

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 大学院工学研究科

(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⑤でマンチェスター大学が開発する小型の 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

核種崩壊生成計算用の核データ及び線量率分布評価に必要なガンマ線等のスペクトルデータを最新の評価済崩壊データライブラリ (JENDL/DDF-2015) [1]に基づき作成したライブラリを組み込んだ JENDL-4 版の ORIGEN2 コード[2]を使用して、福島第一原子力発電所 1 号機(1F1)の燃料デブリに対する光子線源データ(18 群)を作成した。また、1F1 の運転履歴データに基づき ORIGEN2 による放射化計算を行い、炉内構造物の Co-60 線源データを作成した。事故時に放出された Cs 汚染源については、IRID(国際廃炉研究開発機構)の平成 27 年度成果に基づき、格納容器(PCV)/圧力容器(RPV)内の分布を推定した。これらの線源データと平成 27 年度に作成した 1 号機に対する 3 次元プラントモデルを用いて、粒子輸送モンテカルロ計算コード PHITS[3]を用いた線量率分布計算を行い、1 号機プラント内の線量率分布推定値を得た。(図 1 左) 更に、ロボットによる 1 号機内部調査で得られた線量率実測値を用いてドライウエル内の Cs 線源強度を修正し、実測値と整合する線量率分布の推定結果を得た。(図 1 右)

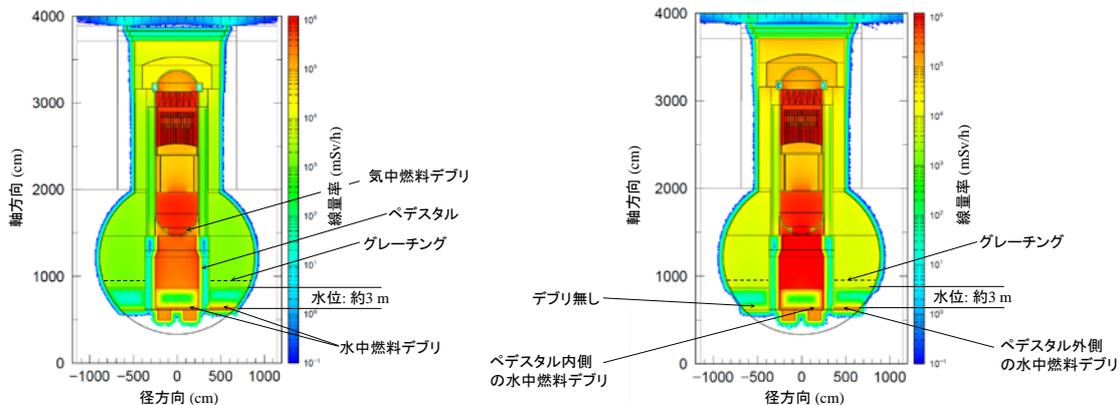


図 1 1 号機プラント内線量率分布 (左: 実測値線量率の反映前、右: 実測値線量率の反映後)

(2) 局所線量評価手法の開発

光ファイバーなどからの蛍光成分を排除し、目的とする波長帯域を選択的に観測するため、焦点距離 100mm、口径比 3.0 の小型分光器に、1200 本/mm の回折格子を取り付けることで、32nm のバンド幅を有したバンドパス型フィルターを構築し、小型ルビーシンチレータに適用した。その結果、3kGy/h の高い線量率環境では、400nm から 700nm にかけてファイバー自体の蛍光が観測されることから、全発光量に対するルビーシンチレータからの発光量の寄与は 4%程度であったが、本フィルター導入により、信号強度がノイズ成分の約 13 倍に向上し、S/N で数百倍の改善に成功した。(図 2 左)

Co-60 照射環境において、ルビーシンチレータの特長的な発光波長である 693nm 近傍の発光強度に着目し、線量率に対する発光出力依存性を調べたところ、100Gy/h から約 10kGy/h までの範囲で良好な線形性が確認でき、ガンマ線光子フラックスに対する良好なモニタリングツールとなることが示された。

ルビー以外の発光素子として、レーザー結晶である Nd:YAG 結晶に着目し、ガンマ線照射に対する発光特性を調べた。その結果、885nm とレーザー発振波長である 1064nm に特長的な発光線が見出せた。両成分とも、線量率 10kGy/h までの範囲で、線量率に対して良好な線形性を持つ発光出力が得られ、ルビー同様、ガンマ線光子フラックス検出器として機能することが確認できた。Nd:YAG

結晶の発光波長帯域には、光ファイバーからの蛍光成分が見られないこと、耐放射線性光ファイバーの良好な透過波長領域であることから、より高いS/Nが確保できる可能性のあることも確かめられた。(図2右)

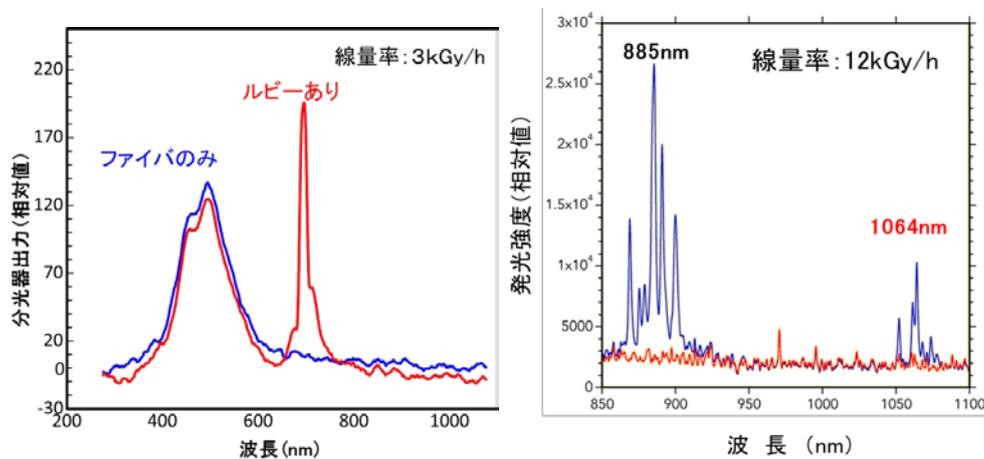


図2 ルビーシンチレータプローブからの代表的な波長分布観測例(左)とNd:YAG結晶のガンマ線による発光スペクトル測定例(右)

2.2 水中デブリ探査技術の開発

放射線の影響を受けない超音波を使って、1F(特に燃料デブリが深く水没していると考えられている1号機と3号機)における水面下の燃料デブリ分布を得ることを意図している。水中ソナーによるマッピングは、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の原子炉格納容器への適用性を評価することが必要となる。これまで模擬デブリによる基礎的な試験及び試験方策の検討を行った他、既存の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)を用いてデブリ模擬試験体、並びに新たに製作した格納容器(PCV)模擬試験体を活用して詳細なデブリ探査性能試験を実施し、評価・検討した。またマルチビームソナーの他、回転式スキャン・ソナーについてもマルチビームソナーと同一条件にて試験を行ってデブリ探査性能の評価を行った。これら2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、軽量な回転式スキャン・ソナーの方が優れていることが分かった。また、当初懸念されていた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、実態のない虚像(ゴースト)の発生を確認した。このゴースト発生の対策として、ソナーヘッドの周りを吸音材によりマスキングを行うことで、解消できることを実証した。さらに、大型円形試験水槽による試験を実施した結果、ある程度探査範囲が広がれば、ゴーストの発生は見られない事が判明した。(図3)

また、英国側との情報交換の他、英国側からの研究者を迎えて高線量のガンマ線照射下において中性子を弁別可能な中性子検出器及び中性子検出器やソナーを搭載するROV等の開発状況の情報を入手した。これら情報に基づき日本側ソナーシステムを英国側のROVに搭載する構造やインターフェイスなどについて検討した。

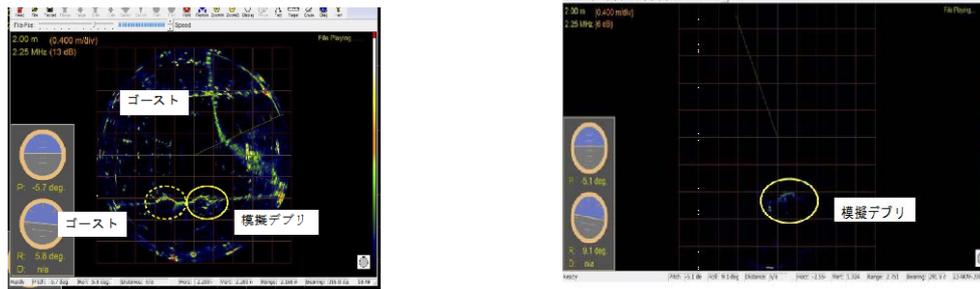


図3 左：ゴーストが発生した画像 右：ソナーヘッドにマスクをした場合の画像

3. 今後の展望

最確線量率分布評価手法の開発では、今後、1号機を対象として、廃炉開始予定時期において、ウェルプラグ、圧力容器上蓋、蒸気乾燥器、気水分離器等を脱着させた場合についてケーススタディを行い、廃炉時各工程におけるプラント内線量率分布の変化を評価する予定である。局所線量評価手法の開発では、高線量照射試験に利用可能な可搬型検出系を使用してガンマ線発光素子の特性評価を実施する他、新規発光素子として、従来に比べ小型でガンマ線のエネルギーを吸収可能な高密度物質で、かつ耐放射線性光ファイバーの透過波長領域である近赤外領域での発光が期待できるルテチウム酸化物焼結体に着目し、ガンマ線による発光特性や耐放射線性を評価することで、炉内局所放射線計測への適用性について検討する予定である。

水中デブリ探査技術の開発では、日本側のソナー・システムと英国側ROVとの統合化を行い、日本の試験施設におけるスケジュールを調整後、日英共同による水中モックアップによる総合試験を実施する予定である。

この総合試験の結果から、1Fで運用する際の課題を抽出し解決策の検討を行う。特にソナーによる水中探査と小型中性子検出器による探査との組み合わせによるデブリ分布評価の高精度化方法についても具体案を策定する予定である。

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] 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)