

測定値を用いた最小二乗法による BWR の出力分布の最確値推定法の見直し(1)

Review of Method for Estimating Most Probable Power Distribution in BWRs
by Least Squares Method Using In-core Measurements (1)

*江連 秀夫 株式会社 ナイス

「発電炉の燃焼度、安全等の管理のために出力分布の監視が行われている。その方法の一つに、拡散方程式と炉内中性子検出器の測定値とを結合した結果に最小二乗法を適用して、最適な中性子束、出力分布を推定する方法がある。しかし、この方法は複雑で難しいと言われている。そこで、その見直しを行っている。その見直し結果、問題、課題は適宜発表する。今回は、見直し結果について発表する。

キーワード：三次元拡散方程式、測定値、内外挿法、最小二乗法、最確出力分布、データ同化

1. まえがき 中性子束及び出力分布を推定する方法には、① 炉内検出器による測定値の内外挿法、② 三次元核熱水力計算法、③ ①及び②の組み合わせた最小二乗法及び、④ 測定値を用いたデータ同化法(Data assimilation)がある。③の最小二乗法は④のデータ同化法に比べて複雑で難しいと言われている。そこで、最小二乗法の見直しを行う。初めに、見直した結果、問題、課題について発表する。

2. 見直し (1)内外挿法¹⁾：測定値のみ又は測定値と計算値とを内外挿法を適用して中性子束、出力分布を求める方法である。また、内挿法にも EIM(Empirical Interpolation Method)、GEIM(Generalized EIM)、拡散方程式の解を関数表示し、その結果を測定値で修正する方法等がある。

(2)核熱計算法²⁾：炉定数と熱水力の計算を行って、その結果とこれ以外の必要なデータを準備して三次元核熱水力計算コードで中性子束、出力の計算、評価を行う方法である。計算手順が複雑で、大変労力と時間がかかる。

(3)最小二乗法³⁾：三次元核熱水力計算方程式と、中性子束と検出器による測定値との関連式からなる変分方程式に最小二乗法を適用して、最適な中性子束、出力分布等を求める方法である。これも計算手順が複雑で、大変労力と時間がかかる。次に基本式を示す。

拡散方程式： $AX = \lambda X \dots ①$

A: Operator, X: Model state vector, λ : Eigenvalue

測定値と中性子束の関係式： $MX = Z \dots ②$

M: Measurement operator, Z: 測定値

①式と②式とに最小二乗法を適用すると、

$$X = \Delta X_b + (W_1)^{-1} M^T W_2 (Z - MX_b) \dots ③$$

Δ : Iteration operator, X_b : Guessed values,

W_1, W_2 : Weight matrixes

が得られる。③式の第二項は少なくとも測定値の数だけある。炉心のノード分割数は測定値数より多いが、③式は測定値による計算値の修正が行われ、第一項を介して修正が他のノードの計算に伝播される。③式の第一項のプログラムは、修正が必要であるが、既存のプログラムの活用が期待できる。

(4)データ同化法⁴⁾：気象学に用いられ、物理現象を記述する不確かさデータを測定値から確率論的手法で精度を高める方法で、モデル解析の必要がなく、簡便である。精度向上に最小二乗法、ベイズの定理、カルマンフィルタ法が用いられている。次に基本式を示す。

$$X^a = X^b + K(Y - HX^b) \dots ④, K = BH^T(HBH^T + R)^{-1} \dots ⑤, A = (I - KH)B(I - KH)^T + KRK^T \dots ⑥$$

X^b : Background model state, X^a : Analysis model state, Y: Vector of observations, H: observation operator,

B: Covariance matrix of the background errors (n×n), R: Covariance matrix of observation errors, K: Gain matrix,

A: Covariance matrix of analysis errors

測定値の数は限られているので、これに対応する④式の成立は検出器があるノードに限定される。これを避けるためには、測定値から各ノードの内外挿値を求めて、④式からより真値に近い値を求めることである。このためには、 X^b がかなりの精度で求められていることが必要である。データ同化法は内外挿と同じように計算時間が少ないので、オンライン出力マッピング、これを用いた制御棒のメカニカル特性の監視に適するが、現時点では開発段階である。

これらの手法の比較を表 1 に示す。文献は方法につき複数あるが一件として割愛した。

3. 結論 データ同化法は内外挿と同じように計算時間が少ないので、オンライン出力マッピング、監視に適するが、出力分布の微細構造のマッピング、検出器のない領域へのデータ同化法の適用等は課題もある。これに対して、最小二乗法は計算時間がかかる。

参考文献 1) H. Gong, J. P. Arnaud, B. Bouriquet, Y. Maday, O. Mula, "Monitoring flux, and power in nuclear reactors with data assimilation and reduced models", M&C-International Conference on Mathematics & Computational methods Applied to Nuclear Science & Engineering April 16-20, 2017, 2) Tamer Bahadir, Sten-Orjan Lindahl and Scott P. Palmtag, "Sumulate-4 multigroup nodal code with microscopic depletion model", Mathematics and computation supercomputing, reactor physics and biological applications (2005), 3) Ezure H.: "Estimation of most probable power distribution in BWRs by least squares method using in-core measurement," J. Nucl. Sci. Technol., 25, 731-740 (1988), 4) Bertrand Bouriquet, Jean-Philippe Arnaud, Pertrand Brihard, Angeique Poneot, "Unified nuclear core activity map reconstruction using heterogeneous instruments with data assimilation," arXiv: 1108.5971v1 [physics.data-au] 30 Aug 2011.

*Hideo Ezure Nippon Advanced Information Service Company, Inc. (NAIS)

評価手法	内外挿法	核熱計算法	最小二乗法	データ同化法
手法	測定値のみを内外挿法、測定値と計算値の内外挿法	三次元核熱水力計算	測定値と三次元核熱水力計算に最小二乗法を適用	測定値と最小二乗法、ベイズ定理、カルマンフィルタ法の組み合わせ法
精度(%)	<10	<10	<10	<10
難しさ	小	大	大	小
複雑さ	小	大	大	小
労力	小	大	大	小
計算時間	小	大	大	小
分布の微細構造再現	低	高	高	低

表 1 手法の比較