

NRA 技術報告

NRA Technical Report Series

重大事故環境下における ケーブルの絶縁特性の分析

Analysis of Insulation Performance of Cables
under Severe Accident Environmental Conditions

皆川 武史、池田 雅昭、田口 清貴

MINAKAWA Takefumi, IKEDA Masaaki, and TAGUCHI Kiyotaka

システム安全研究部門

Division of Research for Reactor System Safety

原子力規制庁

長官官房技術基盤グループ

Regulatory Standard and Research Department,

Secretariat of Nuclear Regulation Authority (S/NRA/R)

原子力規制委員会
Nuclear Regulation Authority

令和元年 11 月

November 2019

本報告は、原子力規制庁長官官房技術基盤グループが行った安全研究等の成果をまとめたものです。原子力規制委員会は、これらの成果が広く利用されることを期待し適時に公表することとしています。なお、本報告の内容を規制基準、評価ガイド等として審査や検査に活用する場合には、別途原子力規制委員会の判断が行われることとなります。

本レポートの内容に関するご質問は、下記にお問い合わせください。

原子力規制庁 長官官房 技術基盤グループ システム安全研究部門
〒106-8450 東京都港区六本木 1-9-9 六本木ファーストビル
電 話：03-5114-2223
ファックス：03-5114-2233

重大事故環境下におけるケーブルの絶縁特性の分析

原子力規制庁 長官官房技術基盤グループ

システム安全研究部門

皆川 武史 池田 雅昭 田口 清貴

要 旨

原子力発電所のケーブルは、機器へ電力を供給する機能又は機器の監視若しくは制御のための信号伝達機能を有する。安全系ケーブルは、供用期間中において、例えば冷却材喪失事故のような設計基準事故を含め、想定される環境条件下において、機能を維持することが求められる。さらに、2013年に施行された日本の規制基準では、重大事故(以下「SA」という。)対策が要求されており、SA対策の一環として、SAに対処するために必要なパラメータを推定するために有効な情報を把握できる設備の設置が求められている。重大事故等対処設備に属する一部の安全系ケーブルは、この目的で使用される。これらのケーブルは、供用期間中の通常運転時の経年劣化を受けた後であっても、SA環境条件下において意図した機能を維持することが必要である。

原子力規制庁長官官房技術基盤グループは、ケーブル劣化に関する研究を行い、SA条件下における電気絶縁性能を調べるための試験を学校法人早稲田大学への委託研究事業において行った。難燃エチレンプロピレンジエンゴム絶縁ケーブル及びシリコンゴム絶縁ケーブルを熱・放射線同時暴露により経年劣化を模擬し、SAを模擬するための放射線暴露及び蒸気暴露を行った。また、蒸気暴露中において、ケーブルの電気絶縁抵抗の監視を行った。

その結果、蒸気暴露中においては、蒸気暴露による温度上昇及び蒸気による吸湿により、ケーブルの電気絶縁抵抗が大きく低下することが分かった。計装ケーブルの絶縁抵抗が低下すると、測定結果に含まれる誤差が大きくなる可能性がある。したがって、ケーブルのSA時の健全性評価においては、蒸気暴露中にケーブルの絶縁抵抗を測定し、考慮することが重要である。

Analysis of Insulation Performance of Cables
under Severe Accident Environmental Conditions

MINAKAWA Takefumi, Ikeda Masaaki, and TAGUCHI Kiyotaka
Division of Research for Reactor System Safety,
Regulatory Standard and Research Department,
Secretariat of Nuclear Regulation Authority (S/NRA/R)

Abstract

The cables used in nuclear power plants supply electric power or transmit signals for monitoring and/or controlling equipment. Safety-related cables are required to maintain their intended functions under all the postulated environmental conditions, including design basis accidents, such as a loss-of-coolant accident, throughout their service life. In addition, the regulatory requirements in Japan, which were put into effect in 2013, require measures for the prevention of a severe accident (SA) as well as mitigation of the consequences. One of these measures includes a requirement for the installation of equipment that can monitor the information that is necessary to estimate parameters for coping with SAs. Certain safety-related cables in a category called “SA equipment” are used for this purpose. These cables are required to maintain their intended functions during SA environments after having been aged under normal operating conditions throughout their service lives.

The Regulatory Standard and Research Department, Secretariat of Nuclear Regulation Authority (S/NRA/R), conducted research on cable aging, in which a series of tests were conducted in a research program entrusted to Waseda University, to examine the electrical insulation performance of the cables under SA conditions. Cables insulated with either flame-retardant ethylene propylene diene rubber or silicone rubber were pre-aged through simultaneous thermal and radiation exposure. Then these cables were exposed to high-dose radiation and high-temperature steam to simulate an SA. The electrical insulation resistance of the cables was monitored during the steam exposure.

It was found that the electrical insulation resistance of the cables decreased significantly during the steam exposure owing to elevated temperature and moisture intrusion. The reduced insulation resistance of the instrumentation cables may cause an increase in measurement error. Therefore, it is important to consider the electrical insulation resistance of cables, measured during the steam exposure in the cable test, to evaluate their integrity under possible SA conditions.

目 次

	頁
1. 序論	1
1. 1 背景及び目的.....	1
1. 2 本技術報告関連の既発表論文等	5
2. 試験方法	6
2. 1 試料	6
2. 2 試験項目	8
2. 2. 1 経年劣化の模擬	10
2. 2. 2 重大事故の模擬	11
2. 2. 3 耐電圧試験	24
3. 試験結果	25
3. 1 絶縁抵抗測定	25
3. 1. 1 蒸気暴露中のケーブルの絶縁抵抗	25
3. 1. 2 大気中加熱時のケーブルの絶縁抵抗	31
3. 2 比誘電率測定	34
3. 2. 1 蒸気暴露中の絶縁体の比誘電率	34
3. 2. 2 大気中加熱時の絶縁体の比誘電率	37
3. 3 耐電圧試験	40
4. 考察	44
4. 1 蒸気暴露時のケーブルの絶縁抵抗低下の要因について	44
4. 1. 1 実用絶縁ゴムの電気伝導現象の理論	44
4. 1. 2 蒸気暴露時の絶縁体内における蒸気の拡散について	45
4. 1. 3 蒸気暴露前、暴露中及び暴露後のケーブルの絶縁抵抗について	48
4. 2 蒸気暴露時のケーブルの絶縁性能に与える経年劣化の影響について	57
4. 3 ケーブルの絶縁抵抗低下の影響について	57
4. 3. 1 熱電対温度計	57
4. 3. 2 圧力伝送器	60
4. 4 重大事故等時のケーブル健全性評価手法について	62
5. まとめ	62
参考文献一覧	64
執筆者一覧	71
修正履歴	72

表 目 次

		頁
表 2.1	試験ケーブルの製造メーカー、名称、材料、構造及び長さ	7
表 2.2	ケーブルの健全性評価規格等における蒸気暴露中の試験項目	9
表 2.3	ケーブルの経年劣化の模擬試験条件	11
表 2.4	経年劣化の模擬試験及び事故模擬試験の条件(SiR ケーブル(B))	12
表 2.5	経年劣化の模擬試験及び事故模擬試験の条件(FR-EPDM ケーブル(B))	12
表 2.6	経年劣化の模擬試験及び事故模擬試験の条件(SiR ケーブル(P))	13
表 2.7	経年劣化の模擬試験及び事故模擬試験の条件(FR-EPDM ケーブル(P))	13
表 2.8	ケーブルの導体中心間の距離(D)及び導体半径(d)	24
表 3.1	耐電圧試験結果(SiR ケーブル(B))	40
表 3.2	耐電圧試験結果(FR-EPDM ケーブル(B))	40
表 3.3	耐電圧試験結果(SiR ケーブル(P))	41
表 3.4	耐電圧試験結果(FR-EPDM ケーブル(P))	41
表 4.1	蒸気暴露前、暴露中及び暴露後のケーブルの絶縁抵抗の変化について想定される要因	56
表 4.2	熱電対回路の絶縁抵抗低下による測定誤差の計算値	59

図 目 次

		頁
図 1.1	原子力発電所の電気・計装の EQ プログラムにおけるプロセス及び活動	2
図 1.2	電気学会推奨案と JNES ガイドの試験手順	3
図 2.1	試験ケーブルの構造	7
図 2.2	JNES ガイドで示されているケーブル試験手順及び本研究の試験手順	9
図 2.3	ガンマ線照射施設内に設置した恒温槽(国立研究開発法人量子科学技術研究開発機構高崎量子応用研究所)	10
図 2.4	重大事故模擬試験の温度及び圧力条件(BWR 用ケーブル)	15
図 2.5	蒸気暴露試験装置(日立金属株式会社)	16
図 2.6	重大事故模擬試験の温度及び圧力条件(PWR 用ケーブル)	18
図 2.7	蒸気暴露試験装置(株式会社フジクラ・ダイヤケーブル)	19
図 2.8	ケーブル大気中加熱試験の装置	20
図 2.9	蒸気暴露試験及び絶縁抵抗測定回路の模式図	22
図 2.10	試験ケーブルの断面構造	23
図 2.11	耐電圧試験の実施状況	24

図 3.1	171°C で 336 時間の蒸気暴露中及びその後のケーブルの長さ 1 メートル当たりの絶縁抵抗の経時変化(BWR 用ケーブル).....	27
図 3.2	171、200、220°C で 168 時間の蒸気暴露中及びその後のケーブルの長さ 1 メートル当たりの絶縁抵抗の経時変化(BWR 用ケーブル).....	28
図 3.3	155°C で 336 時間の蒸気暴露中及びその後のケーブルの長さ 1 メートル当たりの絶縁抵抗の経時変化(PWR 用ケーブル).....	29
図 3.4	200、220°C で 168 時間の蒸気暴露中及びその後のケーブルの長さ 1 メートル当たりの絶縁抵抗の経時変化(PWR 用ケーブル).....	30
図 3.5	200°C で 168 時間の大気中加熱及びその後のケーブルの長さ 1 メートル当たりの絶縁抵抗の経時変化(BWR 用ケーブル).....	32
図 3.6	200°C で 168 時間の大気中加熱及びその後のケーブルの長さ 1 メートル当たりの絶縁抵抗の経時変化(PWR 用ケーブル).....	33
図 3.7	171、200、220°C で 168 時間の蒸気暴露中及びその後のケーブル絶縁体の比誘電率の経時変化(BWR 用ケーブル).....	35
図 3.8	200、220°C で 168 時間の蒸気暴露中及びその後のケーブル絶縁体の比誘電率の経時変化(PWR 用ケーブル).....	36
図 3.9	200°C で 168 時間の大気中加熱中及びその後のケーブル絶縁体の比誘電率の経時変化(BWR 用ケーブル).....	38
図 3.10	200°C で 168 時間の大気中加熱中及びその後のケーブル絶縁体の比誘電率の経時変化(PWR 用ケーブル).....	39
図 3.11	耐電圧試験後のケーブル供試体	42, 43
図 4.1	熱重量測定により評価した FR-EPDM 絶縁体の重量の温度依存性.....	47
図 4.2	劣化プロセス I・II 及び 220°C の蒸気暴露を行った FR-EPDM ケーブル(B)の絶縁体の赤外吸収スペクトル	48
図 4.3	171°C で 168 時間の蒸気暴露前、暴露中及び暴露後のケーブル長さ 1 メートル当たりの絶縁抵抗の経時変化(劣化プロセス I ありの SiR ケーブル(B))....	51
図 4.4	171°C で 168 時間の蒸気暴露前、暴露中及び暴露後のケーブル長さ 1 メートル当たりの絶縁抵抗の経時変化(劣化プロセス I ありの FR-EPDM ケーブル(B)).....	51
図 4.5	200°C で 168 時間の蒸気暴露前、暴露中及び暴露後のケーブル長さ 1 メートル当たりの絶縁抵抗の経時変化(劣化プロセス I ありの SiR ケーブル(B))....	52
図 4.6	200°C で 168 時間の蒸気暴露前、暴露中及び暴露後のケーブル長さ 1 メートル当たりの絶縁抵抗の経時変化(劣化プロセス I ありの FR-EPDM ケーブル(B)).....	52
図 4.7	220°C で 168 時間の蒸気暴露前、暴露中及び暴露後のケーブル長さ 1 メートル	

	ル当たりの絶縁抵抗の経時変化(劣化プロセス I ありの SiR ケーブル(B))....53
図 4.8	220°C で 168 時間の蒸気暴露前、暴露中及び暴露後のケーブル長さ 1 メートル当たりの絶縁抵抗の経時変化(劣化プロセス I ありの FR-EPDM ケーブル(B)).....53
図 4.9	200°C で 168 時間の蒸気暴露前、暴露中及び暴露後のケーブル長さ 1 メートル当たりの絶縁抵抗の経時変化(劣化プロセス I ありの SiR ケーブル(P))54
図 4.10	200°C で 168 時間の蒸気暴露前、暴露中及び暴露後のケーブル長さ 1 メートル当たりの絶縁抵抗の経時変化(劣化プロセス I ありの FR-EPDM ケーブル(P))54
図 4.11	220°C で 168 時間の蒸気暴露前、暴露中及び暴露後のケーブル長さ 1 メートル当たりの絶縁抵抗の経時変化(劣化プロセス I ありの SiR ケーブル(P))55
図 4.12	220°C で 168 時間の蒸気暴露前、暴露中及び暴露後のケーブル長さ 1 メートル当たりの絶縁抵抗の経時変化(劣化プロセス I ありの FR-EPDM ケーブル(P))55
図 4.13	熱電対回路の等価回路58
図 4.14	熱電対回路の絶縁抵抗と測定温度の関係58
図 4.15	熱電対回路の絶縁抵抗と測定温度の誤差の関係.....59
図 4.16	2 線式伝送器回路の等価回路60
図 4.17	伝送器回路の絶縁抵抗とディストリビュータ内の回路の電流及び出力電圧の関係61
図 4.18	伝送器回路の絶縁抵抗と出力信号の誤差の関係.....61

略 語 表

ACA	Assessment of Cable Aging for Nuclear Power Plants (原子力プラントのケーブル経年変化評価技術調査研究)
BWR	Boiling Water Reactor (沸騰水型原子炉)
CR	Polychloroprene Rubber (クロロブレンゴム)
CSM	Chlorosulfonated Polyethylene (クロルスルホン化ポリエチレン)
DBA	Design Basis Accident (設計基準事故)
EQ	Equipment Qualification (機器認定)
FR-EPDM	Flame-retardant Ethylene Propylene Diene Rubber (難燃エチレンプロピレンジエンゴム)
IAEA	International Atomic Energy Agency (国際原子力機関)

IEC	International Electrotechnical Commission (国際電気標準会議)
IEEE	Institute of Electrical and Electronics Engineers (米国電気電子学会)
JEAG	Japan Electric Association Guide (電気技術指針)
JIS	Japanese Industrial Standards (日本産業規格)
JNES	Japan Nuclear Energy Safety Organization (原子力安全基盤機構)
LOCA	Loss of Coolant Accident (冷却材喪失事故)
NPEC	Nuclear Power Engineering Committee (原子力工学委員会)
PWR	Pressurized Water Reactor (加圧水型原子炉)
SA	Severe Accident (重大事故)
SiR	Silicone Rubber (シリコンゴム)
TECDOC	Technical Documents ((IAEA の) 技術文書)

用語の定義

重大事故	発電用原子炉の炉心の著しい損傷又は核燃料物質貯蔵設備に貯蔵する燃料体又は使用済燃料の著しい損傷 ¹ を伴う事故。本報告においては、特に断りのない限り、前者を指す。
重大事故等	重大事故に至るおそれがある事故(運転時の異常な過渡変化及び設計基準事故を除く)又は重大事故 ²
重大事故等対処設備	重大事故に至るおそれがある事故(運転時の異常な過渡変化及び設計基準事故を除く)又は重大事故に対処するための機能を有する設備 ²
設計基準事故	発生頻度が運転時の異常な過渡変化より低い異常な状態であって、当該状態が発生した場合には発電用原子炉施設から多量の放射性物質が放出するおそれがあるものとして安全設計上想定すべきもの ³
低圧	交流 600V 以下又は直流 750V 以下 ⁴ の電圧区分
安全系	原子炉の安全停止若しくは炉心の残留熱除去又は運転時の異常な過渡変化及び設計基準事故の影響を限定するために設置される安全上重要な系統 ⁵
ケーブル	電線(絶縁物で被覆した電気導体) ⁶ の上にシース(保護外被)を施したもの ⁷

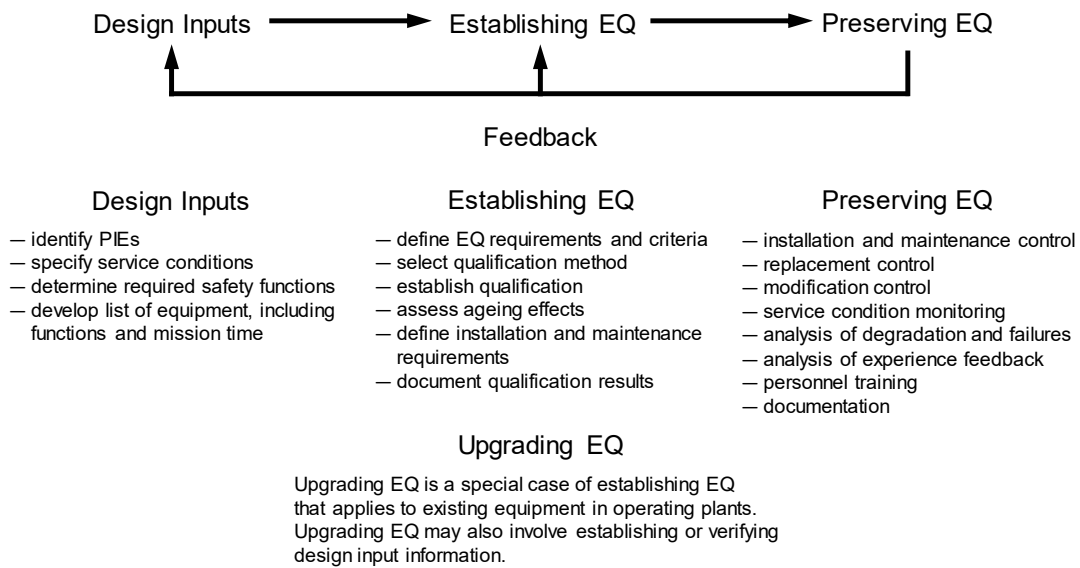
1. 序論

1. 1 背景及び目的

原子力発電所で使用されるケーブルは、発電所内の機器に電力を供給する機能や、機器を監視・制御するための信号を伝送する重要な機能を担う。また、ケーブルは、長期間使用されることが想定される機器の一つである⁸。しかしながら、ケーブルの絶縁材料には、高分子が使用されており、通常運転時に熱や放射線環境にさらされることにより、徐々に経年劣化が進行する。さらに、事故発生時に事故の拡大を防止し速やかに収束させるための安全機能を担うシステムで使用されているケーブル(以下「安全系ケーブル」という。)の一部は、長期間使用されて経年劣化した後に、冷却材喪失事故等の設計基準事故(Design Basis Accident: DBA)が発生し、原子炉格納容器内等において蒸気及び高線量率・大線量の放射線等の事故時雰囲気暴露されても絶縁性能を維持することが求められる⁹。

“Safety of Nuclear Power Plants: Design” (IAEA Specific Safety Requirements No. SSR-2/1)¹⁰(以下「SSR-2/1」という。)では、Requirement 30(Qualification of items important to safety)において、原子力発電所の安全上重要な設備が、供用期間全体にわたって、使用環境下において所定の機能を遂行できることを検証するための認定プログラム(qualification programme)を実施すること及び認定プログラムにおいて、環境条件や環境要因による経年劣化効果等を考慮することが要求されている。また、“Safety of Nuclear Power Plants Commissioning and Operation” (IAEA Specific Safety Requirements No. SSR-2/2)¹¹では、Requirement 13(Equipment qualification)において、安全系の機器等が所定の性能を満たすことを確認するため、体系的な評価を行うことが要求されている。

“Ageing Management and Development of a Programme for Long Term Operation of Nuclear Power Plants”(IAEA Specific Safety Guide No. SSG-48)¹²においては、SSR-2/1¹⁰に基づく機器認定プログラム(equipment qualification programme、以下「EQプログラム」という。)の実施、EQプログラムにおける文書の整備、EQプログラムの有効性評価の実施等が規定されている。さらに、IAEA Safety Reports Series No. 3¹³では、原子力発電所の安全上重要な電気・計装設備等について、想定される使用条件において所定の安全機能を遂行できることを検証及び保証するためのEQプログラムに関する具体的な事例、プロセス及び手法が示されている。EQプログラムの概要を図1.1に示す¹³。図1.1に示すように、EQプログラムでは、まず、「Design inputs」において、対象機器の抽出、要求性能の特定及び各個別プラントにおける想定使用環境(通常運転時及び事故時)の特定を行う。次に「Establishing EQ」では、健全性評価試験等により、想定される使用条件において所定の安全機能を遂行できることを検証し、確認する。これを機器認定(equipment qualification)という⁵。また、この検証結果に基づき、機器認定を維持するために必要な保守管理活動を特定する。さらに、認定に用いた健全性評価試験等の根拠資料の文書化を行う。その後、「Preserving EQ」においては、前の項目で特定した保守管理、機器の状態監視、使用環境の監視、文書化¹⁴等を行う。また、ここ



出典) International Atomic Energy Agency, “Equipment Qualification in Operational Nuclear Power Plants: Upgrading, Preserving and Reviewing”, IAEA Safety Reports Series No. 3, 1998¹³

図 1.1 原子力発電所の電気・計装の EQ プログラムにおけるプロセス及び活動

Fig. 1.1 Schematic diagram of the process and activities in the EQ program for the electrical and I&C equipment in nuclear power plants

で得られた情報及び運転経験・研究開発の知見については、適宜フィードバックされ、新たな評価に反映される¹³。このように、安全上重要な電気・計装設備等の健全性評価試験は、保守管理の内容を決定するための根拠を与えるものであり、EQプログラムの中において重要な要素であると言える。

安全上重要な電気・計装設備等の健全性評価試験については、米国電気電子学会(The Institute of Electrical and Electronics Engineers, Inc、以下「IEEE」という。)により、原子力発電所の安全系電気・計装設備の機器認定について規定したIEEE Std 323-1974¹⁵が発行された。さらに、個別機器の規定として、原子力発電所の安全系ケーブル及びスプライス接続の機器認定について規定したIEEE Std 383-1974¹⁶が発行された。これら及びこれらの改定規格は、米国等において、安全系ケーブルの健全性評価に広く用いられてきた^{17,18}。国内においては、1982年に電気学会において、IEEE Std 383-1974¹⁶を参考として、「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」¹⁹(以下「電気学会推奨案」という。)が策定され、安全系ケーブルの設計基準事故時における健全性評価試験法が規定された。

その後、実際の原子力発電所におけるケーブルの劣化状況をより反映した健全性評価手法を整備することを目的として、平成14～20年度に、国の研究プロジェクト「原子力プラントのケーブル経年変化評価技術調査研究」²⁰(以下「ACA研究」という。)が財団法人発電

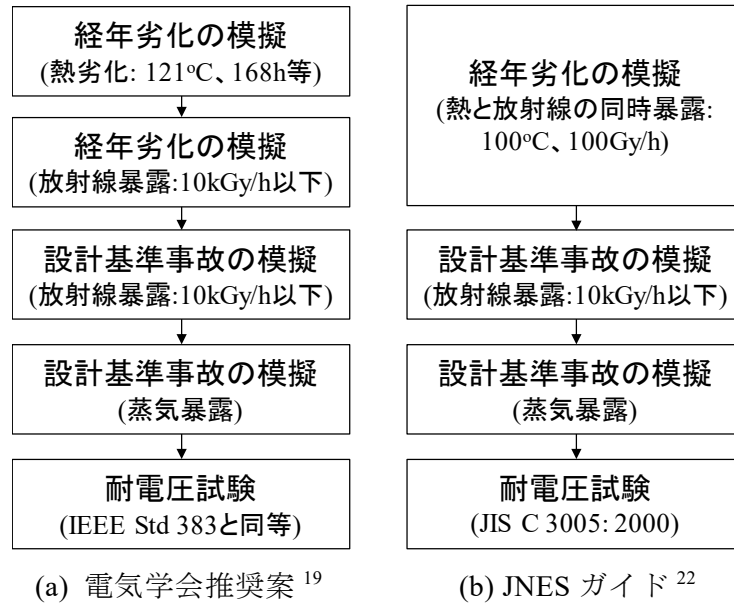


図 1.2 電気学会推奨案と JNES ガイドの試験手順

Fig. 1.2 Test procedures of the IEEJ Recommendation and the JNES Guide

設備技術検査協会により行われた(平成15年10月以降は独立行政法人原子力安全基盤機構に研究移管)。ACA研究²⁰では、設計基準事故時雰囲気において機能要求のあるケーブルの熱・放射線同時暴露環境下による劣化挙動等に関するデータが取得される²¹とともに、経年劣化及び設計基準事故を模擬したケーブルの健全性評価試験が行われた。また、ACA研究²⁰の成果を踏まえ、設計基準事故時を想定した安全系ケーブルの新たな健全性評価手法として、2014年に原子力安全基盤機構のレポート「原子力発電所のケーブル経年変化評価試験ガイド」²²(JNES-RE-2013-2049、以下「JNESガイド」という。)が発行された。JNESガイド²²の手法の電気学会推奨案¹⁹からの主な変更点は、経年劣化の模擬を熱・放射線による同時暴露で行うこと及び健全性判定試験をJIS規格で行うことである。日本電気協会においては、安全系の電気・計装設備の設計基準事象時の耐環境性能の試験方法として、「原子力発電所の安全系電気・計装品の耐環境性能の検証に関する指針」(JEAG4623-2018)²³が策定されている。本指針において、ケーブルについては、電気学会推奨案¹⁹及びJNESガイド²²を用いることが容認されており、これらの手法は設計基準事故を想定したケーブルの健全性評価で用いられている。

平成25年(2013年)に施行された原子力発電所の新たな規制基準「実用発電用原子炉及びその附属施設の位置、構造及び設備の基準に関する規則」では、重大事故対策が要求事項となり²⁴、重大事故に至るおそれがある事故(運転時の異常な過渡変化及び設計基準事故を除く)又は重大事故(以下「重大事故等」という。)に対処するための機能を有する重大事故等対処設備²は、「想定される重大事故等が発生した場合における温度、放射線、荷重その他の使用条件において、重大事故等に対処するために必要な機能を有効に発揮するもので

あること」²⁵と規定された。これにより、重大事故等対処設備に該当する原子炉格納容器内のケーブルは、通常運転時の使用条件による経年劣化を経験した後に、重大事故等が発生した場合においても絶縁性能を維持することが要求されることから、経年劣化及び重大事故等を想定した健全性評価が求められる²⁶⁻²⁸。一方で、このような重大事故等時のケーブルの健全性評価は、従来の設計基準事故時の健全性評価手法を規定した電気学会推奨案¹⁹に基づく試験又は同案の試験項目を参考として実施した試験の結果に基づき行われている^{29,30}。また、重大事故を模擬する蒸気暴露中におけるケーブルの絶縁性能の詳細は明らかではない。

原子力規制庁長官官房技術基盤グループでは、安全研究プロジェクト「運転期間延長認可制度及び高経年化対策制度に係る技術的知見の整備に関する研究」(平成23～28年度)³¹及び「電気・計装設備用高分子材料の長期健全性評価に係る研究」(平成29～31年度(令和元年度))³²を実施した。本技術報告は、上記の背景を踏まえ、最新のケーブル健全性評価試験手法であるJNESガイド²²に基づきケーブルに経年劣化を模擬的に付与した上で、想定される重大事故環境下におけるケーブルの絶縁性能を調べるための試験等を行うことにより、重大事故等時のケーブルの健全性評価手法の高度化を図ることを目的として実施した研究の成果をまとめたものである。

1. 2 本技術報告関連の既発表論文等

本技術報告に記載した成果の一部については、以下に示す論文等において公表済である。

- Takefumi Minakawa, Masaaki Ikeda, Naoshi Hirai, and Yoshimichi Ohki, “Insulation Performance of Safety-related Cables for Nuclear Power Plants under Simulated Severe Accident Conditions”, IEEJ Trans. Fundam. Mater. Vol. 139, No. 2, pp.54-59, 2019.
- Takefumi Minakawa, Masaaki Ikeda, Naoshi Hirai, and Yoshimichi Ohki, “Aging State Analysis of Safety-related Cables for Nuclear Power Plants Exposed to Simulated Accident Conditions,” IEEE Conference on Electrical Insulation and Dielectric Phenomena, 9-2, pp. 765-768, Cancun, Mexico, 2018.10.24.
- 皆川武史、池田雅昭、平井直志、大木義路、“事故模擬環境に暴露した原子力発電所用安全系ケーブルの劣化状態分析”、第48回電気電子絶縁材料システムシンポジウム、愛媛県、愛媛大学、2018.9.11.
- 皆川武史、池田雅昭、平井直志、大木義路、“沸騰水型原子炉用安全系低圧ケーブルの高温蒸気暴露中及びその後の絶縁性能”、日本保全学会第15回学術講演会、福岡県、福岡国際会議場、2018.7.12.
- 皆川武史、平井直志、大木義路、“高温蒸気条件下における原子力発電所用安全系ケーブルの絶縁性能”、電気学会誘電・絶縁材料/電線・ケーブル合同研究会、DEI-18-060、EWC-18-002、大阪府、中央電気倶楽部、2018.3.2.
- 皆川武史、池田雅昭、“重大事故模擬環境下における原子力発電所用安全系ケーブルの絶縁性能”、原子力規制委員会安全研究報告会、2017.10.4.
<http://www.nsr.go.jp/data/000207190.pdf> (2019年11月1日確認)
- Takefumi Minakawa, Masaaki Ikeda, Naoshi Hirai, and Yoshimichi Ohki, “Insulation Performance of Safety-related Cables for Nuclear Power Plants under Simulated Severe Accident Conditions,” Eighth International Symposium on Electrical Insulating Materials, L4, pp. 716-719, Toyohashi, Japan, 2017.9.14.
- 皆川武史、池田雅昭、平井直志、大木義路、“重大事故模擬環境下における原子力発電所用安全系ケーブルの絶縁性能”、日本保全学会第14回学術講演会、愛媛県、ひめぎんホール、2017.8.3.
- 早稲田大学、“平成27年度原子力施設等防災対策等委託費(高経年化技術評価高度化(電気・計装設備の長期健全性評価技術調査研究))事業 成果報告書”、平成28年3月.
- 早稲田大学、“平成28年度原子力施設等防災対策等委託費(高経年化技術評価高度化(電気・計装設備の長期健全性評価技術調査研究))事業 成果報告書”、平成29年3月.
- 皆川武史、池田雅昭、平井直志、大木義路、“重大事故模擬環境に暴露したエチレンプロピレンジエンゴム絶縁ケーブルの劣化状態分析”、電気学会論文誌A、Vol. 139、No.9、pp.380-386、2019.

2. 試験方法

2. 1 試料

国内の原子力発電所の原子炉格納容器内において、一部の安全系ケーブルは重大事故等対処設備と位置付けられ、重大事故等発生時の原子炉格納容器内の事故雰囲気環境下において重大事故等に対処するために必要な機器の温度等を監視するための計装ケーブルとして使用されている。本研究では、このような目的で使用されるケーブルのうち、代表的なケーブルの新品未劣化品を試料として用いた。なお、実際の原子力発電所では、使用用途、目的に応じて、絶縁体及びシース材料は同一であっても、構造等の仕様の異なる様々なケーブルが使用されている。本研究では、ACA研究²⁰で試験実績のある仕様のケーブルを代表として試験した。これらは、沸騰水型原子炉(以下「BWR」という。)で使用されているB社製の難燃エチレンプロピレンジエンゴム絶縁難燃クロロpreneゴムシースケーブル(以下「FR-EPDMケーブル(B)」という。)、加圧水型原子炉(以下「PWR」という。)で使用されているC社製のシリコンゴム絶縁シリコンゴムシースケーブル(以下「SiRケーブル(P)」という。)及び難燃エチレンプロピレンジエンゴム絶縁難燃クロロスルホン化ポリエチレンシースケーブル(以下「FR-EPDMケーブル(P)」という。)である。また、BWRにおいて、安全系ケーブルとして使用されているB社製のシリコンゴム絶縁ガラス編組シースケーブル(以下「SiRケーブル(B)」という。)については、重大事故等対処設備として使用されているという情報はないが、比較参考のため試験対象とした。

表2.1にこれらのケーブルの概要を、図2.1にケーブルの構造を示す。試験ケーブルは、いずれも3芯のケーブルであり、黒、赤及び白の3色の絶縁体を有する。ただし、SiRケーブル(B)については、絶縁体周りのガラス編組に着色されており、絶縁体自体は白色である。また、試験ケーブルの長さは2.5mとした。試験ケーブルの長さについては、JNESガイド²²では3.0mとされているが、ACA研究²⁰において、より短い60cmのケーブルでも試験及び評価が可能であることが確認されている²¹。また、JNESガイド²²では、試験ケーブルの本数に関する規定はないが、本研究では、試験条件ごとにケーブル供試体数n=1又は2で試験を行った。

表2.1 試験ケーブルの製造メーカー、名称、材料、構造及び長さ

Table 2.1 Manufacturer, name, material, structure, and length of the tested cables

製造メーカー	名称 (本報告書における略称)	材料	構造				長さ (m)
			公称ケーブル外径 (mm)	公称導体サイズ (mm ²)	導体数	公称絶縁体厚さ (mm)	
B社	SiR ケーブル(B)	絶縁体：シリコーンゴム シース：ガラス編組	10.5	2.0	3	1.1	2.5
B社	FR-EPDM ケーブル(B)	絶縁体：難燃エチレンプロピレンジエンゴム シース：難燃クロロブレンゴム	11.5	2.0	3	0.8	2.5
C社	SiR ケーブル(P)	絶縁体：シリコーンゴム シース：シリコーンゴム	12.0	1.25	3	0.76	2.5
C社	FR-EPDM ケーブル(P)	絶縁体：難燃エチレンプロピレンジエンゴム シース：難燃クロロスルホン化ポリエチレン	11.5	2.0	3	0.8	2.5

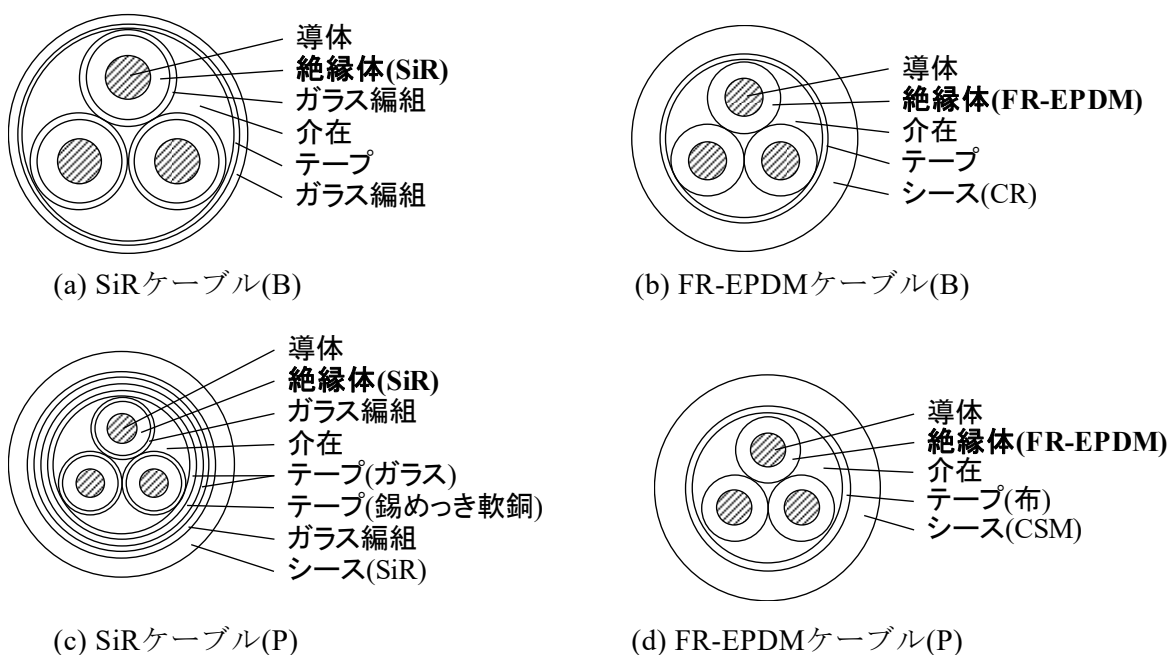


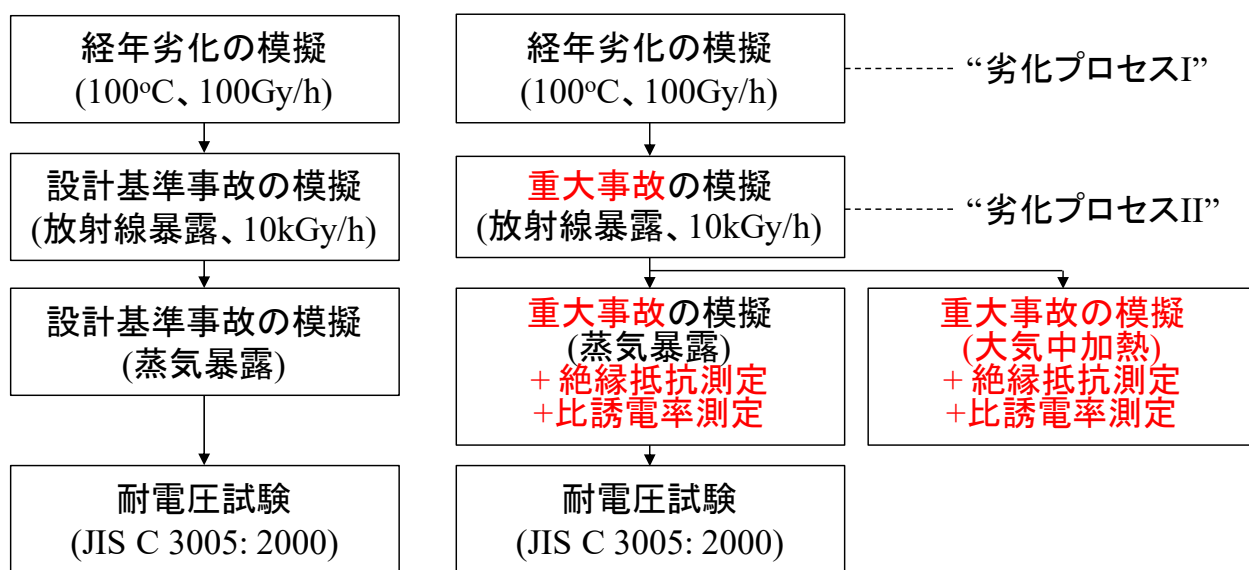
図2.1 試験ケーブルの構造

Fig. 2.1 Structures of the tested cables

2. 2 試験項目

本研究では、設計基準事故を考慮した最新の健全性評価試験手法であるJNESガイド²²で示されている試験手順を参考として、経年劣化及び重大事故等を模擬する試験を行うこととした。図2.2に、JNESガイド²²のケーブル健全性評価手順と本研究の試験手順を示す。図2.2(a)に示すように、JNESガイド²²では、経年劣化を模擬するため、熱・放射線同時暴露によりケーブルに劣化を付与した後、設計基準事故時の放射線環境を模擬する放射線暴露を行い、その後、設計基準事故時の蒸気環境を模擬する蒸気暴露を行うとされている。最後に、健全性判定試験として、日本産業規格「ゴム・プラスチック絶縁電線試験方法」(JIS C 3005: 2000)³³に基づく耐電圧試験を行うことが規定されている。また、蒸気暴露中には、ケーブルの機能維持を確認するため、供試ケーブルの監視パラメータを監視することとされており、低圧ケーブルについては、監視パラメータの例として、定格電圧の課電状態の監視等が示されている。表2.2にJNESガイド²²及びその他の設計基準事故を想定したケーブルの健全性評価規格等^{16,19,34}で規定されている蒸気暴露中の試験項目を示す。設計基準事故を考慮したケーブルの健全性評価試験では、蒸気暴露中のケーブルの課電・通電状態が監視される。

本研究では、重大事故時のケーブルの絶縁性能を詳細に調査するため、図2.2(b)に示すように、JNESガイド²²の試験項目を一部変更するとともに、測定項目を追加した試験を行った。すなわち、新品未劣化ケーブルをJNESガイド²²の手法により熱・放射線同時暴露により劣化を付与した後、重大事故等(重大事故に至るおそれがある事故又は重大事故)のうち、ケーブル布設位置においてより厳しい環境条件が想定される重大事故(炉心の著しい損傷を伴う事故)を保守的に模擬する放射線暴露及び蒸気暴露を行った。また、蒸気暴露における蒸気の影響を確認するため、一部の蒸気暴露試験と同じ温度において、大気中で加熱(以下「大気中加熱」という。)を行った。さらに、蒸気暴露中及び大気中加熱時には、ケーブルの詳細な絶縁性能を調べるため、ケーブルの絶縁抵抗及びケーブル絶縁体の比誘電率を継続的に測定した。蒸気暴露を行ったケーブルに対しては、最後にJIS C 3005³³に基づく耐電圧試験を行い、絶縁破壊の有無を確認した。図2.2(b)では、JNESガイド²²から試験項目を変更した箇所及び追加した箇所を赤字で示している。以下に個々の試験項目について詳しく述べる。なお、経年劣化の模擬、重大事故の模擬のうち放射線暴露及び蒸気暴露、絶縁抵抗測定、比誘電率測定並びに耐電圧試験については、前述の安全研究プロジェクト^{31,32}における委託研究事業の受託者である学校法人早稲田大学が実施した。



(a) JNESガイド²²

(b) 本研究の試験手順

図2.2 JNESガイドで示されているケーブル試験手順及び本研究の試験手順 (JNESガイドから試験項目を変更した箇所及び追加した箇所を赤字で示している)

Fig. 2.2 Cable test procedures prescribed in the JNES Guide and used in this study (Items that are changed from and added to the procedure of the JNES Guide are indicated in red letters)

表2.2 ケーブルの健全性評価規格等における蒸気暴露中の試験項目

Table 2.2 Test items during the steam exposure prescribed in the standards for cable integrity evaluation

No.	試験規格等	記載内容の要約
1	JNESガイド ²²	供試ケーブルの監視パラメータを監視する。 監視パラメータの例： ・定格電圧課電(同軸ケーブルを除く全ての種類のケーブル) ・漏洩電流(同軸ケーブルを除く全ての種類のケーブル)
2	電気学会推奨案 ¹⁹	・定格電圧の課電及び許容電流の通電を行う。 (計装ケーブルについては、通電は行わなくても可)
3	IEEE Std 383 ^{16,34}	・定格電圧の課電及び定格電流の通電を行う。

2. 2. 1 経年劣化の模擬

本研究で試験対象としたケーブルが使用されている原子力発電所の原子炉格納容器内の布設箇所において、通常運転時に受ける主要な劣化は、熱と放射線による劣化である¹⁹。このことから、本研究では、ケーブルを図2.3に示すガンマ線照射施設内に設置した恒温槽に入れ、100°Cで加熱しながら線量率100Gy/hで⁶⁰Coガンマ線を照射することにより、熱及び放射線による経年劣化を模擬した。以降、この経年劣化の模擬を「劣化プロセスI」という。劣化プロセスIの温度、放射線線量率条件は、ACA研究²⁰において、絶縁体内部まで均一な劣化が起こると評価された条件である。表2.3に劣化プロセスIにおけるそれぞれのケーブルの劣化処理時間を示す。これらの劣化処理時間は、ACA研究²⁰において、JNESガイド²²の試験方法に基づき設計基準事故を模擬した試験に合格したケーブルの最長劣化処理時間²¹とした。表2.3にこれらの劣化処理時間を時間依存データの重ね合わせ手法^(注1)を用いて、原子力発電所における布設環境条件(ここでは、一例として、温度50°C、放射線線量率0.3Gy/hとした)における使用年数に換算した結果を示す。なお、本研究では、比較のため、劣化プロセスIを行わないケーブルについても以降の試験項目における試験を行った。



図2.3 ガンマ線照射施設内に設置した恒温槽
(国立研究開発法人量子科学技術研究開発機構高崎量子応用研究所)

Fig. 2.3 Ovens placed in a gamma ray irradiation facility
(Takasaki Advanced Radiation Research Institute of the National Institutes for Quantum and Radiological Science and Technology)

^(注1) 時間依存データの重ね合わせ手法は、破断時伸び等を指標として、ケーブル絶縁材料の熱・放射線による劣化特性データに基づき作成したマスターカーブを用い、ケーブルの劣化予測等を行うための手法として IEC1244-2³⁵ や IAEA-TECDOC-1188³⁶ で提案されている手法である。本手法については、ACA 研究²⁰において、本研究で試験したケーブルの絶縁体に対して適用可能であることが確認されるとともに、使用する式等の詳細が示されている²¹。

表2.3 ケーブルの経年劣化の模擬試験条件

Table 2.3 Cable aging conditions

No.	名称	経年劣化の模擬試験条件	実機使用条件の例 (温度 50°C、放射線線量率 0.3Gy/h) に換算した年数
1	SiR ケーブル(B)	100°C、100 Gy/h、6,241 h	135 年
2	FR-EPDM ケーブル(B)	100°C、100 Gy/h、6,990 h	57 年
3	SiR ケーブル(P)	100°C、100 Gy/h、5,549 h	109 年
4	FR-EPDM ケーブル(P)	100°C、100 Gy/h、4,003 h	39 年

注) 経年劣化の模擬において着目しているケーブル絶縁体の熱及び放射線による劣化挙動は、絶縁体種類、メーカー等により個々に異なる。このため、異なる絶縁体について比較する場合、必ずしも 100°C、100 Gy/h による経年劣化の模擬試験条件の劣化時間が長い時に実機における換算年数が長くなるわけではない。

2. 2. 2 重大事故の模擬

重大事故発生時の原子炉格納容器内の放射線及び蒸気環境を模擬するため、ケーブルを放射線及び蒸気に暴露した。実際の重大事故発生時においては、ケーブルは、放射線と蒸気に同時に暴露される。しかしながら、現在、これらを同時に暴露可能な試験設備が存在しない。このため、本研究では、放射線暴露の後に蒸気暴露を行う逐次暴露を行った。放射線暴露の線量、蒸気暴露の温度・圧力の各条件は、規制基準適合性審査において、電気事業者が重大事故対策の有効性評価で提示した原子炉格納容器内の重大事故解析条件^{38-41,45-51}に基づき設定した。また、本研究では、重大事故が7日間(168h)継続する状況を模擬した。これは、重大事故対策の有効性評価において、少なくとも7日間の評価を行うことが要求されている³⁷こと、高経年化技術評価及び運転期間延長認可申請の劣化状況評価において7日間の評価が行われている^{29,30}ことを踏まえた。ただし、計装ケーブルについては、7日以降もその機能を維持できることが望ましいことを考慮し、一部の試験では、重大事故が14日間(336h)継続する状況を模擬した。蒸気暴露については、原則として飽和蒸気を使用することとした。ただし、試験で模擬する温度における飽和蒸気圧力が高く、蒸気暴露試験装置の試験可能最高圧力との関係から試験が実施不可能である場合は、過熱蒸気を使用した。また、蒸気暴露時の蒸気の影響を確認するため、一部の蒸気暴露試験と同じ温度における大気中加熱試験も行った。試験条件のまとめを表2.4～2.7に示す。また、個々の試験項目の詳細について、以下の項に示す。

表2.4 経年劣化の模擬試験及び事故模擬試験の条件(SiRケーブル(B))

Table 2.4 Conditions of pre-aging and accident test for the SiR cable (B)

No	劣化プロセスI 期間 (h)	劣化プロセスII 積算線量 (kGy)	蒸気暴露又は大気中加熱条件					n数	備考
			温度 (°C)	圧力 (MPaG)	時間 (h)	化学 スプレー (0-24 h)	使用 装置		
1	0	1,600	171	0.60	336	噴霧なし	H1	2	14日間の事故を模擬する蒸気暴露
2	6,241	1,600	171	0.60	336	噴霧なし	H1	2	
3	0	800	171	0.60	168	噴霧なし	H1	2	7日間の事故を模擬する蒸気暴露
4	6,241	800	171	0.60	168	噴霧なし	H1	2	
5	0	800	200	0.62	168	噴霧なし	H1	2	
6	6,241	800	200	0.62	168	噴霧なし	H1	2	
7	0	800	220	0.62	168	噴霧なし	H2	1	
8	6,241	800	220	0.62	168	噴霧なし	H2	1	
9	0	800	200	(大気圧)	168	噴霧なし	W	1	7日間の事故を模擬する大気中加熱
10	6,241	800	200	(大気圧)	168	噴霧なし	W	1	

H1: 日立金属株式会社の蒸気暴露装置1号機

H2: 日立金属株式会社の蒸気暴露装置2号機

W: 学校法人早稲田大学の恒温槽

表2.5 経年劣化の模擬試験及び事故模擬試験の条件(FR-EPDMケーブル(B))

Table 2.5 Conditions of pre-aging and accident test for the FR-EPDM cable (B)

No.	劣化プロセスI 期間 (h)	劣化プロセスII 積算線量 (kGy)	蒸気暴露又は大気中加熱条件					n数	備考
			温度 (°C)	圧力 (MPaG)	時間 (h)	化学 スプレー (0-24 h)	使用 装置		
1	0	1,600	171	0.60	336	噴霧なし	H1	2	14日間の事故を模擬する蒸気暴露
2	6,990	1,600	171	0.60	336	噴霧なし	H1	2	
3	0	800	171	0.60	168	噴霧なし	H1	2	7日間の事故を模擬する蒸気暴露
4	6,990	800	171	0.60	168	噴霧なし	H1	2	
5	0	800	200	0.62	168	噴霧なし	H1	2	
6	6,990	800	200	0.62	168	噴霧なし	H1	2	
7	0	800	220	0.62	168	噴霧なし	H2	1	
8	6,990	800	220	0.62	168	噴霧なし	H2	1	
9	0	800	200	(大気圧)	168	噴霧なし	W	1	7日間の事故を模擬する大気中加熱
10	6,990	800	200	(大気圧)	168	噴霧なし	W	1	

H1: 日立金属株式会社の蒸気暴露装置1号機

H2: 日立金属株式会社の蒸気暴露装置2号機

W: 学校法人早稲田大学の恒温槽

表2.6 経年劣化の模擬試験及び事故模擬試験の条件(SiRケーブル(P))

Table 2.6 Conditions of pre-aging and accident test for the SiR cable (P)

No.	劣化プロセスI 期間 (h)	劣化プロセスII 積算線量 (kGy)	蒸気暴露又は大気中加熱条件					n数	備考
			温度 (°C)	圧力 (MPaG)	時間 (h)	化学 スプレー (0-24 h)	使用 装置		
1	0	1,000	155	0.44	336	噴霧あり	F	2	14日間の事故を模擬する蒸気暴露
2	5,549	1,000	155	0.44	336	噴霧あり	F	2	
3	0	500	200	0.62	168	噴霧なし	H1	2	7日間の事故を模擬する蒸気暴露
4	5,549	500	200	0.62	168	噴霧なし	H1	2	
5	0	500	220	0.62	168	噴霧なし	H2	1	
6	5,549	500	220	0.62	168	噴霧なし	H2	1	
7	0	500	200	(大気圧)	168	噴霧なし	W	1	7日間の事故を模擬する大気中加熱
8	5,549	500	200	(大気圧)	168	噴霧なし	W	1	

F: 株式会社フジクラ・ダイヤケーブルの蒸気暴露装置

H1: 日立金属株式会社の蒸気暴露装置1号機

H2: 日立金属株式会社の蒸気暴露装置2号機

W: 学校法人早稲田大学の恒温槽

表2.7 経年劣化の模擬試験及び事故模擬試験の条件(FR-EPDMケーブル(P))

Table 2.7 Conditions of pre-aging and accident test for the FR-EPDM cable (P)

No.	劣化プロセスI 期間 (h)	劣化プロセスII 積算線量 (kGy)	蒸気暴露又は大気中加熱条件					n数	備考
			温度 (°C)	圧力 (MPaG)	時間 (h)	化学 スプレー (0-24 h)	使用 装置		
1	0	1,000	155	0.44	336	噴霧あり	F	2	14日間の事故を模擬する蒸気暴露
2	4,003	1,000	155	0.44	336	噴霧あり	F	2	
3	0	500	200	0.62	168	噴霧なし	H1	2	7日間の事故を模擬する蒸気暴露
4	4,003	500	200	0.62	168	噴霧なし	H1	2	
5	0	500	220	0.62	168	噴霧なし	H2	1	
6	4,003	500	220	0.62	168	噴霧なし	H2	1	
7	0	500	200	(大気圧)	168	噴霧なし	W	1	7日間の事故を模擬する大気中加熱
8	4,003	500	200	(大気圧)	168	噴霧なし	W	1	

F: 株式会社フジクラ・ダイヤケーブルの蒸気暴露装置

H1: 日立金属株式会社の蒸気暴露装置1号機

H2: 日立金属株式会社の蒸気暴露装置2号機

W: 学校法人早稲田大学の恒温槽

(1) 放射線暴露

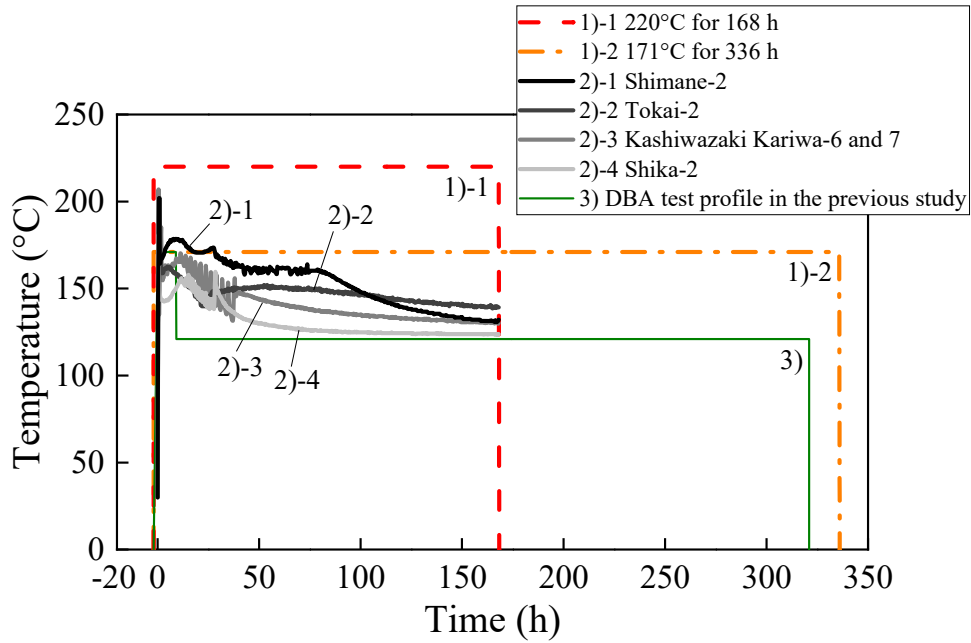
室温において⁶⁰Coガンマ線線量率10kGy/hでケーブルに照射を行った。重大事故発生後168hの原子炉格納容器内の積算線量は、国内のBWR及びPWRでは、それぞれ640kGy、500kGyとされている^{29,30}。これらを踏まえ、168hの事故を模擬する試験では、照射線量をBWR用ケーブルでは800kGy、PWR用ケーブルでは500kGyとした。なお、BWRについては、参考となる情報が限られており、今後行われる規制基準への適合性審査等における評価において想定される積算線量が大きくなる可能性もあると考え、余裕を含んだ照射線量を設定した。また、336hの事故を模擬する試験では、168hの場合の倍の線量とし、BWR用ケーブルでは1,600kGy、PWR用ケーブルでは1,000kGyとした。以降、これらの放射線暴露の試験項目を「劣化プロセスII」という。

(2) 蒸気暴露

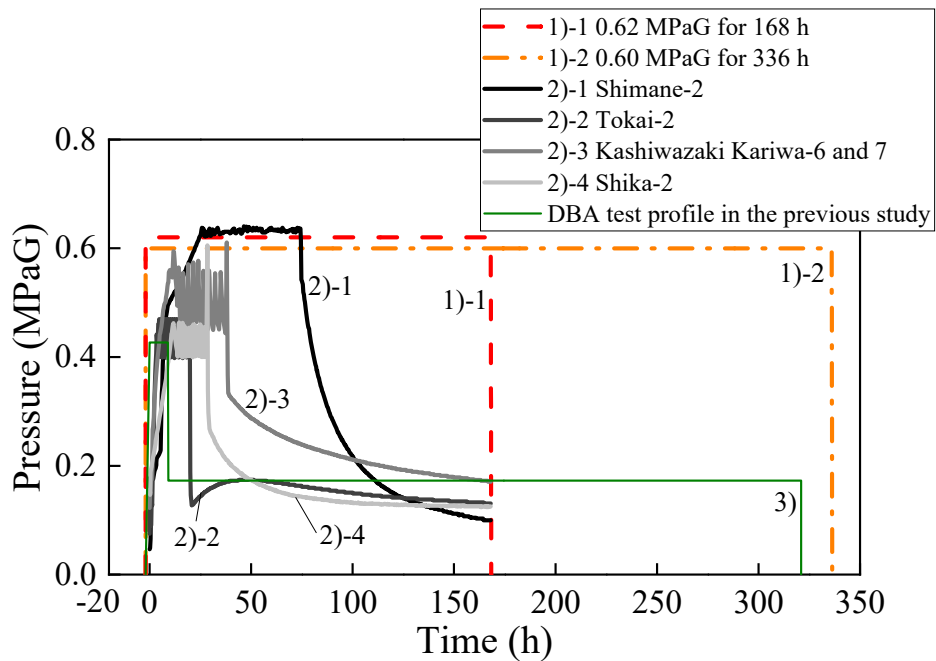
① BWR用ケーブル(SiRケーブル(B)、FR-EPDMケーブル(B))

国内のBWRにおける重大事故時の原子炉格納容器内の気相部の温度及び圧力の解析条件をそれぞれ図2.4(a)及び(b)に示す^{38-41(註2)}。これらの解析条件は、各プラントの発電用原子炉の設置許可に係る申請書に示された重大事故条件のうち、温度及び圧力ごとに最大の条件が想定される事故シーケンス(格納容器過圧・過温破損)の条件³⁸⁻⁴¹を図示している。温度については、図2.4(a)に示すように、いずれのプラントにおいても事故発生初期に急激な温度上昇及び低下(以下「温度ピーク」という。)があり、一部のプラントにおいては、最高温度は200°Cを超える³⁸⁻⁴⁰。これは、想定する事象(大破断LOCA)発生直後に破断口から流出する過熱蒸気による温度上昇とされている^{38,39}。日馬らの研究において、急激な温度上昇を伴う過渡的な温度変化が、ケーブルの絶縁材料に及ぼす影響について調査されており、機械的性質、電氣的性質等に対してほとんど影響を与えないことが報告されている^{42,43}。また、温度ピークが短時間であるとともに、本研究で試験対象としたBWR用ケーブルのSiRケーブル(B)及びFR-EPDMケーブル(B)において絶縁性能を担う絶縁体のベースポリマーの熱分解温度は、それぞれ400°C以上であり⁴⁴、温度ピークの最高温度(約207°C³⁹)と比較しても十分高い。これらのことから、初期の温度ピークの影響は小さいと考えられる。また、初期の温度ピークの後は、一部を除き、温度は概ね170°C以下で推移する。このため、本研究では、温度解析プロファイルのうち、初期の温度ピーク以外の部分を模擬する試験条件として、a. 171°C・0.60MPaG一定の1条件で336h、b. 171°C・0.60MPaG、c. 200°C・0.62MPaG及びd. 220°C・0.62MPaG一定の3条件で168hの蒸気暴露を行った。これらは過熱蒸気による蒸気暴露である。なお、図2.4においては、見やすさのため、条件a及びbのみ記載している。また、蒸気暴露には、図2.5に示す日立金属株式会社の蒸気暴露装置を用いた。

(註2) 図2.4中の各発電所における重大事故時の原子炉格納容器の温度及び圧力の曲線については、参考文献³⁸⁻⁴¹に記載された図をもとに図示しているため、細部においては必ずしも正確ではない箇所がある。詳細については、参考文献³⁸⁻⁴¹を参照されたい。



(a) 温度



(b) 圧力

図 2.4 重大事故模擬試験の温度及び圧力条件(BWR 用ケーブル)^{21, 38-41}

Fig. 2.4 Temperature and pressure profiles for severe accident simulation
(cables used in BWRs)

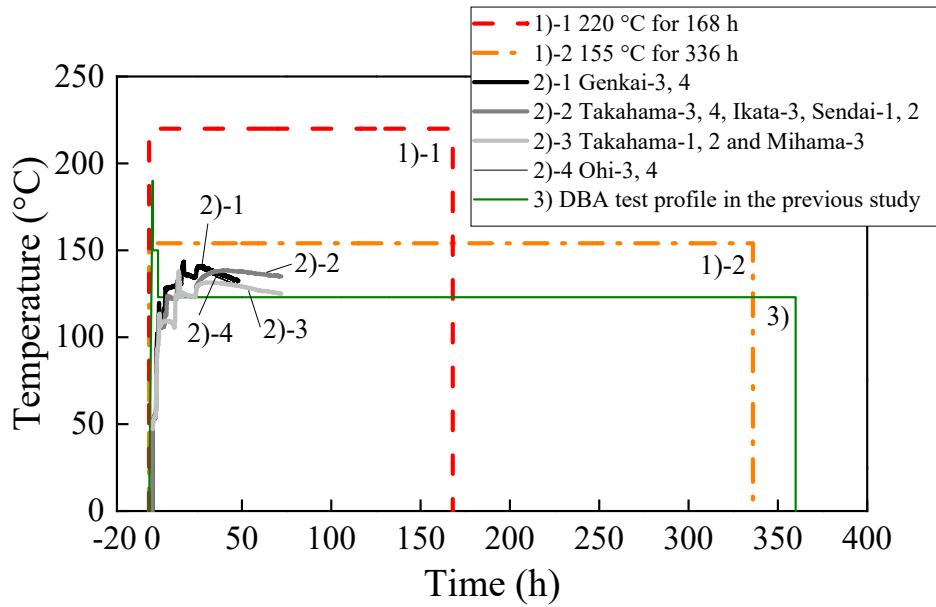


図2.5 蒸気暴露試験装置(日立金属株式会社)
Fig. 2.5 Steam exposure chambers (Hitachi Metals, Ltd.)

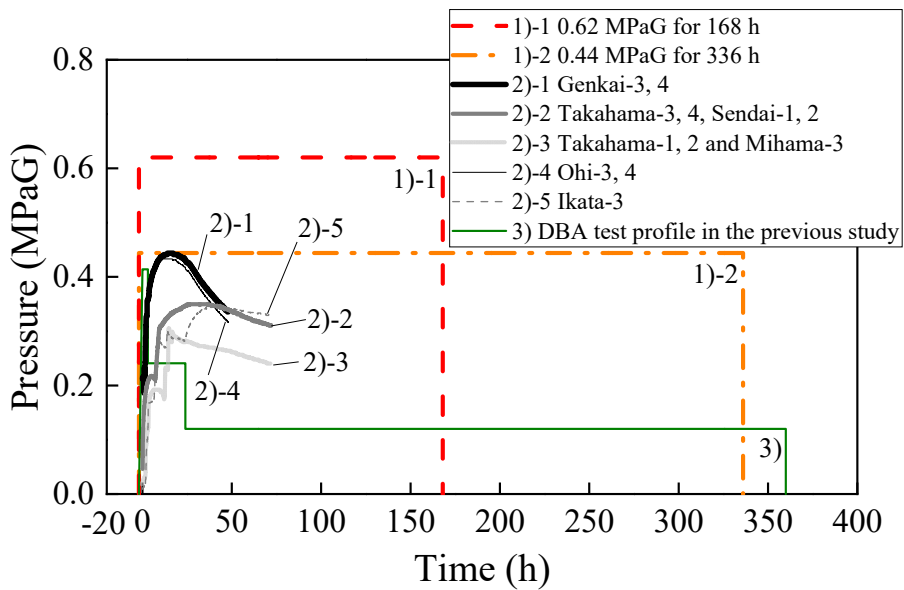
② PWR用ケーブル(SiRケーブル(P)、FR-EPDMケーブル(P))

国内のPWRにおける重大事故時の原子炉格納容器内の気相部の温度及び圧力の解析条件をそれぞれ図2.6(a)及び(b)に示す^{45-51(注3)}。これらの解析条件は、各プラントの発電用原子炉の設置許可に係る申請書に示された重大事故条件のうち、温度及び圧力ごとに最大の条件が想定される事故シーケンス（格納容器過圧、格納容器過温又は格納容器の除熱機能喪失）の条件⁴⁵⁻⁵¹を図示している。全ての条件における温度の最大値は約145°C、圧力の最大値は約0.44MPaGである。これらの条件を踏まえ、a. 155°C・0.44MPaG一定の1条件で336h、b. 200°C・0.62MPaG及びc. 220°C・0.62MPaG一定の2条件で168hの蒸気暴露を行った。条件aは飽和蒸気、条件b及びcは過熱蒸気による蒸気暴露である。また、条件aの試験では、事故時に原子炉格納容器内を冷却するために使用される格納容器スプレイに含まれる薬品の影響を模擬するため、蒸気暴露装置内の温度が設定温度の155°Cに到達後の最初の24時間において化学スプレイ液を噴霧した。噴霧した化学スプレイ液は、設計基準事故を模擬する蒸気暴露試験と同様のH₃BO₃を0.3重量%、NaOHを添加してpHが10.5±0.5となるように調整した水溶液である^{19,52}。なお、図2.6においては、見やすさのため、条件a及びcのみ記載している。条件aについては、化学スプレイが実施可能な株式会社フジクラ・ダイヤケーブルの蒸気暴露試験装置を用いた(図2.7参照)。また、条件b及びcについては、200°C以上の蒸気暴露が実施可能な日立金属株式会社の蒸気暴露装置を用いた(図2.5参照)。

(注3) 図2.6に示すように、各発電所における重大事故時の原子炉格納容器内の温度及び圧力の解析条件は、参考文献⁴⁵⁻⁵¹において48時間又は72時間まで示されている。また、図2.6中の各発電所における重大事故時の原子炉格納容器の温度及び圧力の曲線については、参考文献⁴⁵⁻⁵¹に記載された図をもとに図示しているため、細部においては必ずしも正確ではない箇所がある。詳細については、参考文献⁴⁵⁻⁵¹を参照されたい。



(a) 温度



(b) 圧力

図 2.6 重大事故模擬試験の温度及び圧力条件(PWR 用ケーブル)^{21,45-51}

Fig. 2.6 Temperature and pressure profiles for severe accident simulation
(cables used in PWRs)

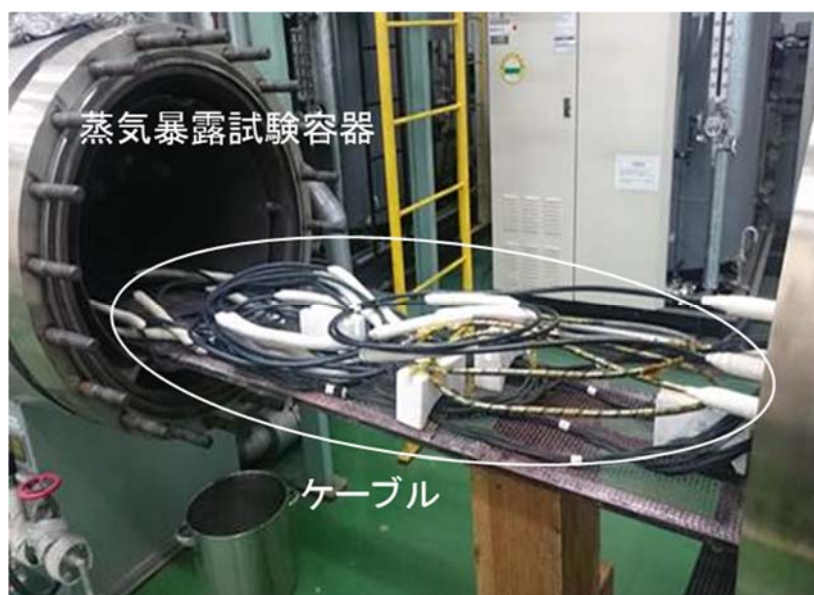


図 2.7 蒸気暴露試験装置(株式会社フジクラ・ダイヤケーブル)
Fig. 2.7 Steam exposure chamber and cables before the exposure
(Fujikura Dia Cable Industries, Ltd.)

(3) 大気中加熱

SiR ケーブル(B)、FR-EPDM ケーブル(B)、SiR ケーブル(P)及びFR-EPDM ケーブル(P)を恒温槽内に設置し、200°C 一定の大気中で 168h の加熱試験を行った。図 2.8 に大気中加熱試験の試験装置を示す。



図 2.8 ケーブル大気中加熱試験の装置

Fig. 2.8 Apparatuses used for the cable heat exposure test in the air

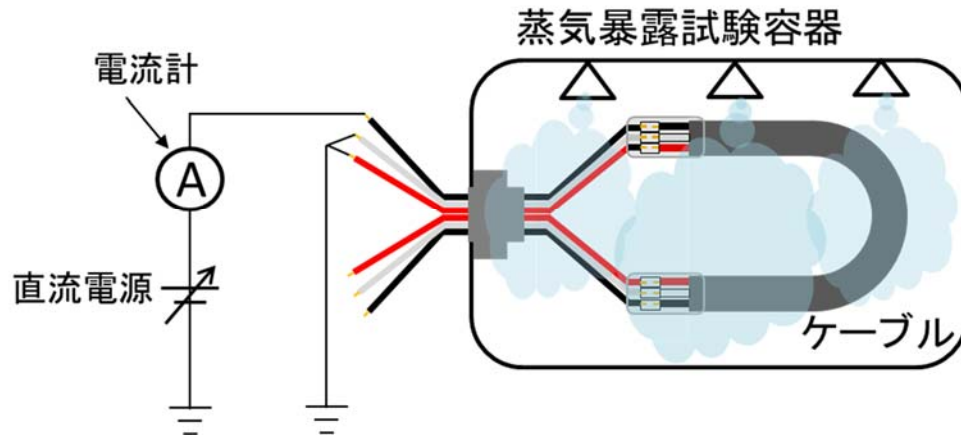
(4) 絶縁抵抗測定

蒸気暴露中に、エレクトロメータ(Keysight Technologies B2985A)により、線間を流れる電流の測定を行った。図2.9に、蒸気暴露時のケーブル設置状況及び電流測定の測定回路の模式図を示す。測定では、JIS C 3005: 2000³³の4.7項を参考として、コネクタを介して蒸気暴露装置外に引き出したケーブルの絶縁芯線3本のうち2本(赤芯、白芯)の導体を短絡させた上で、他の1本(黒芯)との間に直流電圧最大100Vを継続的に印加し、電流を2分ごとに測定した。印加電圧値を電流値で除すことによってケーブルの絶縁抵抗が得られるが、この値は、試験ケーブルの長さに反比例する。JIS C 3005:2000³³の4.7.1項では、温度 t °Cで測定したケーブルの絶縁抵抗 R_t を温度20°Cにおけるケーブル長さ1km当たりの絶縁抵抗 R_{20} (M Ω ・km)に換算する式として、

$$R_{20} = R_t \times K_t \times \frac{l}{1000} \quad (2.1)$$

が示されている³³。ここで、 R_t は t °Cでの絶縁抵抗の測定値(M Ω)、 K_t は測定温度 t °Cの値を20°Cに換算する係数、 l は線長(m)である。本研究では、重大事故時の蒸気条件におけるケーブルの絶縁抵抗そのものを評価するため温度換算は行わない。このため、式(2.1)の温度換算に係る項の K_t を省略し、蒸気暴露時の絶縁抵抗 R_t (Ω)にケーブル長 l (m)を乗じることにより、ケーブル長さ1メートル当たりの絶縁抵抗(Ω m)(以下「換算絶縁抵抗」という。)を算出した。また、大気中加熱時についても同様の測定を行い、ケーブルの換算絶縁抵抗を求めた。

なお、これまで、設計基準事故時を模擬する健全性評価試験の蒸気暴露中にケーブルの絶縁抵抗を測定した例が報告されている。国内においては、ケーブルメーカーにおけるIEEE Std 383-1974¹⁶の要求に適合する安全系ケーブルの研究開発の一環で実施した蒸気暴露試験時に、ケーブルの絶縁抵抗が間欠的に測定された⁵³。海外では、熱劣化を付与したケーブルについて、設計基準事故を模擬する蒸気暴露試験時にケーブルの絶縁抵抗の測定が行われた⁵⁴。また、設計基準事故時を模擬する蒸気暴露中の絶縁抵抗測定に関する試験規格が、国際電気標準会議(International Electrotechnical Commission: IEC)及びIEEEの共同規格として策定された⁵⁵。本研究ではこれらについても参考とした。



出典) T. Minakawa, M. Ikeda, N. Hirai, and Y. Ohki, “Insulation Performance of Safety-related Cables for Nuclear Power Plants under Simulated Severe Accident Conditions”, IEEJ Trans. Fundam. Mater. Vol. 139, No. 2, pp.54-59, 2019 ⁵⁶

図 2.9 蒸気暴露試験及び絶縁抵抗測定回路の模式図

Fig. 2.9 Schematic diagram of the configuration of the steam exposure test and the circuit for electrical insulation resistance measurement

(5) 比誘電率測定

蒸気暴露中に、LCRメータ(Keysight Technologies E4980AL)により、周波数1kHzで静電容量及び誘電正接($\tan\delta$)を2分ごとに測定した。無限長平行導体の単位長当たりの静電容量 C (F)は、

$$C = \frac{\pi\epsilon_r\epsilon_0}{\ln\frac{D-d}{d}} \quad (2.2)$$

と表される。ここで、 ϵ_r は比誘電率、 ϵ_0 は真空の誘電率(8.854×10^{-12} (F/m))、 D (m)は導体の中心間の距離、 d (m)は導体断面の半径である。図2.10に、本研究で試験対象としたケーブルについて、3本の絶縁体で被覆した導体(絶縁体付き芯線)の位置関係の模式図を示す。3本の絶縁体付き芯線はらせん状に撚り合わせられており、ケーブル長さ方向の任意の位置において、線心間の距離は一定に保たれていると考えることができる。また、本研究で試験したケーブルの長さは2.5mであり、導体間の距離に対して十分長い。このため、3本の導体のうち、短絡させた2本(赤芯、白芯)の導体と残りの1本(黒芯)の導体の間には、2対の平行導体があると考えられる。また、絶縁体付き芯線は、らせん状に撚り合わされているため、ケーブルより長くなる。しかしながら、絶縁体付き芯線とケーブルの長さの差は1%未満と計算されることから、ここでは、両者の長さが等しいとして計算する。この場合、測定した静電容量 C' (F)は、

$$C' = 2 \times 2.5 \times C \quad (2.3)$$

と表される。また、表2.8に、表2.1の構造仕様に基づき算出した各ケーブルの D 及び d を示す。これらの D 及び d 、静電容量の測定値 C' 、式(2.2)並びに式(2.3)から、比誘電率 ϵ_r を求めた。また、大気中加熱についても同様に ϵ_r を求めた。このようにして求めた ϵ_r は、導体間の絶縁体の比誘電率が反映されると考えられる。ただし、劣化プロセスI、劣化プロセスII、蒸気暴露及び大気中加熱においては、絶縁体の厚さが変化する可能性がある。上記の方法により求めた比誘電率は、このような絶縁体の厚さの変化を考慮していない見かけの値である。なお、シリコーンゴムの比誘電率は2.7~3.6⁵⁷、エチレンプロピレンジエンゴムの比誘電率は3~4⁵⁸とされている。

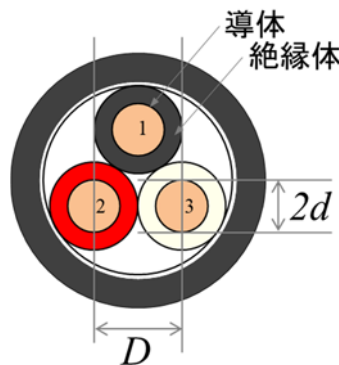


図 2.10 試験ケーブルの断面構造

Fig. 2.10 Cross sectional structure of the tested cables

表 2.8 ケーブルの導体中心間の距離(D)及び導体半径(d)

Table 2.8 D and d of the cables tested in this study

名称	D (mm)	d (mm)
SiR ケーブル(B)	3.8	0.80
FR-EPDM ケーブル(B)	3.2	0.80
SiR ケーブル(P)	2.8	0.63
FR-EPDM ケーブル(P)	3.2	0.80

2. 2. 3 耐電圧試験

蒸気暴露後のケーブルについて、JIS C 3005: 2000³³の4.6 a)項に基づき、水中で交流電圧を印加し、耐電圧試験を行った。判定基準は、交流1,500V(電圧は実効値。商用周波数)に1分間耐えることである^{33,59,60}。図2.11に耐電圧試験実施時の状況を示す。



図 2.11 耐電圧試験の実施状況

Fig. 2.11 Voltage withstand test

3. 試験結果

各試験項目の結果を以下に示す。表 2.4～2.7 に示すように、本研究では、試験条件ごとにケーブル供試体数 $n=1$ 又は 2 で試験を行った。 $n=2$ で試験した試験条件においては、絶縁抵抗及び比誘電率のデータは同等であったことから、3.1 及び 3.2 節においては、代表して 1 つのデータを示す。

3. 1 絶縁抵抗測定

3. 1. 1 蒸気暴露中のケーブルの絶縁抵抗

(1) BWR用ケーブル(SiRケーブル(B)、FR-EPDMケーブル(B))

171°C・0.60MPaGで336hの蒸気暴露時のケーブルの換算絶縁抵抗の推移を図3.1に示す(注4)。図3.1では、蒸気暴露装置内の温度及び圧力が設定値以上となった時点をも0hとして図示している。なお、これ以降に示す図においても、同様に図示している。蒸気暴露開始後は、ケーブルの換算絶縁抵抗は $10^7\Omega\text{m}$ 程度まで低下する。その後、SiRケーブル(B)では80h程度まで、FR-EPDMケーブル(B)では100h程度まで、換算絶縁抵抗が徐々に低下した後、 $10^5\Omega\text{m}$ 程度ではほぼ一定となる。劣化プロセスIの有無により、換算絶縁抵抗の挙動に大きな差異は見られない。蒸気暴露終了後に常温まで降温した後は、換算絶縁抵抗は $10^6\Omega\text{m}$ 程度となり、蒸気暴露中よりも高い値を示している。

171°C・0.60MPaG、200°C・0.62MPaG、220°C・0.62MPaGで168hの蒸気暴露時のケーブルの換算絶縁抵抗の推移を図3.2に示す。蒸気暴露開始前の常温での換算絶縁抵抗は、SiRケーブル(B)及びFR-EPDMケーブル(B)で $10^{11}\sim 10^{14}\Omega\text{m}$ 程度である。蒸気暴露開始直後は、ケーブルの換算絶縁抵抗は $10^7\Omega\text{m}$ 程度まで急激に低下する。その後、換算絶縁抵抗は徐々に低下するが、蒸気暴露温度が高いほど、より早く低下する傾向が見られる。168h時点では、 $10^5\Omega\text{m}$ 程度で蒸気暴露温度により大きな差は見られない。また、FR-EPDMケーブル(B)の200°Cのデータを除き、劣化プロセスIの有無により、換算絶縁抵抗の挙動に大きな差異は見られない。蒸気暴露終了後に常温まで降温した後の換算絶縁抵抗は $10^6\sim 10^7\Omega\text{m}$ 程度となり、蒸気暴露中よりも高い値を示している。

(2) PWR用ケーブルの試験(SiRケーブル(P)、FR-EPDMケーブル(P))

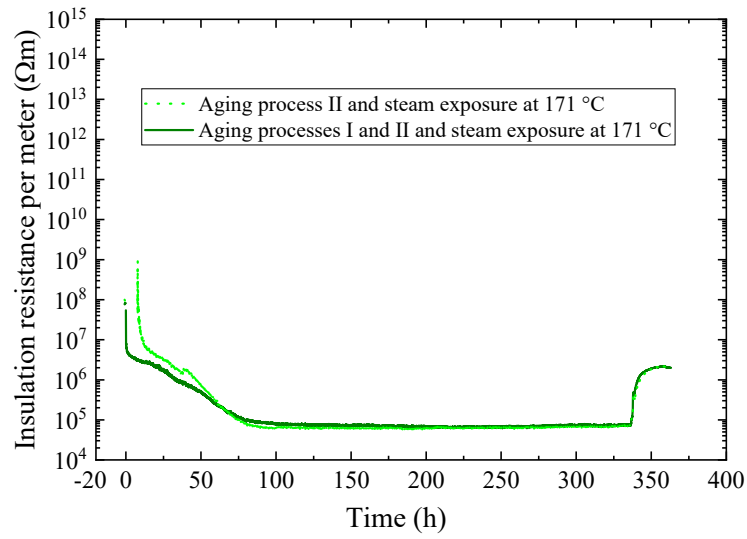
155°C・0.44MPaGで336hの蒸気暴露時のケーブルの換算絶縁抵抗の推移を図3.3に示す。蒸気暴露開始直後は、換算絶縁抵抗は $10^8\sim 10^9\Omega\text{m}$ 程度まで急激に低下する。その後30h付近において最小値の $10^8\Omega\text{m}$ 程度となった後、時間の経過とともに緩やかに上昇する。蒸気暴露終了後に常温まで降温した後の換算絶縁抵抗は $10^9\Omega\text{m}$ 程度となり、蒸気暴露中よりも高い値を示している。

200°C・0.62MPaG、220°C・0.62MPaGで168hの蒸気暴露時のケーブルの換算絶縁抵抗の

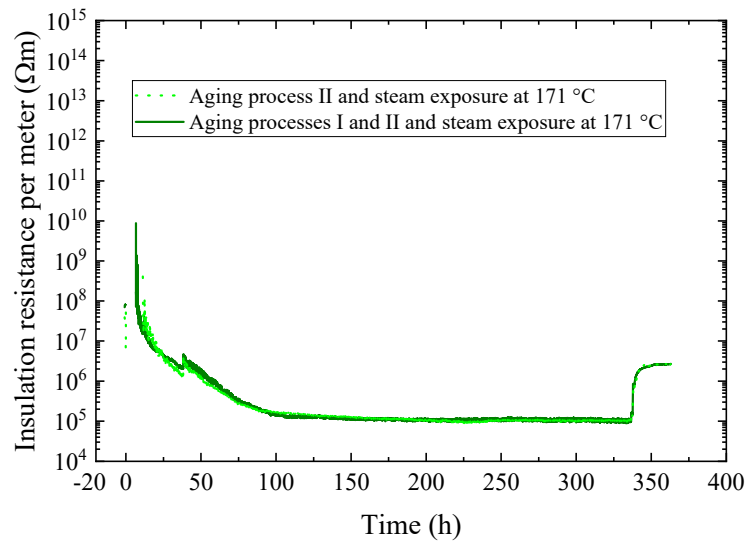
(注4) 171°C・0.60MPaGで336hの蒸気暴露では、エレクトロメータによる電流測定ができなかったことから、LCRメータで測定した静電容量 C 及び誘電正接($\tan\delta$)及び関係式($\tan\delta = 1/(2\pi fCR)$)⁶⁾より絶縁抵抗を算出した。この方法では、絶縁抵抗が概ね $10^7\Omega\text{m}$ 以上で誤差が大きくなり、算出ができなくなるため、図 3.1 に示すように、蒸気暴露開始前及び開始直後の絶縁抵抗の高い領域のデータが得られていない。

推移を図3.4に示す。蒸気暴露開始前の常温での換算絶縁抵抗は、SiRケーブル(P)及びFR-EPDMケーブル(P)で $10^{11} \sim 10^{13} \Omega m$ 程度である。蒸気暴露開始直後は、換算絶縁抵抗は $10^7 \sim 10^8 \Omega m$ 程度まで急激に低下する。その後は、換算絶縁抵抗は徐々に低下するが、蒸気暴露温度が高いほど、より早く低下する傾向が見られる。168h時点では、 $10^5 \Omega m$ 程度で蒸気暴露温度により大きな差は見られない。蒸気暴露終了後に常温まで降温した後の換算絶縁抵抗は、いずれのケーブルにおいても、 $10^7 \sim 10^8 \Omega m$ 程度となり、蒸気暴露中よりも高い値を示している。

なお、図3.3では、劣化プロセスIの有無により、換算絶縁抵抗に差異が見られるが、明確な傾向は見られない。また、同一の劣化状態のケーブルを蒸気暴露した場合であっても、同程度の差異が観察されていることから、有意差ではないと考えられる。



(a) SiRケーブル(B)

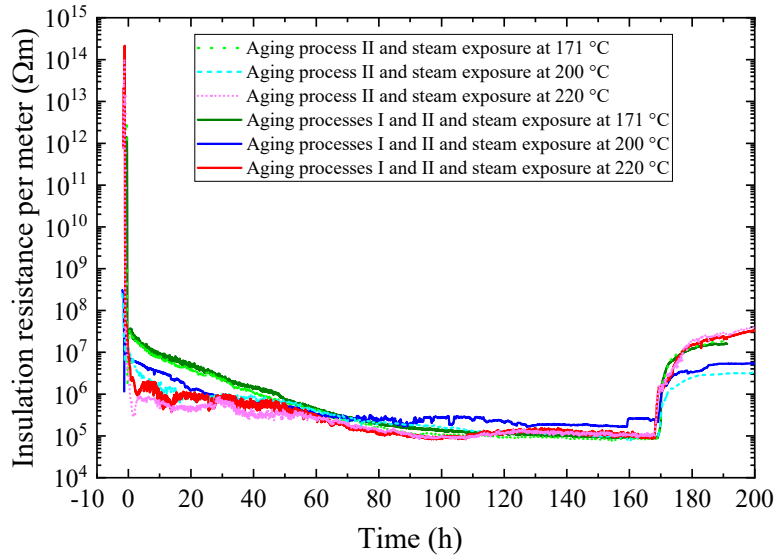


(b) FR-EPDMケーブル(B)

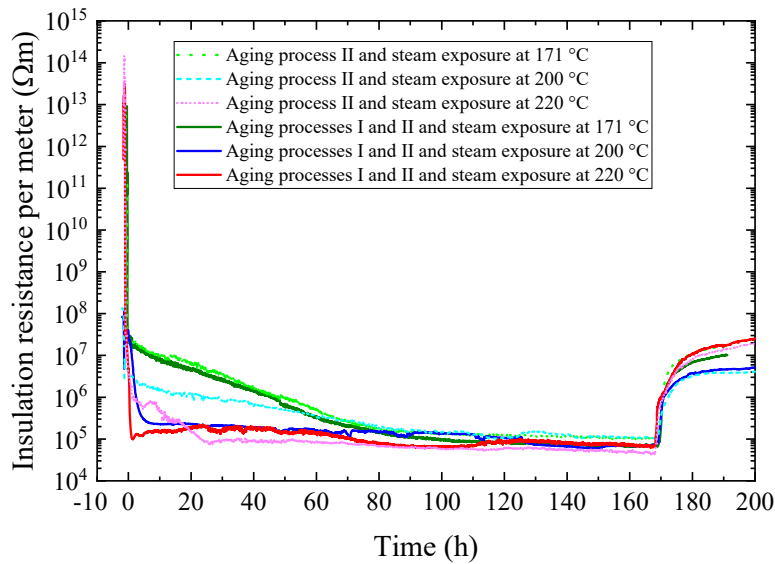
出典) 皆川武史、池田雅昭、平井直志、大木義路、“沸騰水型原子炉用安全系低圧ケーブルの高温蒸気暴露中及びその後の絶縁性能”、日本保全学会第15回学術講演会要旨集、pp.465-470、2018⁶² (一部データ抜粋)

図3.1 171°Cで336時間の蒸気暴露中及びその後のケーブルの長さ1メートル当たりの絶縁抵抗の経時変化(BWR用ケーブル)

Fig. 3.1 Insulation resistances per meter as a function of time, during and after the steam exposure at 171°C for 336 h, measured for the cables used in BWRs



(a) SiRケーブル(B)

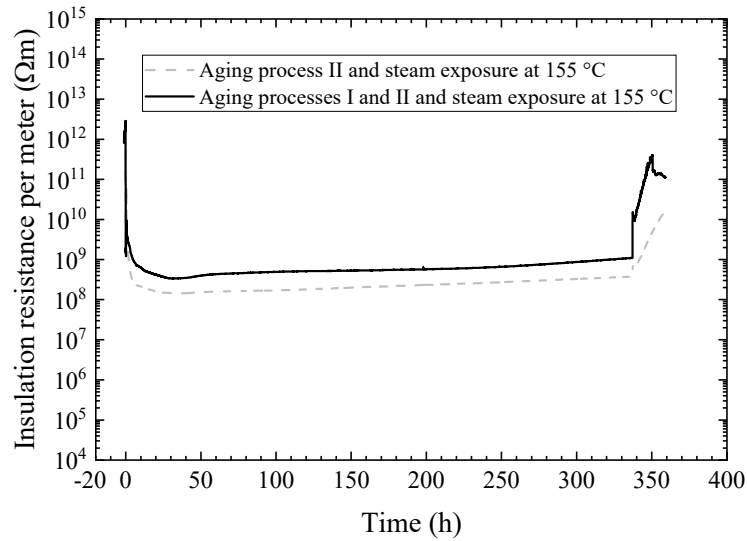


(b) FR-EPDMケーブル(B)

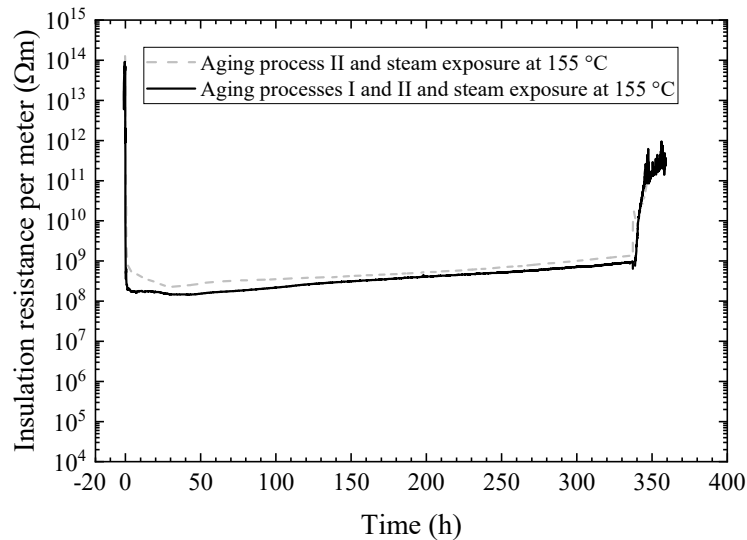
出典) 皆川武史、池田雅昭、平井直志、大木義路、“沸騰水型原子炉用安全系低圧ケーブルの高温蒸気暴露中及びその後の絶縁性能”、日本保全学会第15回学術講演会要旨集、pp.465-470、2018⁶² (200°Cの蒸気暴露のデータ抜粋し、171、220°Cのデータを新たに追加)

図3.2 171、200、220°Cで168時間の蒸気暴露中及びその後のケーブルの長さ1メートル当たりの絶縁抵抗の経時変化(BWR用ケーブル)

Fig. 3.2 Insulation resistances per meter as a function of time, during and after the steam exposure at 171, 200, and 220°C for 168 h, measured for the cables used in BWRs



(a) SiRケーブル(P)

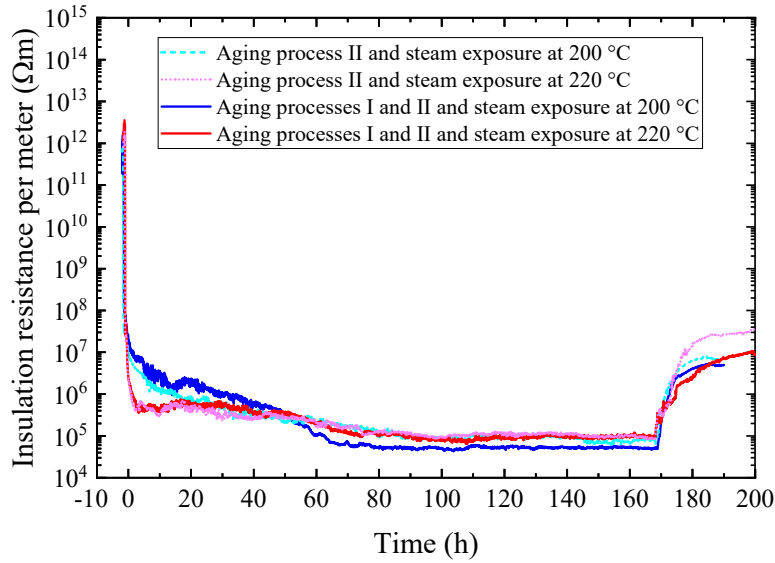


(b) FR-EPDMケーブル(P)

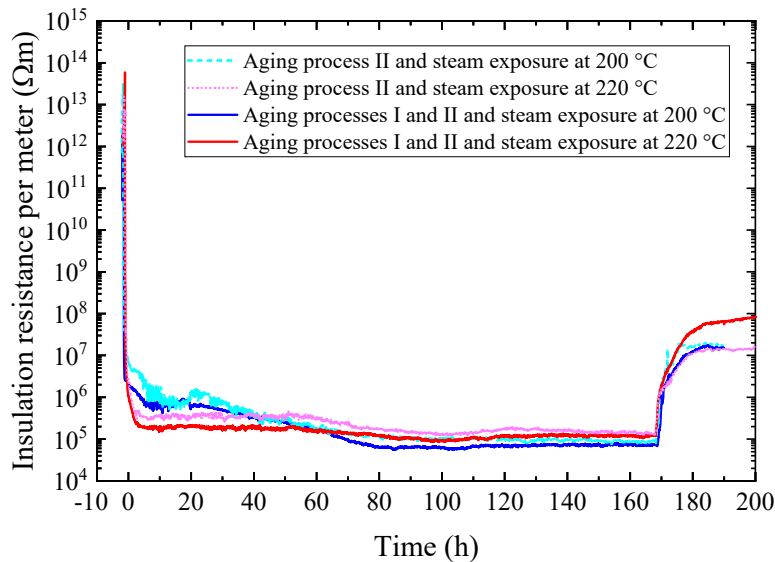
出典) T. Minakawa, M. Ikeda, N. Hirai, and Y. Ohki, “Insulation Performance of Safety-related Cables for Nuclear Power Plants under Simulated Severe Accident Conditions”, IEEJ Trans. Fundam. Mater. Vol. 139, No. 2, pp.54-59, 2019⁵⁶ (一部データ抜粋)

図3.3 155°Cで336時間の蒸気暴露中及びその後のケーブルの長さ1メートル当たりの絶縁抵抗の経時変化(PWR用ケーブル)

Fig. 3.3 Insulation resistances per meter as a function of time, during and after the steam exposure at 155°C for 336 h, measured for the cables used in PWRs



(a) SiRケーブル(P)



(b) FR-EPDMケーブル(P)

出典) T. Minakawa, M. Ikeda, N. Hirai, and Y. Ohki, “Insulation Performance of Safety-related Cables for Nuclear Power Plants under Simulated Severe Accident Conditions”, IEEJ Trans. Fundam. Mater. Vol. 139, No. 2, pp.54-59, 2019⁵⁶ (200°Cの蒸気暴露のデータ抜粋し、220°Cのデータを新たに追加)

図 3.4 200、220°C で 168 時間の蒸気暴露中及びその後のケーブルの長さ 1 メートル当たりの絶縁抵抗の経時変化(PWR 用ケーブル)

Fig. 3.4 Insulation resistances per meter as a function of time, during and after the steam exposure at 200 and 220°C for 168 h, measured for the cables used in PWRs

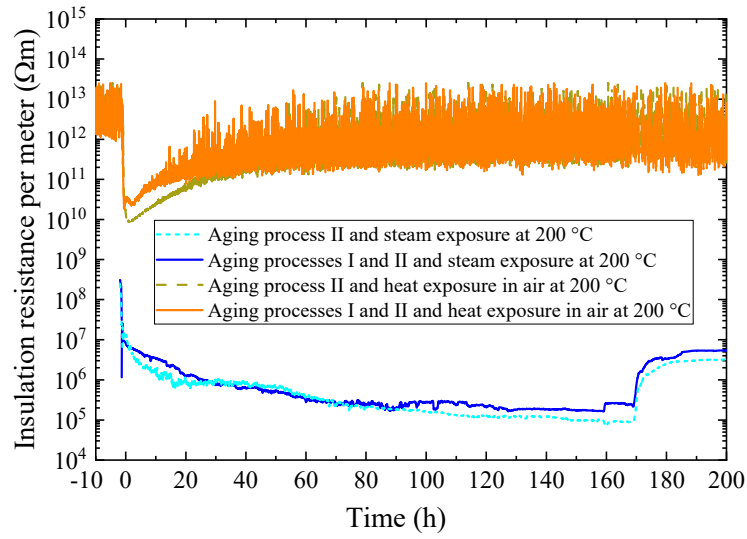
3. 1. 2 大気中加熱時のケーブルの絶縁抵抗

(1) BWR用ケーブル(SiRケーブル(B)、FR-EPDMケーブル(B))

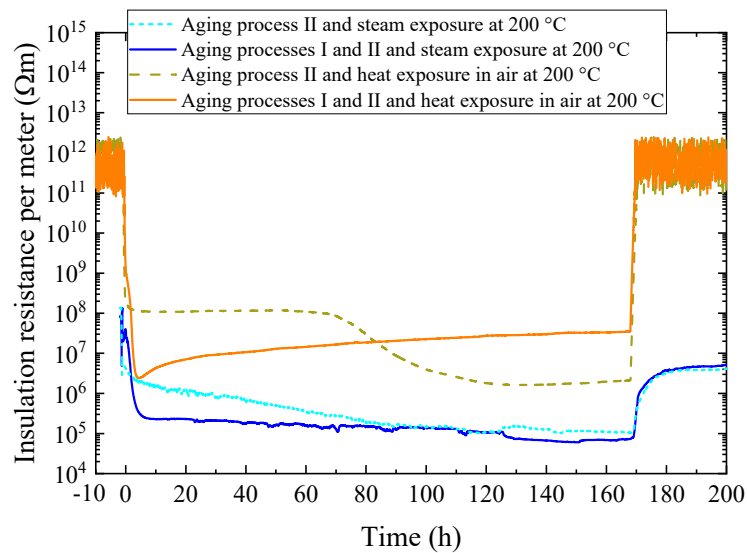
200°Cで168hの大気中加熱時のケーブルの換算絶縁抵抗の推移を図3.5に示す。また、比較のため、200°Cで168hの蒸気暴露時のケーブルの換算絶縁抵抗の推移も併せて示す。図3.5(a)に示すように、SiRケーブル(B)の換算絶縁抵抗は、加熱開始後の初期に温度上昇とともに低下し $10^{10}\Omega\text{m}$ 程度となった後上昇し、約40時間以降においては $10^{11}\Omega\text{m}$ 程度以上で一定となる。なお、20h以降において換算絶縁抵抗データに変動が見られるが、これは、エレクトロメータの測定限界に近づくとともに、測定している電流が微小であるため、試験装置等のノイズ影響を受けているためと考えられる。一方、図3.5(b)に示すように、FR-EPDMケーブル(B)は、劣化プロセスIの有無で挙動が異なるが、加熱開始後168h時点において、いずれも $10^6\sim 10^7\Omega\text{m}$ 程度となる。

(2) PWR用ケーブルの試験(SiRケーブル(P)、FR-EPDMケーブル(P))

200°Cで168hの大気中加熱時のケーブルの換算絶縁抵抗の推移を図3.6に示す。また、比較のため、200°Cで168hの蒸気暴露時のケーブルの換算絶縁抵抗の推移も併せて示す。図3.6(a)に示すように、SiRケーブル(P)の換算絶縁抵抗は、加熱開始後に温度上昇とともに低下し $10^9\Omega\text{m}$ 程度となった後上昇し、約40時間以降においては $10^{11}\Omega\text{m}$ 程度以上で一定となる。なお、50h以降において換算絶縁抵抗データに変動が見られるが、SiRケーブル(B)と同様に、試験装置等のノイズ影響を受けているためと考えられる。一方、図3.6(b)に示すように、FR-EPDMケーブル(P)は、劣化プロセスIの有無で挙動が異なるが、加熱開始後168h時点において、いずれも $10^6\Omega\text{m}$ 程度となる。



(a) SiRケーブル(B)

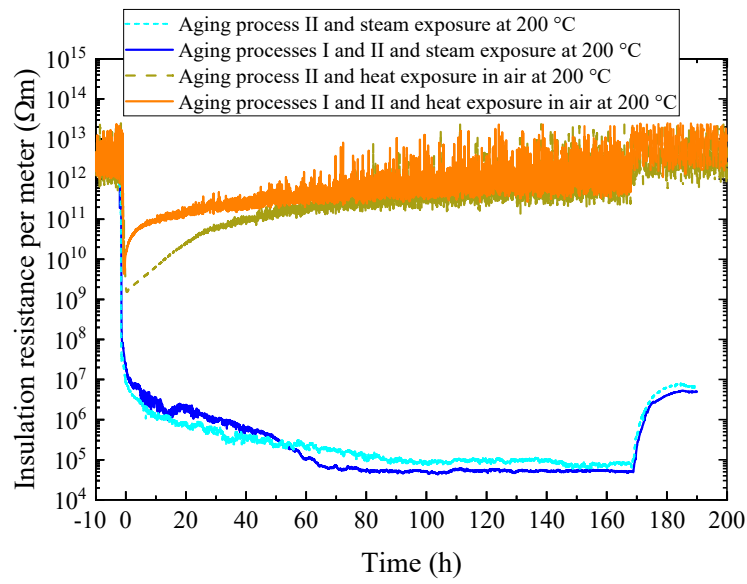


(b) FR-EPDMケーブル(B)

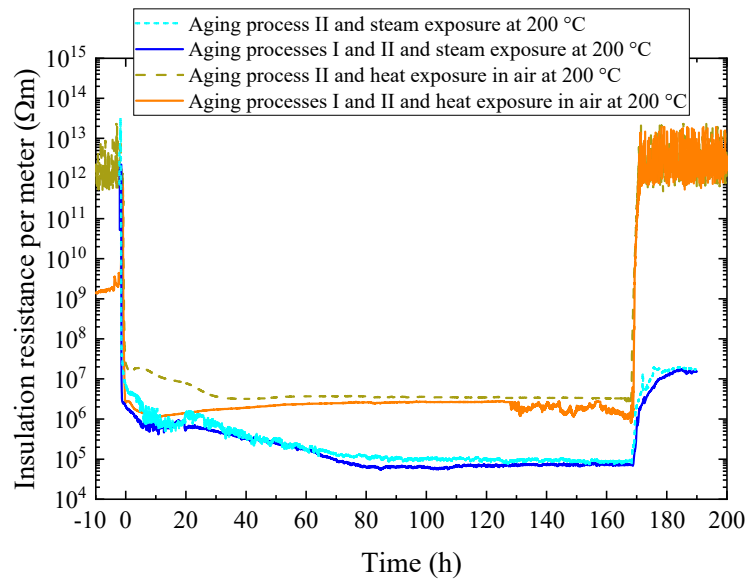
出典) 皆川武史、池田雅昭、平井直志、大木義路、“沸騰水型原子炉用安全系低圧ケーブルの高温蒸気暴露中及びその後の絶縁性能”、日本保全学会第15回学術講演会要旨集、pp.465-470、2018⁶² (一部データ抜粋)

図 3.5 200°C で 168 時間の大気中加熱及びその後のケーブルの長さ 1 メートル当たりの絶縁抵抗の経時変化(BWR 用ケーブル)

Fig. 3.5 Insulation resistances per meter as a function of time, during and after the heat exposure in air at 200°C for 168 h, measured for the cables used in BWRs



(a) SiRケーブル(P)



(b) FR-EPDMケーブル(P)

図 3.6 200°C で 168 時間の大気中加熱及びその後のケーブルの長さ 1 メートル当たりの絶縁抵抗の経時変化(PWR 用ケーブル)

Fig. 3.6 Insulation resistances per meter as a function of time, during and after the heat exposure in air at 200°C for 168 h, measured for the cables used in PWRs

3. 2 比誘電率測定

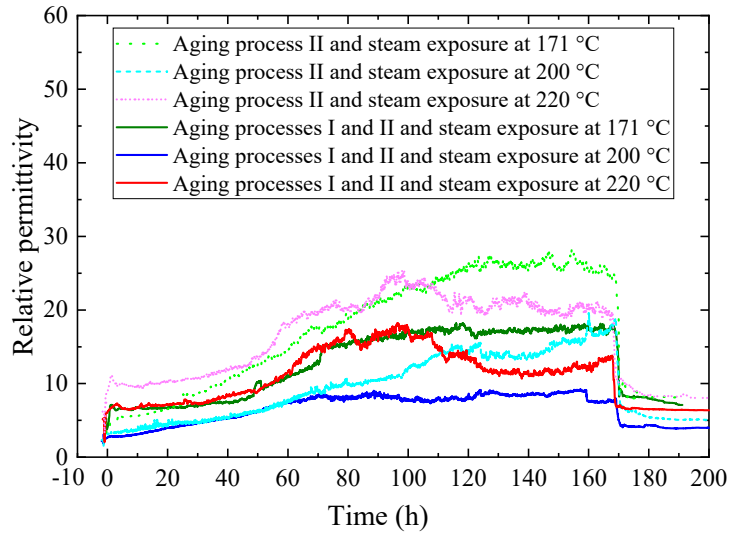
3. 2. 1 蒸気暴露中の絶縁体の比誘電率

(1) BWR用ケーブル(SiRケーブル(B)、FR-EPDMケーブル(B))

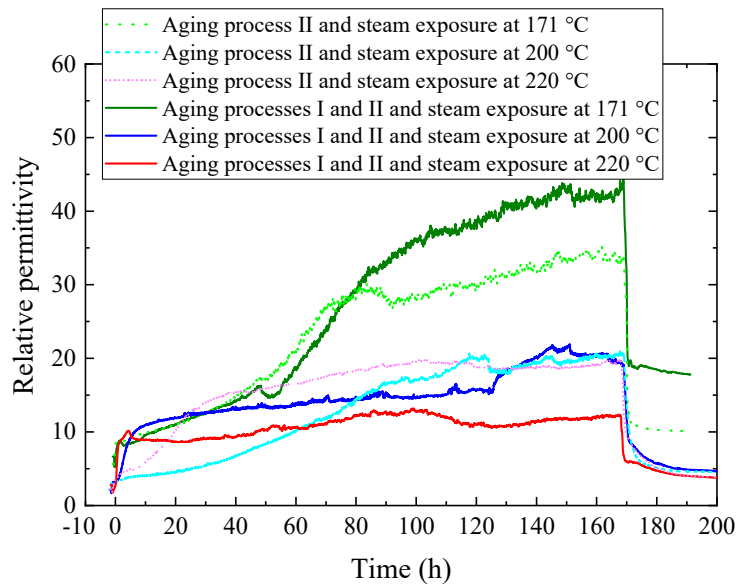
171°C・0.60MPaG、200°C・0.62MPaG、220°C・0.62MPaGで168hの蒸気暴露時のケーブル絶縁体の ϵ_r の推移を図3.7に示す。蒸気暴露開始前の常温での ϵ_r は、SiRケーブル(B)及びFR-EPDMケーブル(B)で2~6程度である。蒸気暴露開始後に ϵ_r が増加し、蒸気暴露前よりも大きくなる傾向が見られる。

(2) PWR用ケーブルの試験(SiRケーブル(P)、FR-EPDMケーブル(P))

200°C・0.62MPaG、220°C・0.62MPaGで168hの蒸気暴露時のケーブル絶縁体の ϵ_r の推移を図3.8に示す。蒸気暴露開始前の常温での ϵ_r は、SiRケーブル(P)及びFR-EPDMケーブル(P)で2~3程度である。蒸気暴露開始後に ϵ_r が増加し、蒸気暴露前よりも大きくなる傾向が見られる。



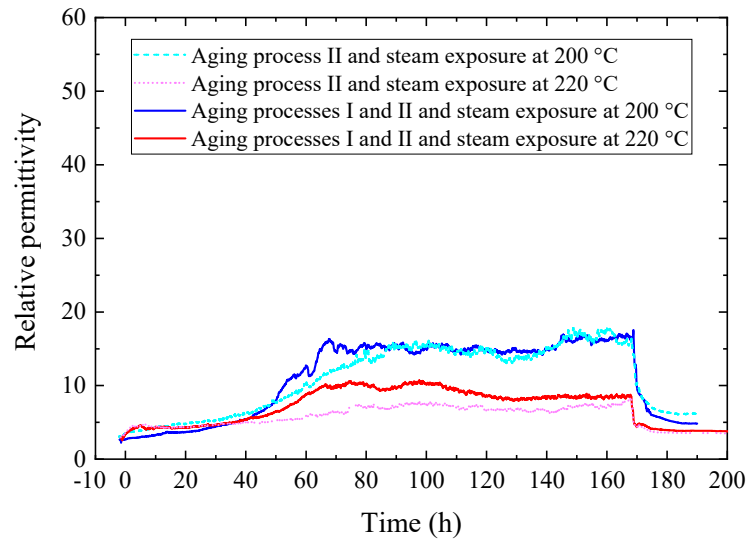
(a) SiRケーブル(B)



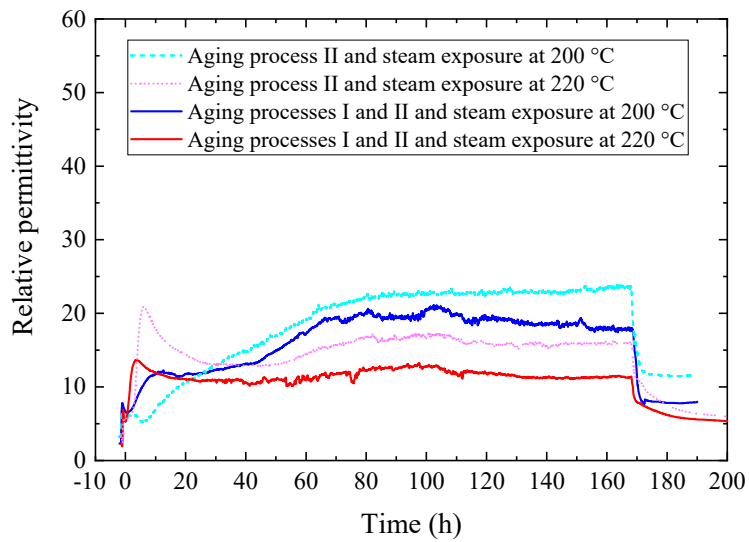
(b) FR-EPDMケーブル(B)

図3.7 171、200、220°Cで168時間の蒸気暴露中及びその後のケーブル絶縁体の比誘電率の経時変化(BWR用ケーブル)

Fig. 3.7 Relative permittivity of cable insulations as a function of time, during and after the steam exposure at 171, 200, and 220°C for 168 h, measured for the cables used in BWRs



(a) SiRケーブル(P)



(b) FR-EPDMケーブル(P)

図3.8 200、220°Cで168時間の蒸気暴露中及びその後のケーブル絶縁体の比誘電率の経時変化(PWR用ケーブル)

Fig. 3.8 Relative permittivity of cable insulations as a function of time, during and after the steam exposure at 200 and 220°C for 168 h, measured for the cables used in PWRs

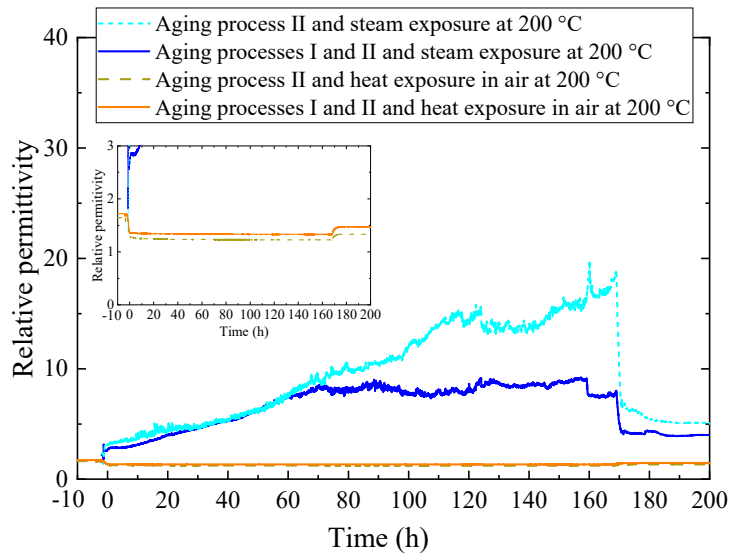
3. 2. 2 大気中加熱時の絶縁体の比誘電率

(1) BWR用ケーブル(SiRケーブル(B)、FR-EPDMケーブル(B))

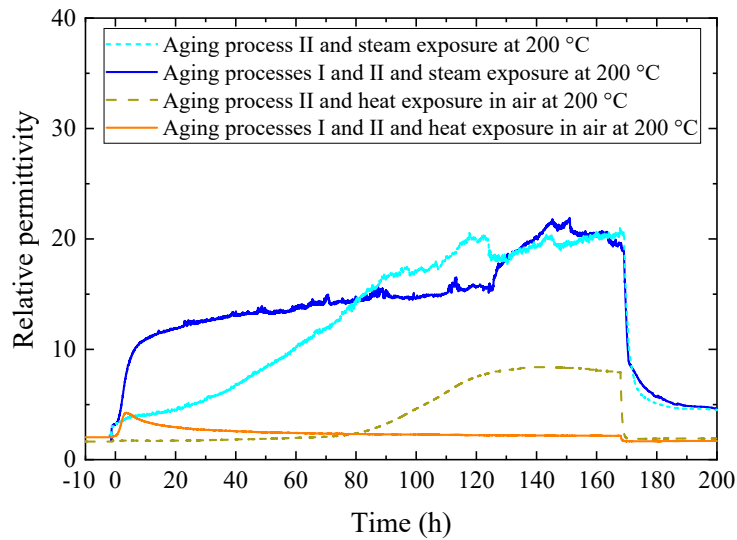
200°Cで168hの大気中加熱時のケーブル絶縁体の比誘電率の推移を図3.9に示す。また、比較のため、200°Cで168hの蒸気暴露時のケーブルの比誘電率の推移も併せて示す。大気中加熱開始後は、SiRケーブル(B)では、図3.9(a)中の拡大図に示すとおり、 ϵ_r が減少する。一方、FR-EPDMケーブル(B)では、図3.9(b)に示すとおり、劣化プロセスIありの試料及び劣化プロセスIなしの試料で、それぞれ、加熱期間前半、加熱期間後半において、 ϵ_r が増加する。

(2) PWR用ケーブル(SiRケーブル(P)、FR-EPDMケーブル(P))

200°Cで168hの大気中加熱時のケーブル絶縁体の比誘電率の推移を図3.10に示す。また、比較のため、200°Cで168hの蒸気暴露時のケーブルの比誘電率の推移も併せて示す。大気中加熱開始後は、SiRケーブル(P)では、図3.10(a)中の拡大図に示すとおり、 ϵ_r が減少する。一方、FR-EPDMケーブル(P)では、図3.10(b)に示すとおり、 ϵ_r が増加する。



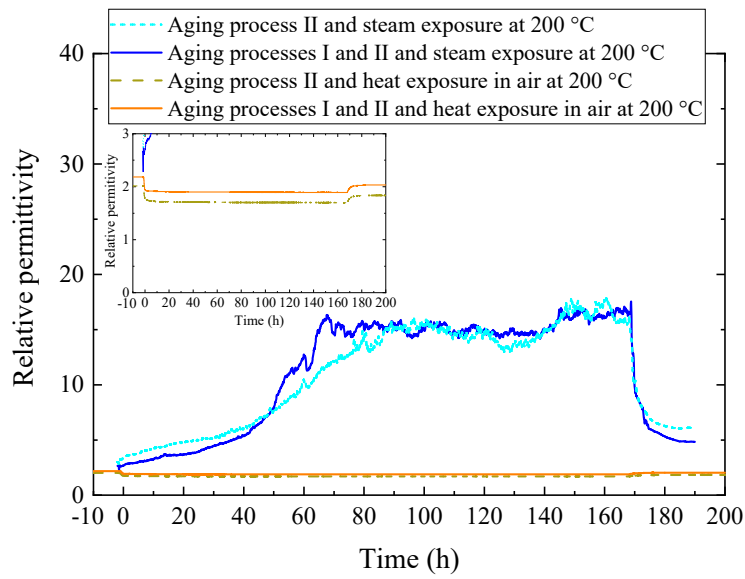
(a) SiRケーブル(B)



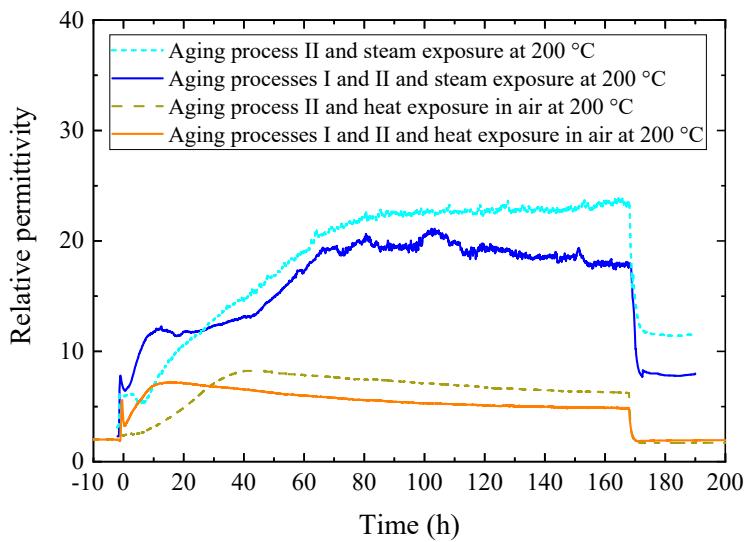
(b) FR-EPDMケーブル(B)

図3.9 200°Cで168時間の大気中加熱中及びその後のケーブル絶縁体の比誘電率の経時変化(BWR用ケーブル)

Fig. 3.9 Relative permittivity of cable insulations as a function of time, during and after the heat exposure in air at 200°C for 168 h, measured for the cables used in BWRs



(a) SiRケーブル(P)



(b) FR-EPDMケーブル(P)

図3.10 200°Cで168時間の大気中加熱中及びその後のケーブル絶縁体の比誘電率の経時変化(PWR用ケーブル)

Fig. 3.10 Relative permittivity of cable insulations as a function of time, during and after the heat exposure in air at 200°C for 168 h, measured for the cables used in PWRs

3. 3 耐電圧試験

表 3.1~3.4 に耐電圧試験の結果を示す。本研究で蒸気暴露を行った全てのケーブルは、JNES ガイド²²が健全性判定試験として規定する JIS C 3005: 2000 に基づく耐電圧試験^{33,59,60}に合格した。耐電圧試験後のケーブル供試体の状態の例を図 3.11 に示す。シース材料がガラス編組である SiR ケーブル(B)を除き、劣化プロセス I により劣化を付与したケーブル試験料では、シースの割れが見られる。

表3.1 耐電圧試験結果(SiRケーブル(B))

Table 3.1 Results of the voltage withstand test for the SiR cable (B)

No	事前劣化期間 (h)	放射線暴露積算線量 (kGy)	蒸気暴露条件				耐電圧試験結果	備考
			温度 (°C)	圧力 (MPaG)	時間 (h)	化学スプレー (0-24 h)		
1	0	1,600	171	0.60	336	噴霧なし	合格	14日間の事故を模擬する蒸気暴露
2	6,241	1,600	171	0.60	336	噴霧なし	合格	
3	0	800	171	0.60	168	噴霧なし	合格	7日間の事故を模擬する蒸気暴露
4	6,241	800	171	0.60	168	噴霧なし	合格	
5	0	800	200	0.62	168	噴霧なし	合格	
6	6,241	800	200	0.62	168	噴霧なし	合格	
7	0	800	220	0.62	168	噴霧なし	合格	
8	6,241	800	220	0.62	168	噴霧なし	合格	

表3.2 耐電圧試験結果(FR-EPDMケーブル(B))

Table 3.2 Results of the voltage withstand test for the FR-EPDM cable (B)

No	事前劣化期間 (h)	放射線暴露積算線量 (kGy)	蒸気暴露条件				耐電圧試験結果	備考
			温度 (°C)	圧力 (MPaG)	時間 (h)	化学スプレー (0-24 h)		
1	0	1,600	171	0.60	336	噴霧なし	合格	14日間の事故を模擬する蒸気暴露
2	6,990	1,600	171	0.60	336	噴霧なし	合格	
3	0	800	171	0.60	168	噴霧なし	合格	7日間の事故を模擬する蒸気暴露
4	6,990	800	171	0.60	168	噴霧なし	合格	
5	0	800	200	0.62	168	噴霧なし	合格	
6	6,990	800	200	0.62	168	噴霧なし	合格	
7	0	800	220	0.62	168	噴霧なし	合格	
8	6,990	800	220	0.62	168	噴霧なし	合格	

表3.3 耐電圧試験結果(SiRケーブル(P))



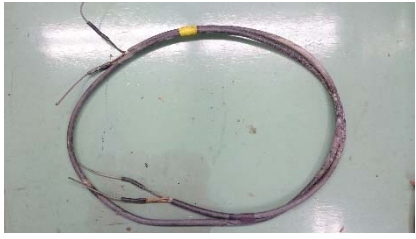

Table 3.3 Results of the voltage withstand test for the SiR cable (P)

No	事前劣化期間 (h)	放射線暴露積算線量 (kGy)	蒸気暴露条件				耐電圧試験結果	備考
			温度 (°C)	圧力 (MPaG)	時間 (h)	化学スプレー (0-24 h)		
1	0	1,000	155	0.44	336	噴霧あり	合格	14日間の事故を模擬する蒸気暴露
2	5,549	1,000	155	0.44	336	噴霧あり	合格	
3	0	500	200	0.62	168	噴霧なし	合格	7日間の事故を模擬する蒸気暴露
4	5,549	500	200	0.62	168	噴霧なし	合格	
5	0	500	220	0.62	168	噴霧なし	合格	
6	5,549	500	220	0.62	168	噴霧なし	合格	

表3.4 耐電圧試験結果(FR-EPDMケーブル(P))

Table 3.4 Results of the voltage withstand test for the FR-EPDM cable (P)

No.	事前劣化期間 (h)	放射線暴露積算線量 (kGy)	蒸気暴露条件				耐電圧試験結果	備考
			温度 (°C)	圧力 (MPaG)	時間 (h)	化学スプレー (0-24 h)		
1	0	1,000	155	0.44	336	噴霧あり	合格	14日間の事故を模擬する蒸気暴露
2	4,003	1,000	155	0.44	336	噴霧あり	合格	
3	0	500	200	0.62	168	噴霧なし	合格	7日間の事故を模擬する蒸気暴露
4	4,003	500	200	0.62	168	噴霧なし	合格	
5	0	500	220	0.62	168	噴霧なし	合格	
6	4,003	500	220	0.62	168	噴霧なし	合格	

No.	ケーブル名	熱・放射線同時劣化(劣化プロセスI)	
		なし	あり
1	SiRケーブル(B)		
2	FR-EPDM ケーブル(B)		

注) 試験後の分析のためケーブルを一部切断した後に撮影

図3.11(1/4) 耐電圧試験後のケーブル供試体

(劣化プロセスII : 1,600kGy、蒸気暴露 : 171°C、0.60MPaG、336h)

Fig. 3.11 (1/4) Cable specimens after the voltage withstand test

(aging process II: 1,600 kGy, steam exposure: 171°C and 0.60 MPaG for 336 h)




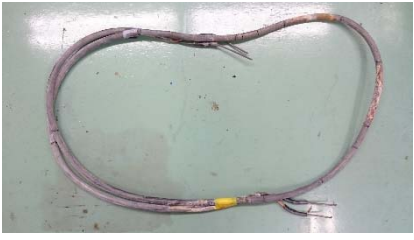
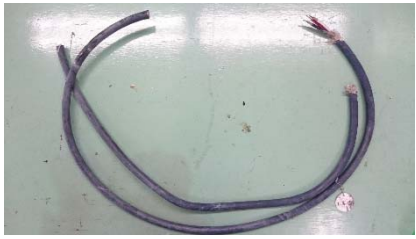
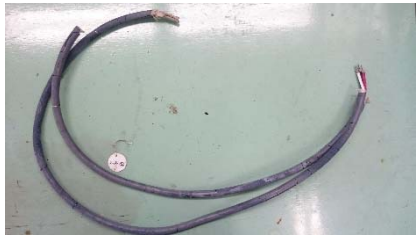


No.	ケーブル名	熱・放射線同時劣化(劣化プロセスI)	
		なし	あり
1	SiRケーブル(B)		
2	FR-EPDM ケーブル(B)		

図3.11(2/4) 耐電圧試験後のケーブル供試体

(劣化プロセスII : 800kGy、蒸気暴露 : 200°C、0.62MPaG、168h)

Fig. 3.11 (2/4) Cable specimens after the voltage withstand test

(aging process II: 800 kGy, steam exposure: 200°C and 0.62 MPaG for 168 h)

No.	ケーブル名	熱・放射線同時劣化(劣化プロセスI)	
		なし	あり
1	SiRケーブル(P)		
2	FR-EPDM ケーブル(P)		




注) 試験後の分析のためケーブルを一部切断した後に撮影

図3.11(3/4) 耐電圧試験後のケーブル供試体

(劣化プロセスII : 1,000kGy、蒸気暴露 : 155°C、0.44MPaG、336h)

Fig. 3.11 (3/4) Cable specimens after the voltage withstand test

(aging process II: 1,000 kGy, steam exposure: 155°C and 0.44 MPaG for 336 h)

No.	ケーブル名	熱・放射線同時劣化(劣化プロセスI)	
		なし	あり
1	SiRケーブル(P)		
2	FR-EPDM ケーブル(P)		

注) 試験後の分析のためケーブルを一部切断した後に撮影

図 3.11(4/4) 耐電圧試験後のケーブル供試体

(劣化プロセスII : 500kGy、蒸気暴露 : 200°C、0.62MPaG、168h)

Fig. 3.11 (4/4) Cable specimens after the voltage withstand test

(aging process II: 500 kGy, steam exposure: 200°C and 0.62 MPaG for 168 h)

4. 考察

4. 1 蒸気暴露時のケーブルの絶縁抵抗低下の要因について

2.2.2節の(4)で述べたように、過去に、設計基準事故時を模擬する健全性評価試験の蒸気暴露中にケーブルの絶縁抵抗を測定した例があり、ケーブル長さ1m当たりの絶縁抵抗は、 $10^6\Omega\text{m}$ を下回る程度まで低下することが報告されている^{53,54}。また、これらの絶縁抵抗低下の要因として、温度の影響が挙げられている^{53,54}。一方、本研究では、図3.1～3.4に示すように、重大事故を模擬する蒸気暴露中において、ケーブルの絶縁抵抗は最大でケーブル長さ1m当たりで $10^5\Omega\text{m}$ 程度まで低下することが分かった。過去の報告例と本研究の試験では、ケーブルの種類、経年劣化の模擬試験条件、事故環境の模擬試験条件等が異なることから、試験結果を単純に比較することはできないが、高温の蒸気暴露中においてケーブルの絶縁抵抗が低下するという点では一致している。

ここでは、実用絶縁ゴムの電気伝導現象の理論について述べた上で、3章で示した試験結果、試験後に追加的に実施したケーブル絶縁体分析結果等から、重大事故を模擬する蒸気暴露中のケーブルの絶縁抵抗低下の要因について、以下のとおり考察する。

4. 1. 1 実用絶縁ゴムの電気伝導現象の理論

本研究では、ケーブルの絶縁芯線間の電流、即ちケーブル絶縁体中を流れる電流を測定し、絶縁抵抗を求めた。実用絶縁ゴムの電気伝導は、絶縁体中に存在する不純物等により供給されるイオンによる伝導とされており、その電流密度 $j(\text{A}/\text{m}^2)$ は、

$$j = 2eNave \exp\left(-\frac{U}{k_B T}\right) \sinh \frac{eEa}{2k_B T} \quad (4.1)$$

で表される⁶³。ここで、 $e(\text{C})$ はイオンの電荷量、 $N(1/\text{m}^3)$ は可動イオン密度、 $a(\text{m})$ は隣接イオン平衡位置間の距離、 $\nu(\text{Hz})$ はイオンの熱振動の振動数、 $U(\text{J})$ はイオンの移動障壁、 k_B はボルツマン定数、 $T(\text{K})$ は絶対温度、 $E(\text{V}/\text{m})$ は電界である。また、イオン密度 N は、

$$N \propto \exp\left(-\frac{U_d}{k_B T}\right) \quad (4.2)$$

で表される⁶⁴。ここで、 $U_d(\text{J})$ は、不純物の解離エネルギーである。イオン密度 N については、不純物、各種添加剤、吸湿が寄与する⁶³。これらの式より、温度 T が大きく、イオン密度 N が大きいほど、電流密度が大きくなり、絶縁抵抗が低下する。さらに、高分子が吸湿し、誘電率の大きな水分が存在する場合、イオン解離性物質の解離度が増加し⁶⁵、イオン密度 N の増加に寄与する。

4. 1. 2 蒸気暴露時の絶縁体内における蒸気の拡散について

(1) SiRケーブル(B)、SiRケーブル(P)について

SiRケーブル(B)及びSiRケーブル(P)の絶縁体のシリコンゴムの組成や配合等の情報は開示されておらず詳細は不明であるが、シリコンゴムにはベースポリマーの他、充填剤、分散助剤や難燃性向上剤等の添加剤が配合されていると言われている⁶⁶。これらの添加剤等を発生源とするイオン結合性物質が解離し、可動イオンとなる可能性が考えられる。

また、SiRケーブル(B)及びSiRケーブル(P)の絶縁体であるシリコンゴムは、気体透過性が高く⁶⁷、水蒸気の透過性も高い⁶⁸ことが知られている。また、SiRケーブル(B)及びSiRケーブル(P)のシース材料は、それぞれ、隙間の多い構造であるガラス編組、絶縁体と同様に気体透過性が高いと考えられるシリコンゴムであることから、蒸気暴露時に蒸気は容易にシースを透過し、さらに絶縁体内を拡散していると考えられる。

次に、蒸気暴露時に、絶縁体内を拡散する蒸気が、どのような状態にあるのか考える。図 3.7(a)、図 3.8(a)に示すように、絶縁体の比誘電率 ϵ_r は、蒸気暴露開始後に増加する。経年劣化の模擬のあり・なし、蒸気暴露温度及び時間によって異なるが、 ϵ_r は最大約 25 程度となる。一方、図 3.9(a)及び図 3.10(a)中の拡大図に示すように、200°C の蒸気暴露における熱のみの影響を模擬した 200°C の大気中加熱時には、 ϵ_r は増加せず、わずかに減少する。このような挙動は、本研究の供試ケーブルの絶縁体と同配合のシート試料に対する比誘電率測定でも観察されており^{69,70}、熱擾乱の影響による分極の乱れや、熱膨張による分極密度の低下が原因であるとされている⁷¹⁻⁷³。これらのことから、蒸気暴露時の ϵ_r の増加は、蒸気暴露中において、比誘電率の大きな物質が絶縁体中に存在しているためと考えられる。しかしながら、本研究の蒸気暴露温度近傍の 150~220°C における蒸気の比誘電率は、1.01~1.06⁷⁴であるとされており、単に絶縁体中に蒸気が拡散するだけでは、比誘電率を増加させる要因にはならない。一方、150~220°C における水の比誘電率は 43.94~31.53⁷⁴と報告されている。このことから蒸気暴露中においては、絶縁体内に拡散した蒸気の一部が凝縮し、液体の水となっている可能性が考えられる。

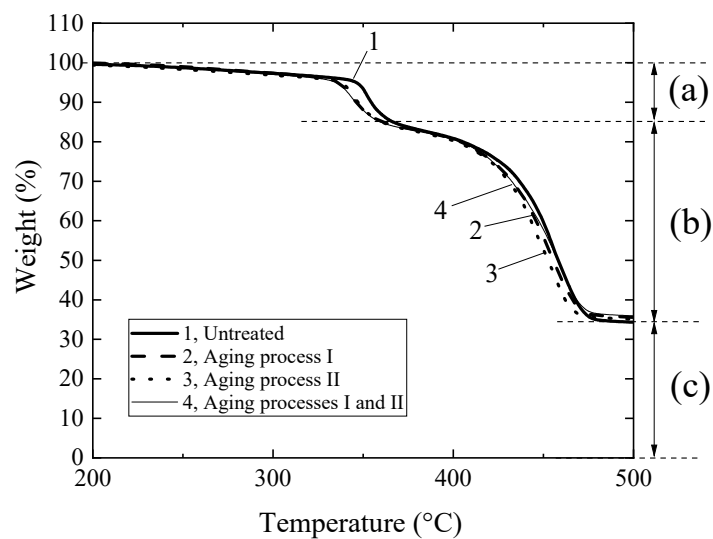
(2) FR-EPDMケーブル(B)、FR-EPDMケーブル(P)

FR-EPDMケーブル(B)及びFR-EPDMケーブル(P)についても、絶縁体のエチレンプロピレンジエンゴムの組成や配合剤等の情報は開示されていないが、分析の結果、難燃剤、酸化防止剤、滑剤、充填剤等の添加剤が配合されていることが分かっている。図4.1にFR-EPDMケーブル(B)及びFR-EPDMケーブル(P)の黒色の絶縁体(以下それぞれ「FR-EPDM(B)」、「FR-EPDM(P)」という。)の熱重量分析の結果を示す。未処理試料では、室温から500°Cまで昇温する際、350°C近傍及び450°C近傍において2段階で質量減少している。図4.1(a)及び(b)中の(a)、(b)は質量減少率、(c)は500°Cで分解しない部分の質量割合(残分率)であり、未処理試料について、JIS K 7120に基づき算出した結果を示している。エチレンプロピレンジエンゴムの標準材料を用いた窒素雰囲気中での熱重量測定において、400~450°Cにおいて熱分解による急激な重量減少が一段階で起こる⁷⁵ことが報告されている。このことから、図4.1(a)

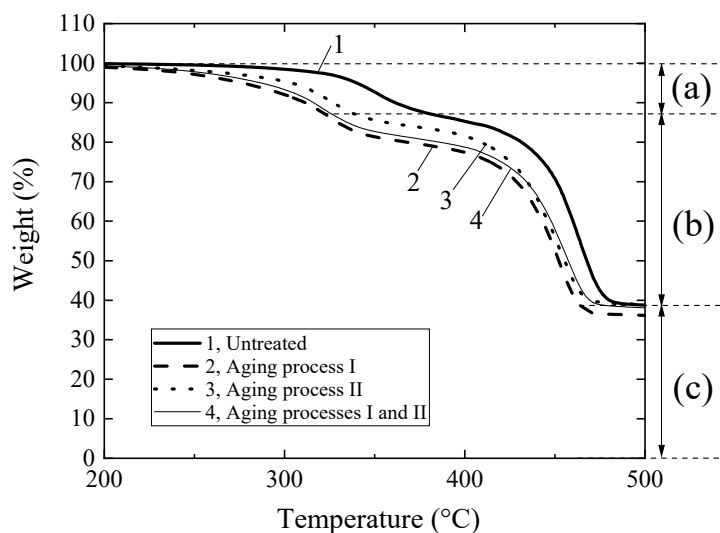
及び(b)中に示す質量減少率(b)はベースポリマーのEPDMの熱分解に起因すると考えられ、質量減少率(a)は、ベースポリマー以外の有機物の添加剤に起因すると考えられる。また、FR-EPDM絶縁体には、充填剤としてタルクが、着色剤としてカーボンブラックが使用されている。これらは、少なくとも500°C程度までは熱的に安定であることが知られている^{76,77}。このことから、図4.1(a)及び(b)中に示す残分率(c)はタルク及びカーボンブラックであると考えられる。劣化プロセスI、劣化プロセスIIのみで処理した試料、劣化プロセスIの後に劣化プロセスIIを行った試料でも、同様に2段階での質量減少が見られる。このように、FR-EPDM(B)及びFR-EPDM(P)には、重量の半分程度をベースポリマー以外の添加剤等が占めている。これらの添加剤等を発生源とするイオン結合性物質が解離し、可動イオンとなる可能性が考えられる。

FR-EPDMケーブル(B)、FR-EPDMケーブル(P)の絶縁体であるエチレンプロピレンジエンゴムについても、一定のガス透過性を有する⁷⁸。図4.2に劣化プロセスI、II及び220°Cの蒸気暴露を行ったFR-EPDMケーブル(B)を試験後に分解して取り出した絶縁体FR-EPDM(B)に対して、全反射型フーリエ変換赤外分光法により測定した赤外吸収スペクトルを示す。なお、本測定では、測定結果に絶縁体内部の状態が反映されるように、絶縁体の厚さ方向の1/2程度の断面を得られるように切断し、この断面を測定対象とした。図4.2(a)に示すように、蒸気暴露後の試料では、3000~3600 cm^{-1} 近傍にブロードな吸収ピークの増加が見られる。一方、図4.2(b)に示すように、この試料を150°Cの空气中で15、30分間加熱した試料では、ブロードな吸収ピークの減少が見られた。また、FR-EPDM(P)についても、同様の変化が観察された。このことから、3000~3600 cm^{-1} 近傍の幅広い吸収ピークは、蒸気暴露中に絶縁体中に浸透・拡散していた水蒸気が、蒸気暴露後の降温により凝縮して残留した水のOHの伸縮⁷⁹に起因するものと考えられる。また、日馬らの研究において、蒸気暴露したエチレンプロピレンジエンゴムにおいて吸水膨潤が起こることが示されている⁴³。これらのことから、蒸気暴露時に蒸気が絶縁体内を拡散していると推定される⁸⁰。

図 3.7(b)、図 3.8(b)に示すように、絶縁体の比誘電率 ϵ_r は、蒸気暴露開始後に増加する。 ϵ_r は劣化プロセス I の有無、蒸気暴露温度及び時間によって異なり、171°C で蒸気暴露した試料では 30~40 程度、その他の試料では、最大約 20 程度となる。一方、図 3.9(b)及び図 3.10(b)に示すように、200°C の蒸気暴露時の ϵ_r は、200°C の大気中加熱時よりも大きくなる。このことから SiR ケーブル(B)及び SiR ケーブル(P)と同様に、蒸気暴露中においては、絶縁体内に拡散した蒸気の一部が凝縮し、液体の水となっている可能性が考えられる。また、FR-EPDM ケーブル(B)及び FR-EPDM ケーブル(P)については、図 3.9(b)及び図 3.10(b)に示すように、大気中加熱と蒸気暴露の試料を劣化プロセス I の有無ごとに比較すると、 ϵ_r が増加する時間がほぼ重なる傾向が見られる。このことは、蒸気暴露時には、蒸気の浸透・凝縮と加熱による効果が重畳し、 ϵ_r の増加に寄与していることを示唆している。



(a) FR-EPDM(B)

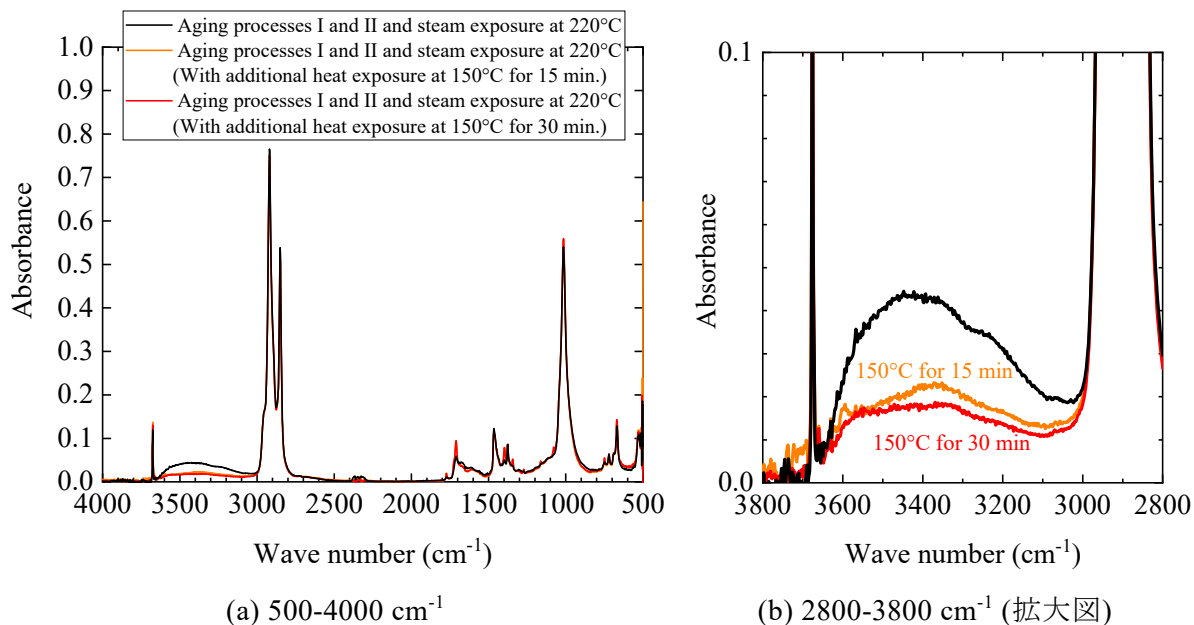


(b) FR-EPDM(P)

出典) 皆川武史、池田雅昭、平井直志、大木義路、“重大事故模擬環境に暴露したエチレンプロピレンジエンゴム絶縁ケーブルの劣化状態分析”、電気学会論文誌A、Vol. 139、No.9、pp.380-386、2019⁸⁰ (図4.1(a)について、出典図より一部データ抜粋)

図4.1 熱重量測定により評価したFR-EPDM絶縁体の重量の温度依存性

Fig. 4.1 Changes in weight of FR-EPDM insulation as a function of temperature obtained by thermogravimetric analysis



出典) 皆川武史、池田雅昭、平井直志、大木義路、“重大事故模擬環境に暴露したエチレンプロピレンジエンゴム絶縁ケーブルの劣化状態分析”、電気学会論文誌A、Vol. 139、No.9、pp.380-386、2019⁸⁰ (図4.2(b)について、出典の図を一部改変)

図4.2 劣化プロセスI・II及び220°Cの蒸気暴露を行ったFR-EPDMケーブル(B)の絶縁体の赤外吸収スペクトル

Fig. 4.2 FT-IR absorption spectra as a function of wave number, observed for insulation of FR- EPDM cable (B) subjected to aging processes I and II and steam exposure at 220°C

4. 1. 3 蒸気暴露前、暴露中及び暴露後のケーブルの絶縁抵抗について

4.1.1及び4.1.2節の内容を踏まえ、蒸気暴露前、暴露中及び暴露後におけるケーブルの絶縁抵抗の変化について考察する。168hの蒸気暴露を行った場合の蒸気暴露開始時及び終了時点近傍におけるケーブルの換算絶縁抵抗、絶縁体の比誘電率及び蒸気暴露装置内の温度の関係を図4.3～4.12に示す。これらの図では、代表例として、劣化プロセスI及び劣化プロセスIIの後に蒸気暴露を行ったケーブルのデータを示す。図4.3～4.12中に示すように、蒸気暴露試験における換算絶縁抵抗と比誘電率の挙動から、以下のI～IVの期間に区分する。

- ・ I：蒸気暴露開始前
- ・ II：蒸気暴露開始直後
- ・ III：IIの後、蒸気暴露終了まで
- ・ IV：蒸気暴露終了後

(I) 蒸気暴露開始前

Iにおいては、蒸気暴露前に室温でケーブルの線芯(導体)間に直流電圧100Vを印加している。直流電圧100Vを印加開始後、芯線間には吸収電流が流れる。その後、電流は減少して漏れ電流に収束する⁸¹。このため、Iでは、換算絶縁抵抗が上昇すると考えられる。図4.4(a)、4.7(a)、4.10(a)及び4.12(a)の換算絶縁抵抗の変化からこの傾向が読み取れる。

(II) 蒸気暴露開始直後

IIにおいては、図4.3～4.12の(a)に示すように、蒸気暴露装置内に蒸気が注入され、ケーブルの周囲温度が短時間に上昇する。同時に、換算絶縁抵抗は $10^7\Omega\text{m}$ 程度まで急激に減少する。一方、ケーブル絶縁体の比誘電率は減少する。これは、蒸気暴露開始後短時間であるため、ケーブル絶縁体内に蒸気の浸透及び凝縮が殆ど起こらないうちに、ケーブルの温度が上昇し、熱膨張や熱擾乱の影響による分極の乱れ等により分極密度が低下することを示唆している⁷¹⁻⁷³。このことから、IIにおけるケーブルの絶縁抵抗の低下は、温度上昇により、式(4.1)により表される電流密度が増加することが原因であると考えられる。また、温度上昇により、式(4.2)により表されるイオン密度が増加することも電流密度の増加に寄与する。

(III) IIの後、蒸気暴露終了まで

IIIにおいては、図4.3～4.12の(a)に示すように、蒸気暴露装置内の温度は設定温度まで上昇し、その後、蒸気暴露終了まで一定となる。ケーブル絶縁体の比誘電率は増加し、初期値よりも大きくなる。これは、絶縁体中に蒸気が浸透し、一部の蒸気の凝縮が起こるためと考えられる。また、ケーブルの換算絶縁抵抗は、 $10^5\Omega\text{m}$ 程度まで減少する。これは、IIで述べた温度の効果による電流密度の増加に加え、蒸気の浸透・凝縮の結果もたらされる吸湿によりイオン解離性物質の解離度の増加が起こり、イオン密度がさらに増加することにより、電流密度が増加するためと考えられる。また、蒸気暴露による絶縁体のベースポリマーの変化が寄与している可能性がある。

また、図3.2及び図3.4に示すように、蒸気暴露温度が高いほど、より早期に換算絶縁抵抗が低下する傾向が見られる。さらに、蒸気暴露開始後約80時間以降において、換算絶縁抵抗は、蒸気暴露温度によらず、 $10^5\Omega\text{m}$ 程度でほぼ一定となる。また、図3.3に示すように、 155°C で336hの蒸気暴露した試料については、劣化プロセスIIの γ 線照射線量が異なる、蒸気暴露は飽和蒸気で行っている、蒸気暴露中に化学スプレーを適用している、といった試験条件の相違があるため、単純な比較はできないが、ケーブルの換算絶縁抵抗は初期に $10^8\Omega\text{m}$ 程度となった後、緩やかに増加しており、図3.2及び図3.4に示す試料と異なる傾向を示す。これらの理由については、現時点で明らかではない。

一方、図3.5、図3.6に示すように、SiRケーブル(B)及びSiRケーブル(P)においては、大気中加熱時には、蒸気暴露時と比較して、換算絶縁抵抗は高いが、FR-EPDMケーブル(B)及びFR-EPDMケーブル(P)においては、その差は小さい。このことから、SiRケーブル(B)及びSiRケーブル(P)においては、吸湿による効果が大きいのに対し、FR-EPDMケーブル(B)及び

FR-EPDMケーブル(P)においては、元々絶縁体中に存在する添加剤等による効果が大きいと考えられる。これは、図4.1(a)及び(b)に示すように、FR-EPDMケーブル(B)及びFR-EPDMケーブル(P)の絶縁体の重量の半分以上をベースポリマー以外の添加剤が占めているためと考えられる。

(IV) 蒸気暴露終了後

IVにおいては、図4.3～4.12の(b)に示すように、蒸気暴露装置内への蒸気の注入が停止され、蒸気暴露装置内の温度が室温まで低下する。同時に、ケーブル絶縁体の比誘電率は減少する。これは、蒸気暴露中に絶縁体中に浸透していた蒸気や液体の状態の水が、絶縁体の外に排出されたことが要因として考えられる。また、この時、ケーブルの換算絶縁抵抗が上昇している。これは、温度低下により、式(4.1)に表される電流密度が減少することが原因であると考えられる。また、温度低下により式(4.2)により表される添加剤等を発生源とするイオン密度が減少すること及び絶縁体内に存在していた液体の状態の水の減少により、イオン解離性物質の解離度が減少することも電流密度の減少に寄与する。ただし、図4.3～4.12に示すように、ケーブルの換算絶縁抵抗は、蒸気暴露前と比較して小さくなる。これは、蒸気暴露による吸湿の他、蒸気暴露による絶縁体のベースポリマーの変化が寄与している可能性がある。

表4.1にI～IVにおけるケーブルの絶縁抵抗の変化の要因について考察のまとめを示す。

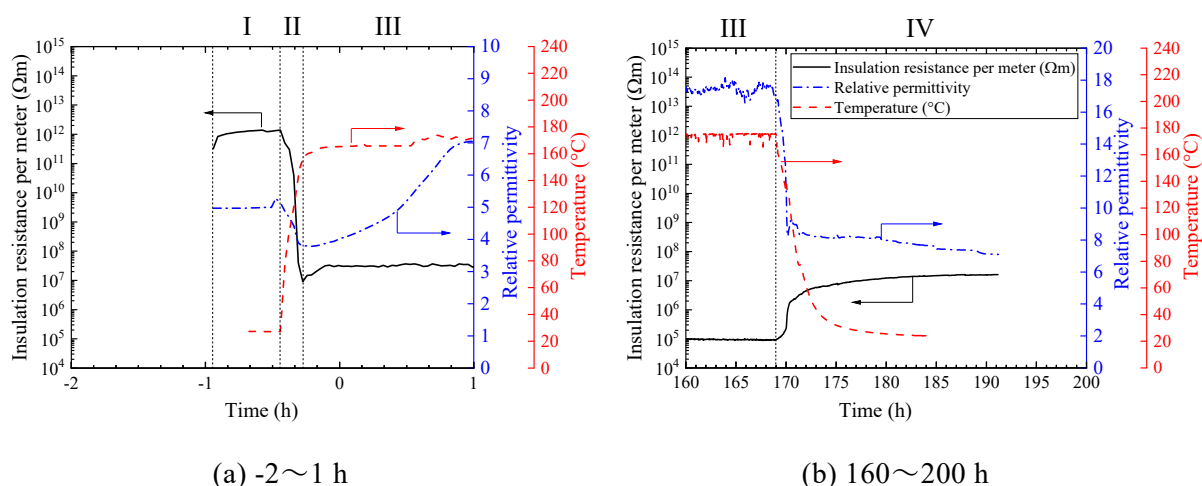


図4.3 171°Cで168時間の蒸気暴露前、暴露中及び暴露後のケーブル長さ1メートル当たりの絶縁抵抗の経時変化(劣化プロセスIありのSiRケーブル(B))

Fig. 4.3 Insulation resistance per meter as a function of time, before, during, and after the steam exposure at 171°C for 168 h, measured for SiR cable (B) with aging process I

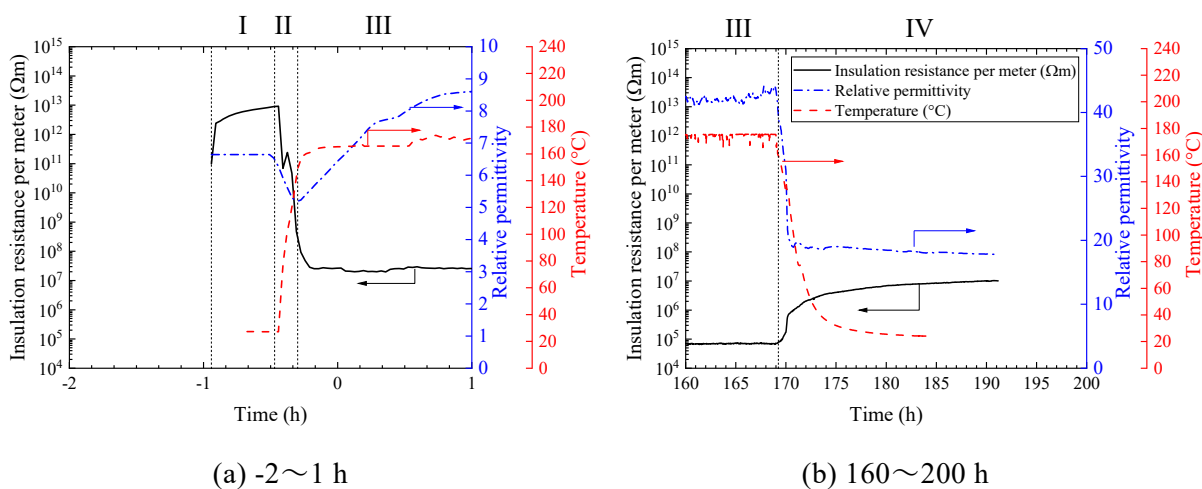


図4.4 171°Cで168時間の蒸気暴露前、暴露中及び暴露後のケーブル長さ1メートル当たりの絶縁抵抗の経時変化(劣化プロセスIありのFR-EPDMケーブル(B))

Fig. 4.4 Insulation resistance per meter as a function of time, before, during, and after the steam exposure at 171°C for 168 h, measured for FR-EPDM cable (B) with aging process I

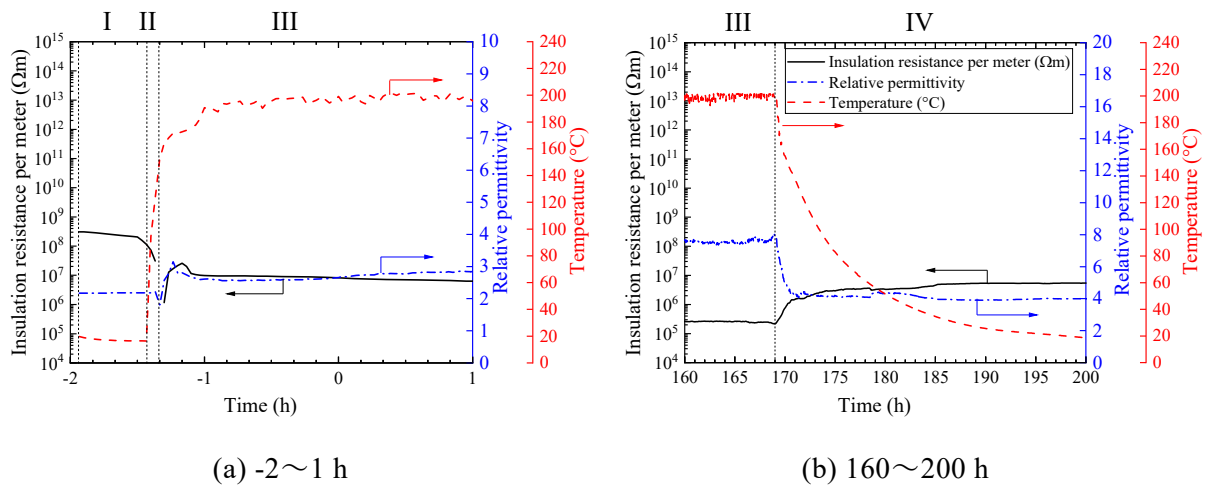


図4.5 200°Cで168時間の蒸気暴露前、暴露中及び暴露後のケーブル長さ1メートル当たりの絶縁抵抗の経時変化(劣化プロセスIありのSiRケーブル(B))

Fig. 4.5 Insulation resistance per meter as a function of time, before, during, and after the steam exposure at 200°C for 168 h, measured for SiR cable (B) with aging process I

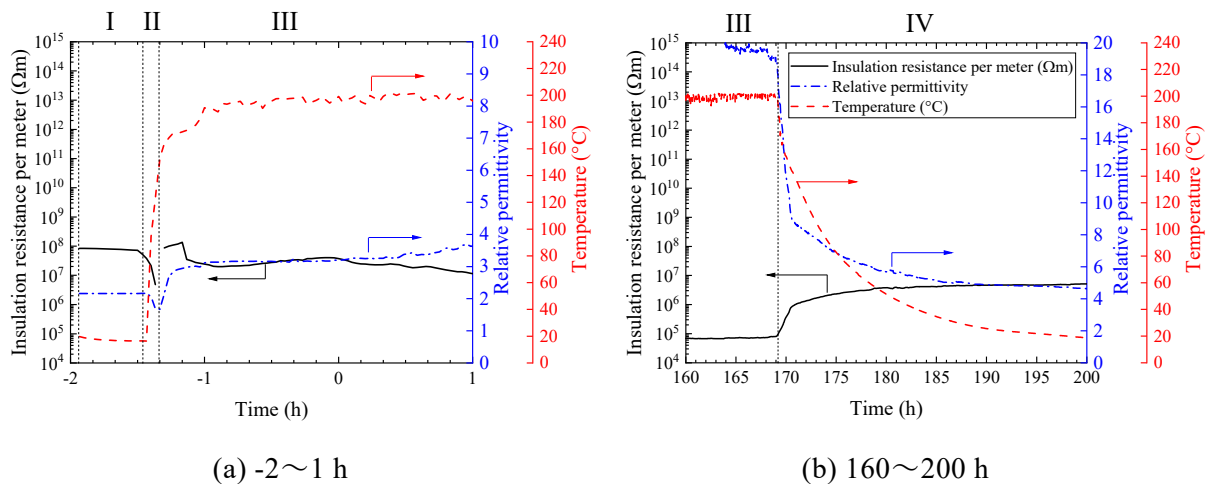


図4.6 200°Cで168時間の蒸気暴露前、暴露中及び暴露後のケーブル長さ1メートル当たりの絶縁抵抗の経時変化(劣化プロセスIありのFR-EPDMケーブル(B))

Fig. 4.6 Insulation resistance per meter as a function of time, before, during, and after the steam exposure at 200°C for 168 h, measured for FR-EPDM cable (B) with aging process I

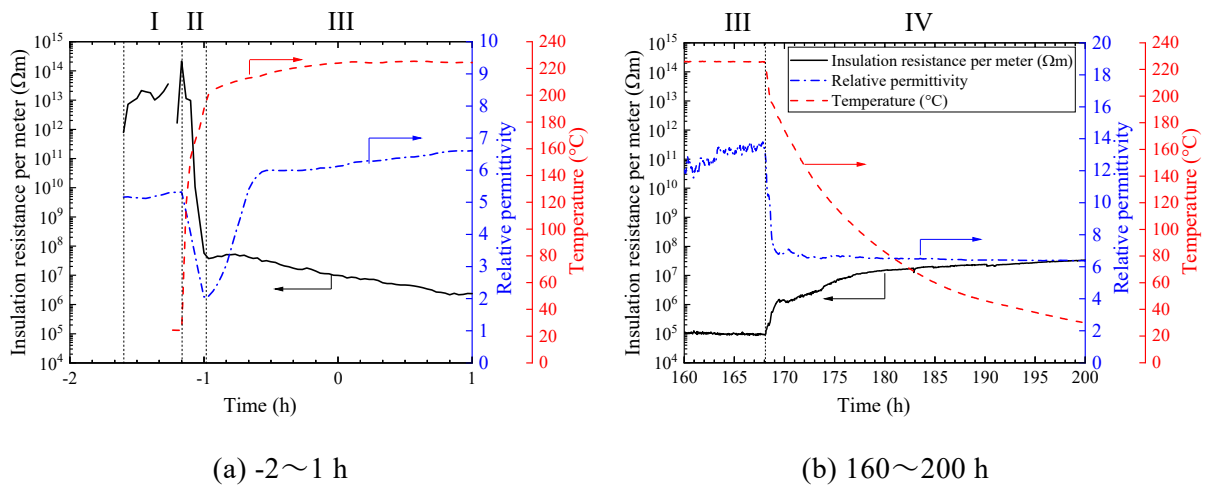


図4.7 220°Cで168時間の蒸気暴露前、暴露中及び暴露後のケーブル長さ1メートル当たりの絶縁抵抗の経時変化(劣化プロセスIありのSiRケーブル(B))

Fig. 4.7 Insulation resistance per meter as a function of time, before, during, and after the steam exposure at 220°C for 168 h, measured for SiR cable (B) with aging process I

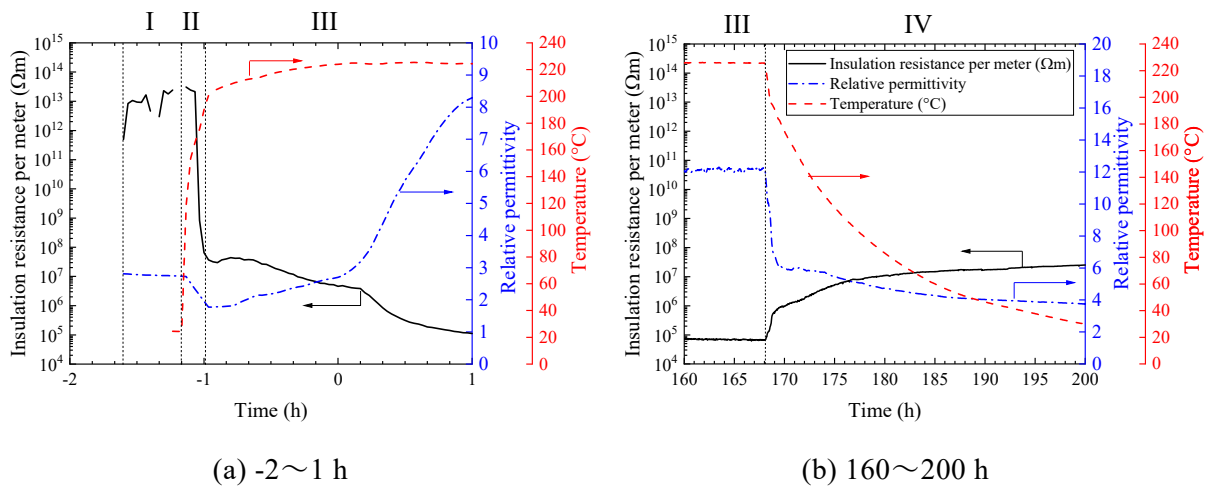


図4.8 220°Cで168時間の蒸気暴露前、暴露中及び暴露後のケーブル長さ1メートル当たりの絶縁抵抗の経時変化(劣化プロセスIありのFR-EPDMケーブル(B))

Fig. 4.8 Insulation resistance per meter as a function of time, before, during, and after the steam exposure at 220°C for 168 h, measured for FR-EPDM cable (B) with aging process I

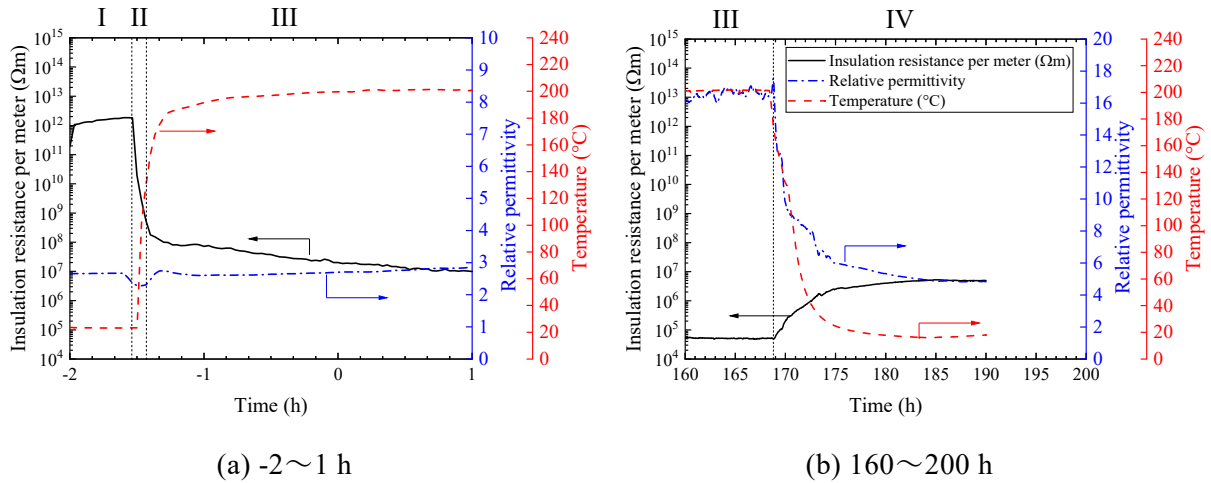


図4.9 200°Cで168時間の蒸気暴露前、暴露中及び暴露後のケーブル長さ1メートル当たりの絶縁抵抗の経時変化(劣化プロセスIありのSiRケーブル(P))

Fig. 4.9 Insulation resistance per meter as a function of time, before, during, and after the steam exposure at 200°C for 168 h, measured for SiR cable (P) with aging process I

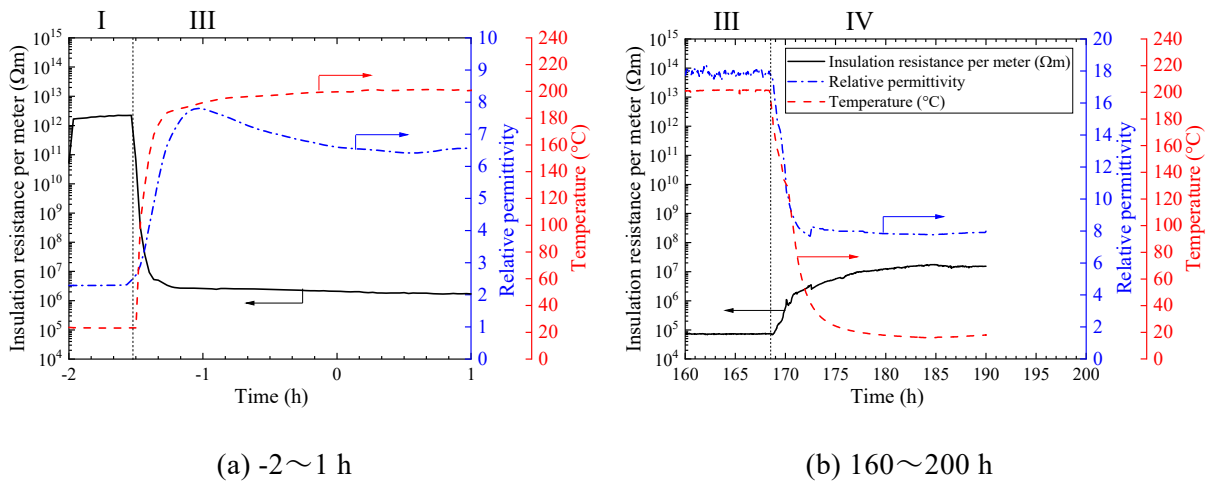


図4.10 200°Cで168時間の蒸気暴露前、暴露中及び暴露後のケーブル長さ1メートル当たりの絶縁抵抗の経時変化(劣化プロセスIありのFR-EPDMケーブル(P))

Fig. 4.10 Insulation resistance per meter as a function of time, before, during, and after the steam exposure at 200°C for 168 h, measured for FR-EPDM cable (P) with aging process I

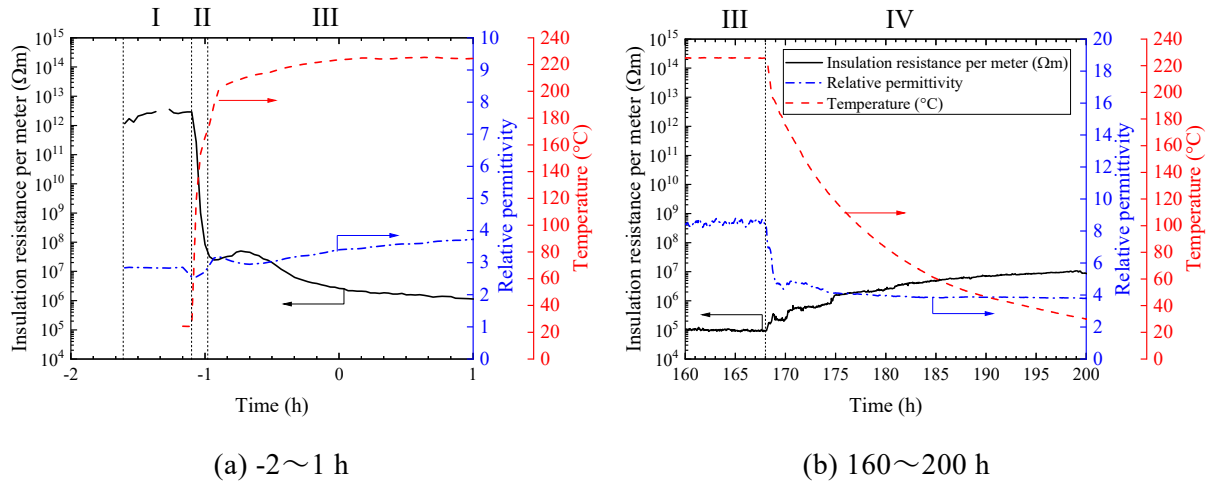


図4.11 220°Cで168時間の蒸気暴露前、暴露中及び暴露後のケーブル長さ1メートル当たりの絶縁抵抗の経時変化(劣化プロセスIありのSiRケーブル(P))

Fig. 4.11 Insulation resistance per meter as a function of time, before, during, and after the steam exposure at 220°C for 168 h, measured for SiR cable (P) with aging process I

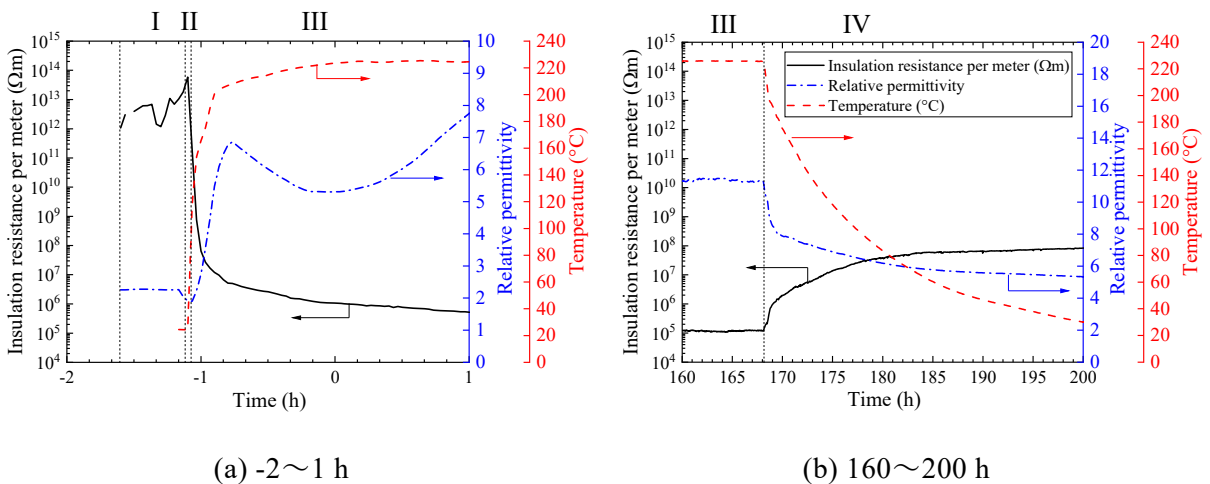


図4.12 220°Cで168時間の蒸気暴露前、暴露中及び暴露後のケーブル長さ1メートル当たりの絶縁抵抗の経時変化(劣化プロセスIありのFR-EPDMケーブル(P))

Fig. 4.12 Insulation resistance per meter as a function of time, before, during, and after the steam exposure at 220°C for 168 h, measured for FR-EPDM cable (P) with aging process I

表4.1 蒸気暴露前、暴露中及び暴露後のケーブルの絶縁抵抗の変化について
想定される要因

Table 4.1 Possible factors for change in insulation resistance of the cables, before, during, and after the steam exposure

期間	I: 蒸気暴露 開始前	II: 蒸気暴露 開始直後	III: II の後、 蒸気暴露 終了まで	IV: 蒸気暴露 終了後
蒸気暴露 装置内の温度	→	↑	→	↓
絶縁体の 比誘電率	→	↓ - 温度上昇による 絶縁体の熱膨 張、熱擾乱の影 響による分極の 乱れによる分極 密度の低下 - 絶縁体内に蒸気 の浸透及び凝縮 は殆どに起こら ない	↑ - 蒸気が絶縁体中 に浸透し、一部 が凝縮する	↓ - 蒸気暴露中に絶 縁体中に浸透し ていた蒸気や液 体の状態の水が 絶縁体の外に排 出される。
芯線間の 電流密度	↓ - 直流電圧 100V の印加開始後に 流れる吸収電流 の減少	↑ - 温度上昇による 電流密度の増加	↑ - 蒸気の浸透・凝 縮の結果もたら される吸湿によ りイオン解離性 物質の解離度が 増加し、イオン 密度が増加して 電流密度が増加	↓ - 温度低下による 電流密度の減少 - 絶縁体中の水の 減少により蒸気 のイオン解離性 物質の解離度が 減少し、イオン 密度が減少して 電流密度が減少
ケーブルの 絶縁抵抗	↑	↓	↓	↑

注) “→”、“↑”、“↓”は、それぞれ、一定、増加、減少を意味する。

4. 2 蒸気暴露時のケーブルの絶縁性能に与える経年劣化の影響について

図 3.1~3.4 に示すように、劣化プロセス I の有無による蒸気暴露中のケーブルの絶縁抵抗の有意な差は観察されなかった。このことから、本研究で劣化プロセス I として各ケーブルに付与した劣化度までは、重大事故模擬環境下における絶縁性能に有意な影響を与えないと考えられる。ただし、本研究の劣化プロセス I で付与したよりも、劣化度が大きいケーブルについては、経年劣化が重大事故模擬環境下における絶縁性能に影響を与える可能性は否定できない。

4. 3 ケーブルの絶縁抵抗低下の影響について

計装システムで使用されるケーブルの絶縁抵抗が低下した場合、絶縁抵抗に応じて測定値に誤差が生じる可能性がある。ここでは、本研究で観測されたケーブルの絶縁抵抗低下が計装システムの測定結果に与える影響について、検出器として熱電対温度計及び圧力伝送器が使用されている回路を例として考える。

4. 3. 1 熱電対温度計

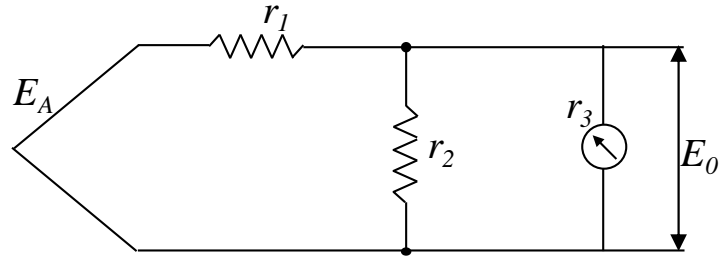
ここでは、K型(クロメル・アルメル)熱電対温度計の回路を例として考える。図4.13に熱電対回路の等価回路⁸²を示す。 E_A は熱電対の熱起電力(V)、 r_1 は熱電対・補償導線の抵抗(Ω)、 r_2 は絶縁抵抗(Ω)、 r_3 は計器の内部抵抗(Ω)、 E_0 は計器への入力電圧(V)である。ここで、 r_2 と r_3 の合成抵抗 R 、 E_0 は、それぞれ式(4.3)、(4.4)で表される。

ここで、熱電対・補償導線の抵抗 r_1 を 11Ω 、計器の内部抵抗 r_3 を $10^8\Omega$ と仮定し、熱電対で $100\sim 240^\circ\text{C}$ の温度を測定した際の、熱電対回路の絶縁抵抗 r_2 と温度測定結果(測定される温度)の関係を図4.14に示す。なお、本図を図示するに当たっては、National Institute of Standards and Technology(米国国立標準技術研究所)が公表している熱起電力を温度に変換する式(4.5)⁸³を用いた。式(4.5)における係数 d_n は、熱起電力 E の単位をmVとする時、 $d_0=0$ 、 $d_1=2.508355 \times 10^1$ 、 $d_2=7.860106 \times 10^{-2}$ 、 $d_3=-2.503131 \times 10^{-1}$ 、 $d_4=8.315270 \times 10^{-2}$ 、 $d_5=-1.228034 \times 10^{-2}$ 、 $d_6=9.804036 \times 10^{-4}$ 、 $d_7=-4.413030 \times 10^{-5}$ 、 $d_8=1.057734 \times 10^{-6}$ 、 $d_9=-1.052755 \times 10^{-8}$ である⁸³。

図4.14に示すように、 $100\sim 240^\circ\text{C}$ のいずれの温度を測定した場合においても、絶縁抵抗が概ね $10^3\Omega$ を下回ると、実際の温度よりも低く測定される傾向がある。図4.15に、熱電対で $100\sim 240^\circ\text{C}$ の温度を測定した際の、絶縁抵抗 r_2 と測定誤差の関係を示す。同図より、測定対象の温度が高いほど、絶縁抵抗 r_2 の低下する際に、測定される温度の実際の温度からの誤差が大きくなる。

温度 200°C の測定を行った際に、熱電対回路の絶縁抵抗 r_2 が低下した場合の測定誤差の計算値を表4.2に示す。測定誤差は、絶縁抵抗が $10^4\Omega$ まで低下してもJIS C 1602: 2015⁸⁴で規定されるクラス1の許容差に含まれるが、 $10^3\Omega$ まで低下するとクラス3の誤差となる。本研究でケーブルを蒸気に暴露した際に観測されたケーブル長さ1m当たりの絶縁抵抗の最小値は、概ね $10^5\Omega\text{m}$ 程度であった。原子炉格納容器内の計装システムに使用されるケーブルの

長さは、炉型や個別プラントの布設状況によっても異なるが、数十メートル程度と推定される。仮にケーブル長さを100mとした場合、ケーブルの絶縁抵抗は $10^3\Omega$ となる。これらより、本研究において観測された絶縁抵抗低下によっては、温度 200°C の測定を行う場合には、JIS C 1602: 2015で規定されるクラス3($\pm 3^\circ\text{C}$ 以内)の誤差が生じると計算される。



出典) 岡崎製作所HP⁸²

図4.13 熱電対回路の等価回路

Fig. 4.13 Equivalent circuit model for a thermocouple circuit

$$R = \frac{r_2 \times r_3}{r_2 + r_3} \quad (4.3)$$

$$E_0 = \frac{R \times E_A}{R + r_1} \quad (4.4)$$

$$T_m = \sum_{n=0}^9 d_n E^n \quad (4.5)$$

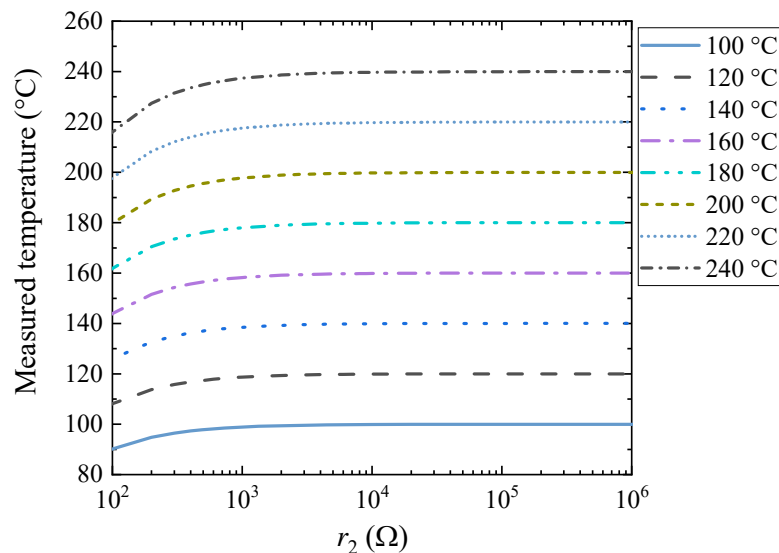


図4.14 熱電対回路の絶縁抵抗と測定温度の関係

Fig. 4.14 Measured temperature as a function of insulation resistance of the thermocouple circuit

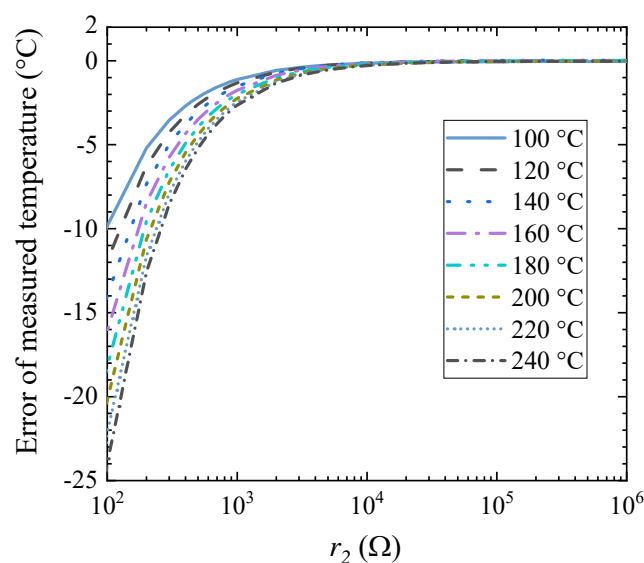


図4.15 熱電対回路の絶縁抵抗と測定温度の誤差の関係

Fig. 4.15 Error of measured temperature as a function of insulation resistance of the thermocouple circuit

表4.2 熱電対回路の絶縁抵抗低下による測定誤差の計算値

Table 4.2 Calculated measurement errors due to reduced insulation resistance of a thermocouple circuit

No.	絶縁抵抗 $r_2(\Omega)$	200°Cの 熱起電力 ⁸⁴ $E_A(\mu V)$	$E_0(\mu V)$	測定値 T_m (°C)	誤差 ΔT (°C)	許容差の クラス*1
1	10^6	8138	8137.9	199.970	-0.030	クラス1
2	10^5	8138	8137.1	199.950	-0.050	クラス1
3	10^4	8138	8129.1	199.749	-0.251	クラス1
4	10^3	8138	8049.5	197.758	-2.242	クラス3
5	10^2	8138	7331.5	179.797	-20.203	-

*1: 測定温度 200°C の許容差⁸⁴

クラス 1: $\pm 0.004 \cdot |t| = \pm 0.8^\circ\text{C}$

クラス 2: $\pm 0.0075 \cdot |t| = \pm 1.5^\circ\text{C}$

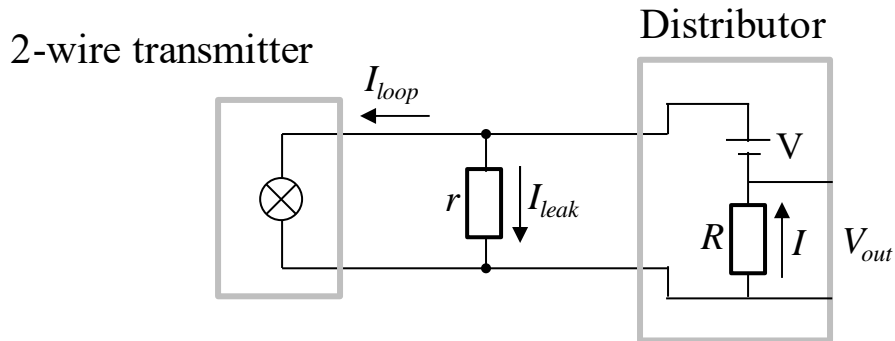
クラス 3: $\pm 0.015 \cdot |t| = \pm 3^\circ\text{C}$

4. 3. 2 圧力伝送器

図4.16に伝送器回路の等価回路^{85, 86}を示す。Vは電源電圧(V)、 I_{loop} はループ電流(A)、 r は伝送器回路の絶縁抵抗、即ち、ケーブルの線間の絶縁抵抗(Ω)、 I_{leak} はケーブル線間の漏洩電流(A)、 R はディストリビュータの内部抵抗(Ω)、 I はディストリビュータ内の回路の電流(A)、 V_{out} は出力電圧である。なお、ここでは簡単のため、配線抵抗は考慮しない。このとき、 I_{leak} 、 I 、 V_{out} は、それぞれ式(4.6)～(4.8)で表される。電源電圧Vは24V、ディストリビュータの内部抵抗 R は250 Ω である。また、ループ電流 I_{loop} は4～20mA(0.004～0.020A)である。

伝送器回路の絶縁抵抗 r とディストリビュータ内の回路の電流 I 及び出力電圧 V_{out} の関係を図4.17に示す。本図では、代表例として、 I_{loop} が4、8、12、16及び20mAの場合について示す。伝送器回路の絶縁抵抗 r が概ね $10^5\Omega$ より減少すると、ディストリビュータ内の回路の電流 I が増加する。その結果、図4.17の右軸に示すように、最終的に、 I をディストリビュータの内部抵抗 R (250 Ω)で変換して得る出力信号 V_{out} も大きくなる。このことは、例えば、伝送器回路が水位計として使用される場合、実際よりも水位が高く測定される可能性があることを意味する。さらに、電流 I が20mAとなると、ディストリビュータの電流容量により電流制限がかかり、電流が増加しなくなる。これにより、実際の水位に関わらず、測定レンジ上限の水位が測定結果として示される可能性がある。

伝送器回路の絶縁抵抗 r と出力電圧 V_{out} の誤差の関係を図4.18に示す。ループ電流 I_{loop} が小さい方が、誤差が大きくなる。



出典) エムシステム技術研 HP^{85, 86} (出典先の図を参考として作成)

図4.16 2線式伝送器回路の等価回路

Fig. 4.16 Equivalent circuit model for a 2-wier transmitter circuit

$$I_{leak} = \frac{V - I_{loop} \times R}{r + R} \quad (4.6)$$

$$I = I_{loop} + I_{leak} \quad (4.7)$$

$$V_{out} = IR \quad (4.8)$$

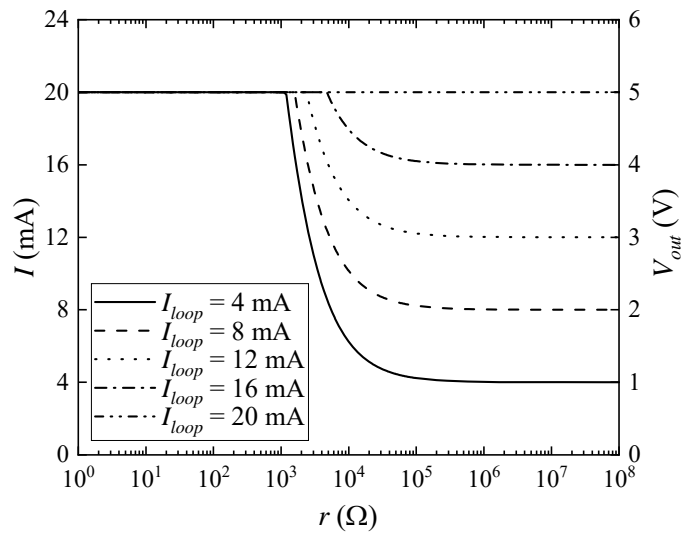


図4.17 伝送器回路の絶縁抵抗とディストリビュータ内の回路の電流及び出力電圧の関係
 Fig. 4.17 Current in the distributor and output voltage as a function of insulation resistance of the transmitter circuit

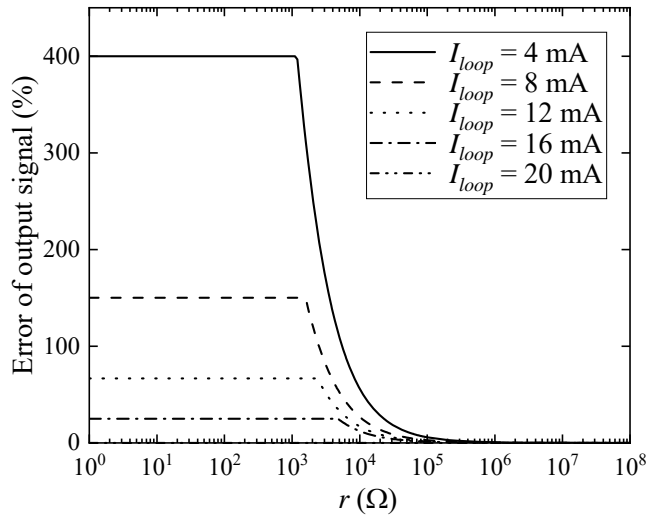


図4.18 伝送器回路の絶縁抵抗と出力信号の誤差の関係

Fig. 4.18 Error of output signal as a function of insulation resistance of the transmitter circuit

ケーブルの絶縁抵抗の低下が計装システムの測定結果に与える影響については、検出器の種類や回路構成等によって異なると考えられることから、個別の状況を考慮してケーブルの健全性を評価していく必要がある。

4. 4 重大事故等時のケーブル健全性評価手法について

本研究の試験結果から、4.1節で述べたように、蒸気暴露中においては蒸気の影響により、ケーブルの絶縁抵抗が低下すると考えられる。また、4.3節で述べたように、計装ケーブルの絶縁抵抗が低下すると、その絶縁抵抗の低下の程度や、計装システムの構成・種類によっては、計測結果に測定誤差が生じる可能性がある。ケーブルの重大事故等時の健全性評価で参考として使用されている電気学会推奨案¹⁹及び本研究の試験で参考としたJNESガイド²²では、ケーブルの健全性は、健全性評価試験における事故環境を模擬するための蒸気暴露試験の終了後に行われる耐電圧試験結果により判定することが規定されている。これらのことから、ケーブルの重大事故等時の健全性評価においては、現状の健全性評価試験の試験項目に加え、蒸気暴露中にケーブルの絶縁抵抗を測定し、その測定結果をケーブルの重大事故等時の必要な絶縁抵抗値等の要求性能と照らし合わせて評価することが重要であると考えられる。あるいは、検出器とケーブルを一体で試験し、測定結果が重大事故等時に許容される誤差範囲にあるか確認することも、有効な手段であると考えられる。

5. まとめ

本研究では、重大事故等時におけるケーブルの健全性評価手法の高度化を図ることを目的として、最新のケーブル健全性評価試験手法である JNES ガイド²²に示された手法に基づきケーブルに経年劣化を模擬的付与した上で、想定される重大事故環境下におけるケーブルの絶縁性能を調べるための試験等を行った。本研究で得られた知見は以下のとおりである。

- (1) 本研究では、重大事故環境下におけるケーブルの詳細な絶縁性能を評価するため、重大事故を模擬する蒸気暴露中にケーブルの絶縁抵抗測定を行った。その結果、ケーブルの絶縁抵抗は、蒸気暴露試験中において、最大でケーブル長さ1メートル当たりで $10^5\Omega\text{m}$ 程度まで低下することが確認された。このようなケーブルの絶縁抵抗の低下は、蒸気暴露による温度上昇及び蒸気による吸湿が要因とであると考えられる。
- (2) 重大事故時の蒸気環境下に暴露されて計装ケーブルの絶縁抵抗が低下すると、検出器の種類や回路構成等により、重大事故時に監視するパラメータの測定結果に含まれる誤差が大きくなる可能性がある。
- (3) ケーブルの重大事故等時の健全性評価で参考として使用されている電気学会推奨案¹⁹及び本研究の試験で参考とした JNES ガイド²²では、ケーブルの健全性は、健全性評価試験における事故環境を模擬するための蒸気暴露試験の終了後に行われる耐電圧試験結果により判定することが規定されている。(1)及び(2)を踏まえると、ケーブルの重大事故等時の健全性評価においては、現状の健全性評価試験の試験項目に加え、蒸気暴露中にケーブルの絶縁抵抗を測定し、その測定結果をケーブルの重大事故等時における要求性能と照らし合わせて評価を行う必要がある。

今後取り組むべきこととして、以下の研究課題がある。

(1) 重大事故模擬環境に暴露したケーブルの劣化機構等の解明

本研究では、蒸気暴露中の絶縁抵抗測定の結果、171～220℃で168時間蒸気に暴露されたケーブル試料の蒸気暴露開始後168時間時点における絶縁抵抗は、ケーブルの種類や蒸気暴露温度によらず、同程度まで低下することが分かった。しかしながら、個々のケーブル種類における劣化の形態及び進行程度並びに当該劣化が重大事故模擬環境におけるケーブルの絶縁抵抗に与える影響については、まだ明らかではない。本研究で得られた重大事故模擬環境におけるケーブルの絶縁抵抗低下の知見に関する技術的根拠を確かなものとするため、本研究に供試したケーブル試料の分析を行い、ケーブルの劣化状態及び劣化機構を明らかにする必要がある。

(2) 経年劣化の影響の調査

本研究で実施した経年劣化の模擬の有無により、蒸気暴露中におけるケーブルの絶縁抵抗の有意な差は見られなかった。今後、さらに劣化が進んだケーブルについて同様の試験を行い、経年劣化と重大事故時の絶縁性能との関係について調査する必要がある。

(3) 重大事故時の水酸化ナトリウム水溶液スプレイの影響の調査

国内のBWRでは、重大事故発生時に原子炉格納容器内の放射性よう素を捕捉して放出量を低減することを目的として、原子炉格納容器内に水酸化ナトリウム水溶液を注入する格納容器pH制御設備を自主的に設置することとしている⁸⁷⁻⁹⁰。このため、重大事故時の蒸気暴露環境下における水酸化ナトリウム水溶液のスプレイがケーブルの絶縁性能に与える影響について検証する必要がある。

(4) 過熱蒸気と飽和蒸気による蒸気暴露のケーブル絶縁性能への影響について

本研究から、蒸気暴露時の絶縁抵抗低下には、水が影響を与えている可能性が示唆された。一方、原子力発電所の安全系の系統機器に関する認定規格について制改定を行っている IEEE Nuclear Power Engineering Committee (NPEC) Subcommittee SC-2 における、IEEE Std 383-2015³⁴ の改定に係る検討において、事故を模擬する蒸気暴露は、過熱蒸気で行うよりも水分を多く含む飽和蒸気で行った方が絶縁性能に与える影響が大きい可能性があるとの指摘があったことから、技術的な検討が行われるとともに、規格への反映も検討されている。これらのことから、過熱蒸気と飽和蒸気で蒸気暴露した場合のケーブルの絶縁性能に与える影響について調べる必要がある。

参考文献一覧

- 1 原子力規制委員会、“実用発電用原子炉の設置、運転等に関する規則(第四条)”、令和元年原子力規制委員会規則第三号、2019.
- 2 原子力規制委員会、“実用発電用原子炉及びその附属施設の位置、構造及び設備の基準に関する規則(第二条第二項第十四号)”、令和元年原子力規制委員会規則第三号、2019.
- 3 原子力規制委員会、“実用発電用原子炉及びその附属施設の位置、構造及び設備の基準に関する規則(第二条第二項第四号)”、令和元年原子力規制委員会規則第三号、2019.
- 4 通商産業省、“電気設備に関する技術基準を定める省令(第二条第一項第一号)”、平成九年通商産業省令第五十二号、1997.
- 5 International Atomic Energy Agency, “IAEA Safety Glossary terminology used in nuclear safety and radiation protection”, p. 126, 2016.
- 6 通商産業省、“電気設備に関する技術基準を定める省令(第一条第六号)”、平成九年通商産業省令第五十二号、1997.
- 7 一般社団法人日本電線工業会ホームページ
<https://www.jcma2.jp/jigyoudenshen/index.html> (2019年11月1日確認)
- 8 International Atomic Energy Agency, “Assessment and management of ageing of major nuclear power plant components important to safety: In-containment instrumentation and control cables”, IAEA-TECDOC-1188, Volume I, p. 14, 2000.
- 9 原子力規制委員会、“実用発電用原子炉及びその附属施設の位置、構造及び設備の基準に関する規則(第十二条第三項)”、令和元年原子力規制委員会規則第三号、2019.
- 10 International Atomic Energy Agency, “Safety of Nuclear Power Plants: Design”, IAEA Specific Safety Requirements No. SSR-2/1 (Rev. 1), Requirement 30, p. 30, 2016.
- 11 International Atomic Energy Agency, “Safety of Nuclear Power Plants Commissioning and Operation”, IAEA Specific Safety Requirements No. SSR-2/2 (Rev. 1), Requirement 13, p. 17, 2016.
- 12 International Atomic Energy Agency, “Ageing Management and Development of a Programme for Long Term Operation of Nuclear Power Plants”, IAEA Specific Safety Guide No.SSG48, pp. 23-25, 2018.
- 13 International Atomic Energy Agency, “Equipment Qualification in Operational Nuclear Power Plants: Upgrading, Preserving and Reviewing”, IAEA Safety Reports Series No. 3, 1998.
- 14 United States Nuclear Regulatory Commission, “Environmental qualification of electric equipment important to safety for nuclear power plants”, 10CFR Part 50.49, 2017.
<https://www.nrc.gov/reading-rm/doc-collections/cfr/part050/part050-0049.html> (2019年

- 11月1日確認)
- 15 Institute of Electrical and Electronics Engineers “IEEE Standard for Qualifying Class IE Equipment for Nuclear Power Generating Stations”, IEEE Std 323-1974, 1974.
 - 16 Institute of Electrical and Electronics Engineers “IEEE Standard for Type Test of Class 1E Electric Cables, Field Splices, and Connections for Nuclear Power Generating Stations”, IEEE Std 383-1974, 1974.
 - 17 United States Nuclear Regulatory Commission, “Qualification of Safety-related Cables and Field Splices for Nuclear Power Plants”, Regulatory Guide 1.211, 2009.
 - 18 United States Nuclear Regulatory Commission, “Environmental Qualification of Certain Electric Equipment Important to Safety for Nuclear Power Plants”, Regulatory Guide 1.89 Revision 1, 1984.
 - 19 電気学会、“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”、電気学会技術報告(II部)第139号、1982.
 - 20 原子力安全・保安部会原子力安全基盤小委員会、“原子力の安全基盤の強化について”、第45回原子力委員会資料第1-2号、p. 46、2007.
<http://www.aec.go.jp/jicst/NC/iinkai/teirei/siryo2007/siryo45/siryo45-1-2.pdf> (2019年11月1日確認)
 - 21 原子力安全基盤機構、“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、pp. 39-124、179-245、2009.
<http://warp.da.ndl.go.jp/info:ndljp/pid/10207746/www.nsr.go.jp/archive/jnes/content/000013215.pdf> (2019年11月1日確認)
 - 22 原子力安全基盤機構、“原子力発電所のケーブル経年劣化評価ガイド”、JNES-RE-2013-2049、2014.
<http://warp.da.ndl.go.jp/info:ndljp/pid/10207746/www.nsr.go.jp/archive/jnes/content/000127230.pdf> (2019年11月1日確認)
 - 23 日本電気協会、“原子力発電所の安全系電気・計装品の耐環境性能の検証に関する指針”、JEAG4623-2018、2018.
 - 24 原子力規制委員会、“実用発電用原子炉及びその附属施設の位置、構造及び設備の基準に関する規則(第三十七条)”、令和元年原子力規制委員会規則第三号、2019.
 - 25 原子力規制委員会、“実用発電用原子炉及びその附属施設の位置、構造及び設備の基準に関する規則(第四十三条第一項)”、令和元年原子力規制委員会規則第三号、2019.
 - 26 原子力規制委員会、“実用発電用原子炉の運転の期間の延長の審査基準”、2016.
<http://www.nsr.go.jp/data/000147250.pdf> (2019年11月1日確認)
 - 27 International Atomic Energy Agency, “AMP207 Environmental qualification of electrical and I&C equipment (version 2018)”, 2018.

- https://gnssn.iaea.org/NSNI/PoS/IGALL/Shared%20Documents/IGALL%20folder/IGALL%20AMPs/AMP207_EQ_final_18122018.doc (2019年11月1日確認)
- 28 International Electrotechnical Commission / Institute of Electrical and Electronics Engineers, “International Standard Nuclear Facilities – Electrical equipment important to safety - Qualification”, IEC/IEEE 60780-323, 2016.
- 29 日本原子力発電、“東海第二発電所運転期間延長認可申請書(発電用原子炉施設の運転の期間の延長)(添付書類二：東海第二発電所劣化状況評価書)”、発室発第176号、2017. <http://www.nsr.go.jp/data/000210828.pdf> (2019年11月1日確認)
- 30 関西電力、“高浜発電所運転期間延長認可申請書(2号発電用原子炉施設の運転の期間の延長)の一部補正について(添付書類二：高浜発電所2号炉劣化状況評価書)”、関原発第111号、2016. <http://www.nsr.go.jp/data/000153497.pdf> (2019年11月1日確認)
- 31 原子力規制庁、“平成28年度安全研究計画”、pp. A-11-1～3、2016.
<http://warp.da.ndl.go.jp/info:ndljp/pid/10338561/www.nsr.go.jp/data/000156579.pdf>
(2019年11月1日確認)
- 32 原子力規制庁、“平成29年度安全研究計画”、pp. 110-112、2017.
<http://www.nsr.go.jp/data/000191282.pdf> (2019年11月1日確認)
- 33 日本産業規格、“ゴム・プラスチック絶縁電線試験方法”、JIS C 3005: 2000、2000.
- 34 Institute of Electrical and Electronics Engineers “IEEE Standard for Qualifying Electric Cables and Splices for Nuclear Facilities”, IEEE Std 383-2015, p. 20, 2015.
- 35 International Electrotechnical Commission, “Determination of long-term radiation ageing in polymers-Part2: Procedures for predicting ageing at low dose rate”, IEC 1244-2, 1996.
- 36 International Atomic Energy Agency, “Assessment and management of ageing of major nuclear power plant components important to safety: In-containment instrumentation and control cables”, IAEA-TECDOC-1188, Volume II, pp. 76-83, 2000.
- 37 原子力規制委員会、“実用発電用原子炉に係る炉心損傷防止対策及び格納容器破損防止対策の有効性評価に関する審査ガイド”、改正 平成29年11月29日原規技発第1711294号、pp. 3、14、2017.
<http://www.nsr.go.jp/data/000213306.pdf> (2019年11月1日確認)
- 38 日本原子力発電、“東海第二発電所発電用原子炉設置変更許可申請書(発電用原子炉施設の変更)本文及び添付書類の一部変更”、添付書類十、pp. 10-7.2-74、10-7.2-108、2018.
<http://www.nsr.go.jp/data/000233534.pdf> (2019年11月1日確認)
- 39 東京電力、“柏崎刈羽原子力発電所原子炉設置変更許可申請書(6号及び7号原子炉施設の変更)本文及び添付書類の一部補正について”、添付書類十、pp. 10-7-2-14、10-7-2-184、2017.
<http://warp.da.ndl.go.jp/info:ndljp/pid/11105588/www.nsr.go.jp/data/000194746.pdf>

- (2019年11月1日確認)
- 40 中国電力、“島根原子力発電所の発電用原子炉設置変更許可申請書(2号原子炉施設の変更)”、添付書類十、pp. 10-II-115、10-II-127、10-II-128、2013。
<http://warp.da.ndl.go.jp/info:ndljp/pid/11105588/www.nsr.go.jp/data/000031478.pdf>
(2019年11月1日確認)
- 41 北陸電力、“志賀原子力発電所用原子炉設置変更許可申請書(2号発電用原子炉施設の変更)”、添付書類十、pp. 10-4-148、10-4-149、2014。
<http://warp.da.ndl.go.jp/info:ndljp/pid/11105588/www.nsr.go.jp/data/000028442.pdf>
(2019年11月1日確認)
- 42 日馬康雄、伊藤政幸、岡田漱平ら、“電線材料のLOCA模擬環境劣化におよぼす過渡温度条件の影響”、電気学会絶縁材料研究会資料、pp. 39-46、EIM-81-94、1981。
- 43 日馬康雄、岡田漱平ら、“原子炉用電線類の健全性試験法に関する研究-SEAMATE-IIを用いた絶縁材料のLOCA時の劣化の研究-”、日本原子力研究所、JAERI-M 88-178、pp. 122-130、254-276、1988。
- 44 皆川武史、池田雅昭、“原子力発電所用安全系低圧ケーブルの難燃性に対する経年劣化処理の影響”、電気学会論文誌A、Vol. 137, No. 11、pp. 620-625、2017。
- 45 九州電力、“玄海原子力発電所の発電用原子炉設置変更許可申請書(3号及び4号発電用原子炉施設の変更)”、添付書類十、p.10(3)-5-111、2013。
<http://warp.da.ndl.go.jp/info:ndljp/pid/11105588/www.nsr.go.jp/data/000032216.pdf>
(2019年11月1日確認)
- 46 関西電力、“高浜発電所発電用原子炉設置変更許可申請書(3号及び4号発電用原子炉施設の変更)”、添付書類十、pp. 10-5-83、10-5-112、2013。
<http://warp.da.ndl.go.jp/info:ndljp/pid/11105588/www.nsr.go.jp/data/000032131.pdf>
(2019年11月1日確認)
- 47 四国電力、“伊方発電所の発電用原子炉設置変更許可申請書(3号原子炉施設の変更)”、添付書類十、p. 10(3)-5-101、2013。
<http://warp.da.ndl.go.jp/info:ndljp/pid/11105588/www.nsr.go.jp/data/000032171.pdf>
(2019年11月1日確認)
- 48 九州電力、“川内原子力発電所の発電用原子炉設置変更許可申請書(1号及び2号発電用原子炉施設の変更)”、添付書類十、pp. 10(1)-5-94、10(1)-5-111、2013。
<http://warp.da.ndl.go.jp/info:ndljp/pid/11105588/www.nsr.go.jp/data/000032185.pdf>
(2019年11月1日確認)
- 49 関西電力、“高浜発電所発電用原子炉設置変更許可申請書(1号、2号、3号及び4号発電用原子炉施設の変更)”、添付書類十、p. 10(1)-7-496、2015。
<http://warp.da.ndl.go.jp/info:ndljp/pid/11105588/www.nsr.go.jp/data/000101392.pdf>
(2019年11月1日確認)

- 50 関西電力、“美浜発電所発電用原子炉設置変更許可申請書(3号発電用原子炉施設の変更)”、添付書類十、p. 10-7-494、2015。
<http://warp.da.ndl.go.jp/info:ndljp/pid/11105588/www.nsr.go.jp/data/000101383.pdf>
(2019年11月1日確認)
- 51 関西電力、“大飯発電所発電用原子炉設置変更許可申請書(3号及び4号発電用原子炉施設の変更)”、添付書類十、pp. 10-5-108、10-5-112、2013。
<http://warp.da.ndl.go.jp/info:ndljp/pid/11105588/www.nsr.go.jp/data/000032125.pdf>
(2019年11月1日確認)
- 52 Institute of Electrical and Electronics Engineers “IEEE Standard for Type Test of Class 1E Equipment for Nuclear Power Generating Stations”, IEEE Std 323-1974, p. 19, 1974.
- 53 栗山将、長谷川徹、小椋二郎、大西隆雄、木村洋、“原子力発電所ケーブルの開発”、日立評論、Vol. 58、No. 3、pp. 79-84、1976.
- 54 K. Spang, “Aging of Electrical Components in Nuclear Power Plants”, Swedish Nuclear Power Inspectorate (SKI), SKI Report 97:40, p. 45, 1997.
- 55 IEC/IEEE, “IEEE/IEC International Standard-Nuclear Power Plants-Instrumentation and Control Important to Safety - Electrical Equipment Condition Monitoring Methods. Part 6: Insulation resistance”, IEC/IEEE 62582-6-2019, 2019.
- 56 T. Minakawa, M. Ikeda, N. Hirai, and Y. Ohki, “Insulation Performance of Safety-related Cables for Nuclear Power Plants under Simulated Severe Accident Conditions”, IEEE Trans. Fundam. Mater. Vol. 139, No. 2, pp. 54-59, 2019.
- 57 和田正、今井聖、“RTVシリコンゴム”、日本ゴム協会誌、Vol. 46、No. 4、pp. 314-335、1973.
- 58 Mitsui EPT, Mitsui Chemicals.
https://www.mitsuichem.com/en/service/pdf/mitsui-ept_e.pdf (2019年11月1日確認)
- 59 日本産業規格、“600Vけい素ゴム絶縁電線”、JIS C 3323: 2012、2012.
- 60 日本産業規格、“600VEPゴム絶縁ケーブル”、JIS C 3621: 2000、2000.
- 61 キーサイトテクノロジー、Keysight E4980A/ALプレジジョンLCRメータユーザーズ・ガイド、p. 202。
<http://literature.cdn.keysight.com/litweb/pdf/E4980-97210.pdf> (2019年11月1日確認)
- 62 皆川武史、池田雅昭、平井直志、大木義路、“沸騰水型原子炉用安全系低圧ケーブルの高温蒸気暴露中及びその後の絶縁性能”、日本保全学会第15回学術講演会要旨集、pp. 465-470、2018.
- 63 篠原卯吉、家田正之、“電気絶縁用高分子構造と電気抵抗”、高分子、Vol. 10、No.8、pp. 680-684、1961.
- 64 大木義路、“誘電体物性”、培風館、2002.
- 65 R. E. Barker Jr. and A. H. Sharbaugh, “Ionic conduction in polymer Films and Related

- Systems”, *J. Polym. Sci.: Part C, Polym. Symp.*, No 10, pp. 139-152, 1965.
- 66 山谷正明、“シリコーン-広がる応用分野と技術動向”、化学工業日報社、p. 87、2003.
- 67 W. L. Robb, “Thin silicone membranes - their permeation properties and some applications”, *Ann. N. Y. Acad. Sci.*, 146, pp. 119-137, 1968.
- 68 角野元昭、“シリコーンゴム”、日本ゴム協会誌、Vol.46、No.4、pp.295-313、1973.
- 69 早稲田大学、“平成28年度原子力施設等防災対策等委託費(高経年化技術評価高度化(電気・計装設備の長期健全性評価技術調査研究))事業成果報告書”、pp. 746-749、2017.
- 70 S. Hanada, M. Miyamoto, N. Hirai, L. Yang, and Y. Ohki, “Experimental investigation of the degradation mechanism of silicone rubber exposed to heat and gamma rays”, *High Voltage*, Vol. 2, No. 2, pp. 92-101, 2017.
- 71 Y. Hasegawa, Y. Ohki, K. Fukunaga, M. Mizuno, and K. Sasaki: “Complex permittivity spectra of various insulating polymers at ultrawide-band frequencies”, *IEEJ Trans. FM*, Vol. 135, No. 2, pp. 63-68, 2015.
- 72 K. Ishimoto, E. Kanegae, Y. Ohki, T. Tanaka, Y. Sekiguchi, Y. Murata, and C. C. Reddy: “Superiority of dielectric properties of LDPE/MgO nanocomposites over microcomposites”, *IEEE Trans. Dielectr. Electr. Insul.*, Vol. 16, No. 6, pp. 1735-1742, 2009.
- 73 Y. Hasegawa, J. Takihana, and Y. Ohki, “Estimation of thermal expansion coefficients of polymeric insulating films from temperature dependence of dielectric permittivity”, *Jpn. J. Appl. Phys.*, Vol. 53, No. 7, pp. 071501(1)-071501(4), 2014.
- 74 M. Uematsu and E. U. Franck “Static Dielectric Constant of Water and Steam”, *J. Phys. Chem. Ref. Data*, Vol. 9, No.4, pp. 1291-1306, 1980.
- 75 C. Gamlin, N. Dutta, N. R. Choudhury, D. Kehoe, and J. Matison, “Influence of ethylene-propylene ratio on the thermal degradation behavior of EPDM elastomers”, *Thermochimica Acta*, Vol. 367-368, pp. 185-193, 2001.
- 76 下田右、“粘土鉱物の示差熱分析”、粘土科学、Vol. 11、No. 4、pp. 174-187、1971.
- 77 J. J. Maurer, “Thermal analysis of elastomers”, *The Rubber Age*, Vol. 102, No. 2, pp. 47-51, 1970.
- 78 春末哲史、隠塚裕之、大武義人、“エラストマーの気体透過性評価方法”、日本ゴム協会誌、Vol.83、No.1、pp. 14-19、2010.
- 79 堀口博、“赤外吸収図説総覧”、三共出版、p. 117、1973.
- 80 皆川武史、池田雅昭、平井直志、大木義路、“重大事故模擬環境に暴露したエチレンプロピレンジエンゴム絶縁ケーブルの劣化状態分析”、電気学会論文誌A、Vol. 139、No.9、pp. 380-386、2019.
- 81 中島達二、“高分子の体積電気伝導”、高分子、Vol.9、No.11、pp. 993-998、1960.
- 82 岡崎製作所HP

- https://www.okazaki-mfg.com/Tech_info/faq_01.html (2019年11月1日確認)
- 83 National Institute of Standards and Technology HP,
https://srdata.nist.gov/its90/download/type_k.tab (2019年11月1日確認)
- 84 日本産業規格、“熱電対”、JIS C 1602: 2015、2015.
- 85 エムシステム技術研、“電源配線が要らない2線式伝送器”、MS TODAY、Vol. 5、
No. 10(通巻54号)、1996.
<https://www.m-system.co.jp/mstoday/plan/mame/pdf/m9610.pdf> (2019年11月1日確認)
- 86 エムシステム技術研、“ディストリビュータ(2)”、MS TODAY、Vol. 13、No. 8(通巻
151号)、2004.
<https://www.m-system.co.jp/mstoday/plan/mame/pdf/m0408.pdf> (2019年11月1日確認)
- 87 東京電力ホールディングス、“柏崎刈羽原子力発電所6号及び7号炉 重大事故等
対処設備について”、第428回原子力発電所の新規制基準適合性に係る審査会合、
資料1-2、pp. 3.7-58、2017.
<http://www2.nsr.go.jp/data/000174759.pdf> (2019年11月1日確認)
- 88 日本原子力発電、“東海第二発電所 重大事故等対策の有効性評価”、PS-C-1改86、
p. 添付3.1.3.1-31、2018.
<http://www.nsr.go.jp/data/000229792.pdf> (2019年11月1日確認)
- 89 中国電力、“島根原子力発電所2号炉 重大事故等対策有効性評価成立性確認 補足
説明資料”、EP-015(補)改21、p. 補1.15-1~11、2016.
<http://www.nsr.go.jp/data/000161087.pdf> (2019年11月1日確認)
- 90 中部電力、“浜岡原子力発電所4号炉 重大事故等対策の有効性評価 補足説明資料”、
H4-NP-027-R26、pp. 補1.16-1~12、2016.
<http://www.nsr.go.jp/data/000161089.pdf> (2019年11月1日確認)

執筆者一覧

原子力規制庁 長官官房 技術基盤グループ システム安全研究部門
皆川 武史 技術研究調査官
池田 雅昭 上席技術研究調査官
田口 清貴 首席技術研究調査官

修正履歴

No.	修正年月	修正箇所	修正前	修正後	備考
1	2023年8月	p.25、下から6行目	155°C ・ <u>0.60</u> MPaG で 336h の蒸気暴露時のケーブルの換算絶縁抵抗の推移を図 3.3 に示す。	155°C ・ <u>0.44</u> MPaG で 336h の蒸気暴露時のケーブルの換算絶縁抵抗の推移を図 3.3 に示す。	誤記修正