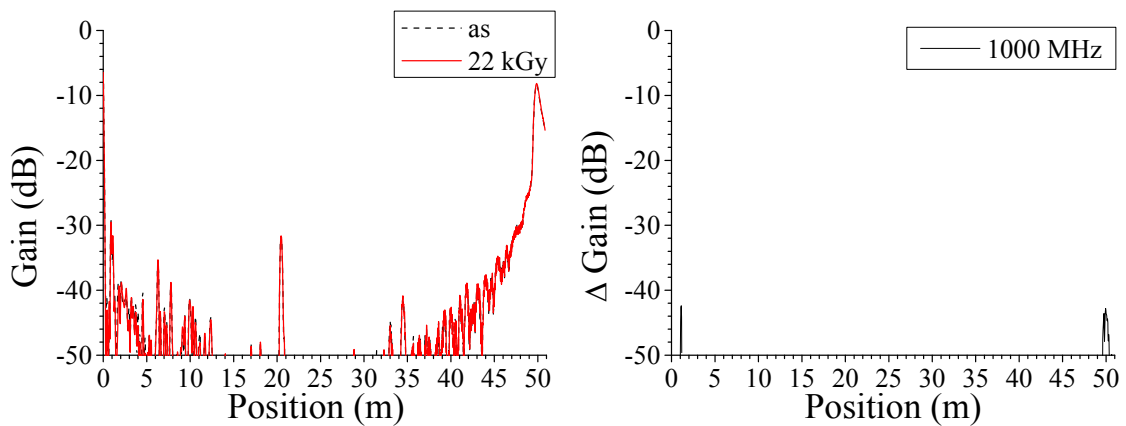


(i)位置標定結果

(ii) 差分

(c) 測定端子：赤－白

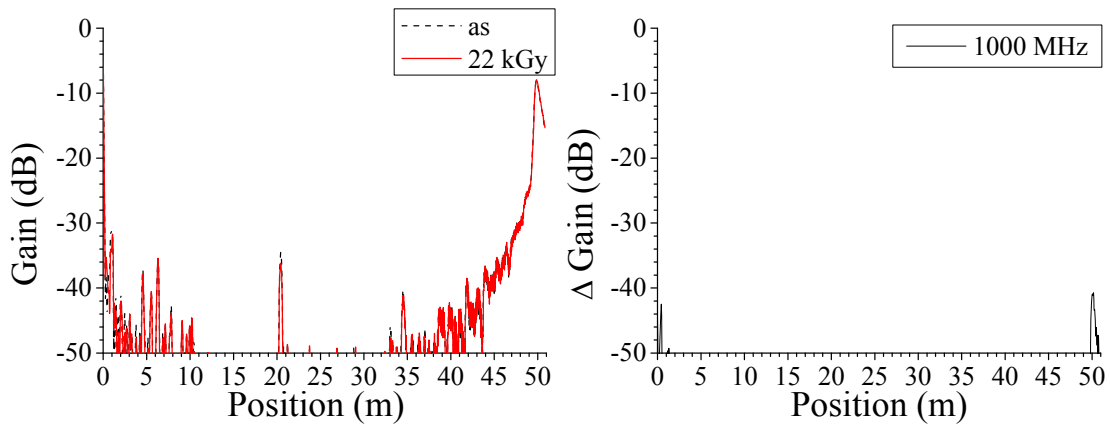
図 3. 3. 1-12 BIS 法による難燃 EPDM 絶縁ケーブル劣化位置標定結果：120℃、0.5kGy/h、44h、測定端－劣化部：20m、測定条件：熱・放射線同時劣化中、測定周波数域：1～900MHz、測定反対側端子：開放



(i)位置標定結果

(ii) 差分

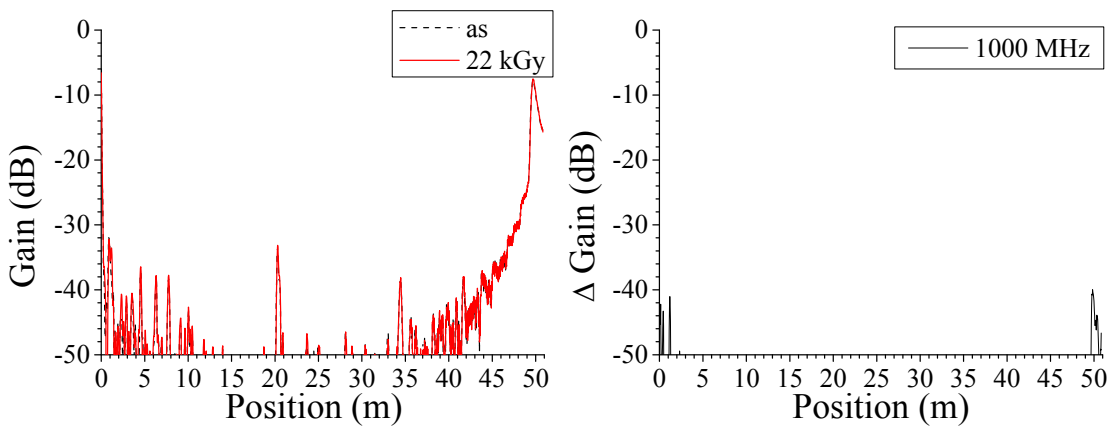
(a)測定端子：黒－赤



(i)位置標定結果

(ii) 差分

(b)測定端子：黒－白

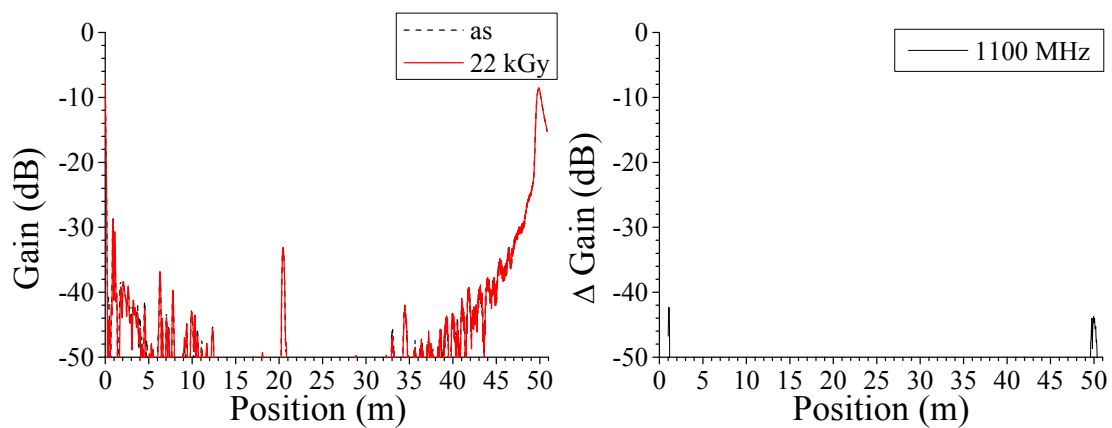


(i)位置標定結果

(ii) 差分

(c)測定端子：赤－白

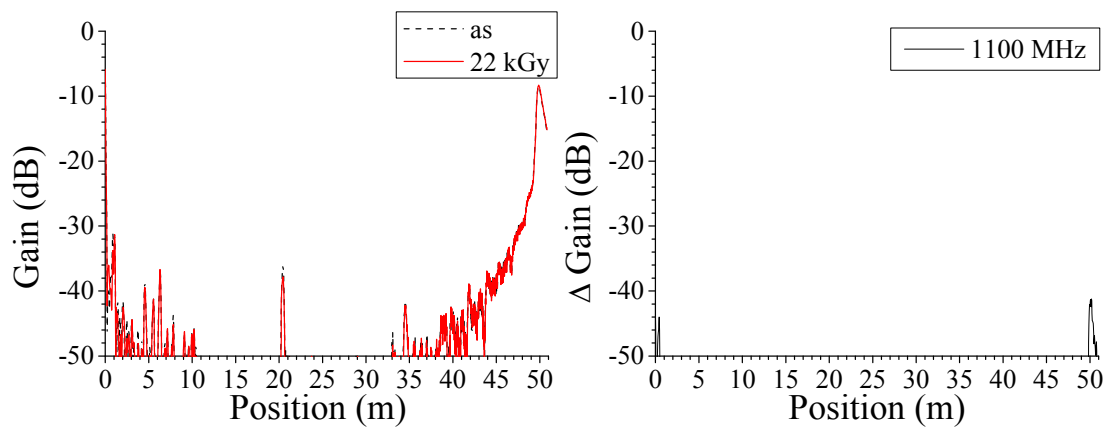
図 3.3.1-13 BIS 法による難燃 EPDM 絶縁ケーブル劣化位置標定結果：120℃、0.5kGy/h、44h、測定端－劣化部：20m、測定条件：熱・放射線同時劣化中、測定周波数域：1～1000MHz、測定反対側端子：開放



(i)位置標定結果

(ii) 差分

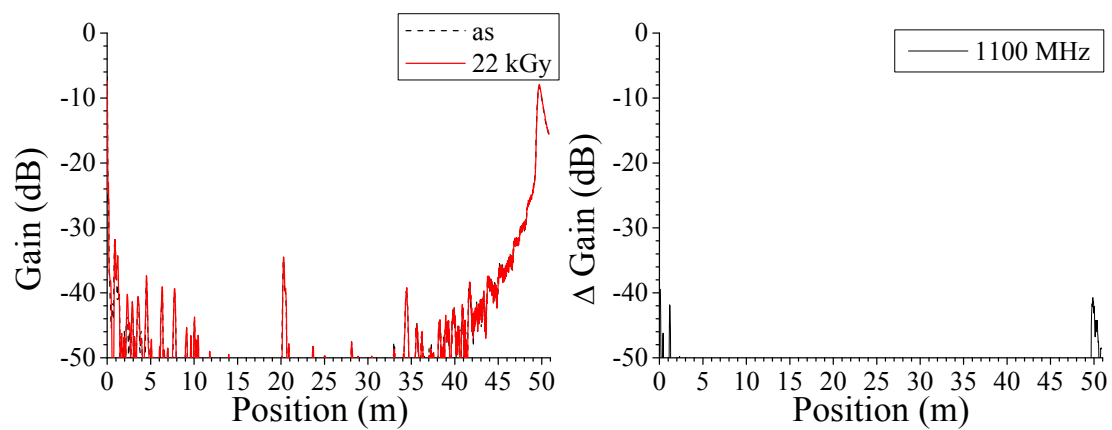
(a)測定端子：黒－赤



(i)位置標定結果

(ii) 差分

(b)測定端子：黒－白



(i)位置標定結果

(ii) 差分

(c)測定端子：赤－白

図 3. 3. 1-14 BIS 法による難燃 EPDM 絶縁ケーブル劣化位置標定結果：120℃、0. 5kGy/h、44h、測定端－劣化部：20m、測定条件：熱・放射線同時劣化中、測定周波数域：1～1100MHz、測定反対側端子：開放

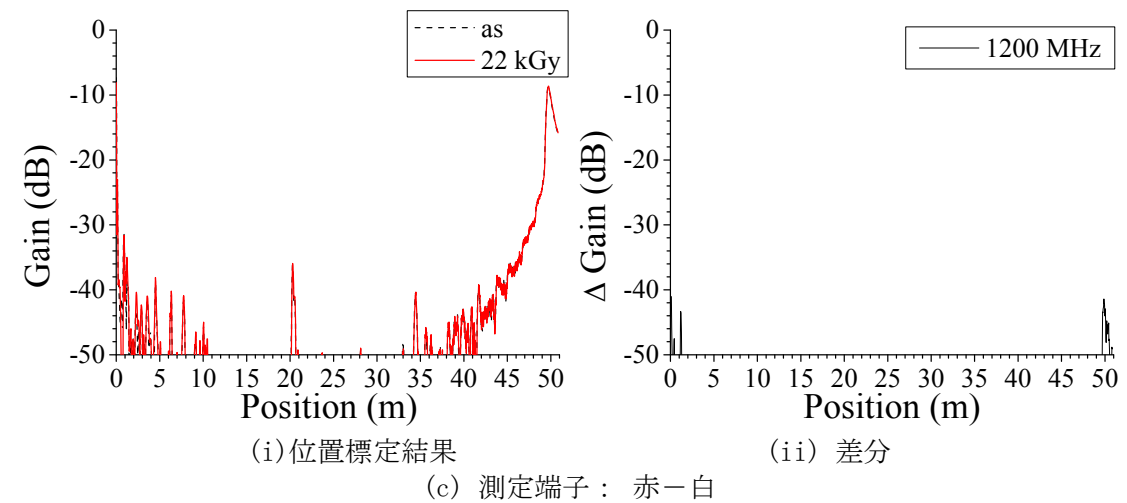
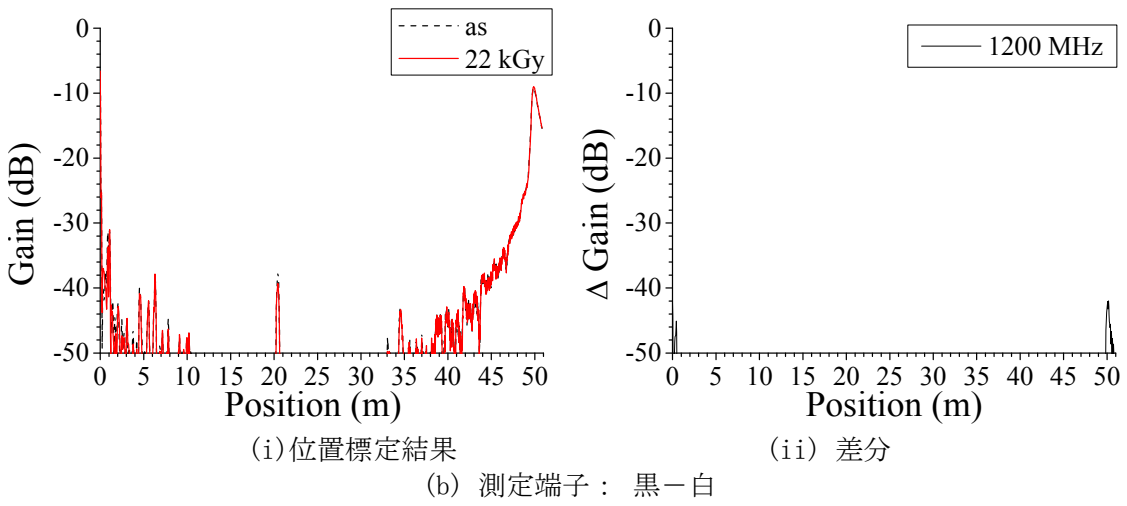
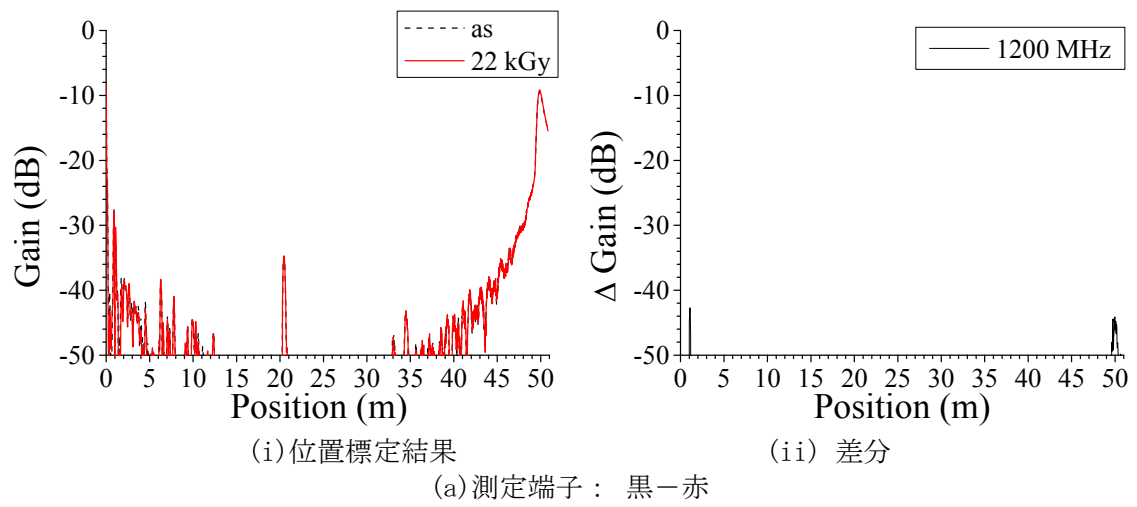
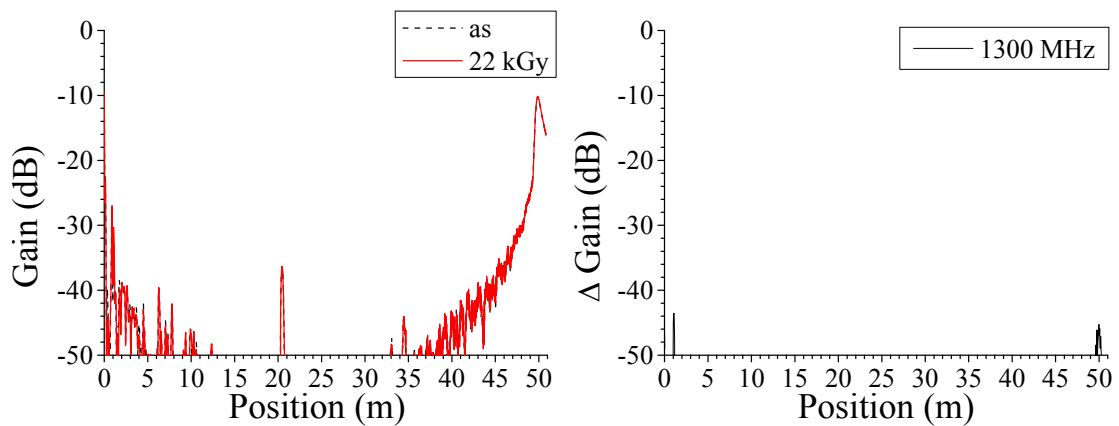


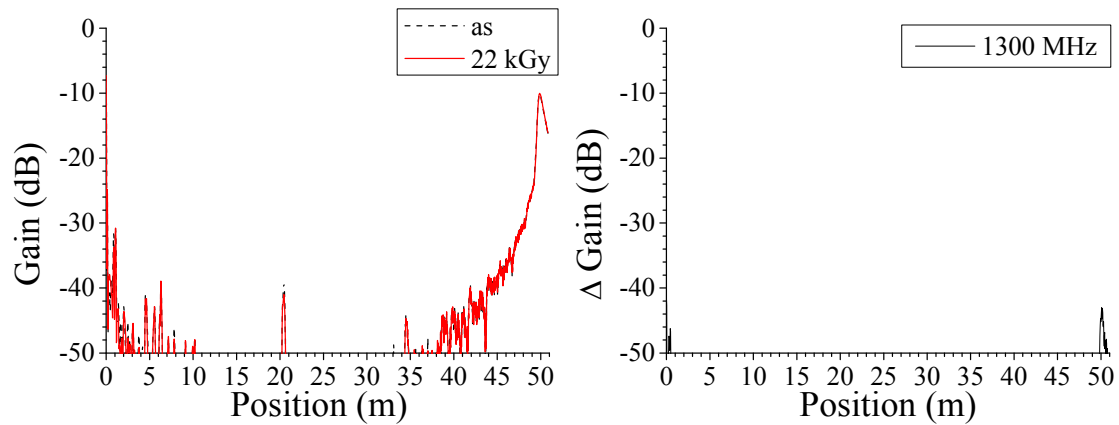
図 3.3.1-15 BIS 法による難燃 EPDM 絶縁ケーブル劣化位置標定結果：120℃、0.5kGy/h、44h、測定端—劣化部：20m、測定条件：熱・放射線同時劣化中、測定周波数域：1～1200MHz、測定反対側端子：開放



(i)位置標定結果

(ii) 差分

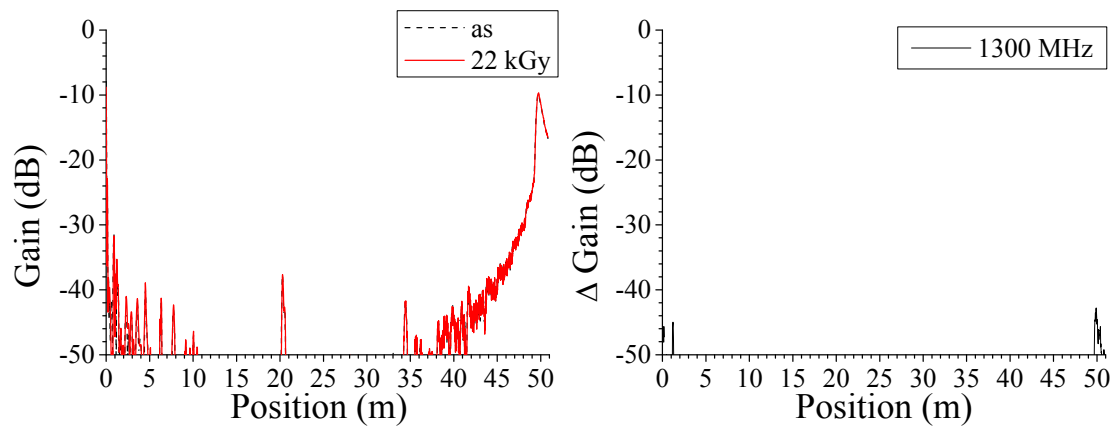
(a)測定端子：黒－赤



(i)位置標定結果

(ii) 差分

(b)測定端子：黒－白

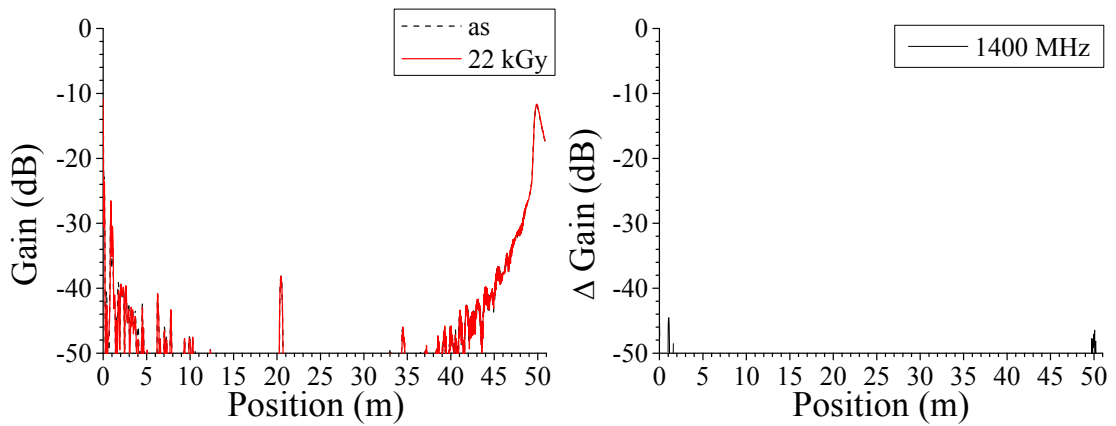


(i)位置標定結果

(ii) 差分

(c)測定端子：赤－白

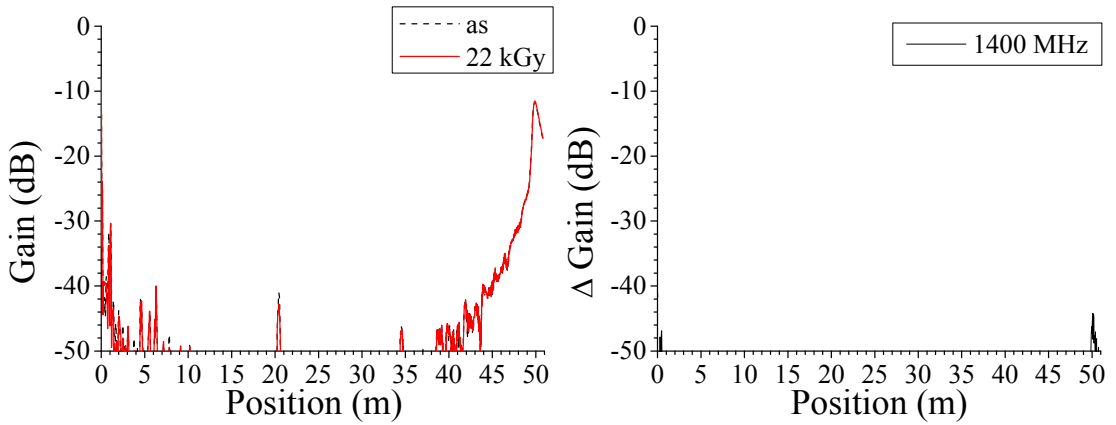
図 3.3.1-16 BIS 法による難燃 EPDM 絶縁ケーブル劣化位置標定結果：120℃、0.5kGy/h、44h、測定端－劣化部：20m、測定条件：熱・放射線同時劣化中、測定周波数域：1～1300MHz、測定反対側端子：開放



(i)位置標定結果

(ii) 差分

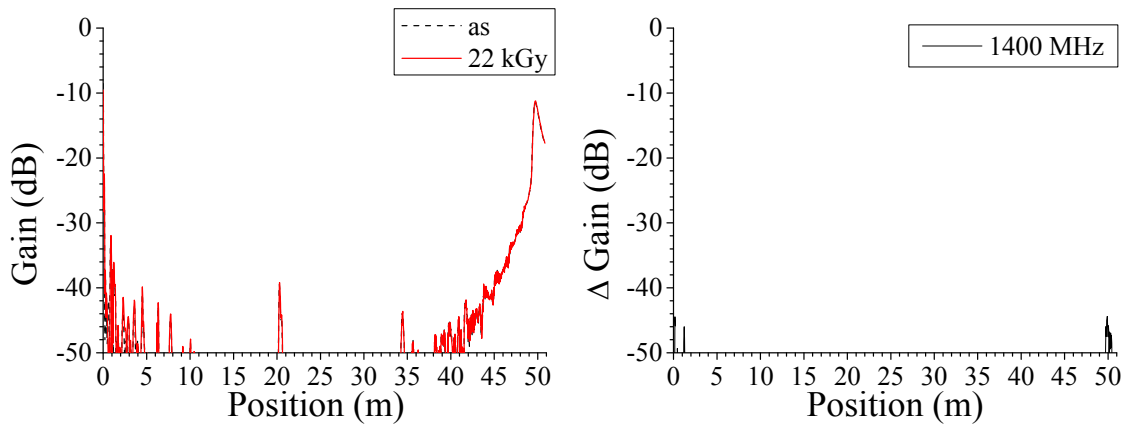
(a)測定端子：黒－赤



(i)位置標定結果

(ii) 差分

(b)測定端子：黒－白

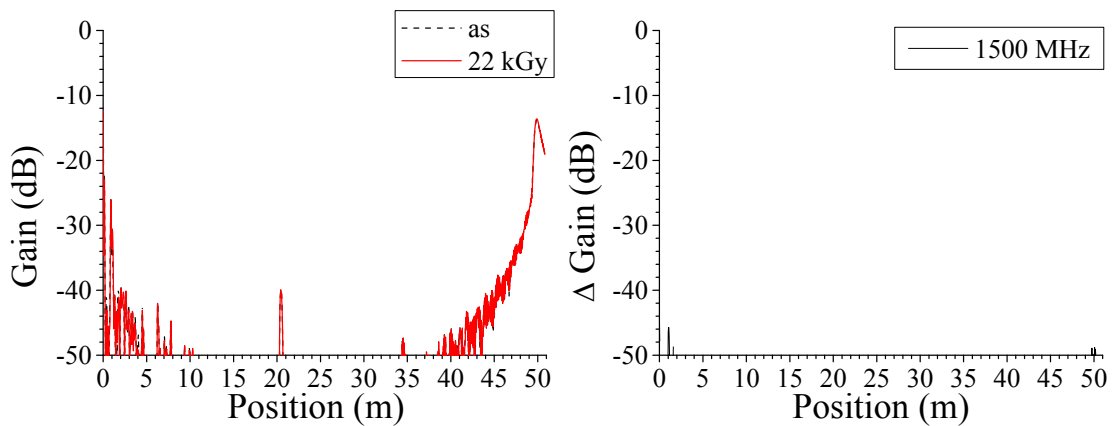


(i)位置標定結果

(ii) 差分

(c)測定端子：赤－白

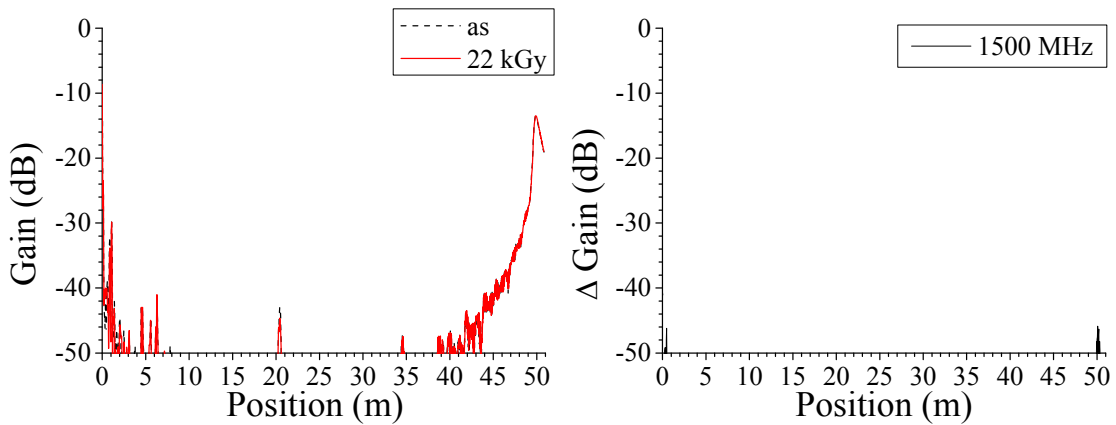
図 3. 3. 1-17 BIS 法による難燃 EPDM 絶縁ケーブル劣化位置標定結果：120℃、0. 5kGy/h、44h、測定端－劣化部：20m、測定条件：熱・放射線同時劣化中、測定周波数域：1～1400MHz、測定反対側端子：開放



(i)位置標定結果

(ii) 差分

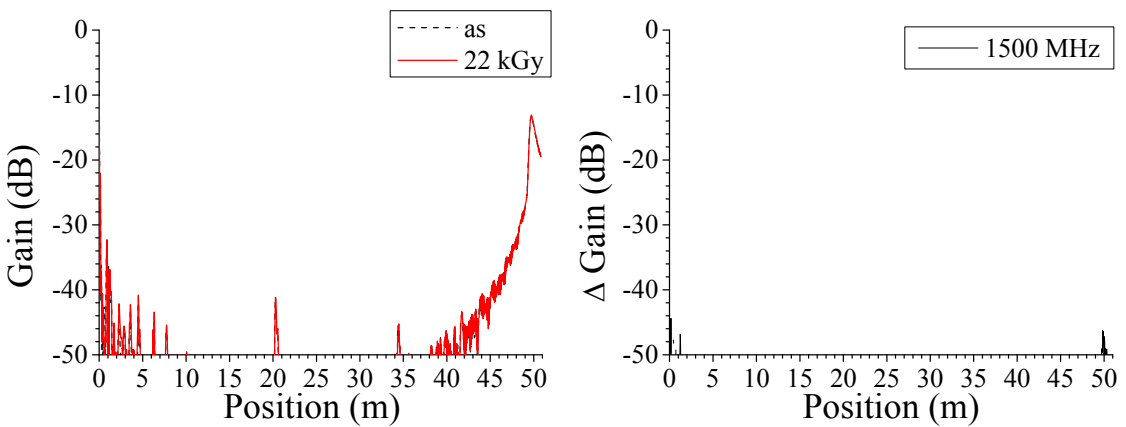
(a)測定端子：黒-赤



(i)位置標定結果

(ii) 差分

(b)測定端子：黒-白

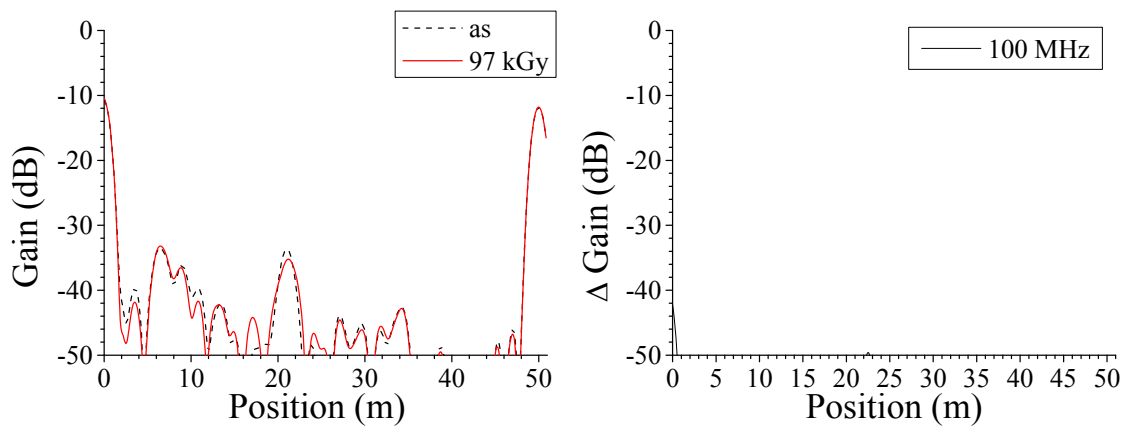


(i)位置標定結果

(ii) 差分

(c)測定端子：赤-白

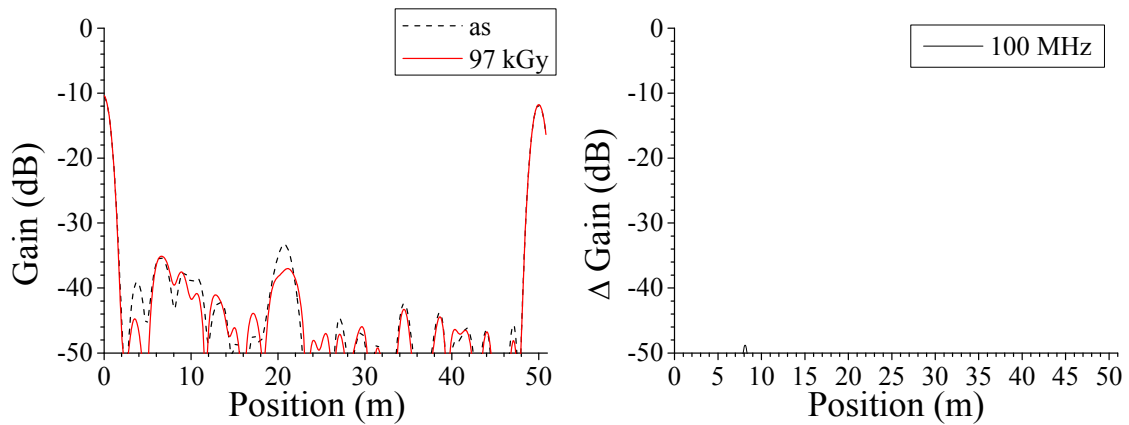
図 3.3.1-18 BIS 法による難燃 EPDM 絶縁ケーブル劣化位置標定結果：120℃、0.5kGy/h、44h、測定端-劣化部：20m、測定条件：熱・放射線同時劣化中、測定周波数域：1～1500MHz、測定反対側端子：開放



(i)位置標定結果

(ii) 差分

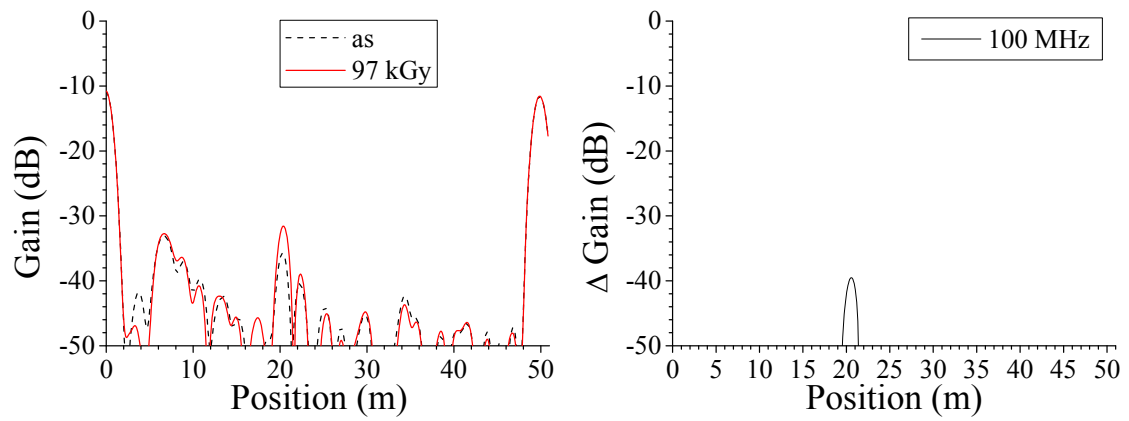
(a)測定端子：黒－赤



(i)位置標定結果

(ii) 差分

(b)測定端子：黒－白



(i)位置標定結果

(ii) 差分

(c)測定端子：赤－白

図 3. 3. 1-19 BIS 法による難燃 EPDM 絶縁ケーブル劣化位置標定結果：120℃、0. 5kGy/h、194h、測定端－劣化部：20m、測定条件：熱・放射線同時劣化中、測定周波数域：1～100MHz、測定反対側端子：開放

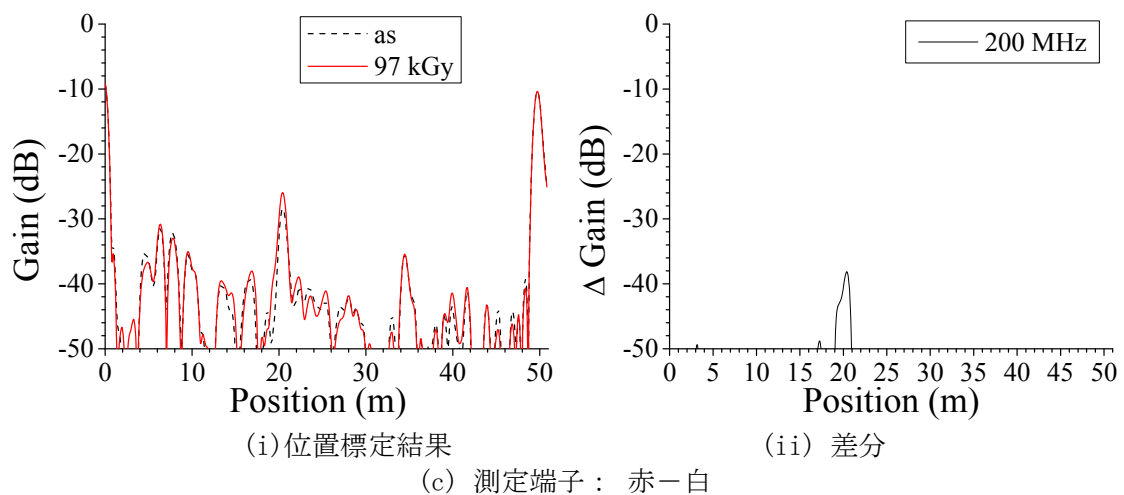
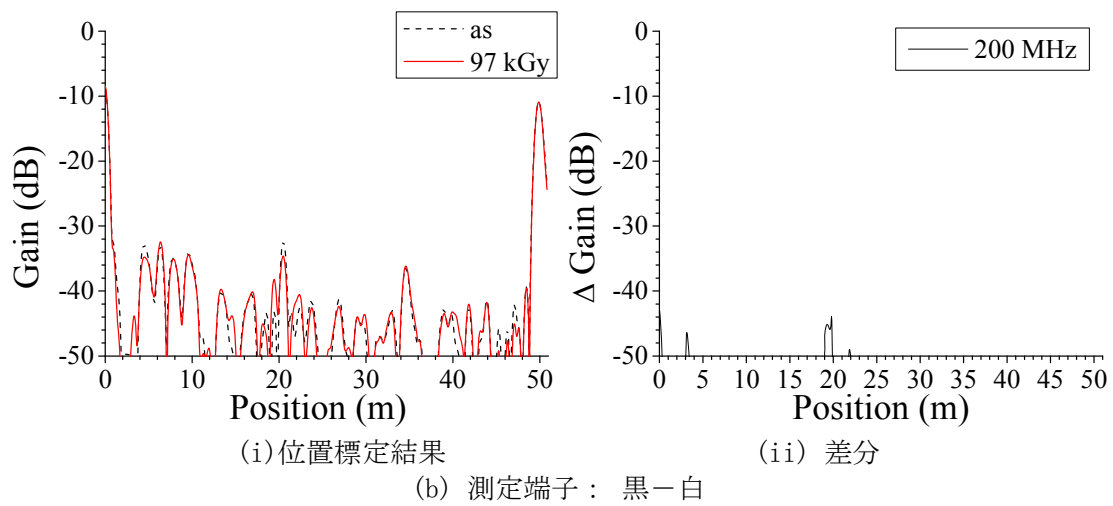
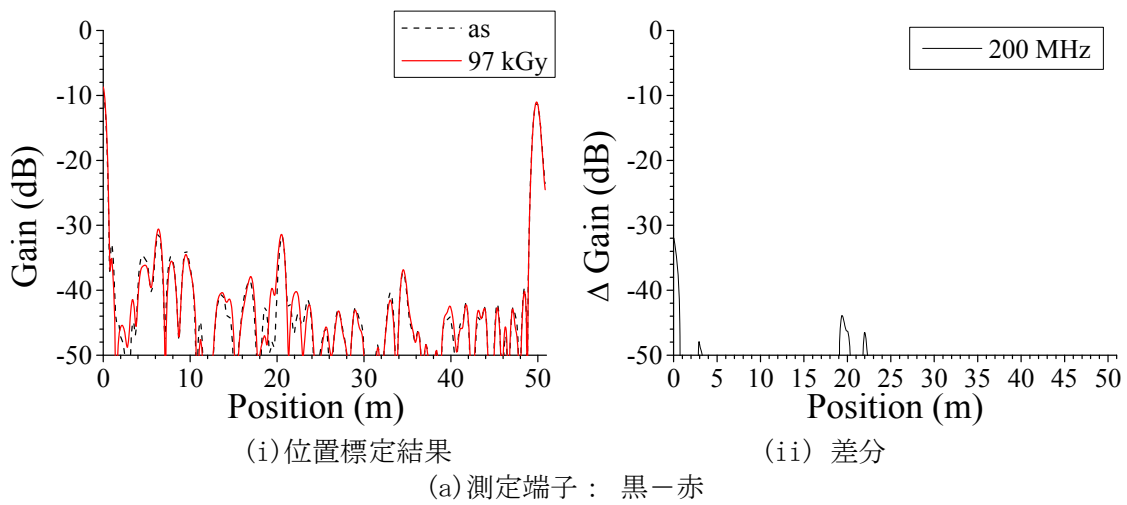
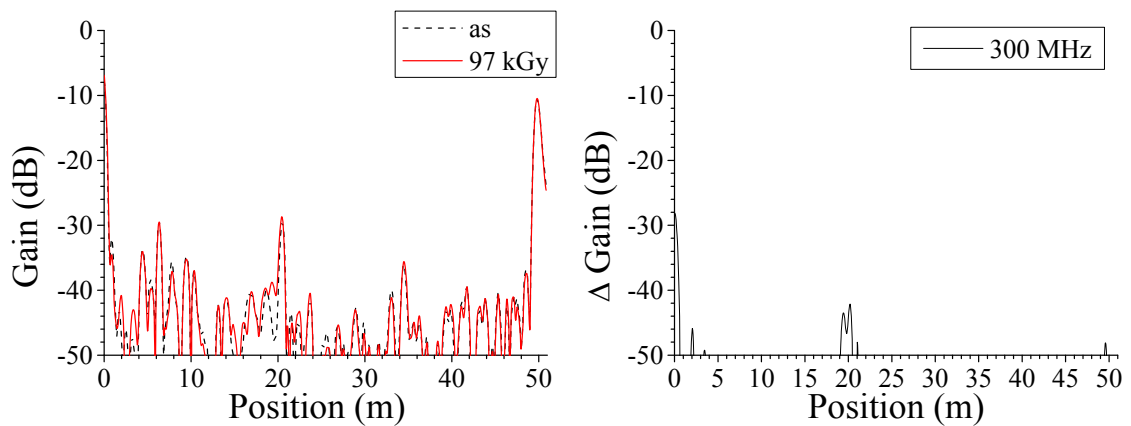


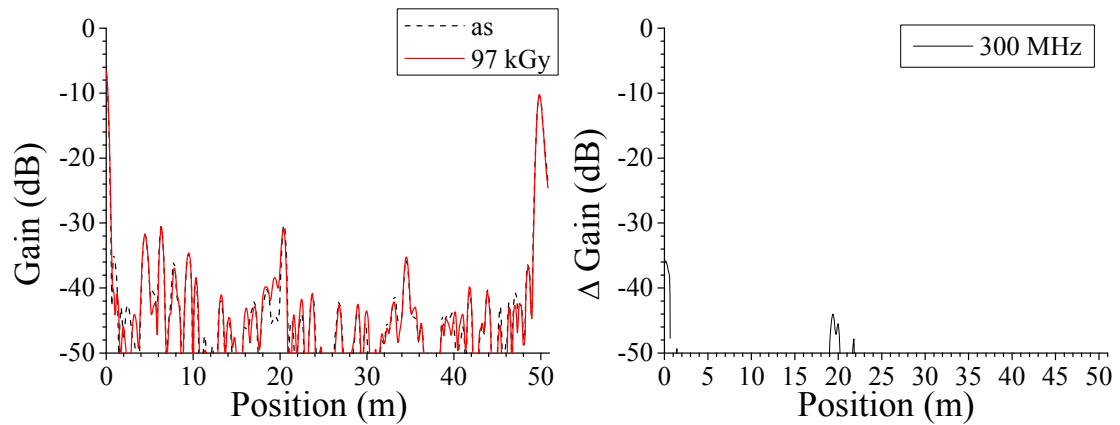
図 3. 3. 1-20 BIS 法による難燃 EPDM 絶縁ケーブル劣化位置標定結果：120℃、0. 5kGy/h、194h、測定端－劣化部：20m、測定条件：熱・放射線同時劣化中、測定周波数域：1～200MHz、測定反対側端子：開放



(i) 位置標定結果

(ii) 差分

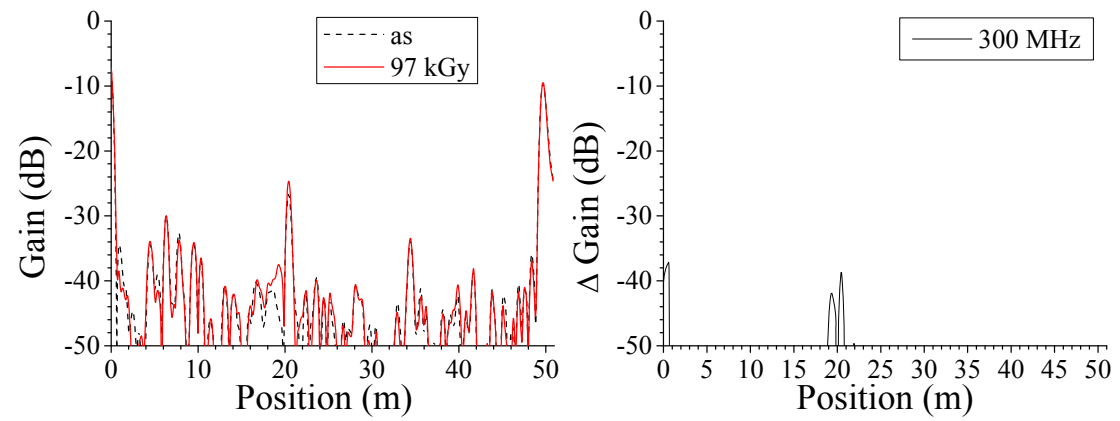
(a) 測定端子：黒－赤



(i) 位置標定結果

(ii) 差分

(b) 測定端子：黒－白

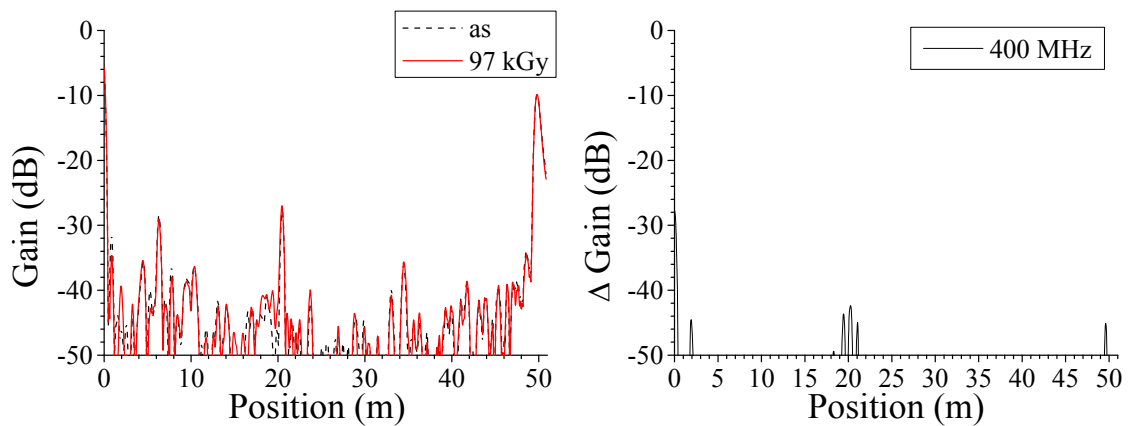


(i) 位置標定結果

(ii) 差分

(c) 測定端子：赤－白

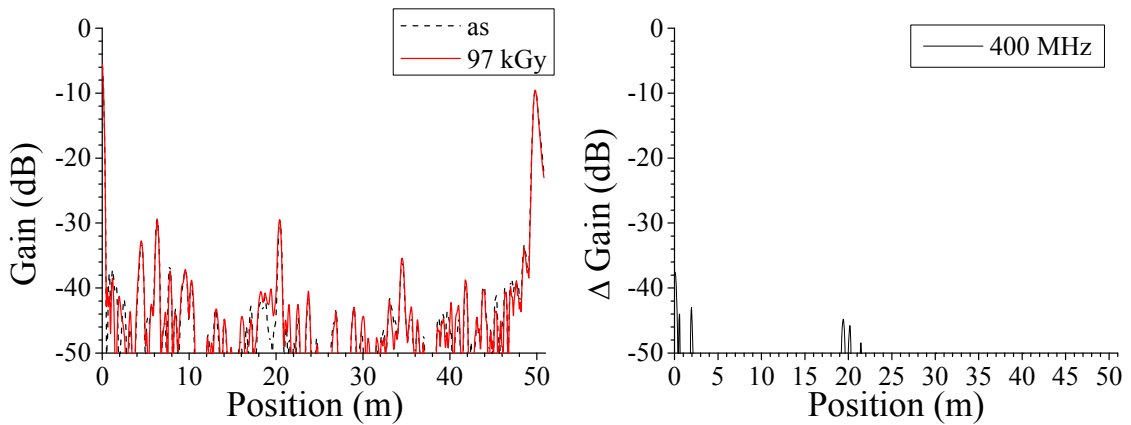
図 3.3.1-21 BIS 法による難燃 EPDM 絶縁ケーブル劣化位置標定結果：120℃、0.5kGy/h、194h、測定端－劣化部：20m、測定条件：熱・放射線同時劣化中、測定周波数域：1～300MHz、測定反対側端子：開放



(i)位置標定結果

(ii) 差分

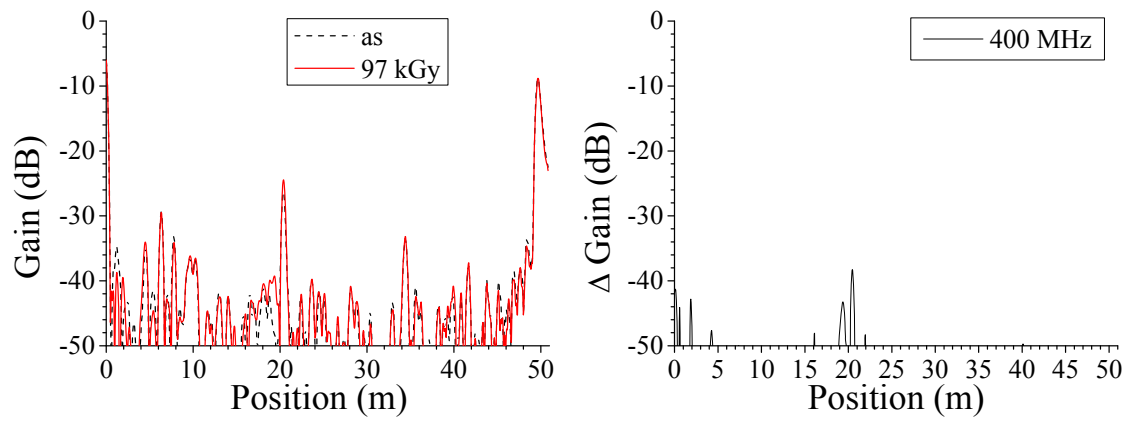
(a)測定端子：黒－赤



(i)位置標定結果

(ii) 差分

(b)測定端子：黒－白

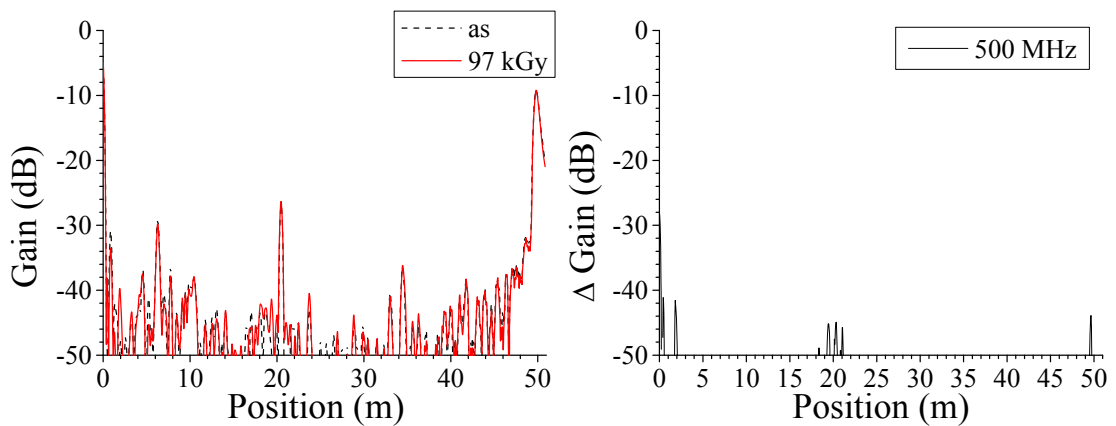


(i)位置標定結果

(ii) 差分

(c)測定端子：赤－白

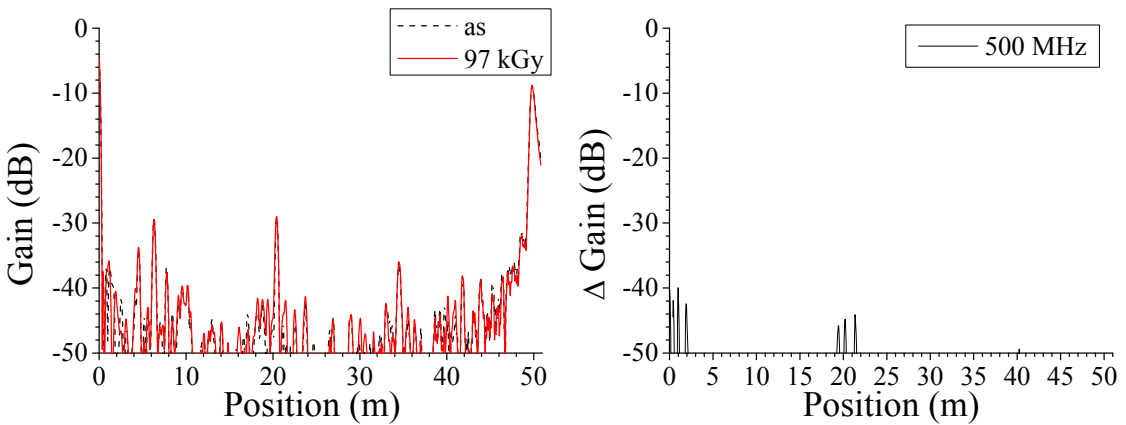
図 3. 3. 1-22 BIS 法による難燃 EPDM 絶縁ケーブル劣化位置標定結果：120℃、0. 5kGy/h、194h、測定端－劣化部：20m、測定条件：熱・放射線同時劣化中、測定周波数域：1～400MHz、測定反対側端子：開放



(i)位置標定結果

(ii) 差分

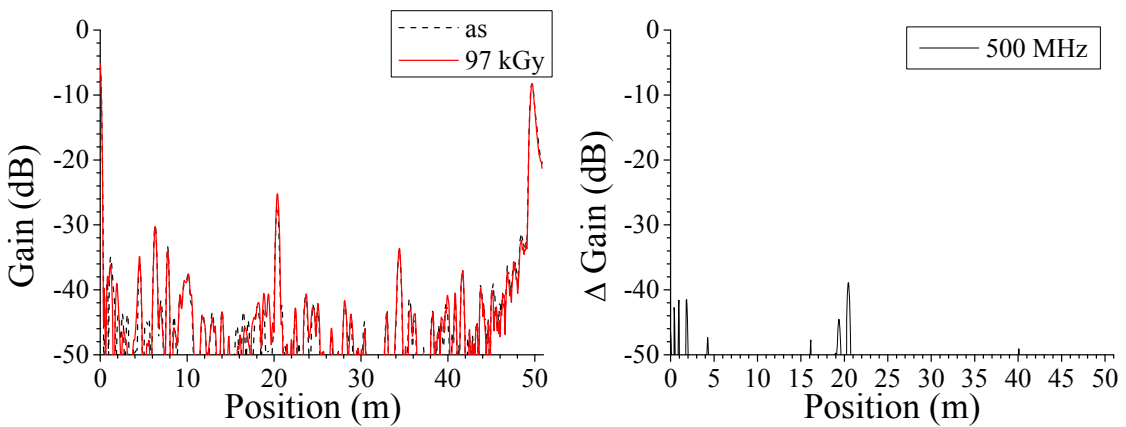
(a)測定端子：黒－赤



(i)位置標定結果

(ii) 差分

(b)測定端子：黒－白

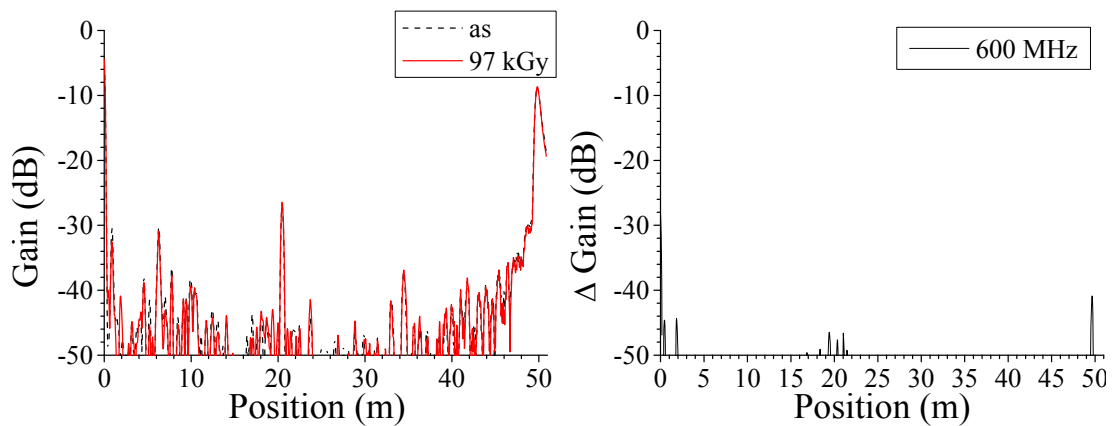


(i)位置標定結果

(ii) 差分

(c)測定端子：赤－白

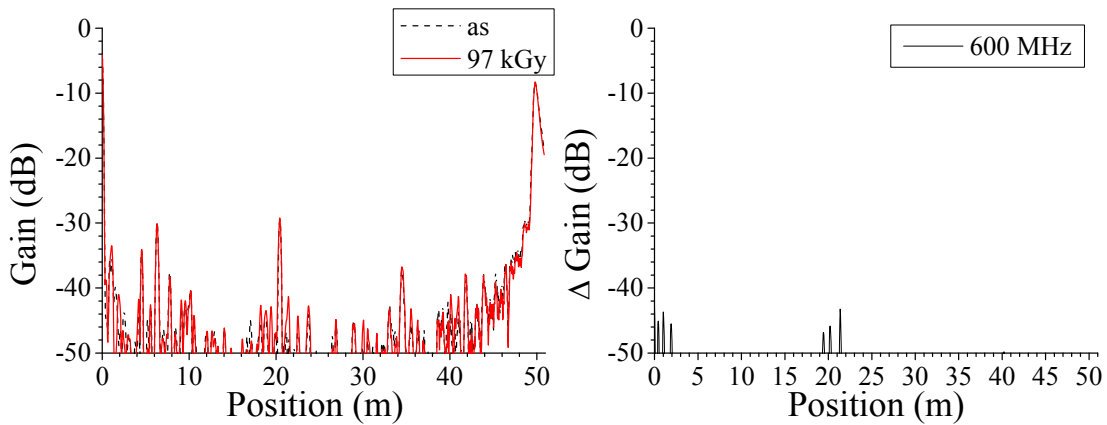
図 3. 3. 1-23 BIS 法による難燃 EPDM 絶縁ケーブル劣化位置標定結果：120℃、0.5kGy/h、194h、測定端－劣化部：20m、測定条件：熱・放射線同時劣化中、測定周波数域：1～500MHz、測定反対側端子：開放



(i)位置標定結果

(ii) 差分

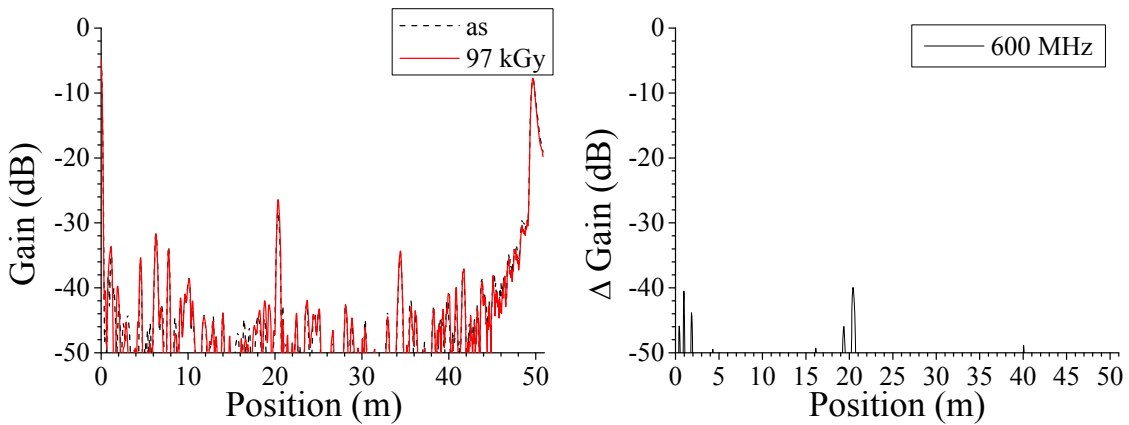
(a)測定端子：黒－赤



(i)位置標定結果

(ii) 差分

(b)測定端子：黒－白

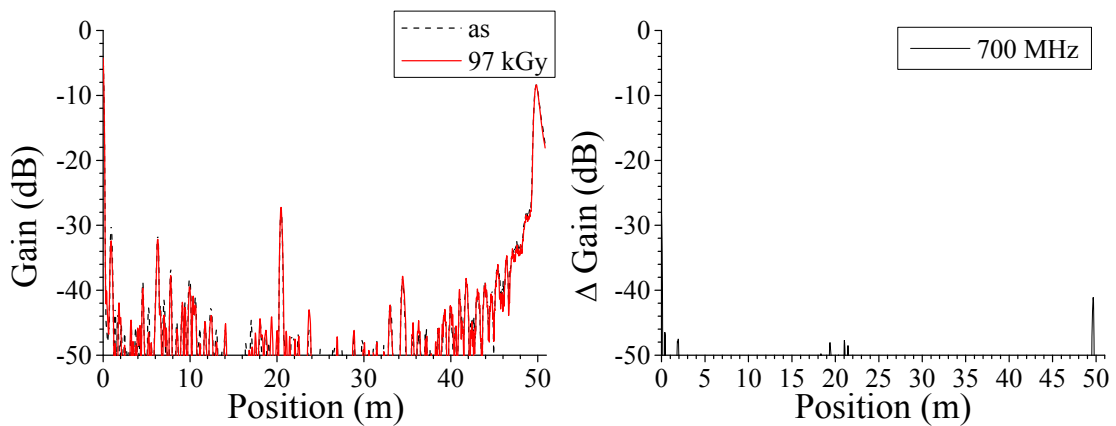


(i)位置標定結果

(ii) 差分

(c)測定端子：赤－白

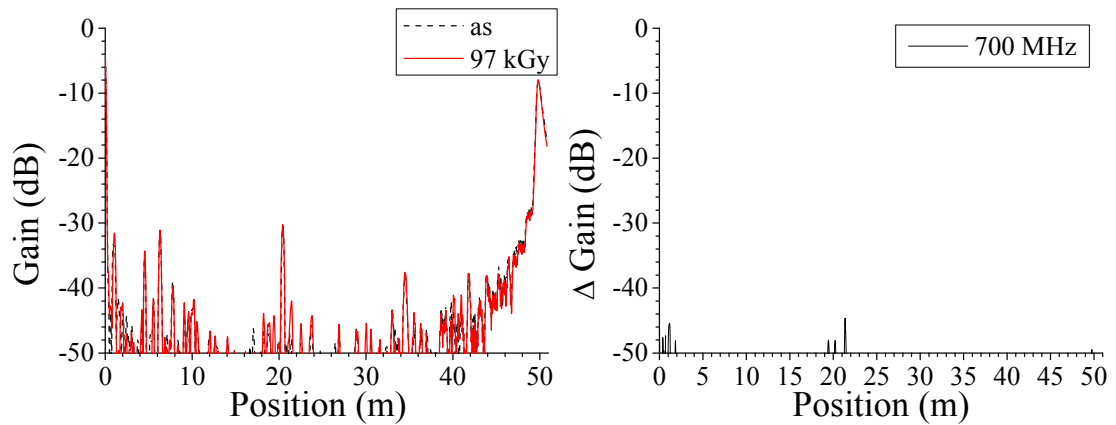
図 3. 3. 1-24 BIS 法による難燃 EPDM 絶縁ケーブル劣化位置標定結果：120℃、0. 5kGy/h、194h、測定端－劣化部：20m、測定条件：熱・放射線同時劣化中、測定周波数域：1～600MHz、測定反対側端子：開放



(i)位置標定結果

(ii) 差分

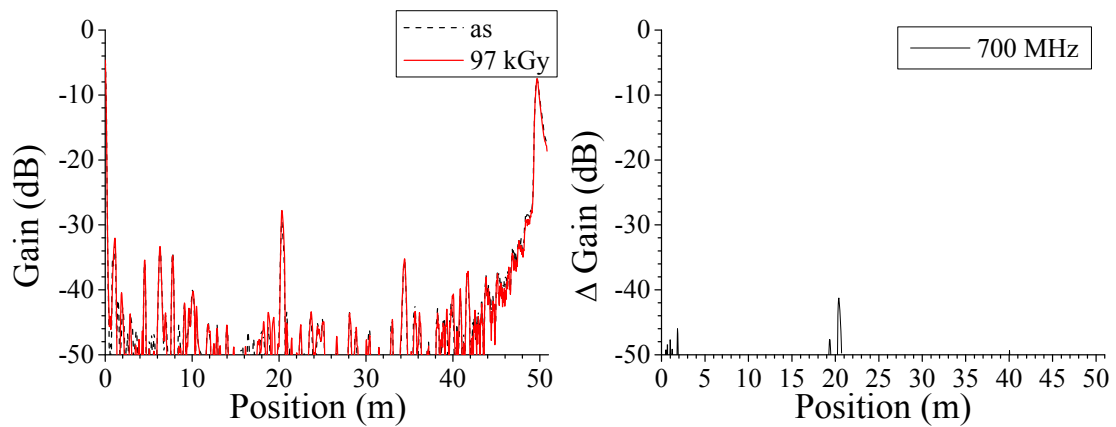
(a) 測定端子：黒－赤



(i)位置標定結果

(ii) 差分

(b) 測定端子：黒－白



(i)位置標定結果

(ii) 差分

(c) 測定端子：赤－白

図 3. 3. 1-25 BIS 法による難燃 EPDM 絶縁ケーブル劣化位置標定結果：120℃、0. 5kGy/h、194h、測定端－劣化部：20m、測定条件：熱・放射線同時劣化中、測定周波数域：1～700MHz、測定反対側端子：開放

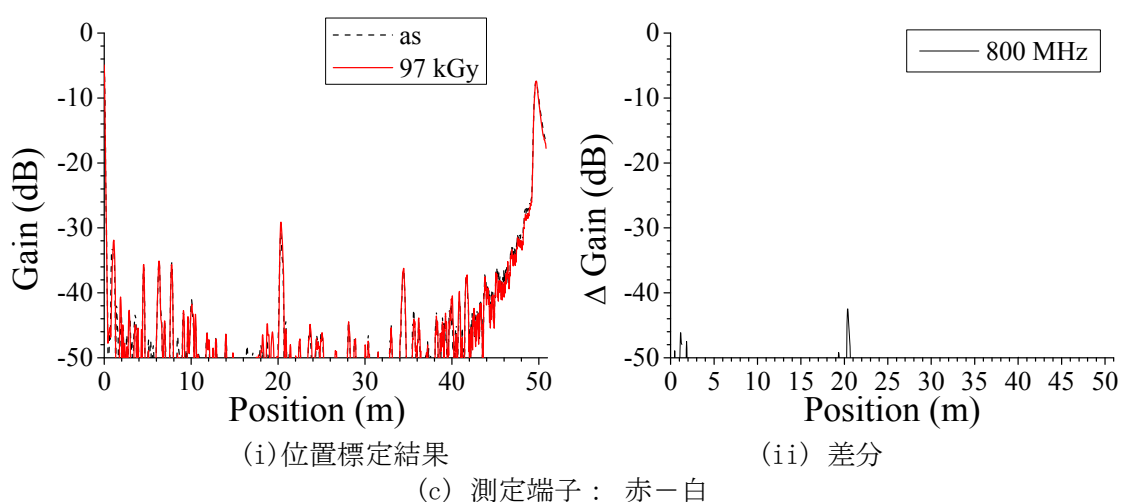
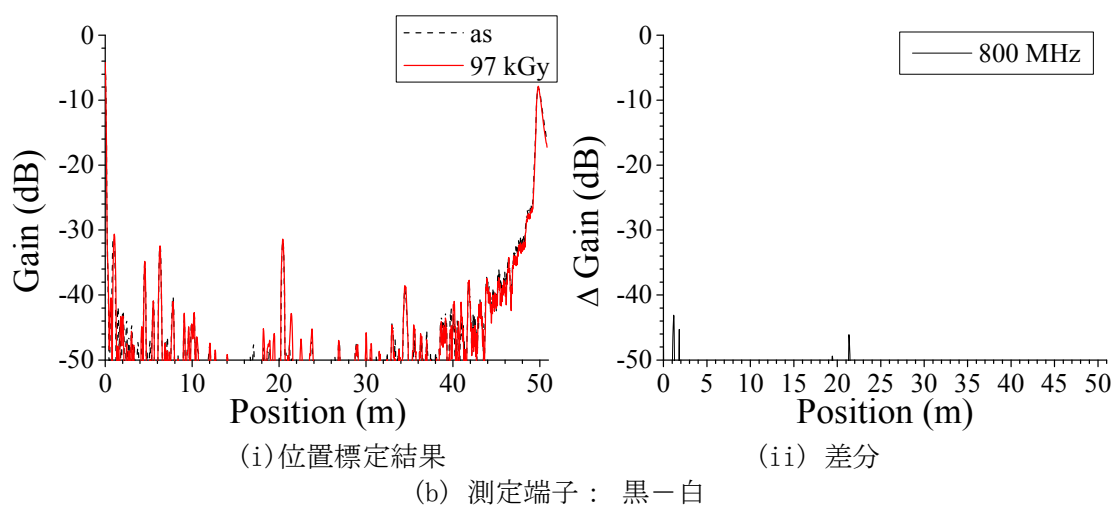
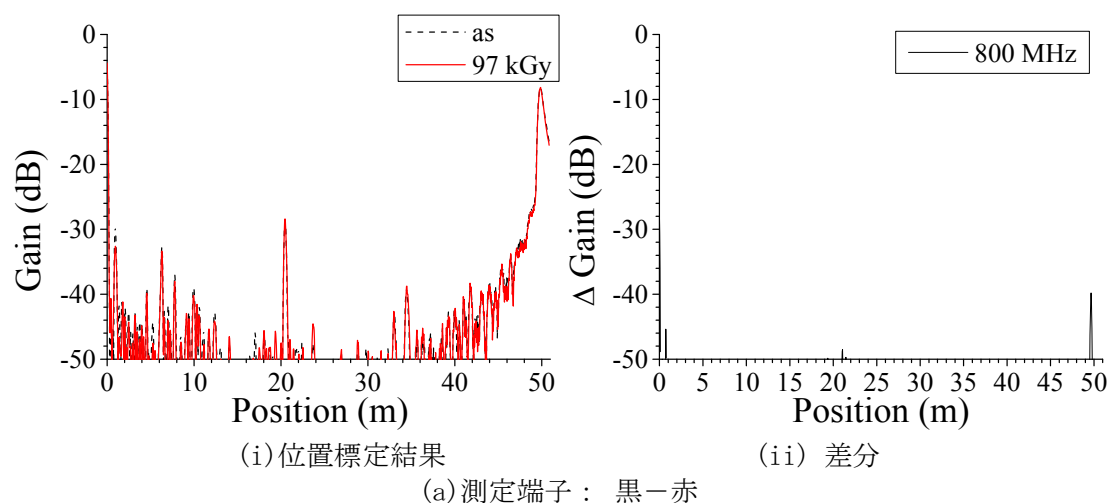
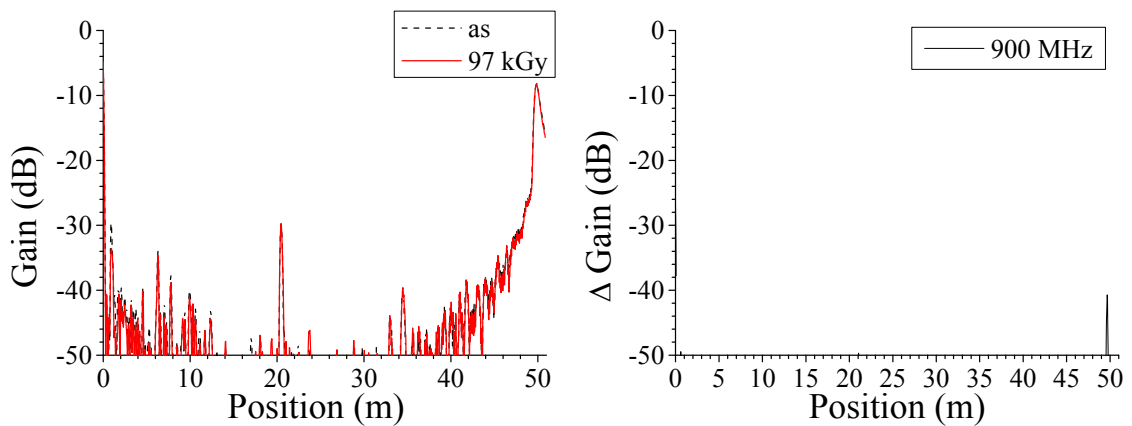


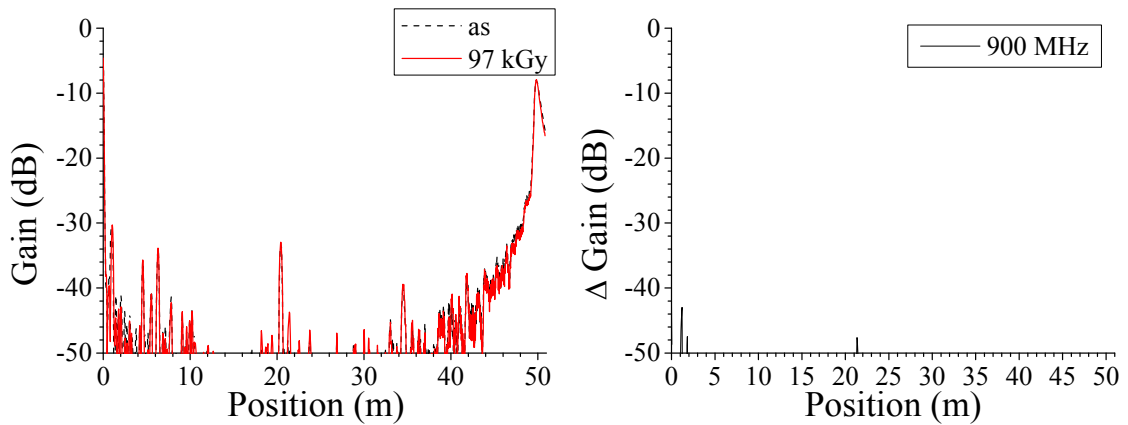
図 3.3.1-26 BIS 法による難燃 EPDM 絶縁ケーブル劣化位置標定結果：120℃、0.5kGy/h、194h、測定端－劣化部：20m、測定条件：熱・放射線同時劣化中、測定周波数域：1～800MHz、測定反対側端子：開放



(i)位置標定結果

(ii) 差分

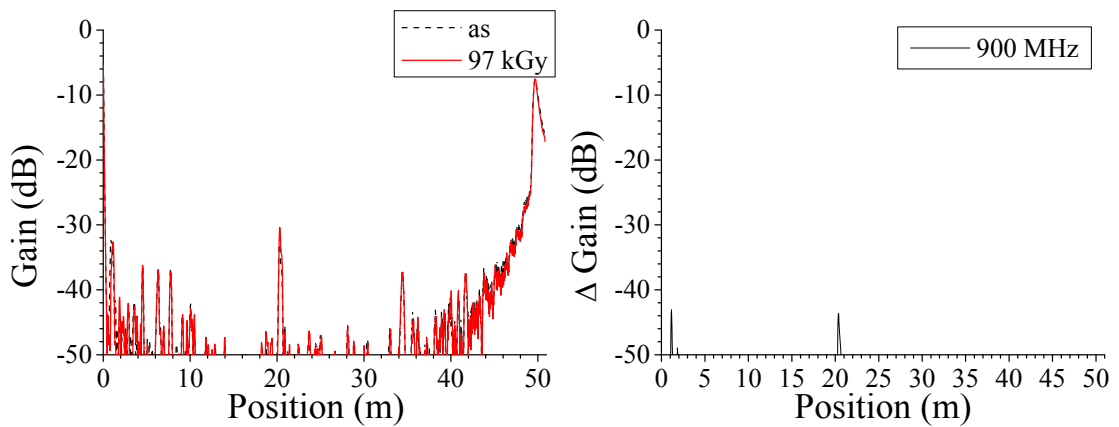
(a)測定端子：黒－赤



(i)位置標定結果

(ii) 差分

(b)測定端子：黒－白



(i)位置標定結果

(ii) 差分

(c)測定端子：赤－白

図 3.3.1-27 BIS 法による難燃 EPDM 絶縁ケーブル劣化位置標定結果：120℃、0.5kGy/h、194h、測定端－劣化部：20m、測定条件：熱・放射線同時劣化中、測定周波数域：1～900MHz、測定反対側端子：開放

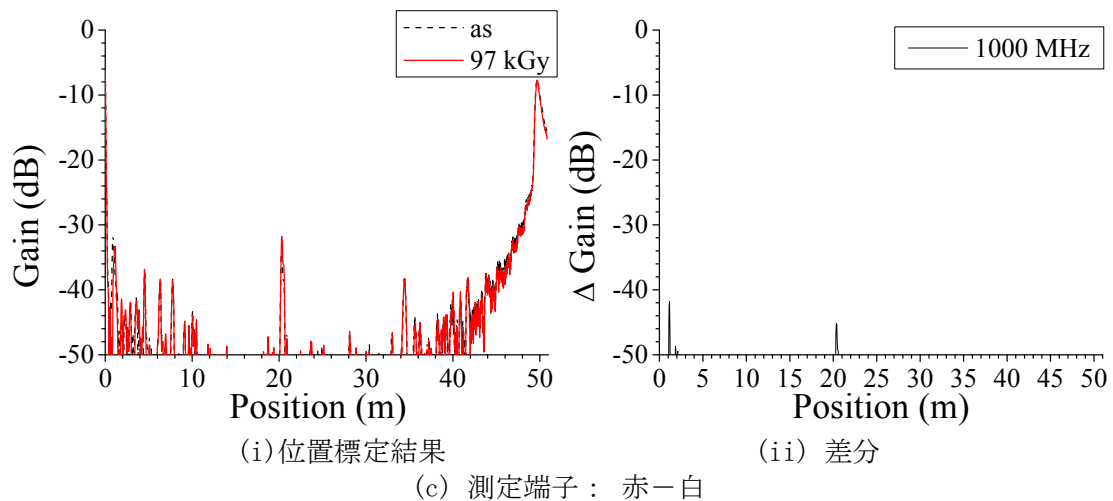
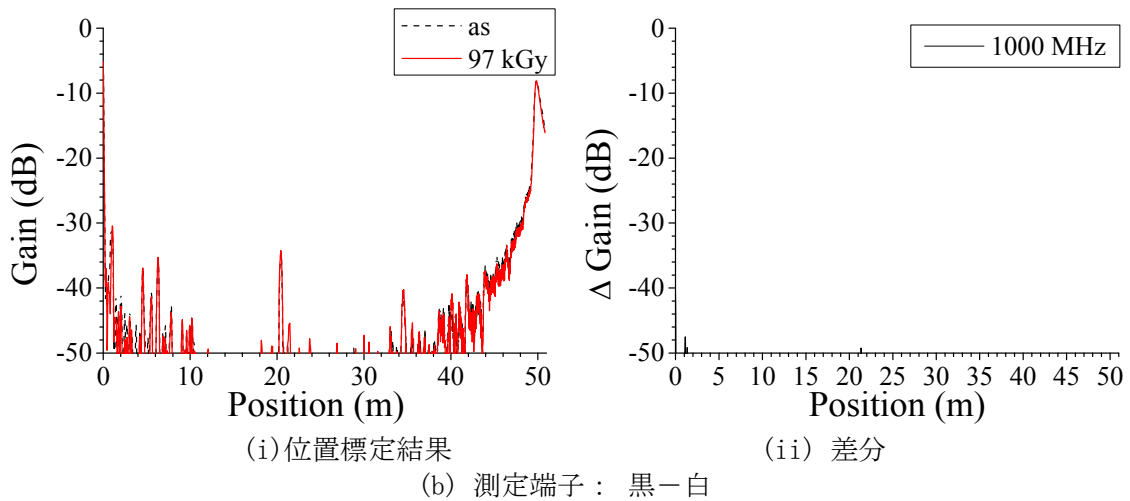
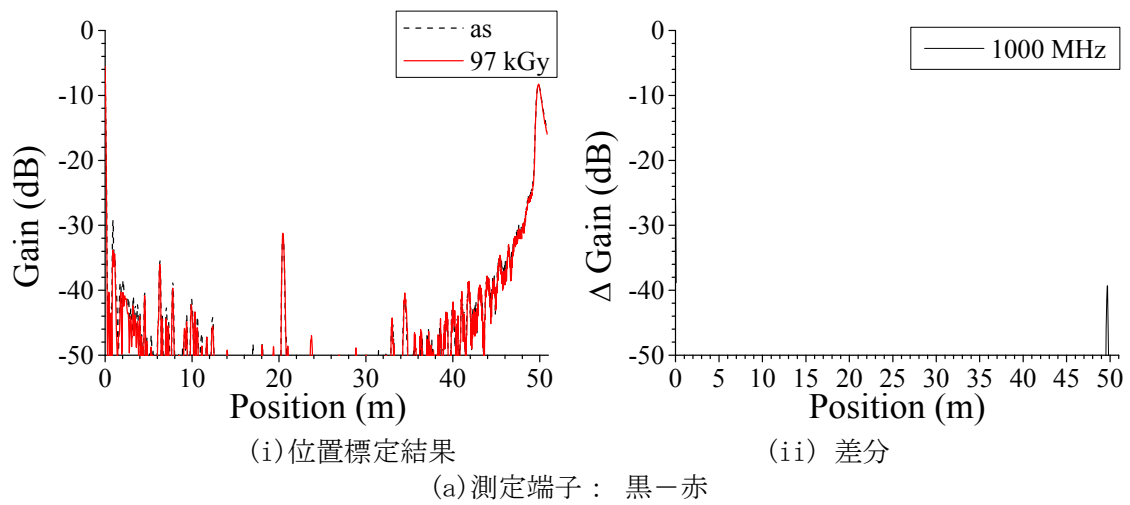
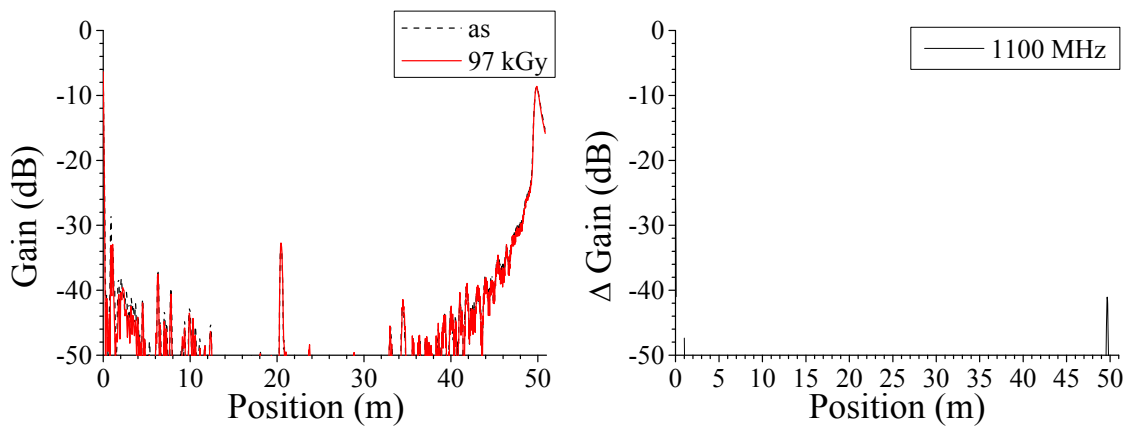


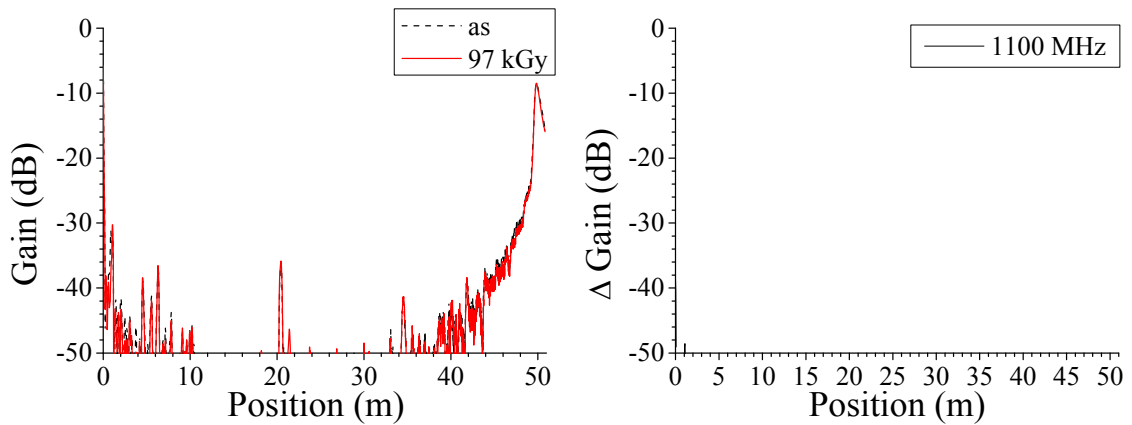
図 3. 3. 1-28 BIS 法による難燃 EPDM 絶縁ケーブル劣化位置標定結果：120℃、0. 5kGy/h、194h、測定端—劣化部：20m、測定条件：熱・放射線同時劣化中、測定周波数域：1～1000MHz、測定反対側端子：開放



(i)位置標定結果

(ii) 差分

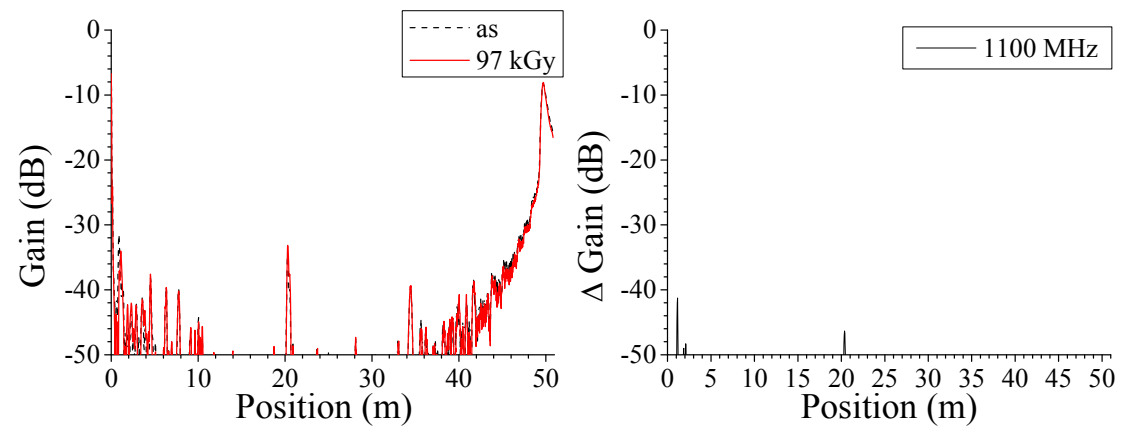
(a)測定端子：黒－赤



(i)位置標定結果

(ii) 差分

(b)測定端子：黒－白



(i)位置標定結果

(ii) 差分

(c)測定端子：赤－白

図 3.3.1-29 BIS 法による難燃 EPDM 絶縁ケーブル劣化位置標定結果：120℃、0.5kGy/h、194h、測定端－劣化部：20m、測定条件：熱・放射線同時劣化中、測定周波数域：1～1100MHz、測定反対側端子：開放

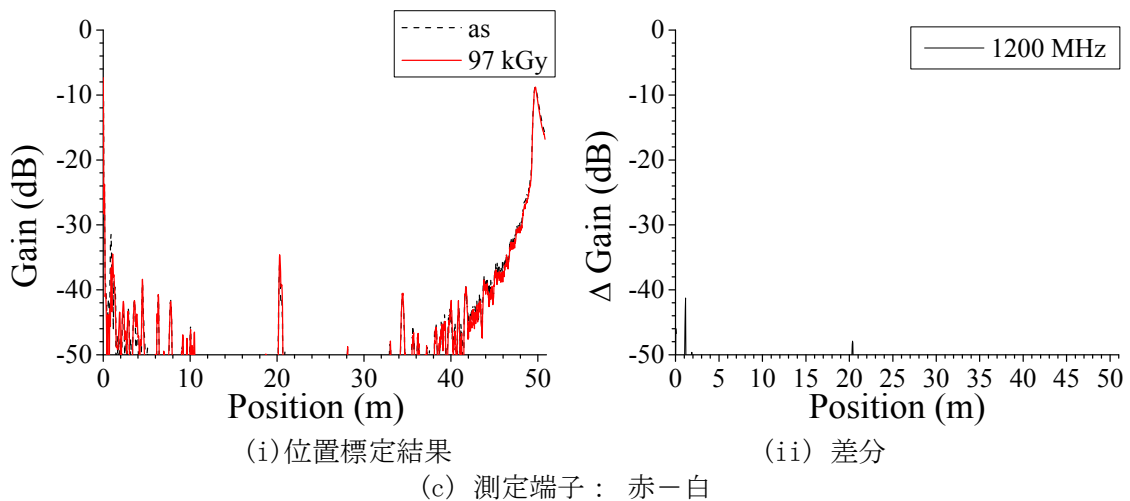
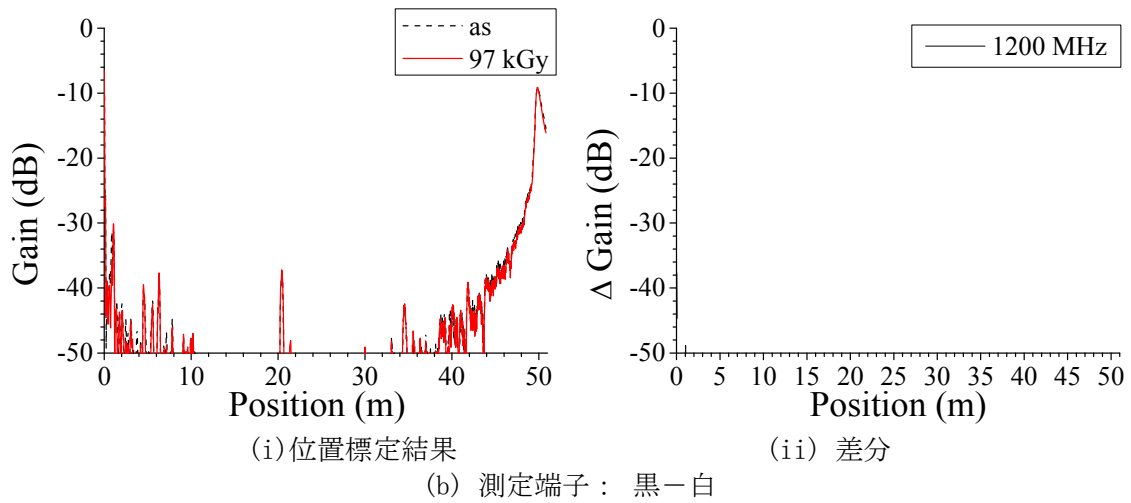
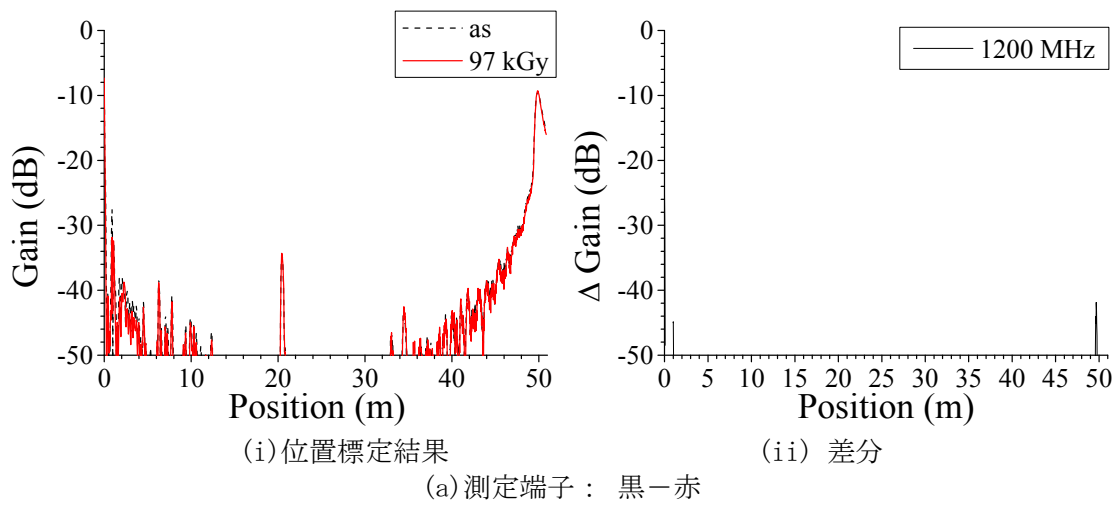
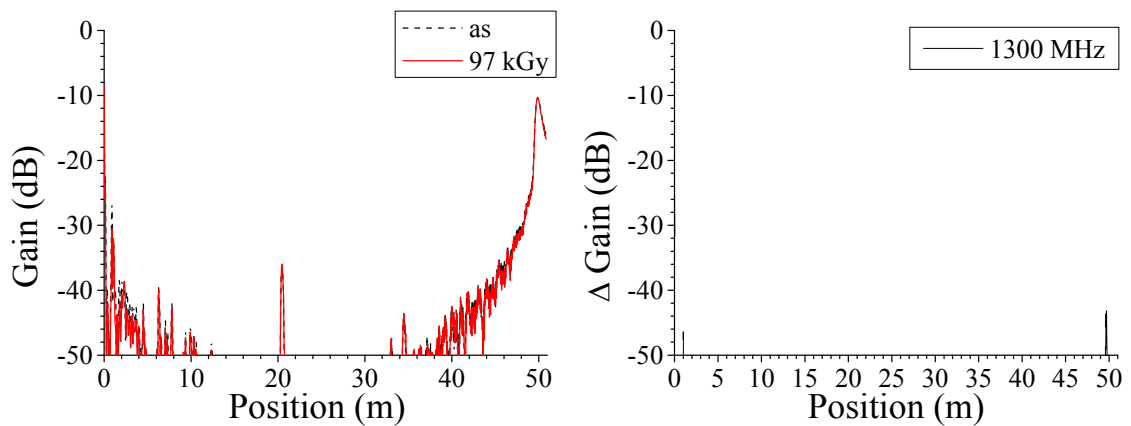


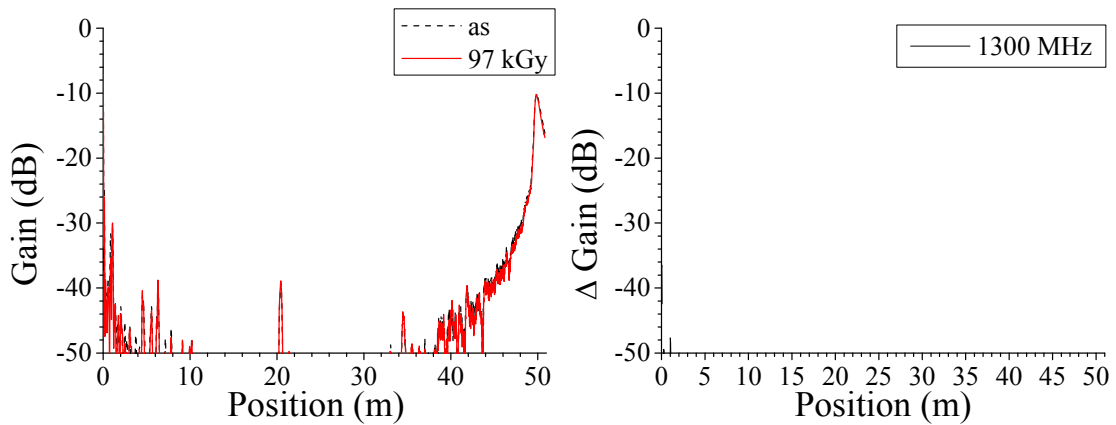
図 3.3.1-30 BIS 法による難燃 EPDM 絶縁ケーブル劣化位置標定結果：120℃、0.5kGy/h、194h、測定端－劣化部：20m、測定条件：熱・放射線同時劣化中、測定周波数域：1～1200MHz、測定反対側端子：開放



(i)位置標定結果

(ii) 差分

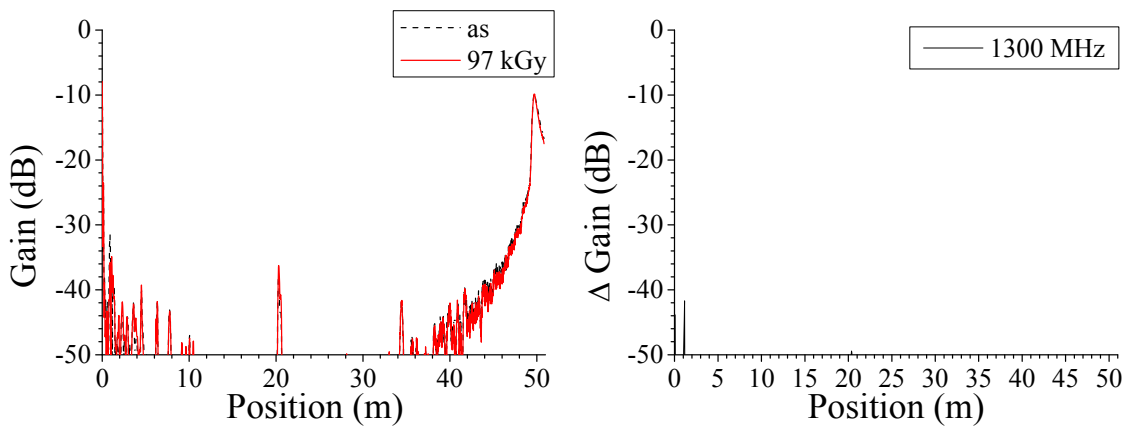
(a)測定端子：黒－赤



(i)位置標定結果

(ii) 差分

(b)測定端子：黒－白

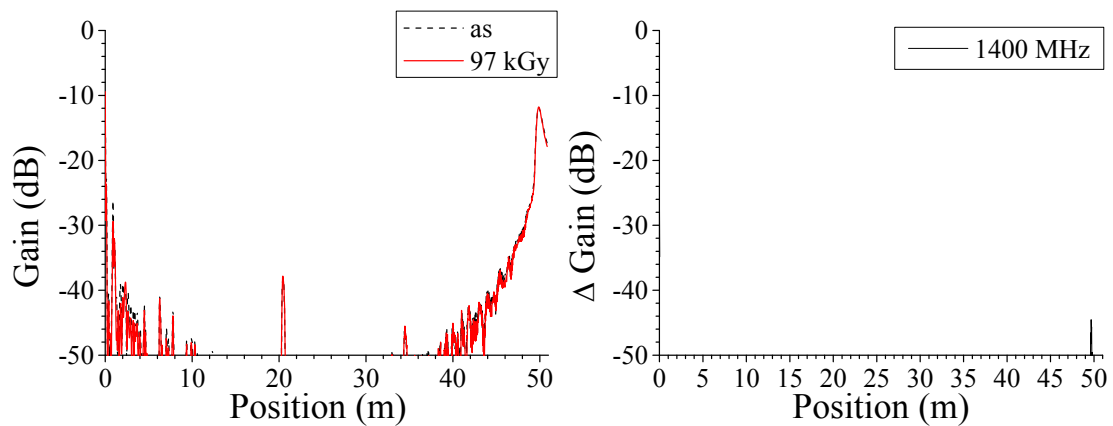


(i)位置標定結果

(ii) 差分

(c)測定端子：赤－白

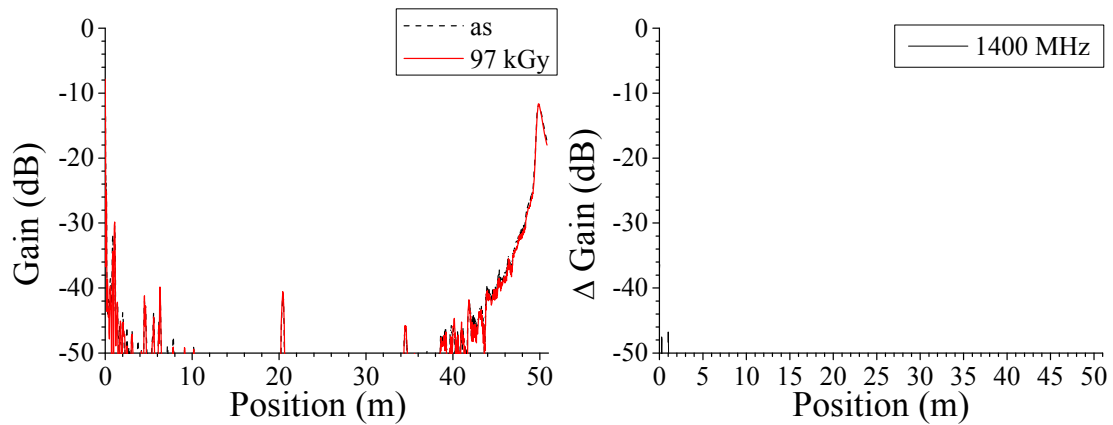
図 3. 3. 1-31 BIS 法による難燃 EPDM 絶縁ケーブル劣化位置標定結果：120℃、0. 5kGy/h、194h、測定端－劣化部：20m、測定条件：熱・放射線同時劣化中、測定周波数域：1～1300MHz、測定反対側端子：開放



(i)位置標定結果

(ii) 差分

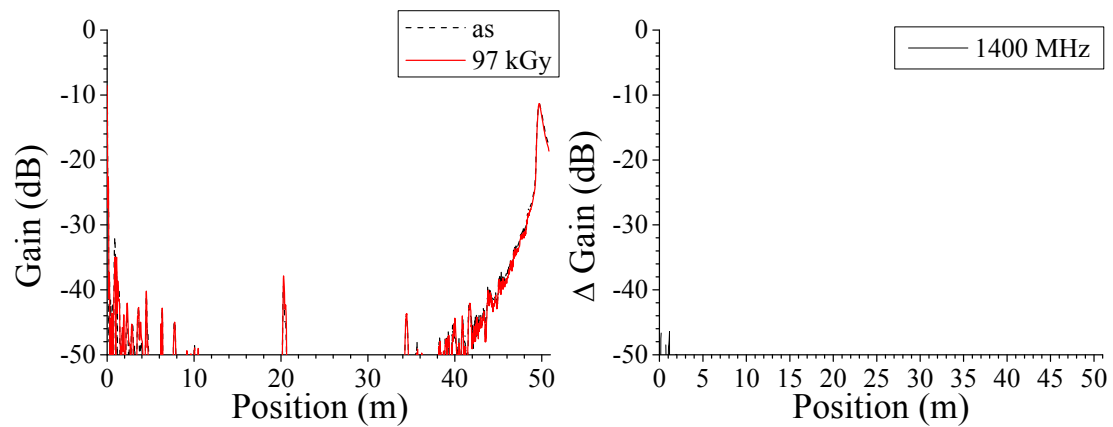
(a)測定端子：黒－赤



(i)位置標定結果

(ii) 差分

(b)測定端子：黒－白

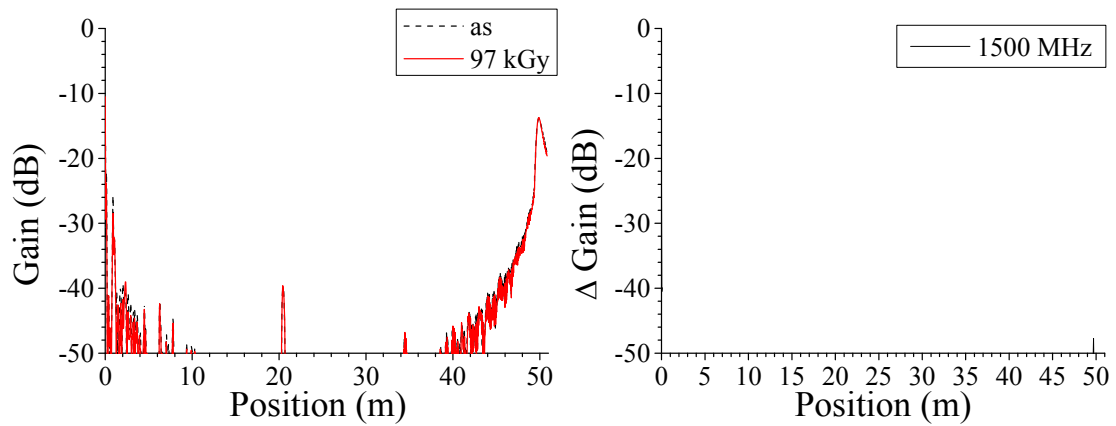


(i)位置標定結果

(ii) 差分

(c)測定端子：赤－白

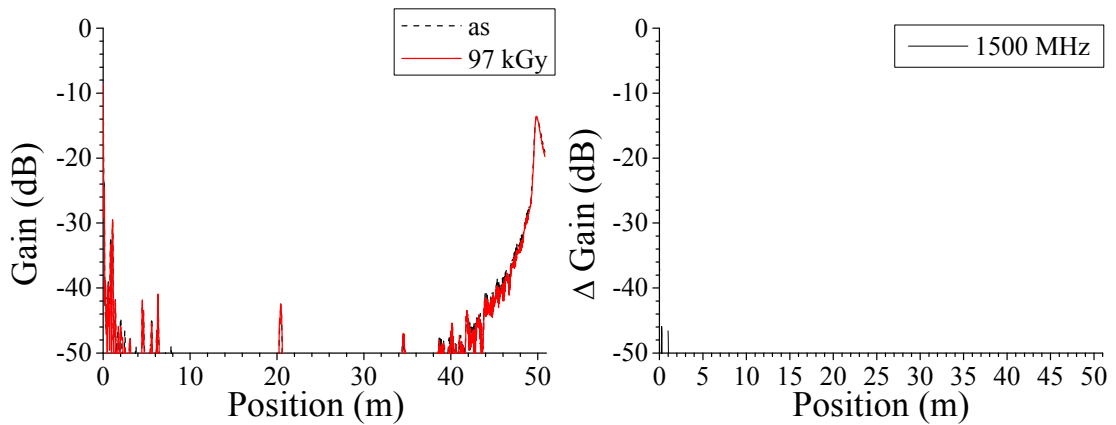
図 3. 3. 1-32 BIS 法による難燃 EPDM 絶縁ケーブル劣化位置標定結果：120℃、0. 5kGy/h、194h、測定端－劣化部：20m、測定条件：熱・放射線同時劣化中、測定周波数域：1～1400MHz、測定反対側端子：開放



(i)位置標定結果

(ii) 差分

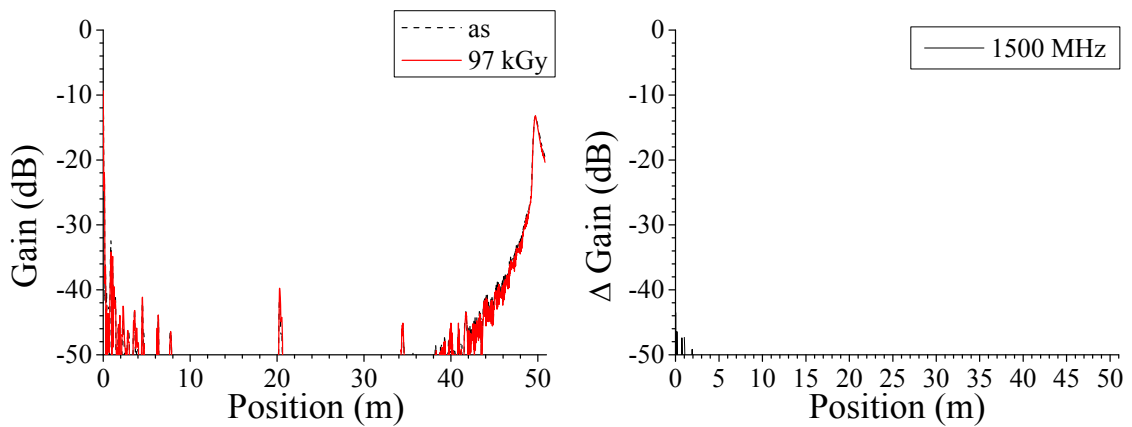
(a)測定端子：黒－赤



(i)位置標定結果

(ii) 差分

(b)測定端子：黒－白

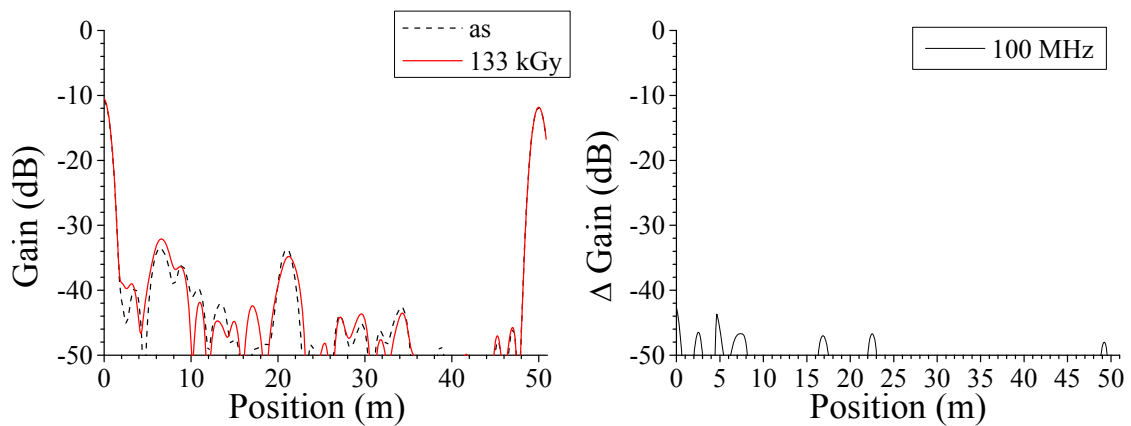


(i)位置標定結果

(ii) 差分

(c)測定端子：赤－白

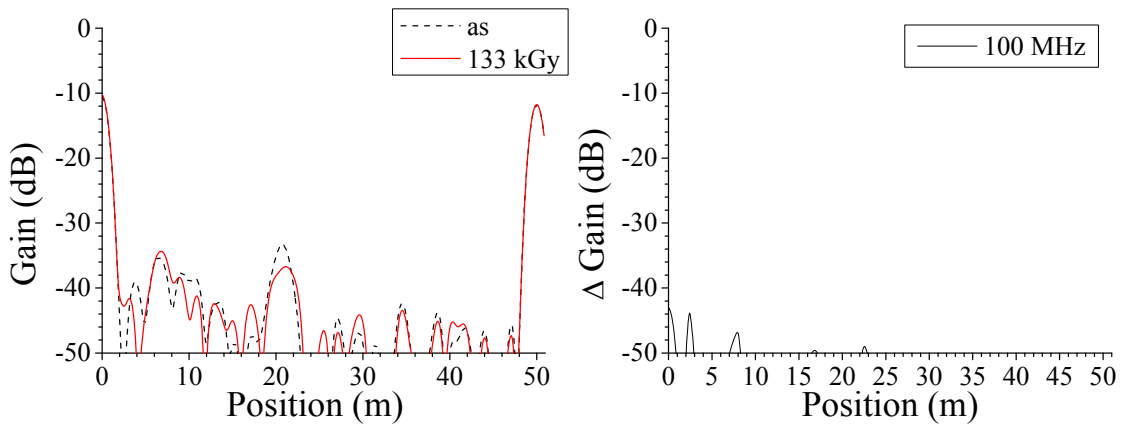
図 3. 3. 1-33 BIS 法による難燃 EPDM 絶縁ケーブル劣化位置標定結果：120℃、0.5kGy/h、194h、測定端－劣化部：20m、測定条件：熱・放射線同時劣化中、測定周波数域：1～1500MHz、測定反対側端子：開放



(i)位置標定結果

(ii) 差分

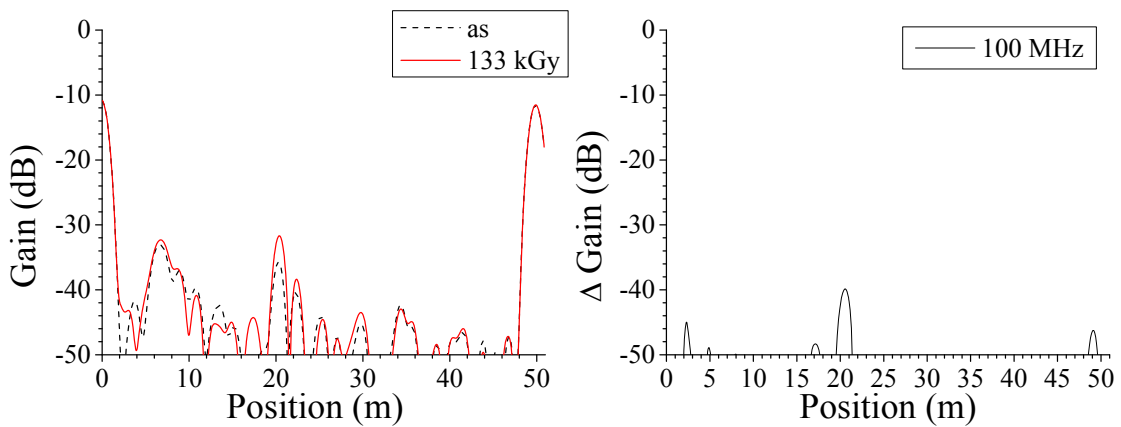
(a)測定端子：黒－赤



(i)位置標定結果

(ii) 差分

(b)測定端子：黒－白



(i)位置標定結果

(ii) 差分

(c)測定端子：赤－白

図 3. 3. 1-34 BIS 法による難燃 EPDM 絶縁ケーブル劣化位置標定結果：120℃、0. 5kGy/h、266h、測定端－劣化部：20m、測定条件：熱・放射線同時劣化中、測定周波数域：1～100MHz、測定反対側端子：開放

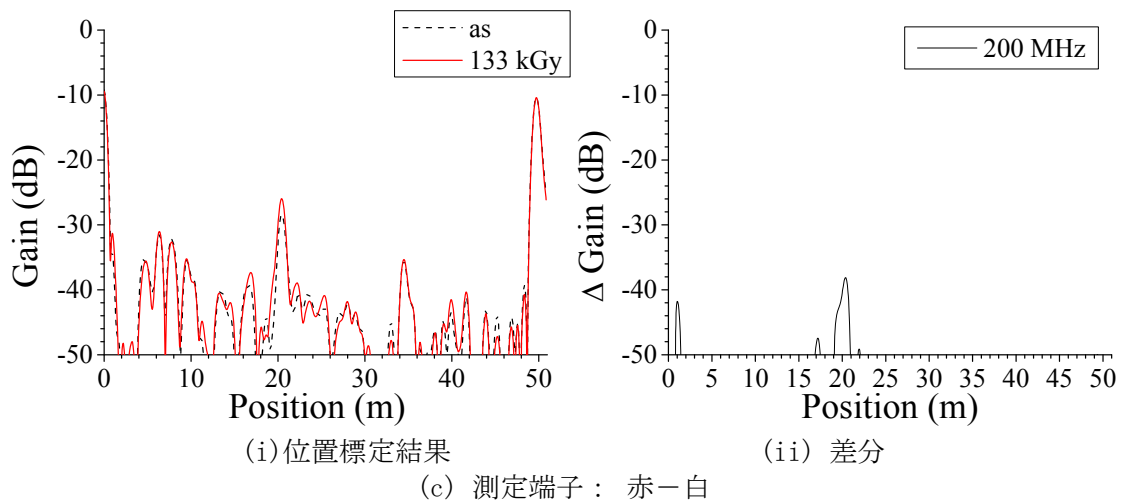
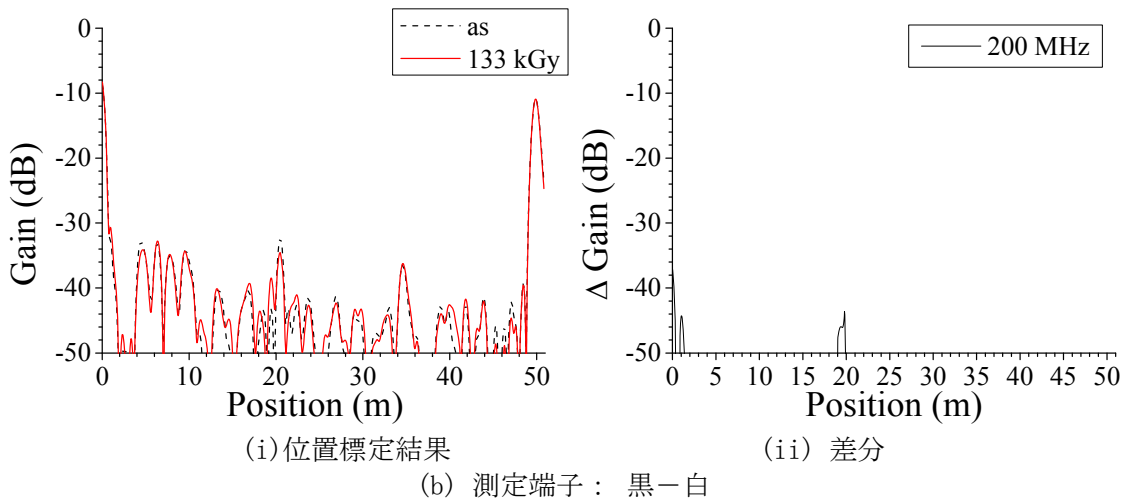
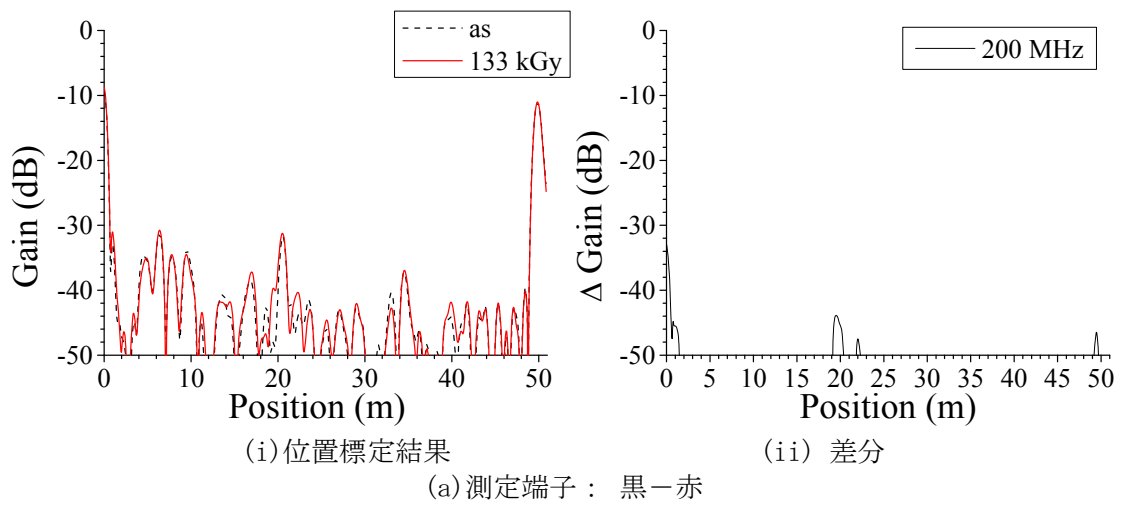


図 3.3.1-35 BIS 法による難燃 EPDM 絶縁ケーブル劣化位置標定結果：120℃、0.5kGy/h、266h、測定端—劣化部：20m、測定条件：熱・放射線同時劣化中、測定周波数域：1～200MHz、測定反対側端子：開放

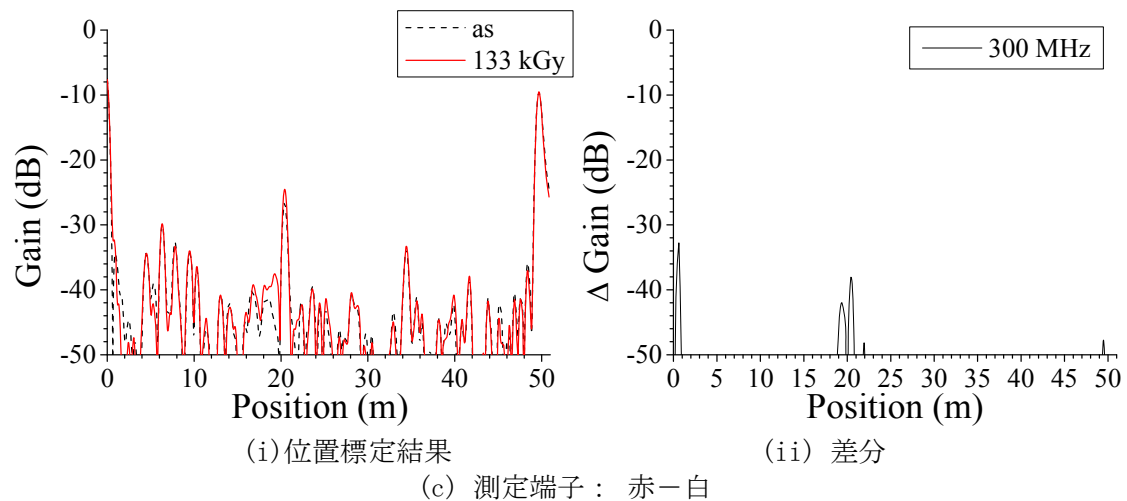
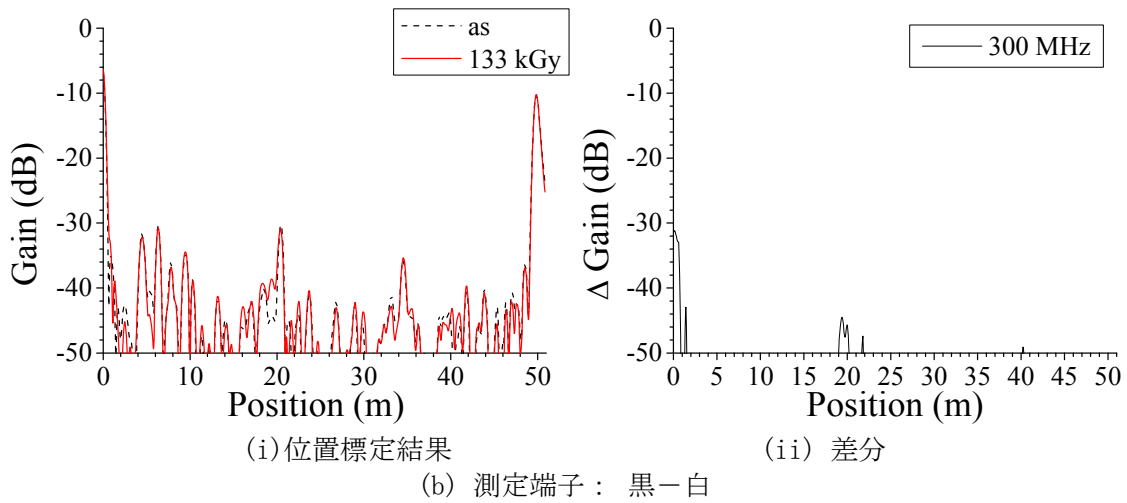
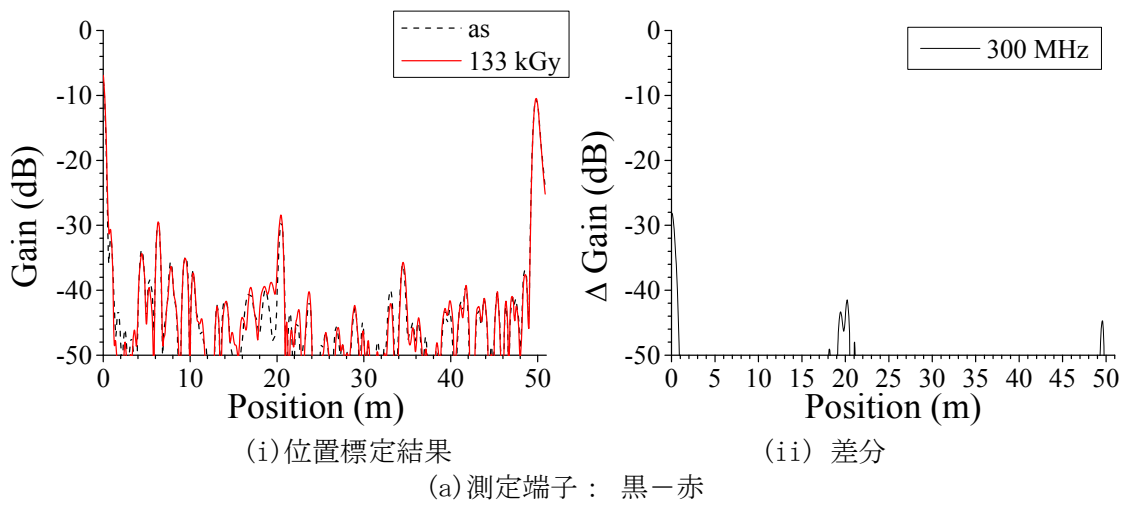
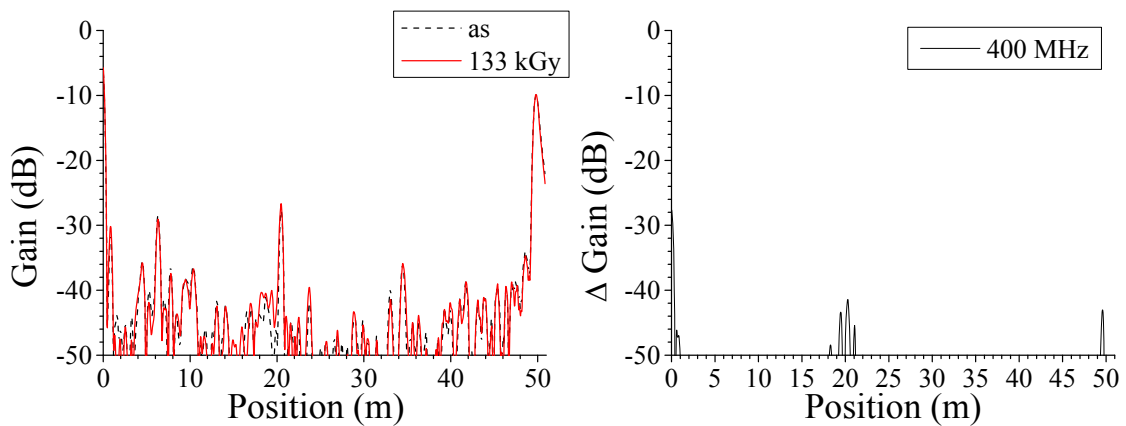


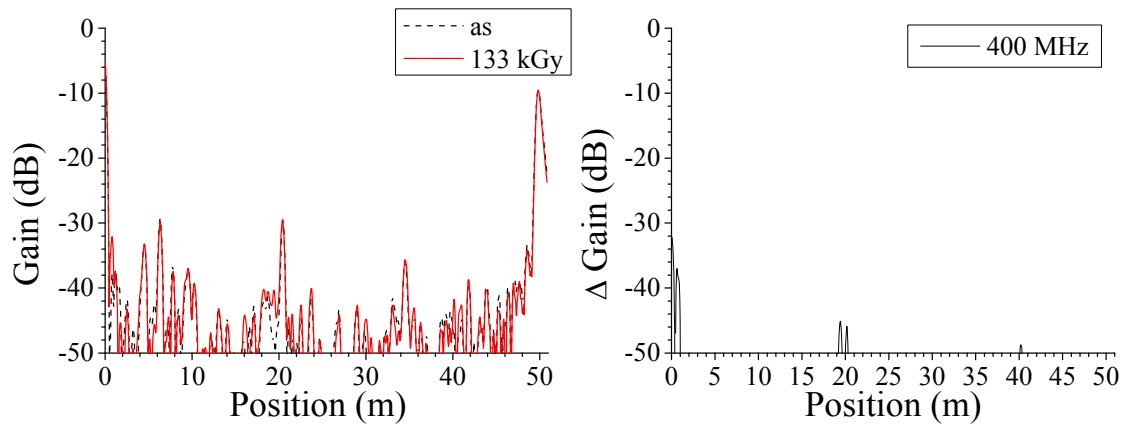
図 3.3.1-36 BIS 法による難燃 EPDM 絶縁ケーブル劣化位置標定結果：120℃、0.5kGy/h、266h、測定端－劣化部：20m、測定条件：熱・放射線同時劣化中、測定周波数域：1～300MHz、測定反対側端子：開放



(i) 位置標定結果

(ii) 差分

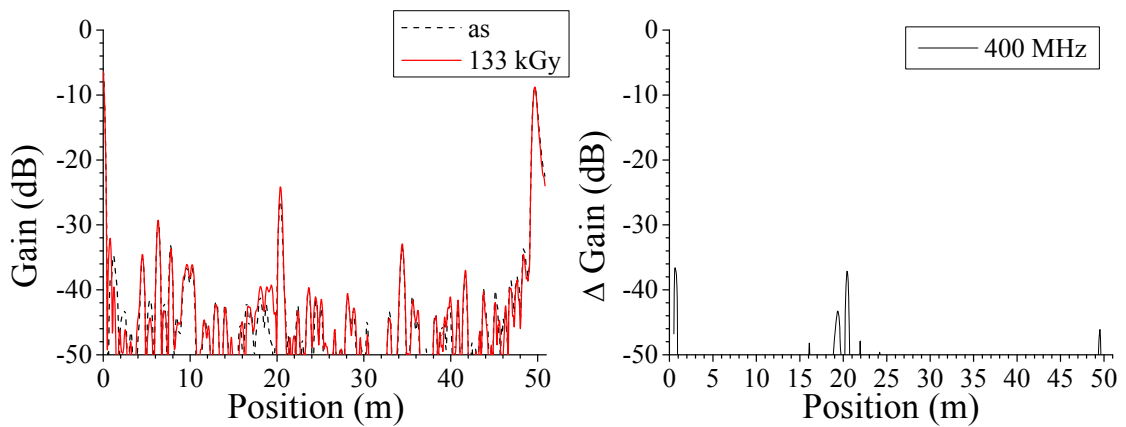
(a) 測定端子：黒－赤



(i) 位置標定結果

(ii) 差分

(b) 測定端子：黒－白

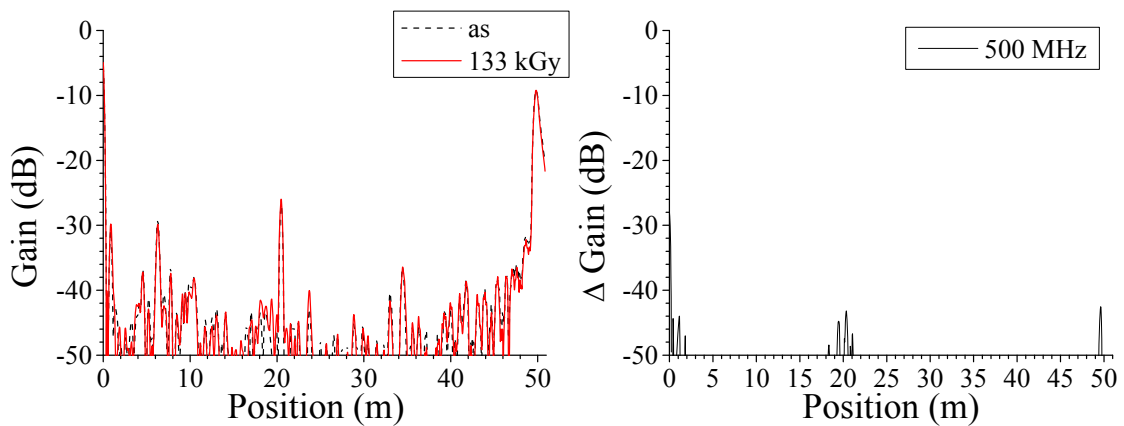


(i) 位置標定結果

(ii) 差分

(c) 測定端子：赤－白

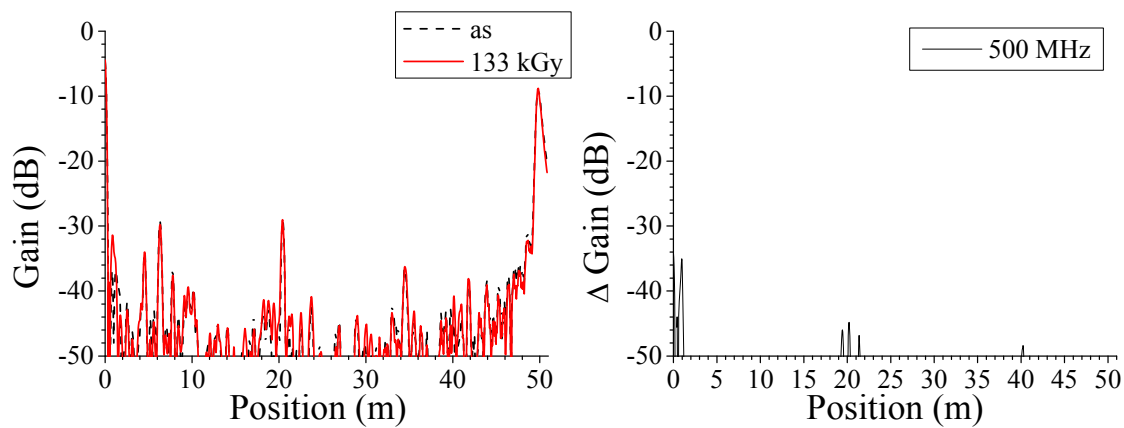
図 3.3.1-37 BIS 法による難燃 EPDM 絶縁ケーブル劣化位置標定結果：120℃、0.5kGy/h、266h、測定端－劣化部：20m、測定条件：熱・放射線同時劣化中、測定周波数域：1～400MHz、測定反対側端子：開放



(i)位置標定結果

(ii) 差分

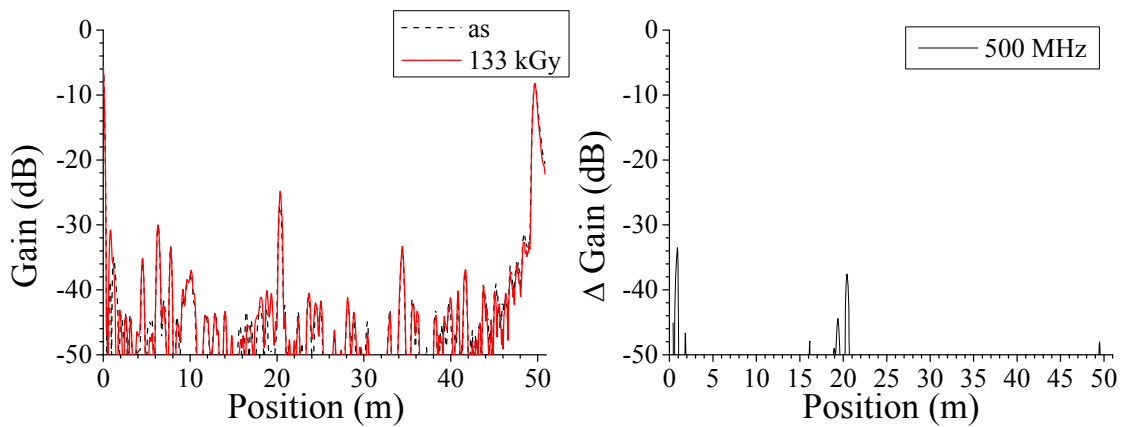
(a)測定端子：黒－赤



(i)位置標定結果

(ii) 差分

(b)測定端子：黒－白

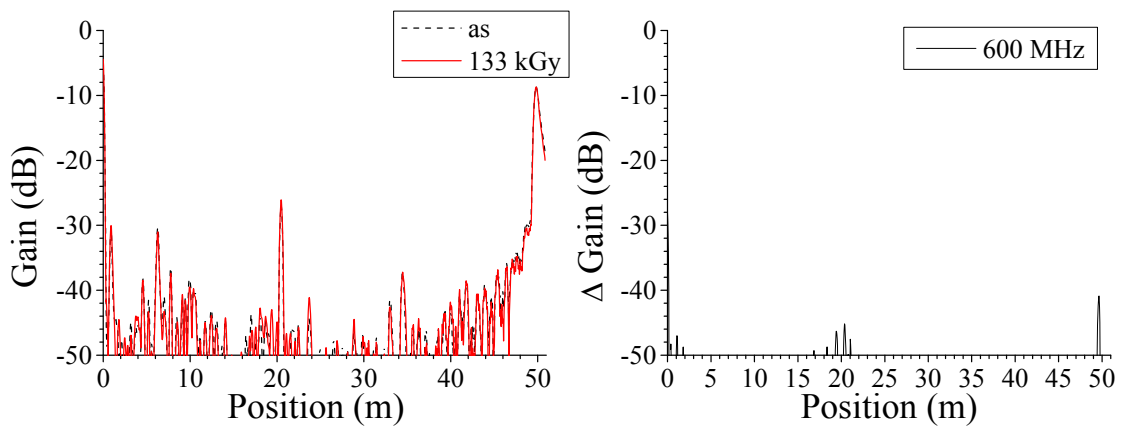


(i)位置標定結果

(ii) 差分

(c)測定端子：赤－白

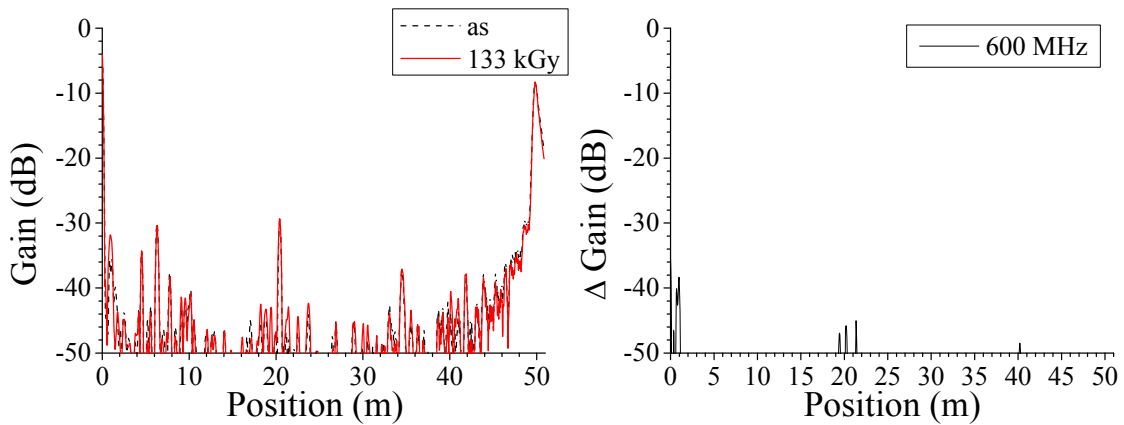
図 3. 3. 1-38 BIS 法による難燃 EPDM 絶縁ケーブル劣化位置標定結果：120℃、0.5kGy/h、266h、測定端－劣化部：20m、測定条件：熱・放射線同時劣化中、測定周波数域：1～500MHz、測定反対側端子：開放



(i)位置標定結果

(ii) 差分

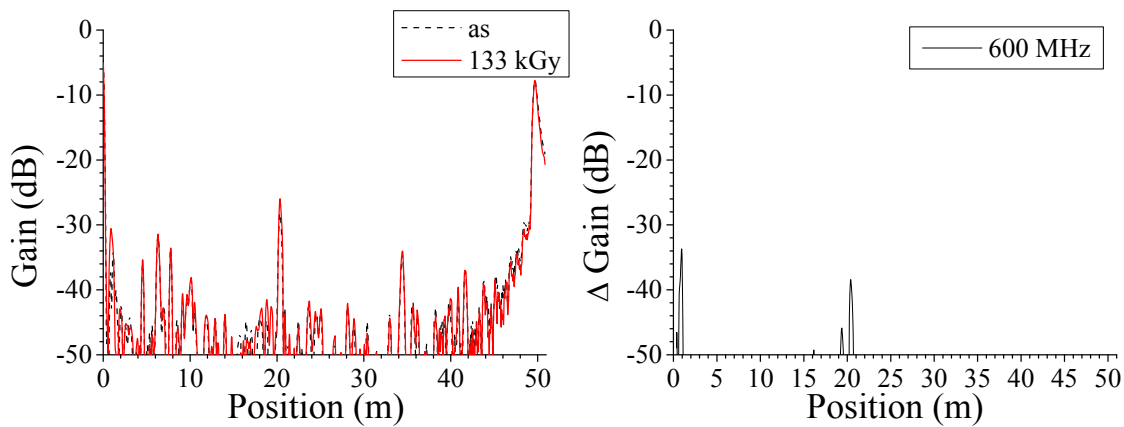
(a)測定端子：黒-赤



(i)位置標定結果

(ii) 差分

(b)測定端子：黒-白

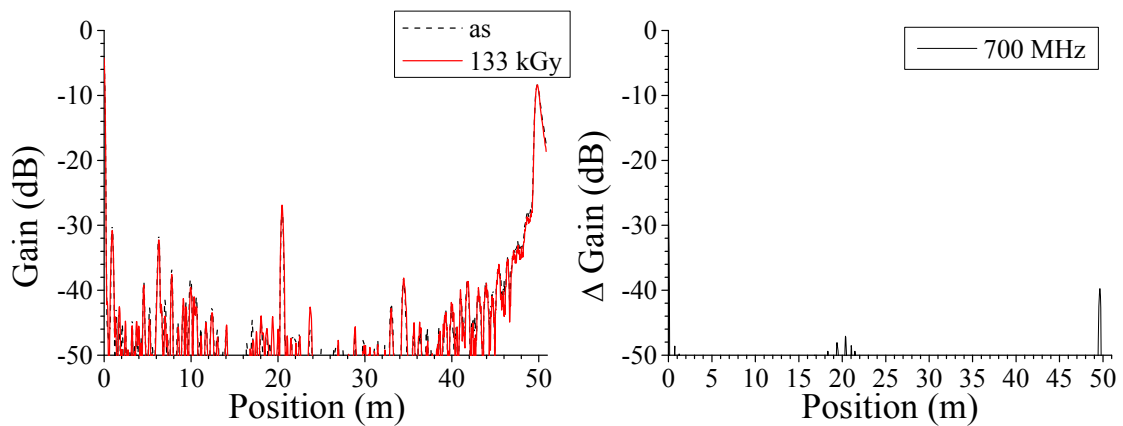


(i)位置標定結果

(ii) 差分

(c)測定端子：赤-白

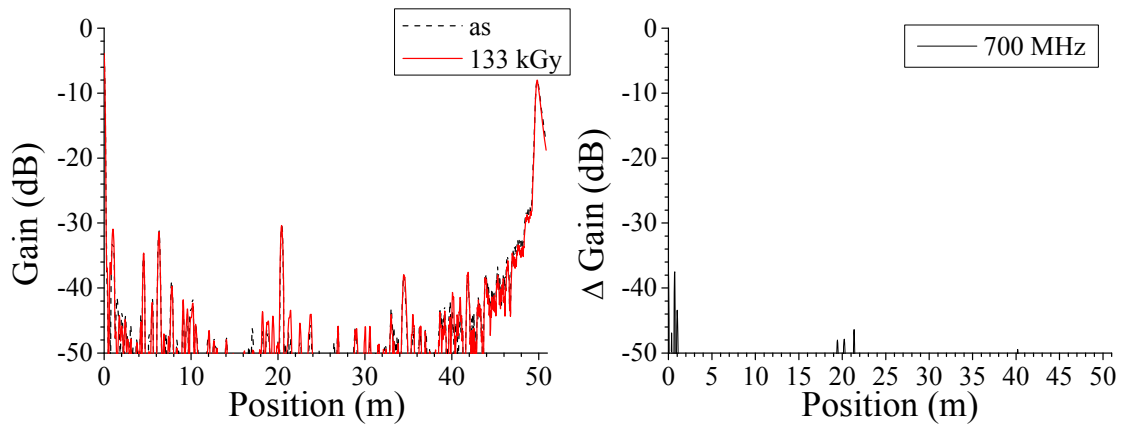
図 3. 3. 1-39 BIS 法による難燃 EPDM 絶縁ケーブル劣化位置標定結果：120℃、0. 5kGy/h、266h、測定端—劣化部：20m、測定条件：熱・放射線同時劣化中、測定周波数域：1～600MHz、測定反対側端子：開放



(i)位置標定結果

(ii) 差分

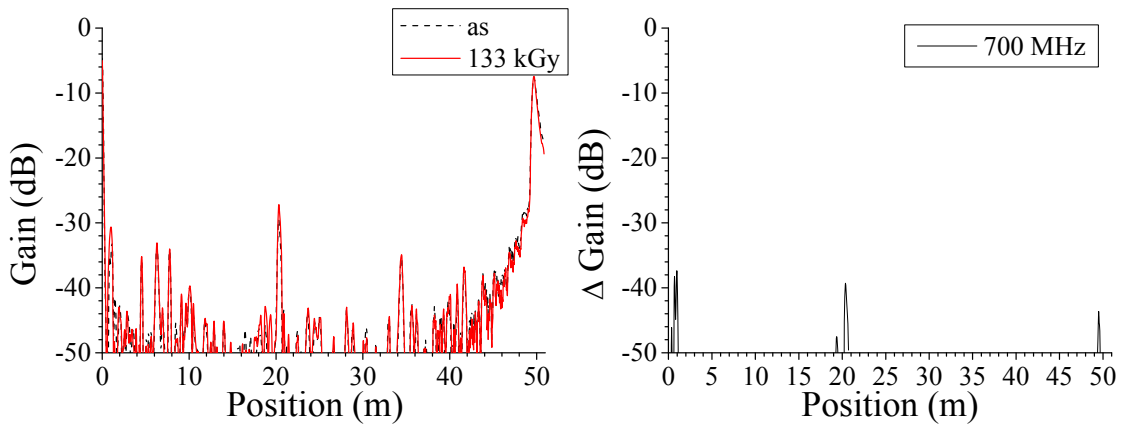
(a)測定端子：黒－赤



(i)位置標定結果

(ii) 差分

(b)測定端子：黒－白

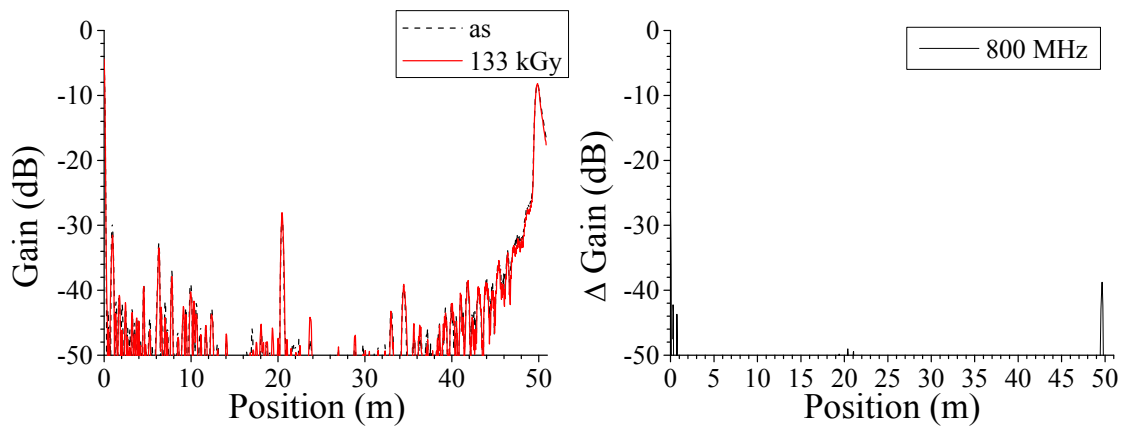


(i)位置標定結果

(ii) 差分

(c)測定端子：赤－白

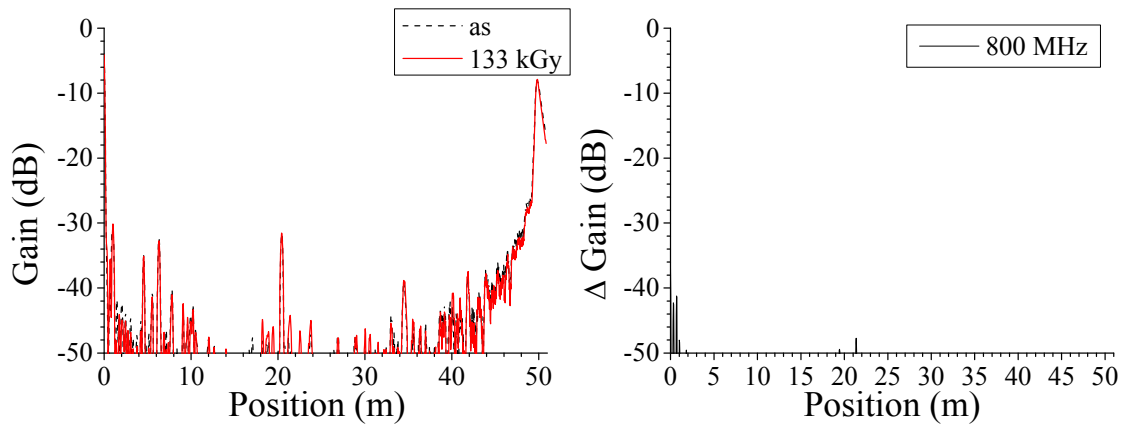
図 3.3.1-40 BIS 法による難燃 EPDM 絶縁ケーブル劣化位置標定結果：120℃、0.5kGy/h、266h、測定端－劣化部：20m、測定条件：熱・放射線同時劣化中、測定周波数域：1～700MHz、測定反対側端子：開放



(i)位置標定結果

(ii) 差分

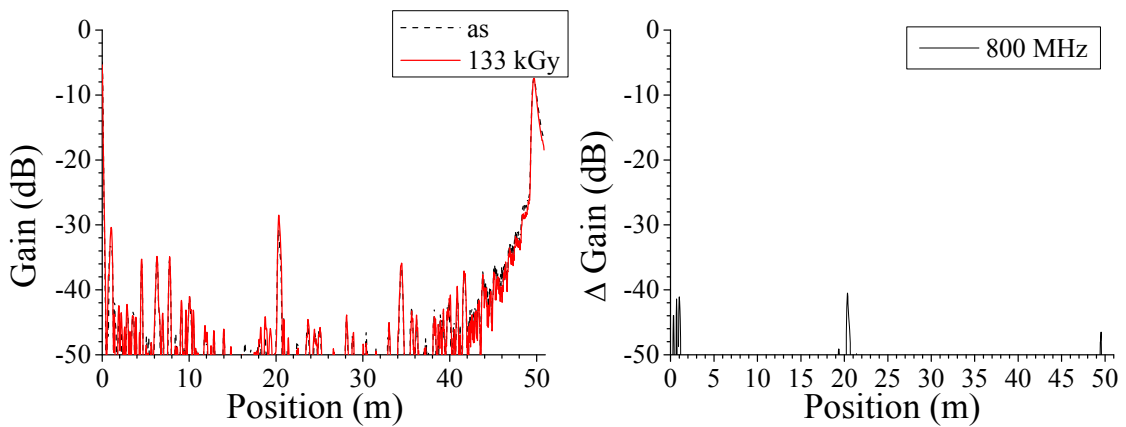
(a)測定端子：黒－赤



(i)位置標定結果

(ii) 差分

(b)測定端子：黒－白

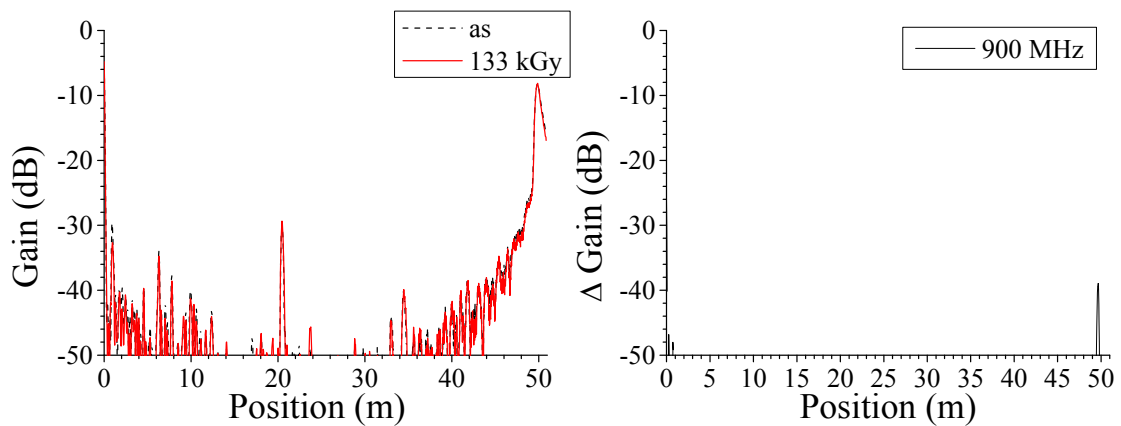


(i)位置標定結果

(ii) 差分

(c)測定端子：赤－白

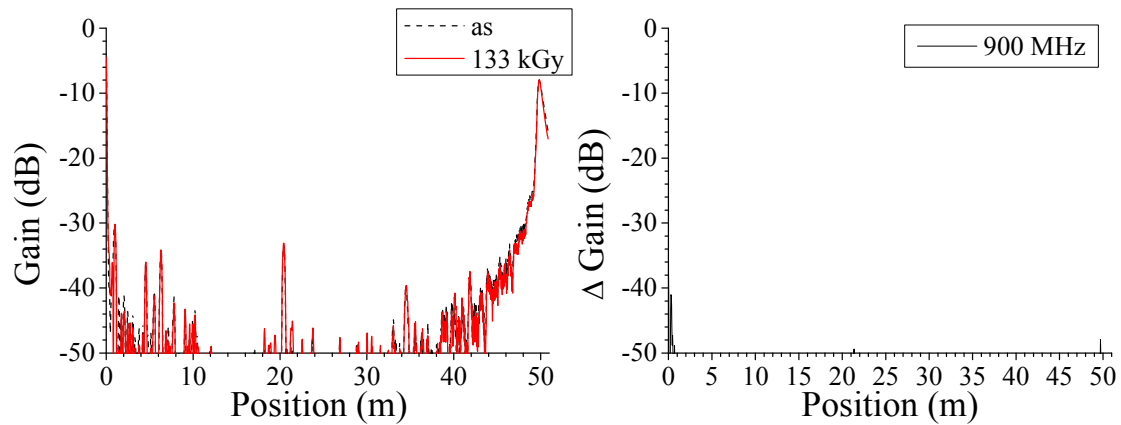
図 3. 3. 1-41 BIS 法による難燃 EPDM 絶縁ケーブル劣化位置標定結果：120℃、0. 5kGy/h、266h、測定端－劣化部：20m、測定条件：熱・放射線同時劣化中、測定周波数域：1～800MHz、測定反対側端子：開放



(i)位置標定結果

(ii) 差分

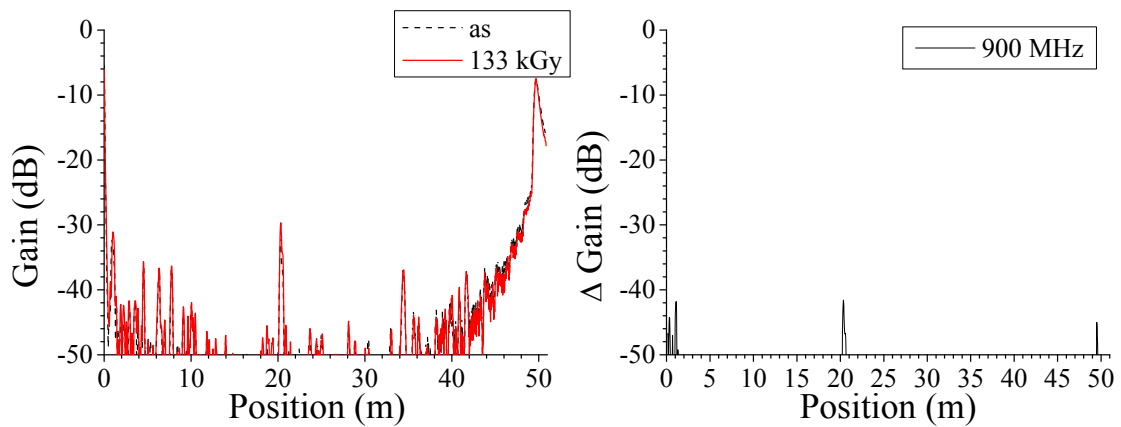
(a)測定端子：黒－赤



(i)位置標定結果

(ii) 差分

(b)測定端子：黒－白

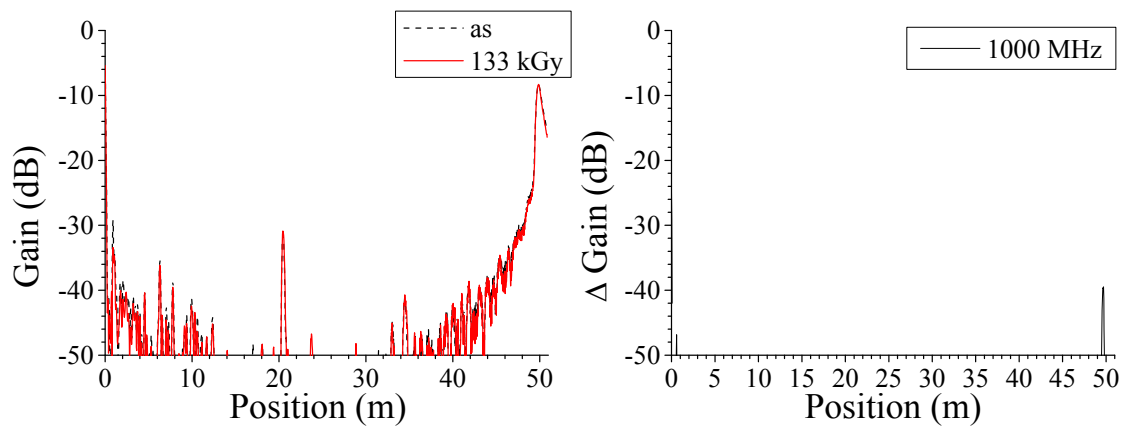


(i)位置標定結果

(ii) 差分

(c)測定端子：赤－白

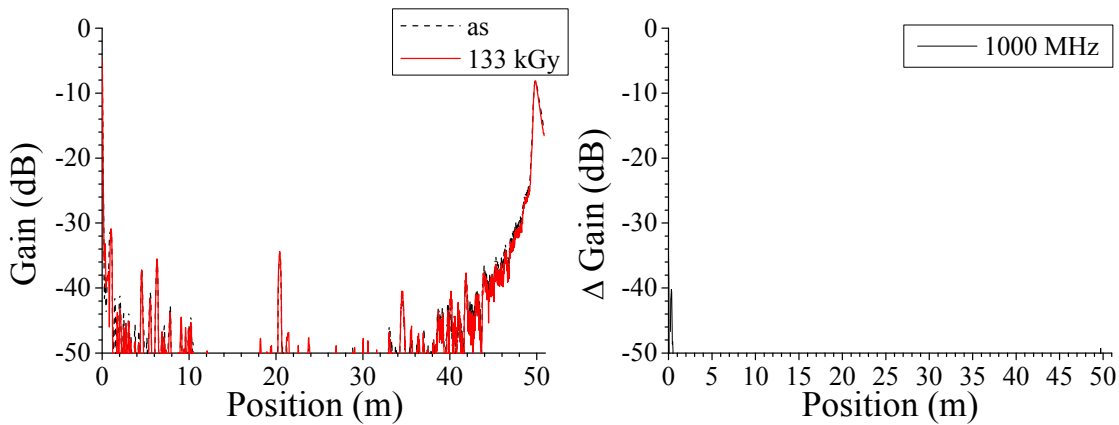
図 3. 3. 1-42 BIS 法による難燃 EPDM 絶縁ケーブル劣化位置標定結果：120℃、0. 5kGy/h、266h、測定端－劣化部：20m、測定条件：熱・放射線同時劣化中、測定周波数域：1～900MHz、測定反対側端子：開放



(i)位置標定結果

(ii) 差分

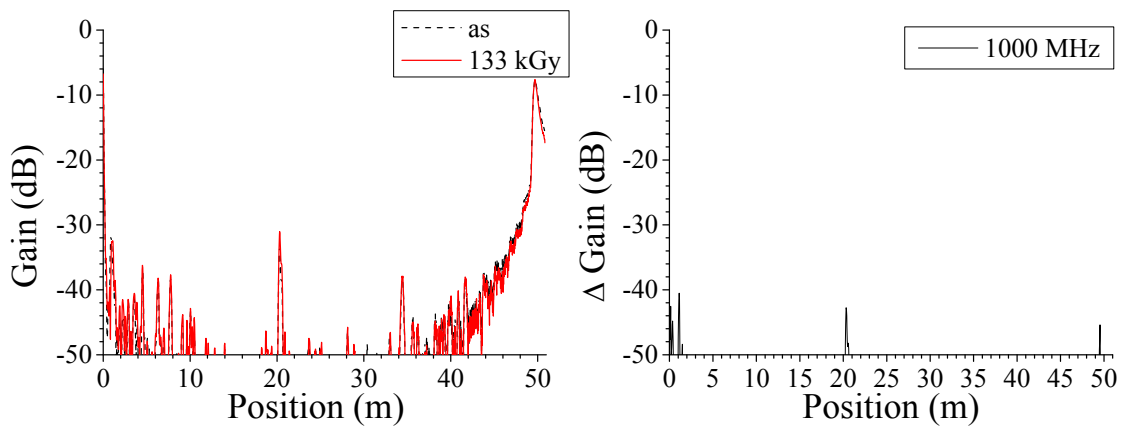
(a)測定端子：黒－赤



(i)位置標定結果

(ii) 差分

(b)測定端子：黒－白



(i)位置標定結果

(ii) 差分

(c)測定端子：赤－白

図 3. 3. 1-43 BIS 法による難燃 EPDM 絶縁ケーブル劣化位置標定結果：120℃、0. 5kGy/h、266h、測定端－劣化部：20m、測定条件：熱・放射線同時劣化中、測定周波数域：1～1000MHz、測定反対側端子：開放

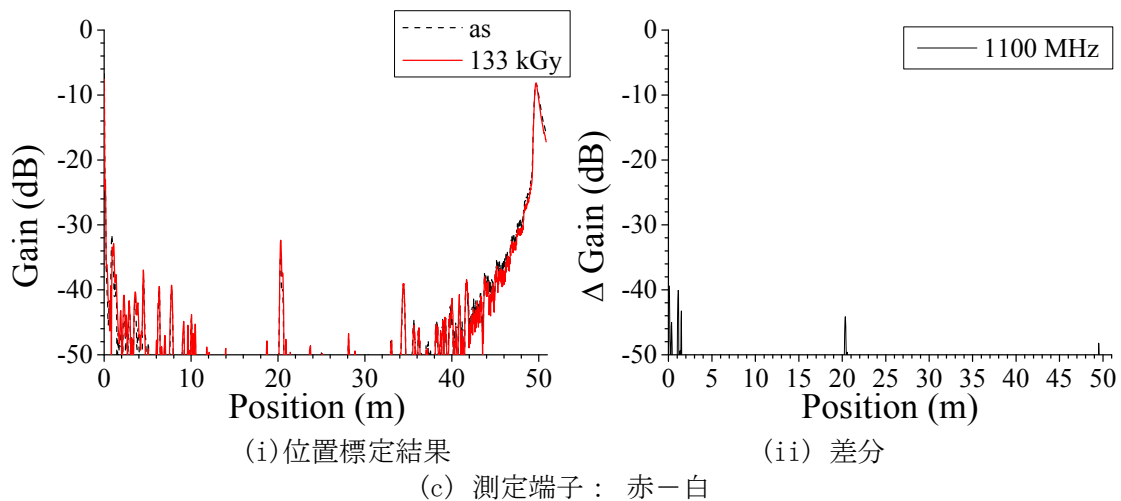
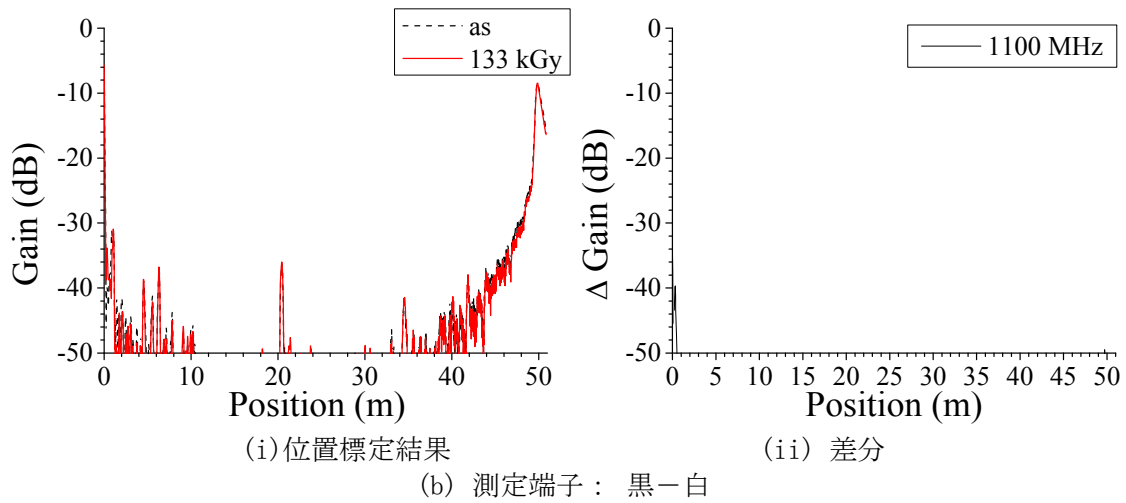
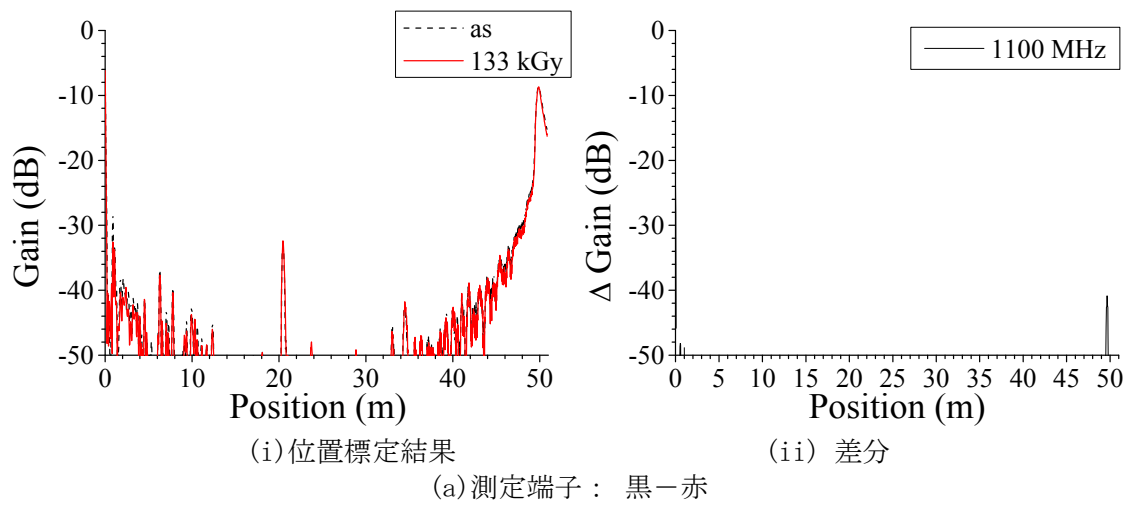
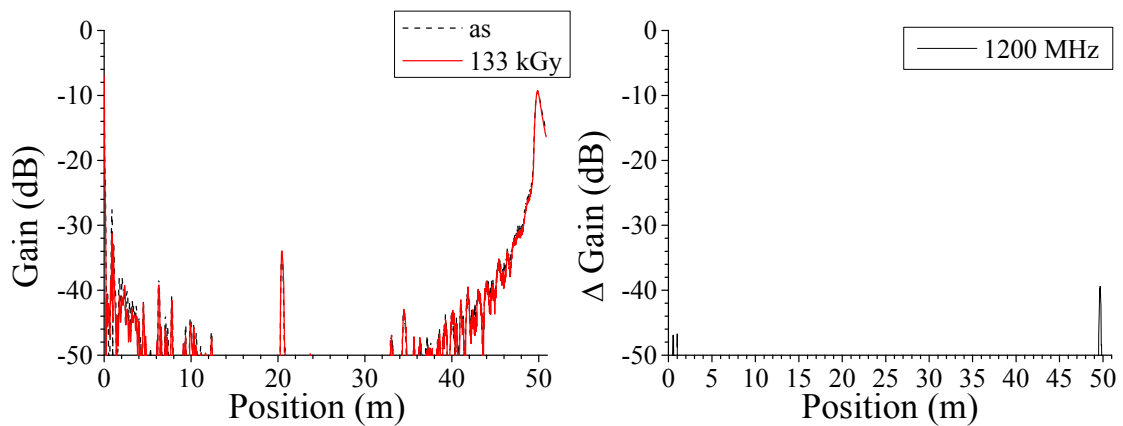


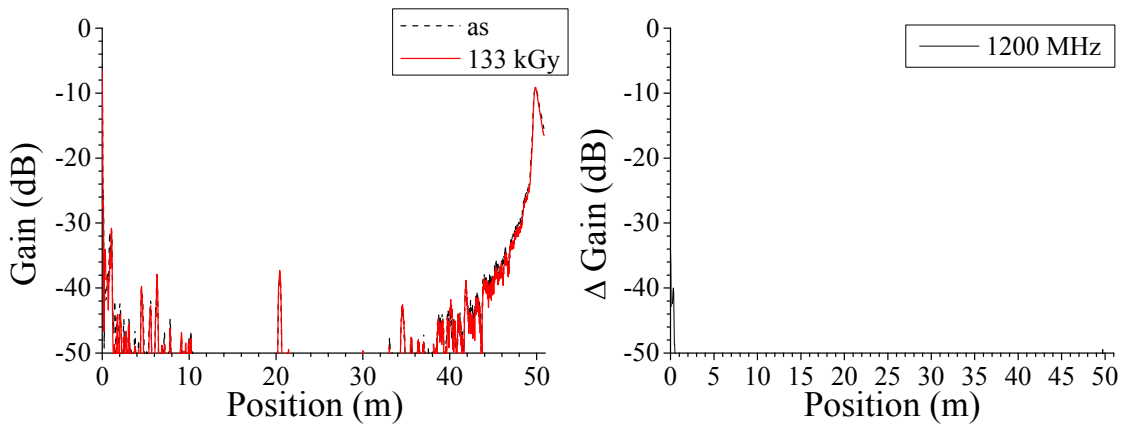
図 3.3.1-44 IS 法による難燃 EPDM 絶縁ケーブル劣化位置標定結果：120°C、0.5kGy/h、266h、測定端－劣化部：20m、測定条件：熱・放射線同時劣化中、測定周波数域：1～1100MHz、測定反対側端子：開放



(i)位置標定結果

(ii) 差分

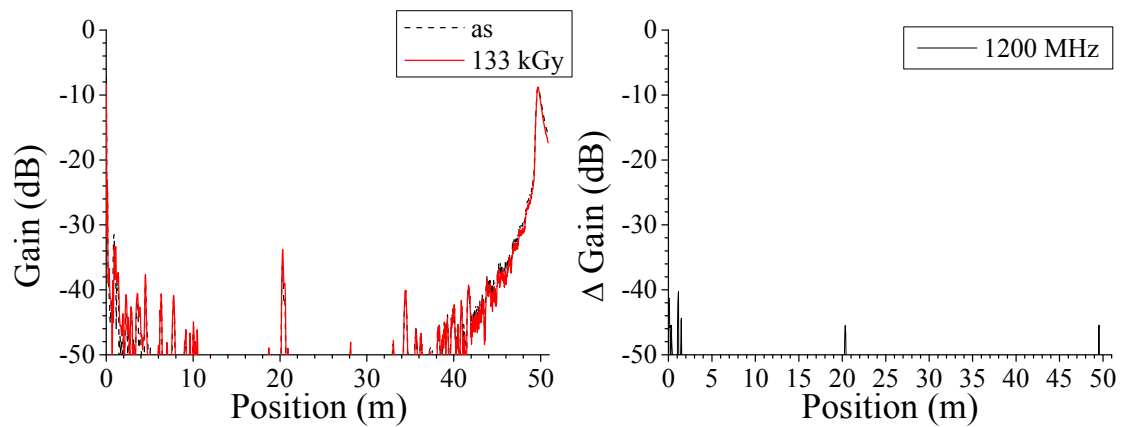
(a)測定端子：黒－赤



(i)位置標定結果

(ii) 差分

(b)測定端子：黒－白

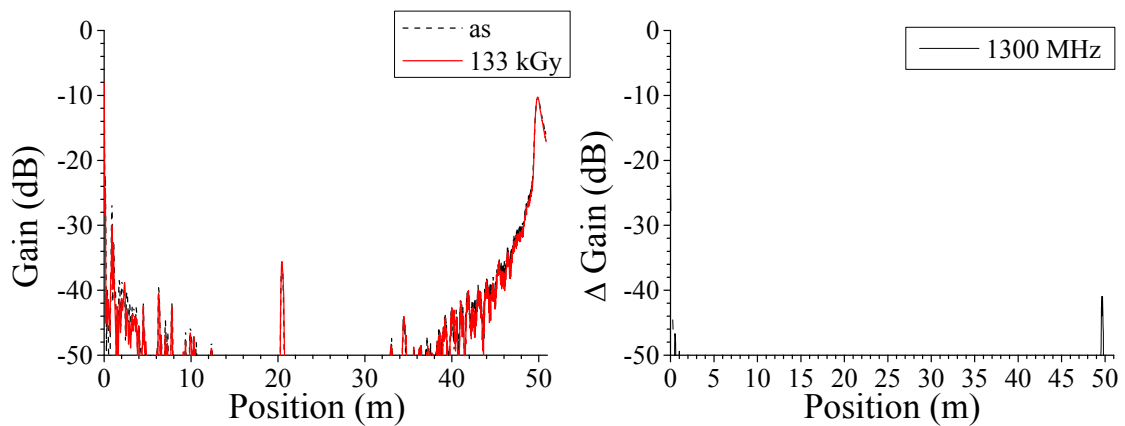


(i)位置標定結果

(ii) 差分

(c)測定端子：赤－白

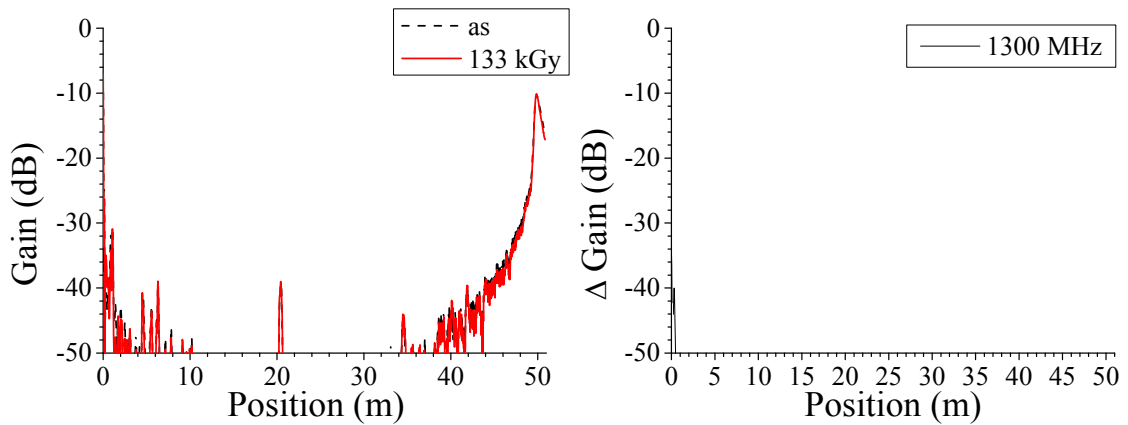
図 3.3.1-45 IS法による難燃 EPDM 絶縁ケーブル劣化位置標定結果：120℃、0.5kGy/h、266h、測定端－劣化部：20m、測定条件：熱・放射線同時劣化中、測定周波数域：1～1200MHz、測定反対側端子：開放



(i)位置標定結果

(ii) 差分

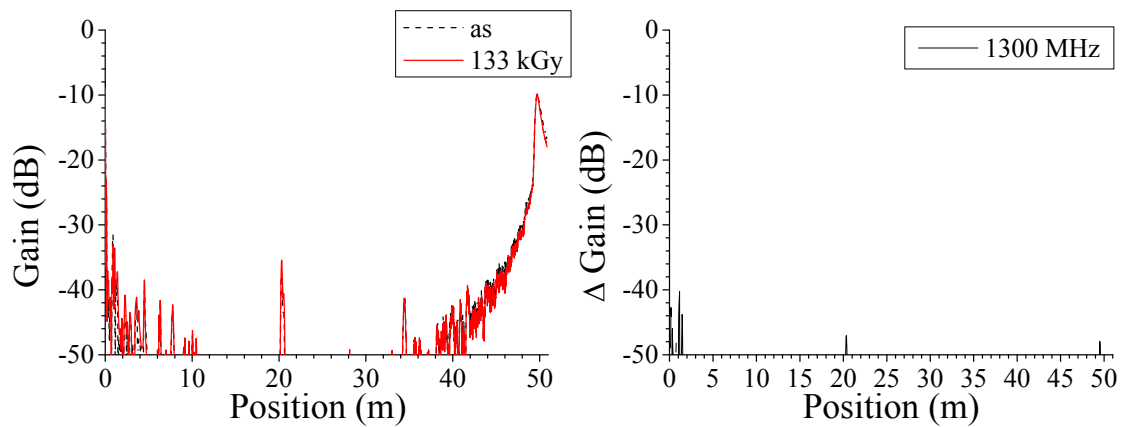
(a)測定端子：黒-赤



(i)位置標定結果

(ii) 差分

(b)測定端子：黒-白

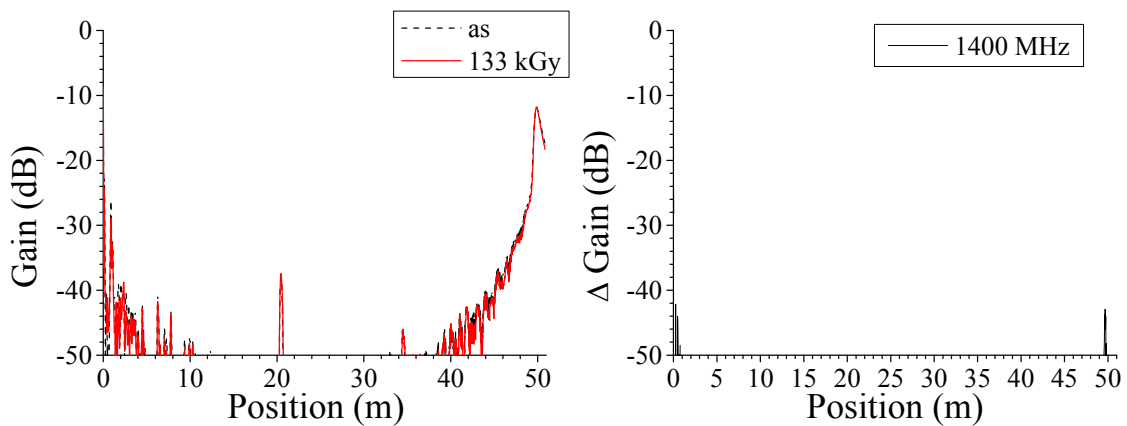


(i)位置標定結果

(ii) 差分

(c)測定端子：赤-白

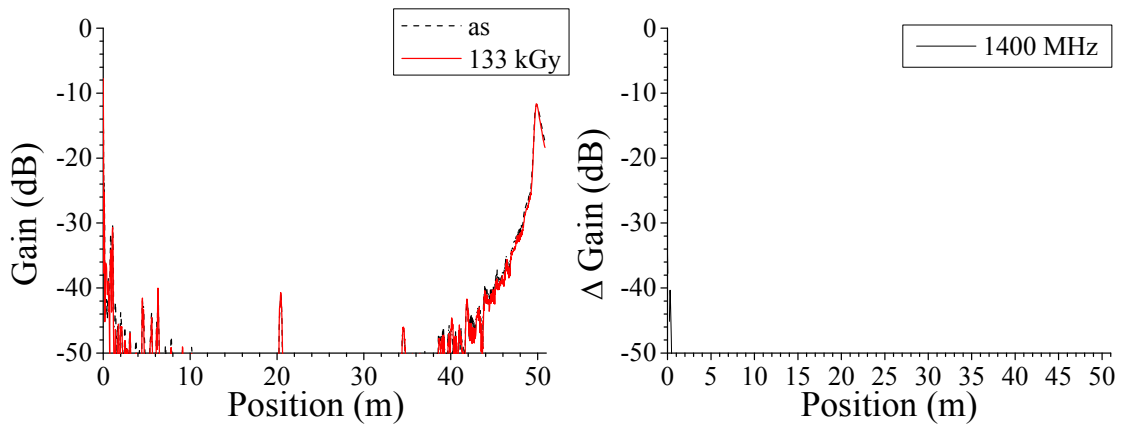
図 3. 3. 1-46 BIS 法による難燃 EPDM 絶縁ケーブル劣化位置標定結果：120℃、0. 5kGy/h、266h、測定端-劣化部：20m、測定条件：熱・放射線同時劣化中、測定周波数域：1~1300MHz、測定反対側端子：開放



(i)位置標定結果

(ii) 差分

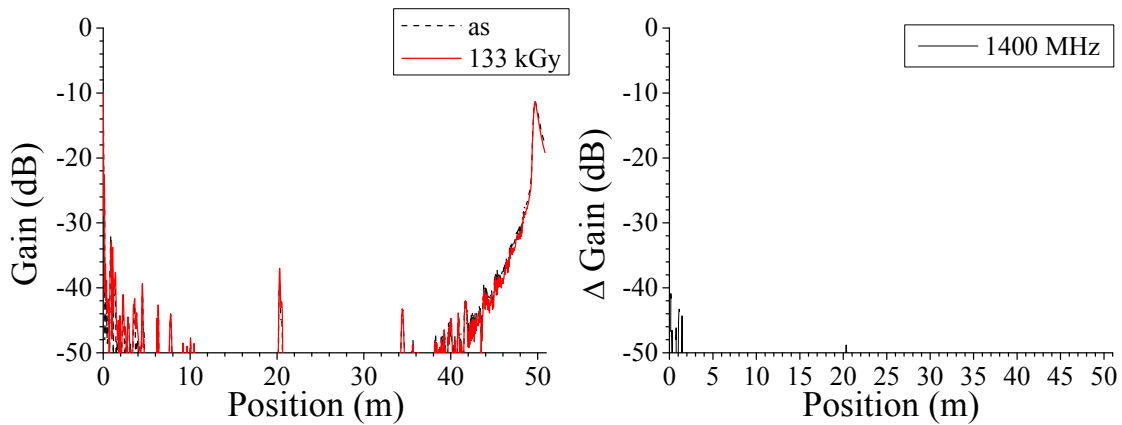
(a)測定端子：黒－赤



(i)位置標定結果

(ii) 差分

(b)測定端子：黒－白



(i)位置標定結果

(ii) 差分

(c)測定端子：赤－白

図 3. 3. 1-47 BIS 法による難燃 EPDM 絶縁ケーブル劣化位置標定結果：120℃、0. 5kGy/h、266h、測定端－劣化部：20m、測定条件：熱・放射線同時劣化中、測定周波数域：1～1400MHz、測定反対側端子：開放

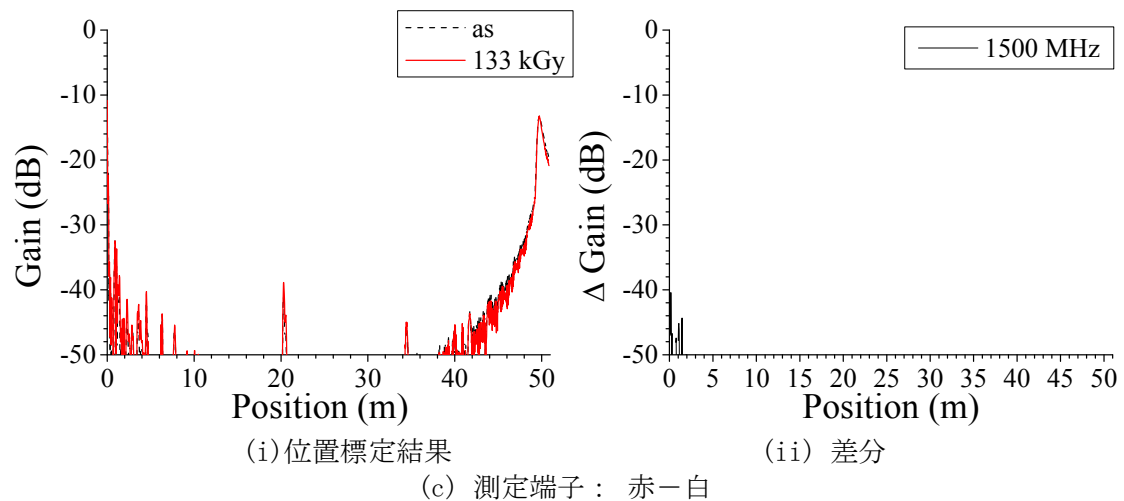
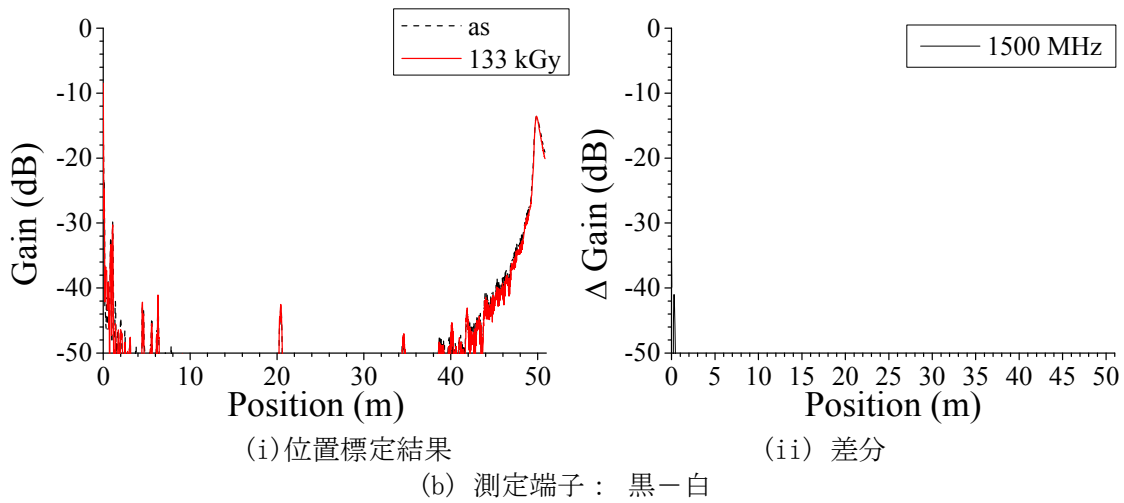
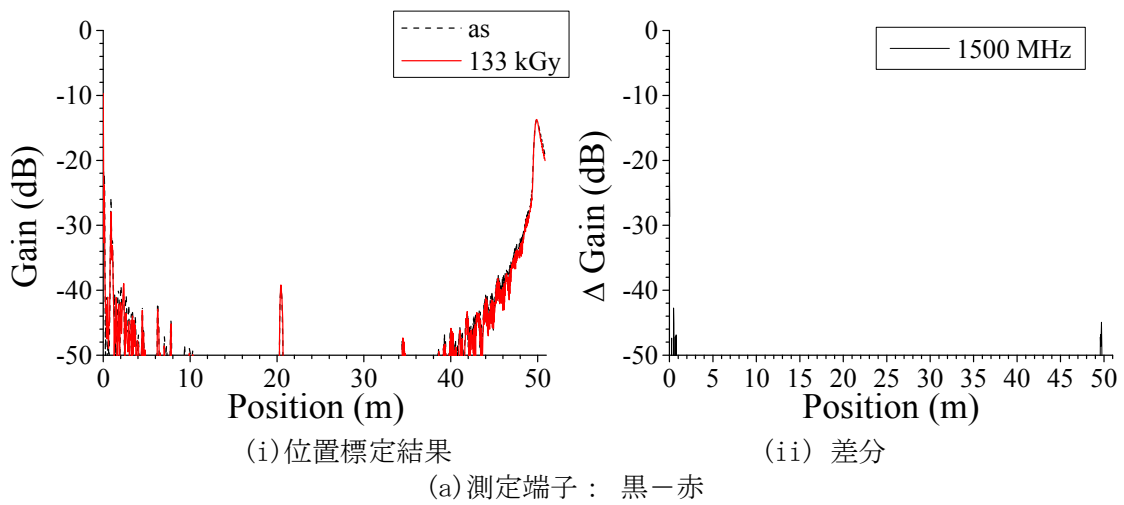


図 3. 3. 1-48 BIS 法による難燃 EPDM 絶縁ケーブル劣化位置標定結果：120℃、0. 5kGy/h、266h、測定端—劣化部：20m、測定条件：熱・放射線同時劣化中、測定周波数域：1～1500MHz、測定反対側端子：開放

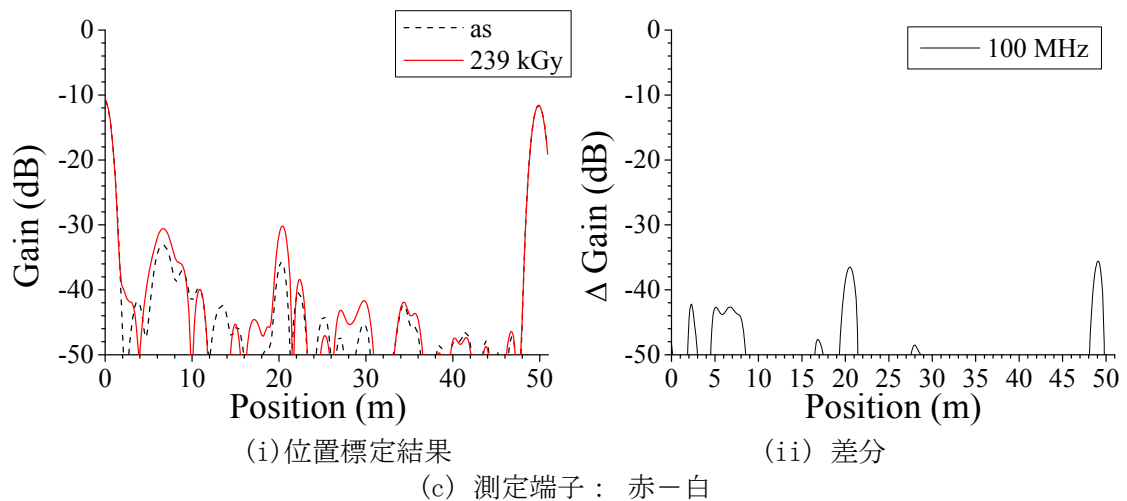
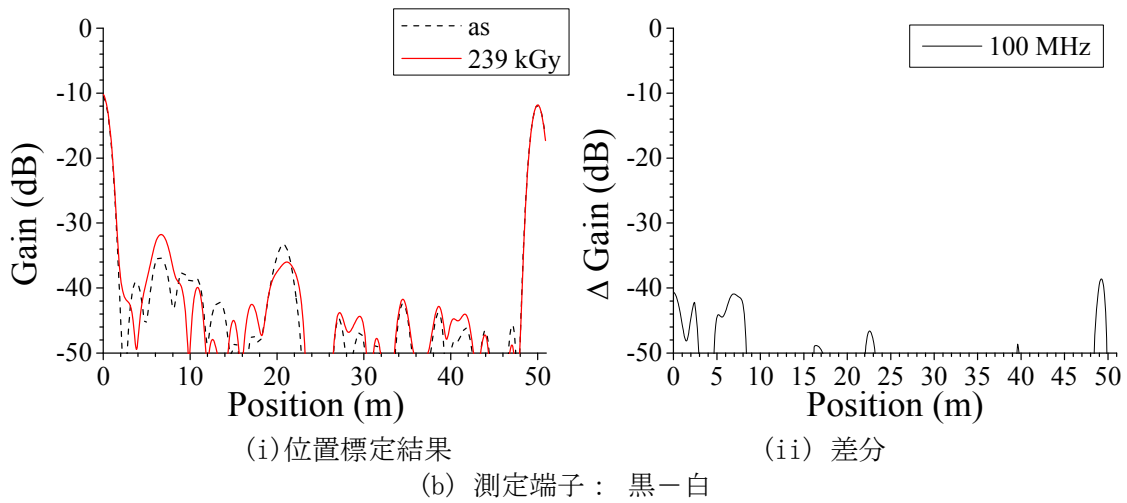
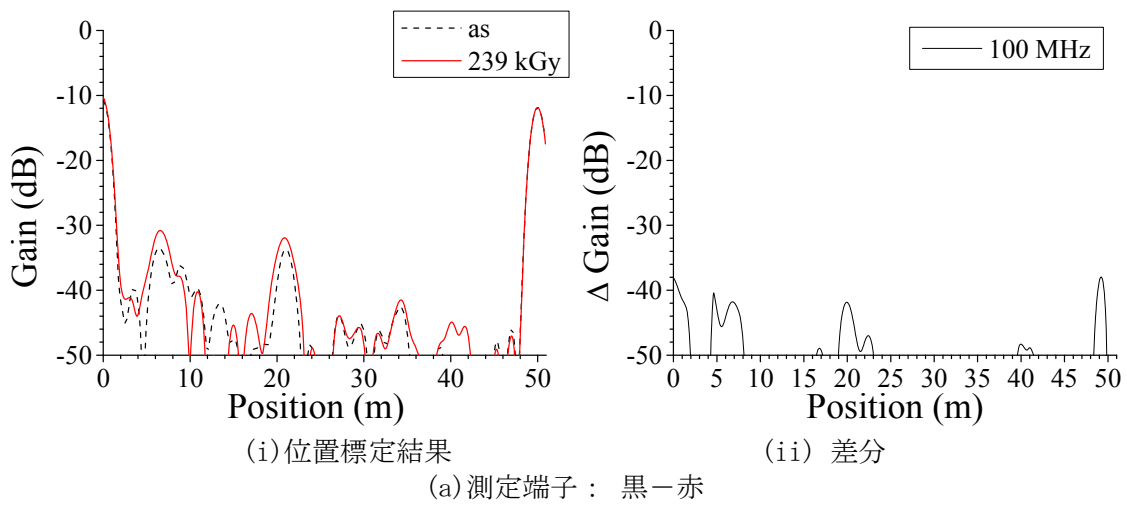


図 3.3.1-49 BIS 法による難燃 EPDM 絶縁ケーブル劣化位置標定結果：120℃、0.5kGy/h、478h、測定端—劣化部：20m、測定条件：熱・放射線同時劣化中、測定周波数域：1～100MHz、測定反対側端子：開放

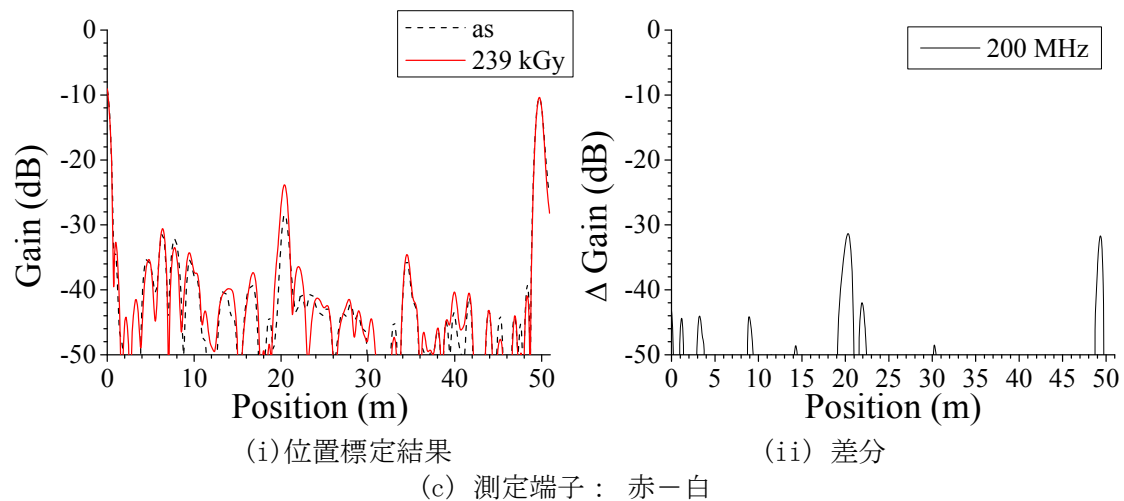
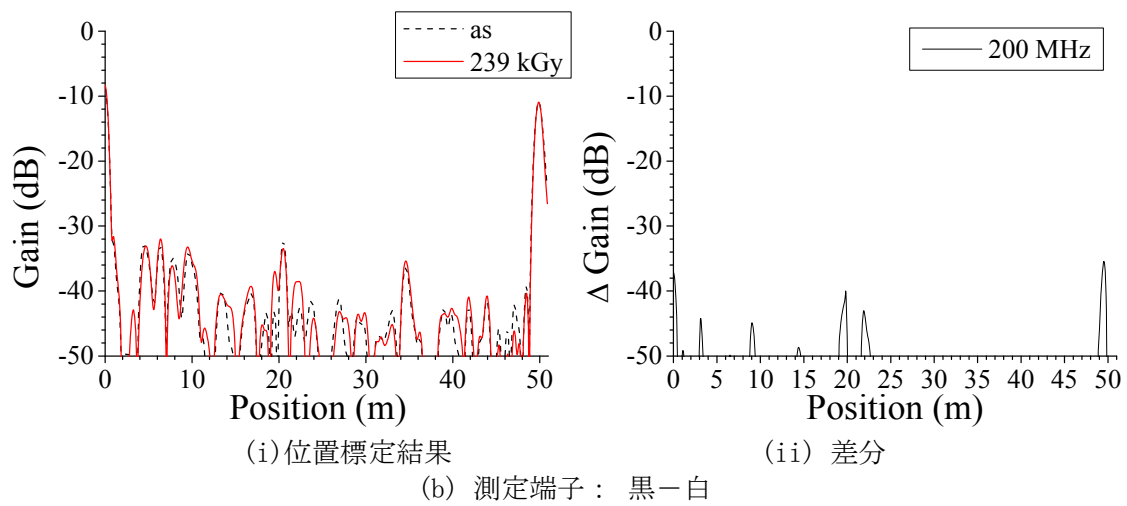
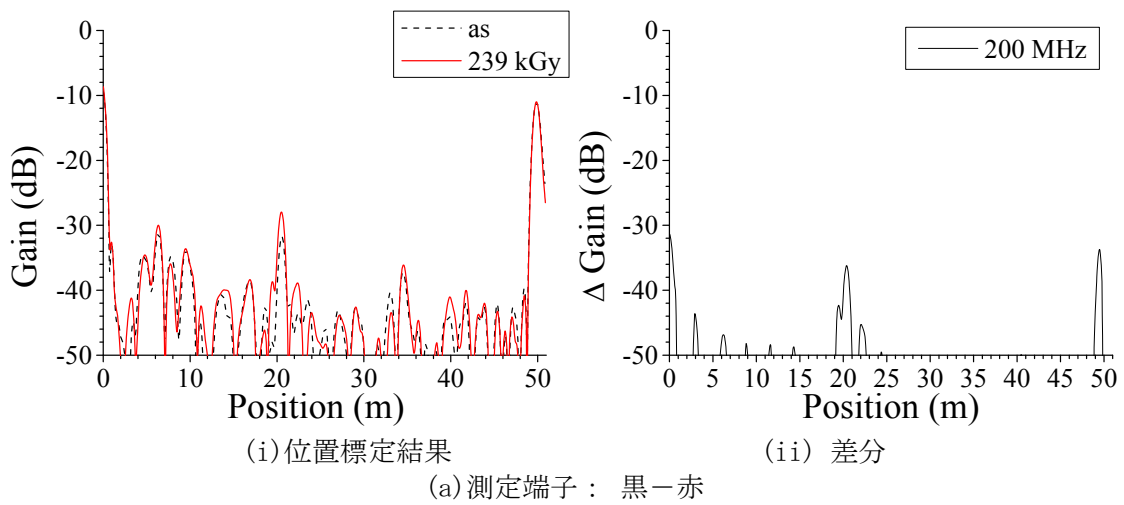
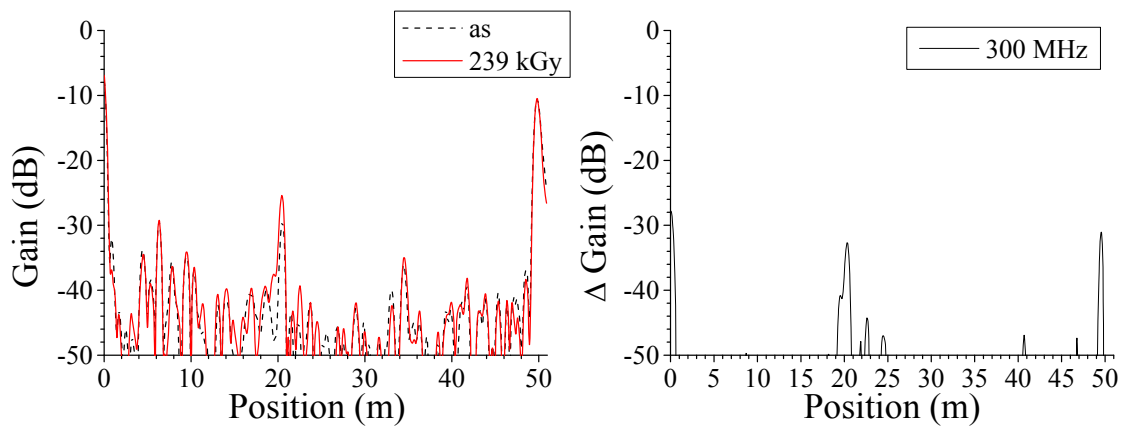


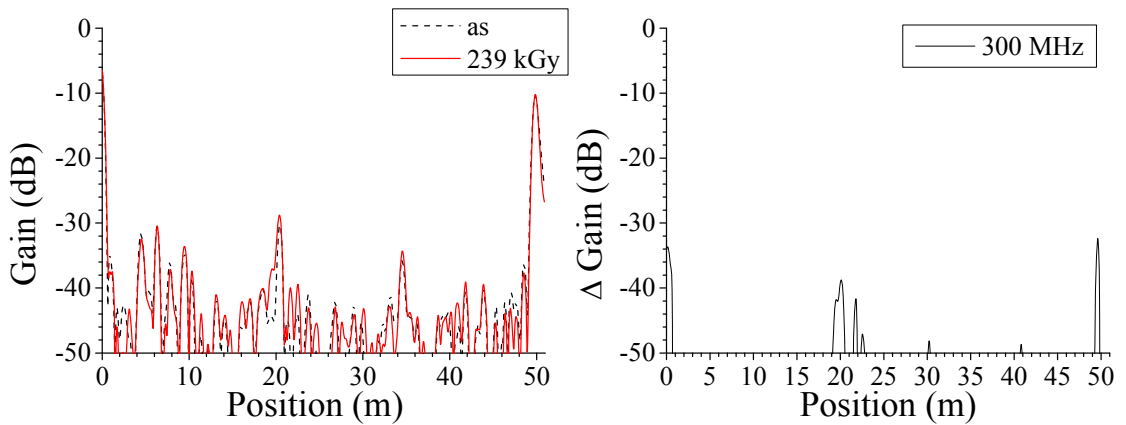
図 3. 3. 1-50 BIS 法による難燃 EPDM 絶縁ケーブル劣化位置標定結果：120℃、0. 5kGy/h、478h、測定端－劣化部：20m、測定条件：熱・放射線同時劣化中、測定周波数域：1～200MHz、測定反対側端子：開放



(i) 位置標定結果

(ii) 差分

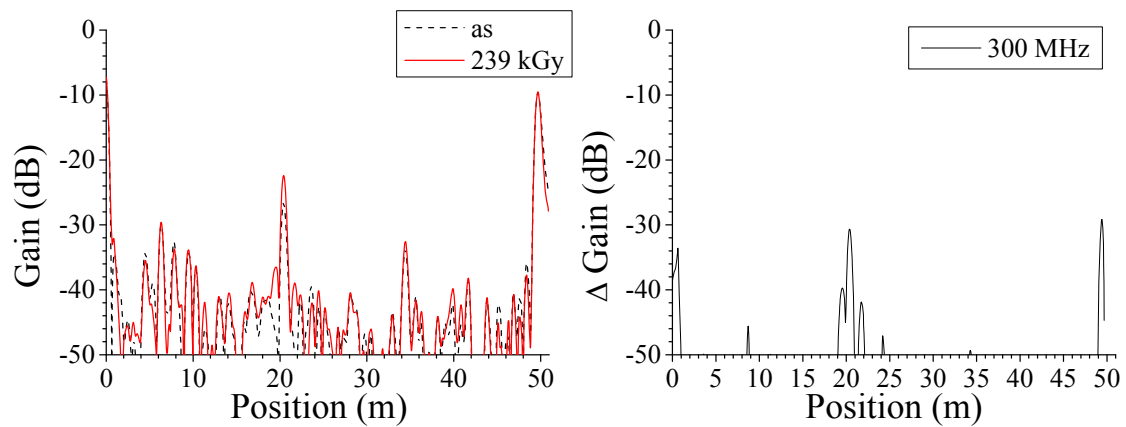
(a) 測定端子：黒－赤



(i) 位置標定結果

(ii) 差分

(b) 測定端子：黒－白

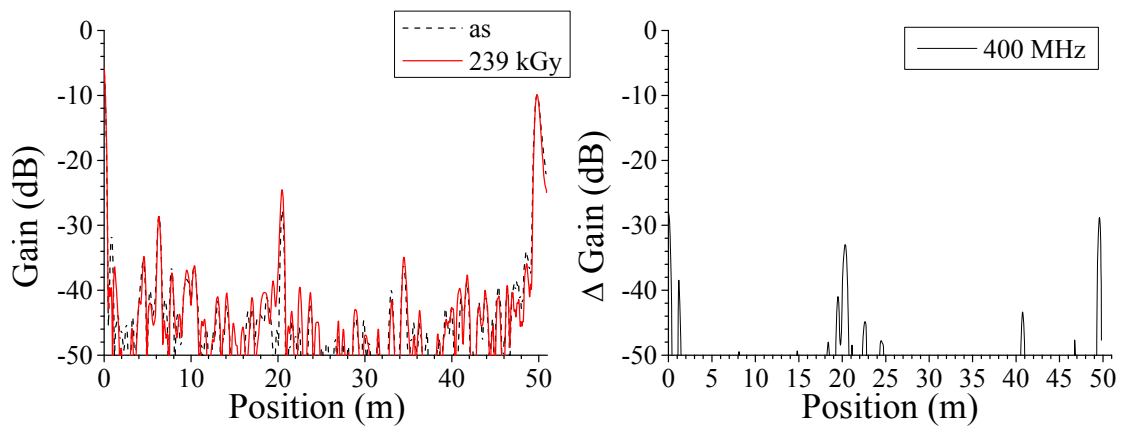


(i) 位置標定結果

(ii) 差分

(c) 測定端子：赤－白

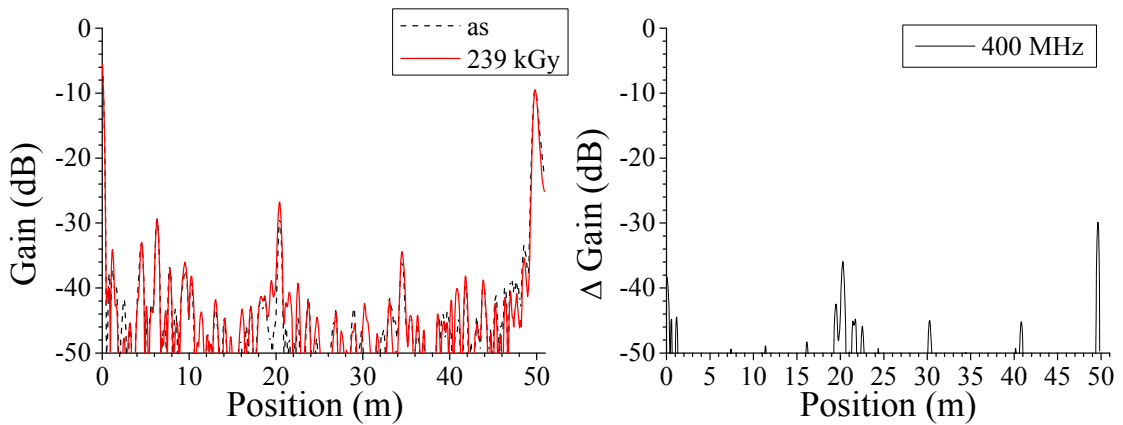
図 3.3.1-51 BIS 法による難燃 EPDM 絶縁ケーブル劣化位置標定結果：120℃、0.5kGy/h、478h、測定端－劣化部：20m、測定条件：熱・放射線同時劣化中、測定周波数域：1～300MHz、測定反対側端子：開放



(i)位置標定結果

(ii) 差分

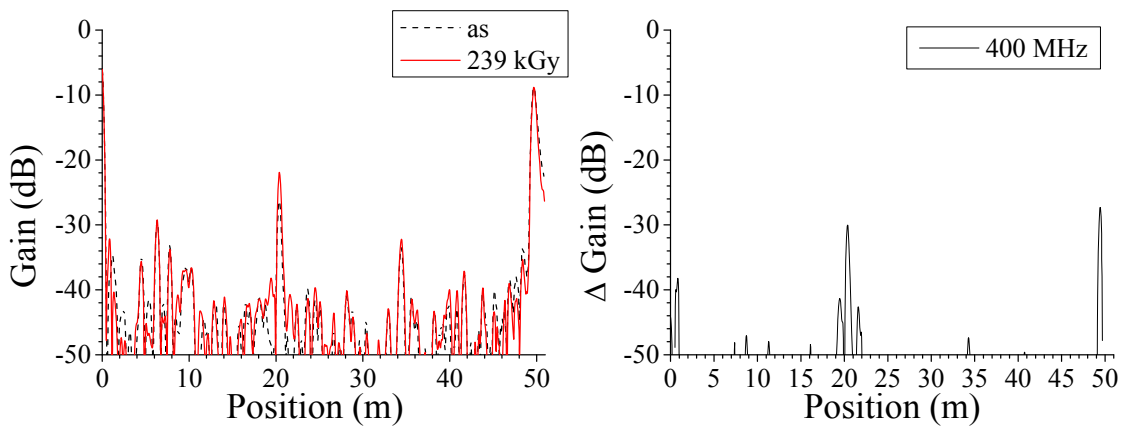
(a)測定端子：黒－赤



(i)位置標定結果

(ii) 差分

(b)測定端子：黒－白

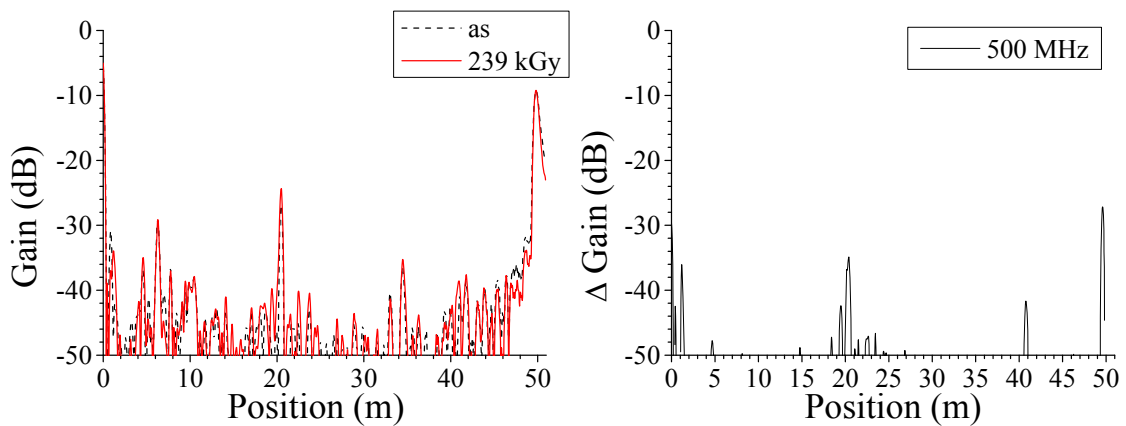


(i)位置標定結果

(ii) 差分

(c)測定端子：赤－白

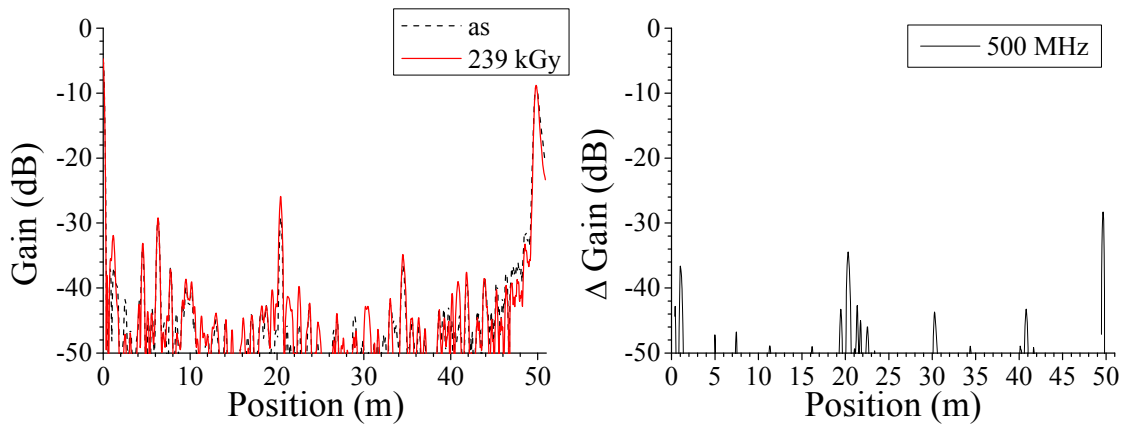
図 3. 3. 1-52 BIS 法による難燃 EPDM 絶縁ケーブル劣化位置標定結果：120℃、0.5kGy/h、478h、測定端－劣化部：20m、測定条件：熱・放射線同時劣化中、測定周波数域：1～400MHz、測定反対側端子：開放



(i)位置標定結果

(ii) 差分

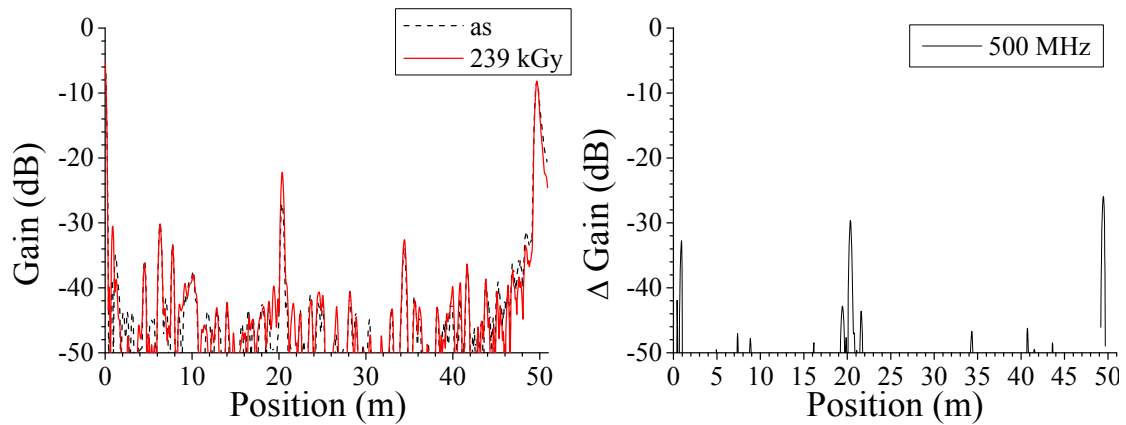
(a)測定端子：黒－赤



(i)位置標定結果

(ii) 差分

(b)測定端子：黒－白



(i)位置標定結果

(ii) 差分

(c)測定端子：赤－白

図 3.3.1-53 BIS 法による難燃 EPDM 絶縁ケーブル劣化位置標定結果：120℃、0.5kGy/h、478h、測定端－劣化部：20m、測定条件：熱・放射線同時劣化中、測定周波数域：1～500MHz、測定反対側端子：開放

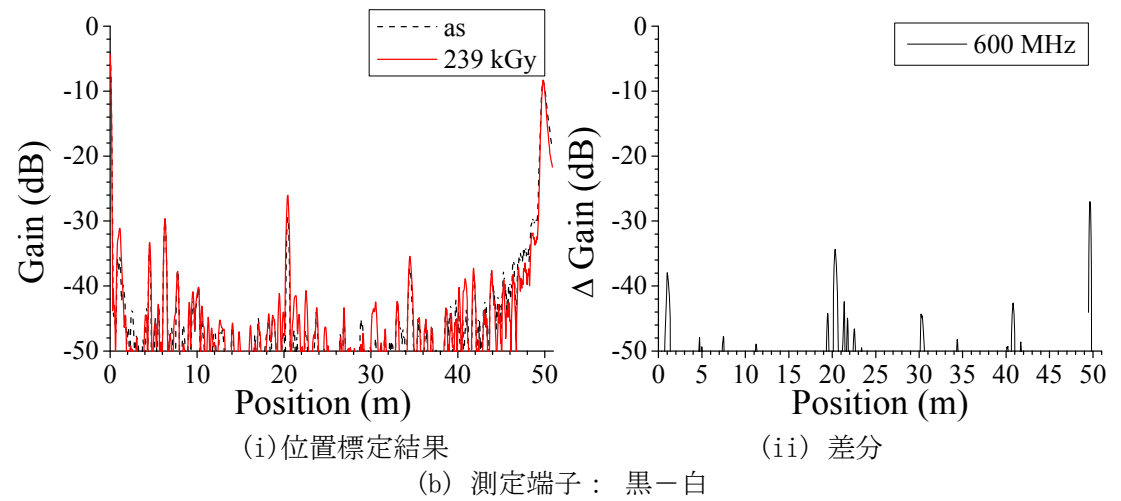
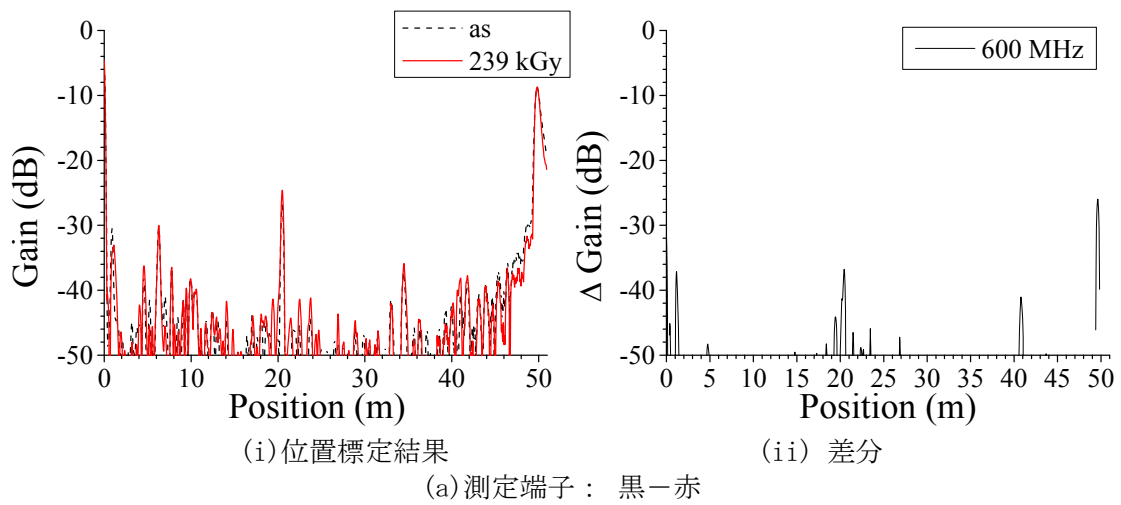
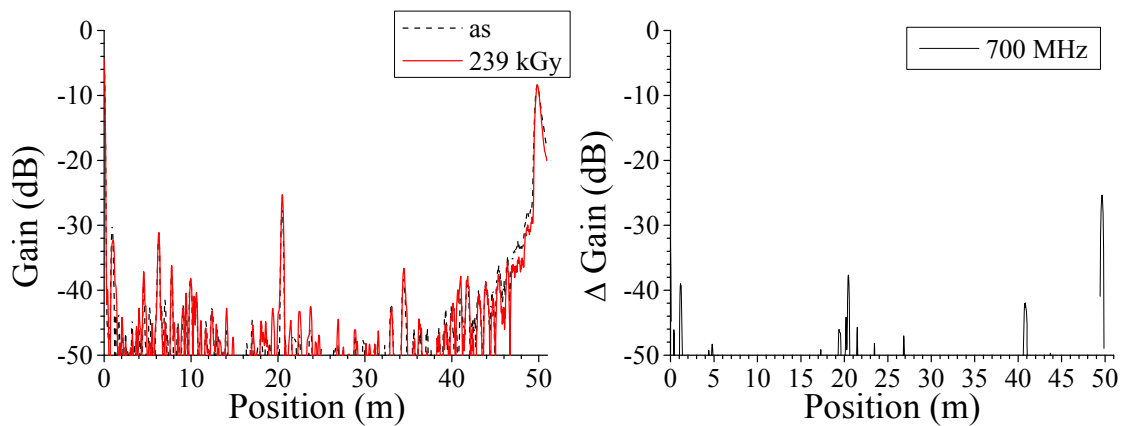


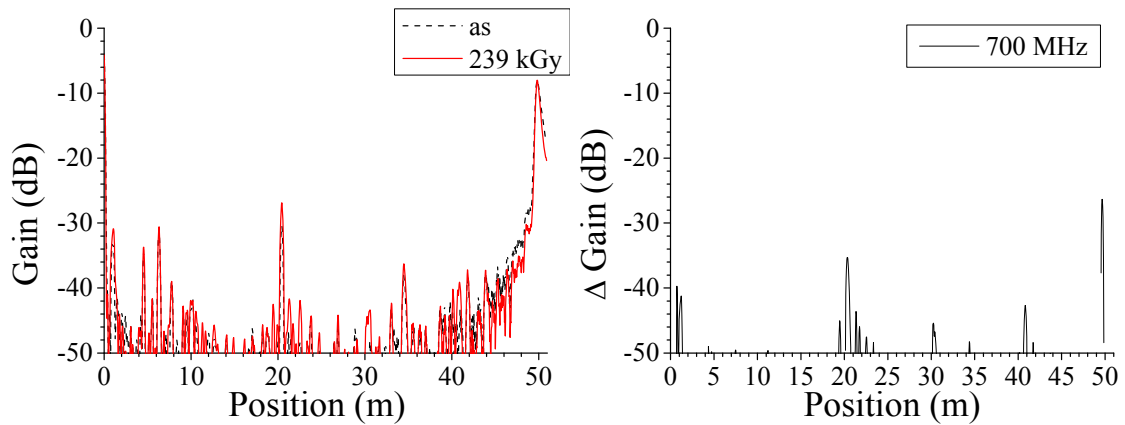
図 3.3.1-54 BIS 法による難燃 EPDM 絶縁ケーブル劣化位置標定結果：120℃、0.5kGy/h、478h、測定端—劣化部：20m、測定条件：熱・放射線同時劣化中、測定周波数域：1～600MHz、測定反対側端子：開放



(i)位置標定結果

(ii) 差分

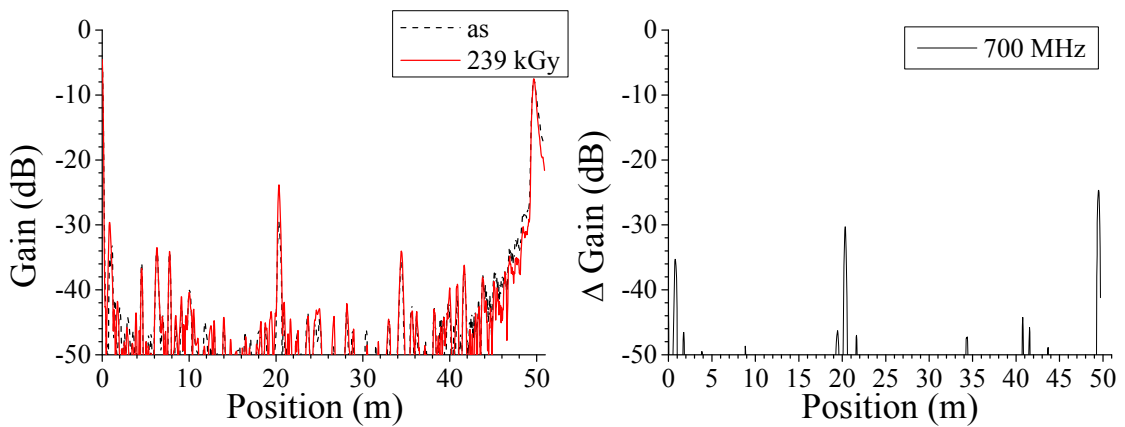
(a)測定端子：黒－赤



(i)位置標定結果

(ii) 差分

(b)測定端子：黒－白



(i)位置標定結果

(ii) 差分

(c)測定端子：赤－白

図 3. 3. 1-55 BIS 法による難燃 EPDM 絶縁ケーブル劣化位置標定結果：120℃、0. 5kGy/h、478h、測定端－劣化部：20m、測定条件：熱・放射線同時劣化中、測定周波数域：1～700MHz、測定反対側端子：開放

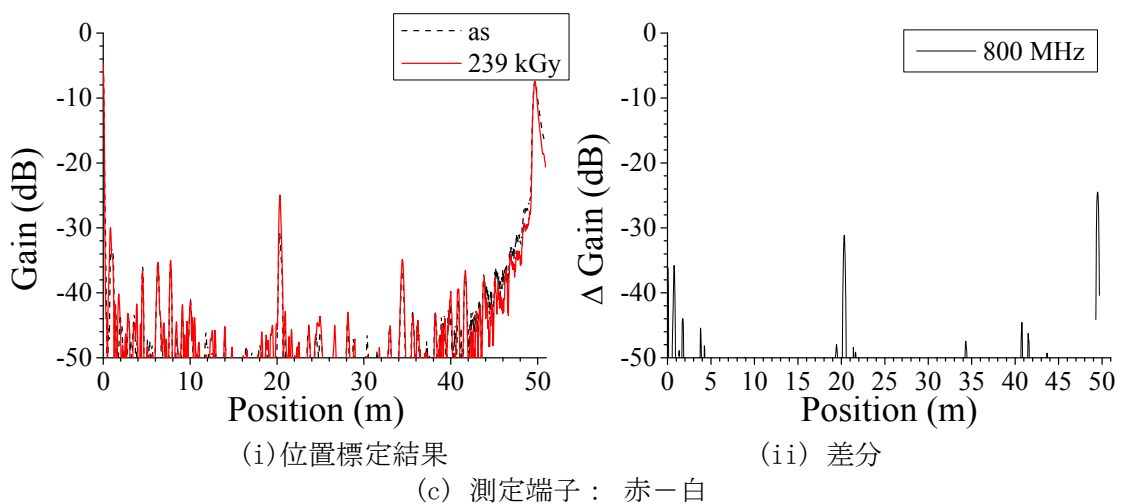
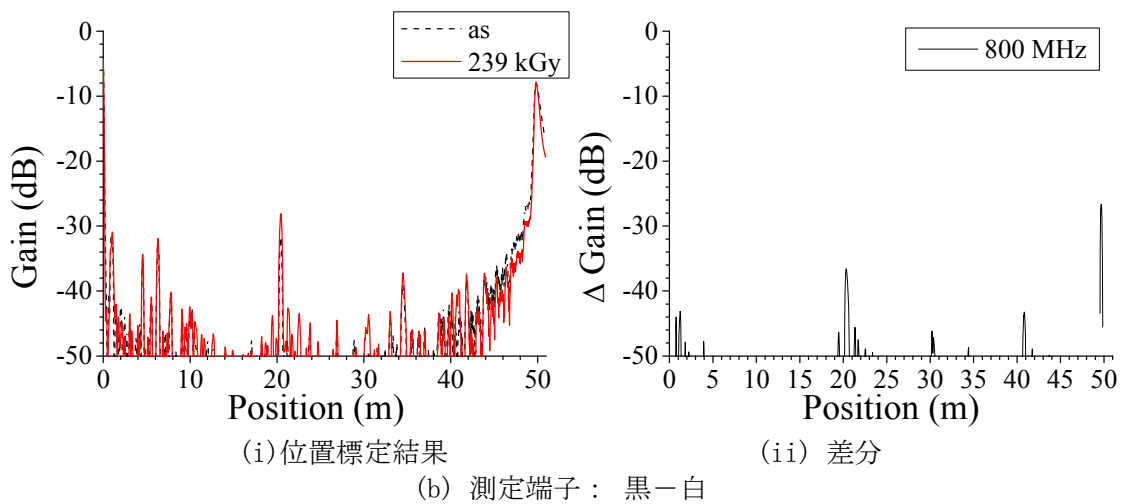
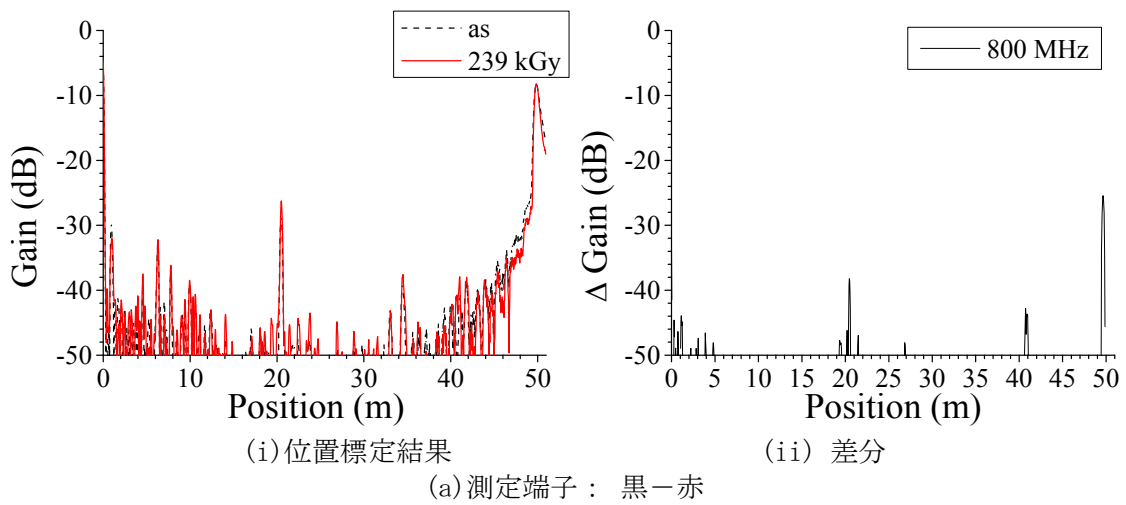
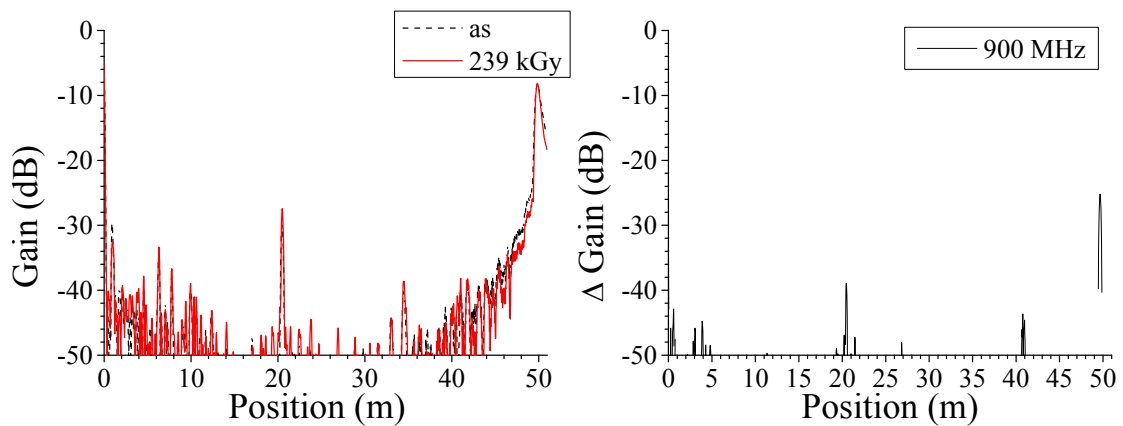


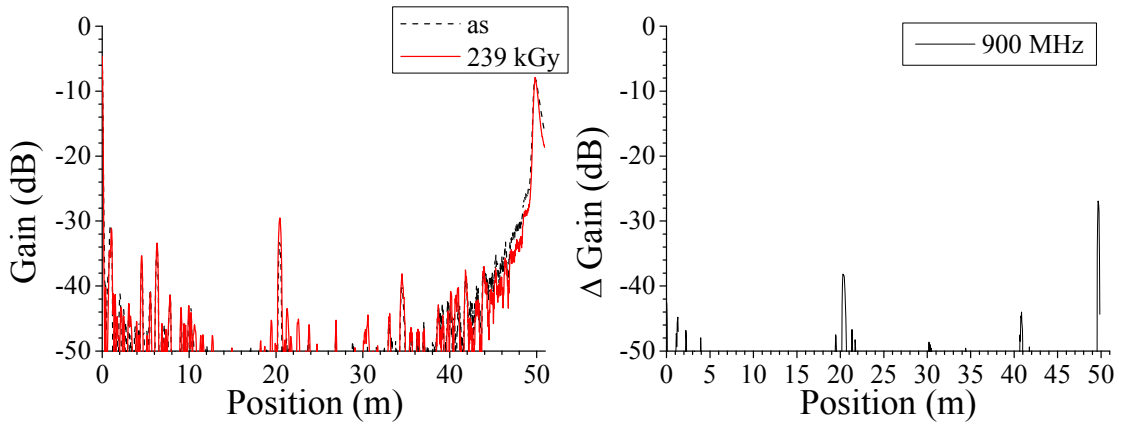
図 3.3.1-56 BIS 法による難燃 EPDM 絶縁ケーブル劣化位置標定結果：120℃、0.5kGy/h、478h、測定端－劣化部：20m、測定条件：熱・放射線同時劣化中、測定周波数域：1～800MHz、測定反対側端子：開放



(i)位置標定結果

(ii) 差分

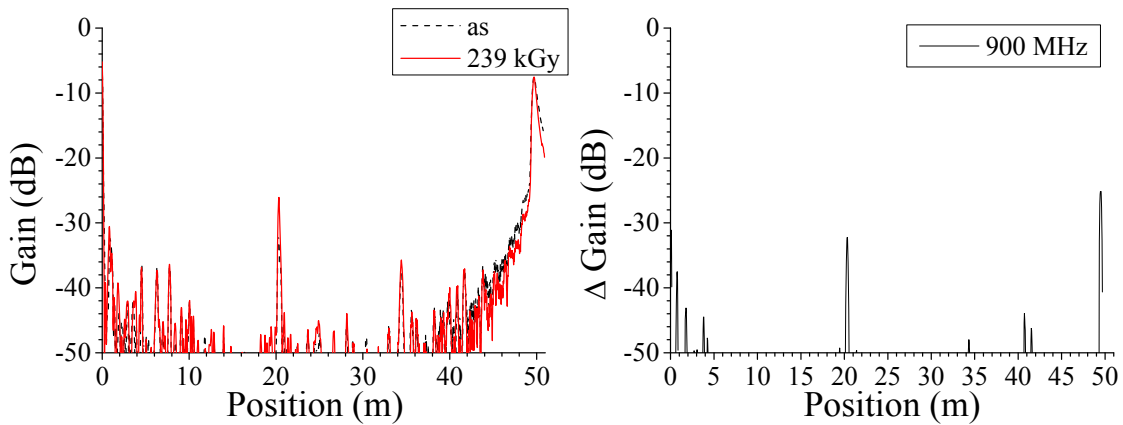
(a)測定端子：黒－赤



(i)位置標定結果

(ii) 差分

(b)測定端子：黒－白



(i)位置標定結果

(ii) 差分

(c)測定端子：赤－白

図 3. 3. 1-57 BIS 法による難燃 EPDM 絶縁ケーブル劣化位置標定結果：120℃、0.5kGy/h、478h、測定端－劣化部：20m、測定条件：熱・放射線同時劣化中、測定周波数域：1～900MHz、測定反対側端子：開放

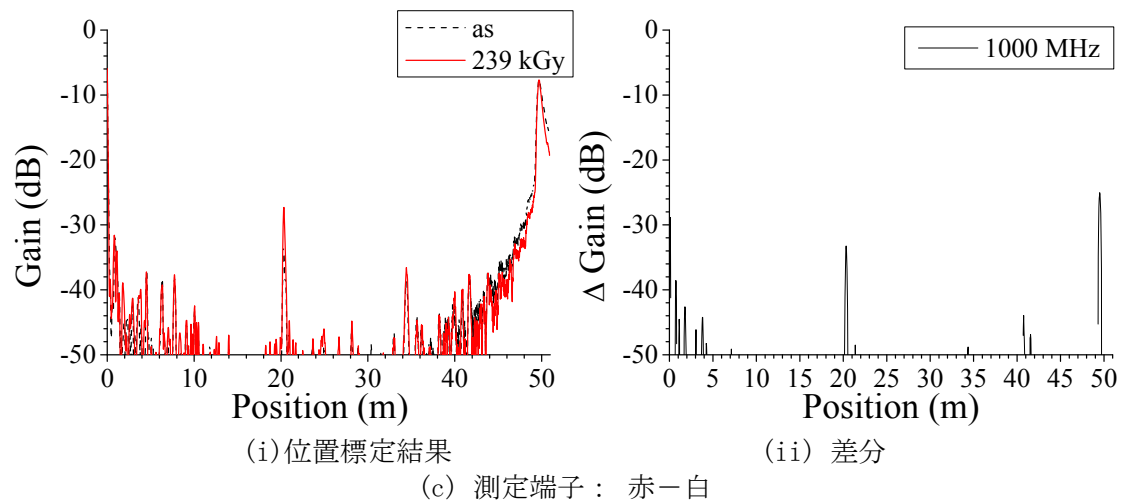
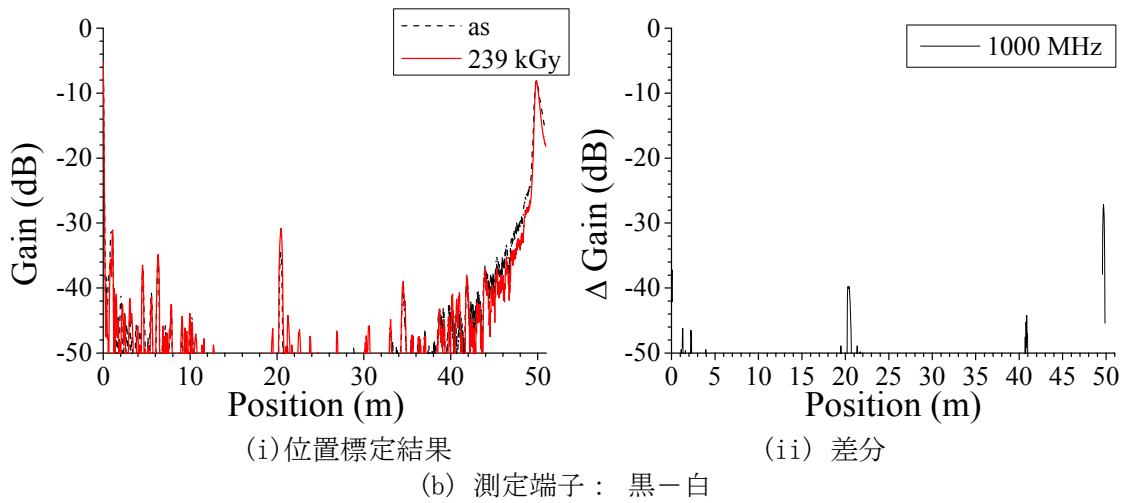
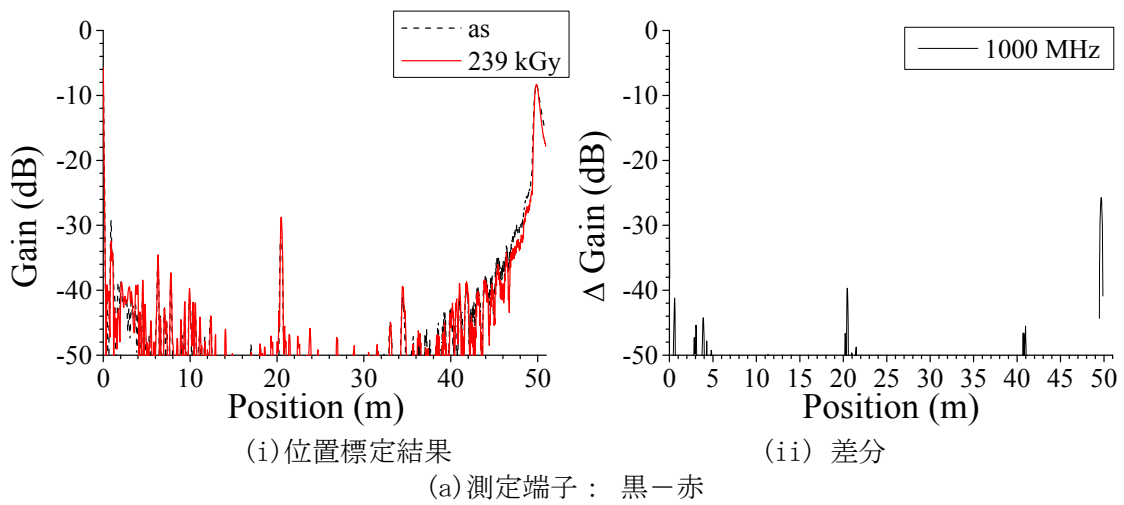
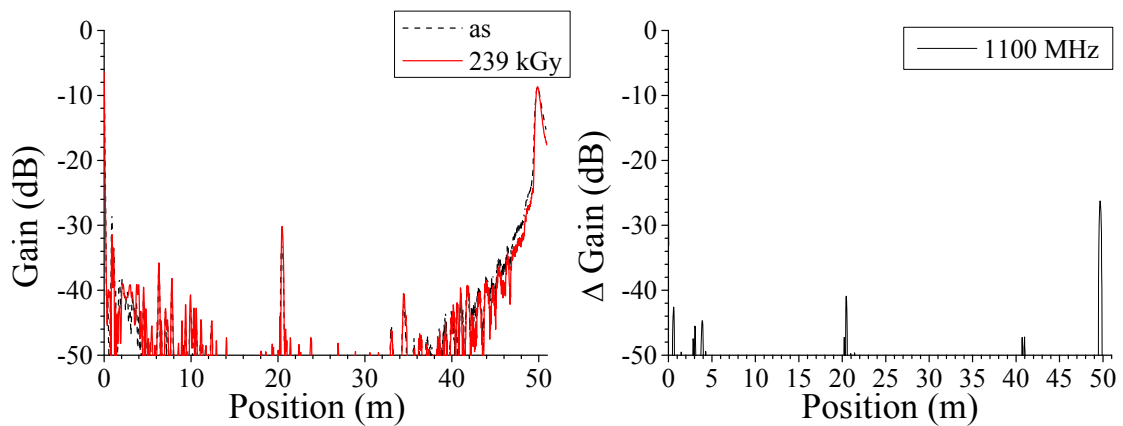


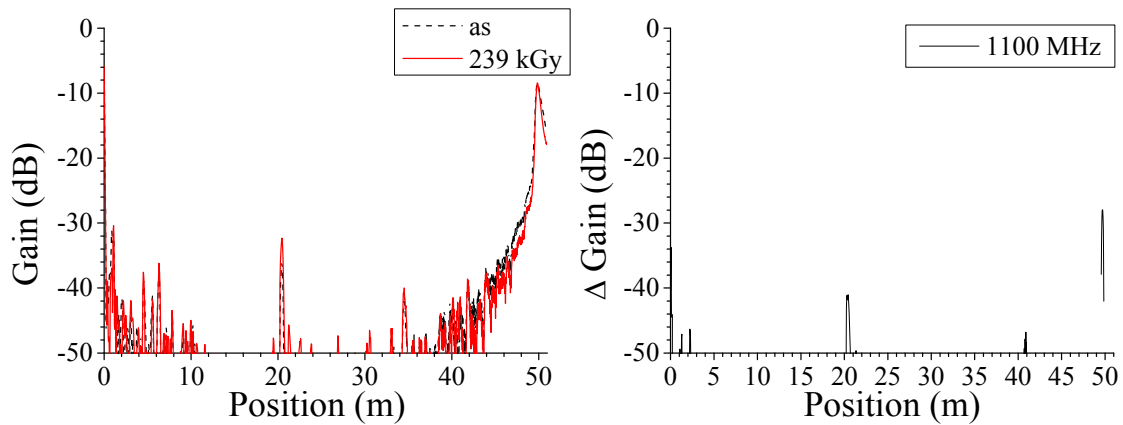
図 3. 3. 1-58 BIS 法による難燃 EPDM 絶縁ケーブル劣化位置標定結果：120℃、0. 5kGy/h、478h、測定端－劣化部：20m、測定条件：熱・放射線同時劣化中、測定周波数域：1～1000MHz、測定反対側端子：開放



(i)位置標定結果

(ii) 差分

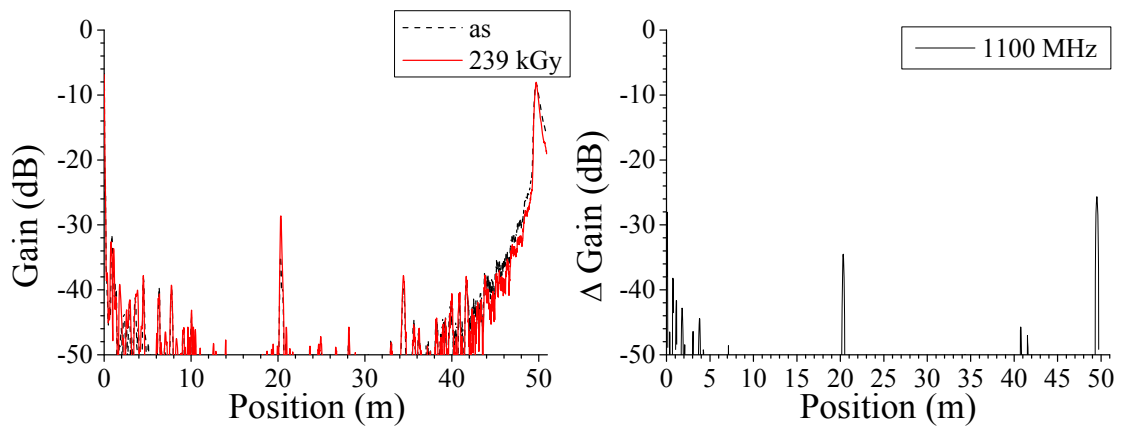
(a)測定端子：黒－赤



(i)位置標定結果

(ii) 差分

(b)測定端子：黒－白

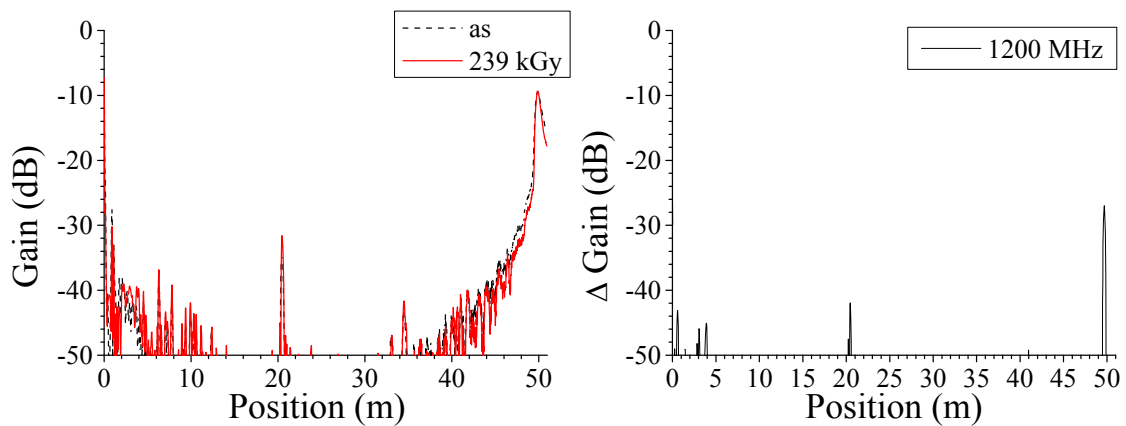


(i)位置標定結果

(ii) 差分

(c)測定端子：赤－白

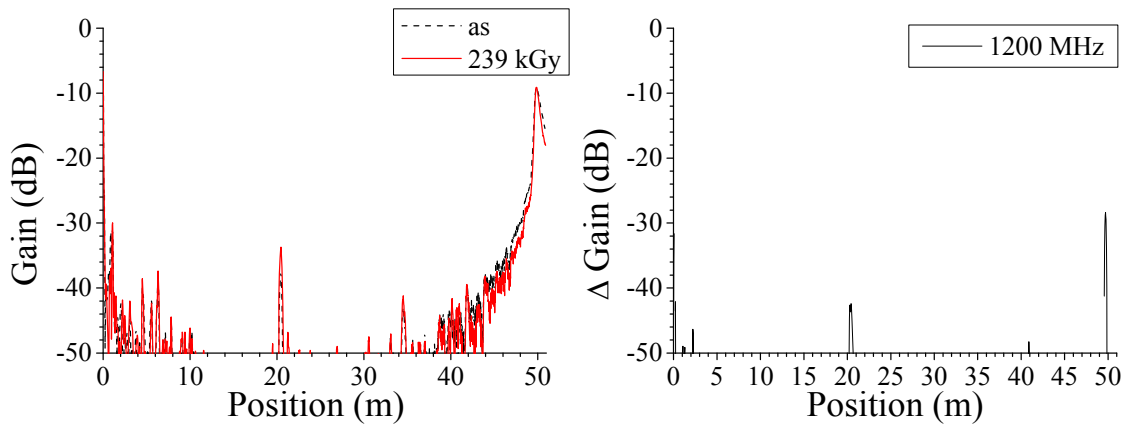
図 3. 3. 1-59 BIS 法による難燃 EPDM 絶縁ケーブル劣化位置標定結果：120℃、0. 5kGy/h、478h、測定端－劣化部：20m、測定条件：熱・放射線同時劣化中、測定周波数域：1～1100MHz、測定反対側端子：開放



(i)位置標定結果

(ii) 差分

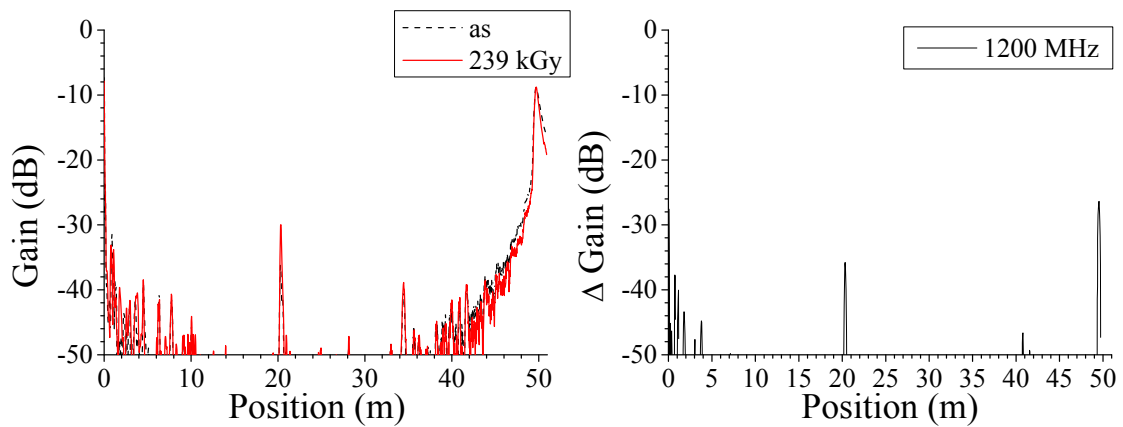
(a)測定端子：黒－赤



(i)位置標定結果

(ii) 差分

(b)測定端子：黒－白

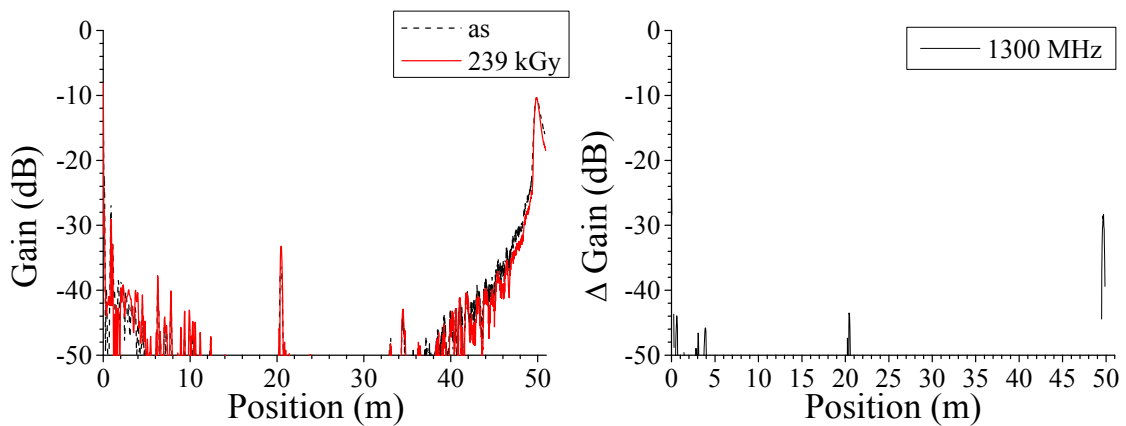


(i)位置標定結果

(ii) 差分

(c)測定端子：赤－白

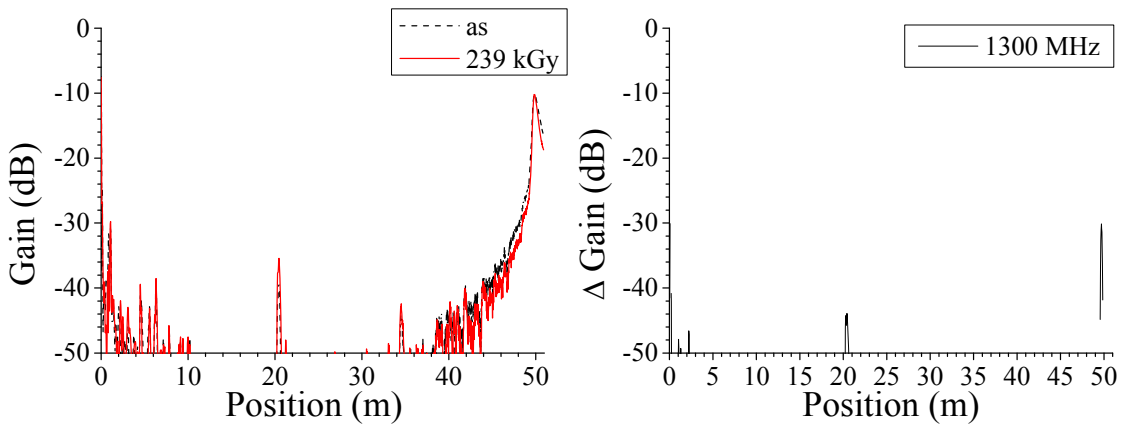
図 3.3.1-60 BIS 法による難燃 EPDM 絶縁ケーブル劣化位置標定結果：120℃、0.5kGy/h、478h、測定端－劣化部：20m、測定条件：熱・放射線同時劣化中、測定周波数域：1～1200MHz、測定反対側端子：開放



(i)位置標定結果

(ii) 差分

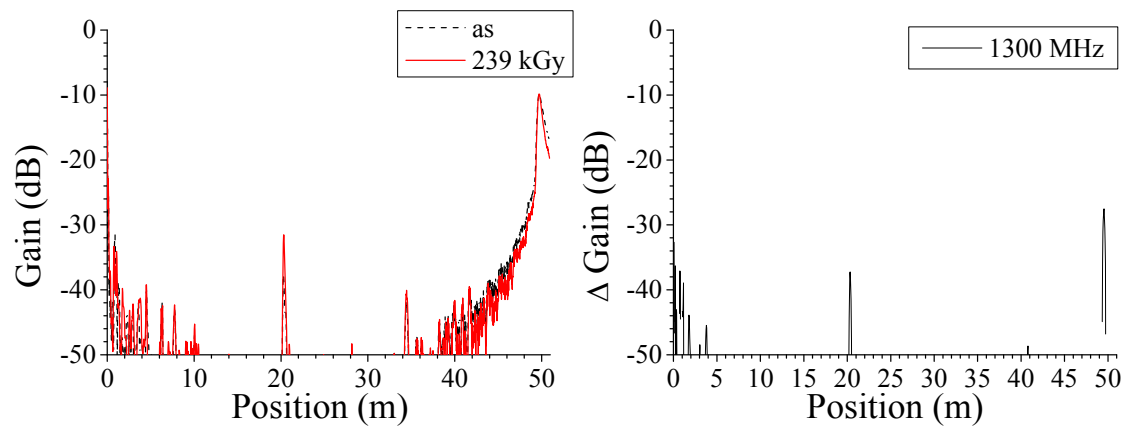
(a)測定端子：黒-赤



(i)位置標定結果

(ii) 差分

(b)測定端子：黒-白



(i)位置標定結果

(ii) 差分

(c)測定端子：赤-白

図 3. 3. 1-61 BIS 法による難燃 EPDM 絶縁ケーブル劣化位置標定結果：120℃、0. 5kGy/h、478h、測定端-劣化部：20m、測定条件：熱・放射線同時劣化中、測定周波数域：1～1300MHz、測定反対側端子：開放

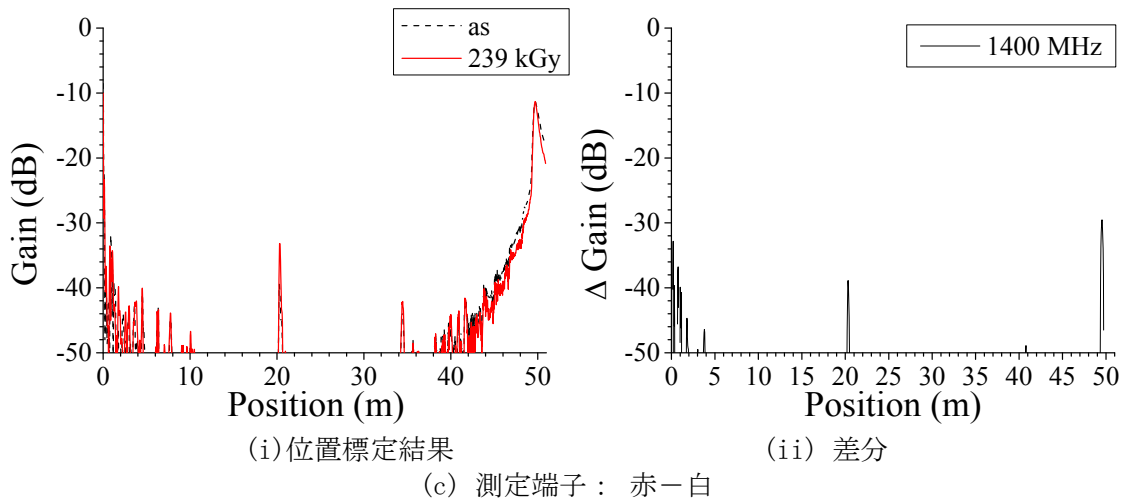
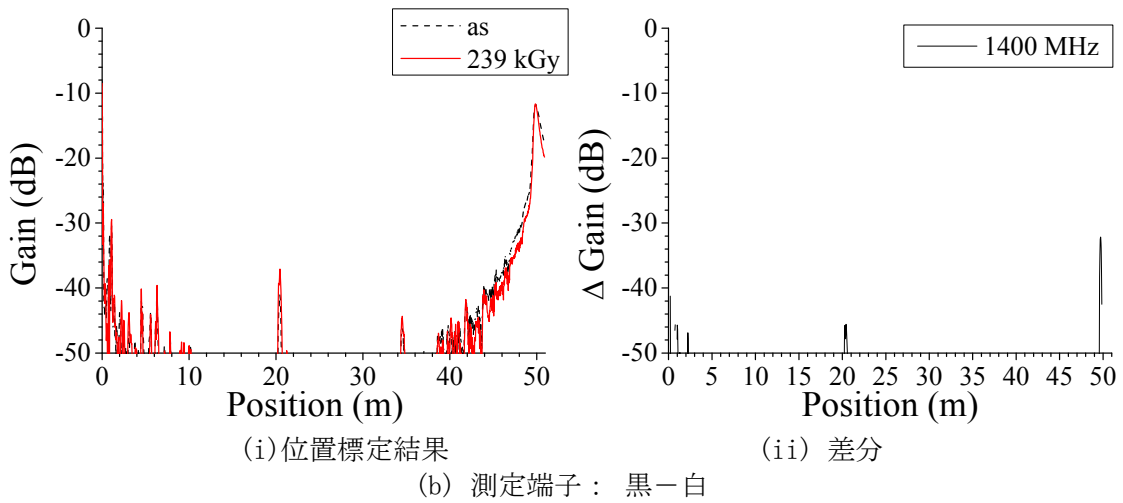
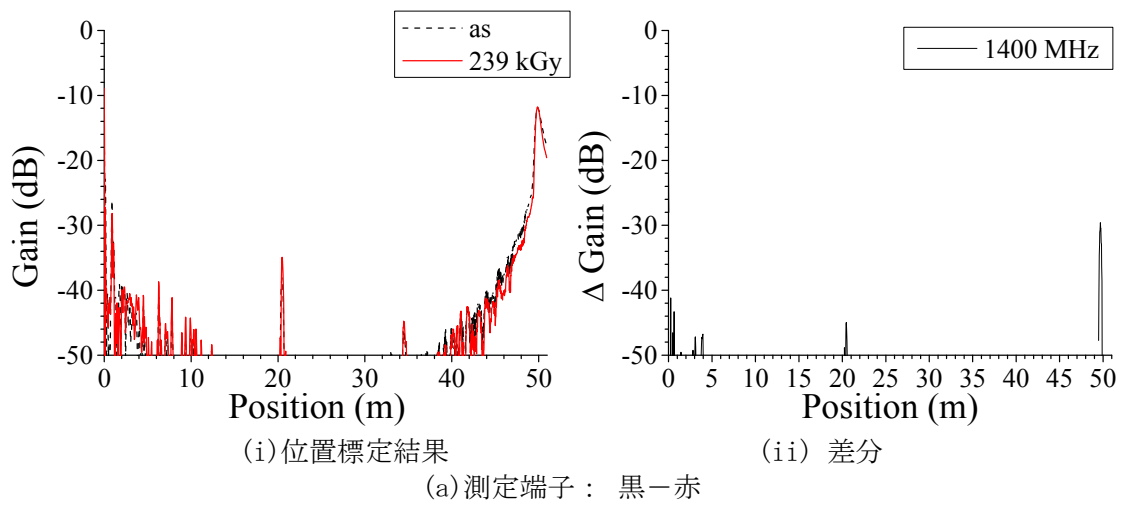
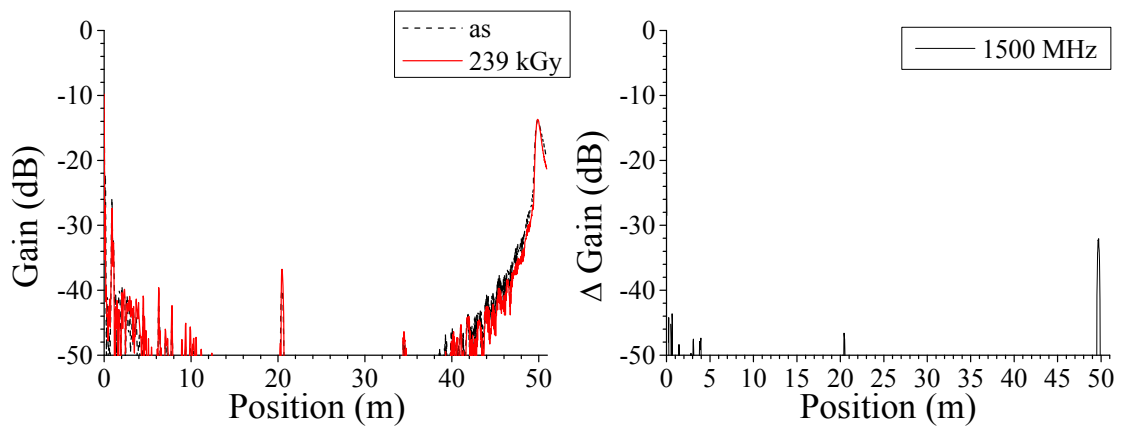


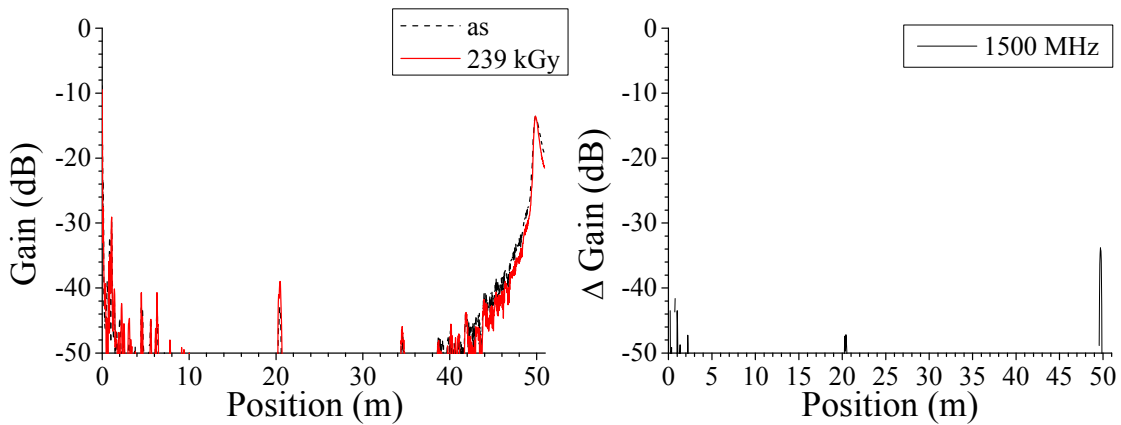
図 3.3.1-62 BIS 法による難燃 EPDM 絶縁ケーブル劣化位置標定結果：120℃、0.5kGy/h、478h、測定端－劣化部：20m、測定条件：熱・放射線同時劣化中、測定周波数域：1～1400MHz、測定反対側端子：開放



(i)位置標定結果

(ii) 差分

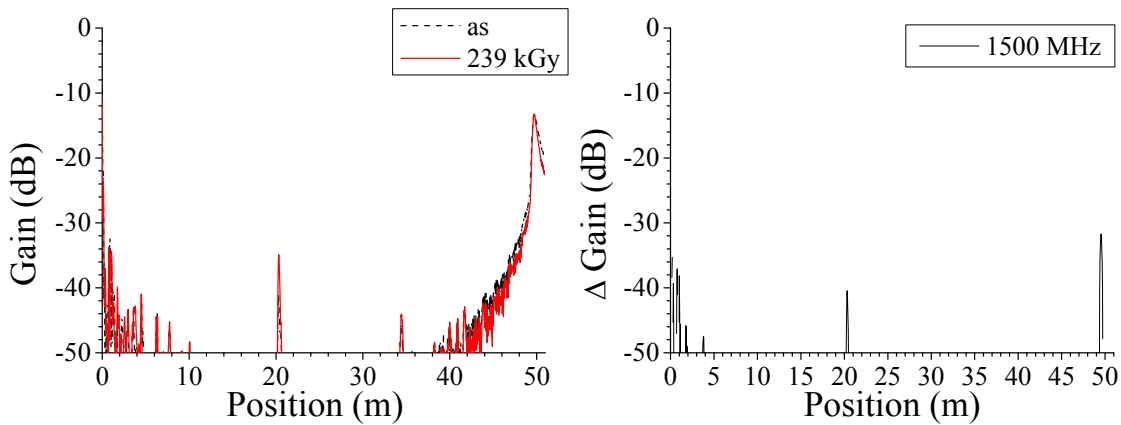
(a)測定端子：黒－赤



(i)位置標定結果

(ii) 差分

(b)測定端子：黒－白



(i)位置標定結果

(ii) 差分

(c)測定端子：赤－白

図 3. 3. 1-63 BIS 法による難燃 EPDM 絶縁ケーブル劣化位置標定結果：120℃、0. 5kGy/h、478h、測定端－劣化部：20m、測定条件：熱・放射線同時劣化中、測定周波数域：1～1500MHz、測定反対側端子：開放

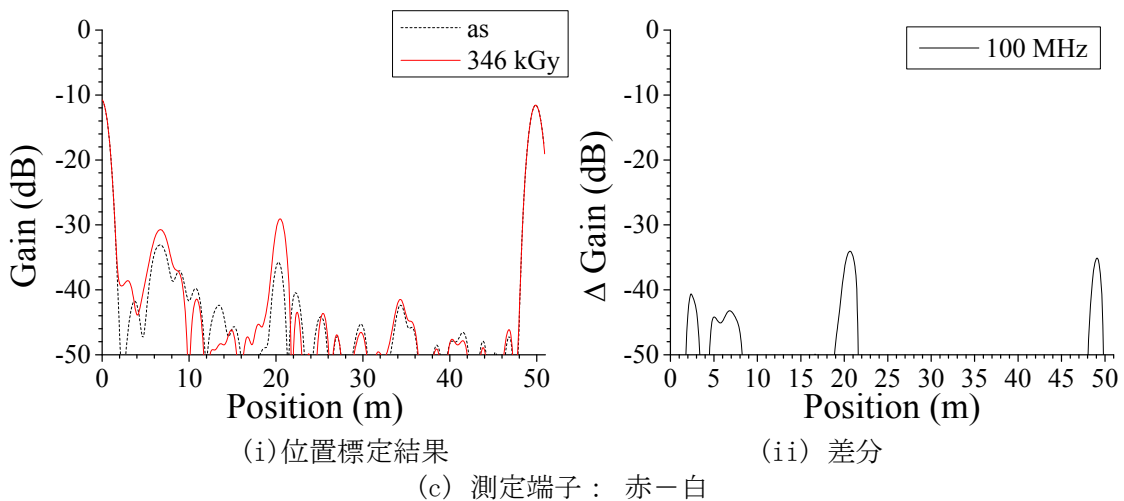
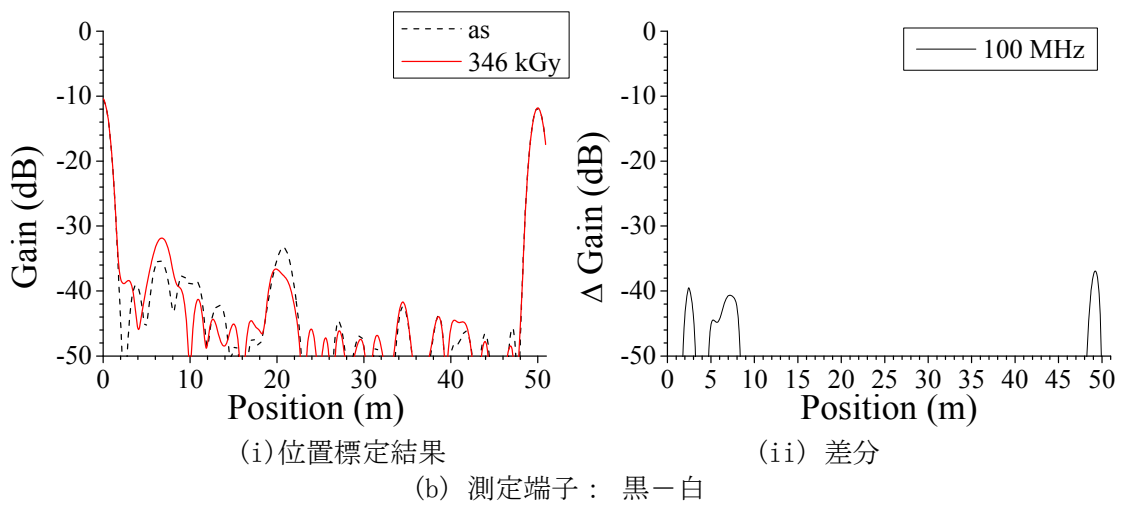
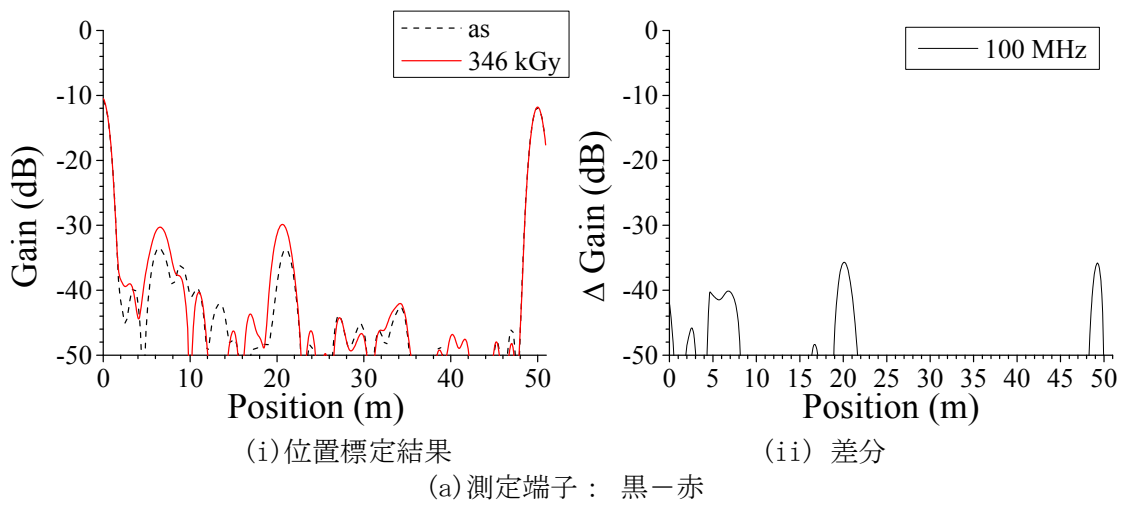
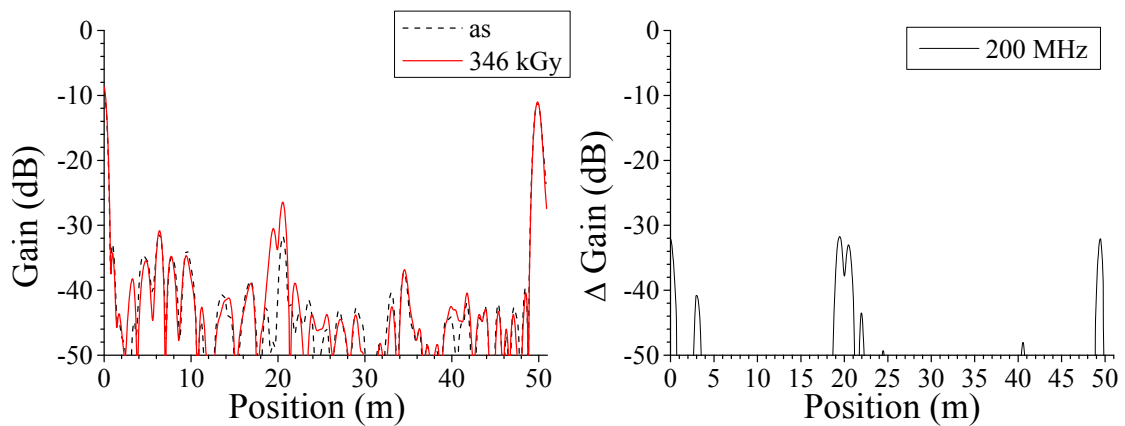


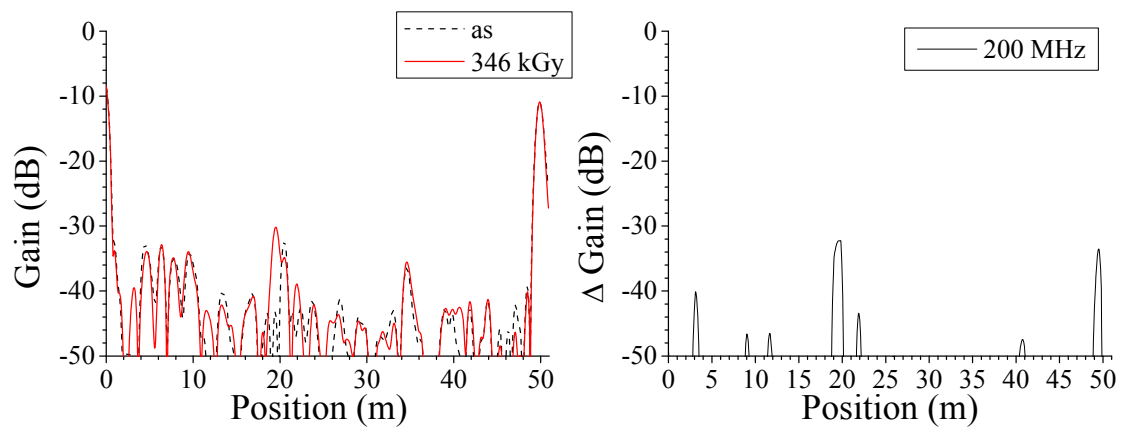
図 3.3.1-64 BIS 法による難燃 EPDM 絶縁ケーブル劣化位置標定結果：120℃、0.5kGy/h、691h、測定端－劣化部：20m、測定条件：熱・放射線同時劣化中、測定周波数域：1～100MHz、測定反対側端子：開放



(i) 位置標定結果

(ii) 差分

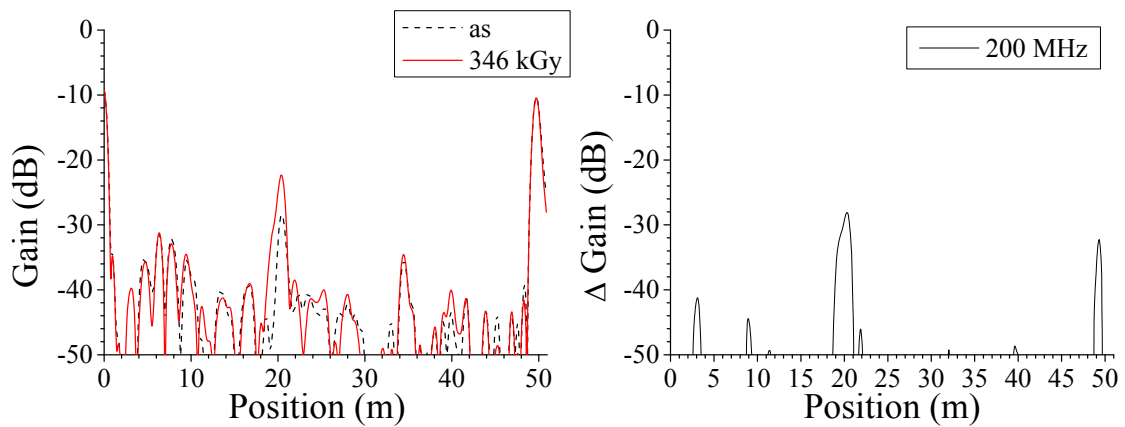
(a) 測定端子：黒－赤



(i) 位置標定結果

(ii) 差分

(b) 測定端子：黒－白

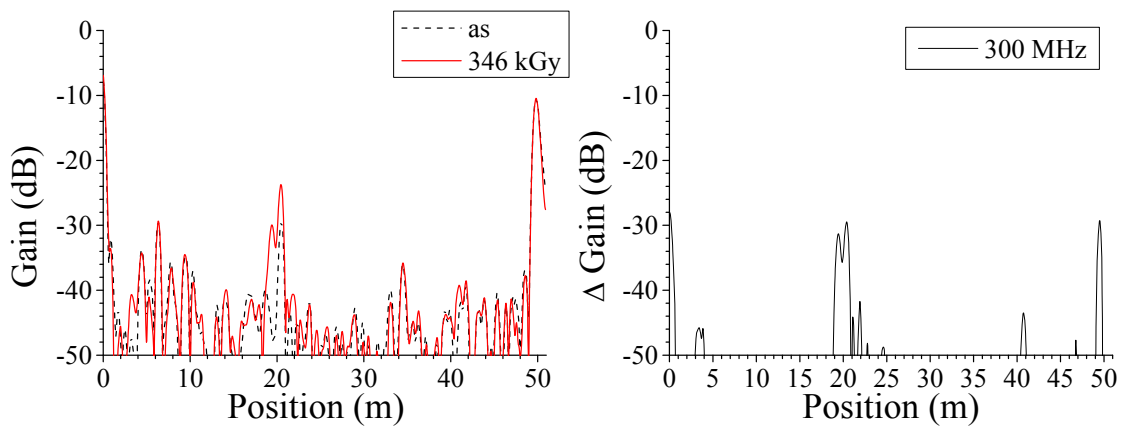


(i) 位置標定結果

(ii) 差分

(c) 測定端子：赤－白

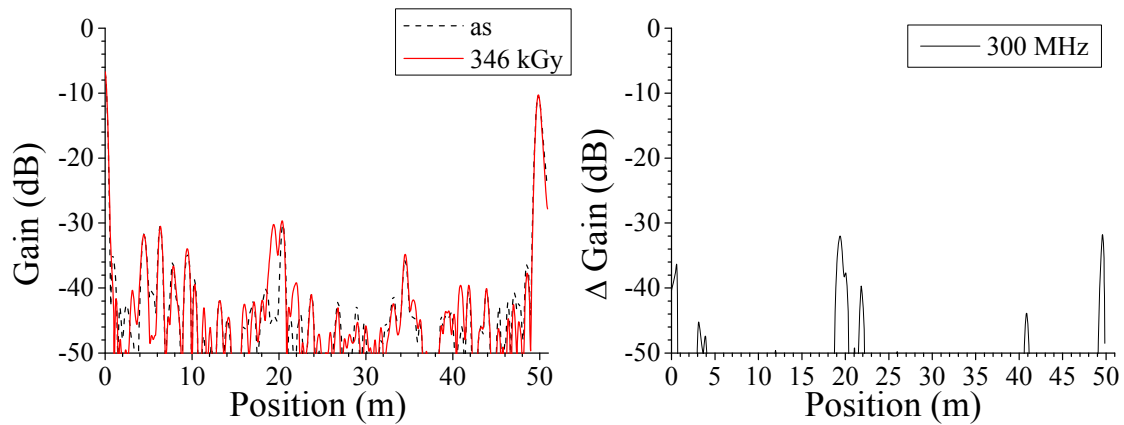
図 3.3.1-65 BIS 法による難燃 EPDM 絶縁ケーブル劣化位置標定結果：120℃、0.5kGy/h、691h、測定端－劣化部：20m、測定条件：熱・放射線同時劣化中、測定周波数域：1～200MHz、測定反対側端子：開放



(i) 位置標定結果

(ii) 差分

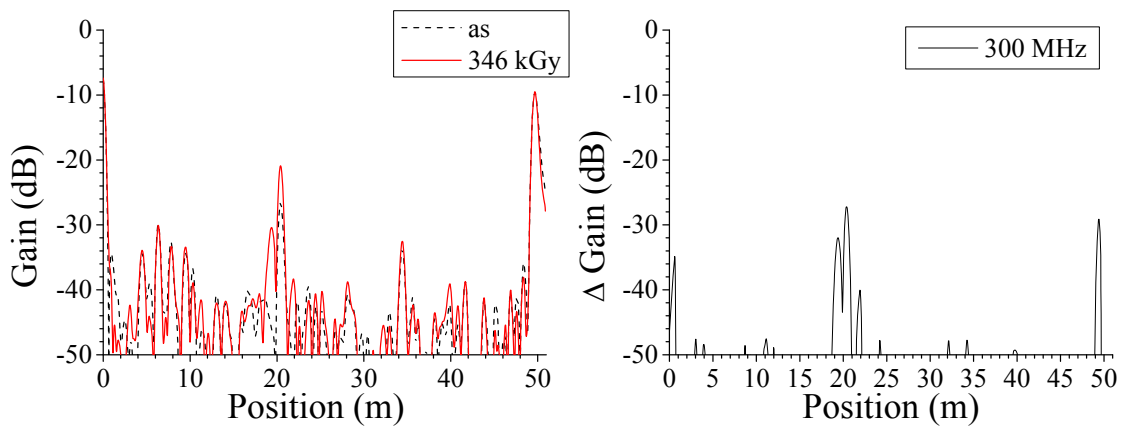
(a) 測定端子：黒－赤



(i) 位置標定結果

(ii) 差分

(b) 測定端子：黒－白

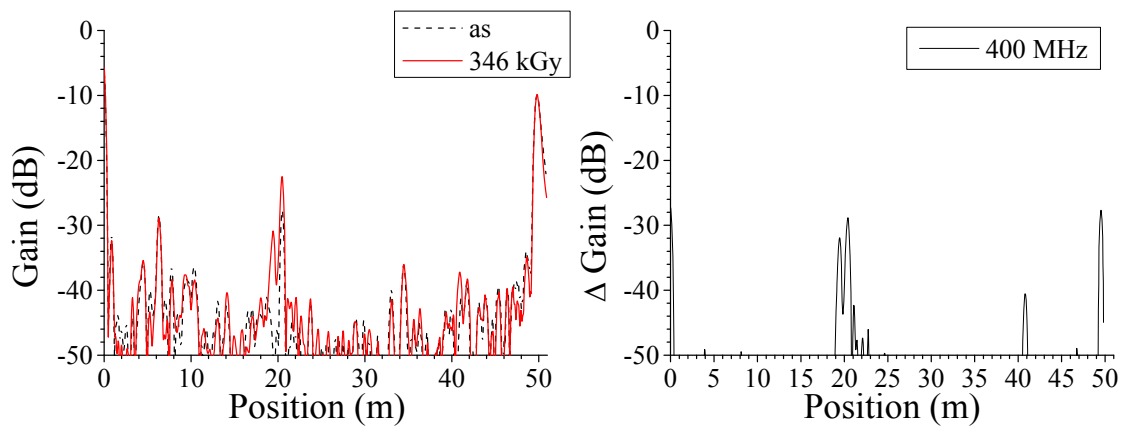


(i) 位置標定結果

(ii) 差分

(c) 測定端子：赤－白

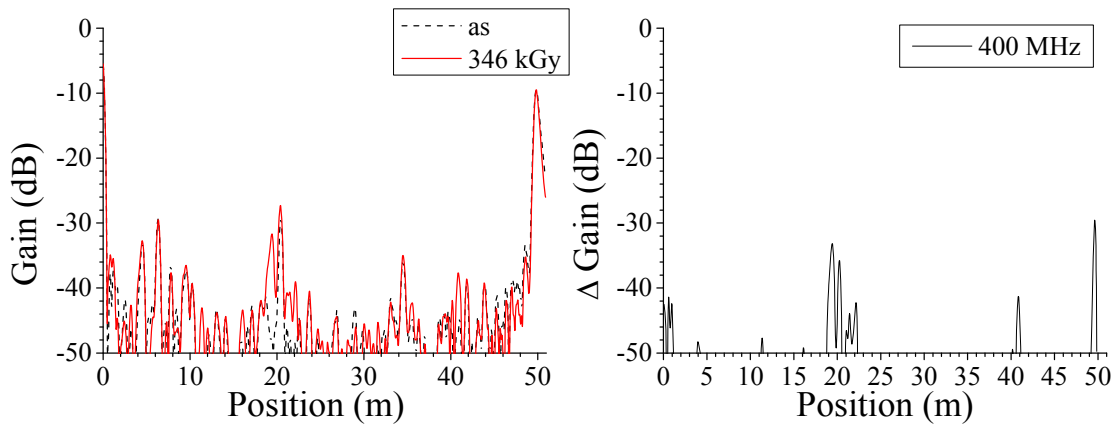
図 3.3.1-66 BIS 法による難燃 EPDM 絶縁ケーブル劣化位置標定結果：120℃、0.5kGy/h、691h、測定端－劣化部：20m、測定条件：熱・放射線同時劣化中、測定周波数域：1～300MHz、測定反対側端子：開放



(i) 位置標定結果

(ii) 差分

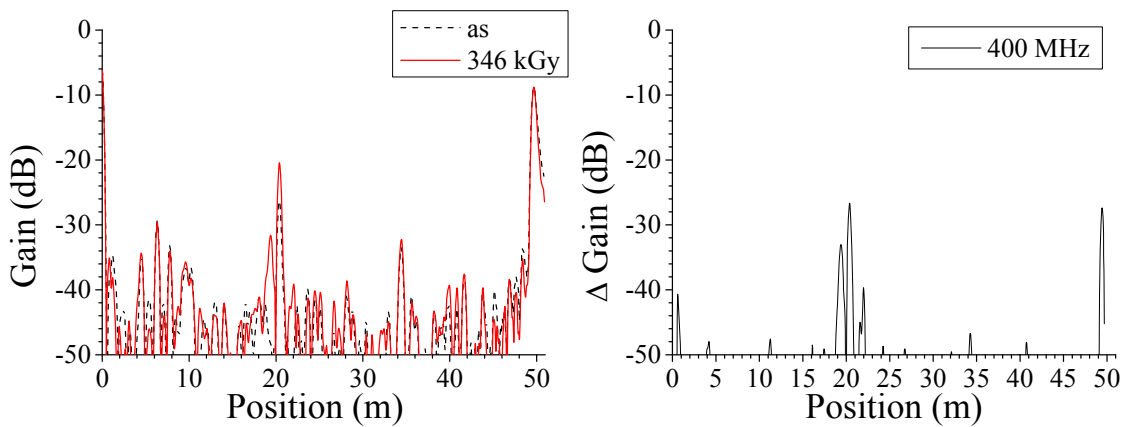
(a) 測定端子：黒－赤



(i) 位置標定結果

(ii) 差分

(b) 測定端子：黒－白

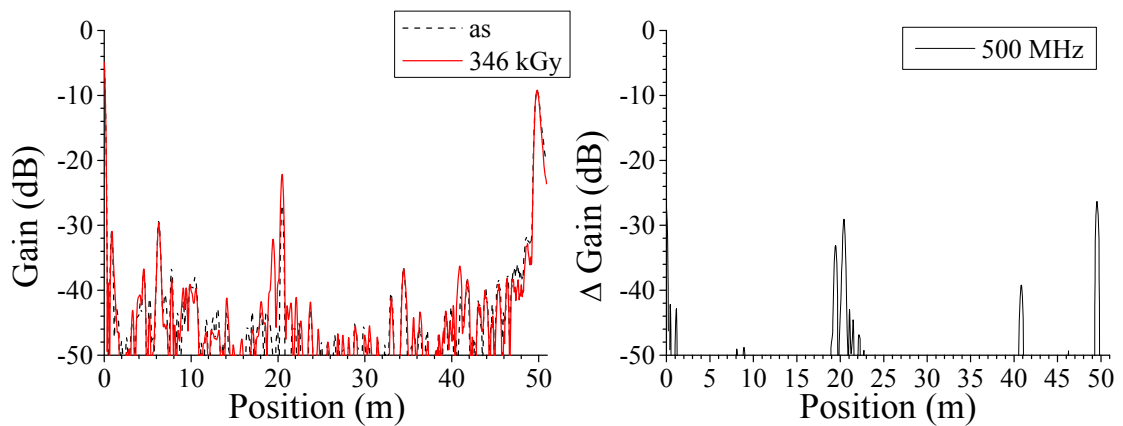


(i) 位置標定結果

(ii) 差分

(c) 測定端子：赤－白

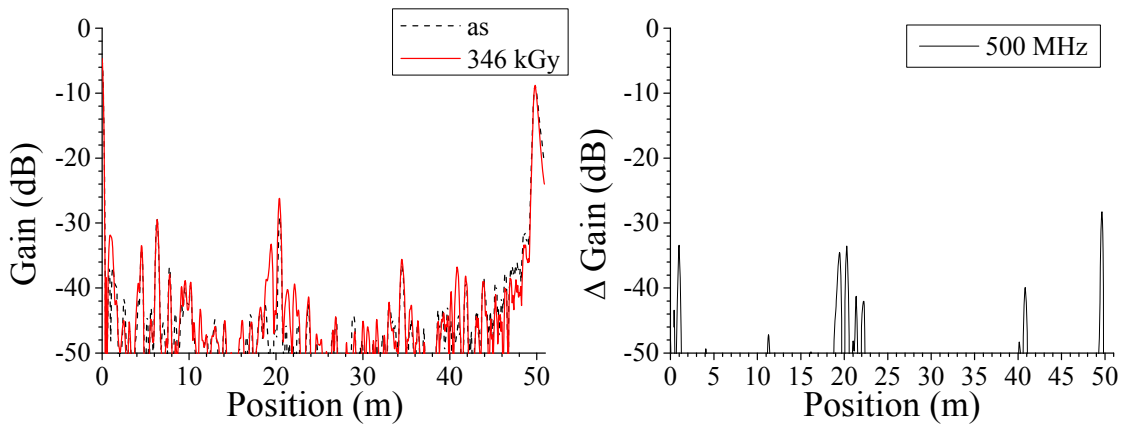
図 3.3.1-67 BIS 法による難燃 EPDM 絶縁ケーブル劣化位置標定結果：120℃、0.5kGy/h、691h、測定端－劣化部：20m、測定条件：熱・放射線同時劣化中、測定周波数域：1～400MHz、測定反対側端子：開放



(i)位置標定結果

(ii) 差分

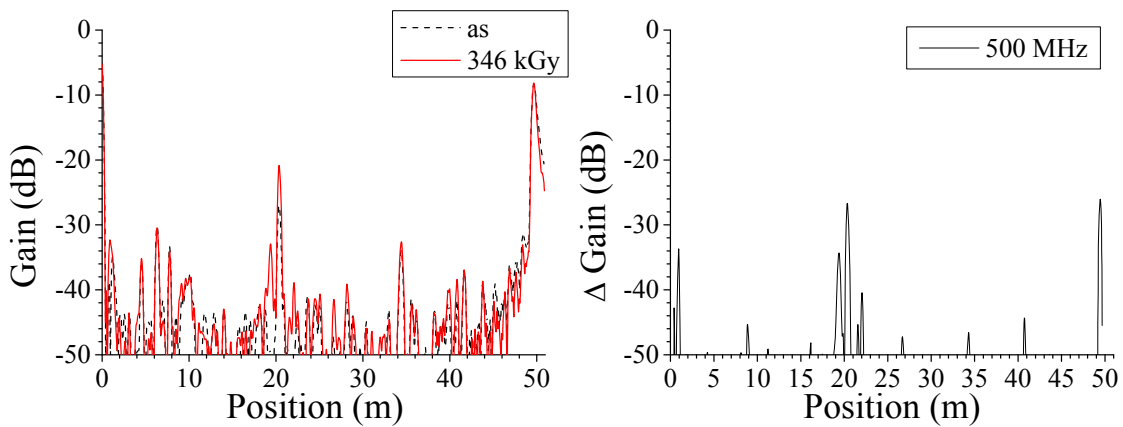
(a)測定端子：黒-赤



(i)位置標定結果

(ii) 差分

(b)測定端子：黒-白



(i)位置標定結果

(ii) 差分

(c)測定端子：赤-白

図 3.3.1-68 BIS 法による難燃 EPDM 絶縁ケーブル劣化位置標定結果：120℃、0.5kGy/h、691h、測定端-劣化部：20m、測定条件：熱・放射線同時劣化中、測定周波数域：1～500MHz、測定反対側端子：開放

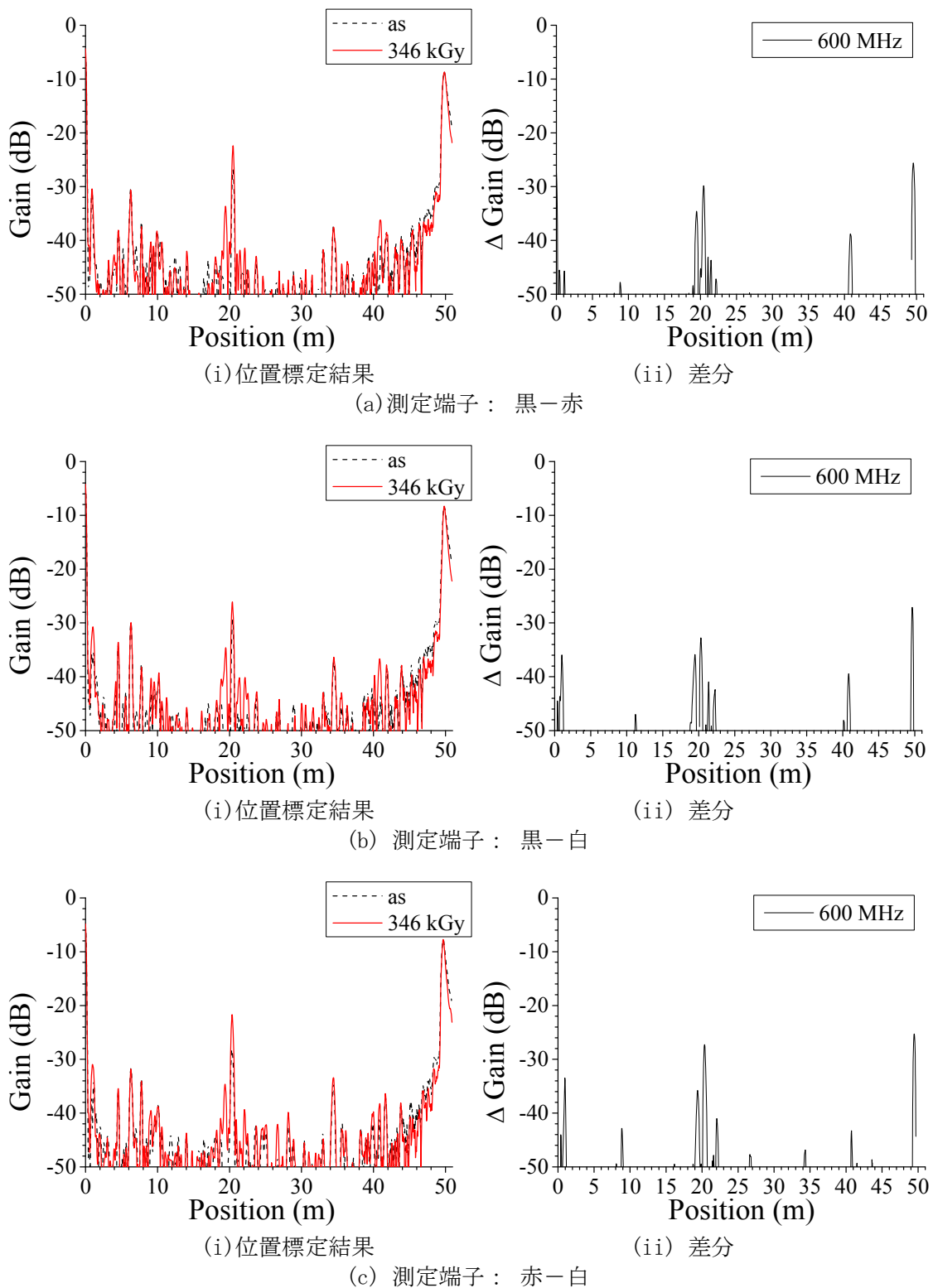


図 3.3.1-69 BIS 法による難燃 EPDM 絶縁ケーブル劣化位置標定結果：120℃、0.5kGy/h、691h、測定端—劣化部：20m、測定条件：熱・放射線同時劣化中、測定周波数域：1～600MHz、測定反対側端子：開放

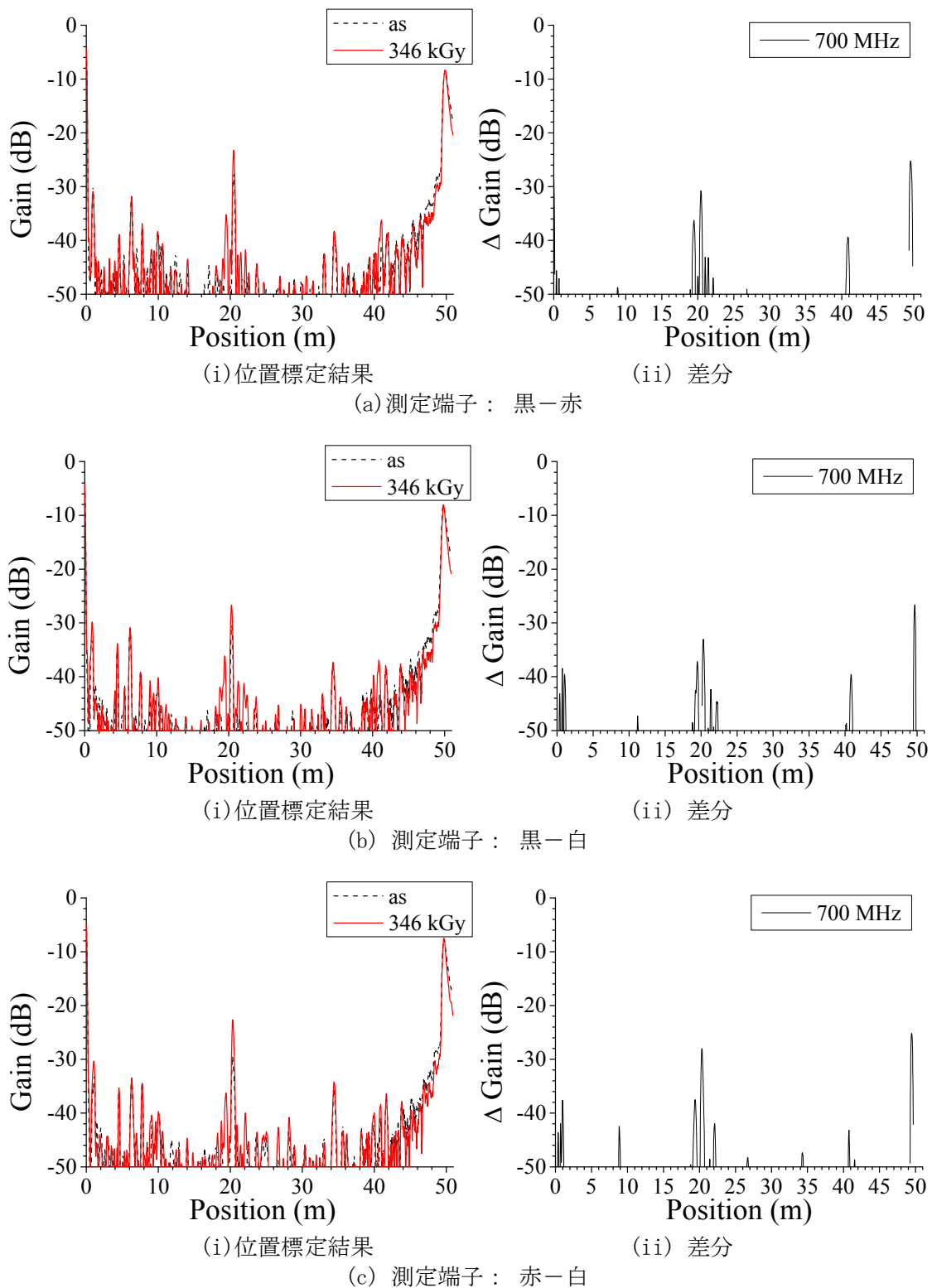
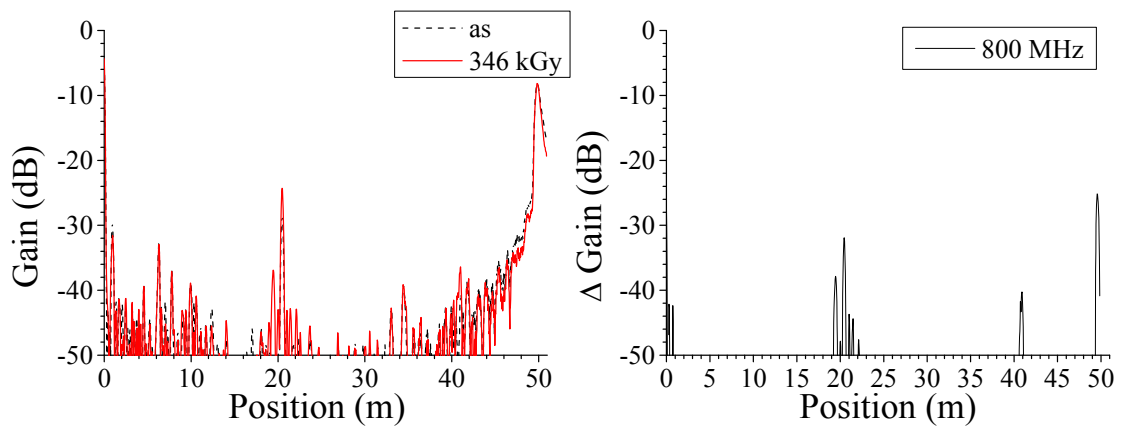


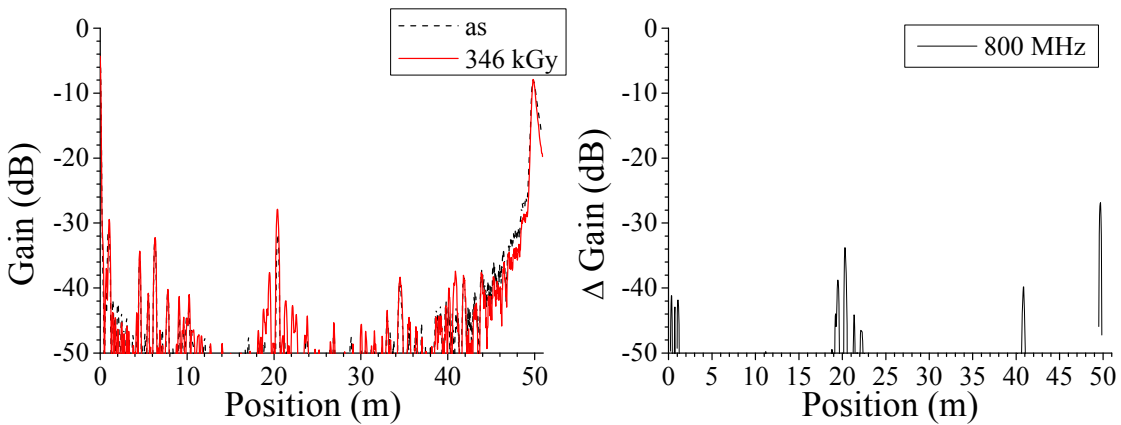
図 3.3.1-70 BIS 法による難燃 EPDM 絶縁ケーブル劣化位置標定結果：120℃、0.5kGy/h、691h、測定端—劣化部：20m、測定条件：熱・放射線同時劣化中、測定周波数域：1～700MHz、測定反対側端子：開放



(i)位置標定結果

(ii) 差分

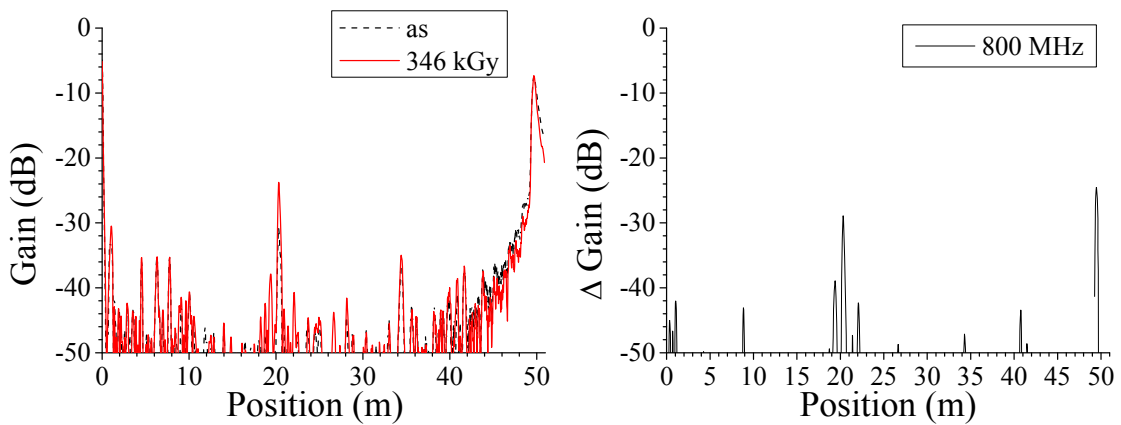
(a)測定端子：黒-赤



(i)位置標定結果

(ii) 差分

(b)測定端子：黒-白

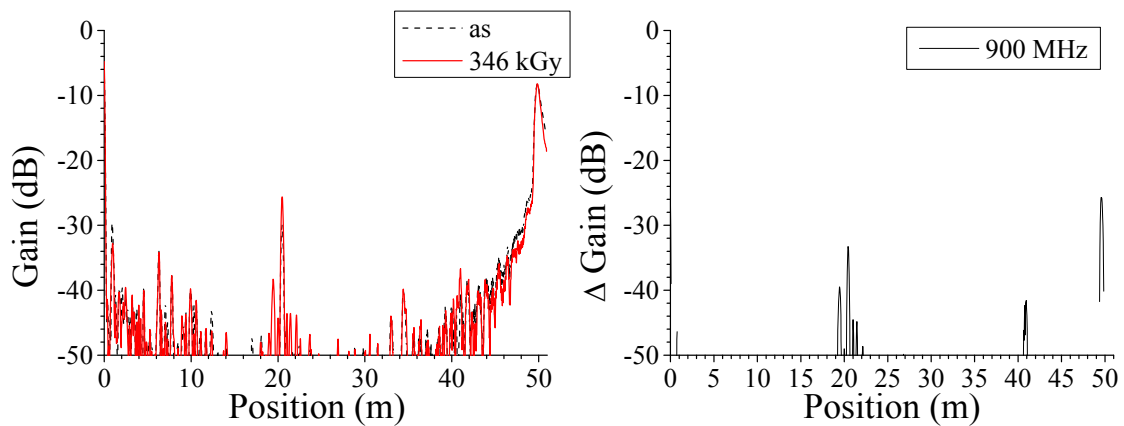


(i)位置標定結果

(ii) 差分

(c)測定端子：赤-白

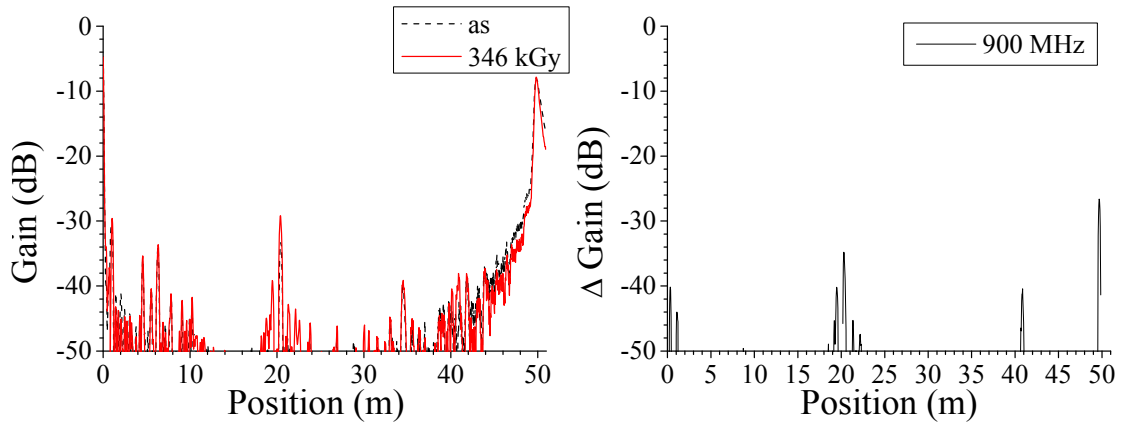
図 3.3.1-71 BIS 法による難燃 EPDM 絶縁ケーブル劣化位置標定結果：120℃、0.5kGy/h、691h、測定端-劣化部：20m、測定条件：熱・放射線同時劣化中、測定周波数域：1~800MHz、測定反対側端子：開放



(i)位置標定結果

(ii) 差分

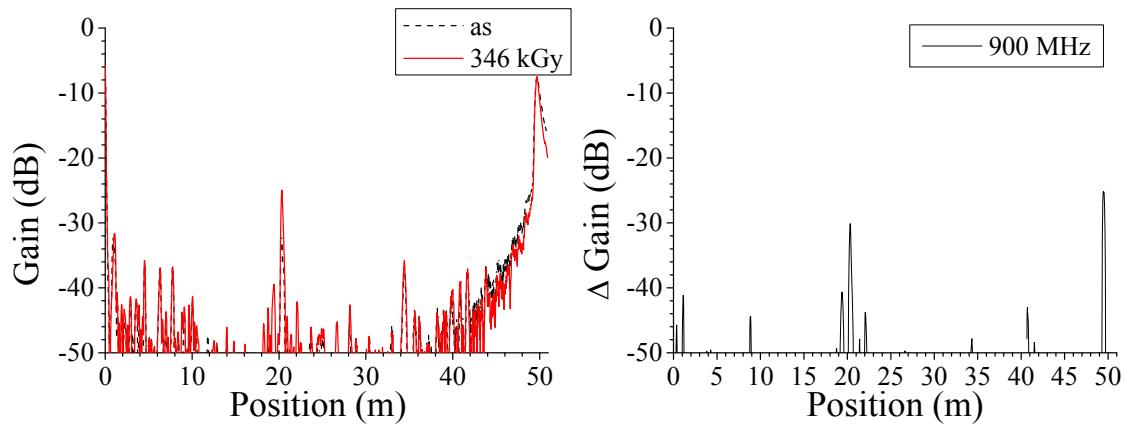
(a) 測定端子：黒－赤



(i)位置標定結果

(ii) 差分

(b) 測定端子：黒－白

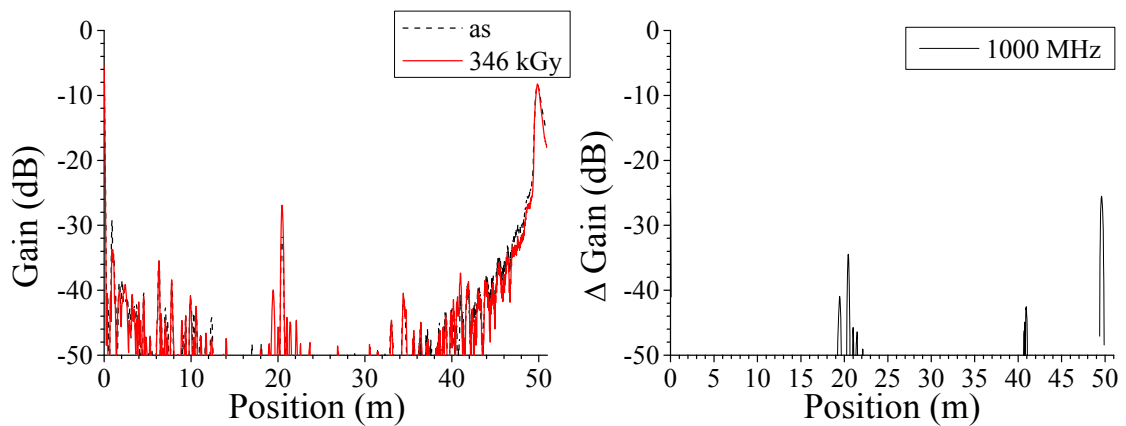


(i)位置標定結果

(ii) 差分

(c) 測定端子：赤－白

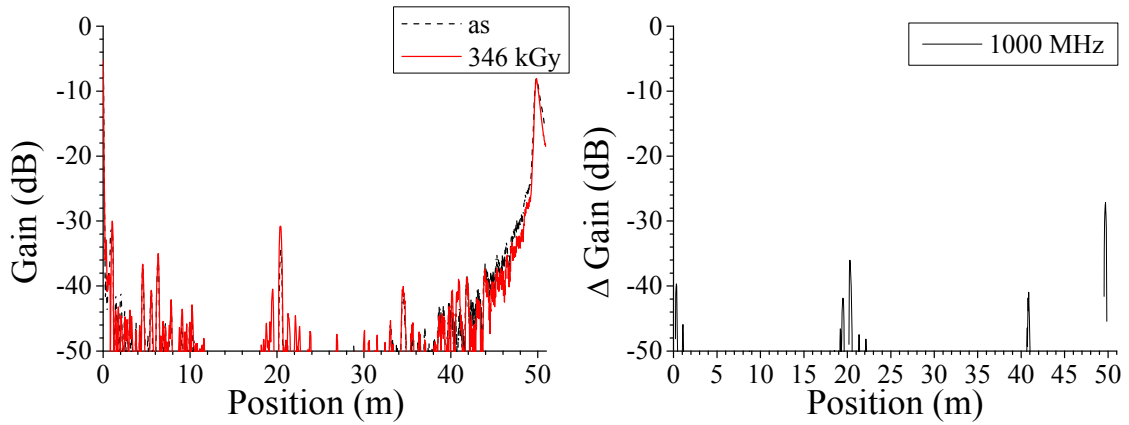
図 3. 3. 1-72 BIS 法による難燃 EPDM 絶縁ケーブル劣化位置標定結果：120℃、0.5kGy/h、691h、測定端－劣化部：20m、測定条件：熱・放射線同時劣化中、測定周波数域：1～900MHz、測定反対側端子：開放



(i)位置標定結果

(ii) 差分

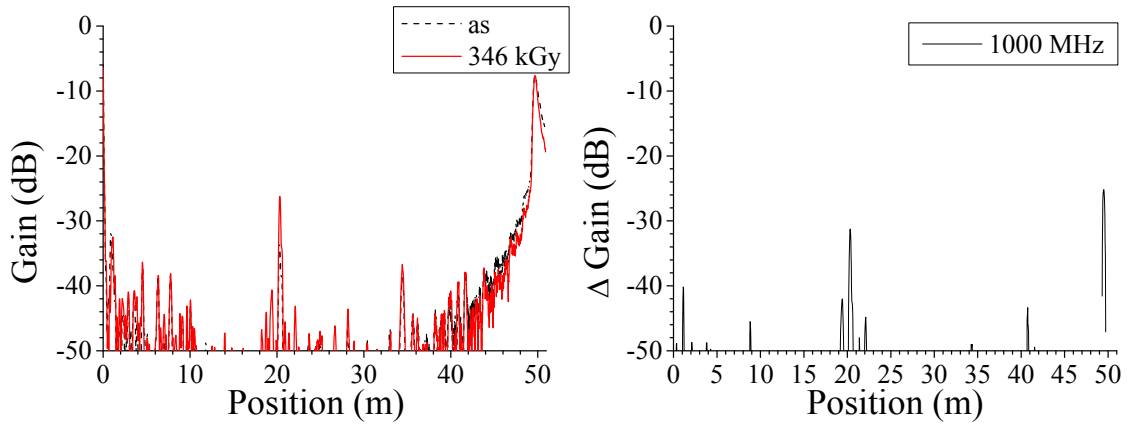
(a)測定端子：黒-赤



(i)位置標定結果

(ii) 差分

(b)測定端子：黒-白



(i)位置標定結果

(ii) 差分

(c)測定端子：赤-白

図 3.3.1-73 BIS 法による難燃 EPDM 絶縁ケーブル劣化位置標定結果：120℃、0.5kGy/h、691h、測定端-劣化部：20m、測定条件：熱・放射線同時劣化中、測定周波数域：1～1000MHz、測定反対側端子：開放

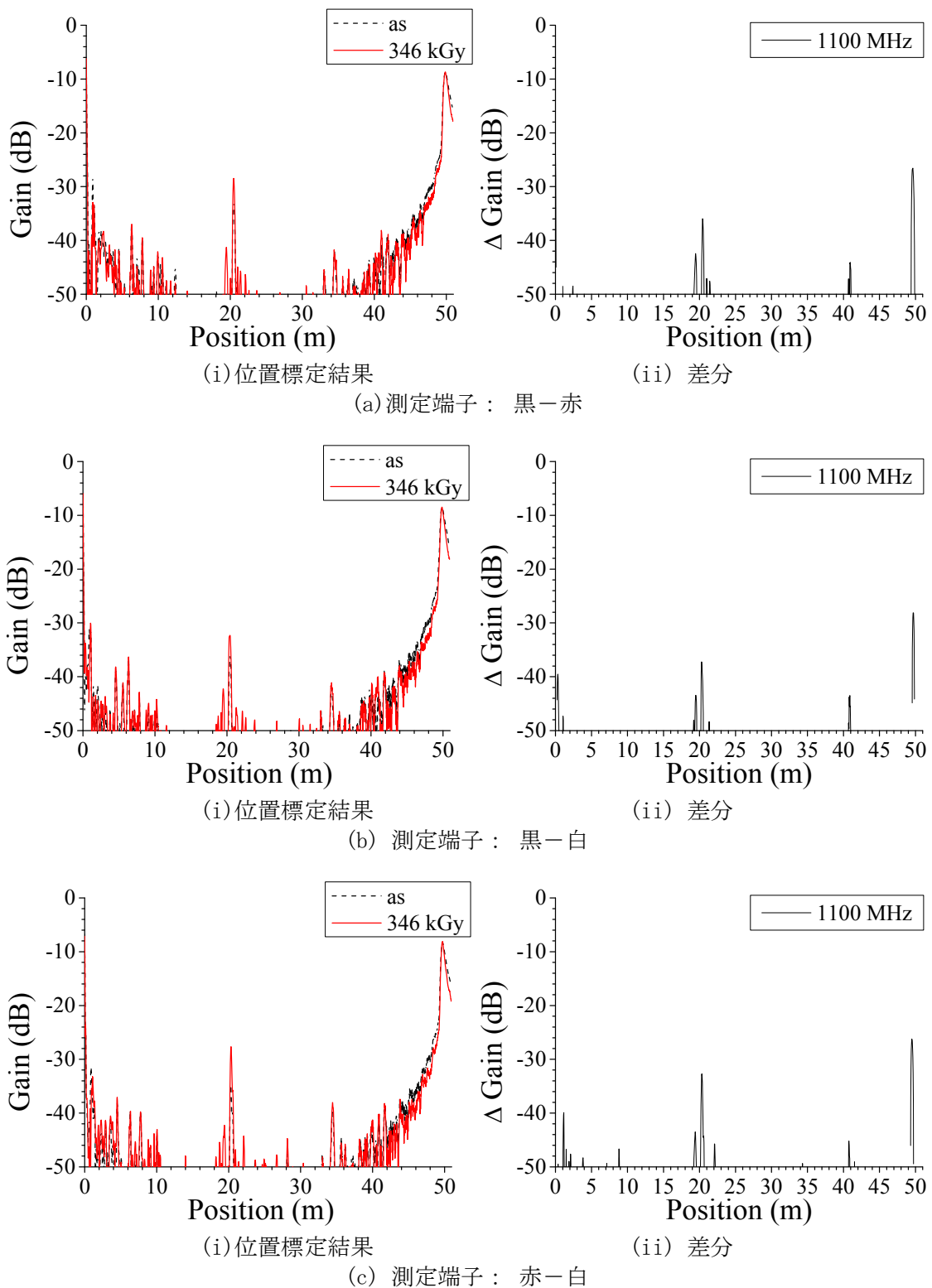
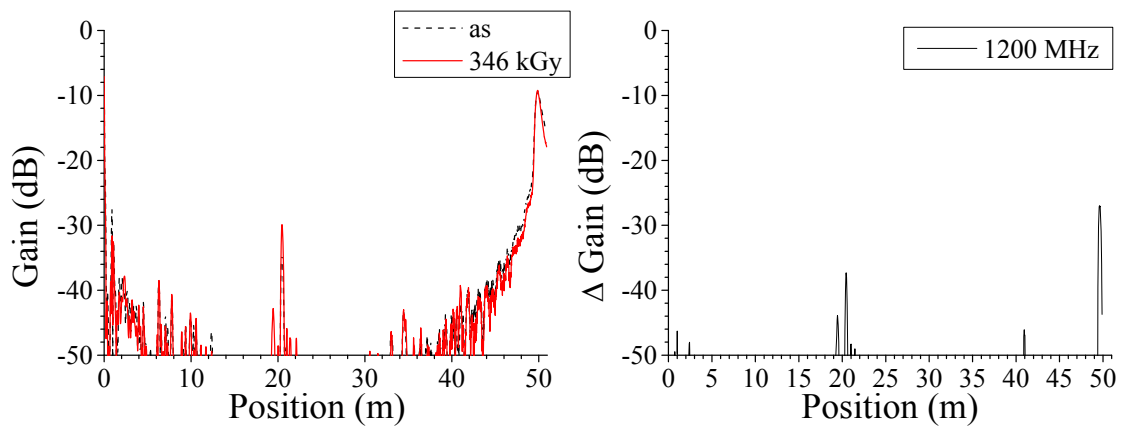


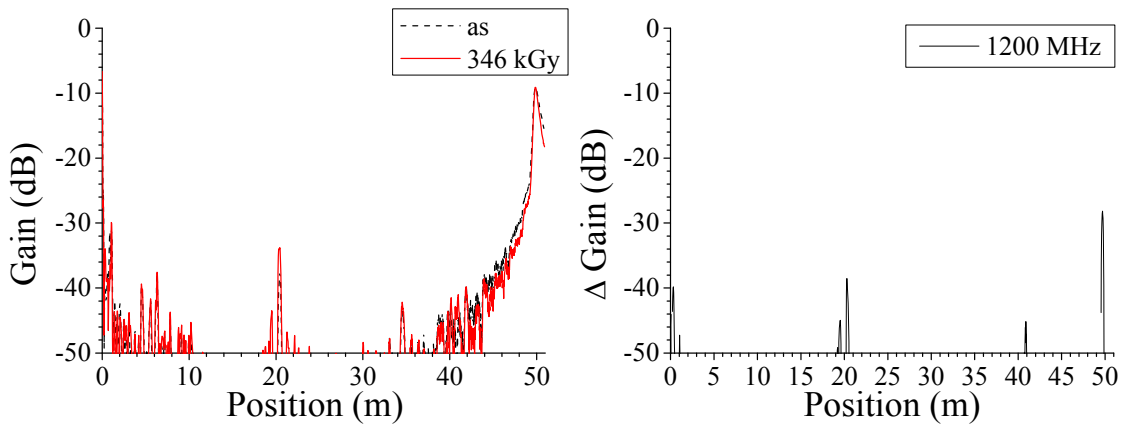
図 3.3.1-74 BIS 法による難燃 EPDM 絶縁ケーブル劣化位置標定結果：120℃、0.5kGy/h、691h、測定端—劣化部：20m、測定条件：熱・放射線同時劣化中、測定周波数域：1～1100MHz、測定反対側端子：開放



(i)位置標定結果

(ii) 差分

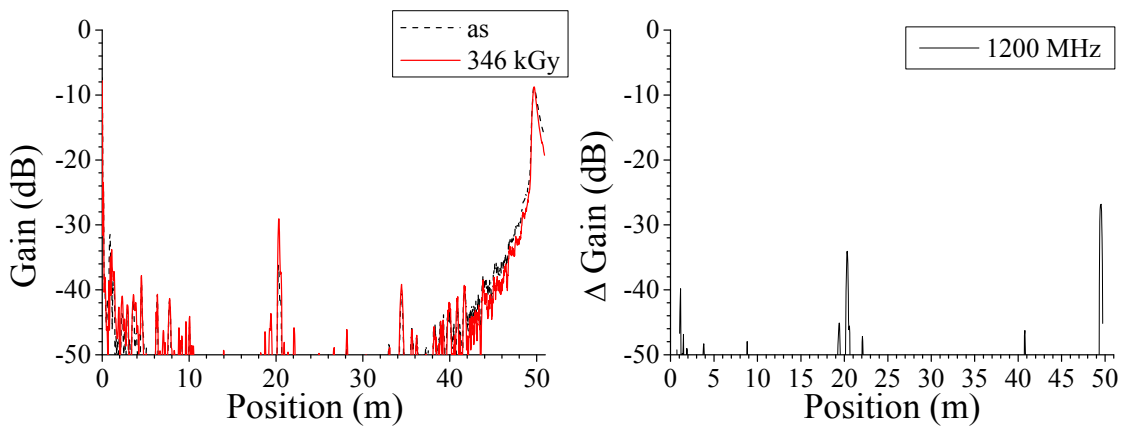
(a)測定端子：黒－赤



(i)位置標定結果

(ii) 差分

(b)測定端子：黒－白

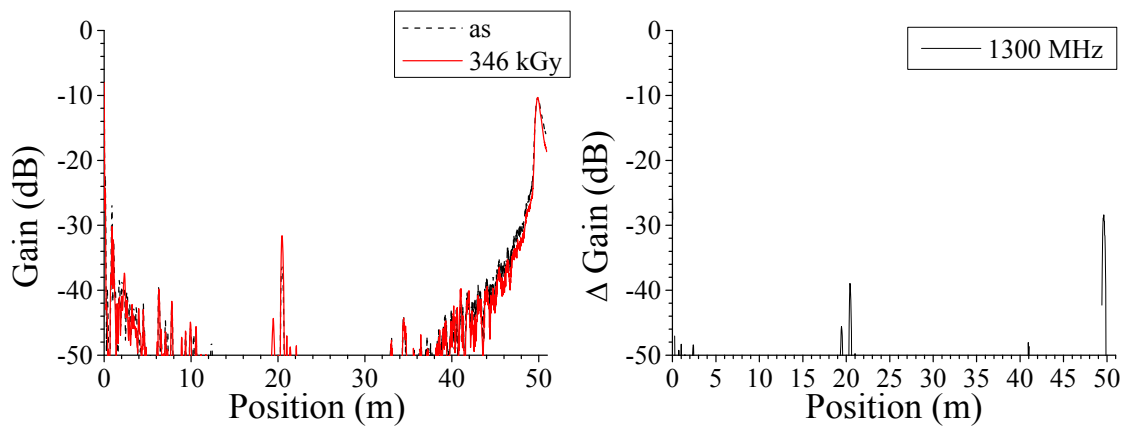


(i)位置標定結果

(ii) 差分

(c)測定端子：赤－白

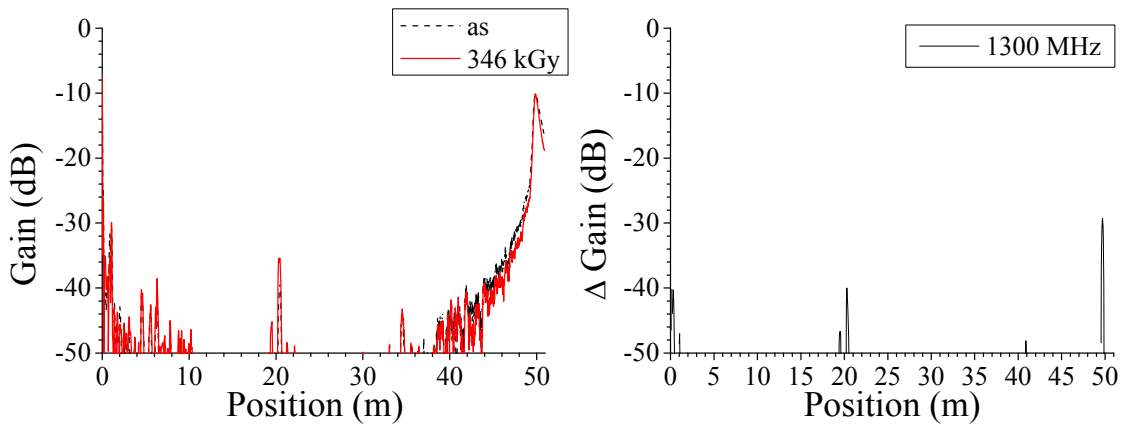
図 3.3.1-75 BIS 法による難燃 EPDM 絶縁ケーブル劣化位置標定結果：120℃、0.5kGy/h、691h、測定端－劣化部：20m、測定条件：熱・放射線同時劣化中、測定周波数域：1～1200MHz、測定反対側端子：開放



(i)位置標定結果

(ii) 差分

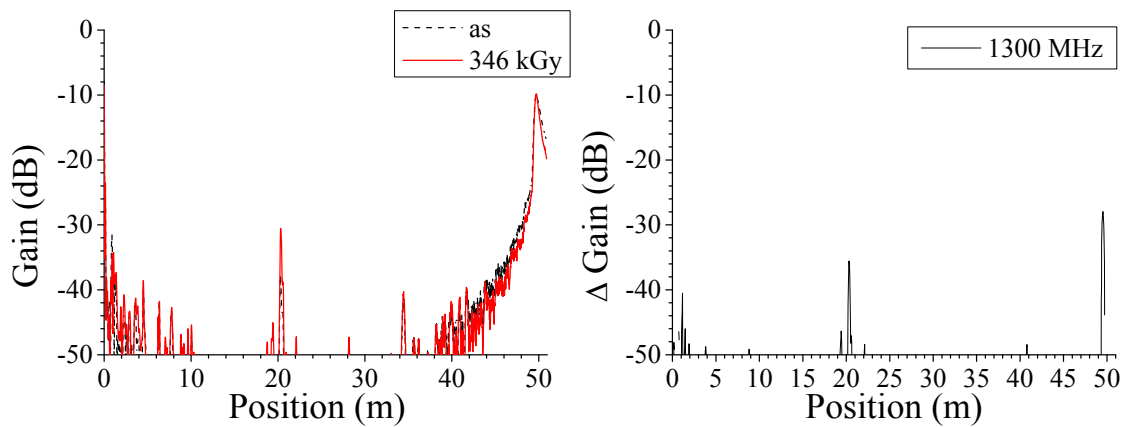
(a)測定端子：黒－赤



(i)位置標定結果

(ii) 差分

(b)測定端子：黒－白

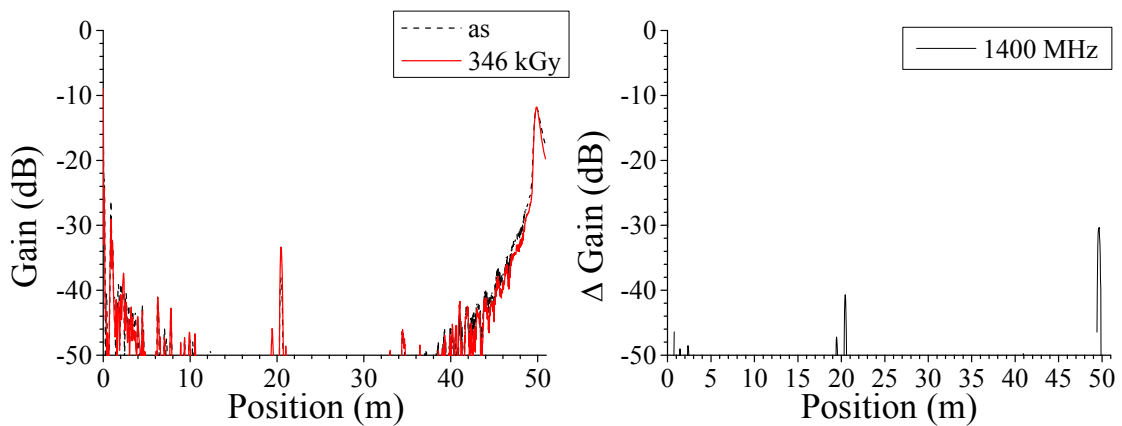


(i)位置標定結果

(ii) 差分

(c)測定端子：赤－白

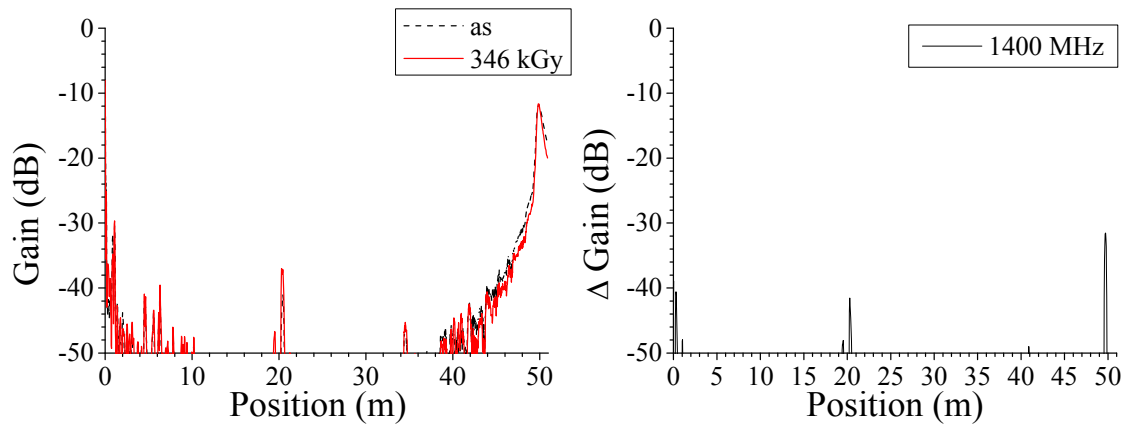
図 3.3.1-76 BIS 法による難燃 EPDM 絶縁ケーブル劣化位置標定結果：120℃、0.5kGy/h、691h、測定端－劣化部：20m、測定条件：熱・放射線同時劣化中、測定周波数域：1～1300MHz、測定反対側端子：開放



(i)位置標定結果

(ii) 差分

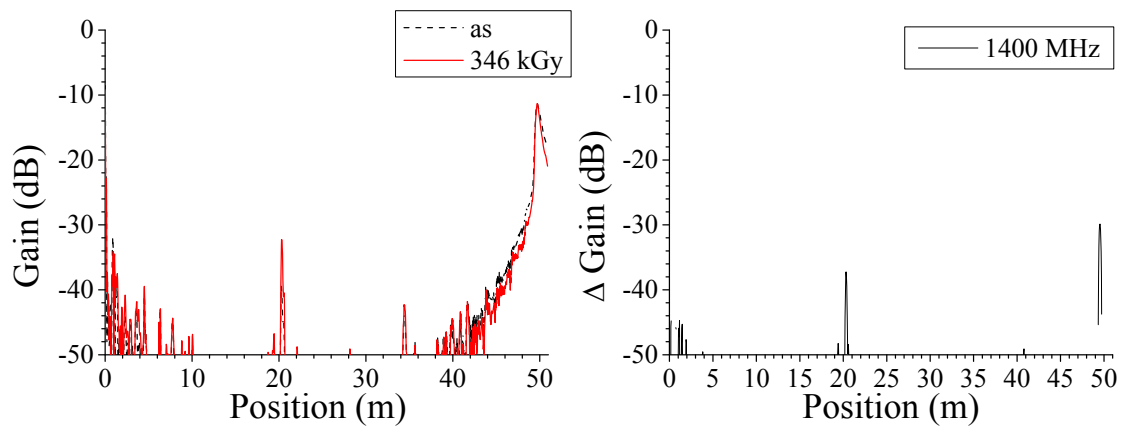
(a)測定端子：黒-赤



(i)位置標定結果

(ii) 差分

(b)測定端子：黒-白



(i)位置標定結果

(ii) 差分

(c)測定端子：赤-白

図 3.3.1-77 BIS 法による難燃 EPDM 絶縁ケーブル劣化位置標定結果：120℃、0.5kGy/h、691h、測定端-劣化部：20m、測定条件：熱・放射線同時劣化中、測定周波数域：1～1400MHz、測定反対側端子：開放

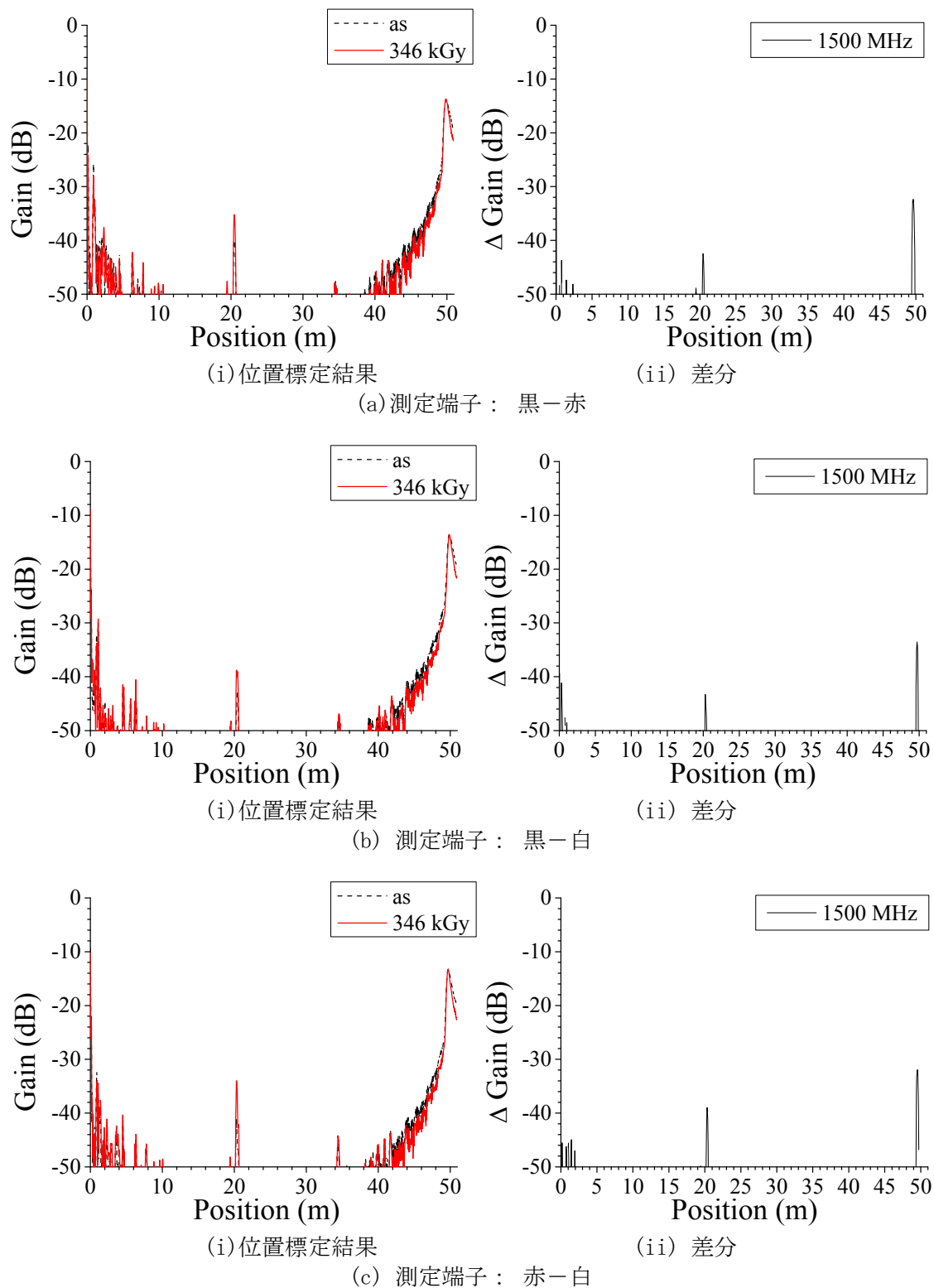


図 3. 3. 1-78 BIS 法による難燃 EPDM 絶縁ケーブル劣化位置標定結果：120℃、0. 5kGy/h、691h、測定端－劣化部：20m、測定条件：熱・放射線同時劣化中、測定周波数域：1～1500MHz、測定反対側端子：開放

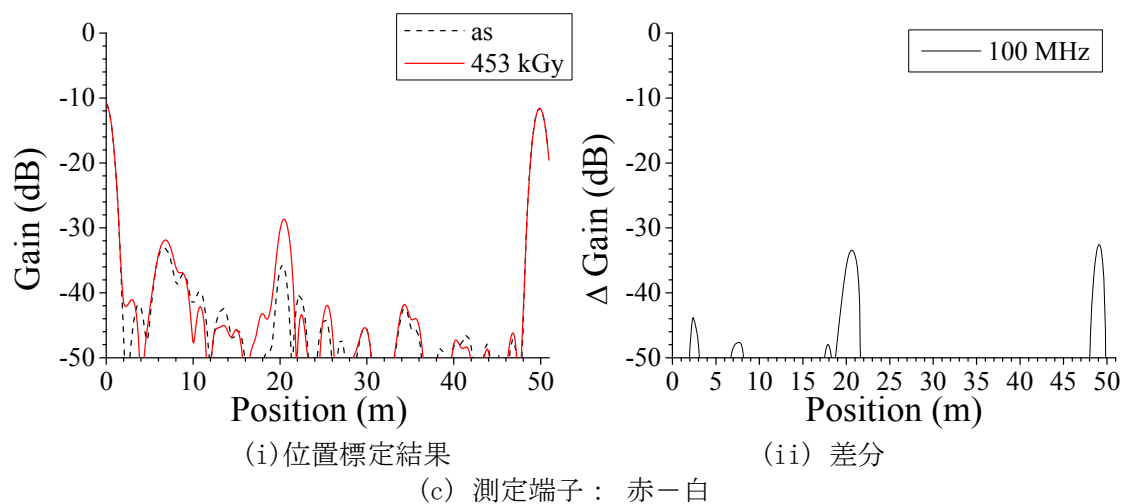
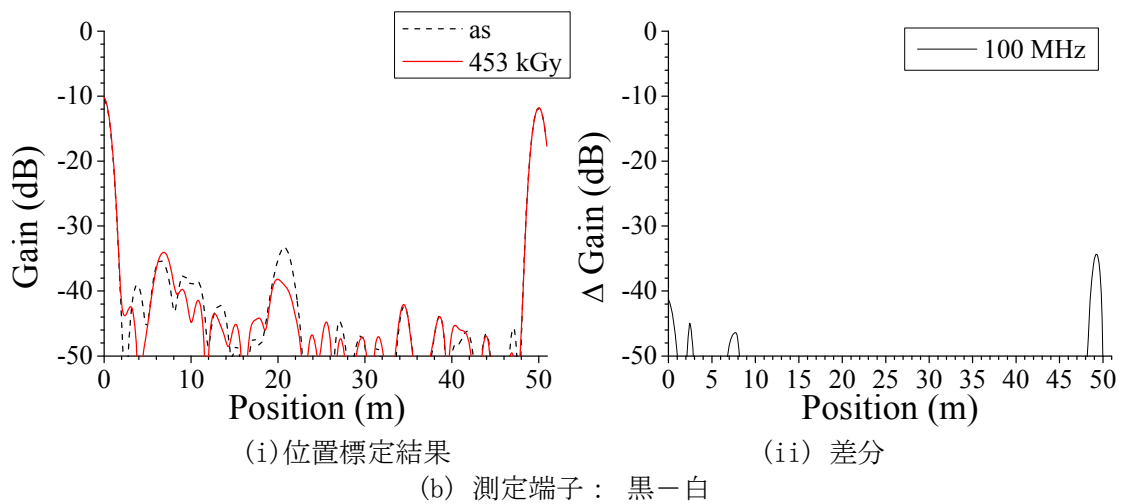
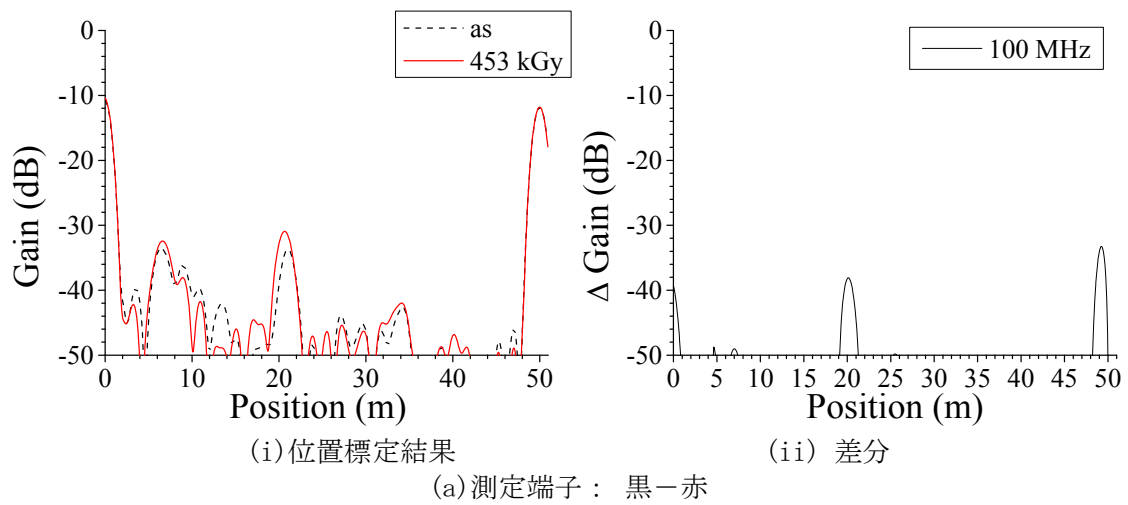
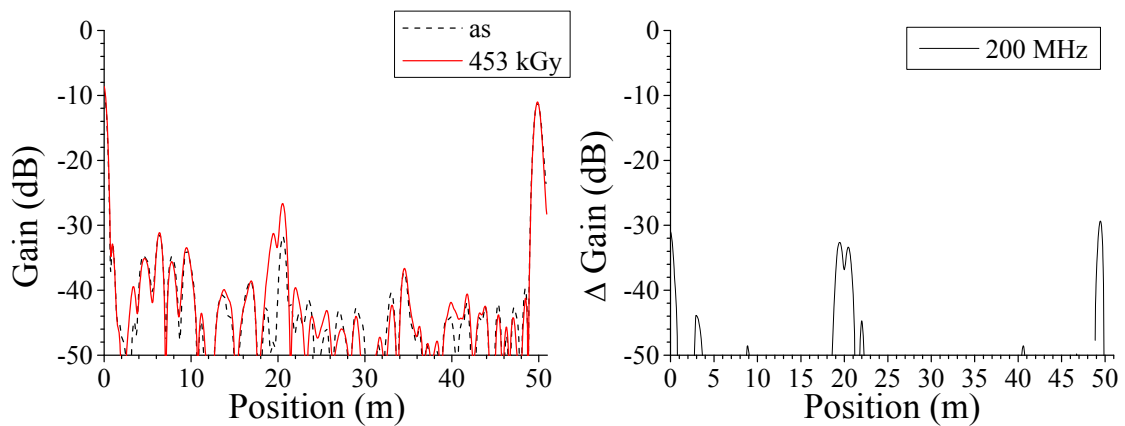


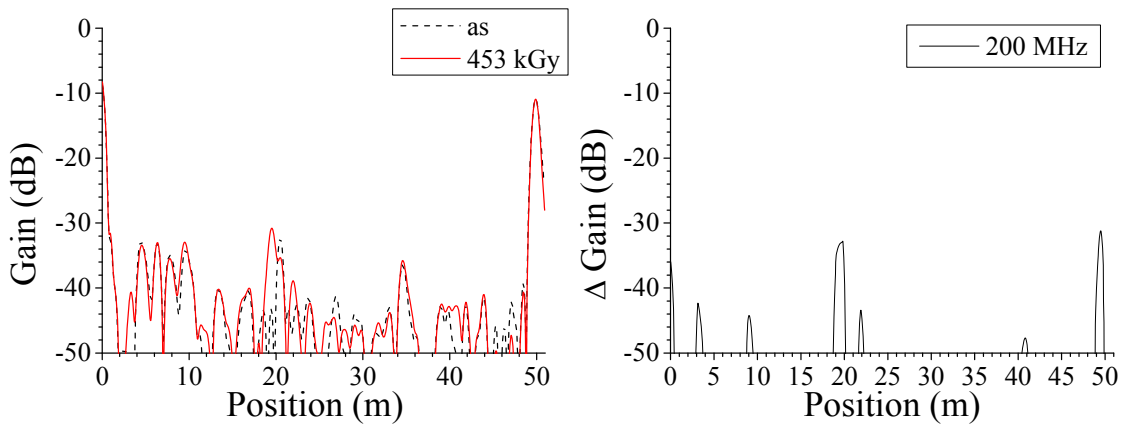
図 3. 3. 1-79 BIS 法による難燃 EPDM 絶縁ケーブル劣化位置標定結果：120℃、0. 5kGy/h、906h、測定端—劣化部：20m、測定条件：熱・放射線同時劣化中、測定周波数域：1～100MHz、測定反対側端子：開放



(i)位置標定結果

(ii) 差分

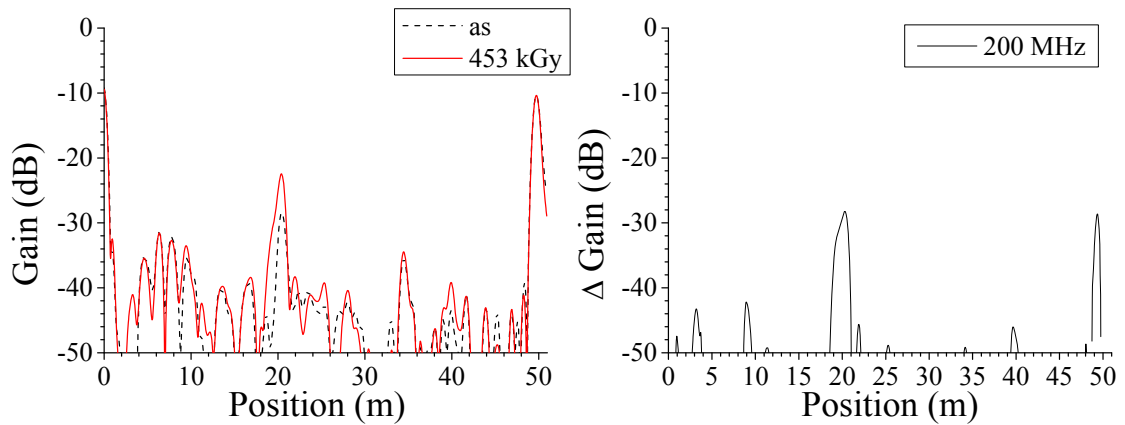
(a)測定端子：黒－赤



(i)位置標定結果

(ii) 差分

(b)測定端子：黒－白

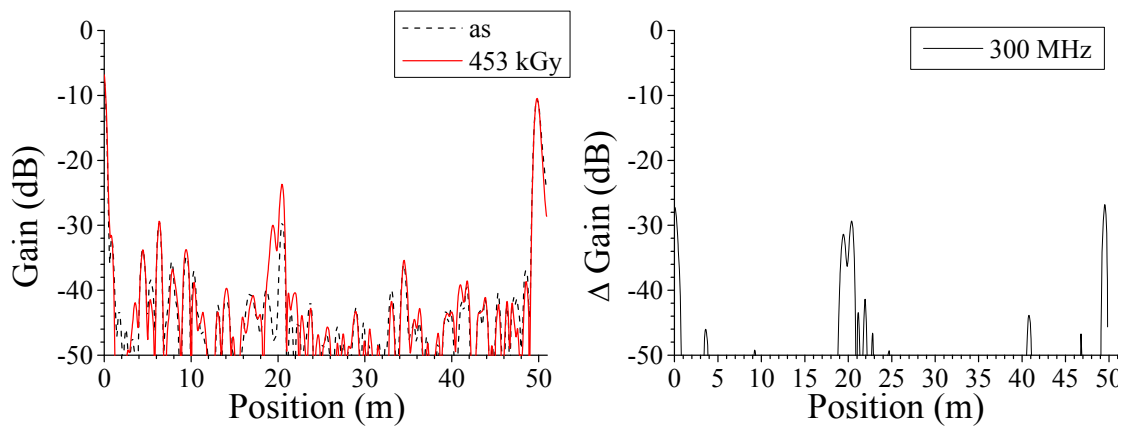


(i)位置標定結果

(ii) 差分

(c)測定端子：赤－白

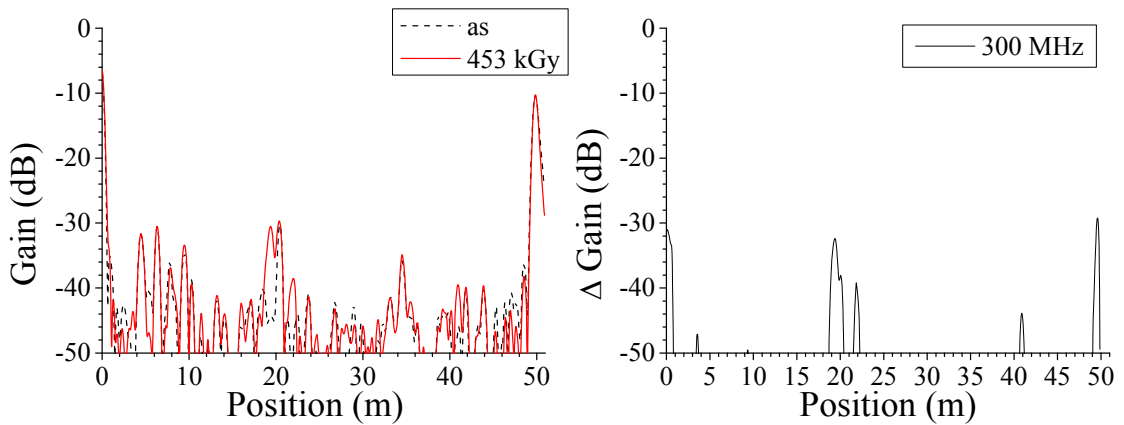
図 3.3.1-80 BIS 法による難燃 EPDM 絶縁ケーブル劣化位置標定結果：120℃、0.5kGy/h、906h、測定端－劣化部：20m、測定条件：熱・放射線同時劣化中、測定周波数域：1～200MHz、測定反対側端子：開放



(i) 位置標定結果

(ii) 差分

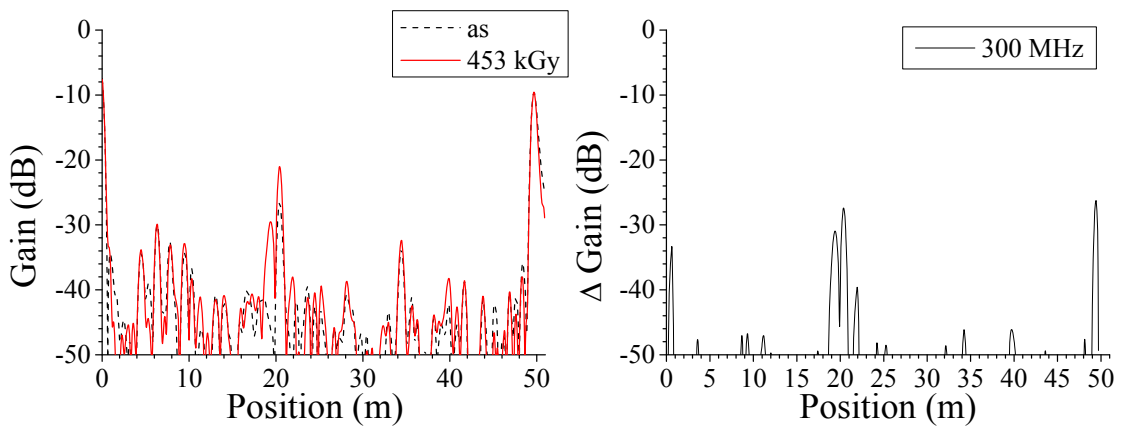
(a) 測定端子：黒－赤



(i) 位置標定結果

(ii) 差分

(b) 測定端子：黒－白

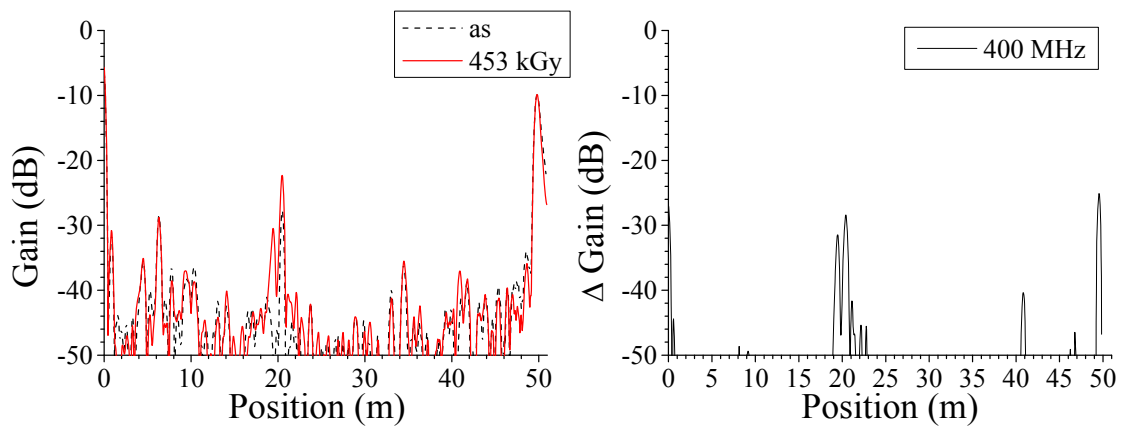


(i) 位置標定結果

(ii) 差分

(c) 測定端子：赤－白

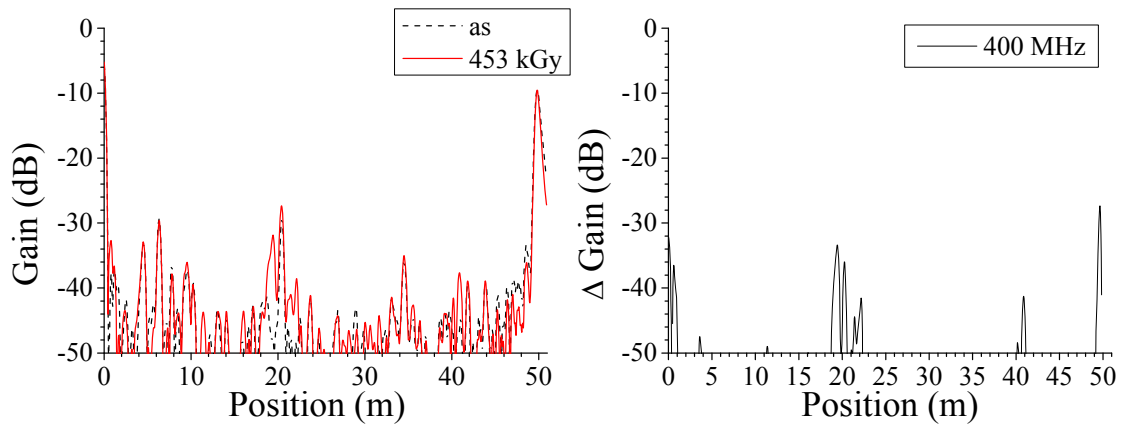
図 3.3.1-81 BIS 法による難燃 EPDM 絶縁ケーブル劣化位置標定結果：120℃、0.5kGy/h、906h、測定端－劣化部：20m、測定条件：熱・放射線同時劣化中、測定周波数域：1～300MHz、測定反対側端子：開放



(i)位置標定結果

(ii) 差分

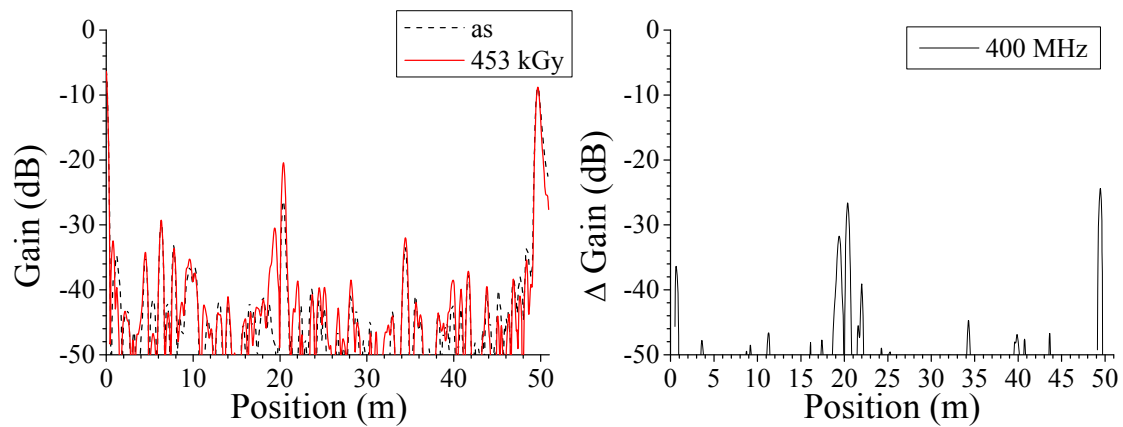
(a)測定端子：黒－赤



(i)位置標定結果

(ii) 差分

(b)測定端子：黒－白

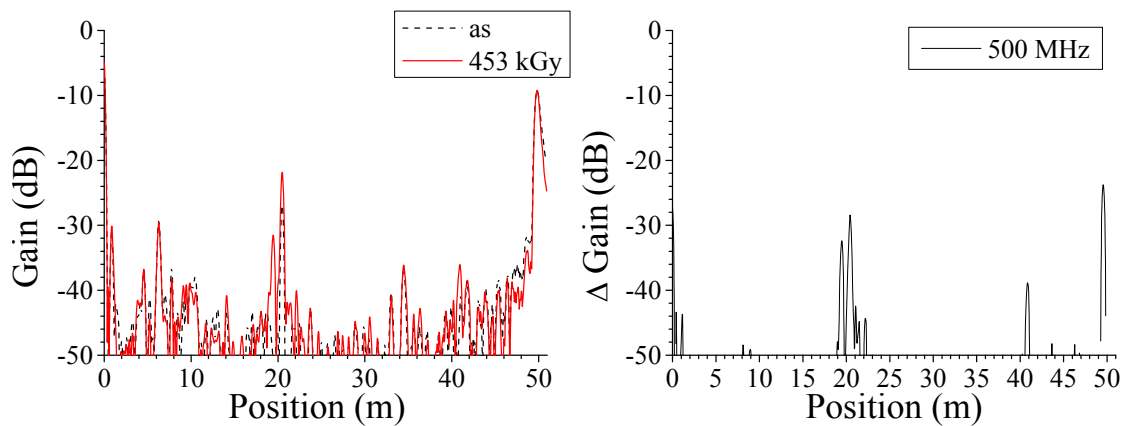


(i)位置標定結果

(ii) 差分

(c)測定端子：赤－白

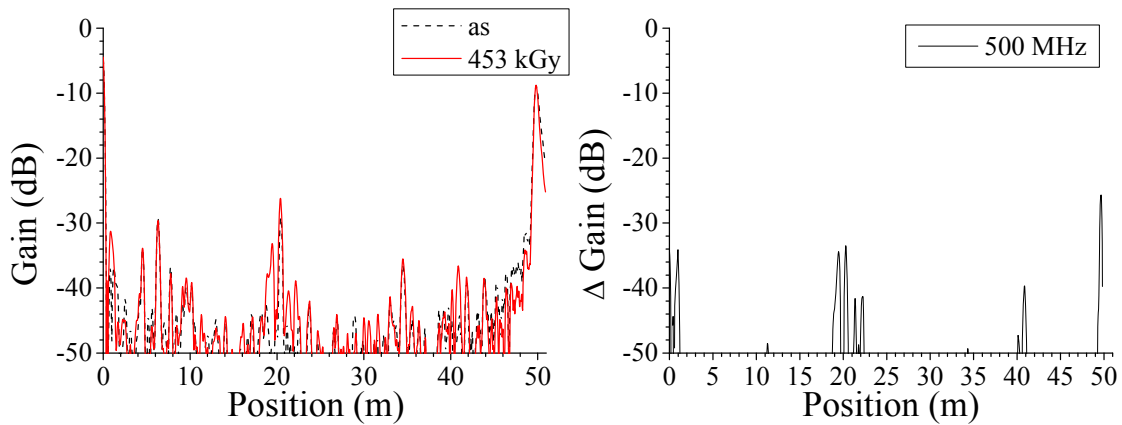
図 3.3.1-82 BIS 法による難燃 EPDM 絶縁ケーブル劣化位置標定結果：120℃、0.5kGy/h、906h、測定端－劣化部：20m、測定条件：熱・放射線同時劣化中、測定周波数域：1～400MHz、測定反対側端子：開放



(i)位置標定結果

(ii) 差分

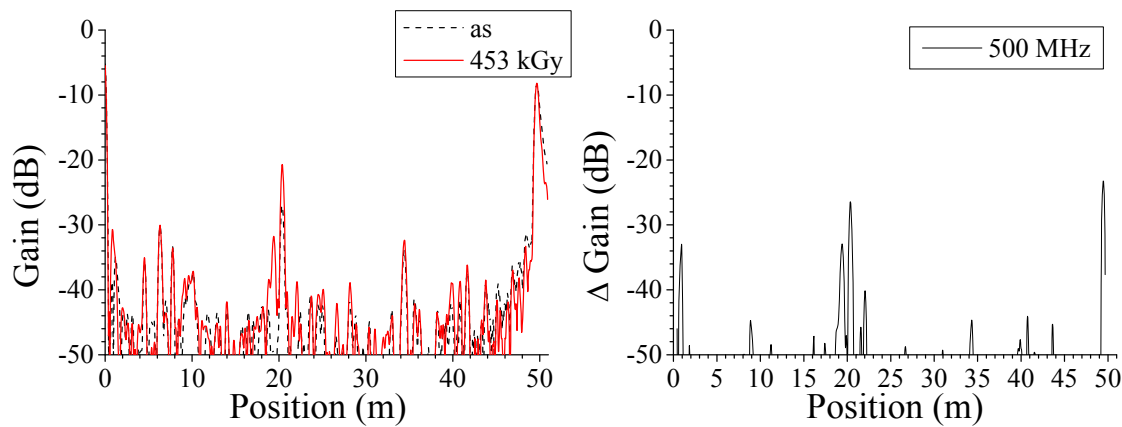
(a) 測定端子：黒-赤



(i)位置標定結果

(ii) 差分

(b) 測定端子：黒-白

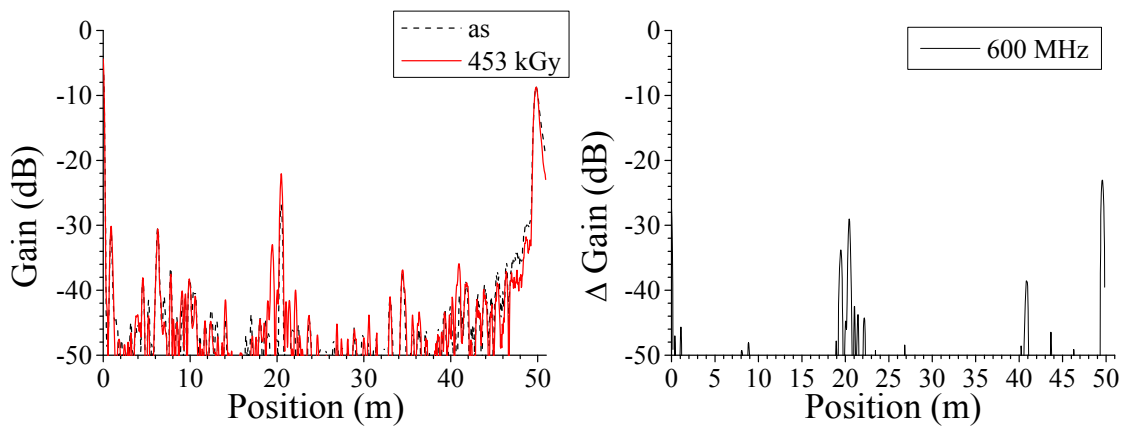


(i)位置標定結果

(ii) 差分

(c) 測定端子：赤-白

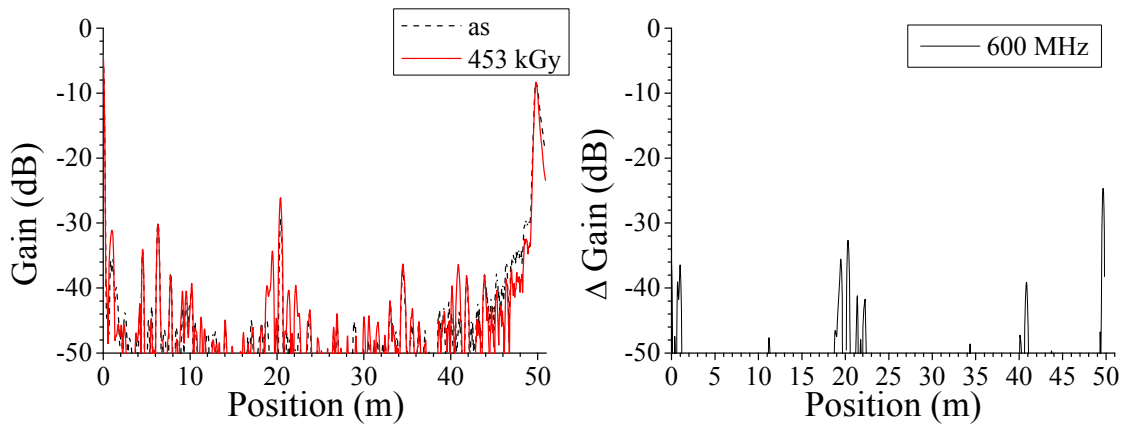
図 3.3.1-83 BIS 法による難燃 EPDM 絶縁ケーブル劣化位置標定結果：120℃、0.5kGy/h、906h、測定端-劣化部：20m、測定条件：熱・放射線同時劣化中、測定周波数域：1～500MHz、測定反対側端子：開放



(i)位置標定結果

(ii) 差分

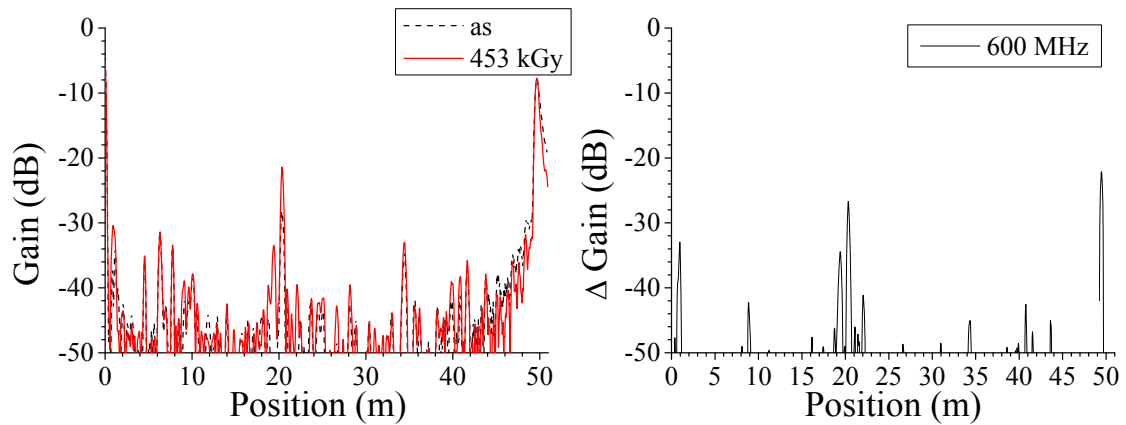
(a)測定端子：黒-赤



(i)位置標定結果

(ii) 差分

(b)測定端子：黒-白

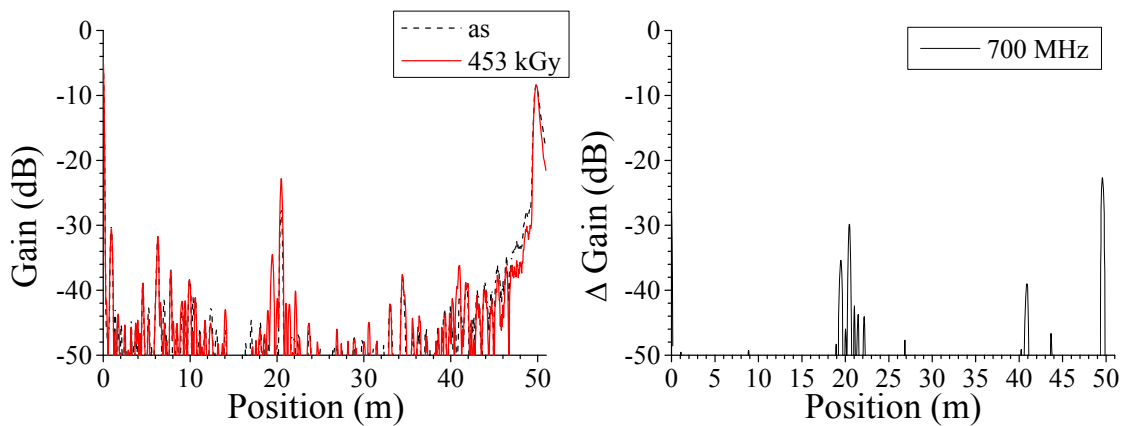


(i)位置標定結果

(ii) 差分

(c)測定端子：赤-白

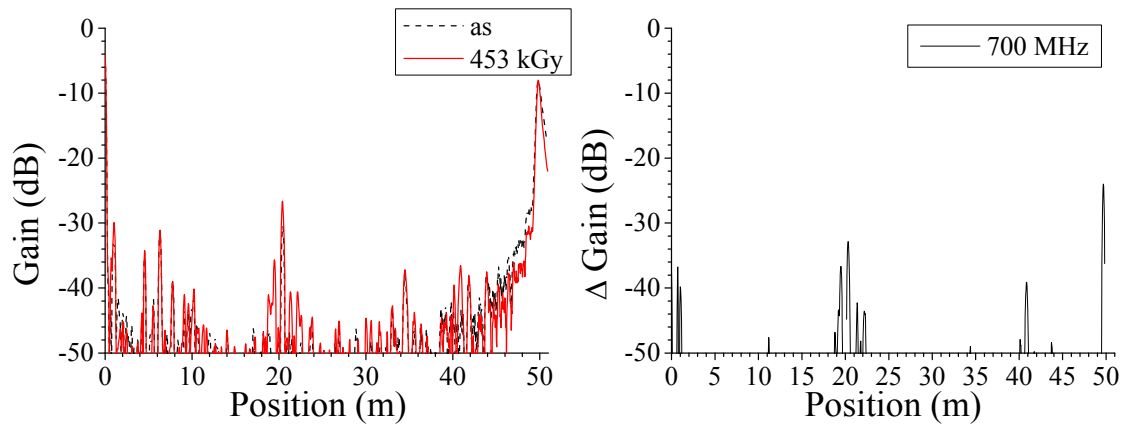
図 3.3.1-84 BIS 法による難燃 EPDM 絶縁ケーブル劣化位置標定結果：120℃、0.5kGy/h、906h、測定端-劣化部：20m、測定条件：熱・放射線同時劣化中、測定周波数域：1~600MHz、測定反対側端子：開放



(i)位置標定結果

(ii) 差分

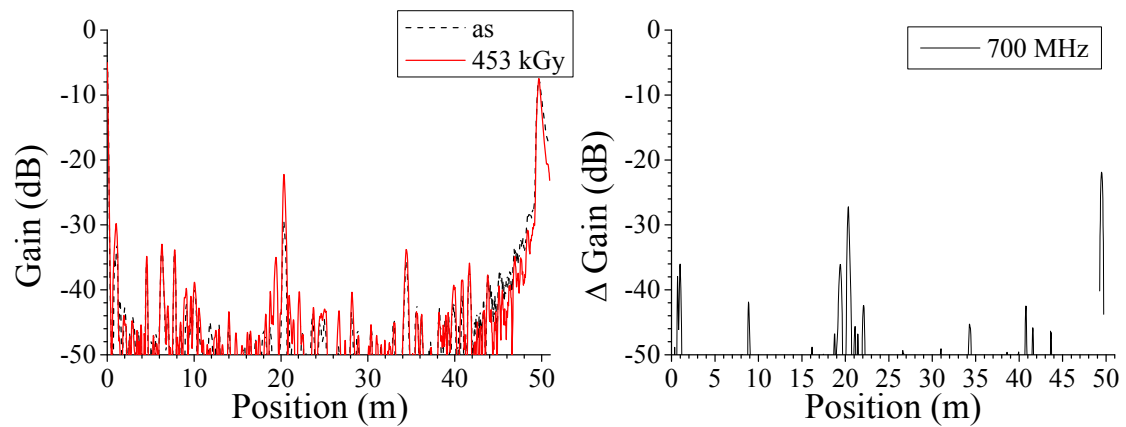
(a)測定端子：黒－赤



(i)位置標定結果

(ii) 差分

(b)測定端子：黒－白

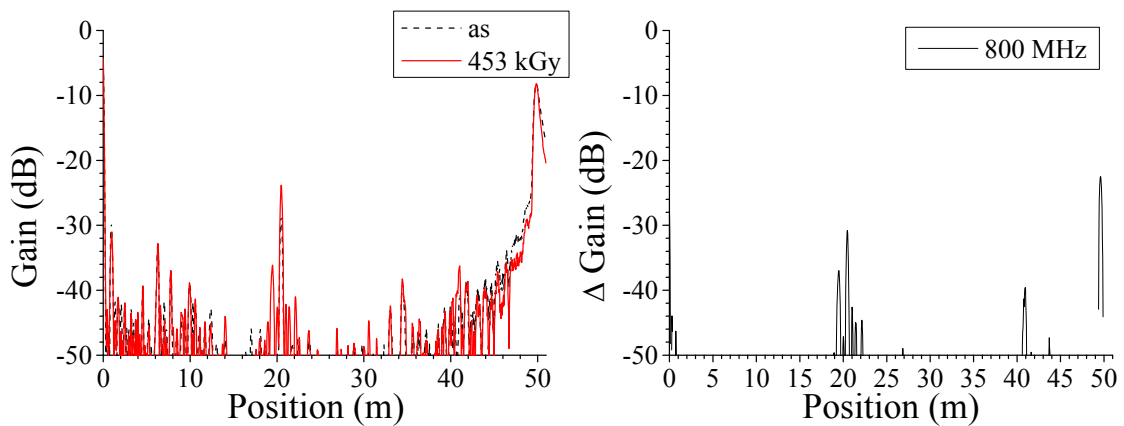


(i)位置標定結果

(ii) 差分

(c)測定端子：赤－白

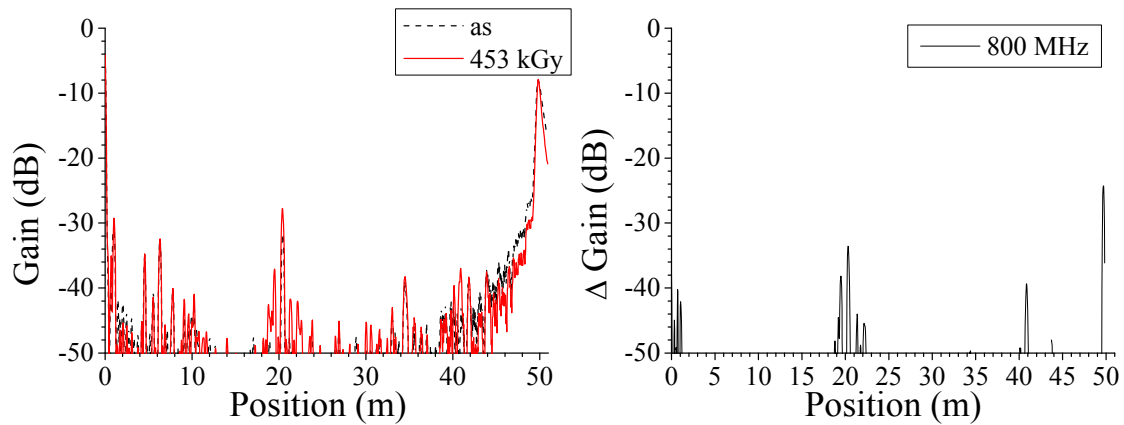
図 3. 3. 1-85 BIS 法による難燃 EPDM 絶縁ケーブル劣化位置標定結果：120℃、0.5kGy/h、906h、測定端－劣化部：20m、測定条件：熱・放射線同時劣化中、測定周波数域：1～700MHz、測定反対側端子：開放



(i)位置標定結果

(ii) 差分

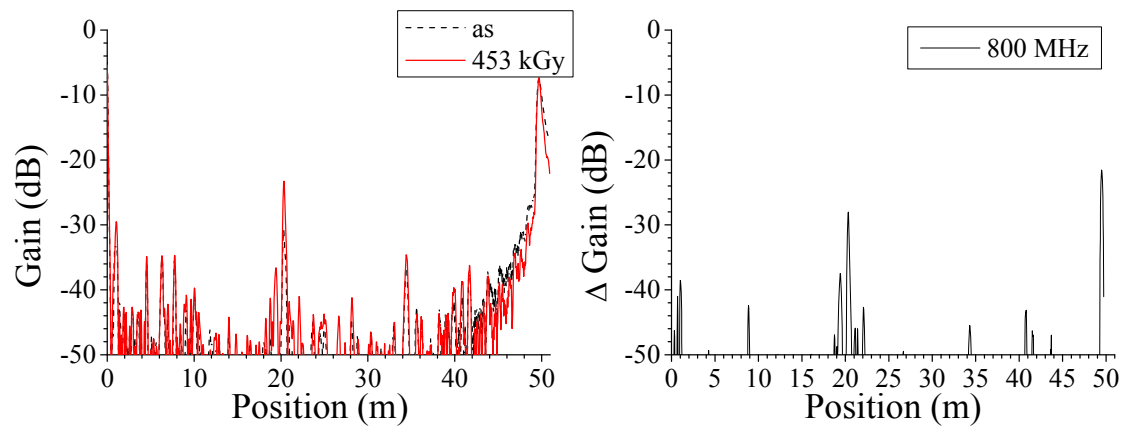
(a)測定端子：黒－赤



(i)位置標定結果

(ii) 差分

(b)測定端子：黒－白

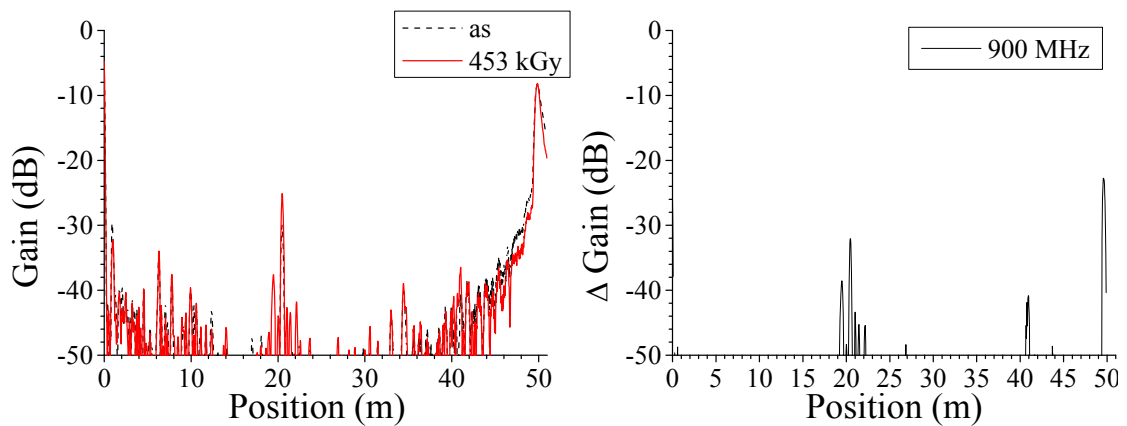


(i)位置標定結果

(ii) 差分

(c)測定端子：赤－白

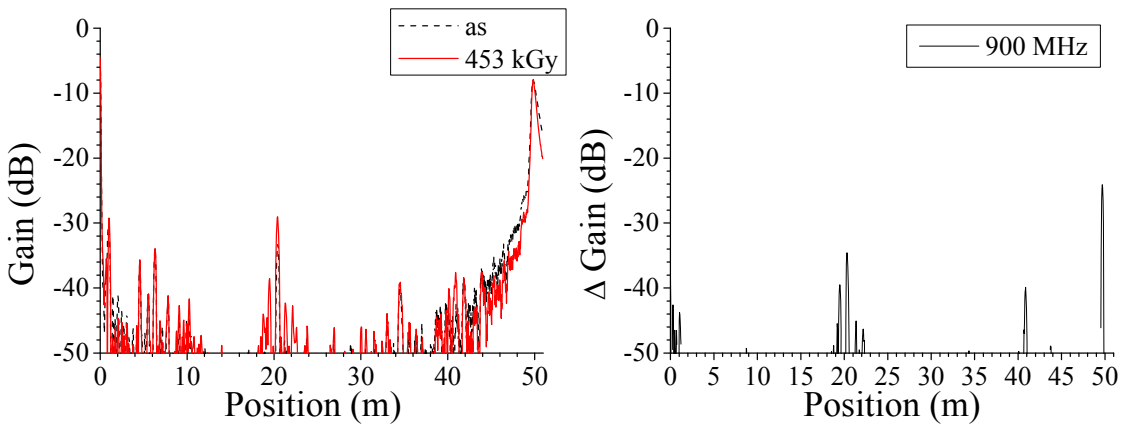
図 3.3.1-86 BIS 法による難燃 EPDM 絶縁ケーブル劣化位置標定結果：120℃、0.5kGy/h、906h、測定端－劣化部：20m、測定条件：熱・放射線同時劣化中、測定周波数域：1～800MHz、測定反対側端子：開放



(i)位置標定結果

(ii) 差分

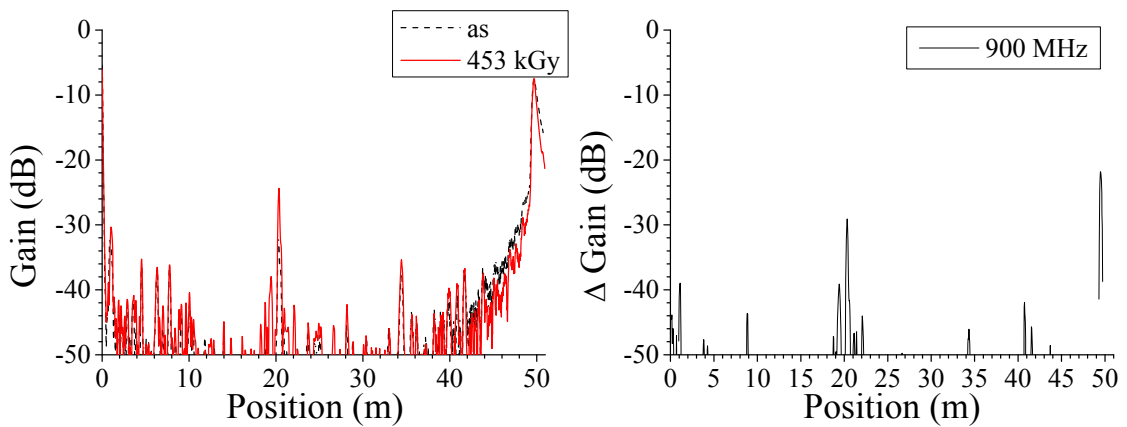
(a)測定端子：黒－赤



(i)位置標定結果

(ii) 差分

(b)測定端子：黒－白

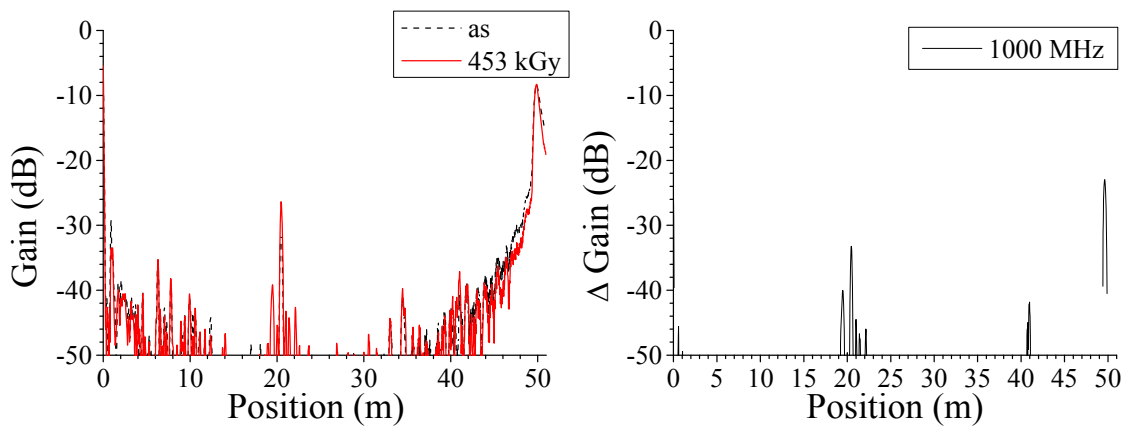


(i)位置標定結果

(ii) 差分

(c)測定端子：赤－白

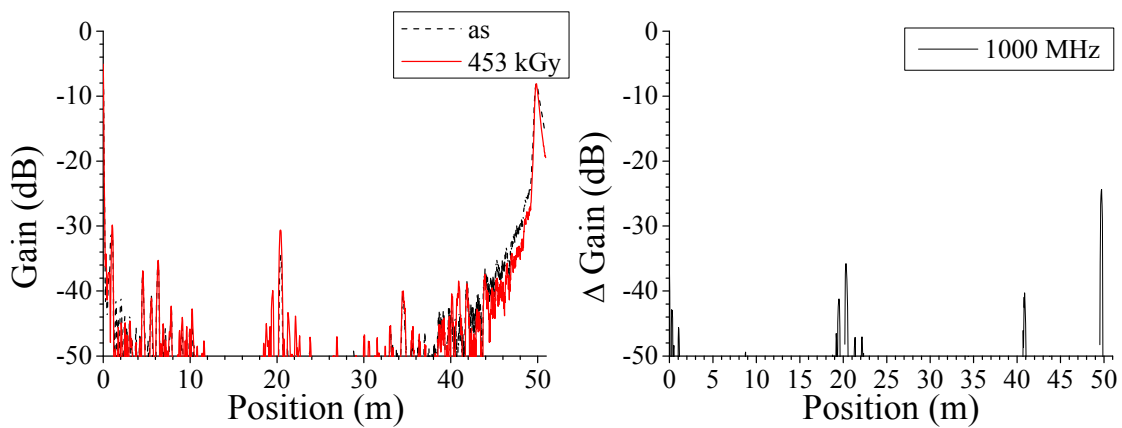
図 3.3.1-87 BIS 法による難燃 EPDM 絶縁ケーブル劣化位置標定結果：120℃、0.5kGy/h、906h、測定端－劣化部：20m、測定条件：熱・放射線同時劣化中、測定周波数域：1～900MHz、測定反対側端子：開放



(i)位置標定結果

(ii) 差分

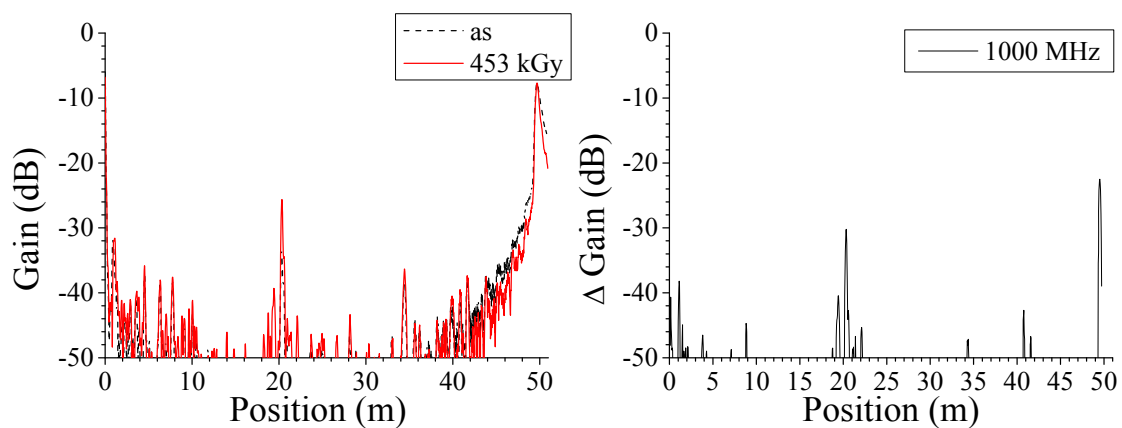
(a) 測定端子：黒-赤



(i)位置標定結果

(ii) 差分

(b) 測定端子：黒-白

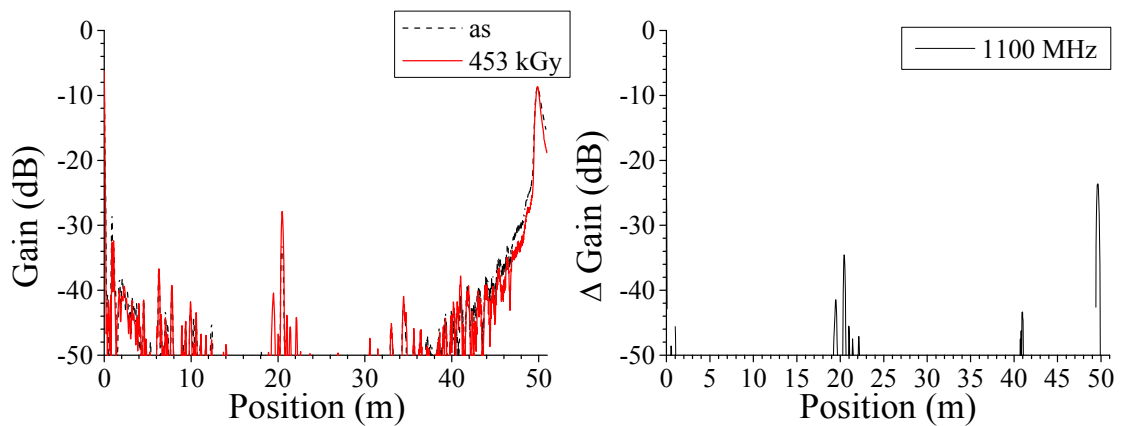


(i)位置標定結果

(ii) 差分

(c) 測定端子：赤-白

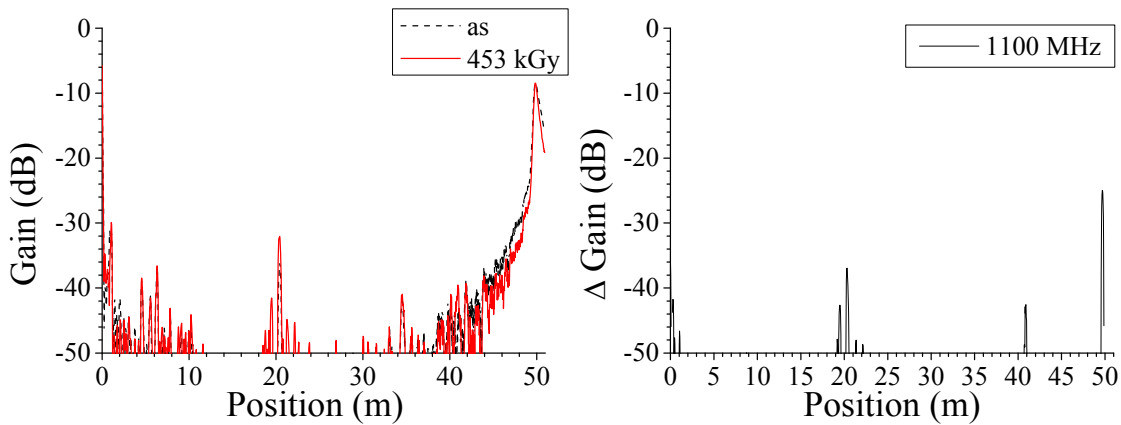
図 3.3.1-88 BIS 法による難燃 EPDM 絶縁ケーブル劣化位置標定結果：120℃、0.5kGy/h、906h、測定端-劣化部：20m、測定条件：熱・放射線同時劣化中、測定周波数域：1～1000MHz、測定反対側端子：開放



(i)位置標定結果

(ii) 差分

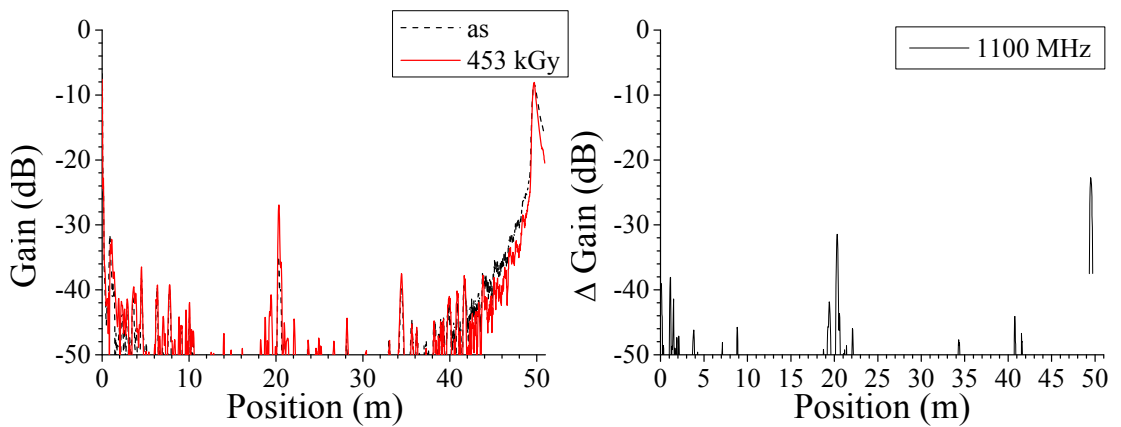
(a)測定端子：黒－赤



(i)位置標定結果

(ii) 差分

(b)測定端子：黒－白

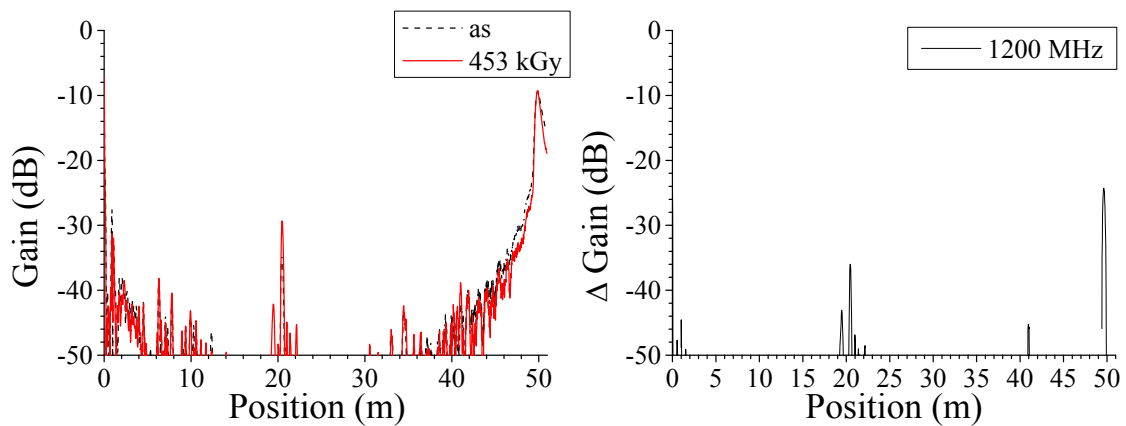


(i)位置標定結果

(ii) 差分

(c)測定端子：赤－白

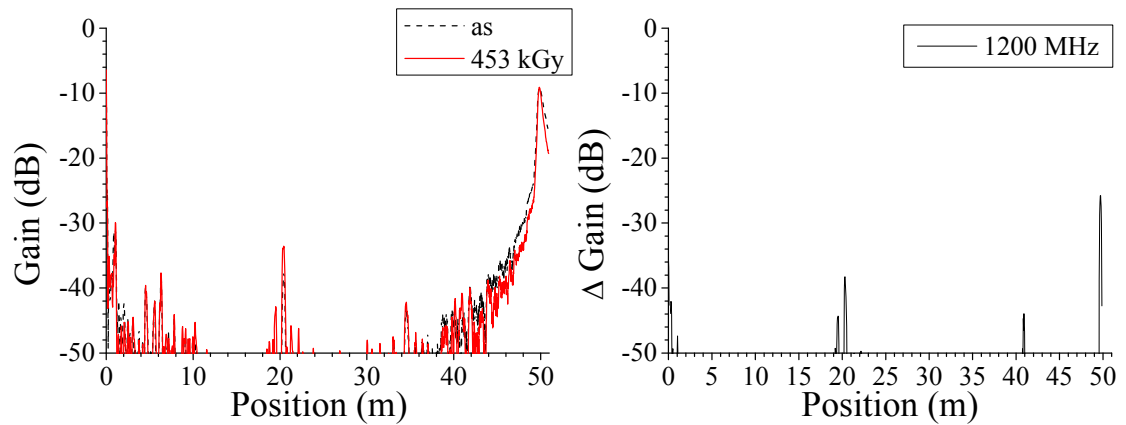
図 3.3.1-89 BIS 法による難燃 EPDM 絶縁ケーブル劣化位置標定結果：120℃、0.5kGy/h、906h、測定端－劣化部：20m、測定条件：熱・放射線同時劣化中、測定周波数域：1～1100MHz、測定反対側端子：開放



(i)位置標定結果

(ii) 差分

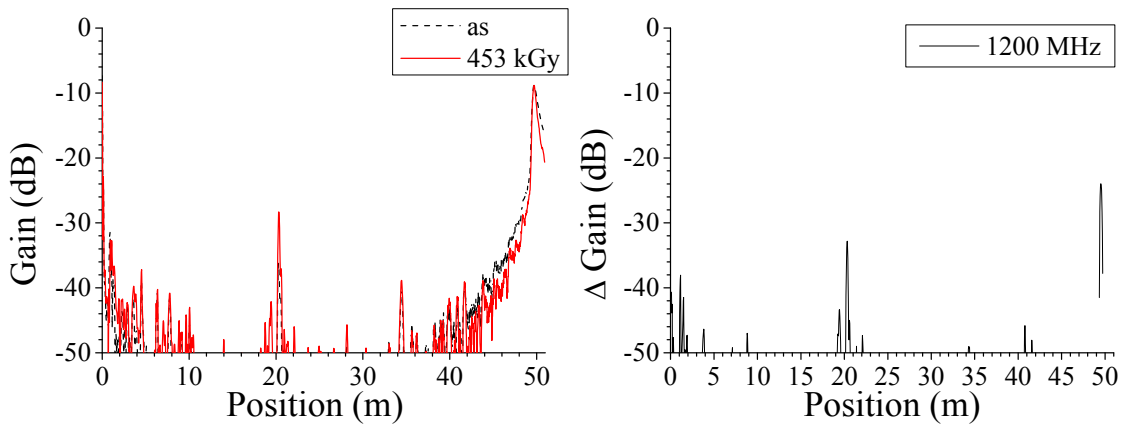
(a)測定端子：黒－赤



(i)位置標定結果

(ii) 差分

(b)測定端子：黒－白



(i)位置標定結果

(ii) 差分

(c)測定端子：赤－白

図 3. 3. 1-90 BIS 法による難燃 EPDM 絶縁ケーブル劣化位置標定結果：120℃、0. 5kGy/h、906h、測定端－劣化部：20m、測定条件：熱・放射線同時劣化中、測定周波数域：1～1200MHz、測定反対側端子：開放

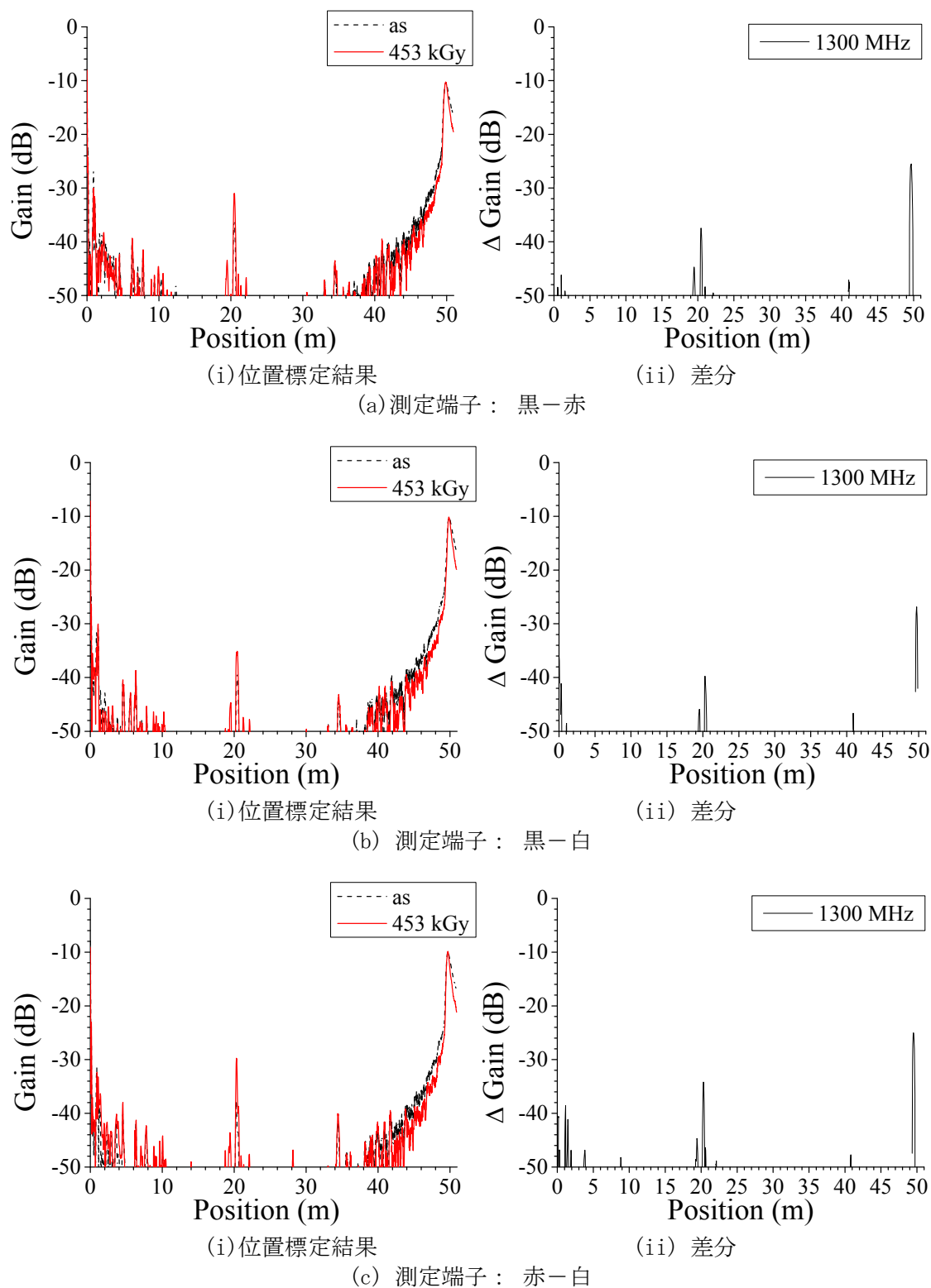
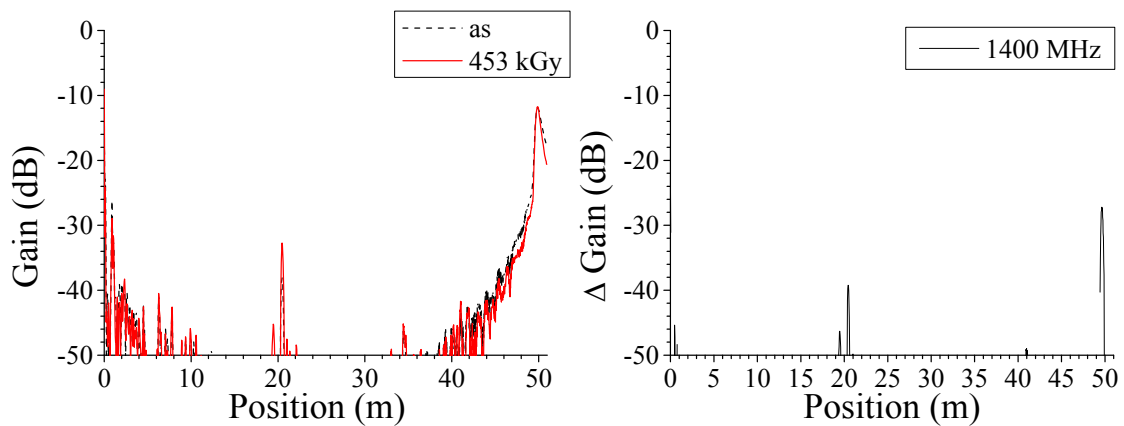


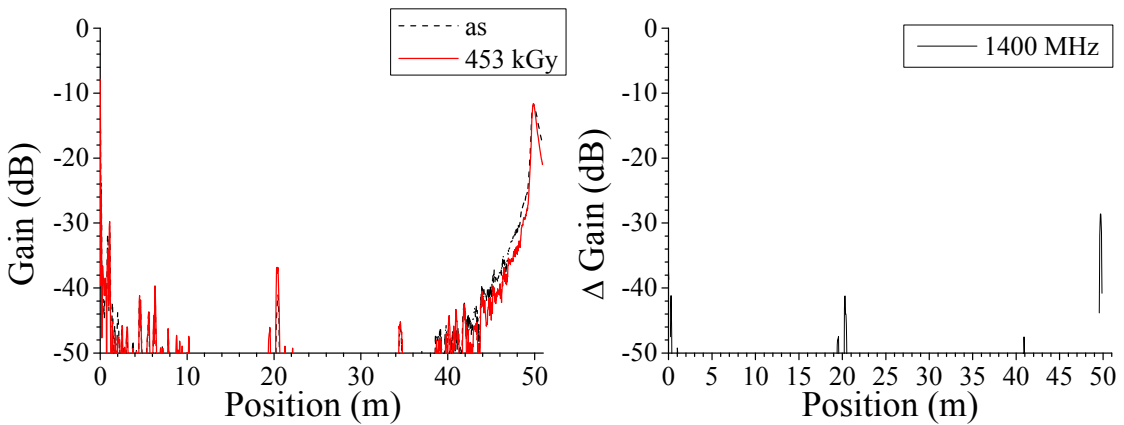
図 3.3.1-91 BIS 法による難燃 EPDM 絶縁ケーブル劣化位置標定結果：120℃、0.5kGy/h、906h、測定端－劣化部：20m、測定条件：熱・放射線同時劣化中、測定周波数域：1～1300MHz、測定反対側端子：開放



(i)位置標定結果

(ii) 差分

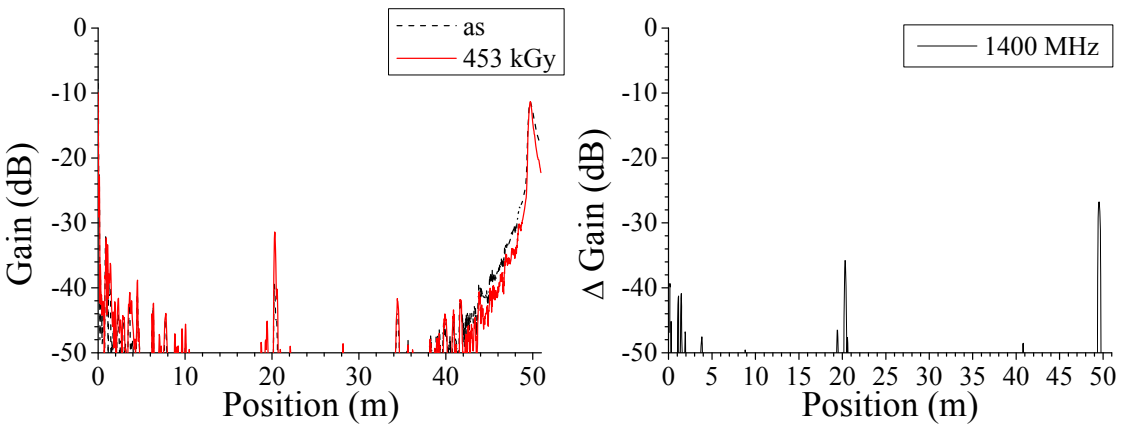
(a)測定端子：黒－赤



(i)位置標定結果

(ii) 差分

(b)測定端子：黒－白



(i)位置標定結果

(ii) 差分

(c)測定端子：赤－白

図 3. 3. 1-92 BIS 法による難燃 EPDM 絶縁ケーブル劣化位置標定結果：120℃、0. 5kGy/h、906h、測定端－劣化部：20m、測定条件：熱・放射線同時劣化中、測定周波数域：1～1400MHz、測定反対側端子：開放

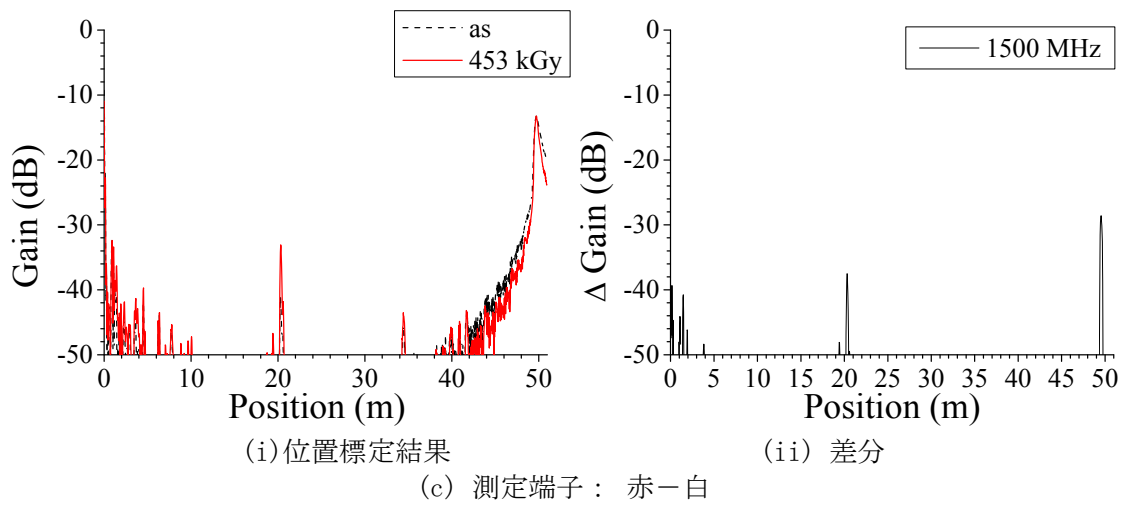
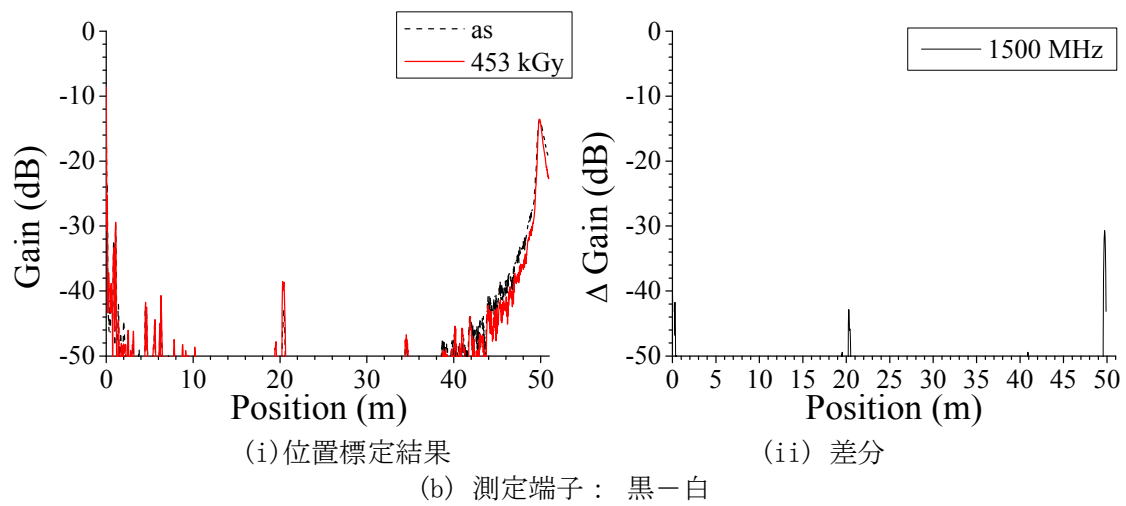
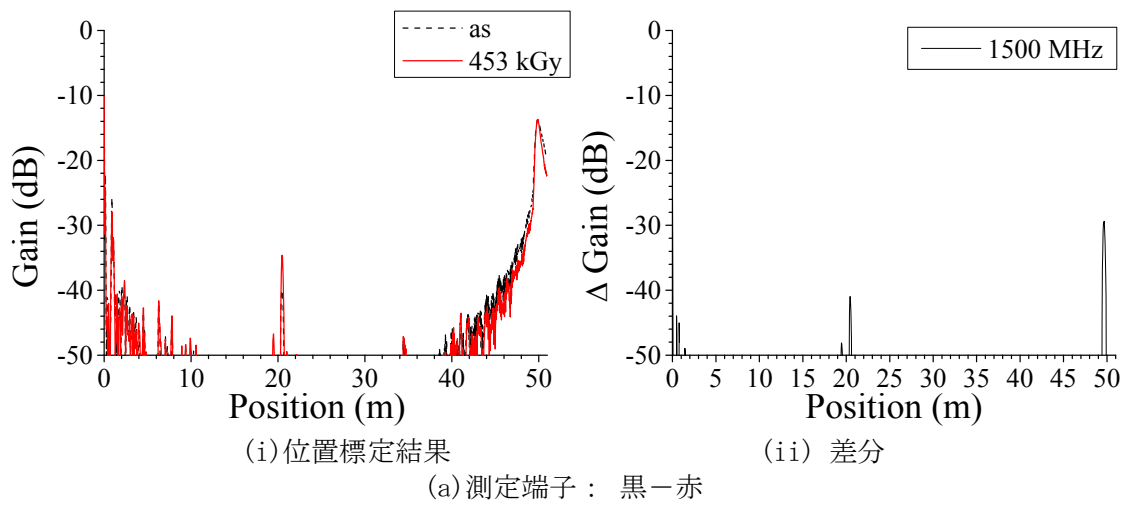


図 3.3.1-93 BIS 法による難燃 EPDM 絶縁ケーブル劣化位置標定結果：120℃、0.5kGy/h、906h、測定端—劣化部：20m、測定条件：熱・放射線同時劣化中、測定周波数域：1～1500MHz、測定反対側端子：開放

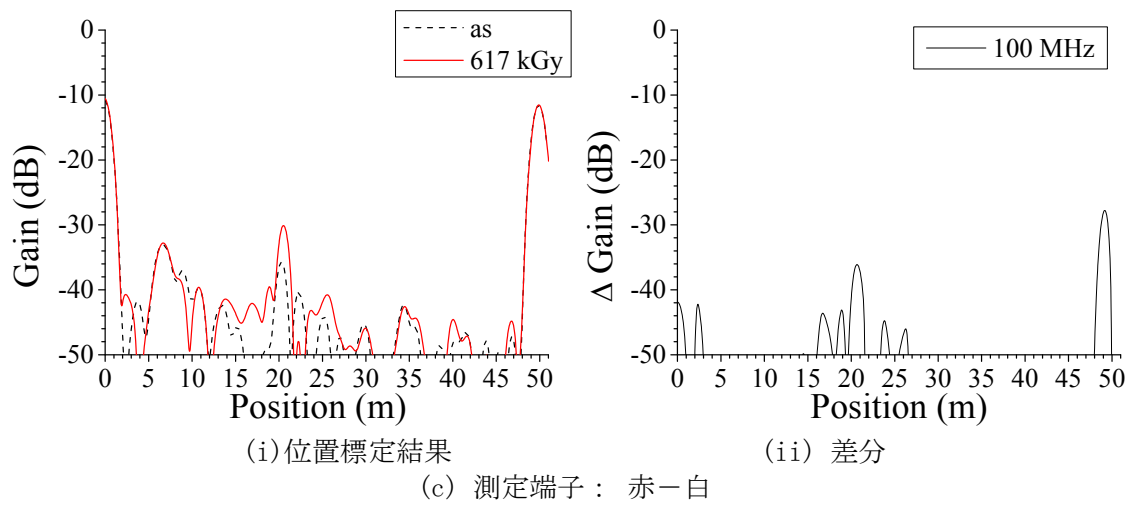
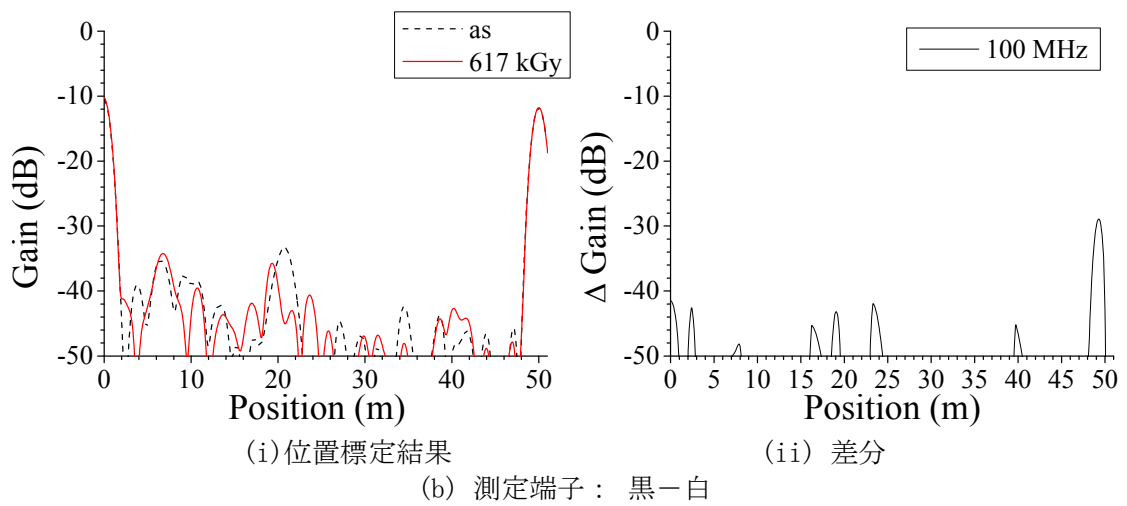
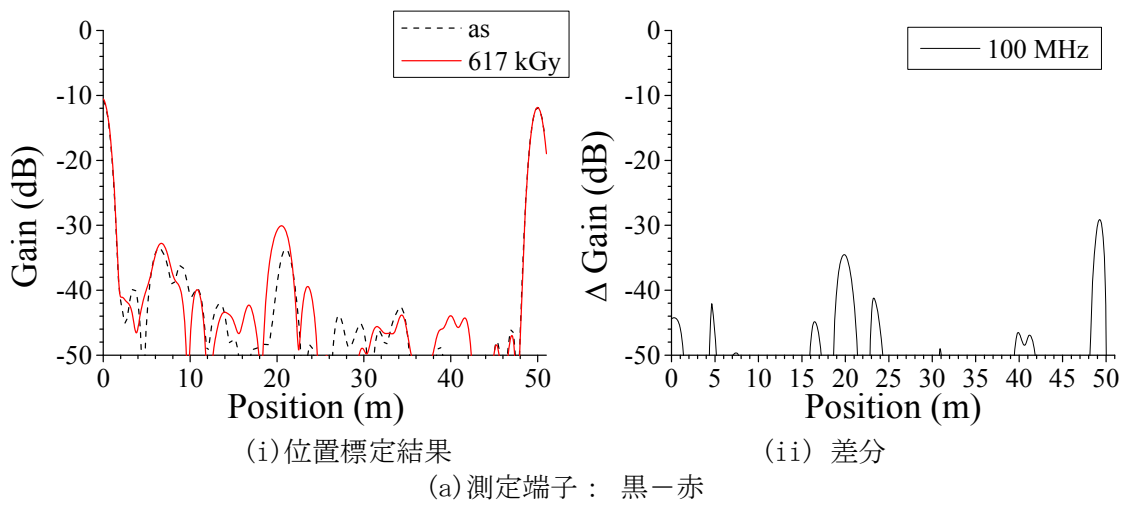
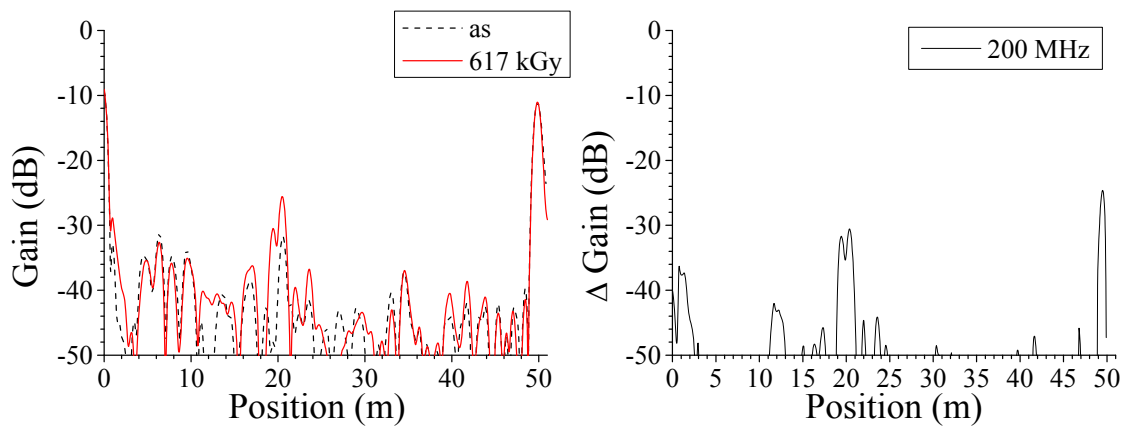


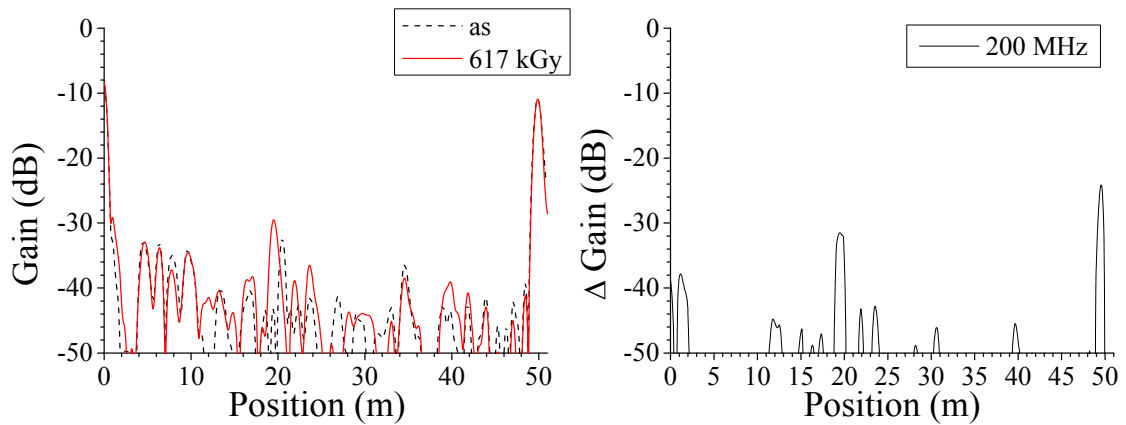
図 3.3.1-94 BIS 法による難燃 EPDM 絶縁ケーブル劣化位置標定結果：120℃、0.5kGy/h、1233h、測定端—劣化部：20m、測定条件：熱・放射線同時劣化中、測定周波数域：1～100MHz、測定反対側端子：開放



(i) 位置標定結果

(ii) 差分

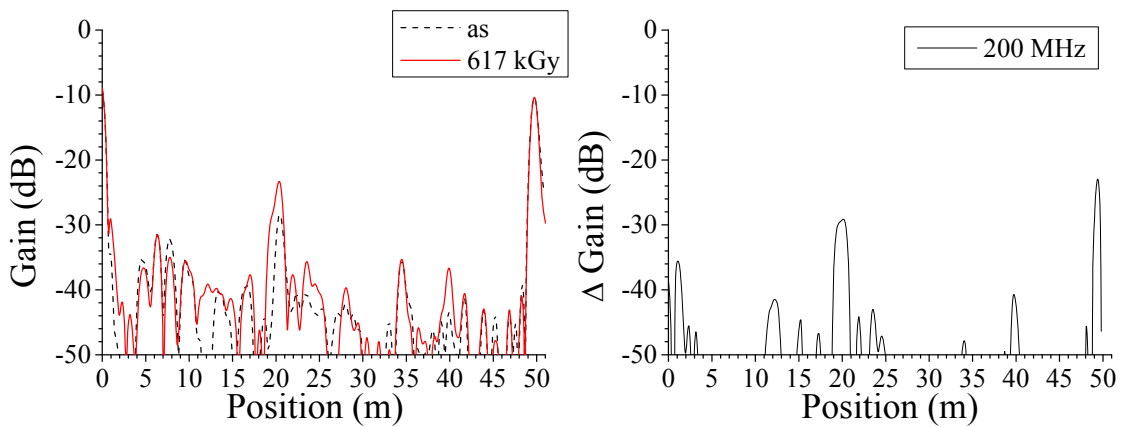
(a) 測定端子：黒－赤



(i) 位置標定結果

(ii) 差分

(b) 測定端子：黒－白

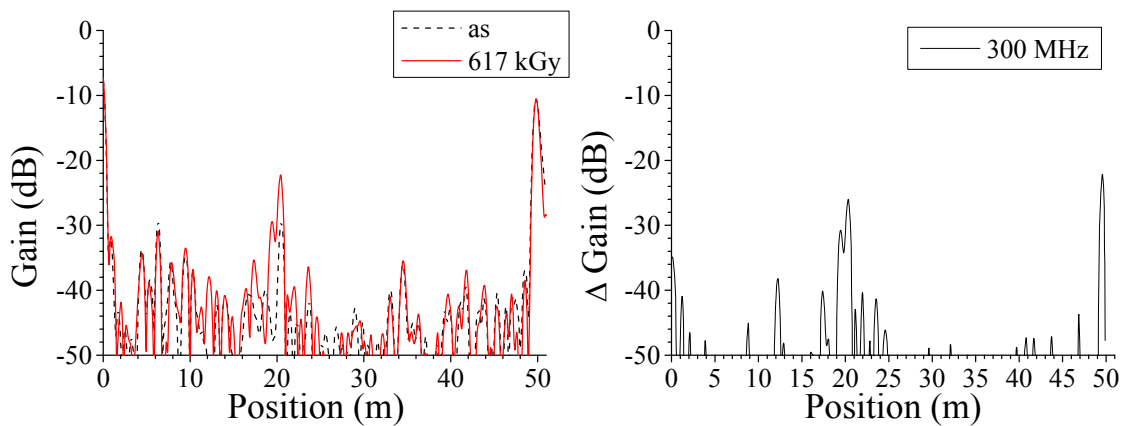


(i) 位置標定結果

(ii) 差分

(c) 測定端子：赤－白

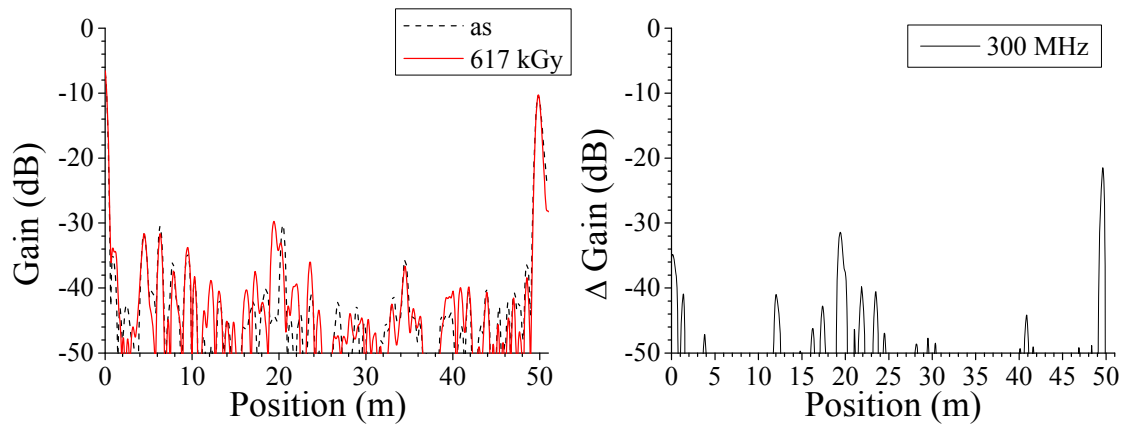
図 3.3.1-95 BIS 法による難燃 EPDM 絶縁ケーブル劣化位置標定結果：120℃、0.5kGy/h、1233h、測定端－劣化部：20m、測定条件：熱・放射線同時劣化中、測定周波数域：1～200MHz、測定反対側端子：開放



(i)位置標定結果

(ii) 差分

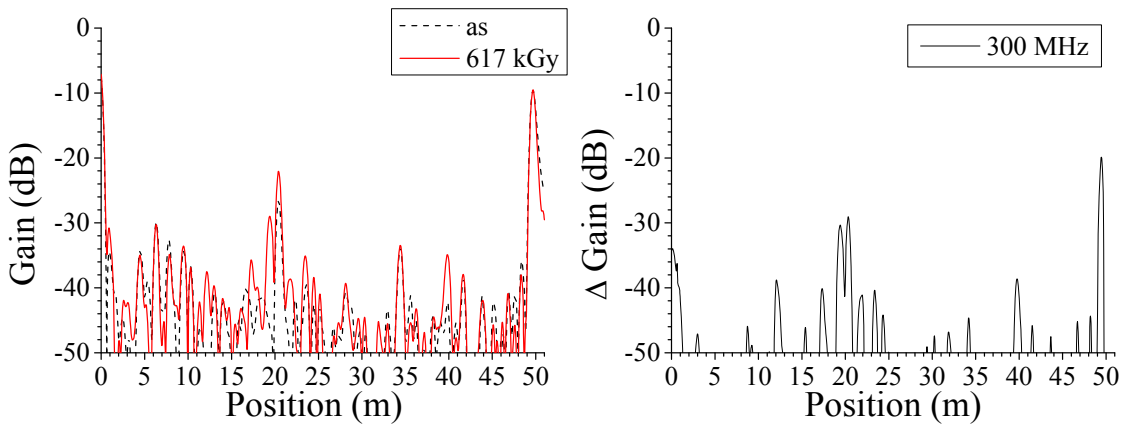
(a)測定端子：黒－赤



(i)位置標定結果

(ii) 差分

(b)測定端子：黒－白

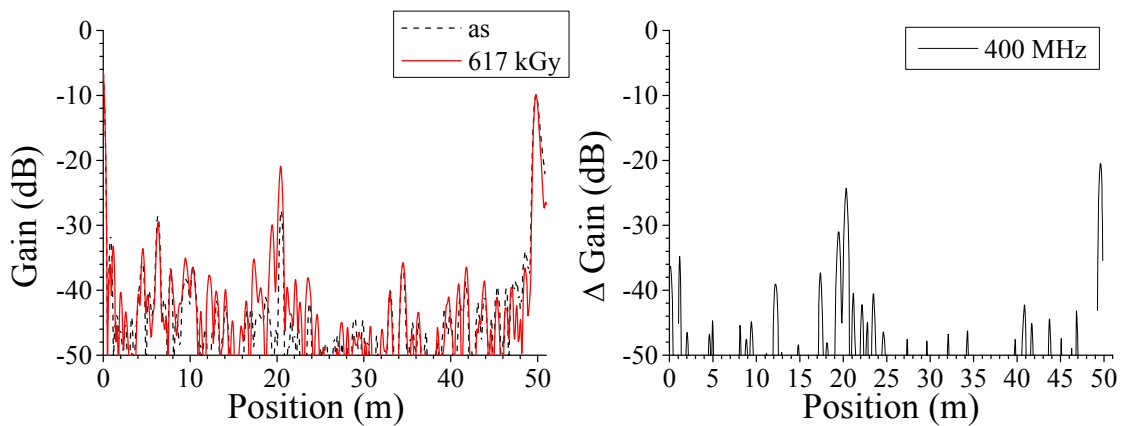


(i)位置標定結果

(ii) 差分

(c)測定端子：赤－白

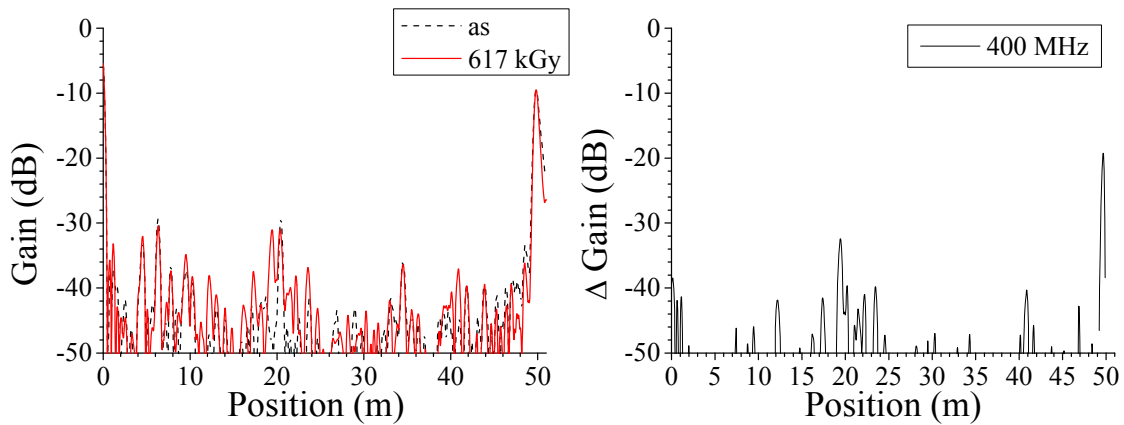
図 3.3.1-96 BIS 法による難燃 EPDM 絶縁ケーブル劣化位置標定結果：120℃、0.5kGy/h、1233h、測定端－劣化部：20m、測定条件：熱・放射線同時劣化中、測定周波数域：1～300MHz、測定反対側端子：開放



(i) 位置標定結果

(ii) 差分

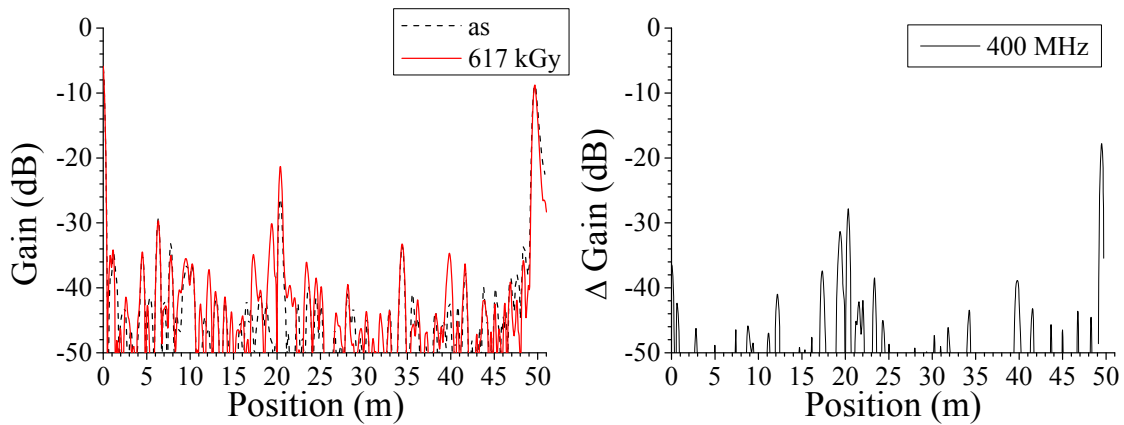
(a) 測定端子：黒-赤



(i) 位置標定結果

(ii) 差分

(b) 測定端子：黒-白

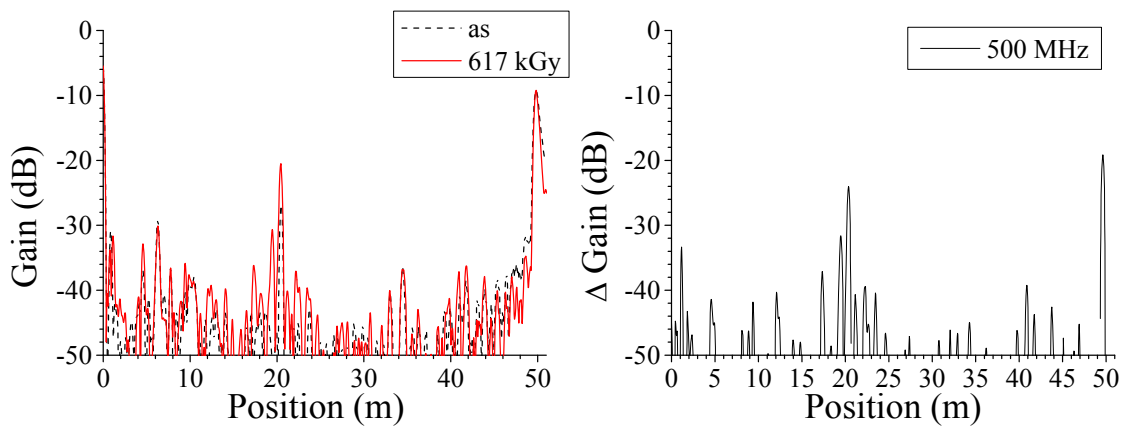


(i) 位置標定結果

(ii) 差分

(c) 測定端子：赤-白

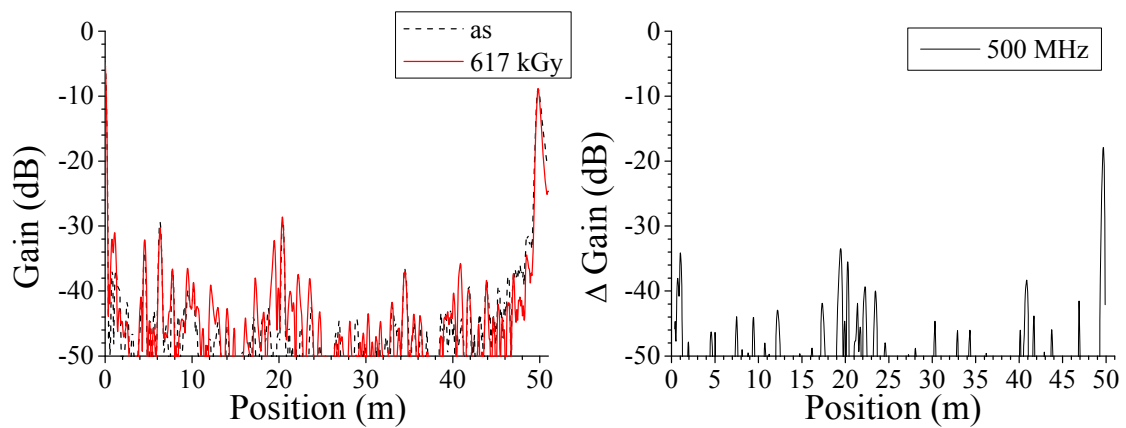
図 3.3.1-97 BIS 法による難燃 EPDM 絶縁ケーブル劣化位置標定結果：120℃、0.5kGy/h、1233h、測定端-劣化部：20m、測定条件：熱・放射線同時劣化中、測定周波数域：1~400MHz、測定反対側端子：開放



(i)位置標定結果

(ii) 差分

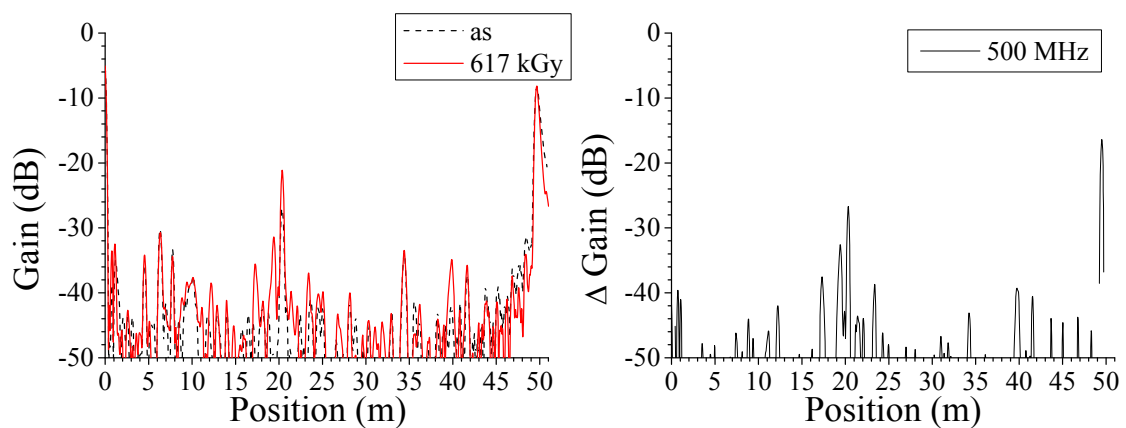
(a)測定端子：黒－赤



(i)位置標定結果

(ii) 差分

(b)測定端子：黒－白

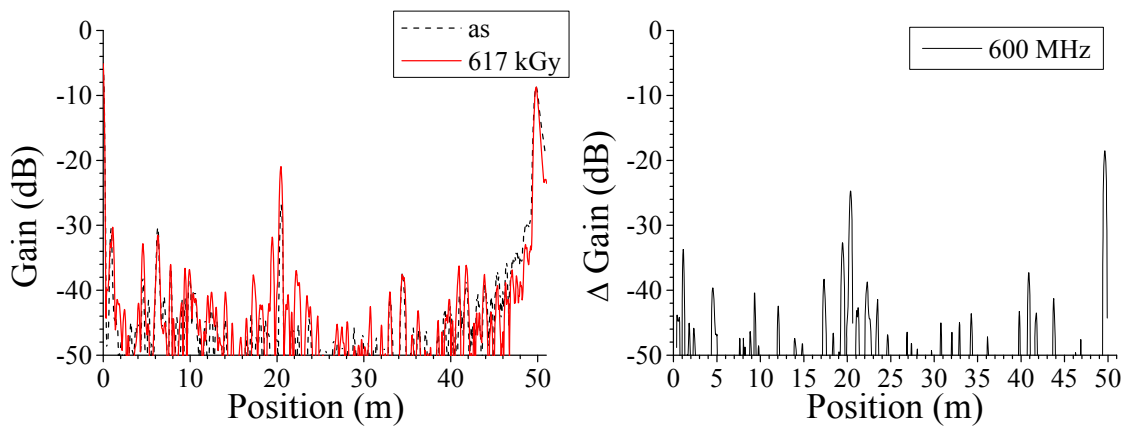


(i)位置標定結果

(ii) 差分

(c)測定端子：赤－白

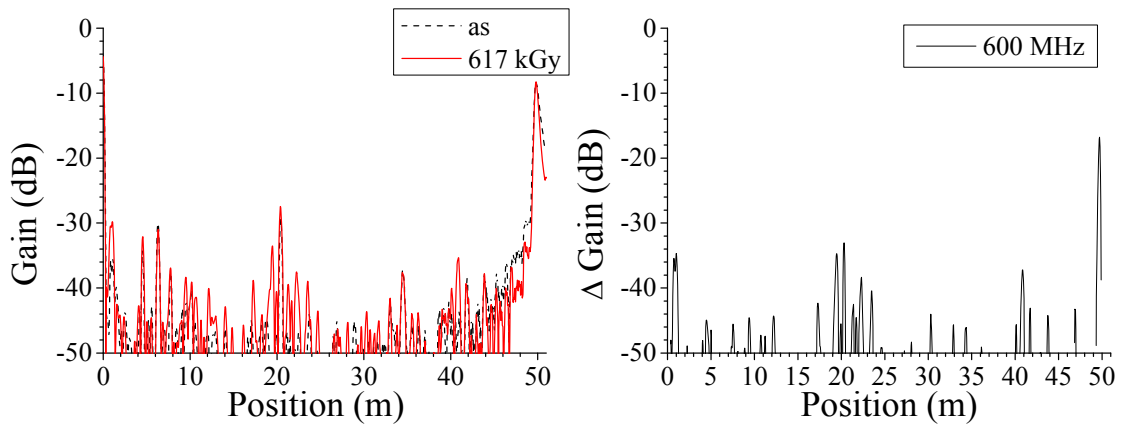
図 3.3.1-98 BIS 法による難燃 EPDM 絶縁ケーブル劣化位置標定結果：120℃、0.5kGy/h、1233h、測定端－劣化部：20m、測定条件：熱・放射線同時劣化中、測定周波数域：1～500MHz、測定反対側端子：開放



(i)位置標定結果

(ii) 差分

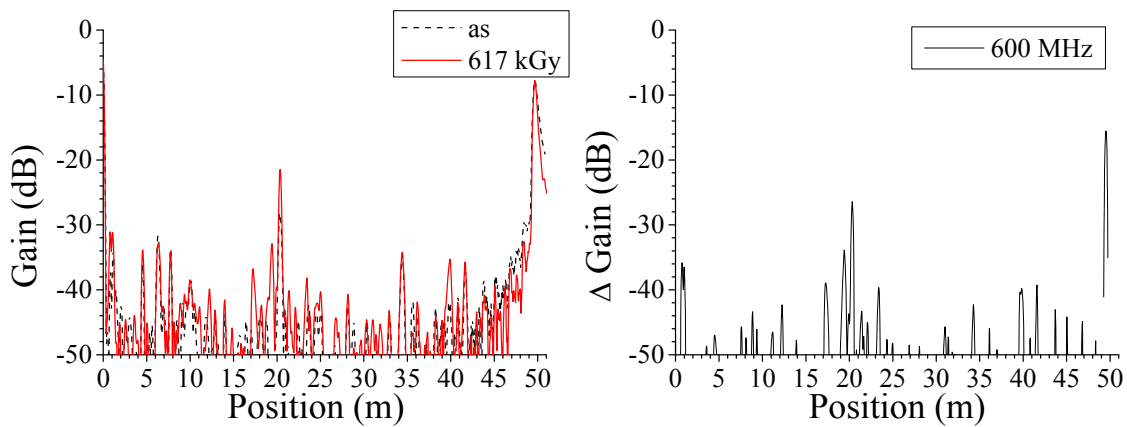
(a)測定端子：黒－赤



(i)位置標定結果

(ii) 差分

(b)測定端子：黒－白



(i)位置標定結果

(ii) 差分

(c)測定端子：赤－白

図 3. 3. 1-99 BIS 法による難燃 EPDM 絶縁ケーブル劣化位置標定結果：120℃、0.5kGy/h、1233h、測定端－劣化部：20m、測定条件：熱・放射線同時劣化中、測定周波数域：1～600MHz、測定反対側端子：開放

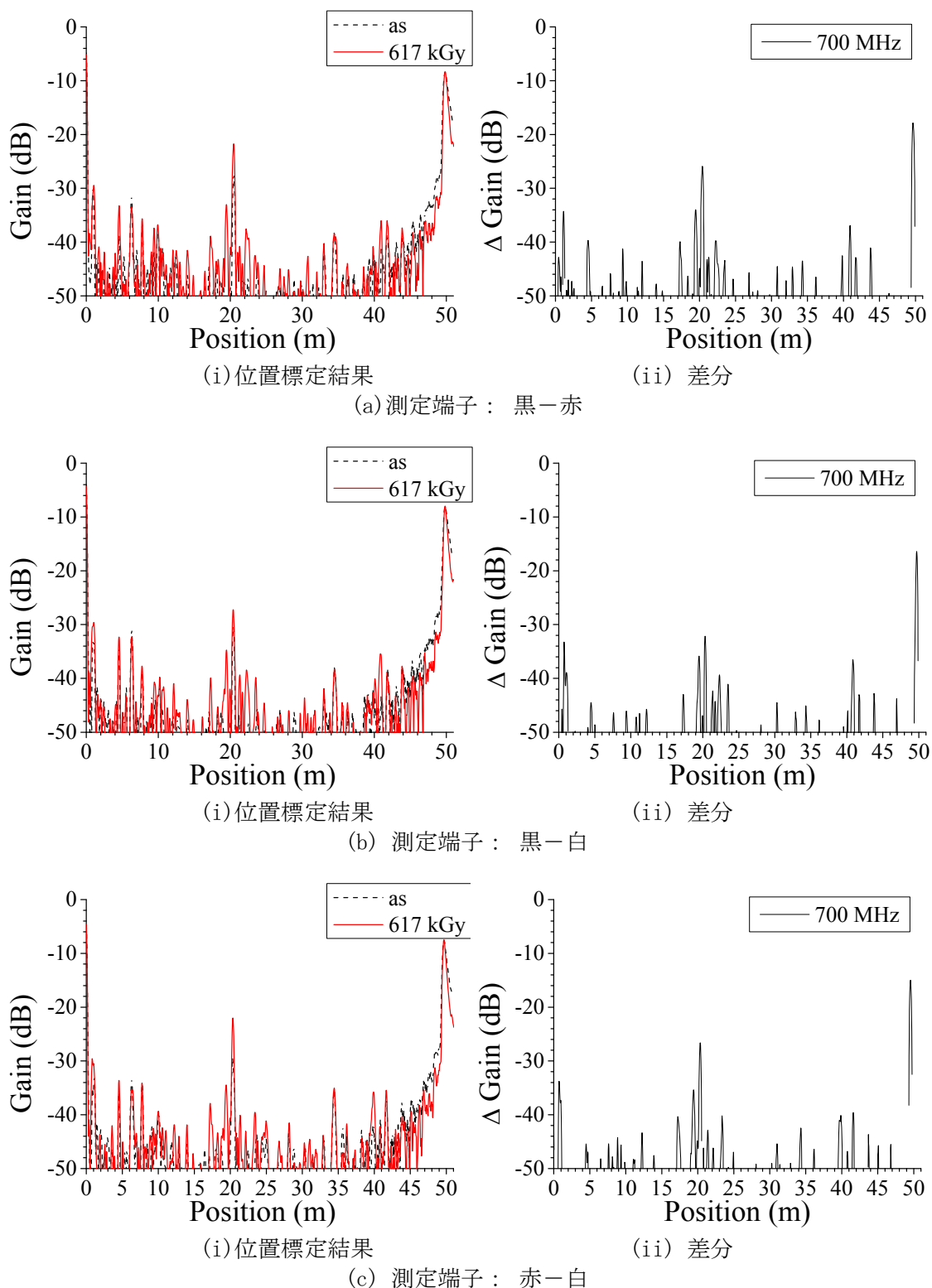
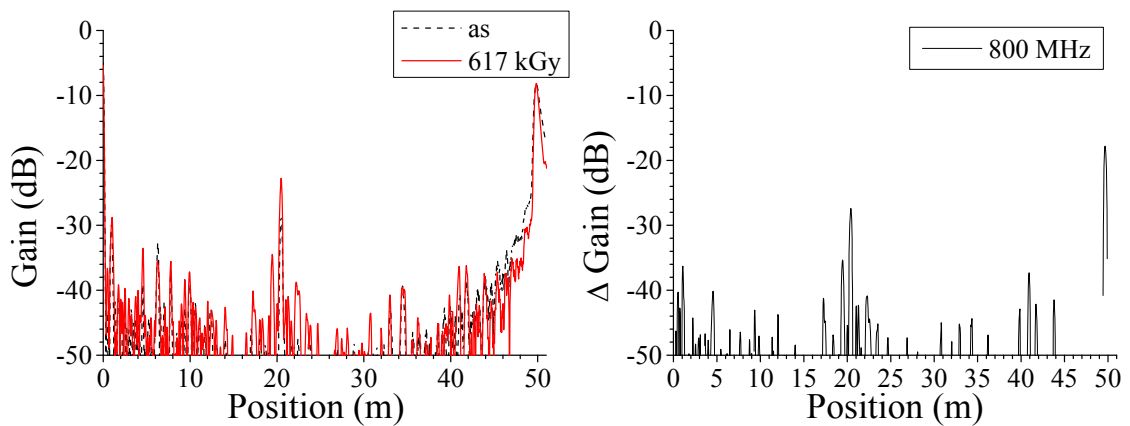


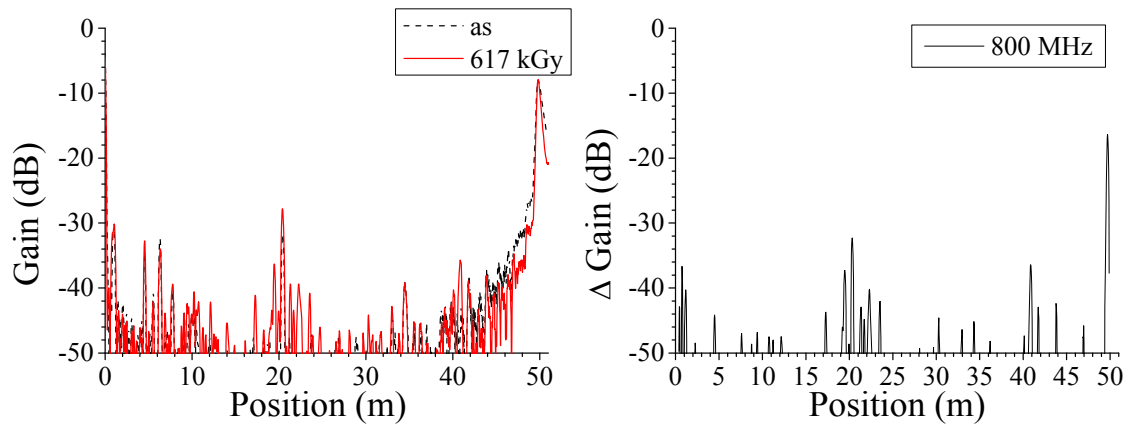
図 3.3.1-100 BIS 法による難燃 EPDM 絶縁ケーブル劣化位置標定結果：120℃、0.5kGy/h、1233h、測定端－劣化部：20m、測定条件：熱・放射線同時劣化中、測定周波数域：1～700MHz、測定反対側端子：開放



(i)位置標定結果

(ii) 差分

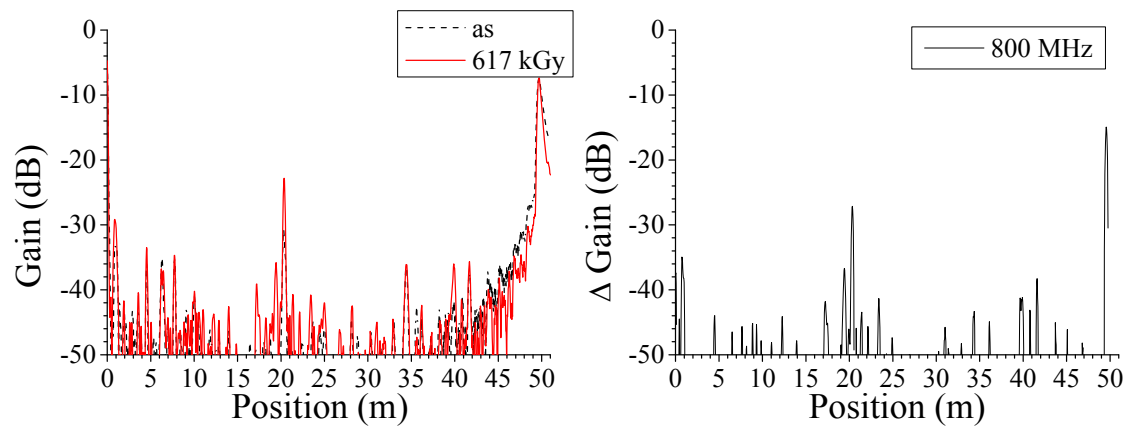
(a) 測定端子： 黒－赤



(i)位置標定結果

(ii) 差分

(b) 測定端子： 黒－白

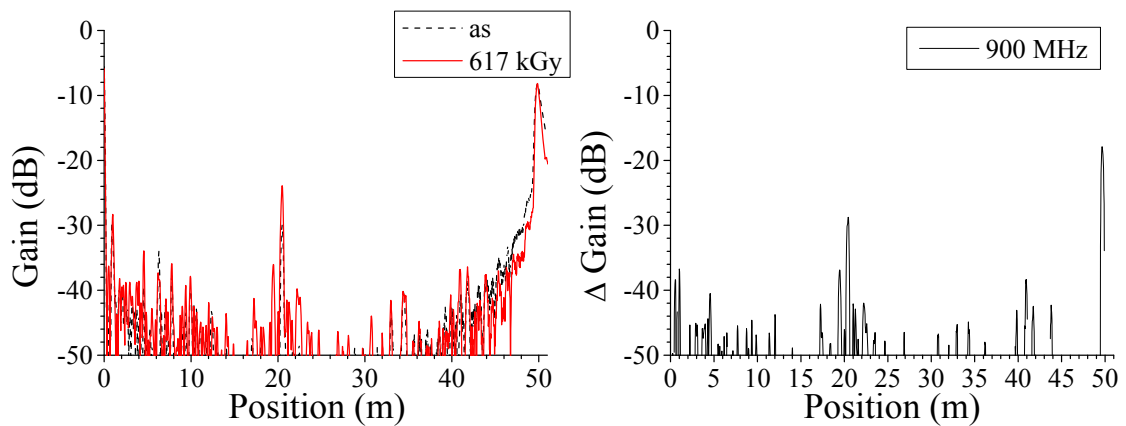


(i)位置標定結果

(ii) 差分

(c) 測定端子： 赤－白

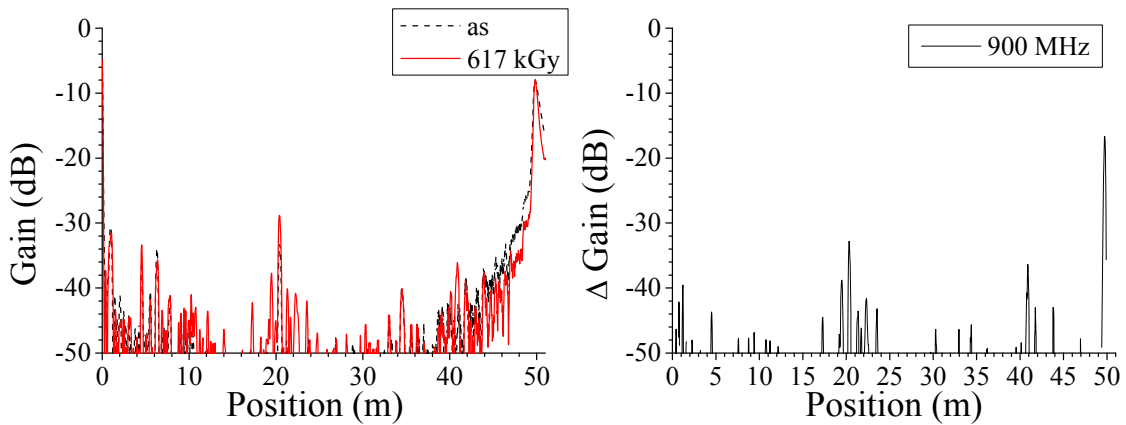
図 3. 3. 1-101 BIS 法による難燃 EPDM 絶縁ケーブル劣化位置標定結果：120℃、0. 5kGy/h、1233h、測定端－劣化部：20m、測定条件：熱・放射線同時劣化中、測定周波数域：1～800MHz、測定反対側端子：開放



(i)位置標定結果

(ii) 差分

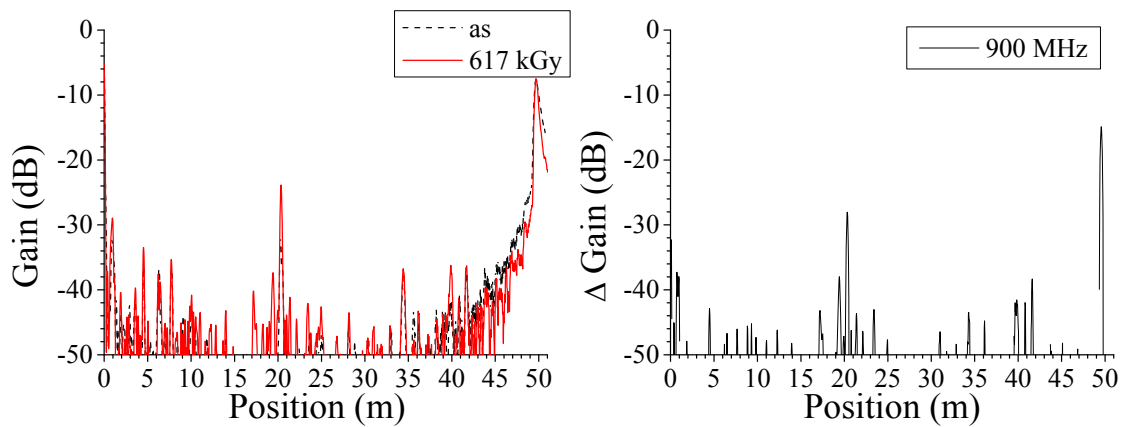
(a)測定端子：黒-赤



(i)位置標定結果

(ii) 差分

(b)測定端子：黒-白



(i)位置標定結果

(ii) 差分

(c)測定端子：赤-白

図 3.3.1-102 BIS 法による難燃 EPDM 絶縁ケーブル劣化位置標定結果：120℃、0.5kGy/h、1233h、測定端—劣化部：20m、測定条件：熱・放射線同時劣化中、測定周波数域：1～900MHz、測定反対側端子：開放

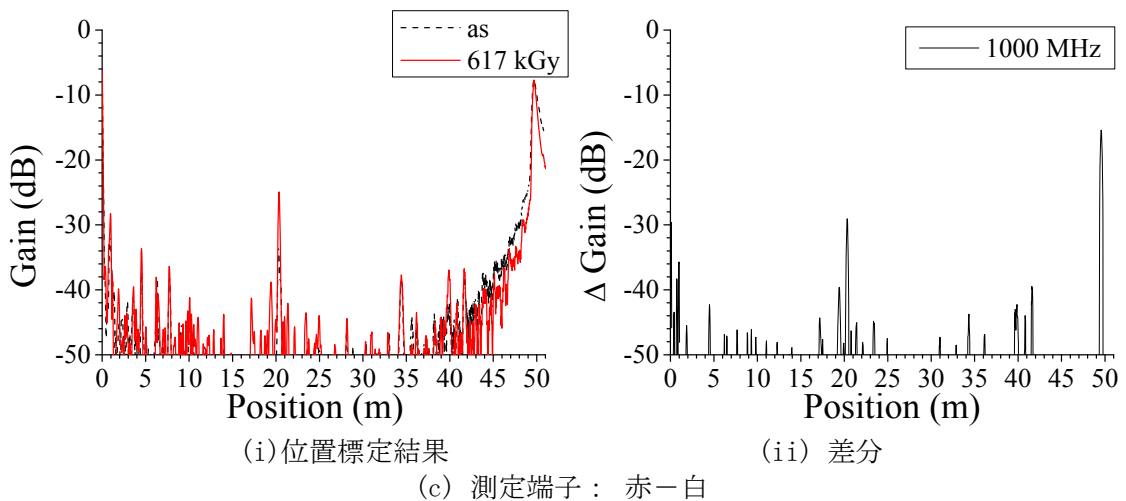
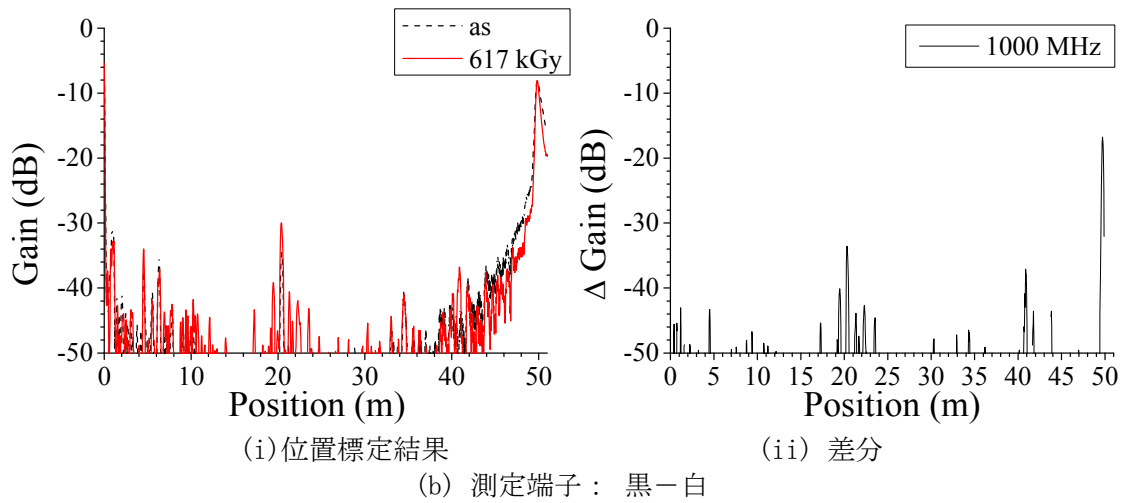
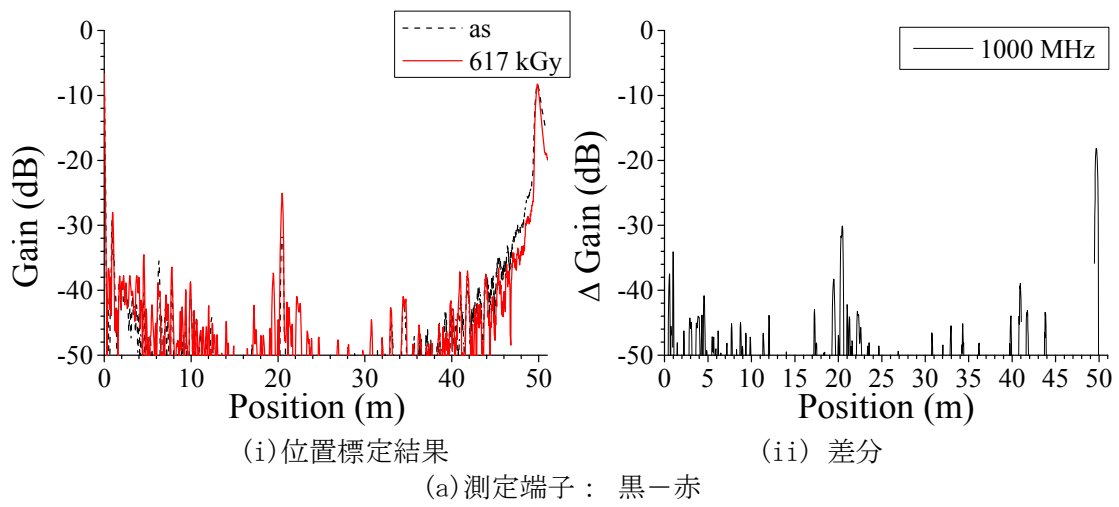


図 3.3.1-103 BIS 法による難燃 EPDM 絶縁ケーブル劣化位置標定結果：120℃、0.5kGy/h、1233h、測定端－劣化部：20m、測定条件：熱・放射線同時劣化中、測定周波数域：1～1000MHz、測定反対側端子：開放

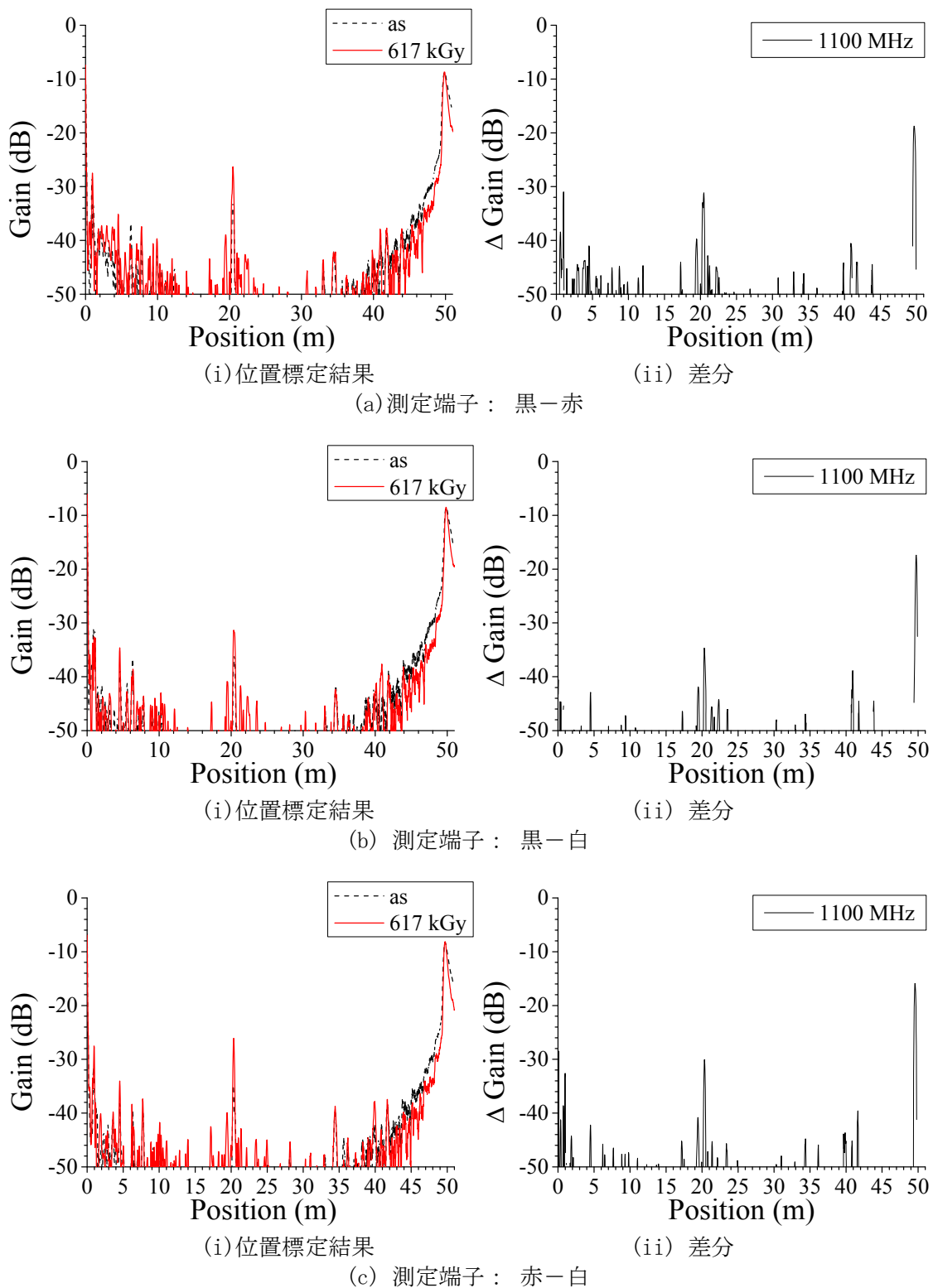


図 3. 3. 1-104 BIS 法による難燃 EPDM 絶縁ケーブル劣化位置標定結果：120℃、0. 5kGy/h、1233h、測定端－劣化部：20m、測定条件：熱・放射線同時劣化中、測定周波数域：1～1100MHz、測定反対側端子：開放

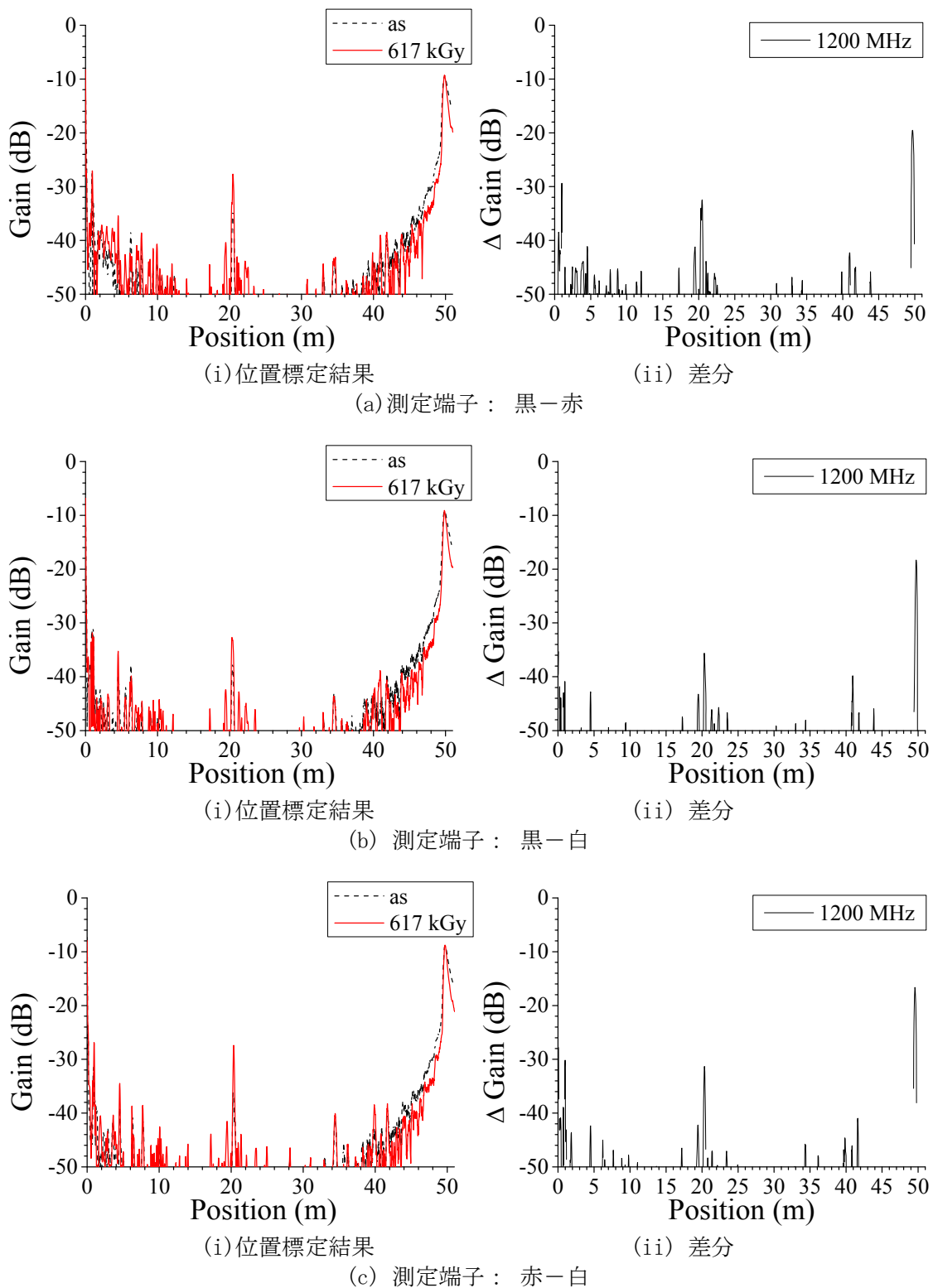


図 3.3.1-105 BIS 法による難燃 EPDM 絶縁ケーブル劣化位置標定結果：120℃、0.5kGy/h、1233h、測定端—劣化部：20m、測定条件：熱・放射線同時劣化中、測定周波数域：1～1200MHz、測定反対側端子：開放

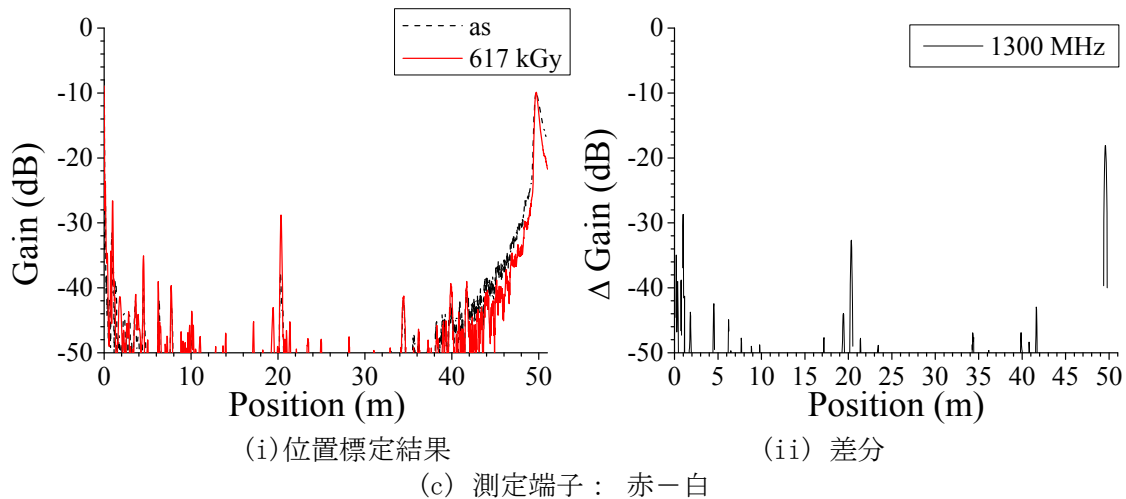
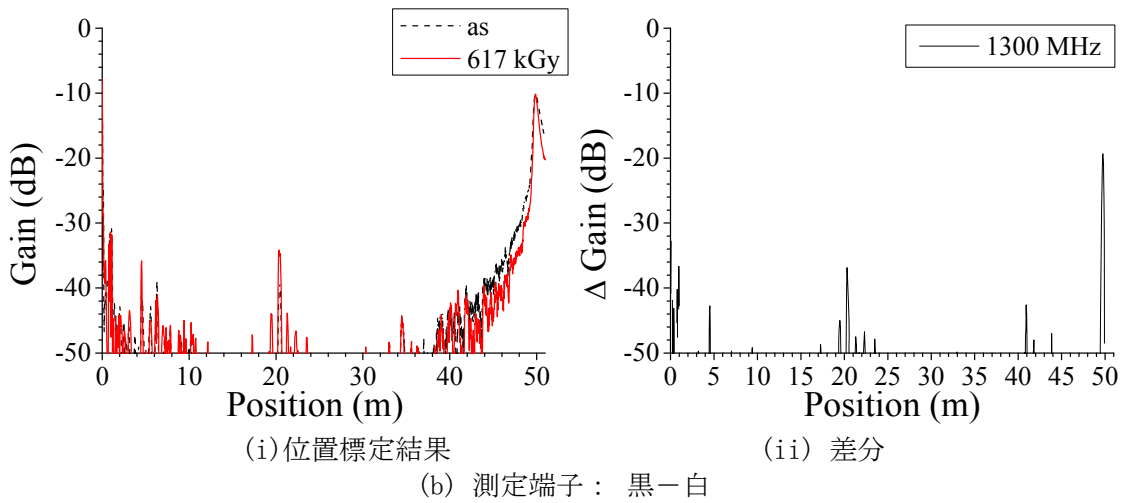
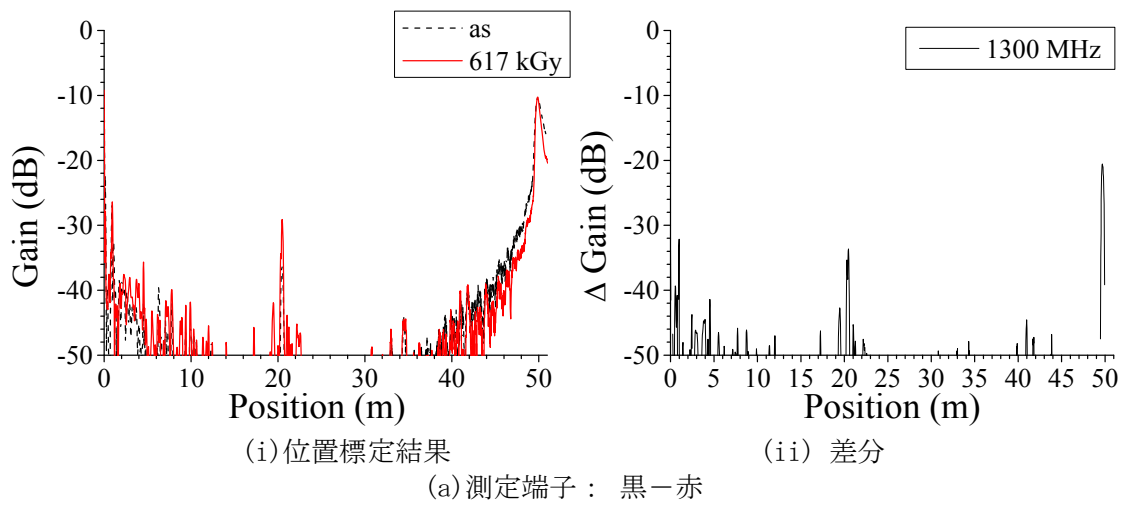


図 3.3.1-106 BIS 法による難燃 EPDM 絶縁ケーブル劣化位置標定結果：120℃、0.5kGy/h、1233h、測定端－劣化部：20m、測定条件：熱・放射線同時劣化中、測定周波数域：1～1300MHz、測定反対側端子：開放

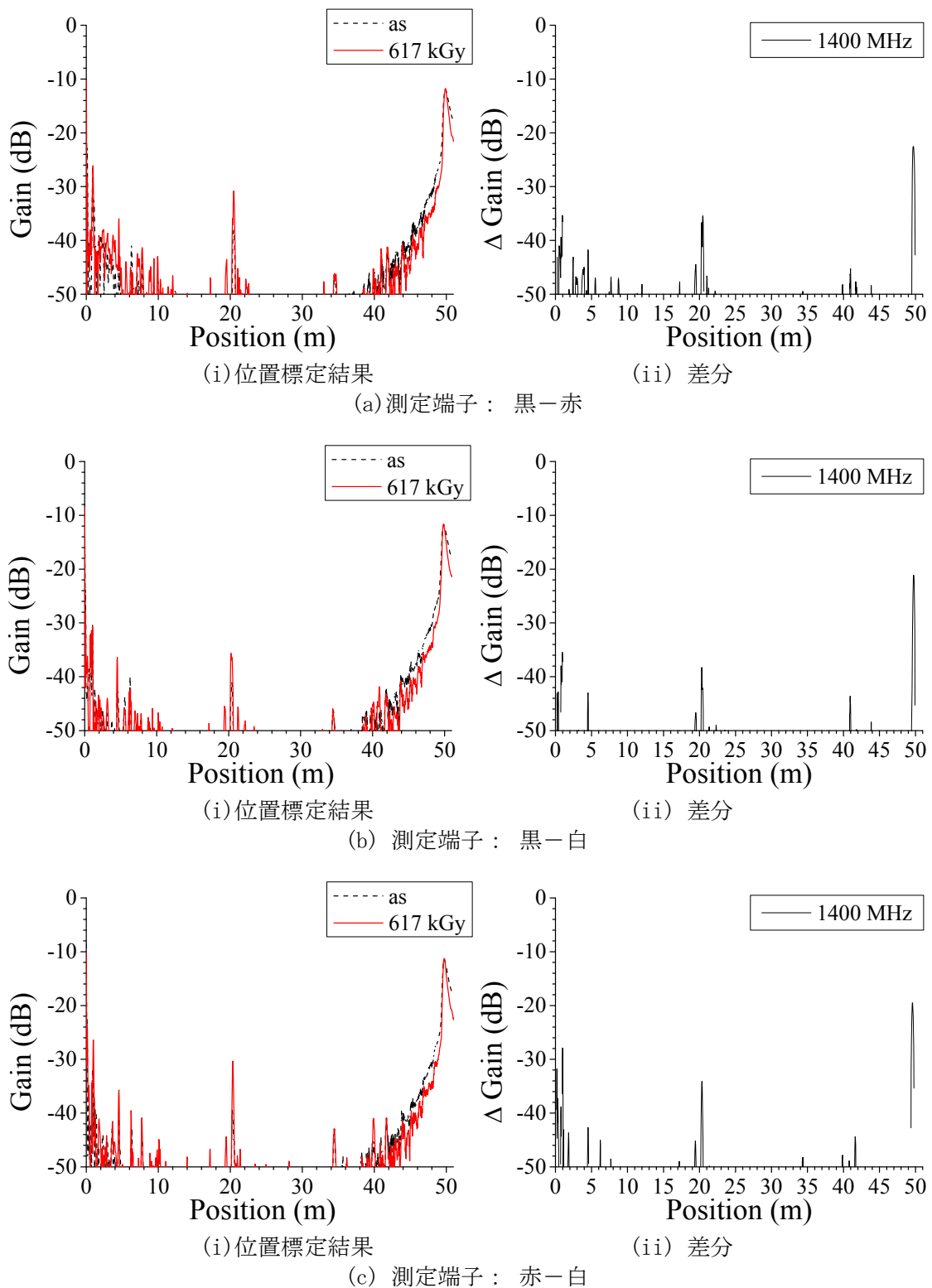


図 3. 3. 1-107 BIS 法による難燃 EPDM 絶縁ケーブル劣化位置標定結果：120℃、0. 5kGy/h、1233h、測定端－劣化部：20m、測定条件：熱・放射線同時劣化中、測定周波数域：1～1400MHz、測定反対側端子：開放

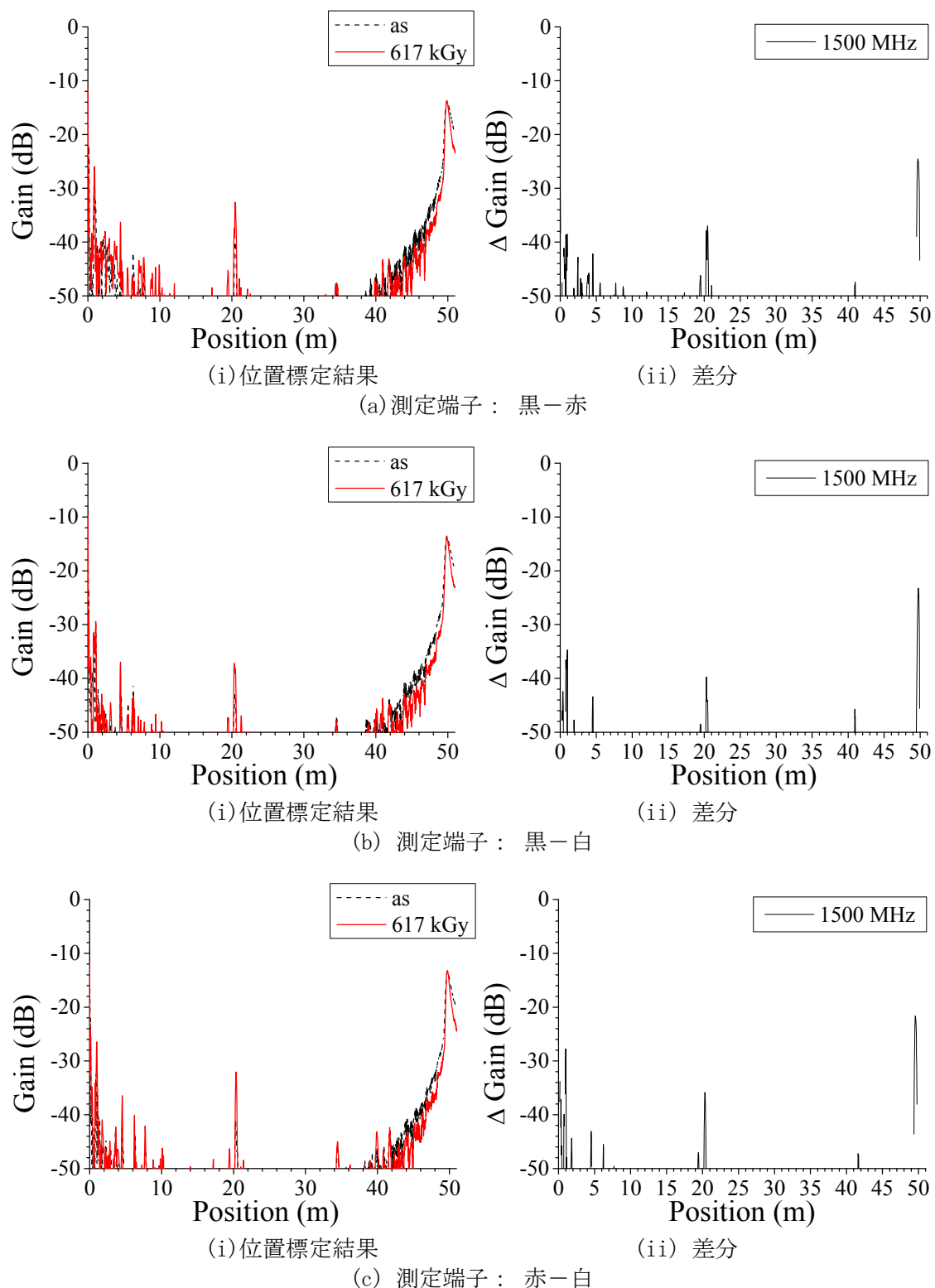
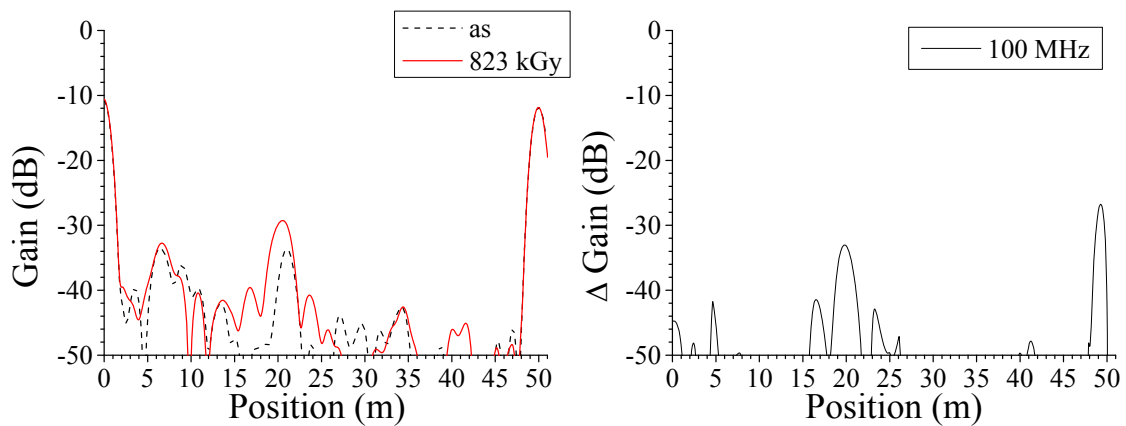


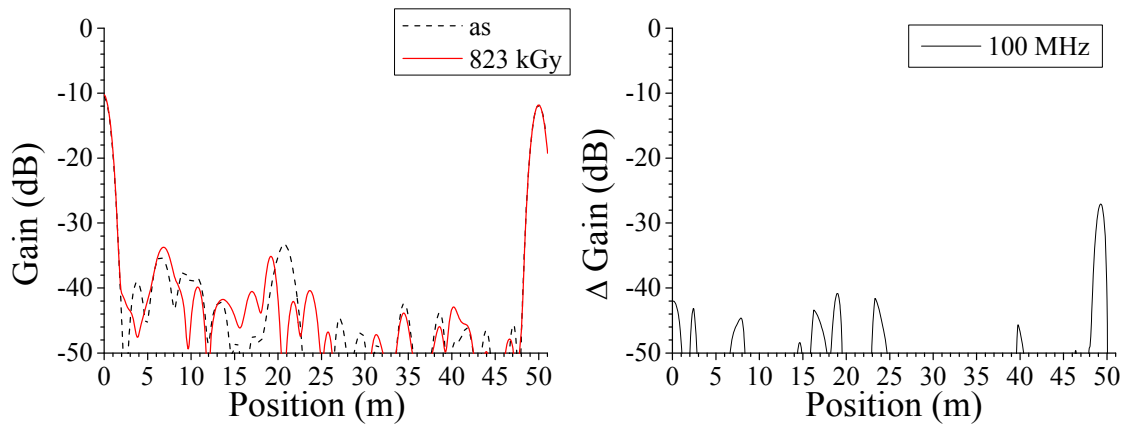
図 3. 3. 1-108 BIS 法による難燃 EPDM 絶縁ケーブル劣化位置標定結果：120℃、0. 5kGy/h、1233h、測定端—劣化部：20m、測定条件：熱・放射線同時劣化中、測定周波数域：1～1500MHz、測定反対側端子：開放



(i)位置標定結果

(ii) 差分

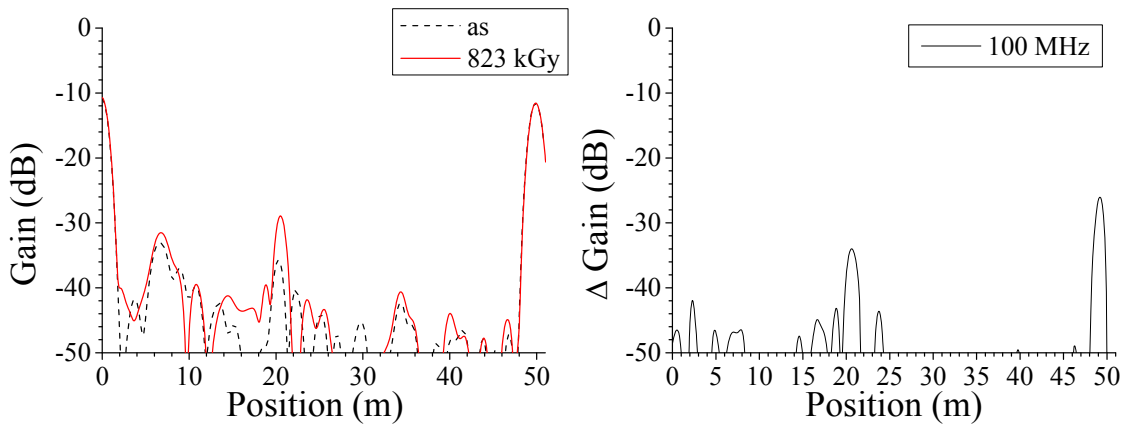
(a) 測定端子：黒－赤



(i)位置標定結果

(ii) 差分

(b) 測定端子：黒－白



(i)位置標定結果

(ii) 差分

(c) 測定端子：赤－白

図 3. 3. 1-109 BIS 法による難燃 EPDM 絶縁ケーブル劣化位置標定結果：120℃、0. 5kGy/h、1645h、測定端－劣化部：20m、測定条件：熱・放射線同時劣化中、測定周波数域：1～100MHz、測定反対側端子：開放

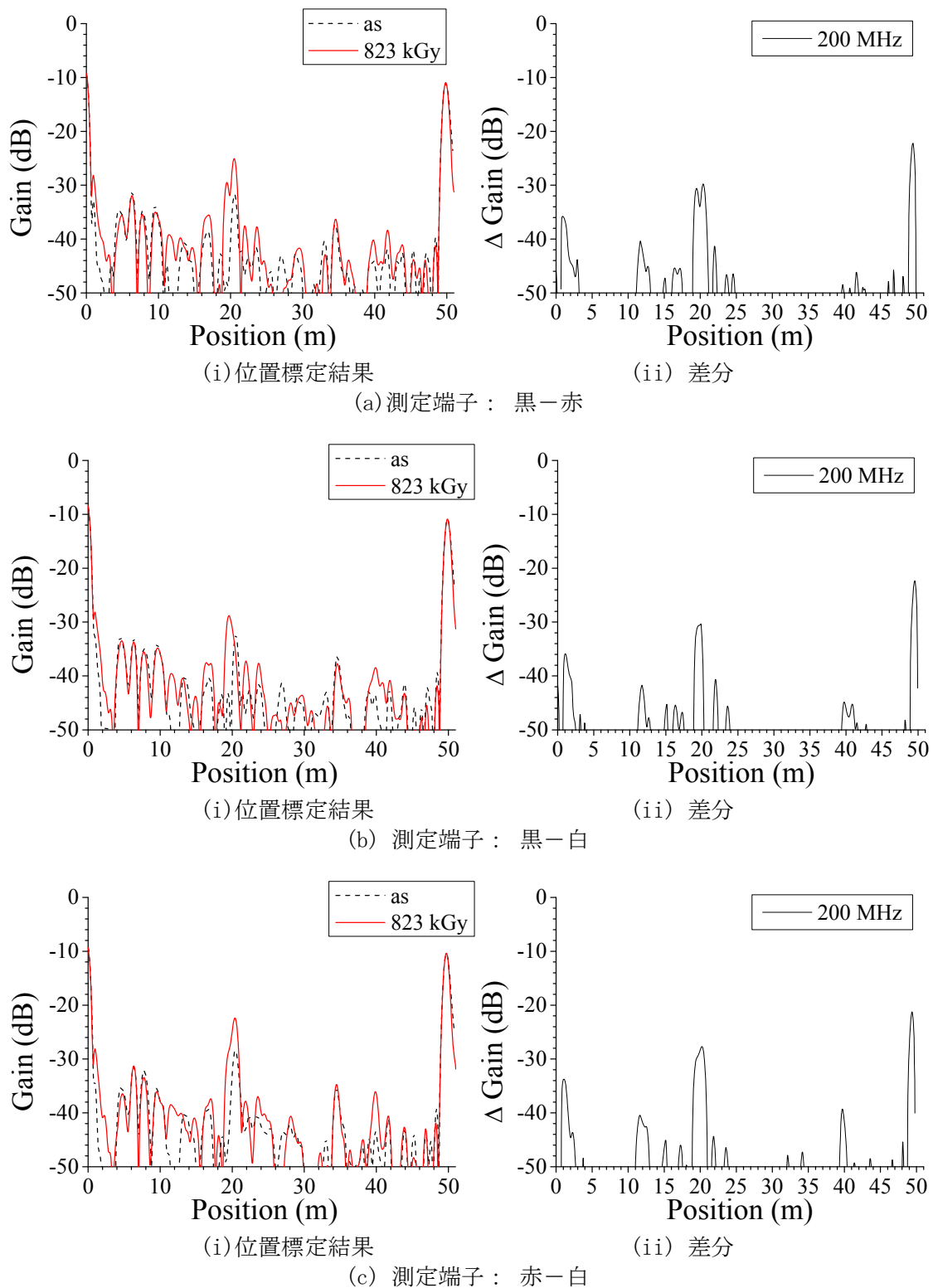
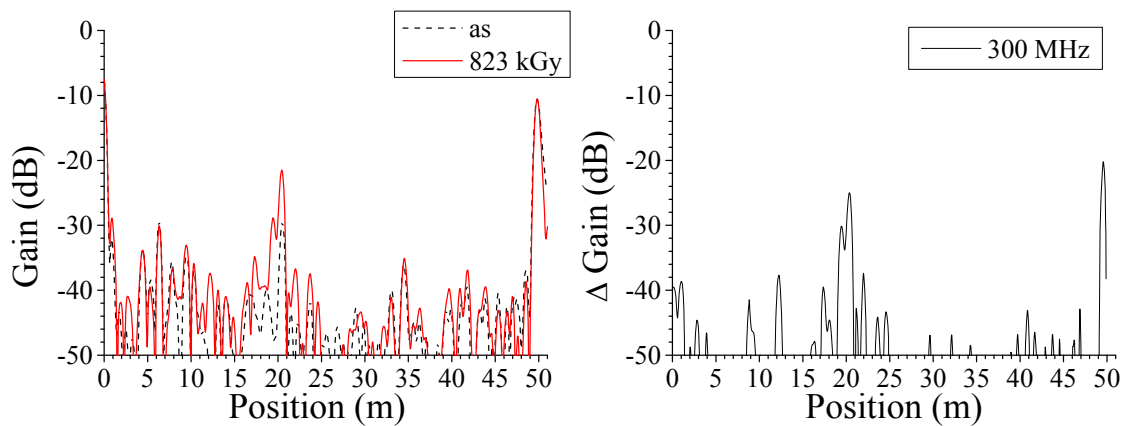


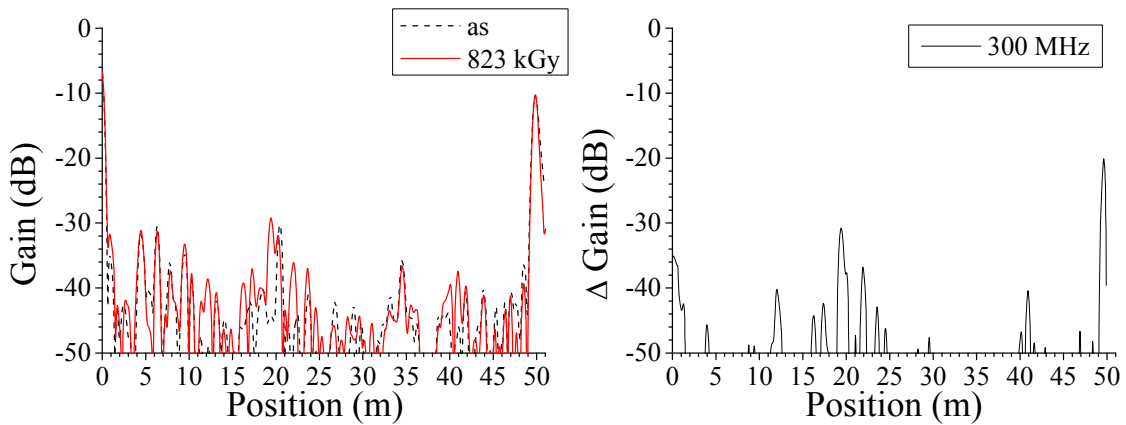
図 3.3.1-110 BIS 法による難燃 EPDM 絶縁ケーブル劣化位置標定結果：120℃、0.5kGy/h、1645h、測定端—劣化部：20m、測定条件：熱・放射線同時劣化中、測定周波数域：1～200MHz、測定反対側端子：開放



(i)位置標定結果

(ii) 差分

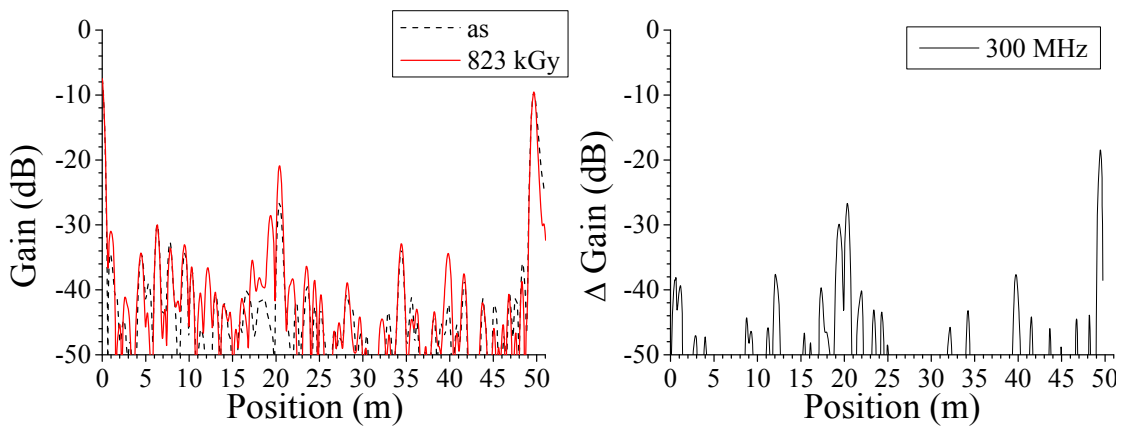
(a) 測定端子： 黒-赤



(i)位置標定結果

(ii) 差分

(b) 測定端子： 黒-白

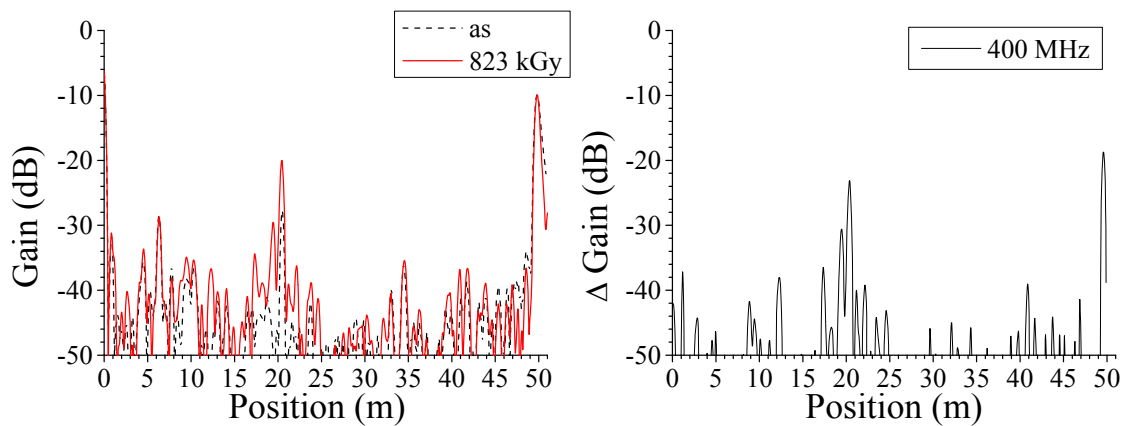


(i)位置標定結果

(ii) 差分

(c) 測定端子： 赤-白

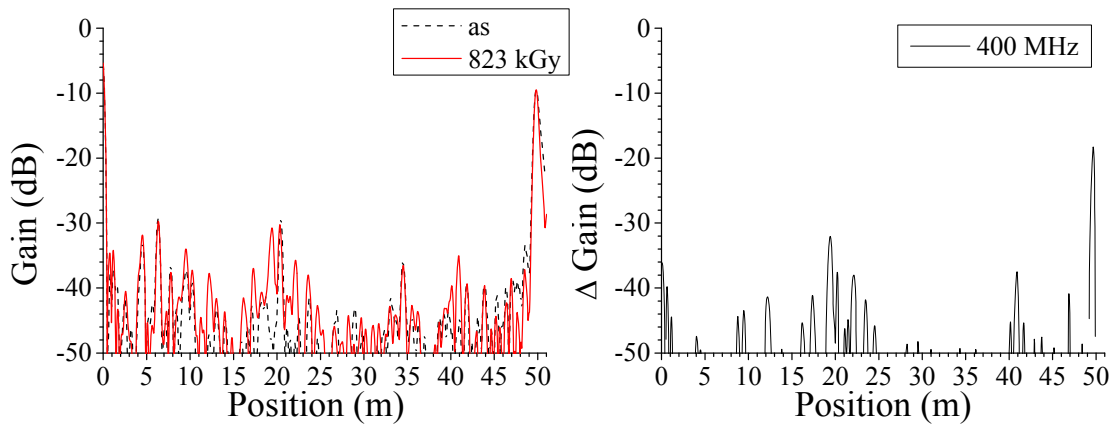
図 3.3.1-111 BIS 法による難燃 EPDM 絶縁ケーブル劣化位置標定結果：120℃、0.5kGy/h、1645h、測定端—劣化部：20m、測定条件：熱・放射線同時劣化中、測定周波数域：1～300MHz、測定反対側端子：開放



(i)位置標定結果

(ii) 差分

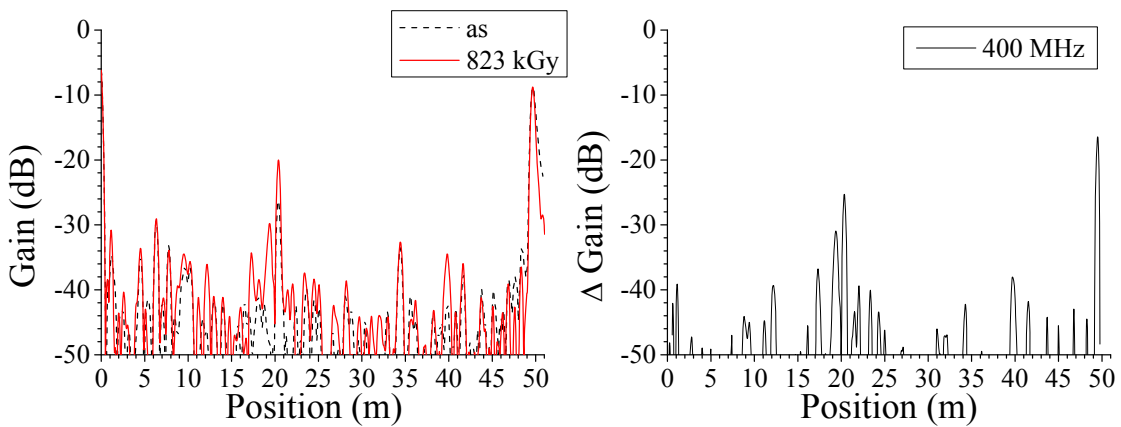
(a)測定端子：黒－赤



(i)位置標定結果

(ii) 差分

(b)測定端子：黒－白

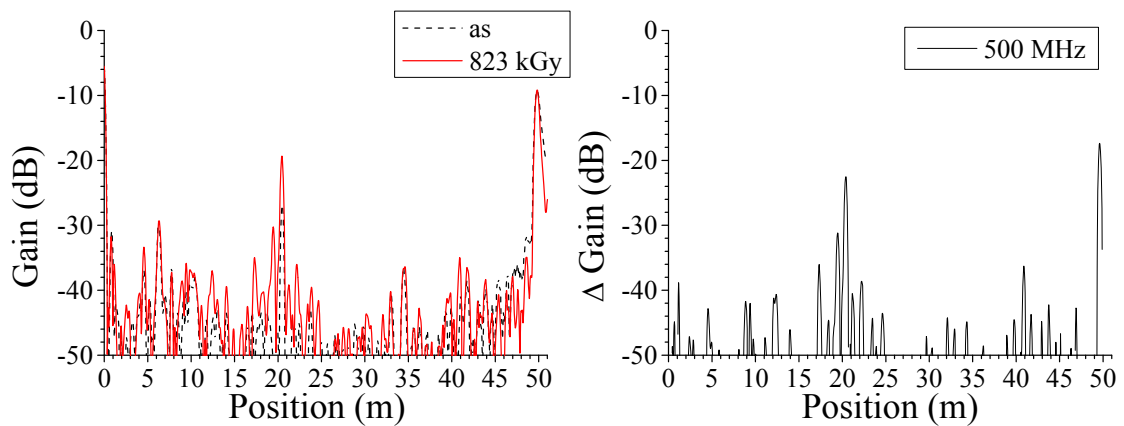


(i)位置標定結果

(ii) 差分

(c)測定端子：赤－白

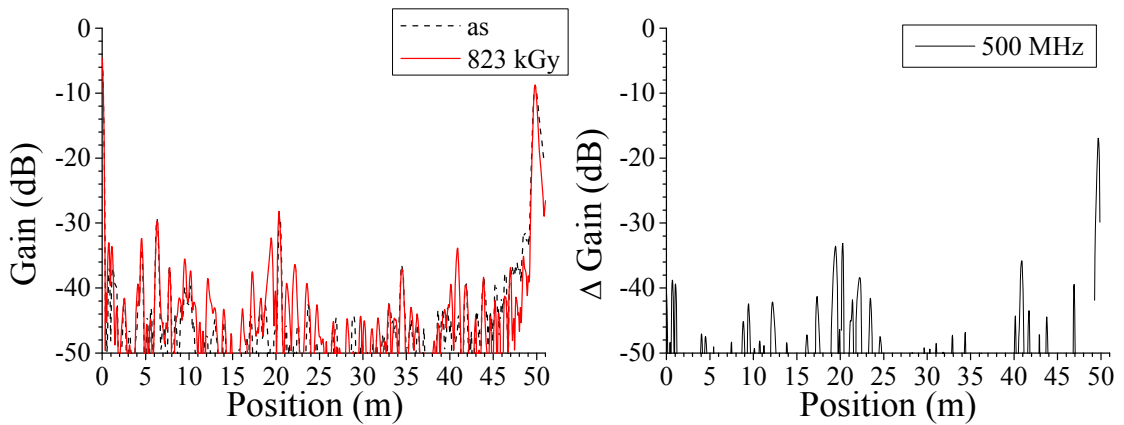
図 3.3.1-112 BIS 法による難燃 EPDM 絶縁ケーブル劣化位置標定結果：120℃、0.5kGy/h、1645h、測定端－劣化部：20m、測定条件：熱・放射線同時劣化中、測定周波数域：1～400MHz、測定反対側端子：開放



(i)位置標定結果

(ii) 差分

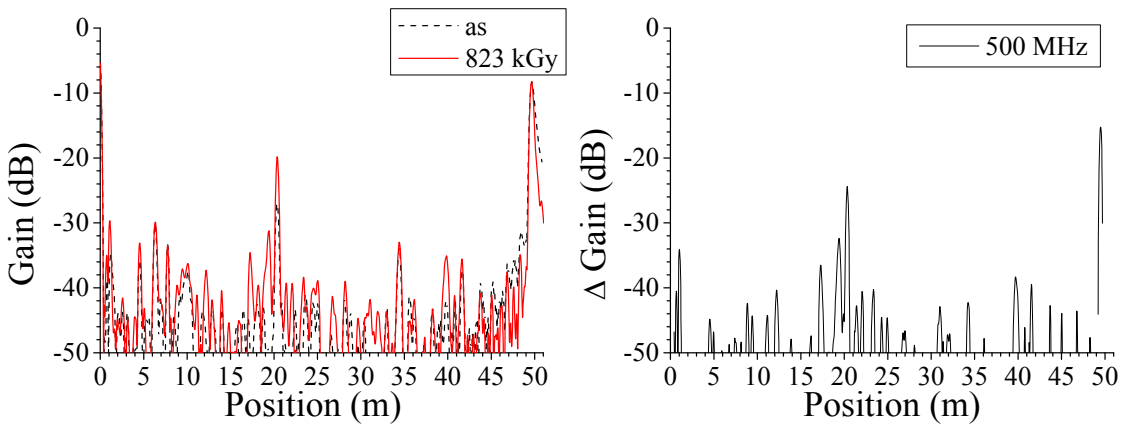
(a)測定端子：黒－赤



(i)位置標定結果

(ii) 差分

(b)測定端子：黒－白

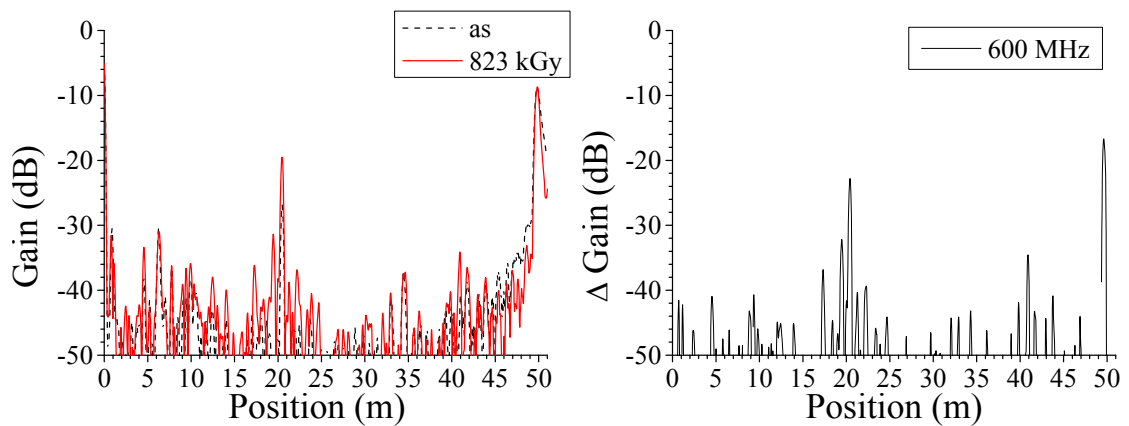


(i)位置標定結果

(ii) 差分

(c)測定端子：赤－白

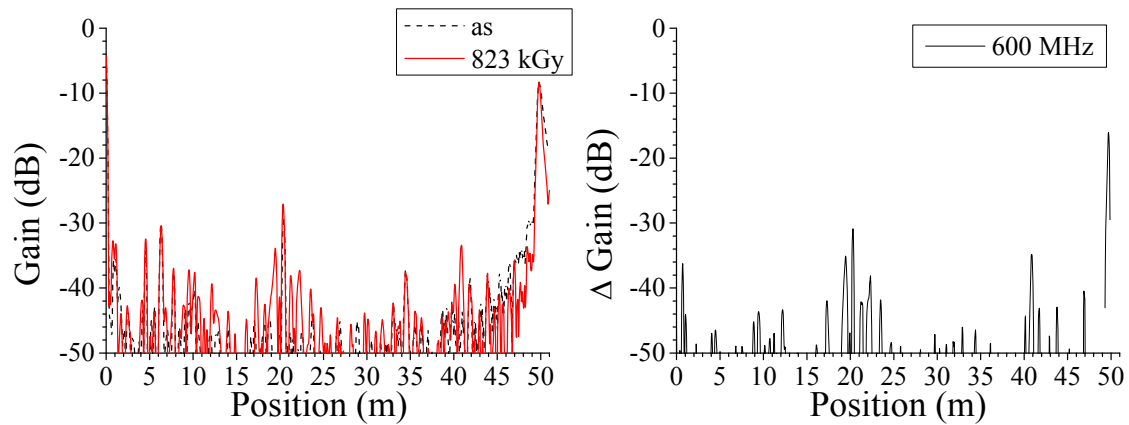
図 3. 3. 1-113 BIS 法による難燃 EPDM 絶縁ケーブル劣化位置標定結果：120℃、0. 5kGy/h、1645h、測定端－劣化部：20m、測定条件：熱・放射線同時劣化中、測定周波数域：1～500MHz、測定反対側端子：開放



(i)位置標定結果

(ii) 差分

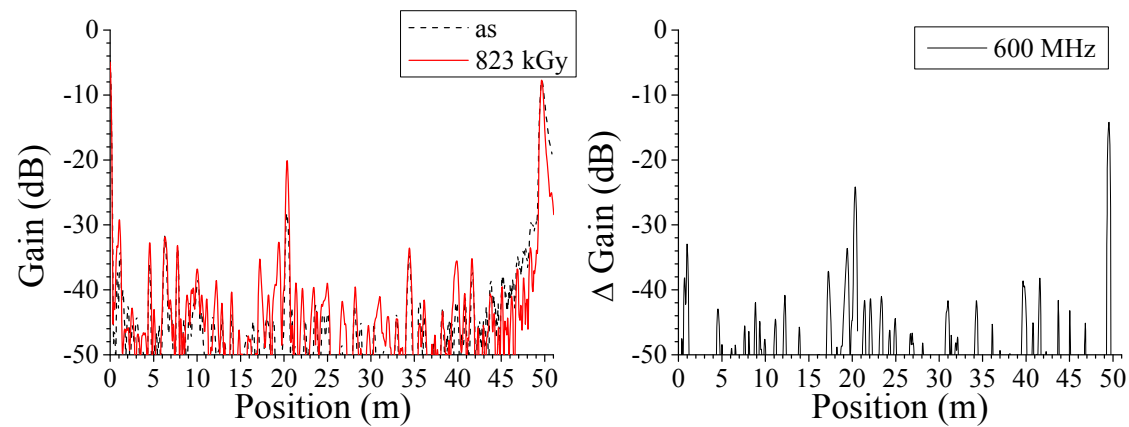
(a)測定端子：黒－赤



(i)位置標定結果

(ii) 差分

(b)測定端子：黒－白



(i)位置標定結果

(ii) 差分

(c)測定端子：赤－白

図 3. 3. 1-114 BIS 法による難燃 EPDM 絶縁ケーブル劣化位置標定結果：120℃、0. 5kGy/h、1645h、測定端－劣化部：20m、測定条件：熱・放射線同時劣化中、測定周波数域：1～600MHz、測定反対側端子：開放

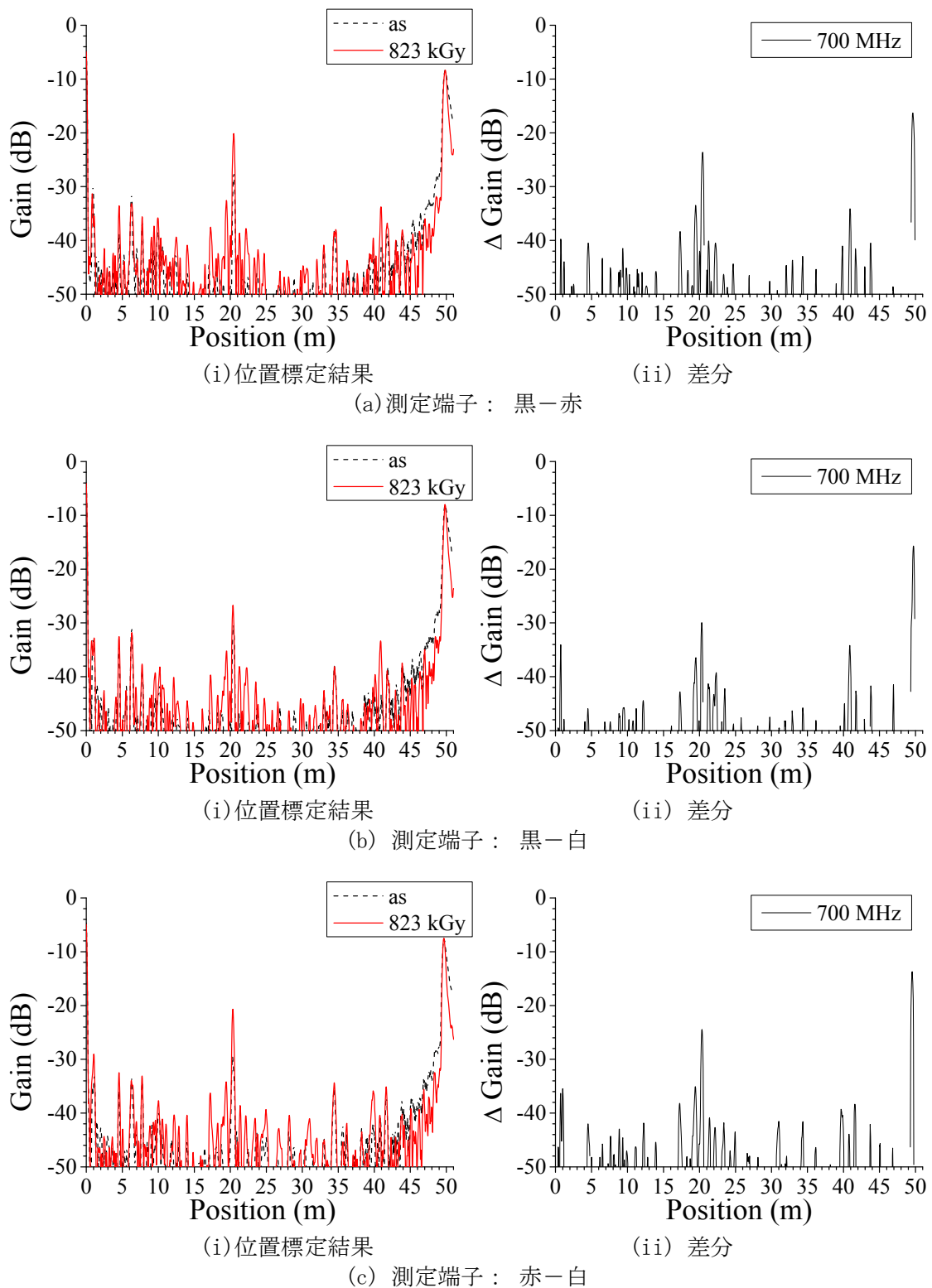
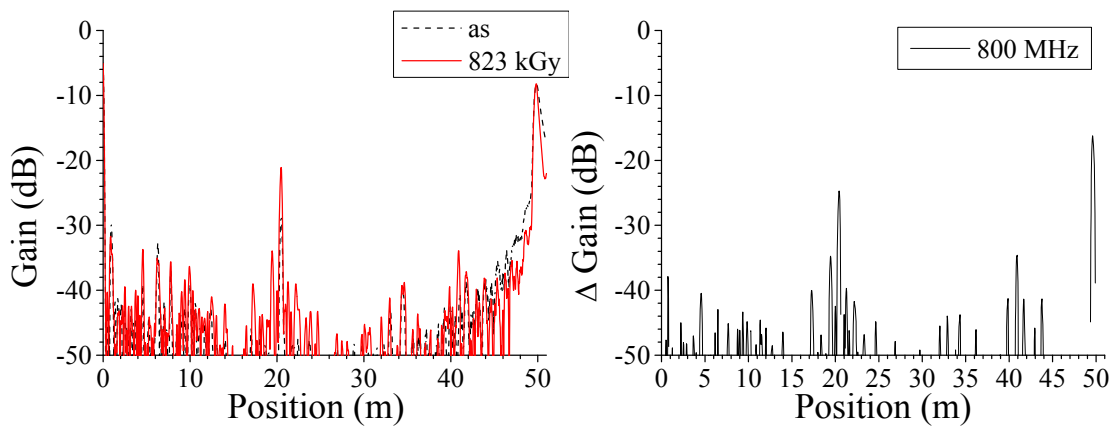


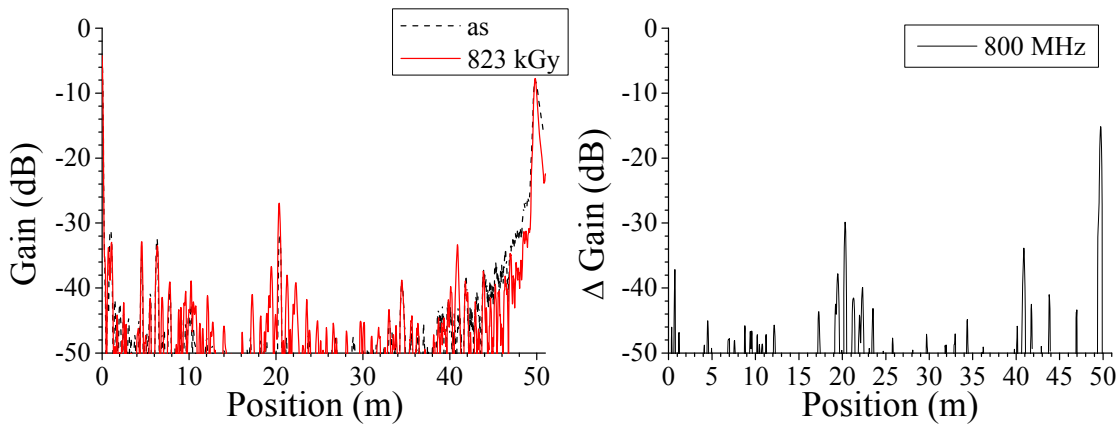
図 3.3.1-115 BIS 法による難燃 EPDM 絶縁ケーブル劣化位置標定結果：120℃、0.5kGy/h、1645h、測定端—劣化部：20m、測定条件：熱・放射線同時劣化中、測定周波数域：1～700MHz、測定反対側端子：開放



(i)位置標定結果

(ii) 差分

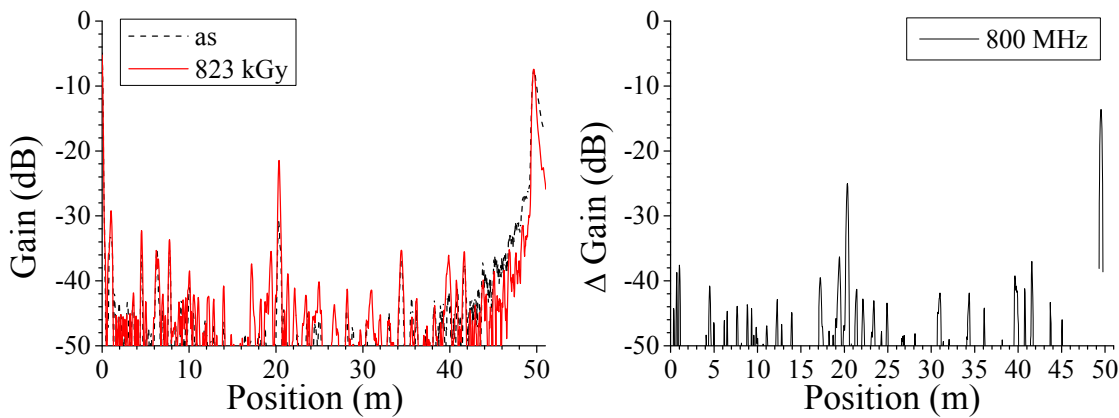
(a)測定端子：黒－赤



(i)位置標定結果

(ii) 差分

(b)測定端子：黒－白

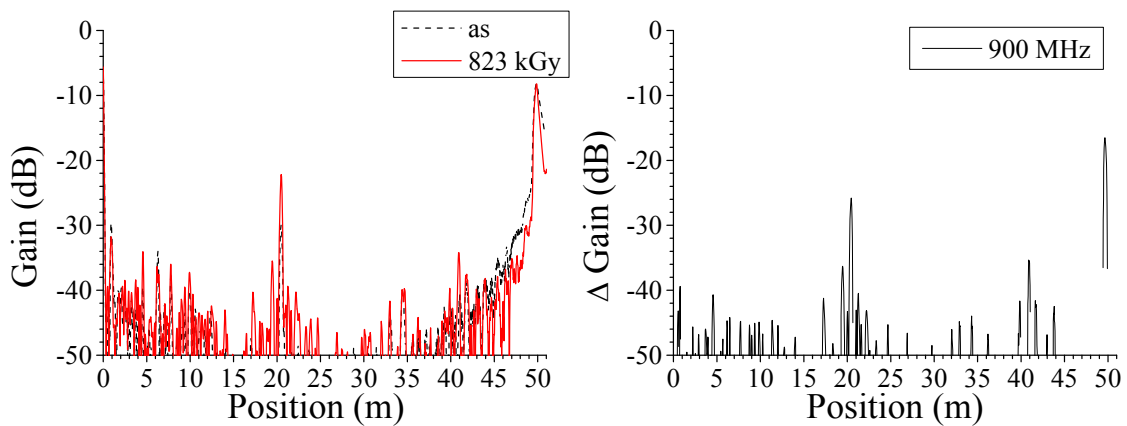


(i)位置標定結果

(ii) 差分

(c)測定端子：赤－白

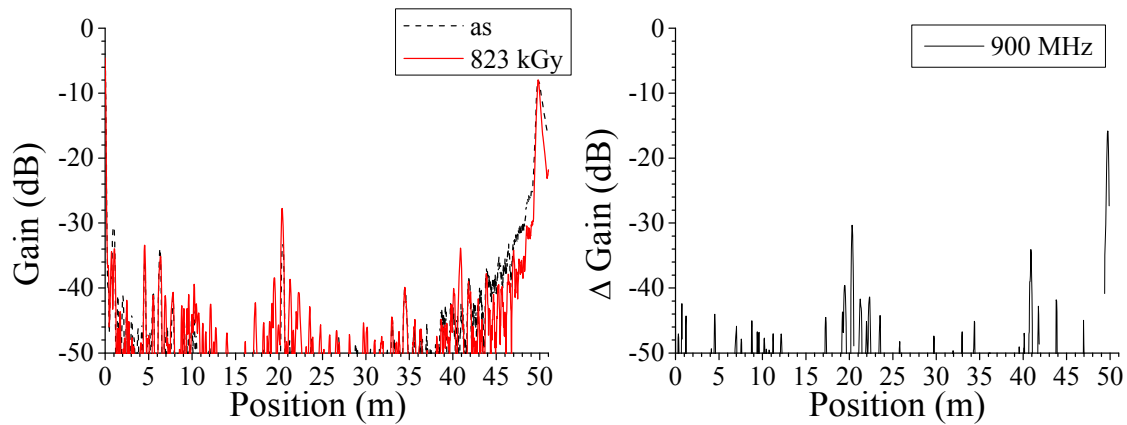
図 3. 3. 1-116 BIS 法による難燃 EPDM 絶縁ケーブル劣化位置標定結果：120℃、0. 5kGy/h、1645h、測定端－劣化部：20m、測定条件：熱・放射線同時劣化中、測定周波数域：1～800MHz、測定反対側端子：開放



(i)位置標定結果

(ii) 差分

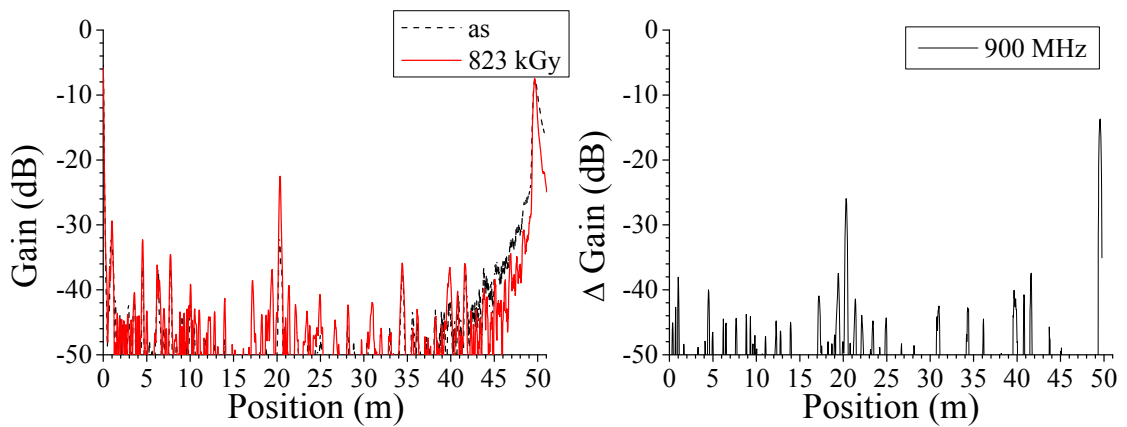
(a) 測定端子：黒－赤



(i)位置標定結果

(ii) 差分

(b) 測定端子：黒－白

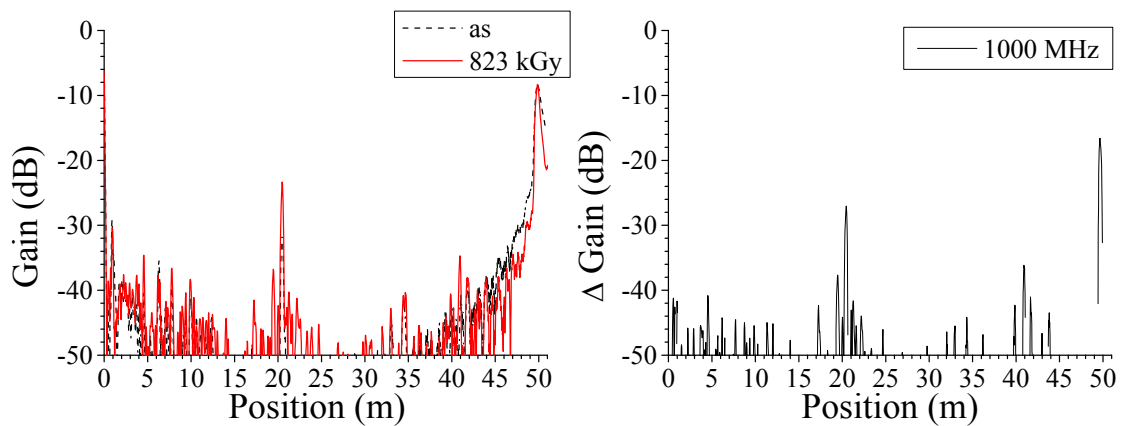


(i)位置標定結果

(ii) 差分

(c) 測定端子：赤－白

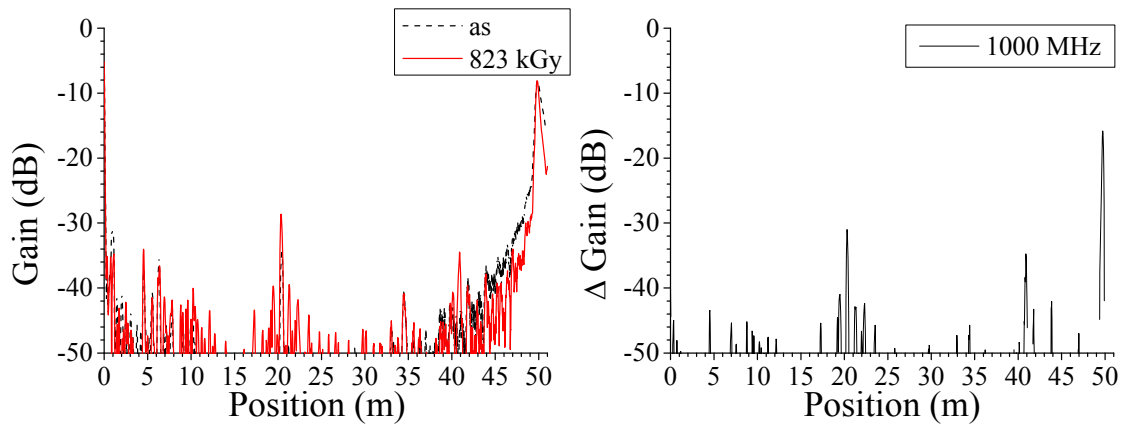
図 3. 3. 1-117 BIS 法による難燃 EPDM 絶縁ケーブル劣化位置標定結果：120℃、0.5kGy/h、1645h、測定端－劣化部：20m、測定条件：熱・放射線同時劣化中、測定周波数域：1～900MHz、測定反対側端子：開放



(i)位置標定結果

(ii) 差分

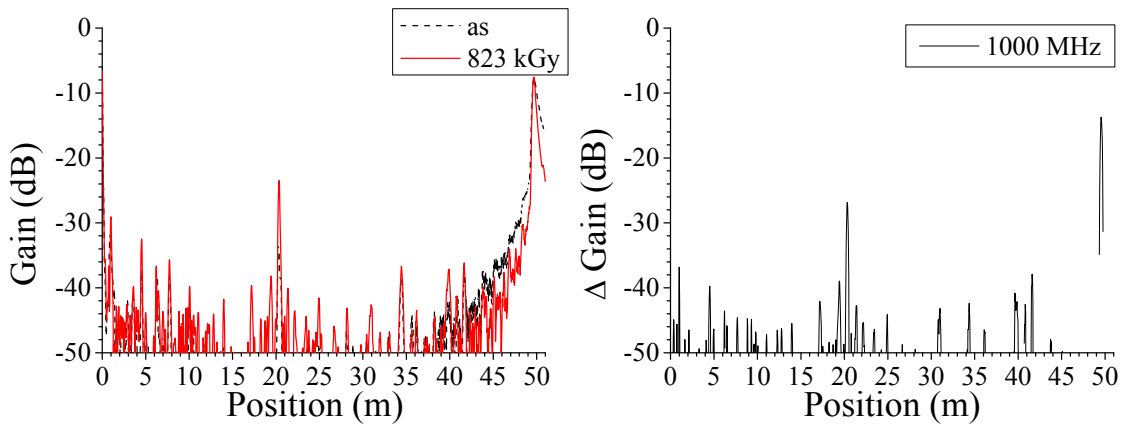
(a)測定端子：黒－赤



(i)位置標定結果

(ii) 差分

(b)測定端子：黒－白



(i)位置標定結果

(ii) 差分

(c)測定端子：赤－白

図 3. 3. 1-118 BIS 法による難燃 EPDM 絶縁ケーブル劣化位置標定結果：120℃、0. 5kGy/h、1645h、測定端－劣化部：20m、測定条件：熱・放射線同時劣化中、測定周波数域：1～1000MHz、測定反対側端子：開放

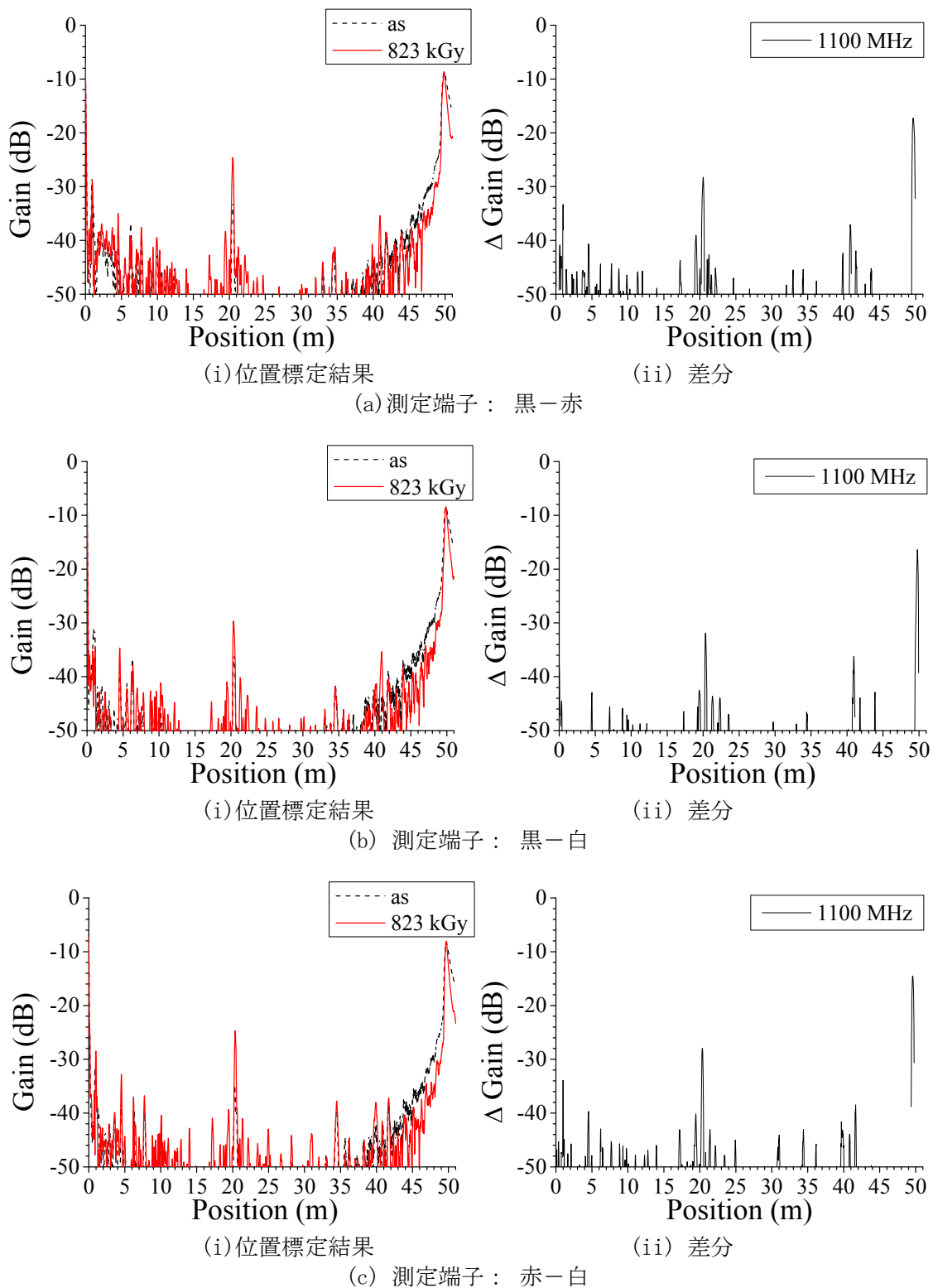
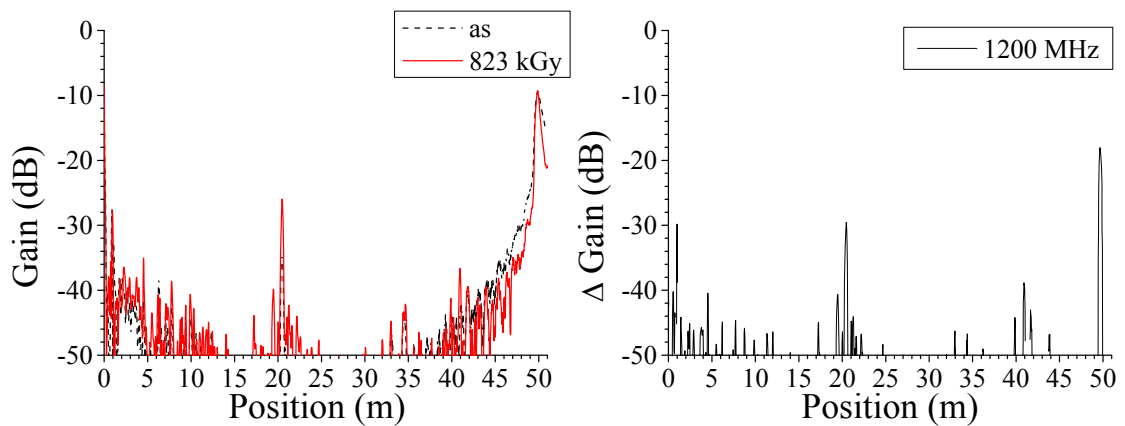


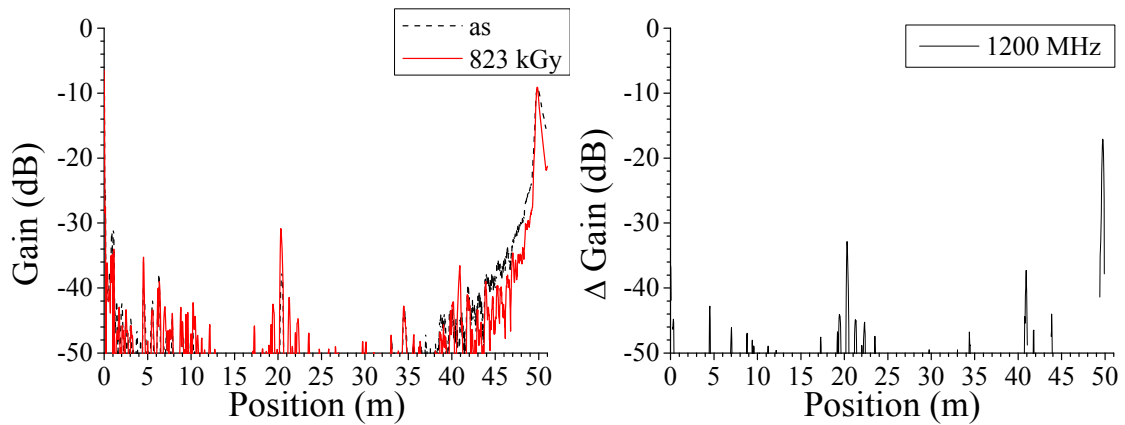
図 3.3.1-119 BIS 法による難燃 EPDM 絶縁ケーブル劣化位置標定結果：120℃、0.5kGy/h、1645h、測定端—劣化部：20m、測定条件：熱・放射線同時劣化中、測定周波数域：1～1100MHz、測定反対側端子：開放



(i)位置標定結果

(ii) 差分

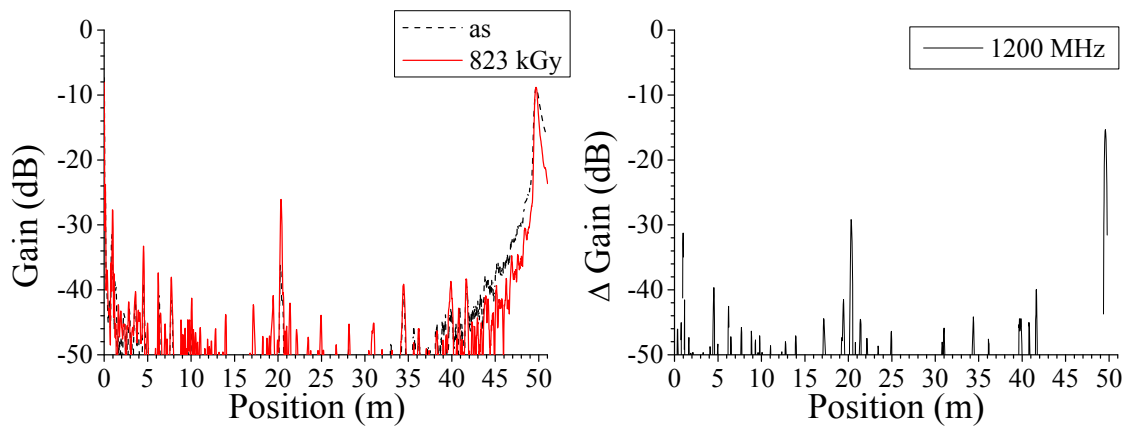
(a)測定端子：黒－赤



(i)位置標定結果

(ii) 差分

(b)測定端子：黒－白

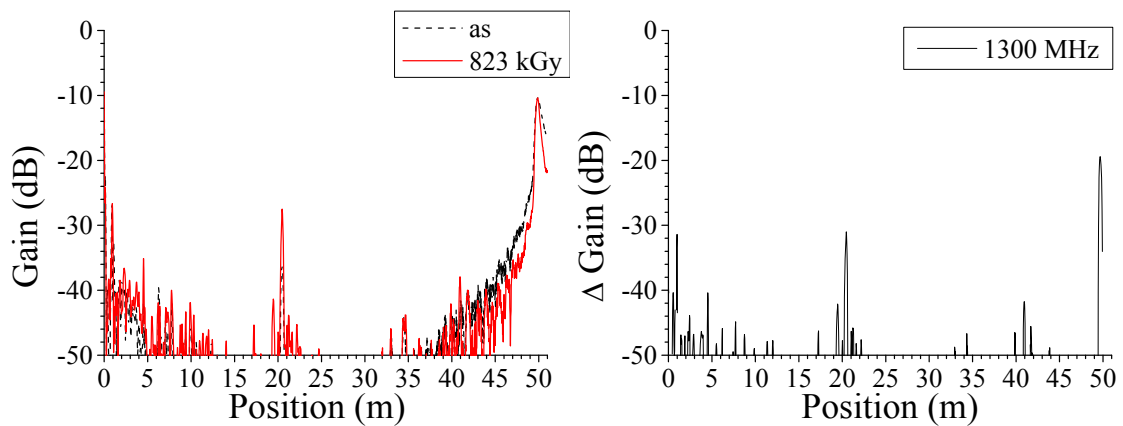


(i)位置標定結果

(ii) 差分

(c)測定端子：赤－白

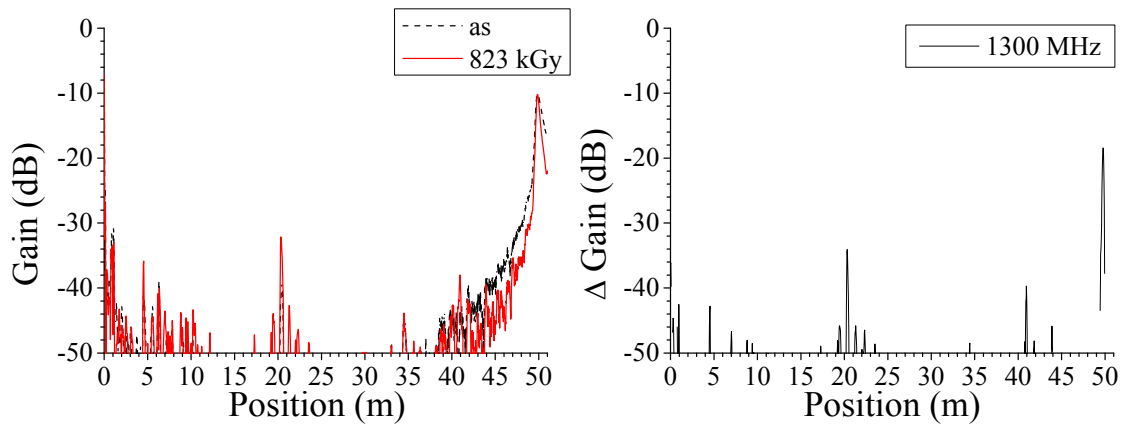
図 3. 3. 1-120 BIS 法による難燃 EPDM 絶縁ケーブル劣化位置標定結果：120℃、0. 5kGy/h、1645h、測定端－劣化部：20m、測定条件：熱・放射線同時劣化中、測定周波数域：1～1200MHz、測定反対側端子：開放



(i)位置標定結果

(ii) 差分

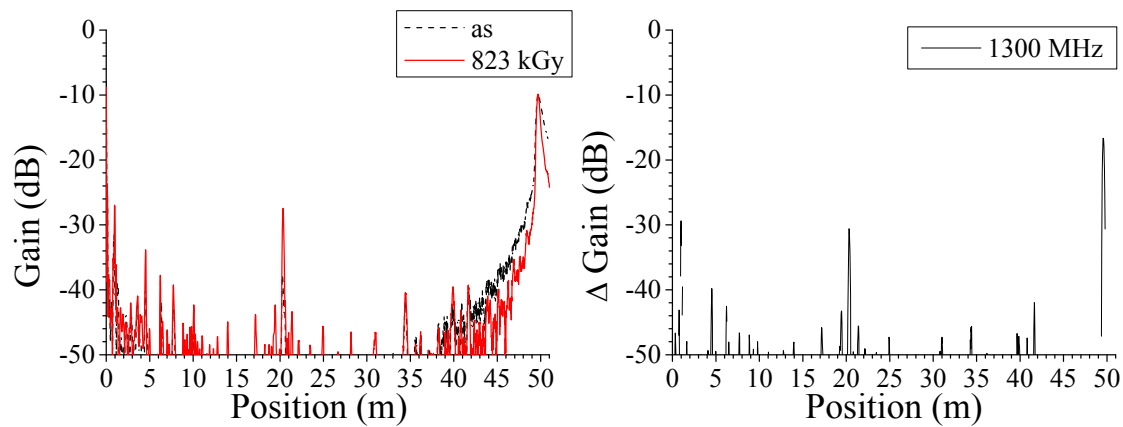
(a)測定端子：黒－赤



(i)位置標定結果

(ii) 差分

(b)測定端子：黒－白

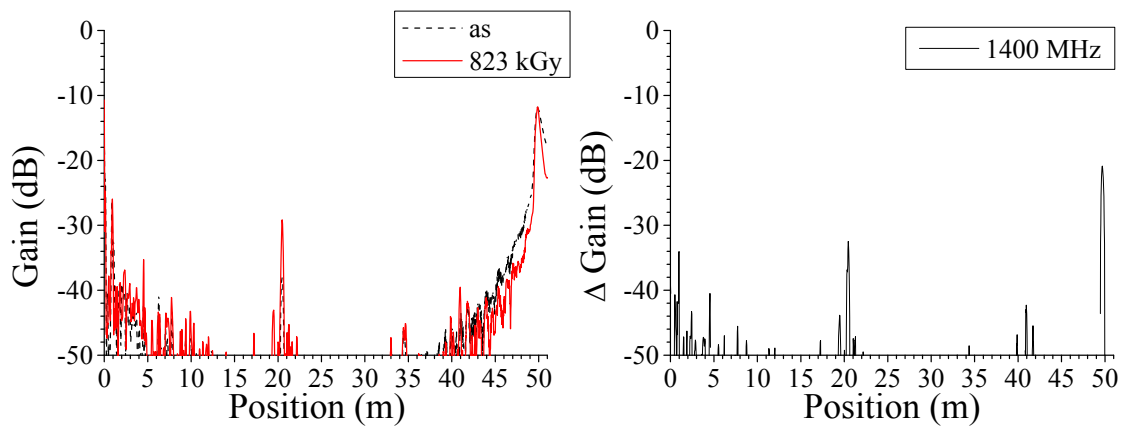


(i)位置標定結果

(ii) 差分

(c)測定端子：赤－白

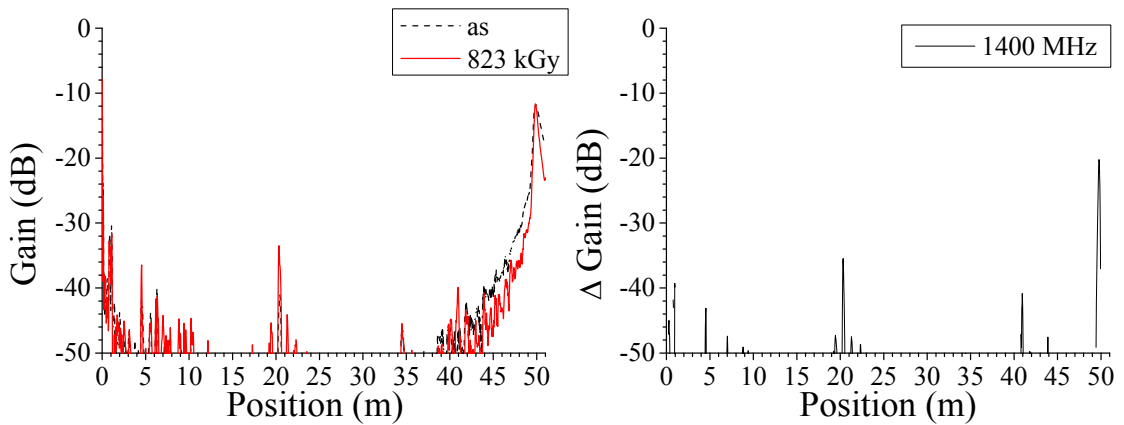
図 3. 3. 1-121 BIS 法による難燃 EPDM 絶縁ケーブル劣化位置標定結果：120℃、0. 5kGy/h、1645h、測定端－劣化部：20m、測定条件：熱・放射線同時劣化中、測定周波数域：1～1300MHz、測定反対側端子：開放



(i)位置標定結果

(ii) 差分

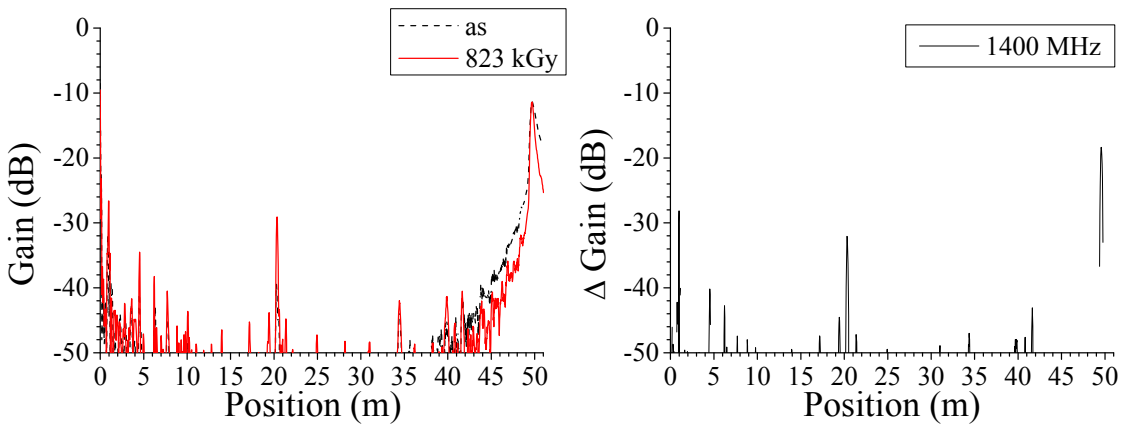
(a) 測定端子： 黒－赤



(i)位置標定結果

(ii) 差分

(b) 測定端子： 黒－白



(i)位置標定結果

(ii) 差分

(c) 測定端子： 赤－白

図 3. 3. 1-122 BIS 法による難燃 EPDM 絶縁ケーブル劣化位置標定結果：120℃、0. 5kGy/h、1645h、測定端－劣化部：20m、測定条件：熱・放射線同時劣化中、測定周波数域：1～1400MHz、測定反対側端子：開放

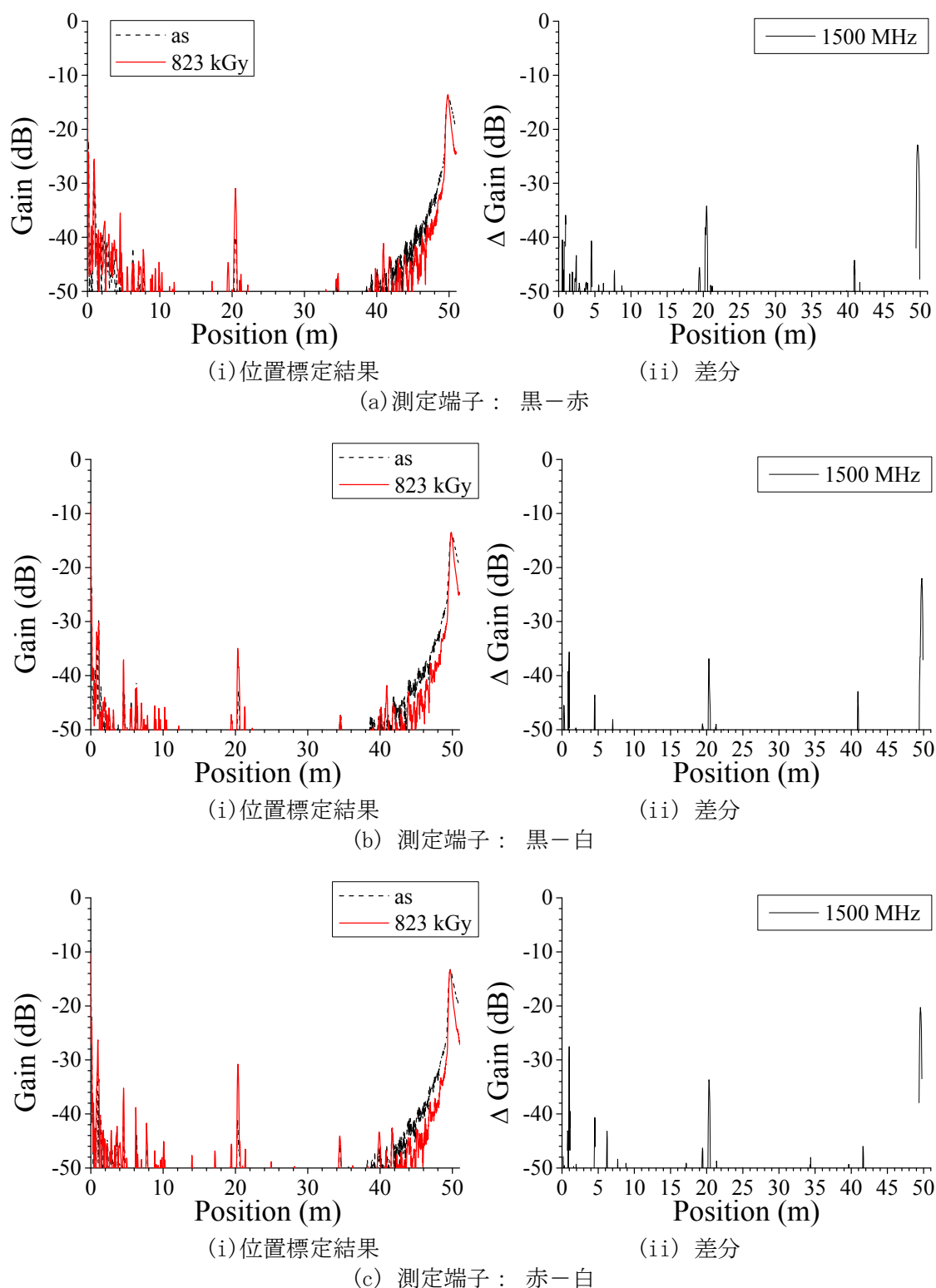
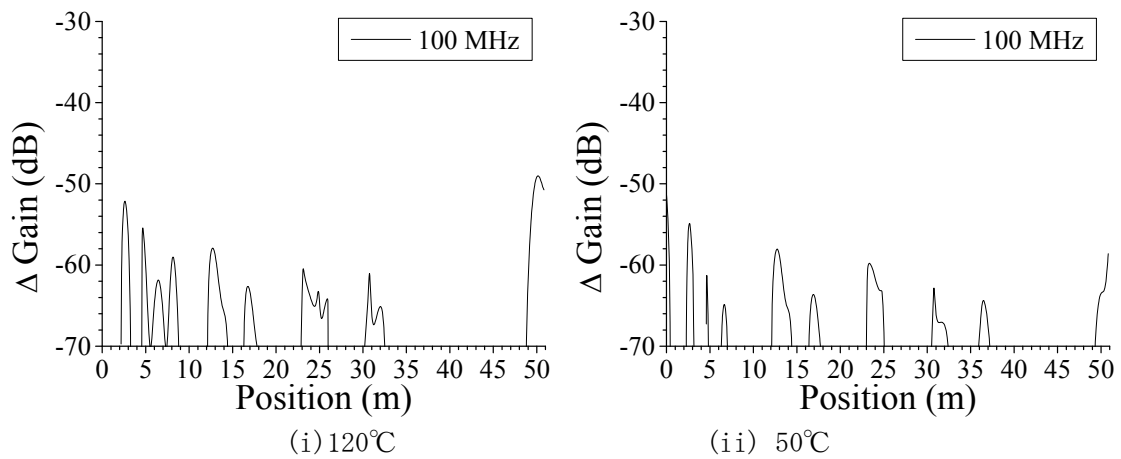


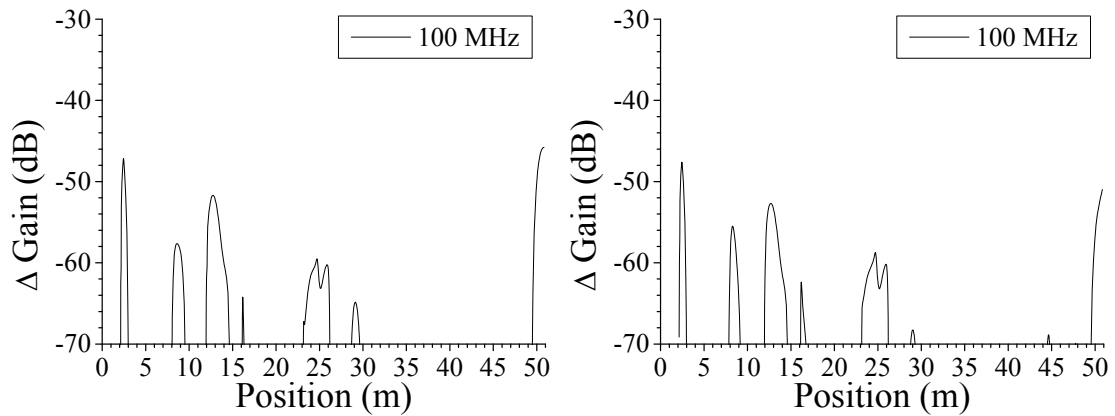
図 3.3.1-123 BIS 法による難燃 EPDM 絶縁ケーブル劣化位置標定結果：120℃、0.5kGy/h、1645h、測定端—劣化部：20m、測定条件：熱・放射線同時劣化中、測定周波数域：1～1500MHz、測定反対側端子：開放



(i) 120°C

(ii) 50°C

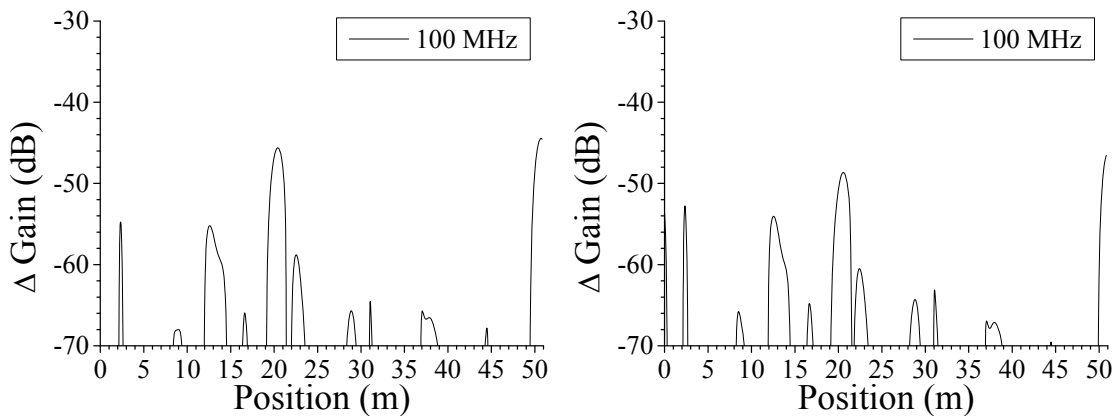
(a) 測定端子：黒-赤



(i) 120°C

(ii) 50°C

(b) 測定端子：黒-白



(i) 120°C

(ii) 50°C

(c) 測定端子：赤-白

図 3.3.1-124 BIS 法による難燃 EPDM 絶縁ケーブル劣化位置標定差分結果における照射中温度の影響：0.5kGy/h、44h、測定端-劣化部：20m、測定条件：熱・放射線同時劣化中、測定周波数域：1~100MHz、測定反対側端子：開放

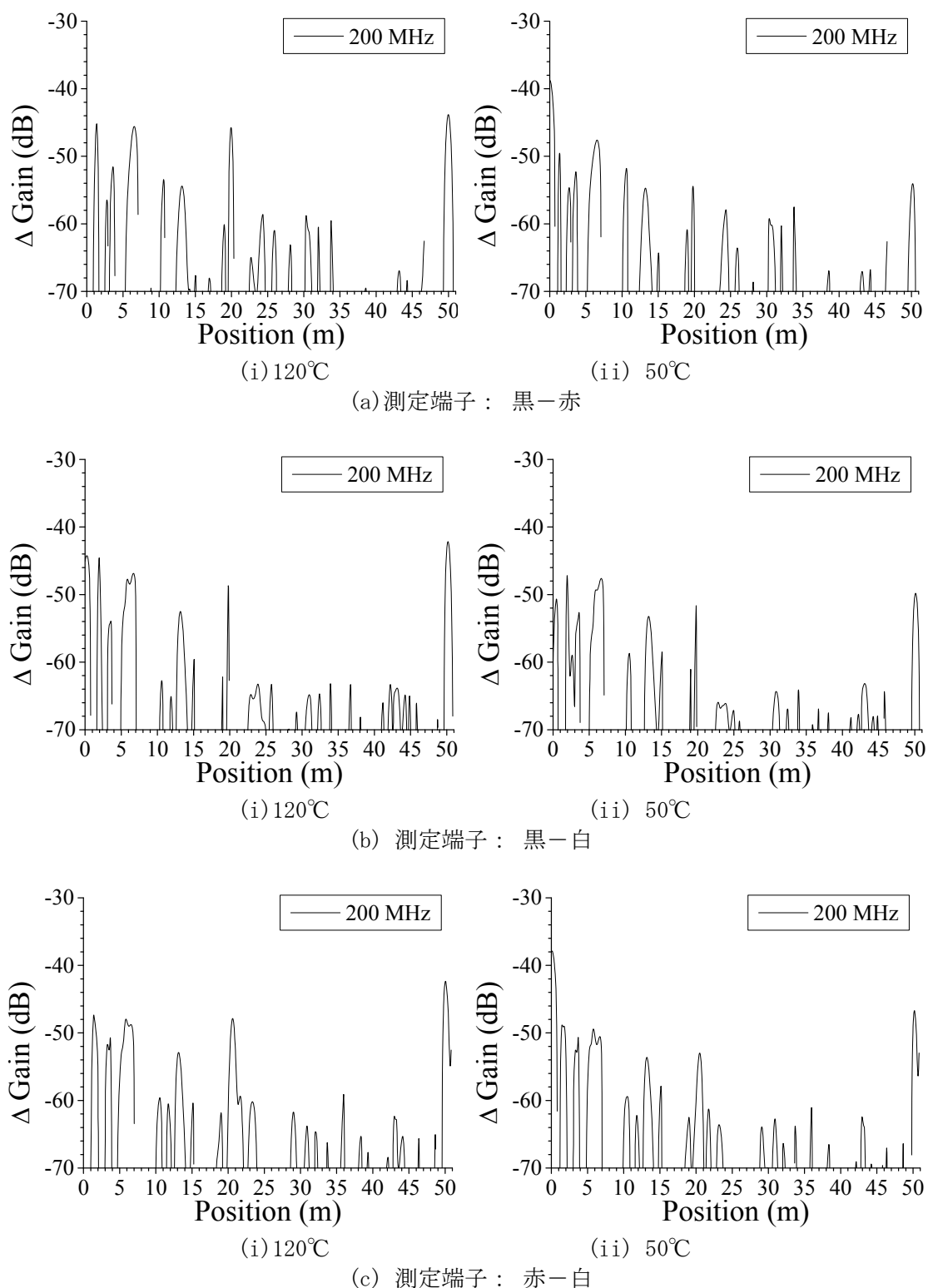


図 3.3.1-125 BIS 法による難燃 EPDM 絶縁ケーブル劣化位置標定差分結果における照射中温度の影響：0.5kGy/h、44h、測定端－劣化部：20m、測定条件：熱・放射線同時劣化中、測定周波数域：1～200MHz、測定反対側端子：開放

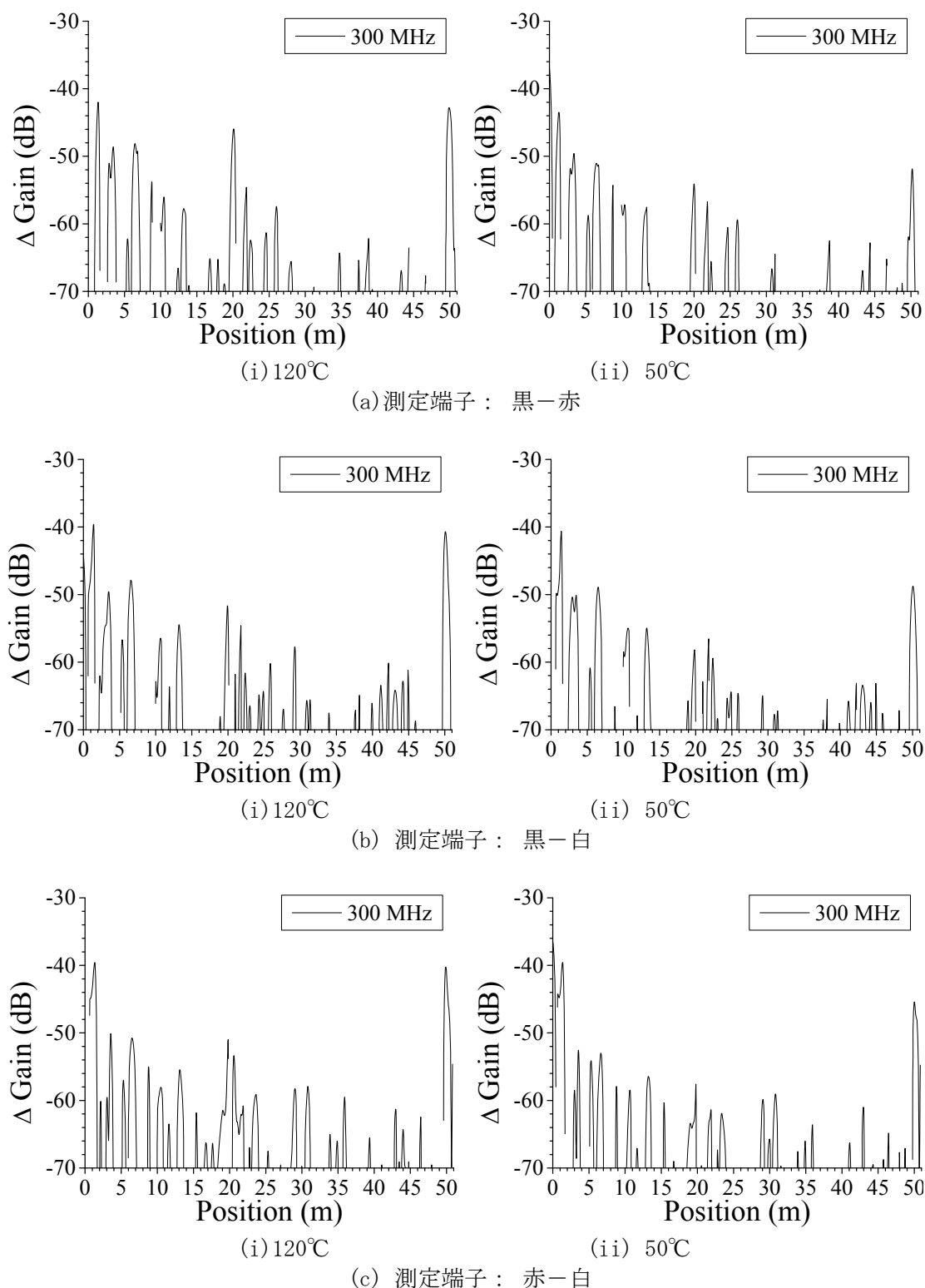


図 3.3.1-126 BIS 法による難燃 EPDM 絶縁ケーブル劣化位置標定差分結果における照射中温度の影響：0.5kGy/h、44h、測定端－劣化部：20m、測定条件：熱・放射線同時劣化中、測定周波数域：1～300MHz、測定反対側端子：開放

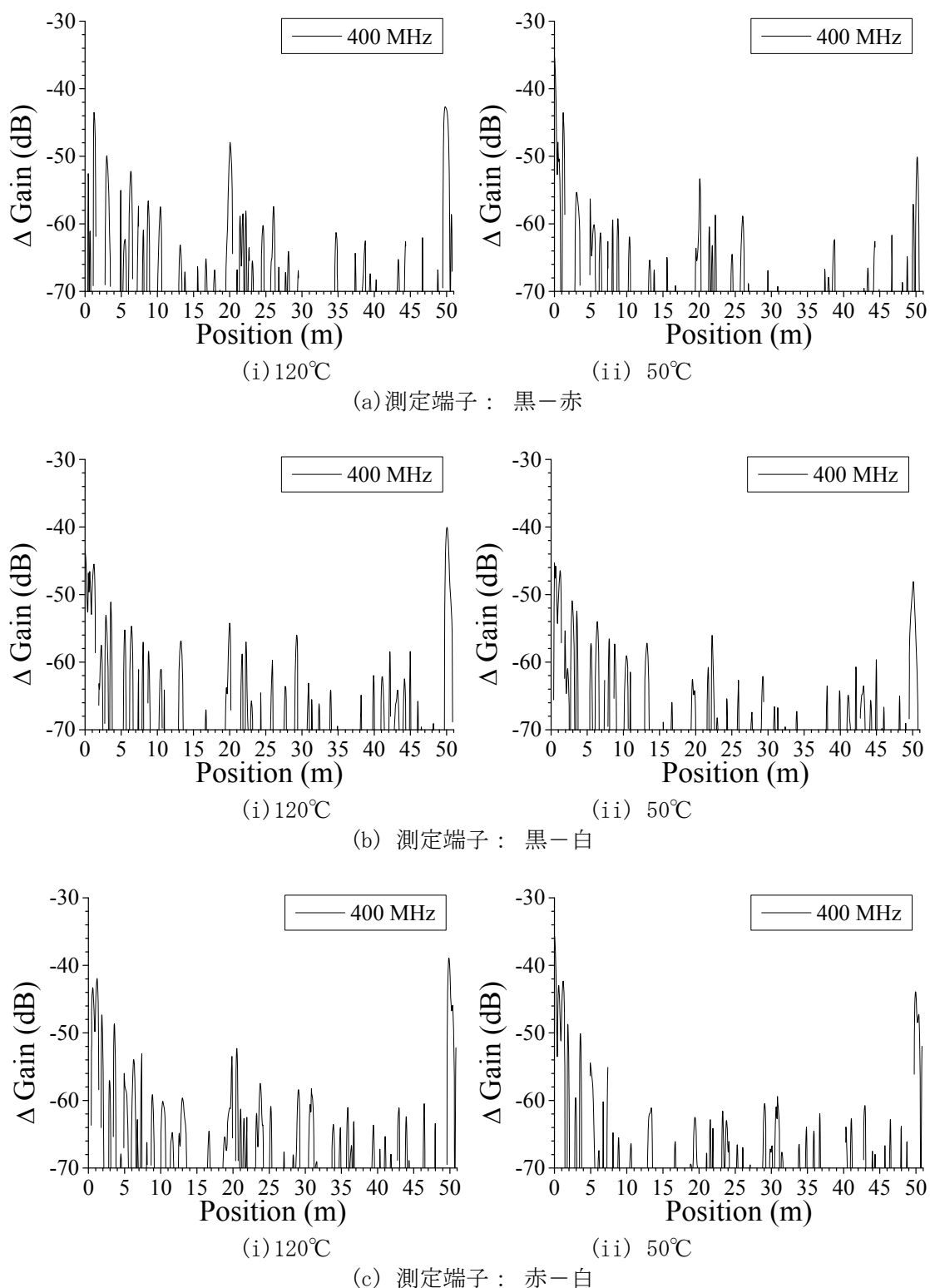
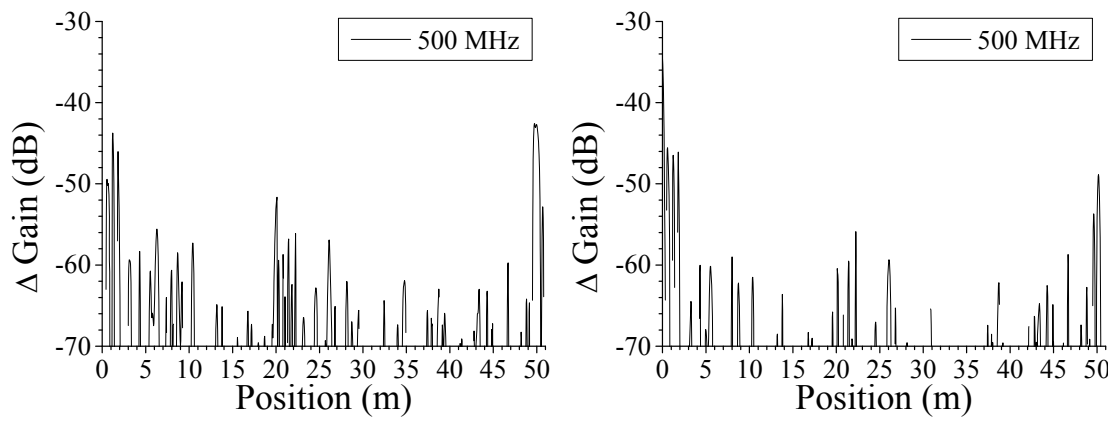
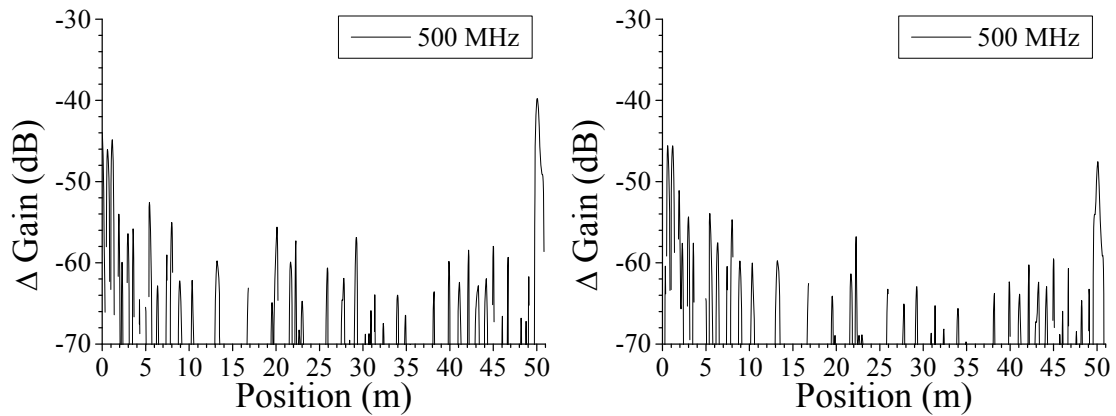


図 3.3.1-127 BIS 法による難燃 EPDM 絶縁ケーブル劣化位置標定差分結果における照射中温度の影響：0.5kGy/h、44h、測定端-劣化部：20m、測定条件：熱・放射線同時劣化中、測定周波数域：1~400MHz、測定反対側端子：開放



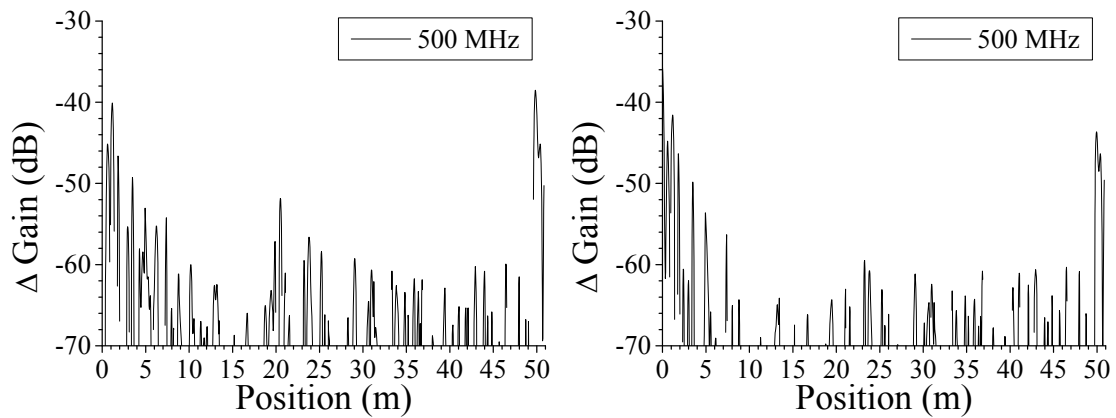
(i) 120°C (ii) 50°C

(a) 測定端子：黒-赤



(i) 120°C (ii) 50°C

(b) 測定端子：黒-白



(i) 120°C (ii) 50°C

(c) 測定端子：赤-白

図 3.3.1-128 BIS 法による難燃 EPDM 絶縁ケーブル劣化位置標定差分結果における照射中温度の影響：0.5kGy/h、44h、測定端-劣化部：20m、測定条件：熱・放射線同時劣化中、測定周波数域：1～500MHz、測定反対側端子：開放

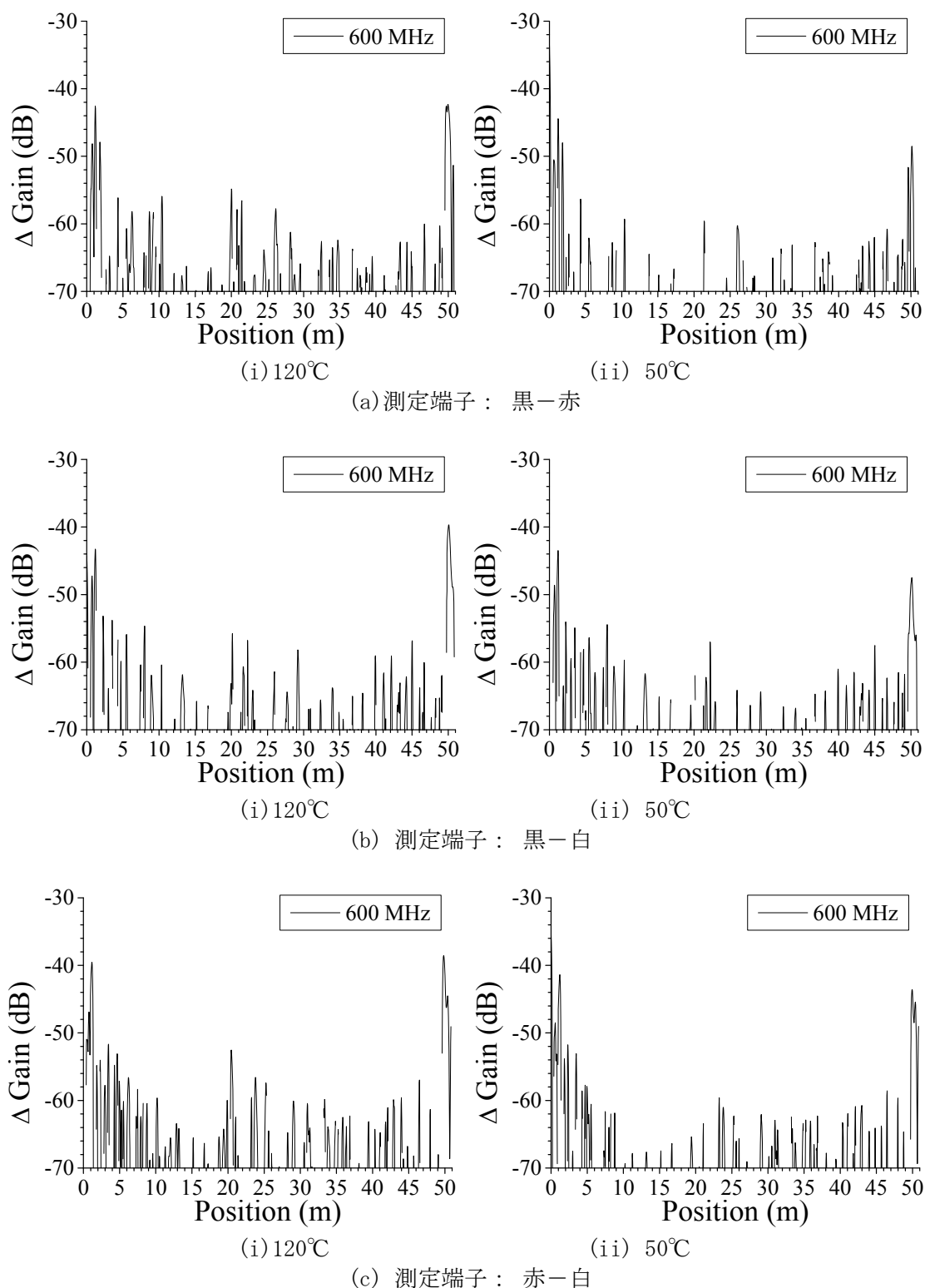


図 3.3.1-129 BIS 法による難燃 EPDM 絶縁ケーブル劣化位置標定差分結果における照射中温度の影響：0.5kGy/h、44h、測定端－劣化部：20m、測定条件：熱・放射線同時劣化中、測定周波数域：1～600MHz、測定反対側端子：開放

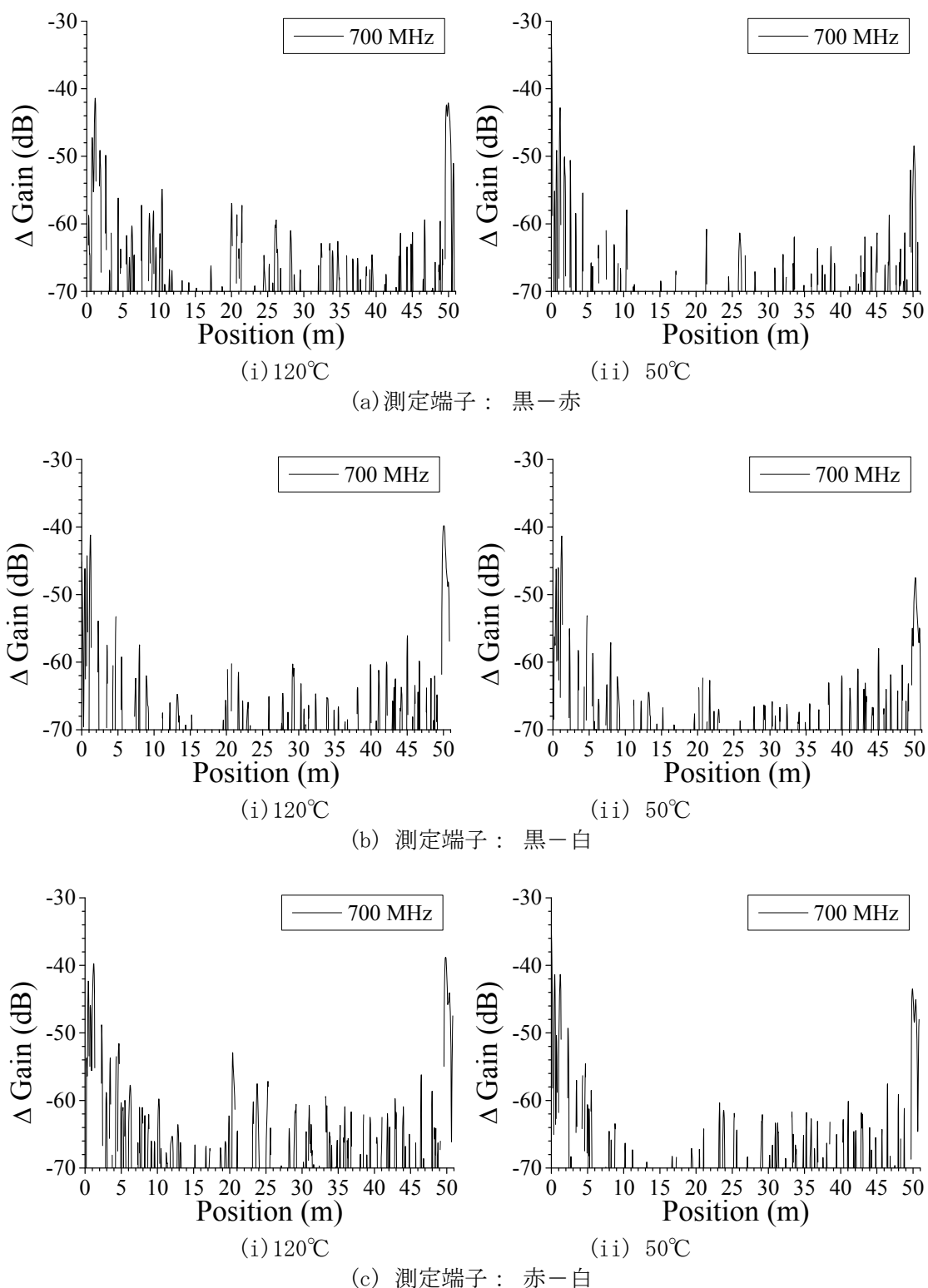
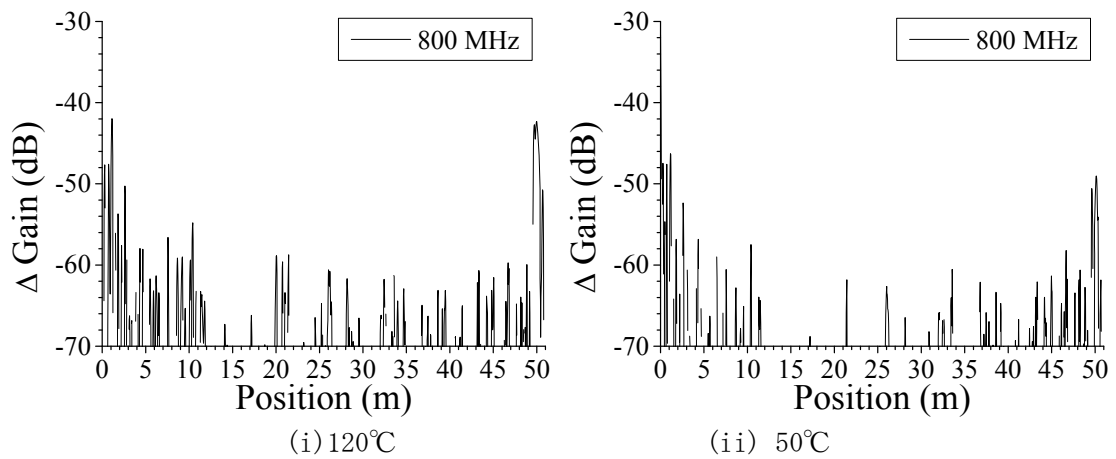
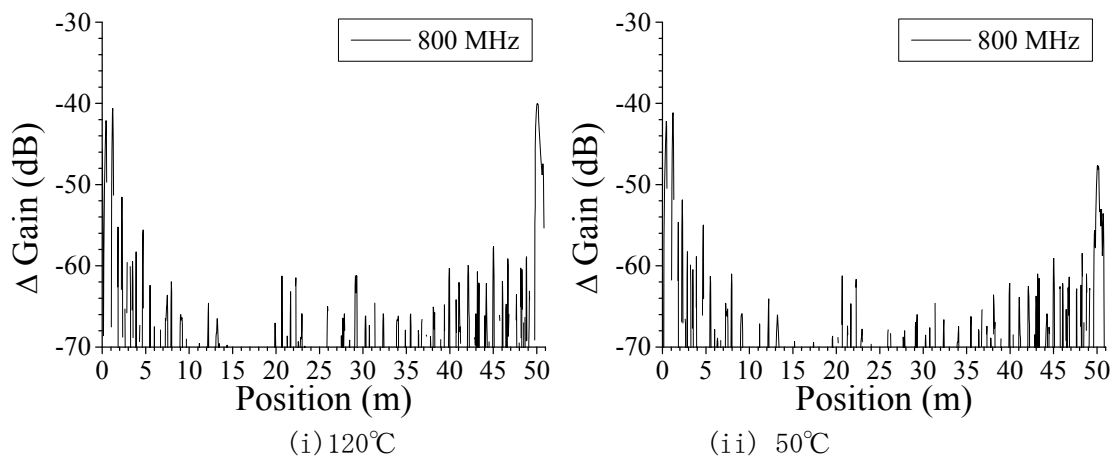


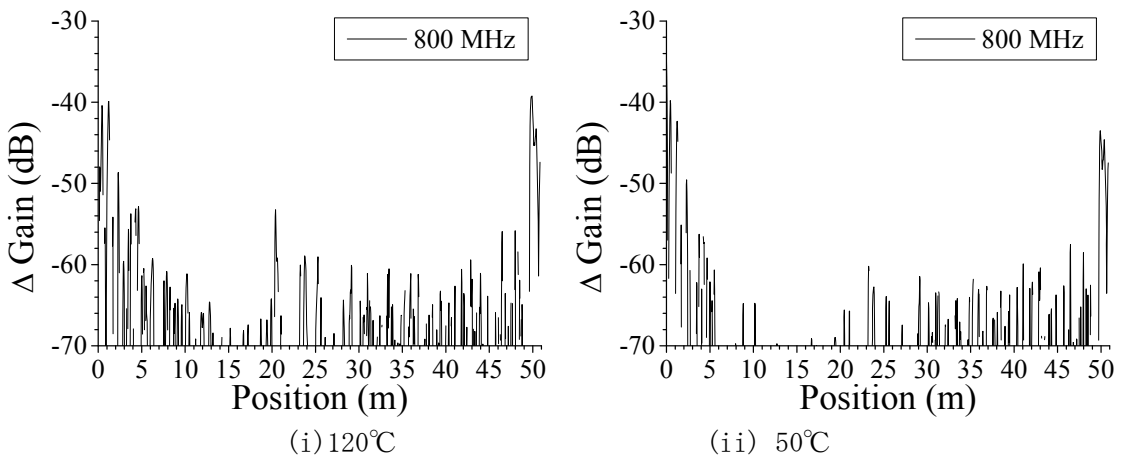
図 3.3.1-130 BIS 法による難燃 EPDM 絶縁ケーブル劣化位置標定差分結果における照射中温度の影響：0.5kGy/h、44h、測定端－劣化部：20m、測定条件：熱・放射線同時劣化中、測定周波数域：1～700MHz、測定反対側端子：開放



(i) 120°C (ii) 50°C
(a) 測定端子：黒－赤

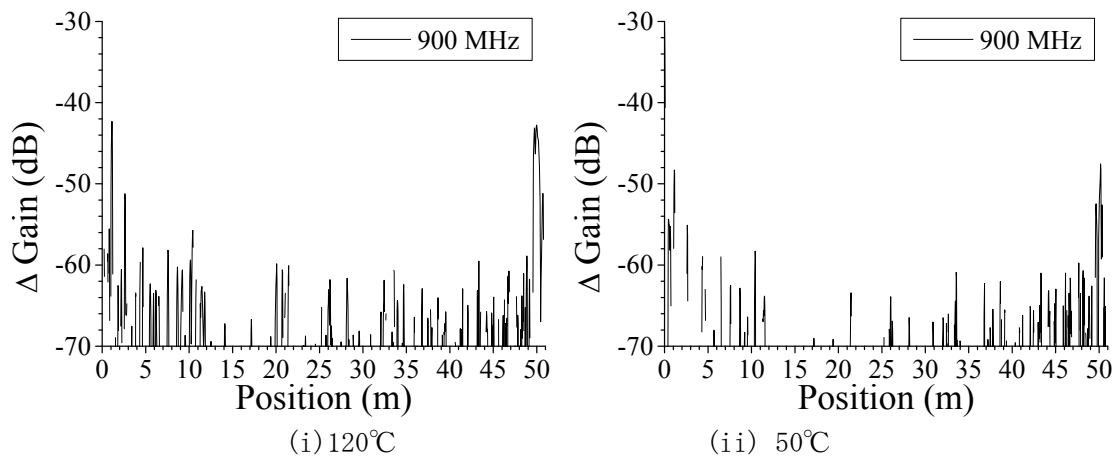


(i) 120°C (ii) 50°C
(b) 測定端子：黒－白

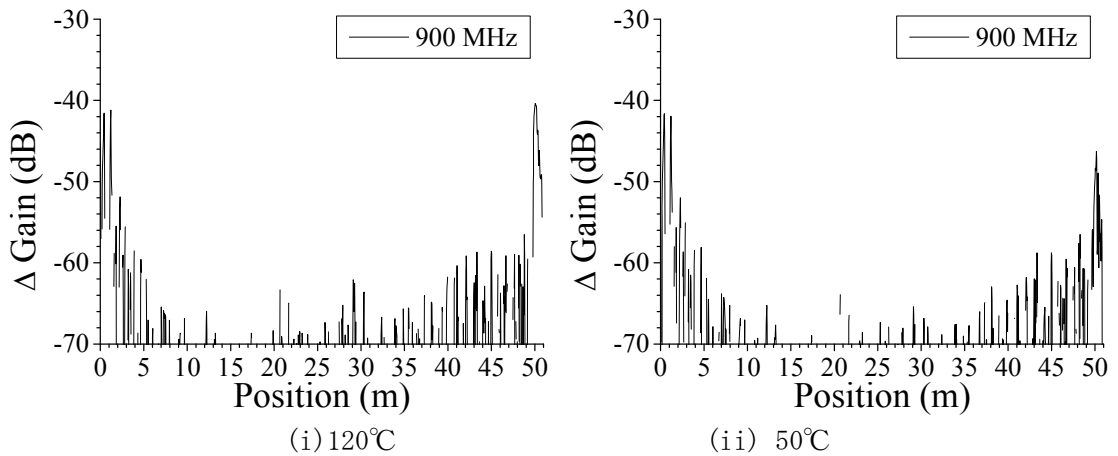


(i) 120°C (ii) 50°C
(c) 測定端子：赤－白

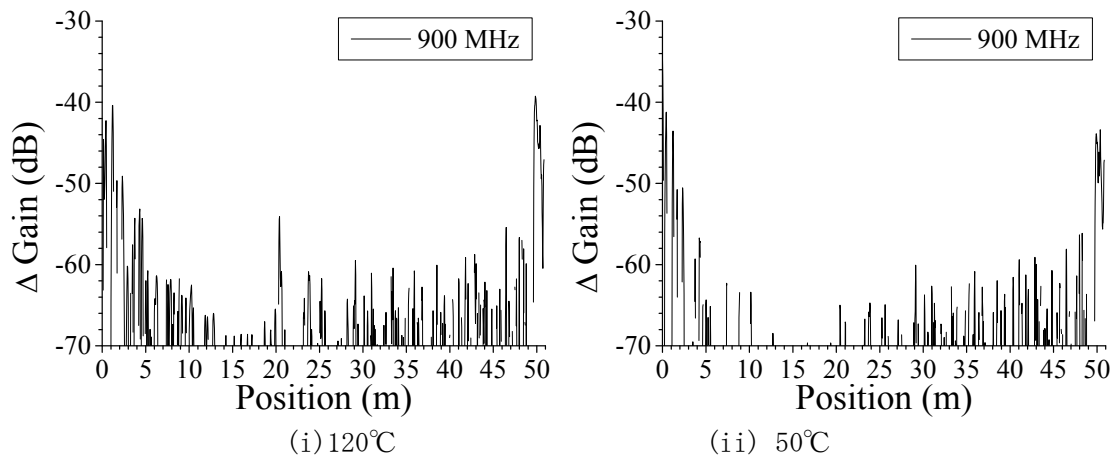
図 3.3.1-131 BIS 法による難燃 EPDM 絶縁ケーブル劣化位置標定差分結果における照射中温度の影響：0.5kGy/h、44h、測定端－劣化部：20m、測定条件：熱・放射線同時劣化中、測定周波数域：1～800MHz、測定反対側端子：開放



(a) 測定端子：黒-赤



(b) 測定端子：黒-白



(c) 測定端子：赤-白

図 3.3.1-132 BIS 法による難燃 EPDM 絶縁ケーブル劣化位置標定差分結果における照射中温度の影響：0.5kGy/h、44h、測定端-劣化部：20m、測定条件：熱・放射線同時劣化中、測定周波数域：1~900MHz、測定反対側端子：開放

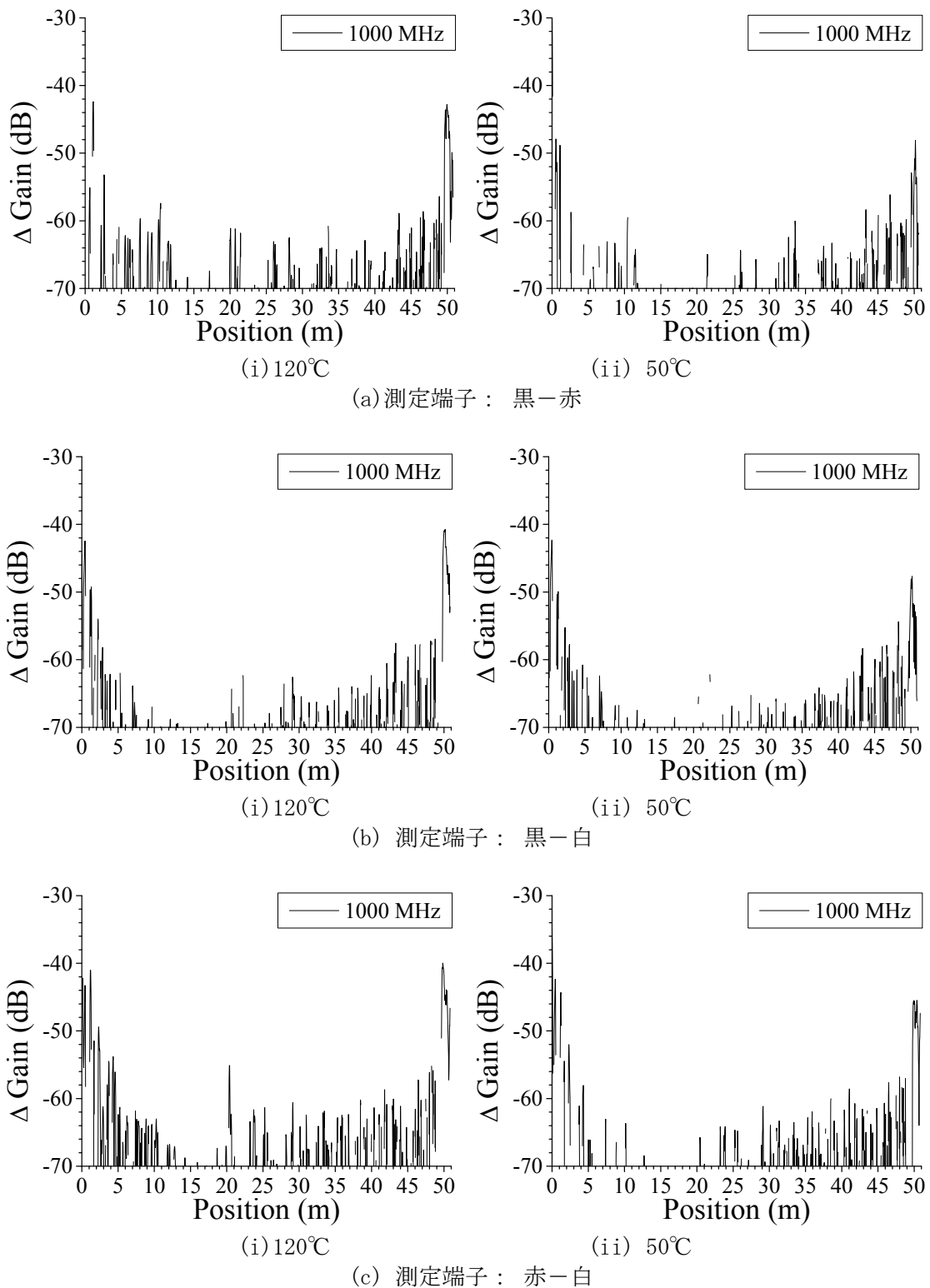


図 3.3.1-133 BIS 法による難燃 EPDM 絶縁ケーブル劣化位置標定差分結果における照射中温度の影響：0.5kGy/h、44h、測定端-劣化部：20m、測定条件：熱・放射線同時劣化中、測定周波数域：1~1000MHz、測定反対側端子：開放

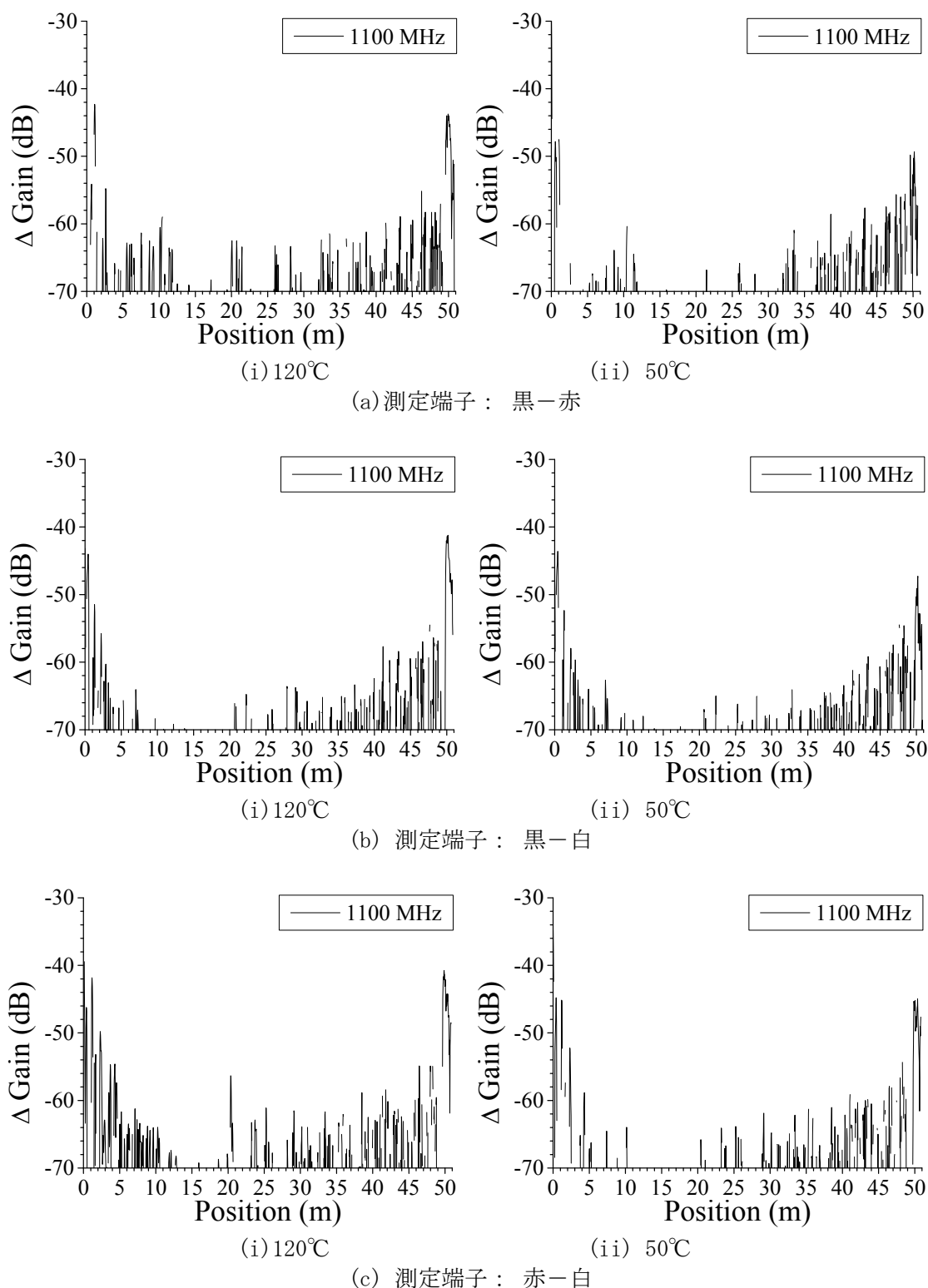


図 3.3.1-134 BIS 法による難燃 EPDM 絶縁ケーブル劣化位置標定差分結果における照射中温度の影響：0.5kGy/h、44h、測定端-劣化部：20m、測定条件：熱・放射線同時劣化中、測定周波数域：1~1100MHz、測定反対側端子：開放

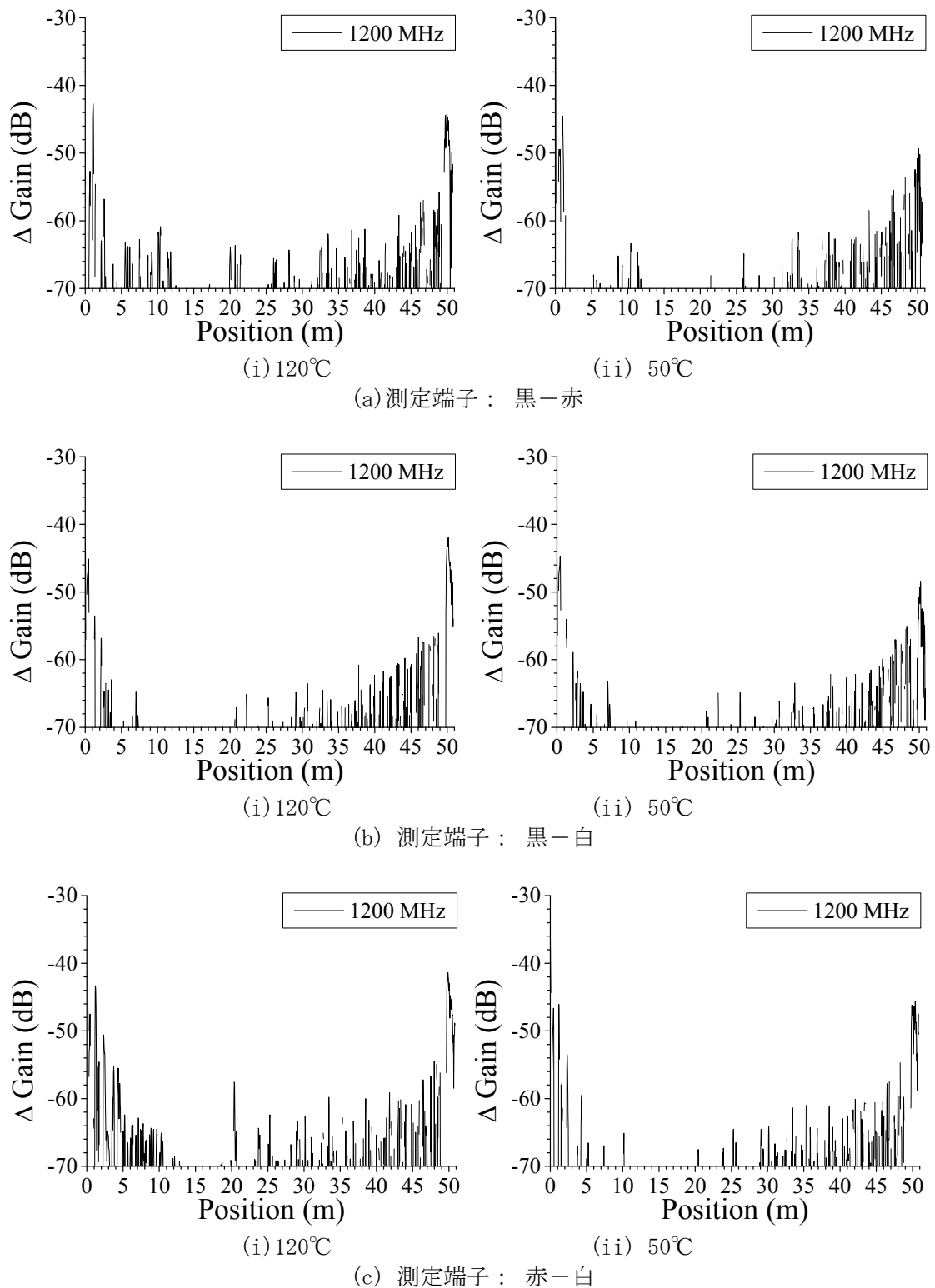
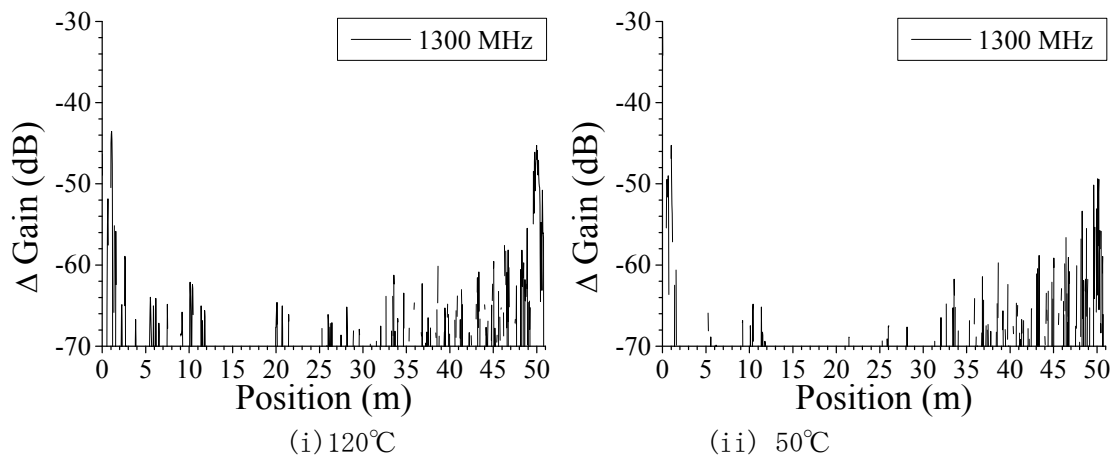
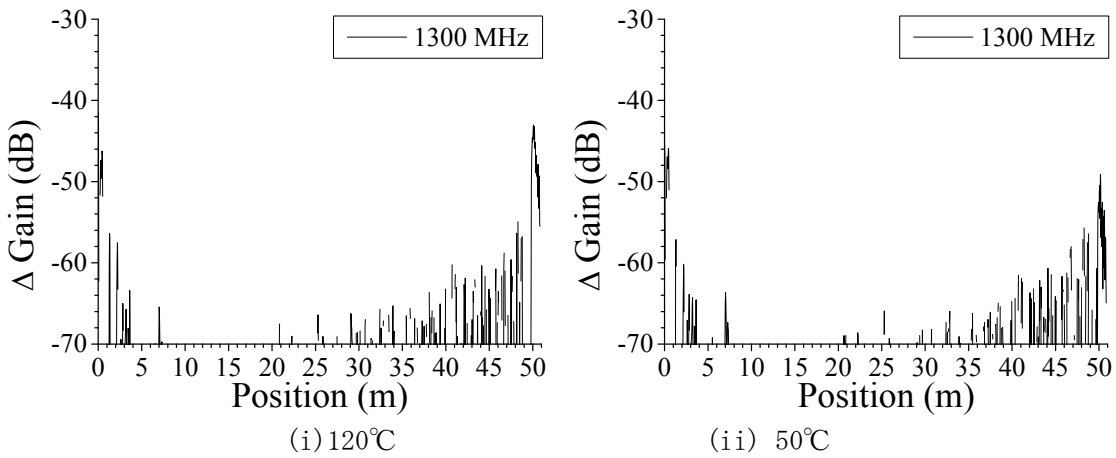


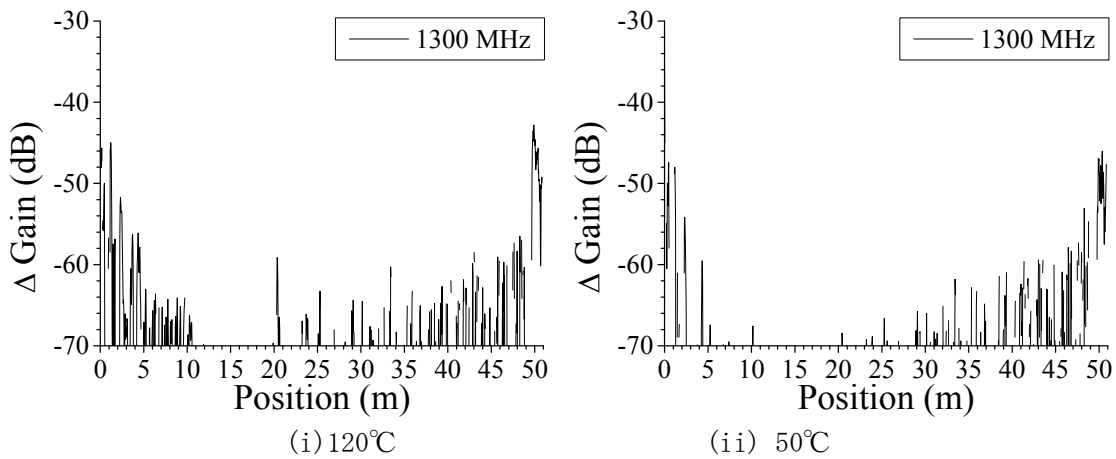
図 3.3.1-135 BIS 法による難燃 EPDM 絶縁ケーブル劣化位置標定差分結果における照射中温度の影響：0.5kGy/h、44h、測定端－劣化部：20m、測定条件：熱・放射線同時劣化中、測定周波数域：1～1200MHz、測定反対側端子：開放



(i) 120°C (ii) 50°C
(a) 測定端子：黒-赤



(i) 120°C (ii) 50°C
(b) 測定端子：黒-白



(i) 120°C (ii) 50°C
(c) 測定端子：赤-白

図 3.3.1-136 BIS 法による難燃 EPDM 絶縁ケーブル劣化位置標定差分結果における照射中温度の影響：0.5kGy/h、44h、測定端-劣化部：20m、測定条件：熱・放射線同時劣化中、測定周波数域：1~1300MHz、測定反対側端子：開放

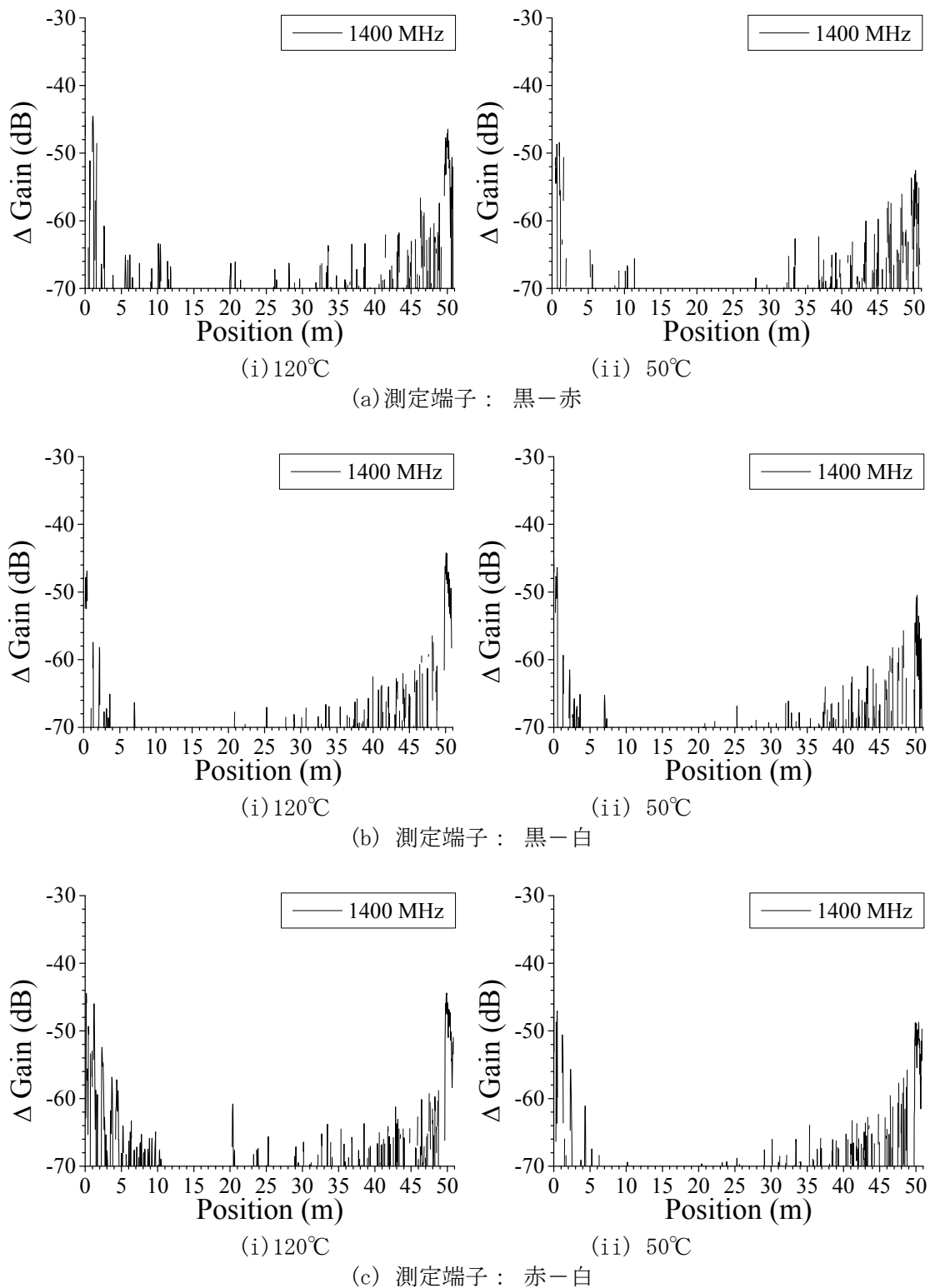


図 3.3.1-137 BIS 法による難燃 EPDM 絶縁ケーブル劣化位置標定差分結果における照射中温度の影響：0.5kGy/h、44h、測定端—劣化部：20m、測定条件：熱・放射線同時劣化中、測定周波数域：1~1400MHz、測定反対側端子：開放

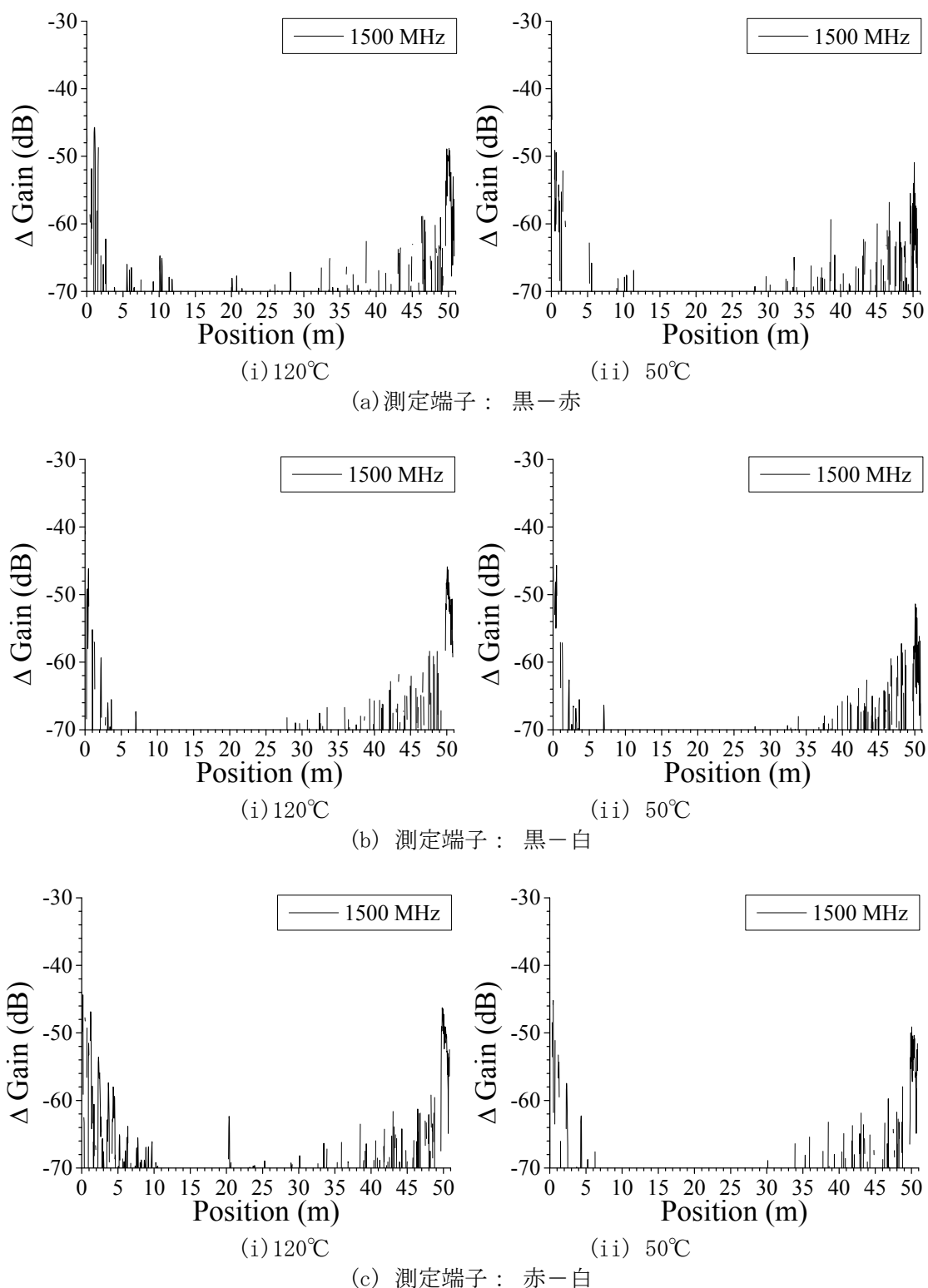
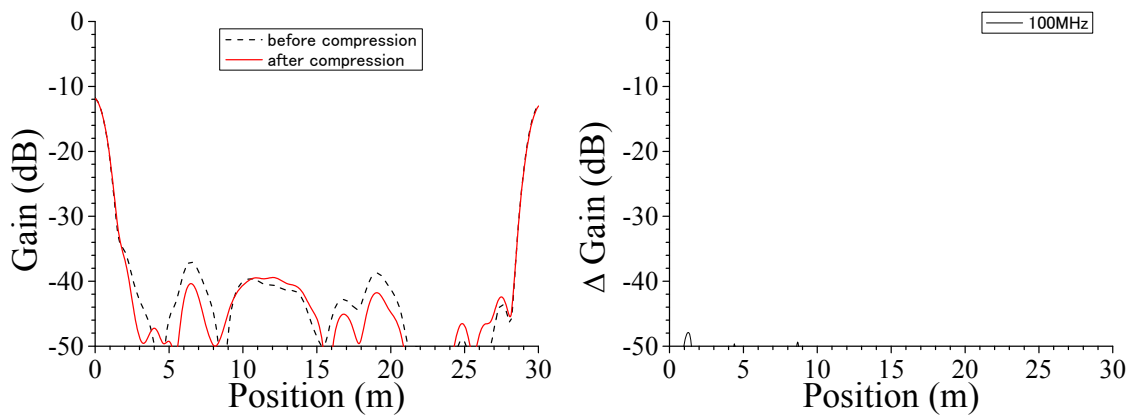


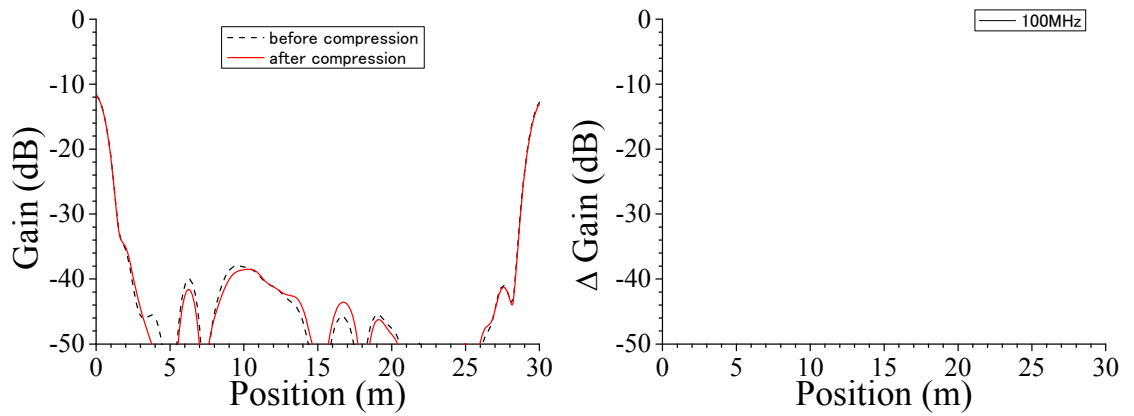
図 3.3.1-138 BIS 法による難燃 EPDM 絶縁ケーブル劣化位置標定差分結果における照射中温度の影響：0.5kGy/h、44h、測定端-劣化部：20m、測定条件：熱・放射線同時劣化中、測定周波数域：1~1500MHz、測定反対側端子：開放



(i)位置標定結果

(ii) 差分

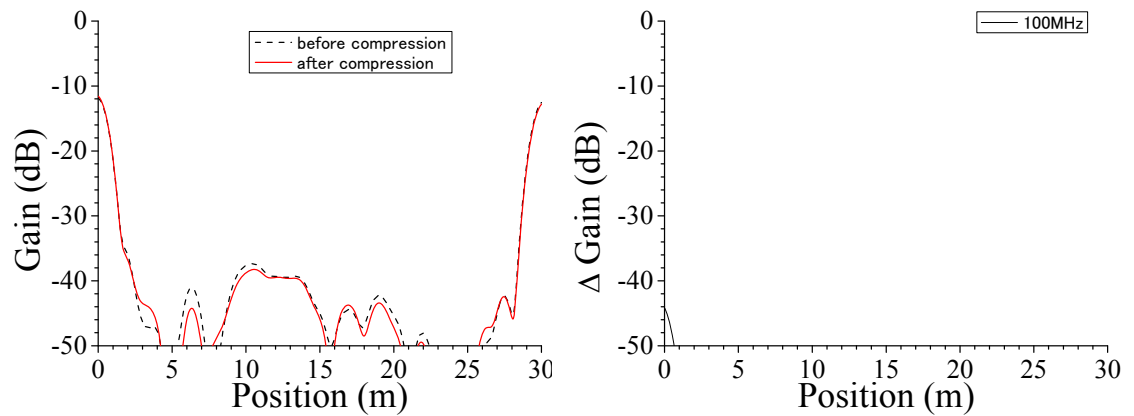
(a) 測定端子： 黒－赤



(i)位置標定結果

(ii) 差分

(b) 測定端子： 黒－白

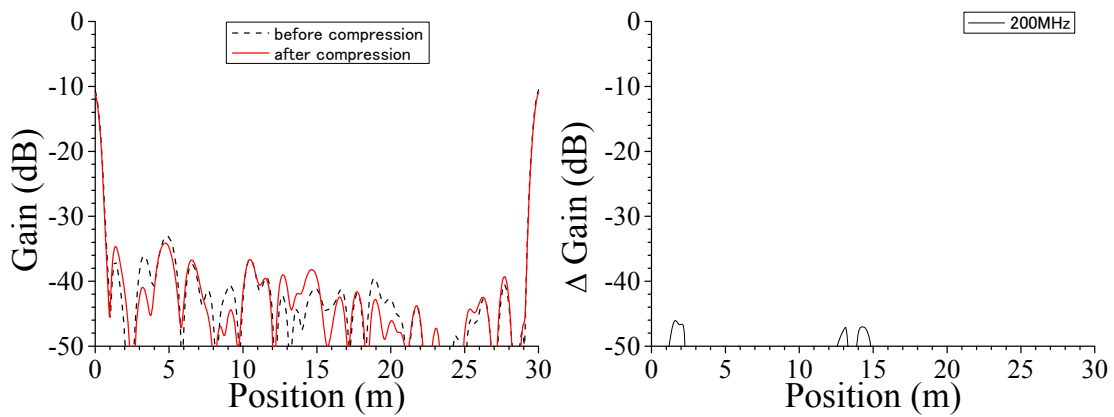


(i)位置標定結果

(ii) 差分

(c) 測定端子： 赤－白

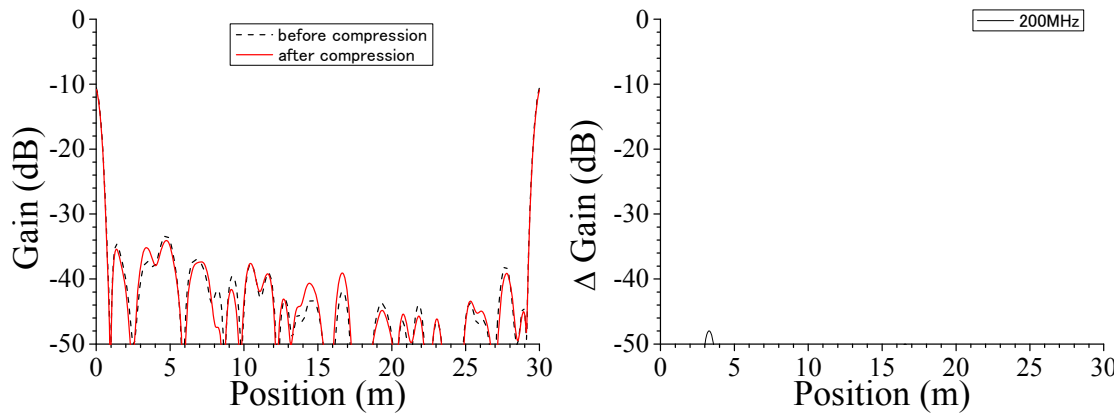
図 3. 3. 1-139 BIS 法による難燃 EPDM 絶縁ケーブル歪み位置標定結果
 歪み手段：クランプ、歪み幅：約 1. 0cm、ケーブル長：30m、ケーブル外径：約 12. 5mm⇒9. 0mm、
 測定端－歪み部：3. 5m、測定周波数域：1～100MHz、測定反対側端子：開放



(i)位置標定結果

(ii) 差分

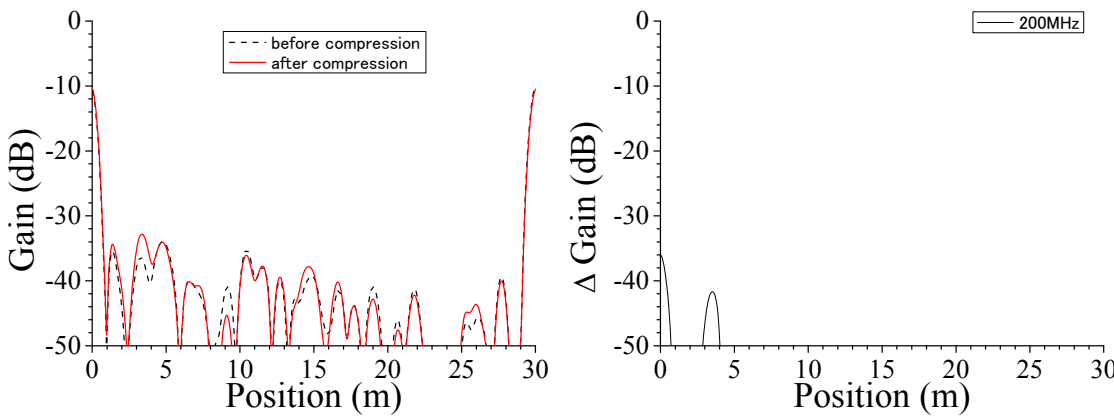
(a) 測定端子： 黒－赤



(i)位置標定結果

(ii) 差分

(b) 測定端子： 黒－白

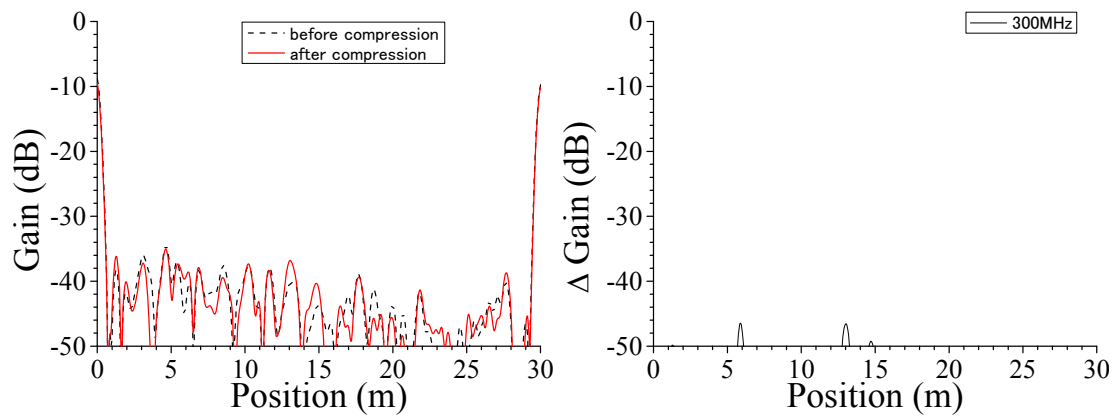


(i)位置標定結果

(ii) 差分

(c) 測定端子： 赤－白

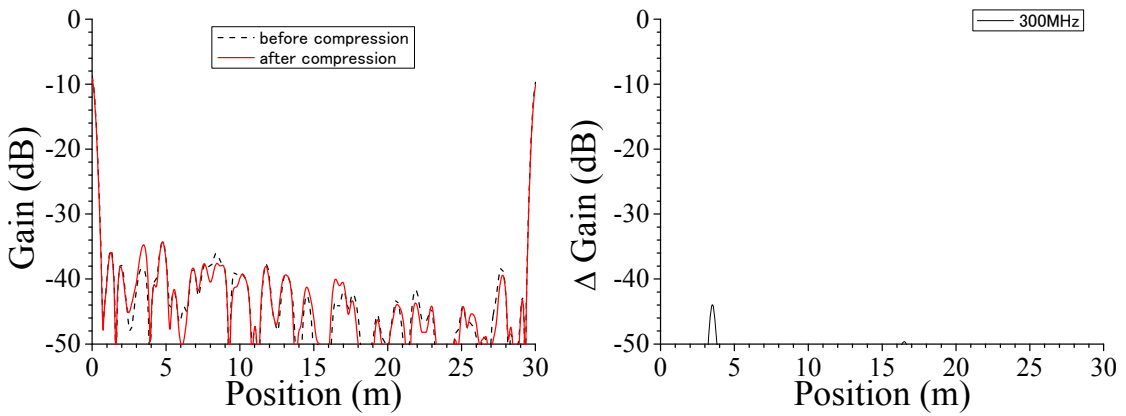
図 3. 3. 1-140 BIS 法による難燃 EPDM 絶縁ケーブル歪み位置標定結果
 歪み手段：クランプ、歪み幅：約 1.0cm、ケーブル長：30m、ケーブル外径：約 12.5mm⇒9.0mm、
 測定端－歪み部：3.5m、測定周波数域：1～200MHz、測定反対側端子：開放



(i)位置標定結果

(ii) 差分

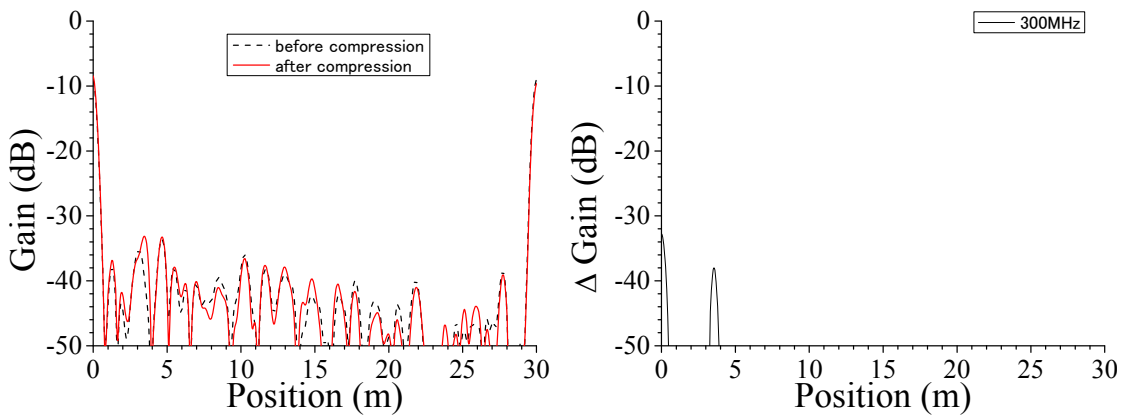
(a) 測定端子：黒－赤



(i)位置標定結果

(ii) 差分

(b) 測定端子：黒－白



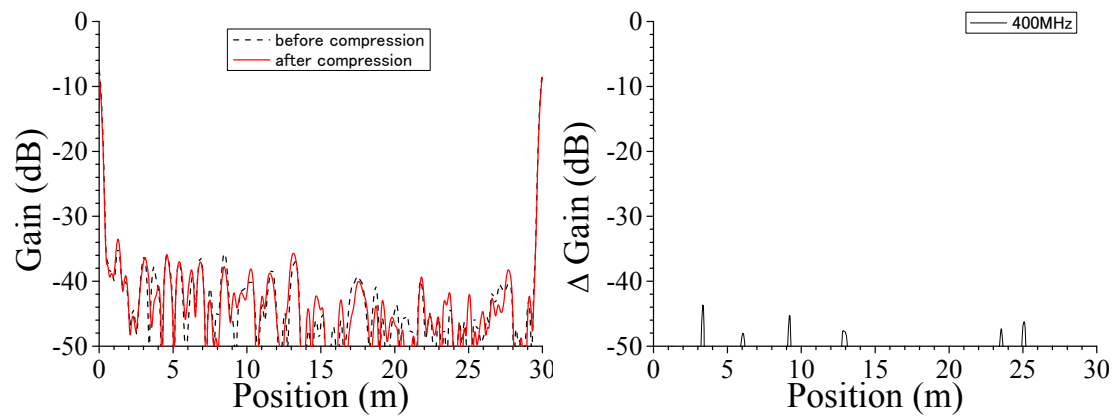
(i)位置標定結果

(ii) 差分

(c) 測定端子：赤－白

図 3. 3. 1-141 BIS 法による難燃 EPDM 絶縁ケーブル歪み位置標定結果

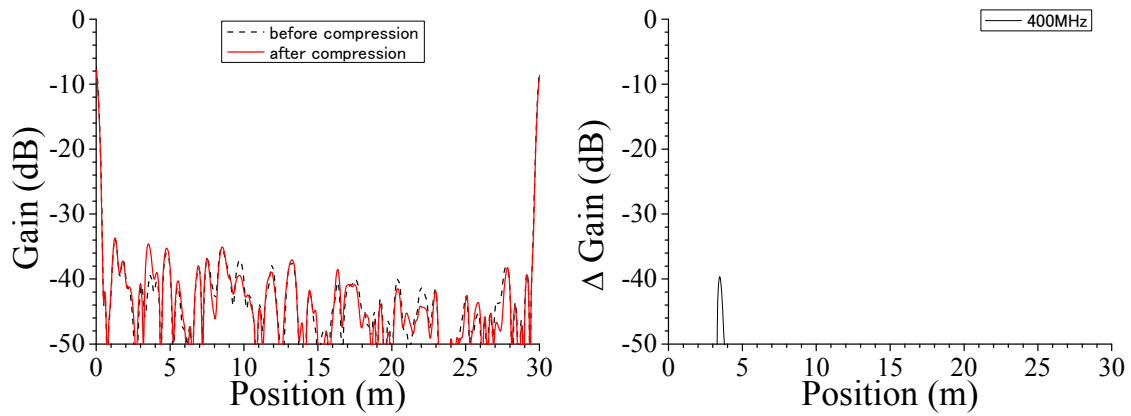
歪み手段：クランプ、歪み幅：約 1.0cm、ケーブル長：30m、ケーブル外径：約 12.5mm⇒9.0mm、
測定端－歪み部：3.5m、測定周波数域：1～300MHz、測定反対側端子：開放



(i) 位置標定結果

(ii) 差分

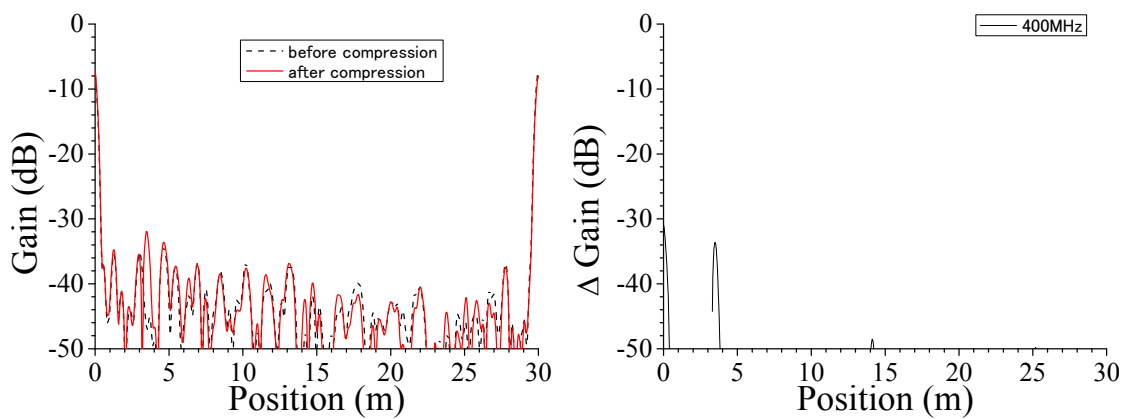
(a) 測定端子：黒－赤



(i) 位置標定結果

(ii) 差分

(b) 測定端子：黒－白



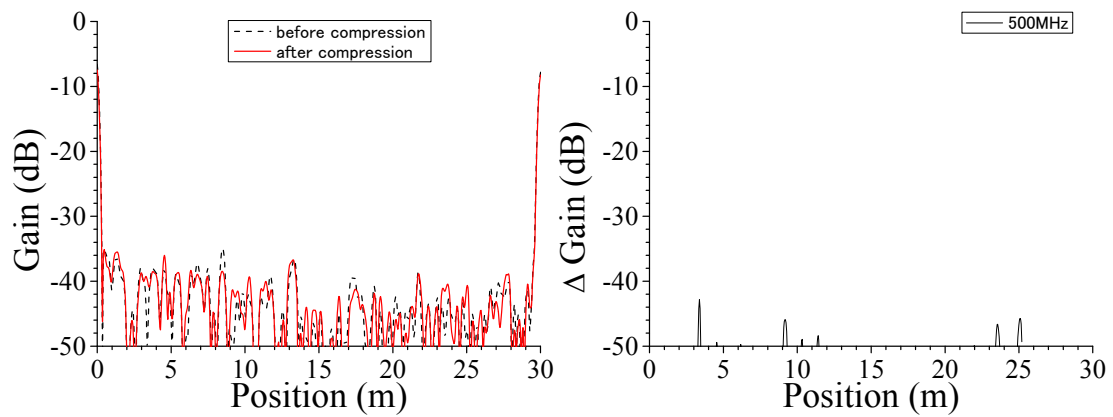
(i) 位置標定結果

(ii) 差分

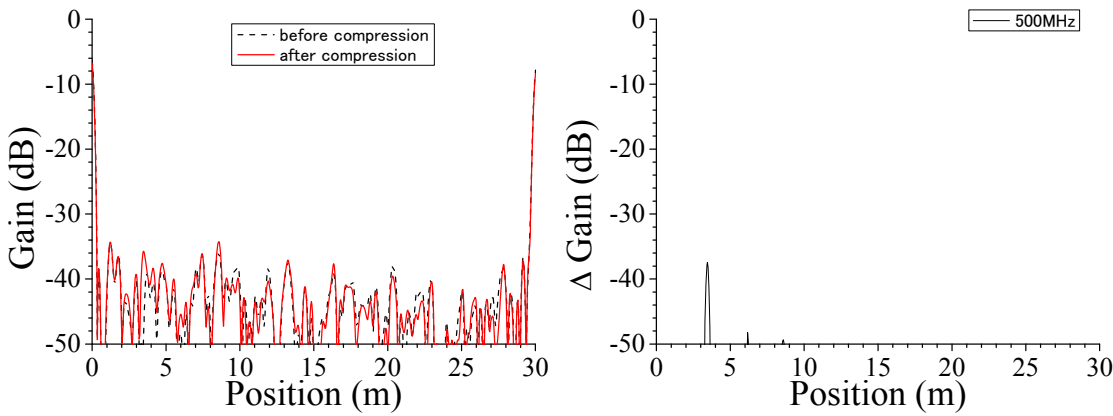
(c) 測定端子：赤－白

図 3.3.1-142 BIS 法による難燃 EPDM 絶縁ケーブル歪み位置標定結果

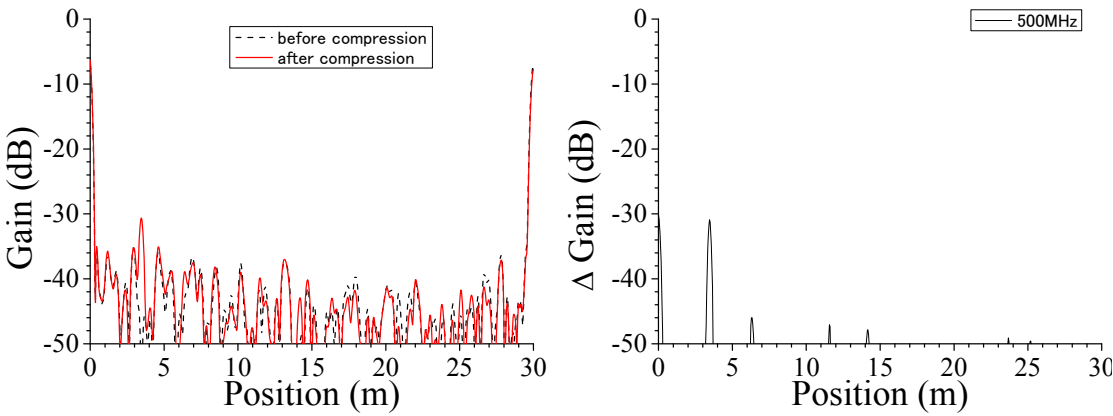
歪み手段：クランプ、歪み幅：約 1.0cm、ケーブル長：30m、ケーブル外径：約 12.5mm⇒9.0mm、
測定端－歪み部：3.5m、測定周波数域：1～400MHz、測定反対側端子：開放



(i)位置標定結果 (ii) 差分
(a) 測定端子： 黒－赤

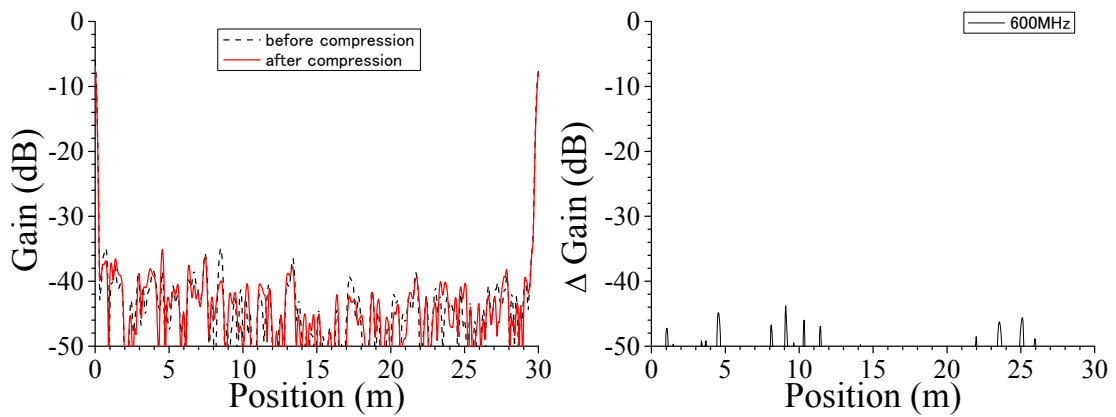


(i)位置標定結果 (ii) 差分
(b) 測定端子： 黒－白



(i)位置標定結果 (ii) 差分
(c) 測定端子： 赤－白

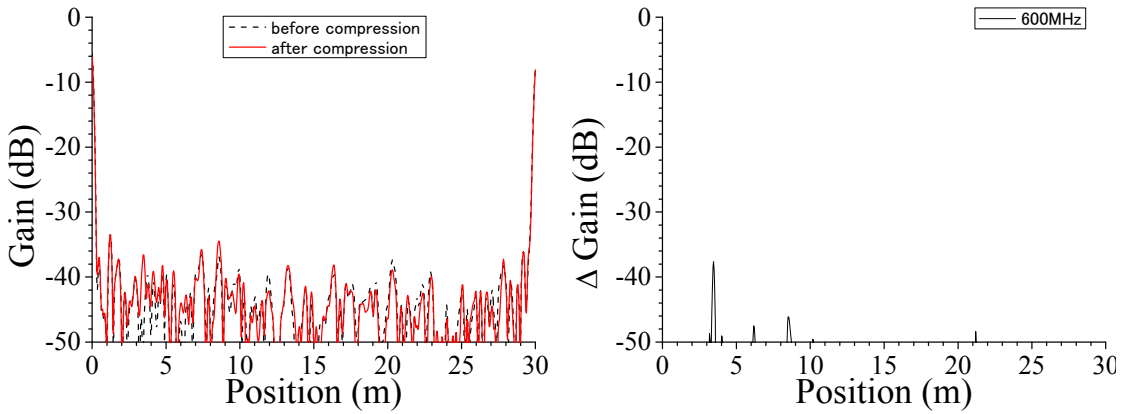
図 3. 3. 1-143 BIS 法による難燃 EPDM 絶縁ケーブル歪み位置標定結果
 歪み手段：クランプ、歪み幅：約 1.0cm、ケーブル長：30m、ケーブル外径：約 12.5mm⇒9.0mm、
 測定端－歪み部：3.5m、測定周波数域：1～500MHz、測定反対側端子：開放



(i)位置標定結果

(ii) 差分

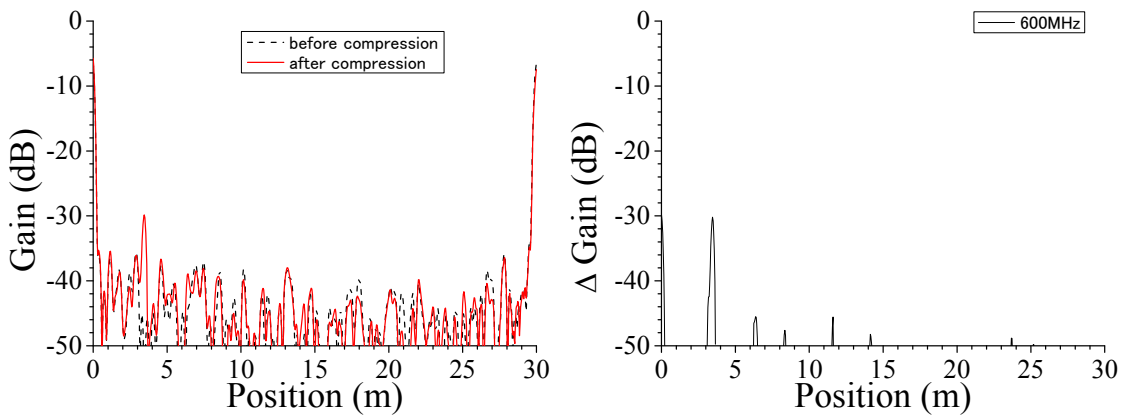
(a) 測定端子： 黒－赤



(i)位置標定結果

(ii) 差分

(b) 測定端子： 黒－白



(i)位置標定結果

(ii) 差分

(c) 測定端子： 赤－白

図 3. 3. 1-144 BIS 法による難燃 EPDM 絶縁ケーブル歪み位置標定結果

歪み手段：クランプ、歪み幅：約 1.0cm、ケーブル長：30m、ケーブル外径：約 12.5mm⇒9.0mm、
測定端－歪み部：3.5m、測定周波数域：1～600MHz、測定反対側端子：開放

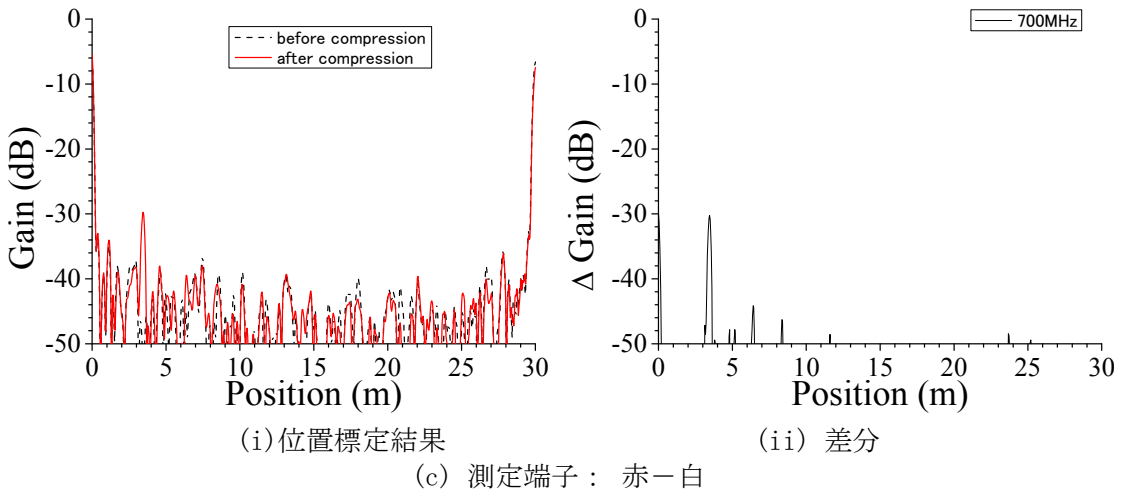
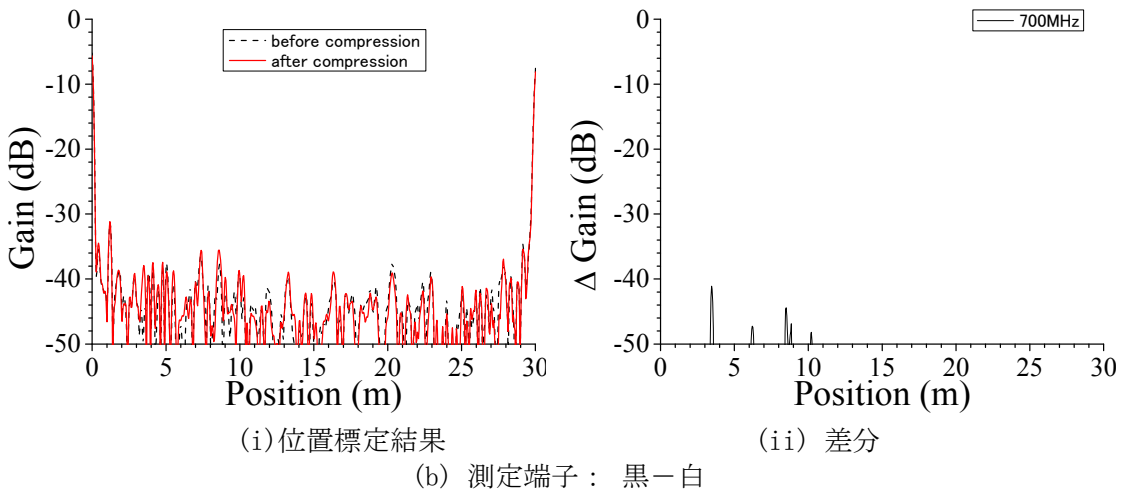
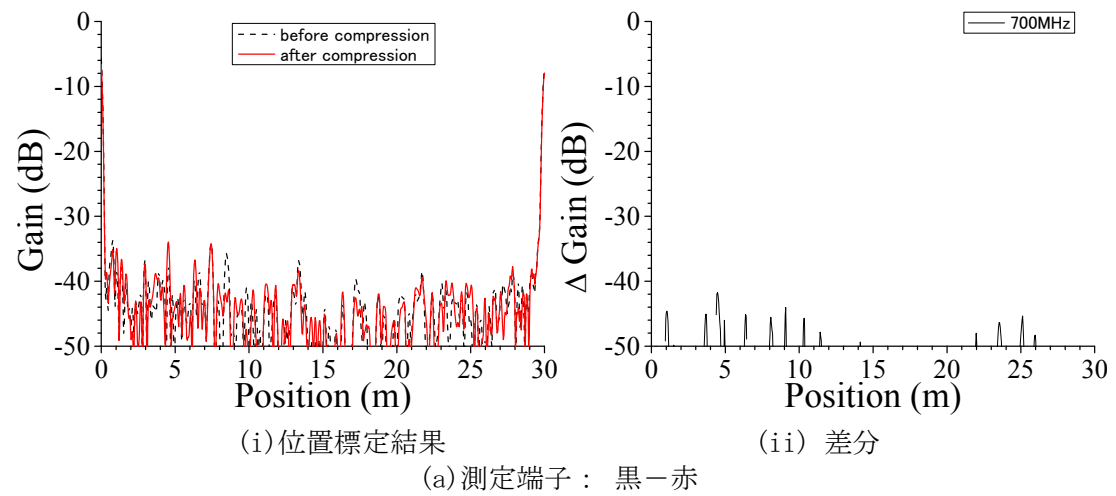
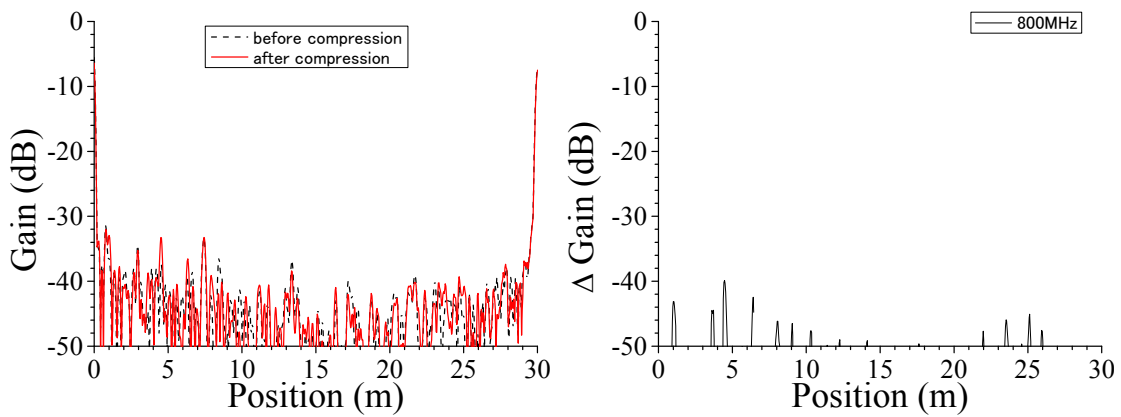


図 3. 3. 1-145 BIS 法による難燃 EPDM 絶縁ケーブル歪み位置標定結果

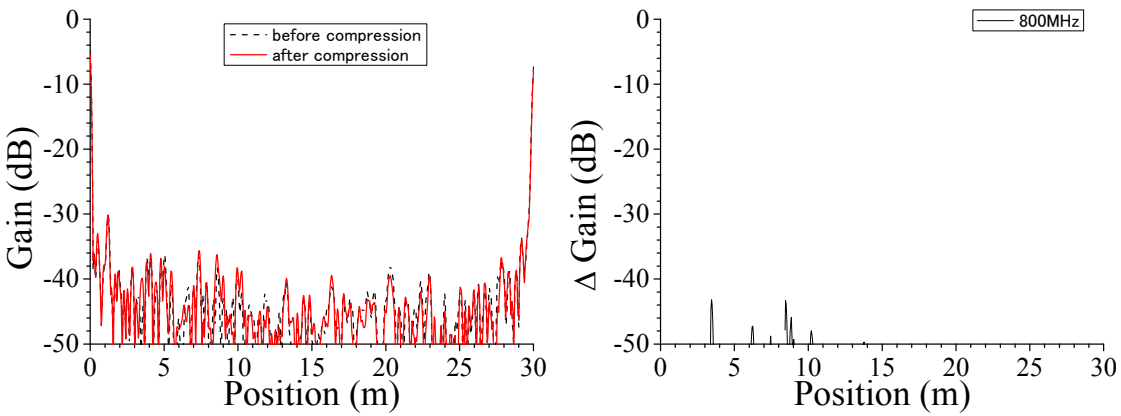
歪み手段：クランプ、歪み幅：約 1.0cm、ケーブル長：30m、ケーブル外径：約 12.5mm⇒9.0mm、
測定端—歪み部：3.5m、測定周波数域：1～700MHz、測定反対側端子：開放



(i)位置標定結果

(ii) 差分

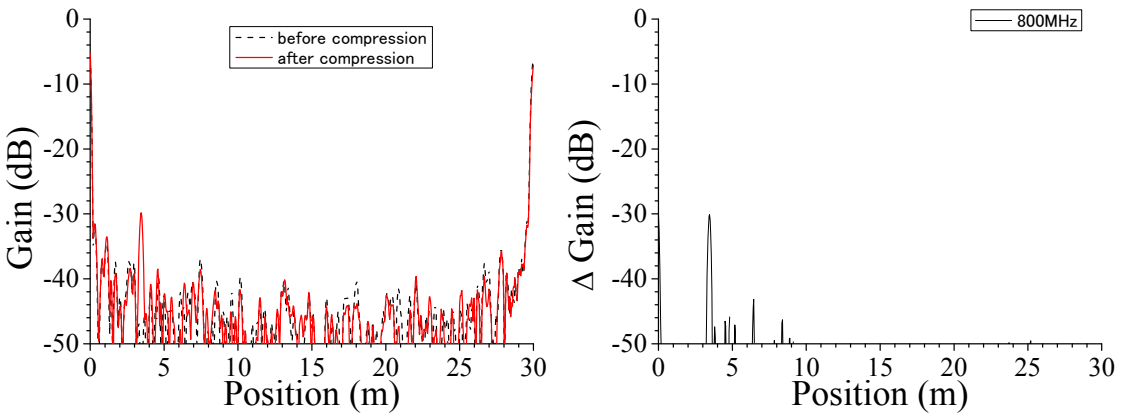
(a) 測定端子： 黒-赤



(i)位置標定結果

(ii) 差分

(b) 測定端子： 黒-白



(i)位置標定結果

(ii) 差分

(c) 測定端子： 赤-白

図 3. 3. 1-146 BIS 法による難燃 EPDM 絶縁ケーブル歪み位置標定結果

歪み手段：クランプ、歪み幅：約 1.0cm、ケーブル長：30m、ケーブル外径：約 12.5mm⇒9.0mm、
測定端—歪み部：3.5m、測定周波数域：1～800MHz、測定反対側端子：開放

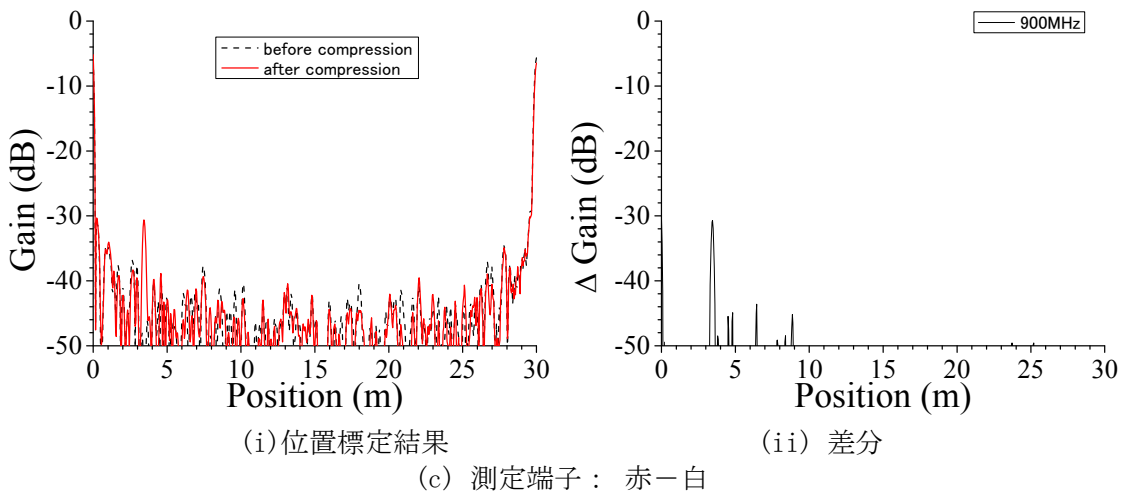
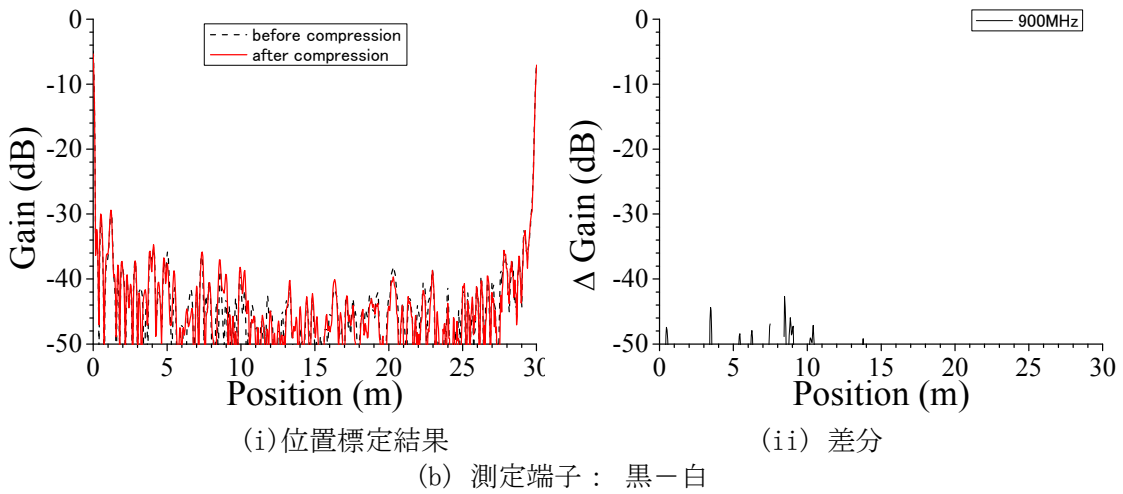
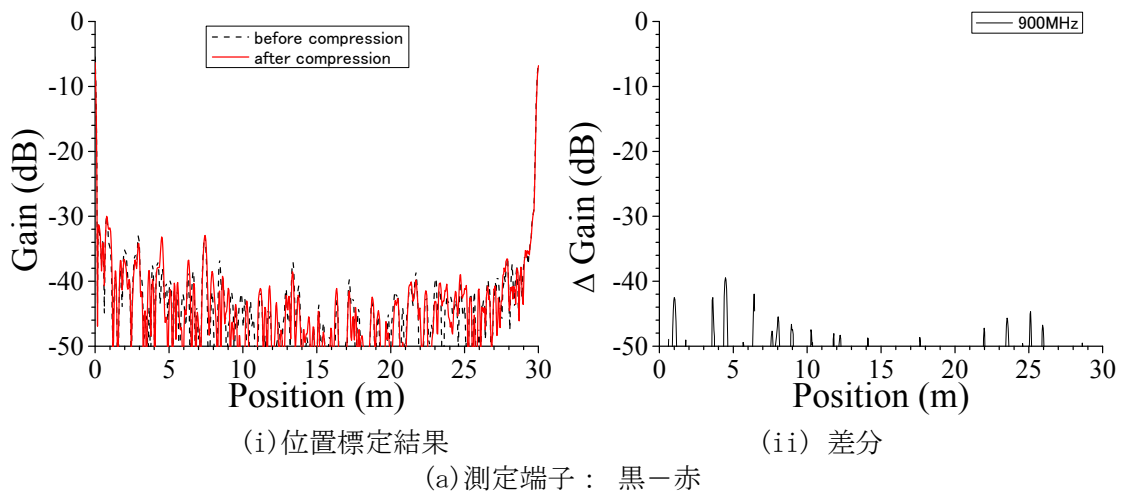
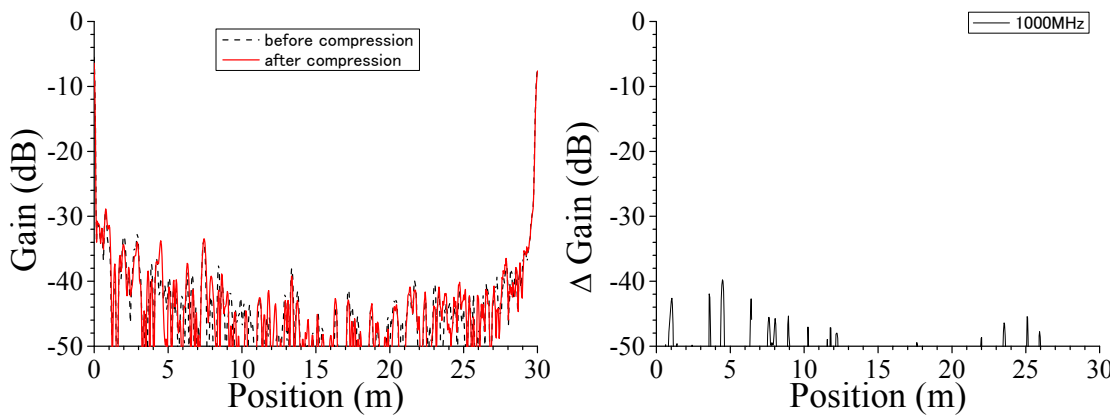


図 3.3.1-147 BIS 法による難燃 EPDM 絶縁ケーブル歪み位置標定結果

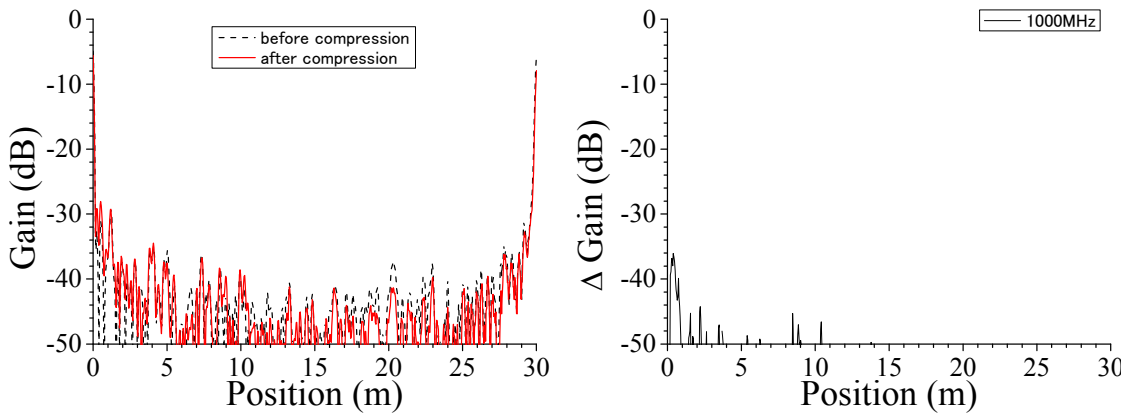
歪み手段：クランプ、歪み幅：約 1.0cm、ケーブル長：30m、ケーブル外径：約 12.5mm⇒9.0mm、
測定端—歪み部：3.5m、測定周波数域：1～900MHz、測定反対側端子：開放



(i)位置標定結果

(ii) 差分

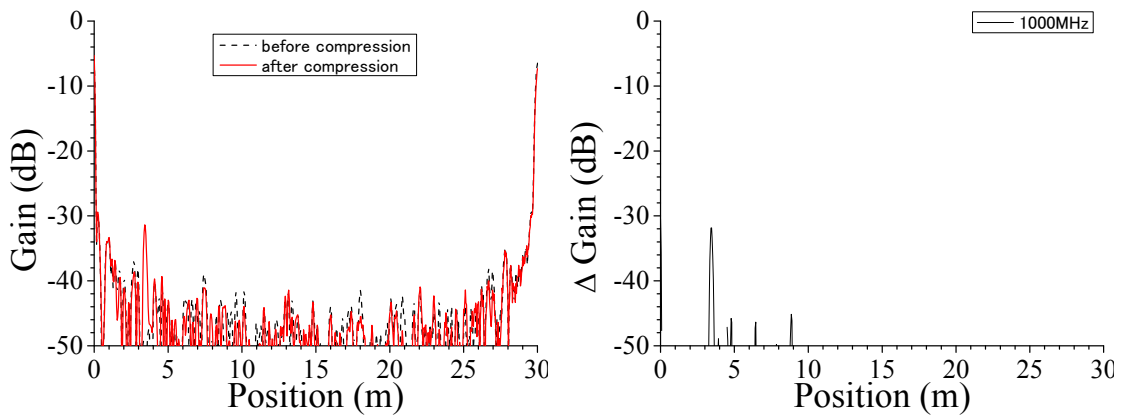
(a) 測定端子： 黒-赤



(i)位置標定結果

(ii) 差分

(b) 測定端子： 黒-白

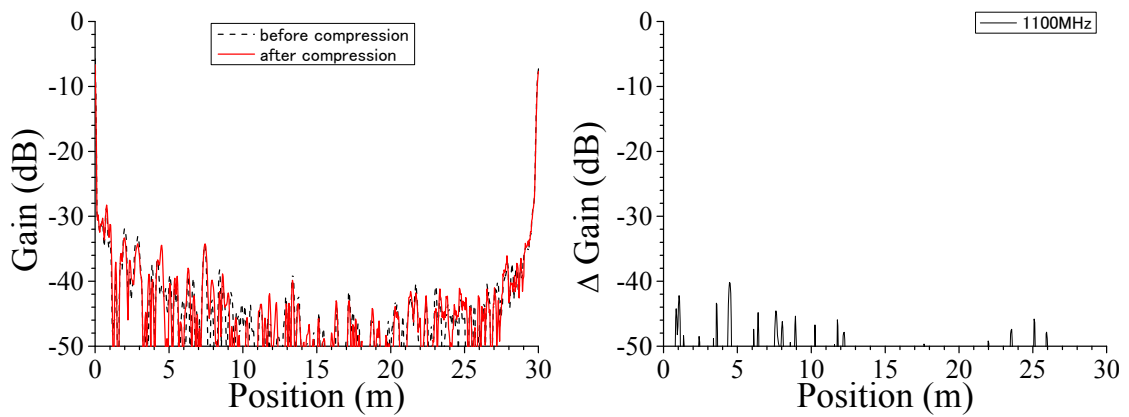


(i)位置標定結果

(ii) 差分

(c) 測定端子： 赤-白

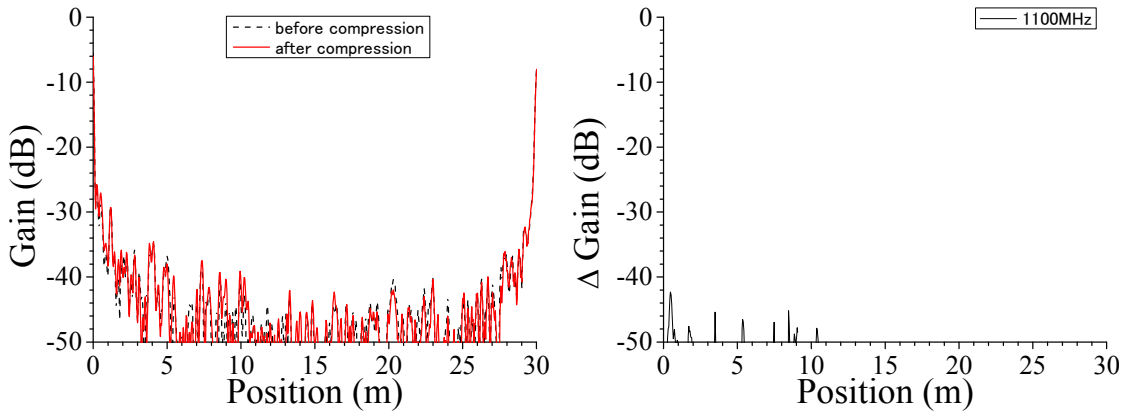
図 3.3.1-148 BIS 法による難燃 EPDM 絶縁ケーブル歪み位置標定結果
 歪み手段: クランプ、歪み幅: 約 1.0cm、ケーブル長: 30m、ケーブル外径: 約 12.5mm⇒9.0mm、
 測定端—歪み部: 3.5m、測定周波数域: 1~1000MHz、測定反対側端子: 開放



(i)位置標定結果

(ii) 差分

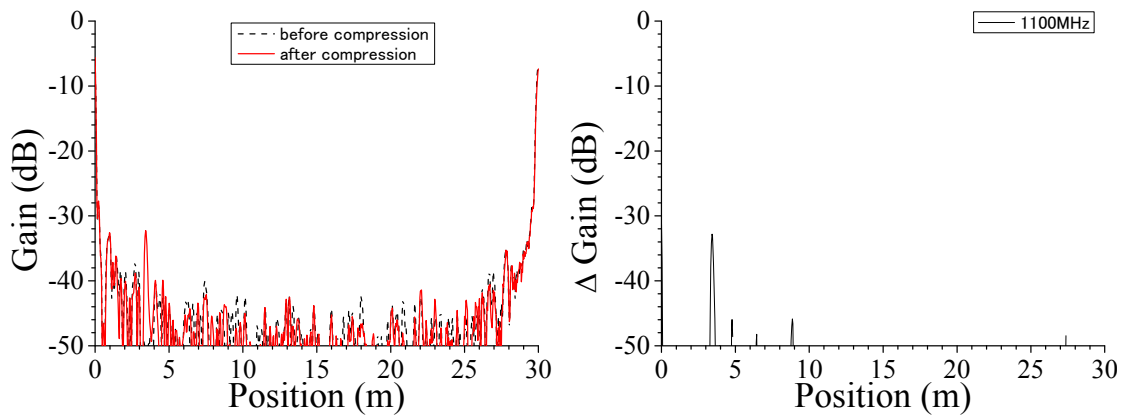
(a) 測定端子： 黒－赤



(i)位置標定結果

(ii) 差分

(b) 測定端子： 黒－白

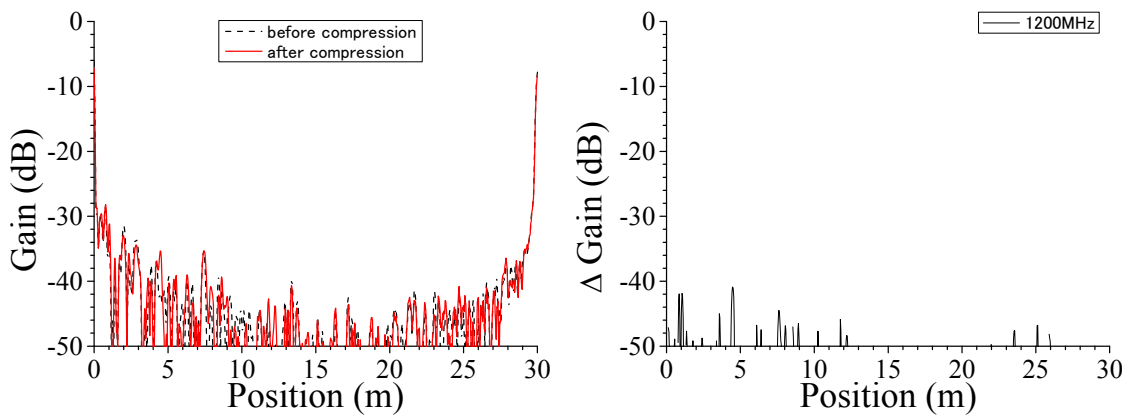


(i)位置標定結果

(ii) 差分

(c) 測定端子： 赤－白

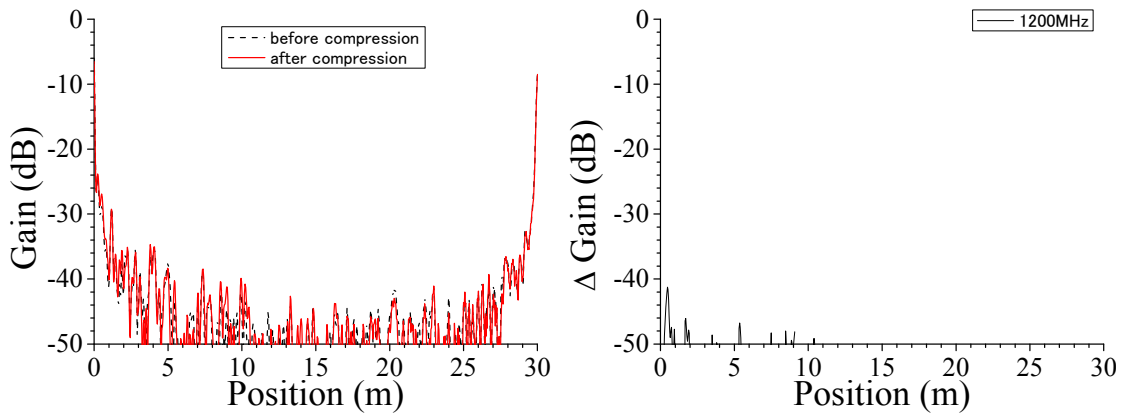
図 3. 3. 1-149 BIS 法による難燃 EPDM 絶縁ケーブル歪み位置標定結果
 歪み手段：クランプ、歪み幅：約 1. 0cm、ケーブル長：30m、ケーブル外径：約 12. 5mm⇒9. 0mm、
 測定端－歪み部：3. 5m、測定周波数域：1～1100MHz、測定反対側端子：開放



(i)位置標定結果

(ii) 差分

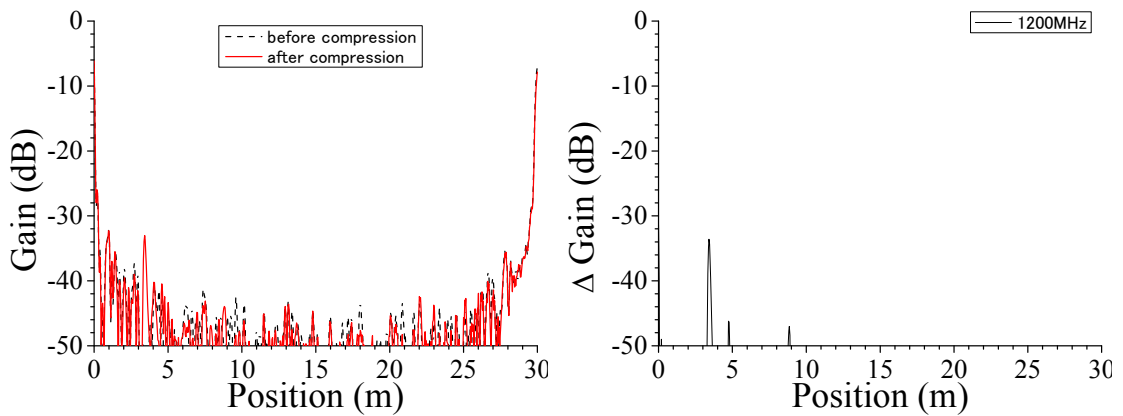
(a) 測定端子：黒－赤



(i)位置標定結果

(ii) 差分

(b) 測定端子：黒－白

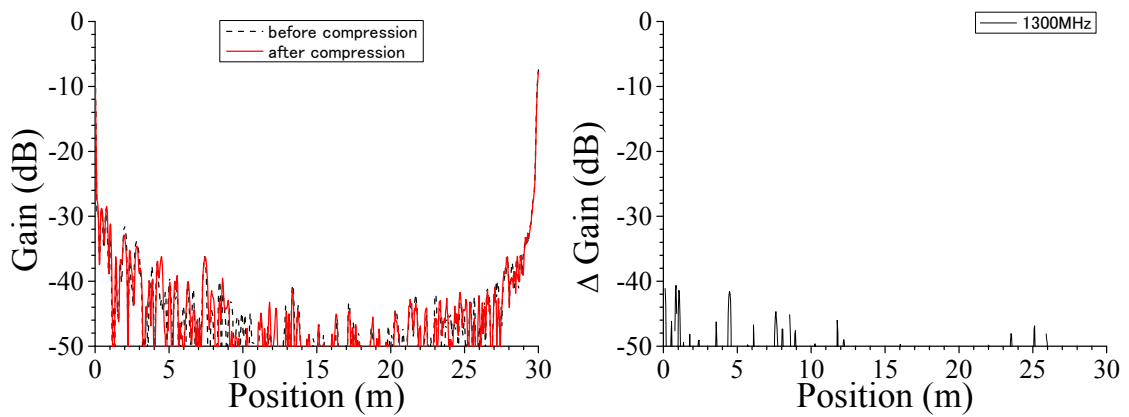


(i)位置標定結果

(ii) 差分

(c) 測定端子：赤－白

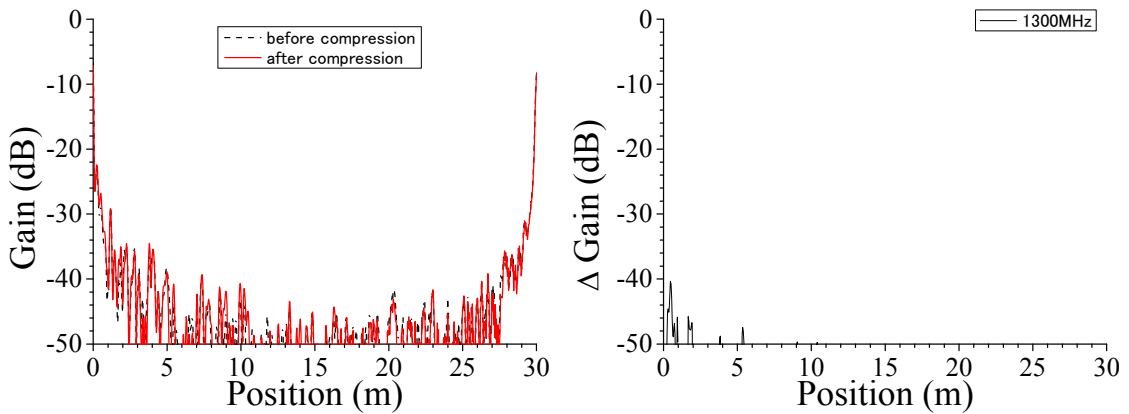
図 3. 3. 1-150 BIS 法による難燃 EPDM 絶縁ケーブル歪み位置標定結果
 歪み手段: クランプ、歪み幅: 約 1. 0cm、ケーブル長: 30m、ケーブル外径: 約 12. 5mm⇒9. 0mm、
 測定端－歪み部: 3. 5m、測定周波数域: 1～1200MHz、測定反対側端子: 開放



(i)位置標定結果

(ii) 差分

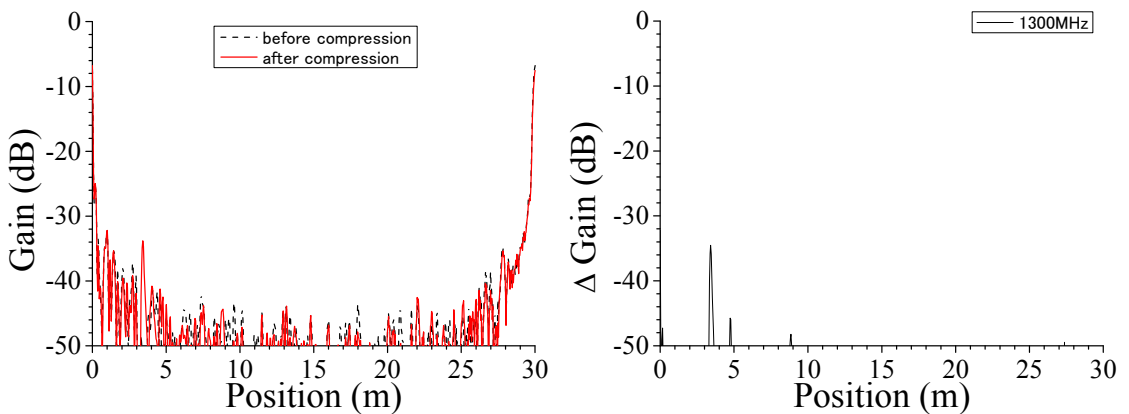
(a) 測定端子： 黒－赤



(i)位置標定結果

(ii) 差分

(b) 測定端子： 黒－白

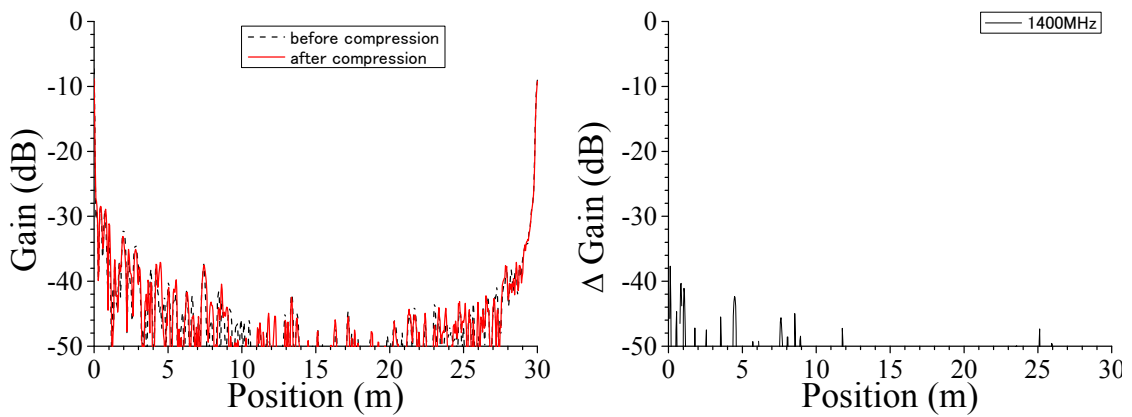


(i)位置標定結果

(ii) 差分

(c) 測定端子： 赤－白

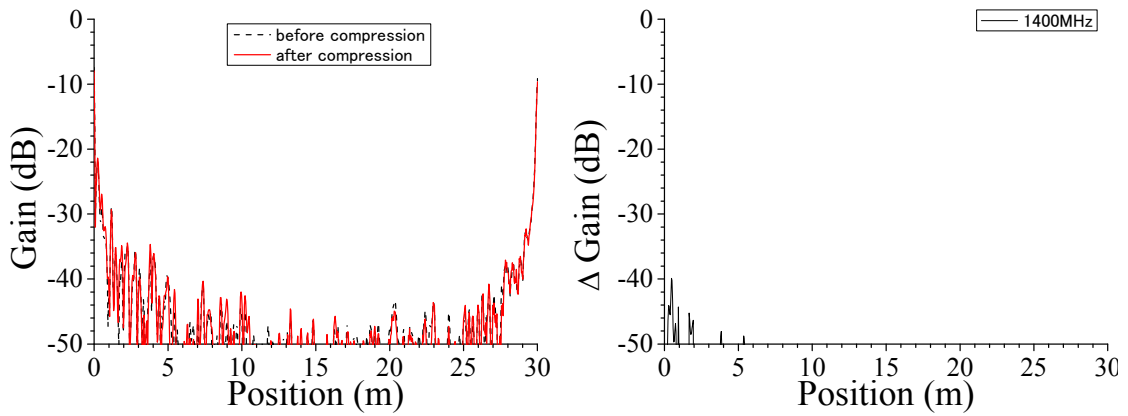
図 3.3.1-151 BIS 法による難燃 EPDM 絶縁ケーブル歪み位置標定結果
 歪み手段：クランプ、歪み幅：約 1.0cm、ケーブル長：30m、ケーブル外径：約 12.5mm⇒9.0mm、
 測定端－歪み部：3.5m、測定周波数域：1～1300MHz、測定反対側端子：開放



(i)位置標定結果

(ii) 差分

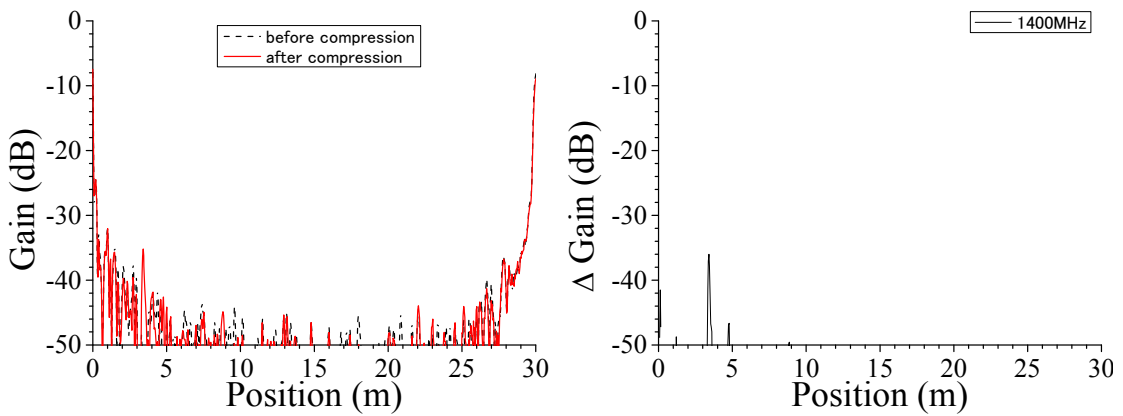
(a) 測定端子： 黒－赤



(i)位置標定結果

(ii) 差分

(b) 測定端子： 黒－白

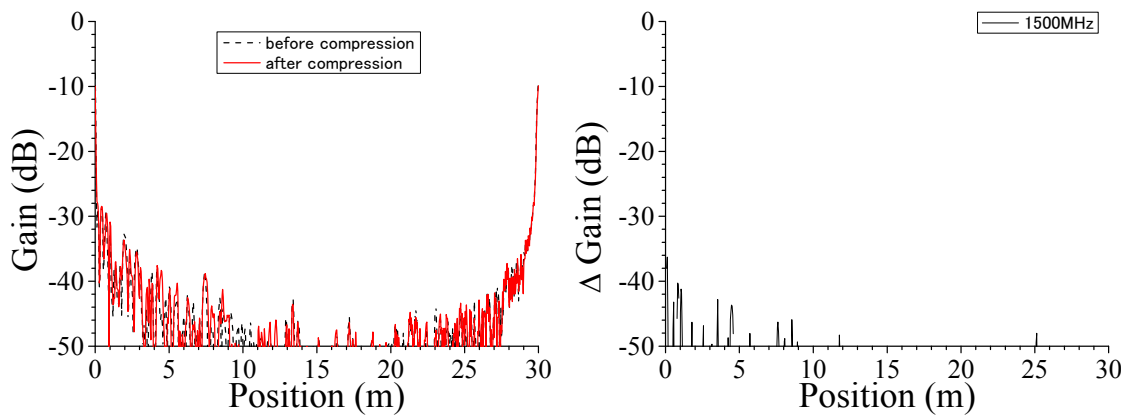


(i)位置標定結果

(ii) 差分

(c) 測定端子： 赤－白

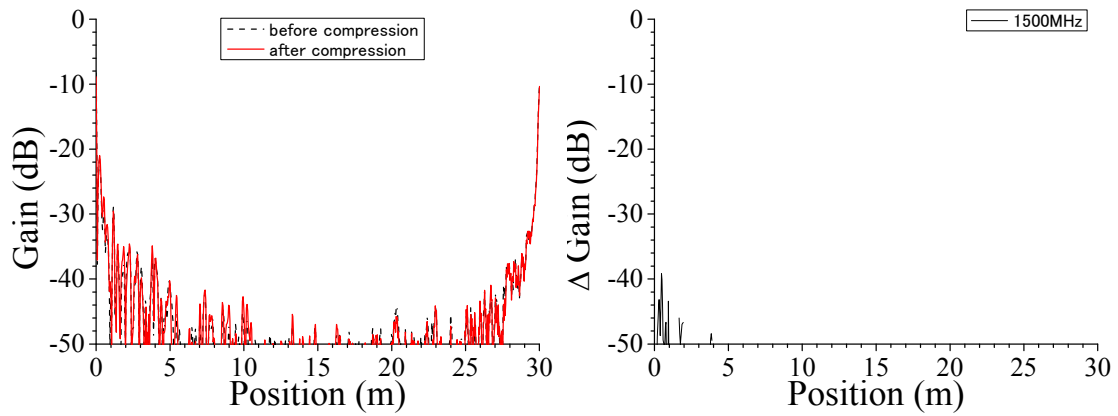
図 3. 3. 1-152 BIS 法による難燃 EPDM 絶縁ケーブル歪み位置標定結果
 歪み手段：クランプ、歪み幅：約 1.0cm、ケーブル長：30m、ケーブル外径：約 12.5mm⇒9.0mm、
 測定端－歪み部：3.5m、測定周波数域：1～1400MHz、測定反対側端子：開放



(i) 位置標定結果

(ii) 差分

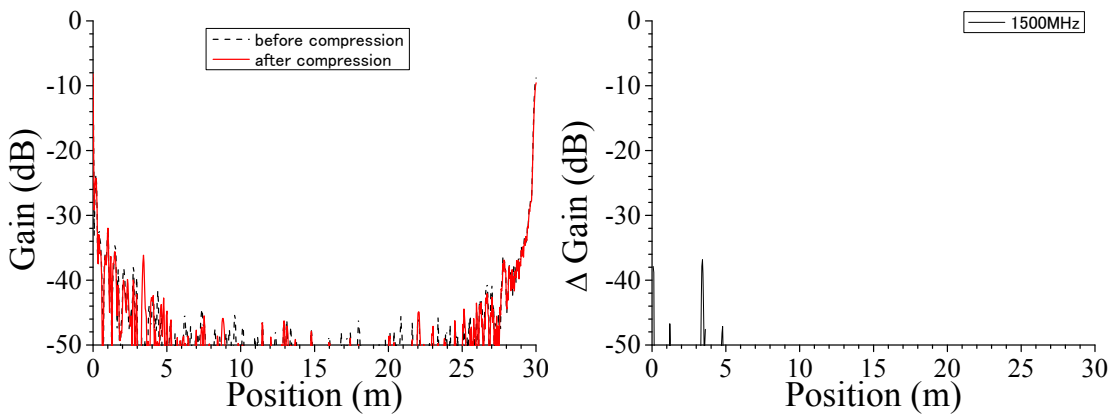
(a) 測定端子：黒－赤



(i) 位置標定結果

(ii) 差分

(b) 測定端子：黒－白

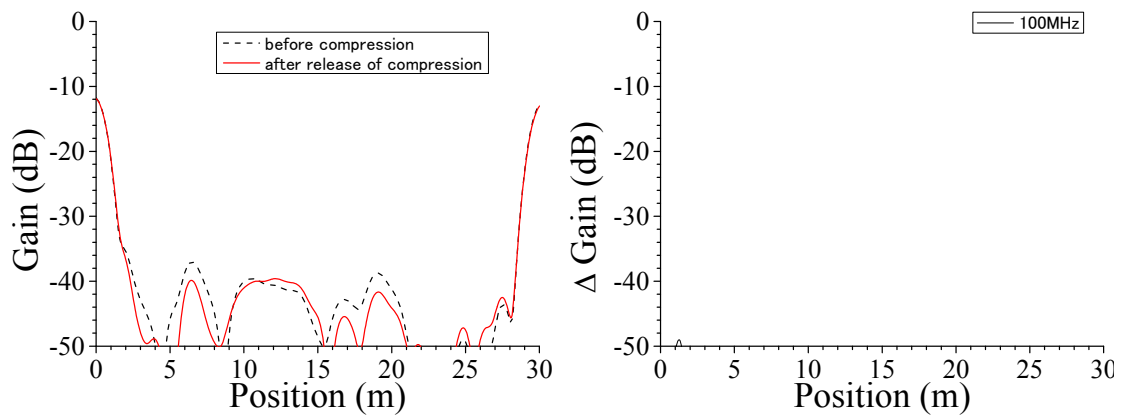


(i) 位置標定結果

(ii) 差分

(c) 測定端子：赤－白

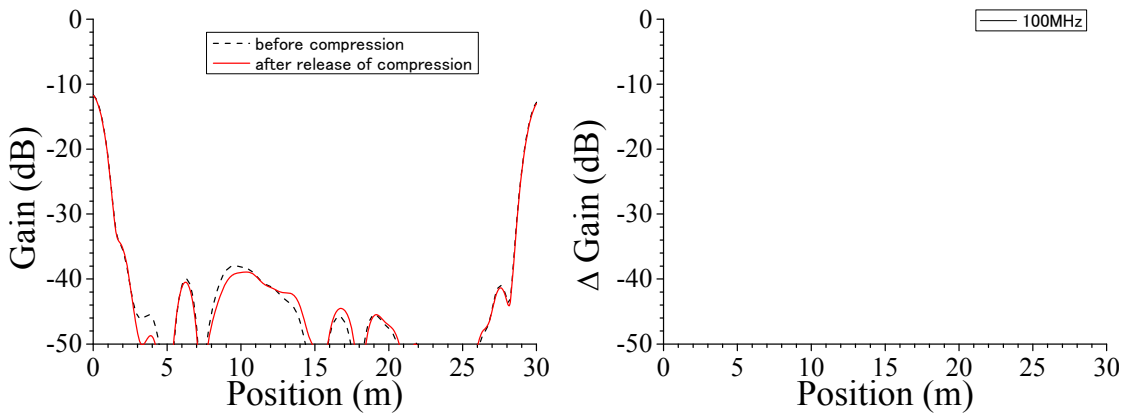
図 3.3.1-153 BIS 法による難燃 EPDM 絶縁ケーブル歪み位置標定結果
 歪み手段：クランプ、歪み幅：約 1.0cm、ケーブル長：30m、ケーブル外径：約 12.5mm⇒9.0mm、
 測定端－歪み部：3.5m、測定周波数域：1～1500MHz、測定反対側端子：開放



(i)位置標定結果

(ii) 差分

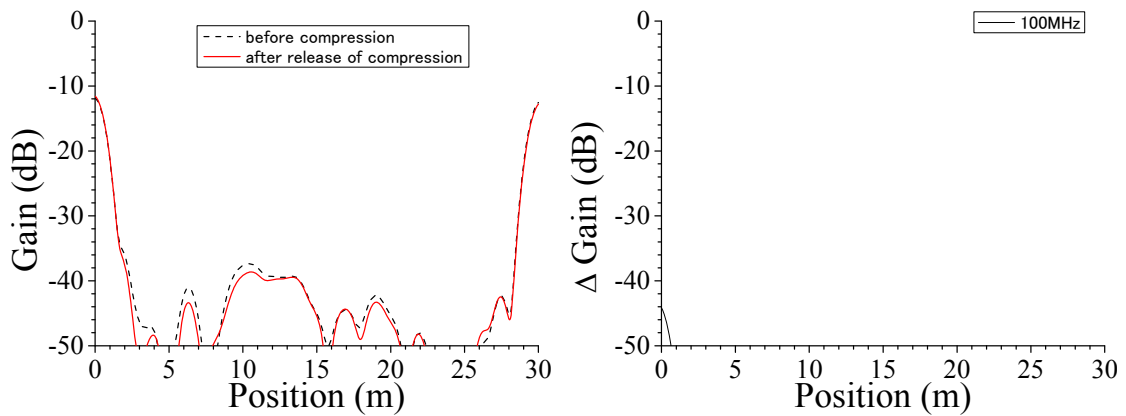
(a) 測定端子： 黒－赤



(i)位置標定結果

(ii) 差分

(b) 測定端子： 黒－白

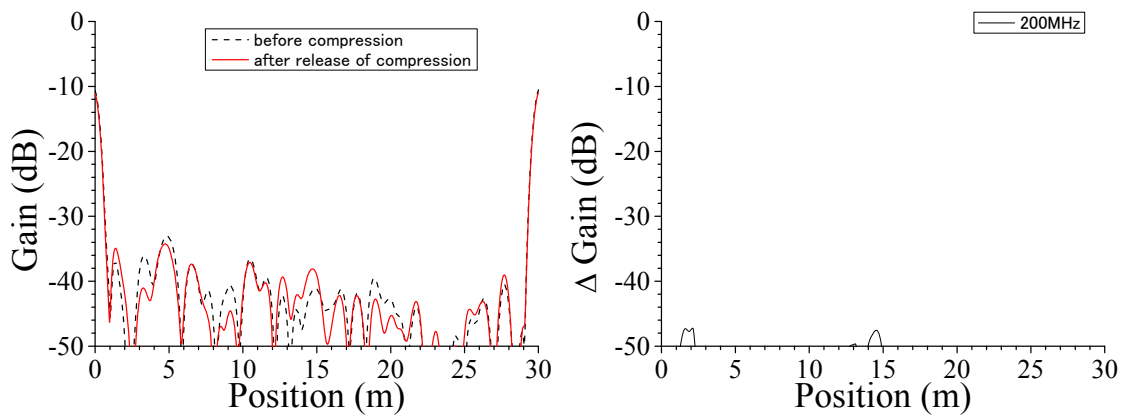


(i)位置標定結果

(ii) 差分

(c) 測定端子： 赤－白

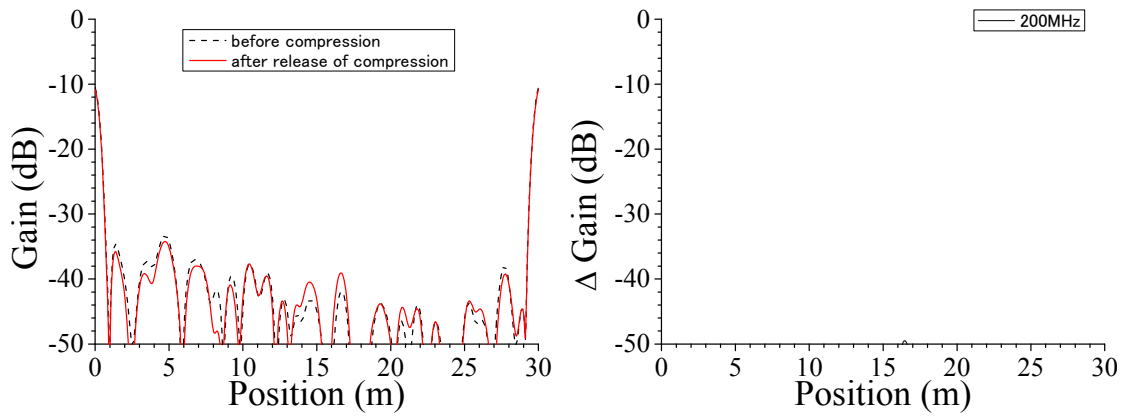
図 3. 3. 1-154 クランプ取り外し後 BIS 法による難燃 EPDM 絶縁ケーブル歪み位置標定結果
 歪み手段：クランプ取り外し後、歪み幅：約 1.0cm、ケーブル外径：約 9.0mm⇒12.5mm、測
 定端－歪み部：3.5m、測定周波数域：1～100MHz、測定反対側端子：開放



(i)位置標定結果

(ii) 差分

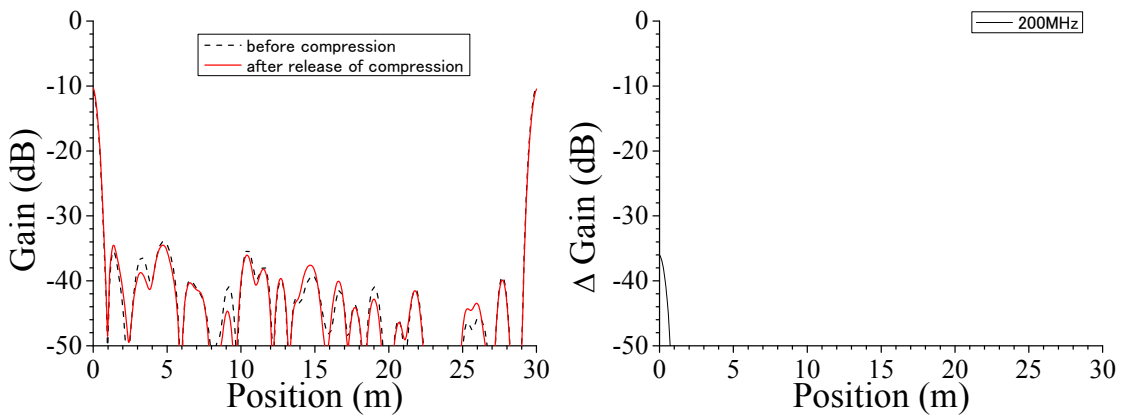
(a) 測定端子： 黒－赤



(i)位置標定結果

(ii) 差分

(b) 測定端子： 黒－白

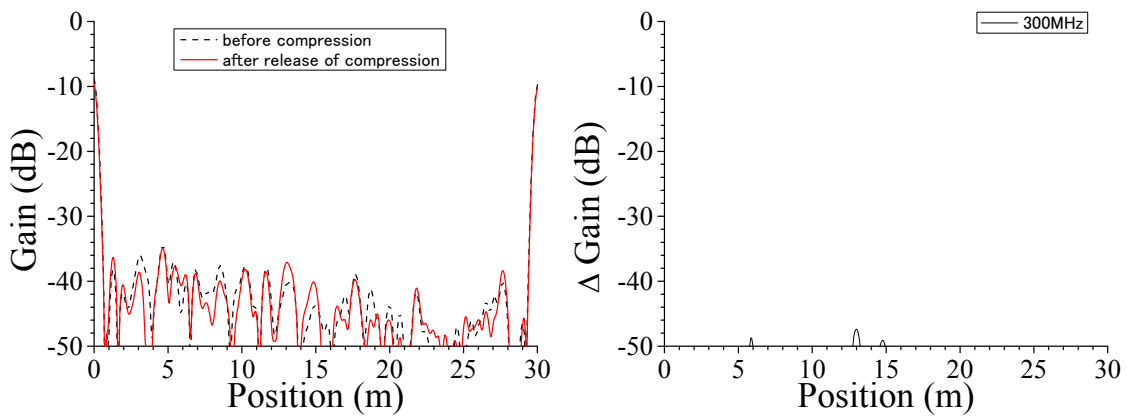


(i)位置標定結果

(ii) 差分

(c) 測定端子： 赤－白

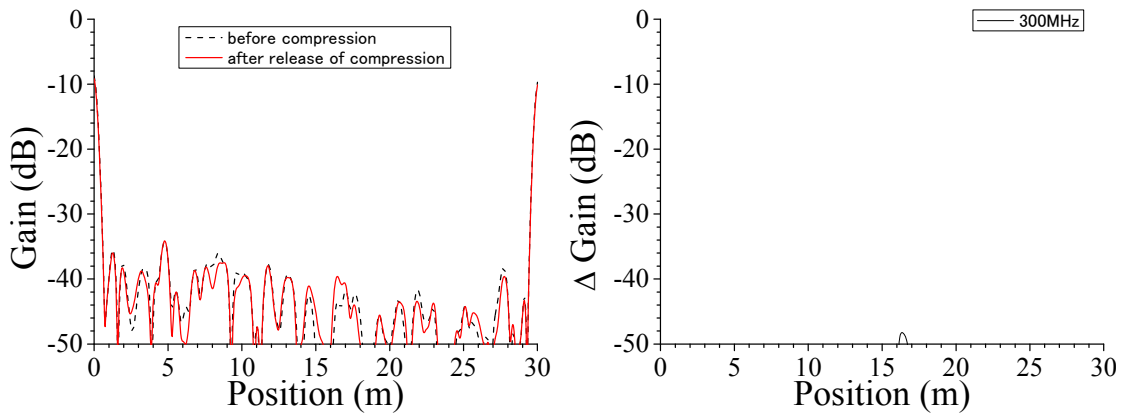
図 3. 3. 1-155 クランプ取り外し後 BIS 法による難燃 EPDM 絶縁ケーブル歪み位置標定結果
 歪み手段：クランプ取り外し後、歪み幅：約 1.0cm、ケーブル外径：約 9.0mm⇒12.5mm、測
 定端－歪み部：3.5m、測定周波数域：1～200MHz、測定反対側端子：開放



(i)位置標定結果

(ii) 差分

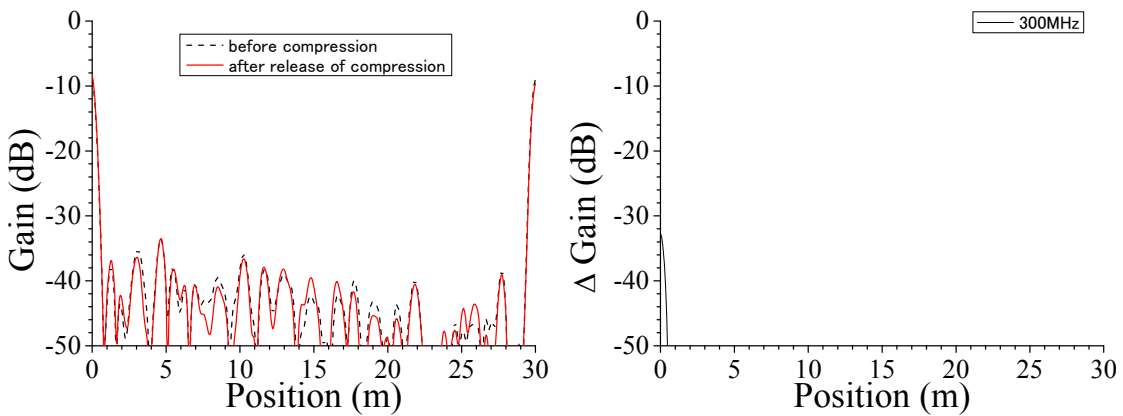
(a) 測定端子： 黒－赤



(i)位置標定結果

(ii) 差分

(b) 測定端子： 黒－白

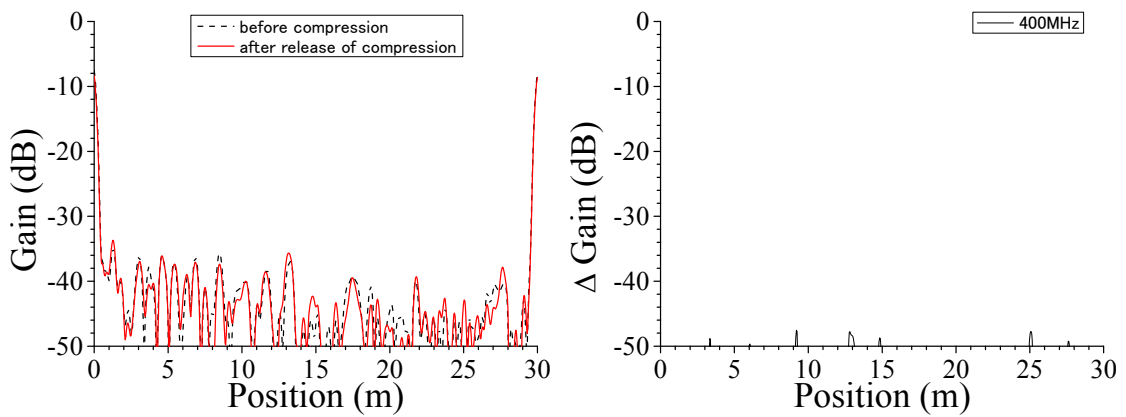


(i)位置標定結果

(ii) 差分

(c) 測定端子： 赤－白

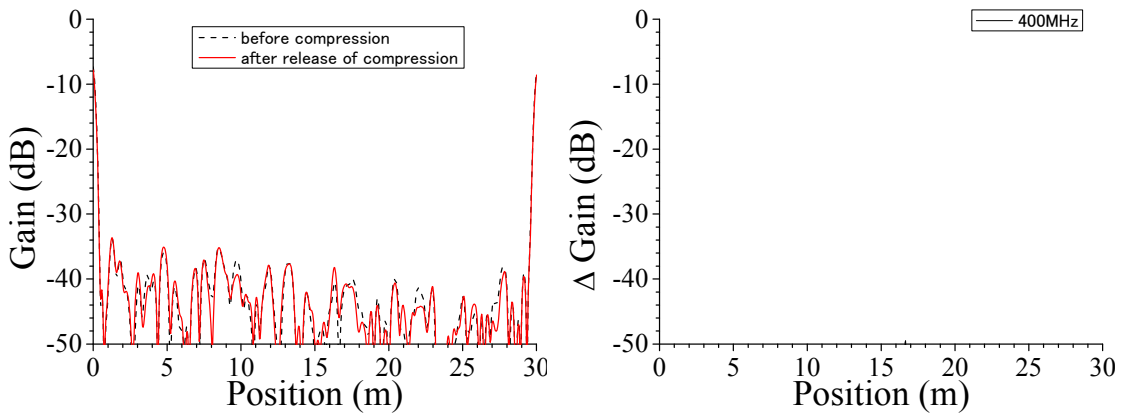
図 3. 3. 1-156 クランプ取り外し後 BIS 法による難燃 EPDM 絶縁ケーブル歪み位置標定結果
 歪み手段：クランプ取り外し後、歪み幅：約 1.0cm、ケーブル外径：約 9.0mm⇒12.5mm、測
 定端－歪み部：3.5m、測定周波数域：1～300MHz、測定反対側端子：開放



(i)位置標定結果

(ii) 差分

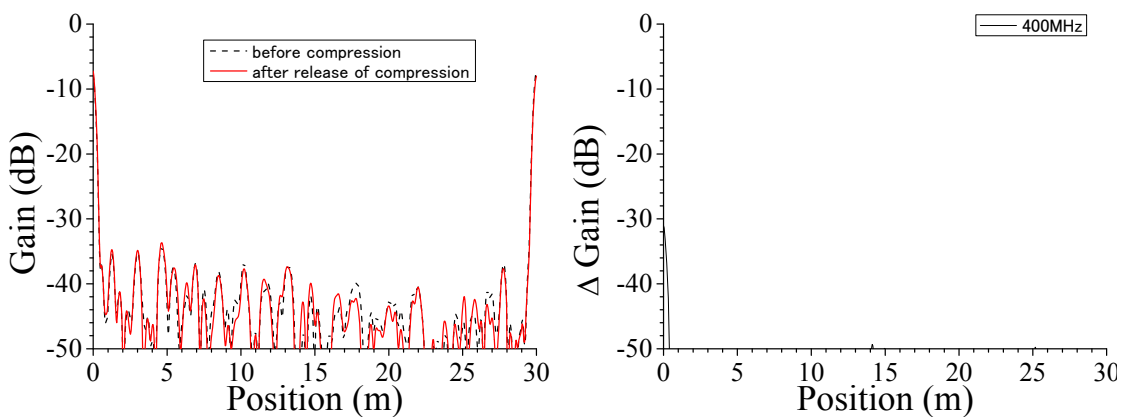
(a) 測定端子：黒－赤



(i)位置標定結果

(ii) 差分

(b) 測定端子：黒－白

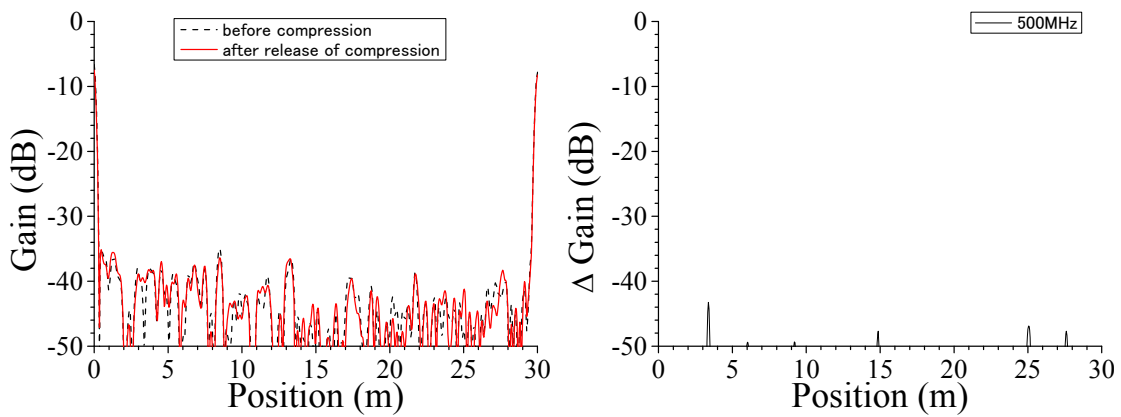


(i)位置標定結果

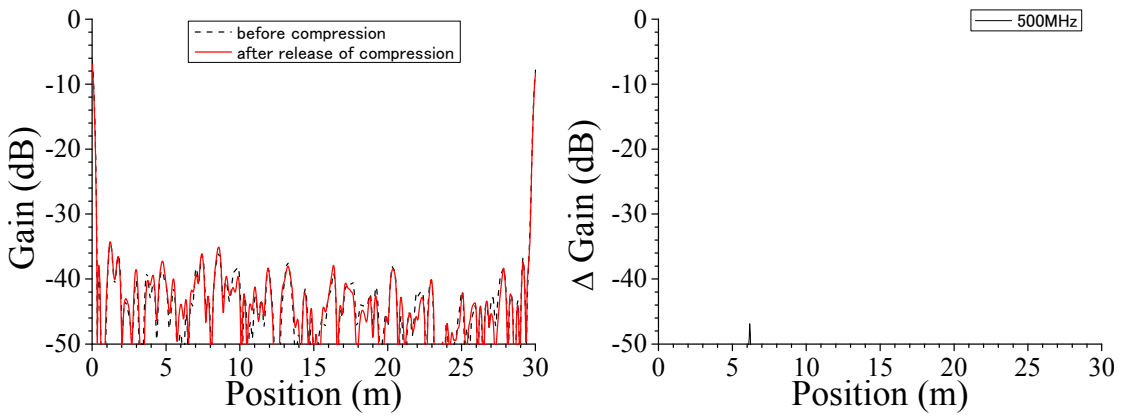
(ii) 差分

(c) 測定端子：赤－白

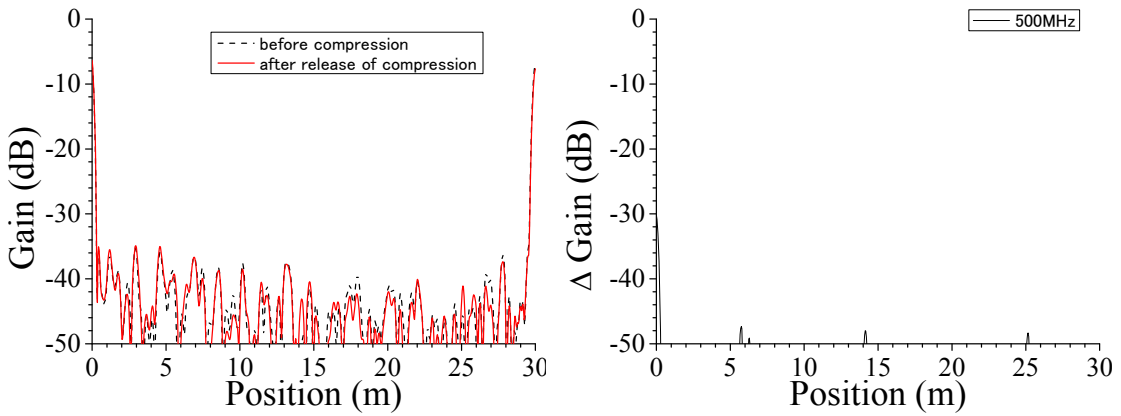
図 3. 3. 1-157 クランプ取り外し後 BIS 法による難燃 EPDM 絶縁ケーブル歪み位置標定結果
 歪み手段：クランプ取り外し後、歪み幅：約 1.0cm、ケーブル外径：約 9.0mm⇒12.5mm、測
 定端－歪み部：3.5m、測定周波数域：1～400MHz、測定反対側端子：開放



(i)位置標定結果 (ii) 差分
(a)測定端子：黒－赤

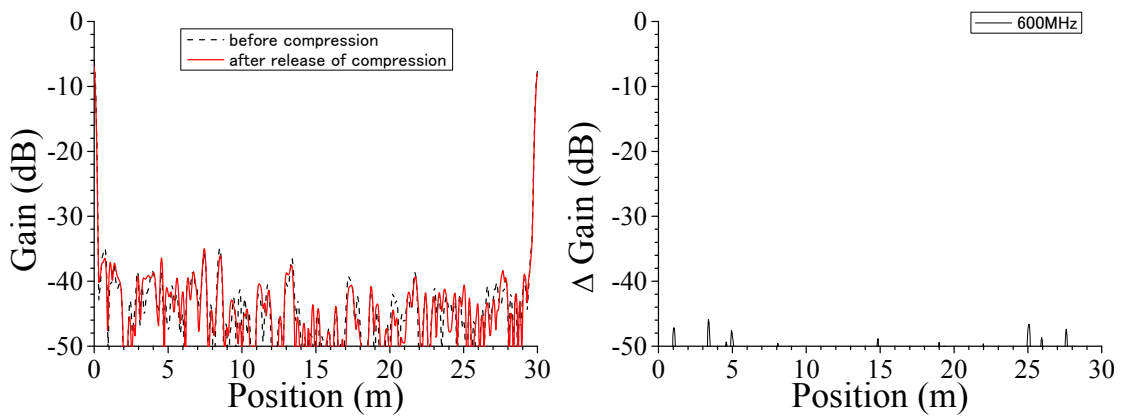


(i)位置標定結果 (ii) 差分
(b)測定端子：黒－白



(i)位置標定結果 (ii) 差分
(c)測定端子：赤－白

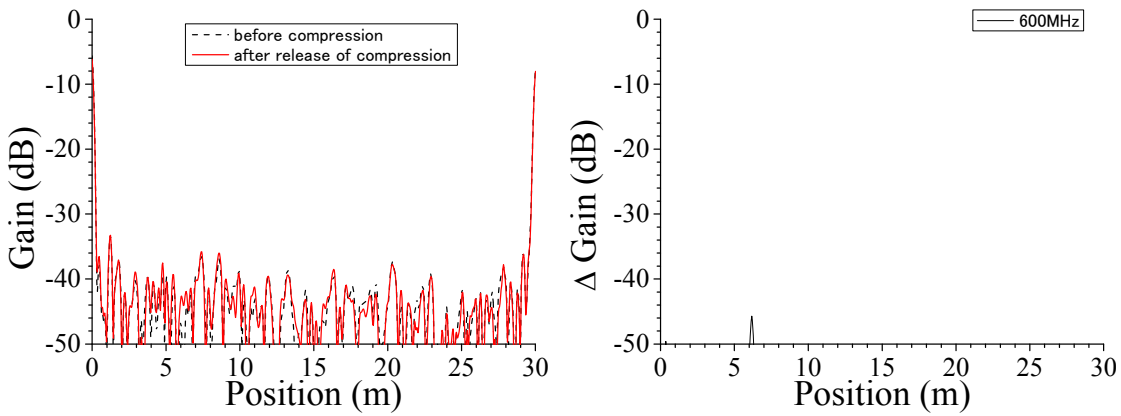
図 3. 3. 1-158 クランプ取り外し後 BIS 法による難燃 EPDM 絶縁ケーブル歪み位置標定結果
歪み手段：クランプ取り外し後、歪み幅：約 1.0cm、ケーブル外径：約 9.0mm⇒12.5mm、測定端－歪み部：3.5m、測定周波数域：1～500MHz、測定反対側端子：開放



(i)位置標定結果

(ii) 差分

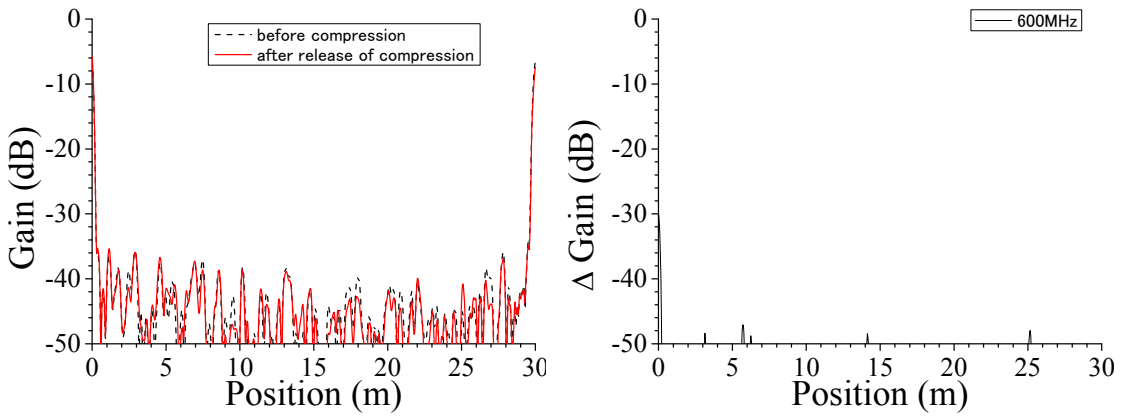
(a) 測定端子： 黒－赤



(i)位置標定結果

(ii) 差分

(b) 測定端子： 黒－白

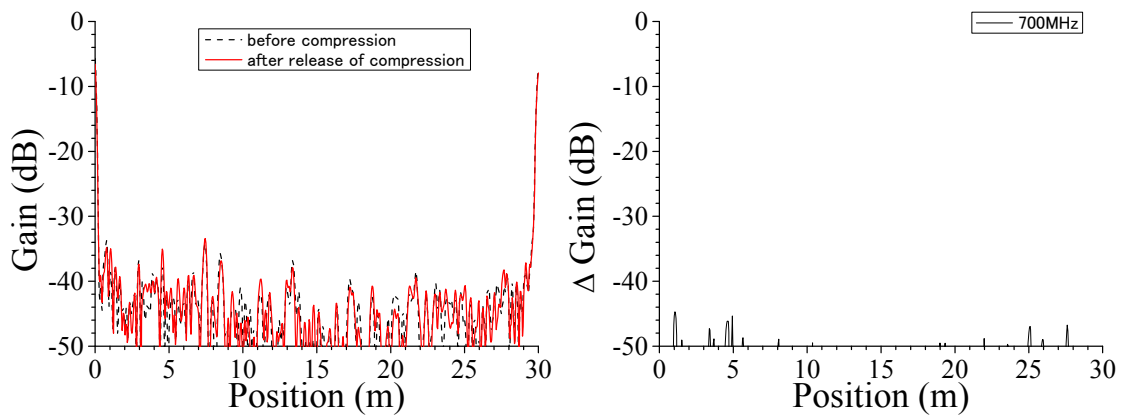


(i)位置標定結果

(ii) 差分

(c) 測定端子： 赤－白

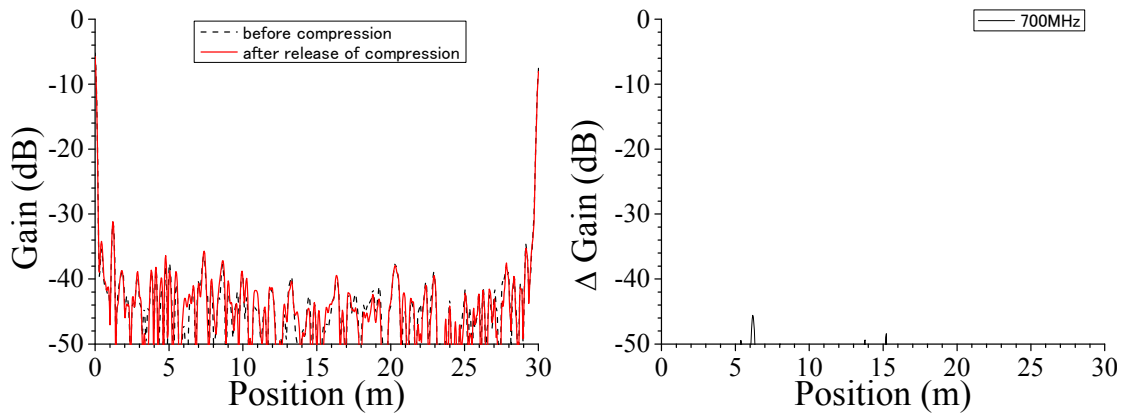
図 3. 3. 1-159 クランプ取り外し後 BIS 法による難燃 EPDM 絶縁ケーブル歪み位置標定結果
 歪み手段：クランプ取り外し後、歪み幅：約 1.0cm、ケーブル外径：約 9.0mm⇒12.5mm、測
 定端－歪み部：3.5m、測定周波数域：1～600MHz、測定反対側端子：開放



(i)位置標定結果

(ii) 差分

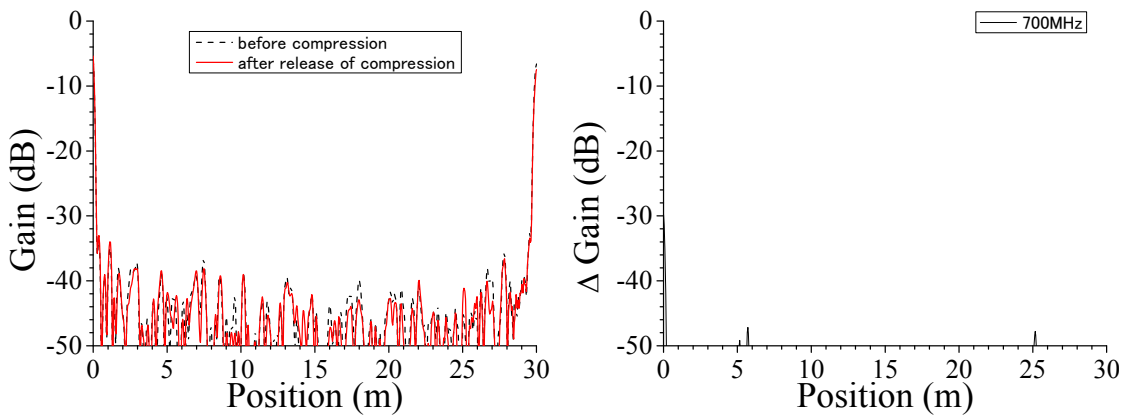
(a) 測定端子： 黒－赤



(i)位置標定結果

(ii) 差分

(b) 測定端子： 黒－白



(i)位置標定結果

(ii) 差分

(c) 測定端子： 赤－白

図 3. 3. 1-160 クランプ取り外し後 BIS 法による難燃 EPDM 絶縁ケーブル歪み位置標定結果
 歪み手段：クランプ取り外し後、歪み幅：約 1.0cm、ケーブル外径：約 9.0mm⇒12.5mm、測
 定端－歪み部：3.5m、測定周波数域：1～700MHz、測定反対側端子：開放

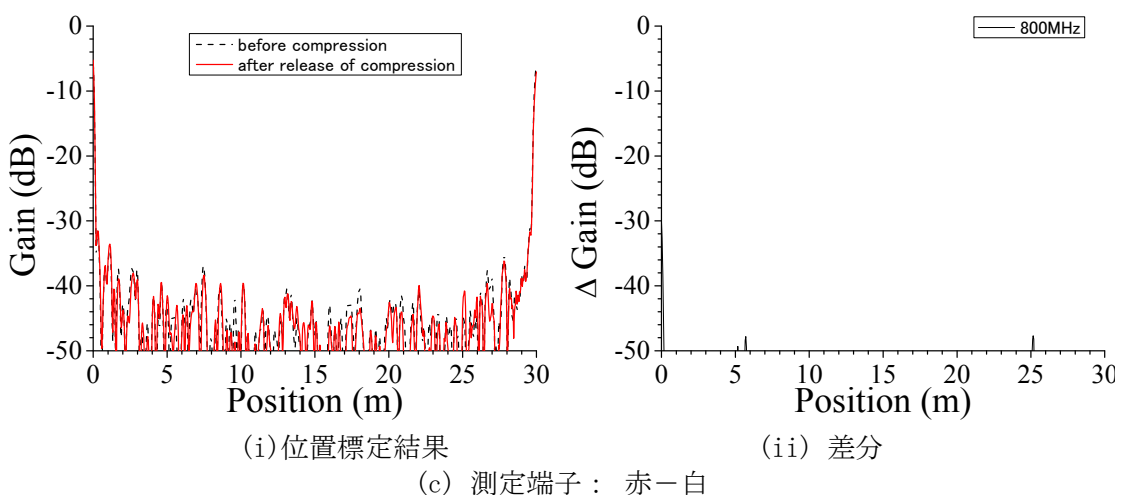
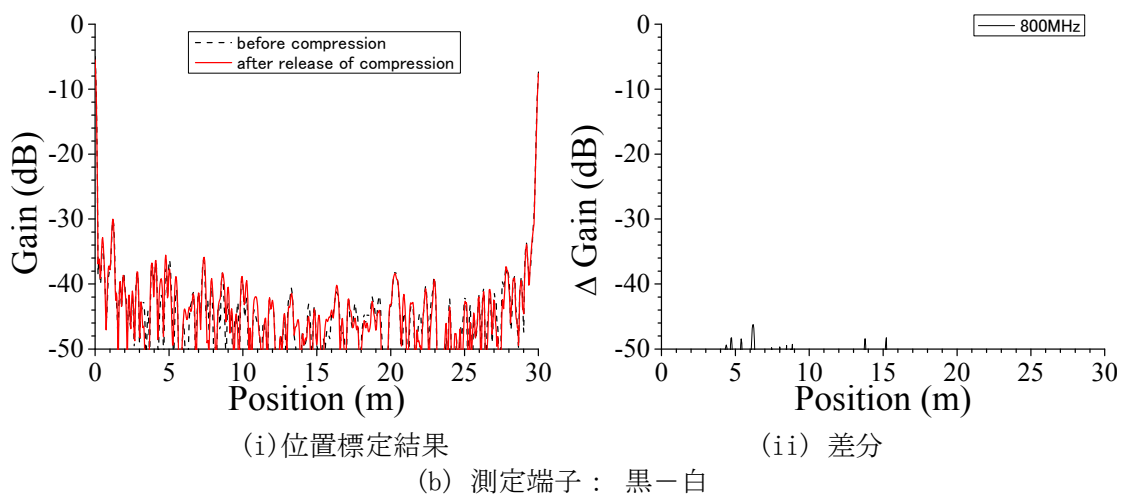
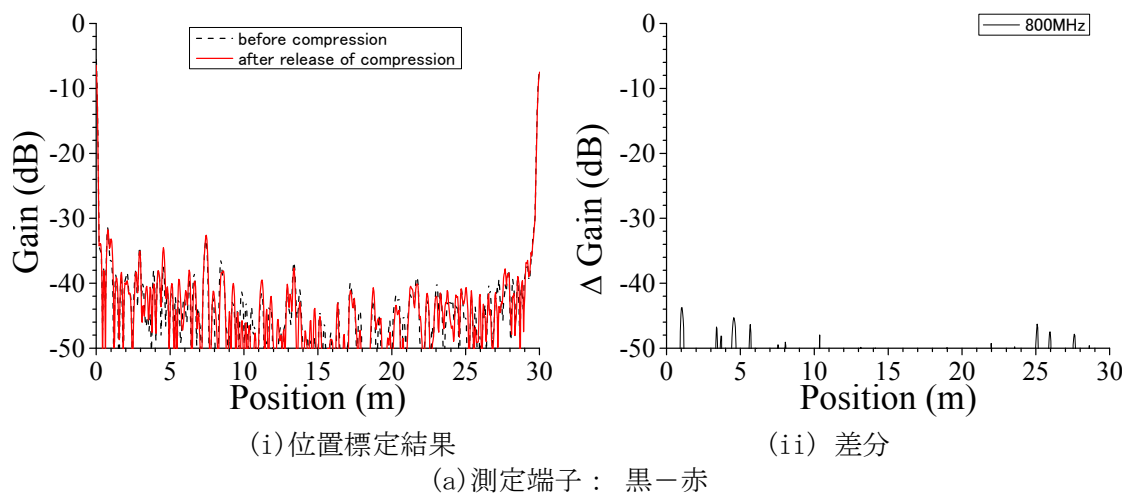
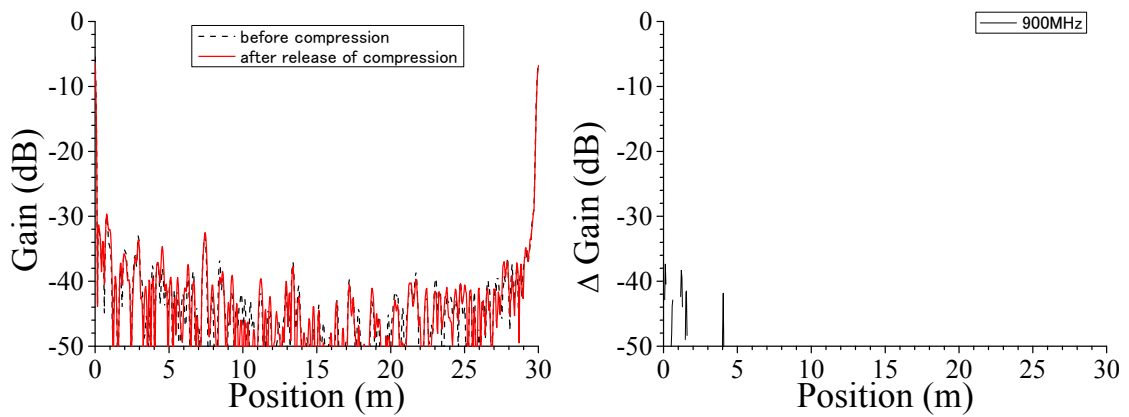


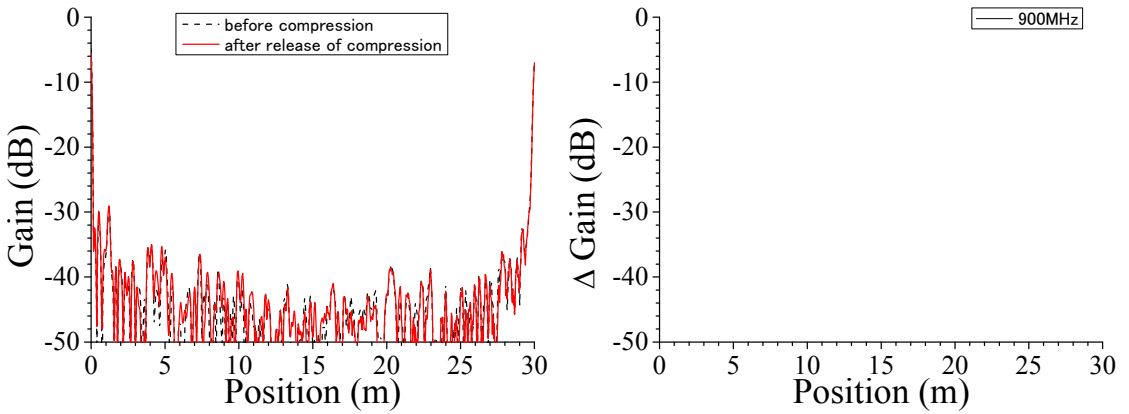
図 3. 3. 1-161 クランプ取り外し後 BIS 法による難燃 EPDM 絶縁ケーブル歪み位置標定結果
 歪み手段：クランプ取り外し後、歪み幅：約 1.0cm、ケーブル外径：約 9.0mm⇒12.5mm、測
 定端—歪み部：3.5m、測定周波数域：1～800MHz、測定反対側端子：開放



(i)位置標定結果

(ii) 差分

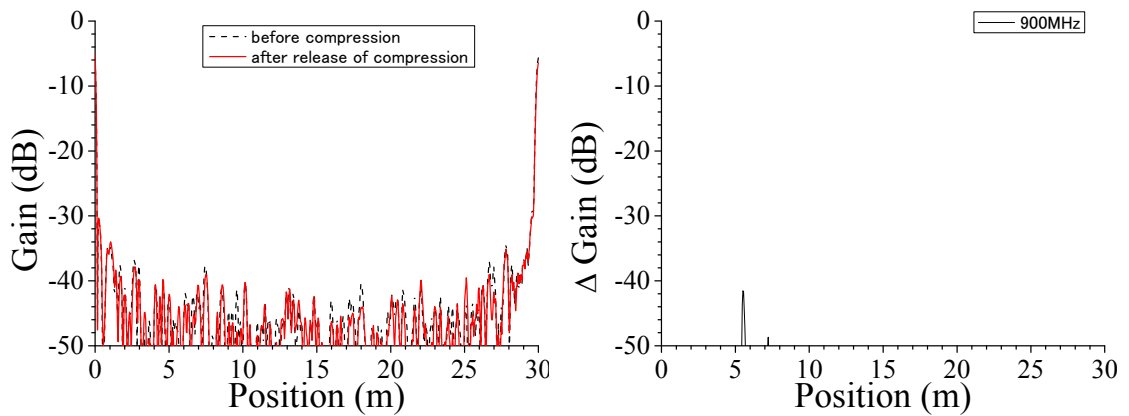
(a)測定端子：黒一赤



(i)位置標定結果

(ii) 差分

(b)測定端子：黒一白

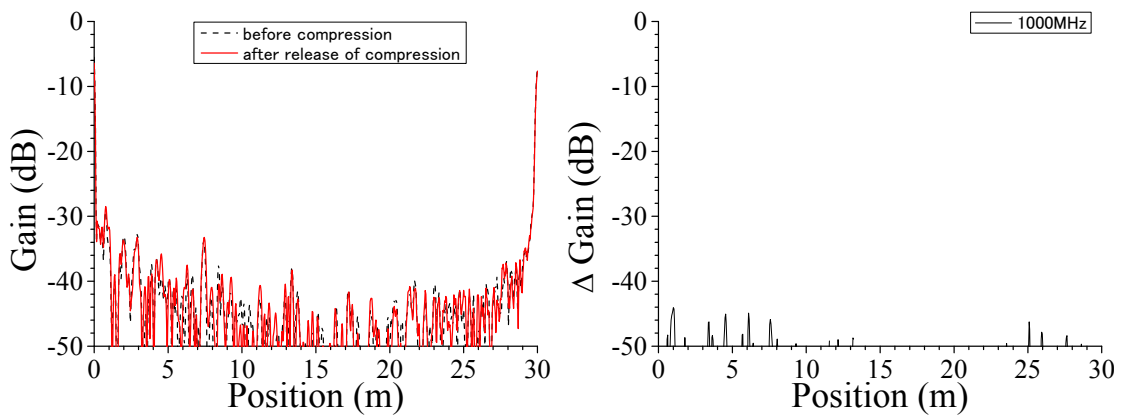


(i)位置標定結果

(ii) 差分

(c)測定端子：赤一白

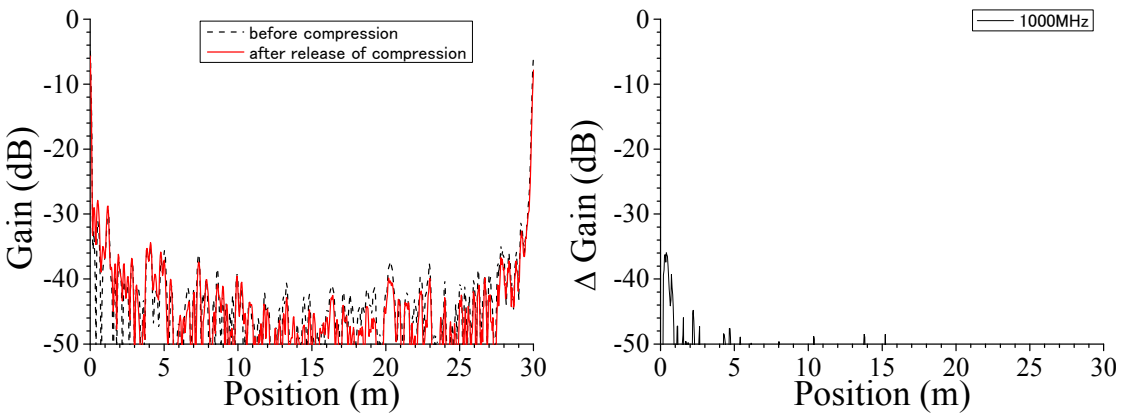
図 3. 3. 1-162 クランプ取り外し後 BIS 法による難燃 EPDM 絶縁ケーブル歪み位置標定結果
 歪み手段：クランプ取り外し後、歪み幅：約 1.0cm、ケーブル外径：約 9.0mm⇒12.5mm、測
 定端一歪み部：3.5m、測定周波数域：1~900MHz、測定反対側端子：開放



(i)位置標定結果

(ii) 差分

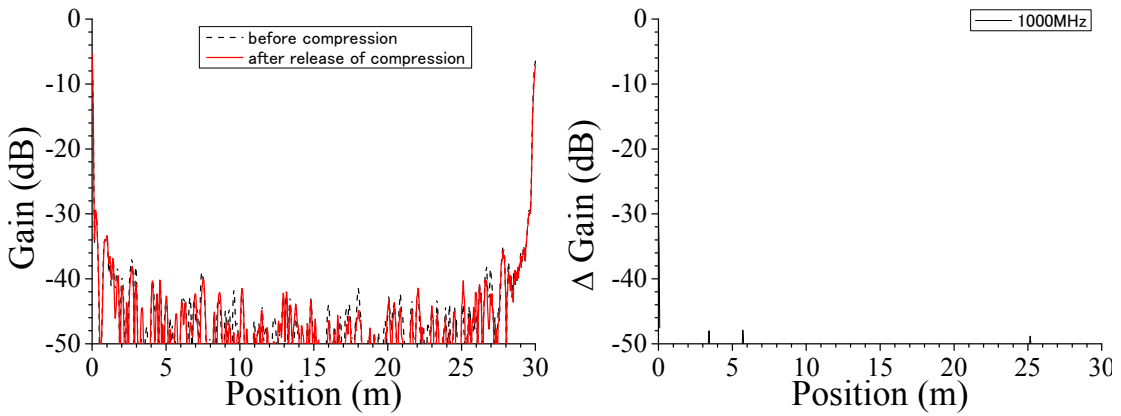
(a)測定端子： 黒－赤



(i)位置標定結果

(ii) 差分

(b)測定端子： 黒－白

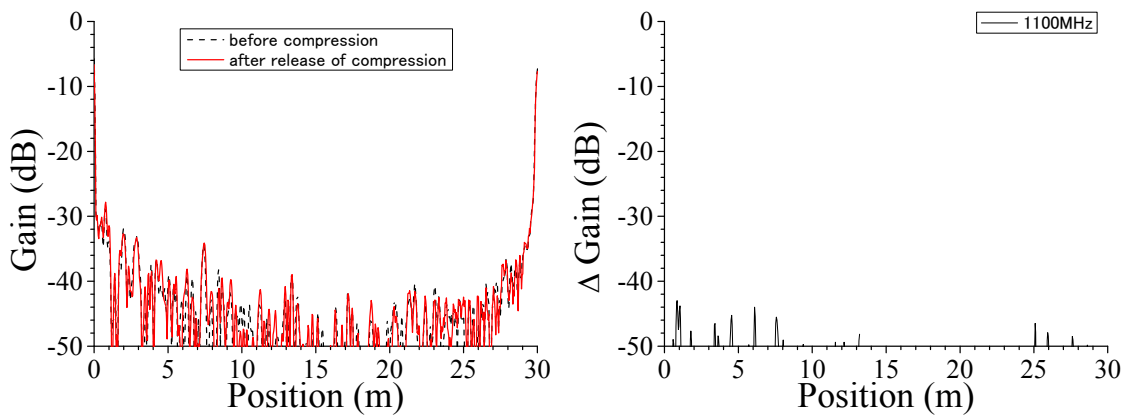


(i)位置標定結果

(ii) 差分

(c)測定端子： 赤－白

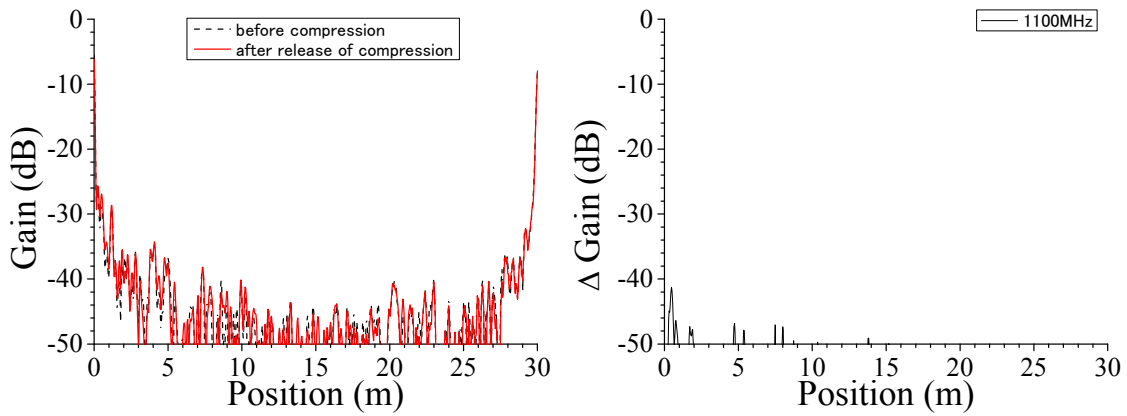
図 3. 3. 1-163 クランプ取り外し後 BIS 法による難燃 EPDM 絶縁ケーブル歪み位置標定結果
 歪み手段：クランプ取り外し後、歪み幅：約 1.0cm、ケーブル外径：約 9.0mm⇒12.5mm、測
 定端－歪み部：3.5m、測定周波数域：1～1000MHz、測定反対側端子：開放



(i)位置標定結果

(ii) 差分

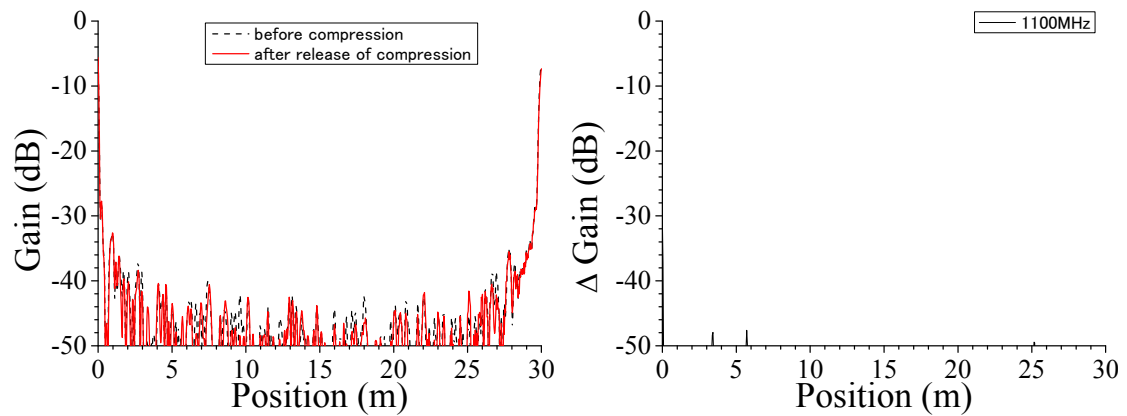
(a) 測定端子： 黒－赤



(i)位置標定結果

(ii) 差分

(b) 測定端子： 黒－白

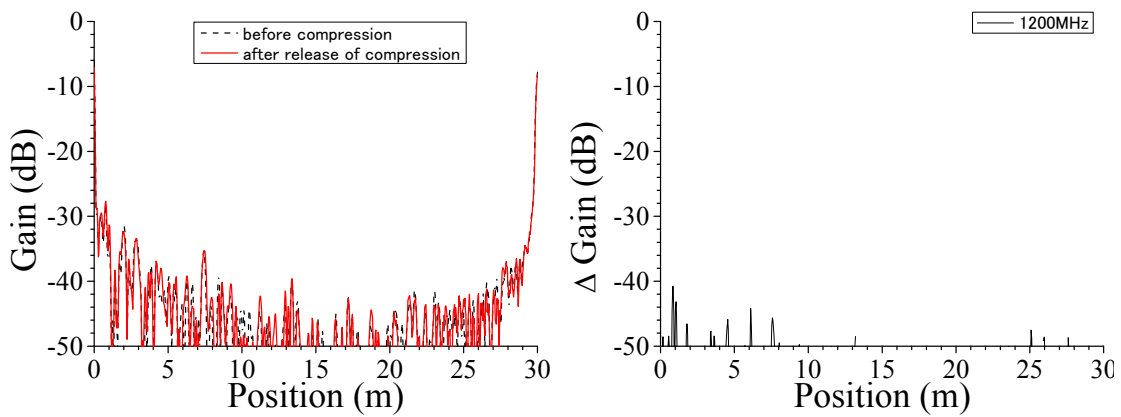


(i)位置標定結果

(ii) 差分

(c) 測定端子： 赤－白

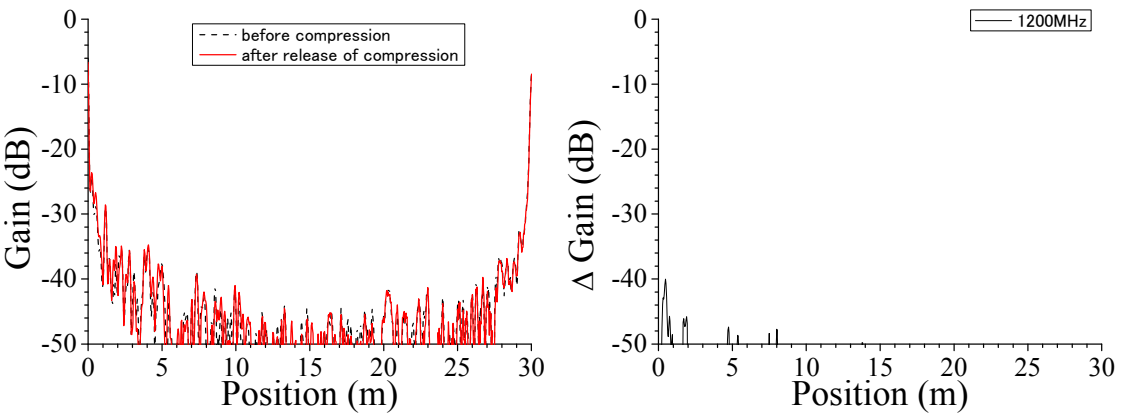
図 3. 3. 1-164 クランプ取り外し後 BIS 法による難燃 EPDM 絶縁ケーブル歪み位置標定結果
 歪み手段：クランプ取り外し後、歪み幅：約 1.0cm、ケーブル外径：約 9.0mm⇒12.5mm、測
 定端－歪み部：3.5m、測定周波数域：1～1100MHz、測定反対側端子：開放



(i)位置標定結果

(ii) 差分

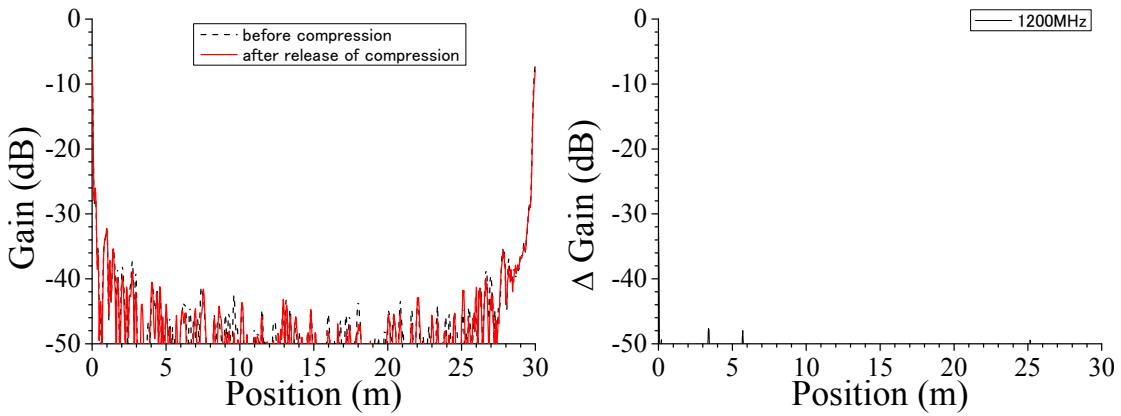
(a)測定端子： 黒－赤



(i)位置標定結果

(ii) 差分

(b)測定端子： 黒－白

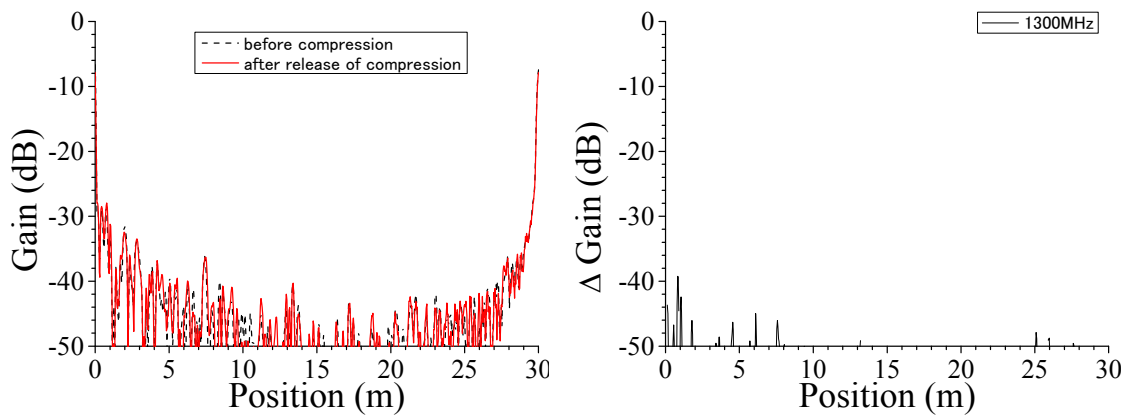


(i)位置標定結果

(ii) 差分

(c)測定端子： 赤－白

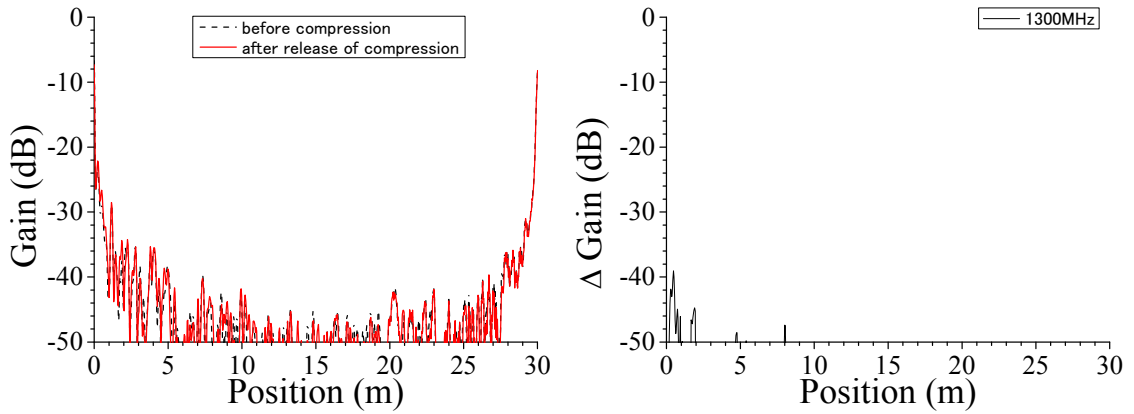
図 3. 3. 1-165 クランプ取り外し後 BIS 法による難燃 EPDM 絶縁ケーブル歪み位置標定結果
 歪み手段：クランプ取り外し後、歪み幅：約 1.0cm、ケーブル外径：約 9.0mm⇒12.5mm、測
 定端－歪み部：3.5m、測定周波数域：1～1200MHz、測定反対側端子：開放



(i)位置標定結果

(ii) 差分

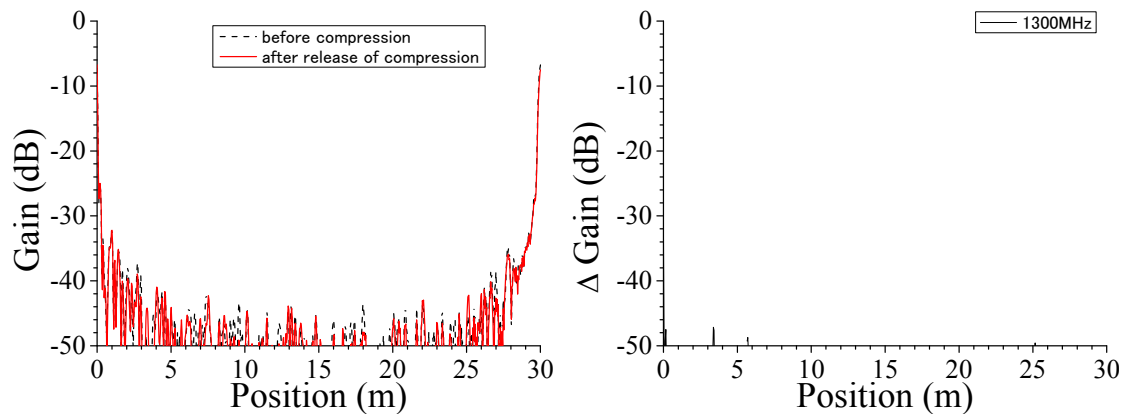
(a) 測定端子： 黒－赤



(i)位置標定結果

(ii) 差分

(b) 測定端子： 黒－白

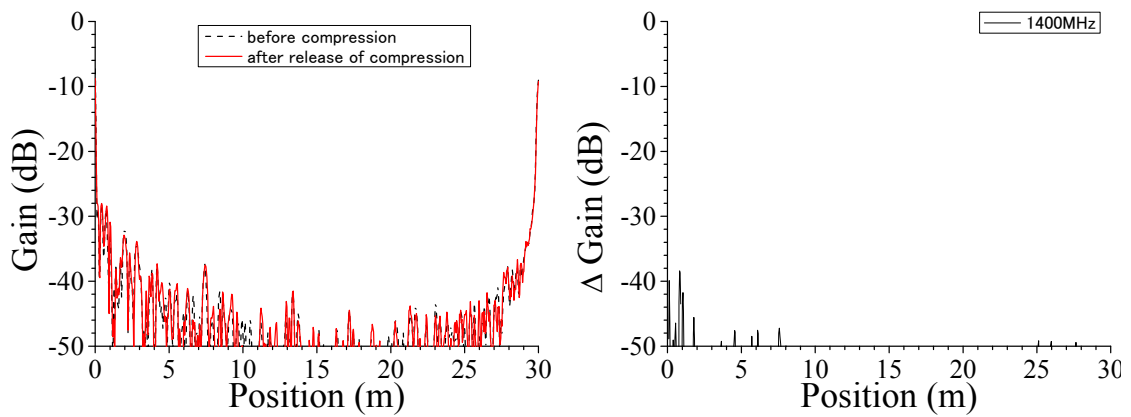


(i)位置標定結果

(ii) 差分

(c) 測定端子： 赤－白

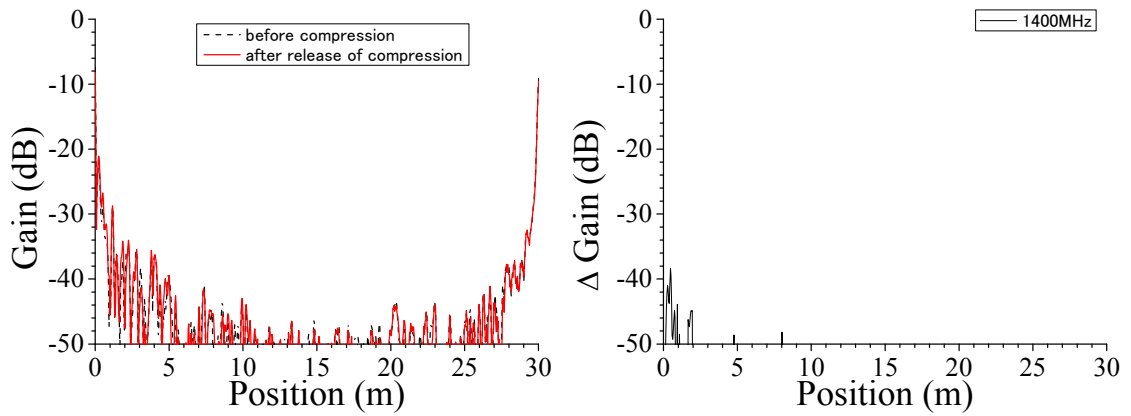
図 3. 3. 1-166 クランプ取り外し後 BIS 法による難燃 EPDM 絶縁ケーブル歪み位置標定結果
 歪み手段：クランプ取り外し後、歪み幅：約 1.0cm、ケーブル外径：約 9.0mm⇒12.5mm、測
 定端－歪み部：3.5m、測定周波数域：1～1300MHz、測定反対側端子：開放



(i)位置標定結果

(ii) 差分

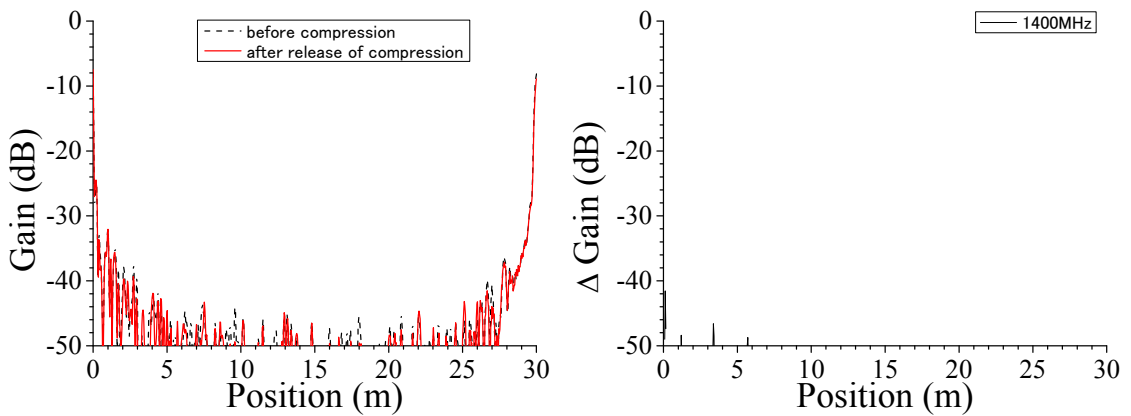
(a) 測定端子： 黒－赤



(i)位置標定結果

(ii) 差分

(b) 測定端子： 黒－白

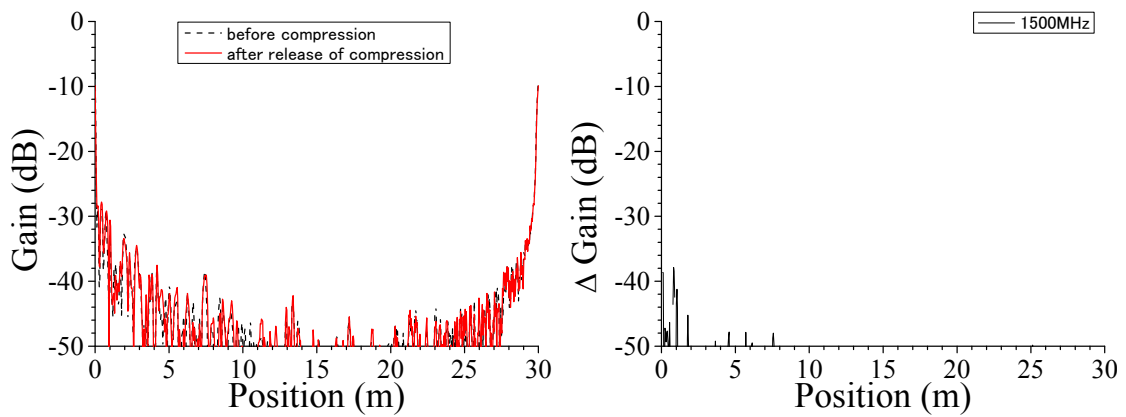


(i)位置標定結果

(ii) 差分

(c) 測定端子： 赤－白

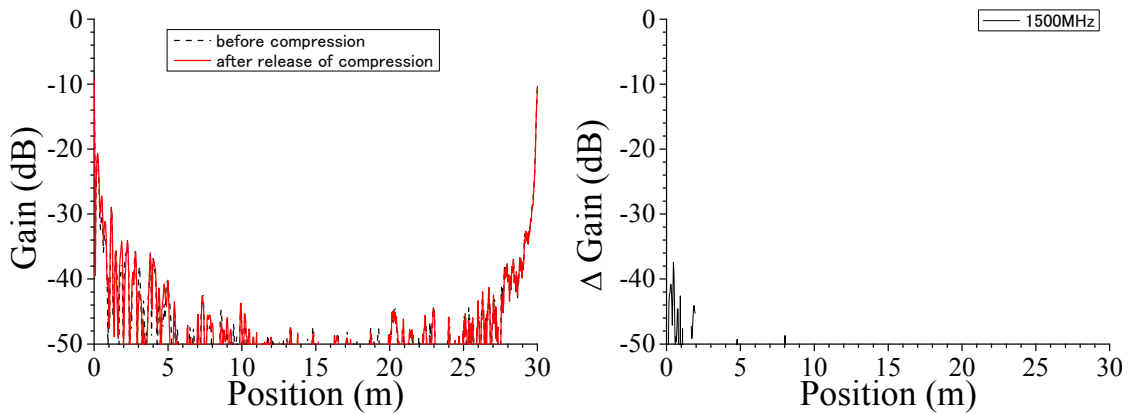
図 3. 3. 1-167 クランプ取り外し後 BIS 法による難燃 EPDM 絶縁ケーブル歪み位置標定結果
 歪み手段：クランプ取り外し後、歪み幅：約 1.0cm、ケーブル外径：約 9.0mm⇒12.5mm、測
 定端－歪み部：3.5m、測定周波数域：1～1400MHz、測定反対側端子：開放



(i)位置標定結果

(ii) 差分

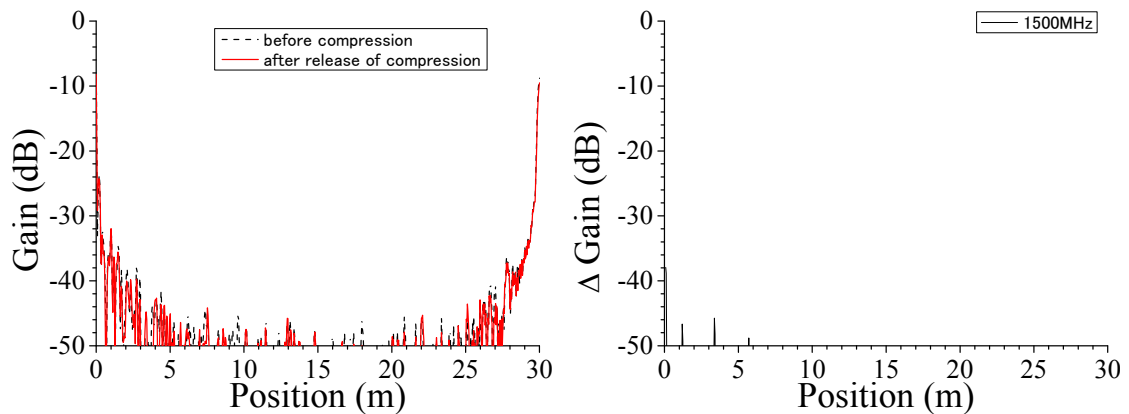
(a)測定端子：黒－赤



(i)位置標定結果

(ii) 差分

(b)測定端子：黒－白



(i)位置標定結果

(ii) 差分

(c)測定端子：赤－白

図 3. 3. 1-168 クランプ取り外し後 BIS 法による難燃 EPDM 絶縁ケーブル歪み位置標定結果
 歪み手段：クランプ取り外し後、歪み幅：約 1.0cm、ケーブル外径：約 9.0mm⇒12.5mm、測
 定端－歪み部：3.5m、測定周波数域：1～1500MHz、測定反対側端子：開放

(9) まとめ

長さ約 50 m の難燃 EPDM 絶縁ケーブルに局部的に熱・放射線同時劣化を施し、劣化中において BIS 法により劣化位置標定を試み、本診断法の劣化位置検出感度を検証した。劣化中のケーブル設置状態が変化しない条件では、本 BIS 法は、JNES の劣化指標値よりはるかに軽度の劣化の位置を検出することができる。照射量が少ない時に検出されたピークは、温度による誘電率変化と物理的な静電容量変化に起因している。

長さ 30m の難燃 EPDM 絶縁 3 芯ケーブルを用いて歪み箇所的位置標定を行った結果、本診断法においては、測定周波数域が 1.0~200MHz と比較的低くても、歪みが与えられる前のケーブルのスペクトルが既知であれば、そのスペクトルとの差分を取ることで、ケーブルに与えた幅 1cm 程の歪みの位置を標定できることがわかった。特性インピーダンスの温度変化が誘電率の温度変化にのみ依存するとしたとき、本診断法は約 0.1% の特性インピーダンス変化を検出できることになるが、仮に、これが真実であると仮定したとき、測定 2 芯間の距離が約 5 μ m 以上変化すれば、その歪み位置が検出できることになる。また、測定最高周波数を増加させると測定分解能と感度が向上する。歪み箇所が検出できることにより、布設時のケーブルへの損傷が把握できるため、本手法における歪み位置標定は本事業にとって重要な意味を持つ。

今後は、実プラントの安全系ケーブル絶縁体として、難燃 EPDM に次いで多く使用されているシリコーンゴム絶縁ケーブルについて、本診断法の劣化位置適用性を検証する。さらに、実プラントに布設されているケーブルや、撤去ケーブルに対しての本診断法の適用性についても検証する。

3.3.2 原子力発電所に布設されたケーブルの高温・高放射線環境下での絶縁機能低下メカニズムの解明

(1) 研究背景

原子力発電所の安全系ケーブルについては、型式試験¹⁷の実施により、通常運転・設計想定事象時両方でその健全性は保たれている¹⁸。実際、ケーブル高経年化に関する不具合事象は今日まで起きていない¹⁹。また、種々の絶縁体劣化機構の解明を受け、型式試験の条件設定手法も高度化されている²⁰。試験条件設定に用いられるモデルで最も信頼性の高いものは等価損傷線量 (DED) データの重ね合わせ手法であり、12年経年の実機 PVC 絶縁、および PE 絶縁ケーブル劣化状況の再現に成功している²¹。しかし、国プロ研究「原子力プラントのケーブル経年変化評価技術調査」によれば、上記重ね合わせ手法は一部ケーブルの寿命(設計想定事故を考慮しても健全性を維持できる供用期間)を「かなり保守的」に見積もる場合がある^{22, 23}。

このような背景から、検査と予測に基づく高経年化管理が重要視されている。この管理体系には次の2種がある。1つは、最も劣化環境の厳しい箇所に対して不確実性を考慮した保守的なケーブル絶縁体加速劣化試験を実施し、早期の張替えも視野に入れる方法である。もう1つは、状態基準認定 (CBQ: condition based qualification) として継続的な状態監視 (CM: condition monitoring) により絶縁体劣化を把握し、型式試験が想定する認定劣化度と比較しながら管理を継続するものである。後者は、裕度や余寿命に関する不確実性を最小限に留める理念を持っているため、特に欧米で期待されている²⁴。しかし、その適用には、各種 CM 値と材料劣化あるいはケーブル機能高経年化の相関を解明し、管理値を設定する必要がある。また、ケーブル状態評価として劣化予測等を目的としたデータ解析も必要になると想定される。

¹⁷ 「原子力発電所用電線・ケーブルの環境試験方法ならびに対延焼性試験方法に関する推奨案」、電気学会技術報告 II 部 139 号、電気学会、1982

¹⁸ 「主要経年劣化事象の性状とこれに対する高経年化対策について」、presented at 経済産業省原子力安全・保安部会 高経年化対策検討委員会 (第5回)、原子力安全・保安院総合資源エネルギー調査会、2005

¹⁹ 原子力施設情報公開ライブラリー、<http://www.nucia.jp/>

²⁰ Determination of Long-term Radiation Aging in Polymers. Part 2: Procedures for Predicting Aging at Low Dose Rates, IEC 1244-2, IEC Publ., 1996.

²¹ K. T. Gillen and R. L. Clough, “Time-temperature-dose rate superposition: A methodology for extrapolating accelerated radiation aging data to low dose rate conditions”, Polym. Degrad. Stab., Vol. 24, pp. 137-168, 1989.

²² 「原子力プラントのケーブル経年変化評価技術調査研究に関する中間報告書」、JNES-SS-0619、原子力安全基盤機構、2006

²³ 「原子力プラントのケーブル経年変化評価技術調査研究に関する最終報告書」、JNES-SS-0903、原子力安全基盤機構、2009

²⁴ Technical Basis for Commendable Practices on Aging Management, NEA/CSNI/R(2010)15, The Nuclear Energy Agency of the Organisation for Economic Co-operation and Development, 2010.

また、上記議論は、加速劣化試験を通じた材料劣化度評価とCBQどちらの観点においても、劣化予測モデルは実機劣化をより正確に反映できるよう高度化する必要があることを示している²⁵。本事業では、国プロ「高経年化対策強化基盤整備事業」において酸化防止剤（ここではArOHと略す）特性と非アレニウス挙動が更なる材料劣化機構解明項目として挙げられたことも踏まえ、この2項目のモデル化研究を進めている²⁶。この新しい劣化モデルに期待されることとして、加速劣化試験環境と実環境での劣化挙動の差異に関する定性把握を通じ、実機絶縁体の劣化進展が想定より緩慢²⁷な原因を探求することが挙げられる。

(2) 研究目的

非破壊劣化診断法の実機適用性検証を支援するため、上記非破壊法の指示値に変化をもたらす材料劣化挙動を解明する。また、各種機器分析を通じ、絶縁機能低下をもたらす材料物性変化を明確にする。また、加速劣化試験／実機使用環境の両条件下での絶縁体劣化挙動を統一的に説明する材料劣化モデルの精緻化を行なう。当該知見に基づき、「

²⁵ 布施則一、本間宏也、岡本達希、「原子力発電所用安全系ケーブルの高経年化管理に向けた絶縁体劣化メカニズム研究の課題」、電力中央研究所調査報告、H12001、2013

²⁶ 布施則一、岡本達希、栗原隆史、金神雅樹、水谷嘉伸、秀耕一郎、足立和郎、本間宏也、「熱・放射線ストレスによるケーブル絶縁体の劣化特性の調査および新モデル考案」、電力中央研究所報告、H11007、2012.

²⁷ Y. Eguchi, “Study of used cables from Japanese NPPs”, presented at 2012 Equipment Qualification Technical Meeting, San Antonio, TX, 2012.

3.3.1 原子力発電所低圧ケーブルの非破壊劣化診断法の選定と適用可能性の検証」にて選定する非破壊劣化診断法の適用可能な劣化度の範囲に係る判断根拠を得る。

(3) 研究内容

文献調査等により得られる絶縁材料の劣化基礎特性を踏まえ、一定の条件下での熱・放射線同時劣化を付与した材料の物性変化と絶縁機能低下を明確にする。これに基づき、限界酸化防止剤濃度理論に基づき絶縁機能低下メカニズムを明らかにする。また、定常運転条件下でのケーブル絶縁機能低下検出への BIS 法等の適用性検証の支援をするために、上記の材料物性変化と誘電率および導電率変化の関係を実験的に明らかにする。さらに、各種絶縁材料の基礎特性を踏まえ、加速劣化試験／実環境の両条件下での絶縁体劣化挙動を統一的に説明する材料劣化モデルを構築する。

(4) 期待される成果

非破壊法と材料劣化あるいは機能低下の相関解明を通じ、CBQ 実施における管理値の提言に繋げる。また、実機で観測される緩慢な劣化挙動を再現するため、実機想定環境に近い条件下での加速劣化試験による材料劣化の挙動を実験的に検討するとともに、更なるモデル精緻化の課題を抽出する。

(5) 実施方法

非破壊劣化診断法の実機適用性検証を支援するため、試料としては、安全系ケーブルの絶縁材料に用いられている難燃エチレンプロピレンゴム (EPDM) を用いる。加速劣化試料の作製は、沸騰水型原子炉環境により近い条件（低酸素濃度雰囲気下）にて実施する。実施計画策定にあたって、実機撤去ケーブル絶縁体の評価結果の統計解析を行い、その結果を活用する。絶縁機能低下をもたらす材料物性変化を実験的に明確にする手法として、破断伸び率や赤外分光測定に加え、微小領域の表面硬度測定や化学発光等の適用可能性も検討する。材料劣化モデルの構築は、文献調査による各種絶縁材料の基礎特性を踏まえた上で、昨年度までの成果をもとに、放射線照射ののちに熱劣化を施す逆逐次法を模擬する数値計算プログラムに取り組む。研究は、ソフト的研究とハード的研究を組み合わせる。推進する。

(6) 実施体制

研究推進に当たっては、適宜ケーブル劣化検討会等を開催し情報共有と検討の精緻化を行う。

(7) 実施内容

本報告書では、ハード研究として難燃 EPDM を対象とし、実機環境に近い温和な条件下での加速劣化試験を実施する。具体的には、熱・放射線同時劣化試験を行う際、各種酸素濃度雰囲気（酸素濃度 5、10、21 % $-O_2$ ）での加速劣化試験を実施し、各種機器測定により劣化度を評価する。低酸素濃度下では劣化試料作成期間の長期化が予想されるため、酸化防止剤を含まない試料を利用する。これにより、非破壊法の指示値に変化をもたらす材料劣化挙動をより実機環境に近い条件にて解明するとともに、劣化メカニズム解明に関する検討を行なう。

また、ソフト研究として、開発中の材料劣化モデルに逆逐次試験の模擬を可能とする改良を加える。放射線照射の後に熱劣化を施す逆逐次試験について、熱劣化時間と放射線線量率をパラメータとし、劣化が目標損傷となる最適な放射線劣化時間を把握することが期待できる。

(8) 沸騰水型原子炉格納容器から採取された EPDM 絶縁安全系ケーブルの絶縁体経年変化統計解析

1) 統計解析に用いるデータ

評価対象の材料は難燃 PN と呼ばれる難燃 EPDM 絶縁／難燃クロロプレンジACKETケーブルにおける、絶縁体である。文献^{22、23}での呼称は A 社製 G 試料である。この絶縁体には顔料による着色が施されており、この色が材料劣化特性に影響を与える場合がある²⁸。ここで評価する絶縁体は、調査実機ケーブルの大半であった黒色のものとした。

本研究で統計解析する破断伸び (EAB) データの一覧を表 3.3.2-1 にまとめる。大多数は文献²⁷で報告されたものである。ただし、ケーブル 31～33 については、産業界側の協力を得て電力中央研究所が測定した結果である。また、国プロ研究²²で取得された実機データのうち、唯一明示されている最低 EAB 値 332%も評価に加える。同表には、次章で詳述する各ケーブルの推定寿命²⁹も記す。

2) 実機絶縁体 EAB データによる経年変化統計解析と絶縁体寿命推定の試み

表 3.3.2-1 に示した EAB 値について、実稼働年数を基準に図 3.3.2-1 にまとめる。使用環境が 45℃付近の絶縁体は本材料の初期値 40%²³から若干低下している程度である。概ね 66℃以上の環境に晒された絶縁体の EAB 値はそれより低く、一定の温度特性があると示唆される。ただし、この高温環境下での EAB データはバラツキが比較的大きい。また、55℃といった中程度の温度環境に晒された番号 19 の絶縁体では、EAB 値の低下が比較的早い。そもそも、これら絶縁体は温度とともに放射線環境にも晒されている。実機環境下での絶縁体劣化トレンドを把握するには、これらデータを同じ尺度で統一的に解析する必要がある。

絶縁体機能低下に関する種々の熱・放射線環境条件の可換性については、等価損傷線量 (DED) データの重ね合わせ手法^{20、30}と、これと同様の変換を経験式にて行なう時間依存データの重ね合わせ手法^{20、31}が、同程度に高い信頼性を持つとされる²³。本研究では、数式の扱いが容易な後者を利用する。参照環境 (温度 T_{ref} 、放射線照射なし) と、ある照射環境 (温度 T 、線量率 D) の間の時間軸シフト比、すなわちシフトファクターは次式で表される。

²⁸ R.L. Clough and K.T. Gillen, "Investigation of cable deterioration inside reactor containment", Nucl. Technol., Vol. 59, pp. 344-354, 1981.

²⁹ 健全性を維持できると見込まれる供用期間(最短の実稼働時間)

³⁰ K.T. Gillen and R.L. Clough, "A kinetic model for predicting oxidative degradation rates in combined radiation-thermal environments", J. Polym. Sci., Polym. Chem. Ed., Vol. 23, pp. 2683-2707, 1985.

³¹ S.G. Burnay, "A practical model for prediction of the lifetime of elastomeric seals in nuclear environments", in Radiation Effects on Polymers, R.L. Clough and S.W. Shalaby Ed., American Chemical Society, Washington, DC, 1991, pp. 524-533.

$$a = \exp\left[-\frac{E_a}{k_B}\left(\frac{1}{T} - \frac{1}{T_{\text{ref}}}\right)\right] \left[1 + KI^X \exp\left[\frac{E_a X}{k_B}\left(\frac{1}{T} - \frac{1}{T_{\text{ref}}}\right)\right] \right] \quad (3.3.2-1)$$

$$= a_T \left[1 + KI^X a_T^{-X} \right]$$

ここで、 k_B はボルツマン定数、 E_a は活性化エネルギーである。100°C以上で 26.2 kcal/mol、100°C以下で 15 kcal/mol (暫定値) が本材料の E_a 値として推奨されている²³。数式(3.3.2-1)での定数 X と K はモデルパラメータと呼ばれ、放射線の材料劣化への寄与度を表す²⁰。80～120°Cでの加速劣化試験の結果より、 $X = 0.9027$ 、 $K = 58.66$ が見出されている²³。

実機環境基準として 60°C、10 mGy/h を仮に設定し、数式(3.3.2-1)と上記パラメータにより各ケーブル環境と上記基準とのシフト率を個別に計算した。得られたシフト率を実稼働年数に乘じ、「60°C、10 mGy/h 環境下等価実稼働年」として再度 EAB 値を纏めた結果の例を図 3.3.2-2 に示す。EAB 値は中央値で議論すべきものであるため²³、同図以降では EAB 測定値標準偏差に関するエラーバーは記載しない。また、同図に示される曲線は次で定義されるロジスティック関数による回帰分析結果である。

$$y = \frac{A_1 - A_2}{1 + (x/x_0)^p} + A_2 \quad (3.3.2-2)$$

x は等価実稼働年、 y は EAB 値である。 A_1 と A_2 はロジスティック関数曲線の最大および最小 EAB 値である。本材料では $A_1 = 405\%$ 、 $A_2 = 5\%$ であり²³、図 3.3.2-2 の回帰分析にもこの値を用いている。 x_0 は曲線の中点を与える年数である。本研究の実機データ統計解析では、60°C、10 mGy/h 相当環境での各ケーブルの x が直接得られるため、 x_0 もこれを元に改めて算出した。数式(3.3.2-2)で曲線の緩急を決定する p も、実機データ統計解析より改めて得た。すなわち、本統計解析では、当該難燃 EPDM の初期および末期 EAB 値については文献²³を踏襲しながらも、劣化トレンドの緩急等については、実機データをもとに再度検討したことになる。

同図に示す 95.4%予測区間は次式より算出した。

$$Y = \hat{\mu}_0 \pm t_{.023} \cdot s \sqrt{\frac{1}{n} + \frac{(x - \hat{x})^2}{\sum (x_i - \hat{x})^2} + 1} \quad (3.3.2-3)$$

$$s^2 = \frac{1}{n-2} \sum (y_i - \hat{\mu}_0)^2 \quad (3.3.2-4)$$

ここで、 $\hat{\mu}_0$ は回帰曲線上の EAB 値、 n は回帰分析に用いたデータ数、 $t_{.023}$ はスチューデントの t 分布における 95.4%信頼区間、 x_i は各実機データにおけるシフト後の等価実稼働年、 \hat{x} はその平均、 y_i は実データである。 x と Y はそれぞれ任意の等価実稼働年とそれに対応する EAB 値の 95.4%予測区間計算値である。すなわち、数式(3.3.2-3)は回帰曲線における観

測値との誤差 s を推定することで、その観測値の 95.4% を見出す予測範囲を表している。図 3.3.2-2 によれば、この予測範囲の中に今回の測定結果が概ね全て収まっている。

本材料の DBE 耐性管理 EAB 推奨値は 70% であるので²³、これに至る時間として寿命推定を試みる。文献²³の加速劣化試験結果およびそこから導かれるパラメータでは、図 3.3.2-2 に示すように 12.8 年と算出される。これに対し、例えば E_a を 4.5 kcal/mol と仮定した場合での本統計解析では、データのバラツキを考慮した 95.4% 予測区間の最低値でも 21.0 年と算出される。数式(3.3.2-3)の第 1 項 $\hat{\mu}_0$ は観測 EAB 値より推定された回帰曲線であり、ありうべき x_0 と p の組み合わせの平均より求まる。 E_a を 4.5 kcal/mol とした図 3.3.2-2 では、 p の取りうる値は 2.50 ± 0.13 となる。これは文献²³の予測値 5.23 の半分程度である。このことは、視覚的に、図 3.3.2-2 において、実機データの回帰曲線の方が加速劣化試験結果よりの予測曲線より緩慢であることと符合する。

上記統計解析により得られた緩慢な EAB 低下トレンド曲線は、実機環境下での参照曲線と位置付けられる。この参照曲線を図 3.3.2-1 の実稼働年数上の各プロットに当てはめ、各々が 70% の EAB 値を取る時間を推定寿命として計算した。この当てはめ作業はアレニウス則の下、対数尺上でカーブシフトして行なった。 $E_a = 4.5$ kcal/mol として得た参照曲線を適用した場合の各ケーブル推定寿命を表 3.3.2-1 最終列にまとめる。また、等価損傷時間を材料寿命と定め、その線量率依存性を図 3.3.2-3 (a) にまとめる。推定寿命のゆらぎ(エラーバー)は、上述の p の推定における 95.4% 信頼区間に由来する。さらに、推定寿命に至るまでの総線量として算出した等価損傷線量 (DED) 値の線量率依存性を図 3.3.2-3 (b) に示す。これは本質的に図 3.3.2-3 (a) と同じ意味を持つ。図 3.3.2-3 (b) ではデータ群が傾き 1 の直線近くに分布している。このことは、概ね線量率 0.1 Gy/h 以下の実機環境での絶縁体高経年化支配要因は、放射線ではなく熱であることを示している。文献²³では赤色絶縁体において概ね 1 Gy/h 以上で当該絶縁体の劣化に放射線の寄与が表れると報告されている。今回の解析では黒色絶縁体を用いているものの、上記事実はこれと矛盾しない。

上記にて、各実機データにおける放射線の寄与は無視出来るほど小さいと考察された。そこで、表 3.3.2-1 最終列で推定された材料寿命は温度環境により直接決定されると見なし、4.5 kcal/mol を仮定した場合での温度特性を図 3.3.2-4 にまとめる。最適 E_a 値の探索に関する検討は後述するが、実機データを尤もらしく回帰する値として、上記 E_a 値を得ている。概ね 100°C 以上で実施される加速劣化試験の結果から実環境下経年寿命を予測するには、図 3.3.2-4 の一点鎖線のようにアレニウス直線のある温度で折り曲げる必要があると文献²³は指摘している。しかし、同図で実機データとの比較から明らかなように、文献²³による折り曲げは多くの温度領域において材料寿命を短く見積もる原因となっている。実機データと文献²³の予測は 40~50°C 付近で一旦符合する様相を見せる。しかし、このよ

うな低温領域では逆温度効果と呼ばれる別の温度特性が生じる可能性があり、やはり文献²³の予測は正しくない可能性があるとの指摘もある³²。

さて、上記議論の冒頭で保留していた最適 E_a 値について述べる。この検討では、当初、文献²³に倣って $E_a = 15$ kcal/mol を設定した。このとき、図 3.3.2-4 のようなアレニウスプロットの直線の傾きとして得られる E_a 値は、6.1 kcal/mol となった。すなわち、仮定として入力した E_a と、解析結果の出力として得た E_a の間に自己矛盾が生じている。入出力 E_a 値におけるこの自己矛盾を避ける目的で、種々の E_a 値を仮定し、図 3.3.2-2 相当の統計解析からロジスティック曲線を導出した。さらに、この曲線の外挿より得られる推定寿命を図 3.3.2-4 相当のアレニウスプロットに表し、‘出力’ E_a 値を確認した。結果を図 3.3.2-5 に示す。低い E_a を仮定するほど入出力 E_a 値の自己矛盾が解消されている。

重要なこととして、アレニウスプロット上で確認される E_a 値（出力 E_a 値）は図 3.3.2-5 のように幅を持つ。この第 1 の理由は、推定寿命値全体がアレニウスプロット上で図 3.3.2-4 のようにばらつくためである。さらに、第 2 の理由として、ロジスティック回帰曲線の p がゆらぐため、推定寿命値自体にもゆらぎが生じる。図 3.3.2-4 で議論した入力 $E_a = 4.5$ kcal/mol の場合を例に、具体的に述べる。図 3.3.2-4 に示される 95.4%信頼区間は p の平均値 2.50 を用いた推定寿命でのものであるが、このとき、上記第 1 の理由により出力 E_a 値は 2.0 ± 1.9 kcal/mol の幅を持つ。さらに、上記第 2 の理由として p 自身に対して 95.4%の信頼区間を設けると、アレニウスプロット上での出力 E_a 値は $0 \sim 4.5$ kcal/mol となる。この E_a 幅は、一般的な変動である $\pm 2 \sim 3$ kcal/mol²¹ と符合する。上記と同様の検討を種々の入力 E_a 値にて行なった図 3.3.2-5 において、青のエラーバーで示される範囲は、本研究と同様の EAB 測定を行ったと想定した場合に 95.4%の確率で再び得られると想定される出力 E_a 値の範囲である。この評価範囲で入出力 E_a に自己矛盾が生じないためには、入力 E_a 値は 4.5 kcal/mol 以下である必要がある。

ところで、図 3.3.2-2 では E_a 値によりシフトされたプロットに対し、対応する回帰曲線が描かれている。この中で、推定回帰曲線と上記プロットとの乖離が小さいことも、統計解析としては重要である。そこで、次式で得られる χ^2 値で上記乖離度合いを評価し、最適 E_a 値探索の考慮に加えた。

$$\chi^2 = \sum \left(\frac{y_i - \hat{\mu}_0}{\sigma_i} \right)^2 \quad (3.3.2-5)$$

ここで、 σ_i は i 番目の観測 EAB 値の標準偏差である。図 3.3.2-6 に結果を示すように、観測値と回帰予測の乖離を最小とする E_a 値は 10 kcal/mol である。上で議論した入出力 E_a 値に自己矛盾が生じない範囲と併せて考えると、今回の実機データを解析する E_a 値として

³² K. T. Gillen and R. Bernstein, Review of Nuclear Power Plant Safety Cable Aging Studies with Recommendations for Improved Approaches and for Future Work, SAND 10-7266, Sandia National Labs., Albuquerque, NM, 2010.

は、少なくとも統計解析としての視点からは、図 3.3.2-2～図 3.3.2-4 で議論した 4.5 kcal/mol が尤もらしいことになる。

3) 劣化予測手法の高度化に関する考察

資源エネルギー庁の報告書³³が指摘するように、ケーブルは補修・取替が容易でなく、絶縁体は経年劣化する。従って、一般論からは点検等による劣化管理が必要である。しかし、種々の点検時要求を満足する状態監視法は未だ確立していない^{24, 34, 35}。そのため、本研究で扱った種類のケーブル絶縁体以外については、従前の型式試験による安全担保が最も信頼できるデータとなる。その意味で、加速劣化試験とその結果のデータ評価により絶縁体寿命の推定を行うことは今後も重要な課題である。図 3.3.2-2 と図 3.3.2-4 より明らかな事実は、現在の劣化予測手法では、実態より著しく短命に寿命推定を行なう場合があることである。より具体的には、実機環境下での劣化が緩慢で、 E_a 値も低い。

絶縁体機能低下に関する種々の熱・放射線影響については、種々の基礎検討が過去 50 年以上行われてきた。その結果として、前述の DED データ、又は時間依存データの重ね合わせ手法が、成立した経緯がある。しかし、このような重ね合わせ手法は、マスターカーブのシフト量を定めるものであり、そのカーブ自体の緩慢さの変化までは考慮していない。図 3.3.2-4 に示される 80、90、100°C の加速劣化試験結果は、時間依存データの重ね合わせ手法により放射線の影響を除去し、それぞれの熱劣化環境下を想定した推定寿命を算出したものである。この 3 データが図 3.3.2-4 上でなす傾きは、100～120°C の高温加速試験結果がなすそれよりも緩やかである。すなわち、加速試験の低温 3 条件において、 E_a の変化として認識される非アレニウス挙動は既に確認できる。しかし、実機の最高温度と加速劣化試験の最高温度の差異はわずか 4°C 弱であるにも関わらず、推定寿命は 25 倍程度も乖離がある。したがって、劣化予測手法としては、熱と放射線に第 3 の要素を加え、この乖離を是正することが求められる。

現在、筆者らが考えている有力な候補は酸素濃度の影響である。今回の実機ケーブルが布設されていた沸騰水型原子炉格納容器内では、酸素濃度を数%程度まで低下させている。関連する低酸素濃度環境下での照射研究は、 N_2 や真空中などで 1980 年代に行われてきた²⁸。ここでは、光電効果やコンプトン効果等によりバルク内に二次電子が生じ、これらが分子のイオン化や電子励起を誘起すると考えられていた³⁶。このような物理過程が低酸素濃度環境下で生じるとすれば、実機環境下での材料劣化メカニズムとしては化学・物理両過程を考慮する必要がある。低酸素濃度研究により見込まれる成果イメージを図 3.3.2-7

³³ 「高経年化に関する基本的な考え方」、資源エネルギー庁、1996。

³⁴ Assessment and Management of Ageing of Major Nuclear Power Plant Components Important to Safety, IAEA-TECDOC-1188, IAEA, 2000.

³⁵ M. Villaran and R. Lofaro, Essential Elements of an Electric Cable Condition Monitoring Program, NUREG/CR-7000, US NRC, 2009.

³⁶ 草野、宇野、「高分子系材料の耐放射線特性とデータ集」、JAERI-Data/ Code 2003-015、日本原子力研究所、2003

に示す。不活性ガス環境下（酸素濃度 0%）で物理過程により絶縁体に生じる脆化は、単位放射線吸収量あたりに換算でき、温度には殆ど依存しないと考えられる。放射線照射により生じるラジカルと化学反応するための酸素は、不活性ガス環境系では存在せず、その結果化学過程そのものが成立しないためである。この時、例えば 5～15%の酸素濃度下での温度依存性は、不活性ガス中と大気中での挙動の中間を取るようになる。すなわち、酸素濃度が低いほど、材料寿命が長くなることは勿論、見かけの E_a は小さくなると想定できる。つまり、実機データの統計解析にて見出された低 E_a 値には、酸素濃度が影響を及ぼしている可能性が示唆される。

さらに、この低酸素濃度環境での材料劣化挙動を研究することにより、図 3.3.2-2 で示唆された緩慢な劣化も解明される可能性がある。自動酸化理論における素反応を図 3.3.2-8 に示す。簡単な系では、ラジカル $R\cdot$ および劣化前駆体 $ROO\cdot$ の形成を通し、劣化物が生成される。従って、見かけの劣化物生成速度は $R\cdot$ および $ROO\cdot$ の濃度に依存する。絶縁体機能特性の低下は、この各種ラジカルや劣化前駆体の濃度のべき関数で表される劣化物生成速度に依存すると考えられる。すなわち、実機環境の酸素濃度が加速劣化環境の 1/10 程度に低下していれば、10 のべき乗といった形で、実機との乖離を説明できる可能性がある。同図には、上述の見通しを実験的に検証するための「視点」を付記している。

4) 劣化予測手法の高度化に関する考察

最新の劣化予測手法で短命とされた実機 PN ケーブルにおける EPDM 絶縁体の破断伸び評価結果を統計解析し、沸騰水型原子炉格納容器内での経年劣化特性の解明を試みた。以下に、得られた知見を列挙する。

- 実機ケーブルの布設温度・線量率条件は同一ではない。そこで、まず、実機絶縁体の破断伸びデータを、劣化予測手法で寿命が約 12.8 年と推定された 60℃、10 mGy/h 相当の経年数へ換算し、この環境下での経年変化として統計解析を行なった。沸騰水型原子炉格納容器内での経年劣化特性は、加速劣化試験により予測されたそれよりも 2 倍程度緩慢であると示唆された。
- 上記で得られた経年変化特性を参照曲線として個々の実機破断伸びデータに当てはめ、経年変化によりこれらが 70%になる寿命終点を算出した。この寿命と劣化予測手法による推定寿命を実機温度領域で比較した結果、後者の推定寿命は実際より短く見積もっていることが示唆された。
- 実機データより新たに見積もられた寿命は、加速劣化試験結果を用いる従来の推定に比べて長い上、見かけの活性化エネルギー値が 4.5 kcal/mol と低い。
- 上記解析結果をもたらす原因としては、沸騰水型原子炉格納容器内での低酸素濃度雰囲気劣化抑制効果を持つためと考えられる。これを踏まえ、酸素濃度の影響を解明し、劣化予測手法の基礎となる絶縁体劣化モデルから向上を図る必要がある。

表 3.3.2-1 本研究の統計解析に用いるデータ一覧

プロット 記号	ケーブル 番号	使用環境		使用 年数	実稼働 年数	EAB 値 (%)		推定 寿命年 ^{a)}
		温度 (°C)	線量率 (mGy/h)			中央 値	標準 偏差	
●	2	40.7	10.7	29.4	21.2	323	19	66.1~75.1
●	30	43.1	12.2	23.2	15.4	342	17	54.1~62.3
○	25	43.3	14.6	23.2	15.4	322 ^{b)}	35	47.6~54.1
▲	26	46.1	22.1	23.2	15.4	341	7	53.9~62.1
△	27	46.1	22.1	23.2	15.4	336	34	52.1~59.8
■	28	46.1	22.1	23.2	15.4	384	12	85.3~103.5
□	29	46.1	22.1	23.2	15.4	352	11	58.6~68.1
●	20	48.7	19.2	26.8	20.6	363	33	86.1~101.3
●	19	55	7.1	25.4	19.5	148 ^{b)}	27	29.1~30.4
○	31	55	6.0	23.7	16	294	4	42.9~48.0
▲	1	55.4	16.0	18.6	13.6	423	14	
△	9	55.3	14.4	25.4	19.5	283	4	49.7~55.2
■	11	55.3	14.4	25.4	19.5	243	29	425.1~45.9
●	3	55.8	26.2	25.4	19.5	292 ^{b)}	7	51.8~57.8
○	5	55.8	26.2	25.4	19.5	208 ^{b)}	73	36.7~39.4
▲	7	55.8	26.2	25.4	19.5	313	11	57.5~65.0
△	14	55.8	26.2	25.4	19.5	267	41	46.4~51.1
■	15	55.8	26.2	25.4	19.5	287	33	50.6~56.4
□	16	55.8	26.2	25.4	19.5	317	9	58.8~66.6
●	4	60.7	18.3	25.4	19.5	253	42	43.7~47.9
○	6	60.7	18.3	25.4	19.5	175	5	32.4~34.3
▲	8	60.7	18.3	25.4	19.5	281	51	49.2~54.7
△	17	60.7	18.3	25.4	19.5	256	26	44.2~48.5
■	18	60.7	18.3	25.4	19.5	275	16	47.9~53.0
●	31	65	8.0	23.7	16	315	24	47.7~54.0
○	ACA	65	20	14.5	11.8	332 ^{c)}		38.8~44.4
▲	10	66.9	35.6	25.4	19.5	278	27	48.5~53.8
△	12	66.9	35.6	25.4	19.5	293	13	52.0~58.1
■	13	66.9	35.6	25.4	19.5	272	20	47.4~52.4
□	32	65	52.0	23.7	16	223	47	31.9~34.5
▼	33	65	52.0	23.7	16	231	4	32.9~35.7
●	21	76.2	49.8	26.8	20.6	312	56	60.3~68.0
○	22	76.2	49.8	26.8	20.6	274	91	50.5~55.8
▲	23	76.2	49.8	26.8	20.6	267	27	49.0~54.0
△	24	76.2	49.8	26.8	20.6	245	37	44.7~48.8

^{a)}算出方法については本文参照。^{b)}試験回数が2回で、規格³⁷⁾に満たないため回帰分析からは除外した。^{c)}標準偏差が不明のため、標準偏差を重みに使った回帰分析では除外された。

³⁷⁾ 加硫ゴム及び熱可塑性ゴム—引張特性の求め方、JIS K 6251、1993.

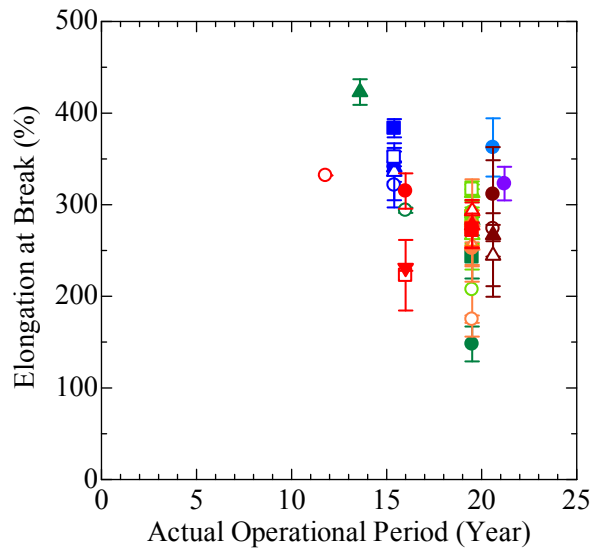


図 3.3.2-1

実稼働年数における EAB 値。プロットの凡例は表 3.3.2-1 の通り。概ね温度の順に低温は青、高温は赤とソートしている。エラーバーは標準偏差を表す。矢印はその測定点が電力中央研究所測定結果であることを示す。

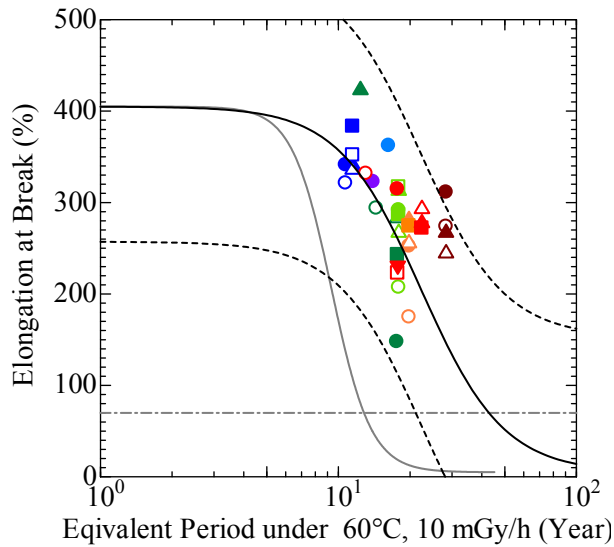
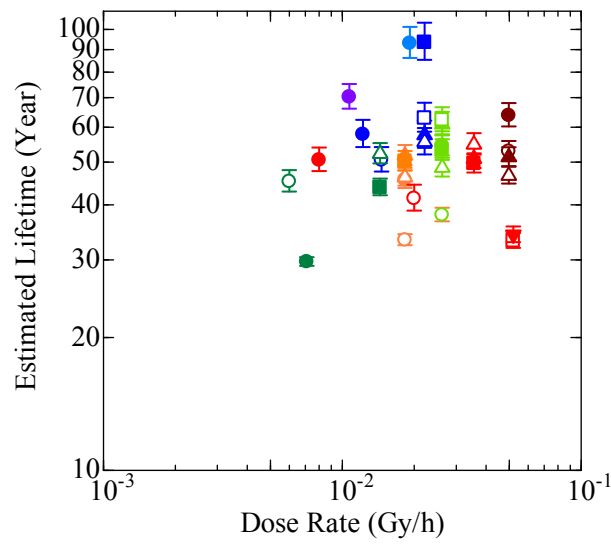
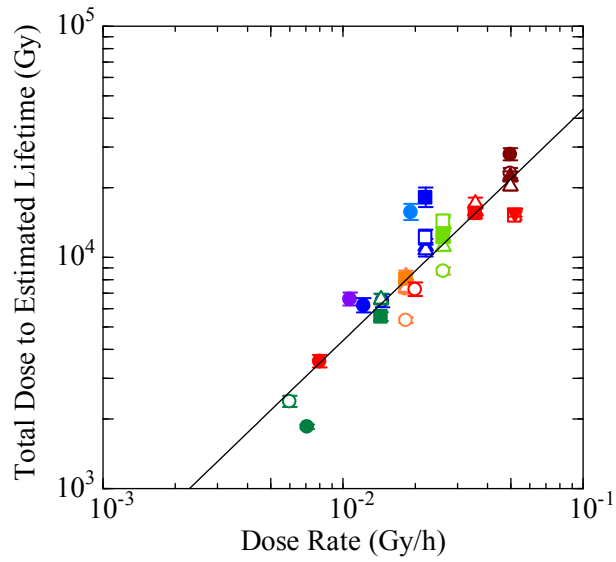


図 3.3.2-2

時間依存データの重ね合わせ手法で 60°C、10 mGy/h 基準にシフトさせた実機 EAB 値。黒曲線は数式(3.3.2-2)のロジスティック関数による回帰曲線で、その上下の黒破線は 95.4%予測区間。灰色曲線は ACA 研究のマスターカーブによる上記環境での劣化予測²³。実機データ解析では 2 種の E_a 値を検討しているが、灰色曲線では ACA 研究に基づき、15 kcal/mol とした。



(a)



(b)

図 3. 3. 2-3

推定寿命としての等価損傷時間(a)および対応する等価損傷線量(b)の線量率依存性。新マスターカーブを図 3. 3. 2-1 の実稼働年数上の各プロットに当てはめ、各々が 70%の EAB 値を取る時間を推定寿命として計算した。

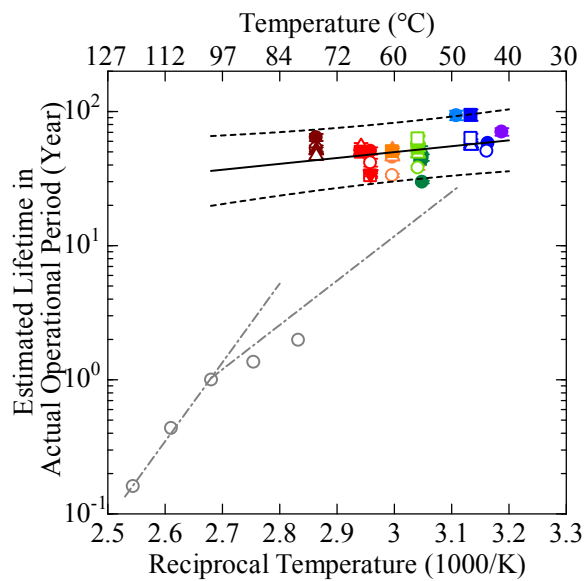


図 3.3.2-4

個々の実機ケーブル推定寿命とその温度環境。黒実線はこれより推定されたアレニウス直線、その上下の黒破線は 95.4% 予測区間。ACA 研究にて得られた同材料の加速試験結果²³ は灰色プロットで表しており、灰色一点鎖線は同研究にて推奨された寿命予測曲線 (100°C 以上での E_a 値は 26.2 kcal/mol、100°C 以下では 15 kcal/mol)

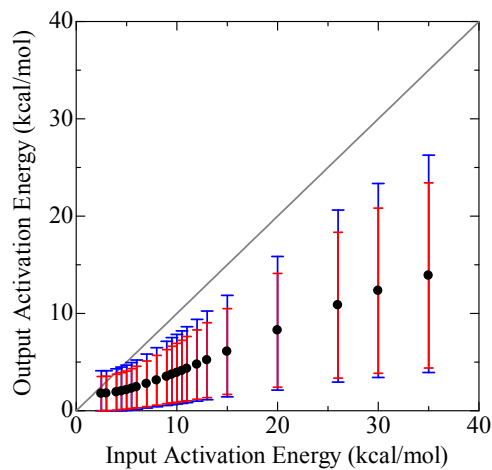


図 3.3.2-5

統計解析において仮定した E_a 値と、一連の操作の後推定された材料寿命の温度特性より得られた E_a 値の関係。赤と青のエラーバーは、それぞれ標準誤差内および 95.4% 内のアレニウス回帰直線が取りうる E_a 値幅を表す。

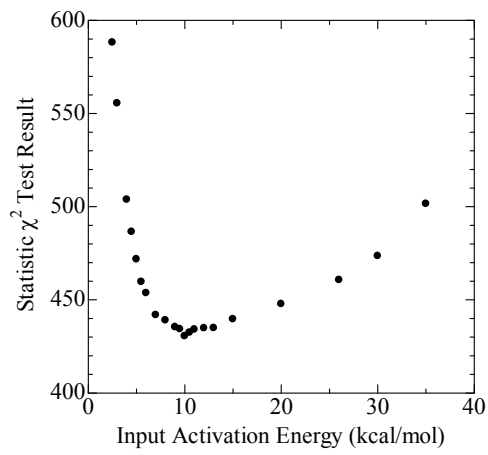


図 3.3.2-6

種々の入力 E_a 値における、EAB 観測値とその回帰分析結果との乖離程度。

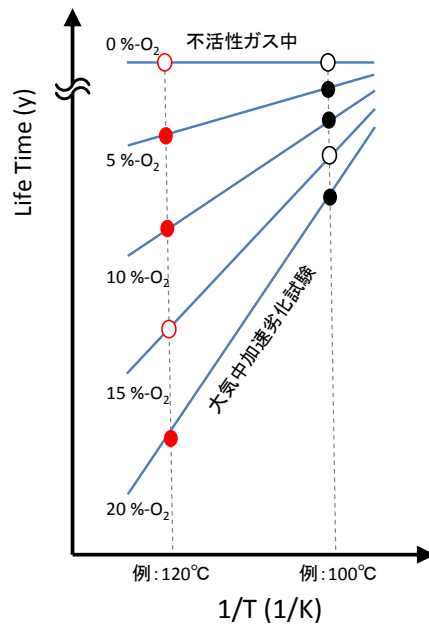


図 3.3.2-7

低酸素濃度研究により見込まれる成果イメージ

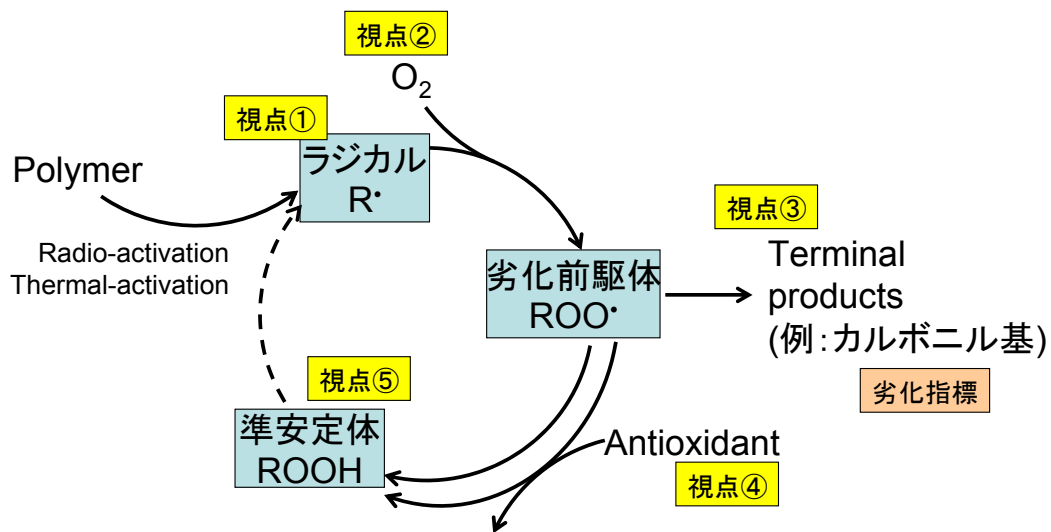


図 3. 3. 2-8

自動酸化理論による材料劣化化学反応のイメージ。破線は、この反応が低温で起きにくいことを表している。

(9) 熱・放射線同時劣化したエチレンプロピレンゴム評価

1) 低酸素濃度環境下における加速劣化試験条件の計画

前項「(8) 沸騰水型原子炉格納容器から採取された EPDM 絶縁安全系ケーブルの絶縁体経年変化統計解析」より、実機環境下では経年変化特性が加速劣化試験により予測されたそれよりも緩慢なことが確認され、その一つの要因として低酸素濃度環境（酸素濃度 5 %-O₂未満と推測）の影響が予想された。そこで、酸素濃度による影響を解明することを目的として、低酸素濃度環境下での熱・放射線同時劣化試験の実施を試みた。実施にあたって劣化試験条件を決める際に、前項の知見とともに国プロの結果²³を活用し、時間依存データの重ね合わせ手法を利用することで、線量率 1.0 kGy/h の下での予想劣化曲線を作製した。酸素濃度が 5、10、21 %-O₂ 環境について、100℃および 120℃での計算結果を図 3.3.2-9 に示す。また、予想劣化曲線の作製にあたって利用した各種パラメータを表 3.3.2-2 に示す。予想劣化曲線より、低酸素濃度条件下ほど長期間の照射期間が必要なことが確認された。特に、青点線で示された 5 %-O₂、100℃条件では、初期値より 1 割程度 EAB 値が低下するまでに、2000 時間近く要することが推測された。

続いて、実際の加速劣化試験期間の算出を行った。上述の通り、低酸素濃度条件下では試験期間の長期化が懸念される。そこで、試験期間の短縮を図るため、実ケーブルグレード相当の組成から酸化防止剤のみを除いた試料（A0 無添加試料：ただし、シート形状試料を製造する上で必要な、最低限の酸化防止剤は含まれている）を加速劣化試験へと供した。加速劣化試験に必要な期間を見積もる上で、A0 無添加試料がどのような挙動となるか知見は存在せず、何らかの仮定が必要となる。限界酸化防止剤濃度理論の考えに則ると、酸化防止剤濃度が一定値を下回った時点から、緩慢であった機械特性の低下が急速に起こり始めることが予想されている。そこで、A0 無添加試料は規格化 EAB 値が 97 %程度の劣化試料、すなわち、劣化初期の緩慢な機械特性低下により、材料劣化が 3%程度進行したと仮定して、急速な材料劣化が進行し始める直前の試料と考え、試験期間を算出した。以上の結果や仮定を踏まえ、今回の試験実施期間において、各試験条件では図 3.3.2-10 に示す程度の熱・放射線同時劣化を付与できることを予想した。

2) 実験手法

(a) 試料作製

難燃 EPDM シート試料は、厚さ 0.5 mm ないし 1.0 mm、サイズ 100×110 mm の成形品（日立金属製（旧日立電線製））であり、酸化防止剤等の各種添加剤を含むケーブルグレード相当品（A0 添加品）を用いた。また、劣化試料作製期間を短縮するため、酸化防止剤を添加していない酸化防止剤無添加品（A0 無添加品：厚さ 0.5 mm、サイズ 100×110 mm の成形品。但し、酸化防止剤以外の各種添加剤は上記ケーブルグレード相当品と同等に含有）も用いた。熱・放射線同時加速劣化試料の作製は、日本原子力研究開発機構（JAEA）高崎量子応用研究所にて ⁶⁰Co 線源を用いて行った。熱・放射線同時劣化試料の作製条件は、酸素濃度

3 パターン (5 %-O₂、 10 %-O₂、 21 %-O₂)、劣化温度 2 パターン (100℃と 120℃)、線量率 2 パターン (0.5 kGy/h ないし 1.0 kGy/h) より、8 種類の条件を選択して実施した。いずれの条件においても試料は経過時間ごとに 8 回に分けて採取した。図 3.3.2-11 に照射実施状況を示す。恒温槽内および上部でのガンマ線線量率は、アラニン線量計で評価した (図 3.3.2-12 を参照)。また、試験実施のスケジュールを表 3.3.2-3～表 3.3.2-5 に示した。

熱・放射線同時劣化試験に用いた恒温槽のうち、ケーブル試料とともに加速劣化試験を実施した恒温槽の寸法図を図 3.3.2-13 に示す。同図にはケーブル位置を原点としてガンマ線源の方向に z 軸を引いた。シート試料は左右 2 台のスタンドで保持し、またケーブルを跨いで上下に配置することで同一距離当たり 4 枚のシート試料を装填することとした。その他の恒温槽については、アルミホルダーにセットした供試難燃 EPDM シート試料 (図 3.3.2-11 参照) をアルミ製の台座に差し込む形で並べて配置した。また、恒温槽内の酸素濃度を制御するため、ガス配管を取り付けた恒温槽およびガス循環系の簡略図を図 3.3.2-14 に示した。恒温槽本体と扉の隙間は、アルミテープを全周にわかって貼り付けることでシールした。これは、ゴムパッキン類では放射線照射環境下で気密性を保持できないことが予想されたためである。また、恒温槽内のファンを回す軸受け部分については、ボールベアリングを取り付け、隙間を極力減らす改造を施した。恒温槽内を循環するガス中の酸素濃度は酸素モニターにて検知し、規定酸素濃度範囲となるよう、窒素ガスボンベ前に組み込まれた電磁弁の開閉によって濃度制御を行った。加速劣化試験を実施するにあたって、5 %-O₂ 条件は酸素濃度 4.5～5.5 %、10 %-O₂ 条件では酸素濃度 9.5～10.5 % の間に収まるように酸素濃度を規定した。

(b) 機器測定

熱・放射線同時劣化試験にて作製した劣化試料と各種未劣化試料 (A0 添加品および A0 無添加品) について以降に示す機器測定を行った。

顕微赤外分光測定 (ATR FT-IR) は高分子絶縁材料の劣化生成物検出のために行った。これは材料劣化によって生じた副生物、たとえば高分子主鎖や添加剤の分解によって生じた C=O 結合などを検出することを目的として行った。測定は、Thermo Fischer Scientific 社製 NICOLET iN10 に ATR 結晶 (Ge クリスタル) を装着し、シート試料の断面中央部について、各部位 6 回測定を行い、平均値によるスペクトルを作成した。

破断伸び率 (EAB) 測定は、ケーブル絶縁材料において、まず機械特性が低下し、続いて電気特性の低下が起こることから、ケーブル絶縁材料の劣化度を表す指標として用いられている。その際、EAB の値がある一定値を下回った時点で絶縁材料の寿命と評価される。測定にはオリエンテック社製テンシロン UCT-1T 万能試験機を使用し、ダンベル状試験片 (JIS 6 号ダンベル) について 5 回測定時の中央値を用いた。また、その際の引張り強さ (TS) についても記録した。

酸化誘導時間 (OIT) 測定は、試料中に含まれる酸化防止剤の残量を、酸化反応に伴う発熱ピークの出現までの時間差として間接的に測定することができる。測定には Perkin-Elmer 社製示差走査熱量計 DSC 8500 を用い、IEC/IEEE 62582-4 に従って測定を行った³⁸。OIT の算出は、細片に砕いた試料 20 mg 程度をアルミパン上で 180°C (A0 無添加品) あるいは 240°C (A0 添加品) まで窒素雰囲気下にて加熱した後、酸素雰囲気へと置換して、酸化反応に伴う発熱ピークが出現するまでの時間を測定した。また、酸化誘導温度 (OITP) 測定は、酸化防止剤の有無による未劣化試料の熱的性質の差を確認する目的で行った。測定は OIT と同様の試料細片について、120°C まで窒素雰囲気下にて加熱した後、酸素雰囲気へと置換して、5 °C/min の速度で昇温し、酸化反応に伴う発熱ピークが出現する温度を測定した。

走査型プローブ顕微鏡 (SPM) による試料表面観察は、先端曲率が数 10 nm 程度の微小な探針 (プローブ) を試料表面に近づけて、試料-探針間の力学的・電磁氣的相互作用を検出しながら走査し、試料表面を三次元的に観察する。試料-探針間に働く力を検出するため大気中でも観測できる。探針を上下に高速で単振動させており、表面形状など全ての情報は、上記単振動への変調として記録される。測定時、この単振動に際して、探針は試料表面に突き刺さるため、試料への吸着が大、試料表面が軟らかい等が原因で、試料と探針間の固着力が大であるほど、探針の応答は大きく遅れる。熱劣化、熱・放射線同時劣化、放射線劣化を施した難燃 EPDM シートについて、5×5 μm の領域を室温大気中で高さと位相遅れを測定した。また、試料に探針を押し込む際に必要とした力を測定したフォースカーブデータより、押し込んだ距離での微係数を算出し、ケーブル絶縁材料の硬度測定手法の標準的評価装置となっているインデントと比較した。

熱的な酸化評価法として、化学発光 (CL) 測定を行った。本手法は高分子材料の酸化反応過程で生じる CL を検出し、その強度の時間依存性やスペクトル変化より、高分子材料の劣化評価を可能とする。熱・放射線同時劣化を施した 10×10 mm、厚さ 1.0 mm の難燃 EPDM シートについて、大気中 180°C で 400~500 時間 CL 強度および CL スペクトルを測定した。

3) 実験結果

(a) 顕微赤外分光 (ATR FT-IR) 測定

2 種の未劣化試料 (A0 添加品と A0 無添加品) について、シート断面中央部を ATR FT-IR 測定したところ、1400~4000 cm⁻¹ の領域において、ほぼ同一のスペクトルを得ることが出来た (図 3.3.2-15 参照)。この結果より、酸化防止剤の有無にかかわらず、材料劣化により生じた化学構造変化を FT-IR 測定によって検出できることが確認できた。続いて、それぞれの劣化試料 (A0 添加品と A0 無添加品) の測定を行い、未劣化試料のスペクトルとともに示した (図 3.3.2-16)。いずれの劣化試料においても、1700 cm⁻¹ に存在したピークの

³⁸ Nuclear Power Plants - Instrumentation and Control Important to Safety - Electrical Equipment Condition Monitoring Methods. Part 4: Oxidation Induction Techniques, IEC 62582-4, IEC Publ., 2011.

高さが増加するとともに、1600 cm^{-1} 付近にブロードなピークの出現が確認された。また、酸化防止剤の有無や加速劣化条件によらず、同程度のピーク強度で確認できた。続いて、図 3.3.2-17 に 1.0 kGy/h、100°C、5 %- O_2 条件下で加速劣化を行った試料における、FT-IR スペクトルの経時変化を示した。1400~4000 cm^{-1} の領域において、1600 cm^{-1} 付近のブロードなピーク以外に新たなピークは確認出来なかった。また、1600 cm^{-1} のピークは 1222 時間経過した劣化試料にて検出され始めた。続いて、各種酸素濃度環境下での加速劣化試験により作製した劣化試料の比較を行った（図 3.3.2-18 を参照）。上記で確認されている 1600 cm^{-1} 付近のブロードなピークについて、5%- O_2 条件下でのみ確認することができ、10、21 %- O_2 条件下のいずれからも確認することが出来なかった。

(b) 破断伸び率 (EAB) 測定

実ケーブルグレード相当試料 (A0 添加品) を用いた加速劣化試験を実施した結果を図 3.3.2-19 に示す。なお、図には平成 24 年度実施分データも追加して描画している。図 3.3.2-19 より、劣化試料の EAB 値は直線的に低下する傾向が確認された。より詳細には、劣化中盤まで EAB 値の低下が直線的であるが、EAB 値が 30 %未満まで低下した試料では、低下の速度が緩まる傾向が示された。また、温度や線量率の違いによる EAB 値の差はほぼ確認されず、劣化進行が総線量のみ依存している結果が得られた。

続いて、A0 無添加試料を用いた加速劣化試料の EAB 測定結果を図 3.3.2-20 に示す。さまざまな酸素濃度環境下にて加速劣化試験を実施した劣化試料の EAB 値は、100°C と 120°C のいずれでも温度に依らず同一の低下傾向を示した。この傾向は加速劣化試験初期において、図 3.3.2-19 で示した A0 添加品の劣化試料と比べて顕著であった。また、各酸素濃度間での劣化傾向の違いは、1.0 kGy/h という高線量率下では確認することが出来なかった。次に、各酸素濃度下にて温度依存性の有無を検討した（図 3.3.2-21 参照）。その結果、いずれの酸素濃度条件においても、100°C で加速劣化した試料の EAB 値に比べて、120°C での EAB 値の方が下回っており、温度依存性を確認することが出来た。

図 3.3.2-22 には、各劣化条件にて作製した試料の引張強さ (TS) と破断伸び率 (EAB) との相関を示した。図より、5 %- O_2 条件では EAB 値が時間とともに途中まで低下し続けたが、EAB 値が 50 %未満の辺りで TS 値の減少が止まり、劣化終期には逆に TS 値が大きくなった。また、10%- O_2 条件においても TS 値と EAB 値は時間とともに低下し、EAB 値が 30 % 付近で TS 値が逆転して上昇する傾向が確認された。一方、21%- O_2 条件については、100°C、120°C のいずれのプロットも、対角線近傍から上側にかけてに存在し、温度による影響は確認されていない。

(c) 酸化誘導時間 (OIT) 測定

劣化試料の酸化誘導時間 (OIT) を測定する前に、未劣化試料 2 種の熱的特性の把握を行う目的で酸化誘導温度 (OITP) 測定を実施した。結果を図 3.3.2-23 に示す。実ケーブルグ

レード相当である A0 添加品は 280°C から、酸化反応の開始に伴う発熱ピークが観測された一方、A0 無添加品では 199°C の時点で発熱ピークが現れた。この結果より、熱的性質の面からも、A0 無添加品を用いることで、A0 添加品を用いた時と比較してより短期間で劣化試料作成が可能であることが明確となった。よって、当初の予定通り、酸化防止剤を含まないことで、ある程度劣化の進行した模擬試料として取り扱えること予想される。

続いて、A0 添加品より作製した劣化試料の OIT 測定を行った。結果を図 3.3.2-24 に示す。A0 添加品の劣化試料では、時間の経過とともに、OIT 値は直線的に低下する傾向が確認された。加えて、温度や線量率といった加速劣化条件の違いによる影響は検出されず、いずれの条件においても一様に直線的な低下傾向を示した。

一方、A0 無添加品より作製した劣化試料の OIT 測定結果図 3.3.2-25 に示す。100 時間前後という劣化初期の時点で OIT 値が初期値の半分以下まで低下した。この低下傾向は、A0 添加品に比べてかなり急激であった。また、120°C 条件下では、低下傾向のばらつきが大きいが、100°C 条件下では一様に急激な低下傾向が示された。A0 無添加試料の OIT 測定が可能である点について、シート形状試料を作製するために含まれる最低限の酸化防止剤が、成形過程を通じてごくごく僅かに残存したものを検出していると考えられる。つまり、酸化劣化による機械特性低下を防ぐ目的の酸化防止剤は含まれていないことから、加速劣化初期時点で急激な機械特性低下が引き起こされたと考えられる。以上より、EAB 値の傾向と同様に、各酸素濃度間での劣化傾向の違いは、1.0 kGy/h という高線量率下では確認することが出来なかった。また、図示はしないが、各酸素濃度環境での温度依存性については今のところ確認することができていない。

(d) SPM 測定

図 3.3.2-26～図 3.3.2-27 に酸素濃度および線量率の異なる条件での熱・放射線同時劣化難燃 EPDM シートの SPM による表面観察における位相遅れ測定結果と図 3.3.2-28～図 3.3.2-29 に位相遅れの最頻値と照射線量の関係を示す。酸化防止剤通常量添加試料について、大気中、120°C 照射では、300kGy 程度までは照射量の増加とともに位相遅れは小さくなり、300kGy 以上では、位相遅れは殆ど飽和している。これより、300kGy までに表面の劣化が急激に進行していることがわかる。放射線照射中における酸素濃度の影響については、酸素濃度 5%の方が照射量の増加に対して表面の硬化の進行が緩やかになっている。つまり、表面の酸化進行は、酸素濃度に影響されている。

図 3.3.2-30 に大気中、100°C、1kGy/h で、熱劣化、放射線劣化、熱・放射線同時劣化を施した難燃 EPDM シートの厚さ方向におけるフォースカーブ測定より算出した、押し込む力の距離に対する微係数(勾配)と照射量の関係を示す。なお試料の厚さ方向における測定位置は、①最端部(表面付近)、②中央部(試料表面より 0.5mm の位置)、③中間部(①と②の間)の 3 点である。熱劣化試料では、いずれの場所においてもフォースカーブの勾配に大きな差は見られない。放射線照射試料では、500kGy 以上で最端部と中間部に劣化が進行して

いるように見えるが、中央部では殆ど進行していない。熱・放射線同時劣化試料では、照射量の増加と共に最端部と中間部は劣化が急激に進行し、中央部についても前者よりは進行が遅いが、劣化は進行していることがわかる。

図 3.3.2-31 に 100°C、1kGy/h で、熱劣化、放射線劣化、熱・放射線同時劣化を施した難燃 EPDM シートの表面におけるフォースカーブの勾配 (FG) とインデントモジュラス (IM)³⁹ の測定結果を比較して示す。熱劣化およびγ線照射の進行により、IM と FG は増加しており、試料表面が硬化していることが分かる。

(e) 化学発光測定

図 3.3.2-32 に熱・放射線同時劣化試料の CL 強度の時間依存性を示す。全ての試料において CL 測定初期に大きな CL が出現し、その後再度ピークが見られる。CL 測定において見られる 2 つめのピークのピーク到達時間は、全ての劣化試料において、変化量に差はあるにせよ照射量の増加と共に短くなっている。つまり、劣化度合いが大きくなるとピーク到達時間が短くなっている。よって、この時間は OIT に対応していると見なすことができる。

図 3.3.2-33 に各劣化試料についてピーク到達時間 (OIT) および破断伸び値と照射量との関係を比較して示す。照射量の増加と共に OIT は大きく減少し、破断伸び値も同様の傾向を示し、両者はよく類似していることがわかる。つまり、CL 測定により算出された OIT は難燃 EPDM の劣化度に対応しているといえる。この結果からも CL 測定は、高分子絶縁材料の劣化評価手法として適用できる。

(f) 複素誘電率測定

図 3.3.2-34、図 3.3.2-35 に大気中、120°C、0.5kGy/h で 133kGy～825kGy 照射した酸化防止剤が通常量添加された難燃 EPDM シートについての比誘電率および比誘電損率、図 3.3.2-36、図 3.3.2-37 に酸素濃度 5%、120°C、1.0kGy/h で 196kGy～1210kGy 照射した酸化防止剤が添加されていない難燃 EPDM シートについての比誘電率および比誘電損率、図 3.3.2-38、図 3.3.2-39 に大気中、120°C、1.0kGy/h で 67kGy～311kGy 照射した酸化防止剤が添加されていない難燃 EPDM シートについての比誘電率および比誘電損率の測定温度依存性をそれぞれ示す。また、これら 3 種類のシートについて、それぞれの比誘電損率より算出した導電率のアレニウスプロットを図 3.3.2-40～図 3.3.2-41 にそれぞれ示す。酸化防止剤未添加試料では、照射量の増加とともに比誘電率、比誘電損率は増加している。酸化防止剤添加試料では、比誘電率、比誘電損率は未劣化試料が最も高く、照射開始とともに急激に減少し、その後照射量の増加とともにゆっくりと増加している。未劣化時における誘電特性は酸化防止剤に起因していることが推定できる。照射開始とともに酸化防止剤が分解あるいは揮発し、その結果比誘電率および比誘電損率が減少したのであろう。アレ

³⁹ (1) 松波潮・三上雅生：「インデントモジュラス法によるケーブルの経年劣化診断手法の検討」、INSS JOURNAL、Vol.15、p. 236 (2008)

ニウスプロットの傾きから算出できる活性化エネルギーについては、劣化時における酸素濃度による明瞭な影響は見られない。

4) 考察

(a) 低酸素濃度環境による加速劣化試験結果への影響

今年度は、沸騰水型原子炉の実機環境により近いと考えられる低酸素濃度条件下において、熱・放射線同時加速劣化試験を実施した。酸素濃度の低下に伴い、照射期間の長期化が予想されたことから、実ケーブル相当グレードのシート試料（A0 添加品）とは別に、酸化防止剤を含まない試料である A0 無添加品（ただし、酸化防止剤以外の添加剤に関しては、上記グレードと同等に含まれる）を用いた。その結果、EAB および OIT 測定結果より、酸素濃度による影響、たとえば、EAB 値や OIT 値の低下の傾向が低酸素濃度環境では緩和されるといった現象は確認されなかった。この要因として、今回選択した 1.0 kGy/h という高線量率によるものと考えられる。すなわち、線量率が非常に高いことから、シート試料内では不均一劣化が生じ、EAB 測定や OIT 測定といった、シート厚さ方向の全領域にわたって一様に測定する手法では、わずかな違いを見逃してしまっている可能性が考えられる。仮に、不均一劣化によるシート厚さ方向での劣化挙動の違いや組成の変化が存在すれば、顕微 FT-IR 測定などを用いた厚さ方向での分析や、ゲル分率測定にて架橋がより進行した領域の割合を求めることなどで、新たな側面から上記データを見直し、より深い考察が可能であることが予想される。

(b) A0 添加試料の加速劣化について

劣化試料の ATR FT-IR 測定結果より（図 3.3.2-16）、 1600 cm^{-1} 付近に出現したブロードなピークについて、出現したピーク領域および形状から、カルボニル化合物に由来するものであると予想される。これは、高分子主鎖の酸化劣化に伴う主鎖切断および各種添加剤の分解物の生成が起こったと予想されるためである。

劣化試料の機械的特性（EAB 測定）および熱的特性（OIT 測定）の両面より、線量率の差による劣化挙動への影響が確認できなかった。このことから、 $0.5\sim 1.0\text{ kGy/h}$ の範囲では劣化挙動が同一であったことが予想される。また、EAB 値と OIT 値との相関に関して、図 3.3.2-45 に示す。いずれの線量率および温度においても、EAB 値と OIT 値はほぼ同一の挙動で低下してゆく傾向が確認された。通常、高分子材料の劣化挙動として、まず酸化防止剤が劣化初期段階でのラジカル捕捉を行い、機械特性が低下し始める時間を遅らせる効果が期待できる。しかし、図 3.3.2-42 に示したとおり、本研究では EAB 値と OIT 値の間に、そのような傾向を確認することは出来なかった。その原因として、高線量率のため材料劣化を抑制しきれずに両方の値が同時に低下したと考えられる。なお、図 3.3.2-25 に示した A0 無添加の劣化試料での傾向と比較して、劣化挙動が緩やかであることから、酸化防止剤

を添加することによる材料劣化、すなわち自動酸化反応の抑制効果は確認できた。また、詳細については今後も検討を行う予定である。

(c) A0 無添加試料の加速劣化について

劣化試料の ATR FT-IR 測定結果より (図 3.3.2-16)、 1600 cm^{-1} 付近に出現したブロードなピークについて、A0 添加品と同様に、カルボニル化合物に由来するものであることが予想される。また、図 3.3.2-17 および図 3.3.2-18 より、5%- O_2 条件下かつ 1222 時間以上経過した試料からのみ、上記ブロードなピークが確認された。この点について、酸素濃度条件の差による影響であると考えられる一方、シート試料の総線量による影響である可能性も考えられる。これは、 1.0 kGy/h という高線量率条件下であることから、酸素濃度に依らず劣化が進行し、どれだけ放射線照射を受けたかが劣化生成物の生成量に比例したことが考えられるためであり、さらなる検証が必要と思われる。

劣化試料の機械的特性 (EAB 測定) および熱的特性 (OIT 測定) の両面より、酸素濃度の差による劣化挙動への影響が確認できなかった。これは、4)-(a) 章 (上記参照) でも既に述べたが、 1.0 kGy/h という高線量率環境下では、架橋や不均一劣化による影響が顕著となり、酸素濃度による影響が確認できなかったものと予想される。また、EAB 値についてのみ、温度の差による影響を確認することができた。A0 添加品での加速劣化試験結果と異なり、EAB 値において温度依存性が確認できた要因について、A0 添加品では条件設定の都合などから、 1.0 kGy/h 、 100°C 条件ではシート試料厚さが 1.0 mm 、 1.0 kGy/h 、 120°C 条件では厚さ 0.5 mm のシート試料を用いたことによる影響が考えられる。それぞれの EAB 値は、未劣化試料の EAB 値を用いて規格化して比較しているが、温度依存性による差以上の影響が生じている可能性があるためである。

次に、破断時伸び率 (EAB) と引っ張り強さ (TS) の相関について (図 3.3.2-22 を参照)、対角線よりも上側の領域では、劣化反応のうち架橋反応が主に進行しており、劣化と共に材料の硬化と脆化が起こることを示す。一方、下側の領域では、主に高分子主鎖の酸化開裂に伴う低分子量化と機械的強度の低下を示すことが知られている⁴⁰。いずれの加速劣化条件においても、対角線近傍から上側の領域に分布していることから、今回実施した同時加速劣化条件においては高分子主鎖の分子鎖切断劣化 (= 低分子量化) よりも架橋劣化 (= 硬化・脆化) の方が優位に進行したことが予想される。5%- O_2 条件下では、EAB 値が時間とともに途中まで低下し続けると同時に、TS 値が時間の経過とともに低下から上昇へと転じたことから、劣化終期に架橋反応の急激な進行による硬化が起きたものと予想した。10%- O_2 条件下では、劣化初期から終期にかけて対角線よりも上側の領域にプロットされ、かつ傾き 45 度よりも小さいことから、分子鎖切断よりも架橋反応の方がより高頻度に起こり、加速劣化期間の全体にわたって架橋反応が優位に進行したと推測した。最後に、21%- O_2 条件

⁴⁰ 岡田漱平、日馬康雄、伊藤政幸、八木敏明、吉川正人、吉田健三、「LOCA 模擬環境下における絶縁材料の劣化の反応速度論的解析」、日本原子力研究所、EIM-82-111、1982。

下では、温度にかかわらずいずれのプロットも対角線近傍に存在することから、架橋と分子鎖切断のいずれも同等に進行したことが推測される。

EAB 値と OIT 値との相関に関して、図 3.3.2-43 に示す。酸化防止剤無添加品では、いずれの劣化条件においても、EAB 値の低下に先駆けて OIT 値が減少する傾向が確認された。このことから、高分子材料として EPDM においても限界酸化防止剤濃度理論が有効であることが明らかとなった。

(d) 劣化試料の表面観察と熱的手法による酸化評価

図 3.3.2-30 において、100℃で加熱された試料ではフォースカーブの勾配は、中央部、中間部、最端部とも低いままで殆ど変化しない。一方、室温でγ線を照射した試料では照射量の増加に従い最端部、中間部では勾配は大きくなるが、断面中央部では殆ど変化していない。さらに、100℃でγ線を照射した試料では、3点全てで勾配は大きくなっている。フォースカーブの勾配は単位長さ押し込むときに必要な力を示し、硬い試料ほど大きくなる。つまり、熱劣化時では、1000時間では表面付近でさえも硬化は進行しておらず、放射線照射のみでは、熱劣化時に比べると硬化は試料内部まで進行していることを示している。さらに、熱・放射線同時劣化では、これら2者に比べて表面付近、さらには試料内部までも硬化が進行していることを示している。難燃 EPDM にとって硬化の進行は、100℃熱劣化<室温 γ線<100℃γ線の順で厳しい劣化となっていることを示唆している。

図 3.3.2-31 に示すように、SPM の FG と IM は、よく一致した変化を示す。したがって、SPM は既に実績のある IM と同様に高分子の劣化を評価できる。さらに、IM 測定装置の押針径約 1.0mm に対して SPM の探針径は約 10nm と非常に小さく、SPM では、例えば、前述のような厚さ 1mm 程度の難燃 EPDM シート試料の厚さ方向における劣化評価も可能である。

図 3.3.2-32 において、CL 測定初期に大きな発光 (CL1 と呼ぶ) が検出されている。EPDM は極めて複雑な物質である。本研究の試料について、エチレンとプロピレンの重合部分以外に、一般的に 5~10%程度含まれるとされる第 3 成分などの組成は開示されていない。ポリエチレンや多くの生分解性高分子は、CL 測定開始、すなわち 180℃あるいは 160℃や 155℃での加熱直後には CL を呈さない。類似の現象は、ポリプロピレン^{41, 42}、スチレンブタジエン共重合体⁴³、アクリロニトリルブタジエン共重合体⁴²、高密度ポリエチレン⁴⁴、ブチルゴ

⁴¹ M. Kato and Z. Osawa: "Effect of Stereoregularity on the Thermo-oxidative Degradation of Polypropylenes", Polym. Degrad. Stab., Vol. 65, pp. 457-461 (1999)

⁴² Z. Osawa, M. Kato, and M. Terano: "Effect of Stereoregularity on the Thermo-oxidative Degradation of Poly(propylene)s Estimated by Chemiluminescence", Macromol. Rapid Commun., Vol. 18, pp. 667-671 (1997)

⁴³ Z. Osawa, M. Nishimoto, and H. Otsuki: "Chemiluminescence from the Isothermal Oxidation of SBR and NBR Elastomers", Polym. Degrad. Stab., Vol. 57, pp. 69-75 (1997)

⁴⁴ S. Jipa, T. Zaharescu, R. Setnescu, T. Setnescu, M. Dumitru, L. M. Gorghiu, I. Mihalcea, and M. Bumbae: "Effect of Calixarenes on Thermal Stability of Polyethylenes", Polym. Degrad. Stab., Vol. 80, pp. 203-208 (2003)

ム⁴⁵、クロロブチルゴム⁴⁴、ブromoブチルゴム⁴⁴、等についても報告されている。一方、EPDMあるいはEPMについては、CL測定初期にCL1と類似の挙動を示すCLが見られる報告^{46, 47}と見られない報告^{48, 49, 50}がある。CL1と類似のCLが見られるとしている報告^{45, 46}においてもCL1の原因についての言及はない。今回の難燃EPDM試料に関してエチレンとプロピレンの重合部分以外の成分についての情報はないが、EPDMにゴム弾性を付与するための架橋を施すためには、通常エチリデンノルボルネン、ジシクロペンタジエン、またはヘキサジエンなどの第3成分を加える。我々の試料にも、また文献(45)、(47)、(48)のEPDMにも、当然これらのいずれかは含まれている筈である。一方、これらの第3成分は前述のEPMや他のゴム類には含まれていない。EPMにおいてCL1の存在が報告されている⁴⁶事実より、今回の難燃EPDM試料に含まれている筈の第3成分がCL1の原因である可能性は低いと思われる。

我々が調べた限りでは、上記文献(40)～(49)で報告された材料について、「難燃化されている」という記述はない。よって、現時点での推論として、難燃剤がCL1として発光している可能性が十分に考えられる。EPDMの難燃剤としては無機水酸化物も使用されており、加熱時に無機充填剤がルミネセンスを呈するという現象⁵¹は過去にも報告されている。以上のことから、難燃剤がCL1に寄与している可能性は十分考えられる。

図3.3.2-33において、CL測定により算出した見かけのOITと破断伸び値は照射量の増加に伴い減少し、両者はよく相関している。この結果より、難燃EPDMのCL測定において見かけのOITを算出するために使用したCLピークの挙動は、試料の酸化挙動を反映しているといえる。つまり、このCLピークは難燃EPDMの酸化反応に起因していると言える。

⁴⁵ S. Jipa, M. Giurginca, T. Setnescu, R. Setnescu, G. Ivan, and I. Mihalcea: "Thermo-oxidative Behaviour of Halobutyl and Butyl Elastomers", *Polym. Degrad. Stab.*, Vol. 54, pp. 1-6 (1996)

⁴⁶ T. Zaharescu, S. Jipa, A. Mantsch, and D. Henderson: "Stabilization Effects of Naringenin and Caffeic Acid on γ -irradiated EPDM", *Radiation Physics and Chemistry*, Vol. 84, pp. 35-38 (2013)

⁴⁷ M. Ito: "Effect of Irradiation on Chemiluminescence of EPR Pure Vulcanisate", *Radiation Physics and Chemistry*, Vol. 41, No. 3, pp. 443-446 (1993)

⁴⁸ R. Broska, N. C. Billingham, and P. K. Fearon: "Accelerating Effect of Poly(methyl methacrylate) on Rubber Oxidation. Part 1: A Chemiluminescence Study", *Polym. Degrad. Stab.*, Vol. 93, pp. 1100-1108 (2008)

⁴⁹ V. Gueguen, L. Audouin, B. Pinel, and J. Verdu: "Thermal Oxidation of EPDM Terpolymer and Vulcanisate", *Polym. Degrad. Stab.*, Vol. 43, pp. 217-223 (1994)

⁵⁰ 八木敏明・瀬口忠男: 「化学発光分析による絶縁材料の放射線・熱劣化の評価」, 電気学会誘電絶縁材料研究会資料, 東京, DEI-92-114, pp. 63-71 (1992)

⁵¹ A. Kron and B. Strenberg: "Chemiluminescence Applied to Oxidation of Polyolefins", *Prog. Rubber Plast. Technol.*, Vol. 13, pp. 81-107 (1997)

5) まとめと今後の課題

実機ケーブルと同じグレードの難燃 EPDM 試料に対し、熱・放射線同時加速劣化試験および熱加速劣化試験を行い、各種機器測定（ATR FT-IR、EAB、OIT、SPM、CL）により劣化度を評価するとともに、劣化メカニズム解明に関する検討を行った。その結果、以下のことが明らかとなった。

- 低酸素濃度条件にて熱・放射線同時加速劣化試験を実施した。1.0 kGy/h という高線量率条件下において、酸素濃度に依存する明確な測定データの差異は、現時点では確認できなかった。
- 各種劣化条件にて作製した劣化試料の機械特性変化の傾向から、酸素濃度に依らず劣化の終期には架橋が急激に進行することが予想された。
- 熱・放射線同時劣化した酸化防止剤（AO）添加試料（実ケーブルグレード相当）では、線量率や温度に依らず、EAB 値と OIT 値がほぼ同一の傾向で低下した。一方、AO 無添加試料では、いずれも EAB 値の低下に先駆けて OIT 値が減少する傾向が確認された。以上の結果より、5%-O₂ 条件下（BWR 想定環境下）で作製した劣化試料においても、限界酸化防止剤濃度理論および OIT 測定が有効であることが明らかとなった。
- SPM による試料断面深さ方向の表面観察より、酸化進行による深さ方向の表面硬化を観測できた。試料内部の硬化は、熱劣化、放射線劣化、熱・放射線同時劣化の順で進行が早くなる。
- SPM によるフォースカーブの勾配は IM と同程度の信頼性を有し、しかも微視的に高分子表面の劣化を捉えられる。
- 化学発光測定により得られた酸化誘導期間は、破断伸び結果と良い相関を示すことより、高分子酸化評価手法として有用である。
- 各種条件下において作製した試料を比較したところ、線量率依存性および酸素濃度依存性が観測されなかったことから、データ解析には不均一劣化（例えば架橋反応）などによる影響を考慮する必要がある。今後、様々な機器測定を利用して、劣化メカニズムへの影響を検討する。

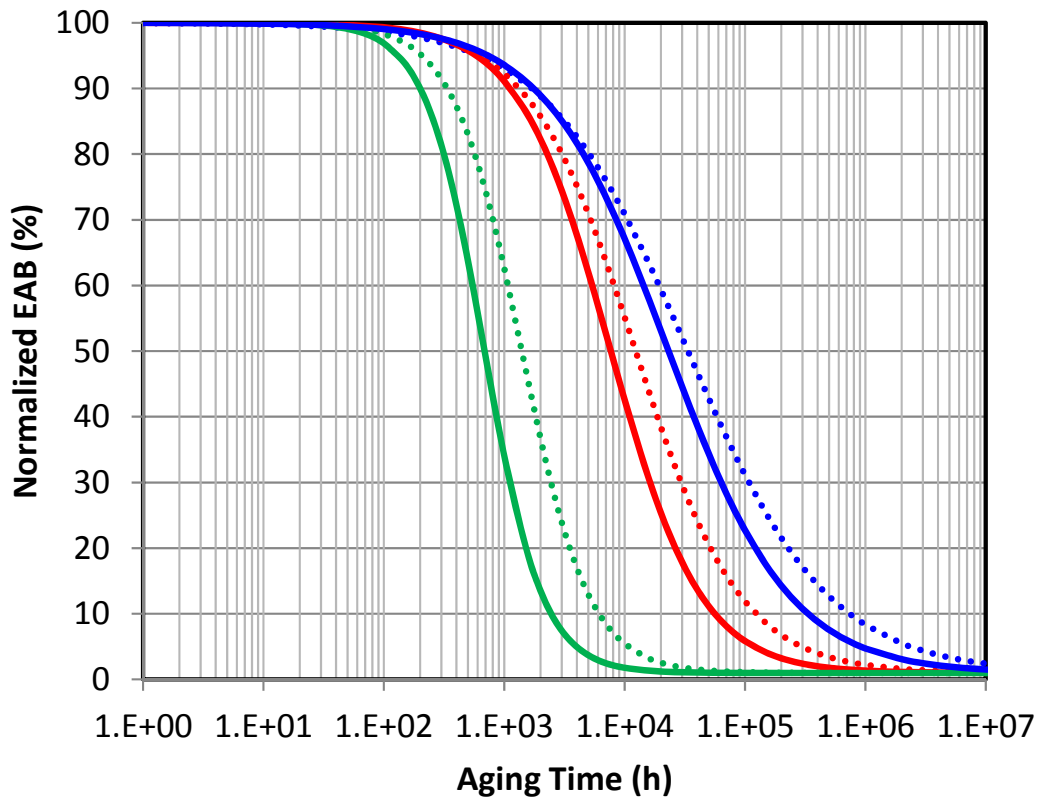


図 3.3.2-9

時間依存データの重ね合わせ手法を用いて予測した 1.0 kGy/h 条件下での予想劣化曲線。パラメータには表 3.3.2-2 の数値を用いた。実線は 120°C、点線は 100°C を意味し、青色は 5 %-O₂ 環境、赤色は 10 %-O₂ 環境、緑色は 21 %-O₂ 環境を示す。

表 3.3.2-2 1.0 kGy/h での時間依存データ重ねあわせ手法に必要な推定パラメータ

酸素濃度 (%-O ₂)	劣化温度 (°C)	活性化 エネルギー (kcal/mol)	マスターカーブ近似式				シフトパラメータ		推定寿命 ^c (h)
			A1	A2	x0	p	x	k	
5	100	5.23	510 ^a	5 ^a	30,964	0.738	0.5152 ^a	63.32 ^a	41,644
	21,552				0.855	27,834			
10	100	6.81	510 ^a	5 ^a	11,624	0.990	0.5152 ^a	63.32 ^a	14,496
	7,254				1.147	8,777			
21	100	10.31 ^b	510 ^a	5 ^a	1,347	1.545 ^a	0.5152 ^a	63.32 ^a	1,551
	660				1.790 ^a	745			

^a 文献²³より引用。^b 文献値 20.33 kcal/mol²³より線量率 1.0 kGy/h 時へと換算して算出。その他キャプションの無い数値は前項(8)より得られた数値関係から類推して算出して用いた。

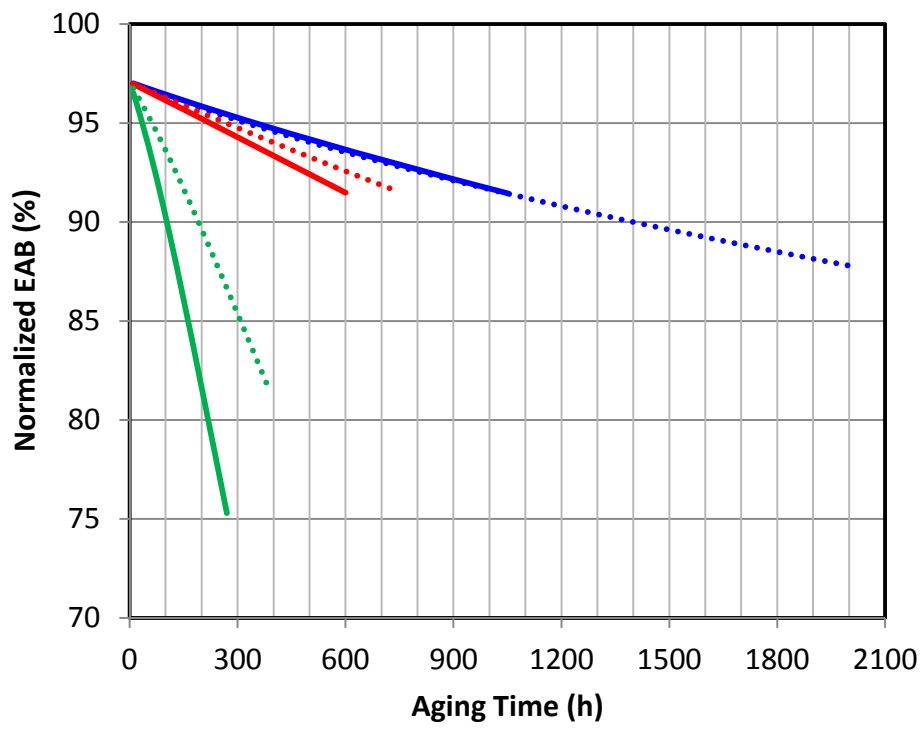


図 3.3.2-10

時間依存データの重ね合わせ手法を用いて予測した本試験期間内での劣化試料の予想劣化曲線。

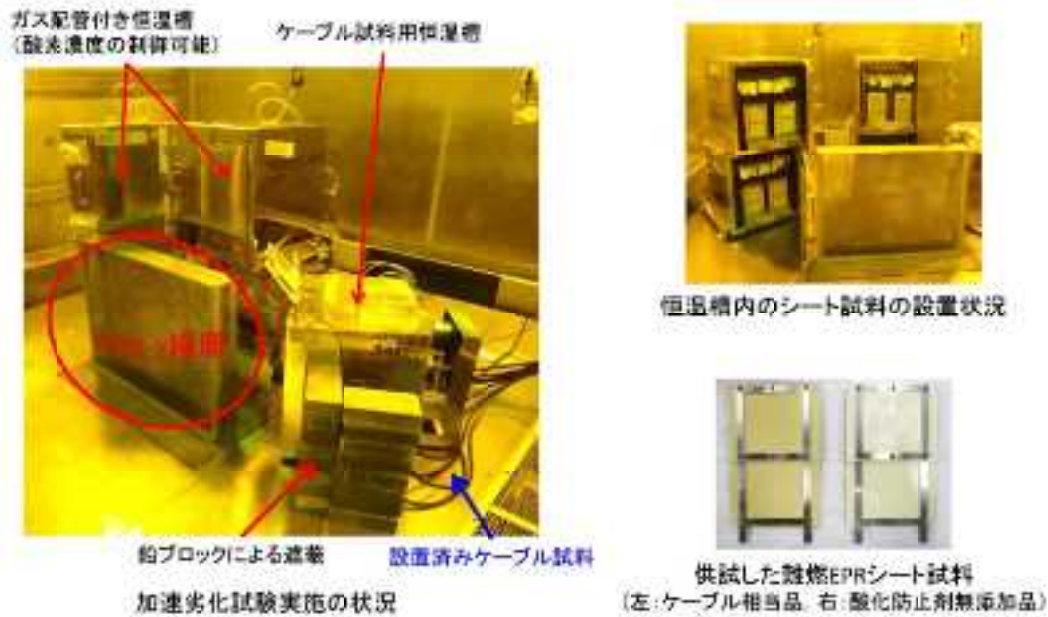


図 3.3.2-11

難燃 EPDM シート試料のガンマ線照射試験（熱・放射線同時劣化および放射線劣化）の実施状況および加速試験前の供試試料外観

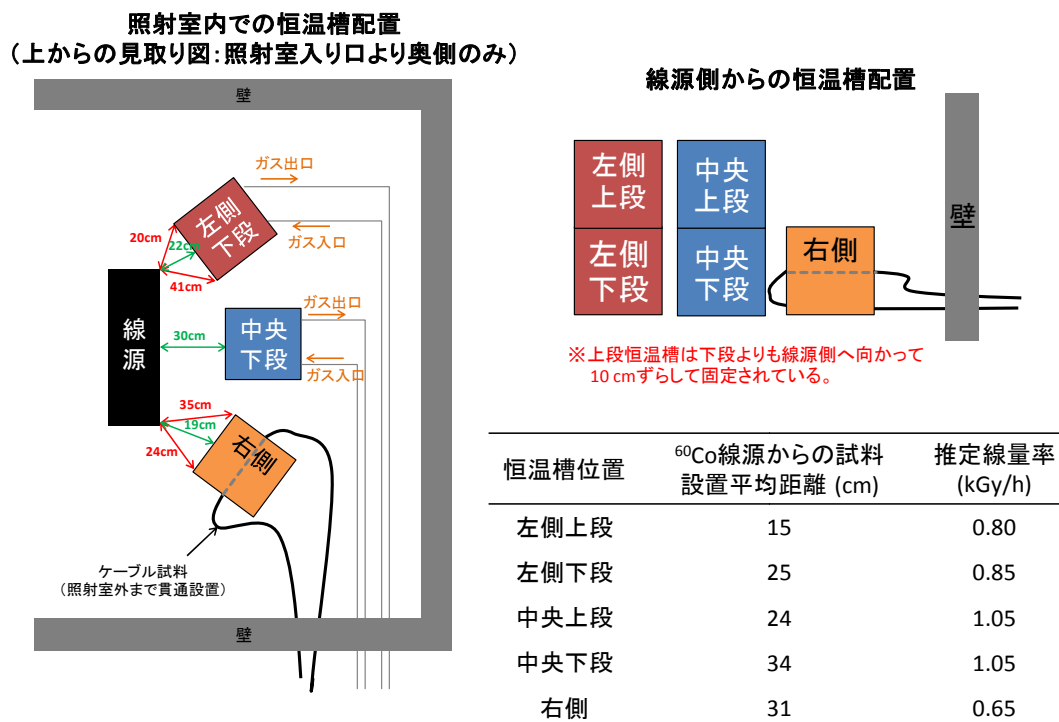


図 3.3.2-12

照射室内における各恒温槽の配置図および各恒温槽内の推定線量率値。

表 3.3.2-3 熱・放射線同時加速劣化試料の作製日程(A0 添加品：実ケーブルグレード、1.0 kGy/h、120℃)

照射条件	開始時刻	取出時刻	時間 (h)	総線量 (kGy)	TS (MPa)	EAB (%)
恒温槽：右側 (0.65 kGy/h) 条件：120℃、21 %-O ₂ 試料：A0 添加品 (1.0mm 厚) (実ケーブルグレード相当)	10/23 15:00	10/30 13:00	136	89	14.3	815.3
	10/23 15:00	11/5 13:00	265	172	13.0	670.0
	10/23 15:00	11/11 13:00	397	258	12.5	614.7
	10/23 15:00	11/15 13:00	478	311	12.9	576.7
	10/23 15:00	11/25 13:00	692	450	12.2	524.0
	10/23 15:00	12/5 10:00	906	589	10.3	350.0
	10/23 15:00	12/18 16:00	1233	801	13.4	325.3
	10/23 15:00	1/20 13:00	1645	1069	12.7	243.3
恒温槽：中央上段 (1.05 kGy/h) 条件：120℃、21 %-O ₂ 試料：A0 添加品 (0.5mm 厚) (実ケーブルグレード相当)	8/23 17:00	9/2 14:00	226	238	13.8	807.3
	8/23 17:00	9/5 14:00	298	313	12.8	748.0
	8/23 17:00	9/24 14:00	747	784	12.5	484.0
	8/23 17:00	10/3 13:00	958	1006	12.4	445.3
	8/23 17:00	10/18 13:00	1222	1283	12.1	307.3
	8/23 17:00	10/30 13:00	1466	1539	12.9	290.7
	8/23 17:00	11/11 13:00	1727	1813	14.0	256.0
	8/23 17:00	11/19 13:00	1891	1986	12.9	194.0

表 3.3.2-4 各酸素濃度雰囲気下での熱・放射線同時加速劣化試料の作製日程 (A0 無添加品、1.0 kGy/h、100°C)

照射条件	開始時刻	取出時刻	時間 (h)	総線量 (kGy)	TS (MPa)	EAB (%)
恒温槽：中央下段 (1.05 kGy/h) 条件：100°C、5 %-O ₂ 試料：A0 無添加品 (0.5mm 厚)	8/23 17:00	9/2 14:00	226	238	7.1	310.0
	8/23 17:00	9/5 14:00	298	313	6.7	293.3
	8/23 17:00	9/24 14:00	747	784	7.0	178.0
	8/23 17:00	10/3 13:00	958	1006	7.3	149.3
	8/23 17:00	10/18 13:00	1222	1283	7.7	125.3
	8/23 17:00	10/30 13:00	1466	1539	9.1	105.3
	8/23 17:00	11/11 13:00	1727	1813	9.1	96.0
	8/23 17:00	11/19 13:00	1891	1986	9.3	94.0
恒温槽：左側上段 (0.80 kGy/h) 条件：100°C、10 %-O ₂ 試料：A0 無添加品 (0.5mm 厚)	10/3 17:00	10/7 15:00	95	76	9.8	545.3
	10/3 17:00	10/15 15:00	196	157	8.2	412.0
	10/3 17:00	10/18 13:00	245	196	7.9	402.0
	10/3 17:00	10/24 16:00	372	298	8.3	312.0
	10/3 17:00	10/30 13:00	508	407	8.2	313.3
	10/3 17:00	11/5 13:00	637	510	7.6	218.7
	10/3 17:00	11/11 13:00	769	615	7.6	225.3
	10/3 17:00	11/19 13:00	934	747	7.6	203.3
恒温槽：左側下段 (0.85 kGy/h) 条件：100°C、21 %-O ₂ 試料：A0 無添加品 (0.5mm 厚)	11/19 17:00	11/22 16:00	65	52	11.6	577.3
	11/19 17:00	11/25 13:00	130	104	10.2	496.7
	11/19 17:00	11/27 13:00	176	141	8.6	421.3
	11/19 17:00	11/29 16:00	211	169	8.3	389.3
	11/19 17:00	12/2 15:00	277	222	8.5	393.3
	11/19 17:00	12/5 10:00	345	276	7.5	304.0
	11/19 17:00	12/9 10:00	434	347	8.0	329.3
	11/19 17:00	12/11 16:00	480	384	9.6	337.3

表 3.3.2-5 各酸素濃度雰囲気下での熱・放射線同時加速劣化試料の作製日程(A0 無添加品、1.0 kGy/h、120°C)

照射条件	開始時刻	取出時刻	時間 (h)	総線量 (kGy)	TS (MPa)	EAB (%)
恒温槽：左側下段 (0.85 kGy/h) 条件：120°C、5 %-O ₂ 試料：A0 無添加品 (0.5mm 厚)	10/3 17:00	10/7 15:00	95	81	8.9	470.7
	10/3 17:00	10/15 15:00	196	167	7.0	332.0
	10/3 17:00	10/18 13:00	245	208	7.2	299.3
	10/3 17:00	10/25 11:00	390	331	7.1	221.3
	10/3 17:00	11/1 11:00	543	462	7.4	194.7
	10/3 17:00	11/8 16:00	701	596	7.2	160.7
	10/3 17:00	11/18 13:00	915	777	7.2	129.3
	10/3 17:00	11/28 13:00	1210	1029	8.6	107.0
恒温槽：中央下段 (1.05 kGy/h) 条件：120°C、10 %-O ₂ 試料：A0 無添加品 (0.5mm 厚)	11/19 17:00	11/22 16:00	65	68	10.7	507.0
	11/19 17:00	11/27 13:00	111	117	8.3	392.0
	11/19 17:00	11/29 16:00	145	153	9.0	342.0
	11/19 17:00	12/2 15:00	212	222	8.3	296.0
	11/19 17:00	12/6 16:00	301	316	7.7	236.0
	11/19 17:00	12/10 11:00	392	412	7.3	213.0
	11/19 17:00	12/13 16:00	453	476	7.7	179.3
	11/19 17:00	12/18 16:00	568	596	8.4	151.3
恒温槽：左側下段 (0.85 kGy/h) 条件：120°C、21 %-O ₂ 試料：A0 無添加品 (0.5mm 厚)	12/2 13:00	12/3 16:00	23	20	11.0	612.0
	12/2 13:00	12/5 10:00	68	58	10.9	550.7
	12/2 13:00	12/6 16:00	89	76	6.9	362.7
	12/2 13:00	12/9 10:00	157	133	7.7	386.0
	12/2 13:00	12/10 11:00	181	154	7.9	380.0
	12/2 13:00	12/11 16:00	203	173	9.7	372.0
	12/2 13:00	12/13 16:00	242	205	9.0	340.7
	12/2 13:00	12/16 13:00	311	264	8.9	285.3

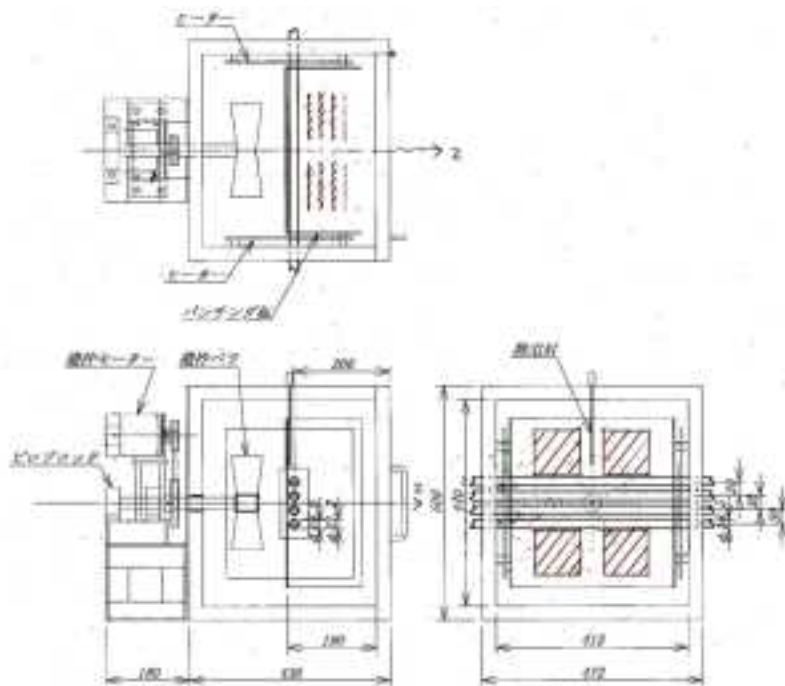
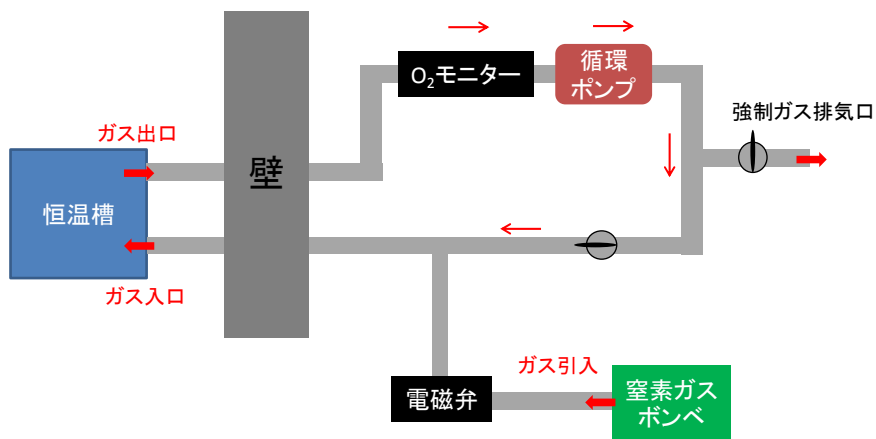


図 3. 3. 2-13

ケーブル試料とともに加速劣化試験を実施した恒温槽（図 3. 3. 2-12 参照、右側に設置）の寸法図。ケーブルと恒温槽を黒線で、シート試料の配置の概念を赤線で記した。



- ・恒温槽はガス出入り口を取り付けたものを利用した。
- ・恒温槽の隙間は、アルミテープやボールベアリングなどを利用して、試験期間中のシール処理を施した。
- ・酸素モニタリングは常時行い、4.5～5.5%ないし9.5～10.5%に自動調整されるように設計した。

図 3. 3. 2-14

低酸素濃度条件下での熱・放射線同時劣化試験装置の簡略図

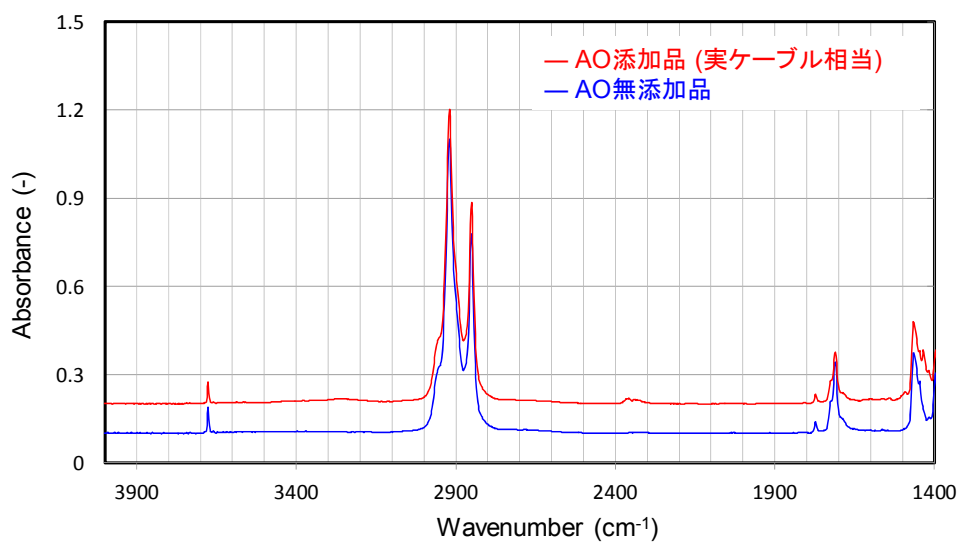


図 3. 3. 2-15

熱・放射線同時加速劣化試験に供試した試料 2 種 (AO 添加品 : 実ケーブルグレード相当と AO 無添加品) の ATR FT-IR スペクトル

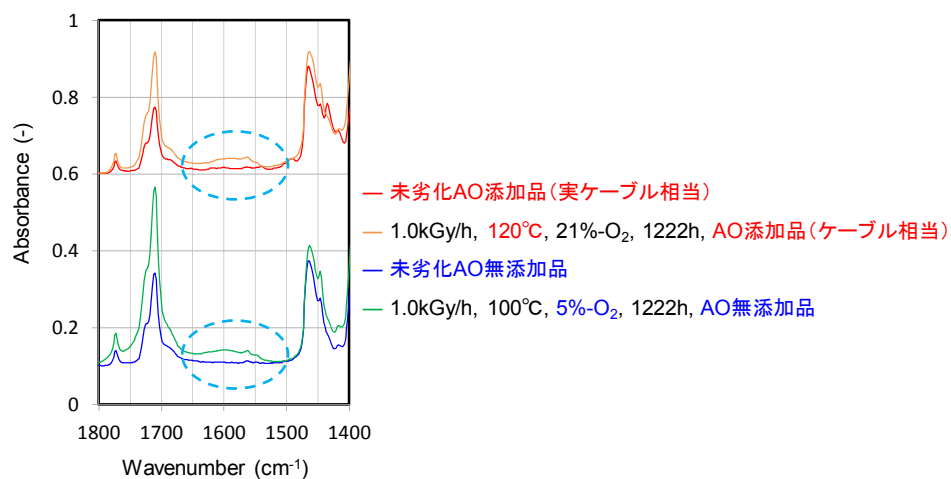


図 3. 3. 2-16

AO 添加品と加速劣化試料 (上段) および AO 無添加品と加速劣化試料 (下段) の ATR FT-IR スペクトル

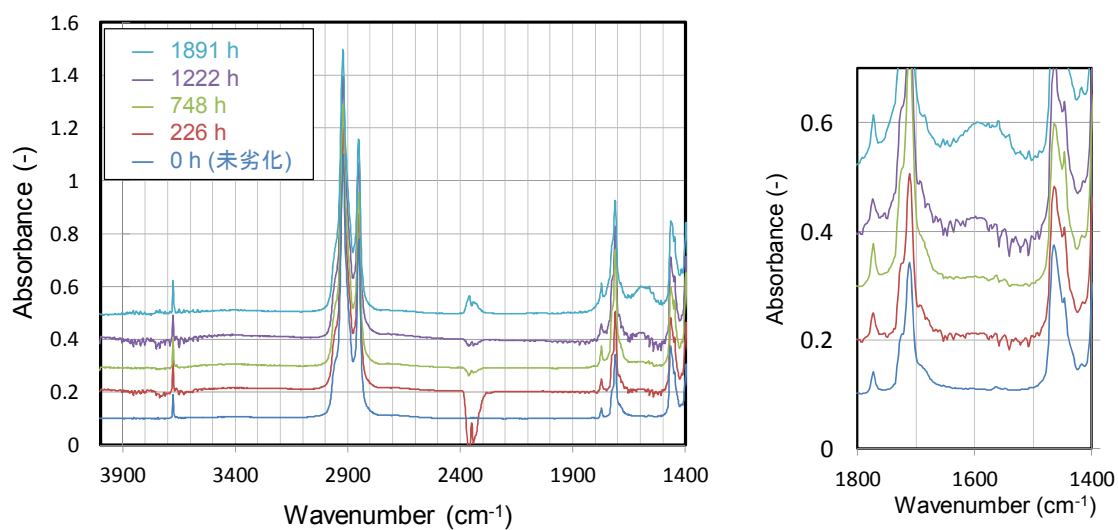


図 3.3.2-17

低酸素濃度条件下での加速劣化試験によって作製した劣化試料のATR FT-IR スペクトル(加速劣化条件 : 1.0 kGy/h、100℃、5 % O_2 。なお、スペクトルを見やすくするために上下にずらして表示している)

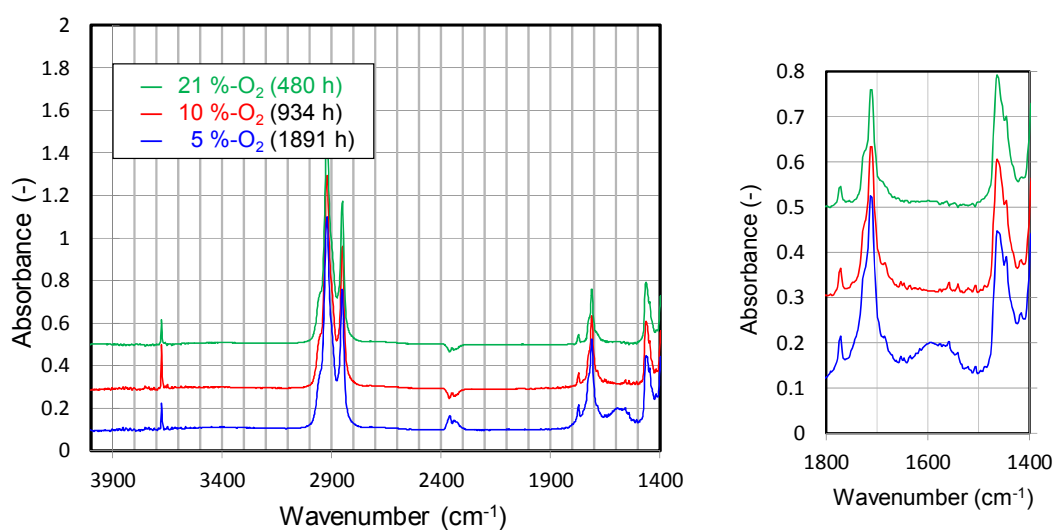


図 3.3.2-18

各種酸素濃度条件下での加速劣化試験により作製した劣化試料のATR FT-IR スペクトル(加速劣化条件 : 1.0 kGy/h、100℃。なお、スペクトルを見やすくするために上下にずらして表示している)

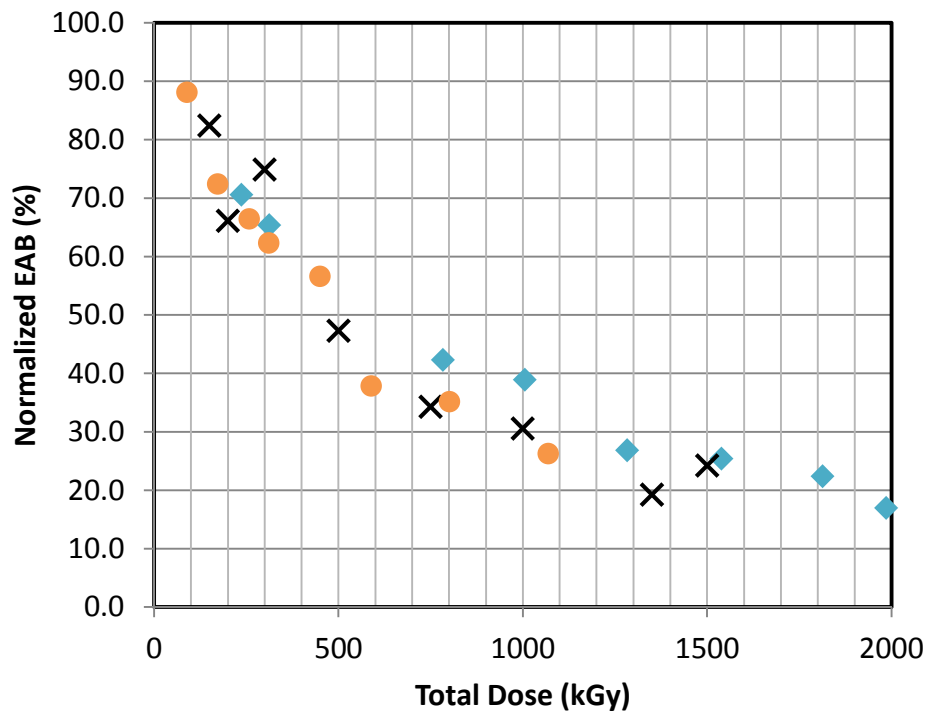
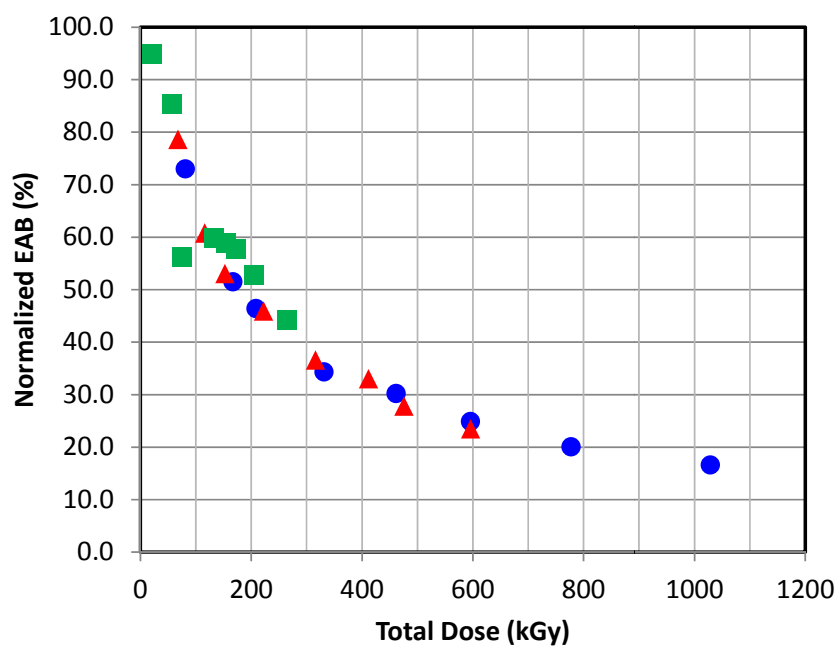
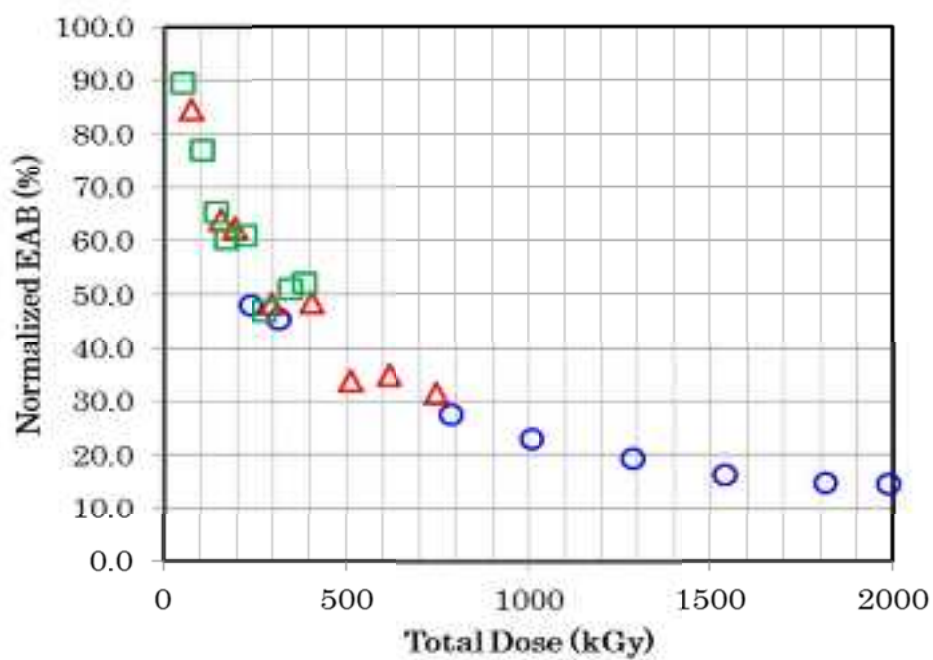


図 3. 3. 2-19

各種の熱・放射線同時劣化条件下にて加速劣化した試料 (A0 添加品) の破断伸び率 (EAB) 測定結果 (● : 0.5 kGy/h、120°C、21 %-O₂、◆ : 1.0 kGy/h、120°C、21 %-O₂、× : 1.0 kGy/h、100°C、21 %-O₂)



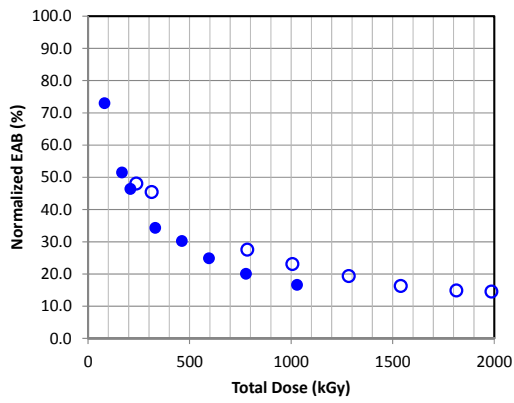
(a) 120°C



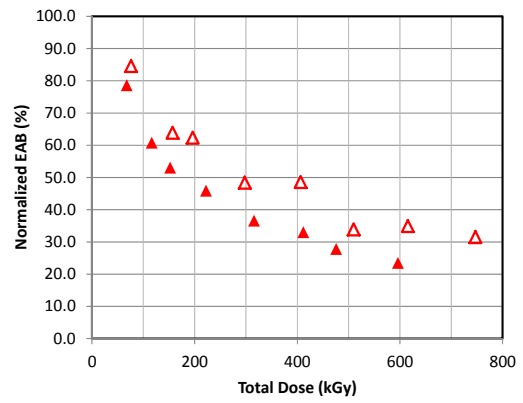
(b) 100°C

図 3.3.2-20

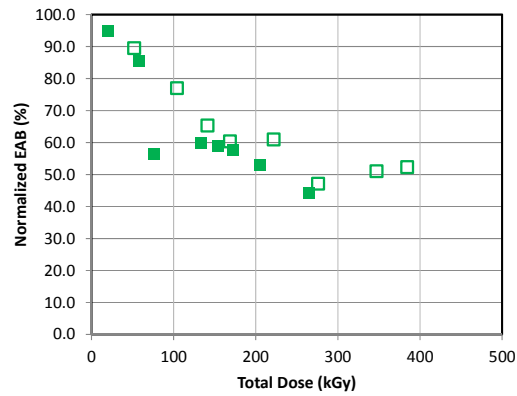
各温度において熱・放射線同時加速劣化した試料 (AO 無添加品) の破断伸び率 (EAB) 測定結果。(a) ● : 1.0 kGy/h、120°C、5 %-O₂、▲ : 1.0 kGy/h、120°C、10 %-O₂、■ : 1.0 kGy/h、120°C、21 %-O₂。(b) ○ : 1.0 kGy/h、100°C、5 %-O₂、△ : 1.0 kGy/h、100°C、10 %-O₂、□ : 1.0 kGy/h、100°C、21 %-O₂。



(a) 5 %-O₂



(b) 10 %-O₂



(c) 21%-O₂

図 3. 3. 2-21

各酸素濃度において熱・放射線同時加速劣化した試料 (AO 無添加品) の破断伸び率 (EAB) 測定結果。(a) ● : 1.0 kGy/h、120℃、5 %-O₂、○ : 1.0 kGy/h、100℃、5 %-O₂。(b) ▲ : 1.0 kGy/h、120℃、10 %-O₂、△ : 1.0 kGy/h、100℃、10 %-O₂。(c) ■ : 1.0 kGy/h、120℃、21 %-O₂、□ : 1.0 kGy/h、100℃、21 %-O₂。

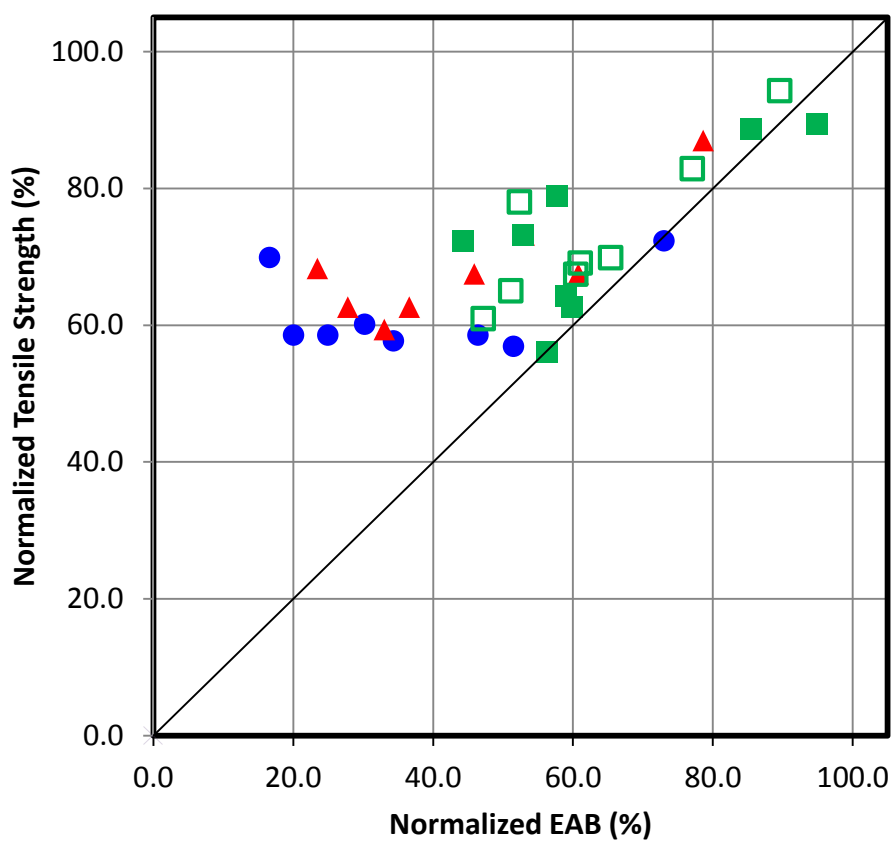


図 3.3.2-22

熱・放射線同時加速劣化した試料の破断伸び率 EAB と引張強度 TS との関係。(●: 1.0 kGy/h、120°C、5 %-O₂、▲: 1.0 kGy/h、120°C、10 %-O₂、■: 1.0 kGy/h、120°C、21 %-O₂、□: 1.0 kGy/h、100°C、21 %-O_{2o})

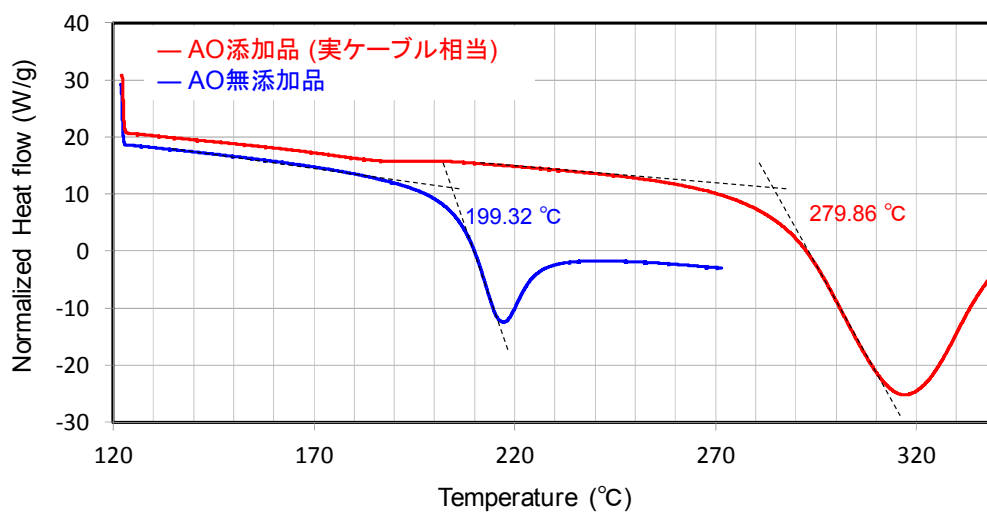


図 3. 3. 2-23

熱・放射線同時加速劣化試験に供試した試料 2 種 (AO 添加品 : 実ケーブルグレード相当と AO 無添加品) の酸化誘導温度 (OITP) 測定結果

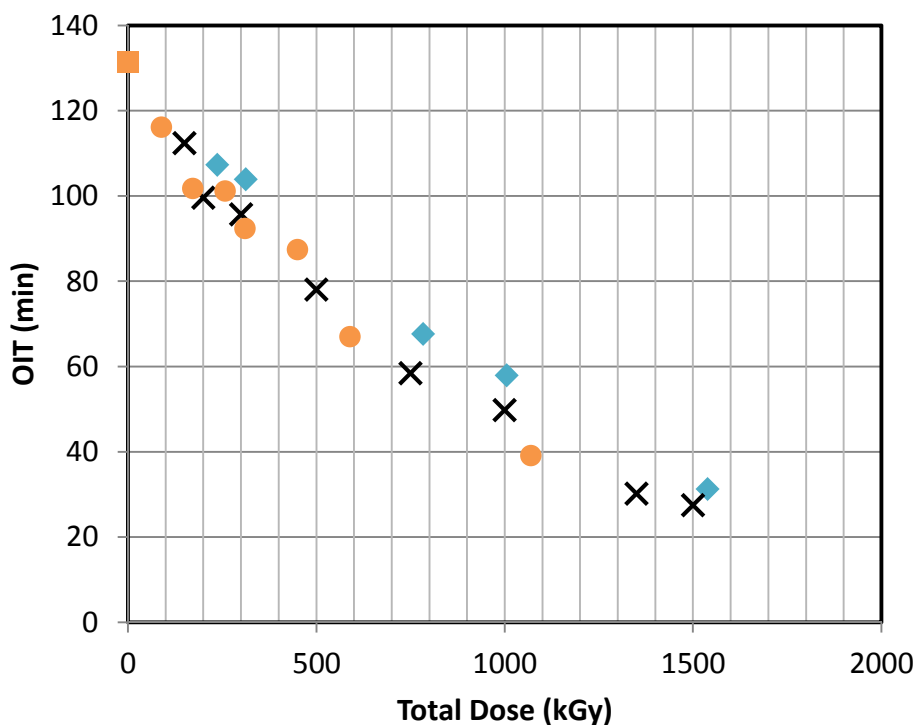
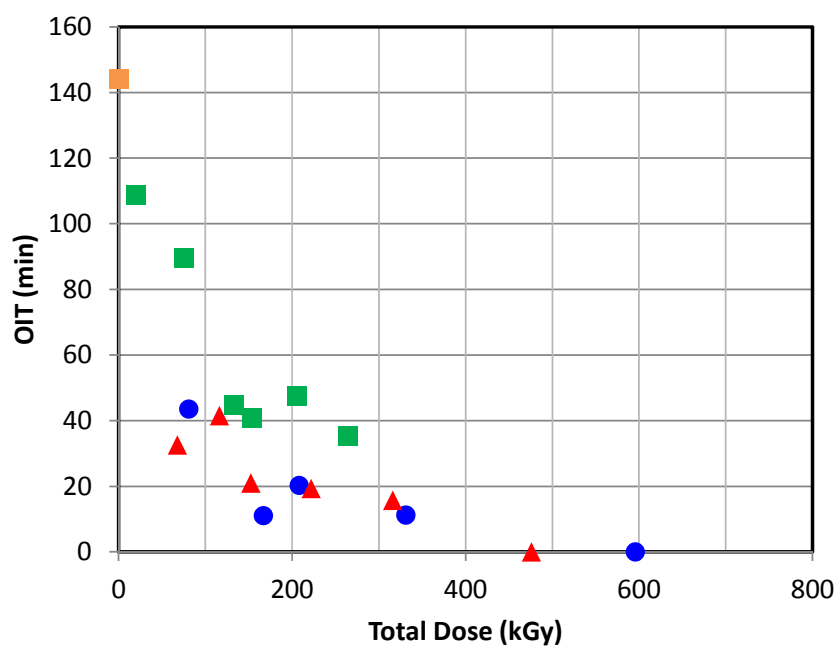
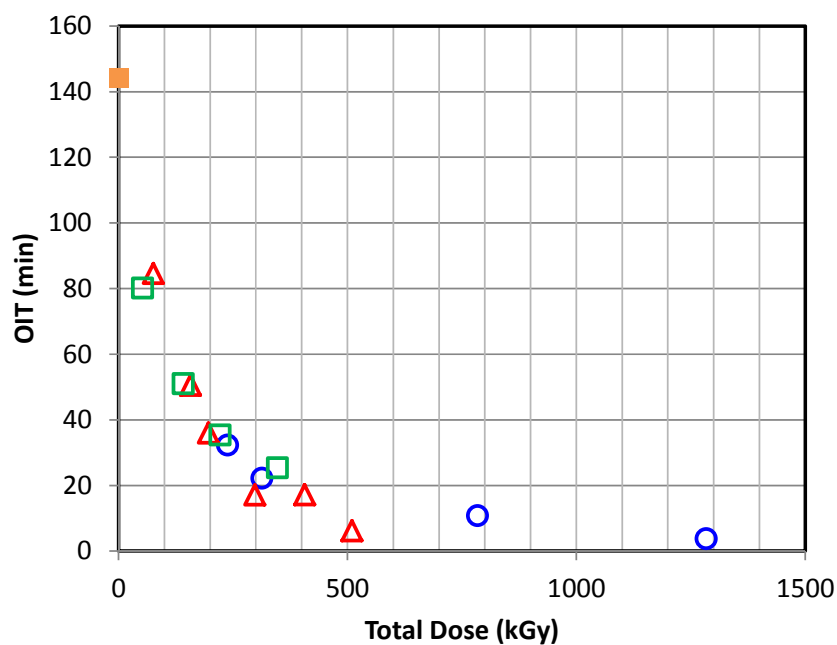


図 3. 3. 2-24

各熱・放射線同時劣化条件下にて加速劣化した試料 (AO 添加品) の酸化誘導時間 (OIT) 測定結果 (● : 0.5 kGy/h、120°C、21 %-O₂、◆ : 1.0 kGy/h、120°C、21 %-O₂、× : 1.0 kGy/h、100°C、21 %-O₂)



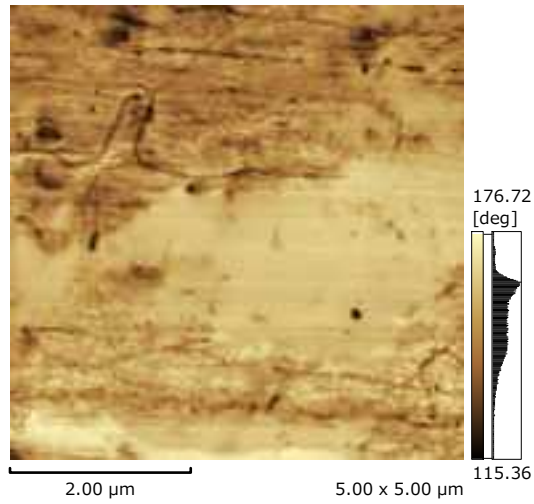
(a) A0 ナシ 120°CのEAB



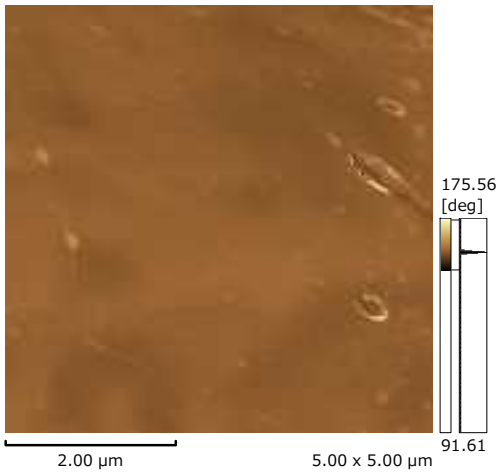
(b) A0 ナシ 100°CのEAB

図 3.3.2-25

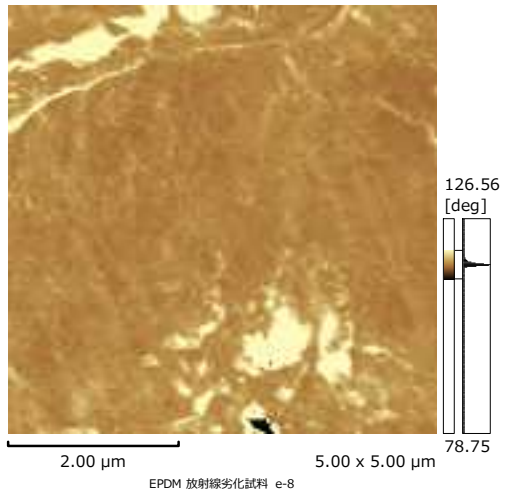
各温度において熱・放射線同時加速劣化した試料（A0 無添加品）の酸化誘導時間（OIT）測定結果。(a) ● : 1.0 kGy/h、120°C、5 %-O₂、▲ : 1.0 kGy/h、120°C、10 %-O₂、■ : 1.0 kGy/h、120°C、21 %-O₂。(b) ○ : 1.0 kGy/h、100°C、5 %-O₂、△ : 1.0 kGy/h、100°C、10 %-O₂、□ : 1.0 kGy/h、100°C、21 %-O₂。



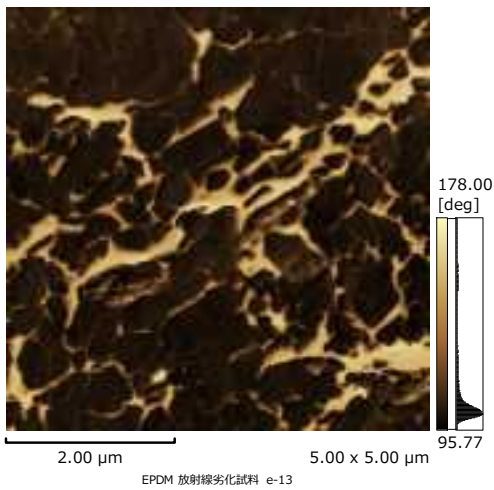
(a) as



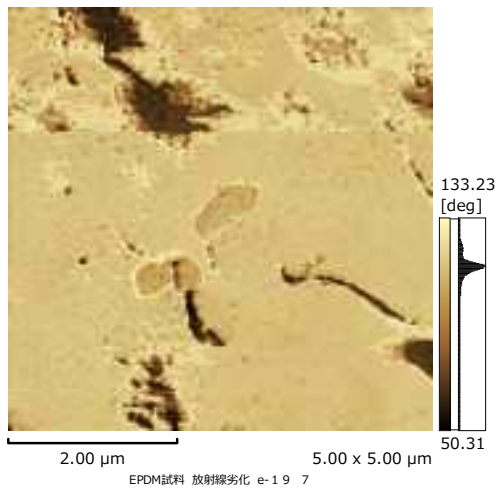
(b) 133 kGy 照射



(c) 239 kGy 照射

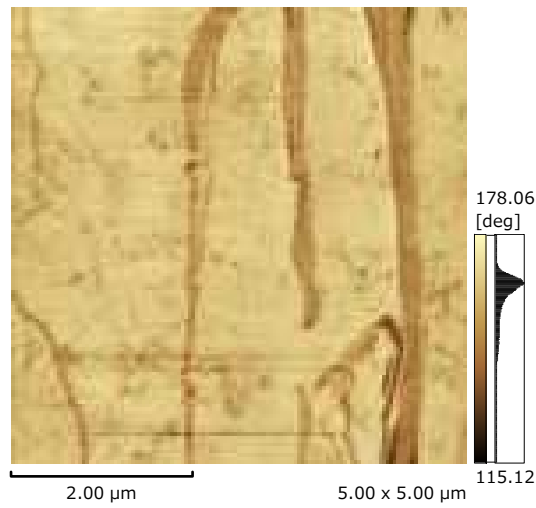


(d) 453 kGy 照射

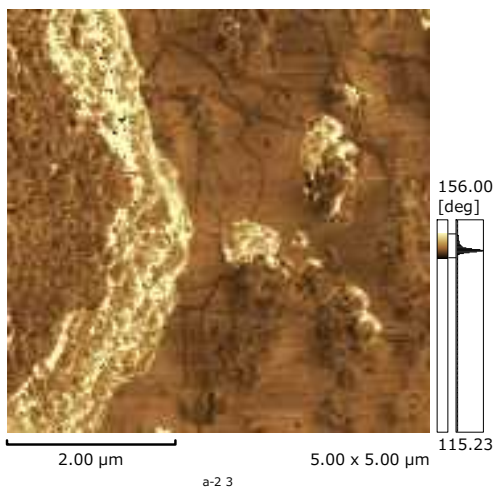


(e) 825 kGy 照射

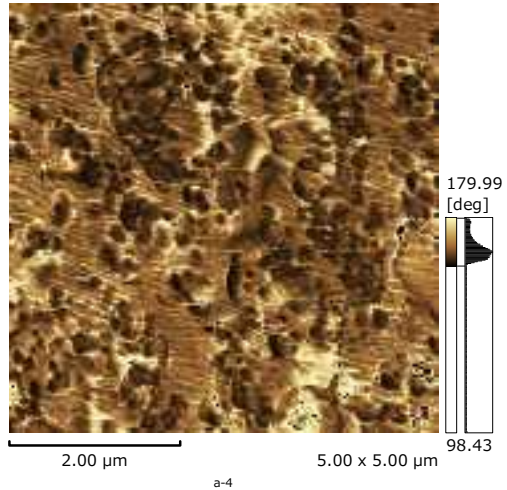
図 3.3.2-26 熱・放射線同時劣化難燃 EPDM 試料の SPM 表面観察位相遅れ測定結果
劣化条件：大気圧中、120°C、0.5kGy/h、試料厚さ：1 mm、酸化防止剤通常添加



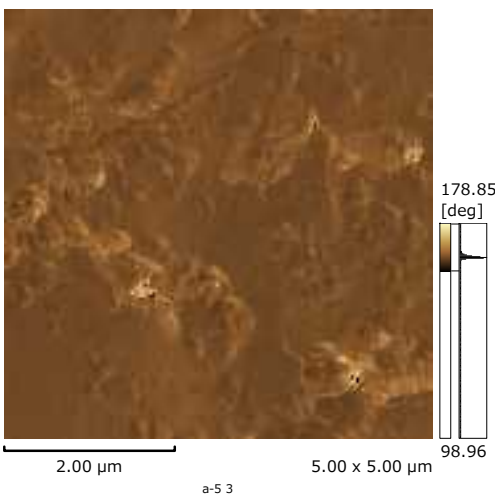
(a) as



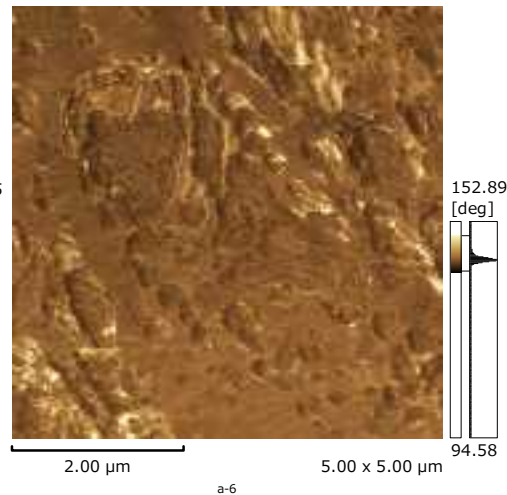
(b) 196 kGy 照射



(c) 390 kGy 照射



(d) 543 kGy 照射



(e) 700 kGy 照射

図 3.3.2-27 熱・放射線同時劣化難燃 EPDM 試料の SPM 表面観察位相遅れ測定結果
劣化条件：酸素濃度 5%、120°C、1kGy/h、試料厚さ：0.5 mm、酸化防止剤無添加

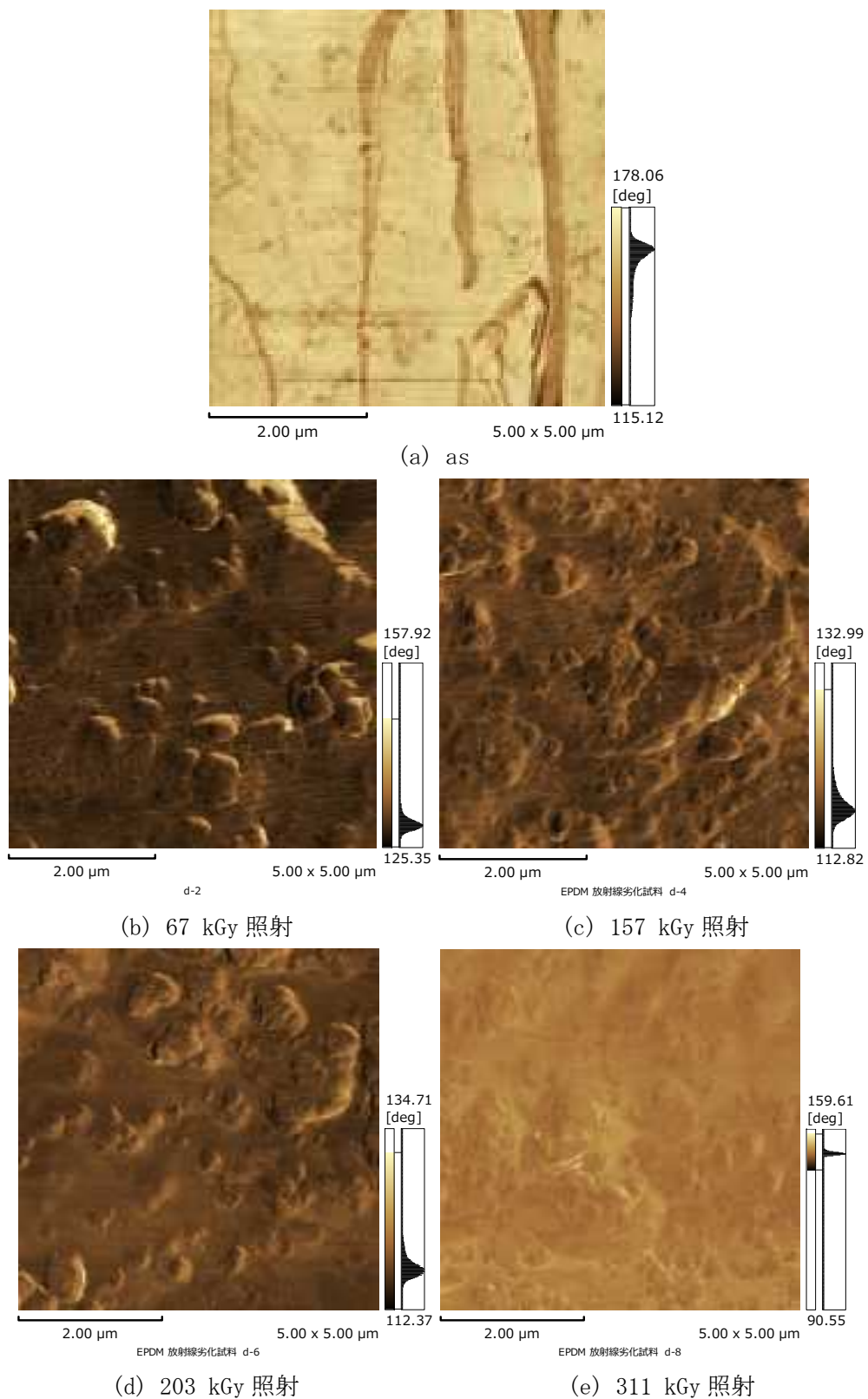


図 3. 3. 2-27 熱・放射線同時劣化難燃 EPDM 試料の SPM 表面観察位相遅れ測定結果

劣化条件：大気圧中、120℃、1kGy/h、試料厚さ：0.5 mm、酸化防止剤無添加

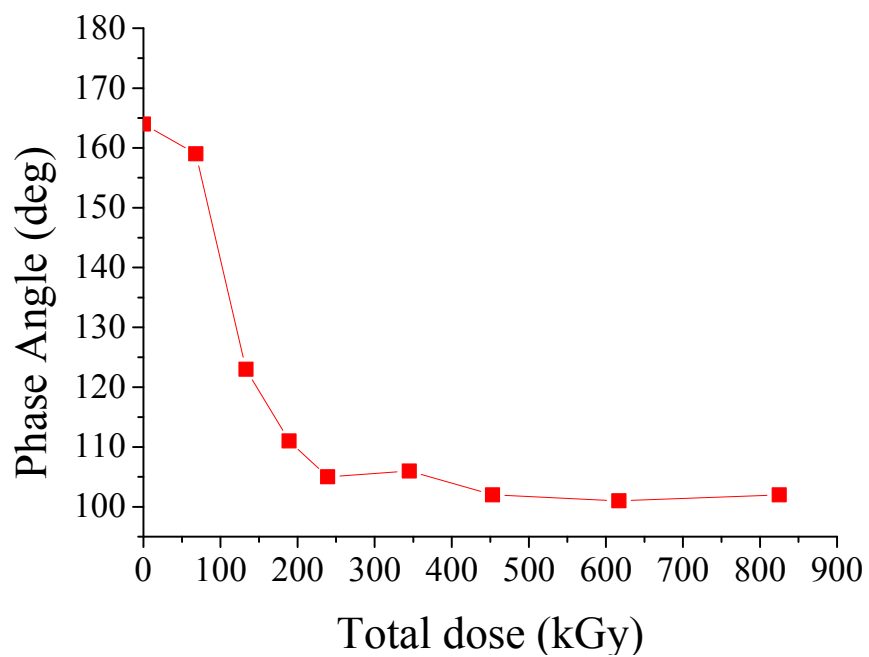


図 3. 3. 2-28 熱・放射線同時劣化難燃 EPDM 試料の SPM 測定の位相遅れと照射量の関係

劣化条件：大気圧中、120℃、0.5kGy/h、試料厚さ：1 mm、酸化防止剤通常添加

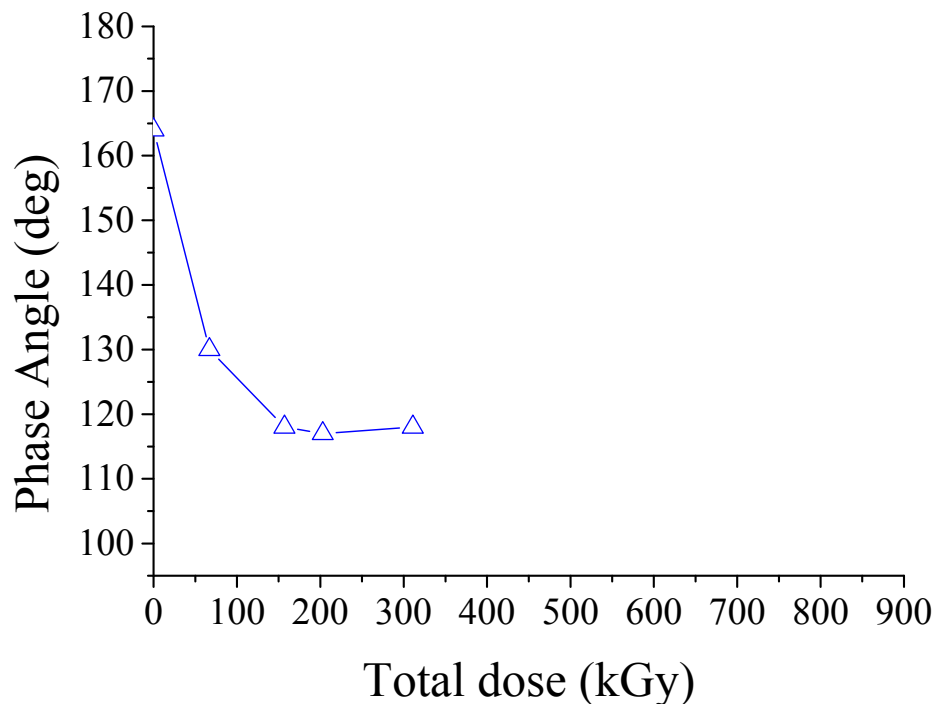
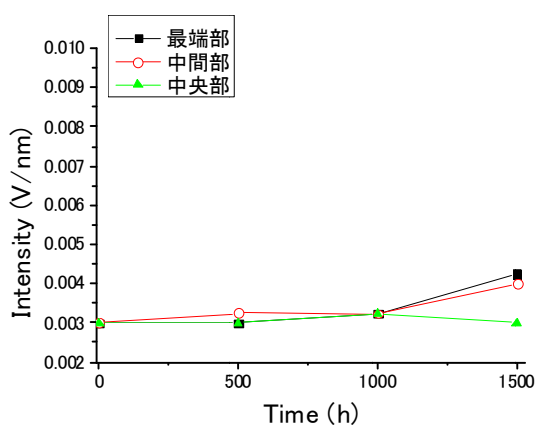
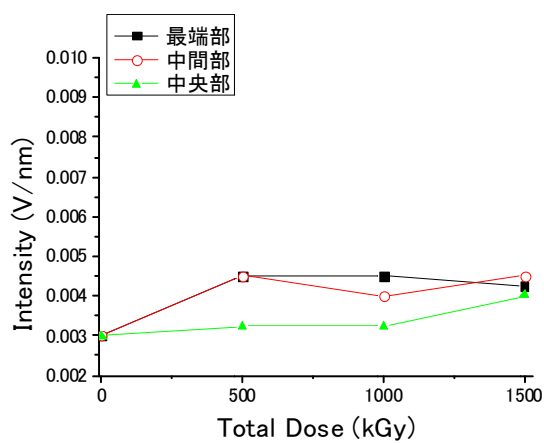


図 3.3.2-29 熱・放射線同時劣化難燃 EPDM 試料の SPM 測定の位相遅れと照射量の関係

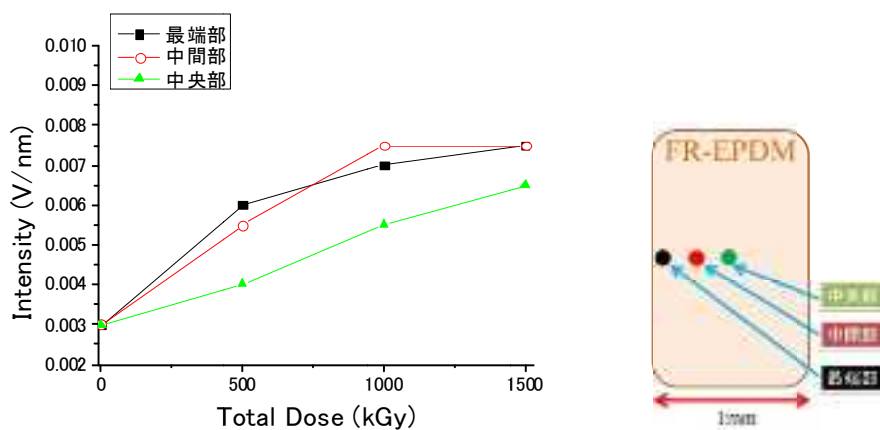
劣化条件：大気圧中、120℃、1kGy/h、試料厚さ：0.5 mm、酸化防止剤無添加



(a) 100°C、大気中

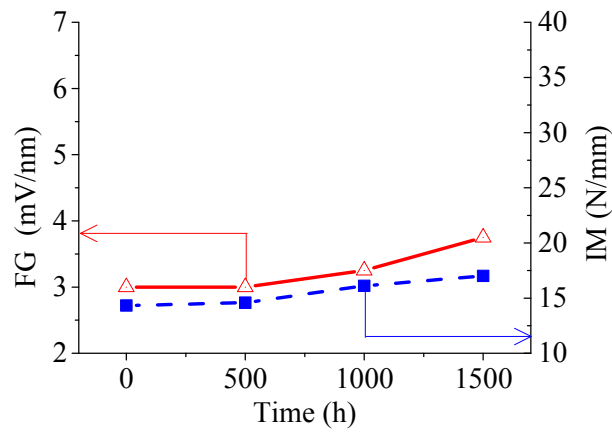


(b) 室温、1 kGy/h、大気中

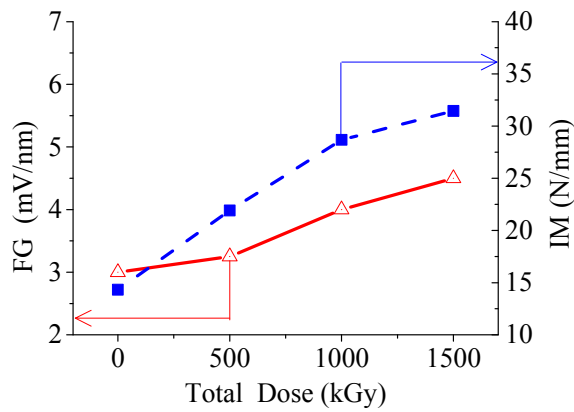


(c) 100°C、1 kGy/h、大気中

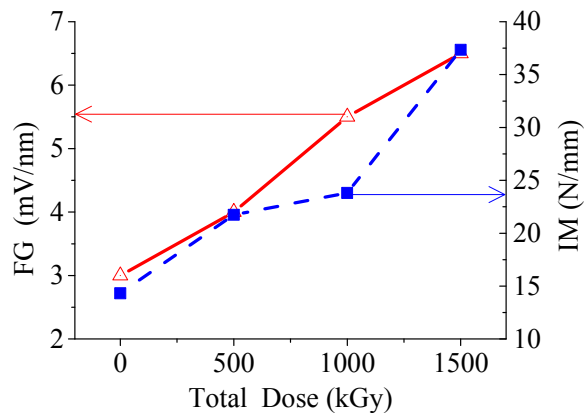
図 3. 3. 2-30 熱・放射線同時劣化難燃 EPDM 試料の SPM によるフォースカーブ測定結果
劣化条件：大気圧中、100°C、1kGy/h、試料厚さ：1.0 mm、酸化防止剤通常量添加



(a) 100°C、大気中



(b) 室温、1 kGy/h、大気中



(c) 100°C、1 kGy/h、大気中

図 3.3.2-31 熱・放射線同時劣化難燃 EPDM 試料の SPM によるフォースカーブ測定と
インデンターモジュラスの比較

劣化条件：大気圧中、100°C、1kGy/h、試料厚さ：1.0 mm、酸化防止剤通常量添加

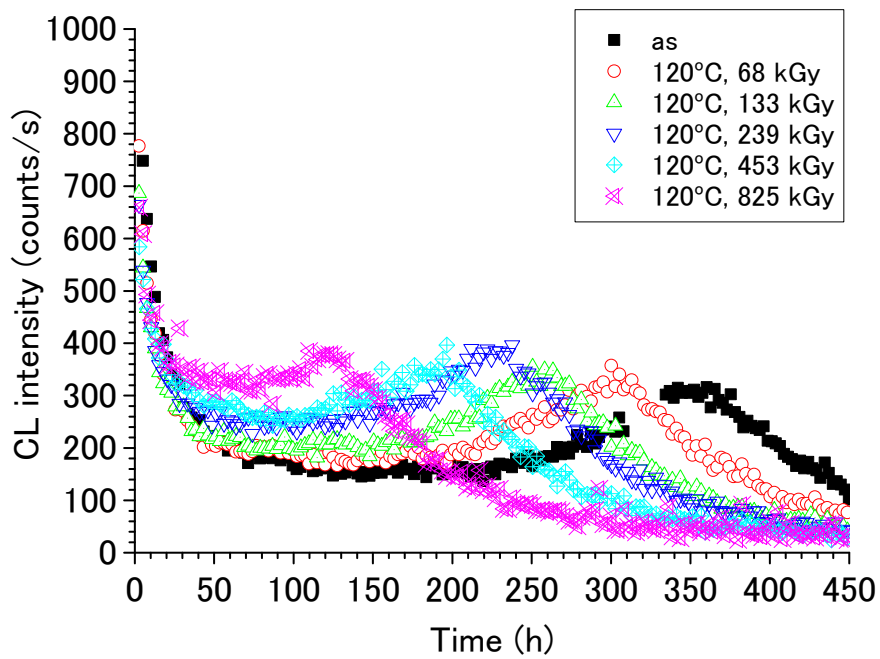


図 3. 3. 2-32 熱・放射線同時劣化難燃 EPDM 試料の CL 測定結果

劣化条件：大気圧中、120°C、0.5kGy/h、試料厚さ：1 mm、酸化防止剤通常添加

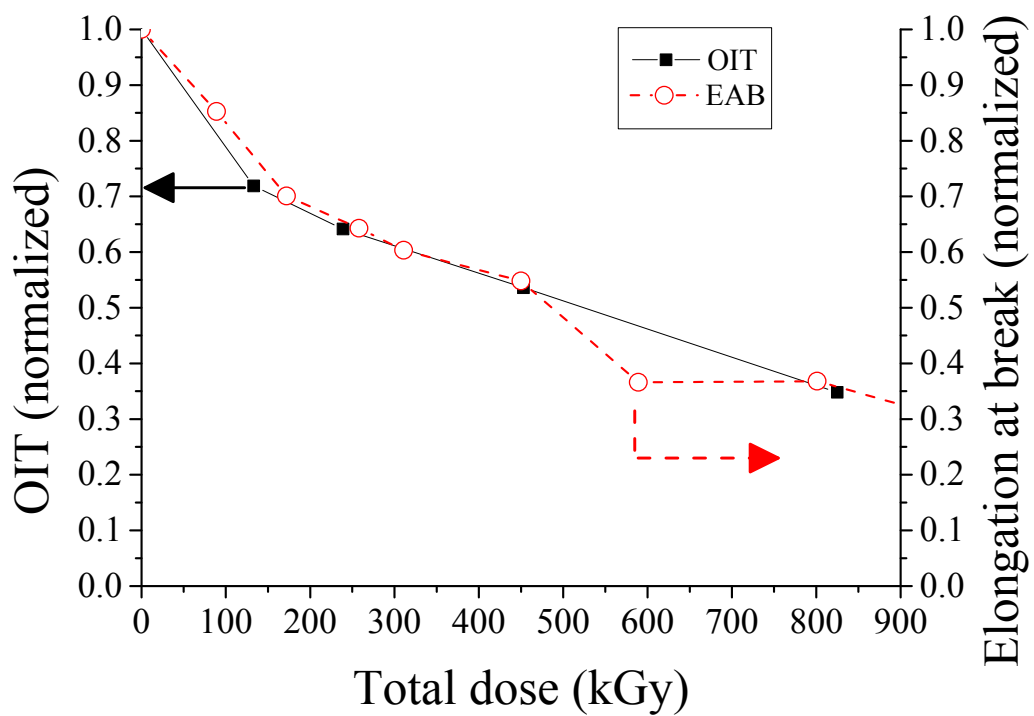
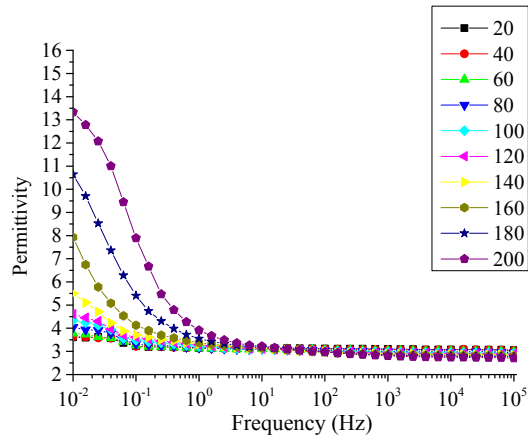
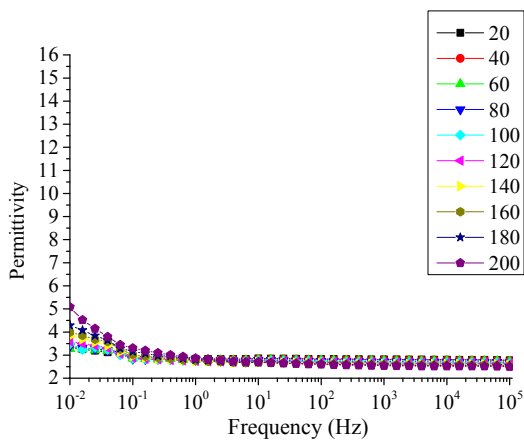


図 3.3.2-33 熱・放射線同時劣化難燃 EPDM 試料の CL 測定より算出した見かけの OIT と
引っぱり破断伸び値の比較

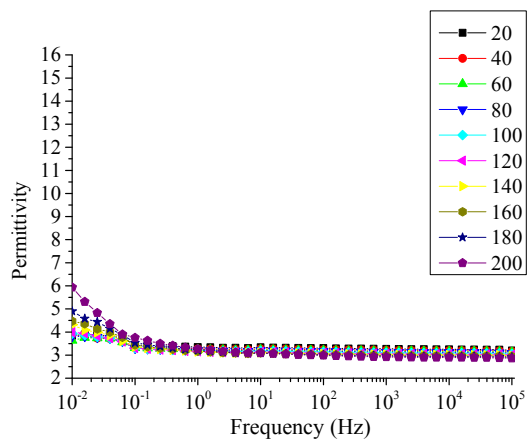
劣化条件：大気圧中、120℃、0.5kGy/h、試料厚さ：1 mm、酸化防止剤通常添加



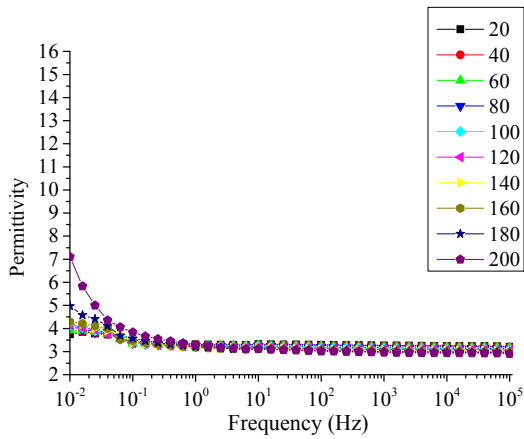
(a) as



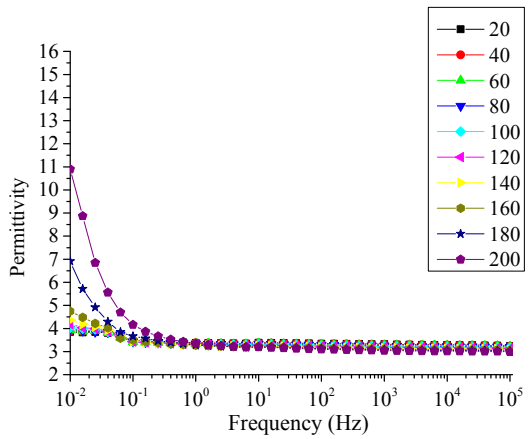
(b) 133 kGy 照射



(c) 239 kGy 照射



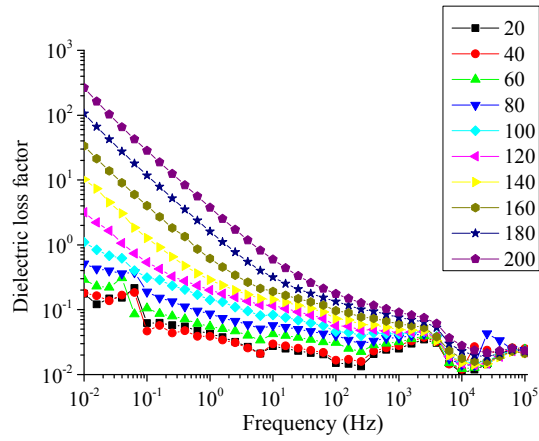
(d) 453 kGy 照射



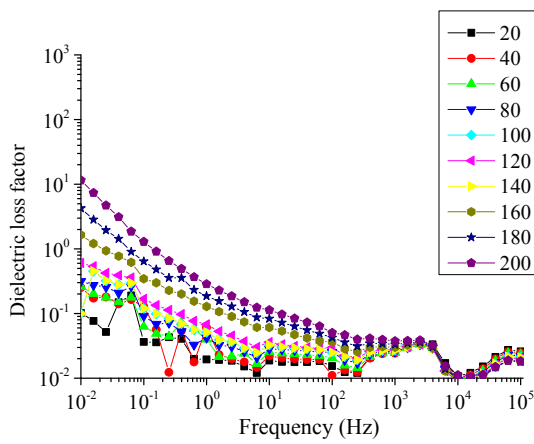
(e) 825 kGy 照射

図 3.3.2-34 熱・放射線同時劣化難燃 EPDM 試料の比誘電率の測定温度依存性

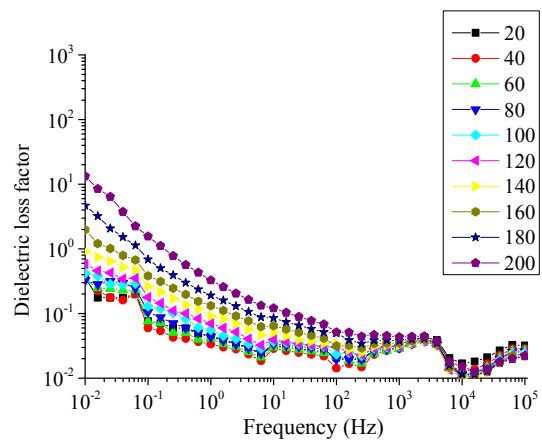
劣化条件：大気圧中、120°C、0.5kGy/h、試料厚さ：1 mm、酸化防止剤通常添加



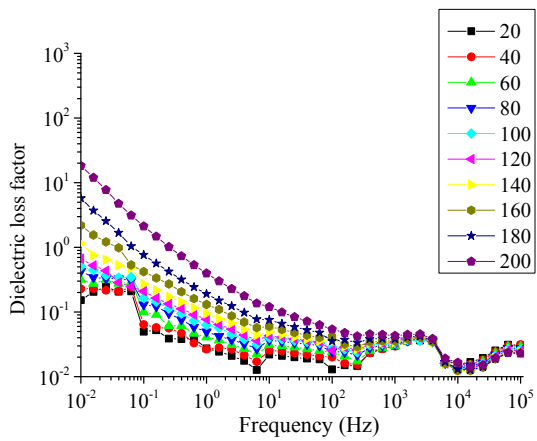
(a) as



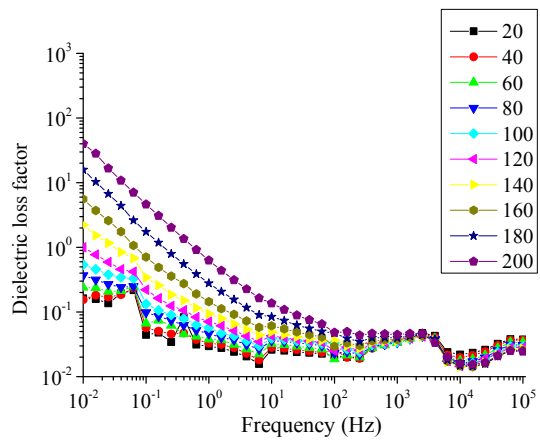
(b) 133 kGy 照射



(c) 239 kGy 照射



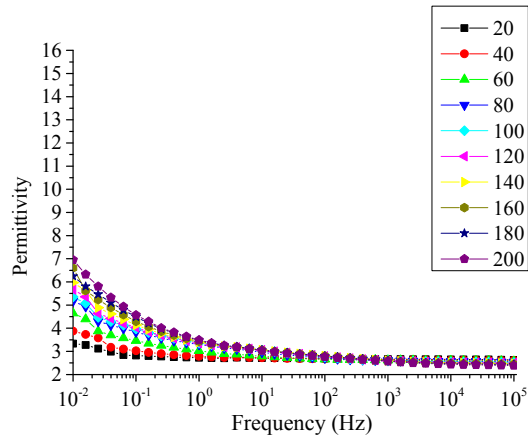
(d) 453 kGy 照射



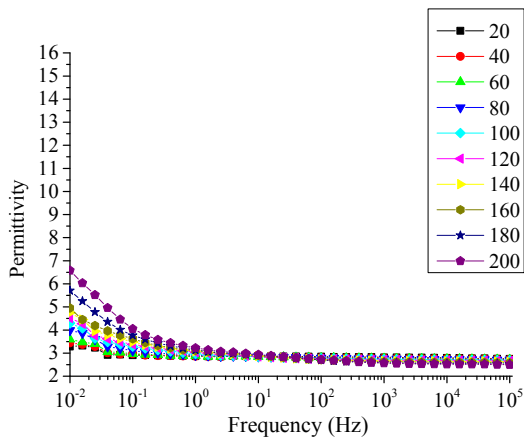
(e) 825 kGy 照射

図 3. 3. 2-35 熱・放射線同時劣化難燃 EPDM 試料の比誘電損率の測定温度依存性

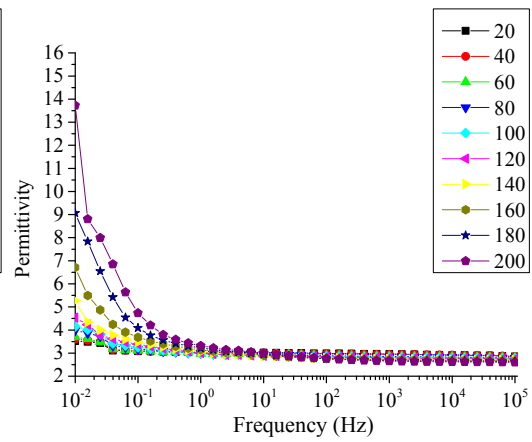
劣化条件：大気圧中、120°C、0.5kGy/h、試料厚さ：1 mm、酸化防止剤通常添加



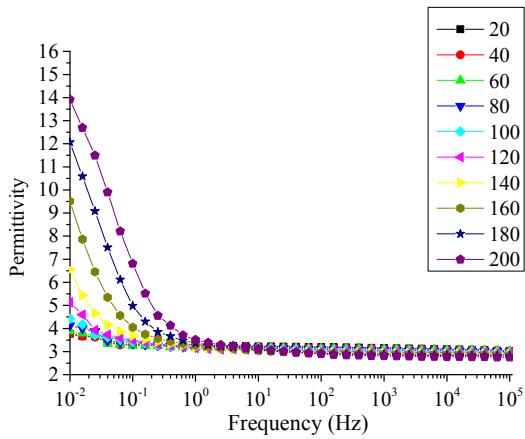
(a) as



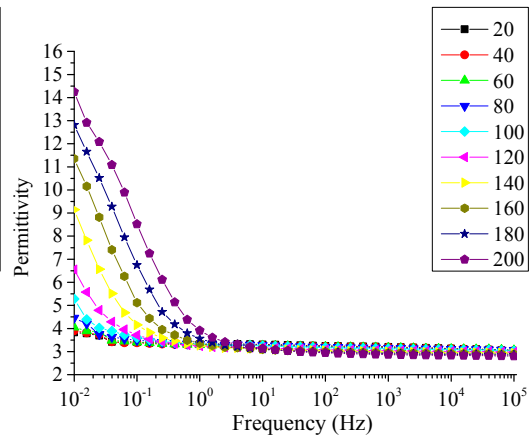
(b) 196 kGy 照射



(c) 390 kGy 照射



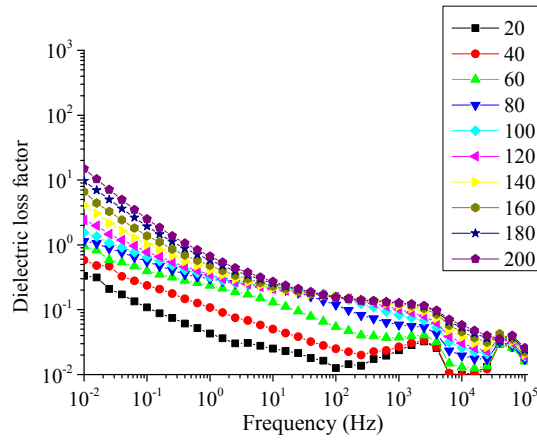
(d) 700 kGy 照射



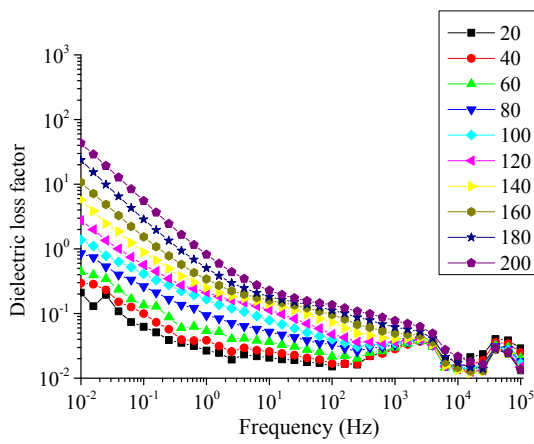
(e) 1210 kGy 照射

図 3. 3. 2-36 熱・放射線同時劣化難燃 EPDM 試料の比誘電率の測定温度依存性

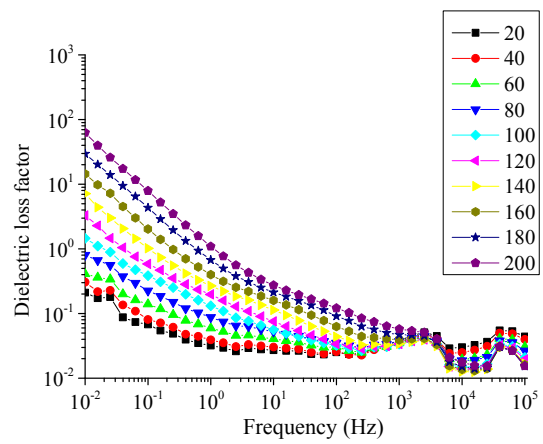
劣化条件：酸素濃度 5%、120°C、1kGy/h、試料厚さ：0.5 mm、酸化防止剤無添加



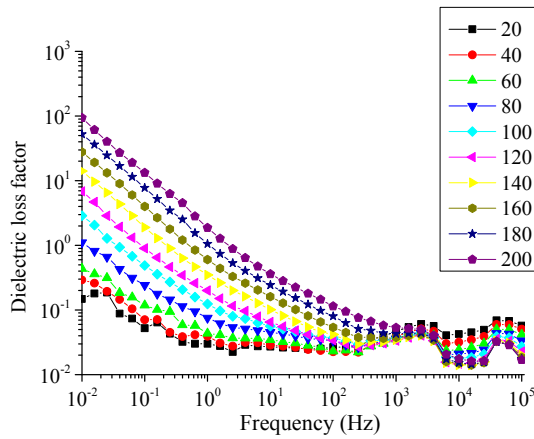
(a) as



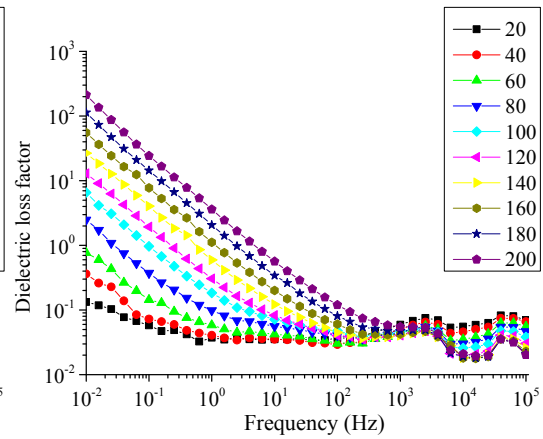
(b) 196 kGy 照射



(c) 390 kGy 照射



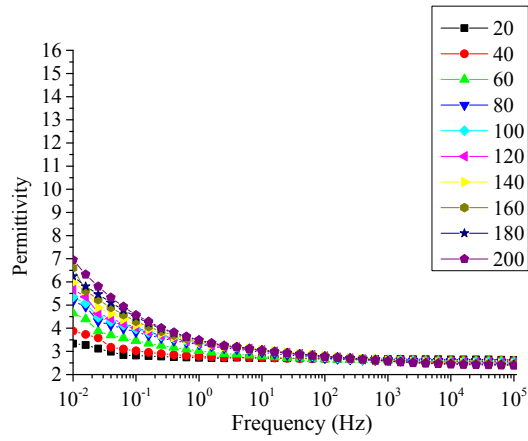
(d) 700 kGy 照射



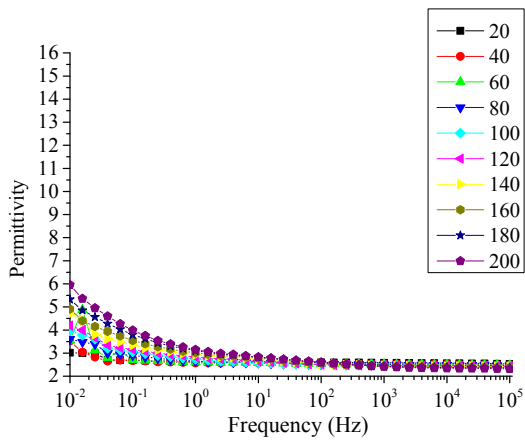
(e) 1210 kGy 照射

図 3.3.2-37 熱・放射線同時劣化難燃 EPDM 試料の比誘電損率の測定温度依存性

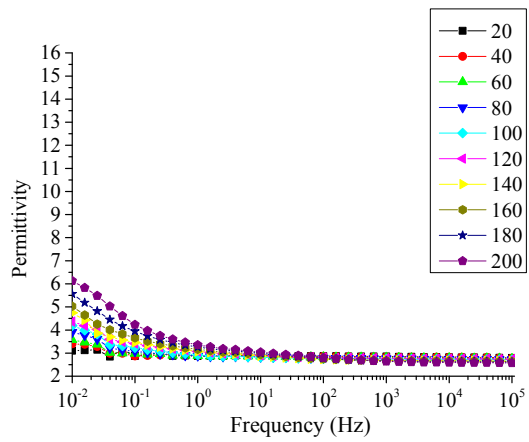
劣化条件：酸素濃度 5%、120°C、1kGy/h、試料厚さ：0.5 mm、酸化防止剤無添加



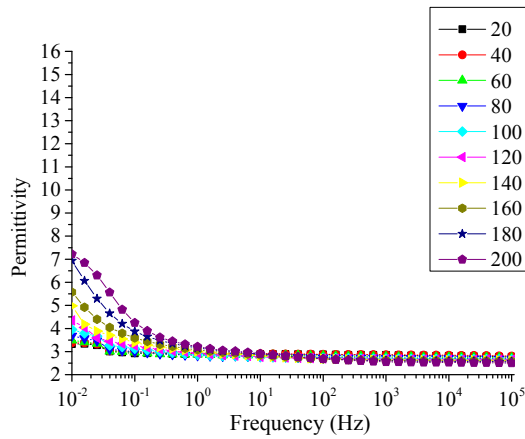
(a) as



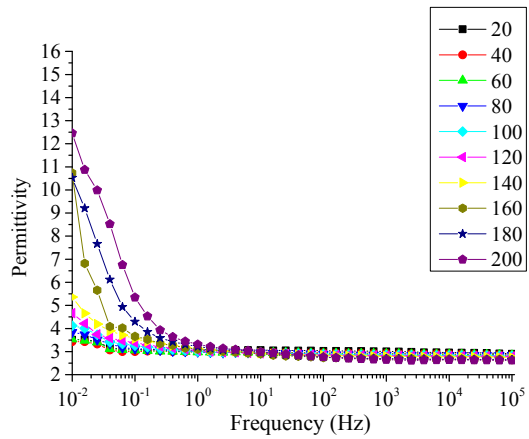
(b) 67 kGy 照射



(c) 157 kGy 照射



(d) 203 kGy 照射



(e) 311 kGy 照射

図 3. 3. 2-38 熱・放射線同時劣化難燃 EPDM 試料の比誘電率の測定温度依存性

劣化条件：大気圧中、120℃、1kGy/h、試料厚さ：0.5 mm、酸化防止剤無添加

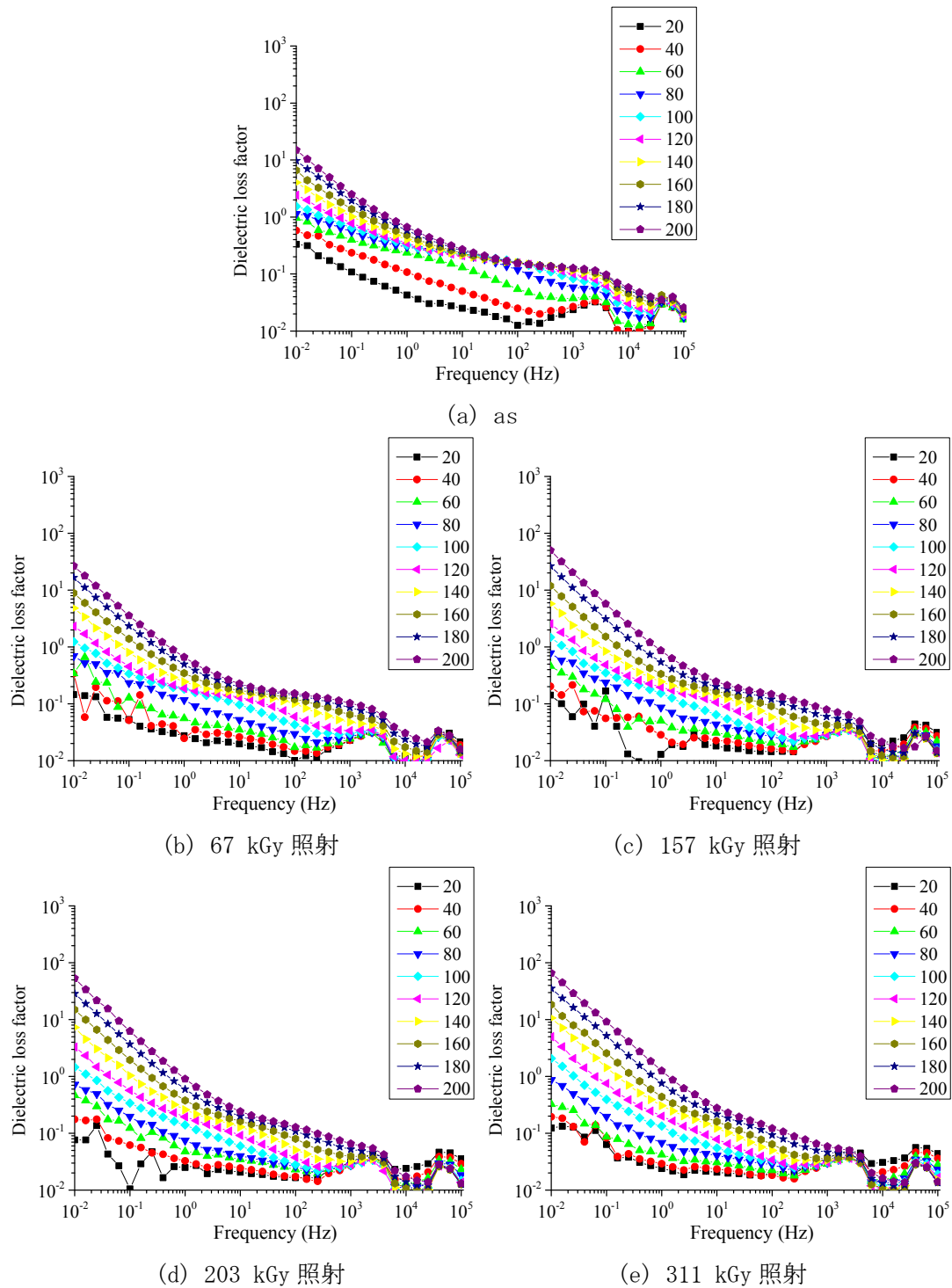


図 3. 3. 2-39 熱・放射線同時劣化難燃 EPDM 試料の比誘電損率の測定温度依存性

劣化条件：大気圧中、120℃、1kGy/h、試料厚さ：0.5 mm、酸化防止剤無添加

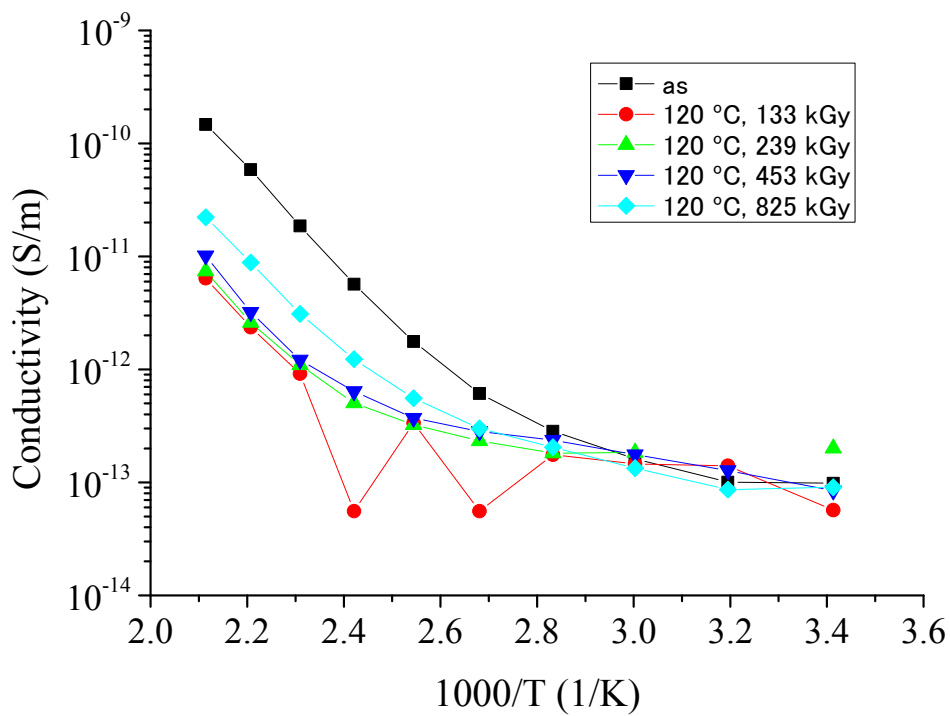


図 3.3.2-40 熱・放射線同時劣化難燃 EPDM 試料の比誘電損率より算出した

導電率のアレニウスプロット

劣化条件：大気圧中、120°C、0.5kGy/h、試料厚さ：1 mm、酸化防止剤通常添加

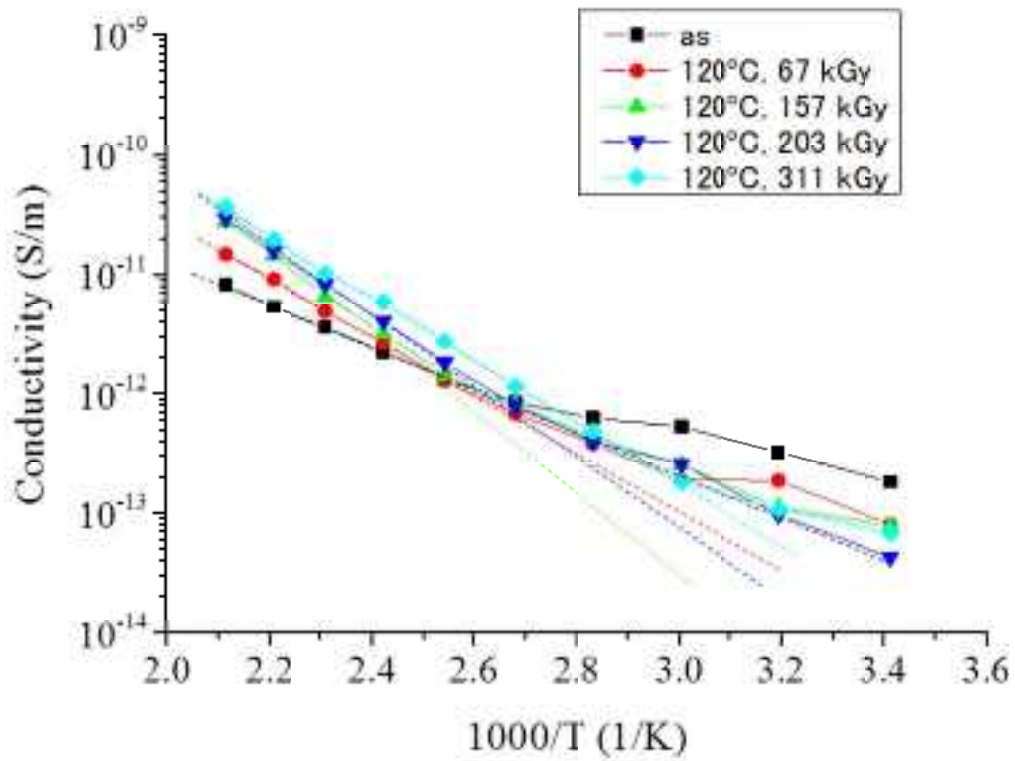
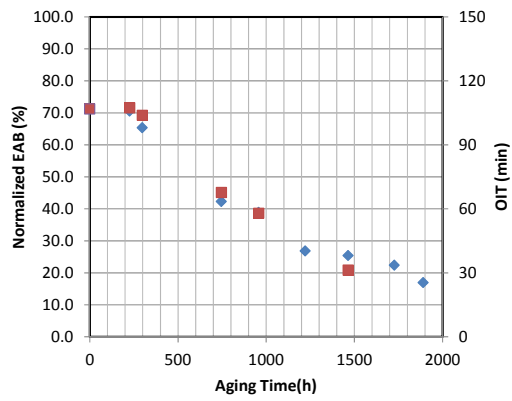


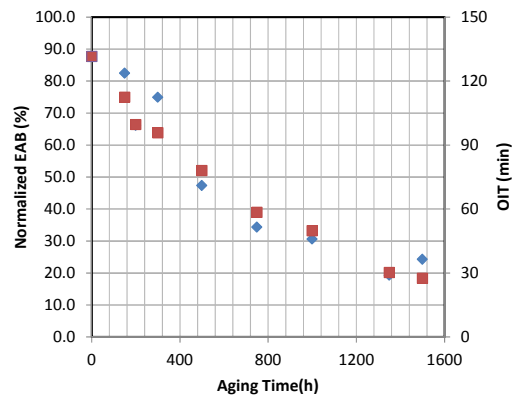
図 3.3.2-41 熱・放射線同時劣化難燃 EPDM 試料の比誘電損率より算出した

導電率のアレニウスプロット

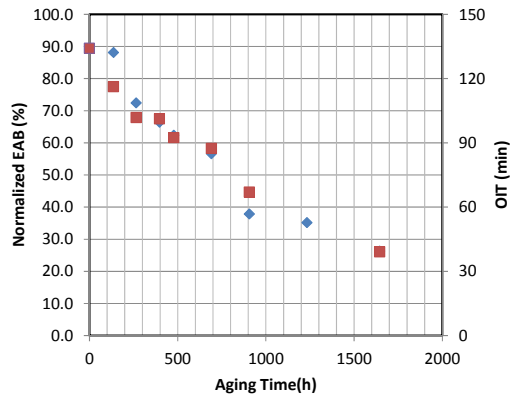
劣化条件：大気圧中、120°C、1kGy/h、試料厚さ：0.5 mm、酸化防止剤無添加



(a) 1.0 kGy/h、 120 °C、 21 %-O₂



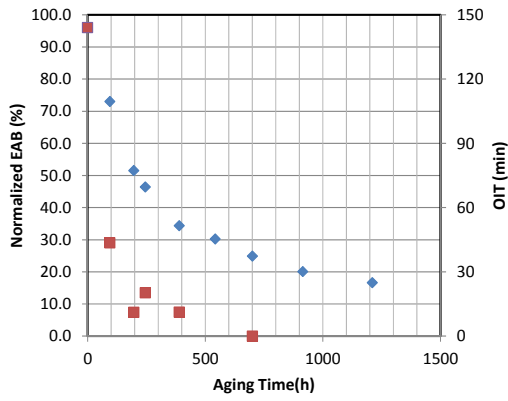
(b) 1.0 kGy/h、 100 °C、 21 %-O₂



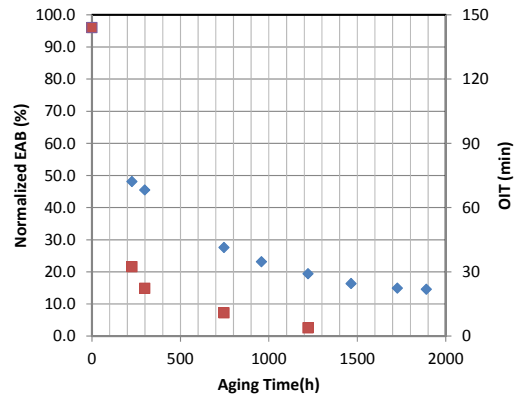
(c) 0.5 kGy/h、 120 °C、 21 %-O₂

図 3.3.2-42

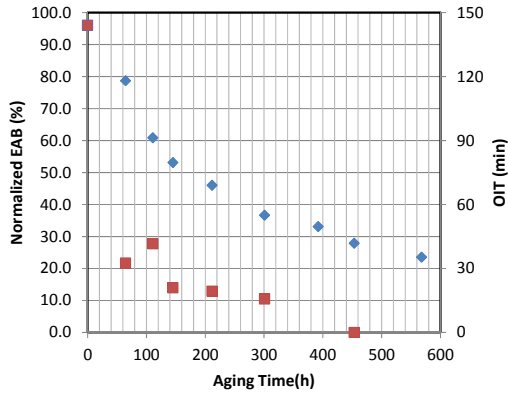
各条件にて熱・放射線同時加速劣化した試料 (AO 添加品) の EAB と OIT との相関 (◆ : EAB、
■ : OIT)



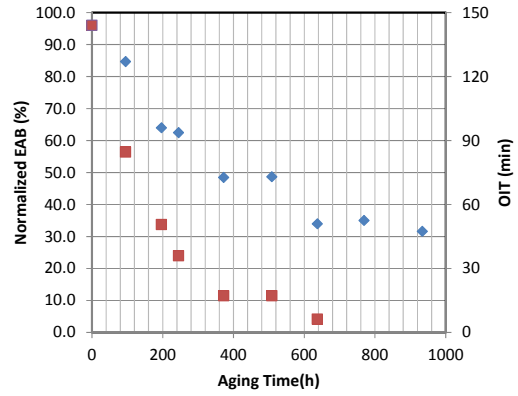
(a) 1.0 kGy/h、 120 °C、 5 %-O₂



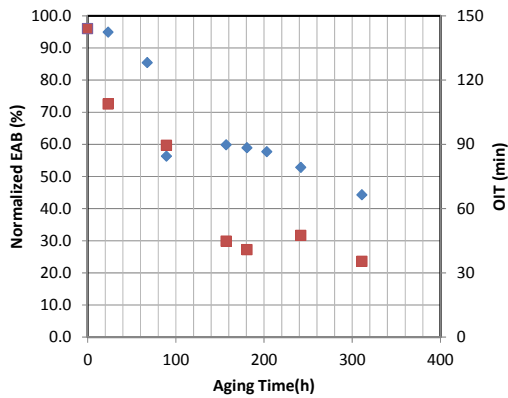
(b) 1.0 kGy/h、 100 °C、 5 %-O₂



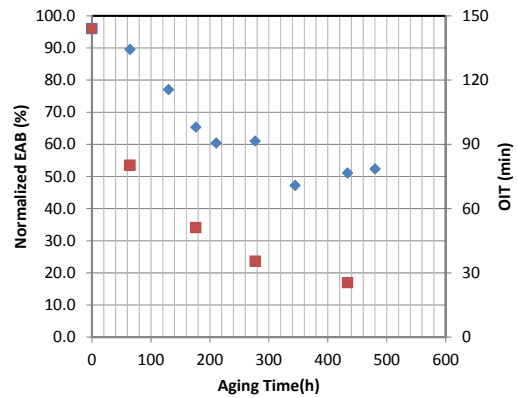
(c) 1.0 kGy/h、 120 °C、 10 %-O₂



(d) 1.0 kGy/h、 100 °C、 10 %-O₂



(e) 1.0 kGy/h、 120 °C、 21 %-O₂



(f) 1.0 kGy/h、 100 °C、 21 %-O₂

図 3. 3. 2-43

各条件にて熱・放射線同時加速劣化した試料 (A0 無添加品) の EAB と OIT との相関 (◆ : EAB、 ■ : OIT)

(10) 熱・放射線同時照射と等価な絶縁体劣化を与える逆逐次法条件模索のための計算プログラムの構築

1) 計算プログラム中心部の概要

ここで取り扱う劣化モデルは、図 3.3.2-47 に示す自動酸化反応式に基づいている。ここでは、酸素と放射線によるラジカル生成寄与を分離している。劣化指標は劣化生成物量 $[P_{\text{term}}]$ としている。反応式群より得る反応速度式に、酸素と酸化防止剤 (AH) の物理拡散項 D_{O_2} 、 D_{AH} を加え、次の微分方程式群を得る。

$$\frac{\Delta[\text{R}\cdot]}{\Delta t} = kI + k_0[\text{RH}][\text{O}_2] - k_1[\text{R}\cdot][\text{O}_2] + k_2[\text{ROO}\cdot][\text{RH}] + \delta k_4[\text{ROOH}][\text{RH}] \quad (3.3.2-6)$$

$$\frac{\Delta[\text{ROO}\cdot]}{\Delta t} = k_1[\text{R}\cdot][\text{O}_2] - k_2[\text{ROO}\cdot][\text{RH}] - k_{12}[\text{ROO}\cdot][\text{AH}] - 2k_7[\text{ROO}\cdot]^2 \quad (3.3.2-7)$$

$$\frac{\Delta[\text{ROOH}]}{\Delta t} = k_2[\text{ROO}\cdot][\text{RH}] + k_{12}[\text{ROO}\cdot][\text{AH}] - k_4[\text{ROOH}][\text{RH}] \quad (3.3.2-8)$$

$$\frac{\Delta[\text{O}_2]}{\Delta t} = D_{\text{O}_2} \frac{\Delta^2[\text{O}_2]}{\Delta x^2} - k_0[\text{RH}][\text{O}_2] - k_1[\text{R}\cdot][\text{O}_2] \quad (3.3.2-9)$$

$$\frac{\Delta[\text{AH}]}{\Delta t} = D_{\text{AH}} \frac{\Delta^2[\text{AH}]}{\Delta x^2} - k_{12}[\text{ROO}\cdot][\text{AH}] \quad (3.3.2-10)$$

$$\frac{\Delta[P_{\text{term}}]}{\Delta t} = 2k_7[\text{ROO}\cdot]^2 \quad (3.3.2-11)$$

これら 6 式を連立させて、時刻 Δt 後の各種化合物の分布状態を計算する。これを規定回数、または目標損傷に至るまで連続計算することで、経時変化を得る。本研究で用いた物性パラメータを表 3.3.2-6 にまとめる。ここで扱う数値は全て相対値である。ただし、得られる計算結果は定性的には合理的であり、特性把握としては有効である⁵²。

さらに、各素反応の反応速度と D_{O_2} 、 D_{AH} それぞれに活性化エネルギー (E_a) 値を仮定し、種々の温度での材料劣化挙動を計算する。2 温度条件間での反応速度比はアレニウス則で決定されるので、温度 T の逆数差 $1/T - 1/T_{\text{ref}}$ を上記各種定数のパラメータとする。ここで、 T_{ref} は任意に定められる基準温度である。 E_a 値の把握は、化学反応や拡散の定数と同様に困難である。しかし、材料劣化を決定づける素反応により反応スキーム全体が律速さ

⁵² 布施則一、本間宏也、岡本達希、「非アレニウス挙動を考慮した安全系ケーブルのための複合因子環境劣化モデルの構築」、電気学会誘電絶縁材料/電線ケーブル合同研究会資料 DEI-13-30/EWC-13-2、東京、2013.

れる場合、最も簡単な仮定では、全ての素反応を見かけの E_a とすれば良い。ここではこの考えをさらに拡張し、表 3.3.2-6 第 4 列に示すように熱によるラジカル生成に高い E_a を与えて非アレニウス挙動を再現した。重要な留意点として、この値は実際の材料劣化における数値ではなく、非アレニウス挙動を顕在化させる目的で敢えて大きな差異を与えたものである。

2) 同時法を模擬した計算の結果例

上記条件設定下での連続計算結果の一例を図 3.3.2-48 に示す。6 つの微分方程式の連立・連続計算により、各種化合物のバルク深さ方向分布と経時変化が計算される。図 3.3.2-48(a) に示すように、線量率 I が低く放射線によるラジカル生成が遅い場合、比較的長時間、酸素がバルク内まで拡散される。この結果、劣化生成物 P_{term} の分布は均一となる。一方、 I が高い(b) の場合は、バルク全域に亘りラジカルが急速に生成される。これにより、初期値入力した酸素はすぐ消費される。外部から供給される酸素は、表面でのラジカルと化学反応し消費される。そのため、酸素の供給とバルク内部への拡散は、ラジカル生成に追いつかない(拡散律速酸化: DL0)。この結果、 P_{term} 分布は不均一となる。

これらの計算では熱と放射線両方に一定の寄与を与えている。そのため、得られる結果は、種々の同時法試験環境下での材料劣化を模擬していると思わせる。ここで、表面からバルク深さ 10% における $[P_{\text{term}}]$ が、目標損傷値となる時刻を等価損傷時間 (TED) と定義する。このとき、種々の T 、 I で TED 値を計算すれば、同時法環境で一定の絶縁体損傷を与えるための期間一覧に相当する特性図が得られる。本研究で扱う値は全て相対値なので、この目標損傷度は実運転供用全期間での経年変化量相当とも、設計想定事象耐性管理値相当とも見なすことが出来よう。表 3.3.2-6 の条件での計算結果を図 3.3.2-49 に示す。ここでは、TED 時におけるバルク内劣化の均一性評価も行なっている。具体的には、各種実験的評価と同様に、表面とバルク中央部での $[P_{\text{term}}]$ 比を用い、これが 0.7 以上の場合を均一劣化と定義した。同図には仮に T_{ref} を 50°C としたときの相対温度も付記しているが、上述のように本研究で示す値は定量的な意味は持たない。

TED 曲線の I 依存性は殆どの温度条件で U 字型を示す。これは、次の 3 条件で説明できる。① 低 I 条件では放射線の影響が弱く、熱劣化が支配的である。このため、TED 値は I に対し依存性を殆ど示さない。② I が高く、材料劣化への放射線寄与が大きくなると、TED 値は徐々に低下する。③ I がさらに高くなると、ラジカル生成が酸素拡散より速くなり、材料劣化は表面近傍に集中する。バルク内部での材料劣化は遅くなる結果、TED 値は上昇に転じる。

温度の違いに着目すると、低温条件では劣化の化学反応に時間がかかり、TED 値が長い。さらに、熱によるラジカル生成が活発でないため、相対的に放射線の影響を受けやすい。その結果、比較的 I が低い条件から TED 曲線が上記 U 字型を示す。温度が高くなるにつれ、材料劣化への熱の寄与が大きくなる。TED が一定値を示す領域は、低 I 側から徐々に増加

している。また、酸素の拡散が助長され、比較的高い条件までバルク劣化が均一となっている。温度がさらに高くなると、熱によるラジカル化が活発になり、この影響のみでもバルク内部が酸素欠乏になり易くなる。その結果、全 I 条件で劣化が不均一になる。

3) 同時法の場合との差異から考案した、逐次法模擬計算プログラム

(a) 同時法模擬計算の特徴

この方法では、熱と放射線両方に有意な値を入力する。これにより、2 者が同時かつ複合的に図 3.3.2-47 に示す自動酸化に寄与する。図 3.3.2-50(a) に示すように、計算は $[P_{\text{term}}]$ が目標損傷値に至るまで繰り返し行われる。単位時間 Δt に繰り返し数 N を掛け、総劣化時間 t_{Tot} (= TED) を得る。等価損傷線量 (DED) 値は、目標の損傷に至った時間 TED (= $\Delta t \times N$) に I を掛けて得る。

(b) 逐次法模擬計算の特徴

この方法では、上記の熱・放射線複合環境劣化を、2 者の逐次印加により模擬する。従って、図 3.3.2-50(b) に示すように、逆逐次模擬計算でも、連立微分方程式の連続数値計算がコアとなり、これを 2 回連続で実施する。それぞれのプロセスで印加する環境量は、基本的には、相当量と想定される総熱量・総線量となる。しかし、目標損傷度に至るには一方のプロセスの印加時間を長くし、他方を短くするなど、多様な時間条件が考えられる。すなわち、熱劣化の温度条件 T_1 と放射線劣化の I を定めても、総劣化時間 t_{Tot} は定まらない。それぞれの印加時間、熱劣化時間 t_1 と放射線照射時間 t_r の様々な組合せを考える必要がある。また、これら劣化時間は熱と放射線どちらを先に付与するかにも依存する。本研究の計算では、照射の順序を逆逐次とした。逆逐次の方が順逐次や同時法よりシビアで⁵³、絶縁体劣化の管理手法に適しているためである。また、同法はラジカル生成を担う放射線劣化を先に施し、そののち反応促進を担う熱劣化を行なう点で、化学反応機構の観点から合理性を持つ。

t_1 と t_r の求め方については、DED 値の観点から議論する必要がある。まず、DED は目標損傷度に至るまでに照射された放射線の総量だから、 $t_r \times I$ で与えられ、 t_1 は直接には関係しない。次に、同時法と等価な逐次条件をこの 2 つの時間パラメータにより求める場合、一般には、前プロセスの時間を予め定め、目標損傷に至るまで後プロセスの劣化模擬を繰り返すことになる。この考えを逆逐次法に適用すると、 t_r を予め定め、目標損傷に至るまでの t_1 を求めることになる。このとき、一定値である t_r から求まる DED 値も一定となり、「目標損傷を与える線量」との意味をなさない。そこで、本研究では後プロセスの t_1 を予め定め、 t_r を計算で求めることで DED 値が各種パラメータにより変化するようにした。図 3.3.2-50(b) にはこの計算操作をループとして示している。放射線照射と熱劣化の

⁵³ 「高経年化対策関連技術調査等（原子力プラントのケーブル経年変化評価技術調査研究）に関する報告書」、04 基材報-0007、独立行政法人 原子力安全基盤機構、2003。

総合結果としての $[P_{\text{term}}]$ が目標損傷以下なら Δt_R を長く、目標以上なら短く設定し直し、再度初めから計算をやり直す。通し計算を1回だけ行なう同時法模擬計算に比べ、計算操作が複雑になっている。

逆逐次特性の計算に用いたパラメータ値を表 3.3.2-7 にまとめる。放射線照射時の温度 T_R は室温模擬相当との意味合いから、図 3.3.2-49 表記での‘21℃’を与えるものとした。従って、「放射線劣化」は、室温程度の熱影響を同時に受けたものとなる。また、放射線劣化温度条件 T_T は‘50℃’相当とした。図 3.3.2-49 より、この T_T の熱のみで目標損傷に至るには、時間 110 が必要となる。これ以上の t_T 値を設定すると、劣化は熱の効果のみでも目標値を上回ってしまう。そこで、本計算での t_T 値はゼロから 110 までの間で変動させた。さらに、計算速度を向上させるため、放射線照射と熱劣化それぞれに対し計算マトリクス（計算回数 N_R 、 N_T ）を定め、割り当てメモリを確定させた。これにより、 t_R は $\Delta t_R \times N_R$ で、 t_T は $\Delta t_T \times N_T$ で与えられる。また、放射線照射でバルク内に蓄積された化合物の分布情報は、ラジカル R と R00 を除いて熱劣化計算へ引き継がれている。これは、ラジカルの消滅時定数が相当短いと考えられるためである。さらに、劣化の均一性、すなわち $[P_{\text{term}}]$ 分布については、放射線照射直後、熱劣化後の両方で判定する。放射線照射時に劣化が不均一であっても、酸素の拡散が熱劣化条件下で助長されれば、最終的には劣化が均一化される場合もあろう。

4) 逆逐次法を模擬した計算の結果例

表 3.3.2-7 の条件下で計算された t_R は、図 3.3.2-51(a)のように、 I 、 t_T の両方に対し複雑な依存性を示す。ここでは、 t_T をその最大値 110 で規格化してある。まず、図 3.3.2-51(b)の I 依存性を考察する。 $t_T = 0$ の場合の計算結果は、‘21℃’の熱・放射線同時劣化環境で目標損傷に至る時間条件であり、図 3.3.2-49 でも既に示されている。 t_T の増加に伴い、 I - t_R 曲線は全体的に低下する。さらに、均一劣化が実現される I の範囲が徐々に広がる。放射線劣化時に劣化が不均一であっても、熱劣化を経てこれが均一化される計算結果も得られている。規格化 t_T が99%の条件では、 $I \geq 25$ でこれが得られている。そもそも、 T_T である‘50℃’条件では、劣化への寄与が熱のみなら、図 3.3.2-49 にも示されるように P_{term} 分布は均一となる。そのため、目標損傷に対して熱劣化の寄与が有意に大きい場合、劣化は自ずと均一化されると解釈できる。図 3.3.2-51(b)によれば、このような場合、DL0 に起因する高 I 側での I - t_R 曲線の反転現象は計算されなくなる。

図 3.3.2-51(c)の t_T 依存性によれば、 t_T と t_R は概ね負の相関を示す。この相関は規格化 t_T が100%に近い条件で顕著である。また、本研究では計算の対象外としたが、規格化 t_T が100%のとき、放射線劣化は余剰な損傷を与えるだけなので、 $t_R = 0$ となる筈である。一方、規格化 t_T が概ね20%以下では、図 3.3.2-51(c)で t_R がほぼ一定となっている。このときの t_T は10程度で、特に $I \leq 10^{-1}$ での t_R より数桁小さい。従って、目標損傷に対する放射線の寄与が大きく、熱劣化の寄与はほぼ無視されることが、上記計算結果の原因と考え

られる。ただし、 t_R と t_T の時間オーダがほぼ同一となる概ね $I \geq 1$ の条件でも、規格化 t_T が20%以下で t_R はやはり一定となっている。 I が大きいと目標損傷に対する放射線劣化の寄与が大きく、上記と類似の現象が連続計算の過程で生じていると推察される。

図3.3.2-51で計算された t_R について、対応する t_T を加えて総劣化時間 t_{Tot} を求めた。結果を図3.3.2-52に示す。 I 依存性を示す図3.3.2-52(b)によれば、 $t_T = 0$ とした場合、総劣化時間は t_R そのもの、つまり図3.3.2-49の‘21°C’の計算結果となる。一方、規格化 t_T が100%に近く、 $I > 10^{-1}$ の場合、 t_{Tot} は t_T の最大値110に漸近する。 $t_T \gg t_R$ が理由であり、定性的には、目標損傷全体に対する熱劣化の寄与が大きいためと解釈できる。ただし、 $I \leq 10^{-1}$ では放射線劣化の「担当」分を処理する時間が有意にかかる。事実、図3.3.2-51(b)でも、 $I = 10^{-4}$ での t_R 値は $10^2 \sim 10^3$ のオーダを示す。これにより、図3.3.2-52(b)での低 I 側での t_{Tot} 値を押し上げている。

図3.3.2-52(c)に示す t_T 依存性は、 I が低く $t_R \gg t_T$ の場合、図3.3.2-51(c)とほぼ同じ曲線を描く。ただし、 I が高くなるにつれ特に低 t_T 側での t_{Tot} が短くなる。 I が10~100のとき、 t_T - t_{Tot} 曲線はほぼ同一となる。このとき、 t_R が十分小さく、 t_T 値にほぼ律速される曲線になっている。 I がそれ以上高くなると、 t_R はDL0現象によって増加に転じ、 t_T 依存性曲線も若干かさ上げされる。ただし、DL0が生じる条件では計算結果が十分得られておらず、この変化は図3.3.2-52(c)では顕在化されていない。

5) 考察

本研究の目標は、 t_T を室温での放射線照射で補償し、総劣化時間 t_{Tot} である $t_R + t_T$ を短縮する条件や法則を見出すことである。各線量率条件で2プロセスの結果としての劣化が均一で、かつ、 t_{Tot} が最短と計算された結果を図3.3.2-52(b)より抽出し、図3.3.2-53として改めて示す。得られた特性は、 $I = 0.16$ と2.5付近で不連続となる。これは、各線量率領域での t_R と t_T の大小関係に由来する。① $I < 0.16$ では、図3.3.2-52(b)に関連して述べたように $t_R > t_T$ であり、放射線劣化の「担当」分を処理する時間が有意にかかる。従って、目標損傷を最短で達成するには放射線の分担を小さくし、熱劣化のみであるのが良い。② $I > 0.16$ では、 t_R と t_T の大小関係は逆転する。そのため、 $t_T = 0$ とし、総劣化時間を t_R としたときが最短となる。③ただし、 I が高いと劣化分布は不均一になりやすくなる。 $I > 2.5$ では熱劣化過程において酸素供給を促進し、放射線劣化時に一旦不均一となった P_{term} 分布を均一化する必要がある。重要なこととして、図3.3.2-51(c)に関連して述べたように、目標損傷に対する熱劣化の寄与を有効化するためには規格化 t_T を概ね20%以上にすることが必要である。この制約下で $t_R < t_T$ の関係にある2種の時間を合算すると、 t_{Tot} は t_T に近づく。線量率を更に高くすると、放射線劣化時の P_{term} 分布はさらに不均一になりやすく、熱劣化の寄与をさらに高める必要が生じる。これに伴って t_T をその最大値に近づけると t_{Tot} もこれに従うことになる。今回の計算結果によれば、 t_{Tot} は $I = 2.5$ のとき最小値

14.6 を取り、このとき $t_R = 14.6$ 、 $t_T = 0$ である。熱劣化に一定の寄与を持たせるのであれば、 $I = 4.0$ のときの $t_{Tot} = 74.3$ ($t_R = 7.8$ 、 $t_T = 65.2$) が最短となる。

このように、 t_{Tot} を短くするには2種の不連続点 $I = 0.16$ と 2.5 に着目する必要がある。 $I = 0.16$ での不連続点は、前述のように t_R と t_T の大小関係で決まるので、 T_R での $I-t_{Tot}$ 曲線と T_T における熱のみの劣化時間の交点として与えられる。これは図 3.3.2-49 の補助水平線および図 3.3.2-52(b) で示されている。したがって、 $I = 0.16$ の交点を与える上記2種の劣化時間特性は、いずれも同時法模擬計算にて既に示されている。

さらに、図 3.3.2-49 の補助水平線が示唆するように高 T_T では熱のみで目標損傷に達する時間が短くなる。この結果、 $I = 0.16$ の不連続点に相当する、 T_R での $I-t_{Tot}$ 曲線との交点が高 I 側にシフトする。一方、図 3.3.2-53 で $I = 2.5$ に存在するもう1つの不連続点は、温度 T_R で均一劣化を達成できる最大の I であり、 T_R での $I-t_{Tot}$ 曲線から独自に得られる。そのため、 $I = 2.5$ の不連続点は T_T によらない。温度上昇とともにこの2種の不連続点は近づき、図 3.3.2-49 の水平補助線が示唆するように $T_T = '72^{\circ}\text{C}'$ で一致する。このとき、図 3.3.2-53 で議論した領域②がなくなる。さらに、 $T_T = '91^{\circ}\text{C}'$ 条件において、熱のみで目標損傷に達する時間が T_R での $I-t_{Tot}$ 曲線の最小値よりも短くなり、 T_T に依存する $I = 0.16$ 相当の交点自体がなくなる。総劣化時間 t_{Tot} 特性の把握としては、このような不連続点の挙動を考慮して今後も検討を進める必要があると考えられる。

6) まとめ

放射線照射ののちに熱劣化を施す逆逐次試験を模擬する数値計算プログラムを構築した。熱劣化時間 t_T と放射線線量率 I をパラメータとし、劣化が目標損傷となる最適な放射線劣化時間 t_R を求めた。得られた知見を以下に列挙する。

- t_R は t_T と概ね負の相関を示す。しかし、規格化 t_T が概ね 20% 以下では、 t_R がほぼ一定となる。目標損傷に対する放射線の寄与が大きく、熱劣化の寄与はほぼ無視されるためと考えられる。
- t_R は I に対し負の相関を示す。 t_T が短い条件では温度 T_R での同時法特性と符合し、高 I 側では DLO に由来する不均一劣化が生じる。 t_T が長い条件では放射線劣化後に劣化物分布が不均一でも、これが均一化される。
- 各 t_R に、対応する t_T を加え、総劣化時間 t_{Tot} を短くする条件を求めた。 I が低いときは $t_R > t_T$ なので、熱劣化のみが良い。 T_R での $I-t_{Tot}$ 曲線が T_T における熱のみの劣化時間より短くなる I 条件では、放射線劣化のみが良い。さらに I を高くすると、放射線劣化で一旦不均一となった劣化分布を熱劣化で均一化する必要がある。このため、総劣化時間は熱のみの劣化時間に再び漸近する。

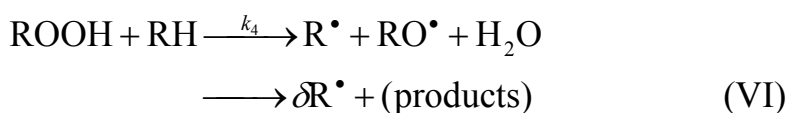
Initiation reaction



Propagation reaction



Branching reaction



Bimolecular termination

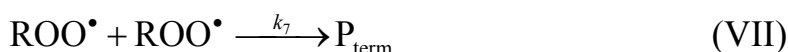


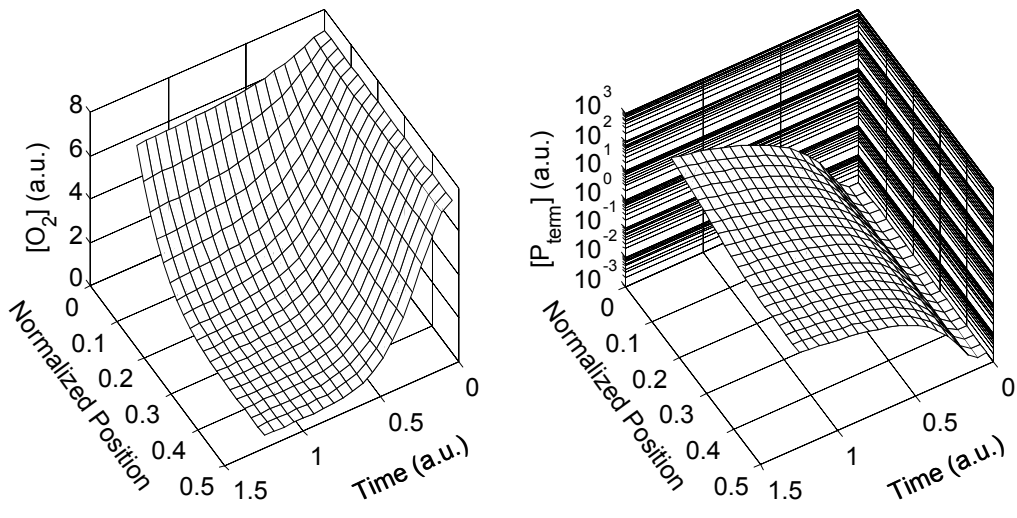
図 3.3.2-47

本研究で解析する自動酸化反応スキーム。R[•]、ROO[•]、ROOH 及び P_{term} はそれぞれアルキルラジカル、ペルオキシラジカル、ヒドロペルオキシド及び劣化生成物を示す。

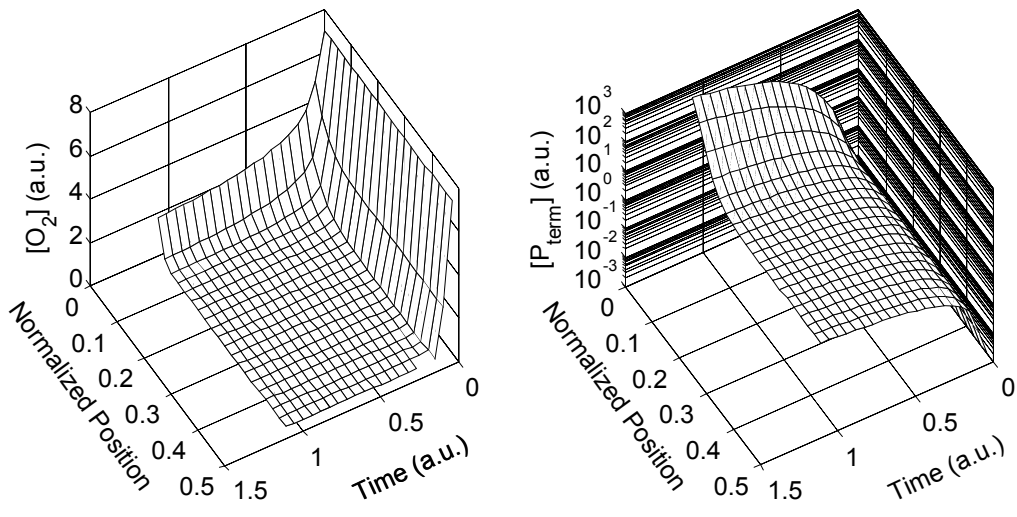
表 3.3.2-6 本稿のシミュレーションにおける入力物性値

	反応定数 ^{a)}	拡散定数 ^{a)}	E _a (eV)	初期値
[O ₂]		0.1	0.5	7
[AH]		0.005	0.5	0
k	0.5		0 ^{b)}	
k ₀	0.001		1.5	
k ₁	1		0	
k ₂	0.1		0.5	
k ₁₂	0.5		0	
k ₄	0.05		0.5	
k ₇	0.01		0.5	
δ	0.8		0	

^{a)} 基準温度 (T_{ref}) における数値。 ^{b)} 放射線によるラジカル化係数のため、温度特性を与えない。



(a) $I = 63.1$



(b) $I = 1580$

図 3.3.2-48

T_{ref} での酸素と P_{term} のバルク深さおよび過渡挙動 (計算結果の一例)。位置 0 と 0.5 はそれぞれバルク表面および中点。位置 1 は再び大気と接する条件にしている。酸素、 P_{term} いずれの分布も位置 0.5 で対称となるため、煩雑さを避けるため位置 0.5 以降は表示していない。

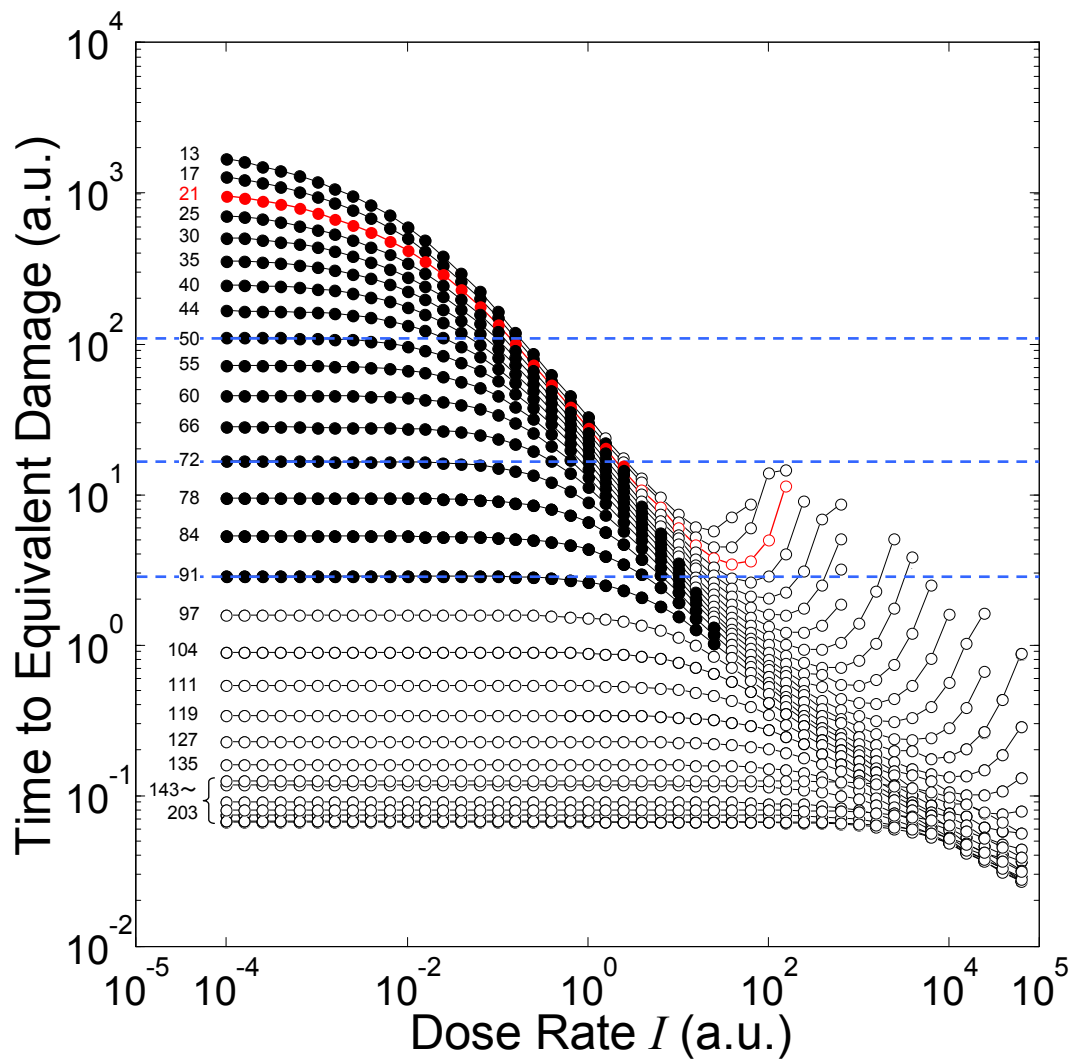


図 3. 3. 2-49

同時法模擬計算プログラムで計算された、目標損傷に至る時間 TED と線量率 I の相関。温度は、 $1/T - 1/T_{ref} = -4 \times 10^{-4} \text{ K}^{-1}$ から $1 \times 10^{-3} \text{ K}^{-1}$ まで、 $5 \times 10^{-5} \text{ K}^{-1}$ 刻みで変化させた。TED 時のバルク内劣化が均一な場合は●、不均一な場合は○でプロットしている。参考まで、 $T_{ref} = 50^\circ\text{C}$ とした場合の温度（単位は $^\circ\text{C}$ ）をプロット横に付記した。赤いプロットと曲線の意味は「4）逆逐次法を模擬した計算の結果例」、青い水平線は「5）考察」参照のこと。

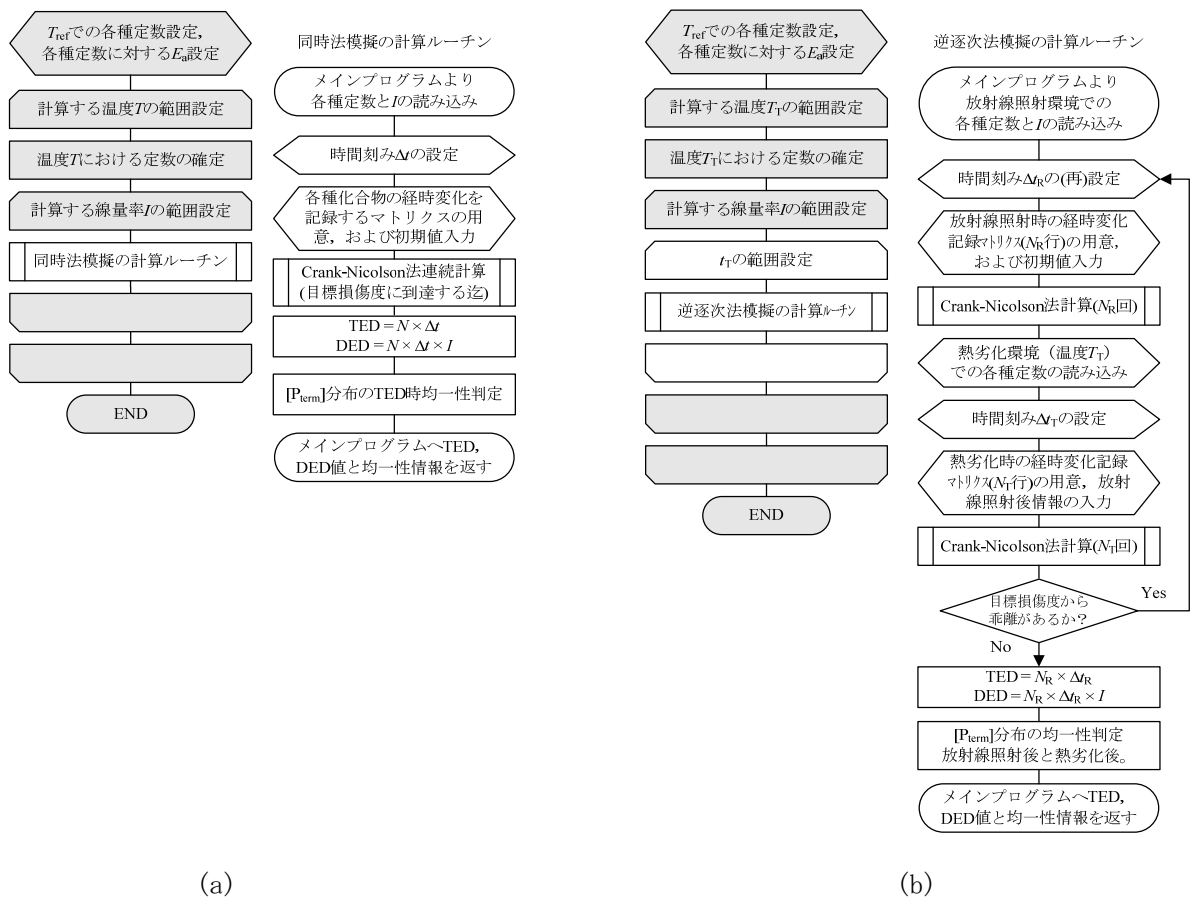


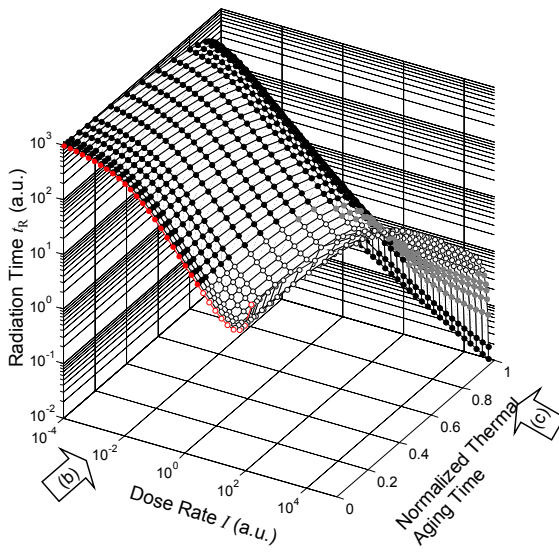
図 3.3.2-50

逐次法 (a) と逆逐次法 (b) を模擬するプログラム構造の比較。各図において、左右のフロー図はそれぞれメインプログラムとサブルーチンを表す。両方で完全に共通する計算操作については、ハッチングにてハイライトしてある。

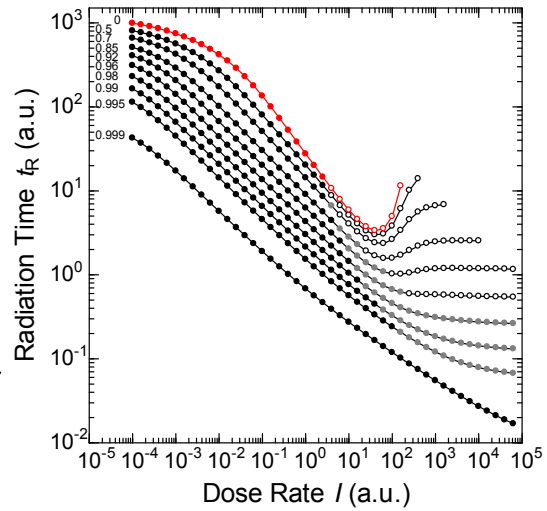
表 3.3.2-7 逆逐次特性の計算に用いた各種パラメータ

	放射線劣化		熱劣化	
	略	数値	略	数値
温度	T_R	‘21℃’ ^{a)}	T_T	‘50℃’ ^{a)}
線量率	I	$10^{-4} \sim 10^5$		
劣化時間	t_R	$\Delta t_R \times N_R$	t_T	0~110
分割時間	Δt_R	計算で最適値を求める	Δt_T	T_T / N_T
計算回数	N_R	2×10^4	N_T	10^4
初期値		表 3.3.2-6 記載の数値		放射線劣化後の値を引き継ぐ ^{b)}

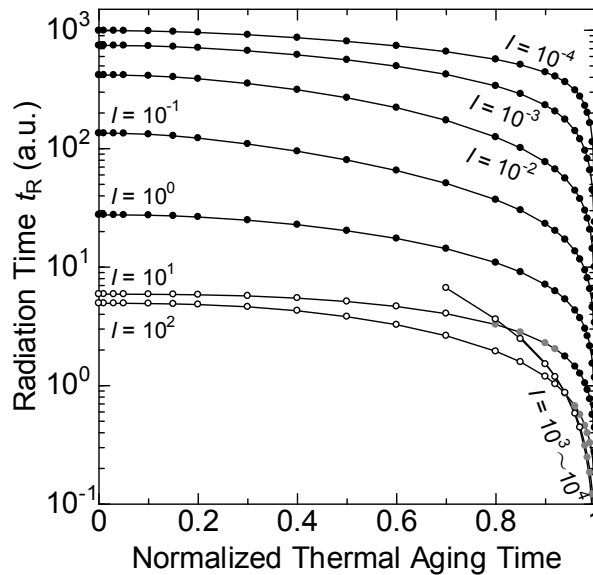
a) $T_{ref} = 50^\circ\text{C}$ とした相対値で、絶対値としての意味は無い。 b) ラジカルについては引き継がず、表 3.3.2-6 記載の数値に戻す。



(a) 3次元表示



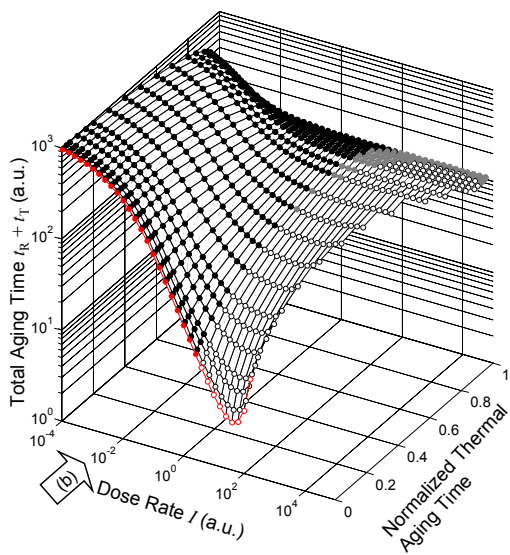
(b) 線量率依存性。プロット横の数字は規格化された熱劣化時間



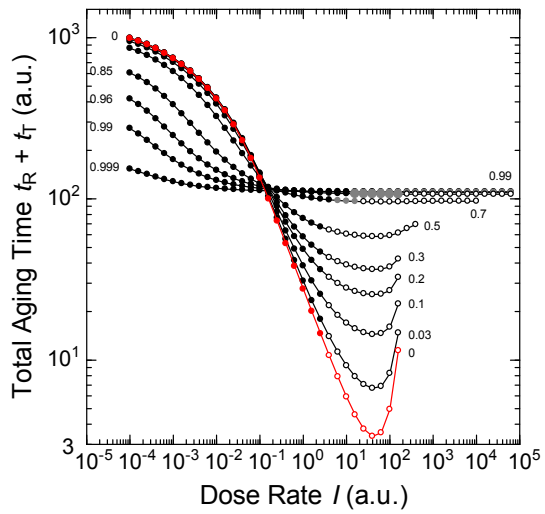
(c) 熱劣化時間 t_T 依存性

図 3.3.2-51

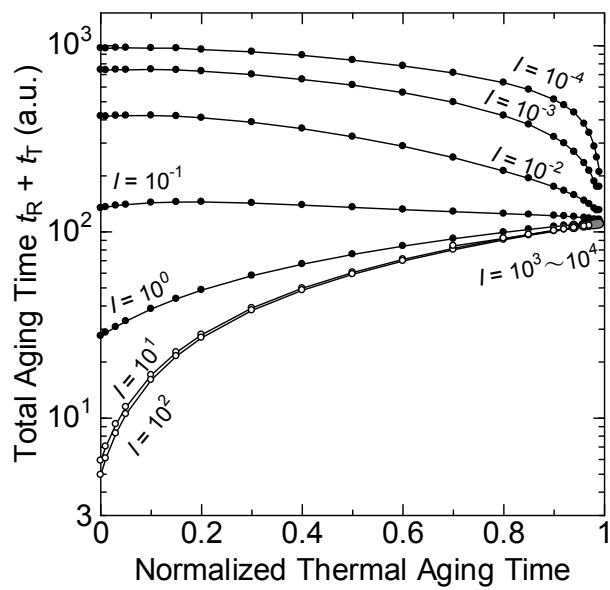
熱劣化温度を '50°C' ($1/T_T - 1/T_{ref} = 0$) とした場合に計算された、同時法と等価な逆逐次用 t_R 条件。プロットの種類は P_{term} 分布の均一性判定を示しており、意味は次の通り。●：放射線劣化後均一で、熱劣化後も均一。●：放射線劣化後は不均一だが、熱劣化後に均一。○：放射線劣化後、熱劣化後ともに不均一。本文記載のように、熱劣化時間をゼロとした場合に得られる計算結果は、'21°C' での放射線照射のみで目標損傷に至る条件であり、図 3.3.2-49 での同温度条件での結果と同一になる。ここでは、赤く色付けしてこれを示している。



(a) 3次元表示



(b) 線量率依存性。プロット横の数字は規格化された熱劣化時間



(c) 熱劣化時間依存性

図 3.3.2-52

熱劣化温度を '50°C' ($1/T_T - 1/T_{ref} = 0$) とした場合に計算された、同時法と等価な逆逐次用総劣化時間 ($t_R + t_T$) 条件。プロットの意味は図 3.3.2-51 と同じ。

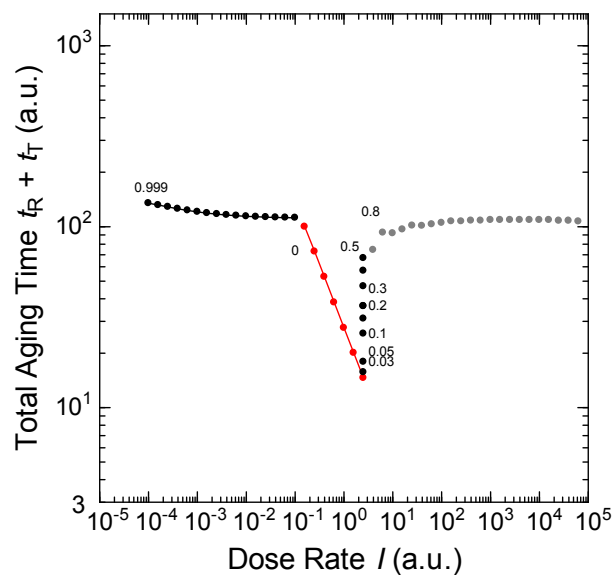


図 3. 3. 2-53

熱劣化温度を '50°C' ($1/T_T - 1/T_{ref} = 0$) とした場合に計算された、同時法と等価な逆逐次用総劣化時間の最短条件。プロットの意味は図 3. 3. 2-51 と同じ。プロット横の数字は規格化 t_{T0}

(11) まとめ

ハード研究では難燃エチレンプロピレンゴムの低酸素濃度環境下での劣化挙動を調査した。ソフト研究では熱・放射線同時照射法と等価な損傷を与える逆逐次照射法に関する改良を行なった。以下にその成果概要をまとめる。

難燃エチレンプロピレンゴムを用いたハード研究において、実機撤去ケーブル絶縁体の破断伸び評価結果を統計解析し、沸騰水型原子炉格納容器内での経年劣化特性は、加速劣化試験予測よりも緩慢であると示唆された。その知見を元に各種酸素濃度環境下で加速劣化した試料において、時間の経過とともに徐々に劣化が進行し、架橋反応が起きている実験結果を得た。走査型プローブ顕微鏡でも試料断面の酸化進行による表面硬化を観測できた。CL測定より算出したOITは試料の劣化度と相関している。また、5%-O₂条件下（BWR想定環境下）で作製した劣化試料においても、限界酸化防止剤濃度理論および酸化防止剤残存量測定が有効であることが示された。

ソフト研究では、放射線照射ののちに熱劣化を施す逆逐次試験を模擬する改良を行った。熱劣化時間と放射線線量率をパラメータとし、劣化が目標損傷となる最適な放射線劣化時間を求めることに成功した。放射線照射時間は熱劣化時間と概ね負の相関を示すが、熱劣化時間が概ね20%以下では、放射線照射時間がほぼ一定となる傾向を明らかとした。また、放射線照射時間は線量率に対し負の相関を示し、熱劣化時間が短い条件では室温での同時法特性と符合する結果を得た。

3.4 コンクリート構造物の健全性評価に係る調査研究

3.4.1 コンクリート構造物の複合劣化メカニズム解明と長期健全性評価手法の高度化

(1) 長期健全性評価方法の高度化

1) 長期健全性評価の枠組み

(a) 複合劣化による長期健全性評価の枠組み方針

RC 構造物の劣化度評価ダイヤグラム

RC 構造物の劣化度予測に関して、「RC 構造物の劣化度評価ダイヤグラム ($PDFt$ 曲線)」を用い、実際の劣化度測定データに基づいた RC 構造物の健全性評価法¹ (以下、 $PDFt$ 曲線による健全性評価)がある。図 3.4.1-1 に $PDFt$ 曲線の概念図を示す。本法の基本的考え方は、劣化関数の基本形を予め定め、構造物の実際の劣化度測定データを外挿し、劣化関数の係数を帰納的に決定し、劣化関数を決定し劣化予測を行うことにある。劣化関数の係数により様々な構造物(ここでは各地域の原子力関連施設)の耐久性に関する特性を共通的な尺度で評価できる。また、時間 t 、劣化因子の作用量 F 、材料劣化度 D 、構造物の性能 P について各因子間の関係を独立事象として明確にとらえることで推定精度が上がる。 $F-t$ 曲線、 $D-F$ 曲線は基本式に基づく外挿法により定めるのが適当と考えられ、そのために基本式の妥当性を広範囲の条件で確認する必要がある。また、 $P-D$ 曲線については、劣化後の材料特性を用いた数値解析、設計式などで評価するのが現実的である。最終的に構造性能の時間変化を評価する $P-t$ 曲線が得られる。

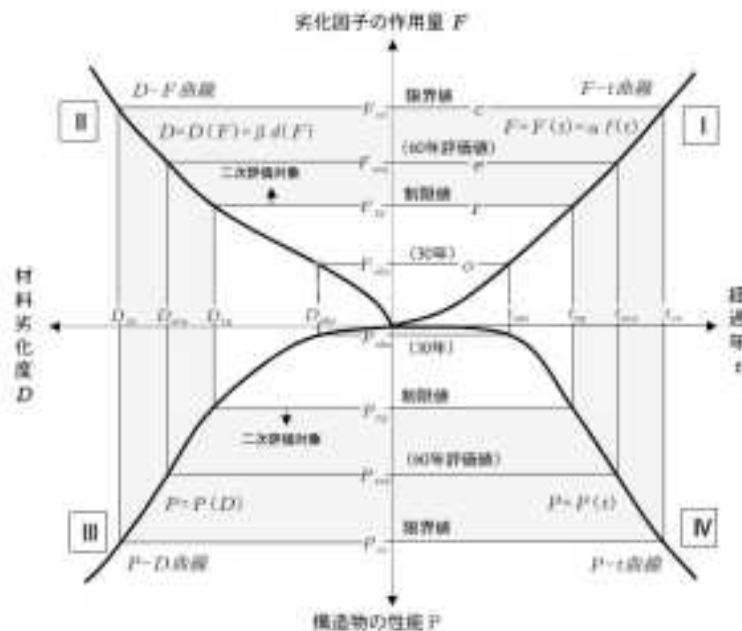


図 3.4.1-1 RC 構造物の劣化度評価ダイヤグラム ($PDFt$ 曲線)

¹ 橋高義典、「鉄筋コンクリート構造物の高経年化技術評価における健全性評価の方法」、日本建築学会技術報告集、No. 32、pp. 27-30 (2010)

PDFt 曲線による複合劣化の評価方法

PDFt 曲線による評価に複合劣化を適用する基本的な考え方は、劣化評価基本式の各係数（劣化因子指数および材料劣化指数）の中に複合因子の影響を含んだ評価式を構築することである。以下に、劣化因子作用量 F と時間 t との関係（ $F-t$ 曲線）、材料劣化度 D と劣化因子作用量 F との関係（ $D-F$ 曲線）それぞれの劣化評価基本式の劣化因子指数および材料劣化指数に複合因子の影響を含ませた評価式を示す。構造性能 P と材料劣化度 D との関係（ $P-D$ 曲線）は基本的には複合的な作用を組み込んだ、計算式、数値解析等より評価する。

・劣化因子作用量 F と時間 t との関係（ $F-t$ 曲線）

劣化評価基本式は、式 (3.4.1-1) のとおりである。

$$F(t) = \alpha f(t) \quad (3.4.1-1)$$

ここに、 α : 劣化因子指数

劣化因子指数 α は複合因子が作用する場合は、式 (3.4.1-2) で表せる。

$$\alpha = \alpha(I_1, I_2, \dots, I_n) \quad (3.4.1-2)$$

ここに、 $I_{1\sim n}$: 影響要因

影響因子が複合的に作用しても基本式が成立することが実験等により検証されれば、実測値に基づく外挿法により α で劣化因子の複合作用を一律に評価可能となる。

たとえば、塩化物イオンの作用量に関しての基本式は下式が提案されている²、

$$F_2 = \int_0^{t_n} C_t dt, \quad C_t \geq C_{cr} \quad (3.4.1-3)$$

ここに、 F_2 : 塩化物イオンの作用量 ($\text{kg}/\text{m}^3 \cdot \text{year}$)

C_t : 塩化物イオン濃度 (kg/m^3)

t : 年数 (year)

t_n : 評価年 (year)

C_{cr} : 鉄筋腐食開始塩化物イオン濃度 = $1.2 \text{ kg}/\text{m}^3$

C_t は下式となる。

$$C_t = C_0 \left\{ 1 - \sqrt{1 - \exp\left(-\frac{\alpha_2 x^2}{t}\right)} \right\}, \quad \alpha_2 = \frac{1}{\pi D} \quad (3.4.1-4)$$

C_0 : コンクリート表面の塩化物イオン濃度 (kg/m^3)

x : かぶり厚さ (mm)

D : みかけの拡散係数 (mm^2/year)

α_2 は材料条件などに影響される劣化因子の作用量に関する定数である。 C_0 および α_2 は各評価年での塩化物イオン濃度の深さ方向の分布の実測値などから求める。影響因子 I_1 として、各種調合、温湿度について基本式が成立すれば、各種調合、温湿度、の影響は α に含ませることができ、実測結果の外挿により、式 (3.4.1-3) で各種調合、温湿度の複合的な影響を評価できることになる。

- ・材料劣化度 D と劣化因子作用量 F との関係 (D - F 曲線)

劣化評価基本式は、式 (3.4.1-5) のとおりである。

$$D(F) = \beta d(F) \quad (3.4.1-5)$$

ここに、 β : 材料劣化指数

材料劣化指数 β は複合因子が作用する場合は、式 (3.4.1-6) で表せる。

$$\beta = \beta (F_1, F_2, \dots, F_n) t \quad (3.4.1-6)$$

ここに、 $F_{1 \sim n}$: 劣化因子

劣化因子が複合的に作用しても基本式が成立することが実験等により検証されれば、実測値に基づく外挿法により β で劣化因子の複合作用を一律に評価可能となる。

たとえば、塩化物イオンの作用量と鉄筋腐食度に関しての基本式は、

$$D_3 = \beta F_2 \quad (3.4.1-7)$$

ただし、 D_1 : 鉄筋腐食度、 F_1 : 塩化物イオンの作用量

であるが²、 F_1 として、温湿度について基本式が成立すれば、温湿度の影響は β に含ませることができ、実測結果の外挿により、式 (3.4.1-7) で温湿度の複合的な影響を評価できることになる。

- ・構造性能 P と材料劣化度 D との関係 (P - D 曲線)

構造性能 P と材料劣化度の複合的な作用は、式 (3.4.1-8) で表せる。

$$P(D) = P(D_1, D_2, \dots, D_n) \quad (3.4.1-8)$$

ただし、 $D_{1 \sim n}$: 材料劣化度

本式による評価は、材料劣化度について、複合的な作用を組み込んだ、演繹式、計算式、数値解析などによる。

検討方針

まず既往の研究成果から複合劣化に関する表示式を調査しデータベース化する。本事業で推進する研究の成果として、基礎的なメカニズムの解明とともに、実験・解析結果により得られた因子間の関係を定式化し、 F - t 曲線、 D - F 曲線を整備する。以上のデータベースならびに実験結果に基づき、 F - t 曲線、 D - F 曲線に関して、劣化基本式についての外挿法の適用性を検証する。

P - D 曲線に関しては解析的な手法がメインとなる。この場合は材料劣化の複合的な関係を解析的に明らかにする。複合劣化による P - D 曲線を明らかにすることは、二次評価（材料劣化が規定値を超えた場合での構造性能の評価）での規定値策定にも重要となる。特に原子力関連施設は一般的な構造物よりも高い安全性が要求され、設計上の裕度も大きいと考えられるが、 P - D 関係を整備することにより、材料の劣化に対する構造性能上の安全性の検証にもなる。

²橋高義典、“塩害による鉄筋腐食における劣化因子の作用量と材料劣化度との関係について”、2013年度日本建築学会大会学術講演梗概集 A-1、pp. 423-424 (2013)

2) コンクリート構造物の長期健全性評価の枠組み構築

本研究では、中性化、塩化物、温度等の劣化要因が複合的に作用する場合、鉄筋コンクリート構造物の材料劣化および構造性能の低下にどのような影響を及ぼすかについて、既往の調査研究、実験研究などの事例をもとに検討を行ってきた。特に、以下に示す既往の研究事例を広範に収集しつつ、複合劣化を受けた鉄筋コンクリートの強度低下、ひび割れ発生、コンクリート中の鉄筋の腐食進展・強度低下メカニズムなどにに基づき、複合劣化の健全性評価方法の枠組みを、劣化度評価ダイアグラム (PDFt 曲線) を用いて構築してきた。

- ・ 鉄筋腐食による劣化因子の作用量と材料劣化度の関係の整理・分析した研究
- ・ 複合劣化現象を詳細に見た研究成果（例えば、長期の暴露期間で鉄筋位置の塩化物イオン量、中性化深さ、鉄筋減少率の推移を詳細に取得した研究など）
- ・ 塩化物イオンの時間積算値と鉄筋腐食率の関係について、実構造物での実験、計測をもとにした検討・分析した研究

今年度は、図 3.4.1-2 に示すように劣化度評価ダイアグラムの「第Ⅲ象限」に位置づけられる「鉄筋腐食が構造物性能に与える影響」を研究した事例について、特に原子力建屋の耐荷性能で重要な「せん断耐力」の低下を対象とした最近の研究事例を収集し、その評価式について検討を行った。

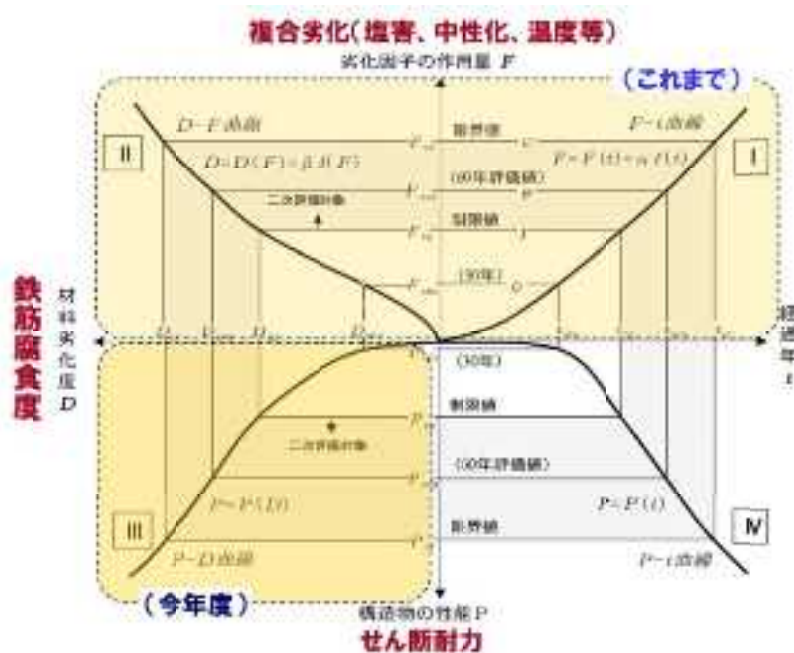


図 3.4.1-2 鉄筋コンクリート構造物の劣化度評価ダイアグラム (PDFt 曲線)

3) 鉄筋腐食のせん断耐荷に及ぼす影響を論じた研究事例

鉄筋コンクリート構造物の鉄筋腐食による耐力低下については、梁部材の鉄筋腐食と曲げ耐力低下の関係について論じた研究事例は多く見られるが、鉄筋腐食とせん断耐荷力の関係を研究した事例は数少ない。しかしながら、近年、鉄筋腐食を有する鉄筋コンクリート構造物のせん断耐荷に及ぼす影響について、部材レベル、実構造物レベルで実験や解析を行った事例は徐々に増加しており、例えば、過去5年以内には、表3.4.1-1に示すような研究事例が見られる。各研究について要点を概説する。

表 3.4.1-1 鉄筋腐食のせん断耐荷に及ぼす影響を論じた研究 (例)

論文名	著者	発表年	概要
局所的鉄筋腐食を有するRCはりのせん断耐荷機構に関する実験的研究	竹内靖人 三木朋広	2010年	軸方向鉄筋を局所的に腐食させたRCはりの載荷試験を実施し、 <u>腐食により生じたひび割れが、斜めひび割れの進展、RCはりの耐荷機構に与える影響</u> を検討
鉄筋腐食が生じたRCボックスカルバートのせん断耐荷特性に関する解析的評価	松尾豊史 松村卓郎 岩森暁如	2013年	鉄筋腐食に伴う材料劣化を考慮した材料非線形解析を行い、 <u>鉄筋腐食がRCボックスカルバートのせん断耐荷特性に与える影響</u> を評価
鉄筋が腐食したRCはりのせん断耐荷挙動に関する研究	薛 昕	2010年	鉄筋が腐食したRCはりのせん断耐荷性状を実験および解析により検討し、 <u>鉄筋の腐食による影響を定量化して、せん断耐力を評価する算定式</u> を提案

4) 局所的鉄筋腐食を有するRCはりのせん断耐荷機構に関する実験的研究

(土木学会第65回年次学術講演会 (平成22年9月))

(a) 実験概要

電食試験により局所的に軸方向鉄筋を腐食させた鉄筋コンクリート梁の試験体を6本用意し、油圧式2000KNの万能試験機により単純支持鉄筋コンクリート梁の2点集中載荷試験を行っている。図3.4.1-3に示す6本の試験体に対し、図3.4.1-4に示す通り腐食位置、腐食幅を変えて電食試験を行い、表3.4.1-2に示す6本の腐食試験体が用意された。

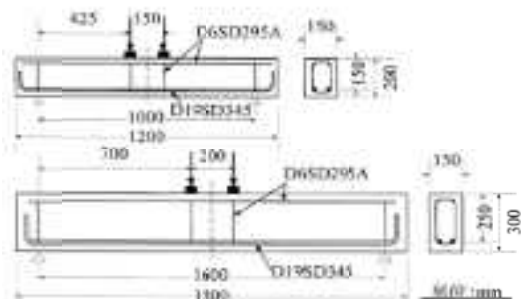


図 3.4.1-3 試験体の概要

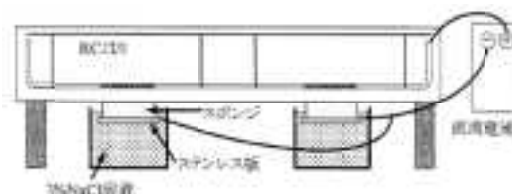


図 3.4.1-4 電食試験の概要

表 3.4.1-2 腐食試験体の概要

試験体	腐食位置	腐食幅 (mm)
No.1	なし	0
No.2	せん断スパン中央	100
No.3	せん断スパン中央～端	312.5
No.4	せん断スパン中央～端 (追加：定着部)	312.5 (100)
No.5	せん断スパン中央 (切り欠きあり)	100
No.6	せん断スパン中央	165

(b) 実験結果

電食試験の結果、図 3.4.1-5 に示す通り、軸方向鉄筋に局所的な腐食を施されている。また、図 3.4.1-6 に示す荷重 - 変位関係によると、斜めひび割れが発生した約 70kN までは同様の挙動を見せているが、その後は試験体ごとに異なっている。腐食なしの試験体 (No. 1) は斜めひび割れの発生と進展と同時に斜め引張破壊に至り、荷重が低下している一方で、腐食試験体 (No. 2～6) は斜めひび割れ発生後も荷重が増加し、せん断圧縮破壊もしくは付着割裂破壊に至り、荷重が低下している。切り欠き部分に集中して鉄筋腐食が発生した試験体 (No. 5) については、荷重の増加に伴って斜めひび割れが再び発生、進展して斜め引張破壊に至っている。

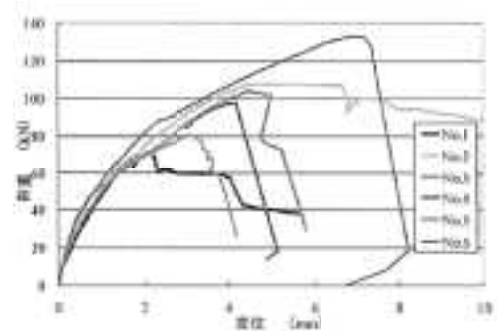
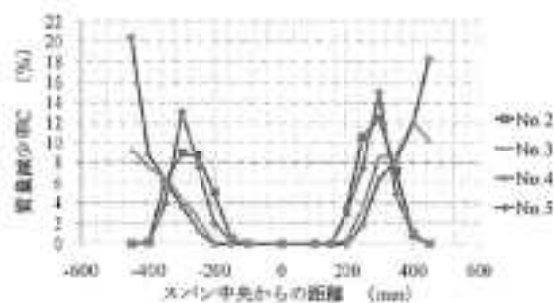


図 3.4.1-5 腐食鉄筋の質量減少分布 図 3.4.1-6 荷重 - 変位の関係

(c) 得られた示唆

局所的な鉄筋腐食を有する鉄筋コンクリート梁と健全な鉄筋コンクリート梁では、耐荷機構に相違がある。また、鉄筋腐食を有する鉄筋コンクリート梁の中でも腐食の位置と幅、腐食の状況によって耐荷機構が異なる場合がある。鉄筋腐食により耐荷力が高まり、その状況によって斜め引張破壊、せん断圧縮破壊など異なる破壊モードを選択し、破壊に至っている。

5) 鉄筋腐食が生じた RC ボックスカルバートのせん断耐荷特性に関する解析的評価
 (コンクリート工学論文集 第24巻第3号 2013年9月)

(a) 解析概要

鉄筋腐食に伴う材料劣化をモデル化した材料非線形解析を用いて、鉄筋腐食が生じた実規模の鉄筋コンクリートボックスカルバートを対象に実験及び解析検討を行っている。解析については、図 3. 4. 1-7 に示す通り、鉄筋の材料劣化、鉄筋とコンクリートの付着劣化、コンクリートの材料劣化をモデル化し、二次元非線形 FEM プログラム「WCOMD-SJ」(ver7. 7) を用いて行われている。

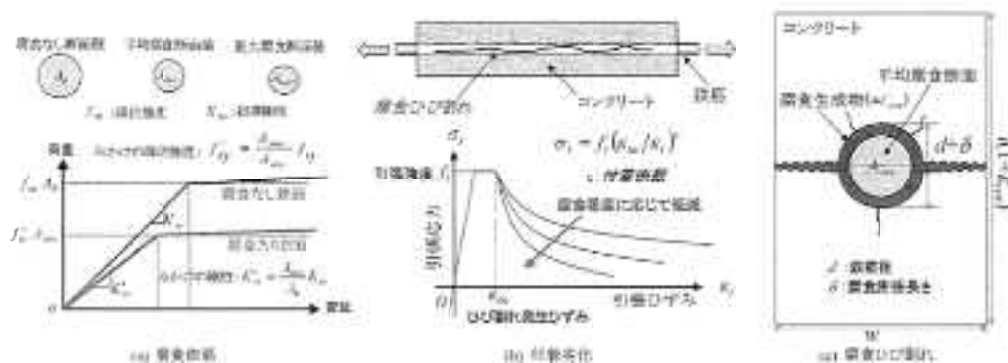


図 3. 4. 1-7 鉄筋腐食に伴う材料劣化のモデル化

(b) 解析条件

解析をモデル化した有限要素解析メッシュ図は図 3. 4. 1-8 に示す通りである。また、解析を行うケースを表 3. 4. 1-3 の通り 4 種類用意し、自重、上載荷重、側方荷重、鉛直荷重を作用させた後、層間変形角を 1/1000 ピッチで±1/100 までを目安に水平方向に正負交番荷重が行われている。

表 3. 4. 1-3 解析ケース

ケース名	解析対象	主筋腐食量(%)		腐食度	備考
		平均値	最大値		
解析A	N-N-N	0.0	0.0	なし	腐食なし
解析B	N-L1-N	11.6	16.4	0	腐食あり
解析C	N-L2-A	10.4	42.1	0	局所的な腐食
解析D	N-L2-A	10.4	10.4	0	腐食ひび割れなし

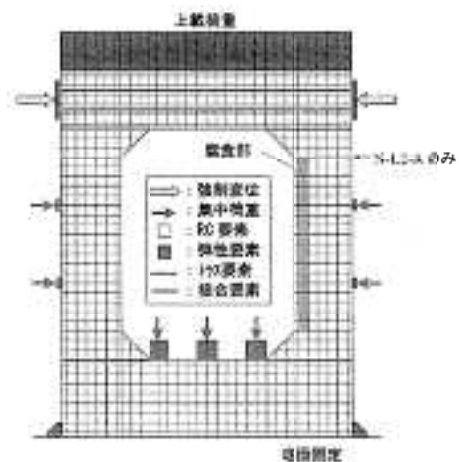


図 3. 4. 1-8 有限要素解析メッシュ図

(c) 解析結果

〔ひび割れ損傷過程〕

鉄筋腐食が生じた箇所のみひび割れが進展するのではなく、腐食した側壁の部材剛性が先行して低下した結果、剛性の高い側壁に損傷が集中し、鉄筋腐食が生じていない側にもひび割れが発生する。鉄筋コンクリートボックスカルバートでは、劣化が生じた部材から破壊する場合も、劣化が生じていない部材から破壊する場合もあり得る。

〔荷重の分担機構〕

鉄筋腐食が生じた部位・部材は、鉄筋腐食が生じていない部位・部材よりも分担するせん断力が低下する。不静定構造である鉄筋コンクリートボックスカルバートでは荷重が再配分されるため、腐食箇所に損傷が生じてても耐荷力が低下しにくい。

(d) 得られた示唆

鉄筋コンクリートボックスカルバートでは、不静定構造で荷重が再配分されるため、局所的な材料劣化により荷重が増加する効果も低下する効果も受けにくい、せん断ひび割れの進展に与える腐食ひび割れの影響が大きく、耐荷力よりも変形性能に及ぼす影響が相対的に大きい。鉄筋腐食が生じた鉄筋コンクリートボックスカルバートのせん断破壊挙動において、腐食ひび割れの影響を適切に考慮することで、腐食ひび割れからせん断ひび割れが進展する状況や腐食ひび割れと載荷によるひび割れがつながる状況などを解析的に再現することが可能である。

6) 鉄筋が腐食した RC はりのせん断・耐荷挙動に関する研究

(a) 研究概要

実験および解析結果により、鉄筋腐食が鉄筋コンクリート梁のせん断耐荷性能に及ぼす影響を考察し、鉄筋が腐食した鉄筋コンクリート梁のせん断算定式を提案している。

(b) 鉄筋腐食によるせん断耐荷性能への影響

・スターラップの腐食による影響

梁部材のせん断耐力は、トラス作用でのスターラップによるせん断抵抗力とトラス作用以外のコンクリートによるせん断抵抗力の和で算定される。スターラップの腐食とコンクリートによるせん断抵抗力の関係を既往の研究データを含めて整理すると、表 3.4.1-4 に示す通りとなる。また、コンクリートによるせん断抵抗力の変化率とスターラップの最大腐食減少率との関係は図 3.4.1-9 に示す通りとなり、スターラップの最大腐食減少率が既往の研究では 50%以内、上記研究では 35%以内であれば、スターラップの腐食はコンクリートによるせん断抵抗力の変化に殆ど影響を及ぼさない。

表 3.4.1-4 スターラップの腐食とコンクリートによるせん断抵抗力の関係
(上：既往研究、下：上記研究)

実験データ	供試体名	α/d^2 ²⁾	$C_{f,max}$ ³⁾	せん断耐力 F_u (kN)	せん断抵抗(kN)		F_u 変化率
					F_2	F_1	
Christopher	SRRA ¹⁾	2.0	0.0	594.0	250.0	344.0	1.00
	SRD	2.0	44.6	471.0	138.5	332.5	0.97
	IGRA ¹⁾	2.0	0.0	578.0	220.0	358.0	1.00
	IGRB	2.0	31.1	507.0	151.5	355.5	0.99
	IGRC	2.0	57.9	467.0	136.7	330.3	0.92
橋本ら	SO-B0-I ¹⁾	2.5	37.9	68.6	23.8	44.8	1.00
	S10-B0-I	2.5	10.0	61.2	19.1	42.1	0.94
	S20-B0-I	2.5	20.0	60.7	14.4	46.3	1.03
松尾ら	A-0 ¹⁾	2.6	0.0	86.4	18.0	68.4	1.00
	A-18H	2.6	7.6	85.4	16.6	68.7	1.00

注：1) 健全な試験体 2) セン断スパン比 3) $C_{f,max}$ ：スターラップの最大腐食減量率(%)

	供試体名	配筋比 P_v (%)	せん断耐力 F_u (kN)	せん断抵抗(kN)		F_u 変化率
				F_2	F_1	
実験	B(2.6)-ms	0.39	74.0	28.0	46.0	1.00
	B(2.6)-ms1		72.0	26.3	45.7	0.99
	B(2.6)-ms2		74.1	24.9	49.2	1.07
	B(2.6)-ms3		69.5	22.1	47.3	1.03
	B(2.6)-ms4		70.4	20.3	50.1	1.09
	B(2.6)-ms5		69.5	18.4	51.0	1.11
	B(2.6)-msn	0.52	84.1	37.0	47.1	1.00
	B(2.6)-msn1		87.9	33.7	54.2	1.15
	B(2.6)-msn2		80.7	31.5	49.1	1.05
	B(2.6)-msn3		72.1	28.9	43.2	0.92
解析	B(2.6)-ms	0.39	71.4	28.0	43.4	1.00
	B(2.6)-ms1		68.7	23.8	44.9	1.03
	B(2.6)-ms3		64.9	19.6	45.3	1.04
	B(2.6)-ms5		57.0	16.0	41.0	0.95

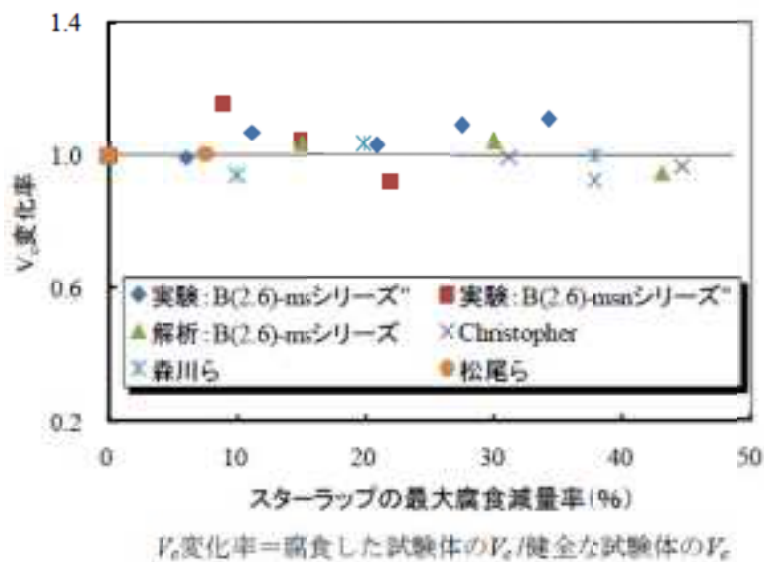


図 3.4.1-9 スターラップ最大腐食減少率とコンクリートによるせん断抵抗変化率の関係

・軸引張鉄筋の腐食による影響

軸引張鉄筋の平均腐食減量率とせん断耐力変化率との関係を、異なるせん断スパン比について実験と解析の結果を整理したものを図 3. 4. 1-10 に示す。せん断スパン比が 2.0 以上では、せん断耐力は軸引張鉄筋の腐食の影響を大きく受けると考えられる。

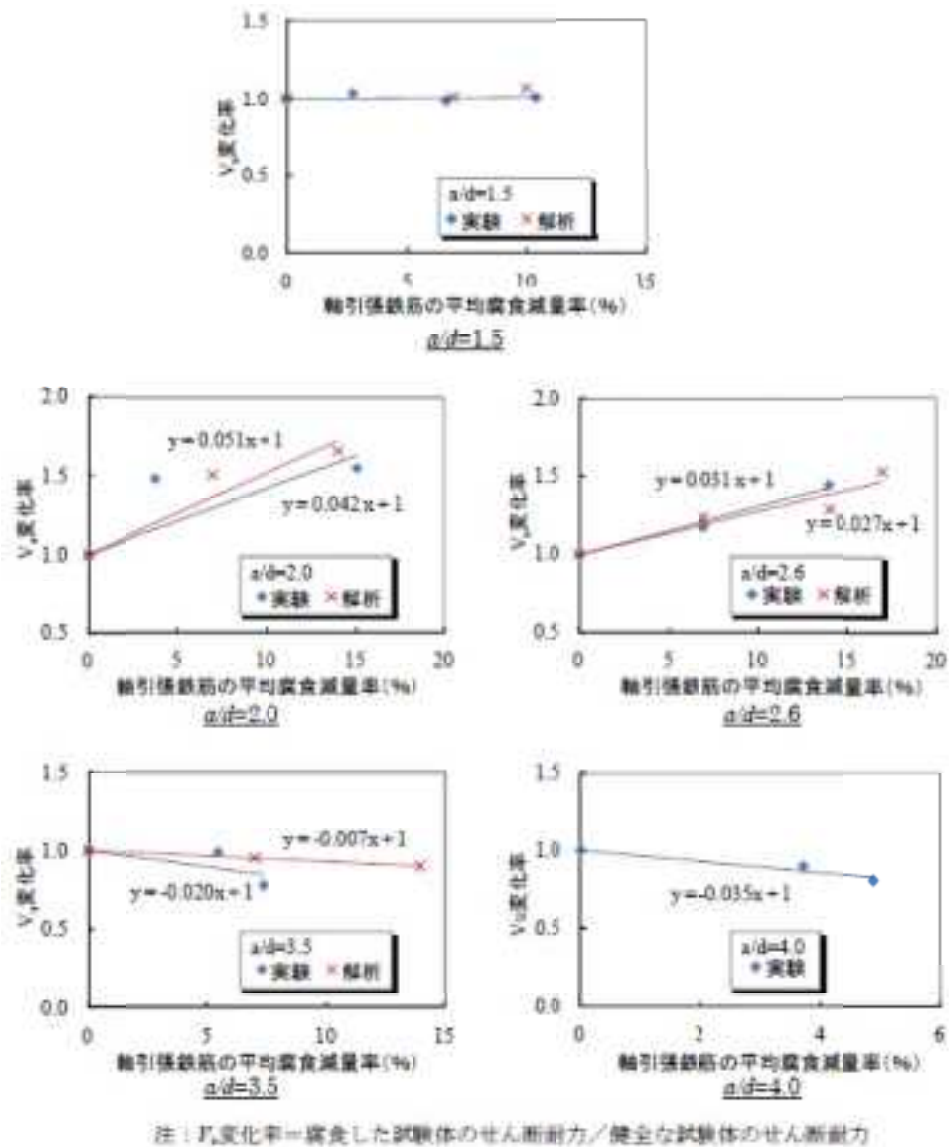


図 3. 4. 1-10 軸引張鉄筋の腐食によるせん断耐力変化率の変化

以上より、スターラップの腐食とせん断耐荷性状、軸引張鉄筋の腐食とせん断耐荷性状との相関を整理したものを各々、図 3. 4. 1-11、図 3. 4. 1-12 の通り示している。

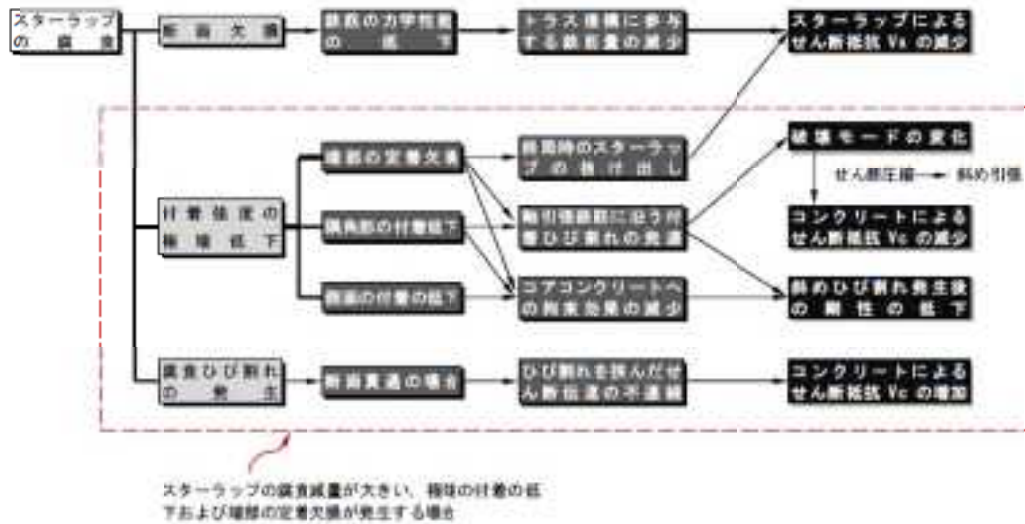


図 3. 4. 1-11 スターラップの腐食とせん断耐荷性状の相関図

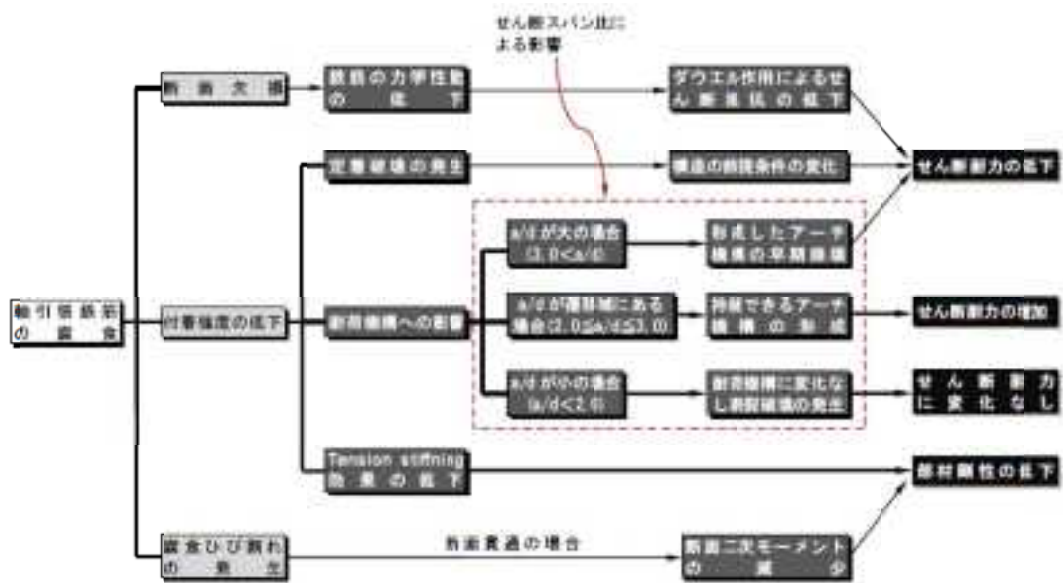


図 3. 4. 1-12 軸引張鉄筋の腐食とせん断耐荷性状の相関図

(c) 鉄筋腐食によるせん断耐荷性能への影響の定量化

[軸引張鉄筋のみの場合]

腐食した試験体のせん断耐力は、健全な試験体のせん断耐力をもとに鉄筋の腐食影響係数 α_1 を導入し、式(3.4.1.9)に示す算定式で考えている。

$$V_{u-eval} = \alpha_1 \cdot V_u \quad (3.4.1-9)$$

ここに、 V_{u-eval} : 腐食した試験体のせん断耐力

V_u : 健全な試験体のせん断耐力

鉄筋が腐食したはりのせん断耐力は、せん断スパン比 a/d 、軸引張鉄筋の平均腐食減量率 C_m による影響が認められるため、 α_1 は式(3.4.1.10)で評価できると考えられている。

$$\alpha_1 = f(a/d, C_m) \quad (3.4.1-10)$$

図 3.4.1-10 に示されている回帰式を参考にして、 α_1 を式(3.4.1.11)で表すしている。

$$\alpha_1 = 1 + k \cdot C_m \quad (3.4.1-11)$$

ここに、 C_m : 軸引張鉄筋の平均腐食減量率(%)

k : 図 3.4.1-9 に示す回帰式の勾配

図 3.4.1-10 に示す実験回帰式の勾配 k と a/d との関係を回帰した結果を図 3.4.1-11 として示し、回帰式を式(3.4.1.12)として示している。

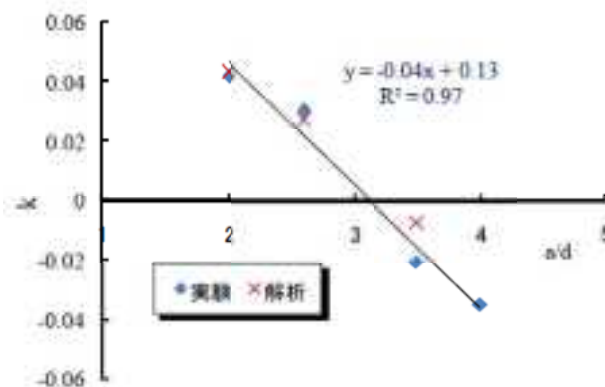


図 3.4.1-13 実験回帰式の勾配 k と a/d との関係

$$k = 0.13 - 0.04 \times (a/d) \quad (3.4.1-12)$$

式(3.4.1.11)、(3.4.1.12)より式(3.4.1.13)が求められる。

$$\alpha_1 = 1 + (0.13 - 0.04 \times (a/d)) \cdot C_m \quad (3.4.1-13)$$

[スターラップを配置する場合]

鉄筋が腐食した場合のせん断算定式は、健全な試験体を基準として鉄筋の腐食による影響係数を考慮して式(3.4.1.14)を考えることとしている。

$$V_{s-est}^{u-aval} = \alpha_2 \cdot V_{co} + \beta \cdot V_{sc} \quad (3.4.1-14)$$

ここに、 V_{s-est}^{u-aval} : 腐食した試験体のせん断耐力
 V_{co} : 健全な試験体のコンクリートによるせん断抵抗
 V_{sc} : 健全な試験体のスターラップによるせん断抵抗
 α_2 : 鉄筋の腐食が V_c に与える影響を考慮する係数
 β : 鉄筋の腐食が V_s に与える影響を考慮する係数

スターラップの腐食が V_c に及ぼす影響は少ないことが確認されているため、 V_c には軸引張鉄筋の腐食による影響のみ、 V_s にはスターラップの腐食による影響のみを考慮することとしている。

スターラップの腐食が V_s に与える影響の定量化

スターラップの腐食による影響はトラス作用で負担するせん断抵抗の断面減少分で定量化することとし、式(3.4.1.15)により表す。

$$\beta = 1 - C_{s-max} / 100 \quad (3.4.1-15)$$

ここに、 C_{s-max} : スターラップの最大腐食減量率(%)

軸引張鉄筋の腐食が V_c に与える影響の定量化

スターラップを配置する場合、鉄筋腐食が V_c に与える影響を考慮する係数 α_2 にせん断スパン比 a/d 、軸引張鉄筋の平均腐食減量率 C_m に加えて、スターラップの鉄筋比 p_w も考慮に入れることにしている。 α_2 は式(3.4.1.13)をもとに式(3.4.1.16)により表わされている。

$$\alpha_2 = \alpha_1 \cdot f(p_w) \quad (3.4.1-16)$$

ここに、 p_w : スターラップの鉄筋比(%)

スターラップの鉄筋比の影響については、軸引張鉄筋のみの試験体とスターラップを配置する試験体の実験データを整理して検討し、調査対象および調査結果を表3.4.1-5に示

している。まず、腐食した試験体のコンクリートにより負担するせん断抵抗 V_c を式

(3.4.1.17)を用いて計算している。

表 3. 4. 1-5 スターラップの鉄筋比による影響

試験体名	α	β_v (%)	腐食減量(%)		実験値					計算値	
			C_{av} ³⁾	C_{max} ⁴⁾	V_{cs} ⁵⁾ (kN)	V_{cs} ⁵⁾ (kN)	V_{cs} ⁵⁾ (kN)	V_{cs} ⁵⁾ (kN)	V_{cs} ⁵⁾ (kN)	V_{cs} ⁵⁾ (kN)	V_{cs} ⁵⁾ (kN)
B(2.0)-m	2.0	0.00	0.0		61.9	61.9			61.9	1.00	
B(2.0)-m1			3.8		91.8	91.8			73.7	1.25	
B(2.0)-m2			15.0		95.8	95.8			108.3	0.88	
B(2.6)-m	2.6	0.00	0.0		43.2	43.2			43.2	1.00	
B(2.6)-m1			7.0		50.7	50.7			50.6	1.00	
B(2.6)-m2			13.9		62.5	62.5			57.9	1.08	
B(2.6)-m3			17.0		55.5	55.5			61.1	0.91	
B(3.5)-m	3.5	0.00	0.0		39.9	39.9			39.9	1.00	
B(3.5)-m1			5.4		39.4	39.4			37.7	1.05	
B(3.5)-m2			7.3		31.0	31.0			35.9	0.84	
B(4.0)-m	4.0	0.00	0.0		33.4	33.4			33.4	1.00	
B(4.0)-m1			3.7		30.2	30.2			29.7	1.02	
B(4.0)-m2			4.9		26.9	26.9			28.5	0.94	
B(2.0)-ms	2.0	0.30	0.0	0.0	82.0	54.0	28.0	54.0	1.00		
B(2.0)-ms1			7.8	1.6	89.3	61.7	27.6	75.1	0.82		
B(2.0)-ms2			9.1	5.0	103.1	76.3	26.6	78.6	0.97		
B(2.6)-ms	2.6	0.30	0.0	0.0	74.0	46.0	28.0	46.0	1.00		
B(2.6)-ms1			3.1	5.6	77.4	51.0	26.4	49.5	1.03		
B(2.6)-ms2			18.4	29.2	82.1	62.3	19.8	66.7	0.93		
B(3.2)-ms	3.2	0.30	0.0	0.0	70.6	42.6	28.0	42.6	1.00		
B(3.2)-ms1			5.0	4.8	70.5	43.8	26.7	43.0	1.02		
B(3.2)-ms2			6.9	2.5	71.7	44.4	27.3	43.1	1.03		

- 注：1) 健全な試験体 2) スターラップの鉄筋比(%)
 3) 軸引張鉄筋の平均腐食減量率(%) 4) スターラップの最大腐食減量率(%)
 5) スターラップによるせん断抵抗、トラス理論により求める。
 6) コンクリートによるせん断抵抗、 $V = V_c - V_w$ 、 $p=0$ の場合、 $V = V_c$
 7) V_{c-eval} ：コンクリートによるせん断抵抗の計算値、式(3. 4. 1. 19)により求める。

$$V_c = V_{test} - \beta \cdot V_{so} \quad (3. 4. 1-17)$$

ここに、 V_c ：各試験体のコンクリートによるせん断抵抗の計算値

ただし、 $p=0$ の場合、 $V = V_w$

V_{test} ：各試験体のせん断耐力の実験値

V_{so} ：健全なスターラップによるせん断抵抗

β ：式(3. 4. 1. 15)により計算

次に、スターラップの影響がないと仮定して式(3. 4. 1. 10)を用いてコンクリートの負担するせん断抵抗 V_{c-eval} を計算する。

$$V_{c-eval} = (V_{test-so} - V_{so}) \times \alpha_1 \quad (3. 4. 1-18)$$

ここに、 $V_{test-so}$ ：健全な試験体のせん断耐力の実験値

V_{so} ：健全なスターラップによるせん断抵抗

α_1 ：式(3. 4. 1. 13)により計算

V_c/V_{c-eval} の結果はスターラップによる影響 $f(p_w)$ と考えられる。 V_c/V_{c-eval} を縦軸として実験データをプロットしたものを図 3. 4. 1-14 に示し、図に示される回帰式により、 $f(p_w)$ を式(3. 4. 1. 19)で表している。

$$f(p_w) = 1 - 0.05p_w \quad (3. 4. 1-19)$$

式(3. 4. 1. 13)、(3. 4. 1. 16)、(3. 4. 1. 19)よりスターラップを配置する場合の α_2 を式(3. 4. 1. 20)で表している。

$$\alpha_2 = [1 + (0.13 - 0.04 \times (a/d)) \cdot C_m] \times (1 - 0.05p_w) \quad (3. 4. 1-20)$$

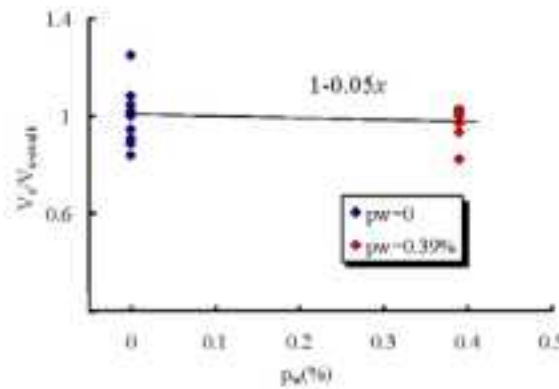


図 3. 4. 1-14 V_c/V_{c-eval} の関係

(d) 算定式の提案

以上より、鉄筋が腐食する RC はりのせん断耐力算定式を次のようにまとめている。

〔軸引張鉄筋のみの場合〕

$$V_{sc,eval} = \alpha_1 \cdot V_{sc} \quad (3. 4. 1-21)$$

$$\alpha_1 = 1 + [0.13 - 0.04 \times (a/d)]$$

〔スターラップを配置する場合〕

$$V_{sc,eval} = \alpha_2 \cdot V_{sc} + \beta \cdot V_{sl} \quad (3. 4. 1-22)$$

$$\alpha_2 = [1 + (0.13 - 0.04 \times (a/d)) \cdot C_m] \times (1 - 0.05p_w)$$

$$\beta = 1 - C_{m-sl} (1/8)$$

ここに、 a/d : せん断スパン比

C_m : 軸引張鉄筋の平均腐食減量率 (%)

- C_{s-max} : スターラップの最大腐食減量率 (%)
 p_w : スターラップの鉄筋比 (%)
 V_{co} : 軸引張鉄筋のみ健全なはりのせん断耐力、式(3.4.1.23)、
 (3.4.1.24) により計算
 V_{so} : 健全なスターラップによるせん断抵抗、式(3.4.1.25)
 により計算

健全な試験体で斜め引張破壊を発生したときのせん断耐力：

$$V_{co} = 0.2 f_c'^{1/3} (100 p_t)^{1/3} \left(\frac{10^3}{d} \right)^{1/4} \left(0.75 + \frac{1.4d}{a} \right) b_w d \quad (3.4.1-23)$$

健全な試験体でせん断圧縮破壊を発生したときのせん断耐力：

$$V_{co} = \frac{0.24 f_c'^{2/3} (1 + \sqrt{100 p_t}) (1 + 3.33 r / d)}{1 + (a / d)^2} b_w d \quad (3.4.1-24)$$

- ここに、 f_c' : コンクリートの圧縮強度 (N/mm²)
 p_t : 軸引張鉄筋比 (%)
 d : 断面の有効高さ (mm)
 b_w : 部材断面の幅 (mm)
 r : 載荷板の軸方向の長さ (mm)

軸方向と 90° のスターラップのみを配置する健全な試験体の場合：

$$V_{so} = A_w \times f_{wy} \times jd / s \quad (3.4.1-25)$$

- ここに、 A_w : スターラップ 1 組の断面積 (mm²)
 f_{wy} : スターラップの降伏強度 (N/mm²)
 d : 断面の有効高さ (mm)
 j : $j=1/1.15$ とする
 s : スターラップの間隔 (mm)

(e) せん断耐力の提案式の検証

国内外で行なわれた鉄筋が腐食したはり部材の実験データ(軸引張鉄筋のみの28体とスターラップ配置の15体、合計43体)を取りまとめ、提案式を用いて検証している。データはいずれも腐食促進実験の結果で、各実験パラメータの範囲は以下のとおりとなっている。

せん断スパン比 a/d : 2.5~4.0

軸引張鉄筋の平均腐食減量率 C_m : 0~18%

スターラップの鉄筋比 p_w : 0.1~0.4%

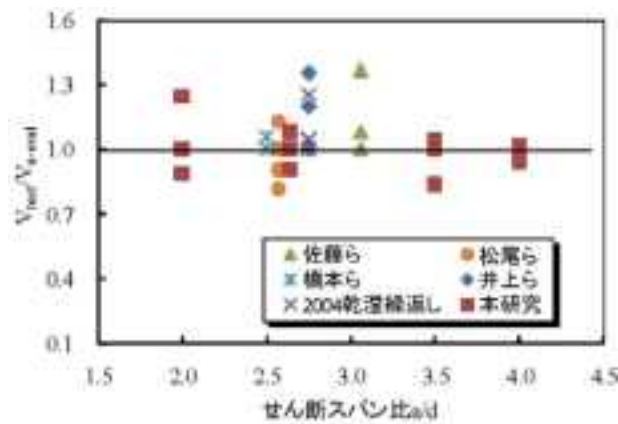
スターラップの最大腐食減量率 C_s : 0~35%

表 3.4.1-6 軸引張鉄筋のみの場合の検証

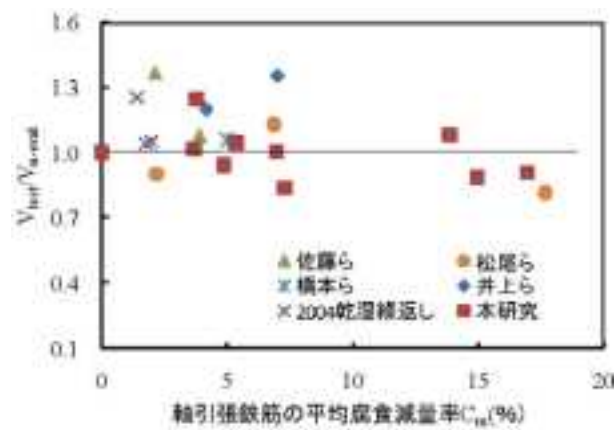
実験データ	供試体名	a/d	$f_c^{(7)}$ (N/mm^2)	C_m (%) ⁽⁸⁾	$V_{int}^{(9)}$ (N/mm^2)	$V_{smead}^{(10)}$	$\frac{V_{int}}{V_{smead}}$	
佐藤ら (電食)	L1 ⁽⁶⁾	3.1	—	0.0	26.5	26.5	1.00	
	L3			2.1	36.8	26.9	1.37	
	L5			3.9	29.5	27.3	1.08	
松尾ら (電食)	N-0 ⁽⁶⁾	2.6	18	0.0	88.3	88.3	1.00	
	N-30E1			2.2	84.4	93.6	0.90	
	N-72H			6.9	118.2	104.9	1.13	
	N-144H			17.7	106.5	130.8	0.81	
橋本ら (人工塩霧)	80-B0-II ⁽⁶⁾	2.5	15	0.0	36.6	36.6	1.00	
	80-B5-II			5.0	44.5	42.1	1.06	
井上ら (電食)	A0 ⁽⁶⁾	2.8	25	0.0	21.3	21.3	1.00	
	Ae1			4.2	27.7	23.1	1.20	
	Ae2			7.0	32.9	24.3	1.35	
2004年 (乾湿繰り返し)	A3	2.8	25	1.8	23.0	22.1	1.04	
	A4			1.4	27.4	21.9	1.25	
	A5			2.0	23.2	22.2	1.05	
本研究 (電食)	B(2.0)-m ⁽⁶⁾	2.0	43	0.0	61.9	61.9	1.00	
	B(2.0)-m1			4.6	3.8	91.8	73.7	1.25
	B(2.0)-m2			4.5	15.0	95.8	108.3	0.88
	B(2.6)-m ⁽⁶⁾	2.6	33	0.0	43.2	43.2	1.00	
	B(2.6)-m1			3.5	7.0	50.7	50.6	1.00
	B(2.6)-m2			3.6	13.9	62.5	57.9	1.08
	B(2.6)-m3	3.6	17.0	55.5	61.1	0.91		
	B(3.5)-m ⁽⁶⁾	3.5	43	0.0	39.9	39.9	1.00	
	B(3.5)-m1			4.6	5.4	39.4	37.7	1.05
	B(3.5)-m2			4.4	7.3	31.0	36.9	0.84
	B(4.0)-m ⁽⁶⁾	4.0	33	0.0	33.4	33.4	1.00	
	B(4.0)-m1			3.5	3.7	30.2	29.7	1.02
B(4.0)-m2	3.6			4.9	26.9	28.5	0.94	

〔軸引張鉄筋のみの場合〕

軸引張鉄筋のみの場合の検証データを表 3.4.1-6 にまとめ、検証した結果を図 3.4.1-15 に示している。実験データは、加工鉄筋を用いて鉄筋の腐食を模擬した橋本らのデータ以外、いずれも電食試験による結果である。28 体の実験データに対し、 V_{test}/V_{u-eval} の平均値は 1.04 で、変動係数は 13% であり、実験結果が概ね評価できている。



(a) C_m と V_{test}/V_{u-eval} の関係



(b) a/d と V_{test}/V_{u-eval} の関係

図 3.4.1-15 軸引張鉄筋のみを配置する場合の検証

[スターラップを配置する場合]

表 3.4.1-7 スターラップを配置する場合の検証

実験データ	供試体名	α _l	ρ _s ^(%)	腐食減量(%)		F _腐 ^(%)	F _{腐_{max}} ^(%)	F _腐 ^(%) F _{腐_{max}}
				C _腐 ^(%)	C _{腐_{max}} ^(%)			
松原ら (喰食)	A-0	26	0.11	0.0	0.0	106.0	106.0	1.00
	A-26H			0.8	21.3	109.3	108.5	1.06
	A-72H			1.8	38.0	114.3	102.9	1.11
橋本ら (人工腐蝕)	S0-B0-1	25	0.28	0.0	0.0	52.8	52.8	1.00
	S10-B5-1			3.0	10.0	56.6	51.9	1.09
	S20-D10-1			10.0	20.0	53.8	51.5	1.04
本研究 (喰食)	D(2.0)ms	20	0.30	0.0	0.0	82.0	82.0	1.00
	D(2.0)ms1s			7.8	1.6	89.3	101.0	0.88
	B(2.0)ms2s			9.1	5.0	102.1	103.5	1.00
	B(2.6)ms	26		0.0	0.0	74.0	74.0	1.00
	B(2.6)ms1s			3.1	5.6	77.4	74.9	1.03
	B(2.6)ms2s			18.4	29.2	82.1	85.1	0.97
	B(3.2)ms	32		0.0	0.0	70.6	70.6	1.00
	D(3.2)ms1s			5.0	4.8	70.5	68.8	1.03
	D(3.2)ms2s			6.0	2.5	71.7	69.5	1.03

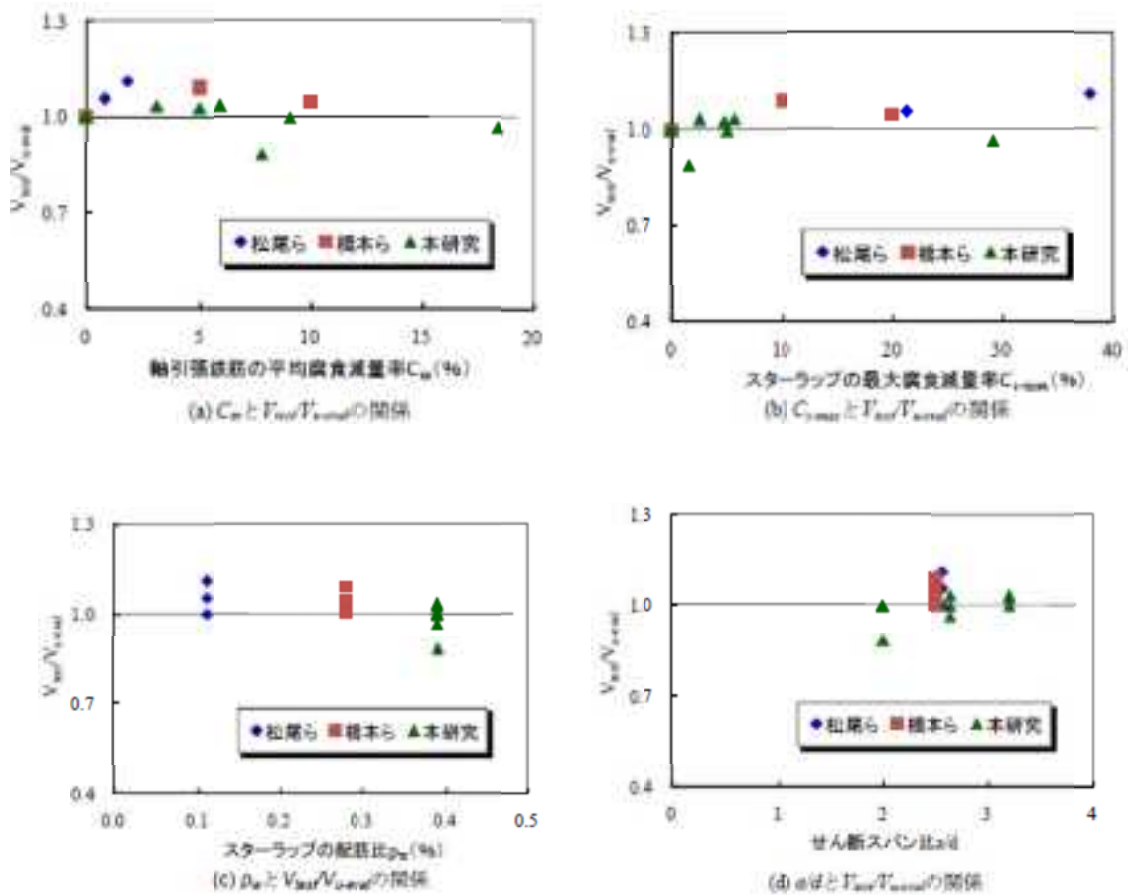


図 3.4.1-16 軸引張鉄筋のみを配置する場合の検証

7) 今年度研究のまとめ

鉄筋腐食による鉄筋コンクリート構造物のせん断耐荷力の低下に関する近年の研究事例より、以下の事項が明らかとなった。

[鉄筋コンクリート梁]

- ・ 局所的な鉄筋腐食を有する鉄筋コンクリート梁は、腐食の位置、幅、状況によって耐荷機構が異なるほか、鉄筋腐食により耐荷力が高まり、斜め引張破壊やせん断圧縮破壊などの異なる破壊モードを選択し、破壊に至る。
- ・ スターラップの腐食が耐荷メカニズムに与える影響は少なく、修正トラス理論でトラス作用によるせん断抵抗を求める際には、スターラップの最大断面減量率を考慮すれば定量化することができる。
- ・ 軸引張鉄筋の腐食による影響は、軸引張鉄筋の平均腐食減量率、せん断スパン比 a/d 、スターラップの配筋 p_w に明確な関係があり、これらのパラメータを用いて定量化することができる。
- ・ 鉄筋腐食を考慮したせん断耐荷力の評価式として、軸引張鉄筋のみの場合、スターラップを配置した場合の各々について、以下が提案されている。

(軸引張鉄筋のみの場合)

$$V_{sc,red} = \alpha_1 \cdot V_{sc}$$

$$\alpha_1 = 1 + [0.13 - 0.04 \times (a/d)]$$

(スターラップを配置した場合)

$$V_{sc,red} = \alpha_2 \cdot V_{sc} + \beta \cdot V_{so}$$

$$\alpha_2 = [1 + (0.13 - 0.04 \times (a/d)) \cdot C_m] \times (1 - 0.05 p_w)$$

$$\beta = 1 - C_{s-max} \quad (10)$$

ここに、 a/d : せん断スパン比

C_m : 軸引張鉄筋の平均腐食減量率 (%)

C_{s-max} : スターラップの最大腐食減量率 (%)

p_w : スターラップの鉄筋比 (%)

V_{sc} : 軸引張鉄筋のみ健全なはりのせん断耐力

V_{so} : 健全なスターラップによるせん断抵抗

[鉄筋コンクリートボックスカルバート]

- 不静定構造で荷重が再配分されるため、局所的な材料劣化による荷重の増減効果は受けにくい。腐食ひび割れがせん断ひび割れの進展に与える影響が大きく、耐荷力よりも変形性能に大きな影響を及ぼす。
- 腐食ひび割れの影響を適切に考慮することにより、腐食ひび割れからせん断ひび割れが進展する状況、腐食ひび割れと荷重によるひび割れがつながる状況などを解析的に再現できる。

(2) 熱影響を受けたコンクリートのひび割れ発生に関する検討

1) 研究の背景および目的

コンクリート構造物は様々な用途に用いられているが、その供用期間中に多くの劣化因子の影響を受ける。熱の影響を受ける場合は、強度特性などの性質が変化するため、長期にわたり熱の影響を受ける原子力発電所施設では、供用時のコンクリートに対して温度制限値が設けられる³。また、火災時においても、短期間ではあるが高温加熱の影響を受けて、コンクリートの性質は変化する。そのため、熱の影響を受けたコンクリートに関しては多くの検討がなされている。コンクリート構造物におけるコンクリートの役割は、主に圧縮応力を負担することであるため、強度特性に関しては多くの検討がなされている。100℃未満の長期加熱に関しては、高温乾燥による含水状態の変化によって強度が50℃付近で低下すること⁴、⁵、⁶、一方、シールの有無や養生条件に関係なく加熱後の強度低下がないこと⁷、温度65℃、湿度30%R.H.に5ヶ月間放置したコンクリートの強度変化がなかったこと⁸などが報告されている。また、100℃以上の高温加熱に関しては、普通強度および高強度コンクリートについて、熱間および加熱冷却後における検討が行われ、熱間の圧縮強度は100℃で低下し、200℃で常温とほぼ同等まで再上昇して低下していくこと、加熱冷却後では温度上昇にともない徐々に低下すること⁹、超高強度コンクリートの加熱冷却後の圧縮強度は100℃で低下し、200℃で常温とほぼ同等の強度まで再上昇して低下していくこと¹⁰などが報告されている。また、高温加熱の影響によるコンクリートの引張強度は、割裂引張試験により高温になるほど低下し、600℃では20℃と比較して30%程度まで低下すること¹¹、¹²が報告されており、高強度および一般強度のコンクリートについて、1200℃まで加熱の影響を受けた場合の引張強度

³ 日本建築学会、“原子炉建屋構造設計指針・同解説”(1988)

⁴ 岸谷孝一、嵩英雄、椎葉大和、奥野亨：“各種セメントモルタルの耐熱性に関する研究”、日本建築学会大会学術講演梗概集、pp. 157-158 (1971)

⁵ 岸谷孝一、嵩英雄、奥山治也、奥野亨：“20～300℃の高温にさらされたコンクリートの諸性状に関する研究(その1)”、日本建築学会大会学術講演梗概集、pp. 143-144 (1972)

⁶ 岸谷孝一、嵩英雄、奥山治也、奥野亨：“20～300℃の高温にさらされたコンクリートの諸性状に関する研究(その2)”、日本建築学会大会学術講演梗概集、pp. 145-146 (1972)

⁷ 長尾覚博、中根淳：“高温履歴を受けるコンクリートの物性に関する実験的研究”、日本建築学会構造系論文集、No. 457、pp. 1-10 (1994)

⁸ 廣永道彦、蔵重勲、井元晴丈：“セメント硬化体の熱影響に関する検討—温度 65℃におけるセメント系材料の変質状況について—”、電力研究所報告、N04013 (2004)

⁹ 安部武雄、古村福次郎、戸祭邦之、黒羽健嗣、小久保勲：“高温度における高強度コンクリートの力学特性に関する基礎的研究”、日本建築学会構造系論文集、第 515 号、pp. 163-168 (1999)

¹⁰ 松戸正士、西田浩和、片寄哲務、安部武雄：“高温加熱後の超高強度コンクリートの力学的性質に関する実験的研究”、日本建築学会構造系論文集、第 603 号、pp. 171-177 (2006)

¹¹ 本田義博、大岡督尚、藤巻敏之：“高強度コンクリートの耐火性能に関する実験的研究(その1 定常温度の一軸試験)”、日本建築学会大会学術講演梗概集、A-2 分冊、pp. 23-24 (1996)

¹² 河辺伸二、一瀬賢一、川口徹、長尾覚博：“高温加熱を受けたコンクリートの強度特性に関する研究”、コンクリート工学年次論文報告集、Vol. 25、No. 1、pp. 377-382 (2003)

低下が、圧縮強度低下と比較して大きいことも報告されている^{13, 14, 15}。このように、高温加熱の影響を受けたコンクリートは強度が低下するため、ひび割れも発生しやすくなることが予想される。しかし、高温加熱の影響を受けたコンクリートの、ひび割れ発生や進展に関する検討はなされていない。

ひび割れは、主に引張破壊によって起こるため、ひび割れ発生や進展を検討する際には、引張変形による破壊進展の評価が必要となる。そのためには、コンクリートの引張変形時における最大荷重以降の軟化域を含め、安定した荷重-変位関係が得られる破壊靱性試験を応用し、間接的に引張軟化曲線を求める方法が有効であると考えられる。

そこで、本研究では、原子炉建屋特有の温度 100℃未満の環境下で熱影響を受けたコンクリートを想定し、それらのコンクリートにひび割れの発生や、その後のひび割れ進展に関して破壊靱性試験により検討を行った。同時に SA 時などを想定し、短期間に高温の熱影響を受けた場合の検討も行った。なお、実験は、100℃未満で長期（本年度は 12 ヶ月まで）加熱を行なったコンクリート、100℃以上で短期加熱を行ったセメントペースト、モルタルコンクリート（ペーストおよびモルタルは 12 時間まで、コンクリートは 168 時間まで）について行った。

2) 破壊特性の評価

(a) 引張軟化曲線の推定方法

引張軟化曲線は、くさび割裂試験より得られる荷重-開口変位 (CMOD) 曲線の解析プログラムを作成し、実験結果を多直線近似法^{16, 17, 18}により逆解析して求めた。逆解析による多直線近似方法は、実験により求められた荷重-開口変位 (CMOD) 曲線のデータを利用して結合応力-開口変位 (COD) の関係を非線形ひび割れ方程式の繰り返し演算により求める際に、計算により既に求めている一部の結合応力-開口変位 (COD) 関係を繰り返し演算の構成則として適用し、逐次解析をするという手法を採用している。

くさび割裂試験による引張軟化曲線の推定も、切欠き梁 3 点曲げ試験による方法^{16, 17}と同様に求めることが可能であるが、応力拡大係数が切欠き梁 3 点曲げ試験の場合と異な

¹³ Sammy Y. N. Chan, Gai-fai Peng and John K. W. Chan : “Comparison between high strength concrete and normal strength concrete subjected to high temperature”, Material and Structure, Vol. 29, pp. 616-619 (1996)

¹⁴ A. N. Noumowe, P. Clasters, G. Debicki, M. BolvinY. : “High Temperature Effect on High Performance Concrete (70-600C) Strength and Porosity”, SP-145 Durability of Concrete, Third International Conference, pp.157-172 (1994)

¹⁵ P. A. Jahren : “Fire Resistance of High Strength/Dense Concrete with Particular Reference to the Use of Condensed Silica Fume”, SP-114, pp.1013-1049 (1989)

¹⁶ 橘高義典、上村克郎、中村成春 : “コンクリートの引張軟化曲線の多直線近似解析”、日本建築学会構造系論文集、No. 453、pp. 15-25 (1993)

¹⁷ 橘高義典 : “引張軟化曲線の多直線近似解析によるコンクリートの弾塑性破壊パラメータの評価”、日本建築学会構造系論文集、No. 469、pp. 17-24 (1995)

¹⁸ 橘高義典、高橋仁智 : “破壊力学手法によるひび割れ分散を考慮した繊維補強軽量コンクリートパネルの曲げ破壊解析”、日本建築学会構造系論文集、No. 541、pp. 37-42 (2001)

っている。その応力拡大係数は、コンパクトテンション試験¹⁹によっている。また、解析に用いる、くさび割裂試験における形状関数は、既往研究¹⁸により求めている。

(b) 破壊パラメータ

破壊特性は、引張軟化曲線から得られる破壊パラメータである初期結合応力および破壊エネルギーにより評価した。

引張軟化曲線は、結合力モデルにより破壊進展をモデル化した場合の結合力とひび割れ開口変位の関係を示す指標となり、その初期結合応力は、材料の本質的な引張強度を反映するパラメータとなる。初期結合応力は、ひび割れ発生抵抗性を示す値となり、この値が大きいほどひび割れが発生しにくいことを意味する。

引張軟化曲線で囲まれた面積は破壊エネルギーとなる。破壊エネルギーは、ひび割れ進展抵抗性を示す値となり、この値が大きいほどひび割れが進展しにくいことを意味する。

3) 実験概要

(a) 供試体概要

表 3.4.1-8 に実験要因と水準を示す。実験は、100℃未満で長期間（本年度は12ヶ月まで）の加熱を行った場合（以下、100℃未満加熱）、100℃以上で1週間までの短期間の加熱を行った場合（以下、100℃以上加熱）の2種類について行った。100℃未満加熱は強度3水準のコンクリートについて、100℃以上加熱は骨材の有無に関して、強度1水準でセメントペースト、モルタル、コンクリートについて検討を行った。

表 3.4.1-8 実験の要因と水準

実験	要因	水準
100℃ 未満加熱	供試体	コンクリート
	呼び強度 (N/mm ²)	18 (σ 18)、27 (σ 27)、36 (σ 36)
	加熱温度 (°C) ※	20、40、60、80 (40、80 は呼び強度 27 のみ)
	加熱開始材齢 (週)	13
	加熱期間 (週)	26、52、104、156
	加熱開始時含水状態	表乾
	シールの有無	有り、無し
100℃ 以上加熱	供試体	コンクリート、モルタル、ペースト
	呼び強度 (N/mm ²)	27 (σ 27)
	加熱時最高温度 (°C)	20、100、200、300、400、500、600、700、800
	加熱開始材齢 (週)	13
	最高温度保持時間 (時間)	1、12、24、72、168 (モルタル、ペーストは1、12時間)
	加熱開始時含水状態	表乾
シールの有無	無し	

※80℃加熱に関しては、試験装置故障により加熱26週以降の試験は中止

¹⁹ G. V. Guinea, M. Elices and J. Planas : “Stress Intensity Factors for Wedge-splitting Geometry”, Int. J. of Fract. 81, pp.113-124 (1996)

表 3.4.1-9 にモルタルおよびコンクリートの使用材料、表 3.4.1-10 にセメントペースト作製に用いたセメントの試験成績、表 3.4.1-11 にモルタルおよびコンクリートの調合を示す。セメントペーストには、分析を行うために混合材の混入していないセメントを用いた。

モルタルおよびコンクリートは、レディーミクストコンクリート工場（神奈川県相模原市）の 2 軸強制練りミキサ（公称容量 1.7m³）を用いて製造されたものを用いた。コンクリート製造から打込み開始までの時間は約 15 分である。

モルタルおよびコンクリートの供試体数は、各試験条件につき破壊靱性試験用供試体（100×100×120mm）3 体、圧縮強度試験およびヤング係数測定用供試体（φ100×200mm）3 体、質量変化測定用供試体 1 体（φ100×200mm）とした。また、100℃以上加熱に関しては、加熱前後の供試体の外観観察のために、100×100×400mm 供試体を厚さ約 15mm に切断したものを用意した。供試体は打込み後 2 日で脱型し、材齢 13 週まで標準養生を行なった。

セメントペースト供試体作製は温度 20℃の恒温室で行った。水セメント比は呼び強度 27 のモルタルおよびコンクリートと同様に 57.2%とした。練混ぜには容量 50 リットルのパン型ミキサを使用した。水、セメントを投入し練混ぜを 60 秒間、掻き落としを 30 秒間行い、さらに 90 秒間練り混ぜを行った。セメントペーストは材料分離が生じやすいため、分離を生じないように練り返しを行いながら打ち込みを行うこととした。

セメントペーストの供試体数は、各試験条件につき破壊靱性試験用供試体（100×100×120mm）3 体、圧縮強度およびヤング係数測定用供試体（φ50×100mm）3 体、質量変化測定用供試体（φ50×100mm）1 体、分析用供試体（φ25×20mm）3 体とした。また、加熱前後の供試体の外観観察のために、100×100×400mm 供試体を厚さ約 15mm に切断したものを用意した。供試体は打込み後 2 日で脱型し、材齢 13 週まで標準養生を行なった。

表 3.4.1-9 モルタルおよびコンクリートの使用材料

材料	種類	記号	物性
セメント	普通ポルトランドセメント	C	密度 3.16g/cm ³
細骨材	砕砂（相模原産）	S1	表乾密度 2.63g/cm ³ 、吸水率 1.15%、粗粒率 3.00
	砕砂（八王子産）	S2	表乾密度 2.63g/cm ³ 、吸水率 1.15%、粗粒率 3.00
	陸砂（君津産）	S3	表乾密度 2.56g/cm ³ 、吸水率 1.19%、粗粒率 1.80
粗骨材	碎石（相模原産）	G1	表乾密度 2.66g/cm ³ 、吸水率 1.14%、実積率 60.0%
	碎石（八王子産）	G2	表乾密度 2.66g/cm ³ 、吸水率 1.14%、実積率 60.0%
混和剤	AE 減水剤	Ad1	リグニンスルホン酸塩、オキシカルボン酸塩とポリカルボン酸系化合物
	高性能 AE 減水剤	Ad2	ポリカルボン酸系化合物

表 3.4.1-10 セメントペーストに用いたセメントの試験成績

密度 (g/cm ³)	比表面積 (cm ² /g)	Ig. loss (%)	化学成分 (mass%)								
			SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	CaO	MgO	SO ₃	Na ₂ O	K ₂ O	Cl
3.16	3490	0.61	20.94	5.45	2.83	64.96	1.54	2.05	0.32	0.48	0.025

表 3.4.1-11 モルタルおよびコンクリートの調合

実験	供試体	呼び強度	Gmax (mm)	スランプ (cm)	空気量 (%)	W/C (%)	S/a (%)	W	C	S1	S2	S3	G1	G2	Ad1	Ad2
100℃未満加熱	コンクリート	18	20	18	4.5	69.6	51.2	183	263	368	323	230	447	447	2.63	—
		27	20	18	4.5	57.2	50.1	173	303	359	314	225	455	455	—	2.73
		36	20	18	4.5	48.3	48.7	173	359	339	297	212	456	456	—	3.23
100℃以上加熱	コンクリート	27	20	18	4.5	57.2	49.9	175	306	356	312	222	455	455	—	3.06
	モルタル	27	—	—	—	57.2	—	280	490	1408	—	—	—	—	—	4.41

(b) 試験方法

加熱方法

100℃未満加熱は恒温恒湿槽（図 3.4.1-17）を用いて行なった。試験時の湿度は 60%R. H. 一定とした。



図 3.4.1-17 恒温恒湿槽

図 3.4.1-18 に 100℃以上の加熱履歴例（最高温度保持時間 1 時間）を示す。供試体の加熱はプログラム調整器付きマッフル炉（図 3.4.1-19、炉内寸法 W310×D610×H310mm、左右 2 面加熱）を用いた。炉内での均一加熱を行なうために、供試体は左右のヒーターからの距離が同一になるよう炉内の中央に設置した。また、炉内の昇温は、表面および中心部に K 型熱電対を設置した φ100×200mm 供試体（呼び強度 27）を用いて、あらかじめ昇温試験を実施し、供試体表面と内部中央との温度差が 20℃以下となるよう²⁰に 0.5℃/min とした。炉内温度が目標温度に到達した後は、目標温度を所定の時間保持して加熱を終了、炉内で外気温度と同温度になるまで自然除熱し、試験を行なった。なお、セメントペースト供試体は、1 時間加熱で 700℃以上、12 時間加熱で 500℃以上において加熱により破壊してしまったため、試験を実施できなかった。

²⁰ RILEM TC 129-MIT: “Modulus of elasticity for service and accident conditions”, Materials and Structures, Vol. 37, pp. 139-144 (2004)

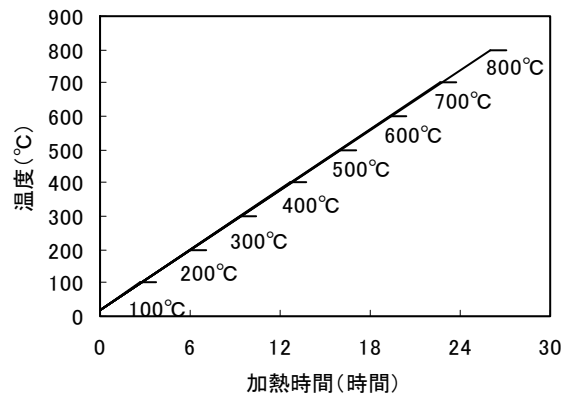


図 3.4.1-18 100°C以上の加熱履歴例（最高温度保持時間 1 時間）



図 3.4.1-19 マッフル炉

破壊靱性試験

コンクリートの破壊特性を評価する方法として、モード I 型（引張型）の破壊が得られる切欠き梁による 3 点曲げ試験方法が示されているが^{21, 22}、この試験では、例えば 100×100×400mm のように寸法の大きな供試体が必要であり、このような供試体を用いて破壊特性の評価を行う場合は、供試体の自重の影響が無視できない。本研究のように高温加熱の影響を受けたコンクリートは、加熱前と比較して加熱後ではコンクリートが脆性的となり、自重が破壊特性に及ぼす影響が大きくなることが予想された。そのため、小型の供試体を用いる方が実験値の誤差が小さいと考えられた。また、炉内でコンクリートを均一に加熱するという観点からは、試験に用いる供試体寸法を可能な限り小さくする方がよい。そこ

²¹ RILEM AAC13.1: “Determination of the specific fracture energy and strain softening of AAC”、RILEM Recommendations for the Testing and Use of Constructions Materials、pp. 156-158 (1994)

²² “切欠きはりを用いたコンクリートの破壊エネルギー試験方法”、JCI-S-001-2003

で、本研究では、切欠き梁による3点曲げ試験と同様にモードI型（引張型）の破壊が小型供試体（100×100×120mm）（図3.4.1-20）で得られるくさび割裂試験（図3.4.1-21）を採用した。なお、くさび割裂試験も、切欠き梁3点曲げ試験同様に引張軟化特性を評価できることが確認されている²³。

くさび割裂試験用供試体は、加熱前に供試体中央にダイヤモンドカッター（刃厚1mm）を用いてリガメント高さが50mmとなるように切欠きを入れ、くさびの挿入により引張破壊を生じさせることとした。試験に用いた冶具の寸法などは、RILEMで提案されている方法²¹に準じた。高温加熱の影響を受けたコンクリートは、加熱を受ける前と比較して脆性的となるため、引張力に対する抵抗性が著しく弱くなることが予想された。したがって、安定した荷重-開口変位曲線を計測するためには、最大荷重以降の軟化域を精度良く検出する必要があった。そのため、試験装置として加力部、油圧装置およびフィードバック機能を有する制御装置からなるクローズドループシステム型（閉回路機構）のサーボ・コントロール式油圧試験機（MTS社製、図3.4.1-22）を用いた。また、供試体の安定破壊が得られるように、切欠き端部の開口変位の変位速度を0.02mm/minに設定し、開口変位の計測には変位制御用の高感度クリップゲージを使用した。

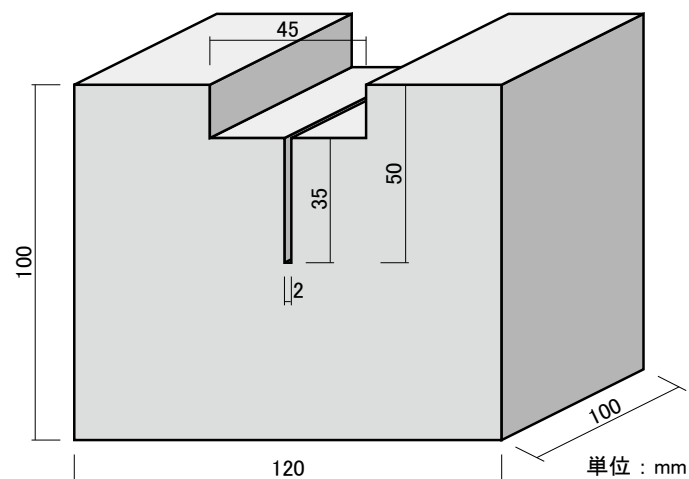


図 3.4.1-20 くさび割裂供試体概要

²³ 神山力、橘高義典、田村雅紀：“各種コンクリートの破壊特性の試験方法に関する研究”、コンクリート工学年次論文集、Vol123、No. 3、pp. 91-96（2001）

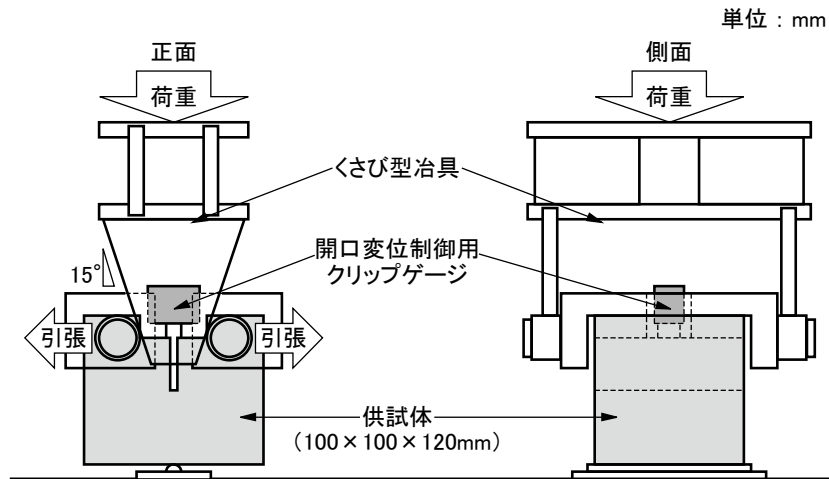


図 3. 4. 1-21 破壊靱性試験（くさび割裂試験）概要



図 3. 4. 1-22 サーボコントロール式油圧試験機

細孔径分布測定

モルタルおよびセメントペーストの細孔径分布の変化を水銀圧入方式のポロシメータ (Micromeritics 社製、図 3. 4. 1-23) により行った。各条件で加熱を終えた分析用に作製した供試体を 2.5~5mm の大きさに粉碎し、アセトン浸漬により水和を停止させ、塩化リチウムを用いて湿度 11%R. H. に調湿を行った窒素ガス環境のデシケータ内で乾燥させ、測定を行った。測定範囲は 5.5nm~500 μ m である。なお、本年度はモルタルの細孔径についてのみの報告である。



図 3. 4. 1-23 ポロシメータ

熱重量分析 (TG-DTA)

セメントペーストの水酸化カルシウムの変化を熱重量分析装置 (BrukerAXS 社製、図 3. 4. 1-24) により行った。各条件で加熱を終えた分析用に作製した供試体を 2.5~5mm の大きさに粉砕し、アセトン浸漬により水和を停止させ、塩化リチウムを用いて湿度 11% R. H. に調湿を行った窒素ガス環境のデシケータ内で乾燥させた後、高速振動試料粉砕機を用いて微粉砕した。その試料を測定に用いた。

測定は試料重量 $20 \pm 2\text{mg}$ について、室温から 1000°C まで昇温速度 $10^\circ\text{C}/\text{min}$ 、 N_2 フロー ($150\text{ml}/\text{min}$) 環境下で行った。本研究では、 $405 \sim 515^\circ\text{C}$ における重量変化を水酸化カルシウムの脱水によるものと仮定し、水酸化カルシウム量を算定した。



図 3. 4. 1-24 熱重量分析装置

粉末 X 線回折 (XRD)

セメントペーストの鉱物組成の変化を粉末 X 線回折装置 (Bruker AXS 社製、図 3. 4. 1-25) により行った。各条件で加熱を終えた分析用に作製した供試体を 2.5~5mm の大きさに粉碎し、アセトン浸漬により水和を停止させ、塩化リチウムを用いて湿度 11% R. H. に調湿を行った窒素ガス環境のデシケータ内で乾燥させた後、高速振動試料粉碎機を用いて微粉碎した。その試料を測定に用いた。

測定は管電圧 30kV、管電流 10mA、走査範囲 $2\theta = 5 \sim 65^\circ$ 、ステップ幅 0.03° で行った。



図 3. 4. 1-25 粉末 X 線回折装置

4) 実験結果および考察

(a) 基本的性状

表 3. 4. 1-12 にコンクリートのフレッシュ性状および材齢 4 週における標準養生供試体の強度試験結果を示す。いずれもスランプは 18 ± 2.5 cm、空気量は $4.5 \pm 1.5\%$ となっている。

表 3. 4. 1-12 コンクリートのフレッシュ性状および強度試験結果

実験名	呼び強度	スランプ (cm)	空気量 (%)	圧縮強度 (N/mm ²)	ヤング係数 (kN/mm ²)
100°C未満加熱	18	17.0	5.8	22.1	22.0
	27	20.0	5.8	31.4	25.2
	36	19.0	4.5	39.0	27.3
100°C以上加熱	27	18.0	5.5	34.3	37.7

(b) 加熱後の供試体外観

図 3. 4. 1-26 に 100°C 以上 1 時間加熱後の供試体を示す。300°C あたりから変色していき、500°C から 600°C で灰白色に変化している。コンクリートでは、高温加熱の影響により、骨材も変色しているのがわかる。また、セメントペーストでは、高温になるにしたがい加熱による収縮が大きくなり、600°C から亀甲状のひび割れが確認できる。

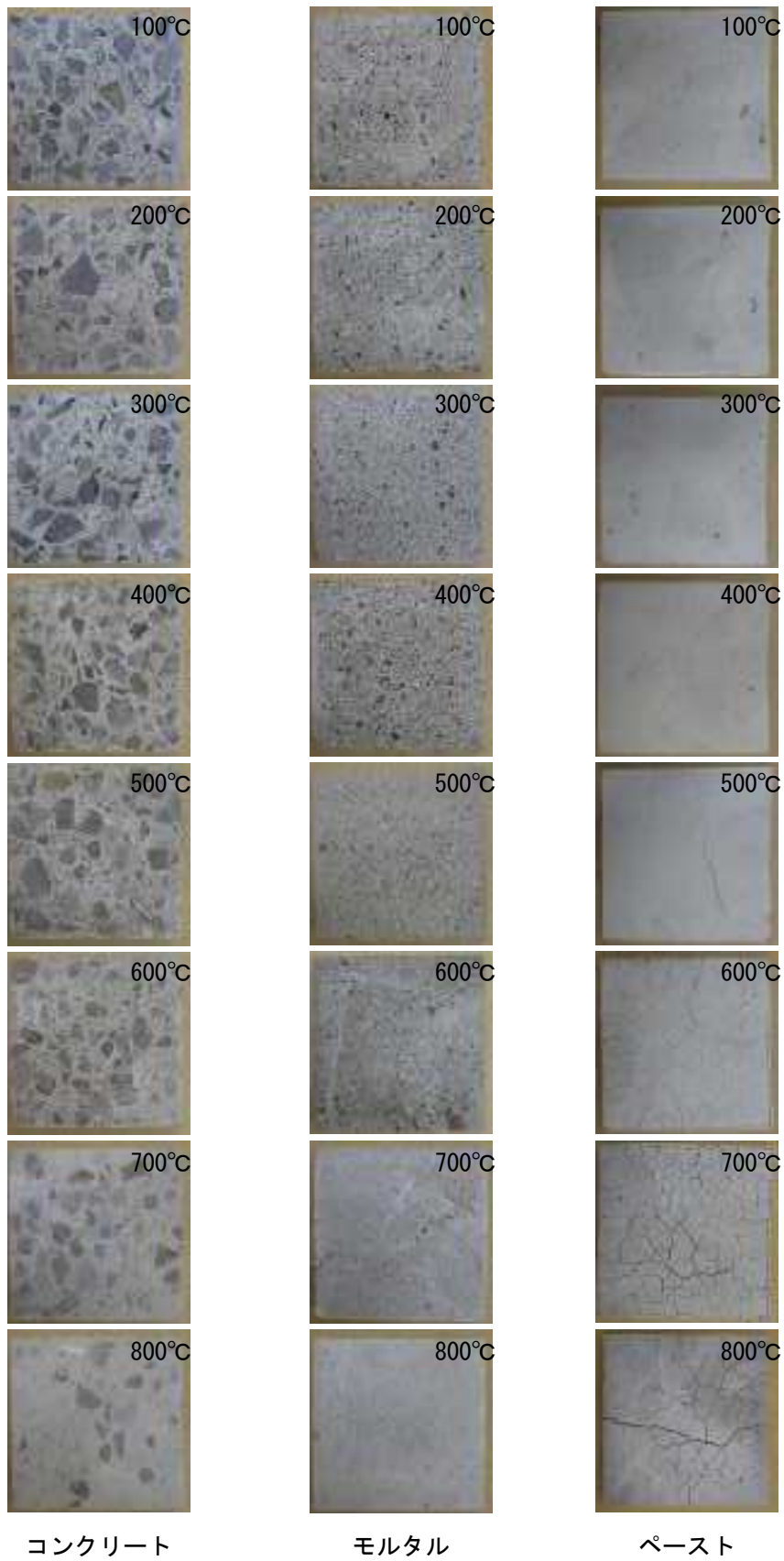


図 3. 4. 1-26 加熱後の供試体 (1 時間加熱)

(c) 力学特性

圧縮強度

図 3. 4. 1-27 に 100℃未満加熱の圧縮強度を示す。水セメント比が小さくなると圧縮強度は大きくなっている。シールあり供試体は、 $\sigma 18$ で加熱温度が上昇すると強度が増加している。これは、加熱により水和が促進されているものと思われる。なお、 $\sigma 27$ 、 $\sigma 36$ の強度はほとんど変化していない。シールなし供試体は、調合に関係なく加熱温度の上昇とともに強度が低下している。これは、乾燥により水分が逸散し、水和が阻害されていると思われる。加熱期間による影響は、シールの有無に関係なく見られない。

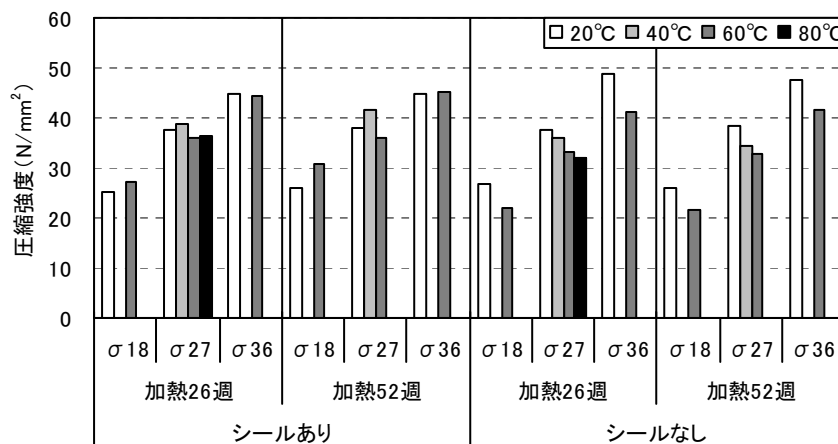


図 3. 4. 1-27 圧縮強度 (100℃未満加熱)

図 3. 4. 1-28 に 100℃以上加熱の圧縮強度を示す。コンクリート供試体は加熱 1 時間で 300℃、加熱 12、24 時間で 200℃、加熱 72、168 時間で 100℃における圧縮強度が最大となっている。そして、圧縮強度が最大となった後は、加熱温度の上昇とともに直線的に低下している。モルタル供試体は加熱 1 時間で 300℃、加熱 12 時間で 200℃における圧縮強度が最大となり、コンクリートと同様の傾向を示している。また、セメントペースト供試体は 20℃で圧縮強度が最も大きく、100℃で急激に低下した後、再び強度が加熱 300℃まで増加し、急激に低下している。に質量変化を見ると (図 3. 4. 1-29)、コンクリート供試体では加熱 1 時間で 300℃、加熱 12、24 時間で 200℃、加熱 72、168 時間で 100℃における質量変化が大きい。また、モルタル供試体では加熱 1 時間で 300℃、加熱 12 時間で 200℃までの質量変化が大きいことがわかる。これらから、供試体の乾燥の影響により強度が異なっていると思われる。なお、セメントペースト供試体に関しては、加熱による急激な収縮により、微細ひび割れが発生し強度が低下するものの、加熱による水和反応により強度が上昇したものと推測される。

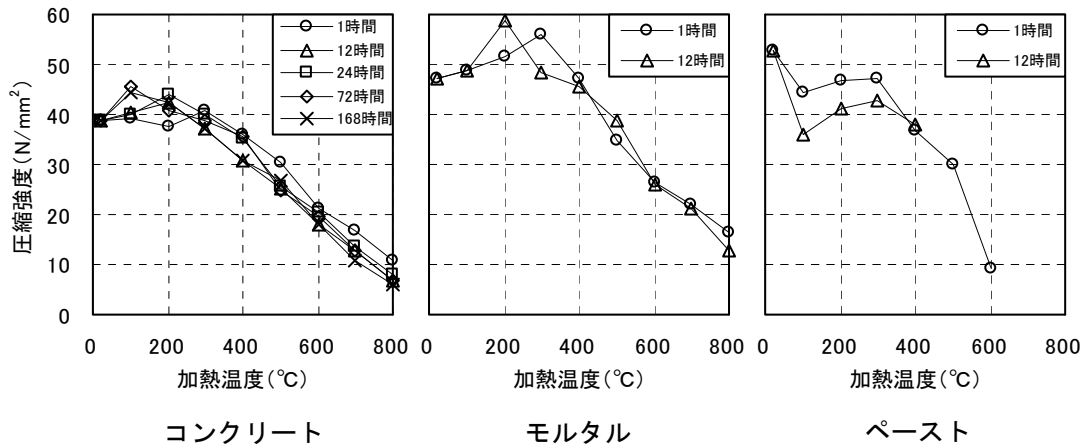


図 3.4.1-28 圧縮強度 (100°C以上加熱)

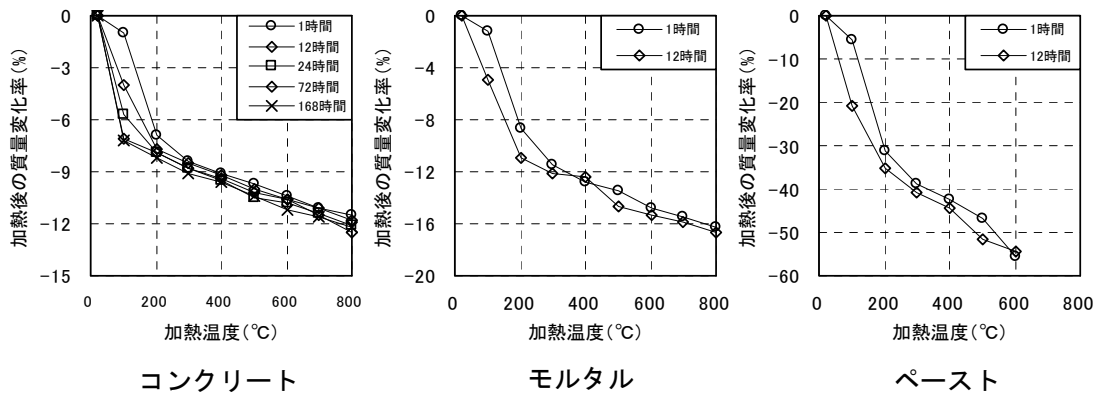


図 3.4.1-29 質量変化 (100°C以上加熱)

ヤング係数

図 3. 4. 1-30 に 100℃未満加熱のヤング係数を示す。水セメント比が小さくなるとヤング係数は大きくなる。シールあり供試体は、加熱温度が高くなるヤング係数が小さくなる傾向にある。また、シールなし供試体は、加熱温度がた高くなってもヤング係数はほとんど変化していない。なお、加熱期間による影響は、シールの有無に関係なく見られない。

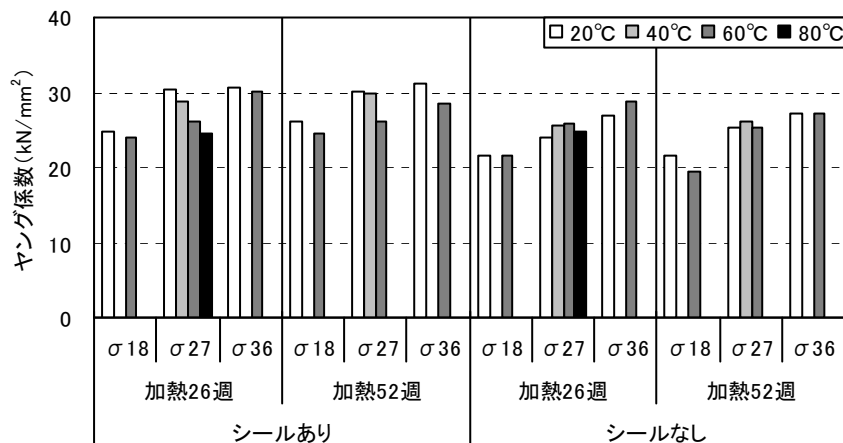


図 3. 4. 1-30 ヤング係数 (100℃未満加熱)

図 3. 4. 1-31 に 100℃以上加熱のヤング係数を示す。ヤング係数は、温度の影響を大きく受けるとされているが、本研究でも加熱温度の上昇とともに低下している。コンクリート供試体は加熱 300℃程度まで、モルタル供試体は 200℃程度までばらついているが、その後は 600℃まで急激にヤング係数が低下している。セメントペースト供試体は 100℃で急激に低下した後、若干緩やかな勾配でほぼ直線的に低下している。

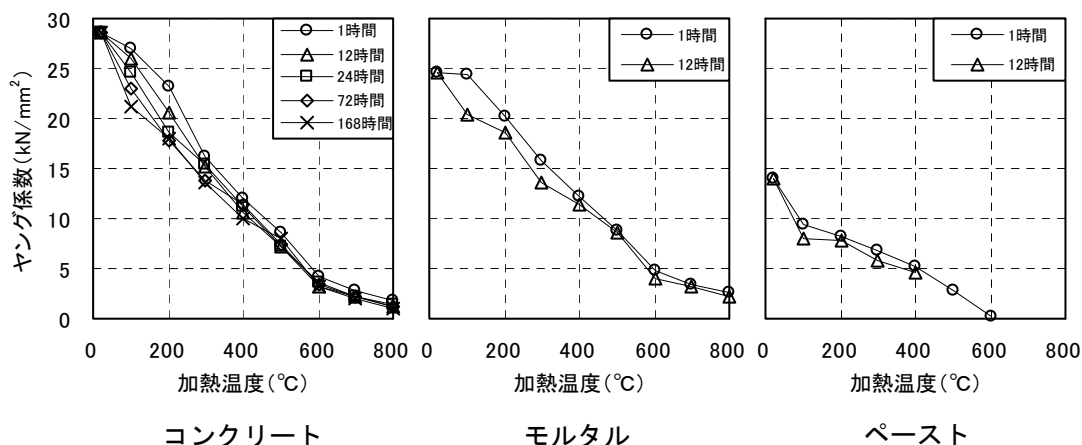


図 3. 4. 1-31 ヤング係数 (100℃以上加熱)

(d) 破壊靱性試験結果（荷重－開口変位曲線）

図 3.4.1-32 に 100℃未満加熱の荷重－開口変位曲線を示す。水セメント比が小さくなる
と最大荷重が大きくなる傾向にある。なお、加熱 52 週では加熱温度およびシールの有無に
よる大きな差は見られない。

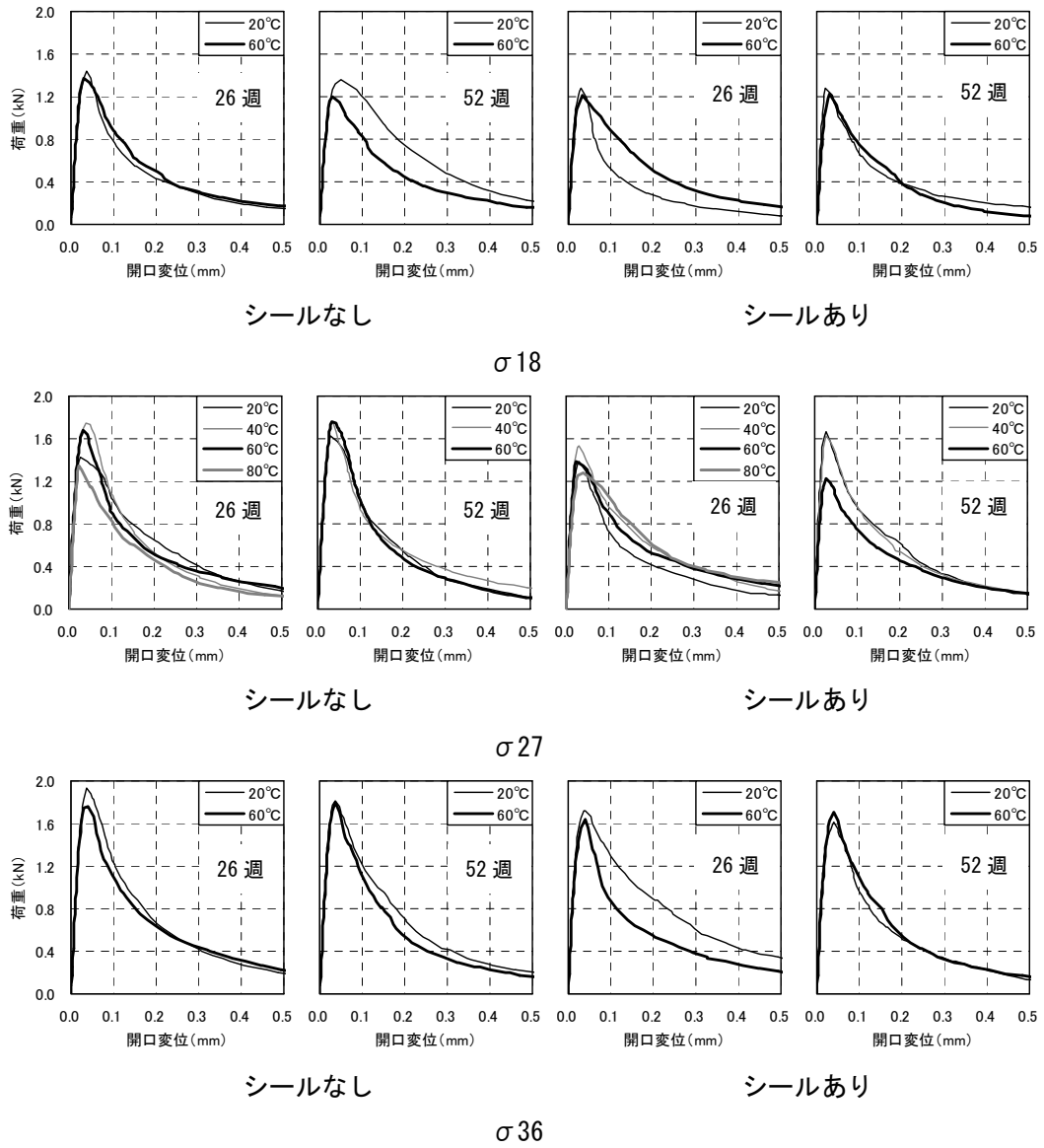
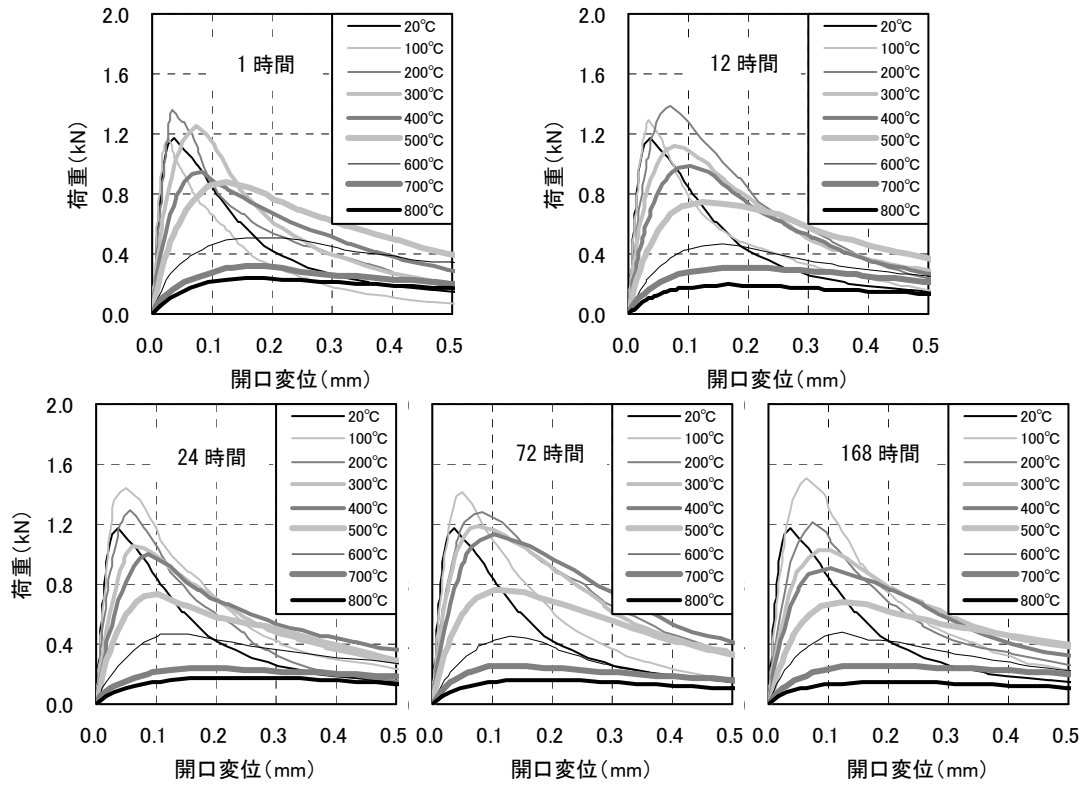
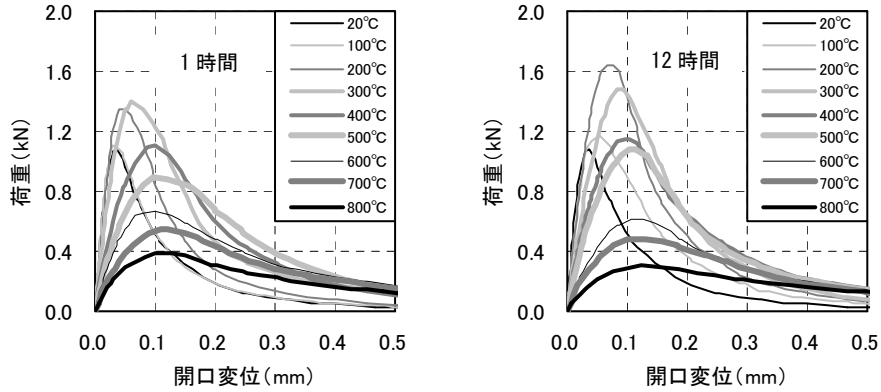


図 3.4.1-32 荷重－開口変位曲線（100℃未満加熱）

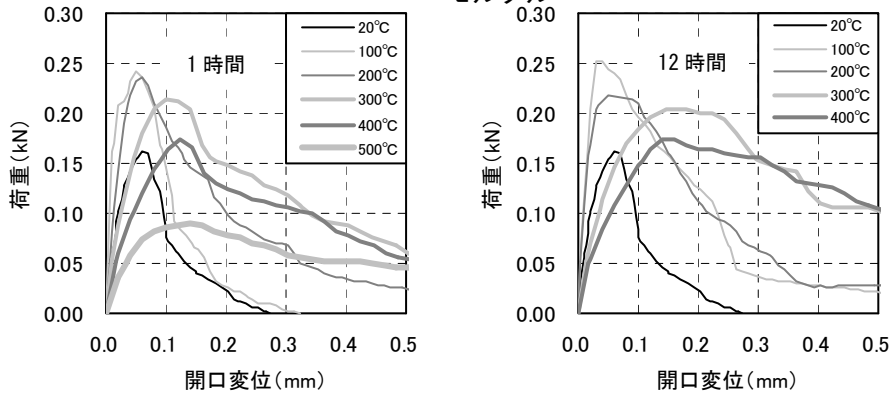
図 3.4.1-33 に 100℃以上加熱の荷重－開口変位曲線を示す。コンクリート供試体は、加熱 1、12 時間で 200℃、加熱 24 時間以上で 100 における最大荷重が最も大きい。最大荷重時のグラフ形状は、加熱温度が低いと先端が尖り、高くなると丸みを帯びるように変化している。最大荷重以降の荷重低下は、加熱温度が低いと急勾配であるが、加熱温度が高くなると緩やかになっている。モルタル供試体は、加熱 1 時間で 300℃、加熱 12 時間で 200℃における最大荷重が最も大きい。最大荷重時のグラフ形状は、コンクリート供試体と同様に、加熱温度が低いと先端が尖り、高くなると丸みを帯びるように変化している。最大荷重以降の荷重低下は、加熱温度が低いと急勾配であるが、加熱温度が高くなると緩やかになっている。



コンクリート



モルタル



ペースト

図 3.4.1-33 荷重—開口変位曲線 (100°C以上加熱)

(e) 引張軟化曲線

図 3. 4. 1-34 に 100°C未満加熱、図 3. 4. 1-35 に 100°C以上加熱の荷重－開口変位曲線を基に、多直線近似解析法によって求めた引張軟化曲線を示す。調合、材齢、養生、加熱温度、加熱時間に関係なく、開口変位の増加にともない結合応力は低下している。しかし、その低下は条件により異なっている。

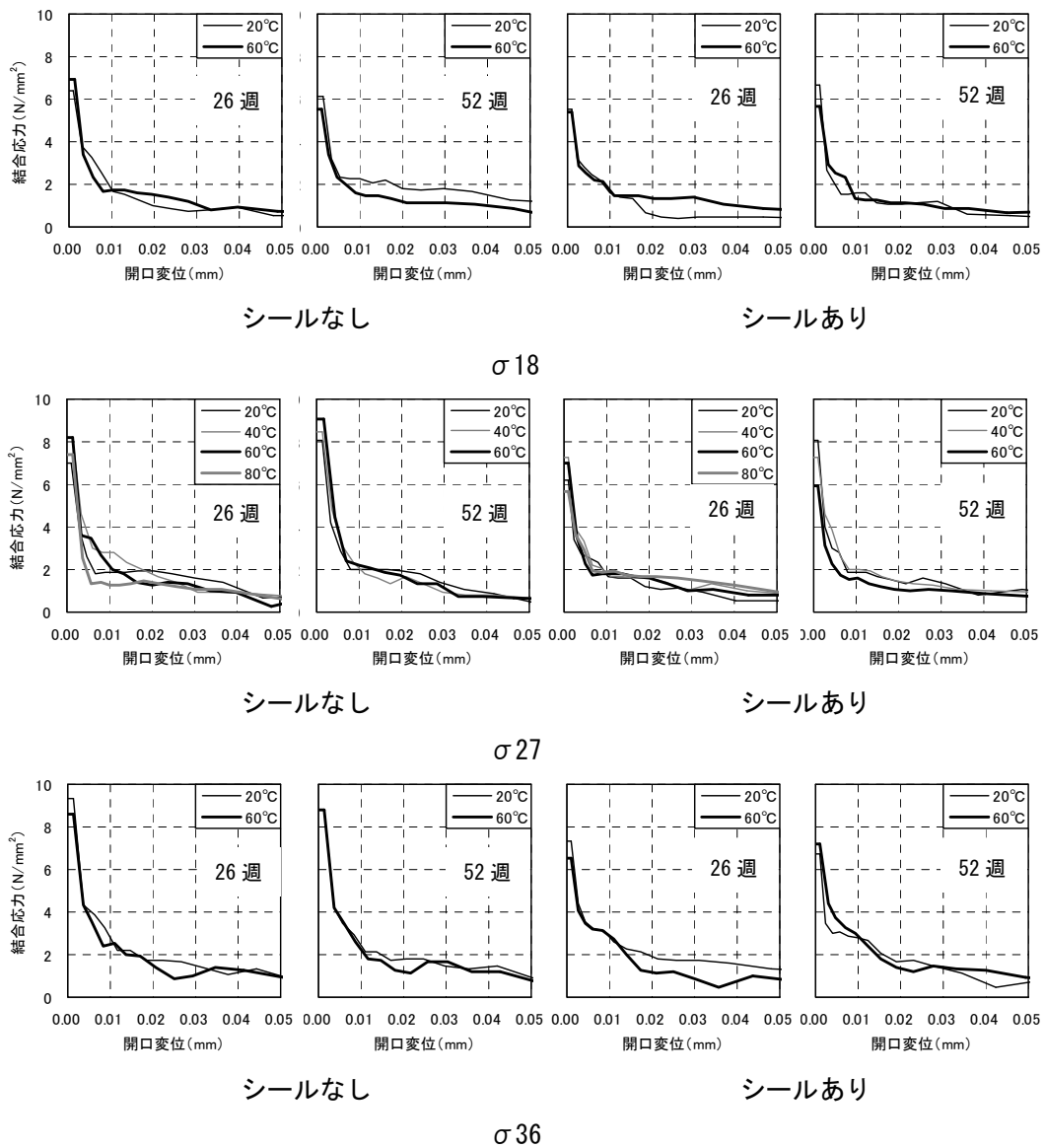
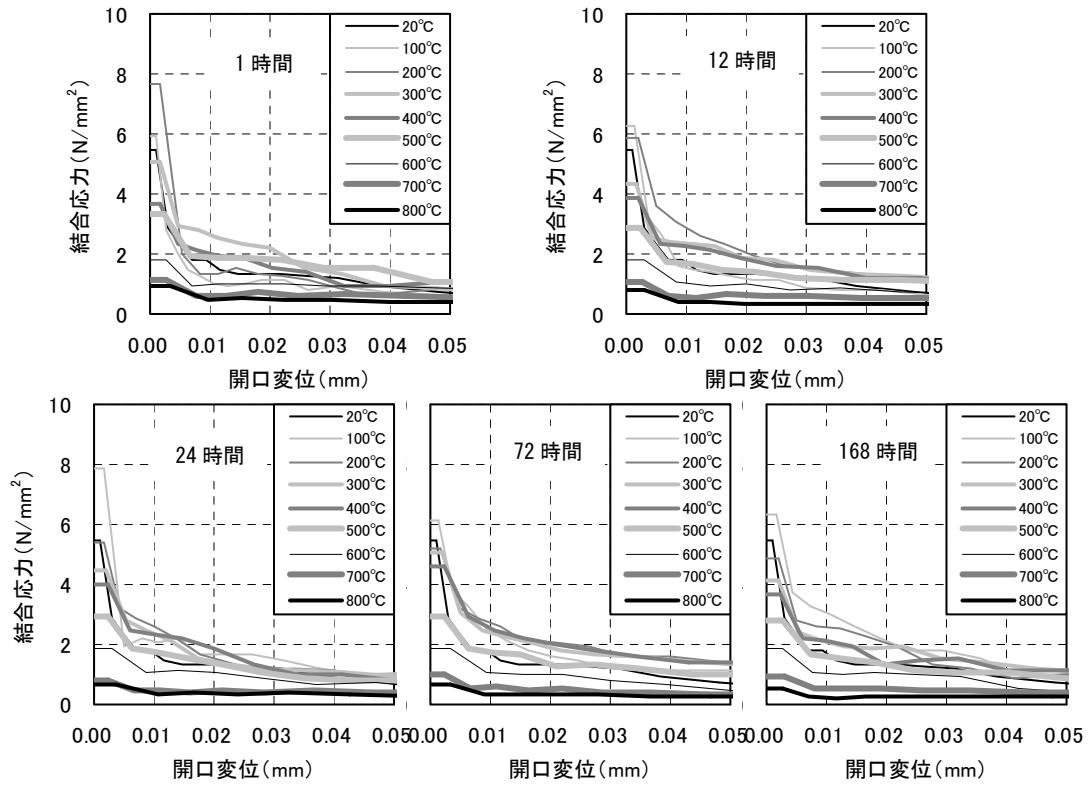
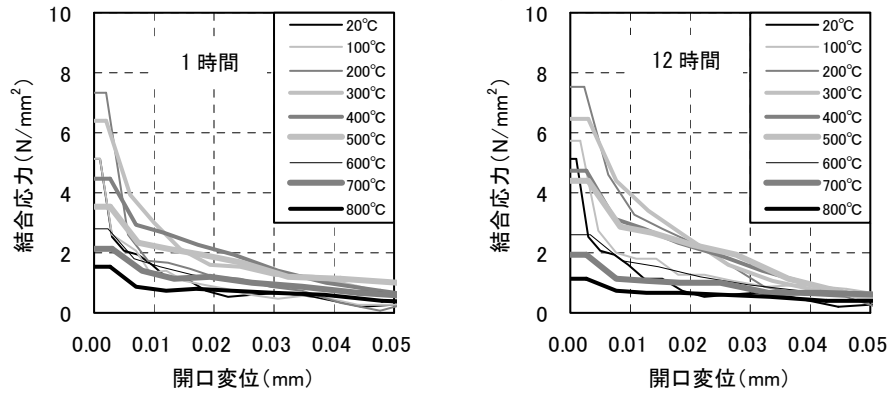


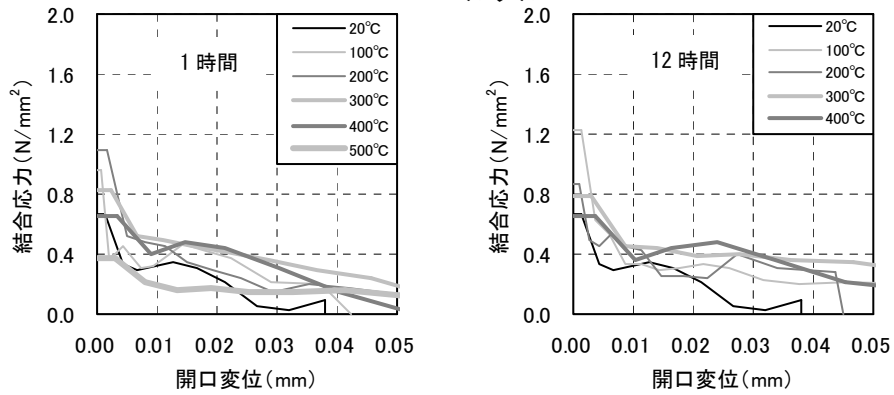
図 3. 4. 1-34 引張軟化曲線 (100°C未満加熱)



コンクリート



モルタル



ペースト

図 3. 4. 1-35 引張軟化曲線 (100°C以上加熱)

(f) 破壊特性

初期結合応力

図 3. 4. 1-3. 4. 1-36 に 100℃未満加熱の初期結合応力を示す。シールあり供試体は強度の違いによる影響がほとんど見られず、加熱に関しても強度によりばらつきがあり、明確な傾向は得られなかった。また、材齢が進んでも初期結合応力はほとんど変化していない。シールなし供試体は強度が高くなると初期結合応力も高くなっている。加熱温度に関しては、26 週では σ_{18} 、 σ_{27} で 60℃まで初期結合応力が上がる傾向にあるが、52 週になると加熱温度の上昇にともない若干ではあるが初期結合応力が低下している。

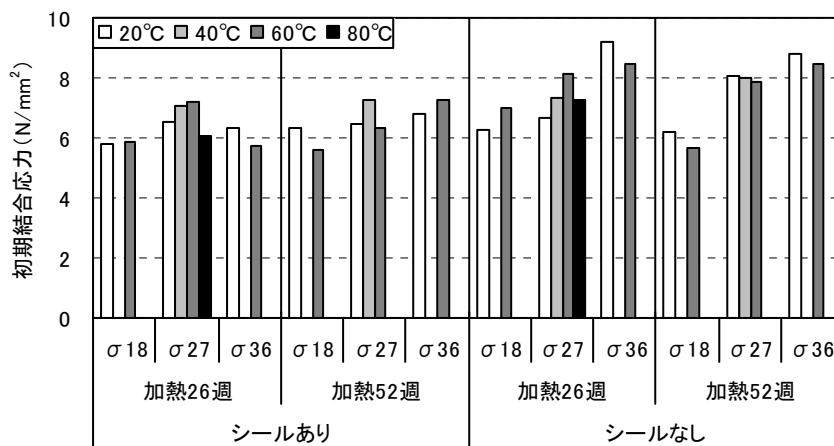


図 3. 4. 1-3. 4. 1-36 初期結合応力 (100℃未満加熱)

図 3. 4. 1-37 に 100℃以上加熱の初期結合応力を示す。コンクリート供試体は、加熱 1、12 時間の初期結合応力は 200℃まで、加熱 24 時間以上では 100℃で最大となり、その後は、加熱時間に関係なく温度上昇とともにほぼ直線的に低下している。モルタル供試体は、500℃でばらつきがあるものの、200℃まで上昇し、その後はコンクリート供試体と同様にほぼ直線的に低下している。また、セメントペースト供試体は、加熱により若干増加するものの、300℃以降で低下している。

コンクリートは加熱されると、骨材は膨張し、セメント水和物は収縮するため、加熱温度上昇とともに骨材とセメント水和物の界面には微細ひび割れが発生する。その微細ひび割れの進展、増加により初期結合応力は低下する。しかし、その一方では、加熱による未水和セメントの水和反応促進、自由水や毛管水などの逸散にともなう乾燥の影響により強度が増加することが考えられる。本研究では、モルタル供試体の初期結合応力が 200℃まで上昇していることから、骨材の存在やその膨張とセメント水和物の収縮の関係により、加熱 200℃程度まででは初期結合応力にばらつきが生じると考えられる。また、セメントペースト供試体の初期結合応力が著しく小さいのは、収縮により微細ひび割れが発生しているためであると考えられる。

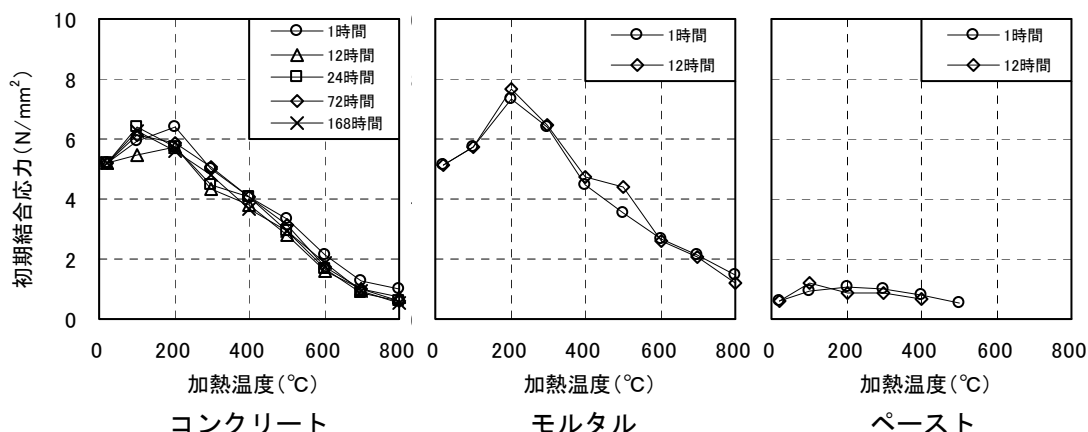


図 3.4.1-37 初期結合応力 (100°C以上加熱)

破壊エネルギー

図 3.4.1-38 に 100°C未満加熱の破壊エネルギーを示す。シールあり供試体は、加熱 26 週では強度が高くなるほど、また、加熱温度が高くなるほど破壊エネルギーも大きくなるが、加熱 52 週では加熱温度に関係なくほぼ同等か、60°Cで若干低下する傾向にある。シールなし供試体は加熱温度が高くなるともない、また、加熱期間が長くなると低下する傾向にある。

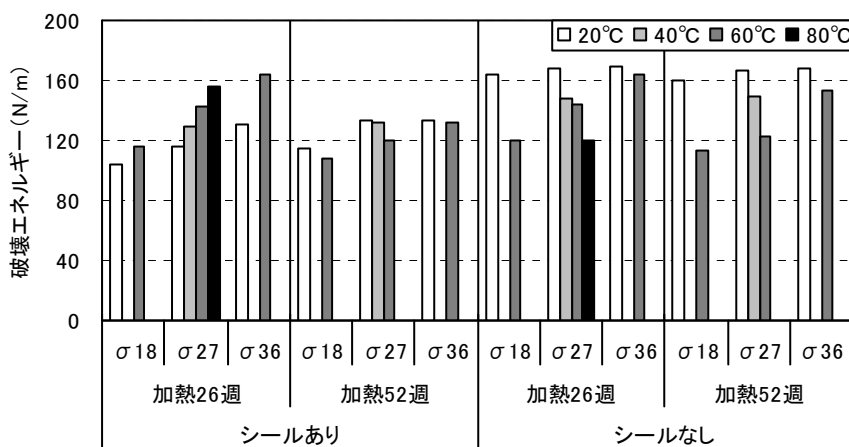


図 3.4.1-38 破壊エネルギー (100°C未満加熱)

図 3.4.1-39 に 100°C以上加熱の破壊エネルギーを示す。コンクリート供試体は加熱 1 時間では 500°Cまで、12 時間以上では 400°Cまで破壊エネルギーは増加し、その後は加熱温度の上昇とともに低下している。また、モルタル供試体も 400°C程度までは破壊エネルギーは上昇している。なお、セメントペースト供試体は、加熱温度の上昇とともに若干ではあるが破壊エネルギーが増加している。

破壊エネルギーは引張軟化曲線で囲まれた面積であるが、開口変位の増加にともなう結合応力の低下が緩やかな場合に大きくなる。それには、加熱による微細ひび割れの発生が影響している。コンクリートのひび割れが進展する際には、ひび割れ先端に破壊進行領域が形成される。その部分に欠陥が存在しなければ、ひび割れは骨材などの影響を受けるものの、ほぼ直線的に進展する。しかし、破壊進行領域に微細ひび割れなどの欠陥が存在すると、ひび割れは欠陥を介して進展するため蛇行し、破壊に要するエネルギーが大きくなる。そのため、加熱 400℃程度までは破壊エネルギーが大きくなったと考えられる。なお、破壊エネルギーは全体的にコンクリート供試体が最も大きく、次いでモルタル供試体、セメントペースト供試体となっている。これは、コンクリートは粗骨材によるブリッジング効果により結合応力の低下が緩やかになり破壊エネルギーが大きくなっていると考えられる。また、セメントペースト供試体は、粗骨材および細骨材がなく、脆性的な挙動となり、破壊エネルギーが小さくなっていると考えられる。

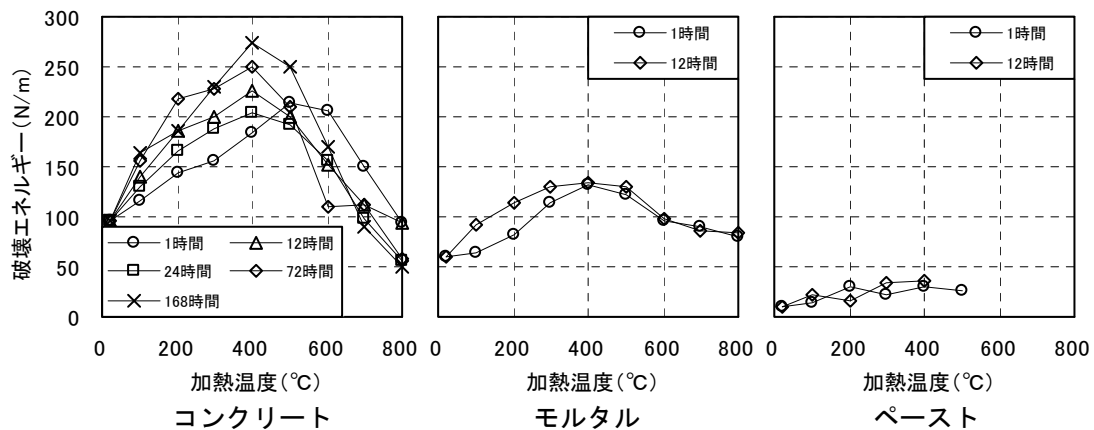


図 3.4.1-39 破壊エネルギー (100℃以上加熱)

(g) 細孔径分布

図 3.4.1-40 にモルタル供試体の細孔量を示す。累積細孔量は、加熱すると増加し、加熱温度が高くなるとその増加は大きくなる。また、加熱時間が長くなるとともに、細孔量は若干ではあるが増加する傾向にある。

細孔径は、加熱なし (20℃) は 40nm に細孔のピークがあるが、加熱 100、200℃で 110nm にシフトし、300℃以降では分布が細孔径の大きい方に広がっている。そして、加熱 800℃では 150nm 付近の細孔が急激に増加し、その細孔量が時間とともに増加している。

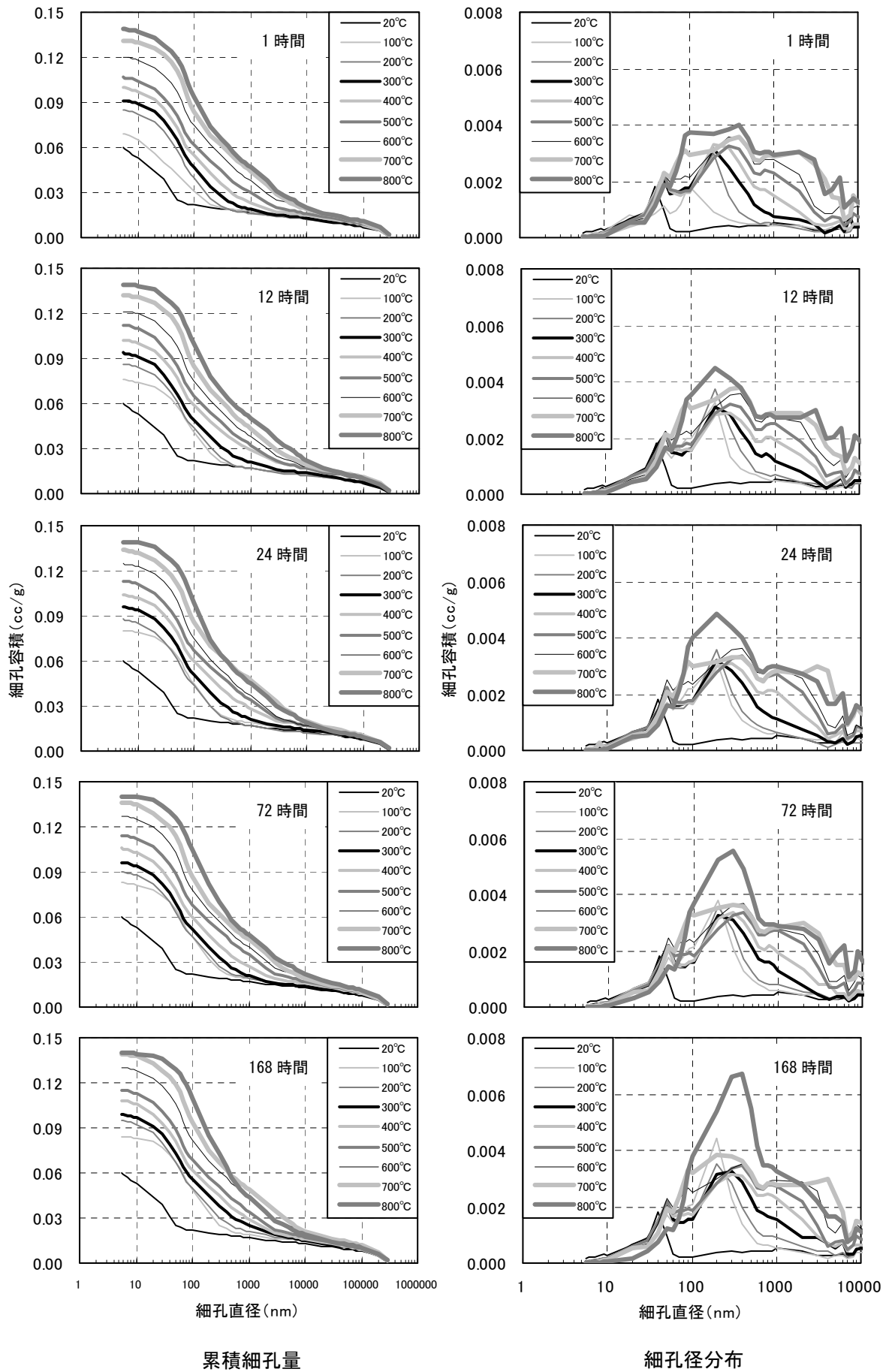


図 3.4.1-40 細孔量 (モルタル)

(h) 熱分析結果

図 3. 4. 1-41 にペースト供試体を用いた熱分析による温度と重量変化(TG)の関係を示す。セメント水和物の温度を上げていくと、100℃付近で自由水の脱水、100～300℃付近でモノサルフェイトなどの脱水、400～500℃で水酸化カルシウムの脱水、650～900℃で炭酸カルシウムの脱炭酸が起こる。加熱温度が低いと、自由水や石膏、モノサルフェイトなどの脱水により 300℃程度までの重量変化が大きくなっているのがわかる。本研究では 405～415℃における重量変化を水酸化カルシウムの脱水によるものとして扱った。

図 3. 4. 1-42 に 405～415℃の重量変化から算出した水酸カルシウム量を示す。加熱温度に関係なく、300℃までは水酸化カルシウム量が増加しているのがわかる。これは、加熱により未水和セメントの水和反応によるものと考えられる。そして、400℃で水酸化カルシウム量は若干減少し、それ以降では急激に少なくなっている。これは、加熱により水酸化カルシウムが脱水したためである。なお、500℃で加熱時間により水酸化カルシウム量が異なっているが、加熱時間が長くなることにより、脱水量が多くなったと考えられる。

加熱により 300～400℃までは水和により水酸化カルシウム量は増加するが、その後は、脱水により水酸化カルシウム量は減少する。

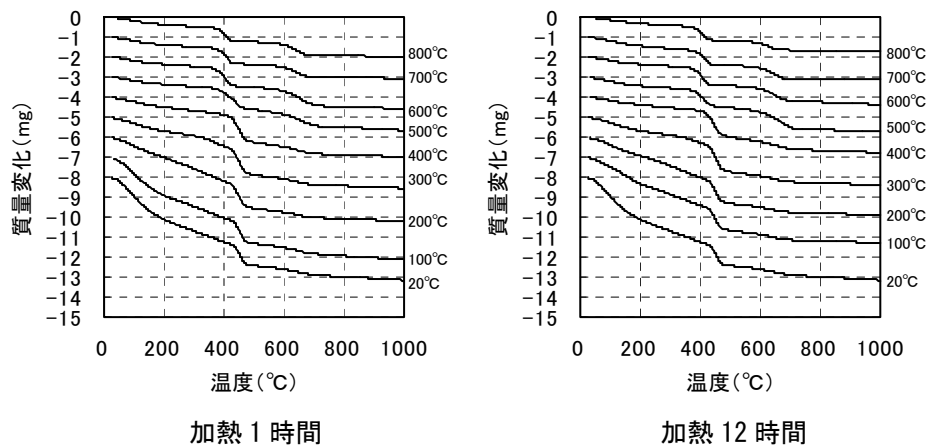


図 3. 4. 1-41 熱分析による温度と重量変化の関係 (ペースト)

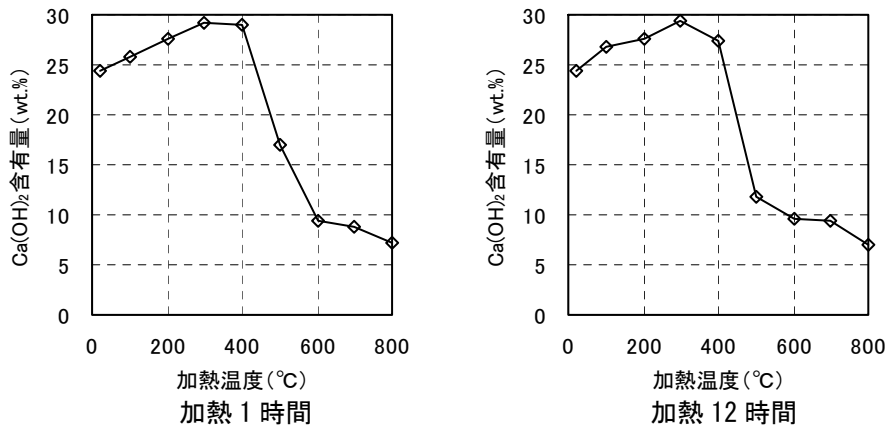


図 3.4.1-42 熱分析による水酸化カルシウム算出結果 (ペースト)

(i) 粉末 X 線回折結果

図 3.4.1-43 に X 線回折チャートを示す。また、表 3.4.1-13 に鉱物組成の変化を示す。加熱によりエトリンガイト、100°C でクゼライト、200°C で石膏、そして、500°C でカトイト、600°C でカルサイトがなくなっている。そして、加熱により 600°C でアルミネート相、アラゴナイトが生成されているのがわかる。

加熱により、セメントペースト中の鉱物組成は変化し、その変化は 500~600°C で大きい。

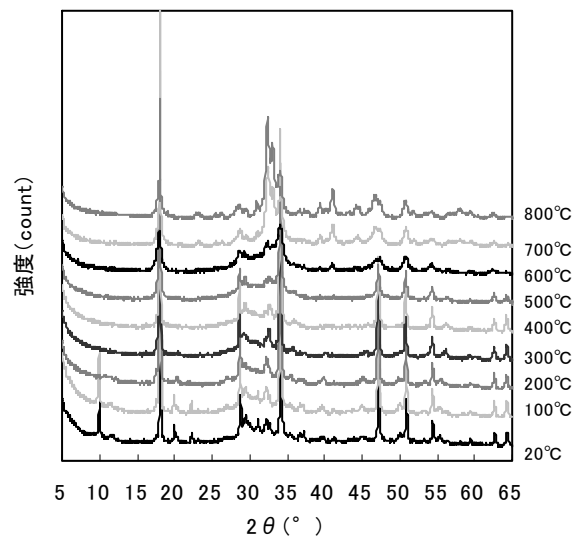


図 3.4.1-43 X 線回折チャート (ペースト)

表 3. 4. 1-13 鉱物組成の変化

結晶相	加熱温度 (°C)								
	20	100	200	300	400	500	600	700	800
C3A cubic : アルミネート相							○	○	○
Calcite : カルサイト	○	○	○	○	○	○	○		
Aragonite : アラゴナイト							○	○	○
Portlandite : ボルトランダイト	○	○	○	○	○	○	○	○	○
Anhydrite : 硬石膏								○	○
Kuzelite : クゼライト	○	○							
Gypsum : 石膏	○	○	○						
Katoite : カトイト	○	○	○	○	○	○			
C4AF : フェライト相	○	○	○	○	○	○	○	○	○
Ettringite : エトリンガイト	○								
Magnetite : 磁鉄鉱	○	○	○	○	○	○			
C3S mono : エーライト	○	○	○	○	○	○	○	○	○
C2S beta : ビーライト	○	○	○	○	○	○	○	○	○

5) まとめ

本研究で得られた知見を以下に示す。

100°C未満加熱

- (1) ひび割れ発生抵抗性を示す初期結合応力は、シールあり供試体は加熱 52 週においては、強度、加熱温度、加熱期間による差は見られない。シールなし供試体では加熱 26 週では加熱温度の上昇とともに初期結合応力も増加するが、加熱 52 週では加熱温度とともに若干低下する傾向にある。
- (2) ひび割れ進展抵抗性を示す破壊エネルギーは、シールあり供試体の加熱 26 週で加熱温度の上昇とともに増加するが、52 週ではほぼ同等か若干低下する傾向にある。また、シールなし供試体では加熱温度の上昇とともに、また、加熱期間が長くなるにともない低下する傾向にある。

100°C以上加熱

- (3) 初期結合応力は、コンクリート供試体は、加熱 1、12 時間は 200°C まで、加熱 24 時間以上は 100°C で最大となる。また、モルタル供試体およびセメントペースト供試体もは 200°C まで上昇する。
- (4) 破壊エネルギーは、コンクリート供試体は加熱 1 時間で 500°C、12 時間以上で 400°C まで増加する。また、モルタル供試体およびセメントペースト供試体も 400°C 程度までは破壊エネルギーは上昇する。
- (5) モルタルの細孔量は、加熱温度の上昇とともに増加する。また、加熱時間が長くなると若干増加する。細孔径のピークは、加熱温度が高くなると粗大な方にシフトし、加熱 800°C では加熱時間とともにピーク径の細孔量が増加する。
- (6) 熱分析では、加熱 300~400°C までは水酸化カルシウム量が増加し、その後は、急激に低下する。

(7) 鉱物組成は、高温加熱により変化し、その変化は 500～600℃で大きい。

6) 今後の課題

次年度以降の課題を以下に示す。

- (1) 100℃未満加熱では、より長期での加熱について検討を行う必要がある。
- (2) 100℃以上加熱では、コンクリートに関して昨年度と異なる傾向となったため、より多くのデータを取得し、検討する必要がある。また、高温加熱を受けたセメント硬化体は、組成の変化が大きいため、ひび割れ特性と組成変化の関係性についても検討を行う。

(3) 複合劣化を受けた鉄筋コンクリートのひび割れ発生に関する検討

1) 研究の背景および目的

コンクリート構造物の複合劣化の中でも、鉄筋腐食によるコンクリートのひび割れは、さらなる鉄筋腐食を促進するため重要である。特に原子力施設で問題となるのは、海水と接する環境下にある取水構造物、潮風などの影響を受ける構造物である。また今回の震災のように、鉄筋コンクリート海水に曝された場合にどのような劣化現象が生じるかは明らかではない。

コンクリート内部の鉄筋腐食やひび割れを非破壊的に把握する手法として、X線透過技術を用いる方法がある。この検査方法は物体のX線透過量の違いを利用し部材を破壊せずに目視で構造物の鉄筋の配置・かぶり厚さ・配管などの内部構造およびその異常箇所を確認することが出来るため、様々な検査や評価に用いることができる。また、鉄筋腐食の評価法の代表的なものとして、鉄筋表面の不動態被膜と錆の部分での電位差により内部鉄筋の腐食状態を推定する自然電位法がある。本手法は、RC構造物内部の鉄筋が腐食し、腐食によりかぶりコンクリートにひび割れが発生するまでの、コンクリート構造物が腐食劣化する初期の段階での診断にのみ有効であるため、鉄筋の腐食の進行度合いとそれに伴うかぶりコンクリートへの影響を経時的に観察することには適しておらず、また鉄筋の詳細な腐食状態を立体的に把握することが難しいと考えられる²⁴。X線画像によって、鉄筋の腐食度合いを把握し、それによる構造物のかぶり面に起こるひび割れの発生時期およびその幅を経時的に観察することによって、何らかの関係を把握することが出来れば、構造物にひび割れが起きる時期やひび割れ幅等を予測することが可能となり、早期の補修・改善が可能になる。

本研究では、コンクリート内部鉄筋の腐食の状態と表層のひび割れとの関係を推定する手法の検討を行う。特に中性化を想定した均一な鉄筋腐食、塩害を想定した孔食などの鉄筋の立体的な腐食性状とコンクリート表面のひび割れとの関係を検討する。昨年度は、X線透過装置を用い、コンクリート内部に配置された鉄筋の腐食に対する経時変化を2次元的に撮影し、鉄筋の腐食状況の観察を行なった。本年度は、昨年度の延長として、RC試験体内部の鉄筋の腐食状況をデジタルX線画像の明度分布の分析を元に立体的に把握する手法を確立する。さらに、継続的に複合劣化作用を受ける小型RC供試体の腐食促進実験を行い、コンクリート内部の鉄筋の腐食状態を明らかにする。

本報告の内容は以下で構成される。

- 2) コンクリートに埋込まれた鉄筋の腐食実験
- 3) デジタルX線画像によるコンクリート内部の鉄筋腐食の評価
- 4) コンクリートに埋込まれた鉄筋の腐食促進実験の経過
- 5) まとめおよび今後の課題
- 6) 今後の予定

²⁴ 社団法人 日本コンクリート工学協会：“コンクリート診断学”、pp162-163

2) コンクリートに埋込まれた鉄筋の腐食実験

(a) 目的

中性化、温度、塩分などの複合劣化作用を受けたコンクリート内部鉄筋の腐食状態を三次元的に観察することを目的とし、鉄筋を埋込んだコンクリート試験体に継続的に外部劣化作用を加え続け、一定期間ごとにデジタルX線撮影装置によりX線撮影を行い、得られたX線画像から錆の程度を計測する。また、鉄筋の腐食状況を三次元的に把握するとともにその特徴並びに原因を考察する。

b) 供試体概要

表3.4.1-14に実験の要因と水準を、図3.4.1-44に実験で使用する供試体の寸法を示す。実験で用いる供試体の寸法は40mm角とし、鉄筋(SD295・D10)をかぶり厚さを指定して埋め込んだものとする。供試体は、かぶり厚さ5mm、10mmの2種類と、塩化物イオンが0kg/m³、50kg/m³の2種類。外部劣化作用(腐食方法)の種類は、中性化促進試験(温度35℃・湿度60%・二酸化炭素濃度10%)のみ行なうもの、中性化促進試験(同上)を2週間行なった後に複合劣化試験機を用いて塩水噴霧試験を行うもの、中性化促進試験(同上)を2週間行なった後に屋外暴露試験を行うものの3種類とする。

表 3.4.1-14 要因と水準

要因	水準
水セメント比[%]	80
かぶり厚さ[mm]	5、10
外部劣化作用の種類	中性化、 中性化+塩水噴霧 中性化+屋外暴露
塩化物量[kg/m ³]	0、50

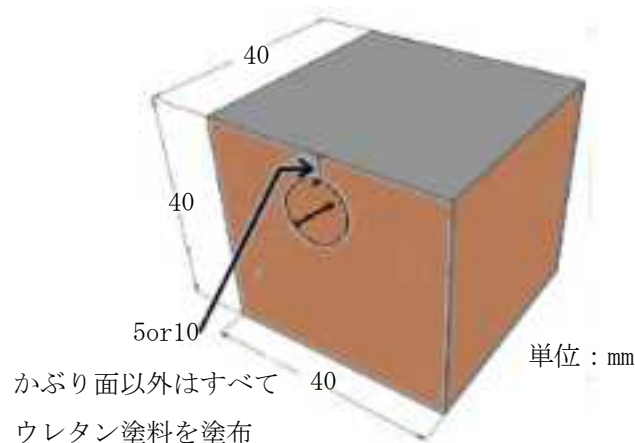


図 3.4.1-44 供試体寸法

表 3. 4. 1-15 に使用材料、表 3. 4. 1-16 にモルタルの調合を示す。セメントと細骨材をミキサに入れ 30 秒混ぜ、あらかじめ塩化物を混入あるいは無混入の水を投入し、30 秒間混ぜる。その後掻き落としを行ない、60 秒間練り混ぜを行なった。試験体の作製は、温度 20℃、相対湿度 60%の恒湿恒温室内で行なった。打込みから 4 日で脱型し、露出した鉄筋端部に防水塗料を塗装し、材齢 1 週まで水中養生を行なった。かぶり面への外部劣化作用のみの影響によって、供試体内部の鉄筋の腐食が進むように、養生後、かぶり面以外の 5 面に防水性、耐候性に優れた油性ウレタン塗料の塗装を施した。図 3. 4. 1-45 に実験フローを示す。

表 3. 4. 1-15 使用材料

材料	種類および物性
セメント	普通ポルトランドセメント：表乾密度 3.16g/cm ³
細骨材	硬質砂岩砕砂 表乾密度 2.56g/cm ³ 絶乾密度 2.58g/cm ³
鉄筋	SD295・D10
練り混ぜ水	東京都八王子市南大沢の上水道：20℃

表 3. 4. 1-16 モルタルの調合

W/C [%]	S/C [kg/kg]	質量(kg/m ³)			
		水	セメント	砕砂(表乾状態)	NaCl
80	4.3	289	362	1556	0
					86.7

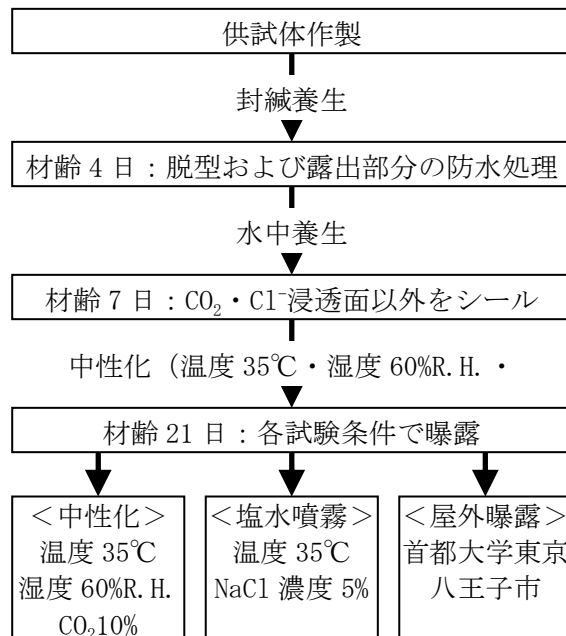


図 3. 4. 1-45 実験フロー

3) デジタル X 線画像によるコンクリート内部の鉄筋腐食の評価

(a) デジタル X 線画像の撮影装置

本実験で使用した産業用 X 線撮影装置の概要を図 3. 4. 1-46 に、外観を図 3. 4. 1-47 に示す。装置内部の X 線発生部よりコーンビーム状に、X 線が照射室に設置した試験体に照射され、二次元検出器 (FPD) に入力された電気信号により、255 階調の二次元 X 線画像データを取得することが出来る。本装置の X 線照射仕様を表 3. 4. 1-17 に示す。既往の研究を踏まえ、本研究における撮影条件は、管電圧 160kV、管電流 $200 \mu\text{A}$ 、照射時間 3 秒間とした。

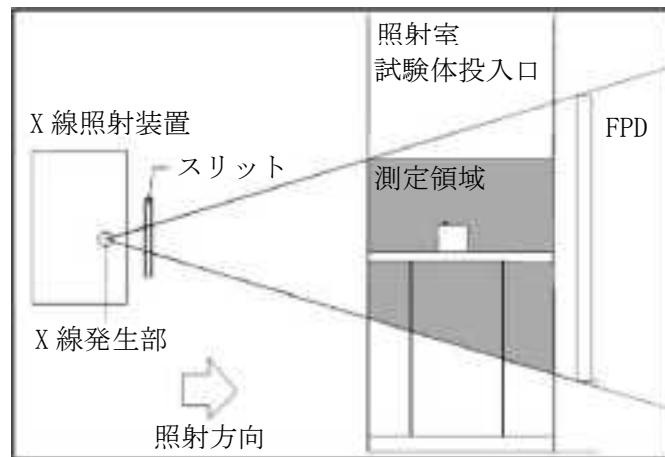


図 3. 4. 1-46 デジタル X 線撮影装置概要



図 3. 4. 1-47 X 線撮影装置外観

表 3. 4. 1-17 X 線照射仕様

管電圧 [kV]	0~160
管電流 [μA]	0~500
照射時間 [sec]	1~5

(b) 内部鉄筋の三次元的観察手法の検討

腐食促進試験を行った試験体の内部の鉄筋腐食状況を三次元的に把握する方法を検討した。X線撮影装置の中に試験体を設置する際に、図 3.4.1-48 のようにかぶり面が X 線発生部に向いている状態を撮影角度 0° とする。試験体を水平に保った状態で機械制御により、鉄筋を回転の中心とし、図 3.4.1-49 のように時計回りに 15° 回して計 12 回撮影を行なう。

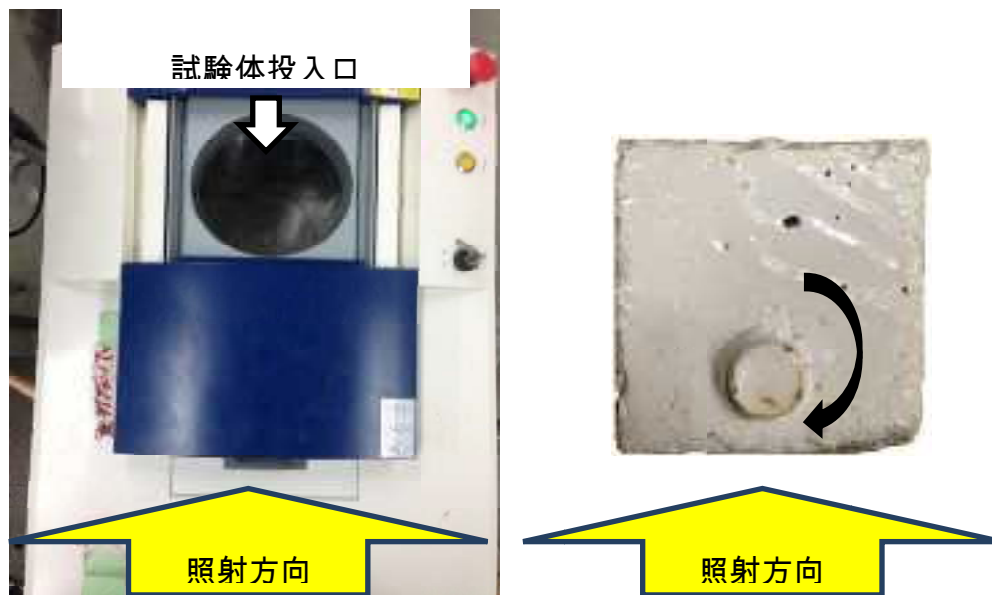


図 3.4.1-48 撮影における供試体の設置例 (0° の場合)

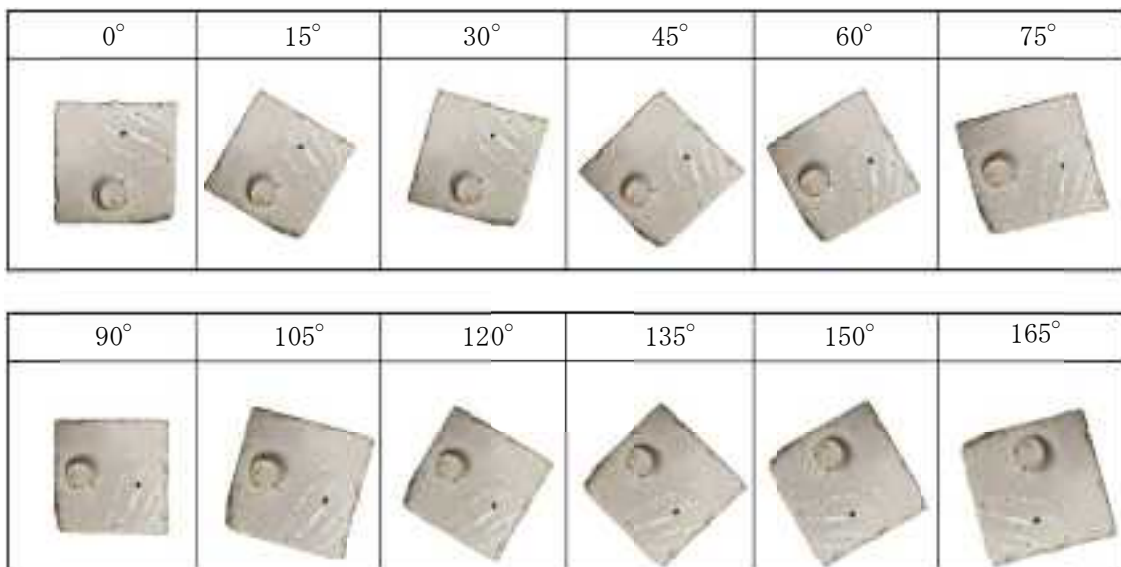


図 3.4.1-49 供試体の撮影角度一覧

a) によって 1 個の供試体につき、図 3.4.1-50 のような X 線画像が 12 枚得られる。それぞれに対して錆の有無を、目視による確認と、画像処理ソフトを用いたモルタルの明度と

鉄の明度との比較による確認を行なう。予備実験により図 3. 4. 1-51 のように錆部分はモルタル部分、鉄筋部分とは違う明度として画像上に現れる。錆が確認された場合、錆の部分を一定高さごとに半径方向の長さを計測する。

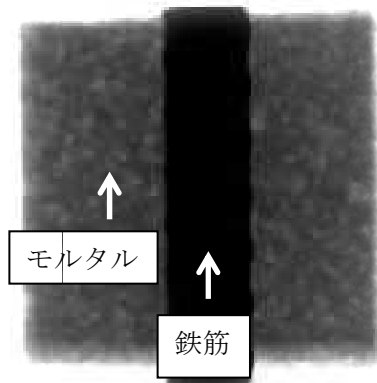


図 3. 4. 1-50 供試体の X 線画像例(0°)

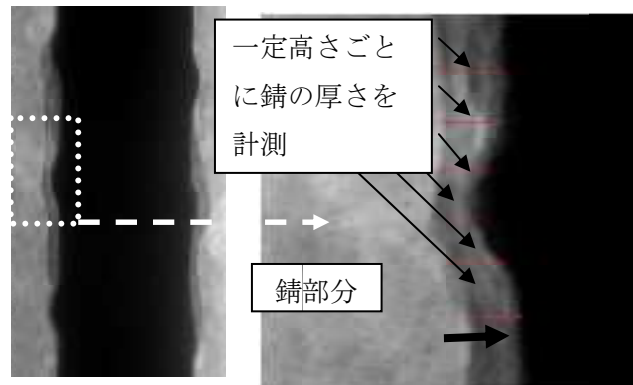


図 3. 4. 1-51 錆部分の測定例

測定した数値を角度により直交座標系(x、y、z)に変換する。ただし z は鉄筋の下端からの距離とする。図 3. 4. 1-52 に直交座標系に変換する際に必要な角度の設定例を示す。さらに三次元グラフ描画ソフト「gnuplot」を用いて、錆の厚さで色分けをし、三次元グラフで可視化する。

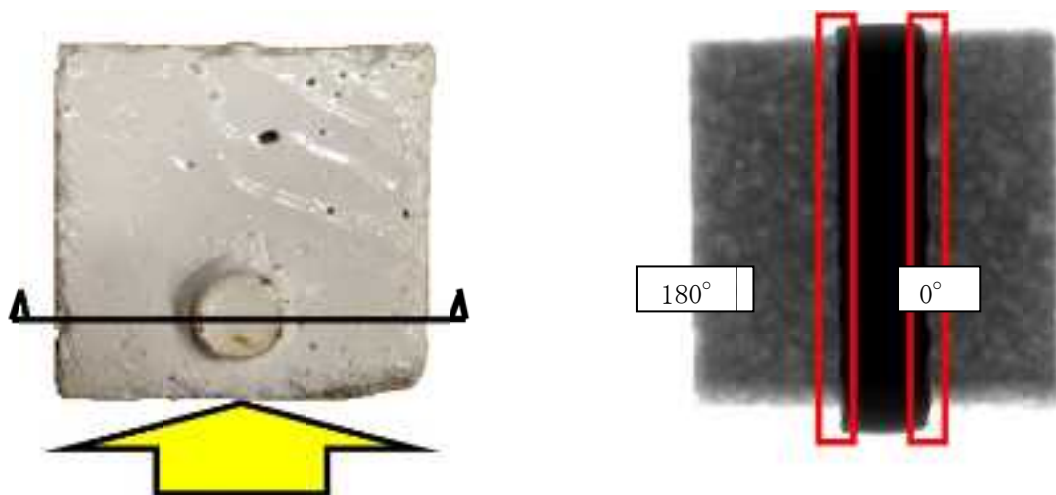


図 3. 4. 1-52 計測部分の角度の設定例(0° の場合)

(c) 錆部分の線減弱係数の評価

目的

健全鉄筋と腐食鉄筋を同時に映しこんだ X 線画像より明度と X 線透過率との校正曲線を求め、さらに錆部分の明度から校正直線により錆部分の線減弱係数を求める。

評価方法

まず、健全鉄筋と腐食鉄筋を同時に映しこんだ X 線画像を取得する。健全鉄筋で X 線透過長さ (X 線が透過する長さ) が数種類となるような鉄筋の位置を中心から設定し、その位置での明度を計測する (図 3. 4. 1-53)。

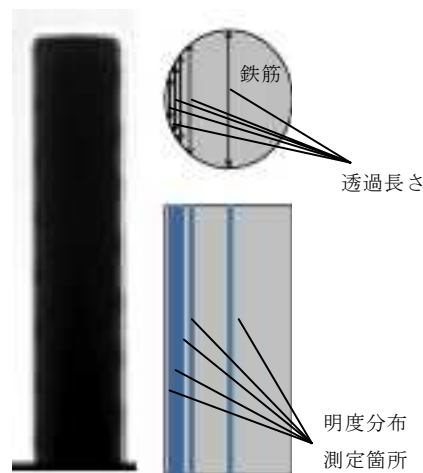


図 3. 4. 1-53 鉄筋の透過長さの設定による明度分布測定箇所の決定

X 線が物質を透過したときの減衰には、狭い平行線束の単一エネルギーの光子の物質中での減衰を表す基本式は (3. 2. 1-26) である。

$$I = I_0 \exp(-\mu_i \times x) \quad (3. 2. 1-26)$$

ただし I_0 は入射光子のフルエンス率、 I は物質を通過した光子のフルエンス率、 x [mm] は材料の厚さ (透過部分の長さ)、 μ_i [mm⁻¹] は物質の光子に対する線減弱係数である。光子フルエンスとはある場所を通過する単位面積、単位時間当たりの放射線光子数を指す。遮蔽率 S (%) は (3. 2. 1-27) で算出する。

$$S = (1 - I/I_0) \times 100 \quad (3. 2. 1-27)$$

(3. 2. 1-26)、(3. 2. 1-27) の基本式を利用し、(3. 2. 1-28) のように表すことができる。

$$S = (1 - \exp(-\mu_i \times x)) \times 100 \quad (3. 2. 1-28)$$

なお鉄筋の線減弱係数 μ_i は管電圧 160kV の照射条件のとき、 $0.15[\text{mm}^{-1}]$ である。得られた明度平均値と遮蔽率をプロットする。これらを直線回帰し、明度と遮蔽率の校正曲線を得る。これに同画像における錆の明度からの錆の遮蔽率を求め、錆の線減弱係数を求めることが出来る。

錆部分の計測

腐食鉄筋(D16)と健全鉄筋(D10)をX線画像内で中心位置に近づくように配置し、撮影を行なう。これは、シェーディング効果(画像の中心から離れた部分が暗くなっていく現象)の影響を出来るだけなくするためである。撮影条件は管電圧 160kV・管電流 $200\mu\text{A}$ ・照射時間 3 秒とし、撮影した画像の一例を図 3.4.1-54 に示す。撮影は 3 回行なう。



図 3.4.1-54 腐食鉄筋(D16)と健全鉄筋(D10)のX線画像例(No.1)

図 3.4.1-53 の要領で明度分布を測定していき、そこから明度平均値と遮蔽率を算出する。それらをグラフ上に X 軸を遮蔽率[%]、Y 軸を明度としたグラフにプロットし、回帰式を算出した。今回は直線回帰を行なった。表 3.4.1-18 に鉄筋各部分の明度および遮蔽率の算出結果、図 3.4.1-55～図 3.4.1-57 に表 3.4.1-18 から得た校正直線、表 3.4.1-19 に錆の遮蔽率と線減弱係数の算出結果を示す。

表 3.4.1-18 X線画像における鉄筋各部分の明度および遮蔽率の算出結果

透過長さ [mm]	鉄筋中心から の距離 [mm]	No. 1		No. 2		No. 3	
		明度	遮蔽率 [%]	明度	遮蔽率 [%]	明度	遮蔽率 [%]
2	4.9	94.8	25.9	104.5	25.9	101.9	25.9
4	4.58	62.3	45.1	68.7	45.1	81.5	45.1
6	4	36.2	59.3	38.7	59.3	54.6	59.3
8	3	17.1	69.9	15.4	69.9	31.9	69.9
10	0	8.5	77.7	3.1	77.7	20.7	77.7
相関係数		-0.9987		-0.9993		-0.9914	

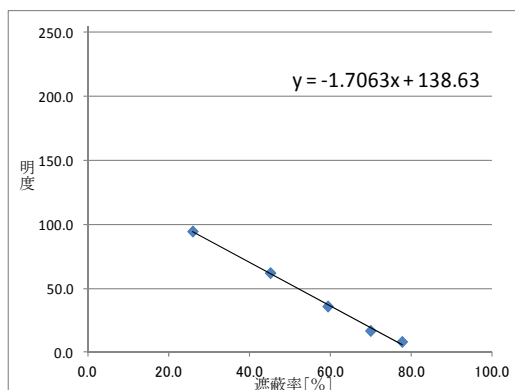


図 3. 4. 1-55 No. 1 の校正直線

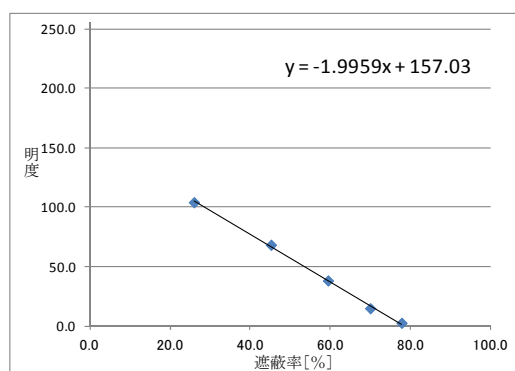


図 3. 4. 1-56 No. 2 の校正直線

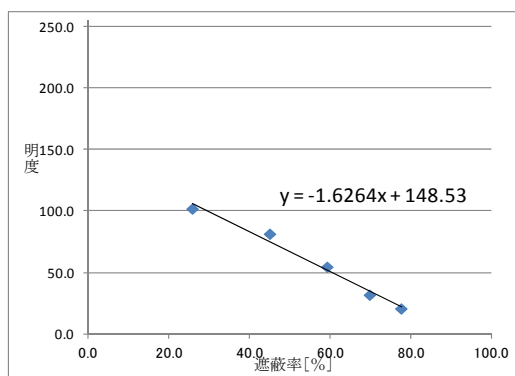


図 3. 4. 1-57 No. 3 の校正直線

表 3. 4. 1-19 画像ごとの錆の遮蔽率と線減弱係数の算出結果

	No. 1		No. 2		No. 3	
	明度	遮蔽率 [%]	明度	遮蔽率 [%]	明度	遮蔽率 [%]
錆中心部	117.1	12.6	121.9	17.6	126.2	13.7
線減弱係数 [mm ⁻¹]	0.0486		0.07		0.0534	
平均値 [mm ⁻¹]	0.0574					

(d) 腐食鉄筋を埋込んだモルタル供試体

目的

実際の腐食鉄筋を埋込んだモルタル供試体に対して X 線画像により鉄筋の腐食部分の評価を行なう。

供試体概要

表 3. 4. 1-20、表 3. 4. 1-21 に使用材料とモルタル調合表を示す。打込は温度 20℃、相対湿度 60%の恒湿恒温室で行なった。セメントと細骨材をミキサに入れ中速で 30 秒混ぜ、塩化物を混入した水を投入し中速で 30 秒間混ぜる。その後掻き落としを行ない高速で 60 秒間練り混ぜを行なった。寸法は 40×40×160mm とし内部に腐食鉄筋(D16)を埋め込んだ。図 3. 4. 1-58 に供試体寸法、図 3. 4. 1-59 に腐食鉄筋(D16)、図 3. 4. 1-60 に供試体を示す。

表 3. 4. 1-20 使用材料

材料	種類および物性
セメント	普通ポルトランドセメント：表乾密度 3. 16g/cm ³
細骨材	硬質砂岩砕砂 表乾密度 2. 56g/cm ³ 絶乾密度 2. 58g/cm ³
鉄筋	D16(塩水噴霧による腐食(温度 35℃・5%NaCl))

表 3. 4. 1-21 調合表

W/C [%]	S/C [kg/kg]	質量(kg/m ³)		
		水	セメント	砕砂(表乾状態)
80	4. 3	289	362	1556

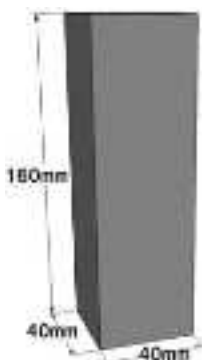


図 3. 4. 1-58 供試体寸法

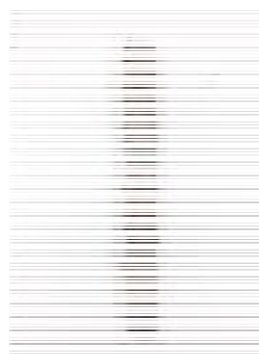


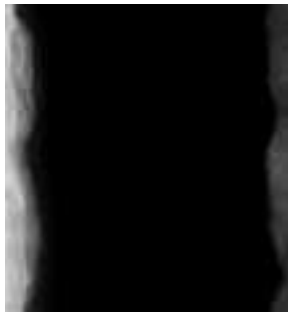
図 3. 4. 1-59 腐食鉄筋(D16)



図 3. 4. 1-60 供試体

腐食部分の三次元的観察

腐食促進実験の内部鉄筋の三次元的観察手法の手順により、最も腐食していると思われる部分 20 mm を選択し、その部分を写真 3. 4. 1-1 のように切り取り、高さごとに錆の厚さを計測し、三次元グラフを作成した。図 3. 4. 1-61 に三次元グラフを示す。



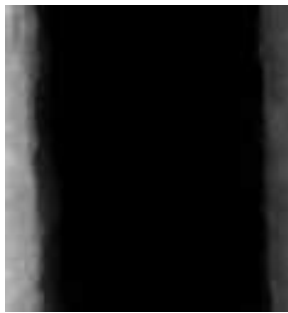
a 0° & 180°



b 15° & 195°



c 30° & 210°



d 45° & 225°



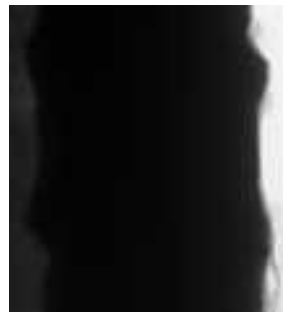
e 60° & 240°



f 75° & 255°



g 90° & 270°



h 105° & 285°



i 120° & 300°



j 135° & 315°



k 150° & 330°



l 165° & 345°

写真 3.4.1-1 腐食部の角度ごとの X 線画像

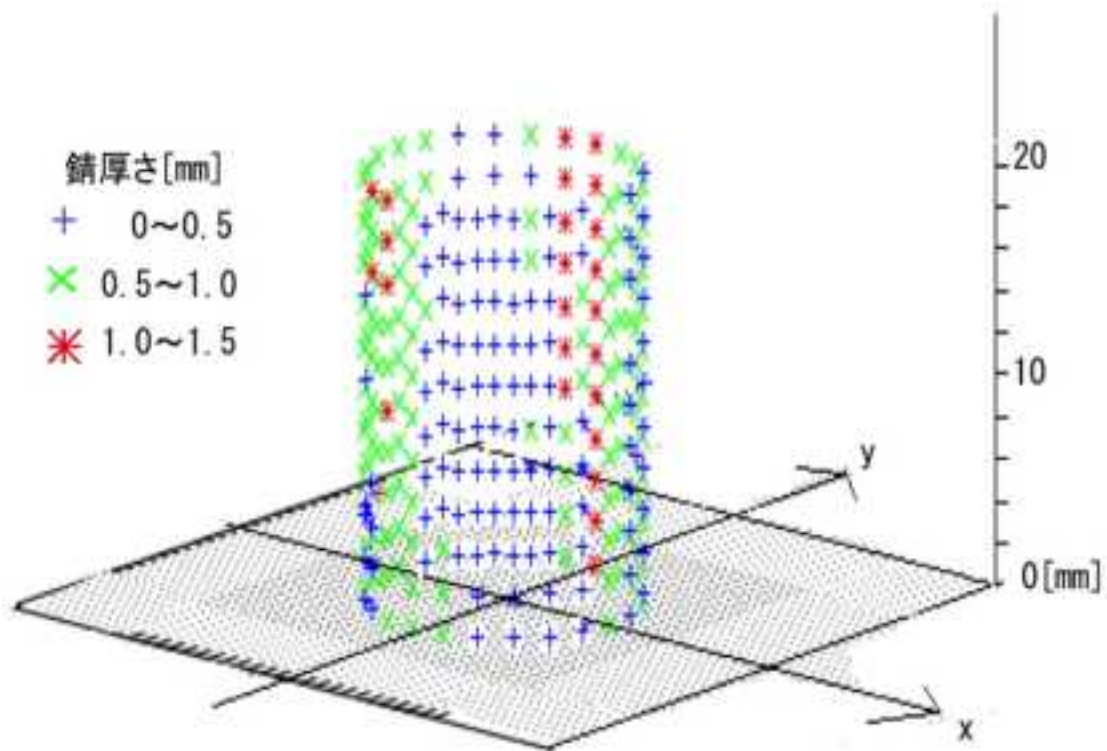


図 3. 4. 1-61 腐食部の三次元グラフ

4) コンクリートに埋込まれた鉄筋の腐食促進実験の経過

腐食促進開始後 15 週間での試験体の X 線画像計測例を図 3. 4. 1-62 に示す。最も錆の進行が早いと予想される、塩水噴霧試験を行ない、かぶり厚さ 5mm、モルタルに塩化物を混入した供試体の結果を図 3. 4. 1-62 に示す。本促進期間では、鉄筋の界面にはまだ腐食部分が確認されない。今後も発錆の進行と、かぶり面への影響を経時的に観察する必要がある。

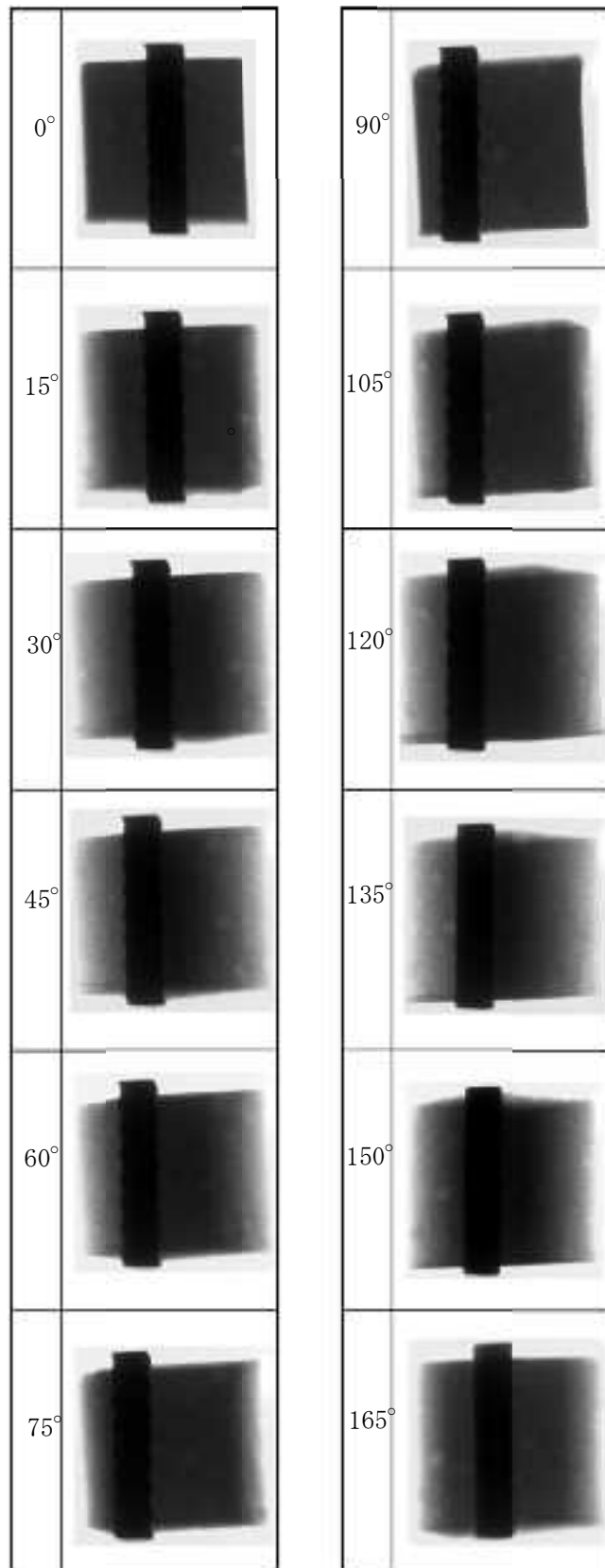


図 3.4.1-62 小型 RC 供試体の X 線画像 (試験開始後 15 週間)

5) まとめおよび今後の課題

小型 RC 供試体を劣化作用により腐食させて、内部の鉄筋の腐食を観察する実験を行い、内部鉄筋の腐食状況の評価方法として三次元的観察手法の検討を行なった。また、腐食した鉄筋の X 線画像の特徴、腐食鉄筋を埋め込んだモルタル供試体中の腐食鉄筋の X 線画像の特徴を把握した。

今後の課題としては、引続き小型 RC 供試体の腐食促進の継続と、内部鉄筋の発錆状況と供試体表面のひび割れとの関係の経時的観察、モルタル中の鉄筋、錆の定量的評価腐食鉄筋の腐食程度の三次元的な可視化である。

6) 今後の予定

今後もそれぞれの条件で鉄筋を腐食させた供試体について、各試験期間において X 線撮影を行い、X 線画像による内部鉄筋の腐食に関する検討を行なう。以下が計測予定である。

中性化のみ：試験期間 0 日、4 週、8 週、3 カ月、6 カ月、1 年、1.5 年、2 年

中性化+塩水噴霧：試験期間 0 日、3 週、6 週、9 週、3 か月、6 カ月、9 か月、1 年、1.5 年、2 年

中性化+屋外暴露：試験期間 0 日、3 カ月、6 カ月、9 カ月、1 年、1.5 年、2 年

(4) 複合劣化を受けた鉄筋コンクリートの鉄筋腐食に関する検討

1) 研究の背景および目的

従来、鉄筋コンクリート構造は優れた耐久性を有しているとされてきたが、一方で近年、塩害、アルカリ骨材反応、中性化などの様々な要因による構造物の劣化現象が報告されている^{25, 26}。また、原子力発電所施設には取水構造物もあり、それらの構造物は海水と接する環境下にあるため、飛来塩化物の影響を受け、鉄筋コンクリート構造物内部の鉄筋が腐食する場合がある。コンクリート構造物中の鉄筋の腐食は、部材の耐久性能の低下を引き起こすため、鉄筋腐食と鉄筋の強度性状の把握は構造物の耐久性の観点から極めて重要である。

鉄筋の腐食の程度が、腐食した鉄筋の力学的性能に及ぼす影響についての研究はいくつか見られるが、SD490やD41などの高強度太径鉄筋の腐食が力学的の性状の変化に及ぼす影響について検討を行った例は少ない。また、コンクリートはその性質上、乾燥収縮や自己収縮によるひび割れが発生する恐れがあり、ひび割れが発生した鉄筋コンクリート構造において、内部の鉄筋は発錆しやすくなる。しかし、ひび割れのあるコンクリート構造体内の鉄筋腐食について検討を行った例は少ない。

本研究では、SD490やD41などの高強度太径鉄筋を含む、種類および径の異なる異形鉄筋が、電食試験や塩水噴霧試験などにより腐食した場合の断面形状を、回転式3次元レーザー変位計によって鉄筋軸方向に沿って測定し、腐食領域の形状ならびに断面減少率を把握し²⁷、鉄筋の力学的性質との関係について明らかにすることを目的とする。

検討内容は、コンクリート内部の鉄筋が均一に腐食した場合を想定し、鉄筋そのものを電食または塩水噴霧により腐食させた場合（以下、鉄筋全面腐食試験）と、コンクリートのひび割れなどにより、内部の鉄筋の一部が孔食により腐食した場合を想定し、予めひび割れを発生させたモルタル中の鉄筋を塩水噴霧により腐食させた場合（以下、鉄筋孔食試験）である。なお、電食による検討は、昨年度からの検討であり、前年度のD13、D19に関する検討に、D29、D41の結果を加えたものである。

2) 実験概要

(a) 供試体概要

表 3. 4. 1-22 に実験の要因と水準、表 3. 4. 1-23 に使用鉄筋の主な機械的性質、表 3. 4. 1-24 に使用鉄筋の寸法・質量を示す。鉄筋種類は、異形棒鋼として JIS G 3112²⁸に規定されている SD295A、SD345、SD390、SD490 とし、SD295A は D13、SD345 および SD390 は D13、D19、D29、D41、SD490 は D19、D29、D41 について試験を行なった。また、腐食方法は塩水噴霧

²⁵土木学会：鉄筋腐食・防食および補修に関する研究の現状と今後の動向、コンクリート委員会腐食防食小委員会報告(1997)

²⁶社団法人日本コンクリート工学協会：複合劣化コンクリート構造物の評価と維持管理計画研究委員会報告書(2001)

²⁷金螢来、野口貴文、長井宏憲：腐食形態を考慮した腐食鉄筋の力学的性能の評価に関する研究、日本建築学会構造系論文集、第 73 巻、第 624 号、pp181-188(2008)

²⁸日本工業規格 JIS G 3112、鉄筋コンクリート用棒鋼(2010)

および電食の2種類、腐食長さは25、50、100mmの3水準、腐食による目標断面減少率は0～30.0%の9水準とした。また、鉄筋孔食試験において使用したモルタルの使用材料を表3.4.1-25、調合を表3.4.1-26に示す。モルタル中の鉄筋が腐食しやすいように、また、フロー値が180±0.5mmなるように水セメント比を80%、砂セメント比4.3とした。

本年度は、塩水噴霧試験による目標腐食断面減少率0～10%のについて検討を行った。また、電食試験によって腐食したD29やD41などの太径鉄筋の結果を前回結果と合わせて報告する。

表 3.4.1-22 実験の要因と水準

試験名	要因	水準
鉄筋全面腐食試験	鉄筋種類	SD295A、SD345、SD390、SD490
	呼び名(径)	D13、D19、D29、D41
	腐食方法	塩水噴霧、電食
	腐食長さ(mm)	25、50、100
	腐食による目標断面減少率(%)	0、2.5、5.0、7.5、10.0、15.0、20.0、25.0、30.0
鉄筋孔食試験	鉄筋種類	SD295A、SD345、SD390、SD490
	呼び名(径)	D13、D19、D29、D41
	腐食方法	塩水噴霧
	腐食長さ(mm)	50
	腐食促進期間(週)	0、3、6、12、18、24
	中性化促進試験	有り(温度60℃、相対湿度60%、CO2濃度10%)

※下線部が本年度の報告内容

表 3.4.1-23 機械的性質

種類の記号	降伏点または0.2%耐力(N/mm ²)	引張強さ(N/mm ²)
SD295A	295以上	440～600
SD345	345～440	490～
SD390	390～510	560～
SD490	490～625	620～

表 3.4.1-24 鉄筋径毎の寸法・質量

呼び名	公称寸法			外径φD(mm)
	直径(mm)	断面積(cm ²)	単位重量(kg/m)	
D13	12.7	1.267	0.995	14.0
D19	19.1	2.865	2.25	21.5
D29	28.6	6.424	5.04	32.1
D41	41.3	13.40	10.50	46.3

表 3.4.1-25 モルタル使用材料

材料	種類	物性
セメント	普通ポルトランドセメント	密度3.16g/cm ³
細骨材	砂岩砕砂	表乾密度2.56g/cm ³ 、絶乾密度2.58g/cm ³

表 3.4.1-26 モルタル調合

水セメント比 W/C (%)	砂セメント比 S/C(wt)	質量(kg/m ³)			フロー値 (mm)
		水	セメント	細骨材	
80	4.3	289	362	1556	175

図 3.4.1-63 に鉄筋全面腐食実験で用いた供試体、図 3.4.1-64 に鉄筋孔食試験で用いた供試体概要を示す。鉄筋長さは 600mm のねじ節鉄筋とし、腐食面以外をシリコン樹脂およびビニールテープでシールした。鉄筋孔食試験では鉄筋全面腐食試験で用いた供試体を 0.5mm 幅のひび割れを有するブロック状のモルタルに埋め込んだ。なお、モルタル部分の腐食劣化促進面に 0.5mm のひび割れを再現するため、型枠に設置した 0.5mm 厚のプラスチック板により、0.5mm 幅の切欠きを入れた。ひび割れ位置はちょうど鉄筋の腐食対象領域の中心位置の真上となるようにした。またモルタルと鉄筋のかぶり厚さは全て 5mm とするにした。



図 3.4.1-63 鉄筋全面腐食試験供試体概要

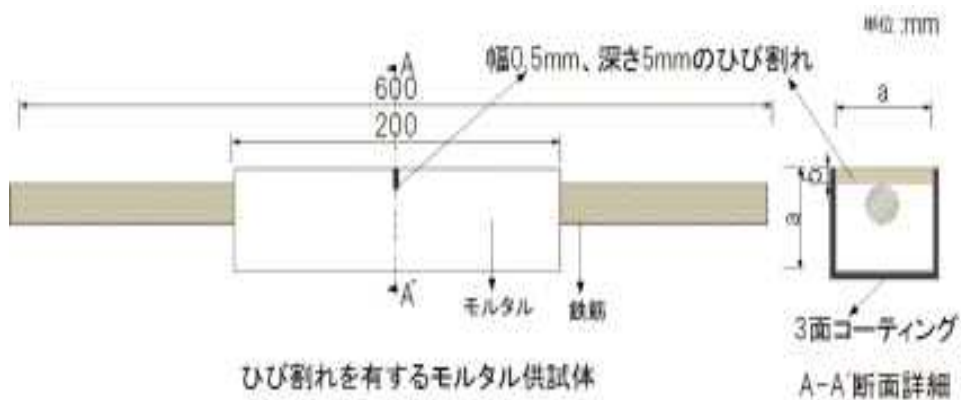


図 3.4.1-64 鉄筋孔食試験供試体概要

(b) 鉄筋腐食促進方法

鉄筋全面腐食試験における鉄筋の腐食には複合劣化促進試験装置を用いての塩水噴霧（図 3.4.1-65、図 3.4.1-66）にて行った。塩水噴霧は温度 35℃環境下で 5%NaCl 水溶液を連続噴霧して行なった。腐食期間は、鉄筋の目標断面減少量が 2.5、5.0、7.5、10.0、15.0、20.0、25.0、30.0%になるまでとし、所定の腐食を終えた供試体は、10%クエン酸二アンモニウム水溶液浸漬にて錆を除去し、断面計測をし、引張試験を実施した。

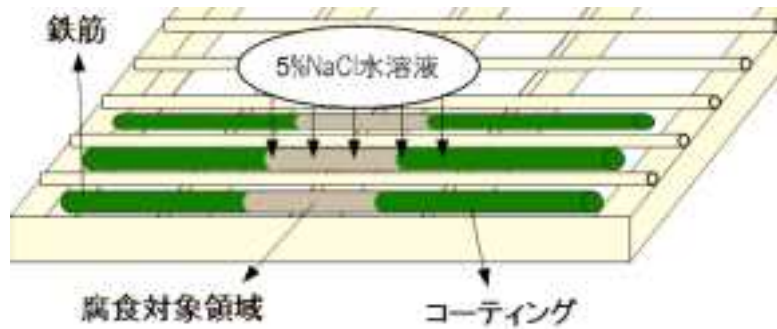


図 3.4.1-65 塩水噴霧試験概要



図 3.4.1-66 塩水噴霧試験の様子

また、鉄筋孔食試験における腐食劣化促進試験は温度 60℃、相対湿度 60%、二酸化炭素濃度 10%の条件で一週間中性化促進試験を行い、モルタル表面から鉄筋までのモルタル部分を中性化させてから、温度 35℃環境下で 5%NaCl 水溶液を連続噴霧して、塩水噴霧試験を行った(図 3. 4. 1-67)。



図 3. 4. 1-67 ひび割れを有するモルタル供試体の塩水噴霧試験の様子

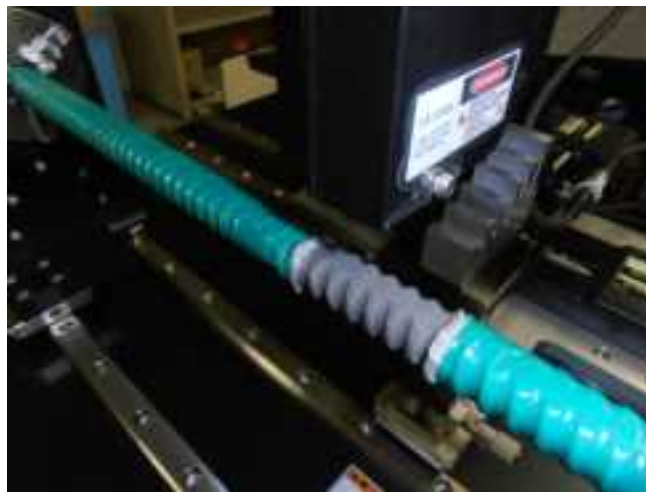
(c) 断面測定方法

図 3.4.1-68 に断面測定に用いた測定装置を示す。本装置はレーザー変位計を用いてφ50mm 程度までの棒鋼の断面を長手方向 100mm まで 0.1mm ピッチで測定できる装置である。なお、円周方向では 0.36° 間隔でデータを測定している。

本研究では、長手方向 1mm ピッチで断面を測定することとした。



(a) 外観



(b) 測定状況

図 3.4.1-68 断面測定装置

(d) 引張試験方法

供試体は断面の測定後、万能試験機（容量 1000kN）を用いて引張試験を行なった。供試体には試験前にポンチによる打跡により標点を作製し、ノギスを用いて標点間距離並びに腐食領域部の材軸方向距離を測定した（図 3. 4. 1-69）。標点間距離は 120 mm とし、試験前には鉄筋と試験機のチャックとのすべりを防ぐため、試験体に防水の目的で巻きつけたビニールテープやシリコンを除去した。なお、試験の際には、図 3. 4. 1-70 に示すように変位測定治具を用いて変位も測定することとした。



図 3. 4. 1-69 標点作製状況



図 3. 4. 1-70 引張試験状況

3) 実験結果および考察

(a) 鉄筋の断面減少状況

図 3.4.1-71 に塩水噴霧により腐食した鉄筋の断面積測定地点ごとの断面減少率の結果例、図 3.4.1-72 にひび割れを有するモルタル中の鉄筋が腐食した断面積測定地点ごとの断面減少率の結果例を示す。また、図 3.4.1-73 に断面積測定時の 3D 表示例を示す。断面積減少率は、腐食劣化促進試験前後で断面積測定開始地点を揃え、節は節というように対応する腐食後の断面積を腐食前の断面積で除した値とした。また、腐食後の断面積の平均値は間隔 1mm ごとに測定した計測地点ごとの鉄筋断面の平均、最小断面はその最小値である。平均腐食断面減少率は平均腐食断面積を公称断面積で除したもので、最大腐食断面減少率は最小腐食断面積を公称断面積で除したものである。

塩水噴霧によって全面腐食させた鉄筋の断面減少率は腐食領域 50mm においてほぼ均一に腐食する傾向が分かった。また、節の頂点部分では節と節の間の部分と比較すると断面減少が緩やかな傾向を見せ、節が残るような腐食形態をみせた。ひび割れを有するモルタル中の鉄筋は、ほとんどの供試体において、ひび割れ近傍(断面計測地点 25mm 付近)で断面減少が生じていた。しかし、そのほかの腐食対象領域ではほとんど断面減少、および発錆も見られなかった。なお、12 週間塩水噴霧を行った供試体中の鉄筋において、ひび割れ近傍の最も腐食している部分を平均すると 2.34%程度の断面減少が生じていた。

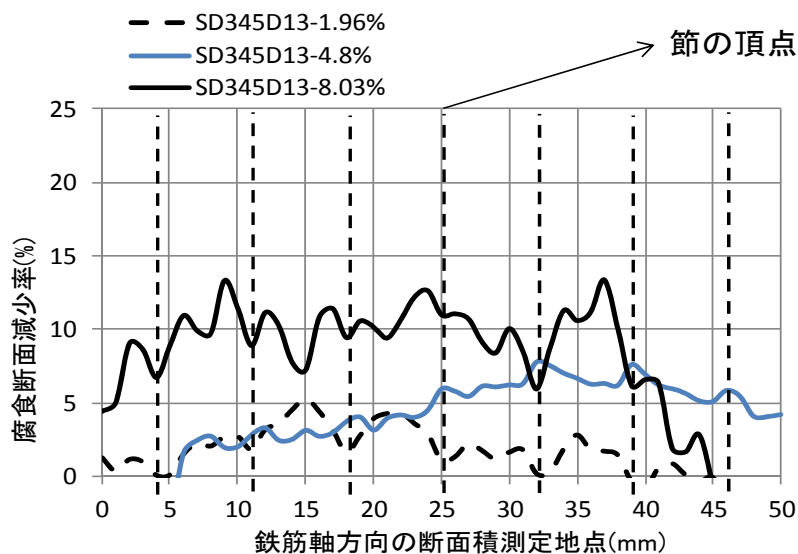


図 3.4.1-71 測定地点ごとの断面減少率(塩水噴霧、全面腐食)

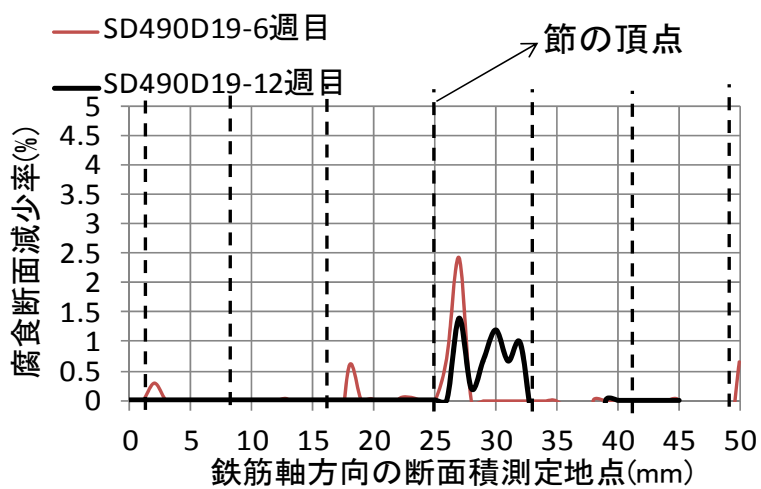


図 3. 4. 1-72 測定地点ごとの断面減少率(孔食)

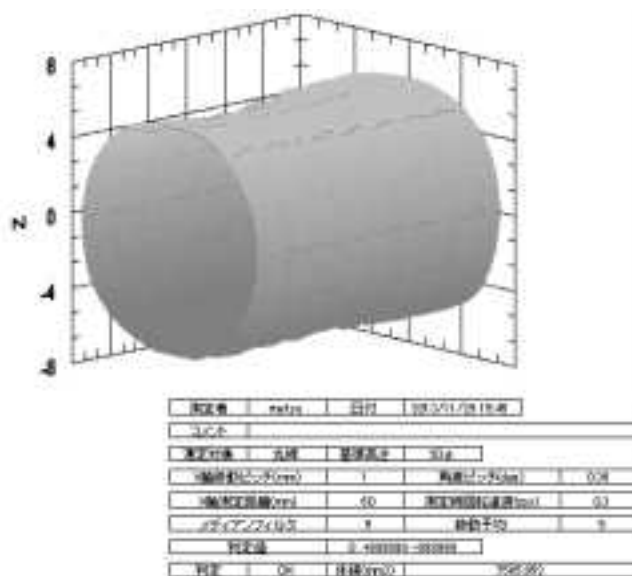


図 3. 4. 1-73 断面積 3D 表示例

(b) 降伏点残存率(鉄筋全面腐食試験)

図 3. 4. 1-74 に電食により腐食した鉄筋の平均腐食断面減少率と降伏点残存率の関係、図 3. 4. 1-75 に電食により腐食した鉄筋の最大腐食断面減少率と降伏強度残存率の関係を示す。グラフ上で赤く表現しているところは本年度の実験によって得られた D29 および D41 の結果である。電食によって腐食した鉄筋の強度試験結果は前年度に報告した D13、D19 の細径のものに D29、D41 の太径の結果をあわせて示す。なお、降伏点は引張荷重を公称断面面積で除した見かけの値である。降伏点残存率は、腐食した鉄筋の降伏点を健全な鉄筋の降伏点で除した値である。鉄筋が腐食し、断面減少すると鉄筋の種類や径によらず降伏点は線形に低下している。また、その低下の割合は断面減少の割合とほぼ等しい。

図 3. 4. 1-76 に塩水噴霧により腐食した鉄筋の平均断面減少率と降伏点残存率の関係、図 3. 4. 1-77 に塩水噴霧により腐食した鉄筋の最大断面減少率と降伏点残存率を示す。塩水噴霧試験において腐食した鉄筋の降伏点は、種類や径によらず線形に低下することがわかる。また、塩水噴霧により腐食した鉄筋と電食により腐食した鉄筋の降伏点残存率を比較すると、僅かだが電食の方が断面減少に伴う降伏点残存率の低下が大きい。これは、電食によって腐食した鉄筋は全面腐食であるため、20%や 30%などの平均腐食断面減少率が大きいものは、腐食対象領域全体でほぼ同程度に大きく断面減少しているため、応力集中が生じ、強度低下が起きるためであると考えられる。

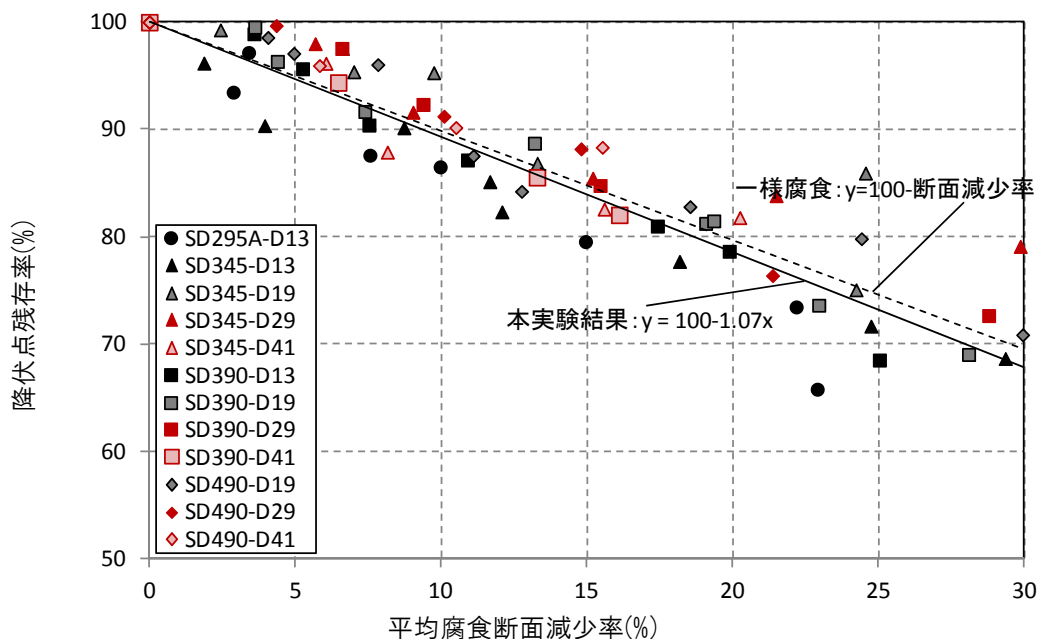


図 3. 4. 1-74 平均腐断面減少率とみかけの降伏点残存率の関係(電食)

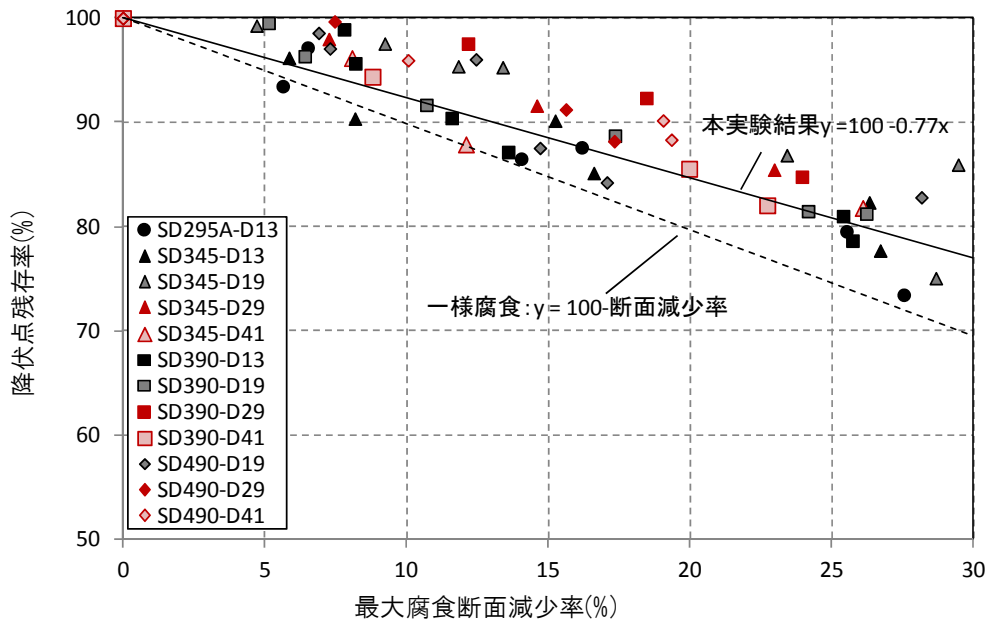


図 3. 4. 1-75 最大腐食断面減少率とみかけの降伏点残存率の関係(電食)

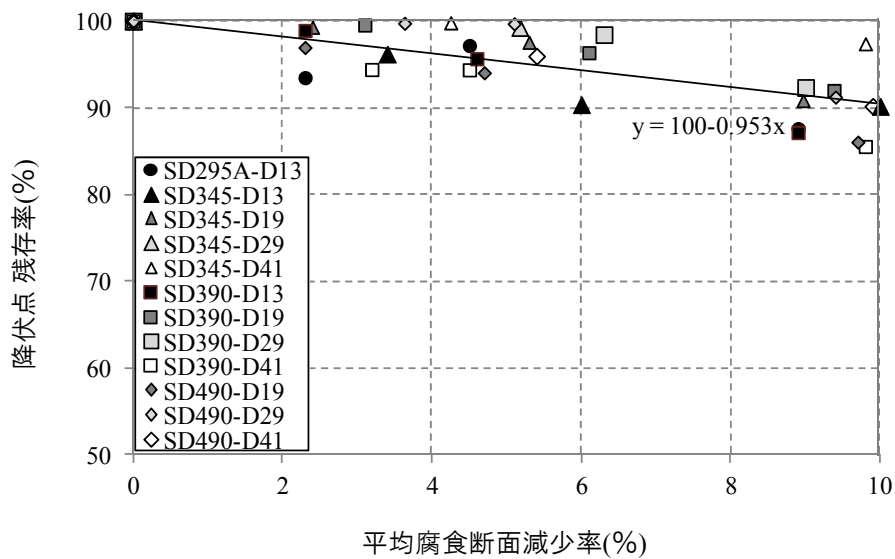


図 3. 4. 1-76 平均腐食断面減少率とみかけの降伏点残存率の関係(塩水噴霧)

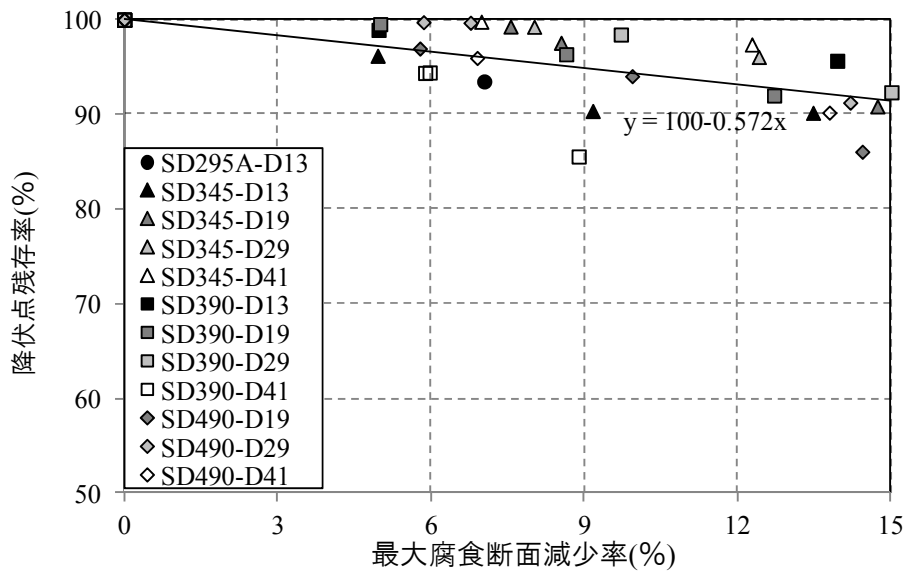


図 3. 4. 1-77 最大腐食断面減少率とみかけの降伏点残存率の関係(塩水噴霧)

(c) 引張強さ残存率(鉄筋全面腐食試験)

図 3. 4. 1-78 に電食によって腐食した鉄筋の平均腐食断面減少率と見かけの引張強さ残存率の関係、図 3. 4. 1-79 に電食によって腐食した最大腐食断面減少率とみかけの引張強さ残存率の関係を示す。グラフ上で赤く表現しているところは今年度の実験によって明らかになった D29 および D41 の結果である。ここでの見かけの引張強さは、最大荷重を試験に供した鉄筋の公称断面積で除したものである。また、引張強さ残存率は、腐食した鉄筋の引張強さを健全な鉄筋の引張強さで除したものである。これを見ると、鉄筋の引張強さは腐食に伴い一定の割合で線形に減少することがわかる。健全なものと比較して、15%腐食では約 80%、30%では 60%の強度低下率であり、降伏点強度低下率と近い結果である。

図 3. 4. 1-80 に塩水噴霧によって腐食した平均腐食断面減少率と見かけの引張強さ残存率の関係を示し、図 3. 4. 1-81 に塩水噴霧によって腐食した最大腐食断面減少率と見かけの引張強さ残存率の関係を示す。塩水噴霧試験において腐食した鉄筋の引張強さは種類や径によらず線形に低下している。また、電食試験において腐食した鉄筋の引張強さ残存率と比較すると、電食試験により腐食した鉄筋は、塩水噴霧試験で腐食した鉄筋より僅かながら、断面減少に伴う引張強さ残存率の低下が大きい。これは、降伏点残存率の時と同様の傾向である。

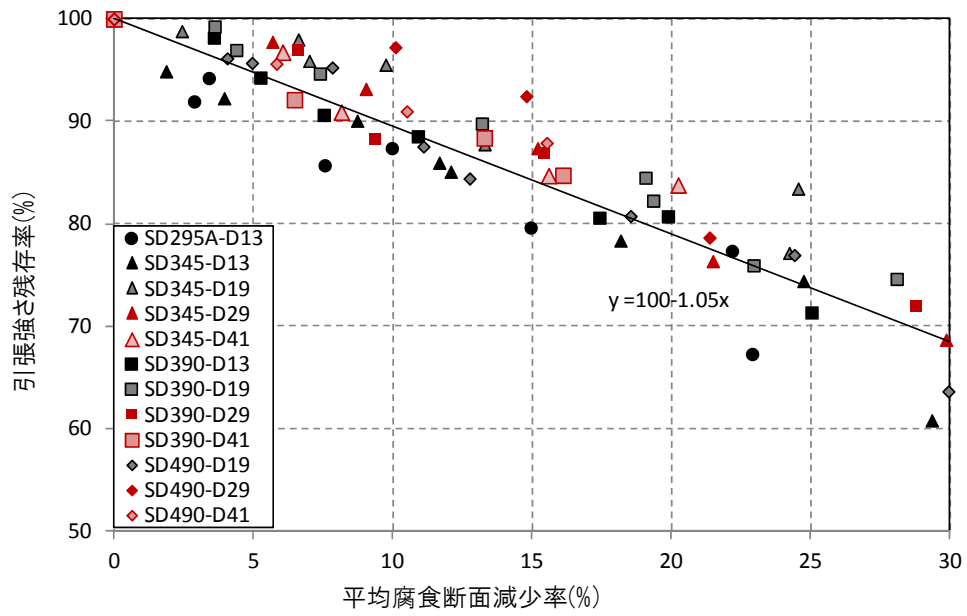


図 3. 4. 1-78 平均腐食断面減少率と見かけの引張強さ残存率の関係(電食)

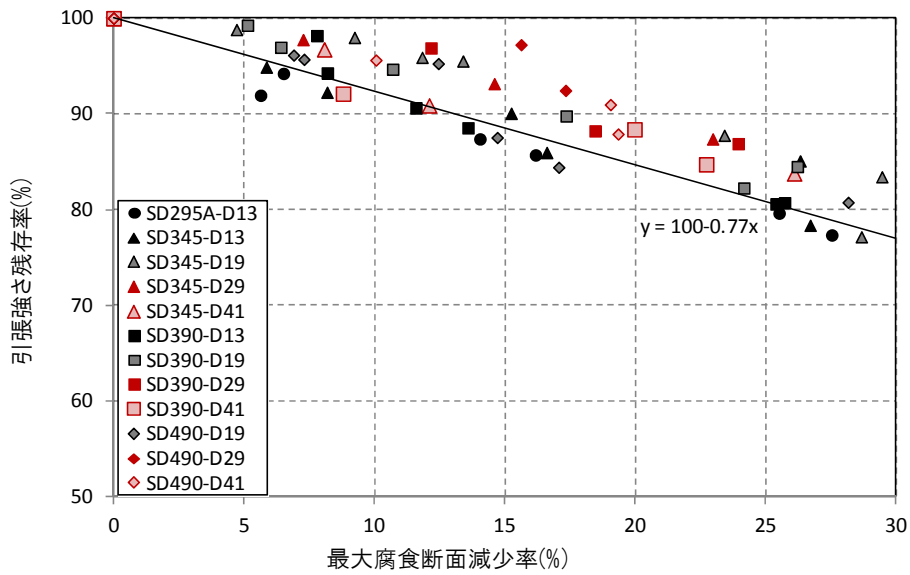


図 3. 4. 1-79 最大腐食断面減少率とみかけの引張強さ残存率の関係(電食)

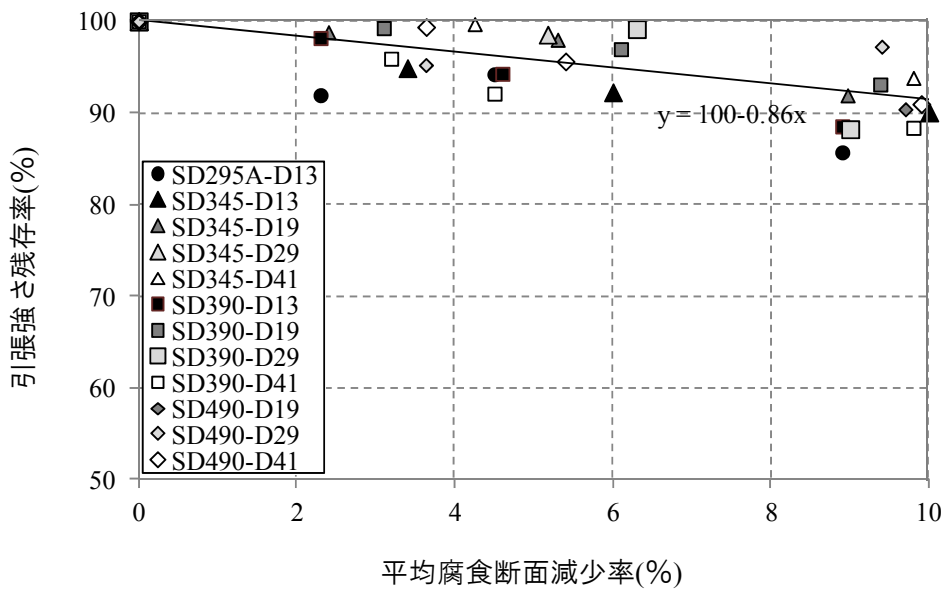


図 3. 4. 1-80 平均腐食断面減少率と見かけの引張強さ残存率の関係(塩水噴霧)

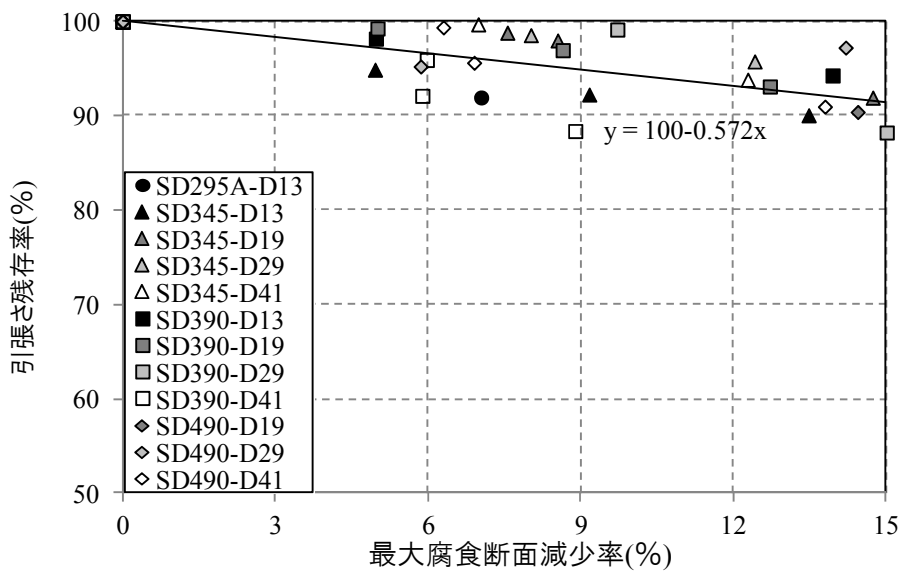


図 3. 4. 1-81 最大腐食断面減少率と見かけの引張強さ残存率の関係(塩水噴霧)

(d) 腐食断面減少率とヤング率の関係(鉄筋全面腐食試験)

図 3. 4. 1-82 に電食によって腐食した鉄筋の平均腐食断面減少率とヤング率残存率の関係、図 3. 4. 1-83 に最大腐食断面減少率とヤング率残存率の関係を示す。これらのグラフ上で赤く表現しているところは今年度の実験によって明らかになった D29 および D41 の結果である。表示実験では、試験区間 120 mmのうち、腐食部分は 50 mmとしている。そこで、腐食部の見かけのヤング係数は、試験で得られた荷重-変位関係から腐食していない健全部のヤング係数を実測値から求めたヤング係数の平均の値である 191. 755kN/mm² とし、下式により求めた。

$$E_2 = l_2 / (S \times \Delta l / \Delta P - l_1 / E_1) \quad (3. 2. 1-29)$$

ここに、 E_1 、 E_2 は健全部のヤング係数および腐食部の見かけのヤング係数、 l_1 および l_2 は試験区間における健全部および腐食部の鉄筋長さ、 ΔP は降伏点の 1/3 および 2/3 時の荷重の差、 Δl は降伏点の 1/3 および 2/3 時の変位の差である。

鉄筋の腐食にともない、見かけのヤング係数も線形に低下している。鉄筋のヤング率は一般的に鉄筋種類にかかわらず 205kN/mm² として用いられるが、腐食した鉄筋の断面積は不均一であり、その結果として応力集中で全体の伸びが小さくなっている。従って健全な鉄筋に対して、同じような変形を生じさせる荷重が腐食した鉄筋では小さくなるため、見かけのヤング率は小さくなることが考えられる。腐食減少率が大きいものほどヤング率は小さくなり、鉄筋の強度が小さいほどヤング率の低下度は大きくなる。

図 3. 4. 1-84 に塩水噴霧試験によって腐食した鉄筋の平均腐食断面減少率とヤング係数残存率の関係、図 3. 4. 1-85 に塩水噴霧試験によって腐食した最大腐食断面減少率とヤング係数残存率の関係を示す。塩水噴霧試験において腐食した鉄筋のヤング率は、腐食した鉄筋の断面積の不均一性から、応力集中が生じやすい。その結果、降伏点までの全体の伸びが小さくなっており、従って健全な鉄筋に対して、同じような変形を生じさせる荷重が腐食した鉄筋では小さくなるため、見かけのヤング係数は小さくなることが考えられる。

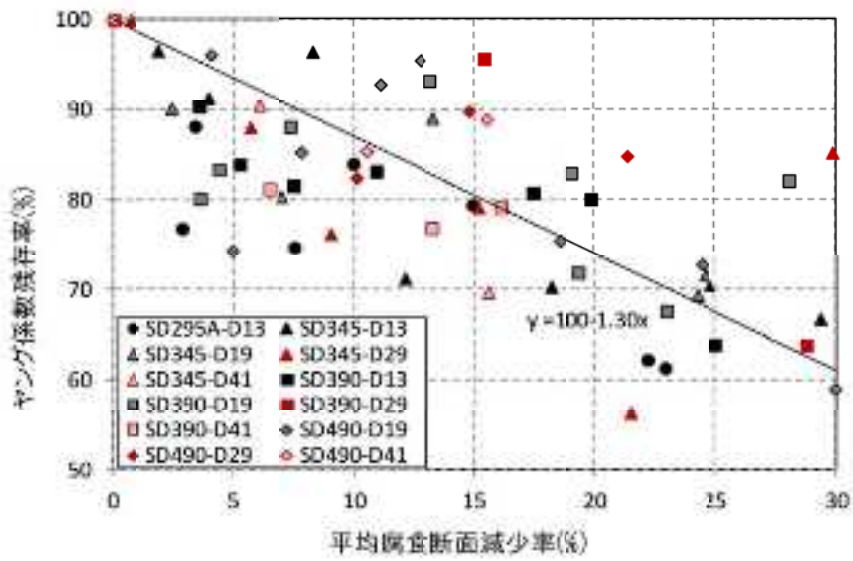


図 3. 4. 1-82 平均腐食断面減少率とみかけのヤング係数残存率の関係(電食)

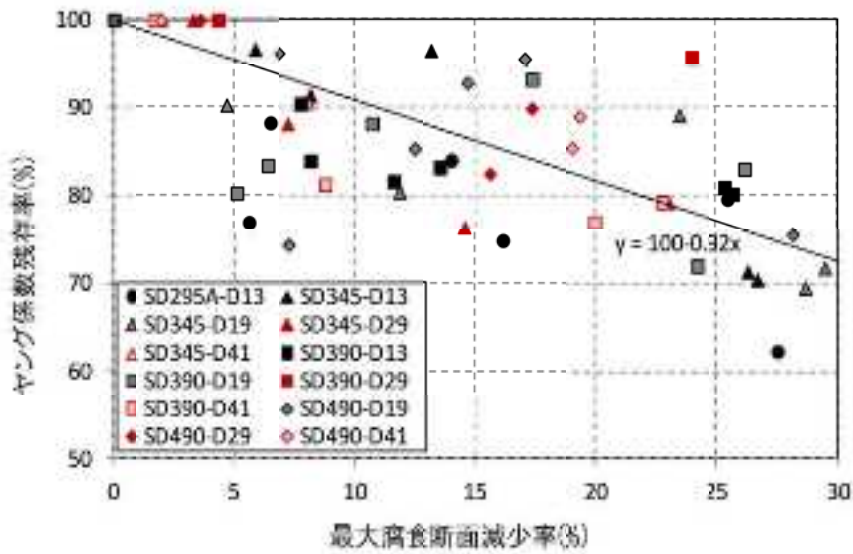


図 3. 4. 1-83 最大腐食断面減少率とみかけのヤング係数残存率の関係(電食)

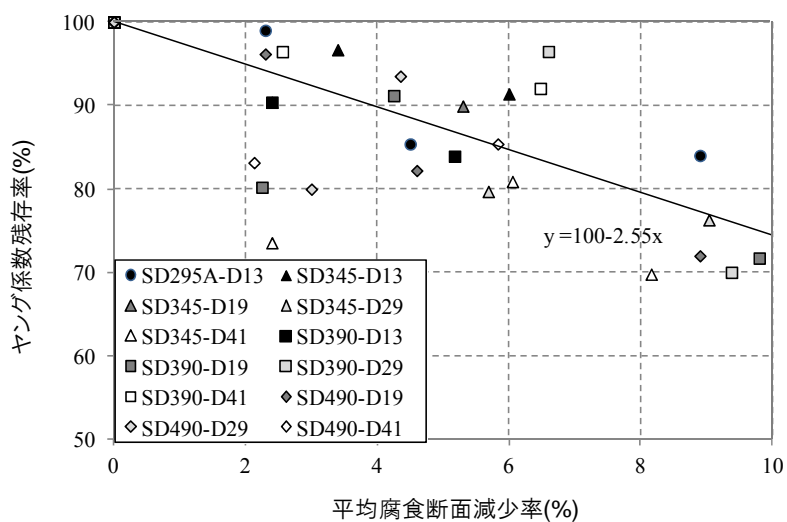


図 3.4.1-84 平均腐食断面減少率とみかけのヤング係数残存率の関係(塩水噴霧)

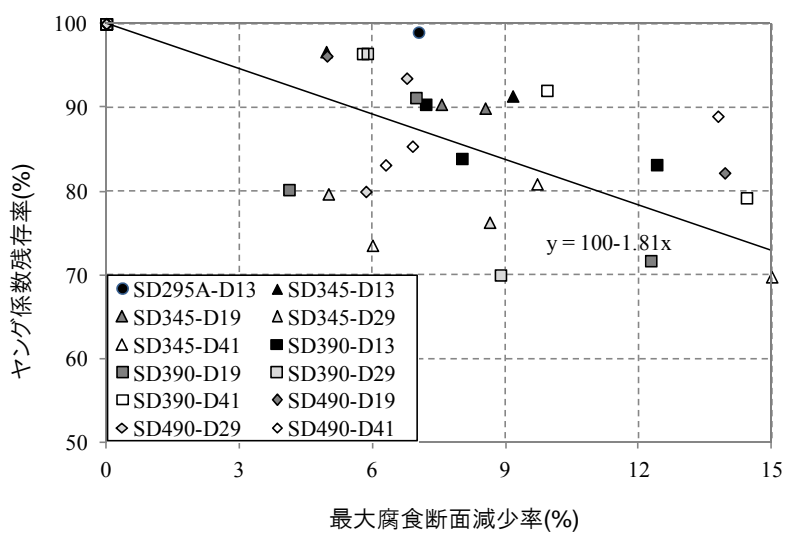


図 3.4.1-85 最大腐食断面減少率とみかけのヤング係数残存率の関係(塩水噴霧)

(e) 腐食方法毎の比較

表 3. 4. 1-27 に電食、塩水噴霧など腐食劣化促進方法毎の、降伏点残存率、引張強さ残存率、ヤング係数残存率のそれぞれの線形低下式の係数 α の一覧を示す。

$$y=100-\alpha x \quad (3. 2. 1-30)$$

ここに y は残存率、 α は線形低下係数、 x は断面減少率である。

線形低下係数が大きいほど、断面減少率にともなう強度低下率は大きくなっている。

電食による腐食試験や塩水噴霧試験による腐食試験など、同一試験で平均腐食断面減少率と最大腐食断面減少率を比較すると、平均腐食断面減少率の方が強度低下度は大きい。最大断面減少率と降伏点、および引張強さの関係図は最も腐食断面減少した地点における強度低下を示しているため、実際の強度低下の傾向と近い結果が出ていると考えられる。一方で、平均断面減少率にすると、すべて均一かつ全面的に腐食したこととして算出したことになるため、降伏点残存率および引張強さ残存率、ヤング係数残存率が最大断面減少率より小さい値である平均断面減少率で計算されることとなるので、傾きが大きくなる傾向を示したと考えられる。

また、電食試験によって腐食した鉄筋と、塩水噴霧試験によって腐食した鉄筋の強度低下にも差がでていた。これは電食試験によって腐食した鉄筋は節や節間によらず腐食断面減少が生じ、均一かつ全体腐食が生じていたのに対して、塩水噴霧試験によって腐食した鉄筋は節ではあまり腐食断面減少が進まず、節間では断面減少が進む傾向にあり腐食形態は節を残す様な全体腐食が生じていた。そのため、節や節間によらず均一的に腐食していた電食試験によって腐食した鉄筋の方が降伏点および、引張強さの低下が大きい。

表 3. 4. 1-27 腐食方法毎の線形低下式係数一覧

腐食方法	腐食断面減少率	降伏点残存率	引張強さ残存率	ヤング係数残存率
電食	平均	1.07	1.05	1.30
	最大	0.77	0.77	0.92
塩水噴霧	平均	0.95	0.86	2.55
	最大	0.57	0.72	1.81

(f) 鉄筋引張試験結果(鉄筋孔食試験)

図 3. 4. 1-86 に 0～12 週の塩水噴霧期間ごとの降伏点強度、図 3. 4. 1-87 に塩水噴霧期間ごとの引張強さを示す。ここでの降伏強度は降伏点荷重を引張試験に供した鉄筋の公称断面積で除した値、引張強さは最大荷重を試験に供した鉄筋の公称断面積で除した値とした。

これを見ると、3 週および 6 週塩水噴霧した供試体中の鉄筋はほとんど発錆することなく、強度性状も健全なものと変わらない結果となった。また、12 週間塩水噴霧を行った供試体では、強度が 2.5～5%低下している。今後、ひび割れを有するモルタルに鉄筋を埋め込んだ供試体には更なる塩水噴霧期間が必要であり、断面欠損の経過と合わせて検討を続ける。

12 週間の塩水噴霧をおこなったモルタル供試体中の鉄筋は、前述の通り、2.34%程度の腐食では、特に太径鉄筋では耐荷力低下は起きないということが分かった。これは電食試験や塩水噴霧試験において全面腐食が生じ、断面減少が均一に起きた場合は、その平均断面減少率がたとえ 2.5%でも耐荷力低下が生じるという結果から考察すると、腐食領域が大きい程、腐食による体力低下は大きくなるということがわかった。ひび割れを有するモルタル供試体中の鉄筋は、塩水噴霧試験中、ひび割れから極狭い領域に塩分が作用し、局所的かつ限定的な腐食が起きたため、孔食が生じない程度の発錆では耐荷力低下は生じないと考えられる。

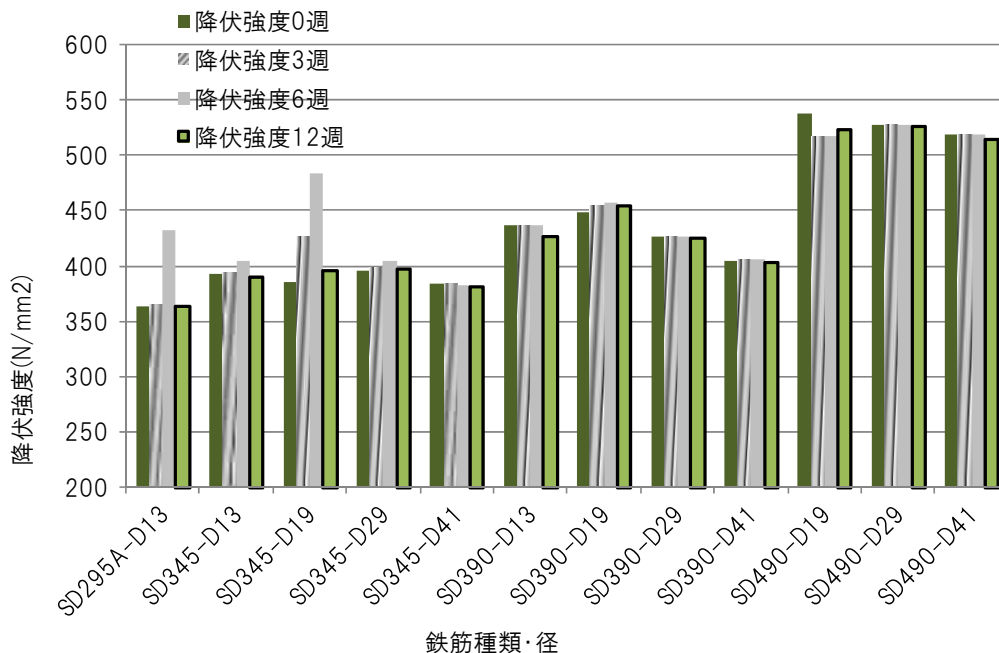


図 3. 4. 1-86 ひび割れを有するモルタル中の腐食した鉄筋の降伏強度

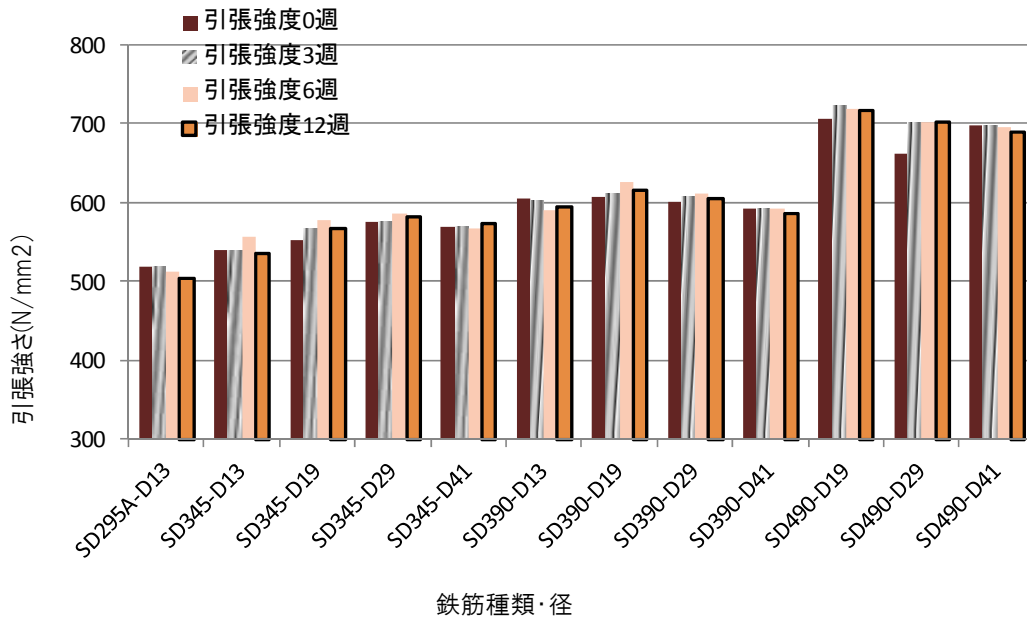


図 3. 4. 1-87 ひび割れを有するモルタル中の腐食した鉄筋の引張強さ

4) まとめ

本研究で得られた知見および今後の課題を以下に示す。

- (1) 鉄筋が電食により均一に腐食した場合、降伏強度、引張強さ、およびヤング係数は鉄筋の種類や径に拠らず、断面減少率と同程度の割合で線形に低下する。
- (2) 鉄筋が塩水噴霧により均一に腐食した場合、降伏強度、引張強さ、およびヤング係数は鉄筋の種類や径に拠らず、断面減少率と同程度の割合で線形に低下する。
- (4) 塩水噴霧によって腐食した鉄筋は節の頂点部より節間がより腐食しやすい傾向にあった。
- (5) 電食によって腐食した鉄筋と、塩水噴霧試験によって腐食した鉄筋を比較すると、力学的性状の低下度はわずかに電食によって腐食した鉄筋の方が大きい。電食試験によって腐食した鉄筋は節や節間によらず腐食断面減少が生じ、均一かつ全体腐食が生じていたのに対して、塩水噴霧試験によって腐食した鉄筋は節ではあまり腐食断面減少が進まず、節間では断面減少が進む傾向にあり、腐食形態は節を残す様な全体腐食が生じていた。そのため、節や節間によらず均一的に腐食していた電食試験によって腐食した鉄筋の方が降伏点および、引張強さの低下が大きい。
- (6) 電食試験や塩水噴霧試験など、同一試験で平均腐食断面減少率と最大腐食断面減少率を比較すると、平均腐食断面減少率の方が強度低下度は大きい。最大断面減少率と強度低下の関係は最も腐食断面減少した地点における強度低下を示しているため、実際の強度低下の傾向と近い結果が出ており、一方で、平均断面減少率にすると、すべて均一かつ全面的に腐食したこととして算出したことになる。そのため、

- 降伏点および引張強さ、ヤング係数が最大断面減少率より小さい値である平均断面減少率で計算されることとなるので、傾きが大きくなる傾向を示したと考えられる。
- (7) ひび割れを有するモルタル中の鉄筋は、ひび割れからの塩分の侵入により局所的に腐食が進行する傾向にある。
 - (8) 今回の実験では、ひび割れを有するモルタル供試体中の鉄筋は平均すると、ごく小さい面積で約2.5%断面減少していたが、小さい断面減少率かつ狭い領域の腐食では、SD490やD41などの高強度太径鉄筋では耐荷力低下が生じにくく、腐食面積が大きく最大腐食断面減少率が大きければ、腐食による鉄筋の耐荷力はそれに伴って大きく低下する

5) 今後の課題

今後の課題を以下に示す。

- (1) 鉄筋そのものの塩水噴霧を継続し、断面減少率が20～30%と大きくなったものについて検討を行う。
- (2) ひび割れを有するモルタル中の鉄筋の腐食について、塩水噴霧を継続し、鉄筋の一部が著しく腐食した場合の力学的性状に関して明らかにする。
- (3) 電食や塩水噴霧などの促進試験だけでなく、実環境(可能であれば発電所施設付近)での暴露試験を行い、促進試験との関係を明らかにすることで、健全性評価の精度が向上する。

(5) 鉄筋腐食が RC 部材の強度低下および剛性劣化に及ぼす影響

1) 目的

鉄筋腐食を伴う鉄筋コンクリート部材の実験および有限要素解析を行い、経年劣化部材の強度低下および剛性低下の推定方法を確立し、構造健全性評価基準に資することを目的としている。鉄筋コンクリート部材端部は構造上、地震時の曲げモーメントが大きくなるが、部材中央部では曲げモーメントは小さい。したがって、部材端部の必要鉄筋量は多くなり、多段配筋となる場合が多いが、2 段筋は途中で切断するカットオフ筋が多用されている。このカットオフ筋は短い付着長さで応力を伝達しなければならず、付着割裂破壊が懸念される。また途中で切断した鉄筋は、廃炉に至るまでの長期間を想定した場合、鉄筋腐食の極限である破断に相当するとも考えられる。

一方、原子力建屋を含む重要構造物に対する耐震基準が強化され、必要鉄筋量が多くなり、配筋の過密化による施工性やコンクリート充填性の悪さが問題となってきた。高強度鉄筋の利用はその解決策の一つである。しかし、横補強筋に用いる際は横補強筋量を減らすことによる付着割裂強度の低下が懸念される。特に、2 段目主筋にカットオフ筋を有する場合、付着割裂破壊を避けるために多くの横補強筋量が必要である。

合理的な解決案としては、施工性の良い非閉鎖型補強筋によって横補強筋比を高め、主筋の付着割裂破壊に対し補強する提案²⁹がある。昨年度は、非閉鎖型補強筋を付着割裂防止筋として使用した場合の補強効果について実験により検討した。しかし、施工性に優れた非閉鎖型補強筋を用いた 2 段目主筋やカットオフ主筋を対象とした研究例は少ない。

今年度は、カットオフ筋（鉄筋腐食の極限）の付着付着割裂破壊に対する非閉鎖型補強筋量を 2 倍にし、鉄筋コンクリート造梁部材の逆対称曲げせん断載荷実験により、2 段目カットオフ主筋の付着割裂破壊に対する補強効果の比較、検討を行う。非閉鎖型補強筋を含む各種横補強筋を用いたそれらの実験に基づいて、構造部材の強度低下および剛性劣化に及ぼす影響を明らかにする。廃炉後も含めた経年劣化に対して最も有効な付着割裂抑制方法を提案し、鉄筋コンクリート構造物の健全性評価の判断基準に資することによって、長期健全性評価手法を高度化する。

²⁹ 長友克寛，佐藤裕一，松原三郎，高橋恵子：“非閉鎖型補強筋による付着割裂強度の改善効果に関する研究，コンクリート工学年次論文集，Vol. 27，No. 2，pp. 1135-1140，（2005）”

2) 実験計画

(a) 試験体計画

試験体は表 3.4.1-28 に示す全 10 体である。これは昨年度報告した 6 体に加えて、同シリーズの 4 体を加えたものとなっている。試験体 0.3-M は基準試験体であり、その他の試験体は試験体 0.3-M に各種付着割裂防止筋を付加し横補強筋比を相対的に高めた試験体 (0.3%、0.6%)、カットオフ長さ (900mm、1070mm、1230mm) を変えた試験体である。主筋の降伏強度に対する付着割裂強度の比は、0.3、0.4 および 0.5 とし、日本建築学会靱性指針式³⁰にしたがって付着割裂破壊が先行するように設計している。付着割裂補強筋の配筋方法を図 3.4.1-88 に示す。せん断スパン比は 3 で、主筋をカットオフするためのスパンを確保した。表 3.4.1-28 に示す各試験体のコンクリート圧縮強度は材齢の線形補間により算出した。また、上下端の主筋に付着強度の差が生じないよう試験体を寝かした状態で打設した。

カットオフ筋長さは 2 段目主筋の付着強度計算値が主筋降伏時の付着応力度に対する比 (以下 τ_{2cal} / τ_y) が、 $\Sigma p_w=0.9\%$ の補強効果と同じ 0.5 となる 1230mm (試験体名の後ろが L)、基準長さ 1070mm ($\tau_{2cal} / \tau_y=0.4$ 、試験体名の後ろが M)、900mm ($\tau_{2cal} / \tau_y=0.3$ 、試験体名の後ろが S) の 3 種類を設定した。2 段目主筋の付着強度計算値は横補強筋比を Σp_w として日本建築学会の靱性指針に規定された 2 段目主筋の付着強度式により算出した。ただし、指針式は安全係数として 0.8 を乗じていることを考慮し、0.8 で除した実験平均値を使用した。

主筋降伏時の付着応力度は付着応力が危険断面から有効せい 430mm 以上中央側の領域で、カットオフ筋にそって一律に働くとして算出した平均付着応力度である。2 段目主筋の付着割裂強度が計算値どおり Σp_w の補強効果を発揮する場合は、 τ_{2cal} / τ_y に比例して最大耐力が増大する。

あばら筋は高強度鉄筋を使用し、横補強筋比は 0.3% である。付加した付着割裂補強筋は普通強度鉄筋を使用し、中子筋 (試験体名の先頭が TR)、内側の非閉鎖型補強筋 (試験体名の先頭が IR)、外側の非閉鎖型補強筋 (試験体名の先頭が OR) の 3 種である。外側の非閉鎖型補強筋は定着を確保するために、内側に折り曲げた。一方内側の非閉鎖型補強筋は、中子筋と比較するため直線定着とした。付着割裂補強筋比はあばら筋と同等の 0.3% と、2 倍の 0.6% ととなるように配した。試験体名中央の数字はあばら筋を含む横補強筋比の合計値 (以下 Σp_w) を表している。カットオフ筋長さは 900mm (試験体名の最後が M) 1070mm (試験体名の最後が M) と 1230mm (試験体名の最後が L) の 3 種類とした。主筋は D22 を 2 段配筋とし、各段に 4 本ずつ配し、2 段目主筋はすべてカットオフ筋とした。主筋は付着割裂破壊が先行するように SD390 に熱処理を施した高強度鉄筋とした。表 3.4.1-29 および表 3.4.1-30 に鉄筋の対応表と力学特性を示し、各試験体の配筋図は図 3.4.1-89、図 3.4.1-90、図 3.2.1-91、図 3.4.1-92 および図 3.4.1-93 に示す。

³⁰ 日本建築学会：鉄筋コンクリート造建物の靱性保証型耐震設計指針・同解説，1999

表 3.4.1-28 試験体の変動因子及び計算値一覧

試験体名	コンクリート強度 (N/mm ²)	せん断補強筋	横補強筋比 Σpw	カットオフ長さ (mm)	付着強度			耐力計算値			Q _{BU} /Min (Q _{FU} , Q _{SU})	
					τ _{2cal} (N/mm ²)	τ _{2y} (N/mm ²)	$\frac{\tau_{2cal}}{\tau_{2y}}$	Q _{BU} (kN)	Q _{FU} (kN)	Q _{SU} (kN)		
0.3-M	38.3	U - 7.1 @80 (σy1275) pw=0.3%	0.3%	1070	2.5	8.5	0.3	292	763	864	0.4	
TR-0.6-M	46.7		0.6%		900	3.5			417	819	941	0.5
IR-0.6-M	48.4					3.5	8.8	0.4	421	828	954	0.5
OR-0.6-M	50.0					3.5			425	837	965	0.5
IR-0.6-S	42.3			3.4		11.9	0.3	299	795	903	0.4	
IR-0.6-L	50.8		0.6%	1230	3.6	7.0	0.5	529	841	970	0.6	
IR-0.6-M-W	42.4				3.4	8.8	0.4	409	796	904	0.5	
IR-0.9-M	42.4				0.9%	1070	4.2			499	798	904
TR-0.9-M	49.3		4.4	8.5			0.5	514	833	960	0.6	
IR-0.9-M	42.2		4.2					499	797	903	0.6	

注) τ_y: カットオフ主筋降伏時の付着応力度

τ_{1cal}, τ_{2cal}: 靱性指針²に規定された1段目及び2段目主筋強度計算値を式の安全係数0.8で除した値

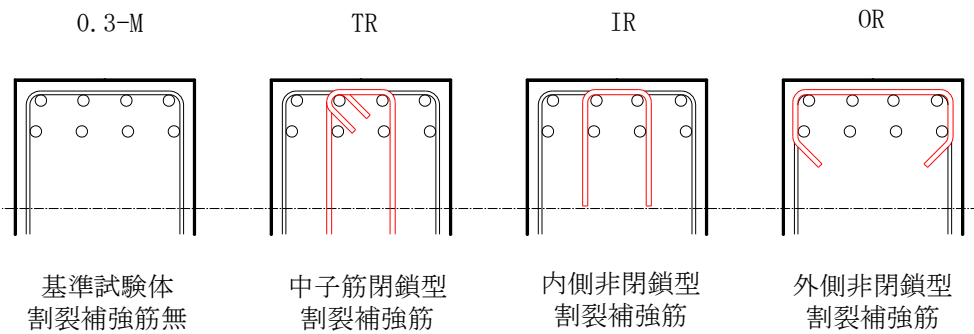


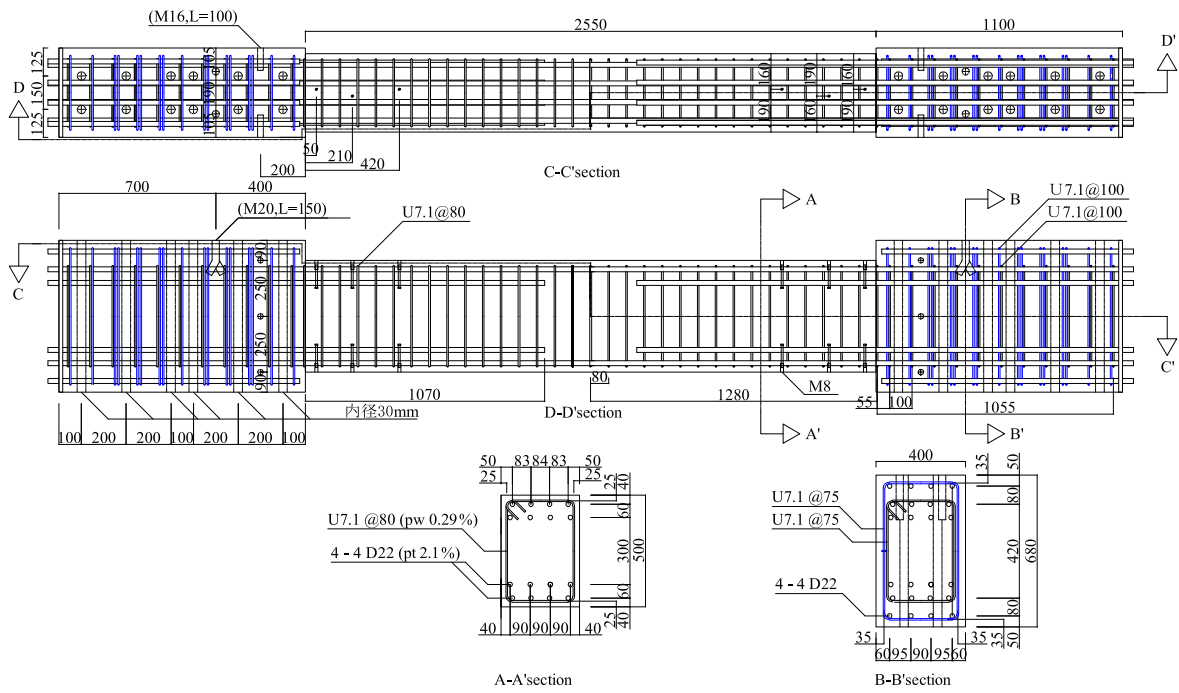
図 3.4.1-88 付着割裂補強筋の配筋方法および試験体名

表 3.4.1-29 鉄筋対応表

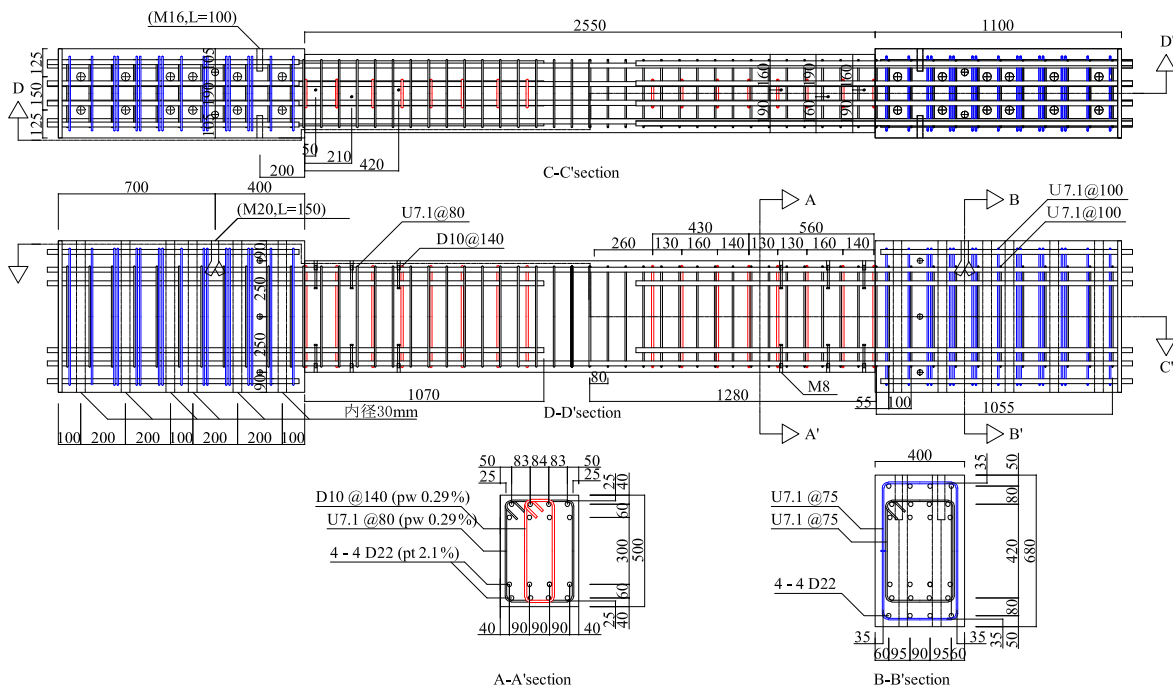
試験体	1 段目 主筋	2 段目主筋	
		正載荷 引張側	正載荷 圧縮側
0.3-M	LOT-1	LOT-2	
TR-0.6-M		LOT-1	
IR-0.6-M			
OR-0.6-M			
IR-0.6-S			
IR-0.6-L			
IR-0.6-M-W			
TR-0.9-M		LOT-2	
IR-0.9-M		LOT-1	
OR-0.9-M		LOT-2	

表 3.4.1-30 鉄筋の力学特性一覧

呼び径 (種類) 使用箇所	供試体 番号	降伏強度 σ_y (N/mm ²)	引張強度 σ_t (N/mm ²)	ヤング係 Es (10 ⁵ N/mm ²)	破断伸び δ (%)
D22 (SD390 熱処理) 主筋 (LOT-1)	No. 1	1016	1097	1.81	5.2
	No. 2	1006	1086	1.81	6.5
	No. 3	1012	1088	1.82	6.5
	平均	1011	1090	1.81	6.1
主筋 (LOT-2)	No. 1	988	1037	1.87	6.7
	No. 2	983	1032	1.85	6.3
	No. 3	974	1023	1.81	7.0
	平均	982	1031	1.84	6.7
U7.1 (SBPD1275/1420) あばら筋	No. 1	1465	1477	2.04	(-)
	No. 2	1445	1465	2.06	(-)
	No. 3	1457	1477	2.12	(-)
	平均	1456	1473	2.08	(-)
D10 (SD295) 中子筋 付着割裂補強筋	No. 1	373	506	1.67	22.2
	No. 2	374	506	1.76	22.6
	No. 3	375	503	1.66	23.1
	平均	374	505	1.69	22.6
D6 (SD295) 中子筋 付着割裂補強筋	1	322	482	1.61	14.0
	2	324	494	1.62	17.4
	3	316	495	1.43	13.6
	平均	320	490	1.56	15.0

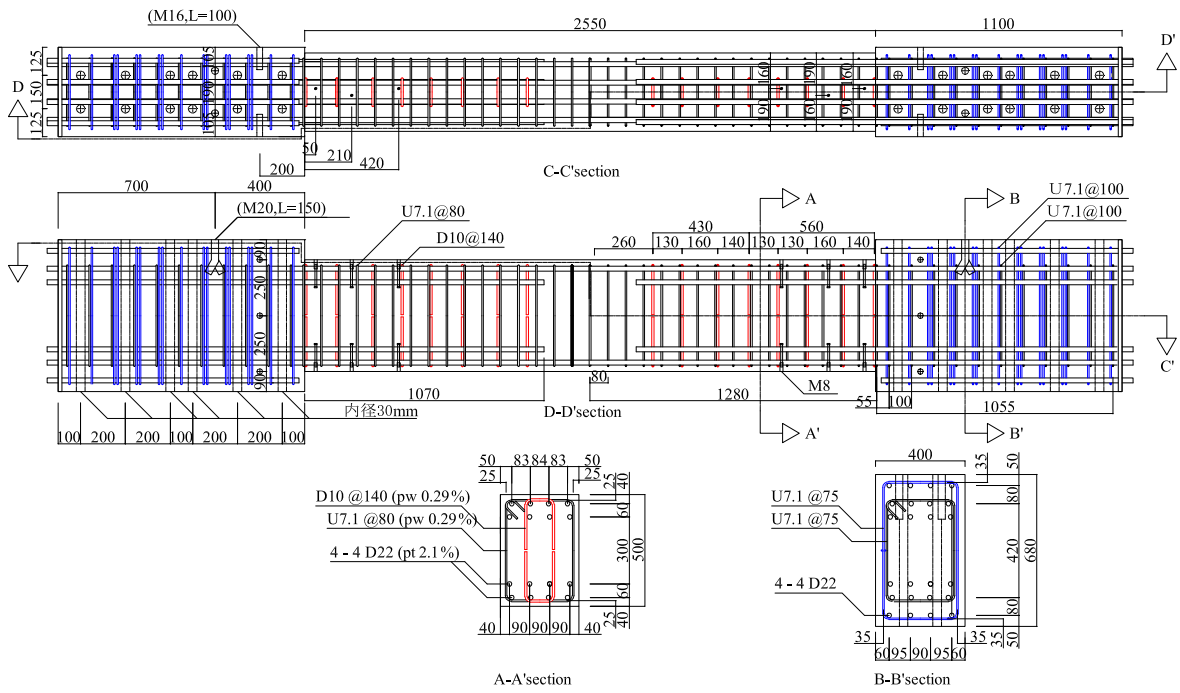


(1) 基準試験体 0.3-M

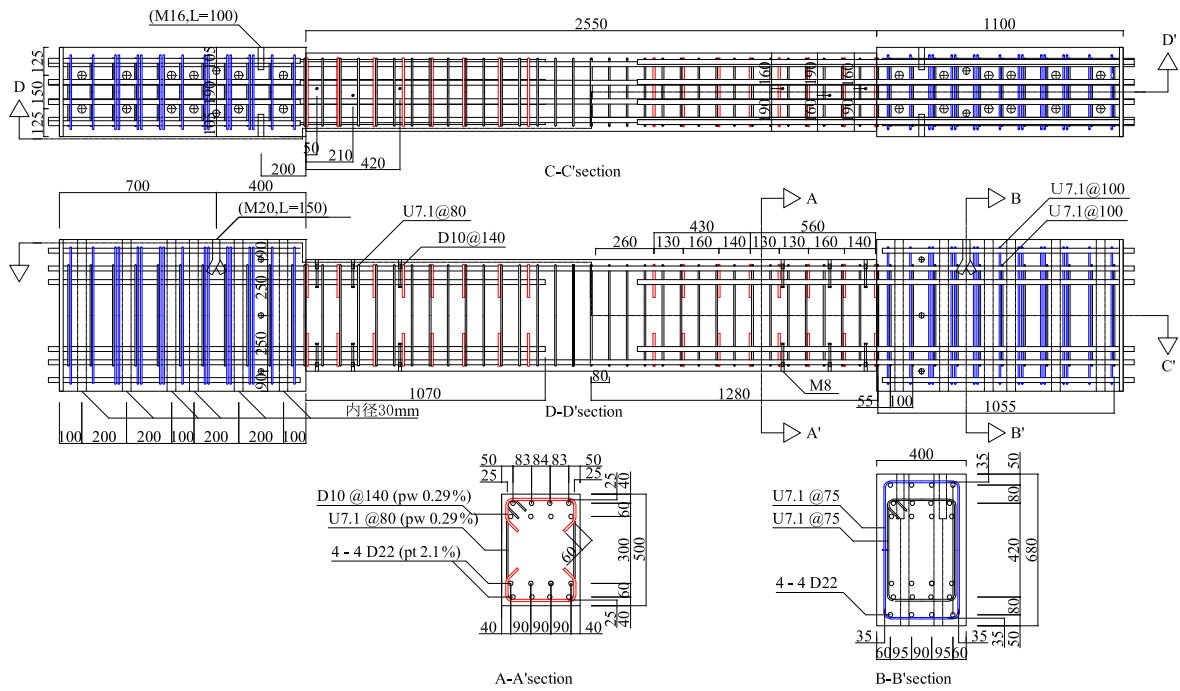


(2) 中子筋閉鎖型割裂補強筋試験体 TR-0.6-M

図 3.4.1-89 0.3-M および TR-0.6-M 試験体配筋図

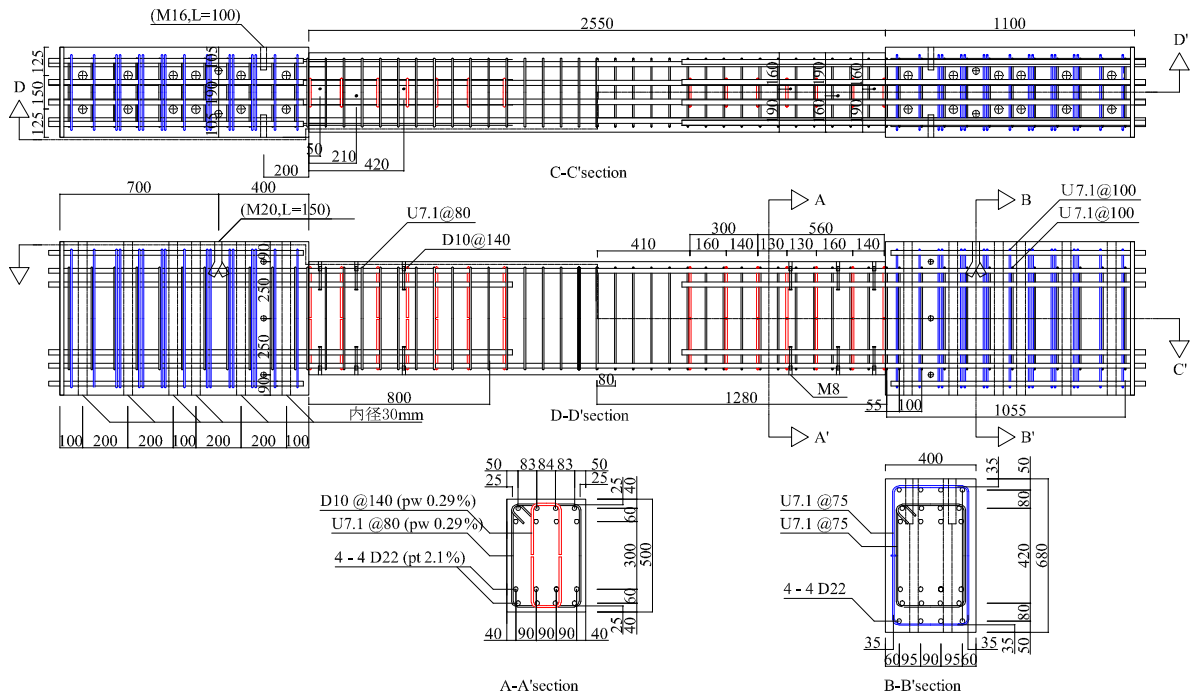


(3) 内側非閉鎖型割裂補強筋試験体 IR-0.6-M

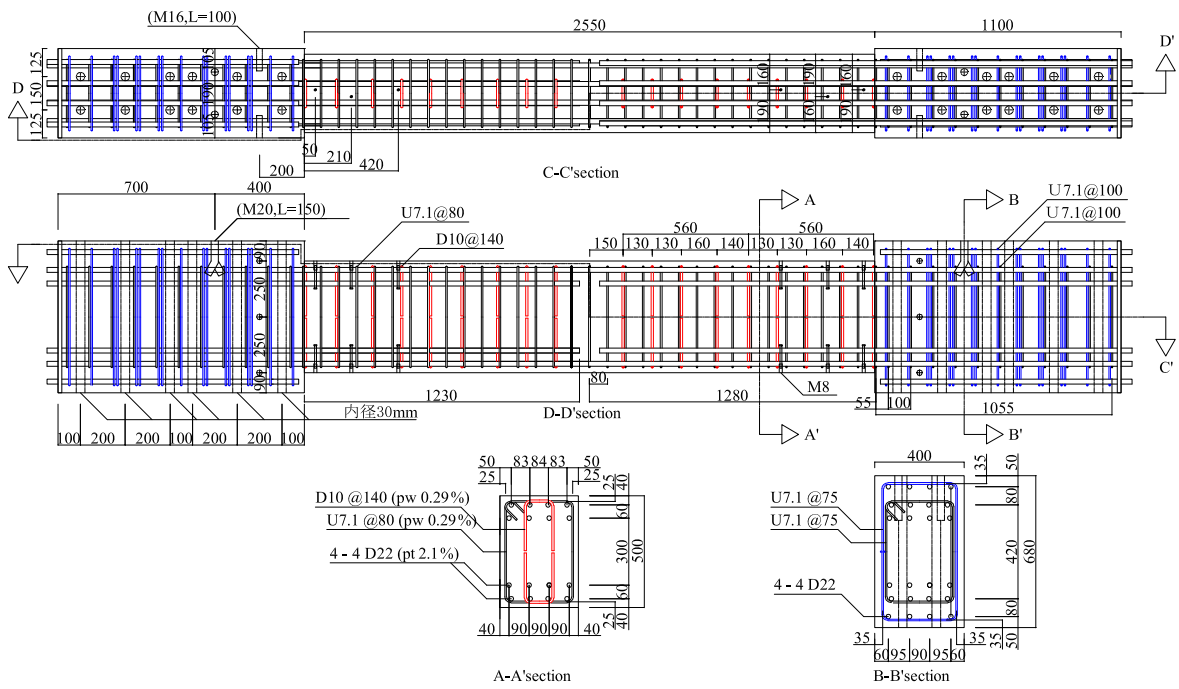


(4) 外側非閉鎖型割裂補強筋試験体 OR-0.6-M

図 3.4.1-90 IR-0.6-M および OR-0.6-M 試験体配筋図



(5) 内側非閉鎖型短筋割裂補強筋試験体 IR-0.6-S



(6) 内側非閉鎖型長筋割裂補強筋試験体 IR-0.6-L

図 3.2.1-91 IR-0.6-S および IR-0.6-L 試験体配筋図

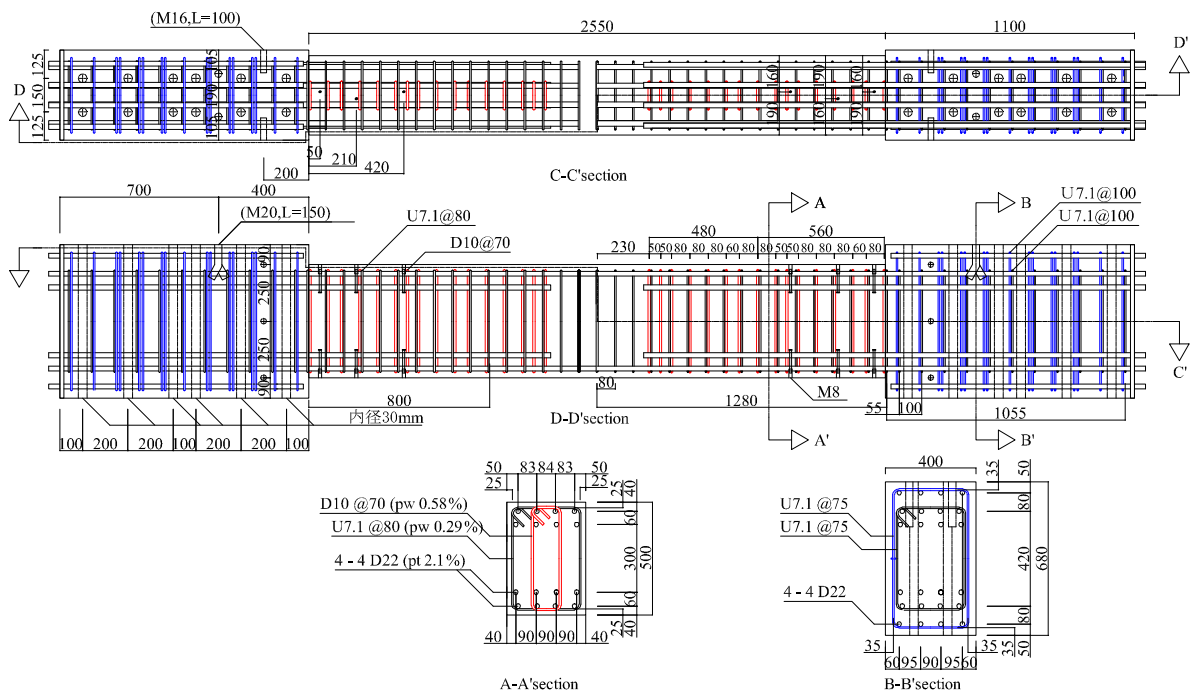
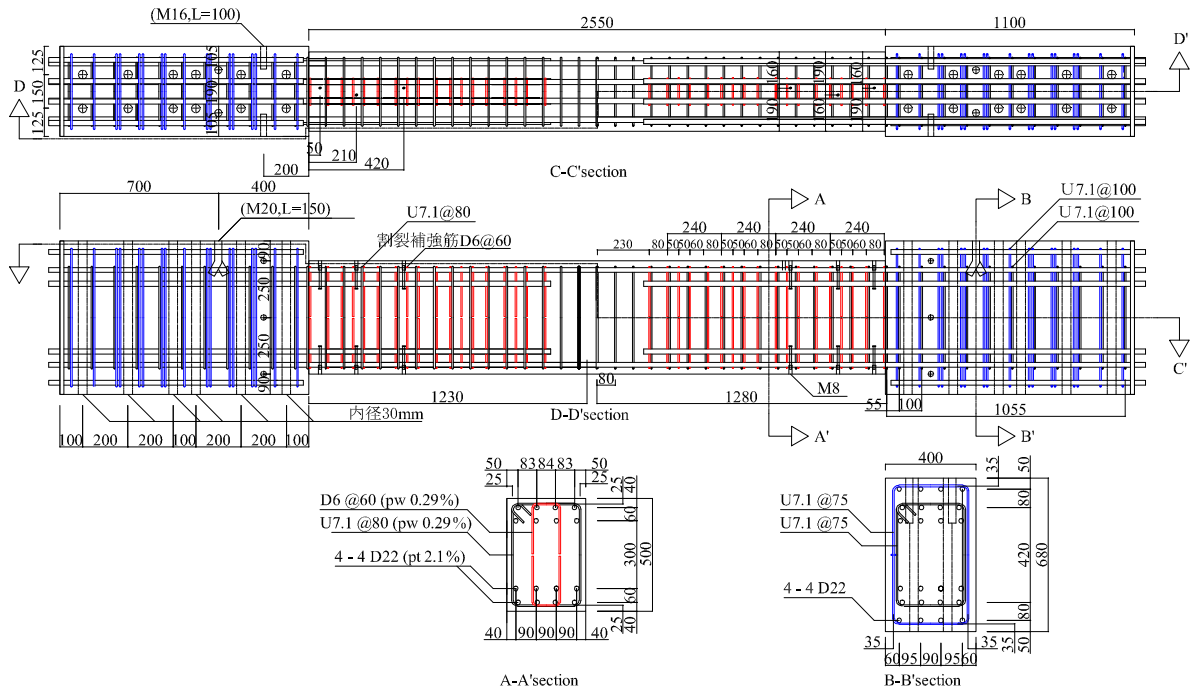
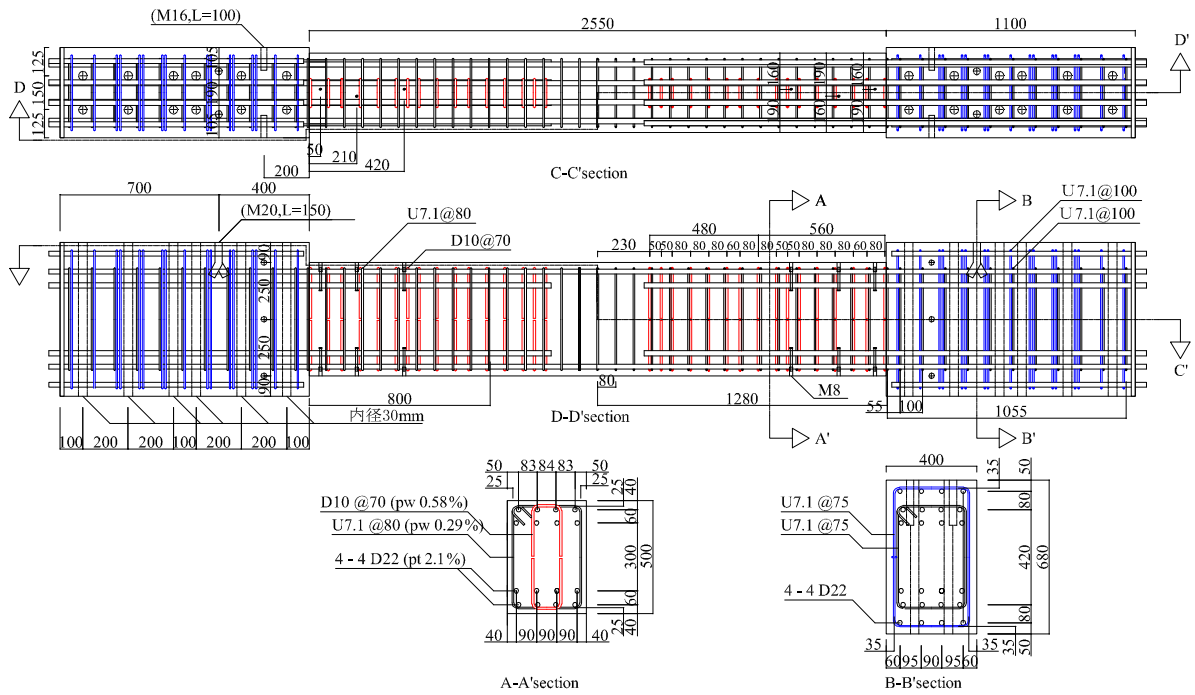
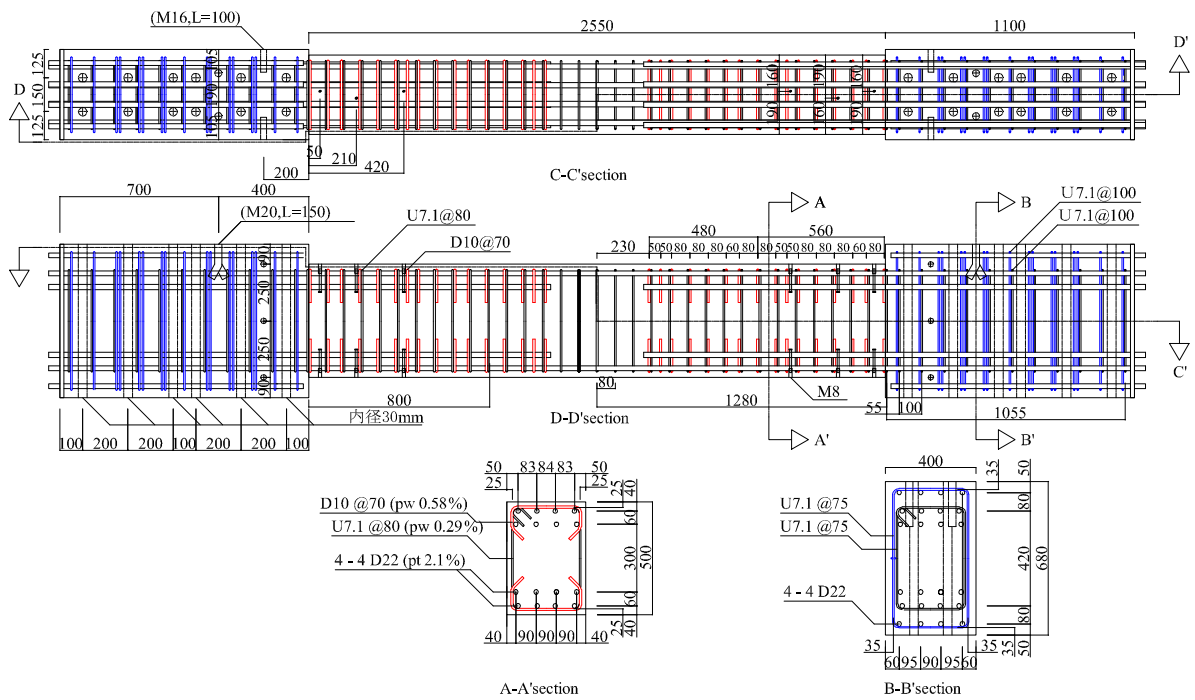


図 3.4.1-92 IR-0.6-M-W および TR-0.9-M 試験体配筋図



(9) 内側非閉鎖型割裂補強筋試験体 IR-0.9-M



(10) 内側非閉鎖型割裂補強筋試験体 OR-0.9-M

図 3.4.1-93 IR-0.9-M および OR-0.9-M 試験体配筋図

(b) 載荷方法

載荷方法は図 3. 4. 1-94 に示す建研式載荷方法により逆対称モーメント分布を模擬した正負交番静的漸増繰り返し載荷とした。図の両端のスタブは加力梁、および反力梁に PC 鋼棒を用いて緊結されており、加力梁に取り付けた 2 本のジャッキで両スタブが平行を保つように制御した。加力に変位制御とし、変形角で $1/800$ 、 $1/400\text{rad}$ がそれぞれ 1 回、その後は $1/200$ 、 $1/100$ 、 $1/67$ 、 $1/33\text{rad}$ で各 2 回の繰り返しとした。ただし、1 回目の変形角ピーク時にせん断力が過去の最大値を超えない場合は除荷後加力を打ち切った。

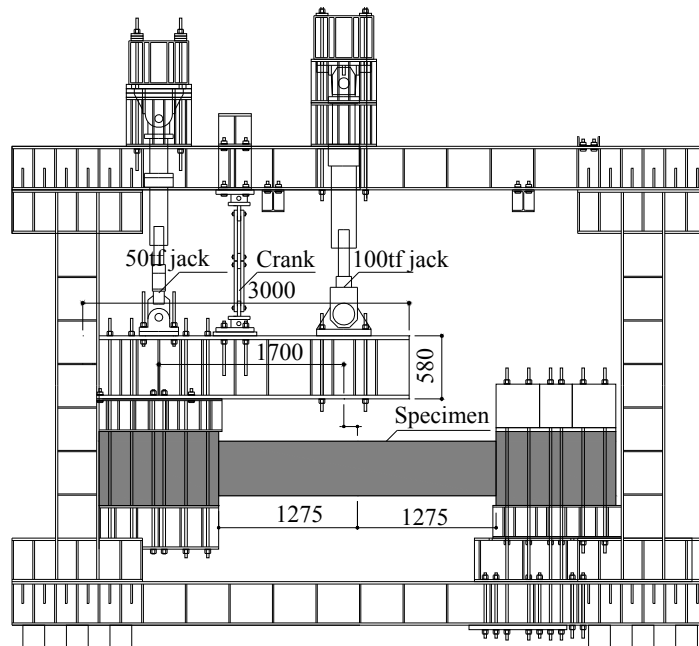


図 3. 4. 1-94 載荷装置

(c) 測定方法

測定項目は、試験体に作用するせん断力、スタブ間の相対変位、主筋及び横補強筋の歪である。各鉄筋の歪は歪ゲージにより測定した。今年度行った4試験体の歪ゲージの添付位置を図3.4.1-95に示す。ただし歪を測定した主筋は幅方向に並ぶ4本のうち打設底面に近い外側の1本と打設上面に近い内側の1本ずつである。また、横補強筋の歪ゲージは打設時底面側に1枚ずつ添付した。

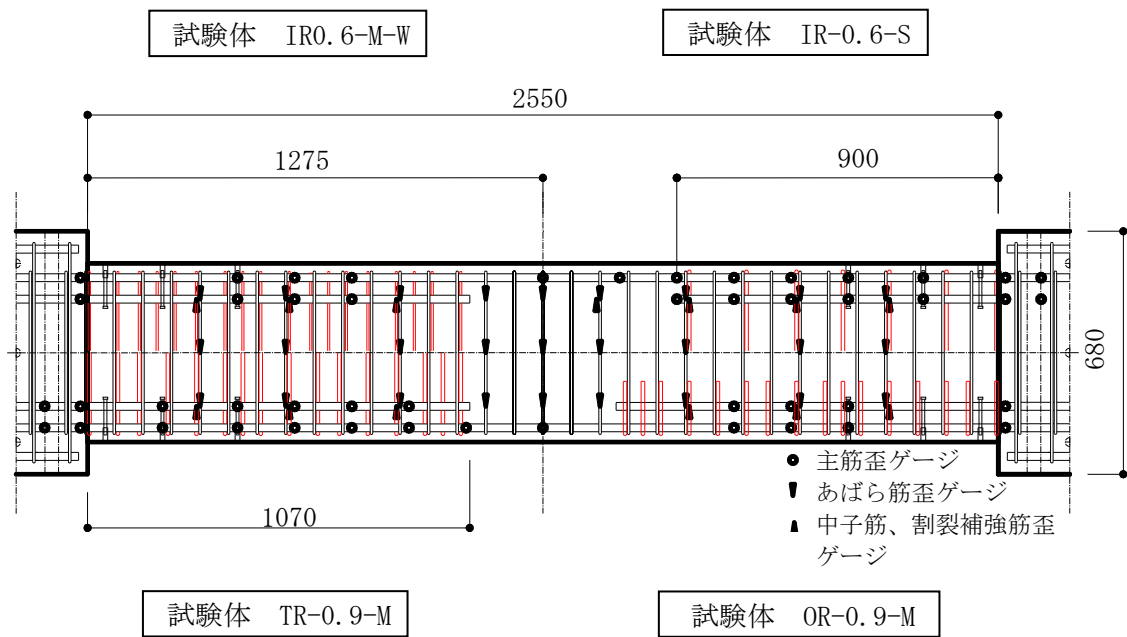


図 3.4.1-95 歪ゲージ付位置

3) 実験結果および考察

(a) ひび割れ性状および破壊モード

図 3.4.1-96、図 3.4.1-97 に最大耐力時のひび割れ図および最終破壊状況写真を示す。ひび割れ図の青線が正載荷時に、赤線が負載荷時に発生したひび割れである。いずれの試験体もせん断ひび割れおよび付着ひび割れが多数生じた。

最大耐力時には、カットオフした 2 段目主筋の先端を横切る斜めひび割れ挙動が支配的になり、大きく開いた。拘束効果の高い中子筋を配した試験体（試験体名の先頭が TR）およびカットオフ筋長さの長い試験体（試験体名の最後が L）は、その他の試験体と比べ中央部までせん断ひび割れが生じていた。最終破壊状況を示した写真に注目すると引張り側の 2 段目主筋のカットオフ端 10cm~20cm の部分と 1 段筋の中央部で付着割裂破壊が顕著に現れている。また、危険断面では圧縮側かぶりコンクリートの剥落が確認できる。試験体中央部は中子筋を配した試験体に大きな損傷が見られる。

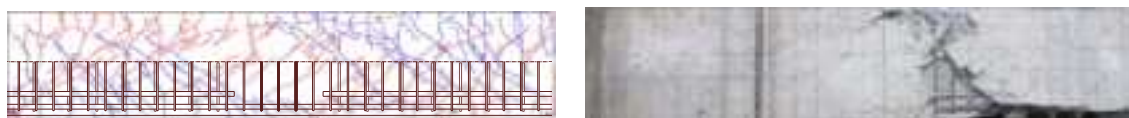
破壊形式は見た目だけでは断定できないが、2 段目主筋のカットオフ端近傍の付着割裂破壊後、1 段目主筋の引張応力が増大し、特に後述する付着応力の高い中央部から 1 段目主筋の付着割裂が進展すると共に、圧縮端のかぶりコンクリートの圧壊で徐々に抵抗力を失ったと考えられる。さらに後述する付着強度計算値と対応が良いことや歪性状からカットオフ筋の端部の付着割裂破壊と判断した。



試験体 0.3-M（最大耐力 471.5 kN、変形角 1/67）



試験体 TR-0.6-M（最大耐力 697.6 kN、変形角 1/33）

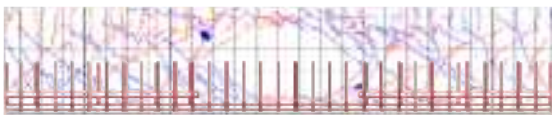


試験体 IR-0.6-M（最大耐力 612.8 kN、変形角 1/50）

図 3.4.1-96 最大耐力時のひび割れ図および最終破壊状況写真（その 1）



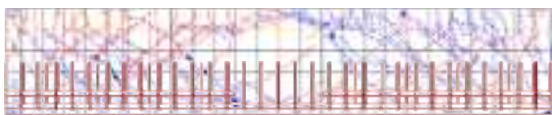
試験体 OR-0.6-M (最大耐力 581.5 kN、変形角 1/50)



試験体 IR-0.6-S (最大耐力 570.4kN、変形角 1/50)



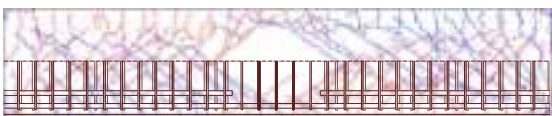
試験体 IR-0.6-L (最大耐力 680.9 kN、変形角 1/50)



試験体 IR-0.6-M-W (最大耐力 612.0kN、変形角 1/50)



試験体 TR-0.9-M (最大耐力 817.3kN、変形角 1/33)



試験体 IR-0.9-M (最大耐力 657.0 kN、変形角 1/50)



試験体 OR-0.9-M (最大耐力 590.4kN、変形角 1/50)

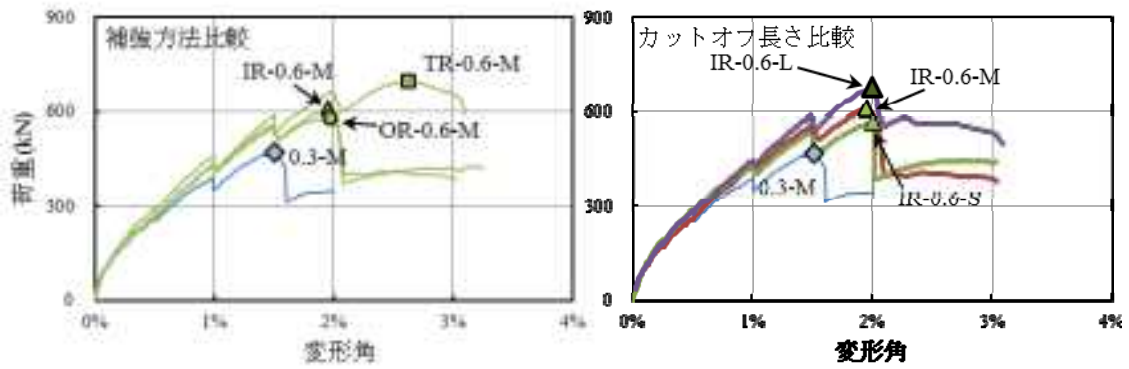
図 3.4.1-97 最大耐力時のひび割れ図および最終破壊状況写真 (その 2)

(b) 荷重－変形角関係

図 3.4.1-98 に骨格曲線の比較、図 3.4.1-99 に荷重変形角関係を示す。履歴は全試験体とも最大耐力の前まではほぼ同様な傾向を示し、最大耐力を迎えた後はスリップ型となった。剛性、最大耐力とその時の変形角は試験体ごとに差があり、付着割裂防止筋とカットオフ長さの影響が現れている。まず基準試験体に 3 種類の異なる付着割裂補強筋 (TR、IR、OR) を 0.3% 配した試験体を比べると、TR 型を配した試験体は最大耐力が基準試験体から 48% 上昇し、変形角も 1 サイクル大きい。IR 型、OR 型を配した試験体の最大耐力はほぼ同等に補強されその増加は 23%~30% であった。さらに付着割裂防止筋の補強量を 0.6% まで増やすと TR 型の補強筋は最大耐力をさらに 17% 増加させたが IR 型は 7% 増、OR は 1% 増となり、非閉鎖型の耐力増分は閉鎖型の TR 型と比べると僅かであり、補強限界がみられる。

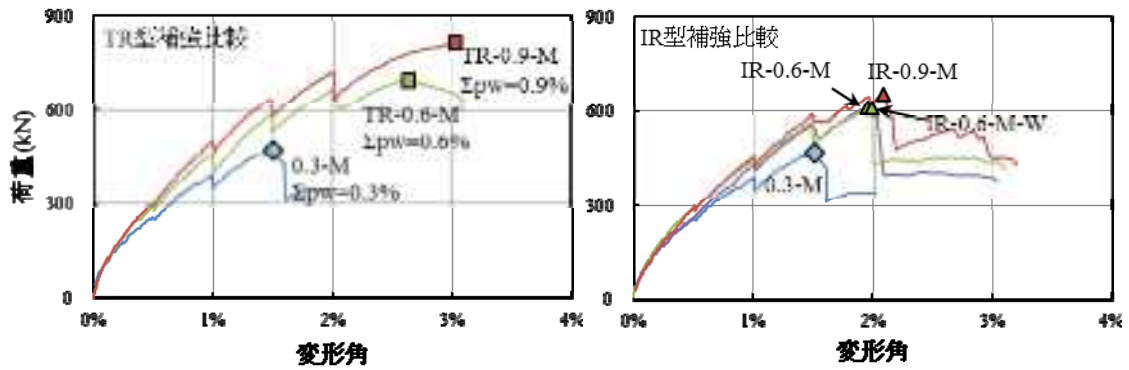
カットオフ長さの異なる試験体を比べると、最大耐力はカットオフ長さが長くなるにつれ上昇したが、最大耐力時の変形角はほぼ等しかった。最もカットオフ長さの短い IR-0.6-S 試験体は、基準試験体と同じ $\tau_{2cal} / \tau_y = 0.3$ であるが、 $\tau_{2cal} / \tau_y = 0.4$ の IR-0.6-M 試験体と同程度の耐力を発揮している。これは引張力を短い付着長さで伝達しなければならず、必然的に後述する付着応力が高くなるためである。逆にカットオフ長さの長い IR-0.6-L 試験体は、付着応力が低くなるが付着長さが長いことによって、同じ $\tau_{2cal} / \tau_y = 0.5$ の非閉鎖型試験体 IR-0.9-M や OR-0.9-M より大きな最大耐力となっている。

なお、割裂防止筋の径と間隔を変えてもその補強筋量が等しければ、剛性及び最大耐力に影響は見られなかった。



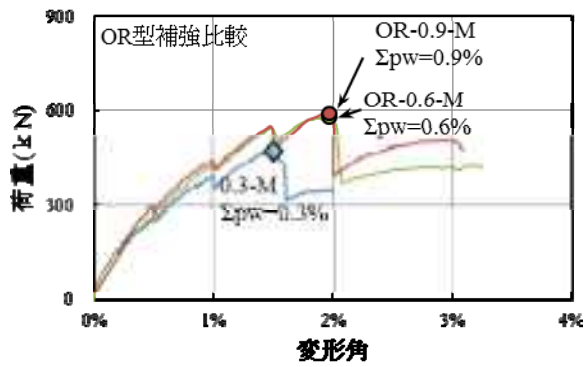
(1) 補強方法比較

(2) カットオフ長さ比較



(3) 中子筋型補強比較

(4) 内側開口型補強比較



(5) 外側開口型補強比較

図 3.4.1-98 各種補強による骨格曲線の比較

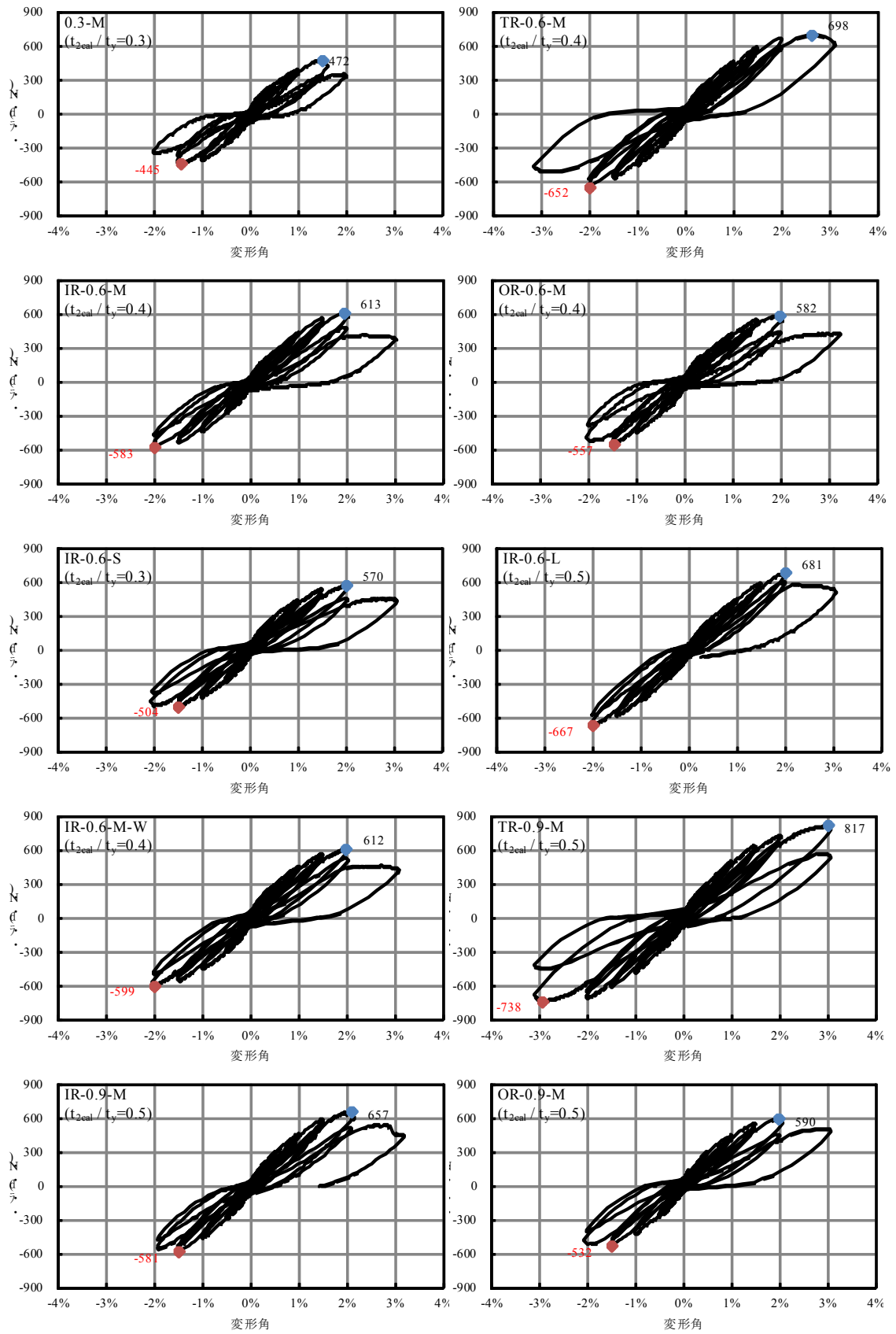


図 3.4.1-99 各種補強による荷重変形関係の比較

(c) 主筋の歪・付着性状

測定した主筋の歪から付着性状の検討を行った。大きな変形性能を示した TR-0.9-M 試験体を除いて、主筋の降伏は見られなかった。図 3.4.1-100 は試験体 IR-0.6-S、図 3.4.1-101 に試験体 IR-0.6-M と IR-0.6-L の主筋の正載荷時における歪分布を示している。図中の数字は変形角を示している。実線で示す 2 段目主筋の歪分布に注目すると、引張側のカットオフ筋端部に歪勾配が大きく、1 段目主筋の付着応力の 2~3 倍の付着応力が作用していることが分かる。破線で示す 1 段目主筋のひずみ分布は、2 段目主筋の存在しない部材中央部でひずみ勾配が大きく、大きな付着応力が作用しているのがわかる。危険断面位置から中央に有効せい分の 430 mm の位置を破線で示した。この位置と危険断面位置の歪差はどの試験体も小さく斜めひび割れによる歪シフトが起きていると考えられる。

またカットオフ長さが異なる 3 体を比較すると 1 段筋の歪分布に大きな差は見られなかった。しかしその一方で 2 段筋に関してはどの試験体も前述した有効せい分位置での歪は 0.2% 程とほぼ同様な値を示しているが、カットオフ端部の歪は 0 と定義しているためにカットオフ長さが短い方の歪勾配が大きくなっている。これは後述する最大付着応力度に関係している。

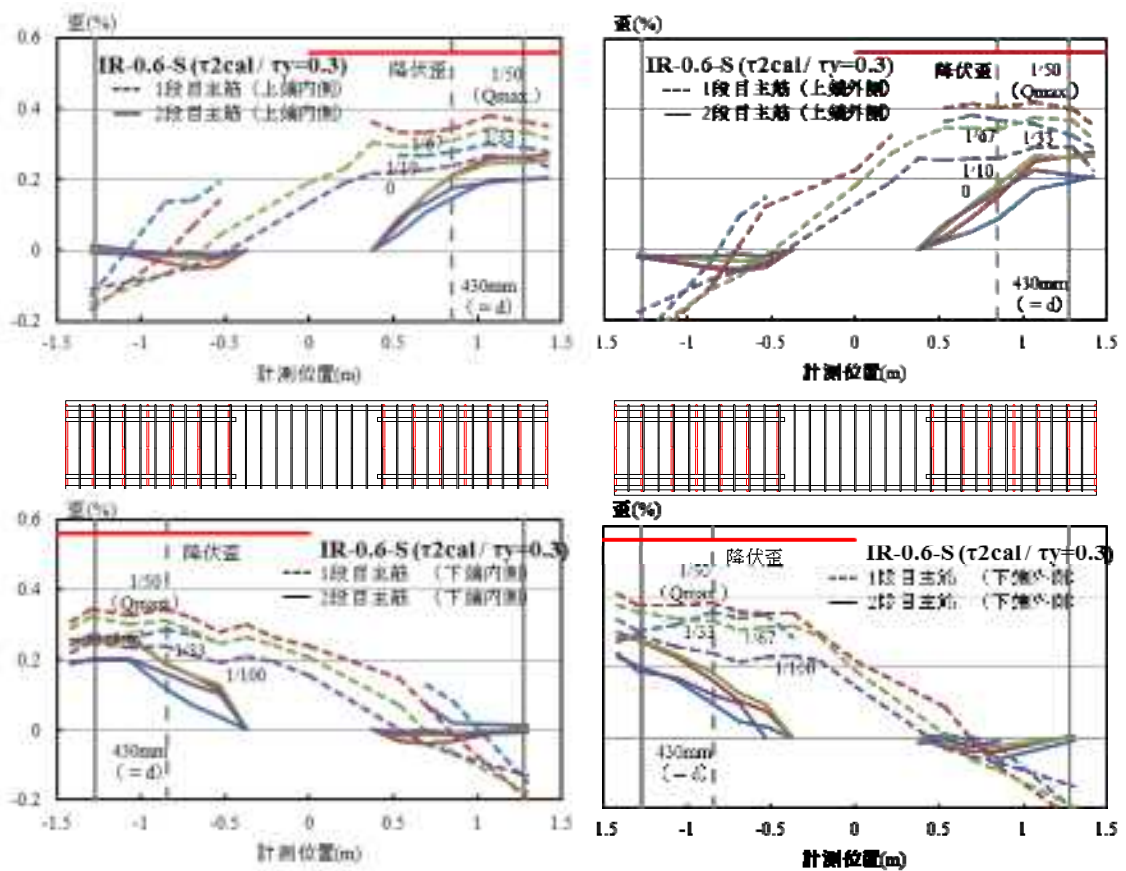


図 3.4.1-100 IR-0.6-S 試験体の軸方向鉄筋ひずみ分布

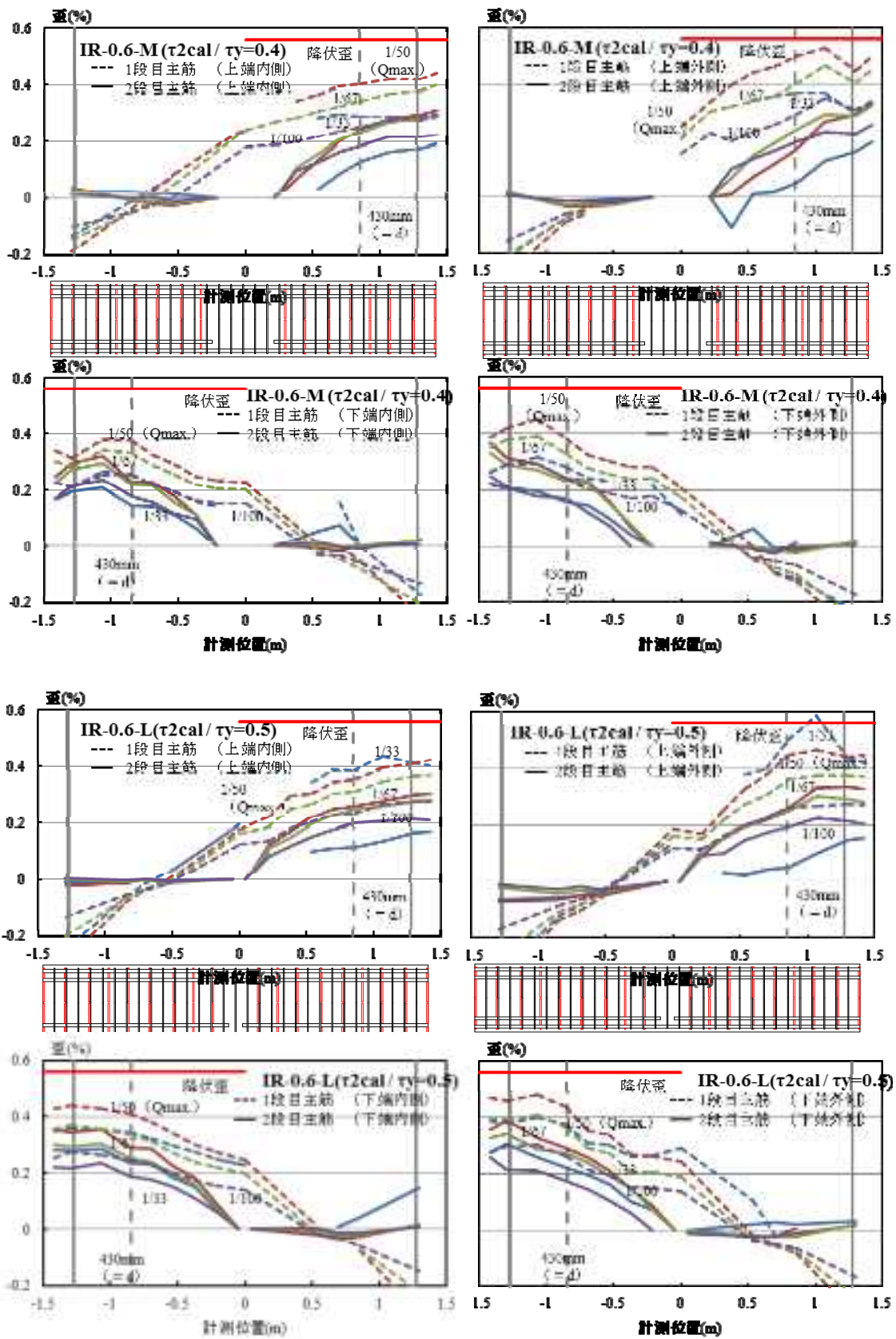


図 3.4.1-101 IR-0.6-M(上段)と IR-0.6-L(下段)試験体の軸方向鉄筋ひずみ分布

(d) 主筋の最大付着応力度

表 3. 4. 1-31 に正載荷における最大平均付着応力度一覧、図 3. 4. 1-102 に 2 段目主筋付着強度の実験値と計算値の比較を示す。図中の付着強度は引張側の主筋の最大付着応力度実験値を平均した値（表 3. 4. 1-31 の最右欄）を示している。平均付着応力度は主筋に添付した歪ゲージにより計測した引張り側と圧縮側の歪の差から算出した。また、前述したとおり、危険断面より有効せい分中央よりの領域は歪シフトが起きていたため、引張り側の歪は危険断面から 420mm の位置に添付したゲージの値、圧縮側は危険断面のゲージの値とし歪シフトの領域は除いて計算した。なお、同じ試験体の主筋でも最大付着強度の発現は異なる変形角の場合もあり、表中の赤字は最大耐力前の値で、青字は最大耐力後の値である。ほとんどの鉄筋が最大耐力付近で最大付着応力を発現している。2 段目主筋については、最大耐力後平均付着応力度が最大となるものは少ない。

試験体 0. 3-M と IR-0. 6-M、IR-0. 9-M を比較すると、非閉鎖型割裂補強筋の補強筋量の増加により、内側主筋の付着強度が効果的に補強されていることがわかる。一方で試験体 0. 3-M と OR-0. 6-M、OR-0. 9-M を比較すると補強筋量が 0. 6% までは IR 型補強と同様の補強効果が得られたが、OR 型において補強筋量が 0. 9% の時では 0. 6% と同様の補強効果しか得ることができなかった。TR 型補強に関しては概ね、計算式と良い対応が得られたが、大きく余裕度を取っている。

中子筋型→内側非閉鎖型→外側非閉鎖型の順で付着割裂への補強効果があることが分かる。また、カットオフ筋の長さは短いほど付着強度は高くなった。

表 3. 4. 1-31 最大平均付着応力度一覧

試験体	計算値		実験値 [N/mm ²]									
	τ_{bu1}	τ_{bu2}	1 段目上端		2 段目上端		1 段目下端		2 段目下端		全平均 [N/mm ²]	
			内側	外側	内側	外側	内側	外側	内側	外側	1 段目	2 段目
0. 3-M	3. 8	2. 5	2. 2	2. 5	3. 0	3. 1	2. 2	2. 3	3. 0	3. 0	2. 3	3. 0
TR-0. 6-M	5. 8	3. 5	3. 7	4. 3	4. 0	3. 9	3. 4	3. 6	4. 0	3. 8	3. 8	3. 9
IR-0. 6-M	5. 9	3. 5	2. 8	3. 6	3. 9	3. 7	3. 0	3. 3	3. 7	3. 8	3. 2	3. 8
OR-0. 6-M	5. 3	3. 5	2. 4	3. 2	4. 1	4. 0	2. 4	3. 0	3. 4	3. 5	2. 7	3. 7
IR-0. 6-S	5. 7	3. 4	2. 4	3. 3	4. 5	3. 9	2. 5	2. 9	4. 0	3. 9	2. 8	4. 1
IR-0. 6-L	5. 9	3. 6	3. 1	4. 1	3. 3	3. 4	3. 3	3. 5	3. 7	3. 8	3. 5	3. 5
IR-0. 6-M-W	5. 7	3. 4	2. 7	3. 3	4. 0	3. 7	3. 0	3. 0	4. 2	3. 7	3. 0	3. 9
TR-0. 9-M	7. 1	4. 2	4. 5	5. 2	6. 3	4. 8	4. 7	4. 4	5. 3	4. 4	4. 7	5. 2
IR-0. 9-M	7. 3	4. 4	3. 2	3. 9	4. 4	4. 1	3. 4	3. 7	4. 4	4. 0	3. 5	4. 2
OR-0. 9-M	6. 1	4. 2	2. 7	3. 4	3. 6	3. 7	2. 5	2. 8	3. 6	4. 1	2. 9	3. 7

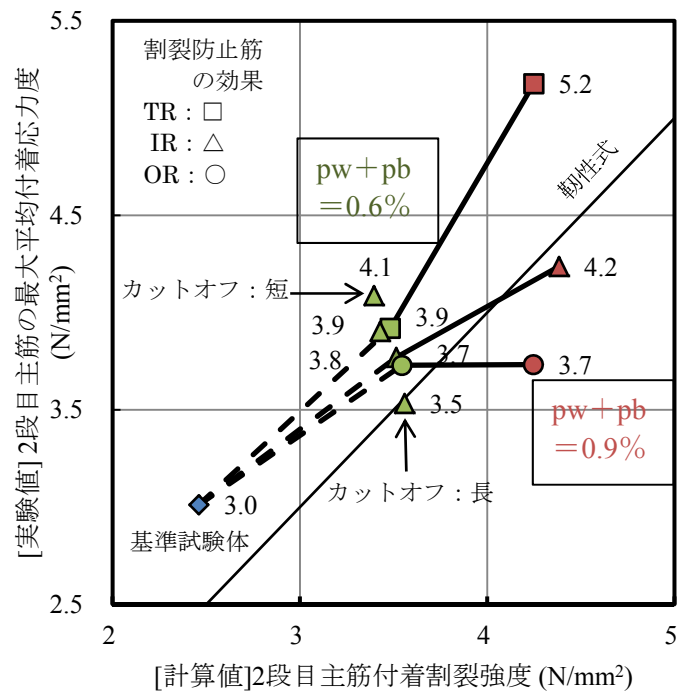


図 3.4.1-102 2 段目主筋の最大付着応力度の実験値と計算値の比較

なお、付着割裂防止筋の径と間隔を変えてもその補強筋量が等しければ、剛性及び最大耐力に影響がなかったのと同様に、付着耐力に関しても今回の範囲においては影響がなかったことから極端に補強筋間隔を開けない限り、概ね補強筋量に付着耐力は比例することが分かった。

次に、図 3.4.1-103 と図 3.4.1-104 に各試験体の正載荷時の付着応力度の履歴を示す。試験体によって、概ね次の二つの履歴が得られた。(1)2 段筋と 1 段筋が同時に最大耐力を迎えた。(2)2 段筋が最大耐力を迎えた後に 1 段筋が最大耐力を迎えた。これは(1)2 段目主筋の付着割裂破壊が先行するが、2 段主筋の引張力を 1 段筋が負担できず、同時に破壊が起きるか、(2)2 段目主筋の付着割裂破壊が先行し、その後の载荷による引張力の増大によって 1 段目主筋も破壊に至ったかの違いによるものだと考えられる。また、1 段目主筋と比較すると、2 段目主筋は最大付着応力度が大きく、その後の付着応力低下が著しくなっている。

カットオフ長さに関しては長さを短くすると小さい変形角で大きな付着応力を負担しなければならないことが分かる。

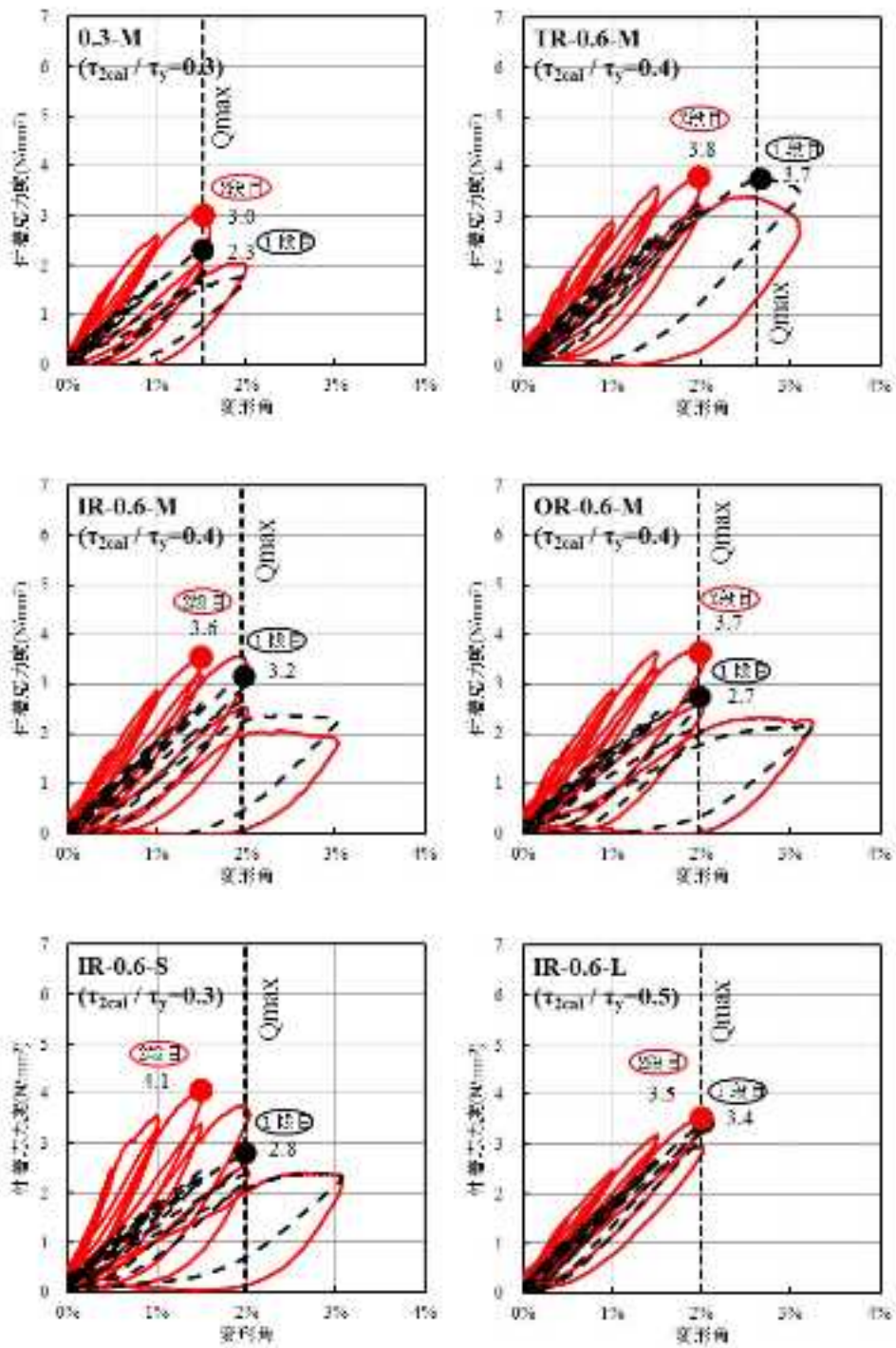


図 3.4.1-103 正載荷時の付着応力度の履歴その 1

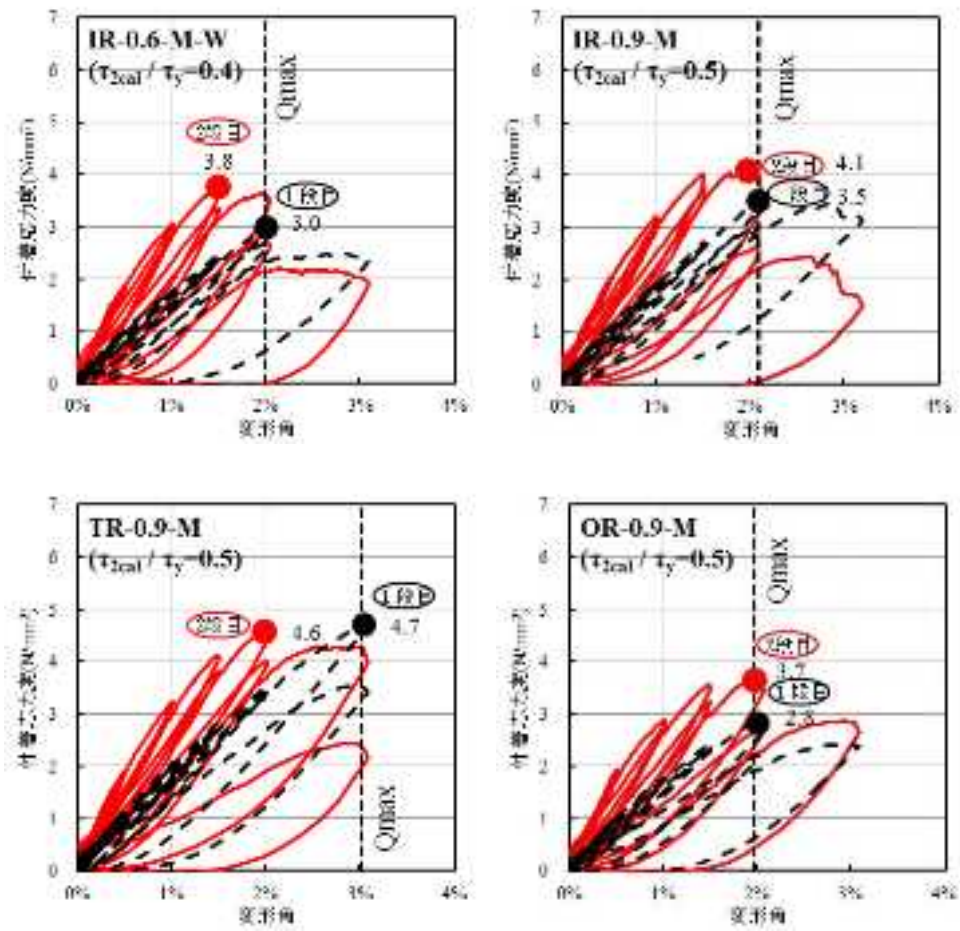


図 3.4.1-104 正載荷時の付着応力度の履歴その 2

(e) 横補強筋の応力度

表 3. 4. 1-32 に最大耐力時の横補強筋の応力一覧を示す。赤字はすでに降伏を経験している値であり、赤で塗りつぶした値に関しては圧縮を示したものである。今年度試験体の 4 体について示す。OR 型補強に着目すると付着割裂防止筋において応力が圧縮の値を示した。これは昨年度と同様に折り曲げ部に近いところにゲージを貼付したため、曲げ戻りがあったと考えられる。よって OR-0. 6-M と OR-0. 9-M を比較すると補強筋量を 2 倍に増やしても、この折り曲げの影響を受けているため、前述した最大耐力と最大平均付着応力度ともに上昇が見られなかったと考えられる。IR-0. 6-M と IR-0. 6-M-W を比較すると補強筋間隔が与える影響は顕著に見られなかった。またカットオフ長さに着目するとカットオフ位置に対応した横補強筋の応力が大きくなっているが、特に、カットオフ長さの短い IR-0. 6-S 試験体はこの傾向が顕著であり、カットオフ位置から離れると補強筋の応力が小さくなっていく。

表 3. 4. 1-32 最大耐力時の横補強筋の応力一覧

試験体	横補強	補強筋比	最大耐力時		下端				上端				平均応力		平均応力 N/mm2	負担割合
			せん断力 kN	変形角	-4	-3	-2	-1	1	2	3	4	上端 N/mm2	下端 N/mm2		
0.3-M	あばら	0.29%	471.5	1.5%	633	815	910	434	577	1138	642	550	786	777	781	-
TR-0.6-M	あばら	0.29%	697.6	2.6%	959	979	1275	630	816	不良	938	1041	1071	990	1030	0.74
	中子	0.29%			374	不良	不良			331	374	357	374	354	364	0.26
IR-0.6-M	あばら	0.29%	612.8	2.0%	499	720	821	546	1048	1099	830	714	680	881	780	0.73
	非閉鎖	0.29%			139	374	374			374	300	158	296	277	286	0.27
IR-0.6-L	あばら	0.29%	681.0	2.0%	548	689	656	879	1051	774	839	628	631	747	689	0.72
	非閉鎖	0.29%			259	215	342	365	219	316	283	200	272	266	269	0.28
OR-0.6-M	あばら	0.29%	581.5	2.0%	717	865	1160	771	699	1049	827	628	914	835	874	1.09
	非閉鎖	0.29%			-133	-210	43			-50	-24	-59	-100	-44	-72	-0.09
IR-0.9-M	あばら	0.29%	657.0	2.1%	784	1235	1333	1014	769	981	803	609	1117	798	957	0.67
	非閉鎖	0.58%			203	301	209			252	不良	192	238	222	230	0.33
IR-0.6-M-W	あばら	0.29%	610.9	2.0%	767	819	1110	539	646	1456	1144	808	898	1136	1017	0.78
	非閉鎖	0.29%			224	320	200			320	320	320	248	320	284	0.22
IR-0.6-S	あばら	0.29%	568.4	2.0%	614	872	1237	387	384	1014	817	685	908	838	873	0.79
	非閉鎖	0.29%			106	218	374			374	220	78	233	224	228	0.21
TR-0.9-M	あばら	0.29%	811.6	3.0%	894	681	834	569	693	1263	1171	1004	803	1146	974	0.65
	中子	0.58%			122	374	81			374	317	250	192	314	253	0.35
OR-0.9-M	あばら	0.29%	588.9	2.0%	623	714	1097	627	377	1359	962	616	811	979	895	1.07
	非閉鎖	0.58%			-82	10	-62			3	-44	-9	-45	-16	-31	-0.07

4) まとめ

施工性を考慮した非閉鎖型補強筋を含む各種付着割裂補強筋による2段目カットオフ主筋（鉄筋腐食の極限）に対する付着割裂強度の補強効果を検討するために、梁部材の静的載荷実験を行い、以下の結論を得た。

- a) 破壊形式は2段目主筋のカットオフ端で付着割裂が起こった後、1段目主筋が引張抵抗を肩代わりし、1段筋の歪勾配が大きいカットオフ内から1段目主筋の付着割裂が進展し、圧縮端のかぶりコンクリートの圧壊を伴って、徐々に抵抗力を失ったと考えられる。
- b) 割裂防止筋の径と間隔を変えてもその補強筋量が等しければ、剛性及び最大耐力、付着耐力に影響は見られなかった。
- c) 非閉鎖型補強筋を用いて、付着割裂割裂破壊に対する補強を行う場合、その補強効果は靱性式による閉鎖型横補強筋量の評価の6割程度であった。
- d) 外側非閉鎖型補強筋と内側非閉鎖型補強筋は、補強筋量0.6%まではほぼ同程度の付着補強効果を得られたが、非閉鎖型補強筋を0.6%配し、補強筋量を0.9%にすると、外側非閉鎖型補強筋では付着補強効果に頭打ちが見られた。
- e) カットオフ長さに関しては長さを短くすると構造上ひずみ勾配が大きくなり、小さい変形角で大きな付着応力を負担するが、梁部材耐力は低下する。
- f) カットオフ位置に対応した場所での横補強筋の応力が大きくなっていることが確認でき、付着割裂に対して有効に機能した。

今後は、カットオフ位置での横補強筋応力が大きくなったことから、カットオフ位置での重点的補強の効果を期待すると共に、せん断補強筋量と付加する横補強筋量の関係などさらにパラメータを増やし実験と解析を行う予定である。

(6) RC 部材の主筋・横補強筋腐食の付着割裂実験

1) 目的

海岸近くに建設される原子力建屋等の鉄筋コンクリート(RC)構造物の鉄筋腐食は長期健全性に対して最も深刻な問題である。鉄筋に腐食が発生すると、健全鉄筋より体積の大きい腐食生成物が鉄筋周りの空隙に侵入し、膨張ひび割れを引き起こす。鉄筋周りの小さなひび割れは、RC 造建物の構造性能に大きな影響を及ぼすものではないことが明らかにされている³¹。しかしながらひび割れが進展し、コンクリート表面に達すると、より塩化物イオンの侵入が多くなり、腐食速度が速くなり、美観的な問題やかぶりコンクリートの剥落を引き起こす可能性も想定される。したがって、RC 造建物の長期健全性や構造性能を評価する場合、腐食膨張ひび割れの進展挙動を高い精度で予測することが要求される。そのためには、経年劣化による鉄筋の腐食量を正確に知る必要があるが、実際に RC 造建物から腐食鉄筋を取り出し、質量測定を行うのは時間・費用の面からも実用的ではない。そこで鉄筋の腐食レベルとひび割れ挙動（ひび割れの開始と進展）の関係を評価するために数多くの実験³²が行われてきたが、大部分が柱状のコンクリートに単一の鉄筋を有する試験体を使用しており、実際の鉄筋コンクリート部材の横補強筋の影響が考慮されていない。解析的研究³³も行われているが、利用できる実験データは少ない。

本年度は、昨年度行った鉄筋コンクリート梁型試験体の促進腐食実験を解析対象とする腐食膨張 FEM 解析を行い、マイクロスコップで計測した腐食膨張ひび割れ幅、およびひび割れによって上昇する横補強筋のひずみ挙動の実験結果を再現できる適切な腐食膨張倍率を設定する。また、試験体のパラメータは横補強筋量、横補強方法およびコンクリート強度が腐食膨張ひび割れに及ぼすメカニズムを明らかにし、コンクリート構造物の長期健全性評価手法を高度化する。最終的に観測の容易なひび割れ幅から鉄筋の腐食量を推定し、各種構造材料特性が経年複合劣化を受けた鉄筋コンクリート建屋の構造性能を評価する手法を確立することを目的としている。

さらに、軸方向鉄筋と横補強筋両方が腐食した場合のひび割れ挙動と横補強筋の応力挙動を考察する予備実験として、横補強筋に貼付したひずみゲージが、電食中に損傷しないことを確認するため、各種ゲージ保護方法を用いてパイロット実験を行い、適切な保護方法を検討する。

³¹ 東京工業大学, コンクリート構造物の健全性二次評価にかかわる評価法の調査・試験研究, 成果報告書 (2010)

³² Vu, K., Stewart, M. G., and Mullard, J. A., “Corrosion- Induced Cover Cracking: Experimental Data and Predictive Models”, Structural Journal., ACI, Vol. 102, No. 5, pp. 719-726, (2005)

³³ Shinohara. Y., “Effect of Confinement upon Crack Behaviors caused by Corrosion-Product Expansion around Corroding Bars”, Proceeding of the 12th International Conference on Durability of Building materials and Components, Vol. 3, pp. 1577-1584, (2011).

2) 促進腐食実験概要

(a) 試験体概要

昨年度の促進腐食試験体を図 3.4.1-105 に示す鉄筋コンクリート梁型試験体の計 6 体である。各試験体は引張側鉄筋の 400 mm 区間を促進腐食対象とし、腐食区間両側の主筋およびせん断補強筋は、ひずみゲージの保護や正確な横補強筋量を確保するために、ビニールテープによって被覆した。28 日間の養生後、電食による促進腐食実験を開始した。

コンクリート強度は 24 N/mm^2 を基準とし、高強度コンクリート 48 N/mm^2 の 2 種類を設定した。引張鉄筋は 4-D19 を基準に、鉄筋量がほぼ同等となる 3-D22 の 2 種類とした。主筋は付着割裂破壊が先行するように SD390 を焼き入れした。その降伏強度および弾性係数は、D19 が 1053 N/mm^2 および $1.87 \times 10^5 \text{ N/mm}^2$ 、D22 が 980 および $1.85 \times 10^5 \text{ N/mm}^2$ であった。せん断補強筋には高強度鉄筋を使用し、降伏強度および弾性係数は、 1414 N/mm^2 および $2.00 \times 10^5 \text{ N/mm}^2$ であった。表 3.4.1-33 に試験体名と実験変数を示す。

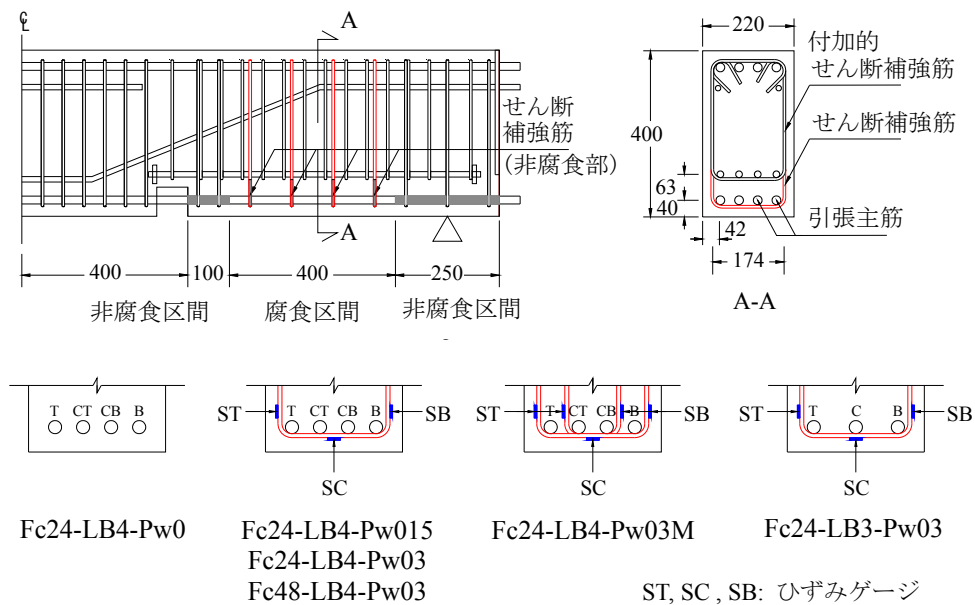


図 3.4.1-105 試験体とゲージ貼付位置

表 3. 4. 1-33 促進腐食試験体一覧

試験体名	水セメント比	コンクリート強度 Fc (σ_B N/mm ²)	引張主筋	せん断補強筋
Fc24-LB4-Pw0	0.74	24 (22)	4-D19	No ($p_w=0\%$)
Fc24-LB4-Pw015			4-D19	U6.4@200 ($p_w=0.15\%$)
Fc24-LB4-Pw03			4-D19	U6.4@100 ($p_w=0.3\%$)
Fc24-LB4-Pw03M			4-D19	2-U6.4@200 ($p_w=0.3\%$)
Fc24-LB3-Pw03			3-D22	U6.4@100 ($p_w=0.3\%$)
Fc48-LB4-Pw03	0.46	48 (49)	4-D19	U6.4@100 ($p_w=0.3\%$)

(b) 実験結果概要

a) 腐食速度

鉄筋の腐食量（質量損失）を正確に評価するために、すべての実験終了後、コンクリートから取出した腐食鉄筋を 10%クエン酸水素二アンモニウム溶液に浸し、ブラシで腐食生成物を除去した。腐食生成物の除去および質量損失の計測は、JCI-SCI³⁴に従って行った。各試験体の鉄筋質量損失を要約して、表 3. 4. 1-34 に示す。

表 3. 4. 1-34 には、各試験体の各位置における鉄筋（T：打設時上側の 1 段目鉄筋、CT：打設時上側の 2 段目鉄筋、CB：打設時下側の 2 段目鉄筋、B：打設時下側の 1 段目鉄筋）の質量損失が示されている。すべての鉄筋に同じ電圧を与えたが、いずれの試験体も打設時上側の 1 段目鉄筋（T）の質量損失が最も大きく、次に打設時下側の 1 段目鉄筋（B）が大きい。これは、打設時後のブリーディングにより、打設時上側のコンクリートの空隙が多くなることや、上側と下側鉄筋が気中に近く、腐食速度が速くなったと思われる。さらに後述のひび割れ挙動に示すように、上側 T と下側 B の鉄筋に沿ってひび割れが発生したため、ひび割れ後の腐食が加速されたこと影響している。一方、組織が密実になる高強度コンクリートは通常強度コンクリートより、鉄筋位置における腐食量の変動は比較的小さい。このコンクリートの打設方向や強度によるセメントペーストの細孔構造の違いに関しては、図 3. 4. 1-106 に示すように胡桃沢ら^{35, 36}が試験体にガリウムを圧入して詳細に検討している。各鉄筋位置で腐食差はみられるが、平均質量損失は Faraday の予測値に対して 10%程度のばらつきであった。

³⁴ コンクリート中の鋼材の腐食評価方法，コンクリート構造物の腐食・防食に関する試験方法ならびに規準(案)，pp. 1-4，(1987)

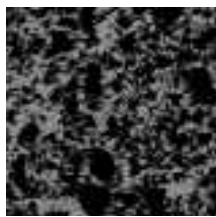
³⁵ 胡桃澤清文、田中享二、セメントペーストの打ち込み高さごとの空隙構造の違い、コンクリート工学年次論文集，Vol. 33，No. 2，781～786，2011.7

³⁶ Tanaka, K. and Kurumisawa, K.: Development of technique for observing pores in hardened cement paste. Cement and Concrete Research Vol. 32, pp.1435-1441, 2001

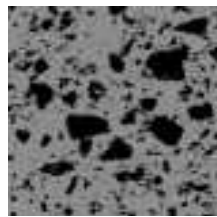
表 3. 4. 1-34 各試験体の質量損失 (%)

試験体名	鉄筋位置					i_{corr} mA. hr/cm ²	Faraday' s Law	
	T	CT	CB	B	平均		i_{corr}	mA. hr/cm ²
Fc24-LB4-Pw0	10.6	4.7	3.8	5.6	6.2	210	(222)	
Fc24-LB4-Pw015	8.9	4.9	4.4	4.9	5.8	210	(207)	
Fc24-LB4-Pw03	8.2	4.4	5.4	6.3	6.1	210	(218)	
Fc24-LB4-Pw03M	7.4	4.5	4.6	5.2	5.4	210	(195)	
Fc24-LB3-Pw03	7.4	3.9		6.3	5.8	262	(243)	
Fc48-LB4-Pw03	6.6	4.0	6.0	6.1	5.7	210	(205)	

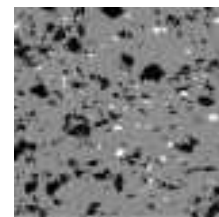
(注) : ()内の数値は、実測の質量損失を Faraday' s Law によって評価した場合の積算電流密度 mA. hr/cm²



w/c =0.3



w/c =0.45



w/c =0.6

■ ペーストのみ(空隙なし) ■ ペースト空隙の混在 □ 空隙のみ

図 3. 4. 1-106 セメントペーストの空隙構造に及ぼす水セメント比の影響

b) 表面ひび割れ幅の進展挙動

促進腐食試験を開始してから、数日後にすべての試験体表面に腐食膨張ひび割れが現れた。最初のひび割れ箇所は様々であるが、大部分は、鉄筋周りのコンクリートが密になる打設時下側鉄筋Bおよび空隙の多い打設時上側鉄筋Tの下側底面に現れた。その後鉄筋に沿ってひび割れが進展した。図 3.4.1-107 の各試験体で観測された最大ひび割れ幅と積算電流密度の関係に示すように、横補強筋はひずみゲージの保護や横拘束を一定とするためテーピングを施したことによって、コンクリートとの付着が損なわれ、ひび割れ進展挙動に及ぼす影響は小さくなった。一方、コンクリート強度の影響は大きく、空隙が少なく密実になる高強度コンクリートの Fc48-LB4-Pw03 試験体は、電流密度が 100 mAhr/cm²を超えると、その他 Fc24 試験体と比較して、ひび割れ幅が急増し最終的に 3 倍程度となった。前述したように、空隙が少ない密実な高強度コンクリートでは、腐食鉄筋周りの空隙に侵入する腐食生成物が少なくなり、膨張ひび割れに腐食生成物が集中するためと思われる。

腐食膨張 FEM 解析を行う場合、横補強筋に腐食保護のためのテーピングにより、コンクリートとの付着作用が減少していることから、横補強筋の付着すべり関係を考慮する必要があり、さらに、コンクリート強度による細孔構造の違いによる腐食生成物の挙動を考慮して適切な腐食膨張倍率を設定する必要があることがわかる。

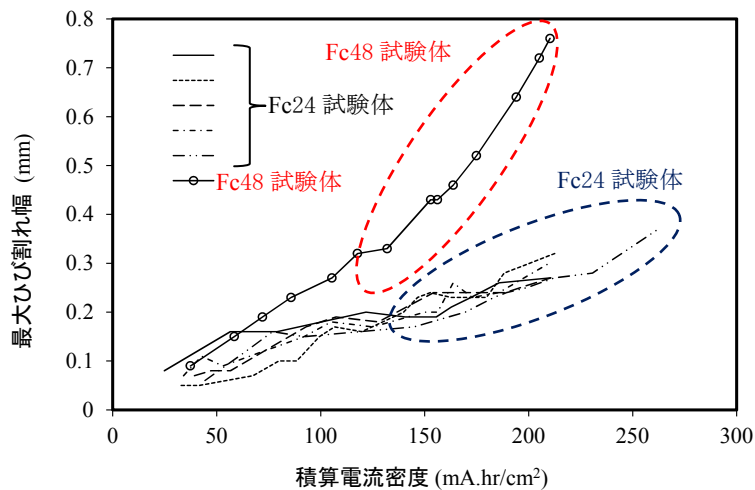
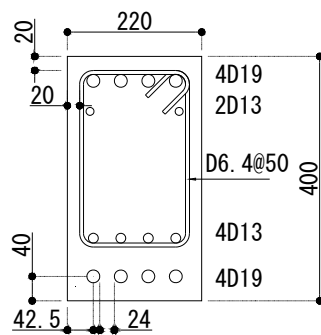


図 3.4.1-107 最大ひび割れ幅と積算電流密度の関係

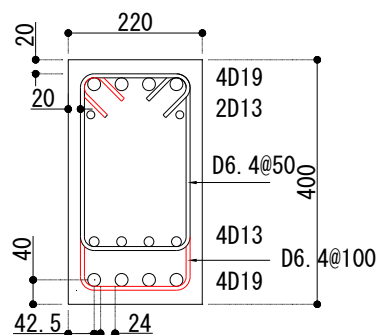
3) 腐食膨張ひび割れ解析

(a) 解析概要

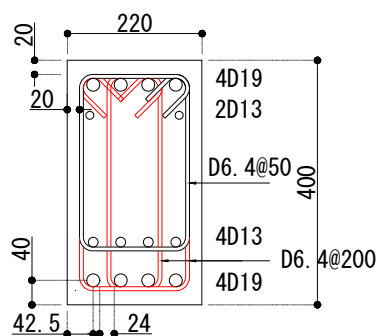
促進腐食実験では、せん断補強筋の断面の確保およびひずみゲージの保護のために、テーピングを施した。ビニールテープは、せん断補強筋とコンクリートとの付着機能を低下させるため、腐食膨張ひび割れ発生後、せん断補強筋ひずみの増加割合は小さく、せん断補強筋量や補強方法の影響も明確には認められなかった。昨年度は、付着膨張ひび割れ挙動に及ぼすせん断補強筋の影響を検討するために、完全付着を想定したFEM解析を行ったが、実際の試験体の付着すべりを反映していない。そこで今年度は付着すべり関係を考慮すると共に、軸方向筋の腐食レベルとひび割れ幅および横補強筋の応力上昇の整合性を比較検討し、容易に計測できる腐食ひび割れ幅から鉄筋の腐食レベルなどを評価する手法を高度化する。解析対象試験体の配筋詳細を図3.4.1-108に示す。



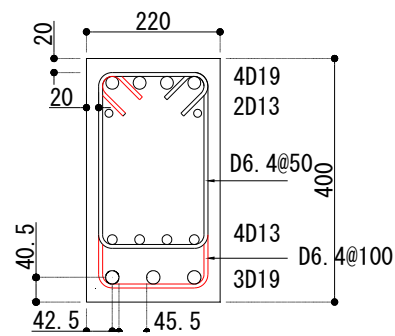
(1) Fc24-LB4-Pw0



(2) Fc24 (48)-LB4-Pw015 (0.3)



(3) Fc24-LB4-Pw03M

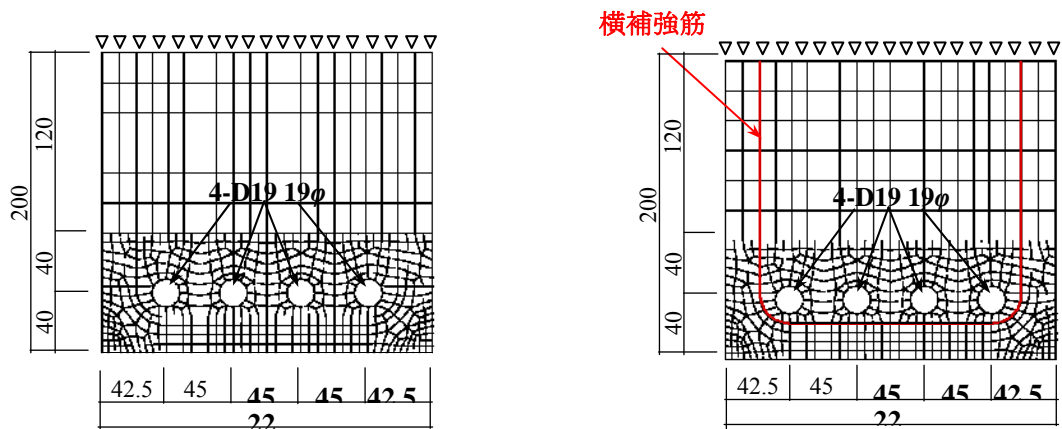


(4) Fc24-LB3-Pw03

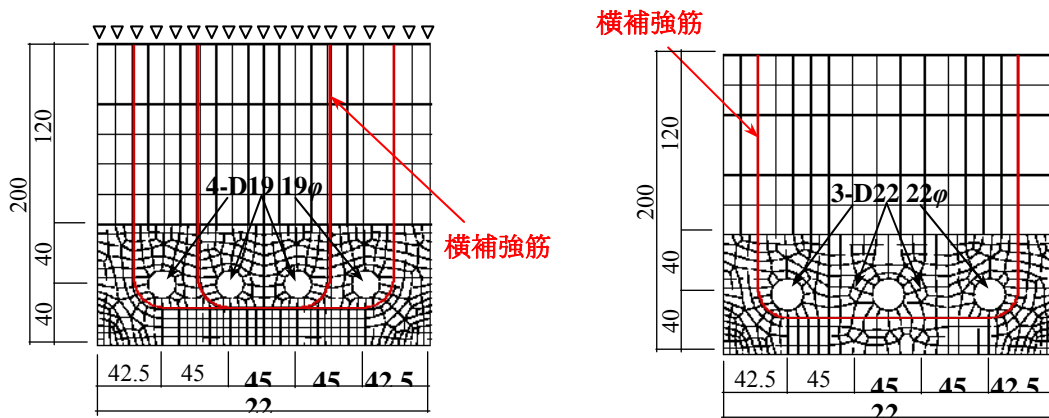
図 3.4.1-108 解析対象試験体の配筋詳細

(b) 解析対象試験体のモデル化

図 3.4.1-109 に腐食膨張ひび割れ挙動に対する横補強筋の拘束効果を検討した解析モデルを示す。横補強筋はゲージ保護用テーピングによる付着劣化を考慮した付着すべり関係を有するトラスとしてモデル化した。解析モデルは鉄筋コンクリート梁の促進腐食実験における腐食区間 400 mm を対象として切り取り、さらに鉄筋の腐食膨張に対して影響の少ない上側半分はピン支持としている。コンクリートには 2 次元平面応力要素を使用する。腐食膨張する主筋 D19 または D22 は、鉄筋径の孔で表現し、孔内に内圧を増分させることによって、鉄筋の腐食膨張挙動を模擬する。



(1) Fc24-LB4-Pw0 試験体解析モデル (2) Fc24 (48)-LB4-Pw015 (0.3)試験体解析モデル



(3) Fc24-LB4-Pw03M 試験体解析モデル (4) Fc24-LB3-Pw03 試験体解析モデル

図 3.4.1-109 解析モデルと境界条件

(c) 荷荷方法

荷荷方法は、昨年度行った予備解析の結果、図 3. 4. 1-110 に示すように、主筋を模擬したすべての孔の内側から 0.1 N/mm^2 増分の圧力を与えると、実験で見られた両側の主筋底面に沿うひび割れが現れず、中央 2 本の主筋下側にひび割れが集中した。

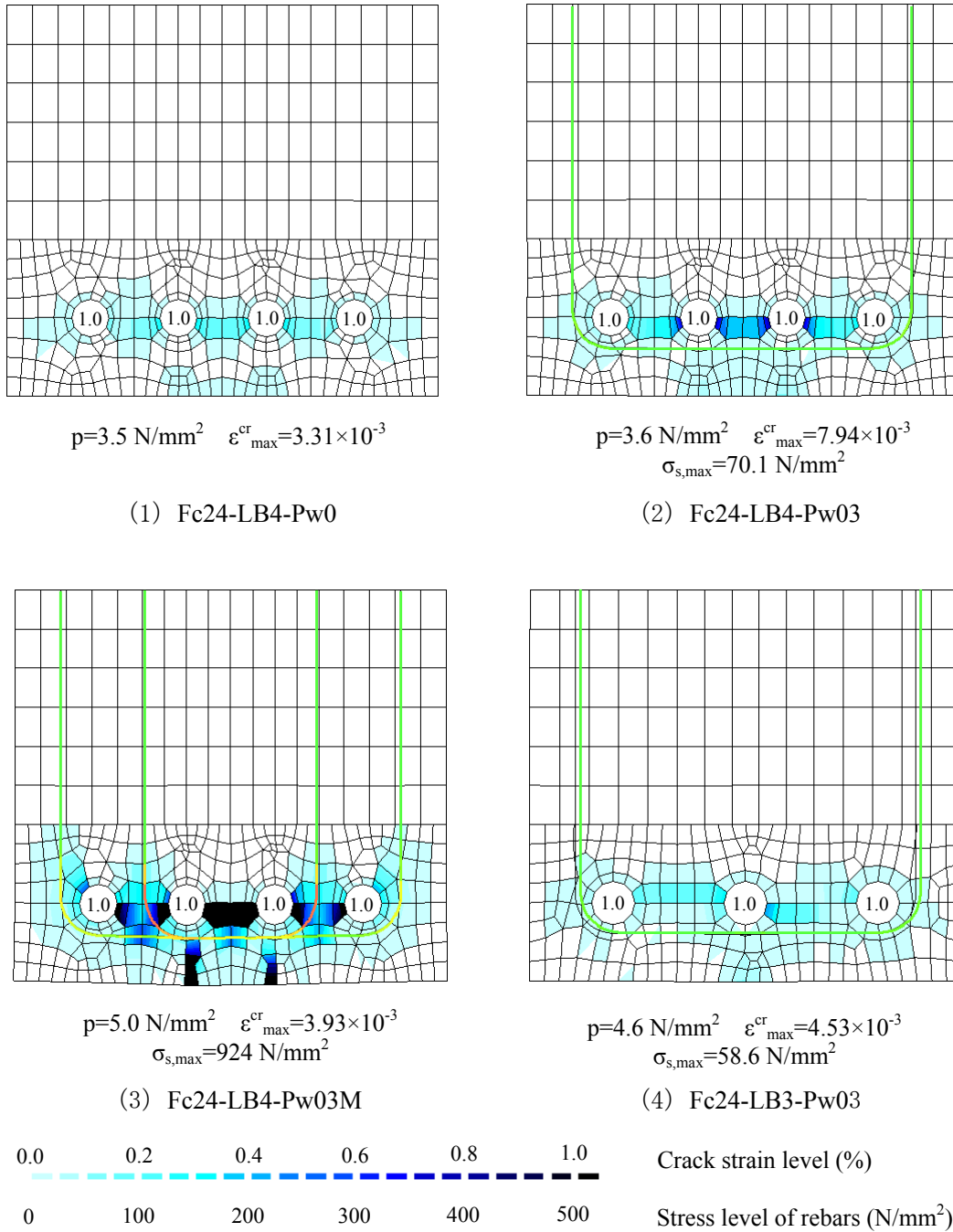


図 3. 4. 1-110 0.1 N/mm^2 均一膨張圧増分によるひび割れ進展挙動

そこで各主筋の腐食レベルの違いを考慮して、腐食レベルの高い外側主筋に 0.2 N/mm^2 、内側主筋に 0.1 N/mm^2 増分の圧力を与えると、実験と同様に、両側の主筋底面に沿うひび割れが現れた（図 3.4.1-111 参照）。そこで本年度は、腐食レベルの違いを考慮して、外側と内側の膨張圧を 2 対 1 で増分させる荷重制御方式を採用する。

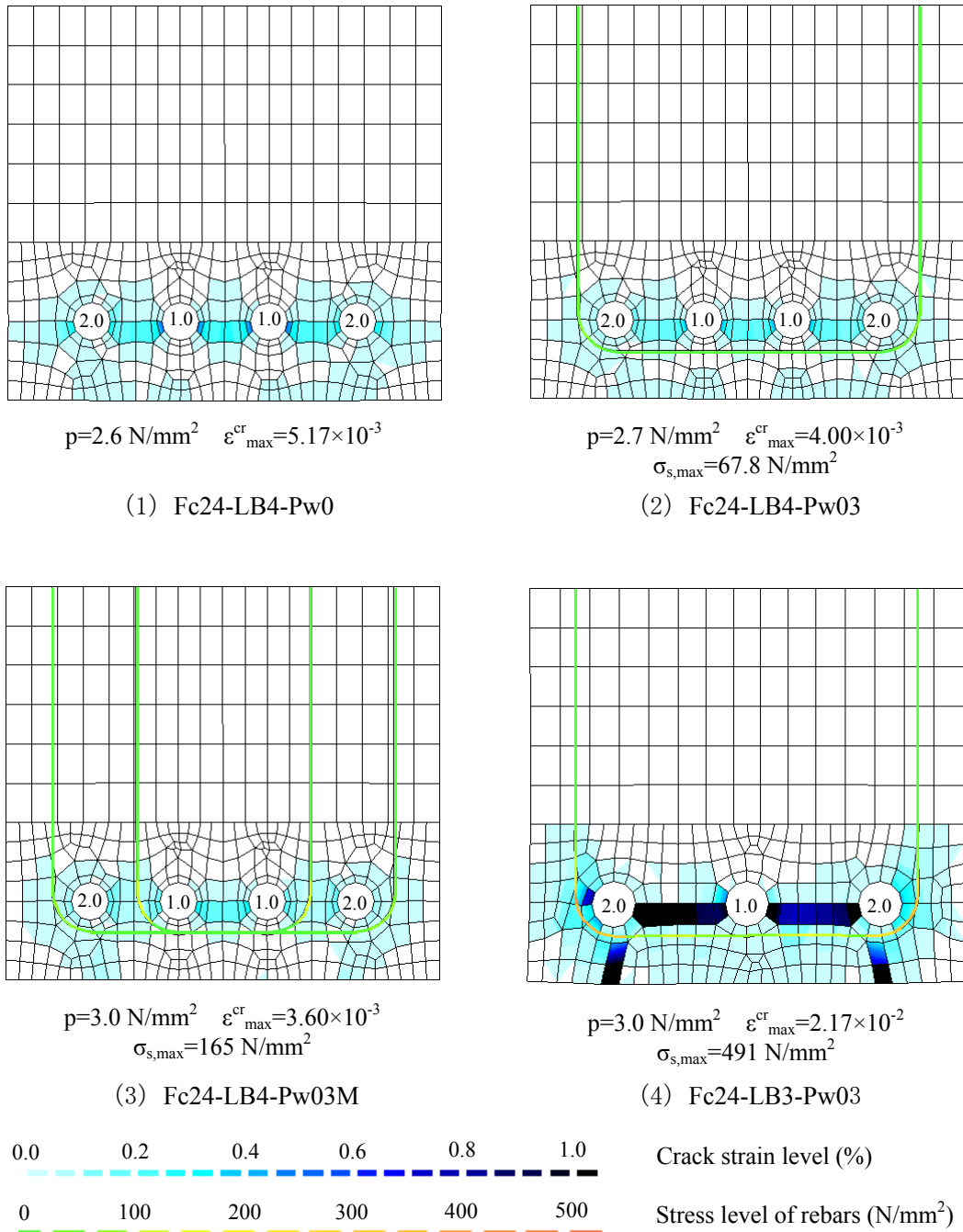
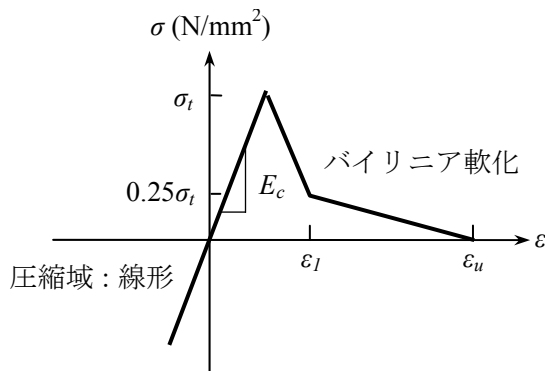


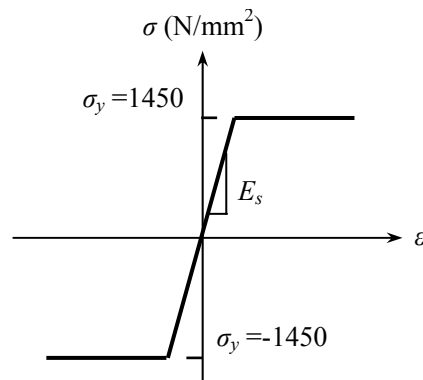
図 3.4.1-111 外主筋 0.2 N/mm^2 、内主筋 0.1 N/mm^2 膨張圧増分によるひび割れ進展挙動

(c) 使用した材料の力学特性

解析で使用したコンクリートと横補強筋の力学特性を材料試験結果に基づいてモデル化し、図 3.4.1-112 に示す。本解析では、コンクリートは低い圧縮応力下における引張ひび割れが支配的であるため、圧縮領域は弾性挙動を仮定している。Rankine の最大主応力基準³⁷に従って、ひび割れの開始を定義している。すなわち、ひび割れは、他の面に作用している応力にかかわらず最大主応力がコンクリートの引張強度に達すると、最大主応力方向と垂直な面に形成される。60 度を閾値とする多方向分散ひび割れモデルを採用した。ひび割れ発生後の挙動は、バイリニア型軟化モデル³⁸とした。またひび割れ発生後のせん断剛性低下は、ひび割れひずみの関数³⁹としている。せん断および付着割裂補強筋はバイリニア（ひずみ硬化なし）を仮定した。



コンクリートの応力-ひずみ関係



横補強筋の応力-ひずみ関係

幾何学形状と力学特性	
厚さ	400 mm
弾性係数 E_c	23000 N/mm ² (Fc24) 33000 N/mm ² (Fc48)
ポアソン比 ν	0.2
引張強度 σ_t	1.9 N/mm ² (Fc24) 2.8 N/mm ² (Fc48)

(1) コンクリート

幾何学形状と力学特性	
断面積	120 (60) {0} mm ²
弾性係数 E_s	200000 N/mm ²
降伏強度 σ_y	1450 N/mm ²

()内は、Fc24-LB4-Pw015(03M)試験体
{ }内は、Fc24-LB4-Pw0 試験体

(2) 横補強筋

図 3.4.1-112 コンクリートと鉄筋の力学特性と解析モデル

³⁷ Chen, W. F. : Plasticity in Reinforced Concrete, McGraw-Hill Book Company, 1982

³⁸ 篠原保二, 安部武雄, 古村福次郎: ノッチ深さ, 載荷速度, 骨材寸法, 水セメント比, 載荷法, 養生および材令がコンクリート曲げ試験体の引張軟化特性に及ぼす影響, 日本建築学会構造系論文報告集, No. 442, pp. 13~22, (1992)

³⁹ 篠原保二, 金子葉: コンクリートの破壊進行領域における圧縮せん断挙動に関する実験的研究, 日本建築学会構造系論文報告集, No. 525, pp. 1~6, (1999)

昨年度は、横補強筋の付着特性は完全付着を仮定した。しかしながら前述したように、ひずみゲージ保護や一定の拘束を確保するために、横補強筋にテーピングを施したことにより、付着剛性・強度とも低下していると考えられる。そこで解析精度向上させるため、せん断補強筋に付着すべり関係を考慮する。テーピングを施した鉄筋の付着すべり関係に関しては、利用できるデータがほとんどないため、最大付着応力と最大付着応力時のすべりは、CEB-FIP Model code⁴⁰のスムーズバー（丸鋼）に対する付着すべり関係（最大付着応力 $0.3\sigma_B^{1/2}$ と最大付着応力時のすべり 0.1 mm ）を採用し、図 3.4.1-113 のようなバイリニア型付着すべり関係仮定した。

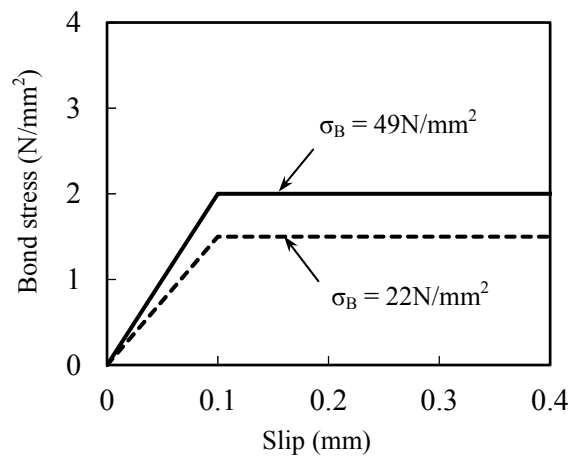


図 3.4.1-113 横補強筋の付着すべり関係

⁴⁰ Comite Euro-International du Beton.: CEB-FIP Model Code 1990, DESIGN CODE, p. 85

(d) 腐食深さの評価方法

解析結果より腐食深さ x を評価する手順を図 3.4.1-114 に示す。初めに主筋の（孔）の変位から内圧 p_i 時の解析結果の平均膨張 $u_{cor}(p_i)$ を求める。腐食深さ x と膨張率 ν を仮定し、自由膨張半径 a を計算する。 u_{cor} 、 x 、 a より、腐食生成物のひずみを求め、そのひずみから腐食生成物の力学特性に基づいて腐食深さ x のときの内圧 $p(x)$ を算定する。 $p(x)$ が p_i と等しくなるまで、腐食深さ x を変えて繰り返し計算を行う。

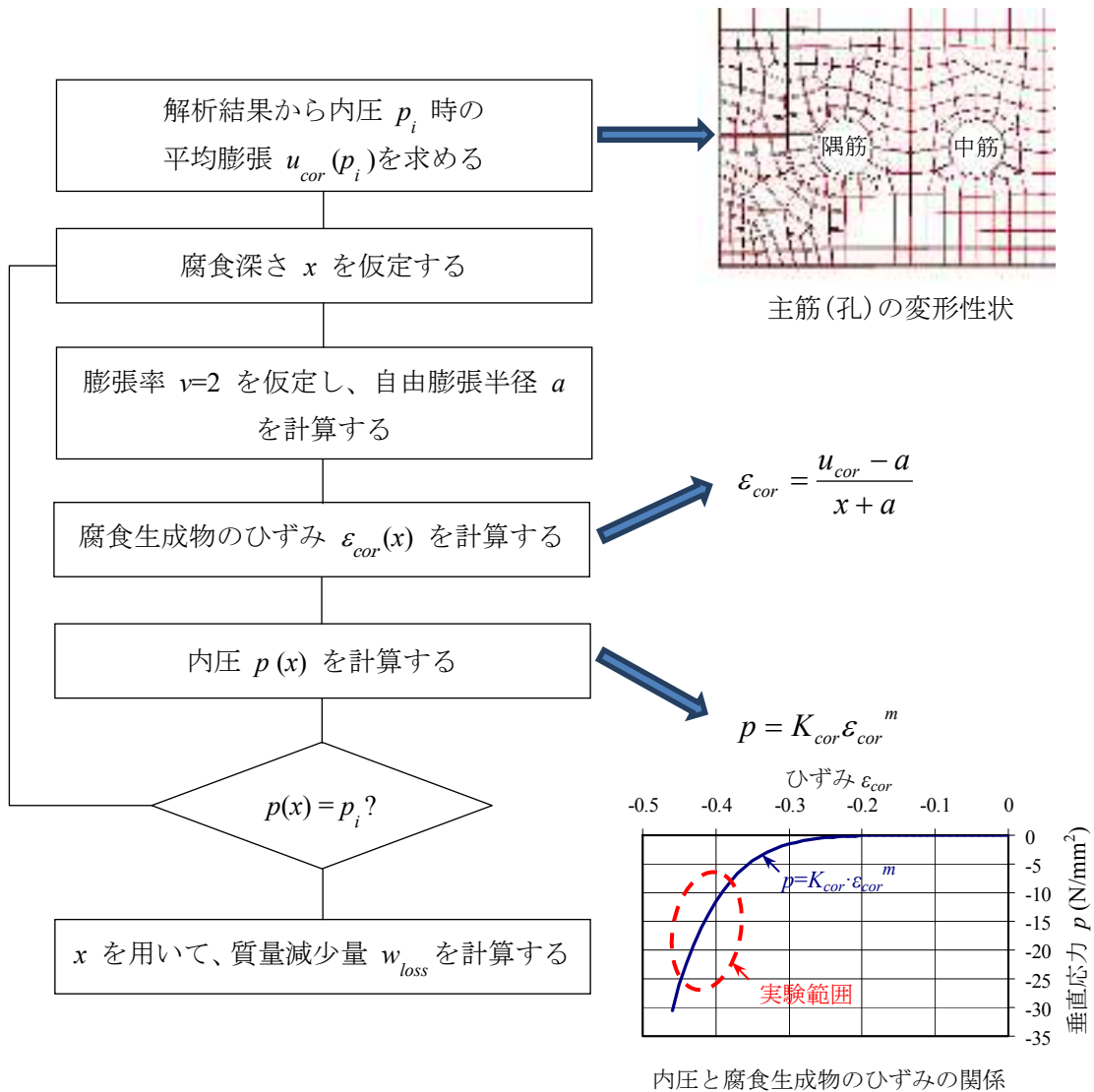
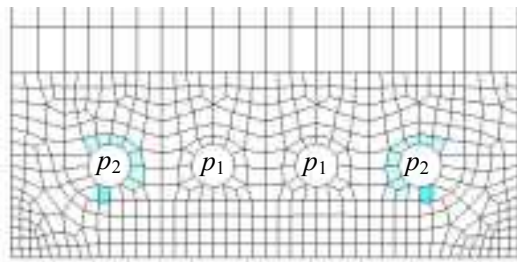


図 3.4.1-114 腐食深さの評価方法のフロー

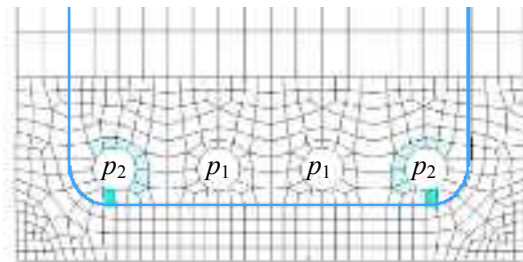
(e) 解析結果（ひび割れ進展挙動）

図 3.4.1-115 に腐食ひび割れが主筋周りに現れる時点のひび割れ進展挙動を示す。この時点までは、主筋周りのコンクリートが腐食膨張圧に抵抗するため、横補強筋の影響はほとんどなく、Fc24 の試験体はすべて $p_2 = 1.5 \text{ N/mm}^2$ でひび割れが発生し、Fc48 の試験体は膨張圧 $p_2 = 2.0 \text{ N/mm}^2$ でひび割れが発生している。

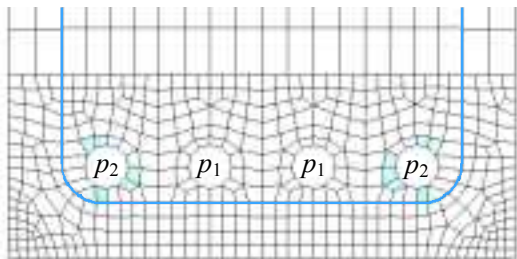
この時点の腐食深さは、 $2 \mu\text{m}$ から $9 \mu\text{m}$ 、質量減少量は 0.05% から 0.20% と非常に小さい。



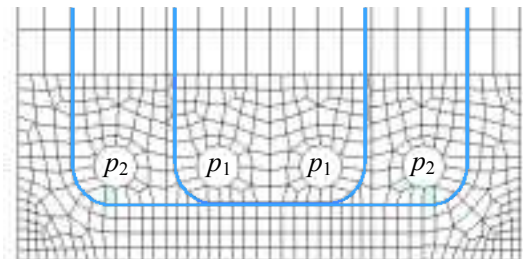
$p_2 = 1.5 \text{ N/mm}^2, p_1 = p_2/2$
 $\varepsilon_{\max}^{cr} = 2.43 \times 10^{-3}$
 $\sigma_{s,\max} = \text{NA}$
 $x_{cor} = 7 \mu\text{m}, x_{mid} = 1 \mu\text{m}$
 $w_{cor} = 0.14 \%, w_{mid} = 0.02 \%$
 (1) Fc24-LB4-Pw0 試験体



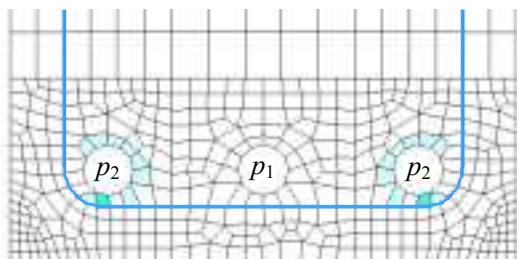
$p_2 = 1.5 \text{ N/mm}^2, p_1 = p_2/2$
 $\varepsilon_{\max}^{cr} = 3.40 \times 10^{-3}$
 $\sigma_{s,\max} = 4.92 \text{ N/mm}^2$
 $x_{cor} = 9 \mu\text{m}, x_{mid} = 1 \mu\text{m}$
 $w_{cor} = 0.20 \%, w_{mid} = 0.02 \%$
 (2) Fc24-LB4-Pw015 試験体



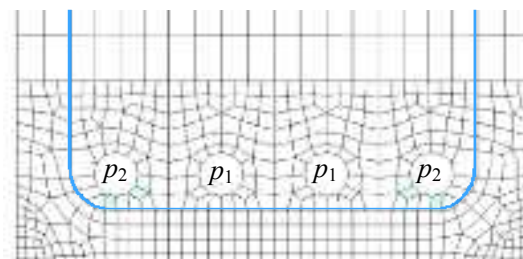
$p_2 = 1.5 \text{ N/mm}^2, p_1 = p_2/2$
 $\varepsilon_{\max}^{cr} = 7.62 \times 10^{-4}$
 $\sigma_{s,\max} = 2.37 \text{ N/mm}^2$
 $x_{cor} = 4 \mu\text{m}, x_{mid} = 1 \mu\text{m}$
 $w_{cor} = 0.08 \%, w_{mid} = 0.02 \%$
 (3) Fc24-LB4-Pw03 試験体



$p_2 = 1.5 \text{ N/mm}^2, p_1 = p_2/2$
 $\varepsilon_{\max}^{cr} = 6.24 \times 10^{-5}$
 $\sigma_{s,\max} = 3.24 \text{ N/mm}^2$
 $x_{cor} = 2 \mu\text{m}, x_{mid} = 1 \mu\text{m}$
 $w_{cor} = 0.05 \%, w_{mid} = 0.03 \%$
 (4) Fc24-LB4-Pw03M 試験体



$p_2 = 1.5 \text{ N/mm}^2, p_1 = p_2/2$
 $\varepsilon_{\max}^{cr} = 2.90 \times 10^{-3}$
 $\sigma_{s,\max} = 6.43 \text{ N/mm}^2$
 $x_{cor} = 9 \mu\text{m}, x_{mid} = 1 \mu\text{m}$
 $w_{cor} = 0.17 \%, w_{mid} = 0.02 \%$
 (5) Fc24-LB3-Pw03 試験体



$p_2 = 2.0 \text{ N/mm}^2, p_1 = p_2/2$
 $\varepsilon_{\max}^{cr} = 1.55 \times 10^{-3}$
 $\sigma_{s,\max} = 9.17 \text{ N/mm}^2$
 $x_{cor} = 2 \mu\text{m}, x_{mid} = 1 \mu\text{m}$
 $w_{cor} = 0.05 \%, w_{mid} = 0.02 \%$
 (6) Fc48-LB4-Pw03 試験体

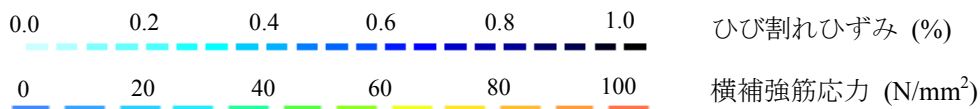
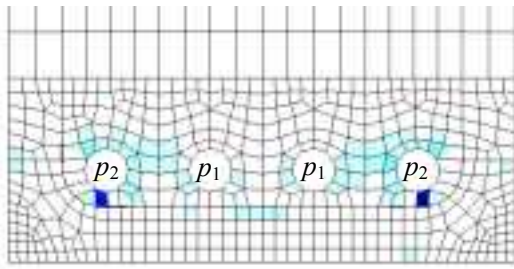


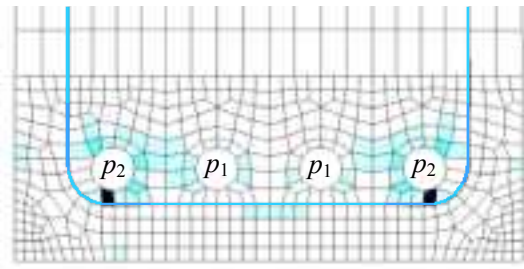
図 3. 4. 1-115 腐食ひび割れが主筋周りに現れる時点のひび割れ進展挙動

図 3.4.1-116 に腐食ひび割れが主筋間で連結する時点のひび割れ進展挙動を示す。内圧は Fc24 試験体が 3N/mm^2 程度、Fc48 試験体が 4.5N/mm^2 である。Fc24 の横補強筋のない試験体 Fc24-LB4-Pw0 は、 2.9N/mm^2 と若干低く、主筋 3 本の試験体 Fc24-LB3-Pw03 は、主筋間隔が他の試験体より大きいため、腐食ひび割れが主筋間で連結する前に、腐食ひび割れが主筋下側の表面まで到達している。主筋 4 本の試験体の横補強筋の応力を比較すると、外周筋のみの試験体は 20N/mm^2 弱とさほど変わらないが、中子筋を有する Fc24-LB4-Pw03M 試験体の横補強筋（中子筋）応力は、 70N/mm^2 強と他の試験体より大きい。これは中子筋が主筋間の腐食ひび割れを抑えているのに効果的であること示しており、実際に著しく抑えられているのがわかる。



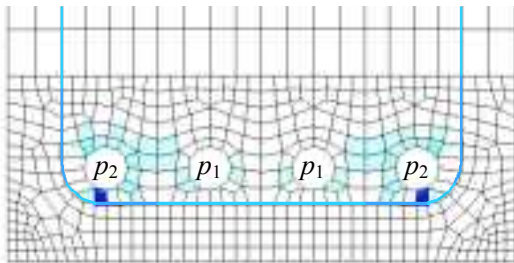
$p_2 = 2.9 \text{ N/mm}^2, p_1 = p_2/2$
 $\varepsilon_{\max}^{cr} = 8.23 \times 10^{-3}$
 $\sigma_{s,\max} = \text{NA}$
 $x_{cor} = 28 \mu\text{m}, x_{mid} = 3 \mu\text{m}$
 $w_{cor} = 0.60 \%, w_{mid} = 0.05 \%$

(1) Fc24-LB4-Pw0 試験体



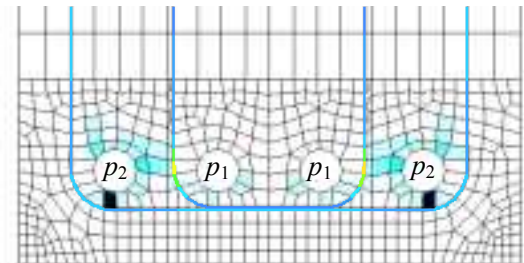
$p_2 = 3.0 \text{ N/mm}^2, p_1 = p_2/2$
 $\varepsilon_{\max}^{cr} = 1.10 \times 10^{-2}$
 $\sigma_{s,\max} = 19.5 \text{ N/mm}^2$
 $x_{cor} = 39 \mu\text{m}, x_{mid} = 3 \mu\text{m}$
 $w_{cor} = 0.83 \%, w_{mid} = 0.06 \%$

(2) Fc24-LB4-Pw015 試験体



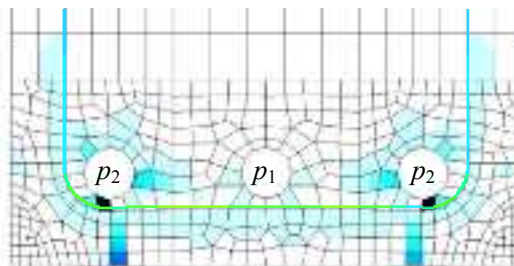
$p_2 = 3.0 \text{ N/mm}^2, p_1 = p_2/2$
 $\varepsilon_{\max}^{cr} = 6.80 \times 10^{-3}$
 $\sigma_{s,\max} = 14.6 \text{ N/mm}^2$
 $x_{cor} = 26 \mu\text{m}, x_{mid} = 3 \mu\text{m}$
 $w_{cor} = 0.54 \%, w_{mid} = 0.05 \%$

(3) Fc24-LB4-Pw03 試験体



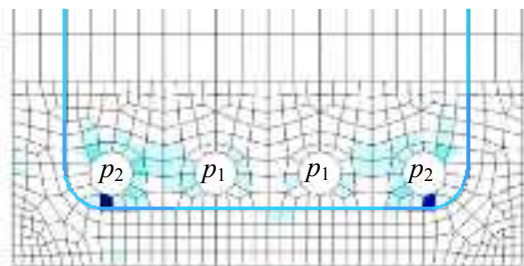
$p_2 = 3.0 \text{ N/mm}^2, p_1 = p_2/2$
 $\varepsilon_{\max}^{cr} = 1.03 \times 10^{-2}$
 $\sigma_{s,\max} = 70.6 \text{ N/mm}^2$
 $x_{cor} = 40 \mu\text{m}, x_{mid} = 3 \mu\text{m}$
 $w_{cor} = 0.83 \%, w_{mid} = 0.07 \%$

(4) Fc24-LB4-Pw03M 試験体



$p_2 = 3.05 \text{ N/mm}^2, p_1 = p_2/2$
 $\varepsilon_{\max}^{cr} = 1.11 \times 10^{-2}$
 $\sigma_{s,\max} = 56.8 \text{ N/mm}^2$
 $x_{cor} = 53 \mu\text{m}, x_{mid} = 2 \mu\text{m}$
 $w_{cor} = 0.96 \%, w_{mid} = 0.03 \%$

(5) Fc24-LB3-Pw03 試験体



$p_2 = 4.5 \text{ N/mm}^2, p_1 = p_2/2$
 $\varepsilon_{\max}^{cr} = 9.16 \times 10^{-3}$
 $\sigma_{s,\max} = 18.0 \text{ N/mm}^2$
 $x_{cor} = 38 \mu\text{m}, x_{mid} = 4 \mu\text{m}$
 $w_{cor} = 0.80 \%, w_{mid} = 0.08 \%$

(6) Fc48-LB4-Pw03 試験体

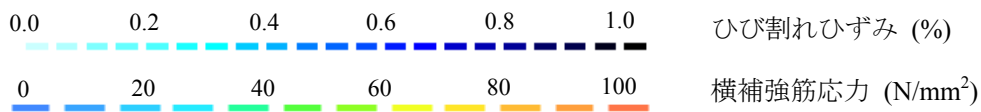
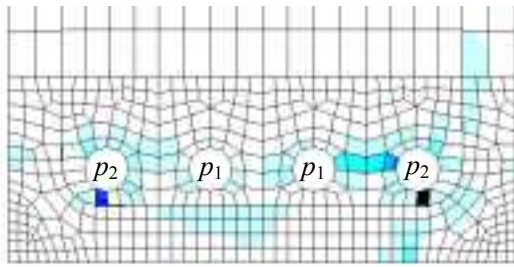


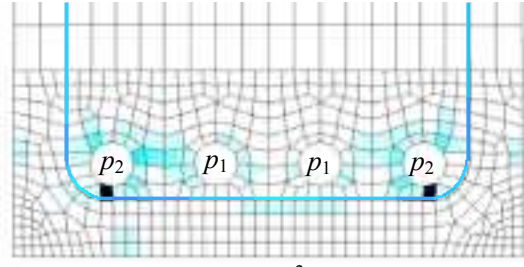
図 3. 4. 1-116 腐食ひび割れが主筋間で連結する時点のひび割れ進展挙動

図 3.4.1-117 に腐食ひび割れが主筋下側のコンクリート表面に到達した時点のひび割れ進展挙動を示す。図 3.4.1-116 で述べたように、主筋 3 本の試験体 Fc24-LB3-Pw03 は、主筋間の腐食ひび割れが連結する前に腐食ひび割れが主筋下側の表面まで到達している。主筋間のひび割れ連結と底面への到達は、ほとんどの試験体は同程度の内圧で起きている。しかしながら中子筋を有する試験体 Fc24-LB4-Pw03M は、内圧 3.0 N/mm^2 で主筋間のひび割れが連結した後もひび割れ成長を抑制し、内圧 3.4 N/mm^2 までひび割れは底面に到達しない。すなわち、中子筋は、最も効果的な補強法であるといえる。

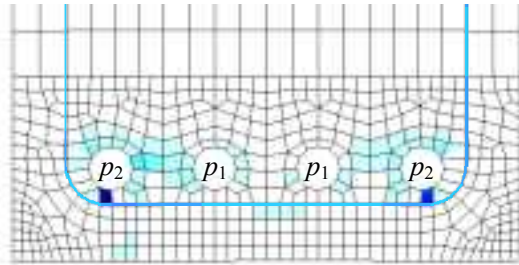
腐食ひび割れが主筋下側のコンクリート表面に到達した時点の腐食深さは、 $30 \mu\text{m}$ から $50 \mu\text{m}$ 程度、質量減少量は 0.6% から 1% 程度であり、この時点で腐食の進行を食い止める何らかの処置を行えば、構造耐力上、問題のない腐食レベルである。



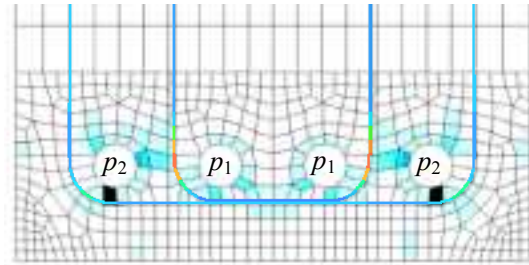
$p_2 = 2.95 \text{ N/mm}^2, p_1 = p_2/2$
 $\varepsilon_{\max}^{cr} = 1.17 \times 10^{-2}$
 $\sigma_{s,\max} = \text{NA}$
 $x_{cor} = 37 \mu\text{m}, x_{mid} = 6 \mu\text{m}$
 $w_{cor} = 0.78 \%, w_{mid} = 0.14 \%$
 (1) Fc24-LB4-Pw0 試験体



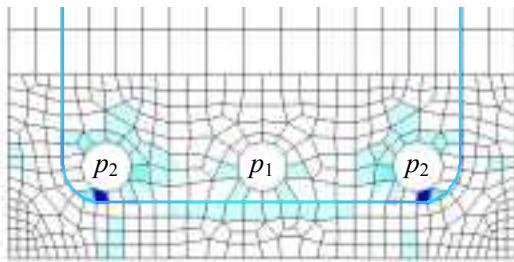
$p_2 = 3.05 \text{ N/mm}^2, p_1 = p_2/2$
 $\varepsilon_{\max}^{cr} = 1.23 \times 10^{-2}$
 $\sigma_{s,\max} = 23.0 \text{ N/mm}^2$
 $x_{cor} = 42 \mu\text{m}, x_{mid} = 4 \mu\text{m}$
 $w_{cor} = 0.89 \%, w_{mid} = 0.09 \%$
 (2) Fc24-LB4-Pw015 試験体



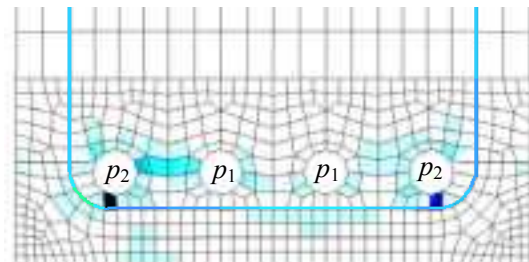
$p_2 = 3.1 \text{ N/mm}^2, p_1 = p_2/2$
 $\varepsilon_{\max}^{cr} = 8.25 \times 10^{-3}$
 $\sigma_{s,\max} = 18.5 \text{ N/mm}^2$
 $x_{cor} = 30 \mu\text{m}, x_{mid} = 4 \mu\text{m}$
 $w_{cor} = 0.63 \%, w_{mid} = 0.09 \%$
 (3) Fc24-LB4-Pw03 試験体



$p_2 = 3.4 \text{ N/mm}^2, p_1 = p_2/2$
 $\varepsilon_{\max}^{cr} = 1.22 \times 10^{-2}$
 $\sigma_{s,\max} = 121 \text{ N/mm}^2$
 $x_{cor} = 50 \mu\text{m}, x_{mid} = 14 \mu\text{m}$
 $w_{cor} = 1.05 \%, w_{mid} = 0.30 \%$
 (4) Fc24-LB4-Pw03M 試験体



$p_2 = 3.0 \text{ N/mm}^2, p_1 = p_2/2$
 $\varepsilon_{\max}^{cr} = 7.38 \times 10^{-3}$
 $\sigma_{s,\max} = 22.9 \text{ N/mm}^2$
 $x_{cor} = 34 \mu\text{m}, x_{mid} = 2 \mu\text{m}$
 $w_{cor} = 0.62 \%, w_{mid} = 0.04 \%$
 (5) Fc24-LB3-Pw03 試験体



$p_2 = 4.55 \text{ N/mm}^2, p_1 = p_2/2$
 $\varepsilon_{\max}^{cr} = 1.20 \times 10^{-2}$
 $\sigma_{s,\max} = 33.2 \text{ N/mm}^2$
 $x_{cor} = 44 \mu\text{m}, x_{mid} = 8 \mu\text{m}$
 $w_{cor} = 0.92 \%, w_{mid} = 0.17 \%$
 (6) Fc48-LB4-Pw03 試験体

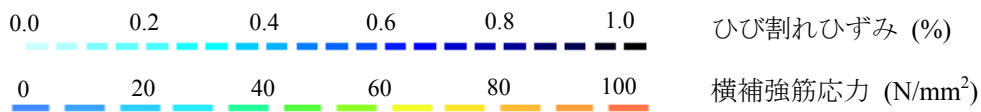
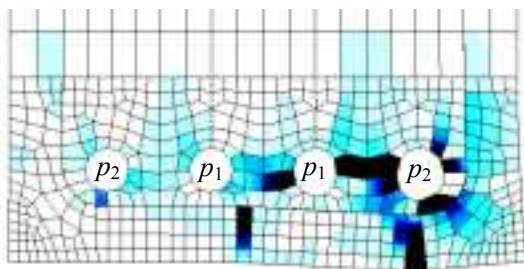
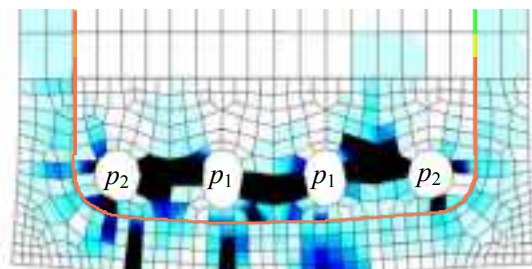


図 3. 4. 1-117 腐食ひび割れがコンクリート底面に到達した時点のひび割れ進展挙動

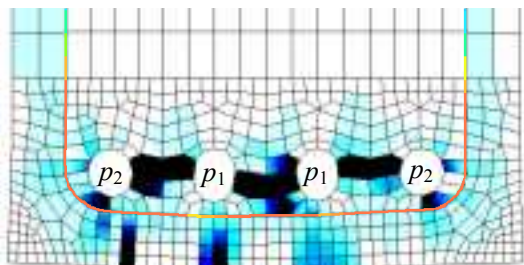
図 3.4.1-118 に解析上最終段階におけるひび割れ進展挙動を示す。最終段階では、中子筋のない主筋 4 本の試験体は、主筋間のひび割れが顕著になり、中主筋の下側底面のひび割れも発生している。一方、中子筋を有する試験体と主筋間間隔の広い主筋 3 本試験体では、主筋間ひび割れが抑えられ、中主筋の下側底面のひび割れは少ない。しかしながら実験では、いずれの試験体においても中主筋の下側には腐食ひび割れは発生しておらず、整合性が取れていない。図 3.4.1-117 に示すように、腐食ひび割れがコンクリート底面に到達すると、腐食生成物がひび割れからコンクリートの外に流れ出すことによって（実際に食塩水の中に腐食生成物が溜まった）、腐食膨張圧は減少する（または一定になる）傾向にあると思われる。この現象を解明するには、さらに詳細な実験および解析が必要である。現在のところは、解析結果の有効性は、腐食生成物がひび割れからコンクリートの外に流出すまでと考えるべきである。



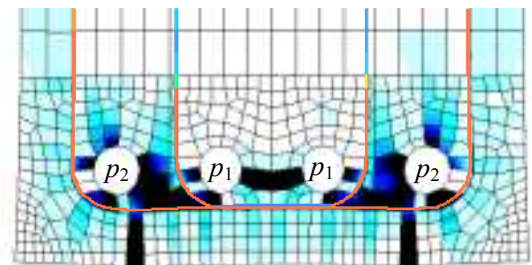
$p_2 = 3.0 \text{ N/mm}^2, p_1 = p_2/2$
 $\varepsilon_{\max}^{cr} = 7.70 \times 10^{-2}$
 $\sigma_{s,\max} = \text{NA}$
 $x_{cor} = 259 \mu\text{m}, x_{mid} = 112 \mu\text{m}$
 $w_{cor} = 5.38 \%, w_{mid} = 2.34 \%$
 (1) Fc24-LB4-Pw0 試験体



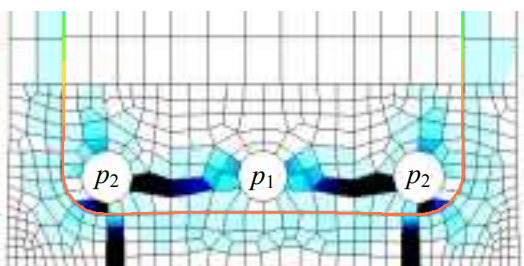
$p_2 = 3.2 \text{ N/mm}^2, p_1 = p_2/2$
 $\varepsilon_{\max}^{cr} = 1.20 \times 10^{-1}$
 $\sigma_{s,\max} = 439 \text{ N/mm}^2$
 $x_{cor} = 360 \mu\text{m}, x_{mid} = 596 \mu\text{m}$
 $w_{cor} = 7.44 \%, w_{mid} = 12.15 \%$
 (2) Fc24-LB4-Pw015 試験体



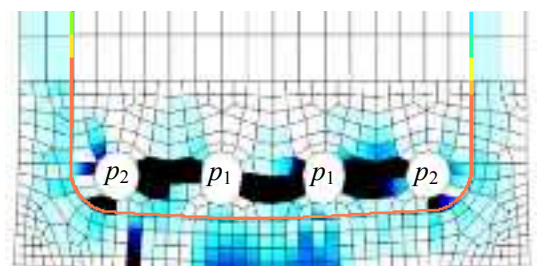
$p_2 = 3.25 \text{ N/mm}^2, p_1 = p_2/2$
 $\varepsilon_{\max}^{cr} = 7.73 \times 10^{-2}$
 $\sigma_{s,\max} = 230 \text{ N/mm}^2$
 $x_{cor} = 210 \mu\text{m}, x_{mid} = 369 \mu\text{m}$
 $w_{cor} = 4.37 \%, w_{mid} = 7.61 \%$
 (3) Fc24-LB4-Pw03 試験体



$p_2 = 5.0 \text{ N/mm}^2, p_1 = p_2/2$
 $\varepsilon_{\max}^{cr} = 4.78 \times 10^{-2}$
 $\sigma_{s,\max} = 457 \text{ N/mm}^2$
 $x_{cor} = 397 \mu\text{m}, x_{mid} = 199 \mu\text{m}$
 $w_{cor} = 8.18 \%, w_{mid} = 4.15 \%$
 (4) Fc24-LB4-Pw03M 試験体



$p_2 = 3.65 \text{ N/mm}^2, p_1 = p_2/2$
 $\varepsilon_{\max}^{cr} = 2.36 \times 10^{-2}$
 $\sigma_{s,\max} = 202 \text{ N/mm}^2$
 $x_{cor} = 164 \mu\text{m}, x_{mid} = 48 \mu\text{m}$
 $w_{cor} = 2.96 \%, w_{mid} = 0.86 \%$
 (5) Fc24-LB3-Pw03 試験体



$p_2 = 4.65 \text{ N/mm}^2, p_1 = p_2/2$
 $\varepsilon_{\max}^{cr} = 9.33 \times 10^{-2}$
 $\sigma_{s,\max} = 821 \text{ N/mm}^2$
 $x_{cor} = 280 \mu\text{m}, x_{mid} = 505 \mu\text{m}$
 $w_{cor} = 5.80 \%, w_{mid} = 10.4 \%$
 (6) Fc48-LB4-Pw03 試験体

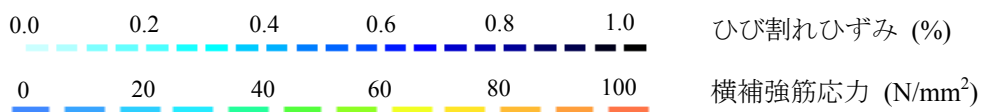


図 3. 4. 1-118 最終段階におけるひび割れ進展挙動

(f) 解析結果（ひび割れ幅の評価）

実験と解析のひび割れ幅の比較を行い、ひび割れ幅成長の評価について検討する。実験でのひび割れ幅は、図 3.4.1-119 に示す(1)、(2)、(3)の線上のデジタルマイクロスコープで計測したひび割れ幅を加算した合計ひび割れ幅である。一方、解析によるひび割れ幅は、図 3.4.1-120 に示す底面両端の節点変位から算出する。コンクリートの引張ひずみは非常に小さく、両端の変位はすべてひび割れに起因するという概念である。

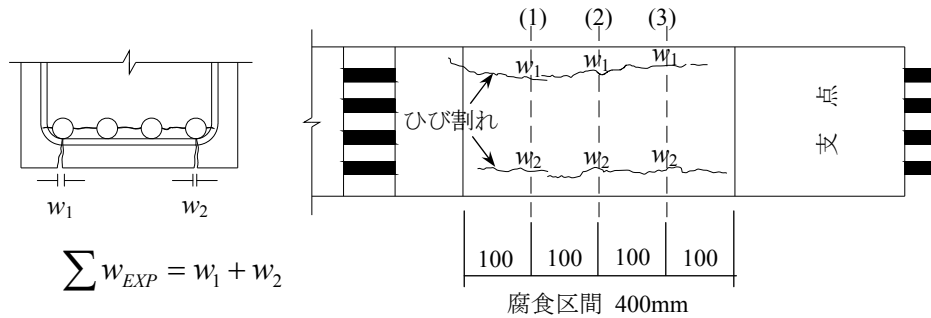


図 3.4.1-119 実験による合計ひび割れ幅

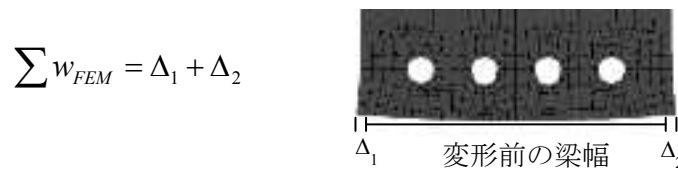
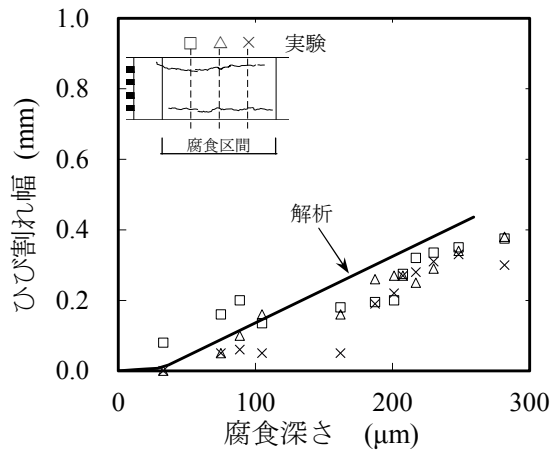


図 3.4.1-120 解析による合計ひび割れ幅

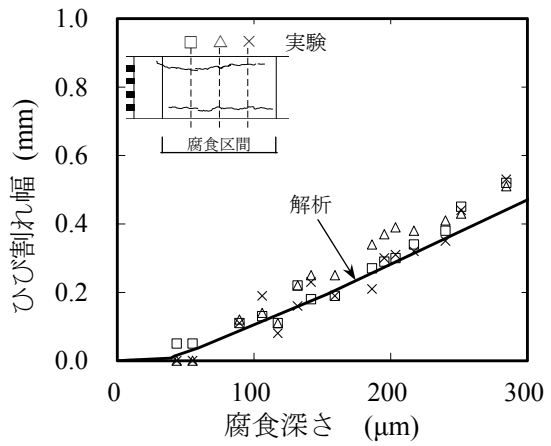
図 3.4.1-121 に各試験体の腐食区間底面に現れる実験による合計ひび割れ幅と解析による合計ひび割れ幅を比較して示す。Fc24 試験体は、腐食膨張倍率を 2 とすることで、実験結果と整合性のあるひび割れ幅が得られたが、Fc48 の高強度コンクリート試験体は、腐食膨張倍率を 2.5 から 3 としなければ、整合性のある結果が得られない。これは図 3.4.1-106 で説明したように、高強度になるとセメントペーストの細孔が少なくなり、腐食生成物がひび割れに集中することに起因していると考えられる。

(g) 解析結果（横補強筋の応力上昇の評価）

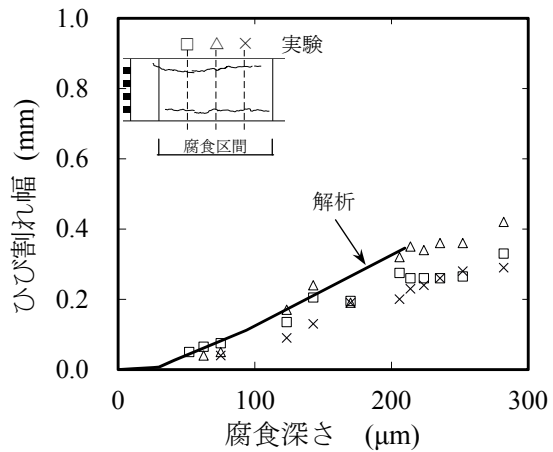
図 3.4.1-122 に各試験体の実験による横補強筋の応力上昇と解析結果を比較して示す。解析結果の破線は、図 3.4.1-118 で述べたように、解析が発散する最終 STEP において中間主筋孔の急激な膨張を引き起こし、横補強筋の底部のひずみが急増することに起因する。実験ではそのような現象は起こらなかったため、ひび割れが表面に出現後の解析には、さらに検討が必要であり、参考値として破線で示した。



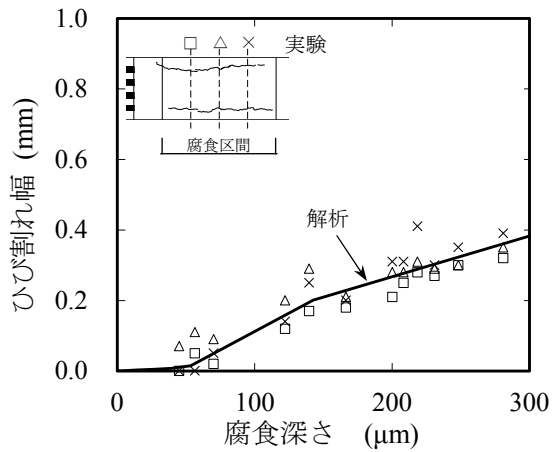
(1) Fc24-LB4-Pw0 試験体



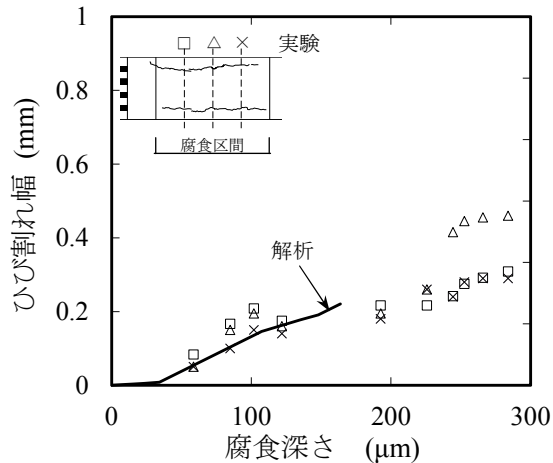
(2) Fc24-LB4-Pw015 試験体



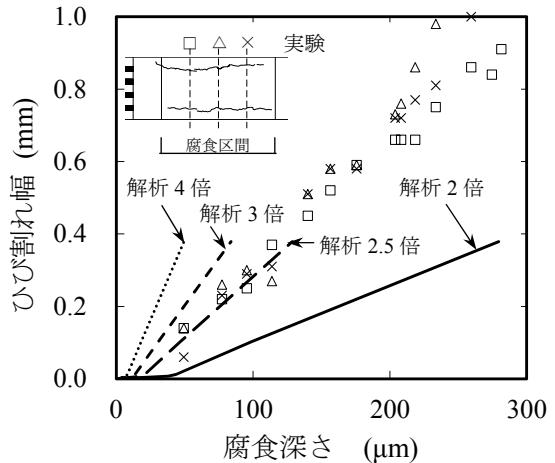
(3) Fc24-LB4-Pw03 試験体



(4) Fc24-LB4-Pw03M 試験体



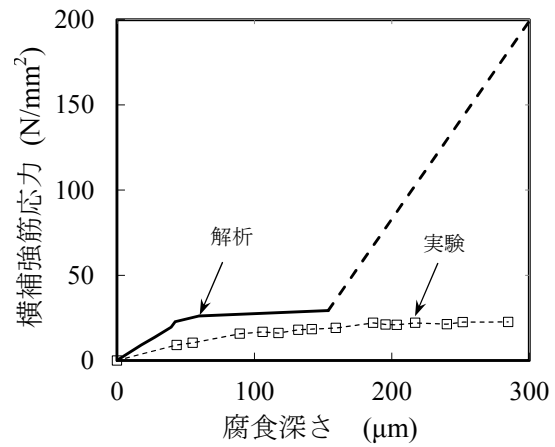
(5) Fc24-LB3-Pw03 試験体



(6) Fc48-LB4-Pw03 試験体

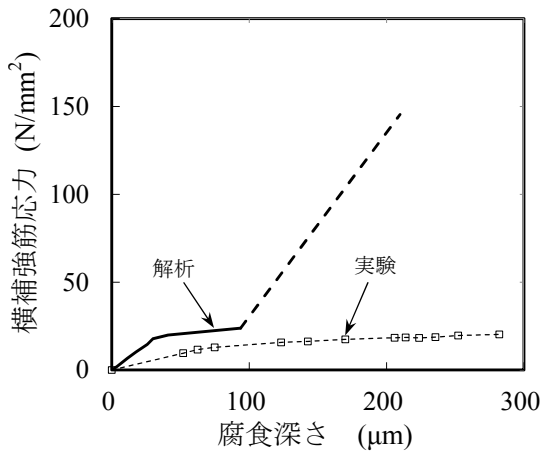
図 3.4.1-121 実験と解析による合計ひびわれ幅の比較

Not Applicable

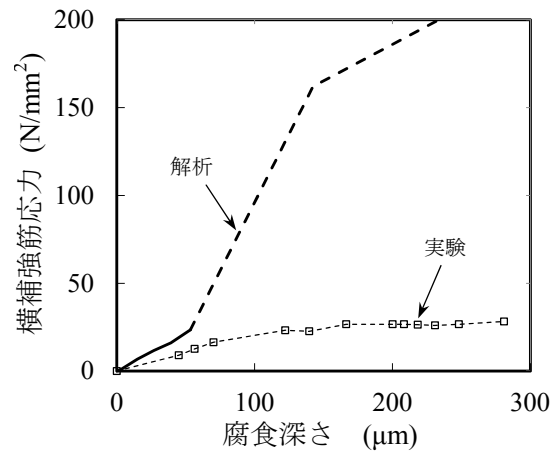


(1) Fc24-LB4-Pw0 試験体

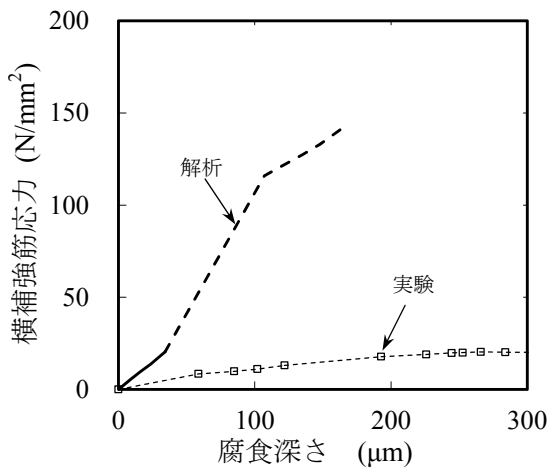
(2) Fc24-LB4-Pw015 試験体



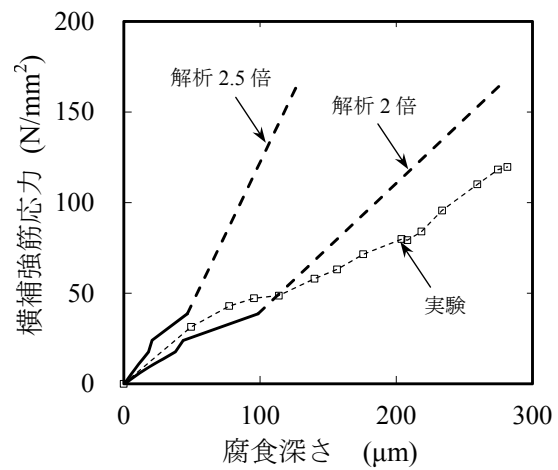
(3) Fc24-LB4-Pw03 試験体



(4) Fc24-LB4-Pw03M 試験体



(5) Fc24-LB3-Pw03 試験体



(6) Fc48-LB4-Pw03 試験体

図 3. 4. 1-122 実験と解析による横補強筋の応力挙動の比較

4) 鉄筋コンクリート部材の主筋・横補強筋の促進腐食予備実験

主筋と横補強筋両方が腐食した場合のひび割れ挙動と横補強筋の応力挙動を考察する予備実験として、横補強筋に貼付したひずみゲージが、電食中に損傷しないことを確認するための促進腐食実験を行う。試験体はコンクリートに埋め込んだ鉄筋と裸鉄筋を使用し、ゲージ保護幅が電食中のひずみゲージ損傷に及ぼす影響を検討し、適切な保護方法を提案する。

(a) 試験体概要

高強度せん断補強筋を想定した鉄筋(U6.4) 3本を図3.4.1-123に示すように10×10×40 cmのコンクリート試験体に埋め込んだ。鉄筋3本をstr1、str2、str3と名付けた。各鉄筋は3箇所で2方向、計6箇所の直径をノギスで測定し、その平均値を鉄筋の直径とした。また、電子天秤でそれぞれの質量を測定した。表3.4.1-35に各鉄筋の計測値を示す。

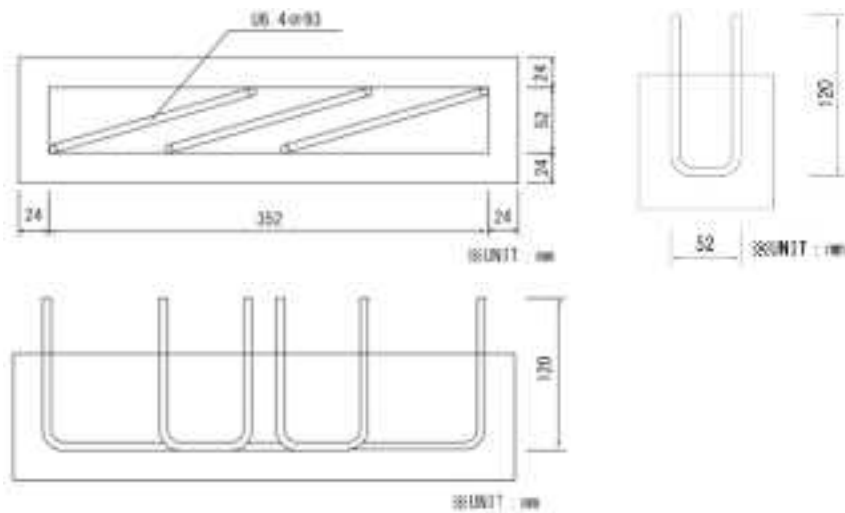


図 3.4.1-123 コンクリートに埋め込んだ促進腐食予備実験試験体

表 3.4.1-35 鉄筋名と平均直径及び質量一覧

鉄筋名	平均直径 (mm)	質量 (g)
Str1	6.25	87.7
Str2	6.25	87.4
Str3	6.25	87.4

各鉄筋に貼付したひずみゲージとその名称を図 3. 4. 1-124 に示す。ひずみゲージ名の最初の英数字は B が底部、S が側部に貼付したゲージであり、その後の数値はゲージ保護幅を表している。

一方、より高い腐食レベルまでゲージ保護の有効性を確認するために使用した裸鉄筋試験体は、通常強度 D10 竹節鉄筋に 3 枚のひずみゲージを貼付し、ゲージ保護幅は 20mm、30mm、40mm とした。

いずれのひずみゲージもロウ・練けし・黒いパッチ・自己癒着テープ・ビニールテープの順に保護した。

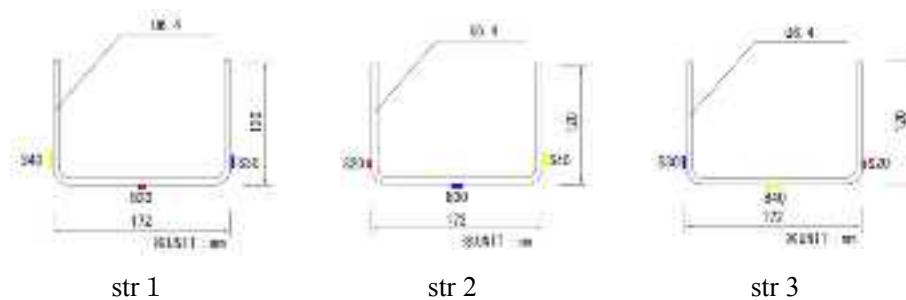


図 3. 4. 1-124 各鉄筋に貼付したひずみゲージ位置と名称

(b) 促進電食試験方法

コンクリートに埋め込んだ試験体は、コンクリート強度が目標強度(24 N/mm²)に達した後、水槽に質量濃度 3%NaCl 水溶液にスポンジを置き、そのスポンジの上に試験体を設置した。試験体の各鉄筋に陽極を並列接続、水槽中に設置した銅板に負極を接続した。3 本の鉄筋に分配される電流を測定するために 2Ω の抵抗をそれぞれの鉄筋と電線の間接続し、その間の電圧をデータロガーによって 5 時間置きに計測した。 図 3. 4. 1-125 に食中の写真を示す。



図 3. 4. 1-125 コンクリートに埋め込んだ鉄筋の電食試験状況

一方、D10 裸鉄筋は、コンクリート中には埋め込まず、そのまま 3% の食塩水に浸し、促進腐食試験を行った。図 3. 4. 1-126 に裸鉄筋の電食試験模式図を示す。

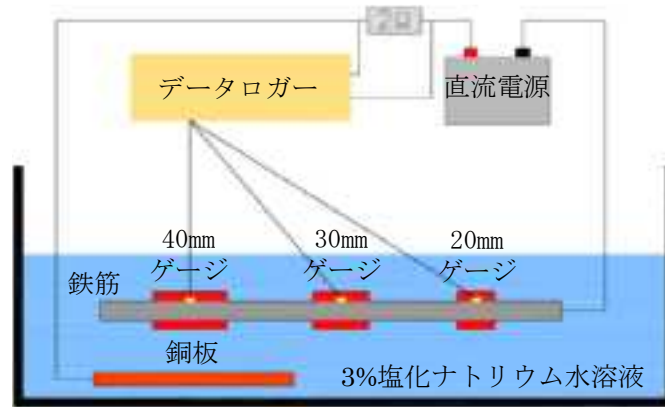


図 3. 4. 1-126 裸鉄筋の電食試験模式図

(c) 実験結果

コンクリートに埋め込んだ鉄筋に貼付したひずみゲージによるひずみと積算電流量の関係を図 3. 4. 1-127 に示す。いずれのひずみゲージも促進腐食試験終了まで、健全であったと思われる。しかしながら試験終了後コンクリートから取り出した腐食対象鉄筋は、コンクリート打設用組立筋を通して多くの電流が流れたことによって、図 3. 4. 1-128 に示す組立筋との接触部の腐食が激しく、コンクリートに埋め込まれた鉄筋部は、目標の腐食レベルに達していなかったと思われる。

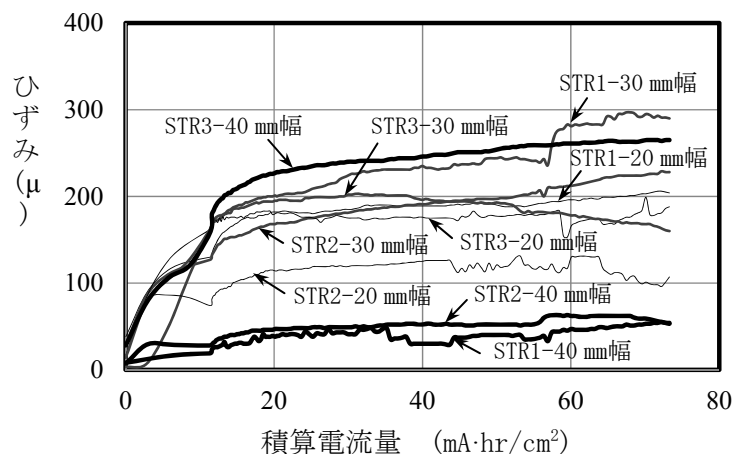


図 3. 4. 1-127 コンクリートに埋め込んだひずみと積算電流量の関係



図 3. 4. 1-128 コンクリートから取り出した鉄筋の腐食状況

一方、D10 裸鉄筋の促進腐食試験終了後、10%のクエン酸アンモニウム水溶液によって鉄筋に付着している腐食生成物を除去し、質量を測定した様子を図 3. 4. 1-129 に示す。実測質量減少率は 36. 9%と予測値 26. 6%を上回った。

図 3. 4. 1-130 に D10 裸鉄筋に貼付したひずみゲージの値と積算電流量の関係を示す。保護幅 20 mmゲージは積算電流量 50 mA・hr/cm²程度から不安定になるが、保護幅 30 mmと 40 mmゲージは試験終了まで安定した挙動を示した。促進腐食試験終了後の保護幅 20 mmゲージの様子を図 3. 4. 1-131 に示す。ゲージを保護するコーティング材内側には鉄筋の腐食は見られず、ゲージが異常な値を示したのはわずかな水分の侵入等が原因だと考えられる。以上のことから、促進腐食試験中のゲージを保護するためには、保護幅を 30mm 以上にすれば問題ないと考えられる。



図 3. 4. 1-129 D10 裸鉄筋の促進腐食試験前と終了後

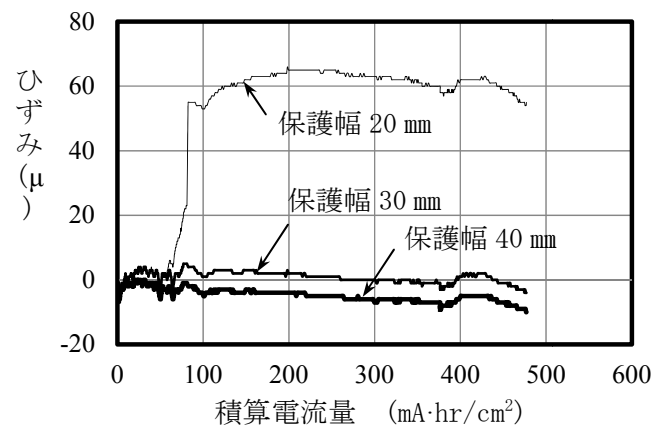


図 3.4.1-130 D10 裸鉄筋のひずみと積算電流量の関係



図 3.4.1-131 D10 裸鉄筋の促進腐食試験終了後の保護幅 20 mmゲージ

5) 主筋とせん断補強筋での腐食率の制御予備実験

(a) 目的

主筋とせん断補強筋では塩害等による腐食の進行速度が違うことが予測される。予備実験では、電気化学的な促進腐食試験下において主筋とせん断補強筋の腐食進行速度の違いを再現することが可能か否かを検証する。

(b) 実験方法および結果

実験方法の概要を図 3.4.1-132 に示す。コンクリートは打設せず、引張主筋 D19 とせん断補強筋 D10 を二本ずつ配筋した配筋した。組み立てに鋼製の結束線を使用するとそこからせん断補強筋と主筋が電導してしまうため、組み立てにはビニールひもを用いた。さらにエポキシ樹脂によって主筋とせん断補強筋の接点を絶縁した。塩化ナトリウム水溶液中に浸した主筋には低い電圧を、せん断補強筋には高い電圧を別々の電源により導入した。それぞれの鉄筋に導入した電流量は、それぞれに接続した 2Ω の抵抗の両端の電位差をデータロガーで 1 時間おきに記録することによって求めた。

実験結果を表 3.4.1-36 に示す。ほぼ予測値程度の腐食レベルが得られている。

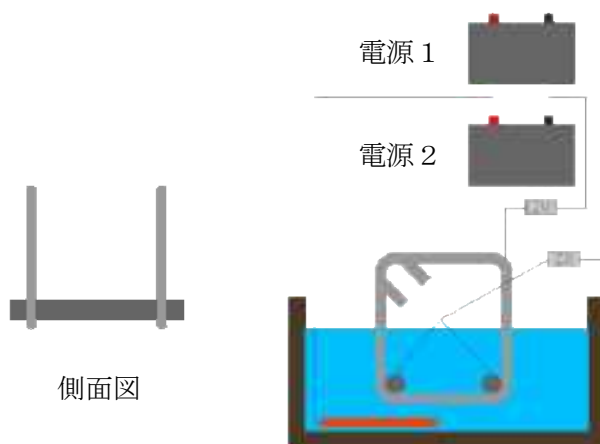


図 3.4.1-132 腐食率の制御予備実験の電食試験模式図

表 3.4.1-36 各鉄筋の質量減少率一覧

鉄筋名	予測質量減少率 W_c (%)	実際の質量減少率 W_e (%)	W_e/W_c
主筋 1	3.55	4.03	1.14
主筋 2	3.20	3.68	1.15
せん断補強筋 S1	7.72	8.56	1.11
せん断補強筋 S2	4.43	4.98	1.12

6) まとめ

横補強筋量、横補強方法、腐食対象軸方向鉄筋径およびコンクリート強度をパラメータとする RC 梁型試験体を用いて行った昨年度の促進腐食実験に基づき、鉄筋腐食量と表面ひび割れ幅の関係および横補強筋の応力上昇の関係を検討するために、有限要素解析を行った。さらに、実際の RC 部材では、横補強筋も腐食することを考慮し、横補強筋に対して促進腐食を行った場合のゲージ保護方法、および軸方向筋と横補強筋を同時に促進腐食した場合の腐食量の制御方法に関するパイロット実験を行い、以下の結論を得た。

- a) 実験による腐食レベルに基づいて、2:1 の内圧で主筋孔に載荷すると、実験と同様に隅主筋にひび割れが発生することを示した。
- b) 腐食深さ x が $40\sim 50\ \mu$ で、コンクリート表面にひび割れが出現（質量減 1%程度）し、横補強筋応力上昇は $20\ \text{N/mm}^2$ 程度になるが、この段階で何らかの対策をすれば、構造耐力上大きな問題にはならない。
- c) 中子筋には高い応力上昇が生じ、主筋間ひび割れ拘束効果が期待できるため、中補強筋補強は耐久性上、高い評価を与えることができる。
- d) 太径鉄筋の腐食速度は遅いが、腐食膨張力による割裂力が大きくなり、小さな腐食膨張圧でひび割れが発生する。
- e) コンクリート強度を 2 倍にすると、ひび割れ抵抗性は 1.5 倍となり、強度の平方根である引張強度に対応している。
- f) コンクリート強度によるひび割れ挙動の相違を細孔構造に基づいて明らかにし、腐食膨張解析に用いる膨張倍率は $F_c24=2$ 、 $F_c48=2.5\sim 3.0$ を提案した。
- g) 来年度行う予定の実情に近い主筋と横補強筋を同時に腐食させる促進腐食実験の予備実験によって、電食中、鉄筋に貼付したゲージの損傷を防ぐために、30 mm以上の保護幅を決定した

今後は、主筋と横補強筋を同時に促進腐食させる実情に近い実験を行い、腐食ひび割れ性状、横補強筋挙動を高精度化するするとともに、観測の容易なひび割れ幅から鉄筋の腐食量を推定し、各種構造材料特性が経年複合劣化を受けた鉄筋コンクリート建屋の構造性能を評価するために、FEM 解析を行う予定である。

3.4.2 放射線照射を伴うコンクリート構造物の健全性評価手法の検討

(1) 背景および目的

ここでは、本研究の背景および目的を明らかにするため、過去の報告書の内容も踏まえて示すこととする。

1) 本プロジェクトにおける調査の現状¹

(独)原子力安全基盤機構の高経年化技術評価に係わる審査マニュアル²（以降、JNES審査マニュアル）では、放射線照射によるコンクリートの劣化メカニズムについて、「コンクリートへの中性子照射やガンマ線照射によるコンクリート強度低下のメカニズムについては必ずしも明確になっていない。ただし、中性子照射やガンマ線照射を受けた物質は発熱することが知られており、コンクリート中に水分逸散が生じて、乾燥に伴うひび割れなどによりコンクリートの強度低下に結びつく可能性がある。」と記載しており、強度低下を発生させる可能性のある原因として、乾燥収縮によるひび割れなどを挙げている。

また、放射線に対するコンクリート構造物の健全性評価は、60年時点の放射線照射量予測値がコンクリート強度に問題となるようなレベル（下記を目安値）を超えているか否かを評価しており、中性子およびガンマ線について、目安値を超えていなければ健全であると評価している。

中性子照射： 1×10^{20} n/cm²

ガンマ線照射： 2×10^{10} rad

この目安値は、Hilsdorf 論文³などを参照して設定した数値であると言われているので、目安値に関して文献調査を実施した。具体的には、放射線影響評価や目安値設定の根拠となっているとされている図 3.4.2-1 および図 3.4.2-2 にまとめられている放射線照射試験における材料条件や照射条件について調査し、軽水炉における材料条件や照射条件と比較することにより、軽水炉の高経年化技術評価への適用性について検討した。

その結果、下記の通り、照射試験における試験条件が軽水炉の供用条件と異なることが明らかとなった。中性子照射試験に関する詳細条件を整理した結果を表 3.4.2-1 に示す。

- ・ 評価物性：圧縮強度ではなく曲げ強度を評価しているケースを確認した。
- ・ 使用材料：軽水炉の建設で使用されているポルトランドセメント以外のセメント（アルミナセメント等）が使われているケースを確認した。

¹ ここで示す内容は、前フェーズにおける研究成果の内容である。

² (独)原子力安全基盤機構：高経年化技術評価審査マニュアル コンクリートの強度低下及び遮へい能力低下（含む鉄骨構造の強度低下），H21.4.3

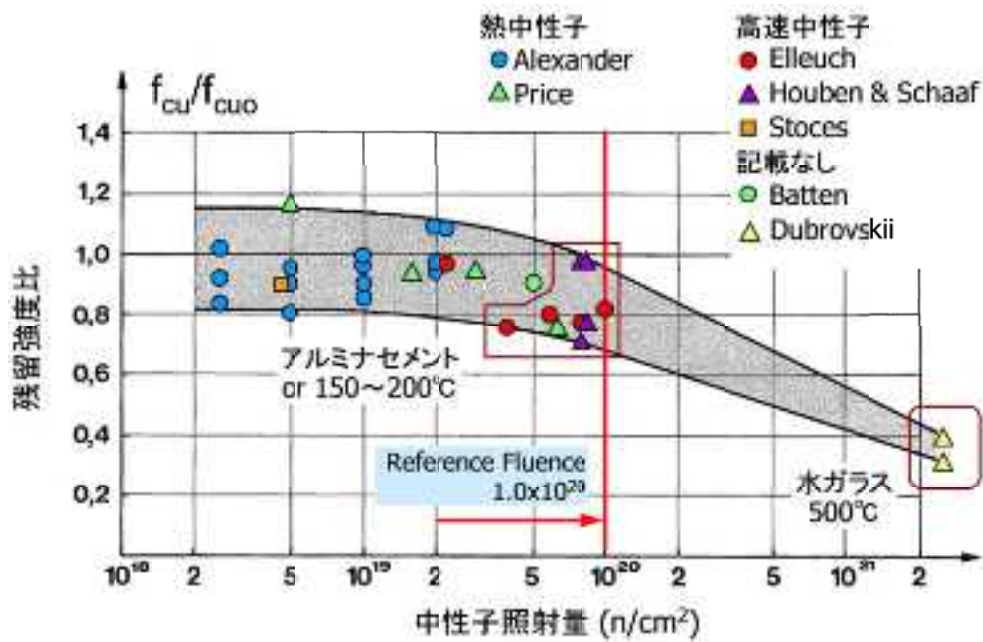
³ Hilsdorf, H. K., et al., “The Effects of Nuclear Radiation on the Mechanical Properties of Concrete,” ACI SP-55, 1978

- ・ 試験体形状：試験体形状（直方体：8×8×70mm）より圧縮強度を評価できるとは考えにくいケースがあった。
- ・ 照射条件（温度）：加速照射を行うため、照射温度が100℃を超えているケースが多く見られた。なお、軽水炉ではコンクリート構造物の温度が65℃（局部的には90℃）以下に押さえられている。
- ・ 照射条件（中性子エネルギーレベル）：高経年化技術評価における中性子照射に対する健全性評価では、0.1MeV以上の高速中性子照射量予測値と目安値の比較により健全性評価を行っているが、エネルギーレベルの低い中性子により照射試験を行っているケースやエネルギーレベルが不明であるケースを確認した。
- ・ 軽水炉ではステンレス製ライナー等により、コンクリートが直接水と接触することはないが、試験体を水中に浸漬して、ガンマ線照射試験を行っている照射試験が含まれていた。

以上の調査結果に基づいて、図3.4.2-1および図3.4.2-2より、軽水炉の環境条件とは異なる試験条件で取得されたデータを除去すること、下記のことが明らかとなった。

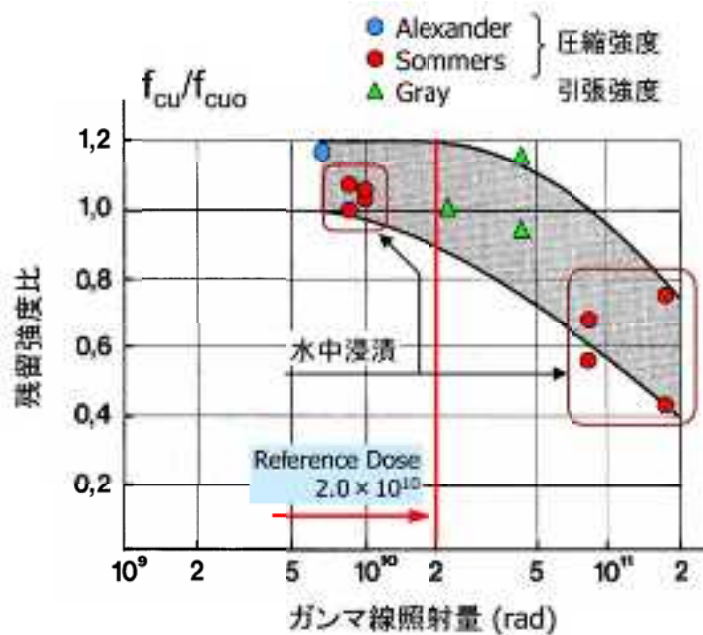
- ・ 中性子のエネルギーレベルを考慮すると、軽水炉の高経年化技術評価に向けて残留強度を議論できるデータ数は2点（Stoces and Batton）となる。
- ・ ガンマ線については、もともとデータ数が少なく、軽水炉条件とは異なるデータを除去すると、残留強度を議論できるデータは1点（Alexander）となる。
- ・ Hilsdorf 論文では、中性子およびガンマ線ともに、照射量の増加に伴い、残留圧縮強度が低下する傾向は確認できない。
- ・ Hilsdorf 論文では、中性子およびガンマ線ともに、照射試験データが少ないので、残留強度を議論することは難しい。

このように、Hilsdorf 論文³は、放射線影響評価や目安値設定の根拠としては、科学的な根拠が不足しており、放射線照射に対する健全性評価の信頼性を向上させるためには、放射線照射がコンクリートの物理特性に与える影響を把握し、劣化メカニズムを解明し、安全審査に資する科学的基盤を拡充する必要があることが重要であることを明確にした。



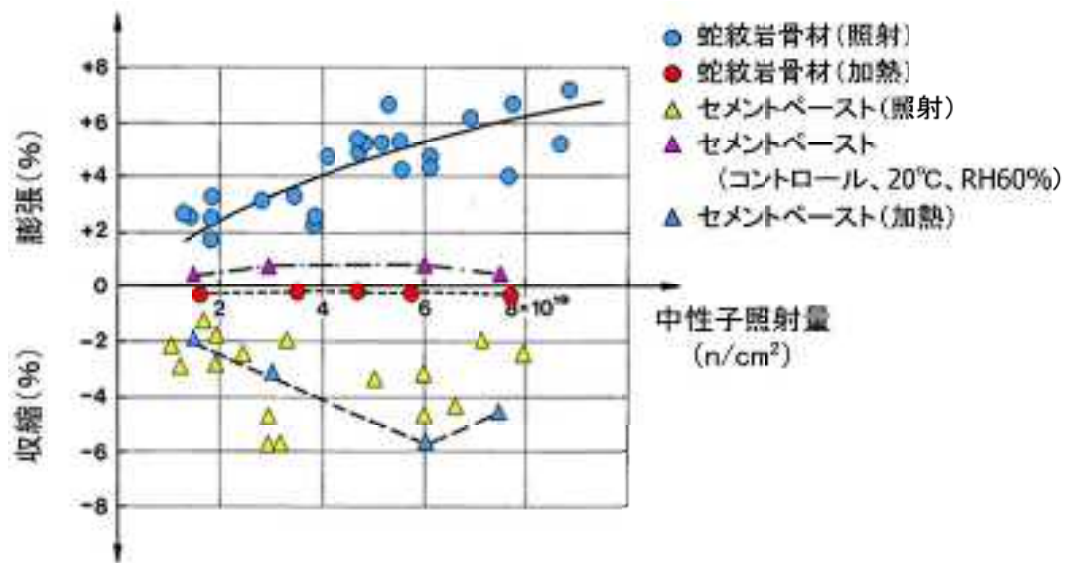
(参考文献3の凡例を変更、注記を追加)

図 3.4.2-1 中性子照射量とコンクリートの圧縮強度の関係³



(参考文献3の凡例を変更、注記を追加)

図 3.4.2-2 ガンマ線照射量とコンクリートの圧縮強度の関係³



(参考文献 3 の凡例を変更)

図 3.4.2-3 中性子照射量と骨材・セメントペーストの体積変化の関係³

表 3.4.2-1 中性子照射データの評価結果

著者	①評価物性	②使用材料	③試験体形状 (mm)	照射条件		評価
				④温度 (°C)	⑤中性子エネルギーレベル (照射量 (n/cm ²))	
Alexander ⁴	圧縮強度	普通ポルトランドセメント系	50.8 立方体	20~100 度	熱中性子 (0.29~2.3x10 ¹⁹)	×
Batten ⁵	圧縮強度	普通ポルトランドセメント系	51x51x203 直 方体	温度条件 不明	エネルギーレベル 不明 (5x10 ¹⁹)	△
Dubrovskii ⁶	圧縮強度	液体ガラス系	直径 15x15 円 柱	200~550 度	エネルギーレベル 不明 (2~2.4x10 ²¹)	×
Elleuch ⁷	圧縮強度	アルミナセメント	25x25x50 直 方体	210 度	高速中性子 (2.6~11.1x10 ²⁰)	×
Houben ⁸ Schaaf ⁹	圧縮強度	普通ポルトランドセメント系	8x8x70 直方 体	約 150~ 200 度	高速中性子 (3~8x10 ¹⁹)	×

⁴Alexander, S.C., "Effects of Irradiation on Concrete, Final Results", Atomic Energy Research Establishment, Harwell, 34 pp., 1963.

⁵Batten, A.W.Ch., "Effect of Irradiation on the Strength of Concrete", Atomic Energy Research Establishment, Harwell, 13 pp., 1960.

⁶Dubrovskii V. B.; Ibragimov, Sh. Sh.; Ladygin, A. Ya. and Pergamenschkik, B. K., "The Effect of Neutron Irradiation on Certain Properties of Refractory Concretes," Atomnaya Energiya 21, pp.108-112, 1966.

⁷Elleuch, M. R.; Dubois, F. and Rappenau, J., "Effects of Neutron Radiation on Special Concretes and their Components," American Concrete Institute, Special Publication SP-34, pp. 1071-1108, 1972.

⁸Houben, J. A., "De Bestraling van Mortelproefstukken," (Radiation of mortar specimens), Commission of the European Communities, Brussel, pp. 170-178, 1969.

⁹Van der Schaaf, C. F., "Invloed van Bestraling en Verhitting op de Sterkte van Mortels en Beton," Commission of the European Communities, Brussel, pp. 179-183, 1969.

Price ¹⁰	曲げ強度	普通ポルトランドセメント系	51x51x203 直方体	約 50 度	熱中性子 (0.5~7x10 ¹⁹)	×
Stoces ¹¹	圧縮強度	普通ポルトランドセメント系	直径 50x70 円柱	80 度以下	高速中性子 (4.2x10 ¹⁸)	○

①評価物性：圧縮強度を評価していない。②使用材料：ポルトランドセメント以外のセメントが使用されている。③試験体形状：圧縮強度を評価できるとは考えにくい。④照射条件(温度)：照射温度が 100℃を超えている。⑤照射条件(中性子エネルギーレベル)：エネルギーレベルの低い中性子による照射試験である。あるいは、エネルギーレベルが不明である。

評価  : 不適合  : 不明 (不適合とは評価できない。)

Stoces-○ (すべての条件に適合)、Batton-△ (不明の条件があるが、NG とは言えない。)、その他-× (不適合の条件が存在する。)

¹⁰Price, B. T.; Horton, C. C. and Spinney, K. T., "Radiation Shielding", International Series of Monograph on Nuclear Energy, Pergamon Press, New York, London, Paris, pp. 276-278, 1957.

¹¹Stoces, B.; Otopal, P.; Juricka, V. And Gabriel, J., "The Effect of Radiation on the Mechanical Properties of Concrete", Ceskoslovenska Akademie, Translated from the Czech; Oak Ridge National Laboratory, Purchase Order: 34B-83481, Letter Release No. : T81, STS No. : 10487.

2) 劣化メカニズムの作業仮説の高度化¹²

a) ガンマ線とセメントペーストおよび骨材との相互作用

コンクリートには比較的軽い核が多く含まれており、また、原子炉から放出されるガンマ線は10keVから10MeVの範囲のエネルギーが主なので、コンクリートとガンマ線の相互作用はコンプトン散乱が支配的であると考えられる。コンプトン散乱により、ガンマ線は軌道電子を弾き出すとともに、エネルギーを失っていく。放出されたコンプトン電子は、エネルギーが高ければ制動放射や対消滅で光子を発生するといった光子-電子のカスケード過程(電磁カスケード)によってさらに電子を生み出す。これらの電子は、最終的には原子・分子を電離(イオン化)したり、原子・分子を励起したりすることでエネルギーを失う。電子による原子の弾き出しは、MeV以上のエネルギーの電子であれば無視できない影響があることが知られているが、中性子に比べればはるかに小さい。

すなわち、ガンマ線とコンクリートの相互作用ではコンプトン散乱が支配的となるので、多くの放出電子が発生する。この電子は、最終的には原子・分子に吸収され、電離によるイオンや励起によるラジカルを生じて、化学反応を促進する。水分を含む物質にガンマ線が入射した場合には、ガンマ線により水分が電離あるいは励起されて、水の放射線分解が生じ、最終的には水素ガスや酸素ガスが発生する。

2012年度、あらたに調査・インタビュー(市川恒樹北大名誉教授、阿部弘亨東北大教授)により明らかになった点は以下のとおりである。

- ・重イオンビームであっても、ガンマ線であってもエネルギー沈着の仮定で塑性ひずみが生じ、一部がひずみエネルギーとして残留可能性は常にある。ただし、これらの割合は速中性子よりは断然低い。だからといって、無視してよいかについてはわからない。金属の弾き出し作用とことなり、Si-O-Si結合が熱的に振動し、最終的にどのように落ち着くかという問題である点に注意が必要である。金属の原子弾出し現象は、金属結合を断ち切るエネルギーが入力粒子に必要となるが、熱振動をさせるエネルギーに下限は無い。そのため、熱中性子も含めて、骨材の密度低下現象に寄与すると考えられる。
- ・ガンマ線単独では、大きな問題は生じないかもしれないが、上述の熱振動において中性子の衝突が生じるとすると、重畳的な問題を生じさせる可能性がある。ガンマ線、中性子線の影響は独立でない場合もあるので注意が必要である。

以上の点を加味したガンマ線とセメントペースト/骨材との相互作用について表3.4.2-2にとりまとめる。

¹² 本節は2012年度報告書と重複している。

表3.4.2-2 ガンマ線とセメントペースト/骨材の相互作用

	水分	固体
セメントペースト	<ul style="list-style-type: none"> ・セメントペースト内の水分の放射線分解により、水素ガス/酸素ガスが放出される。 ・ガンマ線発熱により水蒸気として放出される。 ・ガンマ線発熱により、未水和セメントが反応する可能性がある。 ・放射線分解の過程で発生する過酸化水素などのラジカルやイオンはセメントペーストと反応する可能性がある。 	<ul style="list-style-type: none"> ・散乱によってはじき出される電子のエネルギーレベルは低いので、セメントペーストや骨材の固体相に及ぼす影響は小さいと考えられる。
骨材	<ul style="list-style-type: none"> ・骨材内の水分は、放射線分解により水素ガス/酸素ガスとして、また、ガンマ発熱により水蒸気として放出される。 ・骨材中の共有結合においては、エネルギー沈着する過程において大部分は熱として放出されるが、一部は塑性ひずみの蓄積、すなわちひずみエネルギーの形で蓄積すると思われる。 ・ガンマ線による熱沈着が中性子線の影響を増幅させる可能性もある。 	

b) 中性子とセメントペーストおよび骨材との相互作用

高速中性子が、原子が格子状に配列した物質に入射すると、弾性・非弾性散乱により原子が弾き出され、格子欠陥が発生する。また、弾き出された原子のエネルギーが、格子エネルギーよりもはるかに高い場合、この原子が他の原子を次々と弾き出し、カスケード状の格子欠陥の集合体を発生させることが知られている。

一方、コンクリートには比較的軽い核が多く含まれているので、中性子による原子の弾き出しは起きやすい。しかし、既往の研究では、 10^{19} n/cm²程度の中性子照射を受けてもセメントペーストには何の変化も発生しなかったことが報告されている¹³。セメントペーストは、大量の水分を含んだ多孔質材料であり構造が疎であるため、原子が弾き出されたとしても、原子の移動が容易であり元の位置に戻り易い。また、万が一、弾き出しにより原子が移動したとしても、多孔質なセメントペーストは、多少の膨張は吸収できると考えられると考えられる。一方、多くの骨材は結晶質で密実なので、中性子照射により弾き出しが発生し、格子欠陥が蓄積され、劣化が発生する可能性がある。

また、中性子は、弾性散乱や非弾性散乱で原子（イオン）を弾き出し、原子核と核反応を生じることで、物質にエネルギーを与える。弾き出されたイオンは、物質中を電離や励起を起こしながら進んでエネルギーを失う。さらに、イオンからの電離で生じた電子（デルタ線と呼ばれる）もガンマ線から生じる電子と同じく、物質を電離・励起する。また、中性子と原子核に核反応から生じるガンマ線も、先に述べたコンプトン散乱などで電子となってエネルギーを物質に与えていく。中性子によるエネルギー付与（すなわち電子の発生量）はガンマ線に比べて高密度であるので、微視的なセメントペースト構造との相互作用により、同じ吸収線量の場合でも影響の程度がガンマ線と異なることが考えられる。中性子とガンマ線による水中での放射線化学反応に関する研究は行われているが、セメントペースト内の水分について微視的な構造までを考えた研究は実験・シミュレーションのいずれも行われていないので、十分に把握する必要がある。

骨材におよぼす中性子の影響は、古くは石英の研究が代表的である¹⁴。図3.4.2-4は、石英と速中性子照射量の関係を示したものである。ここに示されるように石英は、中性子照射によって密度低下を生じさせる。この密度低下の原因は、中性子による原子の弾き出しではない。たしかに、Si-O-Si結合は、中性子によって乱れるが最終的に密度低下が生じてできあがる構造は完全なアモルファス構造ではなく、周期的な結晶構造が保持されていることが報告されている¹⁴。また、密度の観点から言えば、最終的に到達される結晶構造はクリストバライトに似通ったものであると推察される（図3.4.2-5）。

¹³ Elleuch, M. R.; Dubois, F. and Rappenu, J., "Effects of Neutron Radiation on Special Concretes and their Components," American Concrete Institute, Special Publication SP-34, pp. 1071-1108, 1972.

¹⁴ Primak, W. et al., "Fast-Neutron-Induced Changes in Quartz and Vitreous Silica", Phys. Rev., 110(6) 1240-1254, 1958.

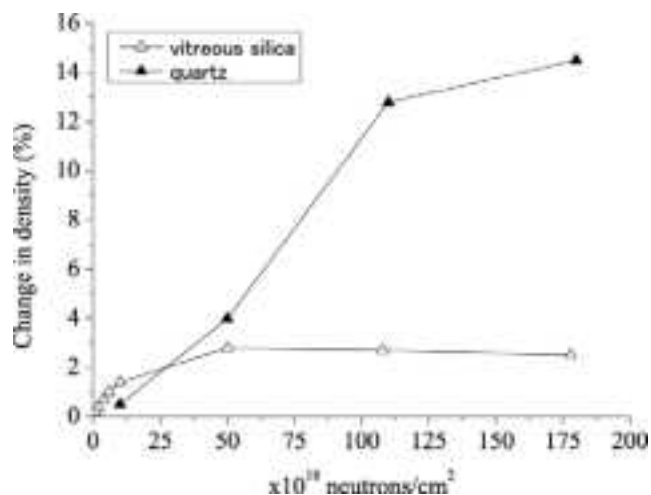


図 3. 4. 2-4 石英およびガラス質シリカの速中性子照射量と密度変化量の関係¹⁵

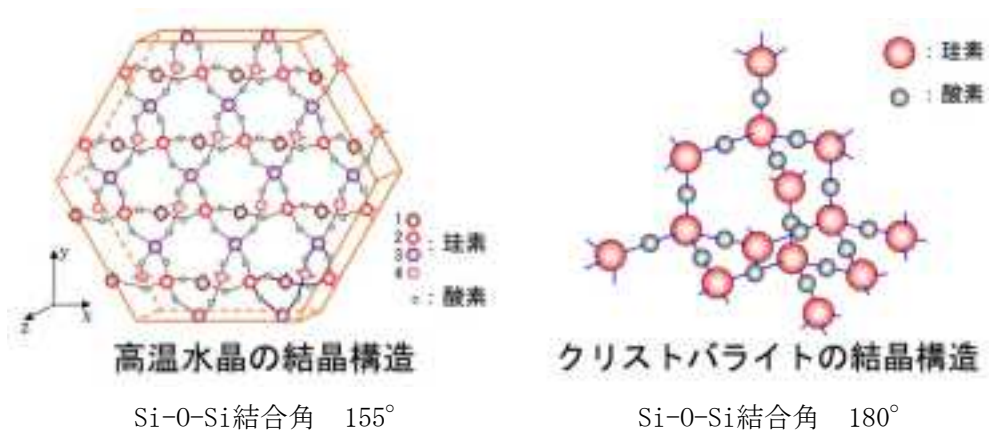


図3. 4. 2-5 シリカ質鉱物の結晶構造の事例 (市川恒樹北大名誉教授による提供)

表3. 4. 2-3 各種放射線のQuartzのアモルファス化を生じさせる照射量
(市川恒樹北大名誉教授提供)

Radiation source	Crystalline α -quartz	Amorphous quartz
200 keV Ar ion beam	6×10^{14} ions/cm ²	0.6×10^{14} ions/cm ²
> 0.1 MeV fast neutron (estimated)	5×10^{19} n/cm ² > 60 years for PWR	0.5×10^{19} n/cm ² > 6 years for PWR
γ and β rays (estimated)	5×10^{11} Gy > 600 years for PWR	0.5×10^{11} Gy > 60 years for PWR
(Change of density)	2.65 \rightarrow 2.27	2.20 \rightarrow 2.27
(Increase of reaction rate)	> $\times 700$	> $\times 3$

¹⁵ Primak, W. et al., "Fast-Neutron-Induced Changes in Quartz and Vitreous Silica", Phys. Rev., 110(6) 1240-1254, 1958.

中性子が石英中のシリカの結合に及ぼす影響は、ガンマ線の項でも示したように、非回復名ひずみエネルギーを蓄積する点にある。これは、必ずしも、原子の弾き出しを必要とせず、結合にエネルギーを付与した場合にある一定の割合で、ひずみエネルギーに変換されると考えられる。過去の実験データを集約すると、各種放射線の石英をアモルファス化するために必要な照射量を表3.4.2-3に示す。この表は、市川恒樹北大名誉教授により提供いただいた。アモルファス化のエネルギー効率はあきらかにガンマ線やベータ線の方が低いが、少なからず影響があることが示されている。この観点からいえば、熱中性子も同様に無視できない要因であることがわかる。

表3.4.2-4 中性子とセメントペースト/骨材の相互作用

	水分	固体
セメントペースト	<ul style="list-style-type: none"> 核反応や反跳原子によるエネルギー付与が及ぼす影響についてはガンマ線の場合と同じであると考えられるが、エネルギー付与密度の違いから、微視的なセメントペースト構造との相互作用により、同じ吸収線量の場合でも影響の程度がガンマ線と異なることが考えられる。(線質効果) 	<ul style="list-style-type: none"> セメントペーストは多孔質で疎な構造なので、中性子により原子が弾き出されても、ペースト内を簡単に移動でき、少々の体積膨張は吸収できると考えられるので、損傷を受け難い。
骨材	<ul style="list-style-type: none"> 中性子は水分に影響を及ぼすと考えられるが、セメントペーストと比較すると水分量は少ないので、影響も小さいと考えられる。 	<ul style="list-style-type: none"> 骨材中の共有結合に塑性ひずみが生じ、密度低下が生じる。場合によってはアモルファス化が生じる。 この密度低下には、骨材の弾き出しの影響も無視できない。 ガンマ線との重畳効果の可能性も無視できない。 密度低下、すなわち体積膨張によってコンクリート中で周囲のモルタル相にひび割れを生じさせる可能性がある。

3) 照射影響に関わる文献調査¹⁶

Hilsdorf の検討で用いられた実験のうち、いくつかについては軽水炉の条件を満足していないものがあることが明らかとなった。しかしながら、Gray¹⁷、Hilsdorf¹⁸、Dubrovskii¹⁹ が指摘しているように骨材の膨張とセメントペーストの収縮によって生じるダメージに起因して強度が低下する傾向は確かに生じうるものと考えられる。そこで、Hilsdorf の検討に加え、あらたな照射量と強度比の関係についてデータのとりまとめを検討することとした。

まず、データの収集条件について検討を行った。軽水炉のための安全性評価であるので、ポルトランドセメントを用いたコンクリートを第一の原則とした。次に、コンクリート用骨材であるが、これらについては基本的にシリカ質骨材（石英、長石等を含むと考えられる骨材）を基準として考えた。次に照射条件温度であるが、実機は 65°C 以下とかなり低い温度であるが、加速試験である照射試験が一般的であることを考えると、これらについては適用範囲について議論が必要だと考えられる。そこで、まず、熱影響として問題の無い範囲を特定することとした。図 3.4.2-6 は、NRC の加熱に関するレポートから、シリカ質骨材のデータのみを抜粋したものである。

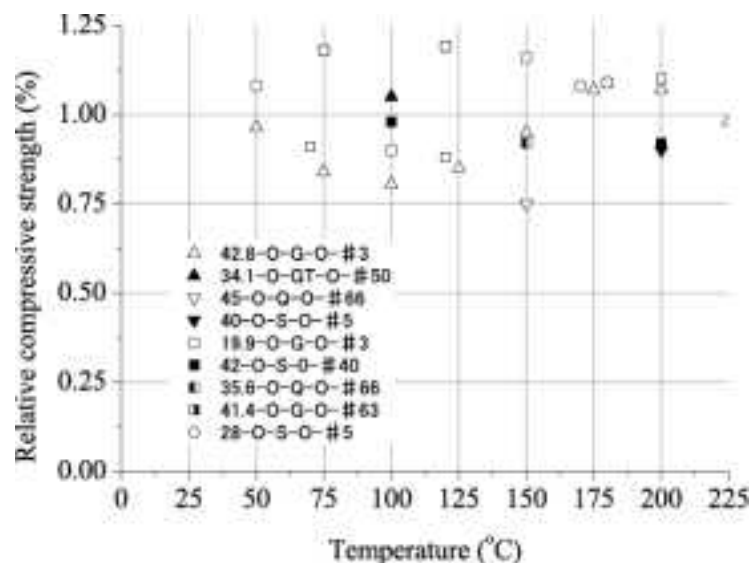


図 3.4.2-6 シリカ質骨材を用いたコンクリートのコンクリート強度比
(非加熱試験体コンクリートの圧縮強度を基準) と温度の関係²⁰

¹⁶ 本検討内容は 2012 年度報告書において示した内容である。

¹⁷ Gray, B. S., “The Effect of Reactor Radiation on Cements and Concrete”, Commission of the European Communities, Luxembourg, pp. 17-39, 1966.

¹⁸ Hilsdorf, H. K. et al., “The Effects of Nuclear Radiation on the Mechanical Properties of Concrete,” ACI SP-55, 223-249, 1978

¹⁹ Dubrovskii V. B., et al., Hematite concrete for shielding against high neutron fluxes, Translated from Atomnaya Energia, Vol.28, No.3, 1970

²⁰ US-NRC:A Compilation of Elevated Temperature Concrete Material Property Data and

ここに示されるように、シリカ質骨材を用いたコンクリートの強度は、最低で0.75となるが、必ずしも100°C~200°Cの範囲においてコンクリート強度が温度上昇に伴い、強度低下を示すわけではない。これを裏付けるデータがセメントペーストにおいて存在する。図3.4.2-7は、セメントペーストの異なる温度条件において長期間保管した後の曲げ強度および圧縮強度の結果である。ここに示されるように、セメントペースト強度においても、75°C~125°C近傍において極小値をとり、200°Cまでの間はむしろ、温度の上昇とともに強度は増大する傾向を示している。この観点から考えて、200°C以下までの範囲であれば、照射の影響について評価可能と判断できる。

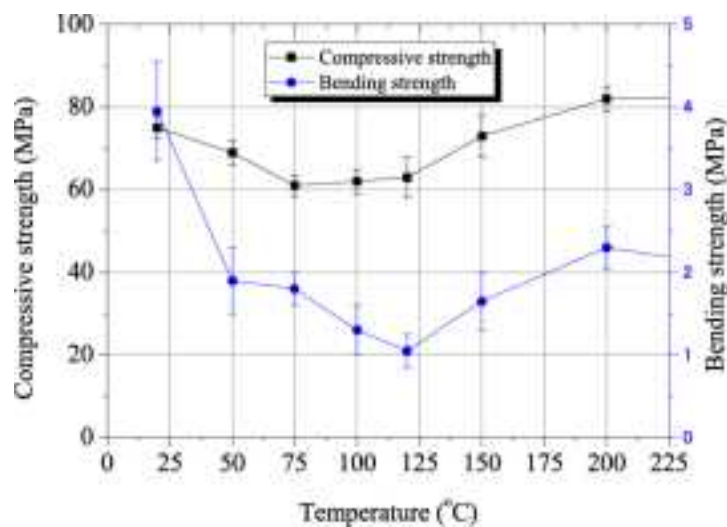


図 3.4.2-7 セメントペーストの各種強度と温度の関係²¹

以上の条件をもとに、Hilsdorf 論文以前、以降のコンクリートの照射実験結果についてデータを収集し、とりまとめたものが図3.4.2-8である。ここでは、特にソビエトのデータが格段に増加し、その結果として $2 \times 10^{20} \text{n/cm}^2$ までの照射量データがそろった。ただし、注意しなくてはならないのは、これは速中性子だけではなく、熱中性子まで含む全中性子照射量であるものが大半であるということである。これらのデータの吟味については、次節に示す劣化メカニズムを考慮した上で評価の必要がある。

今回のデータ収集の範囲では、おおよそ $4 \times 10^{19} \text{n/cm}^2$ 程度から強度低下の傾向が認められた。

Information for Use in Assessments of Nuclear Power Plant Reinforced Concrete Structures: Prepared by D. J. Naus/NUREG/CR-7031, Fig. 2.92

²¹ J. Komonen and V. Penttala, —Effects of High Temperature on the Pore Structure and Strength of Plain and Polypropylene Fiber Reinforced Cement Pastes, || Fire technology 39(1), pp. 23-34, 2003.

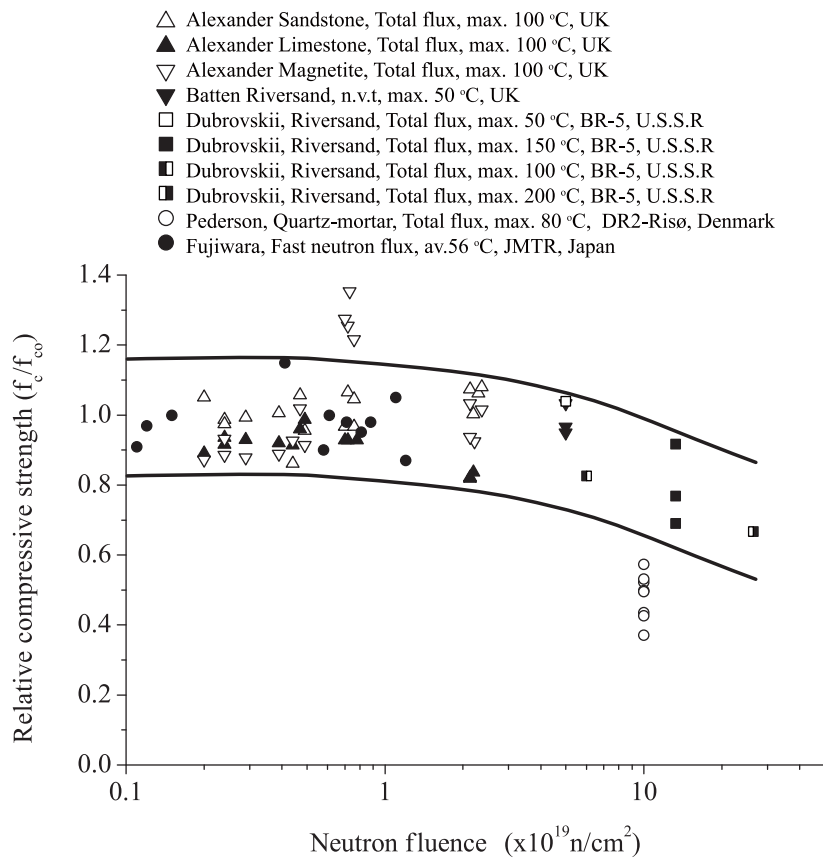


図 3. 4. 2-8 中性子照射量と相対コンクリート強度の関係²²

²² J. Komonen and V. Penttala, —Effects of High Temperature on the Pore Structure and Strength of Plain and Polypropylene Fiber Reinforced Cement Pastes, || Fire technology 39(1), pp. 23-34, 2003.

4) 本研究のアプローチ²³

放射線の影響下にある鉄筋コンクリート部材の健全性評価は、コンクリートの劣化がどのように生じるのか、という科学的視点に基づきすすめる必要がある。規制側の観点から考えれば、以下のような流れとなると考えられる。

a) 照射量に基づく劣化度評価手法の検討：どのような骨材を用いた場合に膨張挙動が生じ、結果として、コンクリート内の損傷とコンクリートの強度低下につながるかに関する基盤データの拡充が不可欠である。もっとも敏感性の高い石英のデータをにおいて安全側の評価を実施することとする。たとえば、図 3. 4. 2-8 におけるコンクリート強度の低下傾向が開始されると考えられる照射量 $2 \times 10^{19} \text{n/cm}^2$ は図 3. 4. 2-4 から考えると、ガラス質石英の膨張、石英の膨張のいずれもが体積膨張として 4% に範囲で生じたときと考えられる。これは、蛇紋岩自体が 4% 膨張する時点ともおおよそ対応していることを考慮すると²⁴、一つの目安になりうる。

対象とする部材は、放射線の影響のみならず、ガンマ発熱の影響を受けることから、加熱・乾燥の影響をも受ける。そのため、図 3. 4. 2-9 に示す各種要因について、それぞれの化学的変質とそのメカニズム、また、それらがコンクリート物性変化に及ぼす影響について定量的に把握する必要がある。

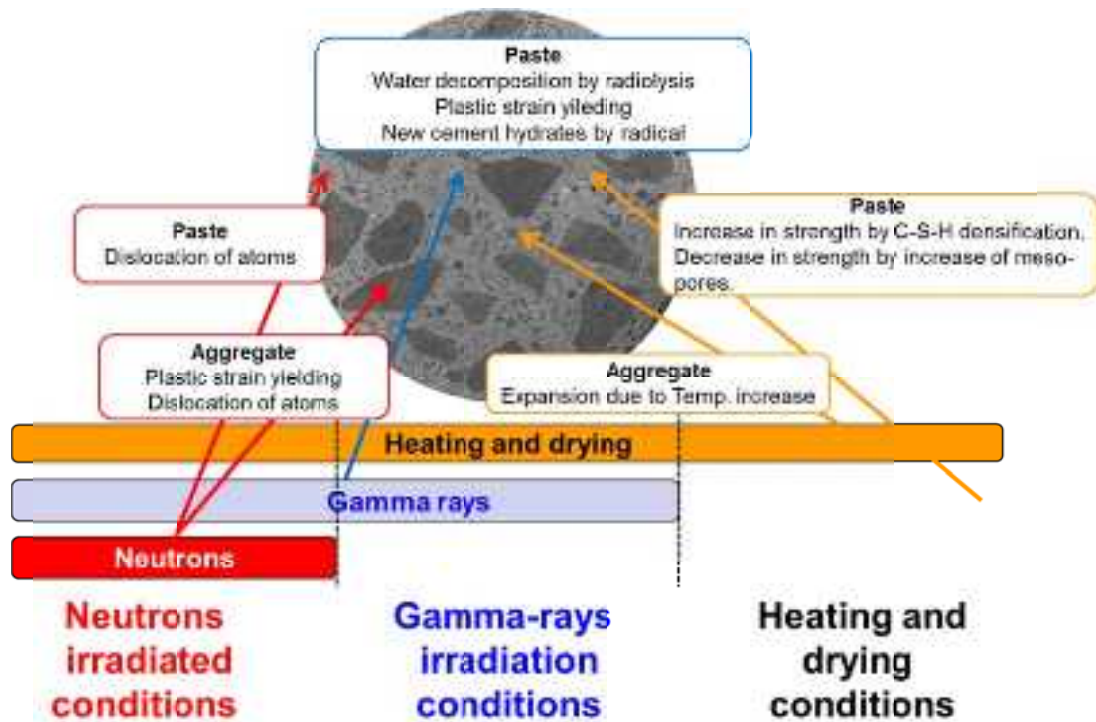


図 3. 4. 2-9 コンクリートの変質を及ぼす要因

²³ 本節は、2012 年度報告書に加筆したものである。

²⁴ Gray, B. S., “The Effect of Reactor Radiation on Cements and Concrete”, Commission of the European Communities, Luxembourg, pp. 17-39, 1966.

注意しなくてはいけないのは、コンクリートは地産地消の材料であり、そのために普遍性のあるデータをいかに効率的に収集するかという視点である。そのため、単にコンクリートのデータをとるだけでなく、構成材料の挙動、科学的知見が有用であることに着目する必要がある。これを網羅するための実験マトリクスを図 3.4.2-10 に示した。ここには、本プロジェクトで実施・担当する場所も併せて示している。

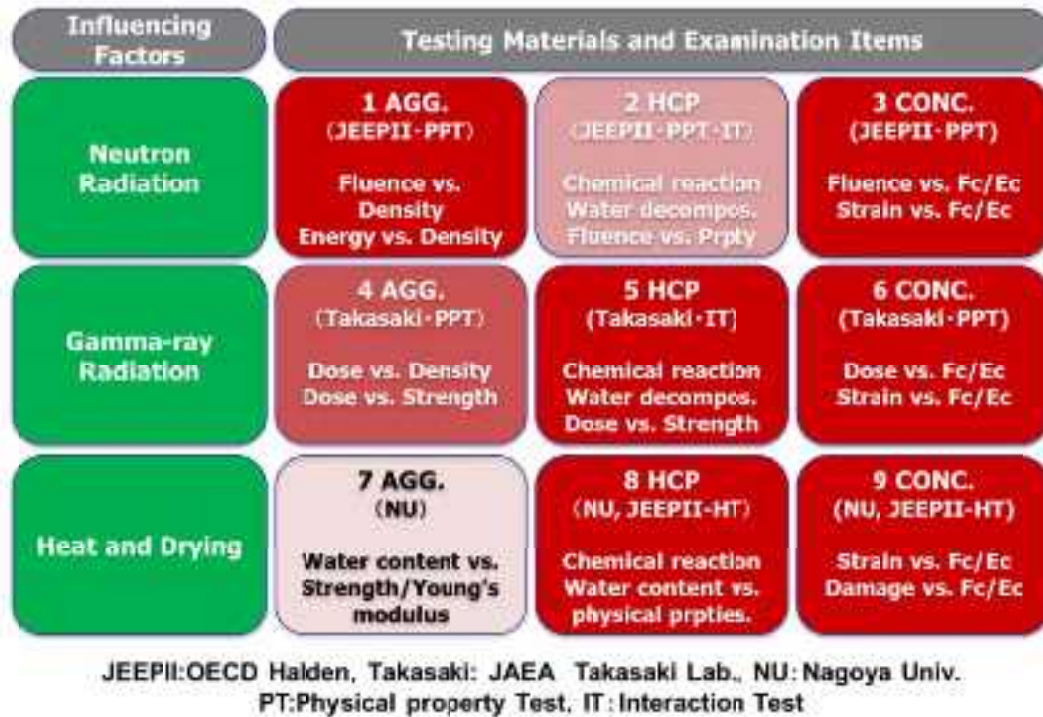


図 3.4.2-10 放射線照射の影響を受けるコンクリートの劣化メカニズム同定に必要な実験群

ここに示される 9 つのマトリクスを効率的に埋めていくことが本プロジェクトの成功の鍵である。図 3.4.2-11 には、マトリクスを埋めることで得られる成果について具体的に示した。

Experimental Items	Expected results
Item 3, Conc. (PT) - Neutron Item 4, Conc. (PT) - Gamma ray	1) Simple reference level. 2) Fundamental data for concrete property change under irradiation condition for developing simulation codes.
Item 3 - Item 6 - Item 9	1) Effect of neutron on deterioration of concrete.
Item 6 - Item 9	1) Effect of gamma ray on deterioration of concrete.
Item 9	1) Effect of heat and drying on deterioration of concrete. 2) Relationship between volume change and property. 3) Relationship between damage and properties.
Item 3 + Item 1 + Item 2 + Item 4 + Item 5	1) Major mechanism of concrete deterioration under neutron and gamma-ray irradiation condition.
Item 7 + Item 8	1) Effect of heat and drying on concrete components, property change and volume change.
Item 4 - Item 7 + Item 5 - Item 8	1) Effect of gamma ray on concrete components.
Item 1 - Item 4 - Item 7 Item 2 - Item 5 - Item 8	1) Effect of neutron on concrete components, 2) Reference level based on concrete components and fluence.

図 3. 4. 2-11 実験群とそこから得られる成果の一覧

次にこれらの知見を求めた上で、さらなる規制のあり方を議論する場合には、以下のよう
な 2 項目の検討を行う必要がある。

b) **本躯体によるコンクリート強度等の直接評価**：照射量の制限値を上回ったとしてもコン
クリート強度の低下が本当に生じているかどうかは、まだ検討の余地がある。この場合、
実躯体からのコアコンクリート強度の調査、あるいは非破壊試験と数値解析的検討の組み
合わせなどによって、評価をすることで健全性評価が可能である。また、これは将来の課
題となるが、表層部骨材の分析から、骨材の膨張量が推定できる場合においては、この値
からコンクリートの健全性を評価することが可能と推察される。

c) **部材レベルによる性能評価**：中性子およびガンマ線が照射される部材のコンクリート
劣化は、コンクリート自体に遮蔽効果があるため、もっとも影響を受けるのは最内側コン
クリートであると考えられる。コンクリート強度と体積変化の分布を考慮した部材性能評
価を実施することで健全性評価を実施することができる。

以上の枠組みをとりまとめたのが、図 3. 4. 2-12 である。

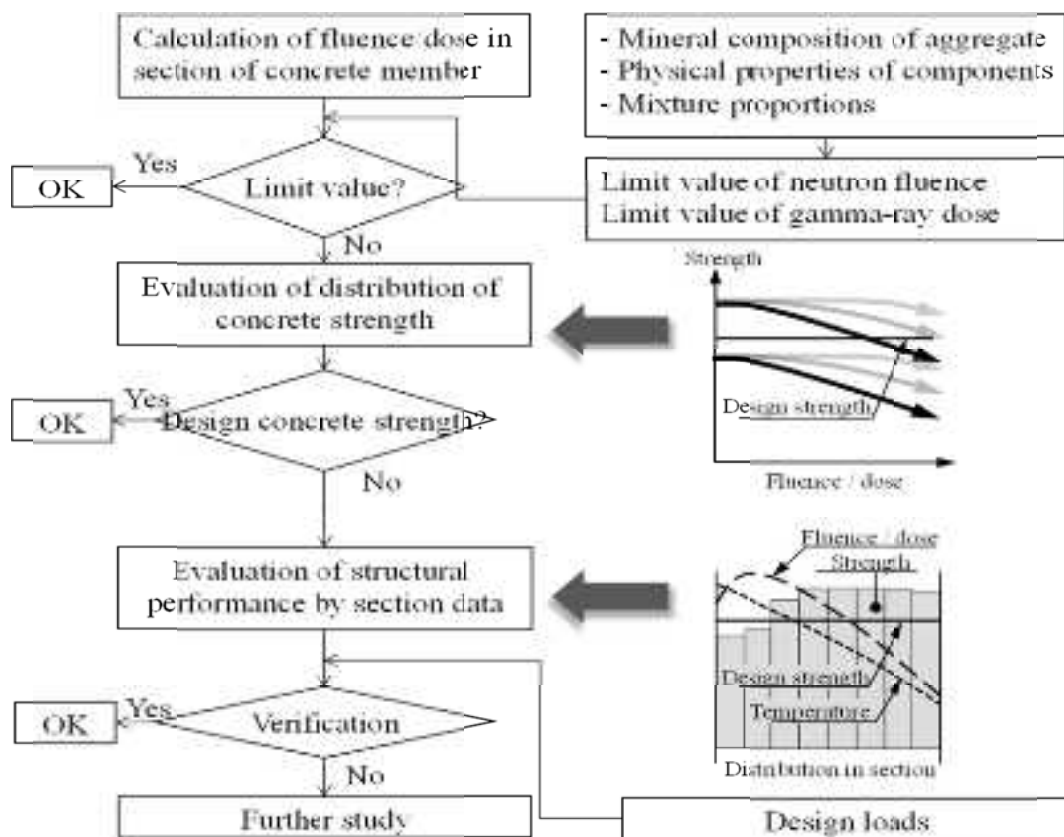


図3.4.2-12 放射線照射の影響を受けるコンクリート部材の健全性評価のフロー

このフローを成立させるため、もっとも科学的知見が無いものが放射線照射影響に関する科学的知見、規制値を定めるための情報基盤、である。また、科学的知見を網羅し、実験データを整理するだけでは照射量による規制値の設定はできるが、それより上位の健全性評価フローを構成することはできない。科学的基盤を接合する数理モデルによる評価が、規制値より上位の健全性評価フローを構成可能とする。数値解析的検討と9つの実験マトリクスを接合した場合、健全性評価の各プロセスとそれをどのように解析的検討が補完関係にあるかについて、図3.4.2-13にその相互関係を示した

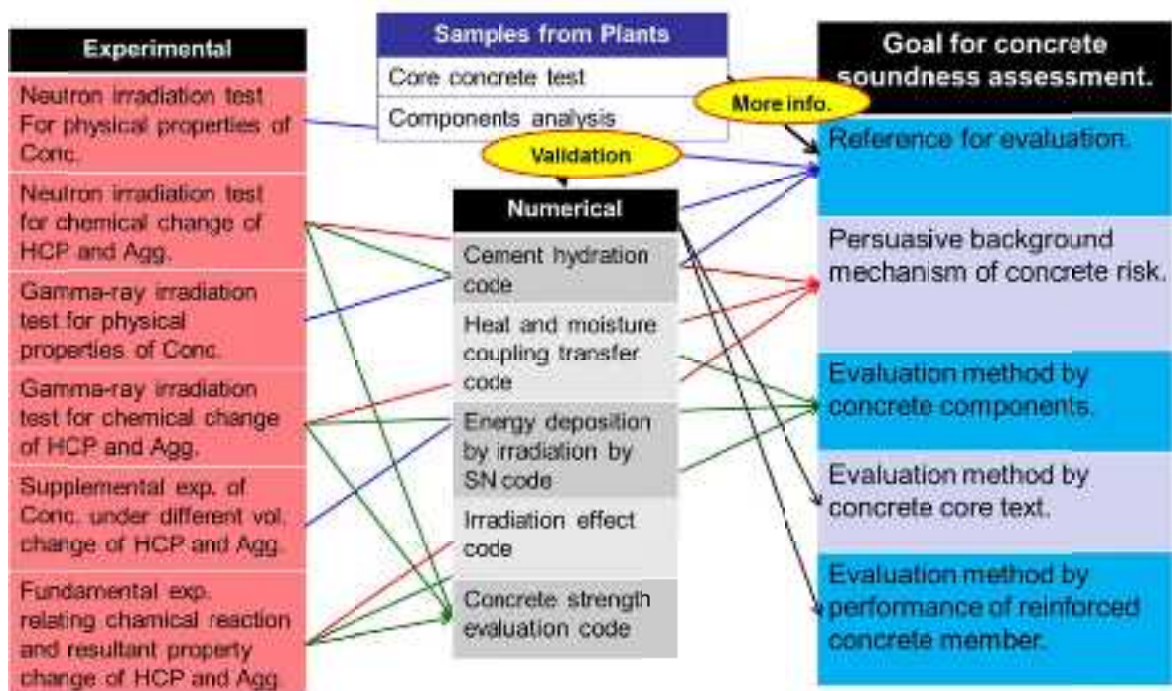


図 3.4.2-13 実験群と解析検討から得られる健全性評価フローにつながる諸項目の関係

5) 国際知見交換会と先進技術の反映

コンクリートの放射線影響は、原子力プラントの Long-term operation において重要な課題となっている。一方、コンクリートの放射線影響を明らかにして規制のあり方を検討する上では、照射試験が高価なこと、コンクリートが地産地消の材料であり、セメントや骨材を初め、極めて多様な構成材料より成り立つといった課題がある。このことを考慮すると、その影響の解明と規制のあり方については、国際的知見を共有して最新知見を反映するとともに、規制に関する知見も情報を共有することが、我が国の規制研究を実施する上では、極めて重要である。また、現在、科学的にはもっとも進んでいると考えられる日本の検討結果を国際的な場で情報公開することは、国際貢献としても大きな役割として評価されると考えられる。

この観点から、本研究グループでは、国内においても第一線の研究者による照射影響検討会を組織し、本研究の遂行が科学的合理性に基づき行われているかについて、逐次評価をしてもらうことを実施するとともに、米国オークリッジ国立研究所との知見交換会を定期的実施してきた。また、今年度より、これらの知見交換会の枠組みを日米だけでなく、他国（スペイン、フィンランド、チェコ等）に拡大する議論を進めることとした。組織の概要について、図 3.4.2-14 に示す。

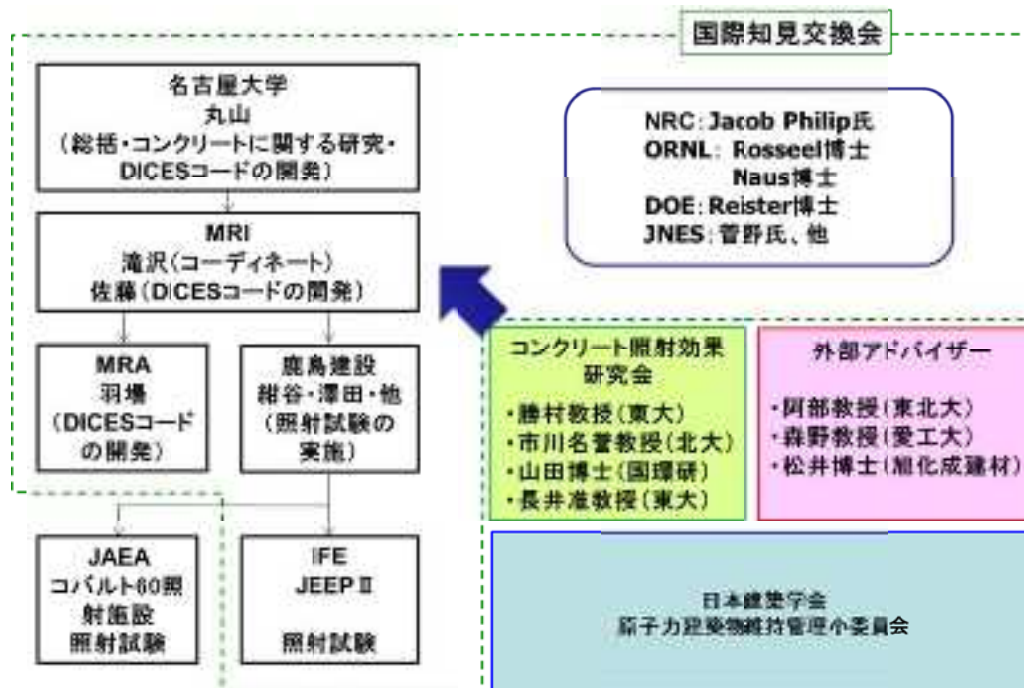


図 3.4.2-14 本研究を実施する上での関係者および組織図

今年度は、2013年7月30日にオークリッジ国立研究所において、以下の出席者により知見交換会を行った。

- ORNL : Tom Rosseel, Dan Naus, Jermy Busby, Yann Pape, Kevin Field
- EPRI : James J Wall
- JPN : Takizawa, Kontani, Maruyama

その会合では、US側の近況としては、チェコ工科大学と包括的な研究協定を結んで実験を実施する予定であること、EPRIでは東ドイツのBRW炉の一部を切り出し、チェコに持ち込んで実験を実施していること、国内の数個の廃炉について、照射履歴について同定できるものを選定し、コア抜きしてサンプルを集めることを検討していることを紹介いただいた。技術的取り組みについてはまだ、データが蓄積されていなかった。日本側からは、JAMPSSプロジェクト内の成果について適宜紹介し、議論を行った。

また、今後、国際知見交換会という枠組みを構築し、年に2回程度の頻度で、コンクリートの照射影響に関する知見交換会を行うことで同意した。この交換会は、インフォーマルな会合として位置づけ、公表可能なデータで知見交換を行うことを基本とする、としている。

また、2014年3月12-14日において、スペイン・マドリードにおいて、国際知見交換会を実施し、各国の状況についての意見交換を行うとともに、今後の枠組み、次回スケジュールについての可能性等について議論を行った。参加国は米国、スペイン、チェコ、フィンランドであった。

6) 2013年度プロジェクトにおける目標

以上みてきたように、本プロジェクトにおいては、さまざまな規制に資する科学的基盤を実験によって蓄積する。また、メカニズムを明らかにした上で、コンクリート部材中のコンクリート性能の時間変化（すなわち、将来予測）と分布を予測可能な数値解析手法を整備することにより、その知見を体系化する。

さらに、従来から行われている規制の方針や諸外国との動向を踏まえて上で、規制の一例を提案することで、規制の高度化に役立てることを目標とする。

この枠組の中において、2013年度は、以下のような目標設定を行い、技術的基盤の確立を目指した。

[ガンマ線影響]

・一般環境下において、コンクリート供試体にガンマ線を照射し、強度およびヤング率の変化を実験的に確認する。環境影響を受けることが考えられるので、実験室の温湿度を計測し、リファレンスとしての温湿度変化のみ与えた実験について、実験計画を立案する。

[中性子影響]

・ノルウェー、IFE 所有の JEEP-II において、コンクリート、骨材、セメントペースト試験体の照射試験を開始する。相互作用メカニズムを明確化することを目的に、照射中の H₂、O₂、H₂O の発生量を計測するとともに、照射前後の寸法変化、質量変化を計測する。その上で、中性子のコンクリートにおける H₂ 発生に関する G 値の値を算出する。

また、物理特性試験では、コンクリートの物性変化を定量的に把握することを目的、照射開始時および照射後の載荷試験を実施する。

中性子照射試験においては、ガンマ線およびガンマ線発熱による影響も重畳するので、リファレンスとして、加熱試験も併せて実施する。今年度は、照射中のサンプルの温度、含水率の経時変化量を把握するとともに、炉内のバラ付きを考慮して、加熱試験計画を立案し、予備実験を行いこれが実施可能であることを確認する。

[数値解析的手法]

・今年度は、中性子の骨材影響について考慮できる枠組みの構築を行う。照射量-骨材膨張については、文献調査値をモデルに組み込む。骨材膨張量-コンクリートひずみ関係については、有限要素法による予測手法を構築する。コンクリートひずみ-コンクリートの強度、ヤング率変化については、骨材膨張をアルカリ骨材反応によって模擬したコンクリート試験体を作製し、これによって応力ひずみ関係を得てモデルに組み込む。以上の実験、解析的個別要素を取り組む。また、水分移動（吸着熱）や強度、乾燥による割裂引張強度の変化などについてもデータを拡充し、次年度以降のモデル高度化のための検討を行う。

・モデルの検証のため、JPDR 炉の生体遮蔽壁に関する解析を開始する。

(2) ガンマ線照射試験

1) 物理特性試験（コンクリート）

(a) 試験の概要

a) 試験目的

ガンマ線照射量および骨材の違いがコンクリートの物理特性（強度、剛性等）に及ぼす影響を把握するために照射試験を実施する。コンクリート試験体を用い、容器等には封入せず、暴露状態で照射を行う。試験パラメータは、ガンマ線照射量 4 水準および骨材種 2 水準とする。

b) 試験場所

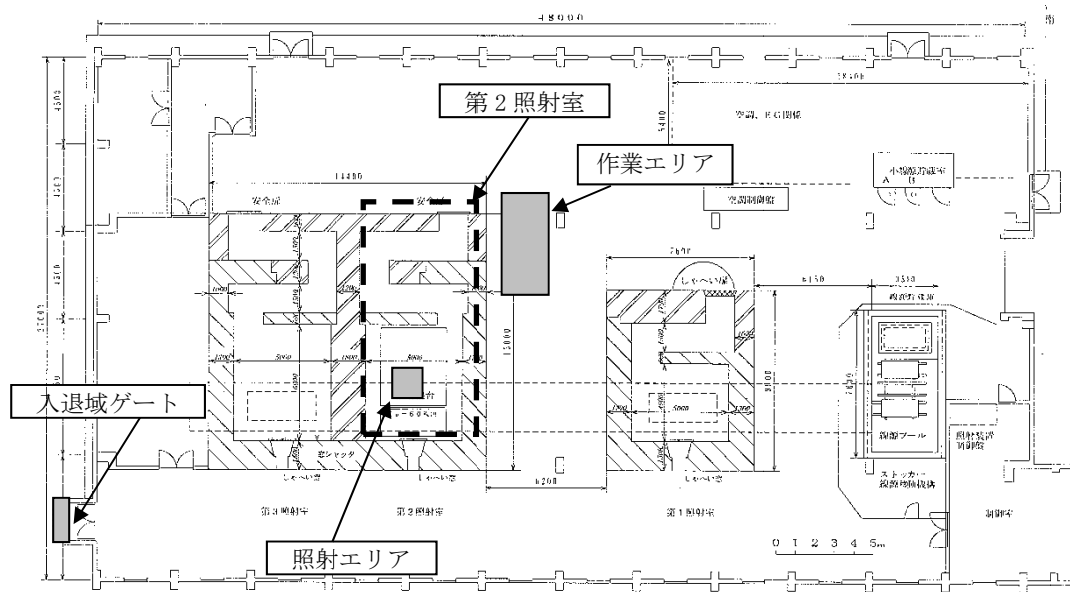
ガンマ線照射は、高崎量子応用研究所（群馬県高崎市綿貫町 1233）のコバルト第 1 照射棟の第 2 照射室で行ない、計測のための配管、配線を照射室外の計測システムに接続した。コバルト第 1 照射棟の概要を図 3.4.2-15 に示す。また照射室内における試験体配置状況、照射室内外での配線の経路及び敷設状況、乾湿計の設置箇所を図 3.4.2-16～図 3.4.2-19 に、さらに照射室外の計測システムの外観を図 3.4.2-20～図 3.4.2-24 に示す。図 3.4.2-20 の風速計は照射停止時間帯のみに使用され（計測時間帯 2013 年 3 月 19 日 9：17～13：07）、照射開始前に室外に搬出した。



(a) イメージ図

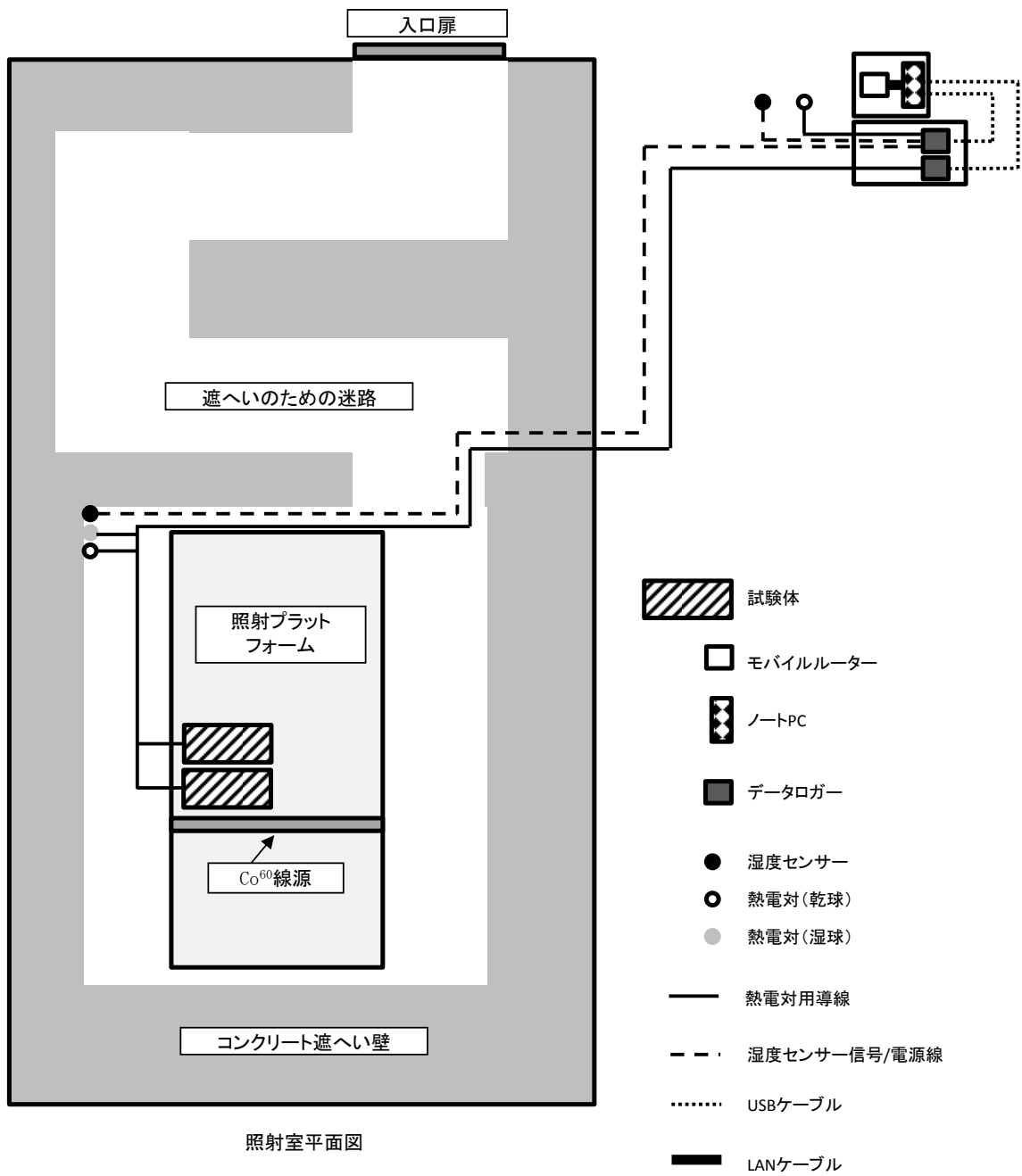


(b) 正面写真



(c) 平面図

図 3.4.2-15 コバルト第1照射棟



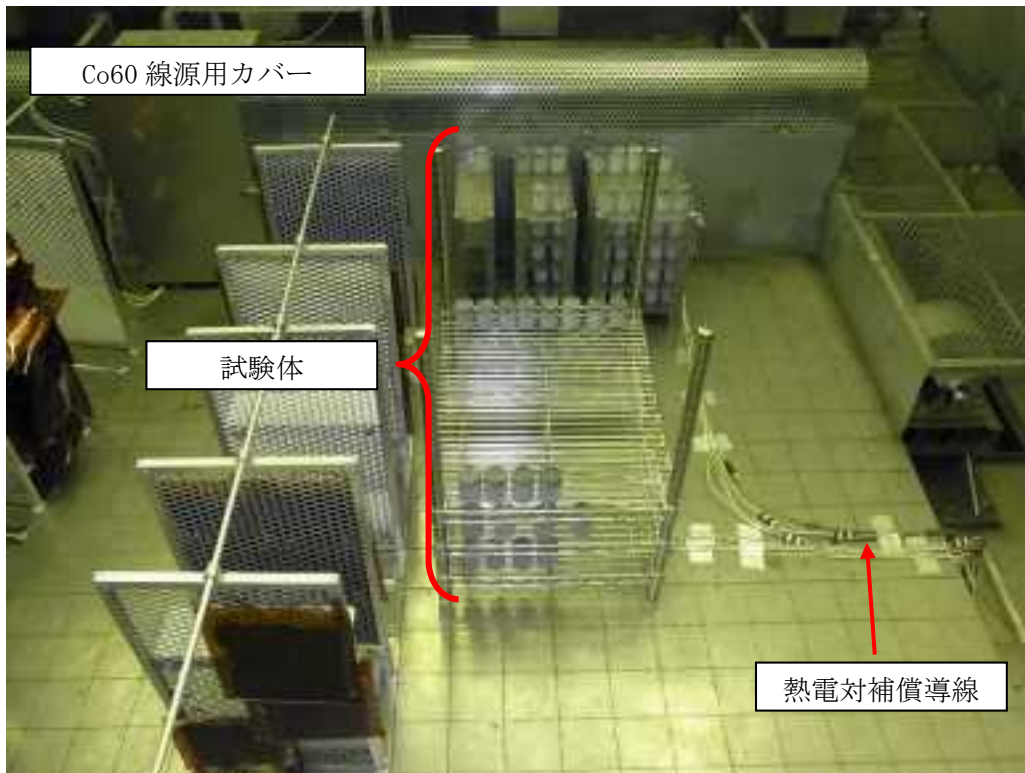


図 3. 4. 2-17 試験体配置写真 (全体)



図 3. 4. 2-18 試験体配置写真 (前列柵)



図 3. 4. 2-19 試験体配置写真（後列棚）



図 3. 4. 2-20 湿度計測ユニット及び風速計測システム

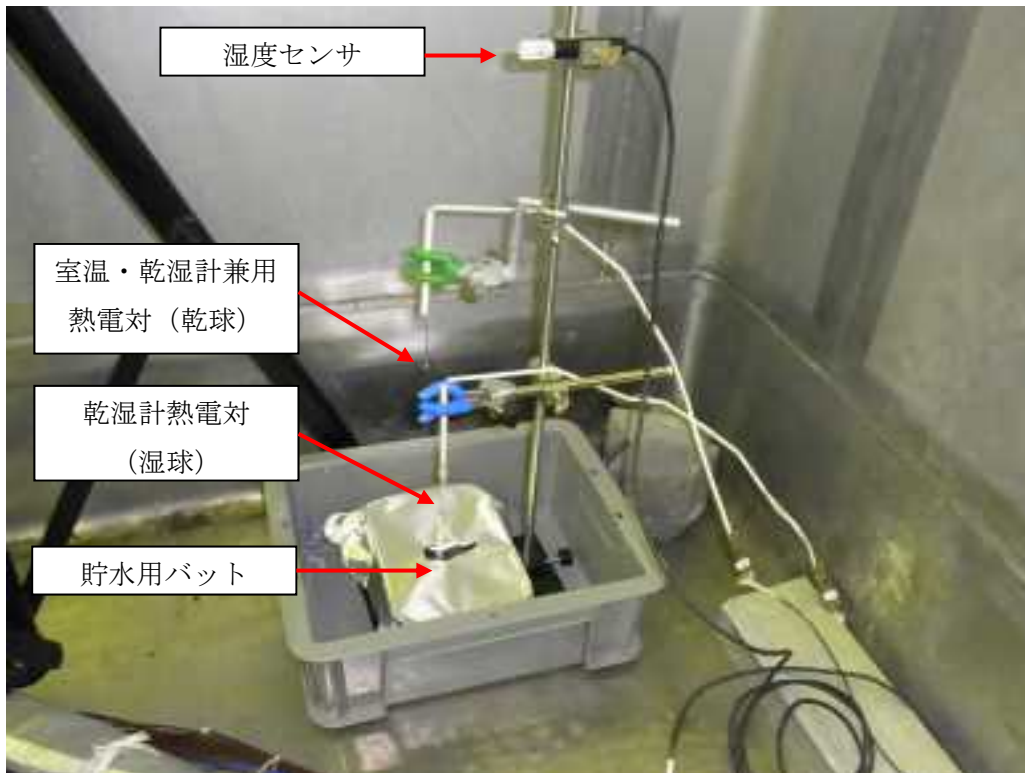


図 3. 4. 2-21 湿度計測ユニット



図 3. 4. 2-22 照射室外計測システム外観



図 3. 4. 2-23 通信機内臓モバイルルーター外観



図 3. 4. 2-24 照射室外湿度センサ及び熱電対設置箇所

c) 試験計画

(i) 試験体

試験体は、2011 年度に製作した $\phi 40 \times 60\text{mm}$ の円柱形コンクリート試験体とする。調査は、セメントには早強ポルトランドセメントを、細骨材には山砂 (SD2) を用いて、水セメント比を 50% として、粗骨材に砂利 (GV2) 1 種類と硬質砂岩 (SS6) 1 種類を用いた計 2 調合である。

打設後、 20°C で封緘養生していた試験体を、試験開始前に脱型し、研磨した後、以下に示す試験体 ID を油性マジックで記入した。

- ・コンクリート試験体 (砂利) ($\phi 40 \times 60\text{mm}$) : 1-001~1-060 (60 体)
- ・コンクリート試験体 (碎石) ($\phi 40 \times 60\text{mm}$) : 2-001~2-060 (60 体)

(ii) 照射試験

① 試験条件

試験環境は暴露環境下とし、ステンレス製試験体設置棚に試験体を配置し照射した。ステンレス製試験体設置棚を図 3.4.2-25 に示す。

照射量は、 $2.0 \times 10^5\text{kGy}$ 、 $1.0 \times 10^5\text{kGy}$ 、 $5.0 \times 10^4\text{kGy}$ 、 $2.5 \times 10^4\text{kGy}$ の 4 水準とし、線量率が 10kGy/h 、 5kGy/h 、 2.5kGy/h 、 1.25kGy/h の位置に試験体を 4 ヶ月、8 ヶ月、16 ヶ月、32 ヶ月間配置することにより、照射速度の影響も考慮する。なお、この照射期間は目標の照射量を得るための目安の期間であり、照射期間中の線源の交換や減衰による線量率の変化を踏まえて適宜見直しすることとした。試験パラメーター一覧を表 3.4.2-5 に示す。

図 3.4.2-26~図 3.4.2-30 に照射試験配置図、図 3.4.2-31 に試験体管理番号、図 3.4.2-32 に照射エリアを示す。



図 3. 4. 2-25 ステンレス製試験体設置棚

表 3. 4. 2-5 試験パラメーター一覧

		線量率			
		10kGy/h	5kGy/h	2.5kGy/h	1.25kGy/h
照射期間	4ヶ月	2.5×10 ⁴ kGy 骨材 2種類	—	—	—
	8ヶ月	5.0×10 ⁴ kGy 骨材 2種類	2.5×10 ⁴ kGy 骨材 2種類	—	—
	16ヶ月	1.0×10 ⁵ kGy 骨材 2種類	5.0×10 ⁴ kGy 骨材 2種類	2.5×10 ⁴ kGy 骨材 2種類	—
	32ヶ月	2.0×10 ⁵ kGy 骨材 2種類	1.0×10 ⁵ kGy 骨材 2種類	5.0×10 ⁴ kGy 骨材 2種類	2.5×10 ⁴ kGy 骨材 2種類

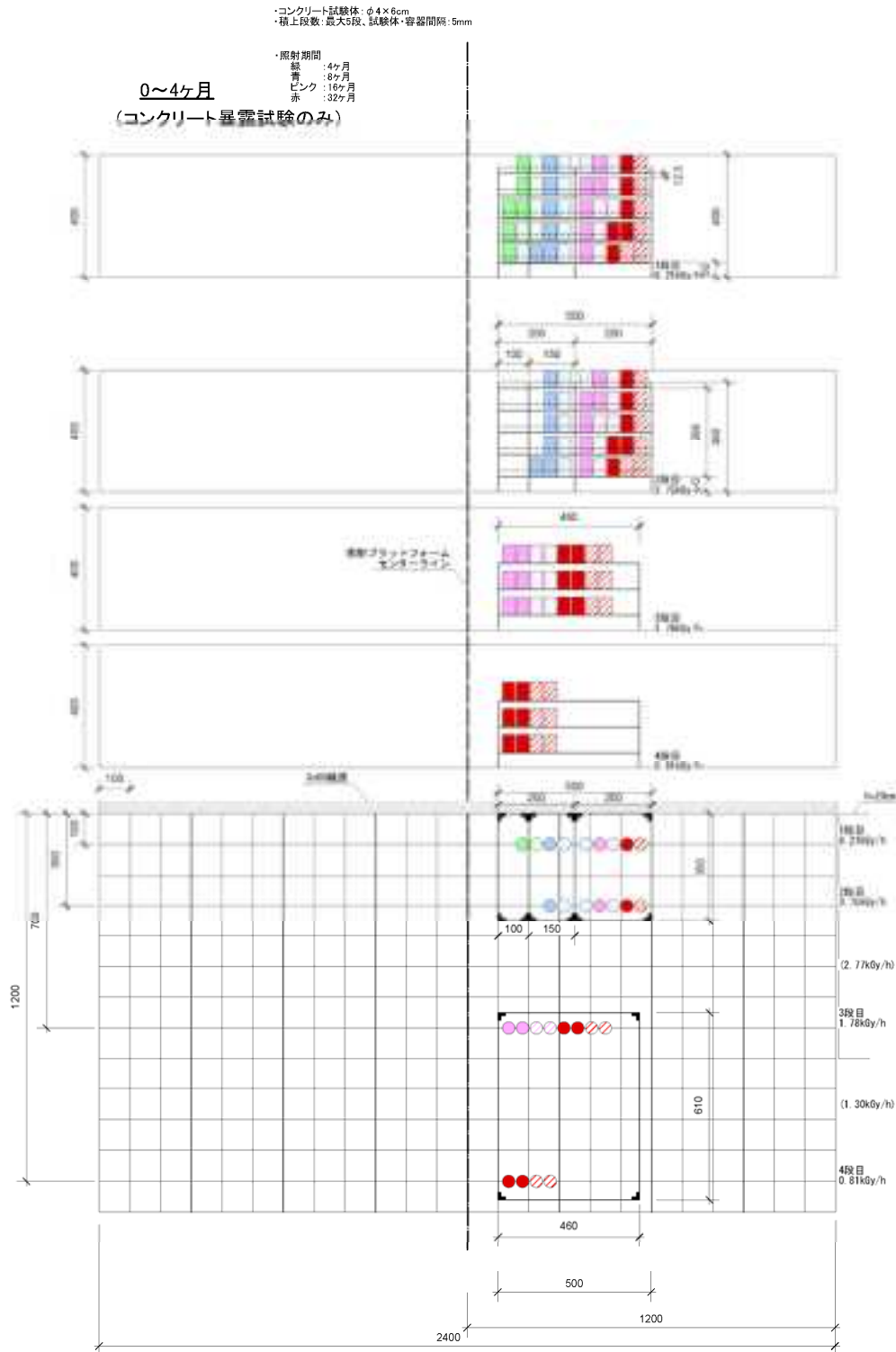


図 3. 4. 2-26 照射試験配置図：0~4ヶ月間

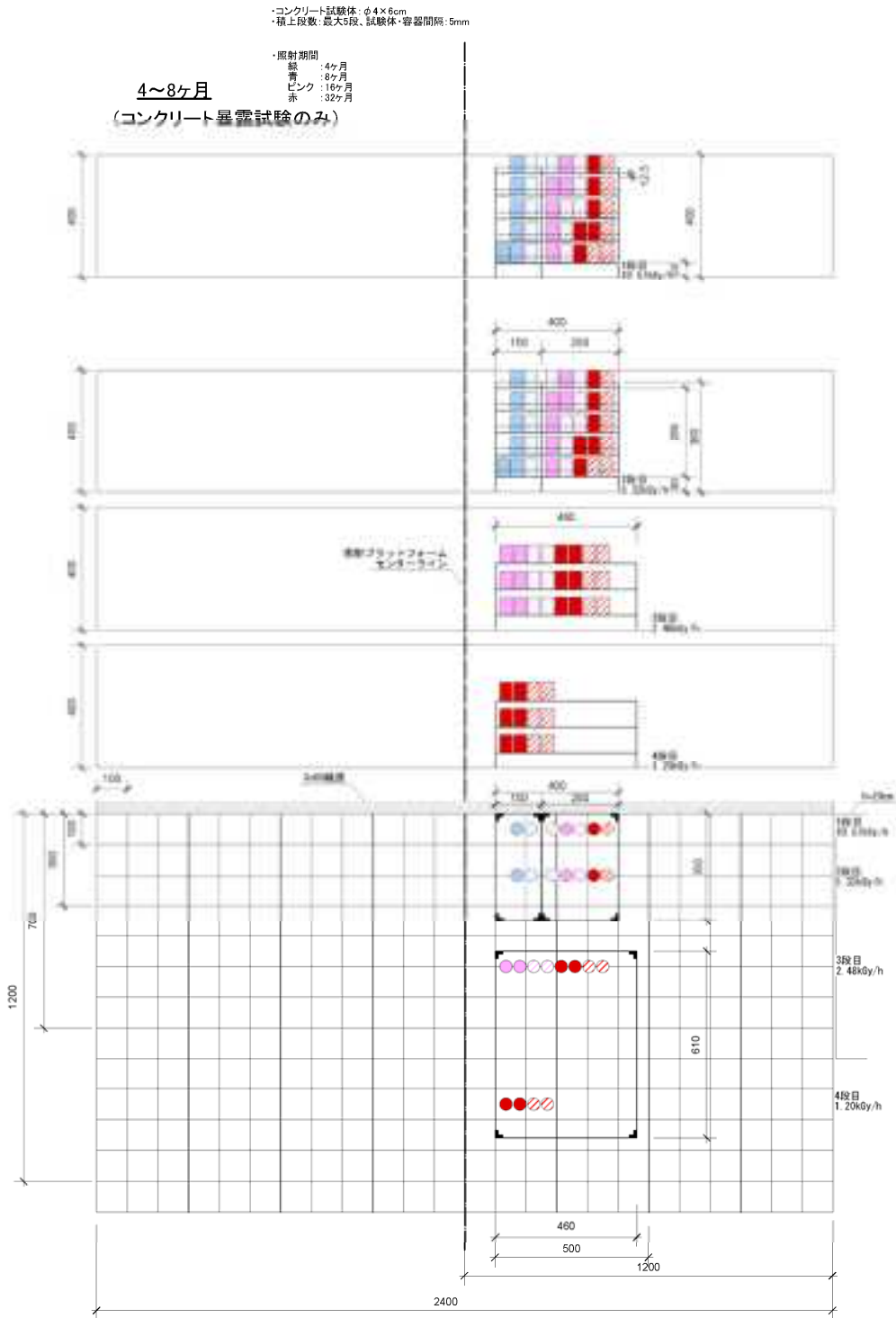


図 3.4.2-27 照射試験配置図：4~8ヶ月間

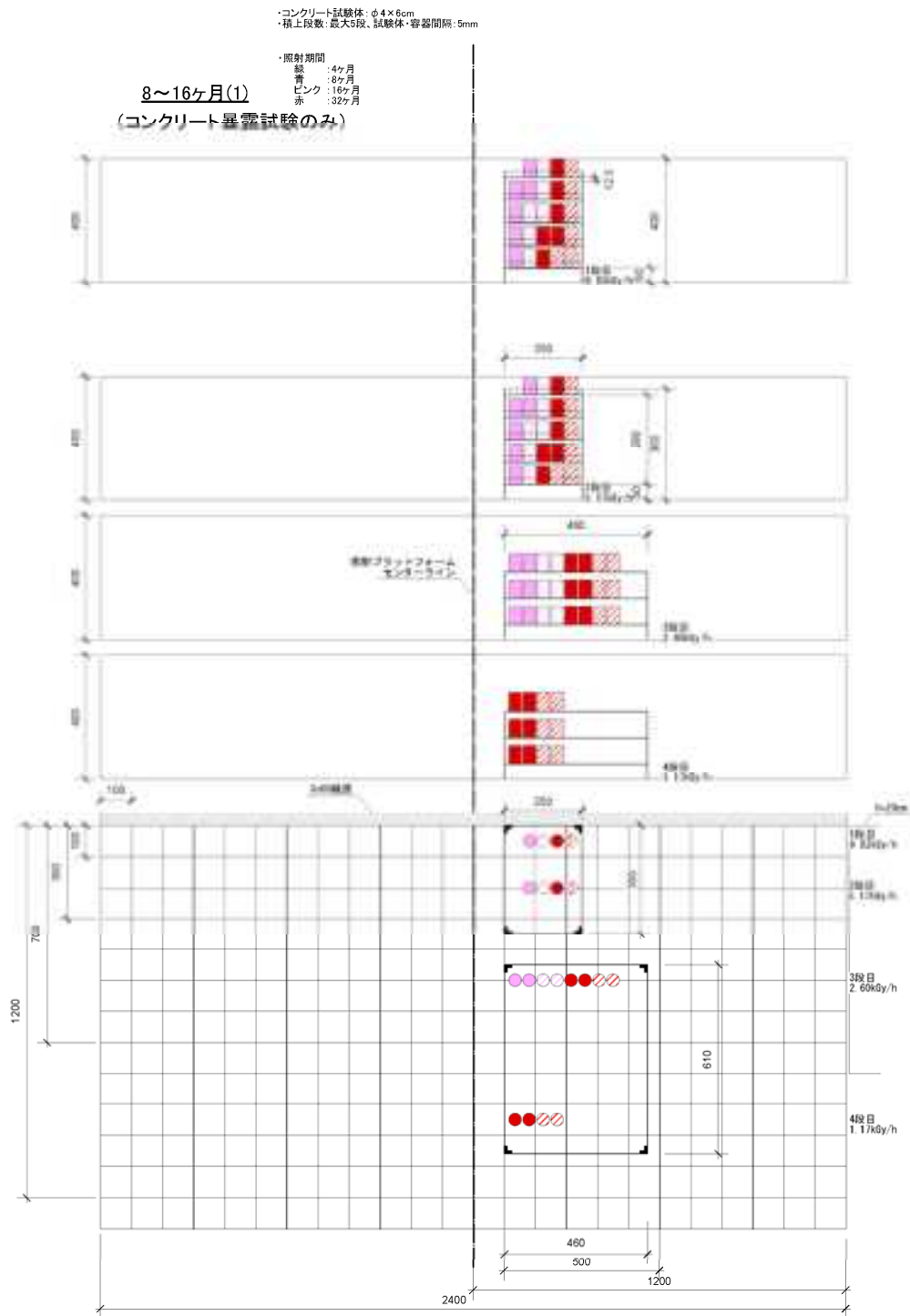


図 3.4.2-28 照射試験配置図 : 8~16ヶ月間 (1)

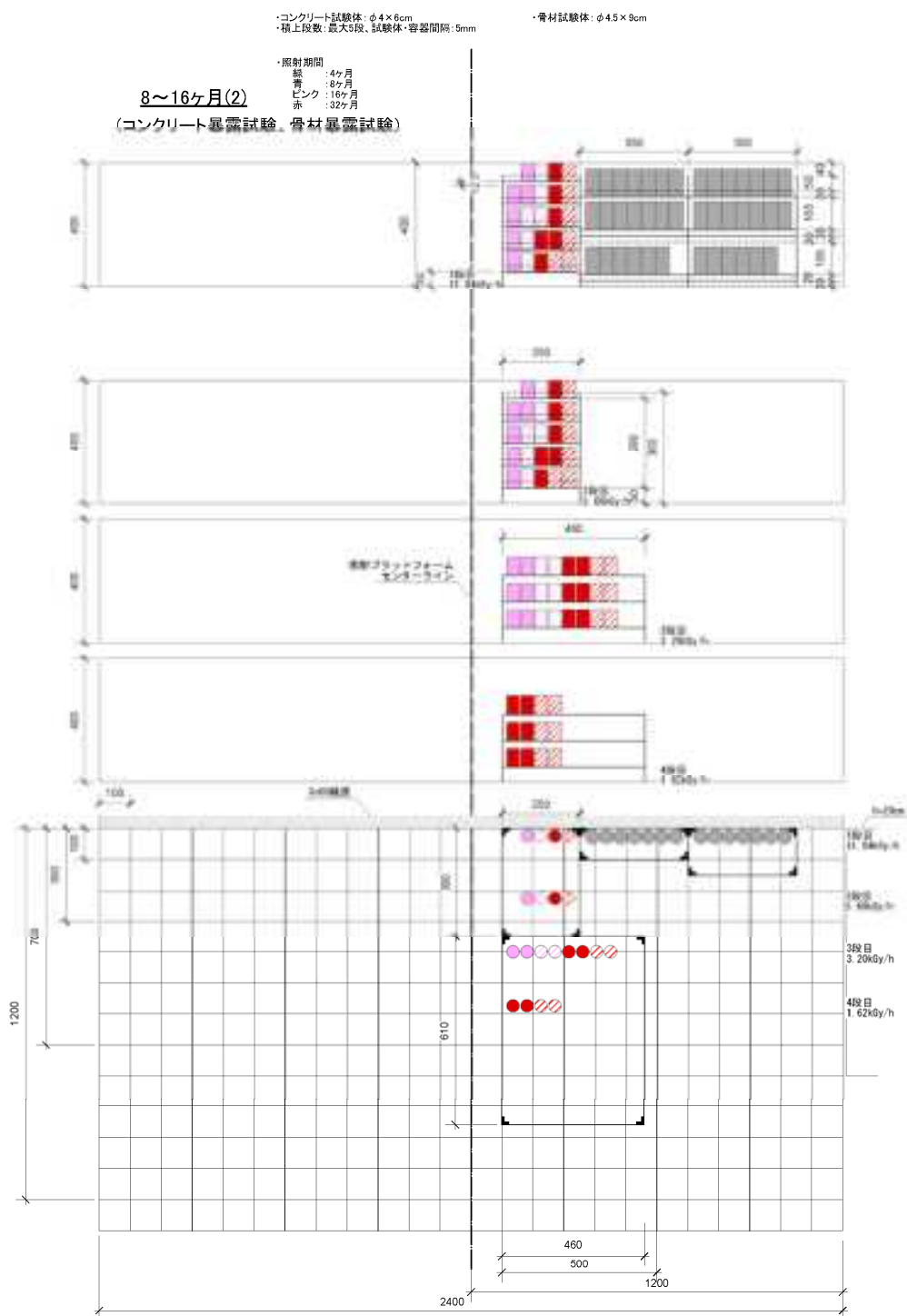


図 3.4.2-29 照射試験配置図 : 8~16 ヶ月間 (2)

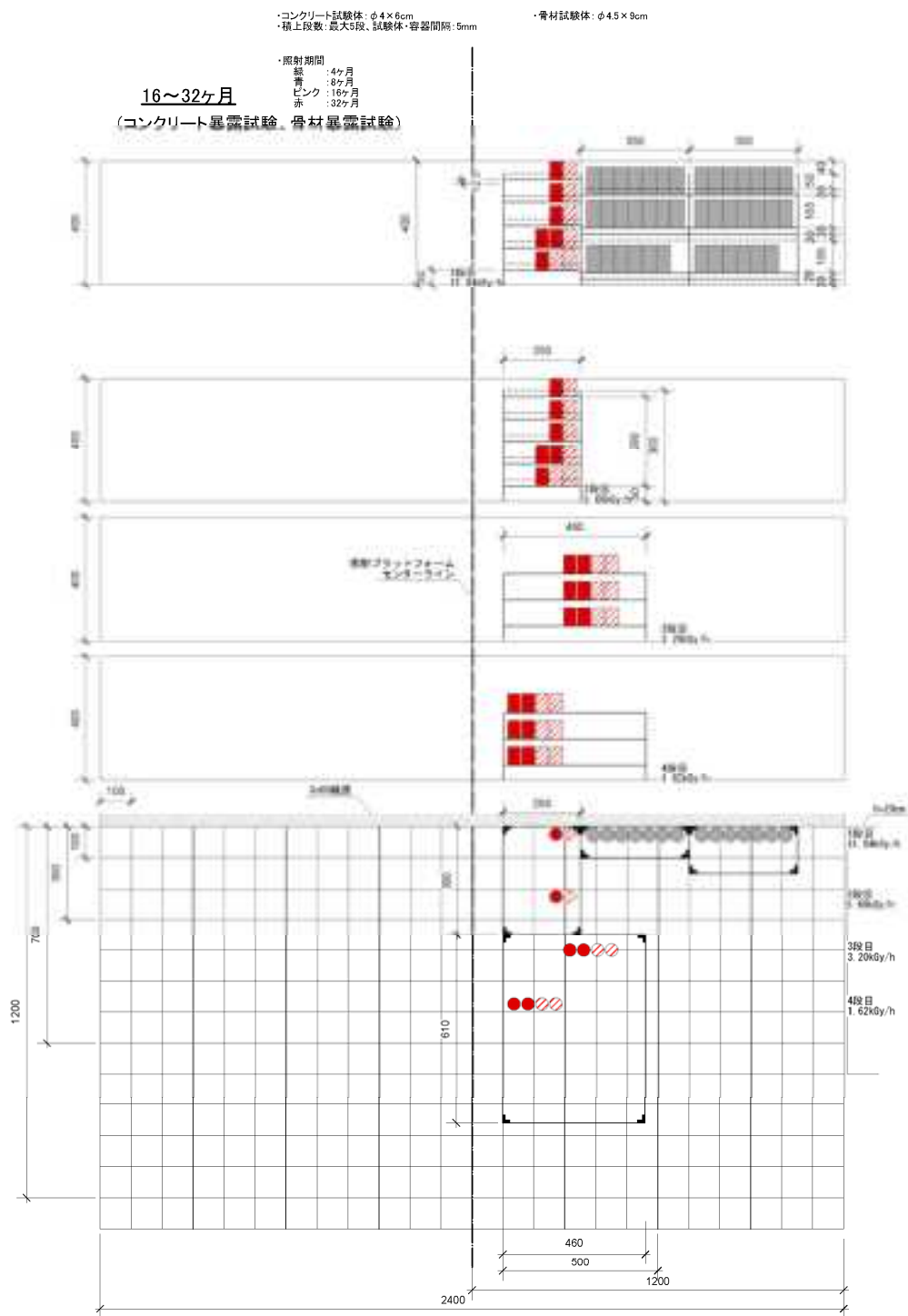


図 3.4.2-30 照射試験配置図: 16~32ヶ月間

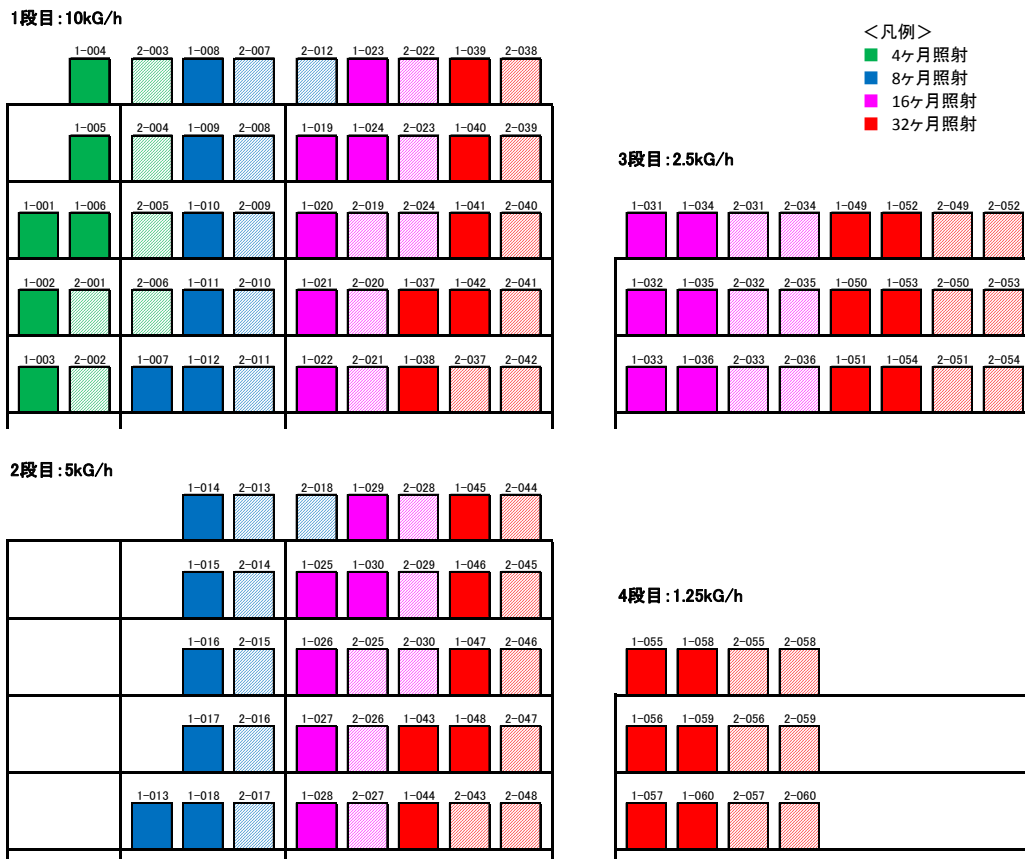


図 3. 4. 2-31 試験体管理番号



図 3. 4. 2-32 照射試験エリア

② 測定項目

照射試験中の測定項目を以下に示す。

- 温度 : 照射試験中の室内および試験体表面の温度を測定する。試験体に取り付けた熱電対のケーブルをデータロガーに取り込む。なお、照射板からの距離に応じて試験体を6体程度選定し、試験体側面に熱電対を取り付けた。
- 湿度 : 照射試験中の室内の湿度を測定し、データロガーに取り込む。
- ガンマ線量 : 指定日にガンマ線量を測定する。測定は1回当たり1時間とする。
- 照射時間 : 照射時間を記録、管理する。

照射後物性試験の項目(案)を以下に示す。なお、自由水量、結合水量、TG-DTAなどの化学分析に関する測定項目については、今後の検討の進捗に応じて見直しになる可能性がある。

質量変化、寸法変化、圧縮強度、静弾性係数、自由水量、結合水量、TG-DTA

(iii) 試験実施工程

物理特性試験（暴露試験）の工程表を表 3.4.2-6 に示す。

なお、試験体取出し時期については、実際に得られる線量率に対して目標とする照射量が得られるように変更する可能性がある。

2013年3月中旬に実施済	高崎研測定準備、試験体寸法・質量測定 照射開始 試験体の物性試験
2013年8月中旬に実施済	4ヶ月照射分の試験体取出し、質量・寸法測定 試験体の物性試験
2013年11月下旬に実施済	8ヶ月照射分の試験体取出し、質量・寸法測定 試験体の物性試験

表 3.4.2-6 物理特性試験（暴露試験）の工程表

	2012年度			2013年度				2014年度				2015年度		
	3	4	7	10	1	4	7	10	1	4	7	10	1	
物理 特性 試験				4ヶ月 照射終了	8ヶ月 照射終了	16ヶ月 照射終了予定				32ヶ月 照射終了予定				
	照射開始	ガンマ線照射試験(最大32ヶ月):暴露試験												
	照射開始時 物性試験 2013/3	4ヶ月照射後 物性試験 2013/8	8ヶ月照射後 物性試験 2013/11	16ヶ月照射後 物性試験 2014/6 (予定)				32ヶ月照射後 物性試験 2015/5 (予定)						
	ガンマ線照射試験(最大32ヶ月):暴露試験													

(b) 試験計測方法

a) 質量・寸法計測

照射試験前後の質量および寸法を測定し、それらの変化量を算定した。測定にあたっては、寸法はデジタルノギス使用し 0.01mm 単位まで、質量は電子天秤を使用し 0.01g 単位まで各試験体同じ条件のもと計測した。

b) 温湿度計測

試験体温度計測用の熱電対 (T 型) は温度計測用試験体の側面に接着され、セラミック絶縁管に通したのちに補償導線に切り替えてデータロガー1 (OMRON 製、ZR-RX20) に接続した。照射室内湿度計測ユニットの 2 本の熱電対 (乾球及び湿球) もデータロガー1 に接続した。照射室内の温度は、湿度計測ユニットの熱電対 (乾球) により計測を行った。

照射室内外の湿度センサ (立山科学製 SPF-54) および照射室外の室温計測用 T 型熱電対はデータロガー2 (データロガー1 と同型式) に接続した。データロガー本体におけるデータ記録は 5 分間隔とし、データロガーから通信用 PC へのデータ転送は 30 分間隔とした。

乾湿計温度からの湿度計算は、以下の Tetens の飽和蒸気圧曲線の式および Pernter の式を用いた (いずれも経験式、(3.4.2-1)式~(3.4.2-4)式)。Pernter の式における定数 a, b, p はそれぞれ a=0.008、b=610、p=1013 とした (ESPEC 技術情報 No. 11 (1997)P1-6)。

Tetens の飽和蒸気圧曲線の近似式による乾球温度における飽和水蒸気圧 $e(t)$

$$e(t) = 6.1078 \times 10^{\wedge}(7.5t / (t + 237.3)) \quad (3.4.2-1) \text{式}$$

t : 乾球温度

Tetens の飽和蒸気圧曲線の近似式による湿球温度における飽和水蒸気圧 $e_{sw}(t_w)$

$$e_{sw}(t_w) = 6.1078 \times 10^{\wedge}(7.5t_w / (t_w + 237.3)) \quad (3.4.2-2) \text{式}$$

t_w : 湿球温度

Pernter の式

$$e = e_{sw} - ap(t - t_w) * (1 + t_w / b) \quad (3.4.2-3) \text{式}$$

a, b : 定数

p : 計測環境下の気圧 (hPa)

相対湿度 (%)

$$\text{相対湿度 (\%)} = e / e(t) \times 100 \quad (3.4.2-4) \text{式}$$

c) リモートアクセスシステム

試験では計測データのリモートアクセスシステムを用いた。各々の計測結果はインターネット回線を通じてメールの添付ファイルで定時送付された。表 3.4.2-7 にリモートアクセスシステムの概要を示す。

リモートアクセスシステム伝送系の概略を図 3.4.2-33 に示す。PC に取り込まれた出力データは、LAN ケーブルを経由して無線通信機内臓のモバイルルーターに送られ、所定のアドレスに送信された。

表 3.4.2-7 リモートアクセスの概要

項目	温湿度計測用 PC
概要	温湿度計測に関連するデータを送信。データロガーに接続された PC を使用。データロガーから一定間隔で転送される CSV データを登録アドレス宛てに定時送信する。また、必要時には要求者に対する CSV データの送信も可能（リクエスト送信機能）。
PC 型式	DELL 製 INSPIRON2200
プログラム言語	VBScript 、Outlook2007 VBA
送信データ	①計測日時 ②Ch1～8 の試験体温度 ③照射室内温度(乾球、湿球) ④照射室内温度および湿度
送信頻度	1 回/日

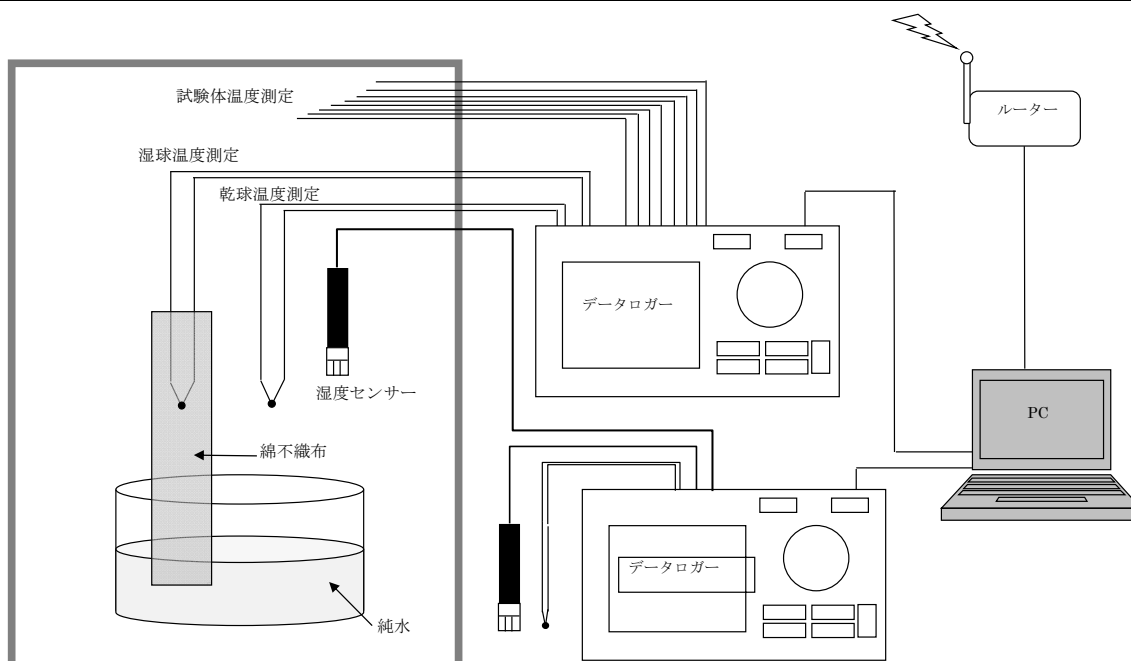


図 3.4.2-33 リモートアクセスシステム伝送系の概略

d) 物性試験

照射試験後の物性試験として、圧縮強度、静弾性係数、自由水率、結合水率の4項目について計測を実施する。比較用に照射試験を実施していない標準養生状態の試験体についても適宜計測を行うものとする。各試験体の試験項目及び実施時期を表 3.4.2-8 および表 3.4.2-9 に示す。

自由水率および結合水率試験は、圧縮強度試験後の所定の試験体について実施する。試験方法は、セメント協会法 (F-18) を準用する。自由水率試験および結合水率試験フローを図 3.4.2-34 に示す。

【自由水率試験方法】

所定の試験体の乾燥前の質量を測定し、試験体の質量が一定となるまで 105℃で乾燥させ、乾燥後の試験体質量を測定し、(3.4.2-5)式より算出する。

$$\text{自由水率 (\%)} = m' / m \times 100 \quad (3.4.2-5) \text{式}$$

ここに、 m' : 乾燥減量 (g)

M : 乾燥後の試験体質量 (g)

【結合水率試験方法】

自由水率試験で用いた試験体をジョークラッシャーで全量粗粉碎 (5mm 以下) し、試料が 100g 程度になるまで縮分した。縮分した試料 (100g 程度) を振動ミルで微粉碎 (105 μ m 以下) し、この中から 1g 程度試料を採取し、これを結合水率の試験用試料とした。結合水率の試験用試料 (1g 程度) を 600℃の電気炉で 15 分間強熱し、放冷した後質量を測定した。15 分間ずつ強熱を繰返し、恒量になった時の減量 (強熱減量) を求め、(3.4.2-6)式より算出した。

$$\text{結合水率 (\%)} = m' / m \times 100 \quad (3.4.2-6) \text{式}$$

ここに、 m' : 強熱減量 (g)

M : 試料の質量 (g)

表 3.4.2-8 各試験体の試験項目及び実施時期（骨材 1）

目的	試験種類		照射期間 (月)	照射量 (kGy)	温度	雰囲気	骨材	試験体	試験体 ID	試験項目		
										圧縮強度	静弾性係数	自由水率 結合水率
物理特性	暴露	照射試験	4	2.5x10 ⁴	照射室内 温度・雰囲気	骨材1	6	1-001	○	○	○	
								1-002	○	○	○	
								1-003	○	○	○	
								1-004	○	○	○	
								1-005	○	○	○	
								1-006				
			8	5.0x10 ⁴	照射室内 温度・雰囲気		1-007	○	○	○		
							1-008	○	○	○		
							1-009	○	○	○		
							1-010	○	○	○		
							1-011	○	○	○		
							1-012					
			2.5x10 ⁴				1-013	○	○	○		
							1-014	○	○	○		
							1-015	○	○	○		
							1-016	○	○	○		
							1-017	○	○	○		
							1-018					
			16	1.0x10 ⁵	照射室内 温度・雰囲気		1-019	○	○	○		
							1-020	○	○	○		
							1-021	○	○	○		
							1-022	○	○	○		
							1-023	○	○	○		
							1-024					
			5.0x10 ⁴				1-025	○	○	○		
							1-026	○	○	○		
							1-027	○	○	○		
							1-028	○	○	○		
							1-029	○	○	○		
							1-030					
			2.5x10 ⁴				1-031	○	○	○		
							1-032	○	○	○		
							1-033	○	○	○		
							1-034	○	○	○		
							1-035	○	○	○		
							1-036					
			32	2.0x10 ⁵	照射室内 温度・雰囲気		1-037	○	○	○		
							1-038	○	○	○		
							1-039	○	○	○		
							1-040	○	○	○		
							1-041	○	○	○		
							1-042					
			1.0x10 ⁵				1-043	○	○	○		
							1-044	○	○	○		
							1-045	○	○	○		
							1-046	○	○	○		
							1-047	○	○	○		
							1-048					
			5.0x10 ⁴				1-049	○	○	○		
							1-050	○	○	○		
							1-051	○	○	○		
							1-052	○	○	○		
							1-053	○	○	○		
							1-054					
			2.5x10 ⁴				1-055	○	○	○		
							1-056	○	○	○		
							1-057	○	○	○		
							1-058	○	○	○		
							1-059	○	○	○		
							1-060					
標準養生 試験	28日強度	—	—	20℃封緘	3	1-127	○					
						1-128	○					
						1-129	○					
						1-130	○	○				
						1-131	○	○				
						1-132	○	○				
						1-133	○	○	○			
						1-134	○	○	○			
						1-135	○	○	○			
						1-136	○	○	○			
						1-137	○	○	○			
						1-138	○	○	○			
						1-139	○	○	○			
						1-140	○	○	○			
1-141	○	○	○									
4ヶ月照射後	—	—	3	1-142	○	○	○					
				1-143	○	○	○					
				1-144	○	○	○					
8ヶ月照射後	—	—	3									
16ヶ月照射後	—	—	3									
32ヶ月照射後	—	—	3									

表 3.4.2-9 各試験体の試験項目及び実施時期（骨材 2）

目的	試験種類		照射期間 (月)	照射量 (kGy)	温度	雰囲気	骨材	試験体	試験体 ID	試験項目		
										圧縮強度	静弾性係数	自由水率 結合水率
物理特性	暴露	照射試験	4	2.5x10 ⁴	照射室内 温度・雰囲気	骨材2	6	2-001	○	○	○	
								2-002	○	○	○	
								2-003	○	○	○	
								2-004	○	○	○	
								2-005	○	○	○	
								2-006				
			8	5.0x10 ⁴	照射室内 温度・雰囲気		2-007	○	○	○		
							2-008	○	○	○		
							2-009	○	○	○		
							2-010	○	○	○		
							2-011	○	○	○		
							2-012					
			2.5x10 ⁴				2-013	○	○	○		
							2-014	○	○	○		
							2-015	○	○	○		
							2-016	○	○	○		
							2-017	○	○	○		
							2-018					
			16	1.0x10 ⁵	照射室内 温度・雰囲気		2-019	○	○	○		
							2-020	○	○	○		
							2-021	○	○	○		
							2-022	○	○	○		
							2-023	○	○	○		
							2-024					
			5.0x10 ⁴				2-025	○	○	○		
							2-026	○	○	○		
							2-027	○	○	○		
							2-028	○	○	○		
							2-029	○	○	○		
							2-030					
			2.5x10 ⁴				2-031	○	○	○		
							2-032	○	○	○		
							2-033	○	○	○		
							2-034	○	○	○		
							2-035	○	○	○		
							2-036					
			32	2.0x10 ⁵	照射室内 温度・雰囲気		2-037	○	○	○		
							2-038	○	○	○		
							2-039	○	○	○		
							2-040	○	○	○		
							2-041	○	○	○		
							2-042					
			1.0x10 ⁵				2-043	○	○	○		
							2-044	○	○	○		
							2-045	○	○	○		
							2-046	○	○	○		
							2-047	○	○	○		
							2-048					
			5.0x10 ⁴				2-049	○	○	○		
							2-050	○	○	○		
							2-051	○	○	○		
							2-052	○	○	○		
							2-053	○	○	○		
							2-054					
			2.5x10 ⁴				2-055	○	○	○		
							2-056	○	○	○		
							2-057	○	○	○		
							2-058	○	○	○		
							2-059	○	○	○		
							2-060					
標準養生 試験	28日強度	—	—	20℃封緘	3	2-127	○					
						2-128	○					
						2-129	○					
						2-130	○	○				
						2-131	○	○				
						2-132	○	○				
						2-133	○	○	○			
						2-134	○	○	○			
						2-135	○	○	○			
						2-136	○	○	○			
						2-137	○	○	○			
						2-138	○	○	○			
						2-139	○	○	○			
						2-140	○	○	○			
32ヶ月照射後	—	—	—	3	2-141	○	○	○				
					2-142	○	○	○				
					2-143	○	○	○				
					2-144	○	○	○				

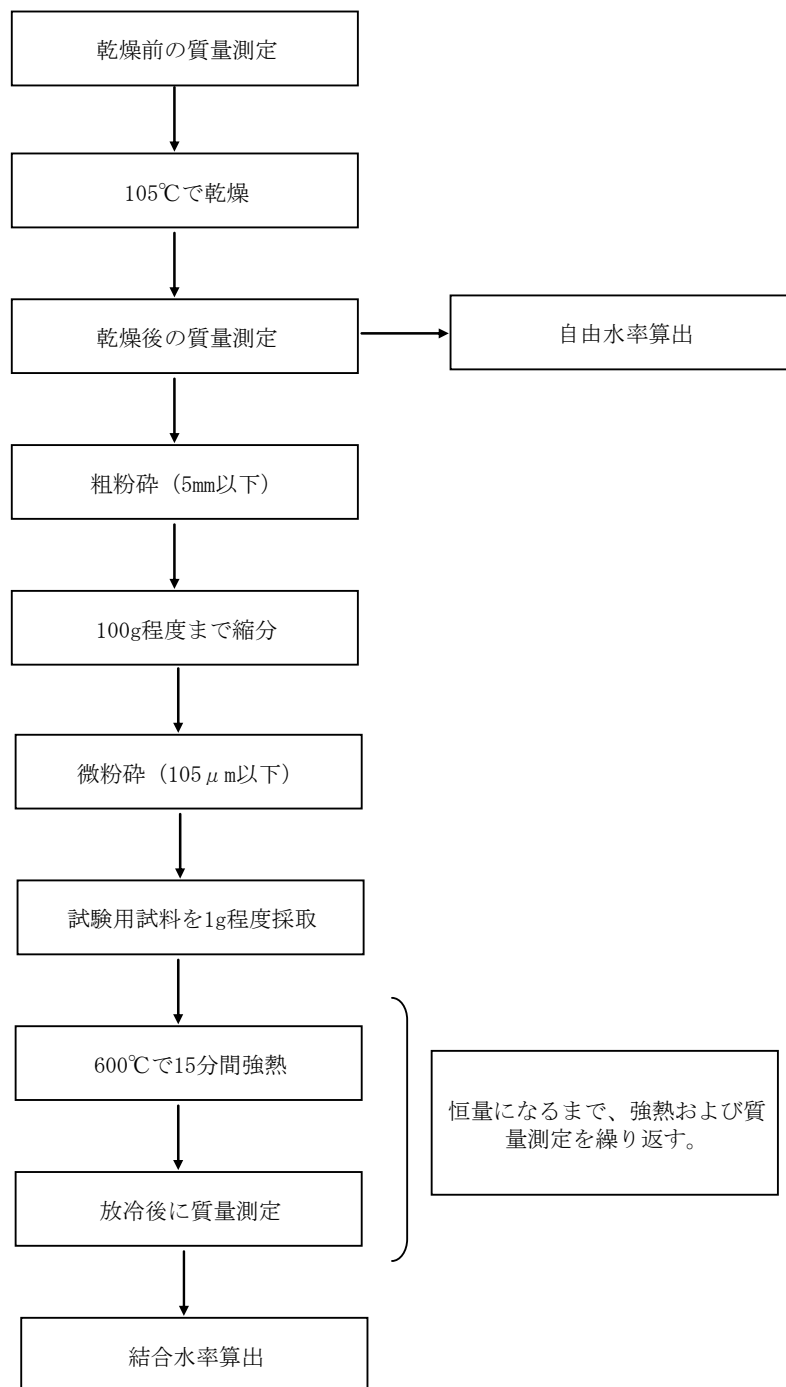


図 3.4.2-34 自由水率試験および結合水率試験フロー

(c) 試験結果

a) 試験期間

照射試験は2013年3月19日に開始した。

なお、試験期間中に主に維持管理に関わる理由で照射停止することがあり、表3.4.2-10に主な照射停止期間を示す。各試験結果については、2013年2月28日時点までに実施済みの内容について示す。

表 3.4.2-10 主な照射停止期間

照射停止期間	備考
2013/04/27-2013/04/30	計画停電に伴う照射施設・装置停止（温湿度計測も停止）
2013/12/24-2014/01/10	線源交換に伴う照射施設・装置停止
2014/01/31-2014/02/02	計画停電に伴う照射施設・装置停止（温湿度計測も停止）
2014/02/14-2014/02/17	計画停電に伴う照射施設・装置停止（温湿度計測も停止）
2014/02/21-2014/02/24	計画停電に伴う照射施設・装置停止（温湿度計測も停止）
2014/02/25-2014/02/28	線源交換に伴う照射施設・装置停止

b) 温度計測結果

照射試験を開始した2013年3月19日から2013年2月28日までの、照射室内外における温度計測結果を図3.4.2-35に、試験体温度計測結果を図3.4.2-36に示す。なお、表3.4.2-10に示す停電期間はデータが採取されていない。

照射室内外における温度について、照射室の空調換気により室内外の温度は同様な推移となった。なお、冬季にかかる11月(226日目)頃から照射室内外で温度差が生じ始めた。これは、照射室外温度計の設置位置に関して、昼間は空調(暖房)による影響、夜間は外気による影響を受けやすい位置であったことによるものと推察され、照射室内外温度計の値がともに異常値ではないことが考えられる。またこれは室外温度計の最大温度が概ね20℃程度で一定となっていることから確認できる。

試験体温度に関しては、いずれも照射室内の温度に連動して推移しており、照射板までの距離が小さい順、つまりガンマ線の線量率が大きい順に温度が高くなった。照射板からの距離が遠い3段目及び4段目については、照射室内と同程度の温度となった。なお、照射板からの距離が同一である時の骨材が異なるコンクリート試験体間での温度差は認められなかった。

試験期間中の照射停止により、各々停止時間に応じた温度低下が確認された。また、2013年8月9日(143日目)及び2014年1月22日(309日目)に行った線量率調整のための試験体位置の変更及び2014年1月10日(297日目)の線源交換による線量率の変動により、試験体温度が変化している。

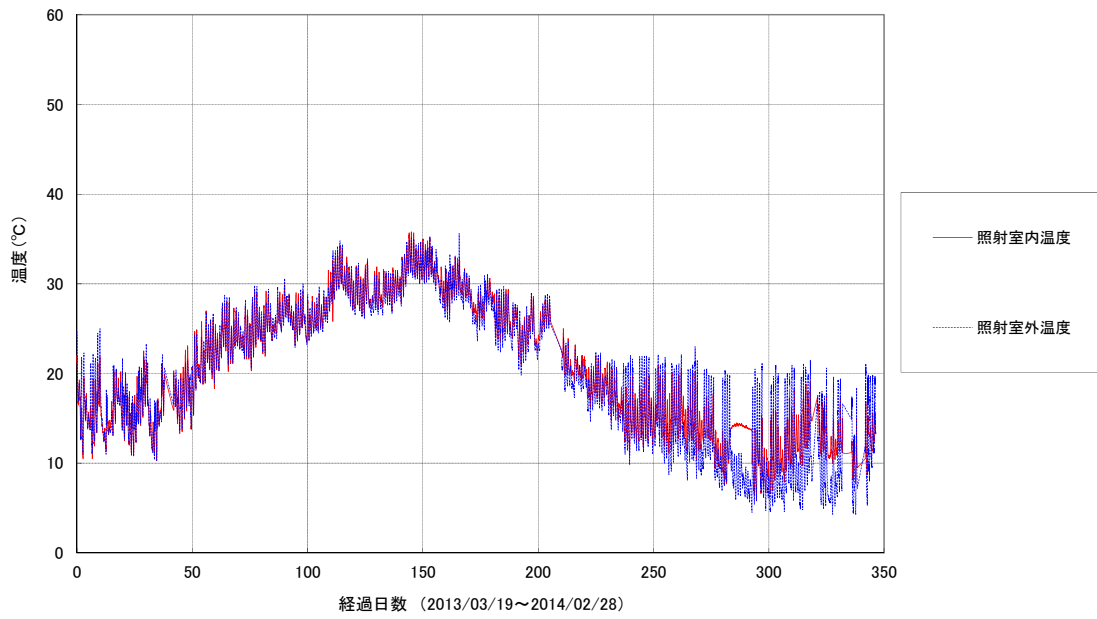


図 3. 4. 2-35 照射室内外における温度計測結果

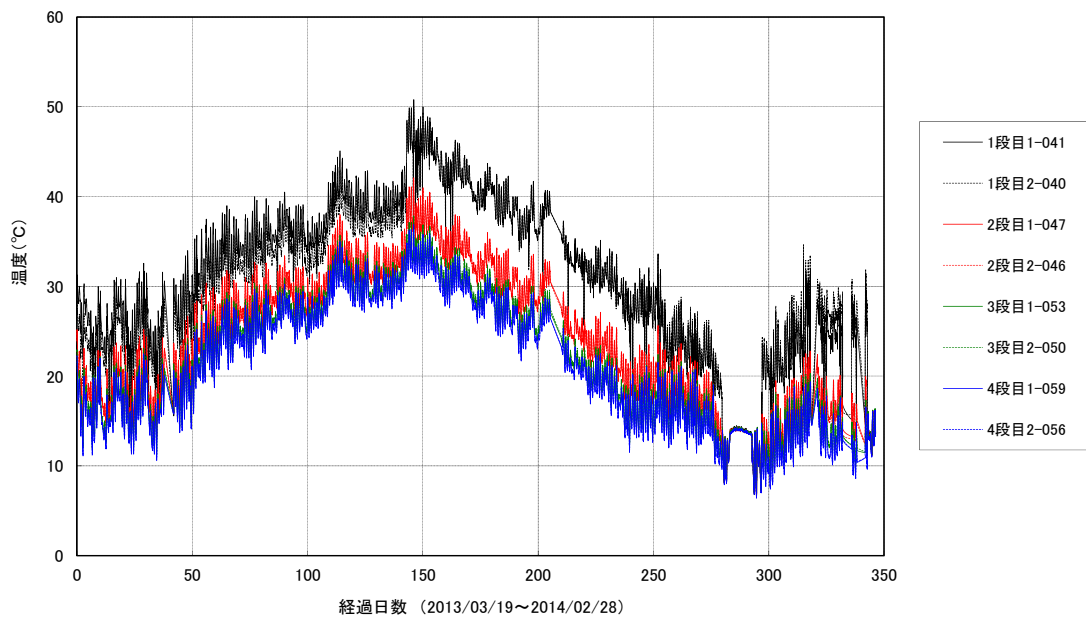


図 3. 4. 2-36 試験体温度計測結果 (実線：骨材 1(砂利)、点線：骨材 2(砕石))

c) 照射室内湿度計測結果

照射試験を開始した2013年3月19日から2013年2月28日までの、照射室内外における湿度計測結果を図3.4.2-37に示す。なお、温度と同様に停電期間はデータが採取されていない。

照射室内の湿度センサがガンマ線による影響を受け、照射開始直後から異常値を示した。なお、2013年8月26日（160日目）以降、計測値が0のままとなり故障を確認したため、2014年1月22日（309日目）に湿度センサを撤去した。

照射室内の乾湿計換算湿度は、照射室外の湿度センサとほぼ同等の値で推移しており、照射室の空調換気の影響を考慮すると、照射室内の湿度が概ね適切に計測されていると判断できる。なお、線源交換が行われた期間（280～297日目）において、室内外の湿度に乖離が見られるが、これは同期間の照射室内の温度が概ね一定となっていることから、この期間に空調が停止していたことによるものと推察される。

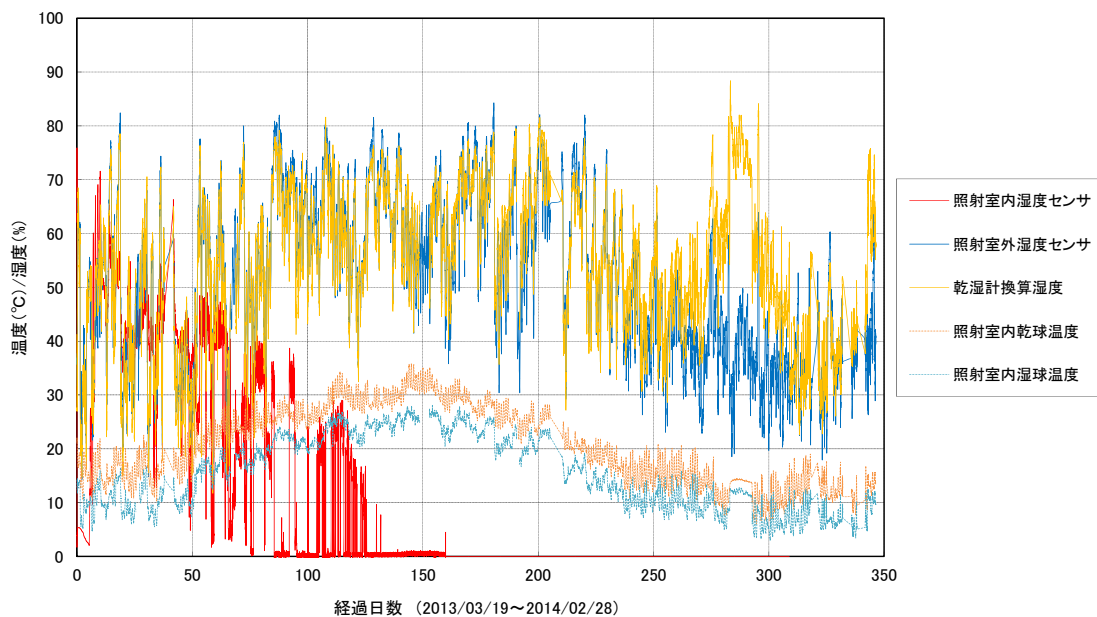


図 3.4.2-37 照射室内外における湿度計測結果

(d) 照射後物性試験

a) 質量・寸法計測結果

質量および寸法の計測状況を図 3.4.2-38 および図 3.4.2-39 に、質量・寸法計測結果一覧を表 3.4.2-11 および表 3.4.2-12 に示す。また、図 3.4.2-40～図 3.4.2-42 に照射前後での質量差分を示す。

図 3.4.2-42 より照射前後での質量減少を各種試験体の平均値で比較すると、照射量に依存しガンマ線照射量が高い試験体の方が質量減少が大きく、さらに線量率（線源からの距離）にも依存し照射線量がより高い試験体の方が質量減少が大きい傾向が確認された。なお、骨材間における質量減少に顕著な差は認められなかった。

体積については、質量ほど大きな変化は生じなかった。その結果、単位体積質量は、質量と同様の傾向を示した。



図 3.4.2-38 質量測定状況



(a) 直径



(b) 高さ

図 3.4.2-39 寸法測定状況

表 3.4.2-11 形状・重量計測結果一覧（骨材 1）

場所	試験状況	照射期間	照射量 (kGy)	No	照射開始時					照射終了時					差分(照射開始時-照射終了時)				
					質量 (g)	直径 (mm)	高さ (mm)	体積 (cm ³)	単位体積質量 (g/cm ³)	質量 (g)	直径 (mm)	高さ (mm)	体積 (cm ³)	単位体積質量 (g/cm ³)	質量 (g)	直径 (mm)	高さ (mm)	体積 (cm ³)	単位体積質量 (g/cm ³)
高崎	暴露	4ヶ月	2.5 × 10 ⁴	1-001	181.72	40.23	59.52	75.66	2.40	177.87	40.22	59.47	75.56	2.35	3.85	0.01	0.05	0.10	0.05
				1-002	183.14	40.31	59.53	75.97	2.41	179.38	40.32	59.51	75.98	2.36	3.76	-0.01	0.02	-0.01	0.05
				1-003	184.16	40.34	59.96	76.63	2.40	180.68	40.33	59.92	76.55	2.36	3.48	0.01	0.04	0.09	0.04
				1-004	181.54	40.30	59.82	76.30	2.38	177.64	40.24	59.79	76.04	2.34	3.90	0.06	0.03	0.27	0.04
				1-005	183.78	40.24	59.94	76.23	2.41	180.50	40.20	59.90	76.03	2.37	3.28	0.04	0.04	0.20	0.04
				1-006	182.26	40.32	59.28	75.69	2.41	178.88	40.34	59.22	75.69	2.36	3.38	-0.02	0.06	0.00	0.04
		8ヶ月	5.0 × 10 ⁴	1-007	184.84	40.31	59.47	75.90	2.44	181.43	40.28	59.49	75.81	2.39	3.41	0.03	-0.02	0.09	0.04
				1-008	180.11	40.34	58.83	75.19	2.40	176.24	40.33	58.87	75.20	2.34	3.87	0.01	-0.04	-0.01	0.05
				1-009	182.66	40.34	59.06	75.48	2.42	179.25	40.33	59.14	75.55	2.37	3.41	0.01	-0.08	-0.07	0.05
				1-010	181.06	40.27	59.27	75.49	2.40	177.23	40.24	59.46	75.62	2.34	3.83	0.03	-0.19	-0.13	0.05
				1-011	183.95	40.38	60.05	76.90	2.39	180.03	40.34	59.99	76.67	2.35	3.92	0.04	0.06	0.23	0.04
				1-012	182.59	40.28	59.73	76.11	2.40	178.71	40.25	59.66	75.91	2.35	3.88	0.03	0.07	0.20	0.04
			2.5 × 10 ⁴	1-013	181.88	40.35	59.44	76.01	2.39	178.59	40.30	59.40	75.77	2.36	3.29	0.05	0.04	0.24	0.04
				1-014	184.51	40.39	59.92	76.77	2.40	181.17	40.40	59.84	76.71	2.36	3.34	-0.01	0.08	0.06	0.04
				1-015	182.02	40.46	59.47	76.46	2.38	178.30	40.35	59.38	75.93	2.35	3.72	0.11	0.09	0.53	0.03
				1-016	182.78	40.30	59.65	76.09	2.40	179.34	40.29	59.65	76.05	2.36	3.44	0.01	0.00	0.04	0.04
				1-017	181.82	40.35	59.20	75.70	2.40	178.38	40.34	59.31	75.80	2.35	3.44	0.01	-0.11	-0.10	0.05
				1-018	184.01	40.35	59.79	76.46	2.41	180.71	40.35	59.73	76.38	2.37	3.30	0.00	0.06	0.08	0.04
		16ヶ月	1.0 × 10 ⁵	1-019	184.49	40.33	59.90	76.52	2.41										
				1-020	182.23	40.29	59.86	76.32	2.39										
				1-021	181.36	40.32	59.44	75.89	2.39										
				1-022	181.44	40.23	59.32	75.40	2.41										
				1-023	183.79	40.31	59.69	76.18	2.41										
				1-024	184.11	40.32	59.92	76.51	2.41										
			5.0 × 10 ⁴	1-025	183.60	40.37	59.94	76.72	2.39										
				1-026	182.50	40.29	59.90	76.37	2.39										
				1-027	182.46	40.24	59.77	76.01	2.40										
				1-028	183.58	40.33	59.87	76.48	2.40										
				1-029	181.26	40.34	59.32	75.82	2.39										
				1-030	183.76	40.32	60.01	76.62	2.40										
			2.5 × 10 ⁴	1-031	182.82	40.29	59.73	76.15	2.40										
				1-032	183.11	40.32	59.75	76.29	2.40										
				1-033	182.81	40.35	59.77	76.43	2.39										
				1-034	182.05	40.34	59.21	75.68	2.41										
				1-035	184.94	40.37	59.81	76.56	2.42										
				1-036	181.70	40.31	59.51	75.95	2.39										
		32ヶ月	2.0 × 10 ⁵	1-037	182.95	40.33	59.70	76.26	2.40										
				1-038	184.14	40.38	59.91	76.72	2.40										
				1-039	178.93	40.33	58.71	75.00	2.39										
				1-040	184.07	40.38	59.81	76.59	2.40										
				1-041	183.26	40.40	59.65	76.47	2.40										
				1-042	183.40	40.29	59.65	76.05	2.41										
			1.0 × 10 ⁵	1-043	182.66	40.25	59.91	76.23	2.40										
				1-044	183.65	40.30	59.85	76.34	2.41										
				1-045	183.19	40.36	59.82	76.53	2.39										
				1-046	183.06	40.29	59.90	76.37	2.40										
				1-047	182.25	40.40	59.58	76.38	2.39										
				1-048	183.47	40.31	60.20	78.83	2.39										
			5.0 × 10 ⁴	1-049	181.15	40.30	59.04	75.31	2.41										
				1-050	180.99	40.32	59.15	75.52	2.40										
				1-051	183.06	40.34	59.89	76.55	2.39										
				1-052	183.79	40.35	60.04	76.78	2.39										
				1-053	182.12	40.36	59.46	76.07	2.39										
				1-054	183.85	40.43	59.79	76.76	2.40										
			2.5 × 10 ⁴	1-055	180.38	40.26	59.33	75.53	2.39										
				1-056	183.79	40.29	60.01	76.51	2.40										
				1-057	183.73	40.27	59.89	76.28	2.41										
				1-058	182.88	40.39	59.49	76.22	2.40										
				1-059	182.70	40.29	59.71	76.13	2.40										
				1-060	180.24	40.41	58.57	75.12	2.40										

表 3.4.2-12 形状・重量計測結果一覧（骨材 2）

場所	試験状況	照射期間	照射量 (kGy)	No	照射開始時				照射終了時				差分(照射開始時-照射終了時)						
					質量 (g)	直径 (mm)	高さ (mm)	体積 (cm ³)	単位体積質量 (g/cm ³)	質量 (g)	直径 (mm)	高さ (mm)	体積 (cm ³)	単位体積質量 (g/cm ³)	質量 (g)	直径 (mm)	高さ (mm)	体積 (cm ³)	単位体積質量 (g/cm ³)
高崎	暴露	4ヶ月	2.5 × 10 ⁴	2-001	182.53	40.23	59.97	76.23	2.39	179.88	40.25	59.88	76.19	2.36	2.85	-0.02	0.09	0.04	0.04
				2-002	182.61	40.22	59.77	75.94	2.40	178.97	40.24	59.74	75.98	2.36	3.64	-0.02	0.03	-0.04	0.05
				2-003	183.43	40.28	59.87	76.29	2.40	179.77	40.29	59.84	76.29	2.36	3.66	-0.01	0.03	0.00	0.05
				2-004	182.13	40.31	59.41	75.82	2.40	178.20	40.30	59.38	75.74	2.35	3.93	0.01	0.03	0.08	0.05
				2-005	183.39	40.23	59.87	76.10	2.41	179.89	40.22	59.83	76.01	2.37	3.50	0.01	0.04	0.09	0.04
		2-006	183.47	40.25	59.98	76.32	2.40	179.64	40.24	59.90	76.18	2.36	3.83	0.01	0.08	0.14	0.05		
		8ヶ月	5.0 × 10 ⁴	2-007	183.92	40.22	59.91	76.12	2.42	180.24	40.38	59.82	76.81	2.35	3.68	-0.16	0.09	-0.49	0.06
				2-008	182.21	40.28	59.25	75.50	2.41	178.43	40.34	59.22	75.69	2.36	3.78	-0.06	0.03	-0.19	0.06
				2-009	182.76	40.32	59.54	76.02	2.40	178.93	40.41	59.48	76.29	2.35	3.83	-0.09	0.06	-0.26	0.06
				2-010	184.40	40.25	60.04	76.40	2.41	180.58	40.33	59.97	76.61	2.36	3.82	-0.08	0.07	-0.21	0.06
				2-011	184.25	40.27	59.88	76.27	2.42	180.49	40.38	59.81	76.59	2.36	3.76	-0.11	0.07	-0.33	0.06
			2-012	182.60	40.28	59.64	76.00	2.40	178.52	40.27	59.65	75.97	2.35	4.08	0.01	-0.01	0.02	0.05	
			2-013	182.77	40.32	59.07	75.42	2.42	179.77	40.38	59.04	75.61	2.38	3.00	-0.06	0.03	-0.19	0.05	
			2-014	180.36	40.34	59.05	75.47	2.39	176.77	40.46	59.06	75.93	2.33	3.59	-0.12	-0.01	-0.46	0.06	
			2-015	182.67	40.33	59.68	76.24	2.40	179.07	40.42	59.68	76.58	2.34	3.60	-0.09	0.00	-0.34	0.06	
			2-016	181.72	40.28	59.32	75.59	2.40	178.25	40.33	59.35	75.82	2.35	3.47	-0.05	-0.03	-0.23	0.05	
		2-017	181.74	40.27	59.46	75.73	2.40	178.31	40.35	59.36	75.91	2.35	3.43	-0.08	0.10	-0.17	0.05		
		2-018	183.06	40.25	59.36	75.53	2.42	179.80	40.40	59.34	76.07	2.36	3.26	-0.15	0.02	-0.54	0.06		
		16ヶ月	1.0 × 10 ⁵	2-019	184.68	40.28	59.74	76.13	2.43										
				2-020	182.67	40.29	59.51	75.87	2.41										
				2-021	181.44	40.28	59.39	75.68	2.40										
				2-022	182.47	40.26	59.36	75.57	2.41										
				2-023	183.59	40.24	59.50	75.67	2.43										
			2-024	183.32	40.28	59.84	76.25	2.40											
			2-025	181.57	40.35	59.58	76.19	2.38											
			2-026	181.75	40.24	59.20	75.29	2.41											
			2-027	182.09	40.29	59.11	75.36	2.42											
			2-028	182.81	40.26	59.74	76.05	2.40											
			2-029	183.65	40.34	59.88	76.53	2.40											
			2-030	183.13	40.24	59.64	75.85	2.41											
			2-031	183.84	40.32	59.87	76.44	2.40											
			2-032	183.88	40.27	60.09	76.53	2.40											
			2-033	183.63	40.31	60.02	76.60	2.40											
		2-034	182.11	40.29	59.77	76.20	2.39												
		2-035	183.94	40.27	59.37	75.62	2.43												
		2-036	181.91	40.25	59.20	75.33	2.41												
		32ヶ月	2.0 × 10 ⁵	2-037	181.11	40.29	59.68	76.09	2.38										
				2-038	181.88	40.26	59.42	75.64	2.40										
				2-039	183.35	40.28	59.70	76.08	2.41										
				2-040	183.77	40.33	59.85	76.46	2.40										
				2-041	182.26	40.29	59.87	76.33	2.39										
			2-042	182.61	40.25	59.96	75.02	2.43											
			2-043	183.67	40.34	59.77	76.39	2.40											
			2-044	181.25	40.29	59.22	75.50	2.40											
			2-045	184.78	40.28	59.95	76.39	2.42											
			2-046	183.80	40.32	59.93	76.52	2.40											
			2-047	180.84	40.34	59.63	76.21	2.37											
			2-048	181.92	40.29	59.65	76.05	2.39											
			2-049	182.92	40.27	59.47	75.74	2.41											
			2-050	182.77	40.28	59.64	76.00	2.40											
			2-051	181.34	40.29	59.64	76.04	2.38											
			2-052	184.57	40.31	59.96	76.52	2.41											
			2-053	181.41	40.34	59.73	76.34	2.38											
			2-054	181.71	40.29	59.56	75.93	2.39											
			2-055	182.47	40.28	59.66	76.02	2.40											
			2-056	182.32	40.22	59.72	75.87	2.40											
		2-057	183.76	40.40	59.82	76.68	2.40												
		2-058	184.14	40.39	59.91	76.76	2.40												
		2-059	181.44	40.36	59.32	75.89	2.39												
		2-060	183.66	40.29	59.74	76.16	2.41												

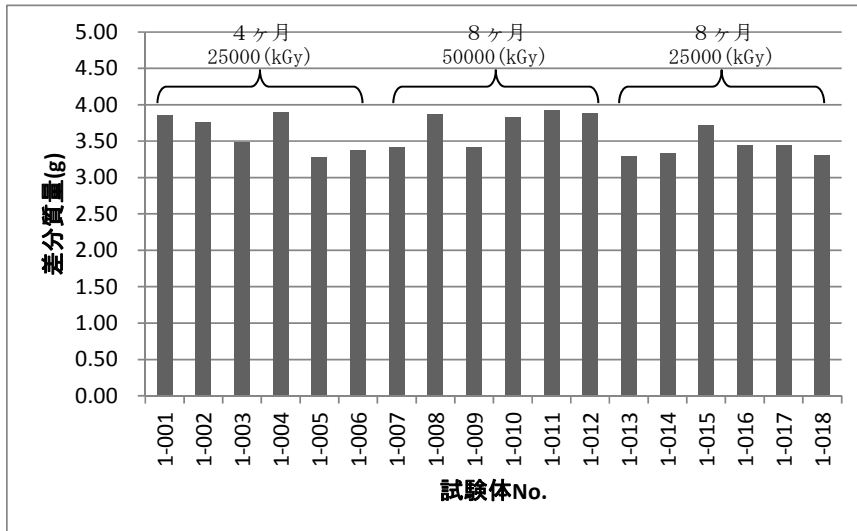


図 3. 4. 2-40 照射前後での差分質量 (骨材 1)

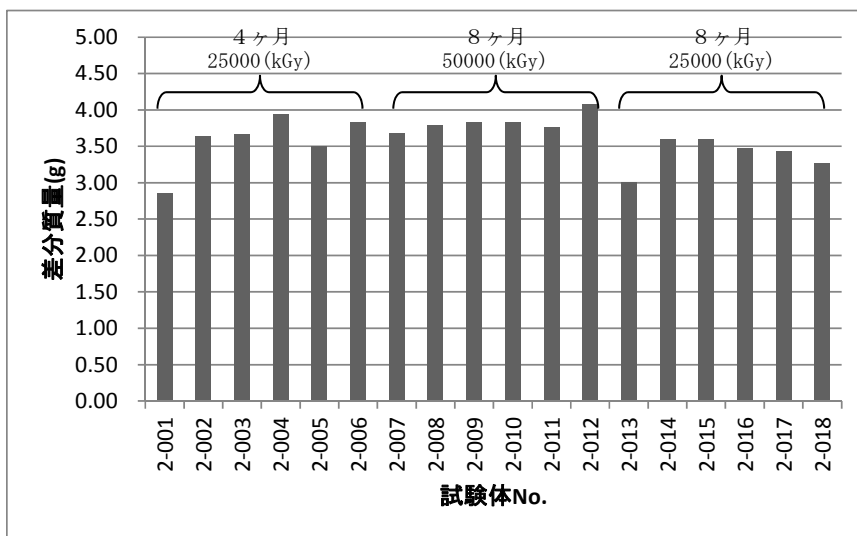


図 3. 4. 2-41 照射前後での差分質量 (骨材 2)

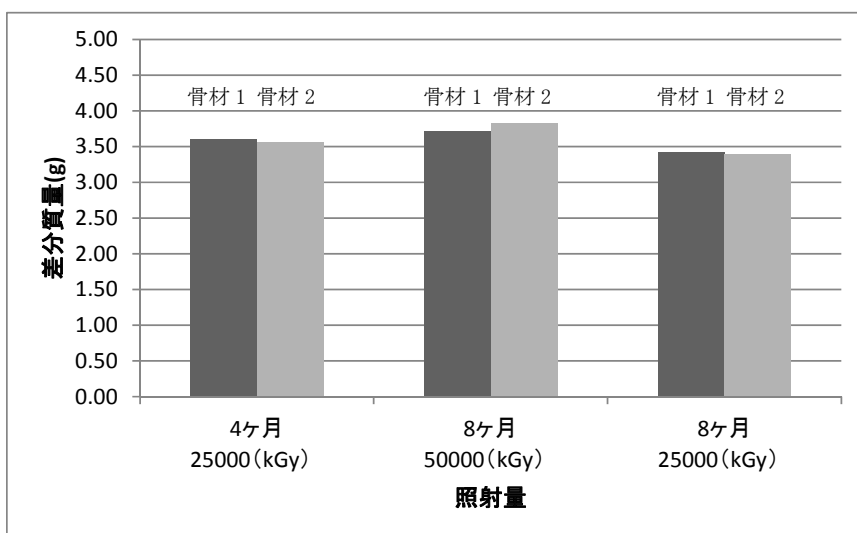


図 3. 4. 2-42 照射前後での差分質量 (平均値比較)

b) 物性試験結果

物性試験（圧縮強度、静弾性係数、自由水率、結合水率）について、試験結果の一覧を表 3.4.2-13 および表 3.4.2-14 に示す。また各試験項目に対して、ガンマ線照射による影響を評価するため、ガンマ線照射量及び線量率（線源からの距離）に関する比較を図 3.4.2-43～図 3.4.2-46 に示す。

図 3.4.2-43 より同程度の材齢の試験体について、ガンマ線の照射有無で圧縮強度を比較すると照射を受けた試験体の方が強度が高いことが確認できる。また、受けたガンマ線照射量が高いほど圧縮強度が上昇している。これは、図 3.4.2-45 において照射を受けることで自由水率が減少していることが確認できるが、ガンマ線による発熱で標準養生試験体よりも乾燥が進み、強度が増進したことが考えられる。なお、線量率による差については、本試験結果からは判断できない。

一方で、静弾性係数については、図 3.4.2-44 に示すようにガンマ線の照射を受けた試験体の方が小さくなった。これは乾燥が進むことで、静弾性係数が低下したことによる。またガンマ線照射量及び線量率の大小で顕著な差は確認できなかった。

自由水率については、既に述べた照射による発熱のための自由水率の減少に関連して、図 3.4.2-45 より照射量及び線量率に依存して、それぞれの値が大きいほど自由水率の減少が大きくなる傾向がわずかに見られる。

なお、結合水率については、図 3.4.2-46 より照射の有無やガンマ線照射量及び線量率による明らかな差は確認できない。

表 3.4.2-13 物性試験結果一覧（骨材 1）

試験体ID	試験内容	材齢情報	照射量 (kGy)	材齢 (日)	圧縮強度 (N/mm ²)		静弾性係数 (kN/mm ²)		自由水率 (%)		結合水率 (%)		
						平均		平均		平均		平均	
1-001	照射試験	照射期間 4ヶ月後	2.5×10 ⁴	544	66.7	65.5	35.2	34.5	1.5	1.5	3.8	3.9	
1-002					65.8		32.8		1.4		3.8		
1-003					63.9		36.8		1.4		3.9		
1-004					67.0		37.6		1.5		3.9		
1-005					64.1		30.3		-		-		-
1-007		照射期間 8ヶ月後	5.0×10 ⁴	628	79.9	75.2	32.6	34.2	1.4	1.4	3.5	3.5	
1-008					72.9		36.8		1.4		3.6		
1-009					73.7		31.7		1.3		3.4		
1-010					74.4		35.3		1.3		3.5		
1-011		75.1	34.6	-	-	-	-						
1-013		照射期間 8ヶ月後	2.5×10 ⁴	628	76.3	73.4	36.3	35.9	1.6	1.6	3.4	3.4	
1-014					77.7		35.5		1.7		3.3		
1-015					73.8		37.1		1.6		3.6		
1-016					70.3		37.3		1.6		3.3		
1-017					69.1		33.4		-		-		-
1-127		標準養生	材齢28日	-	28	46.8	46.1	-	-	-	-	-	-
1-128						45.1		-		-		-	
1-129	46.5					-		-		-			
1-130	照射試験 開始時		-	370	62.0	61.9	31.9	34.1	-	-	-	-	
1-131					61.6		37.9		-		-		
1-132					62.1		32.5		-		-		
1-133	照射期間 4ヶ月後		-	546	66.1	61.8	37.1	35.2	4.5	4.3	3.8	3.6	
1-134					57.9		35.8		4.0		3.4		
1-135					61.3		32.7		-		-		-
1-136	照射期間 8ヶ月後		-	651	64.8	65.1	47.1	42.6	4.5	4.5	3.4	3.4	
1-137					61.8		40.2		4.5		3.4		
1-138		68.8			40.6		-		-		-		-

表 3.4.2-14 物性試験結果一覧（骨材 2）

試験体ID	試験内容	材齢情報	照射量 (kGy)	材齢 (日)	圧縮強度 (N/mm ²)		静弾性係数 (kN/mm ²)		自由水率 (%)		結合水率 (%)		
						平均		平均		平均		平均	
2-001	照射試験	照射期間 4ヶ月後	2.5×10 ⁴	544	76.4	70.9	37.0	36.0	1.3	1.4	3.4	3.5	
2-002					70.0		34.5		1.5		3.5		
2-003					68.7		36.4		1.4		3.5		
2-004					68.5		33.5		1.5		3.6		
2-005					70.9		38.4		-		-		-
2-007		照射期間 8ヶ月後	5.0×10 ⁴	628	77.5	75.4	33.3	36.5	1.4	1.4	3.2	3.2	
2-008					73.4		34.5		1.3		2.9		
2-009					75.5		37.9		1.3		3.2		
2-010					75.2		36.1		1.4		3.3		
2-011		75.3	40.5	-	-	-	-						
2-013		照射期間 8ヶ月後	2.5×10 ⁴	628	69.0	74.0	35.4	36.5	1.5	1.6	3.0	3.1	
2-014					79.2		34.2		1.7		3.1		
2-015					68.8		38.5		1.6		3.1		
2-016					78.8		36.9		1.5		3.1		
2-017					74.0		37.4		-		-		-
2-127		標準養生	材齢28日	-	28	50.4	54.1	-	-	-	-	-	-
2-128						58.3		-		-		-	
2-129	53.5					-		-		-			
2-130	照射試験 開始時		-	370	69.5	69.3	34.3	36.2	-	-	-	-	
2-131					68.7		36.5		-		-		
2-132					69.7		37.9		-		-		
2-133	照射期間 4ヶ月後		-	546	68.8	67.0	40.9	39.3	4.1	4.1	3.1	3.2	
2-134					66.9		36.4		4.1		3.2		
2-135					65.2		40.5		-		-		-
2-136	照射期間 8ヶ月後		-	651	74.0	73.4	38.9	38.6	4.1	4.1	3.1	3.2	
2-137					72.3		37.8		4.1		3.2		
2-138		74.0			39.1		-		-		-		-

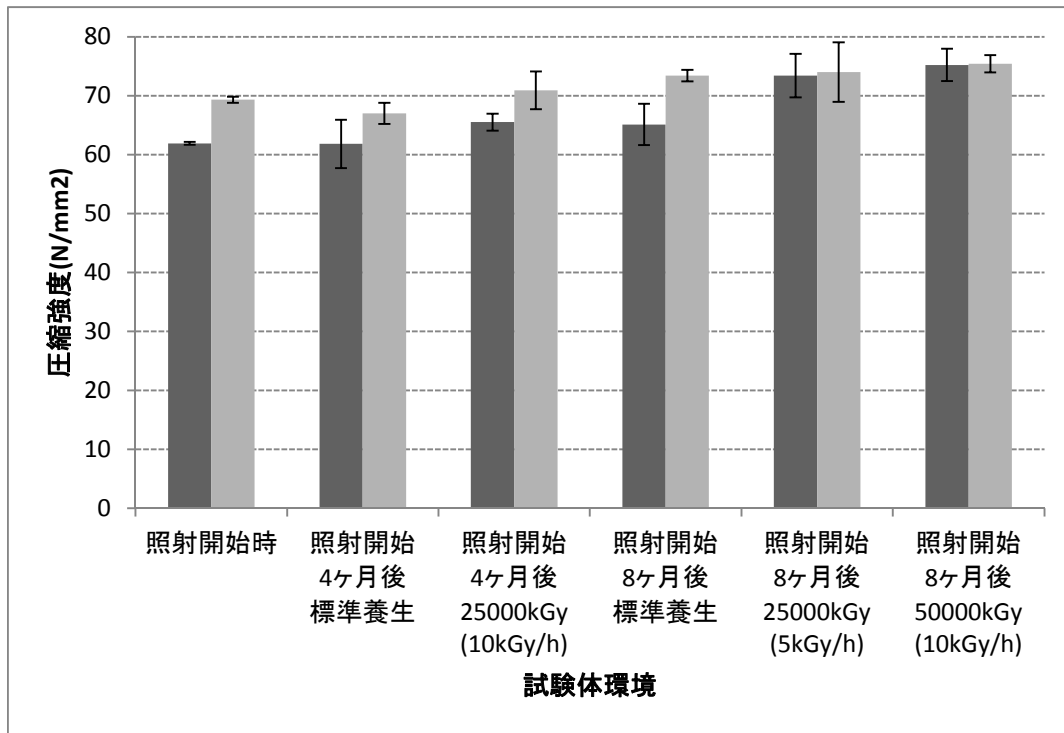


図 3. 4. 2-43 圧縮強度の比較 (■骨材 1 (砂利) 平均、■骨材 2 (碎石) 平均)

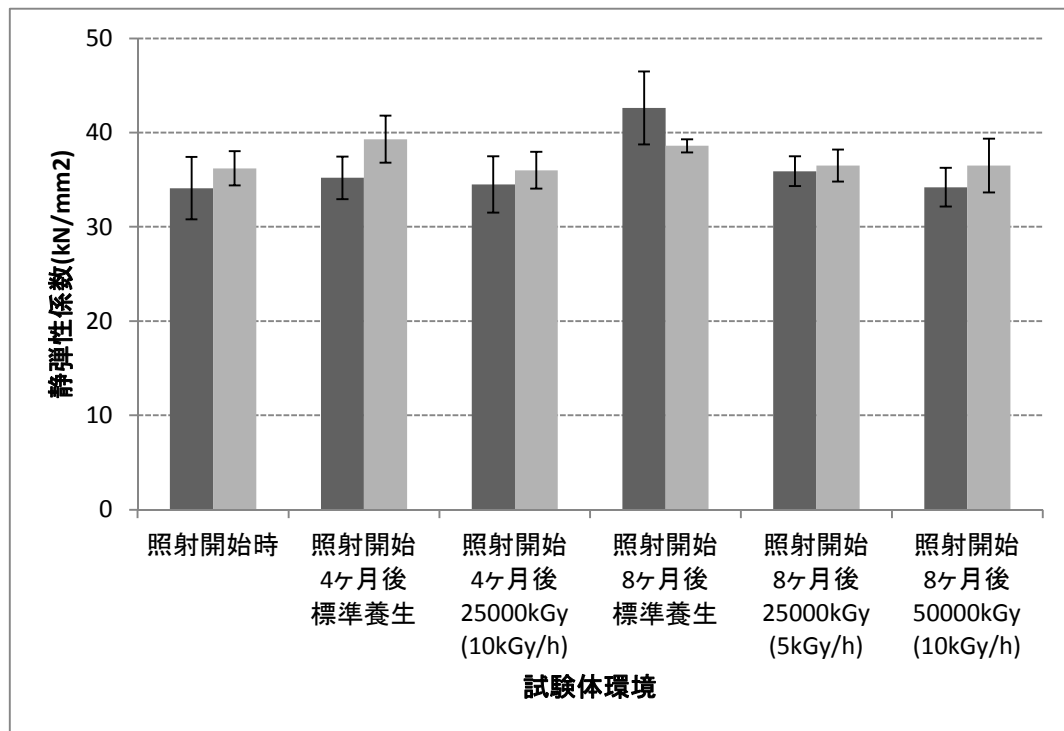


図 3. 4. 2-44 静弾性係数の比較 (■骨材 1 (砂利) 平均、■骨材 2 (碎石) 平均)

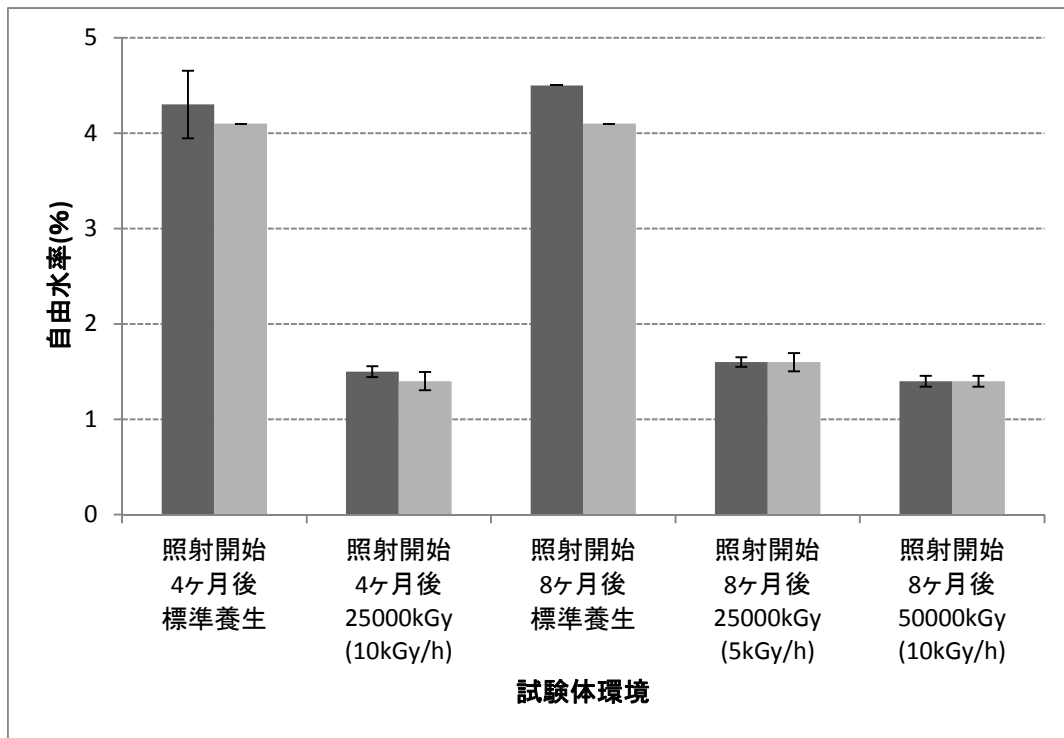


図 3. 4. 2-45 自由水率の比較 (■骨材 1 (砂利) 平均、■骨材 2 (砕石) 平均)

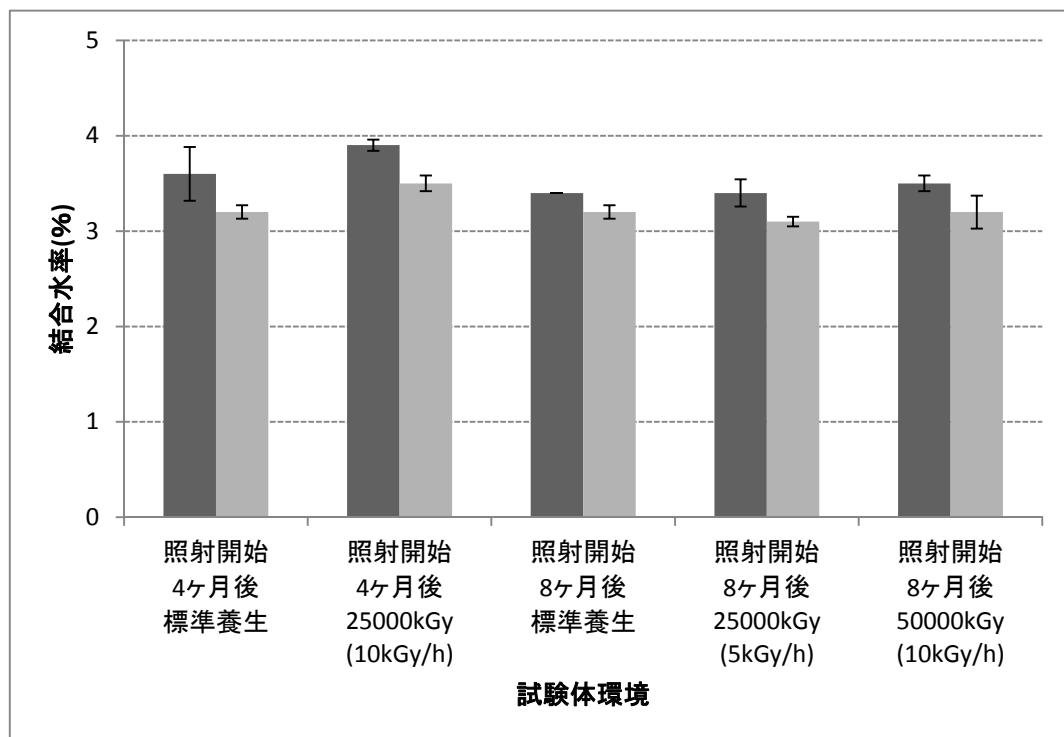


図 3. 4. 2-46 結合水率の比較 (■骨材 1 (砂利) 平均、■骨材 2 (砕石) 平均)

c) 線量計測結果

線量計測結果を表 3.4.2-15 に、平均線量率および照射量結果を表 3.4.2-16 に示す。

また、線量計測状況を図 3.4.2-47 および図 3.4.2-48 に示す。

表 3.4.2-15 線量計測結果

試験体 位置	2013/03/19	2013/08/09		2013/11/28	2014/01/10	2014/01/22
	試験開始	4ヶ月回収		8ヶ月回収	線源交換後	位置調整後
	-	位置調整前	位置調整後	-		
1 段目	8.21	8.14	10.57	9.83	11.03	11.04
2 段目	3.75	3.93	5.32	5.17	5.32	5.60
3 段目	1.78	1.89	2.48	2.60	3.25	3.20
4 段目	0.81	0.86	1.20	1.17	1.80	1.62

表 3.4.2-16 平均線量率および照射量結果

目標照射量 (kGy)	目安期間	試験体位置	平均線量率 (kGy/h)	総照射時間 (h)	総照射量 (kGy)
25000	4ヶ月	1 段目	8.18	3408	27860
25000	8ヶ月	2 段目	4.46	6096	27185
50000	8ヶ月	1 段目	9.07	6096	55278



(a) 線量計



(b) 線量計取り付け状況

図 3. 4. 2-47 線量計測状況 (その 1)



(a) 線量計配置状況 (1)



(b) 線量計配置状況 (2)

図 3. 4. 2-48 線量計測状況 (その 2)

2) 物性特性試験（骨材）

(a) 試験の概要

ガンマ線照射試験では、セメントペースト試験体を用いてガンマ線との相互作用について分析するとともに、コンクリート試験体を用いてガンマ線がコンクリートの物理特性に及ぼす影響について検討している。これらの試験結果の分析より、ガンマ線がセメントペーストおよびコンクリートに及ぼす影響については、かなり明確になってきている。

一方、「平成 22 年度高経年化対策強化基盤整備事業」（成果報告書 H23. 6）では、骨材単体のガンマ線照射試験を実施した。その際の結果の一部を図 3. 4. 2-49 および図 3. 4. 2-50 に示す。砂岩と石灰石ともに、ガンマ線照射による強度上昇の傾向が見られ、特に、砂岩での上昇が著しい。また、弾性係数については明確な傾向は見られなかった。

また、「平成 23 年度高経年化技術評価高度化事業」（成果報告書 H24. 3）では、中性子照射による主な劣化要因は骨材の膨張であるとの仮説を証明するために、中性子照射試験に用いる骨材を選定するための検討を行った。この段階で乾燥により収縮する骨材が比較的多く存在することが明らかとなっており、中性子照射で膨張しても乾燥で収縮すると中性子照射の影響を捉えられない。そこで、当時の研究では、中性子照射で膨張しやすいと考えられる石英の含有量が大きく、ガンマ線照射による乾燥でも骨材が収縮しないという特性の骨材を選定するために、全国から骨材サンプルを収集し分析を行った。乾燥収縮の小さい骨材に共通の特性としては、粘土鉱物の含有量が少ないことがわかっていたので、石英と粘土鉱物の含有量について分析し、これらをパラメータとして骨材を選定した。

そこで、今年度は、ガンマ線照射による骨材の強度変化について検討するために、骨材単体の照射試験を行う。強度変化の原因としては、骨材の乾燥収縮により骨材の密度が増大し、骨材強度が上昇することが考えられるので、この仮説を検証するための実験計画とする。

ガンマ線による骨材照射用に選定した骨材を表 3. 4. 2-17 に示す。また、図 3. 4. 2-51、図 3. 4. 2-52 および図 3. 4. 2-53 に、ガンマ線照射試験用に選定した骨材について、XRD による分析結果を示す。なお、石灰石については、中性子照射の対象とはしておらず、ガンマ線照射の対象をして、今回選定したものである。以下に各骨材の特徴を示す。

SS4（硬質砂岩）：砂岩として典型的なプロファイルである。緑泥石と雲母粘土鉱物は粘土鉱物ではあるが、一般には吸水/脱水に伴い、膨張/収縮するものではない。緑泥石や雲母粘土鉱物の幅広い(シャープでない)ピークや左右非対象なピークは、吸水/脱水に伴い、膨張/収縮する粘土鉱物であるスメクタイトとの混合層鉱物である可能性もある。ただし、その特定にはさらなる検討が必要である。

SS6（硬質砂岩）：産地と石英の卓越した粉末X線回折のプロファイルなどから、チャートが周辺に貫入した花崗岩により焼かれた変成岩（チャートホルンフェルス）である可能性が強い。もともとチャートは主に石英からなり粘土鉱物は少量、さらに含まれていた粘土

鉱物の大部分も熱変成により結晶性の高い雲母に再結晶している。

GV2 (砂利) : 緑泥石と雲母粘土鉱物は粘土鉱物ではあるが、一般には吸水/脱水に伴い、膨張/収縮するものではない。緑泥石や雲母粘土鉱物の幅広い(シャープでない)ピークや左右非対象なピークは、吸水/脱水に伴い、膨張/収縮する粘土鉱物であるスメクタイトとの混合層鉱物である可能性もある。ただし、その特定にはさらなる検討が必要である。

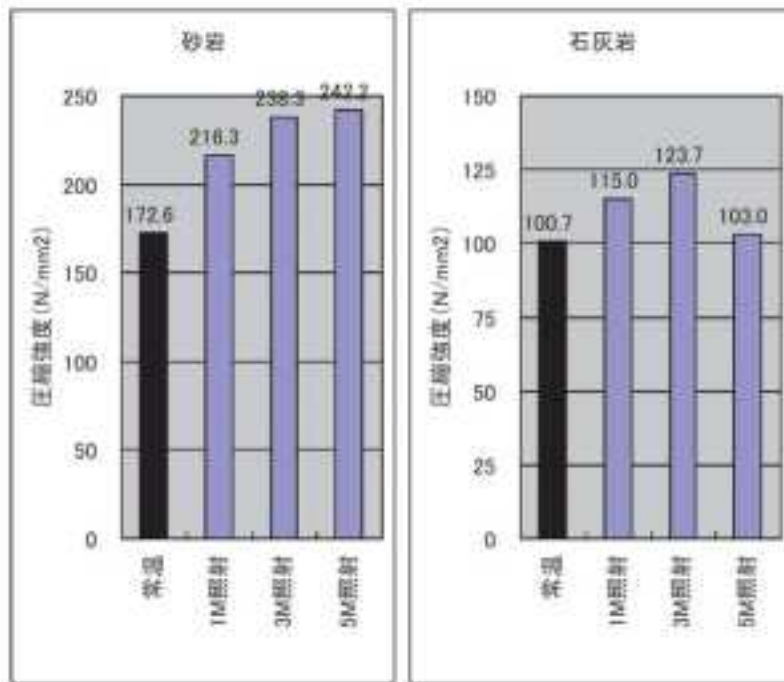


図 3. 4. 2-49 骨材の圧縮強度変化

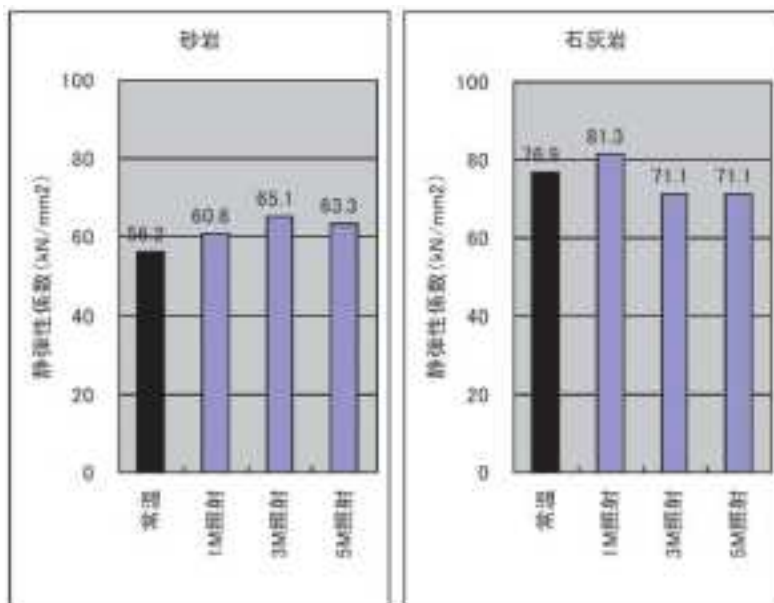


図 3. 4. 2-50 骨材の弾性強度変化

表 3.4.2-17 ガンマ線照射試験における骨材選定

骨材の種類		試料名	産地	特徴	骨材 ガンマ線 照射	中性子 照射	
粗骨材	硬質 砂岩	SS1	埼玉県 秩父市	典型的な砂岩 石灰石含有量が多い			
		SS2	静岡県 掛川市	典型的な砂岩 SiO ₂ とAl ₂ O ₃ がSS5と同等			
		SS3	岐阜県 多治見市	砂岩ではなくチャート SiO ₂ の含有率が90%以上 石英がSS6と同等に卓越			
		SS4	東京都 青梅市	典型的な砂岩 SiO ₂ とAl ₂ O ₃ がSS2と同等	○		
		SS5	-----	Al ₂ O ₃ の含有率が高い 雲母のピークが特徴的			
		SS6	愛知県 春日井	砂岩ではなくチャート 石英がSS3と同等に卓越	○	○	
	石灰石		津久見	(中性子照射では対象外、 平成22年度成果の検証)	○		
	砂利	GV1	神奈川県 足柄	SiO ₂ の含有率が少なめで 石英、長石類、角閃石の ピークがGV4と類似			
		GV2	静岡県 御前崎市	砂岩起源と考えられる SiO ₂ の含有率が75%程度 石英がGV3と同等に卓越	○	○	
		GV3	埼玉県 川越市	砂岩起源と考えられる SiO ₂ の含有率が77%程度 石英がGV2と同等に卓越			
		GV4	富山県 黒部市	SiO ₂ の含有率が少なめで 石英、長石類、角閃石の ピークがGV1と類似			
	細骨材	山砂	SD1	静岡県 掛川市	SiO ₂ の含有率が78%程度 石英がSD2と同等に卓越		
			SD2	静岡県 御前崎市	SiO ₂ の含有率が76%程度 石英がSD1と同等に卓越		○

ハッチングは、骨材単体のガンマ線照射試験のために選定した骨材に対応している。あわせて、中性子照射のためのコンクリート試験体製作で用いた骨材を示す。

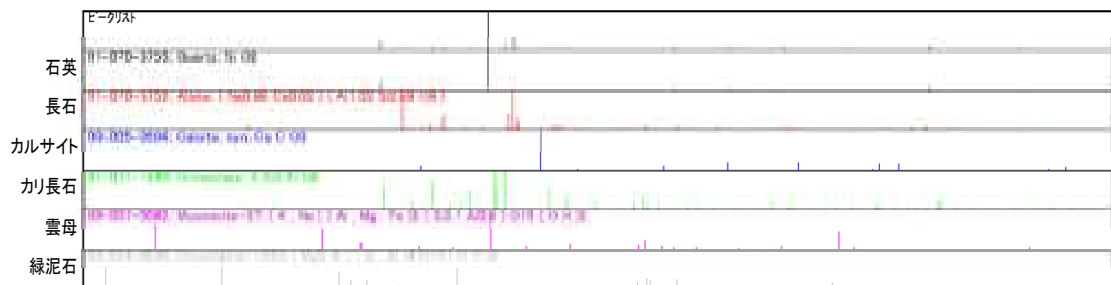
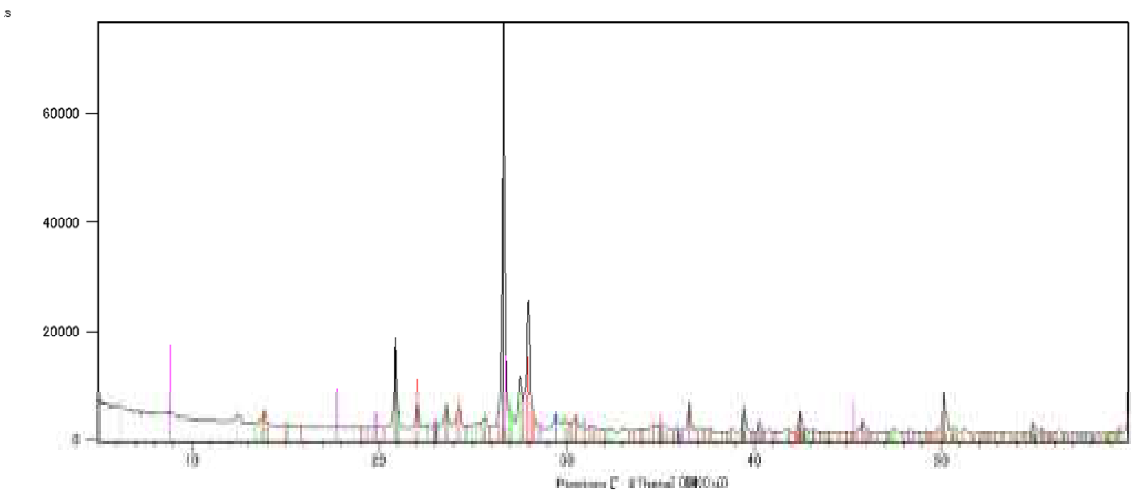
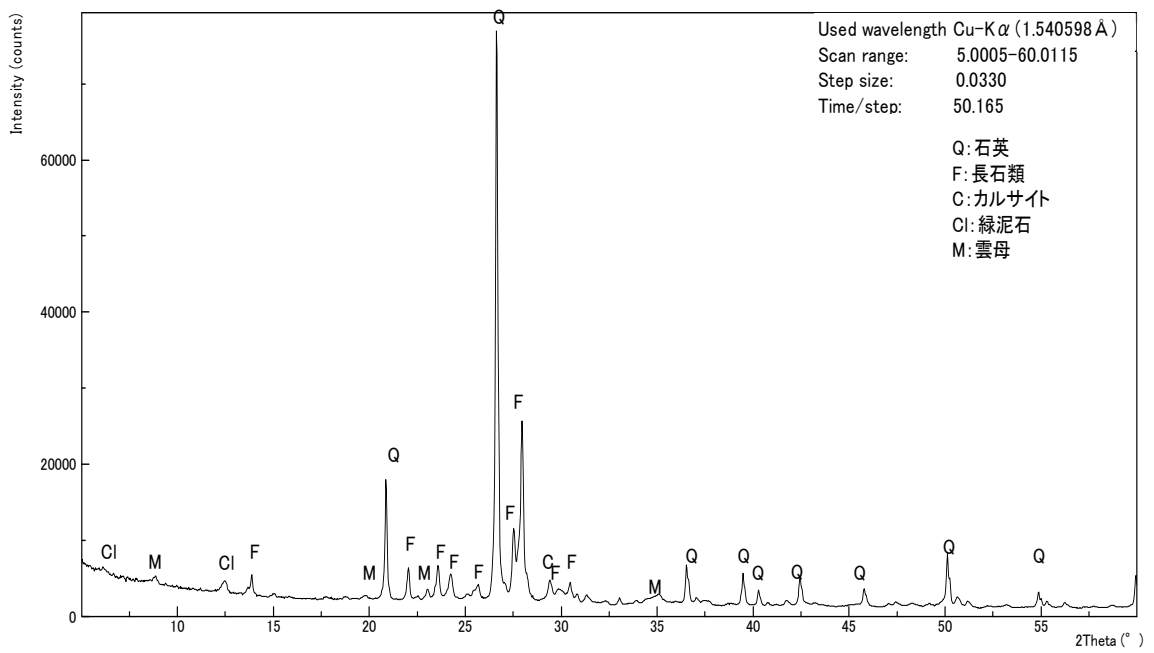


図 3.4.2-51 XRD 試験結果 (SS4)

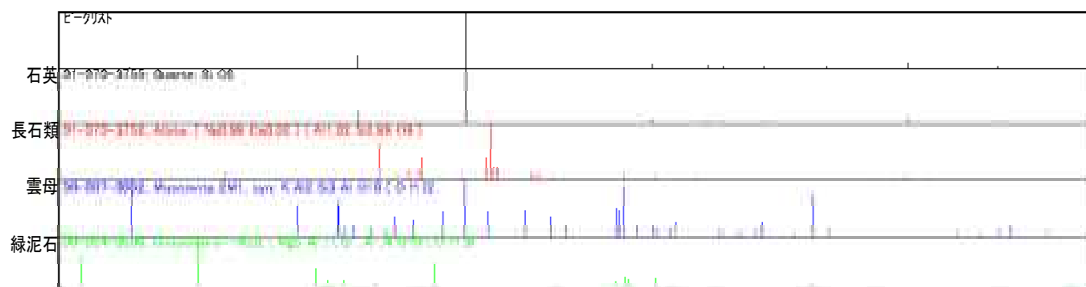
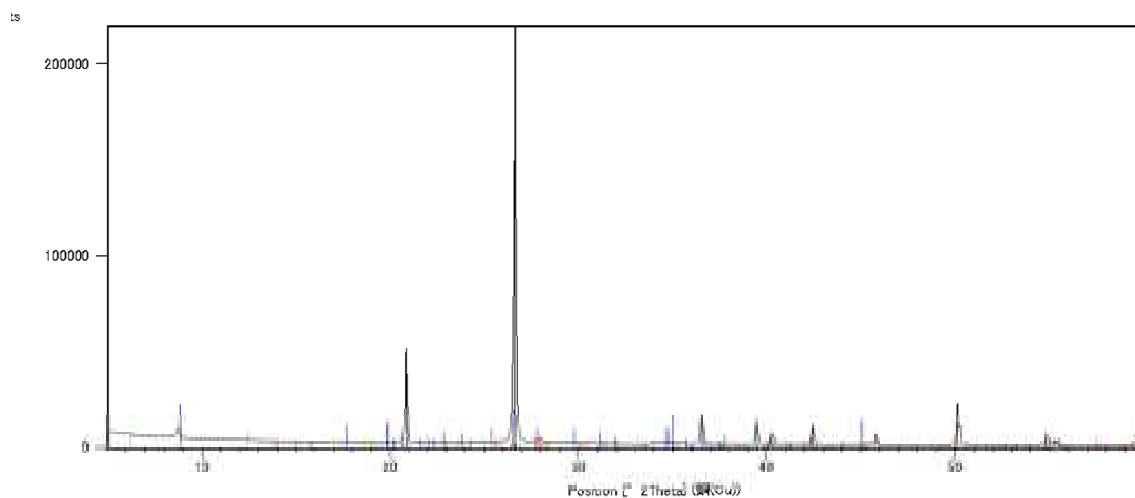
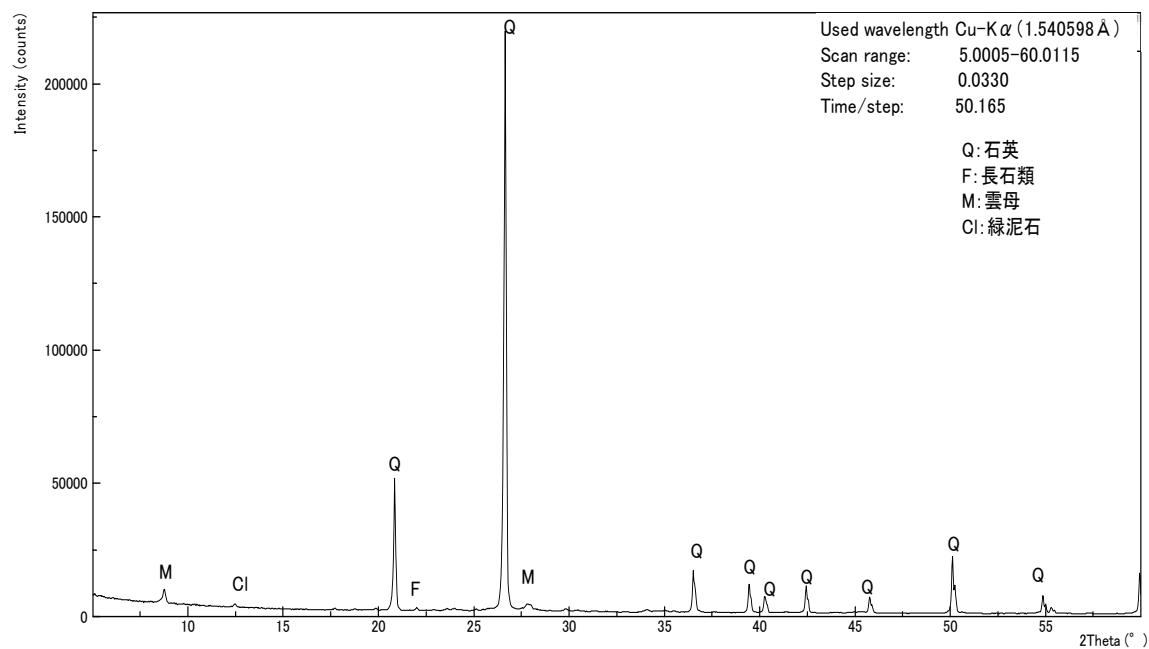


図 3.4.2-52 XRD 試験結果 (SS6)

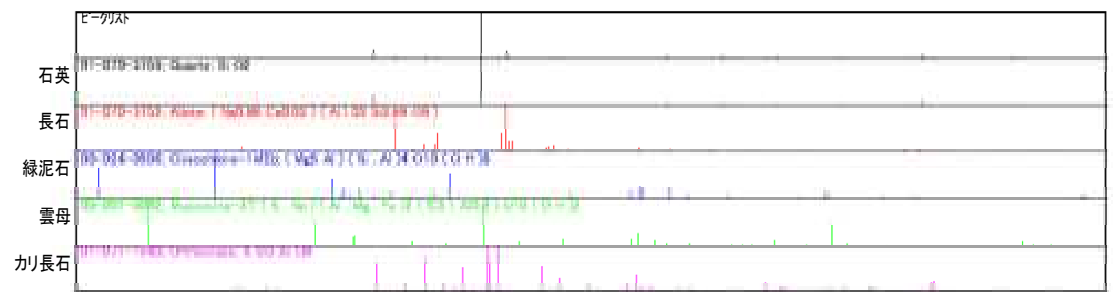
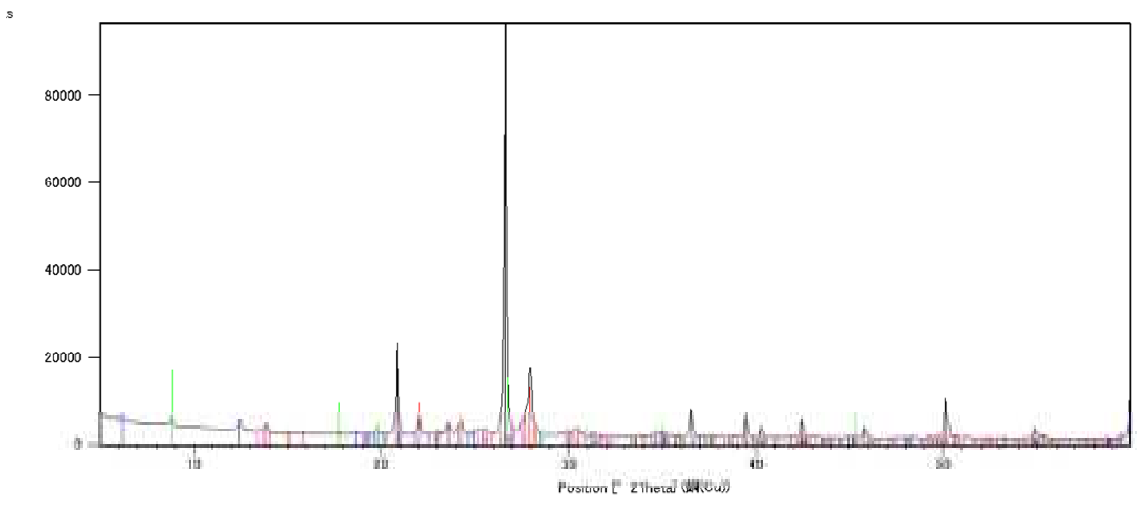
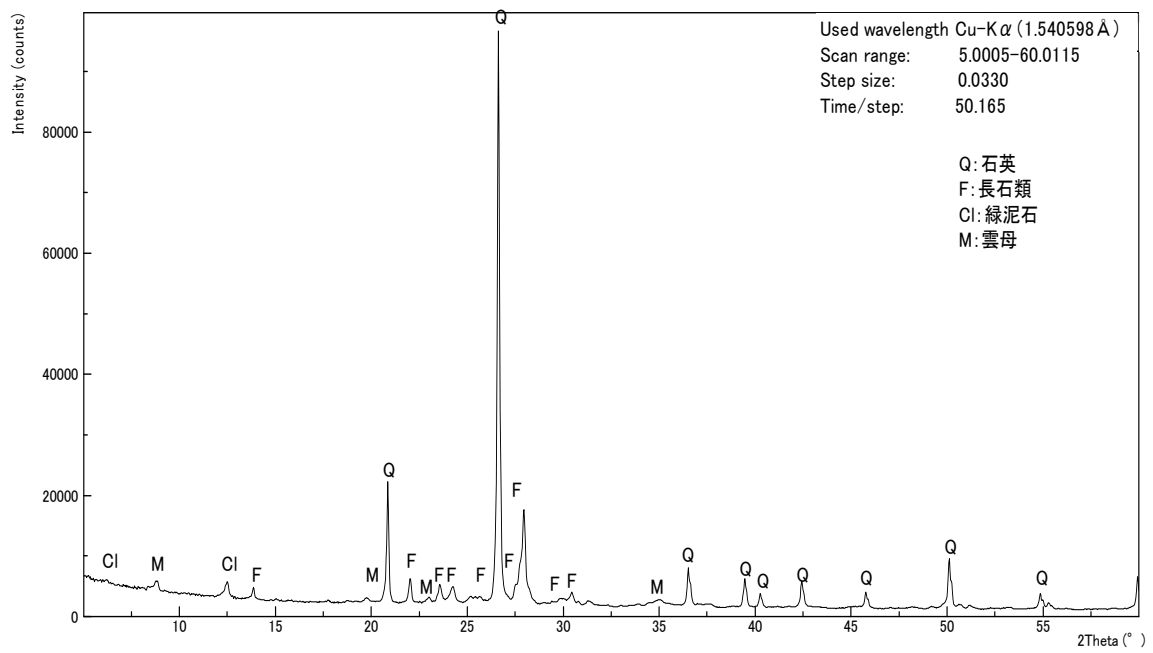


図 3.4.2-53 XRD 試験結果 (GV2)

(b) 試験・計測方法

本研究では、ガンマ線照射が骨材単体に及ぼす影響について把握するために、4種類の骨材から試験体を取得して、ガンマ線による照射試験を実施する。選定した骨材を以下に示す。

- ① 凝灰岩（春日井：碎石）
- ② 砂岩（御前崎：砂利（砂岩起源））
- ③ 砂岩（青梅：碎石）
- ④ 石灰岩（津久見：碎石）

骨材の試験体サイズは直径4~5cm、長さ径比2の円柱試験体とする。なお、試験体の取得が困難な場合は、直径4~5cm、長さ径比2より小さめのサイズでもよい。②の骨材については砂利なので、大きめの砂利を採取し、コア試験体を取得する。

各骨材についての試験ケースを表3.4.2-18に示す。同一条件での試験体数を、ばらつきが大きい場合を想定して、5体とする。ガンマ線照射期間は、4ヵ月、8ヵ月、16ヵ月の3水準とし、JAEA高崎研究所の照射施設で実施する。非照射・加熱試験については、ガンマ線照射試験における温度計測結果を1週間毎に平均化し加熱する。また、ガンマ線照射開始時に管理試験を行う。コンクリートとは異なり、照射期間の変化に伴う強度変化を考慮する必要がないので、管理試験は照射開始時のみとする。試験体は、各骨材について35体となる。

また、表3.4.2-18に65℃加熱による試験ケースを示す。これは、照射効果研究会での指摘に対応するもので、65℃での急速な乾燥が骨材の物理特性に及ぼす影響を把握するために実施する。

表3.4.2-18 骨材試験体による試験ケース数

	照射影響評価				加熱影響評価	
	4ヵ月 (2.5× 10 ⁴)	8ヵ月 (5.0× 10 ⁴)	16ヵ月 (1.0× 10 ⁵)	照射 開始時	恒量 達成時	加熱 開始時
ガンマ線 照射試験	5体	5体	5体	—	—	—
非照射 加熱試験	5体	5体	5体	—	—	—
65℃加熱	—	—	—	—	5体	—
管理試験	—	—	—	5体		5体

() : 目標照射量 (kGy)

骨材試験体製作後、寸法・質量計測を行う。計測後水分の変化を防ぐために、アルミパック等で密閉保管する。

管理試験（5体）については、照射試験を実施する前の段階で、圧縮強度試験およびXRDを実施する。

照射試験および非照射・加熱試験の試験体については、試験期間終了後、速やかに、寸法・質量計測、圧縮強度試験、XRDの試験を実施する。

XRDについては、強度試験を実施した5体の試験体の内、1体を用いてサンプリングを行い、計測を行うものとする。

試験後の材料実験において、試験体を移送する必要がある場合には、アルミパック等で密閉保管する。

圧縮強度試験では、強度と剛性を計測する。

表 3.4.2-19 に各骨材についての照射影響を評価するための試験ケースを示す。表 3.4.2-20 に加熱影響評価のための試験ケースを示す。また、試験体番号を表 3.4.2-21 に示す。

表 3.4.2-19 照射影響評価試験ケース

実施項目	ガンマ線照射試験			非照射・加熱試験			管理試験
	4ヵ月	8ヵ月	16ヵ月	4ヵ月	8ヵ月	16ヵ月	
寸法・質量計測 (試験実施前)	5体	5体	5体	5体	5体	5体	5体
ガンマ線照射試験	5体	5体	5体	—	—	—	—
非照射・加熱試験	—	—	—	5体	5体	5体	—
寸法・質量計測 (試験実施後)	5体	5体	5体	5体	5体	5体	—
圧縮強度試験	5体	5体	5体	5体	5体	5体	5体
XRD	1体	1体	1体	1体	1体	1体	1体

表 3.4.2-20 熱影響評価試験ケース

実施項目	65℃加熱	管理試験
寸法・質量計測（加熱前）	5体	5体
恒量達成時	5体	—
寸法・質量計測（加熱後）	5体	—
圧縮強度試験	5体	5体
XRD	1体	—

表 3.4.2-21 骨材試験体番号

試験種類		A 凝灰岩 (春日井: 碎石)	B 砂岩 (御前崎: 砂利)	C 砂岩 (青梅: 碎石)	D 石灰石 (津久見: 碎石)
照射影響確認試験	照射試験 (4ヵ月)	A-01	B-01	C-01	D-01
		A-02	B-02	C-02	D-02
		A-03	B-03	C-03	D-03
		A-04	B-04	C-04	D-04
		A-05	B-05	C-05	D-05
	照射試験 (8ヵ月)	A-06	B-06	C-06	D-06
		A-07	B-07	C-07	D-07
		A-08	B-08	C-08	D-08
		A-09	B-09	C-09	D-09
		A-10	B-10	C-10	D-10
	照射試験 (16ヵ月)	A-11	B-11	C-11	D-11
		A-12	B-12	C-12	D-12
		A-13	B-13	C-13	D-13
		A-14	B-14	C-14	D-14
		A-15	B-15	C-15	D-15
	非照射 加熱試験 (4ヵ月)	A-16	B-16	C-16	D-16
		A-17	B-17	C-17	D-17
		A-18	B-18	C-18	D-18
		A-19	B-19	C-19	D-19
		A-20	B-20	C-20	D-20
	非照射 加熱試験 (8ヵ月)	A-21	B-21	C-21	D-21
		A-22	B-22	C-22	D-22
		A-23	B-23	C-23	D-23
		A-24	B-24	C-24	D-24
		A-25	B-25	C-25	D-25
	非照射 加熱試験 (16ヵ月)	A-26	B-26	C-26	D-26
		A-27	B-27	C-27	D-27
		A-28	B-28	C-28	D-28
		A-29	B-29	C-29	D-29
		A-30	B-30	C-30	D-30
管理試験	A-31	B-31	C-31	D-31	
	A-32	B-32	C-32	D-32	
	A-33	B-33	C-33	D-33	
	A-34	B-34	C-34	D-34	
	A-35	B-35	C-35	D-35	
加熱影響確認試験	65°C加熱試験	A-36	B-36	C-36	D-36
		A-37	B-37	C-37	D-37
		A-38	B-38	C-38	D-38
		A-39	B-39	C-39	D-39
		A-40	B-40	C-40	D-40
	管理試験	A-41	B-41	C-41	D-41
		A-42	B-42	C-42	D-42
		A-43	B-43	C-43	D-43
		A-44	B-44	C-44	D-44
		A-45	B-45	C-45	D-45

(c) 試験結果

骨材のガンマ線照射は、コンクリート試験体と同様に、日本原子力研究開発機構高崎量子応用研究所のコバルト第1照射棟の第2照射室で実施した。試験スケジュールを表3.4.2-22に示す。第2照射室の照射スペースを有効に使用するために、3水準の照射試験を同時に行うのではなく、4ヵ月照射と8ヵ月照射は同一スペースを用いて連続して実施することとした。

照射室での試験体設置のイメージ(平面)および(立面)を図3.4.2-54および図3.4.2-55に示す。骨材試験体、熱電対の取り付け状況、および骨材試験体の照射状況を図3.4.2-56から図3.4.2-58に示す。

照射中は、各骨材の代表サンプル2体について温度計測を行った。また、あわせて、室温および湿度の計測も行っている。図3.4.2-59に温度測定結果を示す。

表 3.4.2-22 骨材試験スケジュール

実施項目	2013			2014												2015						
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	1	2	3	4	5	6	7			
ガンマ線照射試験				4ヵ月照射																		
				8ヵ月照射																		
				16ヵ月照射																		
非照射・加熱試験				4ヵ月照射																		
				8ヵ月照射																		
				16ヵ月加熱																		
65°C加熱試験																						
				:照射・加熱後試験(質量・寸法計測、強度・剛性計測、XRD)																		

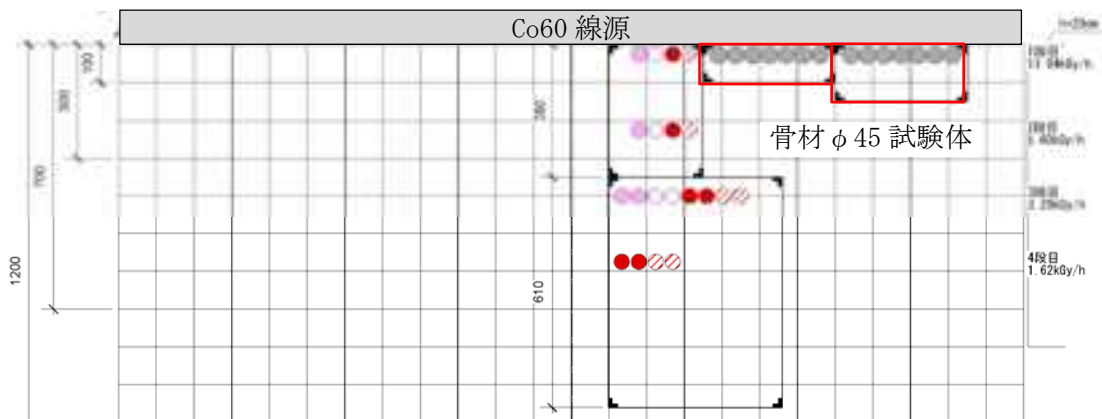


図 3.4.2-54 照射室での試験体設置のイメージ (平面)

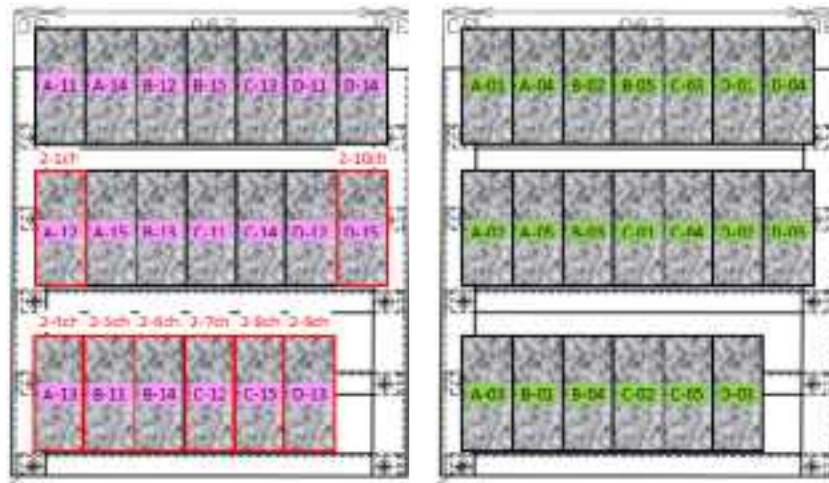


図 3. 4. 2-55 照射室での試験体設置のイメージ (立面)
(照射開始から 4 ヶ月間の状況)



図 3. 4. 2-56 骨材試験体



図 3. 4. 2-57 熱電対の取り付け状況



図 3. 4. 2-58 骨材試験体の照射状況

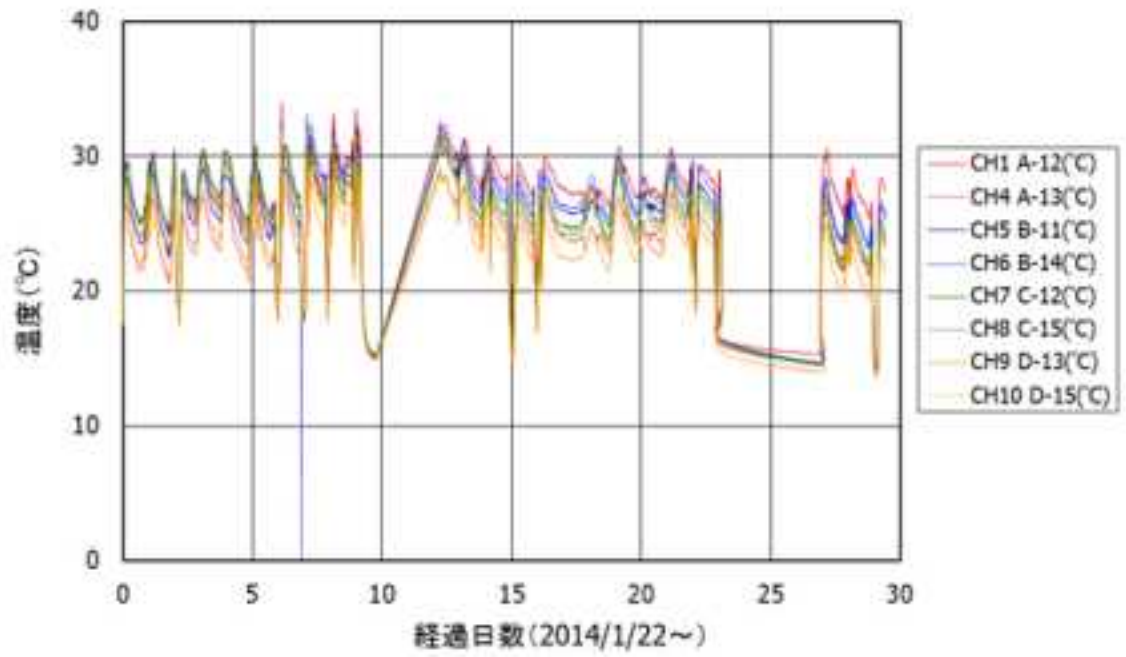


図 3. 4. 2-59 骨材の温度計測結果

ガンマ線照射が骨材に及ぼす影響を把握するための比較の対象である非照射試験体の強度・剛性計測結果を表 3. 4. 2-23 に示す。また、65°Cの加熱影響を把握するための比較の対象である非加熱試験体の強度・剛性計測結果を表 3. 4. 2-24 に示す。

表 3. 4. 2-23 非照射試験体の強度・剛性計測結果

試験体 管理番号	岩石名	試験開始時期	圧縮強さ		静弾性係数	
			(N/mm ²)		(kN/mm ²)	
A31	凝灰岩 (春日井)	管理試験 (試験体作製直後)	262	246	85.0	73.5
A32			250		52.0	
A33			258		84.1	
A34			148		71.5	
A35			313		74.8	
B31	砂岩 (御前崎)	管理試験 (試験体作製直後)	198	275	68.2	60.3
B32			300		61.6	
B33			236		46.1	
B34			292		56.3	
B35			351		69.4	
C31	砂岩 (青梅)	管理試験 (試験体作製直後)	129	153	60.6	52.7
C32			167		48.6	
C33			145		45.1	
C34			170		63.0	
C35			156		46.2	
D31	石灰石 (津久見)	管理試験 (試験体作製直後)	135	119	82.5	77.1
D32			151		69.0	
D33			130		81.6	
D34			91.5		81.6	
D35			85.3		70.7	

表 3.4.2-24 非加熱試験体の強度・剛性計測結果

試験体 管理番号	岩石名	65°C乾燥の有 無	圧縮強さ		静弾性係数	
			(N/mm ²)		(kN/mm ²)	
A41	凝灰岩 (春日井)	無	141	199	82.0	71.1
A42			187		73.2	
A43			174		62.8	
A44			276		67.5	
A45			216		69.8	
B41	砂岩 (御前崎)	無	249	284	70.4	62.9
B42			303		65.7	
B43			381		70.3	
B44			319		63.8	
B45			169		44.4	
C41	砂岩 (青梅)	無	150	166	65.7	60.8
C42			131		64.5	
C43			140		51.4	
C44			287		61.7	
C45			124		60.9	
D41	石灰石 (津久見)	無	114	164	73.8	78.4
D42			176		81.0	
D43			179		85.2	
D44			176		79.3	
D45			174		72.7	

3) 今後の課題

セメントペースト試験体を用いたガンマ線照射による相互作用試験で、ガンマ線がセメントペースト中の水分にどのように作用するかということがわかってきた。今後は、ガンマ線がコンクリートの物理特性にどのような影響を与えるかについて明確にすることが最重要課題である。その課題解決に向けて、今年度より、コンクリート試験体を用いた、長期的なガンマ線照射試験をスタートした。

特に、これまでの研究成果より、ガンマ線自体がコンクリートに及ぼす影響は小さく、ほとんどが、ガンマ線発熱と少しの水の放射線分解による乾燥が原因であると考えている。この仮説を証明するために、今後も引き続き照射試験を継続するとともに、検証に必要な試験計測を継続する。

また、平成 22 年度に実施した骨材単体のガンマ線照射試験では、骨材サンプルの強度傾向が見られた。平成 23 年度に実施した、中性子照射試験に用いる骨材調査では、乾燥による収縮する骨材が多く存在することが明らかとなった。骨材が収縮すると、密度が上昇する傾向となり、鋼材の強度増進に寄与する可能性があると考えられる。

この課題を解明するために、今年度より、骨材単体の暴露照射試験を開始した。今後は、照射試験を継続するとともに、課題解明に必要なデータ取得を目指して、詳細な分析を行う。

(3) 中性子照射試験

1) 照射試験の実施状況

(a) 照射環境条件

中性子照射がコンクリートに及ぼす影響を把握するために、下記に示す2種類の中性子照射試験を行う。

- ・相互作用試験 (Interaction test : IT)

相互作用試験では、セメントペースト試験体を照射し、中性子とセメントペーストとの化学的・物理的反応(水の放射線分解、水和物の変化等)を把握する。

- ・物理特性試験 (Physical property test : PPT) :

物理特性試験では、中性子照射量をパラメータとして照射試験を行い、中性子がコンクリート、セメントペーストおよび骨材の物理特性(強度、剛性等)に及ぼす影響を把握する。

図 3.4.2-60 に研究炉 JEEP II の炉心の水平断面を示す。燃料が全体に分布し、制御棒が周辺部に配置されている。照射孔は実験研究に用いられ、挿入されるキャプセルは冷却水で冷却される。炉の周辺部には冷却されない直径の大きな照射孔が配置されている。

本研究のために確保された照射孔は、Position36 と Position52 の2カ所で、炉の周辺部に位置している。これは、本研究の照射試験計画に基づいて選定されており、炉の中央部では、中性子束やガンマ線発熱が大きいと考えられる。

図 3.4.2-61 に研究炉 JEEP II の炉心の縦断面を示す。炉心の高さは90cmとなっているが、上下端では中性子束が小さくなり高さ方向で照射量に大きな差が発生するのを避けるために、中央の60cmの領域で照射を行う計画としている。

表 3.4.2-25 に中性子照射試験のスケジュールを示す。表 3.4.2-26 に照射試験における照射条件をまとめて示す。併せて、目標照射量、照射条件の計画値を示す。

最初に、試験ケース IT-A3 (IFA-760) を36番照射孔で、試験ケース PPT-B (IFA-753) を52番照射孔で開始した。この段階では、ガンマ線発熱の違いから、36番照射孔では76℃となっていたが、52番照射孔では70.5℃となっており、5.5℃の差があった。その後、試験ケース PPT-B が終了し、試験ケース PPT-E (IFA-750) を開始した。また、試験ケース IT-3 終了後、試験ケース PPT-C (IFA-752) を開始した。52番照射孔での温度には変化はなかったが、36番照射孔ではガンマ発熱が20%程度低下し、それに伴って温度も76℃から70℃へと6℃低下した。

JEEP II では、年3回(4月に1か月、7-8月にかけて2か月、12-1月にかけて1か月、計4か月/年)の停止期間が設定されており、炉の照射環境を変更する場合(照射キャプセルの設置・撤去等)は、照射期間途中で変更する事はなく、停止期間に準備を行い、停止期間後の照射再開に合わせて変更することとなっている。今回の36番照射孔での変化は、こ

のような照射条件の変化によると考えられ、結果的に、両方の照射孔の温度が同等となっている。

照射条件の計画値と比較すると、試験体中央の温度が、やや低めとなっているにもかかわらず、高速中性子束は大きくなっていることがわかる。

表 3.4.2-27 に、目標照射量に到達するまでの照射期間に関して計画値と実測値を比較して示す。計画値では、高速中性子束を $2.0\sim 3.5\times 10^{12}\text{n/cm}^2/\text{s}$ 、稼働率を 50%として評価し、目標照射量までには、13.2～23.1 ヶ月必要であった。一方、実測では、高速中性子束は $3.9\times 10^{12}\text{n/cm}^2/\text{s}$ 、稼働率は 58%としてなっているため、必要照射期間は 10.3 ヶ月となっており、計画よりもかなり短縮されている。これは、高速中性子束の実測値が、計画の最大値よりも 10%以上大きいことに起因している。

表 3.4.2-28 に実機条件と照射試験条件とを比較して示す。

本試験における高速中性子照射量 (0.1MeV 以上) の目標値は、既存の軽水炉における 60 年間の照射量予測値に基づいて、また、ガンマ線照射量の目標値は、高経年化技術評価におけるガンマ線照射量の目安値を採用し、それぞれ、 $6.0\times 10^{19}\text{n/cm}^2$ 、および $2.0\times 10^5\text{kGy}$ となっている。軽水炉の稼働率を 0.75 と仮定すると、実機の一次遮へい壁に作用する高速中性子束は $4.2\times 10^{10}\text{n/cm}^2/\text{s}$ 、ガンマ線量率は 0.51kGy/h となる。

一方、本研究における高速中性子束は $3.5\sim 3.9\times 10^{12}\text{n/cm}^2/\text{s}$ で、実機条件の 83～93 倍となっている。中性子照射試験におけるガンマ線量率は $271\sim 375\text{kGy/h}$ で、実機条件の 531～735 倍となっている。本照射試験では 1 年弱で 60 年分の中性子照射試験を行うので、中性子照射では 80～90 倍の加速試験となっている。さらに、中性子照射に伴うガンマ線量率は、500～700 倍の加速試験となっている。従って、中性子の影響を把握するためには、ガンマ線の影響も正確に把握する必要がある。

なお、JAEA 高崎研究所で実施しているガンマ線照射試験の最大線量率は 10kGy/h 程度なので、実際のガンマ線照射の 20 倍程度の加速試験となっている。

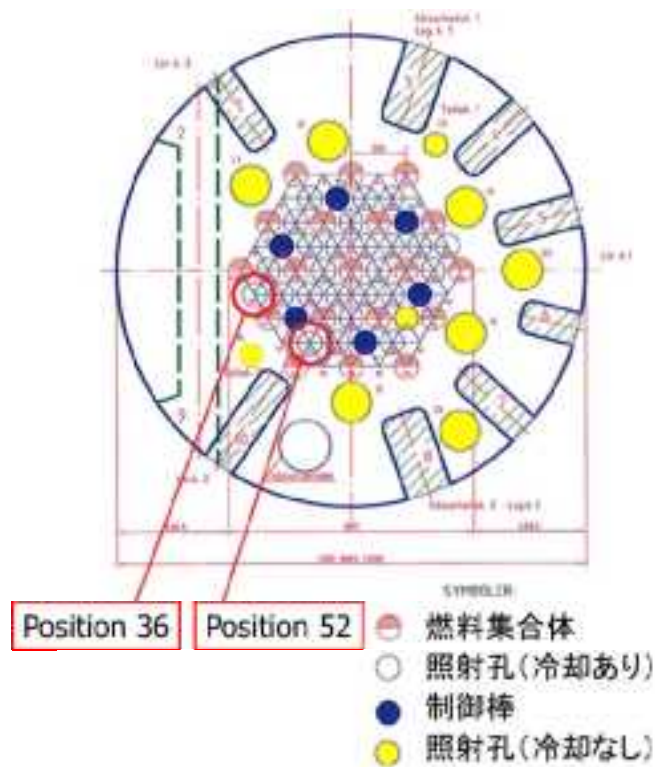


図 3. 4. 2-60 JEEP II 炉心水平断面

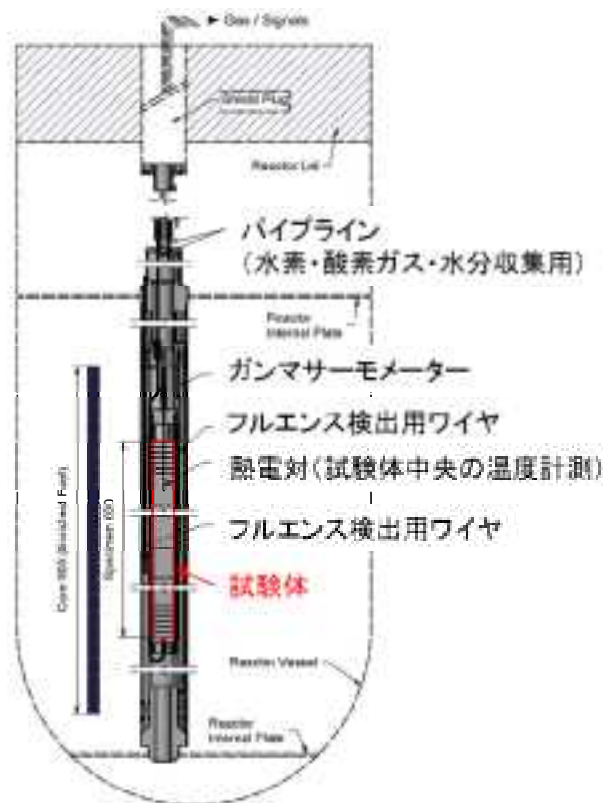


図 3. 4. 2-61 JEEP II 炉心縦断面

表 3. 4. 2-26 照射試験における照射条件

照射孔	試験体	目標照射量 (n/cm ²)	試験体中央温度 (°C)	高速中性子束 (n/cm ² /s)	ガンマ発熱 (W/g)	ガンマ線量率 (kGy/h)
Position 52	コンクリート PPT-B (IFA-753)	7.5x10 ¹⁸	70.5	3.7x10 ¹²	0.097	325
	コンクリート PPT-E (IFA-750)	6.0x10 ¹⁹	70.5	3.9x10 ¹²	0.105	375
Position 36	セメントペースト IT-A3 (IFA-760)	-----	76.0	3.6x10 ¹²	0.107	370
	コンクリート PPT-C (IFA-752)	1.5x10 ¹⁹	70.0	3.5x10 ¹²	0.087	271
計画値			72.0	2.0~3.5x10 ¹²	0.04~0.06	

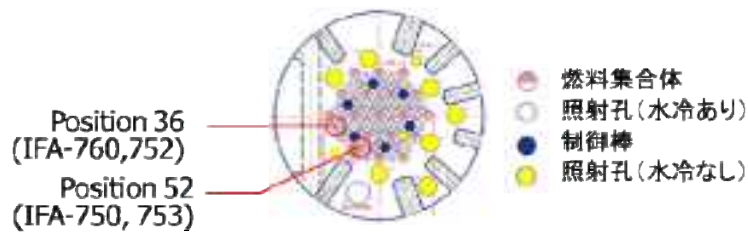


表 3. 4. 2-27 目標照射量に到達するまでの照射期間の比較

高速中性子束 (n/cm ² /s)		計画値		実測値 (IFA-750)
		最小値	最大値	
		2.0x10 ¹²	3.5x10 ¹²	3.9x10 ¹²
目標照射量 (n/cm ²)		6.0x10 ¹⁹		
稼働率		0.5 ^{*1}	0.5 ^{*1}	0.58 ^{*2}
照射期間	日(稼働率1.0)	347	198	178
	日(稼働率考慮)	694	397	308
	月(稼働率考慮)	23.1	13.2	10.3

*1：計画時における想定

*2：原子炉計画停止期間 4 ヶ月：0.67、稼働期間の日常作業による停止：0.87

$$0.67 \times 0.87 = 0.58$$

表 3.4.2-28 実機条件と照射試験条件との比較

		実機条件*1	中性子 照射試験*2	ガンマ線 照射試験*3
高速中性子照射量 60年間予測値	n/cm ²	6.0x10 ¹⁹		
ガンマ線照射量 60年間予測値	kGy	2.0x10 ⁵		
稼働率		0.75		
高速中性子束	n/cm ² /s	4.2E+10	3.5~3.9x10 ¹² (83~93)	
ガンマ線量率	kGy/h	0.51	271~375 (531~735)	10 (20)



*1 : PWR の一次遮へい壁

(稼働率を考慮し、60 年間予測値より高速中性子束、線量率を評価)

*2 : JEEP II における照射試験ケース (PPT-E:IFA-750) での実測値

*3 : JAEA 高崎研究所での最大値

() : 実機条件に対する試験条件の倍率

(b) 試験・計測方法

a) 照射試験中の計測

中性子束やガンマ発熱の計測は、図 3.4.2-61 に示すように、照射キャプセルにあらかじめ設置してある装置により計測する。試験体の温度は、キャプセル最上部の試験体に設置した熱電対で計測する。

ガンマ線照射の場合は、計測システム端は常に開放されており、流量計を用いてガス発生量を計測し、定期的なガスサンプルをガスクロマトグラフィーにより分析するとともに、水分吸収材を含む装置を系統に設置し、吸収材の質量差で水分量を計測した。発生する水蒸気、水素・酸素を容器から計測系へ移送するために Ar ガスを用いていたが、実機条件よりも乾燥の程度が厳しいとの指摘があったため、中性子照射試験では、キャリアーガスを用いない計測系とした。

図 3.4.2-62 に中性子照射試験におけるガス・水分計測システムを示す。中性子照射により発生するガス（水素および酸素）によって、キャプセルから放出バルブまでの閉鎖系統領域が加圧され、系統内部の圧力が上昇する。圧力が 1.25Bar まで上昇すると、放出バルブを開放し、圧力を開放する。発生ガス量は、流量計により計測するとともに、圧力と系統内部の体積より数値計算により評価する。

水分量は、当初、湿度計を用いて、発生ガス量と同様の方法で評価する計画であったが、湿度計測タンク内に多くの水蒸気が結露し湿度が 100% となり、水分量を計測できないことが判明した。そこで、発生する多くの水蒸気を捕集するために、系統内で圧力計の炉側にコンデンサーを設置した。

また、キャプセル内部で結露し、発生ガスの排出がスムーズでなくなった場合や系統内部の配管で水が凝縮して、発生ガスや水蒸気の流れが悪くなる場合等に対応するために、ヘリウムガスによるフラッシュラインを設置し、不測の場合に備えた。

図 3.4.2-63 にコンデンサーを示す。コンデンサー上部は冷却効率を上げるためにアルミニウムブロックとし、吸気・排気管はこの部分に連結した。ブロックの下部には排水バルブ付きのガラス管を設置し、凝縮した水分量を把握し計測できる構造とした。また、コンデンサーでほとんどの水分が凝縮され、湿度計測タンク内の相対湿度は 30~40% 程度となっているので、コンデンサーで凝縮できない水分については数値計算で評価した。

発生したガスについては、定期的にサンプリングラインからサンプリングを行い、ガスクロマトグラフィーで、ガス組成を分析した。

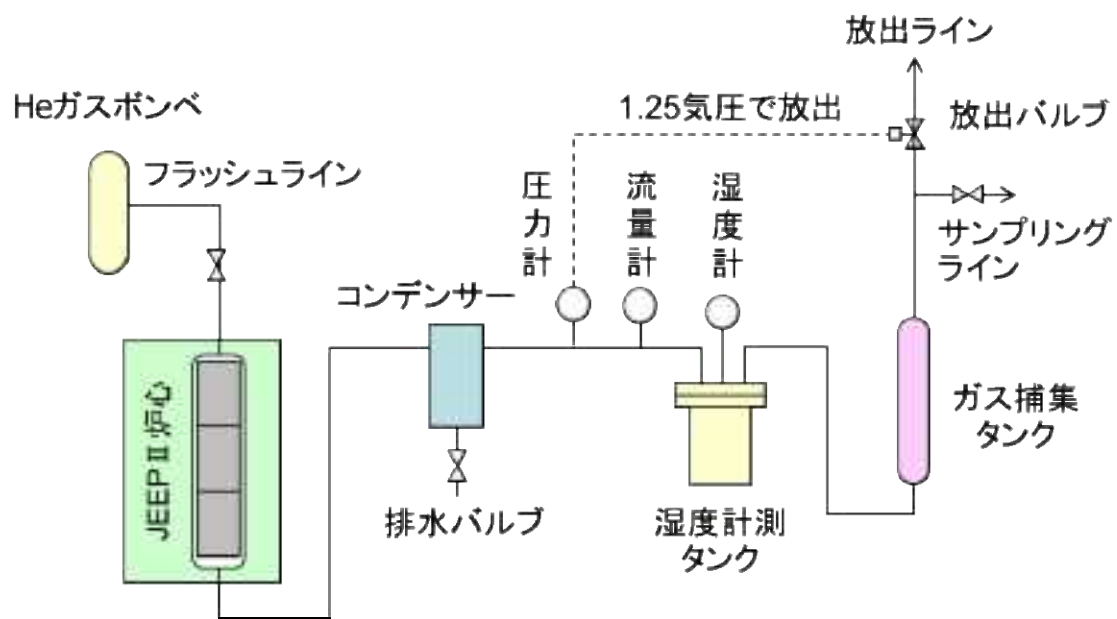


図 3. 4. 2-62 ガス・水分計測システム



図 3. 4. 2-63 コンデンサー

b) 寸法計測

試験体については、試験前後で寸法計測を行うが、計測位置を図 3.4.2-64 に示す。
直径の計測は、試験体の高さ中央位置で、5 点の計測を行い、その平均値を取る。
高さの計測は、異なる位置で 3 回の計測を行い、その平均値を取る。

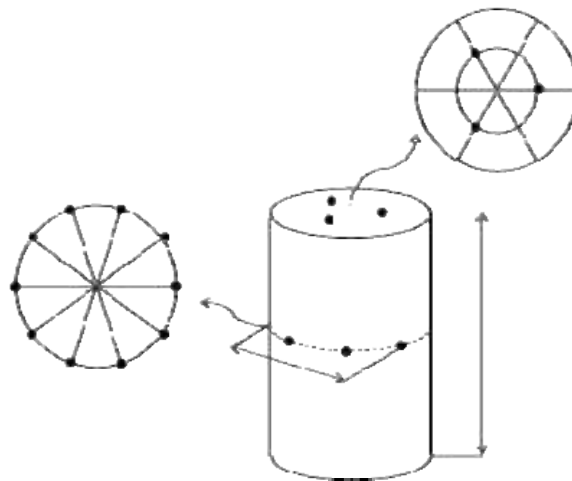


図 3.4.2-64 寸法計測位置

2) 物理特性試験 (IT : Interaction Test)

(a) 試験の概要

a) 中性子照射試験

照射試験による最終的な目的は、放射線がコンクリート特性に及ぼす影響の実験的な把握、劣化メカニズムの解明、さらに放射線に対する健全性評価法の構築であるが、劣化メカニズムを解明するためには、中性子とセメントペースト/骨材/コンクリートとの相互作用について検討することが重要である。

ガンマ線照射試験においても、物理特性照射試験を実施する前に、相互作用試験を行いガンマ線がセメントペースト中の水分に及ぼす影響について重要な知見を取得した。

これまでまとめてきた中性子とセメントペースト/骨材との相互作用に関する検討結果では、中性子と固体相との関係では、表 3. 4. 2-29 に示す知見が得られている。

表 3. 4. 2-29 中性子照射が固体相に及ぼす影響

セメントペースト 固体相	<ul style="list-style-type: none">・セメントペーストは多孔質で疎な構造なので、中性子により原子が弾き出されても、ペースト内を簡単に移動でき、少々の体積膨張は吸収できると考えられるので、損傷を受け難い。
骨材固体相	<ul style="list-style-type: none">・骨材中の共有結合に塑性ひずみが生じ、密度低下が生じる。場合によってはアモルファス化が生じる。・この密度低下には、骨材の弾き出しの影響も無視できない。・ガンマ線との重畳効果の可能性も無視できない。・堆積膨張による密度低下によってコンクリート中で周囲のモルタル相にひび割れを生じさせる可能性がある。

一方、中性子と水分相（主にセメントペースト）との関係については、核反応や反跳原子によるエネルギー付与が及ぼす影響についてはガンマ線の場合と同じであると考えられるが、エネルギー付与密度の違いから、微視的なセメントペースト構造との相互作用により、同じ吸収線量の場合でも影響の程度がガンマ線と異なることが考えられる。そこで、この影響について相互作用試験より事前に把握することは、その後の劣化メカニズム検討で非常に重要であると考えられる。

相互作用試験は、中性子とセメントペーストとの相互作用の把握（中性子による速度効果と水分の分解挙動の把握）を目的として、セメントペースト試験体を圧力容器に封入し、照射試験を行い、発生する水蒸気や水素ガスの計測を行なう。相互作用試験のパラメータとしては、水分の分解挙動を把握するために、セメントペースト中の水分量（3 水準）とし、中性子束と温度は一定とする。計画当初は、速度効果を把握するために高速中性子束をパラメータとしていたが、使用している照射孔では、十分な中性子束の違いを出す配置

ができないことから、現時点では中性子束をパラメータとした試験は計画しないが、4体の容器のうち、1体の試験条件はHOLDとし、今後の計画変更に対応できるようにしておく。

表 3.4.2-30 に、相互作用試験における試験条件と試験体配置の一覧を示す。

照射容器には、5体の $\phi 4 \times 6$ cm 試験体を収納することができるが、容器の中央部から端部に向かって、中性子束が低下するので、中央3体を本試験体とし、上部1体を温度計測用の試験体、下部1体をダミー試験体（アルミニウム製）とする。

b) 照射後試験

中性子照射による影響を把握するために、照射後試験（PIE：Post Irradiation Examination）を行う。なお、中性子照射によりサンプルは放射化するもので、放射線による被曝を低減するために、約2か月間放置し放射能レベルを低減させる。

中性子とセメントペーストの相互作用を把握するためには、下記のPIEを実施することが望ましい。

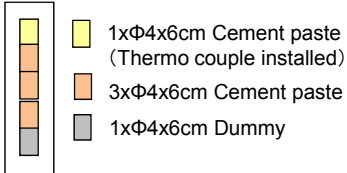
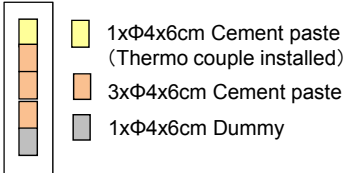
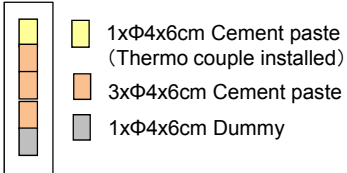
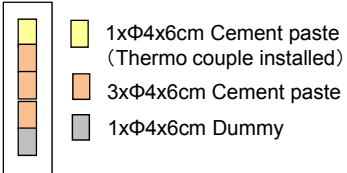
- | | |
|-----------------|-----------------------------|
| ・質量変化、寸法変化 | : 密度および体積の変化 |
| ・強度 | : 機械的特性の変化 |
| ・細孔径分布 | : 空隙構造の変化 |
| ・自由水量、結合水量 | : 水の挙動の変化（中性子とガンマ線の影響の違い） |
| ・XRD | : 水和物組成の変化 |
| ・TG-TDA | : 水和生成物（ポルトランダイト）の変化 |
| ・SEM | : 水和生成物（主にC-S-H）の変化 |
| ・水蒸気吸着等温線 | : 空隙構造の変化 |
| ・NMR | : 水和生成物（C-S-H）のアトミックスケールの変化 |
| ・小角X線 or 中性子線散乱 | : 水和生成物（C-S-H）のナノスケールの変化 |

中性子照射は、ノルウェーエネルギー技術研究所（IFE）のJEEP IIで実施しているので、PIEも同研究所が保有している施設で実施できれば効率的であるが、同研究所はコンクリートを専門としている機関ではないため、実施できるPIEは限定的である。また、全てのPIEの実施は理想的であるが、限られたリソースの中では現実的ではない。したがって、重要度が高いPIEに絞り込むとともに、ノルウェーで実施できる項目を整理し、残りは日本に持ち帰り、国内の施設で実施することも検討する。現時点におけるPIEを以下に示す。

相互作用試験（Interaction test：IT）

- ・セメントペースト：質量変化、寸法変化

表 3. 4. 2-30 相互作用試験の試験条件と試験体配置

Type of test		Interaction test							
Container ID		A1	A2	A3	A4				
Neutron Flux		F1 n/cm ² /s	F1 n/cm ² /s	F1 n/cm ² /s	under consideration				
Temperature		Irradiation atmosphere	Irradiation atmosphere	Irradiation atmosphere	under consideration				
Period (M)		2	2	2	under consideration				
Moisture condition of specimens		dried at 120 dgree	dried at 75 dgree	Sealed	under consideration				
Specimen Arrangement									
		Number of specimens	φ 4x6cm	Cement paste	TC	1	1	1	1
					CP	3	3	3	3
		Number of specimens	φ 1x1cm	Concrete	TC	0	0	0	0
					CCS	0	0	0	0
				White cement paste	CG	0	0	0	0
					WCP	0	0	0	0
				Aggregate	E	0	0	0	0
					F	0	0	0	0
					G	0	0	0	0
H	0				0	0	0		
J	0	0	0		0				
K	0	0	0	0					
Note					Test conditions are still under consideration.				

*: TC=Thermo couple installed, CP=Cement paste, CE=Concrete with E aggregate, CF=Concrete with F aggregate, WCP=White cement paste, E,F,G,H,J,K=E,F,G,H,J,K aggregate

(b) 試験結果

a) 照射試験結果

試験ケース IT-A3 (IFA-760) は、封緘条件で養生したセメントペースト試験体を用いて、中性子とセメントペーストの相互作用について把握するために実施した。今後、実施する試験ケース IT-A2 (IFA-759) では、75°Cで乾燥させ多くの自由水を放出した試験体を用いて、また、試験ケース IT-A1 (IFA-758) では 120°Cで乾燥し、自由水を完全に除去した試験体を用いて、照射試験を行うので、中性子照射が自由水や結合水に及ぼす影響について把握できると考えられる。

試験ケース IT-A3 (IFA-760) について、以下に試験結果を示す。

図 3.4.2-65 に原子炉の出力を示す。約 2.0MW 程度となっている。また、炉は試料の交換等のために、比較的頻繁に ON/OFF を繰り返していることがわかる。図 3.4.2-66 に炉に流入する冷却水と炉から流出する冷却水の温度を示す。冷却水の温度は 52°Cに制御され、炉を冷却することにより 58°C程度まで上昇し、炉外の冷却装置で 52°Cまで冷却され、炉に送り込まれる。図 3.4.2-67 にコンクリート試験体の中心温度の時間変化を示す。コンクリートの中心温度は 76°C程度となっており、計画値 72°Cより若干高くなっている。図 3.4.2-68 にガンマ発熱の時間変化を示す。ガンマ発熱は 0.107W/g となっているが、時間経過に伴って若干上昇傾向が見られる。

図 3.4.2-69 にキャプセル内の圧力変化を示す。キャプセル内の圧力が 1.25bar となると排気バルブを開放して圧力を放出し、1.0bar 程度まで低下すると再びバルブを閉めている状況が見られる。また、バルブ開放間隔は、時間経過に伴って長くなっており、これは時間経過に伴ってガスの発生速度が低下している試験結果と整合している。図 3.4.2-70 にガス流量の変化を示す。

図 3.4.2-71 に高速中性子照射量の時間変化を示す。図 3.4.2-72 にガンマ線照射量の時間変化を示す。中性子照射試験時の高速中性子束は 3.6×10^{12} n/cm²/s、ガンマ線量率は 370kGy/h であった。途中の X 軸と平行な部分は、炉の長期的な停止時期に対応している。図 3.4.2-73 に湿度計測タンクでの計測結果を示す。図 3.4.2-74 は同一位置での絶対湿度の変化を示す。照射終了後に明らかになったが、タンク内に凝縮水がたまっていたので、湿度はほぼ 100%を示している。

図 3.4.2-75 および図 3.4.2-76 に、発生圧力総計の時間変化と照射量に対する変化を示す。図 3.4.2-77 および図 3.4.2-78 に、圧力発生速度の時間変化と照射量に対する変化を示す。図 3.4.2-79 および図 3.4.2-80 に、ガス発生量の時間変化と照射量に対する変化を示す。図 3.4.2-81 および図 3.4.2-82 に、ガス発生速度の時間変化と照射量に対する変化を示す。時間経過に伴って、照射量が増加するので、両方のグラフは同様の形状となっている。時間経過に伴って圧力発生速度およびガス発生速度は低下し、80 日照射後にはほぼ一定の値に収束している。図 3.4.2-83 に、水分放出量の時間変化を示す。時間経過に伴って、水分放出速度が低下している。水蒸気として放出された水分量は 2g 程度であるが、試

験終了後、湿度計測タンク内で 25 g の凝縮水が確認されている。

表 3.4.2-31 に、サンプリングしたガスの組成分析結果を示す。また、図 3.4.2-84 にガス組成の時間変化を示す。水の放射線分解により発生するガスは水素と酸素であり、体積比率は水素：酸素=2：1 となるはずである。図 3.4.2-84 より、水素の体積が酸素のほぼ 2 倍程度となっており、水の放射線分解により発生していると考えられる。また、同時に、窒素が発生している。セメントペースト中には数%の空気が含まれているので、照射の初期の段階では窒素を検出する可能性は否定できないが、70 日間の照射後も依存として窒素を検出しているため、窒素のソースについて検討する必要がある。

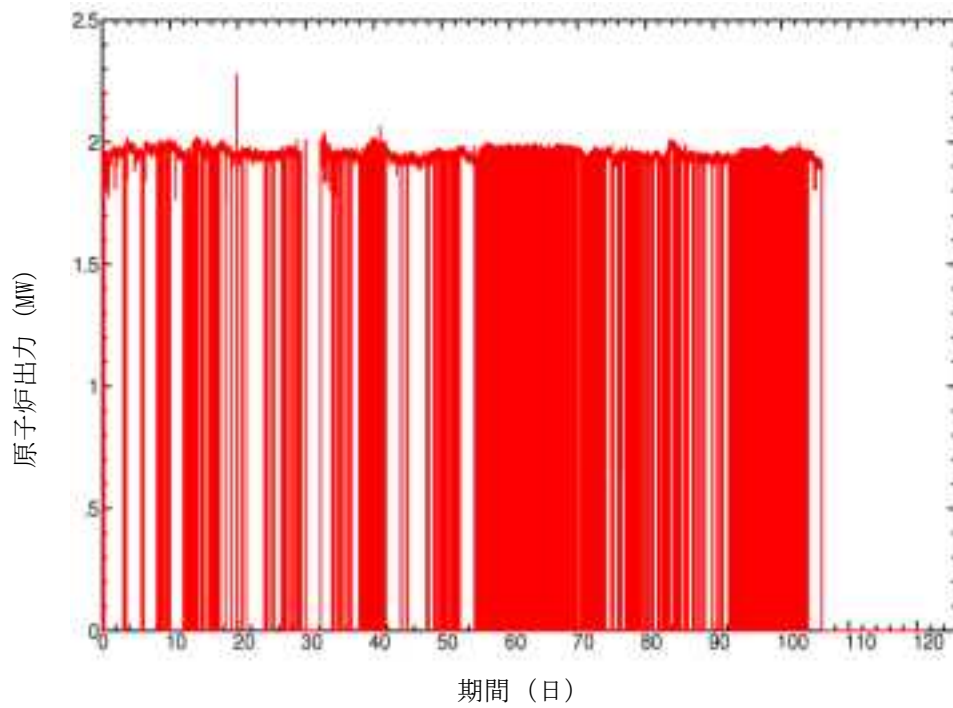


図 3. 4. 2-65 原子炉出力の変化

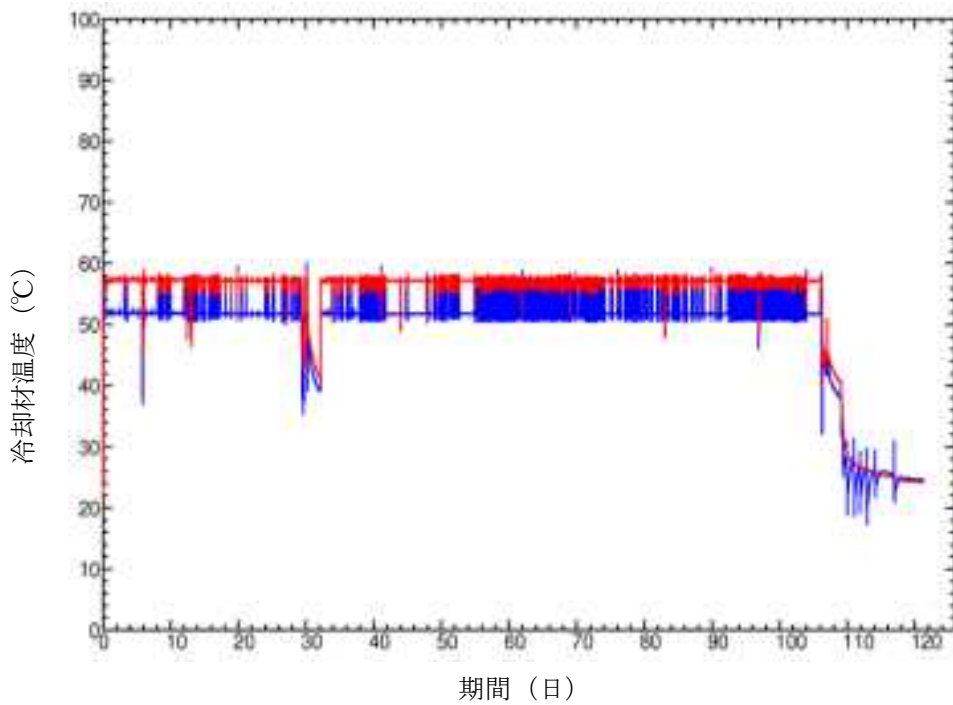


図 3. 4. 2-66 原子炉冷却材の温度変化

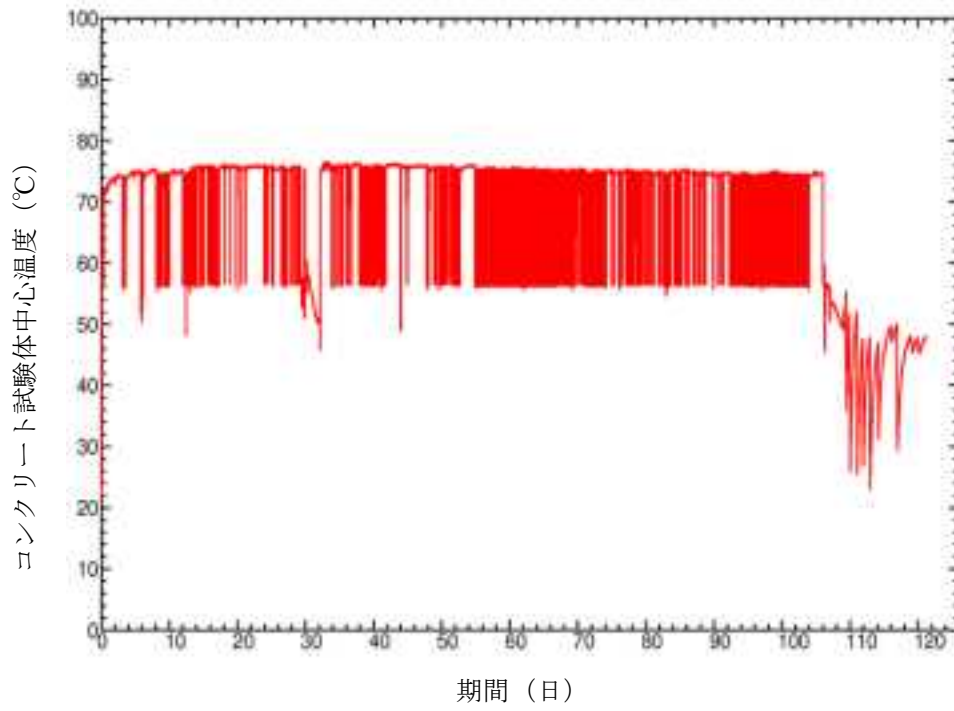


図 3. 4. 2-67 コンクリート試験体の中心温度変化

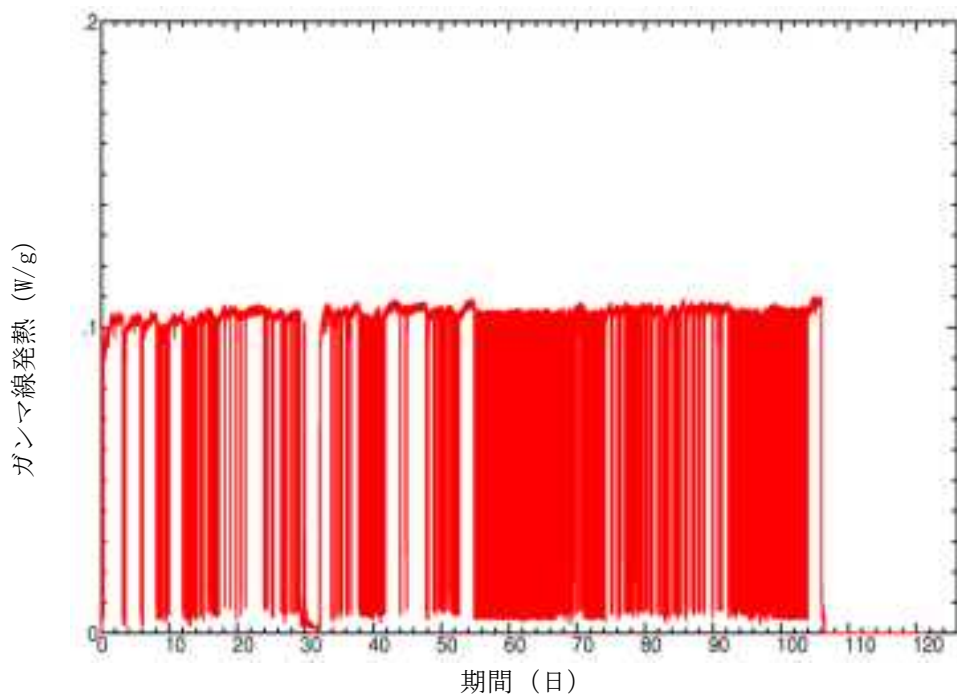


図 3. 4. 2-68 ガンマ線発熱の変化

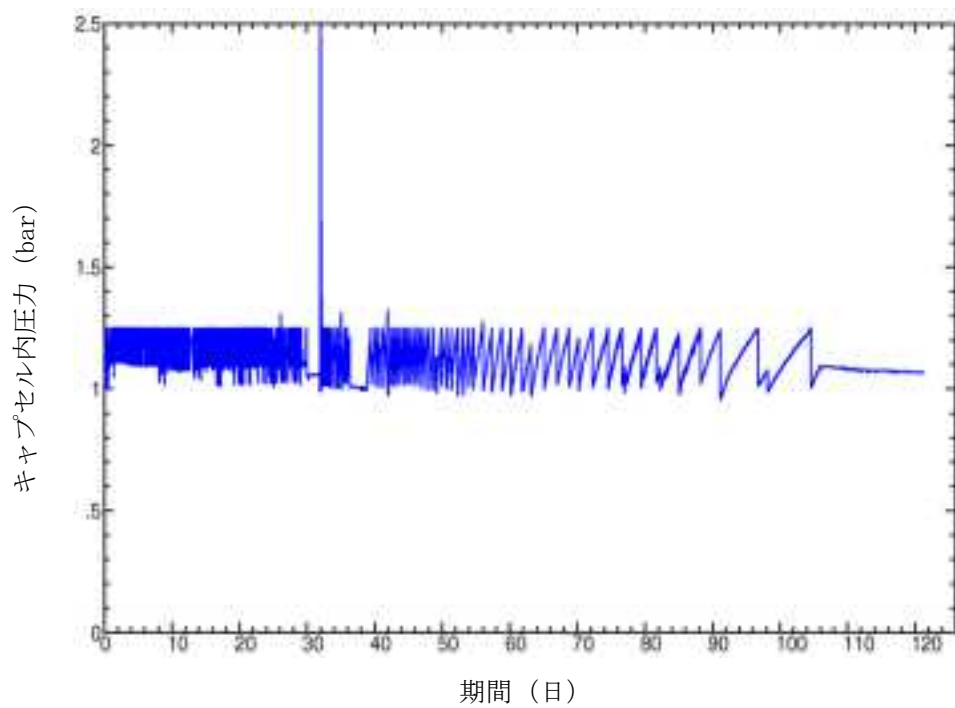


図 3.4.2-69 ガス発生によるキャプセル内の圧力変化

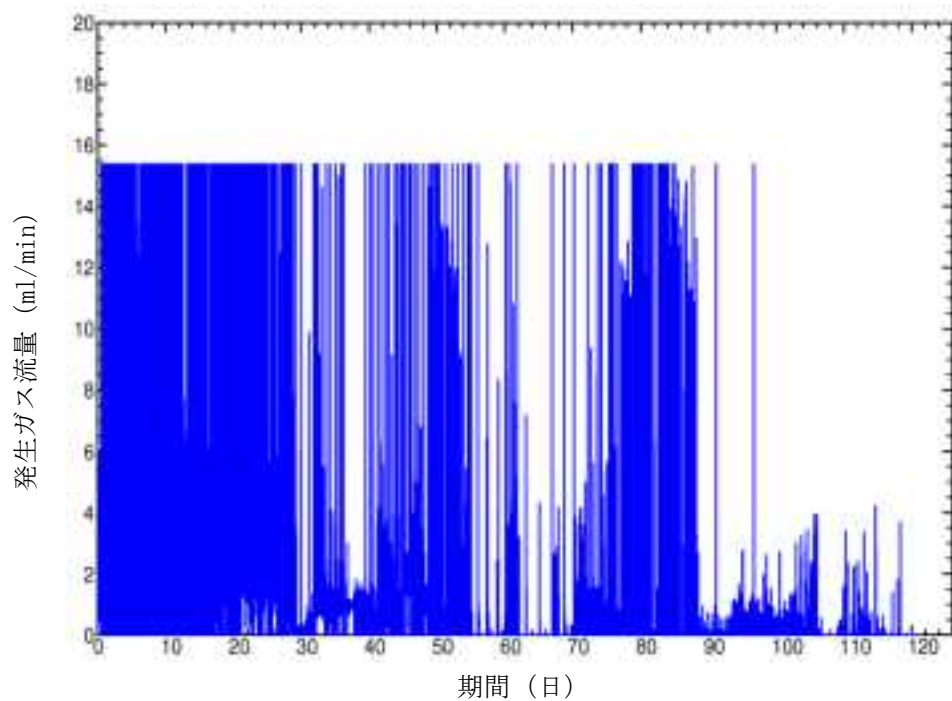


図 3.4.2-70 発生ガス流量の変化

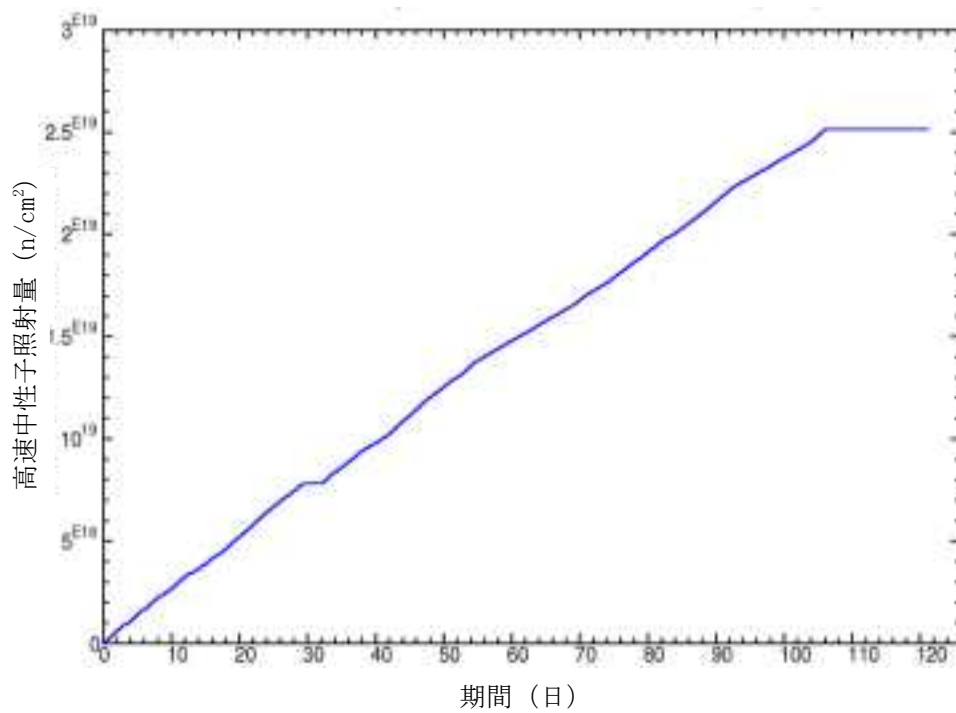


図 3. 4. 2-71 高速中性子照射量の変化

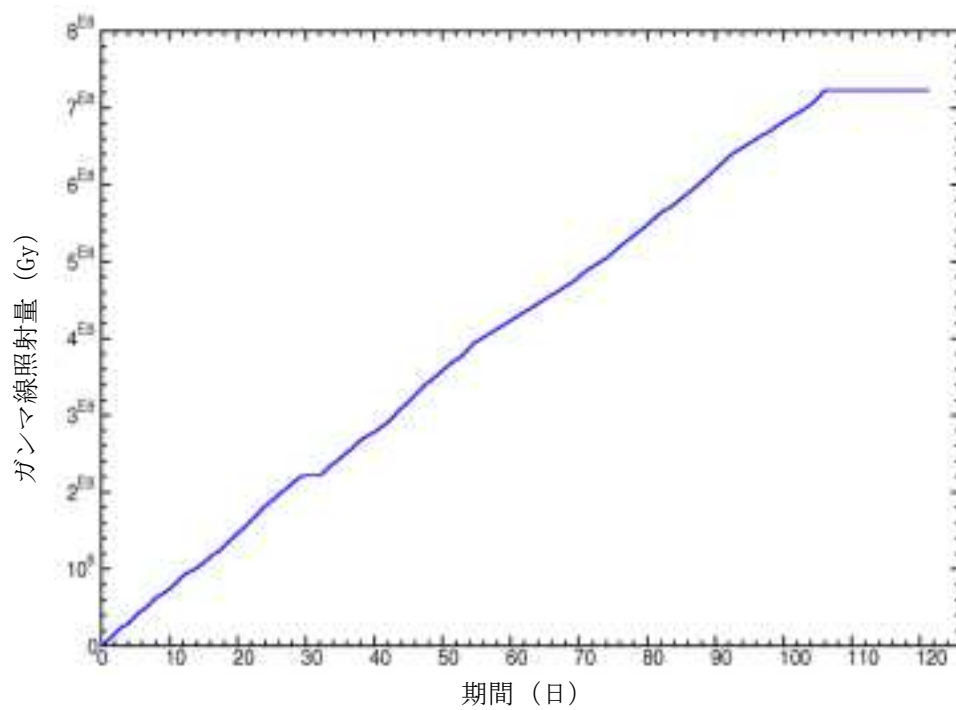


図 3. 4. 2-72 ガンマ線照射量の変化

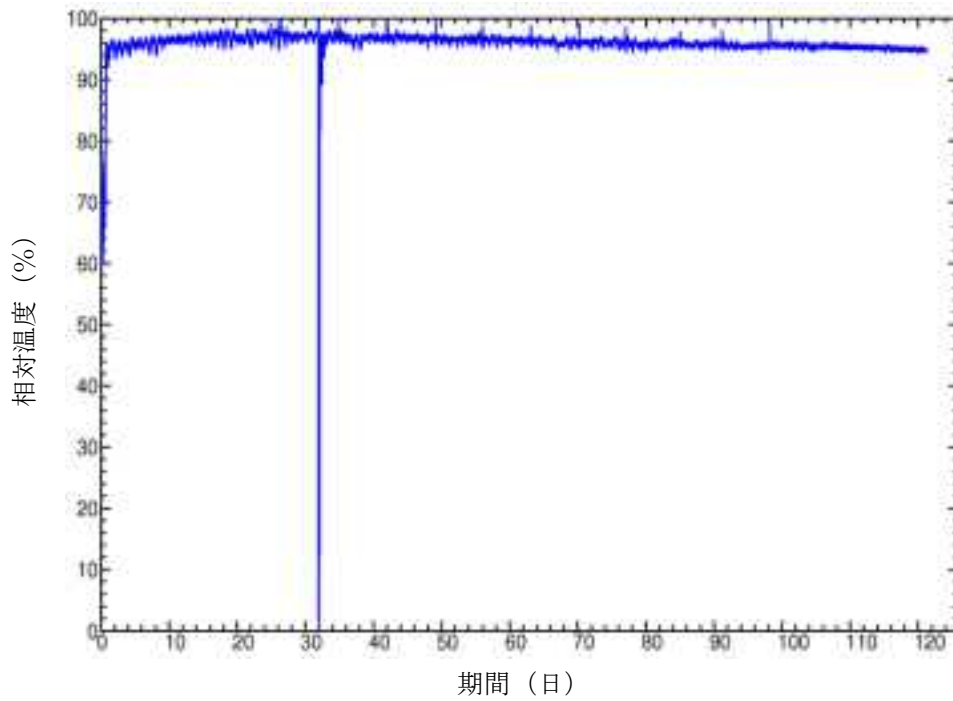


図 3. 4. 2-73 炉外の計測系内相対湿度の変化

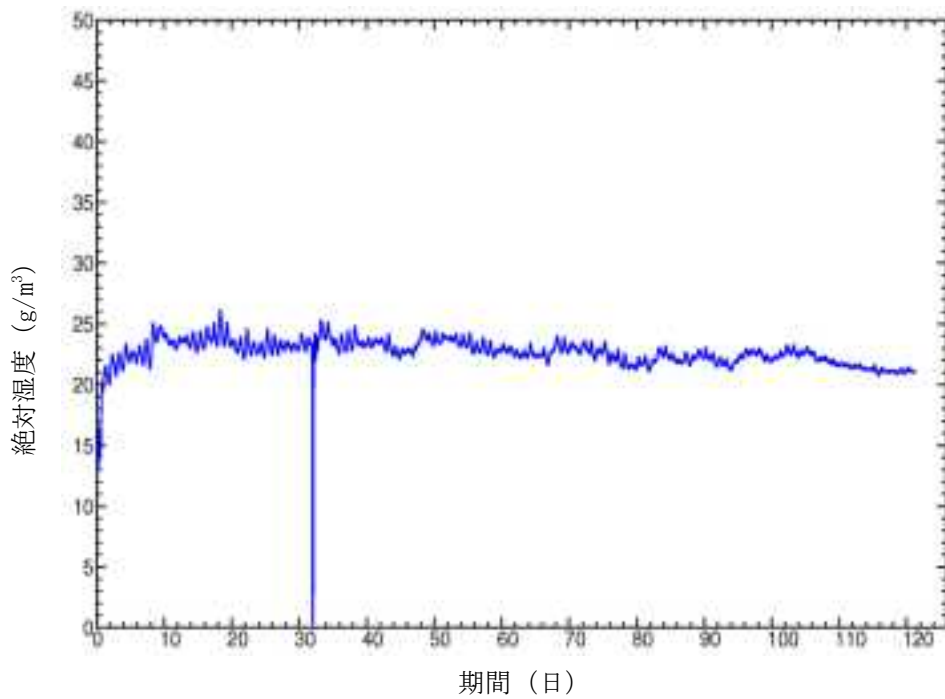


図 3. 4. 2-74 炉外の計測系内絶対湿度の変化

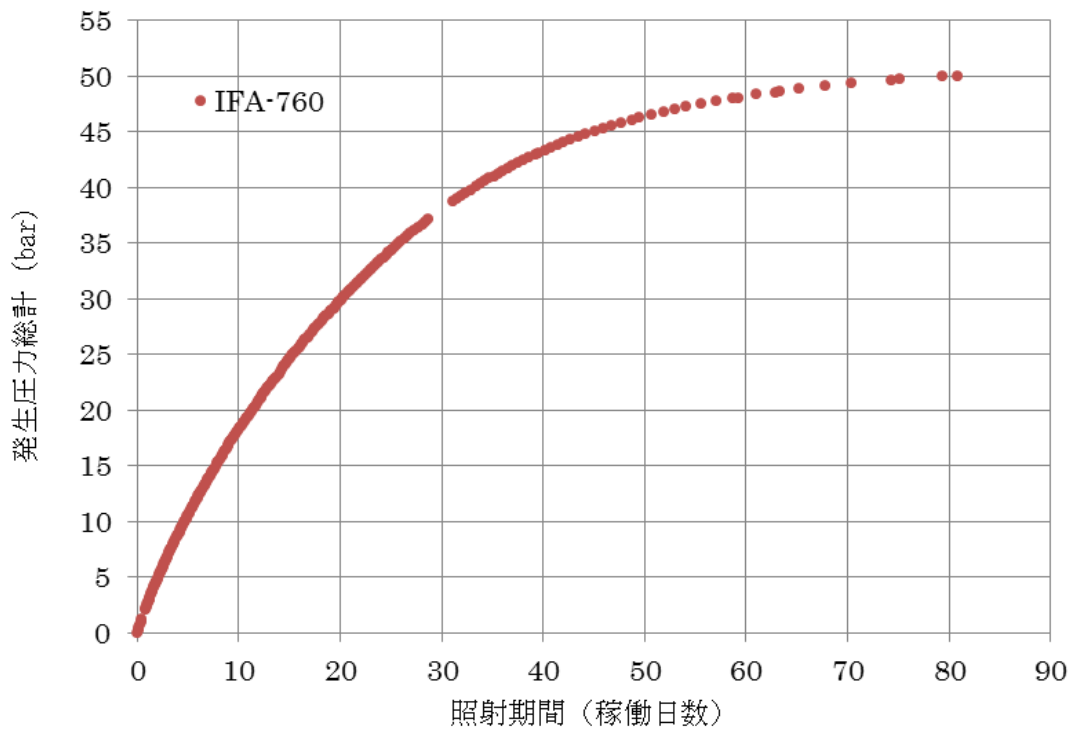


図 3. 4. 2-75 発生圧力総計の時間変化

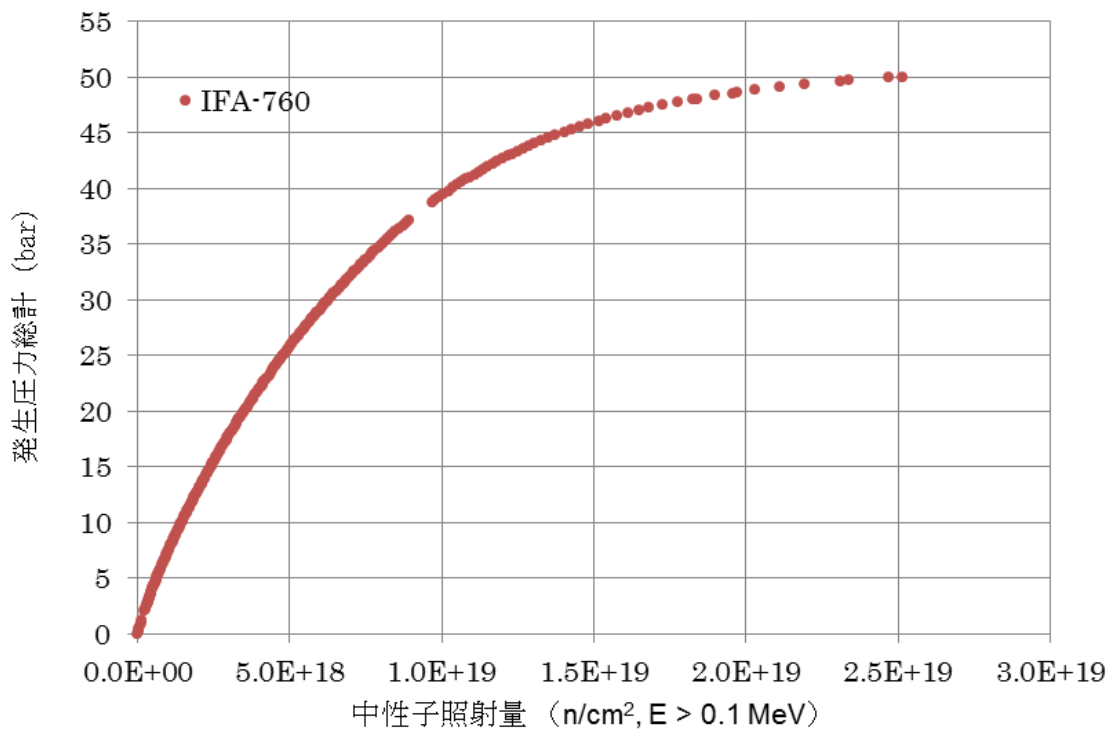


図 3. 4. 2-76 発生圧力総計の照射量に対する変化

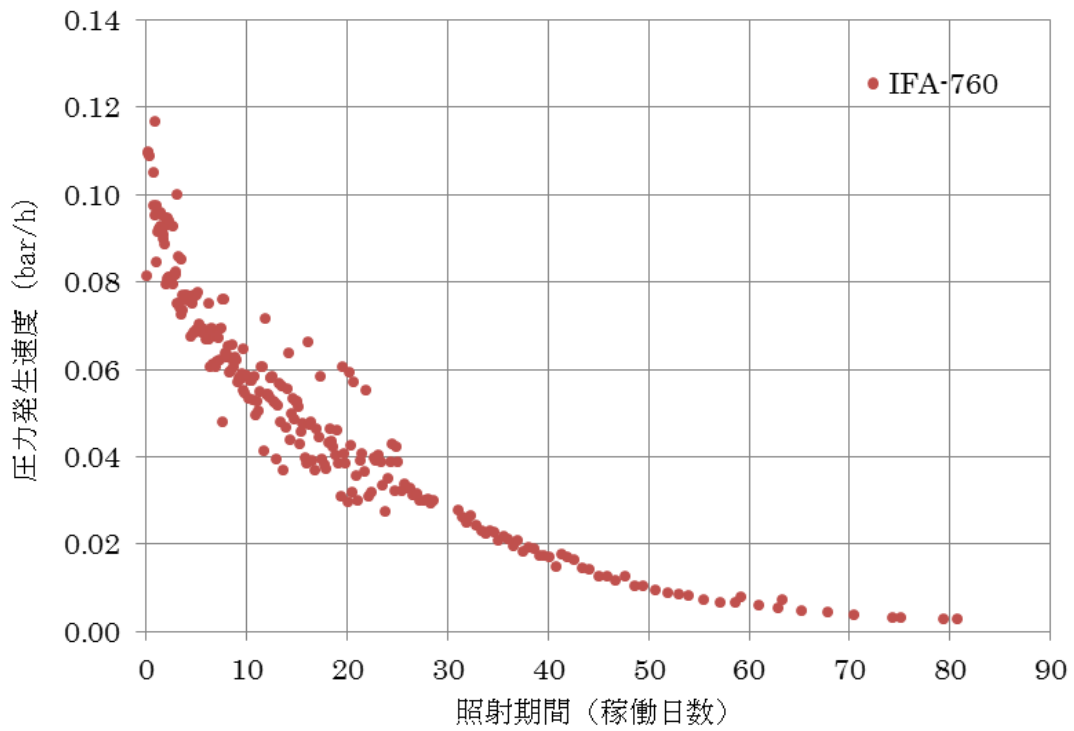


図 3. 4. 2-77 圧力発生速度の時間変化

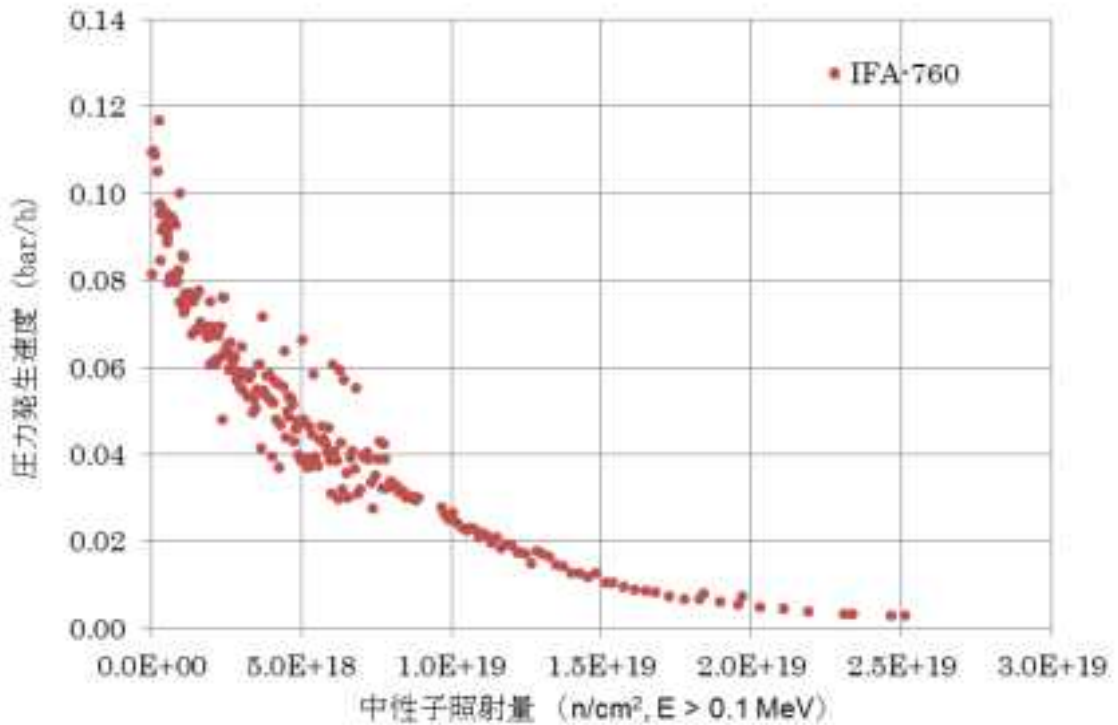


図 3. 4. 2-78 圧力発生速度の照射量に対する変化

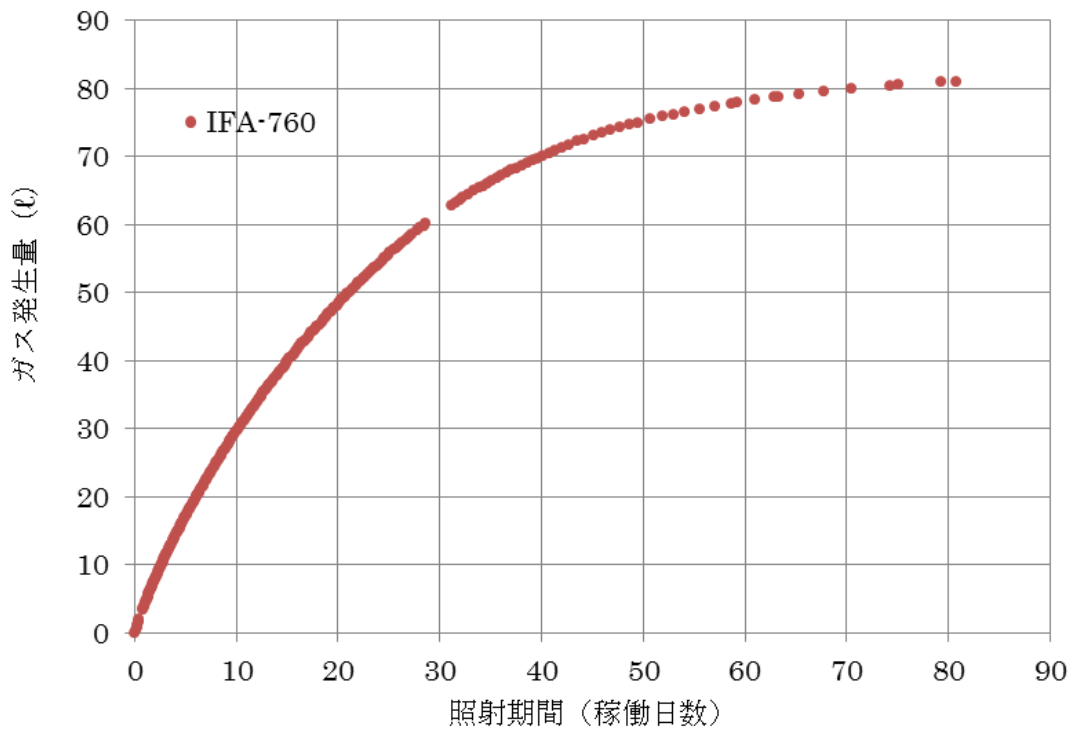


図 3. 4. 2-79 ガス発生量の時間変化 (0°C、1 気圧)

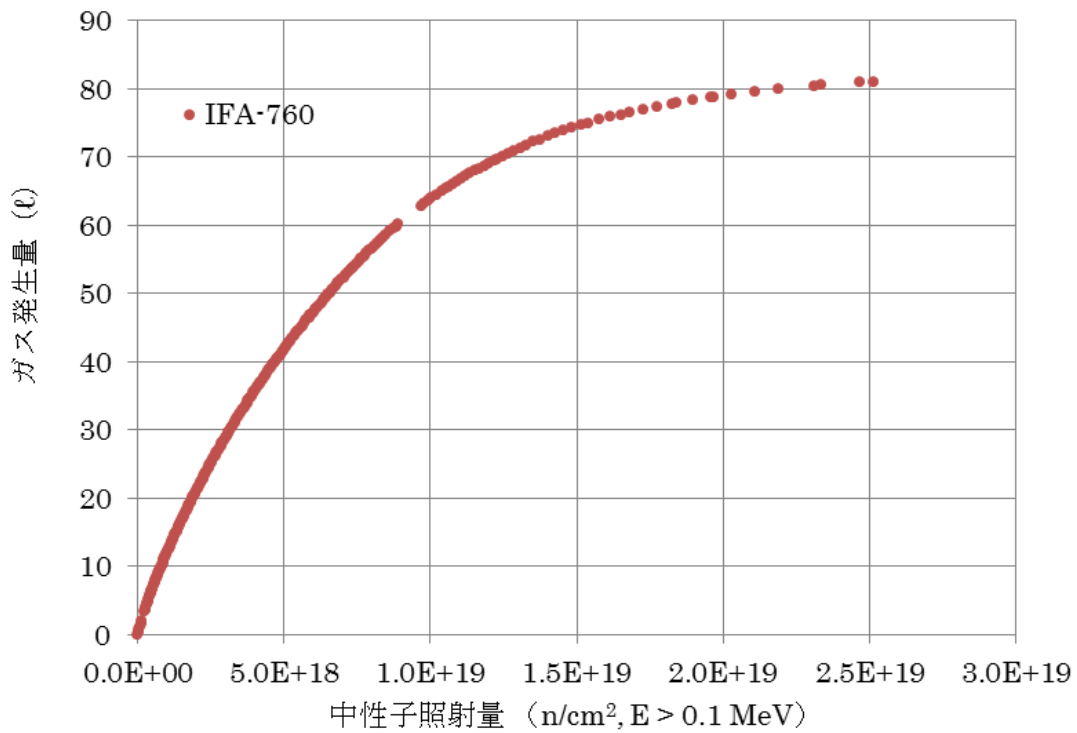


図 3. 4. 2-80 ガス発生量の照射量に対する変化 (0°C、1 気圧)

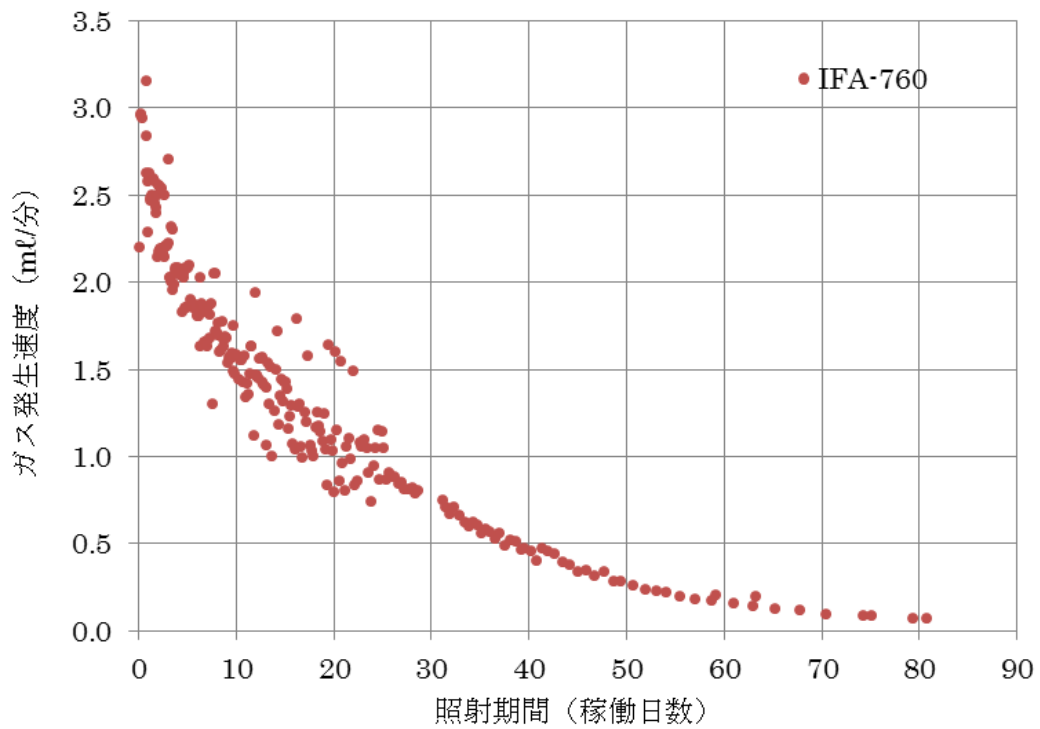


図 3. 4. 2-81 ガス発生速度の時間変化 (0°C、1 気圧)

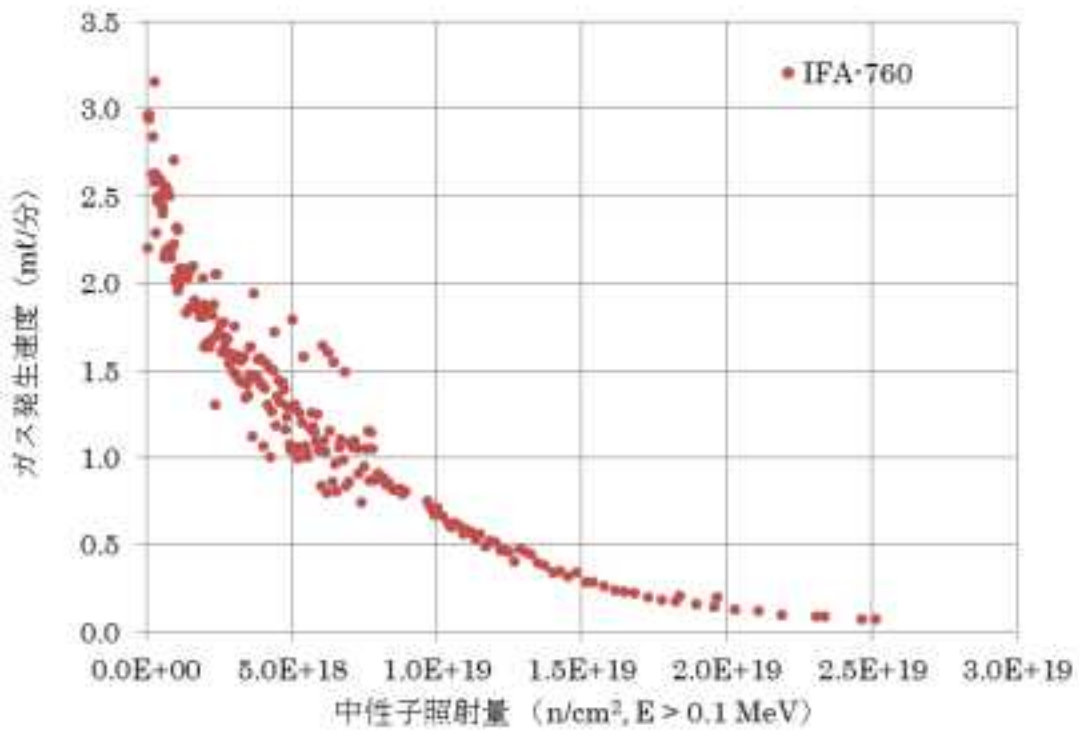


図 3. 4. 2-82 ガス発生速度の照射量に対する変化 (0°C、1 気圧)

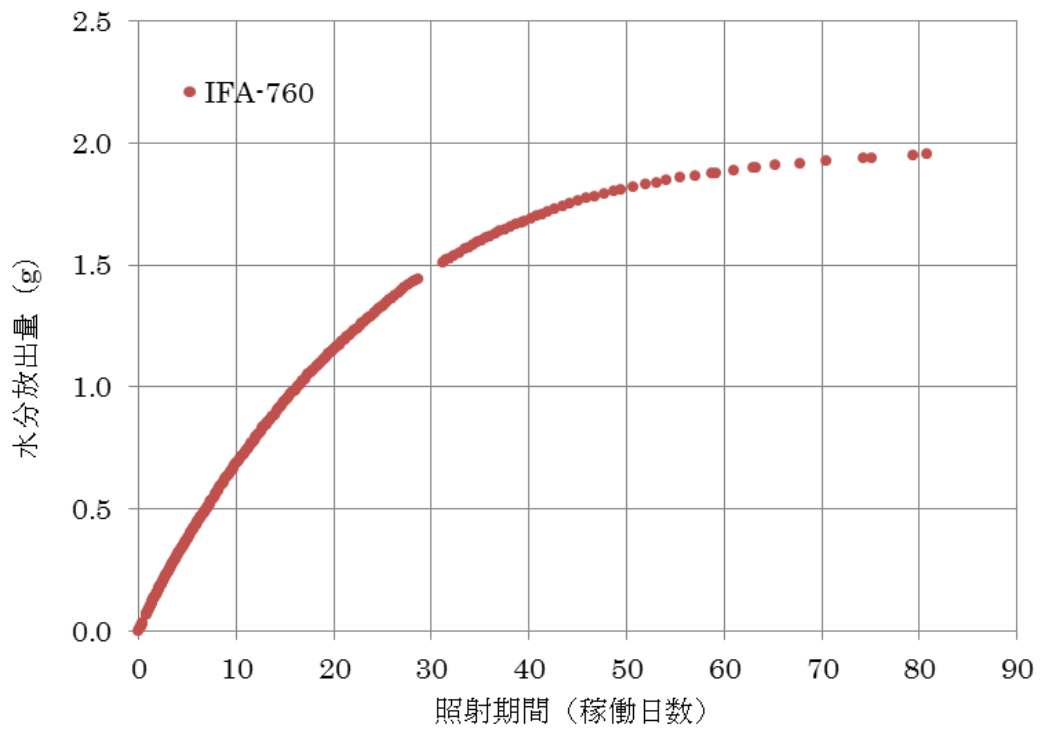


図 3. 4. 2-83 水分放出量の時間変化

表 3. 4. 2-31 発生ガスの組成分析結果(IT-A3 : IFA-760)

	組成 (体積%)					
	水素	酸素	窒素	ヘリウム	一酸化炭素	二酸化炭素
Gas sample No.1 2013-10-01 14:51 22.5FPD	59.1	36.5	4.3	0.0	N/D	0.0
Gas sample No.2 2013-10-10 14:51 27.8FPD	39.9	42.1	10.3	7.5	N/D	0.1
Gas sample No.3 2013-10-17 11:14 32.9FPD	67.1	29.6	3.0	0.2	N/D	0.0
Gas sample No.4 2013-10-24 15:26 39.6FPD	29.7	50.2	20.0	0.1	N/D	0.1
Gas sample No.5 2013-10-31 12:41 45.1FPD	68.3	28.3	3.3	0.1	N/D	N/D
Gas sample No.6 2013-11-07 14:27 49.5FPD	71.3	25.5	3.1	0.1	N/D	0.0
Gas sample No.7 2013-11-14 16:32 54.1FPD	64.0	26.1	9.8	0.0	N/D	0.0
Gas sample No.8 2013-11-21 13:13 59.2FPD	18.0	32.6	49.3	0.0	N/D	0.1
Gas sample No.9 2013-11-29 14:17 65.3FPD	32.7	30.9	36.3	0.0	N/D	0.0
Gas sample No.10 2013-12-05 15:40 70.5FPD	72.8	18.0	9.1	0.0	N/D	0.0

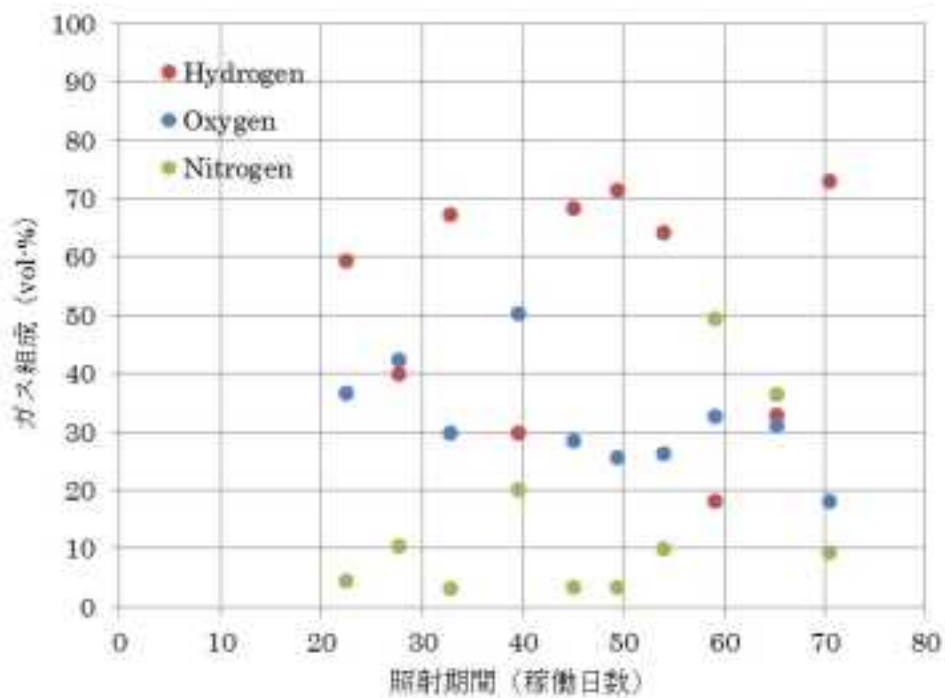


図 3. 4. 2-84 発生ガス組成の時間変化 (IT-A3 : IFA-760)

b) 照射後試験

照射後試験として、試験ケース(IT-A3 : IFA-760)について、照射後の試験体の質量と寸法を計測した。表 3. 4. 2-32 試験結果を示す。

表 3. 4. 2-32 寸法・質量計測結果

試験体 ID	直径(mm)						高さ(mm)				質量 (g)	
	1	2	3	4	5	平均	1	2	3	平均		

c) 中性子の影響検討

水素ガスの発生速度に基づいて、ガンマ線と中性子の影響について検討する。図 3.4.2-85 に平成 22 年度に実施したガンマ線照射試験結果を示す。ガンマ線照射試験では、水素発生速度は時間経過に伴い急速に低下する傾向を示している。中性子照射試験でも同様の傾向が見られる。ここでは、水分条件が同程度のセメントペースト試験体による照射試験結果を用いて、初期水素ガス発生速度に着目して、ガンマ線と中性子の影響について比較する。

ガンマ線照射試験で用いた試験体 D1% は 20℃ で乾燥した試験体であり水分逸散が非常に小さく、60℃ の一定温度で 9.5 k Gy/h の線量率に対して、最大水素ガス発生速度は 90 μ mol/h であった。その際のセメントペースト中の水分量は試験体 (φ5×10cm) 3 体で 272g であった。すなわち、ガンマ線量率 9.5 k Gy/h での水素ガス放出速度は、単位水量当たり 0.33 μ mol/h/g となる。

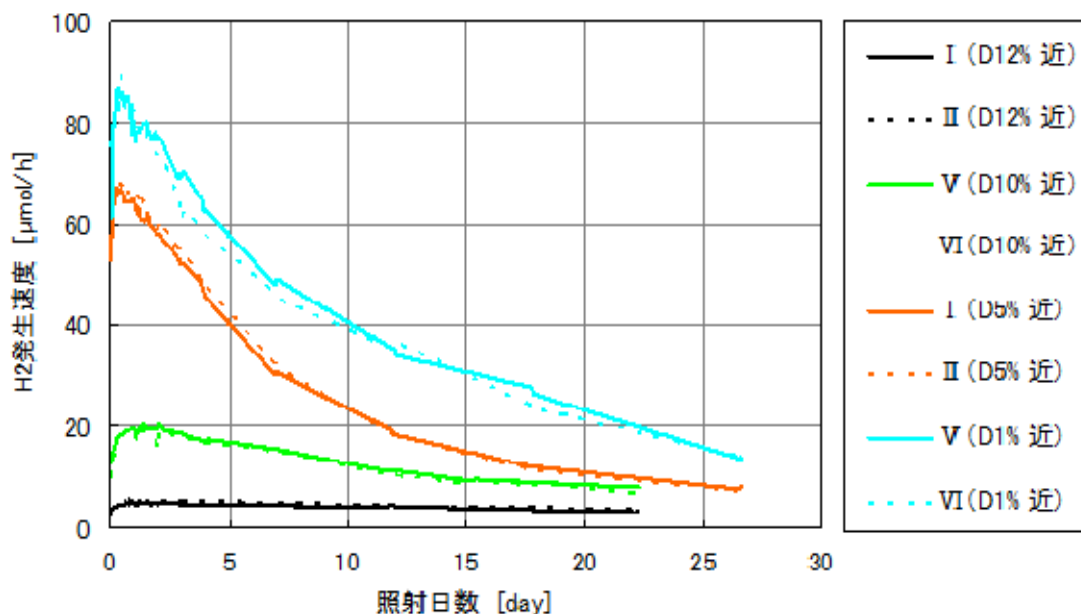


図 3.4.2-85 水素ガス発生速度 (1 列目に設置 : 9.5~9.9kGy/h)
 (「平成 22 年度高経年化対策強化基盤整備事業」(成果報告書 H23.3))

試験体 D1% の水分条件に対応する中性子照射試験は相互作用試験 IT-A3 (IFA-760) で、試験体 (φ4×6cm) は封緘養生となっている。ガンマ線量率 370kGy/h、照射温度 76℃ の条件では、初期ガス発生速度は 3.0ml/分 (0℃、1 気圧) (図 3.4.2-81 参照) であり、水素含有率を 59% とすると、106ml/h (0℃、1 気圧) となり、さらに 1mol=22.4 リットルより、4.7mmol/h となる。その際のセメントペースト試験体中の水分量は 184g であった。照射温度の差は小さいので、温度の影響を無視すると、ガンマ線量率 370kGy/h での水素ガス発生速度は、単位水量当たり 28 μ mol/h/g となる。以上の比較を表 3.4.2-33 示す。

すなわち、ガンマ線の速度効果を見出し、ガンマ線照射試験における単位水量当たりの初期水素発生速度を用いて、中性子照射の影響を評価する。9.5kGy/h の線量率で0.33 $\mu\text{mol/h/g}$ の水素が発生すると仮定すると、370kGy/h では、13 $\mu\text{mol/h/g}$ の水素が発生することになる。一方、中性子照射試験では、照射当初 26 $\mu\text{mol/h/g}$ の水素が発生しているため、13 $\mu\text{mol/h/g}$ はガンマ線の影響であり、残りの 13 $\mu\text{mol/h/g}$ は中性子の影響であると見られる。以上の比較を図 3.4.2-86 に示す。

表 3.4.2-33 初期水素ガス発生速度に関する検討

試験情報	中性子照射試験	ガンマ線照射試験
	セメントペースト	セメントペースト
	IT-A3 (IFA-760) (封緘養生)	D1%試験体 (20°C乾燥:2010年)
ガンマ線量率(kGy/h)	370	9.5
照射温度(°C)	76	60
水素ガス放出速度	4.7 mmol/h	90 $\mu\text{mol/h}$
水分量(g)	184	272
水素ガス放出速度 (単位水量当り)	26 $\mu\text{mol/h/g}$	0.33 $\mu\text{mol/h/g}$

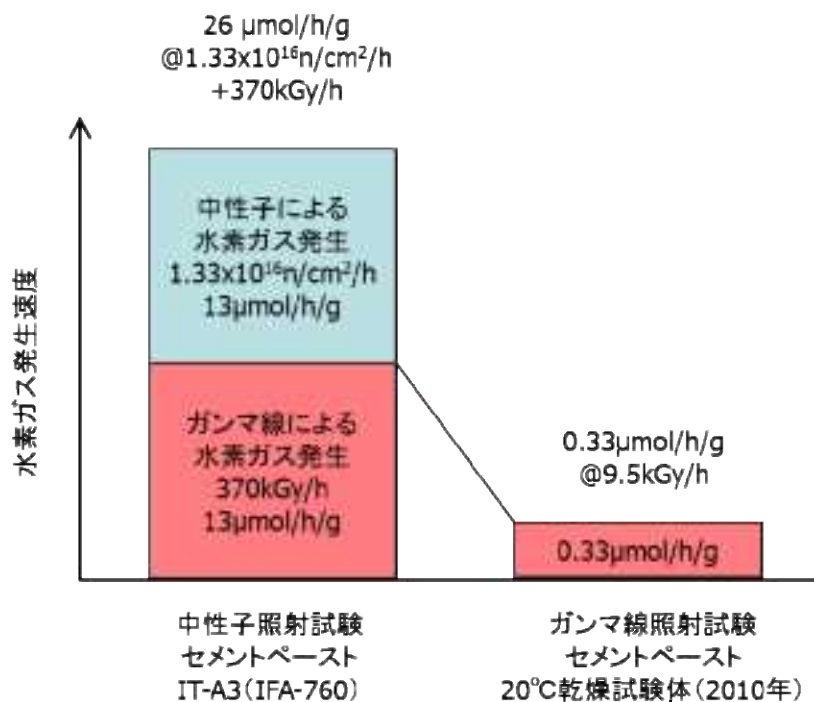


図 3.4.2-86 中性子の影響とガンマ線の影響

3) 物理特性試験 (Physical Property Test :PPT)

(a) 試験の概要

a) 中性子照射試験

物理特性試験では、中性子照射量をパラメータとして中性子照射がコンクリート物理特性に及ぼす影響を把握するために、設定値 ($6 \times 10^{19} \text{n/cm}^2$) をカバーする照射試験を行っている。

試験体については、熱影響ではなく放射線の影響を把握できるように、長期間の養生により十分に水和反応が進んでいるコンクリート試験体を用いることとする。

JEEP II で照射試験を行う場合、キャプセル内で試験体を設置できる長さは 60cm となっているので、 $\phi 4 \times 6 \text{cm}$ の試験体を用いると、キャプセルには 10 体の試験体を収納することが可能となる。2 種類の骨材 (硬質砂岩砂利 E、硬質砂岩砕石 F) によるコンクリート試験体を中央に 4 体ずつ、上部 1 体を温度計測用の試験体、下部 1 体分のスペースに骨材とセメントペーストのサンプルを設置した。下部 1 体分は、さらに 6 層に分割し、1 層ごとに $\phi 1 \times 1 \text{cm}$ のホワイトセメントペースト試験体 1 体と 6 種類の $\phi 1 \times 1 \text{cm}$ の骨材試験体を 1 体ずつ配置した。用いた骨材の種類を表 3.4.2-34 に示す。

表 3.4.2-35 に物理特性試験における試験条件と試験体配置の一覧を示す。

表 3.4.2-34 選定した骨材リスト

岩種	種類	試料名	産地
硬質砂岩	砂利	E	静岡県御前崎市
	砕石	F	愛知県春日井市
		G	東京都青梅市
		H	静岡県掛川市
		J	埼玉県秩父市
石灰岩		K	大分県津久見市

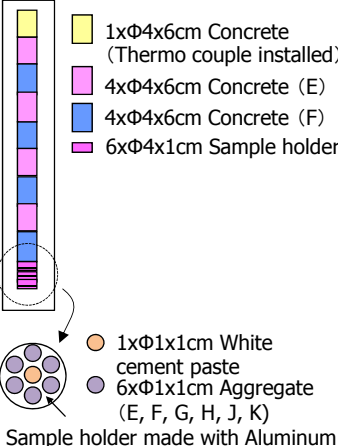
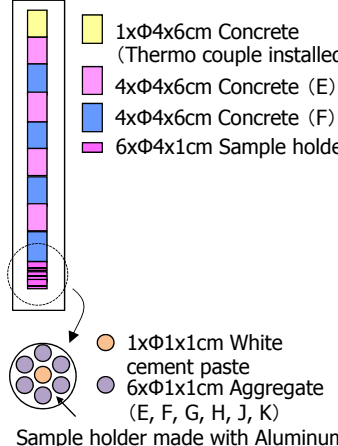
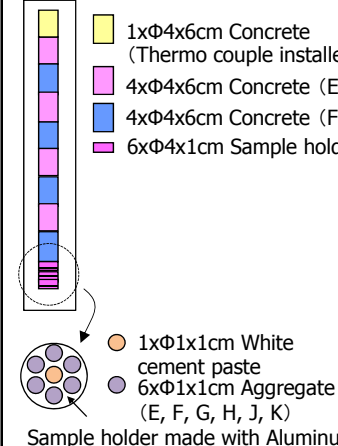
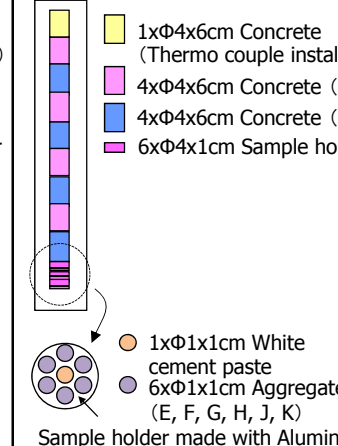
加熱試験では、照射試験時のコンクリート試験体内部の温度分布を模擬するために、試験体にヒーターを埋設して、中心部の温度が高い放物線状の分布を実現するために検討を行ったが、埋設するヒーター (金属線) がコンクリート強度に影響を及ぼすことが分かった。そこで、加熱試験では、断面内部の温度を一定とし、試験体内の最高温度と平均温度の 2 水準の加熱温度を設定した。4 つの容器で温度 2 水準の試験を行う必要があるため、試験体の種類に応じて以下のように配置することとした。表 3.4.2-36 および表 3.4.2-37 に非照射・加熱試験における試験条件と試験体配置の一覧を示す。

コンクリート：照射中の温度勾配の影響を把握するために、最高温度と平均温度の 2 水準を設定する。ただし、平均温度は 3 ヶ月と 24 ヶ月のみとする。

ホワイトセメントペースト、骨材：試験体が小さいため照射中に温度勾配が発生しないため、平均温度の1水準とする。

上記に加え、照射期間中の20℃封緘養生試験体の特性を把握するために、非照射・非加熱試験（CT：Control test）を照射期間中の一定時期に実施する。表3.4.2-38の非照射・非加熱試験の試験条件と試験体配置の一覧を示す。

表 3.4.2-35 物理特性試験 (Physical property test :PPT) の試験条件と試験体配置

Type of test		Physical property test					
Container ID		B	C	D	E		
Fluence		0.75x10 ¹⁹ n/cm ²	1.5x10 ¹⁹ n/cm ²	3.0x10 ¹⁹ n/cm ²	6.0x10 ¹⁹ n/cm ²		
Temperature		Irradiation atmosphere	Irradiation atmosphere	Irradiation atmosphere	Irradiation atmosphere		
Period (M)		3	6	12	24		
Moisture condition of specimens		Sealed	Sealed	Sealed	Sealed		
Specimen Arrangement		 <p>1xΦ4x6cm Concrete (Thermo couple installed) 4xΦ4x6cm Concrete (E) 4xΦ4x6cm Concrete (F) 6xΦ4x1cm Sample holder</p> <p>1xΦ1x1cm White cement paste 6xΦ1x1cm Aggregate (E, F, G, H, J, K) Sample holder made with Aluminum</p>	 <p>1xΦ4x6cm Concrete (Thermo couple installed) 4xΦ4x6cm Concrete (E) 4xΦ4x6cm Concrete (F) 6xΦ4x1cm Sample holder</p> <p>1xΦ1x1cm White cement paste 6xΦ1x1cm Aggregate (E, F, G, H, J, K) Sample holder made with Aluminum</p>	 <p>1xΦ4x6cm Concrete (Thermo couple installed) 4xΦ4x6cm Concrete (E) 4xΦ4x6cm Concrete (F) 6xΦ4x1cm Sample holder</p> <p>1xΦ1x1cm White cement paste 6xΦ1x1cm Aggregate (E, F, G, H, J, K) Sample holder made with Aluminum</p>	 <p>1xΦ4x6cm Concrete (Thermo couple installed) 4xΦ4x6cm Concrete (E) 4xΦ4x6cm Concrete (F) 6xΦ4x1cm Sample holder</p> <p>1xΦ1x1cm White cement paste 6xΦ1x1cm Aggregate (E, F, G, H, J, K) Sample holder made with Aluminum</p>		
		Number of specimens	φ4x6cm	Cement paste	TC	0	0
CP	0				0	0	0
Concrete	TC			1	1	1	1
	CE			4	4	4	4
φ1x1cm	Aggregate		CF	4	4	4	4
			WCP	6	6	6	6
			E	6	6	6	6
			F	6	6	6	6
			G	6	6	6	6
			H	6	6	6	6
J	6	6	6	6			
K	6	6	6	6			
Note							

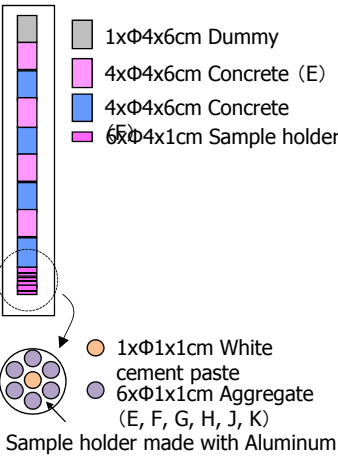
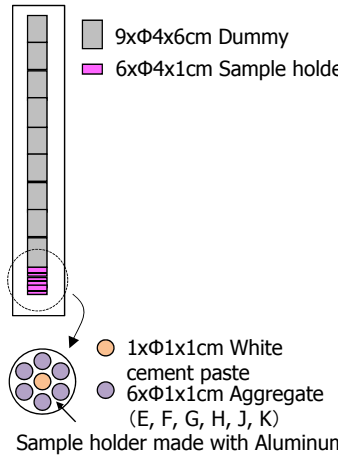
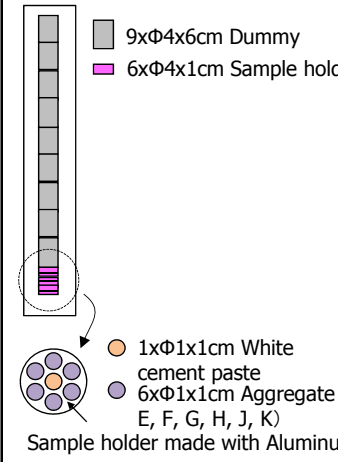
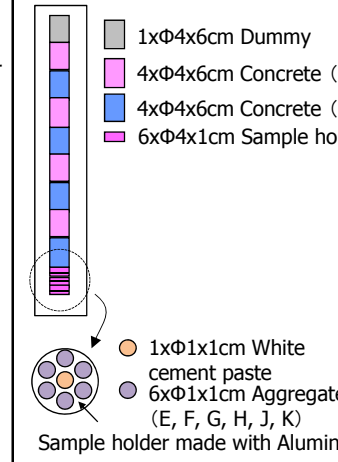
*: TC=Thermo couple installed, CP=Cement paste, CE=Concrete with E aggregate, CF=Concrete with F aggregate, WCP=White cement paste, E,F,G,H,J,K=E,F,G,H,J,K aggregate

表 3.4.2-36 非照射・加熱試験 (Heating test : HT) の試験条件と試験体配置

Type of test		Heating test																																																																	
Container ID		H1		H2																																																															
Fluence		-	-	-	-																																																														
Temperature		Maximum	Maximum	Maximum	Maximum																																																														
Period (M)		3	6	12	24																																																														
Moisture condition of specimens		Sealed	Sealed	Sealed	Sealed																																																														
Specimen Arrangement		<p>1xΦ4x6cm Dummy 4xΦ4x6cm Concrete (E) 4xΦ4x6cm Concrete (F) 6xΦ4x1cm Sample holder</p> <p>Sample holder without specimens</p>	<p>1xΦ4x6cm Dummy 4xΦ4x6cm Concrete (E) 4xΦ4x6cm Concrete (F) 6xΦ4x1cm Sample holder</p> <p>Sample holder without specimens</p>	<p>1xΦ4x6cm Dummy 4xΦ4x6cm Concrete (E) 4xΦ4x6cm Concrete (F) 6xΦ4x1cm Sample holder</p> <p>Sample holder without specimens</p>	<p>1xΦ4x6cm Dummy 4xΦ4x6cm Concrete (E) 4xΦ4x6cm Concrete (F) 6xΦ4x1cm Sample holder</p> <p>Sample holder without specimens</p>																																																														
		<table border="1"> <thead> <tr> <th rowspan="10">Number of specimens</th> <th rowspan="4">φ 4x6cm</th> <th rowspan="2">Cement paste</th> <th>TC</th> <td>0</td> <td>0</td> <td>0</td> <td>0</td> </tr> <tr> <th>CP</th> <td>0</td> <td>0</td> <td>0</td> <td>0</td> </tr> <tr> <th rowspan="2">Concrete</th> <th>TC</th> <td>0</td> <td>0</td> <td>0</td> <td>0</td> </tr> <tr> <th>CE</th> <td>4</td> <td>4</td> <td>4</td> <td>4</td> </tr> <tr> <th rowspan="6">φ 1x1cm</th> <th rowspan="2">White cement paste</th> <th>CF</th> <td>4</td> <td>4</td> <td>4</td> <td>4</td> </tr> <tr> <th>WCP</th> <td>0</td> <td>0</td> <td>0</td> <td>0</td> </tr> <tr> <th rowspan="4">Aggregate</th> <th>E</th> <td>0</td> <td>0</td> <td>0</td> <td>0</td> </tr> <tr> <th>F</th> <td>0</td> <td>0</td> <td>0</td> <td>0</td> </tr> <tr> <th>G</th> <td>0</td> <td>0</td> <td>0</td> <td>0</td> </tr> <tr> <th>H</th> <td>0</td> <td>0</td> <td>0</td> <td>0</td> </tr> <tr> <th>J</th> <td>0</td> <td>0</td> <td>0</td> <td>0</td> </tr> <tr> <th>K</th> <td>0</td> <td>0</td> <td>0</td> <td>0</td> </tr> </thead> </table>	Number of specimens	φ 4x6cm	Cement paste	TC	0	0	0	0	CP	0	0	0	0	Concrete	TC	0	0	0	0	CE	4	4	4	4	φ 1x1cm	White cement paste	CF	4	4	4	4	WCP	0	0	0	0	Aggregate	E	0	0	0	0	F	0	0	0	0	G	0	0	0	0	H	0	0	0	0	J	0	0	0	0	K	0	0
Number of specimens	φ 4x6cm	Cement paste				TC	0	0	0	0																																																									
					CP	0	0	0	0																																																										
		Concrete			TC	0	0	0	0																																																										
				CE	4	4	4	4																																																											
	φ 1x1cm	White cement paste		CF	4	4	4	4																																																											
				WCP	0	0	0	0																																																											
		Aggregate		E	0	0	0	0																																																											
				F	0	0	0	0																																																											
				G	0	0	0	0																																																											
			H	0	0	0	0																																																												
J	0	0	0	0																																																															
K	0	0	0	0																																																															
Note																																																																			

*: TC=Thermo couple installed, CP=Cement paste, CE=Concrete with E aggregate, CF=Concrete with F aggregate, WCP=White cement paste, E,F,G,H,J,K=E,F,G,H,J,K aggregate

表 3.4.2-37 非照射・加熱試験 (Heating test : HT) の試験条件と試験体配置

Type of test				Heating test																																																																	
Container ID				H3		H4																																																															
Fluence				-		-																																																															
Temperature				Average		Average																																																															
Period (M)				3		6																																																															
Moisture condition of specimens				Sealed		Sealed																																																															
Specimen Arrangement																																																																					
				<p>Number of specimens</p> <table border="1"> <thead> <tr> <th rowspan="2">φ 4x6cm</th> <th rowspan="2">Cement paste</th> <th>TC</th> <td>0</td> <td>0</td> <td>0</td> <td>0</td> </tr> <tr> <th>CP</th> <td>0</td> <td>0</td> <td>0</td> <td>0</td> </tr> <tr> <th rowspan="2">Concrete</th> <th>TC</th> <td>0</td> <td>0</td> <td>0</td> <td>0</td> </tr> <tr> <th>CE</th> <td>4</td> <td>0</td> <td>0</td> <td>4</td> </tr> <tr> <th>CF</th> <td>4</td> <td>0</td> <td>0</td> <td>4</td> </tr> <tr> <th rowspan="7">φ 1x1cm</th> <th>White cement paste</th> <th>WCP</th> <td>6</td> <td>6</td> <td>6</td> <td>6</td> </tr> <tr> <th rowspan="6">Aggregate</th> <th>E</th> <td>6</td> <td>6</td> <td>6</td> <td>6</td> </tr> <tr> <th>F</th> <td>6</td> <td>6</td> <td>6</td> <td>6</td> </tr> <tr> <th>G</th> <td>6</td> <td>6</td> <td>6</td> <td>6</td> </tr> <tr> <th>H</th> <td>6</td> <td>6</td> <td>6</td> <td>6</td> </tr> <tr> <th>J</th> <td>6</td> <td>6</td> <td>6</td> <td>6</td> </tr> <tr> <th>K</th> <td>6</td> <td>6</td> <td>6</td> <td>6</td> </tr> </thead></table>				φ 4x6cm	Cement paste	TC	0	0	0	0	CP	0	0	0	0	Concrete	TC	0	0	0	0	CE	4	0	0	4	CF	4	0	0	4	φ 1x1cm	White cement paste	WCP	6	6	6	6	Aggregate	E	6	6	6	6	F	6	6	6	6	G	6	6	6	6	H	6	6	6	6	J	6	6	6	6	K
φ 4x6cm	Cement paste	TC	0	0	0	0																																																															
		CP	0	0	0	0																																																															
Concrete	TC	0	0	0	0																																																																
	CE	4	0	0	4																																																																
CF	4	0	0	4																																																																	
φ 1x1cm	White cement paste	WCP	6	6	6	6																																																															
	Aggregate	E	6	6	6	6																																																															
		F	6	6	6	6																																																															
		G	6	6	6	6																																																															
		H	6	6	6	6																																																															
		J	6	6	6	6																																																															
		K	6	6	6	6																																																															
Note																																																																					

*: TC=Thermo couple installed, CP=Cement paste, CE=Concrete with E aggregate, CF=Concrete with F aggregate, WCP=White cement paste, E,F,G,H,J,K=E,F,G,H,J,K aggregate

表 3. 4. 2-38 非照射・非加熱試験 (Control test : CT) の試験条件と試験体配置

Type of test		Control test				
ID		C1	C2	C3		
Fluence		-	-	-		
Temperature		20 dgree	20 dgree	20 dgree		
Period (M)		7	15	29		
Moisture condition of specimens		Sealed	Sealed	Sealed		
Specimen Arrangement						
		<p> 3xΦ4x6cm Concrete (E) 3xΦ4x6cm Concrete (F) </p>	<p> 3xΦ4x6cm Concrete (E) 3xΦ4x6cm Concrete (F) </p>	<p> 3xΦ4x6cm Concrete (E) 3xΦ4x6cm Concrete (F) </p>		
Number of specimens	φ 4x6cm	Cement paste	TC	0	0	0
			CP	0	0	0
		Concrete	TC	0	0	0
	CE		3	3	3	
	CF		3	3	3	
	φ 1x1cm	White cement paste	WCP	0	0	0
		Aggregate	E	0	0	0
			F	0	0	0
			G	0	0	0
			H	0	0	0
J			0	0	0	
K			0	0	0	
Note		without container	without container	without container		

*: TC=Thermo couple installed, CP=Cement paste, CE=Concrete with E aggregate, CF=Concrete with F aggregate, WCP=White cement paste, E,F,G,H,J,K=E,F,G,H,J,K

b) 照射後試験

中性子照射による影響を把握するために、照射後試験（PIE：Post Irradiation Examination）を行う。なお、中性子照射によりサンプルは放射化するので、放射線による被曝を低減するために、約2か月間放置し放射能レベルを低減させる。

中性子がコンクリートの物理特性に及ぼす影響を把握するためには、下記のPIEを実施することが望ましい。

■コンクリート

- ・質量変化、寸法変化 : 密度および体積の変化
- ・圧縮強度、ヤング係数 : 機械的特性の変化
- ・細孔径分布 : 空隙構造の変化
- ・自由水量、結合水量 : 水の挙動の変化（中性子とガンマ線の影響の違い）
- ・XRD : 水和物組成の変化
- ・TG-TDA : 水和生成物（ポルトランダイト*2）の変化
- ・SEM : 水和生成物（主にC-S-H*1）の変化
- ・水蒸気吸着等温線 : 空隙構造の変化

*1：セメントペーストでもっとも多くの体積を占める水和生成物。比表面積も大きく、強度を保持する主成分と考えられている。

*2：C-S-Hの次に体積を占める水和生成物。結晶質構造。

■セメントペースト

- ・質量変化、寸法変化 : 密度および体積の変化
- ・強度 : 機械的特性の変化
- ・細孔径分布 : 空隙構造の変化
- ・自由水量、結合水量 : 水の挙動の変化（中性子とガンマ線の影響の違い）
- ・XRD : 水和物組成の変化
- ・TG-TDA : 水和生成物（ポルトランダイト）の変化
- ・SEM : 水和生成物（主にC-S-H）の変化
- ・水蒸気吸着等温線 : 空隙構造の変化
- ・NMR : 水和生成物（C-S-H）のアトミックスケールの変化
- ・小角X線 or 中性子線散乱 : 水和生成物（C-S-H）のナノスケールの変化

■骨材

- ・質量変化、寸法変化 : 密度および体積の変化
- ・XRD : 鉱物組成の変化
- ・TG-TDA : 含水率や結晶水率の変化
- ・TEM : 膨張や損傷の把握

中性子照射は、ノルウェーにあるエネルギー技術研究所（IFE）の JEEP II で実施しているので、PIE も同研究所が保有している施設で実施できれば効率的であるが、同研究所はコンクリートを専門としている機関ではないため、実施できる PIE は限定的である。また、全ての PIE の実施は理想的であるが、限られたリソースの中では現実的ではない。したがって、重要度が高い PIE に絞り込むとともに、ノルウェーで実施できる項目を整理し、残りは日本に持ち帰り、国内の施設で実施することも検討する。現時点における PIE を以下に示す。

- ①物理特性試験（Physical property test : PPT）
 - ・コンクリート：質量変化、寸法変化、圧縮強度
- ②非照射・加熱試験（Heating test : HT）
 - ・コンクリート：質量変化、寸法変化、圧縮強度
- ③非照射・非加熱試験（Control test : CT）
 - ・コンクリート：質量変化、寸法変化、圧縮強度

今後は、エネルギー技術研究所で実施する照射後物性試験の精度の確認と、照射後試験体の日本への輸送方法および国内研究施設での試験実施について、引き続き検討する。このうち、照射後試験体の日本への輸送方法を検討するためには、試験体の放射化レベルを把握する必要がある。放射化レベルを評価するためには、コンクリート中の微量元素の量を把握することが必要となるが、既往の文献では十分な情報が得られないため、今回使用したコンクリートについて、今後、微量成分分析を行う必要がある。

(b) 試験結果

a) 中性子照射試験

表 3.4.2-39 に照射条件を示す。表 3.4.2-40 に照射試験スケジュールを示す。

表 3.4.2-39 照射試験における照射条件 (再掲)

照射孔	試験体	目標照射量 (n/cm ²)	試験体 中央温度 (°C)	高速 中性子束 (n/cm ² /s)	ガンマ 発熱 (W/g)	ガンマ 線量率 (kGy/h)
Position 52	コンクリート PPT-B (IFA-753)	7.5x10 ¹⁸	70.5	3.7x10 ¹²	0.097	325
	コンクリート PPT-E (IFA-750)	6.0x10 ¹⁹	70.5	3.9x10 ¹²	0.105	375
Position 36	セメントペースト IT-A3 (IFA-760)	-----	76.0	3.6x10 ¹²	0.107	370
	コンクリート PPT-C (IFA-752)	1.5x10 ¹⁹	70.0	3.5x10 ¹²	0.087	271
計画値			72.0	2.0~3.5x10 ¹²	0.04~0.06	

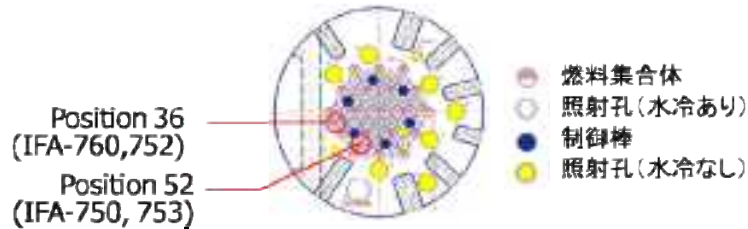


表 3.4.2-40 照射試験スケジュール (再掲)

試験体名称	試験体ID		2013					2014										
			Aug	Sep	Oct	Nov	Dec	Jan	Feb	Mar	Apr	May	Jun					
相互作用試験 (セメントペースト)	A1	IFA-758	■															
	A2	IFA-759																
	A3	IFA-760		■	■	■	■	■	■	■	■	■						
	A4	IFA-761																
物理特性試験 (コンクリート)	B	IFA-753		■	■													
	C	IFA-752							■	■	■	■	■					
	D	IFA-751																
	E	IFA-750			■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■
非照射・加熱 試験 (コンクリート)	H1-3	IFA-757																
	H1-6	IFA-757							■	■	■	■	■					
	H1-12	IFA-757																
	H2-24	IFA-756																
	H3-3	IFA-755																
	H3-6	IFA-755																
	H3-12	IFA-755																
	H4-24	IFA-754																
コントロール 試験 (封緘・20°C) (コンクリート)	C0	-																
	C1	-																
	C2	-																
	C3	-																

■: 照射孔36 ■: 照射孔52 ■: 研究炉停止期間 ■: 炉外試験

(i) 試験ケース PPT-B (IFA-753)

図 3.4.2-87 に原子炉の出力を示す。約 2.0MW 程度となっている。また、炉は試料の交換等のために、比較的頻繁に ON/OFF を繰り返していることがわかる。図 3.4.2-88 に炉に流入する冷却水と炉から流出する冷却水の温度を示す。冷却水の温度は 52°C に制御され、炉を冷却することにより 58°C 程度まで上昇し、炉外の冷却装置で 52°C まで冷却され、炉に送り込まれる。図 3.4.2-89 にコンクリート試験体の中心温度の時間変化を示す。コンクリートの中心温度は照射当初から徐々に上昇し、照射終了の段階では 70.5°C 程度であった。図 3.4.2-90 にガンマ発熱の時間変化を示す。ガンマ発熱は 0.097W/g となっている。

図 3.4.2-91 にキャプセル内の圧力変化を示す。キャプセル内の圧力が 1.25bar となると排気バルブを開放して圧力を放出し、1.0bar 程度まで低下すると再びバルブを閉めている状況が見られる。また、バルブ開放間隔は、時間経過に伴って長くなっており、これは時間経過に伴ってガスの発生速度が低下している試験結果と整合している。図 3.4.2-92 にガス流量の変化を示す。

図 3.4.2-93 に高速中性子照射量の時間変化を示す。図 3.4.2-94 にガンマ線照射量の時間変化を示す。中性子照射試験時の高速中性子束は 3.7×10^{12} n/cm²/s、ガンマ線量率は 325kGy/h であった。途中の X 軸と平行な部分は、炉の長期的な停止時期に対応している。図 3.4.2-95 に湿度計測タンクでの計測結果を示す。図 3.4.2-96 は同一位置での絶対湿度の変化を示す。照射終了後に明らかになったが、タンク内に凝縮水がたまっていたので、湿度はほぼ 100% を示している。

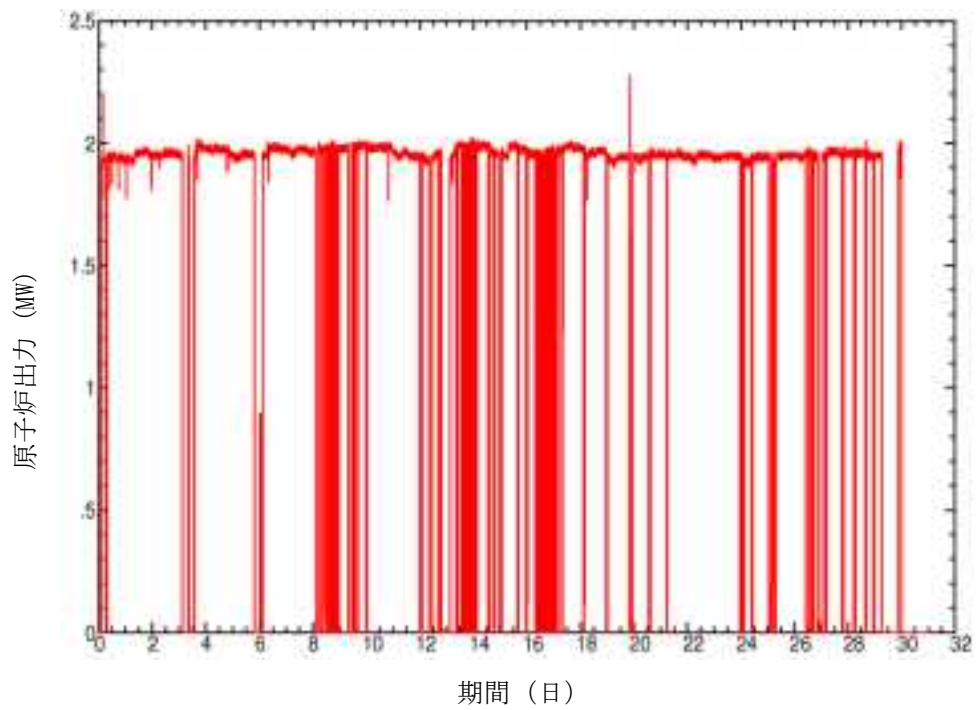


図 3. 4. 2-87 原子炉出力の変化

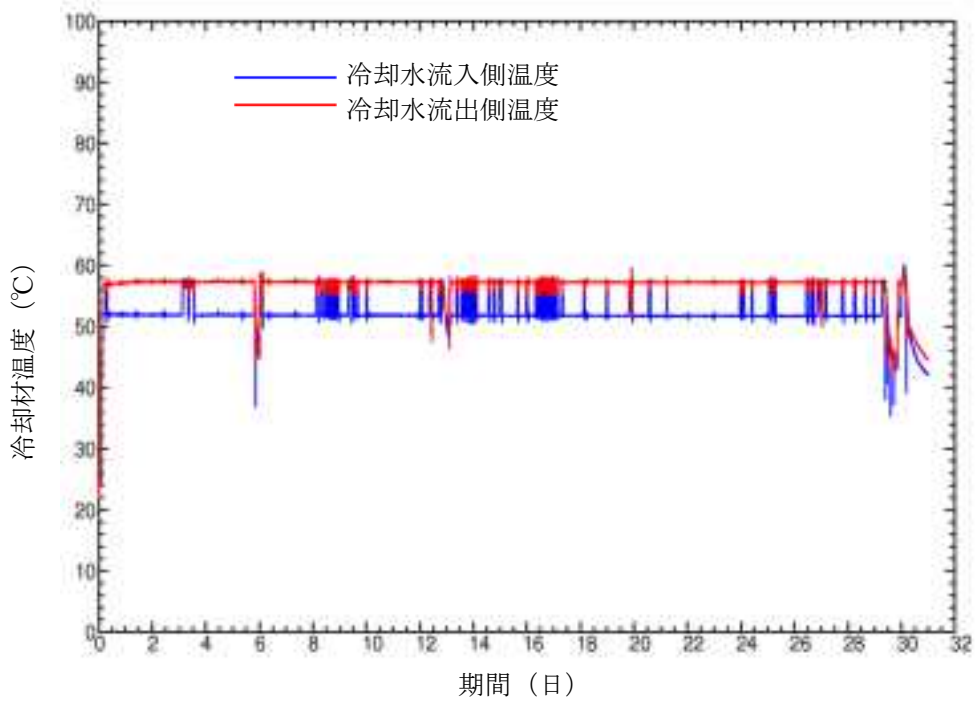


図 3. 4. 2-88 原子炉冷却材の温度変化

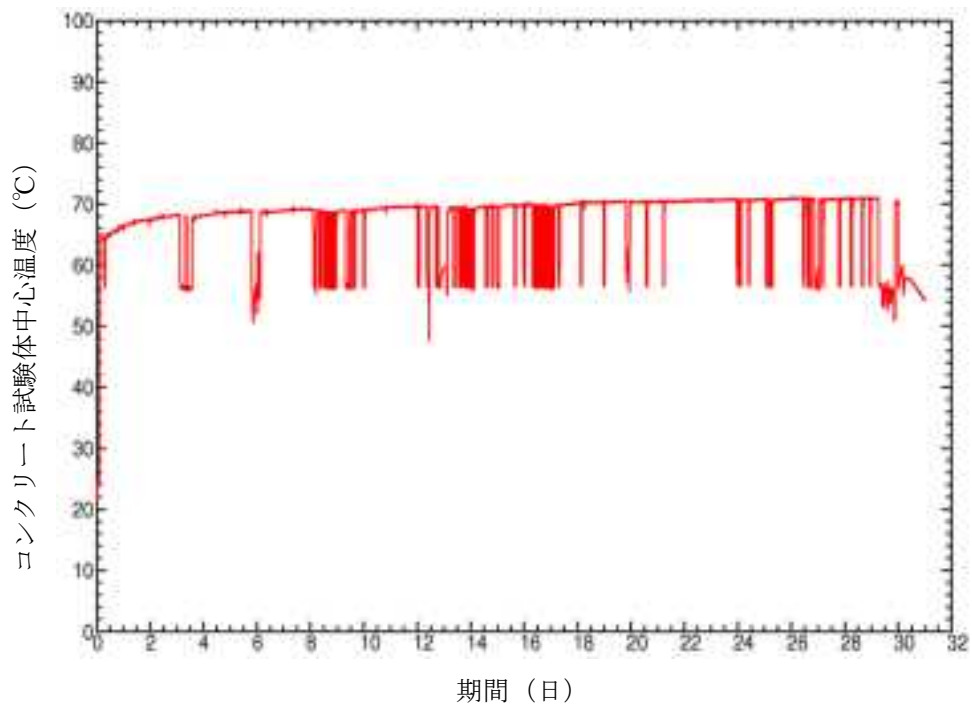


図 3. 4. 2-89 コンクリート試験体の中心温度変化

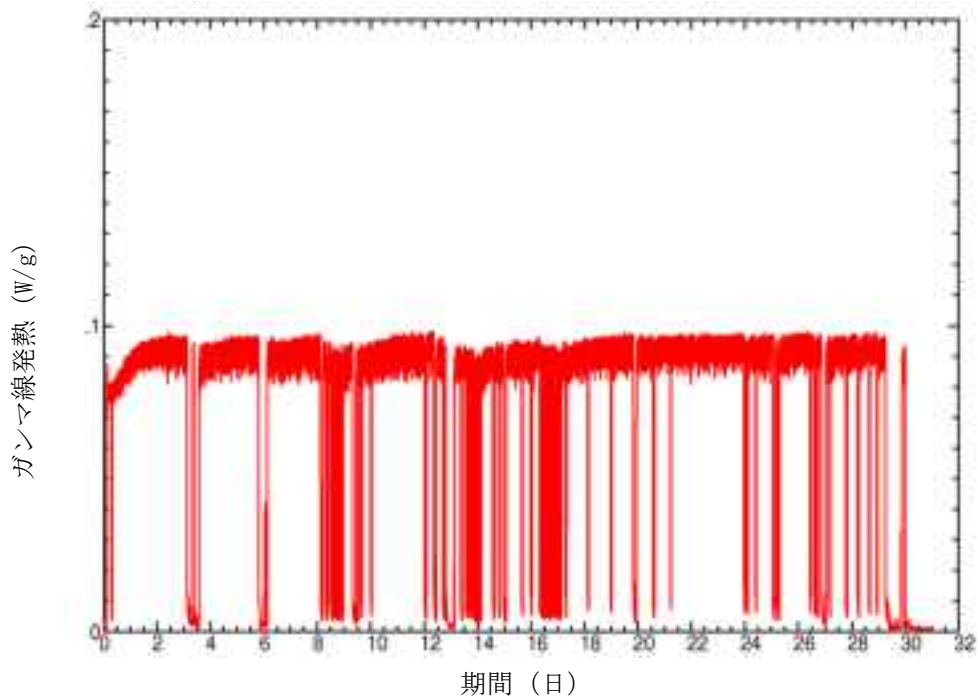


図 3. 4. 2-90 ガンマ線発熱の変化

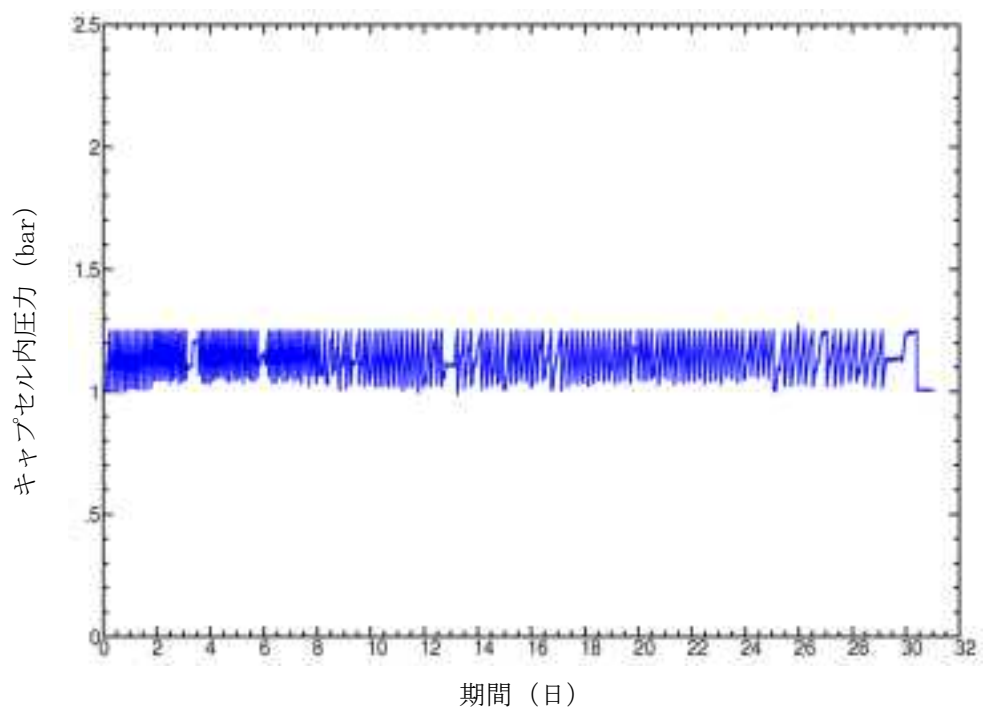


図 3.4.2-91 ガス発生によるキャプセル内の圧力変化

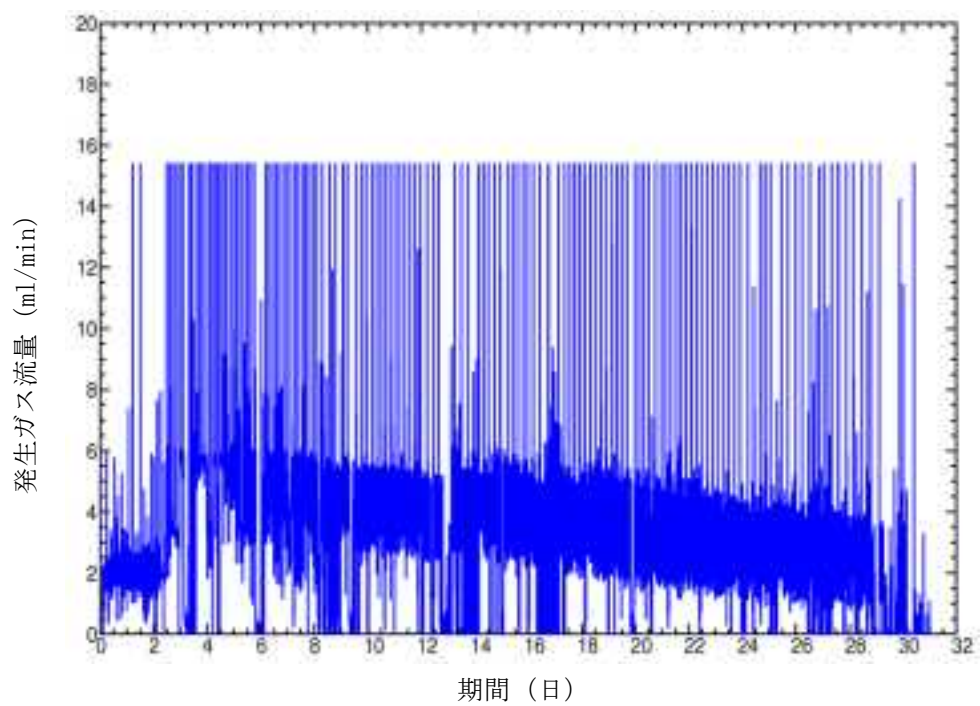


図 3.4.2-92 発生ガス流量の変化

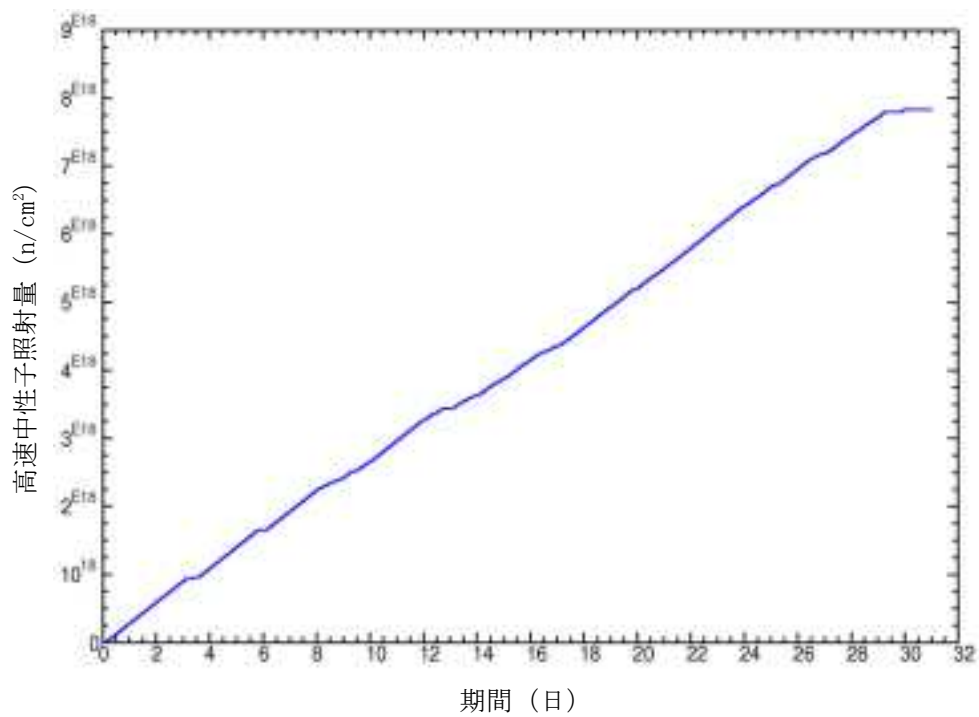


図 3. 4. 2-93 高速中性子照射量の変化

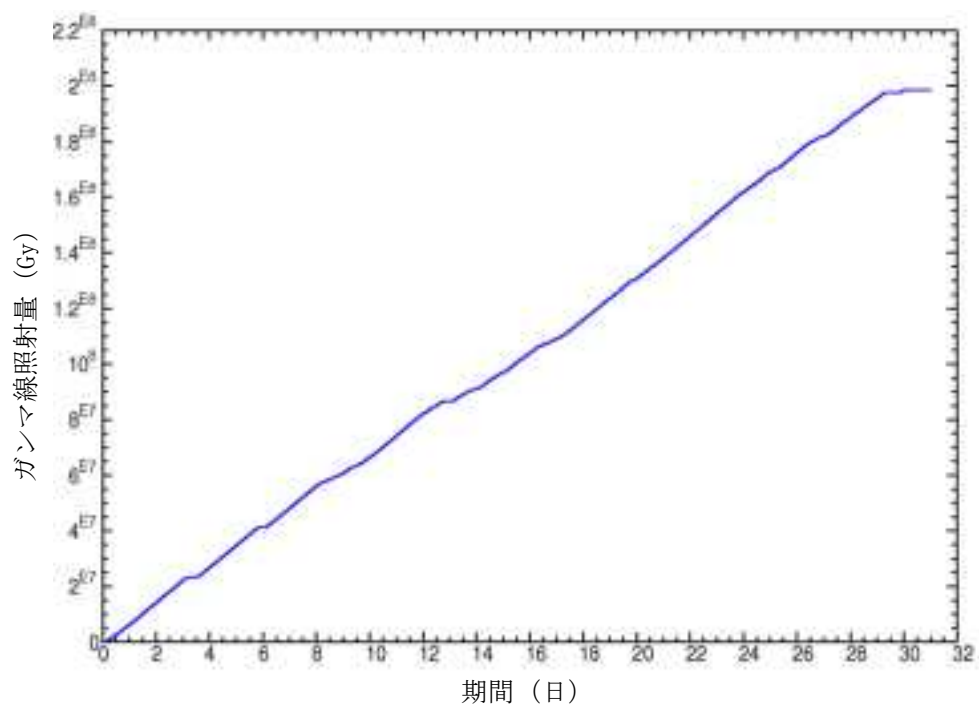


図 3. 4. 2-94 ガンマ線照射量の変化

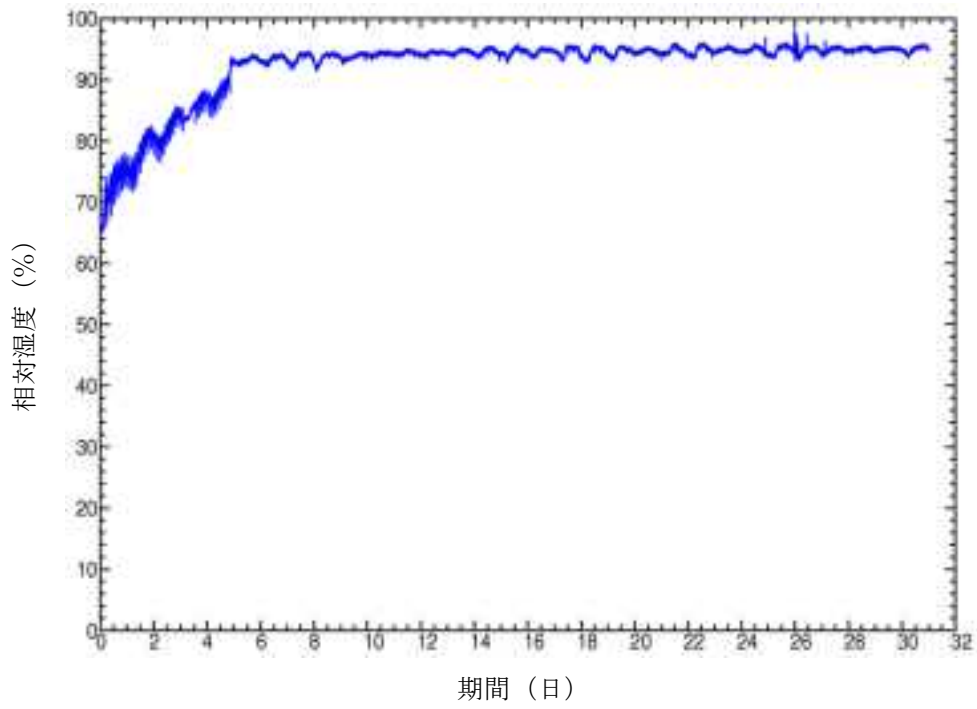


図 3. 4. 2-95 炉外の計測系内相対湿度の変化

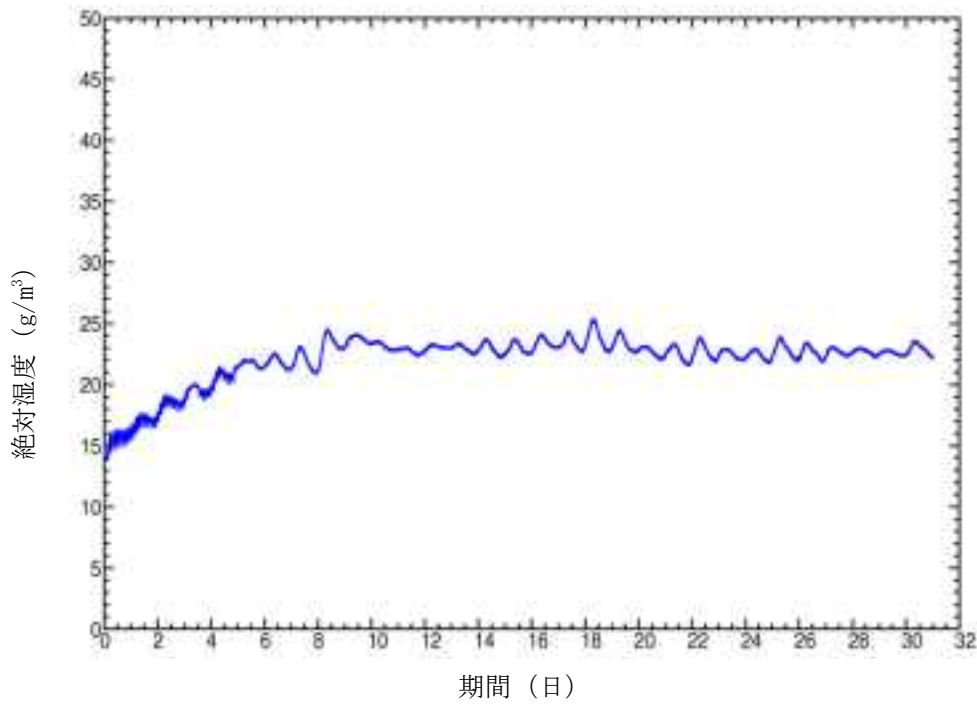


図 3. 4. 2-96 炉外の計測系内絶対湿度の変化

(ii) 試験ケース PPT-E (IFA-750)

図 3.4.2-97 に原子炉の出力を示す。約 2.0MW 程度となっている。70～100 日の炉停止は、12 月～1 月にかけての定期的な停止期間に対応している。図 3.4.2-98 に炉に流入する冷却水と炉から流出する冷却水の温度を示す。冷却水の温度は 52℃に制御され、炉を冷却することにより 58℃程度まで上昇し、炉外の冷却装置で 52℃まで冷却され、炉に送り込まれる。図 3.4.2-99 にコンクリート試験体の中心温度の時間変化を示す。コンクリートの中心温度は照射当初から徐々に上昇し、70.5℃程度で安定している。図 3.4.2-100 にガンマ発熱の時間変化を示す。ガンマ発熱は 0.105W/g となっている。

図 3.4.2-101 にキャプセル内の圧力変化を示す。キャプセル内の圧力が 1.25bar となると排気バルブを開放して圧力を放出し、1.0bar 程度まで低下すると再びバルブを閉めている状況が見られる。停止期間後の再稼働以降は、キャプセルの開放圧力を 1.15bar に落としている。図 3.4.2-102 にガス流量の変化を示す。

図 3.4.2-103 に高速中性子照射量の時間変化を示す。図 3.4.2-104 にガンマ線照射量の時間変化を示す。中性子照射試験時の高速中性子束は 3.9×10^{12} n/cm²/s、ガンマ線量率は 375kGy/h であった。途中の X 軸と平行な部分は、炉の長期的な停止時期に対応している。図 3.4.2-105 に湿度計測タンクでの計測結果を示す。図 3.4.2-106 は同一位置での絶対湿度の変化を示す。照射開始以降、湿度計の出力はほぼ 100%となっていた。これは、湿度計測タンク内に凝縮水がたまっていたためである。定期的な停止期間終了後、水蒸気を凝縮させて水分を確実に捕集するために、計測システム系統内にコンデンサーを設置した。このコンデンサーがよく機能しているので、湿度計測タンク内には凝縮水がたまることなく、相対湿度も 60%程度となっている。

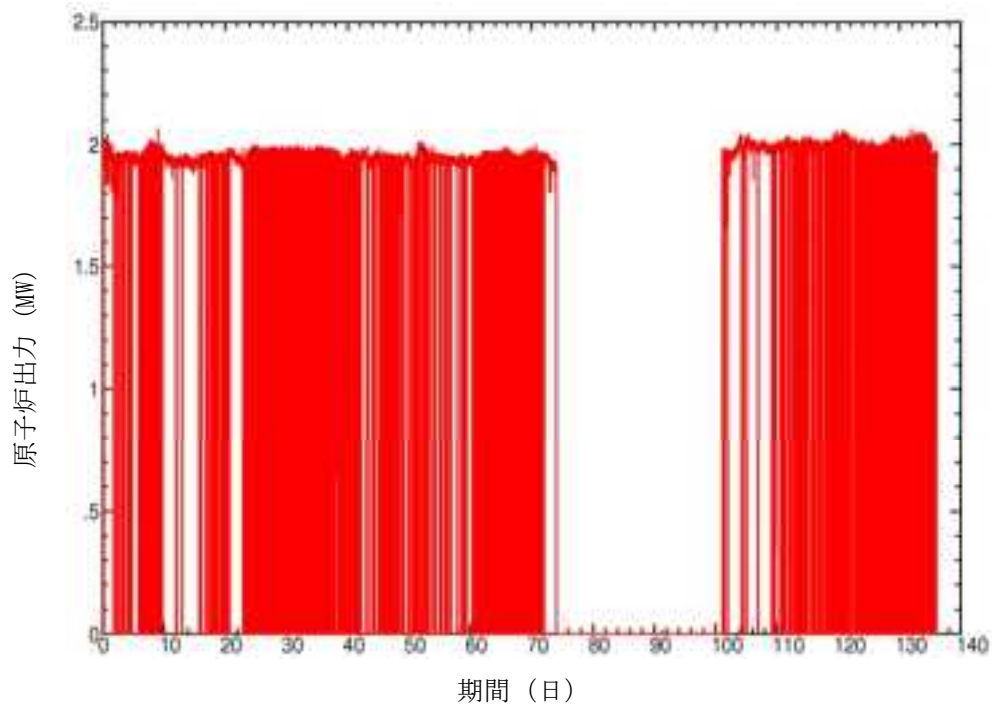


図 3. 4. 2-97 原子炉出力の変化

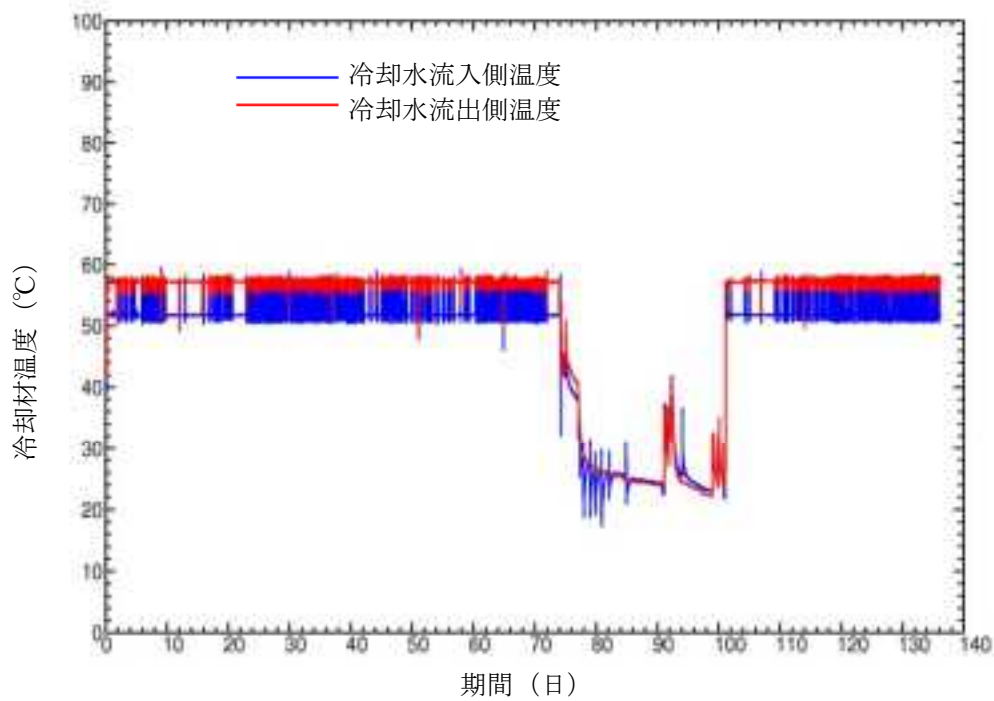


図 3. 4. 2-98 原子炉冷却材の温度変化

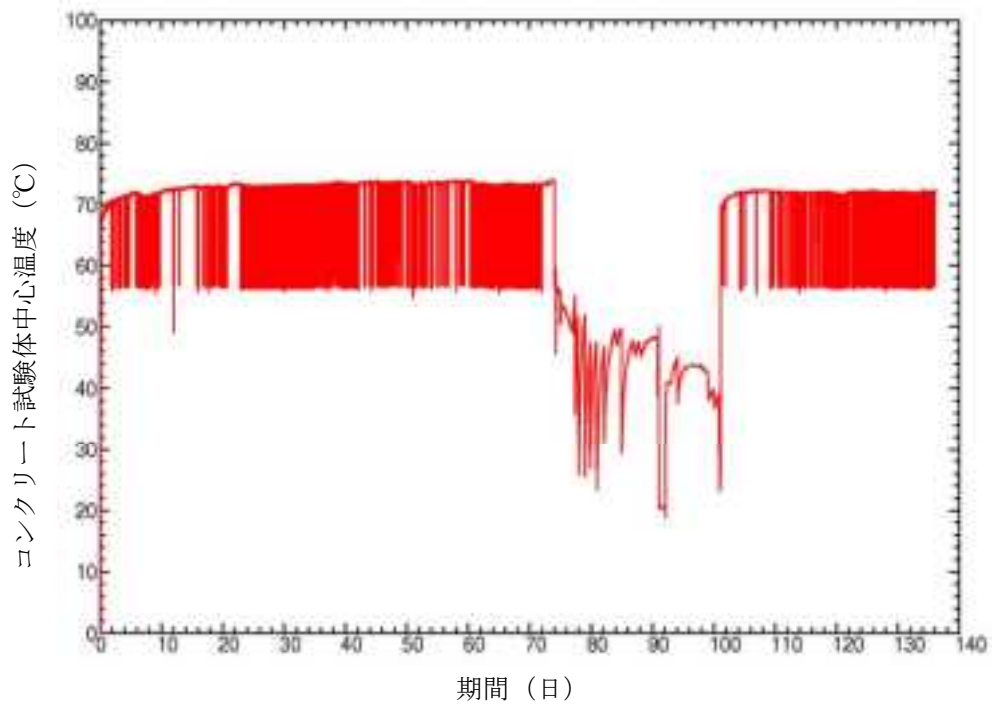


図 3.4.2-99 コンクリート試験体の中心温度変化

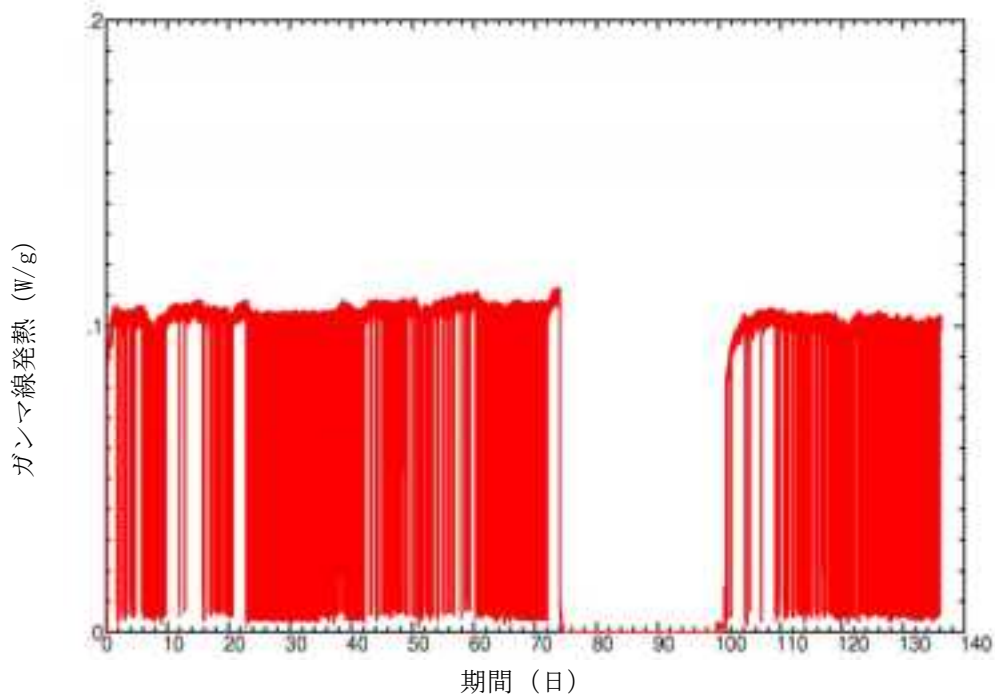


図 3.4.2-100 ガンマ線発熱の変化

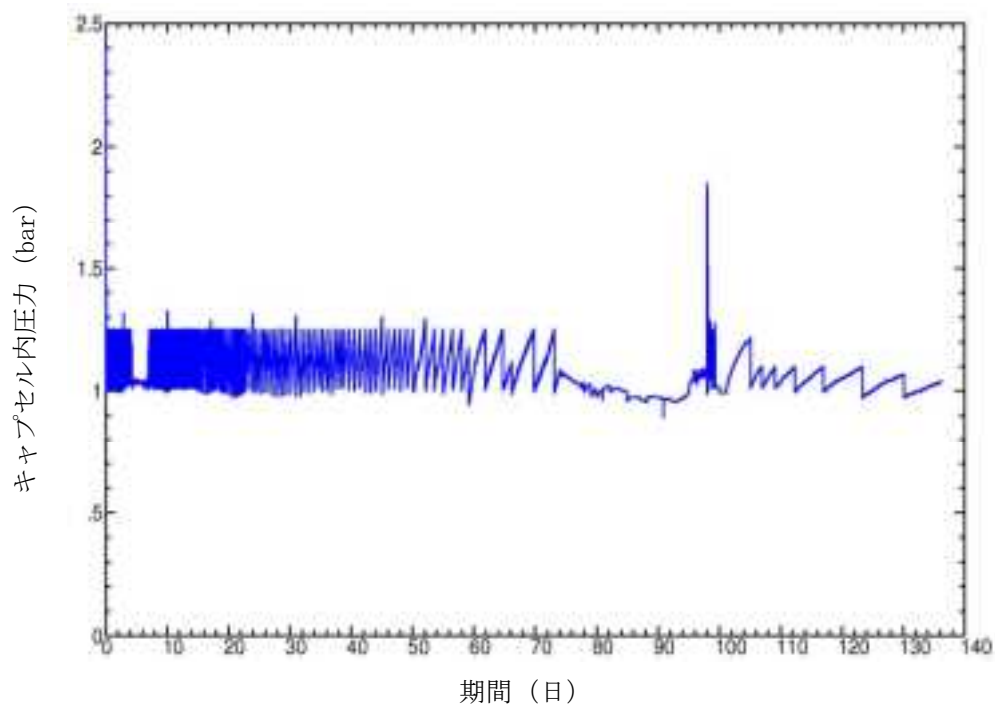


図 3. 4. 2-101 ガス発生によるキャプセル内の圧力変化

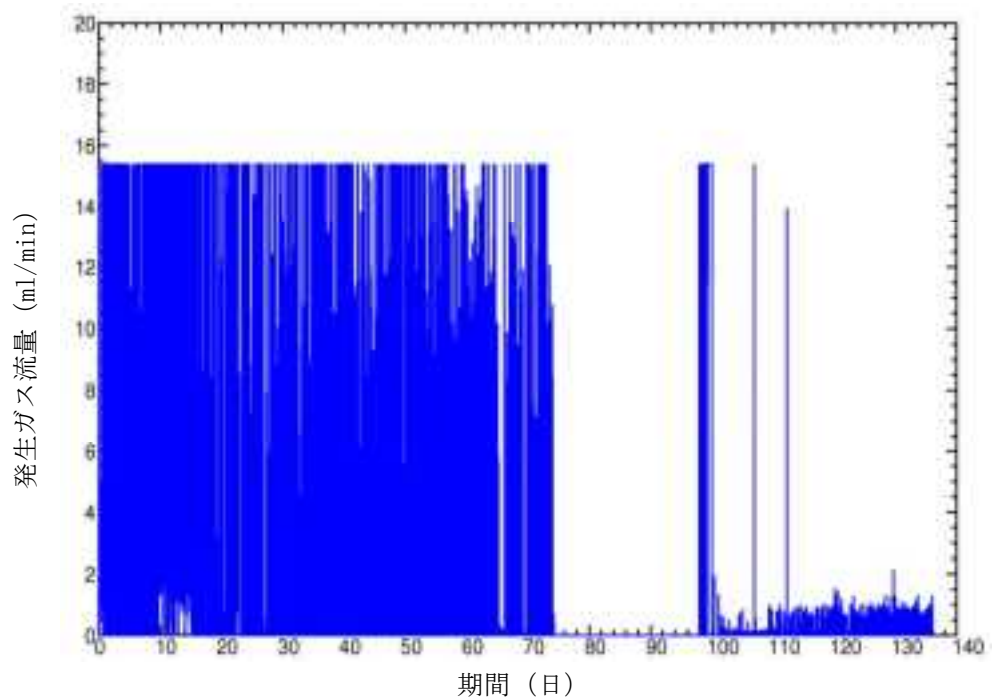


図 3. 4. 2-102 発生ガス流量の変化

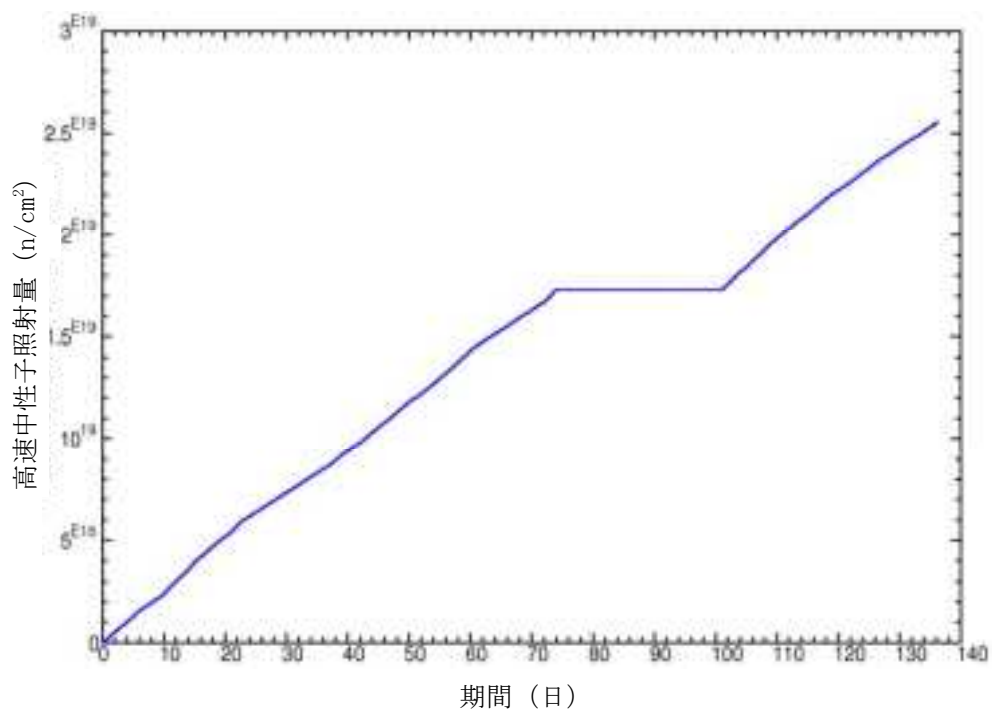


図 3. 4. 2-103 高速中性子照射量の変化

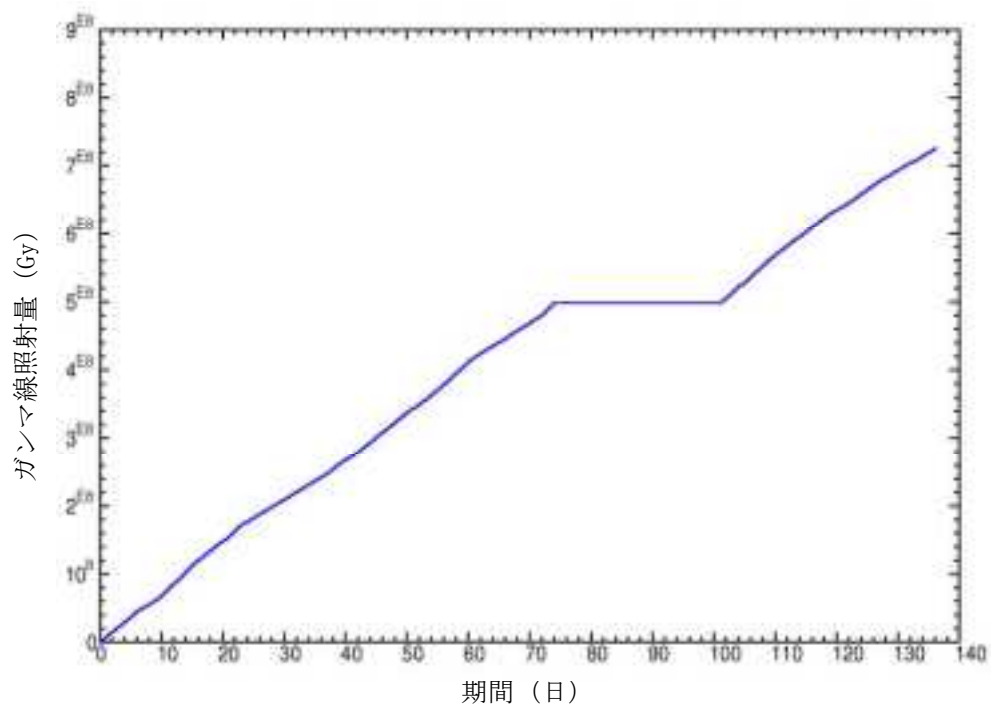


図 3. 4. 2-104 ガンマ線照射量の変化

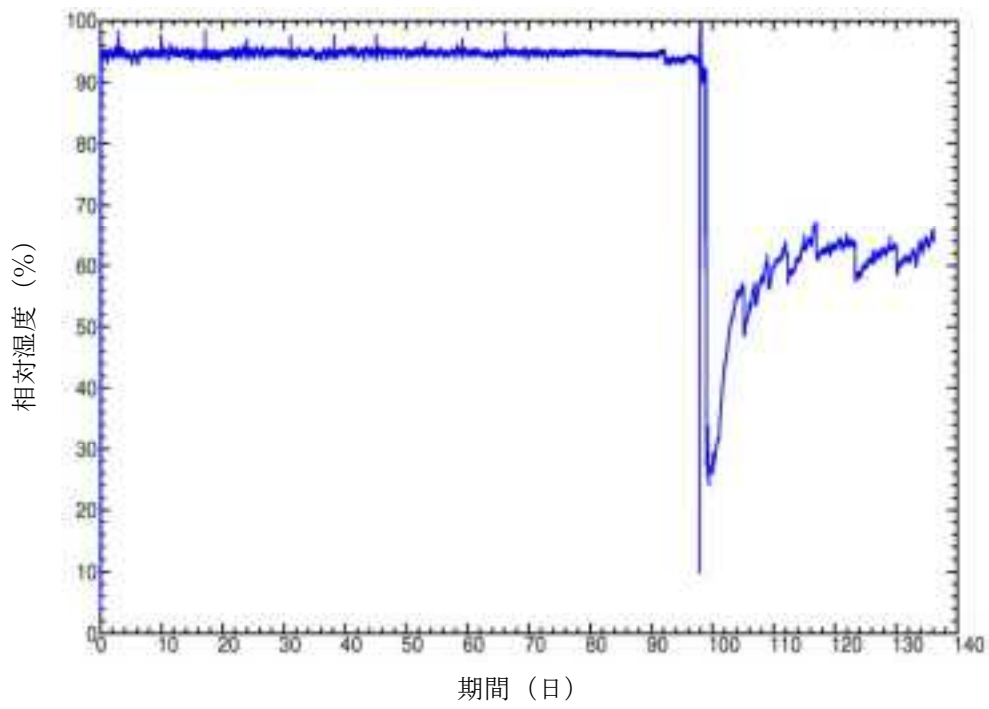


図 3. 4. 2-105 炉外の計測系内相対湿度の変化

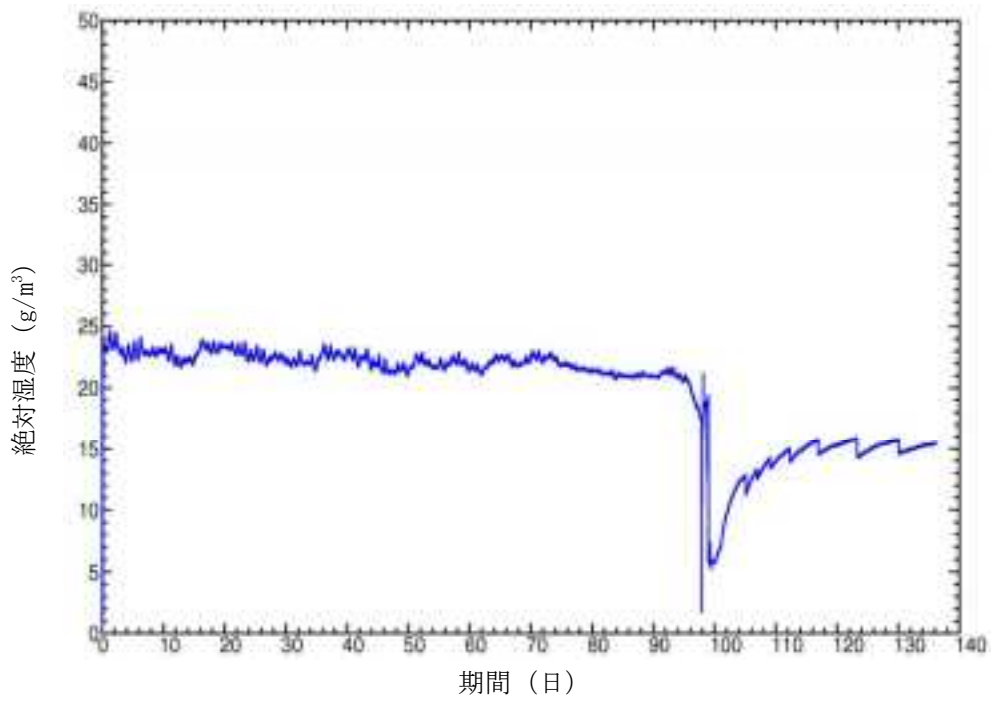


図 3. 4. 2-106 炉外の計測系内絶対湿度の変化

(iii) 試験ケース PPT-C (IFA-752)

図 3.4.2-107 に原子炉の出力を示す。約 2.0MW 程度となっている。図 3.4.2-108 に炉に流入する冷却水と炉から流出する冷却水の温度を示す。冷却水の温度は 52°C に制御され、炉を冷却することにより 58°C 程度まで上昇し、炉外の冷却装置で 52°C まで冷却され、炉に送り込まれる。図 3.4.2-109 にコンクリート試験体の中心温度の時間変化を示す。コンクリートの中心温度は 70°C 程度で安定している。図 3.4.2-110 にガンマ発熱の時間変化を示す。ガンマ発熱は 0.087W/g となっている。

図 3.4.2-111 にキャプセル内の圧力変化を示す。キャプセル内の圧力が 1.25bar となると排気バルブを開放して圧力を放出し、1.0bar 程度まで低下すると再びバルブを閉めている状況が見られる。また、バルブ開放間隔は、時間経過に伴って長くなっており、これは時間経過に伴ってガスの発生速度が低下している試験結果と整合している。図 3.4.2-112 にガス流量の変化を示す。

図 3.4.2-113 に高速中性子照射量の時間変化を示す。図 3.4.2-114 にガンマ線照射量の時間変化を示す。中性子照射試験時の高速中性子束は 3.5×10^{12} n/cm²/s、ガンマ線量率は 271kGy/h であった。途中の X 軸と平行な部分は、炉の長期的な停止時期に対応している。図 3.4.2-115 に湿度計測タンクでの計測結果を示す。

52 番照射孔での照射温度 (PPT-B (IFA-753) 70.5°C、PPT-E (IFA-750) 70.5°C) には変化はなかったが、36 番照射孔ではガンマ発熱が 20% 程度低下し、それに伴って温度も 76°C (IT-A3: IFA-760) からの 70°C (PPT-C: IFA-752) へと 6°C 低下した。JEEP II では、年 3 回 (4 月に 1 か月、7-8 月にかけて 2 か月、12-1 月にかけて 1 か月、計 4 か月/年) の停止期間が設定されており、炉の照射環境を変更する場合 (照射キャプセルの設置・撤去等) は、照射期間途中で変更する事はなく、停止期間に準備を行い、停止期間後の照射再開に合わせて変更することとなっている。今回の 36 番照射孔での変化は、このような照射条件の変化によると考えられ、結果的に、両方の照射孔の温度が同等となっている。

図 3.4.2-116 は同一位置での絶対湿度の変化を示す。試験ケース PPT-C (IFA-752) では、照射開始から、計測システム系統内にコンデンサーを設置しているため、相対湿度は 20~30% となっている。

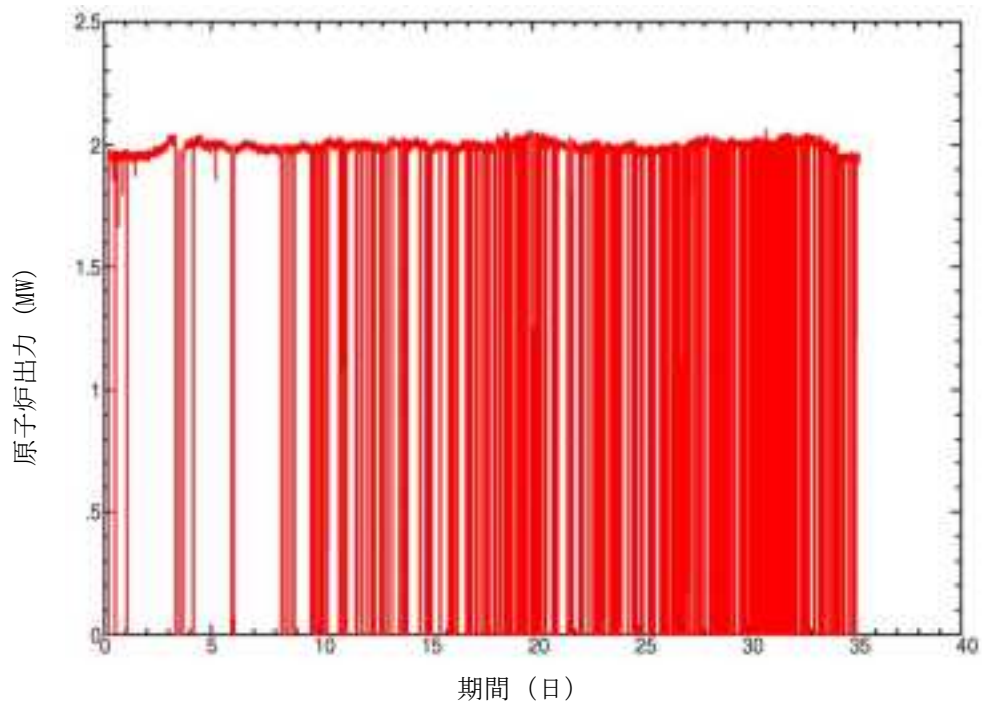


図 3.4.2-107 原子炉出力の変化

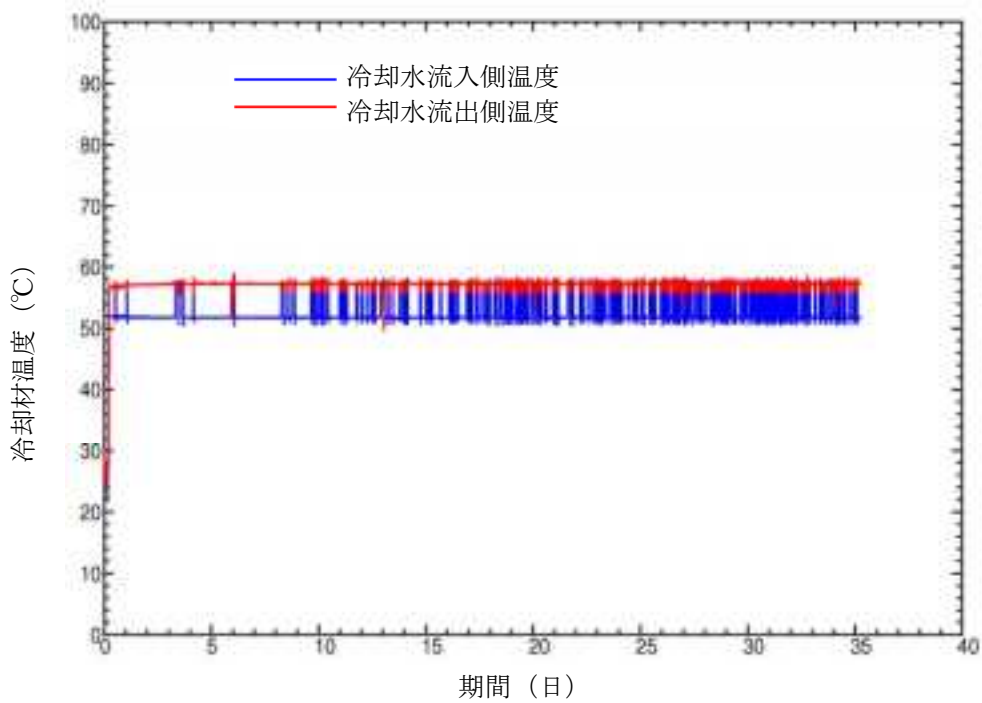


図 3.4.2-108 原子炉冷却材の温度変化

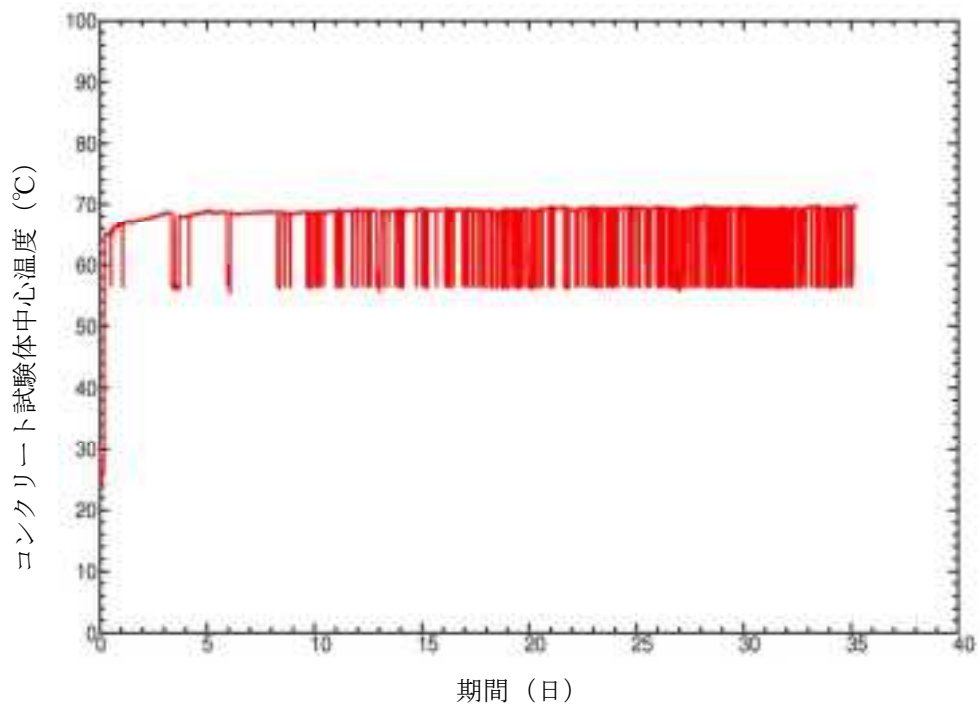


図 3.4.2-109 コンクリート試験体の中心温度変化

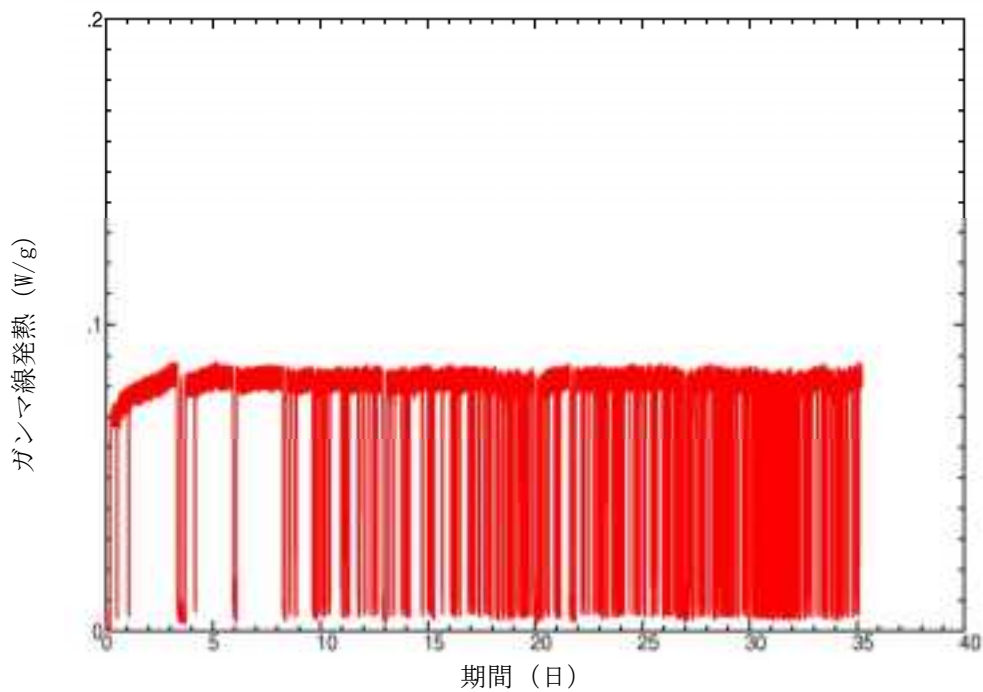


図 3.4.2-110 ガンマ線発熱の変化

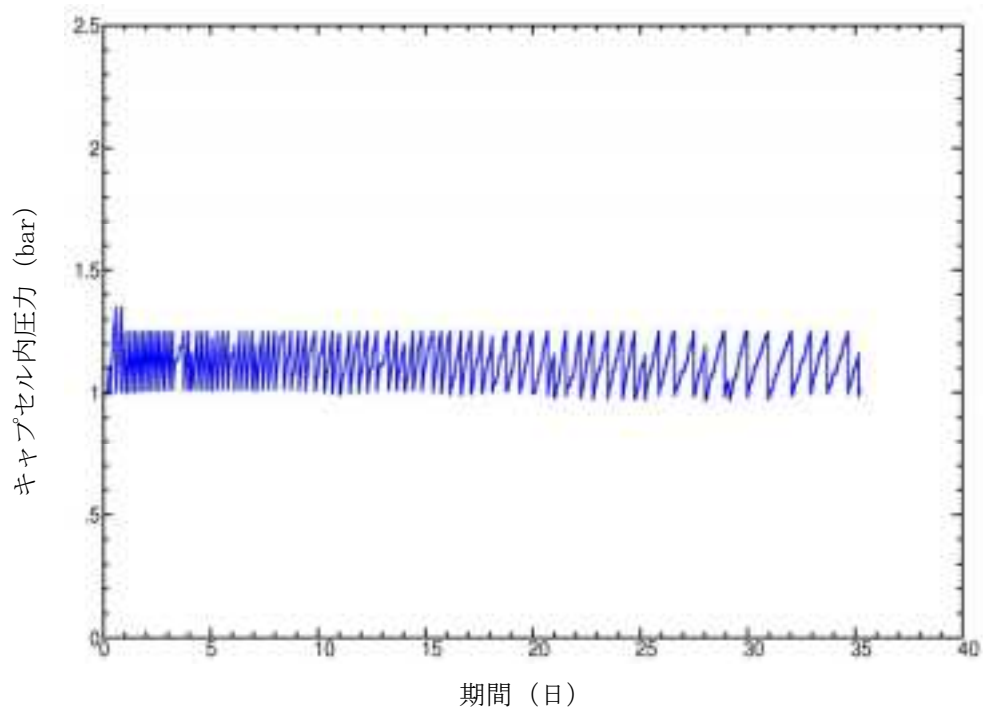


図 3. 4. 2-111 ガス発生によるキャプセル内の圧力変化

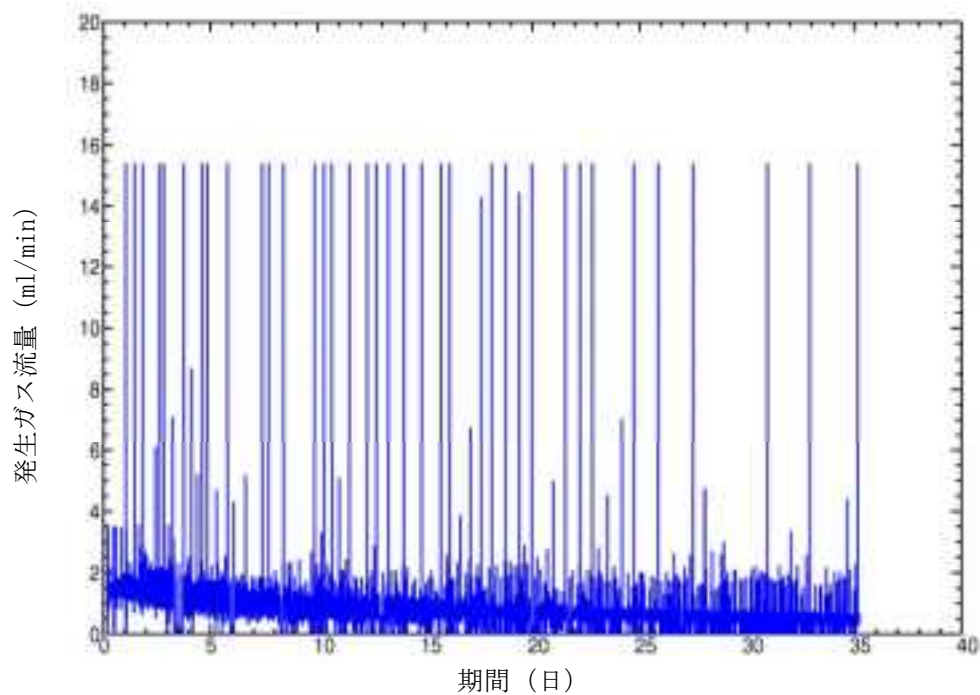


図 3. 4. 2-112 発生ガス流量の変化

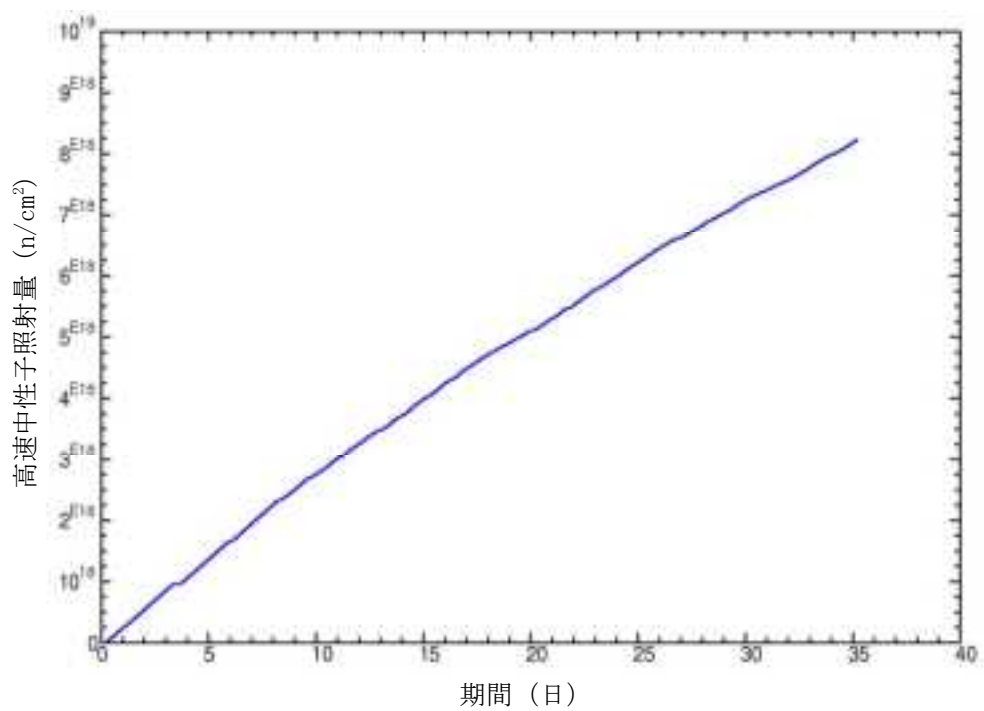


図 3.4.2-113 高速中性子照射量の変化

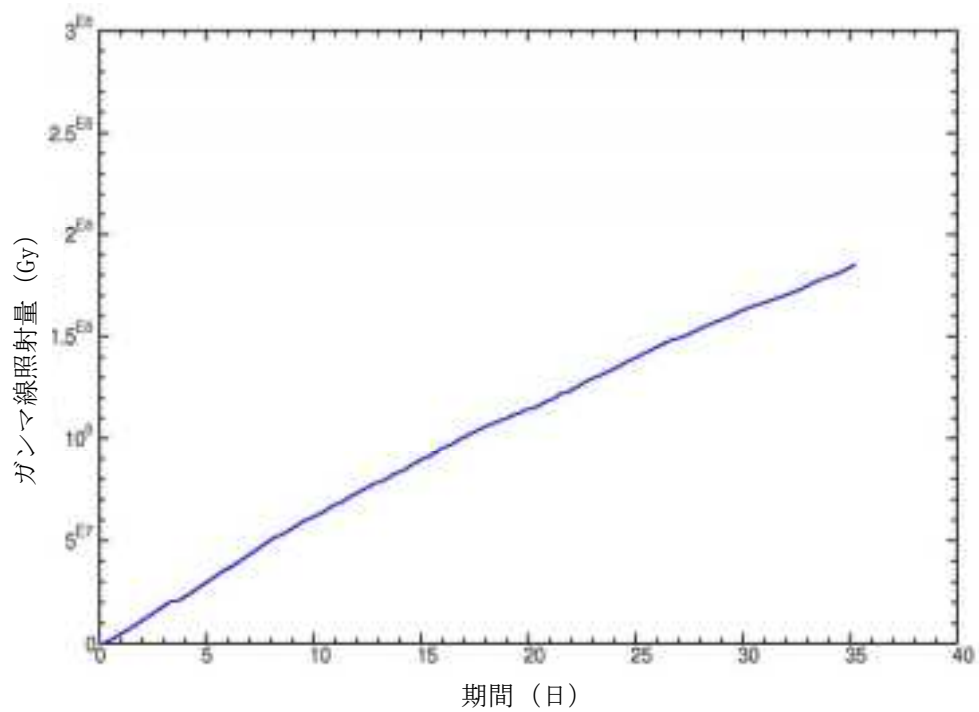


図 3.4.2-114 ガンマ線照射量の変化

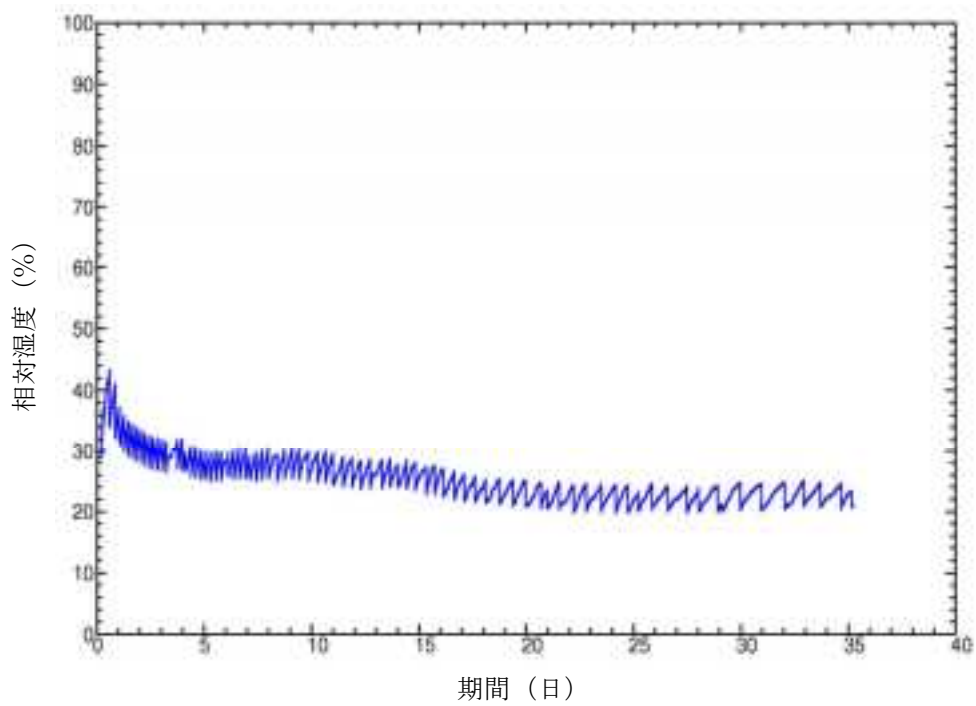


図 3. 4. 2-115 炉外の計測系内相対湿度の変化

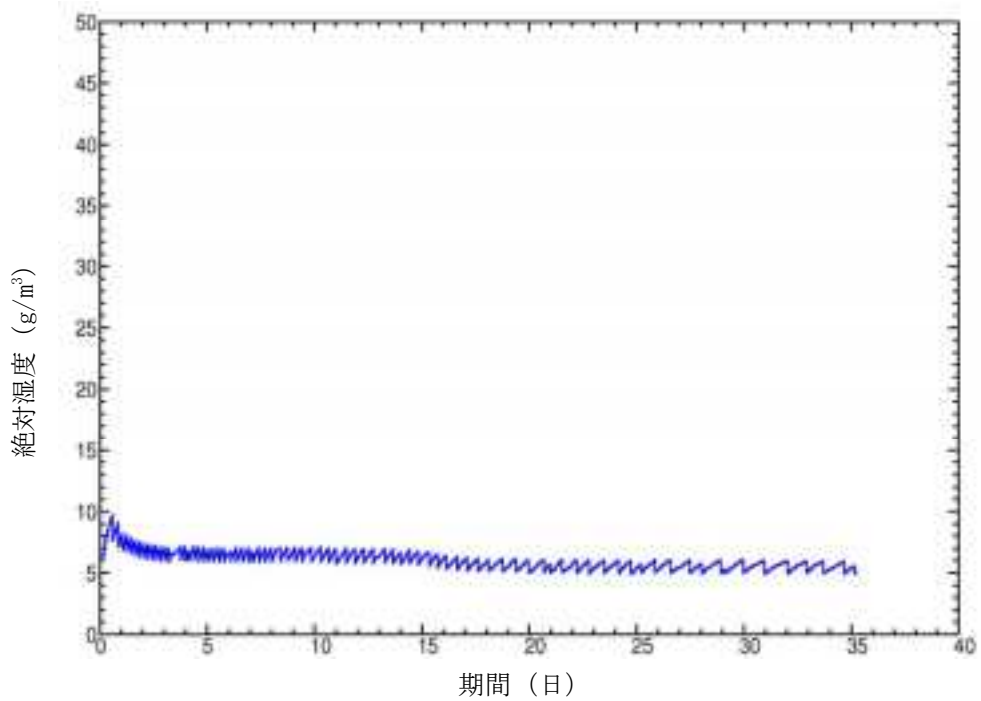


図 3. 4. 2-116 炉外の計測系内絶対湿度の変化

(iv) キャプセル内圧上昇とガス発生状況

図 3.4.2-117 および図 3.4.2-118 に、発生圧力総計の時間変化と照射量に対する変化を示す。図 3.4.2-119 および図 3.4.2-120 に、圧力発生速度の時間変化と照射量に対する変化を示す。図 3.4.2-121 および図 3.4.2-122 に、ガス発生量の時間変化と照射量に対する変化を示す。図 3.4.2-123 および図 3.4.2-124 に、ガス発生速度の時間変化と照射量に対する変化を示す。時間経過に伴って、照射量が増加するので、両方のグラフは同様の形状となっている。時間経過に伴って圧力発生速度およびガス発生速度は低下し、80 日照射後にはほぼ一定の値に収束している。図 3.4.2-125 に、水分放出量の時間変化を示す。時間経過に伴って、水分放出速度が低下している。

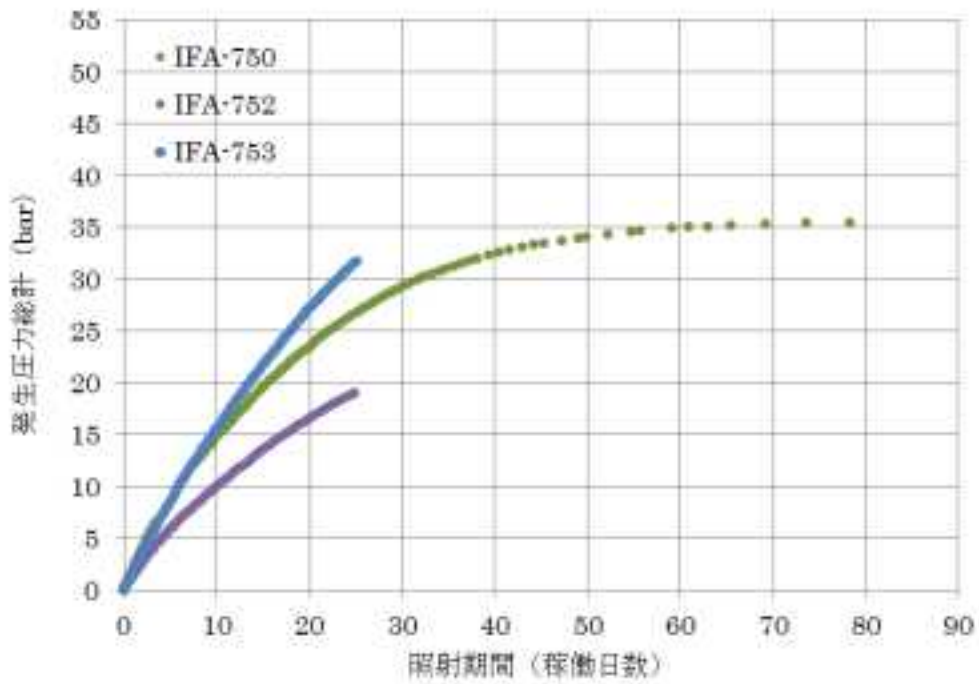


図 3.4.2-117 発生圧力総計の時間変化

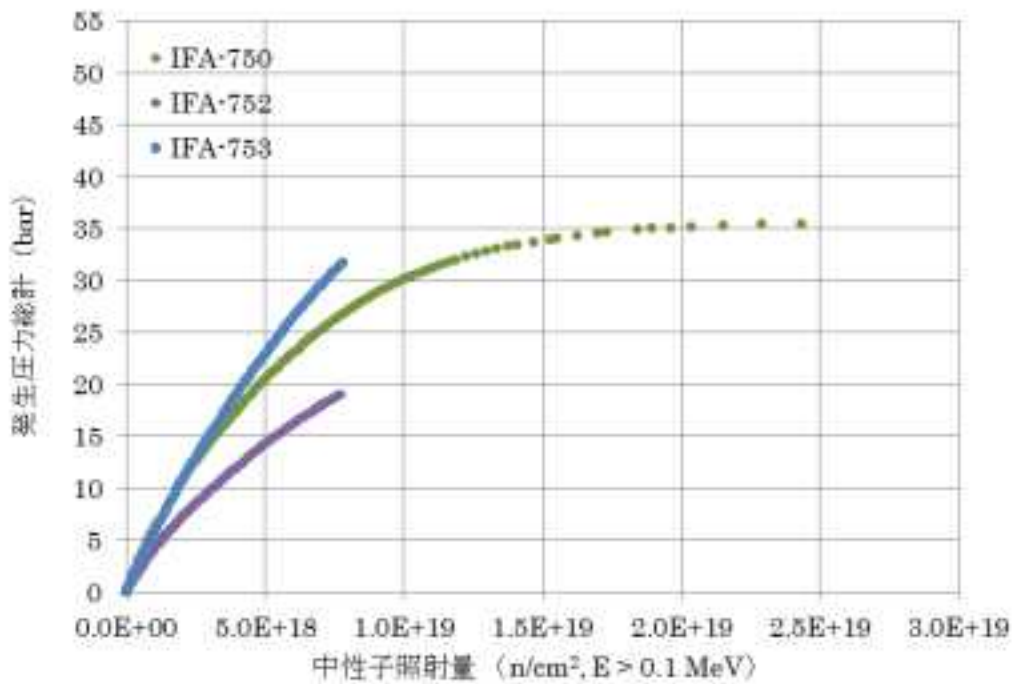


図 3.4.2-118 発生圧力総計の照射量に対する変化

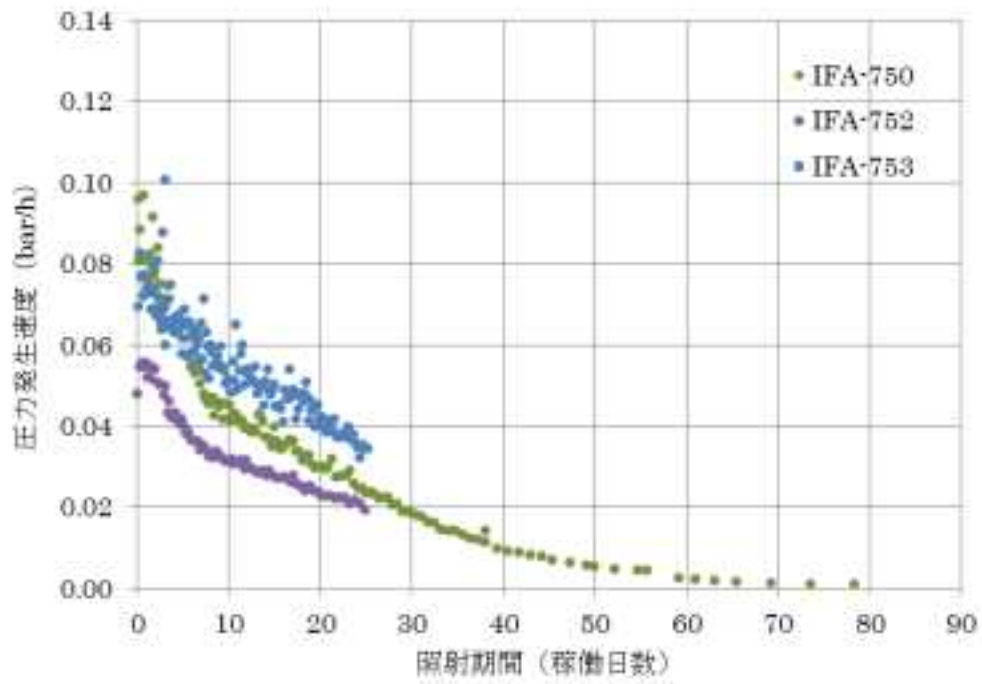


図 3.4.2-119 圧力発生速度の時間変化

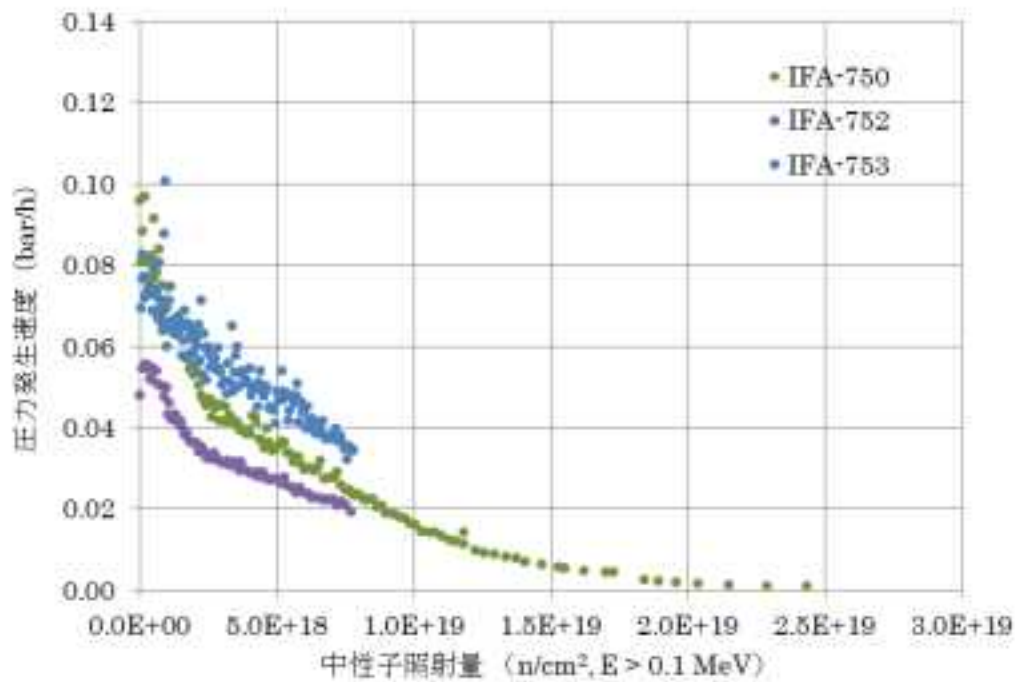


図 3.4.2-120 圧力発生速度の照射量に対する変化

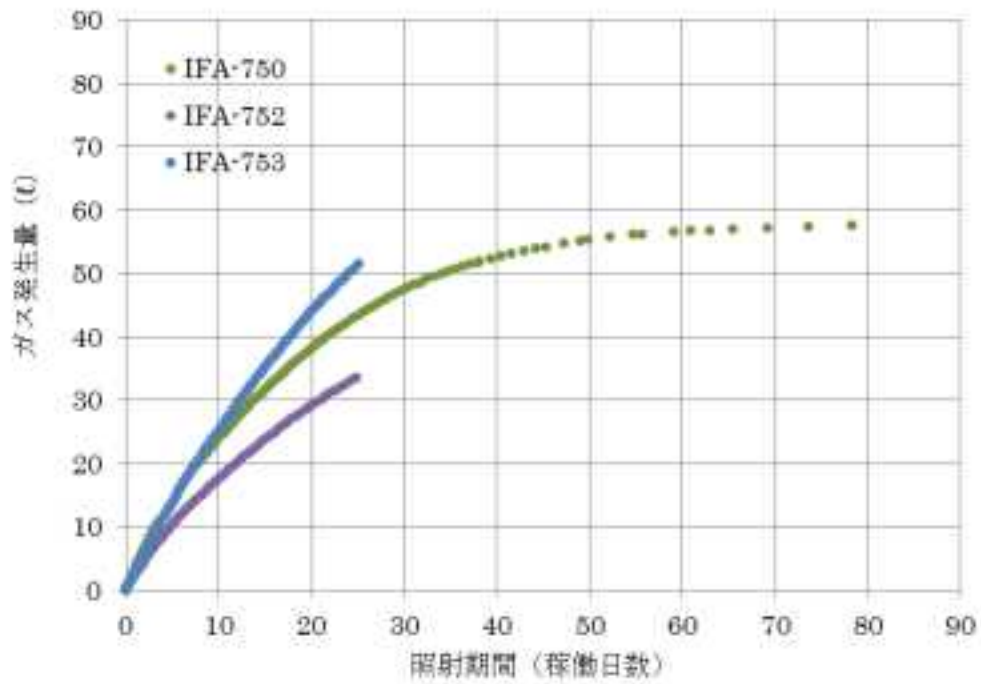


図 3. 4. 2-121 ガス発生量の時間変化 (0°C、1 気圧)

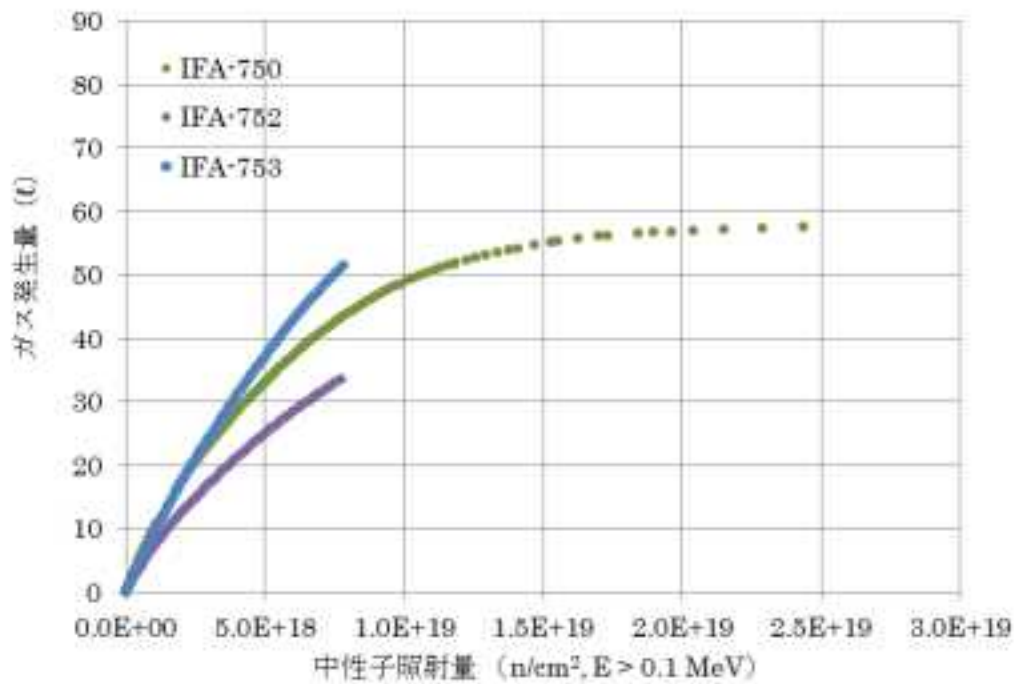


図 3. 4. 2-122 ガス発生量の照射量に対する変化 (0°C、1 気圧)

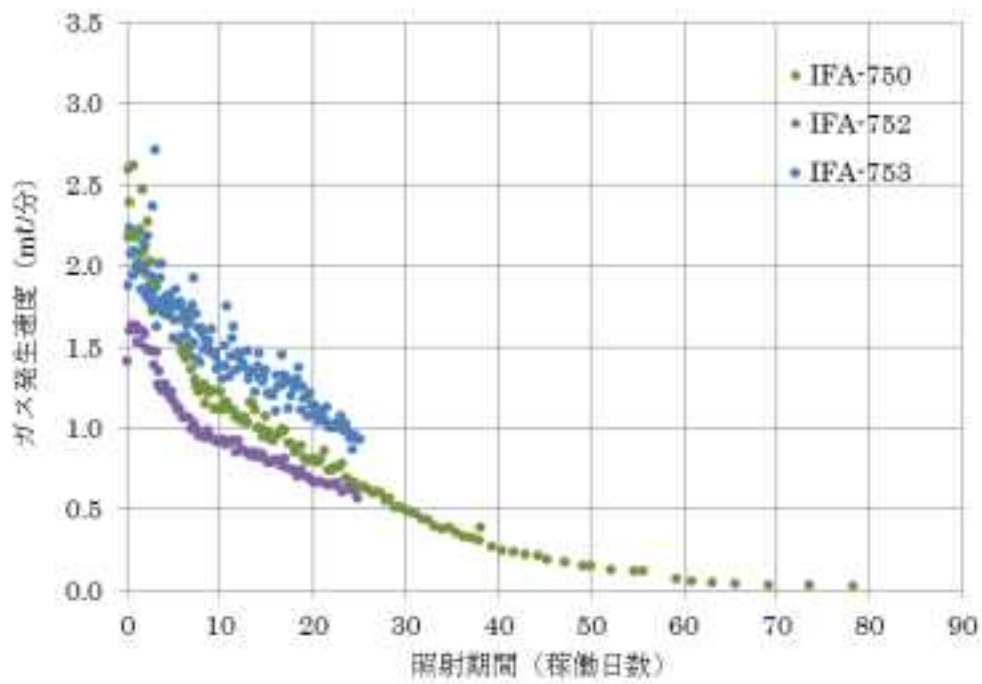


図 3.4.2-123 ガス発生速度の時間変化 (0°C、1 気圧)

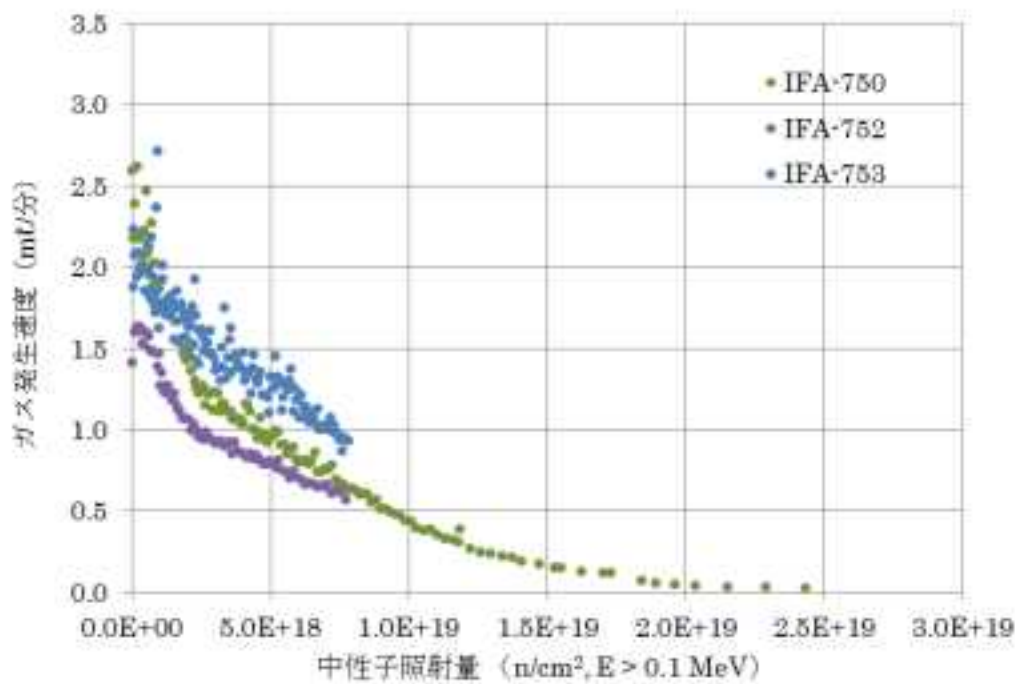


図 3.4.2-124 ガス発生速度の照射量に対する変化 (0°C、1 気圧)

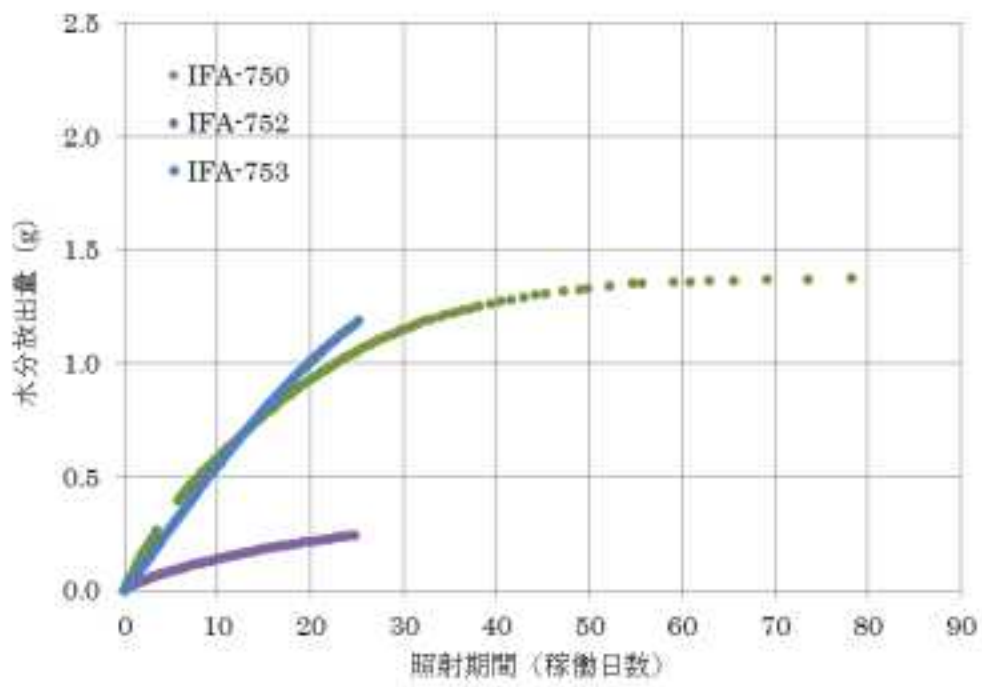


図 3.4.2-125 水分放出量の時間変化

(v) 発生ガスの組成分析

中性子照射試験により水素ガスおよび酸素ガスが放出されるが、水の放射線分解により発生するので、水素と酸素の体積比は2:1となると考えられる。この状況や他のガスの発生について把握するために、発生バスのサンプリングを行い、ガスクロマトグラフィーで成分分析を行った。

表 3.4.2-41 に、試験ケース PPT-B (IFA-753) の分析結果を示す。水の放射線分解を基本とすると、酸素ガスの体積が多めになっている。また、窒素ガスが発生しているが、そのソースが不明である。

表 3.4.2-42 に、試験ケース PPT-E (IFA-750) の分析結果を示す。図 3.4.2-126 に分析結果の時間変化を示す。照射を開始した段階では、水素ガスと酸素ガスの体積は同等となっているが、時間経過に伴って、水素ガスと酸素ガスの体積比が2:1となっている。コンクリートには数%の空気が含まれているので、この空気を窒素ガスのソースと考えていたが、照射日数45日後も発生しているので、別のソースがあると考えられる。

表 3.4.2-43 に、試験ケース PPT-C (IFA-752) の分析結果を示す。図 3.4.2-127 に分析結果の時間変化を示す。照射を開始した段階では、酸素ガスの発生量が少ないが時間経過に伴って、水素ガスと酸素ガスの体積比が2:1となっている。依存として窒素が5%程度発生しており、原因を解明する必要がある。照射前にキャプセル系統内をヘリウムガスでフラッシュしているので、照射当初の含有率は大きいですが、時間経過に伴ってほぼゼロとなっている。

表 3.4.2-41 ガスサンプルの組成分析結果 (IT-A3 : IFA-753)

	組成 (vol-%)					
	水素	酸素	窒素	ヘリウム	一酸化炭素	二酸化炭素
Gas sample No.1 2013-10-01 11:45 22.4FPD	59.3	35.5	5.2	0.0	0.0	0.0

表 3.4.2-42 ガスサンプルの組成分析結果 (IT-A3 : IFA-750)

	組成 (vol-%)					
	水素	酸素	窒素	ヘリウム	一酸化炭素	二酸化炭素
Gas sample No.2 2013-10-10 10:37 2.4FPD	51.7	42.6	5.3	0.3	0.1	0.1
Gas sample No.3 2013-10-17 13:36 7.8FPD	53.4	40.6	5.8	0.1	0.0	0.0
Gas sample No.4 2013-10-24 15:23 14.4FPD	34.7	56.2	8.9	0.1	0.0	0.2
Gas sample No.5 2013-10-31 11:31 19.9FPD	65.9	31.3	2.8	0.0	0.0	N/D
Gas sample No.6 2013-11-07 11:45 24.2FPD	67.4	30.5	2.0	0.0	0.0	0.0
Gas sample No.7 2013-11-14 16:36 28.9FPD	66.4	29.1	4.5	0.0	0.0	0.0
Gas sample No.8 2013-11-21 13:07 34.0FPD	69.1	27.9	3.0	0.0	0.0	0.0
Gas sample No.9 2013-11-28 13:49 39.4FPD	60.5	29.7	9.8	0.0	N/D	0.0
Gas sample No.10 2013-12-05 15:42 45.3FPD	68.7	23.9	7.5	0.0	N/D	0.0

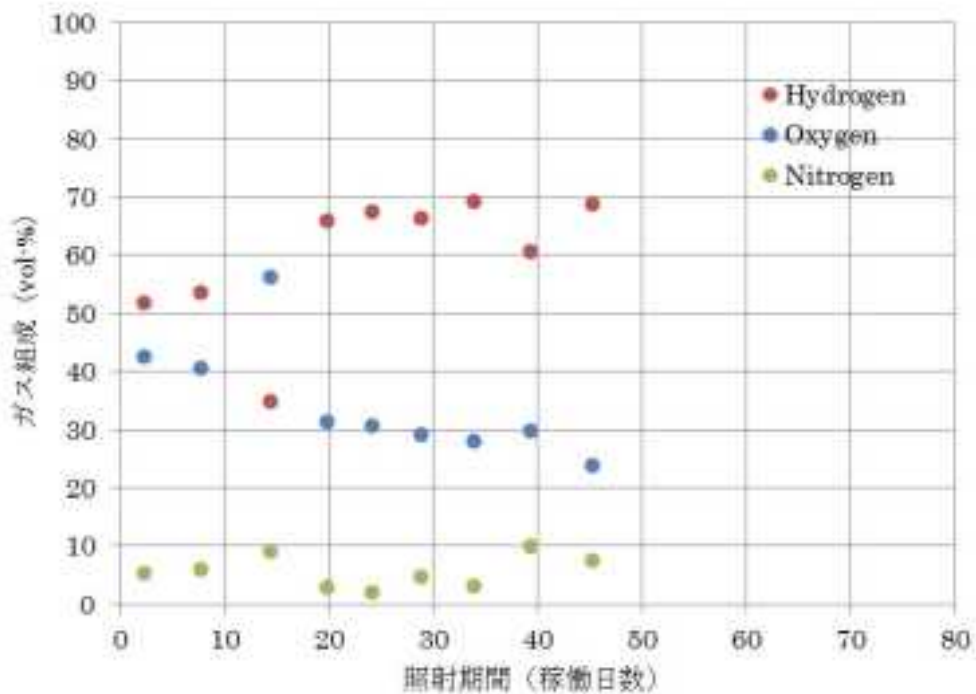


図 3.4.2-126 ガス組成の時間変化 (IT-A3: IFA-750)

表 3.4.2-43 ガスサンプルの組成分析結果 (PPT-C : IFA-752)

	組成 (vol-%)					
	水素	酸素	窒素	ヘリウム	一酸化炭素	二酸化炭素
Gas sample No.12 2014-01-16 16:10 0.1FPD	N/D	2.5	8.7	88.8	N/D	0.0
Gas sample No.13 2014-01-17 10:28 0.8FPD	47.6	9.1	4.4	38.7	0.1	0.0
Gas sample No.14 2014-01-20 11:58 3.5FPD	63.6	28.4	7.6	0.3	0.0	0.1
Gas sample No.15 2014-01-21 10:12 4.4FPD	65.0	29.6	5.1	0.2	0.0	0.1
Gas sample No.16 2014-01-22 11:47 5.4FPD	65.2	30.3	4.3	0.1	0.0	0.1
Gas sample No.17 2014-01-23 12:06 6.4FPD	63.5	30.2	6.1	0.1	0.0	0.0
Gas sample No.18 2014-01-24 08:42 7.2FPD	66.8	30.9	2.2	0.1	0.0	0.0
Gas sample No.19 2014-01-27 08:59 9.7FPD	64.3	30.7	4.8	0.1	0.0	0.0
Gas sample No.20 2014-01-30 10:23 12.0FPD	66.3	30.9	2.6	0.1	0.0	0.0
Gas sample No.21 2014-02-03 12:38 15.2FPD	66.2	30.9	2.9	0.1	0.0	0.0
Gas sample No.22 2014-02-06 09:44 17.0FPD	62.6	30.3	7.1	0.1	0.0	N/D

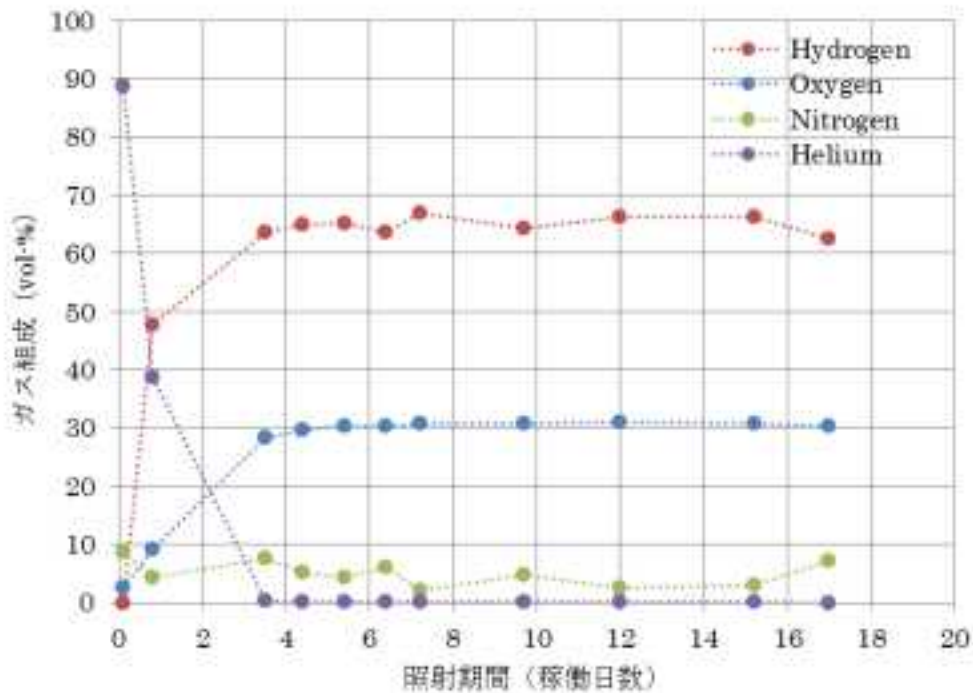


図 3.4.2-127 ガス組成の時間変化 (PPT-C : IFA-752)

(vi) 水分放出状況

図 3.4.2-128 に、試験ケース PPT-C (IFA-752) で、コンデンサーで凝縮された水分量の変化を、図 3.4.2-129 に水分の放出速度の変化を示す。試験ケース PPT-C (IFA-752) では、照射開始の段階から計測システム系統内にコンデンサーを設置し、水蒸気を凝縮し水分として捕集した。水分の放出速度は時間経過にともない低下し、長期的にはほぼゼロになると予想される。

試験ケース PPT-E (IFA-750) では、最初の約 2 か月間照射期間中はコンデンサーを用いず、定期的な長期停止期間後の再起動時にコンデンサーを設置した。従って、最初の 2 か月間に水分が放出されたので、コンデンサーでは、水がほとんど捕集されていない。ちなみに、定期的な長期停止期間に湿度計測タンク内を確認したところ、5g の凝縮水が確認されている。

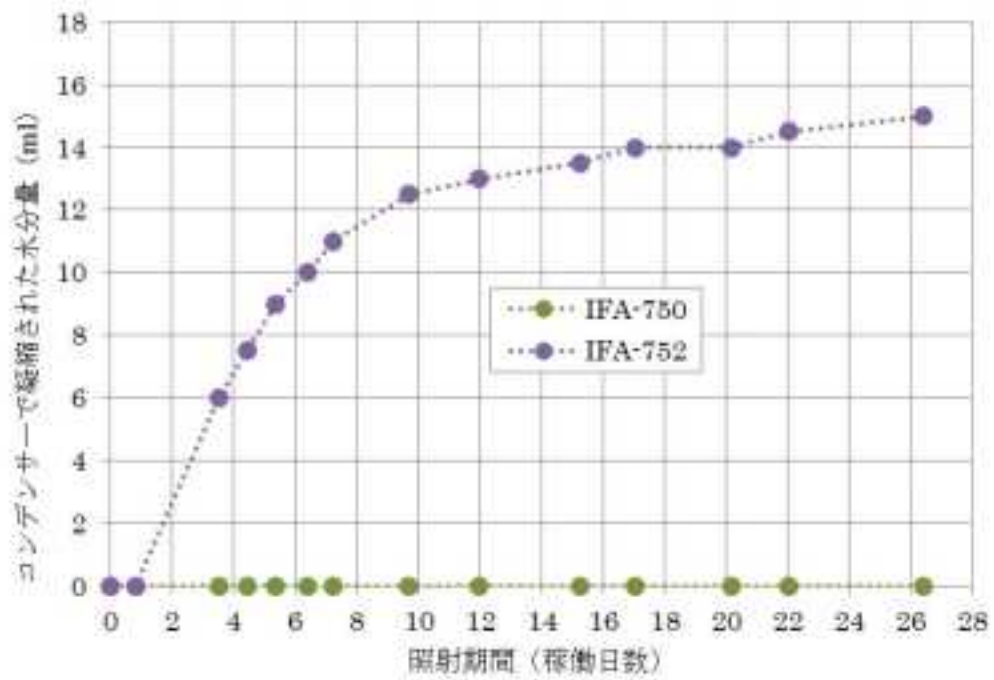


図 3.4.2-128 コンデンサーで凝縮された水分量の時間変化

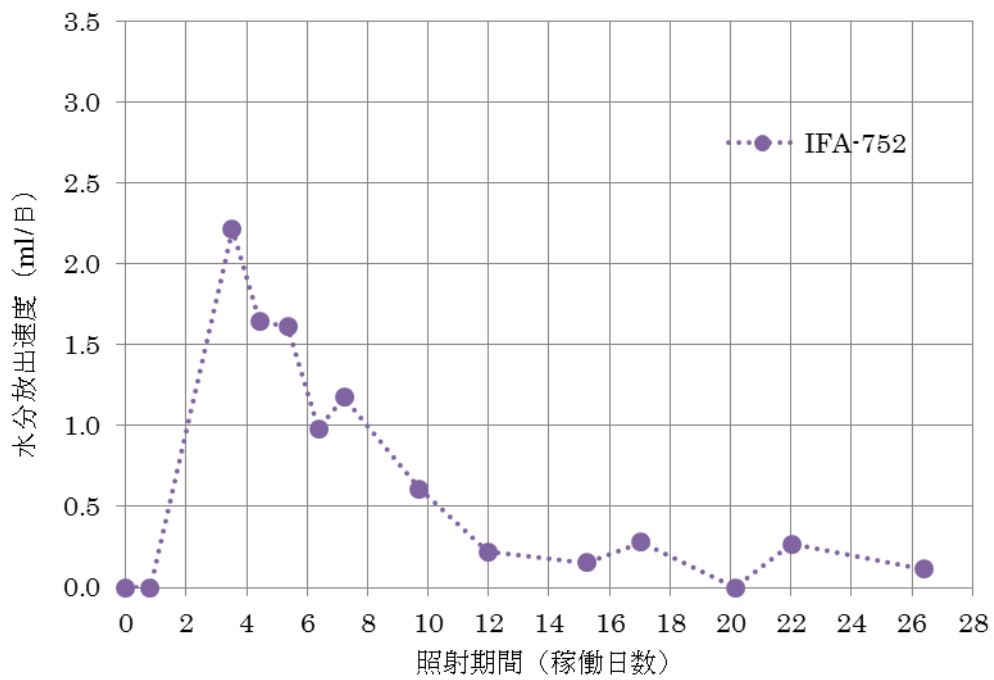


図 3.4.2-129 コンデンサーで凝縮された水分放出速度の時間変化

b) 非照射・加熱試験

中性子照射の影響を把握するために、非照射・加熱試験を行う。試験は炉外で実施し、非照射以外の条件はすべて同一している。しかし、照射時のコンクリート試験体内部の温度分布（中心が最高温度となる放物線分布）を再現することは難しかったので、加熱温度としては、コンクリート試験体断面内の最高温度と平均温度の2水準の温度で、断面内一定温度条件で非照射・加熱試験を行うこととした。

図 3.4.2-130 に、加熱試験の温度制御に関する予備試験結果を示す。試験ケース PPT-B (IFA-753) のコンクリート試験体の中央温度を、外部からの加熱で模擬できることを確認しており、試験ケース H3-1 (IFA-757) のキャプセルを用いて、相当な精度で追従できていることを確認した。あわせて、試験ケース H3-3 (IFA-755) のキャプセルを用いて、試験ケース PPT-B (IFA-753) のコンクリート試験体の平均温度を追従した状況を示す。

図 3.4.2-131 に、試験ケース H3-3 (IFA-755) についてのコンクリート試験体の中心温度変化を示す。図 3.4.2-132 に、ヘリウムフラッシングによるキャプセル内の圧力変化を示す。図 3.4.2-133 に、ヘリウムフラッシングによるガス流量の変化を示す。図 3.4.2-134 に、ヘリウムフラッシングによる湿度計測タンクにおける相対湿度の変化を示す。図 3.4.2-135 に、ヘリウムフラッシングによる湿度計測タンクにおける絶対湿度の変化を示す。

図 3.4.2-136 に、試験ケース H3-1 (IFA-757) についてのコンクリート試験体の中心温度変化を示す。図 3.4.2-137 に、ヘリウムフラッシングによるキャプセル内の圧力変化を示す。図 3.4.2-138 に、ヘリウムフラッシングによるガス流量の変化を示す。図 3.4.2-139 に、ヘリウムフラッシングによる湿度計測タンクにおける相対湿度の変化を示す。図 3.4.2-140 に、ヘリウムフラッシングによる湿度計測タンクにおける絶対湿度の変化を示す。

なお、24 日間の加熱により、試験ケース H3-3 (IFA-755：平均温度模擬) では 6.5g の凝縮水が、試験ケース H3-1 (IFA-757：最高温度模擬) では 7.5g の凝縮水が確認された。

c) コントロール試験

照射期間中の 20°C 封緘養生試験体の特性を把握するために、非照射・非加熱試験 (CT : Control test) を照射期間中の一定時期に実施した。

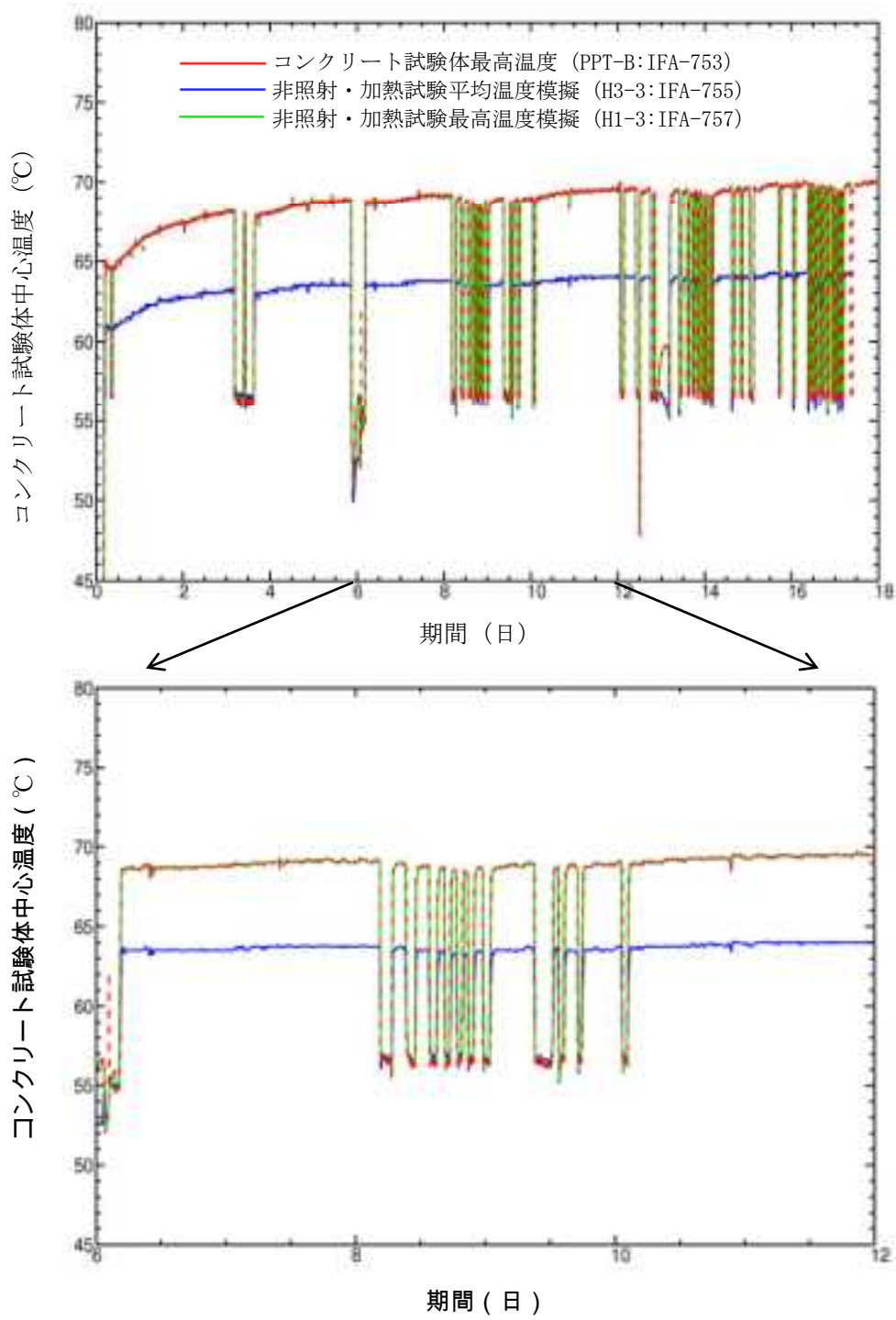


図 3.4.2-130 照射試験結果と非照射・加熱に関する予備試験結果との比較

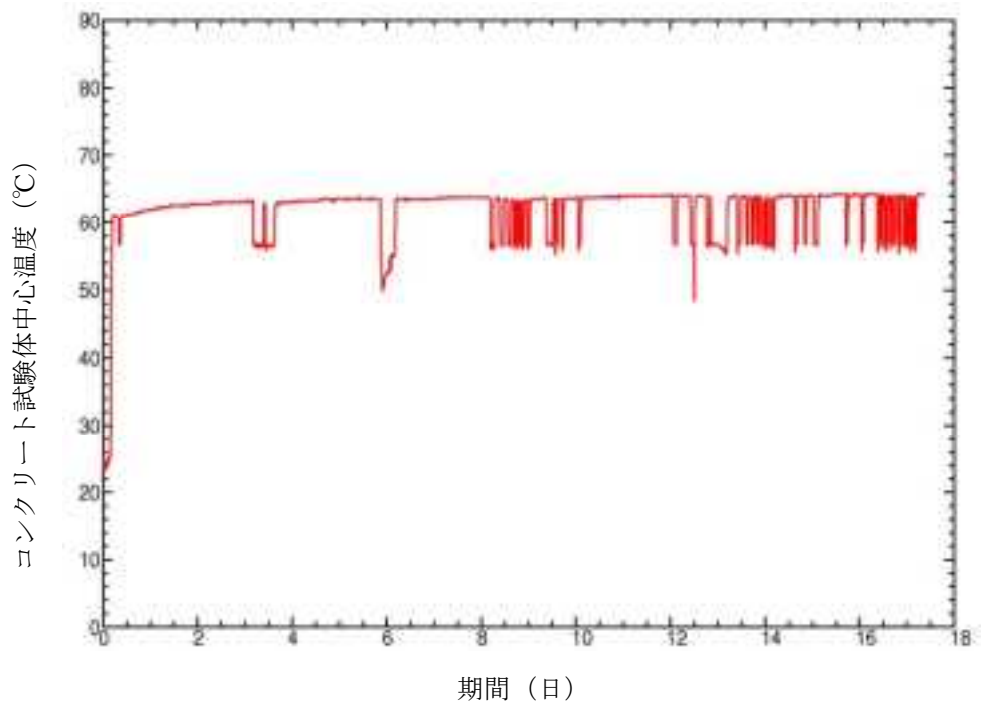


図 3.4.2-131 コンクリート試験体の中心温度変化 (H3-3: IFA-755)
 (PPT-B: IFA-753 平均温度模擬)

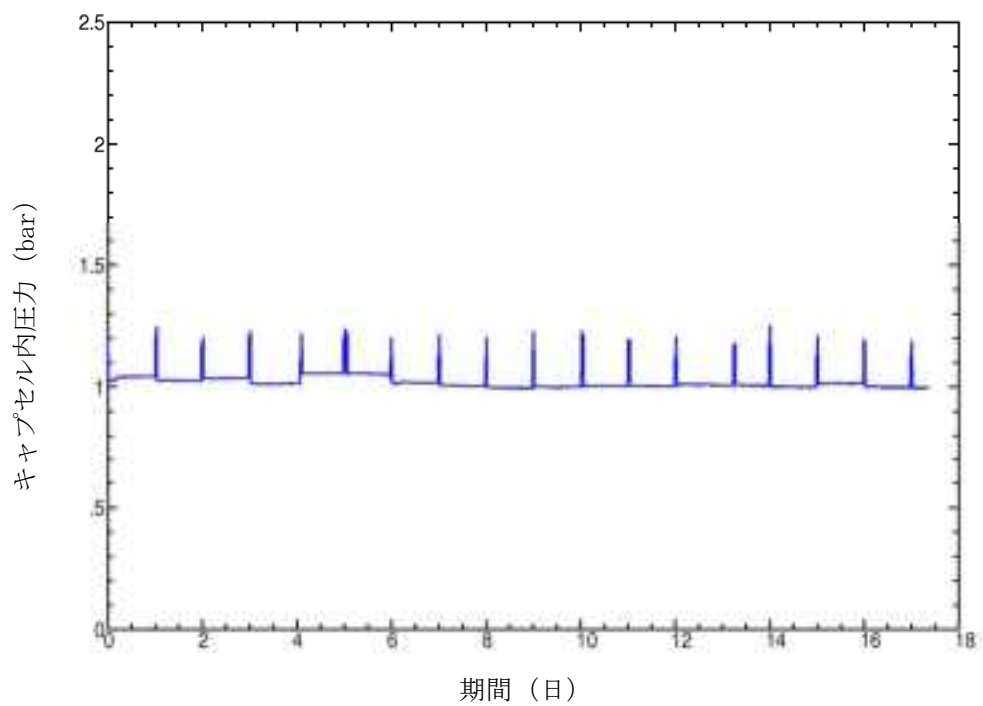


図 3.4.2-132 キャプセル内の変化 (H3-3:IFA-755)
(ヘリウムフラッシングによる圧力変化)

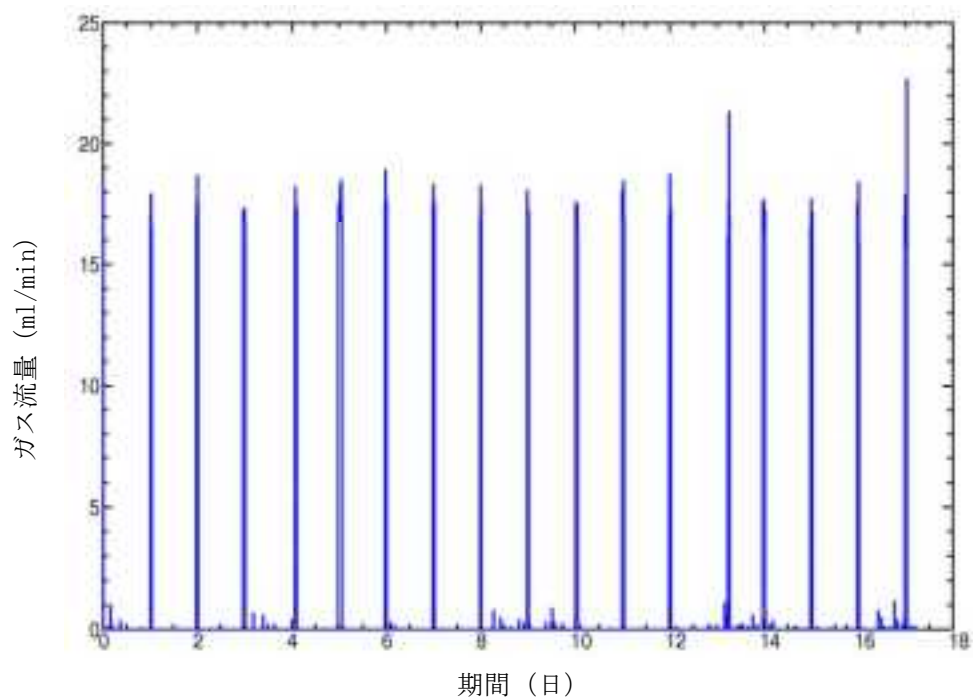


図 3.4.2-133 ガス流量の変化 (H3-3:IFA-755)
(ヘリウムフラッシングによるガスフロー変化)

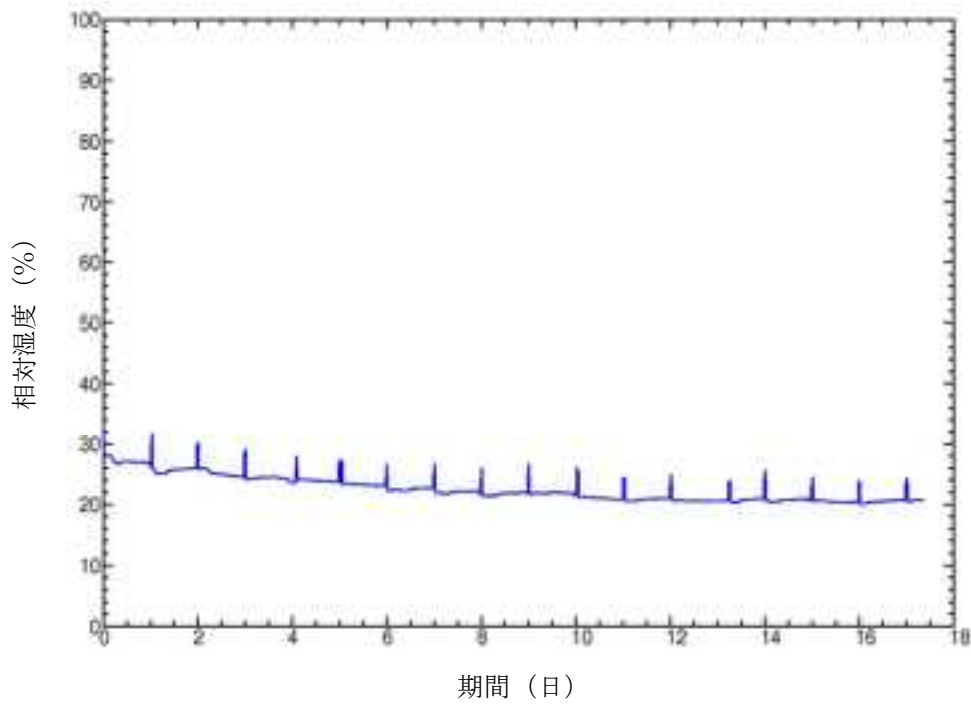


図 3. 4. 2-134 相対湿度の変化 (H3-3: IFA-755)
(ヘリウムフラッシングによる相対湿度変化)

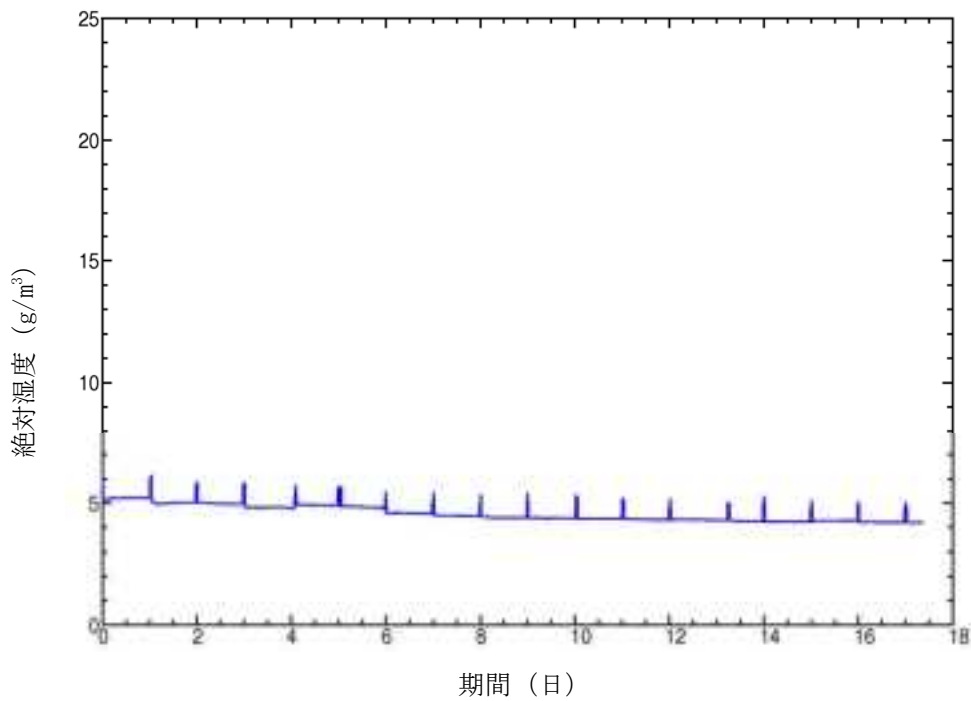


図 3. 4. 2-135 絶対湿度の変化 (H3-3: IFA-755)
(ヘリウムフラッシングによる絶対湿度変化)

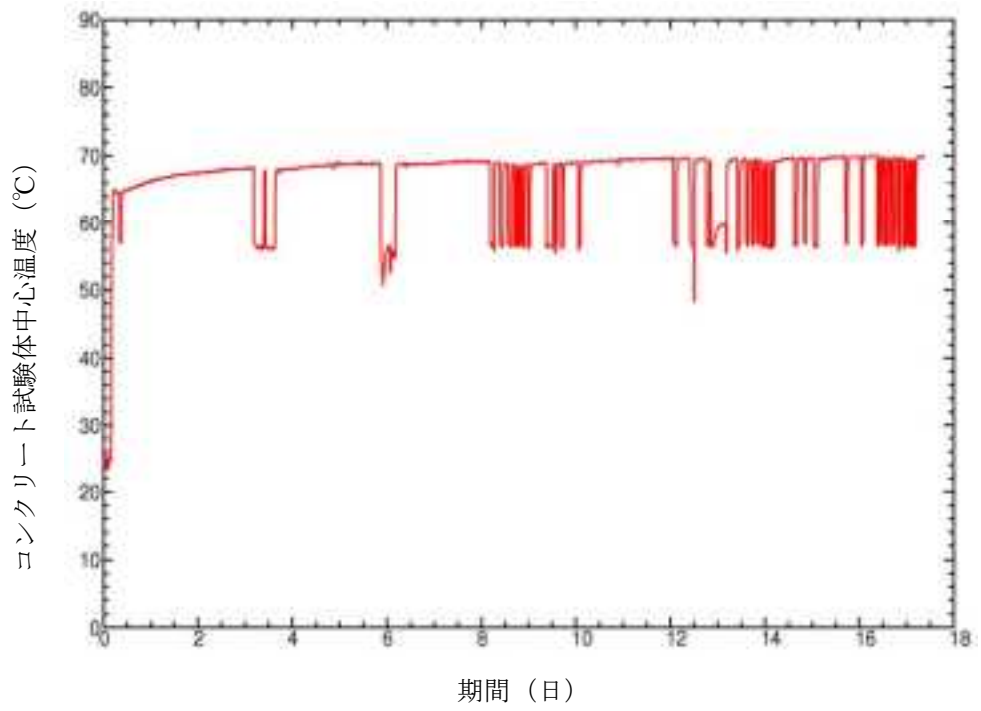


図 3.4.2-136 コンクリート試験体の中心温度変化 (H1-3: IFA-757)
(PPT-B: IFA-753 最高温度模擬)

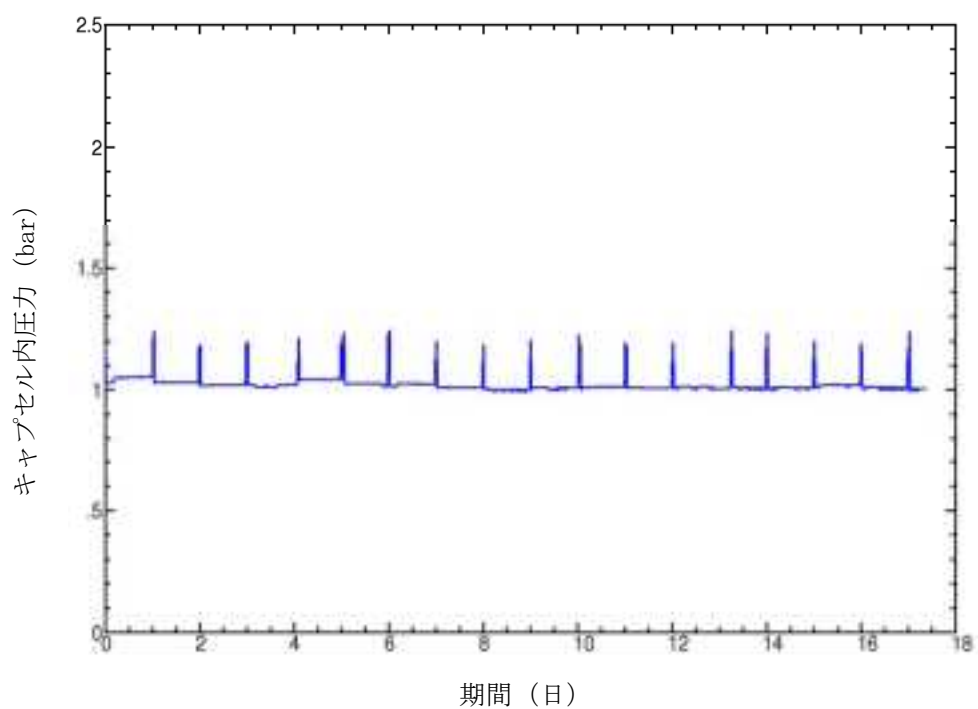


図 3.4.2-137 キャプセル内の圧力変化 (H1-3:IFA-757)
(ヘリウムフラッシングによる圧力変化)

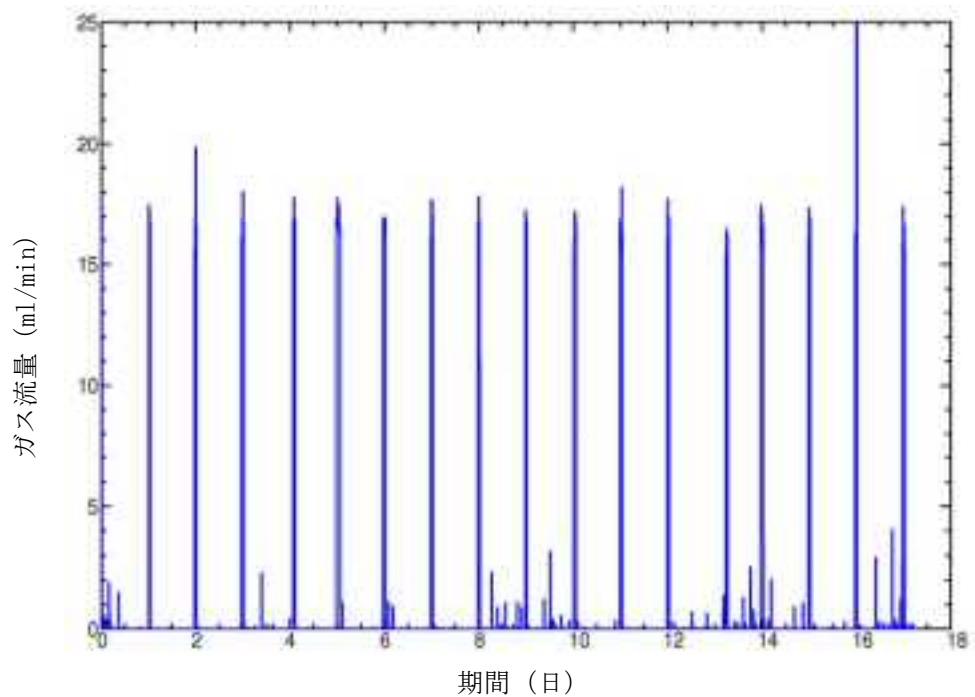


図 3.4.2-138 ガス流量の変化 (H1-3:IFA-757)
(ヘリウムフラッシングによるガスフロー変化)

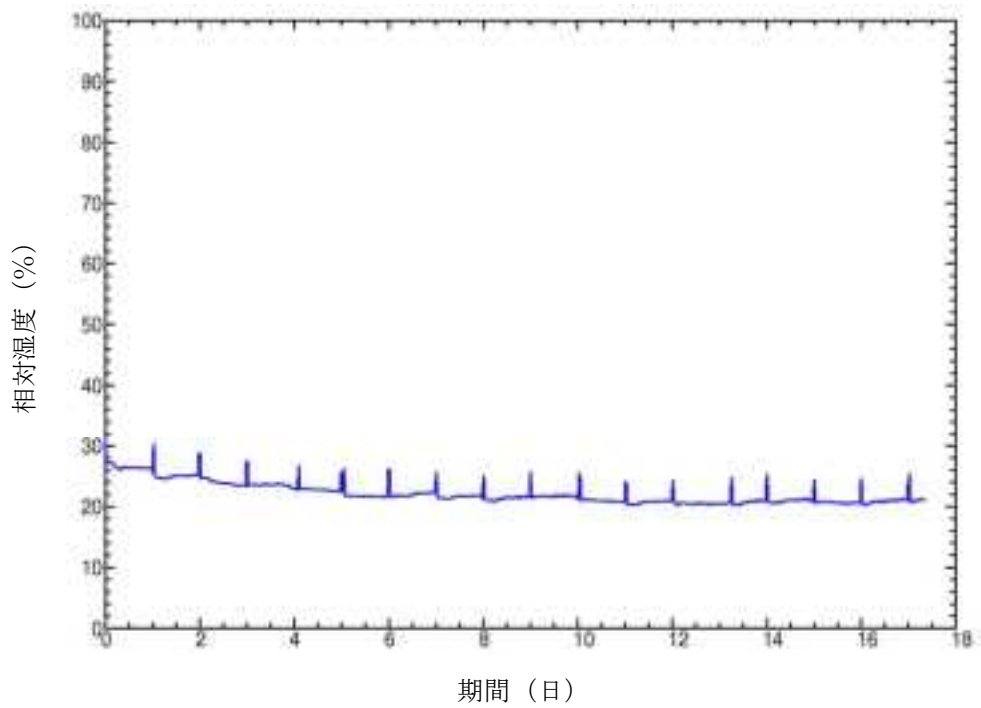


図 3.4.2-139 相対湿度の変化 (H1-3: IFA-757)
 (ヘリウムフラッシングによる相対湿度変化)

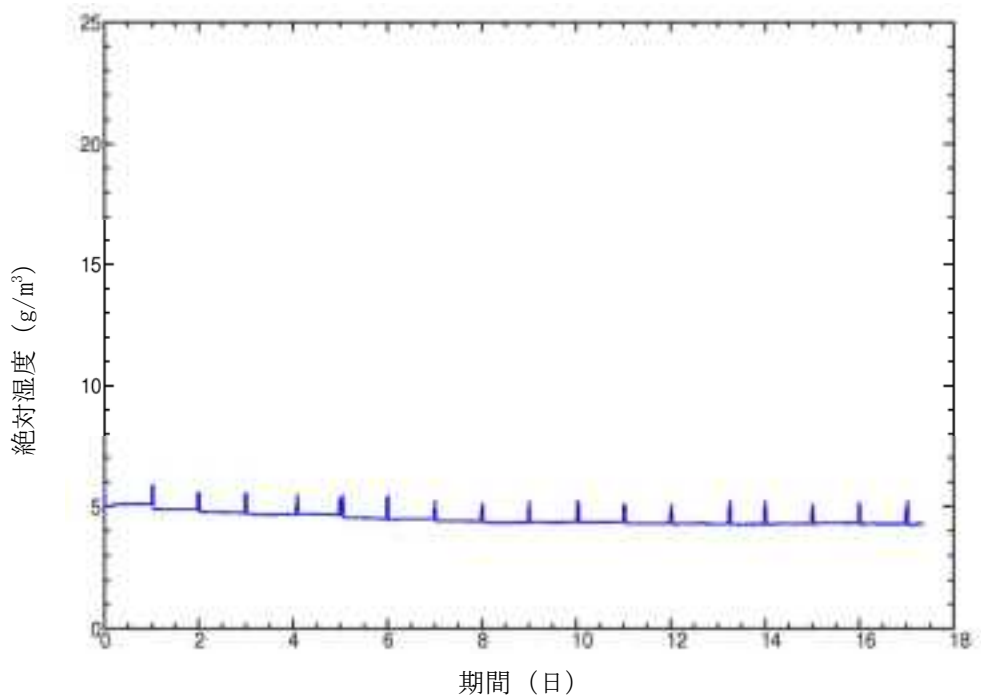


図 3.4.2-140 絶対湿度の変化 (H1-3: IFA-757)
 (ヘリウムフラッシングによる絶対湿度変化)

d) 照射後試験

試験ケース PPT-B (IFA-753) についての寸法・質量計測結果を表 3.4.2-44 および表 3.4.2-45 に示す。試験ケース H1-3 (IFA-757) についての寸法・質量計測結果を表 3.4.2-46 および表 3.4.2-47 に示す。試験ケース H3-3 (IFA-755) についての寸法・質量計測結果を表 3.4.2-48 および表 3.4.2-49 に示す。試験ケース C0 についての寸法・質量計測結果および強度試験結果を表 3.4.2-50～表 3.4.2-52 に示す。試験ケース C1 についての寸法・質量計測結果および強度試験結果を表 3.4.2-53～表 3.4.2-55 に示す。

表 3.4.2-44 寸法・質量計測結果 (PPT-B: IFA-753: 砂利)

試験体 ID	直径 (mm)						高さ (mm)				質量 (g)	
	1	2	3	4	5	平均	1	2	3	平均		

表 3.4.2-45 寸法・質量計測結果 (PPT-B: IFA-753: 碎石)

試験体 ID	直径 (mm)						高さ (mm)				質量 (g)	
	1	2	3	4	5	平均	1	2	3	平均		

表 3. 4. 2-46 寸法・質量計測結果 (H1-3: IFA-757 : 砂利)

試験体 ID	直径(mm)						高さ(mm)				質量 (g)	
	1	2	3	4	5	平均	1	2	3	平均		

表 3. 4. 2-47 寸法・質量計測結果 (H1-3: IFA-757 : 碎石)

試験体 ID	直径(mm)						高さ(mm)				質量 (g)	
	1	2	3	4	5	平均	1	2	3	平均		

表 3. 4. 2-48 寸法・質量計測結果 (H3-3: IFA-755 : 砂利)

試験体 ID	直径(mm)						高さ(mm)				質量 (g)	
	1	2	3	4	5	平均	1	2	3	平均		

表 3. 4. 2-49 寸法・質量計測結果 (H3-3: IFA-755 : 碎石)

試験体 ID	直径(mm)						高さ(mm)				質量 (g)	
	1	2	3	4	5	平均	1	2	3	平均		

表 3.4.2-50 寸法・質量計測結果 (C0:砂利)

試験体 ID	直径 (mm)						高さ (mm)				質量 (g)
	1	2	3	4	5	平均	1	2	3	平均	
1-133	40.4	40.4	40.4	40.1	40.2	40.3	59.3	59.4	59.3	59.3	181.8
1-134	40.3	40.1	40.1	40.4	40.4	40.3	59.6	59.5	59.6	59.6	182.4
1-135	40.4	40.4	40.4	40.2	40.2	40.3	59.7	59.8	59.9	59.8	182.8

表 3.4.2-51 寸法・質量計測結果 (C0:碎石)

試験体 ID	直径 (mm)						高さ (mm)				質量 (g)
	1	2	3	4	5	平均	1	2	3	平均	
2-133	40.5	40.4	40.4	40.1	40.1	40.3	59.7	59.7	59.7	59.7	182.6
2-134	40.2	40.0	40.1	40.4	40.3	40.2	59.0	59.2	59.2	59.1	181.3
2-135	40.2	40.1	40.2	40.4	40.4	40.3	59.8	59.6	59.5	59.6	182.9

表 3.4.2-52 圧縮強度・弾性係数 (C0)

試験体 ID	骨材種類	圧縮強度 (N/mm ²)		弾性係数 (kN/mm ²)	
1-133	砂利	66.1	61.8	37.1	35.2
1-134		57.9		35.8	
1-135		61.3		32.7	
2-133	碎石	68.8	67.0	40.9	39.3
2-134		66.9		36.4	
2-135		65.2		40.5	

表 3.4.2-53 寸法・質量計測結果 (C1:砂利)

試験体 ID	直径 (mm)						高さ (mm)				質量 (g)
	1	2	3	4	5	平均	1	2	3	平均	
1-133	40.4	40.4	40.4	40.1	40.2	40.3	59.3	59.4	59.3	59.3	181.8
1-134	40.3	40.1	40.1	40.4	40.4	40.3	59.6	59.5	59.6	59.6	182.4
1-135	40.4	40.4	40.4	40.2	40.2	40.3	59.7	59.8	59.9	59.8	182.8

表 3.4.2-54 寸法・質量計測結果 (C1:碎石)

試験体 ID	直径 (mm)						高さ (mm)				質量 (g)
	1	2	3	4	5	平均	1	2	3	平均	
2-133	40.5	40.4	40.4	40.1	40.1	40.3	59.7	59.7	59.7	59.7	182.6
2-134	40.2	40.0	40.1	40.4	40.3	40.2	59.0	59.2	59.2	59.1	181.3
2-135	40.2	40.1	40.2	40.4	40.4	40.3	59.8	59.6	59.5	59.6	182.9

表 3.4.2-55 圧縮強度・弾性係数 (C1)

試験体 ID	骨材種類	圧縮強度 (N/mm ²)		弾性係数 (kN/mm ²)	
1-133	砂利	66.1	61.8	37.1	35.2
1-134		57.9		35.8	
1-135		61.3		32.7	
2-133	碎石	68.8	67.0	40.9	39.3
2-134		66.9		36.4	
2-135		65.2		40.5	

4) 今後の課題

(a) 相互作用試験

相互作用試験では、水分放出量は非常に重要な計測項目である。しかし、当初の計測システムでは、湿度計測タンクに水蒸気が凝縮して結露するために、タンク内が飽和状態となり、湿度の計測ができず、その結果、水分放出量の計測が不正確となった。照射前後における試験体の質量差より、放出された水分量を把握することは可能であるが、放出速度を知ることはできない。そこで、湿度計測タンクの前に、コンデンサーを設置し、水蒸気を凝縮水として捕集することにより湿度計測タンクの湿度を計測できる範囲に低下させた。今後は、改良した計測システムを用いて水分放出量、放出速度等のデータを蓄積する。

試験ケース IT-A3 (IFA-760) では、封緘養生のセメントペースト試験体を用いて、中性子照射に対する水分解状況に関するデータを取得した。ガンマ線照射試験で得られたガンマ線が水の分解に及ぼす影響に基づいて、中性子が水分解に及ぼす影響について評価したところ、36 番照射孔位置では、水分分解に及ぼす影響は、中性子とガンマ線ではほぼ同等のレベルとなった。

今後、実施する試験ケース IT-A2 (IFA-759) では、75℃で乾燥させ多くの自由水を放出した試験体を用いて、また、試験ケース IT-A1 (IFA-758) では 120℃で乾燥し自由水を完全に除去した試験体を用いて、照射試験を行い、中性子照射が自由水や結合水に及ぼす影響について把握する。中性子とガンマ線の放射線分解に対する影響の度合いは、放射線による劣化メカニズムを評価する上で非常に重要な知見である。

(b) 物理特性試験 (Physical Property Test :PPT)

物理特性試験については、目標照射量の最も小さい試験ケース PPT-C (IFA-753) を終了し、最も大きい試験ケース PPT-E (IFA-750) を照射中である。

ガンマ線照射試験では、常にアルゴンガスを流して発生するガスや水蒸気を計測系に移送したが、アルゴン雰囲気は乾燥条件としては厳しすぎるとの意見があった。そこで、中性子照射試験ではキャリアガスを用いず、発生する圧力を放出する方法で発生ガスや水蒸気を捕集するシステムとした。

このような計測システムの特徴に加えて、試験ケース PPT-C (IFA-753) については、照射期間が非常に短かったので、コンクリートが湿潤状態であることが予想された。一方、長期的に照射するケースについては、試験体の乾燥も進むことが予想され、強度試験結果には、中性子照射量の影響だけでなく試験体の水分量が影響するとの認識があった。そこで、照射試験体については、乾燥の影響（含有水分量の影響）を排除するために、照射後試験を実施する前に、照射時の最高温度で乾燥させることとした。

このような前処理により、水分の影響を除去し、中性子による骨材膨張の影響を抽出できると考えているが、本当に水分の影響が小さいことについては、非照射・加熱試験、非照射・非加熱試験結果等を活用し、今後総合的に判断する必要がある。

(4) コンクリートの照射劣化評価システム高度化のための基礎的検討

1) 割裂引張強度の温度・乾燥依存性

本研究は、昨年度行った研究とどのように、ガンマ線発熱によってコンクリートの引張強度がどのように変化するかを検討するものである。すでに見てきたように、コンクリートの圧縮強度とヤング率は、まったく別のメカニズムによって変化を生ずる。そのため、強度からヤング率推定することが誤りであることも示した。現状、コンクリートの引張強度はせん断引張破壊や付着割裂破壊などの RC 部材の破壊モードに影響を及ぼすと考えられるが、これらについても圧縮強度から推定されているのが一般的である。そのため、本研究では、割裂引張強度が熱によってどのように変化するかについて検討を行うとともに、そのメカニズムについて検討した。

(a) 実験方法

a) 使用材料及び調合

本実験で使用した材料を表 3.4.2-56、使用したセメントの物性と化学成分を表 3.4.2-57、使用したモルタルとコンクリートの調合及びフレッシュ性状試験の結果を表 3.4.2-58 に示す。

表 3.4.2-56 使用材料

材料	記号	物理的性質など
セメント	C	普通ポルトランドセメント, 密度 : 3.16g/cm ³ , ブレーン値 : 3230cm ² /g
細骨材	S	大井川水産系陸砂, 表乾密度 : 2.59g/cm ³ , 吸水率 : 2.08%
粗骨材	GLS	秩父産石灰岩砕石, 表乾密度 : 2.64 g/cm ³ , 吸水率 : 0.36%
	GSS	硬質砂岩砕石, 表乾密度 : 2.64 g/cm ³ , 吸水率 : 0.89%
AE 減水剤	AE	AE 減水剤標準 I 種
増粘剤	AS	セルロース系水溶性高分子化合物

表 3.4.2-57 セメント物性と化学成分 (mass%)

LOI	化学成分								
	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	CaO	MgO	SO ₃	Na ₂ O	K ₂ O	Cl ⁻
2.3	20.04	5.21	2.87	64.9	1.46	2.21	0.14	0.34	0.019

表 3.4.2-58 コンクリートの調合及びフレッシュ性状試験の結果

	調合									スランブ (cm)	空気量 (%)	練上がり温度 (°C)
	W/C (%)	s/a (%)	単位量(kg/m ³)									
			W	C	S	GLS	GSS	AE	AS			
Mortar	55	—	271	492	1432	—	—	4.9	2.0	23	4.9	21
LS	55	51.8	177	322	940	909	—	3.2	1.3	10.0	3.0	21
SS	55	51.8	177	322	940	—	892	3.2	1.3	9.0	2.6	21

b) 試験体の作製

コンクリートの粗骨材には、図 3.4.2-141 に示されるように、乾燥収縮ひずみの性状が異なる石灰岩砕石 (GLS) と硬質砂岩砕石 (GSS) を使用した。それぞれの粗骨材の粒径を 5～10mm、10～15mm、15～20mm に調整し、この 3 種類を重量で等分に混ぜたものコンクリートに添加した。粗骨材種類の異なる 2 種類のコンクリートと、モルタルを φ100×200mm の型枠に打設し、その後、材齢 1 日または 2 日に脱型を行った。試験開始まで飽和水酸化カルシウム水溶液中で 20°C±1°C の一定条件の下で標準水中養生を行った。試験体は φ100×200mm のモルタル及びコンクリート試験体をダイヤモンドカッターで厚さ 9mm に切断し、φ100×9mm としたものをを用いた。また、乾燥条件は飽水、95%RH、80%RH、43%RH、60%RH、11%RH、40°C、65°C、90°C の計 9 種類であり、骨材種類と合わせて計 27 種類のパラメーターとした。試験体名は、石灰岩砕石を用いたコンクリートを LS、硬質砂岩砕石を用いたコンクリートを SS と表記する。

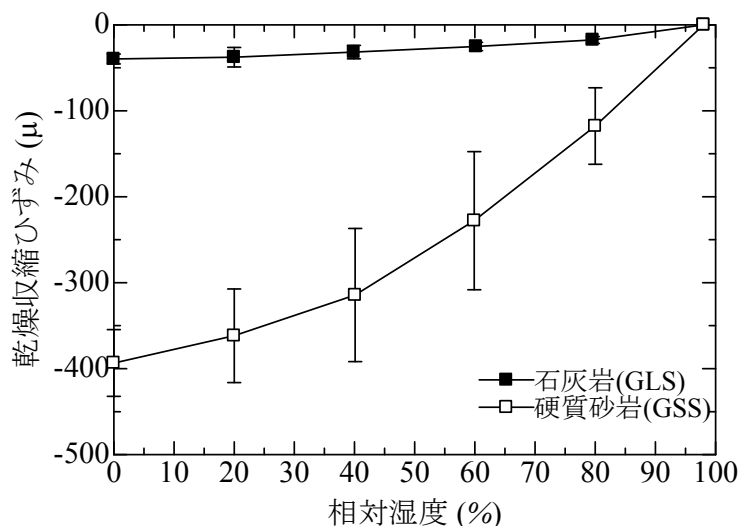


図 3.4.2-141 粗骨材の乾燥収縮ひずみと相対湿度の関係

c) 実験の手順

実験の手順を図 3.4.2-142 に示す。試験体作製後、試験開始まで標準水中養生を行った。飽水状態で長さ測定を行い、乾燥収縮ひずみの基長を得た後、所定の湿度及び温度で乾燥させた。24 時間の試験体の質量変化が 0.03%以下となった時点で平衡状態に達したと判断し、乾燥終了とした。乾燥終了後、再び長さ測定を行い、乾燥収縮ひずみを得た。最後に割裂引張試験を行い、割裂引張強度の測定を行った。

φ100×9mm という寸法の試験体で割裂引張試験を行うにあたって、寸法効果による強度変化の影響が考えられるため、別途検討を行った。

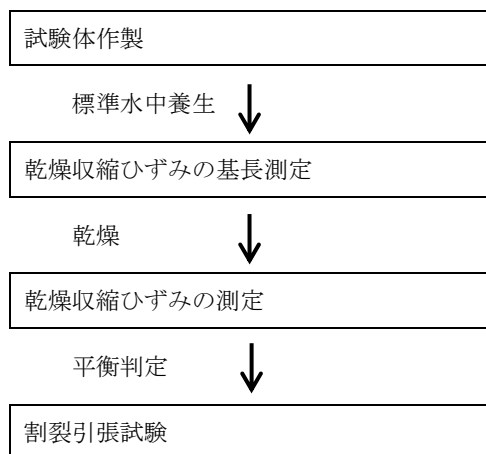


図 3.4.2-142 実験の手順

d) 乾燥収縮ひずみの測定

乾燥前後の試験体の長さ変化を、レーザー変位計(精度：1/2000mm)を用いて測定した。測定の様子を図 3.4.2-143 に示す。長さが既知のステンレス鋼を用意し、試験体との長さの差によって試験体の長さを求め、乾燥収縮ひずみを算出した。なお、ステンレス鋼は温度によって長さが変化するため、測定中の室内温度も合わせて測定し、線膨張係数を用いて補正を行った。ステンレス鋼の線膨張係数は実測した $17 \times 10^{-6}/^{\circ}\text{C}$ とした。また、一つの試験体につき 3 か所の直径を測定し、その平均値をもってその試験体の乾燥収縮ひずみとした。



図 3. 4. 2-143 乾燥収縮ひずみ測定の様子

e) 割裂引張試験

前節に示した所定の条件で乾燥、長さ測定を行った後、同じ試験体で載荷装置を用いて割裂引張試験を行った。

(b) 実験結果及び考察

a) 供試体寸法が実験結果に及ぼす影響に関する検討

通常のコンクリートの割裂引張試験では、 $\phi 100 \times 200\text{mm}$ の試験体を用いるが、本研究では、 $\phi 100 \times 200\text{mm}$ を切断した $\phi 100 \times 9\text{mm}$ の円板状の試験体を使用している。そこで、供試体寸法が実験結果に及ぼす影響についての検討を併せて行った。

コンクリートの強度における寸法効果については、代表的なものとして、破壊力学の観点から評価したもの²⁵や、骨材寸法の観点から評価したもの²⁶などがあり、多くの研究がなされてきた。

特に、割裂引張試験における寸法効果については、長谷川ら²⁷は、試験体長さによる寸法効果は認められないが、試験体の直径が 50cm 以下の範囲では、応力分布性状や、破壊モードに変化が起り、寸法効果によって割裂引張強度が減少すると報告している。また、榊原ら²⁸は、割裂引張強度の平均値はほぼ同等であるが、割裂断面積が大きくなった場合には、標準偏差が小さくなると報告している。さらに、田中ら²⁹は、試験体の直径が 500mm 以上では材料の非均質性に起因する寸法効果が認められ、直径が 200mm 以下の場合には破

²⁵ Z. P. Bazant : " Size Effect in Blunt Fracture: Concrete, Rock, Metal" , Journal of Structural Division, Proc. of ASCE, pp.2473-2490, 1972

²⁶ 谷川恭雄, 山田和夫 : " コンクリートの圧縮強度の寸法効果について" , 日本建築学会論文報告集, 第 262 号, pp.13-21, 1977. 12

²⁷ 長谷川俊昭, 塩屋俊幸, 岡田武二 : " コンクリートの割裂引張強度に関する寸法効果" , コンクリート工学年次論文報告集, Vol. 7, pp. 309-312, 1985

²⁸ 榊原泰造, 近松竜一, 十河茂幸 : " 割裂引張強度の試験結果に及ぼす寸法効果の影響" , 第 58 回土木学会年次学術講演会講演概要集, pp. 419-420, 2003. 9

²⁹ 田中泰司, Joop. A. den Uijl : " 確率論的解析手法による割裂引張強度の寸法効果に関する検討" , コンクリート工学年次論文集, Vol. 30, No. 3, pp. 49-54, 2008. 7

壊エネルギーに起因する寸法効果が起こると報告している。以上のように、寸法効果が割裂引張強度に与える影響については、統一的な見解がなされておらず、さらには今回用いる試験体のように長さ 9mm 程度で実験を行っている例は見られない。そこで、 $\phi 100 \times 9\text{mm}$ の試験体を用いた場合の寸法効果について、併せて評価を行うために、次に示されるように実験条件の設定を行った。

寸法効果の影響を検討するために、本研究で用いる $\phi 100 \times 9\text{mm}$ の試験体のほかに、 $\phi 100 \times 150\text{mm}$ 、 $\phi 100 \times 100\text{mm}$ 、 $\phi 100 \times 50\text{mm}$ の計 4 種類の大きさの試験体について、割裂引張試験を行った。試験体には、石灰岩碎石の粒径が 15 ~ 20mm ものを粗骨材として使用し、調合は表 3.4.2-58 中の LS と同じとした。乾燥は行わず、飽水状態で各寸法につき 3 体載荷を行った。

各寸法の試験体の割裂引張試験の結果を図 3.4.2-144 に示す。全体としては、試験体寸法と割裂引張強度との間には相関関係が無く、試験体寸法が $\phi 100 \times 9\text{mm}$ においても、割裂引張強度を評価することが可能であると推測される。

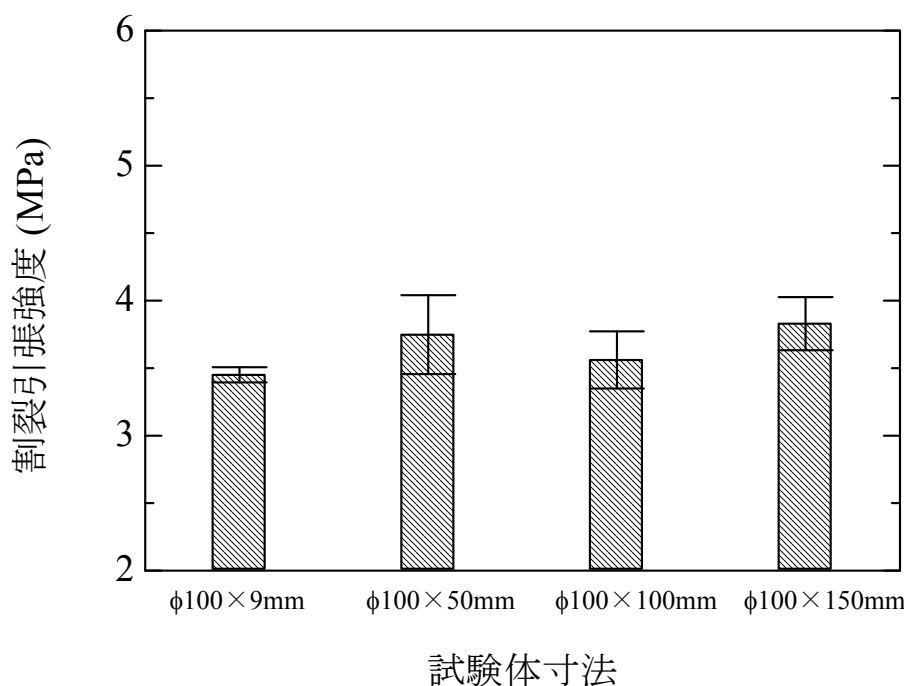


図 3.4.2-144 試験体寸法と割裂引張強度の関係

b) コンクリート・モルタルの乾燥収縮ひずみについて

図 3.4.2-145 に LS、SS、モルタル試験体の乾燥収縮ひずみと乾燥条件の関係を示す。各乾燥条件において、SS の乾燥収縮ひずみのほうが、LS の乾燥収縮ひずみよりも大きいという結果になった。図 3.4.2-141 で示したように、各相対湿度における乾燥収縮ひずみは粗骨材 SS のほうが大きい。このことは、粗骨材の乾燥収縮ひずみが、コンクリートの乾燥収

縮ひずみに影響を及ぼすという既往の研究³⁰と一致した。

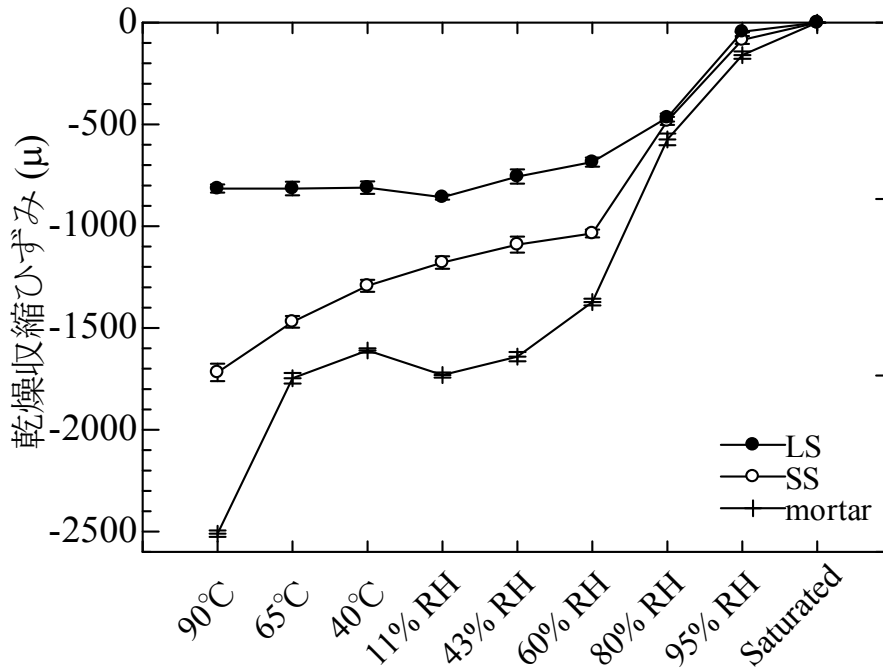


図 3.4.2-145 乾燥収縮ひずみと乾燥条件の関係

c) コンクリート・モルタルの割裂引張強度について

(i) セメントペーストの強度変化の観点からの考察

図 3.4.2-146 に各試験体の割裂引張強度と乾燥条件の関係、図 3.4.2-147 に各試験体の強度比と乾燥条件の関係を示した。ここで、強度比とは飽水状態の試験体の割裂引張強度の平均値に対する、各乾燥条件の試験体の割裂引張強度の平均値の比である。モルタルについては、飽水から 60%RH まで割裂引張強度が増加し、60%RH から 43%RH にかけては減少、43%RH から 11%RH にかけては再び増加して、11%RH における割裂引張強度が最大となった。図-7 に示したセメントペーストの曲げ強度³¹と比較すると、80%RH から 60%RH での挙動はセメントペーストの強度変化とは異なるものの、60%RH から 11%RH では似た傾向を示し、11%RH で割裂引張強度が最大値を取ることから、湿度乾燥領域においては、モルタルの割裂引張強度には、ベースとなっているセメントペーストの強度変化が大きな影響を与えると推測される。

³⁰ 後藤幸正, 藤原忠司: “コンクリートの乾燥収縮に及ぼす骨材の影響”, 土木学会論文報告集, 第 286 号, pp.125-137, 1979

³¹ 丸山一平, 西岡由紀子, 五十嵐豪: “乾燥下におけるセメントペーストの物性変化 V. 強度およびヤング率の評価”, 第 67 回セメント技術大会講演要旨, pp.234-235, 2013.5

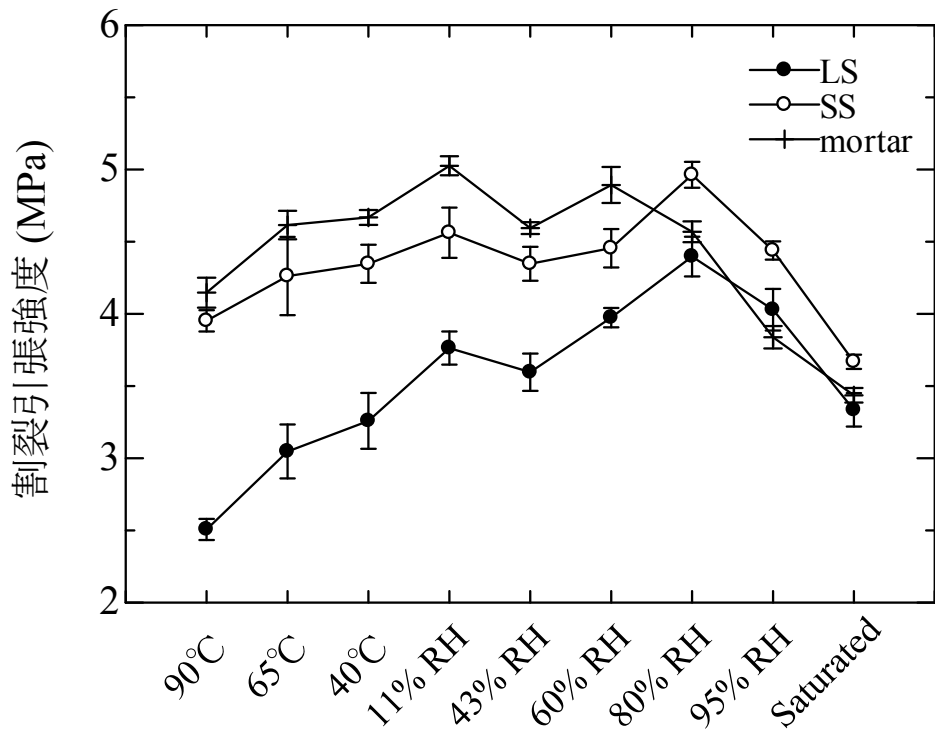


図 3.4.2-146 割裂引張強度と乾燥条件の関係

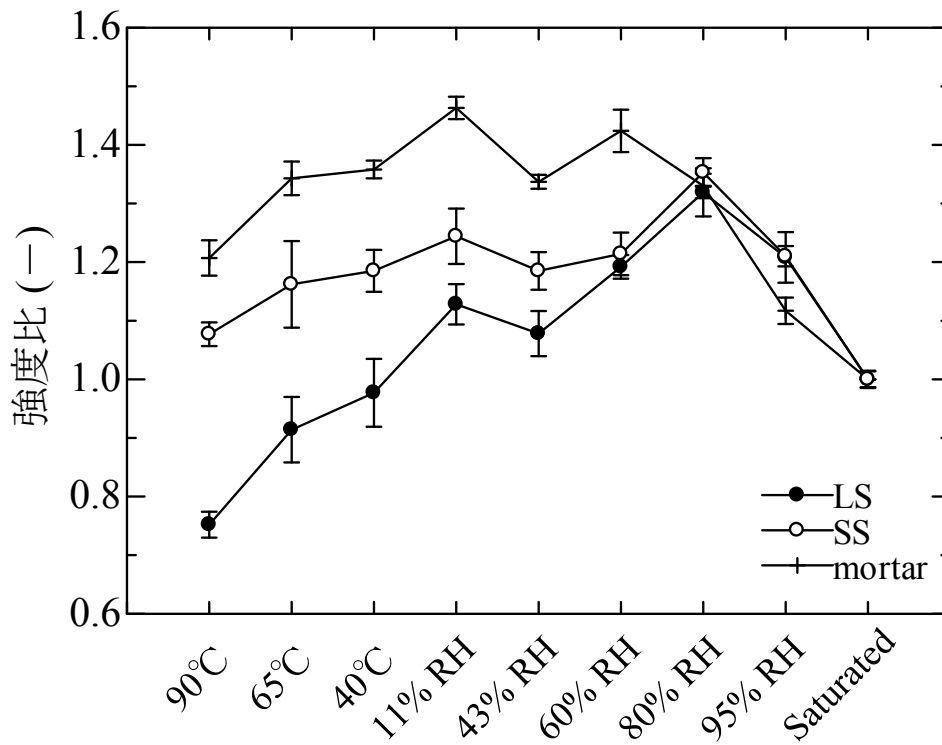


図 3.4.2-147 強度比と乾燥条件の関係

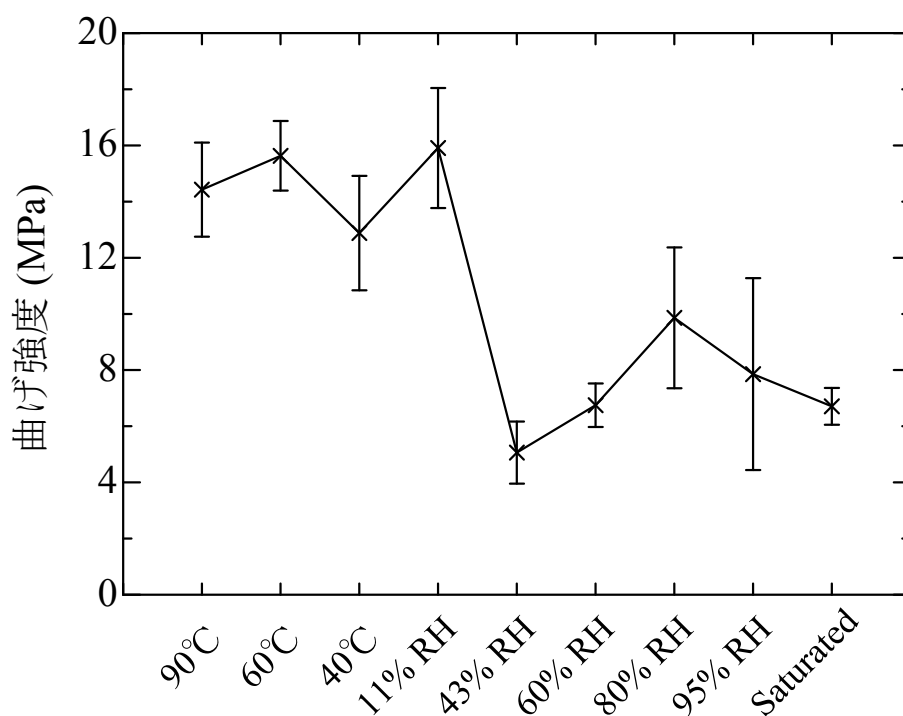


図 3.4.2-148 セメントペースト曲げ強度と乾燥条件の関係

LS 試験体と SS 試験体については、湿度乾燥領域において、両者とも、飽水から 80%RH までは割裂引張強度が増加し、その後 43%RH まで減少、43%RH から 11%RH にかけて再び増加するという結果が得られた。高温乾燥領域では、乾燥温度の上昇に伴って割裂引張強度が減少していった。湿度乾燥領域において、80%RH で LS・SS 試験体の割裂引張強度が最大値を取るという点がセメントペーストの曲げ強度の変化とは異なる。しかし、各乾燥条件における、割裂引張強度の変化がセメントペーストの曲げ強度の変化と同様の傾向であることから、湿度乾燥領域においては、コンクリートの割裂引張強度には、セメントペーストの強度変化が強く影響すると推測される。

高温乾燥領域において、LS・SS 試験体ともに減少傾向を示しており、セメントペーストの曲げ強度の変化とは異なる。よって、高温乾燥領域においては、別の要因が、セメントペーストの強度変化よりも強く影響し始めると推測される。このことに関しては、微細ひび割れの観点から考察を行う。

(ii) 微細ひび割れの観点からの考察

粗骨材の拘束効果が高いほど、乾燥収縮ひずみが小さくなる³²ことと、微細ひび割れがより多く発生する³³という報告があることから、乾燥収縮ひずみから微細ひび割れの発生

³² 後藤幸正, 藤原忠司: “コンクリートの乾燥収縮に及ぼす骨材の影響”, 土木学会論文報告集, 第 286 号, pp.125-137, 1979

³³ Ippei Maruyama, Hiroshi Sasano: ” Strain and crack distribution in concrete during drying ”, M&S, DOI 10.1617/10.1617/s11527-013-0076-7, 2013.4

の程度を評価できると考え、Gap strain を定義して考察を行う。Gap strain は、同じ乾燥条件におけるコンクリート試験体の乾燥収縮ひずみとモルタル試験体の乾燥収縮ひずみとの差として定義する。Gap strain は、コンクリートにおいて、モルタルの収縮を、粗骨材がどれだけ拘束したかを表す指標であり、つまり、この値が大きいほど、粗骨材がモルタルを強く拘束し、微細ひび割れがより多く発生していると推測される。

図 3.4.2-149 に Gap strain と乾燥条件の関係を示した。どの乾燥条件においても LS 試験体のほうが Gap strain の値が大きく、SS 試験体よりも微細ひび割れが多く発生していると推測される。

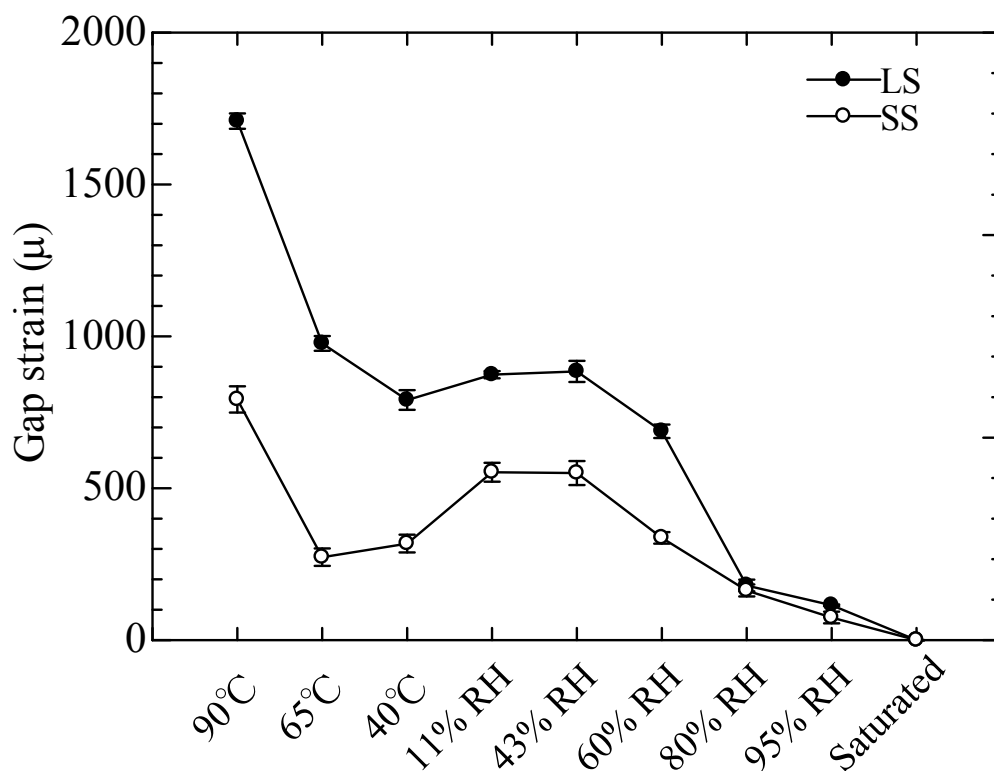


図 3.4.2-149 Gap strain と乾燥条件の関係

図 3.4.2-150 にはすべての乾燥条件における、強度比と Gap strain の関係を、図 3.4.2-151 には高温乾燥させた試験体の、強度比と Gap strain の関係を示した。図 3.4.2-150 より、全体的な傾向として、Gap strain の増加に伴って強度比が低下することが確認され、微細ひび割れが割裂引張強度の変化に影響を及ぼす考えられた。

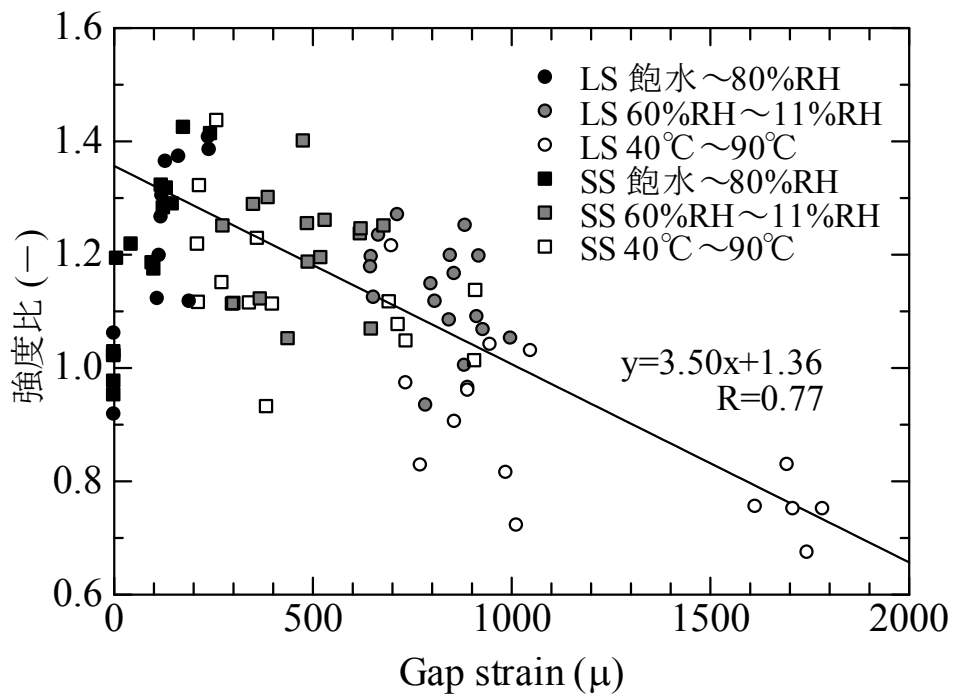


図 3.4.2-150 強度比と Gap strain の関係 (全ての乾燥条件)

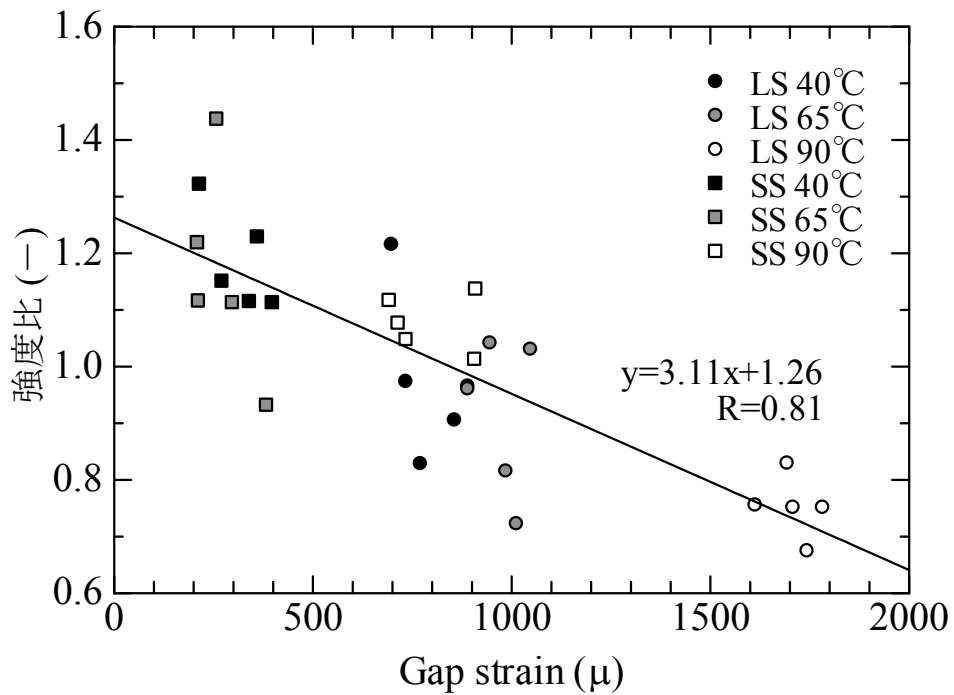


図 3.4.2-151 強度比と Gap strain の関係 (高温乾燥のみ)

セメントペーストの強度変化と異なる傾向を示すコンクリートの 40°C から 90°C の高温乾燥領域では、図 3.4.2-151 における Gap strain が著しく増加している。さらに、Gap strain

が最大値をとる LS 90°Cの試験体において、割裂引張強度が最小値を取ることから、Gap strain が大きい領域では、微細ひび割れの影響がセメントペースト強度の影響よりも大きくなり、コンクリートの割裂引張強度の低下要因となるということが推測される。

(c) まとめと今後の展望

本研究では、温度・湿度変化により乾燥を受けたコンクリートの割裂引張強度の変化に関する検討を行い、以下の知見を得た。

- ① モルタルの割裂引張強度については、飽水から 11%RH においてはベースとなっているセメントペーストの影響が支配的となる。
- ② 飽水から 11%RH までのコンクリートの割裂引張強度には、セメントペーストの曲げ強度が支配的な影響を有する。
- ③ コンクリート試験体を高温で乾燥させた場合には、微細ひび割れの影響が顕著となり、コンクリートの割裂引張強度が低下した。全体的な挙動は圧縮強度の結果と類似している。

以上の結論をもとに、来年度以降は、数値解析的検討において、圧縮強度だけでなく、ヤング率、割裂引張強度の分布も評価できるよう高度化を検討する。

2) アルカリ反応性骨材を使用したコンクリートの諸物性

本検討は、(5)節に示す放射線影響の数値解析的検討において重要となる、骨材が膨張したコンクリートの強度低下について、あらかじめ概要を理解するために実施したものである。即ち、コンクリートの膨張量と強度低下率の関係について、定量的データを得ることを第一の目的としている。しかしながら、アルカリ骨材反応は、米国や仏国の原子力発電プラントで経年変化事象として確認されたように、Aging management 上、重要な劣化現象であるがために、本検討結果自体も Aging management に重要な役割を果たす。

(a) 実験方法

a) 使用材料及び調合

本実験で使用した材料を表 3.4.2-59、使用したセメントの物性と化学成分を表 3.4.2-60、使用したコンクリートの調合及びフレッシュ性状試験の結果を表 3.4.2-61 へ示す。

表 3.4.2-59 使用材料

材料	記号	物理的性質など
セメント	C	早強ポルトランドセメント, 密度: 3.14g/cm ³ , ブレーン値: 4400cm ² /g
細骨材	S1	反応性骨材砕砂, 表乾密度: 2.47g/cm ³ , 吸水率: 3.59%
	S2	秩父産石灰砕砂, 表乾密度: 2.65g/cm ³ , 吸水率: 1.3%
粗骨材	G1	反応性骨材碎石, 表乾密度: 2.53 g/cm ³ , 吸水率: 2.19%
	G2	秩父産石灰岩碎石, 表乾密度: 2.72 g/cm ³ , 吸水率: 0.31%
AE 減水剤	AE1	AE 減水剤標準 I 種
AE 調整剤	AE2	カルボン酸共重合体組成物
ASR 促進剤	R	硝酸ナトリウム 20%水溶液

表 3.4.2-60 セメント物性と化学成分 (mass%)

LOI	化学成分								
	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	CaO	MgO	SO ₃	Na ₂ O	K ₂ O	Cl ⁻
0.78	20.46	4.96	2.49	65.71	1.48	2.90	0.20	0.33	0.01

表 3.4.2-61 コンクリートの調合及びフレッシュ性状試験の結果

調合											スランブ (cm)	空気量 (%)	練上がり 温度 (°C)
s/a (%)	w/c (%)	単位量 (kg/m ³)											
		W	C	S1	S2	G1	G2	AE1	AE2	R			
47.0	55	130	291	573	265	665	305	2.0	0.5	20	9.0	2.6	9.0

b) 試験体の作製

コンクリートの粗骨材と細骨材にそれぞれ反応性骨材を用い、アルカリ骨材反応の促進剤として、硝酸ナトリウムを添加した。φ50×100mmの型枠に打設し、試験開始まで20°C環境下で封緘養生を行った。飽和水酸化カルシウム水溶液中で20°C±1°Cの一定条件の下で標準水中養生を行った。

c) 実験の手順

試験体作製後は20°C環境下で封緘養生を行い、試験開始前に脱型を行った。脱型後、試験体を両端研磨し、膨張ひずみの基長を得た後、所定のアルカリ骨材反応促進環境下において促進試験を行った。所定の膨張ひずみが得られたのち、圧縮試験を行った。促進環境は、20°C水中、35°C水中、40°C湿潤の3つであり、目標とする膨張量と促進環境を表3.4.2-62に示した。

表 3.4.2-62 目標とする膨張ひずみと促進環境の関係

パラメーター 番号	目標とする ひずみ	促進環境
1	0μ	脱型後すぐに載荷
2	500μ	20°C水中
3	1000μ	20°C水中
4	2000μ	20°C水中
5	4000μ	20°C水中
6	8000μ	20°C水中→40°C湿潤→20°C水中
7	8000μ	35°C水中→40°C湿潤→35°C水中

d) 膨張ひずみの測定

アルカリ骨材反応前後の試験体の長さ変化を、高性能高さ測定機：QM-Height (Mitsutoyo社製、精度差：±(2.8+5L/1000)μm、L：測定長さ)とノギスを用いて測定した。おおよそ4000μ以上の膨張になると、試験体表面にひびが入りはじめ、ハイトゲージの測定圧力に耐えられないことから、4000μ程度以上の膨張については、ノギスを用いて試験体長さを

測定するものとする。ハイトゲージを用いた測定の様子を図 3.4.2-152 に示す。ノギスの測定状況を図 3.4.2-153 に示す。アルカリ骨材反応前後の長さ変化から、膨張ひずみを算出する。測定対象は、試験体の高さ方向 4 か所で、4 か所の平均値をとって、その試験体の膨張ひずみとした。



図 3.4.2-152 ハイトゲージ全体(左)と長さ測定の様子(右)



図 3.4.2-153 ノギスによる長さ測定の様子

e) 圧縮試験

アルカリ骨材反応後、湿潤状態のまま、図 3.4.2-154 に示す Hi-ACTIS 1000 (マルイ社製) を用いて圧縮試験を行った。圧縮試験は、JIS A 1108 に順じて载荷を行った。応力-ひずみ関係上の最大点を強度として定めた。ヤング率は試験体端板間の長さを载荷前に測定し、それを基調とした。载荷中はレーザー変位計 (精度 $1\mu\text{m}$) 3 体を試験体について 120° ずつずらして試験体長さ変化を測定し、3 台の測定結果の平均を用いた。圧縮強度の 30% 点と 5% 点を抽出してヤング率を算出した。

最大荷重経過後は、除荷荷重を計測すると自動的に最大強度点の 5% の荷重除荷を実施するプログラムを施し、圧縮軟化域を最大荷重の 5% まで測定を行った。



图 3. 4. 2-154 载荷装置

(b) 実験結果

a) 膨張ひずみ

各パラメーターの膨張ひずみの経時変化の一例を図 3.4.2-155 に、最終的な結果を図 3.4.2-156 に示した。膨張ひずみが約 4000 μ 以上になると試験体にひび割れが生じ、測定面にもひび割れが達するため、5、6、7 の膨張ひずみは試験体間でのばらつきが大きくなった。

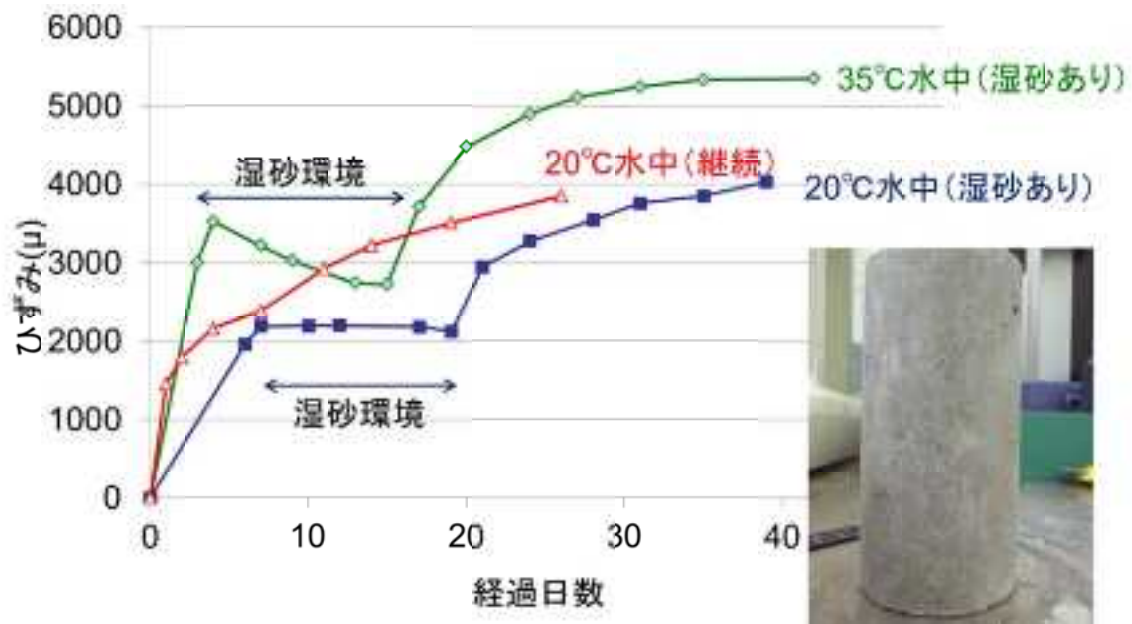


図 3.4.2-155 膨張ひずみの測定事例

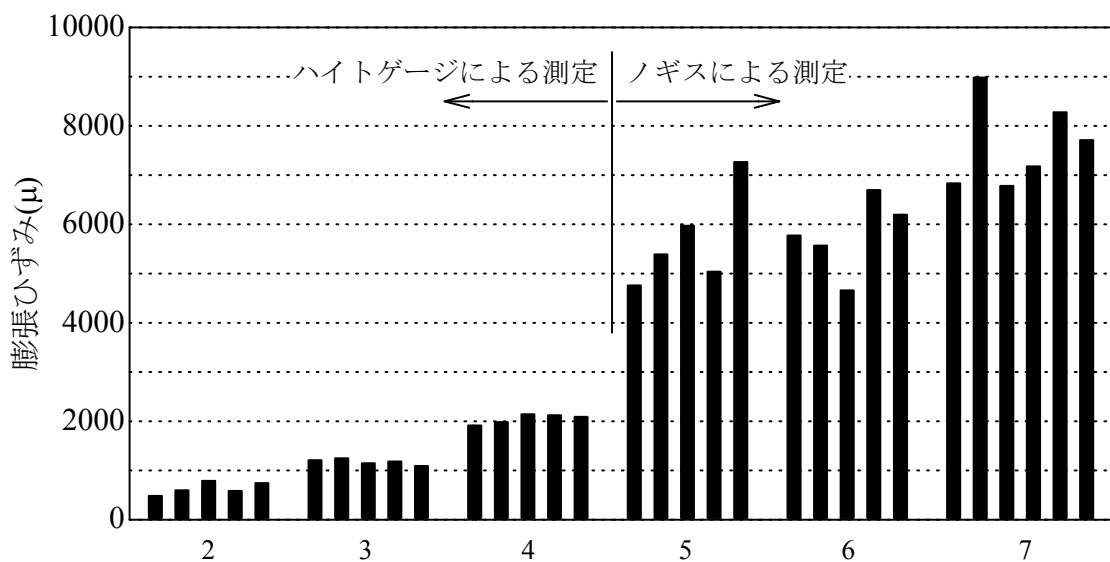


図 3.4.2-156 膨張ひずみの結果

b) 圧縮強度とヤング率

載荷試験における応力-ひずみ関係を図 3.4.2-157 に、圧縮強度と膨張ひずみの関係を図 3.4.2-158 に、ヤング率と膨張ひずみの関係を図 3.4.2-159 にそれぞれ示す。圧縮強度、ヤング率ともに封緘(0 μ)から 2000 μ までは急激な低下を示しており、4000 μ 以上ではほとんど変化していない。4000 μ 以上膨張した場合、ヤング率が封緘の半分程度まで下がり、ヤング率の低下が、圧縮強度の低下よりも顕著であった。

これらは、たとえば、Seabrook での発電所において ASR により 22%の強度低下がみられたが、本研究結果とも良い一致を示している。

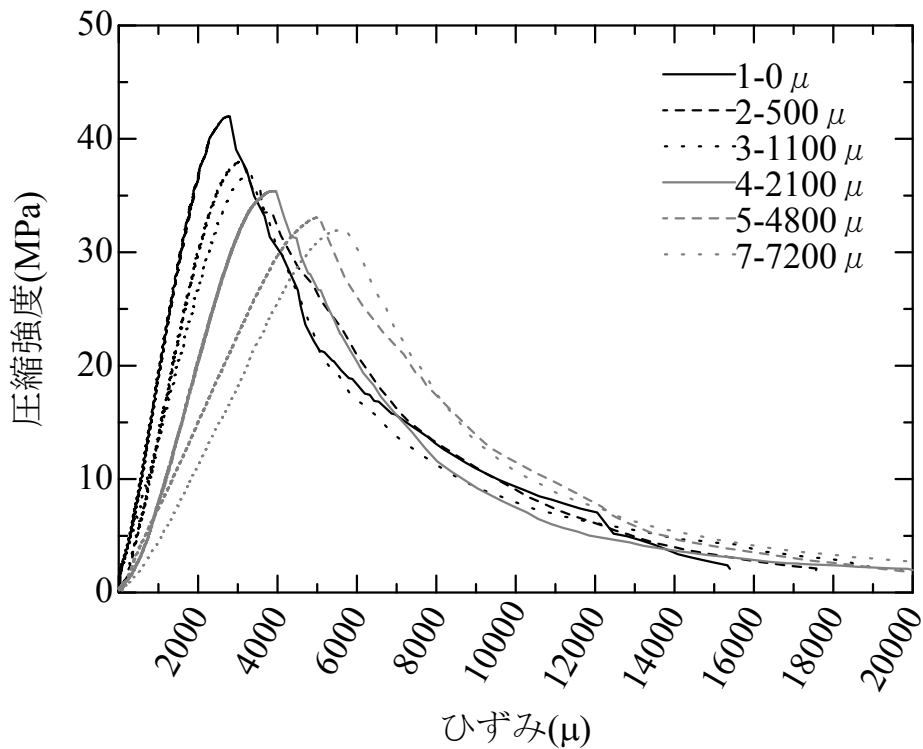


図 3.4.2-157 載荷試験における応力-ひずみ関係

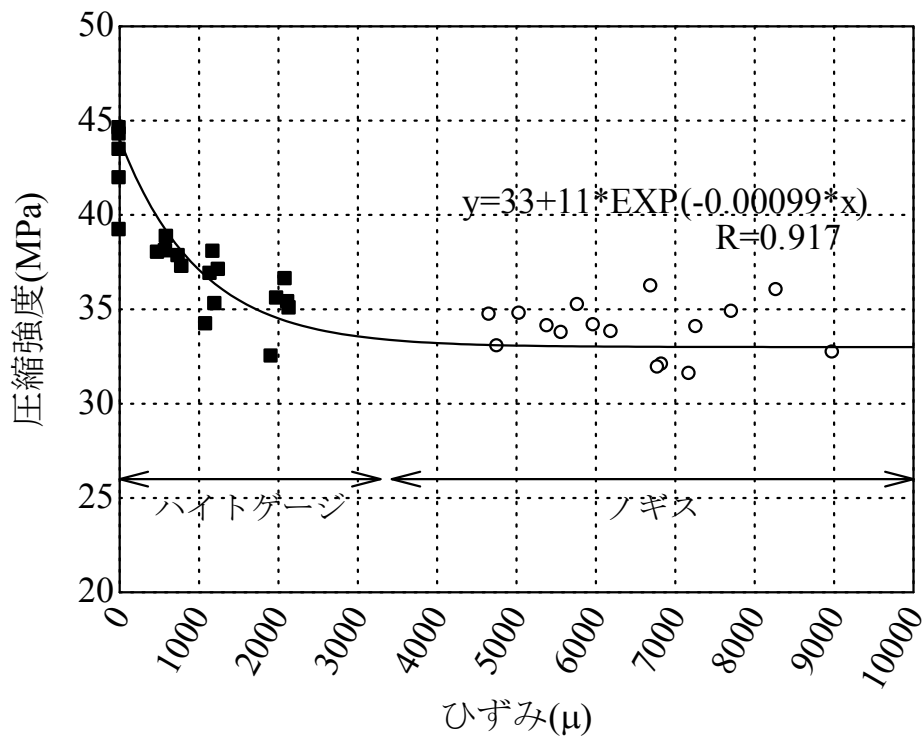


図 3. 4. 2-158 ひずみと圧縮強度の関係

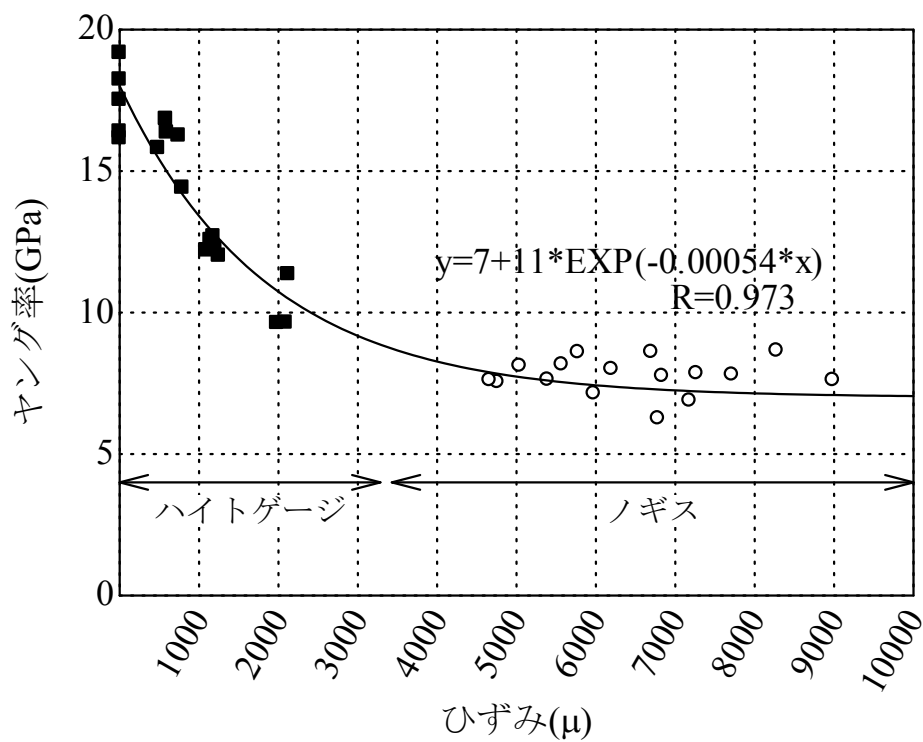


図 3. 4. 2-159 ひずみとヤング率の関係

(c) まとめ

本研究では、骨材膨張時のコンクリート強度低下という観点から、アルカリ骨材反応によって膨張させたコンクリートの圧縮強度やヤング率に関する検討を行い、以下の知見を得た。

- ① 膨張ひずみ 0μ から 2000μ 程度までは、圧縮強度、ヤング率ともに低下し、ヤング率に関しては半分程度まで低下する。
- ② 膨張ひずみ 4000μ 以上では、圧縮強度、ヤング率ともにあまり変化しない。
- ③ 強度、ヤング率について膨張量との関係に関するモデルに資する定量的データを取得した。

3) 骨材膨張時のコンクリートの膨張ひずみ予測手法の開発

本研究は、骨材の膨張量をインプットとしてコンクリートの巨視的な膨張量を評価する手法について検討したものである。2)で示したようにコンクリートの巨視的な膨張は、内部に欠陥を生じさせつつ成立するものであるから、強度および剛性低下を生じさせる。しかしながら、アルカリ骨材反応性を有した骨材のそれぞれがどの程度の膨張をシリカゲルを通じて生じたか、という観点の評価は実験上難しい。そこで、本研究では、遷移帯の影響を考慮したコンクリートの収縮量予測システムを開発し、そこから、骨材膨張量を与えて、コンクリートの巨視的膨張ひずみ量を予測することを検討した。

(a) 解析手法

本研究では、4点アイソパラメトリック要素を用いた非線形2次元有限要素解析を行った。モルタル要素は、ひび割れを考慮できるよう、ひび割れ帯モデルを用いた。なお、ひび割れ帯モデルにおいて要素内に生ずると仮定したひび割れは一つとし、その破壊面で消費されるエネルギーを要素体積当たりで消費されるエネルギーに換算するよう規格化した。

モルタル要素の引張軟化特性については1/4モデルを採用した³⁴。また、ひび割れ後のせん断剛性は、健全なせん断剛性に対して低減係数をかけ合わせることで考慮した。せん断剛性低減係数は、ひび割れ後のひずみを変数とする次式を採用した³⁵。また、せん断剛性低減係数とひび割れに垂直なひずみの関係を

図 3.4.2-160 に示す。

$$\beta = G_{cr} / G = \frac{1}{1 + 4447\varepsilon_{cr}} \quad (3.4.2-1)$$

ここに、 β : せん断剛性低減係数(-)、 G : せん断剛性係数 (MPa)、 G_{cr} : ひび割れ発生後のせん断剛性係数(MPa)、 ε_{cr} : ひび割れに垂直なひずみ(-)を示す。

本解析で用いた材料パラメータを表 3.4.2-63 に示す。粗骨材要素のヤング率とポアソン比には石灰石骨材の実験値を採用した³⁶。モルタル要素のヤング率、引張強度、破壊エネルギーには、セメントペースト試験体の3点曲げ試験の実験結果を用いた³⁷。また、ポア

³⁴ Rokugo, K., Iwasa, M., Suzuki, T., Koyanagi, W., (1989). "Testing methods to determine tensile strain softening curve and fracture energy of concrete, *Fracture Toughness and Fracture Energy*, ed. Mihashi et al., Balkema, The Netherlands, 153-163.

³⁵ Walraven, J. C., Keuser, W., (1987). "The shear retention factor as a compromise between numerical simplicity and realistic material behavior." *Darmstadt Concrete*, 2 221-2341

³⁶ 堀口直也, 五十嵐豪, 丸山一平: 含水率の変化による骨材の体積変化に関する基礎研究, コンクリート工学年次論文集, Vol.33, No.1, 2011.7

³⁷ 三浦泰人, 佐藤靖彦: NaCl 溶液に浸漬したセメントペースト及びモルタルの引張軟化特性評価, コンクリート工学論文集, Vol.21, No.3, pp.77-86, 2010.9

ソン比は超音波試験によって得たセメントペーストの値を用いた³⁸。モルタル要素のパラ

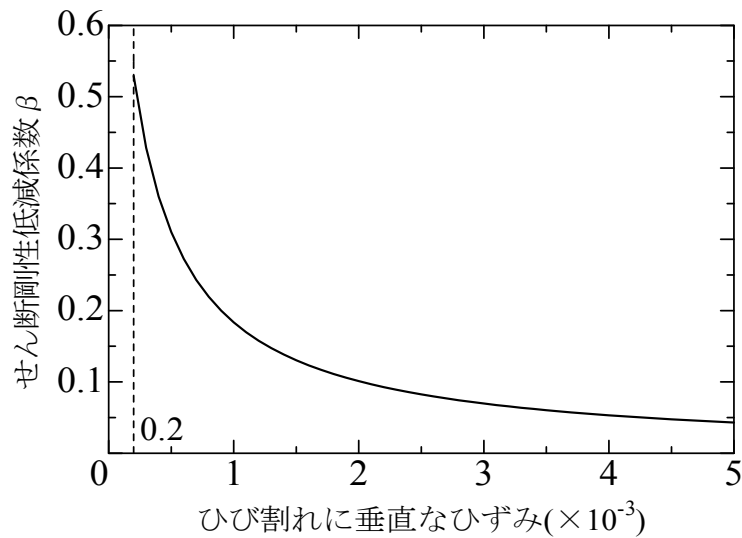


図 3. 4. 2-160 ひび割れに垂直なひずみとせん断剛性低減係数の関係

表 3. 4. 2-63 解析に用いたパラメータ

骨材要素	ヤング率(GPa)	71.3
	ポアソン比(-)	0.30
モルタル要素	ヤング率(GPa)	12.1
	ポアソン比(-)	0.26
	引張強度(MPa)	10.2
	破壊エネルギー(N/m)	15.0

メータに対してセメントペーストの実験値を用いた理由は、今回想定した検討対象の有限要素では一辺が 0.5mm もしくは 1.0mm といった微小な要素を想定していることから、破壊時に骨材が介在することによって複数のひびわれが分散するモルタルの破壊エネルギーの物性値を用いることは解析上適切でないからである。

本研究においてセメントペーストのクリープ現象は考慮しなかった。これは、セメントペーストの引張クリープについては、著者らの研究によりほとんど生じないことを実験的に確認したためである³⁹。骨材の膨張ひずみは、全骨材要素に等価節点力として一律に導入した。

³⁸堀口直也，五十嵐豪，丸山一平：セメント硬化体のヤング率及びポアソン比の相対湿度依存性，日本建築学会構造系論文集，第 660 号，pp231-236，2011. 2

³⁹丸山一平，堀口直也：セメントペーストの引張クリープについて、第 65 回セメント技術大会講演要旨 pp. 268-269，2011. 5

また、本解析では遷移帯を考慮した解析を行った。遷移帯は骨材とセメントペーストマトリクス間に存在する領域で、セメントペーストと比較して、ポーラスであり剛性や強度の低い領域である^{40、41、42、43、44}。この遷移帯は骨材膨張過程の初期において、その剛性が小さいことから、骨材周囲のモルタルに対して強い応力を生じさせない。骨材が膨張し、遷移帯が一定の距離に成ったときに剛性が伝わるようになり、骨材周囲のモルタルに応力が生じると考えられる。

本研究では粗骨材要素に対して、この遷移帯の影響を考慮した構成則を組み込むこととした。

遷移帯は骨材により近いほど粗であるため、遷移帯領域においてヤング率は骨材からの距離に依存して勾配を持って分布をしている⁴⁵。この様子を図 3.4.2-161 に示す。本研究では、この分布を簡略化し、自由に体積が変動可能な空隙領域と骨材の剛性を発揮する固相領域の両者を組み合わせた構成則を用いて遷移帯近傍の挙動を模擬することとした(図 3.4.2-161)。このときの構成則の概念図を図 3.4.2-162 に示す。遷移帯を有する骨材要素は、二つの側面をもつ。すなわち、モルタルと骨材が接触しているときとそうでない時である。モルタルの収縮が卓越し、遷移帯を代表する空間が無くなり、骨材とモルタルが接触した時点の粗骨材要素のひずみを「モルタルー粗骨材接触時ひずみ」 ε_{cr} とする。 ε_{cr} は、遷移帯厚さと粗骨材粒径からなる次式で表現できる。

$$\varepsilon_{cr} = \frac{h_{ITZ}}{d_{aggregate}} \times 10^{-3} \quad (3.4.2-2)$$

ここに、 ε_{cr} : モルタルー粗骨材接触時ひずみ (μ)、 h_{ITZ} : 仮想遷移帯厚さ (μm)、 $d_{aggregate}$: 粗骨材粒径(mm)を示す。この歪み ε_{cr} より要素のひずみが大きな値の場合(図 3.4.2-162 B)は、遷移帯の影響が卓越し、粗骨材要素の剛性は小さいものとし粗骨材のヤング率の

⁴⁰ Diamond, S., Mindess, S., (1992). "SEM investigation of fracture surfaces using stereo pairs: I Fracture surfaces of rock and of cement paste." *Cement and Concrete Research*, 22(1) 67-78

⁴¹ Mindess, S., Diamond, S., (1992). "SEM investigation of fracture surfaces using stereo pairs: II Fracture surfaces of rock-cement paste composite specimens." *Cement and Concrete Research*, 22(4) 678-688

⁴² Oliver, J.P., Maso, J.C., Bourdette, B., (1995). "Interfacial Transition Zone in Concrete." *Advanced Cement Based Materials*, 2(1) 30-38

⁴³ Sonebi, M., (2006). "Utilization of micro-indentation technique to determine the micro-mechanical properties of ITZ in cementitious materials." *Proceeding of ACI Session on 'Nanotechnology of Concrete : Recent Developments and Future Perspective'*, Denver -USA, 57-68

⁴⁴ Erdem, S., Dawson, A.R., Thom, N.H., (2012). "Influence of the micro-and nanoscale local mechanical properties of the interfacial transition zone on impact behavior of concrete made with different aggregates." *Cement and Concrete Research*, 42(2) 447-458.

⁴⁵ Erdem, S., Dawson, A.R., Thom, N.H., (2012). "Influence of the micro-and nanoscale local mechanical properties of the interfacial transition zone on impact behavior of concrete made with different aggregates." *Cement and Concrete Research*, 42(2) 447-458

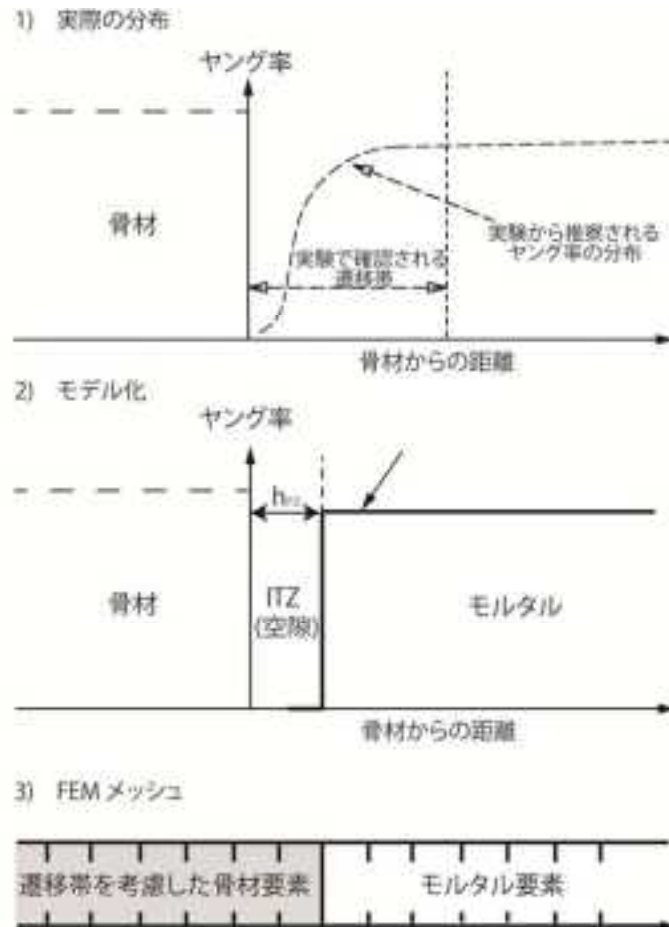


図 3.4.2-161 遷移帯のモデル化の概念図

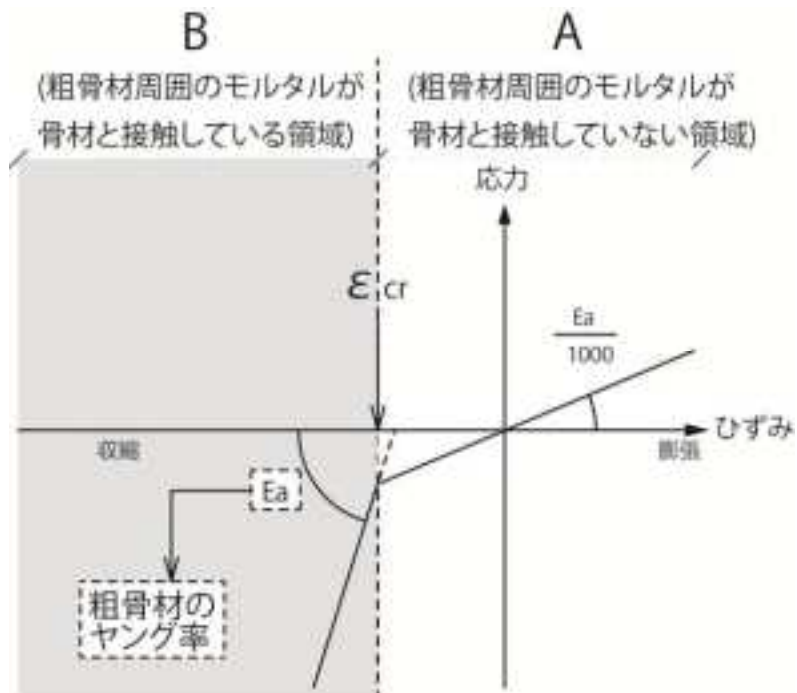


図 3.4.2-162 遷移帯を考慮した粗骨材要素の構成則概念図

1/1000 の値を用いた。逆に ε_{cr} より小さい場合(図 3.4.2-162 A)は、粗骨材要素の剛性には、粗骨材のヤング率を用いた。

$$\varepsilon_{cr} = \frac{h_{ITZ}}{d_{aggregate}} \times 10^{-3} \quad (3.4.2-3)$$

ここに、 ε_{cr} : モルタルー粗骨材接触時ひずみ (μ)、 h_{ITZ} : 仮想遷移帯厚さ (μm)、 $d_{aggregate}$: 粗骨材粒径(mm)を示す。この歪み ε_{cr} より要素のひずみが大きな値の場合(図 3.4.2-162 B)は、遷移帯の影響が卓越し、粗骨材要素の剛性は小さいものとし粗骨材のヤング率の 1/1000 の値を用いた。逆に ε_{cr} より小さい場合(図 3.4.2-162 A)は、粗骨材要素の剛性には、粗骨材のヤング率を用いた。

(b) 構成則の検証

本解析手法の妥当性を検証するため、丸山・篠野の実験⁴⁶を解析対象として、ひび割れ性状と乾燥収縮ひずみの解析結果と実験結果の比較を行う。実験は粗骨材粒径の異なる粗骨材をそれぞれ用いたコンクリートを 20°C RH60%環境で乾燥させ、粗骨材粒径がコンクリートの乾燥収縮ひずみに及ぼす影響について検討したものである。

a) 解析対象のモデル化

解析対象は、 $\phi 100 \times 200$ のモールドに打ち込み十分水和させたコンクリートを試験体寸法 $\phi 100 \times 9\text{mm}$ に切り出したものの断面である。粗骨材には石灰石骨材の粒径を 5-10mm(試験体名 S-ex)、10-15mm(試験体名 M-ex)、15-20mm(試験体名 L-ex)に分級したものをそれぞれ用いている。試験体写真を図 3.4.2-163 に示す。粗骨材要素とモルタル要素には表 3.4.2-63 の材料パラメータを用いた。図 3.4.2-164 に実験で用いた石灰石粗骨材のそれぞれの試験体における粒度分布を示す。粗骨材要素の構成則に用いる粗骨材粒径には、試験体モデル内の全ての粗骨材に対して、それぞれの試験体における平均粒径の値として、図 3.4.2-164 おける累積率が 50%である粗骨材粒径の値を用いた。(S-ex: 8.7mm、M-ex: 14.3mm、L-ex: 19.7mm)

また解析対象としたコンクリートには増粘剤を添加しており材料分離を極力抑制したことから、粗骨材粒径による遷移帯厚さへの影響は少ないと考え、仮想遷移帯厚さは粗骨材粒径に依存せず、仮想遷移帯厚さを $3\mu\text{m}$ の一定値とした。

乾燥収縮ひずみは全モルタル要素に等価節点力として一律に導入した。モルタル要素に入力した乾燥収縮ひずみは、文献 46 より、モルタル試験体を 20°C 60%RH で 9 日間乾燥を行いほぼ恒量状態となった時点での乾燥収縮ひずみ量(-1300 μ)とした。粗骨材要素では収縮を考慮しない。

⁴⁶ Maruyama, I., Sasano, H., (2013). "Strain and Crack distribution in concrete during drying", *Materials and Structures*, Online first, DOI 10.1617/s 11527-013-0076-7.

要素分割数は試験体直径方向に 200 要素 (1 要素 0.5mm×0.5mm)、全要素数 31420 要素とした。図 3.4.2-165 に要素分割の概要を示す。乾燥開始前に撮影した断面の写真図 3.4.2-163 から粗骨材位置を特定し、粗骨材要素とモルタル要素に割り当てた。この時 1 要素を占める粗骨材量の割合が 50%以下の時その要素は粗骨材要素とはせず、モルタル要素とした。その後、全試験体モデルの骨材率を同値とするため骨材量の調整を行い、解析対象における体積骨材率は 41.4%とした。

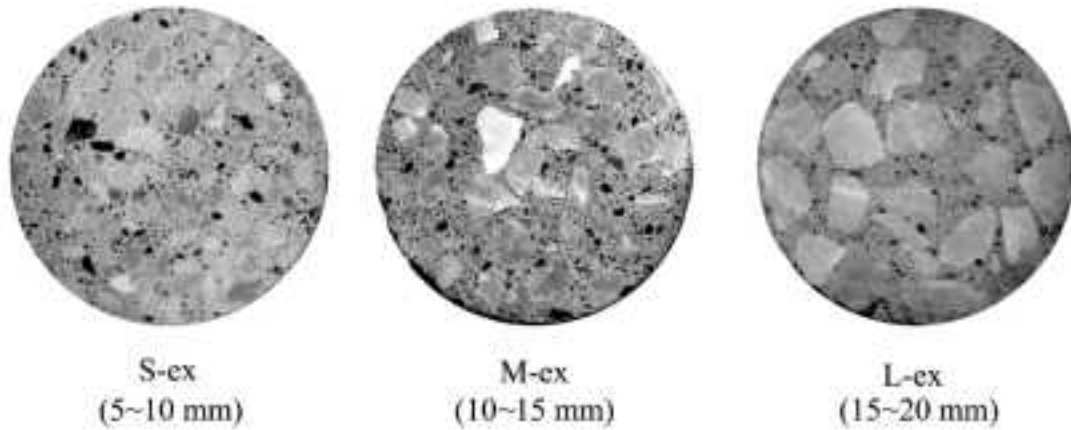


図 3.4.2-163 解析対象とした試験体の断面写真

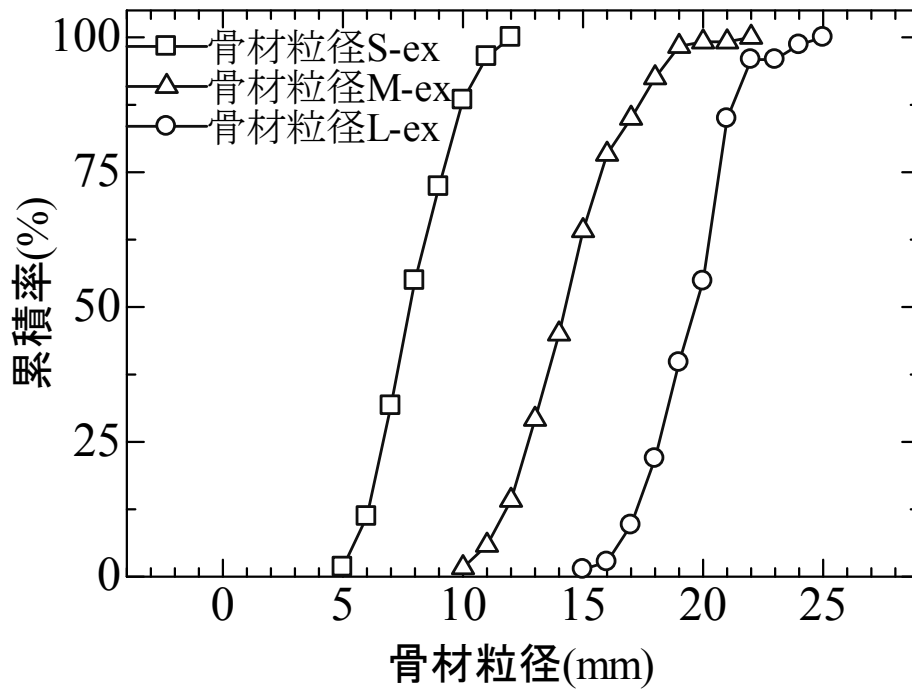


図 3.4.2-164 粗骨材粒度分布

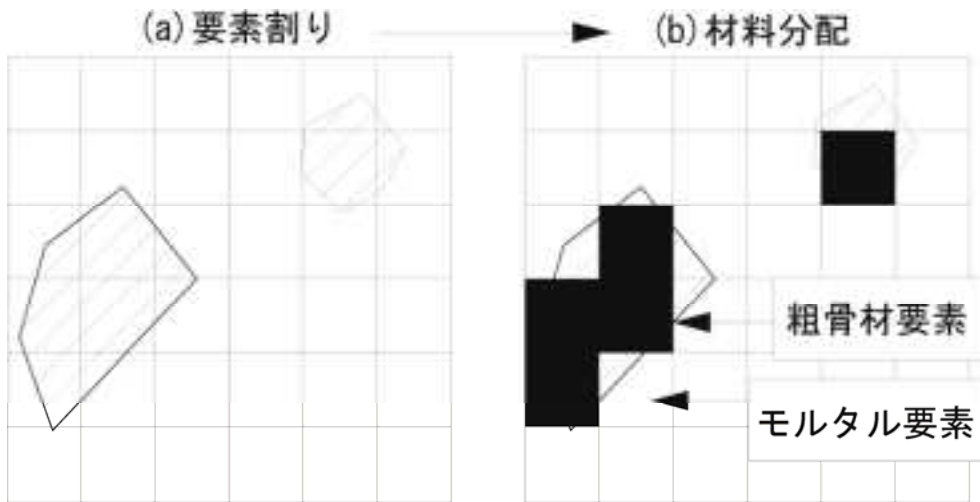


図 3. 4. 2-165 要素分割概念図

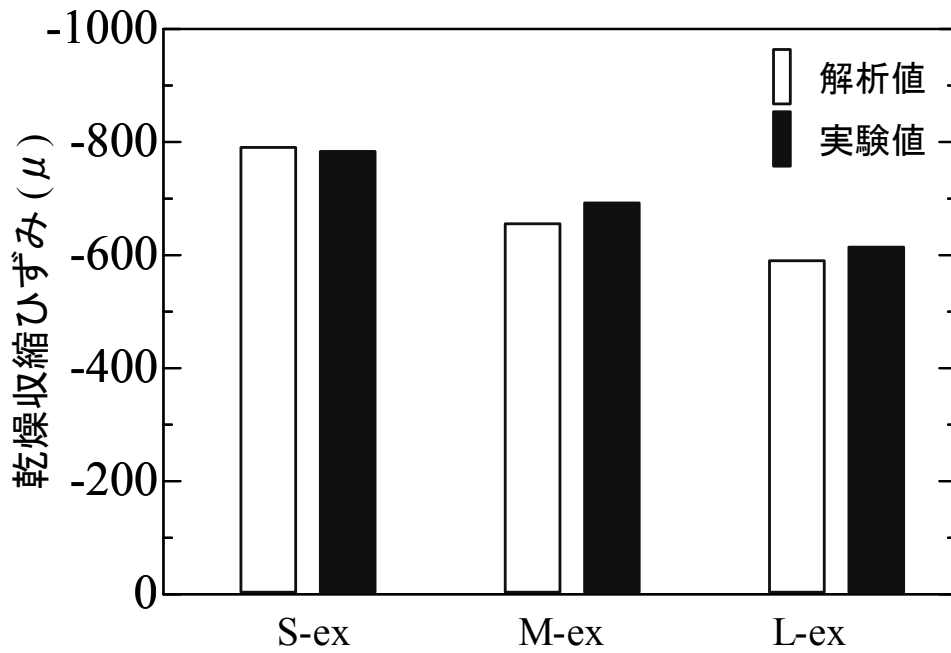


図 3. 4. 2-166 粒径別乾燥収縮ひずみにおける実験値と解析値の比較

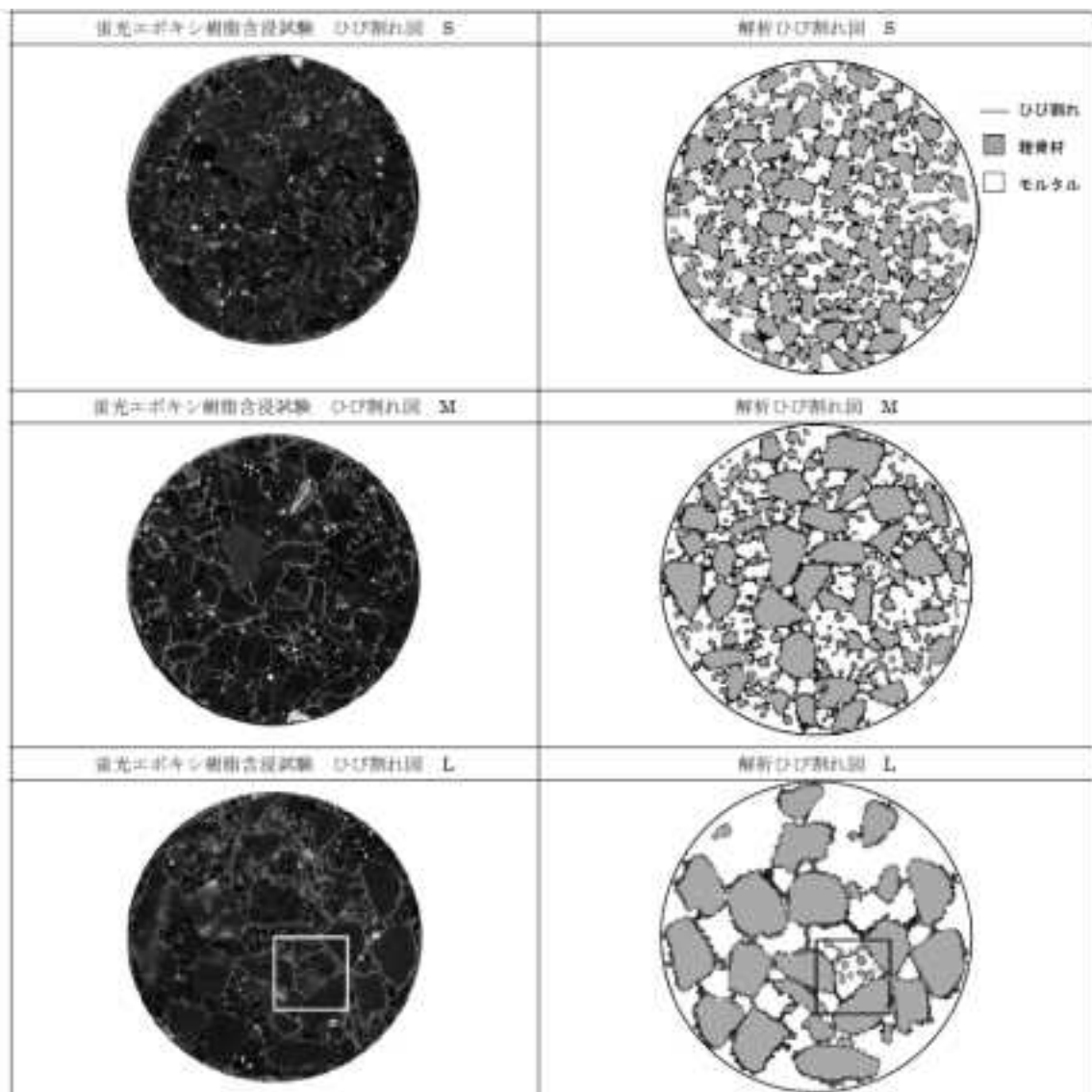


図 3. 4. 2-167 粒径別ひび割れ図比較

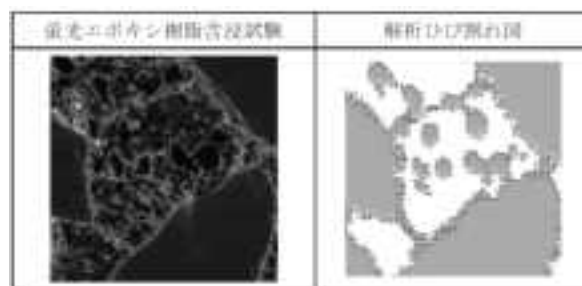


図 3. 4. 2-168 L-ex ひび割れ拡大図比較

b) 解析結果

図 3. 4. 2-166 に試験体解析における粒度別乾燥収縮ひずみを示す。その結果、乾燥収縮ひずみに対する粗骨材粒径の影響の程度が再現された。

図 3. 4. 2-167 に各種粗骨材粒径の、蛍光エポキシ樹脂含浸試験から得たひび割れ図と解析により得たひび割れ図の比較を示す。いずれの粒径におけるひび割れ図においても骨材を囲むひび割れや骨材同士を繋ぐひび割れが再現されており、実験と数値解析の両者のひび割れ図に大きな齟齬はない。また、図 3. 4. 2-168 は図 3. 4. 2-167 の粒径 L-ex において四角に囲んだ領域の拡大図であるが、拡大した図においてもひび割れの位置は良好に対応している。

以上から本数値解析によって、骨材とモルタルの物理的相互作用によって生ずるひび割れの形状と、コンクリートの乾燥に伴う粗骨材粒径の収縮ひずみへの影響を再現でき、だと妥当性が示された。したがって本解析手法を用いて以下で、骨材が膨張挙動を示した時の骨材の膨張ひずみとコンクリートの膨張ひずみの関係、及びひび割れ性状の検討を行う。

(c) 骨材膨張に関する解析

a) 解析概要

解析手法は 0 に示したとおりである。粗骨材要素とモルタル要素には表 3. 4. 2-63 の材料パラメータを用いて、仮想遷移帯厚さは $3\mu\text{m}$ とした。骨材の膨張ひずみは、全骨材要素に等価節点力として一律に導入した。

解析対象は図 3. 4. 2-163 の L-ex とし、モデル化の方法及び諸パラメータも 0-0 と同様とした。ただし、モルタル要素は収縮等の体積変化は考慮しないこととした。

b) 解析結果

図 3. 4. 2-169 に骨材膨張ひずみに対するコンクリートの膨張ひずみの関係を示す。また、併せて解析結果の回帰式も示す。図から、骨材の膨張ひずみとコンクリートの膨張ひずみはほぼ線形関係にあり、コンクリートの膨張ひずみは骨材の膨張ひずみに対して 7 割程度であることが示された。

図 3. 4. 2-170 に骨材ひずみ 2000μ 時のひび割れ図を示す。骨材周囲のひび割れはもちろん骨材同士を繋ぐひび割れも確認でき、ひび割れの性状は乾燥によるモルタルの収縮によってコンクリート内部に生じるひび割れの性状と同様の結果となった。したがってひび割れ図にも大きな矛盾点がないことから、本解析を用いることで骨材の膨張ひずみによりその骨材を有するコンクリートの膨張ひずみを評価することができると示唆される。

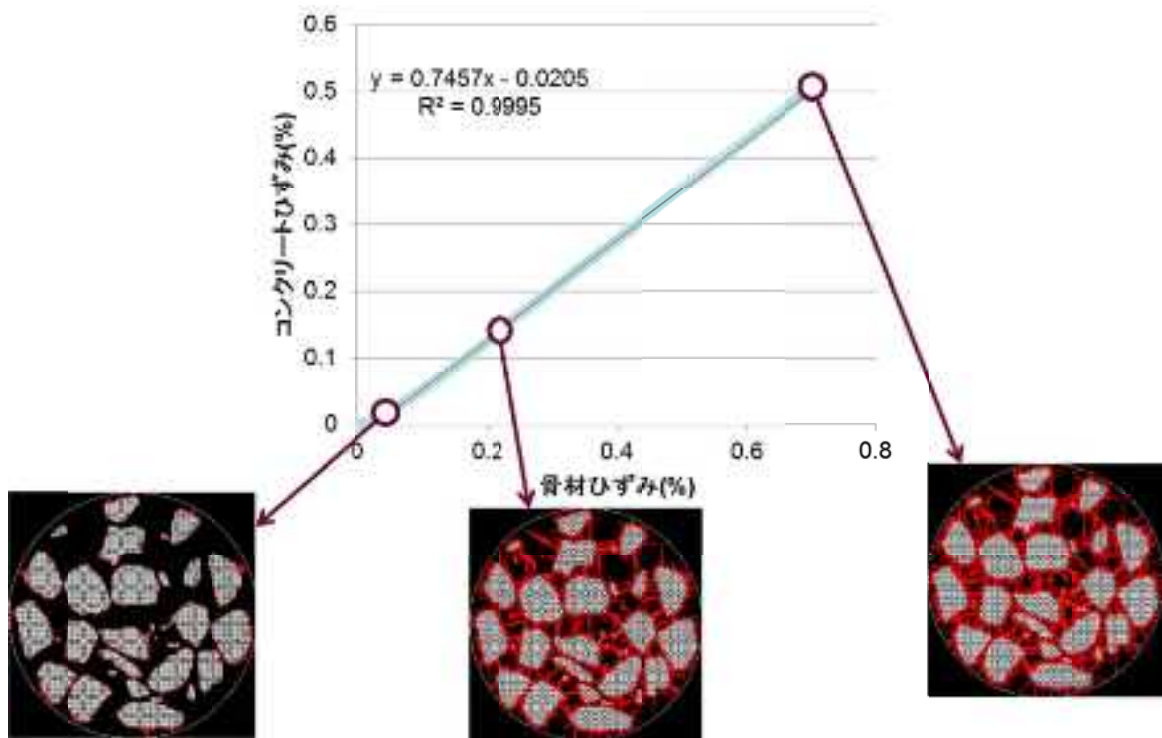


図 3.4.2-169 骨材膨張ひずみーコンクリートのひずみ関係

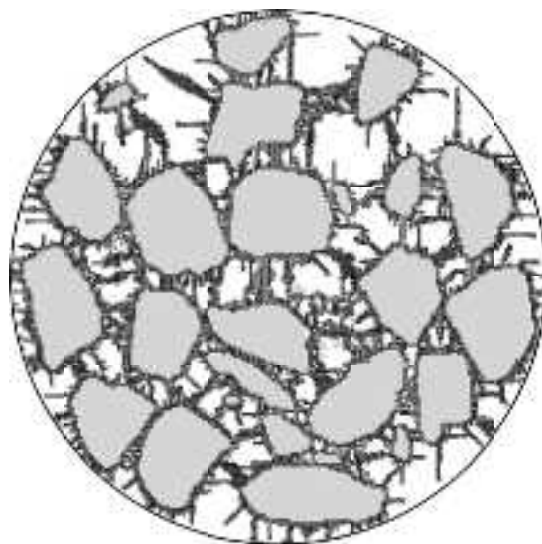


図 3.4.2-170 ひび割れ図(骨材ひずみ 2000 μ 時)

(d) まとめ

本解析手法を用いることで骨材の膨張ひずみによってコンクリートの膨張ひずみを評価し、簡易な推定式を得ることができた。

4) コンクリート中の骨材の放射線照射量算出手法に関する検討

本検討では、モンテカルロ法計算コードを用いて、加圧水型軽水炉の実機第一遮へい壁、及び原子炉で行われるコンクリート照射実験の試験体内部における、セメントと骨材の吸収線量の比を評価し、コンクリート中の骨材の放射線照射量算出に資する情報を整理する

① 計算条件

計算条件を表 3.4.2-64 に示す。粗骨材は $\phi 10\text{mm}$ 球を体積占有率 37.4% で面心立方格子状に配置し、細骨材は構造を考慮せずセメントと均一に混ざっているととした。また、セメントの相対湿度は飽水状態及び 11%RH の 2 通りを考慮した。実機第一遮へい壁を対象とした計算では、美浜 2 号機相当の線源スペクトルを設定し、計算体系は厚さ 100cm の半無限平板を反射境界によりモデル化した。一方、照射実験試験体を対象とした計算では、JEEPII を想定した中性子スペクトルを設定し、計算体系は実際の試験体と同様に $\phi 40\text{mm} \times 60\text{mm}$ とした。ここで、照射実験のガンマ線スペクトルは入手できなかったため、中性子線の影響のみを評価していることに注意する必要がある。

表 3.4.2-64 骨材とセメントの吸収線量比 計算条件

項目		照射実験試験体	実機第一遮へい壁
解析コード		MCNP	
計算体系		φ 40mm×60mm (図 3.4.2-171 参照)	0.88cm×0.88cm×100cm (図 3.4.2-172 参照)
境界条件		真空境界	X 面：真空境界 Y、Z 面：反射境界
線源	入射条件	平板平行線源	
	入射方向	z 軸に対して垂直方向	x 方向
	強度・分布	照射実験中性子スペクトル (図 3.4.2-173 参照)	美浜 2 号機相当線源スペクトル (図 3.4.2-173 参照)
粗骨材	種類	SS6 (硬質砂岩砕石、粒度 5~13mm、愛知県産)	
	組成	表 3.4.2-65 参照	
	形状	φ 10mm 球	
	分布	体積占有率 37.4%で面心立方格子状に分布 (図 3.4.2-173 及び図 3.4.2-173 参照)	
細骨材	種類	SD2 (山砂、静岡産)	
	組成	表 3.4.2-65 参照	
	分布	セメントと均一に混ざり、粗骨材以外を占有	
セメント	種類	太平洋セメント社製早強ポルトランドセメント	
	組成	表 3.4.2-65 参照	
	相対湿度	飽水状態及び 11%RH	
	分布	粗骨材以外を占有	

表 3.4.2-65 セメント及び骨材の組成及び体積率

種類	試料名	密度 (g/cm ³)	体積率 (%)	化学成分 (%)											
				LOS	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	CaO	MgO	S ₂ O ₃	Na ₂ O	K ₂ O	TiO ₂	P ₂ O ₅	MnO
セメント	-	3.14	11.7	2.93	22.43	4.67	0.16	65.69	0.98	2.51	0.00	0.07	0.17	0.03	0.00
細骨材	SD2	2.61	30.6	2.12	75.84	11.37	3.01	0.99	0.98	0.27	2.61	2.04	0.36	0.04	0.05
粗骨材	SS6	2.66	37.4	0.93	86.99	5.09	2.25	0.68	0.98	0.69	0.49	1.25	0.24	0.1	0.17

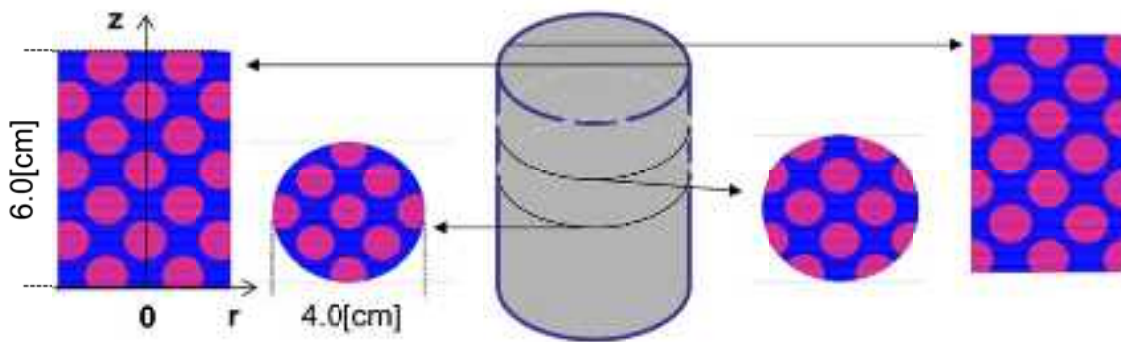


図 3.4.2-171 計算体系 照射実験試験体

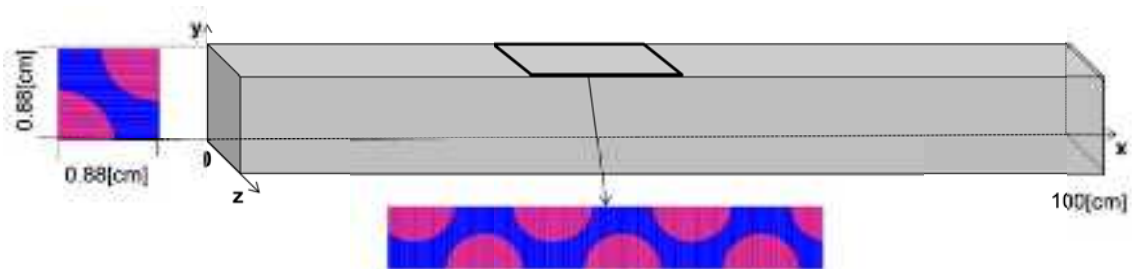


図 3.4.2-172 計算体系 実機第一遮へい壁

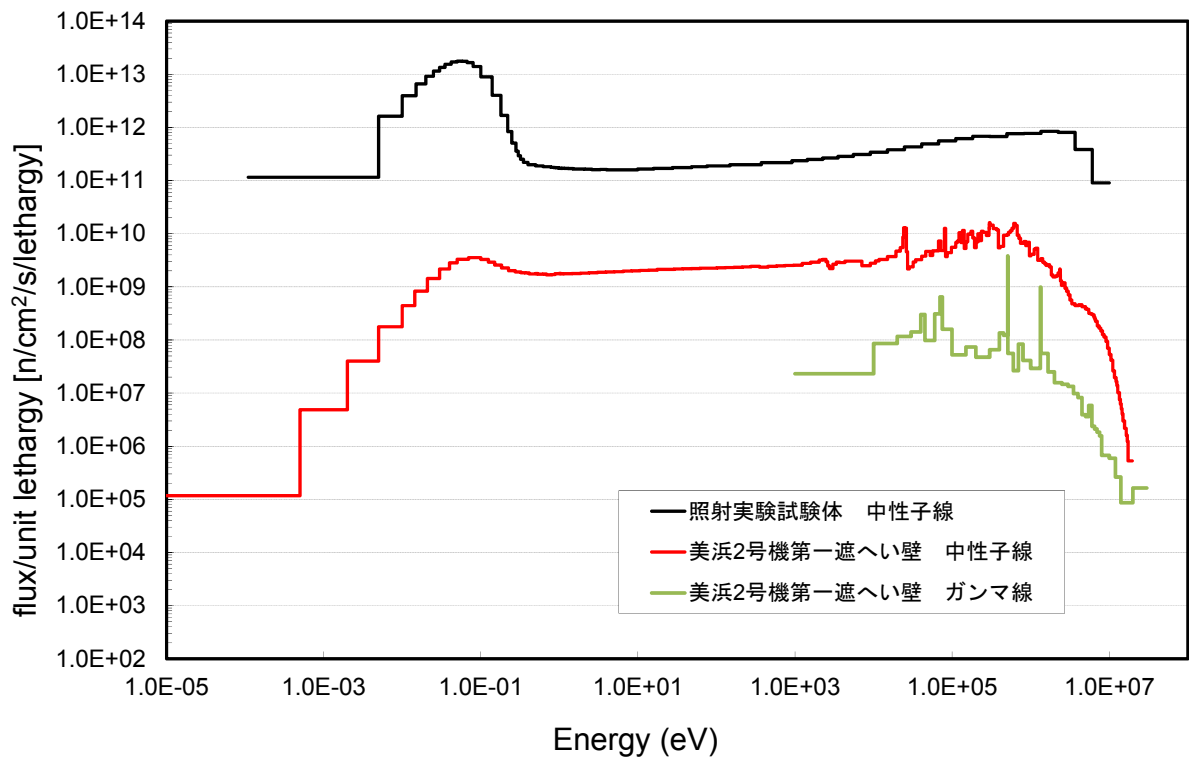


図 3. 4. 2-173 線源スペクトル (照射実験試験体及び実機第一遮へい壁)

② 計算結果

表 3. 4. 2-66 に全放射線束及び全吸収線量の骨材とセメントの比を示す。また、図 3. 4. 2-172～図 3. 4. 2-174 に放射線束及び吸収線量の骨材とセメントの比のエネルギー依存性を示す。ここで、統計誤差が 10%を超えるものはプロットしていない。これらの結果より、線源スペクトルに関係なく、全放射線束は骨材とセメントでほとんど変化しないが、骨材の吸収線量はセメントのそれに比べ 30～45%程度となることがわかる。また、コンクリートの水分量の違いにより、全中性子束の比はほとんど変化しないが、全吸収線量の骨材とセメントの比は水分量によって 35%程度の差異がある。さらに放射線束及び吸収線量の骨材とセメントの比のエネルギー依存性の結果から、放射線束は全エネルギー領域で差が 10%未満であるのに対し、吸収線量の骨材とセメントの比はエネルギーが小さくなるにつれ急激に小さくなることがわかる。

これらの結果は、骨材とセメントの組成の違いにより、放射線束による発熱定数である KERMA 係数が異なるためと考えられる。図 3. 4. 2-178 および図 3. 4. 2-179 に、セメント及び骨材に特徴的な元素の中性子 KERMA 係数及びガンマ線質量エネルギー吸収係数を示す。これらの結果より、低エネルギー領域では KERMA 係数及びガンマ線質量エネルギー吸収係数が小さくなり、元素ごとの KERMA 係数の違いが顕著になることがわかる。そのため、放射線束が同じでも、KERMA 係数が異なることで吸収線量に大きな違いが出ると考えられる。

これらの結果より、中性子束及びガンマ線束を考える場合には、コンクリートと骨材を区別する必要はほとんどないが、吸収線量を考える場合にはそれぞれの組成を考慮する必要がある。従って、コンクリート内の骨材の放射線吸収線量は、コンクリート全体に対する放射線束と組成の違いによる発熱定数を用いて概ね評価可能であると考えられる。

表 3.4.2-66 骨材とセメントの比（全フラックス、全吸収線量）

項目	照射実験試験体				実機第一遮へい壁			
	11%RH		飽和状態		11%RH		飽和状態	
	中性子	(2次 ガンマ線)	中性子	(2次 ガンマ線)	中性子	ガンマ線	中性子	ガンマ線
全フラックス比	1.00	(0.97)	0.99	(0.96)	1.00	1.00	1.01	1.00
全吸収線量比	0.48	(0.96)	0.35	(0.95)	0.44	0.97	0.32	0.97

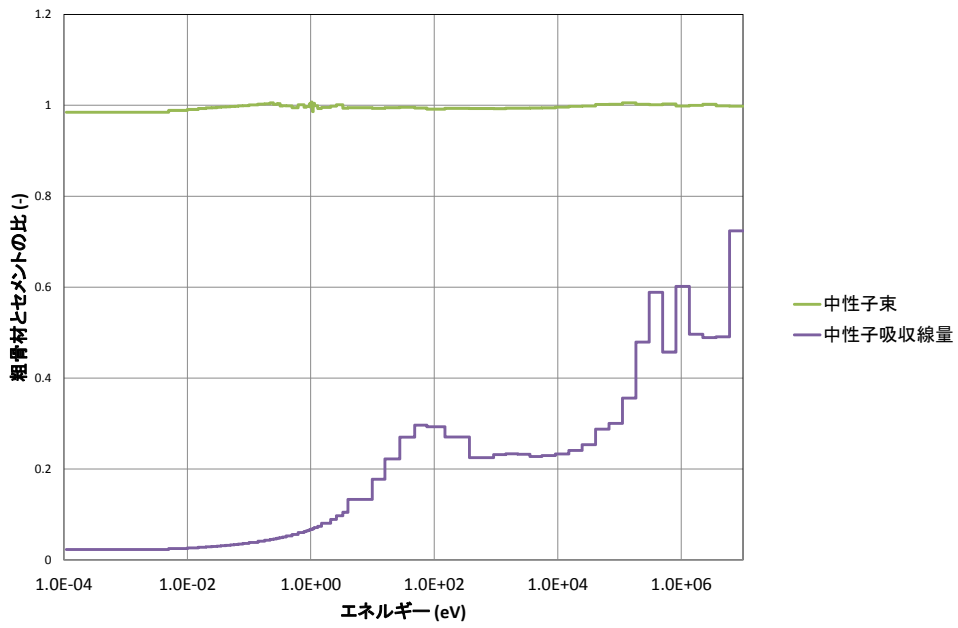


図 3. 4. 2-174 フラックス及び吸収線量に対する骨材とセメントの比
(照射実験試験体、11%RH)

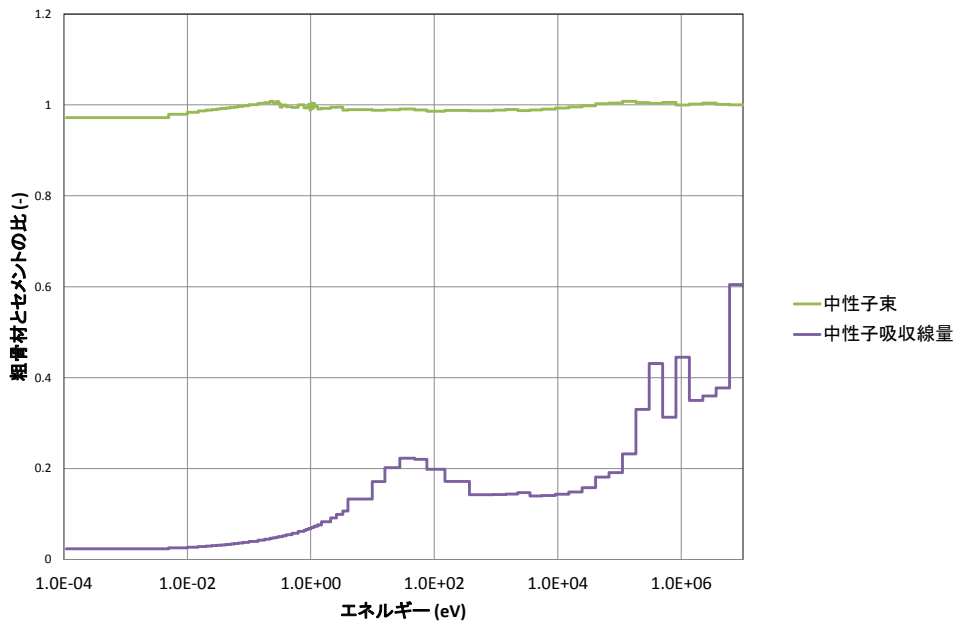


図 3. 4. 2-175 フラックス及び吸収線量に対する骨材とセメントの比
(照射実験試験体、飽水状態)

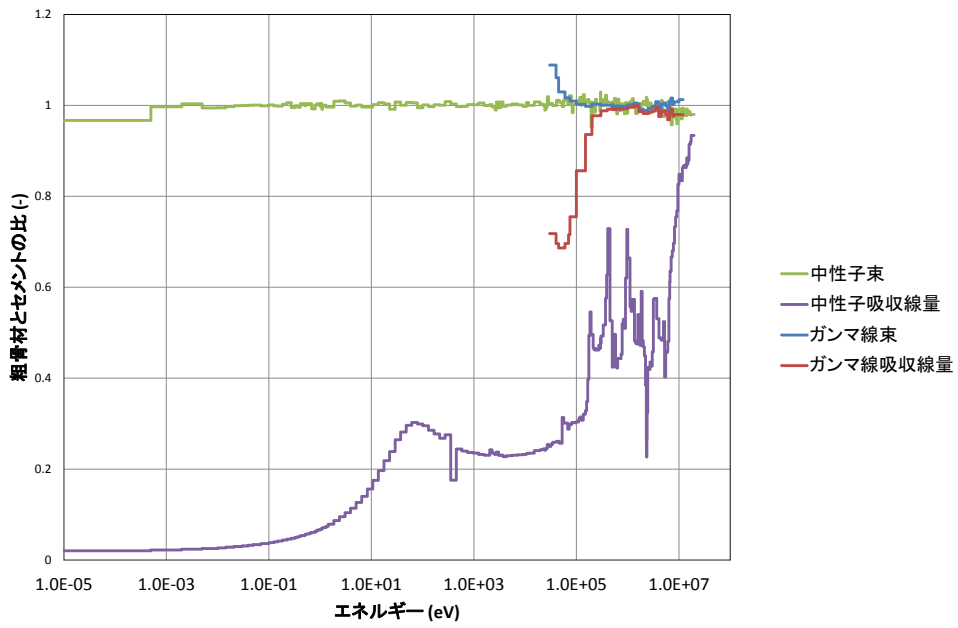


図 3.4.2-176 フラックス及び吸収線量に対する骨材とセメントの比
(実機第一遮へい壁、11%RH)

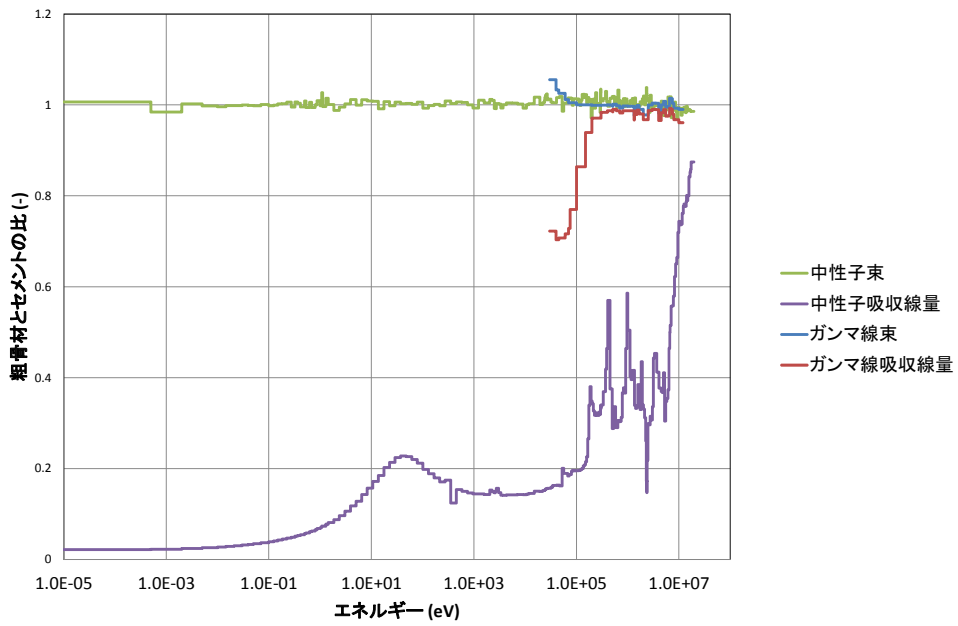


図 3.4.2-177 フラックス及び吸収線量に対する骨材とセメントの比
(実機第一遮へい壁、飽水状態)

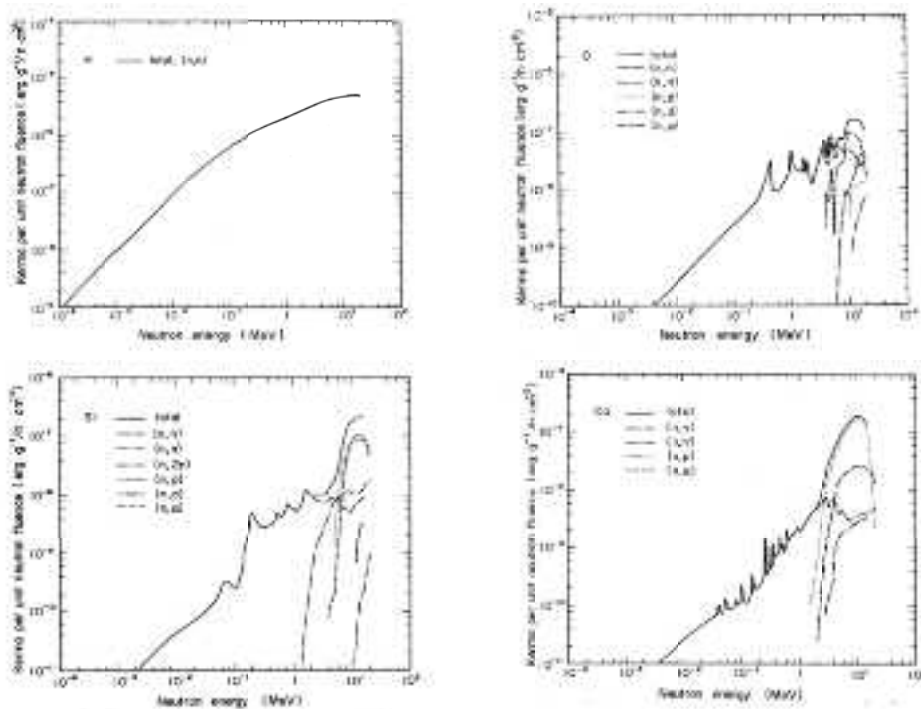


図 3.4.2-178 中性子 KERMA 係数 (H, O, Si, Ca) ⁴⁷

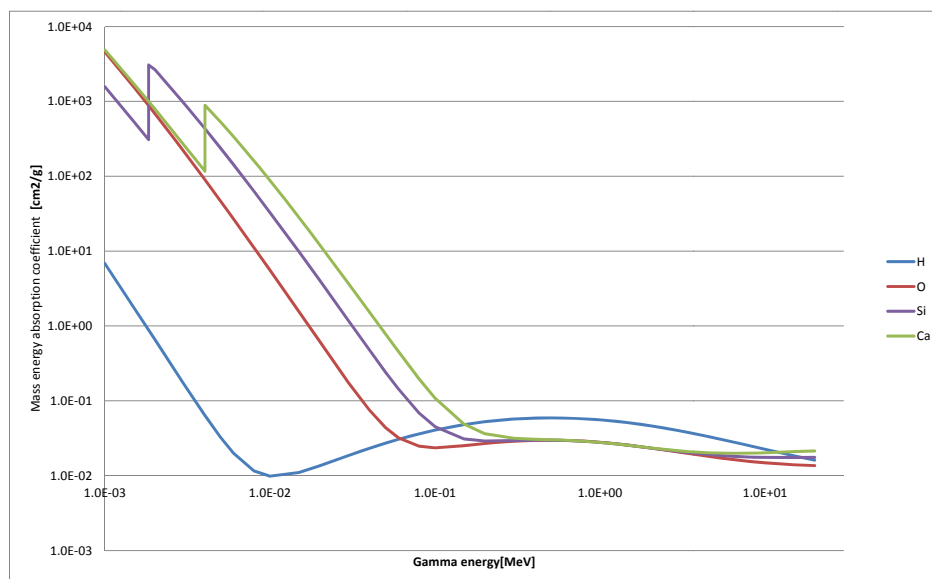


図 3.4.2-179 ガンマ線質量エネルギー吸収係数 (H, O, Si, Ca) ⁴⁸

⁴⁷ S. Tanaka, K. Takeuchi: Neutron Energy-Dependent Kerma Factors for Various Nuclides, JAEA report (1975)

⁴⁸ J. H. Hubbell and S. M. Seltzer: Tables of X-Ray Mass Attenuation Coefficients and Mass Energy-Absorption Coefficients from 1 keV to 20 MeV for Elements Z = 1 to 92 and 48 Additional Substances of Dosimetric Interest, NIST Standard Reference Database 126 (1996)

③ まとめ

モンテカルロ法計算コード MCNP を用いて、セメントと骨材の吸収線量の比を評価した。その結果、セメントと骨材で放射線束の違いはほとんどないが、吸収線量にはそれぞれの組成に依存した差異が見られた。従って、コンクリート内の骨材の放射線吸収線量を評価する際は、コンクリート全体に対する放射線束と組成の違いによる発熱定数を考慮すれば良いことが分かった。

5) 異なる温度条件下での脱着線による吸着熱評価

本検討は、数値解析手法においてコンクリート中の水分移動を高度化する目的で行った基礎検討である。近年、コンクリート中の水の多くは、毛管空隙に存在するのではなく、その多くが、C-S-Hの層間にあることが、1H-NMRによる実験的研究により、明らかになってきた⁴⁹。それ故、高温時のC-S-Hの吸着熱の変化を通じて、水蒸気脱着等温線（水分移動方程式におけるキャパシティ項に相当）のモデルに関する高度化を検討した。

(a) 評価手法

温度環境が及ぼす吸着熱への影響を検討し、セメント硬化体表面の吸着性状を評価するため、異なる温度環境で水中養生した試験体を実験に用いた。

各養生温度の飽水試験体の湿度環境変化による質量変化から、水蒸気脱着等温線を得た後、Clausius-Clapeyron式を用いて、吸着熱を算出した。また、吸着熱の評価軸として、BET比表面積から統計的吸着厚さを求め用いた。

(b) 実験概要

a) 使用材料及び調合

本実験には市販のホワイトセメントを用いた。使用したホワイトセメントの化学組成について、表 3.4.2-59 に示す。

表 3.4.2-67 セメントの化学組成

化学成分 (mass%)											
LOI	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	CaO	MgO	SO ₃	K ₂ O	Ti O ₂	P ₂ O ₅	MnO	合計
2.93	22.43	4.67	0.16	65.69	0.98	2.51	0.07	0.17	0.03	0.00	99.64

水セメント比 0.55 として、ホバートミキサにより 3 分間の練混ぜを行った。練混ぜ後、ブリージングが収まるまで練返しを行い、その後、3×13×300mm の鋼製型枠に打込みを行い、打込み後 4 日で脱型を行った。その後は恒温室 (20±2℃) において、水酸化カルシウム飽和水溶液を用い、材齢 2 年まで水中養生を行った。その後、測定用の試験体を精密切断機で 1×3×3mm 程度に切り出し成型した。各温度環境における吸着水量を比較するため、試験体切断後、養生水と共に、20℃、40℃、80℃の恒温槽にてさらに 2 週間水中養生を行った。

b) 質量変化測定

各湿度ステップにおける吸着水量を得るため、測定に湿度制御型 TG 装置 (BrukerAXS 社

⁴⁹ Muller, A. C. A., et al. (2012). "Densification of C-S-H Measured by 1H NMR Relaxometry." The Journal of Physical Chemistry C 117(1): 403-412.

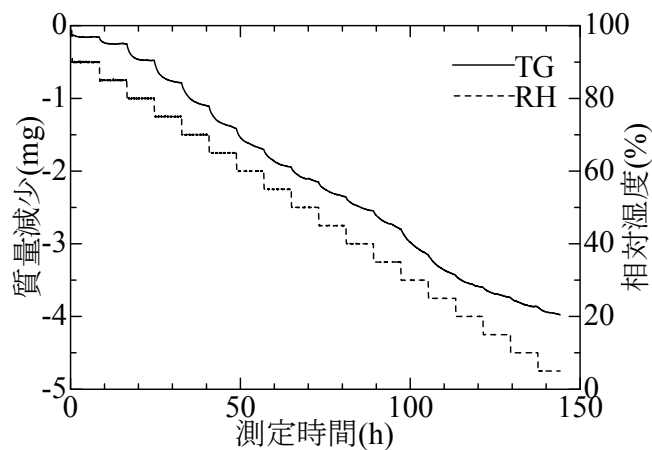
製) を用いた。水中養生した飽水試験体の養生温度ごとに測定中の装置温度を固定した。測定開始相対湿度を RH90% とし、各ステップ 5% ずつ RH5% まで低下させ、その間の質量変化を測定した。

また、質量変化測定後の試験体を用いて、105°C 時の絶乾質量を得るため、TG-DTA 装置 (BrukerAXS 社製) を用いて測定を行った。測定プログラムは、105°C 7 時間とした。

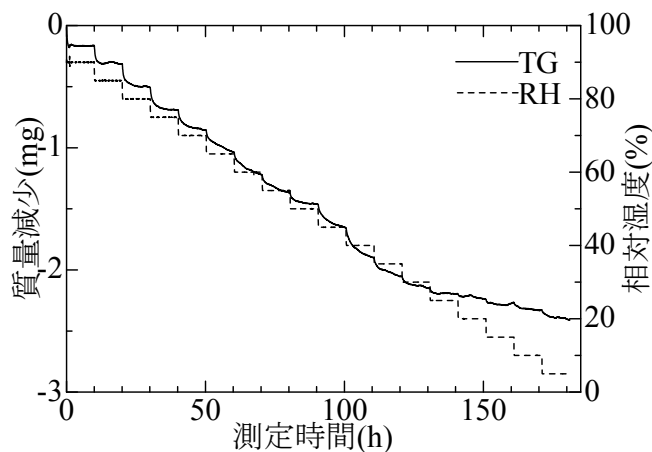
(b) 実験結果及び考察

a) 質量変化測定結果

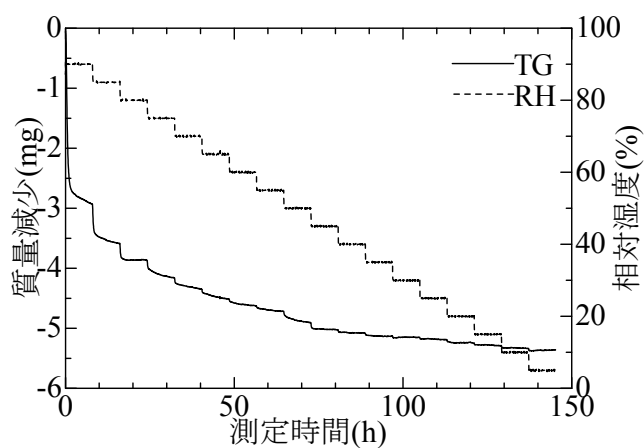
湿度制御型 TG 装置で得られた、乾燥プロセスにおける相対湿度と質量減少の経時変化を図 3. 4. 2-180 に示す。



(a) 20°C養生サンプル



(b) 40°C養生サンプル



(c) 80°C養生サンプル

図 3.4.2-180 質量減少

(c) 水蒸気脱着等温線

得られた吸着水量を、各試験体の105°C時の絶間質量で規格化することで、脱着等温線を求めた。RH100%時とRH0%時の吸着水量は、それぞれ飽水時質量と絶乾質量を用い、同様に求めた。得られた脱着等温線を図 3.4.2-181 に示す。

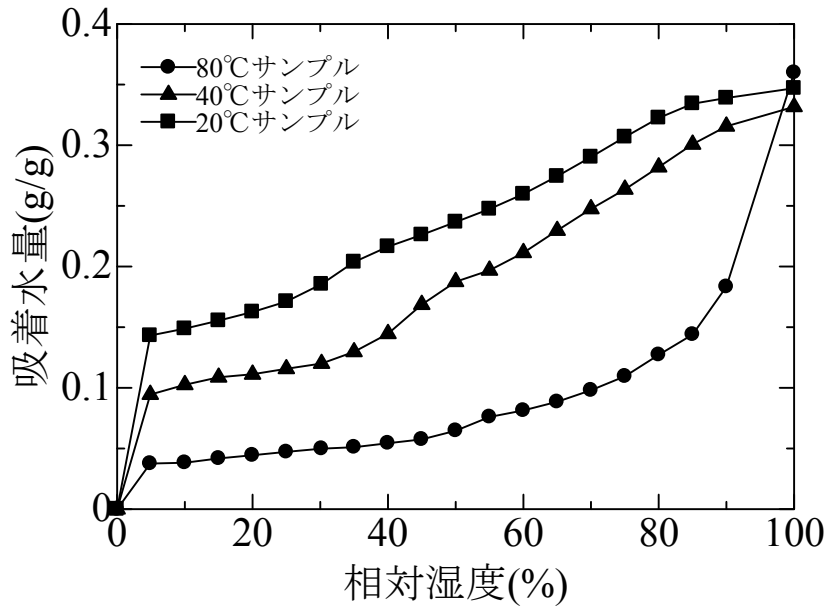


図 3.4.2-181 脱着等温線

(d) BET 比表面積

水蒸気吸着等温線から以下の式を用いて、BET 比表面積を計算により求めた⁵⁰。求めた BET 比表面積を図 3. 4. 2-182 に示す。

$$S_{BET} = \frac{w_m \cdot N \cdot A_{cs}}{M} \quad (3. 4. 2-7)$$

ここで、 S_{BET} : BET 比表面積 (m^2/g)、 w_m : 単分子吸着量、 N : アボガドロ定数 ($6. 023 \cdot 10^{23}$ 分子/mol)、 M : 吸着質分子量である。

図 3. 4. 2-182 に示されるように、高温養生の試験体ほど、BET 比表面積は小さくなった。

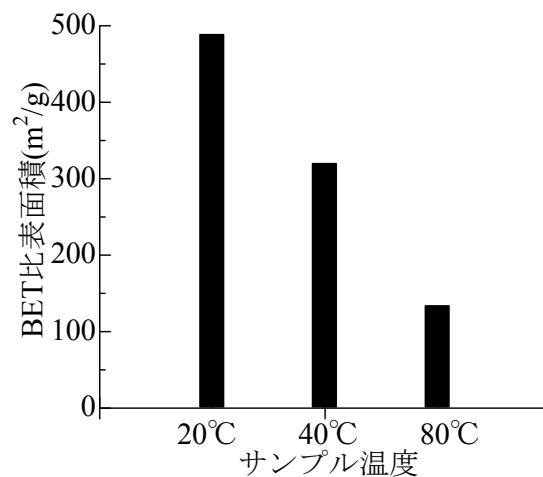


図 3. 4. 2-182 BET 比表面積

(e) 統計的吸着厚さ

得られた BET 比表面積と吸着水量の関係から統計的吸着厚さを以下の式を用いて求めた。

$$t = \frac{w \cdot 10^9}{\rho_w \cdot S_{BET}} \quad (3. 4. 2-8)$$

ここで、 t : 統計的吸着厚さ (nm)、 w : 水蒸気吸着量、 ρ_w : 水の密度 (g/m^3)、 S_{BET} : BET 比表面積 (m^2/g) である。統計的吸着厚さと相対湿度の関係を図 3. 4. 2-183 に示す。

⁵⁰ Brunauer, S., et al.: Adsorption of gases in multimolecular layers, Journal of the American Chemical Society, 60(2), pp.309-319, 1938

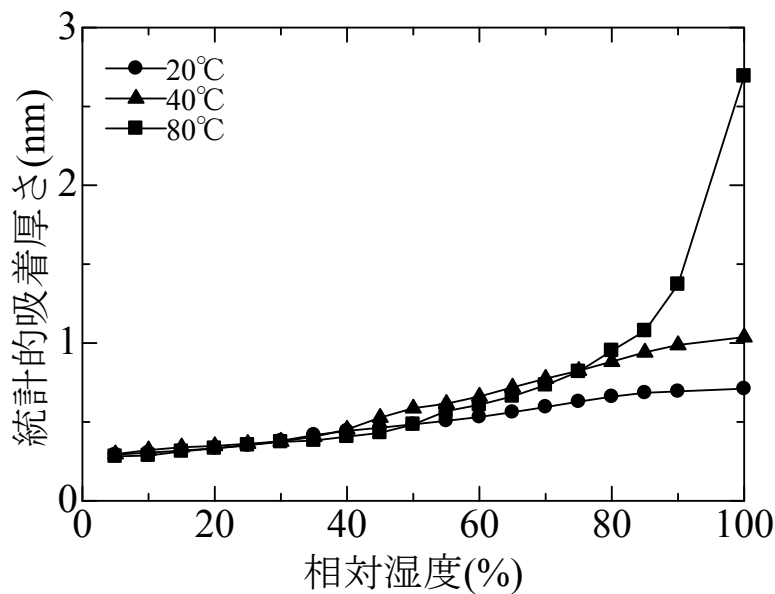


図 3. 4. 2-183 統計的吸着厚さと相対湿度の関係

図 3. 4. 2-183 に示すように、低湿度側では温度間ではほぼ同じ値であった t が RH40% 付近から、相対湿度に対して異なる曲線となる。セメント硬化体表面への水の吸着は、細孔の C-S-H のシラノール基(SiOH)との水素結合により起こっていると考えられている^{51, 52}ことから、RH40%以上の高湿度域においては、それ以下の相対湿度領域とは、C-S-H は異なる吸着性状を示していると考えられる。

(f) Clausius-Clapeyron 式による吸着熱計算

得られた脱着等温線から Clausius-Clapeyron 式を用いて温度別の吸着熱 Q を計算する。 Q は一定温度下での吸着熱量である。ここで、異なる温度の脱着等温線を比較評価するため相対含水率を以下の式の様 に定義した。

$$\theta = w / w_s \quad (3. 4. 2-9)$$

ここで、 θ : 相対含水率、 w : 吸着水量(g/g)、 w_s : 飽和吸着水量(g/g)である。

次に、 θ 一定とした時の温度と湿度を各温度の吸着等温線から抜き出し、図 3. 4. 2-184 に示すように、吸着等量線を作成した。

⁵¹ 浅本晋吾, 宮腰良太, 辻貴大, 松井久仁雄: 固体表面に吸着する液体特性に依存するセメント硬化体の体積変化, コンクリート工学年次論文集, Vol. 32, No. 1, 2010

⁵² 青野義道, 松下文明, 柴田純夫, 濱幸雄: 乾湿繰返しによるセメントペーストの細孔構造変化, コンクリート工学年次論文集, Vol. 28, No. 1, 2006

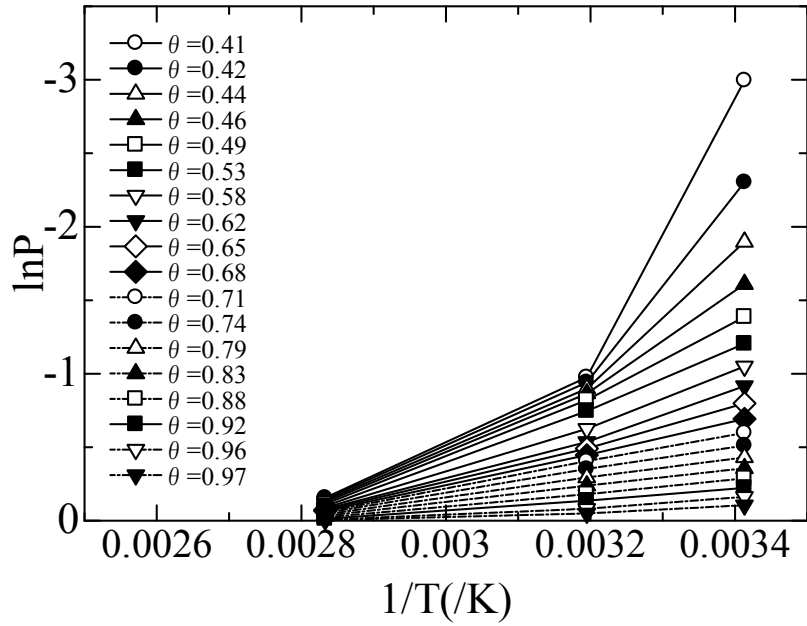


図 3. 4. 2-184 吸着等量線

作成した各温度の吸着等量線の近似曲線の傾きから、 $\ln P$ と T の関係式を求め、以下の Clausius-Clapeyron 式に用いた。

$$Q = -R \left(\frac{\partial \ln P}{\partial (1/T)} \right)_\theta \quad (3. 4. 2-10)$$

ここで、 Q ：吸着熱(kJ/mol)、 R ：気体定数(kJ/K・mol)、 P ：相対湿度、 T ：温度(K)である。

計算から得られた吸着熱と、統計的吸着厚さの関係を図 3. 4. 2-185 に示す。

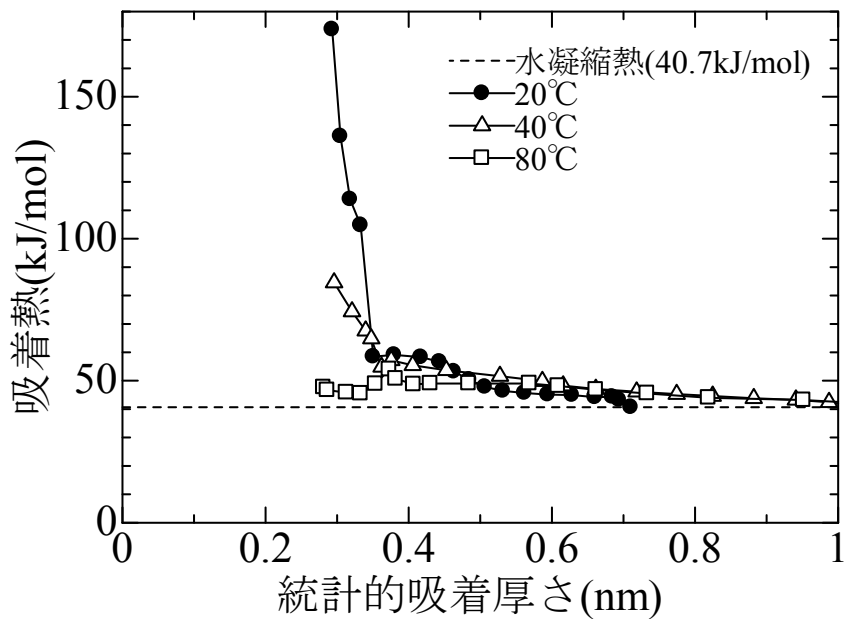


図 3. 4. 2-185 統計的吸着厚さと吸着熱の関係

図 3. 4. 2-185 に示すように、吸着熱は、0.35nm 以下、0.35 から 0.7nm、0.7nm 以上の三つの領域において異なる挙動を示す。水分子の直径が約 0.3nm であることから、それぞれ吸着第一層(単分子吸着層)、第二層、第三層以降における吸着の挙動を示していると考えられる。

第一層では、吸着熱が大きいことから、セメント硬化体表面のシラノールと第一層の水分子が強く接合していると考えられる。また、養生温度間の吸着熱の差が大きいことから、第一層においてのみ、養生温度による表面性状の変質の影響を強く受けることがわかる。これは、水分子が直接結合しているシラノール基が、温度により異なる挙動を示しているためである。高温で養生するほど第一層吸着熱が小さいのは、シラノール基の高温環境下で脱水縮合反応したことにより、吸着サイトの特性が変化したためだと考えられる。

第二層では、セメント硬化体表面から離れるほど、その影響が小さくなり、第三層以降では、ほとんど影響を受けなくなることがわかる。

また、図 3. 4. 2-183、図 3. 4. 2-185 に示すように、養生温度により吸着層厚さが異なる原因として、乾燥や熱による吸着サイトの変質が考えられる。

五十嵐は⁵³、セメント硬化体中の C-S-H、トバモライトに着目し、水蒸気吸着に伴う、C-S-H 中の層状ケイ酸塩の微細構造の変質を図 3. 4. 2-186 の様にモデル化している。この研究では、水蒸気吸着試験における吸着水が C-S-H の層間に吸着するとしており、図 3. 4. 2-186 は吸着サイトを含む、カルシウムシリケート層間距離を示している。また、図 3. 4. 2-186

⁵³ 五十嵐豪:ポルトランドセメント系カルシウムシリケート水和物の水蒸気吸着性状に関する研究, 名古屋大学大学院環境学研究科博士論文, 2014

から分かるように、高温・乾燥時に層間距離が最も小さくなることがわかる。層間距離の変化に伴い、そこに存在する液相と気相の水のエンタルピーが変化し、吸着熱に差が生じる。また、統計的吸着厚さも、層間距離に応じて変化すると考えられる。

本研究においても、同様の変質が起きていると考えられ、図 3. 4. 2-186 参考にすると、得にその影響が大きいのは、養生 80°C サンプルと、図 3. 4. 2-185 に示す養生 20°C サンプルの統計的吸着厚さ 0. 35nm 以下、RH25%以下の領域と考えられる。

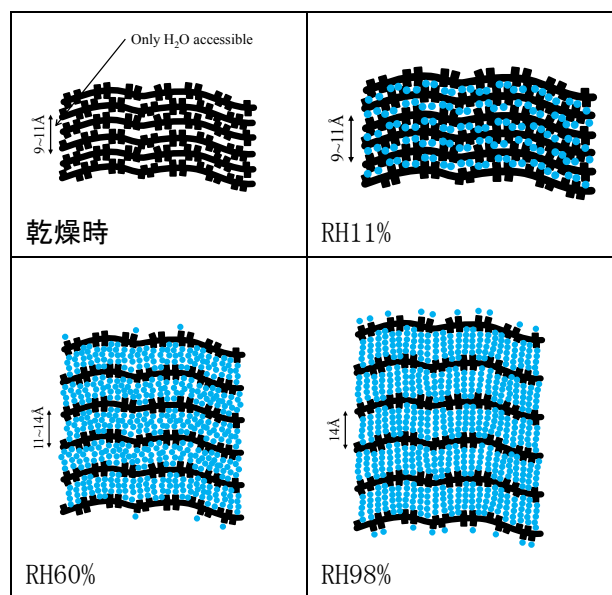


図 3. 4. 2-186 層間変化のモデル⁵³

(g) まとめと展望

本研究は、異なる温度環境下で養生したサンプルを用い、温度環境が及ぼす、吸着熱への影響を検討することで、セメント硬化体表面の吸着性状を評価した。

- ① セメント硬化体表面における吸着特性は、養生温度による構造的変質の影響を受け、温度環境ごとに異なる。
- ② セメント硬化体表面における水蒸気吸着は、吸着第一層のみ、養生温度によるシラノール基の変質の影響を受け、高温で養生した試験体ほど第一層の吸着熱、吸着量が小さくなる。

しかしながら、本検討で取得できたデータ数、再現性については非常に限定的であるとともに得られた検討結果の既往研究との整合性についても、議論の余地がある。引き続き、本検討を来年度も実施する予定である。

6) 乾湿繰返し条件下のセメントペーストの体積変化

コンクリート中の損傷は、セメントペーストと骨材の体積変化差に起因して生ずることがわかっている。この点から、セメントペーストの体積変化に関する知見を蓄えることはコンクリートの健全性評価上、重要な基盤情報となる。本検討はこのような観点から、長さ変化等温線上のヒステリシスについて検討した。

(a) 評価手法

本実験には市販のホワイトセメントを用いた。使用したホワイトセメントの化学組成について、表 3.4.2-59 に示す。ホワイトセメントを用いた理由は、本研究外ではあるが核磁気共鳴法を利用する予定であったためである。普通ポルトランドセメントに比べ、 Fe_2O_3 と MgO の含有量が少ないものの、その他の成分に大きな違いはなく、本検討の中心である乾燥収縮については、普通ポルトランドセメントを用いた際と、大きな相違はないと考えられる。

セメントは水セメント比 0.55 として、ホバートミキサにより 3 分間の練混ぜを行った。練混ぜ後、ブリージングが収まるまで練返しを行い、その後、 $3 \times 13 \times 300\text{mm}$ の鋼製型枠に打込みを行い、打込み後 4 日で脱型を行った。その後は恒温室 ($20 \pm 2^\circ\text{C}$) において、あらかじめ同一のセメントで作成した水酸化カルシウム飽和水溶液を用い、材齢 180 日まで水中養生をおこなった。その後、水酸化ナトリウム濃度を制御し、RH11%、RH20%、RH30%、RH40%、RH50%、RH60%、RH70%、RH80%、RH90%、RH95% に調湿したデシケータ内でおよそ 1 年間乾燥を行った。調湿は、湿度センサ (精度 $\pm 1.8\%$) を用いて、湿度 $\pm 2\%$ 内に収まるように溶液を交換して行った。

TMA 測定は、RH11%、RH40%、RH50%、RH 60%、RH80%、RH90% において長期乾燥した試料 (以後、“RH11%調湿サンプル” 等と表記) について行い、試験体を精密切断機で $1 \times 3 \times 3\text{mm}$ 程度に成型したものをを用いた。長さ変化測定方向を、長さ 3mm 程度とし、上下面は TMA 装置で安定して支持できる程度に平滑にした。

表 3.4.2-68 セメントの化学組成

化学成分 (mass%)											
LOI	SiO_2	Al_2O_3	Fe_2O_3	CaO	MgO	SO_3	K_2O	Ti O_2	P_2O_5	MnO	合計
2.93	22.43	4.67	0.16	65.69	0.98	2.51	0.07	0.17	0.03	0.00	99.64

(b) 乾燥収縮ひずみ測定

乾燥収縮ひずみの測定には湿度制御型 TMA 装置 (BrukerAXS 社製 TMA4000SA+HC9700、最小検出変位 $0.5 \mu\text{m}$) を用いた。たとえば、RH11%調湿サンプルでは、相対湿度を 11、5 (最低脱着湿度)、11、20、30、40、50、60、75、90、98、90、75、60、50、40、30、20、11% の順に変化させ、各湿度において、長さ変化が落ち着くまでの時間によって、5~20 時間静置した。その他の湿度に調湿した試験体についても同様に、それぞれ調湿を行っていた

湿度から脱着を開始し、RH5%まで乾燥させ（処女脱着）、そこから RH98%まで湿度を上げ（吸着）、その後それぞれ元の湿度まで乾燥させて（脱着）、その間の長さ変化を測定した。

RH90%調湿サンプルについては上記の測定湿度パラメータの他に、相対湿度を 90、75、60、50、40（最低脱着湿度）、50、60、75、90、98、90%の順に、最低脱着湿度を RH40%としての測定を行った。また、同じく RH90%調湿サンプルについて、相対湿度を 90、75、60（最低脱着湿度）、75、90、98、90、75、60、75、90、98、90%というように、最低脱着湿度を RH60%として乾湿を 2 回繰り返しての測定も行った。

測定の概要を図 3.4.2-152 に示す。

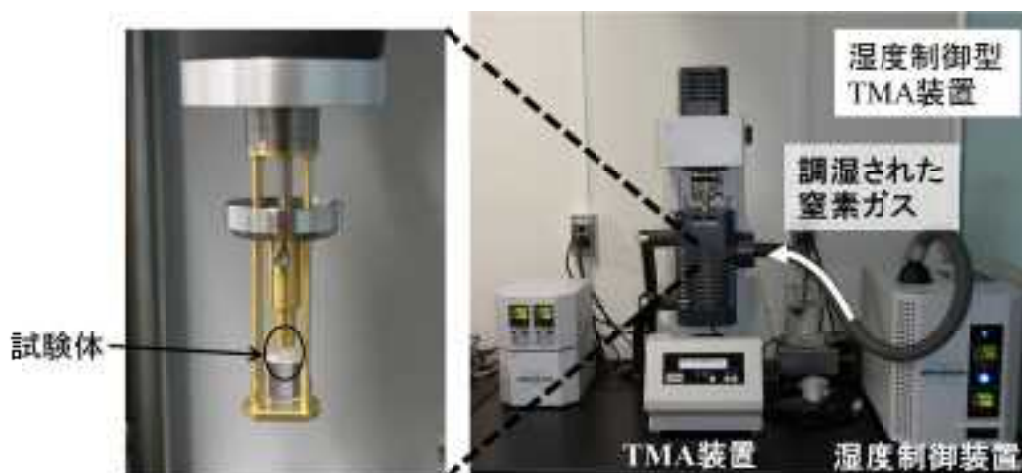


図 3.4.2-187 TMA 測定装置と試験体の概要

(c) 処女脱着等温線試験

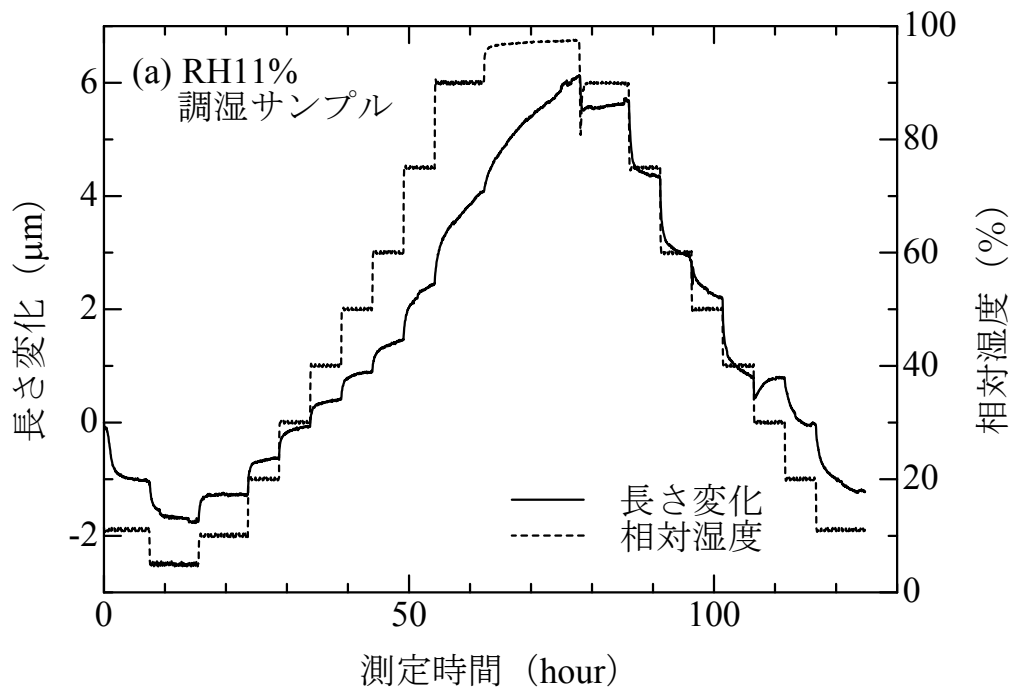
RH60%調湿サンプルについて、重量法水蒸気吸着測定装置（Aquadyne DVS, Quantachrome 社製）を用いて、処女脱着等温線試験を行った。試験体は乾燥収縮ひずみ測定と同様のサイズに切断したものをを用いた。湿度プログラムは相対湿度 60、50、40、30、20、11、5%の順に湿度を下げ、各ステップの保持時間は、RH60%調湿サンプルの乾燥収縮ひずみ測定の処女脱着過程と同様の条件とした。

(d) 窒素吸着試験

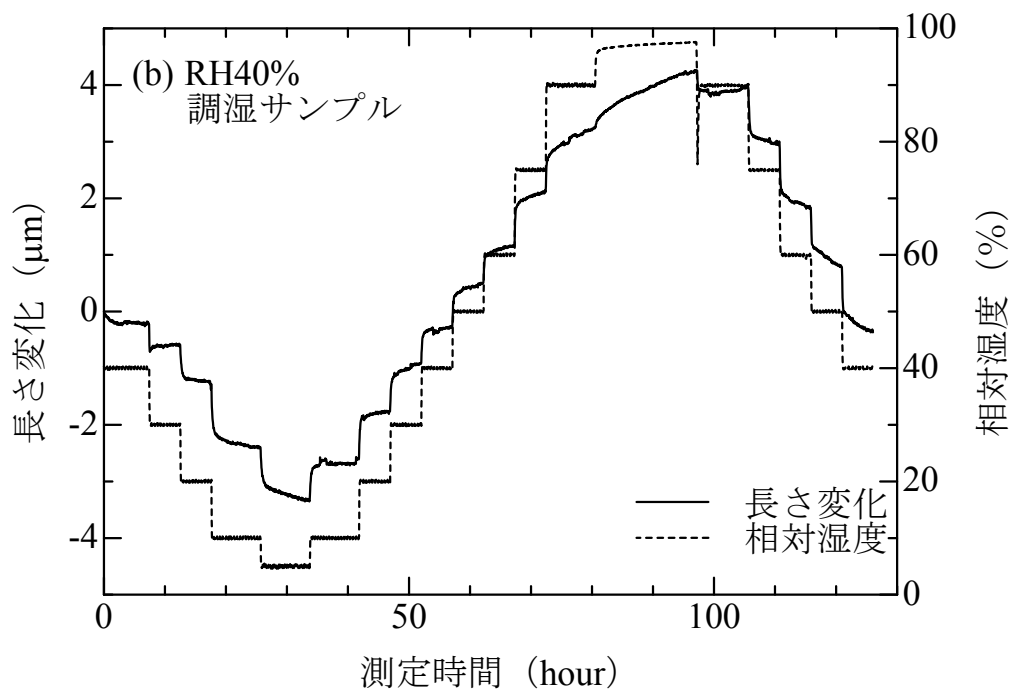
各調湿サンプルについて、前処理として真空脱気を行いながら 105°C 炉で 30 分間加熱し、窒素を充填したデシケータ内で空冷した後、窒素吸着試験を行った。測定には自動比表面積測定装置（Mircometrics 社製 TriStar II 3020）を用いた。

(e) 実験結果と考察

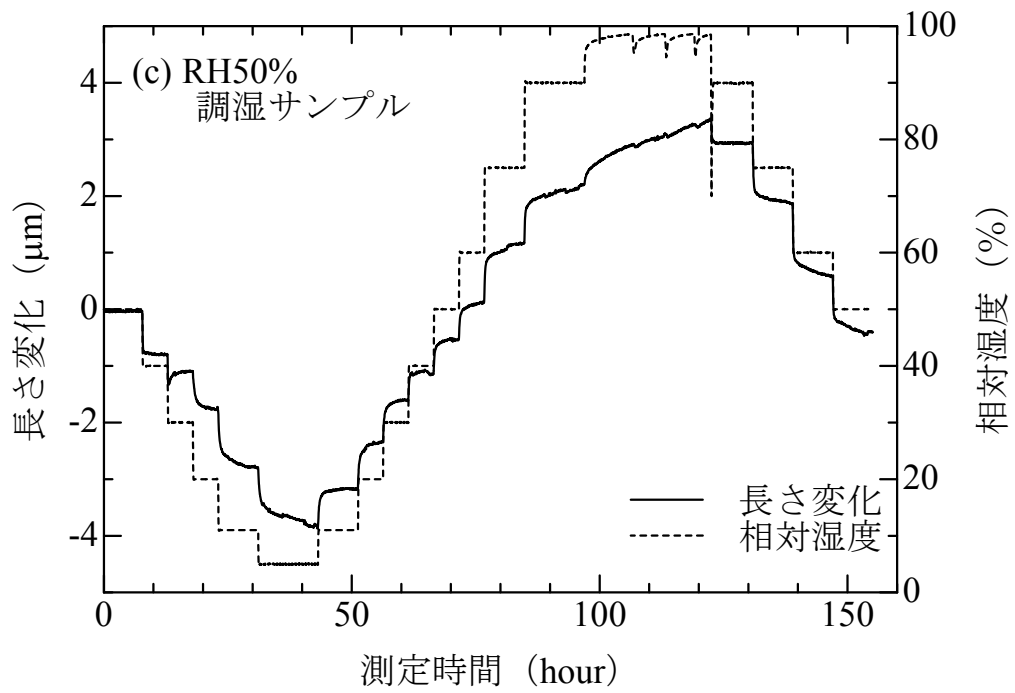
湿度制御型 TMA 装置で得られた、測定過程における湿度と長さの時間変化を図 3.4.2-188 に示す。



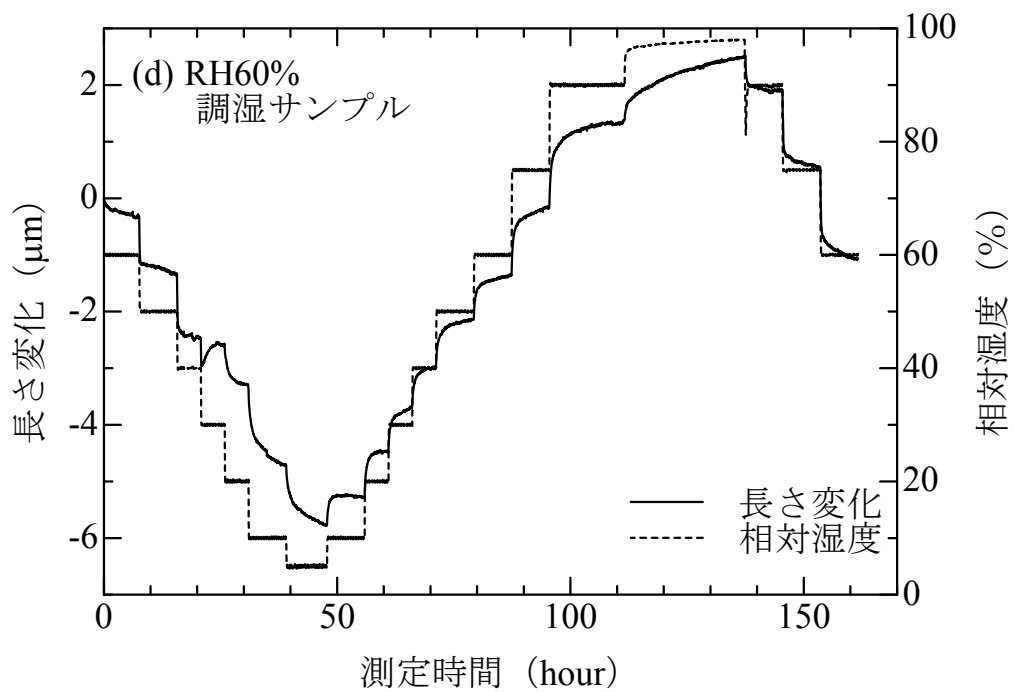
(a) 11%RH 調湿サンプル



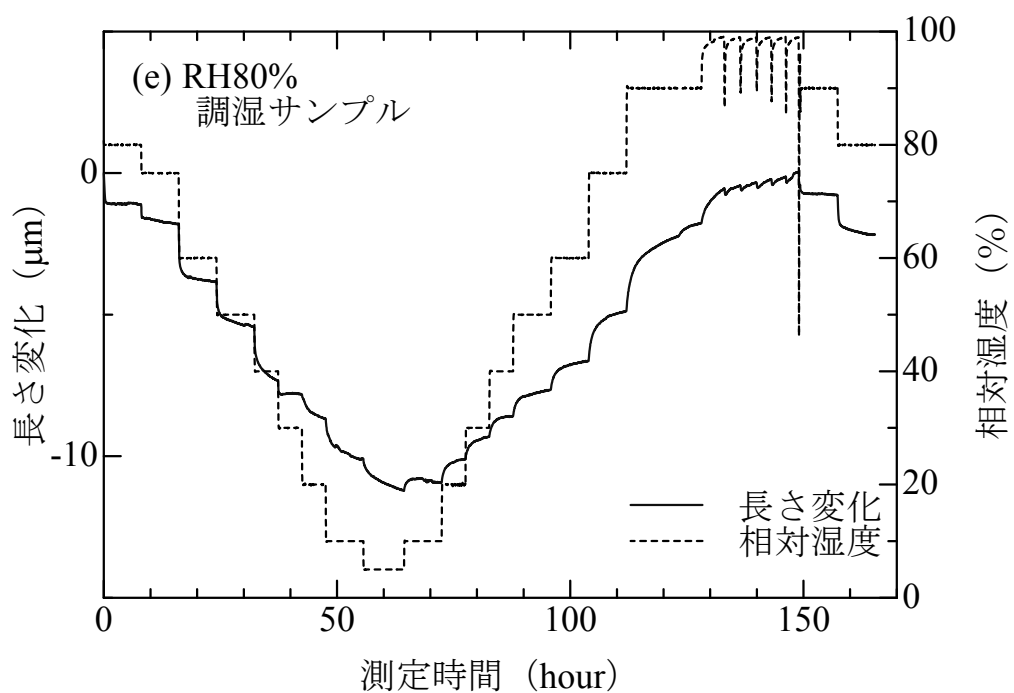
(b) 40%RH 調湿サンプル



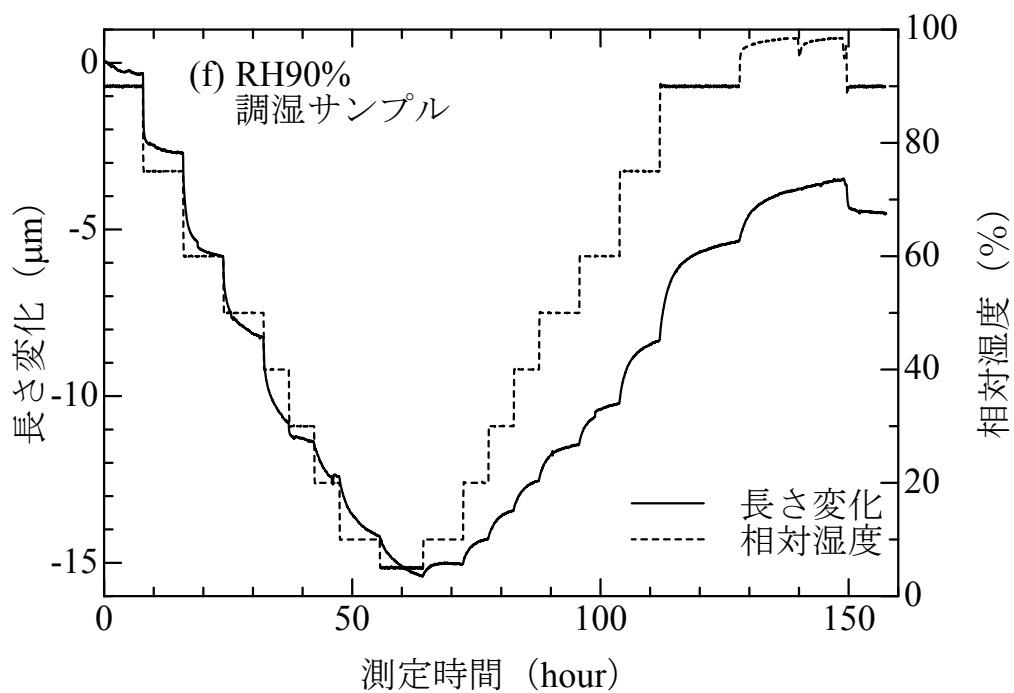
(c) 50%RH 調湿サンプル



(d) 60%RH 調湿サンプル



(e) 80%RH 調湿サンプル



(f) 90%RH 調湿サンプル

図 3.4.2-188 短期乾燥による相対湿度と長さの時間変化

図 3.4.2-188 から分かるように、各湿度ステップで長さ変化が十分に平衡になっていない部分があった。そこで適宜、各湿度ステップについて以下の式を用いて、残差が最小となるようにフィッティングを行い、収束値 a からその湿度ステップにおけるひずみの平衡値を算出した⁵⁴。

$$l(t) = a \left\{ \begin{array}{l} 1 - b \exp(-ct) - 0.25b \exp(-4ct) \\ -0.1b \exp(-9ct) \\ -0.0625b \exp(-16ct) \\ -0.04b \exp(-25ct) \end{array} \right\} \quad (1)$$

ここで、 $l(t)$: 長さ変化 (μm)、 t : 測定時間 (hour)、 a 、 b 、 c : フィッティングに用いるパラメータである。

a には測定データから予想できる収束値をはじめに与えて、収束計算を行った。

各調湿サンプルの乾燥収縮測定における湿度とひずみの関係を図 3.4.2-189 に示す。各測定 of 最初の湿度ステップにおける試験体長さを基準として、各ステップにおけるひずみを算出した。図 3.4.2-189 を見るといずれのサンプルにおいても、脱着過程の RH40% 地点で屈曲がみられ、収縮が停滞していることが分かる。ここで、図 3.4.2-188 の長さ変化の経時変化を見てみると、RH11%、RH50%、RH60% 調湿サンプルにおいて顕著であるが、RH40% から RH30% への脱着過程で試験体が膨張の挙動を示している。このことは、RH40% から RH30% への脱着過程に、セメントペーストの収縮特性を変えるような構造の変化が起こっていることを示唆している。

⁵⁴ 多田眞作, 孫喜山, 渡辺一正: セメント系硬化体の水蒸気吸着等温線の動的測定, コンクリート工学年次論文集, Vol. 22, No. 1, pp775-780, 2000

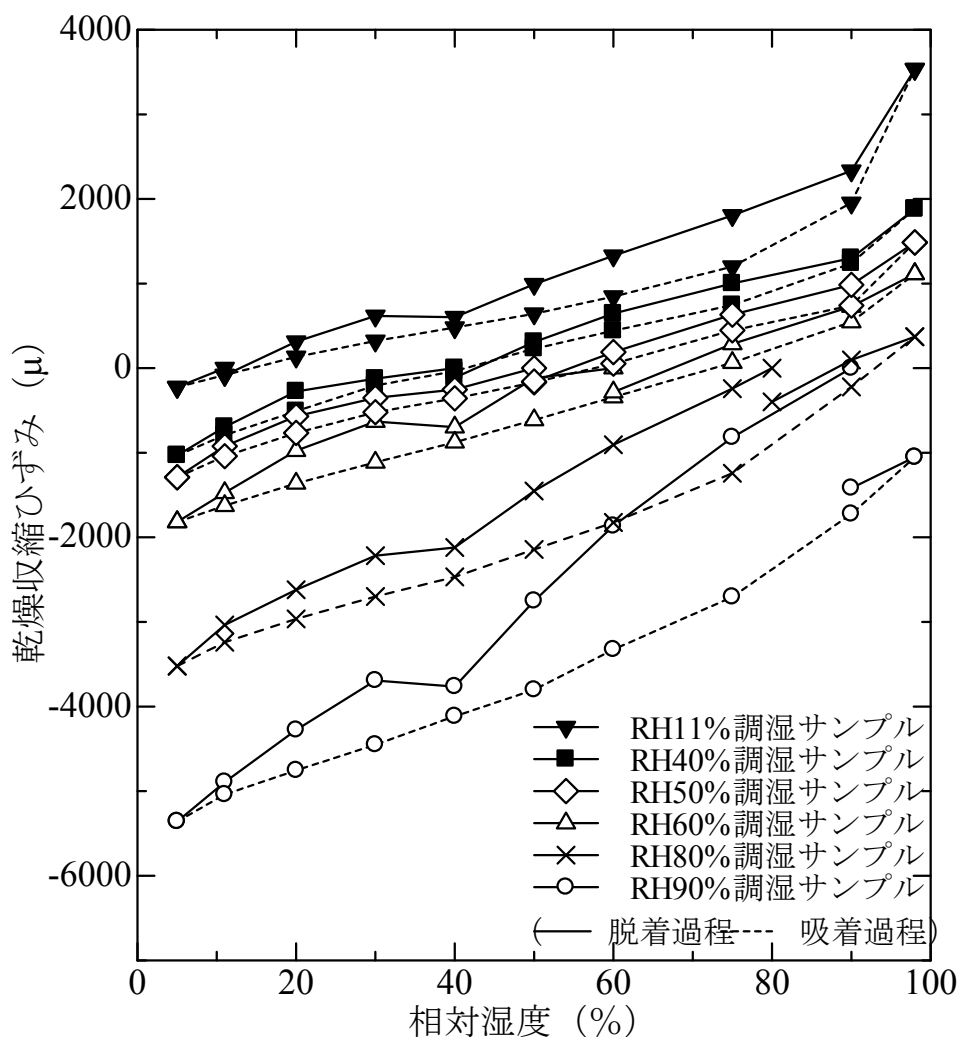


図 3.4.2-189 各調湿サンプルの乾燥収縮ひずみと相対湿度の関係

各調湿サンプルにおける、乾燥収縮ひずみ測定終了時のひずみ（以後、“非回復ひずみ”と表記）を図 3.4.2-190 に示す。非回復ひずみは RH40%調湿サンプルが -100μ 程度で最少となり、おおよそひずみが回復している。RH50%、RH60%、RH80%、RH90%調湿サンプルと見ていくと、サンプルの調湿湿度が大きくなるほど、非回復ひずみが大きくなっていることがわかる。特に RH90%調湿サンプルについては、測定終了時のひずみが -1420μ と大きくなった。

処女脱着等温線試験による相対湿度とサンプル重量の経時変化を図 3.4.2-191 に示す。乾燥収縮ひずみ測定において膨張挙動がみられた RH40%から RH30%の重量変化をみると、前後の湿度ステップに比べて重量変化が大きいことがわかる。また、RH30%のステップ内で試料重量が平衡に達していなかった。

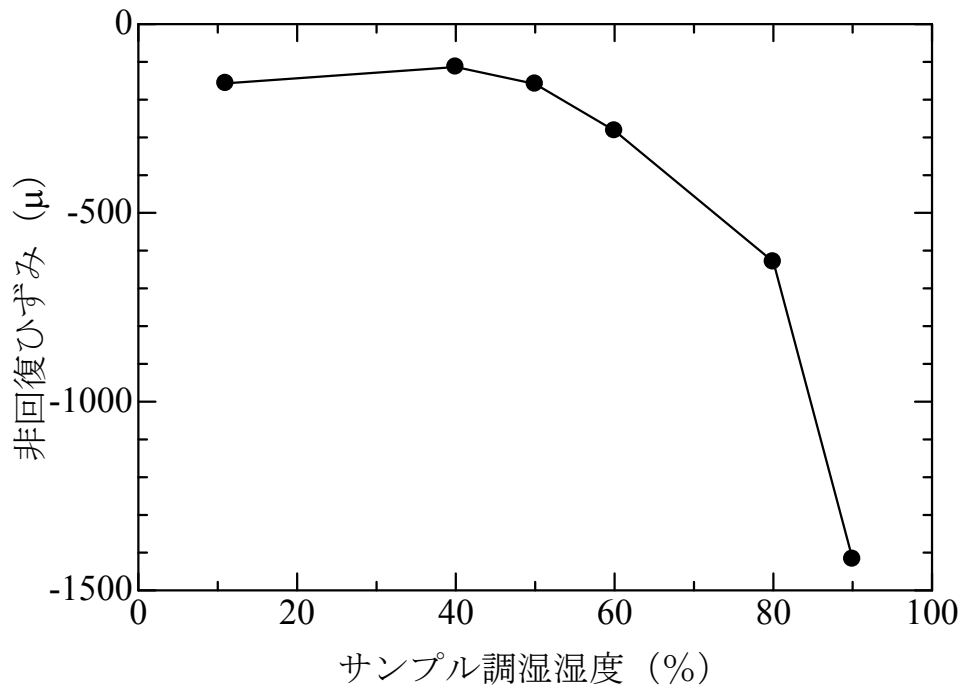


図 3.4.2-190 調湿湿度と非回復ひずみの関係

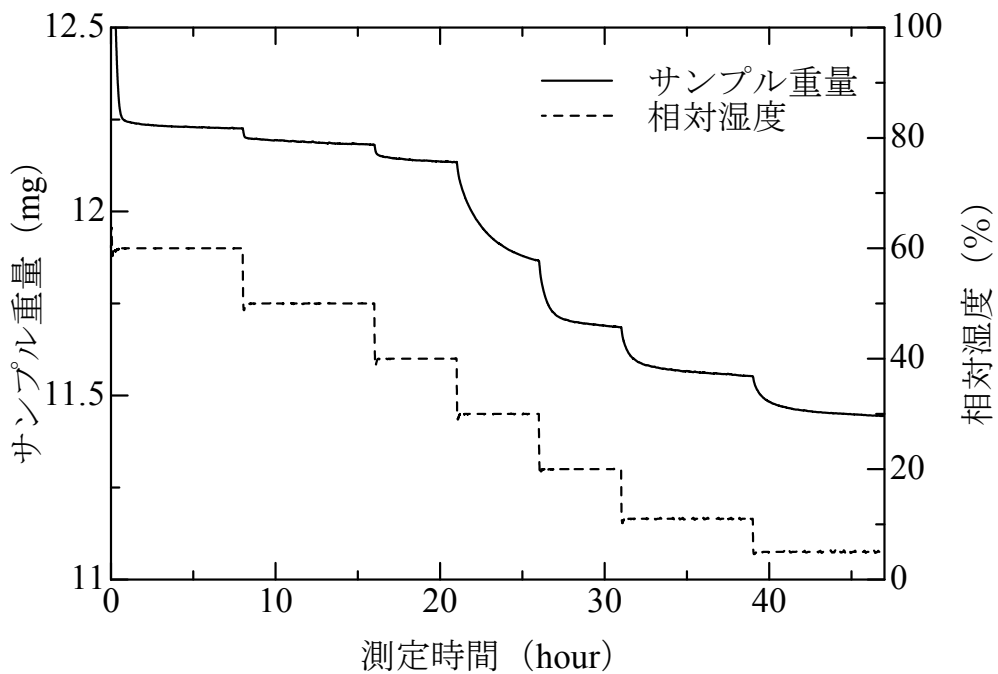


図 3.4.2-191 RH60%調湿サンプルの相対湿度と重量の時間変化

図 3. 4. 2-192 に窒素吸着試験から得られた各調湿サンプルの BET 比表面積を示す。RH95% から RH50%調湿サンプルについてみると、湿度の低下に伴い比表面積が減少しているのに対し、RH50%以下の湿度に調湿したサンプルについては、ほぼ同じ比表面積であり、Parrottらの報告⁵⁵と同じ傾向となった。

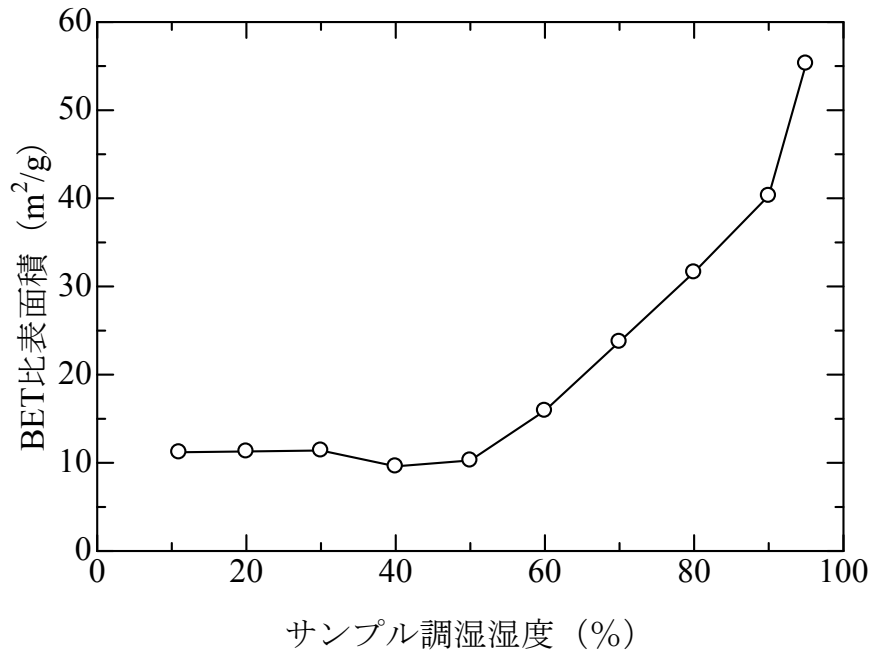


図 3. 4. 2-192 窒素 BET 比表面積と調湿湿度の関係

セメントペーストは乾燥を受けると、毛管張力と溶解析出反応によって長期的に構造の変化が起り、乾燥湿度によって異なる構造となっていると考えられる。本研究における窒素吸着試験の前処理においては、急速に乾燥を行っているため、構造の変化の影響が少なく、測定結果として、長期乾燥時の調湿湿度による差異が得られた推測できる。乾燥収縮ひずみ測定においては、非回復ひずみが生じていることから分かるように、構造の変化が無いわけではなく、むしろ、ある構造をもった状態から生じる処女脱着過程で、構造の変化が比較的少ない状況下での乾燥収縮ひずみを計測できたと考えている。

図 3. 4. 2-193 に各調湿サンプルの窒素吸着試験による BET 比表面積と非回復ひずみの関係を示す。BET 比表面積が大きいほど、非回復ひずみが大きいことがわかる。窒素吸着試験の結果から、乾燥とともに比表面積が変わる RH50%以上の領域では、窒素が吸着できる

⁵⁵ L. J. Parrott, W. Hansen, R. L. Berger : Effect of drying upon the pore structure of hydrated alite paste, Cem. Concr. Res. Vol.10, pp.647-655, 1980

空隙が乾燥とともに徐々に減っているといえる。短期乾燥収縮試験の結果と合わせて考えると、RH50%以上の領域で見られる窒素が吸着できる空隙は、脱着過程でつぶれると、その後の吸着過程で元に戻らない非回復の構造を持っていると推測できる。一方で、乾燥がRH50%以下に進むと、窒素が吸着できる空隙がなくなる、もしくは、窒素が侵入できる経路がふさがれると考えられる。すなわち、RH11%、RH40%調湿サンプルでは、窒素吸着に寄与する非回復の構造が少なく、乾燥による収縮がその後の吸着過程で回復したと考えられる。

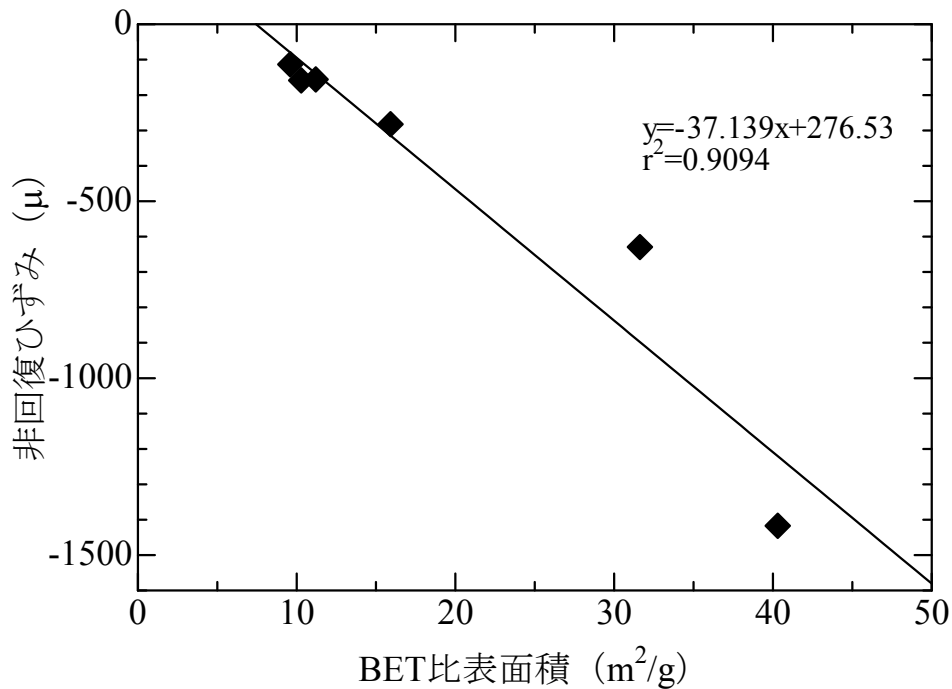


図 3.4.2-193 窒素 BET 比表面積と非回復ひずみの関係

図 3.4.2-194 に RH90%調湿サンプルの、最低脱着湿度 RH5%と RH40%、RH60%での乾燥収縮ひずみの比較を示す。また、それぞれの非回復ひずみを図 3.4.2-195 に示す。最低脱着湿度 RH40%、RH60%においても、脱着過程での収縮がその後の吸着過程でもとに戻っておらず、これらの領域においても構造の塑性的変形が起こっていると考えられるが、測定終了後のひずみは、最低脱着湿度 RH40%での測定で最低脱着湿度 RH5%のひずみの 4 割程度、最低脱着湿度 RH60%での測定で 2 割程度となった。

また、最低脱着湿度 RH60%の測定について、さらに続けて脱着、吸着をくり返したときのひずみを図 3.4.2-196 に示す。2 回目の吸脱着過程でもひずみの非回復成分がみられるものの、1 回目比べて、回復性のある軌道でひずみが増加していることが分かる。

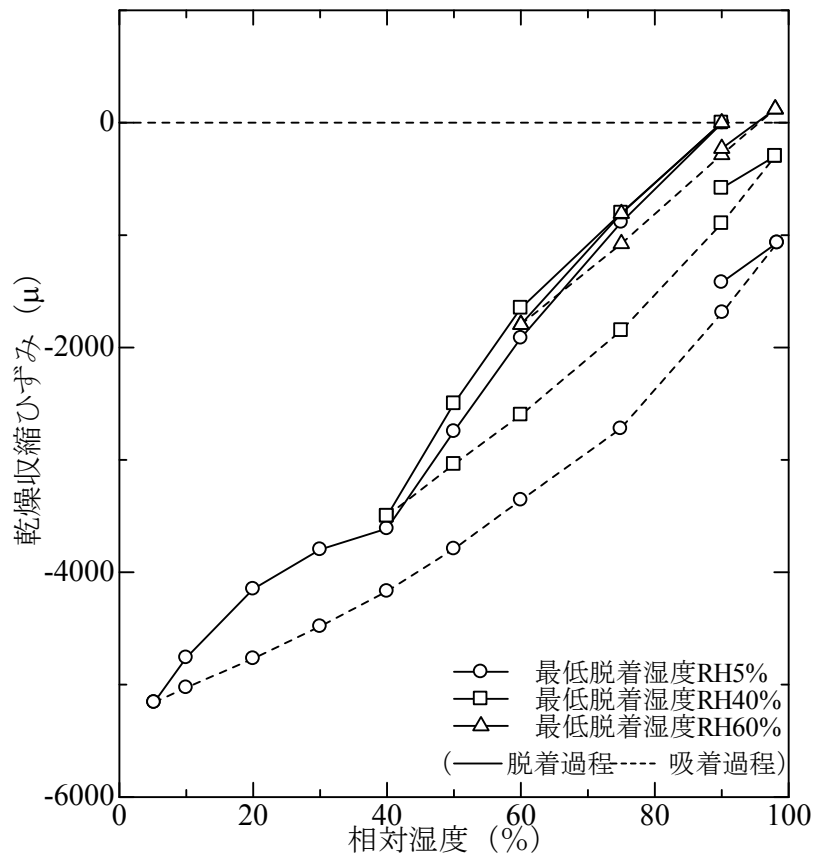


図 3.4.2-194 RH90%調湿サンプルの異なる脱着過程における乾燥収縮ひずみと相対湿度の関係

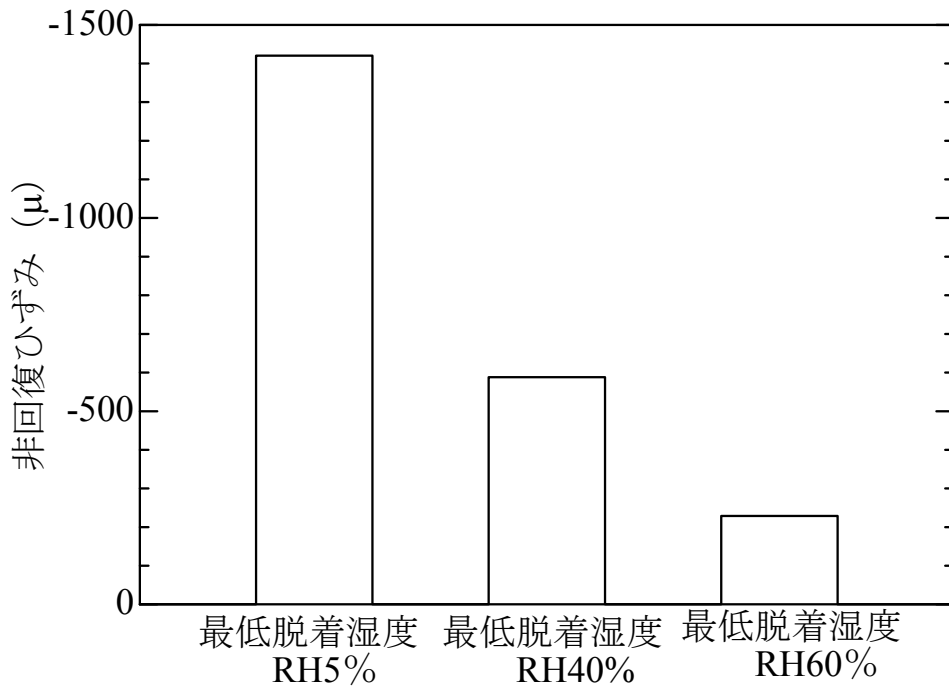


図 3. 4. 2-195 RH90%調湿サンプルの各脱着過程における非回復ひずみ

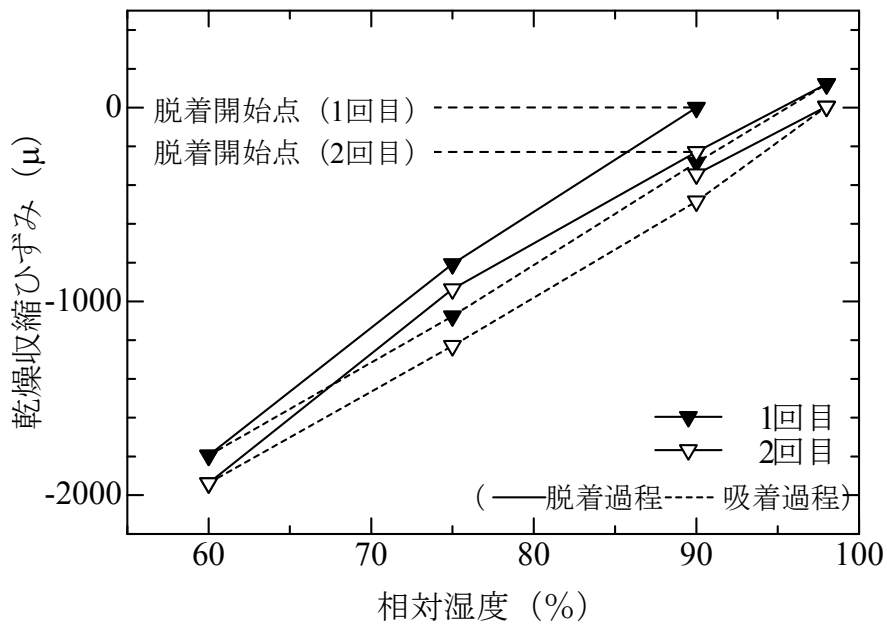


図 3. 4. 2-196 RH90%調湿サンプルの最低脱着湿度 RH60%の乾湿繰り返し測定による乾燥収縮ひずみと相対湿度の関係

(f) まとめ

本検討における結論を以下に示す。

- ① RH40%調湿サンプルでは、RH5%から 98%の領域において、処女脱着による乾燥収縮ひずみが吸着過程でほぼ回復しているが、RH50%、RH60%、RH80%、RH90%調湿サンプルについては、サンプル調湿湿度の上昇とともに非回復ひずみは大きくなり、RH90%調湿サンプルでは -1420μ となった。
- ② いずれのサンプルにおいても RH40%から RH30%への脱着過程で収縮の停滞がみられ、幾つかのサンプルについては、この区間の脱着過程において、一度生じた乾燥収縮ひずみが膨張に転じる現象がみられた。このことは、RH40%から RH30%の脱着過程でセメントペーストの収縮特性を変えるような構造の変化が起こっていることを示唆している。
- ③ 窒素吸着試験から得られた BET 比表面積は RH95%から RH50%調湿サンプルでは、乾燥とともに減少しているのに対し、RH50%以下の湿度に調湿したサンプルについては、ほぼ同じ比表面積である。
- ④ RH50%以上の領域で見られる窒素が吸着できる空隙は、脱着過程でつぶれると、その後の吸着過程で元に戻らない非回復の構造を持っていると推測される。
- ⑤ RH90%調湿試料において、最低脱着湿度 RH40%、RH60%とした乾燥収縮試験においても、処女脱着における乾燥収縮ひずみの一部はその後の吸着過程で回復しておらず、この湿度領域においても構造の塑性的変形が起こっていると考えられる。
- ⑥ RH90%調湿試料の最低脱着湿度 RH60%の測定について、脱着、吸着をくり返したとき、2回目でもひずみの非回復成分がみられるものの、1回目に比べて、回復性のある軌道でひずみが増加する。

7) 高温下でのセメントペーストの挙動

2012年度に実施した研究は、セメントペーストを主として20°C一定条件下で、さまざまに乾燥させた実験であった。高経年化コンクリートの健全性評価上は、100°C以下の温度で平衡状態に達するまで乾燥させたセメントペーストのデータを整備することが高度化において重要である。本検討はこのような観点から、昨年度の検討の延長として、異なる温度にセメントペーストを設置して、さまざまな物性を取得した。

(a) 実験概要

本実験には市販のホワイトセメントを用いた。使用したホワイトセメントの化学組成について、表 3.4.2-59 に示す。ホワイトセメントを用いた理由は、本研究外ではあるが核磁気共鳴法を利用する予定であったためである。普通ポルトランドセメントに比べ、Fe₂O₃とMgOの含有量が少ないものの、その他の成分に大きな違いはなく、本検討の中心である乾燥収縮については、普通ポルトランドセメントを用いた際と、大きな相違はないと考えられる。

セメントは水セメント比 0.55 として、ホバートミキサにより 3 分間の練混ぜを行った。練混ぜ後、ブリージングが収まるまで練返しを行い、その後、3×13×300mm の鋼製型枠に打込みを行い、打込み後 4 日で脱型を行った。その後は恒温室 (20±2°C) において、あらかじめ同一のセメントで作成した水酸化カルシウム飽和水溶液を用い、材齢 180 日まで水中養生をおこなった。その後、水酸化ナトリウム濃度を制御し、40、50、60、70、80、90°C 炉乾燥を行い、3 ヶ月間乾燥を行った。室内は 20°C40±20%前後で推移していた。

表 3.4.2-69 セメントの化学組成

化学成分 (mass%)											
LOI	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	CaO	MgO	SO ₃	K ₂ O	Ti O ₂	P ₂ O ₅	MnO	合計
2.93	22.43	4.67	0.16	65.69	0.98	2.51	0.07	0.17	0.03	0.00	99.64

物性評価にあたり、以下の測定項目を検討した。

X線回折/リートベルト解析：分析の考察にあたり、一部のサンプルを1週間、11%RHに調湿し、粉末 X 線回折/Rietveld 解析を実施した。粉末 X 線回折の測定は、D8 ADVANCE (BrukerAXS 社製)により、X線源 Cu-Kα、管電圧 40kV、管電流 40mA、走査範囲 2θ =5~65°、ステップ幅:0.02°、スキャンスピード:0.5°/min.の条件で行った。試料は、水和停止を行った 11%RH 乾燥状態の粉末試料に、内部標準試料として平均粒径 3.0μm のコランダム (化学式:α-Al₂O₃, Baikowski 社製)を内割で 10wt%添加し、十分に均一になるように乳鉢で混合したものを用いた。リートベルト解析は、測定した全走査範囲を用いて、ソフトウェア TOPAS ver. 4.2 (BrukerAXS 社製)により行った。定量に際しては、セメント鉱物として、C₃S、C₂S、C₃A、C₄AF、ペリクレーズ (化学式:MgO、略記:M)、フリーライム (化学式:CaO、略記:C)、ジプサム (化学式:CaSO₄・2H₂O、略記:C̄SH₂)、バサナイト (化

学式: $\text{CaSO}_4 \cdot 0.5\text{H}_2\text{O}$ 、略記: $\overline{\text{C}}\overline{\text{S}}\overline{\text{H}}_{0.5}$) の 8 種を、水和生成物として、ポルトランドイト (化学式: $\text{Ca}(\text{OH})_2$ 、略記: CH)、カルサイト (化学式: CaCO_3 、略記: $\overline{\text{C}}\overline{\text{C}}$)、エトリンガイト (化学式: $\text{C}_3\text{A} \cdot 3\text{CaSO}_4 \cdot 32\text{H}_2\text{O}$ 、略記: AFt)、モノサルフェート (化学式: $\text{C}_3\text{A} \cdot \text{CaSO}_4 \cdot 12\text{H}_2\text{O}$ 、略記: AFm) の 4 種を、内部標準試料としてセメントペースト試料に混合した $\alpha\text{-Al}_2\text{O}_3$ (10wt% 混合) を定量対象とした。定量に用いた各鉱物の結晶系 C_3S 、 C_2S 、 C_3A 、 C_4AF の結晶構造に関するパラメータは NIST Technical Report と同様とし⁵⁶、M、C、 $\overline{\text{C}}\overline{\text{S}}\overline{\text{H}}_2$ 、 $\overline{\text{C}}\overline{\text{S}}\overline{\text{H}}_{0.5}$ 、CH、 $\overline{\text{C}}\overline{\text{C}}$ 、AFt、AFm、 $\alpha\text{-Al}_2\text{O}_3$ に関しては ICSD Database と同様とした⁵⁷。非晶質物質量は内部標準 $\alpha\text{-Al}_2\text{O}_3$ の定量値から (3.4.2-11) 式に従い算出した⁵⁸。

$$A = \{100 \times (S_r - S)\} / \{S_r \times (100 - S) / 100\} \quad (3.4.2-11)$$

ここに A : 非晶質量 (%), S : $\alpha\text{-Al}_2\text{O}_3$ の混合率 (%), S_r : $\alpha\text{-Al}_2\text{O}_3$ の定量値 (%) である。

曲げ試験 : 3 点荷重により曲げ強度を測定した。スパンは 60mm とし、一つの試験体から 4 回以上の測定を実施することができる。各湿度において一つないし二つの試験体で荷重試験を実施した。曲げ強度は式 (3.4.2-12) により評価した。

$$f_b = P \cdot l / 4 \cdot (I / (h^2)) \quad (3.4.2-12)$$

ここに、 P : 最大荷重、 l : 荷重スパン、 I : 試験体の断面二次モーメント、 h : 試験体厚さ。また、弾性理論を用いて、たわみと荷重の関係からヤング率も求めた。

超音波伝搬試験 : 超音波到達時間の計測には、Panametrics-NDTTM 超音波探触子 (V103-RM、V153-RM)、Panametrics-NDTTM パルサーレシーバ 5077PR (OLYMPUS 社製)、およびデジタル・スコープ・オシロスコープ TDS2012B (Tektronix 社製) を使用した。測定条件として、パルス発振電圧: -400V、探触子周波数: 1.0MHz、パルス繰返し周波数 (PRF) : 100Hz とし、透過法により試験体中央部において、縦波到達時間、横波到達時間をリファレンス波形と透過波形の差分からそれぞれ計測し、縦波伝播速度、横波伝播速度に換算した。測定に際しては、試験体幅は 13mm の方向を用いた。

測定した縦波速度 V_p (km/s)、横波速度 V_s (km/s) および密度 ρ (g/cm³) よりポアソン比

⁵⁶ P. Stutzman, S. Leigh: NIST Technical Note 1441-Phase Composition Analysis of the NIST Reference Clinkers by Optical Microscopy and X-ray Powder Diffraction, pp.34-43, 2002

⁵⁷ Fachinformationzentrum Karlsruhe and National Institute of Standards and Technology, Inorganic Crystal Structure Database, ICSD., 2006, <http://icsd.ill.fr/icsd/index.html>, (accessed 2010-06-09)

⁵⁸ R. C. Jones, C. J. Babcock, W. B. Knowlton: Estimation of the Total amorphous content of Hawaii soils by Rietveld method, Soil Science Society of America Journal, Vol.64, pp.1100-1108, 2000

$\nu(-)$ 、ヤング係数 E_w (GPa) を以下の式(3.4.2-13)、(3.4.2-14)により算出した。

$$\nu = \frac{1-2(V_s/V_p)^2}{2-2(V_s/V_p)^2} \quad (3.4.2-13)$$

$$E_w = V_p^2 \rho \frac{(1+\nu)(1-2\nu)}{1-\nu} \quad (3.4.2-14)$$

ここで ρ は各相対湿度における見かけの密度である。

結合水率試験：結合水率の測定は、TG-DTA 2010 SR-NG21 (BrukerAXS 社製)により、各乾燥状態の粉末試料を用いて、試料重量 20 ± 2 mg、室温から 1000°C まで昇温速度 $10^\circ\text{C}/\text{min}$ 、 N_2 フロー環境下で熱重量分析 (TG) を行った。ポルトランドイト生成量は TG 曲線における $415^\circ\text{C} \sim 515^\circ\text{C}$ 付近の減量分を脱水による減量と仮定し、DTA 曲線から各試料の脱水範囲を特定して算出した。総強熱減量分 (ig. loss) から、結合水量を算出した。

水蒸気吸着等温線試験：試料を、 $25 \mu\text{m}$ 以上 $75 \mu\text{m}$ 以下に分級したものに、マントルヒーターによって 105°C 条件で加熱した条件下で 30 分間真空脱気を行ったもの (真空ポンプの性能： $6.7 \times 10^2 \text{Pa}$) について、吸着等温線の測定を行った。吸着等温線は定容水蒸気吸着法により、Quantachrome 社製 Hydrosorb1000 を用いて測定した。測定点は、許容圧力較差 0.05mmHg 、平衡時間 120sec. とし、 $5\% \text{RH}$ から $95\% \text{RH}$ まで 5% 刻みとして、最大値 $98\% \text{RH}$ を折り返し点とした。脱着は、吸着と同一点を $5\% \text{RH}$ まで測定した。水蒸気吸着による比表面積については、BET 理論を用いて算出した。その際、水分子の占有面積は 0.114nm^2 の値を用いた。

本検討で採用した定容法による水蒸気吸着等温線試験は、質量式の測定方法よりも平衡判定をとりやすく、迅速に吸着等温線の測定を行うことができる。

一般に多孔体中の比表面積を算定する場合に、水分子による吸着等温線を用いることは必ずしも適切ではない。それは、水素結合性の表面がある場合などには、London 分散力や電気的な相互作用によって生じる吸着量よりも多くの吸着が生じることがあるからである。本研究ではセメント硬化体中の水の挙動を評価する目的で検討を行っているので、水分子が表面に吸着するサイト数という意味合いも含めて比表面積という用語を用いることとした。

(b) 実験結果

図 3.4.2-197 に、乾燥の程度と水和物の定量値の関係について示す。今回、明らかになったのは乾燥によってエトリンガイト (Ett) は減少し、モノカーボネート (Mc) は 60°C を超えると急激に減少するとともに、モノサルフェート (Ms) が 70°C 以上で生成するという点である。CH の定量値はばらつきが多少あるがほとんど変化せず、エーライトおよびビーライトは $60\% \text{RH}$ 以上で若干、水和が進行している傾向が確認できた。

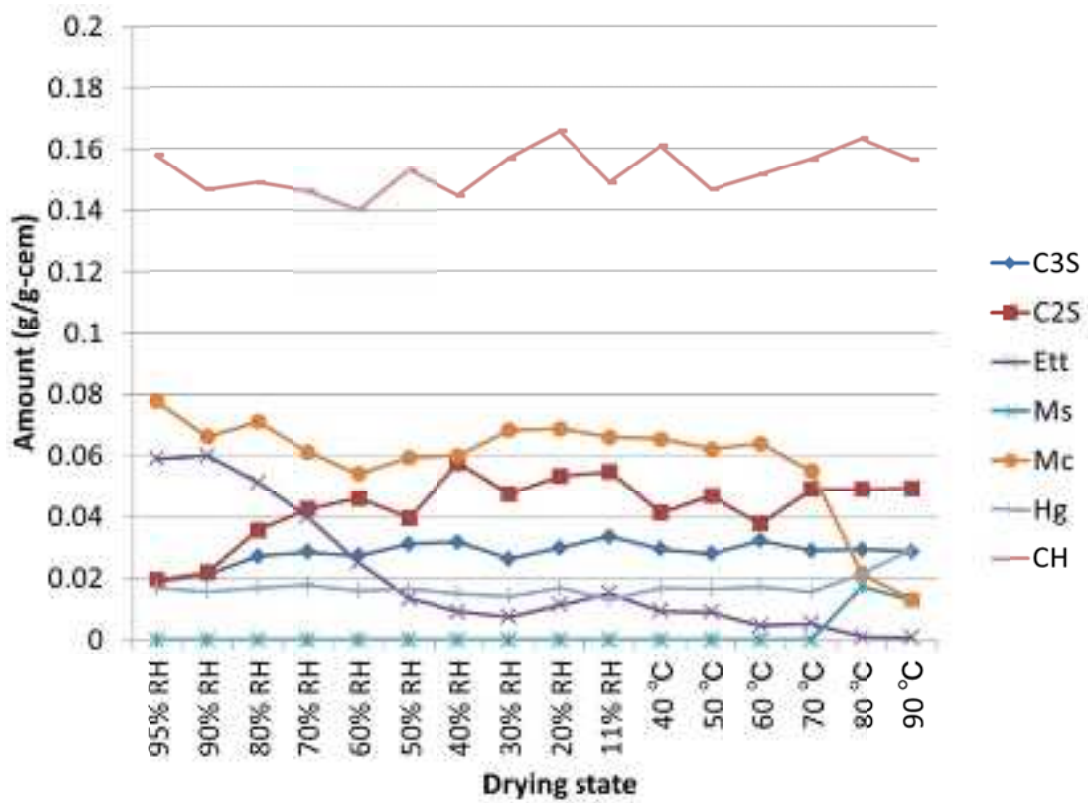


図 3.4.2-197 乾燥の程度と水和物の定量値の関係

曲げ試験の結果を図 3. 4. 2-198、図 3. 4. 2-199 に示す。40℃以上の乾燥では、セメントペーストは70℃をピークに、その後は温度上昇とともに緩やかに強度低下を示すことがわかった。ヤング率もこの傾向と同様である。この傾向は、Mcの分解等と傾向が一致する。

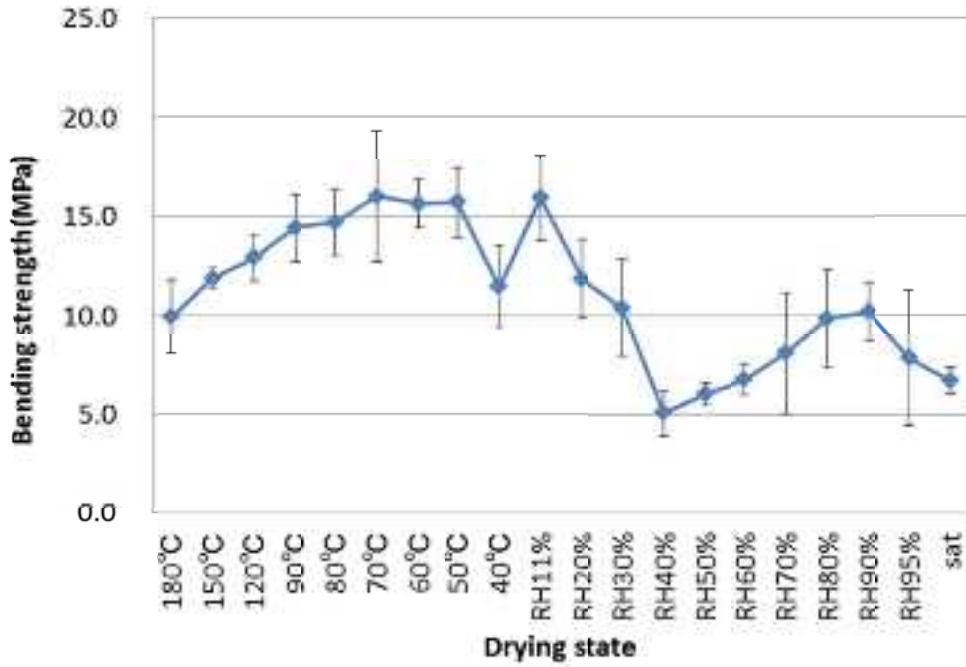


図 3. 4. 2-198 乾燥の程度と曲げ強度の関係

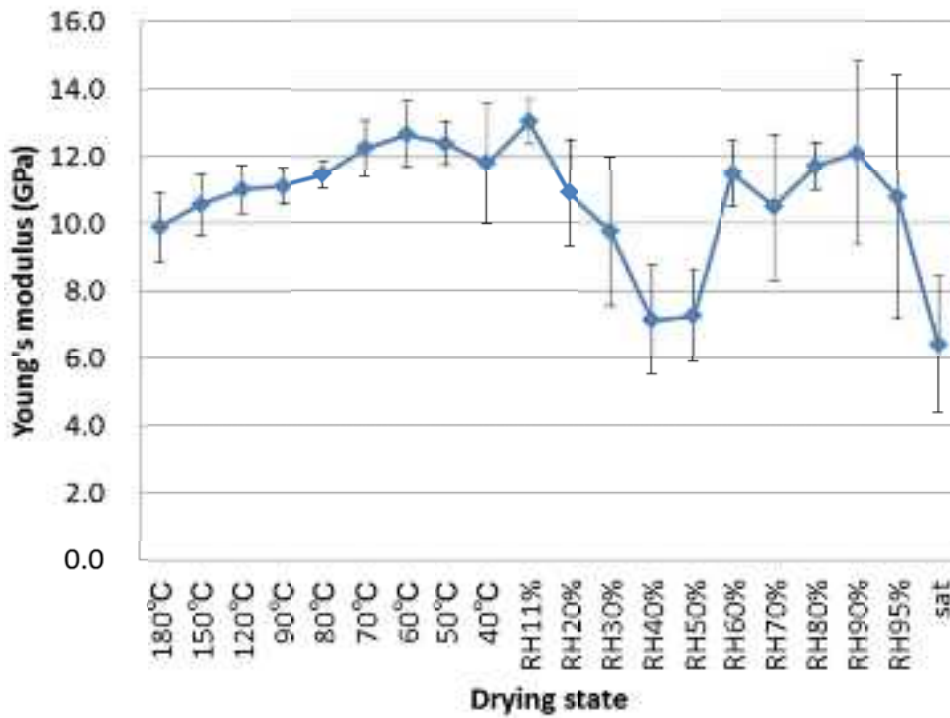


図 3. 4. 2-199 乾燥の程度とヤング率の関係

超音波伝搬試験のうち、縦波伝搬速度について図 3. 4. 2-200 に、横波伝搬速度について図 3. 4. 2-201 に示す。11%RH から 40°Cの区間で一度、値は小さくなり、その後 60°Cまで温度とともに伝搬速度が増加する。一方、60°C~90°Cの区間において伝搬速度は低下するなど、挙動は複雑である。120°C以降は値は高止まりする。

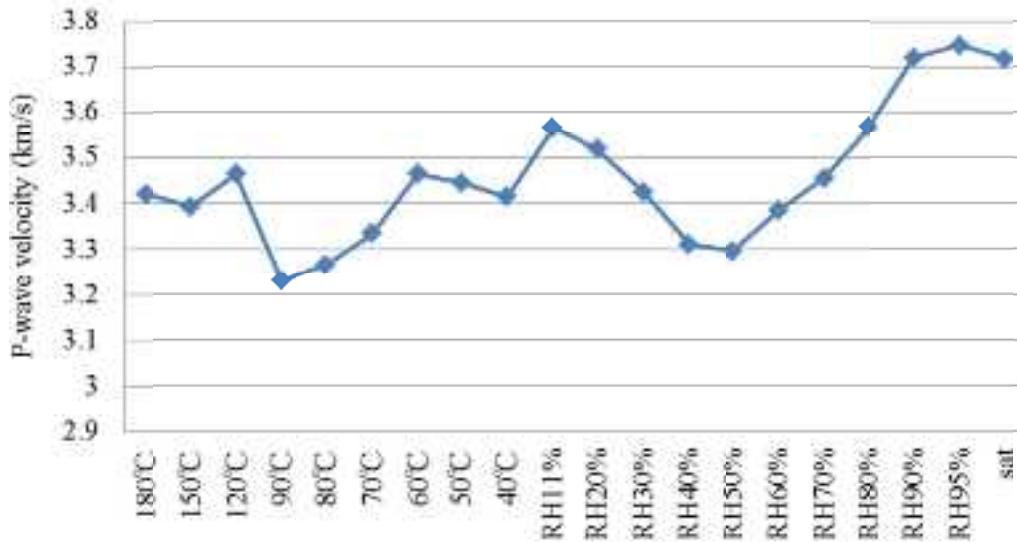


図 3. 4. 2-200 乾燥の程度と縦波伝搬速度の関係

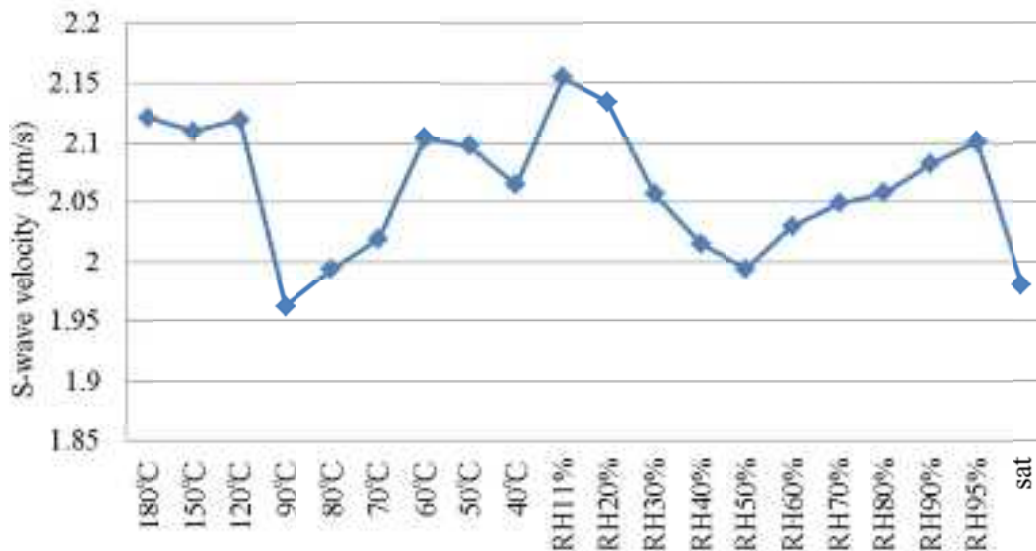


図 3. 4. 2-201 乾燥の程度と横波伝搬速度の関係

この超音波伝搬速度とみかけの密度をもちいて、ヤング率（図 3. 4. 2-202）およびポアソン比（図 3. 4. 2-203）について整理した。ここでみられたようにポアソン比は、乾燥にともなって小さくなり、ヤング率は強度と同じように減少、増大傾向を織り込みながら大きくは低減する傾向となった。

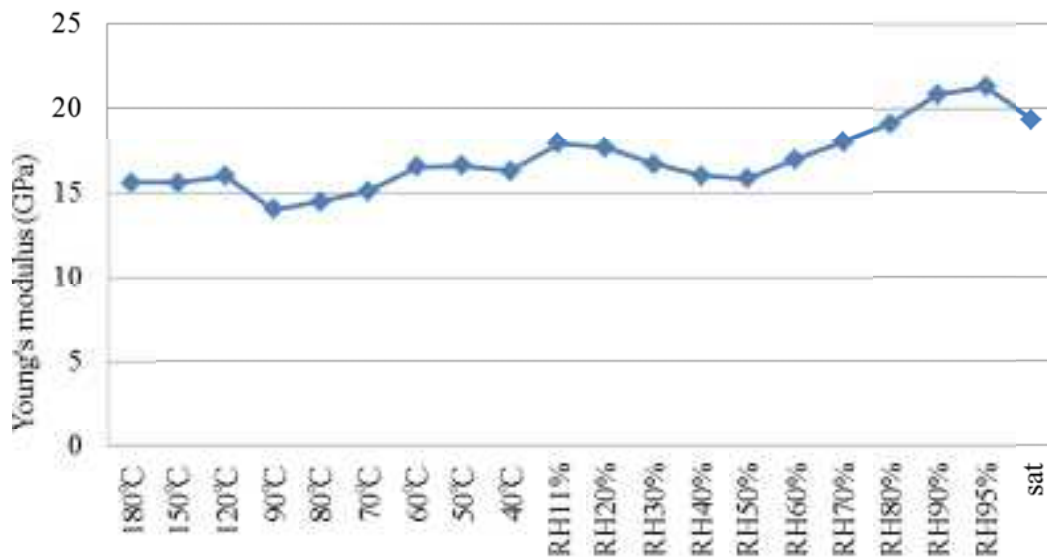


図 3. 4. 2-202 乾燥の程度と動ヤング率の関係

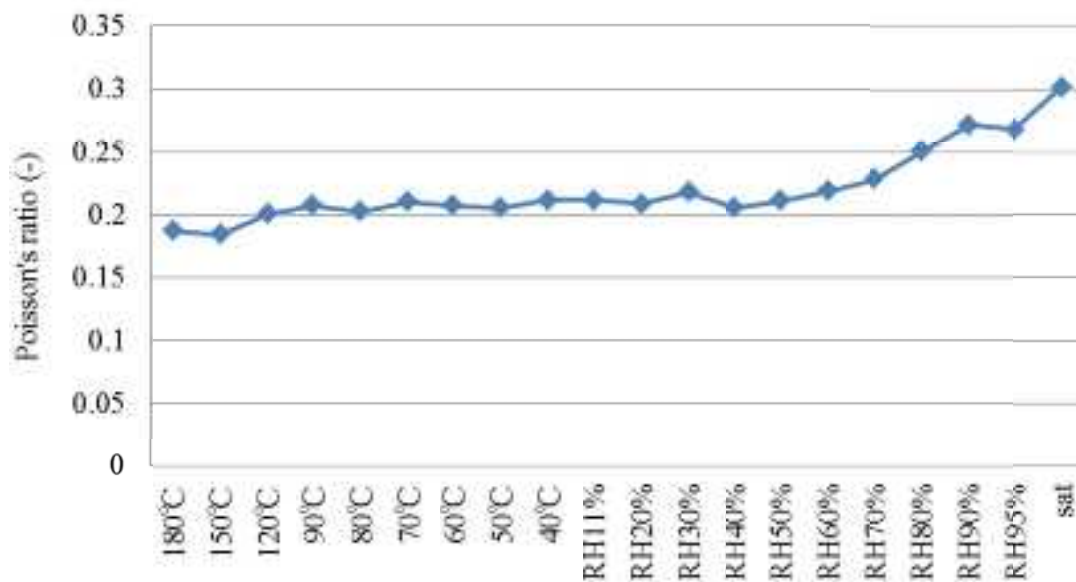


図 3. 4. 2-203 乾燥の程度とポアソン比の関係

図 3.4.2-204 に高温で乾燥させた場合の吸着等温線の変化を閉めアス。40%RH 近傍のキンは、14Å トバモライト構造に似た C-S-H が、11Å トバモライトに変化した場合の挙動と考えられるが、80°C以上の温度では、この脱着線におけるキックが確認できないため、この温度では 11Å トバモライトとして安定になったものと考えられた。

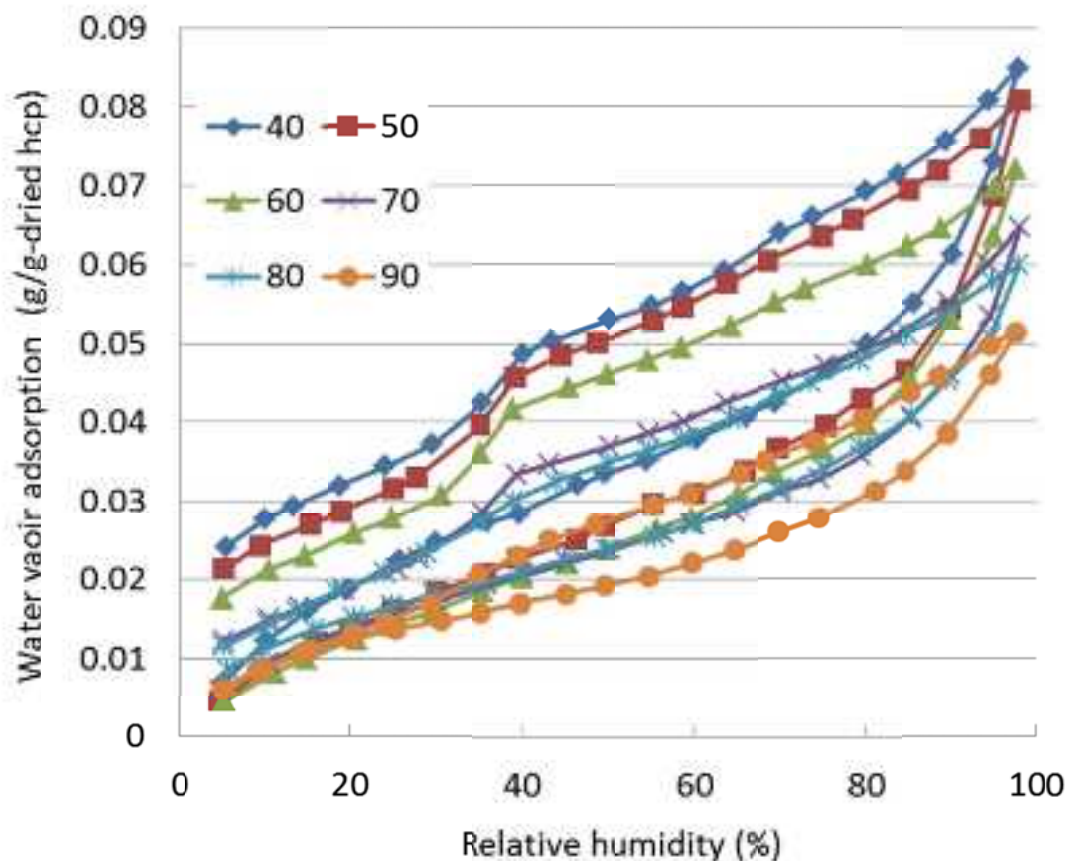


図 3.4.2-204 乾燥にともなう吸着等温線の変化

(c) まとめ

以上の結果から、セメントペーストの高温の変質について検討した。C-S-H は 80°C以上において 11Å トバモライトと同様な層間間隔を有し安定な状態になることが推察された。強度は、70°Cをピークに緩やかに低下するが、セメントペースト強度として特段、急激な変化はみられず、180°C程度まで安定であることが確認された。ヤング率も同様である。これらの傾向は超音波試験によっても再確認されており、セメントペースト強度の観点からは温度規制について、明確な根拠はない。本研究の範囲内においては寧ろ高温により C-S-H の層間が狭まっており、固相としての強度は増大していると考えられた。

8) 様々な乾燥条件下のセメントペーストの空隙構造

セメントペーストの空隙構造は、透水性や透気性、力学的特性等に影響を与えると考えられ、乾燥下のセメントペーストの空隙構造の把握は長期供用時のコンクリート物性評価の基盤となる。

セメントペースト内の空隙構造測定の代表的な手法として、水銀圧入法が挙げられるが、水銀の取扱の難しさや、測定時の圧力や前処理時の乾燥による細孔構造の変化などの問題点があり、近年では、示差熱量測定 (DSC) によるサーモポロメトリー⁵⁹⁾の、セメントペースト内の空隙構造測定への利用について検討が行われている^{60)、61)}。本検討は、水中養生後さまざまな湿度環境で長期間乾燥したセメントペーストを用いて、低温 DSC 測定を行い、セメントペーストの乾燥時の内部構造変化について検討した。

(a) 評価手法

本実験には市販のホワイトセメントを用いた。使用したホワイトセメントの化学組成について、表 3.4.2-59 に示す。ホワイトセメントを用いた理由は、本研究外ではあるが核磁気共鳴法を利用する予定であったためである。普通ポルトランドセメントに比べ、 Fe_2O_3 と MgO の含有量が少ないものの、その他の成分に大きな違いはなく、空隙構造については、普通ポルトランドセメントを用いた際と、大きな相違はないと考えられる。

セメントは水セメント比 0.55 として、ホバートミキサにより 3 分間の練混ぜを行った。練混ぜ後、ブリージングが収まるまで練返しを行い、その後、 $3 \times 13 \times 300\text{mm}$ の鋼製型枠に打込みを行い、打込み後 4 日で脱型を行った。その後は恒温室 ($20 \pm 2^\circ\text{C}$) において、あらかじめ同一のセメントで作成した水酸化カルシウム飽和水溶液を用い、材齢 180 日まで水中養生をおこなった。その後、水酸化ナトリウム濃度を制御し、RH11%、RH20%、RH30%、RH40%、RH50%、RH60%、RH70%、RH80%、RH90%、RH95%に調湿したデシケータ内でおよそ 1 年間乾燥を行った。調湿は、湿度センサ (精度 $\pm 1.8\%$) を用いて、湿度 $\pm 2\%$ 内に収まるように溶液を交換して行った。

表 3.4.2-70 セメントの化学組成

化学成分 (mass%)											
LOI	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	CaO	MgO	SO ₃	K ₂ O	Ti O ₂	P ₂ O ₅	MnO	合計
2.93	22.43	4.67	0.16	65.69	0.98	2.51	0.07	0.17	0.03	0.00	99.64

⁵⁹⁾ M. Burn, et al. : A new method for the simultaneous determination of the size and the shape of pores : the thermoporometry, *Thermochimica Acta* 21, pp59-88, 1977

⁶⁰⁾ 永谷他：サーモポロメトリーを用いたセメント硬化体における細孔構造の定量化，セメント・コンクリート論文集，No.65，pp153-160，2011

⁶¹⁾ 杉山他：水とシクロヘキサンを併用したサーモポロメトリーによる細孔構造解析，第 66 回セメント技術大会講演要旨，pp242-243，2012

なお、各測定は調湿後のサンプル（Dry サンプル）と、調湿後再吸水を行ったサンプル（Re-sat サンプル）の2シリーズについて実施した。再吸水の方法は、真空デシケータ内部にある容器内にイオン交換水を満たし、その中に試料を侵漬させて、5分程度減圧を行った。

(b) 密度測定

乾燥前の飽水状態のセメントペースト試験体のみかけの密度を、アルキメデス法により測定した。また、各湿度での乾燥の際に質量減少と長さ変化を測定し、乾燥前の密度と合わせて、各サンプルの乾燥後のみかけの密度を算出した。

(c) 低温 DSC 測定

RH11%、RH40%、RH50%、RH60%、RH70%、RH80%、RH90%、飽水サンプルについて、熱流束型 DSC 装置（BrukerAXS 社製）を用いて低温 DSC 測定を行った。各湿度で乾燥を行った試験体を、ハンマーで砕いて 10mg 程度の欠片とし、質量を測定した後、測定に用いた。Re-sat サンプル（RH11%、RH40%、RH60%、RH70%、RH80%において測定を行った。）は質量測定後に前述の方法で再吸水を行った。測定の温度プログラムは、室温から 1°C/min で降温して 15°C で 5 分間保持した後、-60°C まで 1°C/min で降温して -60°C で 5 分間保持し、15°C まで 1°C/min で昇温を行った。15°C から -60°C の降温・昇温過程においてデータを取得した。測定には水分の蒸発を防ぐため、アルミ製シール容器を用い、測定のリファレンスにはコランダム（ α -Al₂O₃）を用いた。装置の温度校正には、シクロヘキサン（融解温度 -6.6°C）と水（融解温度 0°C）を用いた。空隙中の水の融解熱を評価するために、11%RH で乾燥を行ったサンプルを基準として、その他の測定データから 11%RH（Dry サンプル）の結果を差し引くことで、装置と容器、セメントペースト固相の DSC 曲線への影響をキャンセルした。また、5~10°C における熱流の平均値を 0 (mcal/sec) として整理を行った。

(d) 実験結果と考察

図3.4.2-188に各サンプルのみかけの密度を示す。みかけの密度は乾燥に伴って小さくなった。低温DSC測定の際の質量と図3.4.2-188の密度から、各サンプルのみかけの体積を算出し、単位体積当たりの熱流((mcal/sec)/cm³)としてDSC曲線の比較を行った。なお、Re-sat サンプルにおいては、再吸水後に体積変化が起こっていると考えられるが、本検討においては吸水前後で体積変化がないと仮定し、DSC曲線の整理を行った。

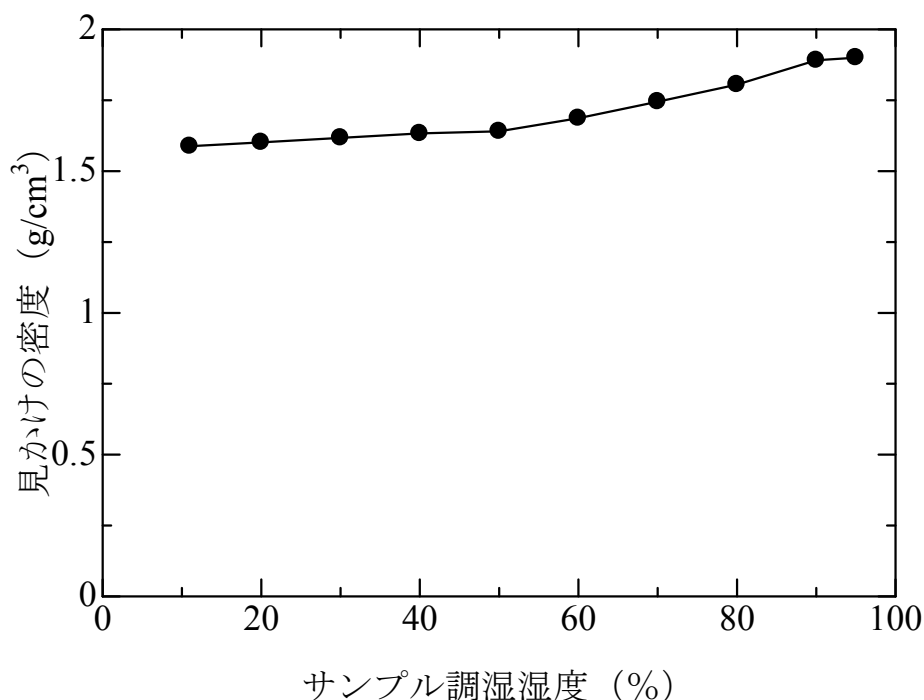
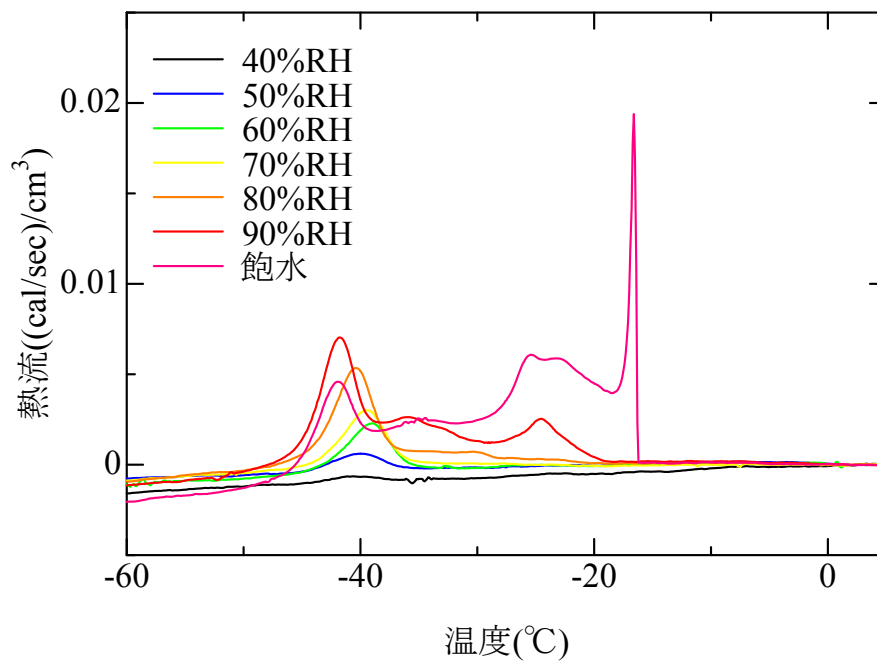


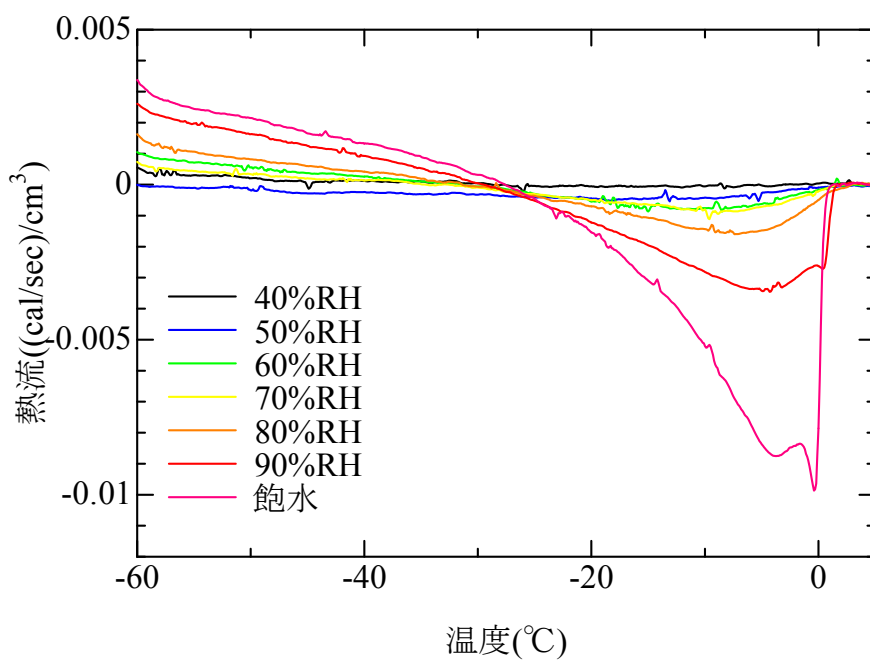
図 3. 4. 2-205 各湿度乾燥サンプルの見かけの密度

図 3. 4. 2-188 にベースライン補正後の Dry サンプルにおける熱流と温度の関係 (DSC 曲線) を示す。飽水サンプルでは降温過程の -17°C 付近に鋭いピークが現れ、その後、 -25°C 、 -40°C 付近に大きな二つのピークが現れている。 -17°C 付近の鋭いピークは比較的大きな空隙 (空隙径 50nm 以上) 内の水の凍結に伴うピークであると考えられ、90%RH 以下のサンプルでは見られなかった。乾燥に伴い、 -25°C 付近のピークが小さくなり、80%RH サンプルでほとんど見られなくなった。それ以下の乾燥条件では、 -40°C 付近のピークが小さくなり、40%RH サンプルでほぼすべてのピークが見られなくなった。また、 -40°C 付近のピークは、乾燥湿度によってピークの位置がシフトしている。飽水サンプルでは -42°C にあったピークトップが 60%RH では 39°C 辺りまで高温側にシフトしており、乾燥に伴って数 nm オーダーの空隙構造が変化していることが推察される。

昇温過程では降温過程とは異なり、ほとんどのサンプルにおいてなだらかな一つのピークとなり、その大きさは乾燥湿度が低いほど小さくなった。飽水サンプルでは鋭角なピークが -1°C 付近に観察された。これは凍結過程の -17°C に観測されたピークと対応するものであると考えられる。



(a) 降温過程

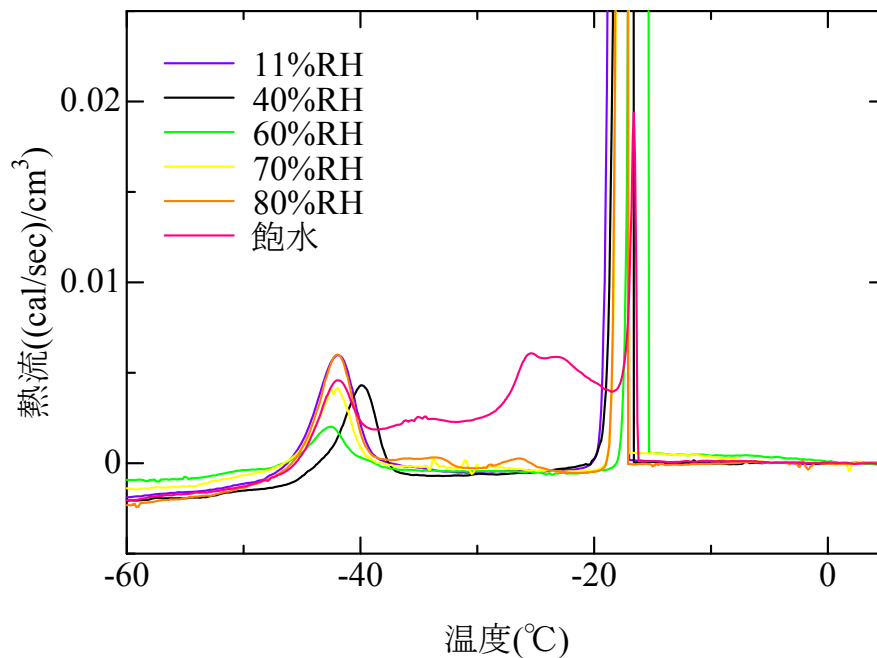


(b) 昇温過程

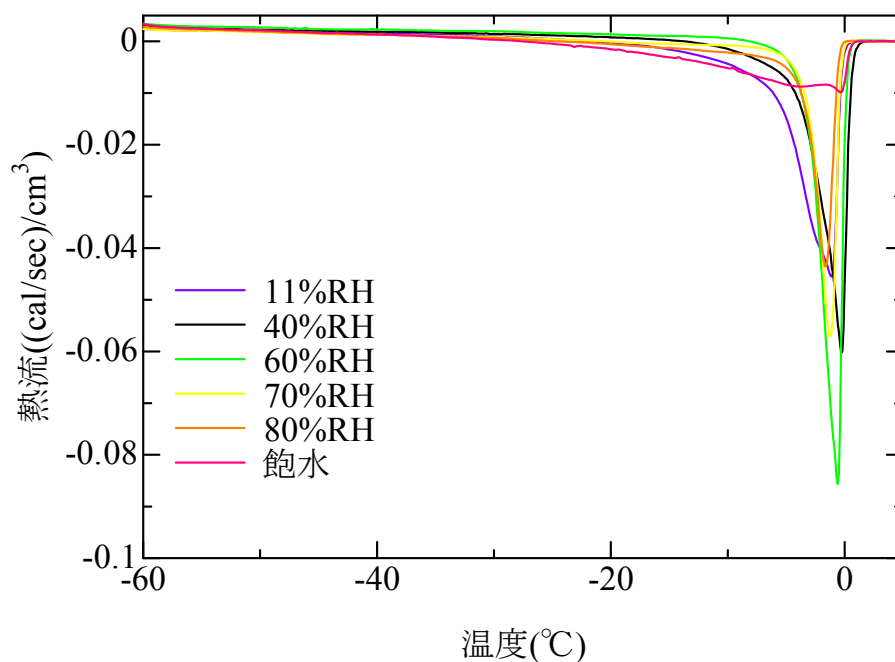
図 3. 4. 2-206 Dry サンプルにおける熱流と温度の関係 (DSC 曲線)

また、図 3.4.2-207 に Re-sat サンプルにおける DSC 曲線を示す。すべてのサンプルにおいて、 -17°C 付近に大きな鋭いピークが観察された。これは図 3.4.2-188(a) における飽水サンプルでも観察されたもので、乾燥後のサンプルを再吸水させたことで比較的大きな空隙が水で満たされ、ピークが再現されたと推察される。一方で、 -25°C 付近のピークは 80%RH 以下の乾燥サンプルを再吸水させても再現されなかった。 -40°C 付近のピークは再吸水によって再現し、また、40%RH サンプルでは他のサンプルに比べて 3°C 程度高温側にピークが測定された。

昇温過程では乾燥を行っていた湿度によってピークの幅が異なり、飽水から乾燥に伴ってピークは鋭くなり、60%RH サンプルで最も鋭敏に、より高いピークが測定された。その後 11%RH までの乾燥によって再度ピーク幅が大きくなる傾向となった。



(a) 降温過程



(b) 昇温過程

図 3. 4. 2-207 Re-sat サンプルにおける熱流と温度の関係 (DSC 曲線)

(e) まとめ

本検討における結論を以下に示す。

- ① 長期乾燥に伴ってセメントペーストのみかけの密度は小さくなる。
- ② セメントペーストの DSC 曲線は降温過程と昇温過程で異なり、飽水サンプルにおいて降温過程では、 -17°C 、 -25°C 、 -40°C 付近にピークが分かれるのに対し、昇温過程ではなだらかな一つの大きなピークと、 -1°C 付近の鋭敏なピークが見られた。
- ③ 降温過程における -17°C のピークは比較的大きな空隙 (空隙径 50nm 以上) 内の水の凍結によるものと考えられ、飽水サンプルと、再吸水サンプルでのみ観察された。
- ④ -25°C 付近のピークは乾燥と共に小さくなり、80%RH 以下の乾燥サンプルでは見られず、また、再吸水を行っても再現されなかった。
- ⑤ -40°C 付近のピークは 80%RH 以下の乾燥に伴って徐々に小さくなり、またそのピーク位置は乾燥条件によって数 $^{\circ}\text{C}$ 程度シフトした。また、 -25°C 付近のピークとは異なり、再吸水によって再現された。

(5) 数値解析的検討

1) システムの全体像

2011年度において、コンクリート照射劣化評価システムでの設計概要についてとりまとめた。設計概要の概念図について、図 3.4.2-208 に再掲する。ここでは、現在、名古屋大学で開発中のコンクリート物性予測モデルに対して、既存の一次元 SN 法輸送計算コード ANISN やモンテカルロコードを想定した既存の相互作用を考慮するプログラムとどのように連成するかについて示した。

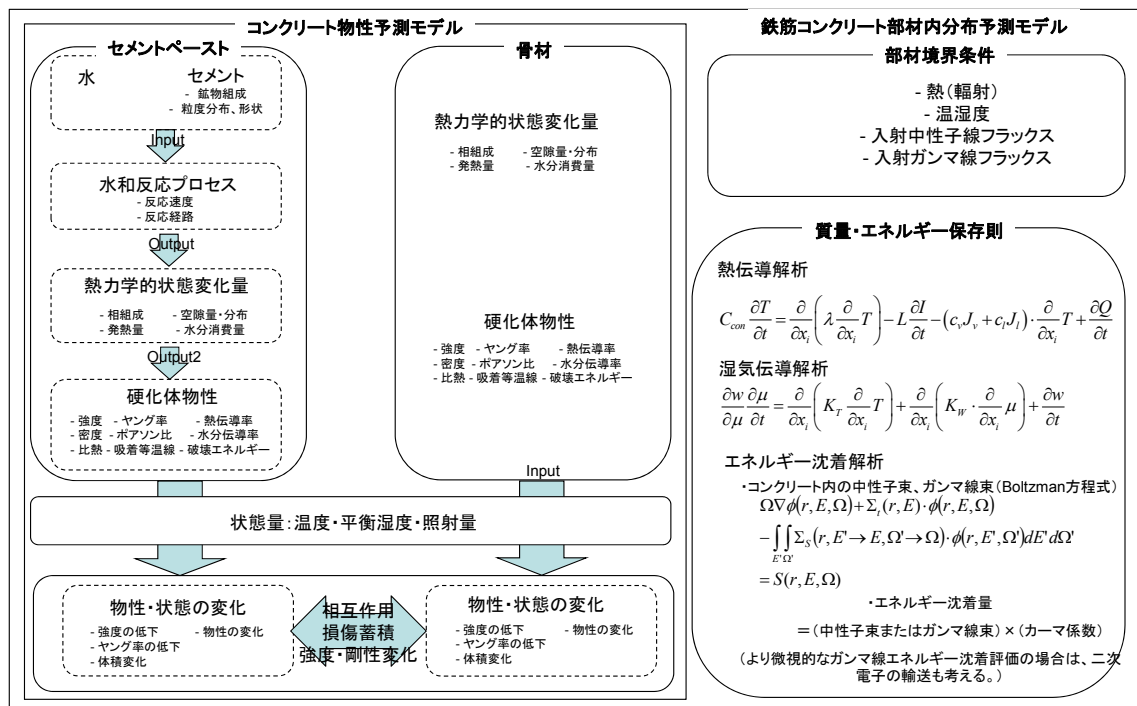


図 3.4.2-208 水・熱・放射線影響を連成して解析する
コンクリート照射劣化評価システムの概要

2012年度は、2011年度の実施項目を踏まえ、実際のプログラムでの実装を検討した。特に既存コードとの特質を踏まえ、当初、モンテカルロコードとの連携を考えていたものを、一次元 SN 法輸送コード ANISN との連携の方針を変えた。ANISN を含めた輸送コード側から、コンクリートコードとの連携に関する実装について概念的に示したものが、図 3.4.2-209 である。今年度実施した改良は、骨材への照射の影響を考慮できるように、Heat_distribution.exe から、heat.dat だけでなく、flux.dat として、各要素の中性子およびガンマ線のフラックスを、毎度算出し、コンクリート劣化プログラムの方に受け渡すことを可能とした端である。本プログラムの計算 1 サイクルの処理フローは以下の通りである。

- ① GIP インプットジェネレータを用いて、深さ毎のコンクリートの組成および温度に対応する巨視的断面計算コード GIP 用インプットデータを作成する。
- ② 巨視的断面積計算コード GIP を用いて、微視的断面積データ、深さ毎のコンクリートの組成及び温度を基に、巨視的断面積を作製する。
- ③ 一次元 SN 法輸送コード ANISN-ORNL を用いて、巨視的断面積データを基に、深さ毎の放射線量を計算する。
- ④ 発熱分布計算プログラムを用いて、深さ毎の放射線量、発熱定数及びコンクリートの組成を基に、発熱密度を算出する。
- ⑤ 発熱分布計算プログラムを介して、深さ毎の放射線量を各スペクトルに対して出力する。
- ⑥ コンクリート強度予測システムを用いて、深さ毎の発熱密度を基に、発熱量を考慮し、水熱連成解析に受け渡すとともに、放射線量から骨材膨張量を評価して、強度低下について算出する。

ここで、GIP インプットジェネレータ及び発熱分布プログラムは新たに作製したプログラムである。この計算 1 サイクルで、近似的に、1 サイクルに対応する時間が経過した後のコンクリートの組成を計算可能である。従って、このサイクルを繰り返し計算することで、長期にわたる照射によるコンクリートの組成（主として水分が変化する。）の経時変化を計算することができる。今年度は、⑤のステップを追加し、Heat_distribution.exe について改良を加えた。

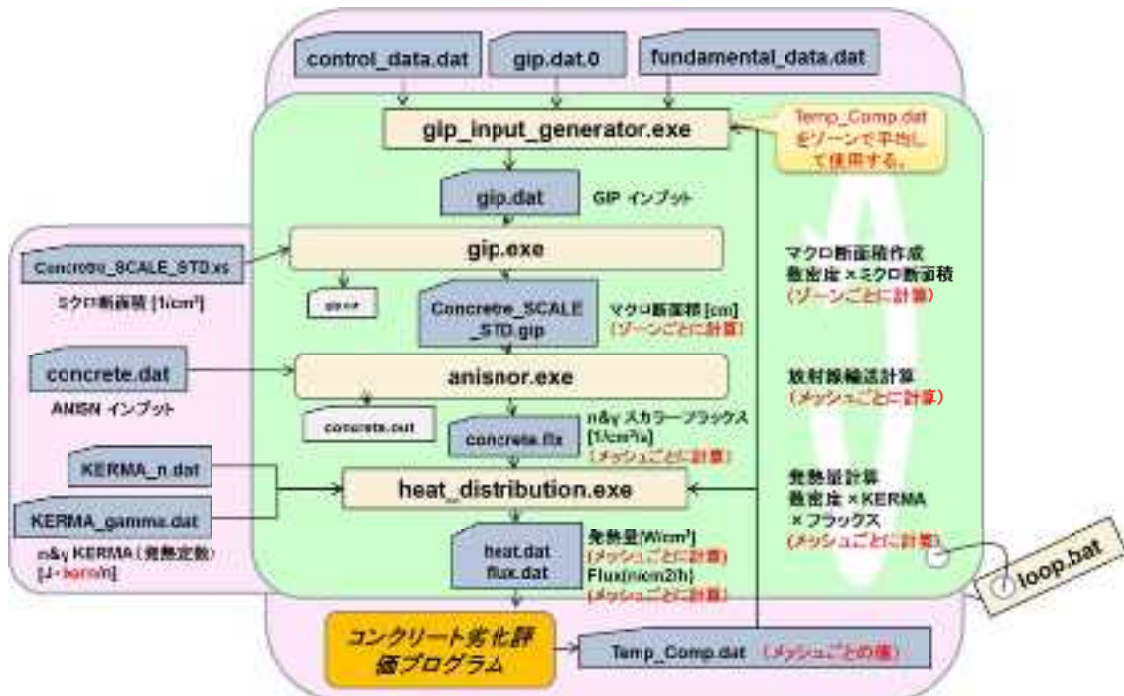


図 3.4.2-209 ANISN を含めた既存一次元 SN 法輸送コードと
コンクリート強度予測システムとの実装

2) コンクリートの強度予測モデルの改良

昨年度までは、ガンマ線発熱に関する強度変化について、セメントペーストの変質と乾燥時のセメントペーストと骨材の体積変化の非均一性によって生じることを明らかにするとともに、日本の骨材事情を踏まえたコンクリート強度の変化に関するデータを取得した。

今年度は、中性子線に照射した骨材膨張の影響を考慮した強度低下メカニズムのモデル化のため、アルカリ骨材反応をおこしたコンクリートの強度・剛性変化について研究を実施し、コンクリート膨張量と強度の関係を得た。骨材膨張量とコンクリート膨張量は、解析的検討によりこれを明らかにし、照射量→骨材膨張量→コンクリート膨張量→コンクリート物性変化の流れが得られた。このプロセスについてとりまとめたものが、図 3.4.2-210 である。

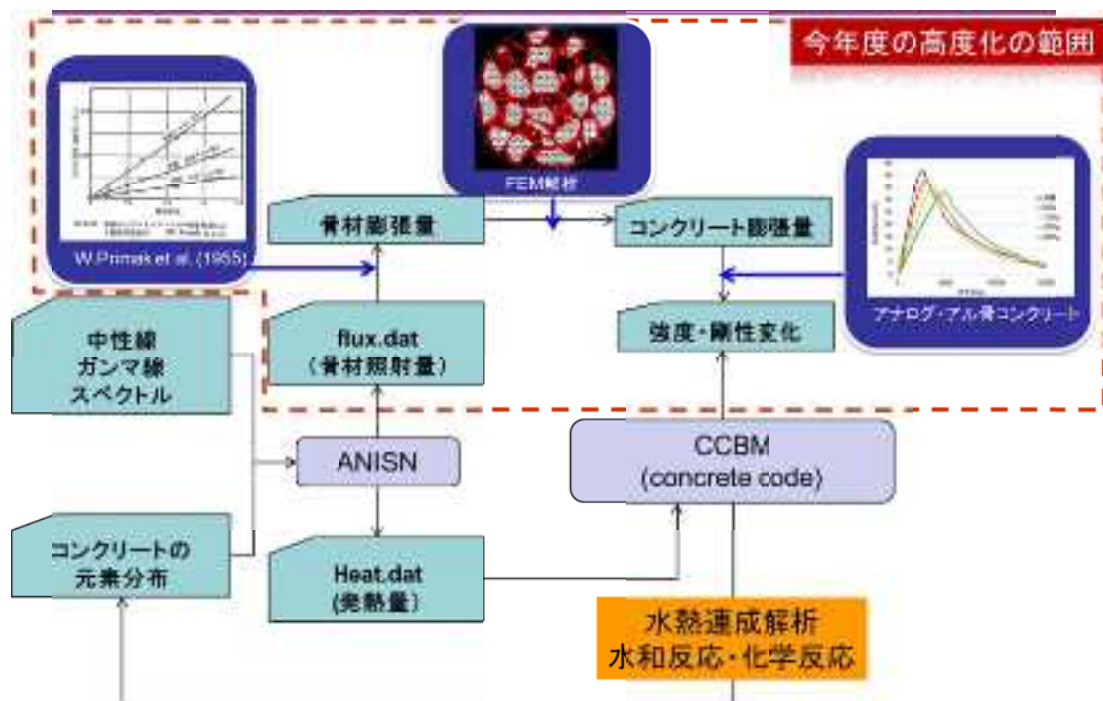


図 3.4.2-210 放射線による骨材膨張が生じたコンクリートの経年変化予測モデルのスキーム

モデルに当たって採用した関数系について、以下に述べる。まず、セメントの水和反応と封緘状態のセメントペースト強度の関係は、昨年度までのデータにより、次式を用いる。

$$f_p = 353 x^{3.8} \quad (1)$$

ここで、 x はセメントペーストのゲルスペース比、である。

ついで、封緘状態のセメントペースト強度からコンクリート強度の推定は、定数をかけ

ることで評価する。

$$f_c = a \cdot f_p \quad (2)$$

ここで、 f_c : コンクリート強度、 a : セメントペースト強度とコンクリート強度の比で、28 日飽水状態のコンクリートの圧縮試験データと、CCBM によって算出したセメントペースト強度の比により評価する。

ガンマ線発熱による強度変化については、2012 年度データを用いることにし、JPDR 解析には式(3)を、一般原子炉の解析においては、式(4)を用いることとした。

$$\begin{aligned} \gamma_{\text{heat}} &= -0.0047066 U^3 - 3.3726110 U^2 - 805.521096 U - 64126.7995 \quad (-242.6 < U \text{ kJ/mol}) \\ \gamma_{\text{heat}} &= 1.091 \quad (U < -242.6 \text{ kJ/mol}) \end{aligned} \quad (3)$$

$$\begin{aligned} \gamma_{\text{heat}} &= 0.006698 U^2 + 3.115526 U + 363.140586 \quad (-235.7 < U < -227 \text{ kJ/mol}) \\ \gamma_{\text{heat}} &= 0.917 \quad (U < -235.7 \text{ kJ/mol}) \end{aligned} \quad (4)$$

これは、式(3)は骨材が大きく収縮する場合（砂岩系骨材でクロライトなどの粘土鉱物を多く含む場合）、式(4)は骨材が収縮しない場合（純度の高い石灰石、あるいは石英量の多い熱変性を受けた凝灰岩の場合等）に対応しており、図 3.4.2-211 にあるデータを用いて作製した。

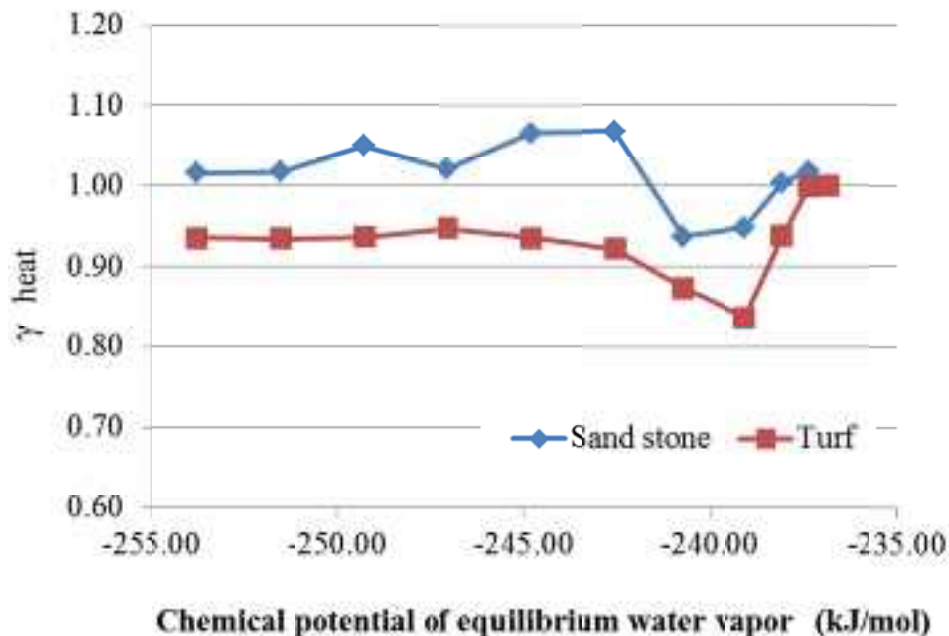


図 3.4.2-211 2012 年度の実験結果から得られたガンマ線発熱による強度変化係数とセメントペースト中の平衡水蒸気化学ポテンシャルとの関係

次に放射線が骨材膨張に及ぼす影響については、次式で考える。
放射線と骨材膨張量の関係は、以下の式(5)～(7)によって定める。

骨材の放射線照射量と骨材の膨張線ひずみ $\varepsilon_{\text{agg}}(\mu)$ の関係：

$$\varepsilon_{\text{agg}} = 5.0 \cdot 10^4 / (1 + \exp(-5.0 \cdot (\log_{10}(F) - 19.75))) \quad (5)$$

ここで、F:Fast neutron (>0.1MeV) の fluence (n/cm²/h)、である。この関係は、Weissmann と Nakajima らの実験結果から得たものである。

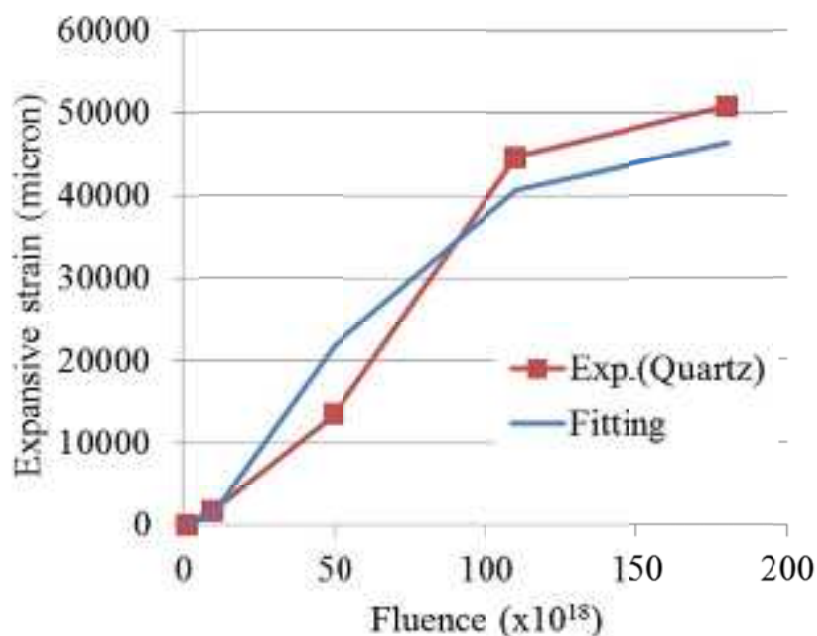


図 3.4.2-212 石英の速中性子線照射量と膨張量の関係⁶²

骨材の膨張線ひずみ ε_{agg} とコンクリートの膨張線ひずみ $\varepsilon_{\text{con,rad}}$ の関係：

$$\varepsilon_{\text{con,rad}} = 0.71 \cdot \varepsilon_{\text{agg}} \quad (6)$$

この式は、3.4.2(4)で行った解析検討より導いた。

⁶² Weissmann, S. and K. Nakajima (1963). "Defect Structure and Density Decrease in Neutron - Irradiated Quartz." Journal of Applied Physics 34(3): 611-618.

コンクリートの膨張線ひずみ $\varepsilon_{\text{con,rad}}$ とコンクリート強度低下比 γ_{rad} の関係：

$$\gamma_{\text{rad}} = (0.75.0 + 0.25 \cdot \exp(-0.00099 \cdot \varepsilon_{\text{con,rad}})) \quad (7)$$

この式は、3.4.2(4)で行ったアルカリ骨材反応を生じたコンクリートの実験結果より導いた。膨張ひずみと強度の関係について、下記に再掲する。

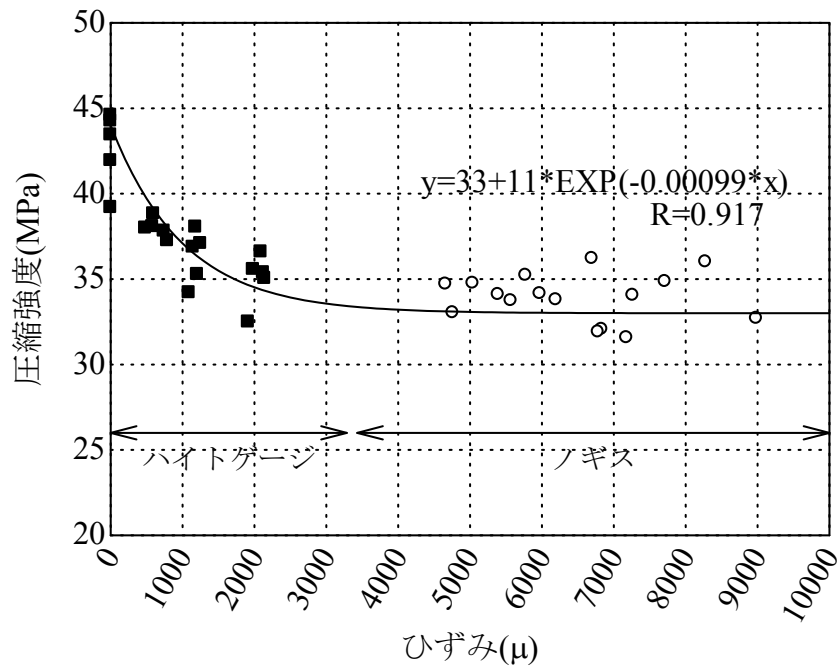


図 3.4.2-213 コンクリートの膨張ひずみと強度の関係

以上の関係から、強度低下を評価することが可能となる。

3) 試算

(i) 計算条件

今年度検討した強度予測モデルと放射線輸送コードとの連成による 60 年間の強度予測の試算の結果について示す。まず、計算の前提については以下の通りである。

○コンクリート・材料の条件

－骨材は川砂利とする。骨材の最大寸法は 20mm とする。

－調合は以下の通りである。

W/C	W (kg/m ³)	C (kg/m ³)	S (kg/m ³)	G (kg/m ³)	Air (vol %)
0.49	139	290	653	1240	47

－セメントの鉱物組成等は以下のとおりである。

Blain 値 (cm ² /g)	C ₃ S (mass%)	C ₂ S (mass%)	C ₃ A (mass%)	C ₄ AF (mass%)	二水石膏 (mass%)
3210	55.0	23.0	9.0	9.8	4.5

－各物性の物性値は以下の通りである。

	水	セメント	細骨材	粗骨材
密度 (g/cm ³)	1	3.14	2.60	2.62
比熱 (J/g)	4.185	0.78	0.80	0.80
熱伝導率 (W/m/K)	温度の関数	3.0	3.0	3.0
		2.0		

○熱伝導解析上の条件

- －材齢 28 日まで型枠を取り付けており、そのときの熱伝達係数は 8.0W/(m² K)。
- －材齢 28 日以降は、自由面となり、14 W/(m² K)。
- －打ち込み温度は 20℃
- －環境温度は 20℃一定
- －実機可動は打ち込みから 1 年後とする。温度境界は室内側を 23℃、炉側を 47℃と設定する。

○水分移動解析上の条件

- －材齢 28 日までは型枠面において水分蒸散は無し
- －材齢 28 日以降、60%RH、20℃。
- －実機稼働時の周囲空気については、最外接点における温度を用い、20℃60%RH の水蒸気が最外接点温度のときの相対湿度として計算を実施

○部材条件

- －部材幅は 2000mm とする。
- －有限要素解析、および ANISN における計算では 1.0mm ピッチのメッシュとする。

○放射線の条件

放射線に関わる条件は、図 3.4.2-214 および図 3.4.2-215 による。

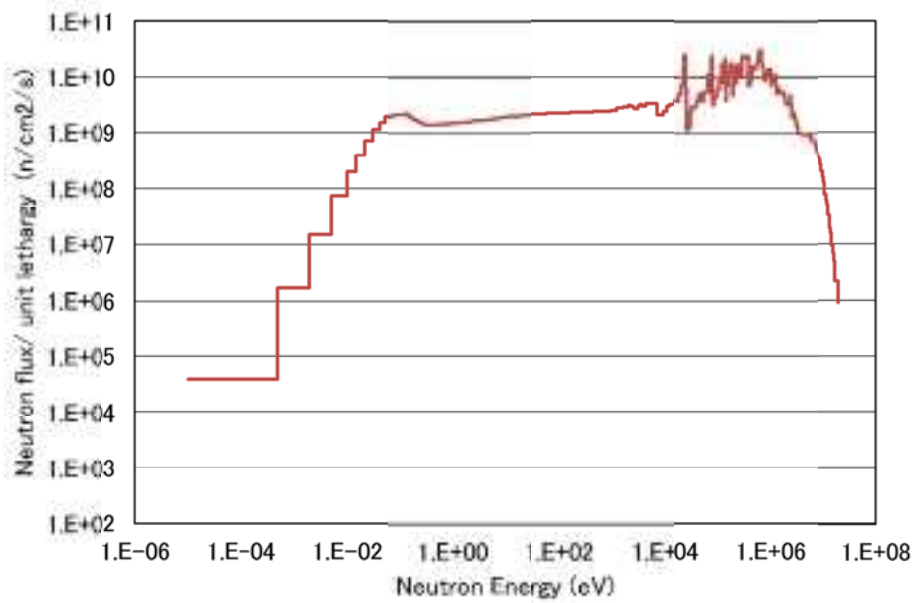


図 3. 4. 2-214 生体遮蔽壁面における中性子スペクトル

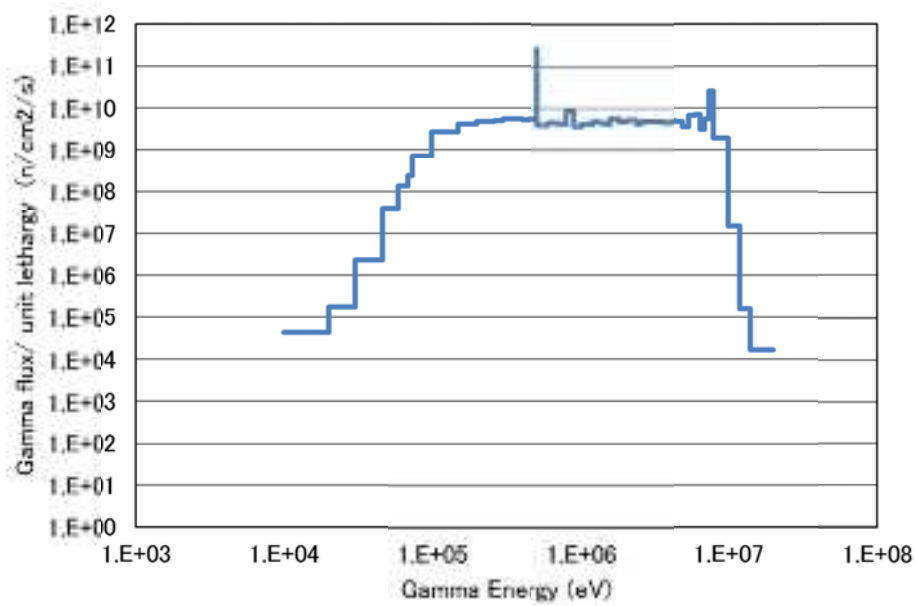


図 3. 4. 2-215 生体遮蔽壁面におけるガンマ線スペクトル

○解析期間

—解析期間は 60 年とする。

(ii) 解析の結果

解析の結果を図 3.4.2-216～図 3.4.2-222 に示す。図 3.4.2-216 は、ガンマ線発熱および中性子影響を考慮しない、セメントペーストの反応率から予想されるコンクリート強度分布の予測である。初期の水和発熱の影響が考慮されるとともに、乾燥にともなって水和が停止する傾向がみられている。両端 500mm 程度までの範囲でその影響が顕著である。なお、途中で不連続点があるのでは、水和反応モデルにおいて、一定温度になるとアルミネート相およびフェライト相の反応プロセスが変化し、モノサルフェートが直接的に析出するようになるからである。オペレーションが開始された材齢以降、照射側の水和はより停止し、水分移動にともなって右端側は水和が継続する。

図 3.4.2-217 は、ガンマ線発熱の影響を考慮したもので、今回の解析では、石英を多く含有している骨材を有しているので、温度上昇によるダメージも累積し、強度が低下する傾向を示すことになる。初期高温履歴を含め、温度分布データについては、図 3.4.2-219 に示した。図 3.4.2-218 には、中性子による骨材膨張を考慮した場合の強度の経時変化について示す。図 3.4.2-221 にコンクリート中の照射量、図 3.4.2-222 に照射を受けた場合のコンクリート中の骨材膨張量を示す。遮蔽に用いたコンクリートについては、内部までかなり照射を受けている可能性が示される。これに応じて骨材膨張量が決定されるが、このようになんかなり深部のコンクリート中の骨材が膨張している可能性がある。なお、60 年での表層側の累積照射量は計算では $7.8E19$ (n/cm²) となっている。これらは、骨材の種類によってインパクトが異なっており、今回はもっとも大きなインパクトを有する石英の事例を計算していることについて、留意する必要がある。また、強度を予測する関数についても実証的データの累積は不可欠であり、今後の蓄積が望まれる。

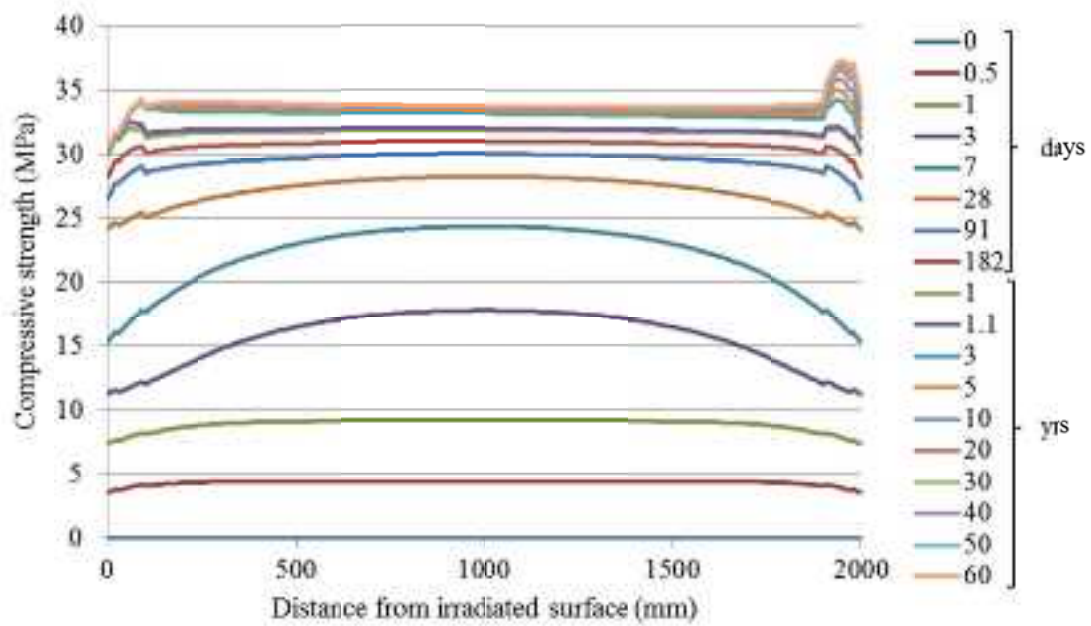


図 3. 4. 2-216 部材中のコンクリート強度（中性子・ガンマ線影響無し）の分布と経時変化

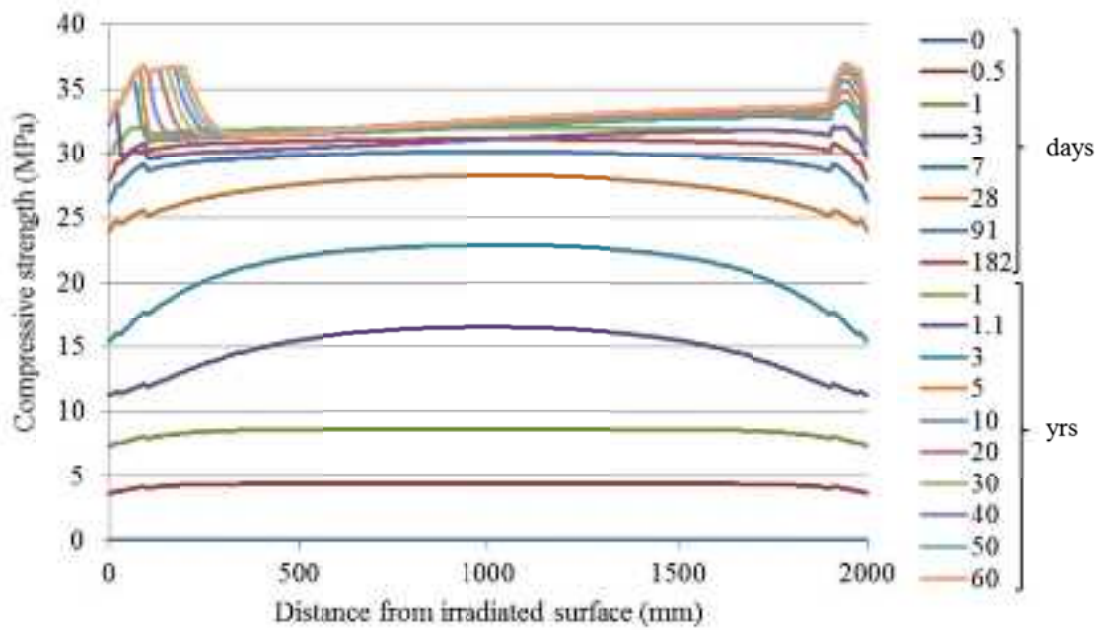


図 3. 4. 2-217 部材中のコンクリート強度（ガンマ線影響考慮）の分布と経時変化

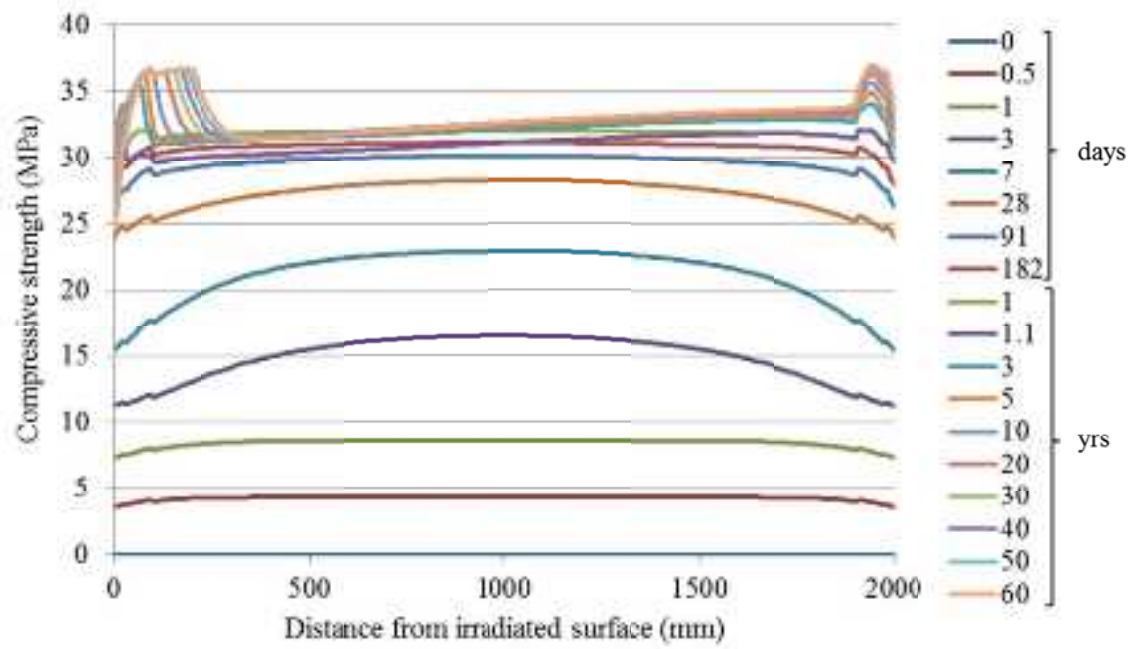


図 3. 4. 2-218 部材中のコンクリート強度(ガンマ線・中性子影響考慮)の分布と経時変化

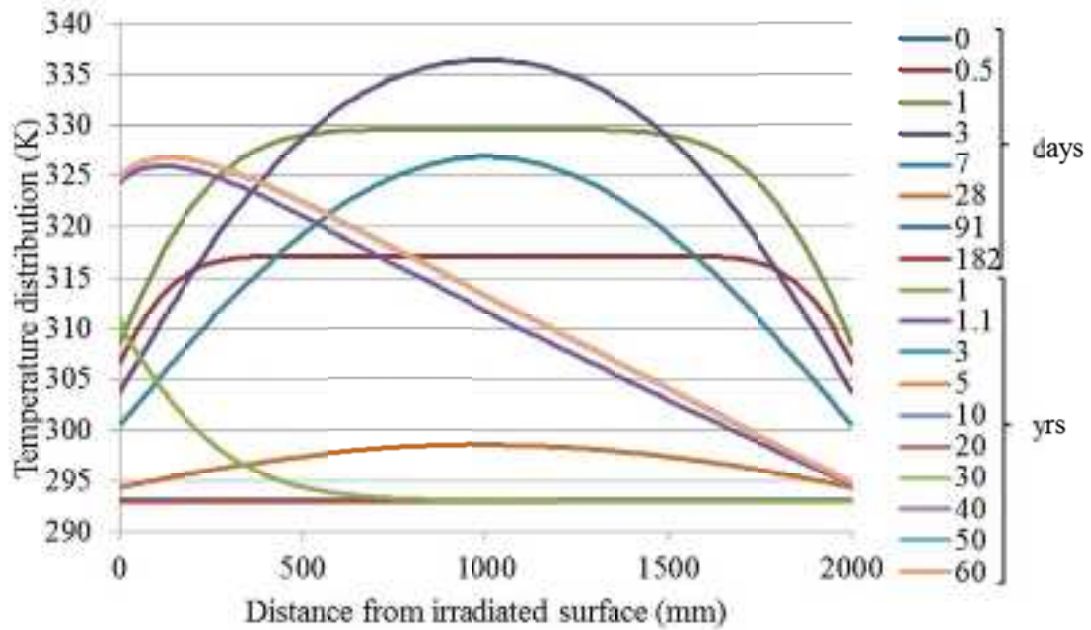


図 3. 4. 2-219 部材中の温度分布とその経時変化

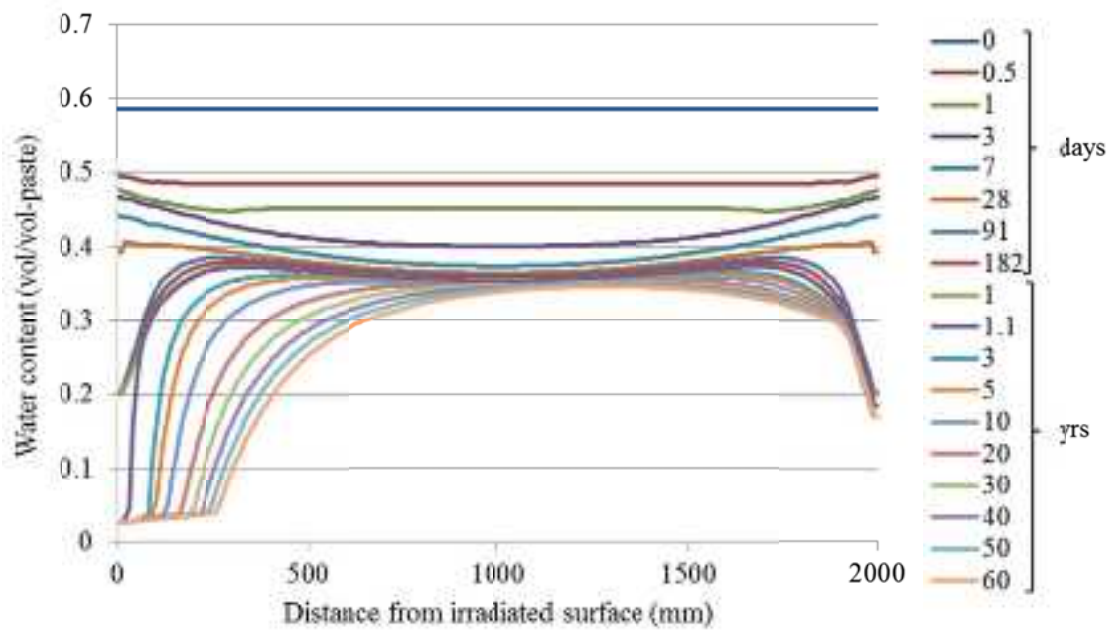


図 3. 4. 2-220 部材中の水分分布とその経時変化

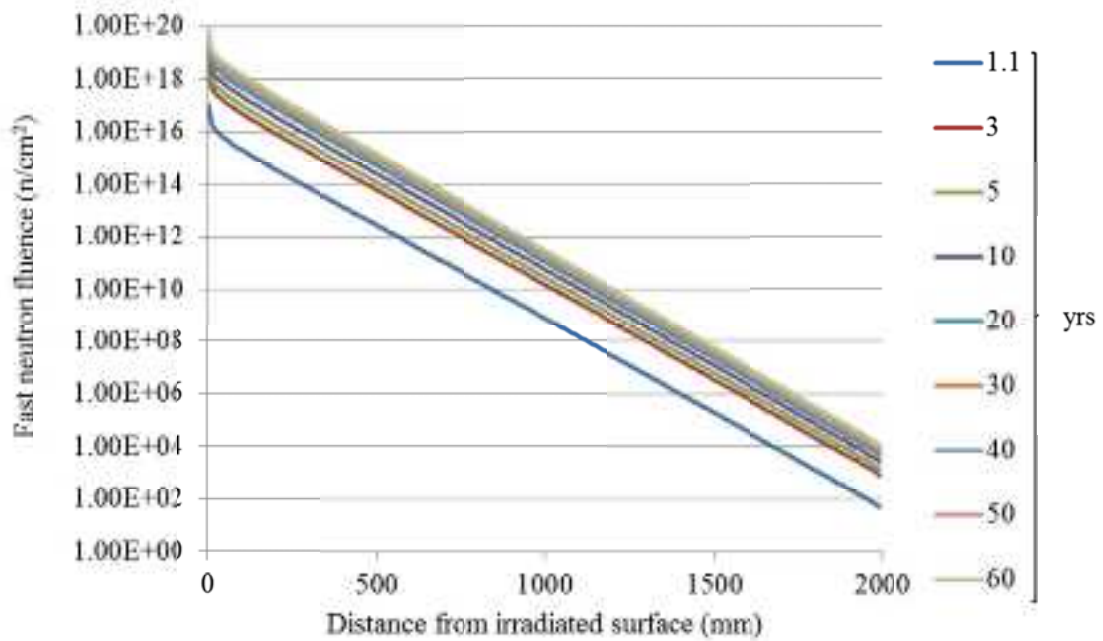


図 3. 4. 2-221 部材中の速中性子照射量の経時変化

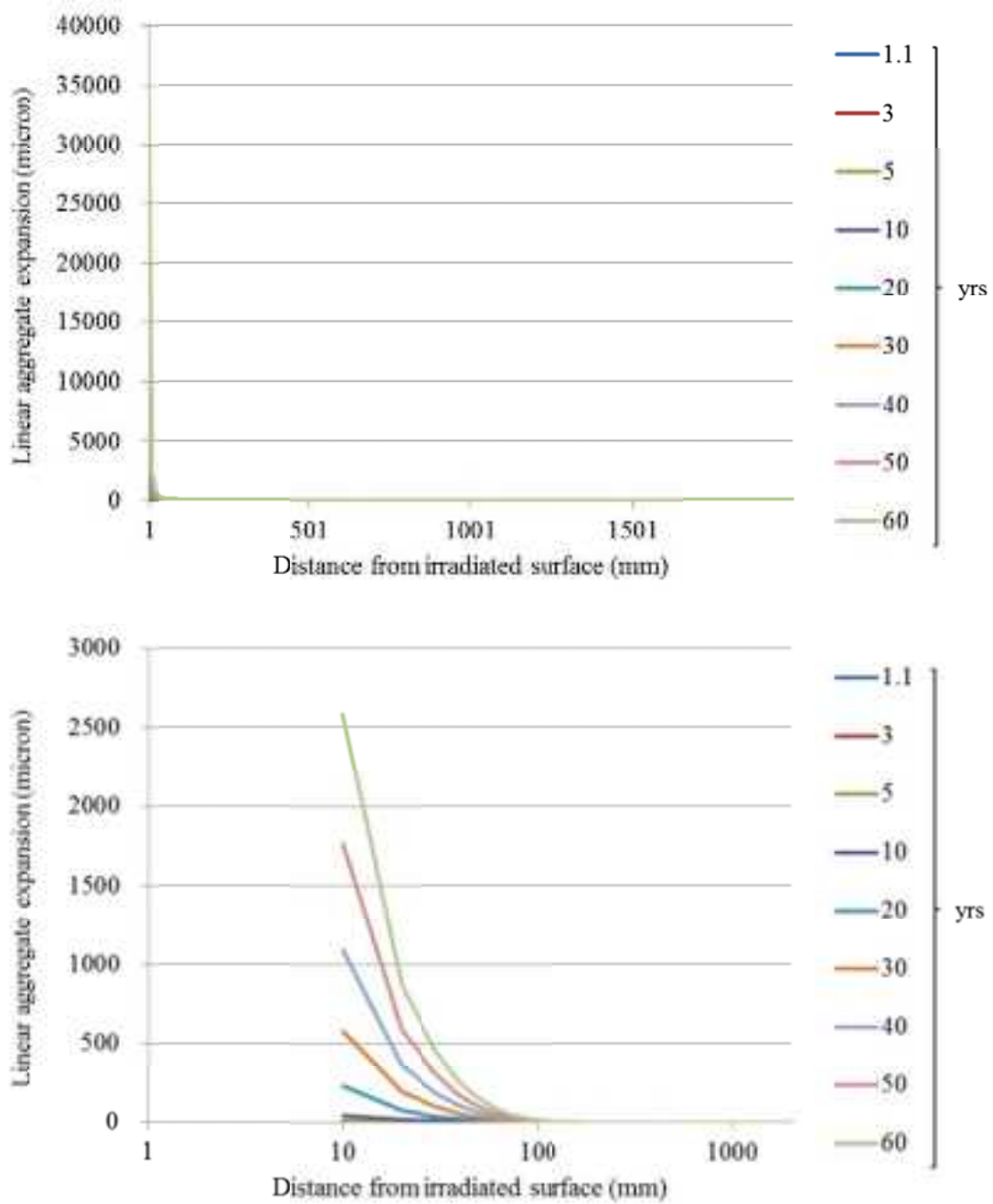


図 3.4.2-222 コンクリート中の骨材の膨張量の分布

5) まとめと今後の課題

本検討では、前フェーズで開発した強度予測モデルと既存の放射線輸送コードを連成し、中性子による骨材膨張を考慮したモデルを開発した。今後は、コンクリート中の水分の影響、ガンマ線によるセメントペーストの変質、等について高度化したうえで、それらを総合したコンクリート物性の変化についての検討を照射試験により実施し、それらを解析コードに反映させることで、より精度の高い強度予測が可能となる。いずれにせよ、今後とも、コンクリートの構成材料およびコンクリートの照射データの累積は非常に重要である。

また、本モデルは、非常に詳細に物理化学的データを積み重ねて予測したモデルではあるが、実部材としての問題において考慮できていない部分が存在する可能性がある。今後は、実機試料でのコア抜きを含め、実構造物調査との比較も重要な課題となる。

(6) 今年度の総括

2013年度研究における総括について以下に示す。

- 本研究を実施するにあたり、国際知見交換、先進知見の反映、ならびに国際貢献の重要性について明らかにし、米国との知見交換を行うとともに、国際知見交換会の組織作りについて検討を行った。もっとも先進的な取り組みを行っている日本の研究成果を世界に示すことによって国際貢献を行うとともに、本テーマをもとに、照射影響評価に関するイニシアチブを取得していこうと考える。
- 2013年度は、中性子照射およびガンマ線照射の物性試験を実施し、データの取得を開始した。実験はおおむね順調であり、今後の継続的検討によって、既往研究と比較してもっとも緻密に計画された実験データが取得できる見込みである。今年度の範囲のデータは、照射量の小さい範囲でのデータであるため、そこからの考察は未だ難しい状態にある。
- 中性子およびガンマ線照射のリファレンスとなる熱影響試験の試験方法について構築し、ガンマ線試験におけるリファレンス試験を開始した。中性子照射試験も、予備実験の確認ができ次第、実験を開始する予定である。
- 放射線影響に関する数値解析手法の高度化を実施した。本年度は、中性子線による骨材膨張影響を考慮できるよう、構築した。本モデルの軸は、照射量 vs 骨材膨張量、コンクリート膨張量 vs 強度低下量、である。これらのデータは既往研究、および、アルカリ骨材反応を生じたコンクリートの物性を参照して構築した。今後、実験データの蓄積によるデータの改定や、実構造物からコア抜きによってこれらの高度化が実施可能になると考えられる。
- 今年度は、当初計画通りに研究を遂行することができた。

4. 事業進捗の管理と成果総括に係る活動の実施

4.1 実施概要

本事業で実施する各個別調査研究について、研究計画に対する進捗度の確認、研究目標に対する実施内容の妥当性の確認、研究成果の取りまとめ等に係る検討の場としての会議体を設置し、運営を行った。当該会議体では、必要に応じて本事業以外の国の安全研究に係る事業や独立行政法人原子力安全基盤機構等で実施されている関連安全研究との情報共有を行い、研究内容の補完や成果レベル向上の相乗効果を図った。

また、各個別調査研究成果を集約し、事業全体の成果を総括する場としての会議体（総括検討会）を設置し、運営を行った。加えて関係者が集う場にて中間報告および最終成果報告を行う会合も合わせて設定し、運営を行った。最終成果報告の場では、参加者が各成果報告に対してピアレビューを行う仕組みを取り入れ、自己評価結果と合わせて、今年度の設定目標に対する達成度ならびに次年度に向けての軌道修正や適切な課題設定のあり方を確認した。

総括検討会の活動の一環として、国際機関や海外関連組織との連携や協力を進め、国際標準への準拠や最新の海外動向の反映、更には国際的な情報発信を図り、事業成果の信頼性や先進性を担保した。

4.2 事業遂行スキームの構築

4.2.1 採択研究テーマと実施項目

本事業は、平成 25 年 4 月 30 日に公示公告がなされ、以下の事業目的に沿った研究企画提案が募集された。

運転開始後 30 年を超えて運転する経年プラントの健全性評価を確かなものとするため、高経年化技術評価に対して最新知見を取り入れて、材料の経年劣化進展に伴う安全裕度の低下に係る予測手法の導入や予測精度の改善を図る。また、プラントの型式やシステム設計に付随した安全裕度の考え方、プラントシステムを構成する機器、構造物、計装系等の点検・補修・取替に係るプラント固有の保全履歴等も考慮して、経年プラントの管理のあり方を定量的に検証できる評価体系の整備に資する。

この目的に即した研究テーマの採択がなされたが、合わせて事業目的を的確に達成するため、事業を円滑に遂行し成果を総括して取りまとめるマネジメント業務を事業活動の一環として組み込み、実施した。

表 4.2.1-1 に、平成 25 年度事業において採択された各研究テーマを示した。各研究テーマは大きくは「総括・国際連携」、「技術情報基盤・システム安全」および「安全基盤研究」

に区分し、それぞれにおいて以下の課題に対する調査研究ならびに事業マネジメントを実施した。

【システム安全研究】

- ・ 稼働プラントの安全評価体系の枠組みの提示
- ・ 稼働プラントの安全評価手法および評価指標の整備
- ・ 安全評価手法の実機適用性の検証
- ・ 安全評価に必要な科学的知見の共有化
- ・ 安全規制の高度化に資する知識ベース構築

【安全基盤研究(機器の機能劣化の定量評価)】

- ・ ケーブル絶縁劣化
- ・ コンクリート強度劣化
- ・ 圧力容器および炉内構造物の照射劣化
- ・ 配管・ノズル部の環境疲労および熱疲労

【総括・国際連携】

- ・ 事業を円滑に進めるための会議体の設置・運営
- ・ 国内外ステークホルダーとの情報共有・連携
- ・ 規制の高度化に資する研究成果創出の要件確認・周知
- ・ 自己評価およびピアレビューに基づく成果検証

これらの実施項目を有機的に連携させ、事業目的の達成に向けて効果的かつ適切に成果を導出するため、事業遂行スキームを明確化し、事業関係者間で確認すると共に意識共有を図った。図 4.2.1-1 に事業の立ち上げに際して構築した事業遂行スキームの模式図を示す。当該図が示すところは以下の通りである。

システム安全研究では、従来の設計ベースでのプラントシステムの安全評価ではなく、個々の稼働プラントの状態に対応した実力ベースの安全評価を実施するための評価手法ならびに評価指標を整備することを念頭に、安全評価体系のあり方や評価の枠組みを検討すると共に、当該評価に資する技術情報を体系的に整備して、有効活用するためのデータベース・知識ベースを構築する。

一方、安全基盤研究では、プラントを構成する主要機器の要求機能と当該機能を損なう経年劣化事象に着目し、劣化発生・進展の予測精度や、劣化に伴う機能低下の適切な把握・管理に資する検査技術の高度化を図る。

そして、当該安全基盤研究の成果をシステム安全の稼働プラント評価に適用するための双方の研究の有機的な連携を促進する。そこでは、安全基盤研究の成果は劣化予測式や解析コード、検査の最適化といった知識として取りまとめ、システム安全研究に取り込む。

これらシステム安全研究と安全基盤研究の連携に基づく成果創出を前提とする本事業の活動においては、本事業内に閉じず、安全規制当局が実施する関連分野の安全研究との情報共有や交換を積極的に実施して、効率的かつ効果的に研究を推進する連携体制をとる。また、国際標準への準拠や国際動向との整合性も念頭に、国際機関や海外の規制機関との情報共有や連携も積極的に対応する。特に国際機関や国際会議への対外発表は、国内に閉じない海外からの外部評価・第三者評価にも耐える成果創出を目指した対応として位置づける。

4.2.2 研究進捗管理・取りまとめのための会議体の設置

前項のスキームに基づく事業を実行に移すため、関係者が情報共有や発信、意見交換を行うための会議体を設置した。設置した具体的会合は、以下の通りである。なお、別途日本原子力研究開発機構が受託し実施した同事業（原子炉压力容器の健全性評価方法の高度化）において設置された原子炉压力容器健全性研究専門部会とも情報共有を行い、事業総括活動では協力して成果取りまとめ対応を行った。

各会合の開催日程を表 4.2.2-1 に示す。

- ・ 総括検討会
- ・ 成果報告会
- ・ システム安全研究会
- ・ 安全評価指標研究会
- ・ 漏えい研究会
- ・ コンクリート建屋・システム安全検討会

- ・ 照射劣化研究会
- ・ 環境疲労グランドデザイン検討会
- ・ 熱疲労評価法高度化検討会
- ・ コンクリート照射効果研究会

これら以外にも、研究テーマごとに必要に応じて、当該分野の有識者や関係者が参加する形での会合を持ち、研究を進めて成果を取りまとめた。また、国際対応に関しては、2013年11月22日に、「原子力発電所のシステム安全に資する経年劣化管理プログラムの高度化に関する国際シンポジウム（ISaG2013）」を本事業の活動の一環として開催した。

表 4.2.1-1 平成 24 年度事業の採択研究テーマ

研究テーマ		所属略称	氏名
総括	事業総括・国際連携・外部評価	東大	関村 直人
技術基盤 システム安全	運転プラントにおけるシステム安全確立のための基準の整備とリスク評価等の手法の開発	法政大	宮野 廣
		京大	森下 和功
		東大	出町 和之
		阪大	山口 彰
	漏えい評価法の高度化	北大	奈良林 直
	技術情報基盤整備の方法論の策定	東大	大澤 幸生
	材料劣化潜在事象・潜在メカニズムのプロアクティブ評価と対応調査	東北大	庄子 哲雄
実機ケーブル敷設に係るシステム安全評価手法の開発に係る課題整理	東大	関村 直人	
コンクリート建屋のシステム安全評価手法の開発に係る課題整理	横国大	楠 浩一	
疲労	疲労評価手法のグランドデザインの検討	阪大	中村 隆夫
	環境疲労メカニズム解明と評価手法の高度化	東北大	庄子 哲雄
	環境割れの非破壊評価の信頼性評価と高信頼化	東北大	高木 敏行
	熱疲労現象のメカニズム解明に基づく熱疲労評価法の高度化	東大	笠原 直人
照射劣化	原子炉圧力容器の健全性評価方法の高度化	JAEA	鬼沢 邦雄
	炉心・炉内構造物の健全性評価手法の高度化	阪大	望月 正人
ケーブル劣化	高温・高放射線環境下での絶縁機能低下メカニズムの解明	早大	大木 義路
コンクリート劣化	原子力関連コンクリート構造物の複合劣化に関する評価法の開発	首都大	橋高 義典
	放射線照射によるコンクリートの強度低下	名大	丸山 一平

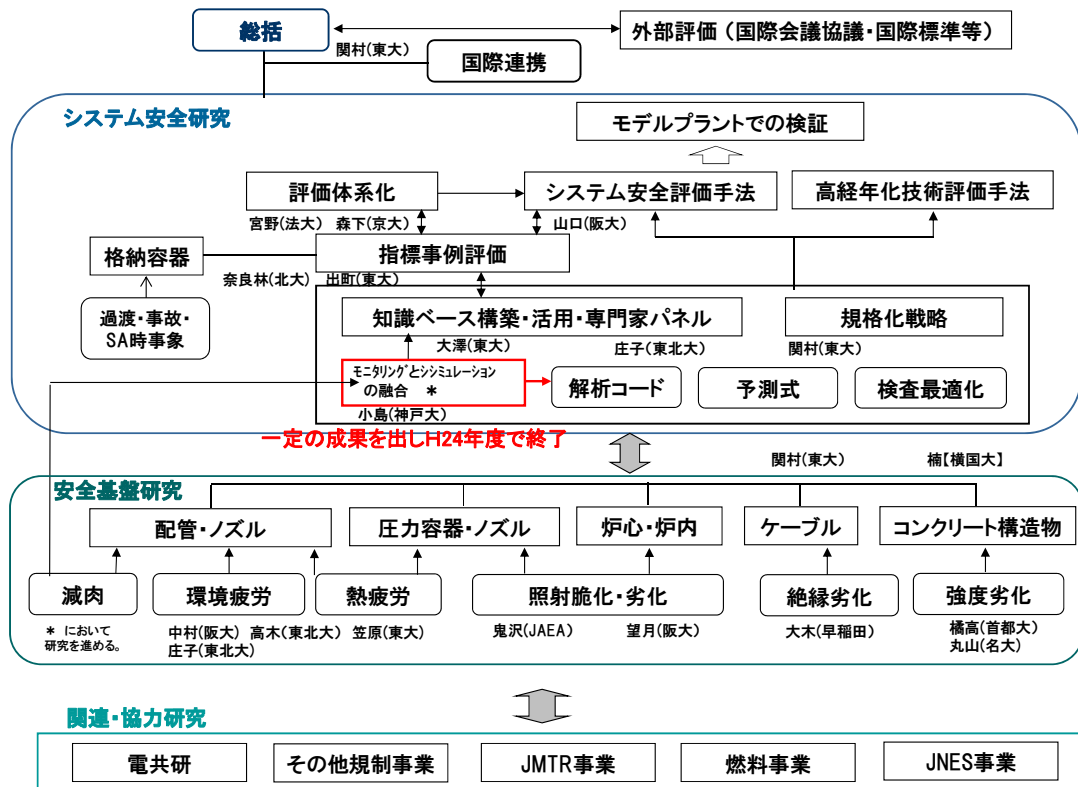


図 4.2.1-1 本事業の遂行スキーム

表 4.2.2-1 各会合の開催日程

分類	会合	6月	7月	8月	9月	10月	11月	12月	1月	2月	
高経年化技術評価高度化事業	総括検討会	第1回 (6/21)				第2回 (10/11)				第3回 (2/14)	
	成果報告会						中間報告 (11/28-29)			最終報告 (2/14, 28)	
	システム安全研究会		第1回 (7/30)				第2回 (11/20)		第3回 (1/20)		
	安全評価指標研究会	第1回 (6/29)	第2回 (7/23)				第3回 (11/2)				
	漏洩研究会						第1回 (11/5)		第2回 (1/30)		
	コンクリート建屋・システム安全検討会			第1回 (8/7)	第2回 (9/25)	第3回 (10/31)		第4回 (12/27)		第5回 (2/13)	
	照射劣化研究会	作業会			第1回 (8/6)	第2回 (9/27)		第3回 (12/11)			
		研究会		第1回 (7/9)		第2回 (9/27)		第3回 (11/13)		第4回 (1/14)	第5回 (2/12)
	疲労評価グランドデザイン検討会		第1回 (7/8)				第2回 (11/6)			第3回 (2/7)	
	熱疲労評価法高度化検討会	作業会			第1回 (8/21)			第2回 (11/19)			第3回 (2/20)
		幹事会		第1回 (7/24)				第2回 (11/18)			第3回 (2/4)
	コンクリート照射効果研究会						第1回 (11/13)				

4.3 国際連携・国際情報発信に係る活動

4.3.1 はじめに

福島第一原発事故の後、原子力安全に対する国際的な連携・協力の必要性が更に高まる中、従来の高経年化対策にシステム安全の考え方を導入した新たな安全評価手法の導入に資する研究を推進していく上でも、海外諸国や国際機関との連携・協力を推し進めていく必要がある。この考え方に基づき、平成 25 年度の国際協力・連携活動の一環として、欧米ならびに中国から関連分野の有識者を招聘し、国際会議を開催した。平成 18 年度から平成 22 年度まで実施された高経年化対策強化基盤整備事業の活動として継続的に開催してきた国際シンポジウム ISaG2007～ISaG2010 を引き継ぎ、さらに平成 23 年度に立ち上がった本事業にて継続開催している ISaG シリーズの平成 24 年度会合として ISaG2013 を開催した。参加数は招聘者含めて約 80 名であった。

また、国際連携・国際協力を進める上で重要な国際機関である IAEA への情報発信や活動への参画・協力、情報収集活動も合わせて実施した。

4.3.2 国際会議の開催

本事業の総括検討会の活動の一環として、国際会議を開催した。会議の名称、開催日時・場所、プログラムは以下の通りである。

【名称】

原子力発電プラントのシステム安全に資する経年劣化管理プログラムの高度化に関する
国際シンポジウム 2013

International Symposium on Ageing Management Program Development for System Safety
of Nuclear Power Plants in 2013 (ISaG2013)

【開催日時・場所】

2013 年 11 月 22 日 9:30-18:00

株式会社三菱総合研究所 4 階 大会議室 ABCD

【プログラム】

9:30 - 9:40 オープニングセッション
「開催挨拶」 関村（東大）

9:40 - 10:10 セッション 1： 基調講演
「新安全規制体系と国際標準を踏まえた最新知見の安全規制への反映」
森下（規制庁）

- 10:10 - 10:55 「米国における高経年化対策と 60 年超運転に向けた取り組みと課題」
K. McCarthy (INL)
- 10:55 - 11:40 「カナダにおける長期供用運転に向けた取り組みと国際機関における
経年劣化管理プログラムの高度化に係る国際協力の動向」
A. Blahoian (Canada-NSC)
- 11:40 - 13:00 昼 食
- 13:00 - 13:30 セッション 2: 運転経験情報の知識基盤構築とシステム安全に向けた活用
「International GALL に対する日本の取り組みと今後の成果活用」
菅野 (JNES)
- 13:30 - 14:00 「IAEA における International GALL の取りまとめ概要と今後の取り組み方針」 R. Havel (RESCO Czech)
- 14:00 - 14:30 「プラントメーカーにおけるプラントライフ中の機器・設備の維持管理
とシステム」 小山 (MHI)
- 14:30 - 15:00 セッション 3: 経年プラントの安全対策に向けた研究開発プログラム
「AREVA 社における経年プラント安全対策の最新知見と今後の研究開発動向」 A. Zander (AREVA)
- 15:00 - 15:30 「中国における安全対策の課題と安全研究プログラムの最新状況」 Z. Li,
(清華大)
- 15:30 - 16:00 「高経年化技術評価高度化事業の取り組み状況と規制高度化への反映」
滝沢 (MRI)
- 16:00 - 16:15 休 憩
- 16:15 - 17:50 セッション 4: 総合討議
「International GALL の成果を踏まえた今後の原子力安全に向けた国際協力のあり方」
座長：関村（東大）、パネリスト：森下（規制庁）、田中（関電）、
K. McCarthy (INL)、A. Blahoian (Canada-NSC)、A. Zander (AREVA)、

Z. Li (清華大)

17:50 - 18:00 クロージングセッション
閉会挨拶 滝沢 (MRI)

4.3.3 議事進行ならびに概要

まず、総括検討会主査の東京大学大学院教授の関村氏より開催挨拶がなされ、原子力利用を取り巻く環境が大きく変化する中、原子力安全に対する今後の国際協力のあり方やその展望について、ISaG2013にて充実した議論がなされることを期待している旨が述べられた。

セッション1の基調講演では、日本、米国、カナダの3ヶ国からそれぞれの状況が報告された。日本からは原子力規制庁の森下氏から、実用発電用原子炉に係る新規規制基準、長期運転と高経年化に係る安全規制、経年劣化管理に資する調査研究、関係する国際協力プロジェクトの概要について講演が行われた。米国からはアイダホ国立研究所(INL)のK. McCarthy氏から、米国内の原子炉におけるライセンス制度、および米DOEによる軽水炉維持活用計画に関し、その目的や運営方法、技術開発計画、その成果について講演がなされた。その中で、リスク情報を活用した安全裕度判定(RISMC)プログラムと原子炉压力容器鋼の照射脆化研究側との共同会議を設置する計画についても言及がなされた。カナダ規制委員会からはBlahoianu氏より、長期運転に関するカナダの規制プロセス、経年劣化管理プログラムの高度化や研究内容、国際協力に関するCNSCの取組の状況について講演がなされた。その中で、原子力発電の安全性に関する地域住民との関わり方や、総合安全レポートがCNSC職員によって調印書として作成されていることについても言及された。

セッション2は、「運転経験情報の知識基盤構築とシステム安全に向けた活用」のテーマで3つの講演が行われた。まず、原子力安全基盤機構の菅野氏より、「International GALLに対する日本の取り組みと今後の成果活用」というタイトルで講演がなされた。ここでは、わが国の高経年化対策の現状、IAEAにおけるInternational GALLの概要と今後の日本としての取り組み方針が示され、国際的な経験がわが国の枠組みに活用されていることや、安全確保に資する経年劣化事象の研究進展状況について説明がなされたと共に、今後の高経年化対策における技術伝承の重要性が言及された。次に、チェコ RESCO 社の R. Havel 氏より、「IAEA における International GALL の取りまとめ概要と今後の取り組み方針」というタイトルで講演が行われた。その中では、IAEA による I-GALL の目的、プロジェクトの内容、成果、今後の方向性が示されたと共に、IAEA による世界各国への協力・支援の状況や動向について言及がなされた。引き続いて、三菱重工業の小山氏より、「プラントメーカーにおけるプラントライフ中の機器・設備の維持管理とシステム」というタイトルで講演が行われた。講演やその後の質疑応答を通じ、プラントの安全評価に関して重要なことは予

測精度であり、安全評価のためには、より現実に即したものでなければならないこと、ならびにわが国においても、確率論的アプローチや劣化事象のリスクについて議論を始めることが重要であることが確認された。

セッション3は、「経年プラントの安全対策に向けた研究開発プログラム」のテーマで3つの講演が行われた。まず、AREVA社のA.Zander氏より、「AREVA社における経年プラント安全対策の最新知見と今後の研究開発動向」というタイトルで講演がなされた。その中では、経年プラントの安全対策のためのCOMSYソフトウェアについて、その開発過程やモジュールの内容、劣化に関する経年予測機能が説明された。また、COMSYはドイツやフィンランドの監査機関で広く受け入れられていることが示された。次に、清華大学のZ.Li氏より、「中国における安全対策の課題と安全研究プログラムの最新状況」というタイトルで講演が行われた。その中では、中国での原子力発電の状況や、原子力発電所におけるライフサイクルマネジメントと経年劣化・安全研究プログラムが説明され、大学が監理する研究用原子炉における運転規制についても言及がなされた。引き続き、三菱総合研究所の滝沢氏より「高経年化技術評価高度化事業の取り組み状況と規制高度化への反映」というタイトルで講演がなされた。そこでは、システム安全に資する経年劣化管理プログラムの高度化を目的に、現在、原子力規制庁が推進する高経年化技術評価高度化事業の概要が報告された。

休憩をはさみ、セッション4でパネルディスカッション形式による総合討議が行われた。メインタイトルは「International GALLの成果を踏まえた今後の原子力安全に向けた国際協力のあり方」が設定され、東大の関村氏が座長を務めた。パネリストは、規制庁の森下氏、関西電力の田中氏、INLのMcCarthy氏、Canada-NSCのBlahoianu氏、AREVA社のZander氏、および清華大のLi氏が務めた。

総合討議では、「各国の経年劣化管理プログラムへの反映」「継続的改善の枠組み」「I-GALLフェーズ2への取り組み」「廃炉CRP構想」を論点に、国際的な視点からの活発な議論がなされ、総括として、長期運転に関するトピックに関しては、様々な観点から充実した議論ができた一方で、安全裕度の妥当性の把握やリスクについては、今後より詳細な議論が必要であることが指摘された。特に、I-GALLのような国際協力活動は、最新知見の共有といった国際連携を促すことに非常に有益であったことが再確認された。

それぞれ安全研究や国際協力の活動に関して、各国・国際機関の最新動向の講演がなされた。その中で日本からは法政大学客員教授の宮野氏より、現在進められているNRA委託事業でのシステム安全に資する様々な安全研究の取り組みの概要が報告された。セッション4では、関村氏が座長を務め、6名のパネリストが参加する形で、「原子力安全に向けた国際プロジェクトと国際協力のあり方」をタイトルとするパネルディスカッションが行われた。フロアーを含め活発な意見交換が行われ、各国の抱える原子力利用上の課題や取り組みの方向性も踏まえ、国際機関の果たす役割も確認しつつ、継続的・発展的な国際協力

の推進の必要性が確認された。最後にクロージングセッションにて、三菱総合研究所の滝沢より次年度の開催計画等に触れた内容で閉会挨拶がなされ、会議は閉会した。

4.3.4 IAEA との連携、情報収集

国際連携・国際協力の役割を担う IAEA の活動への参画ならびに情報発信、情報収集を本事業の中で実施した。平成 25 年度は、廃炉を活用した実機材による経年劣化研究の国際協力の枠組み (IAEA CRP) に関する議論の場への参加や、International GALL (I-GALL) の取りまとめならびに今後の展開に関する情報収集を行った。CRP については、2013 年 7 月 17 日から 18 日にかけて、IAEA から R. Krivanek 氏および O. Plyakov 氏が来日し、東京大学山上会館にて、IAEA と日本側との協議の場としての準備会合が持たれ、本事業関係者も複数参加した。

IAEA 側が設定している CRP の目的は、機械、電気計装および構造物の経年劣化に着目した研究として以下が挙げられた。

1. 一次系構成機器に対する低サイクル疲労（環境疲労を含む）
2. RPV 及び炉内機器に対する照射脆化
3. 炉内機器に対する IASCC
4. 4.2 相ステンレス鋼の熱時効
5. ケーブル・電気計装・ペネの絶縁低下
6. コンクリート構造物の強度、剛性、遮蔽性他の劣化

研究期間は 2014 年から 4 年間とし、基本的には参加国が自己資金で研究を進め、IAEA の場を活用して成果を持ち寄り、最終的には IAEA として CRP 成果報告書として取りまとめるスキームとしている。

本件への日本の携わり方については、国内にて今後協議していくこととした。IAEA での第 1 回会合は 2014 年 6 月 11-13 日に開催される予定であり、各国から 50 機関を超える参加が見込まれている。本会合では、各参加機関からプレゼンテーションがあり、共通する課題について議論がなされる予定である。なお、米国からは NRC、DOE、EPRI の参加も予定されている。これらを踏まえて、CRP の Coordination Meeting が 2015 年の前半に開催することとしている。

また、I-GALL については、Phase II として、以下のように会合が持たれることが予定されている。日本からも強く要請してきた重要な課題である Obsolescence Management については、スペアパーツの availability の観点に加えて、obsolescence の評価法やモニタリングの事例について、検討を行う。また、ケーブルの obsolescence についても検討を行うこととしている。これらについては、2014 年 5 月 20-23 日に会合を IAEA で開催する予定である。

VVER における経年劣化管理プログラムに関する知見については 2014 年 10 月 7-9 日に、また CANDU 炉の経年劣化管理プログラムに関する知見については 2014 年 11 月 11-13 日に会合を持つこととしている。

なお、IAEA では、経年劣化管理に関する最も重要な図書である NS G 2.12 の改訂作業を開始するとしており、その初回の会合が 2014 年 6 月 3-5 日に開催される予定である。

4.4 総括検討会の開催・運営

4.4.1 はじめに

システム安全研究と安全基盤研究を連携し、国際的な動向にも目を向けて最新知見を取り入れ、国際標準にも準拠した稼働プラントのシステム安全評価を可能とする評価手法や評価指標を整備する本事業全体の目指すべき方向性を適切な方向に導くため、本事業を取り巻く様々な環境の変化や最新動向に係る情報を集約・整理し、本事業の各研究テーマの取りまとめ責任者、産官学のステークホルダーの主要メンバー、本事業とは直接関係はしない外部の視点からの意見を頂く方などが一堂に会する場として総括検討会を設置・開催した。

4.4.2 開催概要

平成 25 年度は、事業立ち上げ後の 6 月、中間時期の 10 月ならびに成果取りまとめ時期の 2 月に開催した。開催日時・場所、議事は以下の通りである。

【開催日時・場所】

第 1 回

2011 年 6 月 21 日 13:00 - 18:00

株式会社三菱総合研究所 4 階 大会議室 CD

(契約締結前に開催。後日委託元に報告し、議論内容の承認を得た。)

第 2 回

2012 年 10 月 11 日 13:00 - 18:00

株式会社三菱総合研究所 4 階 大会議室 ABC

第 3 回

2013 年 2 月 14 日 10:00 - 12:00

株式会社三菱総合研究所 4 階 大会議室 ABC

【議題】

第 1 回

1. 開催挨拶 (主査)
2. 事業概要および運営方針 (事務局)
 - 事業全体の目的
 - 主要イベント、マイルストーン
3. 研究計画の紹介 (各研究代表)
 - 安全評価体系化

- 燃料安全体系化
 - 漏えい評価の基準化
 - 安全評価指標
 - 稼働プラント安全評価手法整備
 - 質疑応答
 - コンクリート建屋・システム安全
 - コンクリート放射線照射強度劣化評価
 - コンクリート構造物複合劣化評価
 - プロアクティブ潜在事象評価
 - 情報システム体系化
 - 質疑応答
 - ケーブル・システム安全
 - コンクリートシステム安全
 - 圧力容器健全性評価手法高度化
 - 炉心・炉内構造物の健全性評価手法高度化
 - 疲労健全性評価グランドデザイン構築
 - 環境疲労メカニズム解明と評価手法高度化
 - 環境割れ非破壊評価の高信頼度化
 - 質疑応答
 - 熱疲労評価手法の高度化
 - ケーブル・システム安全
 - ケーブル絶縁劣化
 - 質疑応答
4. 総合討議
- 高経年化対応技術戦略マップの再構築
 - 3ヵ年成果の取りまとめ
 - 新規制の下での安全研究の方向性 等
5. 今後のスケジュール等（事務局）

第2回

1. 開催挨拶（委託元、主査）
2. 研究進捗状況および成果取りまとめの方向性
3. IAEA CRP 計画（JNES）
4. 国際会議 ISaG2013 計画（事務局）
5. 高経年化対応技術戦略マップの再編への対応状況（事務局）
6. 総合討議

7. 好評（委託元、主査）
8. 今後のスケジュール等（事務局）

第3回

1. 開催挨拶（主査）
2. 研究成果取りまとめに向けた確認事項について
 - 第2回総括検討会および中間報告会での指摘事項・コメントの確認
 - 平成25年度成果見通し
 - 評価チェックリスト・第三者評価について
 - 質疑応答・討議
3. 国際会議 ISaG2013 の結果報告（事務局）
4. 高経年化対応技術戦略マップの再編検討状況（事務局）
 - 再編・ローリング検討体系案
 - 再編後の戦略マップフレーム案
 - 今後のスケジュール案
5. 総合討議
 - 原子力安全への成果貢献のあり方
 - 国際標準、国際動向との対応
 - 研究課題の設定と評価のあり方
 - 3ヵ年中間評価と本事業後期の研究計画のあり方
6. 講評（委託元、主査）
7. 今後のスケジュール（事務局）

4.4.3 議論の概要および確認・決定事項

第1回会合は、研究計画ならびに成果目標の確認・共有が主目的であった。そこでの主要な確認事項として、本事業の成果は新規制基準や高経年化技術評価等へ反映し、直接規制庁が使用できる形で取りまとめることを本事業の明確な目標に据えること、各個別研究は、本日の議論も考慮して、研究実施計画に反映すること、技術戦略マップの再構築においては、これまでの「高経年化対応技術戦略マップ」という名称にとらわれず、原子力安全を確立のためにより広い視点で検討すること等、参加関係者の間で共有された。

第2回会合は、各研究の進捗状況の確認が主目的であった。そして、委託元の安全研究の進め方の方針に従って、規制課題の解決に資する成果を取りまとめていくことを基本原則とし、長期的な成果目標に加え、運転期間延長認可制度等に活用できる短期的な成果も創出していくこと、そこでは高経年化対応の技術戦略マップを活用していくこと、さらに IGALL 等の国際的動向も考慮し研究を推進していくことが確認された。技術戦略マップについては、本事業だけで検討するのは限界があるため、技術戦略マップに関する検討の場

や進め方は今後検討すること、また、技術戦略マップ策定・共有の観点からの規制行政と利用行政の関係性についても別途議論することが確認された。原子力規制委員会における安全研究の方針については、規制当局が実施する安全研究では産官学の連携を否定するものではなく、独立性、透明性を担保すれば、民間との研究協力も排除しないことが確認された。また委託元からは、規制当局が求めるアウトプットの確認等議論する場を今後設けることとし、事務局もしくは研究代表者は委託元と日時を調整することとした。

第3回会合は、各研究テーマの取りまとめ状況の確認、および第2回総括検討会で今後の検討事項として挙げた「技術戦略マップ策定・共有の観点からの規制行政と利用行政の関係性」等の議論を目的に開催された。また、ISaG2013の概要報告等も行われた。総括討論の視点は、「原子力安全への成果貢献へのあり方」「国際標準、国際動向との対応」「研究課題の設定と評価のあり方」および「3カ年中間評価と本事業後期の研究計画のあり方」であった。

総合議論を通じて以下が確認された。

- ・ 成果報告会にて、研究評価チェックリストによる各研究活動・成果のピアレビューを実施する。
- ・ 技術戦略マップの再編は、学会等の場も有効活用し、規制・利用行政も含めた産官学全体で議論できる場を設ける。
- ・ 上記学会等との情報共有も図りながら、本事業の総括検討会の場の下で、規制当局としての安全研究の方向性を示すマップを策定する。
- ・ 成果報告会の結果を踏まえ、平成26年度計画の具体化を図る。

4.5 まとめ

より効果的かつ実効的な研究の推進のため、専門性の高い大学等の研究機関との連携の下、システム安全研究を含めた技術情報基盤の整備ならびに安全基盤研究を遂行した。連携する複数の研究機関が実施する研究に対して、効率的かつ適切な経費支出の下で実施されていることを含めて適切な管理を行った。また、原子力規制庁（NRA）の出席の下、本事業における各研究の取りまとめ代表者が委員となり、関連するNRA管轄の安全研究事業、原子力安全基盤機構が実施する安全研究事業の担当者、オブザーバーの形で産業界メンバーが参加する形で、事業全体の方向性の確認、事業成果の総括を行う総括検討会を設置・運営した。そして、各研究の参画メンバーが、研究実施に必要な情報交換・共有、学術的な議論、論文の取りまとめや対外発表等の活動を行う拠点としての研究会合を設置し、個別研究の成果集約機能をもたせ運営した。さらに、本事業で実施する研究テーマ全てについて、NRAならびに事業関係者参加の下、平成25年度成果を取りまとめて報告を行う会合を開催した。

これら事業総括活動を通じて、平成25年度事業は当初目標を達成し、事業成果を取りまとめた。

5. 結論

(1) 技術情報基盤の整備

1) 経年プラントの安全評価の体系化及び安全評価手法開発に関する調査研究

(a) システム安全体系化

運転プラントにおける「システム安全」の評価手法として、プラント全体の安全を総合的に評価する方法を確立した。具体的には、様々な材料劣化などの機能を低下させる状態変化を系統の全てにわたり評価し、その機能低下による系統の求める機能の喪失のリスクの総和として評価することにより、システム全体として「原子力安全」の程度を把握することができる仕組みである。

(b) 経年プラント安全評価手法整備

原子力発電所の安全は、基本設計段階に始まり、運転開始直後から安定運転期、そして高経年段階までのプラント・ライフ全体にわたり維持・確保されるべきものである。これをプラント・ライフ・サイクル安全 (Plant Life Cycle Safety: PLCS) と捉え、PLCS 性能を表現できる指標を定義した。安全性については、PRA (あるいは深層防護) に対比させて指標を評価する手順を提案した。正当性については、環境とエネルギーに関する国民的議論で参照されたキーワードに基づき、指標を評価する手順を提案した。安全目標達成度については、原子力規制委員会設置法で求めている要件に従い、設定した。経年プラントの安全評価を定量的・総合的に実施できる解析評価体制の構築に向け、評価指標の整備・体系化に取り組んだ。また、深層防護性能を表す指標について検討を行った。さらに、実機を模擬した確率論的リスク評価を行い、PLCS として提案した保全指標を用いることで深層防護の各レベルに対する有効性を定量化できることを確認した。

(c) 安全評価指標

保全活動を通常運転時の保全と事故時のための保全の2つに分けて考え、通常運転時の保全指標の策定手法の開発と試評価、ならびに事故時のための保全指標の策定手法の開発を実施した。通常運転時の保全指標の策定手法の試評価では、「炉心冷却機能喪失」を対象とした。その結果、仮想的に保全活動を変更してシステムの機能信頼性を変更前後で比較することで、保全活動の適正を判定することが可能であることが示された。事故時のための保全指標の策定手法の開発では、原子力規制委員会の審査ガイド「原子炉損傷防止対策及び格納容器防止対策の有効性に係る標準評価手法」にて指定されている事故シーケンスのうち、「高圧・低圧注水機能喪失」および「全交流電源喪失」のシナリオを対象に、マネジメントシナリオを展開した。マネジメントはハード (機械) による対応とソフト (人・組織) による対応とに分けて考え、各対応の成功確率とかかる時間を考慮することで、事象の収束確率を評価することを提案した。

(d) 燃料安全体系化

燃料は熱や水素、放射能の発生源であり、刻々と変化する状態に応じた対策を行う必要がある。燃料の状態に基づいてハザードを抽出し、懸念されるリスクの評価をもとに、発生防止策、影響緩和策を立案すること、また、それらを優先順位付けするためのスキームを示した。因果関係ダイアグラムによって燃料の状態とリスクのつながりを明確にするとともに、種々の現象に対して、リスク戦略ダイアグラムに沿って、情報収集、リスク評価、対策の提案を行うことが重要である。

(e) 漏えい評価の基準化

液滴衝撃エロージョンなどの微少漏洩の評価手法を確立し、福島第一1号機の格納容器内配管の微少漏洩評価に適用した。また、新規制基準の格納容器外の内部溢水評価に活用し、内部溢水想定箇所の抽出と対策策定の方針を示した。さらに、ニューシアでの不適合事例調査の体系化により、新規制基準の機器からの内部溢水評価に活用した。過酷事故時の各種バウンダリからの漏洩事象の抽出については、高温溶融物によるMCCI反応対策試験をレジリアンス対策として実施した。

液滴衝撃エロージョンなどの微少漏洩の評価手法を確立し、福島第一1号機の格納容器内配管の大きな損傷が無いことを確認した。また、内部溢水想定箇所の抽出と対策策定の方針について、保全学会規制関連検討会にて資料にまとめ、規制委員会・規制庁に提案した。現在、新規制基準の適合審査対応対策に活用されるに至った。耐津波規格については、日本電気協会で、JEAC「耐津波規格」として水密ドア等の漏洩流量評価手法等も含め、意見募集段階に入った。

2) 機器の機能劣化に基づくシステム安全評価に関する調査研究

(a) コンクリート建屋・システム安全

平成25年度は、コンクリート建造物の損傷評価とシステム安全評価との融合を目標に、建造物の損傷と深層防護の概念とをすり合わせた。地盤・建屋・設備を一体として取り扱った解析法検討については、一体解析の可能性の考え方を整理した。モニタリング技術および実測値のフィードバック方法についても検討を行い、各種文献調査を実施したほか、既存のコアサンプリング手法を整理した。さらに、平成24年度に策定したロードマップのブラッシュアップ方法を検討した結果、評価シナリオを想定して、時系列で開発のプライオリティを整理するという方針を得た。

(b) ケーブル・システム安全

ケーブルの通常時の絶縁性能に影響を及ぼす要因を6つの視点（材料・環境・分類・試験・監視・メカニズム）で整理した。また、外的な要因がケーブルの機能喪失に及ぼす原因と機器等に及ぼす展開を整理したほか、絶縁劣化だけでなく外部影響や端子部に拡張を

行った。さらに、設計基準を超える事象がケーブルに及ぼす影響を、絶縁性能のマージンとの関係から整理した。

3) システム安全評価に資する知識ベース構築

(a) 知識ベースシステムの機能要件実現に係る調査研究

a) データベース・知識ベース構築

知識基盤の構築においては、本事業全体の最新研究成果を知識基盤に盛り込むことで発電用原子炉施設の審査業務における最新知見の活用を基本方針として設定し、検討作業を行った。また、知識基盤が持つべき基本的な機能をヒアリング調査等により整理した上で、GUI を中心とした一部の機能についてプロトタイピングを実施し、想定ユーザーによるユーザビリティの検証を行うことによって、基本的な機能実現の方向性を確認した。さらに、対象文献範囲のリスト化（海外文献を含めた範囲特定の考え方）、知識体系化（複数の知識の体系化方法）、データ化（関係性情報作成のためのテキスト化要件、収録のための著作権問題、新規文献登録手続き等）、などにおける様々な今後の課題を抽出・整理した。

b) システム安全評価データ共有・活用手法

システム安全評価データ共有・活用手法については、原子力システム安全の評価と実現に資するデータの、ダイジェスト情報（DJ）のみを共有し、それらの関係を可視化した上でデータの結合・分析シナリオの検討を行う IMDJ を実験的に実施した。その結果、IMDJ 実施中により獲得された DJ の価値評価は実施後 2～4 ヶ月後も固着し、データ入手方法についての情報提供が増すなどの知見が得られた。また、視線運動計測によってデータとデータ利用シナリオの関係に対する意識が当該専門家に生まれていることが観測されるなどの成果を得た。

(b) プロアクティブ潜在事象評価

潜在事象抽出手法として、体系的 elicitation による議論と PIRT 評価の組合せによる抽出作業を行った。具体的には、プロアクティブ専門家会議及び PMDM/LTO に関する国際シンポジウムを開催し、検討を行った。その結果、提起された各劣化事象に対する感受性レベル、知識レベル及び管理レベルを明示した。また、PIRT 結果を分析した結果、潜在的劣化事象としての将来的に発現可能性が高い劣化事象として 5 つの劣化事象を提起することができた。さらに、PIRT 点数付け結果において、対照的な点数をつけた専門家 3 名に対してインタビューを実施し、潜在事象に対する意見相違を分析した。

抽出されたプロアクティブ潜在事象について将来的な規制・基準への反映のための高経年化対応技術戦略マップへの反映検討（IAEA 国際共同研究テーマへの提案）を行い、可能なテーマを提案した。

(2) 経年劣化事象に係る安全基盤研究の実施

1) 炉内構造物の経年劣化に係る評価手法の高度化

(a) 中性子照射材の破壊強度予測法の検討

中性子照射材の破壊強度予測法の検討として、ステンレス鋼照射材について、引張特性、破壊靱性、IASCC、応力緩和、スウェリングについて MS Excel 形式のデータベースの作成を完了した。引張特性、応力歪関係について dpa をパラメータとした傾向式の作成、破壊靱性について引張特性に基づくモデル式の検討、照射炉や材料の異なるデータの共通傾向式の基礎検討を行った。また、画像相関法等を適用した照射材試験を行い 12dpa までの真歪真応力データを拡充するとともに、ヤング率が照射量にほとんど依存しないことを確認した。さらに、画像相関法等によるステンレス鋼の局所歪・応力測定を行い、破壊機構検討のための結晶塑性解析モデルが妥当であることを確認し、破壊挙動のばらつき要因となりうる局所応力の範囲が照射量の増加により大きくなることを再確認した。

(b) 中性子照射材の破壊評価法に検討

中性子照射材の破壊評価法の検討として、低延性模擬のステンレス鋼加工材の破壊靱性試験により、強度と破壊靱性の関係を把握した。また、画像相関法によるき裂先端局所歪測定に成功し延性き裂発生条件の検討に見通しを得た。維持規格を念頭に置いた照射材の破壊評価法案を検討し、作成した照射材特性傾向式を用いて破壊強度の解析を行い、照射量の増加に伴う破壊強度の変化に関する結果を得た。さらに、照射量、材料特性に加えてき裂寸法のばらつきを考慮したモンテカルロシミュレーションによる破壊強度のばらつきへの影響を検討し、照射量の増加に伴いばらつきが増加する結果を得た。

2) 疲労に伴う圧力バウンダリの構造健全性評価と劣化対策の高度化

(a) 疲労健全性評価グランドデザイン構築

疲労に関する米国の規格改訂動向、国内外の最新研究動向や実機疲労損傷事例の詳細な分析をもとに、疲労評価グランドデザイン見直しの中間取りまとめを行った。また、き裂進展予測モデルを取り入れた疲労評価体系の構築を目標に、応力集中や多軸応力場、環境効果の影響などの実機条件を考慮するための疲労試験を実施し、「仮想き裂成長曲線」におけるき裂発生・成長モデルの拡張について検討を行った。さらに、「仮想き裂成長曲線」をシステム安全評価や保全計画に活用するための方策について検討し、基本的な枠組みを取りまとめた。

(b) 環境疲労メカニズム解明と評価手法高度化

時空間解析による整理においては、平成 24 年度までに指摘された微小き裂の長さ毎に進展速度が異なるため、環境中中断試験片によりき裂長さ毎の速度を評価した。微小き裂進展挙動と破壊力学的き裂進展挙動はより直接的に比較・整理できる事を示した。また、機

構的に両者の共通性について説明を与えることが可能となった。時空間解析による整理の結果により、微小き裂に対して力学的因子が主要因であることが明らかになった。

水素の影響検討と皮膜損傷度評価のため、低ひずみ速度負荷による試験を実施した。極端な条件を模擬するために加工度を上げた試験片を対象とした結果、粒内+粒界割れが発生・進展する結果が得られた。このことで、メカノケミカルプロセス(環境因子+力学因子)としてメカニズムを捉えることの妥当性が支持された。

以上により、き裂発生から巨視的き裂進展までの力学因子影響度の詳細調査が連続的モデルの構築につながることを可能性を確認できた。

(c) 疲労割れ非破壊評価の高信頼化

原子力発電所のシステム安全の観点から、原子力安全あるいは安全機能と検査の関係および検査の在り方について検討し、全体的な大きな骨組みを明確にすることができた。また、原子炉系を構成する主要系統を構成する機器と、検査に必要な性能および実証試験で得られた検査性能の情報を収集し整理した。

従来及び先端非破壊検査手法を用い、平成 24 年度の PIRT 手法により抽出された重要課題に対して、その影響度合いを評価した。知識レベルを向上させ、検査手法の有効性を示すことができた。

PARENT の実機を模擬した試験片に対して、従来および先端非破壊検査手法で測定することにより、その有効性と検査の課題を抽出した。

特別点検部位を対象に検査に適用する検査技術とその検査精度と信頼性の情報を収集し整理した。

(d) 熱疲労評価手法の高度化

熱疲労評価手法の高度化の研究においては、熱疲労メカニズム解明に基づく安全評価手法の高度化、シミュレーション技術の知識ベース構築、システム安全評価のための劣化予測式の提示に関する研究を実施した。熱疲労メカニズム解明に基づく安全評価手法の高度化では、複数の研究成果に基づき、熱疲労の荷重発生から破壊までの熱疲労現象全体のメカニズムと関連する評価技術を記載した、技術情報基盤の入口となるガイダンスとなる知見を得た。シミュレーション技術の知識ベース構築では、配管合流部の長期温度変動評価及び流体構造連成解析を通じて、実験との比較やモデルの検証を実施し、知識ベース構築に資する熱疲労評価手法についての知見を得た。システム安全評価のための劣化予測式の提示については、荷重と強度の不確実性因子としてそれぞれ熱伝達係数、疲労曲線のばらつきを考慮したき裂発生確率評価を行うとともに、リスク評価を可能とするための破損確率評価法の提案についての研究を実施し、簡易に評価可能な実用的な破損確率予測式の枠組みを提案した。また、配管熱疲労に関する実用的な信頼性評価手法の検討を実施し、スクリーニングによる段階的な評価の枠組みについて示した。

3) 電気・計装システムの長期健全性評価に係る調査研究

(a) 原子力発電所低圧ケーブルの非破壊劣化診断法の選定と適用可能性の検証

当該事業で取り扱った診断手法は、実布設環境においても劣化位置を高感度に検出できる可能性を確認した。当診断手法は、FR-EPDM 絶縁 3 芯ケーブルにおいて、ACA の JNES 劣化指標管理値(破断伸び値)230%よりも軽度の劣化である 430%の破断伸び値の劣化位置標定ができることを確認した。また、当診断手法は、FR-EPDM 絶縁 3 芯ケーブルにおいて、熱・放射線劣化箇所だけでなく、異常温度箇所、歪み箇所についても位置標定が可能であることを確認した。

(b) 原子力発電所に布設されたケーブルの高温・高放射線環境下での絶縁機能低下メカニズムの解明

絶縁機能低下メカニズムの解明について、難燃剤である水酸化マグネシウムは加熱初期に化学発光を呈することより、高分子材料の酸化開始前における難燃剤の状態を化学発光測定により検証できることを確認した。SPM(走査型プローブ顕微鏡)により、試料表面の微視的な硬度変化が測定可能であることを確認した。BWR 想定環境である酸素濃度 5 %で劣化させた試料においても、酸化防止剤限界論が成り立つこと、および OIT(酸化誘導期間)測定が効果的であることを明らかとした。

4) コンクリート構造物の長期健全性評価に係る調査研究

(a) コンクリート構造物の複合劣化メカニズム解明と長期健全性評価手法の高度化

既往研究調査より各材料特性の劣化速度と鉄筋コンクリート部材の構造性能の低下の評価の枠組みを示した。

短期間に高温の熱影響を受けたコンクリートを想定し、それらのコンクリートにひび割れが発生するメカニズムや、その後のひび割れ進展に関して破壊力学的手法等を用いて明らかにした。

X線画像を用いた内部鉄筋の腐食度の評価方法を提案した。

複合劣化促進試験により、炭酸ガス、塩化物および温度湿度の影響を受けた鉄筋の腐食と鉄筋の力学的性状との関係を把握し鉄筋の力学性状の推定方法を示した。

複合劣化作用を受けた鉄筋コンクリート部材の強度低下及び剛性劣化を評価するための材料モデルを実験等に基づき提案し、構造の解析手法への適用を図ることを目指し、カットオフ筋の付着割裂防止筋量をパラメータとする実験を行い、その効果を明らかにした。

コンクリート強度および横補強筋が鉄筋コンクリート梁部材の鉄筋腐食ひび割れ挙動に及ぼす影響を明らかにした。

(b) 放射線照射を伴うコンクリート構造物の健全性評価手法の検討

中性子照射試験を 2013 年 9 月 5 日に開始し、相互作用試験および物性試験を行った。中

中性子のコンクリートに及ぼす影響のうち、コンクリート中の水の放射線分解に関する知見を得た。しかし、経時変化に関する要因は複雑で、継続してメカニズム解明検討を続ける必要がある。

昨年度から継続して、ガンマ線照射試験を実施した。物理試験の結果、照射量の小さい範囲でのコンクリートの強度およびヤング率のデータを整備した。強度およびヤング率は、主として熱影響に支配されている傾向を確認した。

中性子およびガンマ線による強度低下メカニズムを考慮できる、解析システムの高度化に成功した。骨材膨張の観点からアルカリ骨材反応を生じたコンクリート強度とヤング率、膨張ひずみの関係を取得し、この工学式を用いて強度低下を考慮可能なモデルを構築することができた。

(3) 事業進捗の管理と成果総括に係る活動の実施

より効果的かつ実効的な研究の推進のため、専門性の高い大学等の研究機関との連携の下、システム安全研究を含めた技術情報基盤の整備ならびに安全基盤研究を遂行した。連携する複数の研究機関が実施する研究に対して、効率的かつ適切な経費支出の下で実施されていることを含めて適切な管理を行った。また、原子力規制庁（NRA）の出席の下、本事業における各研究の取りまとめ代表者が委員となり、関連する NRA 管轄の安全研究事業、原子力安全基盤機構が実施する安全研究事業の担当者、オブザーバーの形で産業界メンバーが参加する形で、事業全体の方向性の確認、事業成果の総括を行う総括検討会を設置・運営した。そして、各研究の参画メンバーが、研究実施に必要な情報交換・共有、学術的な議論、論文の取りまとめや対外発表等の活動を行う拠点としての研究会合を設置し、個別研究の成果集約機能をもたせ運営した。

また、国際協力・連携活動の一環として、欧米ならびに中国から関連分野の有識者を招聘し、国際会議 ISaG2013 を開催した。国際機関である IAEA への情報発信や活動への参画・協力、情報収集活動も合わせて実施した。

さらに、本事業で実施する研究テーマ全てについて、NRA ならびに事業関係者参加の下、平成 25 年度成果を取りまとめて報告を行う会合を開催した。

これら事業総括活動を通じて、平成 25 年度事業は当初目標を達成し、事業成果を取りまとめた。

謝辞

本研究は、株式会社三菱総合研究所が原子力規制庁より委託を受け、再委託契約の下で、北海道大学、東北大学、長岡技術科学大学、東京大学、東京工業大学、名古屋大学、福井大学、京都大学、大阪大学、首都大学東京、福島工業高等専門学校、早稲田大学、立命館大学、発電設備技術検査協会、原子力安全システム研究所及び日本核燃料開発とコンソーシアムを形成して実施したものです。

したがって、本報告書は株式会社三菱総合研究所のクレジットで作成しておりますが、これら再委託先が有するノウハウや知見も含めた研究活動の成果を取りまとめたものです。加えて、専門性の高い知見が必要な研究のとりまとめに際しては、産業界、学术界、官界の方々から構成される個別の委員会や検討会・WG メンバー等から多大なご協力を賜りました。

あらためて、再委託先の各機関ならびにご協力頂いた関係各所に対し、御礼申し上げます。

平成 26 年 3 月
株式会社三菱総合研究所