

高速炉核特性解析における

エネルギー、角度、空間に関する離散化手法の高度化

学位論文内容の要旨

高速増殖炉を柱とした核燃料サイクルは、我が国のエネルギー安全保障を確保するうえで重要な選択肢のひとつである。ところが、そのコストの高さが問題とされており、コストを低減するための技術開発が必要とされている。コスト高の原因のひとつとして高速増殖炉の核特性パラメータに対して過剰に設定された安全裕度が挙げられる。従って、高速増殖炉の核特性予測精度の向上は、より合理的な高速増殖炉の設計を可能とし、コストの低減に繋がることから、極めて重要な研究課題となっている。

高速炉の核特性解析は、炉心内の中性子挙動を記述するボルツマン型の輸送方程式を数値的に解くことで行われる。中性子の挙動は、位置、角度、エネルギーに依存するため、中性子輸送方程式の数値計算の際には、それら独立変数に対して離散化を行う必要がある。

これまでの高速炉の核特性解析では、エネルギーに関して 70 に離散化された定数セットを用い、散乱の非等方性を簡便な手法で考慮し、複雑な形状を有する格子を平均化したうえで全炉心の計算を行う、といった方法を用いてきた。

本研究では、昨今、飛躍的に拡大する計算機能力を利用して、より近似の少ない離散化手法を開発・導入し、数値計算による誤差を低減させた。同時に、従来手法による計算値を、より厳密な計算値と比較することにより、従来手法の数値誤差を定量的に評価した。

本論文は以下の 7 章から構成されている。

第 1 章では、研究の背景とその目的を示し、第 2 章では、従来用いられてきた高速炉核特性解析手法の詳細について説明した。

第 3 章では、重核種の共鳴自己遮蔽効果の評価手法に関連して、エネルギー離散化の高度化に関する検討を行った。共鳴エネルギー領域における断面積の共鳴構造を陽に取り扱うことで計算精度を向上させる格子計算コード SLAROM-UF を開発した。SLAROM-UF による計算値を参照値として、従来用いてきた東捻の方法の精度評価を行い、東捻の方法が 1keV 以下のエネルギー領域で実効断面積に大きな誤差を生じさせること、それが ZPPR-9 の Na ボイド反応度に対して最大 5 パーセント程度の誤差を生じさせることを明らかにした。また、高速・高精度な計算手法として確率テーブルに基づくサブグループ法の導入を行い、東捻の方法よりも高い精度で実効断面積を計算できることを示した。加えて、非整数次モーメントを保存させるという、より少ないステップ数で精度の良い確率テーブルを作成することができる手法を開発した。

第 4 章では、散乱の非等方性とエネルギー平均化に伴い生じる全断面積の角度依存性の取り扱い手法についての検討を行った。従来、散乱の非等方性を取り扱うために輸送近似と呼ばれる簡便な

手法を用いてきたが、散乱の非等方性を直接的に取り扱うコードシステムを整備し、従来手法の精度を評価した。その結果、従来手法は、大型高速炉を模擬した臨界集合体の実効増倍率に対しては反応度差で 0.1 パーセント以内で厳密な手法による計算値と一致することを確認した。一方で、反射体と炉心燃料が接する小型炉心の実効増倍率に対しては 0.2(反応度差) 程度の誤差、ブランケット領域におけるウラン 238 の核分裂反応率分布に対しては 2 パーセント程度の誤差を生じさせることを示した。また、輸送近似を拡張した定義式を提案し、それによる計算値が厳密手法による計算値と実効増倍率、反応率分布ともにほぼ一致することを示した。加えて、エネルギー平均化に伴い生じる全断面積の角度依存性を考慮する方法として、整合 P 近似を用いる方法と方向依存全断面積を用いる方法の比較を行い、両者に大きな優劣な差がないことを確認した。

第 5 章では、反射体等に用いられる構造材核種としての鉄に着目し、その共鳴構造取り扱い手法に関連したエネルギー離散化の高度化に関する検討を行った。鉄に感度を有する高速炉心では、従来の 70 エネルギー群構造の定数は実効増倍率に対して最大で 2.5 パーセント(反応度差)もの誤差を生じさせること。そのような体系に対しては、1381 群の炉定数を用いて実効断面積を計算し、その詳細エネルギー群数のままで体系輸送計算を行うことにより、連続エネルギーモンテカルロ法による計算値と 0.15 パーセント(反応度差)以内で実効増倍率が一致することを示した。加えて、より効率的に炉心計算を行うため、断面積の縮約手法の提案と、縮約誤差を悪化させない縮約群構造の自動生成アルゴリズムの開発を行った。

第 6 章では、臨界集合体の Na ボイド反応度の解析精度を向上させるため、空間に関する離散化の高度化に関する検討を行った。はじめに、いくつかの臨界集合体での Na ボイド反応度の実験解析結果の詳細な分析により、格子内の物質板境界に平行な中性子漏洩成分が過大評価されている可能性があることを指摘した。それを受けて、格子の均質化を行わない臨界集合体の中性子輸送計算を行い、そのような計算においては、用いる角度求積セットとその次数の選択が重要となることを示した。そして、格子の非均質性を全炉心体系で陽に考慮する計算を実現し、従来手法が Na ボイド反応度に対して 10 パーセントを超える誤差を生じさせることを示した。また、格子の均質化を行わずに実験解析をすることにより、Na ボイド反応度の計算値は、実験値と実験誤差の 3 標準偏差以内で一致することを示した。

以上の成果により、臨界集合体における Na ボイド反応度、燃料と反射体が接する小型炉心の実効増倍率、反応率分布の解析精度が向上した。これらは実機高速炉核特性の予測精度向上に結びつくとともに、臨界集合体で取得された積分データの実験解析の高精度化を通して核データの精度向上にも繋がる。加えて、本論文で定量的に評価した従来手法の誤差は、原子炉設計での裕度の合理性を担保する貴重なデータとなる。

学位論文審査の要旨

主 査 教 授 島 津 洋一郎

副 査 教 授 佐 藤 正 知

副 査 教 授 奈良林 直

副 査 教 授 板 垣 正 文

学 位 論 文 題 名

高速炉核特性解析における

エネルギー、角度、空間に関する離散化手法の高度化

核燃料サイクルは我が国のエネルギー安全保障を確保するうえで重要な選択肢のひとつであるが、そのコストの高さが問題とされており、コストを低減する技術の開発が必要である。コスト高の原因の一つとして、高速増殖炉の核設計において過剰に設定される安全裕度が挙げられる。従って、高速増殖炉の核設計精度の向上は、より合理的な高速増殖炉の核設計を可能としコストの低減に繋がることから、極めて重要な研究課題となっている。

高速炉の核特性解析は、炉心内の中性子挙動を記述するボルツマン型の輸送方程式を数値的に解くことで行われる。中性子の挙動は、位置、角度、エネルギーに依存するため、中性子輸送方程式の数値計算の際にはそれら独立変数に対して離散化を行う必要がある。

これまでの高速炉の核特性解析では、エネルギーに関して 70 に離散化された定数セットを用い、散乱の非等方性を簡便な手法で考慮し、複雑な形状を有する格子を平均化したうえで全炉心の計算を行う、といった方法を用いてきた。本研究では、より近似の少ない離散化手法を開発・導入し、数値計算による誤差を低減させた。同時に、より厳密な計算値と比較することにより従来手法の数値誤差を定量的に評価した。

本論文は全 7 章で構成されており各章の概要は以下の通りである。第 1 章では研究の背景とその目的を示し、第 2 章では高速炉核特性解析に対する従来手法について述べた。

第 3 章では、重核種の共鳴自己遮蔽効果の評価手法に関連するエネルギー離散化の高度化に関する検討を行った。共鳴エネルギー領域における断面積の共鳴構造を陽に取り扱うことで計算精度を飛躍的に向上させる格子計算コード SLAROM-UF を開発した。また、SLAROM-UF による計算値を参照値として従来手法の精度評価を行い、従来手法が特定のエネルギー領域で実効断面積に大きな誤差を生じさせることを明らかにした。また、高速・高精度な計算手法として確率テーブルに基づくサブグループ法の導入を行い、従来手法よりも高い精度で実効断面積を計算できることを示した。加えて、より少ないステップ数で精度の良い確率テーブルを作成することができる手法を開発した。

第 4 章では、散乱の非等方性とエネルギー平均化に伴い生じる全断面積の角度依存性の取り扱い

手法についての検討を行った。散乱の非等方性を直接的に取り扱うコードシステムを整備し従来手法の精度を評価した。その結果、従来手法は大型高速炉を模擬した臨界集合体の解析に対しては良好な精度であること、反射体と炉心燃料が接する小型炉心に対しては精度を悪化させることを示した。また、輸送近似を拡張した定義式を提案し、それによる計算値が厳密手法による計算値とほぼ一致することを示した。

第5章では、反射体等に用いられる構造材核種としての鉄に着目し、その共鳴構造取り扱い手法に関連したエネルギー離散化の高度化に関する検討を行った。鉄に感度を有する高速炉心においては、従来手法は非常に大きな誤差を生じさせること、そのような体系に対しては1000群程度の詳細な炉定数を用いる必要があることを示した。

第6章では、臨界集合体のNaボイド反応度の解析精度を向上させるため、空間に関する離散化の高度化に関する検討を行った。複数の臨界集合体でのNaボイド反応度の実験解析結果の詳細な分析により、従来手法は特定の条件下で中性子漏洩を過大評価することを示した。その問題を改善するため、格子の均質化を行わない臨界集合体の中性子輸送計算を実現した。その高度化した手法を用いて実験解析を行うことにより、臨界集合体のNaボイド反応度の計算値が実験値と実験誤差の3σ以内で一致することを示した。

第7章では、本研究で得られた成果を総括した。

これを要するに著者は、高速炉核特性解析におけるエネルギー・角度・空間に関する離散化を高度化させるうえでの問題点を抽出し、それを克服するための方法を見出した。さらに離散化を高度化させた数値計算を実現し、従来手法の計算誤差を定量的に評価するとともに、従来手法で見られた問題点を改善する方法を提示した。これらの研究成果には高く評価できる新規性・有用性が含まれており、原子力工学に貢献するところ大なるものがある。よって著者は、北海道大学博士(工学)の学位を授与される資格があるものと認める。