

報告番号	※ 甲 第 11077 号
------	---------------

主 論 文 の 要 旨

論文題目 Study on Cross Section Generation for BWR Pin-by-Pin Core Analysis (燃料棒単位詳細メッシュBWR炉心解析における断面積の作成に関する研究)

氏 名 藤田 達也

論 文 内 容 の 要 旨

BWR燃料棒単位詳細メッシュ炉心解析における、燃料棒単位断面積の作成方法に関する研究を実施した。

炉心解析は、燃料集合体体系における格子計算と炉心体系における炉心計算とに区別される。炉心計算に必要な断面積は、炉心計算に先立って行われる格子計算により評価され、その空間及び中性子エネルギーに対する依存性を近似して取り扱われる。また、炉心計算に対して種々の炉心状態及び燃焼履歴に応じた断面積を作成できるよう、特定の炉心状態及び燃焼履歴の条件の組み合わせについて格子計算を実施し、そこから得られる断面積をテーブル化する(断面積テーブル)。さらに、格子計算で取り扱う単一燃料集合体体系と異なり、炉心計算では異なる種類の複数の燃料集合体が隣接した炉心体系を取り扱うため、燃料集合体間で中性子束分布が変化する影響を考慮し、断面積テーブルにより再構築された断面積を別途補正する必要がある。

沸騰水型原子炉(BWR)体系における燃料棒単位炉心計算手法の適用にあたっては、燃料棒単位断面積を高精度に作成する手法が必要である。しかしながらこのような検討はこれまでになされておらず、断面積の中性子エネルギー依存性の適切な取り扱い方法及び効率的なテーブル化手法は存在していない。また、燃料集合体間で中性子束分布が変化する影響を考慮した断面積の補正についても、燃料棒単位炉心計算手法に直接適用できる手法は存在していない。

本研究では、数理的及び理論的なアプローチにより、以下に示すとおり、燃料棒単位断面積に関して中性子エネルギー依存性の適切な取り扱い手法、高精度な燃料棒単位断面積の作成手法及び燃料集合体間で中性子束分布が変化する影響を考慮した新たな断面積補正手法について検討を行った。

1. エネルギー群構造最適化手法の開発(第2章)

炉心計算では、計算精度に大きな影響を与える断面積の中性子エネルギー依存性をグルー

プ（エネルギー群）化して取り扱う。炉心計算で使用される断面積のエネルギー群構造は、炉心計算に先立って実施される格子計算におけるエネルギー群構造を基本に、複数のエネルギー群をまとめ（エネルギー群縮約）、エネルギー群数を削減することで、中性子エネルギー依存性を近似し、計算コストを低減している。従来は、経験的に決められた2~3群構造が利用されている。燃料棒単位炉心計算手法ではより詳細なエネルギー群（10群程度）の採用を想定している一方、そのようなエネルギー群構造を経験的に決定することは困難であるため、適切なエネルギー群構造を決定する数理的なアプローチが必要になる。また、炉心計算におけるエネルギー群数の設定は計算精度及び計算コストに大きく影響することから、要求される計算精度に応じて燃料棒単位炉心計算手法に適切なエネルギー群数を設定するためには、計算精度とエネルギー群数の関係を明らかにすることが必要になる。

本研究では、最急降下法を参考に、エネルギー群構造の最適化手法を開発した。本手法は、エネルギー群数を1つだけ変化させた場合の計算精度の変化を網羅的に評価し、その中で計算精度が最も良いものを最適な結果として採用するものである。すなわち、N群構造からN-1群構造を決定する場合には、想定されるN-1群構造の精度を全て評価し、その中で最も計算精度が良いN-1群構造を最適なN-1群構造として採用する。これを最も詳細なエネルギー群数から2群まで繰り返すことで、エネルギー群構造を最適しつつ、計算精度とエネルギー群数の関係が評価される。

本手法と従来のエネルギー群構造の計算精度を比較することで、本手法の優位性を確認した。また、本手法を用いることで、要求される計算精度に応じたエネルギー群数及びエネルギー群構造を評価することが可能になった。

2. 燃料棒単位断面積のテーブル化手法の開発（第3章）

燃料棒単位炉心計算手法では、炉心状態及び燃焼履歴に応じて、燃料棒単位の断面積を用意しておく必要がある。格子計算を特定の計算条件の組み合わせに対して炉心計算に先立って実施し、炉心状態（ボイド率及び制御棒位置等）及び燃焼履歴（燃焼度及び履歴ボイド等）をパラメータとして断面積をテーブル化する。燃料棒単位断面積のテーブル化手法は、加圧水型原子炉（PWR）体系では既に確立している一方、BWR体系での検討はこれまでになされておらず、テーブル化手法の開発にはテーブルの軸となるパラメータの設定及びパラメータ間の相互作用の取り扱いが課題となっていた。

本研究では、空間及び中性子エネルギー依存性の取り扱いが詳細になる燃料棒単位断面積をテーブル化する手法について、BWR体系における炉心状態及び燃焼履歴のパラメータ間の相互作用の影響評価及び断面積の再現精度の観点から検討を行った。

燃料棒単位断面積については、従来の断面積のテーブル化手法を参考に、基準となる状態における断面積、炉心状態の変化を考慮する補正項及び燃焼履歴の変化を考慮する補正項、の線形結合に近似して取り扱うこととした。

及びについて、それぞれが取り扱うパラメータ間の相互作用が燃料棒単位断面積の再現精度に与える影響を定量評価した。その結果、BWR体系特有の現象であるボイドの発生（ボイド率及び履歴ボイド）及び十字型制御棒の挿入（制御棒位置及び制御棒履歴）については、他のパラメータとの相互作用を考慮してテーブルの軸を設定する必要があることを確認した。

これらの結果から、高精度な燃料棒単位断面積のテーブル化を可能とした。

3. スペクトル干渉効果を考慮するための新たな補正手法の開発（第4章及び第5章）

炉心計算において利用される断面積は、それに先立って実施される格子計算の結果を用いて空間及び中性子エネルギー依存性の取り扱いの観点から近似されたものである。格子計算では単一燃料集合体体系を仮定して中性子束を計算している一方、炉心計算では異なる種類の燃料集合体が隣接した炉心体系を取り扱うことから、中性子束分布が燃料集合体間で影響を及ぼしあい（スペクトル干渉効果）、格子計算における中性子束分布から変化する。これにより炉心計算において利用される近似された断面積に誤差が生じるため、炉心計算時に断面積を補正する必要がある。しかしながら、燃料棒単位炉心計算手法（10群程度のエネルギー群を採用）では断面積の中性子エネルギー依存性を従来の炉心計算（2～3群のエネルギー群を採用）より詳細に取り扱っているため、これまでに使用されている簡易な断面積補正手法を直接適用することはできなかった。

本研究では、スペクトル干渉効果を考慮した断面積の新たな補正手法の開発及びその適用性の評価を実施した。

第4章では、スペクトル干渉効果により生じる断面積の変動を補正する、新たな手法を開発した。スペクトル干渉効果による断面積の変動は、中性子の漏洩量の変化により中性子スペクトルが変化し、その結果として生じるものと考えることができる。これを踏まえ、中性子漏洩量の摂動によるエネルギー群縮約後の断面積の変化について一般化摂動論を用いた理論的な検討を行い、エネルギー群縮約後の断面積の変化を中性子漏洩量の変化の関数として数式化した。本補正手法について、エネルギー群縮約後の断面積の再現精度及び計算精度への影響を評価することで、その妥当性を評価した。

第5章では、炉心計算で広く利用されているエネルギー群縮約および空間均質化の誤差を低減する手法（SPH因子及び不連続因子）と第4章で開発した断面積補正手法を組み合わせた場合の適用性を評価した。精度検証の結果、両手法を組み合わせることで適用することが可能であること並びに両手法の適用によりエネルギー群縮約及びスペクトル干渉効果に伴う誤差の両方を低減することが可能であることを確認した。

本研究により、燃料棒単位炉心計算手法において、中性子エネルギー依存性を詳細に取り扱う場合の新たな断面積補正手法が開発され、任意のエネルギー群構造に対してスペクトル干渉効果を高精度に補正することが可能になった。

以上の1. から3. までにおいて開発して新たな計算手法は、今後実用化が進む燃料棒単位炉心計算手法を実現するための課題の解決に資するものであり、従来は経験的に対処されてきた課題に対して数理的及び理論的にアプローチしたものである。本研究をとおして、燃料棒単位炉心計算手法の実現に必要な、燃料棒単位断面積の中性子エネルギー依存性の適切な近似方法、高精度な燃料棒単位断面積の作成手法及びスペクトル干渉効果を考慮した新たな断面積補正手法に関する課題を解決した。