

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

(受託者) 国立大学法人長岡技術科学大学

(研究代表者) 片倉純一 大学院原子力システム安全工学専攻

(再委託先) 国立研究開発法人日本原子力研究開発機構、

国立研究開発法人海上・港湾・航空技術研究所

(研究期間) 平成 27 年度～29 年度

1. 研究の背景とねらい

東京電力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を把握して廃炉工法を決定する必要がある。更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。そこで、本研究開発では、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適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」、および 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査するための技術開発「水中デブリ探査技術の開発」を、日英共同研究として平成 27 年度より 3 ヶ年の計画で実施する。

「線量率分布評価技術の開発」は、「①最適線量率分布評価手法の開発」と「②局所線量評価手法の開発」で構成される。①では、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、プラント内の最適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。この技術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正確に得ることが重要である。そこで、②において耐放射線性長尺光ファイバ(～50m)と、その先端に装着する小型のシンチレータ素材を組み合わせ、 γ 線による発光波長特性と出力特性を ^{60}Co 照射試験により評価し、広範囲な線量に対して適用可能な検出系の最適化検討を行う。シンチレータ素材の選定に当たっては、従来のルビー素材のほか、発光波長が近赤外の高密度素材を用いて、波高分析による線源核種判別の可能性にチャレンジする。

一方、「水中デブリ探査技術の開発」は、日本側が行う「③マルチビームソナーの開発」、英国側で行う「④水中用小型中性子検出器の開発」及び「⑤水中ロボット(ROV)の開発」で構成される。③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(マッピング)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、模擬燃料デブリを用いた水中試験により確認する。ただし、ソナーは、床面の凹凸を探索することはできても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、 γ 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ある。ランカスター大学が担当する④の技術開発は、高 γ 線環境下で燃料デブリから放出される自発核分裂中性子を検出することを狙ったものであり、ソナーまたは小型中性子検出器をマンチェスター大学が開発する⑤の小型の ROV に搭載してこれらを水中の所定の位置に配置させるための技術開発を行う。

2. これまでの研究成果

2.1 線量率分布評価技術の開発

(1) 最確線量率分布評価手法の開発

H27年度（H27.11～H28.3）は、H28年度に本格化する線量率分布計算の前準備と位置づけ、これに必要な放射化計算用のデータ整備と線量率分布計算に使用する3次元プラントモデルの構築を行った。放射化計算用のデータ整備では、2015年に公開された最新の崩壊データライブラリ（JENDL/DDF-2015）[1]をJENDL-4版のORIGEN2コード(ORLIBJ40) [2]に組み込んだ。また、1Fのシュラウド交換から事故に至るまでの運転履歴を調査してモデル化を行うとともに、新型転換炉「ふげん」で採取されたサンプルに対する微量不純物分析データベース[3]を基に、放射化計算に使用する初期組成を決定した。H28年度には、これらのデータを用いて主要な炉内構造物の放射化線源強度を決定する。線量率分布($D(\mathbf{r})$)の計算では、粒子輸送モンテカルロ計算コードPHITS[4]を用いて、予めプラント内に分布させた34種類($i=1\sim 34$)の各単位線源に対して得られる線量率分布($d_i(\mathbf{r})$:応答関数)を用いて、線源強度(S_i)を重みとする線形和 $\{D(\mathbf{r})=\sum\{S_i d_i(\mathbf{r})\}$ ととして求める。この応答関数を計算するため、図1(a)に示す3次元プラントモデルを構築し、少数粒子(5,000ヒストリ)による試解析を線源毎に行ってモデルの妥当性を確認した。図1(b), (c), (d)は、それぞれ、ウエルシールドプラグの内表面Cs汚染、(b)ドライウエル円筒上部内表面のCs汚染、(c)ドライウエル球部内表面のCs汚染を単位線源とする試解析結果の例である。

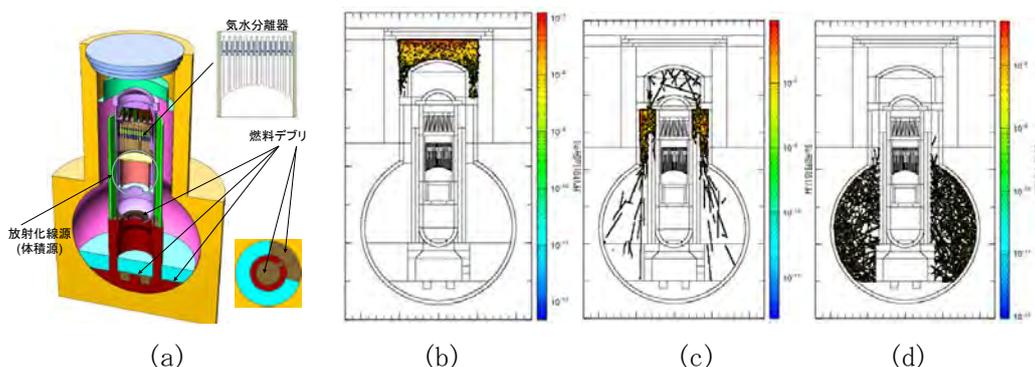


図1. 線量率分布計算用3次元プラントモデル(a)と少数粒子による試解析結果(b)～(d)

(2) 局所線量評価手法の開発

低・中線量に対応した広いエネルギー領域に感度を持つ高速光計測系を整備するため、これを構成する高速の光電流 - 電圧変換増幅器と波高分析も可能な高速のフォトンカウンタ測定系を整備した。本測定系の特長は、入力帯域 200MHz 以上、最小変換率 $2 \times 10^4 \text{V/A}$ の光電流 - 電圧変換増幅器を光電子増倍管に直結させることにより、微弱光電流信号の波形の歪みや減衰、雑音混入を抑制し、この信号を、信号入力帯域 300MHz、最大計数率 200MHz (パルスペア分解能 5ns) で波高帯域 $\pm 300\text{mV}$ 、分解能 1mV の波高分析機能を有したカウンタに入力することで、プリアンプ付高速シングルチャンネルアナライザを構成した点である。

γ 線によるルビーシンチレータの発光波長特性を調べた。直径約 3 mm、厚さ約 0.5 mm の Cr^{3+} を含有したアルミナ多結晶体 (ルビー) を直径 200 μm 、長さ 10m の耐放射線性光ファイバの先端に取り付け、原子力機構高崎研究所の ^{60}Co 照射施設においてガンマ線照射試験を実施した (図2)。

光ファイバからの出力光を分光計測した結果、図3に示すように、700nm 近傍 (693nm) のルビーシンチレータからの蛍光成分が確認され、 γ 線フラックスの検出が可能なが確認された。同時に、400nm から 700nm にかけて光ファイバ自身からの帯域の広い蛍光成分も観測され、線量

率やファイバの長さ等によっては波長選別や差分観測が不可欠であることも分かった。

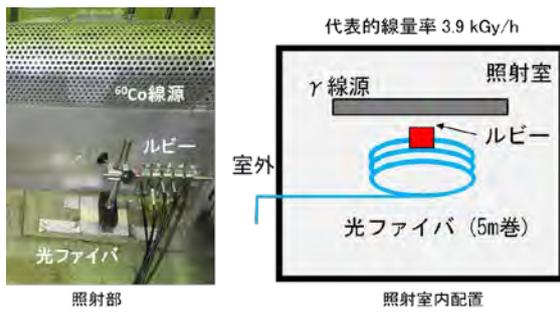


図2 ガンマ線照射体系

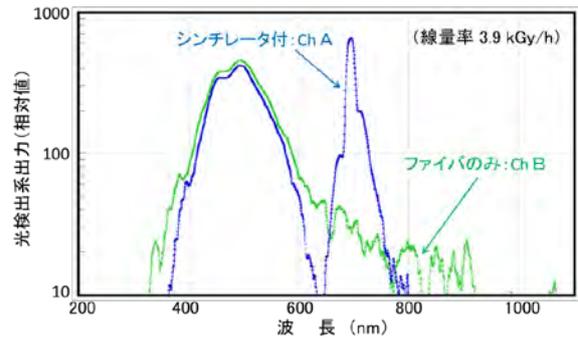


図3 シンチレーション光出力の波長分布計測結果

2.2 水中デブリ探査技術の開発

マルチビームソナーを燃料デブリの分布状況把握に活用するための基礎的な試験を実施するために模擬デブリを製作した。模擬デブリは、その目的に応じて2種類製作した。一つ目は、ソナーによって水中の燃料デブリを計測したときの画像を再現するためにその音響特性を一致させた音響特性模擬デブリである。音波の反射強度は音響インピーダンスに影響されるため、模擬デブリと燃料デブリの音響インピーダンスを合わせることで、その結果を再現できることが期待できる。ただし、福島第一原子力発電所の燃料デブリの音響インピーダンスは明らかになっていないため、スリーマイルアイランド事故における燃料デブリ物性値から音響インピーダンスを推定した。その結果、予想される音響インピーダンスの値に近い模擬デブリの材料としてSUS303を選択した。模擬デブリの形状は、取り扱いが容易なように15cm(L)×10cm(W)×5cm(D)の直方体ブロックとし、試験時には複数個のブロックを組み合わせることで燃料デブリを模擬した(図4)。燃料デブリ表面は多様な粗度を有していると考えられる。そのため表面粗度の違いによる反射強度の相違を調べるために、表面粗度の異なる模擬デブリも作成した(算術平均粗度0mm、3mm、8mm)。二つ目の模擬デブリは、外見的特徴を模擬した性状模擬デブリである。性状模擬デブリの材質としては、鉄酸化物及びSiを主成分とした銅の製錬過程で生じる銅スラグを採用した。銅スラグを成型・固化する方法として、モルタルと銅スラグを混練し、その混練物を山なりに成型した。さらに、成型後、成型物の表面に銅スラグを押し固め、養生後にアセチレンバーナーにより表面を溶融することで燃料デブリの外観を再現した。また、実際の燃料デブリには、溶融していない被覆管等の金属が混入していることも想定されるので、そのような構造物を模擬するものとしてジルコイ-4の円筒と箱状に整形した板材を模擬デブリ上に設置した。また、原子炉容器下部プレナムを貫通した溶融燃料の一部はペDESTAL床面のコンクリート上に分布しているものと考えられている。そこで、模擬デブリを設置するためのコンクリート平板(1m×1m)も併せて作成した。これらの模擬デブリを用いたマルチビームソナーによる初期試験を実施した。図5は、音響特性模擬デブリ(図4)のソナー画像の断面図を示しており、縦軸は距離、横軸は時間軸である。図内に複数段みられる断面画像は、試験水槽の壁面からの反射の影響によるものである。この図から、水槽底面・コンクリート平板・模擬デブリ1段目・2段目・3段目の順番でソナーが対象の形状をよく捉えていることが確認できる。また、ソナーから得られる深度と反射強度の信号からそれぞれ2次元マッピングを行うと、模擬デブリが位置する場所と周囲のコンクリート平板との

境界でソナー信号の相違を確認することができた。表面粗度を変更した試験も実施したが、得られるソナー画像に大きな相違は見られなかった。性状模擬デブリの観察においては、性状模擬デブリの土台であるモルタルを混練した銅スラグの山なりの形状をよく捉えることができた。しかし、構造物を模擬したジルカロイ-4 の円管や角筒の形状までは解像することができなかった。



図4 音響特性模擬デブリ

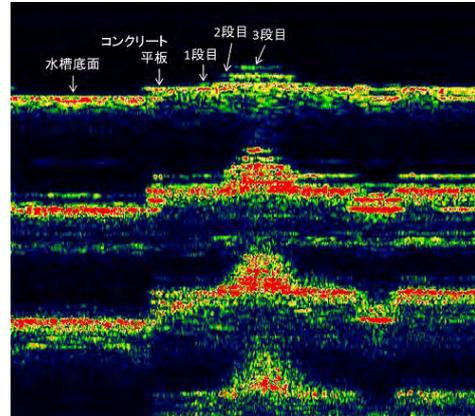


図5 航路に沿ったソナー画像

3. 今後の展望

最確線量率分布評価手法の開発では、技術研究組合 国際廃炉研究開発機構 (IRID) のホームページに公開された炉内状況把握に関する H27 年度研究成果を参考に燃料デブリの分布を反映している。一方、FP 分布については、現状では信頼できる詳細な分布データは得られていないため、当面は大胆な仮定を用いて線源強度を設定する必要があると思われるが、事故進展解析の高度化や PCV/RPV 内部調査等が進展すれば、徐々により良い線源データを与えることができるものと期待する。局所線量評価手法の開発では、H28 年度にルビーに替わる高密度シンチレータの特性把握試験を行う。これがうまくいけば、中性子検出器を用いなくてもデブリ特有の ^{154}Eu や ^{60}Co のガンマ線を捉えることにより、燃料デブリを探索することが可能になるかもしれない。

水中デブリ探査技術の開発では、燃料デブリの反射特性を評価するために、音響特性模擬デブリと性状模擬デブリの2種類製作した。これらを用いて、マルチビームソナーを用いた初期試験を実施した。模擬デブリのソナー画像からその外形的特徴を把握することができたが、今後更にジャイロスコープ等から算出した位置情報を付加することで、より正確な燃料デブリの分布形状とボリュームを把握することが可能となることが期待される。また、ソナーに必要とされる解像度と ROV に搭載するためのサイズとの最適なバランスについても更に検討を行う予定である。

4. 参考文献

- [1] J. Katakura, F. Minato, “JENDL Decay Data File 2015,” JAEA-Data/Code 2015-030 (2016)
- [2] 奥村啓介他, “JENDL-4.0 に基づく ORIGEN2 用断面積ライブラリセット:ORLIBJ40,” JAEA-Data/Code 2012-032 (2013)
- [3] 川太徳夫, 白鳥芳武, 前川清貴, 他, “「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)
- [4] T. Sato, K. Niita, N. Matsuda, et al., “Particle and Heavy Ion Transport Code System PHITS Version 2.52,” J. Nucl. Sci. Technol. 50(9), 913-923 (2013)