

**1. 緒言** 福島第一原子力発電所では、原子炉の廃止措置が進行中である。その中でも燃料デブリについては、線量率が非常に大きいことから、ロボットなどによる遠隔操作を用いた取り出しが検討されている。取り出し時に選択する工法を確定するためには、デブリの分布や組成の特定が求められる。1号機～3号機について、遠隔ロボットによる観察や $\mu$ 粒子を用いた透視によりデブリ分布に関する推定が少しずつ得られている中、放射線検出器による放射線の測定情報からデブリ分布を推定する手法を検討した。デブリ分布の推定に対する本手法の適用性が明らかになれば、現在の調査と併せて、確度がより高いデブリ分布の推定を行うことができると考えられる。

**2. 理論** 原子炉容器(RPV)/格納容器(CV)の内部構造は複雑であり、現状で放射線を検出できる場所は限られる。また燃料デブリ分布は複雑であると想定されることから、分布を再現するためには十分な空間離散化が必要となる。よって、拘束条件(測定点)の数より未知数(各点の放射能強度)の数が多くなり、制約条件を満たす無数の解が生じることが想定される。この逆問題に対してもっともらしい解を推定するための逆問題解法として①Maximum Likelihood-Expectation Maximization (ML-EM) 法、②Moore-Penrose Matrix Inverse (MPMI) 法について検討した。

ML-EM 法は制約条件を満たす解のうち、ポアソン分布に基づく実現

確率を最大化する手法であり、CTなどの画像再構成に用いられていることから、デブリの放射能を対象とすることに適すると考えられる。

ML-EM 法では(1)式の反復計算により、放射能強度の事前推定値から放射線計数が考慮された放射能推定値を計算する。ここで、 $A_j$ は線源 $j$ の放射能、 $y_i$ は検出器 $i$ の計数、 $C_{ij}$ は線源 $j$ の放射線が検出器 $i$ に検出される確率、 $I$ は検出器の総数、 $J$ は線源の総数、 $k$ はML-EM法の反復回数を表す。一方、 $C_{ij}, A_j, y_i$ の関係は連立1次方程式 $\mathbf{CA} = \mathbf{y}$ で表される。劣決定系の場合でも一般化逆行列を用いると、一意に解が得られる。本研究ではMoore-Penrose逆行列 $\mathbf{C}_{MPMI}^+$ を用いて、L2ノルムが最小の解を得る。MPMI法にはML-EM法のような、事前推定を定める過程は存在しない。

**3. 計算条件** 推定の検討には、BWRのCV内部の構造を簡易的に模擬したFig. 1のr-z体系を用いる。1号機、3号機における現在の推定を反映させて、放射能の分布はCV底部に想定する。その放射能にある強度分布を与え、それぞれの検出器位置における放射線計数率を計算する。この計数率を基にした放射能強度の逆算を両手法において実施し、与えた放射能強度と一致するかを確認する。放射線には中性子または光子を想定する。検出器の位置については、一例としてFig. 1に示されるように配置する。検出確率 $C_{ij}$ は随伴輸送計算による随伴束から計算する。中性子反応断面積はENDF-B/VII.1ライブラリに基づく、8群エネルギー構造の断面積を使用する。光子反応断面積はMATXS LIB-J40/VITAMIN-Jの42群構造を使用する。中性子検出器には核分裂計数管、光子検出器にはNaI(Tl)シンチレーション検出器を想定した検出断面積を設定する。

**4. 結果・考察** 放射線放出率密度の推定値をFig. 2に示す。ML-EM法の初期値 $A_j^{k=0}$ は全て100000として一様にした。本推定にて検出器はペDESTALのコンクリート壁の外側に配置しており、ペDESTAL外側の放射線源に対する推定精度が確保されることを期待できるが、その傾向は再現されている。これは中性子源・光子源の両方に対してあてはまっており、どちらの放射線を対象とする場合においても本手法の適用性を期待できる。一方で内側の放射線源については、推定が大きく外れ

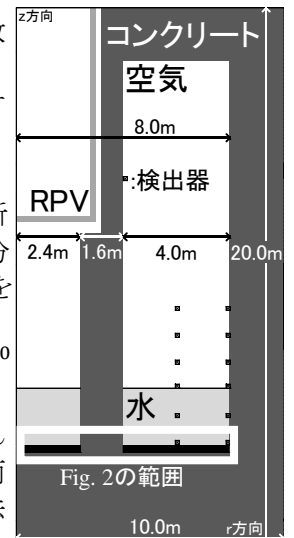


Fig. 1 検討に用いる体系

た。両手法の特性を検討するとML-EM法(中性子)の系列では、推定精度が低い内側にて初期分布の傾向からほぼ更新されていない。MPMI法ではL2ノルム最小の基準に由来する振動が生じた。本検討の実施により、放射線計数を用いたデブリ分布推定の可能性を確認した。体系をより現実に即したものに詳細化すること、各種不確かさに起因する推定結果への影響評価が今後の課題である。

#### 公刊論文および口頭発表

- [1] 菅谷信二・遠藤知弘・山本章夫, 日本原子力学会 2017年春の年会, 2017年3月27日-29日, 東北大学 (2017).
- [2] S. Sugaya, T. Endo, A. Yamamoto, *Proc. M&C2017*, Apr. 16-20, 2017, Jeju, Korea (2017).
- [3] S. Sugaya, T. Endo, A. Yamamoto, *Proc. PHYSOR2018*, Apr. 22-26, 2018, Cancun, Mexico (2018). [to be published]

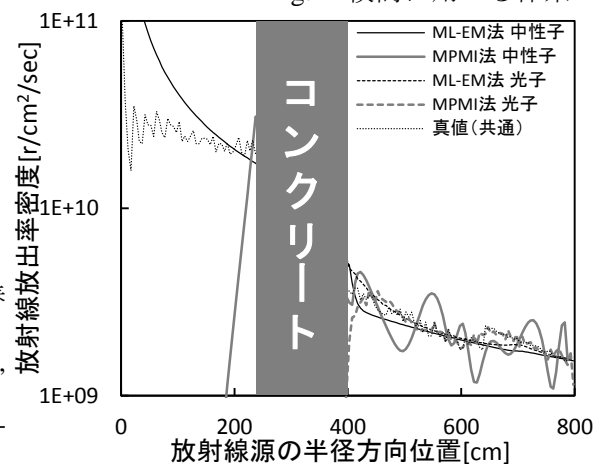


Fig. 2 推定結果