

2次元非均質炉心解析手法の開発

原子核エネルギー制御工学グループ 山本研究室 伊藤 雅人

1. 緒言 炉心解析コスト低減手法として、固有直交分解(POD)が注目されている。POD では、全中性子束分布を少数の POD 基底により展開することで計算コストを低減できる。具体的には、POD 基底に基づき行列形式の連立方程式を圧縮することで、解くべき未知数の総数を削減できる。しかし、従来の POD 手法には、(1)POD 基底数を統計的に決定する際、計算条件が正規分布に従うことを仮定する必要がある、(2)大規模な非均質炉心体系では求める未知数の総数が大きすぎるため POD の効果的な適用が困難である、(3)典型的な輸送計算手法(例:MOC)では行列演算を用いずに中性子束を評価するため POD の適用が困難である、といった課題があった。修士研究では、各課題を解決するために、①Wilks の手法を用いた POD 展開次数探索手法の開発[1],[2]、②local/global 反復法を用いた POD 計算手法の開発[3]、③SP3 法に基づく POD 輸送計算手法の開発[4]、に取り組んだ。本発表では、大規模な非均質炉心体系の輸送計算に対して適用可能な POD 計算手法として新たに開発した「POD を用いた local/global 反復法に基づく SP3 計算手法」について述べる。

2. 提案手法 原子炉の炉心は多数の同一形状の燃料集合体で構成されており、単一集合体の大きさは比較的小さい。したがって、詳細メッシュ単一集合体計算に POD を適用することで、その有効性を十分発揮できる。さらに SP3 輸送計算の場合、解くべき方程式を行列形式の連立方程式で記述できるため、POD を適用できる。提案手法では、①詳細メッシュ単一集合体体系における POD を用いた SP3 計算(local 計算)と②p-CMFD 法による粗メッシュ全炉心計算(global 計算)を、収束条件を満足するまで反復する。本反復では、各 local 計算の境界条件として入射部分中性子流を与え、global 計算結果を用いて更新することで、隣接した集合体からの中性子漏れ量を反映した全炉心の詳細メッシュ全中性子束分布を計算できる。

3. 検証結果 2次元 UO_2 -MOX 炉心体系を対象として提案手法の有効性を検証した。各集合体は C5G7 ベンチマーク体系を燃料棒単位で均質化した体系とした。集合体および反射体領域は $17 \times 17 = 289$ の空間メッシュに分割し、エネルギー群数は 2 群に縮約した。燃料集合体の POD 基底数は Wilks の手法により、反射体領域の POD 基底数は低ランク近似により、それぞれ評価した。その結果、得られた UO_2 燃料集合体、MOX 燃料集合体、反射体領域の POD 基底数はそれぞれ 48, 44, 59 本となり、本検証計算では、各 local 計算で求める未知数を約 1/5 まで低減できた。得られた各 POD 基底を用いて、提案手法により、全中性子束分布と実効増倍率 k_{eff} を計算した。本検証では、詳細メッシュ全炉心 SP3 計算結果を参照解として、提案手法の計算誤差を評価した。計算結果の一例として、熱群全中性子束の相対誤差(絶対値)の空間分布を図 1 に示す。提案手法による全中性子束の相対二乗平均平方根誤差および k_{eff} 誤差はそれぞれ 0.06% および 0.0002% と極めて小さいことを確認した。さらに Intel® core™ i9 (2.99 GHz) で提案手法による SP3 計算を実施した場合、その計算時間は 1.4 秒であり、p-CMFD 加速法を用いた詳細炉心 SP3 計算と比較して、34 倍の高速化を達成することもできた。以上より、本研究の成果として、計算コストを大幅に低減しつつ高精度な非均質炉心解析が可能な計算手法を世界に先駆けて開発できた。

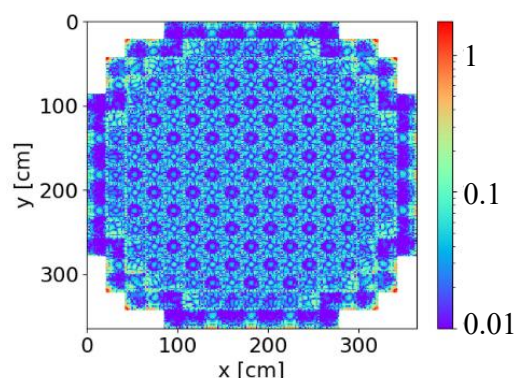


図 1 熱群全中性子束の相対誤差分布[%]

口頭発表 [1] 伊藤雅人 他, 日本原子力学会 2023 年春の年会, 1K03, 3月 13 日-15 日 (2023); [2] M. Ito et al., *M&C 2023*, Tu3T1-5, Niagara Falls, August 13-17 (2023); [3] M. Ito et al., *Proc. RPHA 2023*, C18, Gyeongju, October 24-25 (2023); [4] 伊藤雅人 他, 日本原子力学会 2024 年春の年会, 1L10, 3月 26 日 (2024) (発表予定).