

## 逆問題解法を用いた未知放射線源の放射能強度推定

Estimation of unknown neutron source distribution using inverse problem solutions

\*菅谷 信二<sup>1</sup>, 遠藤 知弘<sup>1</sup>, 山本 章夫<sup>1</sup>

<sup>1</sup>名古屋大学

福島第一原子力発電所の燃料デブリ取り出しにおいて、事前に放射能の分布と強度を調べることが望ましい。放射能分布と強度を推定可能と考えられる手法として、ML-EM法および Moore-Penrose 逆行列法を用い、簡易な体系において限られた放射線測定点の情報により放射能強度の推定を行い、その精度を検証した。

**キーワード**：放射能強度、逆推定、ML-EM法、Moore-Penrose 逆行列法

### 1. 緒言

福島第一原子力発電所では、過酷事故を起こした原子炉の廃炉が行われており、その中で原子炉容器/格納容器内に残された燃料デブリの取出作業は最も困難な作業の一つである。デブリ取出において、安全かつ効率的に作業を立案し、実行するためには、原子炉容器/格納容器内の放射性物質の種類・分布を把握する必要がある。そこで本研究では、複数の測定点で得られた放射線の測定値から、放射能の分布推定を行うことを目的とする。本発表では、炉心周辺の構造を簡単に模擬した体系における放射能強度推定の結果と、本研究で用いる手法の放射線源位置推定に対する有効性について考察を報告する。

### 2. 逆問題解法

格納容器・圧力容器内の構造や燃料デブリの分布は複雑である。一方、容器周辺や内部において検出器を設置でき、放射線が検出可能な場所は限られる。このため、拘束条件（測定値）より未知数（放射能分布）の数が多く、劣決定系になると予想される。そこで、もっともらしい解を推定する手法として①ML-EM(Maximum Likelihood - Expectation Maximization)法、②Moore-Penrose 逆行列法を用いる。本研究では、線源が存在する位置範囲はある程度分かっているものとし、各位置の放射能強度を推定することを考える。

ML-EM法はベイズ推定に基づく手法である。事前に推定された放射線強度に対して、放射線検出数の観測結果の情報を取り込むことで、(1)式に基づく反復計算により放射線強度を推定する[1]。ここで、 $A_j$ は計測の時間幅で線源 $j$ から放出される放射線の数、 $y_i$ は検出器 $i$ において検出される放射線の数、 $C_{ij}$ は線源 $j$ の放射線が検出器 $i$ で検出される確率、 $I$ は検出器の総数、 $J$ は線源の総数、 $k$ はML-EM法における推定の更新数をそれぞれ表す。

$$A_j^{k+1} = \frac{A_j^k}{\sum_{i=1}^I C_{ij}} \sum_{i=1}^I \frac{y_i C_{ij}}{\sum_{j=1}^J C_{ij} A_j^k} \quad (1)$$

一方、本研究における放射線強度の推定問題は連立1次方程式の形に帰着する。このような劣決定系の連立方程式に対して Moore-Penrose 逆行列法を用いた場合には、L2 ノルムが最小の解を求めることとなる。

### 3. 計算条件

線源と測定点の間に円筒の遮蔽体を置き、炉心周辺の構造を簡単に模擬した体系で計算する。体系を Fig. 1 に示す。放射線強度の相対値は Fig. 1 の左下の点線源から順に、10, 12, 14, 16, 18, 19, 19, 18, 16, 14, 12, 10 である。測定点は半径 10m、遮蔽体周りの円周上に等角度間隔で配置する。測定点の高さが 1, 5, 9 [m] のいずれかであるとして、3 通りの場合を計算する。検出数の統計誤差については、測定時間が十分長く無視できると近似する。遮蔽体は厚さ 1m のコンクリートを想定し、中性子束の減衰定数は MVP の計算結果を参考として約 22 [1/m] とする。遮蔽体の影響について調べるため、遮蔽体有無の 2 ケースについて放射線強度の推定を実施する。

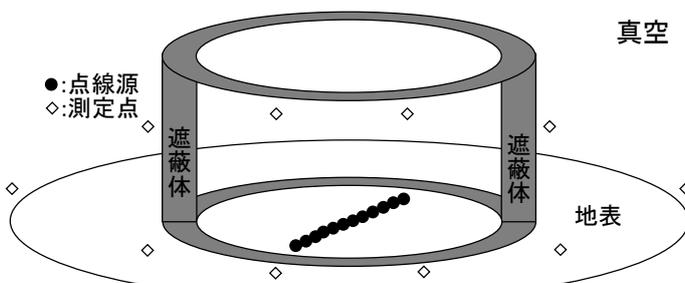


Fig.1 計算体系

### 4. 結果・考察

各点線源に対して推定された放射線強度の誤差

を平均化した指標として、放射線強度推定値の相対誤差の二乗平均平方根(RMS)を Table 1 に示す。ML-EM法と Moore-Penrose 逆行列法(Table 1 においては”M.P.法”)の相対誤差の RMS はいずれも小さく、概ね妥当な放射線強度を推定できた。以上より、炉心構造を簡単に模擬した体系ではあるが、ML-EM法および Moore-Penrose 逆行列法の有効性が確認できた。なお今回の計算条件の場合、遮蔽体有りの体系で推定された放射線強度の相対誤差の RMS は比較的小さいが、この理由は、放射線検出確率  $C_{ij}$  の正確な値を与えることができたためである。実際の推定について考える場合、遮蔽体厚さ・密度・組成等に起因する  $C_{ij}$  の不確かさにより、推定結果に不確かさが生じる。また本計算では無視したが、放射線検出数の統計的変動も不確かさ要因となる。

#### 参考文献

[1] 篠原広行他, “逐次近似画像再構成の基礎,” 医療科学社(2013)

Table 1 相対誤差のRMS[%]

測定点の高さ[m]		1	5	9
ML-EM法	遮蔽体有	0.26	0.47	0.28
M.P.法		0.25	0.34	0.27
ML-EM法	遮蔽体無	0.64	1.33	1.75
M.P.法		0.26	0.26	0.26

\*Shinji SUGAYA<sup>1</sup>, Tomohiro ENDO<sup>1</sup> and Akio YAMAMOTO<sup>1</sup>

<sup>1</sup>NAGOYA Univ.