

**1. 緒言** 原子炉の核特性を評価するために、炉心解析が実施される。一般的な軽水炉解析では、計算コストを考慮して、集合体を均質化し拡散近似を取り入れた均質拡散計算が用いられている。多数の近似を取り入れることで計算コストが低減される一方、近似に起因した計算誤差が生じる。このような計算誤差の定量化は、あまり研究の対象とされていない。例えば、計算誤差として、非均質輸送計算と均質拡散計算による実効増倍率の差異に注目する場合、計算誤差を評価するためには、非均質輸送計算と均質拡散計算を行う必要がある。しかし、全ての炉心設計において詳細な非均質輸送計算を行うことは現実的ではない。そこで本研究では、データ同化に注目し、計算誤差と均質拡散計算で得られる核特性パラメータ(集合体からの中性子漏れ量など)の相関を利用して、非均質輸送計算による実効増倍率を推定した。

**2. 理論** データ同化の理論を応用して、均質拡散計算結果そのものに、計算誤差と相関のあるパラメータを取り入れることで、非均質輸送計算結果を推定する。推定式の導出に関しては、

$$\mathbf{k}_a = \mathbf{k}_{hom} - \bar{\boldsymbol{\varepsilon}} - \boldsymbol{\Sigma}_{\boldsymbol{\varepsilon}P}(\boldsymbol{\Sigma}_{PP})^{-1}(\mathbf{P} - \bar{\mathbf{P}}) \quad (1)$$

$$\mathbf{V}[\mathbf{k}_a] = \boldsymbol{\Sigma}_{\boldsymbol{\varepsilon}\boldsymbol{\varepsilon}} - \boldsymbol{\Sigma}_{\boldsymbol{\varepsilon}P}(\boldsymbol{\Sigma}_{PP})^{-1}\boldsymbol{\Sigma}_{\boldsymbol{\varepsilon}P}^T \quad (2)$$

①参照値である非均質輸送計算の計算結果( $\mathbf{k}_{het}$ )と推定値( $\mathbf{k}_a$ )の期待値が一致し、②推定値の分散( $\mathbf{V}[\mathbf{k}_a] = \mathbf{E}[(\mathbf{k}_a - \mathbf{k}_{het})(\mathbf{k}_a - \mathbf{k}_{het})^T]$ )のトレースが最小になるように、非均質輸送計算の計算結果を(1)式のように推定する。また、推定値の分散を(2)式に示す。ここで、 $\mathbf{k}_a$ 、 $\mathbf{k}_{het}$ 、 $\mathbf{k}_{hom}$ 、 $\boldsymbol{\varepsilon}$ 、 $\mathbf{P}$ はそれぞれ推定値、非均質輸送計算の計算結果、均質拡散計算の計算結果、計算誤差(均質拡散計算と非均質輸送計算の計算結果の差異 $\boldsymbol{\varepsilon} = \mathbf{k}_{hom} - \mathbf{k}_{het}$ )、均質拡散計算で得られるパラメータを表す。 $\bar{\boldsymbol{\varepsilon}}$ 、 $\bar{\mathbf{P}}$ は $\boldsymbol{\varepsilon}$ 、 $\mathbf{P}$ の期待値を表し、 $\boldsymbol{\Sigma}_{PP}$ 、 $\boldsymbol{\Sigma}_{\boldsymbol{\varepsilon}\boldsymbol{\varepsilon}}$ 、 $\boldsymbol{\Sigma}_{\boldsymbol{\varepsilon}P}$ はそれぞれパラメータの分散、計算誤差の分散、パラメータと誤差の共分散を表す。(1)式において、不確かさ評価対象の体系では、 $\mathbf{k}_{hom}$ と $\mathbf{P}$ を均質拡散計算で求める必要があるが、非均質輸送計算を行う必要がない。ただし、あらかじめ別の体系(実験体系など)で、 $\bar{\boldsymbol{\varepsilon}}$ 、 $\bar{\mathbf{P}}$ 、 $\boldsymbol{\Sigma}_{PP}$ 、 $\boldsymbol{\Sigma}_{\boldsymbol{\varepsilon}\boldsymbol{\varepsilon}}$ 、 $\boldsymbol{\Sigma}_{\boldsymbol{\varepsilon}P}$ を求めておく必要がある。よって、別の体系での相関関係が不確かさ評価対象の体系でも同じであるという仮定が必要である。

**3. 検証計算** 3x3 集合体体系を対象として、均質拡散計算で計算した実効増倍率とパラメータを用いて、(1)式から非均質輸送計算での実効増倍率を推定した。3x3 集合体体系の集合体としては、KAIST ベンチマーク問題 2A に示されている、5 種類の集合体(UOX-1, UOX-CR, UOX-BA, MOX-1, MOX-BA)を用いた。また、パラメータは、MOX-1 集合体の 1 群, 3 群, 7 群の中性子漏れ量をとした。

まず、計算誤差とパラメータとの相関を求めるため、2x2 集合体体系で 5 種類の集合体の組み合わせを変えて、非均質輸送計算と均質拡散計算を行った。得られた複数の 2x2 集合体体系での結果から統計処理をして、実効増倍率の誤差とパラメータの相関等を評価した。次に、3x3 集合体体系について均質拡散計算で実効増倍率( $k_{hom}$ )と中性子漏れ量( $\mathbf{P}$ )を計算した。その結果と 2x2 集合体体系で求めた相関を用いて、実効増倍率の推定を行った。同様の実効増倍率の推定を異なる配置の 3x3 集合体体系 100 ケースに対して行った。

非均質輸送計算で計算した実効増倍率を参照値として、推定値との誤差( $k_a - k_{het}$ )及び均質拡散計算との誤差( $k_{hom} - k_{het}$ )を Fig.1 に示す。Fig.1 で示す推定値は、1 群, 3 群, 7 群の中性子漏れ量の三つのパラメータを用いて推定した結果である。Fig.1 に示すように、推定値の誤差は、 $\pm 2\sigma_a$  の不確かさの範囲で概ね 0 と一致した。このことは、推定値( $k_a$ )が参照値( $k_{het}$ )を不確かさの範囲で再現できたことを表している。また、推定値の誤差が 0 と一致しなかった要因は、相関を評価する体系と推定体系の相関関係が同じという仮定が成り立たなかったためである。

また、各群(1, 3, 7 群)の中性子漏れ量(L1, L3, L7)を一つのパラメータとしてそれぞれ用いた推定値と三つのパラメータを用いた推定値の比較を行った。実効増倍率の誤差について、100 ケースの平均値、標準偏差及び、絶対誤差の総計は Table.1 のようになった。三つのパラメータを用いた推定値の絶対誤差の総計が最も小さいことから、三つのパラメータを考慮することで、よりもっともらしい推定が出来ている。

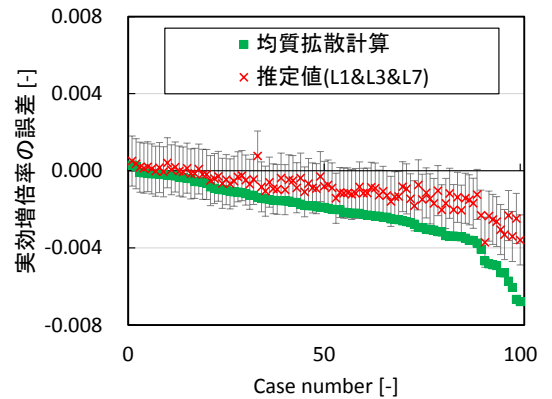


Fig.1 推定値の誤差と均質拡散計算の誤差

**4. 結言** 計算誤差と相関の強いパラメータ(中性子漏れ量)を用いることで、非均質輸送計算を行わずに計算誤差(非均質輸送計算と均質拡散計算の差異)を概ね推定可能であることを確認した。また、複数のパラメータを用いることで、よりもっともらしい推定が可能であることを確認した。適切なパラメータ及び相関を評価する体系の設定が今後の課題である。

Table 1 推定に用いたパラメータによる実効増倍率の誤差

|             | 均質拡散<br>計算結果<br>(なし) | 推定値<br>(L1) | 推定値<br>(L3) | 推定値<br>(L7) | 推定値<br>(L1&L3<br>&L7) |
|-------------|----------------------|-------------|-------------|-------------|-----------------------|
| 平均          | -0.0021              | -0.0013     | -0.0010     | 0.0001      | -0.0010               |
| 標準偏差        | 0.0016               | 0.0013      | 0.0010      | 0.0015      | 0.0009                |
| 絶対誤差<br>の総計 | 0.214                | 0.142       | 0.110       | 0.120       | 0.104                 |

公刊論文および口頭発表

- 1) 木下国治, 遠藤知弘, 山本章夫, 日本原子力学会 2015 年秋の大会, 静岡大学, 9 月 9-11 日, 2015, A58 (2015).
- 2) K. Kinoshita, T. Endo, A. Yamamoto, *Trans. Am. Nucl. Soc.*, 113, pp. 1141-1143 (2015).
- 3) 木下国治, 遠藤知弘, 山本章夫, *KURRI-EKR*, 2, pp. 37-53, (2015).