

平成 29 年度

文部科学省 国家課題対応型研究開発推進事業
英知を結集した原子力科学技術・人材育成推進事業

プラント内線量率分布評価と
水中デブリ探査に係る技術開発

成果報告書

平成 30 年 3 月

国立大学法人 長岡技術科学大学

本報告書は、文部科学省の英知を結集した原子力科学技術・人材育成推進事業による委託業務として、国立大学法人 長岡技術科学大学が実施した平成 27-29 年度「プラント内線量率分布評価と水中デブリ探査に係る技術開発」の成果を取りまとめたものです。

目次

概略	vii
1. はじめに	1-1
2. 業務計画	
2.1 全体計画	2.1-1
3. 業務の実施内容及び成果	
3.1 線量率分布評価技術の開発 (H27～H29)	
3.1.1 線量率分布評価のための核データの整備 (H27～H29)	3.1.1-1
(1) 核データ整備 (H27～H29)	3.1.1-1
(2) まとめ	3.1.1-3
3.1.2 最確線量率分布評価手法の開発 (再委託先：日本原子力研究開発機構)	
(1) はじめに	3.1.2-1
(2) 3次元プラントモデルの構築と改良 (H27～H29)	3.1.2-2
(3) 線源データの作成 (H27～H28)	3.1.2-3
(4) 単位線源による線量率分布応答関数の作成 (H28～H29)	3.1.2-5
(5) 実測値を反映した最確線量率分布 (H28～H29)	3.1.2-6
(6) 最確線量率分布の結果と信頼性に関する考察 (H29)	3.1.2-9
(7) 水中デブリ探査技術開発への提言 (H28)	3.1.2-10
(8) 燃料デブリの取り出し工程模擬解析 (H29)	3.1.2-11
(9) まとめ	3.1.2-13
3.1.3 局所線量評価手法の開発 (再委託先：日本原子力研究開発機構)	
(1) はじめに	3.1.3-1
(2) 波長選択型の光検出系の整備 (H27～H28)	3.1.3-1
(3) 各種シンチレータの放射線による蛍光発光観測 (H27～H29)	3.1.3-4
(4) まとめ	3.1.3-13
3.2 水中デブリ探査技術の開発 (再委託先：海上技術安全研究所)	
3.2.1 ソナーシステムの開発 (H27～H29)	3.2.1-1
(1) 実験装置 (ソナーシステム) の構成と実験方法 (H27～H28)	3.2.1-1
(2) 供試体 (デブリ模擬試験体) (H27～H28)	3.2.1-2
(3) 試験方法及び条件 (H27～H28)	3.2.1-3
(4) 試験結果 (H27～H28)	3.2.1-3
(5) 評価・検討 (H27～H28)	3.2.1-6
(6) プロトタイプ-A 水中探査装置の開発 (H27～H29)	3.2.1-7
(7) プロトタイプ-B 水中探査装置の開発 (H28～H29)	3.2.1-11
(8) まとめ	3.2.1-13
3.2.2 水中デブリ探査システムの最適化検討 (再委託先：海上技術安全研究所)	3.2.2-1
(1) 水中デブリ探査システムの最適化プロセス (H27～H29)	3.2.2-1
(2) プロトタイプ-A 水中探査装置の最適化 (H27～H29)	3.2.2-2

(3) 海技研水槽におけるプロトタイプ-A の性能確認試験 (H29)	3. 2. 2-2
(4) ソナー出力の 3D 画像化処理の検討 (H28~H29)	3. 2. 2-3
(5) 檜葉遠隔技術開発センターの水槽における実証試験 (H29)	3. 2. 2-5
(6) ROV 測位システムの検討 (H29)	3. 2. 2-6
(7) 小型放射線検出器の開発 (H27~H29)	3. 2. 2-8
(8) 堆積物下部のデブリ探査方法の検討 (H29)	3. 2. 2-11
(9) まとめ	3. 2. 2-16
3. 3 研究推進	3. 3-1
4. 結言	
4. 1 総括	4. 1-1
4. 2 今後の展望	4. 2-1

表一覧

表 3.1.2-1	FP 放出率 (%) モデル	3.1.2-4
表 3.1.2-2	線量率測定を含む 1 号機内部調査	3.1.2-7
表 3.1.3-1	波長選択の有無による信号強度の相対比較と S/N の改善	3.1.3-4
表 3.1.3-2	ルビー (Cr:Al ₂ O ₃) 及びルビー以外に選定した発光素子	3.1.3-5
表 3.1.3-3	局所線量評価素子としての適合性	3.1.3-12
表 3.2.1-1	ソナーの仕様比較	3.2.1-1
表 3.2.1-2	3 種のソナーによる水中デブリ探査試験結果	3.2.1-6
表 3.2.1-3	AVEXIS-150 の主要な機能	3.2.1-8
表 3.2.1-4	ROV 構成部品の照射条件と照射結果	3.2.1-9
表 3.2.2-1	超音波の伝播時間に許容される時間差とその誤差	3.2.2-8
表 3.2.2-2	候補となる放射線検出器の特徴と耐放射線性	3.2.2-9

図一覧

図 3.1.1-1	U-235 の 1 秒照射後 2.2 秒後の光子スペクトル (ORNL の測定値と ORIGEN2 の計算値との比較)	3.1.1-2
図 3.1.1-2	照射後試験の測定値と作成したライブラリを用いた計算値との比較 (アクチニド核種)	3.1.1-3
図 3.1.1-3	照射後試験の測定値と作成したライブラリを用いた計算値との比較 (FP 核種)	3.1.1-3
図 3.1.2-1	最確線量率分布評価手法開発の狙い	3.1.2-1
図 3.1.2-2	モデル化の範囲と名称	3.1.2-2
図 3.1.2-3	線量率分布計算用 3 次元プラントモデル (1 号機, 平成 27 年度モデル)	3.1.2-2
図 3.1.2-4	線量率分布計算用 3 次元プラントモデル (1 号機, 平成 29 年度改良モデル)	3.1.2-3
図 3.1.2-5	燃料デブリ線源の計算フロー	3.1.2-4
図 3.1.2-6	1 号機炉内構造物放射化計算用の運転履歴モデル (シュラウド交換後～事故停止)	3.1.2-5
図 3.1.2-7	単位線源による線量率分布応答関数の例	3.1.2-6
図 3.1.2-8	1 号機の内部調査結果を反映した線量率分布予測 (2021 年末)	3.1.2-8
図 3.1.2-9	代表的な線源ごとの線量率分布寄与	3.1.2-9
図 3.1.2-10	燃料デブリの FP が放出するガンマ線スペクトル	3.1.2-11
図 3.1.2-11	燃料デブリ取り出し工程を想定した線量率分布解析モデル	3.1.2-12

図 3.1.2-12	燃料デブリ取り出し工程における線量率分布の変化	3.1.2-13
図 3.1.3-1	局所線量計測手法の概要と炉内計測への適用概念	3.1.3-1
図 3.1.3-2	波長選択型光検出の概要	3.1.3-3
図 3.1.3-3	ルビーシンチレータプローブからの代表的な波長分布観測例	3.1.3-3
図 3.1.3-4	既存シンチレータの放射長と密度	3.1.3-4
図 3.1.3-5	ルビーシンチレータの放射線照射体系	3.1.3-5
図 3.1.3-6	ルビー以外の各種シンチレータの放射線照射体系	3.1.3-6
図 3.1.3-7	線量率の線源からの距離依存性	3.1.3-6
図 3.1.3-8	各種発光素子の放射線照射による蛍光の波長分布観測例	3.1.3-7
図 3.1.3-9	ルビーの放射線照射による蛍光強度の線量率依存性観測例	3.1.3-8
図 3.1.3-10	ルビー以外の素子における蛍光スペクトルの線量率依存性観測例	3.1.3-9
図 3.1.3-11	Nd:YAG と Nd:Lu ₂ O ₃ の蛍光スペクトルの線量率依存性観測例 (発光領域拡大)	3.1.3-10
図 3.1.3-12	Nd:YAG と Nd:Lu ₂ O ₃ の蛍光強度の線量率依存性	3.1.3-11
図 3.2.1-1	PCV 模擬試験体	3.2.1-2
図 3.2.1-2	大型円形水槽における試験体系	3.2.1-2
図 3.2.1-3	性状模擬デブリ	3.2.1-2
図 3.2.1-4	水槽底部に置いた ①粗さブロック、②岩、③SUS 円筒、④SUS 平滑ブロック 及び⑤性状模擬デブリ	3.2.1-3
図 3.2.1-5	粗さブロック (8 mm) 3 個の像	3.2.1-4
図 3.2.1-6	性状模擬デブリ (ジルカロイ管付き) の映像	3.2.1-4
図 3.2.1-7	5.6 m 水底にある模擬デブリの像	3.2.1-5
図 3.2.1-8	3D スキャン・ソナーで得られた海底の性状模擬デブリ像	3.2.1-5
図 3.2.1-9	超音波距離センサー	3.2.1-9
図 3.2.1-10	プロトタイプ-A (AVEXIS-150 に回転ビームソナーを取り付け)	3.2.1-10
図 3.2.1-11	水中デブリ探査装置プロトタイプ-B	3.2.1-11
図 3.2.1-12	水槽中での運動性能試験	3.2.1-11
図 3.2.2-1	海技研水槽におけるプロトタイプ-A 水中探査装置の性能試験	3.2.2-3
図 3.2.2-2	リアルタイム 3D 画像表示システムの出力例	3.2.2-3
図 3.2.2-3	模擬デブリなどの 3D 画像	3.2.2-4
図 3.2.2-4	改良後の 3D 画像表示の例	3.2.2-4
図 3.2.2-5	ROV 位置較正用マーカー	3.2.2-5
図 3.2.2-6	ROV 位置確認用小型カメラ	3.2.1-5
図 3.2.2-7	プロトタイプ-A による模擬デブリ探査	3.2.1-6
図 3.2.2-8	受波器の配置と座標	3.2.2-7
図 3.2.2-9	TRIGA Mark II 炉冷却用プール中の ROV	3.2.2-10

図 3.2.2-10	CeBr ₃ 検出器 (左) と容器 (右)	3.2.2-10
図 3.2.2-11	スチルベン検出器	3.2.2-10
図 3.2.2-12	スチルベン検出器の計測結果 (赤色はガンマ線を、青色は中性子を示す)	3.2.2-11
図 3.2.2-13	電磁誘導式パルス発生装置	3.2.2-12
図 3.2.2-14	測定波形の例	3.2.2-12
図 3.2.2-15	水中スピーカー (黄色)	3.2.2-13
図 3.2.2-16	砂礫の入ったパン	3.2.2-13
図 3.2.2-17	落水槽における測定状況	3.2.2-13
図 3.2.2-18	測定機器とパンの配置	3.2.2-13
図 3.2.2-19	砂礫層中での音波減衰定数	3.2.2-13
図 3.2.2-20	小型水槽による音波の砂礫層透過・反射特性試験体系	3.2.2-14
図 3.2.2-21	小型水槽中の砂利とスピーカー	3.2.2-15
図 3.2.2-22	砂礫層、底面及び水面を繰り返し反射している波形	3.2.2-15
図 3.2.2-23	繰り返し反射波から生成された砂礫層断層図	3.2.2-16
図 3.3-1	檜葉遠隔技術開発センターの水槽施設を使ったソナーと水中ロボットによる模擬デブリ探査試験	3.3-1
図 3.3-2	スロベニアのヨーージェフ・ステファン研究所の研究炉によるデブリ探査用小型放射線検出器 (CeBr ₃) を搭載した水中ロボットの原子炉照射試験	3.3-1

略語一覧

- 1F : TEPCO's Fukushima Daiichi Nuclear Power Station
(東京電力ホールディングス福島第一原子力発電所)
- 3D : 3-dimensional (3次元の)
- AI : Artificial Intelligence (人工知能)
- CSV : Comma Separated Value (カンマ区切り値(データ))
- DCF : Dalton Cumbrian Facility (マンチェスター大学ダルトン原子力研究所の研究拠点)
- D/W : drywell (ドライウエル)
- FP : Fission Product (核分裂生成物)
- IRID : International Research Institute for Nuclear Decommissioning
(技術研究組合 国際廃炉研究開発機構)
- IT : Information Technology (情報技術)
- JENDL : Japanese Evaluated Nuclear Data Library (日本の評価済み核データライブラリ)
- NDF : Nuclear Damage Compensation and Decommissioning Facilitation Corporation
(原子力損害賠償・廃炉等支援機構)
- ORIGEN : Oak Ridge Isotope Generation and Depletion Code
(米国オークリッジ研究所が開発した核種生成崩壊計算コード)
- PCV : Primary Containment Vessel (原子炉格納容器)
- PHITS : Particle and Heavy Ion Transport Code System
(粒子・重イオン輸送計算コードシステム)
- ROV : Remotely Operated Vehicle (遠隔操作式水中ロボット)
- RPV : Reactor Pressure Vessel (原子炉圧力容器)
- SBP : Sub-Bottom Profiler
(水底表層部探査機器：ソナーから低周波音を海底面などに発信して、海底下の地層及び底質を計測するシステム)
- SSBL : Super Short Base Line (超短基線)
- TMI-2 : Three Mile Island 2
(米国ペンシルベニア州のスリーマイル島で炉心溶融事故を起こした原子力発電所)

概略

東京電力ホールディングス福島第一原子力発電所(以下 1F)の廃炉を加速するためには、まずは燃料デブリの位置と分布を把握した後、燃料デブリ取り出しをはじめとする廃炉工法を決定する必要がある。さらに工程まで具体化して作業員の安全を確保するために、廃炉工法の各工程におけるプラント内の線量率分布をなるべく正確に把握し、適切な放射線遮へい対策を施すことが必要となる。そこで、本業務では、高度な理論計算とプラント内の線量率実測値を組み合わせ、廃炉の各工程における最確な線量率分布を評価するための技術開発「線量率分布評価技術の開発」、及び1号機や3号機のように水中に深く水没していると考えられている燃料デブリの分布を探索するための技術開発「水中デブリ探索技術の開発」を、平成27年度より3ヶ年の計画で実施した。また本事業は日英共同研究のため、ランカスター大学では高ガンマ線場で燃料デブリが放出する自発中性子またはデブリ特有のガンマ線を検出するための小型放射線検出器の開発を、マンチェスター大学ではこれら検出器やソナーなどを水中の目的位置に配置させるための小型の遠隔操作式水中ロボット(ROV)の開発を進めた。

「線量率分布評価技術の開発」では、以下の(1)～(3)の成果を得た。

(1) 線量率分布評価のための核データの整備

最新の評価済み核データライブラリを基に線量率分布評価に使用する ORIGEN2 コード用の崩壊データや光子スペクトルデータを整備し、日本原子力研究開発機構(原子力機構)での線量率分布評価に利用できるように整備した。また、整備したデータの妥当性を確認するため、利用できる測定データと整備したデータを用いて計算した結果との比較を行うことにより妥当性を確認し、原子力機構での線量率分布評価を支援することができた。

(2) 最確線量率分布評価手法の開発(再委託先:日本原子力研究開発機構)

長岡技術科学大学が整備したデータと原子力機構が有する高度な計算技術を、1F 内部調査による線量率の実測値と組み合わせ、プラント内の最確な線量率分布を評価する技術を開発した。

本手法は以下の手順で、任意時期における 1F プラント内の最も確からしい線源分布と線量率分布を評価する。1) 燃焼度分布やボイド率分布を考慮した 3次元燃料燃焼組成計算、微量不純物を考慮した炉内構造物の放射化計算、IRIDなどで実施されている 1F 事故進展解析などの成果を活用し、プラント内線源分布をモデル化する。2) 線源分布データと 3次元プラントモデルを用い、粒子輸送モンテカルロシミュレーションコード(PHITS)により、線源要素ごとにプラント内の線量率分布に対する応答関数を作成する。3) 線量率実測値が有る場合には、応答関数と実測値を用いて、最確な線源分布を逆推定する。4) 逆推定された線源分布を用いて、廃炉工程における最確なプラント内線量率分布を評価する。

本手法を 1F の 1号機に適用した。2012年から2017年にかけて実施された3回の内部調査で得られたほぼすべての線量率実測値を反映し、燃料デブリ取り出し開始が予定されている 2021年末における線量率分布の予測値を得た。実測時期、水位、測定場所が異なる線量率実測値と整合する 1F プラント内の連続的な線量率分布を示したのは、世界でも初めてのことである。さらに、気中上アクセス方式と横アクセス方式を想定して、燃料デブリの取り出し工程を模擬した解析を行い、本事業で開発した手法は、今後の 1F における放射線遮へい方策の検討、工法の最適化、事前に必要な内部調査の検討などに活用できることを示した。また、本研究で得られた知見

に基づき、未だ成功していない放射線計測によるデブリ探査方法についての提言を行い、連携している英国チームと海上技術安全研究所が中心となって実施している水中デブリ探査技術の開発を支援した。

(3) 局所線量評価手法の開発（再委託先：日本原子力研究開発機構）

最確線量率分布評価手法を最大限に活用するためには、プラント内の広範囲な位置で線量率の実測値を得ることが重要である。そこで、耐放射線性長尺光ファイバ（～50 m）と、その先端に装着する小型の種々シンチレータ素材を組み合わせ、1F に適用可能な検出系の検討を行った。

本技術開発では、放射線による光ファイバー自身からの蛍光によるノイズ成分を除去するための波長選択型の光検出系を整備するとともに、極小シンチレータについて、耐放射線性光ファイバーの波長透過特性とのマッチングを考慮してその特性を調べた。さらに、Cs など、環境支配的な低エネルギーガンマ線と燃料デブリからの高エネルギーガンマ線とを区別することを念頭に、極小体積においても高エネルギーガンマ線の吸収を担保できる新規高密度シンチレータの選定を行い、発光波長成分や放射線の線量率依存性を観測することで利用の可能性を検討した。

波長選択型の光検出系としては、開口数の大きな短焦点距離の小型分光器をバンドパスフィルタとして活用することで、光ファイバー自身からの蛍光とシンチレータからの蛍光とを分離計測し、S/N を飛躍的に向上できることを示した。放射線による蛍光発光素子（シンチレータ）として、従来から利用していたルビーの発光特性と、ルビー以外のシンチレータとして Md:YAG を、従来に比べ高密度なシンチレータ結晶として、密度約 8.3 g/cm^3 のタングステン酸鉛 (PbWO_4)、と密度約 9.4 g/cm^3 の Nd を含有させたルテチウム酸化物 ($\text{Nd:Lu}_2\text{O}_3$) の 4 つを選定し、ガンマ線による発光特性を取得した。 PbWO_4 では、400 nm から 600 nm までの広い波長帯域で有意な発光が確認されたが、耐放射線性光ファイバーの発光も確認された。 Nd^{3+} を 0.5 % 含有させた $\text{Nd:Lu}_2\text{O}_3$ の場合には、耐放射線性光ファイバーの透過波長領域である 896 nm で発光を確認することができた。また、発光強度はガンマ線線量率に対して良い線形性が有ること、照射による発光強度の有意な劣化が見られず、耐放射線性を有することが確認でき、局所放射線計測への適用が期待できることが分かった。

4 種類のシンチレータ素材の発光特性と耐放射線性光ファイバーとのマッチングを明らかにしたことにより、今後の 1F 応用として、それぞれの特性を活かした適材適所の利用や、エネルギー付与が異なる複数のシンチレータ素材を組み合わせた燃料デブリ探査装置の開発などへの道筋を開くことができた。

「水中デブリ探査技術の開発」においては、1F の 1 号機や 3 号機において原子炉格納容器 (PCV) 下部水中に水没していると予想されている燃料デブリの分布を探査するための技術開発を英国ランカスター大学及びマンチェスター大学と協力して平成 27 年度より実施し、以下の(1)～(4)の成果を得た。

(1) ソナーシステムの開発（再委託先：海上技術安全研究所）

燃料デブリを模擬した音響特性模擬デブリと性状模擬デブリの 2 種類を製作し、それらを観察対象としてマルチビームソナーの性能確認試験を実施し、比較的面積の広いプール水底に設置した模擬デブリの存在を水中ソナーによるマッピングにより確認した。さらに、マルチビームソナーの他、回転ビームソナーなどを用いて、PCV の円環状を模擬した体系を構築して試験を実施し、

デブリ探査精度を評価した。これら複数のソナーの出力である 2D 画像の解像度を比較・検討した結果、PCV のような閉鎖空間におけるデブリ探査用としては、発振子の超音波周波数がより高い、且つ軽量である回転ビームソナーが優れていることを確認するとともに、実態の無い虚像(ゴースト)の発生対策を実施して、解消できることを実証した。これらの結果を反映して、マンチェスター大学が開発した遠隔操作式水中ロボット(ROV)に回転ビームソナーを搭載した水中デブリ探査装置プロトタイプ-Aを開発した。さらに、その仕様の一部を変更し、1F 適用のための要素技術の開発を目的とした、水中デブリ探査装置プロトタイプ-B を製作した。この装置は将来の実用機製作時の原型となることを想定し、水底表層部探査機器である SBP (Sub Bottom Profiler) 及び自己位置検出のための水中 GPS 機器などを搭載し、これらの性能向上のための試験を行うための機器とした。

(2) 水中デブリ探査システムの最適化検討 (再委託先: 海上技術安全研究所)

デブリ探査精度を向上させることを目的として、マルチパスの影響を低減する対策、ソナー出力の 3D 画像表示の検討、ROV 測位システムの概念設計などを実施した。マルチパスの影響低減対策では、ソナーの超音波発振子外周に開口部の有る超音波コリメータを取り付ける方法で低減効果を確認した。さらに、超音波コリメータ機能に代わる方法として超音波発振子の回転範囲をコリメータの開口角度に合わせ、超音波の発生並びに受信範囲を調整する方式を採用することにより対応可能であることも確認した。

海上技術安全研究所(海技研)の試験水槽において、英国チーム製作の ROV と日本チームのソナーとを統合した探査装置(プロトタイプ-A)の運動性能や、ソナーによる模擬デブリ探査性能の確認試験を日英チーム合同で実施するとともに、ソナー出力とマンチェスター大学が開発した光学式測位システムを組み合わせたリアルタイム方式の 3D 画像表示システムを導入し、プロトタイプ-A を改良した。

最後に、原子力機構・楢葉遠隔技術開発センターの大型水槽施設において、改良後のプロトタイプ-A 機の実証試験を日英双方の全機関が協力して実施し、プロトタイプ機は仕様通りの運動性能(潜航、浮上、水平及び旋回運動)を有することを確認した。さらにソナーで得られた画像は性状模擬デブリの形状を識別可能な解像度であることを確認した。光学式測位システムに関しては、ROV の位置とその座標表示を確認することができた。これにより、ソナー出力と測位システムを用いたリアルタイム方式の 3D 画像表示システムを 1F で運用すれば、放射線検出器を ROV に搭載してデブリ分布を調査することにより、デブリの存在が疑われる位置などの情報を取得できる見通しが得られた。また、本業務の実施中に 1F 内部調査により新たな課題として浮上した堆積物下にあるデブリ探査の方法についても検討し、周波数の低い可聴域音波を利用する水底表層部探査機器(SBP)のデブリ探査への適用が有望である見通しを得た。

(3) 小型放射線検出器の開発 (ランカスター大学)

英国側では、ガンマ線検出用として、数種の候補検出器について Co 照射などの試験を行って特性を把握し、最終的に良好なエネルギー分解能を有する CeBr₃ 検出器を候補に選定した。中性子検出用としては、中性子とガンマ線の弁別機能を有する検出器を調査し、EJ-301 有機液体シンチレータ、スチルベンなどを候補に挙げ、Co 照射試験の結果に基づきスチルベンを選定した。これらをマンチェスター大学の ROV に搭載し、スロベニアの TRIGA Mark II 炉において照射試験を実施した。その結果、高線量バックグラウンド環境下では CeBr₃ 検出器応答のパルスのパイル

アップや、ガンマ線と中性子の信号を弁別するスチルベンの弁別器が飽和するなどの現象が観察され、Cs 汚染物からのガンマ線と区別して燃料デブリ特有の放射線を検知することができる放射線検出器の開発は、今後も継続して実施する必要があると結論された。

(4) 小型水中ロボット (ROV) の開発 (マンチェスター大学)

マンチェスター大学のチームは 1F の PCV 内へのアクセスポートが内径 100 mm から 150 mm に拡大された場合を想定し、ROV の外形拡大の設計変更を実施した。同時に水ポンプ個数を増やして推力を増加させた。これにより、ランカスター大学の小型放射線検出器や他のセンサー搭載に必要なスペースが確保できた他、海技研が開発したソナーの搭載も可能となり、本研究で目指した ROV、小型放射線検出器、ソナーシステムとを統合するための基本構造が構成された。システム統合後も ROV の運動性能に問題は無かったため、マンチェスター大学が新たに開発した光学式測位システムを用い、檜葉遠隔技術開発センターの水槽施設において模擬デブリ探査の実証試験を実施した。その結果、当初目標を満足する運動性能と位置表示機能を有することが確認できた。また、ソナー出力と光学式測位システムを組み合わせたリアルタイム方式の 3D 画像表示システムにより、模擬デブリ形状をリアルタイムで 3D 画像表示させることが可能となった。

耐放射線性に関しては、ROV を構成する主要部品の Co 照射試験を行い、部品ごとの耐放射線性特性を明らかにした。この結果を原子力機構の PCV 内線量率分布の予測結果と照らし、今回開発した ROV の適用範囲とそれを拡大するための今後の改良方針が得られた。

1. はじめに

東京電力ホールディングス福島第一原子力発電所(以下 1F と略記)の廃炉を加速するためには、まずは燃料デブリの位置を把握して廃炉工法を決定する必要がある。さらに工程まで具体化するためには、作業員の安全を確保するために、廃炉工法の各工程におけるプラント内の線量率分布をなるべく正確に把握し、適切な放射線遮へい対策を施すことが必要となる。現在、東京電力ホールディングスや国際廃炉研究開発機構(IRID)を中心に、1Fの炉内状況を把握するために、事故進展解析、ミュオンイメージング、ロボットによる原子炉格納容器(PCV)内の線量率測定などの様々な試みがなされている。しかしながら、燃料デブリの正確な分布やPCV及び圧力容器(RPV)内部の広範囲な線量率分布は必ずしも明確になっていない。その要因として、1F事故進展の現象が非常に複雑なため、現在の事故進展解析の技術だけでは信頼性が高い解析結果を得ることが容易ではないこと、1号機や3号機のように多くの燃料デブリがPCV底部(地階)に存在していると推測されており、ミュオンイメージングの適用が必ずしも容易ではないこと、水中に2~6mの範囲で深く水没していると考えられている1号機や3号機の燃料デブリから放出される放射線は水の遮へい効果により、1号機で行われたようなPCV内の気中線量率測定ではデブリ特有の放射線に対する感度が得られないなどの理由が挙げられる。また、現在のPCV/RPV内部調査に限らず、将来廃止措置が実施される段階においても、プラント内の線量率分布評価は継続的に必要となる。さらに、放射性物質の飛散防止や放射線遮へいのために、意図的にPCV内を深く水張りする可能性も有るため、水没した燃料デブリの分布を把握する有効な手段は用意しておくべきと考えられる。本研究は、これらの課題解決を目指して、「プラント内線量率分布評価と水中デブリ探査に係る技術開発」を3年計画で実施するものである。本技術開発は、以下で述べる「(1)線量率分布評価技術開発」と「(2)水中デブリ探査技術の開発」から構成されるが、これらと並行して英国側では「小型放射線検出器の開発」と「水中ロボットの開発」を進める。したがって英国側の進捗状況を考慮しつつ、これら研究チームと連携して効率的に開発を進めることとした。

(1) 線量率分布評価技術の開発(長岡技術科学大学/再委託先:日本原子力研究開発機構)

線量率分布評価技術の開発は、理論計算を中心とする「最確線量率分布評価手法の開発」と1Fプラント内線量率の実測を目指す「局所線量評価手法の開発」とに分けられるが、これらは双方の開発により相乗効果が発揮されるものである。

最確線量率分布評価手法の開発では、長岡技術科学大学が提供する最新知見を反映した核データと日本原子力開発機構(以下、原子力機構)が有する高度な計算技術を、1F炉内調査による線量率の実測値と組み合わせて、プラント内の最確な線源分布と廃炉工程における線量率分布を評価する技術を開発する。具体的には、次の手順で時々の最も確からしい線源分布と線量率分布を評価する手法の確立を目指す。1) 燃焼度分布やボイド率分布を考慮した3次元燃料燃焼組成計算(実施済み)、微量不純物を考慮した炉内構造物の放射化計算(本研究で実施)、IRIDなどで実施されている1F事故進展解析などの成果を活用し、プラント内線源分布をモデル化する。2) 線源分布データと3次元プラントモデルを用い、原子力機構が中心となって開発した粒子輸送モンテカルロシミュレーションコード(PHITS)により、線源要素ごとにプラント内の線量率分布に対する応答関数を作成する。3) 線量率実測値が有る場合には、応答関数と実測値を用いて、最確な線源分布を逆推定する。4) 逆推定された線源分布を用いて、廃炉工程における最確なプラント内線量率

分布を評価する。本手法の有効性を、3回の内部調査による線量率実測値が得られている1号機について検討する。

最確線量率分布評価手法を最大限に活用するためには、プラント内の広範囲な位置で線量率の実測値を得ることが重要である。そこで、プラント内の局所的な線量率実測値を広範囲に得ることを目指した局所線量評価手法の開発を行う。この手法開発では、原子力機構がこれまで開発を進めてきた耐放射線性長尺光ファイバー(~50 m)と、その先端に装着する小型のルビーなどのシンチレータ素材を組み合わせて、ガンマ線による発光波長特性と出力特性を実験により評価し、広範囲な線量に対して適用可能な検出系の設計検討を行う。また、有望な素材については、Co-60照射試験を行い耐放射線性評価を行う。

(2) 水中デブリ探査技術の開発（再委託先：海上技術安全研究所）

本技術開発は、海上技術安全研究所が行うデブリ探査用のソナーシステムの開発と、英国側の研究パートナーであるランカスター大学が行う小型中性子/ガンマ線検出器の開発、及びマンチェスター大学が行う水中ロボット(ROV)の開発で構成される。原子力機構は、1Fプラント内の構造や燃料デブリ性状、線量率分布などの情報を提供してこれらの開発に協力する。ソナーシステムの開発は、放射線の影響を受けない超音波を使って、水面下にある燃料デブリの分布を得ることを狙ったものである。水中ソナーによるマッピングは、水中構造物の検査、河川や海底の3次元地形図の作成などに使用されている既存技術であるが、従来の実用例に比べ狭い閉鎖空間となる1F原子炉格納容器への適用性を、模擬デブリと海上技術安全研究所や原子力機構が所有する水中機器試験水槽を用いた試験を実施して評価を行う。ソナーは、床面の凹凸を探索することは期待できるが、線量率などを計測することはできない。また、放射性物質で汚染された水面下ではガンマ線を測定しても燃料デブリの位置特定に至らない可能性が有る。ランカスター大学が担当する小型検出器の開発は、高ガンマ線環境下で燃料デブリからの自発核分裂中性子またはデブリ特有のガンマ線を検出することを狙いとしたものである。また、将来的には、ソナーや小型検出器を、水面または水中の所定の位置に配置させる必要が有ることから、英国セラフィールドの原子力施設を対象とした水中ロボット開発の経験が有るマンチェスター大学が、1F適用を目指した小型の水中ロボットの開発を担当する。

2. 業務計画

2.1 全体計画

本業務の全体計画を以下に示す。

実施内容	平成 27 年度	平成 28 年度	平成 29 年度
【日本側】			
(1) 線量率分布評価技術の開発	核種崩壊生成計算 用核データ整備	線量計算用核データ整備	全体評価
① 線量率分布評価のための核データの整備 (長岡技術科学大学)	←→	←→	←→
② 最確線量率分布評価手法の開発 (日本原子力研究開発機構)	放射化計算準備及びプラントモデル構築	最確線源と線量率分布評価	廃炉工程時線量率分布ケーススタディ
③ 局所線量率評価手法の開発 (日本原子力研究開発機構)	シンチレータ特性把握・検出系設計	定性評価・代替発光結晶評価	局所線量率評価手法の適合性評価
(2) 水中デブリ探査技術の開発			
① ソナーシステムの開発 (海上技術安全研究所)	模擬デブリ試験体準備と既存システムによる基本性能試験	基本性能試験 (継続) とプロトタイプ探査装置の設計	プロトタイプ機製作と性能評価及び英国との共同試験
② 水中デブリ探査システムの最適化検討 (海上技術安全研究所)	←→	←→	←→
(3) 研究推進 (長岡技術科学大学)		英国側との情報交換・調整	
	←→	←→	←→
		参画機関全体の協力推進と統括	
	←→	←→	←→
【英国側】			
(1) 小型放射線検出器(プローブ)の開発 (ランカスター大学)	プローブ及び制御システム設計	プローブと ROV との統合部品類の耐放射線試験	英国内フィールド試験及び日本での試験 原子炉照射試験
(2) 小型水中ロボット (ROV) 開発 (マンチェスター大学)	ROV 本体及び推進機構の設計	制御システムの設計・製作 ソナー、プローブ及び ROV との統合	英国側内フィールド試験及び日本での試験 原子炉照射試験
	←→	←→	←→

燃料デブリ取り出しを加速するために有効な2つの基盤技術開発を行う。第1の「線量率分布評価技術の開発」では、燃料の燃焼計算、構造材の放射化計算、事故進展解析、内部調査による線量率実測値から得られる情報から、最確なプラント内の線源及び線量率分布を評価する手法を確立する。また、炉内調査に有効な耐放射線性長尺光ファイバーと小型シンチレータを組み合わせたガンマ線検出系の最適化設計を行う。第2の「水中デブリ探査技術の開発」では、水面下にある燃料デブリの位置及び分布状況の把握を目的として、高線量環境で使用できる超音波を用いたソナーシステムの開発を進めるとともに、英国側では自発核分裂中性子または燃料デブリ特有のガンマ線を検出するための小型放射線検出

器の開発とこれらを搭載して所定の位置に配置させるための水中ロボット (ROV) を開発する。本事業ではこれら開発結果を 1F の廃炉作業に適用する場合の技術的成立性を、模擬デブリ材を用いた水中試験などにより明らかにする。

3. 業務の実施内容及び成果

3.1 線量率分布評価技術の開発 (H27～H29)

3.1.1 線量率分布評価のための核データの整備 (H27～H29)

(1) 核データ整備 (H27～H29)

福島第一原子力発電所の線量率分布評価のためには、核分裂生成物や放射化生成物の崩壊定数やガンマ線やベータ線などの放出放射線のエネルギーや強度など、いわゆる核データが必要であるが、核データも測定手法の高度化などにより精度が向上されてきている。このため線量率分布評価をできるだけ正確に行うには信頼度の高い核データを利用する必要がある。線量率分布評価に利用できる信頼度の高い核データとしてはいわゆる評価済み核データが有り、日本の評価済み核データファイル (JENDL) が編集されている。線量評価に用いる崩壊定数などを収納した核データファイルとしては最新の JENDL 崩壊データファイル (JENDL/DDF-2015) [3.1.1-1] が有り、このファイルから原子力機構で線量率分布評価に用いる ORIGEN2 コード[3.1.1-2]用のライブラリを作成することにした。

ORIGEN2 コードには核種の生成崩壊の計算に用いる崩壊定数や崩壊の分岐比などの崩壊データを用いるため、平成 27 年度にはこれらの崩壊データを JENDL/DDF-2015 から ORIGEN2 コード用に変換して、原子力機構で利用できるようにした。この際、ORIGEN2 用に原子力機構で作成され、これまで利用されていた崩壊データライブラリの核種と整合を取るようにした。

線量率分布評価には崩壊データのみならず、ガンマ線や X 線などのスペクトルデータが必要であり ORIGEN2 にはこれらのスペクトルデータとして光子スペクトルのデータが用意されている。平成 28 年度には、線量率分布評価に用いる光子スペクトルデータを JENDL/DDF-2015 より ORIGEN2 のスペクトルのエネルギー構造 (18 群) に合わせて作成した。また、ベータ崩壊で放出されるベータ線が周りの物質との相互作用で減速される際、制動放射線が放出される。この制動放射線についても UO_2 及び H_2O 環境で考慮し、これらの効果をそれぞれ光子スペクトルに加えたデータを作成した。これらの光子スペクトルデータ (3 種類) を原子力機構に供給し、線量率分布評価で使えるようにした。作成したスペクトルを用いて計算した核分裂後のスペクトルを測定データと比較し、測定データと矛盾無く妥当な結果を与えることを確認した。図 3.1.1-1 に比較の一例を示す。これは U-235 の核分裂後の光子スペクトルを比較したものである。ORLIBJ40 とあるのは原子力機構でこれまで利用していたライブラリを用いたものである。New ORLIB とあるのが新しく作成したライブラリを用いた結果である。また、制動放射線を入れたライブラリを用いて計算したものは New ORLIB with H_2O Brem. 及び New ORLIB with UO_2 Brem. で示してある。それぞれ H_2O 及び UO_2 環境での制動放射線の場合を示している。

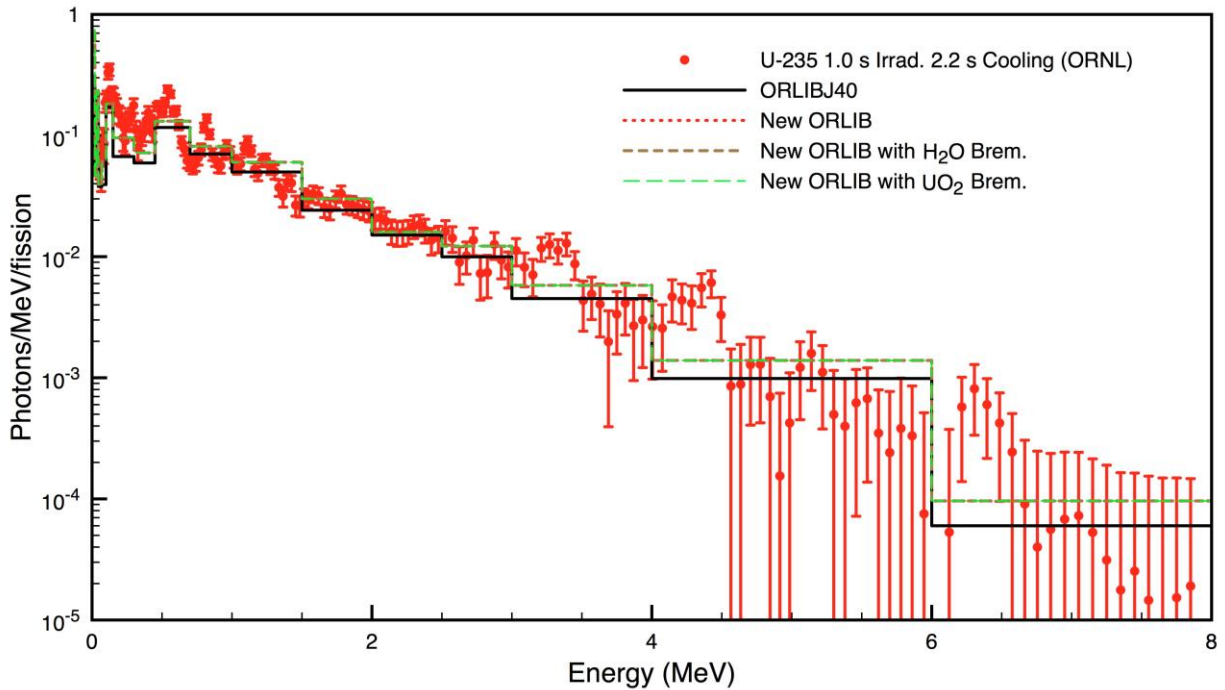


図 3. 1. 1-1 U-235 の 1 秒照射後 2.2 秒後の光子スペクトル (ORNL の測定値と ORIGEN2 の計算値との比較)

平成 29 年度にはこれまでに作成した ORIGEN2 コード用のデータの妥当性確認を利用可能な測定データを基に行った。スペクトルについては平成 28 年度の作業で幾つかの測定データとの比較を行っている。スペクトル以外についても確認するため、使用済み燃料の照射後試験のデータを利用することとした。照射後試験としては日本原子力研究所で実施した使用済み燃料の核分裂生成物やアクチノイド核種の実測データが詳細に報告されている [3. 1. 1-3] ので、そのデータを用いることとした。これは様々な燃焼度に対応した使用済み燃料に含まれる多数の核種を分析したもので、ORIGEN2 のような核種の生成崩壊を計算するコードで使われるデータの妥当性を確認するには適切なデータである。この分析データの測定値と比較するため、測定値の燃料の燃焼度に合わせ、作成したライブラリを用いて核種生成量を計算した。比較した結果を図 3. 1. 1-2 及び図 3. 1. 1-3 に示す。図 3. 1. 1-2 はアクチノイド核種の比較であり、図 3. 1. 1-3 は核分裂生成物 (FP) の比較である。測定値と計算値の比を示しており、測定値と計算値が一致しているのが 1.0 である。アクチノイド核種では Am-241 や Cm-246 で差が大きい。これらの核種の分析値として報告されているのは分析時点のデータではなく、冷却時間がゼロの時点で規格化したデータとして報告されている。Am-241 については、この規格化により測定誤差が拡大する効果が含まれている。また、FP 核種では Ru-106 で計算値の方が大きくなっているが、これは Ru-106 の化学的性質によるもので、溶解時の残渣移行やフラスコなどへ吸着する特性が有るため、計算値の方が大きくなっているものと思われる。このような差異を別にすれば測定値と計算値は良く一致しており、作成したデータの妥当性が確認できたものと考えられる。核種生成量の結果を利用する線量評価計算の支援として、これらの確認結果を原子力機構に伝えた。

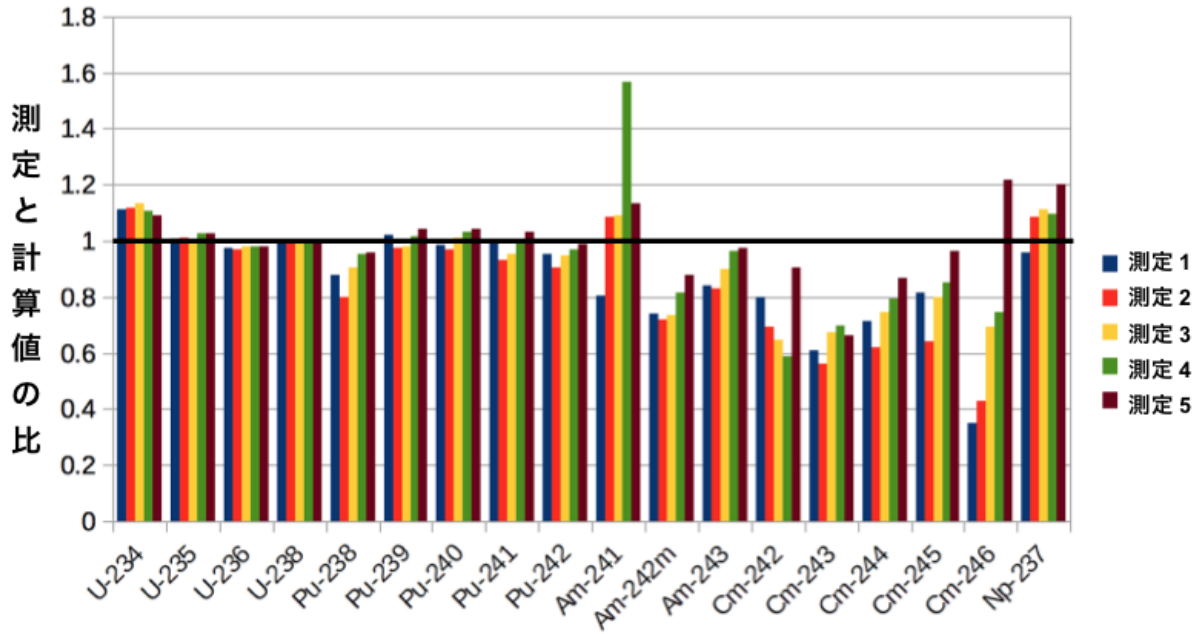


図 3. 1. 1-2 照射後試験の測定値と作成したライブラリを用いた計算値との比較
(アクチノイド核種)

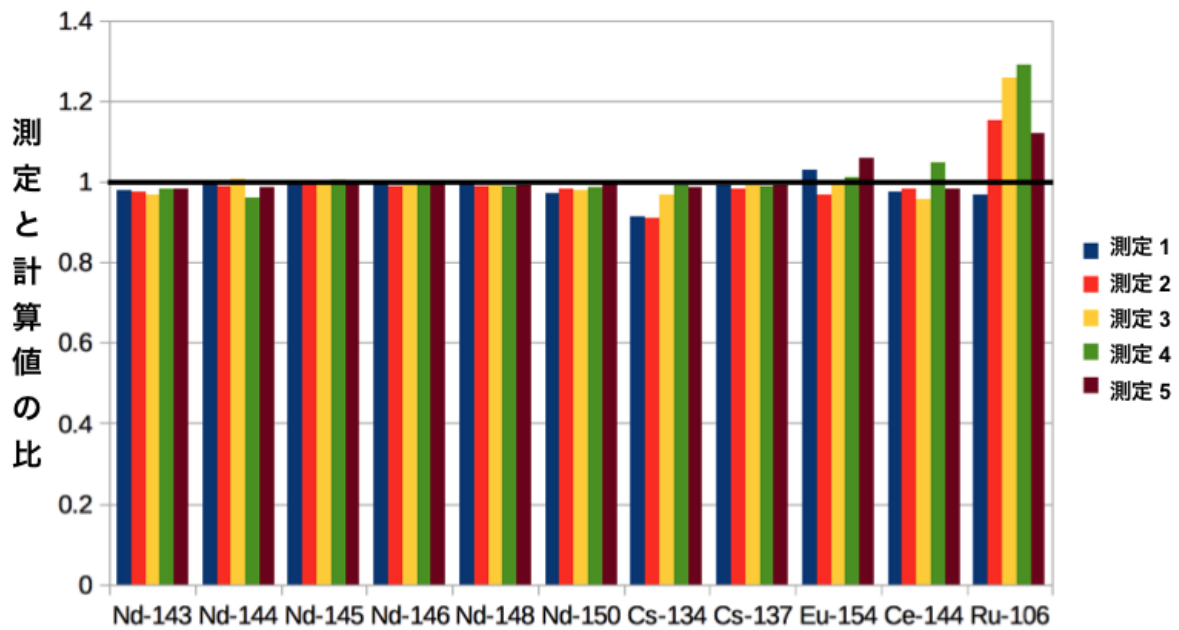


図 3. 1. 1-3 照射後試験の測定値と作成したライブラリを用いた計算値との比較
(FP 核種)

(2) まとめ

原子力機構での線量率分布評価に用いる ORIGEN2 コードで利用する崩壊データや光子スペクトルデータを最新の評価済みファイルから整備し、原子力機構に渡した。また、このデータの妥当性を確認するため利用可能な測定データと比較し、妥当な結果を得た。

参考文献

- [3.1.1-1] J. Katakura and F. Minato, “JENDL Decay Data File 2015,” JAEA-Data/Code

2015-030 (2016).

- [3.1.1-2] A. G. Croff, "ORIGEN2 - A Revised and Updated Version of the Oak Ridge Isotope Generation and Depletion Code," ORNL-5621 (1980).
- [3.1.1-3] (編) 中原、須山、須崎、「軽水炉使用済み燃料の燃焼度クレジットに関する技術開発」、JAERI-Tech 2000-071 (2000).

3.1.2 最確線量率分布評価手法の開発（再委託先：日本原子力研究開発機構）

(1) はじめに

東京電力ホールディングス福島第一原子力発電所(以下 1F)において、燃料デブリ取り出しを含む一連の廃炉作業を加速するためには、プラント内の線量率分布をなるべく正確に把握し、最適な廃炉工程を策定することが重要となる。しかしながら、1F においては、線量率分布を評価するためのベースとなる線源自体が不明確であり、このことが 1F の廃炉作業を困難なものとしている。「最確線量率分布評価手法の開発」は、この問題解決を狙ったものであり、図 3.1.2-1 に本手法開発により期待される 1F 廃炉加速のシナリオを示す。

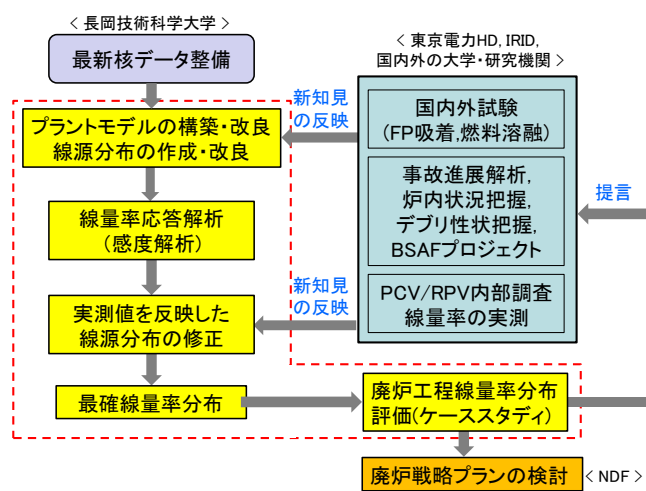


図 3.1.2-1 最確線量率分布評価手法開発の狙い

このシナリオでは、国内外の研究成果を反映したプラント内線量率分布の情報を、原子力損害賠償・廃炉等支援機構(NDF)、東京電力ホールディング、国際廃炉研究開発機構(IRID)の他、基礎・基盤研究に携わる大学や研究機関にフィードバックすることにより、1F 廃炉研究の加速に貢献することを狙いとしている。本手法開発の意義は、現時点での最確な線量率分布を求めるだけのものではなく、内部調査や事故進展解析コードの高度化などへのフィードバックにより相乗効果を作り出し、将来にわたって時々の最確な線量率分布を評価できるようにする点にある。これを実現するため、1号機をモデル対象として、図 3.1.2-1 の赤色破線で示した範囲の手法開発を、以下の①～⑤の手順で実施した。

- ① 長岡技術科学大学から提供された最新知見を反映した線源計算用データを原子力機構の解析コードに組み込むとともに (H27～H28)、IRID により実施されている事故進展解析を含む炉内状況把握や原子炉格納容器(PCV)の内部調査の結果[3.1.2-1～4]を利用し、線源データと3次元プラントモデルを構築した(H27～H28)。また、炉内状況把握や内部調査の進展に合わせ、プラントモデルの改良を実施した(H29)。
- ② 作成した線源データとプラントモデルを基に、幾何学形状の他、PCV 内構造物や燃料デブリなどによる放射線の自己遮へい効果や多重散乱などを近似することなく扱うことができる連続エネルギー法の粒子輸送モンテカルロ計算コード PHITS[3.1.2-5]を使って、単位光子線源に対する光子輸送計算を行い、部位ごとの各種線源に対する線量率分布への感度が分かる応答

関数を作成した(H28)。また、プラントモデルの改良に伴い、応答関数も更新した(H29)。

- ③ ②で作成した応答関数と内部調査による線量率実測値を用いて、実測値を再現するように線源分布を修正し、線源の崩壊を考慮してデブリ取り出し開始時期(2021年末)を想定した最確線量率分布を得た(H28~H29)。
- ④ 気中上アクセスと横アクセスを想定して、燃料デブリの取り出しを模擬するケーススタディを実施し、廃炉工程における線量率分布の変化を把握できることを確認した(H29)。

(2) 3次元プラントモデルの構築と改良(H27~H29)

1Fプラント内の線量率分布を計算するための3次元モデルを構築した。対象とする範囲は、燃料デブリの大部分が存在すると考えられているドライウェル内(図3.1.2-2)とし、サブプレッションチェンバなどは対象外とした。図3.1.2-3は、平成27年度に構築したPHITSによる線量率分布計算用の当初モデルである。

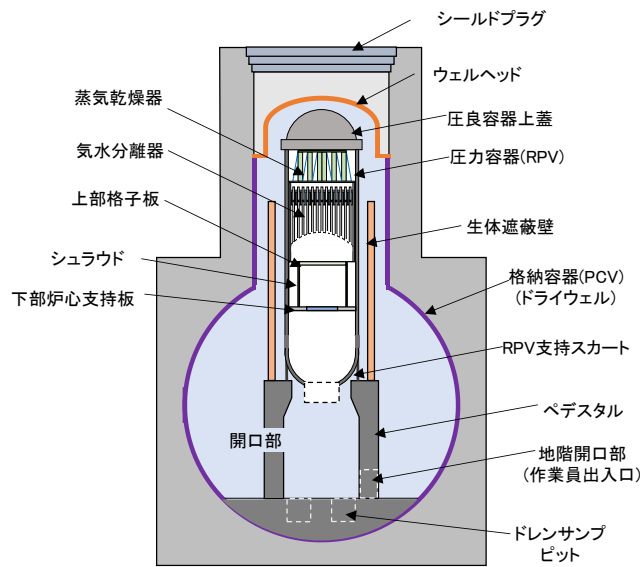


図 3.1.2-2 モデル化の範囲と名称

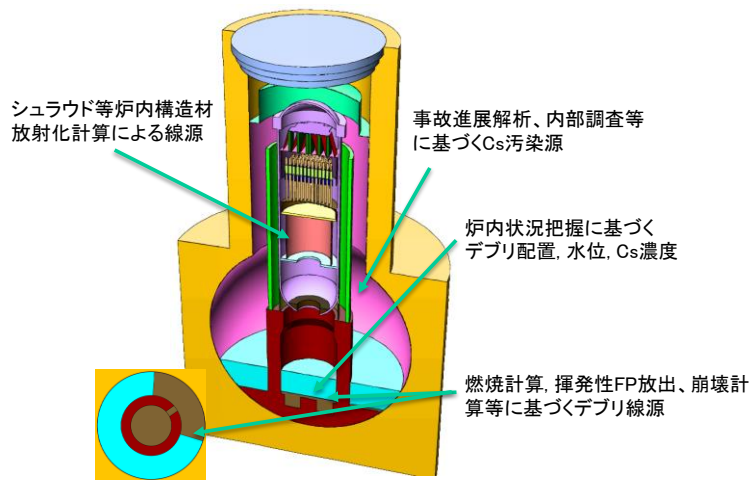


図 3.1.2-3 線量率分布計算用3次元プラントモデル(1号機,平成27年度モデル)

このモデルでは、原子炉圧力容器 (RPV) 内に残存する燃料デブリと PCV 底部へ落下していると見られる燃料デブリは、ともに主成分が $(U, Zr)O_2$ で、かさ密度約 6.3 g/cm^3 の熔融デブリとし、PCV 底部のデブリ高さは一定としていた。その後、平成 28 年 3 月に 1 号機の内部調査 (B2 調査) が実施され、ペDESTAL 外周部の水中に大量の砂状堆積物が観察された。この堆積物表面高さはペDESTAL 地下階の開口部近くで PCV 底部から 90 cm 程度であり、開口部から離れるにしたがって低くなっている。そこで、平成 29 年度の検討では、開口部付近から外周部に向けて階段状に高さ勾配を設けてペDESTAL 外周部の燃料デブリとその上の堆積物をモデル化した。なお、図 3.1.2-4 は、PHITS の入力データから「3DShow」の機能を用いて計算体系をそのまま可視化したものであり、モンテカルロ計算で使用した体系モデルそのものである。

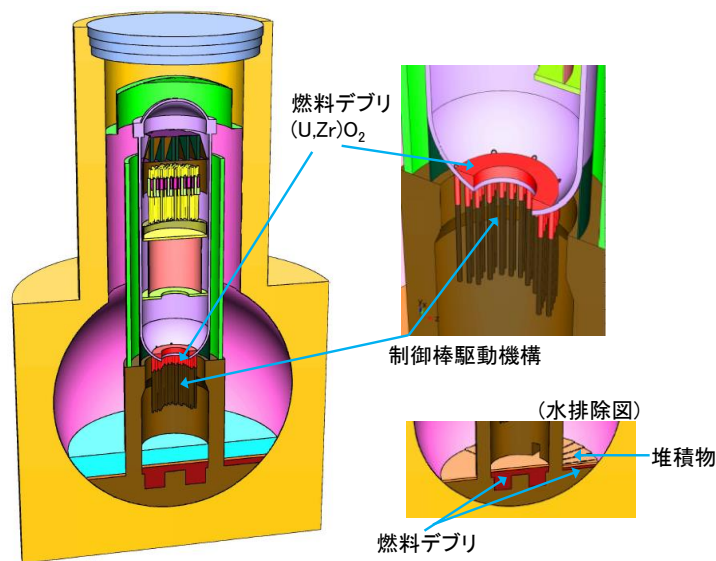


図 3.1.2-4 線量率分布計算用 3 次元プラントモデル (1 号機, 平成 29 年度改良モデル)

堆積物の成分や燃料デブリと堆積物との境界は現状では不明であるため、当面の仮定として、堆積物はコンクリート成分で代表し、堆積物の厚さは 20 cm とした。ただし、これらの組成や厚さは容易に変更できるようにした。

1 号機のペDESTAL 内部は未調査段階であるが、平成 29 年中に実施された 3 号機や 2 号機に対する内部調査でのカメラ映像から、ペDESTAL 内上部の制御棒駆動機構は 1 号機においても構造として残っていることが予想されたため、当初モデルでは考慮していなかった圧力容器下部の制御棒駆動機構を新たにモデル化し、その上部位置に熔融デブリが内部充満及び外周付着しているものとした。

(3) 線源データの作成 (H27~H28)

1F プラント内には、大きく分類して 3 種類の放射線源が存在する。それらは、①事故時に燃料及び被覆管などの構造材物質が熔融混合した燃料デブリ、②事故前の通常運転において中性子の照射を受けて放射化したシュラウドなどの炉内構造物、③事故時に燃料から放出され PCV 内に留まった揮発性の高い Cs などの核分裂生成物 (FP) による表面汚染、である。これらの線源は以下の方法で作成した。

1) 燃料デブリの線源作成

燃料デブリの線源作成の流れを図 3.1.2-5 に示す。燃料デブリの核種組成作成に当たっては、まず、事故時の燃焼度分布とボイド率分布を考慮した 3 次元核種インベントリ計算[3.1.2-6]による燃料組成と、微量不純物を考慮した燃料集合体構造物の放射化計算により得られた放射化構造材の組成を各物質の重量を重みに混合する。次に揮発性の高い FP 元素については、元素に応じた一定割合を放出させる。事故時における実際の FP 放出率は不明であるため、表 3.1.2-1 に示す 3 種類のモデル（ゼロ放出モデル、標準放出モデル、高放出モデル）を設定した。これらの 3 つのモデルは、デブリ線源強度として、上限値、代表値、下限値を与えることを想定したものである。標準値モデルの FP 放出率の値は、照射済み燃料(38 Gwd/t)の UO_2-ZrO_2 混合物を用いた FP 放出試験 (PHEBUS-FPT4) による実験結果[3.1.2-7]を参考に設定した。

揮発性 FP を放出させた後、線量率分布を評価する時点まで崩壊計算を行い、U 重量当たりの光子線源を ORIGEN2 コード[3.1.2-8]と同じ 18 群構造で作成した。PHITS による計算で燃料デブリに与える光子線源は、対象とする部位の燃料デブリ中の U 量に比例するものとした。

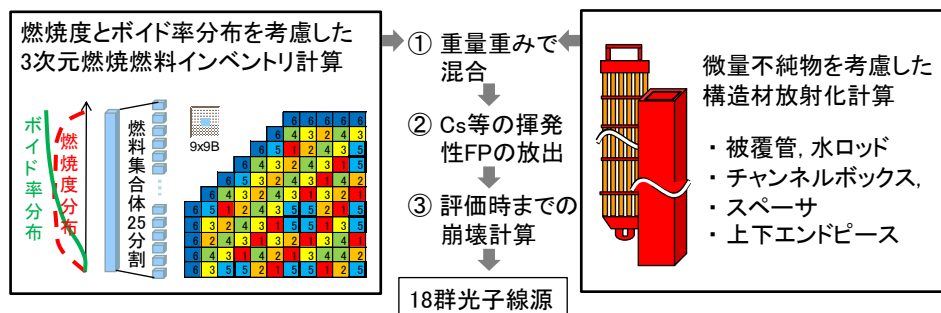


図 3.1.2-5 燃料デブリ線源の計算フロー

表 3.1.2-1 FP 放出率(%)モデル

放出元素	ゼロ放出モデル	標準放出モデル	高放出モデル
希ガス (Xe,Kr,...)	0	99	99
I	0	97	99
Cs	0	84	99
Te	0	80	99
Mo	0	77	99
Rb	0	53	99
Cd	0	44	99
Ba	0	35	99
Sb	0	30	99
Pd	0	27	99
Ag	0	9.2	99
Tc	0	7.1	99
Ru	0	1.8	99
Sr	0	1.4	99
La,Ce,Nd, Eu,Gd	0	0	5

2) 放射化線源の作成

RPV の内部は Cs による表面汚染が主要な線源であると考えられるため、放射化線源については原子炉運転中の中性子束が特に大きい、上部格子板、シュラウド、下部炉心支持板の放射化のみ

を考慮した。これらの各部位における中性子スペクトル及び中性子束レベルを、2次元炉心計算とモンテカルロ計算で求め、多群放射化ライブラリ MAXS2015[3.1.2-9]から各部位に対するORIGEN2用の1群放射化断面積ライブラリを作成した。さらに、「ふげん」の微量不純物分析データ[3.1.2-10]を使ったステンレス組成と1号機の照射履歴(図3.1.2-6)[3.1.2-11]を用いて、シュラウド交換が行われた2011年11月から事故日までの放射化計算を、放射化断面積ライブラリを上記で作成したものと差し替えたORIGEN2により行った。

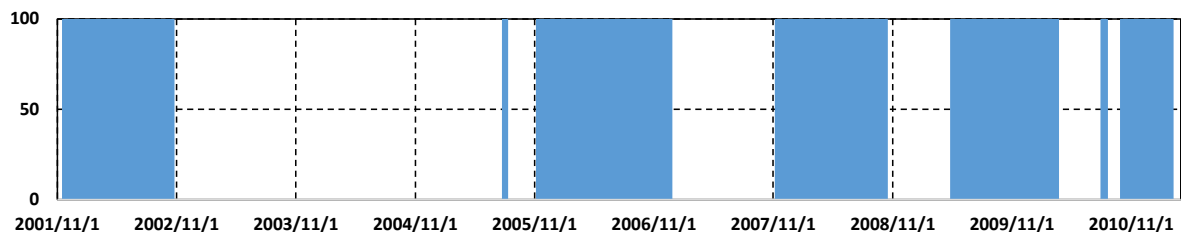


図 3.1.2-6 1号機炉内構造物放射化計算用の運転履歴モデル(シュラウド交換後～事故停止)
(縦軸は定格出力を100%とした出力割合[%]、青色部分が運転期間)

ORIGEN2による放射化計算では、非常に多くの核種組成が出力され、それらのうち特に放射能が大きい核種は、Fe-55、Co-60、Ni-63といった核種である。これらのうち、Fe-55とNi-63はβ崩壊に伴いガンマ線を殆ど放出しないため、線量率寄与として見た場合、Co-59(n, γ)反応で生成されるCo-60のみを考慮すれば良いことが分かった。このため、線量率評価の計算では、放射化計算で得られたCo-60のみを線スペクトルとして与えることとした。

3) Cs 汚染源

燃料の熔融過程で放出される揮発性FP核種によるPCV内の汚染は、線量率への寄与の観点からはCsが支配的と言える。その分布については、IRIDによる事故進展解析コードの結果[3.1.2-12]を用いた。この評価値は事故後6日時点のCs元素量であるため、3次元核種インベントリ計算による事故6日後のCs同位体比(安定なCs-133や長寿命のCs-135を含む。)を用いて、Cs-134とCs-137の重量を計算する必要がある。この際、Cs-134の生成量は、計算モデル、核データ、運転条件の仮定などに依存して、Cs-137に比べて計算の予測精度が悪いため、1号機の滞留水分析[3.1.2-13]によるCs-134/Cs-137比を用いてCs-134の同位体比を補正した。これにより得られたCs-134とCs-137の組成を評価時点まで崩壊させて、線量率分布の計算に使用するCs線源とした。滞留水中のCs線源についても、同じ分析値に基づき作成した。

(4) 単位線源による線量率分布応答関数の作成 (H28～H29)

現状では、線源強度や分布の不確かさが大きいため、評価した線源をすべて1つにまとめて線量率分布評価や多数のケーススタディをすることは効率的ではない。そこで、粒子輸送モンテカルロ計算コードPHITSを用いて、設定した各線源種(i)の単位線源に対するプラント内線量率分布の応答関数 $d_i(\vec{r})$ を求め、現状で推定される線源強度(S_i)を用いた線形和により、プラント内線量率分布 $D(\vec{r})$ を以下の式で評価することとした。なお、内部調査の進展に伴う平成29年度のプラントモデルの改良に伴い、応答関数も最新の情報に基づき更新した。

$$D(\vec{r}) = \sum_{i=1}^N S_i d_i(\vec{r}) \quad (3.1.2-1)$$

ここで、 N は線源種の総数であり、デブリ線源(3:RPV内、ペDESTAL内外、CRDハウジング付着)、Co-60線源(3:シュラウド、上部格子板、下部炉心支持板)、Cs汚染源(33部位)の全39種類であるが、半減期が異なるCs-134とCs-137の崩壊によりCs線源のスペクトルが変化することから、Cs-134とCs-137は別線源として扱っている。よって、現在のモデルでは、 $N=3+3+(33 \times 2)=72$ のガンマ線源(表面源または体積源)を扱っており、必要に応じて増減させることができる。

応答関数は、各単位線源に対しPHITSによるモンテカルロ計算で作成した。この際、追跡粒子数は、線源当たり500万個とした。図3.1.2-7に、代表的な線源に対して得られた応答関数を示す。これらは、単位線源強度(photon/s)に対する分布であるため、現在のように線源のエネルギースペクトルが大きく変化しなければ、線量率の評価時期に依存しない。ただし、モデル化されたプラント体系の形状や材質が変わる場合には、応答関数を再作成する必要がある。

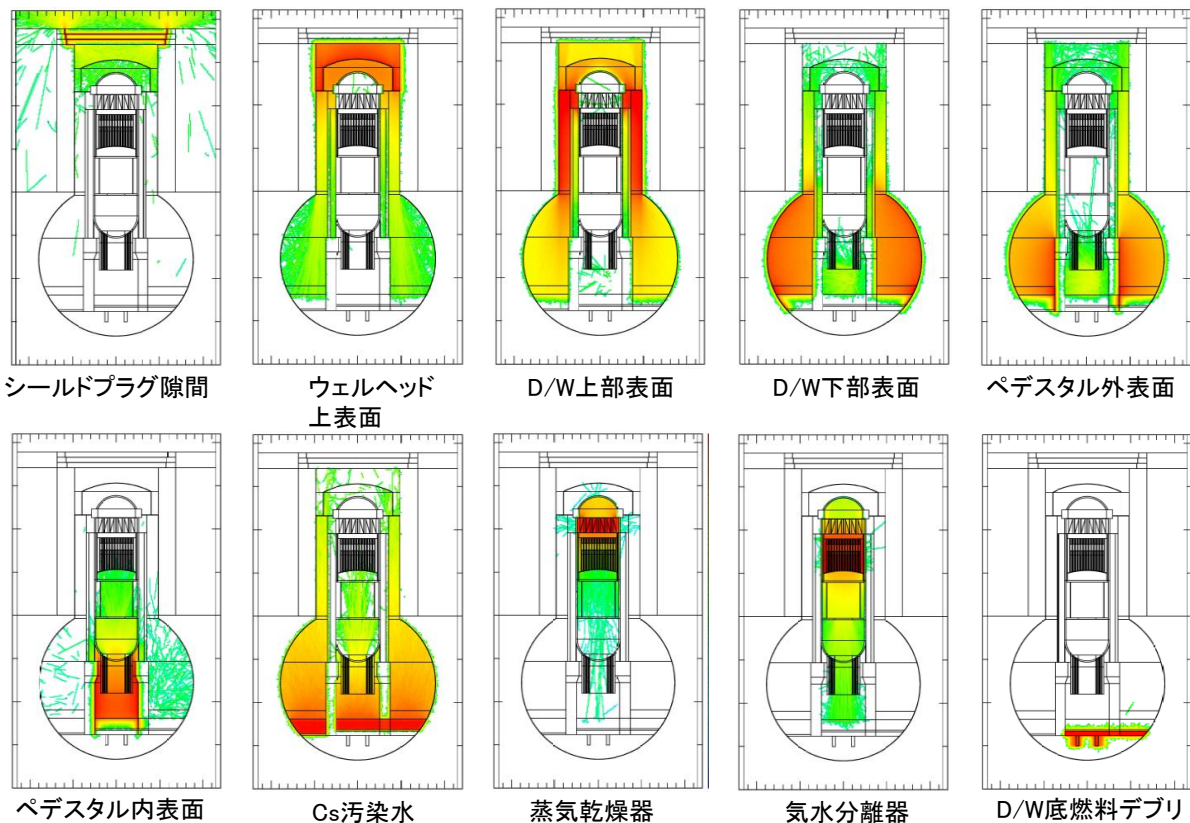


図 3.1.2-7 単位線源による線量率分布応答関数の例

(5) 実測値を反映した最確線量率分布 (H28~H29)

線源強度は、燃料の燃焼計算(デブリ線源)、放射化計算(Co-60線源)、事故進展解析(Cs-134, Cs-137線源)によるもので、特に事故進展解析にCs分布は不確かさが大きいと考えられる。そこで、これまでに内部調査で得られている線量率の実測値を利用して、より確からしい線量率分布

を求めた。1号機に対しこれまでに実施された線量率測定を含む内部調査を表3.1.2-2に示す。

表3.1.2-2 線量率測定を含む1号機内部調査

調査名称	測定日	線量率評価に利用可能な測定内容	線量率範囲(Sv/h)	平均線量率(Sv/h)	PCV底部からの水位(cm)
内部調査1 (1st entry)	2012年10月10日	①X100Bペネ近傍から水面近くまでの9点において気中線量率測定 ②滞留水のCs134, Cs137放射能濃度測定	4.7~11.1 (気中測定値と大きく異なる水面測定値を除く)	X100Bペネ端部1点:11.1 ペネ端部から水平に80cm, PCV底部から330~780cmの7点:8.3	287
内部調査2 (B1調査)	2015年4月10日 ~4月19日	①X100ペネから変形ロボットを入れ1階グレーチング上の16点について気中線量率測定	4.1~11.1(平均8.6)	16点:6.7	252
内部調査3 (B2調査)	2017年3月18日 ~3月22日	①X100ペネからロボットを入れ1階グレーチング上の10点について雰囲気線量率測定 ②グレーチング隙間からセンサーを投下し障害物(堆積物または配管)到達点までの10点について線量率測定	3.6~12(気中) 1.5~11(水中)	気中グレーチング上10点: 7.9 水中障害物付近10点:5.3	190

これまでのところ、2012年に行われた1st entry(以下、内部調査1と呼ぶ)、2015年に行われたB1調査(以下、内部調査2)、及び2017年に行われたB2調査(以下、内部調査3)の測定データが利用可能である。線量率の実測値から線源強度を推定する方法には、最小二乗法や誤差を考慮したベイズ推定法などが考えられるが、本ケースでは、1) 設定した線源数に比べて、線源に対する感度が異なる有効な線量率実測値が少ないこと、2) 事故進展解析によるFP分布の不確かさがまったく不明であること、3) 実測値が得られた測定日、測定位置、及び水位が変わっていることなどから、線量率実測値の反映は以下の手順で行った。

- ① 事故日に対して事前に作成してある線源核種データベースを基に、内部調査1の測定日に合わせて崩壊計算を行い、燃料デブリ、Co-60、Cs-134、Cs-137の線源強度を求めた。また、各単位線源に対しPHITS計算を行い線量率分布の応答関数を計算した。これらの結果から、(3.1.2-1)式により理論計算のみによる線量率分布を作成した。
- ② 内部調査1でのPCV内実測値(8点)と①で得た $S_i d_i(\vec{r})$ を各測定位置で比較し、これらの比の平均値を線源強度の修正定数(計算値×0.31倍)として使用した。この際、線源強度の総和に対しても不確かさが大きく、線源分布の連続性が期待される部位でのCs線源については、同じ修正定数を適用した。これにより、測定した線量率に大きな感度が無い位置のCs線源強度も修正することになり、事故進展解析による結果を相対分布として利用することになる。ただし、測定値がまったく無く、RPV外の線量率への感度も無い隔離されたようなRPV内とペDESTAL内のCs線源については、事故進展解析によるPCV内全体のCs総量を保存するように、相対分布はそのままとして、線源強度を調整した。
- ③ 内部調査2に対しても②と同様な方法を適用するが、内部調査1の実測値反映で決めた線源強度をベースに、内部調査2が行われた時期までの放射性核種の崩壊を考慮して初期線源強度を設定した。①では、ドライウェル(D/W)下部気中部分と水面下の表面Cs汚染濃度は同じであると仮定した。内部調査2では、内部調査1に比べて水位が低下(RPV底部から287cm→252cm)し、露出した表面のCs線源が気中での線量率を増加させることが予測されることから、287cm以下の位置にあるD/W及びペDESTAL外表面のCs濃度だけを調整(②に基づく線源強度の1.5倍)して、線源感度特性がほぼ同じであるグレー

チング上 16 点での測定値の平均値を再現するようにした。これにより、当初から水面下にあった表面の Cs 線源強度が修正される。

- ④ 内部調査 3 については、内部調査 1 及び内部調査 2 の実測値反映で決めた線源強度をベースに線源修正を行う。2017 年に実施された内部調査 3 では、2015 年の内部調査 2 と同じグレーチング上で線量率が測定されている。Cs-134 の崩壊を考慮すると線量率は 2 割程度小さくなることが予想されるが、内部調査 3 での測定値の方がやや高くなっている。これは、水位が 190 cm まで下げられたことによるものと考えられる。③で決定した線源分布を使用し、水位を 190 cm まで下げた PHITS 計算は、線源調整をしなくてもグレーチング上 10 点の実測線量率の平均値を良く再現することを確認した。このことは、①～③の線源調整の妥当性を示している。内部調査 3 では、水中及び PCV 底部堆積物の表面付近における線量率が測定されており、その水中での線量率減衰曲線から水中での線量率は堆積物の Cs 線源によるものと推察されている。そこで、水中の線量率実測値をほぼ再現するように、堆積物中の Cs 濃度を調整した。

以上の①～④により、現時点までに 1 号機に対して実施されたすべての内部調査の結果を反映した線源強度と分布を使用し、デブリ取り出しが予定されている 2021 年末の線量率分布を PHITS により計算した。PCV 内線量率分布の予測結果を図 3.1.2-8 に示す。なお、同図におけるデブリの FP 放出率モデルは、PHEBUS-FPT4 試験に基づく標準モデル(表 3.1.2-1 参照)で、Cs 放出率は 84 %である。水位は、現在と同じ 1.9 m とした。

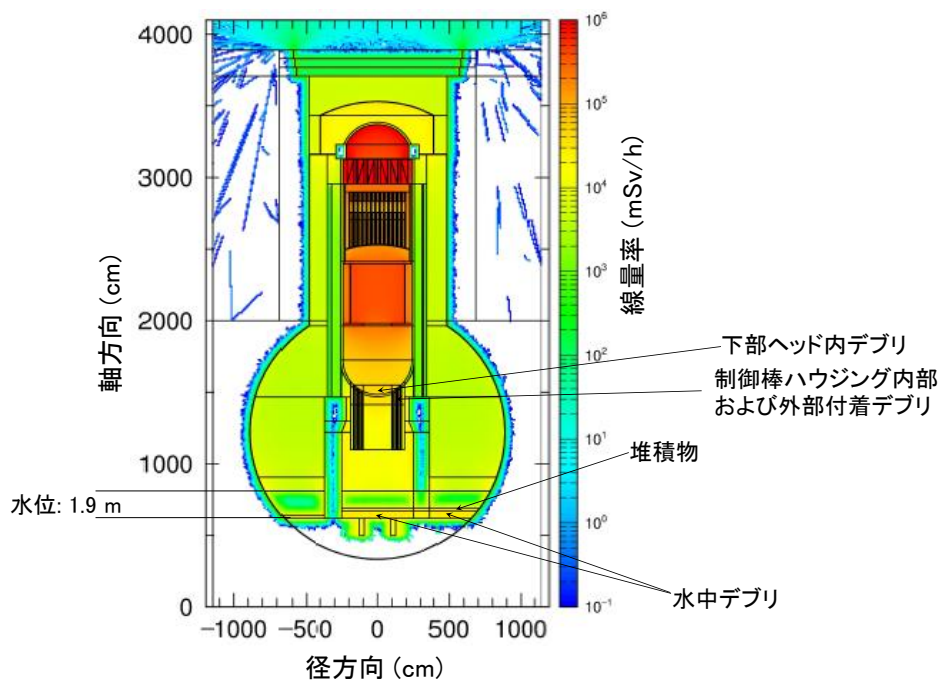


図 3.1.2-8 1 号機の内部調査結果を反映した線量率分布予測(2021 年末)

各部位における線量率の線源寄与を把握するため、代表的な線源ごとの線量率分布 ($S_i d_i(\vec{r})$) を図 3.1.2-9 に示す。これらは、同図に表示していないすべての線源について合算すると、図 3.1.2-8 の分布に一致するものである。

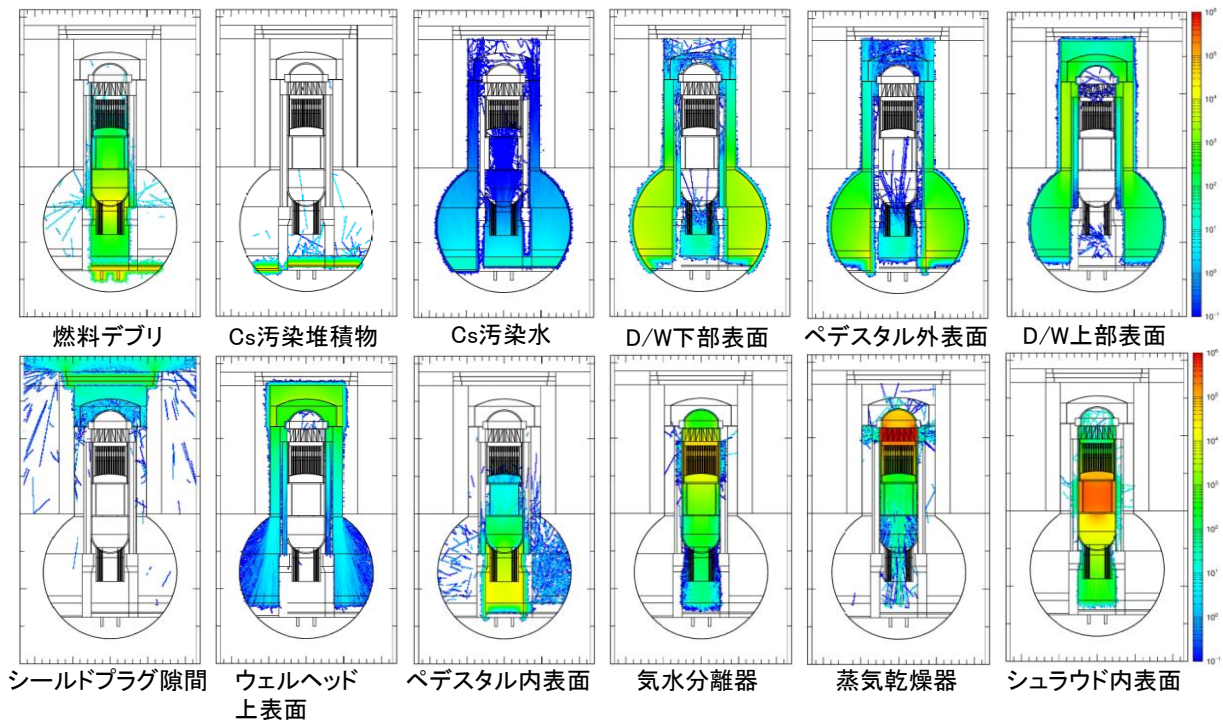


図 3.1.2-9 代表的な線源ごとの線量率分布寄与

(6) 最確線量率分布の結果と信頼性に関する考察 (H29)

図 3.1.2-8 に示した 2021 年末の線量率分布予測値とその信頼性について、図 3.1.2-9 の線源ごとの寄与 (感度) を踏まえて、以下のように考察した。

- ① RPV 内部：表面積が大きい蒸気乾燥器で最大線量率(約 1100 Sv/h)を与える。ただし、これまでの内部調査による線量率測定には RPV 内部の線源に殆ど感度がないため、線量率の信頼性は事故進展解析の Cs 沈着量の精度に強く依存している。IRID による事故進展解析 (MAAP 及び SAMPSON) による事故 6 日後の Cs 沈着量は 9 倍程度の範囲が想定されており [3.1.2-12]、同程度の不確かさが有ると推察される。
- ② ペDESTAL 内部 (気中)：ペDESTAL 外部及び水没している燃料デブリ線源からの感度は殆ど無く、ペDESTAL 内表面の Cs 汚染で線量率が支配的に決まっている。本結果では 14~26 Sv/h 程度であるが、①と同程度の不確かさが有るものと考えられる。
- ③ 燃料デブリ：炉心平均組成を用いた結果ではおよそ 30 Sv/h (γ 成分)である。これまでの内部調査では燃料デブリの線源に感度がある線量率実測値は得られていないため、この信頼性は燃料の燃焼計算や事故進展解析の結果に依存する。JENDL-4.0 [3.1.2-14] を使用した燃焼計算による主な線源寄与核種 (Cs-137, Cs-134, Eu-154, Ce-144 (Pr-144 放射平衡) など) の予測精度はおおむね 10 %以内であるが (第 3.1.1 節の図 3.1.1-3)、燃料デブリの線源強度はその U 濃度に比例するとしているため、事故進展解析による燃料デブリ量と性状 (かさ密度や元素組成) が誤差要因となる。1 号機では、事故進展解析とミュオンイメージングの結果から、高い確度で 90 %程度の U が PCV 底部に落下していると考えられているため、これをすべて熔融デブリと仮定した本計算結果は高めの線源を与えていると言える。燃料デブリの分布は不明であるが、自己遮へい効果により表

面付近の 10 cm 程度までが外部の線量率に寄与することから、不確かさが大きいドレインサンプルピットへの落下量や炉心溶融コンクリート相互作用(MCCI)による浸食量などの影響はほぼ無視できる。また、MCCIによる燃料デブリの場合には、溶融デブリの場合よりも体積が増えて密度が小さくなることにより、ガンマ線の自己遮へい効果は小さくなるが、むしろU濃度が小さくなることにより線量率は小さくなると考えられる。ただし、本計算では、事故時の炉心平均組成(燃焼度：約 26 GWd/t)を使用しており、炉心の軸方向分布まで含めた最大燃焼度は 50 GWd/t 程度は有るものと推測されることから、局所的には 3~55 Sv/h までの線量率を想定しておくことが必要である。

- ④ D/W 下部(球形部分)の気中:Cs の崩壊によりグレーチング位置で約 6 Sv/h と推定される。D/W 外表面及びペDESTAL外表面の Cs 汚染源に感度が高く、不確かさが大きい RPV 内部やペDESTAL内部の線源影響は殆ど無い。また、測定時期及び水位が異なる 3 回の内部調査で得られた多くの線量率実測値と整合していることから、信頼性は高い。崩壊のみで線量率実測値の説明ができることから、D/W 表面の Cs に大きな移行は無いと言える。
- ⑤ D/W 下部(球形部分)の水中：0.1~7 Sv/h (水表面付近で高く、中央部で下がり、堆積物付近で高い。)。燃料デブリの存在や分布は不明であるが線量率への感度は無い。今後堆積物の Cs 汚染に大きな変化が無ければ信頼性は高い。水中での D/W 表面の Cs 汚染濃度は、気中(PCV 底部から 2.9 m 以上)よりも大きいと推察される。
- ⑥ D/W 上部(円筒部分)：5~7 Sv/h 程度と推定される。D/W 内表面や生体遮へい壁外表面などの Cs 汚染に感度が有り、事故進展解析の結果に依存するが、D/W 下部での実測値と連動して線源修正をしているため、信頼性は中程度と考えられる。
- ⑦ オペレーションフロア(汚染がれき無しの場合)：実際にはシールドプラグのずれや浮き上がりが確認されているが[3.1.2-15]、詳細が不明なためここではモデル化をしていない。各シールドプラグの隙間や表面が Cs で汚染されていると、大きなずれが無くても、隙間部付近で 300 mSv 程度の線量率になると考えられる。なお、実測(2017年2月22日)では、ずれが有る隙間部付近で最大 566 mSv/h が観測されている。

(7) 水中デブリ探査技術開発への提言 (H28)

これまでの内部調査では、他号機も含め、線量率測定により燃料デブリは確認されていない。これは、測定位置が燃料デブリの線源に感度が無いこと以外に、Cs が放出された燃料デブリによる線量率は、Cs 汚染源のそれと同等かそれ以下であることに大きな原因が有る。現状では、ロボットに搭載するなどのセンサー軽量化の必要性のため、ガンマ線の全エネルギー領域で積分された信号を出力する検出器が使われている。これを使用する限り、堆積物などの Cs 汚染源と燃料デブリを明確に区別することは今後も困難と思われる。図 3.1.2-10 は、揮発性 FP の高放出モデルの場合について、事故から 7 年後(2018年3月)における燃料デブリの FP が放出するガンマ線の線スペクトルを示したものである。Cs が 99 %放出される場合でも、Cs-134 と Ba-137m(Cs-137 平衡)の線源が有意に見られる。およそ 1 MeV 以下のエネルギー領域では、燃料デブリ以外の Cs 汚染源によるガンマ線やそれらの水や構造物とのコンプトン散乱の影響を受けるため、これらの線源寄与を含む検出器応答からは燃料デブリを明確に区別することはできない。一方、Eu-154 や Pr-144(Ce-144 平衡)といったランタノイド核種は、アクチナイドとの帯同が期待される核種であ

り、これらが放出するガンマ線は燃料デブリによるものと期待できる。また、Co-60 は主に運転中の中性子束が圧倒的に大きい炉心部分において、主に燃料及び被覆管などの金属中に含まれる微量不純物である Co-59 の(n, γ)反応により生成されるため、直接的ではないが、このガンマ線が有意に見られる場合には燃料デブリと推定することができる。さらに、燃料デブリに含まれる Cm-244 の自発核分裂や誘起核分裂による核分裂反応や燃料デブリ周りの物質との(n, γ)反応に起因するガンマ線は 1 MeV 以上の高エネルギー側に現れる。

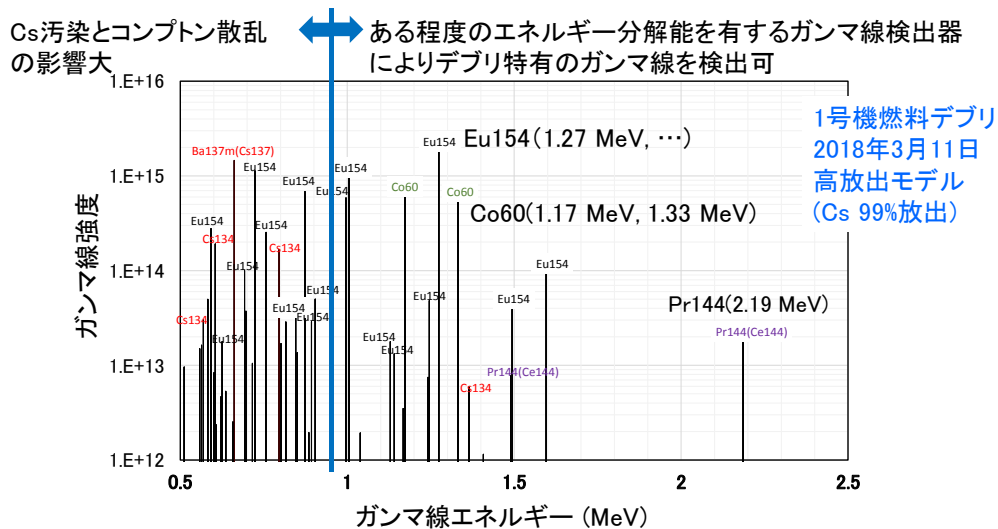


図 3. 1. 2-10 燃料デブリの FP が放出するガンマ線スペクトル

よって、燃料デブリ探査を行うためには、以下の方法が有効である。

- ① 耐放射線性が高い中性子検出器を用いて、Cm-244 の自発または誘起核分裂、あるいはアクチナイド(α , n)による中性子を検出する。
- ② ある程度のエネルギー分解能を有するガンマ線検出器を用いて、1 MeV 以上の Eu-154 (1. 27 MeV など)、Co-60 (1. 17, 1. 33 MeV)、Pr-144 (2. 19 MeV : ただし徐々に見えなくなる。)を検出する。水中では H(n, γ) 反応による 2. 2 MeV など有効である。
- ③ ある程度のエネルギー分解能を有するガンマ線検出器を用いて、1 MeV 以上のガンマ線の積算係数率などをモニタする。

これらの知見や PCV 内の線量率推定については、日本原子力学会や国際会議などで提言を行った他 [3. 1. 2-16, 17]、英国チームとも情報共有を行い、水中デブリ探査のための技術開発を支援した。

(8) 燃料デブリの取り出し工程模擬解析 (H29)

燃料デブリ取り出しが本格化すると、水位の変更、遮へい材の設置、PCV/RPV 内機器の撤去などにより線源条件が変わり、過去に内部調査で得た線量率の情報をそのまま使うことはできなくなる。しかし、最確線量率分布評価で得た線源分布情報を使えば、廃炉工程における線量率分布の変化を予測することができるものと期待される。そこで、NDF により予定されている初号機や燃料デブリ取り出し方法の確定に先立ち、図 3. 1. 2-11 に示す気中上アクセスと横アクセスを想定

した簡易モデルによるケーススタディを実施し、今後の活用への有効性を確認した。本検討では、図 3.1.2-8 で示した 2021 年末での線源分布と体系を使用した。気中上アクセスモデルでは、先ずオペレーションフロアに燃料デブリ取り出し用の鉄セル(25 cm 厚)を設置し、シールドプラグ、ウェルヘッド、RPV 上蓋、蒸気乾燥器の順で撤去し、次に気水分離器、上部格子版、シュラウド、下部炉心支持板を撤去して燃料デブリを露出させ、最後に RPV 底部に穴を開けてペダスタル内の水没燃料デブリにアクセスするものとした。また、横アクセスモデルでは、X6 ペネ位置に鉄セルを設けて PCV 内部にアクセスするものと仮定した。各工程における線量率分布の結果を図 3.1.2-12 に示す。

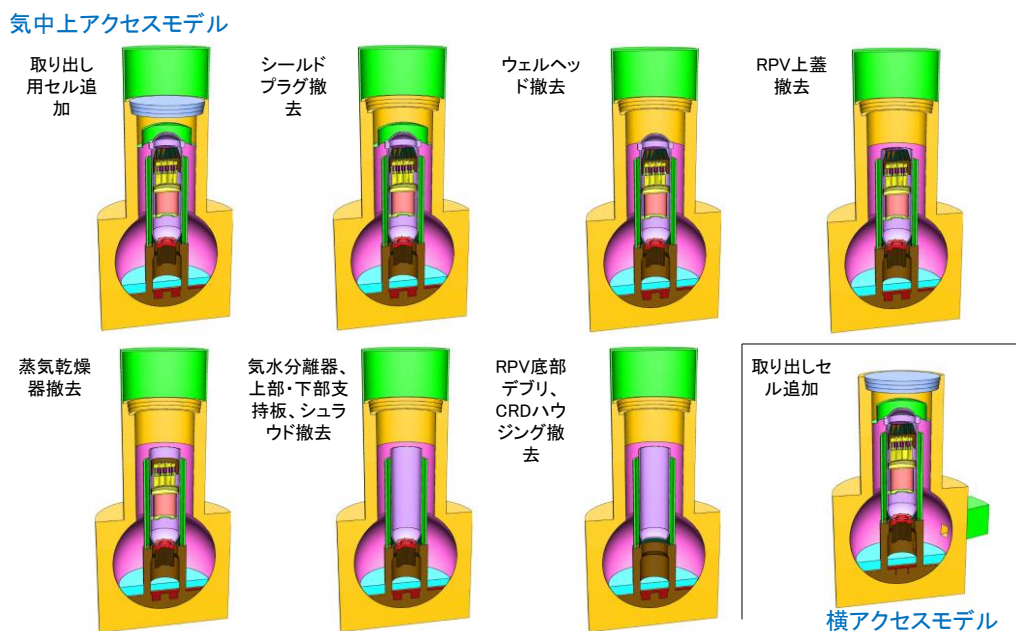


図 3.1.2-11 燃料デブリ取り出し工程を想定した線量率分布解析モデル

気中上アクセス工程では、RPV ヘッドを撤去して気水分離器が露出した場合と、炉内構造物をすべて撤去して RPV 内の遮へい物が無くなった場合に、取り出し用セル内の線量率が高くなっている。この場合には、現状不確かさが大きい RPV 内の線量率を事前によく調査しておくことが求められる。横アクセス方式の場合には、Cs 線源が特に多いと想定される RPV 内を露出しなくて良いため、取り出し用セル内の線量率は小さくなる。また、RPV 内部の線量率を当面は調査しなくて良い。

本研究で開発した最確線量率分布評価手法は、燃料デブリ取り出し方法に依存する、放射線遮へい方策の検討、工法の最適化、事前に必要な内部調査の検討などに活用できるものとする。

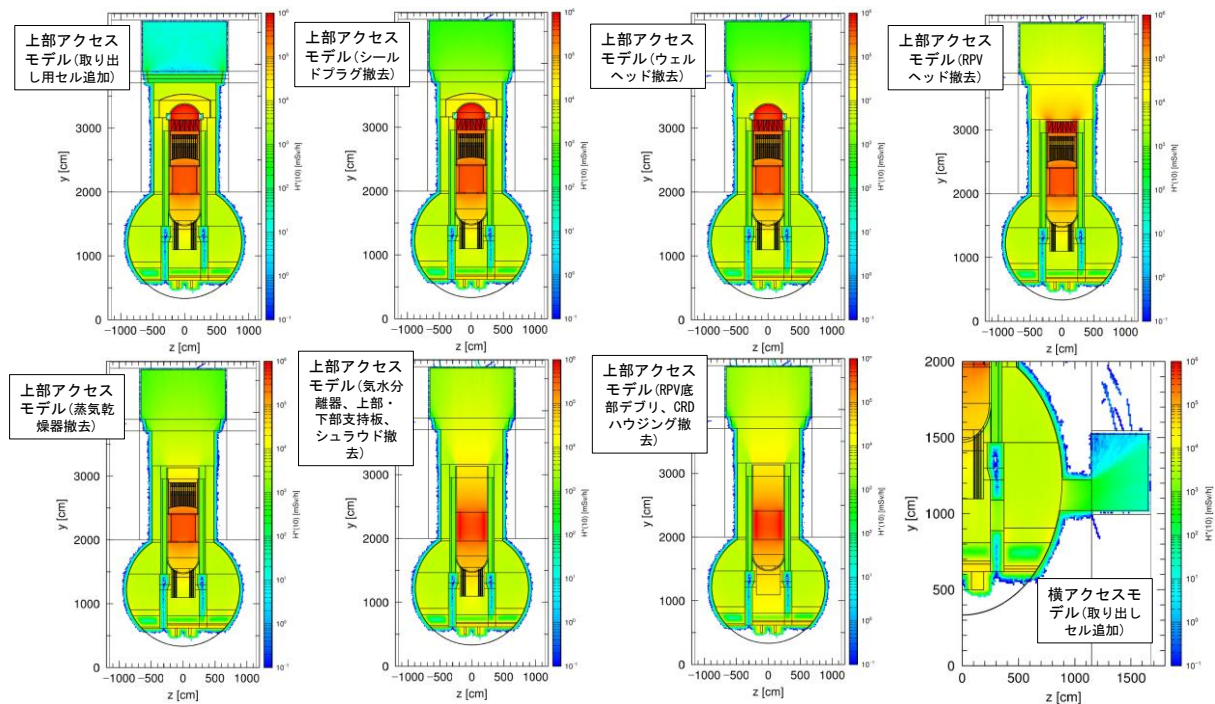


図 3. 1. 2-12 燃料デブリ取り出し工程における線量率分布の変化

(9) まとめ

燃料デブリ取り出しを含む一連の廃炉作業を加速するためには、プラント内の線量率分布をなるべく正確に把握し、最適な廃炉工程を策定することが重要となる。そこで、信頼性が高い核データ及び高度な理論計算（燃料の燃焼計算、構造材の放射化計算、IRIDによる事故進展解析、粒子輸送モンテカルロ計算）と1F内部調査による線量率実測値を組み合わせ、時々のもっとも確からしい線量率分布を得るための「最確線量率分布評価手法」の開発を行った。

平成27年度から平成28年度にかけては、長岡技術科学大学から提供を受けた最新知見に基づくデータを利用して線源データを作成するとともに、1号機に対するガンマ線輸送計算のための3次元プラントモデルの構築を行った。また、単位線源に対する線量率分布の応答関数を作成し、内部調査(B1調査)で得られた線量率実測値を使った逆解析を実施したが、その後、IRIDにより新たな内部調査(B2調査)の結果が公表された。

平成29年度には、「最確線量率分布評価手法」の確立を目指し、B2調査で新たに得られた知見を反映し、3次元プラントモデルの改良を行った。この改良モデルを使用して、これまでに実施された3回の内部調査(2012年1st entry、2015年B1調査、2017年B2調査)で得られたほぼすべての線量率実測値を反映し、燃料デブリ取り出し開始が予定されている2021年末における線量率分布の最確予測値を得た。実測時期、水位、測定場所が異なる線量率実測値と整合する1Fプラント内の連続的な線量率分布を示したのは、世界でも初めてのことである。さらに、部位ごとの線量率予測値に対する信頼性について考察を行うとともに、本研究で得られた知見に基づき、未だ成功していない放射線計測によるデブリ探査方法についての提言を行い、連携している英国チームと海上技術安全研究所が中心となって実施している水中デブリ探査技術の開発を支援した。

最後に、気中上アクセス方式と横アクセス方式を想定して、燃料デブリの取り出し工程を模擬した解析を行い、本研究で開発した最確線量率分布評価手法は、放射線遮へい方策の検討、工法

の最適化、事前に必要な内部調査の検討などに活用できることを示した。今後の展開として、本研究で開発した手法を2号機及び3号機にも適用し、1F 廃炉加速に一層の貢献をすることを目指す。

参考文献

- [3.1.2-1] 技術研究組合 国際廃炉研究開発機構, “研究開発, 平成 27 年度研究開発成果, 平成 28 年度研究開発成果,” <http://irid.or.jp/research/> (2018 年 3 月 31 日現在)
- [3.1.2-2] The Institute of Applied Energy, Information Portal for the Fukushima Daiichi Accident Analysis and Decommissioning Activities, <https://fdada.info/> (2018 年 3 月 31 日現在).
- [3.1.2-3] 原子力損害賠償・廃炉等支援機構, “東京電力ホールディングス(株)福島第一原子力発電所の廃炉のための技術戦略プラン 2017,” <http://www.dd.ndf.go.jp/2017> (2018 年 3 月 31 日現在).
- [3.1.2-4] 日本原子力研究開発機構, “福島原子力事故情報アーカイブ (FNNN),” <http://f-archive.jaea.go.jp/index.php> (2018 年 3 月 31 日現在).
- [3.1.2-5] T. Sato, Y. Iwamoto, S. Hashimoto, et al., “Features of Particle and Heavy Ion Transport code System (PHITS) version 3.02,” J. Nucl. Sci. Technol. Vol. 55, pp. 684-690 (2018).
- [3.1.2-6] K. Okumura, K. Kojima, T. Okamoto, et al., “Nuclear Data for Severe Accident Analysis and Decommissioning of Nuclear Power Plant,” Proc. of the 2012 Symposium on Nuclear Data, Nov. 15-16, 2012, Kyoto Univ., Japan, JAEA-Conf 2013-002, pp. 15-20 (2013).
- [3.1.2-7] P. D. W. Bottomley, A. C. Gregoire, P. Carbol, et al., Fission Product and Actinide Release from the Debris Bed Test PHEBUS FPT4: Synthesis of the Post Test Analyses and of the Revaporisation Testing of the Plenum Samples,” Nuclear Engineering and Technology, Vol. 38, No. 2, Special Issue on ICAP’ 05, pp. 163-174 (2006).
- [3.1.2-8] A. G. Croff, “ORIGEN2 - A Revised and Updated Version of the Oak Ridge Isotope Generation and Depletion Code,” ORNL-5621 (1980).
- [3.1.2-9] K. Okumura, K. Kojima, K. Tanaka, “Development of multi-group neutron activation cross-section library for decommissioning of nuclear facilities,” Proc. of 2014 Symposium on Nuclear Data, JAEA-Conf 2015-003, pp. 43-47 (2015).
- [3.1.2-10] 川太徳夫, 白鳥芳武, 前川清貴, 新井修, 清水光盛, “「ふげん」発電所の主要構造材元素組成分析,” 日本原子力学会和文論文誌, 9(4), 405-418 (2010).
- [3.1.2-11] (独)原子力安全基盤機構, “原子力施設運転管理年報,” (平成 12 年版～平成 24 年版)
- [3.1.2-12] 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), “平成 26 年度補正予算 廃炉・汚染水対策事業費補助金 (事故進展解析及び実機データ等による炉内状況把握の高度化) 完了報告書, 平成 28 年 3 月.
- [3.1.2-13] 東京電力株式会社, “1号機原子炉格納容器(PCV)内部調査の結果について,” 平成 24 年 10 月 22 日.
- [3.1.2-14] K. Shibata, O. Iwamoto, T. Nakagawa, et. al, “JENDL-4.0: A New Library for Nuclear Science and Engineering,” J. Nucl. Sci. Technol. 48(1), pp. 1-30 (2011).
- [3.1.2-15] 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 オペレーションフロア調査結果(中間)について,” 2017 年 3 月 30 日.
- [3.1.2-16] 奥村啓介, Eka Saptia Riyana, 佐藤若英, 他, “福島第一原子力発電所廃炉のためのプラント内線量率分布評価と水中デブリ探査に係る技術開発 (5)格納容器内の線量率分布予測,” 日本原子力学会 2017 年秋の大会 [3L02].

[3.1.2-17] K. Okumura, E. S. Riyana, S. Sato, "A Method for the Prediction of the Dose Rate Distribution in a Primary Containment Vessel of the Fukushima Daiichi Nuclear Power Station," 9th Int. Symposium on Radiation Safety and Detection Technology, July 10-14, 2017, Nagoya, Japan, (accepted for Progr. Nuc. Sci. Tech.)

3.1.3 局所線量評価手法の開発（再委託先：日本原子力研究開発機構）

(1) はじめに

高線量環境での廃炉工程作業で作業員の安全を確保するためには、プラント内線量率分布の評価が必須である。そこで、最新知見を反映した核データと高度な計算技術を、1F 炉内調査による線量率の実測値と組み合わせて、プラント内の最確な線源分布と廃炉工程における線量率分布を評価する技術を開発する。本研究開発はこのうち、炉内調査による線量率の実測値を計測するための遠隔局所線量計測手法の開発を目的としたもので、計算による予測評価に対し、実測値による境界条件を与えることにより、よりの確な線量分布評価を実現するために不可欠な技術開発である。

本技術開発では、線量評価を実現するため、 γ 線の影響を受けやすい電子機器類によるセンサーを炉内に一切持ち込まないことを前提として、強い γ 線環境において線量評価を実現しようとするものである。この実現のため、耐放射線性光ファイバーの先端に放射線により発光する極小シンチレータを取り付け、光ファイバーによりシンチレーション光を強い γ 線の存在する領域外に伝送し、 γ 線の影響の無い領域で微弱光を検出することにより局所の線量（ γ 線フラックス）を計測することを基本概念とした。その概要と適用概念を図 3.1.3-1 に示す。

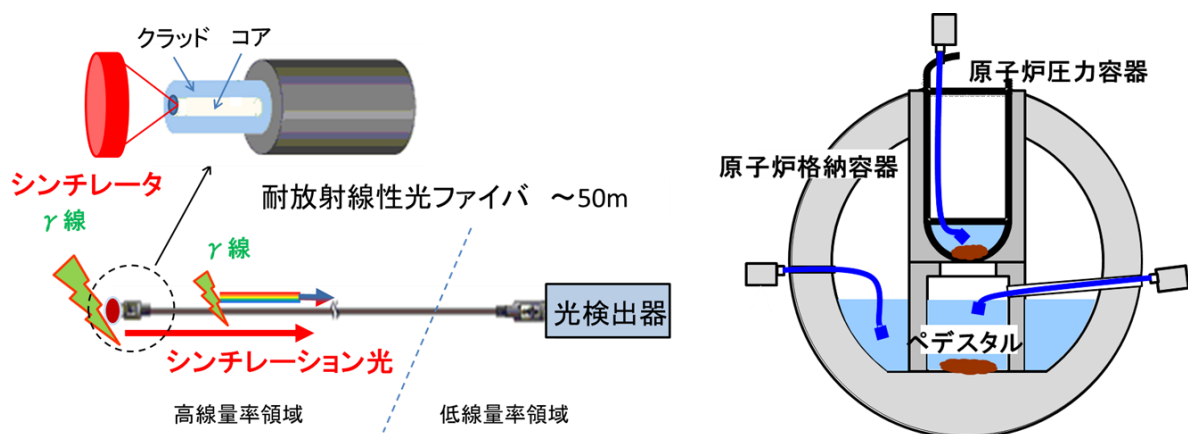


図 3.1.3-1 局所線量計測手法の概要と炉内計測への適用概念

本技術開発では、放射線による光ファイバー自身からの蛍光によるノイズ成分を除去するための波長選択型の光検出系整備と、極小シンチレータとして、従来から発光現象が観測されているルビーシンチレータ、ルビー以外の発光結晶について、耐放射線性光ファイバーの波長透過特性とのマッチングを考慮してその特性を調べた。さらに、Cs など、環境支配的な低エネルギーガンマ線と燃料デブリからの高エネルギーガンマ線とを区別することを念頭に、平成 29 年度には極小体積においても高エネルギーガンマ線の吸収を担保できる新規高密度シンチレータの選定を行い、発光波長成分や放射線の線量率依存性を観測することで利用の可能性を検討した。

(2) 波長選択型の光検出系の整備（H27～H28）

本技術開発においては、耐放射線性光ファイバーの先端に取り付けた極小シンチレータによっ

て、まず、飛来する γ 線の光子数レートを計数計測（低から中線量率相当）または光電流計測（高線量率相当）により観測する計測系を開発し、デブリの存在を推測する手法の確立を目指す。さらに、シンチレータを選ぶことにより、 γ 線の飛来頻度が高い状態でのエネルギー分解計測の可能性にチャレンジする。このためには、シンチレータの発光波長や発光時間などの特性を把握し、耐放射線性光ファイバーとのマッチングを図ることや、放射線によるファイバー内部での迷光発生に伴うS/Nを改善することといった問題を克服する必要がある。

高線量場においては、耐放射線性光ファイバー（石英）自身からの蛍光成分が、400 nm～600 nmに広く分布しており、この蛍光量は、全波長成分で積分した光量全体と比較すると、シンチレータの蛍光成分に対して無視できない量であること、700 nm～750 nmの成分のみでシンチレータからの発光成分とファイバー自身の発光成分を比較すれば、シンチレータからの光信号を高いS/Nで計測可能となることが判明した。そこで、観測波長帯域の最適な選択が重要であり、波長選択型の光検出系の整備が不可欠である。

本波長選択型の光検出系の特長は、透過効率の高い短焦点距離の分光器を活用し、これを波長選択型のバンドパスフィルタとして使用したことである。これにより、シンチレータから放出される蛍光の波長成分を明らかにするとともに、入出力スリットの幅を調整することによりバンドパスフィルタとして動作させ、シンチレータからの任意の波長帯域の発光波長成分のみを選別してより高いS/Nの計測が実現できるシステムとした。概要を以下に示す。

①構成及び仕様

波長成分を分別するモノクロメータ、高次回折成分を遮断する高次カットフィルタ及びモノクロメータの波長を自動的に掃引する波長スキャナから構成された蛍光分光システムとした。

(1)モノクロメータ

- ・ 光入力端子：SMA 光ファイバーコネクタ
- ・ 回折格子：1200本/750 nm ブレーズ
- ・ 焦点距離：100 mm
- ・ 口径比F：3.0
- ・ 波長動作範囲：0～1400 nm
- ・ 波長精度：±1.0 nm 以下
- ・ 最大分解能：1.0 nm(半値幅 スリット幅に依存)

(2)バンドパスフィルタ動作仕様

- ・ 分散幅：8 nm/mm（回折格子：1200本/750 nm ブレーズの場合）
- ・ スリット幅：0～4 mm
- ・ バンドパス性能：透過バンド幅＝分散幅×スリット幅
例) スリット幅 4 mm の場合、バンド幅は 32 nm (750 nm 近傍)

整備した波長選択型光検出の概要を図 3.1.3-2 に示す。

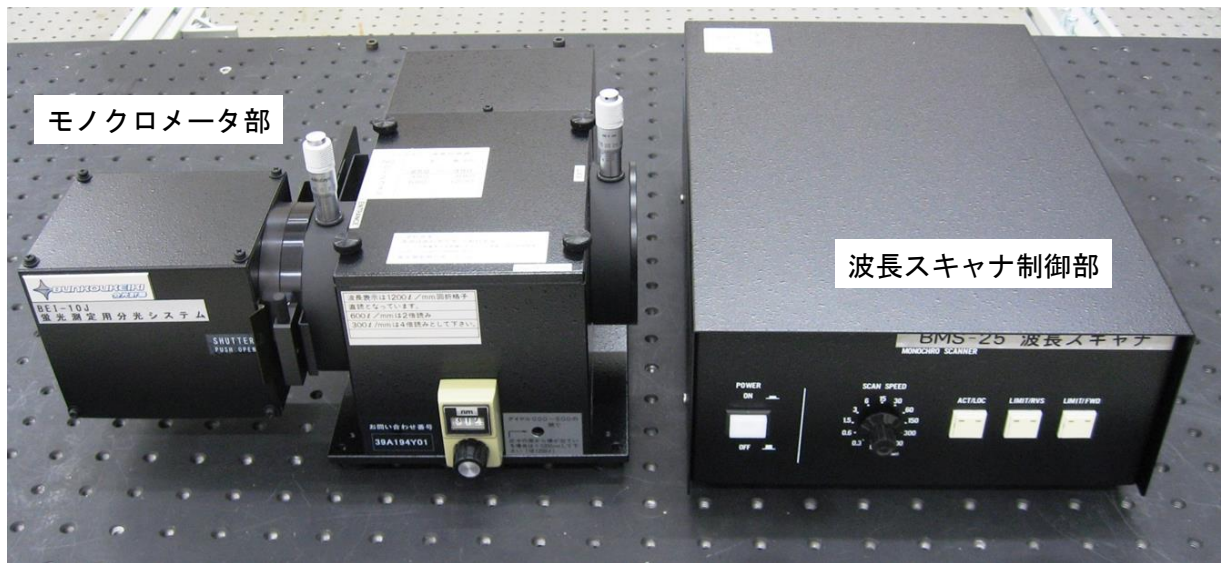


図 3. 1. 3-2 波長選択型光検出の概要

高放射線場においては発光素子以外に光ファイバー自体も蛍光を発することから、発光素子からの発光波長成分を明らかにするとともに、発光素子からの蛍光成分のみをフィルタリングし、S/Nの向上を図った。

②波長選択型光検出系の性能

ルビーシンチレータを用いたガンマ線計測に、当該波長選択型光検出器を適用し、S/Nの改善について確認した。線量率 3 kGy/h における代表的な発光スペクトルを図 3. 1. 3-3 に示す。

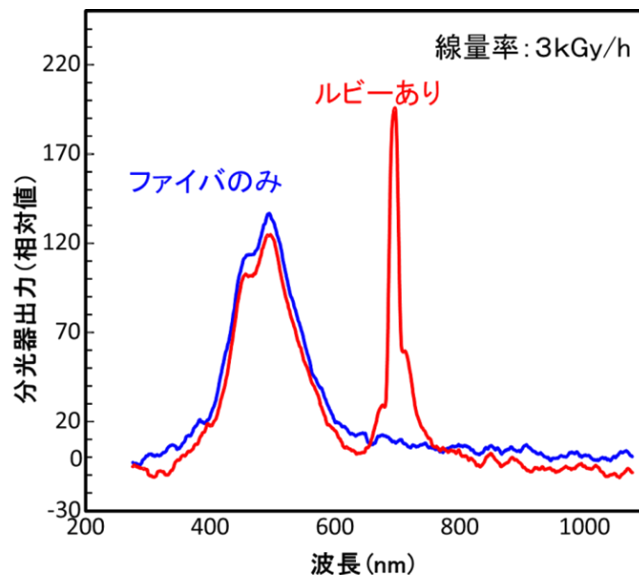


図 3. 1. 3-3 ルビーシンチレータプローブからの代表的な波長分布観測例

500 nm 近傍の線幅の広い発光信号は、光ファイバー自体の発光である。波長選択型光検出器を用いない場合の全光信号強度は、波長全域にわたる信号強度の積算値に相当する。ファイバーのみの場合とシンチレータの有る場合を比較すると、表 3. 1. 3-1 のようになる。

表 3.1.3-1 波長選択の有無による信号強度の相対比較と S/N の改善

	波長選択無し	波長選択有り
ファイバーのみ	3.7×10^5	5.8×10^3
シンチレータ付	3.9×10^5	8.3×10^4
信号成分 (増加分)	2.0×10^4	7.7×10^4
S/N	0.05	13.3

注) 数値は、波長選択無し、波長選択有りのそれぞれの場合における相対値を示すもので、波長選択の有無の間で直接比較することはできない。

シンチレータが無い場合でも光ファイバーからのブロードな発光により、全波長帯域の信号強度の積算は大きな値を示す。これに対してシンチレータの有る場合は、690 nm 近傍の信号強度が大きいものの波長帯域が狭いことから、信号成分の比は全体の 5 %程度と小さい。

一方、波長選択型光検出器の観測中心波長を、ルビーシンチレータの発光波長である 690 nm に合わせ、観測時のバンド幅を約 32 nm (分散幅 : 8 nm/mm、スリット幅 : 4 mm、バンド幅 32 nm) とした場合のバックグラウンド (光ファイバーのみの信号) に対する信号強度を比較すると、表 3.1.3-1 に示すように、S/N は、波長選択しない場合に比べ飛躍的に改選され、約 13 となった (図 3.1.3-3 において 690 nm 近傍のみに着目した場合に相当。)。この結果は、波長選択をしない場合の 250 倍以上の S/N 改善となっており、当該波長選択計測系が有効であることを示している。

(3) 各種シンチレータの放射線による蛍光発光観測 (H27~H29)

①はじめに

シンチレータの選定では、Cs など、環境支配的な低エネルギーガンマ線と燃料デブリからの高エネルギーガンマ線とを区別することを念頭に、極小体積においても高エネルギーガンマ線の吸収を担保できるシンチレータを見出し、その発光波長成分や放射線の線量率依存性を観測した。シンチレータの選定については、極小体積においても高エネルギーガンマ線の吸収を担保する必要がある。そこで、シンチレータ内で放射線が吸収される長さを表す放射長に着目した。既存のシンチレータの密度と放射長との関係を図 3.1.3-4 に示す。放射長の短い素子は高密度であることが分かる。そこで、新規シンチレータとしては、できるだけ高密度であること、耐放射線性光ファイバーの透過波長を考慮して、近赤外発光が見られることを基本的な選定基準とした。本研究では、これまで放射線発光素子として、まず実績の有るルビーシンチレータにつ

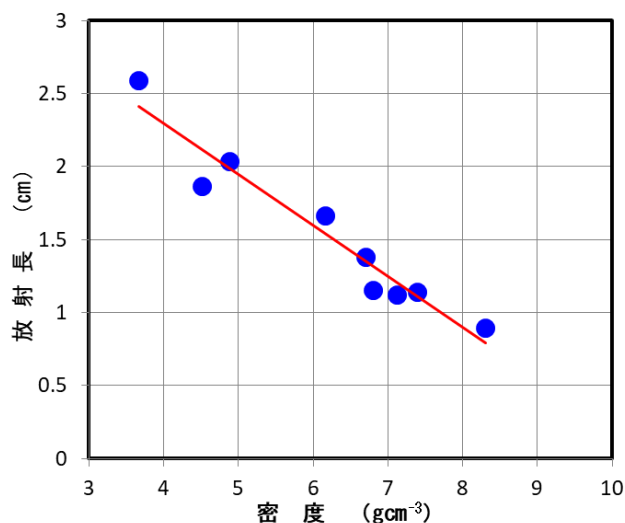


図 3.1.3-4 既存シンチレータの放射長と密度

いて性能を確認したのち、ルビー以外の素子として、近赤外領域に発光成分が確認されているNd:YAG結晶について発光特性を取得し、平成29年度には、既存の高密度シンチレータであるタングステン酸鉛(PbWO₄)、そして新規の高密度シンチレータとして、酸化ルテチウム焼結体(Lu₂O₃)を選定し、ルビーシンチレータ同様、ガンマ線照射時の発光特性を調べてその特性を比較した。シンチレータとして用いた発光素子の概要を表3.1.3-2に示す。

表 3.1.3-2 ルビー (Cr:Al₂O₃) 及びルビー以外に選定した発光素子

	発光素子	試験体サイズ	密度 (g/cm ³)
1	Cr:Al ₂ O ₃ (ルビー)	Φ 2.5 × 0.5 mm	4.0
2	Nd:YAG	Φ 10 × 5 mm	4.5
3	PbWO ₄	22 × 22 × 14mm	8.3
4	Lu ₂ O ₃ (0.5 vol% Ti doped)	Φ 6 × 5 mm	9.4
5	Lu ₂ O ₃ (0.5 vol% Nd doped)	Φ 6 × 5 mm	9.4

②試験方法

量子科学研究開発機構高崎量子応用研究所のCo-60照射試験施設を活用し、ガンマ線を各種シンチレータに照射することで、その発光特性を取得した。放射線により発生した蛍光は、既存の耐放射線性光ファイバーを介して分光計測装置に導入した。ルビーシンチレータを用いた試験体系を図3.1.3-5に、平成29年度に実施したその他の各シンチレータを用いた場合の試験体系を図3.1.3-6に示す。

ルビー以外の試験においては、小型結晶ボックスに各シンチレータを入れ、これをCo-60線源近傍に設置した移動ステージ上に固定し、耐放射線性光ファイバーで照射室外に蛍光を搬送して分光器で発光波長成分を観測した。線量率は、移動ステージを用いて線源からの距離を変えることで変化させた。ステージの位置と線量率の関係を図3.1.3-7に示す。

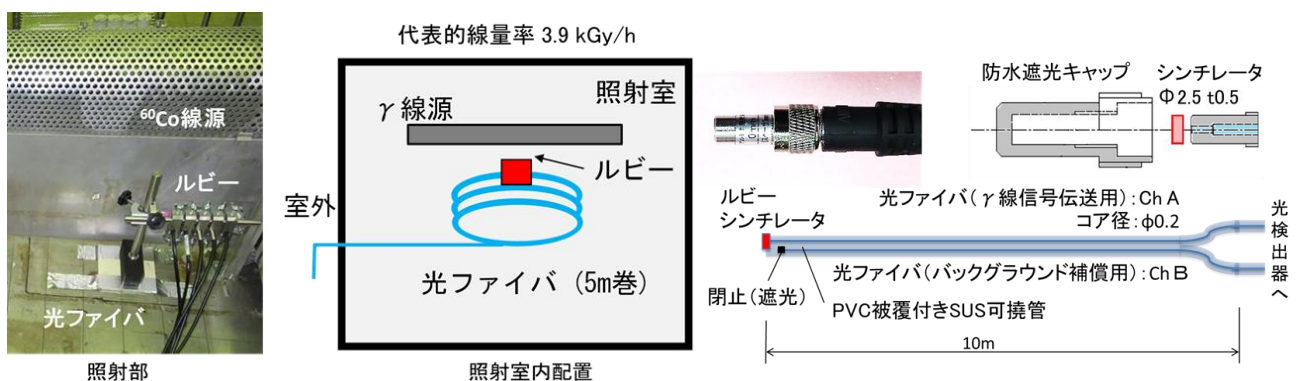


図 3.1.3-5 ルビーシンチレータの放射線照射体系

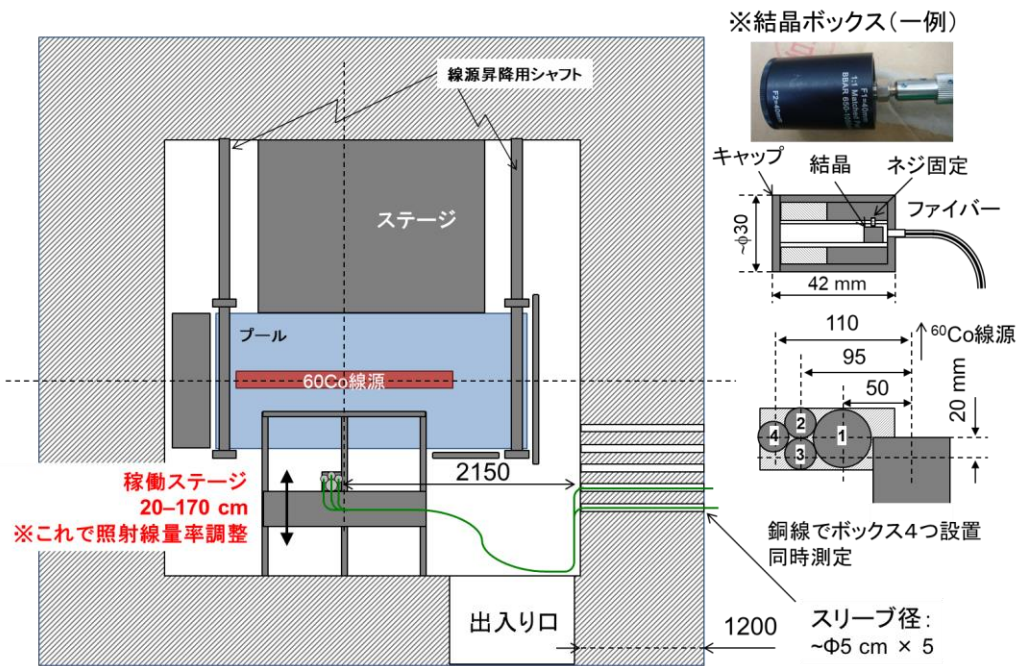


図 3. 1. 3-6 ルビー以外の各種シンチレータの放射線照射体系

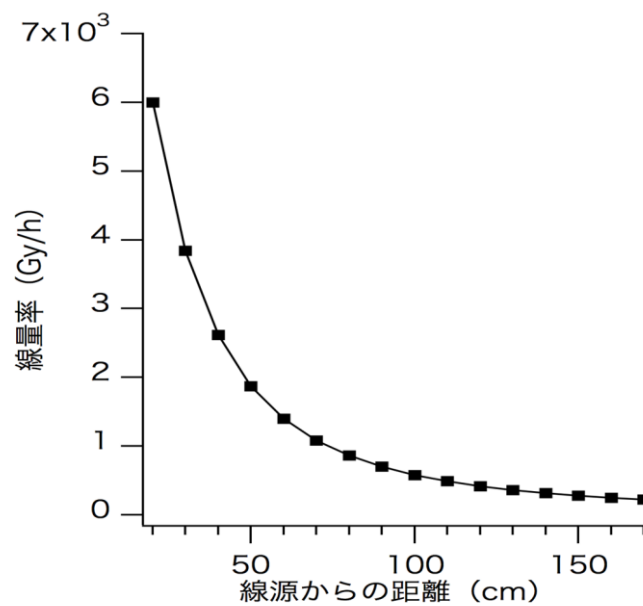


図 3. 1. 3-7 線量率の線源からの距離依存性

③各シンチレータのガンマ線による発光特性

②で示したガンマ線照射環境下において発生する各シンチレータからの蛍光の波長分布を測定した。ルビーシンチレータからの代表的な蛍光の波長分布を図 3. 1. 3-3 に、平成 29 年度に実施したルビー以外のシンチレータからの蛍光の波長分布を図 3. 1. 3-8 に示す。照射線量率は、ルビーの場合は約 3 kGy/h (水に対する吸収線量率として評価。)、ルビー以外の試験については、約 6

kGy/h である。ルビー以外のシンチレータの計測条件は、計測時間（露光時間）が 2 秒間、これを 10 回繰り返した積算値で示した。

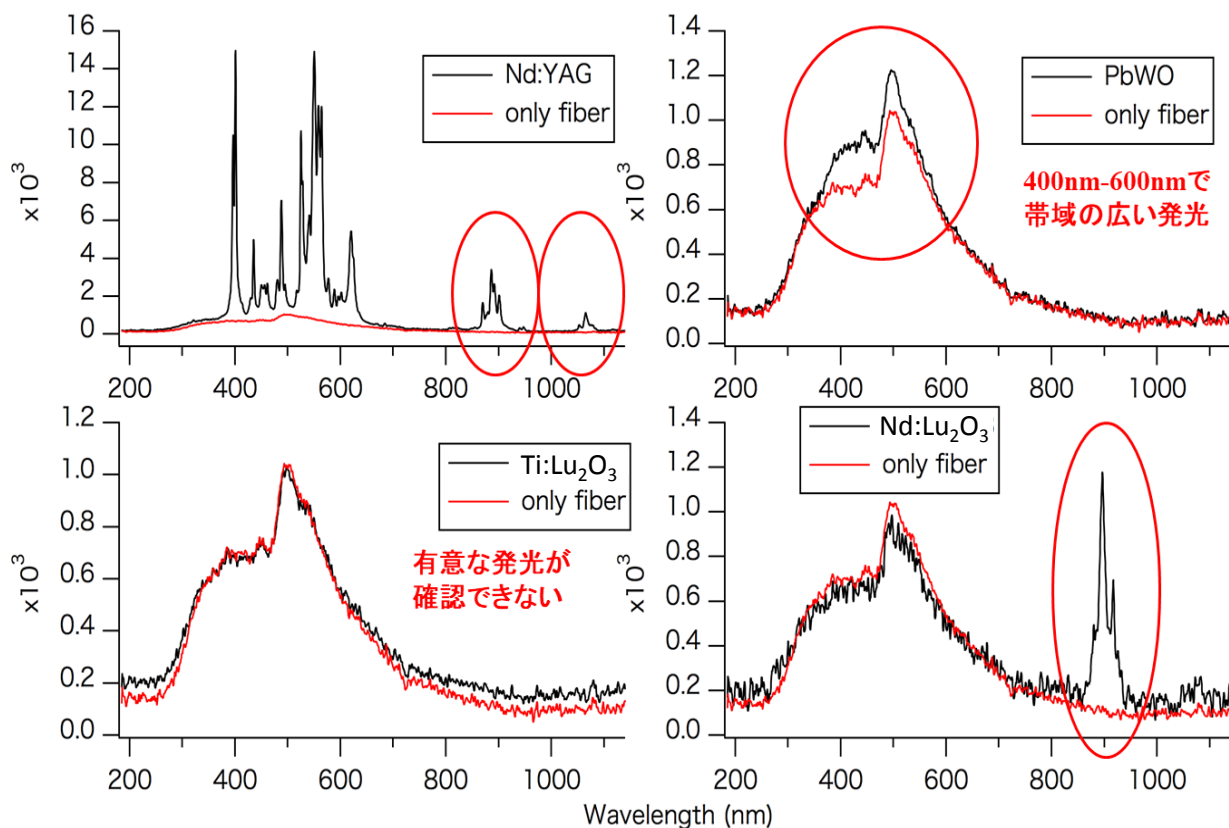


図 3. 1. 3-8 各種発光素子の放射線照射による蛍光の波長分布観測例

以下に各シンチレータの発光波長特性をまとめた。

【Cr:Al₂O₃ (ルビー)】

ガンマ線による特長的な蛍光が、690 nm に出現する。出力特性は良好であるが、光ファイバーからの広帯域な蛍光も 700 nm 近傍まで有ることから、ルビーのみの発光波長である 690 nm 近傍のみに着目して計測する必要がある。この波長域で光ファイバーからの蛍光を分離計測することは困難であるため、低線量率領域では差分計測などを考慮する必要性が有る。

【Nd:YAG】

ルビー以外では発光強度が最も強い。特に、赤丸で示した 900 nm と 1060 nm (レーザー発振波長) での発光成分が特徴的な発光波長である。この波長領域では、光ファイバー自身からの蛍光成分と明確に分離して観測可能である。また発光成分は光ファイバーからの蛍光成分に比べて十分大きいことから、高い S/N で計測が可能となる。

【PbWO₄ (タングステン酸鉛)】

医療用 PET などの高性能化のため、小型で時間分解能の良い放射線検出素子として開発された新規のシンチレータで、蛍光寿命が短く 400 nm~600 nm の蛍光を発生する。観測結果もこれを反映したものとなっている。光ファイバー自身からの蛍光成分とほぼ同一の波長帯域であること、耐放射線性光ファイバーの透過波長域である近赤外領域 (700 nm 以上) より短

波長領域であり、強い放射線領域では透過特性が著しく悪くなる。高密度素子という意味では放射線検出に有利であるが、長時間に及ぶ炉内その場放射線計測には適さないと判断される。

【Ti:Lu₂O₃ (Ti 0.5 %含有酸化ルテチウム)】

Ti 含有アルミニウム酸化物の場合は、700 nm から 900 nm の範囲でブロードな蛍光が観測され、これがレーザー発振に利用されているが、酸化ルテチウムを母材としてガンマ線を照射した本試験においては、明確に蛍光を観測することは困難であった。発光しないか、発光しても波長帯域がブロードでその強度が低く、線量計測には利用できないと判断される。

【Nd:Lu₂O₃ (Nd 0.5 %含有酸化ルテチウム)】

Nd:YAG 同様、900 nm 近傍に、Nd³⁺イオンからの顕著な蛍光が観測されている。発光強度も強く、光ファイバー自身の蛍光と重ならないこと、耐放射線性光ファイバーの透過波長域であることなどの理由から、局所線量評価用シンチレータとして利用できる可能性が高い。

④ 各シンチレータの発光強度の照射線量率依存性と評価

これまで良好な蛍光が観測されているルビーシンチレータについて、特徴的な蛍光である 690 nm 近傍の蛍光強度の線量率依存性を測定した結果を図 3.1.3-9 示す。また、平成 29 年度に実施した③の観測結果からガンマ線照射により蛍光が確認された Nd:YAG、PbWO₄、Nd:Lu₂O₃ の 3 種類のシンチレータについて、蛍光出力の照射線量率依存性を測定した。線量率を変えた場合の蛍光の波長分布(蛍光スペクトル)の観測例を図 3.1.3-10 に示す。図 3.1.3-11 は、発光が顕著な Nd:YAG と Nd:Lu₂O₃ について、発光波長領域を拡大したものである。これらの測定では、光ファイバーからの蛍光成分の影響を抑制するため、実験結果からあらかじめ取得しておいた光ファイバーからの蛍光成分を差し引いた。さらに、線幅が狭く、明確な蛍光が観測された Nd:YAG と Nd:Lu₂O₃ については、それぞれの発光波長成分についてその強度の線量率依存性を調べた。結果を図 3.1.3-12 に示す。

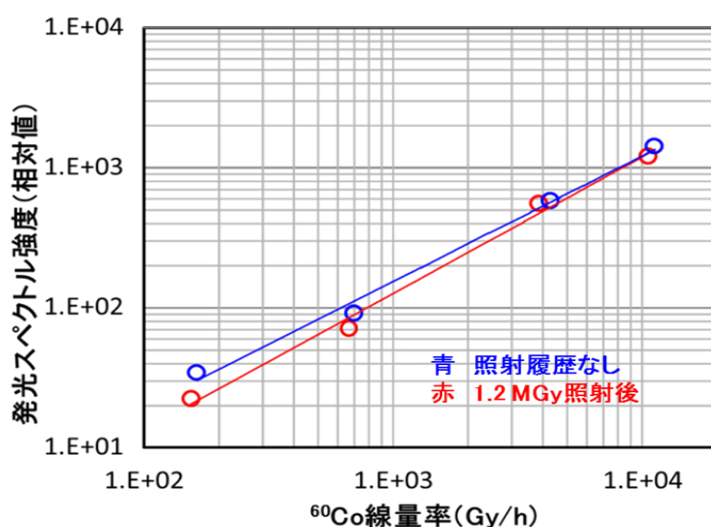


図 3.1.3-9 ルビーの放射線照射による蛍光強度の線量率依存性観測例

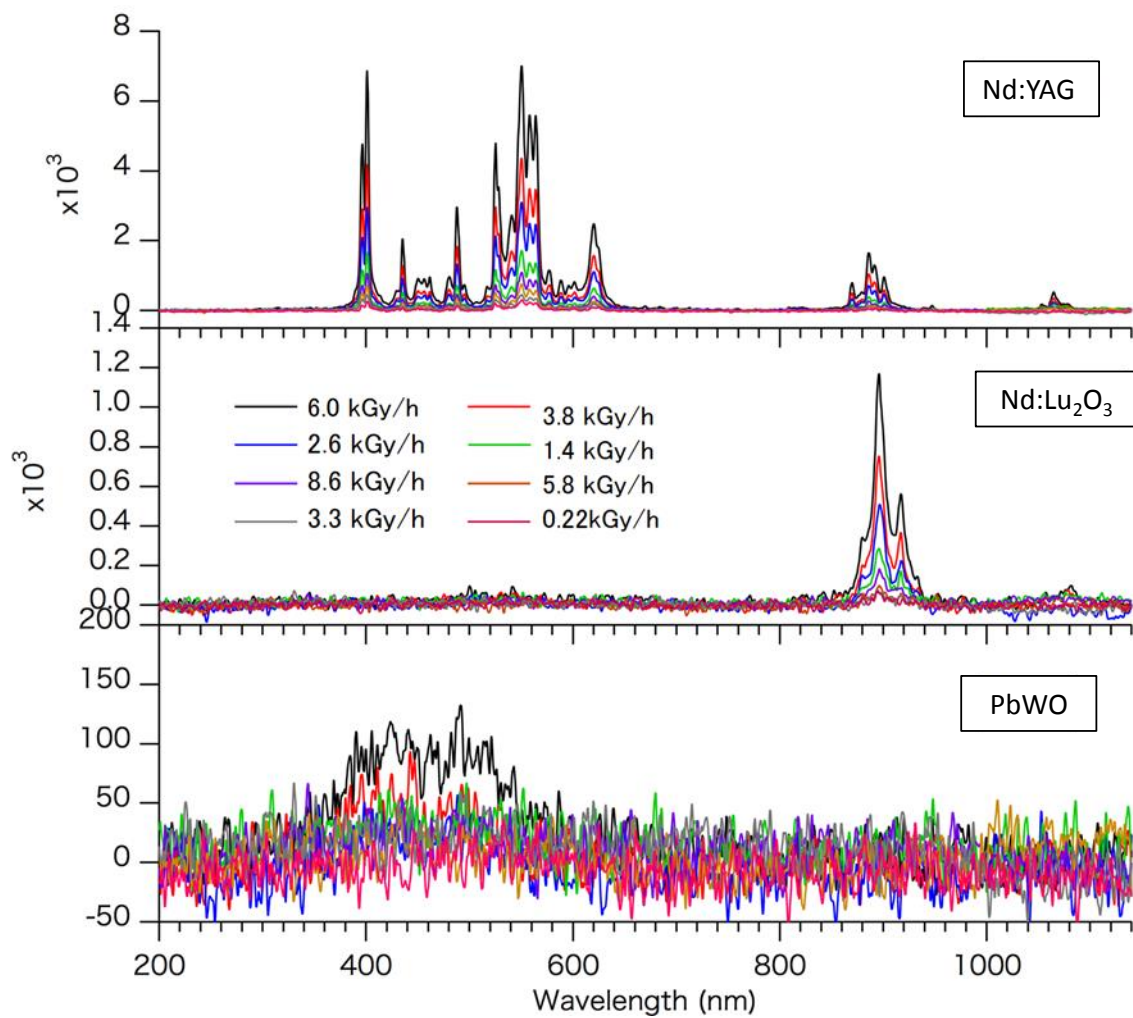


図 3.1.3-10 ルビー以外の素子における蛍光スペクトルの線量率依存性観測例

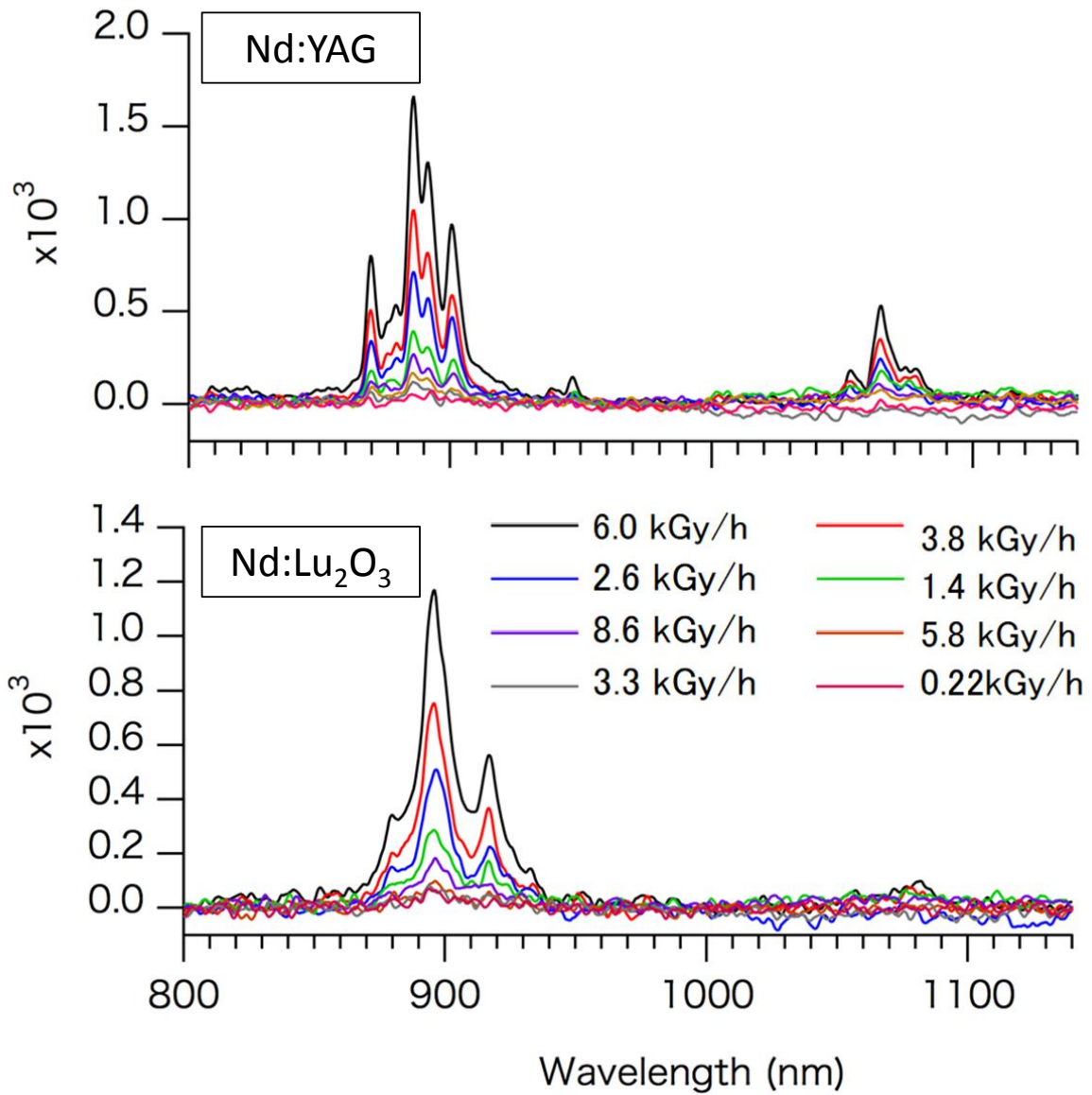


図 3. 1. 3-11 Nd:YAG と Nd:Lu₂O₃ の蛍光スペクトルの線量率依存性観測例（発光領域拡大）

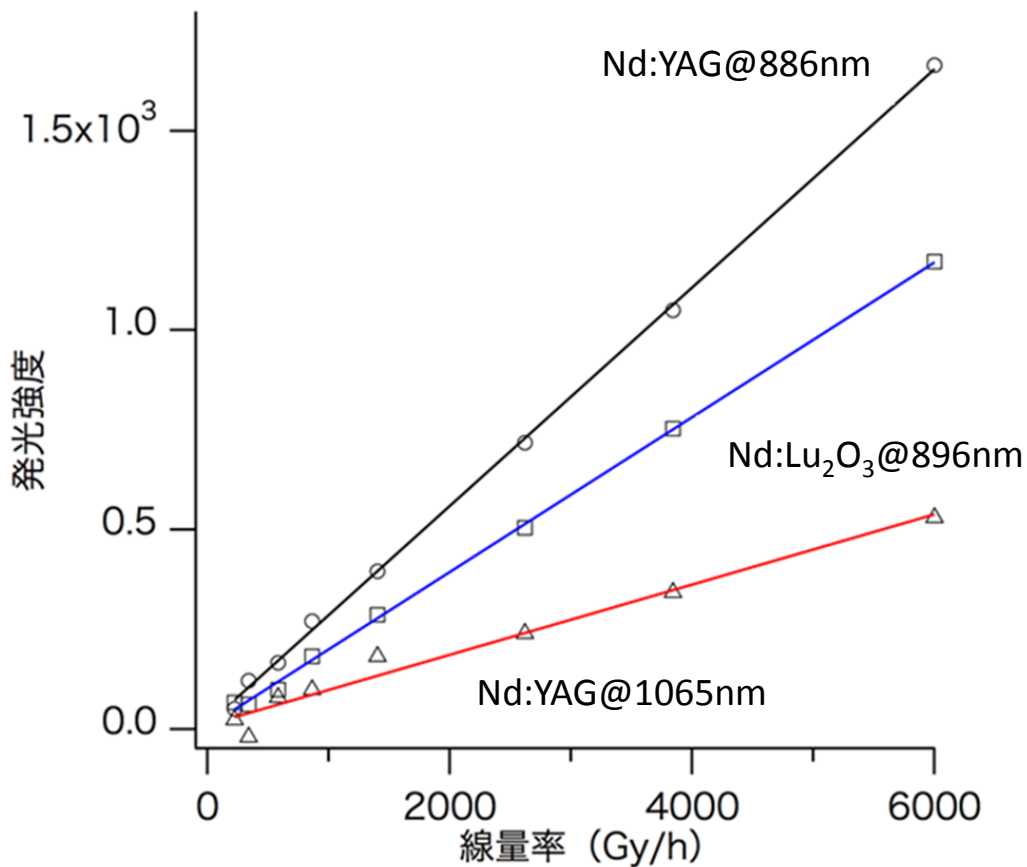


図 3.1.3-12 Nd:YAG と Nd:Lu₂O₃ の蛍光強度の線量率依存性

以下に各シンチレータからの蛍光出力の発光強度依存性に着目し、シンチレータの特徴、局所線量率評価プローブへの適用の可能性についてまとめた。

【Cr:Al₂O₃ (ルビー)】

ガンマ線により強い蛍光が観測され、広い線量率に対してその出力は線形性を持つ。光ファイバー自身の蛍光が素子からの蛍光と混在する波長であることから、差分が必要となる。また、蛍光波長が耐放射線性光ファイバーの透過波長域の境界領域にあることから、ファイバーの透過特性の劣化をモニタする必要も生じる。素子自体の密度が低いことから、ガンマ線のエネルギー応答性が悪い可能性が高い。計測の過程でガンマ線による劣化も見られなかった。このため、線量率計測ではなく、ガンマ線光子フラックスモニタとして活用できるものと考えられる。

【Nd:YAG】

ルビー以外では発光強度が最も強く、広い線量率に対してその出力は線形性を持つ。発光成分は光ファイバーからの蛍光成分員比べて十分大きいことから、高いS/Nで計測が可能となる。蛍光波長も光ファイバー自身からの蛍光成分と明確に分離して観測可能であり、波長

も耐放射線性光ファイバーの透過波長域と重なるため、透過率の劣化に対してはルビーほど慎重に考慮する必要は無い。計測の過程でガンマ線による劣化も見られなかった。ただし、素子自体の密度が低いことから、ルビー同様、ガンマ線のエネルギー応答性が悪い可能性が高い。このため、線量率計測ではなく、ガンマ線光子フラックスモニタとして活用できるものと考えられる。

【PbWO₄ (タングステン酸鉛)】

ガンマ線による蛍光の波長域がブロードで、発光量も少ない。線量率依存性が観測されるものの、発光波長が光ファイバー自身の発光波長とほぼ完全に重なること、耐放射線性光ファイバーの透過波長領域より短波長で、透過率の劣化により観測が厳しいこと、といった理由から、炉内におけるガンマ線モニタリングは困難な可能性が高い。一方、シンチレータとして設計された素子であること、密度が高いことから、線量率の低い領域で光ファイバーの劣化が無視し得る環境である場合においては、従来の放射線計測技術を適用し、エネルギー分解測定は可能であると考えられる。

【Nd:Lu₂O₃ (Nd 0.5 %含有酸化ルテチウム)】

Nd:YAG 同様、900 nm 近傍に、Nd³⁺イオンからの顕著な蛍光が観測され、発光強度も比較的強く、線量率に対して良好な線形性を持つ。蛍光波長は、Nd:YAG 同様、光ファイバー自身からの蛍光成分と明確に分離して観測可能であり、波長も耐放射線性光ファイバーの透過波長域と重なるため、透過率の劣化に対してはルビーほど慎重に考慮する必要は無い。計測の過程でガンマ線による劣化も見られなかった。一方、ガンマ線のエネルギー応答性については、Nd:YAG の場合、素子密度が低いことが問題となる可能性があったが、Nd:Lu₂O₃ の場合、Nd:YAG に比べて密度が2倍であることから、エネルギー計測には有利であり、局所線量評価用シンチレータとして利用できる可能性が高いと考えられる。ただし、近赤外から赤外領域の蛍光は、一般的に時間応答性が良くない可能性が有ることから、今後、高線量率域での計数率(高速応答性)に対する詳細な性能評価が必要である。

以上の結果を総合的に判断し、局所線量評価プローブとしての適用性について定性的に比較した結果を表 3.1.3-3 に示す。

表 3.1.3-3 局所線量評価素子としての適合性

項目 \ 素子	Cr:Al ₂ O ₃	Nd:YAG	PbWO ₄	Nd:Lu ₂ O ₃
蛍光発光強度	◎	◎	×	○
光ファイバーとの整合性 従来ファイバー	△	◎	×	◎
可視域透過ファイバー	○	◎	△	◎
ガンマ線吸収(素子密度)	×	×	○	◎
総合評価	×	△	×	◎

表から明らかなように、ガンマ線光子フラックスだけでなく、線量評価の可能性を重視すると、これまでのところ、Nd を含有させたルテチウム酸化物 ($\text{Nd}:\text{Lu}_2\text{O}_3$) がその候補に挙げられることが分かった。

(4)まとめ

本技術開発では、放射線による光ファイバー自身からの蛍光によるノイズ成分を除去するための波長選択型の光検出系整備と、極小シンチレータとして、従来から発光現象が観測されているルビーシンチレータ、ルビー以外の発光結晶について、耐放射線性光ファイバーの波長透過特性とのマッチングを考慮してその特性を調べた。さらに、Cs など、環境支配的な低エネルギーガンマ線と燃料デブリからの高エネルギーガンマ線とを区別することを念頭に、平成 29 年度には極小体積においても高エネルギーガンマ線の吸収を担保できる新規高密度シンチレータの選定を行い、発光波長成分や放射線の線量率依存性を観測することで利用の可能性を検討した。

波長選択型の光検出系としては、開口数の大きな短焦点距離の小型分光器をバンドパスフィルタとして活用することで、光ファイバー自身からの蛍光とシンチレータからの蛍光とを分離計測し、S/N を飛躍的に向上できることを示した。

放射線による蛍光発光素子（シンチレータ）として、従来から利用していたルビーの発光特性と、ルビー以外のシンチレータとして $\text{Md}:\text{YAG}$ を、さらに平成 29 年度には、従来に比べ高密度なシンチレータ結晶として、密度約 8.3 g/cm^3 のタングステン酸鉛 (PbWO_4)、と密度約 9.4 g/cm^3 の Nd を含有させたルテチウム酸化物 ($\text{Nd}:\text{Lu}_2\text{O}_3$) の 4 つを選定し、ガンマ線による発光特性を取得した。 PbWO_4 では、400 nm から 600 nm までの広い波長帯域で有意な発光が確認されたが、耐放射線性光ファイバーの発光も確認された。 Nd^{3+} を 0.5 % 含有させた $\text{Nd}:\text{Lu}_2\text{O}_3$ の場合には、耐放射線性光ファイバーの透過波長領域である 896 nm で発光を確認することができた。また、発光強度はガンマ線線量率に対して良い線形性が有ること、照射による発光強度の有意な劣化が見られず、耐放射線性を有することが確認でき、局所放射線計測への適用が期待できることが分かった。

極小シンチレータと耐放射線性光ファイバーとを組み合わせた局所線量検出系の開発では、特にシンチレータが高密度であること（輻射距離が小さいこと）、発光波長が耐放射線性光ファイバーの透過波長域と重なることが重要であり、本研究によって従来には無かった新たなシンチレータを候補として選定することができた（表 3.1.3-3 参照）。今後の展開としては、極小シンチレータのエネルギー応答性（波高分析特性）に着目し、Cs-137、Eu-154、Co-60、Pr-144 が混在するガンマ線場で低エネルギーの Cs-137 を分離し、燃料デブリ特有の高エネルギーガンマ線信号のみが取得できるかどうかを確認することが最重要課題となる。その上で、本センサーの運搬手段となり得るマンチェスター大学が開発した ROV などへの搭載を想定し、極小シンチレータハウジング部や光ファイバーの最適化により炉内内部調査装置への適用を図ること、さらには、最確線量率分布評価手法の開発で示された評価結果（図 3.1.2-8 参照）を反映させ、PCV 内の部位にシンチレータを配置するシミュレーションを行って、センサーシステムとしての総合設計を行い、デブリの直接的な評価手法として確立したい。

3.2 水中デブリ探査技術の開発（再委託先：海上技術安全研究所）

水中デブリ探査技術の開発では、日英双方の開発機器を共有した共同試験を日本の試験装置や海外の原子炉を用いて実施するなど、英国チームとの密接な協力のもとに実施した。そこで、英国側の研究内容とその成果についても、本節において記載することとした。

3.2.1 ソナーシステムの開発（H27～H29）

本研究は、放射線の影響を受けない超音波を使って水面下にある燃料デブリの分布状況を把握することを目的にしている。東京電力福島第一原子力発電所（以下、1F と略記。）の原子炉格納容器内は狭い閉鎖空間であるため、超音波を使用すると壁や構造物などの反射によってマルチパス現象が発生しデブリ探査が困難であろうと予想された。このため本研究ではマルチパス現象を実験により確認するとともに、その対策を検討した結果、マルチパスに影響されずに探査が可能である方法を確認した。これら試験研究作業として平成 27 度（以下、H27）に実施したデブリ模擬試験体を対象としたマルチビームプロファイリング・ソナー（以下、マルチビームソナー。）の探査精度確認試験に引き続き、平成 28 年度には市販の回転式ビームスキャン・ソナー（以下、回転ビームソナー。）、フェイズドアレイ 3D スキャン・ソナー（以下、3D スキャンソナー。）も追加して、新たに製作した格納容器（PCV）模擬試験体を使用し、デブリ模擬試験体の種類、試験水槽及び水深などの試験条件を変えて一連の探査試験を実施した。これら試験結果より水中デブリ探査精度の評価を行った後、1F への適用において合理的で且つ探査精度の良いデブリ探査システムの開発を意図して、試験用水中デブリ探査装置（プロトタイプ）の基本設計を行った（以上平成 28 年度）。平成 29 年度には、英国チームが開発した水中探査装置に上記の回転ビームソナーを搭載（プロトタイプ-A と呼称。）し、檜葉遠隔技術開発センターにおいて実証試験を行ってその性能を確認した。また、その後の 1F における PCV 内部調査結果に対応して平成 28 年度設計の一部を変更し、プロトタイプ水中探査装置（プロトタイプ-B と呼称。）を製作した。以下では、平成 27 年度以降の試験研究として実施した市販ソナーの性能確認試験とこれらソナーを搭載して水中デブリ探査するための水中探査技術の開発結果について述べる。

(1) 実験装置（ソナーシステム）の構成と実験方法（H27～H28）

本研究では 3 種類のソナー（表 3.2.1-1）の性能を比較検討するため、①項以下に記すように大小 2 種類の水槽と浅海、並びに PCV 模擬試験体などを用いて探査性能試験を行った。

表 3.2.1-1 ソナーの仕様比較

名称、	型番	メーカー	方式	探査距離	発振子周波数	実効ビーム幅	ビーム数	備考	
マルチビームプロファイリングソナー	DT-100	IMAGENEX社	フェイズドアレイ クロスファンビーム方式	最大60 m (Slant depth:100 m) 最小0.5 m	240 kHz	狭域0.75° 中間1.5° 広域3°	デフォルト 480 選択可能 120, 240	発信子 形状: 170×70×90 mm 重量: 8kg	
回転ビーム式スキャンソナー	831L	IMAGENEX社	回転ビーム式: 360° /1.3 sec ステップ角: 0.9°	0.125～6 m 外周360度	2.25 MHz	1.4°	不明	発信子: 外径 61 mm,長さ308 mm 重量: 2 kg	
3Dスキャンソナー (echoMap95sv)	魚探ソナー	GT-51M-TH	GARMIN社	振動子GT52HW-TM12-pin	240 m	240-150 kHz	詳細不明	詳細不明	発信子 形状: 170×90×40mm 重量: 約5kg
	Panoptix™ PS30 Downward Transducer	PS30	GARMIN社	フェイズドアレイ方式	150 m	455/800 kHz	詳細不明	詳細不明	自動深度等高線作図機能付き(走行中リアルタイムで30cm間隔の深度等高線図を作図可能)

① 箱型小型水槽とソナー設置方法

箱型の小型ステンレス製水槽（幅 2 m、奥行 1 m、深さ 0.9 m）の上部にレールを取り付けてソナー支治具を摺動可能とし所定水深を直進させる構造とした。

② PCV 模擬試験体とソナー設置方法



図 3.2.1-1 PCV 模擬試験体

1F の原子炉 1 号機の格納容器下部 [3.2.1-1] を模擬した縮小模型を設計・製作し、既述の箱型ステンレス製水槽（以下、箱型水槽という）に組み込んで PCV 模擬試験体（図 3.2.1-1）とし、第 3.2.1 (3) 項以降に記すような一連の試験に供した。

PCV 模擬試験体の上部には半円形移動式治具を取り付け、この支治具にソナーを取り付けてソナーが PCV 模擬体の壁面と並行に進むような構造とした。

③ 大型円形水槽とソナー設置方法

上記箱型水槽の試験結果（後述第 3.2.1 (4) 項参照）から、次のような大型の円形型水槽（図 3.2.1-2）を用いて試験を行った。

- ・水槽の形状及び水深；
内径 5 m、高さ 10.5 m、深さ 5.6 m

④ 浅海で試験の場合

ソナーは小型船舶の船底中央に取り付けてあるため、画像の観察は操舵室に設置してある表示盤にて行った。同時にこのソナーは水深計測も可能であるから海底までの水深はこの表示器の値により決定した。

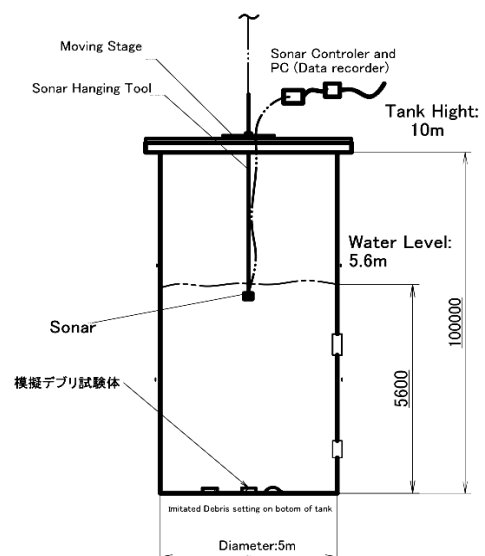


図 3.2.1-2 大型円形水槽における試験体系

(2) 供試体（デブリ模擬試験体）（H27～H28）

デブリ模擬体として下記を用意した[3.2.1-2]。

- ・ステンレス製直方体ブロック（表面粗度は 3 種類）
- ・ステンレス製円筒ブロック
- ・性状模擬デブリ試験体：銅スラグを混練し山なりに成型したもの（図 3.2.1-3：以下、性状模擬デブリと言う。）
- ・屋外より採集の岩石、などを準備した。

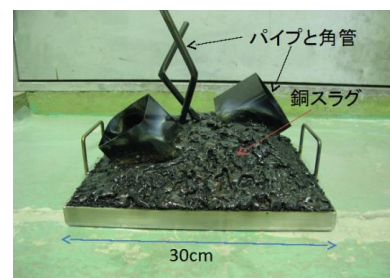


図 3.2.1-3 性状模擬デブリ

(3) 試験方法及び条件 (H27~H28)

3種のソナーの性能、及びマルチパスの影響を調べるため次のような試験方法で実施した。

① 箱型水槽及びPCV 模擬試験体の場合

マルチビームソナー及び回転ビームソナーとも水槽底部に模擬デブリ試験体を置き、ソナーを長軸（長方形水槽の長手）方向や短軸方向の移動、及びソナー角度を変えての試験を行った。また水槽内壁に吸音材（絨毯下敷材）を貼って超音波の吸音や反射状況も観察した他、実機PCV中の水はある程度の濁りが有ることも想定して、人工的に濁り水（陶芸用粘土紛を投入し濁度3~7 FTU。）にした水中での探査試験も行った。

② 大型円形水槽の場合

図3.2.1-2に示すような体系により、ソナーの移動方向は水底に置いたすべての供試体を探査可能なように、供試体中心間を結ぶ軸線上を通過する方向とした。

③ 浅海使用の場合

上記2種のソナーと比較のため魚群探知機として広く使用されている3Dスキャンソナー（表3.2.1-1）を装備している小型船舶にデブリ模擬体を積み込み、水深が5~7mの浅海にアンカーをおろして停留し、性状模擬デブリ試験体を海底に設置した。船底に敷設してあるソナーから下方への発信により、デブリ模擬体の探査試験を行った。

(4) 試験結果 (H27~H28)

① マルチビームプロファイリング・ソナーについて

1) 箱型水槽の場合

模擬デブリの画像は鮮明ではなく、形状の識別は困難であった。

2) PCV 模擬試験体使用の場合

ペDESTAL模擬体やPCV壁など、反射面が多いことによるマルチパスが多く、画像中に多くのノイズが混入するため画像による形状識別は困難であった。

3) 大型円形水槽の場合

ソナー移動方向は直線状のため、水底に置く模擬デブリ試験体類は各試験体中心の軸線上空を直線状に通過可能なように、一定間隔で並べて置いた（図3.2.1-4）。これをマルチビームプロファイリング・ソナーにより探査すると、粗さブロック及び性状模擬デブリとも画像上では僅かに信号が現れるので試験体ごとの存在は推定できるが、各試験体の設置間隔が20cm以上有るにも拘わらず、模擬デブリ別の形状識別は困難であった。



図3.2.1-4 水槽底部に置いた ①粗さブロック、②岩、③SUS円筒、④SUS平滑ブロック及び⑤性状模擬デブリ

② 回転ビームソナーについて

1) 箱型水槽の場合

デブリ模擬体及び水槽の壁とも明瞭な超音波信号の映像として捉えられている。表面に光沢が有って8 mmの溝が有る粗さブロックの場合、2本の棒状信号として表示されるため(図3.2.1-5)、溝(または段差部分)が有ることが推定できる。

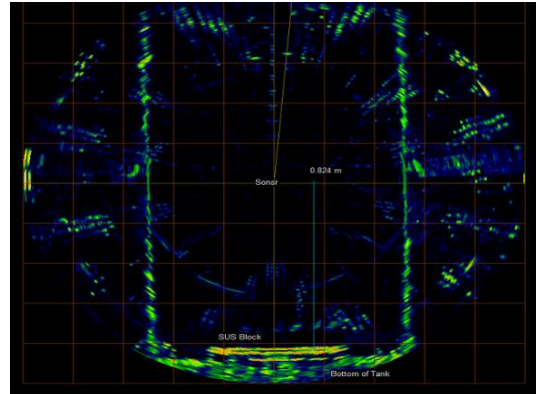


図 3.2.1-5 粗さブロック (8 mm) 3個の像

以上のように回転ビームソナーの場合、水深1 m程度であれば性状模擬デブリの外形のみならず、その上に立ててあるジルカロイ角管やパイプ(直径約10 mm)からの反射信号による映像も取得できた(図3.2.1-6)。また実際の1F炉ではPCV内の水が濁っている可能性も有るため、箱型水槽の場合についてのみ、水を人工的に粘土粉(陶芸用: 並こし、粒度0.3 mm以下、50~60メッシュ)により濁らせて模擬デブリの探査試験を行った結果、探査性能としては既述の探査例とほぼ同等であり、多少の濁りは問題無いと判断される。また水槽内壁に吸音材を付けると吸音材が無い場合より画像上のノイズが大幅に少なくなっており、対象物の信号が見易くなっている。

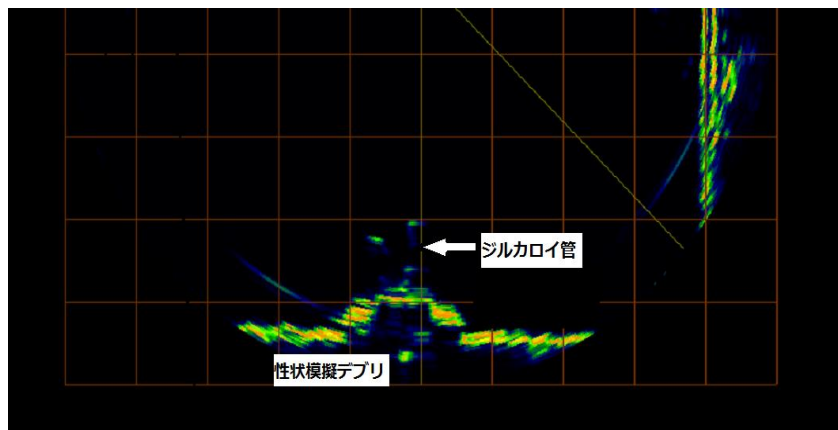


図 3.2.1-6 性状模擬デブリ (ジルカロイ管付き) の映像

2) PCV 模擬試験体の場合

ペDESTAL模擬体やPCV壁模擬体などによるマルチパスのため、画像上にかなりのノイズが入ることはやむを得ないが、デブリ模擬体の形状信号は明瞭に把握できた。

3) 大型円形水槽の場合

内径が5 mの水槽中であるため、相対的に小さいデブリ模擬体は画像中の大きさがかなり小さくなるが、その存在は確実に捉えられている(図3.2.1-7)。また性状模擬デブリより小さい岩やステンレスの円筒ブロック(それぞれ最大外径が12 cm程度。)に

についてもその存在を捉えることができた。これらは約 5 m 離れた位置から探査した結果である。

③ 3D スキャン・ソナーについて

前項までに記載の当所所有のソナーについての試験結果と比較のため、外部機関所有の 3D 型スキャン・ソナー（機種：Garmin PanoptixPS30）についても試験を行った。

このソナーは魚群探知機として小型船舶に取り付けられているため、水深 5~8 m の浅海での試験とした。ソナーで得られた画像の例を図 3. 2. 1-8 に示す。この画面の左半分が 3D 画像であり、海底の凹凸とデブリ模擬体が捉えられている。右画面でデブリ模擬体の他、これを吊るしているロープやカメラ及びそれらの支持棒も捉えていて分かり易く映像化されている。

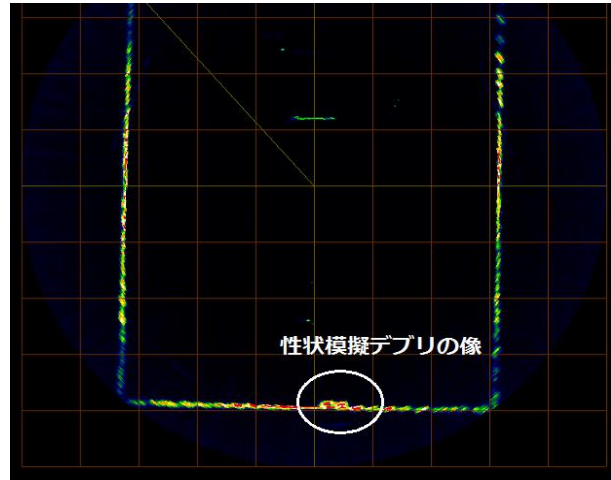


図 3. 2. 1-7 5.6 m 水底にある模擬デブリの像

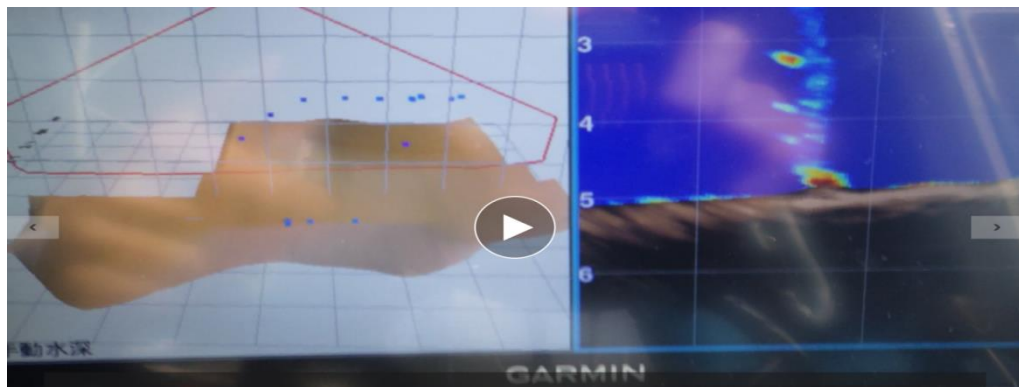


図 3. 2. 1-8 3D スキャン・ソナーで得られた海底の性状模擬デブリ像

以上述べたように、3 種のソナーを用いて実施した水中デブリ探査試験結果より、得られた探査画像を直感的に比較し易いよう、○×方式にまとめて表 3. 2. 1-2 に示した。

表 3. 2. 1-2 3種のソナーによる水中デブリ探査試験結果

比較項目		ソナーの種類		回転式ビームスキャンソナー				マルチビームプロファイリングソナー				3Dスキャンソナー			
				IMAGENEX社製 831L				IMAGENEX社製 DT-100				Garmin社製echoMap95sv他			
探査距離	供試体	表面状態	供試体表示信号	形状認識の程度		画像状態	供試体表示信号	形状認識の程度		画像状態	供試体表示信号	形状認識の程度		画像状態	
				リアルタイム	信号処理後			リアルタイム	信号処理後			リアルタイム	信号処理後		
近接 0.5~1m	SUSブロック	表面平滑(光沢有)	○	○	○	ゴーストあり	○	△	○	△	○	△	○	△	
		3mm粗さ(光沢有)	○	○	○	2種の区別可	○	△	○	△	○	△	○	△	
		8mm粗さ(光沢有)	○	○	○		○	△	○	△	○	△	○	△	
	性状模擬デブリ	不規則な凹凸(光沢有)	○	○	○		○	△	○	△	○	△	○	△	
	岩石	(光沢無し)	○	△	○		△	×							
	SUS円筒ブロック	(光沢有)	○	△	○		—	×							
	SUS灰色ブロック	(光沢無し)	○	△	○		○	×							
短距離 1~1.5m	SUSブロック	表面平滑(光沢有)	○	○	○	ゴーストあり	○	○	○	○	○	○	○	○	
		3mm粗さ(光沢有)	○	○	○	2種の区別可	○	○	○	○	○	○	○	○	
		8mm粗さ(光沢有)	○	○	○		○	○	○	○	○	○	○	○	
	性状模擬デブリ	不規則な凹凸(光沢有)	○	○	○		○	△	○		○	△	○	△	
	岩石	(光沢無し)	○	△	○		△	×							
	SUS円筒ブロック	(光沢有)	○	△	○		△	×							
	SUS灰色ブロック	(光沢無し)	○	△	○		△	×							
中距離 3~約5m	SUSブロック	表面平滑(光沢有)	○	△		ゴーストあり	△	×			—				
		3mm粗さ(光沢有)	○	△		区別不可	△	×			区別不可				
		8mm粗さ(光沢有)	○	△			△	×							
	性状模擬デブリ	不規則な凹凸(光沢有)	○	△	未実施		△	×	未実施		○	△	○	△	
	岩石	(光沢無し)	○	△			×	×							
	SUS円筒ブロック	(光沢有)	○	△			△	×							
	SUS灰色ブロック	(光沢無し)	○	△			×	×							

(5) 評価・検討 (H27~H28)

① ソナーの周波数の影響について

前項までの探査試験結果より、3種のソナーによる2D画像の解像度を比較・検討した結果、PCVのような閉鎖空間におけるデブリ探査用としては、発振子の超音波周波数がより高い、且つ軽量の回転ビームソナー831L型が優れていると判断された。

② マルチパスの影響と探査距離及び水深について

閉鎖空間における超音波のマルチパスによる影響については、PCV模擬試験体における試験の結果、虚像(ゴースト)の発生現象を確認した。このPCV模擬試験体の大きさは実物の約1/6であるため必然的に壁面間での超音波反射回数が増えるが、大型円形試験水槽では探査範囲が広く、ゴーストの発生は認められない。実機PCVの大きさは、ペDESTAL内径が約5mでペDESTALドライウェル内壁間距離も同程度以上有る。また、1号機PCVの滞留水の水深は、1号機は約1.9m、2号機は約0.3m、3号機は約6.3mであり、マルチパスの大きな影響は無いものと予想される[3.2.1-1]。(注:水位は今後調整される可能性が有る。)

③ 表面粗さの影響について

表面が平滑であると超音波が反射し易いため、水面や壁面との往復反射(マルチパス)によりゴーストが出易いことが分かった。しかしながら実際のデブリの表面は平滑であるとは考えにくいと、デブリに起因するゴーストは発生しにくいと推定できる。

④ ビーム形状と方向について

マルチビームソナーのビーム形状は平たい扇状で下方に向かって放射されるのに対し、回転ビームソナーはソナーを中心軸としたビームが360度回転している。このためマルチビームソナーが下方のみの情報取得であるのに対し、回転ビームソナーは外周すべての情報取得が可能である。実際のPCV内部空間は複雑に配管や機器類が配置されて

いるため、これら空間を探索するためには、上下、左右を同時に探索可能な回転ビームソナーが適していると判断される。

⑤ 濁りの影響について

人工的に水を（濁度 FTU 7～8 程度に）濁らせて探索試験を行った結果では、濁りの無い探索例とほぼ同等の画像であったため、今回実施した程度の濁りであれば、濁りの影響は無視できるものと判断される。

以上の結果より、今後使用するソナーとして回転ビームソナーである IMAGENEX 社製 831L 型を使用することとした。

(6) プロトタイプ-A 水中探索装置の開発 (H27～H29)

本研究における水中探索装置の開発は、英国チームと必要な機器やノウハウを共有する共同研究として進めたことと、年月の経緯に伴い格納容器内へのアクセス性が徐々に改善されつつあったことから、今後の情勢変化に対応できるように、水中探索装置はプロトタイプ-A とプロトタイプ-B の 2 種類を開発することとした。

- ・ 英国チーム開発の遠隔操作式水中ロボット (ROV) と日本チームのソナーシステムを組み合わせた水中探索装置をプロトタイプ-A と呼称する。
- ・ 平成 27 年度以降実施したソナーシステムによる水中デブリ探索試験、並びにプロトタイプ-A の試験結果より抽出された課題解決のために、必要な要素試験機能を備えた水中探索装置を製作することとし、これをプロトタイプ-B と呼称することとした。

以下に、これら 2 種類のプロトタイプ水中探索装置の開発経緯の概要について述べる。

① ROV (AVEXIS) の開発 【マンチェスター大学】

英国マンチェスター大学では本プロジェクト開始以前に、英国内再処理施設での需要に応えるため、水槽内で使用可能な水中カメラを装備した ROV である AVEXIS (Aqua Vehicle Explore) を開発済みであった。

平成 27 年度には、この AVEXIS を基に外径 145 mm 長さ約 230 mm の AVEXIS-mini を設計し、さらにこの外径を 100 mm に近づけるために推進システムの小型化、3D プリンターを用いた低コスト製作方法の採用、及び位置決めシステムの開発などの改良設計を進めた。しかしながら AVEXIS-mini は外径を縮小したことにより、積載重量が減少し、水中カメラや位置制御機構及び中性子やガンマ線センサーなどの小型機器の積載は可能としても、デブリ探索用のソナーの重量はキログラムオーダーと予想され、搭載するには困難な状況だった。

平成 28 年度には、口径が異なる 1F の PCV 内へのアクセスポートを通じて PCV に展開できるように幾つかのバージョンについて製作及び試験を行った。内径 100 mm の PCV 内アクセスポートを使用可能なように設計・開発した AVEXIS のプロトタイプを製作したが、内径 150 mm のアクセスポート通過の可能性が出てきたため、ROV の外形の大きさに対する要件も変更された。このため、ROV の外径を拡げる設計変更を行い、AVEXIS-150 を製作した。放射線センサーや他のセンサー収納に必要なスペースを確保でき、水ポンプを増やして推力を増加した。この AVEXIS-150 の水中試験では、日本チームの回転ビ

ームソナーの重量模型を ROV の外殻底部に取り付けて、浮力や機能性を調べており、ROV 設計の適合性を確認している（第 3.2.2 項参照）。さらにワイヤのサイズと重量を削減してイーサネット経由での通信が可能ないように 2 本のワイヤ方式を採用。これによりイーサネットと Windows の実行可能プログラムを介して通信を行えるのでソナーデータを送信することができる。また、主電源基板の改良によって ROV の信頼性が向上したのでさらなる変更に対しても冗長性が担保できた。AVEXIS-150 の主要な機能を表 3.2.1-3 に示す。

表 3.2.1-3 AVEXIS-150 の主要な機能

項目	機能の内容
形状	外径 150 mm の円筒型、制御回路、カメラ及び照明（光学式測位システム用のリング状 LED 緑・赤の光源）搭載
推進システム	両端に配置した 6 個の水ポンプにより前後、左右、上下、及び回転が可能。旋回半径は 140 mm（ROV の長さの半分）
地上との通信ケーブル	2 本の直径 10 mm 未満のテザーの採用により、絡み合いの可能性を減少
積載重量	約 1kg、複数のセンサーを搭載可能
電力通信系	Ethernet over power set-up を採用 <ul style="list-style-type: none"> ・高精度の視覚探査を実現するための通信プロトコルを採用 ・カメラやソナー出力のリアルタイム画像化、動力系のアクチュエータ制御、放射線検出器の測定データ伝送機能等を実現
データ収録装置と ROV との伝送速度	ROV 内電力線アダプタより地上の電力線アダプタと LAN を介して 200 Mbps を達成
放射線検出器への電力供給	2 本のテザーケーブルにより地上の主電源と分離した電圧レギュレータを介して供給
制御系	<ul style="list-style-type: none"> ・Raspberry Pi™Zero（クレジットカードサイズのマイコン）の採用により ROV 主要部の制御を行うため、小型化を実現 ・カメラも Raspberry Pi™Camera（センサーとレンズで構成される小型のカメラモジュール）のため Raspberry Pi からの指示により起動が可能
構成部品の耐放射線性	幾つかの構成部品について照射試験を実施 <ul style="list-style-type: none"> ・ROV の耐吸収線量(TID) は少なくとも 300 Gy

② ROV 構成部品並びにソナー発振子の耐放射線性の検討【マンチェスター大学】

英国チームは ROV 構成部品の耐放射線性を調べるため、マンチェスター大学の Dalton Cumbrian Facility (DCF) の Co-60 照射装置を用いた照射試験を実施した。これらの試験条件と照射結果を表 3. 2. 1-4 に示す。特に制御用ボードについては、高崎量子応用研究所 Co-60 の照射施設での照射試験結果 (200 Gy の照射に耐えた PC ボードの例有り。) と比較するとほぼ同程度の耐放射線性であると言える。

次に超音波発振子については、水中用の超音波センサーが高価なため、代わりに地上用の超音波距離センサー (MaxBotix 社製の MB1010) を用いて耐放射線性を調べた。このセンサーは超音波の発振制御と対象物からの反射波到達時間から距離を演算する処理回路 (20 mm×20 mm) と超音波発振子 (直径 15 mm) が一体化されている (図 3. 2. 1-9)。

平成 29 年度においてセンサー 5 個をマンチェスター大学の DCF の Co-60 照射装置を用いて耐放射線性試験を実施した。この結果、5 個のセンサーは 187 Gy (1080 Gy/h 照射)、205 Gy (240 Gy/h)、210 Gy (240 Gy/h)、242 Gy (240 Gy/h) 及び 280 Gy (240 Gy/h) の積算線量で、機能が損傷した。240 Gy/h の線量率照射では、平均で 234 Gy の積算線量まで正常に作動するが、約 4.5 倍の線量率で照射すると、187 Gy の積算線量までしか正常に作動しないことが分かる。

表 3. 2. 1-4 ROV 構成部品の照射条件と照射結果

ROV 構成部品	照射条件	照射結果
推進制御ポンプ	91 Gy/h の線量率で照射 : 7 個 227 Gy/h の線量率で照射 : 6 個	400 Gy の積算線量で損傷無し 522~867 Gy の積算線量で複数の故障発生
制御用ボード	44 Gy/h の線量率で照射 : 5 個	177 Gy の積算線量で損傷無し



図 3. 2. 1-9 超音波距離センサー

原子力機構による 1 号機 PCV 内線量率分布予測 (図 3. 2. 1-28 参照) では、ペDESTAL 外の水中线量率はせいぜい 10 Gy/h (2021 年) であり、ペDESTAL 内部のデブリ直近でも 30 ~50 Gy/h と予想されている。よって、英国の ROV はペDESTAL 外の水中医デブリ探査には十分利用できるレベルであり、ペDESTAL 内でも 4 時間程度の探査には利用で

きる見込みが有る。万一超音波発振子が故障しても ROV の帰還には致命的な支障とならない。推進制御ポンプは他の構成部品に比べ十分な耐放射線性を有していることから、むしろ安全域への帰還に重要となる制御用ボードの耐放射線性を高めることが今後の課題と言える。

③ 英国チーム開発の ROV と日本チーム開発のソナーの統合 (H28～H29)

英国チームが開発した ROV (AVEXIS-150) と統合するソナーとして、平成 27 年度「ソナーシステムの開発」で性能検討を実施した中で性能が優れていた回転ビームソナー (IMAGENEX 社製 831L 型) を平成 28 年度に AVEXIS と統合するためのソナーシステムとして選定した。選定理由は以下の通りである。

- ・ 選定理由：小型で軽量、超音波発振子の周波数が高く、出力画像の解像度が優れている
- ・ ケーブル (電力供給とデータ出力)：AVEXIS-150 の 2 本のテザーケーブルを利用できるため、ソナー独自のケーブルを使用する必要が無い。

AVEXIS-150 に回転ビームソナーを取り付けた水中探査装置を以降、既述のようにプロトタイプ-A と呼称する (図 3.2.1-10)。このプロトタイプ-A の試験結果については、測位及び画像表示のための改良を含め、第 3.2.2 節で詳しく述べることとする。

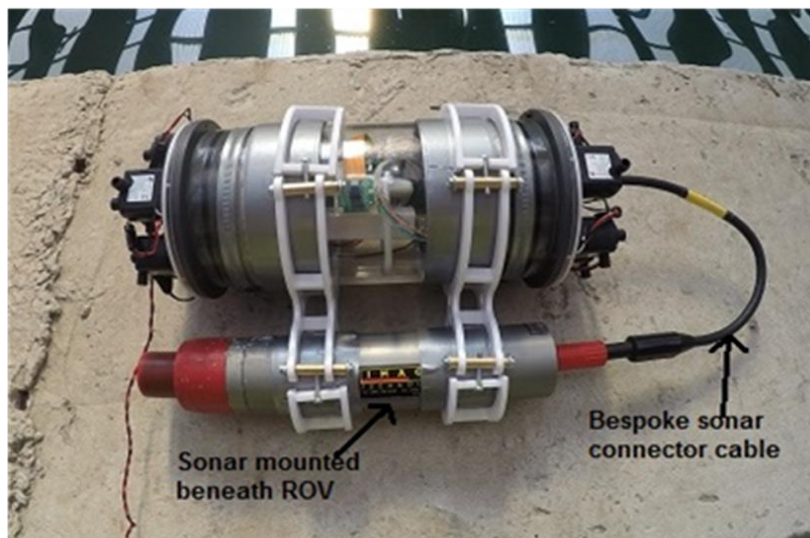


図 3.2.1-10 プロトタイプ-A (AVEXIS-150 に回転ビームソナーを取り付け)

④ 1F 適用課題

開発した水中探査装置プロトタイプ-A は水中デブリ探査のための基本機能を有していると言えるが、これを実際の 1F に適用しようとする場合には、以下の課題が考えられる。

- ・ 回転ビームソナーはその外周 360 度をスキャン可能であるが、前方向は進行後でないと探査できない。
- ・ ROV 自身の位置検出のための水中測位システムが必要となる。

- ・回転ビームソナーによる探査画像を立体的に且つリアルタイムで記録するためのシステムが必要。
- ・近年の内部調査では、堆積物層の下にデブリが存在する可能性が指摘されており、このような場合には高周波のソナーは、有効ではないと考えられる。

(7) プロトタイプ-B 水中探査装置の開発 (H28～H29)

プロトタイプ-Bは、プロトタイプ-Aの1F適用時の課題解決を狙った要素技術開発のための試験装置である。

① 課題解決の方策と機能

これまで実施した一連の試験及び検討結果より、水中探査装置のプロトタイプ-B（図3.2.1-11 参照）に装備するソナーとしてプロトタイプ-Aと同様、探査精度の優れた831L型を選定したが（H28）、このソナーは回転ビームソナーのため推進軸外周360度の探査は可能であっても前方は（進行後でない）探査しないこと、また画像データをリアルタイムに3D画像化することができない短所が有る。このため前方の探査とともにリアルタイム3D画像化が可能なフェイズドアレイ3Dスキャン・ソナーも搭載することとした（H28）他、堆積物の下にあるデブリ探査に対応するための表層部探査機器であるSBP（Sub Bottom Profilerを以降、SBPと称す。）、及び自己位置検出（以降、測位と称す。）のための水中GPS機器も装備させることとした（H29）。



図 3.2.1-11 水中デブリ探査装置プロトタイプ-B



図 3.2.1-12 水槽中での運動性能試験

② 構成要素の仕様（平成28年度設計の仕様を平成29年度に一部変更。）

1) 外形寸法

430 mm（幅）X 900 mm（長さ）X 430 mm（高さ）

2) 装備品

- ・回転式ビームスキャン・ソナー：IMAGENEX社製831L
- ・3Dスキャン・ソナー：ガーミン社製PS-31+表示盤Pantronics75SV
- ・カメラ及び水中LEDライト

- ・測位システム（Blue Robotics 社製水中 GPS ）
- ・SBP システム：ウエタックス社製水中スピーカー及びアクアサウンド社製ハイドロホン
- ・水中スラスタ：6 基（前進・後進・右旋回・左旋回及び浮上用に使用。）

③ 性能確認試験（H29）

本プロトタイプ-B 型は要素試験用であるため、装備している各機能が当初の設計通りであることを、小型水槽を用いて確認した（図 3.2.1-12）

1) 運動性能

前進・後進・右旋回・左旋回及び浮上性能とも設計仕様通りであった。ただし、浮上性能については試験用であるため、水深 6 m までは自重で沈降し、浮上のみスラスタで上昇する設計としてある。

2) SBP について

設備の関係上深さ 1 m 程度までの試験であるが、使用した水中スピーカーは深さ 20 m 程度までの出力が有るため性能的には十分な余裕が有る。また実機として ROV を使用する場合は上下の移動により深さを自由に選べるため、ROV に装備する性能としては問題無いと判断される。

3) 測位システムについて

精度を満足する実用的な測位システムを設計・製作するには時間・費用が必要であることから、市販されている Blue Robotics 社製の水中 GPS 開発キット（WL-11001）を採用することとし、プロトタイプ-B に搭載した。このキットは超音波発振器 1 個、受波器 4 個、データ処理用電子回路、データから位置座標を計算するソフトなどで構成されている。受波器 4 個をプロトタイプ-B 上部の枠に設定し、位置座標が既知である箇所に受波器を設置して、プロトタイプ-B の位置座標を測定することにより、測位システムの精度を評価できる。

実際の PCV において小型 ROV が必要とされる探査時にはプロトタイプ-A の進化型 ROV を、やや大型の ROV でも差し支え無い場合の探査にはプロトタイプ-B の進化型 ROV の使用を想定している。

なお、将来実機探査装置使用時に PCV 内より得られる探査データは、並行して実施中である「プラント内線量率分布評価」研究に直接反映させる必要が有るため、英国チームで開発中の放射線センサー技術も含めて、プラント内線量率評価に効率的なデータ収集方法となるように、探査装置の性能向上とともに運用技術についても研究を進める必要が有る。

また次の第 3.2.2 項に述べるような一連の「最適化」作業の他、現在 廃炉研究実施中である関連研究機関並びに多くの会社では各種のロボットを開発中であるから、これらの技術動向も常に把握し、ROV の測位システム使用時に必要となる基準点（マーカー）設置用にはどのようなロボットまたは機器類を使用すべきかを研究し、最適化作業を継続する必要が有る。

(8) まとめ

平成 27 年度～平成 28 年度には、水中デブリ探査の候補となるソナー性能確認のための実験体系を構築し、体系の大きさ及び水深、並びに水底に置くデブリ模擬物質の性状や大きさを変えた各種試験条件下で得られた結果より、水中デブリ探査用ソナーとして軽量で発振子の超音波周波数がより高い回転式ビームスキャン・ソナー（831L 型）を選定した。ただし、探査精度の優れた回転式ビームスキャン・ソナーは、ソナーデータをリアルタイムで 3D 画像表示することはできないため、リアルタイムに 3D 画像表示が可能なフェイズドアレイ 3D スキャン・ソナーを使用して水底に設置した性状模擬デブリなどの 3D 画像による探査精度を観察し、PCV 内の探査機器として十分効果が見込めることを確認した。

平成 29 年度には、上記のソナーシステムを英国チームが開発した小型 ROV と統合し、当初目標を満足する「水中デブリ探査装置プロトタイプ-A」を開発した。また、測位システムの実用化、砂礫層下のデブリ探査に有効な SBP システムの精度向上、構成機器の小型化など、今後 1F 適用で必要になると考えられる要素技術開発を進めることを目的とした試験装置として「水中デブリ探査装置プロトタイプ-B」を製作し、その基本性能を確認した。

参考文献

- [3. 2. 1-1] 福島第一原子力発電所の基本データ集（IRID：燃料デブリ取り出し代替工法に関する提案公募（RFP））
- [3. 2. 1-2] 平成 27 年度度「プラント内線量率分布評価と水中デブリ探査に係る技術開発」報告書

3.2.2 水中デブリ探査システムの最適化検討（再委託先：海上技術安全研究所）

水中デブリ探査システムの最適化検討は、日英双方の英知を結集して対応した。具体的には、ランカスター大学がデブリ特有の放射線を検知するための小型放射線検出器の開発を担当し、海上技術安全研究所(海技研)は水中のデブリ形状や分布情報を取得するためのソナーシステムの開発を担当した。さらに、これらを格納容器(PCV)内の適切な場所に配置するための遠隔操作式水中ロボット(ROV)の開発をマンチェスター大学が担当した。ROV自身の位置を確認するための測位システムの開発は、海技研とマンチェスター大学が協力して行った。

これらの要素技術を統合した水中デブリ探査システムの最終試験として、海技研及び日本原子力研究開発機構（原子力機構）・檜葉遠隔技術開発センターの大型水槽施設を用いて、ROVの動作確認とソナーシステムによるデブリ探査性能の確認試験を実施した。さらに、高放射線環境下でのデブリ探査性能を確認するため、英国チームが開発した小型放射線検出器をROVに搭載し、スロベニアの研究炉による照射試験を実施した。これらの最終試験には日英双方の全機関が参加して協力した。

(1) 水中デブリ探査システムの最適化プロセス（H27～H29）

システム最適化は多数の要素技術の試験結果を踏まえた試行錯誤によるところが多く、そのプロセスは今後の実用化検討にとって有用と考えられることから、以下に3年間にわたるシステム最適化の経緯を記載する。

平成27年度には、英国ランカスター大学とマンチェスター大学（付属の試験研究設備）を訪問し、意見交換及び開発中のROVや試験・研究設備の見学を行った。意見交換においては、日英両国より本プロジェクトの進捗状況や研究達成目標を確認するとともに、両者の技術を融合するために有効な研究推進の方策について議論し、今後の研究開発の方向性を明確にし、平成28年度以降の研究計画に反映した。

平成28年度においては、英国チームの研究者を日本に迎えて情報交換を行い、小型放射線検出器の開発状況、放射線検出器やソナーを搭載するROVなどの開発状況（日本チームの回転式ビームスキャン・ソナーをROVに実装した場合の浮力や機能性の検討）についての情報を得た。さらにソナーから得られる情報と放射線検出器から得られる情報の両者を併せて有効的に活用することでデブリ探査精度を向上させることを目的として、ソナー出力の3D画像化処理の検討、マルチパスの影響を低減する対策、ROV測位システムの概念設計を実施した。特にマルチパスの影響を低減する対策として、ソナーの超音波発振子周りに開口部の有る超音波コリメータを取り付けて、低減効果を確認した。これらの検討結果に基づき、超音波コリメータ機能に代わる方法として、超音波発振子の回転範囲をコリメータの開口角度に合わせ、超音波の発生並びに受信範囲を調整する方式を採用した。

平成29年度には、英国チーム開発のROVと日本チームのソナーシステムを統合した水中探査装置プロトタイプ-Aを使って、日英チーム共同で海技研水槽において性能試験を実施した。この性能試験の結果に基づき、デブリ探査の効率的な運用を向上させる要素技術として、ソナー出力の3D画像化処理の改良検討とROV測位システムの検討を実施した。これらの検討を反映して、日本原子力研究開発機構・檜葉遠隔技術開発センターの水槽において実証試験を実施した。

放射線検出器に関しては、平成27年度から平成29年度にかけて英国ランカスター大学が候補

となる検出器の長所・短所を調査するとともに、Co 照射施設を用いて耐放射線性の検討を実施した。これらの検討結果を踏まえて、最終的に 2 種類の検出器を選定し、スロベニアのヨーゼフ・ステファン研究所の TRIGA Mark II 炉[3. 2. 2-1]で ROV に搭載した小型放射線検出器の照射試験を実施した。

以上の一連の技術開発により、水中デブリ探査システムの実用化に向けて有用な情報や今後解決すべき課題を得ることができた。

(2) プロトタイプ-A 水中探査装置の最適化 (H27~H29)

英国チーム開発の ROV と海技研のソナーシステムを組み合わせた水中探査装置プロトタイプ-A(前節の図 3. 2. 1-10 参照))について、以下の最適化を行った。

英国チームは、1F1 号機の内部調査に使われていた X100B ペネの大きさに適合するように、当初は直径 100 mm の ROV の外郭模型を 3D プリンターで作成して検討を進めていた。その後、海技研が実施した複数タイプのソナー試験に基づき、回転ビームソナーが選定されたことにより、100 mm 直径の ROV 設計では所定の動作が期待できないことが判明した。また、3 号機では口径が大きい X-6 ペネが利用できる可能性が有ること、今後の内部調査の本格化やデブリサンプリング計画によっては、アクセスポートの拡大も期待できることから、日英全体会合における協議により 100 mm 直径にこだわらないで、システム統合を優先させることを決定した。

マンチェスター大学はこれを受けて、ROV の外径を拡げる設計変更を実施し、AVEXIS-150 を製作した。これによって、多様な小型放射線検出器や他のセンサー収納に必要な十分なスペースが確保できるとともに、水ポンプを増やして推力を増加することが可能となった。また、英国チームにより実施された AVEXIS-150 の水中試験では、海技研が提供した回転ビームソナーの仕様に基づき、これと同重量の模型を ROV の外殻底部に取り付け、浮力や機能性を調べた結果、新しい ROV 設計の適合性が確認できた。

その他、イーサネット経由での通信が可能なように 2 本のワイヤを採用し、ワイヤケーブルの径と重量を減らすことができた。これによりイーサネットと Windows 上で実行可能なプログラムを介して通信が行えるため、ソナーからの出力データを AVEXIS-150 を介して送信することができるようになった。さらに主電源基板の改良によって ROV の信頼性が向上し、最適化による設計変更に対して冗長性が担保できるようになった。

(3) 海技研水槽におけるプロトタイプ-A の性能確認試験(H29) 【日英共同】

平成 29 年度の前半に日英チーム共同により、海技研の試験水槽においてプロトタイプ-A の性能試験を実施した(図 3. 2. 2-1)。試験水槽やデブリの条件は以下の通りである。

- ・試験水槽深さ：6 m
- ・性状模擬デブリ(平成 27 年度製作)：厚さ 5 mm 程度の砂を性状模擬デブリ表面に塗布して性能試験を実施し、以下の結果が得られた。
- ・プロトタイプ-A の水中における ROV としての運動性能に支障は無い。
- ・ソナーによる性状模擬デブリの探査性能については、平成 28 年度に実施した試験の出力画像と同程度の解像度であり、デブリ表面に 5 mm 程度の砂層が有っても超音波によるソナーの解像度には殆ど影響しない。



図 3.2.2-1 海技研水槽におけるプロトタイプ-A 水中探査装置の性能試験

本試験により抽出された課題としては、実際の 1F 運用においてはデブリの所在は不明であり、これを暗闇や濁水中においても効率的に探査するためには、1)ROV 自身の位置検出機能（測位システム）と 2)リアルタイム方式の 3D 画像表示、加えて 3)汚染 Cs と区別できるデブリ特有放射線のリアルタイム検出、が必要となることである。以下では、これらの課題解決を目指した具体的な方策案の検討と、その実証試験の結果について報告する。

(4) ソナー出力の 3D 画像化処理の検討 (H28～H29)

① 英国チームの開発

平成 29 年度に実施した海技研水槽におけるプロトタイプ-A の性能試験の結果、抽出された課題としてソナー出力と ROV 自身の位置検出機能（測位システム）を用いたリアルタイム方式の 3D 画像表示システム装備の必要性が課題として挙げられた。そこで、英国チームでは下記の機能を有するリアルタイム方式の 3D 画像表示システムを開発した。

- ・ ROV ソナーによりデブリ探査した一連の航跡（走査線の集合）データより、フィルターを掛けた音圧と超音波発振子から、Range (距離) データを抽出し、CSV ファイルに出力する。
- ・ 光学式測位システムによる ROV の位置座標を CSV ファイルに出力し、上記データと併せて 3D 画像表示する。

英国チームが開発した 3D 画像表示システムの出力量を図 3.2.2-2 に示す。これは後述する檜葉遠隔技術開発センターでの試験で取得されたデータを使用したものである。

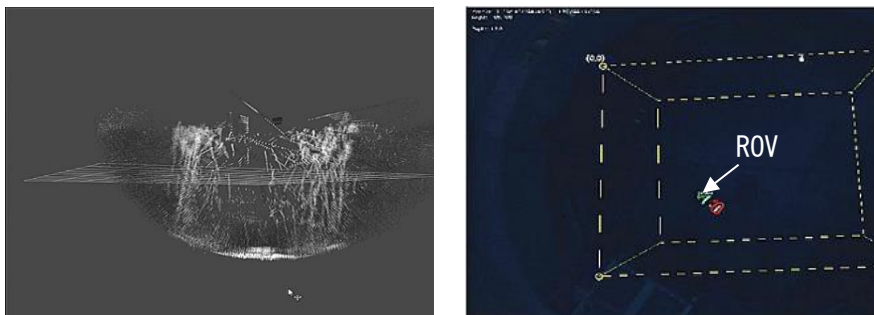


図 3.2.2-2 リアルタイム 3D 画像表示システムの出力量

② 日本チームの開発 (H28～H29)

超音波発振子の周波数が高く探査精度の優れた回転ビームソナーは原理的にソナー出力を 2D 画像表示する。このため、水底下に存在する物体を探索して、その物体の輪郭を把握するには、3D 画像表示が必要となる。平成 28 年度では最初にソナー音圧を利用した物体の輪郭抽出処理、すなわちソナー音圧の 2D 画像表示、及び、指定しきい値によるフィルター処理を行って画像化に必要なデータを CSV のファイルに変換し、さらに CSV のファイルにしたデータを Microsoft Excel により 3D 画像表示など一連の処理を行うシステムを平成 28 年度に開発した。出力したソナーデータの CSV ファイルを、Microsoft Excel の 3D 画示化機能を使用して 3D 画像表示させた例を図 3.2.2-3 に示した。サンプルデータとして、水深 4.1 m の大型円形水槽において、ソナーを微速移動 (1 m/48 sec) させた場合に取得したソナーデータを用いた。

図 3.2.2-3 の上図は、大型円形水槽の底に、性状模擬デブリ、算術平均粗度 0 mm、8 mm の表面粗度が異なる SUS303 製直方体ブロック (15 cm(L)× 10 cm(W)×5 cm(D))、岩石、SUS 製円筒を並べた配置を示している。図 3.2.2-3 の下図は、回転ビームソナーを使用した際のソナー音圧を輪郭抽出処理して 3D 画像表示したものであるが、模擬デブリの存在が明確で、これらの配置も良く再現していることが分かる。

これに対し英国が平成 29 年度に開発した 3D 画像表示システムはリアルタイム方式により対象物表面で反射した位置 (最大の音圧が得られた点) を表示するため、デブリの全体的な表面形状を確認することはできない。このため、平成 29 年度の後半では ROV 運用によるデブリ探査した一連の航跡について、英国チームの作成した 3D リアルタイム画像表示システムより出力された CSV ファイルを日本チームのシステムに入力して対象物表面で反射した位置を連続的な集合分布として描画することで、デブリの表面形状を表現する 3D 画像表示システムの改良を行い、描画精度を向上させた。図 3.2.2-2 に示した英国チームのリアルタイム 3D 画像を日本チームで改良し 3D 画像表示システムで表示した描画を図 3.2.2-4 に示した。

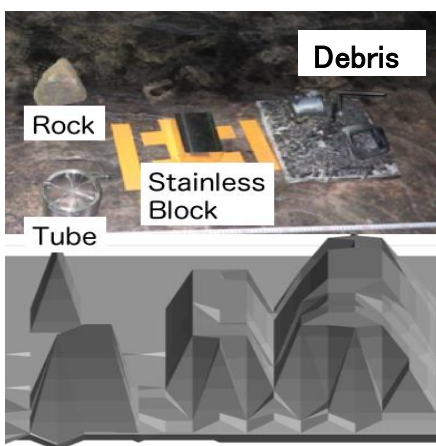


図 3.2.2-3 模擬デブリなどの 3D 画像

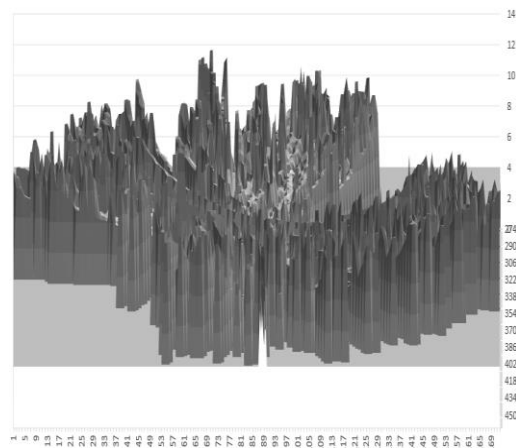


図 3.2.2-4 改良後の 3D 画像表示の例

しかしながら、ROV 運用によるデブリ探査のための走査密度が低くなると、画面上で形状のコントラストも低くなり、デブリ形状の把握が困難になる。この対策として、デブリ探査に対応した ROV 運用方法の検討 (例えば、デブリの上方を旋回するのみではなく、1 方向を

前後左右往復して走査するなど。) が必要になるものと考えられる。

(5) 櫛葉遠隔技術開発センターの水槽における実証試験 (H29) 【日英共同】

平成 29 年度の後半に日英チーム共同により、櫛葉遠隔技術開発センターの水槽にてプロトタイプ-A (以下、ROV と略記) の実証試験を以下の条件で実施した。

- ・水槽 (深さ : 5 m、直径 4.5 m) の水底に性状模擬デブリを設置
- ・英国チーム開発の光学式測位システムを使用するため、水面及び水面下 2 m 位置にマーカーを設置 (図 3.2.2-5)
- ・マーカー及び ROV 位置撮影のための小型カメラをタンク水面中心部の軸方向上方約 2 m に設置
- ・小型カメラによる ROV 位置確認は、ROV 内のリング状 LED 光源 (緑、赤) を撮影し、ROV の位置を認識することで処理する。(図 3.2.2-6)
- ・水槽上方からの光により、小型カメラの ROV 確認が困難であることから、遮光用にブルーシートを水槽上方に張って試験を実施した。

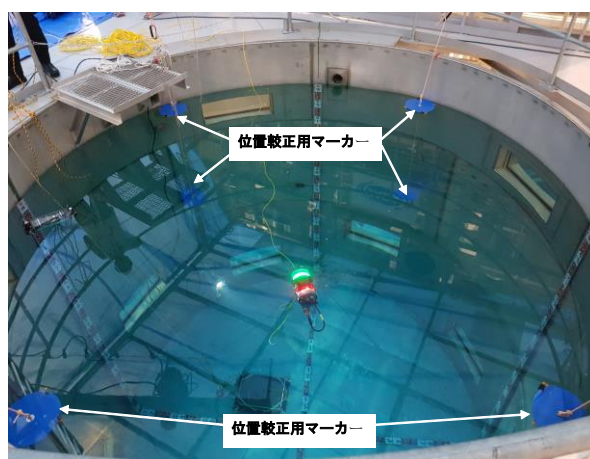


図 3.2.2-5 ROV 位置校正用マーカー



図 3.2.2-6 ROV 位置確認用小型カメラ

本試験により得られた結果は以下の通りである。

- ・実機 PCV 規模である水槽においてプロトタイプ-A は仕様通りの運動性能 (潜航、浮上、水平及び旋回運動) を示した。
- ・模擬デブリについてソナーの 2D 及び 3D 出力画像を収録した。
- ・2D 出力画像については海技研及び大型円形水槽での試験時と同様、性状模擬デブリの形状を確認できる解像度であった。
- ・光学式測位システムは ROV の位置を確認し、座標表示することができた。
- ・英国開発の 3D 画像表示システムはソナー出力と光学式測位システムを用いたリアルタイム方式である。本試験において、ソナーシステムと測位システムを組み合わせ、模擬デブリをリアルタイムで 3D 表示できることが初めて実証された。これらをデブリ特有の放射線を検知することができる小型放射線検出器と併用して 1F に適用すれば、燃料デブリ取り出しに先立ちデブリ分布を把握することが可能になるものと期待される。

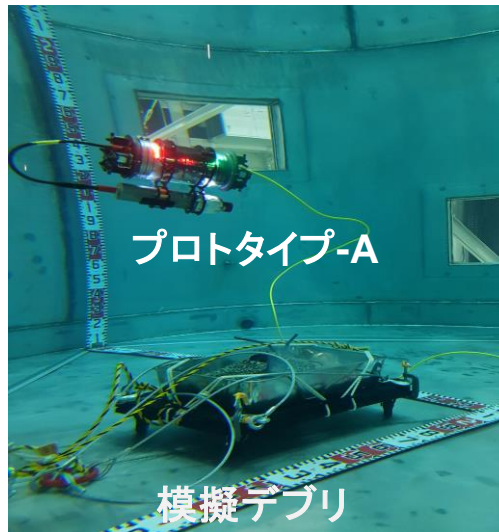


図 3.2.2-7 プロトタイプ-Aによる模擬デブリ探査

抽出された課題としては以下の事項が挙げられた。

1) ソナー出力の 3D 画像化処理方法

現状の機能は測位システムから得られる ROV 位置座標を基点にした走査線上で、しきい値以上の音圧が得られた複数の点を結ぶ軌跡をリアルタイムで描画する。したがって対象物の表面形状はソナーの 1 スキャン（超音波発振子 1 回転）ごとの点と軌跡の集合によって表現されるが、ROV 運用によるデブリ探査のための走査密度が低くなると、スクリーン上で形状のコントラストも低くなり、デブリ形状の把握が困難になる。この対策として、デブリ探査に対応した ROV 運用方法の検討（例えば、デブリの上方を旋回するのみではなく、1 方向を前後左右往復して走査するなど。）が必要となる他、ROV 運用によるデブリ探査が終了した時点において、対象物表面で反射した位置を連続的な集合分布として描画することにより、デブリの全体的な表面形状を表現する機能が必要となった。

2) 探査装置の測位システムについて

今回の方法では 1F の PCV 内環境条件への対応が困難と判断される。理由としては、以下の項目が挙げられる。

- ・ 1F の PCV 内の水は試験に使用した水槽内の水と異なり、透明度が低い
- ・ 1F の PCV 内の探査対象範囲の 4 隅に予め ROV 位置較正用のマーカーを設置するためには、そのためのロボットが別途必要
- ・ 水中の ROV 位置確認用の小型カメラ設置についても同様である。

(6) ROV 測位システムの検討 (H29)

① 英国チームの開発

英国が開発した光学式測位システムの構成は次の通りである。ROV の水中の位置を確認するため小型カメラを水槽中心の水面より上部に設置し、小型カメラで ROV の位置を確認できるよ

うに ROV 内にリング状の LED 光源（緑、赤）を取り付けている。さらに ROV に搭載した深さセンサーの情報も併せて、ROV の位置を評価する。ROV 測位評価用の較正点として水面及び水面下 2 m の位置にマーカーをそれぞれ 4 個設置する。

檜葉遠隔技術開発センターの水槽における実証試験の結果、ROV の位置を確認して、座標表示することができたものの、光学式測位システムでは 1F の PCV 内環境条件への対応が困難と判断された。

② 日本チームの検討

英国チームの測位システムの 1F の PCV 内への適用上の課題が挙げられたため、超音波式測位システムの予備的な精度評価を実施した。

1) SSBL (Super Short Base Line) 方式の精度評価

プロトタイプ-B において報告したように、ROV の上面 3 点に 3 個の受波器を三角形の頂点にそれぞれ配置し、4 個目の受波器を三角形の重心に配置し、超音波発振器 1 個を較正点に配置する方式について、数値計算による SSBL 方式[3.2.2-2]の精度評価を実施した。

〈 超音波発振器の座標計算法 〉

図 3.2.2-8 に示すように受波器は同一平面上に配置する。

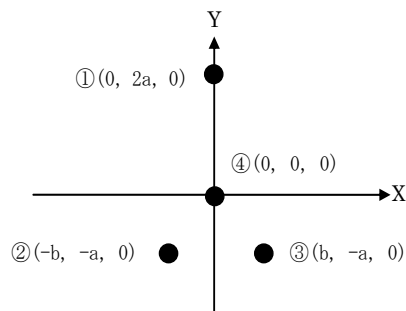


図 3.2.2-8 受波器の配置と座標

ここで、④の受波器の座標を ROV 中心の座標として原点にする。超音波発振器の座標を未知数 x, y, z とすると、超音波発振器から各受波器①から④までの各距離 ($L_1 \sim L_4$) と伝搬時間 ($t_1 \sim t_4$) の関係は、次式で表わされる。

$$L_4 = x^2 + y^2 + z^2 = (ct_4)^2 \quad (3.2.2-1)$$

$$L_1 = x^2 + (y - 2a)^2 + z^2 = (ct_1)^2 \quad (3.2.2-2)$$

$$L_2 = (x + b)^2 + (y + a)^2 + z^2 = (ct_2)^2 \quad (3.2.2-3)$$

$$L_3 = (x - b)^2 + (y + a)^2 + z^2 = (ct_3)^2 \quad (3.2.2-4)$$

上記の連立方程式を解くと、超音波発振器の座標は次式で求めることができる。

ここで、 c は超音波の伝播速度を表し、通常 1500 m/s としている。

$$c^2 = \frac{2b^2 + 6a^2}{(t_1^2 + t_2^2 + t_3^2 - 3t_4^2)} \quad (3.2.2-5)$$

$$x = \frac{(t_2^2 - t_3^2)(b^2 + 3a^2)}{2b(t_1^2 + t_2^2 + t_3^2 - 3t_4^2)} \quad (3.2.2-6)$$

$$y = a - \frac{(t_1^2 - t_4^2)(b^2 + 3a^2)}{2a(t_1^2 + t_2^2 + t_3^2 - 3t_4^2)} \quad (3.2.2-7)$$

このようにして得られた ROV 中心を原点とした超音波発振器の座標と、較正点の実際の座標から、ROV 中心の実際の座標に変換する。

2) 数値計算による精度評価

図 3.2.2-8 に示した受波器の配置条件 a と b をともに 10 cm に、超音波発振器の座標 (x, y, z) を (100 cm, 0 cm, 500 cm) とし、 $L_1 \sim L_4$ を (3.2.2-1) 式～(3.2.2-4) 式から求めた。次に超音波の伝播速度を 1500 m/s として同式から ($t_1 \sim t_4$) を評価した。このようにして得られた ($t_1 \sim t_4$) を (3.2.2-5) 式～(3.2.2-7) 式に代入し、求めた超音波発振器の座標 (x, y, z) が再現することを確認した。

実際の SSBL 方式による測位システムでは、配置した超音波発振器と受波器の各伝播時間を測定し、同じロジックで座標を評価するが、実際には超音波の伝播速度や各伝播時間の測定に誤差を有している。仮に本検討において超音波の伝播速度に誤差が無く、1500 m/s とした場合、各伝播時間に許容される誤差を表 3.2.2-1 に示した。

表 3.2.2-1 超音波の伝播時間に許容される時間差とその誤差

	$\Delta t (\mu\text{ec})$	$\Delta t / t$	$\Delta t / t (\%)$
t1-t2	-11.7	-0.003	-0.3
t1-t3	14.4	0.004	0.4
t1-t4	2.61	0.001	0.1
t2-t3	26.1	0.008	0.8
t2-t4	14.4	0.004	0.4
t3-t4	-11.8	-0.003	-0.3

したがって、超音波発振器、ROV に取り付けられた受信器並びに受信した伝播時間から、ROV の座標を計算するデータ処理系は、上述した伝播時間の計算誤差内に収まるように製作する必要が有る。

(7) 小型放射線検出器の開発 (H27～H29) 【ランカスター大学】

① 検出器候補

本プロジェクトで中性子及びガンマ線検出器の開発に当たり、英国ランカスター大学は下記の開発課題を挙げている。

- ・ 過酷な環境として、水中でしかも高線量の過酷な環境において遠隔操作による測定を行う必要が有る。
- ・ 内径 100 mm 程度のアクセスポートを使用する場合、中性子及びガンマ線検出器を搭載する ROV の直径は 100 mm 以下とされ、制御機器を搭載した状態で検出器の長さの最短化が要求

される。

- ・ 供給電源と信号フィードバックの設計

ランカスター大学が、平成 27 年度から平成 28 年度にかけて、上記の課題を踏まえて候補に挙げた検出器の長所・短所、耐放射線性などを検討した結果を表 3.2.2-2 に整理した。

表 3.2.2-2 候補となる放射線検出器の特徴と耐放射線性

候補となる中性子検出器	長所、短所、性能など	耐放射線性
有機シンチレータ EJ301	<p><u>長所</u></p> <ul style="list-style-type: none"> ・ 中性子・ガンマ線の弁別能が良い。 <p><u>短所</u></p> <ul style="list-style-type: none"> ・ 毒性や可燃性の問題がある。 	<ul style="list-style-type: none"> ・ 約8000 Gyの積算線量でも正常動作する。 ・ 9.9 Gy/h±2% を超える線量率では動作しない。
有機固体シンチレータ：EJ299（プラスチック）	<p><u>長所</u></p> <ul style="list-style-type: none"> ・ 安価で、取り扱い易い。 ・ 中性子・ガンマ線の弁別能が可能 <p><u>短所</u></p> <ul style="list-style-type: none"> ・ 高線量率の環境では変色や劣化し易い。 	耐放射線性試験は未実施
有機固体シンチレータ：スチルベン結晶	<ul style="list-style-type: none"> ・ 中性子・ガンマ線の弁別能が良い。 ・ パイルアップによる中性子ガンマ線識別の誤計測 	10^{13} n/cm ² の中性子照射量で工学的に透明、欠陥無 10^{14} n/cm ² で結晶の白濁と黄褐色の色合い発生
核分裂計数管	<p>直径：6.3 mm、長さ：70 mm</p> <ul style="list-style-type: none"> ・ U-235 コーティングによる熱中性子成分の検出 ・ U-238 コーティングによる高速中性子の検出 ・ コーティング無（補償チャンバー） 	耐放射線性試験は未実施
ダイヤモンド検出器	高ガンマ線照射下でも中性子を弁別可能	耐放射線性試験は未実施

候補となるガンマ線検出器	長所、短所、性能など	耐放射線性
CdZnTe	ガンマ線スペクトル測定で分解能が662 keVガンマ線に対して、良好な分解能	30 kGyの照射で検出器が作動しなくなり、10 kGy で劣化開始
CeBr ₃ 検出器	<ul style="list-style-type: none"> ・ 速い減衰波形（約 17 ns） ・ データのリアルタイム出力により、特定放射線源の局在探知が可能 ・ 水透過後のガンマ線でも同位体特定が可能 ・ エネルギー分解能が比較的良好 	・ 111 kGy 照射後に光電子収率が 8% のみ低下

② 日英チーム共同による検出器照射試験(H29)

平成 30 年 2 月 6 日から 9 日にかけて、最終的にランカスター大学が選定した 2 種類の候補となる検出器を ROV に搭載した状態で、研究用原子炉を使った放射線照射試験を実施した。試験場所は、スロベニアのヨーージェフ・ステファン研究所の TRIGA Mark II 炉（250 kW プール型）[3.2.2-1]である。照射した検出器は CeBr₃ 検出器とスチルベン検出器であり、両検出器とも光電子増倍管（PMT）に接続されている。前者は、良好なエネルギー分解能を有し、原子力機構が示唆した Eu-154、Pr-144、Co-60 などによる比較的高いエネルギー領域のガンマ線（図 3.1.2-10 参照）の検出を狙ったものである。後者は、ガンマ線と中性子のパルス波形の違いを利用して、これらの信号をリアルタイム処理により弁別するものである。

原子炉上部の高線量下（> 15 Gy/h）にある冷却用プール中に ROV を潜水させ（図 3.2.2-9）、放射線を測定した結果、今後の課題が明確になった。



図 3.2.2-9 TRIGA Mark II 炉冷却用プール中の ROV

1) CeBr_3 検出器(図 3.2.2-10)

CeBr_3 検出器は 15 Gy/h まで十分に機能することが観察された。ただし、検出器応答はパルスのパイルアップにより、線量率の増大とともに減少し、妥当なエネルギースペクトルは得られなかった。より高速処理可能な電子回路の工夫や指向性を考慮した遮へい（タングステンなどにより 1/10~1/100 に減衰させる。）により対応することが考えられるが、後者は ROV の操縦性に支障をきたすリスクが有る。

2) スチルベン検出器 (図 3.2.2-11)

検出器の放射化を避けるため、限定された炉出力で照射したが、ガンマ線に対する過度の感受性が予想通り観測された。0.3 Gy/h の線量場で既に一時的に飽和し、その際の計測結果を図 3.2.2-12 に示す。この結果ではガンマ線と中性子は弁別されていることが分かる。ただし、大量のガンマ線から中性子を弁別すると弁別器が飽和し、ガンマ線を中性子と誤って識別する可能性が有るため、遮へいを設置するなどの方策が必要となる。



図 3.2.2-10 CeBr_3 検出器(左)と容器(右)



図 3.2.2-11 スチルベン検出器

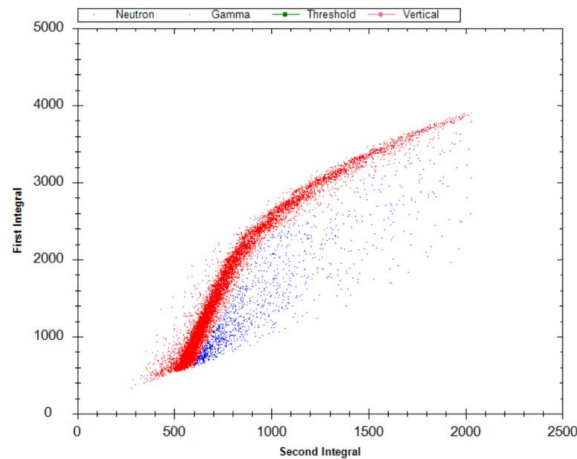


図 3.2.2-12 スチルベン検出器の計測結果
(赤色はガンマ線を、青色は中性子を示す)

(8) 堆積物下部のデブリ探査方法の検討(H29) 【海技研】

平成 29 年 3 月以降に実施された IRID や東京電力による 1F の PCV 内部調査で、砂礫の堆積層や岩塊の存在が確認された[3.2.2-3, 4, 5]。堆積層下部に燃料デブリが埋没あるいは岩塊状の燃料デブリ含有の可能性が推察される。これは平成 27 年度から開始した本研究では想定外のことであり、このような状況に対して、これまでに選定したような高周波のソナー (MHz オーダーの周波数) を使用しても殆どが物体表面で反射されるため、探査が困難になると考えられる。そこで、堆積層中下部に存在するデブリを探査するための解決策として、水底表層部探査機器 (SBP) [3.2.2-6, 7, 8] のデブリ探査への適用性検討を実施した。この方法は堆積層や岩塊を比較的透過し易い周波数の低い可聴域音波の利用しており、音響インピーダンスの異なる燃料デブリと砂礫との境界における反射波を検出する方法であるため、燃料デブリの存在を探査可能であろうと推定される。

SBP の理想的な音源とは、次のような機能を満足するものと言われている。

- ・大出力であること
- ・周波数制御が容易で、目的により適当な周波数選択ができること
- ・単純な波形であること
- ・装置が小型で、操作が簡単であること
- ・発振が安定で再現性の有ること

1F の PCV 内部環境条件を配慮し、上記の機能を満足する音源として、電磁誘導式発振器と水中スピーカーを選定し、予備的な砂礫層の透過・反射測定を実施した。

① 電磁誘導式発振器を使用した砂礫層の透過測定

1) 試験方法

電磁誘導式発振器はブーマーと呼ばれ、蓄電気放電を利用してコイルに瞬間大電流を流し、強力な磁場を発生させる。この磁場と、コイル近接の A1 など金属板中に発生する渦電流との間に生じる反発力より音波を発生する。株式会社アミックの電磁パルス発生装置 (電

源ユニット PGU-1301 とコイルユニット PCU-1602) を音源として使用し、予備的な砂礫層の透過測定を実施した。(図 3.2.2-13)

2) 砂礫層の透過測定結果

砂礫を入れた円形ザルの下にハイドロホンを設置し、電磁誘導式発振器を音源とした音波の透過測定を実施した。ハイドロホンの出力をオシロスコープで波形表示した測定結果の一例を図 3.2.2-14 に示した。この結果、電磁誘導式発振器の音源から発振した音波は砂礫層で減衰することを確認することができた。しかしながら、1F の PCV 内で万が一の火花や放電の発生を避ける必要が有る他、発生する音波の周波数制御が容易で目的により適当な周波数選択ができる機能の観点を考慮すると、水中スピーカーの方が有利であると判断し、水中スピーカーを使用した検討を実施した。



図 3.2.2-13 電磁誘導式パルス発生装置

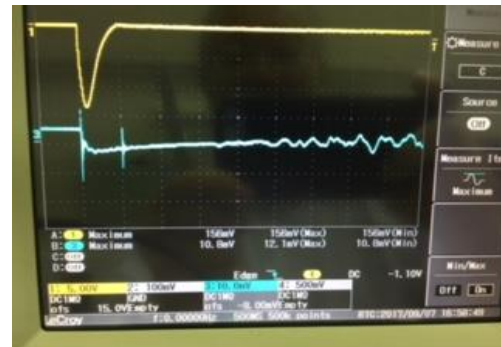


図 3.2.2-14 測定波形の例

② 海技研落下水槽における水中スピーカー使用による砂礫層の透過・反射予備的測定

水中スピーカーの主要な用途は水中作業員への連絡やシンクロナイズド・スイミングなどの練習に使用するもので、水中仕様の大出力スピーカーである。ウエタックス社製の水中スピーカーUA-50(出力 50 W)を音源として使用し、予備的な砂礫層の透過・反射測定を実施した。

1) 測定条件

3 種類の周波数 (500 Hz、1 kHz、5 kHz) を変えて、パンに入れた砂礫層 (約 3 cm 厚) における音波の減衰を測定し、砂礫層の有無による反射波の音圧の変化を調査した。

水中スピーカーを図 3.2.2-15 に、砂礫の入ったパンを図 3.2.2-16 に示す。また、落下水槽に水中スピーカーを降下させた状態を図 3.2.2-17 に、砂礫の入ったパン及びハイドロホンの配置を図 3.2.2-18 に示す。



図 3.2.2-15 水中スピーカー（黄色）



図 3.2.2-16 砂礫の入ったパン



図 3.2.2-17 落下水槽における測定状況

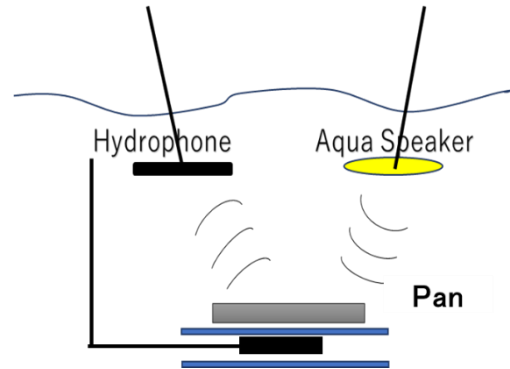


図 3.2.2-18 測定機器とパンの配置

こうして得られた測定データに対して、以下の処理を行った。

- ・ハイドロホンの出力をオシロスコープで波形表示した。
- ・オシロスコープに表示された波形の振幅を目視で読み取り、音圧を評価した。
- ・砂礫層（約 3 cm 厚）を透過した場合、音圧変化（3 種類の周波数）より減衰定数を評価し、図 3.2.1-19 に示した。
- ・砂礫層の有無による反射波の音圧変化を調査したが、顕著な変化は見られなかった。

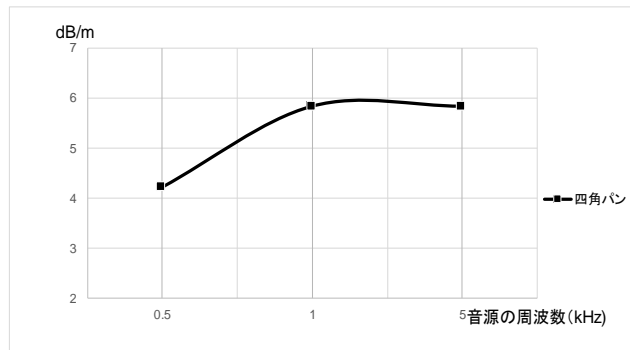


図 3.2.2-19 砂礫層中での音波減衰定数

2) 測定結果

測定結果から以下のことが分かった。

- ・評価した音波の減衰定数は、周波数が 1 kHz と 5 kHz の場合、変化が見られない。
- ・周波数が 500 Hz の場合は減衰定数が低下しており、音波は砂礫層で減衰し難い可能性を示している。
- ・砂礫層の有無による反射波の音圧変化

反射波は以下のように分類できる。

- ・第 1 波：音源から直接到達する波
- ・第 2 波：ハイドロホンに第 2 番目に到達する波
- ・第 3 波：ハイドロホンに第 3 番目に到達する波

第 2 波と第 3 波における砂礫層の有無による音圧の変化は、殆ど見られない。

水槽の底に設置した砂礫層の面積は水槽の床面積に比べて占める割合が極端に低いことから、砂礫層からの反射波は殆ど無いものと推察される。

3) 抽出された検討課題

水中スピーカーを音源とした SBP のデブリ探査への適用性を検討するために、以下の検討を実施することとした。

- ・目視による音圧読取りの誤差を無くすため、ハイドロホンの出力をデジタイザでデジタル化した後、受信波の到達時間から深度を自動処理して、深度と音圧の関係を図示化する処理システム[3.2.2-6, 8]を使用する必要がある。
- ・水槽の床面積に対する砂礫層の面積の割合を大きく設定し、小型水槽（約 1 m 平方）に砂礫層を 2 段に設置した試験を行い、2 段の砂礫層からの反射波を識別できるかどうかを検討する。
- ・低い周波数ほど、音波は砂礫層で減衰しないことが判明したため、500 Hz よりさらに低い帯域の周波数による測定を実施する。
- ・水槽の床面積に対する砂礫層の面積の占める割合が砂礫層からの反射波に影響する現象の検討。
などを行うこととした。

③ 海技研小型水槽試験における砂礫層透過・反射の測定

1) 試験方法

図 3.2.2-20 に示すように約 1 m 角で深さ約 1.5 m の水槽を用い、水深は 1 m とした。水中スピーカーは水面下に置き（図 3.2.2-20）、砂礫層の下側にハイドロホンを置くために内箱を作り、二重式水槽とし、

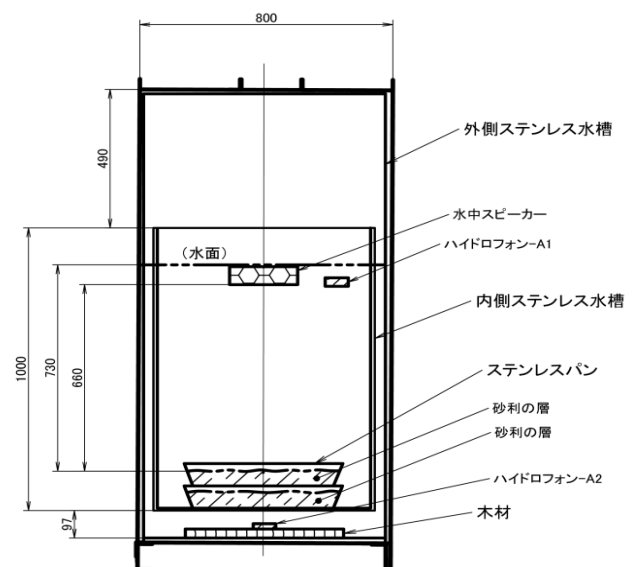


図 3.2.2-20 小型水槽による音波の砂礫層透過・反射特性試験体系

内箱に砂礫層としてステンレスパンに入れた砂利 2 箱（底板合計 2 mm）を重ねた。それぞれの砂利層の厚さは 8.5 cm と 7 cm であり 2 箱分合計約 15 cm である。砂利は市販の砂利を用い、物性値を測定したところ、比重は 1.86 g/cc であり、かさ密度は 1.53 g/cc、粒度分布は(平均粒度)6.8 mm であった。

2) 使用機器類

前記第①項の試験で用いた機器類の他、ハイドロホンの出力をデジタイザでデジタル化し、反射音波の到達時間から深度値を自動処理し、深度と音圧との関係を図示化できるソフト「Sonar with SBP」[3.2.2-8]を利用し、パソコン上に表示される断層図を観察した。

発信音波の周波数については、海技研落水槽における予備的測定結果に基づき、500 Hz よりさらに低い 5 Hz, 10 Hz, 及び 20 Hz の 3 種類を使用した。上記ソフトでは、砂礫層（約 15 cm 厚）による透過・反射及び減衰挙動を集積して画像として生成するので、これらを観察するとともに、同時にハイドロホンで受信する出力波形をオシロスコープにより観察した。

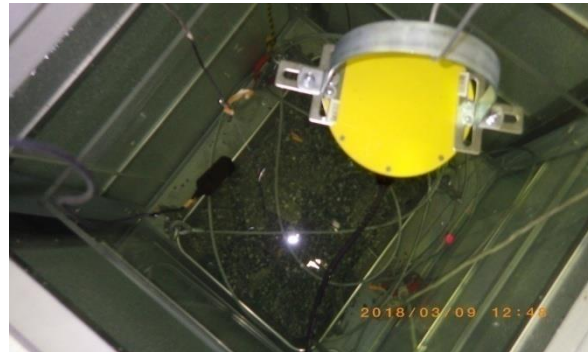


図 3.2.2-21 小型水槽中の砂利とスピーカー

3) 試験結果

得られた断層図、及び同時に記録した波形を図 3.2.2-22 及び図 3.2.2-23 に示す。図 3.2.2-23 は図 3.2.2-22 に示した水槽断面図に対応した縞模様が現われており、砂利の層を通過した音波が水槽底部で反射して受信されていることが分かる。

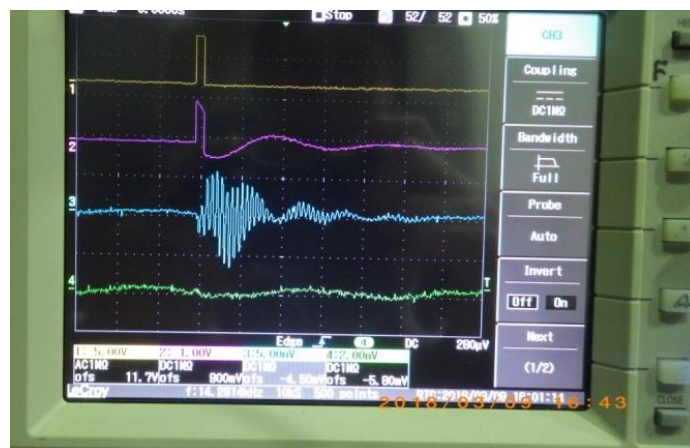


図 3.2.2-22 砂礫層、底面及び水面を繰り返し反射している波形

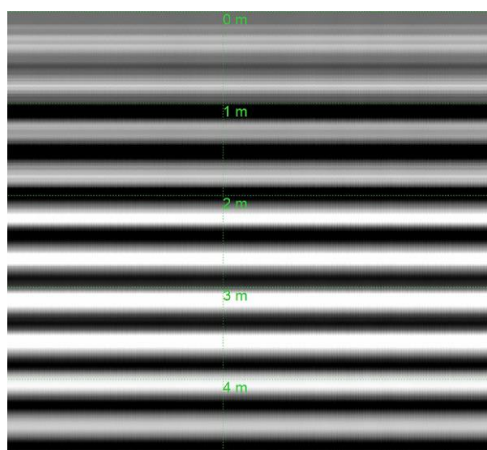


図 3.2.2-23 繰り返し反射波から生成された砂礫層断面図

なお、0.5 m 以上深い部分にも連続して縞模様が現われているが、これらは底部から戻ってきた反射波が再び水面で反射されて底部に届くため、繰り返して探査作業を行っている現象であり、ゴースト画像として表示されているものである。

4) 評価

前項(8)②で記載した落下試験水槽の試験結果と、今回の小型水槽による試験結果より、砂礫層探査のためには SBP の使用が妥当であることが実証された。紙面の都合上、本試験に先立って実施した予備試験結果の詳細については省略するが、距離が異なっても水中を伝搬する音波の波形と、障害物による反射、減衰及び透過現象はオシロスコープにより把握可能である。したがって今後、スピーカーを小型の ROV に搭載可能なように現在以上に小型化する作業は、基礎実験により確認しつつ実施すれば早期に実現可能と考えられる。

(9) まとめ

ランカスター大学の小型放射線検出器、海技研のソナーシステム、マンチェスター大学の ROV を統合するため、海技研が選定した回転式ビームソナーの ROV への実装方法やマルチパスの影響を低減する対策などの最適化検討を行い、水中デブリ探査システムのプロトタイプ機として実現させた。また、本探査システムの 1F 適用で必要と考えられる課題として、ソナー出力の 3D 画像化処理と ROV 測位システムの組み込みを挙げ、その対応方策を検討した。

作成したプロトタイプ機の最終試験として、檜葉遠隔技術開発センターの大型水槽の底部に模擬デブリを設置し、水中動作性能（潜航、浮上、水平及び旋回運動）とデブリ探査性能の確認を行い、基本性能については当初の仕様を満足する結果を得た。これにより、ソナー出力と測位システムを用いたリアルタイム方式の 3D 画像表示システムを 1F で運用すれば、放射線検出器を ROV に搭載してデブリ分布を調査することにより、デブリの存在が疑われる位置などの情報を取得できる見通しが得られた。なお、1F に適用する測位システムの高精度化に関しては、超音波式測位システムの採用など、周辺環境整備を要しない方法のさらなる検討が望まれる。

高線量ガンマ線環境下でデブリ特有の高エネルギーガンマ線または中性子線を検出できるかどうか確認するため、英国チームとの合同で、ROV に搭載した小型放射線検出器($CeBr_3$ またはスチルベン)を原子炉照射する試験を行った。その結果、検出器応答パルスのパイルアップなどによる

課題が明らかとなり、デブリ探査用の検出器開発については今後も継続して検討をする必要が有る。

近年の内部調査で浮上した新しい課題として、堆積物下にあるデブリ探査の方法について検討し、周波数の低い可聴域音波を利用する水底表層部探査機器（SBP）のデブリ探査への適用が有望である見通しを得た。

参考文献

- [3.2.1-1] Gamma Irradiation in JSI Triga Reactor - European Nuclear Society
<https://www.euronuclear.org/meetings/.../RRFM2017-A0066.pdf>
- [3.2.2-2] 「海洋音響の基礎と応用」海洋音響学会編 成山堂書店 2014/02/08
- [3.2.2-3] 「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」
2017/07/27 IRID & TEPCO
- [3.2.2-4] 「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」2018/02/01 IRID
& TEPCO
- [3.2.2-5] 「3号機原子炉格納容器 内部調査について」2017/07/21 IRID & TEPCO
- [3.2.2-6] 「アナログ方式表層音波探査装置のデジタル化」－海-自然と文化－ 東海大学紀要
海洋学部, 第6巻第1号, 129-139頁 (2008).
- [3.2.2-7] 「深海底構造・微地形音響探査パッケージの開発と適用」海洋調査技術, 19, p9～
23 (March 2007).
- [3.2.2-8] 「SONARWIZ -ソナーデータ収録・処理・マッピングソフトウェア-」ビジオテックス
株式会社

3.3 研究推進

平成 27 年度には 12 月に全体会合を開催し、参加機関の業務の調整を図った他、3 月には超音波を用いた類似の研究を進めている東京工業大学のグループと本事業で作成した模擬デブリについて議論を行うなどの情報交換を進めた。なお、模擬デブリの作成に関しては日本原子力研究開発機構（原子力機構）のデブリ性状に関する専門家との活発な意見交換により、本事業推進に有効な模擬デブリを製作することができた。また、3 月には英国出張により英国側研究者と研究調整を図って事業を進めた。

平成 28 年度には 6 月に英国側の研究者の訪日に合わせ、海上技術安全研究所（海技研）において、それぞれの進捗状況を協議するなど、意見交換及び情報交換を行って研究調整に努めた他、原子力機構・櫛葉遠隔技術開発センターの施設を見学して、翌年に実施する日英合同水槽試験の進め方を議論した。8 月及び 12 月には国内研究者間で情報交換などを進めた。また、メールなどを利用して必要に応じて協議を進めるなど、研究連携を密にして研究を進めた。

平成 29 年度には、5 月に海上技術安全研究所にて、水槽を用いた英国側の ROV の試験に合わせて国内研究機関及び英国側との打ち合わせを行った他、10 月には日本側と英国側共同で日本原子力研究開発機構の櫛葉遠隔技術開発センターの施設を用いて水中試験（図 3.3-1）を実施した他、2 月にはスロベニアの TRIGA 炉を用いた英国側の ROV 及び検出器を用いた照射試験（図 3.3-2）に参加するとともに情報交換、打ち合わせを行うなど連携を密にして研究を進めた。

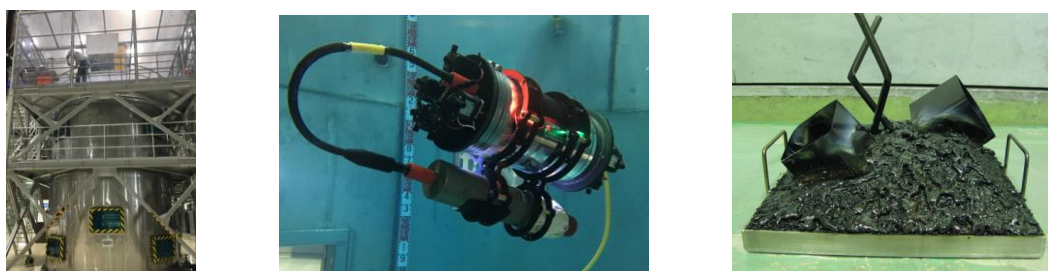


図 3.3-1 櫛葉遠隔技術開発センターの水槽施設を使ったソナーと水中ロボットによる模擬デブリ探査試験（日英全機関参加）

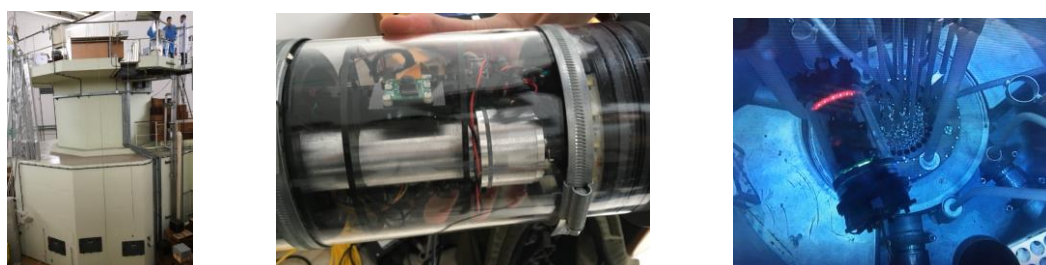


図 3.3-2 スロベニアのヨーージェフ・ステファン研究所の研究炉によるデブリ探査用小型放射線検出器（ $CeBr_3$ ）を搭載した水中ロボットの原子炉照射試験（日英全機関参加）

4. 結言

4.1 総括

本業務では、東京電力福島第一原子力発電所のプラント内線量率分布を計算及び実測により評価するための「線量率分布評価技術の開発」を実施するとともに水中の燃料デブリ分布を評価するための「水中燃料デブリ探査技術の開発」を実施した。以下に3カ年計画の業務実績を述べる。

「線量率分布評価技術の開発」のうち、「① 線量率分布評価のための核データの整備」については、最新の評価済み核データライブラリを基に線量率分布評価に原子力機構で使用する ORIGEN2 コード用の崩壊データや光子スペクトルデータを整備し、原子力機構での線量率分布評価に利用できるようにした。また、整備したデータの妥当性を利用できる測定データを基に確認し、原子力機構での線量率分布評価を支援した。

「② 最確線量率分布評価手法の開発」では、長岡技術科学大学から提供を受けたデータを利用して、事故後の任意時期における線量率分布評価に必要な線源データを作成した。また、1号機を対象として、ガンマ線輸送計算のための3次元プラントモデルの構築を行った。さらに、単位線源に対する線量率分布の応答関数を作成することで、線量率実測値から線源分布を修正する方法を開発した。これらのデータ及び手法を用いて、これまでに実施された3回の内部調査(2012年1st entry、2015年B1調査、2017年B2調査)で得られたほぼすべての線量率実測値を反映し、燃料デブリ取り出し開始が予定されている2021年末における線量率分布の最確予測値を得た。実測時期、水位、測定場所が異なる線量率実測値と整合する1Fプラント内の連続的な線量率分布を示したのは、世界でも初めてのことである。さらに、気中上アクセス方式と横アクセス方式を想定して、燃料デブリの取り出し工程を模擬した解析を行い、最確線量率分布評価手法は、放射線遮へい方策の検討、工法の最適化、事前に必要な内部調査の検討などに活用できることを示した。

「③ 局所線量評価手法の開発」においては、放射線による光ファイバー自身からの蛍光によるノイズ成分を除去するための波長選択型の光検出系整備と、極小シンチレータとして、従来から発光現象が観測されているルビーシンチレータ、ルビー以外の発光結晶について、耐放射線性光ファイバーの波長透過特性とのマッチングを考慮してその特性を調べた。さらに、Csなど、環境支配的な低エネルギーガンマ線と燃料デブリからの高エネルギーガンマ線とを区別することを念頭に、極小体積においても高エネルギーガンマ線の吸収を担保できる新規高密度シンチレータの選定を行い、発光波長成分や放射線の線量率依存性を観測することで利用の可能性を検討した。

波長選択型の光検出系としては、開口数の大きな短焦点距離の小型分光器をバンドパスフィルタとして活用することで、光ファイバー自身からの蛍光とシンチレータからの蛍光とを分離計測し、S/Nを飛躍的に向上できることを示した。

放射線による蛍光発光素子(シンチレータ)として、従来から利用していたルビーの発光特性と、ルビー以外のシンチレータとしてMd:YAGを、さらに、従来に比べ高密度なシンチレータ結晶として、密度約8.3 g/cm³のタングステン酸鉛(PbWO₄)、と密度約9.4 g/cm³のNdを含有させたルテチウム酸化物(Nd:Lu₂O₃)の4つを選定し、ガンマ線による発光特性を取得した。PbWO₄では、400 nm から 600 nm までの広い波長帯域で有意な発光が確認されたが、耐放射線性光ファイバーの発

光も確認された。Nd³⁺を 0.5 %含有させた Nd:Lu₂O₃ の場合には、耐放射線性光ファイバーの透過波長領域である 896 nm で発光を確認することができた。また、発光強度はガンマ線線量率に対して良い線形性が有ること、照射による発光強度の有意な劣化が見られず、耐放射線性を有することが確認でき、局所放射線計測への適用が期待できることが分かった。

「水中デブリ探査技術の開発」のうち、「① ソナーシステムの開発」においては、水中デブリ探査の候補となるソナー性能確認のための実験体系を構築し、体系の大きさ及び水深、並びに水底に置くデブリ模擬物質の性状や大きさを変えた各種試験条件下で得られた結果より、水中デブリ探査用ソナーとして、軽量で発振子の超音波周波数がより高い回転式ビームスキャン・ソナー（83IL 型）を選定した。ただし、探査精度の優れた回転式ビームスキャン・ソナーであっても、データをリアルタイムで 3D 画像表示するにはスキャン数増加による測定時間の増加が有る。このため、リアルタイムに 3D 画像表示が可能なフェイズドアレイ 3D スキャン・ソナーを使用して水底に設置した性状模擬デブリなどの 3D 画像による探査精度を観察し、PCV 内での探査機器として十分効果が見込めることを確認した。

回転式ビームスキャン・ソナーのシステムを英国チームが開発した小型 ROV と統合し、当初目標を満足する「水中デブリ探査装置プロトタイプ-A」を開発した。また、測位システムの実用化、砂礫層下のデブリ探査に有効な SBP システムの精度向上、構成機器の小型化など、今後 1F 適用で必要になると考えられる要素技術開発を進めることを目的とした試験装置として「水中デブリ探査装置プロトタイプ-B」を製作し、その基本性能を確認した。なお、プロトタイプ-A はその原型である英国側開発の ROV（AVEXIS）の技術が使用されており、基本部品が放射線により劣化しても交換可能な構造としてあるため、高放射線下の作業であっても高額な費用とならない工夫がなされている。この技術はプロトタイプ-B にも導入されており、試験中に故障しても簡単に分解が可能であり、部品交換が容易となっている。

「② 水中デブリ探査システムの最適化検討」では、ソナーの ROV への実装方法やマルチパスの影響を低減する対策などを検討した。ランカスター大学の小型放射線検出器、海上技術安全研究所のソナーシステム、マンチェスター大学の ROV を統合した水中デブリ探査装置プロトタイプ-A の 1F 適用で必要と考えられる課題として、ソナー出力の 3D 画像化処理と ROV 測位システムの組み込みを挙げ、その対応方策を検討した。最終試験として、檜葉遠隔技術開発センターの大型水槽の底部に模擬デブリを設置し、水中動作性能（潜航、浮上、水平及び旋回運動）とデブリ探査性能の確認を行い、基本性能について当初の仕様を満足する結果を得た。これにより、ソナー出力と測位システムを用いたリアルタイム方式の 3D 画像表示システムを 1F で運用すれば、放射線検出器を ROV に搭載してデブリ分布を調査することにより、デブリの存在が疑われる位置などの情報を取得できる見通しが得られた。なお、1F に適用する測位システムの高精度化に関しては、超音波式測位システムの採用など、周辺環境整備を要しない方法のさらなる検討が望まれる。

近年の内部調査で浮上した新しい課題として、堆積物下にあるデブリ探査の方法について検討し、周波数の低い可聴域音波を利用する水底表層部探査機器（SBP）のデブリ探査への適用が有望である見通しを得た。

「研究推進」については、事業期間中も進展が見られた 1F 内部調査の状況を踏まえ、国内研究

機関同士の会合を適宜持ち、情報交換や各機関の進捗状況を確認して議論を交わし、全体の研究内容が今後の 1F 現場に有効なものになるよう調整を行った。英国研究者ともメールベースでの情報交換の他、それぞれが訪問して情報交換を進めるなどの連携を図った。また、特に、檜葉遠隔技術開発センターの水槽施設やスロベニアにおける原子炉施設での試験を日英双方の全機関が参加協力して実施するなど、連携を密にして研究を進めた。

以上、3 か年計画の業務項目を着実に実施し、所期の目標を達成した。

4.2 今後の展望

本業務では、今後の福島第一原子力発電所(1F)の廃炉現場への貢献を目指して、「線量率分布評価技術の開発」と「水中デブリ探査技術の開発」を、英国のランカスター大学及びマンチェスター大学と連携して実施した。本業務及び英国側で得られた成果や課題を踏まえて、今後の1F廃炉現場への技術展開について述べる。

長岡技術科学大学と日本原子力研究開発機構(原子力機構)による線量率分布評価技術の開発では、最新の核データ及び高度な計算技術によるシミュレーションと1F内部調査で蓄積される線量率実測値とを組み合わせる最確線量率分布評価手法を完成し、燃料デブリ取り出しの開始が予定されている2021年末における3次元線量率分布の予測値を得た。この技術は、①今後実施すべき内部調査の場所(これまでの調査で線源感度が得られていない場所)の特定、②デブリ探査のために有効な放射線測定法(Cs汚染による放射線と区別可能なデブリ特有放射線測定法)の開発、③デブリ廃炉工法の最適化(遮へい方法の最適化と線量率分布時間変化予測)などに有効である(図3.1.2-8~12)。今後は、この技術を2号機及び3号機にも適用し、燃料デブリサンプリング、今後の内部調査、廃炉工法や工程の具体化への有用な情報を提供していきたい。

極小シンチレータと耐放射線性光ファイバーとを組み合わせた局所線量評価手法の開発では、本研究によって従来には無かった新たなシンチレータを候補として選定することができた(表3.1.3-3)。今後の展開としては、極小シンチレータのエネルギー応答性に着目し、低エネルギーのCs-137ガンマ線や散乱線を分離し、燃料デブリ特有の高エネルギーガンマ線信号(図3.1.2-10)のみが取得できるかどうかを実験的に確認することが課題となる。その上で、本センサーの運搬手段となり得るマンチェスター大学が開発した遠隔操作式水中ロボット(ROV:図3.2.2-9)などへの搭載を想定し、極小シンチレータハウジング部や光ファイバーの最適化により1F内部調査装置への適用を図ること、さらには、最確線量率分布評価手法の開発で示された評価結果(図3.1.2-8)を反映させ、格納容器(PCV)内の部位にシンチレータを配置するシミュレーションを行って、センサーシステムとしての総合設計を行い、デブリの直接的な評価手法として確立したい。

「水中デブリ探査技術の開発」では、水没している1Fデブリの探査技術の開発を目指す日本側と、セラフィールドのプール内にあるレガシー燃料や高放射性廃棄物の調査を目指す英国側との連携により、当初の想像以上に高い相乗効果が得られ、多くの知見を得ることができた。例えば、デブリ探査に有効なソナーの適正評価(表3.2.1-1)、濁水条件での適用性、狭隘空間での超音波マルチパスの影響緩和方策、ROV構成部品と超音波発振子の耐放射線性、ROVの自己位置検出方策(光学的方式と超音波方式)、ソナー出力と測位システムを用いたデブリ分布の3Dリアルタイム画像表示方策、砂礫状の堆積物下にあるデブリ探査方策などの検討結果は、今後の1F現場での超音波を用いたデブリ探査技術の実用化に貴重な情報を与えるものと期待する。また、ランカスター大学の小型放射線検出器(図3.2.2-10)、海上技術安全研究所(海技研)のソナーシステム、マンチェスター大学の小型ROVを統合した水中デブリ探査装置プロトタイプ-A(図3.2.1-10)は、櫛葉遠隔技術開発センターで実施した日英合同水槽施設において、超音波によるデブリ探査のための基本性能を有することが実証された。今後の1F適用のためには、超音波方式の測位システムの採用や回転式ソナーとフェイズドアレイ3Dスキャン・ソナーとの併用などにより、本システムを高度化することが望まれる。また、堆積物下にあるデブリ探査については、周波数の低い可聴域音波を利用する水底表層部探査機器(SBP)の適用が有望である。水中デブリ探査装置プロトタイプ

-B(図 3.2.1-11)は、これらの要素技術開発に必要な機能を搭載したものであり、今後はこの装置を用いた試験を行って、1F 現場に適用できる超音波技術を用いた水中デブリ探査装置の完成を目指したい。なお、プロトタイプ-A 及びプロトタイプ-B ともソナーや放射線検出器及び SBP 以外に水中カメラも搭載しているので、これらを 1F 炉探査用として実用化した場合、水の濁度の大小に拘わらずデブリをはじめ、炉内構造物や障害物などの形状とその分布状況も把握できる。この分布状況を確認後、以下に示すような放射線センサーにより、燃料混在物質の有無が推定可能な探査機器とすれば強力な探査装置となることが期待できる。

ランカスター大学が担当した小型放射線検出器の開発では、Co 照射試験や実験室レベルでの放射線測定試験に基づき、複数の放射線検出器の候補から、小型でありながら安価で比較的高いガンマ線のエネルギー分解能を有する CeBr_3 シンチレータとパルス波形からガンマ線と中性子の信号をリアルタイムで分離することができるスチルベン検出器が選定され、これらをマンチェスター大学が開発した ROV に搭載して原子炉照射試験を実施した(図 3.2.2-9)。その結果、 CeBr_3 検出器ではガンマ線信号のパイルアップにより正しい線量率やガンマ線スペクトルは得られず、スチルベン検出器ではガンマ線レベルが高いと微少な中性子信号の弁別が難しいと判断された。これにより、改めて 1F デブリ探査のための放射線検出器の開発は一筋縄ではいかないことを思い知ることとなった。原子力機構による PCV 内線量率分布の予測結果によると、デブリが存在する可能性が有る場所での線量率は、0.1~500 Sv/h 程度の範囲と推定され、既存検出器のガンマ線遮への最適化だけでこれに対応することは困難と考えられる。今後のデブリ用放射線検出器の開発では、これまでに無い新しい発想も加えて、測定原理が異なる多種多様な検出器候補を検討し、それぞれの検出器で適用可能と考えられる線量率の範囲を明確化し、適材適所の運用を図ることが良いと考えられる。原子力機構の極小シンチレータと耐放射線性光ファイバーと組み合わせた局所線量評価手法もその候補の 1 つとして、今後も検討していきたい。

英国側は、既に新たな放射線検出器の開発と ROV の高度化を計画している。日本側での本業務は平成 29 年度末で終了となるが、今後も英国側との連携を強化し、1F 廃炉技術開発へのチャレンジを継続する予定である。