

高温ガス炉を対象とした POD に基づく炉内出力分布再構成の検証

Verification of In-core Power Distribution Reconstruction Based on POD for High-Temperature Gas-cooled Reactors

*浦瀬 勇希¹, 遠藤 知弘¹, 山本 章夫¹

¹名古屋大学

高温ガス炉を対象として、固有直交分解(POD)に基づいた炉内出力分布再構成法の検証を行った。HTTR を模擬した二次元炉心を想定し、反射体と原子炉压力容器までを近似的に考慮したモデルを用いた。原子炉压力容器外に設置した炉外検出器の信号及び POD の直交基底を組み合わせて再構成した炉内出力分布と参照解を比較し、手法の妥当性を評価した。

キーワード：固有直交分解(POD)、炉内出力分布再構成、炉外検出器、高温ガス炉

1. 緒言 冷却材の漏洩リスク低減のため、炉外検出器のみで炉内の出力分布を測定することが望まれている。先行研究において、炉外検出器によって炉内出力(≈中性子束)分布を再構成する方法論として、少数の基底と展開係数により解を表し、解の自由度を大幅に減少させることが可能な固有直交分解(POD)に基づく手法を提案した[1]。実証炉として円環状の燃料配置が構想されている高温ガス炉へ提案手法の適用を目指している。本研究では、環状炉心ではない高温工学試験研究炉(HTTR)を模擬した体系で压力容器までを考慮し、POD に基づく手法の適用限界を確認した。

2. 計算手法 各エネルギー群の中性子束分布を再構成するために必要となる POD 基底と POD 展開係数を求める。POD 基底を作成するためには、計算条件の異なる複数の教師データが必要である。本検討では、燃料要素の濃縮度を一体ずつ変更することで複数の条件設定をした。この場合、教師データ数は燃料要素数と同数になる。得られた教師データを行列の形に並べて特異値分解することで、POD 基底が得られる。このとき、中性子束分布は $\vec{\varphi}_g = \mathbf{U}_g \vec{f}_g \dots (1)$ のように基底と展開係数を用いて展開可能である($\vec{\varphi}_g$ は中性子束ベクトル、 \mathbf{U}_g は POD 基底行列、 \vec{f}_g は POD 展開係数ベクトル)。次に、炉外検出器計数値より POD 展開係数を求める。炉外検出器計数値を求める式は、 $\vec{n}_g = \mathbf{D} \vec{\varphi}_g \dots (2)$ である(\vec{n}_g は検出器計数値ベクトル、 \mathbf{D} は検出器応答係数行列)。式(1)を式(2)に代入して得られた式の両辺に \mathbf{DU}_g の一般化逆行列 $(\mathbf{DU}_g)^\dagger$ を乗じると、 $\vec{f}_g = (\mathbf{DU}_g)^\dagger \vec{n}_g \dots (3)$ が得られる。式(3)から、未知数である展開係数 \vec{f}_g を求めることができ、再び式(1)を用いれば POD 基底 \mathbf{U}_g と、検出器信号 \vec{n}_g から得られた展開係数 \vec{f}_g を用いて中性子束分布 $\vec{\varphi}_g$ を再構成可能である。さらに、 $\vec{P} = \sum_{g=1}^{NG} v \Sigma_{f,g} \vec{\varphi}_g \dots (4)$ を用いて、エネルギー群ごとに再構成した中性子束分布 $\vec{\varphi}_g$ から出力分布 \vec{P} を計算できる($v \Sigma_{f,g}$ は生成断面積)。

3. 計算結果 HTTR を模擬した二次元炉心を想定し、反射体と原子炉压力容器までを近似的に考慮したモデルを用いた。中性子束分布はエネルギー9群の固有値計算により求めた。炉心を構成する燃料要素の数を30体と設定したため、教師データ数は燃料要素数と同数の30通りである。得られた30個の中性子束分布を教師データとして特異値分解し、POD 基底を作成した。炉外検出器数は12として、炉内出力分布を再構成した。再構成結果と参照解の出力相対誤差分布の一例を図1に示す。燃料濃縮度擾動位置の再構成精度が課題であるものの、炉内出力分布を相対平均二乗誤差4%以内で再構成可能であることを確認した。

参考文献 [1] Y. Urase et al., *Proc. PHYSOR2024*, pp. 1642–1651, San Francisco, CA, April 21–24, 2024.

*Yuki Urase¹, Tomohiro Endo¹ and Akio Yamamoto¹

¹Nagoya Univ.

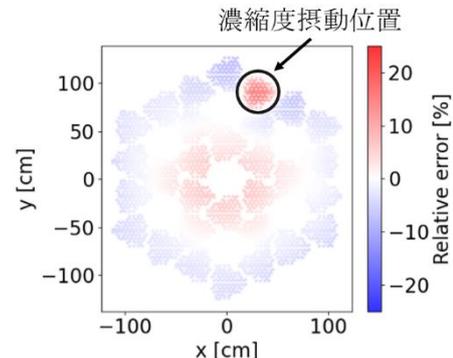


図1 POD 再構成結果と参照解の出力相対誤差分布(%)
(原子炉压力容器外に検出器を12個設置)