

未知放射線源の逆推定に関する研究

名古屋大学工学部物理工学科 量子エネルギー工学コース 山本章夫研究室 菅谷信二

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、安全かつ効率的な作業を立案し、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・分布を調べるのが望ましい。1号機においてはデブリ取出工法を2018年上半期に確定する予定[1]であり、早急に情報を得ることが求められる。現在、1号機内のほぼ全てのデブリは格納容器底部に融け落ちた[2]などという知見が得られているが、十分に推定できているとは言い難い。本研究では放射線源位置推定の取り組みの一環として、複数の測定点で得られた放射線の測定情報から、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の考察を述べる。

2. 逆問題解法 格納容器・圧力容器内の構造や放射線源の分布は複雑である。一方、容器周辺や内部にて、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、②M.P.(Moore-Penrose 逆行列)法に着目する。本研究では、線源が存在する位置はある程度分かっているものとし、これらの方法を用いて各線源位置の放射能強度を推定する。

ML-EM法はベイズの定理に基づき導出される(1)式を用いる。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。事前に推定された放射能強度に対して、放射線検出数の観測結果の情報を取り込むことで、

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

$$\begin{pmatrix} C_{11} & C_{12} & C_{13} \\ C_{21} & C_{22} & C_{23} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} A_1 \\ A_2 \\ A_3 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} y_1 \\ y_2 \end{pmatrix} \quad (2)$$

よりもっともらしい放射能強度を推定する。(1)式を反復することで、最終的な収束解を得る。

一方、本研究における放射能強度の推定問題は、例えば検出器が2個、線源が3個の場合には、(2)式のような連立1次方程式に帰着する。このような劣決定系の連立方程式に対してM.P.法を用いた場合には、(2)式を満たす放射能強度のうちL2ノルムが最小となる解を求めることとなる。

3. 計算条件 線源と測定点の間に、鉛直方向は無限に長い中心半径5mの円筒遮蔽体を置き、炉心周辺の構造を簡単に模擬した体系で計算した。体系をFig.1に示す。放射能強度の相対値は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した。測定点の高さが1, 5, 9[m]のいずれかであるとして、3通りの場合を計算した。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した。遮蔽体は厚さ1mのコンクリートとし、中性子束の減衰定数は別途実施した遮蔽計算結果から22[1/m]とした。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能強度の推定を実施した。

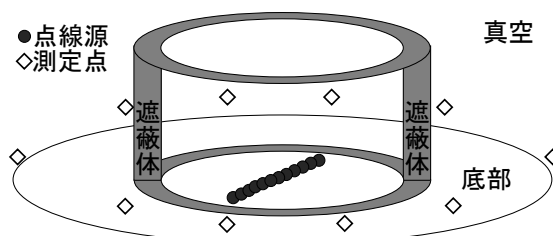


Fig. 1 計算体系

4. 結果・考察 各点線源に対して推定された放射能強度の誤差を平均化した指標として、放射能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、概ね妥当な放射能強度を推定できた。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M.P.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能強度の相対誤差の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。実際の推定では、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] 東京電力(株)福島第一原子力発電所の廃止措置等に向けた中長期ロードマップ(案), TEPCO, 平成27年6月, http://www.tepco.co.jp/nu/fukushima-np/roadmap/images/t150612_05-j.pdf

[2] 格納容器内部調査 | 東京電力, <http://www.tepco.co.jp/decommission/planaction/research/index-j.html> (2016.2.5 アクセス)

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	遮蔽体有	0.25	0.34	0.27
ML-EM法	遮蔽体無	0.64	1.33	1.75
M.P.法	遮蔽体無	0.26	0.26	0.26