

東京電力福島第一原子力発電所事故の調査・分析に係る

中間取りまとめ（2023年版）

令和5年1月25日
原子力規制庁

1. 趣旨

本議題は、「東京電力福島第一原子力発電所事故の調査・分析に係る中間取りまとめ（2023年版）（案）」（以下「中間取りまとめ（2023年版）（案）」という。）の内容について報告するとともに、これに対する科学的・技術的意見の募集を行うことのできる承について諮るものである。

2. 経緯

東京電力福島第一原子力発電所事故の調査・分析については、令和3年度は新型コロナウイルス感染症予防対策などのため、現地調査の自粛または規模の縮小を行い、報告書をまとめるだけの進捗が達成できなかったことなどから、令和4年4月20日の令和4年度第5回原子力規制委員会において、引き続き調査・分析を継続し、令和4年度に結果を取りまとめた上で原子力規制委員会に報告する方針が了承された。

その後、令和5年1月13日の第35回東京電力福島第一原子力発電所における事故の分析に係る検討会（以下「事故分析検討会」という。）において、中間取りまとめ（2023年版）（案）を取りまとめた。

3. 中間取りまとめ（2023年版）（案）の概要

中間取りまとめ（2023年版）（案）は、調査・分析の結果及びその過程における技術的な議論を記述した本文、事故分析検討会の経緯などの事実関係を記載した参考資料及びテーマ別に調査・分析内容を詳細に論述した別添資料から構成している。中間取りまとめ（2023年版）（案）を別紙に、そのポイントを参考に示す。

4. 科学的・技術的意見の募集の実施（委員会了承事項）

3. で示した中間取りまとめ（2023年版）（案）は、科学的・技術的な観点から幅広く議論、活用されるべきものであることから、科学的・技術的意見の募集を行うことを了承いただきたい。

5. 今後の予定

令和5年1月26日（木）～同年2月24日（金）

中間取りまとめ（2023年版）（案）に対する科学的・技術的意見の募集

令和5年3月上旬

事故分析検討会において、科学的・技術的意見の募集の結果等を踏まえた「中間取りまとめ（2023年版）」を取りまとめる。

令和5年3月中

事故分析検討会で取りまとめた「中間取りまとめ（2023年版）」について原子力規制委員会の了承を諮る。

6. 別紙及び参考

別紙 東京電力福島第一原子力発電所事故の調査・分析に係る中間取りまとめ（2023年版）（案）

参考 東京電力福島第一原子力発電所事故の調査・分析に係る中間取りまとめ（2023年版）（案）のポイント

以上

(案)

東京電力福島第一原子力発電所 事故の調査・分析に係る中間取りまとめ (2023年版)

2023年1月13日

東京電力福島第一原子力発電所における
事故の分析に係る検討会

目次

序章

1. 検討の経緯	9
2. 検討の方針	
2. 1 検討対象	10
2. 2 検討の体制及び実施方法	10
2. 3 本中間取りまとめの構成	11

第一章 シビアアクシデント時の Cs-137 移動メカニズムについての考察

第一節 1/2 号機ベント配管系の特徴的汚染パターンからの知見

1-1-1 背景	13
1-1-2 原子力規制庁による新たなシミュレーション	14

第二節 2 号機シールドプラグ汚染からの知見

1-2-1 経緯	16
1-2-2 シールドプラグ内における 多量の Cs-137 汚染存在の検証	16
1-2-2-1 2 号機原子炉ウェル内 周辺線量当量率調査の結果を含めた考察	16
1-2-3 Cs-137 の移動経路とその形成メカニズム	17
1-2-3-1 シールドプラグの形状に関する測定結果	17
1-2-3-2 シールドプラグの自重変形の可能性	18
1-2-3-3 シールドプラグ上での 局所的周辺線量当量率調査との整合性	18
1-2-4 シールドプラグ内の Cs-137 汚染総量と局所汚染の把握	19
1-2-4-1 鉄筋を含めた 150cm 高さ（コリメータなし γ 線線量計） での測定結果及び 30.5cm 高さ（コリメータ付き γ 線線量計） での測定結果を用いた推定結果の改訂	19
1-2-4-2 シールドプラグ上層上面の汚染量の整理	20
1-2-4-3 ボーリング孔内の深さ方向の線量率分布からの考察 （IRID 穴及び新穿孔穴）	20
1-2-4-4 2 号機シールドプラグに関する各種知見の 総合的な関連性評価	23
1-2-4-5 3 種類の測定結果の整合性	24
1-2-4-6 原子炉ウェルよりも強い汚染がシールドプラグ上層と	

中間層の間及び継ぎ目に生じ得るメカニズムの考察	25
第三節 ベントライン及びシールドプラグの汚染状況と 「水蒸気駆動仮説」	25
第二章 落下炉心の挙動と原子炉格納容器への影響	
第一節 1号機原子炉格納容器内の様子と検討状況	
2-1-1 東京電力の報告と特徴点	26
2-1-2 事故分析検討会で提案されたシナリオ案等	29
2-1-3 2022年12月中旬以降に更新された情報	33
第二節 2号機及び3号機原子炉格納容器内の様子と検討状況	
2-2-1 2号機関連	33
2-2-2 3号機関連	33
第三節 今後の分析評価の進め方	
2-3-1 当面の実験計画及び東京電力に収集を求める情報	34
2-3-2 東京電力の情報公開の進展	34
第三章 その他の調査項目の進捗状況など	
第一節 4号機原子炉建屋における「火災現場」位置の特定	
3-1 4号機原子炉建屋 再循環ポンプMGセット(A)付近の調査結果	35
3-2 今後の計画	35
第二節 3号機水素爆発関連の試験等	
3-2-1 原子炉格納容器内の材料からの 有機ガスの発生可能性試験	35
3-2-2 水素ガスの燃焼試験	36
3-2-3 事故分析検討会における 発電用原子炉設置者からの指摘等	37
3-2-4 東京電力における3号機原子炉建屋内 水素濃度シミュレーション	37
第三節 非常用ガス処理系の汚染状況測定等	
3-3-1 遠隔操作ローダーによる調査	37
3-3-1-1 1号機SGTSフィルタトレイン	37

3-3-1-2	2号機 SGTS フィルタトレイン	37
3-3-2	1/2号機 SGTS 配管の切断による 配管内の汚染分布の測定	38
第四節 発電所敷地内外のモニタリングポスト等の空間線量率の推移		
3-4-1	モニタリングポスト等で測定された 空間線量率データ等の整理	39
第五節 その他の活動状況		
3-5-1	現地調査等による継続的な調査	39
3-5-1-1	1号機原子炉建屋内の 汚染状況及び損傷状況の調査	39
3-5-1-2	3号機原子炉建屋内の 汚染状況及び損傷状況の調査	40
3-5-1-3	4号機原子炉建屋内の 3D レーザースキャナによる測定	40
3-5-2	原子炉建屋内汚染物サンプル調査	41
終章 おわりに		
1.	前回中間取りまとめ中の知見の規制上の評価と活用状況	43
2.	謝辞	43
3.	結語	44
略語集		45

参考 1	東京電力福島第一原子力発電所事故に係る継続的な 調査・分析の進め方について	47
参考 2	「東京電力福島第一原子力発電所事故の調査・分析に係る 中間取りまとめ」を踏まえた対応について（第 1 回）	51
参考 3	東京電力福島第一原子力発電所事故の調査・分析の状況	57
参考 4	事故分析検討会のメンバー構成及び開催実績	69
参考 5	調査チームの構成員	77
参考 6	現地調査の実施実績	78
参考 7	東京電力から提供を受けた情報	81
参考 8	連絡・調整会議の開催実績	87
参考 9	事故分析の調査・分析項目の整理	88

別添 1	ベント配管の汚染パターンの追加調査データ等	90
別添 2	1/2号機 SGTS 配管内流動解析	93
別添 3-1	原子炉ウェル内の線量率と 原子炉キャビテイ差圧調整ラインの状態	115
別添 3-2-0	2号機シールドプラグ上層と中間層の間の汚染特定 に係る分析に関する別添資料の構成	123
別添 3-2-1	(1)シールドプラグ上部での測定	126
別添 3-2-2	(2)シールドプラグに穿孔した穴内部での測定	133
別添 3-2-3	(3)シールドプラグに新たに穿孔した穴での測定	150
別添 3-2-4	(4)新たに穿孔した穴での計算結果と測定結果の 比較検討	170
別添 3-2-5-1	2号機シールドプラグの IRID 穴と新穿孔穴の 穴内線量率分布の比較	198
別添 3-2-5-2	61cm コンクリート下部の Cs-137 線源の 寄与領域の検討	209
別添 3-2-5-3	2号機シールドプラグ上層上面の 継ぎ目からの線量率寄与	214
別添 3-2-5-4	2号機オペフロ内壁汚染の シールドプラグ穴内線量率への寄与	223
別添 3-2-5-5	穴内と床上の測定における床上汚染位置による 線量率寄与の違いについて	260
別添 3-2-5-5-1	床上の汚染位置による 線量率寄与の違いについて	265
別添 3-2-5-6	高汚染部からの距離による 床上および穴内線量率分布の検討	272
別添 3-2-5-7	2号機シールドプラグ 床上測定線量率分布図の改訂	285
別添 3-2-5-8	2号機シールドプラグ上層と中間層の間の汚染密度を 評価する場合の鉄筋の影響について	289
別添 3-2-5-9	2号機オペレーションフロア内壁の 汚染状況の把握	299
別添 3-2-5-10	2号機の検討を踏まえた3号機シールドプラグ 上層と中間層の間の汚染密度	334
別添 3-3	2号機シールドプラグの形状	340
別添 3-4	シールドプラグの継ぎ目の断面積の評価	368

別添 4-1	東京電力及び IRID における 1号機原子炉格納容器内部調査に係る公開資料等	381
別添 4-2	1号機、2号機及び3号機における 原子炉格納容器内部調査の比較	384
別添 4-3	1号機原子炉格納容器内における ペDESTAL 損傷及び堆積物の形成	392
別添 5	東京電力福島第一原子力発電所1号機原子炉格納容器内部調査 により確認されたコンクリートに関する事象の検討	416
別添 6	4号機原子炉建屋における火災	421
別添 7	可燃性有機ガスの発生源の検討	435
別添 8	BWR 格納容器内有機材料熱分解生成気体の分析	481
別添 9	3号機原子炉建屋における火災との関係	498
別添 10	1号機 SGTS 室の調査結果等（遠隔調査用ローダ等）	502
別添 11	1/2号機 SGTS 配管の切断による配管内の 汚染分布の測定	510
別添 12	モニタリングポスト等で測定された 空間線量率データ等の整理	518
別添 13	1号機原子炉建屋3階及び4階の調査結果	543
別添 14	3号機原子炉建屋1階及び2階の予備調査結果	575
別添 15	4号機原子炉建屋内のレーザースキャナによる測定結果	581
別添 16	2号機原子炉建屋スミヤ試料等の分析	590

凡例

- 1 時間は、24 時間表記としている。
- 2 圧力は、特に断りがない限り、ゲージ圧である。
- 3 「●号機」は、特に断りがない限り、東京電力ホールディングス株式会社福島第一原子力発電所内の号機を指す。
- 4 本中間取りまとめの中で単に「参考」「別添」と記述しているものは、特に断りがない限り、本中間取りまとめの「参考」「別添」を指している。
- 5 $○○E+△△$ との表示は、 $○○×10^{△△}$ を意味する。（「○○」、 $[△△]$ は数値）
また、単位の記載中、k（キロ）は 10^3 、M（メガ）は 10^6 、G（ギガ）は 10^9 、T（テラ）は 10^{12} 、P（ペタ）は 10^{15} をそれぞれ意味する。

序章

1. 検討の経緯

東京電力福島第一原子力発電所事故に関しては、国会に設置された東京電力福島原子力発電所事故調査委員会の報告書で未解明問題として規制機関に対し実証的な調査が求められた事項を対象に、原子力規制委員会が検討を進め、2014年10月にその見解を「東京電力福島第一原子力発電所事故の分析 中間報告書」に取りまとめた。

その後、2019年9月11日に開催された原子力規制委員会において、2020年度末を目途として、その時点での調査・分析の実施状況の取りまとめを行うことを念頭に、追加的な調査・分析に取り組む方針が了承された（参考1）。これを受けて、原子力規制委員会に置かれた東京電力福島第一原子力発電所における事故の分析に係る検討会¹（以下「事故分析検討会」という。）において、現地調査の結果や東京電力福島第一原子力発電所事故時の記録等を用いた検討を行い、2021年3月にその結果等を「東京電力福島第一原子力発電所事故の調査・分析に係る中間取りまとめ～2019年9月から2021年3月までの検討～」（以下「中間取りまとめ（2021年版）」という。）に取りまとめた。

次いで、2021年3月31日に開催された原子力規制委員会において、「今後の調査・分析の進め方」が了承され（参考2）、中間取りまとめ（2021年版）以降も、引き続き、事故の調査・分析を継続的に実施し（参考3）、2022年12月までに技術的な内容の具体的な検討を行った結果等を、事故分析検討会として取りまとめたものが本中間取りまとめである。

¹ 2013年3月27日に開催された原子力規制委員会において、設置が了承されたもの。

2. 検討の方針

2. 1 検討対象

福島第一原子力発電所では、東京電力福島第一原子力発電所事故後、時間の経過に伴い放射能の減衰が進んだことに加え、同発電所における廃炉作業の進展により、空間線量率の低下等、敷地内の環境が改善してきたことから、敷地内の施設・設備等に人が接近可能な箇所が増えてきている。また、東京電力福島第一原子力発電所事故以降に、遠隔操作による測定など、現場の情報を得るために適用できる手法の進歩、東京電力等から提供される情報や知見の拡大等もあり、追加的に検討を加えることができる事項を特定することが可能となってきた。

その一方で、廃炉作業によって構造物の改変等が進展している箇所も多くあり、適時に状況を確認して記録を作成することで、現場の情報を事後的にも確認及び活用可能な形にして保存することの重要性も大きくなっている。

こうした状況を踏まえて、今般の検討作業では、現場アクセスの可能性や廃炉作業の進展等により追加的に実施できる調査・分析の内容を基に、事故時の事象進展や状況の詳細な検討が可能な範囲を対象として検討を加えるとともに、中間取りまとめ(2021年版)に盛り込んだ内容の一部に対して、更なる検討を加えた。

したがって、本中間取りまとめは、東京電力福島第一原子力発電所事故に関して、これまでに十分に知見が得られていない事項の全てを対象として網羅的な検討を行ったものではない。

2. 2 検討の体制及び実施方法

(1) 検討の場

今般の検討作業に当たっては、外部の有識者、原子力規制委員会委員長、原子力規制委員会委員、原子力規制庁の担当職員及び日本原子力研究開発機構(以下「JAEA」という。)の職員をメンバーとする事故分析検討会を開催し、原子力規制庁の職員からなる調査チーム(以下「調査チーム」という。)による現地調査や情報の分析の結果を基に議論を行った。事故分析検討会のメンバー構成及び開催実績を参考4に、また、調査チームの構成員を参考5に示す。

本中間取りまとめは、調査チームの構成員が(一部の項目については外部の有識者、原子力規制庁の職員及びJAEAの職員の支援を受けて)主に草稿し、事故分析検討会での議論を経たものである。

(2) 現地調査

これまで人による調査を行ったことのない箇所も含めて、直接の観察・撮像、空間線量率の測定、試料採取などが可能となった箇所を中心に現地での測定・観察などの調査を実施した。具体的な内容としては、調査実施時点での構造物等の状況観

察と撮像・形状測定、地点ごとの空間線量率の測定などを実施した。また、敷地内のスミヤ等の試料を採取（サンプリング）し、試料に含まれる放射性核種の分析などを JAEA で実施した。現地調査の実施状況を参考 6 に示す。

（３）東京電力からの情報提供

福島第一原子力発電所の構造物等に関する設計情報、東京電力が実施した調査・分析の結果やその内容、東京電力が保有する関連の情報など、調査・分析を進める上で必要となる数多くの情報を、東京電力から提供を受けた。

東京電力から本中間取りまとめの対象期間中に提供された情報を参考 7 に示す。

（４）メーカー等の関係者からの情報提供

1号機原子炉格納容器内部調査に関するコンクリートの性状等、専門的な知見が必要と判断した事項については、メーカー等から直接に見解を聴き取るなどして、情報提供を受けた。

（５）福島第一原子力発電所廃炉・事故調査に係る連絡・調整会議

今般の調査・分析を進めるに当たっては、福島第一原子力発電所の廃炉作業との干渉・重複等による支障や非効率性を避けるため、作業の内容、手順、スケジュールなどに係る情報共有及び調整が必要となることから、原子力規制庁は、資源エネルギー庁、原子力損害賠償・廃炉等支援機構、東京電力及び原子力規制庁が参加する福島第一原子力発電所廃炉・事故調査に係る連絡・調整会議（以下「連絡・調整会議」という。）を設置し、今般の調査・分析と福島第一原子力発電所の廃炉作業に係る必要な調整を行った。

連絡・調整会議の開催実績を参考 8 に示す。

2. 3 本中間取りまとめの構成

（１）本中間取りまとめの構成

本中間取りまとめは、主な結果を本文の第一章から第三章にまとめて記述し、検討した事項のそれぞれについて、調査・分析内容の詳細や検討結果の技術的説明などは、別添により具体的に論述している。参考は、事故分析検討会の開催実績等の事務的な情報を整理している。

なお、これまでの事故分析検討会において、検討を行った調査・分析項目は、参考 9 に示している。

（２）本中間取りまとめの論述内容について

本中間取りまとめは、主に 2021 年 4 月から 2022 年 12 月末までに行った調査・

分析に基づいて検討を行った結果を、原則 2022 年末の時点での理解・認識として記述したものである。したがって、その内容には、ほぼ確定的な判断を行った事項から仮説や解釈を提案している事項まで、幅広い確度の事項が含まれている。また、2020 年春頃から続く新型コロナウイルス感染症への対策のため、調査・分析が十分に実施できなかった事項、調査・分析を進めていく中で更に検討を要すると考えられる事項があることに加え、今後の廃炉作業の進捗等に伴って明らかにされる事項等も存在する。取りまとめの執筆に当たっては、これらの違いが明確になるように配慮した。こうした本中間取りまとめの性格を踏まえると、今後、新たな情報や知見が得られることによって、いずれの事項についても、その理解や認識が変更される可能性がある。

なお、本中間取りまとめ本文は、調査チームが事故分析検討会の議論も踏まえつつ、自らの責任で取りまとめた。個別の検討事項については別添により詳述しているが、その執筆を担当した取りまとめ組織または個人の名称が明記されている場合は、当該資料の文責は当該組織又は個人に属し、事故分析検討会として記述の細部にわたって確認を行ったものではない。

第一章 シビアアクシデント時の Cs-137²移動メカニズムについての考察

第一節 1/2号機ベント配管系の特徴的汚染パターンからの知見

1-1-1 背景

中間取りまとめ（2021年版）において、1/2号機の原子炉格納容器ベント（以下「ベント」という。）に使用された配管系³（大部分は非常用ガス処理系（以下「SGTS」という。）配管をベント配管として共用している。以下「ベントライン」という。）について、特徴的な汚染パターンを報告した。

その後の調査で得た知見を加えて、その特徴を整理すると下記の点が挙げられる。

- ① ベントに成功していない2号機の非常用ガス処理系配管のSGTSフィルタに近い部分の方が、ベントに成功した1号機のベントラインのSGTS配管よりも汚染の程度が強い⁴。
- ② 1号機及び2号機のベントラインの配管は合流後、下方に向かって降下した後、短い水平部を経由して1/2号機共用排気筒に接続されているが、この短い水平部に強い汚染が見られた。
- ③ 1号機SGTSフィルタトレインは、2号機SGTSフィルタトレインよりも汚染の程度が高い。
- ④ 1/2号機共用排気筒については、底部の汚染の程度が高く、排気筒の上半分の汚染の程度はかなり低い。

詳細なデータは、別添1に記述する。

この汚染パターンを引き起こしたメカニズムを理解するために実施した中間取りまとめ（2021年版）のJAEAによるベントライン及び共用排気筒におけるベントガスの挙動に関する解析シミュレーション⁵では、取り入れた境界条件によりSGTSフィルタトレインへの逆流流量が小さくなり、水蒸気の凝縮量が少ない結果となった。そのため、エアロゾルの付着／沈降を中心に汚染状況の把握を試みたが、測定結果を十分には再現できなかった。

² 炉心損傷後の挙動を考える際、Csの同位体の中でCs-137のみが特殊な挙動を示す訳ではないが事故後に長期間残留する放射線源という観点から「Cs-137」の事故後分布に着目したため、この章ではCs-137という用語を用いて記述している。

³ 「発電用軽水型原子炉施設におけるシビアアクシデント対策としてのアクシデントマネジメントについて」（平成4年5月、原子力安全委員会決定）を踏まえて原子炉格納容器の耐圧強化ベント用に追設された配管が、非常用ガス処理系（SGTS）配管に接続されており、事故時に原子炉格納容器ベントラインとして使用された。

⁴ 1/2号機SGTS配管系全体に流れたとするCs-137による130TBqの汚染は、第二節で2、3号機シーールドプラグ上層と中間層の間に付着していると算定されるCs-137の総量の数百分の1に相当する。これはベントの回数に限られていたことと、サブプレッションチェンバ（S/C）におけるスクラビング効果の結果と考えられる。

⁵ 令和2年度原子力施設等防災対策等委託費（東京電力福島第一原子力発電所プラント内核種移行に関する調査）

1-1-2 原子力規制庁による新たなシミュレーション（別添2）

本中間取りまとめでは、原子力規制庁技術基盤グループの技術支援を得て、原子力規制庁がシミュレーションに取り組み、観測結果に対応した逆流量などの境界条件を見直した。

その結果、図1に示すように観測された1号機及び2号機のSGTSフィルタトレインの汚染⁶を引き起こしたと考えられるベントガスの逆流に関する境界条件を調整することにより、観測されたSGTS配管系の汚染状況の再現性をかなり高くできることが判明した。

また、図2に示すように、この条件下では水蒸気の凝縮及び凝縮水の低所への移動が生じ、これが汚染パターン形成の主なメカニズムであると結論づけられている。

これらにより、水蒸気凝縮及びその後の凝縮水の移動が顕著な現象となり、最終的に凝縮水の滞留位置を中心に理解すれば、現在観測されている1/2号機SGTS配管の高い汚染状況を中間取りまとめ（2021年版）における検討よりもよく再現できることが判明した。ただし、配管形状が複雑な部分などに、今回のシミュレーションを適用することは難しい。これ以上の詳細な解析を追求することは、本検討の目的を超えると考えており、国際共同プロジェクトの課題とするべく関係者と議論を進めている。

⁶ 測定結果（2017年2月～2020年7月）は、中間取りまとめ（2021年版）別添3参照。
測定結果（2021年5月）は、第22回事故分析検討会 資料5-2参照。

各経路上の残留Cs量合計に流量が比例すると仮定

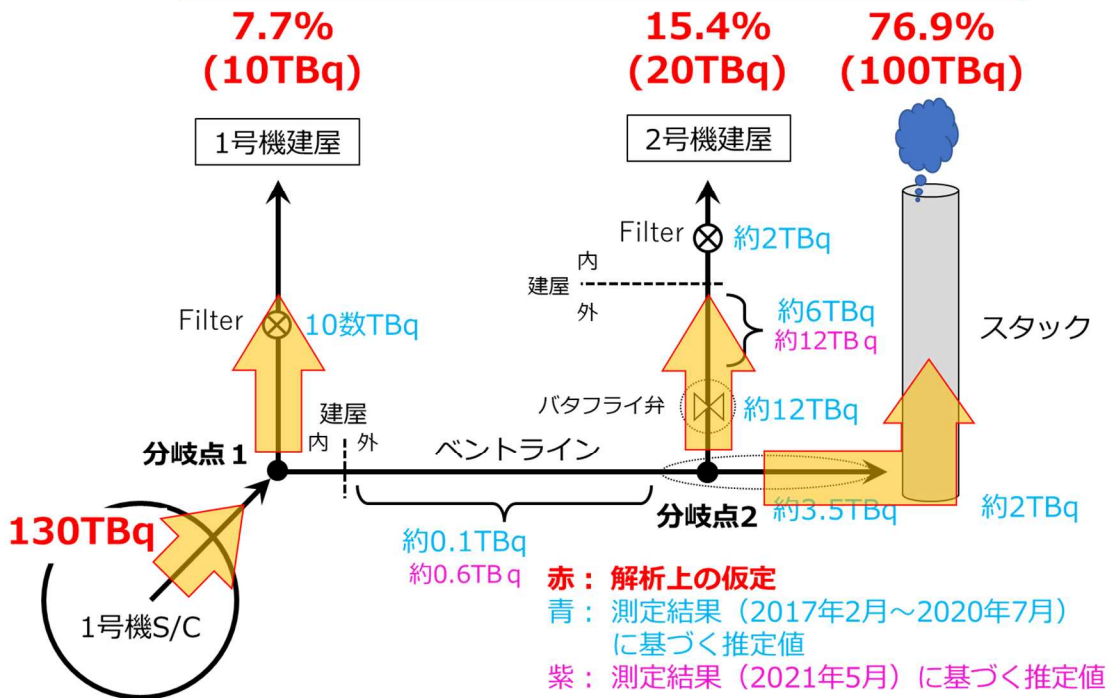


図1 ベントガスの流量配分の仮定

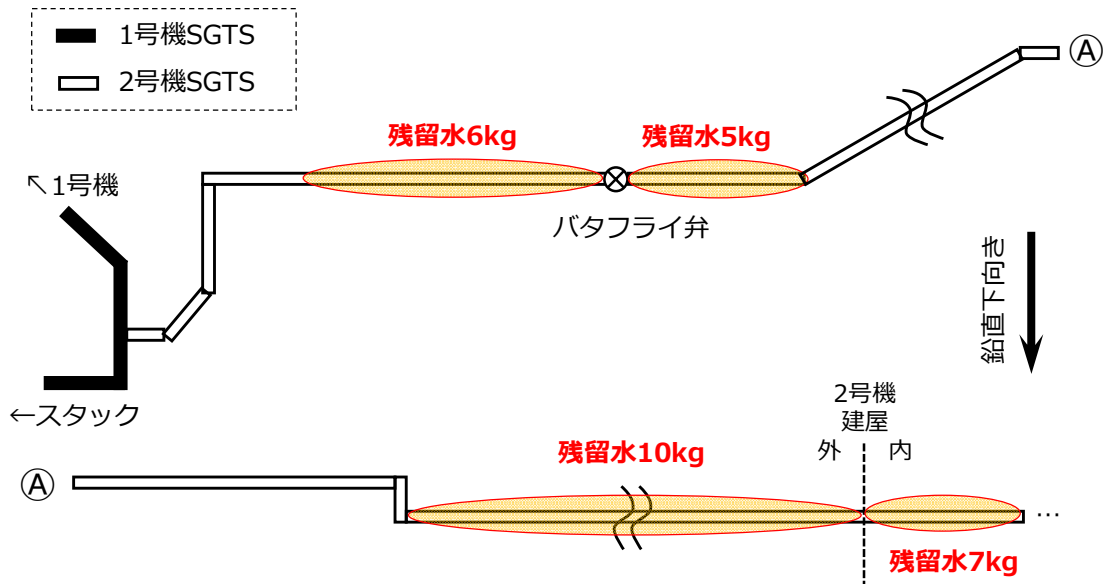


図2 凝縮した水の残留位置と残留量(解析結果)

第二節 2号機シールドプラグ汚染からの知見

1-2-1 経緯

中間取りまとめ（2021年版）では、十分なコリメータ付きの γ 線測定器で測定したエネルギースペクトルに基づき、3号機のシールドプラグ上層と中間層の間に約 $3E+16Bq$ （30PBq）のCs-137が存在する可能性が高いとしていた。

一方、2号機のオペレーションフロア（以下「オペフロ」という。）は種々の条件から、 γ 線のスペクトルを得るための測定は実施できなかった。このため、オペフロ全体の床面汚染をほぼ一様と仮定し、シールドプラグ上部とシールドプラグ周辺との周辺線量当量率の差に基づいて評価を行ったところ、シールドプラグ上層と中間層の間全体で $7E+16Bq$ （70PBq）程度（別の γ 線測定系のデータを用いた場合には $2E+16$ ・ $4.4E+16Bq$ （20-44PBq）程度）のCs-137が存在する可能性があるとしていた。

2号機については、測定条件の厳しさから、中間取りまとめ（2021年版）で算出された汚染量にはかなりの不確実性があると考えられ、本中間取りまとめに向けて各種の詳細な調査・分析を加えた。

1-2-2 シールドプラグ内における多量のCs-137汚染存在の検証

1-2-2-1 2号機原子炉ウェル内周辺線量当量率調査の結果を含めた考察（別添3-1）

2021年5月及び6月に東京電力が実施した2号機原子炉ウェル内の周辺線量当量率測定の結果、原子炉ウェル内の周辺線量当量率はシールドプラグの下層下面近傍では約 $75mSv/h$ 程度であり、下方のトップヘッドフランジに向けて高くなり、最大値はトップヘッドフランジ近傍で約 $530mSv/h$ であった（別添3-1 図3参照）。

また、シールドプラグの下層下面付近の線量率では、原子炉ウェルに面している放射線源はシールドプラグ上部の線量率にはほとんど影響を与えず、加えて、シールドプラグ上層上面の表面汚染密度は、周囲と大差なく、かつ、その程度は $1E+6Bq/cm^2$ を超えないことが確認された（1-2-4-2参照）。

従って、シールドプラグ上部の周辺線量当量率の高さの要因となっている放射線源が、シールドプラグ上層上面や原子炉ウェルに存在するとの考えは、これまでの測定結果から合理的に説明することは困難であり、3層構造となっているシールドプラグのいずれかの領域にCs-137が多量に存在していることはほぼ確実となった。

なお、原子炉ウェル内での周辺線量当量率が上記のような強度及び分布となっていることについては、シールドプラグの汚染状況の把握のみならず、原子炉格納容器内のCs-137の移行挙動を評価する上でも重要な情報であると考えられる。

原子炉ウェル付近の構造概略図を図3に示す。

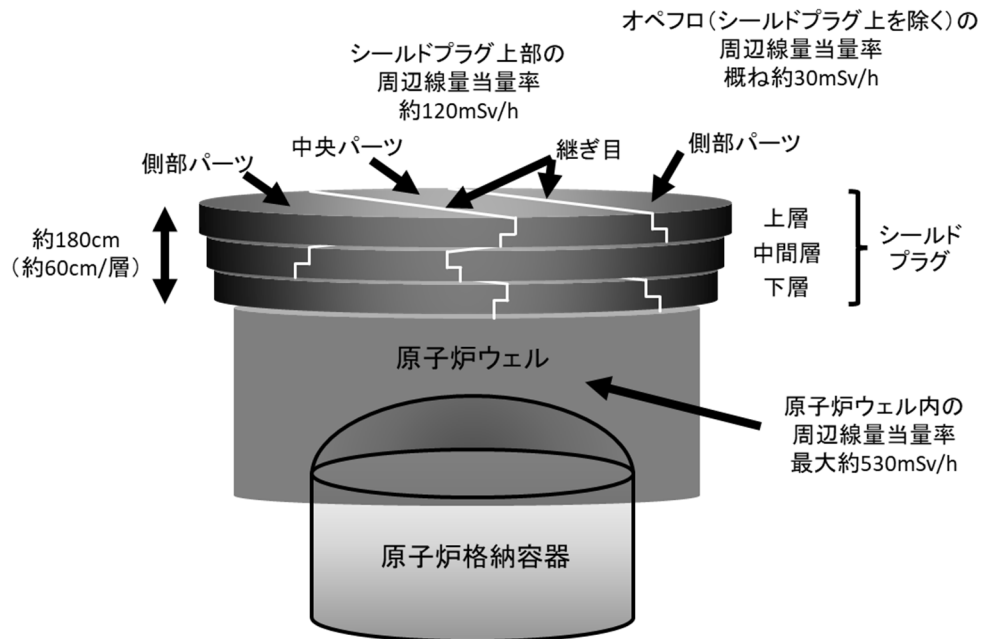


図3 原子炉ウエル付近の構造概略図

1-2-3 Cs-137の移動経路とその形成メカニズム

シールドプラグの継ぎ目垂直部分(図4のA及びC)は、設計図面上では5mm程度、実際には10mm以上の隙間があるが、継ぎ目水平部分(図4のB)はその構造上十分な隙間が生じにくいと考えられていた。このため、どのような原因で継ぎ目水平部分に隙間が生じるかを検討した。

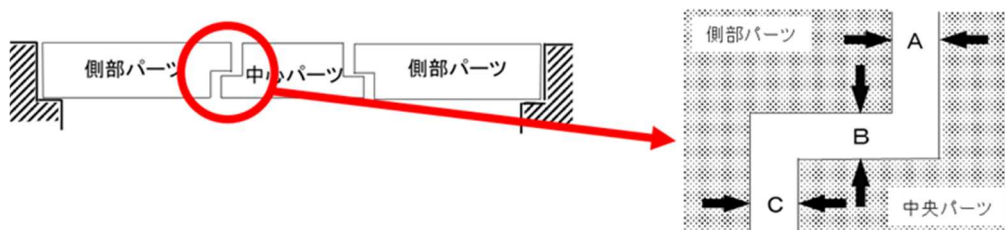


図4 シールドプラグの継ぎ目

1-2-3-1 シールドプラグの形状に関する測定結果(別添3-3)

2号機のみならず、福島第一原子力発電所内の他号機(調査可能な5号機及び6号機)及び2号機と同様の炉型を持つプラント(中国電力島根原子力発電所1号機、日本原子力発電敦賀発電所1号機)のシールドプラグについて、可能な範囲で、3Dレーザースキャナによるシールドプラグ上層上面の形状測定を実施した。

この結果、2号機のシールドプラグ上層上面の中央部は周辺に比べて40mm程度下方に落ち込んでいることが判明した。2号機以外では、5号機で35mm程度、

6号機で25mm程度の落ち込みが観測されたが、他の原子力発電所のプラントでは有意な上層上面の落ち込みは見られなかった。このことから、2号機のシールドプラグの上層上面の落ち込みが事故時に生じたものと断定することはできないが、2号機については5号機及び6号機と比べてもシールドプラグ上層上面の落ち込みの程度が大きいことから、その一部は事故時に生じた可能性もあると考えられる。

なお、事故による影響が極めて考え難い5号機及び6号機のシールドプラグ上層上面に落ち込みが観測された原因は判明していないが、その究明は東京電力福島第一原子力発電所事故の調査・分析の枠を越えるものと調査チームは判断しており、これ以上は追求しない。

また、東京電力により実施された調査によると、3号機のシールドプラグにも大きな変形が見られているが、この変形の大部分は天井クレーンの落下の影響であると考えられるため、ここでの分析には含めていない。

1-2-3-2 シールドプラグの自重変形の可能性（別添3-4）

上記の2号機のシールドプラグの上層上面の落ち込みが事故時のシールドプラグの変形によるものであったとしても、変形が生じた時期は不明であるため、この変形が事故時のCs-137の移動経路に寄与したかどうか確定的なことは言えない。そこで、JAEAはシールドプラグの自重変形の可能性について解析的な検討を行った。

その結果、2号機シールドプラグの中央部分は中心付近で6mm程度落ち込むのに対して、両端の側部部分は最大でも4mm程度であった。この結果、水平継ぎ目部分には最大で2.5mm程度の隙間が自重変形のみで生じ、シールドプラグの上層全体（中心部分の両側の側部部分の間の継ぎ目：2本の継ぎ目）では合計約400cm²程度の隙間が形成されることになる。さらにこの自重変形は、シールドプラグの中間層及び下層でも同じように生じると考えられる。このため、シビアアクシデント時の特殊な条件が発生しなくとも、シールドプラグの継ぎ目部分に十分なCs-137の移動経路が常時存在していたことになる。

1-2-3-3 シールドプラグ上での局所的周辺線量当量率調査との整合性（別添3-3）

シールドプラグの継ぎ目部分を含めて、局所的な線量率を3cm高さにおいてコリメータなしγ線線量計により測定（以下「3cm高さ測定」という。）した結果、シールドプラグ継ぎ目部分が最も高い線量率を示しており（図5）、シールドプラグの継ぎ目部分がCs-137の移動経路になったとの考えと一致している。

なお、検討の過程で東京電力が示したシールドプラグの上層と中間層との関係のように考えると、シールドプラグ上層上面の周辺線量当量率が継ぎ目部分のみなら

ず、シールドプラグ中央付近の南北に張り出した部分で高かったこととよく整合している。

ただし、この周辺線量当量率の測定結果は、シールドプラグ上層上面の局所的な汚染の影響を受けている可能性が一部で指摘されていることに留意を要する。

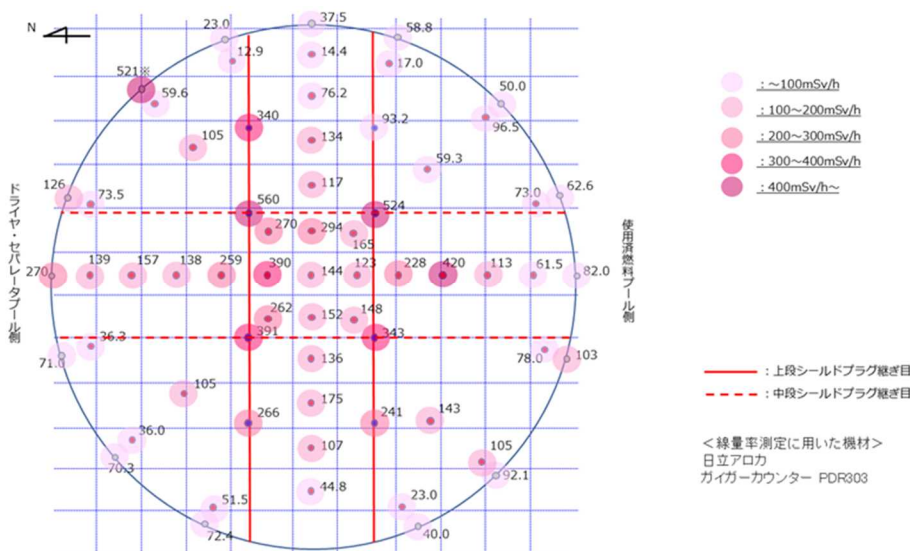


図5 2号機シールドプラグ上層上面の周辺線量当量率⁷

1-2-4 シールドプラグ内のCs-137 汚染総量と局所汚染の把握

1-2-4-1 鉄筋を含めた150cm高さ（コリメータなしγ線線量計）での測定結果及び30.5cm高さ（コリメータ付きγ線線量計）での測定結果を用いた推定結果の改訂（別添3-2-4）

シールドプラグ上層の鉄筋配置が把握できたため、2つの測定結果（鉄筋を含めた150cm高さにおけるコリメータなしγ線線量計による測定（以下「150cm高さ測定」という。）結果及び30.5cm高さにおけるコリメータ付きγ線線量計による測定（以下「30.5cm高さ測定」という。）結果）を用いた推定結果を改訂した。30.5cm高さ測定の結果については、使用された線量計の特性の影響も加味すると共に、シールドプラグの厚み及び鉄筋を加味したコンクリート密度など、計算に用いるパラメータを最新の情報に更新した。また、Cs-137の汚染はシールドプラグ上層と中間層の間のみ一様に存在しているとの中間取りまとめ（2021年版）での仮定は維持した。その結果、150cm高さ測定の結果からは、 $2.3\text{E}+10\text{ Bq/cm}^2$ から $1.1\text{E}+11\text{ Bq/cm}^2$ という汚染密度が得られ、平均は $7.5\text{E}+10\text{ Bq/cm}^2$ となった。シールドプラグ上層と中間層の間全体では $8.4\text{E}+16\text{ Bq}(84\text{PBq})$ に相当する。また、30.5cm高さ測定の結果からは、 $8.4\text{E}+08\text{ Bq/cm}^2$ から $8.5\text{E}+10\text{ Bq/cm}^2$ という汚染密度が得ら

⁷ 2号機シールドプラグトップカバー下面の汚染密度について（第31回事故分析検討会 資料3）

れ、これはシールドプラグ上層と中間層の間全体で $6.2\text{E}+16\text{Bq}(62\text{PBq})$ に相当する。

1-2-4-2 シールドプラグ上層上面の汚染量の整理

これまでの測定によって得られたシールドプラグ上層上面の汚染密度は周囲と大きく変わることはなく、 $2.5\text{E}+5\text{Bq}/\text{cm}^2$ 程度～ $1.0\text{E}+6\text{Bq}/\text{cm}^2$ の汚染（別添 3-2-5-9）であり、その汚染がシールドプラグ上層上面の 150 cm 高さ測定値（100mSv/h 程度）に影響している割合は高々10%程度であった（表 1 参照）。⁸

表 1 シールドプラグ上層上面に仮に Cs-137 が $1\text{E}+6\text{Bq}/\text{cm}^2$ 程度の汚染が一様にあった場合のシールドプラグ中心での周辺線量当量率

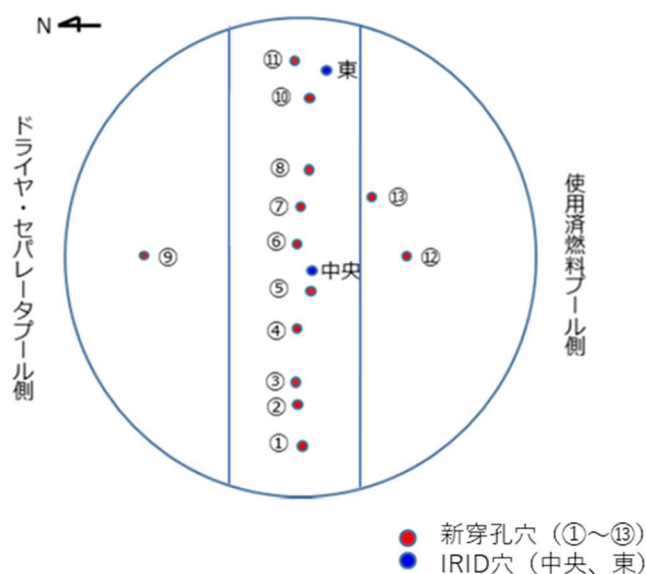
床面からの距離 (cm)	周辺線量当量率	
	$\mu\text{Sv}/\text{h}$ per Bq/cm^2	mSv/h for 1 MBq/cm^2
0	$0.19812 \pm 6.42\text{E}-03$	198 ± 6.42
1.5	$3.94\text{E}-02 \pm 3.75\text{E}-05$	39.4 ± 0.0375
3	$3.51\text{E}-02 \pm 2.61\text{E}-05$	35.1 ± 0.0261
30.5	$2.05\text{E}-02 \pm 7.19\text{E}-06$	20.5 ± 0.00719
100	$1.26\text{E}-02 \pm 3.47\text{E}-06$	12.6 ± 0.00347
150	$9.93\text{E}-03 \pm 2.71\text{E}-06$	9.93 ± 0.00271

1-2-4-3 ボーリング孔内の深さ方向の線量率分布からの考察（IRID 穴及び新穿孔穴）（別添 3-2-2 及び別添 3-2-3）

（1）シールドプラグ上層と中間層の間の汚染密度に関する放射線量率分布（深さ方向）からの情報（2 因子法）

シールドプラグ上層上面の表面汚染による効果とシールドプラグ上層と中間層の間の汚染による効果の 2 つの因子からシールドプラグ上層上面にある穴（2014 年に国際廃炉研究開発機構（以下「IRID」という。）が穿孔した 2 箇所（表 2 の IRID-C 及び IRID-E、図 6 の東及び中央、以下「IRID 穴」という。）及び 2021 年に東京電力が穿孔した 13 箇所（表 2 の No.1～No.13、図 6 の①～⑬、以下「新穿孔穴」という。）の内部の線量率の深さ方向の変化が形成されていると考え、最小二乗法を用いて測定結果に最も近い線量率変化を与える表面汚染密度とシールドプラグ上層と中間層の間の汚染密度を算出する方法である。理論的には、後述する簡易法よりも大幅に優れた方法であるが、僅かな線量率変化の違いが結果に大きく寄与する鋭敏な方法でもある。この方法で算出されたシールドプラグ上層と中間層の間の汚染密度は表 2 のとおり。

⁸ 別添 3-2-5-5-1



穿孔箇所の状況

図6：シールドプラグ上層上面の穿孔箇所⁹

表2 シールドプラグ上層と中間層の間の汚染密度 (2 因子法による算出結果)

穴番号	解析条件	10 cm 分布線源 (A)		2.5 cm 点線源 (B)		Q_B^B / Q_B^A
		Q_B^A	Error	Q_B^B	Error	
No. 1						
No. 2	0.5 cm 除外	1.26E+09	3.34E+08	1.54E+09	2.04E+08	1.22
No. 3		4.77E+09	1.10E+09	9.03E+09	1.08E+09	1.89
No. 4		1.02E+10	2.63E+09	1.85E+10	1.78E+09	1.82
No. 5	0.5 cm 除外	5.81E+09	3.07E+08	6.48E+09	3.79E+08	1.12
No. 6	0.5 cm 除外	1.05E+10	8.66E+08	1.29E+10	8.61E+08	1.23
No. 7		1.03E+10	1.67E+09	1.43E+10	7.91E+08	1.39
No. 8		7.10E+09	3.14E+09	1.02E+10	2.11E+09	1.43
No. 9		1.73E+10	4.99E+09	2.37E+10	5.13E+09	1.37
No. 10	0.5 cm 除外	5.26E+08	6.15E+07	6.18E+08	5.38E+07	1.17
No. 11	0.5 cm 除外			6.90E+08	1.54E+08	
No. 12		2.06E+10	1.12E+09	2.38E+10	2.64E+09	1.16
No. 13		1.85E+10	2.09E+09	2.38E+10	2.64E+09	1.29
IRID-C		5.95E+11	5.96E+10	6.00E+11	4.36E+10	1.01
IRID-E		1.20E+11	1.82E+10	1.36E+11	1.49E+10	1.14

※ Q_B^A 、 Q_B^B ：推定されるシールドプラグ上層と中間層の間の Cs-137 汚染密度 (単位 Bq/cm²)

⁹ 第 27 回事故分析検討会 資料 5 - 1 (一部加筆)

(2) シールドプラグ上層と中間層の間の汚染密度に関する線量率分布からの情報 (簡易法)

IRID 穴及び新穿孔穴の底部付近では表面汚染の効果は十分に小さくなると考え、底部の線量率は全てシールドプラグ上層と中間層の間の汚染によってもたらされたと仮定して計算を行う方法である。簡便ではあるが、シールドプラグ上層と中間層の間の汚染密度を大きめに見積もる性格を有している。従って、数値の正確性よりも汚染密度の上限を把握することを意図している。この方法で算出されたシールドプラグ上層と中間層の間の汚染密度は表3のとおり。

表3 シールドプラグ上層と中間層の間の汚染密度 (簡易法による算出結果)

測定点	測定値 ¹⁾	上層と中間層の間 からの寄与 ²⁾	汚染密度
	mSv/h		Bq/cm ²
[1]	111	50	6.39E+10
[2]	138	77	9.85E+10
[3]	109	48	6.14E+10
[4]	79	18	2.30E+10
[5]	108	47	6.01E+10
[6]	118	57	7.29E+10
[7]	148	87	1.11E+11
[8]	129	68	8.70E+10
[9]	144	83	1.06E+11
[10]	130	69	8.82E+10
[11]	104	43	5.50E+10
[12]	114	53	6.78E+10
Average			7.46E+10

¹⁾2019.2.28 東電測定

²⁾測定値-61 mSv/h (評価値)

いずれの方法による計算結果も、シールドプラグ中央部付近 (表3の測定点 (5) — (8)) では、1 E+10Bq/cm²程度の汚染密度を支持する結果となっており、150cm 高さ測定を基にシールドプラグ上層と中間層の間が一様に汚染していると仮定して算定した結果(7.46E+10Bq/cm²)よりも低めではあるが、オーダー的には近い結果となっている。さらに Cs-137 の移動経路がシールドプラグの継ぎ目部分であると考えられることを考慮すれば、シールドプラグ中

央パーツの中心線に沿った位置の汚染密度としては、妥当な結果である可能性が高い。

1-2-4-4 2号機シールドプラグに関する各種知見の総合的な関連性評価

(1) 表面汚染によるシールドプラグ上層と中間層の間の汚染分布評価の歪みの可能性

シールドプラグ上層上面の汚染密度は最大で $1\text{E}+6\text{Bq}/\text{cm}^2$ 程度と見積もられているが、汚染密度は必ずしも一様ではなく、局所的な放射線源が存在する可能性も十分にある。特に、3cm 高さ測定の測定器位置は表面汚染源に近いので、測定結果は比較的強く表面汚染の影響を受ける。このため、3cm 高さ測定の結果から、単純にシールドプラグ上層と中間層の間の汚染密度を算出し、これを真の汚染密度として採用することは理論的には正確ではない。

ただし、3cm 高さ測定の結果では、シールドプラグ中央付近の上部の周辺線量当量率が $100\text{mSv}/\text{h}$ を超える測定点が多数存在し、これが全て局所的な表面汚染によってもたらされたと考えることは合理性に欠けている。さらにシールドプラグの継ぎ目に沿って Cs-137 が移動したと考えた場合の汚染状況の推定とよく一致するなど、実体的にはシールドプラグ上層と中間層の間の汚染の概要をある程度示していると考えている。

(2) シールドプラグ上層と中間層の間の汚染密度が大きく変動することの影響

IRID 穴及び新穿孔穴の内部の線量率測定結果は、かなり近い測定点間でも大きな違いを見せていることから、シールドプラグ上層と中間層の間の汚染密度が場所によって大きく異なる可能性が高いことが判明した。また、既述のように、3cm 高さ測定の結果は比較的近傍の表面汚染の影響を受けやすい。このため、現在の測定データ数では、シールドプラグ上層と中間層の間の定量性のある汚染密度分布マップを作成することは適切ではないと考え、第 27 回事故分析検討会に提出された同マップは、汚染密度の相対的な関係を検討する際にのみ用いることとした。(別添 3-2-5-7 参照)

(3) シールドプラグ継ぎ目が Cs-137 の移動経路であることの影響

シールドプラグの継ぎ目が Cs-137 の移動経路であるとの結論から、継ぎ目部分に沿っても、対応した Cs-137 による汚染があると考えられるべきである。継ぎ目の汚染密度を正確に算定することは困難であるが、シールドプラグ上層上面での周辺線量当量率から、約 $1\text{E}+6\text{Bq}/\text{cm}^2$ 程度であると評価できる(別添 3-2-5-3 参照)。

この濃度は、これまで算定されたシールドプラグ上層と中間層の間の汚染密度よりもかなり低いですが、シールドプラグ上層上面に近いこと、シールドプラグ上部の周辺線量当量率に影響を与えやすい。その程度を把握することを目的に大胆な近似の上で計算を行ったところ、150 cm 高さ測定に対して約 18mSv/h 程度の影響を持ちうるということが判明した。この種の計算は、影響のオーダーを示す以上の正確性はないことに注意を要する。ただ、これによって、単純に全ての汚染がシールドプラグ上層と中間層の間に一様にあると仮定して計算した場合は、総汚染量を数十%程度過大に評価する可能性があると考えられる。

1-2-4-5 3種類の測定結果の整合性（別添3-2-4）

150 cm 高さ測定の結果、30.5cm 高さ測定の結果並びに IRID 穴及び新穿孔穴の内部での測定結果を用いたシールドプラグ上層と中間層の間の汚染密度の推定値は、シールドプラグ上層と中間層の間からの距離が短いほどばらつきが大きいという整合性のある結果となった（図7参照）。

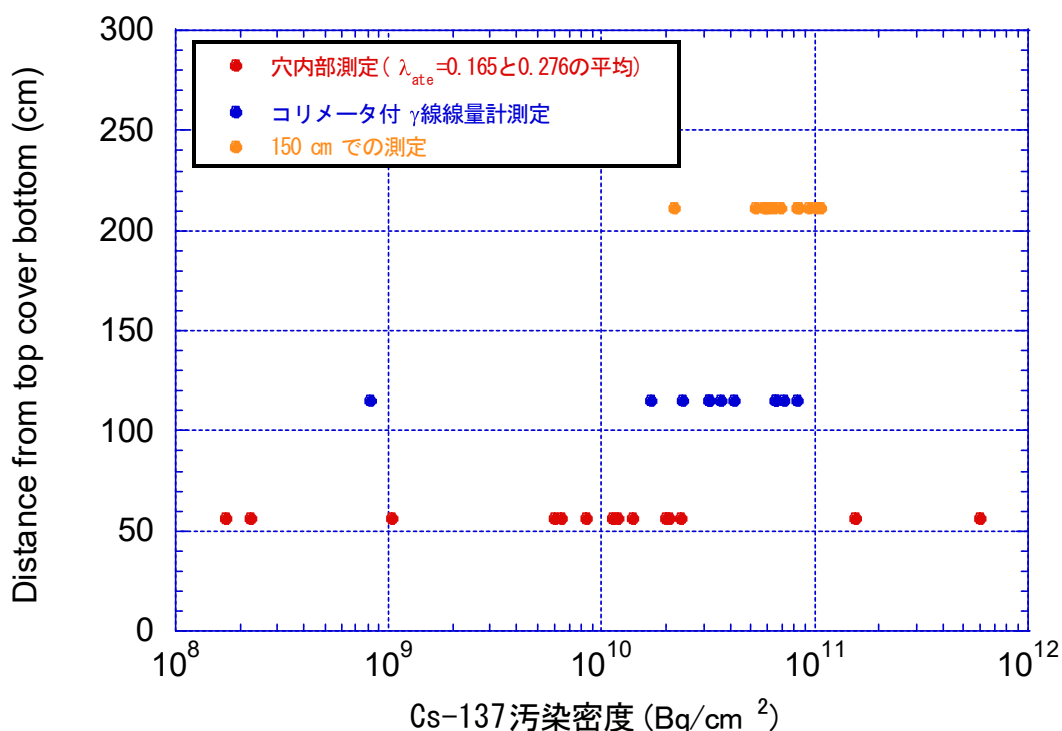


図7 3種類の測定により推定したシールドプラグ上層と中間層の間の汚染密度の比較

1-2-4-6 原子炉ウェルよりも強い汚染がシールドプラグ上層と中間層の間並びに継ぎ目に生じ得るメカニズムの考察

ここでは、原子炉格納容器からの水蒸気を含む内部気体の漏えい点であるトップヘッドフランジに直接面している原子炉ウェルよりも、シールドプラグ上層と中間層の間並びに継ぎ目により多くの Cs-137 が存在している理由を考察する。シールドプラグ上層と中間層の間並びに継ぎ目部分を移動経路として、Cs-137 を含む水蒸気が移動する過程で、温度などが水蒸気の凝縮する条件を満たす場合には凝縮水が生じ、この中に Cs-137 が溶け込んでいる、あるいは、Cs-137 を含む粒子状の化合物が取り込まれていると推定される。

Cs-137 はコンクリートに沈着、定着する性質がある。さらに、Cs-137 が蓄積されてくるに従って、崩壊熱によるエネルギー供給も加わり、凝縮水の再蒸発が生じる一方、さらなる凝縮水 (Cs-137 も) の流入も続くことが考えられる。この結果、Cs-137 の蓄積が進み原子炉ウェルよりも高い汚染密度がシールドプラグ内に存在することになったとの仮説が考えられる。今後の関係者による評価・検証を期待したい。

なお、2号機原子炉ウェルの汚染状況を理解する上で、現時点までで解明されていない事項が一つ残っている。それは、差圧調整ラインの仕切り弁が、現在、手動強制開の状態にあるということに関するものである。同仕切り弁は空気作動弁であるが、手動強制開になっている限り、空気圧を持って閉止することはできず、運転時において2号機の差圧調整ラインは強制開で運用していたと東京電力は明言している。

また、2号機の事故時に当該仕切り弁が常時開状態であったに於ては、接続されているダクトなどの汚染レベルが低すぎるように思われる。

調査チームは、この件についての疑義の余地をなくするため、東京電力に対し起動前弁状況リストを調査チームが確認できるよう要請をし、現在(2022年12月末時点)入手待ちの状況にある。

第三節 ベントライン及びシールドプラグの汚染状況と「水蒸気駆動仮説」

第二節 1-2-4-6 での水蒸気の凝縮及び凝縮水の挙動が Cs-137 の汚染に非均一な分布をもたらす主なメカニズムであるとする考察から、シビアアクシデント時において Cs-137 が水蒸気によって運ばれるという仮説(以下「水蒸気駆動仮説」という。)が整合的に導かれる。

水蒸気駆動仮説は、第一節 1-1-2 で説明する 1/2 号機ベントラインの汚染シミュレーションの結果得られる汚染パターンの他にも、以下に挙げる観測された状況の説明にも幅広く適用できる可能性が高く、今後のデータ取得の進展等に伴って、検討を進

めたい。

- ・3号機のシールドプラグの上層と中間層の間に多量の Cs-137 が存在すること。
- ・1号機のシールドプラグの上層と中間層の間に存在する Cs-137 がかなり少ないこと。
- ・1/2号機共用排気筒の上半分の汚染は非常に少ないこと。
- ・3号機及び4号機の SGTS フィルタトレイン内部に凝縮水と考えられる水が確認されていること。

第二章 落下炉心の挙動と原子炉格納容器への影響

第一節 1号機原子炉格納容器内の様子と検討状況

2-1-1 東京電力の報告と特徴点

東京電力及び IRID は、2022年2月以来、1号機 原子炉格納容器内部の映像撮影等を実施している。具体的な機材、実施内容、撮影結果などについては、別添4-1に記述している。また、これに先立って東京電力及び IRID は、2号機及び3号機の原子炉格納容器内部撮影を実施してきている。環境の厳しさから未だ十分ではないが、その中で得られた情報についても別添4-2に整理している。1号機原子炉格納容器内部撮影の結果は、既に実施されてきた2号機及び3号機の原子炉格納容器内部撮影の結果とは大きく異なる部分があり、注目された。

なお、各号機の原子炉格納容器内部撮影は、未だ十分に進展しておらず、今後、上記認識が変更される可能性がある。

注目された撮影結果は以下の通り（図8～図10参照）。（別添4-3参照）

- ①1号機ペDESTAL開口部付近に、落下した熔融炉心に由来するものである可能性が高い、高さ約1.0m程度のマウンド状のものと東京電力は判定している。
- ②1号機ペDESTAL開口部付近のコンクリートがかなりの範囲にわたって喪失している。一方、コンクリート内部にあった鉄筋部やインナースカートはほぼ原形をとどめて残存している。このような現象は、現時点までのところ2号機及び3号機では確認されていない。
- ③ペDESTAL外周部については、テラス状構造が観測されており、開口部付近では原子炉格納容器底部から1.0～1.1m、開口部の反対側では0.2～0.4m程度の高さとなっている。また、コンクリート破損はテラス状構造以下の部分にのみ生じているように見える。
- ④ごく一部であるがテラス状構造の断面の映像が得られており、気泡を伴う構造が見られるが、それ以上のことは分かっていない。当該部分の厚さは約3cmと推定されている。なお、テラス状構造の下面は滑らかなように見える。

- ⑤原子炉格納容器最外周部に位置するジェットデフレクターの裏側にも、ペDESTALから到達したと考えられる堆積物が見られるが、ジェットデフレクター自体には大きな損傷などは見られない。見える範囲では原子炉格納容器の内面に大きな損傷はない。
- ⑥ペDESTAL開口部付近では、テラス状構造の下部が空洞であることが確認されているが、開口部から離れた場所ではどうなっているのかは、現段階では不明である。また、ペDESTAL開口部前面の構造物が少ない場所では、テラス状構造が原子炉格納容器床面に落下している。
- ⑦テラス状構造下部に位置する配管等の金属構造物は概ね維持されているように見える。ただし、開口部付近の RCW（原子炉冷却系）配管はももとの位置には存在せず、その行方も確認できていない¹⁰。
- ⑧テラス状構造の位置で鉛遮蔽体（鉛毛マット）が溶けて落下しているように見受けられる。テラス状構造の上部では鉛遮蔽体（鉛毛マット）の被覆材料（グラスファイバーとのこと）は維持されているように見え、著しい高温の影響はほぼテラス状構造付近に限られているように見える。なお、東京電力は、ペDESTAL開口部の反対側に位置する場所でも、鉛遮蔽体が開口部付近とほぼ同じ高さ以下で喪失していることを確認し、その原因としては水化学的反応の可能性を示唆している。
- ⑨ペDESTAL開口部、1.4m 高さの位置にバブル形状のものが見られるが、その下部には空間があることが判明している。ただし、バブル状部分の裏面がどのようになっているかの情報は得られていない。
- ⑩ペDESTAL外周部の原子炉格納容器床面のデブリなどの堆積状況は不明確だが、一部に半球状のものが撮影されている。（具体的にどのようなものかは現段階では判明していない。）

¹⁰ 2022年12月20日に東京電力が事故以前のペDESTAL開口部の映像として示した写真（第34回事故分析検討会資料1-3 p.9）にはRCW配管が一本しかないが、東京電力は2023年1月13日の事故分析検討会で本写真を訂正した。



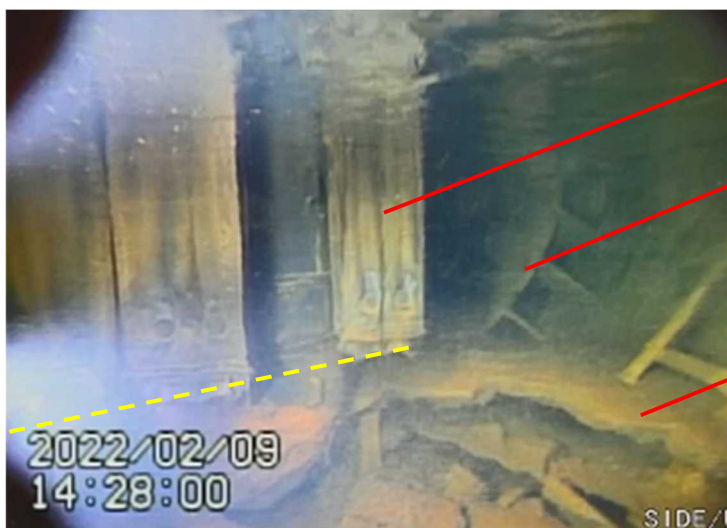
テラス状の構造

コンクリート部の喪失

ペDESTAL開口部

資料提供：国際廃炉研究開発機構（IRID）・
東京電力ホールディングス株式会社

図8 1号機ペDESTAL開口部付近



鉛毛マット

（同じ高さ（約 1.2m）で破断）

ジェットデフレクター

(D)

テラス状の構造

資料提供：国際廃炉研究開発機構（IRID）・
東京電力ホールディングス株式会社

図9 1号機ペDESTAL外周部（開口部付近）



図 10 1号機ペDESTAL外周部（開口部反対側付近）

2-1-2 事故分析検討会で提案されたシナリオ案等（別添4-3及び別添5）

調査チーム内では、以下の3つの基本的設問を念頭に検討を進めている。

① 熔融炉心が薄く広がっていないように見えるのはなぜか。

従来、熔融炉心は薄く広く広がると考えられてきた。ペDESTAL開口部付近のテラス状構造の高さが原子炉格納容器底部から1.0～1.1mであること、現時点では未確認の段階であるがペDESTAL開口部あるいはその奥側に1.0m程度堆積している可能性があることは、この従来知見と一致しない可能性がある。

② ペDESTAL壁のコンクリートが失われたのはなぜか。

従来、安全評価のために考えられてきたMCCI（Molten Core Concrete Interaction）では、2000℃程度の熔融デブリが鉄筋コンクリートと接触し、鉄筋を含めて熔融/破損させると言うものであった。しかし、今回は鉄筋などの金属構造物が広く残存しており、1000℃を下回る（鉄筋のみならず周囲の比較的細かい配管も原形をとどめている。また、鉛遮蔽体（鉛毛マット）の溶け落ちている範囲がテラス状構造の極近くであることも含めて、「低温」での相互作用の結果である可能性もある。

③ テラス状構造はどのように形成されたのか。

テラス状構造の形成過程は現段階では分かっていない。仮にテラス状構造の位置まで熔融デブリ層が存在したとした場合、単純に落下した熔融炉心が原子炉圧力容器（RPV）直下の金属構造物を取り込んだだけでは、それほど堆積に至らないと考えられている¹¹。

¹¹ 事故分析検討会 第33回会合資料1-1 P8に「原子炉内の燃料、炉内構造物が全て溶けたと想定しても、その堆積高さはペDESTAL内で～1.1m程度」とされている。

上述の3つの基本的設問に答えることができる可能性があるものとして、以下の3つのモデルが事故分析検討会に提案された。なお、これらのモデルは、今後の議論や実験などを促進する観点から提示されたものであり、現段階では案の優劣を議論できる段階にない。

事故分析検討会で提案されたシナリオは以下の3種に大別される。

A:コンクリートの高温での溶融モデル

B:コンクリートの水への溶解モデル

C:ガスによる溶融炉心の膨張モデル

A コンクリートの高温での溶融モデル（別添5）

- ・炉心溶融物がペDESTAL内に落下し、ペDESTAL開口部を経て拡がる。
- ・炉心溶融物がコンクリートを昇温し、コンクリートが溶融する。
- ・クラストが形成され、内側の溶融物の消失とともにコンクリート損傷と空洞化が発生する。

上記の過程により、落下した炉心溶融物がペDESTAL開口部付近のコンクリートを昇温させた結果コンクリートの破損とテラス状構造の形成に至ったと考える。このシナリオではコンクリートの温度が鉄筋の溶融温度に至らなかったために、コンクリートのみが破損したことになる。

B コンクリートの水への溶解モデル（別添5）

- ・ペDESTAL内に水または水蒸気が存在する環境下で落下した炉心溶融物により、局所的に水温・圧力が上昇する。
- ・コンクリート成分の高圧水への溶解によりコンクリートが損傷する。コンクリート成分と多量の水から成る高粘度な液相が形成される。水温上昇、また局所圧力の開放により、水の蒸発が進み、溶解したコンクリート成分が発泡しながら凝固する。
- ・さらに水が蒸発し、凝固物の下部に空洞が生成される。

上記の過程により、落下した炉心溶融物が高温の水もしくは水蒸気を発生させ、それがコンクリート成分と反応することでコンクリートが破損し、テラス状構造の元となった高粘度の液相の生成に至ったと考える。

高温・高圧の水は、岩石、特に岩石中の SiO_2 を溶かすことが知られている。コンクリートは骨材とセメントから構成されており、骨材に SiO_2 が豊富に含まれて

いる場合は、コンクリート中の骨材が高温・高圧の水に溶解する可能性がある。

また、高温・高圧の水と SiO_2 が反応して生じる水を多量に含んだガラスは、水が蒸発する際に膨張して多孔質になることが知られている。同様の現象が炉内でも生じ、その結果としてテラス状構造が形成された可能性がある。

C ガスによる溶融炉心の膨張モデル

落下した溶融炉心はペDESTAL開口部の奥に 1m 程度の高さの盛り上がりを作成しているように見えるとともに、ペDESTAL外周部にも広がっている可能性が高い。一方、ペDESTAL内の盛り上がりは、ペDESTALを満たしているようには、現時点では見えない。盛り上がり形成されていることが確認された場合、その成因については、落下炉心の粘性が高かったと言う考えと、落下炉心がある程度下部に溜まった後、ガスなどの噴出口として形成されたという 2 通りの考えが、現段階では、あり得るのではないかと。

その後、落下した溶融炉心は、ペDESTAL開口部を経て、次第にペDESTAL外周部に流れ出たと考えられるが、このときの溶融炉心の温度や外周部での広がり程度などは、今後の 1 号機原子炉格納容器内部調査からの追加情報なしには、確定できない。

この溶融炉心からの輻射による熱エネルギー（ γ 線などによる効果を含む。）によって、ペDESTAL壁の温度が上昇し、コンクリートの分解が進み、強度を失って粉体状になったのではないかと。強度を失うメカニズムとしては、カルシウムの脱落やコンクリート内の結晶成分の相変化による応力発生などがあり得るが、何れもアイデアの段階であり、実験で検証することが必要である。

輻射による加温破損メカニズムは、溶融炉心とコンクリートが直接接触することを必要とせず、ペDESTAL壁の残存鉄筋部に溶融炉心の固化したものがほとんど見られていないことを説明できる可能性がある。また、上記の反応は 700～1000°C程度でコンクリートの圧縮応力が大きく低下することが知られているが、コンクリートの組成などに大きく影響される可能性があるため、現段階では関連情報として位置付けておく。

結合力が低下したコンクリートは、代替注水が本格化した後、流し出されたと考えることが合理的ではないかと。

ペDESTAL床面やペDESTAL壁と溶融炉心が反応すれば、二酸化炭素や水蒸気が発生する。また、炉心から漏れ出た冷却水（量的は限られていたと考えられる）も関与した可能性がある。これらの気体を多く含んだ層（以下「膨張層」という。

MCCI 関連の文献の中には「swelled melt」等の用語が用いられていることがあるが、実験条件などがかなり違うため、全く同じような事象を指しているかどうかは明確ではない。) が溶融炉心本体と一体なのか分離していたのかは不明であるが、ここでは分離状態 (ビールの泡のイメージ) で考えている。

なお、溶融炉心のペデスタル開口部からの流出と「膨張層」の形成の時間的前後関係は現時点では不明である。

「膨張層」の上部にコンクリートから分離したシリコン等を含む成分が集まり、膜あるいは層を形成する。この膜は、温度低下などの要因で固化し、周辺の配管や機器に固着することが考えられる。配管等への固着現象は、これまでの MCCI 実験で「anchoring」と呼ばれている現象であるが、今回のような条件下でも確実に発生するかどうかは確認できていない。この膜の上に粉体化したコンクリートの一部が堆積し、膜の形成を促進した可能性もある。

なお、過去の MCCI 実験で見られた固着した膜/層は比較的脆く、ペデスタル開口部の前面のように「anchoring」するための配管などが無く、広い空間になっている場所では、自重で崩れることは十分に考えられる。

また、「薄い膜」は多くの気泡を含み、かなりの断熱性を持つ可能性がある。その場合、コンクリートの破損部分が、この「薄い膜」の下部に限定されていることを説明できる可能性がある。

その後、崩壊熱の減少や代替注水の進行によって、「膨張層」の温度が下がり、収縮することにより、「薄い膜」のみが元の位置に取り残されたのではないか。なお、「膨張層」の成長過程で、「薄い膜」に裂け目などが生じた場合には、さらにその上部に「膨張層」と「薄い膜」が形成されることは十分にあり得ることから、テラス状の構造が多層になっている箇所があることを説明できる可能性がある。

ペデスタル内に「薄い膜」(テラス状の構造) が 1m 程度の高さの位置に残存している可能性は低いかも知れない。ペデスタルの直径が 6m 程度である一方、1m 程度の高さには anchoring できる配管などがあまりないと考えられる。さらに、代替注水が本格化した時点でかなりの水量が、压力容器の破損部分からペデスタルに流下したと考えられるからである¹²。

¹² 参考文献：第 34 回事故分析検討会 参考資料 Core debris location evaluations [アルゴンヌ国立研究所 Mitch Farmer 氏]

2-1-3 2022年12月中旬以降に更新された情報

なお、2022年12月20日の事故分析検討会において、東京電力から、最新の観察情報として、1号機原子炉格納容器内の堆積物に関する中性子及びγ線のスペクトラムなどの情報が提示された。東京電力はEu-154の検出によって、堆積物が溶融炉心由来のものであるとの説明を行っている。調査チームとしては、測定の詳細情報にアクセスできておらず、また、溶融炉心に巻き込まれたコンクリートの寄与などについての分析に至っていないため、現時点では上記東京電力の主張について、評価を完了していない状況である。

また、調査チームは2022年12月22日に行った5号機の原子炉格納容器内調査において、鉛遮蔽体の接続にプラスチック製の結束バンドが使用されている例があることを確認した。東京電力は1号機の原子炉格納容器内の鉛遮蔽体の接続部には融点の低いものは使われていないとしているが、仮にプラスチック製の結束バンドによって鉛遮蔽体の接続が行われていたのであれば、結束バンドの強度を失う温度はそれほど高くないと考えられることから、多くの鉛遮蔽体がほぼ同じ高さに位置する接続部で分離・落下していることは容易に理解できる。このため、鉛遮蔽体の接続方法等について、事実関係を確認していく必要があると考えている。

第二節 2号機及び3号機原子炉格納容器内の様子と検討状況（別添4-2）

2-2-1 2号機関連

2号機原子炉格納容器内については、2018年1月に制御棒駆動機構（CRD）交換用レールのペDESTAL開口部を経由したペDESTAL内部の調査が実施されている。

1号機原子炉格納容器内部調査で確認されたペDESTAL外周部とは調査範囲が異なっているが、1号機で確認されたペDESTAL基礎部のコンクリート損傷、テラス状構造、半球状の堆積物等は、2号機の調査では確認されていない。

2-2-2 3号機関連

3号機原子炉格納容器内については、2017年7月及び12月に制御棒駆動機構（CRD）交換用レールのペDESTAL開口部を経由したペDESTAL内部の調査が実施されている。

1号機原子炉格納容器内部調査で確認されたペDESTAL外周部とは調査範囲が異なっているが、1号機で確認されたペDESTAL基礎部のコンクリート損傷、テラス状構造、半球状の堆積物等は、3号機の調査では確認されていない。しかし、1号機で確認されている盛り上がったバブル形状の堆積物に形状が似た堆積物（ただし、成因が同じかどうかは不明。）が確認されており、今後詳細な映像等が撮影されれば、各号機における溶融炉心の落下あるいは堆積物の形成に係る知見が拡充されるものと期待される。

第三節 今後の分析評価の進め方

2-3-1 当面の実験計画及び東京電力に収集を求める情報（別添4-1及び別添4-3）

1号機原子炉格納容器内部調査については、今後、東京電力及びIRIDにおいて、「後半調査」として、堆積物デブリ検知・評価、堆積物サンプリング、堆積物3Dマッピング及びペDESTAL内部並びに壁部の詳細観察が予定されている。

このほか、コンクリートの劣化・損傷の原因把握が重要と考えており、調査チームでは1号機原子炉格納容器のペDESTALのコンクリート部と極力同質のコンクリートサンプルを用いた加熱試験などにより、知見の拡充を行う予定である。

具体的に入手を期待している情報には次のようなものがある。

- ① テラス状構造等の試料採取及び分析
- ② ペDESTAL内部及びペDESTAL内壁の動画・画像等
- ③ ペDESTAL外周部であって開口部から離れた地点におけるテラス状構造下部の状況（こうした部分でもテラス状構造下部は空洞になっているのかどうか。）
- ④ 原子炉格納容器床面に分布している物質の試料採取及び分析 等
- ⑤ 1号機で使用されたコンクリートにできるだけ近いコンクリート片を用いた加熱破損実験
- ⑥ 鉛遮蔽体の接続方法

2-3-2 東京電力の情報公開の進展

東京電力及びIRIDが2022年上半期に実施した1号機原子炉格納容器内部調査については、事故分析検討会で議論¹³となったが、東京電力において公開された動画・画像が限定されており、動画・画像の取得から約5ヶ月後に新たな情報として報告される等、東京電力における調査の情報の公開性、速報性に関して指摘があった。

東京電力からは、調査に係る動画・画像等の容量も大きく、公開するための作業に時間を要している旨の回答があるとともに、その後の対応として、事故分析検討会において、今回の1号機原子炉格納容器内部調査で取得された全ての映像を2022年12月中に公表する旨の説明及び同年12月から開始する後半の調査についても調査の速報をインターネットにて公表する旨の説明があった¹⁴。

2022年2月から6月にかけて実施された1号機原子炉格納容器内部調査で取得された全ての映像（準備作業等は除く）¹⁵については、2022年12月12日から東京電

¹³事故分析検討会 第32回会合 議題（1）1号機原子炉格納容器内部調査の状況について

¹⁴福島第一原子力発電所1号機の格納容器内部調査から得られた情報（前半調査とりまとめ）（第33回事故分析検討会 資料1-1）

¹⁵ 記録時間は合計で約180時間

力の本社原子力情報コーナーにて公表されている。

第三章 その他の調査項目の進捗状況など

第一節 4号機原子炉建屋における「火災現場」位置の特定（別添6）

3-1 4号機原子炉建屋再循環ポンプ MG セット（A）付近の調査結果

4号機原子炉建屋については、2011年3月15日6時頃の水素爆発以降、火災の発生が報告¹⁶されている。これらの火災については、火災当時に原子炉建屋外から撮影された画像や2011年11月に東京電力が撮影した4号機原子炉建屋4階内部の画像が公表されているにとどまっていた。

本中間取りまとめでは、2011年3月15日及び16日の4号機原子炉建屋での火災に関してこれまでに公表されている情報を整理するとともに、現地にて現時点での火災の痕跡の有無等を調査した。

その結果、着火原因までは判明しなかったものの、火災の発生場所は、可燃物が燃焼した痕跡が確認された4号機原子炉建屋4階北西部の再循環ポンプ電動発電機（MGセット）周辺であるとの結論を得た。

3-2 今後の計画

火災の発生源や着火原因等については、現場に残されている燃え残り物などを分析することによって、さらに判明する事項もあると考えられるため、引き続き検討を行う。

第二節 3号機水素爆発関連の試験等

3-2-1 原子炉格納容器内の材料からの有機ガスの発生可能性試験（別添7、別添8、別添9）

中間取りまとめ（2021年版）において、3号機の水素爆発時に「水素だけでなく（可燃性）有機化合物が相当量存在していたことを示唆している」とした。

シビアアクシデント時に、原子炉格納容器内で有機化合物が発生する可能性に対する知見を得るために、2021年度及び2022年度に原子炉格納容器内にあるケーブルや断熱材等を用いて東京電力及びJAEAにおいて加熱試験を行った（別添8参照）。

試験結果は、まだ完全なものではないが、ある程度の有機化合物が発生すること自体は確認された。ただし、今回の試験結果では発生量は限られている可能性が高いと考えられる。一方、東京電力が2021年度に実施した試験では、水蒸気条件下で有機

¹⁶ 福島原子力事故調査報告書（平成24年6月、東京電力株式会社）によると、2011年3月15日に4号機原子炉建屋3階北西コーナー付近で火災が発生していることが確認され、また、同年3月16日には4号機原子炉建屋4階北西部付近で炎が上がっていることが確認されている。

物の分解が大幅に促進される可能性を示しており、200°C水蒸気環境下ではウレタン保温材試料が液化することが確認された（図1-1参照）。本来、原子炉格納容器内には2%程度の酸素が存在していること及び水蒸気環境が想定されることから、2022年度には、JAEA及び東京電力において、酸素含有条件下を含めて水蒸気環境下等の原子炉格納容器内の環境条件を考慮した試験を継続している。試験結果は、後続のレポートで報告したい。なお、東京電力の試験結果は、1号機原子炉格納容器内部調査で確認された原子炉再循環系配管のウレタン保温材の消失にも関係している可能性がある。



出典：東京電力福島第一原子力発電所の事故の分析に係る検討会（第29回会合）資料1-1及び資料1-2

図1-1 東京電力及びJAEAにおける加熱試験（ウレタン保温材の例）

3-2-2 水素ガスの燃焼試験

中間取りまとめ（2021年版）では、爆燃現象での原子炉建屋の破損の可能性に言及していた。調査チームでは、実際に爆燃事象を含む水素燃焼現象でどの程度の圧力上昇が生じるかについての試験を準備しており、後続のレポートで結果を報告した

い。

3-2-3 事故分析検討会における発電用原子炉設置者からの指摘等

中間取りまとめ（2021年版）において、3号機の「原子炉建屋5階の損傷や同建屋の屋根部の初期の上昇を可燃性ガスの燃焼のみによって説明することは合理的ではない。」と記載したが、一部の発電用原子炉設置者から「爆発力を主にもたらしたものは水素であることがはっきりしていない」との指摘があった。中間取りまとめ（2021年版）の当該記述は、「爆発力を主にもたらしたものは水素」との認識で書かれたものであり、その旨ここに明記する。

3-2-4 東京電力における3号機原子炉建屋内水素濃度シミュレーション

東京電力は、上記シミュレーションの報告を2022年12月20日の事故分析検討会で行った。本シミュレーション結果は、中間取りまとめ（2021年版）で提案した「多段階事象」モデルの成立可能性を示唆するものと、東京電力は評価をしている。調査チームとしては、境界条件の詳細やシミュレーション結果の安定性などについての追加の意見交換を予定しており、現段階では評価を確定していない。

第三節 非常用ガス処理系の汚染状況測定等

3-3-1 遠隔操作ローダーによる調査（別添10）

3-3-1-1 1号機 SGTS フィルタトレイン

1号機 SGTS フィルタトレインは、これまでの各種調査により一部周辺の線量率等が測定されているが、特にフィルタトレイン出口部（スタック側）の線量率については測定できていない。そのため、現状確認されている線量率の関係だけでは1号機のベント配管側（フィルタトレインの出口側）からフィルタトレインへの逆流があったと判断することができない状況にある。

当該1号機 SGTS フィルタトレイン周辺は、これまでの調査において高い線量率（最大値 3.38Sv/h、2022年1月調査時点）が確認されており、人が接近して測定をすることができないことから、調査チームでは、2021年度に遠隔調査用ローダーの製作及び作動試験を含めて周辺状況の撮影及び線量率の測定を実施した。

3-3-1-2 2号機 SGTS フィルタトレイン

2号機 SGTS フィルタトレインについても、これまでの調査において高い線量率（最大値 0.22Sv/h、2021年7月調査時点）が確認されており、人が接近して測定をすることが困難であることから、調査チームでは、遠隔調査用ローダーにより周辺状況の撮影及び線量率の測定を実施している。

2021年度には、東京電力が確認した2号機 SGTS フィルタトレイン（B系）基

部の漏えい痕について、調査チームは遠隔調査用ローダーを用いて周辺状況の調査を実施した。その結果、当該漏えい痕は SGTS フィルタトレインのドレン配管等とは別の配管からの漏えいと推定した。

東京電力の調査により 3 号機 SGTS フィルタトレイン (B 系) や 4 号機 SGTS フィルタトレイン (A 系) ではフィルタトレイン内部に溜まり水が確認¹⁷されており、1 号機及び 2 号機の SGTS フィルタトレイン内についても、溜まり水が残存している可能性がある。高線量のため現時点では十分なアクセスが出来ないが、溜まり水の有無に関して、引き続き調査を検討していく予定である。

3-3-2 1/2 号機 SGTS 配管の切断による配管内の汚染分布の測定

(別添 1 1)

1/2 号機 SGTS 配管については、東京電力が予定している 1/2 号機廃棄物処理建屋の雨水対策工事及び 1 号機原子炉建屋大型カバー設置工事等の廃炉作業と干渉する範囲があるため、1 号機及び 2 号機原子炉建屋の屋外に敷設されている SGTS 配管の一部を撤去する作業が実施されている。

当該 SGTS 配管撤去については、2021 年 7 月から作業が開始されたが、作業に使用するクレーンの故障、配管切断装置の不具合等により作業が遅延し、2022 年 5 月に 2 号機 SGTS 配管の 1 本目の切断、サンプル採取等が実施された。しかし、その後も同年 6 月には 2 号機 SGTS 配管の 2 本目の切断作業中に切断装置のワイヤーソーの配管への噛み込み事象等が発生した。このため、同年 7 月に周辺工事と工程組み替え、配管切断装置の改造等を行うこととなり、SGTS 配管の切断作業の遅延が生じている。

なお、切断された 2 号機 SGTS 配管の 1 本目については、以下の調査等を実施しており、作業が進めば 2 本目以降の切断配管についても同様の調査等を実施予定である。

① γ カメラ測定

複数の種類の γ カメラ¹⁸を用いて SGTS 配管の汚染状態を確認する。

② 配管内部確認及びスミヤ採取

γ カメラ等で高汚染が確認された箇所等の SGTS 配管内部の映像取得及びスミヤ採取を行う。

③ 配管サンプル採取

¹⁷ 1-4 号機 SGTS 室調査の結果について (第 21 回事故分析検討会 資料 5-2)

¹⁸ 原子力規制庁所有のピンホール型 γ カメラ、東京電力所有のコーデットマスク型 γ カメラ及びコンプトン型 γ カメラを使用した。

γカメラ等で高汚染が確認された箇所等の SGTS 配管部位のサンプル採取を行う。

④スミヤ／配管サンプル分析

スミヤ分析及び配管サンプル分析については、今後、東京電力において、分析を実施する予定である。

上記のうち、①γカメラによる測定結果については、東京電力のコーデットマスク型γカメラ又は原子力規制庁のピンホール型γカメラ(以下「ガンマカメラ」という。)を用いれば、配管上部、配管中央部、配管下部等の汚染分布の推定が可能な情報が得られると考えられる。

また、③配管サンプルの採取では、一部の切断配管の内部に付着物が確認されており、2号機 SGTS 配管内が水蒸気環境だった可能性も示唆される。これは、1-1-2で検討した、SGTS 配管内における水蒸気凝縮及びその後の凝縮水の移動についての裏付けとなる可能性がある。

ただし、②及び③のスミヤ／配管サンプル採取については、スミヤ試料の採取箇所の位置、発電所敷地内の運搬用収納容器に収納・保管した場合の配管の上下左右等の位置・方向情報が十分に記録されていなかったため、東京電力において、スミヤ／配管サンプル採取時の位置・方向情報等の記録を適切に行うこととなった。

第四節 発電所敷地内外のモニタリングポスト等の空間線量率の推移

3-4-1 モニタリングポスト等で測定された空間線量率データ等の整理 (別添12)

調査チームは、東京電力福島第一原子力発電所敷地周辺の市町村に福島県が設置していた環境放射能監視用のモニタリングポストに加えて、同発電所敷地内に設置されたモニタリングポスト、モニタリングカー、プロセスモニタ、エリアモニタ等の空間線量率に関するデータ等を収集するとともに、測定データの確認、整理を行っている。

また、福島県の協力を得て、福島県の環境放射能監視用モニタリングポストの現地調査の他、測定データに係る情報の確認や事故当時に採取された試料の確認を行っている。

これらの測定データには、2011年3月11日から同年3月31日までの期間において、いくつかの空間線量率の推移が記録されているものがあり、今後、各測定点における空間線量率の推移を分析することとしている。

第五節 その他の活動状況

3-5-1 現地調査等による継続的な調査

3-5-1-1 1号機原子炉建屋内の汚染状況及び損傷状況の調査

調査チームは、1号機原子炉建屋内の汚染分布及び損傷状況を把握するため、現地調査を実施した。現地調査では、電離箱、放射線遠隔探知機（テレテクター）（GM計数管）及びポケット線量計（CsI(Tl)シンチレーションガイガーカウンター）による周辺線量当量率の測定を実施するとともに、目視にて損傷状況を確認した。

今回調査を実施した1号機原子炉建屋3階及び4階について、確認された汚染状況及び損傷状況は、別添13に記載している。

3-5-1-2 3号機原子炉建屋内の汚染状況及び損傷状況の調査

調査チームは、3号機原子炉建屋内の汚染分布を把握するため、2017年3月から2020年10月にかけて複数回の現地調査を実施した。現地調査では、電離箱や放射線遠隔探知機（テレテクター）（GM計数管）による周辺線量当量率の測定、ガンマカメラによるCs-137の汚染密度の測定及びスペクトルサーベイメータによる放射線エネルギーの波高分布測定を実施した。

今回調査を実施した3号機原子炉建屋1階及び2階について、確認された汚染状況及び損傷状況は、別添14に記載している。

3-5-1-3 4号機原子炉建屋内の3Dレーザースキャナによる測定 （別添15）

調査チームは、原子炉建屋等の構造物の損傷状況等を目視により確認するとともに、より詳細に構造物の形状、損傷状況等を把握するため、3Dレーザースキャナ測定を実施し、データ化して損傷箇所の形状や構造物の傾斜等を確認している。

測定にあたっては、有人による入域が可能な建屋であり、比較的線量が低く、ある程度の時間にわたり滞在可能な箇所について実施しており、本中間取りまとめでは、4号機原子炉建屋内の測定結果について整理した。

なお、4号機原子炉建屋の測定では、3Dレーザースキャナ測定に用いるターゲット球の設置及び3Dレーザースキャナ測定を行い、事故後の地震¹⁹による影響等の確認も考慮することとした。

4号機原子炉建屋内の3Dレーザースキャナ測定は、4号機原子炉建屋2階、3階及び4階で実施しており、同建屋3階及び4階については、2020年と2022年に測定したデータの重ね合わせ又は比較検討による形状変化の有無を確認した。

その結果、4号機原子炉建屋内の破損した一部の機器や破片等に位置のずれは確認されたが、同建屋3階及び4階で測定した天井、梁、床、壁等の建屋構造物に変化は見られなかった。同建屋は、水素爆発により大きく損傷しているが、事故後の地震などによる追加変形は、本調査では確認されなかった。

¹⁹ 2021年2月13日 福島県沖地震（最大震度6強）
2022年3月16日 福島県沖地震（最大震度6強）

3-5-2 原子炉建屋内汚染物サンプル調査（別添16）

調査チームによる2号機原子炉建屋内調査²⁰並びに東京電力による3号機SGTS室調査²¹及び1/2号機排気筒内部調査²²において、2号機原子炉建屋各階の壁、床、階段裏のスミヤ試料（14試料）、3号機SGTSフィルタトレイン内のフィルタ表面のスミヤ試料（23試料）及び1/2号機SGTS配管内部のスミヤ試料（1試料）が採取されている。これらは、原子炉建屋内及びSGTS配管系における放射性物質の移行経路、組成及び化学形の推定に有用な情報を有していると考えられることから、JAEAにおいてスミヤ試料の分析を実施した²³。

原子炉建屋の壁や床に沈着した放射性物質の量は、各号機の原子炉格納容器から放出され、原子炉建屋に残存する量の大小関係を把握する際の参考情報になり得るため、2021年度は、2号機原子炉建屋の局所領域から採取したスミヤ試料の分析を中心に行った。

その結果、JAEAは：

- ① Cs-134、Cs-137、Tc-99、Mo同位体、Sr-90、U同位体、Pu同位体及びAm-241の定量から、2号機原子炉建屋スミヤ試料では、Tc-99及びMo同位体のいずれも有意に検出された。一方、3号機SGTSフィルタトレインのフィルタ表面スミヤ試料及び1/2号機SGTS配管内部スミヤ試料では、Tc-99及びMo同位体は分析装置の検出下限以下であった。
- ② 2号機原子炉建屋の試料分析の特徴として、Cs-137に対するTc-99及びMo同位体のモル比が、原子炉建屋5階において4階及び1階よりも高いことが確認された。

と報告している。

また、JAEAは

- i) 2号機ではモリブデンがセシウムに対して、通常予想される形態であるモリブデン酸セシウムによる比率よりも、かなり多く検出されているため、酸化モリブデンなどの形態で存在するモリブデンが相当量あると推定される。
- ii) 2号機スミヤ試料の分析により、Tc-99及びMo同位体が検出されていることは、放出時の2号機原子炉格納容器内が酸化性雰囲気であったことを示唆する一方、還元性雰囲気で放出されやすいSr-90も検出されており、現段階ではこれらの結果を統合的に説明することは困難である。

²⁰ 第14回事故分析検討会 資料3

²¹ 第16回事故分析検討会 資料4-1

²² 第12回事故分析検討会 資料6-1

²³ 令和3年度原子力施設等防災対策等委託費（東京電力福島第一原子力発電所プラント内核種移行に関する調査）

としている。

調査チームとしては、現段階は、試料の取得・分析を進め、基礎的データの集積を図る段階にあると考えており、何らかの結論を出すには時期尚早ではないかと考えている。なお、ii) については、事故分析検討会において、2号機の事故シーケンスは長かったため、原子炉格納容器内の雰囲気は酸化性雰囲気だった時点と還元性雰囲気だった時点とが別々に存在した可能性が指摘された。

終章 おわりに

1. 前回中間取りまとめ中の知見の規制上の評価と活用状況

中間取りまとめ（2021年版）で得られた知見のうち、原子炉建屋の水素防護対策については、沸騰水型原子炉（BWR）における原子炉建屋の水素爆発による重大事故等対策への影響が大きいこと、原子炉格納容器ベントが BWR における原子炉建屋の水素防護対策として最も効果的かつ信頼性の高い対策であることから、2022年12月7日の第56回原子力規制委員会²⁴において、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の解釈等²⁵（以下「解釈等」という。）の改正案が討議されている。

当該改正案では、改正前の解釈等において原子炉格納容器の過圧破損防止対策等として位置付けられている原子炉格納容器ベントについて、BWR における原子炉建屋の水素防護対策としての位置付けを明確化している。

また、原子炉格納容器から水素ガスを排出するための手順等の整備についても原子炉格納容器ベントの BWR における原子炉建屋の水素防護対策としての位置付けを明確化するとともに、原子炉格納容器ベント等の対策をその判断基準に達した場合にためらわず実施する必要がある旨が明確化されている。

2. 謝辞

今般の調査・分析作業や事故分析検討会における議論を進めるに当たり、作業に係る準備、検討の基礎となる基本的知識の共有から、仮説・解釈の構築、検討内容の検証などの様々な場面において、以下を含む数多くの方々から積極的かつ貴重なご協力をいただいた。

- ・各分野の専門的知見の共有と科学的技術的な助言等をいただいた外部の専門家の皆様
- ・大学内に専門の組織を立ち上げ1号機原子炉格納容器内部調査の状況を踏まえたシナリオを提案いただくなど事故分析検討会での議論に積極的に参画いただいた大阪大学大石准教授他の皆様
- ・技術的な背景の理解に資する情報及び質疑への対応をいただいた設備メーカーや

²⁴ 令和4年第56回原子力規制委員会 資料2：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の解釈等の改正案及びこれに対する意見公募の実施並びに審査の方針—原子炉格納容器ベントのBWRにおける原子炉建屋の水素防護対策としての位置付けの明確化— 2022年12月7日原子力規制庁

<https://www.nra.go.jp/data/000412797.pdf>

²⁵ 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の解釈（原規技発第1306193号）

実用発電用原子炉及びその附属施設の技術基準に関する規則の解釈（原規技発第1306194号）

実用発電用原子炉に係る発電用原子炉設置者の重大事故の発生及び拡大の防止に必要な措置を実施するために必要な技術的能力に係る審査基準（原規技発第1306197号）

各種団体の皆様

- ・3号機内の水素の挙動について、自主的取り組みでシミュレーションを行っていた東京電力及びテプコシステムズの関係者
 - ・現地調査において放射線管理を中心に現場作業の安全かつ円滑な実施にご尽力いただいた東京電力の皆様
 - ・現地調査の段取りや事前調整などにより円滑な現場作業の実現にご貢献いただいた原子力規制庁福島第一原子力規制事務所の皆様
 - ・4号機原子炉建屋における火災に関して、自らの知識等を大いに活用し、現場調査及び本中間とりまとめの作成にご尽力いただいた原子力規制庁の原子力規制部専門検査部門（前：福島第一原子力規制事務所）の坂中伸次氏
 - ・原子力安全に係る知見と工学的見解の共有、科学的技術的議論への参画等により検討を支援いただいた原子力規制庁の職員の皆様、特に2号機シールドプラグの汚染に関して技術的専門的知見の提供及び本中間取りまとめの品質向上のためにご尽力いただいた原子力規制庁の平山技術参与及び林技術参与
- ご支援、ご協力頂いたすべての方々に対し、ここに感謝の意を示す。

3. 結語

東京電力福島第一原子力発電所事故に係る調査・分析には、まだまだ取り組むべきことが山積している。

今後、福島第一原子力発電所の廃炉作業等が進展し、発電所内の施設・設備に改変が加えられることにより、人のアクセスの可能性や情報収集可能な範囲が変化し、今までは不明であったことが明らかにできるようになる一方、状況の変化で失われる、あるいは、確認ができなくなる情報も存在する。このため、放射線量の低減等の環境改善が図られ、現地での調査が可能となった箇所については、可能な限り、随時、現地調査等を実施することが適当である。事故分析検討会としては、廃炉作業の進捗と現地調査等の状況に応じて、継続的に東京電力福島第一原子力発電所事故に係る調査・分析の結果に基づく検討に取り組んでいくこととしたい。

略語集

略語	名称
MG セット	電動発電機
オペフロ	オペレーションフロア
γカメラ	ピンホール型γカメラ、コーデットマスク型γカメラ及びコンプトン型γカメラの総称を指すが、原子力規制庁の測定結果はピンホール型γカメラによるもの
事故分析検討会	東京電力福島第一原子力発電所における事故の分析に係る検討会
中間取りまとめ（2021年版）	東京電力福島第一原子力発電所事故の調査・分析に係る中間取りまとめ～2019年9月から2021年3月までの検討～ 2021年3月5日 東京電力福島第一原子力発電所における事故の分析に係る検討会
テプコシステムズ	株式会社テプコシステムズ
東京電力	東京電力ホールディングス株式会社
福島第一原子力発電所	東京電力ホールディングス株式会社福島第一原子力発電所
ベント	原子炉格納容器ベント
ベントライン	原子炉格納容器ベントに使用された配管系（大部分は非常用ガス処理系配管をベント配管として共用している。）
連絡・調整会議	福島第一原子力発電所廃炉・事故調査に係る連絡・調整会議
Am	アメリシウム
Cs	セシウム
CRD	制御棒駆動機構
Eu	ユウロピウム
IRID	技術研究組合 国際廃炉研究開発機構
JAEA	国立研究開発法人 日本原子力研究開発機構
MCCI	Molten Core Concrete Interaction、溶融コアコンクリート相互作用
Mo	モリブデン
Pu	プルトニウム
RPV	原子炉圧力容器
S/C	サブプレッションチェンバ
SGTS	非常用ガス処理系
Sr	ストロンチウム

Tc	テクネチウム
U	ウラン

東京電力福島第一原子力発電所事故に係る継続的な 調査・分析の進め方について

令和元年9月11日

原子力規制庁

東京電力福島第一原子力発電所事故に係る継続的な調査・分析の進め方について、令和元年9月4日の第27回原子力規制委員会での指摘を踏まえ、事故分析と廃炉に関して連絡・調整する仕組み及び事故分析に係る検討会の具体的検討内容及び体制を示す。

1. 福島第一原子力発電所の廃炉及び事故調査に係る連絡・調整会議について

(1) 会議の目的及び役割

福島第一原子力発電所において進められている廃炉作業によって、事故分析に必要な情報が失われてしまうおそれがある一方、事故分析のために現場の保存等を東京電力に求めることで廃炉作業への干渉や作業が重複するケースも考えられる。

このような干渉等が対応する現場での混乱・支障となることを避けるため、廃炉を進める資源エネルギー庁、更にこれらの作業に係る原子力損害賠償・廃炉等支援機構（NDF）、東京電力、日本原子力研究開発機構（JAEA）その他関係機関と原子力規制庁との間で、公開で行う「福島第一原子力発電所廃炉・事故調査に係る連絡・調整会議」（以下「連絡・調整会議」という）を設けて、双方の作業の方針や実施計画を共有・確認し、統一された認識のもと、現場で作業を行う東京電力に対するそれぞれの指示を整合させる。

(2) 具体的な連絡・調整事項

- ① 資源エネルギー庁等は、廃炉に係る作業・調査計画や技術戦略プラン等を、原子力規制庁は、事故分析の対象とする個別検討事項や具体的調査内容を共有する。
- ② ①について、相互に干渉し得る事項又は重複する事項の有無を確認する。
- ③ 確認の結果、双方の作業が干渉又は重複するなどのおそれのあるときは、リスクを低減するための廃炉作業の観点と事故進展のプロセス解明の観点からの重要度や作業の先後関係を比較考慮し、具体的な作業方針、計画、手順を変更する、あるいは相互協力により双方の目的を達成する。

上記の他、作業によって留意すべき事項の明確化なども含め、それぞれの目的が達成されるように検討・調整を行い、この会議としての対処方針を決定する。

連絡・調整会議は四半期に1回程度の頻度での開催を念頭に置き、原子力規制庁は、連絡・調整会議により得られた対応方針を原子力規制委員会に報告し、必要な指示を受けるなどして調査・分析を進める。

(3) 体制

以下のメンバーで構成する。なお、適宜、廃炉作業に関係するその他関係機関からも出席を求める。

- ・ 資源エネルギー庁
担当審議官、原子力発電所事故収束対応室職員、原子力政策課職員
- ・ 原子力規制庁
担当審議官、東京電力福島第一原子力発電所事故対策室員、技術基盤グループ職員
- ・ 原子力損害賠償・廃炉等支援機構
担当執行役員、技術グループ職員
- ・ 東京電力ホールディングス株式会社
担当執行役員、プロジェクト計画部職員

2. 事故分析に係る検討会の具体的検討事項及び体制について

事故分析の具体的内容については「東京電力福島第一原子力発電所における事故分析に係る検討会」で検討する。検討状況は、適宜原子力規制委員会に報告する。

(1) 主な具体的検討事項（調査・分析の進展に応じて見直す）

- ① 原子炉格納容器から放射性物質等の放出又は漏えい経路・箇所
 - ・ 原子炉格納容器の耐圧強化ベントシステムのラプチャーディスクの作動状況、ベントガスの移行経路及び非常用ガス処理系を通じたベントガスの原子炉建屋内への逆流の有無
 - ・ 原子炉格納容器トップフランジからの放射性物質等の放出の程度
 - ・ 1号機オペレーティングフロアシールドプラグがずれたメカニズムの考察また、原子炉格納容器の耐圧強化ベントシステムの設計方針、具体的系統構成の妥当性については、福島第一原子力発電所以外のBWRプラントとの比較を行うこと、過去のアクシデントマネジメント策の策定方針を確認することなどにより検証し、そこから得られる教訓及び規制基準に反映すべき点の有無等を検討する。
- ② 原子炉冷却に係る機器の動作状況
 - ・ 1号機非常用復水器の動作条件、操作手順及び運転員への教育内容
 - ・ 3号機自動減圧系の作動状況
 - ・ 消防車による原子炉注水

(2) 体制

検討会の構成メンバーは、別紙のとおりとする。なお、オブザーバーとして適宜、東京電力、資源エネルギー庁等からも出席を求める。

(3) 検討スケジュール

2ヶ月に1回程度の頻度で検討会を開催し、検討を進め、2020年内を目途に中間的な報告書を取りまとめる。

(別紙)

「東京電力福島第一原子力発電所における事故分析に係る検討会」構成メンバー（案）

(原子力規制委員会)

更田 豊志 原子力規制委員会委員長

(原子力規制庁)

櫻田 道夫 原子力規制技監
金子 修一 長官官房審議官
安井 正也 原子力規制国際特別交渉官
平野 雅司 地域連携推進官
永瀬 文久 システム安全研究部門 安全技術管理官
梶本 光廣 シビアアクシデント研究部門 技術参与
星 陽崇 シビアアクシデント研究部門 主任技術研究調査官
竹内 淳 東京電力福島第一原子力発電所事故対策室長
岩永 宏平 東京電力福島第一原子力発電所事故対策室 企画調査官
川崎 憲二 実用炉審査部門 安全管理調査官

(日本原子力研究開発機構 安全研究・防災支援部門)

丸山 結 安全研究センター 副センター長
与能本 泰介 企画調整室 規制・国際情報分析室長
杉山 智之 安全研究センター リスク評価研究ディビジョン長

(外部専門家)

前川 治 原子力損害賠償・廃炉等支援機構 技監
牟田 仁 東京都市大学 工学部原子力安全工学科 准教授

※検討課題に応じて構成メンバーの見直しを行う。

「東京電力福島第一原子力発電所事故の調査・分析に係る 中間取りまとめ」を踏まえた対応について（第1回）

令和3年3月31日
原子力規制庁

1. 経緯・趣旨

令和3年3月10日の第63回原子力規制委員会に東京電力福島第一原子力発電所事故の調査・分析に係る中間取りまとめ（以下「中間取りまとめ」という。）を報告した際に、今後の継続的な調査・分析、発電用原子炉設置者の見解等の確認、及び安全規制との関係の精査について、改めて原子力規制委員会に諮ることとしており、今回は、今後の調査・分析の進め方及び発電用原子炉設置者の見解等の確認について諮る。

2. 今後の調査・分析の進め方

東京電力福島第一原子力発電所における事故の分析に係る検討会（以下「事故分析検討会」という。）において、主に以下の事項について、調査・分析を進める。

- ① モニタリングポスト、エリアモニタ、プロセスモニタ等のデータに基づく核種放出挙動の分析（セシウムの放出時期に関する検討）
- ② シールドプラグの汚染状況の追加調査（シールドプラグの裏面、原子炉ウェル等の汚染状況の調査）
- ③ 水素爆発時の原子炉建屋内のガス組成の検討（水素、可燃性有機化合物等を含むガスの物理的・化学的特性の検討）
- ④ 当時のアクシデントマネジメント策による設備や安全上の重要度の異なる設備の接続などの設計方針の確認（原子炉格納容器の耐圧強化ベントシステムの追加設置、1号機非常用復水器の操作等に係る設計方針の確認）
- ⑤ 原子炉建屋に対する継続的な3次元レーザースキャン、線量率の測定

なお、下記3.（発電用原子炉設置者の見解等の確認）の結果等も踏まえて、更に調査・分析事項を追加、精査する。

調査・分析は、引き続き原子力規制庁の職員が中心となって作業を進め、適時、事故分析検討会を開催して検討を行う。また、調査・分析を円滑に進めるとともに、得られた知見を共有するため、福島第一原子力発電所廃炉・事故調査に係る連絡・調整会議において、必要な調整・連携等を図る。

調査・分析の成果は、年度ごとに取りまとめることを念頭に検討を行う。

3. 発電用原子炉設置者の見解等の確認

発電用原子炉設置者に対して、中間取りまとめの内容に対する見解等を、別紙に記載した事項について聴取する。

原子力規制庁から、発電用原子炉設置者に、聴取する事項と回答要領を送付し、1か月を目処に回答の提出を受け、その内容を整理した上で、事故分析検討会において回答内容を確認する。

別紙 中間取りまとめに関する見解等を聴取する事項

(別紙)

中間取りまとめに関する見解等を聴取する事項

下記の事項は、中間取りまとめで確認した事実、確認した事実に基づいて考えられること、及び確認した事実を踏まえて更なる検討が必要と考えられることを記述しています。

これらの記述内容ごとに異なる見解の有無を明確にし、その理由を具体的に記述することを求めます。その際、その他の見解や意見がある場合は、その内容の記述を求めます。加えて、更なる調査・検討に関する見解（更なる調査・検討の要否、具体的な調査・検討内容、実施主体及びこれらの理由）、及び自らの各発電用原子炉施設的设计、施工、運用等への反映に係る考え方を記述することも求めます。

記

- (1) 2号機における原子炉格納容器ベント（以下「ベント」という。）は、主要な隔離弁の開操作など、ベントラインの系統構成は完了していたが、ラプチャーディスク（以下「RD」という。）の作動圧力（原子炉格納容器（以下「PCV」という。）の設計圧力の1.1倍）に到達せず、ベントは成功しなかった。

このことを踏まえると、事象進展に応じたPCV破損防止対策の意義や役割を検討する必要がある。

なお、3号機のRDにおいてもベントラインの系統構成完了時点では作動圧力には到達しておらず、その後の意図しない自動減圧系（以下「ADS」という。）の動作に伴ってRDが破裂したことでベントに成功している。

- (2) 「発電用軽水型原子炉施設におけるシビアアクシデント対策としてのアクシデントマネジメントについて」（平成4年5月、原子力安全委員会決定）を踏まえて、発電用原子炉設置者が自主的な保安措置として当時整備したアクシデントマネジメント対策（以下「AM対策」という。）の1つである耐圧強化ベントラインが重要安全施設である非常用ガス処理系（以下「SGTS」という。）配管へ接続されていたことにより、自号機のSGTS及び原子炉建屋内へのベントガス（核分裂生成物、水素等）の逆流、汚染及び水素流入による原子炉建屋の破損リスクの拡大を招いている。

これを踏まえ、設計基準対象施設等への接続を含めたAM対策（耐圧強化

ベントライン等) の設計、施工及び運用の考え方を確認する必要がある。

- (3) 1号機におけるベントは、AM対策により、ベントガスがSGTS配管の一部を經由して排気筒から排出される設計、施工及び運用がされていた。

1/2号機共用排気筒内部では、排気筒頂部までの排気配管がなく、排気筒内にベントガスが滞留したことが、排気筒下部の高い汚染の原因となった。

このことを踏まえると、AM対策が排気系統配管の構造やベントガスの挙動、組成等をどのように考慮していたのか確認する必要がある。

また、現行の原子炉施設の排気系統におけるベントガスの挙動の考え方について確認する必要がある。

- (4) 放射性物質の漏えい経路について、真空破壊弁の故障が炉心熔融後のベント時などに生じると、ドライウェル中の気体がサプレッションプールにおけるスクラビングを經由せずにPCV外に放出される経路が生じる可能性がある。

このため、当該経路を従来の重大事故等(以下「SA」という。)時における漏えい経路に追加する必要がある。

- (5) 水素爆発時の映像及び損傷状況を踏まえると、原子炉建屋の破損の主要因は、原子炉建屋内に滞留した水素の爆燃(水素濃度8%程度)によって生じた圧力による可能性が高い。

また、3号機の水素爆発で生じている火炎や爆煙については水素以外の可燃性ガスが寄与している可能性が高い。

- (6) 主蒸気逃がし安全弁(以下「SRV」という。)の逃がし弁機能の不安定動作(中途開閉状態の継続と開信号解除の不成立)が生じた原因が不明である。

このことを踏まえると、全交流動力電源喪失(以下「SBO」という。)条件下でのSRVの逃がし弁機能の挙動、計装用圧縮空気系の隔離による影響(窒素圧の低下等)及び不安定動作が確認されたSRV以外の機器における不安定動作の可能性について、網羅的に把握する必要がある。

- (7) SRVの安全弁機能の作動開始圧力が低下していたなど、SA条件下では様々な機器が設計基準事故条件下とは異なる挙動をしている。

このため、SA時の機器の挙動に関する知見を集積する必要がある。

また、AM対策の圧力計を含めて、SA条件下での計測機器の信頼性について検証する必要がある。

(8) 3号機のベントについては、(1)でも触れているが、ADSが設計の意図と異なる条件(サブプレッションチェンバ圧力の上昇による低圧注水系ポンプの背圧上昇を誤検知したこと)で作動したことによりPCV圧力がRDの破壊圧力に達し、ベントが成立した。

このことを踏まえると、SA時のADSの作動に関する設計条件等を確認する必要がある。

また、PCV圧力が上昇する主要因として、水蒸気発生が想定されてきたが、水素による加圧及び漏えいによる減圧などのふるまいが、従来の事故シナリオに対してどの程度影響するのか具体的に確認する必要がある。

(9) 3号機のベント成功回数は2回である。

3号機のベント時にSGTS配管を通じて4号機原子炉建屋内に水素が流入、その後、40時間に渡り同建屋内に水素が滞留し、爆発に至った。

同建屋内に水素が滞留していた間には、同建屋周辺で作業員による復旧作業が実施されていたことを踏まえると、水素が滞留した原子炉建屋等における重大事故等対策や復旧作業等の安全確保に関して検討する必要がある。

(参考)

東京電力福島第一原子力発電所事故の調査・分析に係る被ばく実績

令和3年3月10日の第63回原子力規制委員会において、ご指示いただいた東京電力福島第一原子力発電所事故の調査・分析に係る現地調査における被ばく実績は、以下のとおり。(現地調査参加者：計26名)

(単位：mSv)

	累積線量 (令和元年度)	累積線量 (令和2年度)
A	11.7	9.4
B	15.9	9
C	9.1	8.9
D	14.1	8.5
E	5	6
F	0.1	3.1
G	—	2.5
H	—	1.3
I	—	1.3
J	—	1.3
K	2.8	1.1
L	2.8	1.0
M	—	0.9
N	2.7	0.5
O	0.2	0.5
P	2.7	0.4
Q	—	0.1
R	—	0.0
S	—	0.0
T	0.0	0.0
U	3.9	—
V	0.4	—
W	0.1	—
X	0.1	—
Y	0.0	—
Z	0.0	—

※1：小数点以下第2位を四捨五入した値

※2：—は、現地調査参加実績なし

東京電力福島第一原子力発電所事故の調査・分析の状況

令和4年4月20日
原子力規制庁

1. 趣旨

本議題は、東京電力福島第一原子力発電所事故の調査・分析の状況について報告するものである。

2. 経緯

東京電力福島第一原子力発電所事故の調査・分析については、令和3年3月31日に開催された第70回原子力規制委員会において、調査・分析を継続し、その状況について、年度ごとに取りまとめながら進める方針が了承された。

昨年度は、新型コロナウイルス感染症予防などのため、報告書をまとめるだけの進捗が達成できず、また、可燃性ガスの発生源の分析作業も継続中であり、現在に至っている(これまでの経緯は参考1のとおり)。

3. 令和3年度の調査・分析の状況

(1)シールドプラグの汚染状況の追加調査(シールドプラグの裏面、原子炉ウエル等の汚染状況の調査)(調査概要は別紙1のとおり)

(ア)2号機シールドプラグ下面の高線量の汚染をより詳細に把握するため、東京電力ホールディングス株式会社(以下「東京電力」という。)との協働調査として、シールドプラグの既存の穿孔穴2箇所(直径50mm、深さ70mm)及び新規に穿孔した穿孔穴13カ所(直径50mm、深さ100mm)の穴内部での線量率分布の測定を行った。また、シールドプラグ下面の放射性物質の偏在性を確認するため、シールドプラグ上の床表面並びにシールドプラグ周囲部及び継ぎ目部の周辺線量当量率を測定した。

(イ)その結果、床表面の汚染は低く、シールドプラグ下面に放射性物質が存在し、偏在性を有していることが確認された。また、シールドプラグ継ぎ目部の周辺線量当量率が高く、放射性物質を含む気体の放出経路の検討に資する知見が得られた。今後、穿孔した穴内部の線量率分布の測定結果が生じるメカニズムの検討を行う。

(2)水素爆発時の原子炉建屋内のガス組成の検討(水素、可燃性有機化合物等を含むガスの物理的・化学的特性の検討)(調査概要は別紙2のとおり)

(ア)BWRの格納容器内には、可燃性有機化合物を含むガスの発生源となり得るケーブルや保温材が存在することから、東京電力から格納容器内で使用され

ているケーブル及び保温材の同材品及び類似品の試料提供を受け、これらの試料の加熱試験を東京電力及び日本原子力研究開発機構(以下「JAEA」という。))にて行った。

- (イ) その結果、各試料を約 1,000°Cまで加熱した際に複数の温度域で試料重量が減少すること、ケーブル等に使用されている有機材料が熱分解生成ガスとして検出されていることが確認された。検出されたガスについては、ガス成分の推定を行ったが、今後、発生ガスの定量化の検討を行う。また、少量(2%程度)の酸素存在条件下での実験の検討を行う。

(3) 原子炉建屋に対する継続的な3次元レーザースキャンの測定(調査概要は別紙3のとおり)

- (ア) 4号機原子炉建屋における継続的な3次元レーザースキャンの測定を行うため、定点測定用の基準点を用いた3次元レーザースキャンを行うとともに、2号機シールドプラグの変形を調査するため、同様の構造を有する他プラントのシールドプラグの詳細な形状測定(3次元レーザースキャン)を行った。
- (イ) その結果、4号機原子炉建屋並びに2号機シールドプラグ及び5号機シールドプラグ等の詳細な形状データが得られた。今後、継続的なデータ取得を進めるとともに、得られた形状データの分析を行う。

(4) 継続的な線量率の測定(調査概要は別紙4のとおり)

- (ア) 3号機原子炉建屋内のガンマカメラ測定及び2号機原子炉建屋内等のスミア試料の採取・分析を行うとともに、高い周辺線量当量率となっている1号機非常用ガス処理系フィルタトレインの線量率測定に用いる遠隔調査用ローダーの準備及び1/2号機非常用ガス処理系配管撤去作業に伴う切断配管のガンマカメラ測定の準備を行った。
- (イ) その結果、3号機原子炉建屋1階における局所的な高線量率の箇所を確認するとともに、2号機原子炉建屋各階、3号機非常用ガス処理系フィルタトレイン内、及び1/2号機非常用ガス処理系配管内のスミア試料の分析により、放射性核種の分布傾向に関する情報が得られた。今後、高い周辺線量当量率の環境下における線量率測定のための資機材準備及び配管切断等の作業が進捗次第、1号機非常用ガス処理系フィルタトレインの線量率測定及び1/2号機非常用ガス処理系配管のガンマカメラ測定を行う。

(5) モニタリングポスト、エリアモニタ、プロセスモニタ等のデータに基づく核種放出挙動の分析(セシウムの放出時期に関する検討)(調査概要は別紙5のとおり)

- (ア) 東京電力福島第一原子力発電所敷地外の空間線量率モニタリングデータ及び同発電所敷地内の6号機非常用ガス処理系排ガス放射線モニタの線量率

データに基づく放射性核種の放出挙動の分析を行った。

- (イ) その結果、平成23年3月12日以降に浪江町浪江のモニタリングポスト(発電所敷地から北北西約 8.6km)等において、複数の空間線量率のピークが確認されること、6号機非常用ガス処理系排ガス放射線モニタでは、1号機格納容器ベント及び1号機原子炉建屋の水素爆発以前にも複数のピークが確認された。今後、バックグラウンドの低い同年3月12日前後のデータ及び空間線量率の高いピークが確認された同年3月15、18、20、24日等のデータを基に放射性核種の放出挙動の分析を行う。

なお、安全規制との関係について、大量の水素発生時における格納容器の圧力制御のあり方、極限環境下におけるインターロック解除の可能性などについて、問題提起をした。

4. 今後の予定

令和4年度は、上記の事項について、調査・分析を継続し、結果がまとまり次第、取りまとめた上で原子力規制委員会に報告する。

なお、中間取りまとめに対する発電用原子炉設置者及び原子力エネルギー協議会(以下「ATENA」という。)の見解等を確認したが、発電用原子炉設置者から共有される情報等についても調査・分析に活用する。

これまでの調査・分析により得られた損傷状況、汚染状況等の画像、データ等については、データベースとして公表するよう検討を進める。

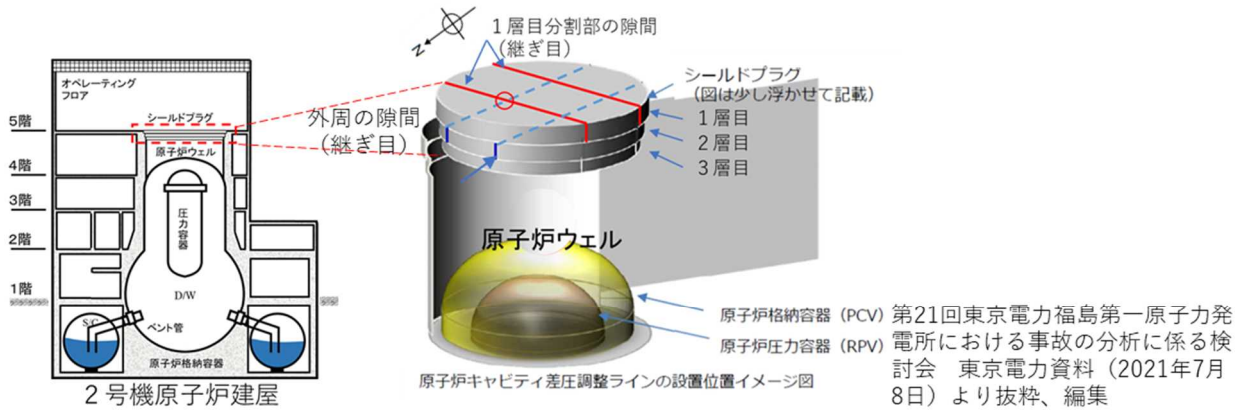
以上

<別紙>

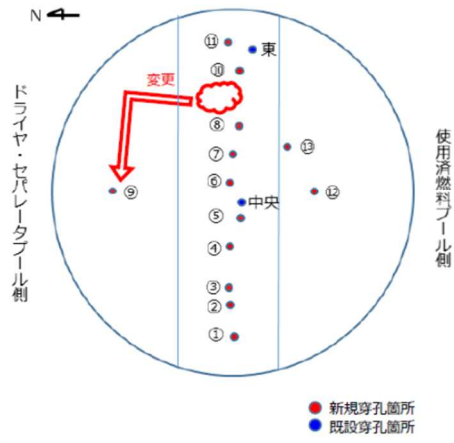
- 別紙1 シールドプラグの汚染状況の追加調査(シールドプラグの裏面、原子炉ウェル等の汚染状況の調査)の調査概要
- 別紙2 水素爆発時の原子炉建屋内のガス組成の検討(水素、可燃性有機化合物等を含むガスの物理的・化学的特性の検討)の調査概要
- 別紙3 原子炉建屋に対する継続的な3次元レーザースキャンの測定の調査概要
- 別紙4 継続的な線量率の測定の調査概要
- 別紙5 モニタリングポスト、エリアモニタ、プロセスモニタ等のデータに基づく核種放出挙動の分析(セシウムの放出時期に関する検討)の調査概要
- 参考1 これまでの経緯
- 参考2 東京電力福島第一原子力発電所事故の調査・分析に係る被ばく実績

(別紙1)

(1) シールドプラグの汚染状況の追加調査(シールドプラグの裏面、原子炉ウェル等の汚染状況の調査)の調査概要



シールドプラグ1層目に穿孔し、穿孔箇所内の線量率測定等



穿孔箇所の状況



線量調査の状況

測定位置No.	穿孔箇所床面からの挿入深さ					
	(最大挿入深さ)	8cm	6cm	4cm	2cm	0cm
1	(9.5) 7.37	7.35	10.2	12.0	24.1	35.3
2	(9.0) 8.65	8.15	8.23	10.4	18.5	41.4
3	(8.0) 32.3	34.7	43.3	43.7	65.5	101
4	(7.0) 72.2	-	66.3	86.4	110	147
5	(7.5) 24.5	-	25.1	26.2	70.1	125
6	(7.0) 42.8	-	44.4	45.9	78.1	169
7	(9.0) 62.0	51.5	52.7	53.9	72.9	112
8	(10.0) 36.5	40.4	45.6	40.5	65.5	137
9	(8.5) 70.2	69.5	91.5	93.6	97.4	176
10	(7.0) 4.83	-	5.34	6.37	12.7	24.0
11	(8.0) 5.90	-	8.41	10.6	15.6	26.8
12	(8.0) 87.3	-	92.4	95.6	111	228
13	(10.0) 75.4	76.2	77.6	88.4	91.3	182
既設穿孔箇所 (中央部)	(5.0) 950	-	-	807	773	529
既設穿孔箇所 (東側)	(5.0) 293	-	-	289	221	136

測定器: Polimaster PM1703MO-1

第27回東京電力福島第一原子力発電所における事故の分析に係る検討会 東京電力資料 (2021年12月21日) より抜粋、編集

測定データ (2021.12.14測定)

(2) 水素爆発時の原子炉建屋内のガス組成の検討(水素、可燃性有機化合物等を含むガスの物理的・化学的特性の検討)の調査概要

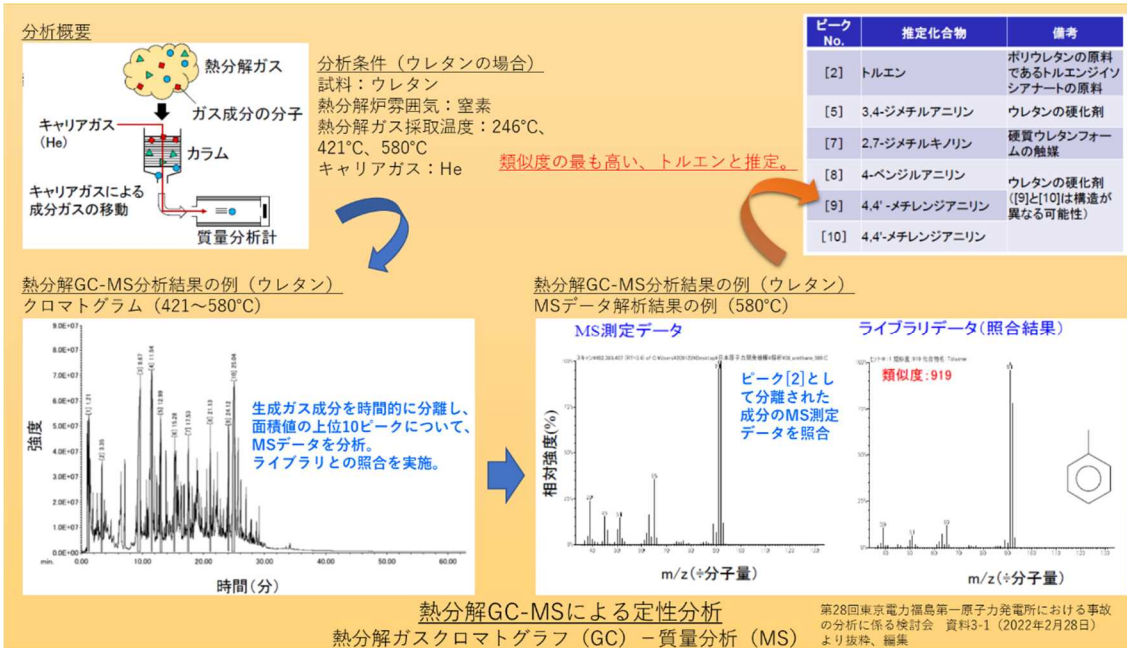
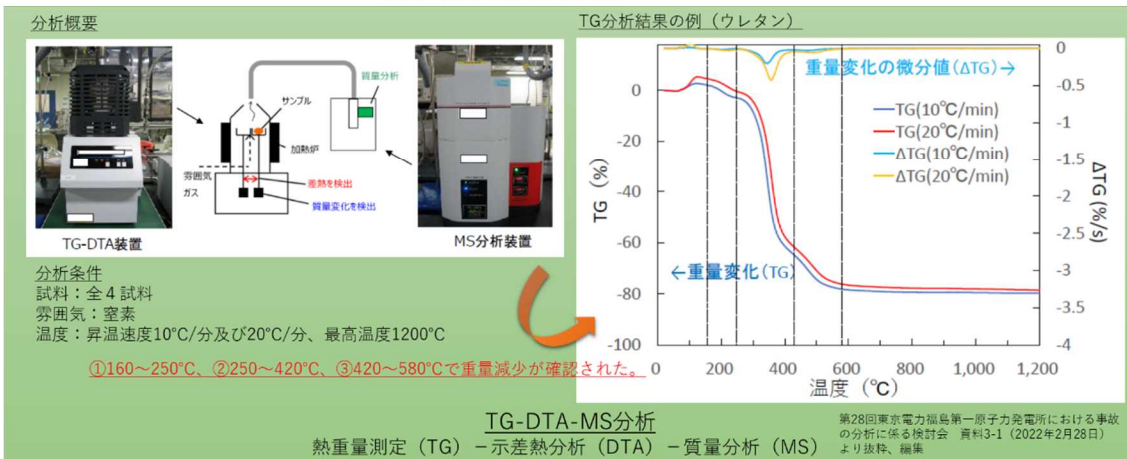
提供試料	仕様	提供試料写真	ケーブル分解前
PNケーブル (絶縁体)	難燃性エチレンプロピレンゴム		
PNケーブル (シース)	特殊クロロブレンゴム		
CVケーブル (絶縁体)	架橋ポリエチレン		
CVケーブル (シース)	難燃性特殊耐熱ビニル		
保温材	ウレタン		

JAEA BWR格納容器内有機材料
熱分解生成気体の分析
(ケーブル及び保温材の加熱試験)

熱重量測定 (TG) -
示差熱分析 (DTA) -
質量分析 (MS)

熱分解ガスクロマトグラフ (GC) - 質量分析 (MS)

(東京電力提供試料を使用)



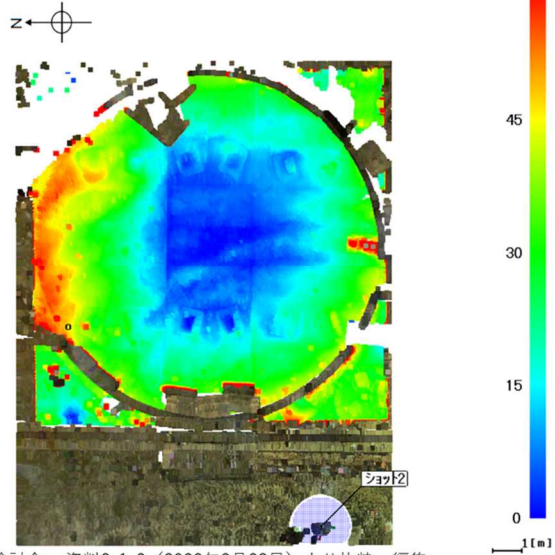
(3) 原子炉建屋に対する継続的な3次元レーザースキャンの測定の調査概要

2号機シールドプラグの形状測定 (各測定点の高低差による分析)

(単位: mm)

シールドプラグの中心を基準点として、高低差を分析

- 端部から中心部に向けて落ち込みが見られる。
- 東西方向よりも南北方向の方が落ち込みの程度が大きい。(東西方向は概ね3cm程度の落ち込みに対して、南北方向は概ね6cm程度の落ち込み)



※株式会社富士テクニカルリサーチの協力の下、「Galaxy-Eye」により分析

第28回東京電力福島第一原子力発電所における事故の分析に係る検討会 資料2-1-3 (2022年2月28日) より抜粋、編集
シールドプラグ表面の状況 (1F2号機)



写真は、いずれも2021年12月14日に原子力規制庁撮影



中心付近を拡大

第28回東京電力福島第一原子力発電所における事故の分析に係る検討会 資料2-1-3 (2022年2月28日) より抜粋、編集

シールドプラグの形状比較 (1F2号機、1F5号機及び島根1号機の比較)

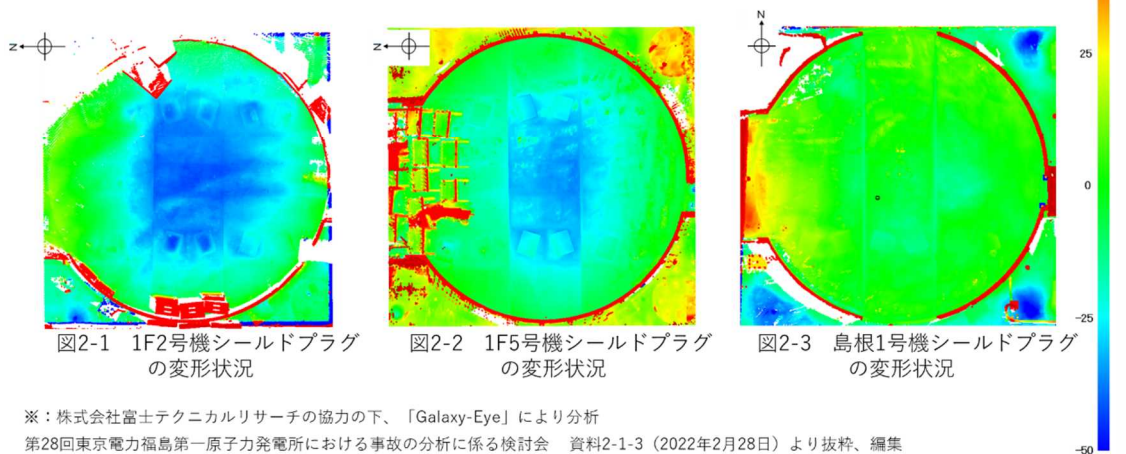


図2-1 1F2号機シールドプラグの変形状況

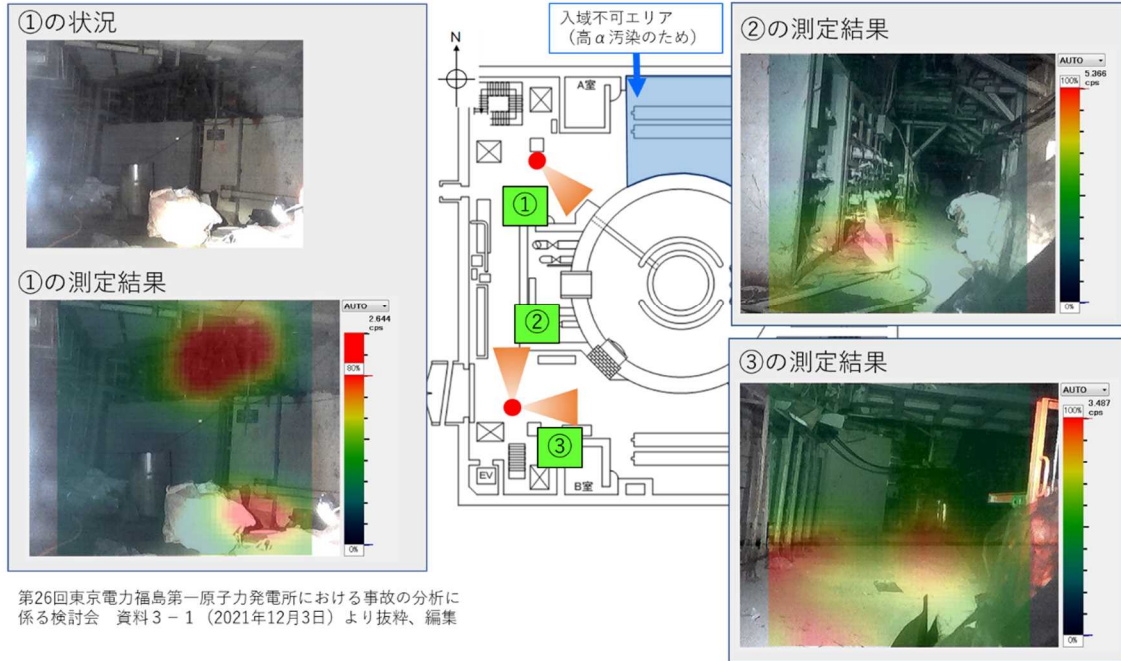
図2-2 1F5号機シールドプラグの変形状況

図2-3 島根1号機シールドプラグの変形状況

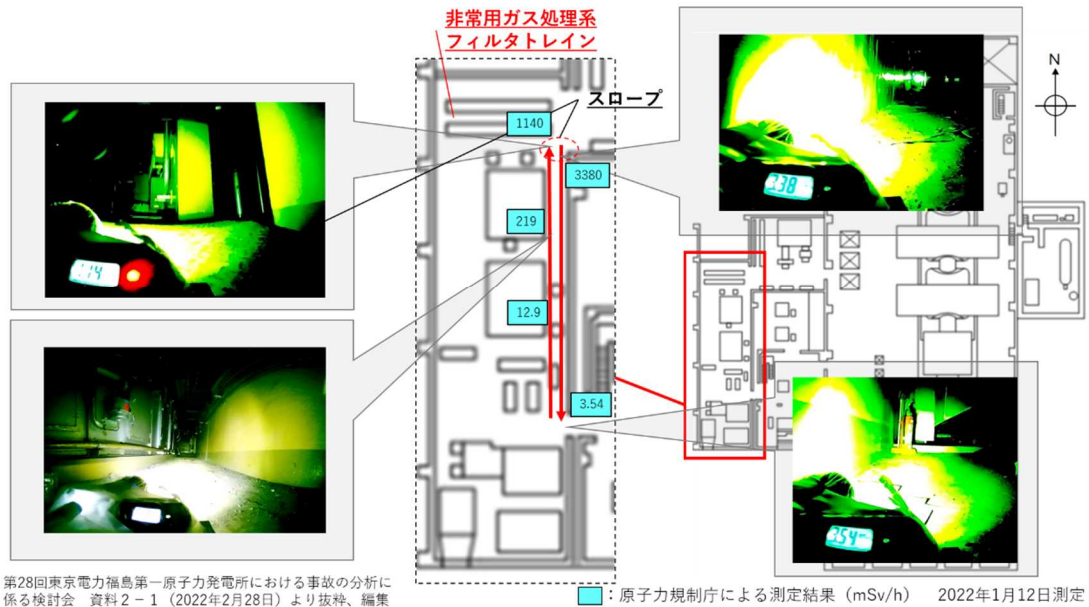
※: 株式会社富士テクニカルリサーチの協力の下、「Galaxy-Eye」により分析
第28回東京電力福島第一原子力発電所における事故の分析に係る検討会 資料2-1-3 (2022年2月28日) より抜粋、編集

(4) 継続的な線量率の測定の調査概要

○ 3号機原子炉建屋1階におけるガンマカメラ測定の概要



○ 1号機非常用ガス処理系フィルタトレインの線量率測定の概要



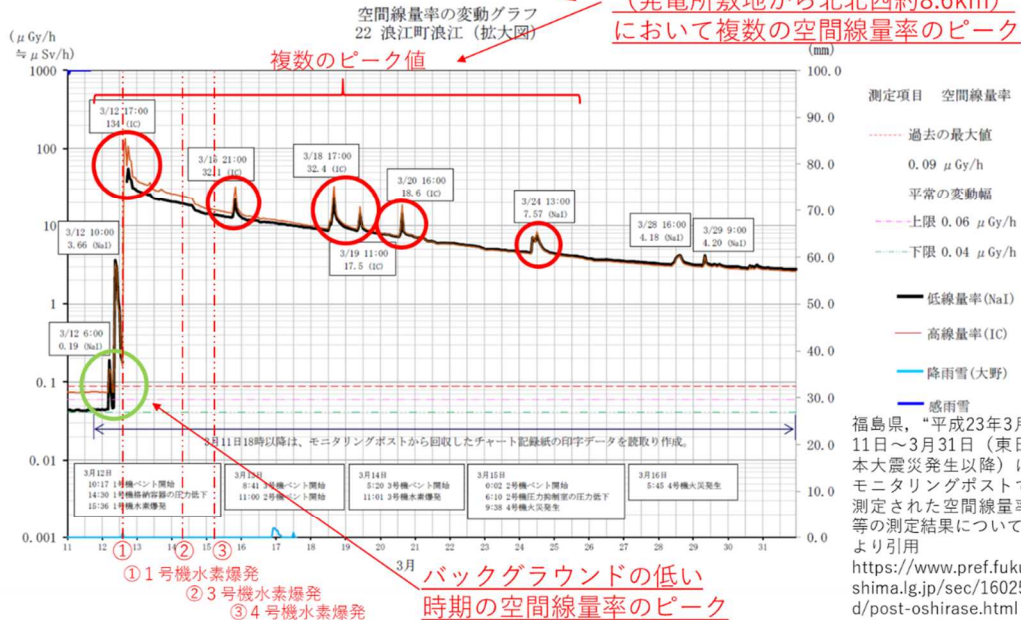
(5) モニタリングポスト、エリアモニタ、プロセスモニタ等のデータに基づく核種放出挙動の分析(セシウムの放出時期に関する検討)の調査概要

○モニタリングポスト等のデータに基づく核種放出挙動の分析



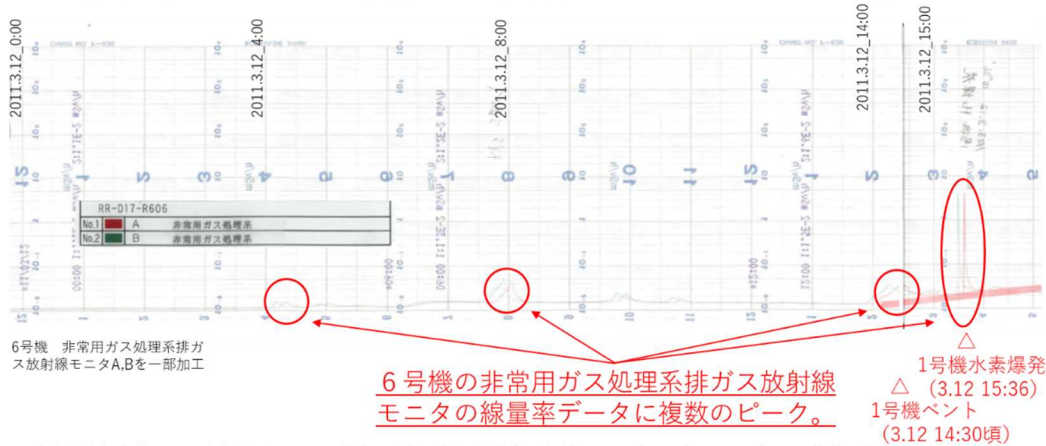
東京電力ホールディングス株式会社, “福島第一原子力発電所 1～3号機の炉心・格納容器の状態の推定と未説明問題に関する検討 第5回進捗報告,” 2017年12月25日より抜粋、一部加工

浪江町浪江のモニタリングポスト
(発電所敷地から北北西約8.6km)
において複数の空間線量率のピーク



福島県, “平成23年3月11日～3月31日(東日本大震災発生以降)にモニタリングポストで測定された空間線量率等の測定結果について”より引用
<https://www.pref.fukushima.lg.jp/sec/16025d/post-oshirase.html>

○6号機非常用ガス処理系排ガス放射線モニタのデータ分析



6号機 非常用ガス処理系排ガス放射線モニタA,Bを一部加工

6号機の非常用ガス処理系排ガス放射線モニタの線量率データに複数のピーク。

△ 1号機水素爆発 (3.12 15:36)
△ 1号機ベント (3.12 14:30頃)

第20回東京電力福島第一原子力発電所における事故の分析に係る検討会 資料2-3 (2021年5月18日)より抜粋、編集

これまでの経緯

令和3年

- 3月 5日 第 19 回事故分析検討会にて中間取りまとめを取りまとめ
- 3月10日 第 63 回原子力規制委員会へ中間取りまとめを報告
- 3月31日 第 70 回原子力規制委員会において、今後の調査・分析の進め方等について了承
- 5月12日 第 7 回原子力規制委員会へ中間取りまとめに対する発電用原子炉設置者の見解等の回答を報告
- 5月18日 第 20 回事故分析検討会
- 今後の調査・分析
 - 中間取りまとめに対する発電用原子炉設置者の見解等
 - (JAEA)試料分析の計画
 - (東京電力)1号機及び2号機非常用ガス処理系配管の一部撤去の状況
 - (東京電力)2号機シールドプラグ高濃度汚染への対応状況及び今後の計画
 - (東京電力)原子力規制庁と協働で実施した2号機オペレーティングフロア調査結果
- 7月 8日 第 21 回事故分析検討会
- 中間取りまとめに対する中国電力株式会社の見解等
 - 2号機シールドプラグ調査、2号機及び4号機原子炉建屋内調査
 - (JAEA)試料分析の状況(前回中間とりまとめ未掲載分の令和2年度成果)
 - (東京電力)福島第一原子力発電所1号機及び2号機非常用ガス処理系配管の一部撤去の状況
 - (東京電力)1～4号機 SGTS 室調査の結果
 - (東京電力)2号機シールドプラグ高濃度汚染への対応状況
 - (東京電力)2号機オペレーティングフロア調査におけるシールドプラグ穿孔の検討状況
- 9月14日 第 22 回事故分析検討会
- 中間取りまとめに対する東北電力株式会社及び日本原子力発電株式会社の見解等
 - 2号機シールドプラグ調査、2号機及び4号機原子炉建屋内調査等の状況

- (JAEA)2号機原子炉建屋スミア試料の γ 線分析結果
 - (東京電力)有機化合物を含む可燃性ガスの発生源に関する過去の調査結果から得られた情報
 - (東京電力)1号機及び2号機非常用ガス処理系配管の一部撤去の状況
 - (東京電力)2号機シールドプラグ穿孔部の調査状況
- 10月19日 第23回事故分析検討会
- 中間取りまとめに対する中部電力株式会社、北陸電力株式会社及び電源開発株式会社の見解等
 - 2号機シールドプラグ調査状況
 - (JAEA)BWR格納容器内有機材料熱分解生成気体の分析計画
 - (東京電力)2号機オペフロ内シールドプラグ穿孔部調査状況
 - (東京電力)ケーブル及び塗料の可燃性有機ガス発生量評価計画
 - (東京電力)福島第一原子力発電所1号機及び2号機非常用ガス処理系配管の一部撤去の状況
- 11月9日 第24回事故分析検討会 非公開
- 中間取りまとめに対する北海道電力株式会社及び関西電力株式会社の見解等
- 11月11日 第25回事故分析検討会 非公開
- 中間取りまとめに対する九州電力株式会社及び四国電力株式会社の見解等
- 12月3日 第26回事故分析検討会
- 中間取りまとめに対する東京電力の見解等
 - 2号機シールドプラグ調査、1号機及び3号機原子炉建屋内調査、2号機及び3号機SGTS室 β 汚染調査の状況
 - (東京電力)2号機オペフロ内シールドプラグ穿孔部調査状況
 - (東京電力)ケーブル及び保温材の可燃性ガス発生量評価予備試験速報
- 12月21日 第27回事故分析検討会
- 2号機シールドプラグ調査、1号機及び3号機原子炉建屋内調査等の状況
 - 令和3年度(2021年度)の調査・分析の状況
 - (JAEA)試料分析の状況
 - (東京電力)2号機オペフロ内シールドプラグ穿孔部調査状況
 - (東京電力)ケーブル及び保温材の可燃性ガス発生量評価予備試験速報
 - (東京電力)福島第一原子力発電所事故調査の中長期計画

令和4年

1月19日 第60回原子力規制委員会へ中間取りまとめに対する発電用原子炉
設置者の見解等の確認結果を報告

2月28日 第28回事故分析検討会

- 4号機原子炉建屋火災、2号機シールドプラグ変形調査、格納容器内ケーブル等調査の状況
- (JAEA)BWR 格納容器内有機材料熱分解生成気体の分析－結果速報－
- (東京電力)ケーブル・塗料・保温材の可燃性ガス発生量評価試験結果
- (東京電力)3号機 RHR 配管における滞留ガス
- (東京電力)1号機 PCV 内部調査の状況
- (東京電力)1号機及び2号機非常用ガス処理系配管の一部撤去の状況
- (ATENA)中間取りまとめに対する ATENA の取り組み

以上

(参考2)

東京電力福島第一原子力発電所事故の調査・分析に係る被ばく実績

令和3年度の東京電力福島第一原子力発電所事故の調査・分析に係る現地調査における被ばく実績は、以下のとおり。(現地調査参加者：計17名)

(単位：mSv)

	累積線量 (令和元年度)	累積線量 (令和2年度)	累積線量 (令和3年度)
1	14.1	8.5	8.8
2	9.1	8.9	8.7
3	15.9	9	8.5
4	—	—	8.2
5	11.7	9.4	6.5
6	5	6	6.2
7	—	1.3	6.2
8	0.2	0.5	6.0
9	—	2.5	0.8
10	2.7	0.5	0.3
11	2.7	0.4	0.3
12	2.8	1.1	0.2
13	—	1.3	0.1
14	0.1	3.1	0.1
15	—	—	0.1
16	—	—	0.1
17	2.8	1.0	0.0
18	—	1.3	—
19	—	0.9	—
20	—	0.1	—
21	—	0.0	—
22	—	0.0	—
23	0.0	0.0	—
24	3.9	—	—
25	0.4	—	—
26	0.1	—	—
27	0.1	—	—
28	0.0	—	—
29	0.0	—	—

※1：小数点以下第2位を四捨五入した値

※2：—は、現地調査参加実績なし

事故分析検討会の構成メンバー

【事故分析検討会メンバー】

(原子力規制委員会)

更田 豊志 原子力規制委員会委員長 (第30回まで)
山中 伸介 原子力規制委員会委員長 (第31回から)
杉山 智之 原子力規制委員会委員 (第32回から)

(原子力規制庁)

櫻田 道夫 原子力規制技監 (第30回まで)
市村 知也 原子力規制技監 (第31回から)
金子 修一 緊急事態対策監 (第30回まで)
森下 泰 長官官房審議官 (第31回から)
安井 正也 原子力規制特別国際交渉官
遠山 眞 技術基盤課 課長 (第21回から)
平野 雅司 技術基盤課 技術参与
阿部 豊 シビアアクシデント研究部門 統括技術研究調査官 (第20回から)
竹内 淳 東京電力福島第一原子力発電所事故対策室長
岩永 宏平 東京電力福島第一原子力発電所事故対策室 企画調査官
星 陽崇 東京電力福島第一原子力発電所事故対策室 上席技術研究調査官
木原 昌二 東京電力福島第一原子力発電所事故対策室 室長補佐
佐藤 雄一 東京電力福島第一原子力発電所事故対策室 管理官補佐
安部 諭 東京電力福島第一原子力発電所事故対策室 室長補佐
川崎 憲二 実用炉審査部門 安全管理調査官 (第20回まで)
角谷 愉貴 実用炉審査部門 管理官補佐 (第21回から第30回まで)
建部 恭成 実用炉審査部門 主任安全審査官 (第31回から)
上ノ内 久光 原子力安全人材育成センター 原子炉技術研修課 教官

(日本原子力研究開発機構 安全研究・防災支援部門)

丸山 結 安全研究センター 副センター長
杉山 智之 安全研究センター 副センター長 (第31回まで)
天谷 政樹 安全研究センター 副センター長 (第14回から)
与能本 泰介 安全研究センター 特別専門職

(外部専門家)

市野 宏嘉 防衛大学校 准教授

浦田 茂 三菱重工業株式会社原子力セグメント炉心・安全技術部 安全評価担当部長
(第31回から)

大石 佑治 大阪大学大学院工学研究科環境・エネルギー工学専攻 准教授
(第30回から)

門脇 敏 長岡技術科学大学 教授

二ノ方 壽 東京工業大学 名誉教授

前川 治 原子力損害賠償・廃炉等支援機構 技監

宮田 浩一 原子力エネルギー協議会 部長 (第21回から)

牟田 仁 東京都市大学 工学部原子力安全工学科 准教授

山路 哲史 早稲田大学理工学術院先進理工学研究科共同原子力専攻 教授
(第31回から)

【その他事故分析検討会出席者】

(原子力規制委員会)

山中 伸介 原子力規制委員会委員 (第30回まで) (再掲)

(原子力規制庁)

秋葉 美幸 シビアアクシデント研究部門 統括技術研究調査官 (第21回まで)

栃尾 大輔 シビアアクシデント研究部門 主任技術研究調査官 (第29回から)

塚本 直史 シビアアクシデント研究部門 主任技術研究調査官 (第27回、第32回)

西村 健 シビアアクシデント研究部門 技術研究調査官 (第21回まで)

小城 烈 シビアアクシデント研究部門 技術研究調査官 (第21回まで)

岡本 肇 実用炉審査部門 上席安全審査官 (第25回)

照井 裕之 実用炉審査部門 安全審査官 (第24回)

坂中 伸次 福島第一原子力規制事務所 防災専門官 (第28回)

平山 英夫 東京電力福島第一原子力発電所事故対策室 技術参与

林 克己 東京電力福島第一原子力発電所事故対策室 技術参与

(日本原子力研究開発機構)

永瀬 文久 安全研究センター 副センター長 (第28回まで)

阿部 仁 規制・国際情報分析室長代理 (第29回、第31回)

飯田 芳久 規制・国際情報分析室 福島第一原子力発電所事故分析チームリーダー
(第20回から)

垣内 一雄 規制・国際情報分析室 福島第一原子力発電所事故分析チーム
研究副主幹 (第29回)

大野 卓也 規制・国際情報分析室 福島第一原子力発電所事故分析チーム 研究員
(第28回、第29回、第31回、第33回)

西田 明美 材料・構造安全研究ディビジョン 副ディビジョン長
(第32回、第34回)

真野 晃宏 材料・構造安全研究ディビジョン 耐震・構造健全性評価研究グループ
研究員 (第 32 回、第 34 回)

(原子力損害賠償・廃炉等支援機構)

中村 紀吉 執行役員 (第 28 回から)
山中 康慎 執行役員 (第 32 回から)
福田 俊彦 執行役員 (第 28 回まで)
若林 宏治 技監
湊 和生 理事特別補佐
笹沼 美和 審議役 (第 31 回)
中野 純一 審議役
藪内 彰夫 (第 31 回)

(大阪大学)

村田 勲 大学院工学研究科環境・エネルギー工学専攻 教授 (第 35 回)
佐藤 文信 大学院工学研究科環境・エネルギー工学専攻 教授 (第 35 回)
牟田 浩明 大学院工学研究科環境・エネルギー工学専攻 教授 (第 33 回から)

(東京電力ホールディングス株式会社)

稲垣 武之 常務執行役員 (第 26 回)
大野 公輔 福島第一廃炉推進カンパニー バイスプレジデント (第 33 回から)
田南 達也 執行役員 福島第一廃炉推進カンパニー バイスプレジデント
(第 31 回まで)
飯塚 直人 福島第一廃炉推進カンパニー 廃炉技術担当 (第 32 回から)
石川 真澄 理事 福島第一廃炉推進カンパニー 廃炉技術担当 (第 31 回まで) 他

(中国電力株式会社) 【第 21 回】

北野 立夫 取締役常務執行役員 電源事業本部 副本部長
山本 直樹 執行役員 電源事業本部 部長 (原子力安全技術) 他

(東北電力株式会社) 【第 22 回】

加藤 功 取締役 常務執行役員 原子力本部長
佐藤 大輔 原子力本部 原子力部 原子力技術課長 他

(日本原子力発電株式会社) 【第 22 回】

剣田 裕史 取締役副社長
山口 嘉温 執行役員 発電管理室長 他

(中部電力株式会社) 【第 23 回】

伊原 一郎 専務執行役員 原子力本部長 兼 原子力部長 CNO
竹山 弘恭 原子力本部フェロー (原子力技術) 他

(北陸電力株式会社) 【第 23 回】

石黒 伸彦 原子力本部長
福村 章 原子力本部 原子力部長 他

(電源開発株式会社) 【第23回】

浦島 彰人 代表取締役副社長執行役員
首藤 敦 原子力事業本部 原子力技術部長 他

(北海道電力株式会社) 【第24回】

勝海 和彦 原子力事業統括部長補佐
西條 政明 原子力事業統括部 部長 (運営管理担当) 他

(関西電力株式会社) 【第24回】

佐藤 拓 原子力事業本部 副事業本部長
吉原 健介 原子力事業本部 安全高度化対策部長 他

(九州電力株式会社) 【第25回】

林田 道生 上席執行役員 原子力発電本部 副本部長
金子 武臣 原子力発電本部 (原子力建設) 部長 他

(四国電力株式会社) 【第25回】

黒川 肇一 常務執行役員 原子力本部副本部長 原子力部長
中川 俊一 原子力本部原子力部 安全グループリーダー 他

(原子力エネルギー協議会)

富岡 義博 理事 (第28回、第29回)
山中 康慎 部長 (第28回) 他

(日立GEニュークリア・エナジー株式会社) 【第30回】

米谷 豊 主管技師
上野 雄一郎 主任研究員
鶴貝 宏久 チーフプロジェクトマネージャー

(大成建設株式会社) 【第31回】

道越 真太郎 技術センター都市基盤研究部防災研究室 室長
馬場 重彰 技術センター都市基盤研究部防災研究室
井尻 祐二 原子力本部 役員本部長 他

(株式会社テプコシステムズ) 【第34回】

野崎 謙一郎 原子力エンジニアリング事業部 原子力炉心技術部 マネージャー

※役職・所属は、出席時点。

以上

事故分析検討会の開催実績（令和3年5月以降、計●回開催）

第20回（令和3年5月18日）

- 今後の調査・分析
- 「東京電力福島第一原子力発電所事故の調査・分析に係る中間取りまとめ」に対する発電用原子炉設置者の見解等
- （JAEA）試料分析の計画
- （東京電力）1号機及び2号機非常用ガス処理系配管の一部撤去の状況
- （東京電力）2号機シールドプラグ高濃度汚染への対応状況及び今後の計画
- （東京電力）原子力規制庁と協働で実施した2号機オペレーティングフロア調査結果

第21回（令和3年7月8日）

- 「東京電力福島第一原子力発電所事故の調査・分析に係る中間取りまとめ」に対する発電用原子炉設置者（中国電力株式会社）の見解等
- 2号機シールドプラグ調査、2号機及び4号機原子炉建屋内調査
- （JAEA）試料分析の状況（前回中間とりまとめ未掲載分の令和2年度成果）
- （東京電力）福島第一原子力発電所1号機及び2号機非常用ガス処理系配管の一部撤去の状況
- （東京電力）1～4号機SGTS室調査の結果
- （東京電力）2号機シールドプラグ高濃度汚染への対応状況
- （東京電力）2号機オペレーティングフロア調査におけるシールドプラグ穿孔の検討状況

第22回（令和3年9月14日）

- 「東京電力福島第一原子力発電所事故の調査・分析に係る中間取りまとめ」に対する発電用原子炉設置者（東北電力株式会社及び日本原子力発電株式会社）の見解等
- 2号機シールドプラグ調査、2号機及び4号機原子炉建屋内調査等の状況
- （JAEA）2号機原子炉建屋スミア試料の γ 線分析結果
- （東京電力）有機化合物を含む可燃性ガスの発生源に関する過去の調査結果から得られた情報
- （東京電力）1号機及び2号機非常用ガス処理系配管の一部撤去の状況
- （東京電力）2号機シールドプラグ穿孔部の調査状況

第23回（令和3年10月19日）

- 「東京電力福島第一原子力発電所事故の調査・分析に係る中間取りまとめ」に対する発電用原子炉設置者（中部電力株式会社、北陸電力株式会社及び電源開発株式会社）の見解等
- 2号機シールドプラグ調査状況
- （JAEA）BWR 格納容器内有機材料熱分解生成気体の分析計画
- （東京電力）2号機オペフロ内シールドプラグ穿孔部調査状況

- (東京電力) ケーブル及び塗料の可燃性有機ガス発生量評価計画
- (東京電力) 福島第一原子力発電所1号機及び2号機非常用ガス処理系配管の一部撤去の状況

第24回(令和3年11月9日)

- 「東京電力福島第一原子力発電所事故の調査・分析に係る中間取りまとめ」に対する発電用原子炉設置者(北海道電力株式会社、関西電力株式会社)の見解等

第25回(令和3年11月11日)

- 「東京電力福島第一原子力発電所事故の調査・分析に係る中間取りまとめ」に対する発電用原子炉設置者(九州電力株式会社、四国電力株式会社)の見解等

第26回(令和3年12月3日)

- 「東京電力福島第一原子力発電所事故の調査・分析に係る中間取りまとめ」に対する発電用原子炉設置者(東京電力ホールディングス株式会社)の見解等
- 2号機シールドプラグ調査、1号機及び3号機原子炉建屋内調査、2号機及び3号機SGTS室β汚染調査の状況
- (東京電力) 2号機オペフロ内シールドプラグ穿孔部調査状況
- (東京電力) ケーブル及び保温材の可燃性ガス発生量評価予備試験速報

第27回(令和2年10月16日)

- 2号機シールドプラグ調査、1号機及び3号機原子炉建屋内調査等の状況
- 令和3年度(2021年度)の調査・分析の状況
- (JAEA) 試料分析の状況
- (東京電力) 2号機オペフロ内シールドプラグ穿孔部調査状況
- (東京電力) ケーブル及び保温材の可燃性ガス発生量評価予備試験速報
- (東京電力) 福島第一原子力発電所事故調査の中長期計画

第28回(令和4年2月28日)

- 3号機及び5号機原子炉建屋内調査等の状況
- (JAEA) 有機材料熱分解生成気体の分析結果速報
- (東京電力) 可燃性ガス発生量評価試験結果
- (東京電力) 2号機RHR配管で確認した滞留ガスに関わる対応
- (東京電力) 1号機PCV内部調査の状況
- (原子力エネルギー協議会) 「東京電力福島第一原子力発電所事故の調査・分析に係る中間取りまとめ」に対する原子力エネルギー協議会の取り組み

第29回（令和4年4月26日）

- （JAEA）有機材料熱分解生成気体の分析結果
- （東京電力）可燃性ガス発生量評価試験結果
- （JAEA）試料分析のまとめ
- 1号機原子炉建屋内調査、5号機RHR配管等確認調査、敦賀1号機シールドプラグ調査等の状況
- （東京電力）1号機PCV内部調査の状況
- （原子力エネルギー協議会）ベント後に格納容器が負圧になる可能性

第30回（令和4年6月30日）

- （東京電力）1号機PCV内部調査の状況
- （東京電力）1号機及び2号機非常用ガス処理系配管の一部撤去の状況
- 2号機及び3号機原子炉建屋内調査、1号機原子炉建屋外観調査等の状況
- （東京電力）1号機CS(A)系テストライン他の配管表面線量の測定結果
- （東京電力）2号機燃料取扱機操作室調査の実施

第31回（令和4年9月6日）

- （東京電力）1号機PCV内部調査の状況
- モニタリングポスト等の空間線量率データ等の分析
- 2号機シールドプラグの汚染量評価
- （JAEA）有機材料熱分解生成ガス分析の計画
- （東京電力）可燃性有機ガス評価計画
- 水素燃焼試験等の概要
- 5号機原子炉建屋調査、モニタリングポスト現地調査の状況
- （東京電力）2号機燃料取扱機操作室調査の状況
- （東京電力）福島第一原子力発電所事故調査中長期計画の取組状況

第32回（令和4年10月31日）

- （東京電力）1号機PCV内部調査の状況
- （大阪大学）1号機PCV内部調査により確認されたコンクリートに関する事象の検討
- 1号機PCV内部調査の整理点
- モニタリングポスト等の空間線量率データ等の分析
- 1, 2号機非常用ガス処理系配管の汚染の分析
- 2号機シールドプラグ変形の状況
- （JAEA）シールドプラグの隙間の断面積の評価
- （東京電力）2号機シールドプラグにおける汚染の状況
- 6号機シールドプラグの形状測定、1号機タービン建屋地下1階の予備調査の状況
- 2号機燃料取扱機操作室調査の状況

- 1号機原子炉補機冷却系内包水サンプリング作業の状況

第33回（令和4年12月5日）

- （東京電力）1号機のPCV内部調査から得られた情報
- 東京電力福島第一原子力発電所事故の調査・分析に係る中間取りまとめ（2022年度）素案
- （東京電力）福島第一原子力事故発生後の詳細な進展メカニズムに関する未確認・未解明事項の調査・検討結果（第6回進捗報告）
- （東京電力）1号機原子炉補機冷却系熱交換器入口ヘッダ配管の滞留ガスの分析結果
- 福島第一原子力発電所2号機シールドプラグの変形に係る検討内容等のまとめ
- 1号機タービン建屋地下1階調査及び2号機原子炉建屋三角コーナー一部予備調査の状況

第34回（令和4年12月20日）

- （東京電力）1号機PCV内部調査（後半）
- （東京電力）1号機PCV内部調査から得られた情報
- （大阪大学）1号機PCV内部調査により確認されたコンクリートに関する事象の検討
- （テプコシステムズ／東京電力）3号機の水素爆発に寄与した漏えい経路と爆発メカニズムの推定
- （JAEA）2号機原子炉建屋スミア試料等の分析
- 東京電力福島第一原子力発電所事故の調査・分析に係る中間取りまとめ（2022年度）案
- （東京電力）1号機原子炉補機冷却系線量低減に向けた内包水サンプリング作業

第35回（令和5年1月13日）

- 東京電力福島第一原子力発電所事故の調査・分析に係る中間取りまとめ（2022年度）案
- 2号機原子炉建屋及び5号機原子炉建屋の調査状況
- （東京電力）1号機PCV内部調査から得られた情報（前半調査とりまとめ）一部修正

以上

(参考5)

調査チームの構成員

(原子力規制庁)

金子 修一	緊急事態対策監 (2022年6月まで、役職・所属は当時)
森下 泰	長官官房審議官 (2022年7月から)
安井 正也	原子力規制特別国際交渉官
竹内 淳	東京電力福島第一原子力発電所事故対策室長
岩永 宏平	東京電力福島第一原子力発電所事故対策室 企画調査官
星 陽崇	東京電力福島第一原子力発電所事故対策室 上席技術研究調査官
木原 昌二	東京電力福島第一原子力発電所事故対策室 室長補佐
佐藤 雄一	東京電力福島第一原子力発電所事故対策室 管理官補佐
佐藤 匡	東京電力福島第一原子力発電所事故対策室 室長補佐
安部 諭	東京電力福島第一原子力発電所事故対策室 室長補佐 (2022年10月から)
小西 興治	東京電力福島第一原子力発電所事故対策室 係長
羽賀 英希	広報室 専門職
塚本 直史	シビアアクシデント研究部門 主任技術研究調査官
上ノ内 久光	原子力安全人材育成センター 原子炉技術研修課 教官
平山 英夫	技術参与
近藤 健次郎	技術参与
鈴木 征四郎	技術参与
林 克己	技術参与
吉田 善行	技術参与

※役職・所属は、2022年12月22日時点。

以上

(参考6)

現地調査の実施実績

2022年			
回数	月	日	実施内容
41	12月	22日	2号機 原子炉建屋（三角コーナー）、5号機 原子炉建屋
40	11月	30日	2号機 原子炉建屋（三角コーナー予備調査）
39	11月	11日	1号機 タービン建屋
38	10月	21日	1号機 タービン建屋（地下階予備調査）
37		13, 14日	4号機 原子炉建屋、5号機 原子炉建屋 6号機 原子炉建屋 オペフロ（シールドプラグ調査） 3D レーザースキャナによる構造測定
36	9月	26, 27日	4号機 カバー建屋、4号機 原子炉建屋
35	8月	25日	5号機 原子炉建屋
34	7月	4, 5日	発電所周辺のモニタリングポスト
33	6月	16, 17日	4号機 原子炉建屋、1号機タービン建屋屋上、3号機原子炉建屋
32		8日	4号機 カバー建屋
31	5月	25, 26, 27日	4号機 原子炉建屋 3D レーザースキャナによる構造測定 2号機 原子炉建屋 オペフロ（シールドプラグ調査） ガンマカメラによる汚染密度測定
30		12日	2号機 原子炉建屋 オペフロ（シールドプラグ調査） ガンマカメラによる汚染密度測定
29		11日	4号機 カバー建屋（1/2号機 SGTS 撤去配管予備調査）
28	4月	28日	4号機 原子炉建屋
27		14, 15日	5号機 原子炉建屋、1号機 原子炉建屋
26		13日	5号機 SGTS 室
25		8日	敦賀発電所 1号機 原子炉建屋 オペフロ（シールドプラグ調査） 3D レーザースキャナによる構造測定

24	3	30日	4号機 原子炉建屋
23	月	3日	4号機 原子炉建屋
22	2月	24日	4号機 カバー建屋 (1/2号機 SGTS 撤去配管予備調査)
21		22日	島根原子力発電所1号機 原子炉建屋 オペフロ (シールドプラグ調査) 3Dレーザースキャナによる構造測定
20		17, 18日	4号機 原子炉建屋、5号機 原子炉建屋
19	1月	12, 13, 14日	1号機 SGTS 室 4号機 カバー建屋 (1/2号機 SGTS 撤去配管予備調査) 5号機 原子炉建屋 オペフロ (シールドプラグ調査) 3Dレーザースキャナによる構造測定 屋外
2021年			
回数	月	日	実施内容
18	12月	16, 17日	1号機 SGTS 室、3号機 原子炉建屋
17		13, 14, 15日	2号機 原子炉建屋 オペフロ (シールドプラグ調査) 3Dレーザースキャナによる構造測定
16		9日	ケーブル加熱試験[東京電力経営技術戦略研究所]
15		6, 7, 8日	2号機 原子炉建屋 オペフロ (シールドプラグ調査)
14		1日	2号機 原子炉建屋 オペフロ (シールドプラグ調査)
14	11月	29, 30日	2号機 原子炉建屋 オペフロ (シールドプラグ調査) 5号機 SGTS 室
13		25, 26日	1号機 原子炉建屋 3号機 原子炉建屋 ガンマカメラによる汚染密度測定
12		18, 19日	2号機 SGTS 室、3号機 SGTS 室
11		12日	4号機 カバー建屋 (1/2号機 SGTS 撤去配管予備調査)
10	10月	7, 8日	2号機 原子炉建屋 オペフロ (シールドプラグ調査) 4号機 タービン建屋 4号機 カバー建屋 (1/2号機 SGTS 撤去配管予備調査)
9	9月	9, 10日	2号機 原子炉建屋 オペフロ (シールドプラグ調査)
8	8月	26, 27日	2号機 原子炉建屋 オペフロ (シールドプラグ調査) 5号機 原子炉建屋
7		5, 6日	2号機 原子炉建屋 オペフロ (シールドプラグ調査) 2号機 SGTS 室

6	7	29, 30 日	2号機 SGTS 室
5	月	20, 21 日	4号機 原子炉建屋 3D レーザースキャナによる構造測定
4	6	24, 25 日	2号機 SGTS 室
	月		4号機 原子炉建屋 3D レーザースキャナによる構造測定
3	4	13, 14 日	2号機 原子炉建屋 オペフロ (シールドプラグ調査)
	月		
2	1	28 日	1, 2 号機共用排気筒 解体片 ガンマカメラによる汚染密度測定
	月		
2020年			
回数	月	日	実施内容
1	12	24, 25 日	1, 2 号機共用排気筒 解体片 ガンマカメラによる汚染密度測定
	月		

※2022年12月22日時点。

東京電力提供情報等

No.	関連する 検討会	調査・分析に係る資料等	東京電力からの提供情報等
第一章 シビアアクシデント時の Cs-137 移動メカニズムについての考察			
第一節 1/2 号機ベント配管系の特徴的汚染パターンからの知見			
特になし			
第一章 シビアアクシデント時の Cs-137 移動メカニズムについての考察			
第二節 2 号機シールドプラグ汚染からの知見			
1	第 21 回 資料 3-3	2 号機オペフロ内表面汚染密度調査の状況	東京電力福島第一原子力発電所の事故分析に関する 面談（2021 年 4 月 1 日） https://www2.nsr.go.jp/data/000349065.pdf 東京電力福島第一原子力発電所の事故分析に関する 面談（2021 年 4 月 21 日） https://www2.nsr.go.jp/data/000351509.pdf 東京電力福島第一原子力発電所の事故分析に関する 面談（2021 年 5 月 10 日） https://www2.nsr.go.jp/data/000353385.pdf
2	第 21 回 資料 3-3	2 号機シールドプラグの穿孔 作業に関する状況	東京電力福島第一原子力発電所の事故分析に関する 面談（2021 年 6 月 2 日） https://www2.nsr.go.jp/data/000355134.pdf https://www2.nsr.go.jp/data/000355133.pdf 東京電力福島第一原子力発電所の事故分析に関する 面談（2021 年 6 月 14 日） https://www2.nsr.go.jp/data/000357857.pdf 東京電力福島第一原子力発電所の事故分析に関する 面談（2021 年 6 月 30 日） https://www2.nsr.go.jp/data/000359237.pdf
3	第 21 回 資料 3-3	2 号機オペフロ全域の空間線 量率及び表面線量率の測定結 果	2 号機原子炉建屋オペフロ内残置物移動・片付後調査 の結果について（2019 年 2 月 28 日廃炉・汚染水対策 チーム会合／事務局会議第 63 回資料 3-2） https://www.meti.go.jp/earthquake/nuclear/decom missioning/committee/osensuitaisakuteam/2019/02 /3-2-4.pdf
4	第 21 回 資料 3-3	2 号機オペフロ全域の表面汚 染密度の測定結果	原子力規制庁と協働で実施した 2 号機オペレーティ ングフロア調査結果について（2021 年 5 月 27 日廃 炉・汚染水・処理水対策チーム会合／事務局会議第 90 回資料 3-2）

No.	関連する 検討会	調査・分析に係る資料等	東京電力からの提供情報等
			https://www.meti.go.jp/earthquake/nuclear/decommissioning/committee/osensuitaisakuteam/2021/05/90-3-2-3-1.pdf
5	第 22 回 資料 3-1	コアサンプリングの採取状況	2号機原子炉建屋オペレーティングフロアフェンス撤去およびコアサンプル採取について(結果報告)(2014年3月27日廃炉・汚染水対策チーム会合/事務局会議第4回資料3-2) https://www.meti.go.jp/earthquake/nuclear/pdf/20140327_02/140327_02_020.pdf
6	第 22 回 資料 3-3	3号機シールドプラグの変形	福島第一原子力発電所 3号機原子炉建屋上部ガレキ撤去後の建屋躯体調査結果について(2014年2月27日廃炉・汚染水対策チーム会合/事務局会議第3回資料3-5) https://www.meti.go.jp/earthquake/nuclear/pdf/140227/140227_02kk.pdf
7	第 22 回 資料 3-3	2号機オペフロの空間線量率の測定結果	2号機原子炉建屋オペフロの放射線等調査結果について～残置物移動・片付後～(2019年5月20日特定原子力施設監視・評価検討会第71回資料2) https://www.nsr.go.jp/data/000270450.pdf
8	第 22 回 追加説明 資料	2号機オペフロの測定状況	2号機オペフロ測定調査時の写真
9	第 23 回 資料 3-1	2号機シールドプラグ上の測定結果	2号機オペフロ線量測定記録
10	第 26 回 追加説明 資料	2号機オペフロ内シールドプラグ穿孔に関する状況	東京電力福島第一原子力発電所の事故分析に関する面談(2021年11月15日) https://www2.nsr.go.jp/data/000374602.pdf https://www2.nsr.go.jp/data/000374603.pdf
11	第 27 回 資料 2-1 別添 2	1号機シールドプラグの変形	1号機 原子炉建屋 ガレキ撤去関連調査結果及び北側屋根鉄骨の切断開始について(2019年9月27日廃炉・汚染水対策チーム会合/事務局会議第70回資料3-2) https://www.meti.go.jp/earthquake/nuclear/decommissioning/committee/osensuitaisakuteam/2019/09/3-2-3-1.pdf
12	第 27 回 資料 2-1 別添 2	3号機シールドプラグの変形	福島第一原子力発電所 3号機原子炉建屋上部ガレキ撤去後の建屋躯体調査結果について(2014年2月27日廃炉・汚染水対策チーム会合/事務局会議第3回資料)

No.	関連する 検討会	調査・分析に係る資料等	東京電力からの提供情報等
			料 3-5) https://www.meti.go.jp/earthquake/nuclear/pdf/140227/140227_02kk.pdf
13	第 32 回 資料 4-1～ 4-3 第 33 回 資料 5-1, 5-2	2 号機及び 5 号機シールドプラグ下方変形の検討状況	東京電力福島第一原子力発電所の事故分析に関する面談（2022 年 10 月 17 日） https://www2.nra.go.jp/data/000408362.pdf
第一章 シビアアクシデント時の Cs-137 移動メカニズムについての考察			
第三節 ベントライン及びシールドプラグの汚染状況と「水蒸気駆動仮説」			
特になし			
第二章 落下炉心の挙動と原子炉格納容器への影響			
第一節 1 号機原子炉格納容器内の様子と検討状況			
14	第 30 回 資料 1-1 第 31 回 資料 1-1, 1-2 第 32 回 資料 1-1 ～1-3 第 33 回 資料 1-1 第 34 回 資料 1-1 ～1-4	1 号機 PCV 内部調査の状況	東京電力福島第一原子力発電所の事故分析に関する面談（2022 年 5 月 31 日） https://www2.nra.go.jp/data/000392933.pdf https://www2.nra.go.jp/data/000392934.pdf 東京電力福島第一原子力発電所の事故分析に関する面談（2022 年 5 月 10 日） https://www2.nra.go.jp/data/000391110.pdf https://www2.nra.go.jp/data/000391111.pdf 東京電力福島第一原子力発電所の事故分析に関する面談（2022 年 6 月 15 日） https://www2.nra.go.jp/data/000394729.pdf https://www2.nra.go.jp/data/000394676.pdf 東京電力福島第一原子力発電所の事故分析に関する面談（2022 年 6 月 28 日） https://www2.nra.go.jp/data/000396839.pdf https://www2.nra.go.jp/data/000396840.pdf 東京電力福島第一原子力発電所の事故分析に関する面談（2022 年 11 月 30 日） https://www2.nra.go.jp/data/000413050.pdf
15	第 31 回 資料 1-2 第 32 回 資料 1-2, 1-3	1 号機原子炉建屋西面外壁のコンクリートコアに係る検討状況	東京電力福島第一原子力発電所の事故分析に関する面談（2022 年 11 月 9 日） https://www2.nra.go.jp/data/000410422.pdf https://www2.nra.go.jp/data/000410423.pdf

No.	関連する 検討会	調査・分析に係る資料等	東京電力からの提供情報等
第二章 落下炉心の挙動と原子炉格納容器への影響			
第二節 2号機及び3号機原子炉格納容器内の様子と検討状況			
特になし			
第二章 落下炉心の挙動と原子炉格納容器への影響			
第三節 今後の分析評価の進め方			
特になし			
第三章 その他の調査項目の進捗状況など			
第一節 4号機原子炉建屋における「火災現場」位置の特定			
特になし			
第三章 その他の調査項目の進捗状況など			
第二節 3号機水素爆発関連の試験等			
16	第22回 資料 3-4	原子炉格納容器内での可燃性 ガスの発生の可能性に係る調 査状況等	東京電力福島第一原子力発電所の事故分析に関する 面談（2021年7月28日） https://www2.nsr.go.jp/data/000362394.pdf 東京電力福島第一原子力発電所の事故分析に関する 面談（2021年8月3日） https://www2.nsr.go.jp/data/000362395.pdf
17	第23回 資料 4-1	可燃性ガス発生源に関する加 熱試験を行うケーブル及び塗 料等の情報	東京電力福島第一原子力発電所の事故分析に関する 面談（2021年10月1日） https://www2.nsr.go.jp/data/000367204.pdf https://www2.nsr.go.jp/data/000367203.pdf 可燃性有機ガス発生量評価に関わる試料について （試験用試料の提供含む）
18	第23回 資料 4-1	ケーブル及び保温材の加熱試 験（予備試験）の状況	東京電力福島第一原子力発電所の事故分析に関する 面談（2021年12月9日） https://www2.nsr.go.jp/data/000377368.pdf https://www2.nsr.go.jp/data/000377369.pdf
19	第28回 資料 4-1	ケーブル・塗料・保温材の可 燃性ガス発生量評価試験結果	東京電力福島第一原子力発電所の事故分析に関する 面談（2022年2月21日） https://www2.nra.go.jp/data/000383054.pdf https://www2.nra.go.jp/data/000383055.pdf
20	第29回 資料 1-2	ケーブル・塗料・保温材の可 燃性ガス発生量評価試験結果	東京電力福島第一原子力発電所の事故分析に関する 面談（2022年4月12日） https://www2.nra.go.jp/data/000387511.pdf https://www2.nra.go.jp/data/000387512.pdf
21	第31回 資料 4-2	可燃性有機ガス評価計画等	東京電力福島第一原子力発電所の事故分析に関する 面談（2022年5月20日） https://www2.nra.go.jp/data/000391913.pdf

No.	関連する 検討会	調査・分析に係る資料等	東京電力からの提供情報等
			東京電力福島第一原子力発電所の事故分析に関する 面談（2022年8月3日） https://www2.nra.go.jp/data/000400769.pdf https://www2.nra.go.jp/data/000400770.pdf
第三章 その他の調査項目の進捗状況など			
第三節 非常用ガス処理系の汚染状況測定等			
22	第23回 資料5-3	1号機及び2号機非常用ガス 処理系配管の一部撤去作業 の状況	東京電力福島第一原子力発電所の事故分析に関する 面談（2021年8月25日） https://www2.nsr.go.jp/data/000364072.pdf https://www2.nsr.go.jp/data/000364071.pdf
23	第28回 資料4-4 第30回 資料2	1号機及び2号機非常用ガス 処理系配管の一部撤去作業 の状況	東京電力福島第一原子力発電所の事故分析に関する 面談（2021年10月27日） https://www2.nsr.go.jp/data/000369904.pdf 東京電力福島第一原子力発電所の事故分析に関する 面談（2021年11月10日） https://www2.nsr.go.jp/data/000373948.pdf 1号機及び2号機非常用ガス処理系配管の一部撤去 作業の進捗状況に係る面談（2021年11月24日） https://www2.nsr.go.jp/data/000373958.pdf https://www2.nsr.go.jp/data/000373959.pdf 1号機及び2号機非常用ガス処理系配管の一部撤去 作業の進捗状況に係る面談（2021年12月15日） https://www2.nsr.go.jp/data/000377370.pdf https://www2.nsr.go.jp/data/000377371.pdf 1号機及び2号機非常用ガス処理系配管の一部撤去 作業の進捗状況に係る面談（2022年3月15日） https://www2.nra.go.jp/data/000384395.pdf https://www2.nra.go.jp/data/000384396.pdf 1号機及び2号機非常用ガス処理系配管の一部撤去 作業に係る面談（2022年7月8日） https://www2.nra.go.jp/data/000399073.pdf https://www2.nra.go.jp/data/000399074.pdf https://www2.nra.go.jp/data/000399075.pdf
第三章 その他の調査項目の進捗状況など			
第四節 発電所敷地内外のモニタリングポスト等の空間線量率の推移			
特になし			
第三章 その他の調査項目の進捗状況など			
第五節 その他の活動状況			

No.	関連する 検討会	調査・分析に係る資料等	東京電力からの提供情報等
24	第 26 回 資料 3-1	1~2 号機原子炉建屋上部階調査の計画	東京電力福島第一原子力発電所の事故分析に関する 面談（2021 年 7 月 20 日） https://www2.nsr.go.jp/data/000360478.pdf https://www2.nsr.go.jp/data/000360477.pdf
25	第 26 回 資料 3-1	3 号機建屋内調査計画	東京電力福島第一原子力発電所の調査に関する面談 （2021 年 5 月 24 日） https://www2.nsr.go.jp/data/000354193.pdf https://www2.nsr.go.jp/data/000354192.pdf
26	第 32 回 資料 5	1 号機タービン建屋地下 1 階調査等の状況	東京電力福島第一原子力発電所の事故分析に関する 面談（2022 年 4 月 27 日） https://www2.nra.go.jp/data/000390000.pdf https://www2.nra.go.jp/data/000390001.pdf 東京電力福島第一原子力発電所の事故分析に関する 面談（2022 年 11 月 7 日） https://www2.nra.go.jp/data/000410158.pdf https://www2.nra.go.jp/data/000410159.pdf
27	第 30 回 資料 4-2	2 号機燃料交換機遠隔操作室 調査状況	東京電力福島第一原子力発電所の事故分析に関する 面談（2022 年 5 月 19 日） https://www2.nra.go.jp/data/000391618.pdf 東京電力福島第一原子力発電所の事故分析に関する 面談（2022 年 6 月 9 日） https://www2.nra.go.jp/data/000396296.pdf https://www2.nra.go.jp/data/000396297.pdf
28	第 32 回 資料 6-1	2 号機燃料交換機遠隔操作室 調査状況	2 号機燃料交換機遠隔操作室調査により採取した試 料（一部）
29	第 32 回 資料 6-2 第 33 回 資料 4 第 34 回 資料 5	1 号機原子炉補機冷却系内包 水サンプリング作業状況	東京電力福島第一原子力発電所の事故分析に関する 面談（2022 年 10 月 4 日） https://www2.nra.go.jp/data/000406178.pdf https://www2.nra.go.jp/data/000406179.pdf

※2022 年 12 月 20 日時点。

(参考8)

連絡・調整会議の開催実績（令和3年5月以降、計4回開催）

第7回（令和3年5月11日）

- 原子力規制庁における今後の調査・分析事項
- 東京電力ホールディングス株式会社福島第一原子力発電所における多核種除去設備等処理水の処分に関する基本方針

第8回（令和3年10月25日）

- 2号機シールドプラグ調査状況
- ケーブル等の加熱実験計画
- 3Dレーザースキャナーの定点測定状況
- （東京電力）2号機オペフロ内シールドプラグ穿孔部調査状況
- （東京電力）ケーブル及び塗料の可燃性有機ガス発生量評価計画
- （東京電力）1号機及び2号機非常用ガス処理系配管の一部撤去の状況

第9回（令和4年5月13日）

- 中期的リスクの低減目標マップの改定
- （東京電力）試料採取・分析計画
- （東京電力）1号機及び2号機非常用ガス処理系配管の一部撤去の状況
- 3号機RHR配管における水素滞留の状況
- （東京電力）3号機RHR配管で確認した滞留ガスに関わる対応状況
- 建物構築物の形状測定等の状況
- （東京電力）建屋健全性評価の進捗状況
- ケーブル、塗料等の加熱試験の実施状況
- （東京電力）ケーブル等の加熱試験の状況

第10回（令和4年12月8日）

- （東京電力）福島第一原子力発電所1号機の格納容器内部調査から得られた情報
- （東京電力）福島第一原子力発電所1号機の格納容器内部調査 後半調査について
- 1号機原子炉格納容器内部調査における試料分析
- （東京電力）1号機RCW熱交換器入口ヘッダ配管の滞留ガスの分析結果
- （東京電力）福島第一原子力発電所1号機及び2号機非常用ガス処理系配管撤去の進捗









以上

福島第一原子力発電所の事故分析に関する調査・分析項目の整理

凡例 ★:現場調査、◆:解析、●:分析等、□:実験等

R5年度以降も継続見込み

調査・分析事項	報告書等	2021年度	2022年度	中間取りまとめ	2023年度～	備考
① ベントラインの汚染メカニズムの解明						
● 1/2号機SGTS配管の汚染メカニズムの検討【分析等】			実施検討			
● がれき、サンプル等の試料分析【分析等】		試料採取・分析【IAEA】		○	試料採取・分析	委託等
● SGTSフィルタレイン内部の溜まり水の核種分析【分析等】		試料採取・分析【東電】		○		
◆ SGTS配管内流動解析・FP沈着検討【解析】		解析		○		
● ベントガス中のCs-水素-水蒸気の濃度、挙動の分析【分析等】		実施検討		○		
★ 1/2号機SGTSフィルタレイン、不活性ガス系の汚染状況調査 γカメラ		汚染状況調査		○		
★ ベントライン、SGTS、排気筒等の線量率測定 γカメラ		汚染状況調査		○	汚染状況調査	1/2号機SGTS撤去配管調査を含む。
★ 原子炉建屋内空調ダクト等の汚染分布調査 スミアγカメラ		実施検討				
② 1～3号機シールドプラグの汚染量の確定						
★ 1～3号機シールドプラグ表面、原子炉ウエル等の汚染状況調査		追加汚染調査		○	汚染調査等	
◆ FP付着シミュレーション【解析】		実施検討				
③ 核種放出のタイミングとメカニズムの分析						
● モニタリングポスト等のデータに基づく核種放出挙動の分析【分析等】			MP等分析	○	MP等分析	1～3号機の事故進展との比較検討を予定
● Cs等の核種の化学形態、移行挙動の検討【分析等】			実施検討			
(1) 放射線物質の放出経路						
1) 1,2号機ベント配管の汚染	○					
★ 1,2号機ベント配管の汚染調査 γカメラ	○					
● スタック下部のドレン水サンプル分析【分析等】	○					
● スタック内高度別汚染分布【分析等】	○					
◆ シミュレーションによる汚染分布再現【解析】	△					
□ S/CにおけるDF【実験or文献調査】	○					
2) SGTS逆流汚染（他号機及び自号機）	○					
★ SGTS配管、フィルタレイン等の汚染状況調査 γカメラ	△					
◆ ベント時の自号機、他号機への排気比率のシミュレーション【解析】	△					
□ GDの逆流防止機能の確認・実験【実験・文献調査】	△					
3) シールドプラグ調査	○					
★ 1～3号機シールドプラグ表面汚染分布調査	○					
◆ 1号機シールドプラグずれの分析【解析】	△					
4) 建屋DF	○					
★ 2号機オベフロの汚染分布確認 γカメラ	○					
● 2号機原子炉建屋内スミア試料分析【分析等】	○					
5) 3号機原子炉建屋4階調査	○					
★ 原子炉建屋3階及び4階の損傷状況調査及び線量率測定	○					
● 原子炉建屋の汚染分布・核種確認【試料採取・分析】	△					
1) 1号機原子炉建屋4階の出水の検討	○					
★ 1号機原子炉建屋4階調査	○					
● 作業員の証言確認等【分析等】	○					
◆ スロッシング解析【解析】	○					
2) 3号機使用済燃料プール内の臨界の可能性及び白煙の発生	○					
★ 使用済燃料プール内及び白煙の発生状況の調査	○					
◆ 臨界評価【解析】	○					
(2) 水素燃焼等						
④ 水素燃焼の物理・化学的検証						
● 水素爆発時の炎色、暗煙、凝縮波の検討【分析等】			実施検討			
● 水素爆発時のガス組成の検討【分析等】		ガス組成	ケーブル加熱試験	○	ケーブル加熱	有機化合物を含む可燃性ガスが存在委託等
□ 水素-水蒸気-可燃性ガス混合気体の燃焼実験【実験等】		実施検討			水素燃焼試験	
● 3号機原子炉建屋火災への可燃性ガスの影響分析【分析等】		実施検討			情報	
◆ 1号機シールドプラグ等のずれ・破損シミュレーション【解析】		実施検討				
6) 1号機及び3号機原子炉建屋における水素爆発	○					
★ 水素爆発による原子炉建屋の損傷調査 レーザースキャナ等	△					
● 水素爆発に係る映像解析等【分析等】	○					
◆ 水素爆発に係る地震計観測波の解析【解析】	○					
3) 4号機原子炉建屋における水素爆発	○					
★ 4号機原子炉建屋の損傷状況及びSGTS線量率調査	○					
● 水素量の推定【分析等】	○					
(3) AM策等の機器の設計方針等						
⑤ 耐圧強化ベントによるPCV破損防止の設計確認						
● 耐圧強化ベントの系統構成に係る設計確認【分析等】		設計確認				
⑥ 1号機非常用復水器(IC)の運用変更の確認						
● 1号機ICの設計・運用等の確認【分析等】		設計確認				
⑦ 3号機RHR配管滞留ガス調査						
★ 3号機RHR配管系統調査等					現地調査等	
● 滞留ガス分析等【分析等】					試料分析	
消防車による原子炉注水					実施検討	
★ 1～3号機注水ラインの系統状態調査						
● コンデンサーホットウエル内の水のサンプリング【試料要求、分析】						
◆ 代替注水シミュレーションによるRVへの注水量推定【解析】						
7) 1～3号機耐圧強化ベント	○					
★ ベント時の系統構成(MO弁、AO弁、真空破壊装置等の状態・設計も含む)	○					
★ 格納容器過温破損の可能性確認	○					
★ 有効ベント回数の推定	○					
◆ ベント時の排気時挙動シミュレーション【解析】	△					

調査・分析事項		報告書等	2021年度	2022年度	中間取りまとめ	2023年度～	備考		
(3) AM策等の機器の設計方針等	8) RDの動作	<ul style="list-style-type: none"> ◆ RD破壊圧力と格納容器破損モードのシミュレーション【解析】 □ RD破壊試験【実験・文献調査】 	○ ×						
	9) 3号機自動減圧系	<ul style="list-style-type: none"> ★ 原子炉建屋内損傷状況及び汚染状況調査 ◆ 3号機RPV圧力挙動【解析】 	○ ○ ○						
	4) 1号機非常用復水器(IC)の作動状況	<ul style="list-style-type: none"> ● IC隔離弁等の作動状況の確認等【分析等】 	○						
	5) 1号機小規模漏えいと逃がし安全弁不作動の可能性	<ul style="list-style-type: none"> ◆ 小規模漏えい解析等【解析】 	○						
	6) 1号機A系非常用交流電源系統の機能喪失	<ul style="list-style-type: none"> ★ 電源盤調査等 ● 津波襲来時の波高計、写真等の整理【分析等】 	○						
	8) 1号機PCV内部調査(水中ROV調査)	<ul style="list-style-type: none"> ★ ベDESTAL損傷状況 ★ 堆積物調査 ★ 中性子測定 □ 高温環境下でのコンクリート劣化試験【実験等】 				○	   	東京電力 & IRID調査 東京電力 & IRID調査 東京電力 & IRID調査 委託・役務	
(4) PCV内部調査									
(5) その他	9) 現場情報のアーカイブ化	<ul style="list-style-type: none"> ★ 3Dレーザースキャナーによる損傷状況調査 レーザースキャナー ★ 原子炉建屋内の汚染状況調査 スミア・γカメラ等 					 	 	継続的に実施 継続的に実施
	10) 設計、運転記録等の基礎情報	<ul style="list-style-type: none"> ★ 設計図面、運転記録等の確認(旧事務本館、情報棟) 							

【報告書等】

○ 中間取りまとめ(2023) 1F事故分析検討会 第20回～

○ 中間取りまとめ(2021年3月5日 1F事故分析検討会) 1F事故分析検討会 第8回～第19回 <https://www.nra.go.jp/data/000345595.pdf>

○ 中間報告書(2014年10月8日 原子力規制委員会) 1F事故分析検討会 第1回～第7回 <https://www.nra.go.jp/data/000069286.pdf>

東京電力福島第一原子力発電所における事故の分析に係る検討会 https://www.nra.go.jp/disclosure/committee/yaushikisva/iko_bunseki01/index.html

(別添 1)

ベント配管の汚染パターンの追加調査データ等

原子力規制庁原子力規制部

東京電力福島第一原子力発電所事故対策室 小西 興治

1. 背景及び目的

1/2号機の非常用ガス処理系(SGTS)配管及び共用排気筒については、中間取りまとめ(2021年版)においても調査結果を報告しており、ベントに成功していない2号機のSGTS配管の下流がベントに成功した1号機のSGTS配管よりも汚染の程度が高いことや、1/2号機共用排気筒基部に汚染の程度が高い箇所が存在する状況が確認されていた。

中間取りまとめ(2021年版)以降、東京電力によるSGTS配管の線量率測定の調査が進展していることを踏まえ、東京電力が公表した測定結果やそれに基づく汚染量評価の結果を改めて整理する。また、2016年に東京電力が実施した小型無人飛行機(ドローン)による1/2号機共用排気筒周辺における線量率調査においても地上に近いほど線量率が上昇するという結果が得られていることから、それらの情報についても整理を行う。

2. 調査の結果

東京電力による1/2号機のSGTS配管の線量率調査結果を図1に示す。測定方法については、コリメートされた線量計を用いて、配管上端から0.1m及び1.0mの高さでの空間線量率を計測している。今回も1号機と比較して2号機の線量率が高いことや、2号機のSGTS配管のうち1号機主排気ダクトから分岐した箇所付近で最も高い線量率(160.0 mSv/h)となっていることが明らかになった。

上記の測定結果を基に東京電力が評価したSGTS配管の汚染量を図2に示す。1号機側の $10\text{E}+10\text{Bq}\sim 10\text{E}+11\text{Bq}$ オーダーという値に比べて、2号機側は $10\text{E}+11\text{Bq}\sim 10\text{E}+12\text{Bq}$ オーダーという高い値が算出されており、2号機が1桁程度高い値となっている。

また、東京電力が実施したドローンによる測定結果を原子力規制庁が高さ方向に整理したものを図3に示す。1/2号機共用排気筒の頂部より底部の線量率が高いことが確認されている。なお、SGTS配管合流部や1/2号機共用排気筒底部の内部分の高線量率についてもあわせて示している。

<参考> 配管切断箇所の放射線量率測定（測定結果）



(1) SGTS配管線量測定結果

- ・ 下記に示す通り、配管線量率は2号機側が高く1号機側は低い結果となった。（昨年と同傾向）
- ・ これらは、ベント流速が速かった1号機配管より2号機は原子炉建屋内のSGTS系機器（フィルタ、ラプチャーディスク等）が抵抗となり流速が抑えられ滞留したものと推測している。
- ・ なお、2号機配管で高線量が確認された範囲（測定点21～26）の配管位置関係は、屋外配管のハイポイント（測定点20）より約1.2m低く、2号機R/Bからは水平位置となっている。

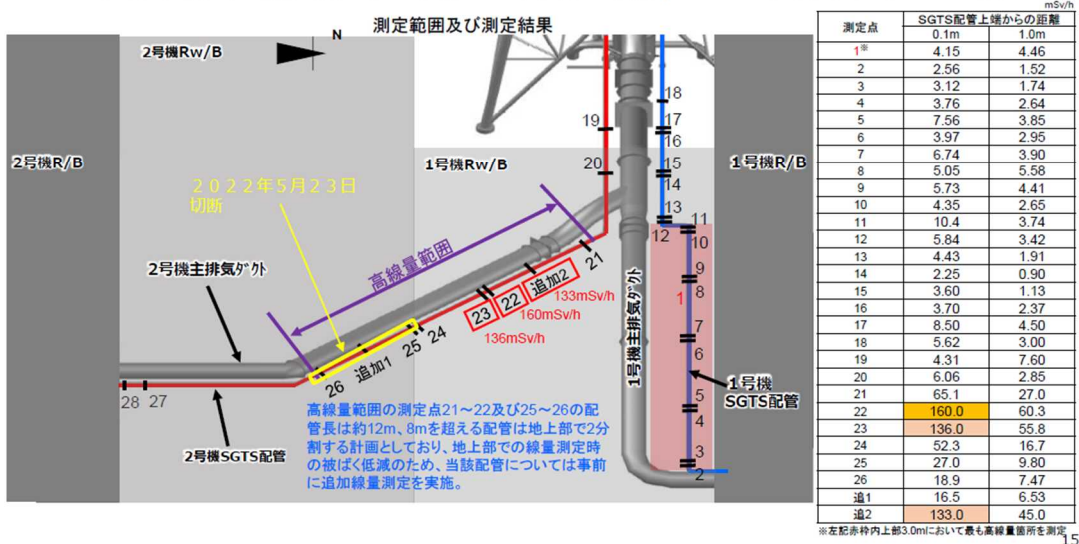


図1 配管切断箇所の放射線量率測定（測定結果）

<参考> 配管切断箇所の放射線量率測定（汚染量評価）



(2) SGTS配管内の汚染評価結果

- ・ 測定した放射線量率から汚染密度を算出し、切断後の配管ごとに汚染量の算出を実施した。
- ・ 1号機側の汚染量は10～11乗オーダー、2号機側は11～12乗オーダーで、第82回監視・評価検討会で示された汚染量評価値と同等な結果となった。

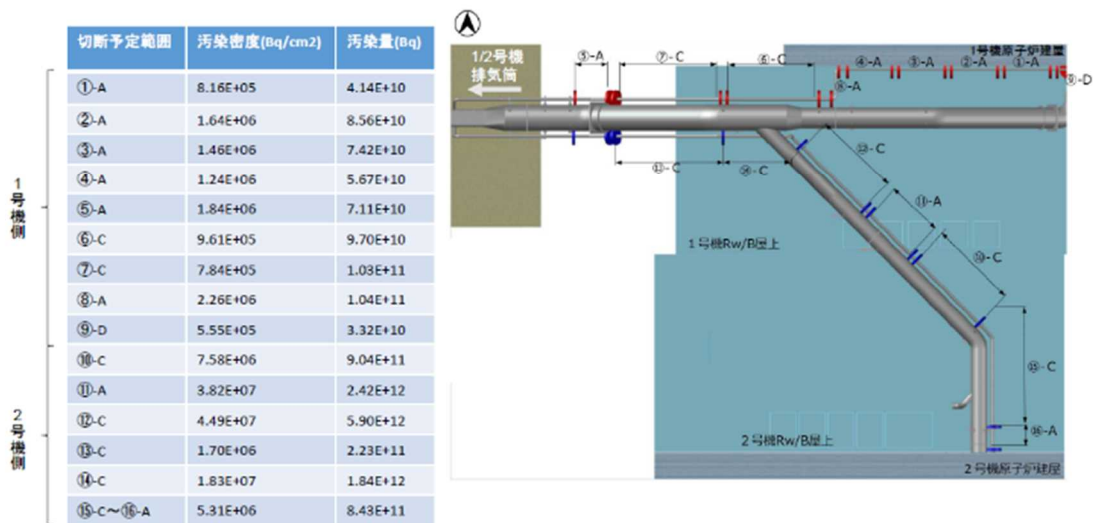


図2 配管切断箇所の放射線量率測定（汚染量評価）

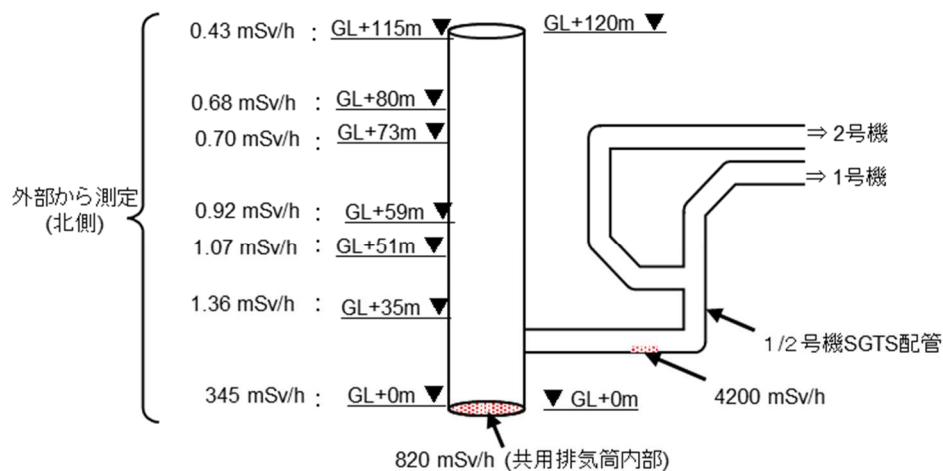


図3 共用排気筒の汚染状況

3. まとめ

東京電力による1/2号機のSGTS配管及び共用排気筒の調査の結果は、これまでの調査により得られていた汚染状況と同様の傾向を示している。今後東京電力が実施するSGTS配管撤去作業の進捗に伴い、さらなる情報が得られることが期待される。

引用文献等

- 1) 東京電力福島第一原子力発電所における事故の分析に係る検討会（第30回会合）
資料2 福島第一原子力発電所1号機及び2号機非常用ガス処理系配管の一部撤去について、2022年6月30日 東京電力ホールディングス株式会社
- 2) 東京電力福島第一原子力発電所における事故の分析に係る検討会（第28回会合）
資料4-4 福島第一原子力発電所1号機及び2号機非常用ガス処理系配管の一部撤去について、2022年2月28日 東京電力ホールディングス株式会社
- 3) 東京電力福島第一原子力発電所における事故の分析に係る検討会（第22回会合）
資料5-2 福島第一原子力発電所1号機及び2号機非常用ガス処理系配管の一部撤去について、2021年9月14日 東京電力ホールディングス株式会社
- 4) 福島第一原子力発電所1/2号機排気筒周辺における線量調査結果について、2016年10月27日 東京電力ホールディングス株式会社

(別添2)

1/2号機 SGTS 配管内流動解析

原子力規制庁長官官房技術基盤グループ
シビアアクシデント研究部門 塚本 直史

1. はじめに

1. 1 背景

1/2号機非常用ガス処理系(SGTS)配管の現地調査において線量測定がなされ、セシウム(Cs)の残留分布の推定がなされている[1]。図1に示すように、汚染分布は2020年度中間とりまとめの別添3でとりまとめられ、また、2021年度においても新たな測定データに基づき一部更新されている[2]。

1号機からのベントガスは、1号機のサプレッションチェンバー(S/C)から配管を通過して1/2号機共用排気筒(スタック)により環境へ放出されたと考えられていたが、線量測定に基づく汚染分布によると、1/2号機SGTSの配管やフィルタで高汚染箇所があり、ベントガスが通過する配管に接続された1/2号機SGTSへと逆流が生じたと推測されている。また、大半のベントガスが通過した配管が低汚染であるにもかかわらず、2号機SGTS配管において局所的に高汚染となっていることが確認されている。

2020年度、上記の汚染分布に至る原因を分析するため、JAEAがRELAP5コードを用いた流動解析を実施し、1/2号機SGTSに設置されているグラビティダンパ(GD)が設計どおりに動作しなかったため逆流が生じたとの推定結果等を示したが[3]、2号機SGTS配管で生じた局所的な高汚染の原因の解明には至らなかった。

そこで、原子力規制庁においてRELAP5コードによる流動解析を継続して実施することとなった。

1. 2 目的

以下2つを目的に、RELAP5コードによる解析を実施した。

- 測定結果に基づく配管内ベントガス挙動の再現、及び事故当時の1/2号機SGTSの状態の推定
- 大半のベントガスが通過したベントラインが低汚染となり、2号機SGTS配管において局所的に高汚染となった原因

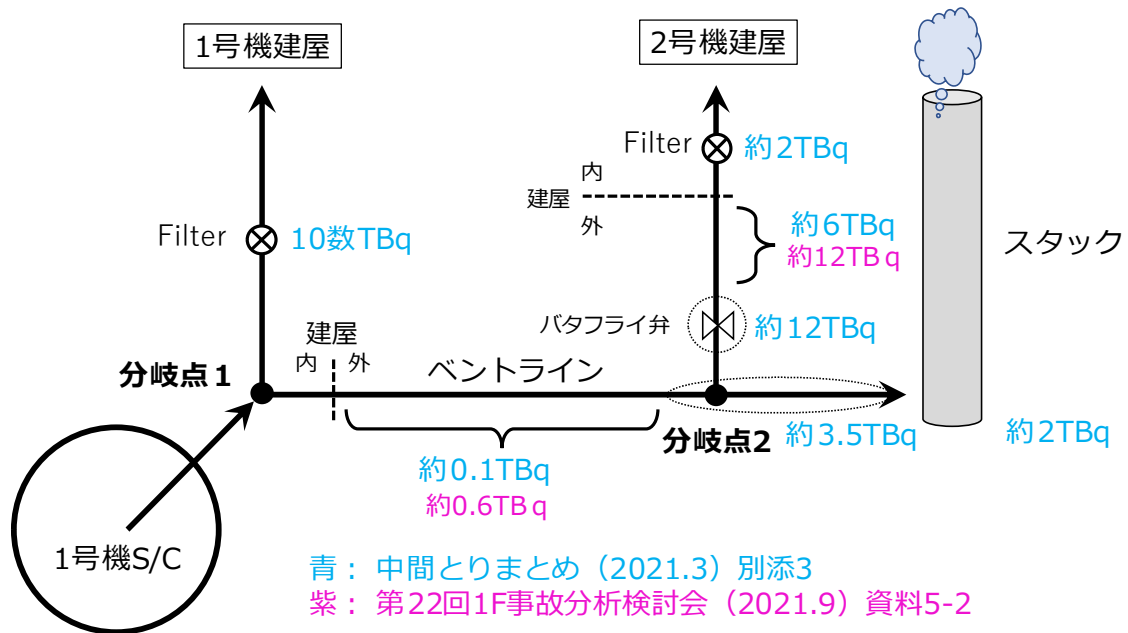


図1 1/2号機SGTSの推定汚染分布

1. 3 検討の概要

1. 2の目的を満たすべく、RELAP5コードを用いて以下3つの検討を行った。
 - 検討① 流量配分の再現解析

測定結果に基づき配管内のベントガス挙動を再現するために、図1に示す汚染分布から1/2号機SGTSへの逆流量を設定し、その逆流量を再現する圧力損失係数等の解析条件の算出を行う。測定結果を再現する解析条件を得て、事故当時の1/2号機SGTSの状態の推定につながる情報を提供する。
 - 検討② 凝縮と汚染分布の対応性の確認

ベントガス中のCsがSGTS配管の途中で残留することで局所的な高汚染となったと考えられるが、RELAP5コードでは配管内でCsが残留するメカニズムを評価することができない。しかし、Csの沈着に影響があると考えられる蒸気凝縮の発生状況を評価し、汚染分布との対応関係を確認する。
 - 検討③ 時間変化を考慮した解析

ベント期間を通じて、ベントガス中のCs濃度、フィルタの流動抵抗が変化すると考えられる。両者の変化を組み合わせることで、SGTS配管内に高濃度のCsが閉じ込められる状況が生じ得る。RELAP5コードでの解析により、ベントラインよりも2号機SGTS配管での高汚染の要因となる可能性について検討する。

2. RELAP5 解析

2. 1 解析コード

解析には、米国 NRC が開発する RELAP5/MOD3.3[4]を使用した。2020 年度に JAEA が使用した RELAP5/MOD3.3 は 2006 年にリリースされたバージョンであったが、今回の解析では 2016 年にリリースされたバージョンを使用した。RELAP5 コードは多数の妥当性確認が実施され、軽水炉の事故解析に適用されている¹。

2. 2 解析体系と解析条件

JAEA が 2020 年度に実施した RELAP5 解析のインプットを一部修正して、解析を実施した。解析モデルを図 2 に示す。1 号機 S/C から放出されたベントガスが通る耐圧強化ベント配管とそれに接続する 1/2 号機 SGTS 配管を流体コンポーネントでモデル化し、配管内の流体を 2 流体モデルにより評価した。また、配管の管壁を熱構造材コンポーネントでモデル化し、管壁内の温度を熱伝導計算で評価した。

配管外側の温度は、1 号機建屋内で 40°C、2 号機建屋内で 20°C、建屋外で 8°C と仮定し、配管外壁との間の熱伝達係数は 5 W/m²/K で固定とした。1 号機 S/C からのベントガスの放出は THALES2[5]の計算結果を流量境界 (T911, T921, T931, TJ912, TJ922, TJ932) としてテーブル値により与えた。スタックと配管との接続口 (T199)、1 号機 SGTS の送風機 (T151) 及び 2 号機 SGTS の送風機 (T251) の位置を圧力境界とし、各々の高さ位置で補正した大気圧の値に設定した。

THALES2 の計算結果に基づき、ベントは約 3120 秒継続するとした。ベントが停止した時点において、ベント期間中に 1 号機 S/C から流入したベントガス（蒸気を除く）のトータル質量の約 99.5%が出口境界から体系外へ流出している計算結果となっていたことから、ベント停止後の挙動が与える影響は小さいとみなし、ベントが開始してから停止するまでの期間を解析対象とした。

なお、JAEA の解析インプットからの主な修正点として、①スタックを圧力境界に変更、②1 号機 S/C からのベントガスの流量境界にアルゴン (Ar) ガスの追加 (T941, TJ942)、③配管のノード分割において粗いノードに対して細分化処理を行った。①のスタックの変更に関して、JAEA のインプットにおいてはスタックを 2 本の配管としてモデル化していたが、スタック内を非現実的な速度で外気が循環する計算となっており、RELAP5 では適切なモデル化が難しいと判断して圧力境界に変更した。②の Ar の追加は、Ar をベントガス中の Cs の代替ガスとして、配管内の

¹ 参考文献[4]の Vo1. 7 に RELAP5/MOD3.3 の妥当性確認の結果がまとめられている。また、U. S. NRC の ADAMS で RELAP5 等のキーワードで検索すれば、RELAP5 を用いた米国の原子力発電所の評価に関する文書が多数表示される。

Cs 分布を仮想的に評価するために追加したものである。追加した Ar の量はベントガスの流入量に比べて十分に小さくしており、Ar の追加による影響が軽微であることは確認済みである。また、③の配管のノーディング変更は、後述する質量バランスの改善のために実施したものであり、ノード長が最大でも 5m 程度以下かつ前後のノード長が可能な限り近くなるように変更している。

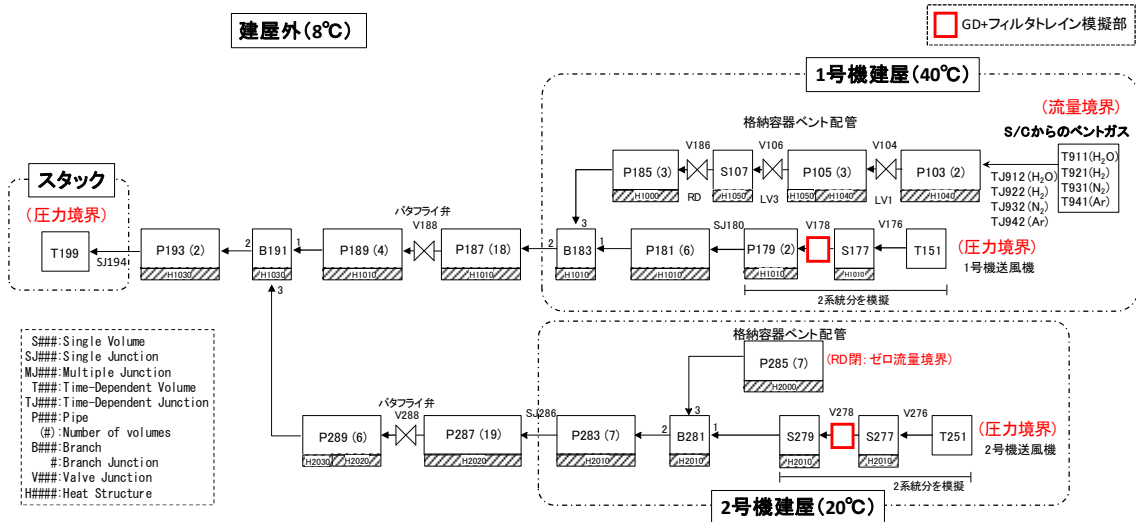


図2 RELAP5コードによる解析体系

3. 検討① 流量配分の再現解析

3. 1 測定結果に基づく流量配分

図1に示すように、分岐点1又は2に接続されたSGTS配管の途中やフィルタで汚染が観測されている。この汚染は1号機のベントガスの逆流によるものと考えられており、その汚染量に相当するCsを含むベントガスが分岐点からSGTSへと逆流していることを示している。

ベントガスはスタック、1号機SGTSへの逆流、2号機SGTSへの逆流の3つの経路を経ており、各経路上のCsの残留量(スタックは環境放出分を含む)の合計は、概算としてそれぞれ100 TBq、10 TBq、20 TBqである。各経路には少なくともその量のCsを含むベントガスが流れ込んだことになるため、各経路への流量配分がこの比率と一致すると仮定する。その結果を図3に示す。

1/2号機SGTSにはGDが設置されているが、測定結果から図3に示す程度の逆流が生じたと推定される。

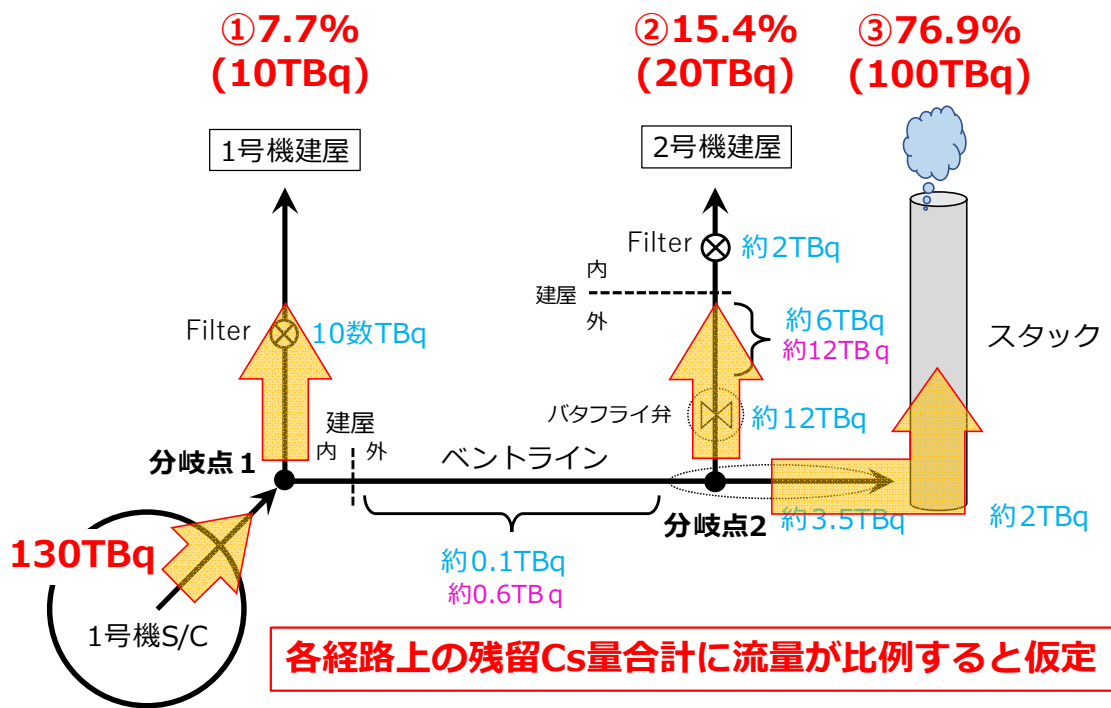


図3 流量配分の仮定

- ① 分岐点1から1号機SGTSへの流量 ($10 \text{ TBq} / 130 \text{ TBq} = 7.7\%$)
- ② 分岐点2から2号機SGTSへの流量 ($20 \text{ TBq} / 130 \text{ TBq} = 15.4\%$)
- ③ 分岐点2からスタックへの流量 ($100 \text{ TBq} / 130 \text{ TBq} = 76.9\%$)

3. 2 解析内容

図3の流量配分が事故当時の配管内のベントガス挙動を表すと考え、RELAP5コードを用いて、その流量配分を再現する条件の算出を行う。算出された条件が事故当時の1/2号機SGTSの状態を推定するための情報となる。

この検討においては、ベント開始から終了までの期間を対象に、各経路に流入したCs（解析においては代替ガスのAr）の質量の積算値を評価し、その比率が図3の流量配分と一致するように1/2号機の圧力損失係数 K の調整を行った。その他不確かさの大きい要因については、変動パラメータとして条件を変更し、その条件下で流量配分を再現する1/2号機SGTSのGDとフィルタの圧力損失係数の算出を行うことで、その影響の程度を定量化する。ベントガスが各経路に分配される事象において重要となる物理現象や模擬するための解析手法、不確かさ要因等に対する考え方を以下に示す。

1/2号機SGTSへの流量配分は、出口境界の圧力と経路上の圧力損失とで決まる。1/2号機SGTSにおける圧力損失のうち、支配的な流動抵抗となるのがフィルタトレインとGDである。その局所的な圧力損失が流量配分を決める最も重要な要因と

なることから、流量配分の再現解析における調整パラメータとして圧力損失係数 K を選定した²。なお、2020年度のJAEAの解析においてはGDの動圧を圧力損失とし、GDの開度 R_{open} という形で圧力損失の調整を行っていた³。

ベントライン及び1/2号機SGTSにおける圧力損失のうち配管壁による摩擦損失は、RELAP5コードに内蔵の汎用的な計算モデルで算出される。今回の解析においては配管内の液相の体積割合は最大でも1%程度であり、ほぼ単相の気体であることから、摩擦損失計算における不確かさは小さいと考えられる。配管の高さ変動による圧力損失（位置圧損）についても同様である。1/2号機SGTSの出口境界で設定する圧力は大気圧としたが、当時の建屋内の状況が不明であり不確かさが大きいと考え、影響を確認するために出口境界圧力を変動パラメータとした。

スタック内及び配管接続部における流動状況はRELAP5では直接評価することができないため、スタックの圧力境界値と入口圧力損失係数を入力条件として与えることで評価している。しかし、その設定根拠はなくその不確かさは大きいと考えられるため、その影響を確認するためにスタック入口の圧力損失係数を変動パラメータとした。なお、2号機SGTSの入口（分岐点2）の圧力はスタック圧力にスタック入口の圧損を足した値となり、スタックの圧力境界値の不確かさはスタック入口の圧力損失係数を変えた解析で包含できるため、スタックの圧力境界値は変動パラメータとしなかった。

また、図3に示した流量配分は現在の測定結果から推定される汚染分布に基づき設定したが、測定できていない場所の線量データがないなど不確かさが大きいと考えられるため、流量配分も変動パラメータとして選定した。

3. 3 再現解析の結果

図3の流量配分を再現する1/2号機SGTSの圧力損失係数 K を表1に示す。出口境界とスタックの入口圧損を2020年度のJAEA解析と同一としたノミナル条件に加えて、3.2で列挙した不確かさ要因を変動パラメータとした以下の感度解析ケースで圧力損失係数の算出を行っている。

- A) 1号機建屋圧力が1 kPa高い（事故の進展により1号機建屋内が高圧化したことを想定⁴）

² 圧力損失は $\Delta P = \frac{1}{2} K \rho v^2$ と評価される（ ρ は流体密度、 v は流速）。圧力損失は流路面積に依存するが、GDが設置された配管（2系統分）の流路面積に対する値として与えた。

³ GDの開度は実際の流路面積を表しておらず、流動抵抗を間接的に表すものである。両者の関係は $K = (R_{open})^{-2}$ であり、2020年度のJAEA解析における開度 $R_{open} = 1\%$ は圧力損失係数 $K = (0.01)^{-2} = 10000$ に相当する。

⁴ 1号機建屋内の高圧化を仮定して圧力を増加させたところ、2 kPa程度増加させると1号機への逆流が止まったため、その半分の増加量を代表ケースとして選定した。

- B) 2号機建屋圧力が0.06 kPa 低い(2号機建屋の負圧維持を想定⁵)
- C) スタック入口の圧力損失係数を10倍(スタック入口において凝縮水等が流動抵抗として作用したことを想定)
- D) 流量配分が1/2号機ともに10%、スタックが80%
- E) 流量配分が1/2号機ともに15%、スタックが70%

2020年度のJAEA解析で用いたGDの漏えい面積の設計値を圧力損失係数に換算すると1/2号機ともに 10^6 を超える値となるが、表1に示す圧力損失係数はいずれもその値よりも圧倒的に小さい結果となっている。

また、1号機に比べて2号機の圧力損失係数が1~2桁小さいことが分かる。これは、図4に示すように1号機と比べて2号機の圧力差が小さく、2号機側の逆流の駆動力が小さいことが原因である。分岐点2の圧力は大気圧にスタックの入口圧損を増加した値となるが、分岐点1の圧力は分岐点2の圧力にベントラインの圧損(主に摩擦圧損)を加えた値となるため、圧力差のこの大小関係は確定的なものと考えられる。

感度解析A)~C)はいずれもノミナル条件よりも1/2号機SGTSの出入口の圧力差が近づく条件であり、感度解析D),E)は1/2号機の流量が近づく条件のため、両者の差が縮まる結果となるが、いずれのケースでも1号機より2号機の圧力損失係数の方が十分に小さいとの関係は変わらなかった。

なお、感度解析C)の結果からスタックの入口圧損が、特に2号機の圧力損失係数に与える影響が大きいことが分かる。これは、2号機SGTSの出入口間の圧力差が小さいことから、スタックの入口圧損の変更による分岐点2の圧力変動の影響が大きく表れるためである。

表1 流量配分を再現する圧力損失係数

条件	1号機	2号機
ノミナル条件	3400	46
A)1号機建屋圧力+1 kPa	880	46
B)2号機建屋圧力-0.06 kPa	3400	123
C)スタック入口圧損10倍	5000	900
D)1, 2号機の流量配分10%	1900	200
E)1, 2号機の流量配分15%	760	47

⁵ 2号機建屋の設計気密度が水柱約6 mm(約0.06 kPa)の負圧状態における漏えい率として与えられており、その負圧が維持されたと仮定して設定した。

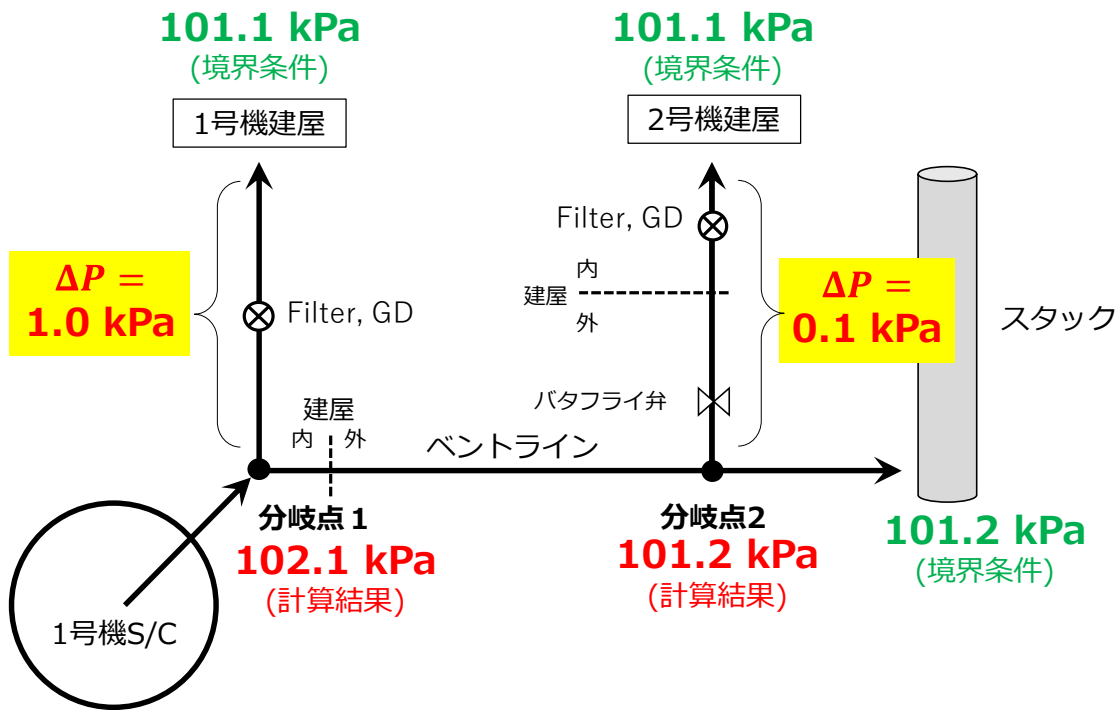


図4 ベント終了時の圧力分布と圧力差（ノミナル条件）

3. 4 流量配分の再現解析からの考察

GD が設置されていたものの、測定データに基づき設定した図3の流量配分が示すように、1/2号機 SGTS にはそれなりの逆流が生じたことが推定される。これは、ベント時の状況下では GD は逆流を妨げるほどの流動抵抗として働かないことを示している。

図3の流量配分を再現する圧力損失係数（表1）を見ると、ノミナル条件だけでなく不確かさ要因を考慮した感度解析においても、2号機の圧力損失係数が1号機よりも1~2桁小さいという結果が得られた。このことから、ベント時に2号機 SGTS の方が1号機 SGTS に比べて流動抵抗が少ない状態だったと推定される。圧力損失係数は GD 及び/又はフィルタトレインの状態が反映される値であり、ベント時において1号機と2号機とで GD 及び/又はフィルタトレインの状態に差があったことが示唆される。2020年度の JAEA の検討においては、1号機と2号機とで圧力損失係数（漏えい面積）を同程度に設定したことから、出入口間の圧力差が小さい2号機への逆流量を過小評価する結果となっている。

なお、スタックの入口圧損が2号機の圧力損失係数に与える影響が大きい結果が得られている。今回の解析では、スタックの圧力境界値及びスタック入口における圧力損失係数の値を仮定して評価したが、SGTS への逆流について詳細に調査する場合には、これらパラメータにスタック入口周辺の流体挙動を適切に反映するこ

とが重要となる。スタックの入口圧損は3号機ベントにおける4号機SGTSへの水素逆流の問題にも強く影響しており、共通の課題と考える。

4. 検討② 凝縮と汚染分布の対応

4. 1 検討内容

大半のベントガスが通過したベントラインが低汚染で、少量のベントガスが通過した2号機SGTS配管が高汚染との測定事実は、ベントガスの通過量で汚染量を評価できないことを示している。汚染の評価をするためにはCsの沈着メカニズムを考慮する必要があるが、それはRELAP5コードで扱うことができない。しかし、Csの沈着に影響し得る現象として配管内の蒸気凝縮をRELAP5コードでは評価できることから、汚染分布と蒸気凝縮との関係について調べた。

4. 2 RELAP5解析における凝縮水の発生、残留状況

3. のノミナル条件の解析結果は、線量測定から推定された汚染分布(図1)に基づき設定した流量配分(図3)となっていることから、事故当時のベントガスの流れを再現していると考えて、その解析結果の分析を行った。蒸気凝縮の発生位置、各経路を通過した蒸気・水の質量、凝縮水の残留位置を図5に示す⁶。図5において「残留水…kg」とはベント停止時に網掛けした領域に存在する液相の水の質量、「(凝縮…kg)」とはベント開始から停止までの間に網掛けした領域で凝縮により発生した水の質量、「水…kg」「蒸気…kg」とはベント開始から停止までの間に矢印位置を通過した水と蒸気の質量を示している。

有意な量の蒸気凝縮の発生が確認できたのは、1号機S/Cから流調弁の高圧領域(建屋内)、ベントライン(建屋外)、2号機SGTS配管(建屋内外)の3か所である。1号機S/Cから流調弁の高圧領域で発生した凝縮水の大半は入口部に残留し、一部流出した水は分岐点1に至るまでの間に蒸発して蒸気となっている。ベントラインで発生した凝縮水は全てスタックへと流出し、ベントライン内に水は残留しない結果となった。2号機SGTS配管内で発生した凝縮水の一部は2号機建屋側の出口境界に到達し、残りが途中の配管内に残留する結果となった。1号機SGTS配管内においては配管壁の温度が高いことから、凝縮が生じなかったと考えられる。

図6に2号機SGTSにおける凝縮水の残留位置の詳細を示す。残留した位置は配

⁶ 第27回東京電力福島第一原子力発電所における事故の分析に係る検討会の資料2-3では水の質量バランスが大きく崩れた結果を示していたが、これは配管のノード分割が不十分であることが一因であった。この報告書に示した解析結果は全てノード分割修正後の結果であるが、依然としてベントラインでの質量バランスが取れておらず、今後の検討課題である。

管の向きが水平となっている2か所である。当該箇所では凝縮した水に加え、上流位置での凝縮水が流されたり、下流位置の凝縮水が配管の傾斜により戻ったりすることで、配管の水平位置に溜まったと考えられる。

ノミナル条件では2号機 SGTS への流量配分は15.4%であるが、流量配分への影響を確認するため、3.の感度解析ケースD(2号機に流量10%)における蒸気凝縮の発生位置、各経路を通過した蒸気・水の質量、凝縮水の残留位置を図7に示す。2号機 SGTS へと流入する蒸気量がノミナル条件より少なくなるため、2号機 SGTS 配管内での凝縮量は減少し、凝縮水は2号機建屋側の出口境界に到達しなくなっている。図7に示すように、凝縮水の残留位置は上流側のバタフライ弁前後の水平配管部のみとなり、下流の水平配管部には凝縮水が残留しない結果となった。

なお、2号機 SGTS への流量を5%まで減少させると、2号機 SGTS 配管内において凝縮がほとんど生じず、凝縮した水が残留しない結果となった。2020年度のJAEAの解析においては2号機 SGTS への流量が約5%であり、2号機 SGTS 配管内で凝縮がほとんど生じない結果となっていたものと推測する。

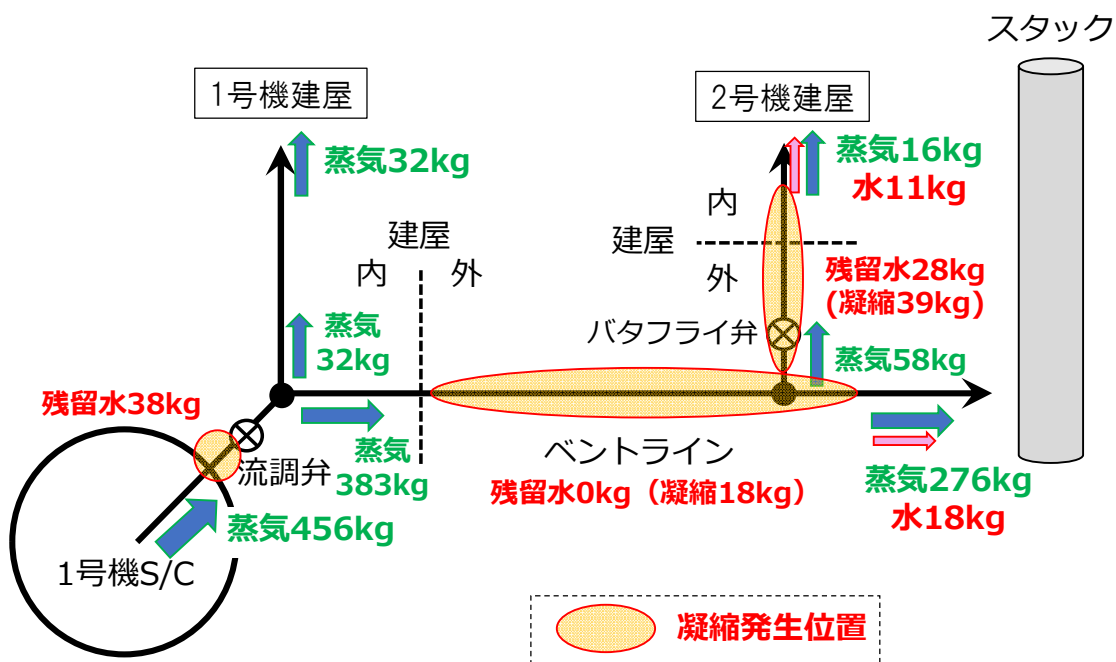


図5 凝縮発生位置、蒸気・水の通過量、残留水 (ノミナル条件)

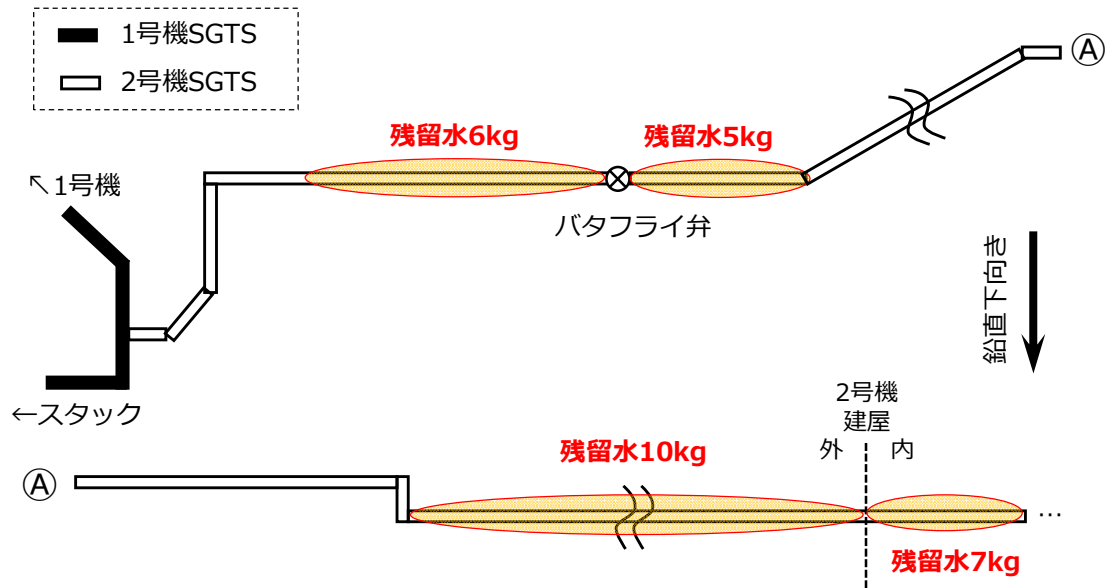


図6 凝縮した水の残留位置と残留量（ノミナル条件）

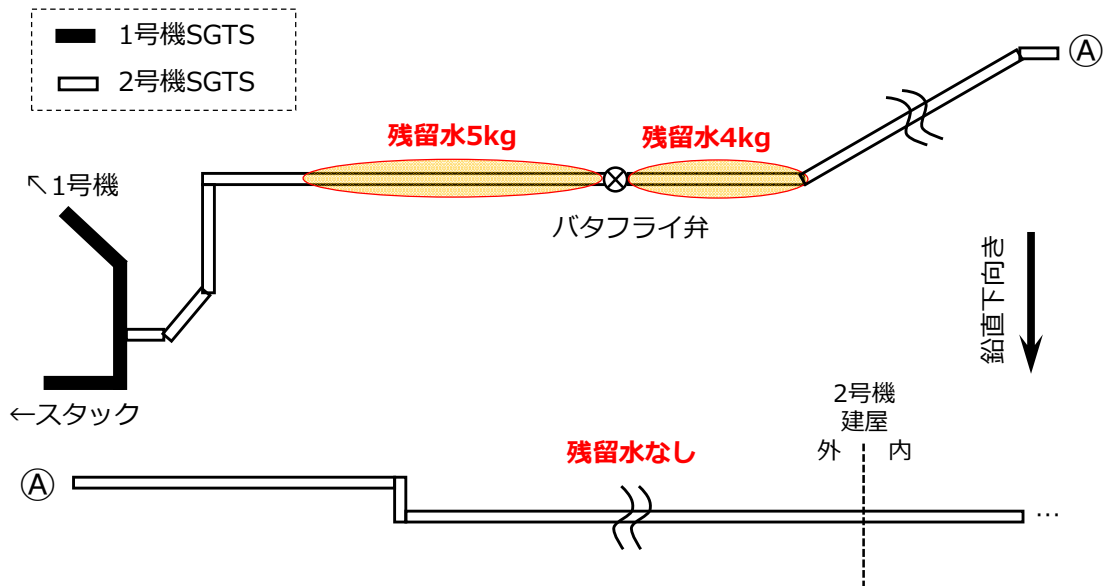


図7 凝縮した水の残留位置と残留量（感度解析ケースD）

4. 3 汚染分布と凝縮水の解析結果との対応関係について

汚染分布は図8に示す線量の測定結果から推定されており、図8で網掛けをした以下の3か所が高汚染箇所となっている。

- ①2号機SGTSのバタフライ弁近傍
- ②2号機SGTSの水平配管部
- ③スタック接続部近傍の配管

図8の①と②の2か所が図6で示した凝縮水の残留位置と一致している。③の位置はベントラインで発生した凝縮水が通過するものの、凝縮水の残留はしない結果となっている。

①の2号機SGTSのバタフライ弁近傍に関して、バタフライ弁から離れた位置では線量が大幅に減少しており、弁の近くで主に汚染していると考えられる。しかし、RELAP5ではバタフライ弁前後に広く凝縮水が分布する結果となっている。RELAP5ではバタフライ弁位置をバルブジャンクションで模擬したものの、解析においては弁を全開としており弁による影響を考慮しない計算となっている。実際には弁の構造物が流路内に存在しており、凝縮した水やベントガスの流れがその影響を受けることで弁のごく近傍のみ汚染された可能性がある。RELAP5解析の結果は2号機SGTSのバタフライ弁前後の水平配管部で凝縮水が残留することを示唆しており、その情報と弁の幾何構造を考慮してより詳細な検討をすることが望ましい。

②の2号機SGTSの水平配管部に関しては、配管が垂直方向から水平方向となって以降の配管部で高線量が観測され、RELAP5解析ではその場所で凝縮水が残留しており、高汚染位置との一致が見られる。図9に示すように、線量の測定値は垂直方向から水平方向へと変わるエルボー部から下流方向へ進むと指数関数的に減衰する結果となり、建屋の手前で低線量となっている。それに対し、RELAP5解析の凝縮水の残留量の分布として液相の体積率とエルボー部からの距離との関係を図10に示すが、エルボー部から離れることで凝縮水が増える結果となっており、線量の分布とは異なっている。これは凝縮水の多寡と線量値とが対応しないことを示している。

③のスタック接続部近傍の配管に関しては、RELAP5解析ではベントラインで発生した凝縮水は全て通過し、この位置で残留する結果とはなっていない。RELAP5は配管内の流れを流れ方向1次元の計算により評価するため、垂直方向の配管位置での重力による加速とベントガスの速い流れとにより、凝縮水が一方的にスタックへと流れ出る計算結果となっている。しかし、配管の曲がり部では一般に流れが乱れた状態となる。配管の幾何形状、凝縮水との相互作用等を考慮した熱流動解析や実験等ができれば、凝縮水が配管内に残留する結果となるかもしれない。なお、スタックの底部においても高線量が観測されており、配管からスタック底部へと流出した凝縮水が一因となっている可能性がある。

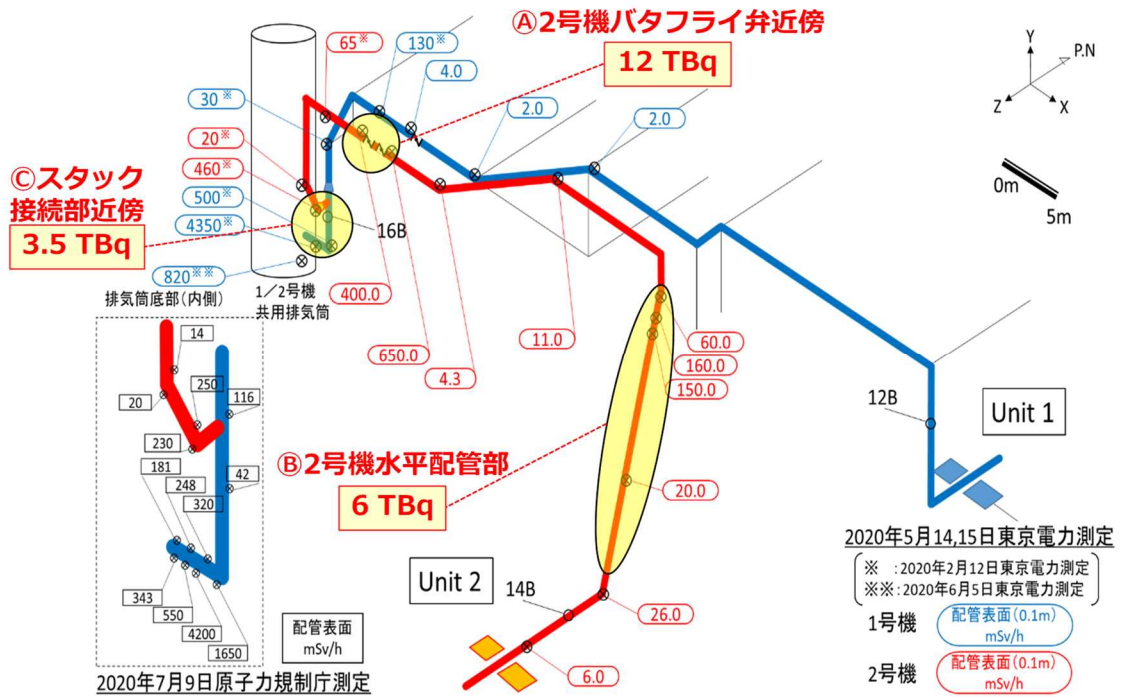


図8 線量の測定結果と高汚染位置（参考文献[1]の図3に一部加筆）

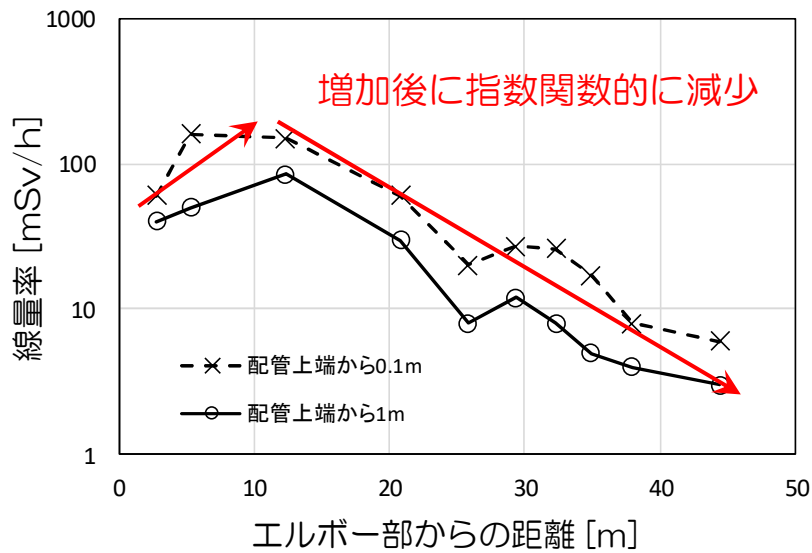


図9 2号機 SGTS 水平配管部の線量分布
 参考文献[6]に記載の測定データから作成

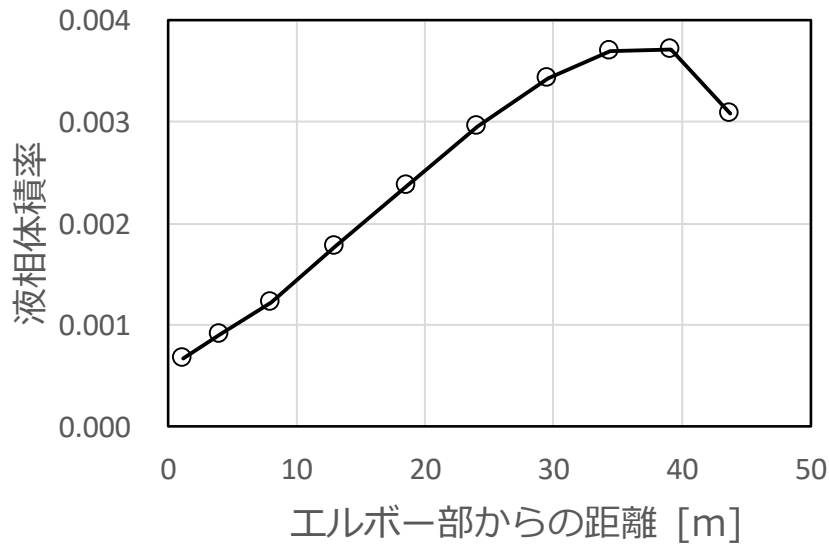


図 10 2号機 SGTS 水平配管部の液相体積率の分布（ノミナル条件）

4. 4 RELAP5 解析の凝縮水の残留量による汚染分布評価

凝縮水の残留量から汚染量を直接算出できないことは明らかであるが、凝縮水の残留量と汚染量との間にある程度の相関があると考えられる。そこで、RELAP5 解析の凝縮水の分布と汚染分布との対応関係を示すべく、Cs が水・蒸気の質量当たり均等に配分されると仮定して、配管内の Cs 分布を評価した結果を表 2 に示す。

放射性物質の移行プロセスを考慮しておらず、参考程度の結果ではあるものの、線量から推定される汚染分布をオーダーレベルで再現できている。

表2 水・蒸気の質量に Cs 量が比例^{※1} するとして評価した Cs 分布 [TBq]

場所↓	条件→ ノミナル条件	感度解析 ケース D	線量からの 推定値 ^[1]
1号機 SGTS 配管	0	0	0.1
1号機 SGTS フィルタ ^{※2}	9	12	10 数
①2号機バタフライ弁近傍	3	2	12
②2号機水平配管部	5	0	6
2号機 SGTS フィルタ ^{※2}	8	2	2
ベントライン	0	0	0.1
スタック ^{※2}	84	87	約 100
スタック底部 ^{※3}	5	5	(測定結果なし)
1号機 S/C～流調弁	11	11	(測定結果なし)

※1 流入蒸気量 (456 kg) を 130 TBq として算出

※2 出口境界に到達した水と蒸気の質量から算出

※3 出口境界に到達した水の質量から算出

5. 検討③ 時間変化を考慮した解析

5. 1 ベント中の時間変化

検討②において、大半のベントガスが通過したベントラインよりも 2号機 SGTS 配管の方が高汚染となっている理由として、凝縮水の残留位置と汚染位置とが対応している可能性を示した。しかし、検討①及び検討②においては、ベントガスの流入条件以外はベント中に一定との条件で解析を行っており、その他条件の時間変化の影響については検討できていなかった。

ベント中に時間変化し得る状態は多数考えられるが、ここでは以下 2 つの変化を考慮した。まず、SGTS のフィルタラインに装着されている HEPA フィルタは、蒸気を処理することで液滴による目詰まりを起こすことが知られている[7]。次に、ベントガス中の Cs 濃度は初期に高く、1号機 S/C の気相部の Cs が排出されていくことで Cs 濃度が低下すると考えられる。

この 2 つの時間変化を考えることで、ベントラインよりも 2号機 SGTS 配管で高汚染となりうる状況を RELAP5 解析で模擬できるかを確認した。RELAP5 解析において、SGTS フィルタの蒸気による目詰まりの模擬として、図 2 の V176 及び V276 を通過する蒸気量が一定量を超えた場合に、その位置を閉塞するように設定した。また、Cs の代わりとして Ar を結果に影響しない少量 (トータル 1.0 kg) だけ流入させ、そのガスの排出量及び残存量をトレースすることで、ベント停止時の Cs の配置を評価した。Cs 濃度の変化は、流量境界 (図 2 の TJ942) の Ar ガスの流入量の

テーブルデータとして入力を行った。

5. 2 解析内容

ベントガスは初期にCsを高濃度含み、含有量が時間とともに減少する。この特性から、高濃度Csを含む初期ベントガスが2号機SGTS配管内に残留するような状況が起こりえないかを検討した。すなわち、ベント初期に体系全体が高濃度Csのベントガスで満たされるが、その状態で1/2号機のフィルタが目詰まりすることで、1/2号機SGTS配管内の流れが止まり、SGTS配管内の高濃度Csガスが閉じ込められる。他方、その後もベントガスはベントラインを通してスタックから環境放出されることから、ベントラインはその後の低濃度Csのベントガスで置換される。その結果、図11に示すように、SGTSの配管内には初期の高濃度Csのベントガスが残留して高汚染、ベントラインは低濃度Csが残留して低汚染となるというシナリオである。

ベントガスのCs濃度の時間変化は、図12のように初期の高濃度期間を経て、それ以降は低濃度となると仮定した。初期の濃度として、Cs濃度を全時間一定としたときの濃度の①30倍、②70倍、③150倍の3つのパターンを考え、いずれの場合も流入する全Cs量は一定(130TBq)とする。

フィルタの目詰まりは、蒸気0.1kgが通過するときを生じると仮定する。目詰まりの蒸気量の影響を見るために、蒸気1.0kgが通過するときフィルタの目詰まりが生じる(Cs濃度パターンは②)とした場合の解析も行う。

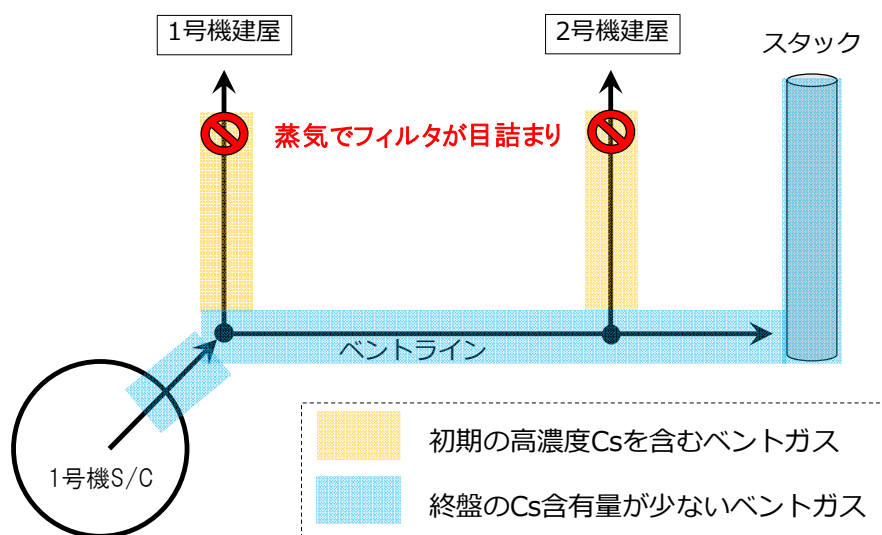


図11 Cs濃度変化とフィルタ目詰まりによりSGTS配管が高汚染となる想定状況

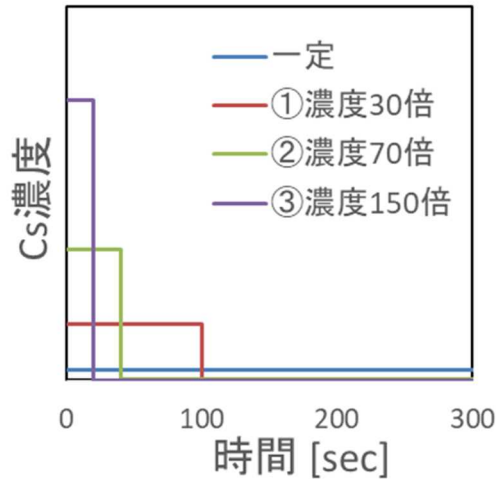


図 1 2 ベントガス中の Cs 濃度の時間変化

5. 3 解析結果

ベント停止時の残留 Cs 分布の解析結果を表 3 に示す。表 3 において 1 号機 SGTS 配管とは分岐点 1 から 1 号機 SGTS の出口境界まで、2 号機 SGTS 配管とは分岐点 2 から 2 号機 SGTS の出口境界まで、ベントラインとは分岐点 1 から分岐点 2 までの配管内の残留量を表す。

条件①～③のいずれにおいても、1/2 号機 SGTS 配管内に有意に Cs が残留し、ベントラインにはほとんど残留しない結果となり、図 1 1 で示すような状況が生じている。なお、初期 Cs 濃度を増加させると、1 号機 SGTS の残留量は増加する一方で、2 号機 SGTS の残留量は③で減少している。1 号機 SGTS 配管（分岐点 1～1 号機 SGTS の出口境界）は 30 m 弱と短いことから、1 号機 SGTS 配管では初期の Cs 濃度に比例するように残留量が増えるが、2 号機 SGTS 配管（分岐点 2～2 号機 SGTS の出口境界）は 100 m 以上と長いこと、初期濃度が高いと高濃度の時間帯が短いことから、2 号機 SGTS 配管ではフィルタが閉塞するまでに低濃度のベントガスが 2 号機 SGTS 配管に到達してしまい残留量が減少したと考えられる。

フィルタの目詰まりが生じる蒸気量を 1.0 kg とした感度解析②' においてはフィルタが閉塞するまでに高濃度 Cs が低濃度 Cs に置換されてしまい、図 1 1 のような状況とはならなかった。

表3 ベント停止時の残留 Cs 分布 [TBq]

条件	1号機 SGTS	2号機 SGTS	ベントライン
	分岐点1～1号機出口	分岐点2～2号機出口	分岐点1～分岐点2
測定結果 ^{※1}	(測定結果なし)	18	0.1
Cs 濃度一定、閉塞なし ^{※2}	0.04	0.26	0.14
① 初期 Cs 濃度 30 倍 ^{※3}	0.22	6.26	0.006
② 初期 Cs 濃度 70 倍 ^{※3}	0.50	11.2	0.015
③ 初期 Cs 濃度 150 倍 ^{※3}	1.1	3.70	0.007
②' 初期 Cs 濃度 70 倍 ^{※3} (閉塞蒸気量 1.0 kg)	0.6	0.02	0.02

※1: 2021 年度中間とりまとめ別添 3[1]の結果 (フィルタ部を除く) を参照

※2: 検討①のノミナル条件かつ Cs 濃度全時間で一定とした解析結果

※3: Cs 濃度以外は検討①のノミナル条件とした解析結果

5. 4 汚染分布と凝縮水の解析結果との対応関係について

条件①～③において図 1 1 のような汚染分布となったものの、1/2 号機の SGTS 配管全体が同程度に汚染する結果となっている。これは図 8 のように局所的に高汚染となる測定結果とは異なる。

また、フィルタの目詰まり蒸気量を 0.1 kg から 1.0 kg に増加させると、図 1 1 のような汚染分布とはならず、目詰まり蒸気量をこれ以上の設定値としても同様である。3 号機の SGTS フィルタトレインでの観測結果⁷から考えると、フィルタの目詰まりに要する蒸気量として 0.1 kg や 1.0 kg は小さいと考えられる。

さらに、このシナリオでは 1 号機 S/C～分岐点 1 の配管は低汚染となるが、この範囲において高線量箇所があるとのことであり⁸、この観測事実を説明できない。

以上より、ここで検討したシナリオでの汚染分布の説明は難しいと考える。しかし、事故当時も Cs 濃度等の時間変化はあったはずであり、それらの影響は今後の課題と考える。

⁷ 例えば、3 号機の SGTS フィルタユニット A 系に約 3 リットル、B 系に約 50 リットルのたまり水が確認されている [8]。

⁸ 第 27 回東京電力福島第一原子力発電所における事故の分析に係る検討会において、東京電力より 1 号機 S/C と分岐点 1 との間に高汚染箇所がある旨のコメントがあった。

6. 結論

6. 1 検討①の結論

測定結果に基づきベントガスの流量配分（図3）を設定したところ、1/2号機SGTSに有意な量の逆流が生じたとの結果となった。1/2号機SGTSにはGDが設置されているが、ベント時の状況下ではGDは逆流を妨げるほどの流動抵抗として働かないことを示している。これは2020年度のJAEAの検討[3]と同じ結論である。

測定結果に基づく流量配分を再現するように圧力損失係数（主にGD及びフィルタトレインでの圧力損失）をRELAP5解析で算出したところ、1号機SGTSよりも2号機SGTSの圧力損失係数が1~2桁小さい結果となった。流量配分に影響する不確かさ要因を変えた条件で計算しても、その傾向が変わらなかったことから、ベント時に2号機SGTSの方が1号機SGTSよりもGD及び／又はフィルタトレインの流動抵抗が小さい状態だったと考えられる。

6. 2 検討②の結論

RELAP5では配管へのCs吸着等を評価できないが、それに影響し得る蒸気凝縮についてRELAP5解析の結果を用いて整理を行った。RELAP5解析で有意な量の蒸気凝縮が発生した位置は、ベントライン、2号機SGTS配管、1号機S/C～流調弁の配管の3か所であった。低汚染のベントラインで蒸気凝縮が発生していることから、蒸気凝縮の発生位置と高汚染位置とは必ずしも一致しないことが分かった。しかし、低汚染のベントラインには凝縮水が残留せず、2号機SGTS配管内の高汚染位置2か所で凝縮水が残留していたことから、高汚染位置と凝縮水の残留位置とが一致することを示唆する結果となった。この結果からの類推として、ベントラインで発生した凝縮水は全てスタックへと流れ出ており、その凝縮水がスタック底部の高線量の一因となっている可能性がある。RELAP5解析の結果と汚染分布との定量的な比較のために、RELAP解析の結果において水と蒸気の質量に汚染量が比例すると仮定して汚染分布を算出したところ、測定に基づく汚染分布をオーダーレベルで再現でき（表2）、凝縮水の残留量と汚染量との間に相関があることを示唆している。

なお、もう一つの高汚染箇所であるスタックへの接続配管部においては、RELAP5解析では凝縮水が残留しなかった。この位置は配管が曲がる構造となっており、RELAP5ではそのような幾何形状に起因した複雑な流れを模擬できない。幾何形状等を考慮した詳細な流動解析、実験等ができれば、今回の解析では考慮されていない凝縮水、エアロゾルの挙動等について理解が深まると期待される。また、解析では1号機S/C～流調弁の配管においても蒸気凝縮が発生しており、凝縮水が残留するような配管構造があれば高線量となっている可能性がある。

6. 3 検討③の結論

検討①、②では、ベント期間中にベントガスの Cs 濃度や流動状態に大きな変化がないことを前提としてきた。検討③では、それらの時間変化を考慮することでベントラインよりも 2 号機 SGTS 配管が高汚染となりうるかを検討した。ベント初期のみ Cs が高濃度、それ以降は Cs が低濃度に変化し、また、SGTS フィルタが通過した蒸気を目詰まりにより完全閉塞するとの仮定の下で、RELAP5 解析を行った。その結果、初期の高濃度 Cs のガスが 2 号機 SGTS 配管に残留し、ベントラインには終盤の低濃度 Cs のベントガスが残留し、ベントラインよりも 2 号機 SGTS 配管の方が高汚染となる状況が再現された。

しかし、このシナリオでは 2 号機 SGTS 配管内が一様に汚染することになり、また、フィルタが閉塞する蒸気量を 0.1 kg から 1.0 kg に増加させると成立しないことを確認した。さらに、このシナリオでは 1 号機 S/C～分岐点 1 は低汚染になるはずであるが、その領域で高汚染箇所があるとの観測事実を説明できないことから、検討③のシナリオでは汚染分布を説明できないと結論づけた。

6. 4 全体的な結論

1. 2 節で示した検討目的に対して、今回の検討で得られた結論を以下に示す。

➤ **検討目的 1：測定結果に基づく配管内ベントガス挙動の再現、及び事故当時の 1/2 号機 SGTS の状態の推定**

検討①により、測定結果に基づき流量配分の設定を行ったところ、GD があるにもかかわらず 1/2 号機 SGTS へのベントガスの有意な逆流が生じる結果となった。ベント時の状況下においては GD が逆流を妨げるほどの流動抵抗として働かないものと推測される。また、この流量配分を RELAP5 解析で再現させることで事故当時のベントガス挙動を模擬した。流量配分を再現する 1/2 号機 SGTS の圧力損失係数を算出したところ、1/2 号機の間には有意な差があり、GD 及び/又はフィルタの状態に差があったことを示唆する結果が得られた。

➤ **検討目的 2：大半のベントガスが通過したベントラインよりも 2 号機 SGTS 配管の方が高汚染となった原因の解明**

検討②により、RELAP5 解析の結果を用いて蒸気凝縮に関する分析を行ったところ、凝縮水の残留位置が高汚染位置と一致することが分かった。また、ベントラインで凝縮した水がスタックへと流出する解析結果となっており、それがスタック底部の高線量の一因となったと類推される。汚染量が凝縮水の残留量に比例すると仮定して汚染分布を評価すると、測定結果をオーダー

レベルで再現できており、配管の高汚染と凝縮水の残留とに密接な関係があることを示唆している。

なお、2号機 SGTS の線量測定データと凝縮水の残留状況とを細かく比較すると、2号機のバタフライ弁近傍等、両者が一致しない部位が存在することを確認している。また、スタック手前の接続配管部の高汚染位置においては、RELAP5 解析では凝縮水の残留がなく、高汚染位置との対応が必ずしも一致していない。この位置には配管の曲がり構造があり、RELAP5 解析では評価できない幾何形状の効果を考慮した流体解析や実験等により検討することで、この位置での汚染メカニズムの理解が深まる可能性がある。さらなる分析を行うには、配管・弁の幾何形状に加え、汚染プロセスも考慮したより詳細な検討が必要と考える。

7. 今後の調査に期待すること

この検討では、測定データに基づき RELAP5 解析を行い、6の結論を得た。不明な点は推測を重ねて検討したが、今後の調査でそのような推測の正否が分かれば、事故時の状況の把握が進むと考える。ここでは、今回の検討から今後の調査で確認できると有用と思われる点を列挙する。

7. 1 GD、フィルタトレイン

検討①で、2号機 SGTS の圧力損失係数が1号機 SGTS よりも小さいとの推定結果が得られた。圧力損失の主要素である GD とフィルタトレインの状態が1/2号機で異なっているか、今後の調査により確認できることを期待する。

また、3号機同様にフィルタトレインでのたまり水が確認されれば、フィルタ部に到達した蒸気量やフィルタの目詰まり状況等の推定に有用と考える。

7. 2 2号機バタフライ弁

2号機のバタフライ弁で高線量が測定されており、検討②により凝縮水が残留する位置と一致することを示した。しかし、測定結果は弁の近傍に限定されている一方で、RELAP5 解析での凝縮水の残留位置はそれよりも広い範囲となっている。より詳細な汚染状況（配管の上部・底部の汚染状況の違い、弁から離れた位置の汚染状況等）が確認できれば、汚染メカニズムの検討に有用と考える。

7. 3 2号機 SGTS 水平配管部

検討②で高汚染箇所と凝縮水の残留位置との一致を示したが、今回の検討結果からでは凝縮水の残留が汚染の原因と特定できない。配管の底部が上部よりも高汚染

となっていれば凝縮水が汚染メカニズムと関連することを支持するデータとなり得る。また、流れ方向の汚染量の変化が分かれば、汚染メカニズムの検討に有用と考える。

7. 4 1号機 S/C から流調弁の間の配管

検討②で、RELAP 解析において1号機 S/C から流調弁の間の配管で有意な蒸気凝縮が発生し、その近辺に凝縮水が残留する結果となった。この範囲の配管で、凝縮水が残留しそうな位置に高汚染箇所があれば、凝縮水の残留が汚染の原因であることを支持するデータとなり得る。また、検討③のように事故分析の正否の判断に使える可能性がある。

参考文献

- [1] 木原昌二、“1/2号機 SGTS 配管系の汚染状況”、東京電力福島第一原子力発電所事故の調査・分析に係る中間取りまとめ ～2019年9月から2021年3月までの検討～ 別添3、Mar. 2021.
- [2] 東京電力ホールディングス株式会社、“福島第一原子力発電所1号機及び2号機非常用ガス処理系配管の一部撤去について”、第22回東京電力福島第一原子力発電所における事故の分析に係る検討会 資料5-2、Sep. 2021.
- [3] 与能本泰介、竹田武司、丸山結、“ベントガスの挙動に関するシミュレーション”、東京電力福島第一原子力発電所事故の調査・分析に係る中間取りまとめ ～2019年9月から2021年3月までの検討～ 別添3-1、Mar. 2021.
- [4] U. S. Nuclear Regulatory Commission, “RELAP5/MOD3.3 Code Manual”, NUREG/CR-5535/Rev.1, 2001.
- [5] 石川淳、森山清史、“BWR4/Mark-I プラントのヨウ素化学挙動を考慮した格納容器内ソースターム評価に係わる検討”、JAEA-Research 2010-051、2011.
- [6] 東京電力ホールディングス株式会社、“1/2号機 SGTS 配管撤去に向けた調査結果について”、第84回特定原子力施設監視・評価検討会 資料4-3、Oct. 2020.
- [7] 尾崎誠、杉本憲治、金川昭、“高性能エアフィルタの苛酷時健全性試験、(IV)多湿試験”、日本原子力学会誌、Vol. 28、No. 6、1986.
- [8] 東京電力ホールディングス株式会社、“1-4号機 SGTS 室調査の結果について”、第21回東京電力福島第一原子力発電所における事故の分析に係る検討会 資料5-2、July 2021.

(別添 3-1)

原子炉ウェル内の線量率と原子炉キャビティ差圧調整ラインの状態

原子力規制庁原子力規制部

東京電力福島第一原子力発電所事故対策室 木原 昌二

1. 背景及び目的

東京電力は、事故分析及び廃炉作業への知見拡充を目的に、原子炉キャビティ差圧調整ラインを用いて、2号機シールドプラグ下部の原子炉ウェル内の調査¹を実施している。

当該原子炉キャビティ差圧調整ラインは、運転中に原子炉キャビティ（原子炉ウェル）とオペレーションフロアの差圧を調整するラインで、空気作動弁を経て原子炉建屋換気空調系の排気ダクトに接続されている。

そのため、当該空気作動弁が開状態となっていると、原子炉ウェルと原子炉建屋換気空調系ダクトが繋がった状態となり、原子炉格納容器から原子炉ウェルへ漏えいした放射性物質を含む水蒸気が原子炉建屋4階に放出された可能性が出てくる。なお、空気作動弁は通常時開、異常時閉の設計であり、制御用空気が喪失した場合には空気作動弁は閉じた状態になる。

調査チームは、2号機の原子炉キャビティ差圧調整ラインに設置されている空気作動弁の調査を実施²するとともに、当該系統の空気作動弁の作動状況を比較検討するために4号機の原子炉キャビティ差圧調整ラインの空気作動弁の調査を実施³した。3号機については、当該配管及び空気作動弁が設置されている原子炉建屋4階西側フロアは高線量であり、かつ、水素爆発等による建屋の破損により階段等が喪失していることから、人の立ち入りができない状態であり、空気作動弁の作動状態の確認はできていない。

¹ 2021年5月20日、24日、6月23日に実施。

引用文献等 1) 福島県原子力発電所の廃炉に関する安全監視協議会（令和3年度第3回） 資料3-2
2号機シールドプラグ高濃度汚染への対応状況について、2021年9月9日 東京電力ホールディングス株式会社 参照

引用文献等 2) 東京電力福島第一原子力発電所における事故の分析に係る検討会（第21回会合） 資料5-3
2号機シールドプラグ高濃度汚染への対応状況について、2021年7月8日 東京電力ホールディングス株式会社 参照

² 2号機については、2020年10月8日に実施。

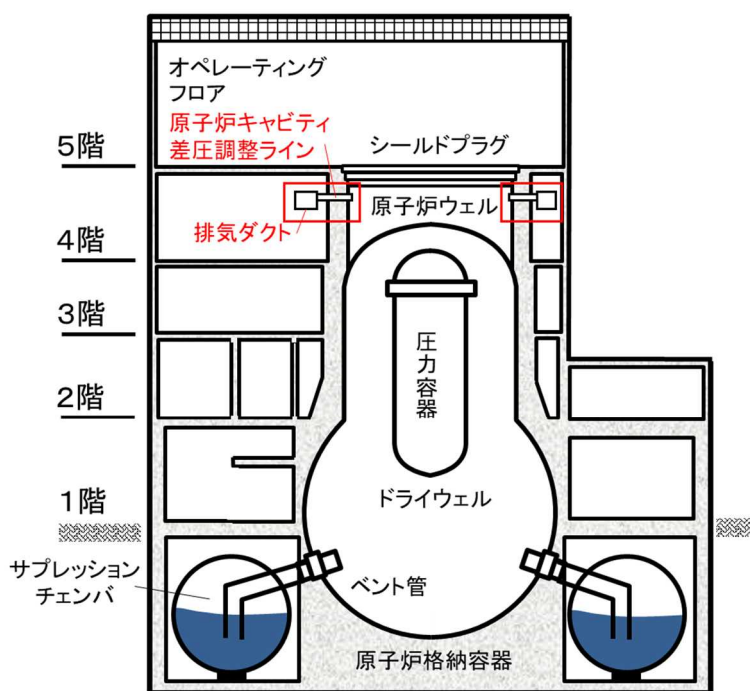
³ 4号機については、2021年6月24日、7月20日に実施。

2. 調査の概要

東京電力による2号機原子炉ウェル内の調査は、原子炉ウェル内の映像取得及び線量測定を行うとともに、2号機原子炉建屋4階西側の原子炉キャビティ差圧調整ラインの配管内部の調査及び配管内の堆積物やダクト腐食部のサンプル採取、同建屋4階東側の原子炉キャビティ差圧調整ライン及びダクトの腐食等の外観調査が実施されている。

東京電力による具体的な原子炉ウェル調査の内容及び方法については、引用文献等の東京電力資料⁴に記載されている。

2号機の原子炉キャビティ差圧調整ラインについては、図1のように原子炉建屋4階の西側フロア及び東側フロアに配置されており、調査チームは、西側の原子炉キャビティ差圧調整ライン及び空気作動弁⁵の外観調査を実施している。



2号機原子炉建屋
(東西断面)

図1 2号機原子炉ウェル及び原子炉キャビティ差圧調整ラインの概要図

4 引用文献等 2) 東京電力福島第一原子力発電所における事故の分析に係る検討会 (第21回会合) 資料5-3 2号機シールドプラグ高濃度汚染への対応状況について、2021年7月8日 東京電力ホールディングス株式会社

5 2号機原子炉建屋4階西側原子炉キャビティ差圧調整ラインの空気作動弁 (BF2-12弁)

2号機原子炉建屋4階西側フロアの原子炉キャビティ差圧調整ライン及び空気作動弁の設置状況等は図2のとおり。

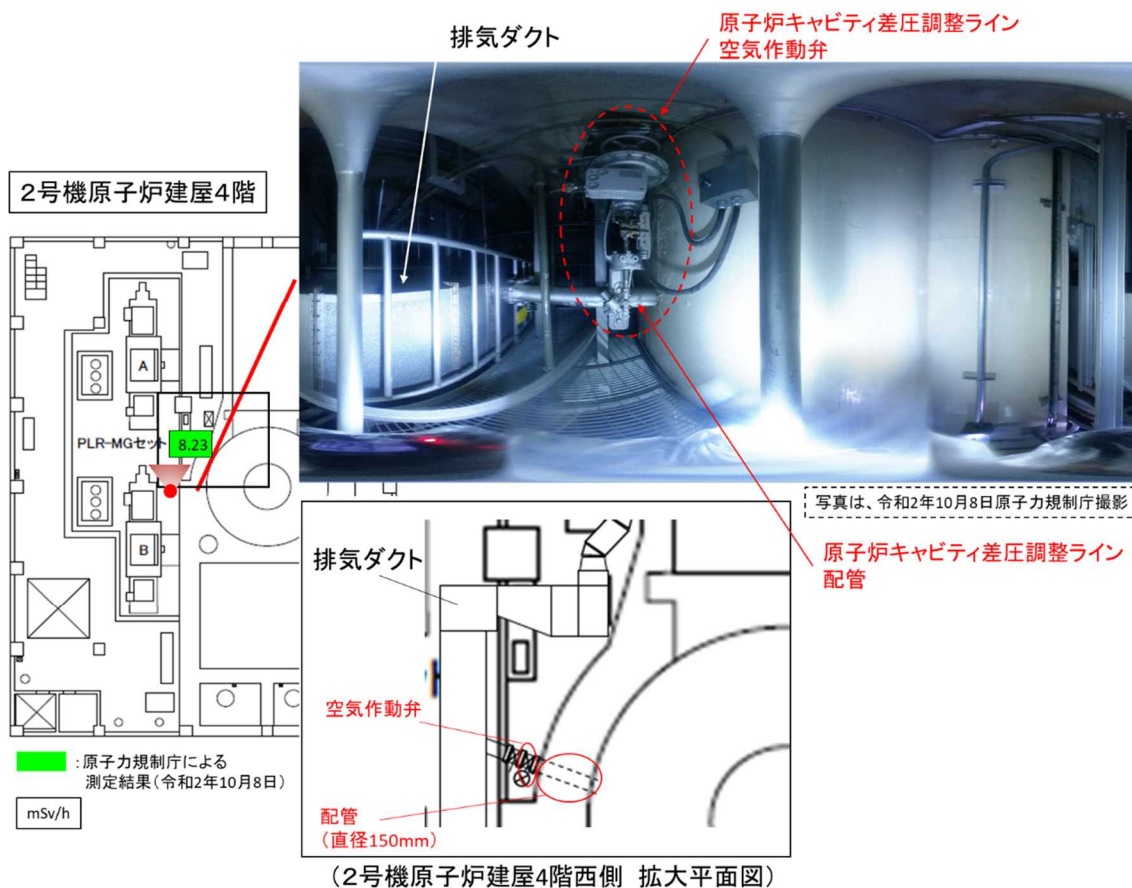


図2 2号機原子炉建屋4階西側フロアの原子炉キャビティ差圧調整ラインの設置状況

2. 現地調査の結果

(1) 東京電力による2号機原子炉ウェル内調査等の結果

東京電力による2号機原子炉ウェル内の調査の結果、2号機原子炉ウェル内の線量については、最大で530mSv/hであった。また、原子炉ウェル内の線量は、ウェル上部(測定点①:74.6mSv/h)からウェル床面(測定点⑨:350mSv/h)に向かって徐々に高くなる傾向が確認された。(図3参照)

3-①. 原子炉ウエル調査結果（線量測定結果）

- 水中線量計で測定したウエル内の線量については、最大で530mSv/hであった。
- ポケット線量計およびルミネスバッジは、累積線量をウエル内滞在時間で換算した値であるため、参考値ではあるが、概ね水中線量計と同等の値であることを確認した。なお、赤色シンチレーターの測定値についても、コバルト60で校正しているため、参考値ではあるが、概ね水中線量計と同等の値であることを確認した。
- ウエル内の線量はウエル上部（測定点①）からウエル床面（測定点⑨）に向かって徐々に高くなる傾向であった。

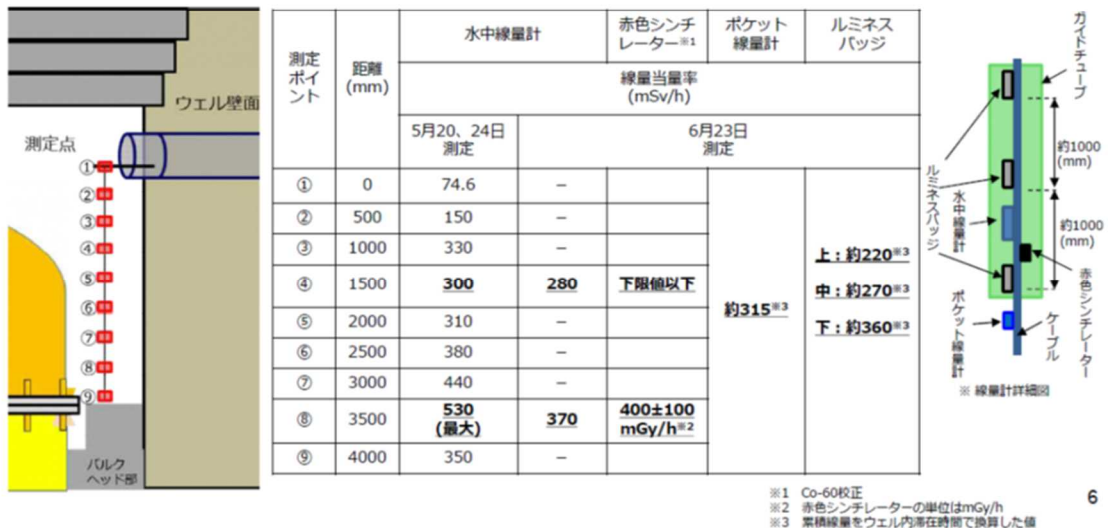


図3 2号機原子炉ウエル調査結果（線量測定結果）

(1-1) 東京電力による2号機原子炉キャビティ差圧調整ラインの調査

東京電力による2号機原子炉建屋4階西側フロアの原子炉キャビティ差圧調整ラインの配管内部の調査及び配管内の堆積物やダクト腐食部のサンプル採取の結果、ダクト上部の劣化部分、ダクト点検口裏のゴムパッキン部分及び配管内堆積物の試料が採取された。また、配管内部については、空気作動弁の上流側配管（SUS材）には、炭素鋼の配管や弁箱で確認された表面荒れや堆積物は確認されなかった。空気作動弁については、開状態であることが確認された。

原子炉キャビティ差圧調整ラインが接続されている原子炉建屋換気空調系の排気ダクトについては、ダクトに腐食等の劣化やダクト内部の底面及び側面に付着物が確認された。

同様に、東京電力による2号機原子炉建屋4階東側フロアの原子炉キャビティ差圧調整ライン及びダクトの腐食等の外観調査の結果、作業エリアの空間線量は約10mSv/hであり、西側の作業エリアの約12mSv/hと同程度であった。ダクトについては、ダクト側面、下部及び点検口に、西側のような劣化は確認されなかった。

東側フロアの原子炉キャビティ差圧調整ラインの空気作動弁⁶は西側フロアと同様に開状態であることが確認された。

原子炉キャビティ差圧調整ラインの線量調査の結果は、西側フロアでは配管下部で最大約 60mSv/h(2021 年 3 月 5 日)、東側フロアでは配管下部で最大約 51mSv/h(2021 年 5 月 20、24 日) が確認された。

東京電力によるこれらの調査結果の詳細については、引用文献等の東京電力資料⁷に記載されている。

(1-2) 東京電力による 1 号機原子炉キャビティ差圧調整ラインの調査

原子炉ウェル及び原子炉キャビティ差圧調整ラインの調査については、東京電力が 2019 年 8 月に 1 号機シールドプラグ下の線量測定及び同年 11 月に 1 号機原子炉キャビティ差圧調整ラインの調査を実施している。

1 号機のシールドプラグ下の線量測定については、測定位置によって差があるが最大約 670mSv/h から約 1190mSv/h の空間線量率が測定されている。

また、1 号機原子炉キャビティ差圧調整ラインの配管出口部周辺の線量測定では、2600mSv/h(配管出口下 50cm) の空間線量率が測定されている。

なお、1 号機原子炉キャビティ差圧調整ラインの空気作動弁については、閉状態であることが確認されている。

東京電力による 1 号機原子炉ウェル等の調査内容の詳細については、引用文献等の東京電力資料⁸に記載されている。

(2) 原子力規制庁による原子炉キャビティ差圧調整ラインの調査等

調査チームによる 2 号機及び 4 号機の原子炉キャビティ差圧調整ラインの空気作動弁の調査の結果、2 号機と 4 号機で空気作動弁の動作を示すリミットスイッチの指示が異なること及び東京電力の 2 号機西側原子炉キャビティ差圧調整ラインの配管内部の調査結果から空気作動弁が開状態であることが確認されていることから、現在の状態は、2 号機西側原子炉キャビティ差圧調整ラインの空気作動弁は

⁶ 2 号機原子炉建屋 4 階東側原子炉キャビティ差圧調整ラインの空気作動弁 (BF2-13 弁)

⁷ 引用文献等 2) 東京電力福島第一原子力発電所における事故の分析に係る検討会 (第 21 回会合) 資料 5-3 2 号機シールドプラグ高濃度汚染への対応状況について、2021 年 7 月 8 日 東京電力ホールディングス株式会社 参照

⁸ 引用文献等 3) 東京電力福島第一原子力発電所における事故の分析に係る検討会 (第 10 回会合) 資料 6-3 1 号機原子炉格納容器上蓋の状況確認について、2020 年 2 月 4 日 東京電力ホールディングス株式会社 参照

開状態、4号機西側原子炉キャビティ差圧調整ラインの空気作動弁は閉状態であると判断した。(図4参照)

また、2号機西側原子炉キャビティ差圧調整ラインの空気作動弁付近の空間線量は約8mSv/h⁹であった。



図4 2号機及び4号機西側原子炉キャビティ差圧調整ライン
空気作動弁調査(外観調査)

3. まとめ

東京電力におけるこれまでの調査・分析では、2号機原子炉ウエル内の線量については、最大で530mSv/h(2021年5月)であり、1号機原子炉ウエルでの2600mSv/h(2019年11月)に比べて低い線量率となっている。さらに、2号機原子炉キャビティ差圧調整ラインの配管下部では60mSv/h、ダクト下部では80mSv/hとなっており、2号機原子炉建屋4階西側エリアの約3mSv/h~10mSv/h¹⁰の空間線量率よりも高い値が確認されている。

また、原子炉キャビティ差圧調整ラインの空気作動弁については、1号機は閉状態、2号機は開状態であることが確認されている。東京電力は、2号機の当該弁は手動操作で開状態になっているとしている。(図5参照)

この2号機の手動操作による開状態については、いつ操作が行われたのか不明であり、周辺の空間線量率及び空気作動弁の設計を踏まえると、事故時に電源及び制御用空気が喪失した2号機では、閉状態であった可能性も十分考えられる。

⁹ 2020年10月8日の現地調査時に測定。

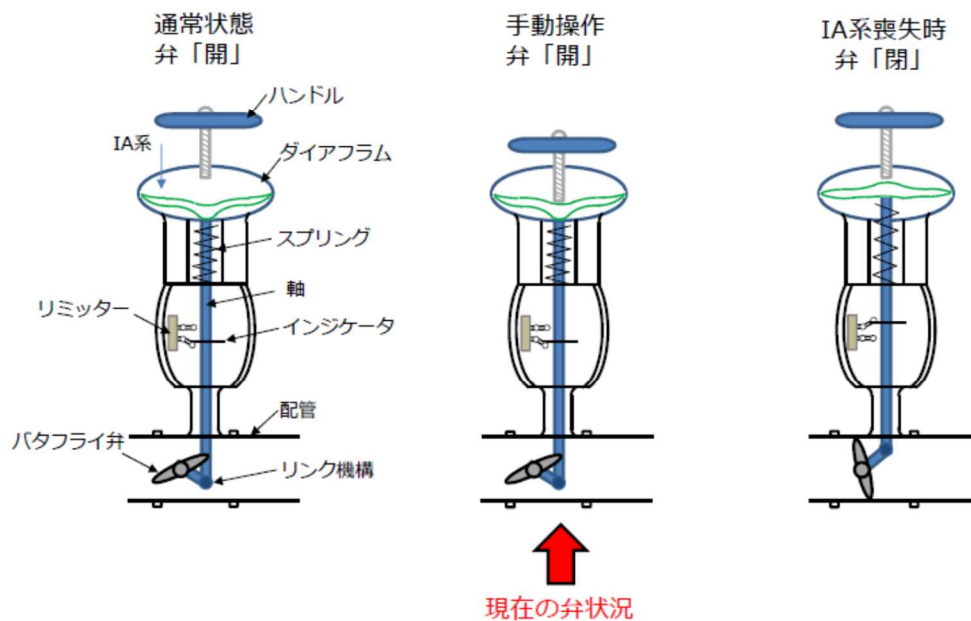
¹⁰ 2020年9月10日、10月8日原子力規制庁による測定

これらの調査結果から、2号機原子炉キャビティ差圧調整ラインの空気作動弁は、事故時にいつのタイミングで開状態に操作されたのかは不明であるが、原子炉キャビティ差圧調整ラインの線量率は、2号機原子炉建屋4階西側エリアのものよりも高く、ダクトの腐食等の劣化の状態も踏まえると、放射性物質を含む水蒸気が流れたものの、その量は限られたものであることを示唆している。ただし、2号機原子炉ウエルの空間線量は、1号機に比べても低く、2号機原子炉建屋5階のオペフロの高い空間線量率に寄与したとは考えにくい。

<再掲 第91回 特定原子力施設監視・評価検討会資料>

(参考) BF2-12弁 イメージ図

TEPCO



34

図5 2号機西側原子炉キャビティ差圧調整ライン空気作動弁の状態 (イメージ図)

引用文献等

- 1) 福島県原子力発電所の廃炉に関する安全監視協議会 (令和3年度第3回) 資料3-2 2号機シールドプラグ高濃度汚染への対応状況について、2021年9月9日 東京電力ホールディングス株式会社

<https://www.pref.fukushima.lg.jp/site/genan02/genan582.html>

- 2) 東京電力福島第一原子力発電所における事故の分析に係る検討会（第 21 回会合）
資料 5-3 2号機シールドプラグ高濃度汚染への対応状況について、2021年7月
8日 東京電力ホールディングス株式会社
<https://www.nra.go.jp/data/000358693.pdf>
- 3) 東京電力福島第一原子力発電所における事故の分析に係る検討会（第 10 回会合）
資料 6-3 1号機原子炉格納容器上蓋の状況確認について、2020年2月4日 東
京電力ホールディングス株式会社
<https://www.nra.go.jp/data/000300424.pdf>

(別添 3-2-0)

2号機シールドプラグ上層と中間層の間の汚染特定に係る分析に関する 別添資料の構成

原子力規制庁原子力規制部

東京電力福島第一原子力発電所事故対策室

平山英夫、近藤健次郎、鈴木征四郎、吉田善行、林克己、岩永宏平

1. はじめに

2号機オペフロにおけるシールドプラグ上層と中間層の間の汚染の特定については、オペフロを含め原子炉建屋が健全であることから床・天井・及び壁に Cs-137 で汚染した線源が存在し、現時点でもオペフロ内部、特にシールドプラグ上部の周辺線量当量率が高く、作業者が立ち入って測定することができない。このような制約条件下において以下に示す測定を行い、汚染の特定に用いることが出来る情報を収集した。

○オペフロ空間内での周辺線量当量率測定

(床面から 150 cm 高さ、大凡シールドプラグ床全体)

○コリメータ付き γ 線線量計による測定 (床面から 30.5cm 高さ、床面直径 300mm)

○ロボットによるスミア

○ γ カメラによる測定

○ β 線 70 μ m 線量計による表面汚染密度の測定

○シールドプラグ上層上面での周辺線量当量率測定

○シールドプラグ上層に掘削した穿孔(穴)内部での線量率測定

上記に示した手法や条件を加味・組み合わせて汚染の特定を試みている。また、穿孔した穴には鉄筋等の存在も影響していることが測定の段階で判明するなど、都度状況を反映する作業も行っており、以降の【別添 3-2】シリーズは時系列を中心に編纂している。一方、本文では最終的な分析の状況及び結果を報告しているので以下にその本文に対する別添の構成・関係を示す。

2. 今回に取り組みで明らかになったこと

(1) 鉄筋の影響が無視できないこと【別添 3-2-4 の 6-2】

(2) コリメータ付き γ 線線量計応答(周辺線量当量率が測定できていない)【別添 3-2-1 の 3】

(3) オペフロ床の汚染は大まかにはシールドプラグと他の場所で差はない(内壁汚染状況の把握)【別添 3-2-5-9】

- (4) シールドプラグの継ぎ目にCs-137の汚染があることは間違い無い（継ぎ目の上部でβ線線量率が高い）が、全体的にはその寄与は限定的である。【別添 3-2-5-3】

3. 2. で明らかになったことを踏まえた検討

オペフロ内部及びシールドプラグの穴内部の線源は基本的に「シールドプラグ上層と中間層の間の汚染」と「オペフロ室内汚染」によるものと考えられる。この観点を基に推定を行なった。

- (1) 150cm位置及びコリメータ付きγ線線量計を使った推定の再検討

【別添 3-2-1 及び別添 3-2-4 の 6-2】

- ・実効的なコンクリート密度で鉄筋の影響を加味
- ・シールドプラグ上部の室内汚染による寄与の再検討（150cm測定）
- ・コリメータ付きγ線線量計の再評価

150 cm位置での周辺線量当量率を用いた推定値の平均からシールドプラグ上層と中間層の間の汚染は全体で84PBqであることが推定された。

- (2) シールドプラグの穴内部の周辺線量当量率を用いた推定

2-1 測定結果で3つのパターンにより推定【別添 3-2-4 の 4-2】

2-2 egs5の計算での鉄筋影響の検討（床面から7cmより浅い位置では、シールドプラグ上層と中間層の間の汚染の寄与の減衰傾向への鉄筋の影響は無視できる）【別添 3-2-4 の 4-1】

2-3 床面以外の室内汚染の推定（QAD-CGGP2の計算結果と、シールドプラグ上部に鉄遮へい設置後の測定との比較から）【別添 3-2-5-4】

2-4 シールドプラグ上層と中間層の間と床表面という2つの線源によるとして実測データ（床以外の内壁寄与を引いた周辺線量当量率）を使ってシールドプラグ上層と中間層の間の汚染密度を推定【別添 3-2-4 の 3】

※床面の寄与による穴内部の減衰については主要な線源位置と形態（点状、均一分布）を変えて検討

2-5 床面汚染の寄与による減衰係数により最大でもファクター2程度の差【別添 3-2-4 の 4-3 (3)】

2-6 シールドプラグ上層と中間層の間の汚染密度は場所により大きなばらつきがあることが分かった【別添 3-2-4 の 4-3 (3)】

2-7 シールドプラグ上層と中間層の間の汚染密度と床表面での線量当量率の間には「定量出来るまでの相関はない」が、大まかには両者は対応しており、床表面のマッピングからシールドプラグ上層と中間層の間の汚染密度分布の大まかな状況を推定することは可能【別添 3-2-4 の 5-4】

- (3) 3種類の測定方法の比較は、線源（シールドプラグ上層と中間層の間）との距離が短くなるほど汚染密度のばらつきが広がるという傾向が見られ、全体としては対応した結果となっている。【別添 3-2-4 の 7】

4. 3号機への適用

2号機で明らかになった「鉄筋」の影響を加味した検討を3号機での測定結果に反映した。測定対象領域が非常に狭いので適用には無理があるが、測定された6箇所の平均を使用すると全体で63 PBqとなる。(2号機の検討を踏まえた3号機シールドプラグ上層と中間層の間の汚染)【別添 3-2-5-10】

(別添 3-2-1)

2号機シールドプラグの上層と中間層の間に沈着しているCs-137放射能の推定

(1) シールドプラグ上部での測定

原子力規制庁原子力規制部

東京電力福島第一原子力発電所事故対策室

平山英夫、近藤健次郎、鈴木征四郎、吉田善行、林克己、岩永宏平

1. はじめに

2021年に東京電力が実施したシールドプラグ上層の穿孔により取り出された13個のコンクリートコア表面の汚染密度が最大でも $5.0E+5Bq/cm^2$ 程度であった(別添3-2-3参照)ことから、シールドプラグ上部の高い周辺線量当量率はシールドプラグ上層と中間層の間に沈着しているCs-137等によることは確認されたと言える。どれだけの放射能がどのように沈着しているかを知るために、様々な測定が必要であるが、2号機の場合には以下のような制約がある。

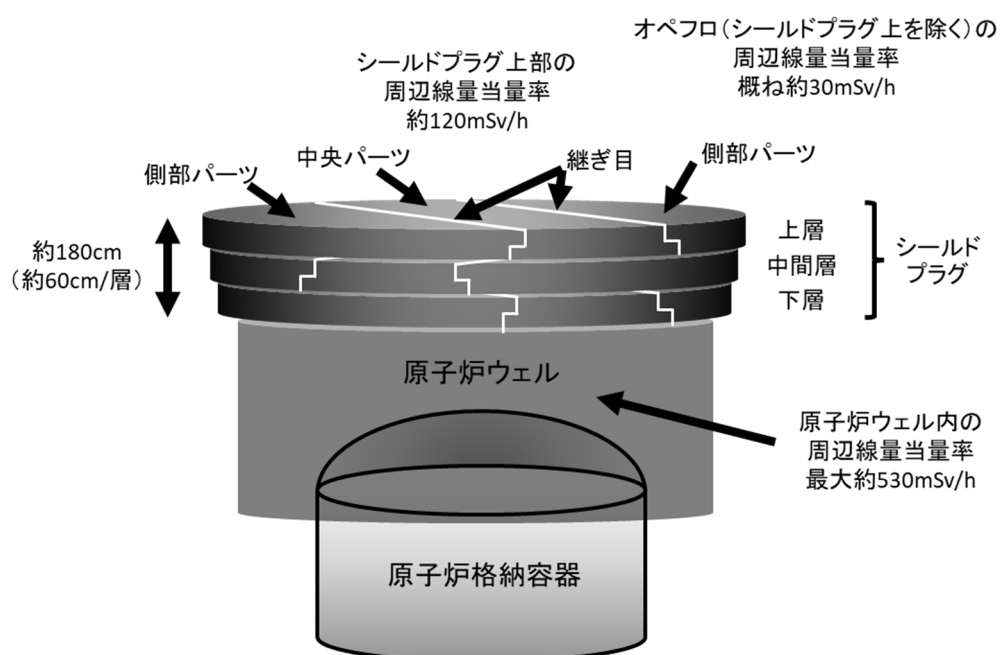


図1 原子炉ウェル及びシールドプラグの配置

- 2号機ではオペレーションフロア(以下「オペフロ」という。)が健全であることから、床、天井及び壁にCs-137で汚染した線源が存在する。
- 現時点でもオペフロ内部、特にシールドプラグ上層上部の周辺線量当量率が高く、

作業者が立ち入って測定することができない。

- 2号機は建物が健全であることから大型の重機による作業や測定はできない。
- 結果として、可能な手段は、小型のロボットで操作可能な手法に限定される。

このような制約条件の下で、

- オペフロ内での周辺線量当量率測定（床面から 150 cm 高さ、大凡シールドプラグ上層上面全体）
- コリメータ付き γ 線線量計による測定（床面から 30.5cm 高さ、床面直径 300mm）
- ロボットによるスミア
- γ カメラによる測定
- β 線 70 μ m 線量計による表面汚染密度の測定
- シールドプラグ上層上面での周辺線量当量率測定
- シールドプラグ上層の穿孔により生じた穴の内部での線量率測定

が行われ、その解析が行われた。個々の測定にはそれぞれ利点と欠点があり、そのことを理解した上で総合的に考えることが必要である。

半径 6m という広いシールドプラグの上層と中間層の間の全体の放射能を測定するためには、シールドプラグ全体からの寄与が含まれる床面からの十分離れた位置での「隙間からの光子による線量当量率」の測定が適している。シールドプラグからの距離が十分ある場合には、バルクとしてのコンクリートが対象となるので、密度以外の微細な構造は考慮する必要はない。しかし、オペフロ内部の汚染の寄与が含まれることから、その見積もり評価が重要となる。また、この手法ではシールドプラグ上層と中間層の間の汚染分布の情報を得ることはできない。

シールドプラグ上層と中間層の間の汚染分布の状況を知るためには、線量に寄与する領域を限定した測定をシールドプラグの表面近くやシールドプラグ内部で測定することが必要になる。コリメータ付き γ 線線量計や穴内部での測定が相当する。コリメータ付き γ 線線量計は、線量計の位置が床面から 30.5cm 離れているのでコンクリート内の微細構造の影響は少ないが、床面汚染による寄与を見積もることが必要となること、対象領域がシールドプラグの大きさに比べて非常に狭いのでシールドプラグ全体の汚染状況を知ることが難しい。穴の内部の測定は、オペフロ内部の汚染の影響を受けにくい測定であり、コリメータ付き γ 線線量計よりは広い領域（大凡半径 50cm の領域）の汚染分布の情報を得ることができるが、シールドプラグ全体の情報を得ることは難しい。また、コンクリート内部での測定であることから、シールドプラグ内の微細構造の影響を受けやすい。

シールドプラグ上部の周辺線量当量率測定は、限られた場所の測定結果と対応することによりシールドプラグ上層と中間層の間の汚染密度との相関が得られればシールドプラグ全体の放射能の推定に使用できるが、測定された周辺線量当量率にはオペフロ内

部の汚染の寄与が含まれていること、測定点が多いとはいえシールドプラグ全体から見れば限られた領域の情報という制約がある。

シールドプラグ上層と中間層の間の汚染に関する検討は、上記の制約の下で可能な情報の取得や計算による分析を積み重ね情報を増やす取り組みである。以下では、この観点からシールドプラグ上部での周辺線量当量率の測定結果を用いて 2022 年度に実施した検討結果をまとめた。

2. 150 cm 位置での周辺線量当量率測定結果の検討

2-1 オペフロ内面（床、天井、壁）の汚染の検討

別添 3-2-5-9 で詳細に検討しているように、天井全体の汚染密度についてはリメータ付き γ 線線量計を天井に向けて使用することにより、包括的な情報を取得することができ、平均的な汚染密度として $3.6E+5Bq/cm^2$ が得られた。また、床については、これまでに得られていた情報から平均的な汚染密度として $2.5E+5Bq/cm^2$ 程度と推定した。しかしながら、オペフロ内の東西南北の壁については、新たな測定データを取得することができなかったこと、一様な汚染密度を仮定して計算した各壁面からの寄与から、東西の壁の寄与が大きくこれまでに得られているそれぞれの汚染密度を用いると実測値を過大評価となることが分かった。各壁面の汚染が均一であるモデルが影響している可能性があることから、東西南北の壁については新たな測定方法を含めた検討が必要である。

これまでは、「オペフロ内壁の汚染による寄与としては、シールドプラグ以外の領域は、シールドプラグ東側の一部を別にすると 20 から 30 mSv/h のレベルで場所による違いは小さい」という状況からシールドプラグ上部でのオペフロ内壁の汚染による寄与として 30 mSv/h を使用した。しかし、内壁の汚染密度の検討から、東壁は他の領域より汚染密度が高い可能性があり、東壁に近い領域の線量率が高い可能性があることが判った。この状況から「シールドプラグ東側の一部を別にして内壁の寄与を推定する」よりも、「東側の測定結果を基に内壁の寄与を推定する」方が適切と考えられる。シールドプラグの東側の 4 箇所平均 61mSv/h を内壁の寄与とする。

シールドプラグ中心軸上で上層と中間層の間の半径 6m の汚染によるシールドプラグ上層上面から高さ 150cm 位置での周辺線量当量率として、これまではコンクリート厚さ 60cm とした計算結果を使用していたが、コンクリートの厚さが 61cm ということが明確になったので、コンクリート密度が $2.1 g/cm^3$ の場合の計算結果 ($1.03E-6 \mu Sv/h$ per Bq/cm^2 (Cs-137 が $1Bq/cm^2$ で Cs-134 と Sb-125 が $0.1Bq/cm^2$)) を使用する。

シールドプラグの中心軸上でシールドプラグ上層上面から高さ 150cm 位置での周辺線量当量率に半径 6m の線源のどの領域が寄与しているかを汚染密度が一様な場合について、線源半径依存性を図 2 に示す。半径 3m までの領域で全体の約 90%の周辺線量当量率であること、割合は小さいが 6m まで寄与が見られることが分かる。半径 3m までの

寄与が中心であることから、シールドプラグ上部の位置によりシールドプラグ上層と中間層の間の汚染密度が一様であっても周辺線量当量率が異なる可能性がある。表1に、シールドプラグの南北の中心位置から東方向に1, 3, 5m離れた位置での周辺線量当量率の比較を示す。東方向への移動距離（表1中のY position）が大きくなる（シールドプラグの端に近い場所）と周辺線量当量率は小さくなるが、5mでも20%程度と影響は小さい。測定箇所の正確な位置が不明であること、シールドプラグ上層と中間層の間の汚染密度に分布がある可能性があるため、以下ではシールドプラグ上部の位置依存は考慮せず、中心軸上と同じであるとして検討する。

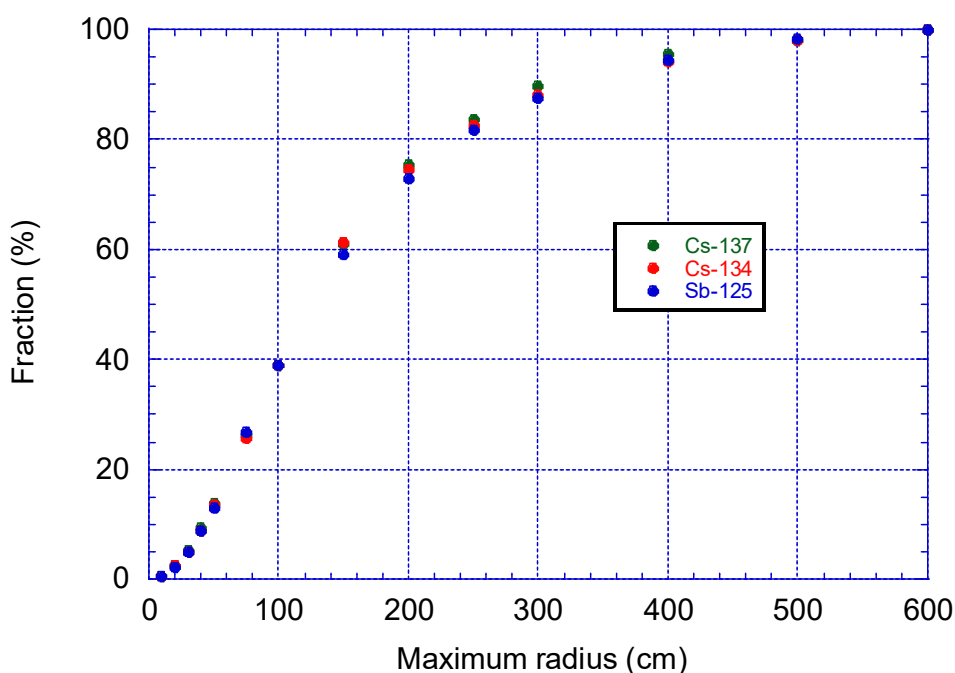


図2 シールドプラグ中心軸上150 cm位置での周辺線量当量率に寄与する線源領域

表1 シールドプラグ上150 cm位置での周辺線量当量率の場所依存

Y position	Cs-137	Cs-134	Sb-125	Total*	Ratio to
m	$\mu\text{Sv/h per Bq/cm}^2$				0 m
0	$7.14\text{E-}07 \pm 1.32\text{E-}08$	$2.90\text{E-}06 \pm 4.50\text{E-}08$	$2.75\text{E-}07 \pm 9.51\text{E-}09$	$1.03\text{E-}06$	1.00
1	$7.12\text{E-}07 \pm 1.31\text{E-}08$	$2.89\text{E-}06 \pm 4.49\text{E-}08$	$2.75\text{E-}07 \pm 9.46\text{E-}09$	$1.03\text{E-}06$	1.00
3	$6.99\text{E-}07 \pm 1.28\text{E-}08$	$2.79\text{E-}06 \pm 4.29\text{E-}08$	$2.66\text{E-}07 \pm 9.06\text{E-}09$	$1.01\text{E-}06$	0.97
5	$5.71\text{E-}07 \pm 1.09\text{E-}08$	$2.29\text{E-}06 \pm 3.64\text{E-}08$	$2.18\text{E-}07 \pm 7.58\text{E-}09$	$8.22\text{E-}07$	0.80
		*1 Bq/cm ² of Cs-137+0.1 Bq/cm ² of Cs-134 and Sb-125			

シールドプラグ上部の測定値（12点）は79mSv/hから148mSv/hで平均は119.3mSv/hである。オペフロ内の汚染による線量率を61mSv/hとすると、シールドプラグ上層と中

間層の間の汚染による線量率は 58.3mSv/h なので、Cs-137 の平均汚染密度は 5.65E+10 (1.74E+10~8.43E+10) Bq/cm² である。平均の汚染密度の場合半径 6m のシールドプラグ全体では 64PBq となる。

2-2 コンクリートの密度の影響

厚さ 61cm のコンクリートによる γ 線の減衰はコンクリートの密度に依存する。これまでの推定では、コンクリートの密度として下限値である 2.1g/cm³ を使用してきた。実際のシールドプラグの実効的密度の情報は無いが、実効的密度がより高い可能性がある。密度の影響を見るために、実効的密度が 2.2 又は 2.3g/cm³ の場合の 1Bq/cm² 当たりの周辺線量当量率を比較した、結果を表 2 に示す。

表 2 コンクリートの密度の違いによる床上部 150 cm での
周辺線量当量率の比較

密度 g/cm ³	Cs-137	Cs-134	Sb-125	Total*	Ratio to 2.1 g/cm ³
	$\mu\text{Sv/h per Bq/cm}^2$				
2.1	7.14E-07 ± 1.32E-08	2.90E-06 ± 4.50E-08	2.75E-07 ± 9.51E-09	1.03E-06	1.00
2.2	5.28E-07 ± 1.11E-08	2.29E-06 ± 3.96E-08	1.85E-07 ± 7.28E-09	7.75E-07	0.75
2.3	4.03E-07 ± 9.55E-09	1.75E-06 ± 3.31E-08	1.51E-07 ± 6.96E-09	5.94E-07	0.58

3. コリメータ付 γ 線線量計による測定結果の検討

コリメータ付 γ 線線量計による測定は、オペフロ内の汚染からの寄与が、対象領域の限られた領域（コリメータの視野領域）であることから、シールドプラグ上層と中間層の間の Cs-137 汚染密度の推定に使用できる。しかしながら、別添 3-2-5-9 で述べたように、コリメータ付 γ 線線量計で測定される線量率が周辺線量当量率と異なることから、計算で求めた周辺線量当量率から測定される線量率への換算が必要となる。床面の汚染の場合は、周辺線量当量率の 1/1.69 である。この違いは、本来ファントム上で使うことを前提としている線量計を鉛の内部で測定したことに起因するものである。シールドプラグ上層と中間層の間の汚染による周辺線量当量率は、床面汚染の場合よりエネルギーが低い散乱線の寄与が大きいことから周辺線量当量率と測定される線量率の関係は違いがより大きい可能性がある。使用されている線量計の詳細情報を得ることができないので、スペクトルに合った関係を得ることができないので、過大評価になっていることを前提に、同じ係数を用いて線量計で得られる線量率を求める。

これまででは、シールドプラグ上層のコンクリートの厚さを 60cm として、Cs-137 の計算結果を用いていたが、コンクリートの厚さが 61 cm であることが判明したので、コンクリート厚さは 61cm とし、測定当時の状況を踏まえ Cs-137 の 10% の Cs-134 と Sb-125 が存在するとした。汚染密度が一様な面線源によるシールドプラグ上層上面から高さ 30.5cm 位置においてコリメータ付き γ 線線量計により測定した周辺線量当量率を電磁

カスケードモンテカルロ計算コード (egs5¹⁾) で計算した。egs5 に「面等方線源と単位球検出器形状を点等方線源と面検出器に変換する手法²⁾」を拡張してコリメータに対応した平面検出器への入射角度の制限をつけることにより、コリメータ内面での散乱線の寄与を無視した条件³⁾で、形状変換を用いて測定位置での周辺線量当量率を計算した。

床表面汚染の場合及び 厚さ 61cm のコンクリート下部の場合の計算結果を表 3 に示す。表中の「Total」は、Cs-134 と Nb-125 の放射能は Cs-137 の放射能の 10 % であるとした場合の Cs-137 : 1Bq/cm² 当たりの周辺線量当量率である。表 1 には、測定された線量率から汚染密度を求める際に使用する線量率 (周辺線量当量率を 1.69 で割った値を合わせて示している。

表 3 面線源によるコリメータ付き γ 線線量計の周辺線量当量率

Source position	Cs-137	Cs-134	Sb-125	Total*	Total/1.69
	μSv/h per Bq/cm ²				
On floor	7.89E-04 ± 6.60E-07	2.00E-03 ± 1.66E-06	6.72E-04 ± 6.29E-07	1.06E-03	6.25E-04
Under 61 cm concrete	2.33E-07 ± 4.55E-09	1.00E-06 ± 1.74E-08	7.99E-08 ± 2.83E-09	3.41E-07	2.02E-07

Cs-137+0.1(Cs-134+Sb-125)

コリメータ付き γ 線線量計による測定結果⁴⁾から、床表面 (シールドプラグ上層上面を除く。) の汚染による平均の線量率は 0.86 mSv/h である。一方、シールドプラグ上層上面の Cs-137 による汚染が最大の 5.0E+05Bq/cm² であると仮定した場合のコリメータ付き γ 線線量計により測定された床表面汚染による線量率は、計算の結果、0.31mSv/h となるので、床表面の測定値の平均 0.86mSv/h を用いることは、シールドプラグ上層上面の汚染の影響を過大に推定している可能性がある。ここでは、シールドプラグ床表面の汚染による寄与として 0.86mSv/h を用いて、シールドプラグ上層と中間層の間の Cs-137 汚染密度を求めた。結果を表 4 に示す。6 か所の平均値 4.5E+10Bq/cm² は、床表面から 150cm 位置での周辺線量当量率の平均値 5.65E+10Bq/cm² とほぼ同じ値である。平均値を使用した場合、半径 6m のシールドプラグ全体では 51PBq に相当する。シールドプラグ以外のオペフロ床表面での汚染密度のばらつきが大きいこと、コリメータ付 γ 線線量計の対象領域が狭いことから、6 か所の結果で平均の汚染密度を評価することには無理があるが、参考値として他の手法との比較に使用することはできる。

表 4 シールドプラグ上層と中間層の間の Cs-137 汚染密度の推定値

測定点	γ線線量当量率 (mSv/h)	床面表面汚染の寄 与除去後 (mSv/h)	Cs-137汚染密 度 (Bq/cm ²)
(48)	12	11.1	5.5E+10
(49)	13	12.1	6.0E+10
(50)	7.1	6.2	3.1E+10
(51)	8.0	7.1	3.5E+10
(52)	15	14.1	7.0E+10
(53)	5.0	4.1	2.1E+10
		Average	4.5E+10

参考資料

1. H. Hirayama, Y. Namito, A. F. Bielajew, S. J. Wilderman, W.R. Nelson, “The EGS5 Code System”, SLAC-R-730 (2005) and KEK Report 2005-8 (2005).
2. Y. Namito, H. Nakamura, A. Toyoda, K. Iijima, H. Iwase, S. Ban and H. Hirayama, “Transformation of a system consisting of plane isotropic source and unit sphere detector into a system consisting of point isotropic source and plane detector in Monte Carlo calculation”, J. Nucl. Sci. Technol, **49**, 167-172 (2012).
3. 波戸 芳仁、平山 英夫、“線源と検出器の形状変換の拡張-コリメータ付き検出器、円柱線源-”、日本原子力学会春の年会 1D01 (オンライン, 2021年3月17日~19日).
4. 東京電力ホールディングス株式会社、“2号機原子炉建屋オペフロ内残置物移動・片付後調査の結果について”、2019年2月28日、
<www2.nsr.go.jp/data/000270192.pdf>

(別添 3-2-2)

2号機シールドプラグ上層と中間層の間に沈着している Cs-137 放射能の推定 (2) シールドプラグに穿孔した穴内部での測定

原子力規制庁原子力規制部

東京電力福島第一原子力発電所事故対策室

平山英夫、近藤健次郎、鈴木征四郎、吉田善行、林克己、岩永宏平

1. はじめに

2号機オペフロ床面から 150 cm 位置での周辺線量当量率又はコリメータ付 γ 線線量計による汚染密度の推定は、オペフロ内壁の汚染による寄与を見積もる必要があることから、シールドプラグ上層と中間層の間に大量の Cs-137 が沈着していることを直接確認する測定が求められた。これまでに判明している状況から、オペフロ床表面の汚染による寄与を念頭に電磁カスケードモンテカルロ計算コード egs5¹⁾ を使った計算を基に、シールドプラグ上層上面に線量計を挿入出来る穴を穿孔し、ある程度深い位置での周辺線量当量率の測定を行えば、オペフロ内壁の寄与を考慮せずにシールドプラグ上層と中間層の間に沈着している Cs-137 等による周辺線量当量率をオペフロ内壁の寄与を考慮せずに測定出来る可能性があることが分かった。この測定の妥当性を実証する目的で、2014 年に国際廃炉研究開発機構 (IRID) が汚染サンプル分析のために穿孔した 2 箇所 (東側及び中央) の穴 (以下「IRID 穴」という。) における測定が東京電力と原子力規制庁との共同で実施 (2021 年 8 月 5 日、26 日及び 9 月 9 日) された。

以下、取り組みを具体的に述べる。

2. 2号機シールドプラグ穴内での周辺線量当量率測定によるシールドプラグ上層と中間層の間の Cs-137 汚染量の測定の可能性についての検討

2-1 測定原理

これまでの推定から、シールドプラグ上部における周辺線量当量率は床表面等オペフロ内部の表面汚染による寄与よりもシールドプラグ上層と中間層の間の汚染の寄与が大きいと考えられている。

図 1 に、測定原理の模式図を示す。オペフロ床面上部の測定では、測定点から直視出来る壁・床・天井等のオペフロ内部の表面汚染からの γ 線は空気のみを通過して検出器に達する (図 1 中の実線) が、シールドプラグ上層と中間層の間の汚染による場合は、最短でも厚さ 61 cm のコンクリートを透過する (図 1 中の点線) ことになる。一方、シールドプラグ上層上面の穴の内部の測定では、床等のオペフロ内部の表面汚染からの γ 線は、コンクリートを透過する事になり、測定点から離れた位置ほど透過するコンクリ

ートの距離が長くなるので、周辺線量当量率に寄与する領域が限定される。それに対してシールドプラグ上層と中間層の間の汚染が線源の場合は、穴内部の測定点の位置が深くなるにつれて、透過するコンクリートの距離が短くなり周辺線量当量率への寄与が増える。

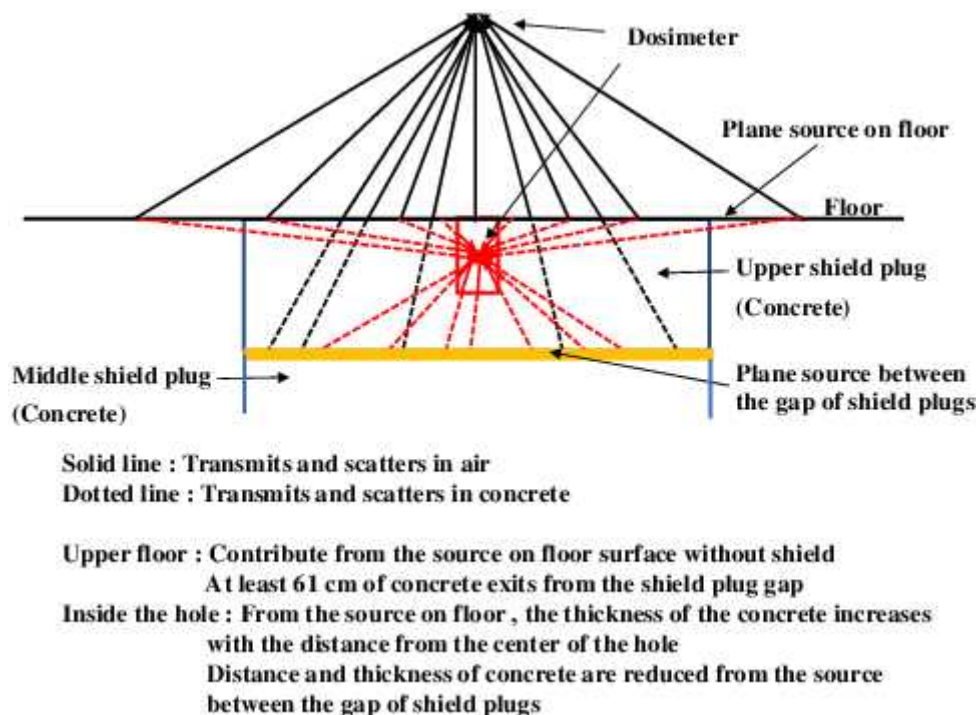


図1 測定原理の模式図

2-2 計算による検討

線源の汚染密度が一樣であるとして egs5^1 を用いて周辺線量当量率を計算した。

穿孔した穴がある場合のシールドプラグ上層と中間層の間の汚染による計算では、線源 (Cs-137 及び Cs-137 の 4.4% の放射能の Cs-134) が、厚さ 61 cm のコンクリート下部で半径 6 m の領域に一樣な密度で分布しているとし、線源領域を円環に分けて各円環の線源による周辺線量当量率を計算した。また、評価点での周辺線量当量率は各円環からの寄与を積算して計算した。これらの計算では、統計精度を上げるために、衝突確率法を適用した。オペフロ内の汚染としては床のみを考慮した。床表面の汚染による計算では、線源が床表面に一樣に分布しているとして同様の方法で周辺線量当量率を求めた。穴が無い場合には、測定位置の周辺線量当量率を「面等方線源からのガンマ線束を線源と検出器を置き換える手法²⁾」を適用して計算した。コンクリート密度は 2.1 g/cm^3 とした。

図2に、直径 5 cm で深さが 30 cm、20 cm、10 cm 及び 7 cm の場合のシールドプラグ

上層と中間層の間の汚染によるシールドプラグ上層上面の穴内の周辺線量当量率を示す。図には、穴が無い場合の結果も併せて示す。横軸はオペフロ床面を0 cmとして、穿孔した穴内の計算評価点の深さを示し、縦軸は「シールドプラグ上層と中間層の間の汚染 (Cs-137 : 1 Bq/cm² と Cs-134 : 0.044 Bq/cm²) からの周辺線量当量率」を示す。穿孔した穴の深さに応じてオペフロ床面からの距離が同じ位置でも穴内部の周辺線量当量率が増加することが分かる。

図3に、穴の深さが10cmの場合のオペフロ床表面汚染による周辺線量当量率とシールドプラグ上層と中間層の間の汚染による周辺線量当量率の比較を示す。オペフロ床表面の汚染密度が測定値の最大値である5E+5Bq/cm²で、シールドプラグ上層と中間層の間の汚染密度が推定値の最小値である2.65E+10Bq/cm²(隙間全体で30PBq)の場合の比較である。オペフロ床面から1cmの深さでは床面の汚染の寄与はシールドプラグ上層と中間層の間からの寄与の5.4%、7cmより深い位置では1%以下であり、オペフロ床面からの寄与は無視できるレベルである。

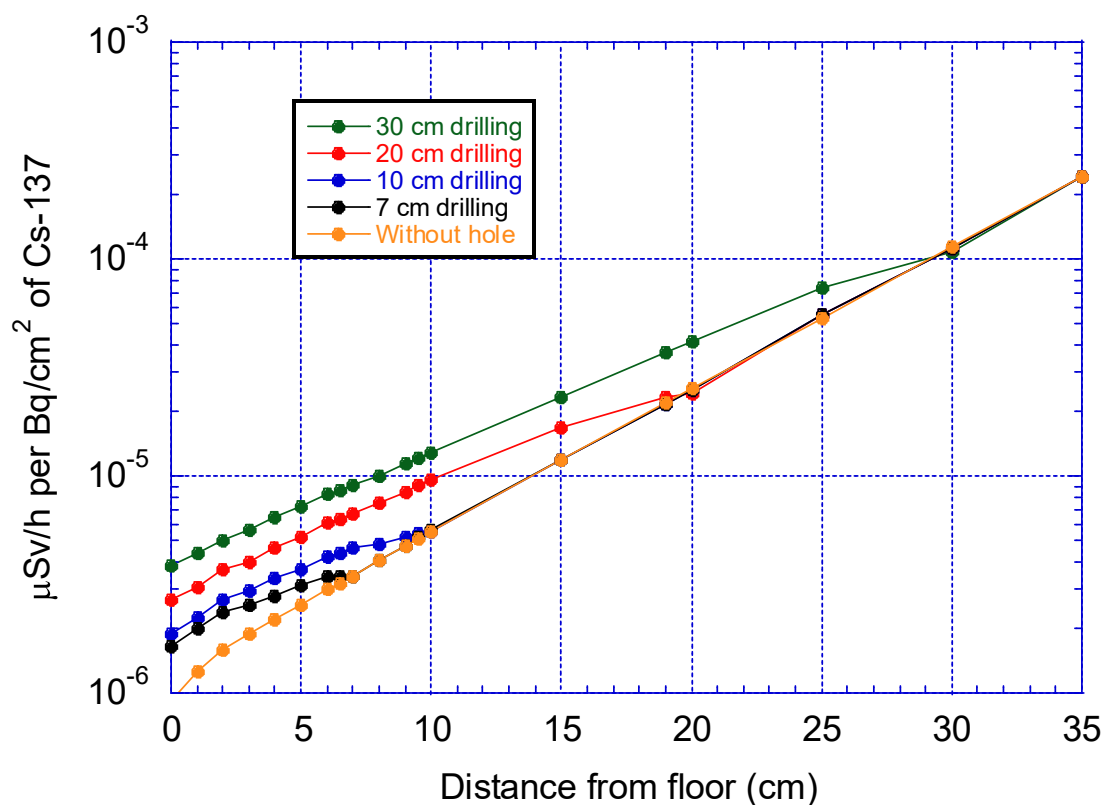


図2 直径5 cm (深さが30 cm、20 cm、10 cm及び7 cm)の穴についてのシールドプラグ上層と中間層の間に存在するCs-137とCs-134 (Cs-137の4.4%)によるシールドプラグ穴内部の周辺線量当量率分布

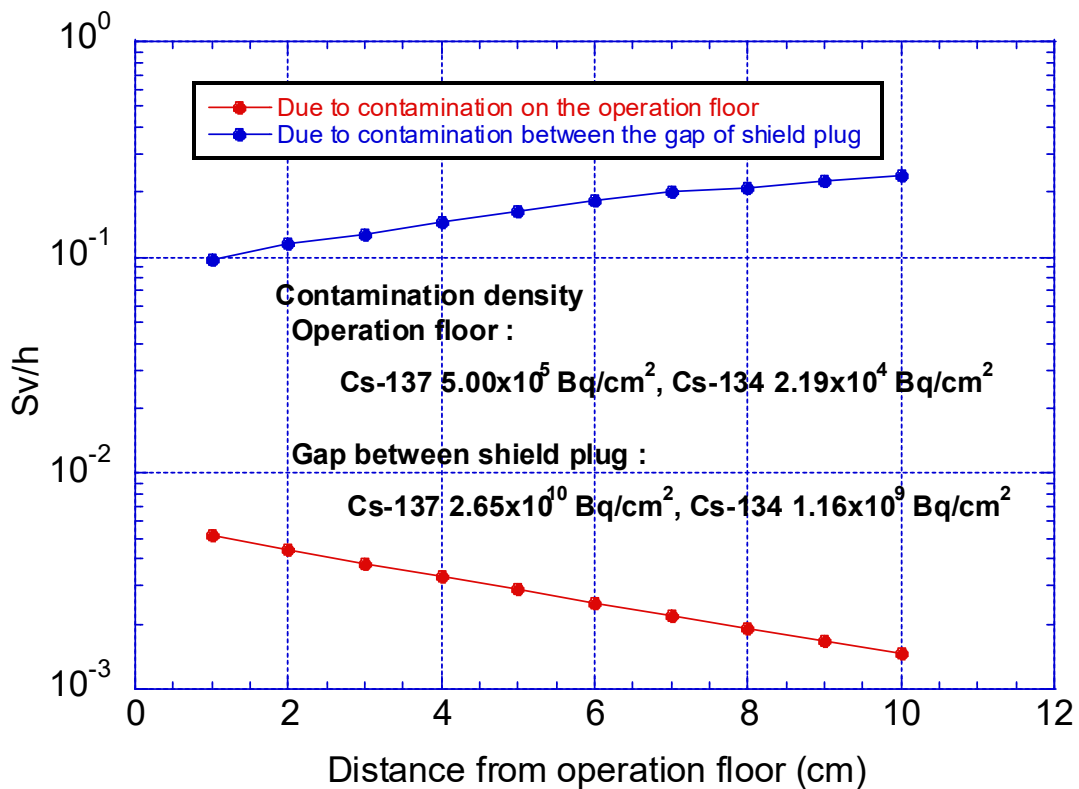


図3 穴（直径 5 cm、深さ 10 cm）内における床表面汚染による
 周辺線量当量率とシールドプラグ上層と中間層の間の汚染による
 周辺線量当量率の比較

（床の汚染密度：5E+5 Bq/cm²、シールドプラグ上層と中間層の間の汚染密度
 2.65E+10Bq/cm²とした場合）

3. IRIDの穴を用いた実証測定に向けた取り組み

シールドプラグに新たな穿孔を行なう前に、シールドプラグ内部での測定によりシールドプラグの上層と中間層の間の Cs-137 による汚染密度を測定することが可能であることを確認する必要があった。2号機シールドプラグ上層上面には IRID 穴があり、この穴を使った実証測定を実施することになった。

3-1 使用する線量計の選定

実証測定で使用する線量計は、新たに穿孔する穴での測定でも使用することを前提に検討した。IRID 穴に挿入可能で、シールドプラグ上層と中間層の間に近い位置での数十 Sv/h レベルまで測定可能な線量計を検討した結果、ATOMTEX 社製の AT2533 線量計³⁾を選定した。図4に示す様に AT2533 線量計は、低線量率用の GM 検出器（100 mSv/h 以下対象、先端から 5cm の位置に線量計の中心がある）と高線量率用の Si 検出器（100 mSv/h 以上対象、先端から 1.5cm に線量計がある）が装備され、線量率により切り替え

て使用する仕組みになっている。



図4 AT2533のセンサー部

3-2 測定治具

AT2533線量計をロボットに持たせ、シールドプラグ上層上面に穿孔されたIRID穴に挿入して測定を行なうためには、専用の治具が必要である。AT2533線量計からの出力はデータを保存すると共にPU-33測定値表示ユニットにケーブル接続して表示させる。測定には高エネルギー加速器研究機構で製作された長さ1 mで外径4 cmの亚克力製パイプの上部近くにPU-33を設置するアルミケースを付けた専用の測定治具を使用した。挿入した深さを確認するために、亚克力製パイプの底面から側面にメジャーが貼り付けられている。

3-3 穴に入っていた砂状物質中のCs-137放射能の推定

2021年8月6日に実施されたIRID穴での最初の測定では、穴内部に砂状の物質があり、中央の穴では1 cm、東側の穴では2 cmしか挿入出来なかった。穴内部の砂状の物質は、東京電力により真空掃除機で取り除かれ、掃除機内の2つのペール缶に収納された。収納された砂状の物質中のCs-137放射能を推定するために、ペール缶中心で、ペール缶蓋上部から25 cm（ペール缶の底から61 cm）位置での周辺線量当量率をATOMTEX社製のPOLIMASTER⁴⁾線量計で同年9月9日に測定した。

(1) POLIMASTERによる測定結果

真空掃除機で回収した砂状物質は、粒子の大きいものはペール缶①に、粒子が細かいものはペール缶②に収納された。ペール缶は、直径30 cmで高さ36 cmの円筒の容器である。POLIMASTERによる測定結果は、ペール缶①の上部では1.83 mSv/hで、ペール缶②の上部では1.09 mSv/hであった。図5にペール缶の写真を示す。ペール缶を除いて同じ場所で測定した場の周辺線量当量率は、0.444 mSv/hであったのでバックグラウンド(BG)として差し引いた周辺線量当量率をペール缶に収納された砂状の物質中のCs-137による周辺線量当量率とした。IRID穴から回収された砂状の物質は、混合した状態でペール缶に収納されている。従って、ペール缶①とペール缶②の測定結果を合わせた周辺線量当量率を、IRID穴にあった砂状の物質中のCs-137による周辺線量当量率と考え

ると、BG を引いた 2.03 mSv/h となる。

ペール缶に収納された砂状物質による周辺線量当量率の測定は、回収後、東京電力により、シャロー型電離箱を用いて実施されている。東京電力の測定結果を表 1 に示す。「 γ 」は、1cm 線量当量率であるが「 $\gamma + \beta$ 」は、 γ 線測定による 1cm 線量当量率と β 線による 70 μ m 線量当量率の合計である。外側の測定がペール缶の蓋の上（底面から 36cm）で実施されたとして、 γ 線の 1cm 線量当量率からペール缶の底から POLIMASTER の距離である 61cm 位置での線量当量率を推定するとペール缶①では 5.48 mSv/h、ペール缶②では 2.98 mSv/h となる。POLIMASTER の測定値より大きいのが、東京電力の測定では口径が約 10cm のシャロー型電離箱が使用されていることを考慮するとほぼ対応していると言える。



ペール缶①

ペール缶②

図 5 ペール缶に回収された砂状物質（東京電力提供）

表 1 東京電力による測定結果

測定箇所	ペール缶①		ペール缶②	
	γ (mSv/h)	$\gamma + \beta$ (mSv/h)	γ (mSv/h)	$\gamma + \beta$ (mSv/h)
外側	11	12	6	8
内側	20	> 100	25	> 100
底	40	45	20	40

(2) 線源状況等の仮定

中央の穴では 1cm、東側の穴では 2cm しか治具を挿入できなかったため、中央の穴には高さ 6cm、東側の穴には高さ 5cm の砂状物質があったことになる。穴の直径は 5cm なので、穴の内部に溜まっていた砂状の物質が全て回収されたとすると、

$$\pi \times (6+5) \times 2.5^2 = 216$$

より、合計で 216 cm^3 となる。ペール缶の半径は 15 cm なので、ペール缶①とペール缶

②に均等に配分されたとし、ペール缶の底に一様にあるとすると、

$$(216/2)/(\pi \times 15^2)=0.15$$

より、1.5 mm の厚さとなる。実際には、①と②に収納された量が異なっており、回収された砂状の物質がペール缶の底で不均一状態であり、コンクリートの破片が含まれている可能性があると思われるが、以下の検討では試料中の自己遮蔽は無視する。又ペール缶蓋の遮蔽も無視し、厚さの無い面線源であると仮定する。また、含まれている放射性核種は、Cs-137 のみとする。

(3) Cs-137 放射能の推定

自己遮蔽の無い半径 R (cm) の平面線源の中心軸上 h (cm) 位置の周辺線量当量率(1cm 線量当量率) q (μ Sv/h per MBq/cm²) は、Cs-137 の 1 cm 線量当量率定数 ($\Gamma_{1\text{cm}}$: 0.0927 μ Sv/h per MBq at 1m) を使って、以下の式で求めることが出来る。

$$q = 10^4 \pi \Gamma_{1\text{cm}} \frac{R^2 + h^2}{h^2}$$

R は 15 cm、h は 61 cm なので、q=171 (μ Sv/h per MBq/cm²) となる。従って、2.03 mSv/h となる汚染密度は、2.03*1000/171=11.9 MBq/cm² となる。総量は、

$$Q=11.9 \times \pi \times 15^2=8410\text{MBq}$$

となる。砂状の物質の体積は、216 cm³ なので、Cs-137 の汚染密度は 38.9 MBq/cm³ となる。

ペール缶内の線源が中央に点状に存在するとして計算した場合、61 cm 位置で 2.03 mSv/h となる Cs-137 放射能は、8150MBq となるので、上記で求めた結果と対応している。

(4) 2021 年 8 月 5 日に実施した穴位置での AT2533 による測定の結果の検討

上記(3)で得られた結果と 2021 年 8 月 5 日に実施した穴位置での AT2533 線量計による測定の結果を比較検討した。

コンクリートコアを採取するボーリング時には、切削により取り除かれたコンクリート粉を吸引しながら作業が行われたとのことなので、穴の内部の砂状の物質は穴が開けられた後に、周辺の床表面から入ってきたと考えられる。回収された砂状物質が 2 つの穴に均等に入っていたとすると、8 月 5 日の東側穴での測定時は、上記で推定した合計放射能の半分の 4080MBq の Cs-137 を含む高さ 5cm の砂状物質の上面から 1.8cm の位置 (図 6) で測定を行ったことになる。

(a) 点線源と見なした場合

Cs-137 が高さ 5cm の砂状物質の中心に点状にあるとすると、点状線源計算による周辺線量当量率は、

$$4080 (\text{MBq}) \times 0.0927 (\mu \text{ Sv/h per MBq at 1m}) / ((2.5+1.8)/100)^2/1000=205 \text{ mSv/h}$$

となる。

(b) 想定したモデルによる詳細計算

図6に示す計算形状で、放射性核種は、砂状の物質全体に均等に存在するとして、検出器位置での周辺線量当量率を $egs5^1$ で計算した。結果を表2に示す。

Cs-137の汚染密度は 38.9 MBq/cm^3 なので、Cs-137とCs-134 (Cs-137の4.4%)による周辺線量当量率は、砂状物質の密度が 1.0 g/cm^3 の場合は、 227 mSv/h となる。

2021年8月5日の東側の穴の測定では床面から2 cm 挿入時の周辺線量当量率が 710 mSv/h で、砂状の物質を取り除いた後に行なった同年8月26日の測定では同じ位置で 225 mSv/h であった。同月5日の測定時には砂状物質が入っていたので、シールドプラグ上層と中間層の間の汚染による寄与は 225 mSv/h よりは少ないと思われるが、仮に 225 mSv/h とした場合には穴内部の砂状物質による寄与は 485 mSv/h である。上記で求めた周辺線量当量率の約2倍の周辺線量当量率である。

2021年8月5日の測定では、中央の穴では時間をかけた測定は行わなかったが、穴内部への挿入を試みた時の値は凡そ 900 mSv/h であった。今回と同じ場所 (床面から1 cm) での測定値が 600 mSv/h であったので、東側の穴の場合と同じ比較を行うと砂状物質の寄与は 300 mSv/h で、上記で求めた周辺線量当量率の約1.5倍の周辺線量当量率である。

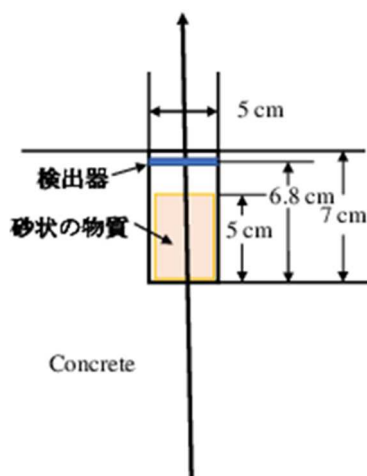


図6 計算形状

表2 放射性核種が砂状物質全体に一様にある場合の計算結果

Source exits whole area (0.0 - 5.0 cm)			
Density of source	Ambient dose equivalent rate		
g/cm ²	Cs-137	Cs-134	Cs-137+Cs-134 (4.4 %)
	μSv/h per Bq/cm ³		
Air	5.56E-03 ± 6.39E-06	1.42E-02 ± 1.63E-05	6.18E-03 ± 1.01E-05
1	5.24E-03 ± 6.20E-06	1.35E-02 ± 1.56E-05	5.84E-03 ± 9.67E-06
1.5	5.11E-03 ± 6.13E-06	1.31E-02 ± 1.55E-05	5.68E-03 ± 9.56E-06

(5) 推定のまとめ

ペール缶に回収された砂状物質をペール缶の底から 61 cm 位置で行なった周辺線量当量率の測定値から求めた Cs-137 放射能は、総量で 8410 MBq (8.41 GBq) で、単位体積当たりの汚染密度は 38.9 MBq/cm³ であった。求めた砂状物質中の Cs-137 汚染密度を用いて、穴内部の砂状物質上部から 1.8 cm 位置での周辺線量当量率は測定結果から推定した周辺線量当量率の約 1/2 程度であった。比較は、砂状物質中の Cs-137 が一様な密度で分布していると仮定していること、砂状物質と検出器の距離が 1.8 cm と短いので砂状物質中の汚染密度分布の影響を受けやすいことを考慮するとほぼ対応していると考えられる。従って、2つの IRID 穴の内部の砂状物質は全量回収されたと考えられる。

4 IRID の穴を用いた実証測定

IRID の穴での実証測定は 2021 年 8 月 26 日と 9 月 9 日の 2 回実施した。

4-1 2021 年 8 月 26 日の測定

(1) 線量計の使用法

線量計としては、ATOMTEX 社の AT2533 線量計を使用した。3-1 で述べた様に、AT2533 線量計は、低線量率用の GM 検出器 (100 mSv/h 以下対象、先端から 5 cm の位置に線量計の中心がある) と高線量率用の Si 検出器 (100 mSv/h 以上対象、先端から 1.5 cm に線量計がある) が装備され、周辺線量当量率により切り替えて使用する仕組みになっている。深さ 7 cm の穴内部での情報を得るために、検出器の先端から 1.5 cm 上に中心がある Si 検出器のみを使用するモード (FoF モード) で実施した。従って、測定値の測定下限線量率は 100 mSv/h である。併せて、先端から約 25 cm の高さの治具外側に ATOMTEX 社の POLIMASTER 線量計を設置した。

(2) 測定方法

2 号機オペフロは周辺線量当量率が高いため、ロボットに線量計を取り付け、遠隔操

作で測定を実施した。AT2533 線量計を高エネルギー加速器研究機構で製作した測定用治具に入れ、PU-33 測定値表示ユニットを治具上部に、POLIMASTER を治具先端から約 25 cm 位置に設置した状態でロボット (Kobra) に持たせて穴に挿入することとした。挿入した深さは、別のロボット (Packbot) で治具に貼り付けた目盛りを読ませることで確認することにした。PU-33 に 1 分毎のデータが記録されるので、回収後読み取ることとした。測定中に線量計が動作していることを確認するために、Packbot に取り付けられたライトで線量計表示部を照らし、PU-33 の表示を確認しながら測定を行った。POLIMASTER の測定値も Packbot が写した映像を遠隔操作室で読み取った。

(3) 測定結果

(a) 穴の状況

穴内部の砂状物質除去後に図 7 に示す測定用アクリル製治具がどこまで挿入できるについての調査が、東京電力により行われた。図 7 によると、中央では 6 cm、東側では 6.5 cm¹まで挿入できていることが確認できる。7 cm まで挿入できないのは、「コアを折って回収したと聞いている」という東京電力の情報から、底面のコンクリートが平坦でなく、一部高い箇所があるためと考えられる。



中央の穴

東側の穴

図 7 治具挿入時の写真 (東京電力から提供されたもの)

(b) 測定位置

中央の穴については、床から 6cm 及び 4cm でそれぞれ 5 分測定すると共に、約 1 cm 移動する毎にデータロガーの表示値を読み取ることで測定を行った。

東側の穴では床から 7.0 cm の穴底部から上側に向け同様の測定を行った。

¹ 写真からは、6.5 cm の様に見えるが、測定時には 7 cm まで挿入出来た。

各測定点では、POLIMASTER の表示値を合わせて記録した。

(c) 測定結果

測定結果を図 8 及び表 3 に示す。

東側の穴では、底まで挿入 (7 cm) 時の周辺線量当量率が 5 cm 挿入時より低かったことから、最後に再度底での測定を行なったが、最初の測定値と同じであることが確認された。中央の穴では、POLIMASTER の結果も従来の測定値より大きかったので、穴内の測定終了後、周辺の床面での測定を行なった。穴から 90 cm までは POLIMASTER の周辺線量当量率はほぼ同じで、床面近くの AT2533 の方が若干低いという結果であった。更に離れた位置では、POLIMASTER の方が低くなり、従来の測定結果に対応するレベルになった。以上から、中央の穴の下部周辺の汚染密度が周辺より高いことを反映していると思われる。

東側穴では、床から 7 cm 及び 6 cm での周辺線量当量率が 5 cm での周辺線量当量率より若干低くなった。コア採取の際に残ったコンクリートが穴の底面近くで遮蔽の役割をした可能性が考えられる。²

² IRID が採取したコンクリートの下部は斜めに欠けている部分があり、これに対応したコンクリートが残っていた可能性がある。最初の挿入テストで 6.5 cm まで挿入だったが、測定時には 7 cm まで挿入出来たことからコンクリートの一部が底面に残っている可能性がある。

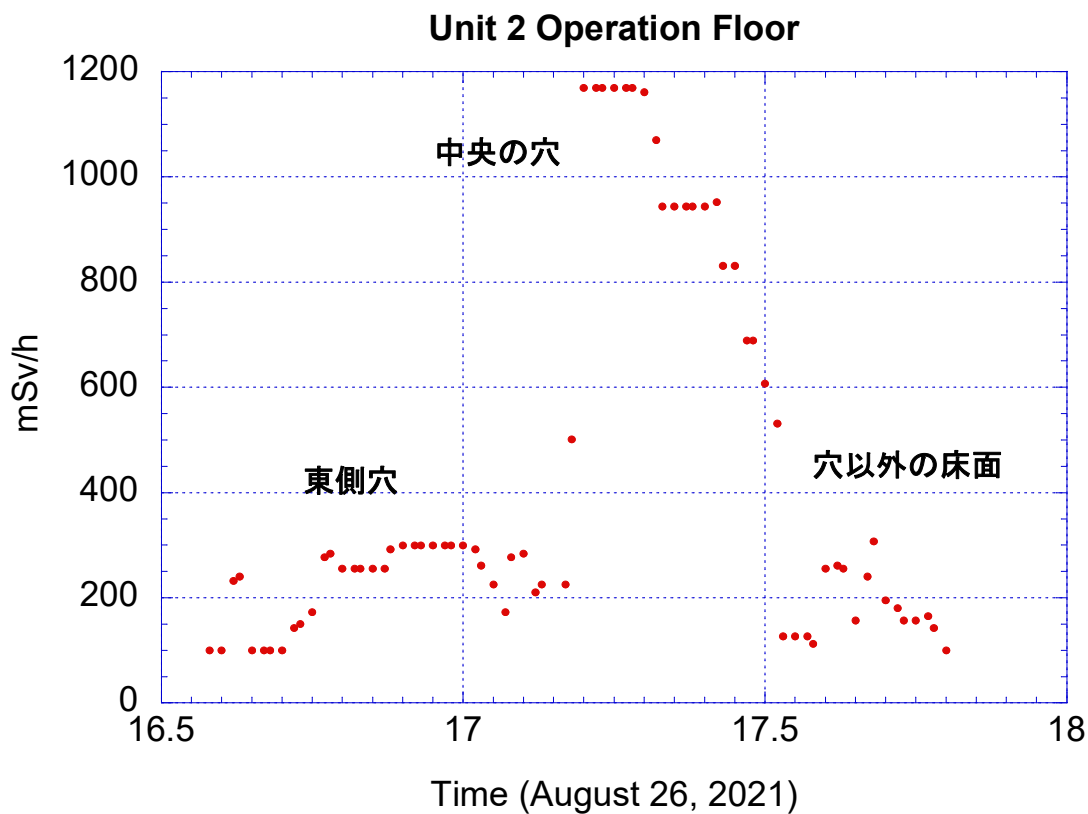


図 8 AT2533 線量計の時系列測定結果

表 3 測定結果

測定場所	床表面からの筒底の距離	時刻	AT2533	POLMASTER
	cm		mSv/h	
東	7.0	16:45 - 16:51	255	52.5
	6.0	16:52	277	51.5
	5.0	16:53 - 16:58	290 - 300	52.1
	4.0	16:58	292	50.9
	3.0	16:59	255	50.7
	2.0	17:02	225	51.9
	1.0	17:02	172	51.9
	7.0	17:03	255	51.5
中央	6.0	17:10 - 17:15	1016	230
	5.0	17:15	1070	236
	4.0	17:16 - 17:21	931 - 945	235
	3.0	17:23	825	225
	2.0	17:25	682 - 690	226
	1.0	17:26	600	225
	0.0	17:27	532	225
中央穴から北15cm	0.0	17:25	121	211
中央穴から北30cm	0.0	17:31	105 - 110	210
中央穴から北90cm	0.0	17:35	156	219
中央: 西との中間	0.0	17:40	151	131

(d) 穴に溜まっていた砂状物質による汚染の影響

2つの方法で、検討を行なった。

① 砂状物質のある状態での中央付近と東側の穴との比較

中央付近の穴では、床面から1 cmの高さまで砂状物質が詰まっており、その位置での周辺線量当量率は、900 mSv/hであった。一方、東側の穴では、床面から2 cmの高さまで砂状物質が詰まっており、その位置での周辺線量当量率は、700 mSv/hであった。

穴の深さは7 cmであるので、中央付近では6 cmの、東側では5 cmの砂状物質が入っていたことになる。回収した砂状物質に放射性核種が多く含まれていることから、これらの砂状物質が主要な線源であると考えられる。穴ごとに砂状物質の回収を行なうことが出来なかったため測定結果で示すことは出来ないが、この砂状物質はオペフロ床面から穴内部に入ったとすると、両者の汚染密度は大差ないと思われる。

砂状物質の除去により取り残されたCs-137を中心とする放射性物質が穴の底に残されて、それが高線量率の線源になったとすると、除去前後での周辺線量当量率の変化は、2つの穴で同じ傾向となると思われる。

中央付近の穴：除去前の900 mSv/hから1,016 mSv/h

東側の穴：除去前の700 mSv/hから255 mSv/h

であり、両者で逆の傾向となることから、底に残った汚染により高線量率になったとは考えられない。

② 汚染密度の推定から

内部に取り残された汚染物質による影響があるとすると、最も深く治具を挿入した時、穴の底に半径2.5 cmの平面線源の中心位置で中央の穴では2.8 cmの高さで、東側の穴では1.8 cmの高さで測定したことになる。

放射性核種をCs-137とし、背後のコンクリートからの後方散乱や穴内部での散乱の影響を無視した平面線源からの1cm線量当量率は、

$$q = 10^4 \pi \Gamma_{1\text{cm}} \ln \frac{R^2 + h^2}{h^2} \quad (\text{MBq/cm}^2)$$

により求めることが出来る。上式で、R (cm) は面線源の半径、h (cm) は面線源の中心での線源面からの距離 ($\Gamma_{1\text{cm}}$ ($\mu\text{Sv/h per MBq at 1m}$)) である。

中央付近の穴で、1,016 mSv/hとなる汚染密度は6.0E+08 Bq/cm²

東側の穴で、255 mSv/hとなる汚染密度は8.2E+07 Bq/cm²

となる。オペフロ床面の汚染密度は1E+06 Bq/cm²程度であることを考えると、取り残された砂状物質の汚染密度がこの様な高濃度となることは考えにくい。

以上の検討から、穴の内部に取り残された汚染が主要な線源となり、高線量率となった可能性は無く、穴内部での高線量率は、シールドプラグ上層と中間層の間に沈着しているCs-137等によると考えられる。

(e) シールドプラグ上層と中間層の間に蓄積した Cs-137 と Cs-134 による穴内部の周辺線量当量率

シールドプラグ上層と中間層の間 (厚さ 61 cm のコンクリート下部) の Cs-137 と Cs-134 による 7 cm のボーリング穴内部の周辺線量当量率を、egs5¹⁾ で計算した。汚染はシールドプラグ上層と中間層の間に一様な密度で存在するとした。半減期の違いから Cs-134 の汚染密度は Cs-137 の 4.4 %とした。シールドプラグ上層と中間層の間における Cs-137 の汚染密度が 1 Bq/cm² の時の結果を図 9 に示す。測定位置に対応した床面からの d (cm) での周辺線量当量率 D は、計算結果を 3 次の多項式で近似した次式

$$D = \exp(-13.32 + 0.2233*d - 0.03170*d^2 + 0.002485*d^3)$$

で求める。

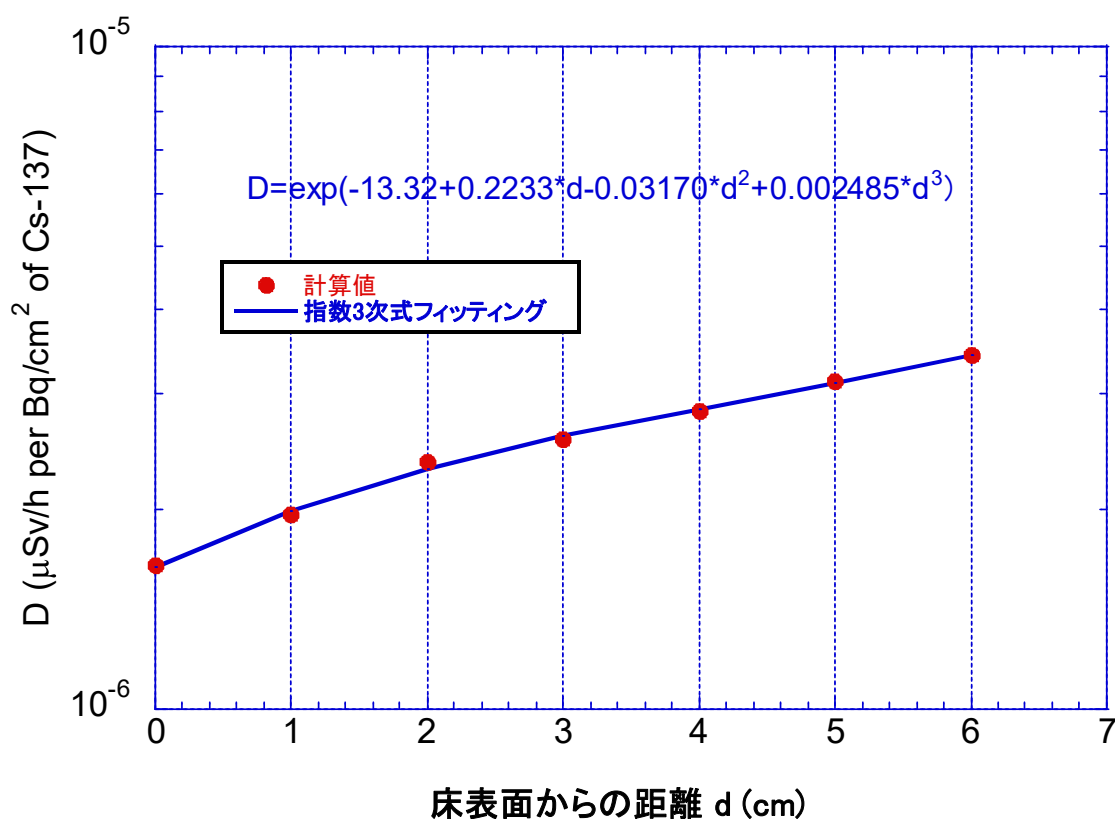


図 9 穴内部の周辺線量当量率分布の計算結果

(f) シールドプラグ上層と中間層の隙間の汚染密度の推定

AT2533 線量計のセンサー中心は先端から 1.5 cm にあり、治具の底面の厚さが 0.3 cm なので、測定位置は治具の先端位置から 1.8 cm 高い位置に相当する。測定結果と計算結果から求めた Cs-137 の 1 Bq/cm² 当たりの周辺線量当量率を用いて Cs-137 汚染密度を求めた。結果を表 4 に示す。図 10 に、シールドプラグ上層と中間層の間の Cs-137 汚染密度が 4.01E+11 Bq/cm² (中央の穴に対応)、1.23E+11 Bq/cm² (東側の穴に対応) の

場合の計算値との比較を示す。測定値と計算値の深さによる増加傾向は、中央の穴では全ての測定値で良くあっており、東側の穴では、4.5 cm と 5.5 cm 以外では良く合っていることが分かる。

表 4 穴の中心から半径 1 m の平均 Cs-137 汚染密度

穴の位置	床からの距離 (cm)	換算係数	AT2533	Cs-137 汚染密度	半径1 m の隙間のCs-137
		$\mu\text{Sv/h per Bq/cm}^2$	mSv/h	Bq/cm^2	PBq
中央	-0.8		600		
	0.2	1.71E-06	686	4.00E+11	12.6
	1.2	2.06E-06	825	4.01E+11	12.6
	2.2	2.36E-06	938	3.97E+11	12.5
	3.2	2.63E-06	1070	4.07E+11	12.8
	4.2	2.88E-06	1160	4.03E+11	12.6
東側	-0.8		172		
	0.2	1.71E-06	225	1.31E+11	4.1
	1.2	2.06E-06	255	1.24E+11	3.9
	2.2	2.36E-06	292	1.24E+11	3.9
	3.2	2.63E-06	295	1.12E+11	3.5
	4.2	2.88E-06	277	9.61E+10	3.0
	5.2	3.15E-06	255	8.08E+10	2.5

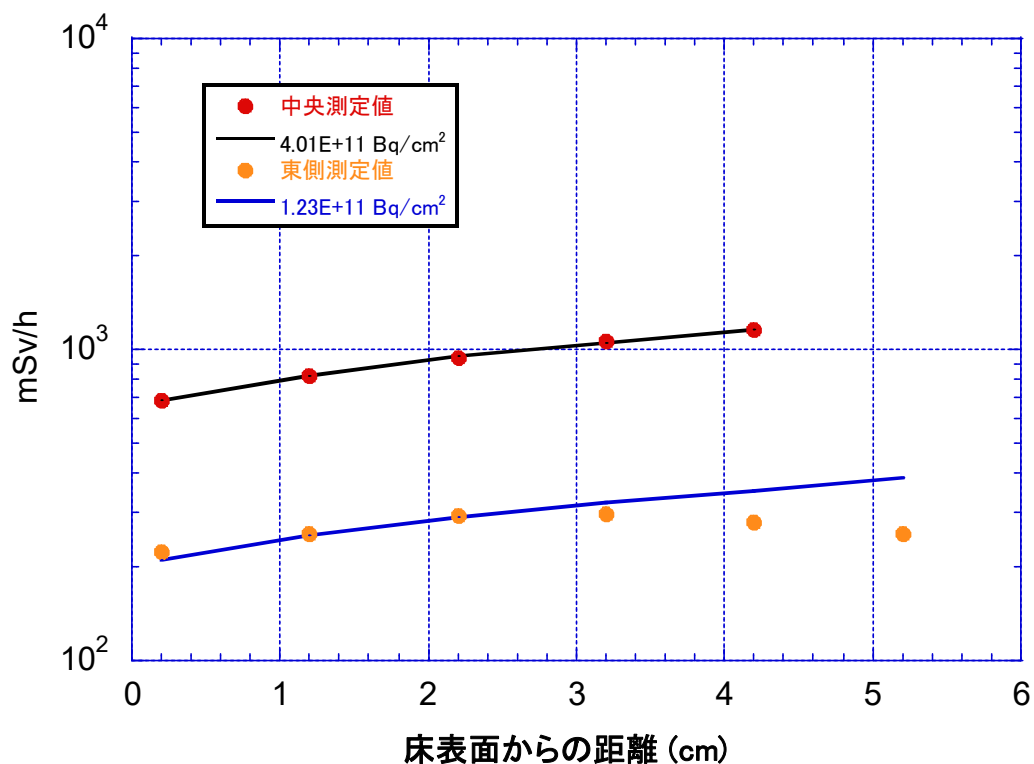


図 10 測定値と計算値の比較

中央の穴では、シールドプラグ内部及び上部の周辺線量当量率が予想していたよりも高かったが、穴内部の線量率変化は計算で推定したものとよく対応していた。東側の穴では、一番深い位置である 7 cm 及び 6 cm まで挿入した時の結果が若干低かったが全体的には計算による線量率変化と対応していた。測定値から推定した中央の穴下部の半径 1 m 領域の汚染密度は、東側穴内下部より約 3 倍高かったが、3 号機の測定で見られた隙間の汚染密度のばらつきと同程度であり、汚染密度のばらつきを反映したものと考えられる。

4-2 2021 年 9 月 6 日の測定

2021 年 9 月 6 日の穴内部での測定は、同年 8 月 26 日の結果を確認することが主目的であったので、各挿入位置で PU-33 の表示を測定値とし、データの記録のための保持は行わなかった。各挿入位置での周辺線量当量率は、同年 8 月 26 日の結果とよく一致していた。

中央及び東の穴内部測定時の 3 つの線量計による測定結果を表 5 に示す。POLIMASTER と PDR-303 測定結果はほぼ同じで床からの距離が小さい POLIMASTER が若干大きい値であった。

表 5 穴内部測定時の比較

測定場所	床表面から筒底までの距離 cm	AT2533	POLIMASTER	PDR-303
		mSv/h		
	治具底からの距離 cm	1.8	25	150
東	7 cm	255	48.4	47.1
	0 cm	150	49.2	47.2
中央	6 cm	1110	205	187
	0 cm	532	193	184

参考資料

1. H. Hirayama, Y. Namito, A. F. Bielajew, S. J. Wilderman, W.R. Nelson, “The EGS5 Code System”, SLAC-R-730 (2005) and KEK Report 2005-8 (2005).
2. Y. Namito, H. Nakamura, A. Toyoda, K. Iijima, H. Iwase, S. Ban and H. Hirayama, “Transformation of a system consisting of plane isotropic source and unit sphere detector into a system consisting of point isotropic source and plane detector in Monte Carlo calculation”, J. Nucl. Sci. Technol., 49, 167-172 (2012).

3. AT2533-AT25331-wide-range-dosimeters, ATOMUTEX;
<https://atomtex.com/en/at2533-at25331-wide-range-dosimeters>
4. PM1703MO-1BT Personal Combined Radiation Detector/Dosimeter, POLIMASTER;
https://polimaster.com/eu/product/personal-radiation-detectors/prd-gamma/personal-combined-radiation-detector-dosimeter-pm1703mo-1_bt/

(別添 3-2-3)

2号機シールドプラグ上層と中間層の間に沈着している Cs-137 放射能の推定 (3) シールドプラグに新たに穿孔した穴での測定

原子力規制庁原子力規制部

東京電力福島第一原子力発電所事故対策室

平山英夫、近藤健次郎、鈴木征四郎、吉田善行、林克己、岩永宏平

1. はじめに

2014年に国際廃炉研究開発機構(IRID)がシールドプラグ上層上面に穿孔した2箇所の穴(以下「IRID穴」という。)での周辺線量当量率測定を踏まえて、下記の一連の作業と測定が東京電力と原子力規制庁との共同で実施された。

- (1) シールドプラグ上層上面(表面から3 cm)の周辺線量当量率分布測定
- (2) シールドプラグ上層上面に新たに穿孔する穴の場所の検討
- (3) 新たに穿孔した穴内部での測定(2021年11月30日から)

以下、取り組みを具体的に述べる。

2. シールドプラグ床表面のマッピング測定

2-1 シールドプラグ上層と中間層の間の汚染分布情報の検討

IRID穴での周辺線量当量率の測定結果から推定したシールドプラグ上層と中間層の間の汚染密度が150 cm高さにおけるコリメータなしγ線線量計による測定結果及び30.5 cm高さにおけるコリメータ付きγ線線量計による測定結果から推定した汚染密度より大きかったことから、シールドプラグ上層と中間層の間の汚染密度に分布があることが推定された。シールドプラグ上層上面への新たな穿孔の数は限られることから、シールドプラグ上層と中間層の間に沈着しているCs-137の大凡の総量を推定するためには、シールドプラグ上層と中間層の間の汚染密度分布に対応した情報を測定し、シールドプラグ上層上面の穴内部の測定から推定した汚染密度との関係を求め、その結果と汚染密度分布に対応した情報から総量を推定することを検討した。ロボットを使用した測定で汚染密度分布に対応した情報として測定可能なものとして、シールドプラグ上層上面近くでの周辺線量当量率測定を選定した。床表面に近い場所であれば、シールドプラグ上層と中間層の間で測定中心から半径1 m程度の領域の寄与を反映することになるので、汚染分布に対応した情報として使用できる可能性がある。但し、当然の事ながら床面上部の測定なのでオペフロ内壁の汚染による寄与が含まれた測定となる。

測定は、2021年10月7日に東京電力と原子力規制庁の共同調査として、ロボット(Kobra)に装着したPDR-303の実効中心が床面から高さ3cmの位置になる条件で図1に示す64箇所で行われた。

測定点は以下の2つの目的に応じて設定しており、それぞれの測定結果概況を以下にまとめる。

(1) 新たな穿孔箇所の検討のための測定点と線量率の傾向

新たな測定用穴の穿孔位置の検討のために、シールドプラグ上の測定点41点を設定した。全体的に中心付近が高く周辺が低い傾向であった。また測定点No.7、62、63が周辺の傾向と比べ高めで、特にNo.55、58は特異的に高い。近くに汚染物があったのか、直下のシールドプラグ上層と中間層の間の汚染が高いのかは不明である。

(2) 事故時Cs-137が抜けた痕跡の検討のための測定点と線量率の傾向

東京電力福島第一原子力発電所事故時に放出されたCs-137が抜けた痕跡の可能性の指摘に対する測定点として、シールドプラグ外周部(15点)とシールドプラグ中央パーツと側部パーツの継ぎ目(8点)に測定点を設定した。シールドプラグ外周部はその近くのシールドプラグ上層上面の測定点より周辺線量当量率が高い所がほとんどである。シールドプラグ上層の継ぎ目の周辺線量当量率は全てその近くのシールドプラグ上層上面の測定点の周辺線量当量率より高く、特にシールドプラグ上層の継ぎ目と中間層の継ぎ目が交差していると思われる4点は周辺に比べ際立って高い周辺線量当量率となっていた。

シールドプラグ外周部では、測定に使用した2台のロボット(測定器移動・把持用のKobra、及び測定値読取用のPackbot)の位置関係や段差の関係でシールドプラグ上層の継ぎ目真上での測定ができない箇所も多かった。またシールドプラグ上層の中央パーツと側部パーツの間の継ぎ目の底には汚染していると考えられる砂状物質が認められたこと、及び継ぎ目からの放射線ストリーミングの影響も考えられる。このため、痕跡の影響を考えるためにはさらなる検討と測定が必要と思われる。

2-2 内壁の汚染の寄与

測定を実施した時点では、オペフロ床表面の汚染を主たる寄与として想定していたが、別添3-2-5-9に示した様に、相対的に平均の汚染密度が高いと思われる東壁及び西壁等の影響があることが分かった。表1に、床、天井及び壁に1Bq/cm²のCs-137と0.044Bq/cm²のCs-134が一様な密度で存在している場合のシールドプラグ上部の5箇所での床面から3cmと150cmの比較を示す。測定位置の番号は、図1の測定場所に対応している。表1には各面の想定した汚染密度の場合の周辺線量当量率を合わせて示している。各面の汚染密度にも分布があり、東西の壁の平均汚染密度は

過大評価になっている可能性が高いのであくまで参考値であるが、内壁の寄与は 3 cm と 150 cm でほぼ変わらないと言える。

1F-2号機 オペフロ線量測定記録（規制庁共同調査）

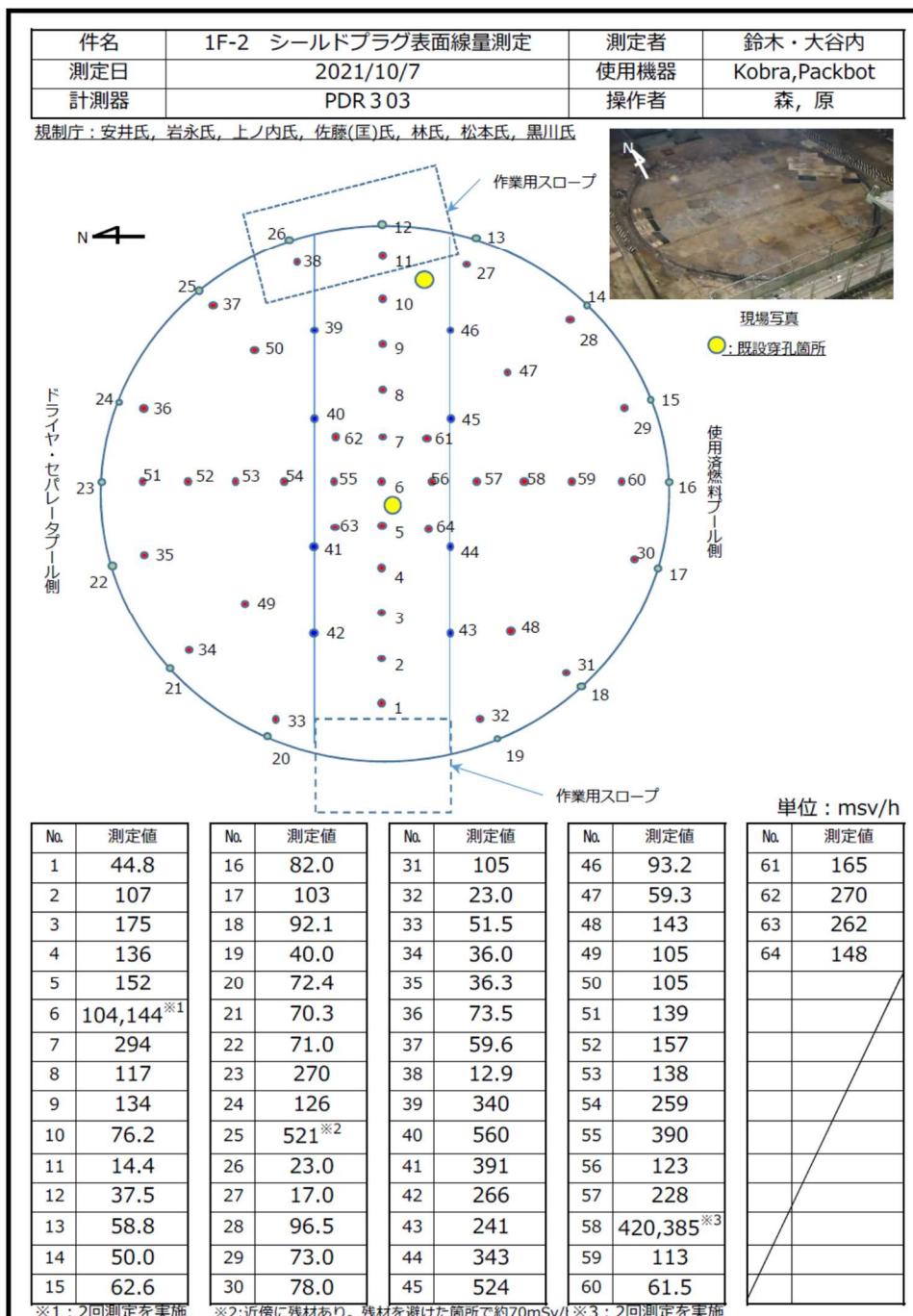


図1 床面から 3 cm 位置の周辺線量当量率測定箇所と測定結果

表 1 2号機オペフロ内壁の汚染によるシールドプラグ上部の
周辺線量当量率

床面から3 cm						床面から150 cm							
	⑨	⑩	⑪	⑮	⑦		⑨	⑩	⑪	⑮	⑱		
μSv/h per Bq/cm ² of Cs-137						μSv/h per Bq/cm ² of Cs-137							
床	4.69E-02	4.78E-02	4.82E-02	4.77E-02	4.77E-02	床	2.35E-02	2.47E-02	2.51E-02	2.46E-02	2.28E-02		
天井	4.61E-03	4.95E-03	5.12E-03	4.90E-03	4.90E-03	天井	6.00E-03	6.46E-03	6.69E-03	6.40E-03	5.48E-03		
北壁	6.21E-03	6.43E-03	6.49E-03	5.41E-03	7.97E-03	北壁	6.76E-03	7.00E-03	7.06E-03	5.26E-03	2.86E-03		
南壁	6.21E-03	6.43E-03	6.49E-03	7.97E-03	5.41E-03	南壁	6.76E-03	7.00E-03	7.06E-03	8.70E-03	2.47E-02		
東壁	2.47E-02	1.70E-02	1.13E-02	1.64E-02	1.64E-02	東壁	2.93E-02	1.95E-02	1.28E-02	1.89E-02	1.86E-02		
西壁	4.88E-03	6.61E-03	8.44E-03	6.60E-03	6.60E-03	西壁	5.46E-03	7.19E-03	9.45E-03	7.18E-03	7.07E-03		
	Cs-137 density (Bq/cm ²)	周辺線量当量率 (mSv/h)					Cs-137 density (Bq/cm ²)	周辺線量当量率 (mSv/h)					
床	2.50E+05	1.17E+01	1.19E+01	1.20E+01	1.19E+01	床	2.50E+05	5.87E+00	6.16E+00	6.28E+00	6.14E+00	5.70E+00	
天井	3.60E+05	1.66E+00	1.78E+00	1.84E+00	1.77E+00	天井	3.60E+05	2.16E+00	2.33E+00	2.41E+00	2.30E+00	1.97E+00	
北壁	8.90E+05	5.52E+00	5.73E+00	5.78E+00	4.81E+00	北壁	8.90E+05	6.01E+00	6.23E+00	6.28E+00	4.68E+00	2.54E+00	
南壁	4.10E+05	2.55E+00	2.64E+00	2.66E+00	3.27E+00	南壁	4.10E+05	2.77E+00	2.87E+00	2.89E+00	3.57E+00	1.01E+01	
東壁	1.40E+06	3.46E+01	2.39E+01	1.59E+01	2.30E+01	東壁	1.40E+06	4.10E+01	2.73E+01	1.80E+01	2.65E+01	2.60E+01	
西壁	1.10E+06	5.37E+00	7.27E+00	9.28E+00	7.26E+00	西壁	1.10E+06	6.00E+00	7.91E+00	1.04E+01	7.89E+00	7.78E+00	
合計 (mSv/h)		6.14E+01	5.32E+01	4.75E+01	5.20E+01	5.33E+01	合計 (mSv/h)		6.38E+01	5.28E+01	4.62E+01	5.11E+01	5.42E+01

2-3 床汚染密度分布の影響

穿孔で取り出されたコア表面の周辺線量当量率から、シールドプラグ床面の汚染密度に分布があることは明らかである。図2に示す様に、床面から3 cm 位置では下部の半径60 cm の領域からの寄与が80 %と大部分である。内壁の内、床面の寄与が最も大きいので、対象となる領域の汚染密度により内壁汚染による周辺線量当量率が変わることになる。

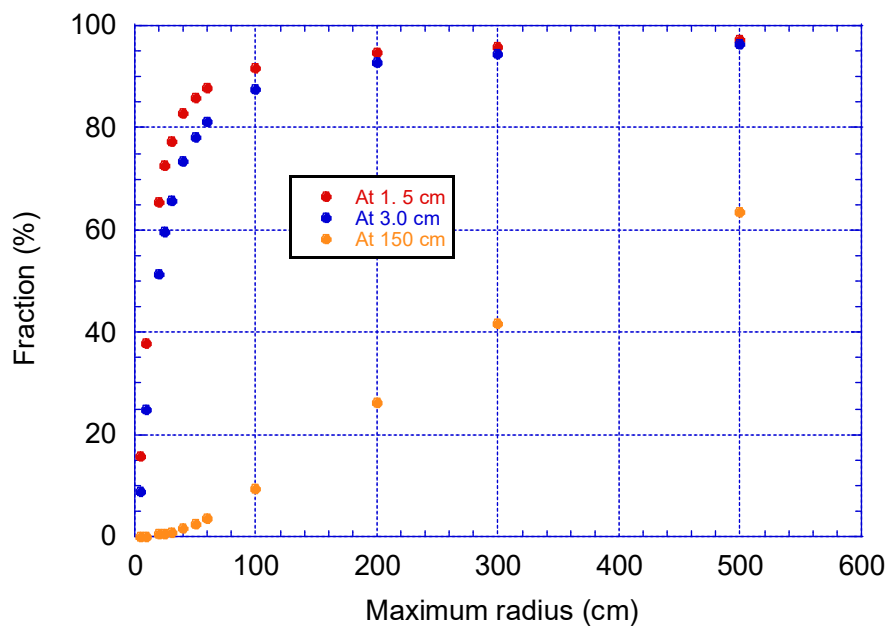


図2 床面汚染の寄与領域

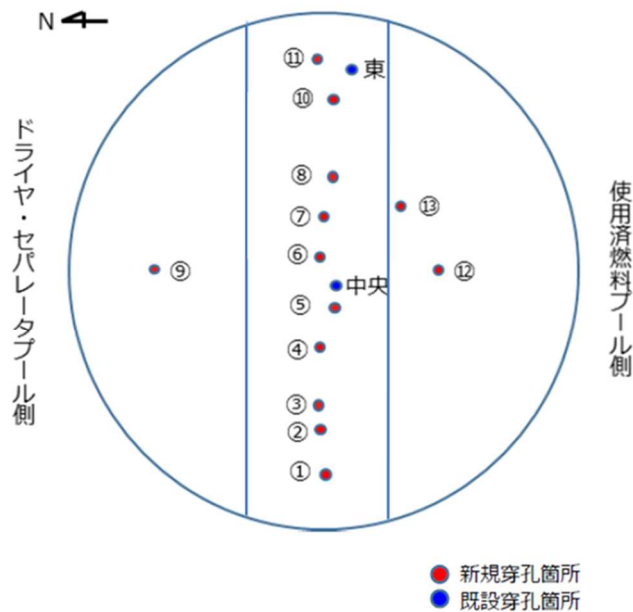
3. 穿孔箇所を選定

各測定点は、直下のシールドプラグ上層と中間層の間の直径1m程度の汚染密度を反映していることから、できるだけ多くのを穴内での測定が望まれる。しかし、直径12mのシールドプラグ全体の分布を穿孔穴内の測定だけで評価するのに必要な多くの穿孔作業は時間を要することから、廃炉工程へ影響も考慮しなくてはならない。

そこで、今回表面線量率を測定したデータと、今後行う新たな穿孔位置での穴内測定を組み合わせる事を前提にして穿孔位置を選定することにした。選定の際には以下の点を考慮した。

- 表面線量率の測定点の中から最大と最小の線量率範囲がカバーできる測定点を選ぶ。
- 得られた表面線量率の範囲を目安にし、重要な南北と東西の汚染量分布、シールドプラグの継ぎ目以外でも特異的に高い位置を含む。

種々の検討の結果、最終的には図3に示す13か所を穿孔することになった。



穿孔箇所の状況

図3 東京電力による穿孔箇所（13箇所）

4. 新たに穿孔した穴での測定

東京電力と原子力規制庁との共同測定として、東京電力が新たに穿孔した穴（以下「新穿孔穴」という。）での測定を、2021年11月30日、12月1日、12月6日、12月7日と12月14日の計5回実施した。12月7日には、穴内部の測定に加えて、新たな穿孔で取り出されたコンクリートコア表面の汚染密度を推定するためにPOLIMASTERを用いて表面線量率を測定した。

4-1 各測定で実施した内容

(1) 11月30日

IRID穴での測定結果と同様に、穴内部での周辺線量当量率は100 mSv/hを超えていると想定し、AT2533をIRID穴での測定と同じ様に高線量率モード（100 mSv/h以上対象の「Fof」モード）にして④、⑥、⑫及び⑬の4か所で測定を行った

しかしながら、当初の予想と異なり、ほとんどの測定結果が100 mSv/h以下であることを示す「L99」であった。

(2) 12月1日

IRID穴（中央）と新穿孔穴（⑤）で測定を行い、データロガーの「表示」とデータロガーのデータは対応していることを確認した。穴内部の位置による周辺線量当量率分布

が新穿孔穴と IRID 穴で異なることが分かった。

(3) 12月6日と7日

有意な線量率を得るために、AT2533 を線量率により「GM 検出器、表面から 5 cm の位置 (130 mSv/h 以下)」または「Si センサー、線量計表面から 1.5 cm の位置 (130 mSv/h 以上)」に切り替わる「FoN」モードで測定を実施した。

測定された周辺線量当量率は、ほとんどが 130 mSv/h 以下であり、穴の底面 4.7 cm より浅い位置であるが、すべての穴で周辺線量当量率情報を測定することができた。

(4) 12月14日

穴内部の深い位置での周辺線量当量率情報を得るために、POLIMASTER の GM 検出器を接続ケーブルを使用して線量計から離れた位置に設置できるようにし、治具の底に固定して IRID 穴を含む 15 箇所での測定を行った。各穴ではシールドプラグ上層上面から 1.5 cm 高さで、穴の直上と東西南北の 5 か所での測定を合わせて実施した。POLIMASTER による測定結果は、表示された周辺線量当量率を読み取り記録する方式で行った。

全ての穴内部での周辺線量当量率分布を測定することができた。

4-2 測定結果

(1) コア表面の汚染密度

大部分のコンクリートコアは、バックグラウンドとほぼ同じで、以下の 4 つで有意な値が得られた。

4 番 : 3 mSv/h

6 番 : 1.6 mSv/h (シールドプラグ中心)

12 番 : 870 μ Sv/h (シールドプラグプラグ継ぎ目)

13 番 : 520 μ Sv/h (表面での周辺線量当量率が特異に高い箇所)

【参考 1】に示す様に、最大の周辺線量当量率である 4 番の 3 mSv/h の場合で $5.2E+05$ Bq/cm² に相当する。この事は、シールドプラグ上層上面の汚染密度が他の床面と同程度であることを確認する直接的なデータである。

(2) 穴内部等での測定結果

「FoN モード」で、系統的なデータが取得できた 2021 年 12 月 6 日と 7 日の測定結果を表 2 に示す。床表面からセンサーまでの距離は、周辺線量当量率が 130 mSv/h 以下の場合には検出器表面から 5 cm の GM 計数管の位置で、130 mSv/h を超える場合は検出器表面から 1.5 cm の Si センサーの位置である。周辺線量当量率はデータロガーに記録された 1 分毎の周辺線量当量率の 3 分間平均である。但し、表中赤字で示した測定位置では「記録なし」とされた多数のデータがあり、表示部の値が大きく変動していたので表示

部の最小値と最大値で示している。「FoNモード」では、130 mSv/h を境に GM 検出器と Si センサーが使用されるようになっている。GM 検出器の位置では 130 mSv/h を超えており、Si センサーの位置では 130 mSv/h より少ない状況であったことからこのような状況が発生したと考えられる。

2021 年 12 月 14 日の実施した POLIMASTER による測定結果を表 3 に示す。全ての位置での周辺線量当量率が得られている。

表2 12月6日と12月7日の「FoNモード」での測定結果

測定日	穴番号	床表面からの距離		AT2533	表面線量率
		軸の底 cm	センサー中心		
12月6日	1	9.5	4.0	11.1	37.7
		8.0	2.5	14.0	
		6.0	0.5	21.0	
		4.0	-1.6	36.0	
		2.0	-3.6	42.0	
12月6日	2	8.0	2.5	10.5	
		6.0	0.5	15.8	
		4.0	-1.6	42.1	
		2.0	-3.6	52.5	
12月7日	3	10.0	4.5	50	115
		8.0	2.5	51.6	
		6.0	0.5	53.4	
		南床	-1.8	171	
12月6日	4	7.0	1.5	82(139)	157
		6.0	0.5	82(156)	
		4.0	-1.6	105	
		2.0	-3.6	135	
12月6日	5	7.5	2.0	33.9	163
		6.0	0.5	38.0	
		4.0	-1.6	67(199)	
		2.0	-3.6	60(245)	
12月6日	6	7.0	1.5	57.8	191
		6.0	0.5	58.7	
		4.0	-1.6	67(199)	
		2.0	-3.6	75(809)	
12月6日	7	9.0	3.5	68.7	179
		7.0	1.5	69	
		6.0	0.5	68	
		4.0	-1.6	75(180)	
		2.0	-3.6	82(453)	
12月7日	8	9.8	4.3	41.5	209
		8.0	2.5	43.4	
		6.0	0.5	43.3	
		南床	-1.8	210	
12月7日	新9	8.5	3.0	112	
		8.0	2.5	111	
		6.0	0.5	115	
		床	-1.8	277	
12月7日	10	7.5	2.0	8.11	31.3
		6.0	0.5	10.3	
		南床	-1.8	41.4	
12月7日	11	10.0	4.5		19.3
		8.0	2.5	11.1	
		6.0	0.5	13.7	
		東床	-1.8	31.5	
12月6日	12	10.0	4.5		354
		8.0	2.5	117	
		6.0	0.5	119	
		4.0	-1.6	119	
12月6日	13	10.0	4.5	97(135)	104
		8.0	2.5	105	
		6.0	0.5	117	
		4.0	-1.6	120	
		2.0	0.2	134	

表3 12月14日のPOLIMASTERによる測定結果

穴番号	床表面からの筒底の距離		POLIMASTER 表面線量率 mSv/h	穴番号	床表面からの筒底の距離		POLIMASTER 表面線量率 mSv/h
	軸の底 cm	センサー中心			軸の底 cm	センサー中心	
1	9.5	8.0	7.37	新9	10.0	8.5	70.2
	8.0	6.5	7.35		8.0	6.5	69.5
	6.0	4.5	10.2		6.0	4.5	91.5
	4.0	2.5	24.1		4.0	2.5	93.6
	2.0	0.5	35.3		2.0	0.5	97.4
	0.0		35.7		0.0		176
	東		35.9		東		157
	西		33.5		西		314
	南		41.6		南		222
北		36.0	北		183		
2	9.0	7.5	8.65	10	7.0	5.5	4.83
	8.0	6.5	8.15		6.0	4.5	5.34
	6.0	4.5	8.23		4.0	2.5	6.37
	4.0	2.5	10.4		2.0	0.5	12.7
	2.0	0.5	18.5		0.0		24
	0.0		41.4		東		22.9
	東		52		西		30.5
	西		41		南		25.9
	南		44.2		北		30
北		43.9	8.0	6.5	5.9		
3	8.5	7.0	32.3	11	6.0	4.5	8.41
	8.0	6.5	34.7		4.0	2.5	10.6
	6.0	4.5	43.3		2.0	0.5	15.6
	4.0	2.5	47.7		0.0		26.8
	2.0	0.5	65.5		東		26.4
	0.0		101		西		26.5
	東		176		南		26
	西		104		北		26.6
	南		105		8.0	6.5	87.3
北		99.4	6.0	4.5	92.4		
4	7.0	5.5	72.2	12	4.0	2.5	95.6
	6.0	4.5	66.3		2.0	0.5	111
	4.0	2.5	86.4		0.0		228
	2.0	0.5	110		東		440
	0.0		148		西		138
	東		157		南		222
	西		207		北		213
	南		161		10.0	8.5	75.4
	北		159		8.0	6.5	76.2
5	7.5	6.0	24.5	13	6.0	4.5	77.6
	6.0	4.5	25.1		4.0	2.5	88.4
	4.0	2.5	26.2		2	0.5	91.3
	2.0	0.5	70.1		0		182
	0.0		125		東		264
	東		132		西		175
	西		169		南		182
	南		107		北		278
	北		142		5	3.5	950
6	7.0	5.5	42.8	RID(中央)	4	2.5	807
	6.0	4.5	44.4		2	0.5	773
	4.0	2.5	45.9		0		529
	2.0	0.5	78.1		東		304
	0.0		169		西		512
	東		145		南		307
	西		196		北		302
	南		191		5	3.5	293
	北		168		4	2.5	289
7	9.0	7.5	52	IRID(東)	2	0.5	221
	8.0	6.5	51.5		0		136
	6.0	4.5	52.7		東		126
	4.0	2.5	53.9		西		101
	2.0	0.5	72.9		南		74.7
	0.0		112		北		102
	東		243				
	西		95.8				
	南		147				
北		154					
8	10.0	8.5	36.5				
	8.0	6.5	40.4				
	6.0	4.5	45.6				
	4.0	2.5	40.5				
	2.0	0.5	65.5				
	0.0		137				
	東		176				
	西		119				
	南		138				
北		135					

5. 測定結果の検討

5-1 深さによる線量当量率分布

図4に、各穴での深さ方向の周辺線量当量率分布を示す。穴の深さが7 cmのIRID穴については、2021年8月26日に実施したAT2533線量計による測定結果を合わせて示している。IRID穴では東側の深い位置を除いて深さと共に周辺線量当量率が増加する傾向を示している。一方、新穿孔穴では、床表面から2 cmまでは深さによりほとんど変わらないか深さと共に若干減少する傾向を示し、0.5 cmより浅くなると増加するというIRID穴と異なる傾向を示している。0.5 cmからの上昇の割合は、周辺線量当量率が低い穴の方が顕著である。

このような違いが生じる原因としては、コンクリート内部の測定であることから、シールドプラグ上層上面から離れた位置での測定では影響が少なかった鉄筋等のシールドプラグ内部の構造が考えられる。もう一つの要因としてオペフロ内壁の影響が考えられる。シールドプラグ内部での測定を検討した段階では、内壁の寄与として主として床面を考慮した。床面の場合は、シールドプラグ上部と内部で線源領域と評価点の関係が顕著に異なることから内壁の汚染による影響は深さと共に急激に減少する。しかしながら、別添3-2-5-9で分析した様に、シールドプラグ上部での内壁汚染の寄与として壁と天井に影響が無視できないことが分かった。天井や壁の場合には、床面の場合よりコンクリートによる減衰が緩やかになり、浅い位置での周辺線量当量率に寄与する可能性がある。

5-2 床表面1.5 cmでの周辺線量当量率分布

状況を理解する上で、シールドプラグ上層上面から高さ1.5 cmでの中心軸上と東西南北の周辺線量当量率分布を比較する。東西南北は、治具の端が穴の淵になるようにして測定したので、中心軸から凡そ4.5 cm位置の測定である。図5に比較を示す。穴の下部が均一な構造であれば、IRID穴（中央）見られるように穴の上部が最も高く東西南北はほぼ同じ程度となると考えられる。新穿孔穴周辺はIRID穴の周辺とは異なる分布となっていることから、シールドプラグ内部の構造の影響を考慮する必要がある。また、床表面近くでも内壁の様々な壁の影響やロボット（Kobra）の筐体の遮蔽効果が影響している可能性がある。

5-3 シールドプラグ内鉄筋について

穴内部での周辺線量当量率に影響を与える可能性があるシールドプラグ内部の構造物として鉄筋が考えられる。東京電力による設計図面の検討から、図6に示す様に、上面から10 cmの位置に東西に15 cm間隔でD25（公称直径2.54 cm）の鉄筋が、その下に南北に20 cm間隔で同じD25の鉄筋があること、下面から10 cmの位置に東西に20 cm間隔でD32（公称直径3.18 cm）の鉄筋が、その下に南北に20 cm間隔で同じ

D32 の鉄筋が設置されていることが分かった。配筋の実際場所は図面とはズレがあること、穿孔された穴の位置は撮影画面からの推定であることから、個々の穴と配筋の位置関係は正確には分からない。

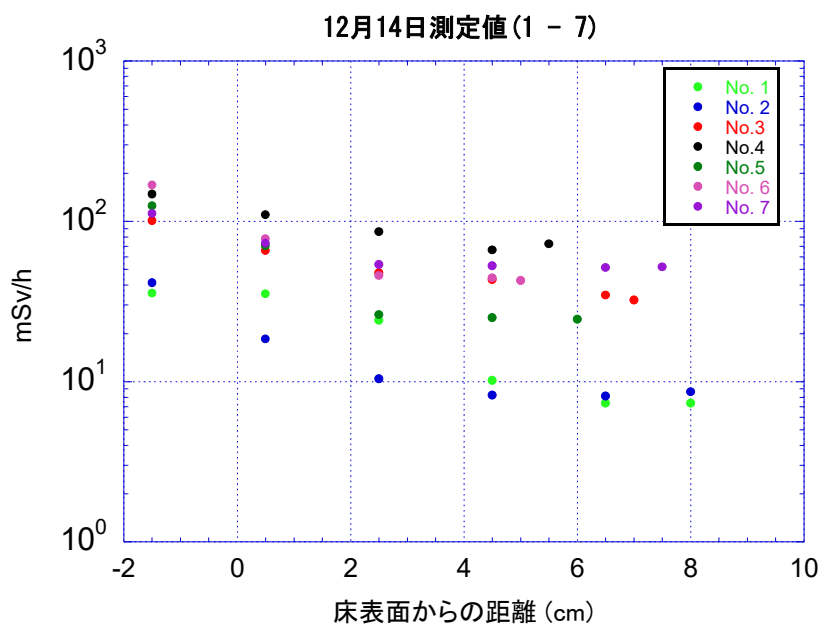


図4 (a) 各穴での深さ方向の周辺線量当量率分布 (新穿孔穴) (1 ~ 7)

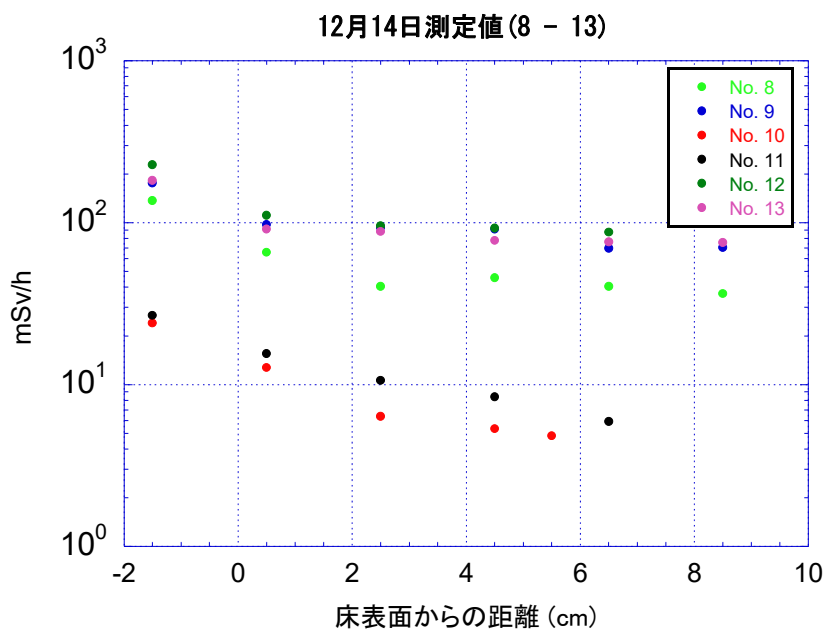


図4 (a) 各穴での深さ方向の周辺線量当量率分布 (新穿孔穴) (8 ~ 13)

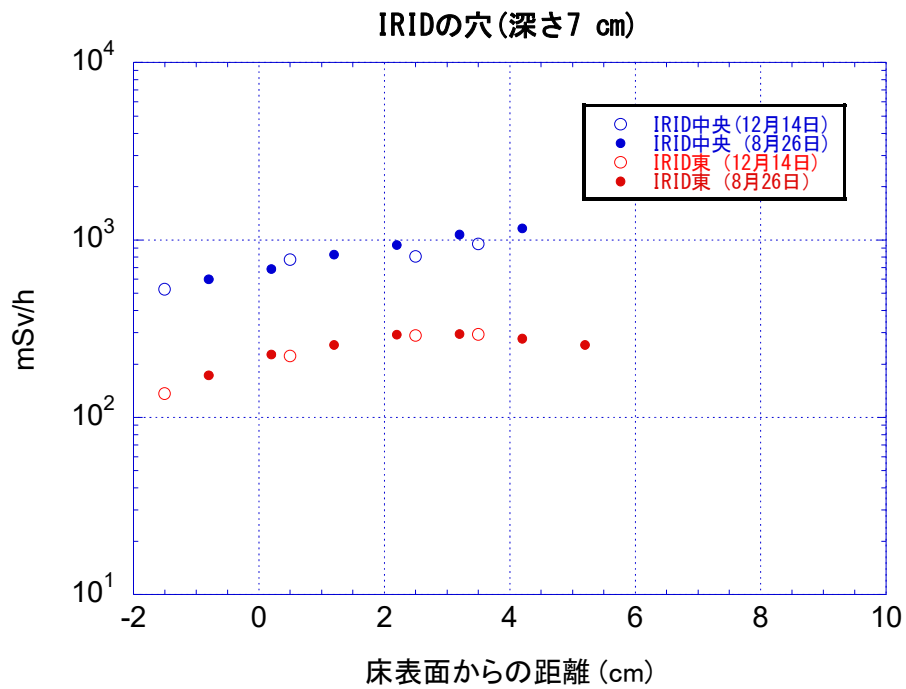


図4 (b) 各穴での深さ方向の周辺線量当量率分布 (IRID 穴)

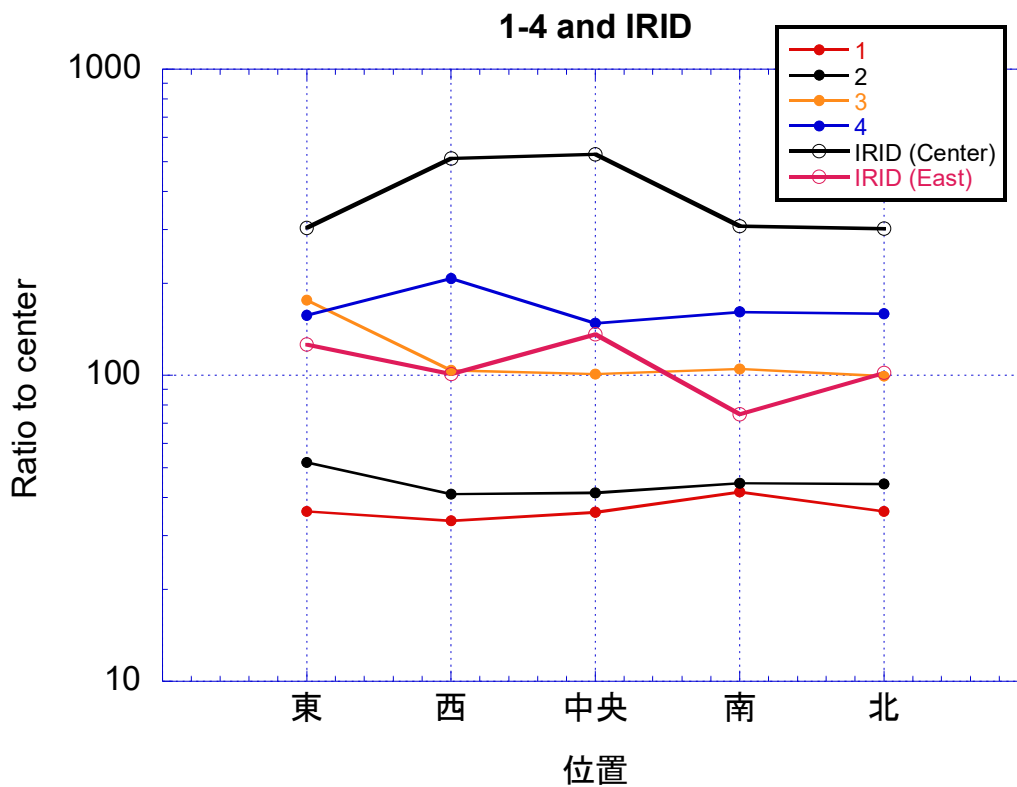


図5 床表面から 1.5 cm 位置での周辺線量当量率分布 (新穿孔穴) (1-4)

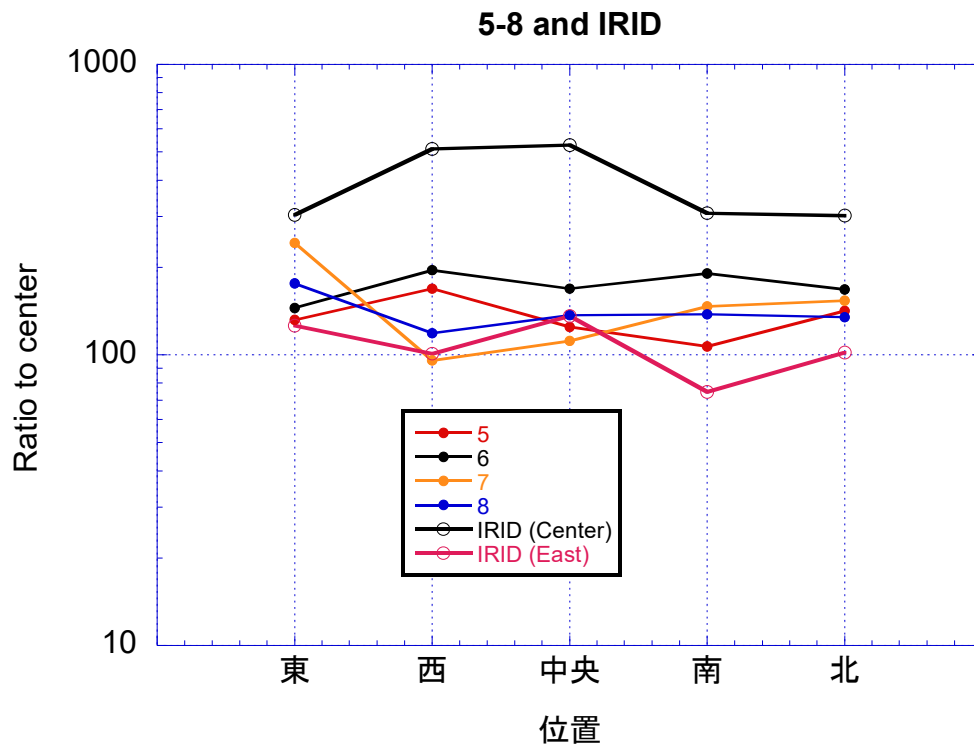


図5 床表面から 1.5 cm 位置での周辺線量当量率分布 (新穿孔穴) (5-8)

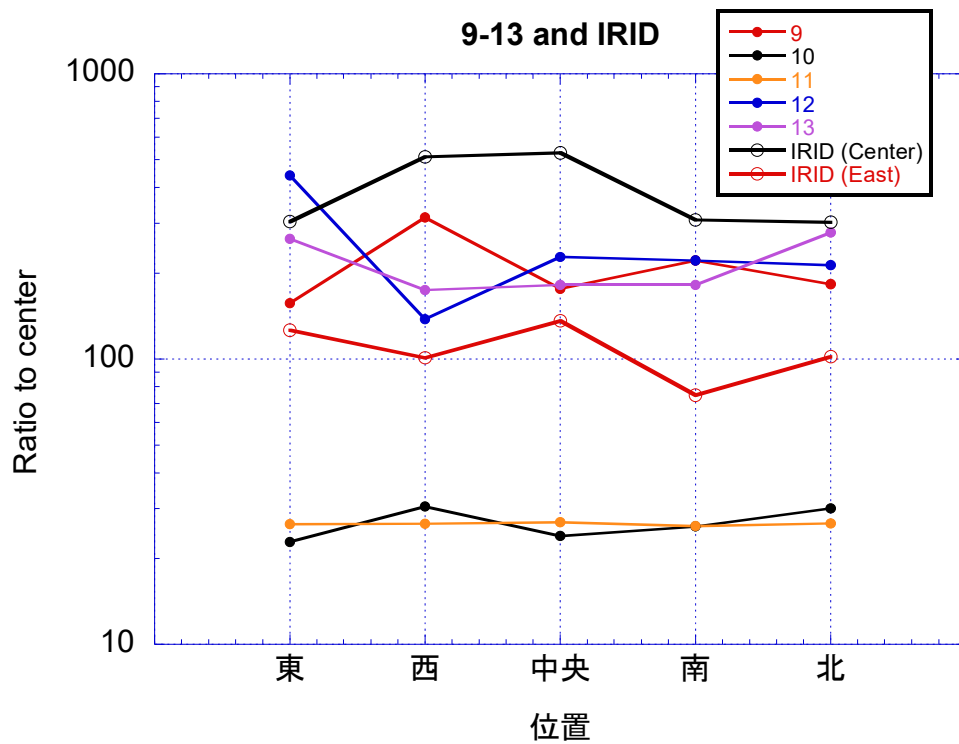


図5 床表面から 1.5 cm 位置での周辺線量当量率分布 (新穿孔穴) (9-13)

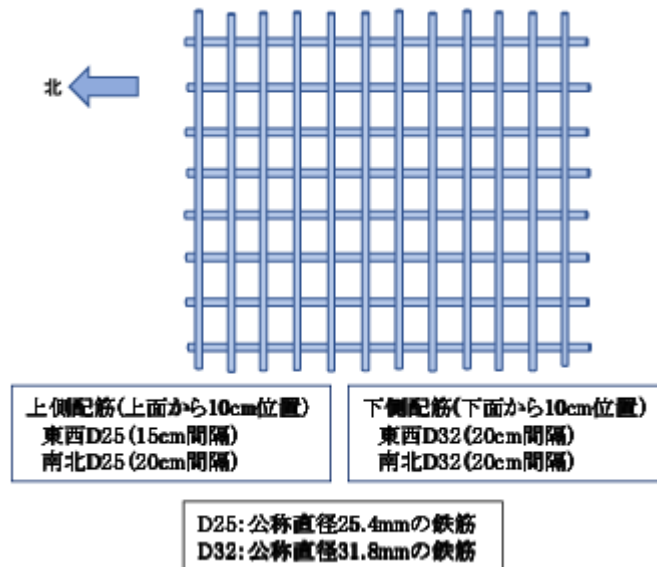


図6 シールドプラグの配筋

6. 測定に使用した線量計の相互比較

測定では Atomtex 社製の AT2533 (低線量率用の GM と高線量率用の Si) , Polimaster (低線量率用 GM) と日立アロカ製の PDR-303 を使用した。実測値の相互比較から各線量計の特性 (エネルギー応答、角度応答) に違いはあるが、【参考 2】に示す様に、測定結果の比較から得られた周辺線量当量率に大きな違いがないことを確認した。

【参考 1】

2 号機シールドプラグ上層の穿孔により採取したコア表面の汚染密度推定

1. はじめに

2 号機のシールドプラグ上層と中間層の間に沈着している Cs-137 の測定を目的に、シールドプラグ上層に直径 5cm、深さ 10cm の穿孔が東京電力により行われた。穿孔により採取したコンクリートコアの表面について、POLIMASTER 線量計で原子力規制庁が測定した結果からコンクリートコア表面の汚染密度を推定した。

2. 測定結果

測定は、2 号機オペフロ前室で行われた。測定場所の空間線量率は $200 \mu\text{Sv/h}$ で、コア表面での測定値からバックグラウンド値を引いた結果をコア表面の汚染によるとした。

大部分のコアは、バックグラウンドとほぼ同じで、下記のコアで有意な線量率が測定された。

4 番 : 3 mSv/h

6 番 : 1.6 mSv/h (シールドプラグ中心)

12 番 : $870 \mu\text{Sv/h}$ (シールドプラグ継ぎ目)

13 番 : $520 \mu\text{Sv/h}$ (シールドプラグ上層上面での周辺線量当量率が特異に高い箇所)

最大線量率は、4 番の 3 mSv/h であった。

3. 汚染密度の推定

背後のコアによる後方散乱の影響を無視し、自己遮蔽の無い面線源の場合には、解析的に MBq/cm^2 当たりの 1cm 線量当量率を以下の式で計算することができる。

$$q = 10^4 \pi \Gamma_{1\text{cm}} \ln \frac{R^2 + h^2}{h^2}$$

上式で、

R (cm) は面線源の半径、 h (cm) は面線源の中心での線源面からの距離 ($\Gamma_{1\text{cm}}$ ($\mu\text{Sv/h}$ per MBq at 1m)) である。

コアの場合は、 $R=2.5 \text{ cm}$ である。測定は、コア表面から 1 cm 位置で測定したとして $h=1 \text{ cm}$ とする。Cs-137 の 1 cm 線量当量率定数は、 0.0927 ($\mu\text{Sv/h}$ per MBq at 1m) であるので、 $q=5789$ ($\mu\text{Sv/h}$ per MBq/cm^2) となる。従って、 3 mSv/h となる汚染密度

は、

$$3.0 \times 1000 / 5789 = 5.2 \text{E} + 05 \text{Bq/cm}^2$$

となる。

この汚染密度は、これまで2号機オペフロで測定されている最大で $1.0 \text{E} + 06 \text{ Bq/cm}^2$ の範囲内である。

【参考 2】

2号機シールドプラグでの測定に使用した線量計の比較

1. はじめに

2号機シールドプラグでの周辺線量当量率測定では、Atomtex社製のAT2533（低線量率用のGMと高線量率用のSi）、Polimaster（低線量率用GM）と日立アロカ製のPDR-303を使用した。それぞれの測定結果を比較することにより、得られた周辺線量当量率に大きな違いがないことを確認した。

2. 測定結果の比較

2-1 AT2533のSi検出器とPolimasterの比較

IRID穴での測定結果の比較を図1に示す。同じ時の測定ではないため、床表面からの距離は若干異なっている可能性がある。中央の穴の深い位置で若干の差が見られる散乱線の寄与が多い場所でもほぼ同じ線量率となっている。AT2533のSi検出器は、他の線量計に比べてエネルギー応答が悪いが、シールドプラグでの測定はほぼPolimasterと同程度の応答である。

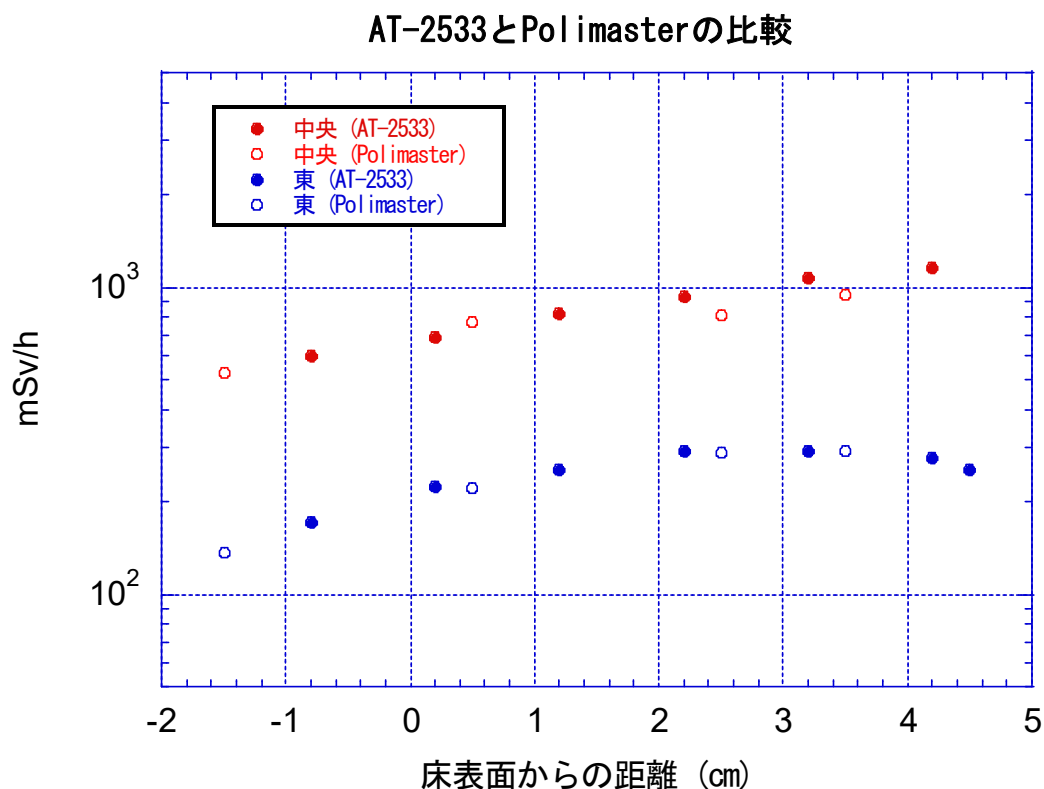


図1 AT2533のSi検出器とPolimasterの比較

2-2 AT2533 (GM) と Polimasater (GM) の比較

Fon モードで AT2533 を使用すると 100 mSv/h までは GM 検出器の結果が、100 mSv/h 以上では Si の結果となる。新穿孔穴での測定結果の比較を表 1 に示す。AT2533 の結果は大部分が GM の結果である。一部、GM の位置と Si の位置での線量率の関係から表示がばたつたデータがあった穴の結果は青字としている。ばたつきの無い穴では、両者はほぼ対応している。

表 1 Fon モードの AT2533 と Polimaster の比較

穴番号	表面からの距離		Polimaster	AT2533 (Fon)	穴番号	表面からの距離		Polimaster	AT2533 (Fon)	穴番号	表面からの距離		Polimaster	AT2533 (Fon)	
	(cm)	mSv/h				(cm)	mSv/h				(cm)	mSv/h			
①	8	7.37			⑥	5.5	42.8			⑪	6.5	5.9			
	6.5	7.35				4.5	44.4				4.5	8.41			
	4.5	10.2				2.5	45.9				2.5	10.6	11.1		
	4.0		11.1			1.5		58.2			0.5	15.6	13.7		
	2.5	24.1	14			0.5	78.1	59			-1.5	26.8			
	0.5	35.3	23.1			-1.5	169				6.5	87.3			
	-1.5	35.7				7.5	52				4.5	92.4			
-1.6		36		6.5	51.5			2.5	95.6						
②	7.5	8.65			⑦	4.5	52.7			⑫	0.5	111	119		
	6.5	8.15				3.5		68.5			-1.5	228			
	4.5	8.23				2.5	53.9				-1.6		119		
	2.5	10.4	10.5			1.5		69.8			8.5	75.4			
	0.5	18.5	16			0.5	72.9				6.5	76.2			
	-1.5	41.4				-1.5	112				4.5	77.6			
	-1.6		42.1			8.5	36.5				2.5	88.4	105		
③	7	32.3			⑧	6.5	40.4			⑬	0.5	91.3	119		
	6.5	34.7				4.5	45.6				-1.5	182			
	4.5	43.3	50			4.3		41.5			-1.6		119		
	2.5	47.7	51.6			2.5	40.5	43.4							
	0.5	65.5	53.4			0.5	65.5	43.3							
	-1.5	101				-1.5	137								
	-1.6					8.5	70.2								
④	4.5	66.3			⑨	6.5	69.5								
	2.5	86.4				4.5	91.5								
	0.5	110				3		112							
	-1.5	148				2.5	93.6	111							
	-1.6		105			0.5	97.4	115							
						-1.5	176								
						5.5	4.83								
⑤	2.5	26.2			⑩	4.5	5.34								
			34.1			2.5	6.37								
	0.5	70.1				2		8.11							
	-1.5	125				0.5	12.7	10.3							
						-1.5	24								

青:表示にばたつきがあるポイント含む

2-3 Polimastet と PDR-303 の比較

2021 年 9 月 9 日の IRID 穴での測定時に治具底から 35cm に設置した Polimaster と 150cm に設置した PDR-303 の比較を表 2 に示す。測定高さが異なるが、ほぼ同じ周辺線量当量率であることが判る。

3. まとめ

使用した線量計によりエネルギー応答が異なるので、線源の γ 線よりエネルギーが低い散乱線が中心の場で応答が異なることが懸念されたが、上記の相互比較から大きな違いが無いことを確認することができた。

表2 Polimaster と PDR-303 の比較

測定場所	治具底からの距離 cm	POLIMASTER	PDR-303
		mSv/h	
		25	150
東	7 cm	48.4	47.1
	0 cm	49.2	47.2
中央	6 cm	205	187
	0 cm	193	184

(別添 3-2-4)

2号機シールドプラグ上層と中間層の間に沈着している Cs-137 放射能の推定 (4) 新たに穿孔した穴での計算結果と測定結果の比較検討

原子力規制庁原子力規制部

東京電力福島第一原子力発電所事故対策室

平山英夫、近藤健次郎、鈴木征四郎、吉田善行、林克己、岩永宏平

1. はじめに

2021年に東京電力が2号機シールドプラグ上層上面に穿孔した穴(以下「新穿孔穴」という。)での測定を実施する以前は、シールドプラグ内部の鉄筋の影響は小さいとして、密度 2.1 g/cm^2 の厚さ 61 cm のコンクリートとしてシールドプラグ上層上面の穴内部等の周辺線量当量率を計算していた。新穿孔穴での測定結果から、上部の鉄筋に近い穴の下面では鉄筋との位置により影響が無視できないことが判明し、測定結果からシールドプラグ上層と中間層の間の汚染密度を推定するためには、鉄筋を含んだ計算が必要になった。以下では、鉄筋の配置を考量した egs5¹⁾の計算結果と測定結果を比較検討した。

2. 鉄筋を考慮した計算

egs5 の計算で鉄筋を組み込むとこれまで使用してきた衝突確率法等の手法の適用が難しいこと、穴内部での分布状況を計算するには検出器に近い小さな検出領域(半径 0.5 cm)の設定が必要なことから計算の妥当性のチェックが必要である。そこで、点減衰核計算コードである QAD-CGGP2²⁾(以下「QAD」という。)の結果と比較検討し、egs5 の計算結果を検証した。

鉄筋を含む比較の前に、均一なコンクリート内部での周辺線量当量率を比較した。表1に、61 cm コンクリート下面の Cs-137 面線源による均一なコンクリート内部での周辺線量当量率の比較を示す。床面から 0.5 cm 以外のコンクリート内では両者はほぼ一致している。これは計算形状が無限媒質中であり、ビルドアップ係数と対応しているためである。0.5 cm で QAD が大きくなっているのは、この位置から上のコンクリートが無限体系と見なすには薄いためであると思われる。

表 1 均一なコンクリート中での Cs-137 による周辺線量当量率の比較

床表面からの 距離 (cm)	QAD	egs5	QAD/egs5
	$\mu\text{Sv/h per Bq/cm}^2$ (Cs-137)		
0.5	1.12E-06	9.70E-07 ± 1.49E-08	1.15
2	1.40E-06	1.33E-06 ± 1.91E-08	1.05
4	1.90E-06	1.87E-06 ± 2.14E-08	1.02
6	2.58E-06	2.58E-06 ± 2.51E-08	1.00
8	3.50E-06	3.52E-06 ± 2.87E-08	1.00
9.75	4.57E-06	4.70E-06 ± 3.69E-08	0.97

2-1 鉄筋を含む計算形状と egs5 と QAD の比較

東京電力による設計図面の検討から、図 1 に示す様に、シールドプラグ上層上面から 10 cm の位置に東西に 15 cm 間隔で D25 (公称直径 2.54 cm) の鉄筋が、その下に南北に 20 cm 間隔で同じ D25 の鉄筋があること、シールドプラグ上層下面から 10 cm の位置に東西に 20 cm 間隔で D32 (公称直径 3.18 cm) の鉄筋が、その下に南北に 20 cm 間隔で同じ D32 の鉄筋が設置されている。

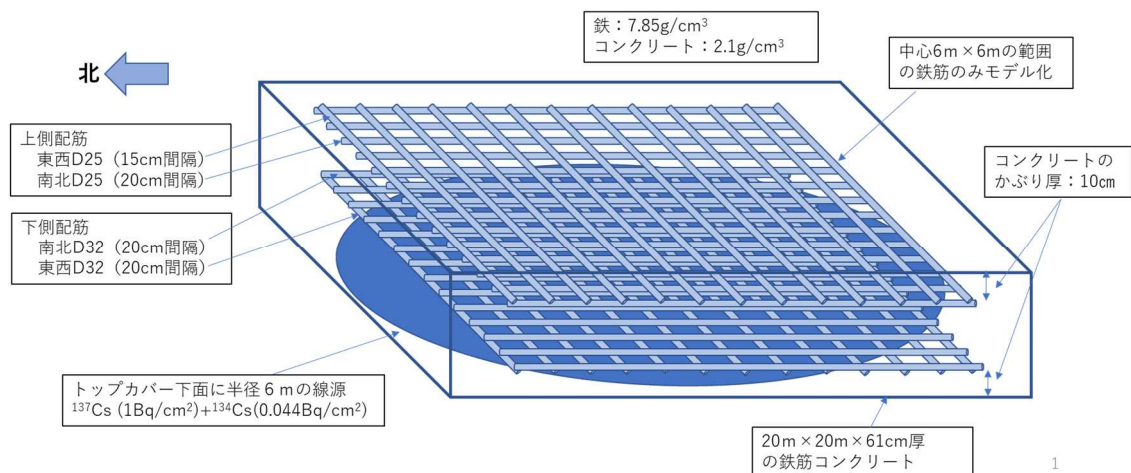


図 1 シールドプラグの配筋 (1 / 2)

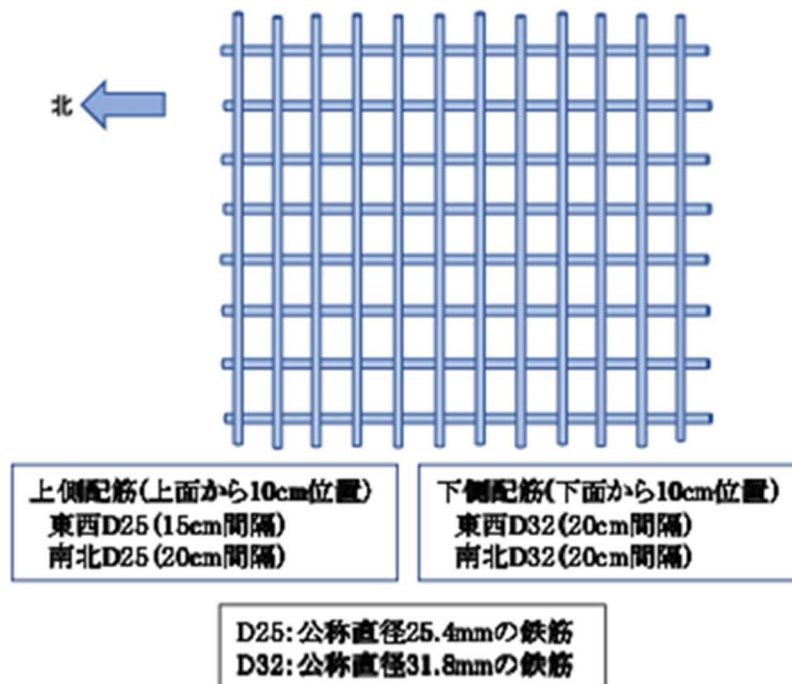


図1 シールドプラグの配筋 (2/2)

配筋の実際の場所は図面とはズレがあること、穿孔された穴の位置はカメラによる撮影画面からの推定であることから、個々の穴と配筋の位置関係は正確には分からない。そこで、図2に示す典型的な5つのケース(①～⑤)についてシールドプラグ上層と中間層の間に沈着しているCs-137とCs-134(Cs-137の4.4%の放射能密度)による穴内部等の周辺線量当量率を計算した。コンクリートの密度は 2.1 g/cm^3 とし、鉄筋の密度は、公称直径³⁾でモデル化し、その密度は重量を保存して決めた 7.85 g/cm^3 とした。

新穿孔穴について、穴の中心軸上1.5 cmを含む穴内部の周辺線量当量率の比較を図3に、穴の中心軸上を含む床表面から1.5 cmの東西南北の周辺線量当量率の比較を図4に示す。

なお、QADの結果は別添3-2-5-1に示したものを使用した。

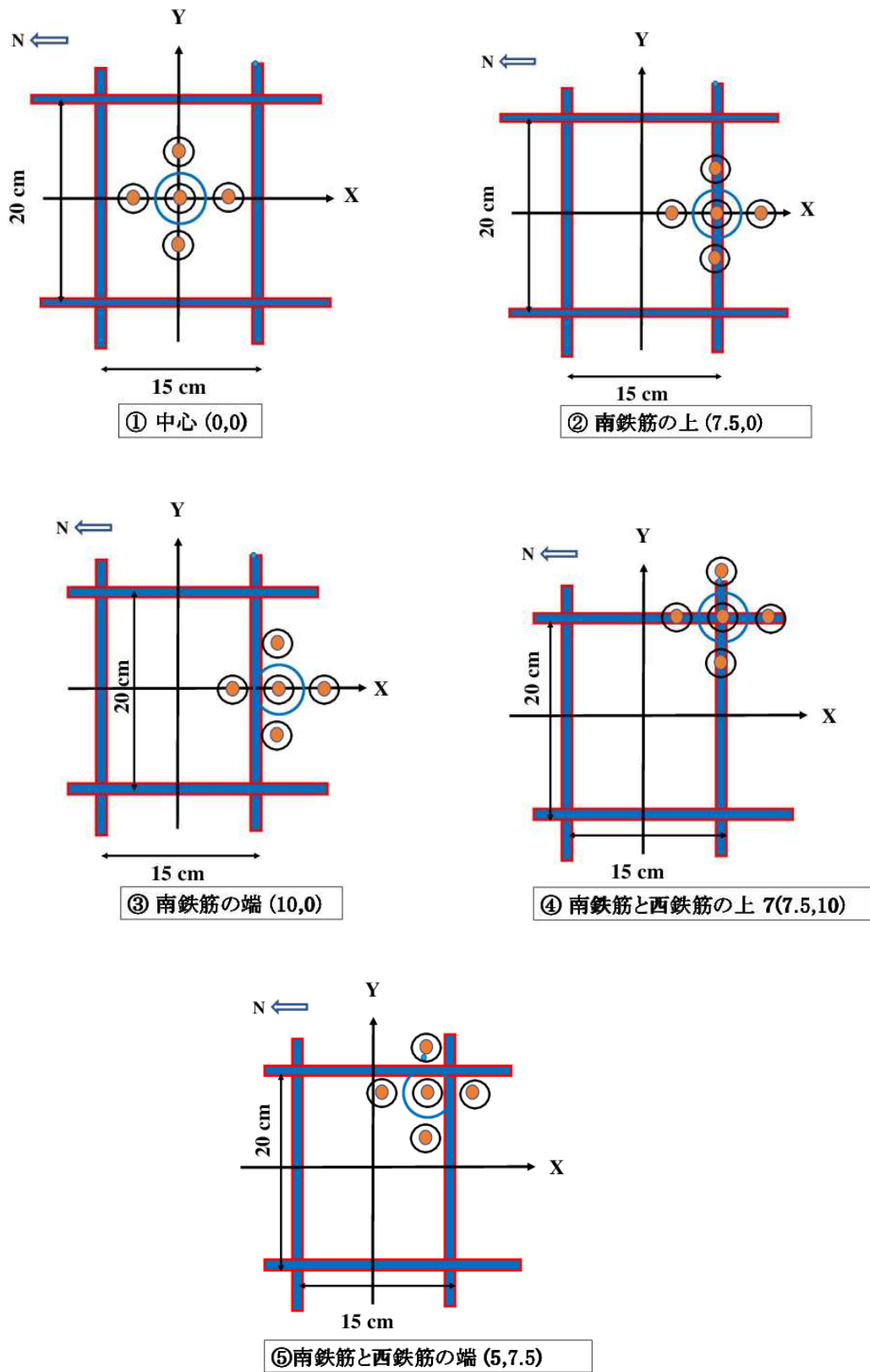


図2 鉄筋を含む計算形状

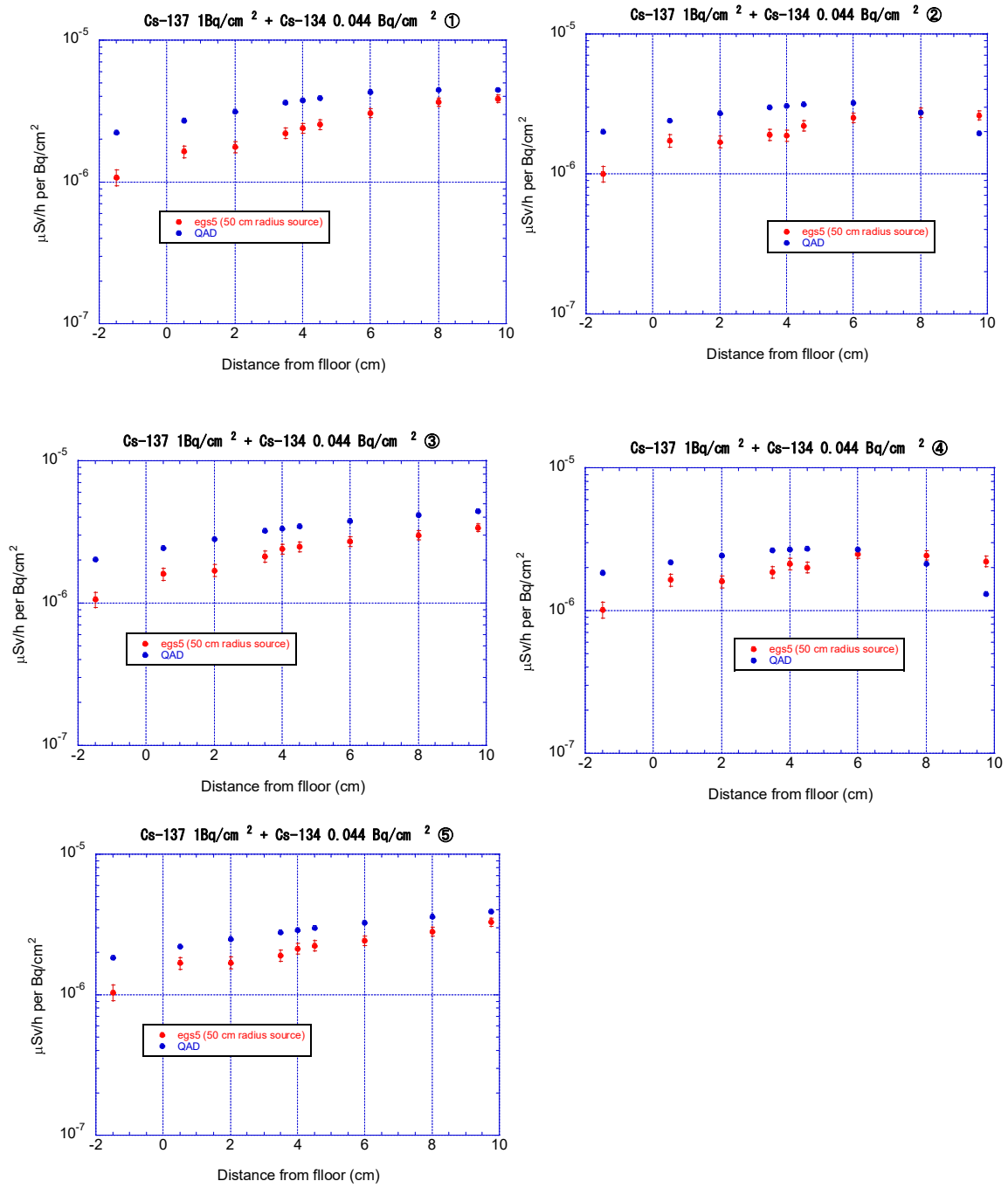


図3 egs5 と QAD の比較 (穴内部)

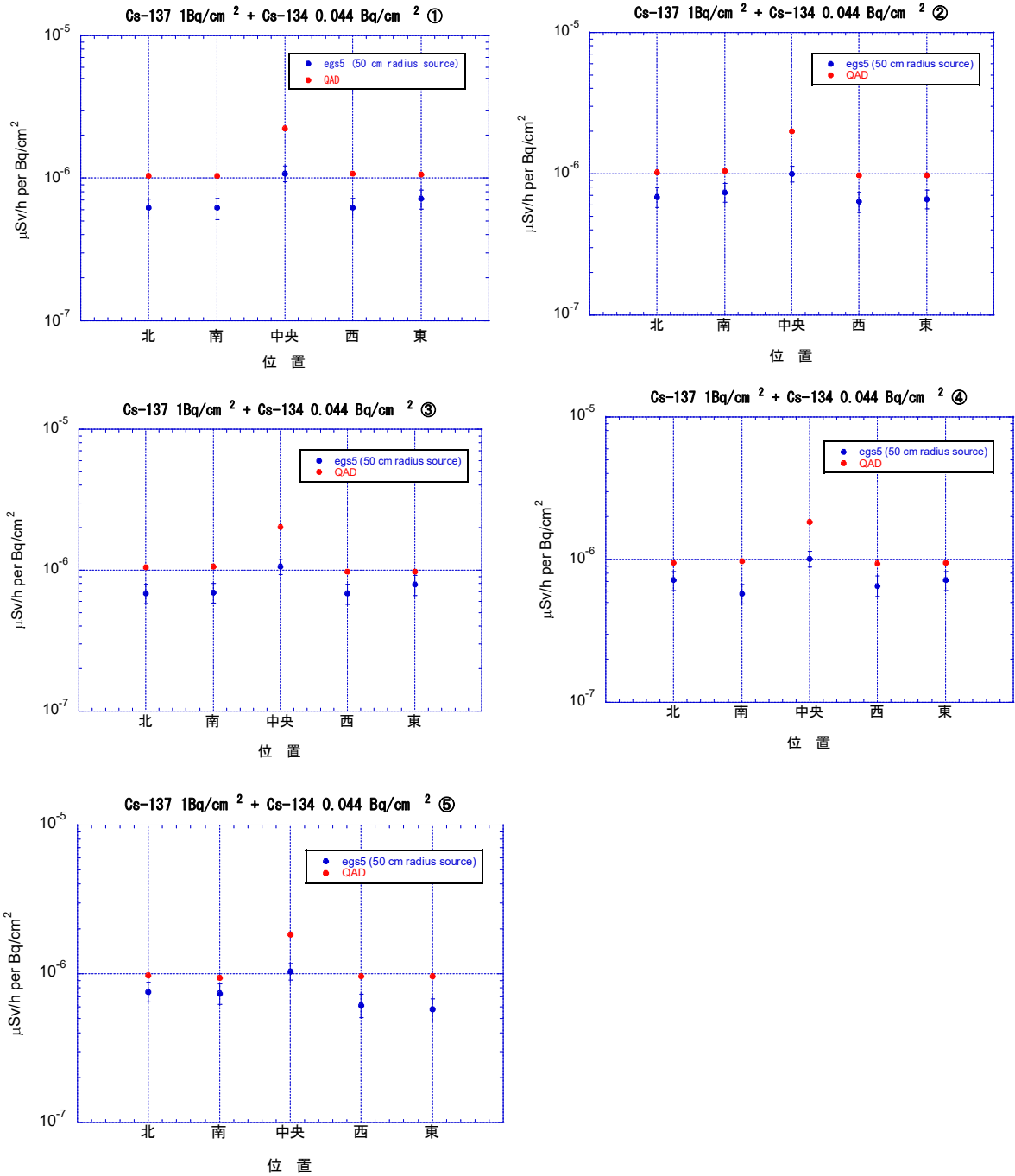


図4 egs5 と QAD の比較 (床表面 1.5 cm)

2-2. 比較の検討

QAD は点減衰核計算コードであるので、周辺線量当量率は直接線（非散乱線）の周辺線量当量率とビルドアップ係数で計算する。ビルドアップ係数としては、本来周辺線量当量に対応する「1 cm 線量当量ビルドアップ係数」を用いるべきであるが、使用した QAD では、ANS-643⁴⁾ の照射線量ビルドアップ係数しか使用できる標準データがなかったため、「照射線量を換算係数で補正する手法」⁵⁾ を適用している。この手法では、遮蔽物質の平均自由行程数 (mfp) に伴い換算係数が増加しその後一定になることから、一定になった値を「実効換算係数」として使用している。従って、遮蔽の厚さにより過大評価になる傾向がある。また、QAD では、ビルドアップ係数を適用する物質は 1 つしか指定できないので、本計算ではコンクリートのビルドアップ係数を使用した。ビルドアップ係数は、同じエネルギーの光子であっても物質により異なる。図 5 に Cs-137 からの γ 線エネルギーに近い 0.6 MeV 光子に対するコンクリート、鉄、空気の周辺線量当量ビルドアップ係数⁴⁾ の比較を示す。コンクリートのビルドアップ係数は鉄よりも大きいことが分かる。異なる物質で構成されている多重層のビルドアップ係数は複雑であるので単純な比較は難しいが、そのことを別としても、コンクリートみのビルドアップ係数を使用するという事は、鉄の部分の mfp をコンクリートの同じ平均自由行程数に置き換えて適用することになる。両者のビルドアップ係数の違いから周辺線量当量率を過大評価する傾向となる。また、使用するビルドアップ係数は、無限体系中のビルドアップ係数である。均一なコンクリート中で egs5 と QAD の結果が一致するのは、ビルドアップ係数が前提としている無限体系中に近いためである。また、空気層の領域では、無限体系よりも有限体系に近い状況となることから、この場合も QAD の結果は過大評価の傾向となる。一方、計算対象となっている穴の底近くでは、線源からの直接線・散乱線に加えて、周辺での散乱線の回り込みが一定の割合で寄与する。QAD の計算ではこの効果は考慮されていないので、過小評価の傾向となる。egs5 の計算では、線源をリング上に分割し、得られた結果の合計から対象領域からの周辺線量当量率を計算している。図 3、図 4 及び図 5 の egs5 の計算結果は線源半径 50 cm の場合の結果である。QAD の計算は半径 6 m の線源の結果である。QAD の計算から半径 50 cm 外部の線源からの寄与が最大で 10 % 程度ある。従って、egs5 の結果は最大で 10 % 程度過小評価となっている。

以上の点を念頭に両者の比較検討を行う。

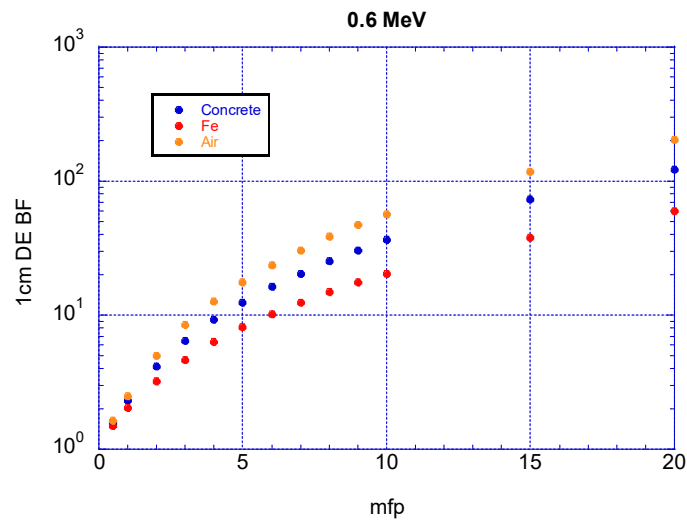


図5 周辺線量当量（1cm線量当量）ビルドアップ係数の比較

(1) 穴内部の分布

egs5 と QAD の穴内部の周辺線量当量率分布は、①から⑤のそれぞれでほぼ対応した傾向になっており、egs5 の計算で鉄筋の記述が妥当であることを示している。全体として、QAD の結果が大きく、シールドプラグ上層上面や上部でその割合が大きくなるのは、QAD のビルドアップ係数に起因すると思われる。②と④のように穴の下面に鉄筋がある形状では穴の底で、egs5 の方が大きくなっている。これは、QAD では扱えない穴周辺からの散乱の影響であると考えられる。

(2) 表面での分布

egs5 と QAD 共に、穴中心部が最も高く東西南北はほぼ同じという結果になっている。全体として QAD の周辺線量当量率が egs5 より大きいのは、(1) と同じ理由である。どちらの結果も形状による分布の違いが小さいことは、コンクリート床面上部では鉄筋と穴との位置関係による影響が小さいことを示している。

2-3 比較のまとめ

上記の比較から egs5 の計算結果は、鉄筋を適切に扱っているといえることができる。

3. 実効線源領域

シールドプラグ上層上面近く及びシールドプラグのコンクリート内部での周辺線量当量率の評価において、評価結果や測定結果が実効的にどのような広さの領域の汚染密度を反映しているかを見ておく必要がある。実際の汚染密度は均一ではなく分布があることが想定されるが、ここでは汚染密度は均一であるとする。評価点からの距離と共に単位放射能当たりの周辺線量当量率は距離と透過するコンクリートの厚さの違

いから急激に減少するが、線源を同じ幅のリングの分割した場合、線源からの距離とコンクリート厚さが同じ領域の面積が増加するので、両者を加味して実効的な線源領域を設定する必要がある。別添 3-2-5-2 に示す様に、シールドプラグ上層上面から 3 cm の領域では評価位置下部の半径 50 cm の位置では単位放射能当たりの周辺線量当量率は、評価位置下部全体の 5 %程度となる。面積を考慮した場合には寄与が若干増えて 10 %程度となる。半径 40 cm までの領域の寄与が 80 %程度であることから、汚染密度が実効的に影響する領域は多めに見積もっても半径 50 cm 程度であると言える。このことを考慮して、線源をリング状に分割している egs5 の計算では半径 50 cm までの寄与を線源からの周辺線量当量率とする。50 cm の外側に寄与が最大で 10 %程度あるので、egs5 の結果は最大で 10 %程度過小評価となり、測定値から汚染密度を推定する場合には、最大 10 %過大評価となる。シールドプラグのコンクリート内部の場合、鉄筋との位置関係により寄与分布の形は若干変化するが、半径 50 cm より外側の寄与が 10 %以下という結果は変わらない。

4. 計算結果を踏まえた測定結果の検討

4-1 計算結果

(1) 新たに穿孔した穴内部

①～⑤の計算形状での egs5 計算結果を図 6 に示す。シールドプラグ上層上面から 6 cm より深い位置では、穴の下部近辺に鉄筋がある場合には床表面からの距離の増加により周辺線量当量率が減少する傾向やほとんど変化しない領域がある。また、シールドプラグ上層上面から 6 cm より浅くなると、鉄筋との位置関係により周辺線量当量率は若干異なるが、シールドプラグ上層上面に近いほど小さくなる傾向となっている。

(2) IRID の穴内部

国際廃炉研究開発機構 (IRID) が穿孔した穴 (以下「IRID 穴」という。) と新穿孔穴の違いは、穴の深さである。IRID 穴は 7 cm で新穿孔穴は 10 cm である。この違いは、

- ・シールドプラグの上側鉄筋の上部は、シールドプラグ上層上面から 10 cm であるので、IRID 穴では穴の底から鉄筋までの間に少なくとも 3 cm のコンクリートがある。
- ・穴内部での測定可能な深さは、線量計の実効中心を考慮するとシールドプラグ上層上面から 6 cm より浅い位置である。

ことを意味する。IRID 穴の内部の計算結果を図 7 に示す。(1) の結果から推定出来るように、鉄筋との位置により程度の違いはあるが、シールドプラグ上層上面に近くなるに伴い周辺線量当量率が減少する傾向になっている。

(3) 周辺線量当量率からシールドプラグ上層と中間層の間の汚染密度への換算係数

各穴と鉄筋の正確な位置関係が分からないので、シールドプラグ上層と中間層の間の汚染 (1 Bq/cm^2 の Cs-137 と 0.044 Bq/cm^2 の Cs-134) による周辺線量当量率としては、典型的な 5 つの形状に対する結果の平均値を使用することとする。形状により分布の形の違いが少ない 6 cm より浅い位置での換算係数を図 8 に示す。穴の深さによる値の違いはあるが、新穿孔穴と IRID 穴で分布の形には大きな違いが無いことが分かる。

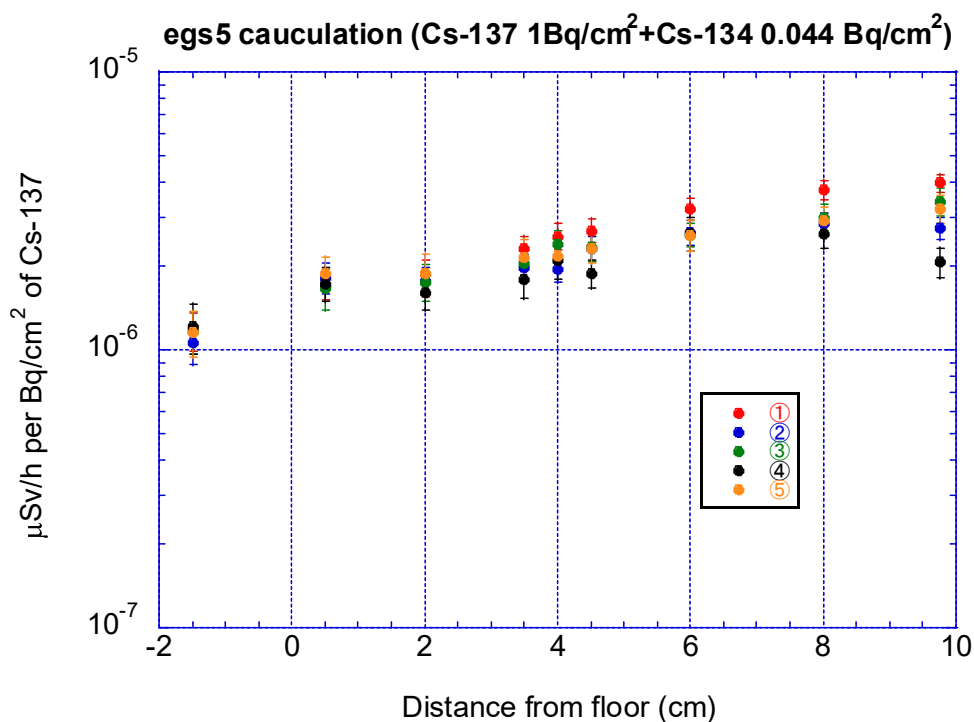


図 6 egs5 の計算結果によるシールドプラグ上層と中間層の間の Cs-137 : 1 Bq/cm^2 と Cs-134 : 0.044 Bq/cm^2 による新穿孔穴内部の周辺線量当量率分布

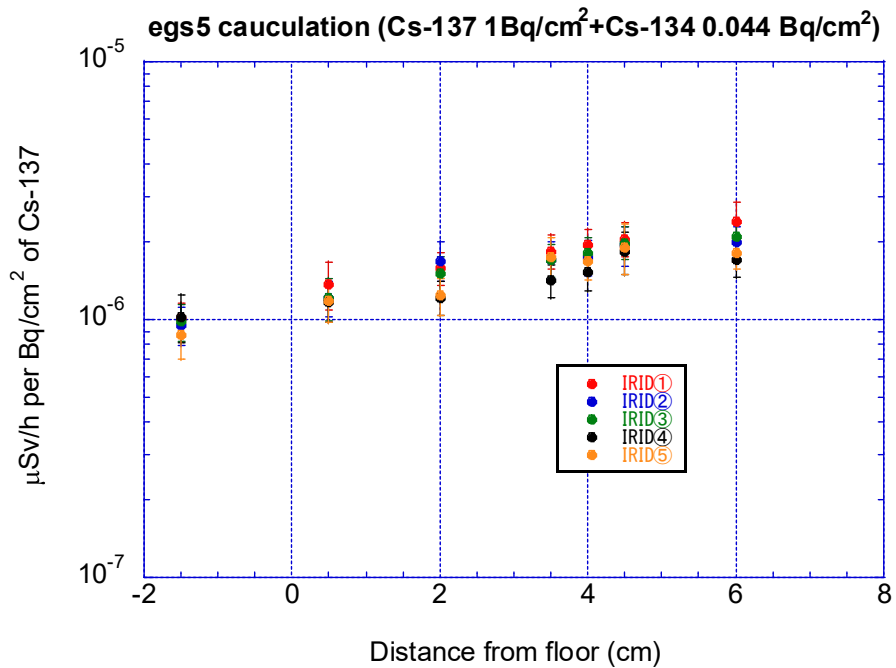


図7 egs5 の計算結果によるシールドプラグ上層と中間層の間の Cs-137 : 1 Bq/cm² と Cs-134 : 0.044 Bq/cm² による IRID 穴内部の周辺線量当量率分布

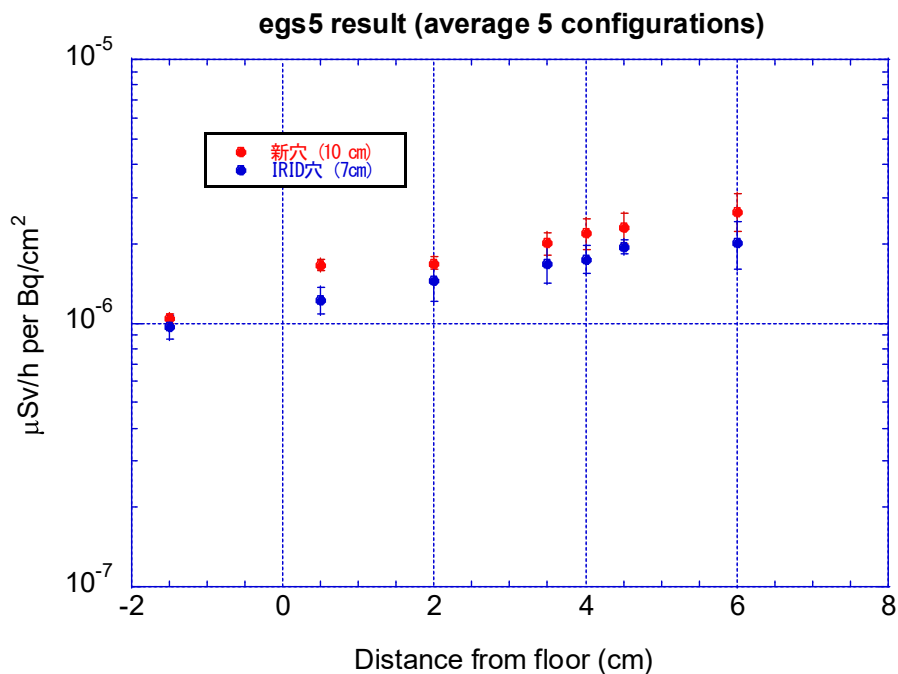


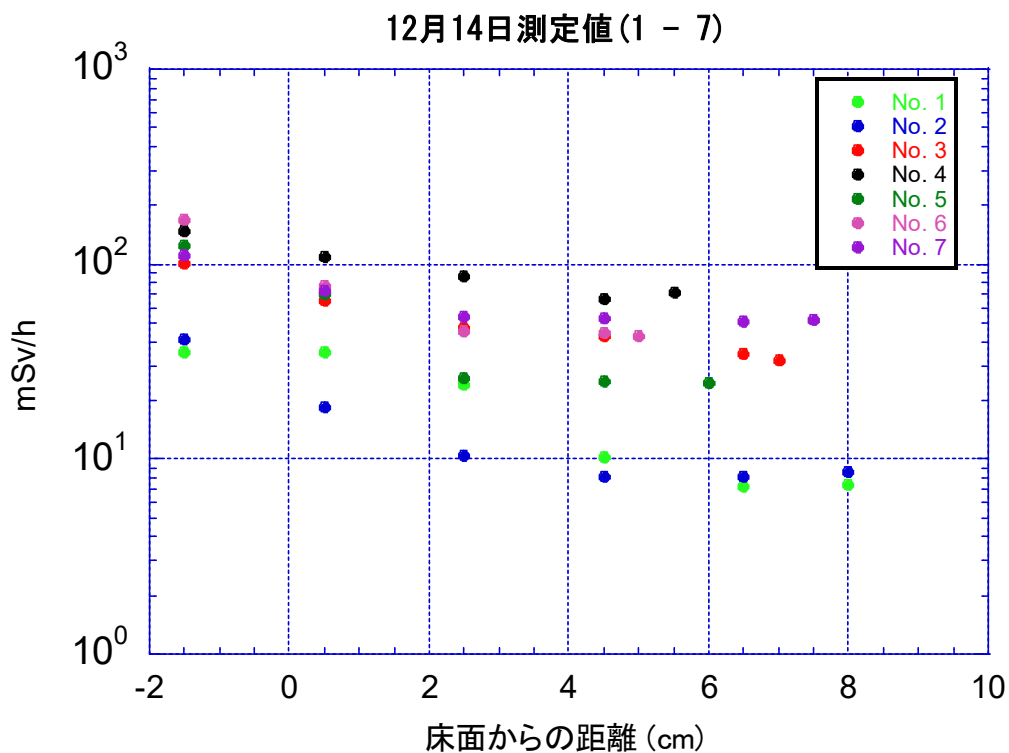
図8 6 cm より浅い位置でのシールドプラグ上層と中間層の間の Cs-137 と Cs-134 による周辺線量当量率 (5つの形状の平均値)

4-2 測定値の検討

新穿孔穴内部での周辺線量当量率の測定結果は、図9に示す様に、2 cm より浅くなると周辺線量当量率が急激に上昇する傾向となっている。一方、IRID 穴では図10に示す様に、浅い位置から床面 1.5 cm での上昇は見られていない。

シールドプラグ上層上面近くの周辺線量当量率にシールドプラグ上層の継ぎ目の汚染が寄与している可能性については、別添3-2-5-3に示されている様に狭い継ぎ目の上部では周辺線量当量率を高める可能性はあるが、影響する領域が限られていることからシールドプラグ上層上面の広い領域の主要な線源とは考えられない。

以下では、IRID 穴と新穿孔穴で測定された周辺線量当量率は、オペフロ内壁の寄与とシールドプラグ上層と中間層の間の汚染寄与によるというモデルで解析を行い、測定結果と比較しモデルの妥当性を検討する。



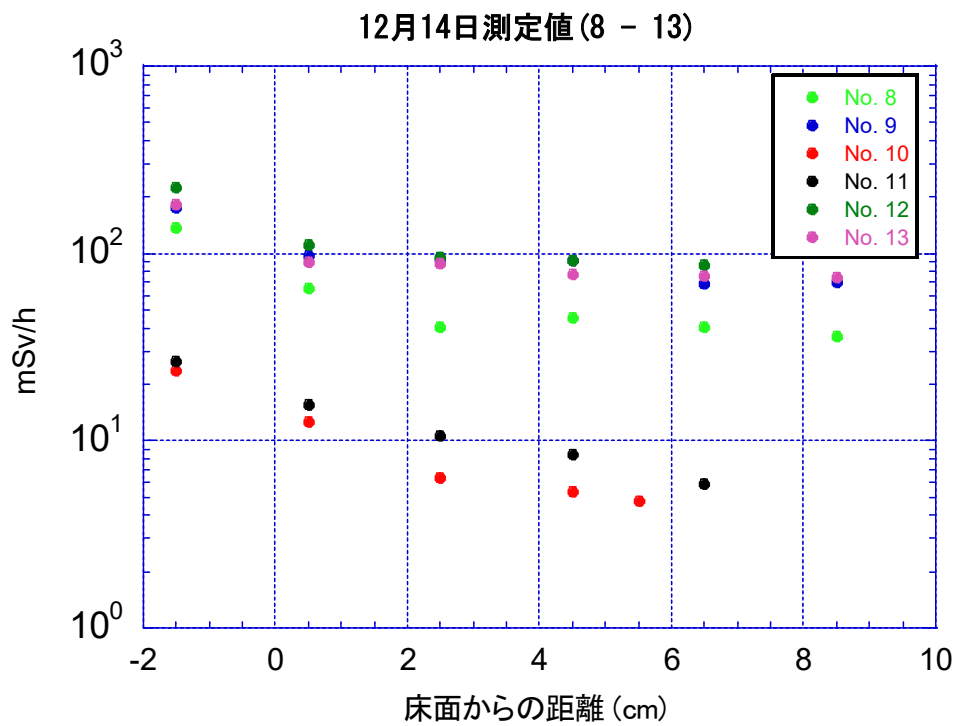


図 9 2021 年 12 月 14 日の測定結果

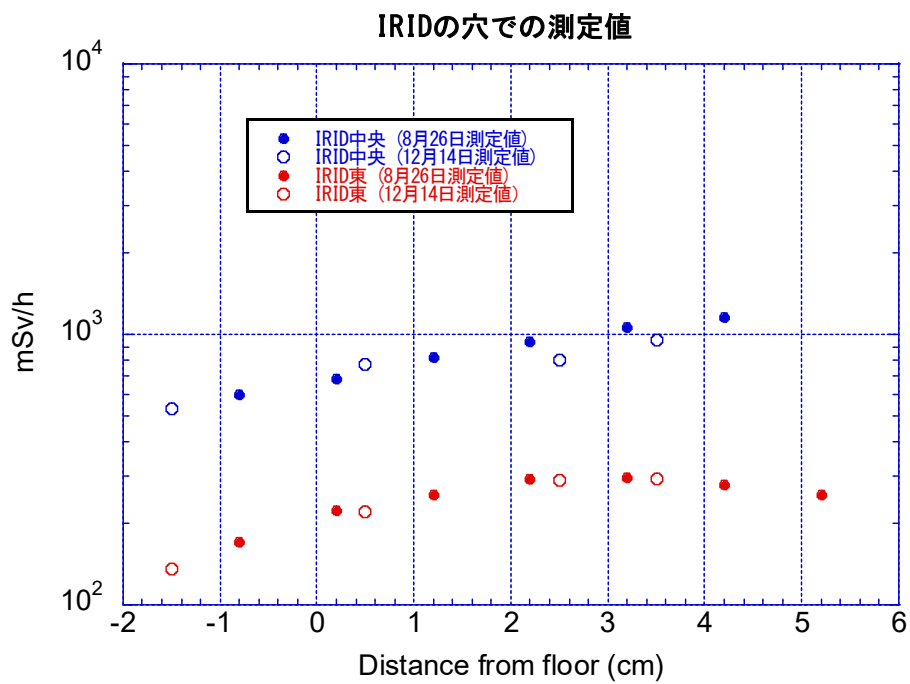


図 1 0 IRID 穴での測定結果

4-3 新穿孔穴内部の分布モデル

穴内部での周辺線量当量率の分布から、オペフロ内壁汚染によるシールドプラグ上部からの線量率寄与とシールドプラグ上層と中間層の間の汚染からの線量率寄与との2つの成分の合成であることが推測された。

(1) 床以外（天井と壁）の内壁汚染の寄与

シールドプラグ上部に鉄板を設置し、シールドプラグ上層上面とシールドプラグ上層と中間層の間の汚染の寄与を除いた測定結果は、シールドプラグ上層上面から 100 cm 位置で 8 mSv/h（原子力規制庁による測定）、シールドプラグ上層上面から 150 cm 位置で 9.0 mSv/h（東京電力による測定）であった。

一方、別添 3-2-5-4 に示す QAD で計算した床以外の内壁（壁と天井）の寄与は、床上 150 cm で 8.5 mSv/h、床上 100 cm では 8.3 mSv/h、また床上から 1.5 cm では 8.0 mSv/h であった。測定値と QAD の結果が 150 cm と 100 cm でほぼ対応しているので 1.5 cm での床以外の内壁寄与を 8.0 mSv/h とした。穴内部の周辺線量当量率は、別添 3-2-5-4 の QAD の計算結果を用いて求めた。

(2) 解析モデル

測定値から床以外の内壁汚染の寄与を除いた周辺線量当量率は、床表面の汚染とシールドプラグ上層と中間層の間の汚染という二つの線源によると考えられる。

(a) 床表面汚染の寄与

床表面汚染による寄与は、汚染密度分布による影響が大きいため、

$$D_s \times \exp(-\lambda_{att} \times t)$$

で近似する。 λ_{att} は穴内部での減衰係数、 t は床面からの距離である。 λ_{att} は、主要な線源が穴近くの点線源（2.5 cm から 5 cm）と 2.5 cm から 10 cm に同じ汚染密度で分布している場合（10 cm 分布線源）について egs5 で計算した。結果を図 11 に示す。計算結果から、 λ_{att} は、 0.165 cm^{-1} （10 cm 分布線源）から 0.276 cm^{-1} （2.5 cm 点線源）の範囲で変化することが分かった。

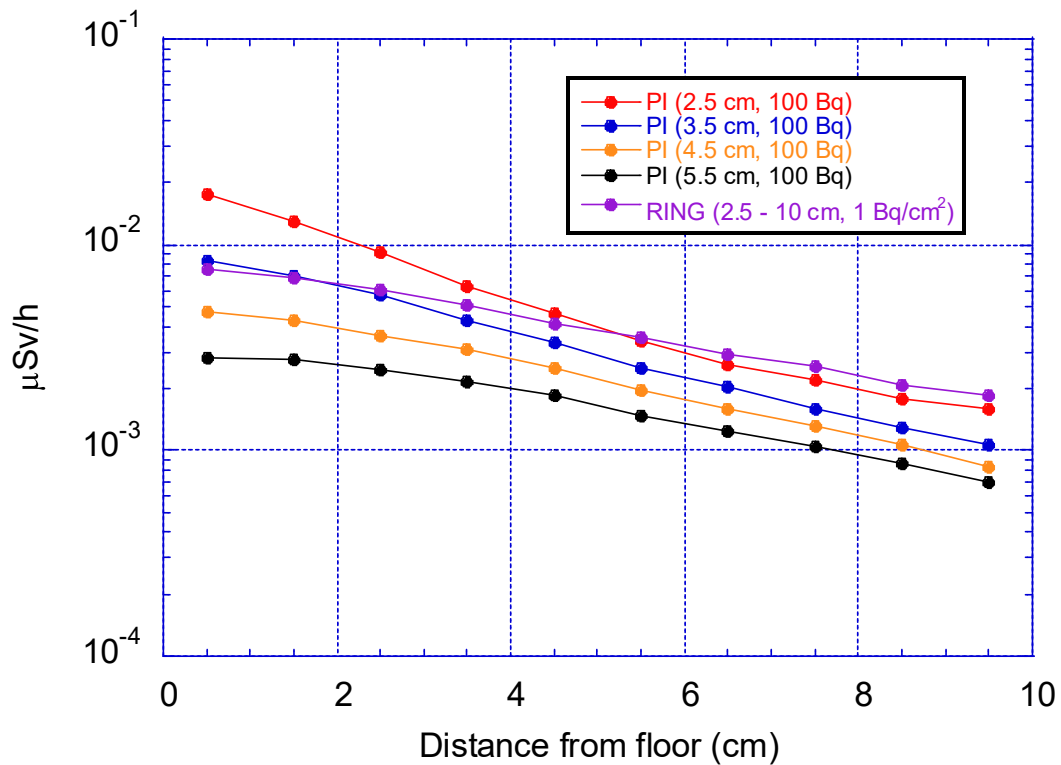


図 1.1 床表面の汚染状況による穴内部の周辺線量率分布

(b) シールドプラグ上層と中間層の間の汚染の寄与

シールドプラグ上層と中間層の間の汚染による寄与は、鉄筋の影響がほとんど無い床面から 6 cm 近辺より浅い領域では、図 1.2 に示す様に新穿孔穴と IRID 穴で分布の形はほぼ同じで、指数関数の傾きは、 $0.113 \text{ (cm}^{-1}\text{)}$ で近似することが出来る。

新穿孔穴の場合、シールドプラグ上層と中間層の間の汚染による t での周辺線量当量率 D_B (mSv/h) は、

$$D_B = Q_B * 1.36E-06 * \exp(0.113 * t) / 1000$$

となる。IRID 穴では、減衰の傾きは同じ $0.113 \text{ (cm}^{-1}\text{)}$ として各計算位置で求めた係数の平均値から、

$$D_B = Q_B * 1.13E-06 * \exp(0.113 * t) / 1000$$

となる。

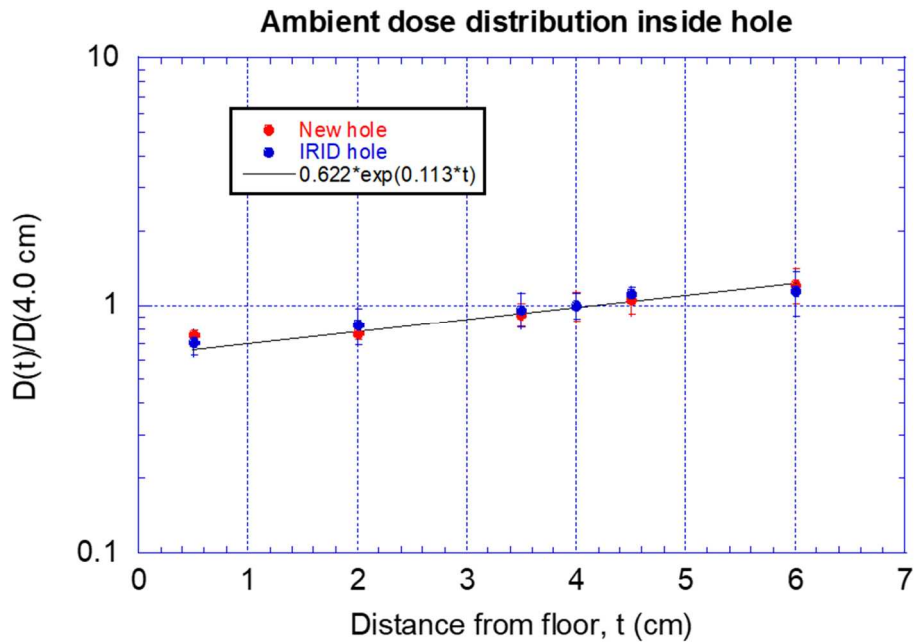


図 1.2 新穿孔穴と IRID 穴の 4 cm 位置に対する相対値の比較

$b = Q_B * 1.36E-06 / 1000.0$ (新穿孔穴) 又は、 $b = Q_B * 1.13E-06 / 1000$ (IRID 穴) とすると、

2つの線源による穴内部の周辺線量当量率は、

$$D = D_s \times \exp(-\lambda_{att} \times t) + b \times \exp(0.113 \times t)$$

となる。

測定値 D と上記の式から最小二乗法により、 D_s と b を求め、 b から Q_B を求めることが課題となる。

(3) Kaleida Graph を用いた最小二乗解

2つの指数関数で構成される上記の式の最小二乗解を求める問題は、「非線形最小二乗問題」⁹⁶⁾ の一つである。グラフ作成・データ解析ソフトウェアであるカレイダグラフ⁹⁷⁾ には、式を定義して非線形最小二乗法の解法の1つである Levenberg-Marquardt 法により回帰曲線を得る機能がある。 λ_{att} をパラメータとして、この機能を使ってシールドプラグ上層と中間層の間の汚染密度を求めた。No. 2, 5, 6, 10 及び 11 については、0.5 cm を含めると有意な結果が得られなかったため、除外して解析を行った。10 cm 分布線源と 2.5 cm 点線源の場合の結果を表 2 に示す。他の点線の場合には、両者の間の値となる。No. 1 と No. 10 の 10 cm 分布線源の場合には有意な結果を得ることが出来なかった。No. 3 と No. 4 を除くと、 λ_{att} の違いによるシールドプラグ上層と中間層の間の汚染密度の違いは 50 % 以下である。

表2 最小二乗法により求めたシールドプラグ上層と中間層の間の汚染密度

穴番号	解析条件	10 cm 分布線源 (A)		2.5 cm 点線源 (B)		$\frac{Q_B^B}{Q_B^A}$
		Q_B^A	Error	Q_B^B	Error	
No. 1						
No. 2	0.5 cm 除外	1.26E+09	3.34E+08	1.54E+09	2.04E+08	1.22
No. 3		4.77E+09	1.10E+09	9.03E+09	1.08E+09	1.89
No. 4		1.02E+10	2.63E+09	1.85E+10	1.78E+09	1.82
No. 5	0.5 cm 除外	5.81E+09	3.07E+08	6.48E+09	3.79E+08	1.12
No. 6	0.5 cm 除外	1.05E+10	8.66E+08	1.29E+10	8.61E+08	1.23
No. 7		1.03E+10	1.67E+09	1.43E+10	7.91E+08	1.39
No. 8		7.10E+09	3.14E+09	1.02E+10	2.11E+09	1.43
No. 9		1.73E+10	4.99E+09	2.37E+10	5.13E+09	1.37
No. 10	0.5 cm 除外	5.26E+08	6.15E+07	6.18E+08	5.38E+07	1.17
No. 11	0.5 cm 除外			6.90E+08	1.54E+08	
No. 12		2.06E+10	1.12E+09	2.38E+10	2.64E+09	1.16
No. 13		1.85E+10	2.09E+09	2.38E+10	2.64E+09	1.29
IRID-C		5.95E+11	5.96E+10	6.00E+11	4.36E+10	1.01
IRID-E		1.20E+11	1.82E+10	1.36E+11	1.49E+10	1.14

(4) 解析結果の検証

最小二乗法で求めた b からシールドプラグ上層と中間層の間の汚染密度 B を求めた。Ds と得られた汚染密度を用いて穴内部の周辺線量当量率（シールドプラグ上層と中間層の間の寄与、床表面汚染の寄与及び床以外のオペフロ内壁寄与の合計）を求め、測定結果と比較することにより解析結果を検証した。10 cm 分布制限の場合の結果を図 13 に示す。⑤と⑥で、0.5 cm 位置で違いが見られるが、それ以外の穴内部での分布については実測値と良く合っている。

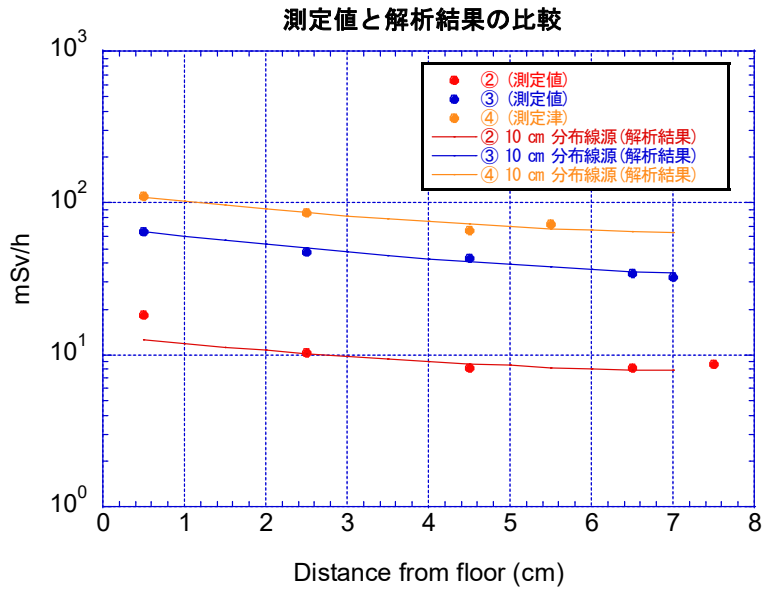


図 1 3 (②、③、④)

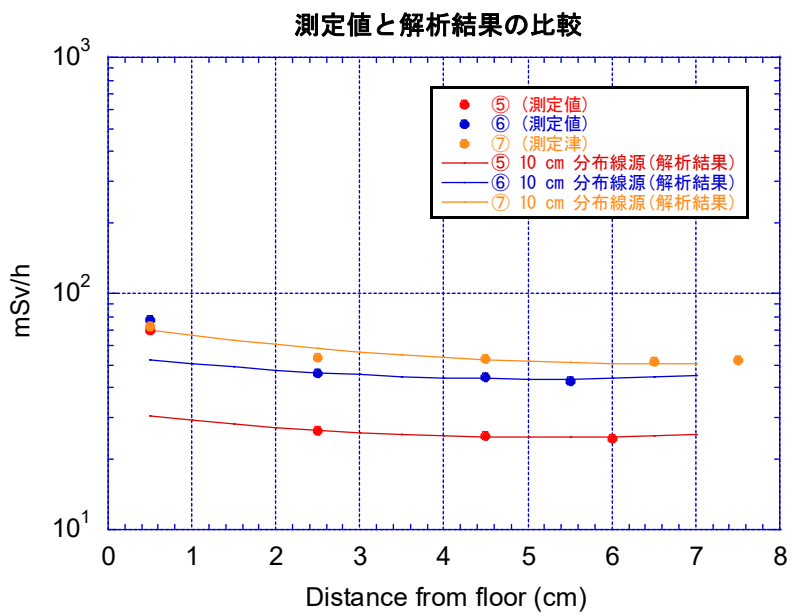


図 1 3 (⑤、⑥、⑦)

測定値と解析結果の比較

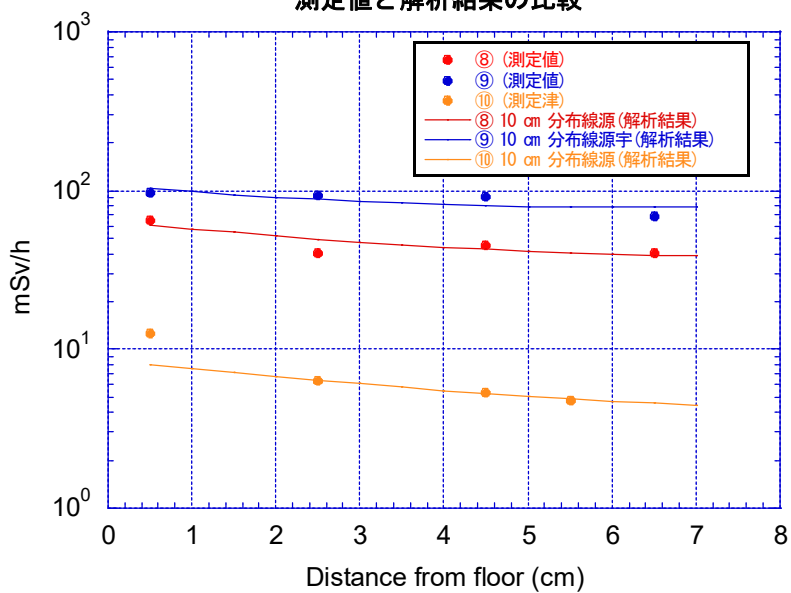


図 1 3 (⑧、⑨、⑩)

測定値と解析結果の比較

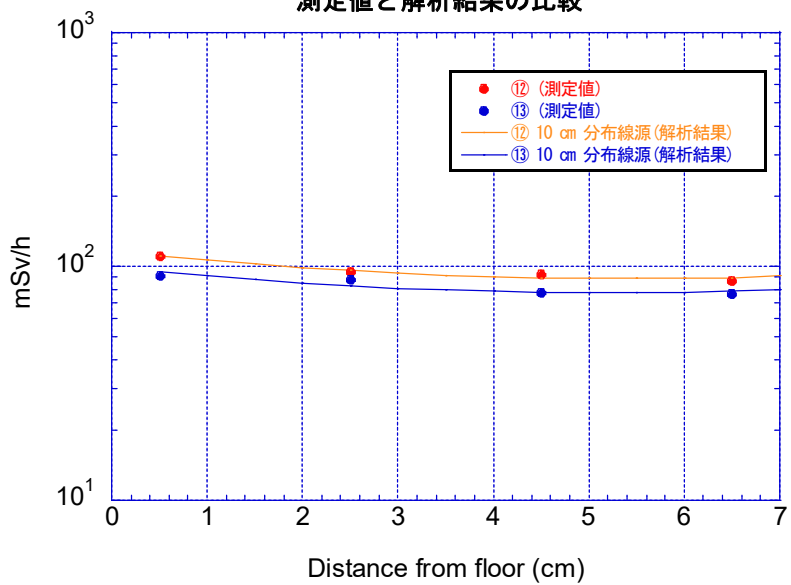


図 1 3 (⑫、⑬)

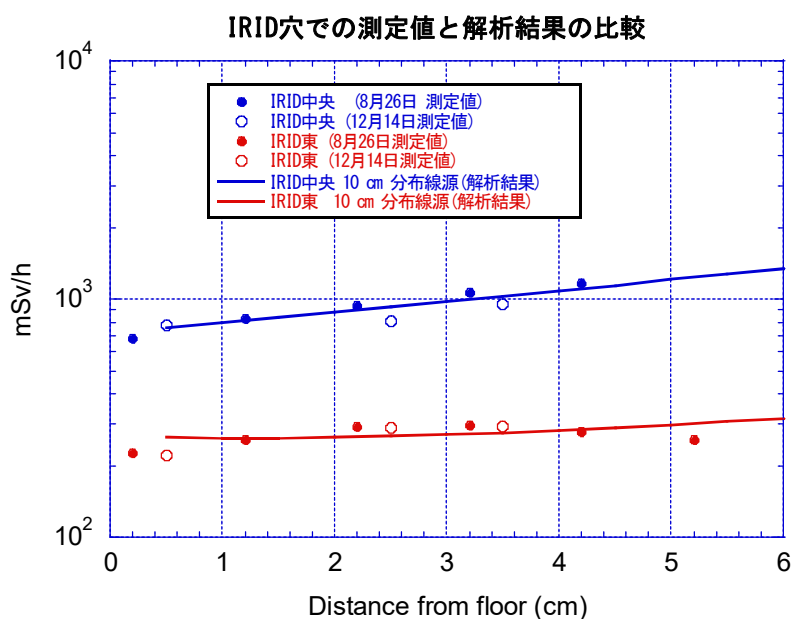


図 1 3 (IRID 中央、IRID 東)

5. 結果の検討

5-1 床表面の汚染について

これまでは、シールドプラグの床表面の汚染は大凡均一であるとして 0.25 Mbq/cm^2 程度であるとしてきた。これに対して、穿孔により取り出されたコア表面での周辺線量当量率の測定では、ほとんどのコアでは周辺の線量率と同じ $200 \mu\text{Sv/h}$ 程度で、以下の 4 つのコアでのみ有意な値が測定されている。

④ : 3 mSv/h 、⑥ : 1.6 mSv/h 、⑫ : $870 \mu\text{Sv/h}$ 、⑬ : $520 \mu\text{Sv/h}$

この事から場所により床表面の汚染の状況が異なることが分かる。

床面から高さ 1.5 cm 位置での周辺線量当量率は、別添 3-2-5-5 に示す様に、測定点に近い場所の寄与が大きい。これまでの測定で実証することはできないが、これらの結果から、実効的にシールドプラグ上層上面近くに汚染密度の高い領域がありそのことが影響している可能性がある、汚染密度の高い領域が存在していた場合、その位置により東西南北の測定値間に大きな違いが生じる要因となることも考えられる。

5-2 シールドプラグ上層と中間層の間の汚染密度について

4. から、表 2 に示したシールドプラグ上層と中間層の間の汚染密度は、新穿孔穴の底面と IRID 穴の底面共に実際の汚染密度に対応していると考えられる。表 2 で得られた汚染密度は、 $5.26\text{E}+08 \text{ Bq/cm}^2$ (No. 10) から $6.00\text{E}+11 \text{ Bq/cm}^2$ (IRID-C) と場所による違いが非常に大きいことが分かる。シールドプラグ上層と中間層の間の全体の状況を反映している 150 cm 高さでの周辺線量当量率の測定値から求めた推定値でも測定場所により 5 倍近くの差があったことから、シールドプラグ上層と中間層の間の汚

染密度にかなりのばらつきがあることは想定されていたが、表2で得られた結果ほど大きなばらつきが存在することは、新穿孔穴での測定によりはじめて分かった重要なことである。得られた情報は限られていることから限界はあるが、高濃度の放射性核種を含んだガスが3層のシールドプラグからどのような経路でオペフロに出て行ったかを推定する際の参考となるデータになると考えられる。

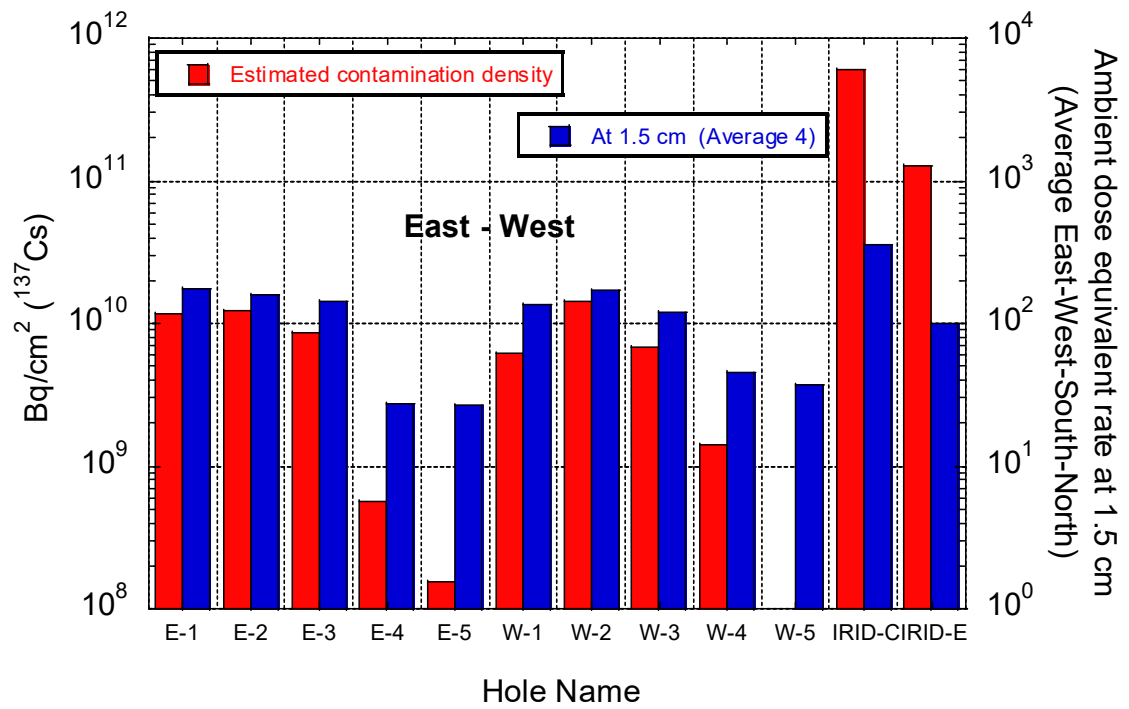
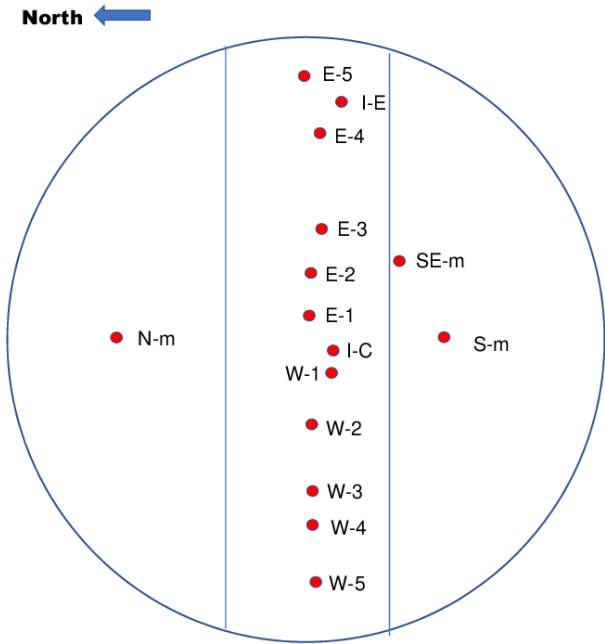
5-3 東西南北の周辺線量当量率分布について

図4に示されているように、シールドプラグ上層と中間層の間の汚染密度が一様であれば、鉄筋の影響を考慮しても、シールドプラグ上層上面から1.5 cm高さでの東西南北と中央での周辺線量当量率の比較では、中央が最も高く、東西南北は中央より低くほぼ同じという結果になっている。床面を含む内壁汚染の寄与については、床面の汚染密度がほぼ一様であれば、東西南北でほぼ同じになる。従って、1.5 cm高さで見られる様な周辺線量当量率に分布があることは、コア表面の測定結果に示されているように、床表面の汚染密度に大きなばらつきがあることを示していると考えられる。

5-4 シールドプラグの床表面近くでの周辺線量当量率とシールドプラグ上層と中間層の間の汚染密度の関係について

シールドプラグに新たに穿孔する穴の数は時間の制限などから限定されることから、「シールドプラグ表面近くの周辺線量当量率へのシールドプラグ上層と中間層の間の汚染の寄与はオペフロ内壁汚染による寄与より大きい」と想定し、穿孔位置を検討するための床面から3 cm高さでのマッピングを行った。マッピング結果とその解釈は別添3-2-5-7に示す。

図14に、穴の無い状態で測定したマッピングとシールドプラグ上層と中間層の間の汚染密度との関係を知るために、東西南北の測定値の平均の周辺線量当量率の測定値とシールドプラグ上層と中間層の間の汚染密度との比較を示す。汚染密度は、 $\lambda_{\text{ate}}=0.167$ と $\lambda_{\text{ate}}=0.276$ の平均である。IRID 穴と穿孔時に場所を変更した No. 9 以外の穴では、穿孔前に床面から高さ 3 cm の位置で周辺線量当量率を測定していた。しかし、事前の測定した場所と実際に穿孔した場所がずれていたためか穴上部 1.5 cm での測定値の方が事前の測定値より低い場合もあったこと、IRID 穴と No. 9 を比較に使えないことから、シールドプラグ上層と中間層の間の汚染密度との関係を見る床表面での周辺線量当量率としては、床面から高さ 1.5 cm での東西南北の平均値を用いた。位置関係を明確にするために、測定番号ではなく東西方向と南北方向が分かる様に付け直した名称で示しているマッピング結果は、シールドプラグ上層と中間層の間の汚染密度分布状況を反映していると思われる。



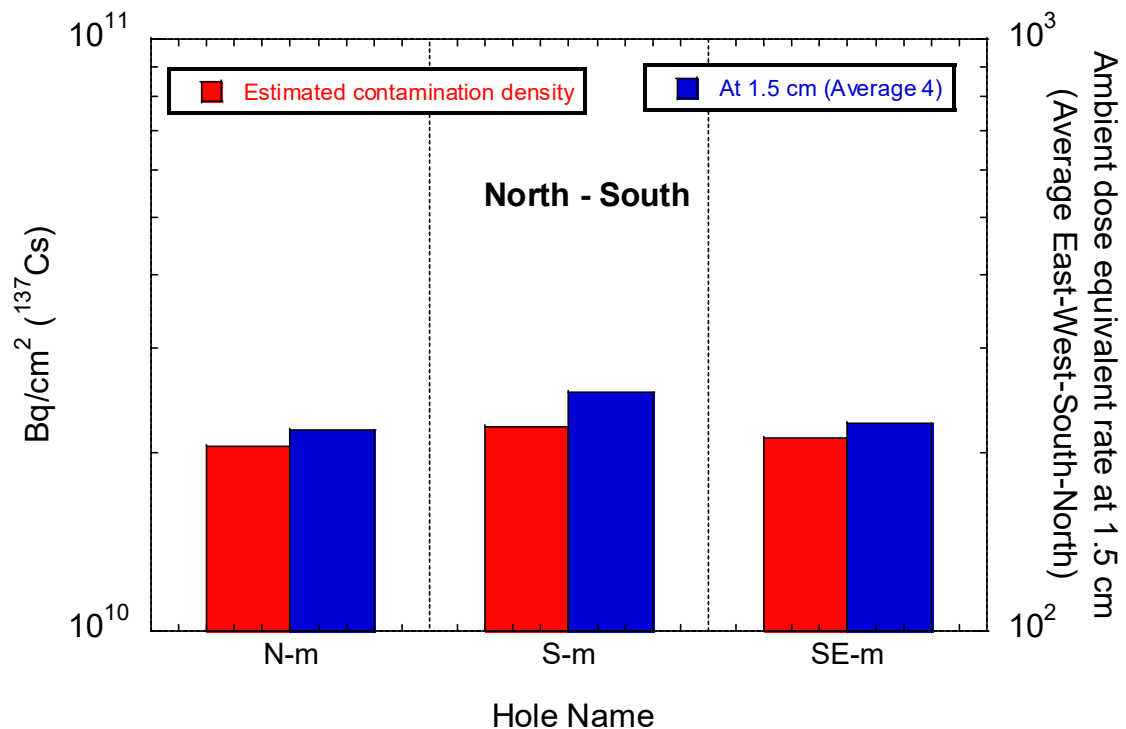


図 1.4 床面から 1.5 cm 高さでの周辺線量当量率（東西南北の平均）とシールドプラグ上層と中間層の間の汚染密度

6. その他の検討

6-1 鉄筋の影響

今回の穿孔穴内部や床表面近くの測定値の検討では、当初から鉄筋の影響が想定されたので鉄筋をモデル化して検討を行った。床面から 150cm 高さにおけるコリメータなしγ線線量計による測定値や床面から 30.5cm 高さにおけるコリメータ付γ線線量計による測定値の検討では鉄筋をモデル化していないので、これらの測定からシールドプラグ上層と中間層の間の汚染密度分布に対する鉄筋の影響評価については、別添 3-2-5-8 に示す。

6-2 コンクリートの密度についての考察

床面から 150 cm 高さにおけるコリメータなしγ線線量計による測定値及び床面から 30.5cm 高さにおけるコリメータ付きγ線線量計による測定値を用いた推定では、鉄筋を含まない密度 2.1 g/cm³ のコンクリートとしてシールドプラグ上層と中間層の間の Cs-137 と Cs-134 による周辺線量当量率を求めている。鉄筋を含むとコンクリートの「実効的な密度」が大きくなるが、鉄筋はコンクリートに一樣に含まれていないので、平均の密度とは影響が異なる。「実効的な密度」を求めるために、QAD を用いてシールドプラグ中央位置で、「鉄筋を組み込んだ床面から 150 cm 高さでの周辺線量当量率」

と「コンクリートの密度を 2 g/cm³ から 2.7 g/cm³ に変えた一様なコンクリート場合の床面から 150 cm 高さでの周辺線量当量率」を計算した。比較した結果を表 3 に示す。鉄筋の重量と残りのコンクリートの重量から求めた平均の密度である密度 2.23 g/cm³ となる。平均の密度では、遮蔽効果を過大評価していることが分る。150 cm 位置での周辺線量当量率を実効コンクリート密度の関数として図 15 に示す。周辺線量当量率は、実効コンクリート密度により指数関数で減衰している。鉄筋モデルに相当する実効コンクリート密度は、2.18 g/cm³ である。

表 3 鉄筋モデルと密度を変えたコンクリートモデルの比較 (QAD)

	鉄筋モデル	コンクリートモデル									
コンクリート密度	2.1 g/cm ³	2.0 g/cm ³	2.1 g/cm ³	2.2 g/cm ³	2.3 g/cm ³	2.7 g/cm ³	2.5 g/cm ³	2.6 g/cm ³	2.7 g/cm ³	2.8 g/cm ³	
鉄筋密度	7.85 g/cm ³										
線量率(μSv/h per Bq/cm ²) 【Cs137+4.4%Cs134】											
床上150 cm	8.37E-07	1.87E-06	1.20E-06	7.75E-07	6.80E-07	5.00E-07	3.23E-07	2.08E-07	1.34E-07	8.66E-08	

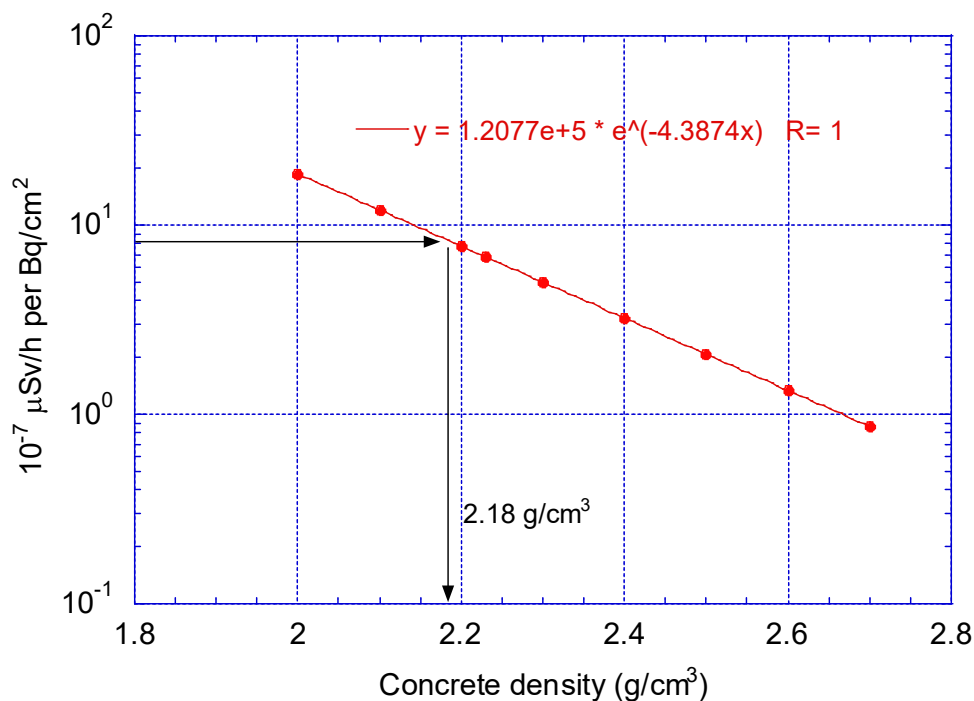
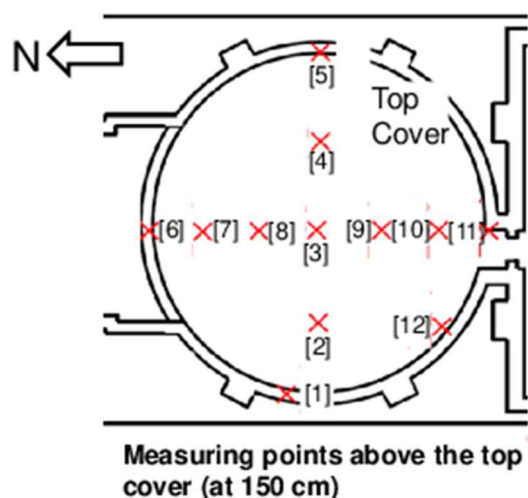


図 15 シールドプラグ上層と中間層の間の Cs-137 (1Bq/cm²) と Cs-134 (0.044Bq/cm²) による床面から高さ 150 cm での周辺線量当量率

6-3 鉄筋を考慮した 150 cm 高さでの周辺線量当量率及びコリメータ付き γ線線量計を用いたシールドプラグ上層と中間層の間の Cs-137 汚染密度の再評価

6-2の結果から、コンクリートの密度を 2.18 g/cm³ として床面から 150 cm 高さにおけるコリメータなし γ線線量計による測定値及び床面から 30.5cm 高さにおけるコ

リメータ付きγ線線量計による測定値を用いて推定したシールドプラグ上層と中間層の間のCs-137汚染密度を再評価した。床面から150 cm高さでのシールドプラグ上層と中間層の間のCs-137:1 Bq/cm²当たりの周辺線量率は7.82E-07 μSv/h per Bq/cm²、シールドプラグ上層と中間層の間のCs-137:1 Bq/cm²当たりのコリメータ付きγ線線量計の線量率は1.67E-07 μSv/h per Bq/cm²となった。この換算係数を使って再評価した結果を図16と図17に示す。150 cm位置での測定結果から求めた汚染密度の平均値を用いると、シールドプラグ上層と中間層の間全体では、84 PBqに相当する。

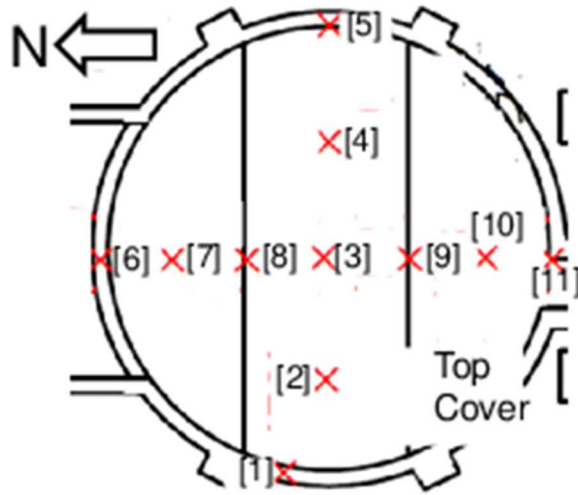


測定点	測定値 ¹⁾	上層と中間層の間からの寄与 ²⁾	汚染密度
	mSv/h		Bq/cm ²
[1]	111	50	6.39E+10
[2]	138	77	9.85E+10
[3]	109	48	6.14E+10
[4]	79	18	2.30E+10
[5]	108	47	6.01E+10
[6]	118	57	7.29E+10
[7]	148	87	1.11E+11
[8]	129	68	8.70E+10
[9]	144	83	1.06E+11
[10]	130	69	8.82E+10
[11]	104	43	5.50E+10
[12]	114	53	6.78E+10
Average			7.46E+10

¹⁾2019.2.28 東電測定

²⁾測定値-61 mSv/h (評価値)

図16 床面から150 cm高さでの周辺線量当量率を用いて推定したシールドプラグ上層と中間層の間の汚染密度



Measuring points above the top cover (γ-dosimeter with collimator)

測定点	γ線線量当量率 ¹⁾	上層と中間層の間からの寄与 ²⁾	汚染密度
	(mSv/h)		(Bq/cm ²)
[1]	6.4	5.5	3.3E+10
[2]	7.1	6.2	3.7E+10
[3]	12	11.1	6.7E+10
[4]	8.0	7.1	4.3E+10
[5]	1.0	0.14	8.4E+08
[6]	6.4	5.5	3.3E+10
[7]	12	11.1	6.7E+10
[8]	13	12.1	7.3E+10
[9]	15	14.1	8.5E+10
[10]	5	4.1	2.5E+10
[11]	3.7	2.8	1.7E+10
Average			4.4E+10
Average (外周部の[1], [5], [6], [11]除く)			5.5E+10

¹⁾2019.2.28 東電測定

²⁾ 測定値 - 0.86 mSv/h (評価値)

図17 コリメータ付きγ線線量計を用いて推定したシールドプラグ上層と中間層の間の汚染密度

7. 3種類の測定により推定したシールドプラグ上層と中間層の間の汚染密度の比較

手法の異なる3種類の測定から推定したシールドプラグ上層と中間層の間の汚染密度の比較を図18に示す。図には、推定に使用した全ての測定点での推定結果を手法毎のシールドプラグ上層と中間層の間からの位置にプロットしている。穴内部の測定に基づく推定値は、床面汚染の穴内部での減衰係数 λ_{ate} が0.165の場合と0.276の場合の平均値である。線源であるシールドプラグ上層と中間層の間からの距離が短くなるに伴い汚染密度のばらつきが増えていることが分かる。この事を含め、3種類の推定結果の関係は合理的であると言える。

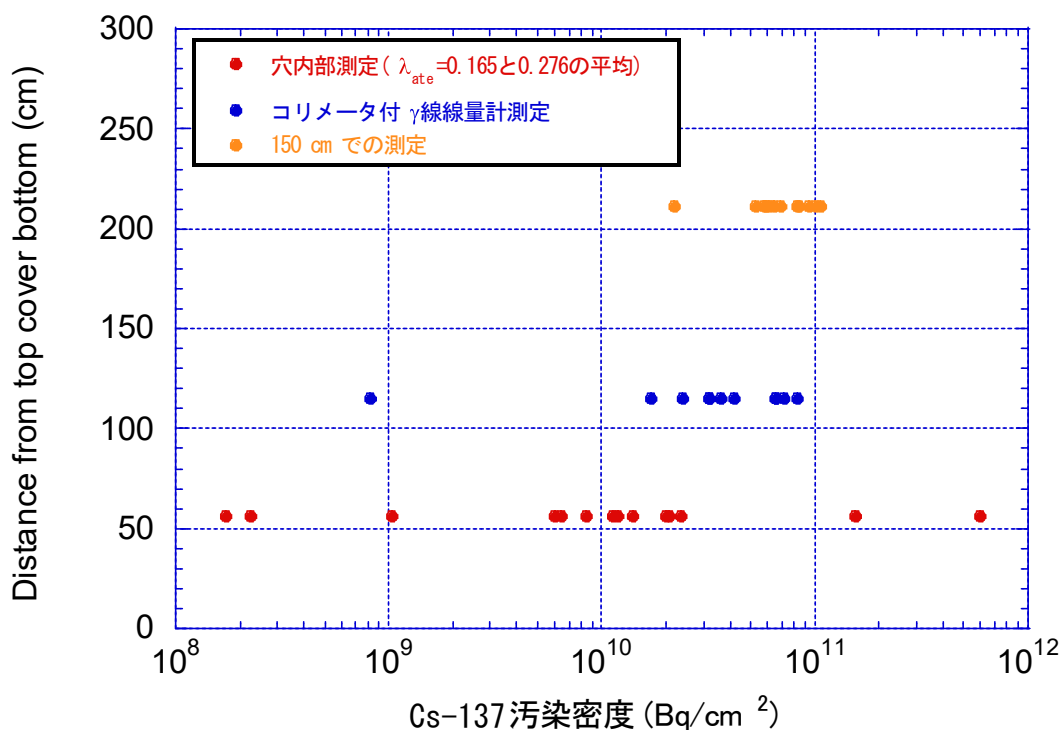


図18 3種類の測定により推定したシールドプラグ上層と中間層の間の汚染密度の比較

8. まとめ

穿孔穴を使用して床汚染の影響をできるだけ少なくした穴内の測定を計画して、IRID 穴の測定を実施した時点では、シールドプラグ上層と中間層の間の汚染密度が場所によってなだらかに変化している程度と考えていた。

新穿孔穴では穴内線量率分布が IRID 穴とは大きく異なることから、今回の解析では、鉄筋の影響、室内汚染（天井・壁・床）を検討した結果を用いたところ、IRID 穴と新穿孔穴での穴内線量率分布がシールドプラグ上層と中間層の間の汚染密度と床汚染密

度の両方の影響を強く受けていたことがわかった。そのことを考慮した解析によりシールドプラグ上層と中間層の間の汚染密度が評価できた。シールドプラグ上層と中間層の間の汚染は、当初想定していたよりもばらつきの範囲が大きいことがわかった。床表面の汚染密度についても穿孔により取り出されたコア表面の線量率、各穴周辺の東西南北の測定値から大きなばらつきが存在していることが推測できたが、詳細な分布を求めるにはデータが不足している。

シールドプラグ上層と中間層の間の汚染密度と床表面での周辺線量当量率の間には、大凡の関係があることが分かり、床表面のマッピングデータは、シールドプラグ上層と中間層の間の汚染密度の定量的推測に用いることには無理があるが、汚染分布の状況を推測するデータとして役立つことが分った。

これらの理解が可能になったのは穴内測定を実施した成果と考えている。

【参考資料】

1. H. Hirayama, Y. Namito, A. F. Bielajew, S. J. Wilderman, W.R. Nelson, “The EGS5 Code System” , SLAC-R-730 (2005) and KEK Report 2005-8 (2005).
2. QAD-CGGP2 AND G33-GP2 : REVISED VERSION OF QAD-CGGP AND G33-GP2, JAERI-M 90-110, June 1990
3. JIS G 3112:2020 鉄筋コンクリート用棒鋼
4. D. K. Trubey, “New Gamma-Ray Buildup Factor Data for Point Kernel Calculations: ANS-643 Standard Reference Data” , NUREG/CR-5740 and ORNL/RSIC-49/R1 (1991).
5. 平山英夫、田中俊一、“光子遮蔽計算における1センチメートル線量当量”、JAERI-memo 01-013 (1989).
6. 例えば、下の URL で解説されている。
https://kamino.hatenablog.com/entry/lm_method
7. https://www.hulinks.co.jp/software/stat_graph/Kaleida

(別添 3-2-5-1)

2号機シールドプラグの IRID 穴と新穿孔穴の穴内線量率分布の比較

原子力規制庁原子力規制部

東京電力福島第一原子力発電所事故対策室

林 克己、平山英夫

1. はじめに

2号機シールドプラグのシールドプラグ上層と中間層の間の Cs-137 による汚染密度については、2018年11月から2019年2月に東京電力が測定したシールドプラグ上層上面から150cm高さにおけるコリメータなしγ線線量計による周辺線量当量率の測定(以下「150cm高さ測定」という。)結果やシールドプラグ上層上面から30.5cm高さにおけるコリメータ付きγ線線量計による周辺線量当量率の測定(以下「30.5cm高さ測定」という。)結果を使用して、おおよその汚染密度が得られている(別添3-2-1参照)。

150cm高さ測定には、オペフロ内の壁、天井及び床の汚染からの周辺線量当量率が寄与する。これらの周辺線量当量率の寄与が少ないと考えられるシールドプラグ上層に設けた穴の中での測定が計画され、2021年12月にPolimaster 1704M(ATOMTEX社製)を使用して、2014年に国際廃炉研究開発機構(IRID)が穿孔した2個の穴(直径10cm、深さ7cm。以下「IRID穴」という。)と2021年に東京電力が穿孔した13個の穴(直径10cm、深さ10cm。以下「新穿孔穴」という。)の中の線量率分布が測定された。

測定された穴内の線量率分布は、IRID穴はその絶対値が4倍違い、また分布形状も異なっていた。また新穿孔穴は、IRID穴より絶対値は小さくIRID穴とは異なる分布形状であった。

これらの線量率測定値にはシールドプラグ上層と中間層の間のうち、それぞれの穴の直下の半径50cm程度のCs-137による汚染密度が反映されるため、絶対値はそれぞれの穴の直下の汚染密度に依存する。しかし穴内の線量率分布が異なる原因は別にあり、これは厚さ61cmのシールドプラグ上層内の鉄筋の効果や、偏在した線源との位置関係などが考えられるが、この資料では鉄筋の効果について検討した。

鉄筋はシールドプラグ上層上面から厚さ10cmの被りコンクリートの下側にある上側鉄筋、およびシールドプラグ上層下面から厚さ10cmの被りコンクリートの上側にある下側鉄筋からなり、特に上側鉄筋が穴底に近い穴内の線量率分布の形状に影響すると考えられる。

また、IRID穴と新穿孔穴は深さが異なり、IRID穴では少なくとも鉄筋と穴底まで3cmのコンクリートが存在し鉄筋も遠くなるので、鉄筋の効果は異なることも想定される。

そこで、今回はIRID穴と新穿孔穴について鉄筋との位置関係でどのような分布にな

るかを検討した。

2. IRID 穴と新穿孔穴での穴内線量率分布の評価

シールドプラグ上層の配筋図どおりの位置に鉄筋が施工されていたとしても、オペロ、特にシールドプラグ上部の周辺線量当量率は高いため人が近づいて穴の正確な位置を測ることはできない。また同様に配筋位置が配筋図どおりになっているかを確認するための非破壊鉄筋探査もできない。そこで、鉄筋と穴との位置関係に関して5つのパターンについての線量率分布の形状と絶対値の範囲を評価することとした。

新穿孔穴の鉄筋の影響評価については別添3-2-5-8に示しているが、今回は穴内計算点を詳細化するとともに、IRID 穴についても同様の手法で評価した。また、この線量率分布に寄与する穴の円筒面から穴に入ってくる成分と穴の底から穴に入ってくる成分に分けて評価し、IRID 穴と新穿孔穴の線量率分布の形成にそれぞれがどのように寄与しているかを調べた。

3. 計算モデル

図1にシールドプラグ上層の計算形状を示す。

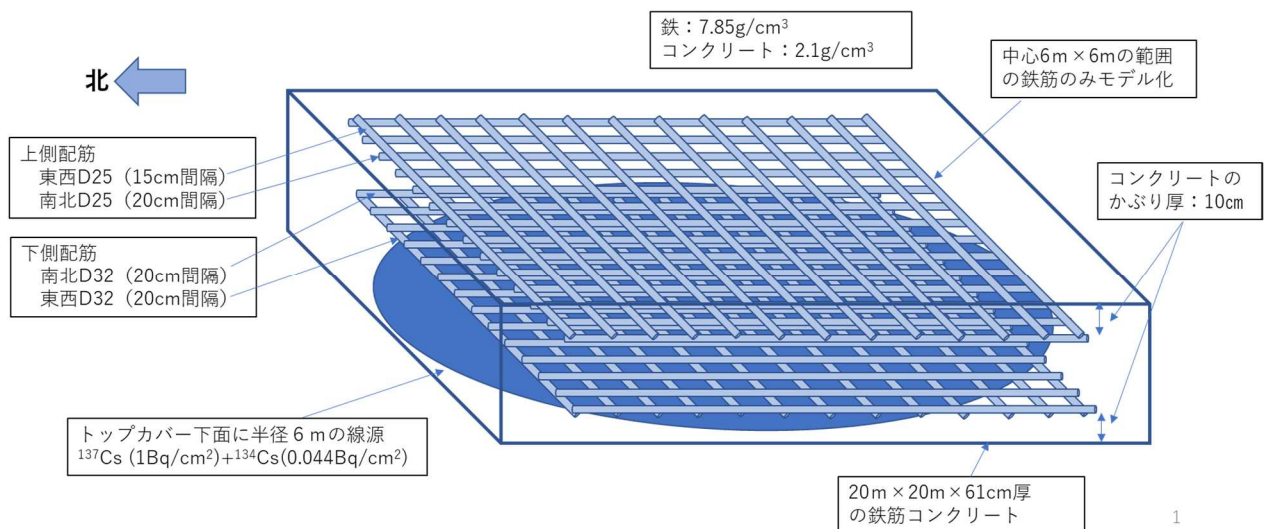


図1 シールドプラグ上層の計算形状

穴の中については、深さ方向とその真上及び東西南北の床上で測定が実施されている。

図2に穴と鉄筋の位置関係のパターン①～⑤を示す。黒丸は穴（IRID 穴は5cmφ×深さ7cm、新穿孔穴は5cmφ×深さ10cm）の位置を示し、赤丸は計算点を示す。上部鉄筋の影響については表1に示すような想定により5つのパターンを選定した。

図3に穴の中の計算点を示す。

表1 選定した配筋パターン

パターン	想定
① 上部鉄筋の間の中心	すべての測定点に影響が少ないと考えられる
② 東西鉄筋の真上	穴の中と東西の床上に影響があると考えられる
③ 東西鉄筋の右側	穴の中と東西北の床上に少し影響があると考えられる
④ 東西南北鉄筋の真上	穴の中と東西南北の床上に大きく影響があると考えられる
⑤ 東西南北鉄筋の内側	穴の中と東西南北の床上に少し影響があると考えられる

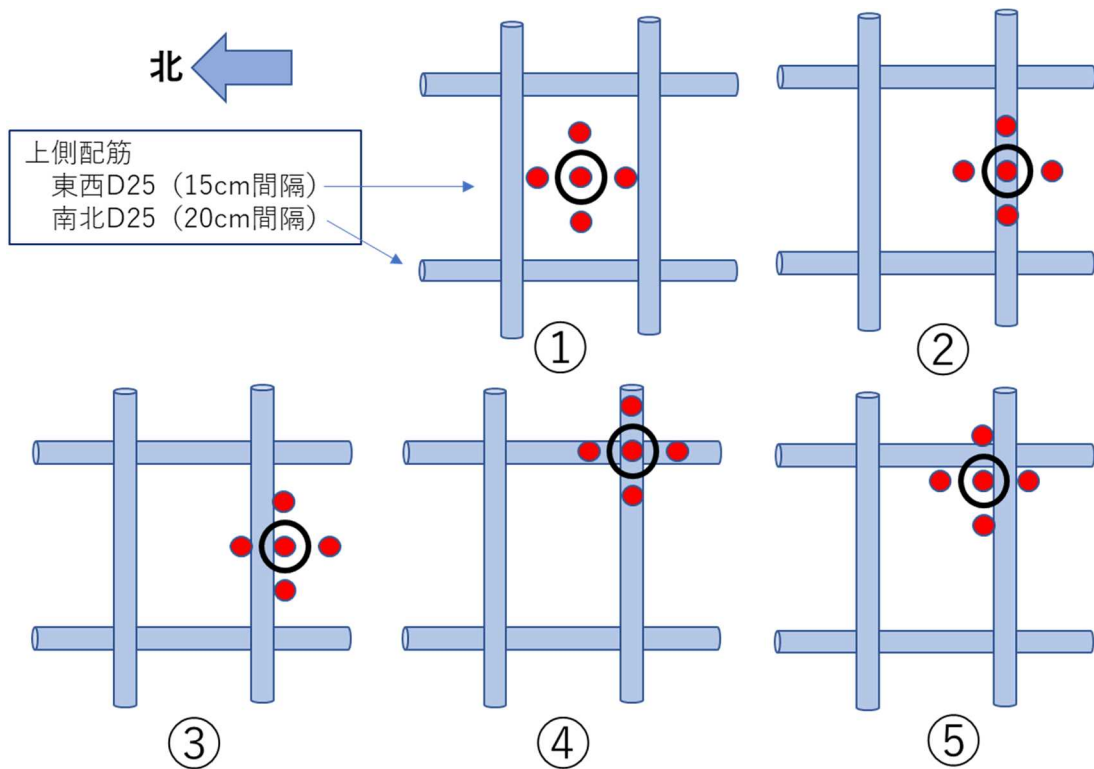
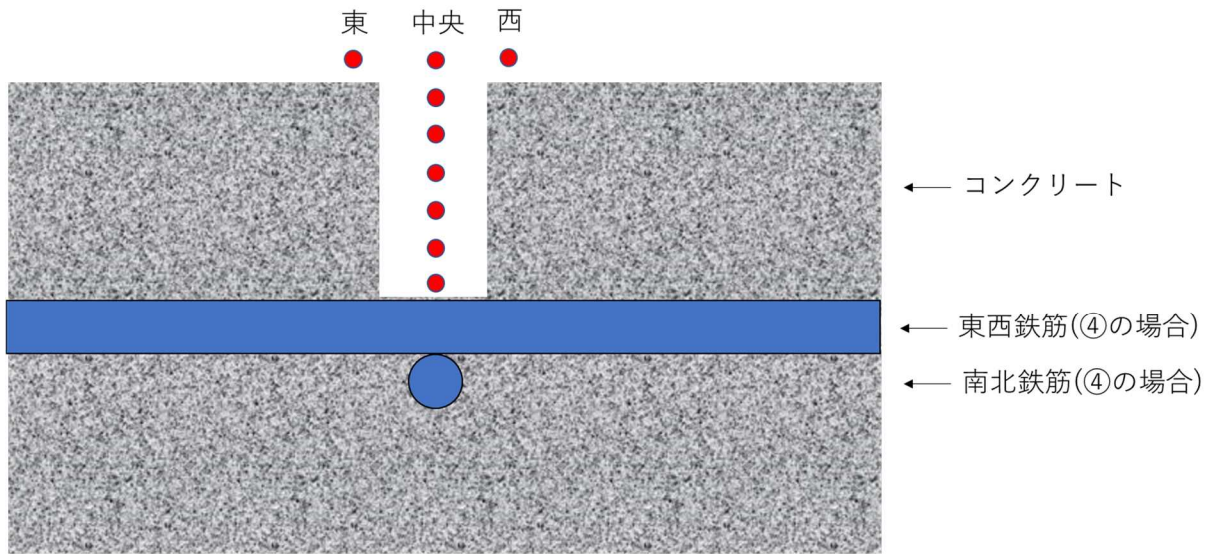


図2 穴と鉄筋の位置関係の5つのパターン



7

図3 穴内および床上の計算点

シールドプラグ上層と中間層の間に半径 6m の線源 ($Cs-137(1Bq/cm^2) + Cs-134(0.044Bq/cm^2)$) を置いたときの、図 2 に示す①～⑤のパターンでのそれぞれ穴中央と東西南北の床上 1.5cm、および図 3 に示す穴内深さ 0.5cm から穴の底まで 0.5cm 毎の線量当量率を QAD-CGGP2R¹⁾ を使用して求めた。

表 2 に IRID 穴の真上及び東西南北の床上と穴の中深さ方向の線量率計算値を示す。表 3 に新穿孔穴の真上及び東西南北の床上と穴の中深さ方向の線量率計算値を示す。

これらの線量率分布については、穴の壁から穴内に入ってくる成分と穴の底から穴内に入ってくる成分それぞれの線量率分布も示した。

なお、鉄筋の無いモデルとの比較については別添 3-2-5-8 に示している。

表 2 の IRID 穴の壁からの寄与に注目すると、穴の底から 3cm あたりから穴内線量率への実質的な寄与が始まり穴の底から 6.5cm まで寄与は大きくなっていく。鉄筋と穴の位置関係の①から⑤でほとんど同じ形となる。少しだけ異なるのは鉄筋の影響と考えられる。

IRID 穴の底からの寄与に注目すると、穴の直下に鉄筋の無い①③⑤では穴の底から 2cm 程度はほぼ減衰は無く、穴の底から 2.5cm 以降から減衰が始まっている。穴の直下に鉄筋のある②④では穴の底から 2.5cm 程度まで増加し、その後穴の出口に向かって減衰している。これは穴の底では鉄筋による遮蔽効果が効いているが 2.5cm 程度からはその効果も緩和され①③⑤と同じ減衰が始まると理解できる。ただし穴出口での絶対値は低めとなる。

また IRID 穴の穴出口で穴の壁からの寄与と穴の底からの寄与はほぼ同じ程度となっ

ていることがわかる。IRID 穴の深さは 7cm であるので、この穴の壁からの寄与と穴の底からの寄与の大小関係が、穴の底から 2cm から 3.5cm の間で入れ替わることにより、穴の直下に鉄筋の無い①③⑤では合計した全体の線量率分布が平坦になっていることが分かる。穴の直下に鉄筋のある②④では合計線量率分布は穴の底から 2cm 程度までの増加が見えている。

表 3 の新穿孔穴の壁からの寄与に注目すると、穴の底から 3cm あたりから穴内線量率への実質的な寄与が始まり穴の底から 6.5cm まで寄与は大きくなっていき、その後は平坦になっている。新穿孔穴は IRID 穴より 3cm 深い、穴の底からの分布の形状はほぼ同じである。なお新穿孔穴の穴底位置が IRID 穴の穴底位置より 3cm 分シールドプラグ上層と中間層の間の汚染に近いので、穴の壁からの寄与の絶対値はその分高くなっている。

新穿孔穴の底からの寄与に注目すると、穴の直下に鉄筋の無い①③⑤では穴の底から 2cm 程度はほぼ減衰は無く、穴の底から 2.5cm 以降から減衰が始まっている。穴の直下に鉄筋のある②④では穴の底から 2.5cm 程度まで増加し、その後穴の出口に向かって減衰している。これは穴の底では鉄筋による遮蔽効果が効いているが 2.5cm 程度からはその効果も緩和され①③⑤と同じ減衰が始まると理解できる。ただし穴出口での絶対値は低めとなる。新穿孔穴は IRID 穴より 3cm 深い、穴の底からの分布の形状はほぼ同じである。なお新穿孔穴の穴底位置が IRID 穴の穴底位置より 3cm 分シールドプラグ上層と中間層の間の汚染に近いので、穴の底からの寄与の絶対値はその分高くなっている。

また新穿孔穴の穴出口で穴の壁からの寄与は穴の底からの寄与のほぼ 2 倍程度となっていることがわかる。新穿孔穴の深さは 10cm であるので、穴出口では穴の壁からの寄与は一定になっているのに対し、穴の底からの寄与は穴出口に向かって減衰が続いていることがこの結果になったと考えられる。

合計線量率の穴内分布をみると、穴の壁からの寄与が穴の底から 6.5cm で一定になるのに対して、穴の底からの寄与は減衰が続くので、IRID 穴の分布のように平坦ではなく、新穿孔穴では全体的に穴の出口に向かって減衰が続く形となる。また穴の直下に鉄筋のある②④では合計線量率分布は底から 4cm 程度までの増加が見えている。

IRID 穴と新穿孔穴での穴壁と穴底からの寄与及び合計の線量率分布を、鉄筋と穴の位置関係①～⑤についてそれぞれ図 4～図 8 に示す。

4. まとめ

IRID 穴と新穿孔穴の穴内線量率分布について、その分布形状の元となる穴の壁と穴の底からの成分に分けて評価した。これにより、IRID 穴と新穿孔穴の穴内線量率分布の形状が変わるのは穴の深さの違いが原因の一つであることがみえてきた。

この検討に使用した QAD-CGGP2R は点減衰核積分コードであり、無限媒質中のビルドアップ係数を使っているため、例えばコンクリートから空気中に出たあとの線量率は多

くて2割程度高めに出ること、また媒質が変わった直後、例えば鉄筋からコンクリートに入った直後はコンクリートのビルドアップ係数を使うと今回の体系では倍程度線量率を高目に出すことが、これまでの egs5²⁾ との比較でわかっている。

また、穴内の分布に関してはコンクリートで散乱して鉄筋を回り込んでくる挙動などは QAD-CGGP2R では計算できず、egs5 の計算結果と穴内分布形状に差異が見られている。さらに、穴の底から来るガンマ線の角度分布は本来広がっているはずなのに QAD-CGGP2R では線源から直線状に穴の底に来たとして計算するので主に真上の成分だけの角度分布になり、そのため穴の底からの成分の減衰は egs5 より傾きが緩やかになると思われる。

従って今回の検討は大まかな分布を掴むという位置づけであり、現在進行している egs5 の解析結果で入れ替える予定である。その後オペフロの壁・床・天井からの穴内への線量率寄与を考慮して測定値との比較検討を進めたい。

5. 参考資料

- 1) QAD-CGGP2 AND G33-GP2 : REVISED VERSION OF QAD-CGGP AND G33-GP2,
JAERI-M 90-110, June 1990
- 2) H. Hirayama, Y. Namito, A. F. Bielajew, S. J. Wilderman and W. R. Nelson,
“The EGS5 Code System” , SLAC-R-730 (2005) and KEK Report 2005-8 (2005)

表2 穴の真上及び東西南北の床上と穴の中深さ方向線量率計算値 (IRID 穴)

計算点位置			線量率($\mu\text{Sv/h per Bq/cm}^2$) 【Cs137+4.4%Cs134】														
No.	床位置	床上高さ	IRID穴①			IRID穴②			IRID穴③			IRID穴④			IRID穴⑤		
			穴壁から	穴底から	合計	穴壁から	穴底から	合計	穴壁から	穴底から	合計	穴壁から	穴底から	合計	穴壁から	穴底から	合計
1	穿孔穴の中心	1.5	1.134E-06	7.770E-07	1.911E-06	1.062E-06	6.940E-07	1.756E-06	1.045E-06	7.010E-07	1.746E-06	8.971E-07	7.359E-07	1.633E-06	9.766E-07	6.314E-07	1.608E-06
2	穿孔穴の東側	1.5	7.930E-07	1.807E-07	9.737E-07	7.615E-07	1.454E-07	9.069E-07	7.464E-07	1.543E-07	9.007E-07	7.671E-07	1.260E-07	8.931E-07	7.258E-07	1.610E-07	8.868E-07
3	穿孔穴の南側	1.5	7.750E-07	1.803E-07	9.553E-07	8.373E-07	1.402E-07	9.775E-07	8.401E-07	1.533E-07	9.934E-07	8.003E-07	1.193E-07	9.196E-07	7.181E-07	1.545E-07	8.726E-07
4	穿孔穴の西側	1.5	7.930E-07	1.807E-07	9.737E-07	7.615E-07	1.454E-07	9.069E-07	7.464E-07	1.543E-07	9.007E-07	7.693E-07	1.220E-07	8.913E-07	7.815E-07	1.272E-07	9.087E-07
5	穿孔穴の北側	1.5	7.750E-07	1.803E-07	9.553E-07	8.266E-07	1.379E-07	9.645E-07	7.791E-07	1.895E-07	9.686E-07	7.897E-07	1.159E-07	9.056E-07	7.882E-07	1.291E-07	9.173E-07
6	穿孔穴内部	-0.5	9.961E-07	1.288E-06	2.284E-06	1.021E-06	1.018E-06	2.039E-06	9.470E-07	1.103E-06	2.050E-06	9.554E-07	9.136E-07	1.869E-06	9.243E-07	9.357E-07	1.860E-06
7		-1.0	9.128E-07	1.456E-06	2.369E-06	9.558E-07	1.146E-06	2.102E-06	9.027E-07	1.216E-06	2.119E-06	8.910E-07	1.031E-06	1.922E-06	8.758E-07	1.040E-06	1.916E-06
8		-1.5	8.184E-07	1.629E-06	2.447E-06	8.755E-07	1.284E-06	2.159E-06	8.372E-07	1.348E-06	2.185E-06	8.213E-07	1.148E-06	1.969E-06	8.025E-07	1.170E-06	1.972E-06
9		-2.0	7.296E-07	1.793E-06	2.523E-06	7.700E-07	1.441E-06	2.211E-06	7.416E-07	1.512E-06	2.254E-06	7.452E-07	1.264E-06	2.009E-06	7.062E-07	1.311E-06	2.017E-06
10		-2.5	6.534E-07	1.945E-06	2.598E-06	6.429E-07	1.609E-06	2.252E-06	6.291E-07	1.691E-06	2.320E-06	6.477E-07	1.389E-06	2.037E-06	6.015E-07	1.456E-06	2.057E-06
11		-3.0	4.569E-07	2.208E-06	2.665E-06	4.740E-07	1.804E-06	2.278E-06	4.755E-07	1.902E-06	2.377E-06	5.046E-07	1.541E-06	2.046E-06	4.667E-07	1.625E-06	2.092E-06
12		-3.5	2.684E-07	2.451E-06	2.719E-06	3.228E-07	1.962E-06	2.285E-06	3.087E-07	2.110E-06	2.419E-06	3.420E-07	1.693E-06	2.035E-06	3.196E-07	1.794E-06	2.114E-06
13		-4.0	1.486E-07	2.610E-06	2.759E-06	1.707E-07	2.109E-06	2.280E-06	1.653E-07	2.280E-06	2.445E-06	1.863E-07	1.826E-06	2.012E-06	1.812E-07	1.951E-06	2.132E-06
14		-4.5	5.575E-08	2.736E-06	2.792E-06	6.621E-08	2.191E-06	2.257E-06	6.602E-08	2.393E-06	2.459E-06	7.471E-08	1.894E-06	1.969E-06	7.211E-08	2.071E-06	2.143E-06
15		-5.0	1.053E-08	2.803E-06	2.814E-06	1.318E-08	2.206E-06	2.219E-06	1.339E-08	2.462E-06	2.475E-06	1.674E-08	1.895E-06	1.912E-06	1.581E-08	2.130E-06	2.146E-06
16		-5.5	6.127E-10	2.829E-06	2.830E-06	8.659E-10	2.169E-06	2.170E-06	8.189E-10	2.489E-06	2.490E-06	1.061E-09	1.841E-06	1.842E-06	1.019E-09	2.144E-06	2.145E-06
17		-6.0	2.102E-12	2.843E-06	2.843E-06	2.484E-12	2.114E-06	2.114E-06	2.446E-12	2.508E-06	2.508E-06	2.017E-12	1.759E-06	1.759E-06	2.073E-12	2.150E-06	2.150E-06
18		-6.5	2.744E-19	2.851E-06	2.851E-06	2.357E-19	2.042E-06	2.042E-06	2.341E-19	2.532E-06	2.532E-06	2.453E-19	1.669E-06	1.669E-06	2.142E-19	2.168E-06	2.168E-06
19		-7.0	4.888E-30	2.856E-06	2.856E-06	4.888E-30	1.953E-06	1.953E-06	4.888E-30	2.567E-06	2.567E-06	4.887E-30	1.569E-06	1.569E-06	4.888E-30	2.200E-06	2.200E-06

表3 穴の真上及び東西南北の床上と穴の中深さ方向線量率計算値（新穿孔穴）

計算点位置			線量率($\mu\text{Sv/h per Bq/cm}^2$) 【Cs137+4.4%Cs134】														
No.	床位置	床上高さ	新穿孔穴①			新穿孔穴②			新穿孔穴③			新穿孔穴④			新穿孔穴⑤		
			穴壁から	穴底から	合計	穴壁から	穴底から	合計	穴壁から	穴底から	合計	穴壁から	穴底から	合計	穴壁から	穴底から	合計
1	穿孔穴の中心	1.5	1.409E-06	8.160E-07	2.225E-06	1.405E-06	6.050E-07	2.010E-06	1.321E-06	6.990E-07	2.020E-06	1.405E-06	4.300E-07	1.835E-06	1.272E-06	5.740E-07	1.846E-06
2	穿孔穴の東側	1.5	8.448E-07	2.172E-07	1.062E-06	8.203E-07	1.549E-07	9.752E-07	7.923E-07	1.848E-07	9.771E-07	8.309E-07	1.172E-07	9.481E-07	7.760E-07	1.894E-07	9.654E-07
3	穿孔穴の南側	1.5	8.200E-07	2.240E-07	1.044E-06	8.864E-07	1.586E-07	1.045E-06	8.694E-07	1.996E-07	1.069E-06	8.604E-07	1.121E-07	9.725E-07	7.811E-07	1.632E-07	9.443E-07
4	穿孔穴の西側	1.5	8.448E-07	2.172E-07	1.062E-06	8.203E-07	1.549E-07	9.752E-07	7.923E-07	1.848E-07	9.771E-07	8.313E-07	1.142E-07	9.455E-07	8.142E-07	1.567E-07	9.709E-07
5	穿孔穴の北側	1.5	8.200E-07	2.240E-07	1.044E-06	8.713E-07	1.597E-07	1.031E-06	8.417E-07	2.153E-07	1.057E-06	8.432E-07	1.137E-07	9.569E-07	8.216E-07	1.584E-07	9.800E-07
6	穿孔穴内部	-0.5	1.719E-06	1.014E-06	2.733E-06	1.593E-06	8.140E-07	2.407E-06	1.508E-06	9.420E-07	2.450E-06	1.563E-06	6.140E-07	2.177E-06	1.394E-06	8.140E-07	2.208E-06
7		-1.0	1.842E-06	1.029E-06	2.871E-06	1.619E-06	8.900E-07	2.509E-06	1.550E-06	1.014E-06	2.564E-06	1.569E-06	6.990E-07	2.268E-06	1.407E-06	8.940E-07	2.301E-06
8		-1.5	1.748E-06	1.259E-06	3.007E-06	1.638E-06	9.750E-07	2.613E-06	1.541E-06	1.140E-06	2.681E-06	1.584E-06	7.740E-07	2.358E-06	1.424E-06	9.760E-07	2.400E-06
9		-2.0	1.877E-06	1.279E-06	3.156E-06	1.643E-06	1.074E-06	2.717E-06	1.576E-06	1.234E-06	2.810E-06	1.579E-06	8.680E-07	2.447E-06	1.419E-06	1.075E-06	2.494E-06
10		-2.5	1.767E-06	1.543E-06	3.310E-06	1.649E-06	1.170E-06	2.819E-06	1.559E-06	1.385E-06	2.944E-06	1.563E-06	9.650E-07	2.528E-06	1.397E-06	1.195E-06	2.592E-06
11		-3.0	1.663E-06	1.809E-06	3.472E-06	1.616E-06	1.299E-06	2.915E-06	1.538E-06	1.542E-06	3.080E-06	1.509E-06	1.086E-06	2.595E-06	1.378E-06	1.315E-06	2.693E-06
12		-3.5	1.798E-06	1.832E-06	3.630E-06	1.539E-06	1.461E-06	3.000E-06	1.491E-06	1.722E-06	3.213E-06	1.445E-06	1.202E-06	2.647E-06	1.312E-06	1.478E-06	2.790E-06
13		-4.0	1.681E-06	2.104E-06	3.785E-06	1.472E-06	1.610E-06	3.082E-06	1.383E-06	1.955E-06	3.338E-06	1.354E-06	1.342E-06	2.696E-06	1.240E-06	1.652E-06	2.892E-06
14		-4.5	1.559E-06	2.381E-06	3.940E-06	1.349E-06	1.799E-06	3.148E-06	1.290E-06	2.165E-06	3.455E-06	1.233E-06	1.492E-06	2.725E-06	1.148E-06	1.847E-06	2.995E-06
15		-5.0	1.428E-06	2.654E-06	4.082E-06	1.192E-06	2.001E-06	3.193E-06	1.156E-06	2.423E-06	3.579E-06	1.071E-06	1.664E-06	2.735E-06	1.017E-06	2.073E-06	3.090E-06
16		-5.5	1.083E-06	3.125E-06	4.208E-06	1.007E-06	2.208E-06	3.215E-06	9.452E-07	2.749E-06	3.694E-06	9.209E-07	1.798E-06	2.719E-06	8.495E-07	2.324E-06	3.173E-06
17		-6.0	7.782E-07	3.537E-06	4.315E-06	7.723E-07	2.439E-06	3.211E-06	7.095E-07	3.090E-06	3.799E-06	7.161E-07	1.955E-06	2.671E-06	6.697E-07	2.581E-06	3.251E-06
18		-6.5	5.681E-07	3.824E-06	4.392E-06	5.082E-07	2.656E-06	3.164E-06	4.624E-07	3.432E-06	3.894E-06	4.908E-07	2.102E-06	2.593E-06	4.386E-07	2.894E-06	3.333E-06
19		-7.0	3.560E-07	4.090E-06	4.446E-06	2.752E-07	2.795E-06	3.070E-06	2.621E-07	3.724E-06	3.986E-06	2.614E-07	2.217E-06	2.478E-06	2.401E-07	3.178E-06	3.418E-06
20		-7.5	1.276E-07	4.346E-06	4.474E-06	1.101E-07	2.817E-06	2.927E-06	1.038E-07	3.959E-06	4.063E-06	9.865E-08	2.221E-06	2.320E-06	8.997E-08	3.413E-06	3.503E-06
21		-8.0	2.276E-08	4.460E-06	4.483E-06	1.942E-08	2.728E-06	2.747E-06	1.657E-08	4.124E-06	4.141E-06	2.083E-08	2.100E-06	2.121E-06	1.838E-08	3.571E-06	3.589E-06
22		-8.5	7.860E-10	4.486E-06	4.487E-06	8.155E-10	2.538E-06	2.539E-06	6.650E-10	4.217E-06	4.218E-06	1.041E-09	1.898E-06	1.899E-06	8.895E-10	3.680E-06	3.681E-06
23		-9.0	8.826E-13	4.482E-06	4.482E-06	9.181E-13	2.299E-06	2.299E-06	1.048E-12	4.284E-06	4.284E-06	1.260E-12	1.658E-06	1.658E-06	1.160E-12	3.783E-06	3.783E-06
24		-9.5	6.760E-22	4.483E-06	4.483E-06	5.009E-22	2.048E-06	2.048E-06	4.654E-22	4.358E-06	4.358E-06	6.509E-22	1.409E-06	1.409E-06	5.220E-22	3.891E-06	3.891E-06
25		-10.0	4.998E-30	4.490E-06	4.490E-06	4.998E-30	1.910E-06	1.910E-06	4.998E-30	4.432E-06	4.432E-06	4.998E-30	1.237E-06	1.237E-06	4.998E-30	3.996E-06	3.996E-06

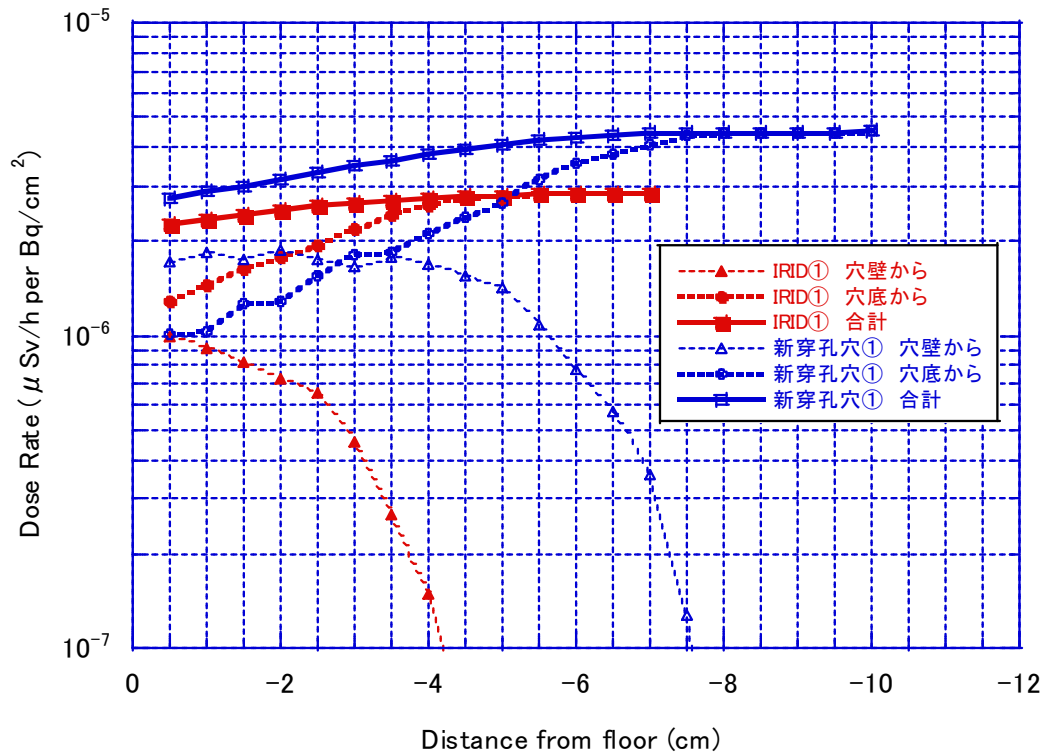


図4 ①での IRID 穴と新穿孔穴の穴壁と穴底からの寄与と合計の線量率分布

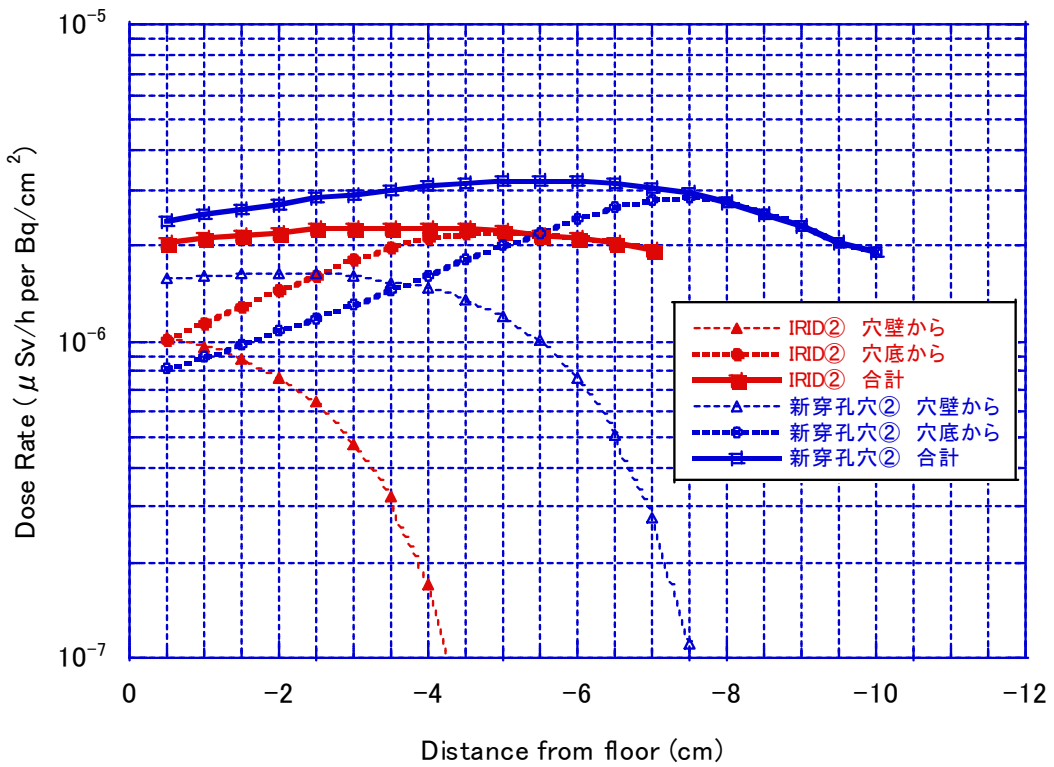


図5 ②での IRID 穴と新穿孔穴の穴壁と穴底からの寄与と合計の線量率分布

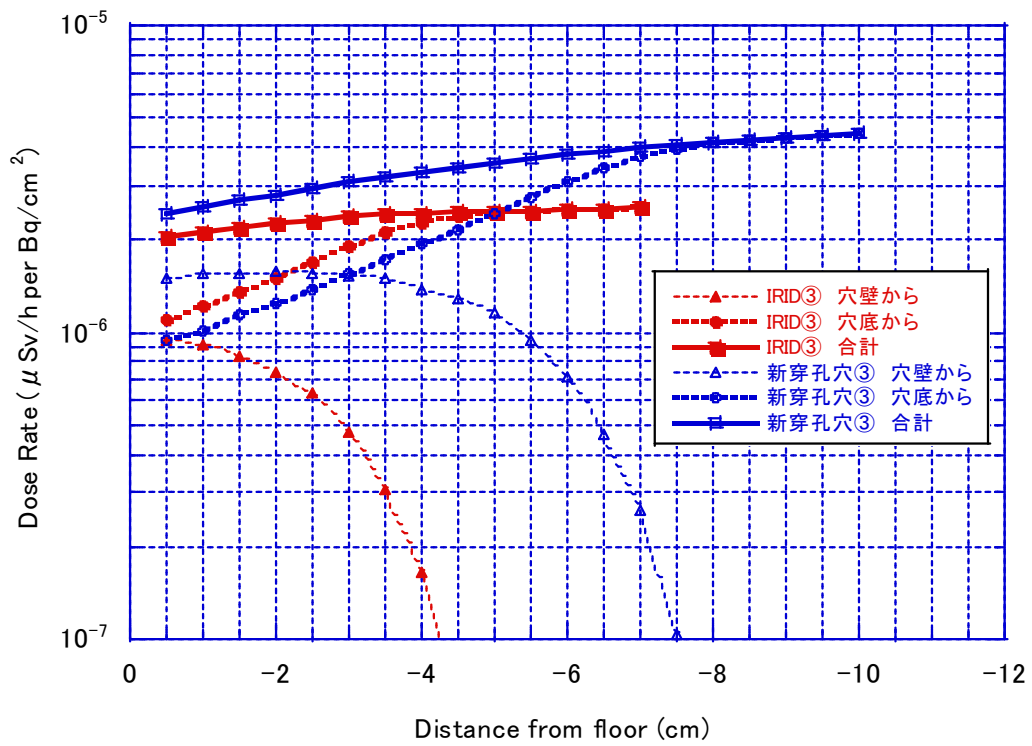


図6 ③での IRID 穴と新穿孔穴の穴壁と穴底からの寄与と合計の線量率分布

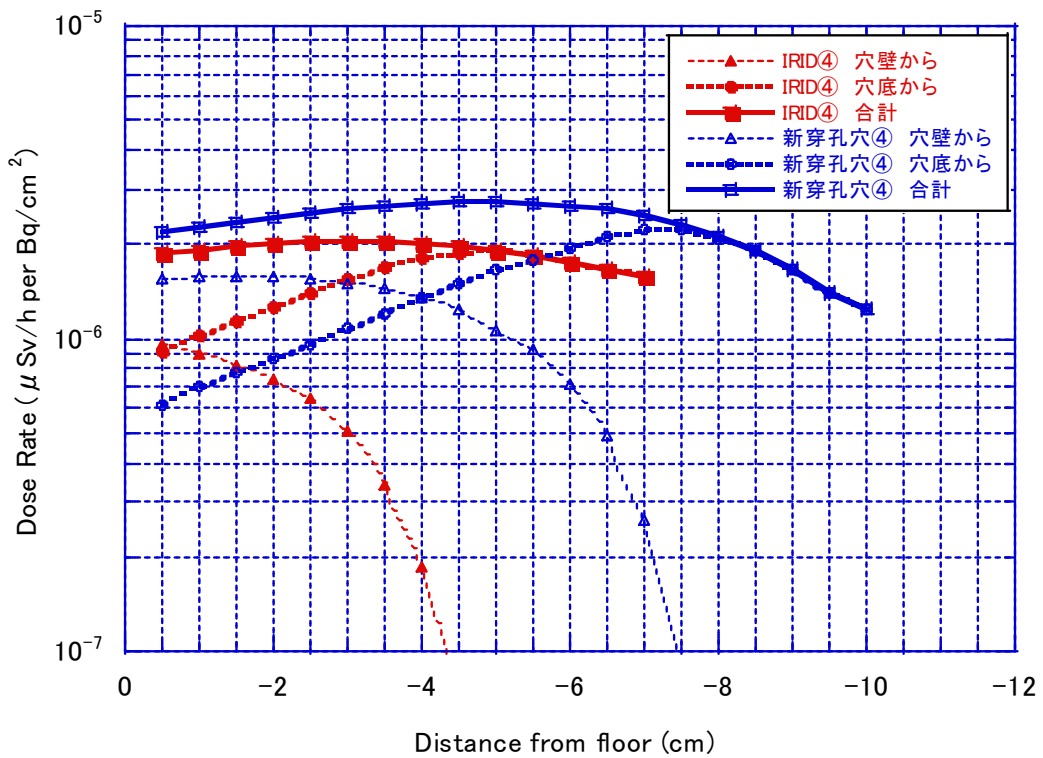


図7 ④での IRID 穴と新穿孔穴の穴壁と穴底からの寄与と合計の線量率分布

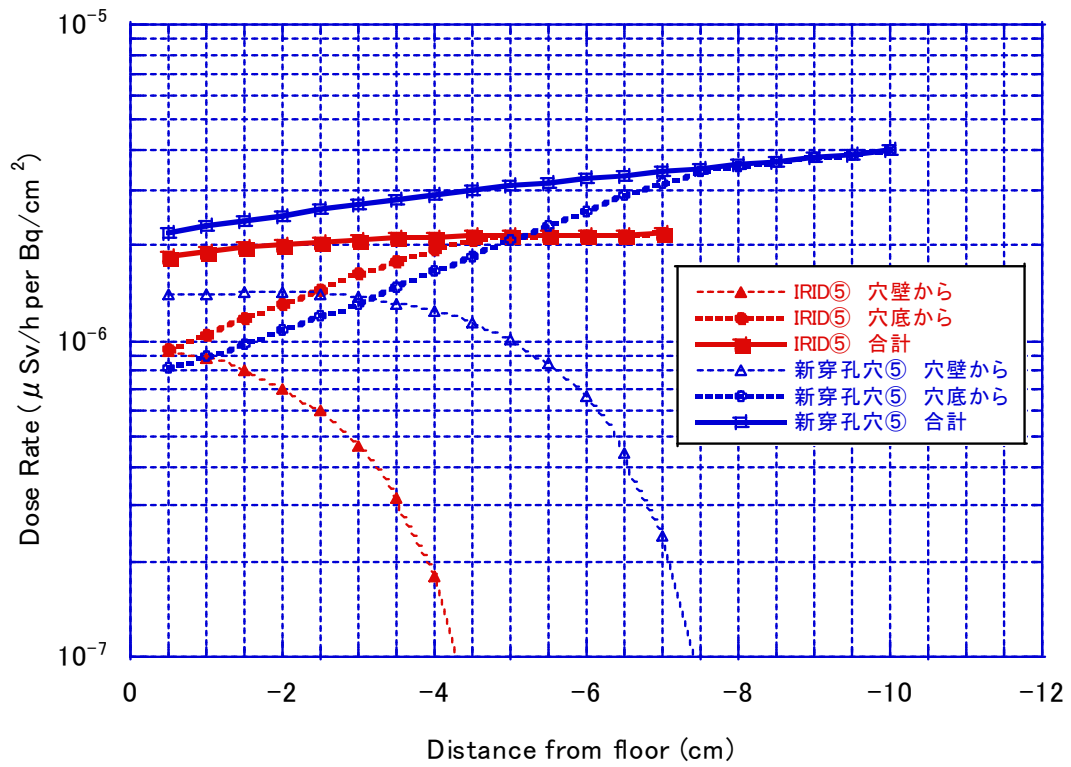


図8 ⑤での IRID 穴と新穿孔穴の穴壁と穴底からの寄与と合計の線量率分布

(別添 3-2-5-2)

61 cm コンクリート下部の Cs-137 線源の寄与領域の検討

原子力規制庁原子力規制部

東京電力福島第一原子力発電所事故対策室

平山 英夫、林 克己

1. はじめに

シールドプラグ上層上面の周辺線量当量率の測定及び 2021 年に東京電力がシールドプラグ上に穿孔した 13 個の穴（以下「新穿孔穴」という。）内部での周辺線量当量率の測定から、シールドプラグの上層と中間層の間に沈着している Cs-137 と Cs-134 の汚染密度の分布が大きい可能性があると考えられる。実際の汚染分布が不明な状態では測定位置の周辺線量当量率の計算は、寄与する領域の汚染密度が一様であるという仮定で行うことになる。計算結果と測定結果を比較検討し、シールドプラグ上層と中間層の間の汚染密度を推定する上では、シールドプラグ上層（厚さ 61 cm のコンクリート）の下部にある Cs-137 又は Cs-134 から放出された γ 線による周辺線量当量率が、線源位置との距離によりどのように変化するかを把握することが必要である。以下では、鉄筋を含まない床表面 3 cm（穴の無い場合）で egs5¹⁾ と QAD-CGGP2²⁾ の比較により位置による相対的な影響が同じであることを確認したうえで、鉄筋を含む複雑な形状での位置による影響については、QAD-CGCP2 を用いて検討した。

2. egs5 と QAD-CGGP2 の比較

厚さ 61 cm のコンクリートの下に、1 Bq の Cs-137 と 0.044 Bq の Cs-134 が存在する時、コンクリート表面から 3 cm の位置で線源位置を中心軸として、中心軸からの距離の変化に伴い周辺線量当量率がどのように変化するかを上記の両コード（egs5 及び QAD-CGGP2）で計算した。最も周辺線量当量率が高い中心軸上の周辺線量当量率との比での比較を図 1 に示す。egs5 の計算では、「面等方線源と単位球検出器形状を点等方線源と面検出器に変換する手法³⁾」と衝突確立法を適用した。両者の分布はよく一致しており、QAD-CGGP2 で検討できることが確認できた。

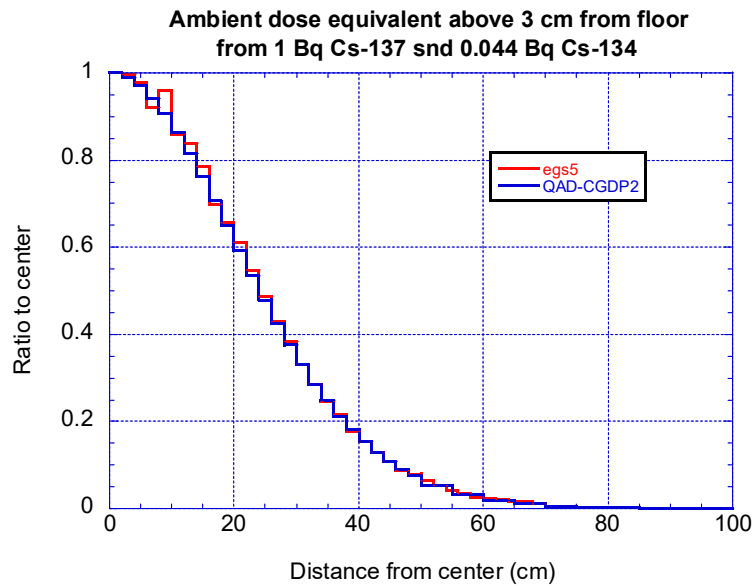
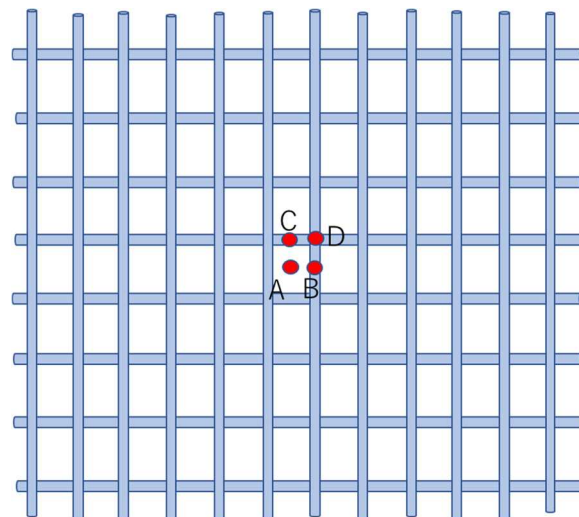


図1 床面上 3 cm での線源との位置の違いによる寄与分布の比較

3. 線源寄与領域の検討

3-1 シールドプラグ上層上面から 3 cm 位置での寄与分布

シールドプラグ上層上面の周辺線量当量率分布の測定に対応した床面から 3 cm 位置での寄与分布について鉄筋を含まない場合と、鉄筋を含む形状で、上部（シールドプラグ上層上面から深さ 10 cm にある鉄筋）と図 2 に示す位置にある場所での中心軸からの距離による周辺線量当量率変化を計算した。結果を図 3 に示す。



※位置 A を RSB-A、位置 B を RSB-B、位置 C を RSB-C、位置 D を RSB-D と表示する。

図2 上部鉄筋と評価位置

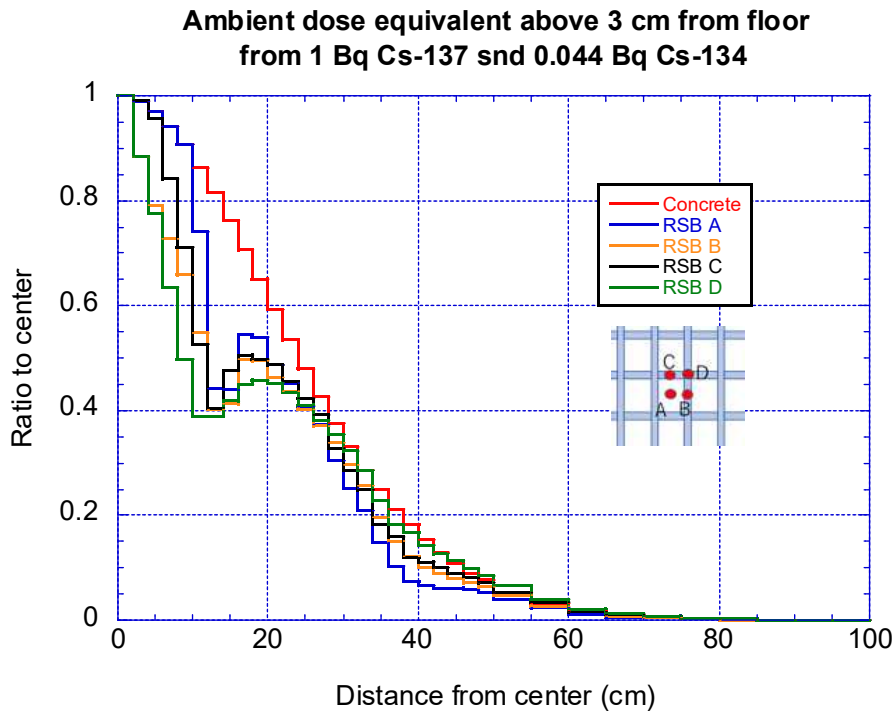


図3 各評価位置での中心軸からの距離による寄与分布

鉄筋により、中心軸から 20 cm までは評価位置により分布の形が異なるが、20 cm より先では、違いの程度は少ない。また、中心軸から 20 cm 離れると中心軸上の 0.5 から 0.6 に、30 cm 離れると 0.3 から 0.37 の寄与が減少することが分かる。もし、評価位置から 30 cm 離れた位置に汚染密度が 2 倍の領域が存在していたとすると、その領域の上部では評価位置の 2 倍以上の周辺線量当量率になる可能性があることになる。評価位置から 50 cm を超えると中心軸上の 0.1 以下となる。

1 Bq/cm² の一様な汚染密度の面線源の場合には、中心軸からの距離が同じ円環の面積を掛けた結果が測定位置での周辺線量当量率に寄与する。図 4 に、線源半径による周辺線量当量率の変化をシールドプラグ全体に相当する半径 6 m の場合の比で示す。半径 50 cm で 90 % 程度となることから、測定に寄与している実効的な領域は半径 50 cm 程度であると言える。

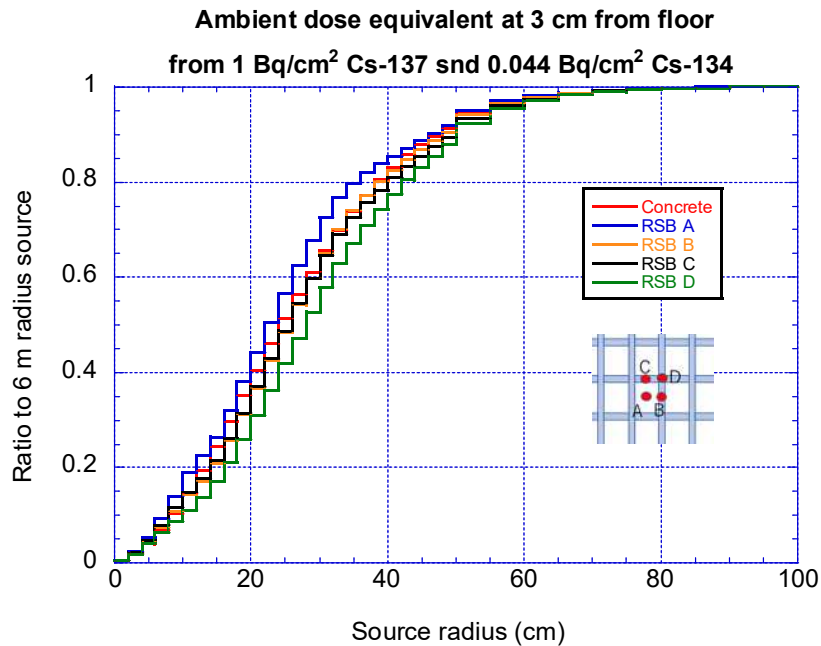


図4 シールドプラグ上層上面から3 cm 位置での線源半径による
周辺線量当量率変化

3-2 シールドプラグのコンクリート内部での寄与分布

図5にシールドプラグ上層上面から4 cm下部の穴内部、図6にシールドプラグ上層上面から9.5 cm下部の穴内部での線源半径による周辺線量当量率の変化をシールドプラグ全体に相当する半径6 mの場合の比で示す。穴の下部に鉄筋が存在するRSB-Dの形状では変化の形が若干異なるが、半径50 cmで90%以上となることから、測定に寄与している実効的な領域は床面上部3 cmの場合と同じように半径50 cm程度であると言える。

4. 参考資料

- 1) H. Hirayama, Y. Namito, A. F. Bielajew, S. J. Wilderman and W. R. Nelson, "The EGS5 Code System", SLAC-R-730 (2005) and KEK Report 2005-8 (2005)
- 2) QAD-CGGP2 AND G33-GP2 : REVISED VERSION OF QAD-CGGP AND G33-GP2, JAERI-M 90-110, June 1990
- 3) Y. Namito, H. Nakamura, A. Toyoda, K. Iijima, H. Iwase, S. Ban and H. Hirayama, "Transformation of a system consisting of plane isotropic source and unit sphere detector into a system consisting of point isotropic source and plane detector in Monte Carlo calculation", J. Nucl. Sci. Technol, 49, 167-172 (2012).

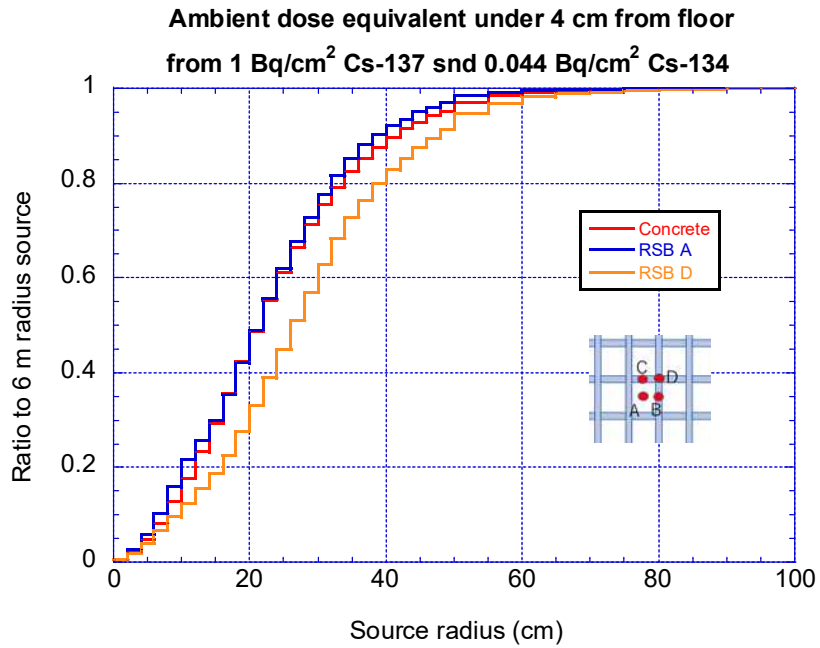


図5 シールドプラグ上層上面から4 cm 下部での線源半径による
周辺線量当量率変化

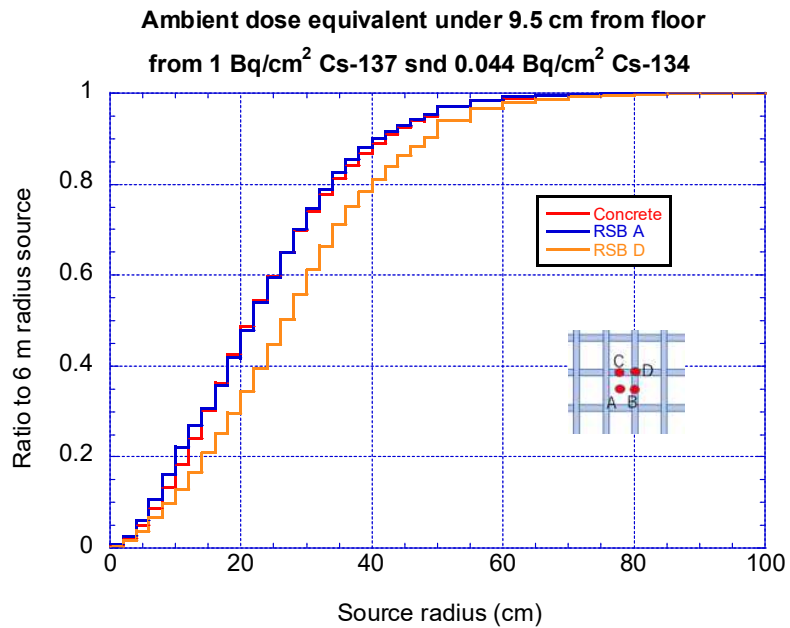


図6 シールドプラグ上層上面から9.5 cm 下部での線源半径による
周辺線量当量率変化

(別添 3-2-5-3)

2号機シールドプラグ上層上面の継ぎ目からの線量率寄与

原子力規制庁原子力規制部

東京電力福島第一原子力発電所事故対策室

林 克己、平山 英夫

1. はじめに

2号機シールドプラグの表面線量率分布の測定結果¹⁾(図1)を見ると、シールドプラグ上層の継ぎ目上の測定点(8点)全てが、継ぎ目から1m程度しか離れていない測定点と比べて2~10倍線量率が高い。この原因はシールドプラグの継ぎ目からのストリーミングと考えられたため、表面線量率分布図やこれを元にしたシールドプラグ上層と中間層の間の汚染密度の検討にはこれらの測定値を除いて検討を進めていたが、今回あらためてシールドプラグの継ぎ目からの寄与について検討することとした。

継ぎ目上での測定では、以下の寄与が考えられる。

- ① シールドプラグ上層と中間層の間の汚染からの線量率寄与(シールドプラグの継ぎ目がない場合の寄与分)
- ② オペフロの床面、天井、壁の汚染による線量率寄与
- ③ シールドプラグの継ぎ目を通り抜けてきた成分による線量率寄与
- ④ シールドプラグの継ぎ目の内面の汚染による線量率寄与

このうち①は別添3-2-5-1、別添3-2-5-2及び本別添、②は別添3-2-5-4で検討されているので、この資料では①、③及び④について検討した。

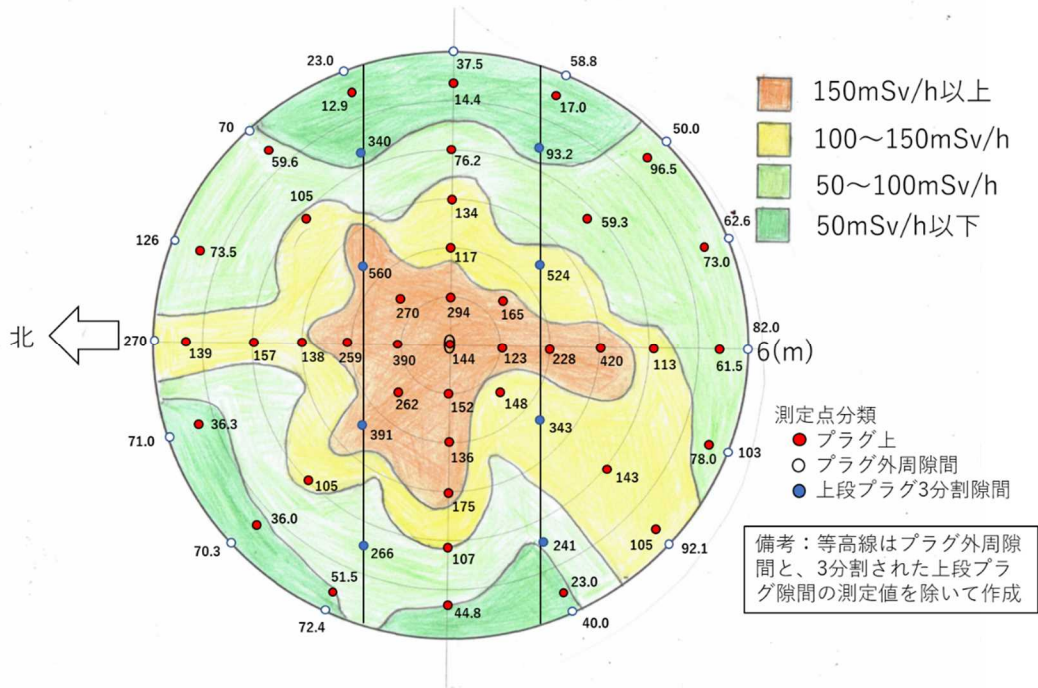


図1 2号機シールドプラグの表面線量率分布の測定結果

2. シールドプラグの構造

図2にシールドプラグの構造を示す。上層、中間層、下層の3層構造で、各層は3分割されており、各層の継ぎ目が90度で交差するように設置されている。また、各層の継ぎ目は、遮蔽効果と支持強度の配慮の観点から半分の厚み部分に幅10 cmの重ね合わせ構造を有している。

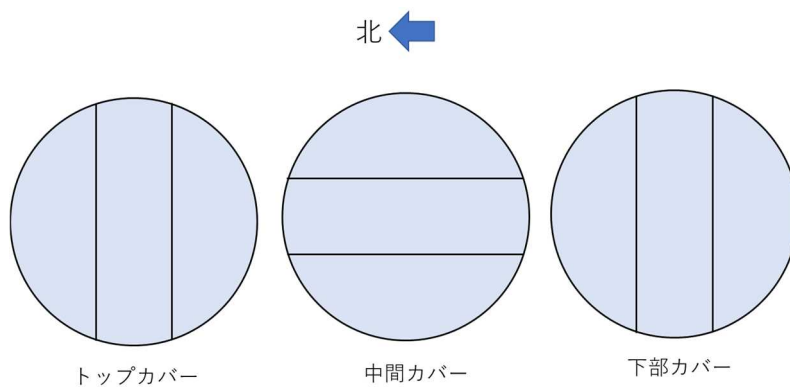


図2 2号機シールドプラグの構造

3. シールドプラグの継ぎ目を通り抜けてきた成分による線量率寄与

3.1 計算体系

2号機オペフロは線量率が高いため、シールドプラグの継ぎ目に近づいて確認することはできないが、水素爆発をしていないので事故の影響で継ぎ目が広がっていることはないと思われるため、継ぎ目の幅は島根2号機調査で確認した「広くても5mm以内」と考えられる。そこで、継ぎ目が無いモデルと継ぎ目の幅が5mm、10mmのモデルでシールドプラグ上層と中間層の間の汚染からの線量率寄与を計算して、継ぎ目による線量率増加割合を求めた。

計算にはQAD-CGGP2R²⁾を使用した。計算体系を図3に示す。継ぎ目の横断方向に床上3cmの線量率分布を求めた。シールドプラグ上層のコンクリート密度は 2.1g/cm^3 とした。

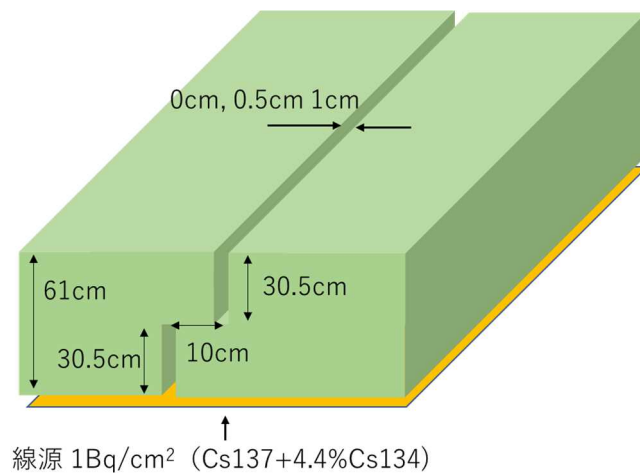


図3 シールドプラグの継ぎ目を通り抜けてきた成分の計算体系

3.2 計算結果

継ぎ目を設けた計算結果と継ぎ目の無い計算結果の比を図4に示す。5mmの継ぎ目があるときは、継ぎ目が無いときに比べて継ぎ目真上では線量率は2.7倍になる。また、10mmの継ぎ目があるときは、継ぎ目が無いときに比べて継ぎ目真上では線量率は4.5倍になる。

スリット長に比べスリット幅が充分狭いので、上のスリットからの漏洩による線量率のピークは見られるが下のスリットからの漏洩による線量率の影響はほとんど見られないこともわかる。

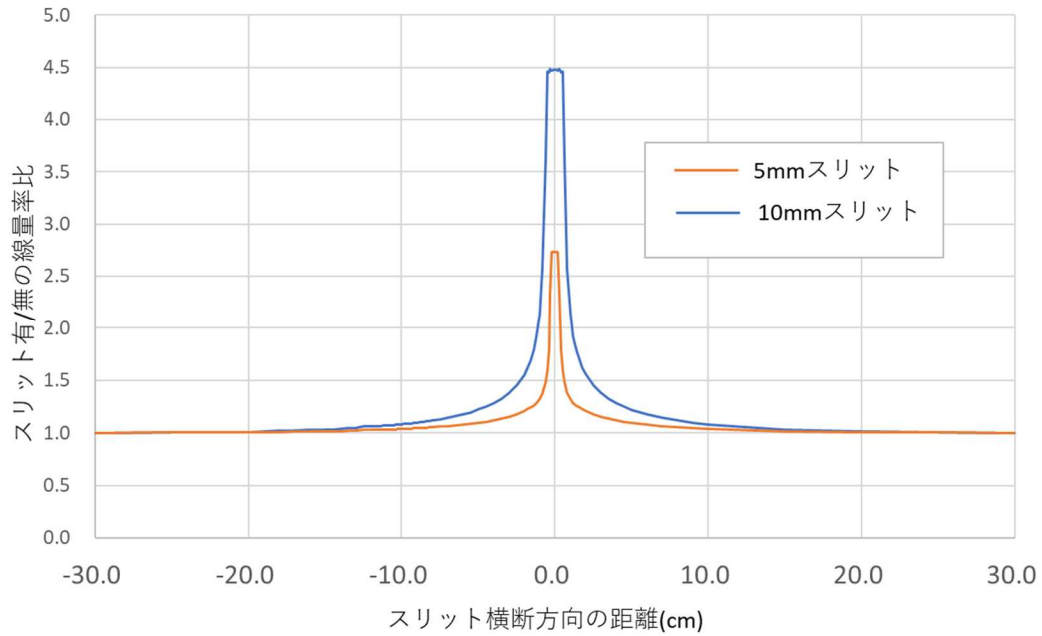


図4 シールドプラグの継ぎ目からのストリーミングによる線量率増加率

4. シールドプラグの継ぎ目の内面の汚染による線量率寄与

4.1 計算体系

計算には QAD-CGGP2R²⁾を使用した。計算体系を図5に示す。線源は継ぎ目内面の両側に存在するとして、その汚染密度が 1 Bq/cm^2 としたときの、継ぎ目横断方向に床上 3 cm の線量率分布を求めた。シールドプラグ上層のコンクリート密度は 2.1 g/cm^3 とした。

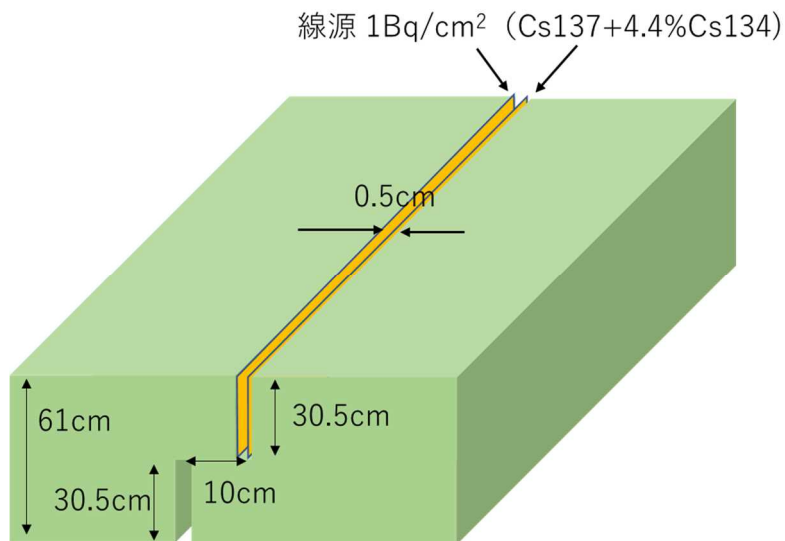


図5 シールドプラグの継ぎ目の内面の汚染による線量率計算体系

4.2 計算結果

スリット内面汚染を $1\text{Bq}/\text{cm}^2$ とした時のスリット横断方向の線量率分布を図6に示す。継ぎ目真上では $1.76\text{E}-2\ \mu\text{Sv}/\text{h per Bq}/\text{cm}^2$ となる。継ぎ目の汚染がオペフロ床汚染と同程度 ($1\text{MBq}/\text{cm}^2$) であるとするると $17.6\text{mSv}/\text{h}$ となる。(継ぎ目の汚染密度の設定については【付録1】参照)

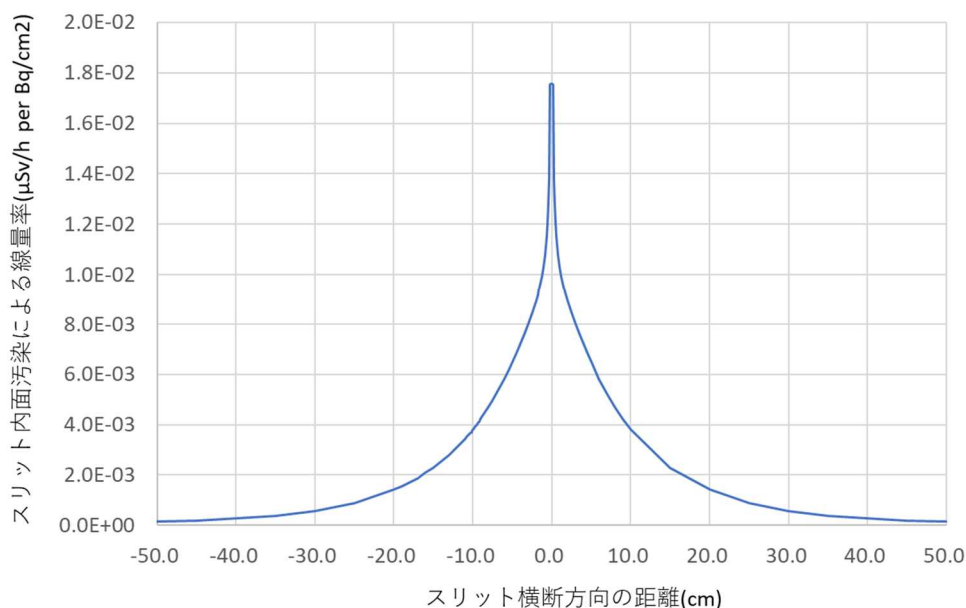


図6 5mm幅のスリットの内面汚染による床上3cm位置での線量率分布

5. まとめ

継ぎ目の測定点8点全てが近くの測定点と比べて2~10倍高い原因として2つの要因について検討し、これまでに検討した2つの要因とあわせてまとめる。

最初に検討した「③シールドプラグの継ぎ目を通り抜けてきた成分による線量率寄与」については、シールドプラグ上層と中間層の間の汚染からの寄与は、5mmの継ぎ目があるときは、継ぎ目が無いときに比べて継ぎ目真上では線量率は2.7倍になることがわかった。測定に使用したPDR-303のセンサー半径は10mm(2022年12月末時点で確認中)であるので、継ぎ目とセンサーの位置関係により測定される値は変わる。例えばセンサーの真ん中にスリットがあったとしても測定値は0.6倍になる。したがって5mmの継ぎ目を通り抜けてきた成分による線量率測定値は、 $(2.7-1.0) \times 0.6 + 1.0 = 2$ となり2倍程度が最大である。

実際には、測定器はロボットで把持され遠隔操作室で位置決めをしているためスリットの中心真上にセンサー中心が来ることはまれであると思われること、また島根2号機調査で確認した継ぎ目は広くても5mm以内ということからも実際はさらに狭い方向な

ので線量率測定値はさらに低くなると思われ、近くの測定点と比べて2～10倍高い主要因にはなりえない。

次に検討した「④シールドプラグの継ぎ目の内面の汚染による線量率寄与」については、汚染密度がオペフロ床汚染と同程度であるとする17.6mSv/hとなり、スリットの中心真上にセンサー中心が来たとしてもその0.6倍の11mSv/hがスリットの無い場合の測定値に付加されるだけなので、近くの測定点と比べて2～10倍高い主要因にはなりえない。

これまでの検討により、シールドプラグ上層上面での周辺線量当量率のうち「①シールドプラグ上層と中間層の間の汚染からの線量率寄与」については局所的な汚染の端から50cm離れると寄与はほとんどないことが判っている。そのため、1m程度離れた場所の汚染が2～10倍異なっていれば表面での測定値が2～10倍異なるのは充分ありえる。

また、表面での線量率のうち「②オペフロの床面、天井、壁の汚染による線量率寄与」については、オペフロ表面での合計はこれまでの検討により、60mSv/h程度であり、1m程度しか離れていない測定点で100mSv/h以上の差がでる要因とはなりえないので、近くの測定点と比べて2～10倍高い主要因にはなりえない。

これらを考え合わせると、シールドプラグの継ぎ目部分の測定点の線量が近くの測定点の線量率の2～10倍高い原因は、シールドプラグ上層と中間層の間の汚染が局所的に高いところがあることが主要因と考えられる。

6. 参考文献

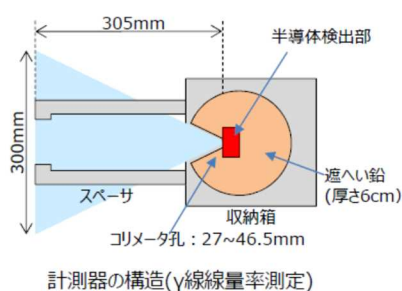
- 1) 第23回東京電力福島第一原子力発電所における事故の分析に係る検討会
資料3-1 現地調査の実施状況について P12、2021年10月19日
- 2) QAD-CGGP2 AND G33-GP2 : REVISED VERSION OF QAD-CGGP AND G33-GP2, JAERI-M 90-110, June 1990
- 3) H. Hirayama, Y. Namito, A. F. Bielajew, S. J. Wilderman and W. R. Nelson, “The EGS5 Code System”, SLAC-R-730 (2005) and KEK Report 2005-8 (2005)
- 4) 東京電力ホールディングス株式会社
2号機原子炉建屋オペフロ内残置物移動・片付後調査の結果について
P24、2019年2月28日
- 5) 第71回特定原子力施設監視・評価検討会
資料2 2号機原子炉建屋オペフロの放射線等調査結果について
～残置物移動・片付後～ P11、2019年5月20日

【付録 1】 シールドプラグ上層の継ぎ目の内面の汚染密度の設定について

シールドプラグ上層の継ぎ目の内面汚染密度を測定値から検討した。

東京電力がコリメータ付線量計を用いて床上高さ 30.5cm でのガンマ線測定したときに同時に床上高さ 1.5cm でベータ線とガンマ線を合わせた 70 μ m 線量当量率が測定されている^{4),5)}。測定に使用された線量計⁴⁾を図 7 に示す。また、シールドプラグ上の測定位置と測定値⁵⁾を図 8 に示す。

■ γ 線線量率(1cm線量当量率)



■ $\beta+\gamma$ 線線量率(70 μ m線量当量率)

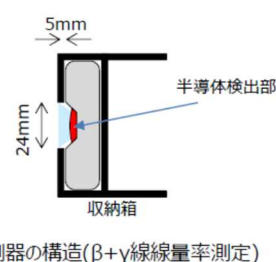


図 7 測定器⁴⁾

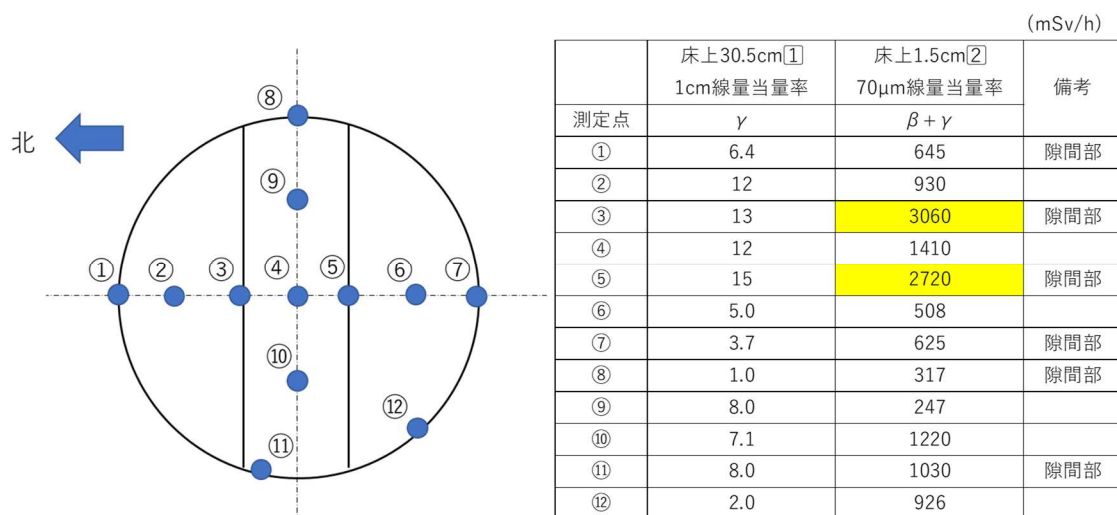


図 8 シールドプラグ上の測定位置と測定値⁵⁾

70 μ m 線量当量率測定器ではベータ線に比べてガンマ線感度がずっと低いので、主にベータ線を測っていることになる。また、そのベータ線は床上や継ぎ目内面の汚染が測られていることになる。

第 7 図で③～⑤の 1cm 線量当量率は大きな違いがないにもかかわらず 70 μ m 線量当量率を見ても、継ぎ目上の③と⑤ではベータ線が特に多く、近くの④の測定点より

2倍程度高いことがわかる。これはベータ線としては③と⑤には④と同程度の床汚染の寄与に加え、床汚染と同程度の隙間内面の汚染の寄与が加わっていると考えられる。またこの測定では他の継ぎ目を見てもこれ以上高いベータ線測定値は無いため、これを最大と考えることとした。

次に、床汚染と継ぎ目内面汚染のベータ線 70 μ m 線量当量率寄与が同じとした場合の汚染密度を決定する必要がある。測定に使用された 70 μ m 線量計は開口部が 24mm ϕ なので、汚染密度が同じ場合、継ぎ目の内面汚染からの寄与を継ぎ目上で測ると深さ方向の両内面の汚染からの寄与をまとめて測ることになるため、床汚染の 24mm ϕ に限られた線源からの寄与より線量率寄与は高くなる。同じ線量率寄与なら床汚染密度より内面汚染密度は低いと考えられるが、保守的に床上と継ぎ目内面の汚染密度は同じレベル (1MBq/cm²) と設定することとした。

なお、エアロゾルによる汚染を考えた場合の間隙部での汚染濃度分布などが考えられる。これらを含め現在の測定の範囲では判っていないことも多くあり、今後のエアロゾル等を含む種々の挙動解明の結果により見直していきたい。

【付録2】 シールドプラグ上層の継ぎ目の内面の汚染による床上 150cm 高さでの線量率寄与

東京電力による床上 150cm 高さの線量率測定値に対して、シールドプラグ上層の継ぎ目のスリットからの線量率寄与を参考として計算した。

計算体系は「4. シールドプラグの継ぎ目の内面の汚染による線量率寄与」と同じである。

スリット内面汚染を $1\text{Bq}/\text{cm}^2$ とした時のスリット横断方向の線量率分布を図9に示す。

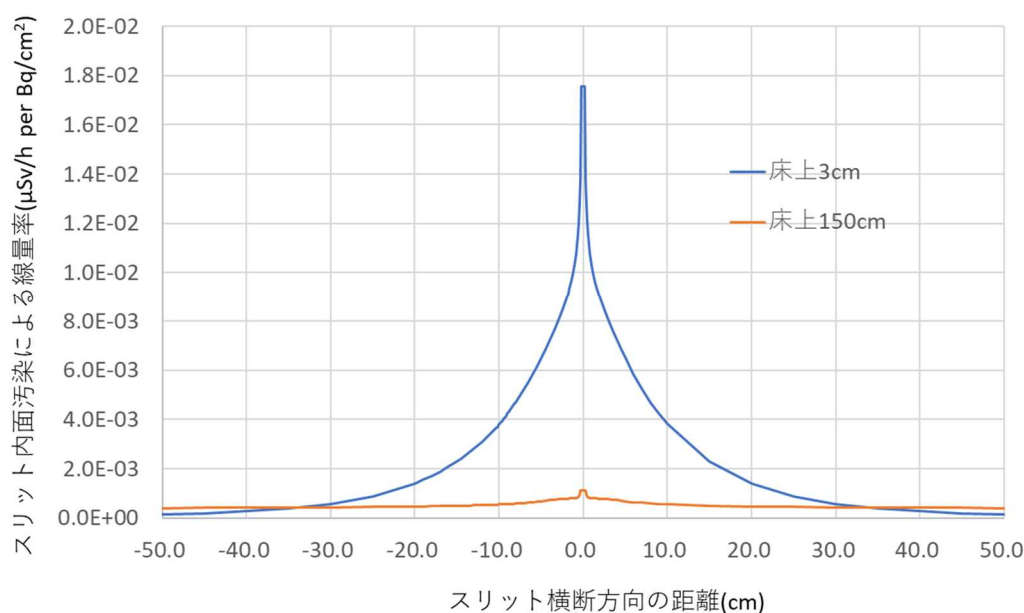


図9 隙間の内面の汚染による床上 150cm 高さでの線量率寄与

床上 3cm と比較すると床上 150cm 位置ではスリットの影響のピークは大きく下がるのがわかる。

継ぎ目真上では $1.13\text{E}-3\ \mu\text{Sv}/\text{h per Bq}/\text{cm}^2$ となる。継ぎ目の汚染がオペフロ床汚染と同程度 ($1\text{MBq}/\text{cm}^2$) であるとする $1.13\text{mSv}/\text{h}$ となる。

シールドプラグ中心は継ぎ目から 1.5m 離れている。今回の計算では 50cm 離れた位置までしか計算していないが、50 cm 離れた位置では片側のスリットからの影響は $3.98\text{E}-4\ \mu\text{Sv}/\text{h per Bq}/\text{cm}^2$ となる。継ぎ目の汚染がオペフロ床汚染と同程度 ($1\text{MBq}/\text{cm}^2$) であるとする $0.398\text{mSv}/\text{h}$ となる。シールドプラグ中心では両側のスリットからの影響の和となるので、多く見積もっても $0.8\ \text{mSv}/\text{h}$ 程度となると考えられる。

(シールドプラグの継ぎ目の汚染密度の設定については【付録1】参照)

(別添 3-2-5-4)

2号機オペフロ内壁汚染のシールドプラグ穴内線量率への寄与

原子力規制庁原子力規制部

東京電力福島第一原子力発電所事故対策室

林 克己、平山 英夫

1. はじめに

2014年に国際廃炉研究開発機構（IRID）が穿孔した2個の穴（以下「IRID穴」という。）と2021年に東京電力が穿孔した13個の穴（以下「新穿孔穴」という。）の内部の周辺線量当量率からシールドプラグ上層と中間層の間の汚染密度の検討を行なっている。穴の内部の周辺線量当量率にはシールドプラグ上層と中間層の間の汚染だけではなく、オペフロ内壁（天井、床、壁）の汚染が寄与するため、これを評価した。

2. 評価方法

穴をモデル化した EGS5¹⁾ での計算は長時間必要であるため、QAD-CGGP2R²⁾ を使って評価した。QAD-CGGP2R の計算結果の確認のため穴の無い位置（床上 150cm、3cm、1.5cm）での EGS5 での計算と比較し適用性を確認した。

次に、天井、床、東西南北の壁の汚染密度の測定値を使って、穴内の線量率分布を計算した。

3. 計算モデル

図1に計算モデルを示す。オペフロの天井、床、東壁、西壁、北壁、南壁に $Cs^{137}1Bq/cm^2$ + $Cs^{134}0.044Bq/cm^2$ の汚染があるときの床上および穴内の線量率分布を計算した。

なお、穴の位置はシールドプラグ中心とし、この中心軸のオペフロ内線量率の高さ方向分布と穴内の線量率の深さ方向分布を求めた。

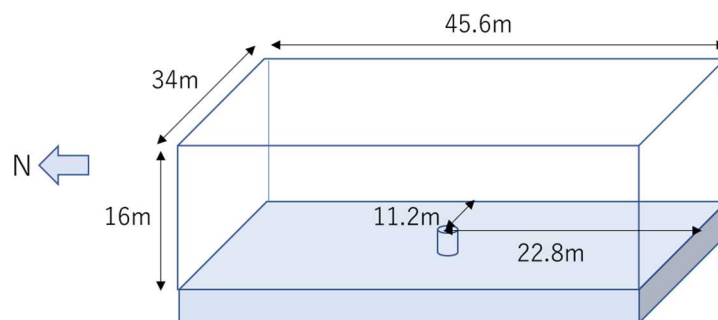


図1 計算モデル

4. 単位汚染あたりのオペフロ内汚染の線量率寄与計算結果

表1に結果を示す。図2に床、単位汚染あたりのオペフロ内汚染の線量率寄与のグラフを、図3に床上3cm以下の詳細図を示す。

天井の汚染によるオペフロ内線量率は床に近づくほど減少していく。穴内線量率は少しずつ減少するが、床や壁に比べて穴の奥まで影響が続くことが判る。

床の汚染によるオペフロ内線量率は床から天井方向に離れるほど大きく減少していく。穴内線量率は穴に入った途端大きく減少しその後も深さごとに減少が続く。

壁の汚染によるオペフロ内線量率はほぼ一定である。穴内線量率は穴に入った途端大きく減少しその後も減少が続く。壁の中でも東壁は距離が11.2mと近いので線量率は高くなり、西壁は22.8mと遠いので線量率は東壁の40%程度となっている。南壁と北壁は距離が同じ22.8mであり線量率も同じとなる。南壁と北壁は西壁と距離は同じだが、壁面積の比で $34/45.6=0.75$ と狭いため、西壁よりその割合で少し低い線量率となる。

全体として、同じ汚染密度の場合の線量率は、オペフロ内では大きい順で床、天井、東壁、西壁、南北壁となる。穴の中の線量率は大きい順で、床、天井、東壁、西壁と同じであるが、穴の中の減衰の緩やかな順で、天井、床、東壁、西南北壁となっている。

表1 単位汚染あたりのオペフロ内汚染の線量率寄与

計算点			線量率($\mu\text{Sv/h per Bq/cm}^2$) 【Cs¹³⁷+4.4%Cs¹³⁴】					
No.	位置	床上高さ (cm)	汚染面					
			天井	床	東壁	西壁	南壁	北壁
1	穿孔穴上部	150	4.475E-03	2.057E-02	3.052E-03	1.208E-03	9.812E-04	9.812E-04
2		100	4.300E-03	2.367E-02	2.990E-03	1.198E-03	9.723E-04	9.723E-04
3		3	3.986E-03	4.873E-02	2.864E-03	1.176E-03	9.534E-04	9.534E-04
4		1.5	3.981E-03	5.095E-02	2.862E-03	1.176E-03	9.531E-04	9.531E-04
5		0	3.976E-03	5.198E-02	2.860E-03	1.175E-03	9.528E-04	9.528E-04
6	穿孔穴内部	-0.5	3.797E-03	1.396E-02	2.586E-03	1.024E-03	8.340E-04	8.340E-04
7		-2	3.787E-03	1.128E-02	2.136E-03	7.490E-04	6.179E-04	6.179E-04
8		-3.5	3.667E-03	9.100E-03	1.719E-03	5.286E-04	4.416E-04	4.416E-04
9		-4	3.601E-03	8.458E-03	1.593E-03	4.693E-04	3.936E-04	3.936E-04
10		-4.5	3.524E-03	7.864E-03	1.474E-03	4.160E-04	3.502E-04	3.502E-04
11		-6	3.249E-03	6.341E-03	1.162E-03	2.881E-04	2.452E-04	2.452E-04
12		-8	2.826E-03	4.801E-03	8.363E-04	1.748E-04	1.509E-04	1.509E-04
13		-9.75	2.448E-03	3.789E-03	6.227E-04	1.122E-04	9.788E-05	9.788E-05

なお QAD-CGGP2R の計算では、線源から計算点まで空気だけを透過するオペフロ内計算点では空気のビルドアップファクターを、線源から計算点まで空気とコンクリートを透過する成分がある穴内計算点ではコンクリートのビルドアップファクターを使用した。

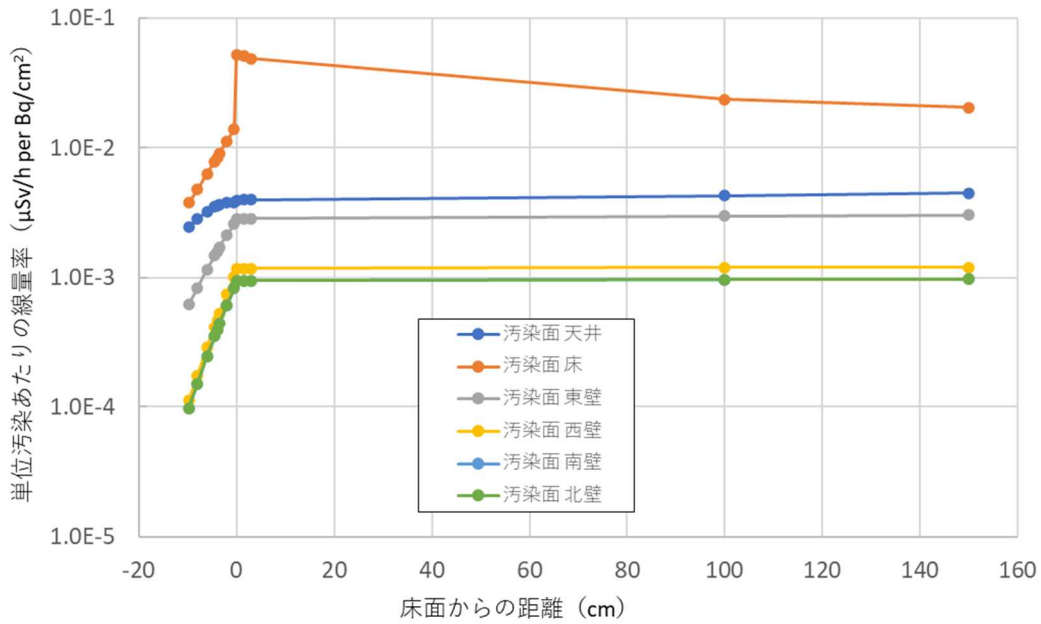


図2 単位汚染あたりのオペフロ内汚染の線量率寄与

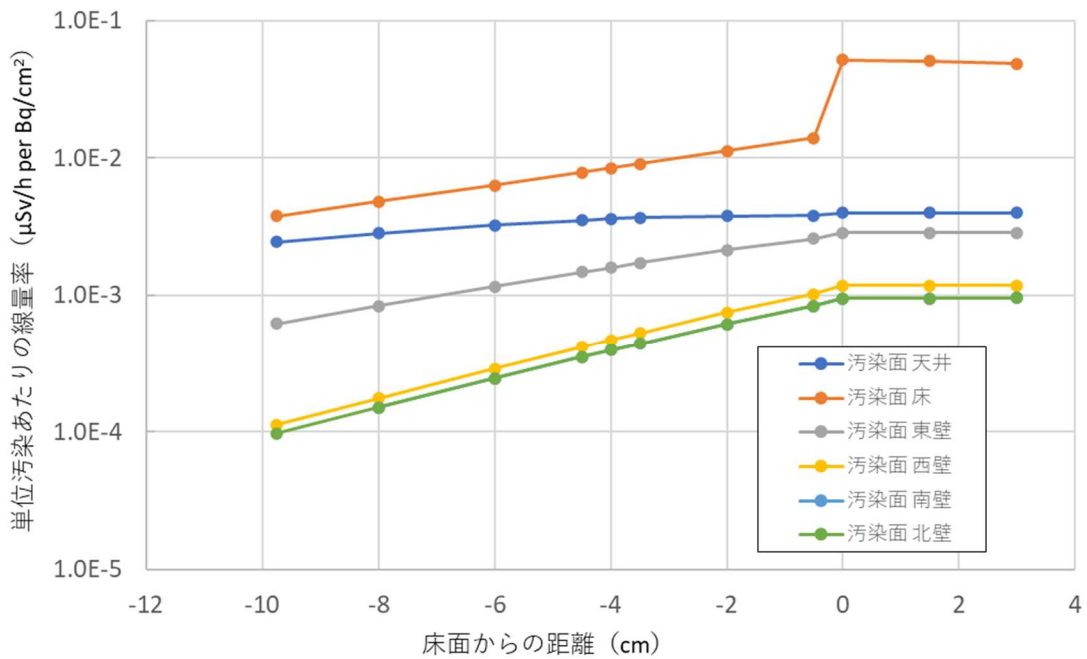


図3 単位汚染あたりのオペフロ内汚染の線量率寄与（床上3cm）

これらの QAD-CGGP2R の計算結果の確認のために、EGS5 で穴が無いモデル^{*)}を設定し、短時間でも統計精度が保てる形状変換法³⁾を使用してオペフロ内の線量率を求めた。計

算結果の比較を表 2 に示す。

* 穴がある形状では形状変換法が適用できないため。

表 2 計算法による結果比較

計算コード	床上高さ (cm)	汚染面毎の線量率($\mu\text{Sv/h per Bq/cm}^2$)					
		天井	床	東壁	西壁	南壁	北壁
QAD	150	4.475E-03	2.057E-02	3.052E-03	1.208E-03	9.812E-04	9.812E-04
	3	3.986E-03	4.873E-02	2.864E-03	1.176E-03	9.534E-04	9.534E-04
	1.5	3.981E-03	5.095E-02	2.862E-03	1.176E-03	9.531E-04	9.531E-04
EGS	150	5.371E-03	2.048E-02	3.134E-03	1.246E-03	9.662E-04	9.662E-04
	3	4.955E-03	4.778E-02	2.946E-03	1.216E-03	9.405E-04	9.405E-04
	1.5	4.950E-03	5.263E-02	2.944E-03	1.215E-03	9.401E-04	9.401E-04
QAD/EGS	150	0.83	1.00	0.97	0.97	1.02	1.02
	3	0.80	1.02	0.97	0.97	1.01	1.01
	1.5	0.80	0.97	0.97	0.97	1.01	1.01

QAD-CGGP2R は EGS5 とほぼ同じ結果であることがわかる。違いの原因は次のように考えられる。QAD-CGGP2R は点減衰核積分法なので、線源と計算点を結ぶ直線の通る材料の透過距離による減衰をベースとして、散乱した成分は材質と透過距離で決まるビルドアップファクターを乗じることにより求める。したがって、今回の例では空気を通る部分しか計算しない。このため線源面の建屋コンクリートで後方散乱して計算点に届く成分や、対置するコンクリート面での後方散乱で計算点に届く成分は計算できない。これに対し EGS5 はモンテカルロ法であり線源面の建屋コンクリートで後方散乱して計算点に届く成分も計算している。特に天井からの後方散乱成分の割合は壁からの後方散乱成分の割合よりも大きくなること、また EGS5 では天井高さを 15.3m と設定している (5%程度大きくなる) ことから、これらを合わせて QAD-CGGP2R と 20%程度の差が出ている。

前述したように穴をモデル化しての EGS5 での計算は長時間必要であるため、これ以降は QAD-CGGP2R の結果を用いて検討を進めることとした。

5. オペフロ内汚染の線量率寄与計算結果

表 3 に使用した天井、床、壁の汚染密度を示す。これらの汚染密度の設定については別添 3-2-5-9 に示す。東壁、北壁、南壁はガンマカメラ (添付資料 1、2 参照)、天井と西壁はコリメータ付線量計、床は新穿孔穴の穿孔時に抜き取ったコア表面測定で得られた値である。

表 4 に結果を示す。図 4 にオペフロ内汚染の線量率寄与のグラフを、図 5 に床上 3cm 以下の詳細図を示す。

表3 天井、床、壁の汚染密度

汚染密度 (MBq/cm ²) 【Cs ¹³⁷ +4.4%Cs ¹³⁴ 】					
天井	床	東壁	西壁	南壁	北壁
0.36	0.25	1.4	1.1	0.41	0.89

表4 オペフロ内汚染の線量率寄与計算結果

計算点			線量率(mSv/h)						合計
No.	位置	(cm)	汚染面						
		床上高さ	天井	床	東壁	西壁	南壁	北壁	
1	穿孔穴上部	150	1.611E+00	5.143E+00	4.273E+00	1.329E+00	4.023E-01	8.733E-01	1.363E+01
2		100	1.548E+00	5.918E+00	4.186E+00	1.318E+00	3.986E-01	8.653E-01	1.423E+01
3		3	1.435E+00	1.218E+01	4.010E+00	1.294E+00	3.909E-01	8.485E-01	2.016E+01
4		1.5	1.433E+00	1.274E+01	4.007E+00	1.294E+00	3.908E-01	8.483E-01	2.071E+01
5		0	1.431E+00	1.300E+01	4.004E+00	1.293E+00	3.906E-01	8.480E-01	2.096E+01
6	穿孔穴内部	-0.5	1.367E+00	3.490E+00	3.620E+00	1.126E+00	3.419E-01	7.423E-01	1.069E+01
7		-2	1.363E+00	2.820E+00	2.990E+00	8.239E-01	2.533E-01	5.499E-01	8.801E+00
8		-3.5	1.320E+00	2.275E+00	2.407E+00	5.815E-01	1.811E-01	3.930E-01	7.157E+00
9		-4	1.296E+00	2.115E+00	2.230E+00	5.162E-01	1.614E-01	3.503E-01	6.669E+00
10		-4.5	1.269E+00	1.966E+00	2.064E+00	4.576E-01	1.436E-01	3.117E-01	6.211E+00
11		-6	1.170E+00	1.585E+00	1.627E+00	3.169E-01	1.005E-01	2.182E-01	5.017E+00
12		-8	1.017E+00	1.200E+00	1.171E+00	1.923E-01	6.187E-02	1.343E-01	3.777E+00
13		-9.75	8.813E-01	9.473E-01	8.718E-01	1.234E-01	4.013E-02	8.711E-02	2.951E+00

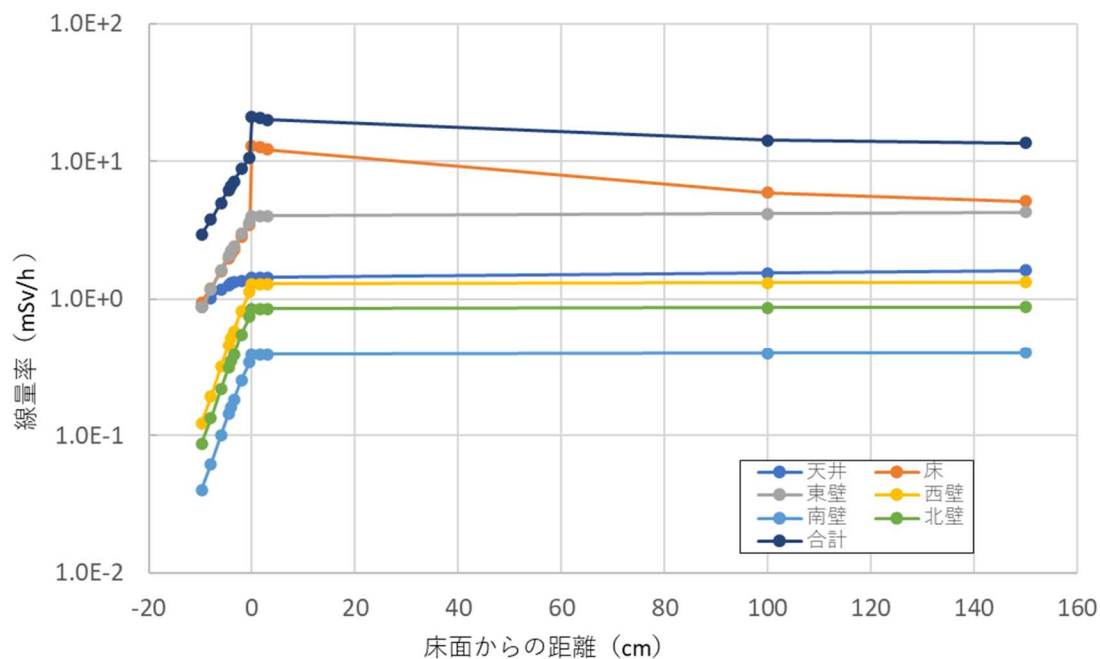


図4 オペフロ内汚染の線量率寄与計算結果

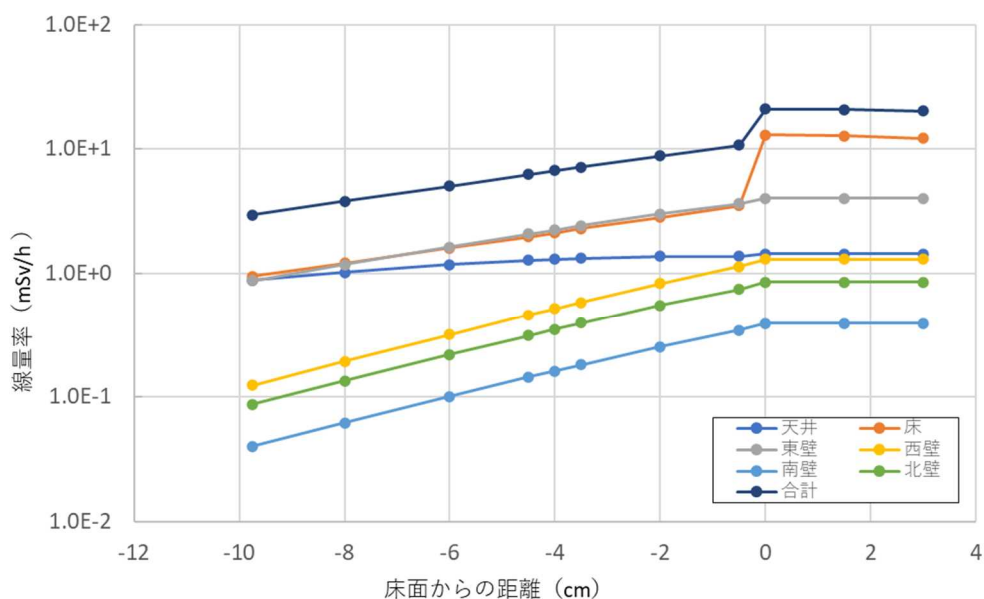


図5 オペフロ内汚染の線量率寄与計算結果（床上3cm）

図5から、0.5cmより深い穴内線量率は床からの寄与と東壁からの寄与が同程度であり、天井、西壁、北壁、南壁の寄与は小さいことがわかる。天井の寄与は小さいため、QAD-CGGP2Rでの天井の過小評価（表2：20%）は合計線量率には影響がほぼ無い。

ここまでの評価で得られた結果を、シールドプラグ上に25cmの鉄板遮蔽を敷設した後の測定値と比較した。鉄板敷設後は床汚染の寄与も無く、またシールドプラグ上層と中間層の間に存在するCs-137の汚染からの寄与は $0.1 \mu\text{Sv/h}$ 程度⁴⁾と小さいので、オペフロ内内壁汚染のうち床汚染の寄与を引いた分の線量率だけになる。表4の合計線量率から床汚染寄与を引いた床上100cmの線量率は 8.3mSv/h 、床上150cmの線量率は 8.5mSv/h である。

原子力規制庁が2022年5月12日にシールドプラグ中心床上100cmで測定した線量率は 8mSv/h （シールドプラグ内全体では $7\sim 15\text{mSv/h}$ の範囲）⁵⁾、東京電力が同年5月17日にシールドプラグ中心床上150cmで測定した線量率は 9mSv/h ⁶⁾であるので、良く一致している。

現在までの測定結果を整理して得られている天井、床、壁の汚染密度を使用して、シールドプラグに穿孔された穴内への線量率寄与を評価し、穴内線量率分布を設定した。今後この分布を使用し、穴内で測定された線量率を検討する予定である。

なお、天井、床の汚染密度測定点が限られていること、ガンマカメラの壁汚染密度測定では統計精度が充分ではないことなどから、現在までに得られている測定結果だけではこれ以上建屋内壁からの穴内への線量率寄与の精度を上げることは困難である。

6. 参考資料

- 1) H. Hirayama, Y. Namito, A. F. Bielajew, S. J. Wilderman and W. R. Nelson, "The EGS5 Code System", SLAC-R-730 (2005) and KEK Report 2005-8 (2005)
- 2) QAD-CGGP2 AND G33-GP2 : REVISED VERSION OF QAD-CGGP AND G33-GP2, JAERI-M 90-110, June 1990
- 3) Y. Namito, H. Nakamura, A. Toyoda, K. Iijima, H. Iwase, S. Ban and H. Hirayama, "Transformation of a system consisting of plane isotropic source and unit sphere detector into a system consisting of point isotropic source and plane detector in Monte Carlo calculation", J. Nucl. Sci. Technol, **49**, 167-172 (2012)
- 4) 「2号機シールドプラグの鉄板遮蔽敷設の効果について」
2022年5月25日 R1 林 克己、平山英夫
- 5) 第30回東京電力福島第一原子力発電所における事故の分析に係る検討会 資料3
- 1 現地調査の実施状況について P7、2022年6月30日
- 6) 第30回東京電力福島第一原子力発電所における事故の分析に係る検討会 資料3
- 1 現地調査の実施状況について P8、2022年6月30日

【添付資料 1】

ガンマカメラによる 2 号機オペレーションフロアの汚染密度の測定結果

1. はじめに

2020 年 1 月 30 日に、東京電力の協力を得て、2 号機オペレーションフロア内の Cs-137 汚染密度を得ることを目的にガンマカメラによる測定を実施した。

2. 測定概要

測定は、前室のオペレーションフロアへの立ち入り開口部から東壁、南壁及び北壁に向けて実施した。Cs-137 の汚染密度を測定することが主要な目的であったので、基本的に Cs-137 の 0.662 MeV γ 線の全エネルギー吸収ピーク計数モードが中心であったが、東壁に向けての測定では、全計数モードでの測定も実施した。

第 1 図に、3 方向の測定結果を併せた画像を示す。



第 1 図 北壁、東壁、南壁の測定結果の合成図（改訂）

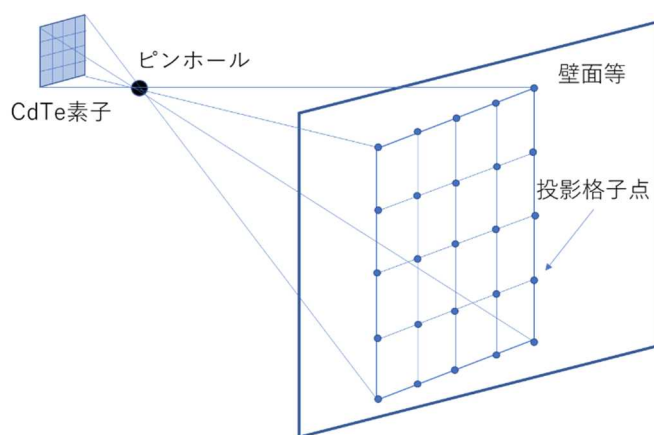
3. 測定結果の解析準備

各ピクセルに対応した Cs-137 の汚染密度を求めるためには、ピクセルに対応する領域の形状、各領域までの実効的距離と領域の面積が必要である。特に今回の測定は斜方向に撮影された壁が多く、これに対応するため以下の解析手法を作成した。他については原子力学会誌への投稿論文の手法を用いた。

(1) CdTe 素子の各ピクセルの測定面への投影

CdTe 素子 (4cm x 4cm) は 16x16 のピクセルに区切られており、素子から 5cm 離れたピンホールから入ってきたガンマ線を計測する。各ピクセルで数える Cs-137 からの直

接線が測定面のどの領域から入ってくるかを知る必要があるので逆に各ピクセルがピンホールを通じてどのように測定面に投影されるかを求めた。各ピクセルは正方形であるが、ピンホールを通じた測定面への投影は面の傾きにより第2図に示すように変形する。CdTe 素子面と投影面が平行の時だけ正方形を保つが、傾きが一方向の場合は一組が平行の四辺形、二方向に傾くと二組とも平行でない四辺形となる。



第2図 CdTe素子の各ピクセルの壁面等への投影格子点

この投影された格子点については、CdTe 素子の各格子点とピンホールを結ぶ直線と、投影される面の式の交点を計算して座標を求める。

また、ガンマカメラの向いている方向は現場では正確に求められない。そこで CdTe 素子の向きは撮影された画面の3か所（画面中心と右上、右下）の座標を写真から読取って入力することによりピンホールとの位置関係から決定した。これにより CdTe 素子の上下左右の傾きが決定できるので CdTe 素子の各格子点の正確な3次元位置が決定され、これをもとに先ほどの投影点計算が可能となる。

これらの計算の座標原点は、後の図の作成も考え、建物の床面中心とした。

(2) 各ピクセル投影領域とピンホールの距離

各ピクセル投影領域の汚染量を求めるためには、投影領域とピンホールの実効距離が必要となる。汚染量を求める式は距離の二乗に反比例であるので、実効距離は投影領域の格子点4点の座標とピンホールの座標からそれぞれ求めた距離をもとに以下の式により求めた。

$$Reff = 1 / (4\sqrt{Ra^{-2} + Rb^{-2} + Rc^{-2} + Rd^{-2}})$$

ここで $Reff$ は実効距離、 Ra 、 Rb 、 Rc 、 Rd は四隅の格子点とピンホールの距離

(3) 各ピクセル投影領域の面積

汚染量から汚染密度を求めるため、各ピクセルの測定面への投影領域の面積が必要と

なる。投影格子点4点の座標で作られる四角形の面積は、対角線で三角形2個に分けてそれぞれの面積を求めて合算した。

(4) 面への投影格子点の図の出力

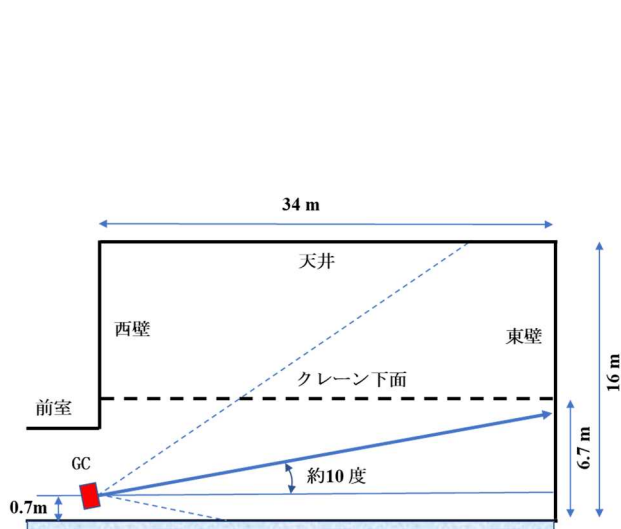
投影格子点が測定面上にどのように分布しているかを EXCEL で図出力させるようにした。この図により投影計算に使用する入力(画面上の3か所の座標の読取など)のミスなどもチェック可能となり、また汚染密度分布の図の作成の元ともできる。

4. 測定詳細

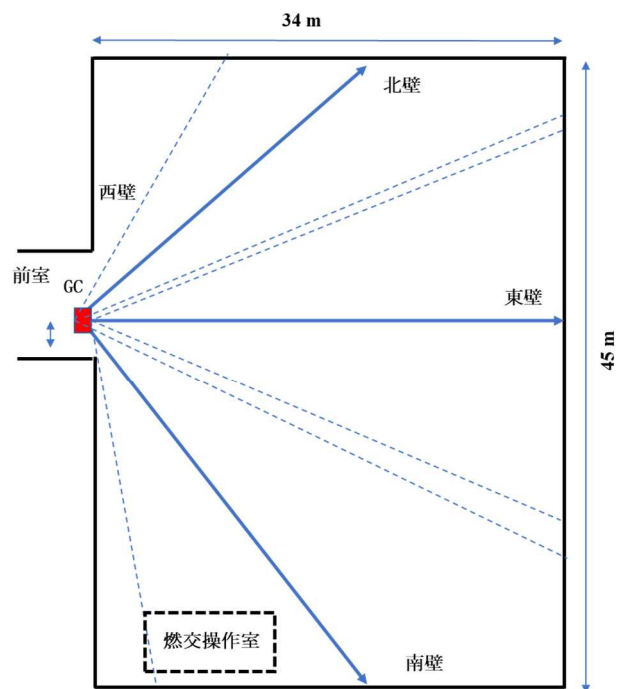
測定は、東壁向き水平(Cs-137モード、全計数モード)、東壁向き10度上向き(Cs137モード)、南壁向き10度上向き(Cs-137モード)、北壁向き10度上向き(Cs-137モード)の5回行い測定時間は各1分間であった。今回の測定はオペフロ前室内での準備、測定器方向変更時間も含め15分間と限られていたので、セットする時間も短く全般に画像が左右に傾いている。東壁向き水平測定は他と同様の傾きであったが、床の汚染量解析には不都合な傾きであったため今回の報告から省く。

撮影位置を第3図(立面)と第4図(平面)に示す。ガンマカメラの設置高さは68.2cm(使用した脚立の踏面高さ57cm+ガンマカメラ脚部からピンホールまでの高さ11.2cm)であった。

前回(2019年10月)の測定では、シールドプラグ手前床に汚染物が存在していたが、今回は東京電力によるロボット(PackPod)にAPDを装着してのシールドプラグの線量率の測定と合わせて行うため撤去されていた。



第3図 撮影位置(立面)



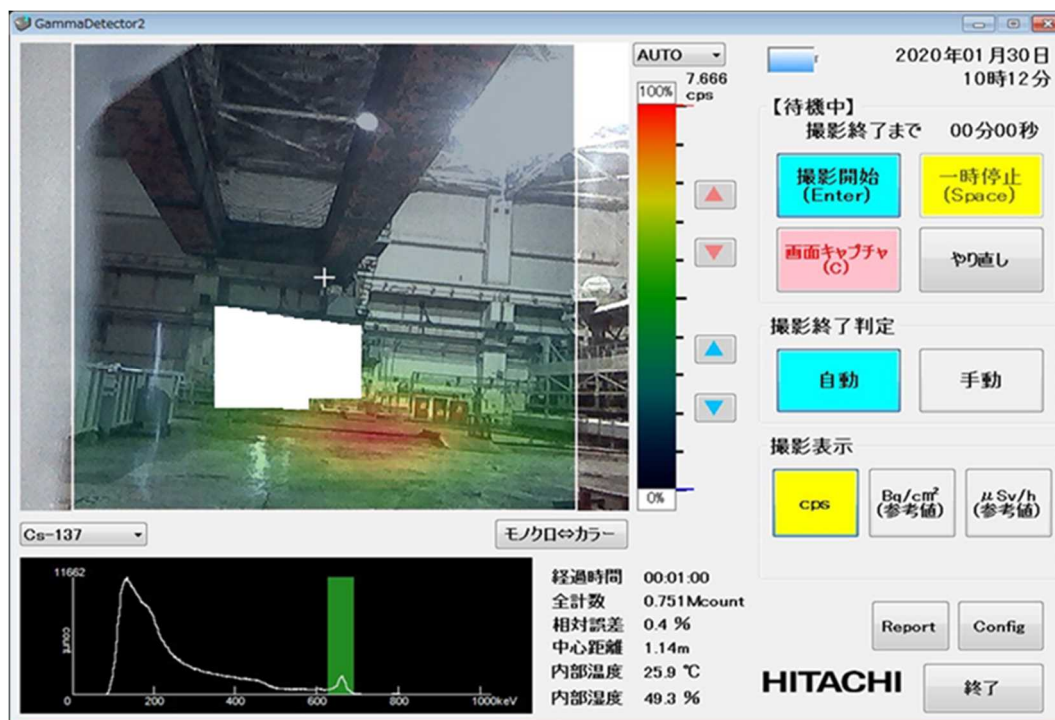
第4図 撮影位置(平面)

4. 1 東壁向き 10 度上向き測定

(1) 測定範囲

ガンマカメラで測定した PC 画面キャプチャーを第 5 図に示す。

東壁に 3 本写っている柱の 2 番目は建物南北の中心の柱であり、カメラ中心はそのやや左にありクレーンガーダー南側下面奥にある。東壁の 6 割程度が画面に収まっている。



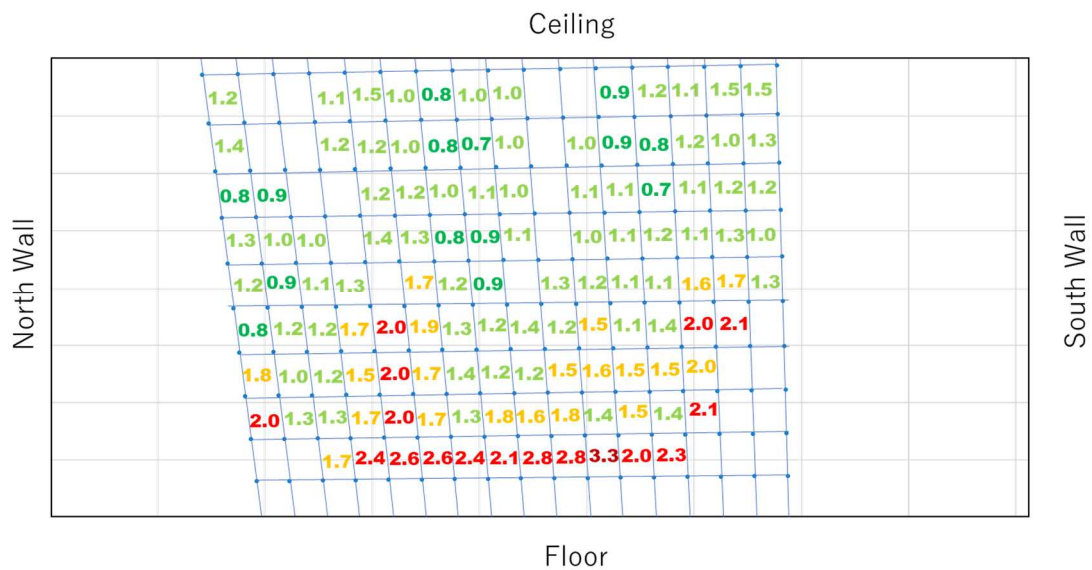
第 5 図 東壁向き 10 度上向き撮影の PC 画面

(2) 東壁中央部の汚染密度分布

第 6 図に得られた東壁中央部の汚染密度分布 (MBq/cm^2) を示す。

測定された領域全体の平均汚染密度は、 $1.4 \text{ MBq}/\text{cm}^2$ であった。壁の前に物が写っている場所については、その物自体が汚染物である可能性や壁からのガンマ線を遮蔽する可能性があるため表示していない。

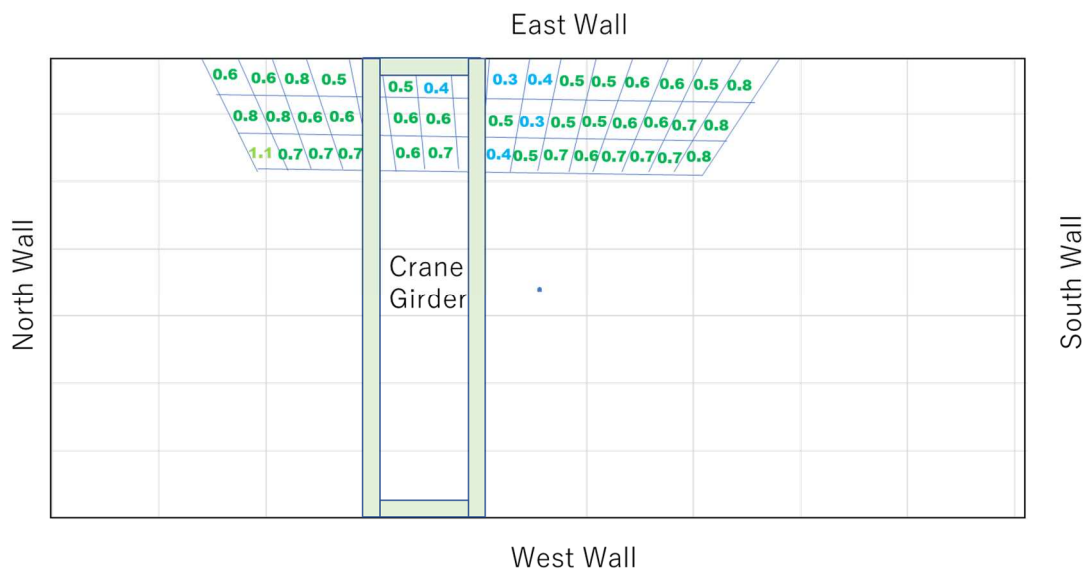
また中心の右と左の柱に相当する領域が同じ高さの壁にくらべて高くなっている。柱が高めになる結果は東京電力の報告¹⁾ (線量率から MCNP 計算で汚染密度を再合成)とも符合しており、東京電力の推定では雨水等により天井クレーンランウェイガーダー上の汚染が流れたこととしている。



第 6 図 東壁向き 10 度上向き撮影による東壁中央部汚染密度分布 (MBq/cm²)

(3) 天井の汚染密度分布

第 7 図に得られた天井の汚染密度分布 (MBq/cm²) を示す。天井のうちクレーンゲーターで隠れた部分は表示していない。10 度上向きだけなので写る天井の領域は限られているが、天井面の平均汚染密度は 0.60 MBq/cm² であった。

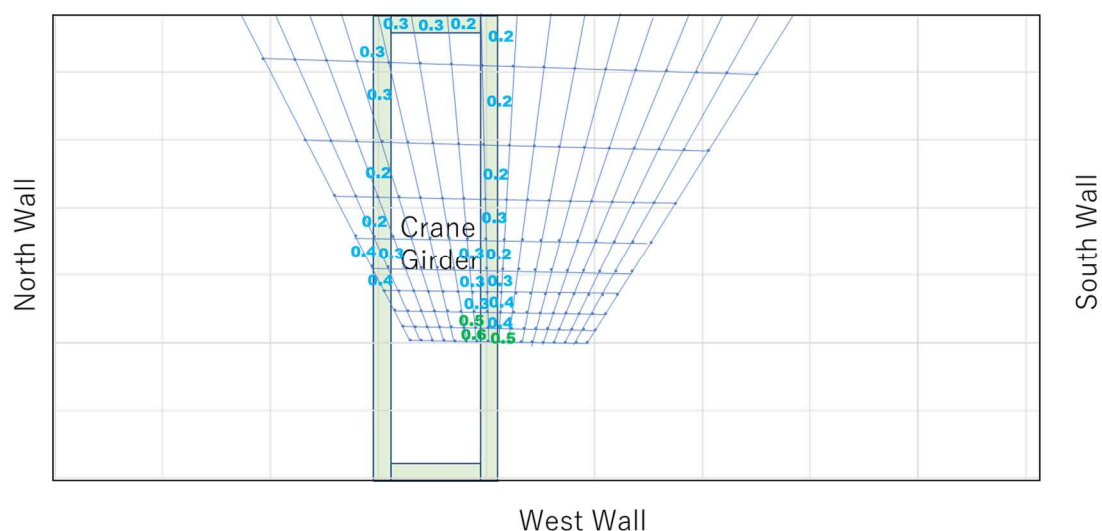


第 7 図 東壁向き 10 度上向き撮影による天井汚染密度分布 (MBq/cm²)

(4) クレーンガーダーの裏面の汚染密度分布

第8図に得られたクレーンガーダーの裏面の汚染密度分布 (MBq/cm²) を示す。クレーンガーダー裏面高さで表示しており、天井部分は表示していない。クレーンガーダーは天井より低いので10度上向きだけでもかなりの長さまで得ることができている。

クレーンガーダーの裏面は、平均汚染密度は0.27 MBq/cm²であり、天井面より少なめの汚染密度であった。(クレーン寸法の情報を得てから、見直しが必要)

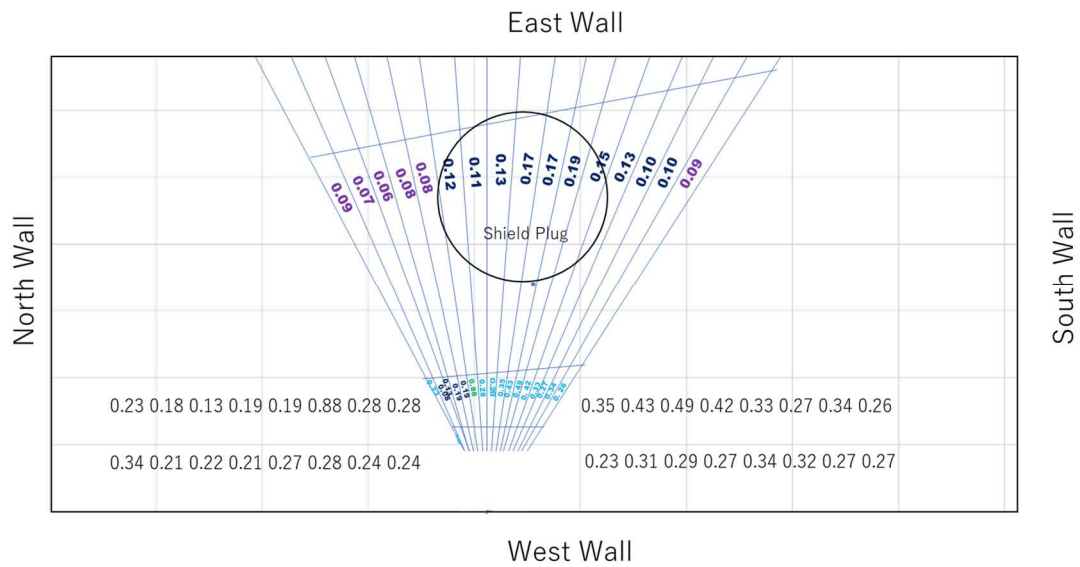


第8図 東壁向き10度上向き撮影によるクレーンガーダー裏面汚染密度分布 (MBq/cm²)

(5) 床の汚染密度分布

第9図に得られた床の汚染密度分布 (MBq/cm²) を示す。

床面から高さ68.2 cmでの測定なので、一つのピクセルは対応する西壁からの距離がカメラからの距離は遠い領域では広くなり、近くほど狭くなること、床面に対してカメラが若干傾いていたことから、シールドプラグ領域との正確な対応は難しいが、シールドプラグを含む領域のピクセルと含まない領域のピクセルでは大きな違いはみられなかった。床面全体のピクセルの平均汚染密度は、0.13 MBq/cm²であった。



第9図 東壁向き10度上向き撮影による床汚染密度分布 (MBq/cm²)

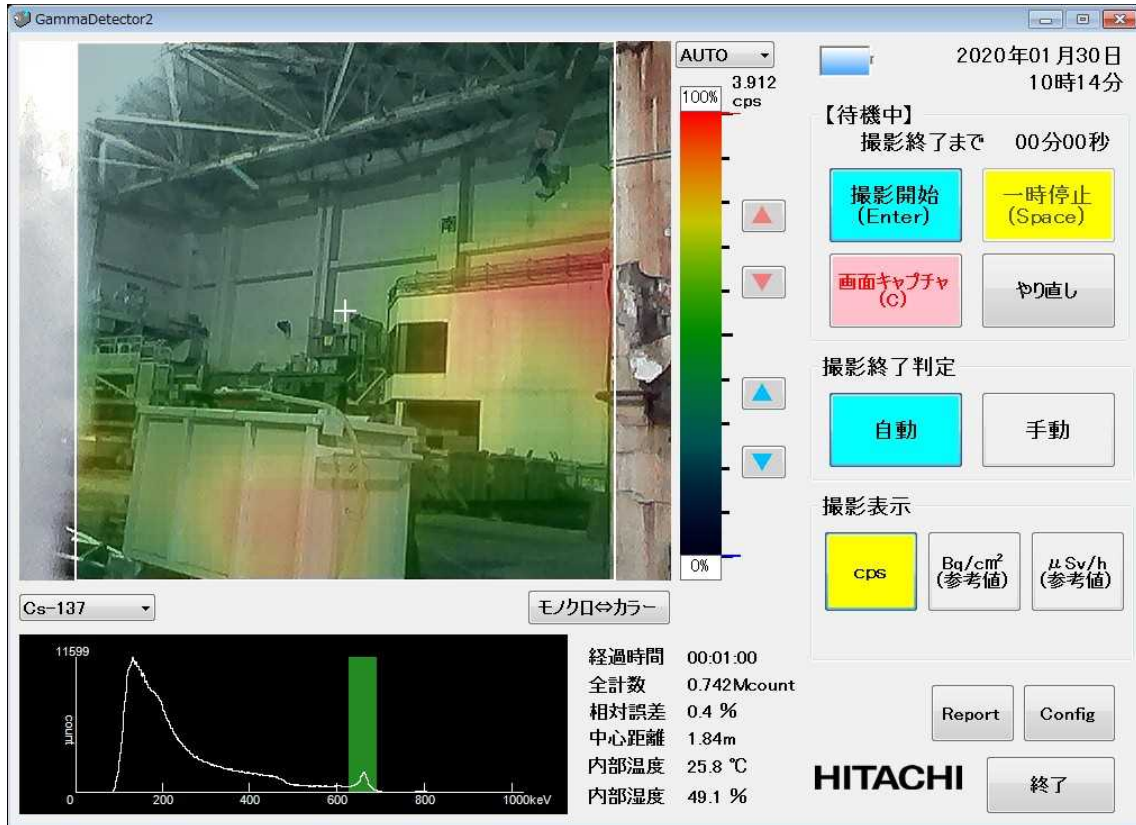
4. 2 南壁向き10度上向き測定

(1) 測定範囲

ガンマカメラで測定したPC画面キャプチャーを第10図に示す。

南壁の8割程度は画面に収まっているが、南壁の手前に西側には燃料交換機操作室があり南壁の一部が隠れている。

画面の左1/5程度は東壁の南側が写っている。下から半分程度は壁の前にある物で壁が隠れており、また上部にもパイプに隠れている。また左手前には汚染物容器と思える容器が写っており、南壁の最下部が隠れている。



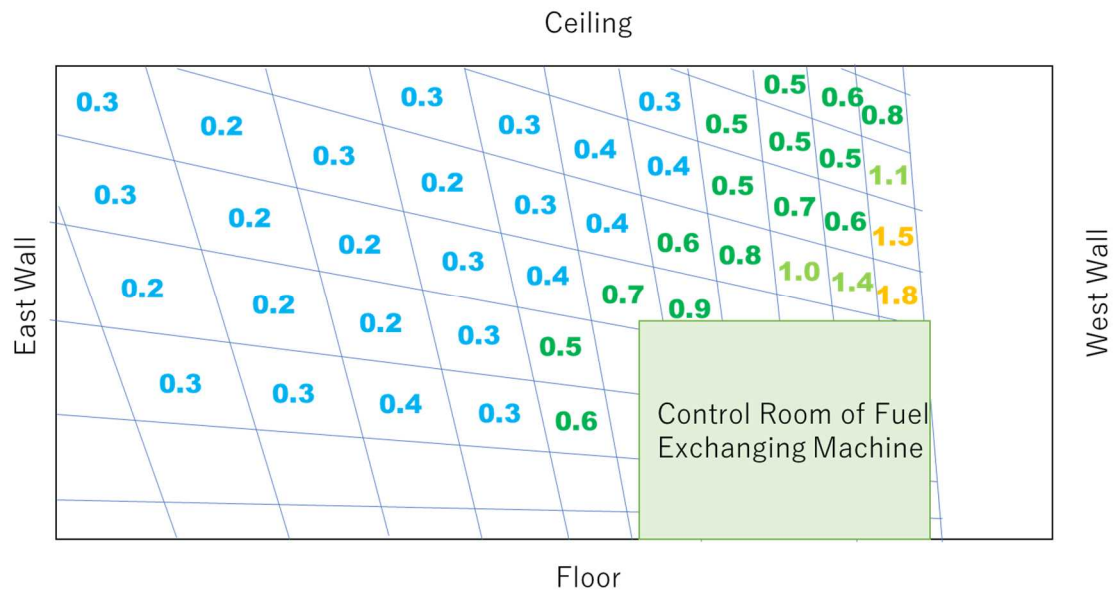
第 10 図 南壁向き 10 度上向き撮影の PC 画面

(2) 南壁の汚染密度分布

第 11 図に得られた南壁の汚染密度分布 (MBq/cm^2) を示す。壁の前に物が写っている場所については、その物自体が汚染物である可能性や壁からのガンマ線を遮蔽する可能性があるので表示していない。

南壁前の南西側に置かれている「燃料交換機操作室」の陰になっていない壁面の平均の汚染密度は、 $0.41 \text{ MBq}/\text{cm}^2$ であった。

また別途解析した結果、燃料交換機操作室の北側の面の平均汚染密度は $1.3 \text{ MBq}/\text{cm}^2$ で、南壁よりは高い密度であった。(燃料交換機操作室の位置と高さの情報を得てから、見直しが必要)

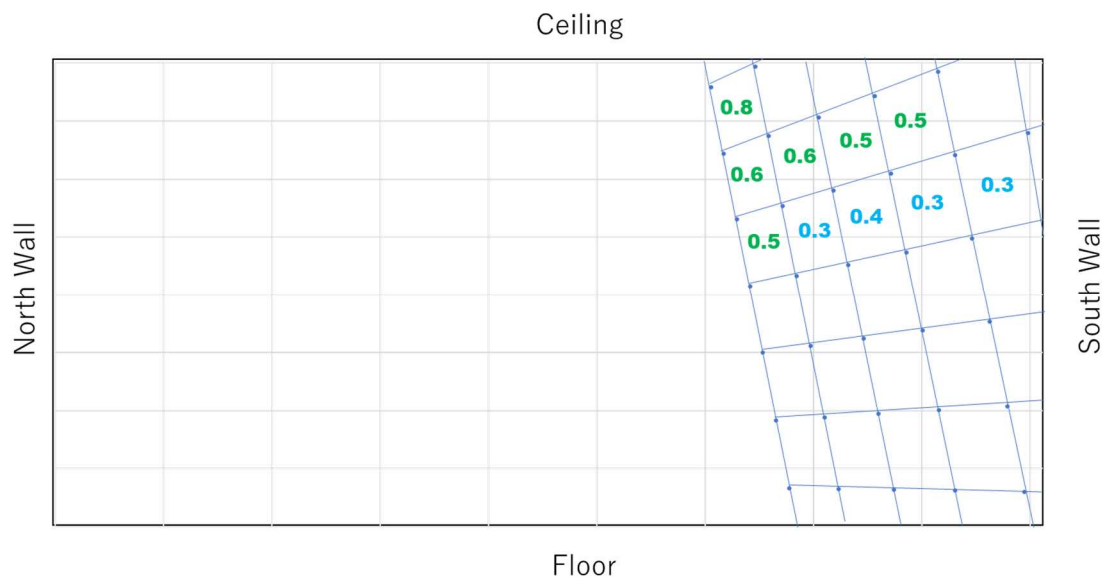


第 11 図 南壁向き 10 度上向き撮影による南壁汚染密度分布 (MBq/cm²)

(3) 東壁南側の汚染密度分布

南壁に向けた測定では、東壁の南側の一部が写っている。第 12 図に得られた東壁南側の汚染密度分布 (MBq/cm²) を示す。壁の前に物が写っている場所については、その物自体が汚染物である可能性や壁からのガンマ線を遮蔽する可能性があるので表示していない。

東壁南側の平均の汚染密度は 0.45 MBq/cm² であり、東壁の中央部分よりは低かった。



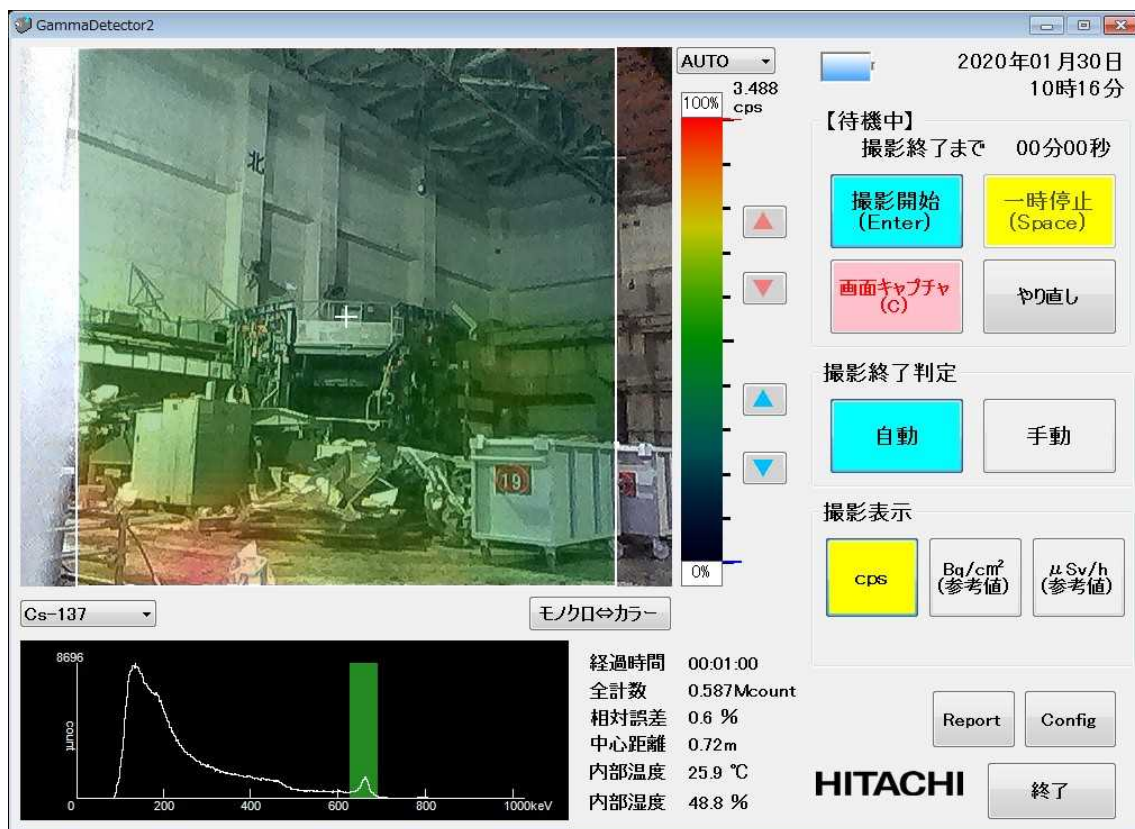
第 12 図 南壁向き 10 度上向き撮影による東壁南側汚染密度分布 (MBq/cm²)

4. 3 北壁向き 10 度上向き測定

(1) 測定範囲

ガンマカメラで測定した PC 画面キャプチャーを第 13 図に示す。

北壁の 6 割程度は画面に収まっているが、北壁の手前にスタッドテンショナーがあり北壁の一部が隠れている。画面の右 1/4 程度は東壁が写っている。また下部には汚染物容器と思える容器が写っており、北壁の下部が隠れている。



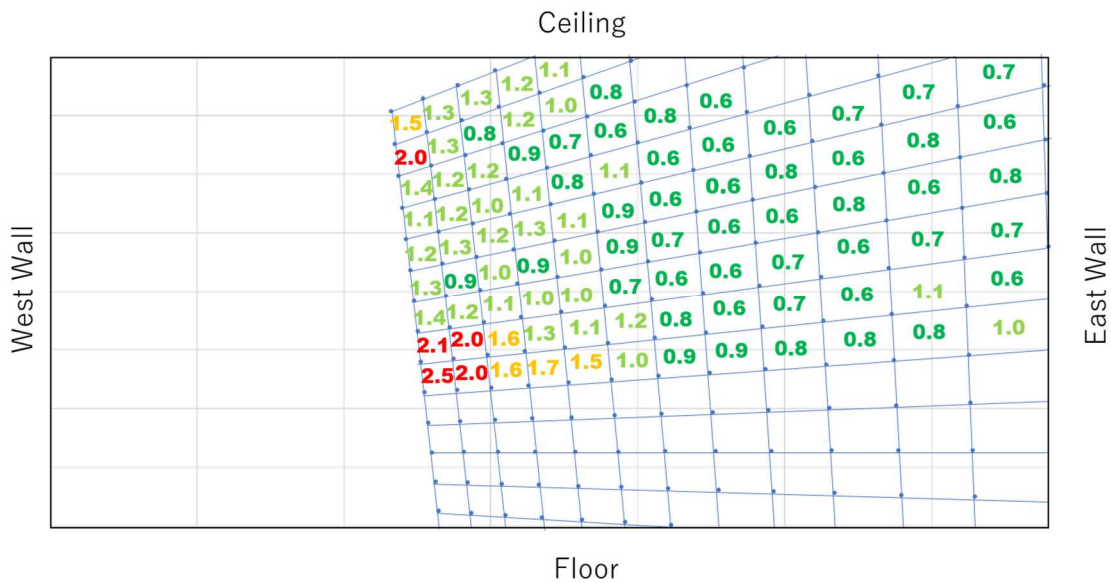
第 13 図 北壁向き 10 度上向き撮影の PC 画面

(2) 北壁の汚染密度分布

第 14 図に得られた北壁の汚染密度分布 (MBq/cm²) を示す。壁の前に物が写っている場所については、その物自体が汚染物である可能性や壁からのガンマ線を遮蔽する可能性があるため表示していない。

壁が明瞭に見えている領域の平均汚染密度は、0.89MBq/cm² であった。南壁よりは高く、燃料取扱い室の壁に近い密度であった。

撮影されている天井面についても別途解析した結果、平均汚染密度は 0.68 MBq/cm² で、東壁に向けた測定で得られた平均密度に近かった。

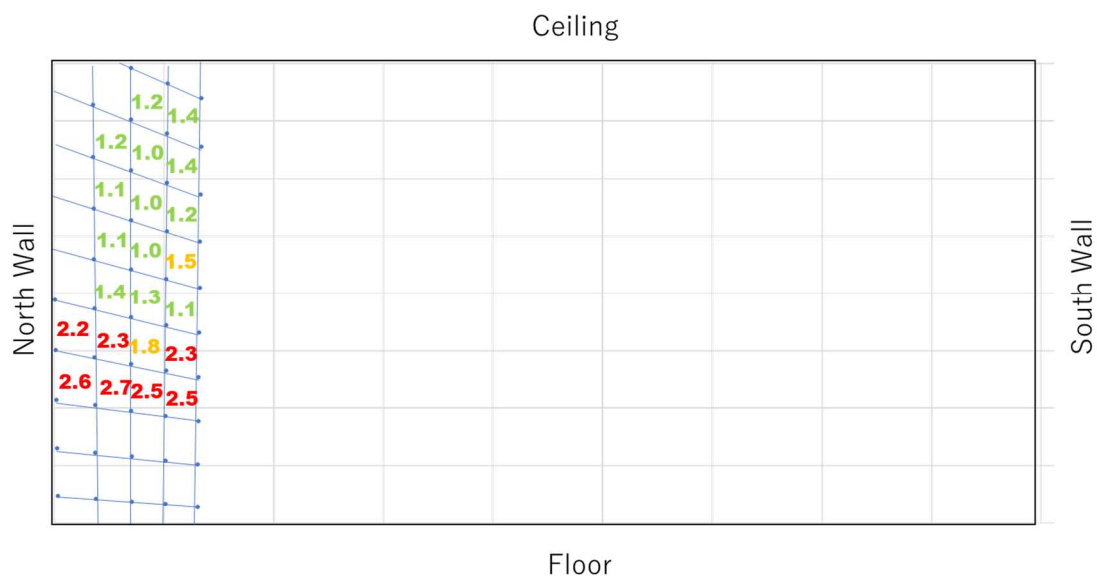


第 14 図 北壁向き 10 度上向き撮影による北壁汚染密度分布 (MBq/cm²)

(3) 東壁北側の汚染密度分布

北壁に向けた測定では、東壁の北側の一部が含まれている。第 15 図に得られた東壁北側の汚染密度分布 (MBq/cm²) を示す。壁の前に物が写っている場所については、その物自体が汚染物である可能性や壁からのガンマ線を遮蔽する可能性があるので表示していない。

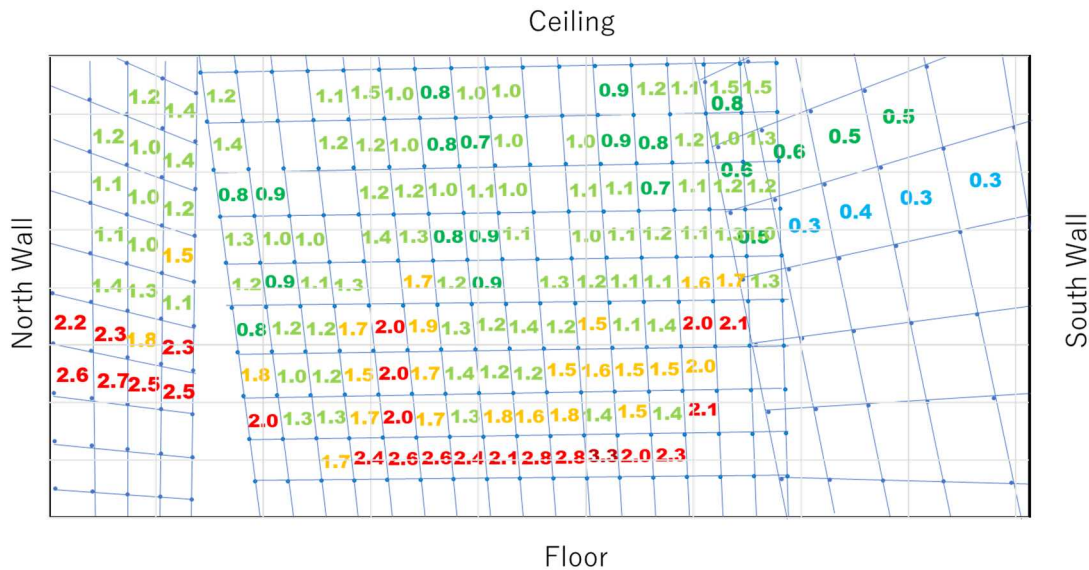
東壁北側の平均の汚染密度は 1.6 MBq/cm² であり、東壁の中央部分とほぼ同じであった。



第 15 図 北壁向き 10 度上向き撮影による東壁北側汚染密度分布 (MBq/cm²)

4. 4 3回の測定による東壁の汚染分布

東壁については3回の測定で、中央、南側、北側の情報が得られた。これらを合成して第16図に示す。南側は使用できる領域が少なく、さらに距離が遠いため領域が粗くなっている。また中央と重なっているところでは汚染密度で2/3~1/2になっていることから、参考程度として見る必要がある。



第16図 東壁汚染密度分布（3回の撮影による合成）(MBq/cm²)

なお、測定結果全般に関連して考慮すべきこととして、汚染物等の影響がある。今回は汚染物などの写っている領域に対応するピクセル分は表示していない。ただし、汚染物などの影響はガンマカメラのピンホール半径が6mmなので隣のピクセルにも及んでいる。例えば第16図では床に近いところが高いがこれは汚染物のすぐ上のピクセルであるためであり壁の汚染ではない可能性もある。

5. スミア測定との比較

表1にガンマカメラ測定で得られた汚染密度と東電が行なったスミア測定¹⁾の汚染密度の比較を示す。

壁の平均汚染密度についてはガンマカメラ測定がスミア測定の10倍以上になっている。ロボットによるスミアなので拭き取り面の状況はつかみにくいが、拭き取り効率が垂直と水平で異なっていた可能性もある。いずれにせよスミア測定点が少ないので正しい比較にはならない。

床の平均汚染密度に関しては、ガンマカメラ測定がスミア測定の1/5程度となっている。スミア効率のばらつきや、ガンマカメラで低い位置から床を計測するときの格子点

投影形状の手前と奥の大きな差異、また特に東京電力のスミア測定の後今回の測定に際し床の片付がおこなわれたことなどを考慮すれば、納得できる範囲と考えられる。

天井に関してはスミア測定はなされていなかった。

表 1 ガンマカメラ測定とスミア測定 of 汚染密度の比較 (MBq/cm²)

		測定値	平均
北壁	ガンマカメラ	0.6~2.3	0.89
	スミア(2ヶ所)	0.0014~0.00035	0.0009
東壁 (東向き測定)	ガンマカメラ	0.7~3.3	1.4
	スミア(5ヶ所)	0.00015~0.32	0.066
南壁	ガンマカメラ	0.2~1.8	0.41
	スミア(5ヶ所)	0.0030~0.062	0.033
床 (東向き測定)	ガンマカメラ	0.09~0.43	0.13
	スミア(20ヶ所)	0.051~2.9	0.68
天井 (東向き測定)	ガンマカメラ	0.3~1.1	0.60
	スミア(0ヶ所)	-	-

6. まとめ

今回の測定結果から、シールドプラグの隙間から2号機のオペレーションフロアに出た放射性核種を含む気体がフロア全体に充満したことが推測される。吹きだした方向やシールドプラグからの距離などにより、壁の汚染密度が違った可能性が考えられる。

全体的に見れば、壁の汚染密度が他の箇所比べて高く、床の汚染密度が全般的に低かった。これは、床が他の箇所と異なり、ロボットを使って汚染物の片付けを行なったことと関係している可能性がある。

7. 参考文献

1) 東京電力ホールディングス株式会社 「2号機原子炉建屋オペフロの放射線等調査結果について ~残置物移動・片付後~」 2019年5月20日

http://www.tepco.co.jp/decommission/information/committee/evaluation_review/pdf/2019/evaluation_review_2019052001.pdf

【添付資料 2】

ガンマカメラによる 2 号機オペフロの壁と床の汚染密度の評価 (シールドプラグ鉄板遮蔽設置後 2022 年 5 月 12 日測定分)

1. はじめに

2 号機オペフロの壁と床の汚染密度については 2020 年 1 月 30 日にガンマカメラ（日立 HGD-E1500）で測定し壁、床、天井の Cs¹³⁷ の汚染密度の評価（添付資料 1 参照）を行っている。今回、シールドプラグ鉄板遮蔽が設置された後の機会に、2 年 3 ヶ月の間の状況変化を確認するため、同様の測定を行なった。

2. 測定

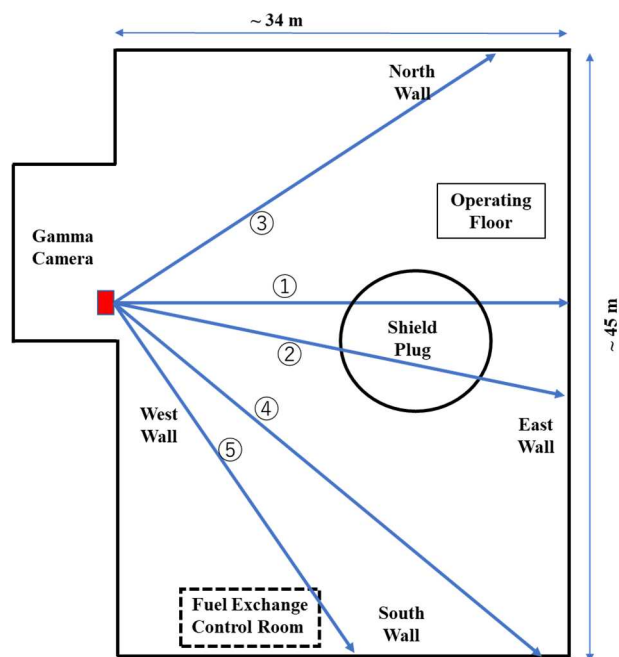
前室のオペフロ入口位置で、以下の 5 方向の撮影を行った。第 1 図に撮影方向を示す。

- ①東向き（水平）
- ②東向きシールドプラグ方向（水平）
- ③北向き（水平）
- ④南向き（やや下向き）
- ⑤燃料交換機操作室向き（やや下向き）

ガンマカメラ設置位置は前回とほぼ同じであり、今回は前回と同じ脚立の上に回転台を載せたため、ガンマカメラゴム脚下面の高さは前回より 5 cm 高い 62cm である。

前回は全方向 10 度上向き測定（東向きは水平もあり）で天井の一部やクレーン下面の汚染評価も行ったが、今回は水平～やや下向きの撮影であり天井はほとんど入っていない。

測定時間は前回と同じ 1 分間とした。



第1図 ガンマカメラ撮影方向

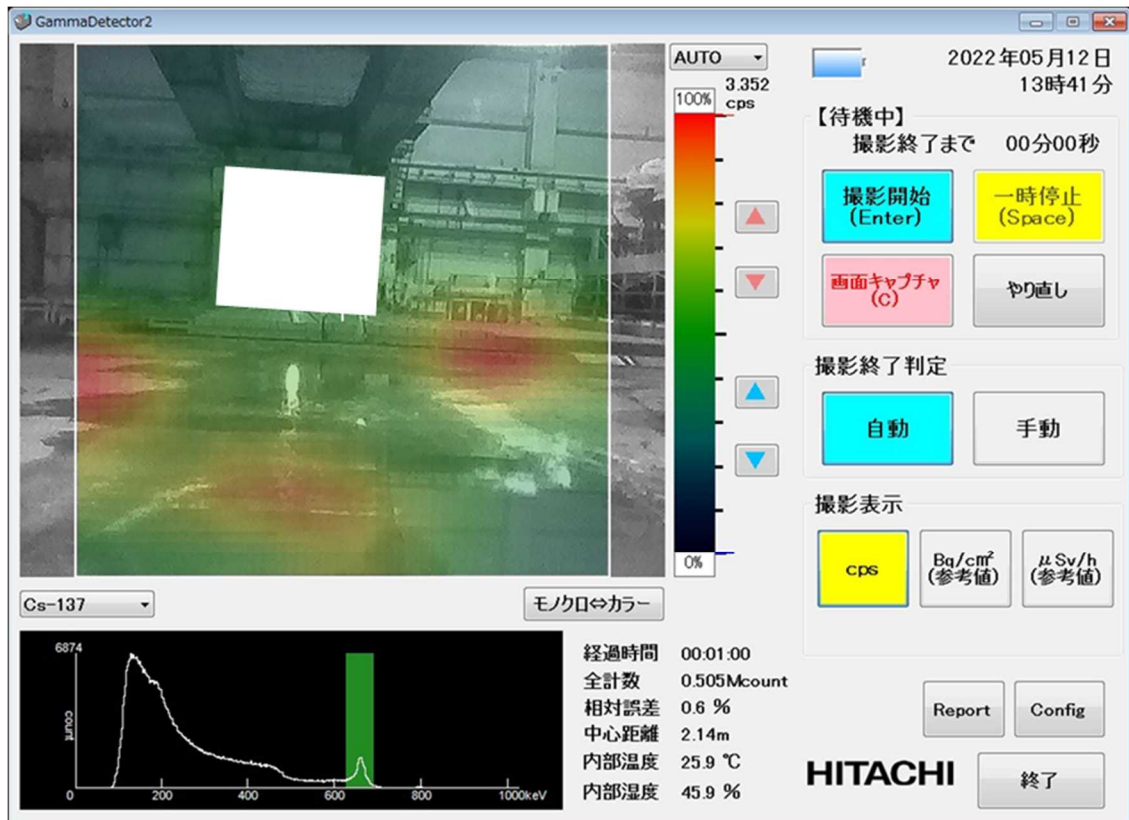
3. 汚染密度分布の評価

ガンマカメラの各ピクセルの Cs^{137} の 660keV 全エネルギー吸収ピーク計数率 (cps) から汚染密度への換算は前回と同じ方法を用いた。

以下に5撮影のガンマカメラの測定終了後のPC画面とともに、得られた汚染密度分布を示す。

3.1 東向き水平撮影による東壁と床の汚染密度分布

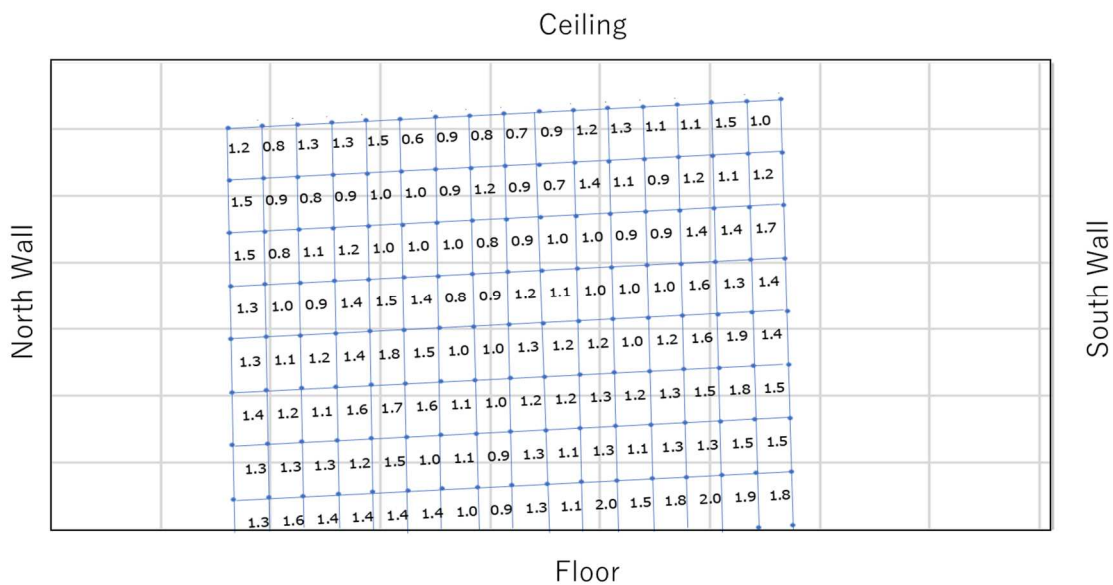
東向き水平測定終了後のPC画面を第2図に示す。



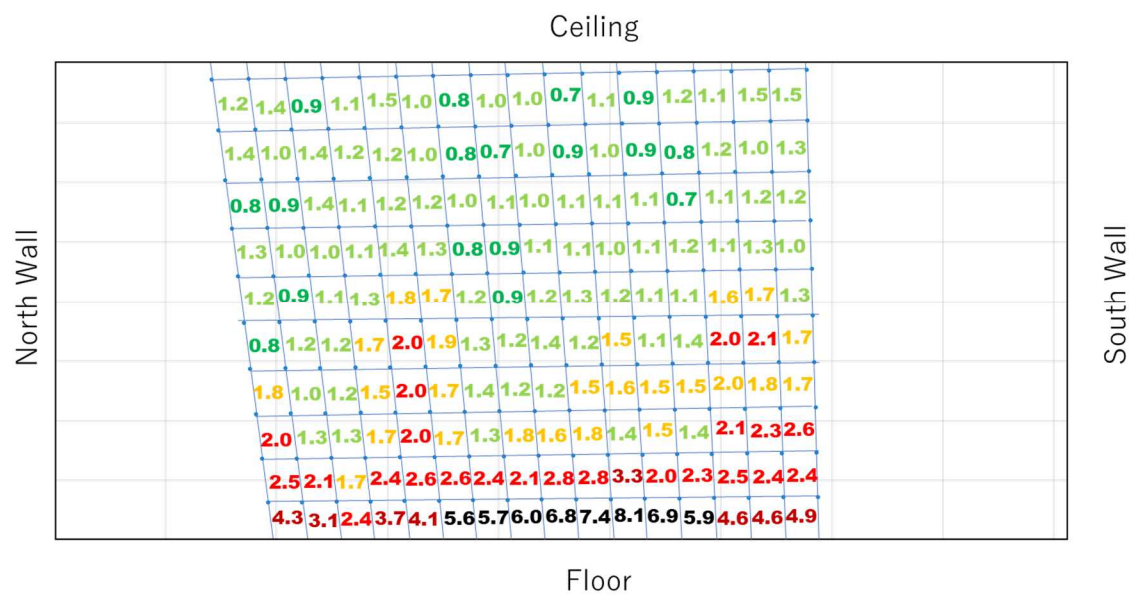
第 2 図 東向き水平撮影測定終了後の PC 画面

3. 1. 1 東向き水平撮影による東壁の汚染密度分布

第 3 図に東向き水平撮影による東壁の汚染密度分布を示す。また前回の東壁の汚染密度分布を第 4 図に示す。東壁上部は前回と大きく変わらないが、下部は前回と比べかなり減少している。壁前面に置かれていた汚染物収納箱の片付が行われた効果と考えられる。



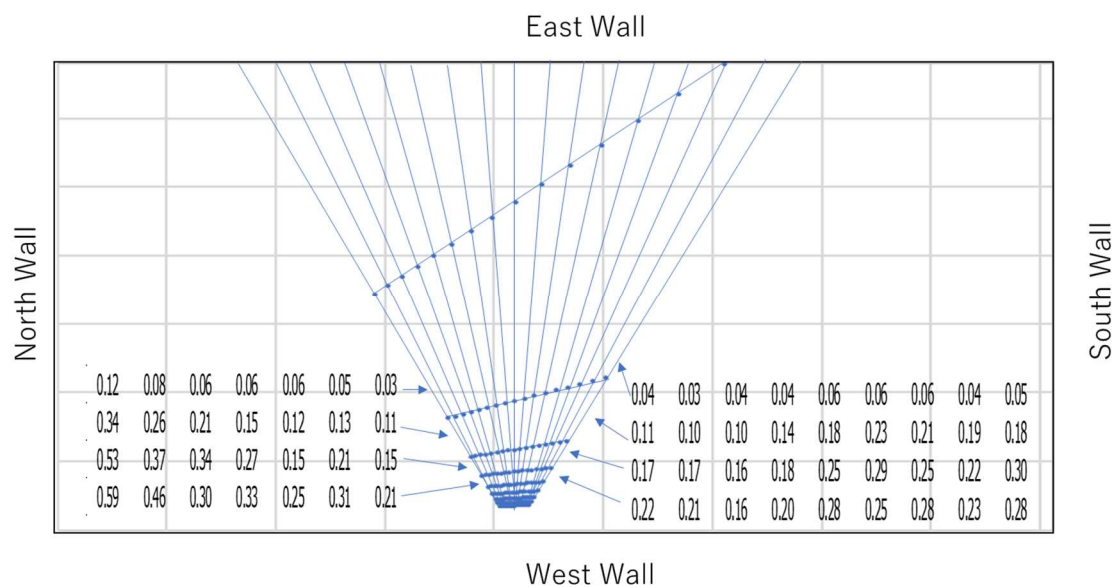
第3図 東向き水平撮影による東壁の汚染密度分布 (MBq/cm²)



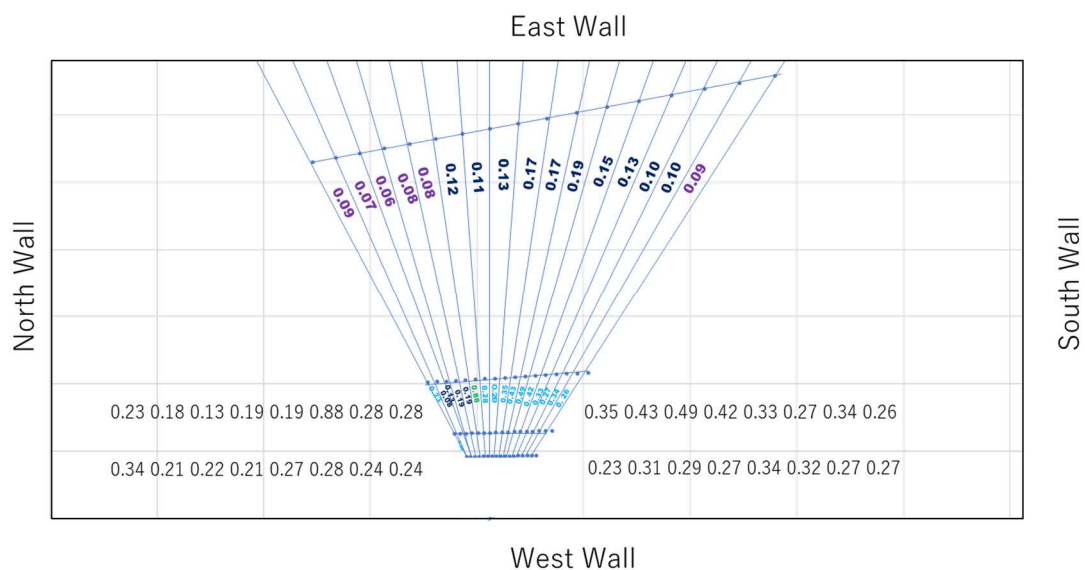
第4図 (2020年1月30日撮影) 東10度上向き撮影による東壁の汚染密度分布 (MBq/cm²)

3.1.2 東向き水平撮影による床の汚染密度分布

第5図に東向き水平撮影による床の汚染密度分布を示す。また前回の床の汚染密度分布を第6図に示す。ばらつきはあるが、全体に見れば大きな変化はないように見える。



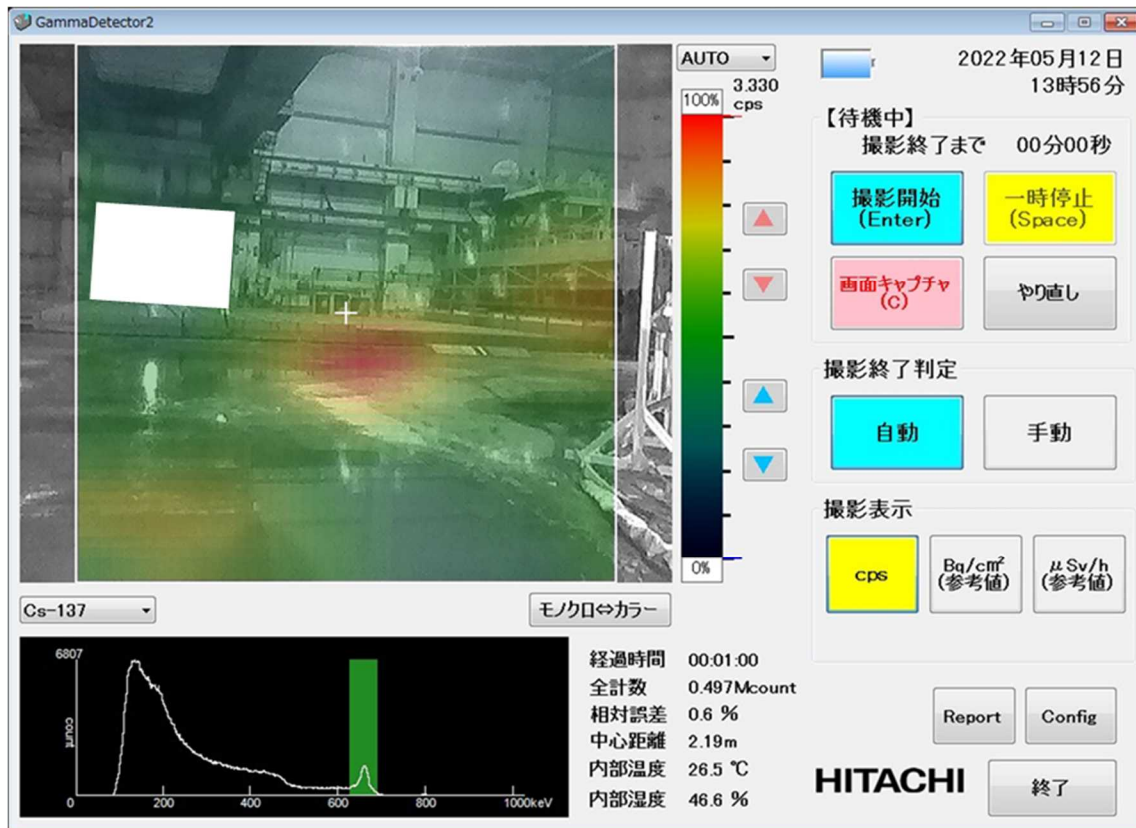
第5図 東向き水平撮影による床の汚染密度分布 (MBq/cm²)



第6図 (2020年1月30日撮影) 東10度上向き撮影による床の汚染密度分布 (MBq/cm²)

3.2 東向きプラグ方向撮影による東壁と床の汚染密度分布

東向きプラグ方向測定終了後のPC画面を第7図に示す。



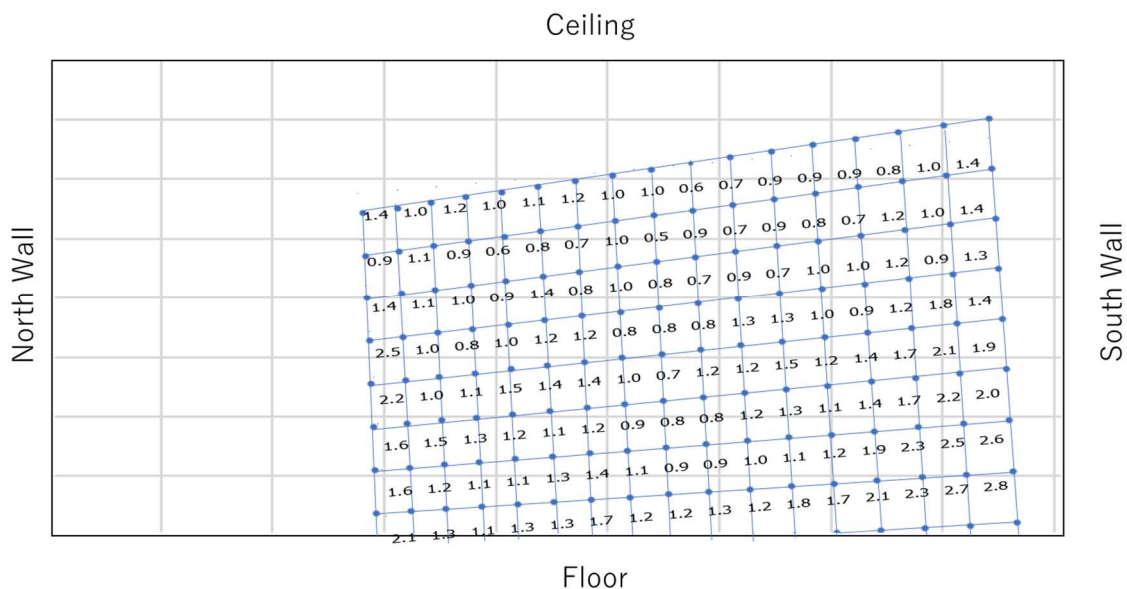
第7図 東向きプラグ方向撮影測定終了後のPC画面

3.2.1 東向きプラグ方向撮影による東壁の汚染密度分布

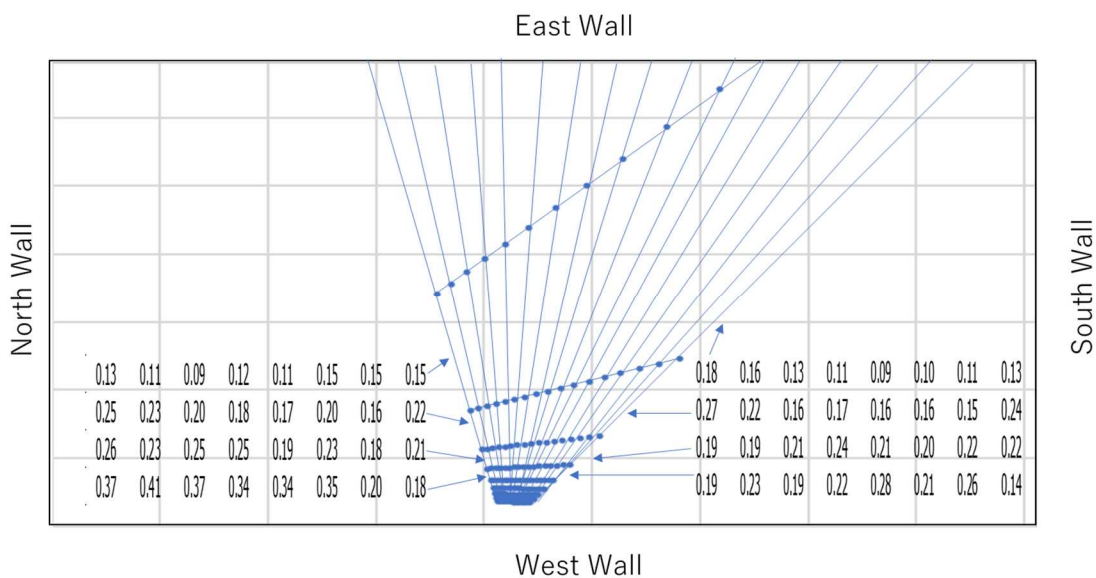
第8図に東向きプラグ方向撮影による東壁の汚染密度分布を示す。第3図の東向き水平方向撮影による東壁の汚染密度分布と同様の分布であり、第4図の前回測定のような下部の汚染密度が高いという分布とは異なり、壁全体での汚染密度の違いは2倍以内となっている。

3.2.2 東向きプラグ方向撮影による床の汚染密度分布

第9図に東向きプラグ方向撮影による床の汚染密度分布を示す。第5図の東向き水平方向撮影による床の汚染密度分布と同様の分布であり、第6図の前回測定と比べてもばらつきはあるが、全体に見れば大きな変化はないように見える。



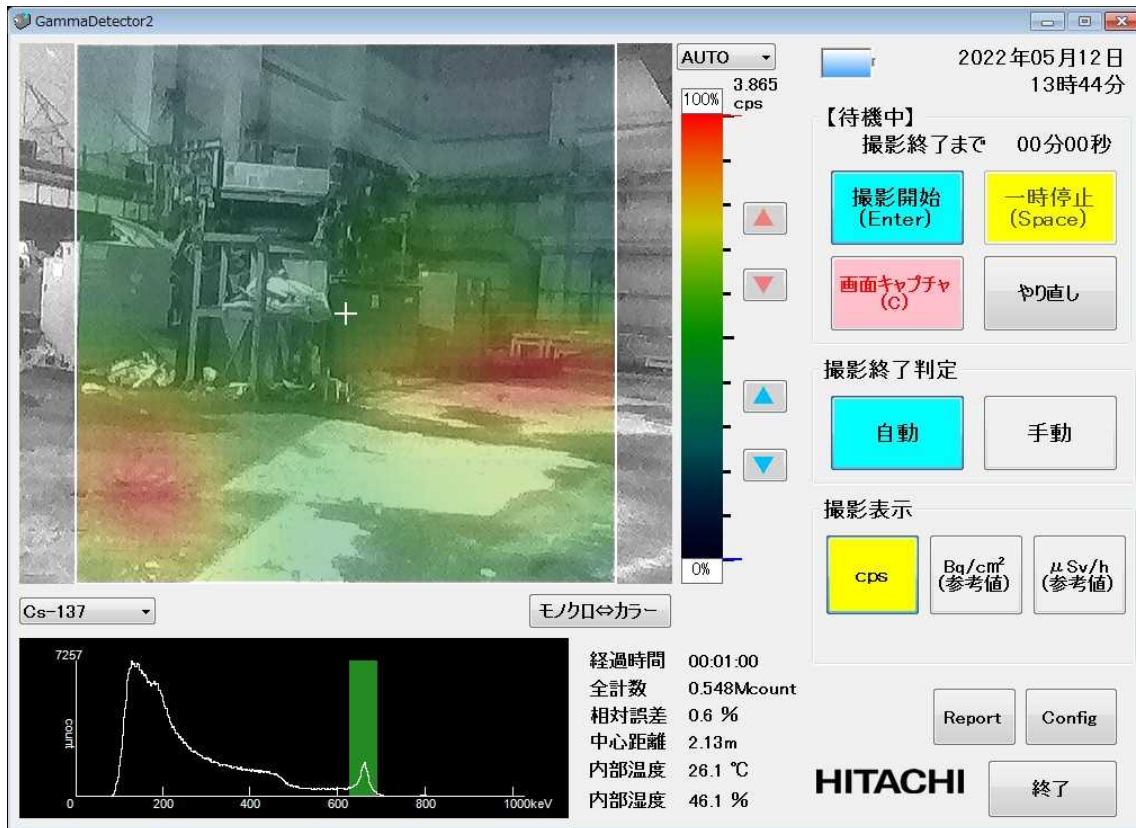
第 8 図 東向きプラグ方向撮影による東壁の汚染密度分布 (MBq/cm²)



第 9 図 東向きプラグ方向撮影による床の汚染密度分布 (MBq/cm²)

3.3 北向き撮影による北壁と東壁と床の汚染密度分布

北向き測定終了後の PC 画面を第 10 図に示す。



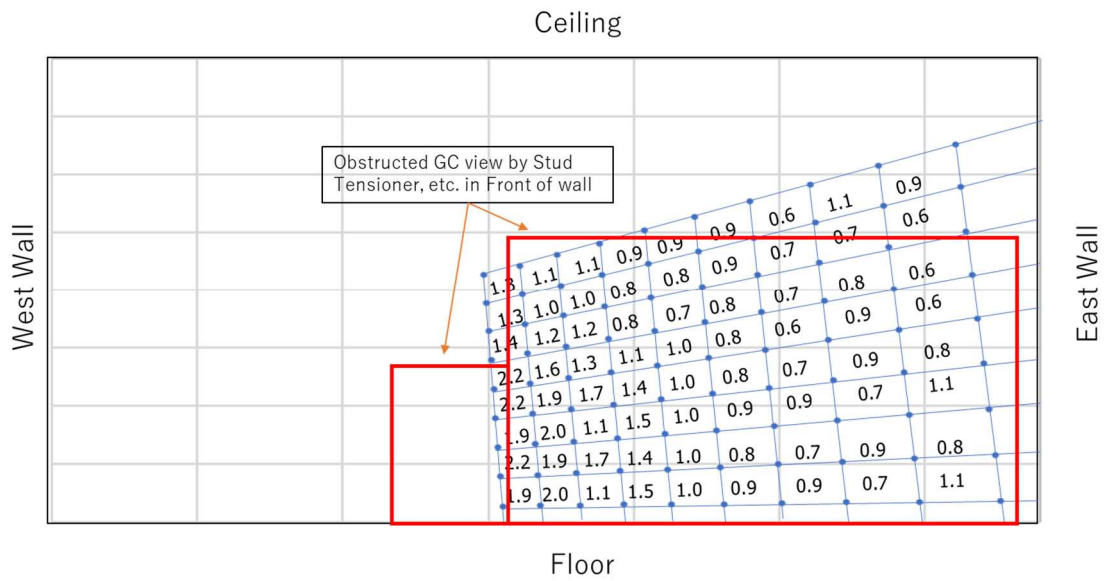
第 10 図 北向き撮影測定終了後の PC 画面

3.3.1 北向き撮影による北壁の汚染密度分布

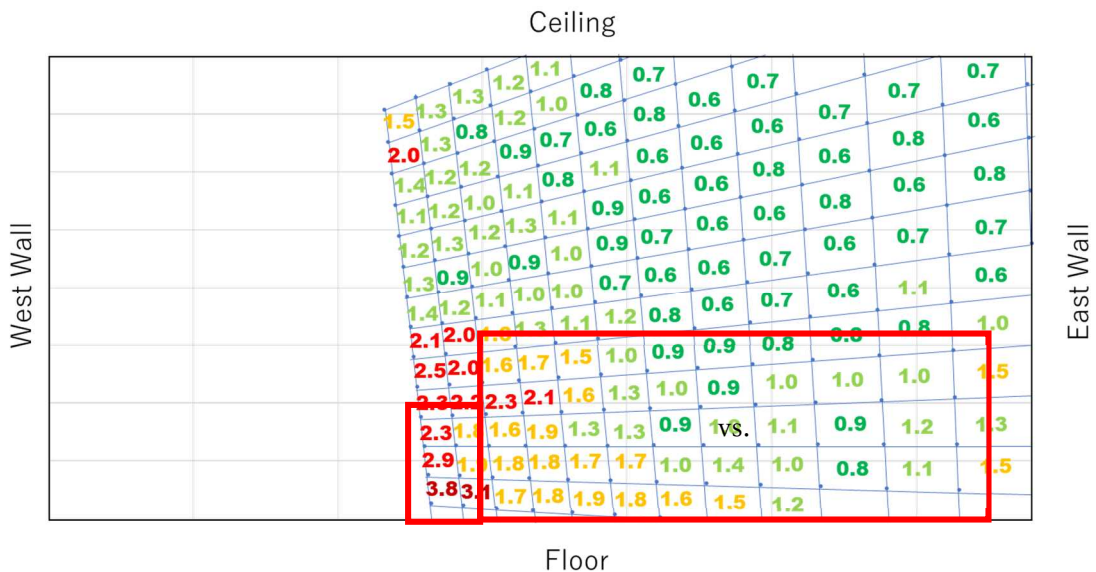
第 11 図に北向き撮影による北壁の汚染密度分布を示す。また前回の北壁の汚染密度分布を第 12 図に示す。今回は水平に近い撮影なので壁上部や天井は写っておらず、また前回より東寄りの方向を撮影しているため北壁の半分しか撮られていない。

また、ガンマカメラ視野の壁の前にはスタッドテンショナーとスチール物置が写っているのは前回と同じだが、水平撮影のため前回より北壁が隠れる割合が多くなっている。前回と今回一部だけ写っている北壁の部分には汚染密度の大きな違いはなく、またスタッドテンショナーの汚染密度も大きくは変わっていない。(壁よりスタッドテンショナーは距離が近いので距離補正が必要だが、ガンマカメラから測った壁とスタッドテンショナーの距離の割合は前回と今回で同じとして比べた。)

なお、スタッドテンショナーの左にあるスチール物置は前回も高い汚染密度を示していた。今回の撮影ではスチール物置の右端に相当する部分だけ測れているが、その部分は同様に高くなっている。



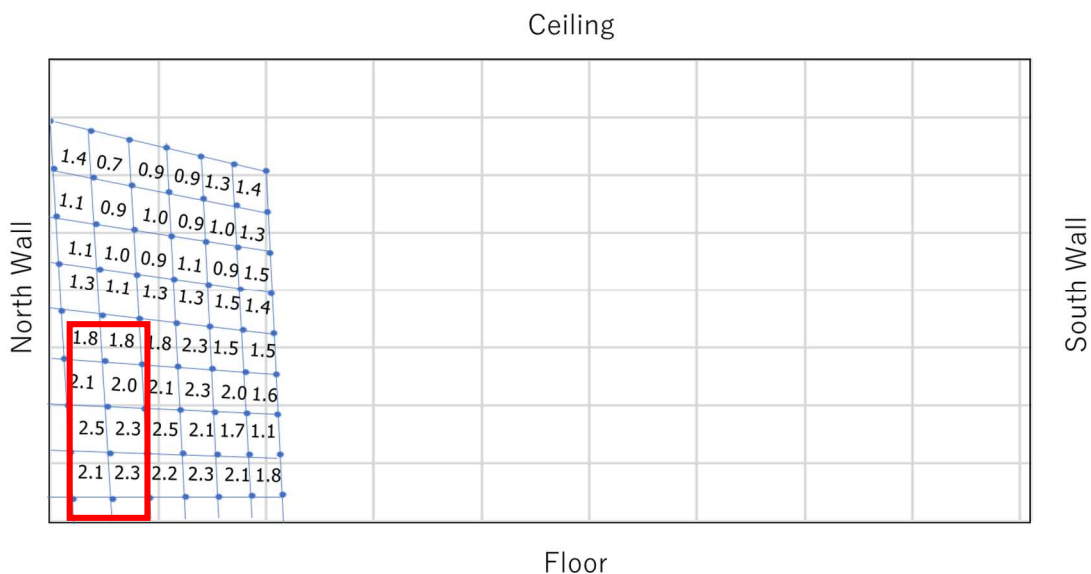
第 11 図 北向き撮影による北壁の汚染密度分布 (MBq/cm²)



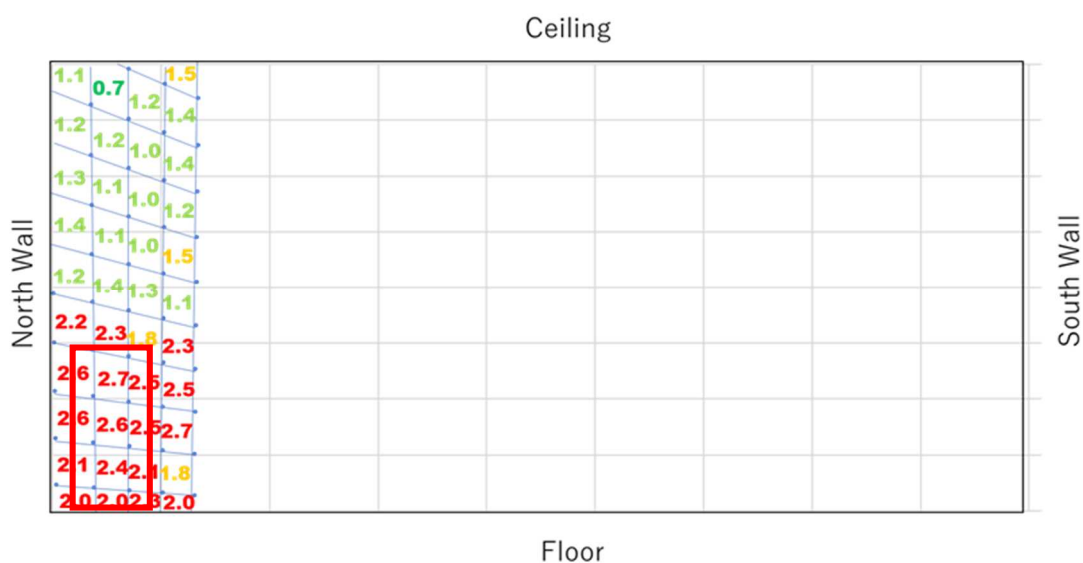
第 12 図 (2020 年 1 月 30 日撮影) 北 10 度上向き撮影による北壁の汚染密度分布 (MBq/cm²)

3.3.2 北向き撮影による東壁の汚染密度分布

第 13 図に北向き撮影による東壁の汚染密度分布を示す。また前回の東壁の汚染密度分布を第 14 図に示す。今回はガンマカメラの方向が前回より東寄りなので、東壁は少し多く写っている。前回も今回も左下にスチール物置が写っており、その部分が他に比べて高くなっている。東壁の他の部分については、ばらつきがあるが全体としては前回から大きな変化は無い。



第 13 図 北向き撮影による東壁の汚染密度分布 (MBq/cm²)

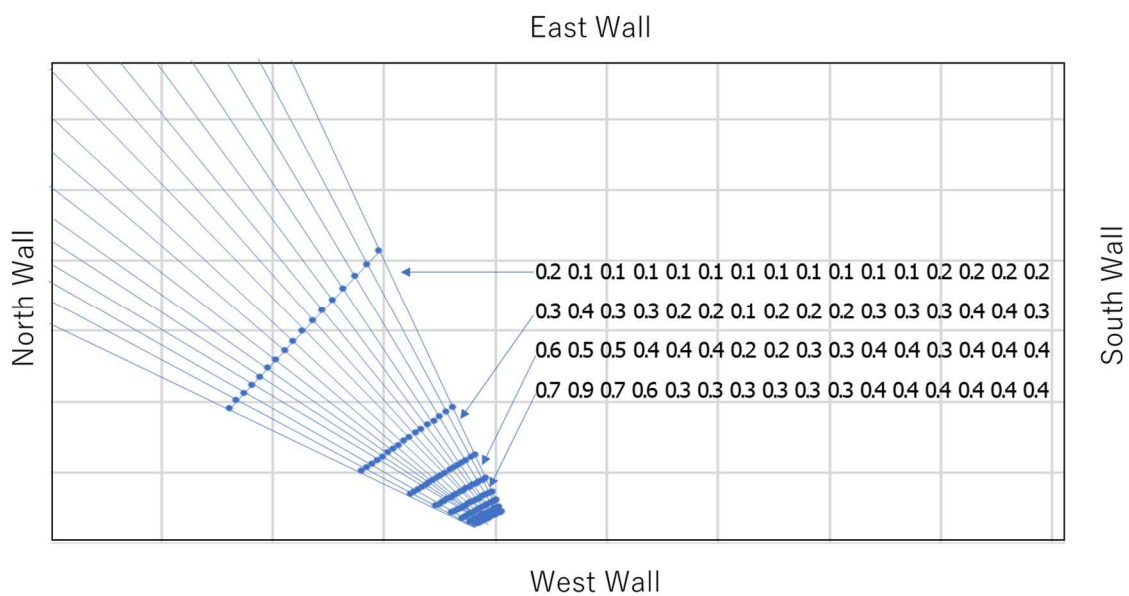


第 14 図 (2020 年 1 月 30 日撮影) 北 10 度上向き撮影による東壁の汚染密度分布 (MBq/cm²)

3. 3. 3 北向き撮影による床の汚染密度分布

第 15 図に北向き撮影による床の汚染密度分布を示す。前回は上向き撮影であったので床は少ないため汚染密度評価ができなかった。今回は水平撮影なので床に対応する部分の汚染密度解析を行なった。しかし写真から見ると床の奥の方向はスタッドテンションナーの下部で隠れている。この部分は外した床部分の汚染密度を第 15 図に示す。前室からオペフロに入ったあたりが少し高めだが、それを除けば東向き撮影の床と大きな違

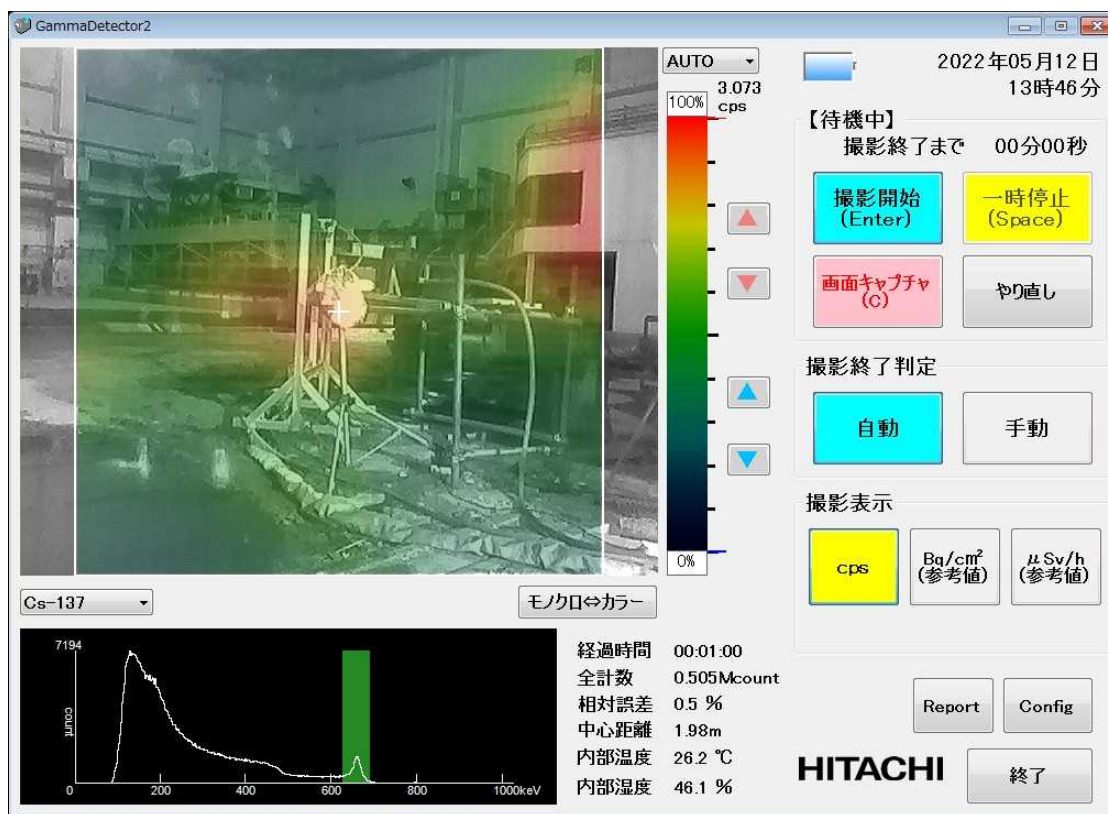
いは無い。



第 15 図 北向き撮影による床の汚染密度分布 (MBq/cm²)

3.4 南向き撮影による南壁と東壁と床の汚染密度分布

南向き向き測定終了後の PC 画面を第 16 図に示す。



第 16 図 南向き撮影測定終了後の PC 画面

3.4.1 南向き撮影による南壁の汚染密度分布

第 17 図に南向き撮影による南壁の汚染密度分布を示す。また前回の南壁の汚染密度分布を第 18 図に示す。今回は前回と比較し撮影方向が少し東寄りでありまた水平撮影のため南壁の撮影面積は少ない。今回の汚染分布は前回より一部は少し高めにも見えるが、統計のばらつきの範囲と考えられる。

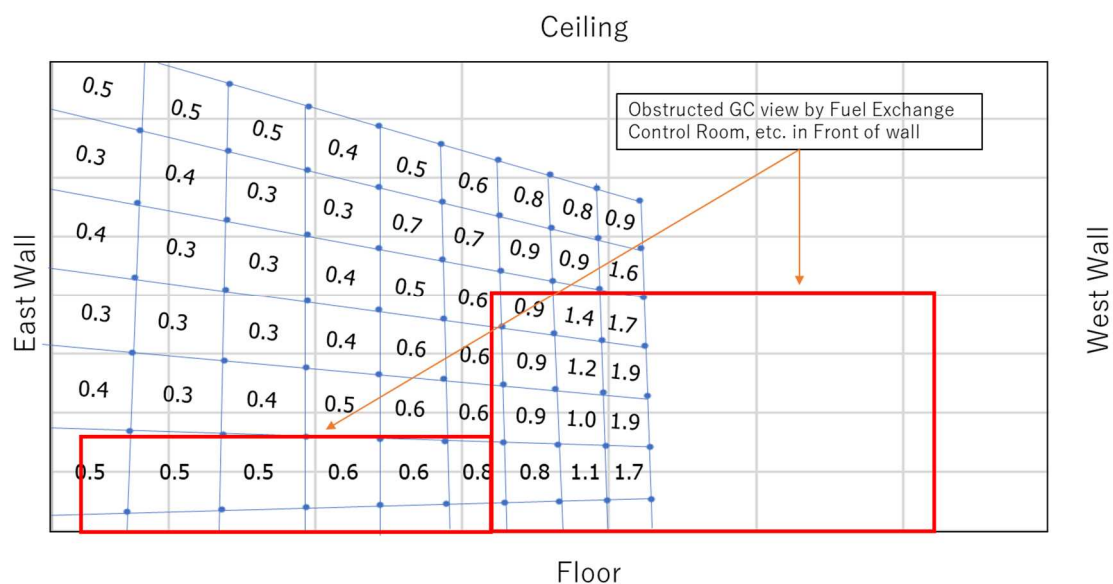
3.4.2 南向き撮影による東壁の汚染密度分布

第 19 図に南向き撮影による東壁の汚染密度分布を示す。また前回の東壁の汚染密度分布を第 20 図に示す。今回は撮影方向が少し東寄りでありまた水平撮影のため東壁の下部は少し広くとれているが天井高さまでは撮れていない。今回の汚染分布は前回より一部は少し高めにも見えるが、統計のばらつきの範囲と考えられる。今回も東壁下部は燃交台車に隠れている。

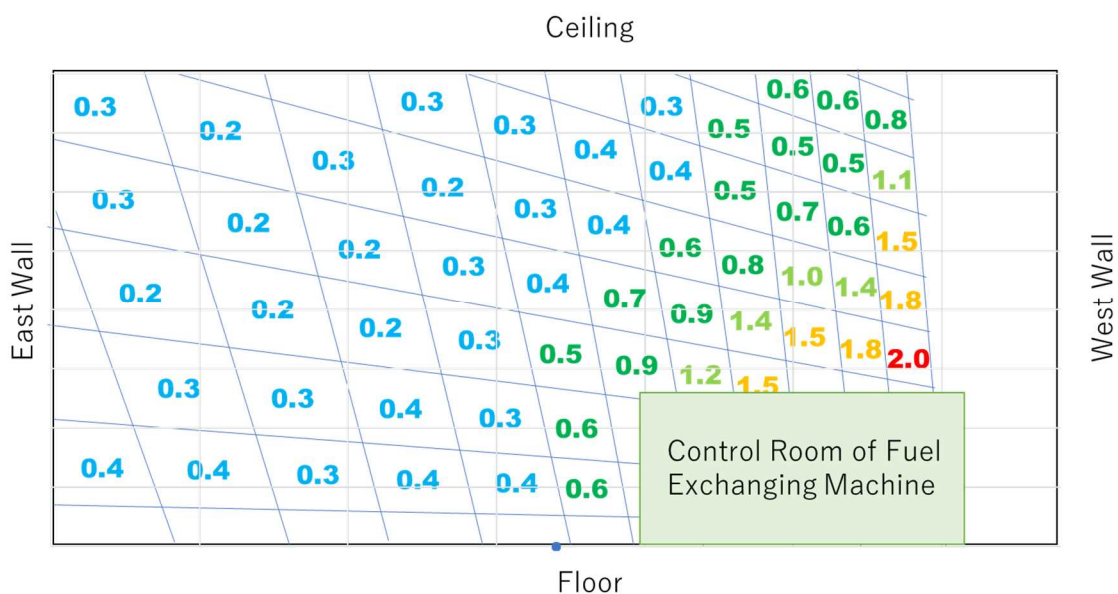
3.4.3 南向き撮影による床の汚染密度分布

第 21 図に南向き撮影による床の汚染密度分布を示す。前回は上向き撮影であったので床は少ないため汚染密度評価ができなかったが、今回は水平撮影なので床に対応する部分の汚染密度解析を行なった。前面に何かの雇が写っているので床の汚染ではない部

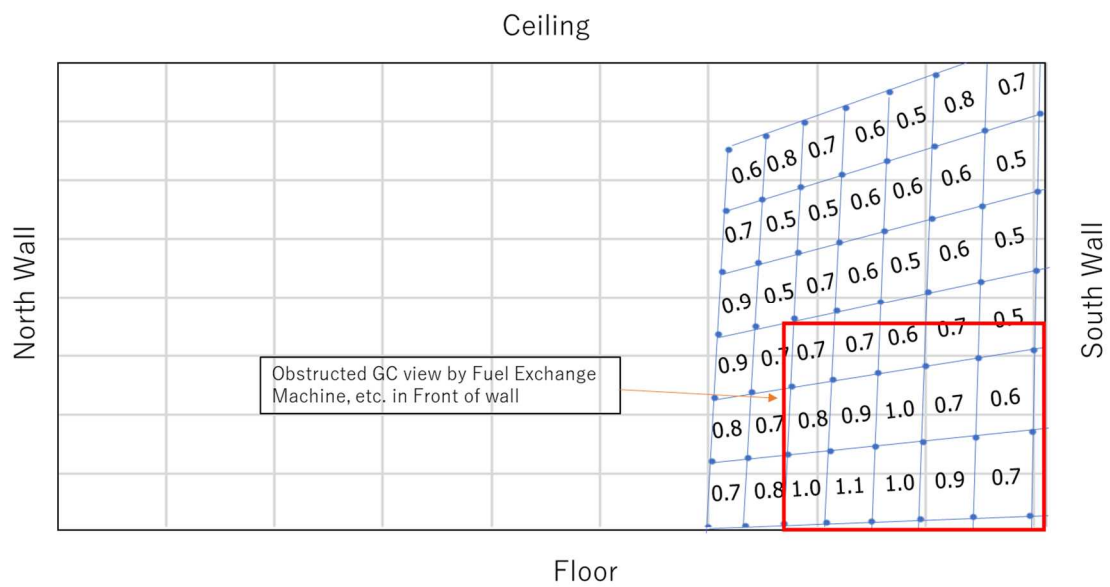
分も含まれるが、東向き、東向きプラグ方向、北向き撮影で得られた汚染密度と同程度であった。



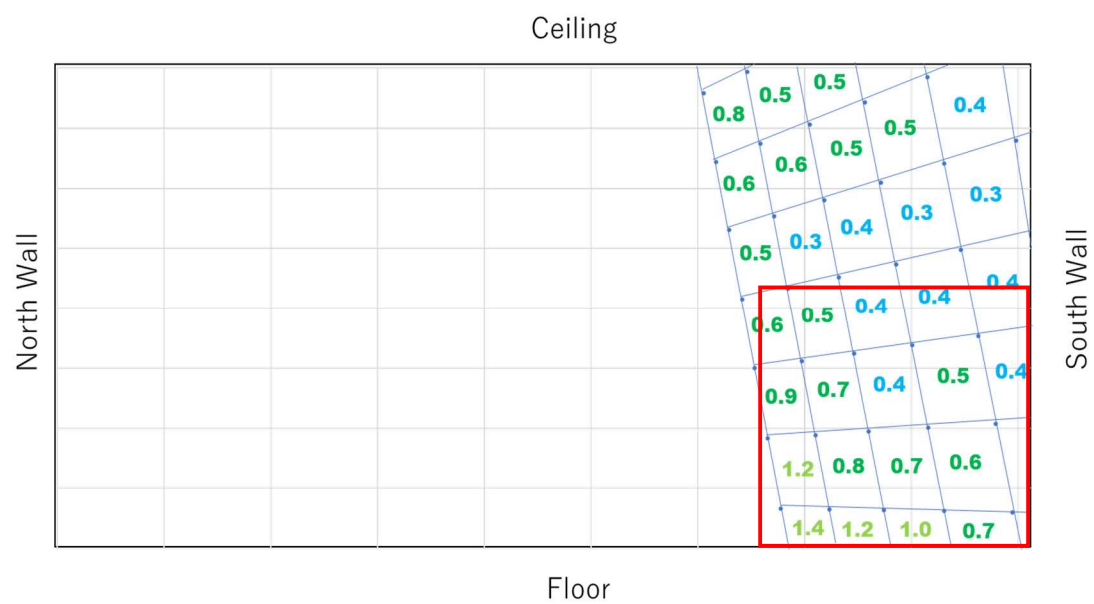
第 17 図 南向き撮影による南壁の汚染密度分布 (MBq/cm²)



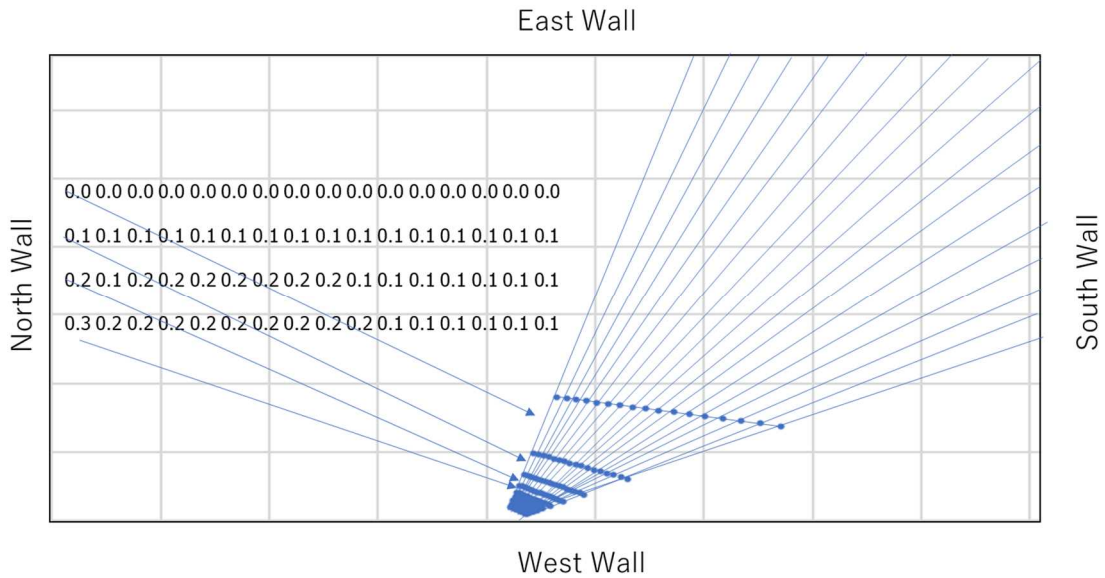
第 18 図 (2020 年 1 月 30 日撮影) 南 10 度上向き撮影による南壁の汚染密度分布 (MBq/cm²)



第 19 図 南向き撮影による東壁の汚染密度分布 (MBq/cm²)



第 20 図 (2020 年 1 月 30 日撮影) 南 10 度上向き撮影による東壁の汚染密度分布 (MBq/cm²)



第 21 図 南向き撮影による床の汚染密度分布 (MBq/cm²)

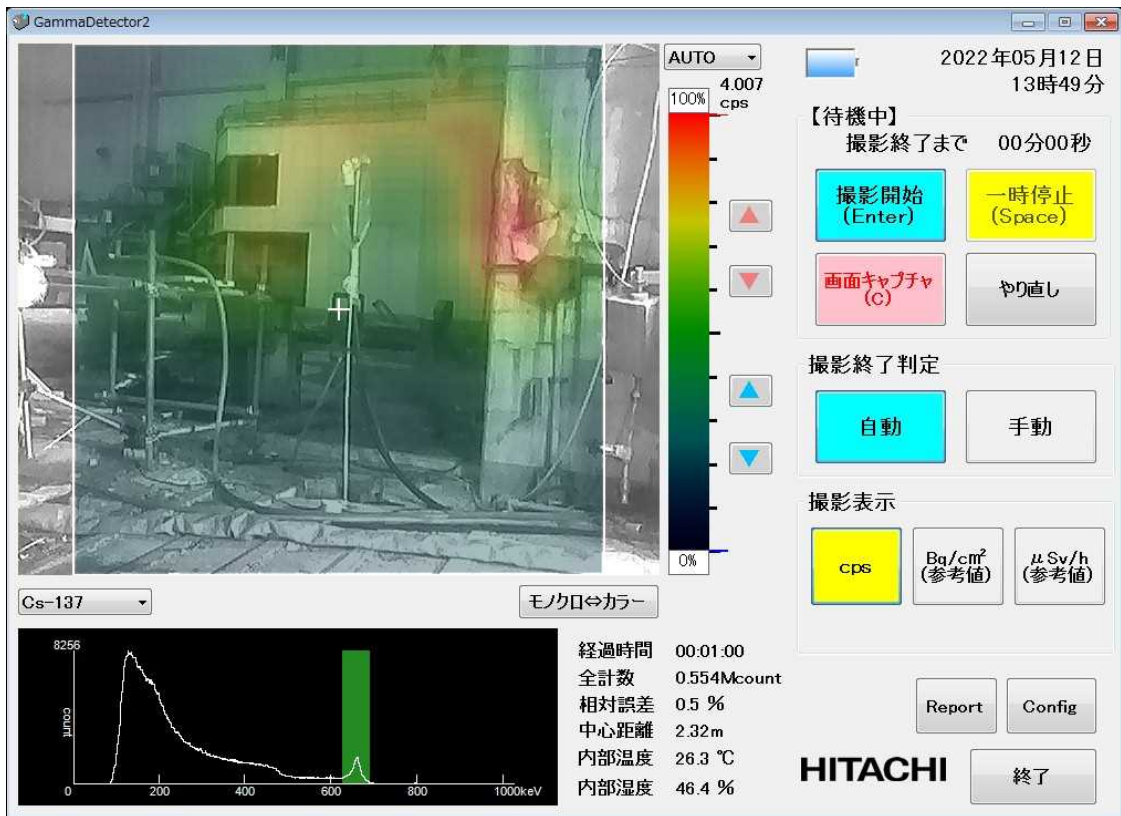
3.5 燃料交換機操作室向き撮影による燃料交換機操作室北面の汚染密度分布

燃料交換機操作室向き測定終了後の PC 画面を第 22 図に示す

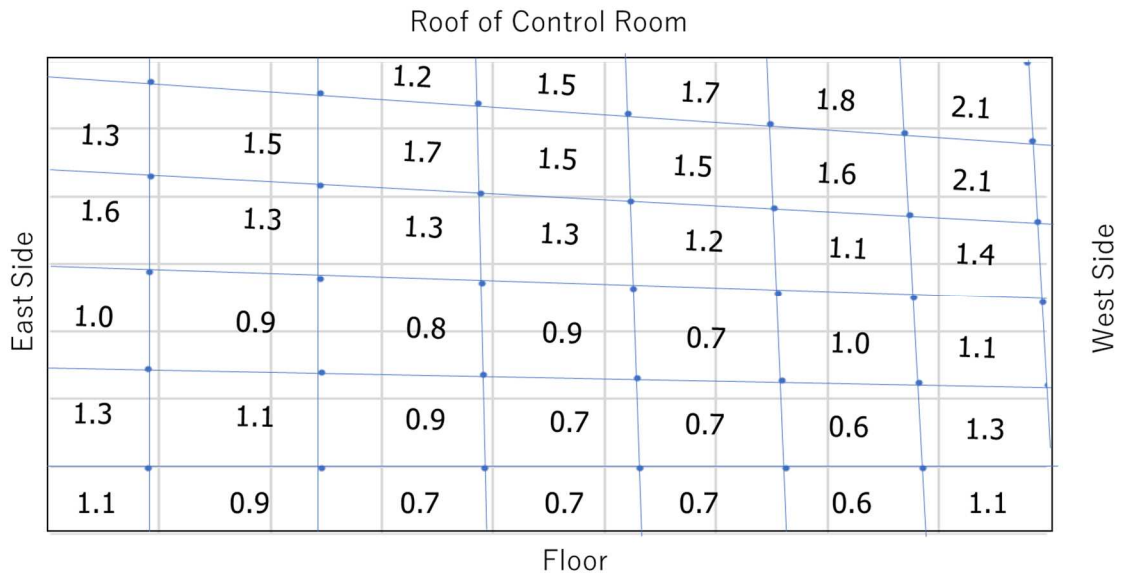
3.5.1 燃料交換機操作室北面の汚染密度分布

燃料交換機操作室は 9m (東西方向) × 4m (南北方向) とのことであるが、高さの情報と設置位置情報が得られなかったため、高さは 7m、位置は旧燃料交換機操作室の北側面と同じとして評価した。

第 23 図に燃料交換機操作室北面の汚染密度分布を示す。壁と同程度か少し高めであった。



第 22 図 燃料交換機操作室向き測定終了後の PC 画面



第 23 図 燃料交換機操作室北面の汚染密度分布 (MBq/cm²)

4. まとめ

2号機オペフロの壁と床の汚染密度について2年3ヶ月の間の状況変化をみるためガンマカメラで測定を行い、汚染密度評価を行なった。東壁の下部の汚染密度は大きく低下したが、他の壁と床については目立った変化が見られなかった。

5. 今後の検討課題

今回の測定の CdTe 素子のピクセル単位のピークカウント計数の統計誤差は 6~22%あり、壁面の統計誤差は距離とともに悪くなっている。

また今回の汚染密度の解析ではガンマカメラのピンホールを点として壁面と CdTe 素子のピクセルの対応を取る方法を取りそれに対応した検出効率計算結果を採用したことによる誤差が特に撮影範囲の端に近づくほど大きくなるなどの問題を含んでいる。

実際にはピンホールの大きさは直径 6mm であり、CdTe 素子 1 ピクセルの大きさは 2.5mm×2.5mm であるので測定面の 1 ピクセル対応範囲からの γ 線は対応ピクセルだけでなく周りのピクセルにも分散してカウントされ、いわゆるボケた分布になる。この効果を考慮した各ピクセルのレスポンス（応答関数）の作成と適切なアンフォールディング法（測定誤差を含むので単純な逆行列法では解けない）によりボケを元に戻すことにより上記の問題が解決できる。レスポンスについては EGS5¹⁾ コードでの計算結果は既に揃っており、アンフォールディング法も種々試しているところである。なおこれができて、今回のような統計誤差の測定値では解が得られないので、さらに統計誤差の少ない測定値を得るために測定時間を長くすることも同時に必要となる。

6. 参考文献

- 1) H. Hirayama, Y. Namito, A. F. Bielajew, S. J. Wilderman and W. R. Nelson, “The EGS5 Code System”, SLAC-R-730 (2005) and KEK Report 2005-8 (2005)

(別添 3-2-5-5)

穴内と床上の測定における床上汚染位置による線量率寄与の違いについて

原子力規制庁原子力規制部

東京電力福島第一原子力発電所事故対策室

林 克己、平山 英夫

1. はじめに

2号機シールドプラグの床上および穴内での測定には、床汚染の寄与が含まれる。現在までに穴内および床上 1.5cm、3cm、1m、1.5m での測定が行われているが、穴内および床に近い高さの測定では床汚染の寄与が大きくなり、さらに床汚染のばらつきが強く反映される。

そこで、汚染の高い場所がある可能性があるときに、その場所から離れた位置でどの程度の寄与があるかを評価した。これは別添 3-2-5-5-1 で示した円環線源で計算した床上のみの解析ではなく、より一般的に結果を利用できるように点線源で床上と穴内両方について実施した。

2. 穴内および床上の汚染箇所位置による線量率寄与の評価

図 1 に示す計算モデルで、床上に点線源 ($Cs^{137}1Bq + Cs^{134}0.044Bq$) を置いたときの穴内および床上の線量率寄与を QAD-CGGP2R¹⁾ を使用して計算した。

点線源は穴の中心軸から 2.5cm(穴の端)、5cm、10cm、20cm、30cm、50cm の位置に置き、計算点は穴内の深さ 0.5cm ずつ 10cm の深さまで、また床上は 0cm、1.5cm、3cm、1m、1.5m の高さとした。

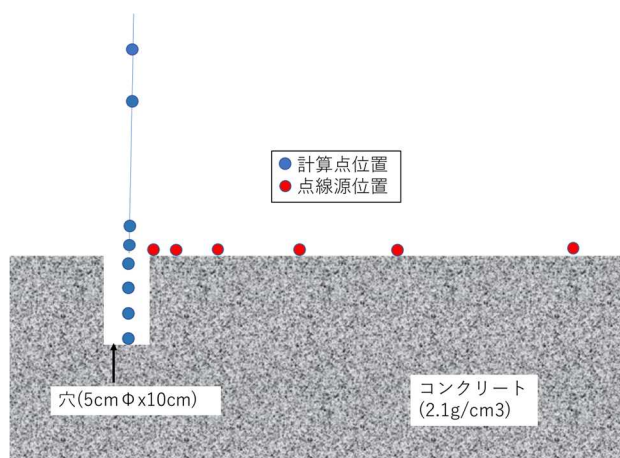


図 1 床上の汚染箇所位置による線量率寄与の計算モデル

表1右に、各位置に線源を置いたときの各高さでと穴内深さでの線量率寄与を示す。またこれとの比較のため表1左には線源を床面上（穴開口部除く）に一様に分布させたときの計算結果を示した。表1にはそれぞれの線源位置毎に床上から穴内までの線量率分布形状比較の参考としてカラーバーで示した。表1の面線源は半径2.5cmから22m（オペフロ床面積と同等になる半径）に置かれた均一線源の結果であり、今回計算した各位置も含み22mまでの寄与を積分したものになる。

表1 線源を各位置に置いたときの中心軸上の各高さでの線量率寄与

線源		面線源	点線源						
線源位置(cm)		2.5-2221.5	2.5	5.0	10.0	20.0	30.0	50.0	
計算点位置(cm)		線量率 ($\mu\text{Sv/h per Bq/cm}^2$) 【Cs137+4.4%Cs134】	線量率($\mu\text{Sv/h per Bq}$) 【Cs137+4.4%Cs134】						
1	穿孔穴上部	150	2.057E-02	5.432E-08	5.428E-08	5.410E-08	5.338E-08	5.224E-08	4.889E-08
2		100	2.367E-02	1.224E-07	1.221E-07	1.212E-07	1.177E-07	1.123E-07	9.789E-08
3		30	3.291E-02	1.359E-06	1.331E-06	1.231E-06	9.455E-07	6.819E-07	3.603E-07
4		3	4.873E-02	8.353E-05	3.665E-05	1.129E-05	2.997E-06	1.347E-06	4.876E-07
5		1.5	5.095E-02	1.492E-04	4.542E-05	1.201E-05	3.045E-06	1.357E-06	4.889E-07
6		0.0	5.198E-02	1.956E-04	4.896E-05	1.224E-05	3.060E-06	1.360E-06	4.892E-07
7	穿孔穴内部	-0.5	1.396E-02	1.853E-04	4.472E-05	9.456E-06	1.250E-06	2.400E-07	1.219E-08
8		-1.0	1.289E-02	1.641E-04	4.277E-05	8.946E-06	1.081E-06	1.866E-07	7.564E-09
9		-1.5	1.207E-02	1.390E-04	4.042E-05	8.646E-06	1.017E-06	1.690E-07	6.301E-09
10		-2.0	1.128E-02	1.149E-04	3.769E-05	8.376E-06	9.797E-07	1.599E-07	5.713E-09
11		-2.5	1.052E-02	9.412E-05	3.473E-05	8.098E-06	9.521E-07	1.540E-07	5.367E-09
12		-3.0	9.788E-03	7.721E-05	3.170E-05	7.803E-06	9.284E-07	1.496E-07	5.134E-09
13		-3.5	9.100E-03	6.374E-05	2.874E-05	7.490E-06	9.064E-07	1.459E-07	4.962E-09
14		-4.0	8.458E-03	5.310E-05	2.593E-05	7.161E-06	8.849E-07	1.427E-07	4.825E-09
15		-4.5	7.864E-03	4.467E-05	2.333E-05	6.822E-06	8.632E-07	1.397E-07	4.711E-09
16		-5.0	7.315E-03	3.795E-05	2.096E-05	6.476E-06	8.412E-07	1.368E-07	4.611E-09
17		-5.5	6.809E-03	3.256E-05	1.882E-05	6.129E-06	8.187E-07	1.340E-07	4.520E-09
18		-6.0	6.341E-03	2.817E-05	1.691E-05	5.783E-06	7.956E-07	1.312E-07	4.436E-09
19		-6.5	5.910E-03	2.458E-05	1.521E-05	5.443E-06	7.720E-07	1.283E-07	4.356E-09
20		-7.0	5.511E-03	2.161E-05	1.370E-05	5.112E-06	7.480E-07	1.255E-07	4.279E-09
21		-7.5	5.142E-03	1.913E-05	1.236E-05	4.791E-06	7.235E-07	1.226E-07	4.204E-09
22		-8.0	4.801E-03	1.704E-05	1.117E-05	4.483E-06	6.988E-07	1.197E-07	4.130E-09
23		-8.5	4.484E-03	1.526E-05	1.012E-05	4.188E-06	6.739E-07	1.167E-07	4.057E-09
24		-9.0	4.191E-03	1.375E-05	9.182E-06	3.908E-06	6.489E-07	1.137E-07	3.984E-09
25		-9.5	3.918E-03	1.244E-05	8.350E-06	3.643E-06	6.239E-07	1.106E-07	3.910E-09
26		-10.0	3.664E-03	1.131E-05	7.608E-06	3.392E-06	5.991E-07	1.076E-07	3.837E-09

図2に床上1.5m、1m、30cm、3cm、1.5cm、0cm位置での各位置に置いた点線源からの線量率を示す。床上1.5m、1mでは線源位置を50cmまで変えても線量率は2割程度しか変わらない。床上30cmでは線源位置によりゆるやかに減少し50cmで1/4程度になる。床上3cm、1.5cm、0cmと床に近づくほど、線源位置からの距離により急激に減少する。

表2に線源位置2.5cmに対する各位置の線量率比を示す。例えば床上1.5cm高さの線量率では、基準位置2.5cmから2.5cm離れた5cm位置の線源では30%に、また7.5cm離れた10cm位置の線源では8%に減少していることがわかる。

なお、床上1.5cmの穴の東西南北の測定点では、東西で最大3倍の線量率の違いが出ている穴（新穿孔穴⑫）があった。東西の測定位置は9cm離れているので、床上汚染が局在していたと考えれば充分ありえると思われる。

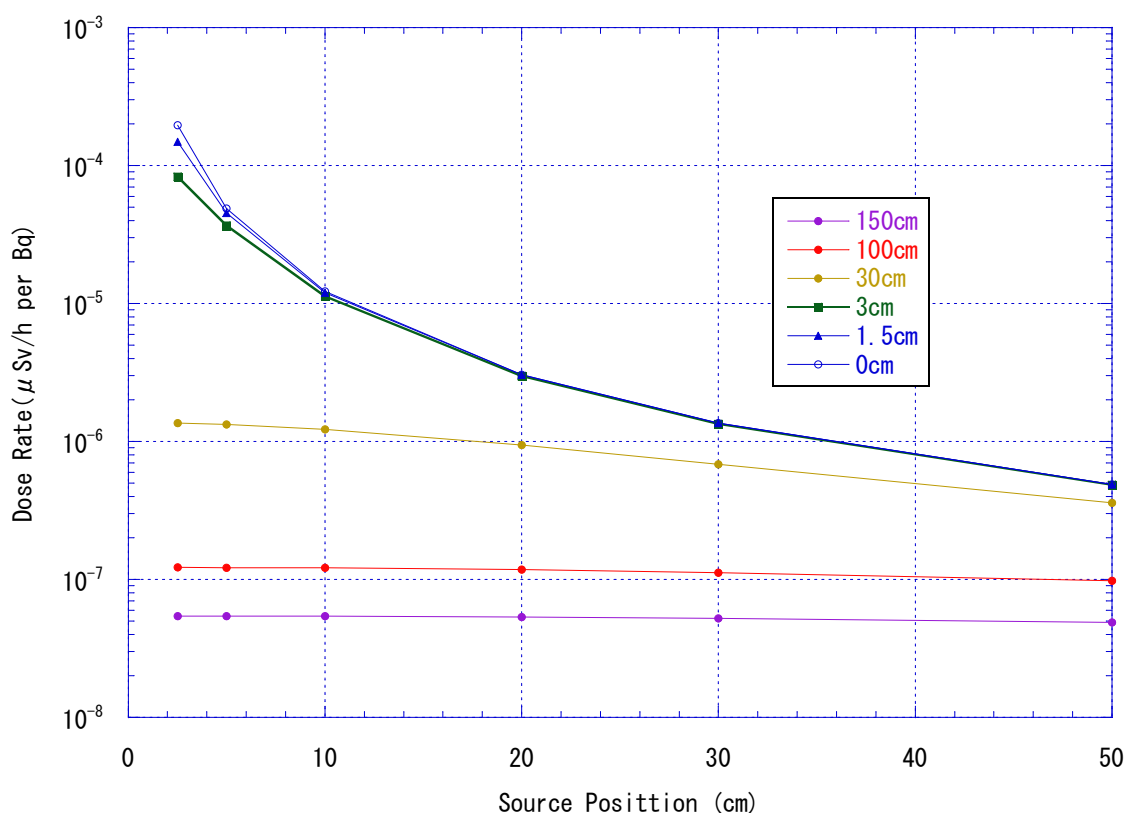


図2 床上高さ毎の点線源からの線量率

表2 線源位置2.5cmに対する各位置の線量率比

線源位置(cm)	点線源					
	2.5	5.0	10.0	20.0	30.0	50.0
線源間距離(cm)	基準(0.0)	2.5	7.5	17.5	27.5	47.5
床上3cm	基準(1.0)	0.4388	0.1352	0.0359	0.0161	0.0058
床上1.5cm		0.3044	0.0805	0.0204	0.0091	0.0033
床上0cm		0.2503	0.0626	0.0156	0.0070	0.0025

図3に点線源位置を変えたときの穴内線量率分布の形状を示す。線源が2.5cm位置では床上も穴内もコンクリートを通過しないが、それ以降は穴から遠ざかるに従いコンクリート通過距離が長くなるため急激に穴内への線量率寄与が小さくなる。床上の位置では線源からの距離の二乗で減衰する。これらが組み合わさった形になっており、各点線源の形を床面全体で積分するとSSと表示した面線源のときの減衰形状になる。

表3に床上1.5cmと穴内0.5cmの線量率比を示す。

面線源では3.6であるが、点線源では20cm位置まではこれより低くなっている。今後の解析で床汚染を面線源で扱うとき、高汚染部位があると違いが大きくなるパラメータの一つである。

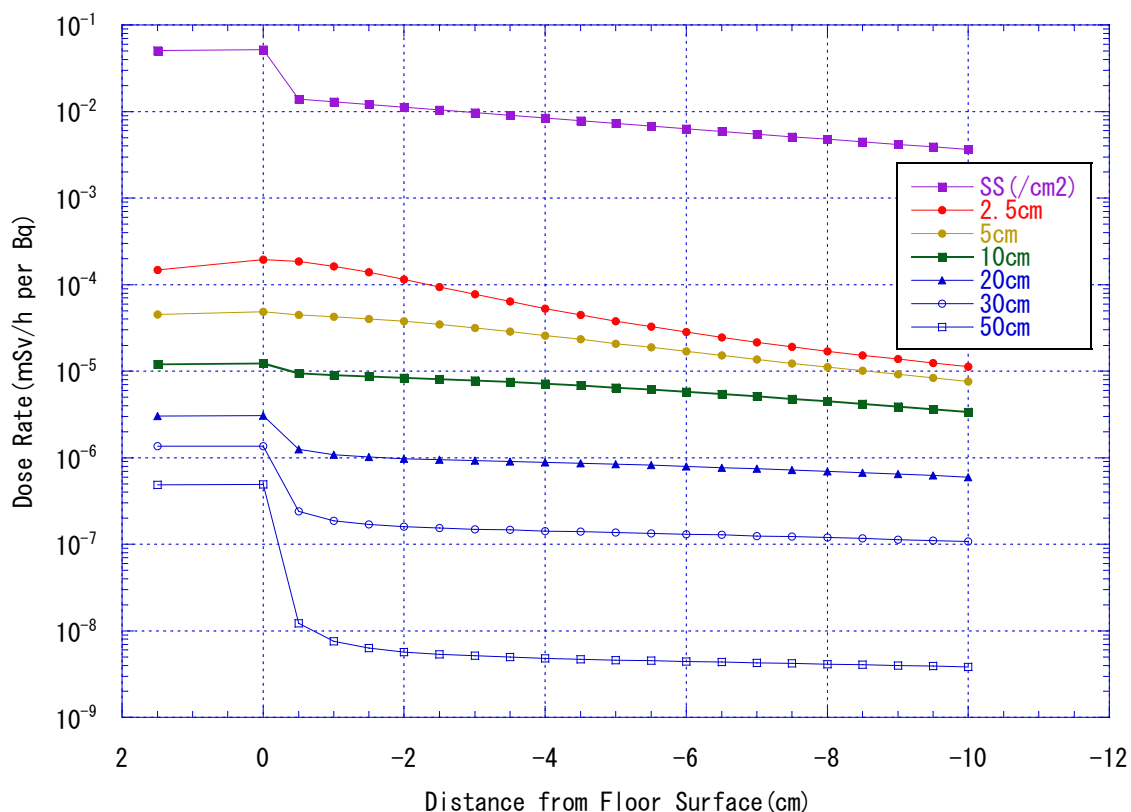


図3 点線源位置による穴内線量率分布(参考: SS=面線源)

表3 床上1.5cmと穴内-0.5cmの線量率比

線源位置(cm)	面線源	点線源					
	2.5-2200.0	2.5	5.0	10.0	20.0	30.0	50.0
比(床上1.5cm/ 穴内-0.5cm)	3.6	0.8	1.0	1.3	2.4	5.7	40.1

3. 参考資料

- 1) QAD-CGGP2 AND G33-GP2 : REVISED VERSION OF QAD-CGGP AND G33-GP2,
JAERI-M 90-110, June 1990

(別添 3-2-5-5-1)

床上の汚染位置による線量率寄与の違いについて

原子力規制庁原子力規制部

東京電力福島第一原子力発電所事故対策室

林 克己、平山 英夫

1. はじめに

2号機シールドプラグの床上での測定では、床汚染の寄与が含まれる。現在までに床上 1.5m、1m、3cm、1.5cm などでの測定が行われているが、床に近い高さの測定では床汚染が大きな寄与となり、さらに床汚染のばらつきが強く反映される。

そこで、汚染の高い場所がある可能性があるときに、その場所から離れた位置でどの程度の寄与があるかを評価した。なお、ここでは参考にシールドプラグ上層表面が仮に $1\text{E}+6\text{Bq}/\text{cm}^2$ で一様に汚染されている場合の各検出器位置での周辺線量当量率も併せて評価した。

2. 床上の汚染箇所位置による線量率寄与の評価

図 1 に示す計算モデルで、床上に円環状の場所に線源 ($\text{Cs}^{137}1\text{Bq}+\text{Cs}^{134}0.044\text{Bq}$) を置いたときの床上 1.5m、1m、3cm、1.5cm、0cm の高さでの線量率寄与を QAD-CGGP2R を使用して計算した。

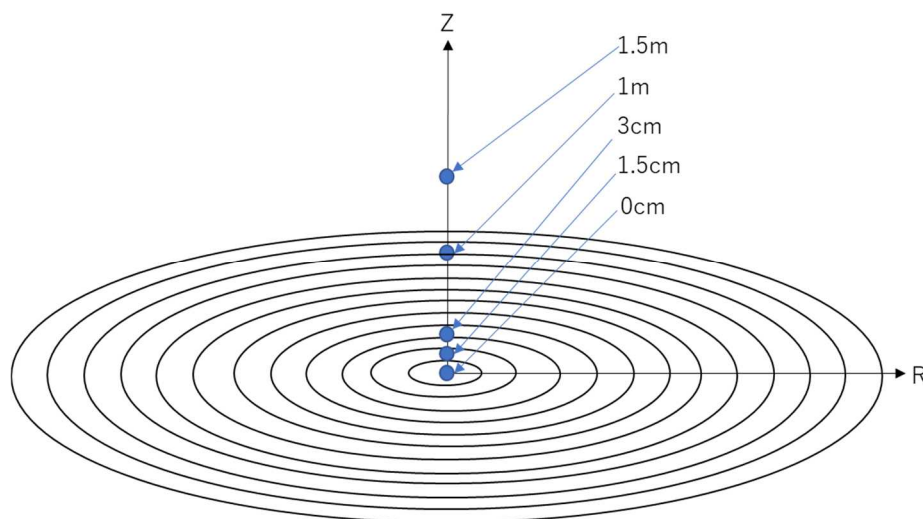


図 1 床上の汚染箇所位置による線量率寄与の計算モデル

表 1 左に、各円環に線源を置いたときの各位置での線量率寄与を示す。また、図 2 には R 方向 6m までの線量率寄与、図 3 にはその 1m までの詳細を、図 4 にはその 50cm までの中心近くの詳細を示す。

図 2 から、1.5m、1m の計算点では線源の距離が遠ざかるとともになだらかに寄与が減るが、3cm、1.5cm、0cm では急激に減衰し 1m 離れた線源では 4 桁程度減衰することがわかる。図 3 で 1m までの分布をみると、1.5m、1m の計算点ではほぼ一定であり、3cm、1.5cm、0cm は 10cm 以内になると寄与に差が出てくることがわかる。図 4 で 1m までの分布をみると、1.5m、1m の計算点では一定であり、3cm、1.5cm、0cm は特に最初の 3cm 以内の差が大きいことがわかる。

表 1 右に、中心の半径 2.5cm からの寄与を基準として、そこから離れた位置にある線源からの線量率寄与の比を示す。また、図 5 には R 方向 6m までの中心に対する比、図 6 にはその 1m までの詳細を、図 7 にはその 50cm までの中心近くの詳細を示す。

図 7 の中心近くの詳細をみると、床上 0cm の計算点では 10cm 離れた線源は中心に置いた線源の 10%程度、床上 1.5cm の計算点では 4%程度、床上 3cm の計算点では 1%程度の寄与しかないことがわかる。

表 1 各円環に線源を置いたときの各位置での線量率寄与
及びその中心に対する比

Rmid (cm)	Rmin (cm)	Rmax (cm)	Derivative Dose Rate(μSv/h per Bq)					Ratio of Derivative Dose Rate				
			1.5m	1m	3cm	1.5cm	0cm	1.5m	1m	3cm	1.5cm	0cm
1.25	0	2.5	5.429E-08	1.224E-07	1.089E-04	2.807E-04	1.282E-03	1.000E+00	1.000E+00	1.000E+00	1.000E+00	1.000E+00
2.75	2.5	3	5.431E-08	1.223E-07	7.656E-05	1.286E-04	1.622E-04	1.000E+00	9.997E-01	7.031E-01	4.582E-01	1.265E-01
3.5	3	4	5.429E-08	1.223E-07	5.911E-05	8.640E-05	1.005E-04	1.000E+00	9.991E-01	5.429E-01	3.078E-01	7.843E-02
4.5	4	5	5.429E-08	1.222E-07	4.269E-05	5.524E-05	6.069E-05	1.000E+00	9.982E-01	3.920E-01	1.968E-01	4.734E-02
5.5	5	6	5.426E-08	1.221E-07	3.169E-05	3.808E-05	4.057E-05	9.994E-01	9.976E-01	2.910E-01	1.357E-01	3.165E-02
6.5	6	7	5.424E-08	1.219E-07	2.418E-05	2.774E-05	2.904E-05	9.990E-01	9.962E-01	2.221E-01	9.884E-02	2.265E-02
7.5	7	8	5.420E-08	1.217E-07	1.895E-05	2.106E-05	2.179E-05	9.983E-01	9.948E-01	1.740E-01	7.502E-02	1.700E-02
8.5	8	9	5.417E-08	1.216E-07	1.519E-05	1.651E-05	1.696E-05	9.978E-01	9.932E-01	1.395E-01	5.884E-02	1.323E-02
9.5	9	10	5.411E-08	1.213E-07	1.242E-05	1.329E-05	1.358E-05	9.967E-01	9.915E-01	1.140E-01	4.735E-02	1.059E-02
11	10	12	5.403E-08	1.210E-07	9.477E-06	9.976E-06	1.014E-05	9.953E-01	9.883E-01	8.703E-02	3.554E-02	7.912E-03
13	12	14	5.394E-08	1.204E-07	6.911E-06	7.174E-06	7.260E-06	9.936E-01	9.838E-01	6.347E-02	2.556E-02	5.663E-03
15	14	16	5.379E-08	1.197E-07	5.251E-06	5.401E-06	5.448E-06	9.909E-01	9.784E-01	4.822E-02	1.924E-02	4.250E-03
17	16	18	5.364E-08	1.189E-07	4.119E-06	4.211E-06	4.240E-06	9.881E-01	9.719E-01	3.783E-02	1.500E-02	3.307E-03
19	18	20	5.348E-08	1.182E-07	3.317E-06	3.376E-06	3.394E-06	9.851E-01	9.654E-01	3.046E-02	1.203E-02	2.648E-03
22.5	20	25	5.312E-08	1.165E-07	2.387E-06	2.418E-06	2.428E-06	9.785E-01	9.516E-01	2.192E-02	8.614E-03	1.894E-03
27.5	25	30	5.255E-08	1.137E-07	1.604E-06	1.618E-06	1.623E-06	9.679E-01	9.294E-01	1.473E-02	5.765E-03	1.266E-03
32.5	30	35	5.188E-08	1.107E-07	1.152E-06	1.159E-06	1.161E-06	9.556E-01	9.043E-01	1.058E-02	4.128E-03	9.054E-04
37.5	35	40	5.112E-08	1.072E-07	8.658E-07	8.700E-07	8.709E-07	9.415E-01	8.760E-01	7.951E-03	3.100E-03	6.794E-04
42.5	40	45	5.027E-08	1.036E-07	6.748E-07	6.772E-07	6.780E-07	9.259E-01	8.464E-01	6.197E-03	2.413E-03	5.289E-04
47.5	45	50	4.935E-08	9.978E-08	5.405E-07	5.421E-07	5.425E-07	9.091E-01	8.153E-01	4.964E-03	1.931E-03	4.232E-04
55	50	60	4.783E-08	9.381E-08	4.043E-07	4.051E-07	4.054E-07	8.811E-01	7.666E-01	3.713E-03	1.443E-03	3.163E-04
65	60	70	4.569E-08	8.589E-08	2.894E-07	2.899E-07	2.899E-07	8.416E-01	7.018E-01	2.658E-03	1.033E-03	2.262E-04
75	70	80	4.342E-08	7.820E-08	2.173E-07	2.175E-07	2.177E-07	7.997E-01	6.390E-01	1.996E-03	7.750E-04	1.698E-04
85	80	90	4.108E-08	7.095E-08	1.692E-07	1.693E-07	1.694E-07	7.567E-01	5.797E-01	1.554E-03	6.033E-04	1.321E-04
95	90	100	3.873E-08	6.423E-08	1.354E-07	1.355E-07	1.355E-07	7.134E-01	5.248E-01	1.243E-03	4.828E-04	1.057E-04
105	100	110	3.641E-08	5.810E-08	1.108E-07	1.109E-07	1.109E-07	6.706E-01	4.747E-01	1.018E-03	3.950E-04	8.652E-05
115	110	120	3.417E-08	5.260E-08	9.238E-08	9.242E-08	9.243E-08	6.294E-01	4.298E-01	8.484E-04	3.293E-04	7.211E-05
125	120	130	3.202E-08	4.767E-08	7.816E-08	7.820E-08	7.822E-08	5.898E-01	3.895E-01	7.178E-04	2.786E-04	6.102E-05
135	130	140	2.997E-08	4.327E-08	6.701E-08	6.703E-08	6.703E-08	5.520E-01	3.535E-01	6.154E-04	2.388E-04	5.229E-05
145	140	150	2.804E-08	3.936E-08	5.808E-08	5.810E-08	5.810E-08	5.166E-01	3.216E-01	5.333E-04	2.070E-04	4.532E-05
175	150	200	2.290E-08	3.005E-08	4.011E-08	4.013E-08	4.013E-08	4.218E-01	2.455E-01	3.683E-04	1.430E-04	3.130E-05
225	200	250	1.667E-08	2.015E-08	2.419E-08	2.419E-08	2.419E-08	3.070E-01	1.646E-01	2.222E-04	8.619E-05	1.887E-05
275	250	300	1.242E-08	1.425E-08	1.616E-08	1.616E-08	1.616E-08	2.288E-01	1.164E-01	1.484E-04	5.757E-05	1.261E-05
325	300	350	9.510E-09	1.055E-08	1.156E-08	1.156E-08	1.156E-08	1.752E-01	8.619E-02	1.061E-04	4.118E-05	9.016E-06
375	350	400	7.465E-09	8.089E-09	8.667E-09	8.667E-09	8.667E-09	1.375E-01	6.610E-02	7.959E-05	3.088E-05	6.761E-06
425	400	450	5.992E-09	6.387E-09	6.742E-09	6.743E-09	6.743E-09	1.104E-01	5.219E-02	6.192E-05	2.402E-05	5.260E-06
475	450	500	4.902E-09	5.164E-09	5.393E-09	5.394E-09	5.394E-09	9.029E-02	4.220E-02	4.953E-05	1.922E-05	4.208E-06
525	500	550	4.077E-09	4.257E-09	4.412E-09	4.412E-09	4.412E-09	7.510E-02	3.478E-02	4.052E-05	1.572E-05	3.442E-06
575	550	600	3.441E-09	3.567E-09	3.676E-09	3.676E-09	3.676E-09	6.337E-02	2.915E-02	3.376E-05	1.310E-05	2.867E-06

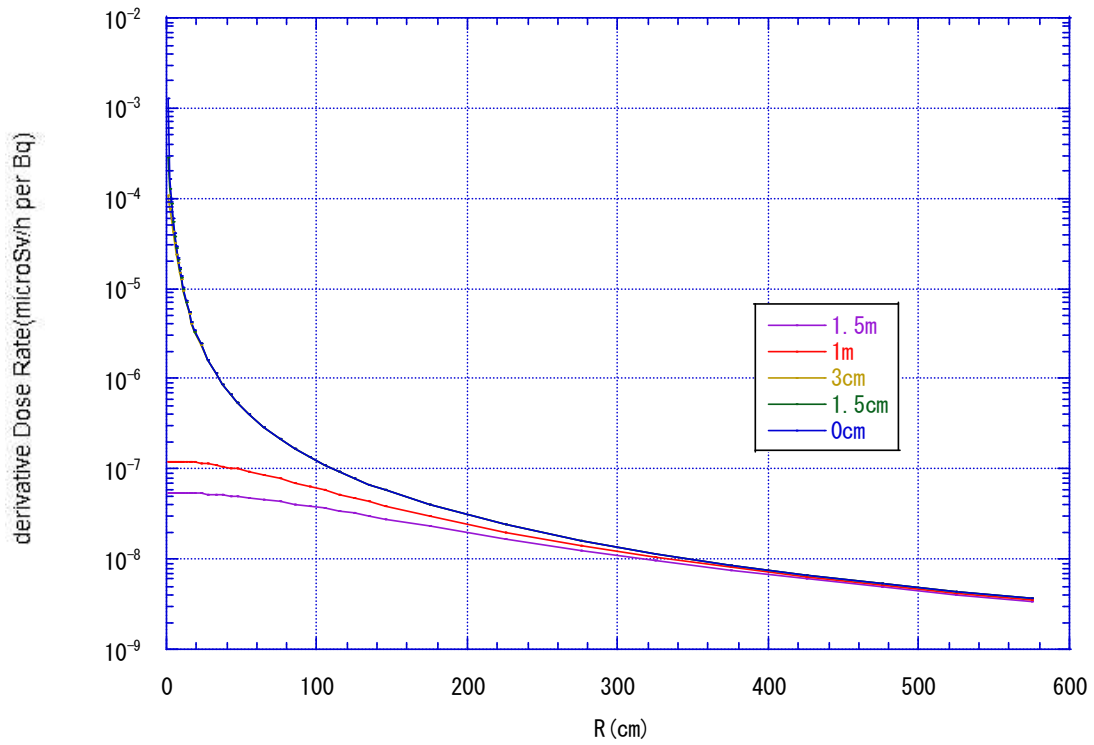


図2 各円環に線源を置いたときの各位置での線量率寄与（全体）

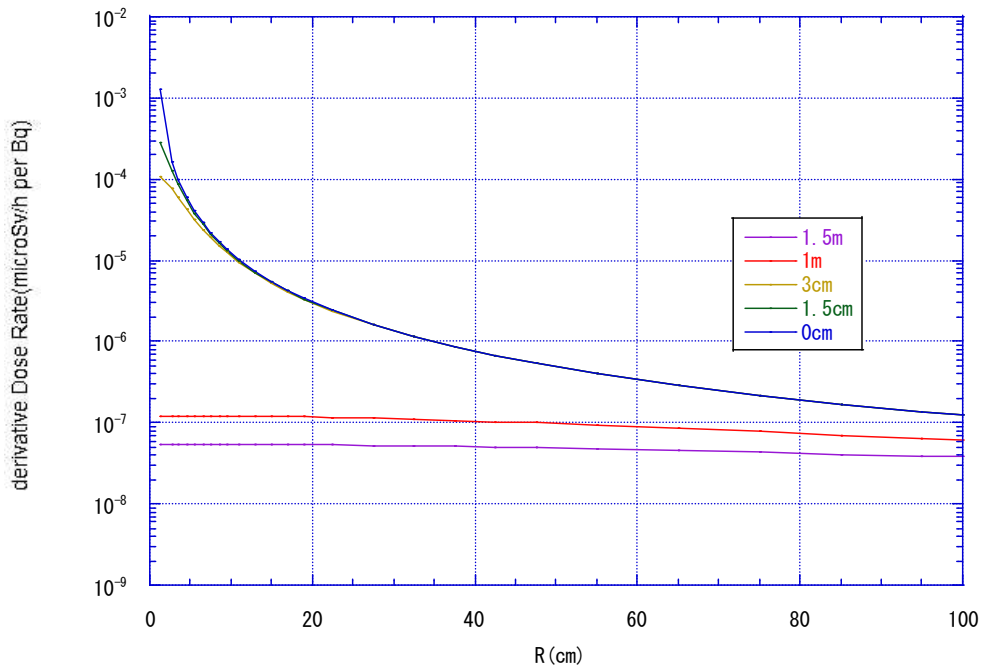


図3 各円環に線源を置いたときの各位置での線量率寄与
(1mまでの詳細)

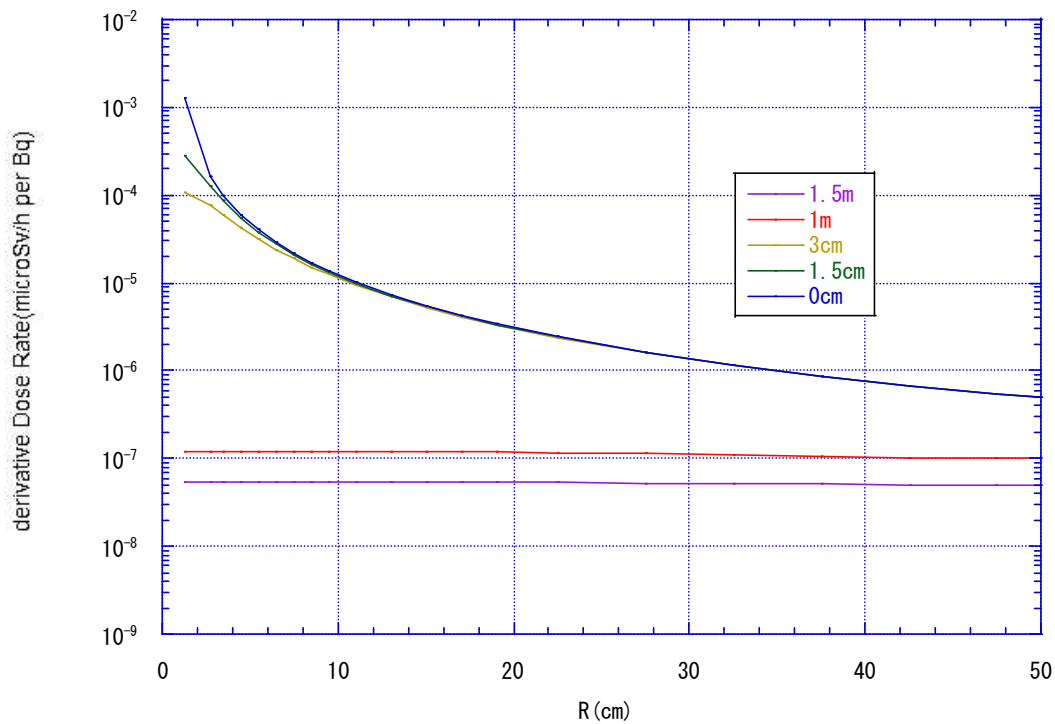


図4 各円環に線源を置いたときの各位置での線量率寄与
(50cm までの詳細)

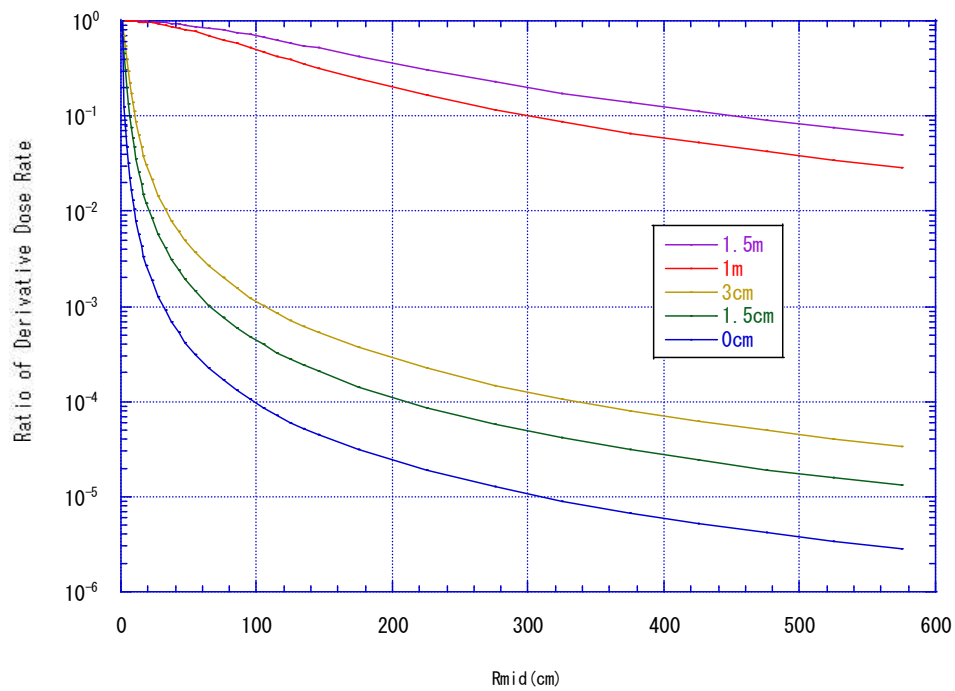


図5 中心から離れた位置にある線源からの線量率寄与の中心に対する比
(全体)

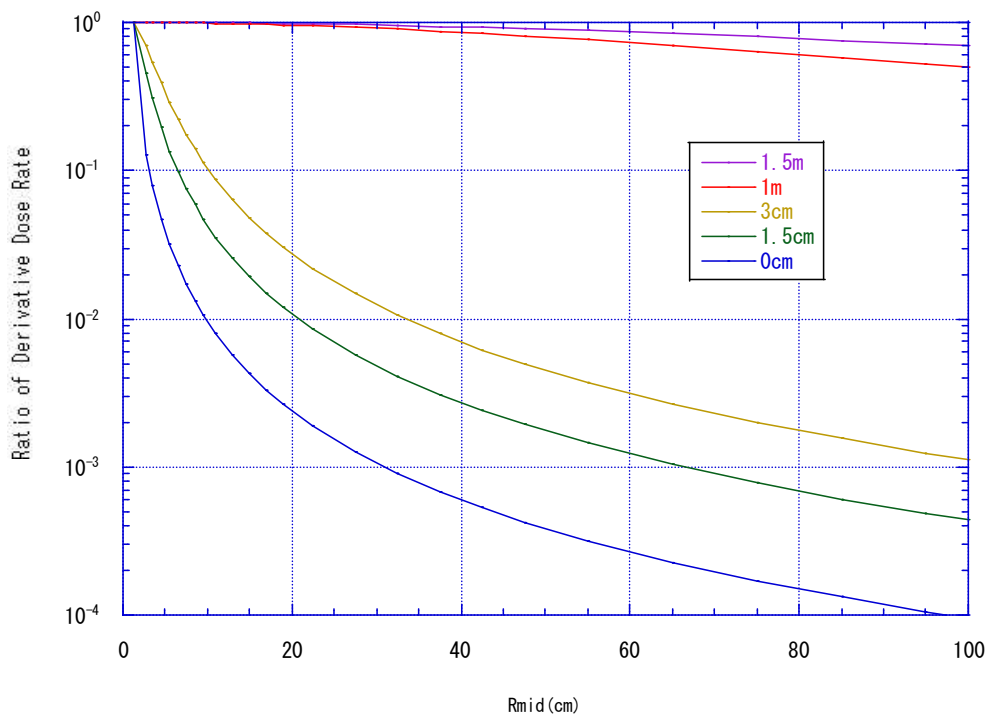


図6 中心から離れた位置にある線源からの線量率寄与の中心に対する比
(1mまでの詳細)

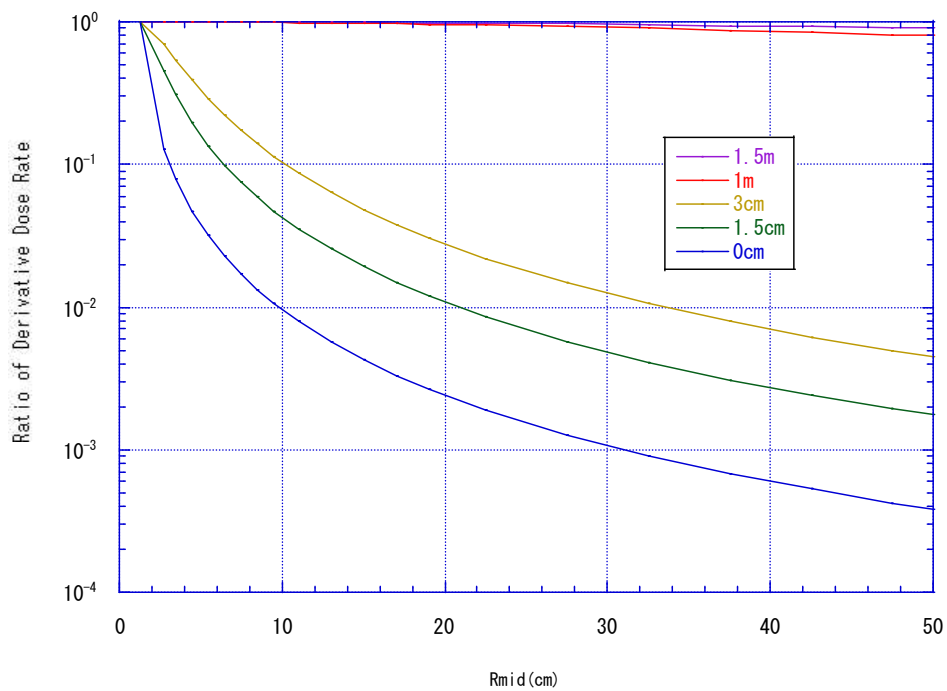


図7 中心から離れた位置にある線源からの線量率寄与の中心に対する比
(50cmまでの詳細)

3. シールドプラグ上層上面が一様に汚染していた場合の検出器位置 (0-1.5m) における周辺線量当量率の評価

表2 シールドプラグ上層上面の汚染 (1 E+6Bq/cm² の Cs-137) によるシールドプラグ中心での周辺線量当量率

床面からの距離 (cm)	周辺線量当量率	
	μSv/h per Bq/cm ²	mSv/h for 1 MBq/cm ²
0	0.19812 ± 6.42E-03	198 ± 6.42
1.5	3.94E-02 ± 3.75E-05	39.4 ± 0.0375
3	3.51E-02 ± 2.61E-05	35.1 ± 0.0261
30.5	2.05E-02 ± 7.19E-06	20.5 ± 0.00719
100	1.26E-02 ± 3.47E-06	12.6 ± 0.00347
150	9.93E-03 ± 2.71E-06	9.93 ± 0.00271

(別添 3-2-5-6)

高汚染部からの距離による床上および穴内線量率分布の検討

原子力規制庁原子力規制部
東京電力福島第一原子力発電所事故対策室

林 克己、平山英夫

1. はじめに

2号機シールドプラグ上層と中間層の間の汚染密度の評価のための最後の測定として、2021年12月にATOMTEX社のPolimaster 1704Mを使用して、2014年に国際廃炉研究開発機構(IRID)が穿孔した2個の穴(直径10cm、深さ7cm、以下「IRID穴」という。)と2021年に東京電力が穿孔した13個の穴(直径10cm、深さ10cm、以下「新穿孔穴」という。)の中の周辺線量当量率分布が測定された。

測定された穴内の周辺線量当量率分布は、IRID穴2個でもその絶対値は4倍違いまた分布形状も異なっていた。また新穿孔穴13個はIRID穴より絶対値は小さくIRID穴とは異なる分布形状であった。

これらの周辺線量当量率の測定値にはシールドプラグ上層と中間層の間のうち、直下の半径50cm程度のCs-137汚染密度が反映されるため、絶対値はそれぞれの穴の位置の直下の汚染密度に依存する。

しかし穴内の周辺線量当量率分布が異なる原因は別にあり、これは厚さ61cmのシールドプラグ上層内の鉄筋の効果や、偏在した高汚染部との位置関係などが考えられる。鉄筋の効果については別添3-2-5-1にて示しており、本資料では高汚染部との距離の効果について検討した。

2. 高汚染部からの床上および穴の中の線量率分布の評価

新穿孔穴の穿孔位置を検討するため予めシールドプラグ上層上面から高さ3cmでの周辺線量当量率の測定が行われた。この測定により測定値に大きな幅があったことからシールドプラグ上層と中間層の間の汚染密度には高汚染部と低汚染部が存在していることが想定されていた。また、この汚染部はシールドプラグ上層上面から高さ3cmでの周辺線量当量率の測定ではシールドプラグ上層と中間層の間の半径50cmの範囲の汚染が反映されるが、測定値をみるとこの範囲の中で高汚染部が偏在または高汚染部から少し離れた位置での測定値である可能性もあることが分かってきた(添付資料及び別添3-2-5-7参照)。

この高汚染部からの距離による違いは、穴内の周辺線量当量率分布にどのように影響

するかを確認するため、床上 1.5cm の中央、東西南北と穴内の周辺線量当量率分布形状について、高汚染部からの距離による違いとともに、汚染がシールドプラグ上層と中間層の間に均一である場合と比較検討した（添付資料参照）。特に穴内の周辺線量当量率分布については穴壁等からの寄与と穴底からの寄与についてそれぞれ比較した。

3. 計算モデル

図 1 に計算モデルを示す。鉄筋の効果については別途検討済みであり高密度線源からの距離の効果だけ検討するため、シールドプラグ上層の鉄筋はモデルに入れず密度 $2.1\text{g}/\text{cm}^3$ のコンクリートとした。シールドプラグ上層と中間層の間に幅 20cm、長さ 50cm の高汚染部を設定し、IRID 穴（直径 5cm、深さ 7cm）、新穿孔穴（直径 5cm、深さ 10cm）について、高汚染部の中心(0cm)、高汚染部の端(10cm)、中心から 20cm、30cm、50cm の位置に計算ケースごとにずらして設定し、計 10 ケースについてシールドプラグ上層上面から高さ 1.5cm で穴の中心と東西南北、および穴内深さ方向に 0.5cm ずつ計算点を設定した。

添付資料では Y（東西）方向に±50cm として長さ 100cm の高汚染部を設定していたが、今回はシールドプラグ上層上面から高さ 1.5cm での東西方向の違いを見るため、片側だけとした。（Y 方向に見る必要がないときは今回の計算値をシールドプラグ上層上面から高さ 1.5cm の場合は東西の結果の和、その他については 2 倍すれば、添付資料での線源設定と同じになる）

穴内の線量率分布については、別添 3-2-5-1 で明らかになったように、穴の底からの寄与と穴の壁からの寄与それぞれの分布の形に特性があり、その結果、2つの合計で決まる穴内の周辺線量当量率分布の形は穴の深さで変わることが判っている。そのため、今回は高汚染部からの距離によってこの傾向が変わるのかをみるため、穴の底からの寄与を塞ぐことにより穴の壁からの成分を求め、これらを分けて検討した。

なお、シールドプラグ上層上面から高さ 1.5cm の中央、東西南北についてもこの 2つの成分に分けているが、穴の底からの成分以外は「穴の壁等から」と表示してあるように穴の壁から透過してくる成分も入っている。

計算には QAD-CGGP2R¹⁾ を使用した。

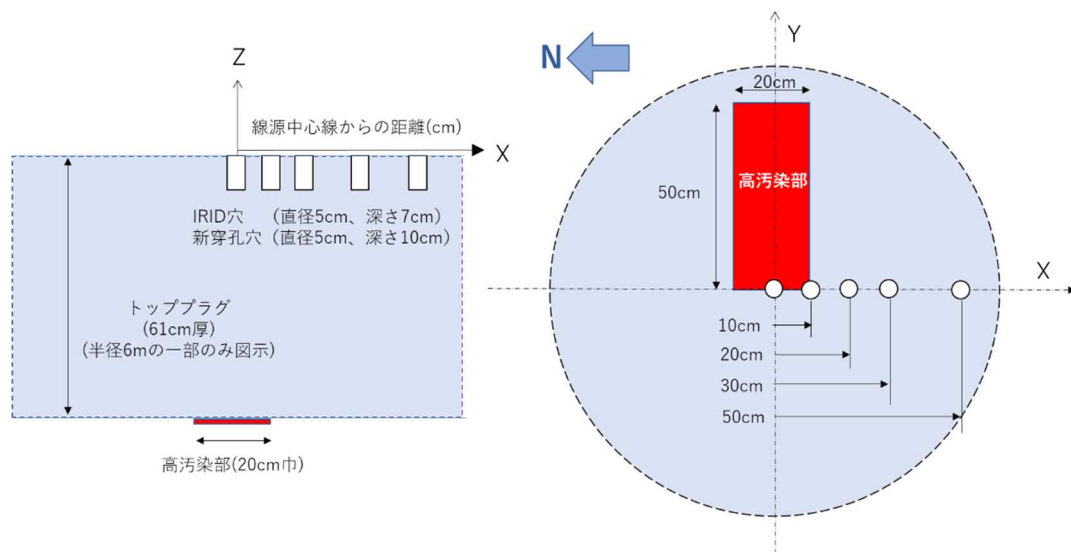


図1 高汚染部と穴（各計算で穴は1個のみ）の計算モデル

4. 計算結果と考察

表1に IRID 穴について、表2に新穿孔穴について高汚染部からの距離による穴の真上及び東西南北の床上と穴の中深さ方向線量率計算値を示す。

表1の IRID 穴と表2の新穿孔穴の計算点のうち、シールドプラグ上層上面から高さ1.5cmの東西南北の線量率について、東西の比と南北の比を表3に示す。

表3 IRID 穴と新穿孔穴のシールドプラグ上層上面から高さ1.5cmの東西の比と南北の比

位置		0cm	10cm	20cm	30cm	50cm
IRID穴	東/西	1.02	1.05	1.16	1.31	1.34
	北/南	1.00	1.17	1.17	1.07	1.02
新穿孔穴	東/西	0.75	0.83	1.07	1.31	1.34
	北/南	1.00	1.04	0.90	0.81	0.75

東側だけに線源が置かれているので東西で比べると東が高く、また線源に近いことから南北で比べると北が高くなることが予想される。IRID 穴はこの想定通りになっており、位置によりその比の範囲は、1.00～1.34 となっている。

新穿孔穴はこれが逆となっている箇所があり、この原因は穴底から寄与にあることが表2からわかる。これらの逆転は穴底から穴を通して穴壁から東西南北の計算点に到達した成分と考えられる。新穿孔穴は IRID 穴より 3cm 深いため穴底の単位汚染密度あたりの線量率が高く、その結果 IRID 穴に比べて穴底の成分が東西南北の計算点

への寄与が大きくなると考えられる。東西と南北の比の範囲は0.75～1.34と IRID 穴に比べて広がっている。

次に、表1と表2の穴の中の分布をみってみる。

表1の IRID 穴も表2の新穿孔穴も、穴の壁からの寄与と穴の底からの寄与、及びそれらの合計の形は、別添3-2-5-1の鉄筋の影響が一番少ない位置（鉄筋との位置関係で①）とほぼ同じ線量率分布形状にみえる。

詳しく見るため図2から図4に、高汚染部からの距離による穴内の周辺線量当量率分布の変化について合計線量率の変化、穴壁からの周辺線量当量率分布の変化、穴底からの周辺線量当量率の変化を示す。

図2の合計線量率をみると、IRID 穴も新穿孔穴も穴内分布形状は20cm位置までは別添3-2-5-1の①と同じなだらかな減衰であるが30cm位置では少し変わり50cmまで離れたところでは形状が異なる。

図3の穴の壁からの寄与をみると IRID 穴も新穿孔穴も穴底から3cm（IRID 穴では深さ4cm位置、新穿孔穴では深さ7cm位置）から寄与があり、別添3-2-5-1の①と同じである。

図4の穴の底からの寄与を見ると20cm位置から別添3-2-5-1の①と比べて傾向が変わり始め、30cm位置、50cm位置では穴の出口に向かって減衰が大きくなる。これは線源から離れるほど線源から底に入射する角度が大きくなることが原因と考えられる。この穴の底からの寄与が距離により違うことが、合計線量率の形状が30cm位置では少し変わり50cmまで離れたところでは形状が異なる原因となっている。

図5から図9に、高汚染部からの距離（0cm、10cm、20cm、30cm、50cm）毎に、IRID 穴と新穿孔穴の穴内線量率分布を示す。

5. まとめ

高汚染部からの距離が20～30cmまでは穴内の合計線量率分布の形は大きく変わらないが、50cm以上では分布形状が変わることがわかった。

別添3-2-5-1に示した鉄筋と穴の位置関係での穴内線量率分布の変化、参考資料5のオペフロ内壁汚染の穴内線量率への寄与評価と合わせ、これらの穴内分布の形は測定データの穴内線量率分布形状の解釈に使う予定である。

6. 参考資料

- 1) QAD-CGGP2 AND G33-GP2 : REVISED VERSION OF QAD-CGGP AND G33-GP2, JAERI-M 90-110, June 1990

表1 高汚染部からの距離による穴の真上及び東西南北の床上と穴の中深さ方向線量率計算値 (IRID 穴)

計算点位置			線量率($\mu\text{Sv/h per Bq/cm}^2$) 【Cs137+4.4%Cs134】														
No.	床位置	床上高さ	IRID穴 (0cm) (汚染中心)			IRID穴 (10cm) (汚染端)			IRID穴 (20cm)			IRID穴 (30cm)			IRID穴 (50cm)		
			穴壁等から	穴底から	合計	穴壁等から	穴底から	合計	穴壁等から	穴底から	合計	穴壁等から	穴底から	合計	穴壁等から	穴底から	合計
1	穿孔穴の中心	1.5	1.561E-07	3.498E-07	5.059E-07	1.840E-07	2.591E-07	4.431E-07	2.034E-07	8.420E-08	2.876E-07	1.404E-07	0.000E+00	1.404E-07	2.328E-08	0.000E+00	2.328E-08
2	穿孔穴の東側	1.5	2.523E-07	0.000E+00	2.523E-07	2.256E-07	0.000E+00	2.256E-07	1.621E-07	0.000E+00	1.621E-07	9.530E-08	0.000E+00	9.530E-08	1.994E-08	0.000E+00	1.994E-08
3	穿孔穴の南側	1.5	2.120E-07	0.000E+00	2.120E-07	1.440E-07	3.600E-08	1.800E-07	6.055E-08	8.105E-08	1.416E-07	2.791E-08	7.219E-08	1.001E-07	1.768E-08	7.780E-09	2.546E-08
4	穿孔穴の西側	1.5	8.777E-08	1.607E-07	2.485E-07	9.965E-08	1.158E-07	2.154E-07	1.043E-07	3.540E-08	1.397E-07	7.251E-08	0.000E+00	7.251E-08	1.489E-08	0.000E+00	1.489E-08
5	穿孔穴の北側	1.5	2.120E-07	0.000E+00	2.120E-07	2.097E-07	0.000E+00	2.097E-07	1.663E-07	0.000E+00	1.663E-07	1.071E-07	0.000E+00	1.071E-07	2.604E-08	0.000E+00	2.604E-08
6	穿孔穴内部	-0.5	1.227E-07	4.442E-07	5.669E-07	1.325E-07	3.712E-07	5.037E-07	1.754E-07	1.718E-07	3.472E-07	1.600E-07	2.260E-08	1.826E-07	2.966E-08	0.000E+00	2.966E-08
7		-1.0	1.084E-07	4.724E-07	5.808E-07	1.161E-07	4.009E-07	5.170E-07	1.565E-07	2.042E-07	3.607E-07	1.540E-07	3.960E-08	1.936E-07	3.150E-08	0.000E+00	3.150E-08
8		-1.5	9.246E-08	5.014E-07	5.939E-07	9.844E-08	4.308E-07	5.292E-07	1.309E-07	2.419E-07	3.728E-07	1.421E-07	6.200E-08	2.041E-07	3.344E-08	0.000E+00	3.344E-08
9		-2.0	7.453E-08	5.315E-07	6.060E-07	7.853E-08	4.617E-07	5.402E-07	9.765E-08	2.854E-07	3.830E-07	1.236E-07	8.990E-08	2.135E-07	3.551E-08	0.000E+00	3.551E-08
10		-2.5	5.442E-08	5.624E-07	6.168E-07	5.739E-08	4.924E-07	5.498E-07	6.864E-08	3.223E-07	3.909E-07	9.734E-08	1.242E-07	2.215E-07	3.769E-08	0.000E+00	3.769E-08
11		-3.0	3.458E-08	5.916E-07	6.262E-07	3.663E-08	5.214E-07	5.580E-07	4.348E-08	3.533E-07	3.968E-07	6.408E-08	1.633E-07	2.274E-07	4.000E-08	0.000E+00	4.000E-08
12		-3.5	1.560E-08	6.186E-07	6.342E-07	1.724E-08	5.473E-07	5.645E-07	2.199E-08	3.787E-07	4.007E-07	3.044E-08	2.001E-07	2.305E-07	3.811E-08	4.320E-09	4.243E-08
13		-4.0	1.333E-09	6.396E-07	6.409E-07	2.482E-09	5.672E-07	5.697E-07	5.687E-09	3.973E-07	4.030E-07	1.024E-08	2.210E-07	2.312E-07	2.263E-08	2.164E-08	4.427E-08
14		-4.5	8.110E-32	6.467E-07	6.467E-07	7.913E-32	5.739E-07	5.739E-07	7.376E-32	4.040E-07	4.040E-07	4.856E-10	2.298E-07	2.303E-07	5.715E-09	3.894E-08	4.465E-08
15		-5.0	8.230E-32	6.526E-07	6.526E-07	8.028E-32	5.780E-07	5.780E-07	7.475E-32	4.047E-07	4.047E-07	6.704E-32	2.288E-07	2.288E-07	5.234E-11	4.362E-08	4.367E-08
16		-5.5	8.353E-32	6.585E-07	6.585E-07	8.145E-32	5.822E-07	5.822E-07	7.576E-32	4.053E-07	4.053E-07	6.785E-32	2.272E-07	2.272E-07	5.083E-32	4.237E-08	4.237E-08
17		-6.0	8.479E-32	6.645E-07	6.645E-07	8.264E-32	5.863E-07	5.863E-07	7.679E-32	4.059E-07	4.059E-07	6.867E-32	2.255E-07	2.255E-07	5.129E-32	4.106E-08	4.106E-08
18		-6.5	8.607E-32	6.706E-07	6.706E-07	8.386E-32	5.905E-07	5.905E-07	7.784E-32	4.065E-07	4.065E-07	6.951E-32	2.238E-07	2.238E-07	5.175E-32	3.977E-08	3.977E-08
19		-7.0	8.712E-32	6.768E-07	6.768E-07	8.485E-32	5.947E-07	5.947E-07	7.869E-32	4.069E-07	4.069E-07	7.019E-32	2.220E-07	2.220E-07	5.213E-32	3.848E-08	3.848E-08

表2 高汚染部からの距離による穴の真上及び東西南北の床上と穴の中深さ方向線量率計算値（新穿孔穴）

No.	床位置	床上高さ	新穿孔穴 (0cm) (汚染中心)			新穿孔穴 (10cm) (汚染端)			新穿孔穴 (20cm)			新穿孔穴 (30cm)			新穿孔穴 (50cm)		
			穴壁等から	穴底から	合計	穴壁等から	穴底から	合計	穴壁等から	穴底から	合計	穴壁等から	穴底から	合計	穴壁等から	穴底から	合計
1	穿孔穴の中心	1.5	2.651E-07	3.861E-07	6.512E-07	3.095E-07	2.289E-07	5.384E-07	2.745E-07	3.580E-08	3.103E-07	1.404E-07	0.000E+00	1.404E-07	2.328E-08	0.000E+00	2.328E-08
2	穿孔穴の東側	1.5	2.523E-07	0.000E+00	2.523E-07	2.256E-07	0.000E+00	2.256E-07	1.621E-07	0.000E+00	1.621E-07	9.530E-08	0.000E+00	9.530E-08	1.994E-08	0.000E+00	1.994E-08
3	穿孔穴の南側	1.5	2.041E-07	9.500E-09	2.136E-07	1.326E-07	6.990E-08	2.025E-07	7.079E-08	1.141E-07	1.849E-07	6.918E-08	6.292E-08	1.321E-07	2.618E-08	0.000E+00	2.618E-08
4	穿孔穴の西側	1.5	1.077E-07	2.265E-07	3.342E-07	1.376E-07	1.331E-07	2.707E-07	1.323E-07	1.980E-08	1.521E-07	7.251E-08	0.000E+00	7.251E-08	1.489E-08	0.000E+00	1.489E-08
5	穿孔穴の北側	1.5	2.041E-07	9.500E-09	2.136E-07	2.097E-07	0.000E+00	2.097E-07	1.663E-07	0.000E+00	1.663E-07	1.071E-07	0.000E+00	1.071E-07	2.604E-08	0.000E+00	2.604E-08
6	穿孔穴内部	-0.5	2.686E-07	4.826E-07	7.512E-07	3.218E-07	3.209E-07	6.427E-07	3.157E-07	7.960E-08	3.953E-07	1.839E-07	0.000E+00	1.839E-07	2.966E-08	0.000E+00	2.966E-08
7		-1.0	2.654E-07	5.116E-07	7.770E-07	3.169E-07	3.528E-07	6.697E-07	3.214E-07	9.710E-08	4.185E-07	1.967E-07	0.000E+00	1.967E-07	3.150E-08	0.000E+00	3.150E-08
8		-1.5	2.589E-07	5.440E-07	8.029E-07	3.075E-07	3.893E-07	6.968E-07	3.249E-07	1.174E-07	4.423E-07	2.104E-07	0.000E+00	2.104E-07	3.344E-08	0.000E+00	3.344E-08
9		-2.0	2.509E-07	5.779E-07	8.288E-07	2.933E-07	4.303E-07	7.236E-07	3.251E-07	1.413E-07	4.664E-07	2.250E-07	0.000E+00	2.250E-07	3.551E-08	0.000E+00	3.551E-08
10		-2.5	2.399E-07	6.146E-07	8.545E-07	2.724E-07	4.773E-07	7.497E-07	3.208E-07	1.700E-07	4.908E-07	2.406E-07	0.000E+00	2.406E-07	3.769E-08	0.000E+00	3.769E-08
11		-3.0	2.250E-07	6.547E-07	8.797E-07	2.505E-07	5.241E-07	7.746E-07	3.118E-07	2.031E-07	5.149E-07	2.509E-07	6.300E-09	2.572E-07	4.000E-08	0.000E+00	4.000E-08
12		-3.5	2.073E-07	6.969E-07	9.042E-07	2.263E-07	5.721E-07	7.984E-07	2.935E-07	2.449E-07	5.384E-07	2.531E-07	2.130E-08	2.744E-07	4.244E-08	0.000E+00	4.244E-08
13		-4.0	1.850E-07	7.426E-07	9.276E-07	2.005E-07	6.202E-07	8.207E-07	2.676E-07	2.932E-07	5.608E-07	2.473E-07	4.430E-08	2.916E-07	4.503E-08	0.000E+00	4.503E-08
14		-4.5	1.595E-07	7.903E-07	9.498E-07	1.705E-07	6.710E-07	8.415E-07	2.303E-07	3.509E-07	5.812E-07	2.331E-07	7.520E-08	3.083E-07	4.776E-08	0.000E+00	4.776E-08
15		-5.0	1.300E-07	8.404E-07	9.704E-07	1.380E-07	7.222E-07	8.602E-07	1.808E-07	4.182E-07	5.990E-07	2.077E-07	1.161E-07	3.238E-07	5.066E-08	0.000E+00	5.066E-08
16		-5.5	9.845E-08	8.906E-07	9.890E-07	1.041E-07	7.727E-07	8.768E-07	1.267E-07	4.864E-07	6.131E-07	1.702E-07	1.670E-07	3.372E-07	5.371E-08	0.000E+00	5.371E-08
17		-6.0	6.474E-08	9.403E-07	1.005E-06	6.868E-08	8.222E-07	8.909E-07	8.210E-08	5.414E-07	6.235E-07	1.204E-07	2.271E-07	3.475E-07	5.694E-08	0.000E+00	5.694E-08
18		-6.5	3.343E-08	9.856E-07	1.019E-06	3.619E-08	8.662E-07	9.024E-07	4.439E-08	5.861E-07	6.305E-07	6.169E-08	2.921E-07	3.538E-07	5.980E-08	5.600E-10	6.036E-08
19		-7.0	8.129E-09	1.023E-06	1.031E-06	1.002E-08	9.015E-07	9.115E-07	1.527E-08	6.194E-07	6.347E-07	2.303E-08	3.326E-07	3.556E-07	4.078E-08	2.270E-08	6.348E-08
20		-7.5	8.873E-32	1.041E-06	1.041E-06	8.637E-32	9.187E-07	9.187E-07	2.281E-10	6.363E-07	6.365E-07	2.551E-09	3.518E-07	3.544E-07	1.410E-08	5.049E-08	6.459E-08
21		-8.0	9.010E-32	1.051E-06	1.051E-06	8.767E-32	9.255E-07	9.255E-07	8.111E-32	6.374E-07	6.374E-07	7.210E-32	3.518E-07	3.518E-07	4.272E-10	6.294E-08	6.337E-08
22		-8.5	9.150E-32	1.061E-06	1.061E-06	8.900E-32	9.323E-07	9.323E-07	8.224E-32	6.382E-07	6.382E-07	7.299E-32	3.489E-07	3.489E-07	5.365E-32	6.132E-08	6.132E-08
23		-9.0	9.294E-32	1.071E-06	1.071E-06	9.036E-32	9.391E-07	9.391E-07	8.340E-32	6.389E-07	6.389E-07	7.390E-32	3.459E-07	3.459E-07	5.413E-32	5.924E-08	5.924E-08
24		-9.5	9.440E-32	1.081E-06	1.081E-06	9.174E-32	9.460E-07	9.460E-07	8.458E-32	6.395E-07	6.395E-07	7.482E-32	3.428E-07	3.428E-07	5.462E-32	5.719E-08	5.719E-08
25		-10.0	9.560E-32	1.089E-06	1.089E-06	9.287E-32	9.515E-07	9.515E-07	8.553E-32	6.398E-07	6.398E-07	7.557E-32	3.403E-07	3.403E-07	5.501E-32	5.555E-08	5.555E-08

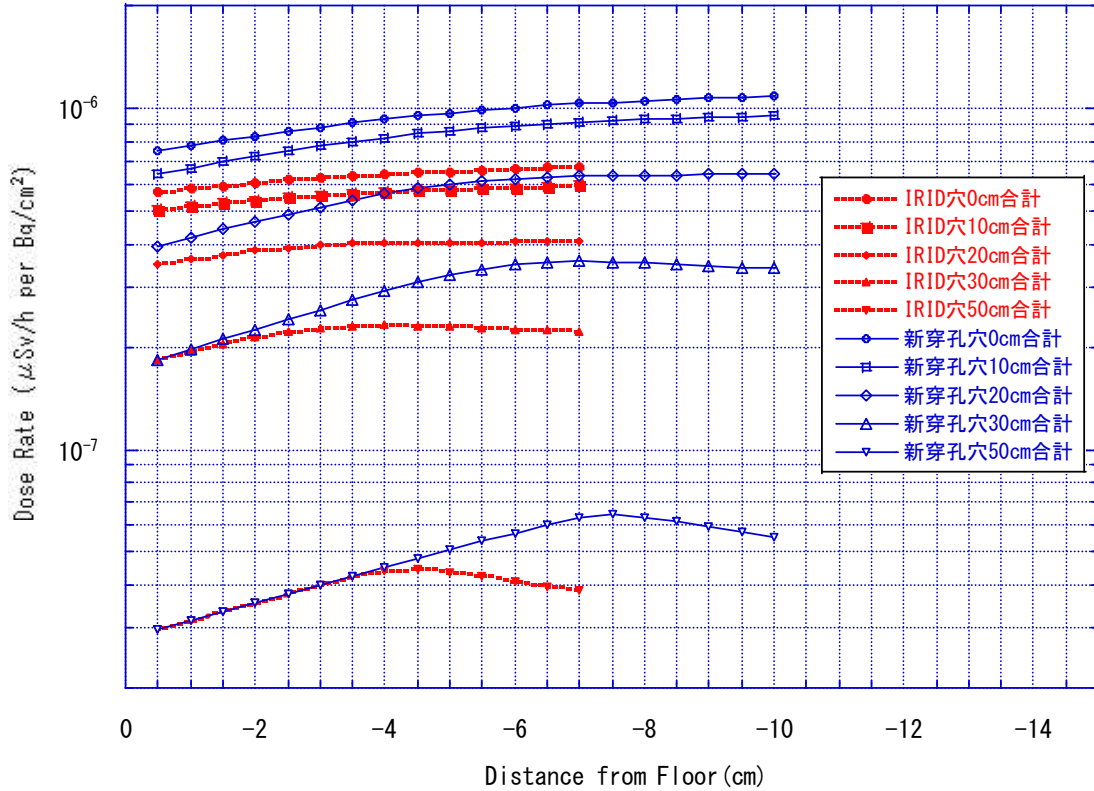


図2 高汚染部からの距離による穴内線量率分布の変化（合計）

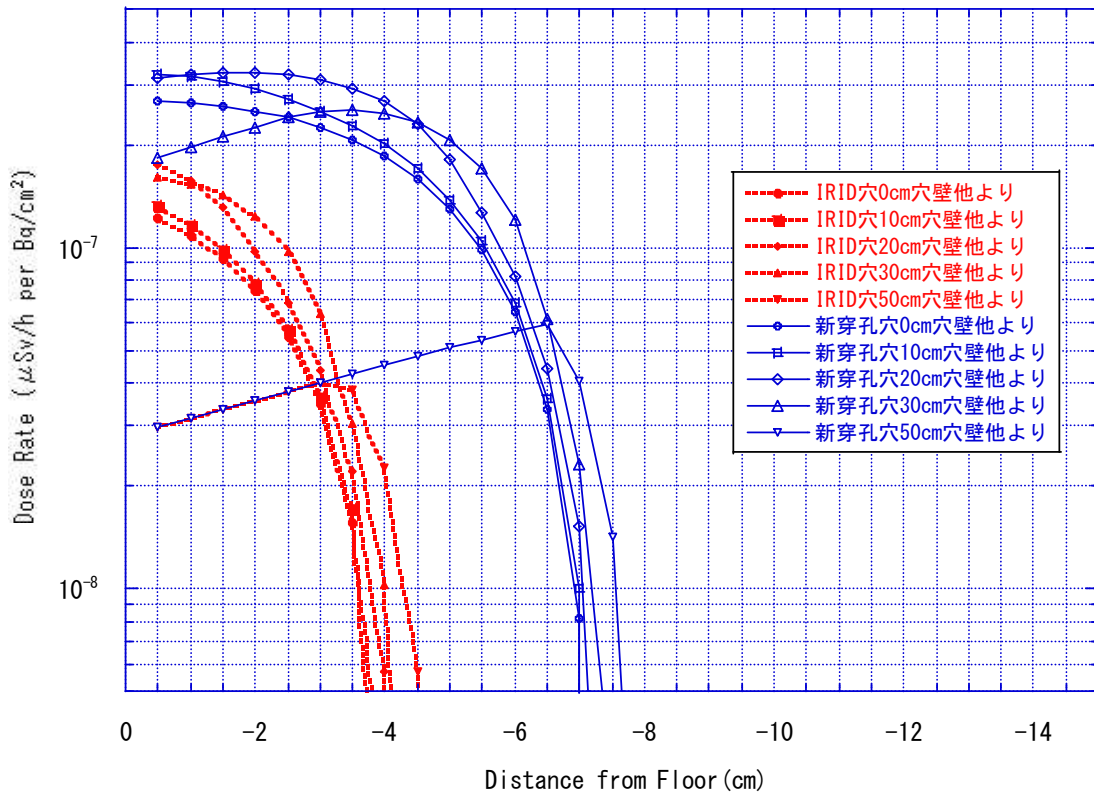


図3 高汚染部からの距離による穴内線量率分布の変化（穴壁等より）

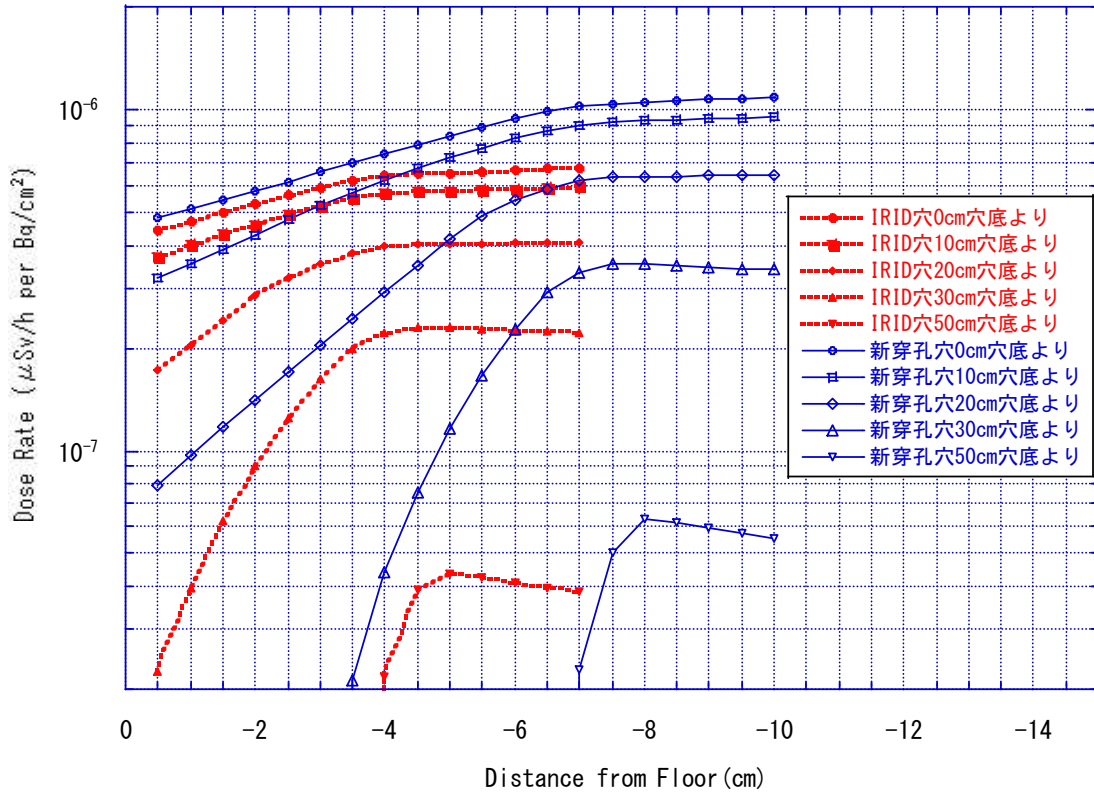


図4 高汚染部からの距離による穴内線量率分布の変化（穴底より）

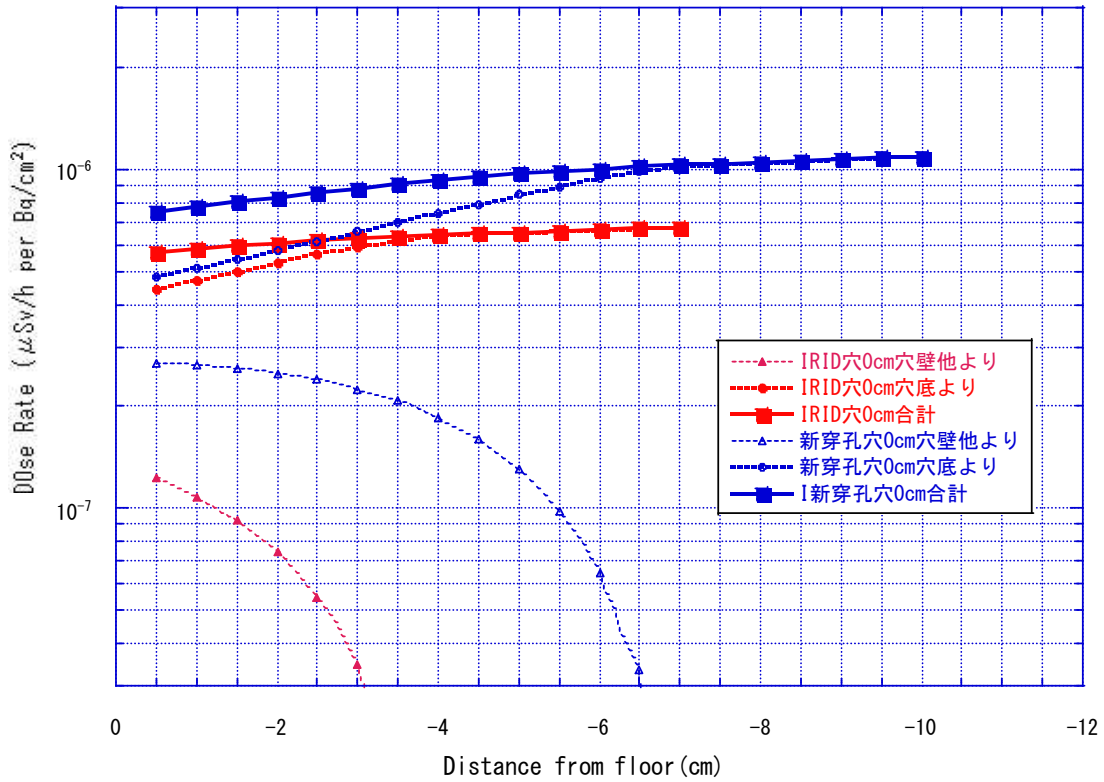


図5 位置 0cm(高汚染部中心)での穴内線量率分布

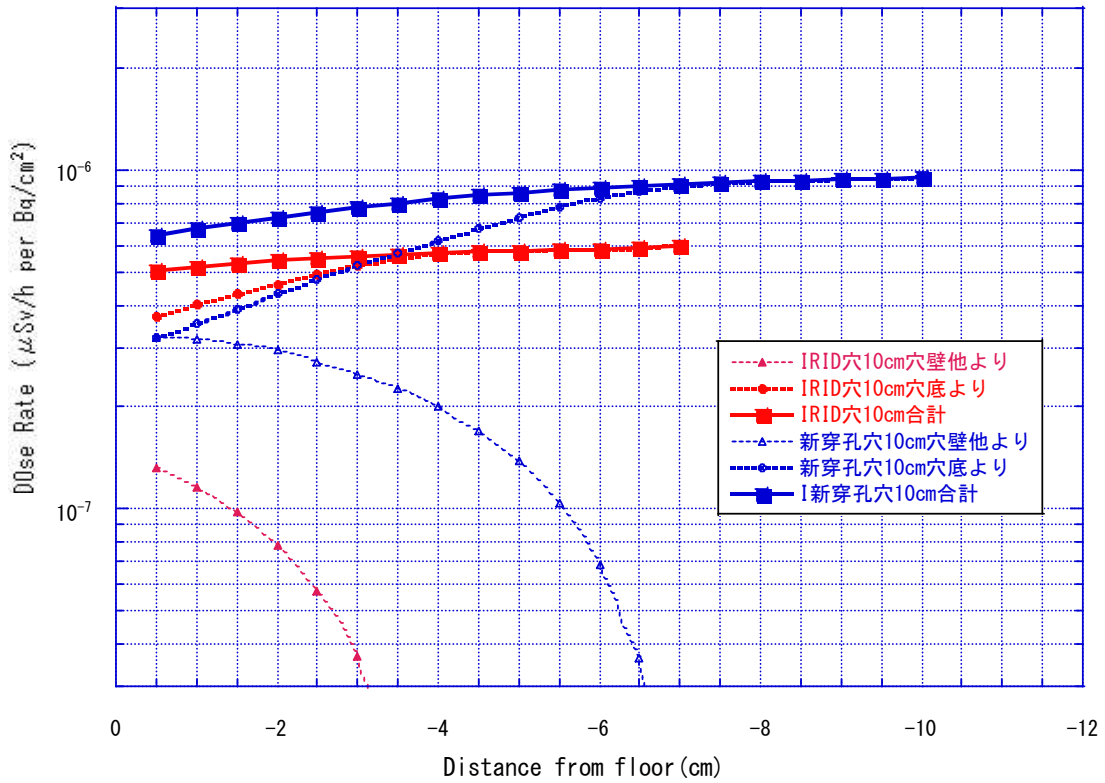


図6 位置 10cm(高汚染部端)での穴内線量率分布

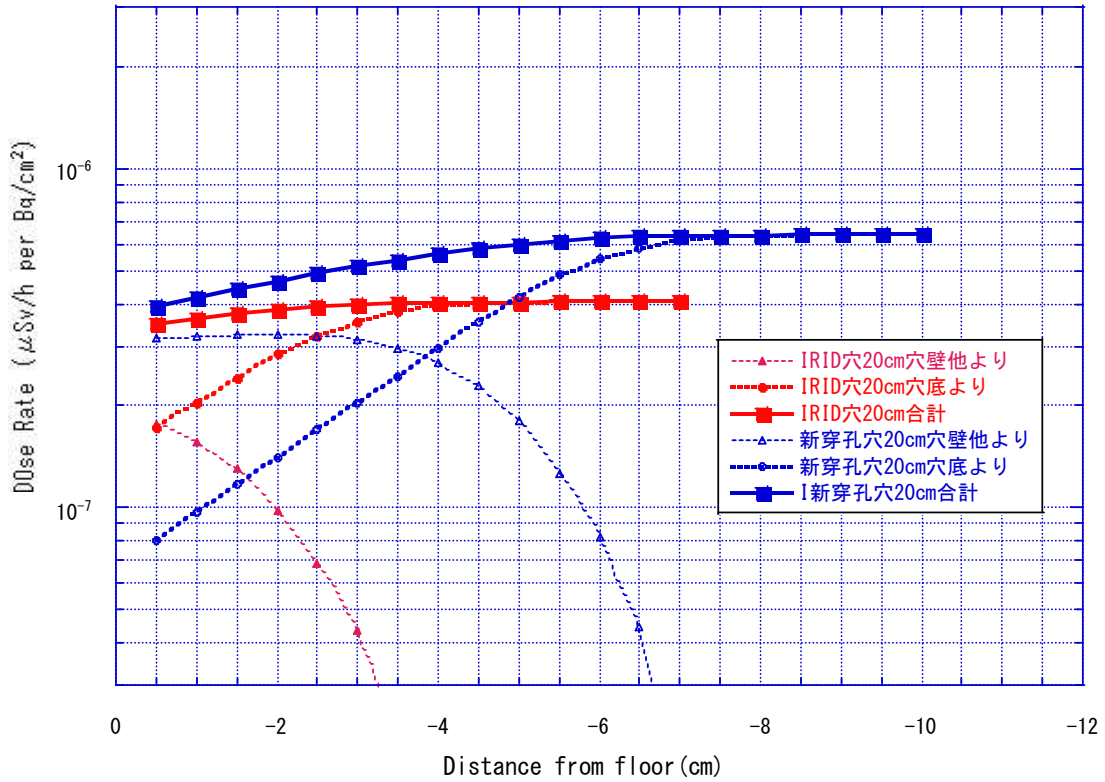


図7 位置 20cm(高汚染部端から 10cm)での穴内線量率分布

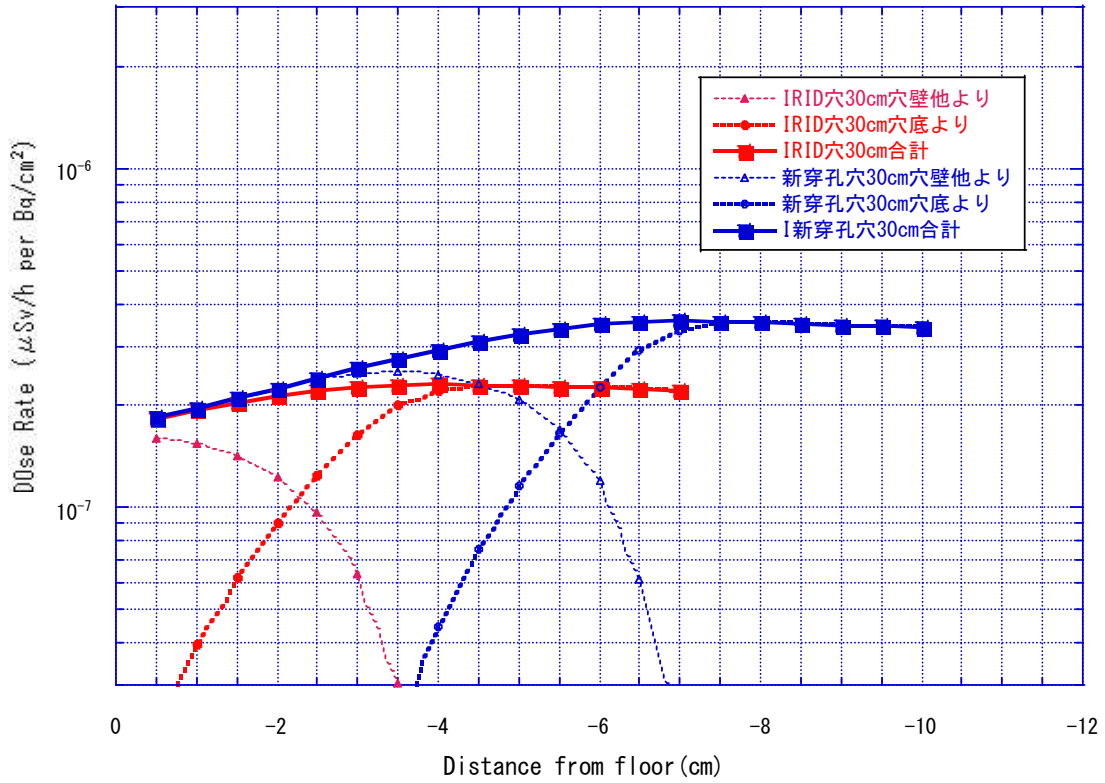


図8 位置 30cm(高汚染部端から 20cm)での穴内線量率分布

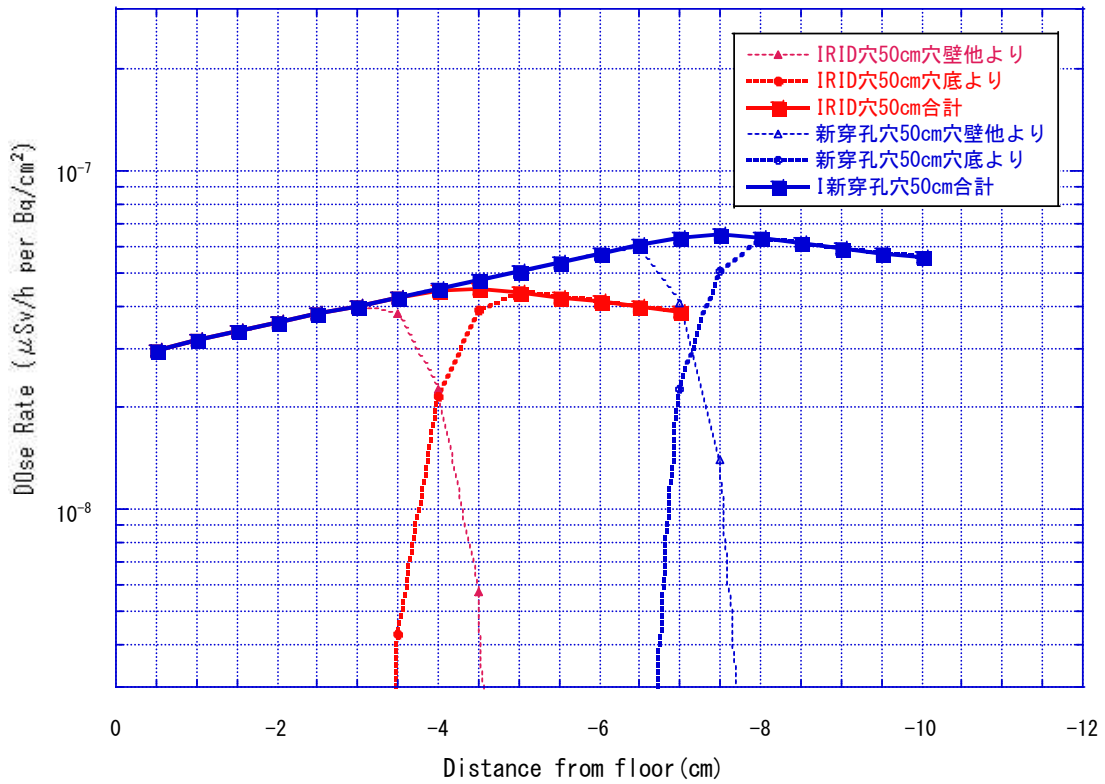


図9 位置 50cm(高汚染部端から 40cm)での穴内線量率分布

【添付資料】

2号機シールドプラグトップカバーの表面線量率測定での 近距離での測定値の違いの考察

1. はじめに

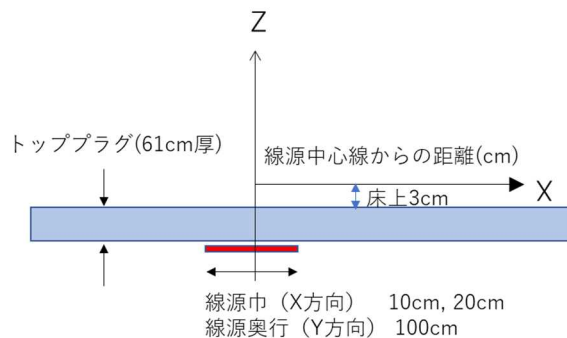
2号機シールドプラグ上層の表面線量率測定が日立アロカ製のPDR-303、Atomtex社製のAT-2533、Polimasterなどで行われた。時期も多少異なりまた遠隔操作のため必ずしも同じ位置では測定できていないが、ほぼ同様の位置（20～30cm程度のずれがあったとしてもそれ以上離れていない位置）での測定値が異なる原因については、測定器の違いによるものではないことが同じ位置の測定結果を比較した結果判っている（別添3-2-3参考2参照）。

また、今までの2号機シールドプラグ床上測定線量率分布（別添3-2-5-7参照）から、シールドプラグ上層下面の汚染分布にはかなりの偏在があることも判ってきている。床上3cmでの線量率測定ではシールドプラグ上層下の直径1m程度の汚染の情報が反映されており、今までは汚染はその中で一様と仮定していた。しかし上層、中間層、下層のそれぞれ3分割されている継ぎ目を通じて汚染した蒸気が出てきたと考え、直径1mの範囲でも均一ではない可能性も見えてきている。その偏在している汚染により、20～30cm程度のずれで線量率がどの程度変わる可能性があるかを検討した。

2. 偏在汚染からの表面線量率の分布

偏在している汚染に対して表面線量率分布を検討する。シールドプラグ上層下面の線源の大きさは幅10cm及び20cm、奥行き100cmの矩形とし、床上3cmでの線量率分布をQAD-CGGP2R¹)を使用し求めた。計算モデルを第1図に示す。

シールドプラグ上層は厚さ61cmのコンクリート（ $\rho=2.1\text{g/cm}^3$ ）とし、線源は $\text{Cs}^{137}1\text{Bq/cm}^2 + \text{Cs}^{134}0.044\text{Bq/cm}^2$ とした。



第1図 計算モデル

線源中心上の床上3cmの線量率で規格化した相対線量率分布を第2図に示す。

第2図のグラフ左下に線源範囲を参考のため示した。

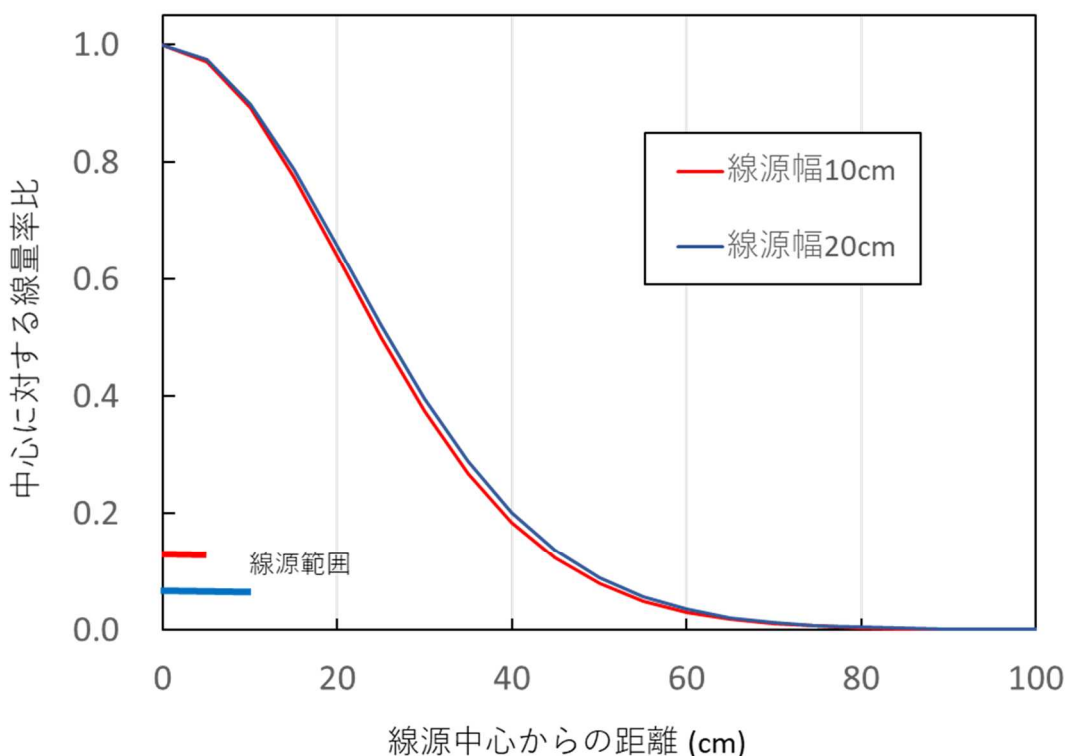
線源が幅10cmの場合は、中心から5cm位置までの計算点までの直下には線源が存在する。線源

端の 5cm 位置の線量率は、そこから 20cm 離れた 25cm 位置より 1.9 倍高く、また 30cm 離れた 35cm 位置より 3.6 倍高い。

線源が幅 20cm の場合は、中心から 10cm 位置までの計算点までの直下には線源が存在する。線源端の 10cm 位置の線量率は、そこから 20cm 離れた 30cm 位置より 2.3 倍高く、また 30cm 離れた 40cm 位置より 4.5 倍高い。

これを纏めると、線源端に対応する位置とそこから 20cm 離れた位置との倍率は 1.9~2.3 倍となる。また線源端に対応する位置とそこから 30cm 離れた位置との倍率は 3.6~4.5 倍となることが判った

なおさらに離れた 1 m 位置での結果を見ると、2 号機シールドプラグ床上測定線量率分布（別添 3-2-5-7 参照）の PDR-303 による測定点はそれぞれ 1m 以上離れているためお互いの影響はほとんどないこともこの図から判る。



第 2 図 矩形線源からの床上での線量率分布

3. 鉄筋の影響

床上での表面線量率は直下の鉄筋と測定点の位置関係により少し影響を受けている。鉄筋影響評価（別添 3-2-5-8 参照）により、上側鉄筋のうち東西鉄筋と南北鉄筋の重なりの上部の線量率は最も低くなり鉄筋が直下に無い場合はその 8%程度高くなることわかっている。

また鉄筋影響評価（別添 3 - 2 - 5 - 8 参照）により、同様に穿孔穴の東西南北の床上 1.5cm の測定点では鉄筋との位置関係により少し影響を受けており、10%程度違いが出ることがわかっている。

4. まとめ

偏在汚染からの表面線量率の分布と鉄筋の影響の組合せを勘案すると、20cm 離れて最大 2.7 倍程度、30cm 離れて最大 5.3 倍程度、が観測される可能性があることがわかった。

5. 参考資料

- 1) QAD-CGGP2 AND G33-GP2 : REVISED VERSION OF QAD-CGGP AND G33-GP2, JAERI-M 90-110, June 1990

(別添 3-2-5-7)

2号機シールドプラグ床上測定線量率分布図の改訂

原子力規制庁原子力規制部

東京電力福島第一原子力発電所事故対策室

林 克己、平山 英夫

1. はじめに

2号機シールドプラグの表面線量率分布の測定結果¹⁾(図1)を見ると、シールドプラグ上層の継ぎ目の測定点(8点)全てが、1m程度しか離れていない継ぎ目以外の測定点と比べて2~10倍線量率が高い。この原因はシールドプラグの継ぎ目からのストリーミングと考えられたため、表面線量率分布図やこれを元にしたシールドプラグ上層と中間層の間の汚染密度の検討にはこれらの測定値を除いて検討を進めていたが、今回あらためてシールドプラグの継ぎ目からの寄与について検討した結果、シールドプラグ継ぎ目からのストリーミングとシールドプラグの継ぎ目の内面の汚染による寄与は大きくなく、シールドプラグの継ぎ目がないときのシールドプラグ上層と中間層の間の汚染からの線量率寄与が主であることが分かった(別添3-2-5-3参照)ため、図1の改訂を行なった。

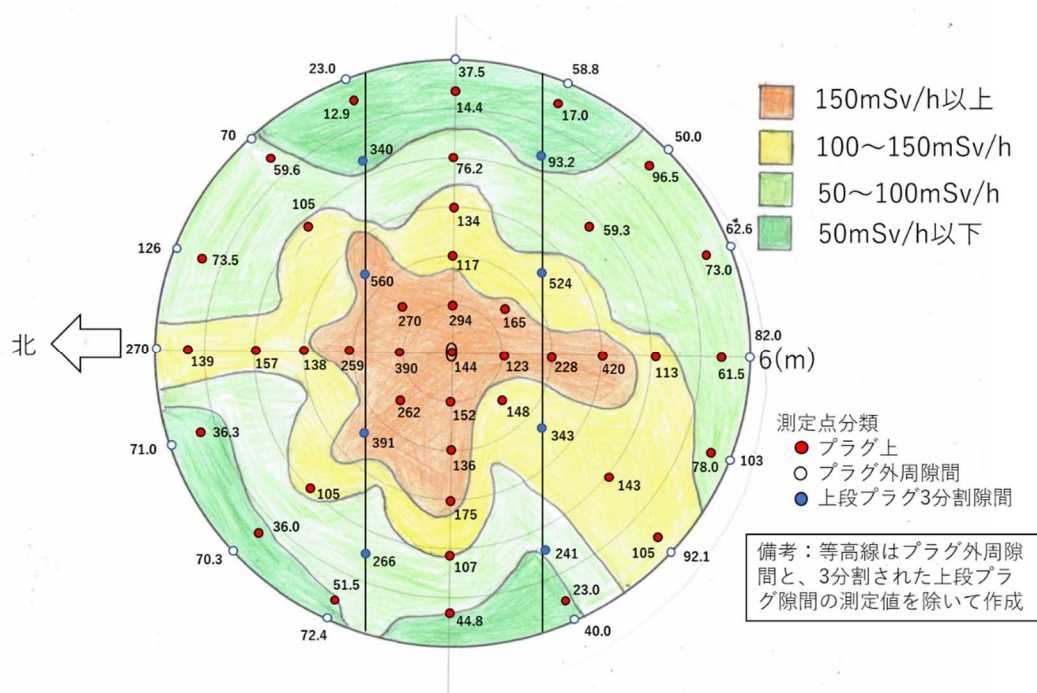


図1 2号機シールドプラグの表面線量率分布の測定結果

2. 床上表面線量率分布図の改訂の考え方

以下の考え方で改訂を行なった。

(1) 測定値を内挿した分布図は作成しない

日立アロカ製 PDR-303 で測定されたシールドプラグ上層上面の 64 点の測定値は全て使うが、それを内挿した分布図は作成しない。床上 3cm の測定ではシールドプラグ上層と中間層の間のほぼ直径 1m[†]だけの汚染の情報を反映しているので、測定点（64 点）だけで内挿して全体の分布図を作成しても離れた測定点間の信頼性は無いこと、それにより誤った理解を引き起こすためである。

† EGS5 による解析結果によって直下の直径 1m だけで 90%の寄与があることが判っている。

(2) 日立アロカ製 PDR-303 以外で測定された測定値の扱い

シールドプラグ上層上面から高さ 1.5cm の測定では穿孔した穴の脇（東西南北）で Atomtex 社製の AT-2533 の測定結果がある。同じ位置で AT-2533 と PDR-303 を使って測定した結果の比較では、得られた周辺線量当量率に大きな違いがないことが確認されている。しかし、AT-2533 での穿孔した穴の脇（東西南北）と PDR-303 での床面測定では測定位置が近いものが多いため、また穴の影響も多少あることから採用しないこととした。

(3) シールドプラグ上層と中間層の間の汚染分布図とシールドプラグ上層と中間層の間の総汚染量

シールドプラグ上層と中間層の間の汚染分布図をシールドプラグ上層上面の周辺線量当量率分布図を元に作成していたが、シールドプラグ上層上面の周辺線量当量率分布図と同じ理由で作成しないこととした。また情報の無い領域の内挿によるシールドプラグ上層と中間層の間の総汚染量の算定も信頼性が無いため行わないこととした。

3. シールドプラグ上層上面の測定線量率分布図

改訂したシールドプラグ上層上面の測定線量率分布図を図 2 に示す。

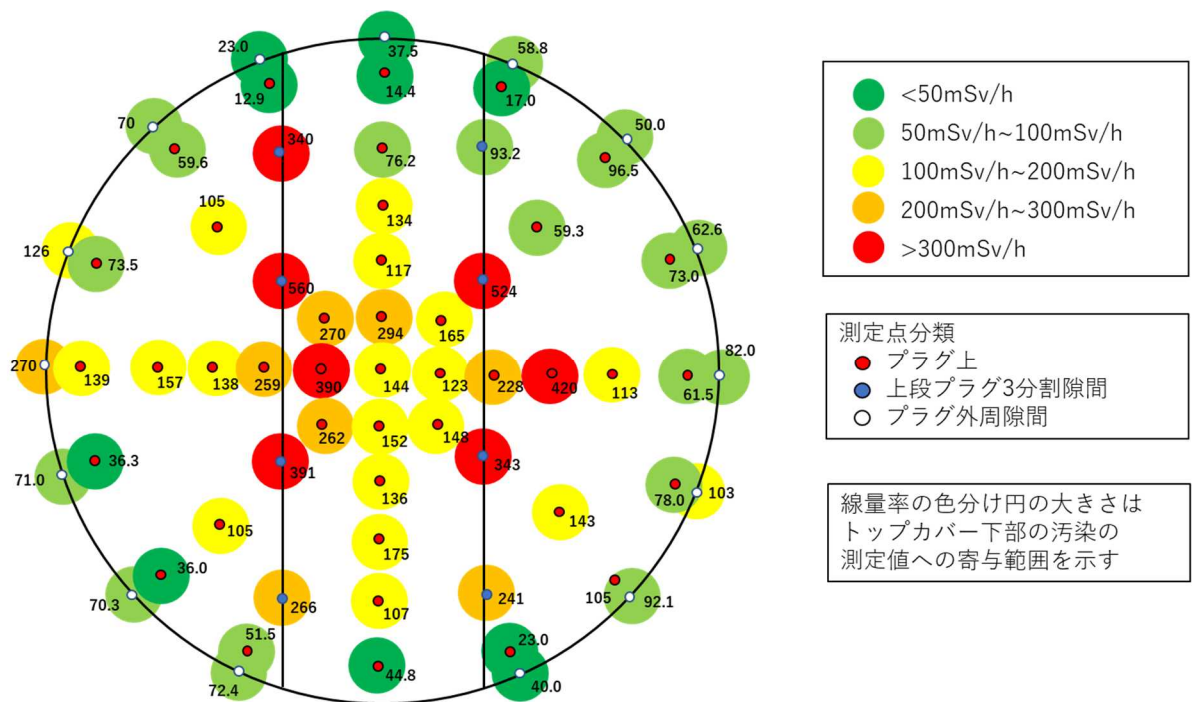


図2 2号機シールドプラグ上層上面の周辺線量当量率分布の測定結果（改訂）

図3にシールドプラグの構造を示す。上層、中間層、下層の3層構造（各層の厚さ61cm）で、各層は3分割（中央パーツ及び2つの側部パーツ）されており、各層の継ぎ目が90度で交差するように設置されている。

今回は継ぎ目の測定点も採用したことにより、汚染分布としてはシールドプラグ上層の東西方向の継ぎ目の周辺線量当量率が高いこと、その中でも中間層の南北方向の継ぎ目との交点が特に高いことが判りやすくなった。

なお、周辺線量当量率の色分け円の直径は1mとして、シールドプラグ上層と中間層の間の汚染の寄与範囲を示した。これにより、測定点（64点）だけではシールドプラグ面積の半分以上の汚染が反映されていないこと、また汚染の高い継ぎ目付近の測定点数がシールドプラグ中心付近の測定点数に比べて少ないため、この情報から汚染分布の作成や汚染総量を算定するのは大きな誤りを生むことも想定できる。

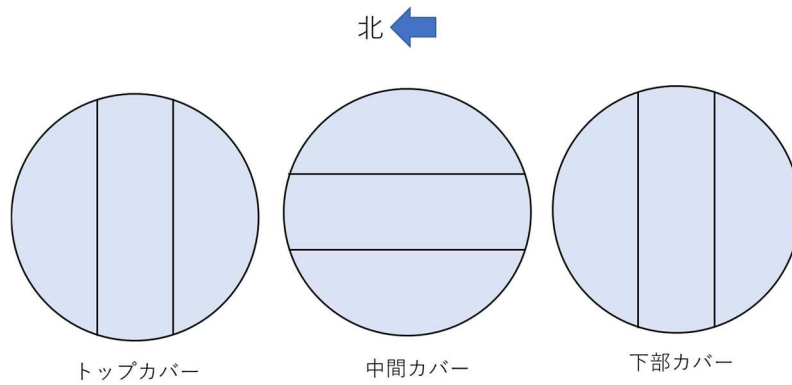


図3 2号機シールドプラグの構造

4. 参考文献

- 1) 第23回東京電力福島第一原子力発電所における事故の分析に係る検討会
資料3-1 現地調査の実施状況について P12、2021年10月19日

(別添 3 - 2 - 5 - 8)

2号機シールドプラグ上層と中間層の間の汚染密度を評価する場合の 鉄筋の影響について

原子力規制庁原子力規制部

東京電力福島第一原子力発電所事故対策室

林 克己、平山英夫

1. はじめに

2号機シールドプラグの上方 1.5m、30.5cm、3cm や穴の中での測定値を使って、シールドプラグ上層と中間層の間の汚染密度の評価を進めている。これまでシールドプラグ上層は厚さ 61cm のコンクリート（密度 2.1g/cm^3 ）としてその評価を進めていたが、この評価に影響する鉄筋について考察した。

2. シールドプラグ上層の鉄筋配置と鉄筋の効果の考え方

シールドプラグ上層の鉄筋は上側と下側にそれぞれコンクリート表面からコンクリートかぶり厚 10 cm の内側に配置されている。上側鉄筋は呼び径 D25 (異形鉄筋のリブとフシを除いた部分の公称直径は 25.4mm) であり、東西方向の鉄筋は 15 cm 間隔で、南北方向は 20 cm 間隔、下側鉄筋は呼び径 D32 (公称直径は 31.8mm) であり、東西方向の鉄筋は 20 cm 間隔で、南北方向は 20 cm 間隔となっている。

鉄筋はコンクリートより遮蔽効果が大きいので線量率に影響するが、その影響の大きさは測定位置により依存する。

床上 150cm での測定では、充分広い範囲となるため鉄筋の効果の位置依存性は現れないと思われるが、床上 30 cm、床上 3cm と近づくと、鉄筋との位置関係に依存する可能性もある。また、穴の中の測定ではコンクリートかぶりがなく鉄筋に近いので、直下の鉄筋の影響が強く表れる可能性が高い。そこで床上と穴の中についてそれぞれ鉄筋の効果の評価した。

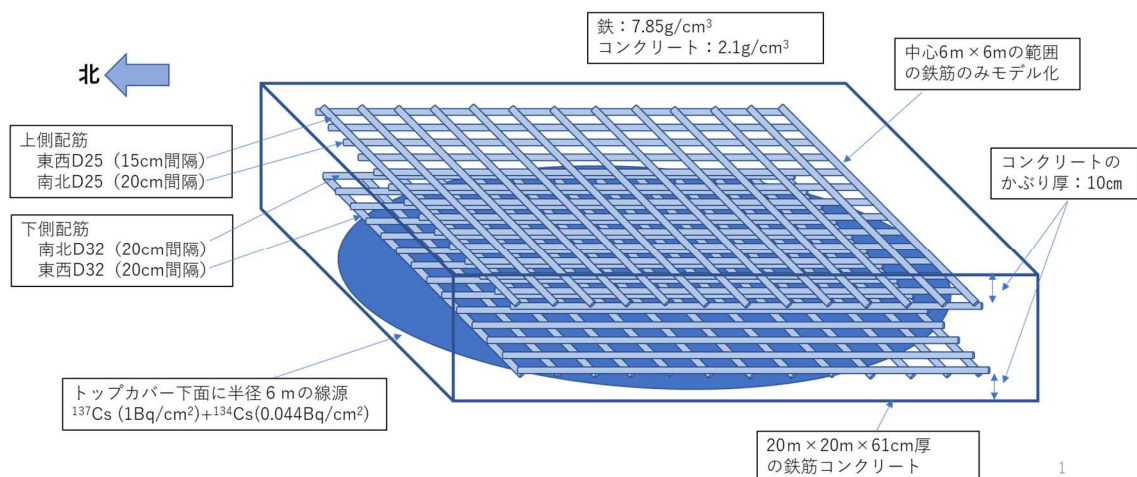


図1 2号機シールドプラグ上層の鉄筋モデル

3. 床上の測定点での鉄筋の効果

図1に2号機シールドプラグ上層の鉄筋モデルを示す。

シールドプラグ上層と中間層の間に半径6mの線源 (^{137}Cs (1Bq/cm²) + ^{134}Cs (0.044Bq/cm²)) を設定した。なお、床上30.5cmの測定だけはコリメータ付線量計であるので、計算ではコリメータで制限される範囲(床面で直径30cm範囲)に対応する線源として、シールドプラグ上層と中間層の間に半径45cmの線源を設定した。この方法を使うために床上30.5cmの解析は線源と計算点の位置関係は固定して全部の鉄筋を必要な位置にずらすという方法を取った。

図2に計算点平面図を示す。計算点に近い上側鉄筋の影響が主と考えられるのでこれを基準として、Aは東西鉄筋及び南北鉄筋の間、Bは東西鉄筋の真上、Cは南北鉄筋の真上、Dは東西及び南北鉄筋の交差部の真上に設定し、A~D位置でのそれぞれ床上高さ150cm、30.5cm、3cmの線量当量率をQAD-CGGP2Rを使用して求めた。

これと比較するために配筋を入れず61cm厚さのコンクリート(密度2.1g/cm³)としたときの計算も行い、この計算結果との比で鉄筋の影響を求めた。

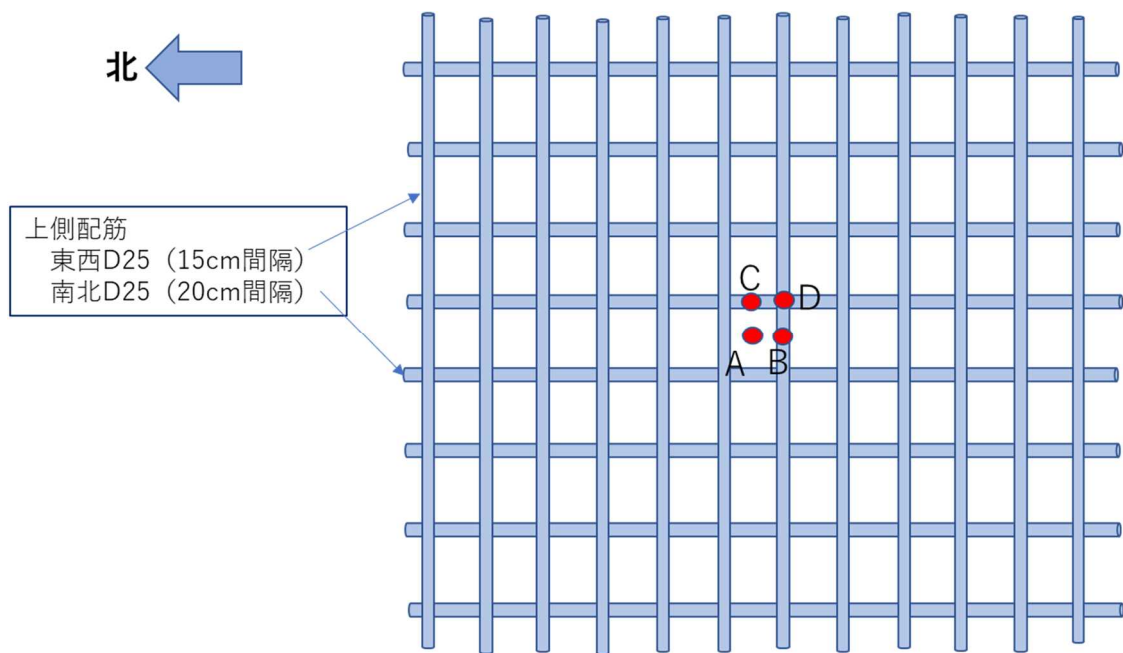


図2 床上での鉄筋効果の計算点

計算結果を表1に示す。

床上 3cm での鉄筋有無の線量率比は、0.68~0.74 となっており、鉄筋が無い位置より鉄筋の真上や鉄筋の重なった真上は鉄筋の効果が大きくなっている。線量率からシールドプラグ上層と中間層の間の汚染密度を換算して求めるときは、鉄筋の考慮により 35~47%多くなることになる。

床上 30.5cm での鉄筋有無の線量率比は、0.69~0.72 となっており、床上距離が大きくなるため鉄筋位置による違いは少なくなる。A、B位置よりC、D位置がわずかだが線量率が大きくなっている。これはコリメータ付線量計が床面の直径 30cm の円内だけ計測していることに起因しており、円内に入る上側鉄筋の面積とコンクリートの面積の割合（図3参照）は、鉄筋間隔の関係で、A、B位置よりC、D位置が少なくなることが原因と考えられる。実際には上側鉄筋ほどではないが下側鉄筋も少し効いていると思われる。線量率からシールドプラグ上層と中間層の間の汚染密度を換算して求めるときは、鉄筋の考慮により 40~44%多くなることになる。

床上 150cm での鉄筋有無の線量率比は、0.69~0.70 となっており、ほぼ鉄筋位置による違いはない。線量率からシールドプラグ上層と中間層の間の汚染密度を換算して求めるときは、鉄筋の考慮により 44%多くなることになる。

表 1 床上での鉄筋効果の計算結果

モデル	位置	A	B	C	D
①【鉄筋コンクリートモデルでの線量率】 鉄筋($\rho=7.85$)・コンクリート($\rho=2.1$) ($\mu\text{Sv/h per Bq/cm}^2$)	床上3cm	9.006E-07	8.659E-07	8.627E-07	8.307E-07
	床上30.5cm	5.451E-07	5.428E-07	5.629E-07	5.633E-07
	床上150cm	8.372E-07	8.340E-07	8.375E-07	8.368E-07
②【コンクリートモデルでの線量率】 コンクリート($\rho=2.1$) ($\mu\text{Sv/h per Bq/cm}^2$)	床上3cm	1.218E-06	1.218E-06	1.218E-06	1.218E-06
	床上30.5cm	7.864E-07	7.864E-07	7.864E-07	7.864E-07
	床上150cm	1.202E-06	1.202E-06	1.202E-06	1.202E-06
鉄筋有／鉄筋無の線量率比 ①／②	床上3cm	0.74	0.71	0.71	0.68
	床上30.5cm	0.69	0.69	0.72	0.72
	床上150cm	0.70	0.69	0.70	0.70
鉄筋を考慮した場合のトップカバー下面汚染量 増加割合 (%) (②／①-1)×100	床上3cm	35%	41%	41%	47%
	床上30.5cm	44%	45%	40%	40%
	床上150cm	44%	44%	44%	44%

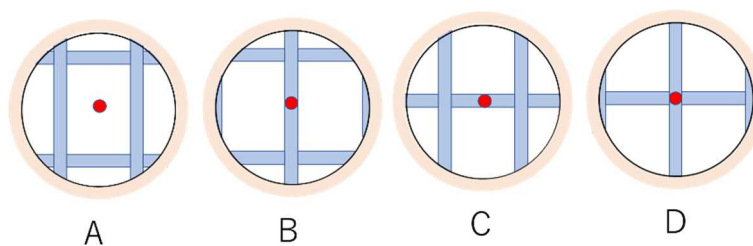


図 3 直径 30cm の視野での上側鉄筋とコンクリートの割合

4. 穴の中および穴の脇の床上 1.5cm での測定点での鉄筋の効果

穴の中については深さ方向とその真上及び東西南北の床上で測定が実施されている。線量率の高い場所なので穴の位置を精度よく測ることができず、また鉄筋の位置は施工誤差もあるため、それぞれの穴と鉄筋の位置関係はわからない。そのため、穴と鉄筋の位置関係の5つのパターンについて、鉄筋の測定値への影響を検討した。

図4に穴と鉄筋の位置関係のパターン①～⑤を示す。黒丸は穴（5cmφ×10cm）の位置を示し、赤丸は測定器センサー位置を示す。上部鉄筋の影響については表2に示すような想定により5つのパターンを選定した。

図5に穴の中の計算点を示す。

表2 選定した配筋パターン

パターン	想定
① 上部鉄筋の間の中心	すべての測定点に影響が少ないと考えられる
② 東西鉄筋の真上	穴の中と東西の床上に影響があると考えられる
③ 東西鉄筋の右側	穴の中と東西北の床上に少し影響があると考えられる
④ 東西南北鉄筋の真上	穴の中と東西南北の床上に大きく影響があると考えられる
⑤ 東西南北鉄筋の内側	穴の中と東西南北の床上に少し影響があると考えられる

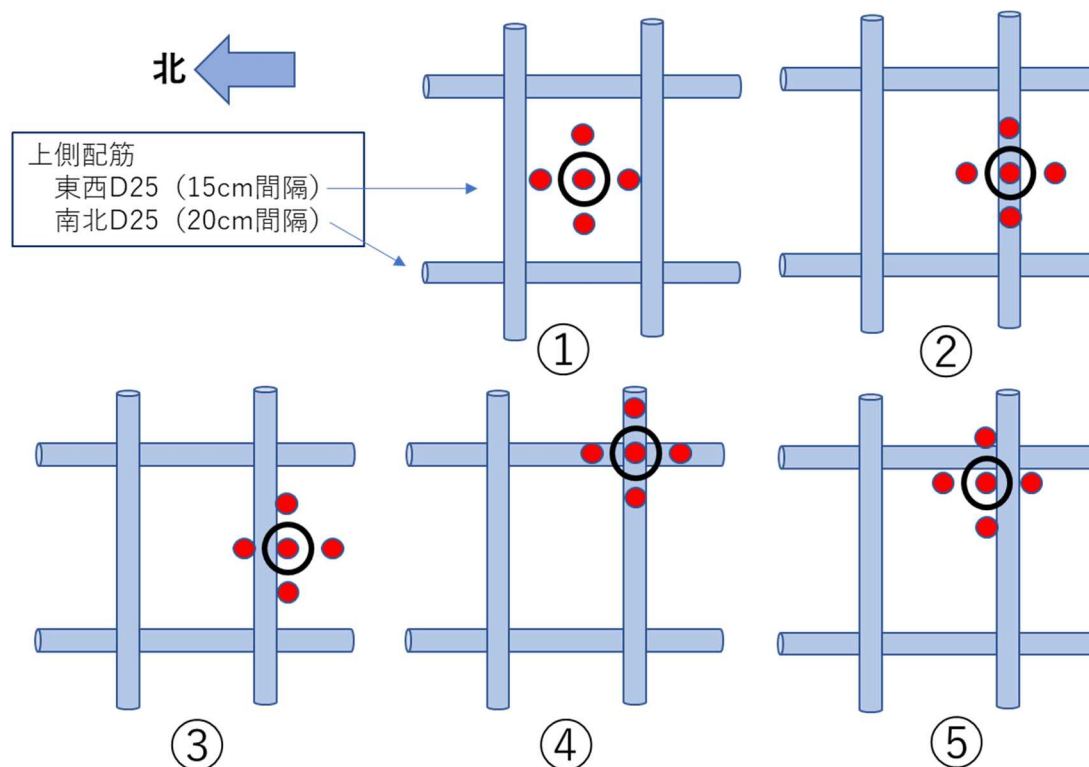
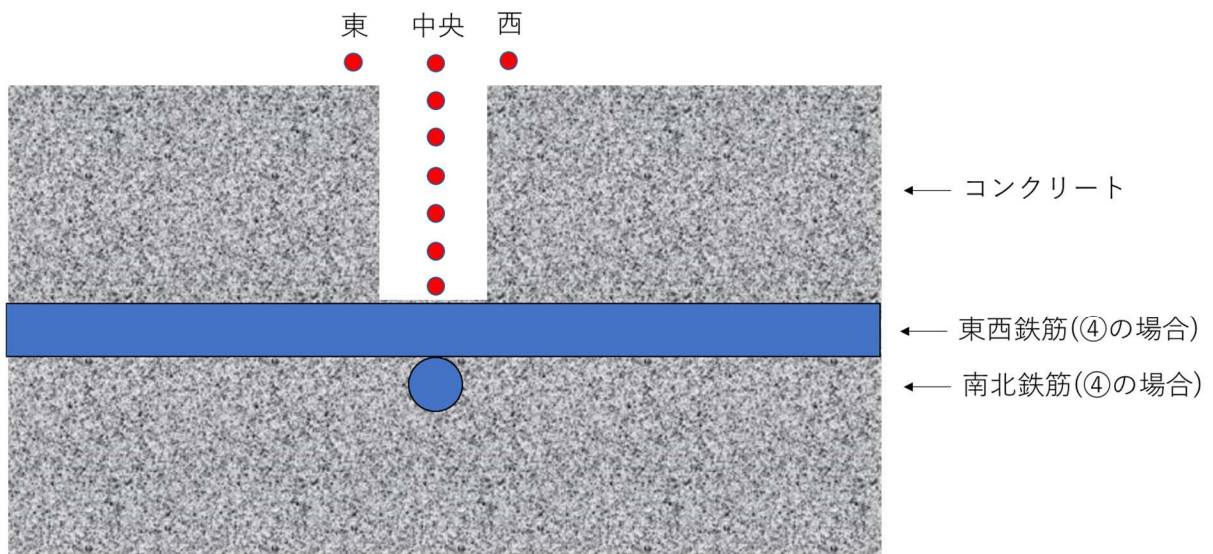


図4 穴と鉄筋の位置関係の5つのパターン



7

図5 穴内および床上の計算点

シールドプラグ上層と中間層の間に半径 6m の線源 (^{137}Cs ($1\text{Bq}/\text{cm}^2$)+ ^{134}Cs ($0.044\text{Bq}/\text{cm}^2$)) を置いたときの、図4に示す①～⑤のパターンでのそれぞれ穴中央と東西南北の床上 1.5cm、および図5に示す穴内深さ 0.5cm、2cm、4cm、6cm、8cm、9.75cm の位置での線量当量率を QAD-CGGP2R を使用して求めた。

これと比較するために配筋を入れず 61 cm厚さのコンクリート (密度 $2.1\text{g}/\text{cm}^3$) としたときの計算も行い、この計算結果との比で鉄筋の影響を求めた。

表3に穴の真上及び東西南北の床上と穴の中深さ方向線量率計算値を示す。

床上高さ 1.5cm の穴の真上はそこから横に 4.5cm 離れた東西南北の線量率を比べると、穴の中心は東西南北に比べて 2 倍程度となるが、同じ穴では東西南北の違いは 10%以下であり、鉄筋の影響は東西南北の大きな違いを生まないことがわかる。

穴の中の深さ方向の分布については、数値を重ねて緑のカラーバーで示した。鉄筋無のモデルでは全く鉄筋がないので穴の底の位置まで、すでに①～⑤の穴の底より線量率が大きくなっている。穴内の分布は①③⑤については鉄筋無の穴内の分布の形に似ているが、②や特に④は直下の鉄筋の影響を強く受けており、穴の底に近づくとも減少している。

表3 穴の真上及び東西南北の床上と穴の中深さ方向線量率計算値

計算点位置			線量率($\mu\text{Sv/h per Bq/cm}^2$)					鉄筋無 モデル
No.	床位置	床上高さ (cm)	穿孔穴の鉄筋との位置関係					
			①	②	③	④	⑤	
1	穿孔穴の中心	1.5	2.225E-06	2.010E-06	2.020E-06	1.834E-06	1.845E-06	2.858E-06
2	穿孔穴の東側	1.5	1.080E-06	9.752E-07	9.770E-07	9.481E-07	9.653E-07	1.454E-06
3	穿孔穴の南側	1.5	1.044E-06	1.045E-06	1.069E-06	9.724E-07	9.442E-07	1.454E-06
4	穿孔穴の西側	1.5	1.062E-06	9.752E-07	9.770E-07	9.455E-07	9.708E-07	1.454E-06
5	穿孔穴の北側	1.5	1.044E-06	1.031E-06	1.057E-06	9.568E-07	9.800E-07	1.454E-06
6	穿孔穴内部	-0.5	2.733E-06	2.407E-06	2.450E-06	2.178E-06	2.208E-06	3.486E-06
7		-2	3.155E-06	2.717E-06	2.809E-06	2.447E-06	2.495E-06	4.010E-06
8		-3.5	3.629E-06	3.000E-06	3.213E-06	2.647E-06	2.790E-06	4.547E-06
9		-4	3.785E-06	3.082E-06	3.338E-06	2.696E-06	2.892E-06	4.721E-06
10		-4.5	3.940E-06	3.148E-06	3.455E-06	2.726E-06	2.995E-06	4.886E-06
11		-6	4.296E-06	3.212E-06	3.799E-06	2.671E-06	3.251E-06	5.294E-06
12		-8	4.483E-06	2.747E-06	4.141E-06	2.121E-06	3.588E-06	5.495E-06
13		-9.75	4.487E-06	1.964E-06	4.398E-06	1.313E-06	3.938E-06	5.499E-06

表4に鉄筋が無いモデルとの各位置での線量率の比を示す。

床上 1.5cm での穴中央と東西南北位置での鉄筋有無の線量率比は、0.64~0.78 となっており、「3. 床上の測定点での鉄筋の効果」での床上 3cm の線量率比と同程度であった。

穴の内部では穴と鉄筋位置の①~⑤のパターンにより異なる。①では 0.78~0.82 となり、穴の底に近づくにつれ少しだけ比が大きくなる。③は 0.70~0.80、⑤は 0.63~0.65、底は 0.72 となる。①③⑤の順に鉄筋の影響が大きくなってきていることがわかる。これらに比べ②と④は穴深さ 4cm より深くなると比が小さくなっていき、底では②が 0.36、④が 0.24 となる。

表4 鉄筋が無いモデルとの各位置での線量率の比

計算点位置			鉄筋有／鉄筋無の線量率比				
No.	床位置	床上高さ (cm)	穿孔穴の鉄筋との位置関係				
			①	②	③	④	⑤
1	穿孔穴の中心	1.5	0.78	0.70	0.71	0.64	0.65
2	穿孔穴の東側	1.5	0.74	0.67	0.67	0.65	0.66
3	穿孔穴の南側	1.5	0.72	0.72	0.74	0.67	0.65
4	穿孔穴の西側	1.5	0.73	0.67	0.67	0.65	0.67
5	穿孔穴の北側	1.5	0.72	0.71	0.73	0.66	0.67
6	穿孔穴内部	-0.5	0.78	0.69	0.70	0.62	0.63
7		-2	0.79	0.68	0.70	0.61	0.62
8		-3.5	0.80	0.66	0.71	0.58	0.61
9		-4	0.80	0.65	0.71	0.57	0.61
10		-4.5	0.81	0.64	0.71	0.56	0.61
11		-6	0.81	0.61	0.72	0.50	0.61
12		-8	0.82	0.50	0.75	0.39	0.65
13		-9.75	0.82	0.36	0.80	0.24	0.72

表5にシールドプラグ上層と中間層の間の推定に鉄筋効果を入れた場合の汚染密度増加を示す。

線量率からシールドプラグ上層と中間層の間の汚染密度を換算して求めるときは、床上1.5cmの穴中央の測定値を使うときは、鉄筋の考慮により28～55%多くなることになる。また、床上1.5cmの東西南北の測定値を使うときは、鉄筋の考慮により35～54%多くなることになる。

穴内部の測定値を使うときは、鉄筋の考慮により23～319%多くなることになる。鉄筋と穴の正確な位置関係が判らないのでこの幅を縮めることはできない。そこで、測定値としては鉄筋の効果が大きく出ない浅い場所での測定値を利用するのがよいと考えられる。

表5 シールドプラグ上層と中間層の間の推定に鉄筋効果を入れた場合の
汚染密度増加

計算点位置			トップカバー下面の推定に鉄筋効果を入れた場合の汚染密度増加				
No.	床位置	床上高さ (cm)	穿孔穴の鉄筋との位置関係				
			①	②	③	④	⑤
1	穿孔穴の中心	1.5	28%	42%	41%	56%	55%
2	穿孔穴の東側	1.5	35%	49%	49%	53%	51%
3	穿孔穴の南側	1.5	39%	39%	36%	49%	54%
4	穿孔穴の西側	1.5	37%	49%	49%	54%	50%
5	穿孔穴の北側	1.5	39%	41%	38%	52%	48%
6	穿孔穴内部	-0.5	28%	45%	42%	60%	58%
7		-2	27%	48%	43%	64%	61%
8		-3.5	25%	52%	42%	72%	63%
9		-4	25%	53%	41%	75%	63%
10		-4.5	24%	55%	41%	79%	63%
11		-6	23%	65%	39%	98%	63%
12		-8	23%	100%	33%	159%	53%
13		-9.75	23%	180%	25%	319%	40%

5. まとめ

鉄筋の影響について検討した結果、床面より上の測定では線量率は0.64~0.78倍に下がり、線量率からシールドプラグ上層と中間層の間の汚染密度を換算して求めるときは、鉄筋の考慮により28~55%多くなることが判った。

また、穴内部の測定値を使うときは、鉄筋の考慮により線量率は0.24~0.82倍に下がることになる。鉄筋と穴の正確な位置関係が判らないのでこの大きな幅を縮めることはできない。そこで、測定値としては鉄筋と床汚染の効果が大きく出ない浅い場所（例えば4cm深さ）での測定値を利用するのがよいと考えられる。

これらの計算に使用したQAD-CGGP2Rは点減衰核積分コードであり、無限媒質中のビルドアップ係数を使っているため、例えばコンクリートから空気に出たあとの線量率は多くて2割程度高めに出ること、また媒質が変わった直後、例えば鉄筋からコンクリートに入った直後はコンクリートのビルドアップ係数を使うと今回の体系では倍程度線量率を高目に出すことが、これまでのEGS5²⁾との比較でわかっている。そのため今回の検討ではそれが結論に影響を及ぼさないよう、コンクリート体系との比を使って議論した。また、穴内の分布に関してはコンクリートで散乱して鉄筋をまわりこんでくる挙動などはQAD-CGGP2Rでは計算できず、EGS5の計算結果と穴内分布形状に差異が見られている。

鉄筋の影響について概略を見るためにQAD-CGGP2Rで今回まとめたが、今後EGS5による解析をさらに進め、精度向上を図る予定である。

6. 参考文献

- 1) QAD-CGGP2 AND G33-GP2 : REVISED VERSION OF QAD-CGGP AND G33-GP2, JAERI-M 90-110, June 1990
- 2) H. Hirayama, Y. Namito, A. F. Bielajew, S. J. Wilderman and W. R. Nelson, "The EGS5 Code System" , SLAC-R-730 (2005) and KEK Report 2005-8 (2005)

(別添 3-2-5-9)

2号機オペレーションフロア内壁の汚染状況の把握

原子力規制庁原子力規制部

東京電力福島第一原子力発電所事故対策室

林 克己、平山英夫

1. はじめに

2号機オペオペフロには、内壁（床、天井及び壁）全体に汚染が存在している。シールドプラグの上層と中間層の間に沈着している Cs-137 の汚染量を推定する上で、内壁の汚染状況を可能な限り正確に推定することが重要である。これまでも、東京電力が測定した情報と原子力規制庁がγカメラで測定した結果から、床表面の汚染密度についてはシールドプラグ上層上面（床表面）と他の床面で大差がないという情報を得ていたが、2021年度においても、この情報を確認するための測定を含め、内壁からの寄与をより正確に評価するために以下に示す取り組みを行った。

2. 床表面の汚染状況

2021年度までは、東京電力がロボットで実施した「スミア測定」と原子力規制庁がγカメラで測定した結果を用いて検討を行った。「スミア測定」は、遊離性の表面汚染を対象としており、使用する「拭き取り効率」による影響を受けやすい。また、オペフロ開口部から行ったγカメラの測定では、カメラの高さが低いためにシールドプラグ領域と他の床面を分けた測定が出来なかった。より直接的な床表面の汚染密度を測定するために、β線による70マイクロメートル線量当量率による「遊離性汚染と固着性汚染」を合わせた直接測定を行った。当初、福島第一原子力発電所で使用されているAPDでの測定を検討したが、APD内部の検出器構造（センサーのサイズなどの構造と位置、70マイクロメートル線量当量率への換算方法等）に関する情報が得られなかったため、NRF54線量計（富士電機製・個人線量計）を購入して使用した。東京電力が測定に使用した「コリメータ付き線量計」について、評価方法の具体的内容の提供を受け、線量計の特性について改めて評価し、床面での測定結果による汚染密度を再評価した。

また、2021年に東京電力により実施されたシールドプラグの新たな穿孔で取り出されたコア表面での周辺線量当量率から、シールドプラグ上層上面（床表面）での汚染密度の情報を推定した。

2-1 NRF54 を用いた β 線による 70 マイクロメートル線量当量率による測定

NRF54 の製造元である富士電機株式会社から、「Si 検出器のサイズ位置、Si 検出器周辺の構造物の種類とサイズ、計数率から線量当量率への換算方法」等の情報の提供を受け、電磁カスケードモンテカルロ計算コード `egs51)` を用いて校正線源を用いた測定結果との比較を行い、ほぼ一致する結果が得られた（添付資料 1 参照）。計算で再現出来ることを踏まえて、Cs-137 がコンクリート上に一様な密度で分布している場合に、線量計表面が床面から 5.0 cm 位置にある場合の β 線による 70 マイクロメートル線量当量率から Cs-137 の汚染密度への換算係数として $7.19\text{E-}04 \text{ mSv/h per Bq/cm}^2$ を使用することとした。

2021 年 4 月 14 日に東京電力の協力を得て、2 号機オペフロでロボットを使い、床面から 5 cm の高さに 2 台の NRF54 線量計（富士電機製・個人線量計）を取り付けて図 1 に示す位置で、測定を行なった（添付資料 2 参照）。2 台の設定時間は 1 分とし、1 台は裸で「 β 線と γ 線による 70 マイクロメートル線量当量」を、他の 1 台には 2 mm 厚さのプラスチックフィルターを設置して Cs-137 からの β 線及び Ba-137m からの内部転換電子を遮蔽し「 γ 線のみによる 70 マイクロメートル線量当量」が測定できるようにした。2 台の線量計は隣接してロボットに取り付けた。両線量計の中心間距離は約 70 mm である。

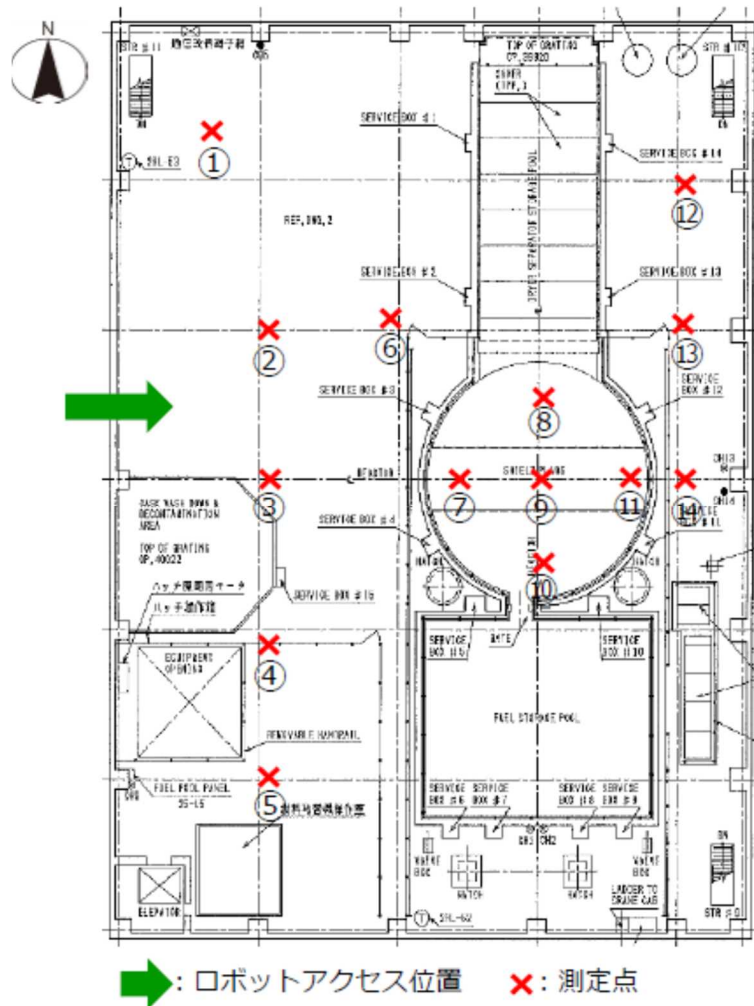


図1 β線による70マイクロメートル線量当量率の測定点
(添付資料2参照)

「β線による70マイクロメートル線量当量率」は、2つの測定器のγ線による寄与が同じであることを前提に、2mmのプラスチックカバーを付けたNo. 1線量計の結果を「γ線による70マイクロメートル線量当量率」として、カバーの無いNo.2線量計(β+γ)の結果から差引くことにより求められる。No.2線量計の1センチメートル線量当量率がNo.1線量計の1センチメートル線量当量率より大きい場合には、γ線による70マイクロメートル線量当量率を過大評価し、逆の場合は過小評価することになる。表1に、両者の比が10%未満であった結果(表中黄塗の測定点)を用い、床面西側、シールドプラグ上部、床面東側の3領域に分けて、汚染密度の平均と最小・最大の測定結果を示した。若干の違いはあるが、3箇所ともほぼ同じレベルである。汚染密度の絶対値については、表面に砂状にものが見られたことから過小評価となっている可能性がある。

表 1 測定結果

測定点	周辺線量当量率		70マイクロメートル線量当量率		β線70マイクロメートル線量当量率	Cs-137汚染密度	
	mSv/h		mSv/h		mSv/h	各測定点	AとBの差が10%未満 Bq/cm ²
	No. 2 (bare) [A]	No. 1 [B]	No. 2 (bare)	No. 1			
No. 1	6.72	6.76	32.3	8.58	23.7	3.3E+04	3.6E+04 (1.2E+04 ~6.2E+04)
No. 2	14.2	25.7	29.8	40.3			
No. 3	5.92	5.84	15.1	6.80	8.34	1.2E+04	
No. 4	8.26	7.78	36.3	9.42	26.9	3.7E+04	
No. 5	19.2	14.2	42.7	16.8	26.0	3.6E+04	
No. 6	17.5	16.3	65.0	20.6	44.4	6.2E+04	
No. 7	38.0	36.3	107	46.8	60.0	8.3E+04	8.4E+04 (1.2E+04~1.6E+05)
No. 8	229	254	362	353	8.82	1.2E+04	
No. 9	265	365	567	485	82.2	1.1E+05	
No. 10	147	123	472	156	316	4.4E+05	
No. 11	22.2	23.3	142	30.5	112	1.6E+05	
No. 12	50.3	49.1	132	60.5	72.0	1.0E+05	6.8E+04 (3.6E+04~1.0E+05)
No. 13	113	85.8	189	102	86.5	1.2E+05	
No. 14	50.3	49.1	92.0	66.4	25.6	3.6E+04	

表 2 に、得られた表面汚染密度とスミア測定及びγカメラによる汚染密度の比較を示す。NRF54 による結果は、若干低いがγカメラの結果とほぼ同程度である。スミア測定の結果が他の測定結果より高いのは、測定場所の表面状態に関係なく一律の拭き取り効率 (0.1) を使用しているためであると思われる。

表 2 オペフロ床表面汚染密度の測定結果の比較

測定点	NRF54 (NRA2021.0414測定)		スミア (東電2019.5.20報告)	ガンマカメラ (NRA2020.1.30測定)
	Cs-137汚染密度 Bq/cm ²			
No. 1	3.3E+04		3.3E+05 位置(8)	-
No. 3	1.2E+04			-
No. 4	3.7E+04			-
No. 6	6.2E+04		6.5E+05 位置 (1)	7.00E+04
No. 7	8.3E+04		6.7E+05 位置 (11)	1.70E+05
No. 8	1.2E+04		6.4E+05 位置 (12)	8.00E+04
No. 9			9.7E+05 位置 (12)	1.70E+05
No. 10			5.1E+05 位置 (15)	1.00E+05
No. 11	1.6E+05		8.2E+05 位置 (13)	1.70E+05
No. 12	1.0E+05		1.0E+06 位置 (16)	-
No. 13			2.0E+05 位置 (17)	1.70E+04
No. 14	3.6E+04		2.9E+06 位置 (18)	1.70E+05
			0)は引用資料内位置番号	東西に長いピクセル内 平均の測定値
				[-]は視野外

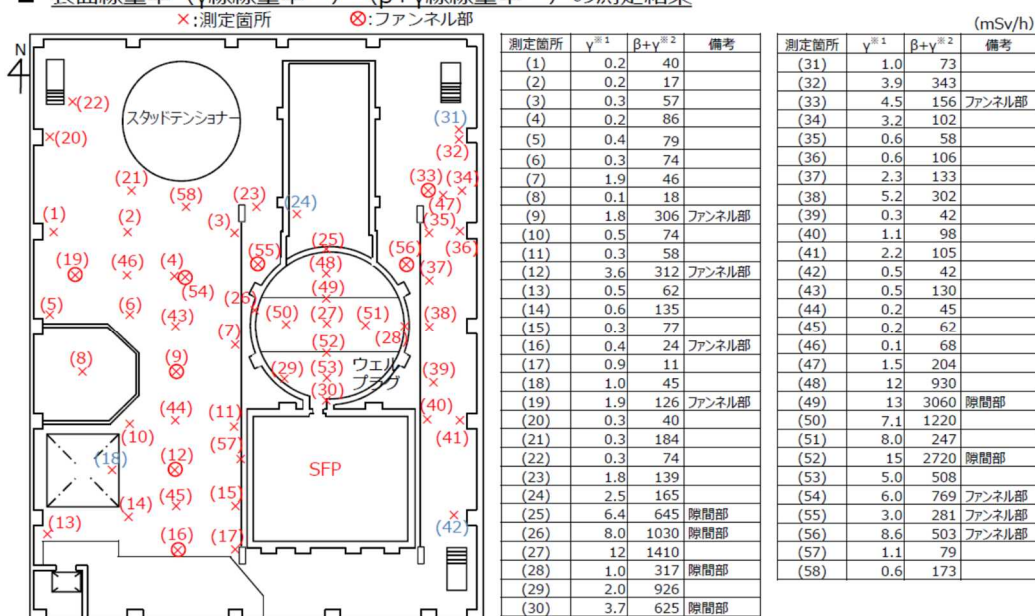
2-2 コリメータ付き γ 線線量計の測定線量当量率の検討

2021 年度の検討では、コリメータ付き γ 線線量計で測定されている線量当量率は「周辺線量当量率 (1 センチメートル線量当量率)」であるとして egs5 で求めた「単位

汚染密度当たりの周辺線量当量率」を使用して汚染密度を求めていた。コリメータ内部に設置されている「線量計」が場の周辺線量当量率測定用であるかについて確認するために、東京電力から線量当量率の求め方及び線量当量率から汚染密度を求める換算係数の決定方法についての資料提供を受け、検討を行った。その結果、コリメータ付き γ 線線量計で得られた線量当量率は、ファントム上で校正された「個人線量計」をファントムが無い状態で同じ換算係数を用いて計数率から求めた線量率であることが判明し、場の周辺線量当量率を過小評価していることが分かった（添付資料3参照）。

使用されている個人線量計の詳細な情報（使用されている半導体検出器のサイズ等の仕様、計数率から線量当量率への変換条件（ディスクリレベルの値等）等）の入手が困難であることから、Cs-137 の場合、東京電力から提供された資料に基づく「線量当量率」と egs5 で計算した「周辺線量率」の比は、1:1.69 である（添付資料3参照）。egs5 で求めた周辺線量当量率を 1.69 で割った値がコリメータ付線量計の線量率となる。この結果、線量当量率の測定結果から Cs-137 の汚染密度への換算係数は、Cs-134 と Sb-125 の影響を加味して $6.09E-07$ mSv/h per Bq/cm² となり、汚染密度は従来の 1.34 倍となる。コリメータ付き線量計による測定位置を図2に、シールドプラグ以外の床面の汚染密度の改定値を表3に示す。他の評価結果より汚染密度が高い場所が見られるが、コリメータ付き γ 線による測定の対象領域は直径 30 cm で局所的な汚染の影響を受け易いことに留意する必要がある。

■ 表面線量率 (γ 線線量率※1) ($\beta+\gamma$ 線線量率※2) の測定結果



※1：1cm線量当量率、床上@30.5cmコリメータ付線量計で測定

※2：70 μ m線量当量率、床上@0.5cmコリメータ付線量計で測定

注：青字は既設機器との干渉により測定箇所から離れて測定した箇所

16

図2 東京電力によるコリメータ付き γ 線線量計による測定場所と測定結果⁴⁾

表3 床の汚染密度（改定値）

測定点	表面γ線線量当量率 (mSv/h)	Cs-137汚染密度 (Bq/cm ²)	測定点	表面γ線線量当量率 (mSv/h)	Cs-137汚染密度 (Bq/cm ²)
(1)	0.2	3.3E+05	(32)	3.9	6.4E+06
(2)	0.2	3.3E+05	(34)	3.2	5.2E+06
(3)	0.3	4.9E+05	(35)	0.6	9.8E+05
(4)	0.2	3.3E+05	(36)	0.6	9.8E+05
(5)	0.4	6.6E+05	(37)	2.3	3.8E+06
(6)	0.3	4.9E+05	(38)	5.2	8.5E+06
(7)	1.9	3.1E+06	(39)	0.3	4.9E+05
(8)	0.1	1.6E+05	(40)	1.1	1.8E+06
(10)	0.5	8.2E+05	(41)	2.2	3.6E+06
(11)	0.3	4.9E+05	(42)	0.5	8.2E+05
(13)	0.5	8.2E+05	(43)	0.5	8.2E+05
(14)	0.6	9.8E+05	(44)	0.2	3.3E+05
(15)	0.3	4.9E+05	(45)	0.2	3.3E+05
(17)	0.9	1.5E+06	(46)	0.1	1.6E+05
(18)	1.0	1.6E+06	(47)	1.2	2.0E+06
(20)	0.3	4.9E+05	(48)	12	シールドプラグ
(21)	0.3	4.9E+05	(49)	13	隙間部
(22)	0.3	4.9E+05	(50)	7.1	シールドプラグ
(23)	1.8	3.0E+06	(51)	8.0	シールドプラグ
(25)	6.4	隙間部	(52)	15	隙間部
(26)	8.0	隙間部	(53)	5.0	シールドプラグ
(27)	12	シールドプラグ	(57)	1.1	3.1E+06
(28)	1.0	隙間部	(58)	0.6	1.7E+06
(29)	2.0	シールドプラグ			
(30)	3.7	隙間部			

*シールドプラグ上と隙間部（継ぎ目上）は、シールドプラグ上層と中間層の間の汚染の影響を受けているため表面のCs-137汚染密度には変換していない。

2-3 穿孔で取り出されたコア表面の汚染密度

東京電力により2021年11月29日から12月6日の期間に、シールドプラグに新たに13箇所の穿孔が行なわれコアが採取された。採取したコンクリートコア表面でのPOLIMASTER線量計による周辺線量当量率の測定値からコア表面の汚染密度を推定した。

(1) 線量当量率の測定結果

測定が行なわれた2号機オペフロ前室の空間線量率は200μSv/hで、コア表面での測定値からバックグラウンド値を引いた結果をコア表面の汚染による線量当量率とした。

大部分のコアでは、バックグラウンドとほぼ同じレベルで、下記のコアで有意な線量当量率が測定された。

4 番 : 3 mSv/h

6 番 : 1.6 mSv/h (シールドプラグ中心)

12 番 : 870 μ Sv/h (シールドプラグ継ぎ目)

13 番 : 520 μ Sv/h (表面での線量当量率が特異に高い箇所)

最大線量率は、4 番の 3 mSv/h であった。

(2) 汚染密度の推定

背後のコアによる後方散乱の影響を無視し、自己遮蔽の無い面線源の場合には、解析的に MBq/cm² 当たりの 1 センチメートル線量当量率を以下の式で計算することができる。

$$q = 10^4 \pi \Gamma_{1cm} \ln \frac{R^2 + h^2}{h^2}$$

上式で、R (cm) は面線源の半径、h (cm) は面線源の中心での線源面からの距離、 Γ_{1cm} (μ Sv/h per MBq at 1m) は 1 センチメートル線量当量率定数である。

コアの場合は、R=2.5 cm である。測定は、コア表面から 1 cm 位置で測定したとして h=1 cm とする。Cs-137 の 1 cm 線量当量率定数は、0.0927 (μ Sv/h per MBq at 1m) であるので、q=5769 (μ Sv/h per MBq/cm²) となる。従って、3 mSv/h となる汚染密度は、

$$3.0 \times 1000 / 5769 = 0.520 \text{ MBq/cm}^2$$

となる。

この汚染密度は、これまで 2 号機オペフロで測定されている最大値 (1.6E+06 Bq/cm²) の範囲内である。

2-4 床面汚染密度

測定手法のより測定された汚染密度に違いがあるが、局所的に汚染密度が高い場所が存在しているという状況の下で対象領域が半径 15 cm と狭いコリメータ付き線量計の結果は参考値とすると、床面の汚染密度は概略としては 2.5E+05 Bq/cm² のレベルであると思われる。

3. 天井の汚染状況

天井の汚染状況は、遮蔽による線量当量率低減が難しいことから、オペフロでの使用済み燃料取りだし作業でも重要である。γカメラによりある程度把握はされていたが、オペフロ入口からの測定で十分とは言えない状況であった。コリメータ付き γ 線線量

計を天井に向けて使用すれば平均的な汚染密度の測定が可能であるという提起（添付資料4参照）を受けて、東京電力により測定が実施された。提起した時点では、コリメータ付 γ 線線量計で測定している線量当量率が周辺線量当量率としていたが、周辺線量当量率の $1/1.69$ の線量率であることが分かった（添付資料3参照）ので、この考え方に基づき汚染密度の推定を行なった。

3-1 測定方法

「コリメータ付 γ 線線量計」の視野を天井に向けて測定を行なう。上向きに設置した場合、天井の視野領域は、線量計の位置が床面から 1 m の場合は半径 7.4 m で、設置位置が床面から 5 m の場合は半径 5.4 m となる。コリメータの構造から、視野以外の領域の線源からの寄与は小さいと考えられる。天井は平坦な構造では無い様であるが、線量計からの距離が長いので、若干のこぼこの影響は小さい。また、床面での線量率に寄与する線源としては線量計に入射する「実効的な線源」であると思われるので、天井の詳細な構造は考慮する必要はないと思われる。

3-2 線量率から汚染密度への換算係数

平坦な天井面に一様な密度で $Cs-137$ がある場合の、床面から 1 m 及び 5 m 位置での「コリメータ付 γ 線線量計」による周辺線量当量率を電磁カスケードモンテカルロ計算コード egs5 に、「面等方線源と単位球検出器形状を点等方線源と面検出器に変換する手法²⁾」を拡張してコリメータに対応した平面検出器への入射角度の制限をつけることにより、コリメータ内面での散乱線の寄与を無視した条件³⁾ で、形状変換を用いて測定位置での 1 センチメートル線量当量率を計算した。汚染密度が 1 Bq/cm^2 の時の周辺線量当量率は、

床面から 1 m : $0.725\text{E-}03 \pm 0.27\text{E-}06 \quad \mu\text{Sv/h}$

床面から 5 m : $0.746\text{E-}03 \pm 0.28\text{E-}06 \quad \mu\text{Sv/h}$

これまでの測定されていた表面から 30.5 cm での 1 Bq/cm^2 あたりの周辺線量当量率が、

$0.769\text{E-}03 \pm 0.29\text{E-}06 \quad \mu\text{Sv/h}$

なので、距離による変化は小さいことが分かる。

換算係数は、

床面から 1 m : $1.38\text{E+}06 \text{ Bq/cm}^2 \text{ per mSv/h}$

床面から 5 m : $1.34\text{E+}06 \text{ Bq/cm}^2 \text{ per mSv/h}$

となる。

「コリメータ付 γ 線線量計」により測定されている「線量当量率」が周辺線量当量率でなく、本来の使用で想定したファントム上ではなく鉛で囲まれた個人線量計による「線量率」である。この事からコリメータ付 γ 線線量計で測定される線量率は、周辺線

量当量率の 1/1.69 となる。

2021 年の測定時には、Cs-137 の 4 %程度の Cs-134 が存在していると考えられる。Cs-134 の汚染密度が 1 Bq/cm² の時の周辺線量当量率は、

床面から 1 m : 0.185E-02 ± 0.68E-06 μSv/h

床面から 5 m : 0.190E-02 ± 0.70E-06 μSv/h

なので、Cs-137 の汚染密度が 1 Bq/cm² の時の周辺線量当量率は、

床面から 1 m : 0.799E-03 μSv/h per Bq/cm² (Cs-137)=7.99E-7 mSv/h per Bq/cm² (Cs-137)

床面から 5 m : 0.822E-02 μSv/h per Bq/cm² (Cs-137)=8.22E-7 mSv/h per Bq/cm² (Cs-137)

となる。コリメータ付き γ 線線量計での線量率は周辺線量当量率の 1/1.69 なので、換算係数は

床面から 1 m : 1/(7.99E-07/1.69)=2.12E+06 Bq/cm² (Cs-137) per mSv/h

床面から 5 m : 1/(8.22E-07/1.69)=2.06E+06 Bq/cm² (Cs-137) per mSv/h

となる。

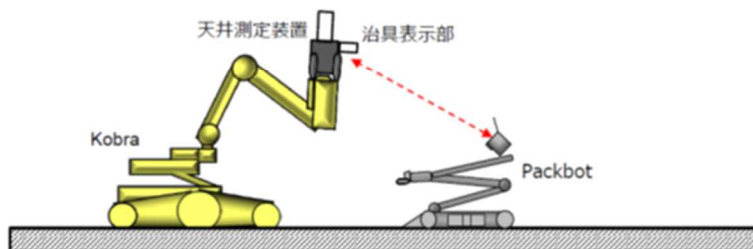
3-3 測定状況

コリメータ付き線量計を使用し、図 3 に示すように Kobra に装着し、床面から 1.2 m の高さでコリメータ開口部を上部に向けて測定が実施された。図 4 に測定点を示す。3-2 で示した様に、天井からの距離による依存性が小さいので、線量率から汚染密度への換算係数としては 1 m での 2.12E+06 Bq/cm² per mSv/h を用いた。線量率の測定結果と推定した汚染密度を表 4 に示す。測定した 14 箇所の天井の汚染密度の平均は 3.57E+05 Bq/cm² (1.26E+05~1.30E+06 Bq/cm²) であった。この値は、原子力規制庁が γ カメラによる測定から推定した「天井面の平均汚染密度は 6.0E+05 Bq/cm²」とほぼ対応した結果である。平均汚染密度の汚染が天井に一様に存在した場合、床から天井までの距離が 16 m の場合、オペフロ中心位置で、床から 1 m 位置での周辺線量当量率は 1.52 mSv/h となる。

γ カメラによる天井の測定は限られた領域であるので、天井の汚染密度としては、コリメータ付き γ 線線量計で得られた概略値 (3.6E+05 Bq/cm²) のレベルであると思われる。

○天井調査

- ・測定治具を天井に向け約1分間測定（待機）する
- ・Packbotのカメラで治具表示を確認し、測定値を記録する



天井測定装置写真
(コリメータ線量計)

図3 天井調査の測定イメージ

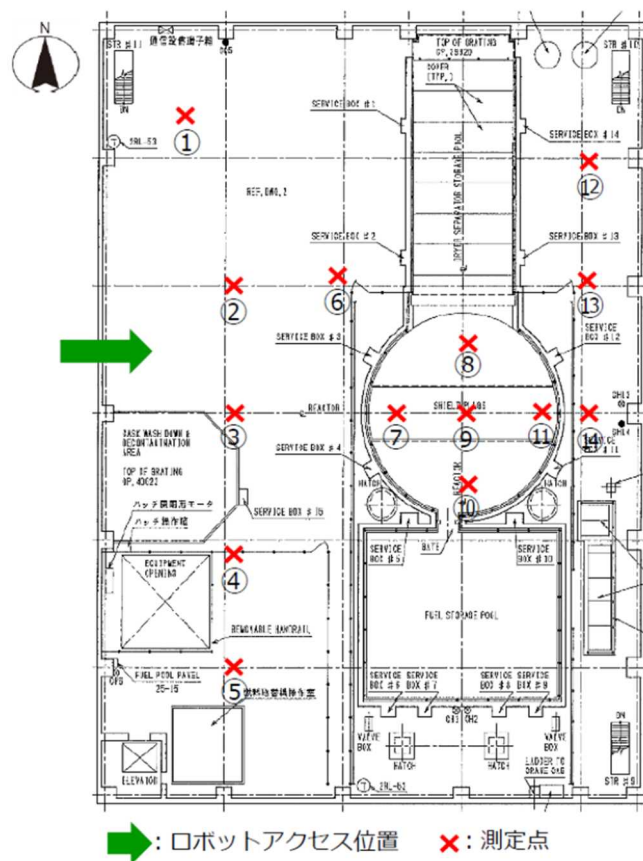


図4 天井の測定点

表4 測定結果と推定した汚染密度

測定点	測定開始時刻	測定終了時刻	PD20A	DOSEi周辺	表面γ線	Cs-137
			計数率 (cps)	線量当量率 (mSv/h)	線量率 (mSv/h)	汚染密度 (Bq/cm ²)
①	11:03:00	11:04:00	113	8.78	7.67E-02	1.63E+05
②	11:07:00	11:08:00	410	13.6	3.11E-01	6.60E+05
③	11:10:00	11:11:00	263	11.1	1.95E-01	4.14E+05
④	11:13:15	11:14:15	126	11.5	8.24E-02	1.75E+05
⑤	11:15:35	11:16:35	155	13.7	1.02E-01	2.17E+05
⑥	11:20:00	11:21:00	229	20.9	1.50E-01	3.18E+05
⑦	11:27:45	11:28:45	299	61.3	1.34E-01	2.83E+05
⑧	11:31:15	11:32:15	293	102.2	5.43E-02	1.15E+05
⑨	11:34:30	11:35:30	379	117.2	9.75E-02	2.07E+05
⑩	11:37:10	11:38:10	262	70.3	8.68E-02	1.84E+05
⑪	11:41:20	11:42:20	346	61.3	1.72E-01	3.65E+05
⑫	11:48:40	11:49:40	147	33.6	5.94E-02	1.26E+05
⑬	11:52:20	11:53:20	343	31.3	2.24E-01	4.75E+05
⑭	11:58:20	11:59:20	865	53.6	6.12E-01	1.30E+06

4. 壁の汚染状況

壁の汚染密度の測定結果としては、東京電力が行った「スミア測定」⁴⁾と「コリメータ付き γ 線線量計を用いた測定」⁴⁾及び原子力規制庁が行ったγカメラによる測定（別添3-2-5-4の添付資料1参照）がある。スミア測定の結果は、他の測定に比べて明らかに低い。床と異なり壁ではロボットによるスミア採取が難しいためではないかと思われる。2019年の測定時には、Cs-137の10%程度のCs-134とSb-125が床のスミア測定で検出されているので、コリメータ付き γ 線線量計でもCs-134とSb-125の寄与があると考えられる。

壁に密着した場合（壁から30.5 cm）

$$\text{Cs-137} : 0.770\text{E-}03 \pm 0.75\text{E-}07 \quad \mu\text{Sv/h per Bq/cm}^2$$

$$\text{Cs-134} : 0.196\text{E-}02 \pm 0.75\text{E-}07 \quad \mu\text{Sv/h per Bq/cm}^2$$

$$\text{Sb-125} : 0.663\text{E-}03 \pm 0.28\text{E-}06 \quad \mu\text{Sv/h per Bq/cm}^2$$

なので、

$$1.03\text{E-}3 \mu\text{Sv/h per Bq/cm}^2 (\text{Cs-137}) = 1.03\text{E-}6 \text{ mSv/h per Bq/cm}^2 (\text{Cs-137})$$

となる。コリメータ付き γ 線線量計での線量率は周辺線量当量率の1/1.69なので、換算係数は

$$1/(1.03\text{E-}06/1.69) = 1.64\text{E+}06 \text{ Bq/cm}^2 (\text{Cs-137}) \text{ per mSv/h}$$

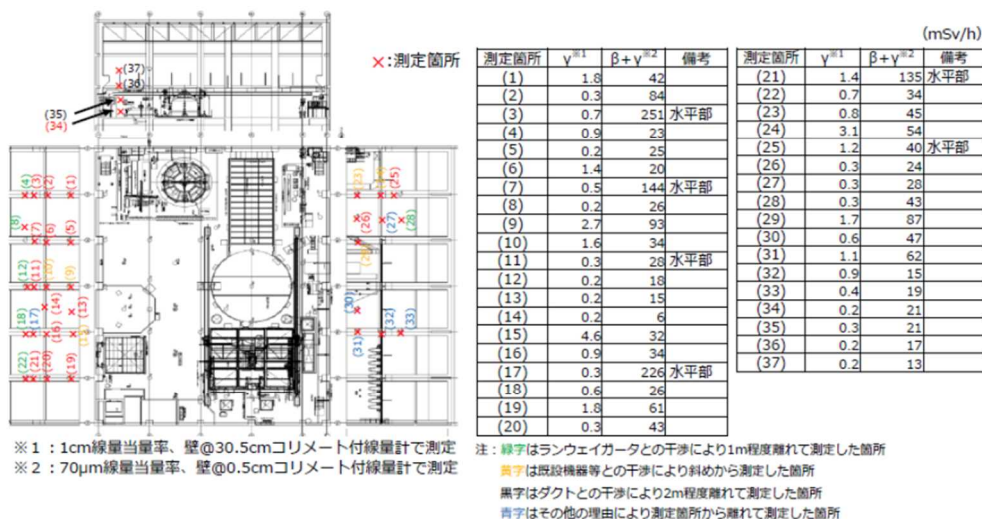
となる。

図5に測定箇所を表5に測定結果と推定した汚染密度を示す。

【参考2】表面線量率③ <壁面>



■ 表面線量率 (γ線線量率※1) (β+γ線線量率※2) の測定結果



- ランウェイガード上面の表面線量率が高い傾向がみられた。
- ランウェイガード上面は、長年に亘ってほこりが堆積しており、このほこりに蒸気に随伴した放射性物質が付着したと考えられる。

20

図5 コリメータ付γ線線量計による壁測定箇所

表5 測定結果と推定した汚染密度

測定箇所	測定番号	コリメータ付 γ線線量率	汚染密度	備考	測定箇所	測定番号	コリメータ付 γ線線量率	汚染密度	備考
		mSv/h	Bq/cm ²				mSv/h	Bq/cm ²	
西壁	(1)	1.8	2.96E+06		西壁	(20)	0.3	4.93E+05	
	(2)	0.3	4.93E+05			(21)	1.4	2.30E+06	
	(3)	0.7	1.15E+06			(22)	0.7	1.15E+06	1m離れた位置
	(4)	0.9	1.48E+06	1m離れた位置		(25)	1.2	1.97E+06	
	(5)	0.2	3.28E+05			(26)	0.3	4.93E+05	
	(6)	1.4	2.30E+06			(27)	0.3	4.93E+05	離れた位置
	(7)	0.5	8.21E+05			(28)	0.3	4.93E+05	1m離れた位置
	(8)	0.2	3.28E+05	1m離れた位置		(30)	0.6	9.85E+05	離れた位置
	(11)	0.3	4.93E+05			(31)	1.1	1.81E+06	離れた位置
	(12)	0.2	3.28E+05	1m離れた位置		(32)	0.9	1.48E+06	離れた位置
	(13)	0.2	3.28E+05			(33)	0.4	6.57E+05	離れた位置
	(14)	0.2	3.28E+05			(34)	0.2	3.28E+05	
	(16)	0.9	1.48E+06			(35)	0.3	4.93E+05	2m離れた位置
	(17)	0.3	4.93E+05	1m離れた位置		(36)	0.2	3.28E+05	2m離れた位置
	(18)	0.6	9.85E+05	1m離れた位置		(37)	0.2	3.28E+05	2m離れた位置
	(19)	1.8	2.96E+06						

斜めからの測定では、コリメータの視野が固定されないことになるので、表5から除いている。コリメータ付γ線線量計の視野は線源から30.5cmの場合は半径15cmの領域である。1m離れた場合でも実効半径は約50cmと限られた領域である。測定箇所の単純平均では、「西壁：1.1E+06 Bq/cm²」、「東壁：1.1E+06 Bq/cm²」で、「北壁：

3.7E+05 Bq/cm²」となる。

2020年2月に原子力規制庁が東京電力の協力を得て行なったγカメラによる測定結果を表6に示す。γカメラの測定は、オペフロ開口部の床面近くという限られた条件での測定で、東壁は大部分が測定されているが、南北の壁については測定された領域が限られており、途中に物がある状態での測定で十分とは言えない。また、西壁はコリメータ付線量計による結果だけである。

表6 ガンマカメラによる測定結果

	汚染密度 (10 ⁶ Bq/cm ²)	
	測定結果	平均
北壁	0.6 ~ 2.3	0.89
東壁	0.7 ~ 3.3	1.4
南壁	0.2 ~ 1.8	0.41

5. 床・天井及び壁の汚染によるオペフロ床面上1.5 m位置の周辺線量当量率

オペフロ内の周辺線量当量率は、床・天井及び壁というオペフロ内壁の汚染によるものである。測定で得られたそれぞれの汚染密度の検討のために、床・天井及び東西南北の壁に一樣な密度の汚染がある時の床面から1.5 m位置での図6に示す位置でのそれぞれからの周辺線量率をegs5に「面等方線源と単位球検出器形状を点等方線源と面検出器に変換する手法²⁾」を適用して計算した。比較対象の測定が2019年5月なので、これまでの検討と同じ様に、Cs-137放射能の10%のCs-134とSb-125が存在しているとして、Cs-137が1Bq/cm²存在している時の周辺線量当量率を表7に示す。同じ汚染密度の場合、どの位置でも床の寄与が大きい、いずれかの壁に近い位置ではその壁からの寄与が床と同程度あることが分かる。表7には、床と天井については測定値から推定した汚染密度を、東・北・南壁についてはγカメラの平均の汚染密度を、西壁についてはコリメータ付γ線量計で測定に基づく平均汚染密度を使った場合の周辺線量当量率を合わせて示している。内面の合計線量当量率は、測定値より明らかに高い。このことは、内壁の汚染密度が不均一であることが影響している可能性と使用した平均の汚染密度が過大になっている可能性が考えられる。内面の汚染密度については更なる検討が必要である。

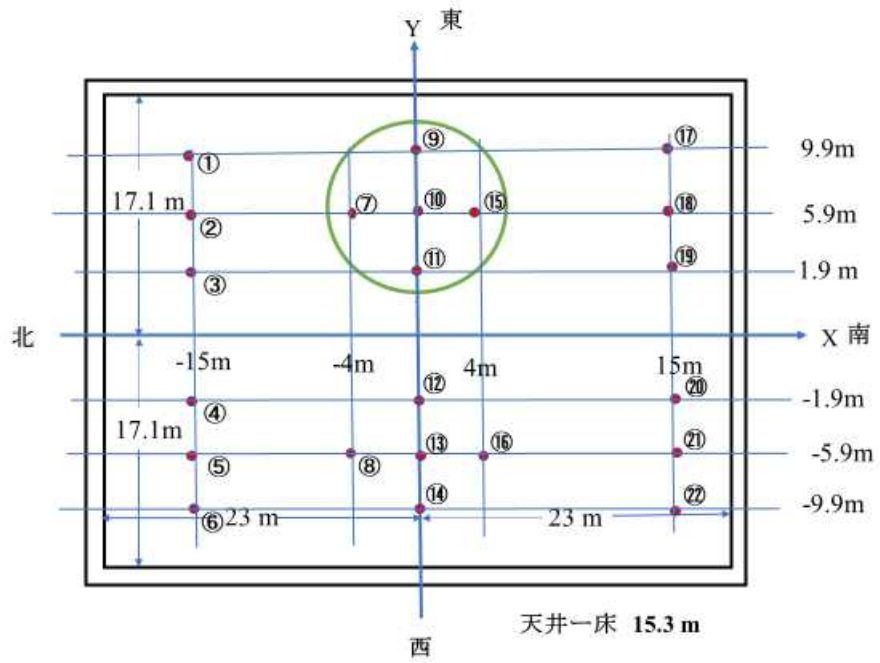


図6 内壁からの寄与の評価位置

表7 床・天井・壁（東西南北）の汚染による周辺線量当量率

		⑨	⑩	⑪	⑮	⑱		
		μSv/h per Bq/cm ² of Cs-137						
床		2.35E-02	2.47E-02	2.51E-02	2.46E-02	2.28E-02		
天井		6.00E-03	6.46E-03	6.69E-03	6.40E-03	5.48E-03		
北壁		6.76E-03	7.00E-03	7.06E-03	5.26E-03	2.86E-03		
南壁		6.76E-03	7.00E-03	7.06E-03	8.70E-03	2.47E-02		
東壁		2.93E-02	1.95E-02	1.28E-02	1.89E-02	1.86E-02		
西壁		5.46E-03	7.19E-03	9.45E-03	7.18E-03	7.07E-03		
	Cs-137 density (Bq/cm ²)	周辺線量当量率 (mSv/h)						
床	2.50E+05	5.87E+00	6.16E+00	6.28E+00	6.14E+00	5.70E+00		
天井	3.60E+05	2.16E+00	2.33E+00	2.41E+00	2.30E+00	1.97E+00		
北壁	8.90E+05	6.01E+00	6.23E+00	6.28E+00	4.68E+00	2.54E+00		
南壁	4.10E+05	2.77E+00	2.87E+00	2.89E+00	3.57E+00	1.01E+01		
東壁	1.40E+06	4.10E+01	2.73E+01	1.80E+01	2.65E+01	2.60E+01		
西壁	1.10E+06	6.00E+00	7.91E+00	1.04E+01	7.89E+00	7.78E+00		
合計 (mSv/h)		6.38E+01	5.28E+01	4.62E+01	5.11E+01	5.42E+01		
		④	⑫	⑳	⑥	⑭	㉔	
		μSv/h per Bq/cm ² of Cs-137						
床		2.32E-02	2.51E-02	2.32E-02	2.18E-02	2.35E-02	2.18E-02	
天井		5.66E-03	6.69E-03	5.67E-03	5.10E-03	6.00E-03	5.10E-03	
北壁		2.48E-02	7.08E-03	2.73E-03	2.44E-02	6.87E-03	2.64E-03	
南壁		2.73E-03	7.08E-03	2.48E-02	2.64E-03	6.87E-03	2.44E-02	
東壁		8.90E-03	9.45E-03	9.19E-03	5.23E-03	5.46E-03	5.26E-03	
西壁		1.25E-02	1.28E-02	1.25E-02	2.89E-02	2.93E-02	2.83E-02	
	Cs-137 density (Bq/cm ²)	周辺線量当量率 (mSv/h)						
床	2.50E+05	5.79E+00	6.28E+00	5.79E+00	5.44E+00	5.87E+00	5.44E+00	
天井	3.60E+05	2.04E+00	2.41E+00	2.04E+00	1.83E+00	2.16E+00	1.84E+00	
北壁	8.90E+05	2.21E+01	6.30E+00	2.43E+00	2.17E+01	6.12E+00	2.35E+00	
南壁	4.10E+05	1.12E+00	2.90E+00	1.02E+01	1.08E+00	2.82E+00	1.00E+01	
東壁	1.40E+06	1.25E+01	1.32E+01	1.29E+01	7.32E+00	7.64E+00	7.37E+00	
西壁	1.10E+06	1.37E+01	1.41E+01	1.38E+01	3.18E+01	3.22E+01	3.12E+01	
合計 (mSv/h)		5.72E+01	4.53E+01	4.71E+01	6.92E+01	5.68E+01	5.82E+01	

【参考資料】

1. H. Hirayama, Y. Namito, A. F. Bielajew, S. J. Wilderman, W.R. Nelson, “The EGS5 Code System” , SLAC-R-730 (2005) and KEK Report 2005-8 (2005).
2. Y. Namito, H. Nakamura, A. Toyoda, K. Iijima, H. Iwase, S. Ban and H. Hirayama, “Transformation of a system consisting of plane isotropic source and unit sphere detector into a system consisting of point isotropic source and plane detector in Monte Carlo calculation”, J. Nucl. Sci. Technol, **49** , 167-172 (2012)
3. 波戸 芳仁、平山 英夫、“線源と検出器の形状変換の拡張-コリメータ付き検出器、円柱線源-”、日本原子力学会春の年会 1D01 (オンライン, 2021年3月17日~19日)
4. 東京電力ホールディングス株式会社、“2号機原子炉建屋オペフロ内残置物移動・片付後調査の結果について”、2019年2月28日、
<www2.nsr.go.jp/data/000270192.pdf>

【添付資料 1】

NRF54 による 2 号機オペフロコンクリート上の Cs-137 汚染密度測定

1. はじめに

2 号機オペフロ床面の Cs-137 汚染状況把握（周辺線量当量率が高いシールドプラグ上部と他の領域で汚染状況がほぼ同じであることの確認）をすることは、3 層構造のシールドプラグの継ぎ目に付着している Cs-137 の放射能を推定する上で重要なことである。そのために、富士電機製の NRF54 線量計¹⁾ を用いた測定を計画している。NRF54 は、 β 線及び γ 線にいる 70 マイクロメートル線量当量を測定する個人線量計である。計画している測定では、2 台の NRF54 を用い、1 台には線量計に 2 mm のアクリルを設置し、Cs-137 の β 線の寄与を含まない γ 線による 70 マイクロメートル線量当量を測定し、裸の NRF54 の β 線+ γ 線の 70 マイクロメートル線量当量との違いから β 線のみによる 70 マイクロメートル線量当量を求める予定である。 β 線による 70 マイクロメートル線量当量は、コンクリートの床表面の Cs-137 汚染密度のみを反映しているため、Cs-137 汚染密度と β 線による 70 マイクロメートル線量当量率の関係が得られていれば、測定結果から床表面の汚染密度を求めることができる。以下では、NRF54 により得られた β 線による 70 マイクロメートル線量当量率から表面汚染密度を求めるための換算係数について検討を行なった。

2. NRF54 β 線線量計

2 - 1 NRF54 の構造

NRF54 では、2 mm のポリカーボネートのケース内に、65 度の開口角度を持つ β 線+ γ 線による 70 マイクロメートル線量当量測定用の Si 検出器（3 mm × 3 mm、400 μ m 厚さで、逆バイアスで表面に 50 - 60 μ m 厚さの空乏層（有感領域）がある）が付されている。開口部と検出器の間には 75 μ m のポリイミドフィルム+0.25 μ m の Al、2 層の 3.5 μ m の PEN フィルム+0.25 μ m の Al と 25 μ m のポリイミドフィルム+0.25 μ m の Al がある。合計で 107 μ m のプラスチックと 0.75 μ m の Al が存在し、人体皮膚組織に近い物質で 70 μ m より若干厚い構造となっている。表面のポリイミドフィルムを補強するために、フィルムの後ろには、中心に直径 2.4 mm で中心に直径 1.2 mm の穴が開いた厚さ 2 mm の銅の補強がある。

開口部以外の箇所には、厚さ 0.2 mm の 2 層の銅層があるので、2 mm のポリカーボネート筐体と併せると、 $0.02 \times 2 \times 8.933 + 0.2 \times 1.2 = 0.597 \text{ g/cm}^2$ であり、Y-90 の β 線を完全に遮蔽できる 1 g/cm^2 よりは薄いだが、開口部以外からの寄与をほとんど除くことができると思われる。

以上のことから、NRF54 は β 線による 70 マイクロメートル線量当量の測定によく対

応じた構造になっていると考えられる。

3. egs5²⁾ による応答計算

3-1 70 マイクロメートル線量当量

Sr-90 と Y-90 の平行ビームが 1 cm² 当たり 1 個の密度で ICRU 平板ファントムに入射した場合の 70 マイクロメートル深さでの吸収線量が 70 マイクロメートル線量当量を egs5 で計算した。

$$\text{Sr-90} : 0.693\text{E-}09 \pm 0.15\text{E-}11 \text{ Sv per } \beta / \text{cm}^2$$

$$\text{Y-90} : 0.397\text{E-}09 \pm 0.89\text{E-}12 \text{ Sv per } \beta / \text{cm}^2$$

であったので、Sr-90 と Y-90 合計では、1.09E-09 Sv per β / cm^2 となる。

3-2 検出器によるディスクリレベル以上の計数値

模擬した NRF54 の表面に 3-1 と同じ条件の Sr-90 β 線又は Y-90 β 線が入射した時に、検出器でディスクリレベル以上のエネルギー吸収が起きる計数率を egs5 で計算した。ディスクリレベルは、80 - 105 keV の範囲で変更した。得られた単位面積当たりの β 線に対する計数率と 3-1 の 70 マイクロメートル線量当量から、計数率から 70 マイクロメートル線量当量への換算係数を求めることが出来る。ディスクリレベル毎の計数率と換算係数を第 1 表に示す。ディスクリレベルが高くなるに伴い換算係数が大きくなるが、計数率が減少するので、総合的に判断する必要がある。

第 1 表 ディスクリレベル毎の計数率と 70 マイクロメートル線量当量への換算係数

Discri level	0.08 keV	0.09 keV	0.095 keV	0.10 keV	0.105 keV
	counts per β / cm^2				
Sr-90	1.30E-02 \pm 1.08E-04	1.23E-02 \pm 1.05E-04	1.20E-02 \pm 1.04E-04	1.17E-02 \pm 1.03E-04	1.10E-02 \pm 9.95E-05
Y-90	7.14E-03 \pm 8.01E-05	6.32E-03 \pm 7.54E-05	5.99E-03 \pm 7.34E-05	5.69E-03 \pm 7.15E-05	5.32E-03 \pm 6.92E-05
合計	2.02E-02	1.86E-02	1.80E-02	1.74E-02	1.63E-02
	Sv/count				
換算係数	5.40E-08	5.86E-08	6.07E-08	6.26E-08	6.68E-08

4. ディスクリレベルの設定

線源面積が小さい小線源を Si センサーからみて十分離れた位置において測定した場合、校正時に近い状況になると考えられる。そこで、日本アイソトープ協会の 303 タイプ Sr-90/Y-90 線源（半径 0.45 cm で、真鍮上に Sr-90/Y-90 があり、0.1 mm の Al カバーがついている。2013 年の購入時 2.48 kBq）をセンサーから 5.54 cm 位置に設置して測定を行い、計算結果と比較した。

結果を第 2 表に示す。この形状では、ディスクリレベルが変わっても結果にほとんど影響せず、測定値と良く一致していることがわかる。以下では、ディスクリレベルは 95

keV とする。この場合の換算係数は、 $6.07\text{E-}08$ Sv/count である。富士電機からの情報で、NRF54 の「調整範囲としては 3.5 cps/(mSv/h) $\pm 25\%$ 」である。これは、 $7.94\text{E-}8 \pm 1.99\text{E-}8$ Sv/count に相当するので、計算で求めた結果は、調整範囲内の値になっている¹。

第 2 表 5.54 cm 位置の小線源での計算と測定値の比較

Discri level	0.08 keV	0.09 keV	0.095 keV	0.10 keV	0.105 keV
	mSv/h Bq/cm ²				
Sr-90	4.71E-06 \pm 8.53E-08	4.88E-06 \pm 9.05E-08	4.92E-06 \pm 9.24E-08	4.95E-06 \pm 9.42E-08	4.95E-06 \pm 9.73E-08
Y-90	5.47E-06 \pm 9.20E-08	5.32E-06 \pm 9.45E-08	5.29E-06 \pm 9.59E-08	5.23E-06 \pm 9.68E-08	5.25E-06 \pm 1.00E-07
平均	5.09E-06	5.10E-06	5.10E-06	5.09E-06	5.10E-06
Measurement	5.11E-06				

5. 校正面線源を用いた測定値と計算値の比較

5 - 1 使用した校正線源

日本アイソトープ協会の 221 タイプ Sr-90 面線源を使用した。

10 cm \times 10 cm の大きさの面線源で、真鍮の上に Sr-90/Y-90 があり、PET と Al のカバーが付いている。表面からの β 線放出率の測定値と公称放射能が示されている。

使用した KEK 所有の線源の場合

β 線表面放出率： 2.474×10^3 /sec (2 π 方向に放出される 590 eV 以上の β 線の数、転換電子で後方散乱効果を含む。)

試験成績書：公称放射能 2.5 kBq

放射能面積 100 cm² (10 cm \times 10 cm) 均一性： $\pm 1.0\%$

カバー：ポリエステルフィルム (~ 1 mg/cm²) + アルミニウム蒸着フィルム (~ 5 mg/cm²)

校正：2013 年

試験成績で示されている放射能は公称値で、 β 線表面放出量の方が測定結果に基づいた値である。egs5 で求めた Sr-90/Y-90 の Sr-90 1Bq 当たりの β 線表面放出量を用いて求めた Sr-90 放射能は、2.43 kBq で、Sr-90 放射能密度は、24.3 Bq/cm² である。以下の測定結果の解析では、この放射能密度を使用する。

5 - 2 測定条件

それぞれの線源の中心が NRF54 の β 線センサーの中心になる条件で、測定高さであ

¹ 校正に用いられている校正場は、強度の強い線源を用いてできるだけ「Sr-90/Y-90 の方向線源」になるように工夫しているものである。また、70 マイクロメートル線量当量率は、外挿電離箱等により測定されたものである。一方、計算では、理想的な「Sr-90/Y-90 の平行ビーム」と「定義通りの 70 マイクロメートル線量当量率」を使用している。

る Si センサーと線源の距離を、1.17、3.66 及び 5.06 cm の 3 ケースで測定を行なった。1.17 cm の場合は、65 度の測定対象領域よりも広い範囲に Sr-90/Y-90 が存在する形状となる。他の場合は、線源は 65 度の範囲内に含まれている。それぞれ大凡 24 時間の積算線量から 70 マイクロメートル線量当量率を求めた。

5 - 3 測定結果

第 3 表に測定結果を示す。使用予定の 2 台の NRF54 (No. 1 と No. 2) の違いは 0.7 % から 2.8 % と小さいことが分かる。

第 3 表 測定結果

線量計番号	No. 1	No. 2	No. 1	No. 2	No. 1	No. 2
測定高さ (cm)	1.17		3.66		5.06	
線量率 (mSv/h)	0.0378	0.0382	0.0278	0.0280	0.0204	0.0199
平均線量率 (mSv/h)	0.0380		0.0279		0.0202	

5 - 4 比較計算

(1) 平板ファントムでの 70 マイクロメートル線量当量率の計算

使用した線源の中心が平板ファントムの中心にある場合の体系で、Sr-90 及び Y-90 の単位線源強度あたりの 70 マイクロメートル線量当量率 (mSv/h per Bq/cm²) を egs5 を用いて計算した。測定高さが 1.17 cm の場合は、65 度以外の領域にも線源が存在するが、NRF54 が 65 度の範囲内の線源を測定対象としていることから、線源は、65 度に対応する半径 2.509 cm であるとして計算した。

(2) NRF54 モデルでの 70 マイクロメートル線量当量率の計算

NRF54 モデルでの 70 マイクロメートル線量当量率は、NRF54 の形状を組み込んで体系で Si センサーのディスクリレベル以上の計数率を計算し、4 で求めた換算係数を適用して、Sr-90 及び Y-90 の単位線源強度あたりの 70 マイクロメートル線量当量率 (mSv/h per Bq/cm²) を計算した。

5 - 5 測定値と計算値の比較

測定値は、Sr-90 と Y-90 の β 線の寄与が半分ずつ入っているので、計算で求めた Sr-90 と Y-90 のそれぞれの計算値の平均値と比較する。

第 4 表に、測定値と計算値の比較を示す。NRF54 モデルの 70 マイクロメートル線量当量率計算値は、平板ファントムモデルでの 70 マイクロメートル線量当量率より 9 から 14 % の過小評価になっている。センサー前の物質が人体等価物質の 70 μ m より厚いことが影響していると思われる。

一方、NRF54 モデルの 70 マイクロメートル線量当量率計算値は、測定値より線源が

65度の範囲内の場合は約10%の、線源が65度の範囲外まで広がっている場合は18%の過大評価となっている。計算値と測定値の違いは大きくはないが、β線は少しの物質で影響を受けるので、組み込んだモデルと実際のNRF54で微妙な違いがある可能性が考えられる。

第4表 校正面線源での計算と測定値の比較
(2πβ線放出能から求めた放射能使用)

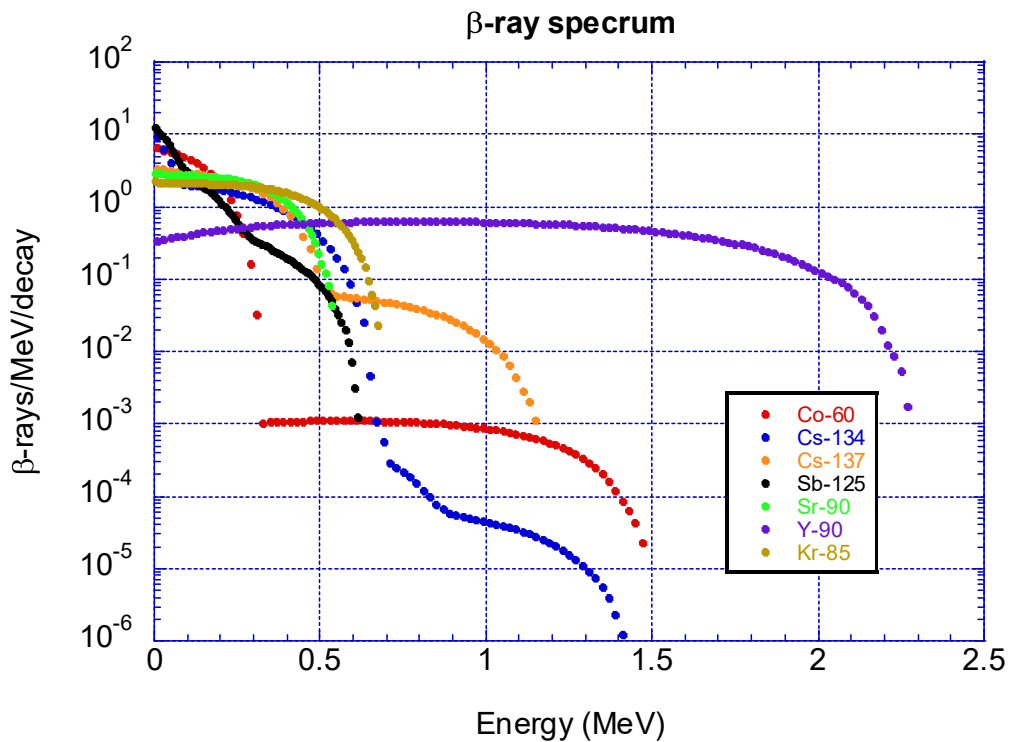
1.17 cm from 10 x 10 cm source with cover (on brass)				R(65degrees)=2.509			
NRF54モデルでの 70μm線量当量率計算値		平板ファントムでの 70μm線量当量率計算値		A/B	NRF54による 測定値	A/C	B/C
mSv/h per Bq/cm ²		mSv/h per Bq/cm ²			mSv/h per Bq/cm ²		
Sr-90 (A)	1.08E-03 ± 1.72E-05	Sr-90 (B)	1.23E-03 ± 4.00E-06	0.88	9.54E-04		
Y-90 (A)	1.18E-03 ± 1.79E-05	Y-90 (B)	1.25E-03 ± 3.44E-06	0.94			
平均 (A)	1.13E-03	平均 (A)	1.24E-03	0.91			
3.66 cm from 10 x 10 cm source with cover (on brass)							
NRF54モデルでの 70μm線量当量率計算値		平板ファントムでの 70μm線量当量率計算値		A/B	NRF54による 測定値	A/C	B/C
mSv/h per Bq/cm ²		mSv/h per Bq/cm ²			mSv/h per Bq/cm ²		
Sr-90 (A)	8.08E-04 ± 1.49E-05	Sr-90 (B)	9.16E-04 ± 3.44E-06	0.88	7.00E-04		
Y-90 (A)	7.35E-04 ± 1.42E-05	Y-90 (B)	8.72E-04 ± 2.84E-06	0.84			
平均 (A)	7.72E-04	平均 (B)	8.94E-04	0.86			
5.06 cm from 10 x 10 cm source with cover (on brass)							
NRF54モデルでの 70μm線量当量率計算値		平板ファントムでの 70μm線量当量率計算値		A/B	NRF54による 測定値	A/C	B/C
mSv/h per Bq/cm ²		mSv/h per Bq/cm ²			mSv/h per Bq/cm ²		
Sr-90 (A)	6.00E-04 ± 1.28E-05	Sr-90 (B)	6.61E-04 ± 2.93E-06	0.91	5.07E-04		
Y-90 (A)	5.22E-04 ± 1.19E-05	Y-90 (B)	5.78E-04 ± 2.30E-06	0.90			
平均 (A)	5.61E-04	平均 (B)	6.19E-04	0.91			

6. 2号機オペフロ床での測定

6-1 対象核種

2号機オペフロ床に付着している放射性核種はほとんどがCs-137で、若干のCs-134とSb-125であることが分っている。Sr-90/Y-90が存在している可能性もあるが、放射能的にはCs-137より遙かに少ないと思われる。従って、測定の点からは、Cs-137のみを対象とすることで十分であるが、NRF54の応答を検討する観点から、Cs-137に加えてSr-90/Y-90、Co-60、Cs-134、Sb-125とKr-85のβ線がコンクリート上にある場合について検討した。

第1図に、検討対象のβ線のスペクトルを示す。Kr-87のβ線スペクトルはSr-90に近い。富士電機がSr-90/Y-90とKr-85のβ線に対してほぼ同じような応答が得られる様にディスクレベルを調整したのは、Sr-90単独の線源を使うことが難しいことから、Sr-90のβ線の代わりにKr-85のβ線を使用したと想定される。



第1図 検討対象核種のβ線スペクトル

6 - 2 比較内容

コンクリート上に、半径 15 cm の線源があり、線源の中心位置で、床から 5 cm の高さに NRF54 を設置（線源と Si 検出器の距離は 5.54 cm）した時の NRF54 モデルによる 70 マイクロメートル線量当量率と同じ条件で計算した平板ファントムモデルによる 70 マイクロメートル線量当量率を比較した。線源上部にはカバーが無いとした。

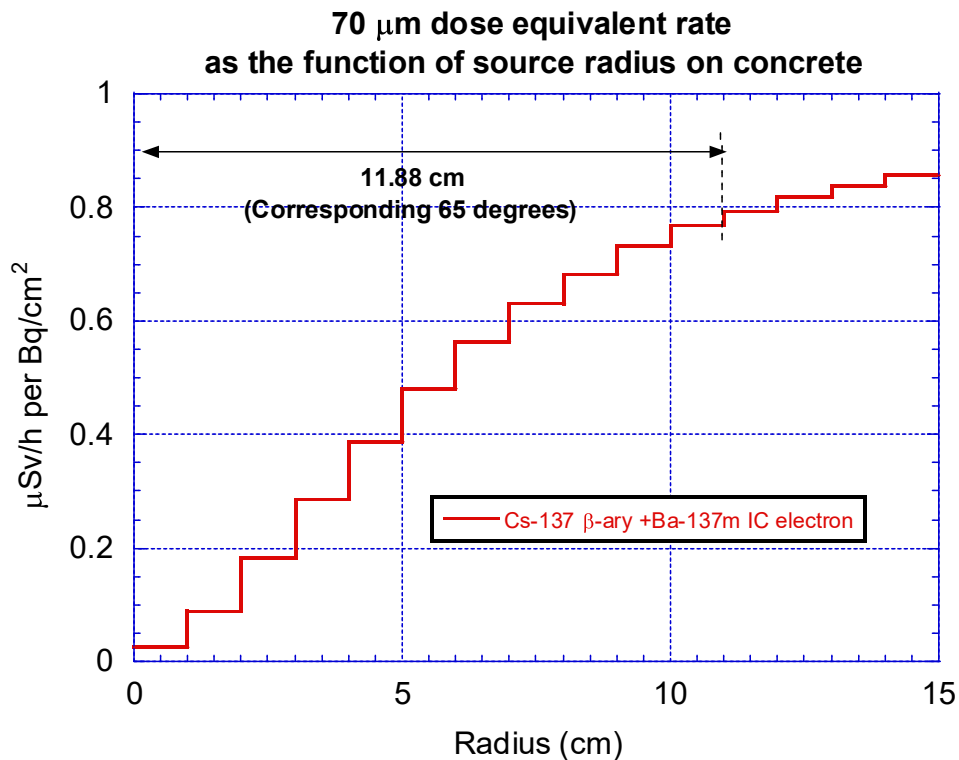
結果を第5表に示す。Co-60 と Sb-125 で NRF54 の応答が小さくなるのは、第1図から分るように、これらの核種からのβ線の平均エネルギーが低いためである。他の核種では、NRF54 モデルによる 70 マイクロメートル線量当量率は、Sr-90/Y-90 校正線源の場合の平板モデルによる 70 マイクロメートル線量当量率とほぼ同程度となっている。

6 - 3 測定対象領域

NRF54 は、65 度の領域を測定対象とする様に設計されている。コンクリート上の Cs-137 (Ba-137m の IC を含む) の 70 マイクロメートル線量当量率に寄与する領域を確認するために、NRF54 モデルで求めた 70 マイクロメートル線量当量率が線源半径による変化を第2図に示す。65 度に対応する半径 11.88 cm に近い 10 cm までは、1 cm 幅のリング領域からほぼ同じ様な寄与があること、12 cm を超えると寄与はあるものの小さくなっていることが分かる。

第5表 コンクリート上の放射性核種による
NRF54 モデルと平板形状モデルの 70 マイクロメートル線量当量率の比較

NRF54モデルでの 70 μ m線量当量率計算値		平板ファントムでの 70 μ m線量当量率計算値		A/B
	mSv/h per Bq/cm ²		mSv/h per Bq/cm ²	
Sr-90 (A)	8.71E-04 \pm 2.08E-05	Sr-90 (B)	9.47E-04 \pm 3.51E-06	0.92
Y-90 (A)	8.22E-04 \pm 1.99E-05	Y-90 (B)	9.68E-04 \pm 3.03E-06	0.85
平均 (A)	8.47E-04	平均 (B)	9.58E-04	0.88
Cs-137 β -ray (A)	7.47E-04 \pm 1.90E-05	Cs-137 β -ray (B)	8.91E-04 \pm 3.46E-06	0.84
Ba-137m IC electron (A)	1.01E-04 \pm 2.24E-06	Ba-137m IC electron (B)	1.13E-04 \pm 3.33E-07	0.89
合計 (A)	8.48E-04	合計 (B)	1.00E-03	0.84
Cs-134 (A)	6.41E-04 \pm 1.76E-05	Cs-134 (B)	6.79E-04 \pm 2.95E-06	0.94
Co-60 (A)	2.35E-04 \pm 1.10E-05	Co-60 (B)	4.99E-04 \pm 2.80E-06	0.47
Sb-125 (A)	2.24E-04 \pm 1.04E-05	Sb-125 (B)	3.55E-04 \pm 2.27E-06	0.63
Kr-85 (A)	9.31E-04 \pm 2.12E-05	Kr-85 (B)	1.01E-03 \pm 3.52E-06	0.92



第2図 5.54 cm 高さでの線源半径による Cs-137 による
70 マイクロメートル線量当量率の変化

6 - 4 2号機オペフロ測定で使用する換算係数

測定する70マイクロメートル線量当量率は、後方散乱を含んでいること、表面のカバーによる減衰があることから、Sr-90/Y-90 校正線源での測定値をそのまま使用することは出来ない。以上の結果を踏まえて以下の様に対応する。

(1) egs5 を使って計算した NRF54 モデルでの計算値は、65 度の範囲外にも線源が広がっている校正面線源の場合には測定値を 18 % 過大評価している。違いの原因は、モデルの不十分さによるので、コンクリート上の場合も同様であると仮定する。

(2) egs5 で計算したコンクリート上の NRF54 モデルでの Cs-137 の換算係数 (Ba-137m の IC 電子の寄与を含む) は、 $8.48\text{E-}04$ mSv/h per Bq/cm² を上記の過大評価を考量して、1.18 で割った値、 $7.19\text{E-}04$ mSv/h per Bq/cm² を換算係数として使用する。

謝辞

計算に必要な NRF54 の構造、校正方法に関する貴重な情報を提供して頂いた富士電機株式会社の関係者に感謝します。

参考文献

1. https://www.fujielectric.co.jp/about/company/gihou_2019/pdf/92-02/FEJ92-02-000-2019a.pdf
2. H. Hirayama, Y. Namito, A. F. Bielajew, S. J. Wilderman, W.R. Nelson, “The EGS5 Code System”, SLAC-R-730 (2005) and KEK Report 2005-8 (2005).

【添付資料 2】

富士電機 NRF54 線量計による 2 号機オペレーションフロアでの測定（速報）

1. はじめに

2021 年 4 月 14 日に、2 号機 R/B オペレーションフロアにてロボットを使い、床面から 5 cm の高さに 2 台の NRF54 線量計（富士電機製・個人線量計）を取り付けて測定を行なった。本測定は、東京電力ホールディングス（株）の協力を得て実施した。

2. 測定条件

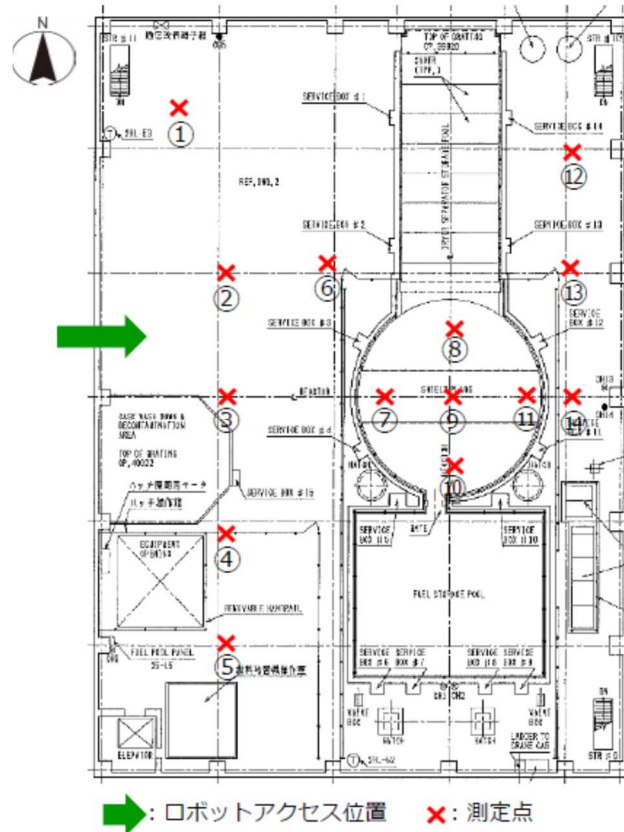
NRF54 は「 β 線と γ 線による 70 マイクロメートル線量当量」と「1 センチメートル線量当量」を、設定時間毎のトレンドとして連続記憶することが出来る。今回の測定では、「 β 線と γ 線による 70 マイクロメートル線量当量」の測定値から、 β 線のみの線量を得る工夫を施した。

設定時間は 1 分とし、1 台は裸で「 β 線と γ 線による 70 マイクロメートル線量当量」を、他の 1 台には 2 mm 厚さのプラスチックフィルターを設置して Cs-137 からの β 線及び Ba-137m からの内部転換電子を遮蔽し「 γ 線のみによる 70 マイクロメートル線量当量」が測定できるようにした。2 台の線量計は隣接してロボットに取り付け、両線量計の中心間距離は約 70 mm である。

3. 測定

第 1 図に示した測定点にロボットを移動させ、5 分間停止させ測定を行なった。測定番号 7 - 11 が、シールドプラグ上部で、他はシールドプラグ以外である。測定点は、出来るだけ平坦な箇所を選択した。

測定時にロボット操作室で観察したオペフロ内カメラ画像では、床表面に砂状のものが見られたことから、エポキシ塗装表面に付着していると思われる Cs-137 の β 線及び Ba-137m の内部転換電子の一部が、砂で遮蔽されている可能性がある。



第1図 オペレーションフロアでの測定位置

4. 測定結果

各測定点での5分の測定中（5 データ）、前後の各1分の測定を除いた3分間のデータを測定点のトレンドデータとして解析した。

「1センチメートル線量当量率」の結果を第1表に、「70 マイクロメートル線量当量率」の測定結果を第2表に示す。

70 マイクロメートル線量当量率については、No. 2 の線量計（裸）の結果から2 mm のプラスチックカバーのついた No. 1 の線量計の結果を減算した値を「β 線による70 マイクロメートル線量当量率」として示した。

第2表には、NRF54 の構造を考慮して egs5 の計算から求めた「コンクリート表面の Cs-137 の β 線と Ba-137m の内部転換電子による70 マイクロメートル線量当量率から表面汚染密度への換算係数」 $7.19E-04 \text{ mSv/h per Bq/cm}^2$ を用いて求めた汚染密度を併せて示した。（添付資料1 参照）

第3表に測定結果のまとめを示す。

(1) 1センチメートル線量当量率

床面の汚染密度がほぼ一様であれば、No. 1 と No. 2 の線量計は同一地点の雰囲気

測定しているので、それらの線量率はほぼ同じになる。

多くの測定点ではほぼ同じであるが、測定点 No. 2、No. 5、No. 9、No. 10 及び No. 13 では、両者の差が 10 %以上ある。測定点 No. 2 では、プラスチックカバーを付けた No. 1 線量計の方が 2 倍ほど大きな線量率となっている。一方、No. 13 では、逆に No. 2 線量計の方が 1.3 倍大きい線量率になっている。これらの 2 箇所では、高い線量率側の線量計の近くに局所的な高濃度の汚染が存在している可能性が考えられる。

No. 1 線量計のデータから、シールドプラグ上部と、東・西の床面を比較すると以下の様になっている。

西側の床面： 平均 12.0 mSv/h (5.92 mSv/h ~ 19.2 mSv/h)

東側の床面： 平均 75.2 mSv/h (61.9 mSv/h ~ 113 mSv/h)

シールドプラグ上部：平均 140 mSv/h (22.2 mSv/h ~ 265 mSv/h)

(2) β 線による 70 マイクロメートル線量当量率

「 β 線による 70 マイクロメートル線量当量率」は、2 つの測定器の γ 線による寄与と同じであることを前提に、2 mm のプラスチックカバーを付けた No. 1 線量計の結果を「 γ 線による 70 マイクロメートル線量当量率」として、カバーの無い No. 2 線量計 ($\beta + \gamma$) の結果から引くことにより求められる。

No. 2 線量計の 1 センチメートル線量当量率が No. 1 線量計の 1 センチメートル線量当量率より大きい場合には、 γ 線による 70 マイクロメートル線量当量率を過大評価し、逆の場合は過小評価することになる。

第 3 表では、両者の比が 10 %未満 (黄色の印の測定点) であった結果を用い、床面西側、シールドプラグ上部、床面東側の 3 領域に分けて、汚染密度の平均と最小・最大の測定結果を示した。若干の違いはあるが、3 箇所ともほぼ同じレベルである。汚染密度の絶対値については、表面に砂状にものが見られたことから過小評価となっている可能性がある。

第1表 1センチメートル線量当量率

測定点	時刻	トレンドデータ		60 sec dose		周辺線量当量率	
		μSv		μSv		mSv/h	
		No. 2 (bare)	No.1	No. 2 (bare)	No.1	No. 2 (bare)	No.1
No. 1	10:02	928	912			6.72	6.76
		1040	1023	112	111		
		1154	1137	114	114		
		1264	1250	110	113		
	10:06	1375	1363				
No. 2	10:09	1854	1912			14.2	25.7
		2092	2336	238	424		
		2327	2765	235	429		
		2564	3196	237	431		
	10:13	2800	3623				
No. 3	10:16	3150	4002			5.92	5.84
		3248	4098	98	96		
		3346	4196	98	98		
		3446	4294	100	98		
	10:20	3544	4393				
No. 4	10:22	3784	4627			8.26	7.78
		3920	4758	136	131		
		4058	4887	138	129		
		4197	5016	139	129		
	10:26	4334	5149				
No. 5	10:28	4758	5529			19.2	14.2
		5078	5766	320	237		
		5397	6002	319	236		
		5717	6240	320	238		
	10:32	6035	6478				
No. 6	10:36	6956	7337			17.5	16.3
		7249	7611	293	274		
		7540	7881	291	270		
		7829	8154	289	273		
	10:40	8122	8427				
No. 7	10:46	13239	13393			38.0	36.3
		13870	14005	631	612		
		14505	14607	635	602		
		15137	15209	632	602		
	10:50	15765	15809				
No. 8	10:52	21801	21991			229	254
		25614	26219	3813	4228		
		29448	30448	3834	4229		
		33264	34699	3816	4251		
	10:56	37089	38928				
No. 9	10:59	50193	52354			265	365
		54611	58421	4418	6067		
		59021	64525	4410	6104		
		63437	70609	4416	6084		
	11:03	67843	76691				
No. 10	11:05	73365	81991			147	123
		75813	84036	2448	2045		
		78260	86076	2447	2040		
		80715	88119	2455	2043		
	11:09	83161	90176				
No. 11	11:11	86898	93747			22.2	23.3
		87264	94134	366	387		
		87635	94521	371	387		
		88008	94911	373	390		
	11:15	88380	95295				
No. 12	11:28	105479	109940			50.3	49.1
		106316	110756	837	816		
		107156	111579	840	823		
		107995	112393	839	814		
	11:32	108832	113213				
No. 13	11:22	95816	102219			113	85.8
		97709	103647	1893	1428		
		99599	105073	1890	1426		
		101488	106508	1889	1435		
	11:26	103383	107944				
No. 14	11:35	112173	116382			61.9	55.3
		113201	117301	1028	919		
		114235	118227	1034	926		
		115270	119146	1035	919		
	11:39	116305	120067				

第2表 70マイクロメートル線量当量率

測定点	時刻	トレンドデータ		60 sec dose		70 μ m DE		β -ray dose	Contamination density
		μ Sv		μ Sv		mSv/h		equivalent rate	
		No. 2 (bare)	No.1	No. 2 (bare)	No.1	No. 2 (bare)	No.1	mSv/h	
No. 1	10:02	2494	1153						
		3014	1295	520	142	32.3	8.58	23.7	3.3E+04
		3572	1437	558	142				
		4110	1582	538	145				
	10:06	4663	1727						
No. 2	10:09	5817	2473						
		6301	3142	484	669	29.8	40.3	-10.5	
		6803	3822	502	680				
		7308	4488	505	666				
	10:13	7831	5154						
No. 3	10:16	8634	5640						
		8879	5754	245	114	15.1	6.80	8.3	1.2E+04
		9130	5869	251	115				
		9391	5980	261	111				
	10:20	9638	6088						
No. 4	10:22	10258	6368						
		10859	6531	601	163	36.3	9.42	26.9	3.7E+04
		11463	6687	604	156				
		12074	6839	611	152				
	10:26	12683	6996						
No. 5	10:28	13608	7455						
		14319	7740	711	285	42.7	16.8	26.0	3.6E+04
		15036	8011	717	271				
		15744	8293	708	282				
	10:32	16442	8567						
No. 6	10:36	18669	9637						
		19736	9977	1067	340	65.0	20.6	44.4	6.2E+04
		20834	10324	1098	347				
		21919	10668	1085	344				
	10:40	23002	11013						
No. 7	10:46	33251	17718						
		35010	18498	1759	780	107	46.8	60.0	8.3E+04
		36794	19280	1784	782				
		38592	20058	1798	778				
	10:50	40365	20847						
No. 8	10:52	50606	29193						
		56630	35082	6024	5889	362	353	8.8	1.2E+04
		62687	40956	6057	5874				
		68707	46853	6020	5897				
	10:56	74687	52694						
No. 9	10:59	96839	70489						
		106286	78545	9447	8056	567	485	82.2	1.1E+05
		115765	86649	9479	8104				
		125205	94746	9440	8097				
	11:03	134666	102810						
No. 10	11:05	149052	109805						
		156907	112412	7855	2607	472	156	316	4.4E+05
		164742	115017	7835	2605				
		172646	117624	7904	2607				
	11:09	180477	120229						
No. 11	11:11	188437	124968						
		190814	125463	2377	495	142	30.5	112	1.6E+05
		193158	125964	2344	501				
		195536	126491	2378	527				
	11:15	197879	126990						
No. 12	11:28	228769	145396						
		230979	146407	2210	1011	132	60.5	72.0	1.0E+05
		233185	147414	2206	1007				
		235392	148421	2207	1007				
	11:32	237581	149441						
No. 13	11:22	212252	136019						
		215387	137736	3135	1717	189	102.1	86.5	1.2E+05
		218538	139428	3151	1692				
		221683	141125	3145	1697				
	11:26	224820	142824						
No. 14	11:35	243581	153551						
		245100	154658	1519	1107	92.0	66.4	25.6	3.6E+04
		246649	155769	1549	1111				
		248182	156872	1533	1103				
	11:39	249713	157979						

第3表 測定結果のまとめ

測定点	周辺線量当量率		70マイクロメートル線量当量率		β線70マイクロメートル線量当量率	Cs-137汚染密度		
	mSv/h		mSv/h			各測定点	AとBの差が10%未満 Bq/cm ²	
	No. 2 (bare) [A]	No. 1 [B]	No. 2 (bare)	No. 1				
No. 1	6.72	6.76	32.3	8.58	23.7	3.3E+04	3.6E+04 (1.2E+04 ~6.2E+04)	
No. 2	14.2	25.7	29.8	40.3				
No. 3	5.92	5.84	15.1	6.80	8.34	1.2E+04		
No. 4	8.26	7.78	36.3	9.42	26.9	3.7E+04		
No. 5	19.2	14.2	42.7	16.8	26.0	3.6E+04		
No. 6	17.5	16.3	65.0	20.6	44.4	6.2E+04		
No. 7	38.0	36.3	107	46.8	60.0	8.3E+04	8.4E+04 (1.2E+04~1.6E+05)	
No. 8	229	254	362	353	8.82	1.2E+04		
No. 9	シールドプラグ	265	365	567	485	82.2		1.1E+05
No. 10		147	123	472	156	316		4.4E+05
No. 11		22.2	23.3	142	30.5	112		1.6E+05
No. 12		50.3	49.1	132	60.5	72.0	1.0E+05	6.8E+04 (3.6E+04~1.0E+05)
No. 13	東側床	113	85.8	189	102	86.5	1.2E+05	
No. 14		50.3	49.1	92.0	66.4	25.6	3.6E+04	

【添付資料 3】

コリメータ付き γ 線線量計による周辺線量当量率の検討

1. はじめに

2号機のシールドプラグ上層と中間層の間に沈着しているCs-137放射能の推定で、コリメータ付き γ 線線量計による結果が、他の測定結果から求めた値より明らかに小さかった。東京電力ホールディングス株式会社から、使用したコリメータ付き γ 線線量計に関する情報が得られたので検討した。

2. コリメータ付き γ 線線量計

東芝電力放射線テクノサービス株式会社からの「工場試験成績書」によると、コリメータ内部に設置される半導体線量計は「PD20A」（メーカー名の記載なし）である。

測定結果から、床表面の汚染密度を求める換算係数の算出は、東芝エネルギーシステムズ株式会社からの「技術連絡書」に以下の様に記載されている。

(1) 測定値 (cps) から線量率の換算

別の資料に示されている校正結果（線量率と測定値 (cps) の関係（線源はCs-137と思われる）から、 $8.20E-4$ mSv/h per cps であるとしている。資料では、mSv/cps となっているが、記載ミスと思われる。

(2) コリメータ γ 線の表面汚染密度への換算係数

測定面を平面で、汚染が均一であるとして、測定線量率から表面汚染密度への換算係数は、「コリメータ γ 線量計の形状と材質・密度を体系とし、線源形状を円」として、モンテカルロシミュレーションで求めている。線源半径が50 cm以上では換算係数が一定になるとして、 $2.20E+06$ Bq/cm² per mSv/h であるとしている。「技術連絡書」の記載されている「コリメータ γ の cps から線量率への換算係数は、使用されている線量計が個人線量計であることから、ファントム上での校正で求められたものと考えられる。線量計内部で、この換算係数を使って cps を線量率に変換して表示していると思われる。モンテカルロシミュレーションでは、線量計で使用されている半導体検出器の詳細な情報を入手して、面線源からの計数率 (cps) も計算し、換算係数を使って線量率に変換している可能性が高いと考えられる。従って、上記の $2.20E+06$ Bq/cm² per mSv/h は、個人線量計である「PD20A」をファントム無しで使用した時の線量率であり、場の周辺線量当量率とは異なることになる。

3. 示されている表面汚染密度の検討

3-1 測定状況

コリメータ γ 線量計が床面の設置された状況では、

- (1) コリメータにより、半径 15 cm の領域表面からの直接線
 - (2) 線源（半径 15 cm に限定せず考慮した線源面全体）から後方のコンクリートに入射し、後方散乱されコリメータ内の線量計に達する散乱線
- の 2 種類の線源がある。(1) は、半径 15 cm の面線源が空気中に存在する場合に相当する。同じ汚染密度の場合、評価されるコリメータ γ 線線量率は、(1) による線量率よりも大きくなければならない。

3-2 表面汚染密度が 1 Bq/cm² の場合の γ 線線量率の比較

換算係数 2.20E+06 Bq/cm² per mSv/h から、4.55E-04 μ Sv/h per Bq/cm² となる。

半径 R (cm) の面線源の中心から h (cm) 位置での周辺線量当量率 (1 cm線量当量率) q (μ Sv/h per MBq/cm²) は、1cm線量当量率定数 Γ (μ Sv/h per MBq at 1 m) を用いて

$$q = 10^4 \pi \Gamma \ln \frac{R^2 + h^2}{h^2}$$

により求めることができる。R=15 cm、h=30.5 cm の場合、q = 6.41E-02 なので、汚染密度が 1 Bq/cm² と時の周辺線量当量率は、6.41E-04 μ Sv/h (1.41 倍) となる。

この値は、明らかに技術連絡書で提起されている線量当量率より大きい。

egs5 を用いて計算した結果は、7.70 E-04 μ Sv/h (1.69 倍) で、半径 15 cm の面線源の寄与に、後方散乱の寄与が加わった結果になっている。

3-3 原因の検討と対応

(1) 違いの原因

2の(2)で示した様に、コリメータ付き γ 線線量計で測定される「線量率」は、ファントム上で校正された換算係数をファントムとは異なる鉛内部で得られた「線量率」であり、周辺線量当量率や個人線量計による 1 cm線量当量とは異なるものである。このことが、違いの理由であると考えられる。

(2) 対応

「PD20A」で使用されている半導体検出器と設定されている「ディスクリレベル」等の詳細な情報を用いた計算を行なうことが望ましいが、必要な詳細情報は入手できない。次善の方法として線源が Cs-137 のみの場合には、技術書で使用の前提としている線源面から 30.5 cm 位置での汚染密度当たりの線量率として 4.55E-04 μ Sv/h per Bq/cm² を用い、条件が異なる場合（線源からの距離、シールドプラグ上層と中間層の間が線源の場合）には、egs5 で求めた周辺線量当量率の 1/1.69 を線量計で測定した線量率として使用する。

散乱線の寄与が中心となるシールドプラグ上層と中間層の間が線源の場合は状況が異なる可能性があることに留意する必要がある。

[別添]

平面線源による 1cm 線量当量率の計算

1. はじめに

1cm 線量当量率定数 (Γ μ Sv/h per MBq at 1 m) を使った面線源の中心軸上の 1cm 線量当量率を計算する解析式を導いた。

2. 条件

半径 R (cm) の円形等方線源の中心軸上 h (cm) の位置での 1cm 線量当量率を考える。単位面積 (1 cm^2) 当たり MBq の線源があるとする。

3. 式

半径 r (cm) から $r+dr$ で角度範囲が θ から $\theta+d\theta$ の微小領域 $dS=rdr\theta d\theta$ からの 1cm 線量当量率 dq (μ Sv/h per MBq/cm²) は、

$$dq = \frac{\Gamma dS}{\rho^2}, \rho^2 = (h^2 + r^2) \times 10^{-4}$$

なので、P 点での 1cm 線量当量率 q (μ Sv/ per MBq/cm²) は、

$$q = 10^4 \Gamma \int_0^R \int_0^{2\pi} \frac{rdr\theta d\theta}{r^2 + h^2} = 2\pi \times 10^4 \Gamma \int_0^R \frac{rdr}{r^2 + h^2}$$

となる。 $x=r^2+h^2$ とすると、 $dx=2rdr$ 、 $x=h^2$ ($r=0$) で $x=R^2+h^2$ となるので、

$$q = 2\pi \times 10^4 \Gamma \int_{h^2}^{R^2+h^2} \frac{dx}{2x} = 10^4 \pi \Gamma [\ln x]_{h^2}^{R^2+h^2} = 10^4 \pi \Gamma \ln \frac{R^2 + h^2}{h^2}$$

となる。

【添付資料 4】

2号機オペフロ天井の実効汚染密度測定について

1. はじめに

2号機オペフロの線量率低減を考える上で、天井は遮蔽を設置することが困難であることから、床面近くの線量に寄与する「実効的な汚染密度」（表面から放出される線源の密度）を知ることは重要である。実現可能な方法について検討した。

2. 測定方法の検討

床面から 16 m の天井の汚染密度については、前室からのガンマカメラによる測定が唯一のものである。しかし、ガンマカメラは、オペフロ開口部の入口の床面近くからの測定で、斜めから天井の一部を測定したものである。ガンマカメラを使用するのであれば、オペフロ内部でカメラを上向きに設置して測定することが望ましいが、線量率が低下しているとはいえ、内部に立ち入ってガンマカメラの測定を行なうことは難しい。また、オペフロ床面で上向きにガンマカメラを設置した場合、床面の汚染によるバックグラウンドの寄与が大きく測定が困難であることが考えられる。

実現可能な方法として、東電が床や壁の表面 γ 線線量率の測定に使用してきた「コリメータ付 γ 線線量計」を用いて測定できる可能性がある。

3. 測定方法

「コリメータ付 γ 線線量計」の視野を天井に向けて測定を行なう。上向きに設置した場合、天井の視野領域は、線量計の位置が床面から 1 m の場合は半径 7.4 m で、設置位置が床面から 5 m の場合は半径 5.4 m となる。コリメータの構造から、視野以外の領域の線源からの寄与は小さいと考えられる。天井は平坦な構造では無い様であるが、線量計からの距離が長いので、若干のこぼこの影響は小さい。また、床面での線量率に寄与する線源としては線量計に入射する「実効的な線源」であると思われるので、天井の詳細な構造は考慮する必要はないと思われる。

4. 周辺線量当量率から汚染密度への換算係数

平坦な天井面に一様な密度で Cs-137 がある場合の、床面から 1 m 及び 5 m 位置での「コリメータ付 γ 線線量計」による周辺線量当量率を電磁カスケードモンテカルロ計算コード *egs5*¹⁾ に、「面等方線源と単位球検出器形状を点等方線源と面検出器に変換する手法²⁾」を拡張してコリメータに対応した平面検出器への入射角度の制限をつけることにより、コリメータ内面での散乱線の寄与を無視した条件³⁾ で、形状変換を用いて測定位置での 1 センチメートル線量当量率を計算した。汚染密度が 1 Bq/cm² の時の周

辺線量当量率は、

床面から 1 m : $0.725\text{E}-03 \pm 0.27\text{E}-06$ $\mu\text{Sv/h}$

床面から 5 m : $0.746\text{E}-03 \pm 0.28\text{E}-06$ $\mu\text{Sv/h}$

これまでの測定されていた表面から 30.1 cm での 1 Bq/cm^2 あたりの周辺線量当量率が、

$0.787\text{E}-03 \pm 0.29\text{E}-06$ $\mu\text{Sv/h}$

なので、距離による変化は小さいことが分る。

換算係数は、

床面から 1 m : $1.38\text{E}+06$ Bq/cm^2 per mSv/h

床面から 5 m : $1.34\text{E}+06$ Bq/cm^2 per mSv/h

となる。

「コリメータ付 γ 線線量計」により測定されている「線量当量率」が周辺線量当量率でなく、ファントムではなく鉛で囲まれた個人線量計による「線量率」である事⁴⁾が判明した結果、換算係数としては、上記の 1.69 倍の下記の値を使用する必要がある。

床面から 1 m : $2.40\text{E}+06$ Bq/cm^2 per mSv/h

床面から 5 m : $2.33\text{E}+06$ Bq/cm^2 per mSv/h

参考資料

1. H. Hirayama, Y. Namito, A. F. Bielajew, S. J. Wilderman and W. R. Nelson, "The EGS5 Code System", SLAC-R-730 (2005) and KEK Report 2005-8 (2005)
2. Y. Namito, H. Nakamura, A. Toyoda, K. Iijima, H. Iwase, S. Ban and H. Hirayama, "Transformation of a system consisting of plane isotropic source and unit sphere detector into a system consisting of point isotropic source and plane detector in Monte Carlo calculation", J. Nucl. Sci. Technol, **49**, 167-172 (2012)
3. 波戸 芳仁、平山 英夫、"線源と検出器の形状変換の拡張-コリメータ付き検出器、円柱線源-"、日本原子力学会春の年会 1D01 (オンライン, 2021年3月17日~19日)

(別添 3-2-5-10)

2号機の検討を踏まえた3号機シールドプラグ上層と中間層の間の汚染密度

原子力規制庁原子力規制部

東京電力福島第一原子力発電所事故対策室

林 克己、平山英夫

1. はじめに

3号機では、シールドプラグ上層上面のコンクリートを5 mm削ったことによりシールドプラグ上層上面には汚染がなく、シールドプラグ上層と中間層の間の汚染が周辺線量当量率の線源となっていると推定した。シールドプラグ上部の光子場は、散乱線が中心であることを、コリメータ直径が0.8 cmで左右上下の鉛の厚さが15 cmのコリメータ内部にCdZnTeを設置し、大型クレーンを用いて測定を行った。シールドプラグ上部では、Cs-137からの0.662 MeV γ 線のピークが散乱線よりはるかに少ないことを確認した。

測定された波高分布の0.662 MeV全エネルギー吸収ピーク計数率から、シールドプラグのコンクリートの厚さが60 cmとして、シールドプラグ上層と中間層の間の半径6 cmの領域内の汚染密度を推定した。

その後、2号機のシールドプラグの検討から、シールドプラグのコンクリートの厚さが61 cmであり、上下に鉄筋があることが判明した。3号機のシールドプラグが2号機と同じであるとして測定結果を再検討した。

2. これまでの3号機測定結果の解析

シールドプラグを密度 2.1 g/cm^3 で厚さ60 cmのコンクリートとして、シールドプラグ上層下面から検出器前面に達する0.662 MeVの非散乱線数が $7.5 \times 10^{-9} \text{ photons/s per Bq/cm}^2$ で、CdZnTe検出器の前面に0.662 MeV γ 線が垂直に入射した場合のピーク検出効率を0.076 (egs5の計算結果)として、CdZnTe検出器の0.662 MeVピーク計数率(cps)からシールドプラグ下部の汚染密度への換算係数を $1.7\text{E}+9\text{Bq/cm}^2 \text{ per cps}$ としていた。

3. 換算係数の再検討

2号機のシールドプラグは厚さ61 cmで、上面から10 cmに東西方向には15 cm間隔で南北方向には20 cm間隔でD25の鉄筋が、下面から10 cmに東西南北共に20 cm間隔でD32の鉄筋が配置されている。鉄筋の密度は、 7.85 g/cm^3 である。3号機の測定では、シールドプラグ上層と中間層の間のCs-137からコリメータ内部のCdZnTe検出器に

入射する非散乱線数が必要である。非散乱線を求めるには、線源位置と検出器の途中に通過する「鉄筋の長さ」が必要である。しかし、2号機の場合と同様に、上下の鉄筋の位置、測定点と鉄筋の位置関係を正確に知ることは出来ない。そこで、上下の鉄筋の中間位置がシールドプラグの中心である場合（配置関係1）と上下の南北と東西の鉄筋の交差点がシールドプラグの中心である場合（配置関係2）について検討した。

測定点と鉄筋の位置関係が不明なので、それぞれの配置位置で、X方向（南北方向）で-30 cmから30 cm、Y方向（東西方向）で-30 cmから30 cmの位置をランダムにサンプリングし、その位置を中心軸としたシールドプラグ上層と中間層の間からコリメータを通して実効的に検出器に非散乱線が到達する半径6 cmの領域から検出器に到達する非散乱線数を【別添】に示す方法で求めた。

配置関係1 : $0.356\text{E}-08 \pm 0.65\text{E}-10$ photons/s per Bq/cm²

配置関係2 : $0.365\text{E}-08 \pm 0.66\text{E}-10$ photons/s per Bq/cm²

と配置の違いによる差は3%以下であった。

非散乱線数が最大となるのは、配置関係1で測定位置が中心の場合である。この場合、非散乱線数は、 $0.513\text{E}-08 \pm 0.23\text{E}-10$ photons/s per Bq/cm²である。

一方、非散乱線数が最小となるのは、配置関係2で測定位置が中心の場合である。この場合、非散乱線数は、 $0.107\text{E}-08 \pm 0.54\text{E}-11$ photons/s per Bq/cm²である。

以上の結果から、非散乱線数は

平均 : $0.361\text{E}-08$ photons/s per Bq/cm²

最大 : $0.513\text{E}-08$ photons/s per Bq/cm²

最小 : $0.107\text{E}-08$ photons/s per Bq/cm²

となる。従って、CdZnTe検出器の0.662 MeVピーク計数率(cps)からシールドプラグ上層と中間層の間の汚染密度への換算係数は、

平均 : $3.64\text{E}+09$ Bq/cm² per cps

最小 : $2.56\text{E}+09$ Bq/cm² per cps

最大 : $1.23\text{E}+10$ Bq/cm² per cps

となる。

4. 再評価結果

3. で求めた換算係数を用いて求めたシールドプラグ上層と中間層の間の汚染密度を表1に示す。全ての測定点で、配置関係1の中央又は配置関係2の中央に相当する位置になることはあまり考えにくい。実態としては、平均に近い状況ではないかと思われる。3号機で使用した測定システムが対象とする領域は、半径6 cmと非常に狭いので、限られた6個の測定結果から全体の状況を推定することには無理があるが、仮に平均値を使うと、2号機より少し少ない63 PBqという汚染量となる。

表 1 再評価したシールドプラグ上層と中間層の間の汚染密度

Point	Peak count rates	Concentration average	Concentration minimum	Concentration maximum
	cps	(Bq/cm ²)		
No. 1	32.8	1.20E+11	8.41E+10	4.03E+11
No. 2	7.19	2.62E+10	1.84E+10	8.84E+10
No. 3	23.4	8.55E+10	6.01E+10	2.88E+11
No.4	4.72	1.72E+10	1.21E+10	5.80E+10
No. 5	8.67	3.16E+10	2.22E+10	1.07E+11
Average concentration		5.60E+10	3.94E+10	1.89E+11
		6 m radius total (PBq)		
		6.33E+01	4.46E+01	2.14E+02

5. 3号機の5 m 高さでの周辺線量当量率を用いた推定

3号機では、除染の各段階でオペフロ床面から5 m の高さで周辺線量当量率の測定が行なわれている。

5-1 シールドプラグ上層表面のコンクリート削除から表面汚染密度の推定

2014年1月の「除染作業の中間計測結果」¹⁾からシールドプラグ上層上面の削除終了後の2015年1月8日までの期間に、シールドプラグ表面削除以外の除染が行われなかったと仮定すると、両者の差がシールドプラグ上層表面の汚染の寄与となる。表2に示すように平均では、47 mSv/hの低減になっている。半径6 mのシールドプラグ中心で床表面から5 m位置での周辺線量当量率は床表面の汚染密度が、Cs-137が1 Bq/cm²でCs-134が0.29 Bq/cm²の時は、5.30E-03 μSv/hとなる。従って、47 mSv/hに相当するCs-137汚染密度は、

$$47 \times 103 / 5.30E-03 = 8.8 E+6 \text{ Bq/cm}^2$$

となる。3号機は、水素爆発が起きているので2号機と単純な比較はできないが、高すぎるように思われる。除染作業に周辺の汚染片の片付けやシールドプラグ上層表面以外のコンクリート表面の削除などによる寄与が含まれていること、測定高さが高いため、周辺の除染の効果も含まれていると考えられる。残っている測定データから分離は難しい。

表2 シールドプラグ上層上面削除による除染効果

2014年4月以降	2015年1月8日	差
mSv/h		
239	195	44
235	185	50
197	172	25
259	200	59
266	213	53
254	201	53
242	204	38
255	205	50
230	179	51
average		47

5-2 2015年1月8日の測定結果を用いたシールドプラグ上層と中間層の間の汚染密度の推定

2015年1月8日のシールドプラグ上部5mの周辺線量当量率を図1に、オペフロ全体の測定結果²⁾を図2に示す。3号機は、2号機の場合と異なり、オペフロ床面の状況が場所により異なり、水素爆発により床が崩落して「除染」や「汚染物の除去」が困難な箇所が存在する。また、測定位置が床面から5mと高いことから、2号機の場合よりも広い領域の寄与を測定していると考えられる。従って、2号機で採用したシールドプラグ以外の領域の測定結果を使うことは出来ない。一方、3号機のシールドプラグ上層上面の汚染は表面5mmの削除により除去されたとすると、シールドプラグ上部での周辺線量当量率は、シールドプラグ上層と中間層の間の汚染による寄与とシールドプラグ以外の領域のお背の寄与ということになる。シールドプラグ上層と中間層の間の汚染による厚さ61cmのコンクリートを透過した光子は、上下方向をZ軸としZ軸に対する角度を θ とした場合 $\cos \theta$ に近い角度分布をしている。従って、シールドプラグを外れた領域への寄与は少ないと考えられる。図2を見ると、シールドプラグの周辺は、シールドプラグ上部より明らかに周辺線量当量率が低くなっている。上記の考え方から、シールドプラグ近くの周辺線量当量率へのシールドプラグ上層と中間層の間の汚染の寄与は小さいとすると、シールドプラグ周辺の測定値をシールドプラグ周辺の寄与と考えることが出来るので、シールドプラグ周辺の10箇所の測定値の平均170 mSv/hを周辺の影響とする。5m高さでのCs-137: 1 Bq/cm² +Cs-134: 0.29 Bq/cm²による周辺線量当量率はシールドプラグを61cm厚さで鉄筋を加味した実効密度2.18 g/cm³の場合、8.82E-7 μ Sv/hである。表2に示すように、平均のCs-137の汚染密度は、2.89E+10 Bq/cm²となる。半径6mのシールドプラグ全体では3.3E+16Bq (33 PBq)に相当する量である。

この結果は、あくまでシールドプラグ周辺の測定値が「シールドプラグ上層表面のシールドプラグ上層と中間層の間汚染以外の寄与」であるという推測に基づいたものである。使用した周辺の線量率として、シールドプラグに近い場所の測定結果を用いていること、測定高さが5 m と高いことから、周辺の測定値にシールドプラグ上層と中間層の間の汚染の寄与が含まれている可能性が高い。シールドプラグ上層と中間層の間以外の寄与を大きめに見積もった推定でも $3.3\text{E}+16\text{Bq}$ (33 PBq) という推定結果になることから、5 m での周辺線量当量率の測定からもシールドプラグ上層と中間層の間に大量の Cs-137 が存在していることを示している。

参考文献

- 1) “3号機オペレーティングフロアの除染・遮へい作業進捗”、東京電力株式会社、経済産業省廃炉・汚染水対策チーム会合/事務局会議第7回、平成26年6月27日
https://www.meti.go.jp/earthquake/nuclear/pdf/140627/140627_01_029.pdf
- 2) “3号機原子炉建屋オペレーションフロア線量低減 各エリアの除染進捗と見通しについて”、平成27年6月8日、東京電力株式会社、平成27年6月8日
<https://www.da.nsr.go.jp/file/NR000014344/000110915.pdf>

【別添】 非飛散乱線の計算方法

図1の形状で、検出器の中心軸状のシールドプラグ上層と中間層の間の半径6 cmの領域でXとYの位置をサンプリングする。半径6 cmを超える領域からの寄与は、鉛コリメータを通過する距離が長くなるため無視できる。位置が決まったら、等方線源として方向をサンプリングする。サンプリングされた方向に進んだ0.622 MeV γ 線が直径0.8 cmの検出器前面に達する場合に、egs5に新たに組み込まれた「CG形状で、2点間の途中にある各物質の長さ(cm)を算出する機能」を用いて求めた γ 線が通過する距離と、それぞれの物質の0.662 MeV γ 線に対する線減衰係数から mfp を求め、途中で反応せずに検出器に達する数として $\exp(-mfp)$ を加え、次の γ 線をサンプリングする。検出器の前面に到達しない場合は、そのまま次の粒子をサンプリングする。

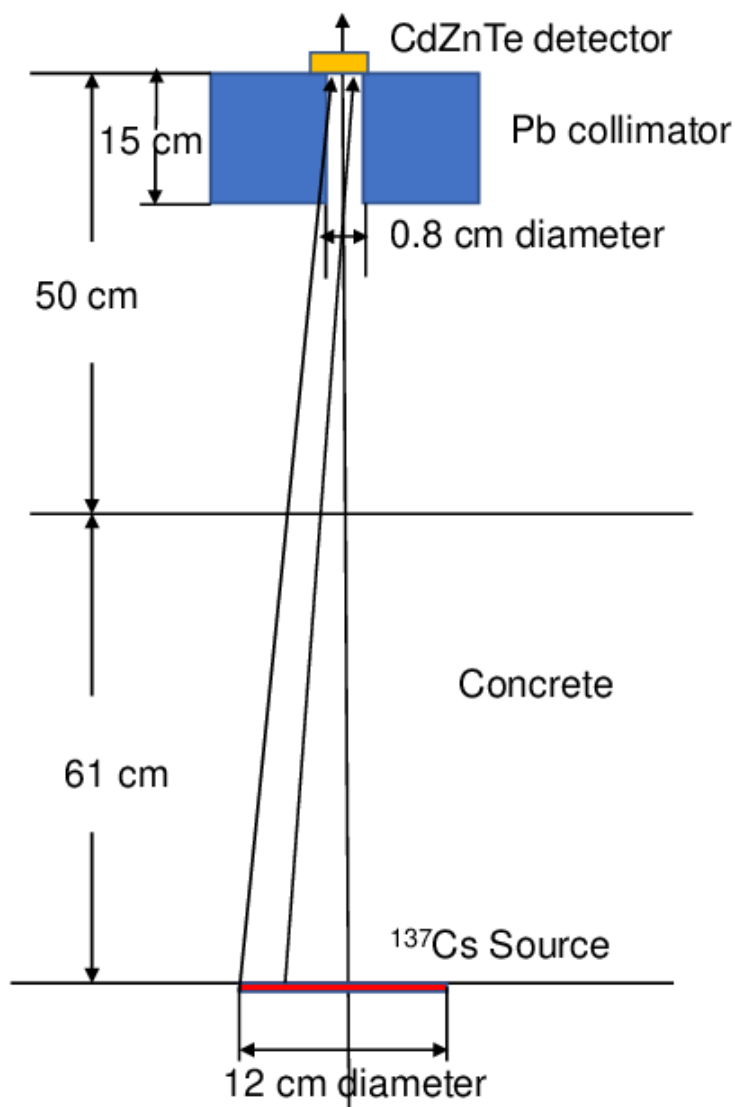


図1 計算形状

(別添 3-3)

2号機シールドプラグの形状

原子力規制庁原子力規制部

東京電力福島第一原子力発電所事故対策室 佐藤 雄一

1. 検討目的

東京電力福島第一原子力発電所事故時の福島第一原子力発電所2号機（以下「1F2号機」という。）における放射性物質の放出経路の推定（シールドプラグのパーツ間のすき間が放射性物質の放出経路となりうるか）に係る検討を行うため、シールドプラグ上層上面の形状に関する検討等を実施した。

2. 調査方法

(1) シールドプラグ上層上面の形状測定等の実施及びその結果の分析

1F2号機のシールドプラグ上層上面の形状測定を実施し、シールドプラグの表面形状を確認した。

また、比較検討のため、福島第一原子力発電所内でシールドプラグ上層上面の形状測定が実施可能である同発電所5号機（以下「1F5号機」という。）及び6号機（以下「1F6号機」という。）、1F2号機と原子炉格納容器の形式が同じである、中国電力株式会社島根原子力発電所1号機（以下「島根1号機」という。）及び日本原子力発電株式会社敦賀発電所1号機（以下「敦賀1号機」という。）のシールドプラグ上層上面の形状測定を実施し、同様にシールドプラグ上層上面の形状を確認した。

さらに、シールドプラグ上層上面の形状測定を実施した各プラント（以下「調査対象プラント」という。）のシールドプラグ上層上面の状況を現物又は画像にて確認した。

これらについて、1F2号機と他プラントの確認結果を比較し、1F2号機のシールドプラグ上層上面の形状の特異性等を分析した。

(2) シールドプラグの形状に影響を与える可能性が考えられる要因に対する調査

調査対象プラントのシールドプラグの開閉履歴等、シールドプラグの形状に影響を与える可能性が考えられる要因に対する情報を調査し、その内容を確認した。

(3) 原子力規制庁以外の機関による調査・検討

- ① 日本原子力研究開発機構（JAEA）にて、シールドプラグの自重によるシールドプラグの変形の有無について、解析的な検討が実施された。詳細は、別添3-4に示す。

- ② 東京電力ホールディングス株式会社（以下「東京電力」という。）にて、福島第一原子力発電所1号機（以下「1F1号機」という。）及び3号機（以下「1F3号機」という。）のシールドプラグの変形状況及び要因に関する検討が実施された。また、1F2号機、1F5号機及び1F6号機のシールドプラグの変形要因について、社内関係者への聞き取り等が実施された。

3. シールドプラグの形状測定等の実施

(1) シールドプラグ上層上面の形状の確認手順

シールドプラグ上層上面の形状について、以下の手順により確認した。

- ① 3Dレーザースキャナ（FARO社製「Focus S350」）を用いて、調査対象プラントのシールドプラグ上層上面の形状に関するデータ（点群データ）を取得する。
- ② 取得したデータは、点群データ処理ソフト（FARO社製「SCENE」）により3Dモデルを構築した上で、点群データ解析ソフト（富士テクニカルリサーチ社製「Galaxy-Eye Modeler」）により、シールドプラグ上（調査対象プラント間で同様の高さ位置）に仮想平面を作成し、仮想平面とシールドプラグ上層上面の各位置との高低差を差分コンター図により示す。なお、差分コンター図のコンター幅は調査対象プラント間で共通（上下50mm幅）であるが、シールドプラグ上層上面の落ち込み等の程度がわかりにくい場合は、コンター幅を縮小したものも示す。
- ③ 調査対象プラントの差分コンター図から、調査対象プラントのシールドプラグ上層上面の形状を確認する。
- ④ 1F2号機の差分コンター図と他の調査対象プラントの差分コンター図を比較し、1F2号機のシールドプラグ上層上面の形状の特異性等を分析する。

(2) 3Dレーザースキャナによるデータ（点群データ）の取得

3Dレーザースキャナによるデータの取得について、シールドプラグの大きさ（調査対象プラントによって異なるが、概ね直径11～12m程度）及び形状（円形状）を踏まえて、図1の左図に示すような位置に高さ約150cm程度に伸ばした三脚を設置し、その上に3Dレーザースキャナを設置し、シールドプラグ上層上面の形状に関するデータ（点群データ）を取得した。なお、1F2号機のシールドプラグ上層上面の形状に関するデータ（点群データ）は、シールドプラグ上部及びその周辺の周辺線量当量率が高く（数十～100数十mSv/h）、スキャナの設置位置が限られたため、図1の右図に示すような位置に3Dレーザースキャナを設置し、データを取得した。

取得した点群データの例（1F2号機のシールドプラグ上層上面の形状）を図2に示す。右に行くほど拡大したものとなっている。右側の「穿孔箇所付近拡大」のもので約10cm四方のデータとなっており、一つ一つの点にそれぞれ位置情報が付加されている。

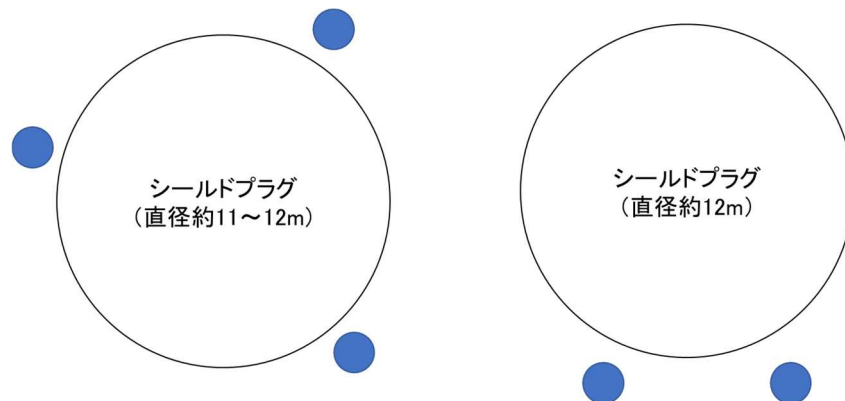


図1 3Dレーザースキャナの設置位置（イメージ）
（スキャナは青丸部分に設置）
（左図：1F2号機以外、右図：1F2号機）

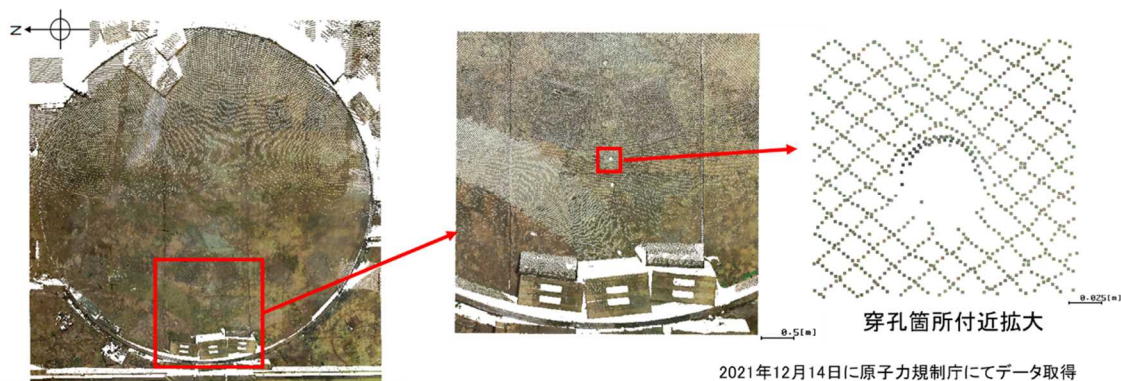


図2 取得した点群データの例（1F2号機のシールドプラグ上層上面の形状）

(3) 3Dレーザースキャナによる測定等の精度

3Dレーザースキャナによる測定精度について、誤差が生じる要素としては以下の2つがある。

① 範囲誤差

「スキャナ設置地点」と「スキャナ設置地点から10m及び25m離れた地点」との2点間の距離に対する前後方向の誤差であり、10m及び25m離れた地点ともに±1mmの誤差が生じる。

② 3D精度

スキャナ設置地点から10m及び25m離れた地点での真値に対する前後、左右、上下方向の誤差であり、10m離れた地点では2mm、25m離れた地点では3mmの誤差が生じる。

また、3Dレーザースキャナにより取得したデータ（点群データ）の合成時に生じる誤差は、最大約5mm（点群データ内の最大値）であった。

これらを踏まえると、シールドプラグに対してmmオーダーの形状変化を把握することは困難であるが、cmオーダーの変化であれば形状変化を把握することが可能である。

（4）差分コンター図

3.（1）②の差分コンター図のイメージを図3に示す。図3の黒点線（赤色の円部分の内側）がシールドプラグの端部となっており、赤色の円部分（黒点線の外側）はシールドプラグ周囲の堰（1F5号機の例を図4に示す）である。

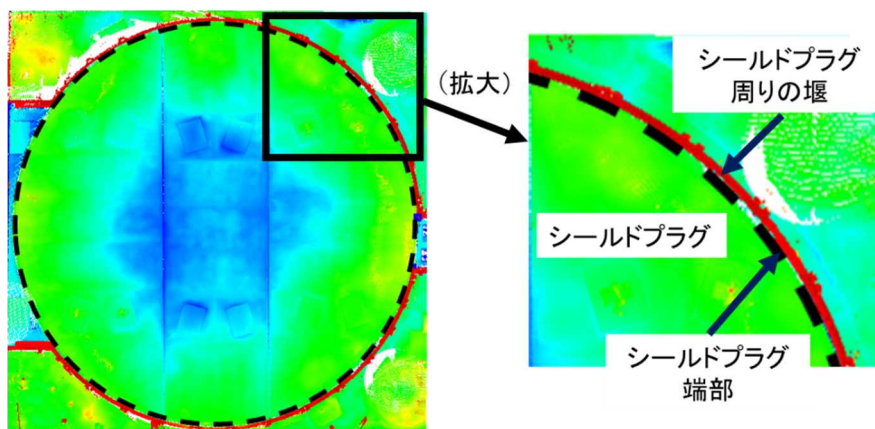


図3 差分コンター図（イメージ）



図4 シールドプラグ周囲の堰（1F5号機の例）

（5）仮想平面の「高さ0mm」位置

3.（1）②の仮想平面について、調査対象プラント間で共通的に図5の★付近が「高さ0mm」位置となるように仮想平面を設定している。

仮想平面の「高さ 0mm」位置については、当初、図5の●付近が「高さ 0mm」位置となるように仮想平面を設定していたが、中心パーツの上層上面の形状をより正確に表現するため、仮想平面の「高さ 0mm」位置を図5の★付近に変更した。

なお、調査対象プラントのシールドプラグの中心パーツ上端（図5の★付近）と下端（図5の■付近）の高さは、表1に示すようにほぼ同じ（3Dレーザースキャナの測定等による誤差（3.（3））の範囲）である。

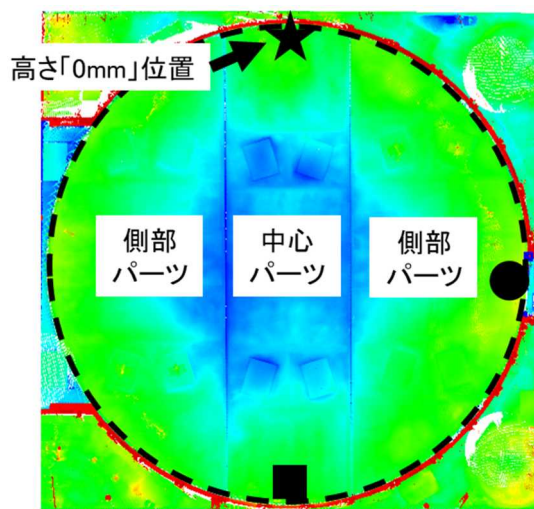


図5 仮想平面の「高さ 0mm」位置

表1 中心パーツの上端と下端の高低差

プラント	中心パーツ上端(左図の★位置)の高さを「0mm」とした場合の中心パーツ下端(左図の■位置)の高さ
1F2号機	-4mm
1F5号機	1mm
1F6号機	0
島根1号機	-4mm
敦賀1号機	-1mm

4. シールドプラグ上層上面の形状の確認結果

(1) 1F2号機

1F2号機のシールドプラグ上層上面の形状の確認結果を図6に、また、シールドプラグ上層の分割イメージを図7に示す。

中心パーツに加えて北側パーツの一部及び南側パーツの一部で上層上面の落ち込

みが見られた。

また、東西方向（中心線付近）は端部から中心への上層上面の落ち込みが 40mm 程度、南北方向（中心線付近）は端部から中心への上層上面の落ち込みが 60mm 程度あることが確認された。

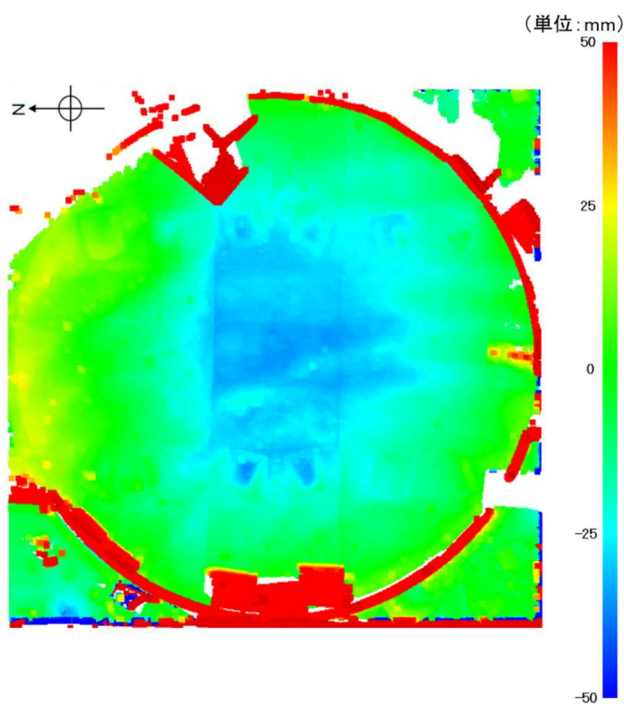


図6 1F2号機シールドプラグ上層上面の形状¹

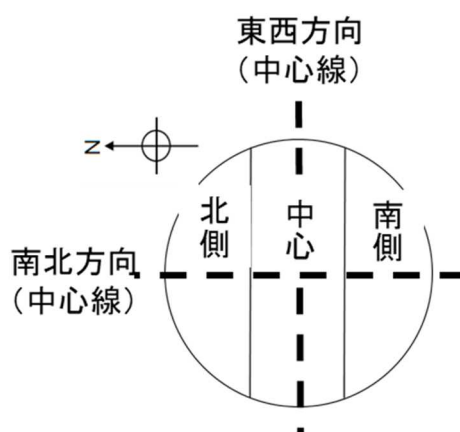


図7 シールドプラグ上層の分割イメージ（1F2号機シールドプラグ）

¹ 2021年12月14日に原子力規制庁にて取得したデータを基に、富士テクニカルリサーチ社の協力の下、「Galaxy-Eye Modeler」により分析

(2) 1 F 5号機

1 F 5号機のシールドプラグ上層上面の形状の確認結果を図8に、また、シールドプラグ上層の分割イメージを図9に示す。

上下50mm幅の差分コンター図(図8)では、シールドプラグ上層上面の落ち込み等の程度がわかりにくいため、コンター幅を縮小したものを図10に示す。

中心パートに加えて南側パートの一部で上層上面の落ち込みが見られた。

また、東西方向(中心線付近)は端部から中心への上層上面の落ち込みが35mm程度、南北方向(中心線付近)は端部から中心への上層上面の落ち込みが40mm程度あることが確認された。

さらに、北側パートと中心パートの間に10~20mm程度の高低差があることが確認された。

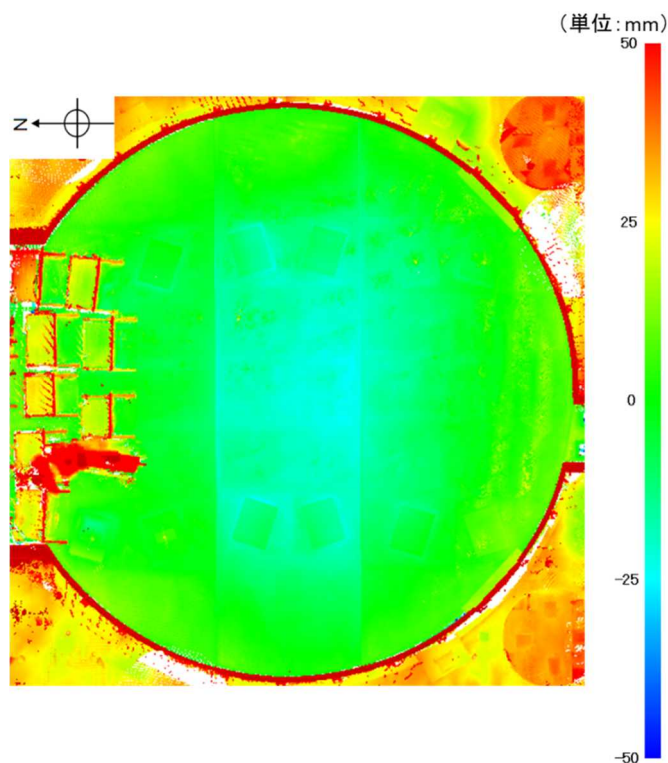


図8 1 F 5号機シールドプラグ上層上面の形状²

² 2022年1月13日に原子力規制庁にて取得したデータを基に、富士テクニカルリサーチ社の協力の下、「Galaxy-Eye Modeler」により分析

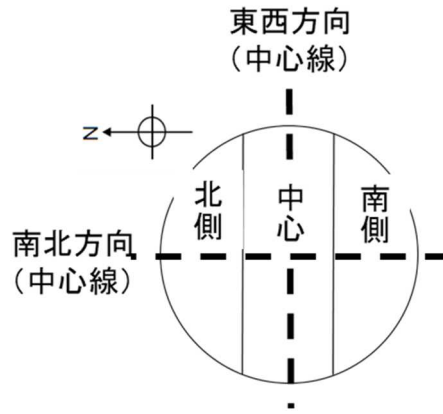


図9 シールドプラグ上層の分割イメージ（1F5号機シールドプラグ）

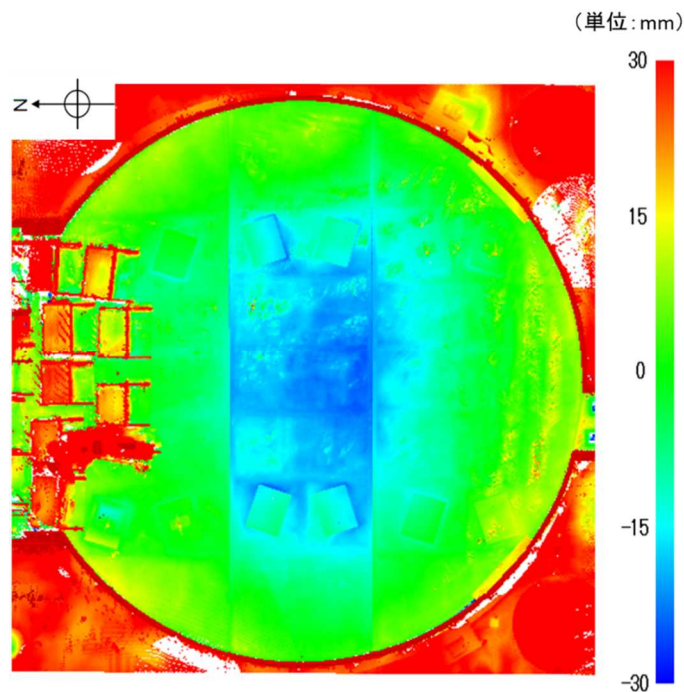


図10 1F5号機シールドプラグ上層上面の形状
（コンター幅を縮小したもの）³

(3) 1F6号機

1F6号機のシールドプラグ上層上面の形状の確認結果を図11に、また、シールドプラグ上層の分割イメージを図12に示す。

上下50mm幅の差分コンター図（図11）では、シールドプラグ上層上面の落ち込み等の程度がわかりにくいため、コンター幅を縮小したものを図12に示す。

³ 2022年1月13日に原子力規制庁にて取得したデータを基に、富士テクニカルリサーチ社の協力の下、「Galaxy-Eye Modeler」により分析

中心パーツに加えて東側パーツの一部及び西側パーツの一部で上層上面の落ち込みが見られた。

また、南北方向（中心線付近）は端部から中心への上層上面の落ち込みが 25mm 程度、東西方向（中心線付近）は端部から中心への上層上面の落ち込みが 40mm 程度あることが確認された。

パーツ間の高低差はほとんどないことが確認された。

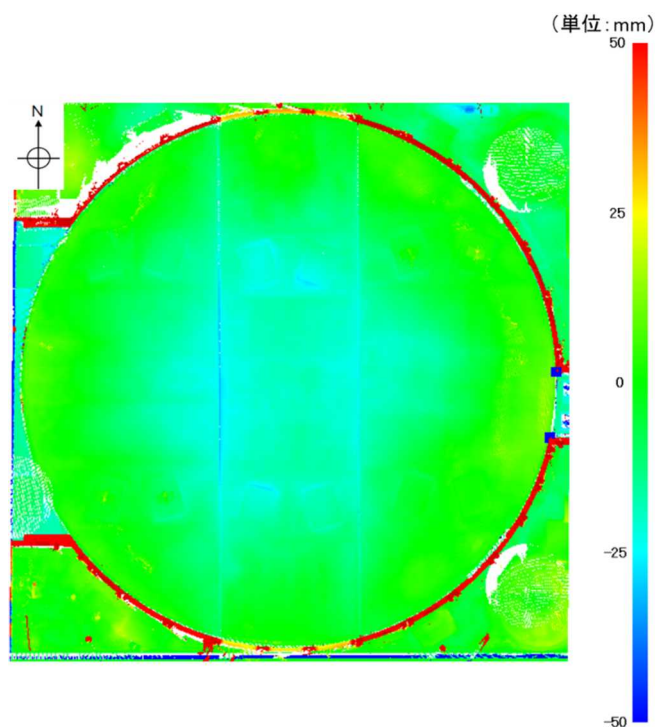


図 1 1 1 F 6 号機シールドプラグ上層上面の形状⁴

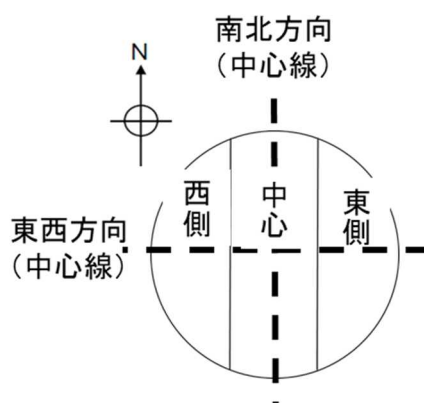


図 1 2 シールドプラグ上層の分割イメージ（1 F 6 号機シールドプラグ）

⁴ 2022 年 10 月 13 日に原子力規制庁にて取得したデータを基に、富士テクニカルリサーチ社の協力の下、「Galaxy-Eye Modeler」により分析

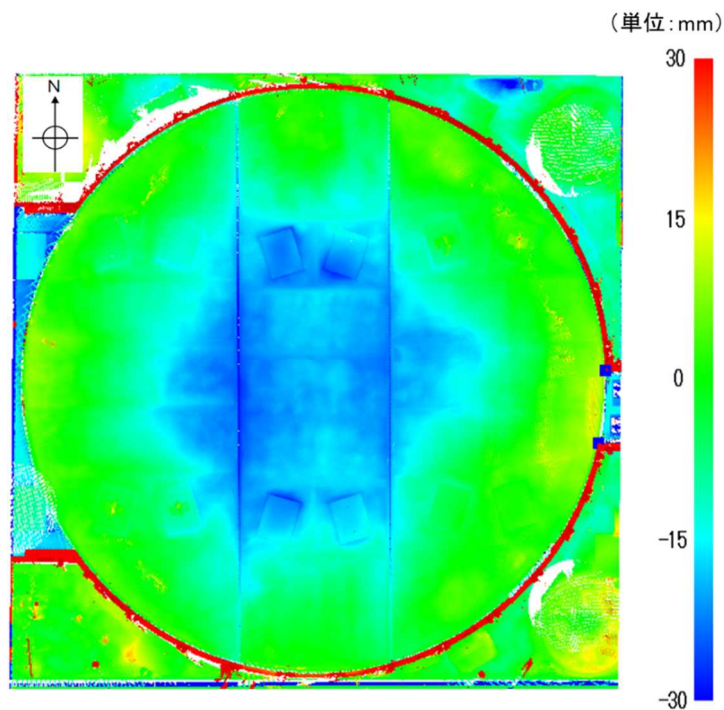


図 1 3 1 F 6 号機シールドプラグ上層上面の形状
(コンター幅を縮小したもの)⁵

(4) 島根 1 号機

島根 1 号機のシールドプラグ上層上面の形状の確認結果を図 1 4 に、また、シールドプラグ上層の分割イメージを図 1 5 に示す。

上下 50mm 幅の差分コンター図 (図 1 4) では、シールドプラグ上層上面の落ち込み等の程度がわかりにくいため、コンター幅を縮小したものを図 1 6 に示す。

西端付近は東端に比べて最大 30mm 程度高くなっていることが確認された。

また、東側パーツの中心側で上層上面の落ち込みが見られたが、東西方向 (中心線付近) 及び南北方向 (中心線付近) とともに端部から中心への上層上面の落ち込みはほとんどないことが確認された。

パーツ間の高低差はほとんどないことが確認された。

⁵ 2022 年 10 月 13 日に原子力規制庁にて取得したデータを基に、富士テクニカルリサーチ社の協力の下、「Galaxy-Eye Modeler」により分析

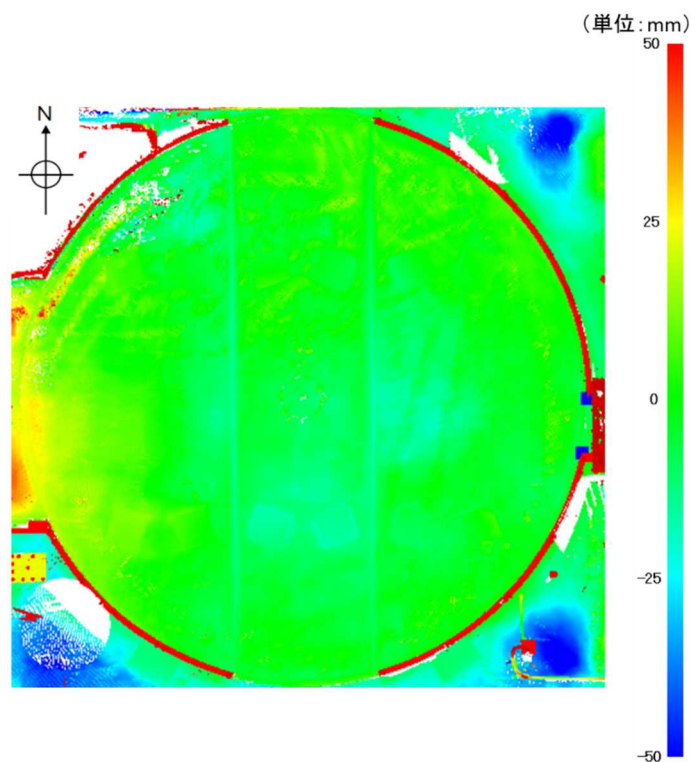


図 1 4 島根 1 号機シールドプラグ上層上面の形状⁶

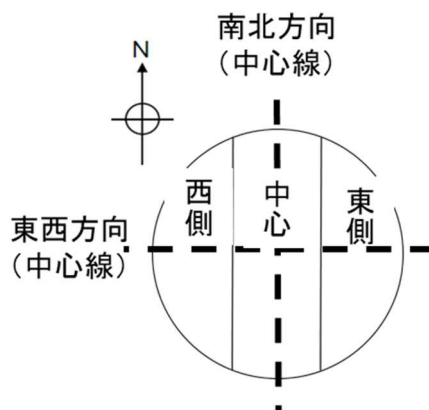


図 1 5 シールドプラグ上層の分割イメージ (島根 1 号機シールドプラグ)

⁶ 2022 年 2 月 22 日に原子力規制庁にて取得したデータを基に、富士テクニカルリサーチ社の協力の下、「Galaxy-Eye Modeler」により分析

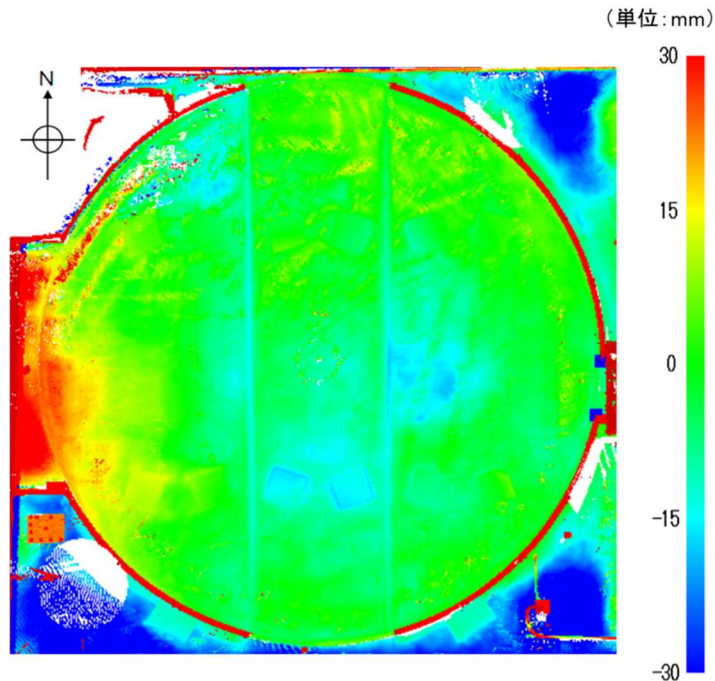


図 1 6 島根 1 号機シールドプラグ上層上面の形状
(コンター幅を縮小したもの)⁷

(5) 敦賀 1 号機

敦賀 1 号機のシールドプラグ上層上面の形状の確認結果を図 1 7 に、また、シールドプラグ上層の分割イメージを図 1 8 に示す。

上下 50mm 幅の差分コンター図 (図 1 7) では、シールドプラグ上層上面の落ち込み等の程度がわかりにくいため、コンター幅を縮小したものを図 1 9 に示す。

中心パーツの一部、西側パーツの一部及び東側パーツの一部で上層上面の落ち込みが見られた。

また、東西方向 (中心線付近) は西端から東端への上層上面の落ち込みが 50mm 程度、南北方向 (中心線付近) は端部から中心への上層上面の落ち込みはほとんどないことが確認された。

さらに東端と DSP 側床面 (右図の左端) との間に最大 40mm 程度の高低差があることが確認された (図 2 0 参照)。

パーツ間の高低差はほとんどないことが確認された。

⁷ 2022 年 2 月 22 日に原子力規制庁にて取得したデータを基に、富士テクニカルリサーチ社の協力の下、「Galaxy-Eye Modeler」により分析

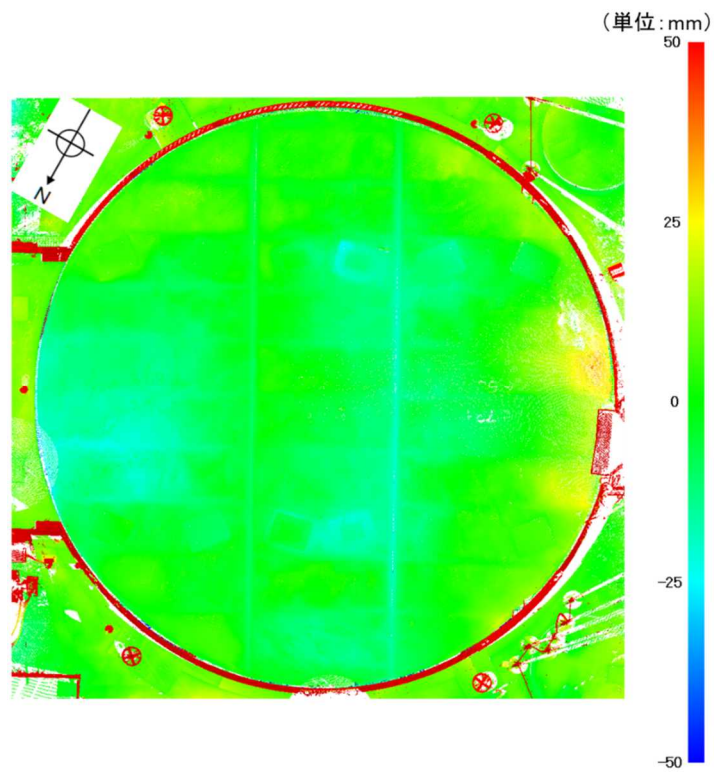


図 1 7 敦賀 1 号機シールドプラグ上層上面の形状⁸

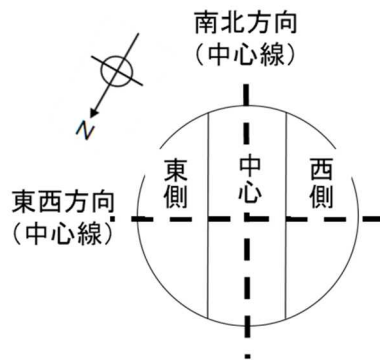


図 1 8 シールドプラグ上層の分割イメージ (敦賀 1 号機シールドプラグ)

⁸ 2022 年 4 月 8 日に原子力規制庁にて取得したデータを基に、富士テクニカルリサーチ社の協力の下、「Galaxy-Eye Modeler」により分析

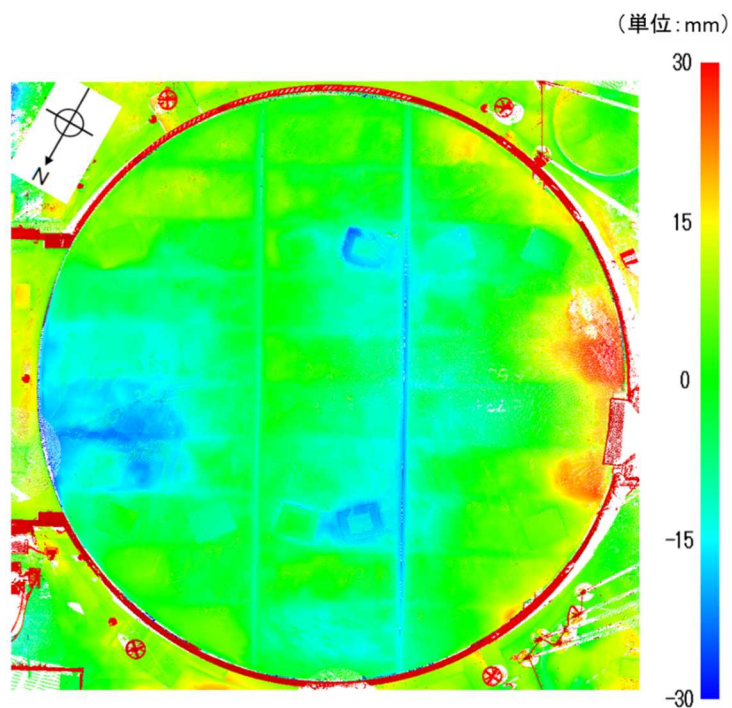


図 19 敦賀 1 号機シールドプラグ上層上面の形状
(コンター幅を縮小したもの)⁹

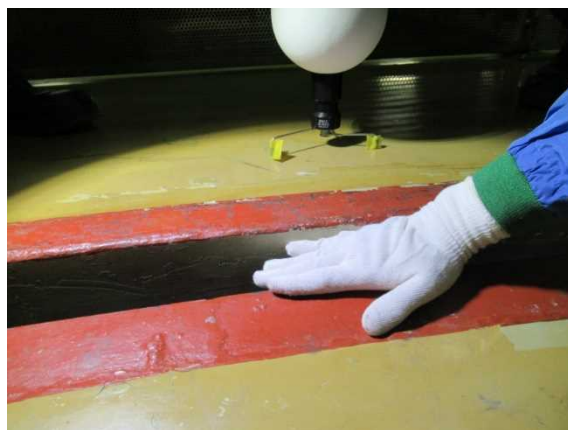


図 20 東端と DSP 側床面 (右図の左端) との間の状況
(敦賀 1 号機シールドプラグ)¹⁰

(6) 1 F 2 号機と他プラントの差分コンター図の比較

1 F 2 号機とそれ以外の調査対象プラントの差分コンター図を並べたものを図 2 1 及び図 2 2 に示す。

⁹ 2022 年 4 月 8 日に原子力規制庁にて取得したデータを基に、富士テクニカルリサーチ社の協力の下、「Galaxy-Eye Modeler」により分析

¹⁰ 2022 年 4 月 8 日の原子力規制庁調査時に日本原子力発電が撮影

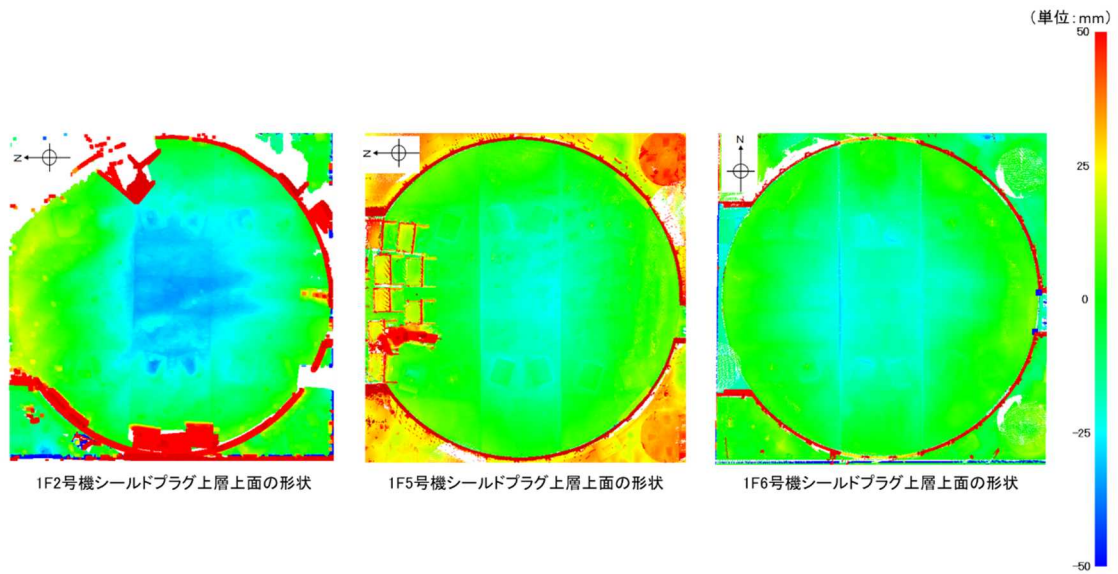


図 2 1 1 F 2 号機と 1 F 5 号機及び 1 F 6 号機の比較

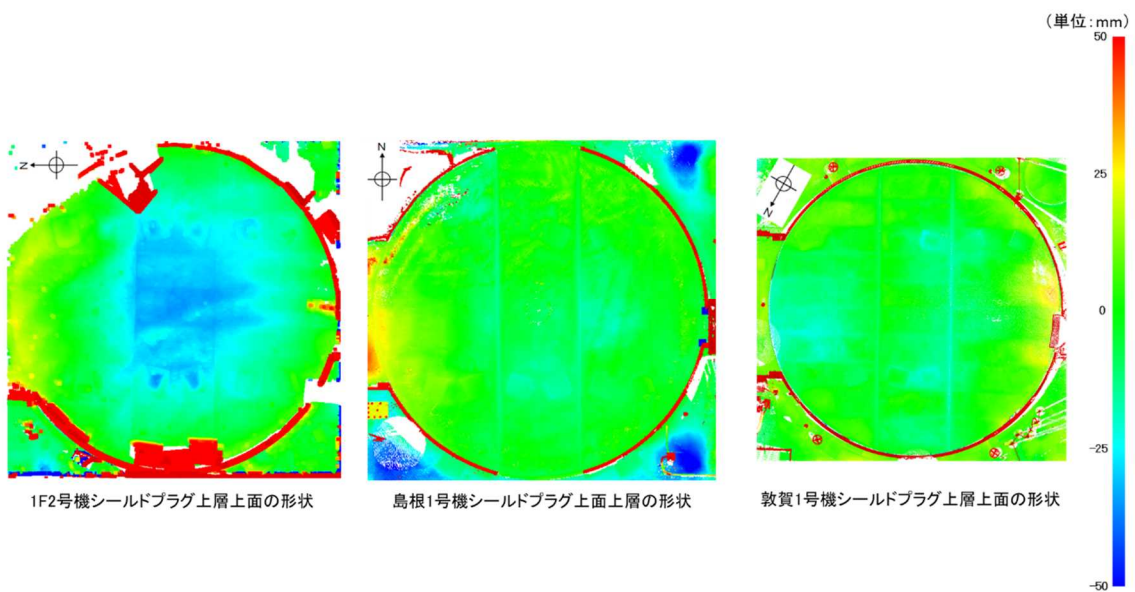


図 2 2 1 F 2 号機と島根 1 号機及び敦賀 1 号機の比較

(7) シールドプラグ上層上面の形状の比較（断面形状の可視化）

調査対象プラントのシールドプラグ上層上面の形状を断面方向から見たデータを取り出し、断面形状の可視化を試みた。

データ（点群データ）の取り出し位置は、図 2 3 に示すようにシールドプラグの中心パーツの中心線付近の断面（図 2 3 の赤線部分）及びシールドプラグのパーツ間を跨がる方向の中心線付近の断面（図 2 3 の黒線部分）とした。

取り出したデータ（図2-4及び図2-5に示しているもの）は、シールドプラグ表面の断面形状のイメージが分かるように縦横比を大きく変えている。なお、実際のシールドプラグの縦横比は、1:約200（図2-4及び図2-5の縦：約6cm程度、図2-4及び図2-5の横：約11~12m程度）となっている。

取得したデータ数（点の数）が十分でない箇所もあるため、図2-4及び図2-5に示す断面形状はあくまで「イメージ」であることに留意する必要がある。

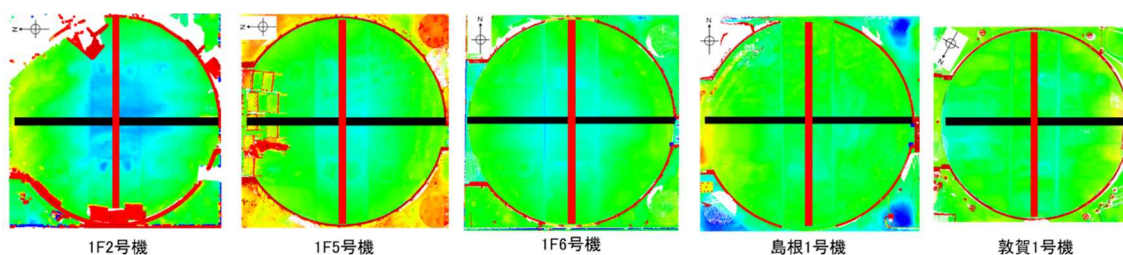


図2-3 点群データの取り出し位置

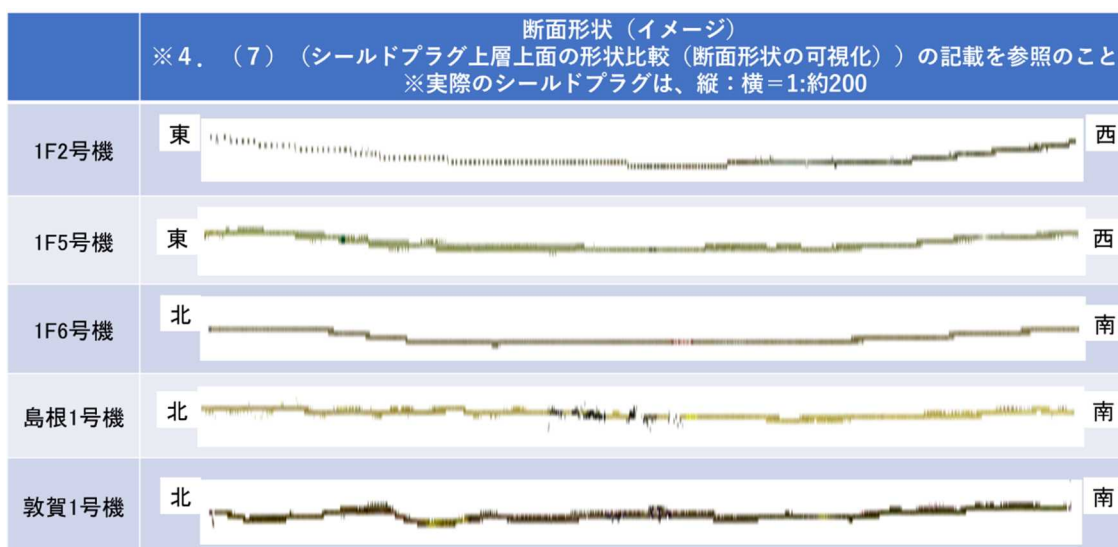


図2-4 取り出した点群データ（中心パーツの中心線付近）

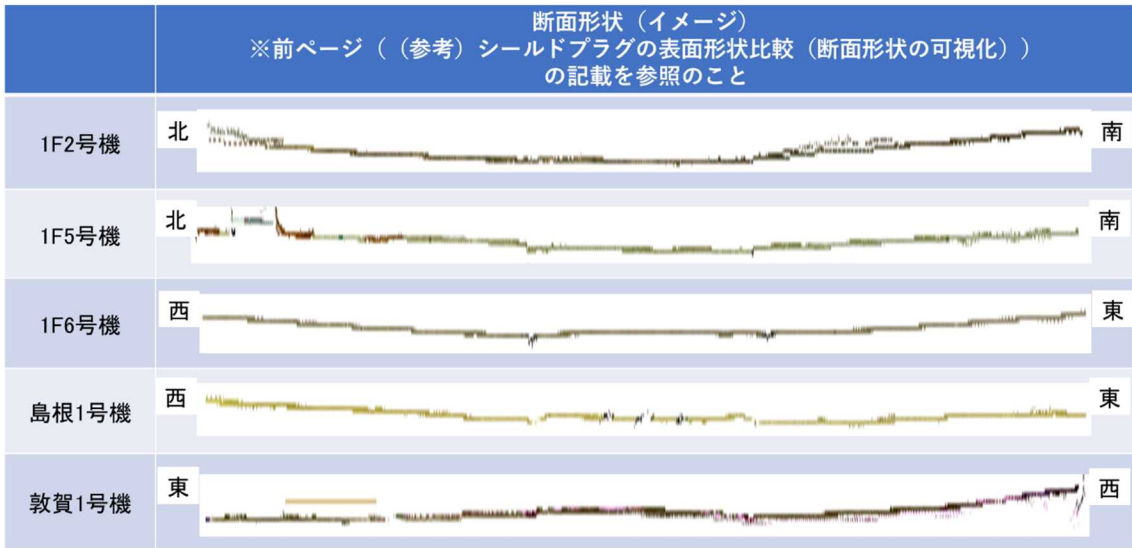


図 2 5 取り出した点群データ（パーツ間に跨がる方向の中心線付近）

(8) シールドプラグ上層上面の状況

調査対象プラントのシールドプラグ上層上面の状況について、調査対象プラントのシールドプラグのデータ（点群データ）取得時に併せて取得した画像データを図 2 6～図 3 0 に示す。

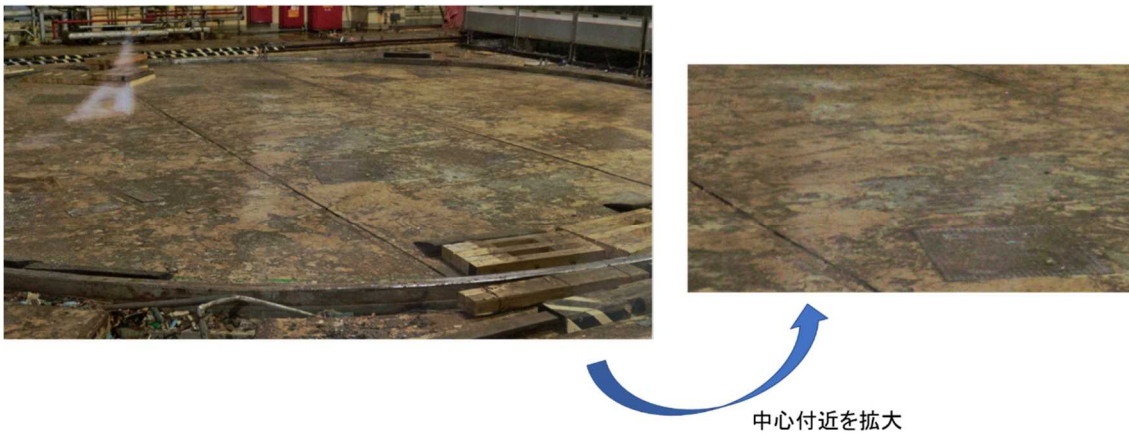


図 2 6 シールドプラグ上層上面の状況（1 F 2 号機）¹¹

¹¹ 2021 年 12 月 14 日に原子力規制庁撮影

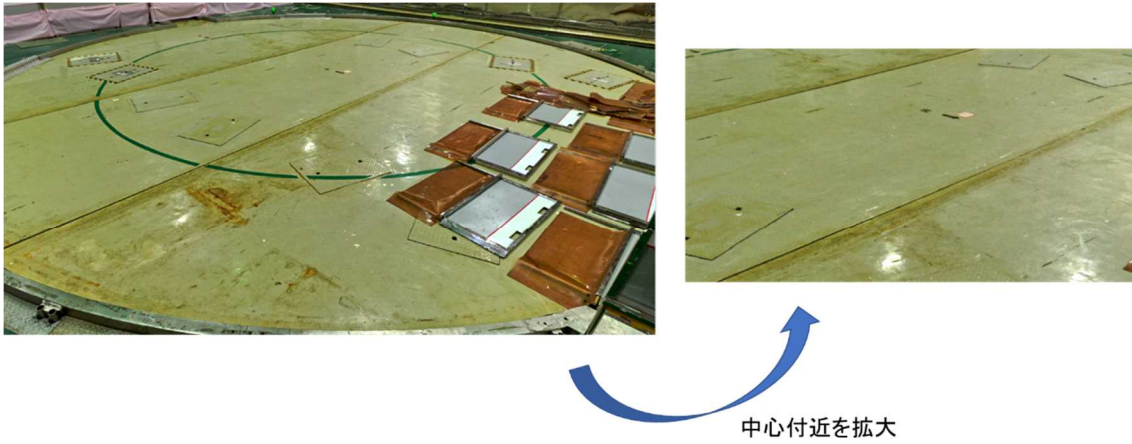


図 2 7 シールドプラグ上層上面の状況（1 F 5号機）¹²

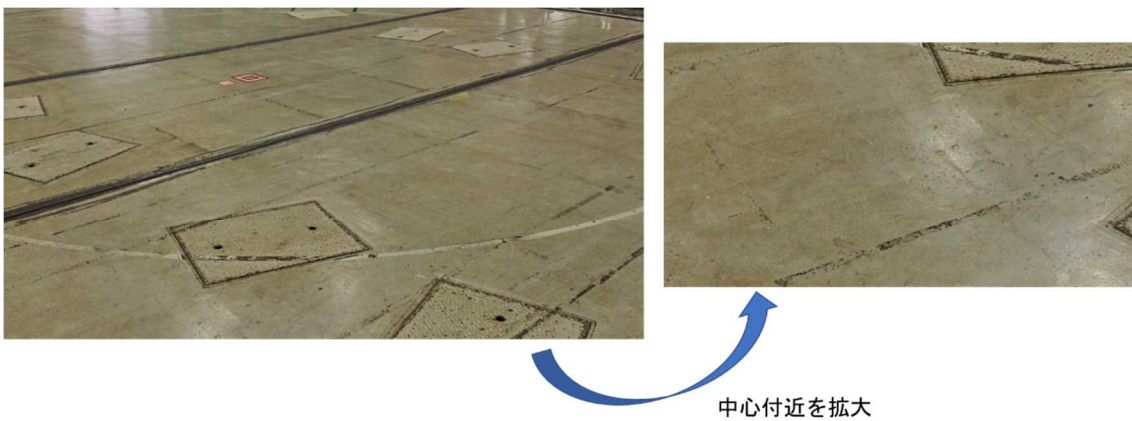


図 2 8 シールドプラグ上層上面の状況（1 F 6号機）¹³

¹² 2022年1月13日に原子力規制庁撮影

¹³ 2022年10月13日に原子力規制庁撮影

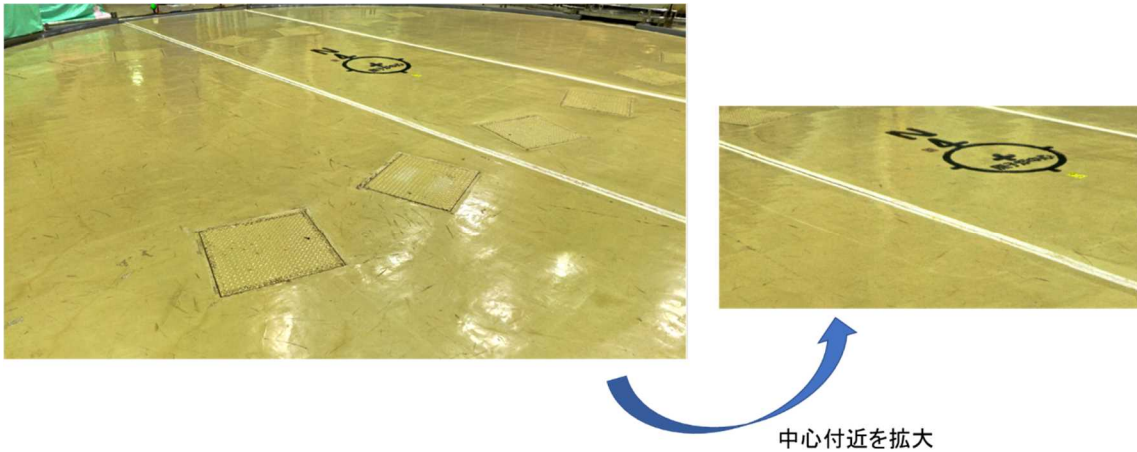


図 29 シールドプラグ上層上面の状況（島根 1 号機）¹⁴

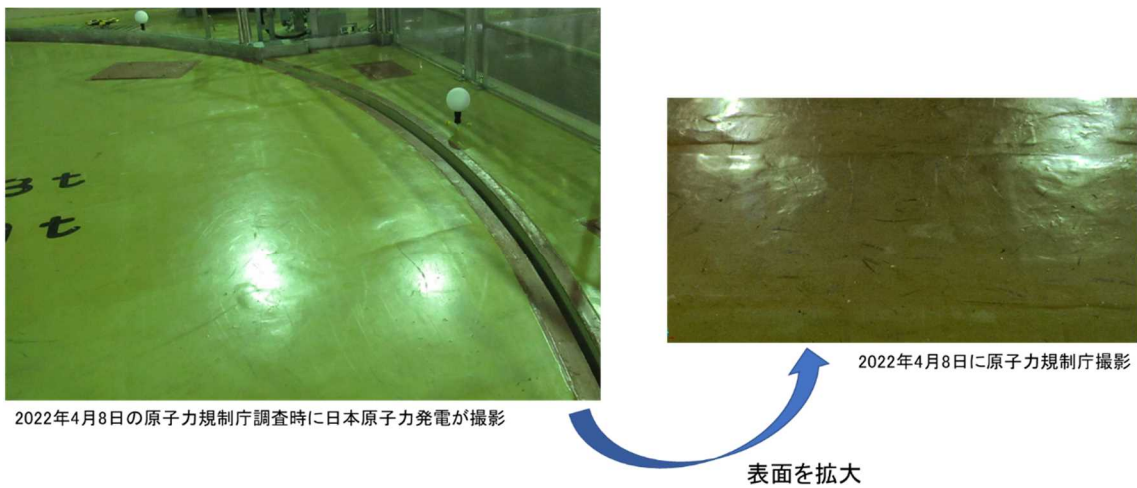


図 30 シールドプラグ上層上面の状況（敦賀 1 号機）¹⁵






(9) シールドプラグ上層上面の形状の確認結果の比較

調査対象プラントのシールドプラグ上層上面の形状の確認結果について、4.(1)～(5)に示した内容を比較したものを表 2 に示す。

¹⁴ 2022 年 2 月 22 日に原子力規制庁撮影

¹⁵ 2022 年 4 月 8 日の原子力規制庁調査時に日本原子力発電が撮影

表2 シールドプラグ上層上面の形状の確認結果の比較

	1F2号機	1F5号機	1F6号機	島根1号機	敦賀1号機
落ち込みの範囲	中心パーツ 北側パーツの一部 南側パーツの一部	中心パーツ 南側パーツの一部	中心パーツ 東側パーツの一部 西側パーツの一部	東側パーツの 中心側付近	中心パーツ 東側パーツの一部 西側パーツの一部
落ち込みの程度 が大きい範囲	中心パーツ 南側パーツの一部	中心パーツの一部	中心パーツ 東側パーツの一部 西側パーツの一部	東側パーツの 中心側付近	東側パーツの一部
端部から中心部 に向かう落ち込み の程度	東西方向:40mm程度 南北方向:60mm程度	東西方向:35mm程度 南北方向:40mm程度	南北方向:25mm程度 東西方向:40mm程度	ほとんどない	ほとんどない (西端から東端への落 ち込みが50mm程度)
パーツ間の高低 差の有無	(確認できない)	有 北側パーツと 中心パーツの間に 10~20mm程度	無	無	無
シールドプラグ 上層の 分割イメージ					

(10) 目視等によるシールドプラグ上層上面の形状の確認結果

調査対象プラントのシールドプラグ上層上面の形状について、目視等による確認を実施した結果、以下のとおりであった。

① シールドプラグ表面の状況

1F2号機のシールドプラグ上層上面について、画像により確認した結果、目立ったひび割れは確認されなかった。

また、他の調査対象プラントのシールドプラグについては、現物及び画像により確認した結果、1F2号機と同様に目立ったひび割れは確認されなかった。

② シールドプラグのパーツ間の高低差の有無

1F2号機のシールドプラグについては、シールドプラグ上部が高線量のため、現物による確認ができなかったため、パーツ間の高低差は確認できなかった。

1F5号機のシールドプラグについては、現物により確認した結果、北側パーツと中心パーツの間に10~20mm程度の高低差が確認された。

1F6号機、島根1号機及び敦賀1号機のシールドプラグについては、現物により確認した結果、パーツ間の高低差は確認されなかった。

③ その他

現物を確認することができた1F5号機、1F6号機、島根1号機及び敦賀1号機のシールドプラグについて、中心付近の上層上面の落ち込みは、目視では確認できなかった。

5. シールドプラグの形状に影響を与える可能性が考えられる要因に対する調査結果

シールドプラグの形状に影響を与える可能性が考えられる要因として「シールドプラグの構造の違い」「シールドプラグの開閉履歴」「シールドプラグ開閉時のシールドプラグの吊り上げ方法」について、調査対象プラントを所有している各社から提供された情報等を基に検討を行い、シールドプラグの形状に影響を与える要因となるかどうかを確認した。

(1) シールドプラグの構造の違い

シールドプラグ上層の直径、分割数及び配筋については、調査対象プラントのシールドプラグ間で大きな差はなかった。

シールドプラグの層数／頂部層の厚さについては、敦賀1号機のみ2層／100cmであり、他プラントは3層／60数cmであった。

シールドプラグの支持方法（端部の切り欠部分にてシールドプラグを支持）、シールドプラグの設置方法（中心パーツの上部に側部パーツを載せる、上層・中間層・下層はそれぞれ互い違いに設置（敦賀1号機のみ、上層と下層は互い違いに設置））は、いずれのプラントともに同様であった。

(2) シールドプラグの開閉履歴

東京電力福島第一原子力発電所事故以前は、いずれのプラントも定期検査ごとに開閉を実施していた。

東京電力福島第一原子力発電所事故以降は、調査対象プラントによって開閉回数が異なるが、大きな差はなかった。

至近の取り付け時期（原子炉ウェル上に設置した時期）は、2014年～2016年であり、大きな差はなかった。なお、1F2号機は、東京電力福島第一原子力発電所事故以降は取り外し実績がなかった。

(3) シールドプラグ開閉時のシールドプラグの吊り上げ方法

いずれの調査対象プラントともに、シールドプラグ上層上面に設置されている吊り上げ用の治具にバックル・リング等を掛け、これらに繋がっているワイヤー等にて吊り上げる方法を採用していた。

これらの内容をまとめたものを表3に示す。

また、シールドプラグの構造イメージを図3-1（敦賀1号機以外）及び図3-2（敦賀1号機）に示す。

表3 シールドプラグの設計情報等

		1F2号機	1F5号機	1F6号機	島根1号機	敦賀1号機
電気出力(MWe) ^{※2}		784	784	1100	460	357
原子炉形式 ^{※2}		BWR-4	BWR-4	BWR-5	BWR-3 ^{※1}	BWR-2
格納容器形式 ^{※2}		マークI	マークI	マークII	マークI	マークI
シールドプラグ ^{※3}	上層の直径(m)	11.8	11.8	12.5	12.4	10.9
	層数	3	3	3	3	2
	上層の厚さ(cm)	62	62	62	63	100
	分割数	3	3	3	3	3
	上層の重量(ton)	165	約180 ^{※4}	181	約180 ^{※5}	218
	配筋(上端筋/下端筋)	D25,D25/ D25,D32	D25,D25/ D25,D32	(不明) ^{※6}	D22,D25/ D22,D35	D25,D25/ D25,D35
	形状測定時の状態	原子炉ウエル上部に設置				
	開閉履歴(1F事故以降) (開⇄閉のセットで1回)	—	1	1	2	2
	原子炉ウエル上に設置した時期(直近) (2022年11月までの経過期間)	—	2016年2月 (6年9ヶ月)	2014年8月 (7年3ヶ月)	2016年7月 (6年4ヶ月)	2014年1月 (8年10ヶ月)
	開閉時のつり上げ方法	シールドプラグ上層上面に設置されているつり上げ用の治具にバックル・リング等を掛け、これらに繋がっているワイヤー等にて、つり上げる。				

※1：ECCSはBWR-4の設計

※2：原子力安全研究協会（編）：軽水炉発電所のあらまし（改訂版）（平成4年10月）、p. 348

※3：シールドプラグに関する情報は、各社から提供されたもの

※4：図面から正確な値が確認できなかったため、概略値

※5：寸法情報等から算定した概略値（図面上に重量の記載なし）

※6：図面上に配筋径に関する記載はなかった

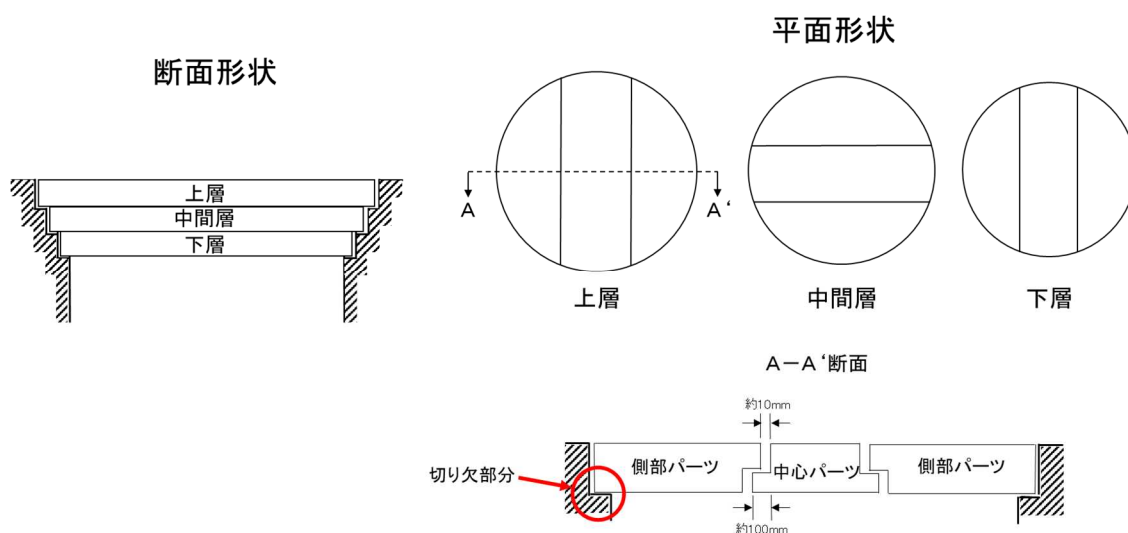


図31 シールドプラグの構造イメージ（敦賀1号機以外）

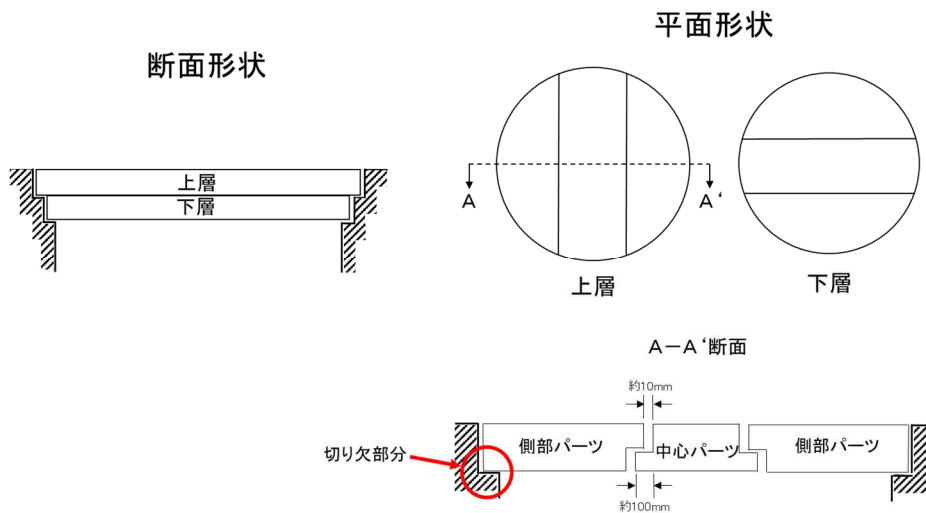


図3-2 シールドプラグの構造イメージ（敦賀1号機）

6. 原子力規制庁以外の機関による調査・検討の結果（概要）

(1) JAEAによる調査・検討

自重によるシールドプラグの変形の有無について、標準的なコンクリートの物性値、1F2号機のシールドプラグの設計情報等を用いて解析コード（Abaqus）により解析した結果、中心のパーツで約6mm、側部のパーツで約4mmの落ち込みが生じたとしている。なお、調査・検討の詳細は、別添3-4に示す。

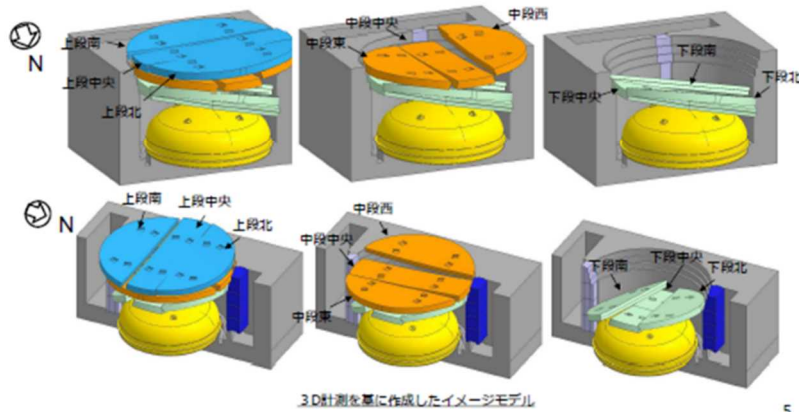
(2) 東京電力による調査・検討

- ① 1F1号機のシールドプラグの形状を測定した結果、図3-3及び図3-4に示すようにシールドプラグに大きな変形（約40～170mm）があることを確認したとしている。
- ② 1F3号機のシールドプラグ上の調査を実施した結果、図3-5及び図3-6シールドプラグ中央部に変形（約300mm）が確認され、この変形は、シールドプラグにトロリーの主巻フック等が衝突したことによるものと推定されるとしている。
- ③ 1F2号機、1F5号機及び1F6号機のシールドプラグ上層上面の形状について、同号機のオペレーションフロアでの作業に携わった社員及び協力企業の関係者に聞き取り調査をした結果、シールドプラグの上層上面の形状に関する有益な情報は得られなかったとしている。
- ④ 1F2号機、1F5号機及び1F6号機のシールドプラグ上層上面の落ち込みの形成の可能性の1つとして、製作時の精度が考えられるとしているが、明確な根拠はないとしている。

3-2 ウェルプラグ調査結果（3D計測）

TEPCO

- プラグの保持状態の確認を目的として3D計測を実施し、上段プラグ下面、中段プラグ上面及び下段プラグ西側の一部について、可能な範囲で寸法情報を取得した結果、プラグにたわみ等の変形があることを確認した。
- 今後、得られた結果に基づいて、ウェルプラグの処置について検討していく。



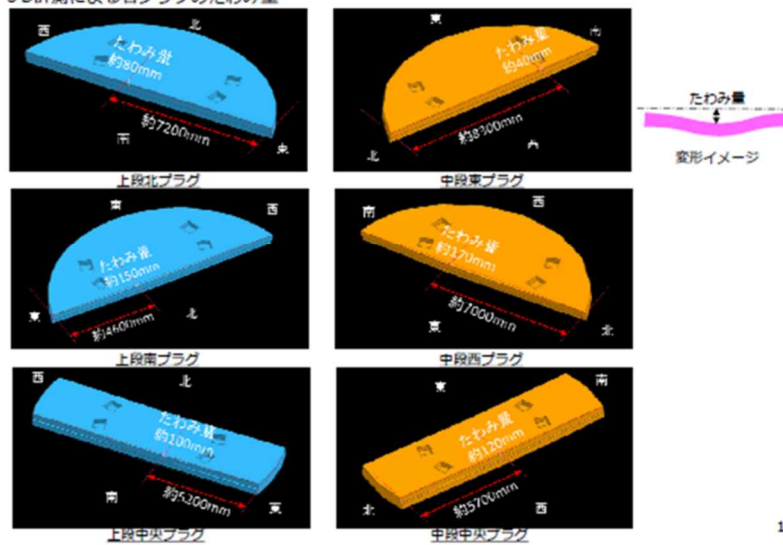
5

図3-3 東京電力による調査・検討
(1号機シールドプラグの調査結果 (1/2))¹⁶

【参考】ウェルプラグ調査各プラグのたわみ量

TEPCO

- 3D計測による各プラグのたわみ量



18

図3-4 東京電力による調査・検討
(1号機シールドプラグの調査結果 (2/2))¹⁷

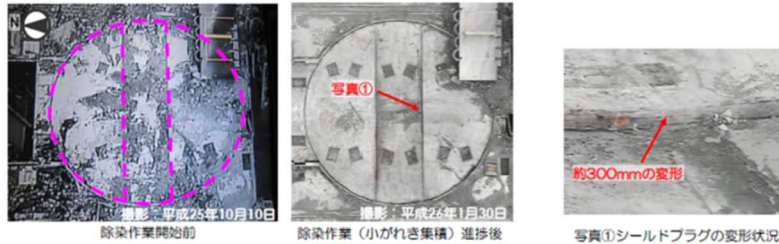
¹⁶ 1号機原子炉建屋ガレキ撤去関連調査結果及び北側屋根鉄骨の切断開始について (2019/9/26 東京電力ホールディングス株式会社)

¹⁷ 1号機原子炉建屋ガレキ撤去関連調査結果及び北側屋根鉄骨の切断開始について (2019/9/26 東京電力ホールディングス株式会社)

添付資料2. シールドプラグの変形について

●状況

- ・除染作業開始前はシールドプラグ上に小がれきが堆積しており、詳細な状況確認ができなかった
- ・小がれきの集積撤去、吸引作業後にシールドプラグ上を調査したところ、シールドプラグ中央部に変形（約300mm）が確認された



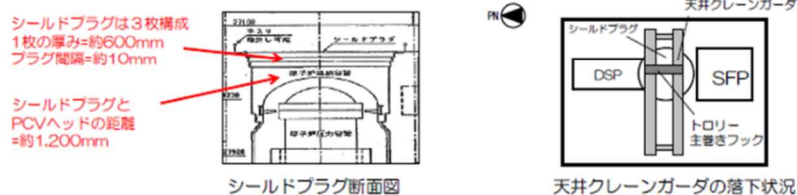
5

図35 東京電力による調査・検討
(3号機シールドプラグの調査結果 (1/2))¹⁸

添付資料2. シールドプラグの変形について

●変形の原因推定

原因として「水素爆発」「天井クレーン等の落下」が考えられるが、シールドプラグ周囲の床スラブ（厚さ:30cm,60cm）が損傷を受けていないことから、水素爆発でシールドプラグ（鉄筋コンクリート製、厚さ約60cm×3層）が変形したとは考え難い。また、落下後の天井クレーン本体は直接シールドプラグに接していなかったものの、プラグ上部にはトロリーがあり主巻フック等の衝突によるものと推定される。



●リスク想定

リスクとして、下記が想定されるが考察を次頁以降に示す。

- ①シールドプラグの変形進行, 落下
- ②落下物による更なるシールドプラグの損傷
- ③PCV損傷 ④線量率増加 ⑤ダスト濃度上昇



6

図36 東京電力による調査・検討
(3号機シールドプラグの調査結果 (2/2))¹⁹

¹⁸ 福島第一原子力発電所3号機原子炉建屋上部ガレキ撤去後の建屋躯体調査結果について（平成26年2月14日 東京電力株式会社）

¹⁹ 福島第一原子力発電所3号機原子炉建屋上部ガレキ撤去後の建屋躯体調査結果について（平成26年2月14日 東京電力株式会社）

7. まとめ

本検討は、1 F 2号機のシールドプラグ上層上面の形状を測定したところ、中心付近に上層上面の落ち込みが確認されたことから、他の調査対象プラントのシールドプラグ上層上面の形状の測定を実施したものである。その結果、測定対象とした他の原子力発電所のプラント（島根1号機、敦賀1号機）のシールドプラグには中心付近の上層上面の落ち込みはほとんど見られなかったが、1 F 5号機及び1 F 6号機では1 F 2号機よりも程度が小さいものの中心付近に上層上面の落ち込みが確認された。

JAEAによるシールドプラグの変形解析では、シールドプラグの自重により数 mm の変形が生じること、及び中心パーツと側部パーツの変形量の違いにより、中心パーツと側部パーツの間に放射性物質の放出経路が形成されることが示された。また、シールドプラグに数 mm 程度の変形があれば、300cm²程度の流路が生じる可能性があると考えられる。さらに、今回の測定で確認されたシールドプラグ中心付近の上層上面の落ち込みと同程度の落ち込みが、原子炉格納容器からの Cs を含む気体放出時までには生じていた場合には、放射性物質の放出経路はより拡大するものと考えられる。

上記の中心付近の上層上面の落ち込みにより中心パーツと側部パーツの間に放射性物質の放出経路が生じるとの分析は、1 F 2号機のシールドプラグ上部の線量率分布（図37参照）及び東京電力が示した放射性物質の放出経路に関する推定（図38）とも整合する。

1 F 2号機、1 F 5号機及び1 F 6号機のシールドプラグでは、それぞれ数十 mm 程度の上層上面の落ち込みが確認され、自重による変形（数 mm の変形）よりも大きな落ち込みとなっている。これは、3Dレーザースキャナによる計測等の誤差（cm オーダーの変化があれば形状変化を把握可能）以上のものである。このため、これらのプラントのシールドプラグでは、自重に加えてそれ以外の何らかの要因によって上層上面の落ち込みが生じていると考えられる。

シールドプラグ上層上面には目立ったひび割れは確認されなかったこと、1 F 2号機、1 F 5号機及び1 F 6号機では、1 F 3号機のように上部から何らかの重量物が落下した事実が確認されていないことから、1 F 2号機、1 F 5号機及び1 F 6号機のシールドプラグ上層上面の落ち込みが、シールドプラグ上部からの物理的な力によって生じた可能性は低い。

1 F 5号機及び1 F 6号機のシールドプラグ上層上面の落ち込みの原因は不明であるが、これらのプラントは炉心損傷を経験しておらず、高温の水蒸気との長期間の接触、水素爆発の影響等はないことから、東京電力福島第一原子力発電所事故に由来するものではない。

1 F 1号機のシールドプラグでは、1 F 2号機のシールドプラグよりもさらに大きな

変形が生じているが、変形原因が1F2号機と同一であるかどうかは判明していない。

1F3号機のシールドプラグの変形原因について、東京電力は「シールドプラグにトロリーの主巻フック等が衝突したことによるもの」と推定しているが、1F2号機のシールドプラグの変形原因が含まれている可能性は否定できないと考えられる。

本検討における3Dレーザースキャナによるシールドプラグ上層上面の形状の測定結果は、JAEAによるシールドプラグの変形解析（自重により下方へ変形が生じる）と矛盾するものは見つからなかった。

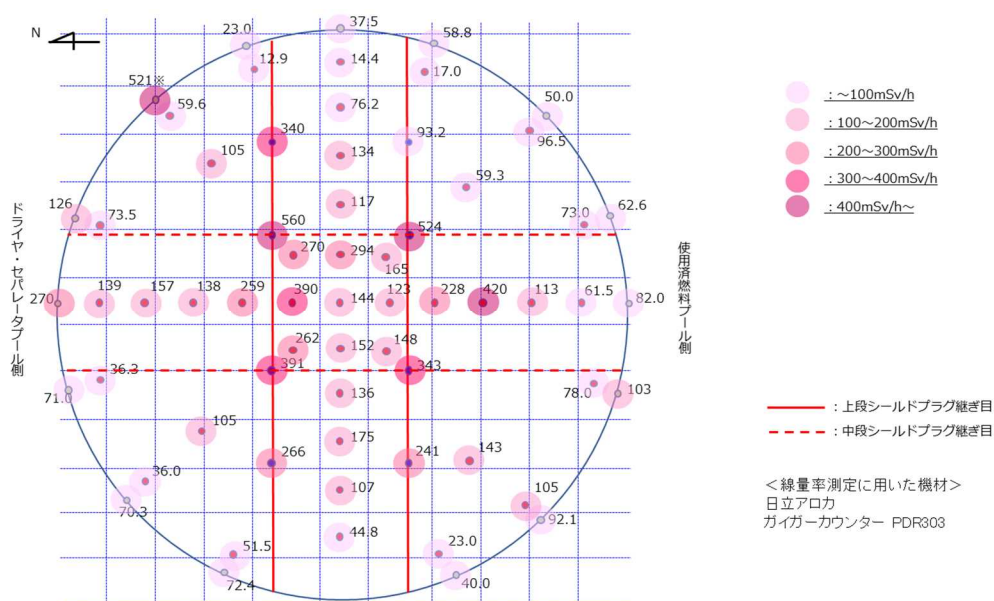


図37 1F2号機のシールドプラグ表面の線量率測定結果
(2021年10月7日、東京電力による測定)²⁰

²⁰ 2号機シールドプラグトップカバー下面の汚染密度について（第31回事故分析検討会資料3）

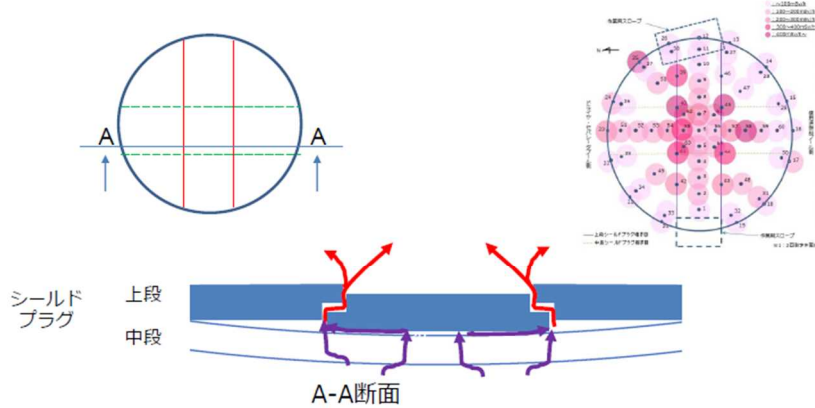


図1 シールドプラグ隙間部での流路の形成（イメージ図）※

- シールドプラグの中央部で、継ぎ目の段差部が接触しない状況になると、比較的大きな流路が形成される
- 継ぎ目の流路を通じてキャリアガスが流れFPも流路に沿って付着すると考えられる。中段では隙間部を抜けると、流路が無くなるように見えるが、流路を90度変えて、上段、中段のクロスする場所、および上段と中段の接する狭隘な流路を抜けて上段の隙間部に到達する
- このような流路を前提とすると、実測された線量の分布とも整合する

※シールドプラグの変位量はデフォルメしている 1

図38 東京電力による放射性物質の放出経路に関する推定²¹

²¹ 2号機シールドプラグにおける汚染について（第32回事故分析検討会 資料4-3）

(別添 3-4)

シールドプラグの継ぎ目の断面積の評価

日本原子力研究開発機構 安全研究・防災支援部門
安全研究センター
真野 晃宏、西田 明美、李 銀生

1. 目的と実施内容

2号機のシールドプラグは、図1に示す3層（上層、中間層、下層）により構成される。このうち、上層の鉛直方向の変形量の実測が行われた。その結果、図2に示す上層を構成する3枚の板のうち、中心部の板（以下、「中央パーツ」という）の鉛直方向の落ち込みが両端の2枚の板（以下、「側部パーツ」という）よりも大きいことが確認された¹。この落ち込みによる放射性物質の流路形成の可能性を確認するため、汎用有限要素法構造解析ソフトウェア Abaqus/Standard Ver.2020 による予備的な自重変形解析を行い、中央パーツと側部パーツの継ぎ目に生じる隙間の断面積を求めた。

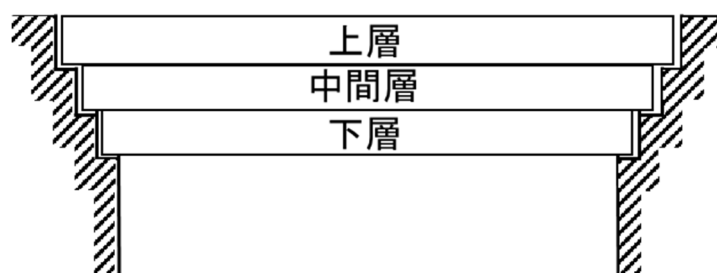


図1 シールドプラグの断面図

¹原子力規制庁、東京電力福島第一原子力発電所における事故の分析に係る検討会 第14回会合資料 5-1 追加説明資料、“シールドプラグの設計等について”、2020年10月16日 (<https://www.nra.go.jp/data/000331518.pdf>)

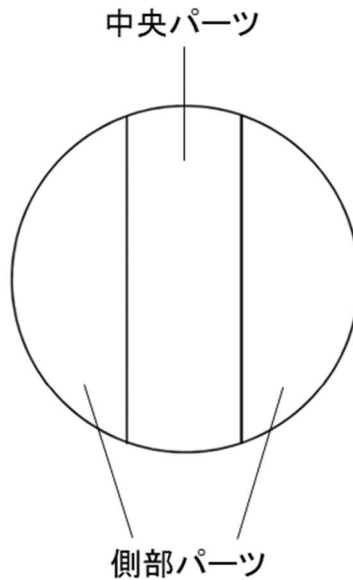


図2 上層の平面図

2. 解析モデルの作成

シールドプラグの寸法値については、設計書類等から適宜設定した。また、図3に示すシールドプラグの継ぎ目の構造図を参考に、側部パーツと中央パーツの間に水平方向5mmの隙間を設定した。

解析モデルの作成に用いた要素は、6面体2次低減積分要素である。要素分割の平面図を図4に、側面図を図5に示す。解析モデル全体の要素数は38272、節点数は174547である。

解析モデルの境界条件を図6に示す。図中(1)はシールドプラグとその支持部との接触である。図7に示すとおりシールドプラグは、約90mmのかかりしろをもって、原子炉建屋(R/B)躯体により支持されている²。そのため、かかりしろが90mmとなるようなリング状の剛体平面をシールドプラグの支持部としてモデル化し、シールドプラグの下面と支持部との間に、変形体と剛体の接触を考慮した。また、(2)の境界条件として、支持部の全方向の変位を拘束した。(3)の境界条件は側部パーツと中央パーツの間の接触である。側部パーツと中央パーツの間の2か所の継ぎ目に対して、変形体と変形体の接触を設定した。

²原子力規制庁、東京電力福島第一原子力発電所における事故の分析に係る検討会 第12回 会合 資料3-1、“1~3号機原子炉建屋における線源調査について ~汚染密度、核種スペクトル測定の実績~”、令和2年6月25日 (<https://www.nsr.go.jp/data/000315708.pdf>)

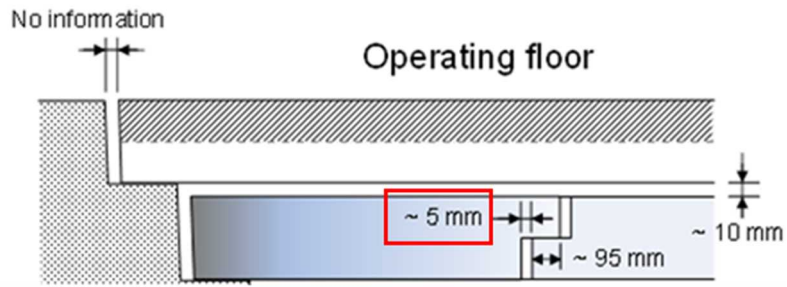


図3 シールドプラグの継ぎ目の構造図

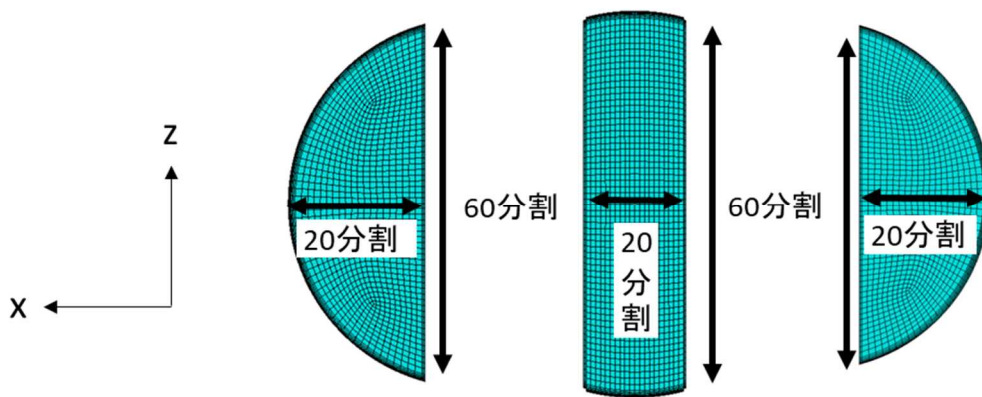


図4 要素分割の平面図

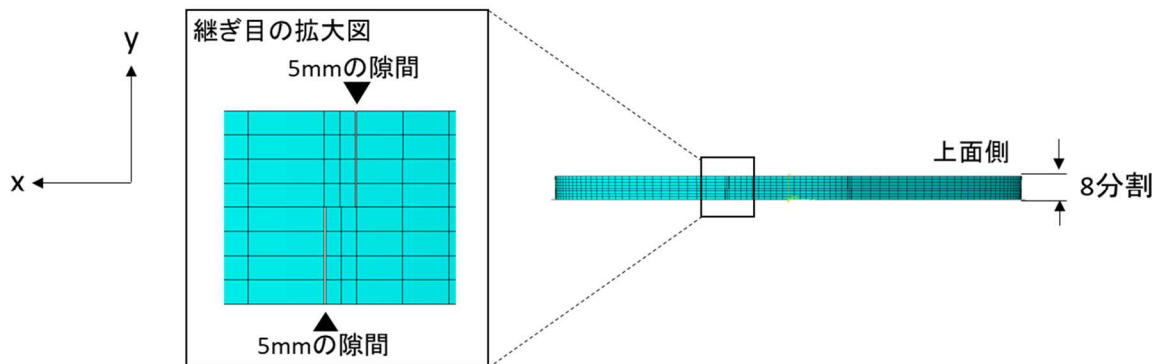


図5 要素分割の側面図

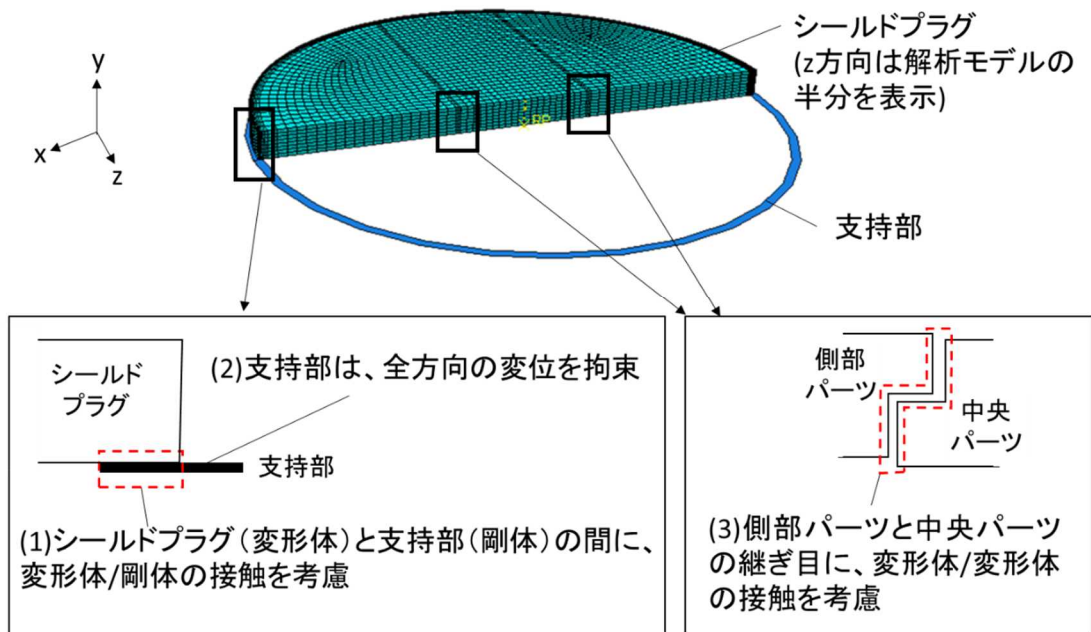


図6 境界条件の設定状況

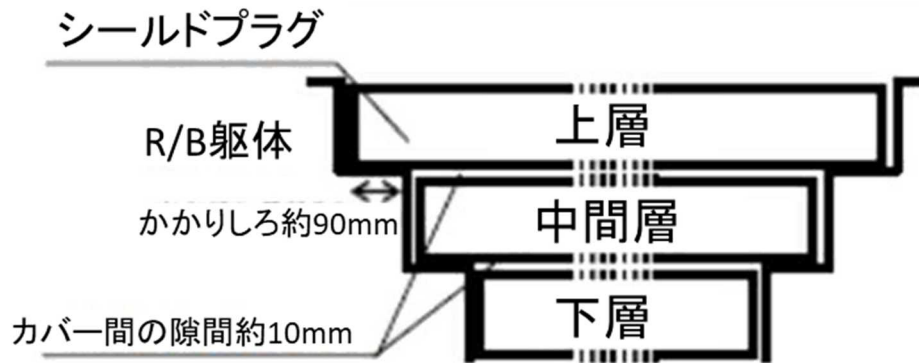


図7 シールドプラグの支持状況²

3. 自重解析

(1) 解析条件

作成した解析モデルを用いて自重解析を行い、中央パーツと側部パーツの間に生じる隙間の断面積を評価した。本解析においては、表 1 に示す室温 (20℃) における鉄筋コンクリートの材料物性値³を各パーツに対して一様に適用した。

表 1 鉄筋コンクリートの材料物性値³

	単位	物性値
密度	t/mm ³	2.4×10 ⁻⁹
ヤング率	MPa	25700
ポアソン比	—	0.2

(2) 自重解析の結果

自重解析の結果から得られた鉛直方向変位のコンターを図 8 に示す。青色が鉛直下向きの変位、すなわち落ち込み量を示している。シールドプラグの最大の落ち込みは中央パーツで発生し、その値は約 6.2mm であった。一方、側部パーツの最大の落ち込みは約 3.7mm であった。このことから、側部パーツよりも中央パーツの方が大きく落ち込み、継ぎ目において鉛直方向に隙間が生じたことが確認された。

次に、鉛直方向の隙間の断面積を評価するために、継ぎ目における中央パーツと側部パーツのそれぞれの変形後の鉛直方向 (y 方向) 座標を抽出した。着目した継ぎ目は、図 9 に示すとおり 2 箇所ある継ぎ目のうちの 1 つである。継ぎ目における鉛直方向座標の抽出位置は、図 10 に示す位置である。図 11 に鉛直方向座標の抽出結果を示す。青線と赤線は、それぞれ側部パーツと中央パーツの変形後の鉛直方向座標を示す。これらの鉛直方向座標を 4 次多項式で近似し、その差を積分することで求めた隙間の断面積は約 1.8×10⁴mm²であった。

また、水平方向の隙間の断面積を、同様の手法により求めた。自重解析の結果から得られた水平方向 (継ぎ目に直交する x 方向) 変位のコンターを図 12 に示す。赤色が紙面左向きの変位を示し、青色が紙面右向きの変位を示している。図より、側部パーツが中央パーツに向かって最大で約 0.5mm 変形し、継ぎ目に直交する水平方向の隙間量がシールドプラグの上面側で初期設定値の 5mm から減少したことが確認された。この結果から、継ぎ目における中央パーツと側部パーツのそれぞれの変形後の水平方向座標を抽出した。着目した継ぎ目は、図 9 に示した 2 箇所ある継ぎ目のうちの 1 つであり、継ぎ目における水平方向座標の抽出位置は、図 13 に示す位置であ

³東京電力株式会社、特定原子力施設監視・評価検討会 (第 4 回) 資料 5-1、“福島第一原子力発電所 1～4 号機本館建物の基準地震動 Ss に対する耐震安全性評価について”、平成 25 年 2 月 21 日

る。図 14 に水平方向座標の計測結果を示す。青線と赤線は、側部パーツと中央パーツの変形後の水平方向座標をそれぞれ示す。これらの水平方向座標を 2 次多項式で近似し、その差を積分することで求めた隙間の断面積は約 $5.2 \times 10^4 \text{mm}^2$ であり、断面積の初期値である約 $5.7 \times 10^4 \text{mm}^2$ とほぼ同等であった。

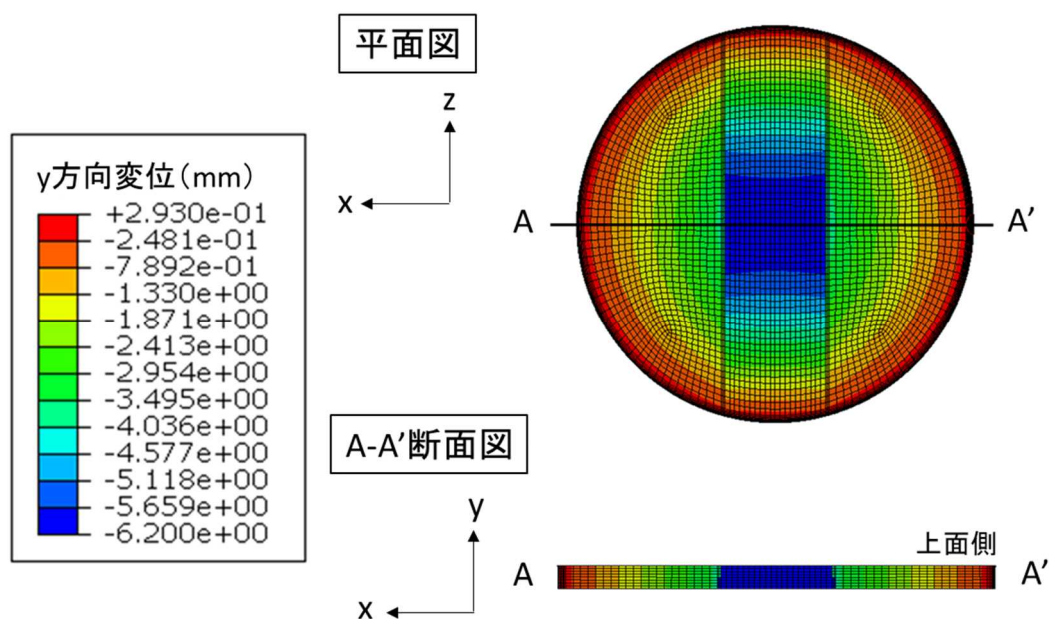


図 8 鉛直方向 (y 方向) 変位のコンター図

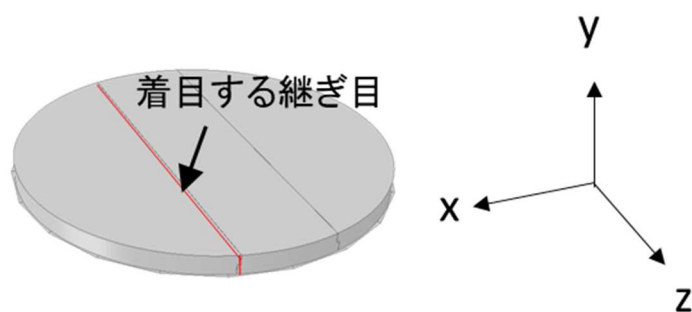


図 9 断面積を評価する継ぎ目位置

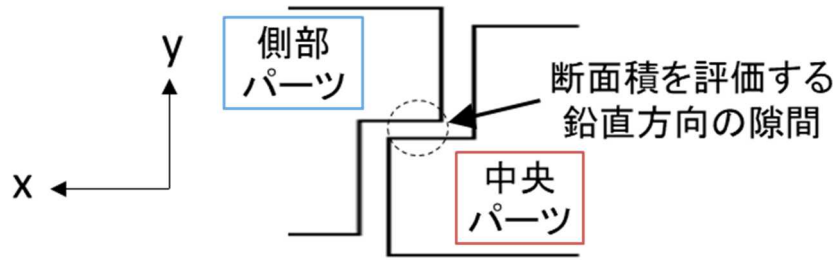


図 10 鉛直方向断面積の評価位置

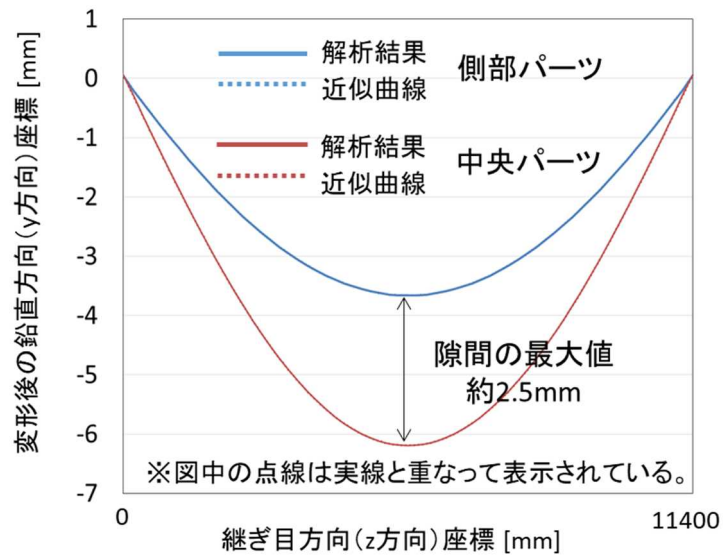


図 11 継ぎ目に沿った変形後の y 方向座標

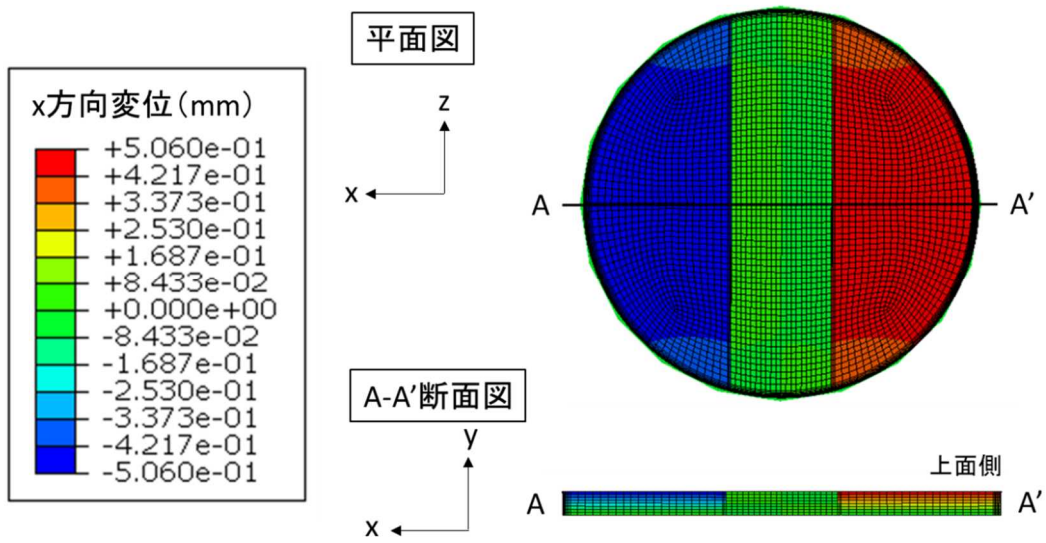


図 12 水平方向（継ぎ目に直交する x 方向）変位のコンター図

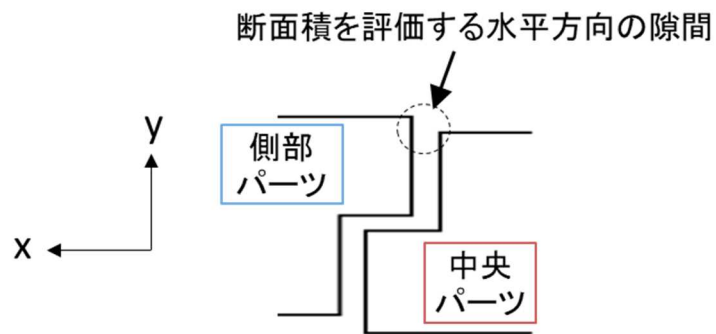


図 13 水平方向断面積の評価位置

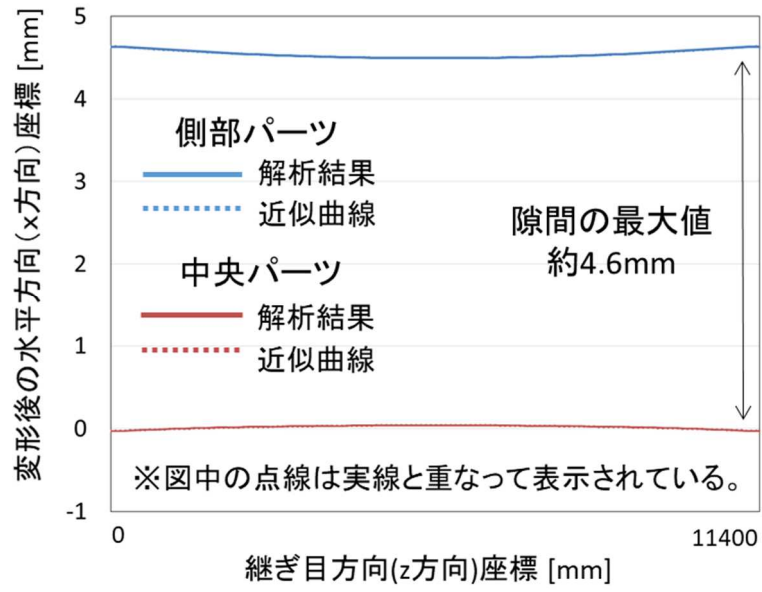


図 14 継ぎ目に沿ったパーツ上面側の変形後の x 方向座標

4. 再現解析

東京電力福島第一原子力発電所における事故の分析に係る検討会の第 28 回会合では、2 号機のシールドプラグ上層の落ち込み量の実測値¹が示され、40mm 程度と推測される。この落ち込み量により側部パーツと中央パーツの継ぎ目に生じる隙間の断面積を推定するため、落ち込み量が実測値の約 40mm となる条件で自重解析を行った。

上述の室温の鉄筋コンクリートのヤング率を考慮した自重解析では、最大落ち込み量が 6.2mm であった。そのため、落ち込み量が実測値となる鉄筋コンクリートのヤング率を逆算し、その値が 4000MPa であることを確認した。そこで、ヤング率を 4000MPa とした自重解析を、落ち込み量の再現解析として行った。このヤング率は、鉄筋コンクリートの温度が 700℃程度の場合に相当する。

再現解析の結果から得られた鉛直方向（y 方向）変位のコンターを図 15 に示す。青色が鉛直下向きの変位、すなわち落ち込みを示している。シールドプラグの中央パーツの最大の落ち込み量は約 40mm であり、実測された落ち込み量が再現されている。また、側部パーツの最大の落ち込みは約 24mm であり、継ぎ目において、室温のヤング率を考慮した自重解析よりも大きな隙間が鉛直方向に生じていることが確認された。図 10 に示した位置における自重による変形後の鉛直方向座標の抽出結果を図 16 に示す。青線と赤線は、側部パーツと中央パーツの変形後の鉛直方向座標をそれぞれ示す。これらの鉛直方向座標を 4 次多項式で近似し、その差を積分することで求めた隙間の断面積は約 $1.1 \times 10^5 \text{mm}^2$ であった。

また、再現解析の結果から得られた水平方向（継ぎ目に直交する x 方向）変位のコンターを図 17 に示す。赤色は紙面左向きの変位を示し、青色は紙面右向きの変位を示している。図より、側部パーツが中央パーツに向かって約 3.4mm 変形し、継ぎ目に直交する水平方向の隙間量が上面側で初期設定値の 5mm から減少したことが確認された。図 14 に示した位置における自重による変形後の水平方向座標の抽出結果を図 18 に示す。青線と赤線は、側部パーツと中央パーツの変形後の水平方向座標をそれぞれ示す。これらの水平方向座標を 2 次多項式で近似し、その差を積分することで求めた隙間の断面積は約 $2.0 \times 10^4 \text{mm}^2$ であった。

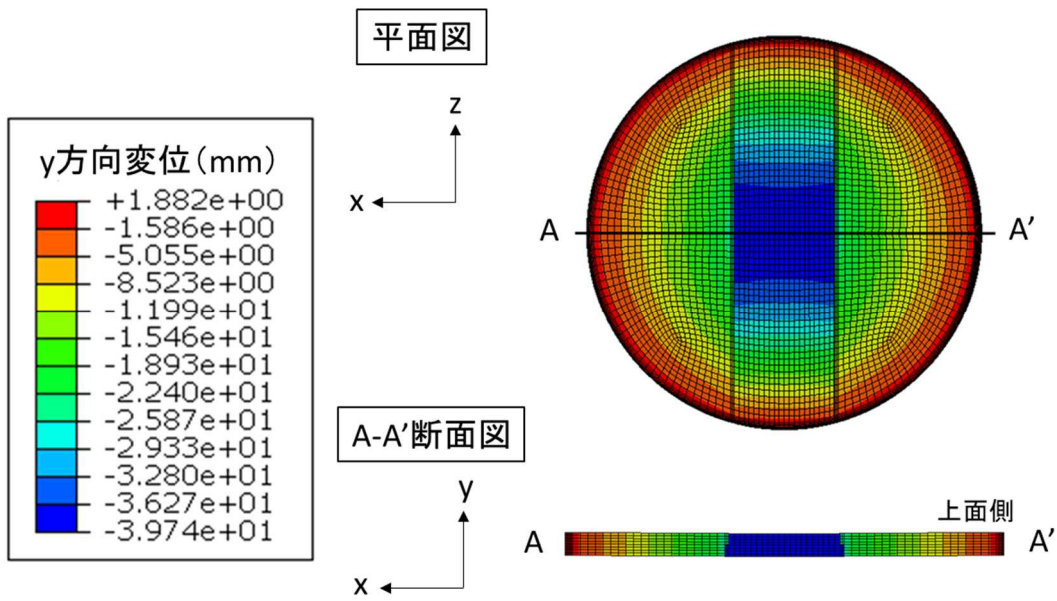


図 15 再現解析における鉛直方向 (y 方向) 変位のコンター図

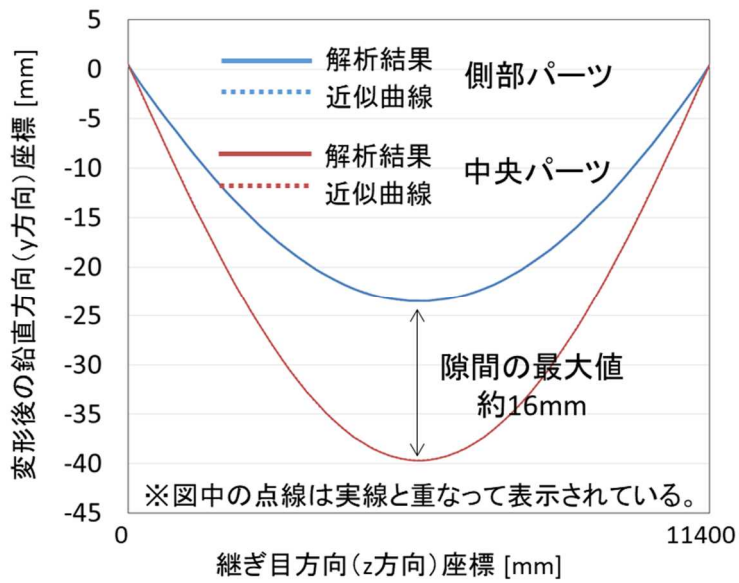


図 16 再現解析における継ぎ目に沿った変形後の y 方向座標

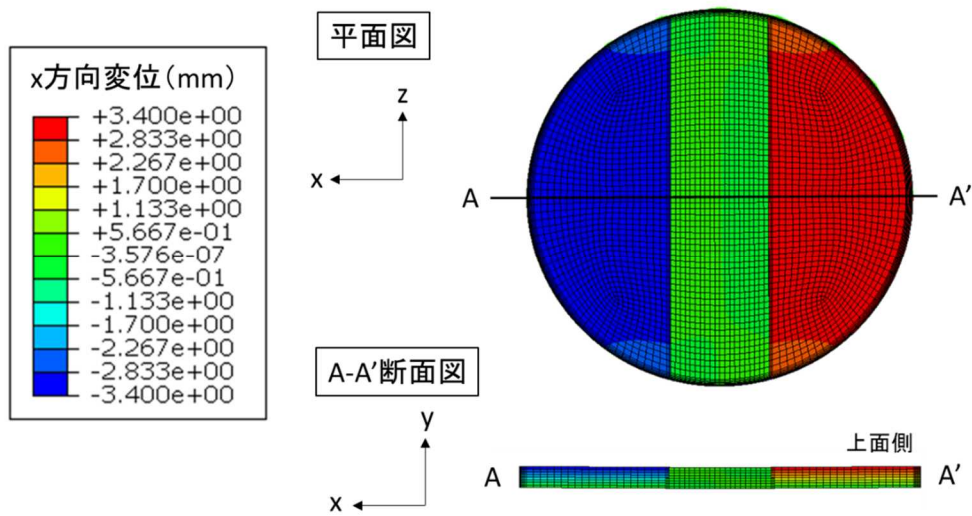


図 17 再現解析における水平方向（継ぎ目に直交する x 方向）変位のコンター図

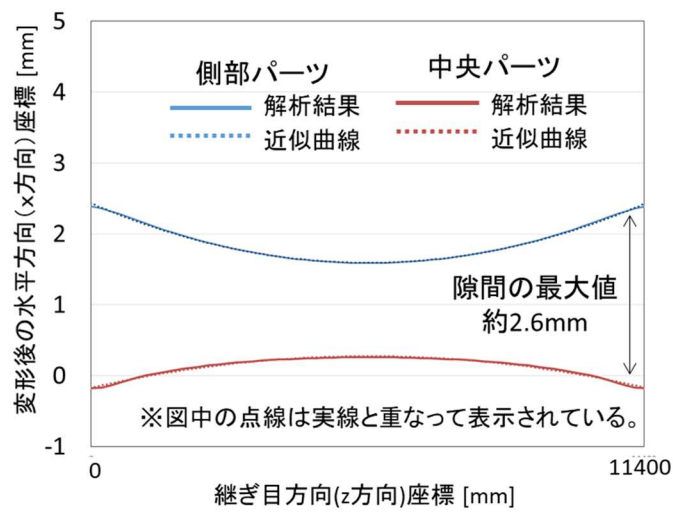


図 18 再現解析における継ぎ目に沿ったパーツ上面側の変形後の x 方向座標

5. まとめ

シールドプラグの自重変形による有意な流路形成の可能性を検討するため、シールドプラグ上層の予備的な有限要素法構造解析を実施した。室温の物性値を用いた場合において、シールドプラグの変形により有意な面積を有する流路が形成され得ることが示された。この解析においては、変形（落ち込み）の程度が実測値に比べて大幅に小さい結果となったため、ヤング率を低減した感度解析を行い、鉄筋コンクリートの温度が想定し難い高温の状態に相当するヤング率を用いた場合に、実測値と概ね同等の落ち込みを再現できることを確認した。本感度解析の結果は、自重による落ち込みを大きく超える変形の要因を温度のみに求めることはできないことを示していると考えられる。

(別添 4 - 1)

東京電力及び IRID における 1 号機原子炉格納容器内部調査に係る
公開資料等

1. 背景及び目的

東京電力及び IRID (International Research Institute for Nuclear Decommissioning_技術研究組合 国際廃炉研究開発機構) が 2022 年 2 月から実施している水中 ROV (Remotely operated vehicle_遠隔操作型の無人潜水機) を用いた 1 号機原子炉格納容器内部調査について、東京電力福島第一原子力発電所における事故の分析に係る検討会第 28 回 (2022 年 2 月 28 日) から第 34 回 (同年 12 月 20 日) までに東京電力から報告、公開された資料は下記の引用文献等のとおり。

各調査に関する具体的な機材、実施内容、撮影結果等については、引用文献等に記載されている。

引用文献等

- 1) 東京電力福島第一原子力発電所における事故の分析に係る検討会 (第 35 回会合)
資料 2 - 2 : 福島第一原子力発電所 1 号機の格納容器内部調査から得られた情報
(前半調査とりまとめ) -一部修正-、2023 年 1 月 13 日 東京電力ホールディングス株式会社
<https://www.nra.go.jp/data/000416235.pdf>
- 2) 東京電力福島第一原子力発電所における事故の分析に係る検討会 (第 34 回会合)
資料 1 - 1 : 1 号機 PCV 内部調査 (後半) について、2022 年 12 月 20 日 技術研究組合 国際廃炉研究開発機構 東京電力ホールディングス株式会社
<https://www.nra.go.jp/data/000414329.pdf>
資料 1 - 2 : 1 号機内部調査動画から得られた情報、2022 年 12 月 20 日 東京電力ホールディングス株式会社
<https://www.nra.go.jp/data/000414330.pdf>
- 3) 東京電力福島第一原子力発電所における事故の分析に係る検討会 (第 33 回会合)
資料 1 - 1 : 福島第一原子力発電所 1 号機の格納容器内部調査から得られた情報
(前半調査とりまとめ)、2022 年 12 月 5 日 東京電力ホールディングス株式会社
<https://www.nra.go.jp/data/000412437.pdf>

- 4) 東京電力福島第一原子力発電所における事故の分析に係る検討会（第 32 回会合）
資料 1 - 1 : 1 号機 PCV 内部調査（後半）について、2022 年 10 月 31 日 技術
研究組合 国際廃炉研究開発機構 東京電力ホールディングス株式会
社
<https://www.nra.go.jp/data/000408669.pdf>
- 5) 東京電力福島第一原子力発電所における事故の分析に係る検討会（第 31 回会合）
資料 1 - 1 : 1 号機 PCV 内部調査の状況について、2022 年 9 月 6 日 東京電力
ホールディングス株式会社
<https://www.nra.go.jp/data/000403164.pdf>
- 6) 東京電力福島第一原子力発電所における事故の分析に係る検討会（第 30 回会合）
資料 1 - 1 : 1 号機 PCV 内部調査の状況について、2022 年 6 月 30 日 技術研
究組合 国際廃炉研究開発機構 東京電力ホールディングス株式会社
<https://www.nra.go.jp/data/000395861.pdf>
補足説明資料 1 : 1 号機 PCV 内部調査の状況について、2022 年 6 月 30 日 技
術研究組合 国際廃炉研究開発機構 東京電力ホールディングス
株式会社
<https://www.nra.go.jp/data/000395885.pdf>
- [動画] 1 号機 PCV 内滞留水水位について（常設監視計器の再設置結果）
[https://www.tepco.co.jp/tepconews/library/archive-
j.html?video_uuid=r4u027fz&catid=61699&year=2015](https://www.tepco.co.jp/tepconews/library/archive-j.html?video_uuid=r4u027fz&catid=61699&year=2015)
- [画像] 福島第一原子力発電所 1 号機 原子炉格納容器内部調査（堆積物サンプ
リング）撮影日 2017 年 4 月 6 日
<https://photo.tepco.co.jp/date/2017/201704-j/170407-01j.html>
- [動画] 1 号機原子炉格納容器内部調査時の動画（2022 年 5 月 23 日 福島第一
原子力発電所 1 号機原子炉格納容器内部調査（ROV-A2）の実施状況
（2022 年 5 月 17～19 日の作業状況） 提供：国際廃炉研究開発機構
（IRID）・日立GEニュークリア・エナジー）
[https://www.tepco.co.jp/library/movie/detail-
j.html?catid=107299&video_uuid=og07od6u](https://www.tepco.co.jp/library/movie/detail-j.html?catid=107299&video_uuid=og07od6u)
- 参考 1 : 日本原子力学会 燃料デブリ研究専門委員会 解析・評価等による燃料デ
ブリ分布の推定について、2022 年 6 月 30 日 技術研究組合 国際廃炉研
究開発機構(IRID) 一般財団法人 エネルギー総合工学研究所 (IAE)
<https://www.nra.go.jp/data/000395863.pdf>
- 7) 東京電力福島第一原子力発電所における事故の分析に係る検討会（第 29 回会合）
資料 3 : 1 号機 PCV 内部調査の状況について、2022 年 4 月 26 日 技術研究組
合 国際廃炉研究開発機構 東京電力ホールディングス株式会社

<https://www.nra.go.jp/data/000388506.pdf>

[動画] 1号機原子炉格納容器内部調査時の動画(2022年3月24日 福島第一原子力発電所1号機原子炉格納容器内部調査(ROV-A2)の実施状況(3月14~16日の作業状況) 提供:国際廃炉研究開発機構(IRID)・日立GEニュークリア・エナジー)

https://www.tepco.co.jp/library/movie/detail-j.html?catid=107299&video_uuid=s19dq021

- 8) 東京電力福島第一原子力発電所における事故の分析に係る検討会(第28回会合)
資料4-3:1号機PCV内部調査の状況について、2022年2月28日 技術研究組合 国際廃炉研究開発機構 東京電力ホールディングス株式会社

<https://www.nra.go.jp/data/000382327.pdf>

資料4-3(参考):1号機原子炉格納容器内部調査について~映像データ及び線量データの分析結果~、2022年2月28日 東京電力ホールディングス株式会社

<https://www.nra.go.jp/data/000382328.pdf>

[動画] 1号機原子炉格納容器内部調査時の動画(2022年2月9日 福島第一原子力発電所 1号機原子炉格納容器内部調査の実施状況(2月9日調査分)について 提供:国際廃炉研究開発機構(IRID)・日立GEニュークリア・エナジー)

https://www.tepco.co.jp/library/movie/detail-j.html?catid=107299&video_uuid=k593g02e

[動画] 1号機原子炉格納容器内部調査時の動画(2022年2月8日 福島第一原子力発電所 1号機原子炉格納容器内部調査の実施状況(2月8日調査分)について 提供:国際廃炉研究開発機構(IRID)・日立GEニュークリア・エナジー)

https://www.tepco.co.jp/library/movie/detail-j.html?catid=107299&video_uuid=ykq5a5n6

- 9) 福島第一原子力発電所廃炉・事故調査に係る連絡・調整会議(第10回会合)
資料1-2:福島第一原子力発電所1号機の格納容器内部調査 後半調査について、2022年12月8日 東京電力ホールディングス株式会社

<https://www.nra.go.jp/data/000413054.pdf>

(別添 4-2)

1号機、2号機及び3号機における原子炉格納容器内部調査の比較

原子力規制庁原子力規制部

東京電力福島第一原子力発電所事故対策室 木原 昌二

1. 背景及び目的

東京電力及び IRID は、2022 年 2 月から実施している水中 ROV を用いた 1 号機原子炉格納容器内部調査の他に、2017 年 7 月及び 12 月には 3 号機原子炉格納容器について、2018 年 1 月には 2 号機原子炉格納容器について、内部調査を実施している。

調査チームでは、各号機におけるペDESTAL 周辺の状況を比較検討するため、図 1～図 9 を整理した。

2. 原子炉格納容器内部調査の比較

1 号機の原子炉格納容器内部調査では、ペDESTAL 外周部の調査が行われ、ペDESTAL 開口部付近でペDESTAL 基礎部のコンクリート部が抜け落ち、内部の鉄筋が露出するような損傷が確認されるとともに、ペDESTAL 外周ではテラス状構造やバブル形状の堆積物、半球状堆積物等が確認されている。

一方、2 号機及び 3 号機の原子炉格納容器内部調査は、制御棒駆動機構 (CRD) 交換用レールのペDESTAL 開口部を経由したペDESTAL 内部の調査であり、1 号機原子炉格納容器内部調査で確認されたペDESTAL 外周部とは調査範囲が異なっているが、1 号機で確認されたペDESTAL 基礎部のコンクリート損傷、テラス状構造、半球状の堆積物等は、2 号機及び 3 号機では確認されておらず、1 号機の原子炉格納容器内での炉心損傷後の事象進展は、2 号機及び 3 号機と異なっている可能性が示唆される。

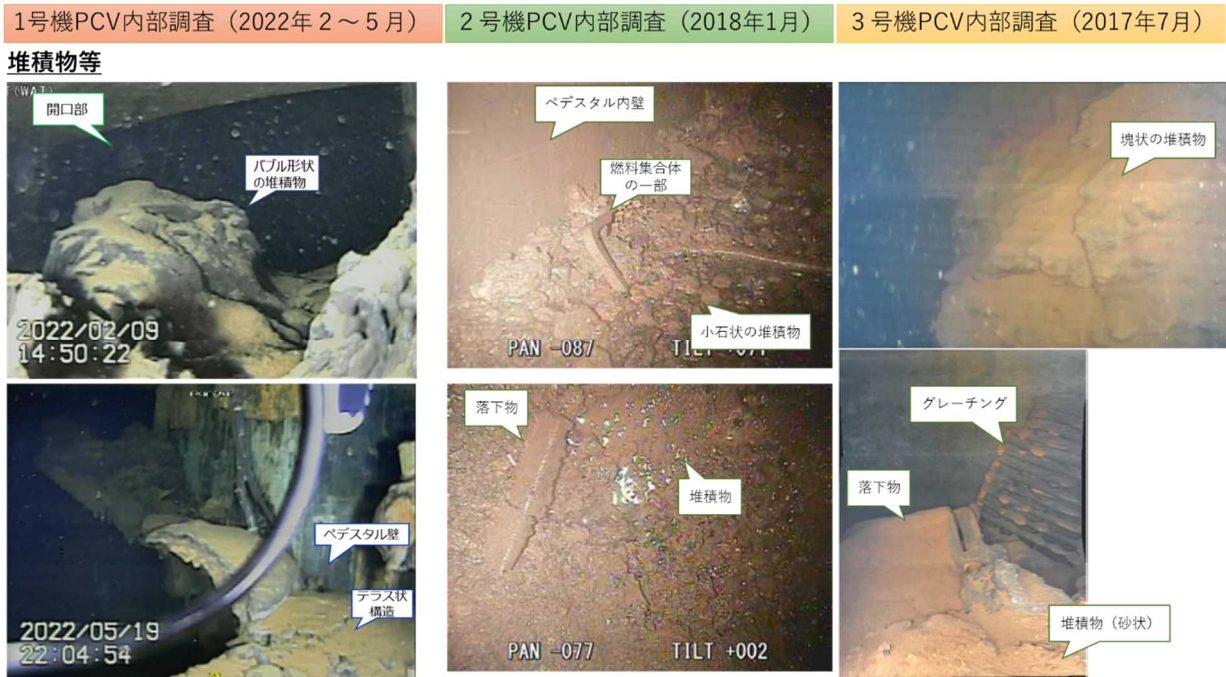


図1 1号機、2号機、3号機のPCV内部調査の比較①



図2 1号機、2号機、3号機のPCV内部調査の比較②

1号機PCV内部調査（2022年2～5月）

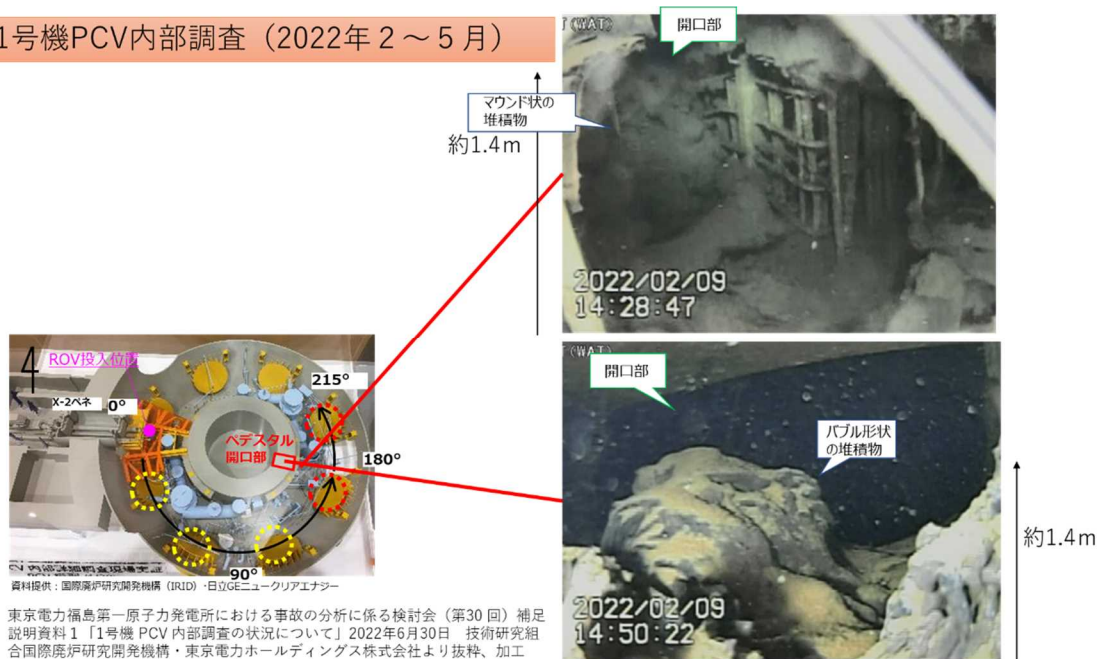


図3 1号機PCV内部調査①

1号機PCV内部調査（2022年2～5月）

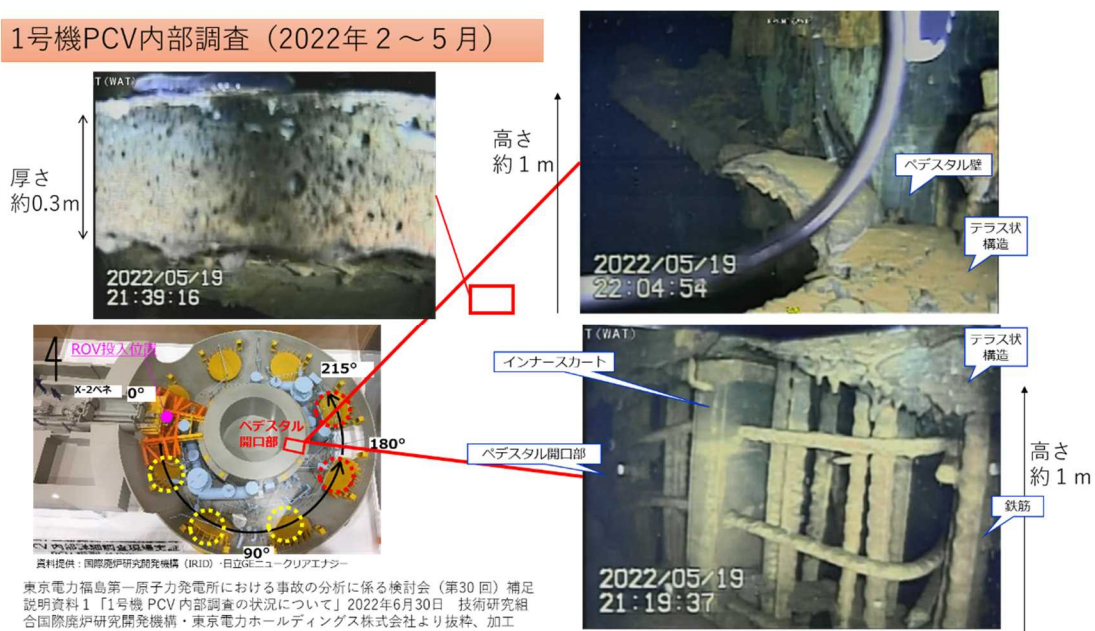
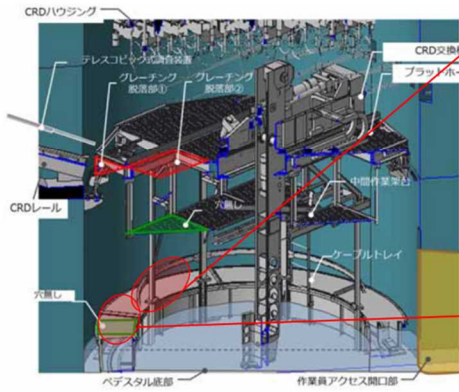


図4 1号機PCV内部調査②

2号機PCV内部調査（2018年1月）



福島第一原子力発電所2号機原子炉格納容器内部調査実施結果（速報）
2018年1月19日 東京電力ホールディングス株式会社より抜粋加工

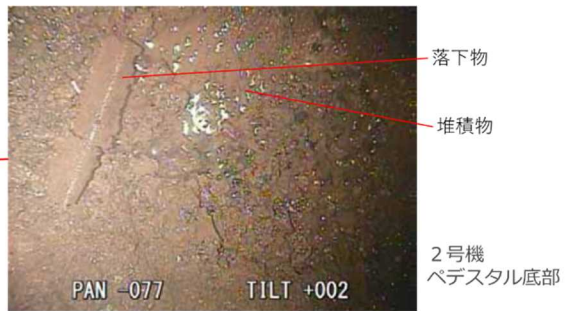
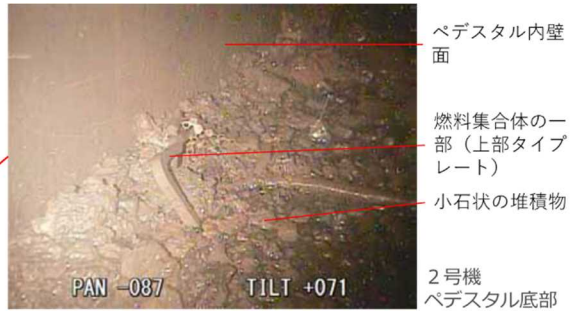
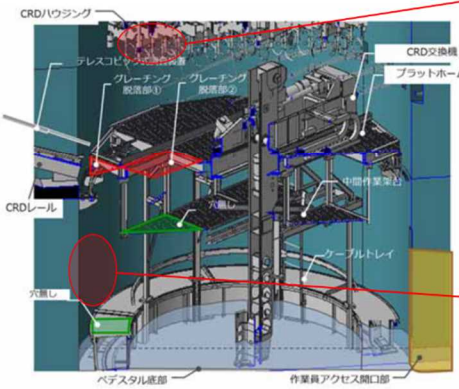


図5 2号機PCV内部調査①

2号機PCV内部調査（2018年1月）



福島第一原子力発電所2号機原子炉格納容器内部調査実施結果（速報）
2018年1月19日 東京電力ホールディングス株式会社より抜粋加工

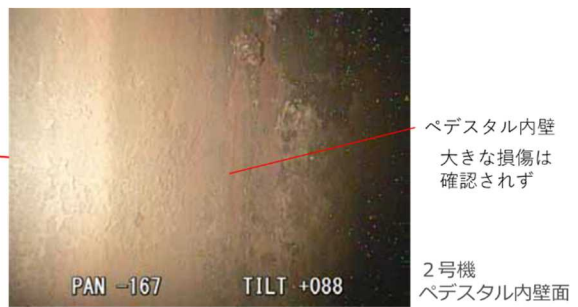
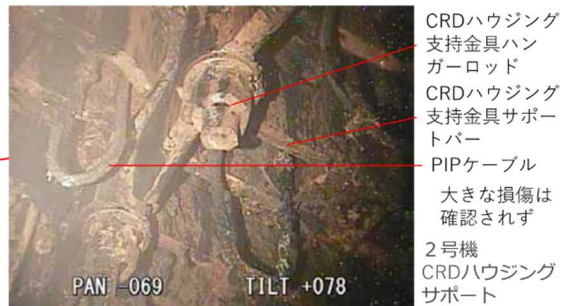


図6 2号機PCV内部調査②

3号機PCV内部調査（2017年7月）

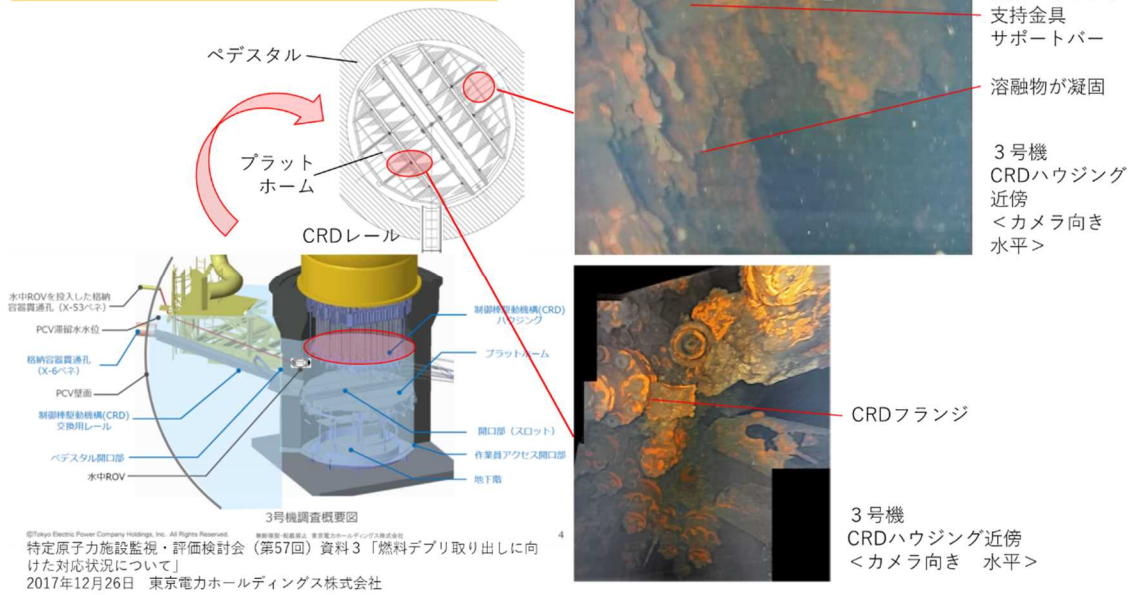


図7 3号機PCV内部調査①

3号機PCV内部調査（2017年7月）

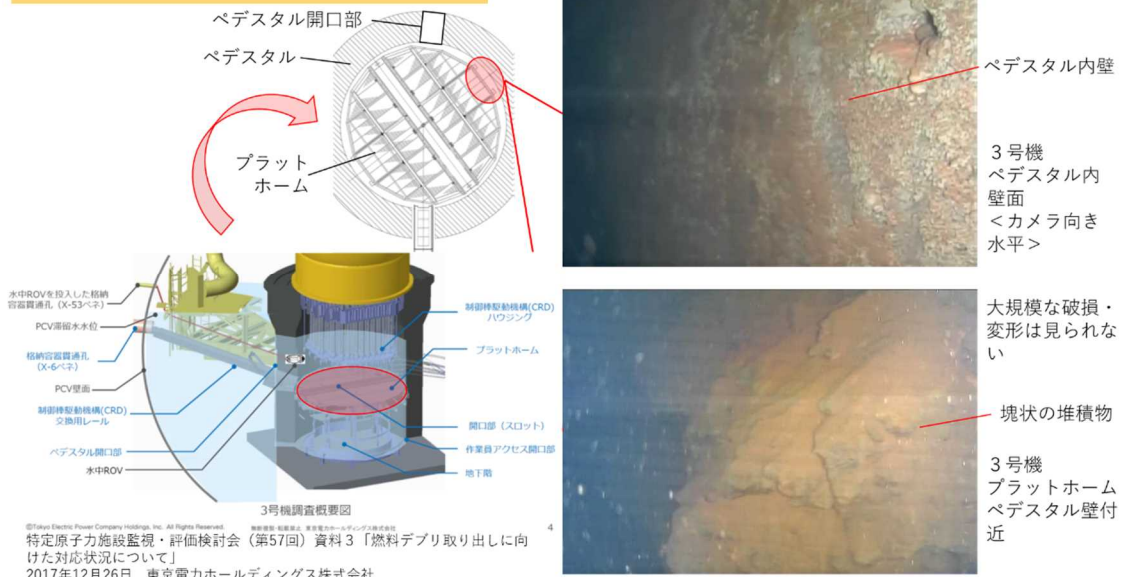


図8 3号機PCV内部調査②

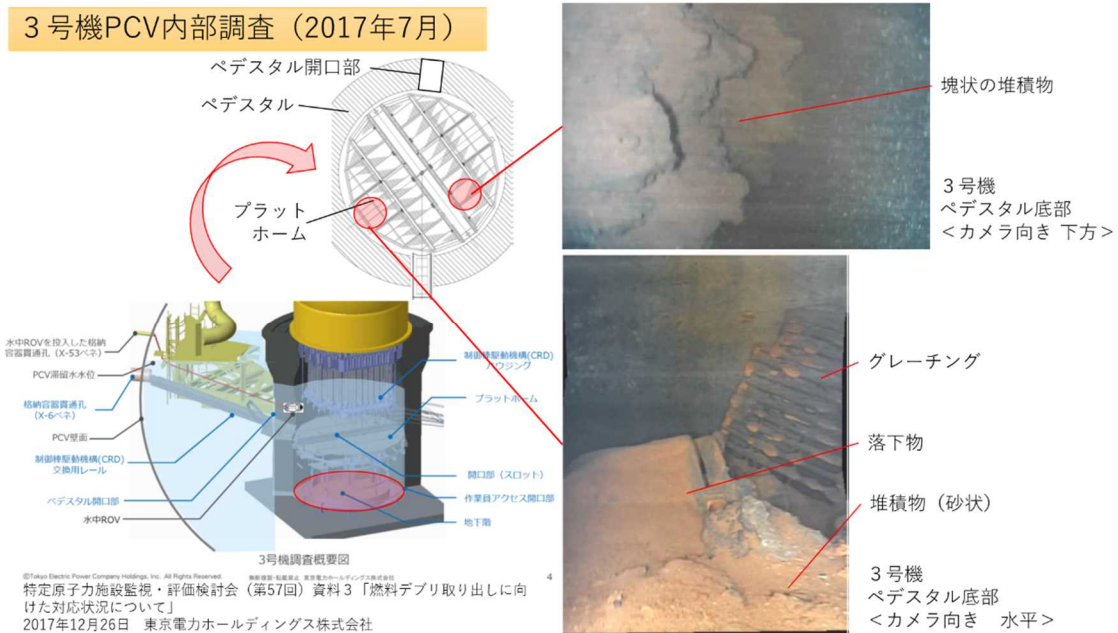


図9 3号機PCV内部調査③

3. まとめ

(1) 2号機関連

2号機PCV内については、2018年1月に制御棒駆動機構(CRD)交換用レールのベデスタル開口部を経由したベデスタル内部の調査が実施されている。

1号機PCV内部調査で確認されたベデスタル外周部とは調査範囲が異なっているが、1号機で確認されたベデスタル基礎部のコンクリート損傷、テラス状構造、半球状の堆積物等は、2号機の調査では確認されていない。

(2) 3号機関連

3号機PCV内については、2017年7月及び12月に制御棒駆動機構(CRD)交換用レールのベデスタル開口部を経由したベデスタル内部の調査が実施されている。

1号機PCV内部調査で確認されたベデスタル外周部とは調査範囲が異なっているが、1号機で確認されたベデスタル基礎部のコンクリート損傷、テラス状構造、半球状の堆積物等は、3号機の調査では確認されていない。しかし、1号機で確認されている盛り上がったバブル形状の堆積物に形状が似た堆積物は確認されており、今後詳細な映像等が撮影されれば、各号機における溶融炉心の落下あるいは堆積物の形成に係る知見が拡充されるものと期待される。

引用文献等

- 1) 東京電力福島第一原子力発電所における事故の分析に係る検討会 第 32 回
資料 1 - 3 : 1 号機原子炉格納容器内部調査の整理点等について [原子力規制
庁]
<https://www.nra.go.jp/data/000408671.pdf>
- 2) 東京電力福島第一原子力発電所における事故の分析に係る検討会 第 30 回
補足説明資料 1 : 1 号機 PCV 内部調査の状況について [技術研究組合国際廃炉研
究開発機構 東京電力ホールディングス株式会社]
<https://www.nra.go.jp/data/000395885.pdf>
資料 1 - 2 : 1 号機原子炉格納容器内部調査時の動画 (2022 年 5 月 23 日福島第
一原子力発電所 1 号機原子炉格納容器内部調査 (ROV-A2) の実施状
況 (2022 年 5 月 17~19 日の作業状況) 提供 : 国際廃炉研究開発
機構 (IRID)・日立 GE ニュークリア・エナジー)
[https://www.tepco.co.jp/library/movie/detail-
j.html?catid=107299&video_uuid=og07od6u](https://www.tepco.co.jp/library/movie/detail-j.html?catid=107299&video_uuid=og07od6u)
- 3) 特定原子力施設監視・評価検討会 第 60 回
資料 2 - 1 : 「原子炉格納容器内部調査及び燃料デブリ取り出しに向けた対応状況
~2 号機原子炉格納容器内部調査結果~」 2018 年 5 月 18 日 東京
電力ホールディングス株式会社
<https://www.nra.go.jp/data/000230853.pdf>
- 4) 廃炉・汚染水対策チーム会合／事務局会議 第 53 回
資料 3 - 3 : 「福島第一原子力発電所 2 号機原子炉格納容器内部調査結果につい
て」 2018 年 4 月 26 日 東京電力ホールディングス株式会社
[https://www.meti.go.jp/earthquake/nuclear/decommissioning/committee/osensui-
taisakuteam/2018/05/3-03-02.pdf](https://www.meti.go.jp/earthquake/nuclear/decommissioning/committee/osensui-
taisakuteam/2018/05/3-03-02.pdf)
- 5) 廃炉・汚染水対策チーム会合／事務局会議 第 50 回
資料 3 - 3 : 「福島第一原子力発電所 2 号機原子炉格納容器内部調査実施結果」
2018 年 2 月 1 日 東京電力ホールディングス株式会社
[https://www.meti.go.jp/earthquake/nuclear/decommissioning/committee/osensui-
taisakuteam/2018/02/3-03-02.pdf](https://www.meti.go.jp/earthquake/nuclear/decommissioning/committee/osensui-
taisakuteam/2018/02/3-03-02.pdf)
- 6) 廃炉・汚染水対策チーム会合／事務局会議 第 40 回
資料 3 - 3 : 「2 号機原子炉格納容器内部調査について~画像解析による追加報告
~」 2017 年 3 月 30 日 東京電力ホールディングス株式会社
[https://www.meti.go.jp/earthquake/nuclear/decommissioning/committee/osensui-
taisakuteam/2017/03/3-03-03.pdf](https://www.meti.go.jp/earthquake/nuclear/decommissioning/committee/osensui-
taisakuteam/2017/03/3-03-03.pdf)

- 7) 東京電力ホールディングス株式会社ホームページ
福島第一原子力発電所 2号機原子炉格納容器内部調査実施結果（速報） 2018年
1月19日 東京電力ホールディングス株式会社
https://www.tepco.co.jp/nu/fukushima-np/handouts/2018/images1/handouts_180119_08-j.pdf
- 8) 特定原子力施設監視・評価検討会 第57回
資料3：「燃料デブリ取り出しに向けた対応状況について」2017年12月26日
東京電力ホールディングス株式会社
<https://www.nra.go.jp/data/000214400.pdf>
- 9) 東京電力ホールディングス株式会社ホームページ
3号機 PCV 内部調査進捗（22日調査速報） 2017年7月22日 東京電力ホールディングス株式会社
https://www.tepco.co.jp/nu/fukushima-np/handouts/2017/images2/handouts_170722_05-j.pdf
- 10) 3号機 PCV 内部調査進捗（21日調査速報） 2017年7月21日 東京電力ホールディングス株式会社
https://www.tepco.co.jp/nu/fukushima-np/handouts/2017/images2/handouts_170721_09-j.pdf
- 11) 3号機 PCV 内部調査進捗（19日調査速報） 2017年7月19日 東京電力ホールディングス株式会社
https://www.tepco.co.jp/nu/fukushima-np/handouts/2017/images2/handouts_170719_08-j.pdf

(別添 4-3)

1号機原子炉格納容器内におけるペDESTAL損傷及び堆積物の形成

原子力規制庁原子力規制部

東京電力福島第一原子力発電所事故対策室 木原 昌二

1. 背景及び目的

東京電力及び IRID が 2022 年 2 月から実施している水中 ROV を用いた 1 号機原子炉格納容器 (PCV) 内部調査において、1 号機のペDESTAL 外周部に堆積物やペDESTAL 開口部周辺のコンクリート部に損傷が確認されている。

これらの堆積物やペDESTAL の損傷は、従来考えられていた MCCI の事象と異なる可能性があり、その事象進展に関して検討を進めている。

今後、東京電力及び IRID において、堆積物のサンプリングやペDESTAL 内部の調査など、更なる調査が計画されている。

本資料では、事故分析検討会で検討した第 28 回 (2022 年 2 月 28 日) から第 33 回 (同年 12 月 5 日) までの東京電力作成資料、大阪大学作成資料、原子力規制庁作成資料等をもとに整理している (詳細は、表 1 参照)。

表 1 事故分析検討会における検討の経緯

	事故分析検討会 における検討	東京電力等からの説明事項
1	第 28 回会合 2022 年 2 月 28 日	【東京電力】 <u>2 月 8 日、9 日の ROV-A の調査映像</u> ・ペDESTAL開口部周辺の画像等
2	第 29 回会合 2022 年 4 月 26 日	【東京電力】 <u>3 月 14 日～16 日、28 日の ROV-A2 の調査映像</u> ・ジェットデフレクター、床面堆積物
3	第 30 回会合 2022 年 6 月 30 日	【東京電力】 <u>5 月 17 日～19 日の ROV-A2 の調査映像</u> ・ペDESTAL開口部付近のコンクリート壁、堆積物の形状 等 <u>6 月 7 日～10 日の ROV-C の調査映像・データ（評価済み 3 箇所／全 13 箇所）</u>
4	第 31 回会合 2022 年 9 月 6 日	【東京電力】 <u>6 月 7 日～10 日の ROV-C の調査映像・データ（評価済み全 13 箇所）</u> 【原子力規制庁】 <u>PCV 内部調査における確認点</u> ・堆積物の形成、コンクリートの破損
5	第 32 回会合 2022 年 10 月 31 日	【東京電力】 <u>前半調査における新たな情報</u> ・水面より上の構造物への付着物 ・膨らみのある形状の物体 等 <u>後半調査の計画</u> 【大阪大学】 <u>コンクリートに関する事象の検討</u> ・コンクリート破損等のシナリオ案 ・コンクリート加熱溶融試験 等 【原子力規制庁】 <u>コンクリート破損等のシナリオ案</u> <u>1、2、3 号機 PCV 内部調査結果の比較</u>
6	第 33 回会合 2022 年 12 月 5 日	【東京電力】 <u>前半調査とりまとめ¹</u> ・堆積物、保温材劣化、鉛毛マット破損高さ 等
7	第 34 回会合 2022 年 12 月 20 日	【東京電力】 <u>12 月 6 日～10 日の ROV-E の調査</u> <u>RCW 配管の損傷状況</u> 【大阪大学】 <u>コンクリートに関する事象の検討</u> ・コンクリート加熱溶融試験 等

¹ 事故分析検討会 第 35 回会合 資料 2-2 において一部修正。

2. 調査の概要

東京電力及び IRID が実施している水中 ROV を用いた 1 号機原子炉格納容器内部調査は、これまで①事前対策となるガイドリング取付 (ROV-A)、②ペDESTAL 外の詳細目視 (ROV-A2) 及び③堆積物厚さ測定 (ROV-C) の調査が実施されている。(表 2 参照)

④堆積物デブリ検知・評価 (ROV-D) 以降の調査 (後半調査) については、2022 年 3 月 29 日の②ペDESTAL 外の詳細目視 (ROV-A2) の調査の際の ROV-A2 のカメラの映像不良の発生や、同年 6 月 10 日の③堆積物厚さ測定 (ROV-C) の調査の際に、ROV-C のケーブルが PCV 内の電線管と配管サポート部材の間に挟まり、移動範囲が限定的となる事象が発生した²こともあり、調査工程の見直しが行われた。東京電力は、後半調査に向けたモックアップ施設の改良及びトレーニングを実施し、準備が整った 12 月 6 日から後半調査が開始された。

表 2 1 号機 PCV 内部調査の概要

		調査時期	調査目的	調査装置等
前半調査	①	2022 年 2 月 8 日～10 日	事前対策となるガイドリング取付	ROV-A
	②	2022 年 3 月 14 日～16 日 ^{※1} 3 月 28 日～29 日 ^{※2} 5 月 17 日～23 日 ^{※3}	ペDESTAL 外の詳細目視	ROV-A2
	③	2022 年 6 月 7 日～11 日	堆積物厚さ測定	RV-C
後半調査	④	2022 年 12 月 6 日～10 日	堆積物デブリ検知・評価	ROV-D
	⑤	2023 年 1 月中旬予定 (1 回目) 2 月上旬予定 (2 回目)	堆積物サンプリング	ROV-E
	⑥	2023 年 2 月下旬予定	堆積物 3D マッピング	ROV-B
	②'	2023 年 3 月中旬予定 ^{※4}	ペDESTAL 内部、壁部の詳細目視	ROV-A2

※ 1 : 2022 年 3 月 16 日 福島県沖を震源とする地震による調査の一時中断

※ 2 : 2022 年 3 月 28 日 ペDESTAL 外周調査を再開するが、同年 3 月 29 日に ROV-A2 のカメラの映像不良 (浸水によるもの) が発生し調査中断

※ 3 : 2022 年 5 月 17 日 ROV-A2 予備機でのペDESTAL 外周調査を再開

² 2022 年 6 月 10 日に、ROV-C のケーブルが PCV 内の電線管と配管サポート部材の間に挟まり、移動範囲が限定的となる事象が発生したが、翌 6 月 11 日に予め定めていた手順 (ケーブル挟まり解消作業) に則り操作を行うことで挟まりを解消、その後 ROV-C を回収し、調査を完了している。

1号機原子炉格納容器内部調査は、1号機原子炉格納容器のX-2ペネトレーション（X-2ペネ）から水中ROVを投入し、PCV内の水中を遊泳させ、各種調査を行う計画となっており、PCV地下階の0°から215°まで（ペデスタル開口部含む）を大まかな調査範囲としている。（図1参照）

水中ROVは、調査目的に応じて計測器を積載した設計となっている。

各調査の概要及びその調査結果は、東京電力の資料（別添4-1）で公開されている。

資料提供：国際廃炉研究開発機構（IRID）

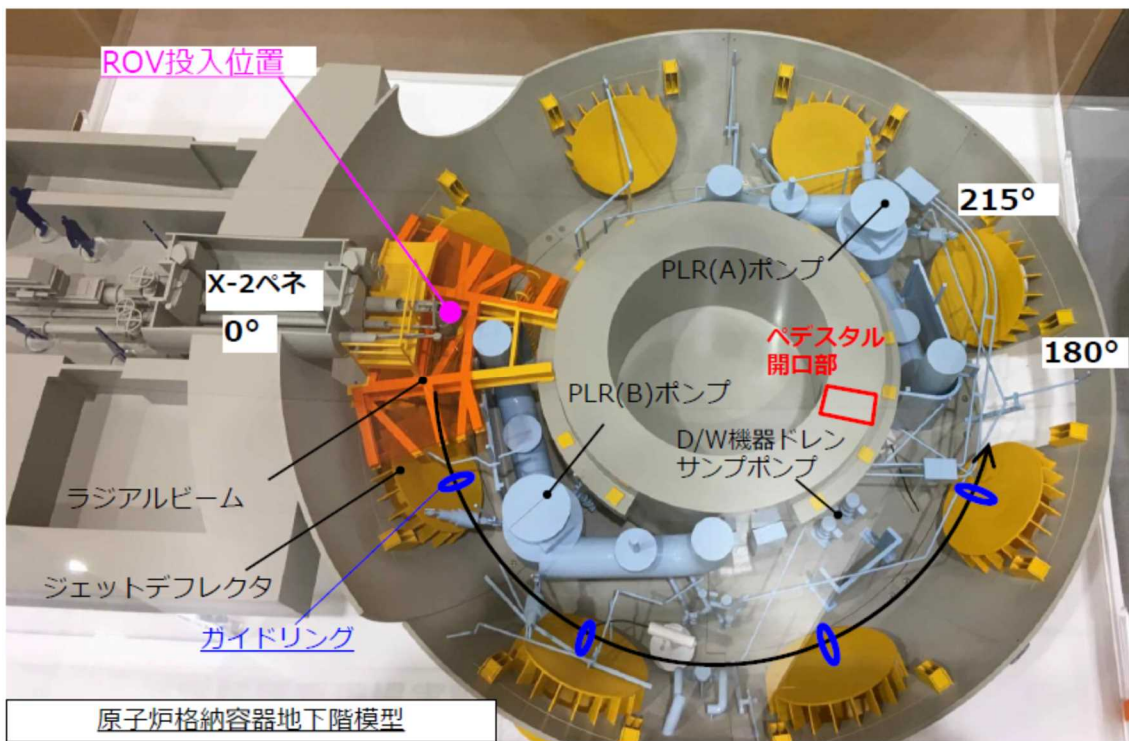


図1 1号機原子炉格納容器内部調査の調査範囲の概要
(ROV-A2調査の例)

3. 調査から得られた情報等

(1) 1号機PCV内部で確認された特徴点等

①事前対策となるガイドリング取付（ROV-A）及び②ペデスタル外の詳細目視（ROV-A2）の調査等の撮影結果から、ペデスタル開口部付近において、ペデスタル基礎部のコンクリートの損傷及び複数の堆積物等が確認されている。

(ペDESTAL開口部付近のコンクリートの損傷及びテラス状構造等)

- 1) 1号機ペDESTAL開口部付近に、落下した溶融炉心に由来するものである可能性が高い、高さ約1.0m程度のマウンド状のものと東京電力は判定している。
- 2) 1号機ペDESTAL開口部付近のコンクリートがかなりの範囲にわたって喪失している。一方、コンクリート内部にあった鉄筋部やインナースカートはほぼ原形をとどめて残存している。このような現象は、現時点までのところ2号機及び3号機では確認されていない。(図2参照)

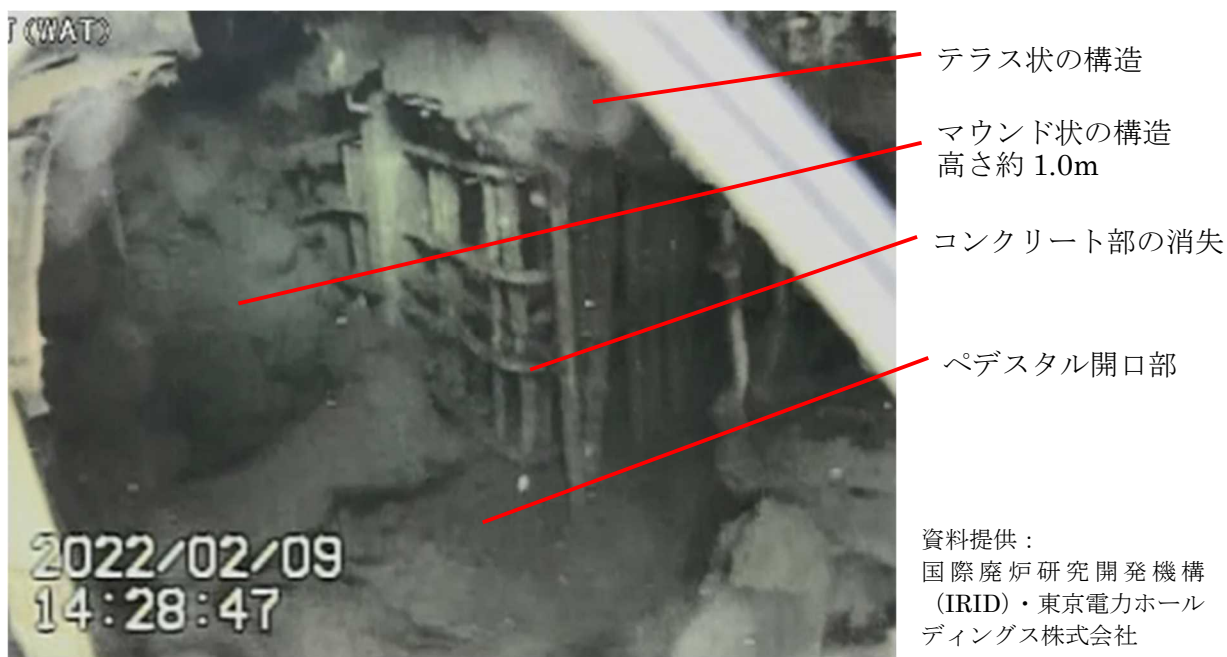
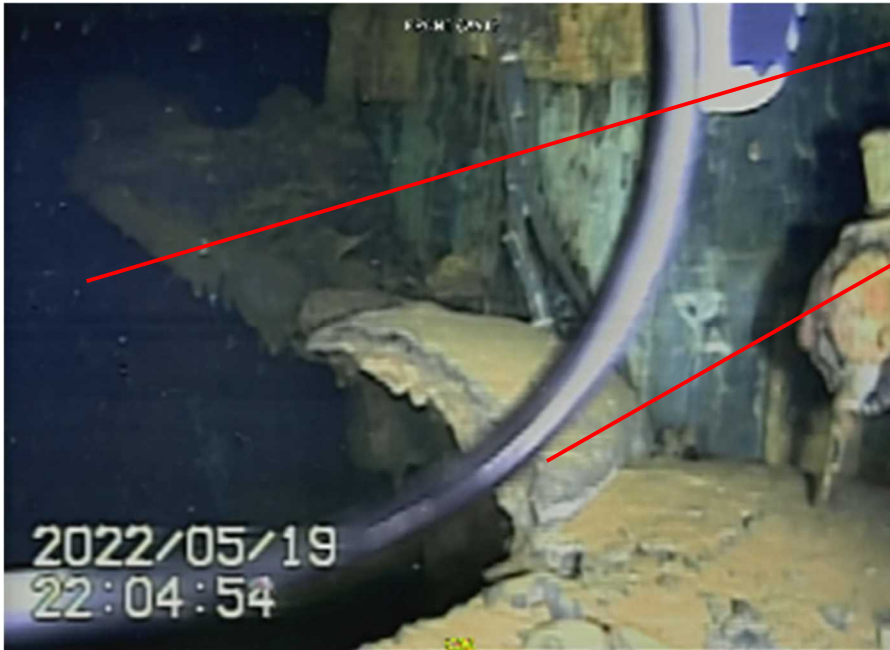


図2 ペDESTAL開口部付近

(ペDESTAL開口部付近のコンクリートの損傷及びテラス状構造等)

- 3) ペDESTAL外周部については、テラス状構造が観測されており、開口部付近ではPCV底部から1.0~1.1m、開口部の反対側では0.2~0.4m程度の高さとなっている。また、コンクリート破損はテラス状構造以下の部分にのみ生じているように見える。
- 4) ごく一部であるがテラス状構造の断面の映像が得られており、気泡を伴う構造が見られるが、それ以上のことは分かっていない。当該部分の厚さは約3cmと推定されている。なお、テラス状構造の下面は滑らかなように見える。(図3及び図4参照)



ペDESTAL開口部

テラス状の構造
厚さ約 3cm
(東京電力推定)

資料提供：
国際廃炉研究開発機構
(IRID)・東京電力ホール
ディングス株式会社

図3 ペDESTAL開口部付近 (近接)



テラス状の構造
厚さ約 3cm
(東京電力推定)

資料提供：
国際廃炉研究開発機構
(IRID)・東京電力ホール
ディングス株式会社

図4 テラス状構造 (断面の近接)

(ペDESTAL外周部（開口部反対側付近）のテラス状構造等）

- 5) PCV 最外周部に位置するジェットデフレクターの裏側にも、ペDESTALから到達したと考えられる堆積物が見られるが、ジェットデフレクター自体には大きな損傷などは見られない。見える範囲ではPCVの内面に大きな損傷はない。
- 6) ペDESTAL開口部付近では、テラス状構造の下部が空洞であることが確認されているが、開口部から離れた場所ではどうなっているのかは、現段階では不明である。また、ペDESTAL開口部前面の構造物が少ない場所では、テラス状構造がPCV床面に落下している。
- 7) テラス状構造の位置で鉛遮蔽体（鉛毛マット）が溶けて落下しているように見受けられる。テラス状構造の上部では鉛遮蔽体（鉛毛マット）の被覆材料（グラスファイバーとのこと）は維持されているように見え、著しい高温の影響はほぼテラス状構造付近に限られているように見える。なお、東京電力は、ペDESTAL開口部の反対側に位置する場所でも、鉛遮蔽体が開口部付近とほぼ同じ高さ以下で喪失していることを確認し、その原因としては水化学的反応の可能性を示唆している。（図5及び図6参照）



図5 ペDESTAL外周部（開口部付近）



鉛毛マット
(同じ高さ(約
1.2m)で破断)

構造物の変色
(変色高さ
(約 1.2m))

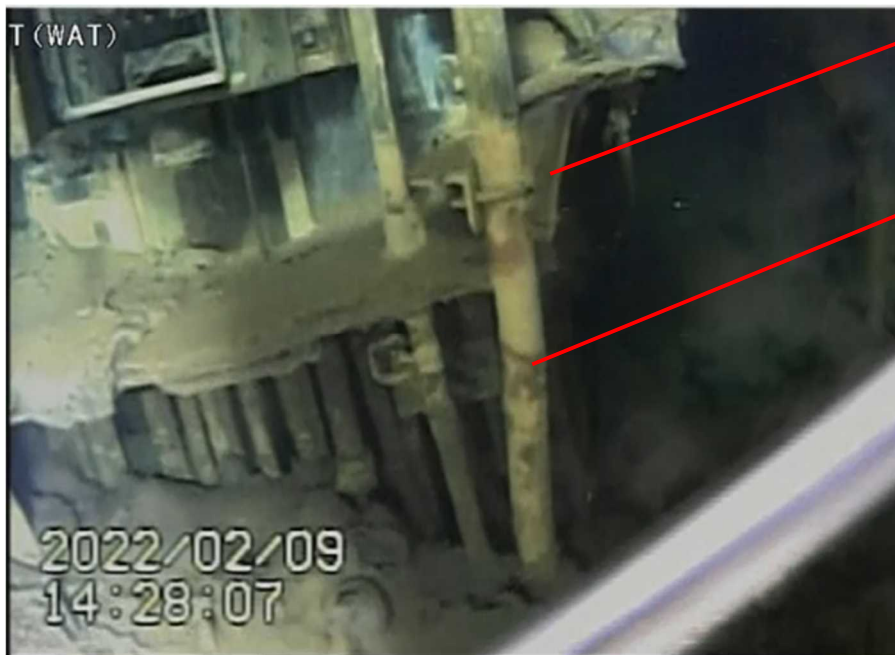
資料提供：
国際廃炉研究開発機構
(IRID)・東京電力ホール
ディングス株式会社

図6 ペDESTAL外周部(開口部反対側付近)

(テラス状構造の下部等の状況)

- 8) テラス状構造下部に位置する配管等の金属構造物は概ね維持されているように見える。ただし、開口部付近の RCW (原子炉冷却系) 配管はもともとの位置には存在せず、その行方も確認できていない³。(図7参照)

³ 2022年12月20日に東京電力が事故以前のペDESTAL開口部の映像として示した写真(第34回事故分析検討会資料1-3 p.9)にはRCW配管が一本しかないが、東京電力は2023年1月13日の事故分析検討会で本写真を訂正した。



テラス状の構造

金属構造物等

資料提供：
国際廃炉研究開発機構
(IRID)・東京電力ホール
ディングス株式会社

図7 ペDESTAL開口部付近

(ペDESTAL開口部奥のバブル状の構造)

9) ペDESTAL開口部、1.4m 高さの位置にバブル形状のものが見られるが、その下部には空間があることが判明している。ただし、バブル状部分の裏面がどのようなになっているかの情報は得られていない。(図8参照)



ペDESTAL開口部

バブル状の構造

資料提供：
国際廃炉研究開発機構
(IRID)・東京電力ホール
ディングス株式会社

図8 ペDESTAL開口部奥

(ペDESTAL外周部 PCV 床面の半球状の構造)

10) ペDESTAL外周部の PCV 床面のデブリなどの堆積状況は不明確だが、一部に半球状のものが撮影されている。(具体的にどのようなものかは現段階では判明していない。)(図9参照)



図9 ペDESTAL外周部の PCV 床面の堆積状況

(2) 中性子束測定 (5月20日、21日調査分)

②詳細目視調査用の ROV-A2 は、計測器として改良型小型 B10 検出器を搭載しており、4箇所で熱中性子の測定を行っている。

東京電力の測定結果(別添4-1参照)では、ペDESTAL開口部付近で熱中性子束が多く確認されているとされているが、使用された検出器(改良型小型 B10 検出器)の測定能力及び熱中性子束への換算等、測定データについては、更なる検討、整理が必要と考えられる。12月6日から10日にかけて実施された ROV-D (堆積物デブリ検知)の結果も踏まえて、 γ 線の核種分析や中性子関係のデータを総合的に検討すべきである。

(3) ROV-CによるペDESTAL基礎部調査の概要

③堆積物厚さ測定(ROV-C)の調査の結果、PCV底部からの堆積物厚さについては、ペDESTAL開口部付近が比較的高く(約1.1~0.8m)、ROV投入位置であ

る X-2 ペネ付近に近づくにつれて徐々に低くなっている（約 0.4～0.2m）ことが確認された。（別添 4－1 参照）

なお、ROV-C は、水面を一定速で遊泳しながら、堆積物（PCV 底部方向）へ超音波を発信、跳ね返りを受信するものであり、水面から堆積物表面までの距離を測定している。そのため、堆積物内部の空洞の有無等の情報を得られるものではない。

今後、ROV-B（堆積物 3D マッピング）による走査型超音波距離計を用いた堆積物の高さ分布の調査も予定されており、堆積物の分布をより詳細に把握することで、堆積物のもととなる燃料デブリの総量や拵がり方に繋がる情報が得られる可能性がある。

(4) 東京電力における 1 号機原子炉格納容器内部調査（前半調査）の取りまとめ（2022 年 12 月 20 日時点）の概要

東京電力は、2022 年 2 月から 6 月にかけて実施された福島第一原子力発電所 1 号機の原子炉格納容器内部調査（ROV-A, A2, C）により取得されたすべての映像（準備作業等を除く）の中から、「事故進展の理解に資するもの」との観点で情報を抽出し、同年 12 月 5 日及び 12 月 20 日の事故分析検討会で前半調査の取りまとめとして報告している。詳細は別添 4－1 の東京電力資料で公開されている。

4. 1 号機原子炉格納容器ペDESTAL の損傷及び堆積物形成に関する検討

調査チームは、東京電力における 3. の調査結果等をもとに、ペDESTAL 基礎部のコンクリート部が抜け落ち、内部の鉄筋が露出するような損傷がどのような要因によって生じたのか、また、ペDESTAL 外周に確認されるテラス状構造や塊状堆積物がどのように形成されたのかと言った観点から検討を進めている。

(1) シナリオ案の検討

調査チームは、3. 調査から得られた情報等から、以下の 3 つの基本的設問を念頭に検討を進めている。

1) 溶融炉心が薄く拵がっていないように見えるのはなぜか。

従来、溶融炉心は薄く広く拵がると考えられてきた。ペDESTAL 開口部付近のテラス状構造の高さが PCV 底部から 1.0～1.1m であること、現時点では未確認の段階であるがペDESTAL 開口部あるいはその奥側に 1.0m 程度堆積している可能性があることは、この従来知見と一致しない可能性がある。

2) ペDESTAL 壁のコンクリートが失われたのはなぜか。

従来、安全評価のために考えられてきた MCCI では、2000℃程度の溶融デブリが鉄筋コンクリートと接触し、鉄筋を含めて溶融/破損させると言うものであった。しかし、今回は鉄筋などの金属構造物が広く残存しており、1000℃を下回る（鉄筋のみならず周囲の比較的細い配管も原形をとどめている。また、鉛遮蔽体（鉛毛マット）の溶け落ちている範囲がテラス状構造の極近くであることも含めて）「低温」での相互作用の結果である可能性もある。

3) テラス状構造はどのように形成されたのか。

テラス状構造の形成過程は現段階では分かっていない。仮にテラス状構造の位置まで溶融デブリ層が存在したとした場合、単純に落下した溶融炉心が原子炉圧力容器（RPV）直下の金属構造物を取り込んだだけでは、それほど堆積に至らないと考えられている⁴。

本中間取りまとめでは、上述の1)～3)に示す状態が発生した原因・プロセスを検討するため、事故分析検討会で提案された以下の3つのシナリオ案を整理している。

- ①コンクリートの高温での溶融モデル⁵
- ②コンクリートの水への溶解モデル⁶
- ③ガスによる溶融炉心の膨張モデル

これらは、議論を促進する観点から、ひとまず提起されたものであり、さらなる検討或いは代替案の案出が必要な段階のものでしかない。逆に言えば、現時点では、どのシナリオ案にも十分に説明できない技術的問題点が残されている。

⁴ 事故分析検討会 第33回会合資料1-1 P8に「原子炉内の燃料、炉内構造物が全て溶けたと想定しても、その堆積高さはペDESTAL内で~1.1m程度」とされている。

⁵ 別添5 東京電力福島第一原子力発電所1号機PCV内部調査により確認されたコンクリートに関する事象の検討（大阪大学）より引用

⁶ 別添5 東京電力福島第一原子力発電所1号機PCV内部調査により確認されたコンクリートに関する事象の検討（大阪大学）より引用

①コンクリートの高温での溶融モデル

- i) 炉心溶融物がペDESTAL内に落下し、ペDESTAL開口部を経て拡がる。
- ii) 炉心溶融物がコンクリートを昇温し、コンクリートが溶融する。
- iii) クラストが形成され、内側の溶融物の消失とともにコンクリート損傷と空洞化が発生する。

上記の過程により、落下した炉心溶融物がペDESTAL開口部付近のコンクリートを昇温させた結果コンクリートの破損とテラス状構造の形成に至ったと考える。このシナリオではコンクリートの温度が鉄筋の溶融温度に至らなかったために、コンクリートのみが破損したことになる。

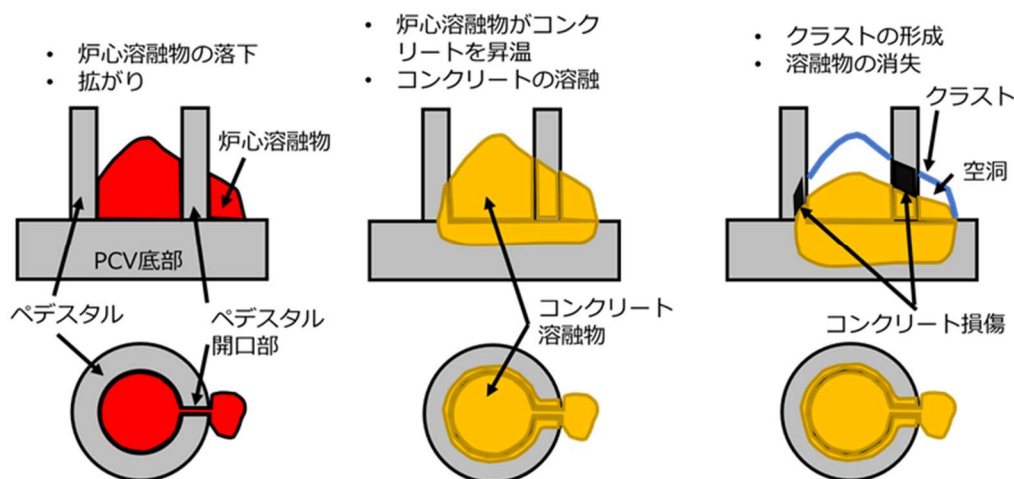


図10 コンクリートの高温での溶融モデル

②コンクリートの水への溶解モデル

- i) ペDESTAL内に水または水蒸気が存在する環境下で落下した炉心溶融物により、局所的に水温・圧力が上昇する。
- ii) コンクリート成分の高圧水への溶解によりコンクリートが損傷する。コンクリート成分と多量の水から成る高粘度な液相が形成される。水温上昇、また局所圧力の開放により、水の蒸発が進み、溶解したコンクリート成分が発泡しながら凝固する。
- iii) さらに水が蒸発し、凝固物の下部に空洞が生成される。

上記の過程により、落下した炉心溶融物が高温の水もしくは水蒸気を発生させ、それがコンクリート成分と反応することでコンクリートが破損し、テラス状構造の元となった高粘度の液相の生成に至ったと考える。

高温・高圧の水は、岩石、特に岩石中の SiO_2 を溶かすことが知られている。コンクリートは骨材とセメントから構成されており、骨材に SiO_2 が豊富に含まれている場合は、コンクリート中の骨材が高温・高圧の水に溶解する可能性がある。

また、高温・高圧の水と SiO_2 が反応して生じる水を多量に含んだガラスは、水が蒸発する際に膨張して多孔質になることが知られている。同様の現象が炉内でも生じ、その結果としてテラス状構造が形成された可能性がある。

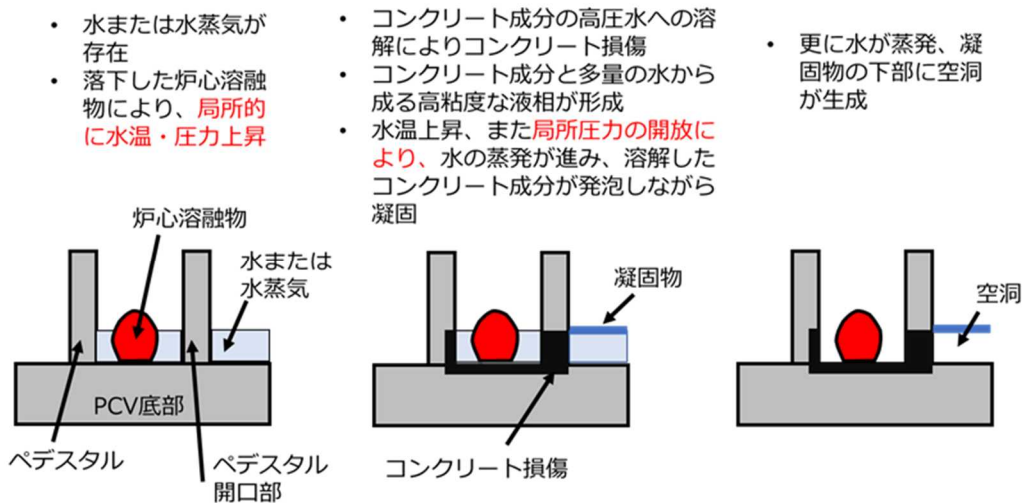


図 11 コンクリートの水への溶解モデル

③ガスによる溶融炉心の膨張モデル

i) 溶融炉心の落下

落下した溶融炉心はペDESTAL開口部の奥に 1m 程度の高さの盛り上がりを作成しているように見るとともに、ペDESTAL外周部にも広がっている可能性が高い。一方、ペDESTAL内の盛り上がりは、ペDESTALを満たしているようには、現時点では見えない。盛り上がり形成されていることが確認された場合、その成因については、落下炉心の粘性が高かったと言う考えと、落下炉心がある程度下部に溜まった後、ガスなどの噴出口として形成されたという 2 通りの考えが、現段階では、あり得るのではないかと考えられる。

ii) 落下した溶融炉心のペDESTAL外周部への拡大（膨張層の形成）

その後、落下した溶融炉心は、ペDESTAL開口部を経て、次第にペDESTAL外周部に流れ出たと考えられるが、このときの溶融炉心の温度や外周部での広がり程度などは、今後の PCV 内部調査からの追加情報なしには、確定できない。

この溶融炉心からの輻射による熱エネルギー（ γ 線などによる効果を含む。）によって、ペデスタル壁の温度が上昇し、コンクリートの分解が進み、強度を失って粉体状になったのではないか。強度を失うメカニズムとしては、カルシウムの脱落やコンクリート内の結晶成分の相変化による応力発生などがあり得るが、何れもアイデアの段階であり、実験で検証することが必要である。

輻射による加温破損メカニズムは、溶融炉心とコンクリートが直接接触することを必要とせず、ペデスタル壁の残存鉄筋部に溶融炉心の固化したものがほとんど見られていないことを説明できる可能性がある。また、上記の反応は 700-1000°C 程度でコンクリートの圧縮応力が大きく低下することが知られているが、コンクリートの組成などに大きく影響される可能性があるため、現段階では関連情報として位置付けておく。

結合力が低下したコンクリートは、代替注水が本格化した後、流し出されたと考えることが合理的ではないか。

ペデスタル床面やペデスタル壁と溶融炉心が反応すれば、二酸化炭素や水蒸気が発生する。また、炉心から漏れ出た冷却水（量的は限られていたと考えられる）も関与した可能性がある。これらの気体を多く含んだ層（以下「膨張層」と呼ぶ。MCCI 関連の文献の中には「swelled melt」等の用語が用いられていることがあるが、実験条件などがかなり違うため、全く同じような事象を指しているかどうかは明確ではない。）「膨張層」が溶融炉心本体と一体なのか分離していたのかは不明であるが、ここでは分離状態（ビールの泡のイメージ）で考えている。

なお、溶融炉心のペデスタル開口部からの流出と「膨張層」の形成の時間的前後関係は現時点では不明である。

「膨張層」の上部にコンクリートから分離したシリコン等を含む成分が集まり、膜あるいは層を形成する。この膜は、温度低下などの要因で固化し、周辺の配管や機器に固着することが考えられる。配管等への固着現象は、これまでの MCCI 実験で「anchoring」と呼ばれている現象であるが、今回のような条件下でも確実に発生するかどうかは確認できていない。この膜の上に粉体化したコンクリートの一部が堆積し、膜の形成を促進した可能性もある。

なお、過去の MCCI 実験で見られた固着した膜/層は比較的脆く、ペデスタル開口部の前面のように「anchoring」するための配管などが無く、広い空間になっている場所では、自重で崩れることは十分に考えられる。

また、「薄い膜」は多くの気泡を含み、かなりの断熱性を持つ可能性がある。その場合、コンクリートの破損部分が、この「薄い膜」の下部に限定されていることを説明できる可能性がある。

iii) 落下した溶融炉心を含む堆積物の収縮（薄い膜の残存）

その後、崩壊熱の減少や代替注水の進行によって、「膨張層」の温度が下がり、収縮することにより、「薄い膜」のみが元の位置に取り残されたのではないかと考えられる。なお、「膨張層」の成長過程で、「薄い膜」に裂け目などが生じた場合には、さらにその上部に「膨張層」と「薄い膜」が形成されることは十分にあり得ることから、テラス状の構造が多層になっている箇所があることを説明できる可能性がある。

ペDESTAL内に「薄い膜」（テラス状の構造）が1m程度の高さの位置に残存している可能性は低いかも知れない。ペDESTALの直径が6m程度である一方、1m程度の高さにはanchoringできる配管などがあまりないと考えられる。さらに、代替注水が本格化した時点でかなりの水量が、圧力容器の破損部分からペDESTALに流下したと考えられるからである⁷。

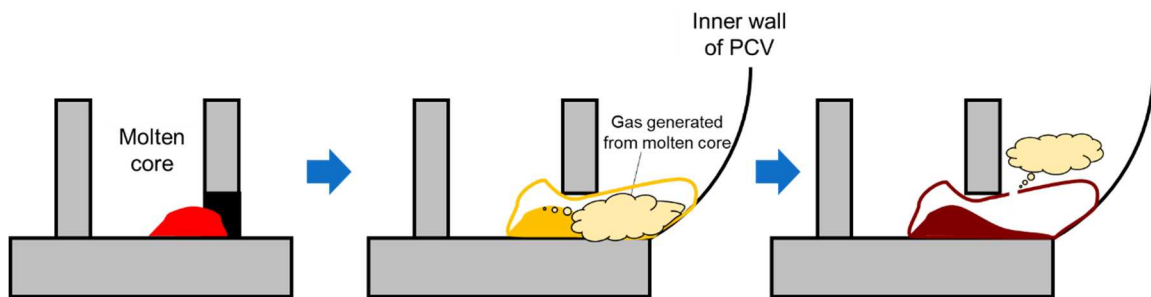


図12 ガスによる溶融炉心の膨張モデル

なお、2022年12月20日の事故分析検討会において、東京電力から、最新の観察情報として、1号機PCV内の堆積物に関する中性子及びγ線のスペクトラムなどの情報が提示された。東京電力はEu-154の検出によって、堆積物が溶融炉心由来のものであるとの説明を行っている。調査チームとしては、測定の詳細情報にアクセスできておらず、また、溶融炉心に巻き込まれたコンクリートの寄与などについての分析に至っていないため、現時点では上記東京電力の主張について、評価を完了していない状況である。

また、調査チームは2022年12月22日に行った5号機のPCV内調査において、鉛遮蔽体の接続にプラスチック製の結束バンドが使用されている例があること

⁷ 参考文献：事故分析検討会 第34回会合 参考資料 Core debris location evaluations [アルゴンヌ国立研究所 Mitch Farmer 氏]

を確認した。東京電力は1号機のPCV内の鉛遮蔽体の接続部には融点の低いものは使われていないとしているが、もう少し、事実関係を確認していく必要があると考えている。

(3) 東京電力における調査・分析等

東京電力福島第一原子力発電所1号機から3号機までの炉心損傷状況の推定については、2011年11月30日に開催された、福島第一原子力発電所1-3号機の炉心損傷状況の推定に関する技術ワークショップ（旧原子力安全・保安院）にて、2、3号機の炉心スプレイ系からの注水による温度変化等、その時点までに得られた情報を総合的に判断して、原子炉圧力容器の状況と損傷・溶融した燃料の落下状態が推定されている。

東京電力は、当該炉心損傷状況の推定に2016年度からIRID及びエネルギー総合工学研究所（IAE）が取組んだ「廃炉・汚染水対策事業費補助金（総合的な炉内状況把握の高度化）」事業と協働で、1～3号機の燃料デブリ分布を推定したものを反映させるとともに、継続して調査研究を実施している⁸ことから、これらの知見のフィードバックも重要となってくると考えられる。（図13参照）

炉心・格納容器内の状況推定のまとめ

参考、燃料デブリ分布の推定について

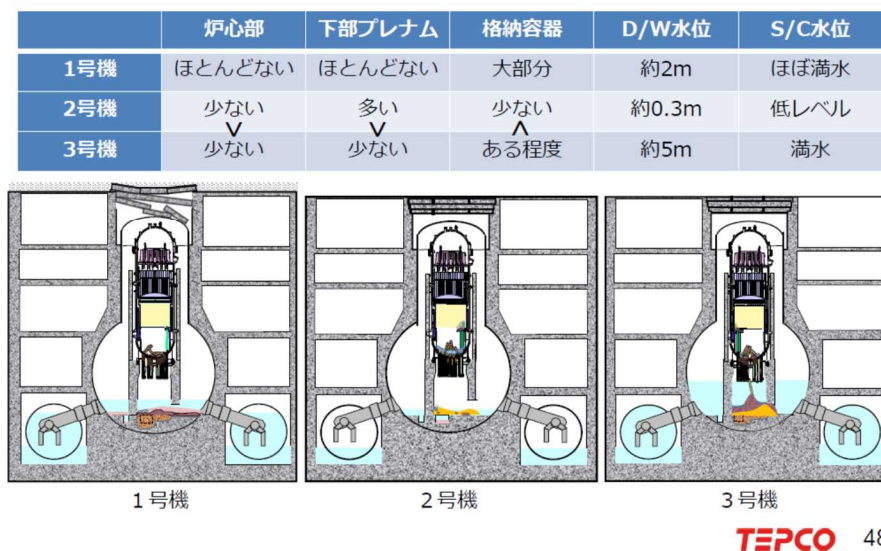


図13 燃料デブリ分布の推定について⁹

⁸ 福島第一原子力発電所事故発生後の原子炉圧力容器内・格納容器内の状態推定について 2021年7月19日東京電力ホールディングス株式会社

https://www.tepco.co.jp/decommission/information/accident_unconfirmed/pdf/20210719.pdf

⁹ 事故分析検討会 第33回会合 資料3 福島第一原子力事故発生後の詳細な進展メカニズムに関する未確認・未解明事項の調査・検討結果のご報告～第6回進捗報告～ 東京電力ホールディングス株式会社

(4) 設計情報等

東京電力から提供された情報等を調査チームにおいて整理した。

1号機ペDESTALの構造概要は、図14のとおりであり、ペDESTALを含む1号機原子炉建屋等のコンクリート材料及び燃料デブリ等の想定体積、PCV内の水量等の物理量は、表3及び表4となる。

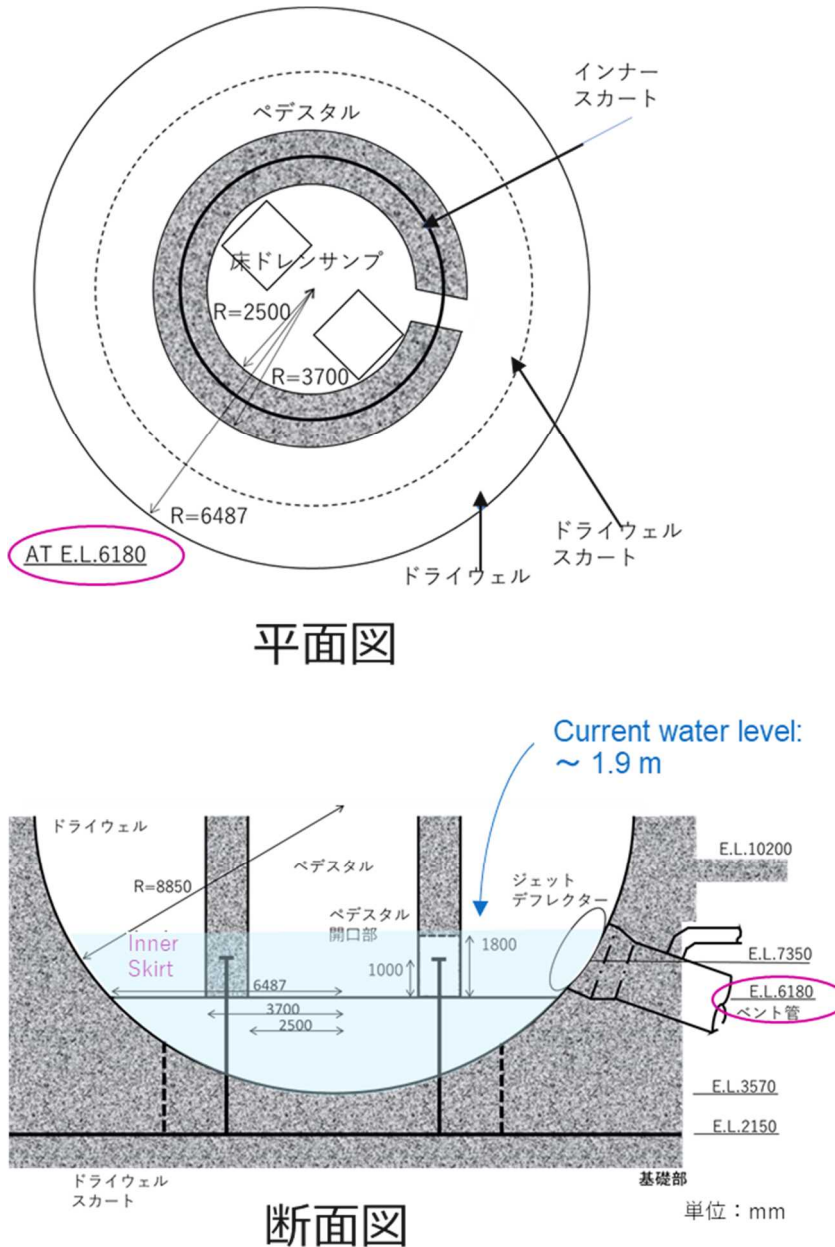


図14 1号機ペDESTALの構造概要

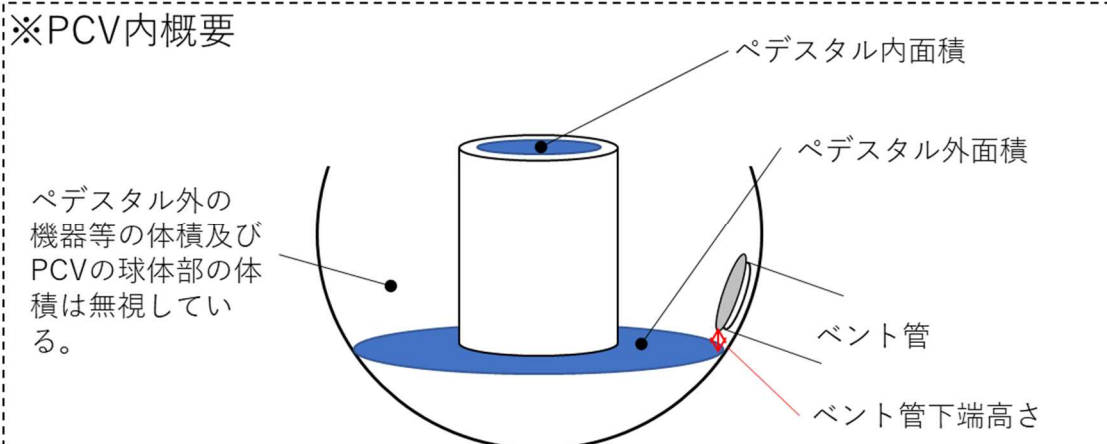
表3 1号機原子炉建屋等のコンクリート材料

品名	産地
粗骨材 (規格:60mm以下)	新田川産及び御山産(碎石)
粗骨材 (規格:25mm以下)	新田川産
細骨材 (規格:5mm以下)	新田川産及び阿武隈川産

東京電力からの提供情報を原子力規制庁において整理。

表4 燃料デブリ等の想定体積、PCV内の水量等の物理量等

物理量等	確認内容
1 1号機の燃料デブリ発生量	1号機発生重量 279ton (燃料成分(UO ₂ 等)76ton、構造材成分(Zr,SUS等)73ton、コンクリート成分 130ton) ※東京電力福島第一原子力発電所における事故の分析に係る検討会(第30回)参考1より引用
2 1号機の燃料デブリの想定体積	約16m ³ UO ₂ :重量76ton、比重10.97g/cm ³ 、SUS:重量73ton、比重7.93g/cm ³ (SUS304等)として想定。
3 1号機PCV内の想定水量(LOCA時の水量想定等)	約20cm水位(ベント管下端高さ(約20cm)を超えた水はS/Cに流出) 1号機一次冷却水体積 約145m ³ 1号機ペデスタル内面積 約20m ² 1号機ペデスタル外面積 約90m ² 1号機S/C頂部付近までの空間容積 約1700m ³ と想定。※PCV内概要参照
4 鉛遮蔽の熔融温度	約330℃(理科年表から引用)
5 UO ₂ の熔融温度	約2800℃ H. Hausner: J. of Nucl. Mater., 15, 3, 1965, pp. 179-183
6 Zrの熔融温度	約1850℃(理科年表から引用)
7 SUSの熔融温度	1400~1450℃ 森松工業株式会社「技術関連情報/ステンレス鋼の特性・性能」 https://www.morimatsu.jp/data/stainless.html



5. まとめ

東京電力及び IRID が 2022 年 2 月から実施している水中 ROV を用いた 1 号機原子炉格納容器内部調査の情報及び事故分析検討会における議論から、調査チームにおいて、1 号機原子炉格納容器内部の特徴を以下のように整理した。

- 1) 1 号機ペDESTAL 開口部付近に、落下した熔融炉心に由来するものである可能性が高い、高さ約 1.0m 程度のマウンド状のものがあると東京電力は判定している。
- 2) 1 号機ペDESTAL 開口部付近のコンクリートがかなりの範囲にわたって喪失している。一方、コンクリート内部にあった鉄筋部やインナースカートはほぼ原形をとどめて残存している。このような現象は、現時点までのところ 2 号機及び 3 号機では確認されていない。
- 3) ペDESTAL 外周部については、テラス状構造が観測されており、開口部付近では PCV 底部から 1.0~1.1m、開口部の反対側では 0.2~0.4m 程度の高さとなっている。また、コンクリート破損はテラス状構造以下の部分にのみ生じているように見える。
- 4) ごく一部であるがテラス状構造の断面の映像が得られており、気泡を伴う構造が見られるが、それ以上のことは分かっていない。当該部分の厚さは約 3cm と推定されている。なお、テラス状構造の下面は滑らかなように見える。
- 5) PCV 最外周部に位置するジェットデフレクターの裏側にも、ペDESTAL から到達したと考えられる堆積物が見られるが、ジェットデフレクター自体には大きな損傷などは見られない。見える範囲では PCV の内面に大きな損傷はない。
- 6) ペDESTAL 開口部付近では、テラス状構造の下部が空洞であることが確認されているが、開口部から離れた場所ではどうなっているのかは、現段階では不明である。また、ペDESTAL 開口部前面の構造物が少ない場所では、テラス状構造が PCV 床面に落下している。
- 7) テラス状構造の位置で鉛遮蔽体（鉛毛マット）が溶けて落下しているように見受けられる。テラス状構造の上部では鉛遮蔽体（鉛毛マット）の被覆材料（グラスファイバーとのこと）は維持されているように見え、著しい高温の影響はほぼテラス状構造付近に限られているように見える。なお、東京電力は、ペDESTAL 開口部の反対側に位置する場所でも、鉛遮蔽体が開口部付近とほぼ同じ高さ以下で喪失していることを確認し、その原因としては水化学的反応の可能性を示唆している。
- 8) テラス状構造下部に位置する配管等の金属構造物は概ね維持されているように見える。ただし、開口部付近の RCW（原子炉冷却系）配管はもともとの位置には存在せず、その行方も確認できていない。
- 9) ペDESTAL 開口部、1.4m 高さの位置にバブル形状のものが見られるが、その下部には空間があることが判明している。ただし、バブル状部分の裏面がどのよう

になっているかの情報は得られていない。

- 10) ペDESTAL外周部の PCV 床面のデブリなどの堆積状況は不明確だが、一部に半球状のものが撮影されている。(具体的にどのようなものかは現段階では判明していない。)

これらの特徴を踏まえ、3つの基本的設問を念頭に検討を進めている。

- 1) 溶融炉心が薄く広がっていないように見えるのはなぜか。
- 2) ペDESTAL壁のコンクリートが失われたのはなぜか。
- 3) テラス状構造はどのように形成されたのか。

1号機 PCV 内部調査における確認点については、今後、内部調査で明らかにすべき点、試験等で確認すべき点を含むものであり、国内外の機関等において、更なる仮説の提唱、議論、検討がなされるべきものとする。

6. 引き続き調査等が必要な課題

1号機 PCV 内部調査については、今後、東京電力及び IRID において、後半調査として、堆積物デブリ検知・評価、堆積物サンプリング、堆積物 3D マッピング及びペDESTAL内部並びに壁部の詳細観察が予定されている。

このほか、コンクリートの劣化・損傷の原因把握が重要と考えており、調査チームでは1号機 PCV のペDESTALのコンクリート部と極力同質のコンクリートサンプルを用いた加熱試験などにより、知見の拡充を行う予定である。(図 15 参照)

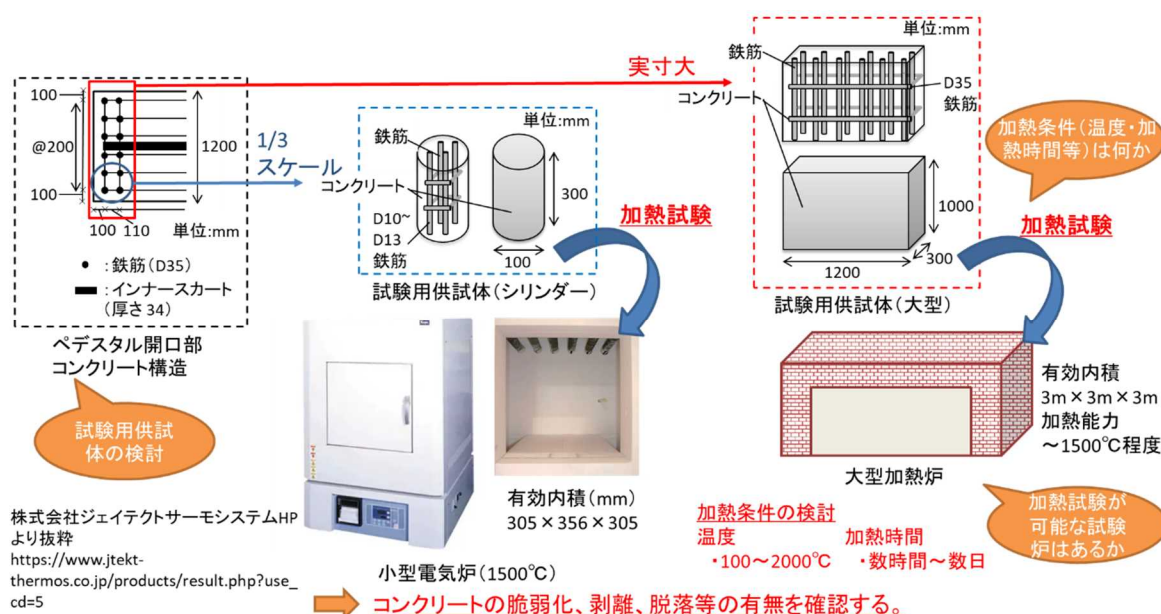


図 15 コンクリート劣化に係る加熱試験

具体的に入手を期待している情報には次のようなものがある。

- ① テラス状構造等の試料採取及び分析
- ② ペDESTAL内部及びペDESTAL内壁の動画・画像等
- ③ ペDESTAL外周部であって開口部から離れた地点におけるテラス状構造下部の状況（こうした部分でもテラス状構造下部は空洞になっているのかどうか。）
- ④ PCV床面に分布している物質の試料採取及び分析 等
- ⑤ 1号機で使用されたコンクリートにできるだけ近いコンクリート片を用いた加熱破損実験
- ⑥ 鉛遮蔽体の接続方法

なお、1F事故分析検討会で議論¹⁰があったが、東京電力及びIRIDが2022年上半期に実施した1号機原子炉格納容器内部調査については、東京電力において公開された動画・画像が限定されており、動画・画像の取得から約5ヶ月後に新たな情報として報告される等、東京電力における調査の情報の公開性、速報性に関して指摘があった。

東京電力からは、調査に係る動画・画像等の容量も大きく、公開するための作業に時間を要している旨の回答があるとともに、その後の対応として、事故分析検討会において、今回の1号機PCV内部調査で取得された全ての映像を2022年12月中に公表する旨の説明及び同年12月から開始する後半の調査についても調査の速報をインターネットにて公表する旨の説明があった¹¹。

2022年2月から6月にかけて実施された1号機PCV内部調査で取得された全ての映像（準備作業等は除く）¹²については、2022年12月12日から東京電力の本社原子力情報コーナーにて公表されている。

¹⁰ 事故分析検討会 第32回会合 議題（1）1号機原子炉格納容器内部調査の状況について

¹¹ 事故分析検討会 第33回会合 資料1-1 福島第一原子力発電所1号機の格納容器内部調査から得られた情報（前半調査とりまとめ） 2022年12月5日東京電力ホールディングス株式会社

¹² 記録時間は合計で約180時間

引用文献等

- 1) 東京電力福島第一原子力発電所における事故の分析に係る検討会（第 34 回会合）
資料 1 - 1、資料 1 - 2
https://www.nra.go.jp/disclosure/committee/yuushikisya/jiko_bunseki01/140000079.html
- 2) 東京電力福島第一原子力発電所における事故の分析に係る検討会（第 33 回会合）
資料 1 - 1
https://www.nra.go.jp/disclosure/committee/yuushikisya/jiko_bunseki01/140000076.html
- 3) 東京電力福島第一原子力発電所における事故の分析に係る検討会（第 32 回会合）
資料 1 - 1
https://www.nra.go.jp/disclosure/committee/yuushikisya/jiko_bunseki01/140000076.html
- 4) 東京電力福島第一原子力発電所における事故の分析に係る検討会（第 31 回会合）
資料 1 - 1、資料 1 - 2
https://www.nra.go.jp/disclosure/committee/yuushikisya/jiko_bunseki01/140000075.html
- 5) 東京電力福島第一原子力発電所における事故の分析に係る検討会（第 30 回会合）
資料 1 - 1、補足説明資料 1、参考 1
https://www.nra.go.jp/disclosure/committee/yuushikisya/jiko_bunseki01/140000073.html
 - [動画] 1号機 PCV 内滞留水水位について（常設監視計器の再設置結果）
https://www.tepco.co.jp/tepconews/library/archive-j.html?video_uuid=r4u027fz&catid=61699&year=2015
 - [画像] 福島第一原子力発電所 1号機 原子炉格納容器内部調査（堆積物サンプリング）撮影日 2017 年 4 月 6 日
<https://photo.tepco.co.jp/date/2017/201704-j/170407-01j.html>
 - [動画] 1号機原子炉格納容器内部調査時の動画（2022 年 5 月 23 日 福島第一原子力発電所 1号機原子炉格納容器内部調査（ROV-A2）の実施状況（2022 年 5 月 17～19 日の作業状況）提供：国際廃炉研究開発機構（IRID）・日立GEニュークリア・エナジー）
https://www.tepco.co.jp/library/movie/detail-j.html?catid=107299&video_uuid=og07od6u
- 6) 東京電力福島第一原子力発電所における事故の分析に係る検討会（第 29 回会合）
資料 3

https://www.nra.go.jp/disclosure/committee/yuushikisya/jiko_bunseki01/140000070.html

[動画] 1号機原子炉格納容器内部調査時の動画（2022年3月24日 福島第一原子力発電所1号機原子炉格納容器内部調査（ROV-A2）の実施状況（3月14～16日の作業状況） 提供：国際廃炉研究開発機構（IRID）・日立GEニュークリア・エナジー）

https://www.tepco.co.jp/library/movie/detail-j.html?catid=107299&video_uuid=s19dq021

- 7) 東京電力福島第一原子力発電所における事故の分析に係る検討会（第28回会合）資料4-3及び資料4-3（参考）

https://www.nra.go.jp/disclosure/committee/yuushikisya/jiko_bunseki01/140000067.html

[動画] 1号機原子炉格納容器内部調査時の動画（2022年2月9日 福島第一原子力発電所 1号機原子炉格納容器内部調査の実施状況（2月9日調査分）について 提供：国際廃炉研究開発機構（IRID）・日立GEニュークリア・エナジー）

https://www.tepco.co.jp/library/movie/detail-j.html?catid=107299&video_uuid=k593g02e

[動画] 1号機原子炉格納容器内部調査時の動画（2022年2月8日 福島第一原子力発電所 1号機原子炉格納容器内部調査の実施状況（2月8日調査分）について 提供：国際廃炉研究開発機構（IRID）・日立GEニュークリア・エナジー）

https://www.tepco.co.jp/library/movie/detail-j.html?catid=107299&video_uuid=ykq5a5n6

- 8) 福島第一原子力発電所廃炉・事故調査に係る連絡・調整会議（第10回会合）資料1-2

<https://www.nra.go.jp/data/000413054.pdf>

(別添 5)

東京電力福島第一原子力発電所1号機原子炉格納容器内部調査により確認されたコンクリートに関する事象の検討

大阪大学 大学院工学研究科

東京電力福島第一原子力発電所事故調査チーム

「1F-2050」

大石 佑治

1. 背景及び目的

大阪大学大学院工学研究科では、附属フューチャーイノベーションセンターに「1F-2050」という研究グループを設立し、東京電力福島第一原子力発電所事故調査を行っている。本チームは放射線、核燃料、炉物理、炉化学のほか、マテリアルや土木の専門家等から構成される。1F-2050は、得られた最新の情報をもとに事故の過程の研究及び解明に挑み、東京電力福島第一原子力発電所事故の全体解明にアカデミアの立場から貢献することを目指している。

1号機原子炉格納容器内部調査により、ペDESTAL開口部におけるコンクリート部の破損、およびペDESTAL外周部にテラス状構造の存在が確認されている。これらは炉心溶融物とコンクリートが反応するという従来の考えでは理解できない事象である可能性がある。そこで、当チームはこれらのコンクリートに関する事象の解明を目的に、様々なシナリオを検討するとともにシナリオに関係した模擬試験を実施している。

2. 調査の概要

ペDESTAL開口部におけるコンクリート部の破損については、コンクリートのみが破損して鉄筋は顕著な損傷を受けていないという特徴がある。また、テラス状構造については断面が多孔質に見えること、下部が空洞になっていること、空洞内の配管等への顕著な熱的損傷が見られないこと、堆積物の高さに傾斜があること等の特徴がある。コンクリートの破損、および多孔質な物質の形成に至る可能性のある要因を可能な限り列挙し、鉄筋が顕著な損傷を受けていないといった特徴を説明できるかという観点から検討することで、現時点で可能性が高いと思われる以下の2つのシナリオを抽出した。これらのシナリオを検証するために、コンクリートに用いられている骨材の分析及びコンクリートの加熱試験を実施した。

(1) コンクリートの高温での溶融シナリオ

本シナリオでは図1のように、落下した炉心溶融物がペDESTAL開口部付近のコンクリートを昇温させた結果コンクリートの破損とテラス状構造の形成に至ったと考える。このシナリオではコンクリートの温度が鉄筋の溶融温度に至らなかったために、コンクリートのみが破損したことになる。

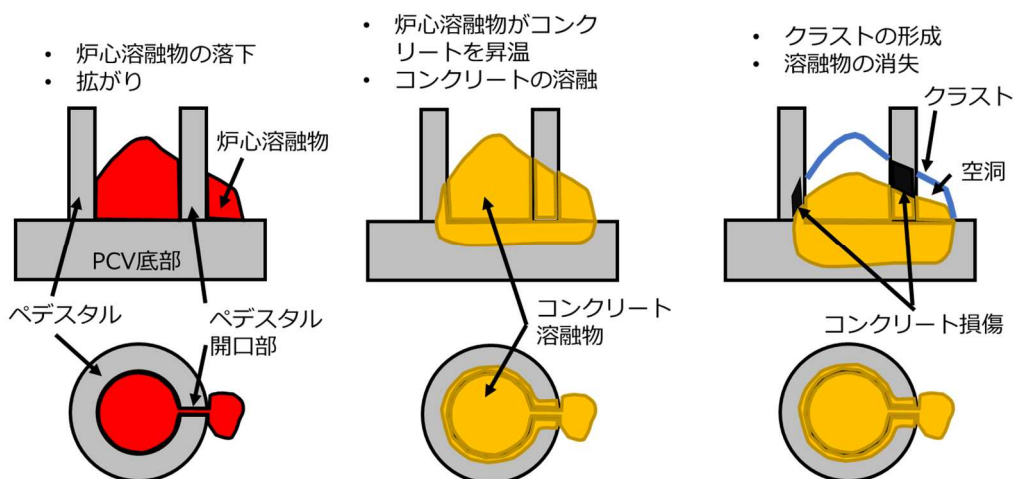


図1 コンクリートの高温での溶融シナリオの概要

(2) コンクリートの水への溶解シナリオ

本シナリオでは図2のように、落下した炉心溶融物が高温の水もしくは水蒸気を発生させ、それがコンクリート成分と反応することでコンクリートが破損し、テラス状構造の元となった高粘度の液相の生成に至ったと考える。

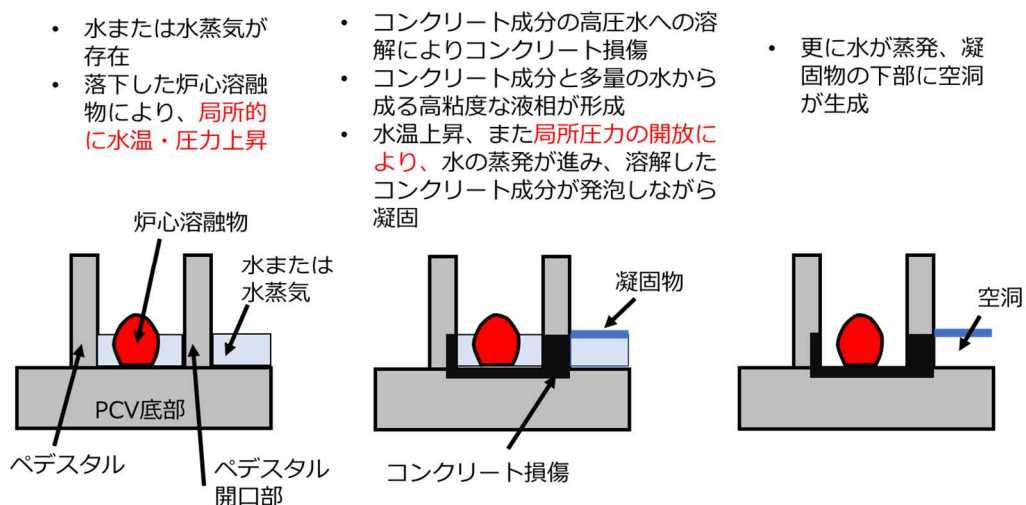


図2 コンクリートの水への溶解シナリオの概要

高温・高圧の水は、図3のように岩石、特に岩石中の SiO_2 を溶かすことが知られている。コンクリートは骨材とセメントから構成されており、骨材に SiO_2 が豊富に含まれている場合は、コンクリート中の骨材が高温・高圧の水に溶解する可能性がある。また、高温・高圧の水と SiO_2 が反応して生じる水を多量に含んだガラスは、水が蒸発する際に膨張して多孔質になることが知られている。同様の現象が原子炉格納容器内でも生じ、その結果としてテラス状構造が形成された可能性がある。

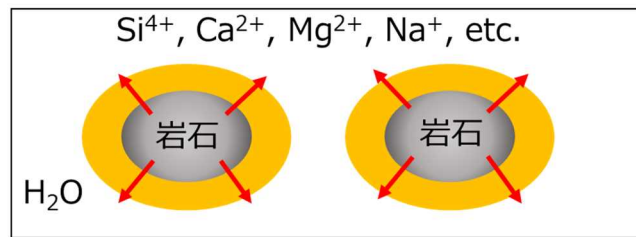


図3 高温・高圧の水が岩石を溶かす様子

3. 模擬試験の結果

福島第一原子力発電所では、新田川産の骨材がコンクリートに用いられた。コンクリートの溶融や溶解について検討するためには、その成分を把握する必要がある。そこで、新田川産の砂利の走査型電子顕微鏡 (SEM) /エネルギー分散型 X線分光法 (EDX) による組成分析を行った。その結果を図4に示す。元素としては Si が最も多く含まれていることが分かった。

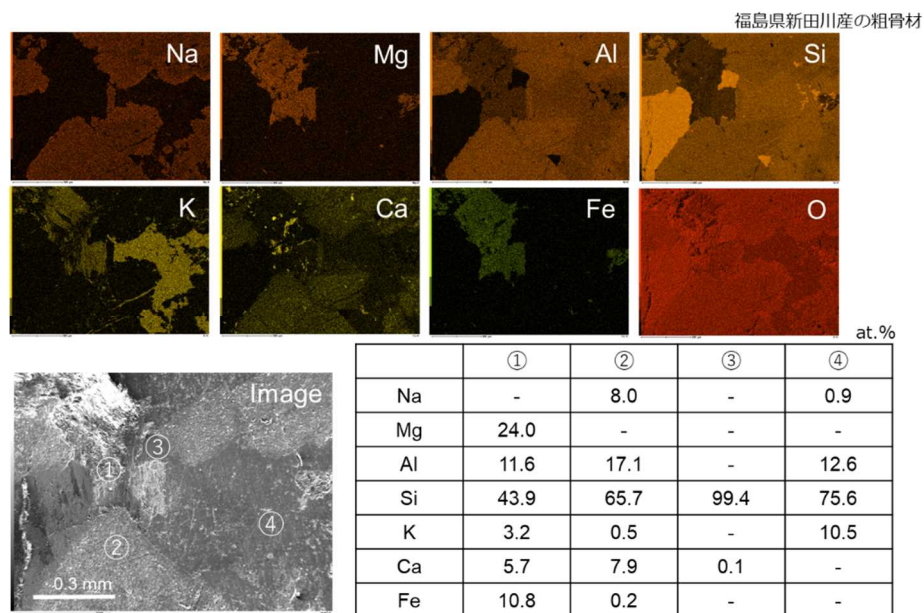


図4 福島県新田川産の砂利の SEM/EDX による元素分析結果

この骨材を用いて鉄筋入りコンクリートを作製し、600℃と1280℃での加熱試験を実施した。保持時間は8時間であり、雰囲気は大気雰囲気である。結果は図5の通りで、600℃で保持したコンクリートは外観上の変化はなかったのに対し、1280℃で保持したコンクリートは溶融して原型をとどめていなかった。1280℃は鉄の融点以下であるため、この温度では鉄筋は大きな損傷を受けずにコンクリートのみが破損する可能性がある。

600℃と1280℃で8時間保持

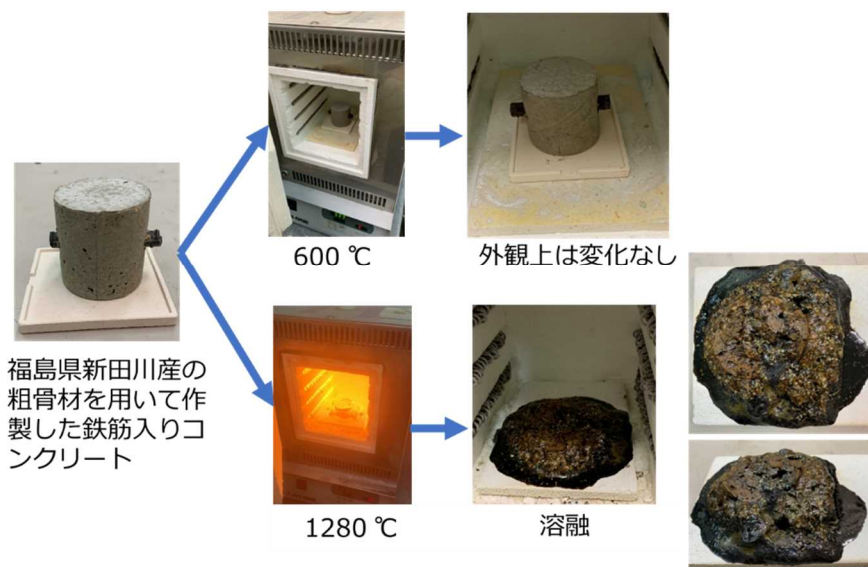


図5 福島県新田川産の骨材を用いて作製した鉄筋入りコンクリートの加熱試験結果

溶融したコンクリートを切断すると、溶融した箇所と溶け残り箇所があることが分かった。溶融した箇所は光沢のある黒色ガラス質であった。この物質をSEM/EDXにより元素分析した結果を図6に示す。溶け残り箇所に比べて、Ca、Fe、Mgが多く含まれていた。共晶反応により、Ca、Fe、Mgを多く含む液相が生じたと考えられる。

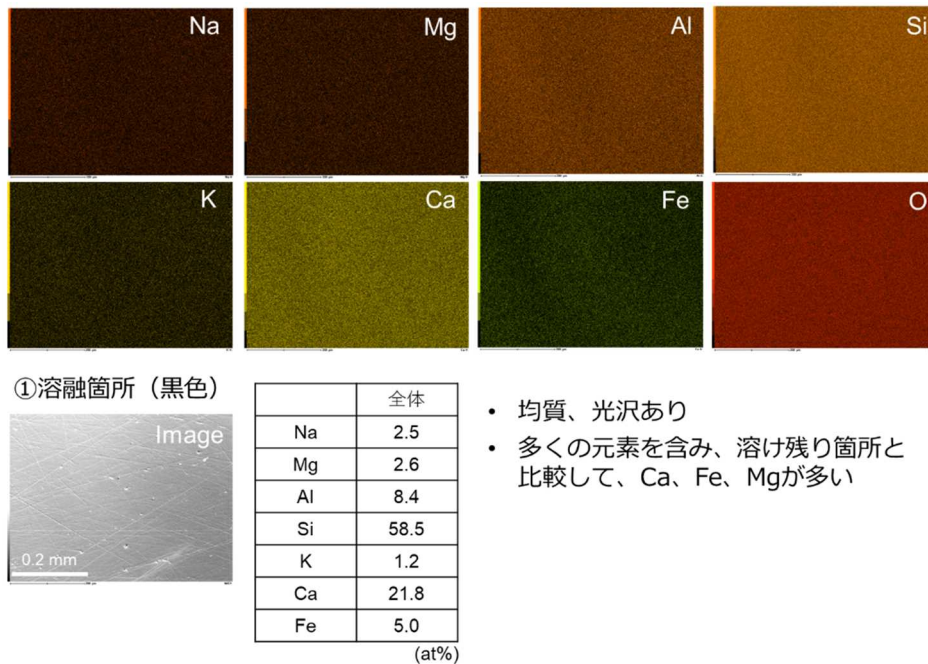


図6 溶融したコンクリートのSEM/EDX 元素分析結果

4. まとめ

1号機ペデスタル開口部におけるコンクリート部の破損、およびペデスタル外周部のテラス状構造について、現時点で可能性が高いと思われる以下の2つのシナリオを抽出した：(1) コンクリートの高温での溶融シナリオ、(2) コンクリートの水への溶解シナリオ。

これらのシナリオを検証するために、模擬試験を行った。(1)、(2)に関連した試験として、コンクリートの骨材として用いられたと考えられる新田川産の砂利の元素分析を実施した結果、Siが最も多く含まれていることが明らかとなった。

(2)のシナリオで主に水へ溶解すると考えられるのはSiO₂であることから、新田川産の骨材は高温・高圧の水へ溶解する可能性がある。また、(1)に関連した試験としてはコンクリートの加熱試験を実施した結果、鉄の融点以下である1280°Cでコンクリートが溶融した。これは、鉄筋に顕著な熱的損傷を与えずにコンクリートのみが破損するような熱的条件が存在することを示唆している。コンクリートは溶融箇所と溶け残り箇所が存在し、溶融箇所は黒色ガラス質で溶け残り箇所に比べてCa、Fe、Mgを多く含んでいた。コンクリートが熱により溶融した場合、黒色ガラス質の物質が形成されると思われる。この存在が確認されていない現状では、(1)コンクリートの高温での溶融シナリオの可能性は低いと考えている。炉内調査では、コンクリート破損箇所と健全な個所の境界に黒色ガラス質の物質が存在するかを確認していただきたい。