

<第16回 炉物理部会賞受賞 記念寄稿>

エネルギーに関するスペクトル展開を用いた共鳴計算手法に関する研究

国立研究開発法人 日本原子力研究開発機構

近藤 諒一

1. はじめに

この度の炉物理部会奨励賞をいただき大変光栄に思います。本研究は私が名古屋大学在学中の修士課程において、山本章夫教授と遠藤知弘准教授のご指導のもとで実施したものです。先生方大変丁寧なご指導により、このような賞を受賞できましたこと、深く感謝いたします。また炉物理部会で関わりましたすべての関係者の方々に、この機会をお借りして感謝の意を表します。

研究の詳細については文献^[1,2]をご覧くださいとしまして、本寄稿では研究のエッセンスのみご紹介いたします。また、現在取り組んでいる本研究に関連した内容についても触れたいと思います。

2. 研究の概要

本研究の目的は新しい共鳴計算手法の開発です。代表的な共鳴計算手法には超詳細群計算、等価原理、サブグループ法の三つがあり、それぞれに利点と欠点があります。一つ目の超詳細群計算は、輸送計算において数十万群の詳細なエネルギー依存性をそのまま取り扱う第一原理的な手法です。高精度である一方で、計算時間が膨大になります。二つ目の等価原理では、均質体系において背景断面積というパラメータを用いることで非均質性を取り扱います。等価原理に基づく計算は、その計算コストの低さから歴史的に広く使われてきましたが、非均質性が高い場合にはその精度は低下します。最後のサブグループ法では、断面積の大きさに応じてエネルギー群を分割します。サブグループ内の中性子束分布の変化が小さくなるため、反応率を精度よく評価できます。しかしながら、断面積の温度依存性(ドップラー効果)や共鳴干渉効果を直接的に取り扱うことが困難です。

本研究では上記の代表的な手法に代わり得る新しい共鳴計算手法として、RSE法 (Resonance calculation using energy Spectrum Expansion method)^[1]を開発しました。RSE法の特徴は大きく二つあります。一つ目は、求めたい実効断面積のエネルギー群内における超詳細群スペクトルを、エネルギーについて関数展開することです。輸送方程式において角度中性子束、全中性子束、中性子源をエネルギーに関する基底関数で展開すると、中性子束の展開係数に関する輸送方程式になります。これは従来の輸送方程式と類似しており、数値的に解くことが可能です。理論的にはどの輸送理論にも適用が可能ですが、本研究では

Characteristics 法に適用しました。二つ目は、超詳細群スペクトルの展開に用いる基底関数を別の簡易的な計算で得られるスペクトルから抽出するということです。基底関数の抽出と選定には特異値分解(SVD)と低ランク近似(LRA)を用います。これは Reduced Order Model (ROM)^[3]の考え方の一つです。RSE 法ではスペクトルの展開次数に伴って計算コストが大きくなるため、解きたい非均質体系の超詳細群スペクトルをよく表現する基底関数を作成することが重要です。本研究では、様々な背景断面積を設定した均質体系で得られる超詳細群スペクトルを基底関数の抽出に用いました。均質体系を用いることで少ない計算コストで超詳細群スペクトルを得ることができます。もちろん、現代の計算機能力を考えれば、簡易な非均質体系を基底関数の作成に使うこともでき^[4]、そうすることで解析対象のスペクトルをよく表現する基底関数を抽出できる可能性があります。

検証計算の結果、RSE 法では超詳細群計算に近い精度で実効断面積を得ることができました。すなわち、空間自己遮蔽効果や核種間の共鳴干渉効果、スペクトル干渉効果の取り扱いが可能であることがわかりました^[1]。また RSE 法の計算効率化についての検討も実施しました^[2]。非均質の 2 次元 UO₂ 集合体体系における共鳴計算では、RSE 法を用いることで、超詳細群計算と同等の計算精度を保ちながら、約 70 %の計算時間を削減できることがわかっています。

RSE 法の理論は、本研究でおおよそ確立されたように思います。すでに RSE 法を用いた別の研究が発表されており^[5]、今後の応用が期待されます。

3. おわりに

この度いただいた奨励賞の研究テーマである RSE 法についてご紹介しました。本研究を通じて、偉大な先人たちが考案した難しい^[6]共鳴計算手法や Characteristics 法を用いた輸送計算コードの作成など、決定論的手法による核解析について多くのことを学ぶことができました。共鳴計算については先生方、先輩方のおかげで日本語のわかりやすい資料が公開されていますので、これから勉強されるという方は文献をご参考にしてください^[6-9]。

また遠藤准教授が日本原子力学会 2022 年秋の大会で発表されたように^[10]、近年、炉物理分野では ROM を取り入れた研究が盛んに行われています^[11-14]。現在は、この ROM を活用して、モンテカルロ計算における関数展開タリー法^[15]について研究を進めています。ここではモンテカルロ法が苦手とする分布量の計算を、関数展開タリー法と ROM を用いることで高精度かつ高速に行う手法を開発しています^[16]。

引き続き研究活動に邁進するとともに、研究成果を学会等で報告し、皆さまと議論できれば幸いです。今後ともどうぞよろしくお願いたします。

参考文献

1. [R. KONDO et al., "A New Resonance Calculation Method Using Energy Expansion Based on a Reduced Order Model," Nucl. Sci. Eng., 195, 7, 694 \(2021\).](#)

2. [R. KONDO et al., “Improvements in Computational Efficiency for Resonance Calculation Using Energy Spectrum Expansion Method,” *Nucl. Sci. Eng.*, **196**, 7, 769 \(2022\).](#)
3. 山本章夫, 「Reduced Order Model とシミュレーション計算」, 第 50 回炉物理夏期セミナー「炉物理プログラミングの「今」を学ぶ」テキスト, 日本原子力学会, (2018).
4. K. YAMAJI et al., “Implementation of a Resonance Calculation Using Energy Spectrum Expansion Method into Heterogeneous Transport Calculation Code GALAXY-Z,” *Proc. M&C 2021*, Virtual Meeting, October 3 – 7, 2021.
5. A. YAMAMOTO et al., “A New Approach for Resonance Treatment of Doubly Heterogeneous Fuel Using the RSE Method,” *Proc. International Conference on Physics of Reactors 2022 (PHYSOR 2022)*, Pittsburgh, PA, May 15 – 20, 2022.
6. [山本章夫, 「共鳴計算は難しいのか?」, 炉物理の研究 第 72 号 \(2020\).](#)
7. 北海道大学オープンコースウェア、原子炉炉心解析手法オンラインセミナー、講義 5 : 実効断面積と共鳴計算手法(2021); <https://ocw.hokudai.ac.jp/lecture/reactor-core-analysis-method> (2022 年 2 月 3 日時点)
8. 宇根崎博信, 「実効断面積計算手法の基礎 (超入門)」, 第 36 回炉物理夏期セミナー「基礎から学ぶ炉心解析」テキスト, 日本原子力学会, (2004).
9. 小池啓基, 「格子計算の基礎」, 第 49 回炉物理夏期セミナー「炉心設計とその解析手法の基礎を学ぶ」テキスト, 日本原子力学会, (2017).
10. [遠藤知弘, “炉物理計算に対する ROM の適用例,” 日本原子力学会 2022 年秋の大会, 1F_PL03, 2022.](#)
11. [R. KATANO et al., “Sensitivity Coefficient Evaluation of an Accelerator-Driven System Using ROM-Lasso Method,” *Nucl. Sci. Eng.*, **196**, 10, 1194 \(2022\).](#)
12. [M. YAMAMOTO et al., “Compression of Cross-Section Data Size for High-Resolution Core Analysis Using Dimensionality Reduction Technique,” *Nucl. Sci. Eng.*, **195**, 1, 33 \(2021\).](#)
13. K. TSUJITA et al., “Efficient reduced order model based on the proper orthogonal decomposition for time-dependent MOC calculations,” *J. Nucl. Sci. Technol.*; <https://doi.org/10.1080/00223131.2022.2097963>.
14. M. ITO et al., “Neutron Diffusion Calculation in Heterogeneous Geometry Based on Local/Global Iteration Using Proper Orthogonal Decomposition,” *Proc. International Conference on Physics of Reactors 2022 (PHYSOR 2022)*, Pittsburgh, PA, May 15 – 20, 2022.
15. D. P. GRIESHEIMER, “Functional Expansion Tallies for Monte Carlo Simulations,” PhD Thesis, University of Michigan (2005).
16. [近藤諒一, 長家康展, “特異値分解による数値的な基底関数を用いた関数展開タリー法の開発 \(1\)一次元平板体系の検証計算,” 日本原子力学会 2022 年秋の大会, 1G14, 2022.](#)