

報告番号	甲 第	号
------	-----	---

## 主 論 文 の 要 旨

論文題目    **DEVELOPMENT OF A UNIFIED  
RESONANCE SELF-SHIELDING  
METHODOLOGY FOR LATTICE  
PHYSICS CALCULATION IN LIGHT  
WATER REACTOR CORE ANALYSIS**  
(軽水炉炉心解析の格子計算における統合  
共鳴計算手法の開発)

氏 名    小池 啓基

## 論 文 内 容 の 要 旨

本研究は、実機軽水炉の炉心解析における格子計算のうち、中性子束計算の入力となる実効断面積を高精度かつ高速に算出する新たな計算手法の開発についてまとめたものである。本研究では、炉心核特性予測精度の向上や不確かさ定量化に資する次世代炉心解析手法に対応した「任意幾何形状の取り扱い」と、実機軽水炉で想定される過渡／事象時を含む「広範な中性子エネルギー分布条件の取り扱い」が可能な実効断面積計算手法を開発する。本開発により軽水炉の炉心解析手法を高度化し、過渡／事象時を含む炉心核特性の予測精度向上を通じて、原子力に求められる安全性向上活動(最新知見の反映、評価技術の改良)に資することを目的としている。

本論文は全 5 章で構成されており、第 1 章では本論文の導入として、研究の背景及び目的について示す。第 2 章では等価原理の改良手法、第 3 章では等価原理と超多群計算の統合手法、第 4 章では等価原理、超多群計算及びサブグループ法の統合手法を開発し、各開発段階において、実効断面積計算の高精度化及び効率化に対する研究成果を示す。最後に第 5 章にて本論文の要点及び成果を総括する。

一般に、実機軽水炉の炉心解析は、燃料集合体体系の核特性を取り扱う「格子計算(集合体計算)」と、格子計算で得られた集合体平均の核特性(平均断面積)を入力として、複数の

燃料集合体で構成された炉心体系の核特性を取り扱う「炉心計算」の 2 段階(多段階手法)で構成される。このうち、格子計算は主に、中性子の実効的な反応確率を算出する「実効断面積(共鳴)計算部」と中性子の空間・エネルギー分布を算出する「中性子束計算部」から構成されており、両計算部の結果に基づき、集合体平均の核特性(平均断面積)が作成される。

中性子束計算部については、近年大幅に向上している計算機能力を活用することで、燃料集合体内部の幾何形状を厳密に取り扱い、かつ、中性子の飛行方向を精緻に取り扱うことが可能なキャラクタリスティックス法(MOC)に基づく計算法の実用化が、現在精力的に進められている。これに対し、実効断面積計算部については、実用的な計算時間で中性子束計算部とのバランスがとれた計算精度を実現する観点から、解決すべき課題がある。特に、取り扱い可能な幾何形状及び中性子エネルギー分布条件の制約が課題となっている。

現在、一般的に適用されている実効断面積計算手法は、「等価原理」、「超多群計算」及び「サブグループ法」の 3 つに分類される。等価原理は、実機軽水炉の炉心解析への豊富な適用実績があり、計算時間も実用に耐えるレベルにある。ただし、任意幾何形状及び広範な中性子エネルギー分布条件に対して安定した計算精度を確保することが困難な手法であり、特に計算精度の観点から、約 30 年間、抜本的な理論改良はなかった。一方、超多群計算は、計算精度は良好であるが膨大な計算時間を要する手法であり、実機軽水炉の複雑な幾何形状への適用において計算時間の制約があるため、商業用に実用化された例は非常に少ない。また、計算精度と計算効率について両者の中間に位置するサブグループ法についても、広範な中性子エネルギー分布条件における計算精度に課題があり、実用化例は少ない。

これら従来法における計算精度及び計算効率に関する課題を解決し、任意幾何形状及び広範な中性子エネルギー分布条件の取り扱いを可能とするため、本研究では、従来 3 手法の高度化及び理論的な統合による新たな実効断面積計算手法を確立した。以下、第 2 章以降の要旨を示す。

第 2 章では、等価原理に基づき任意格子形状と灰色吸収効果を考慮した実効断面積計算手法を開発した。

実機軽水炉の格子計算に対する適用実績が最も豊富な等価原理に着目し、実効断面積計算手法を改良した。従来の等価原理では、中性子エネルギー依存の中性子束を多項有理式に近似して取り扱うが、有理式に対し、燃料集合体内に格子状に配列されている各燃料棒の幾何形状に起因する影響を考慮する際、燃料領域を黒体(中性子完全吸収体)として仮定する近似モデルが含まれ、誤差要因となっていた。

本研究では、エネルギー依存の中性子束を多項有理式で近似する際、燃料領域のモデル化について、実際の物理現象に即して黒体から白体(中性子非吸収体)までの幅広い条件について中性子束を算出し、これを多項有理式に反映する手法を開発した。本手法により、実際の燃料が中性子の非完全吸収体である効果(灰色吸収効果：燃料棒内に入射した中性子は

必ず吸収されるわけではなく、実際の物理現象として、燃料に吸収されるか吸収されずに透過するかの双方が起こりうることを理論的に取り扱うことが可能となった。

本手法を、燃料集合体内の幾何形状を厳密に取り扱い可能な MOC と組み合わせて適用することで、実効断面積計算における幾何形状の近似と黒体近似を同時に撤廃できることを示した。

第 3 章では、等価原理と超多群計算の統合に基づきエネルギー依存散乱中性子源と共鳴干渉効果を考慮した実効断面積計算手法を開発した。

等価原理に基づく実効断面積計算手法では、実効断面積を高速に算出できる一方、広範な中性子エネルギー分布条件を考慮する際、中性子と燃料集合体中の核種との衝突に起因する中性子エネルギーの変化(散乱中性子源)や、複数の核種による中性子吸収効果が中性子エネルギー分布に与える影響(共鳴干渉効果)を直接モデル化することができないという課題があった。

本研究では、第 2 章の研究成果を元に、等価原理において中性子束エネルギー分布を算出する際の近似モデルを見直し、中性子エネルギー分布に対する近似を可能な限り撤廃した超多群計算における散乱中性子源及び共鳴干渉効果の高精度な取り扱い手法を組み込んだ。その結果、エネルギー依存中性子束の計算において、等価原理と超多群計算を理論的に統合する実効断面積計算手法を構築した。

本手法の適用により、実機軽水炉の格子計算に十分耐える計算速度かつ広範な中性子エネルギー分布条件において、連続エネルギーモンテカルロ法と同等の解析精度が得られることを示した。

第 4 章では、統合理論に基づき燃料ペレット内の多分割形状と組成・温度分布を考慮した実効断面積計算の一般化手法を開発した。

等価原理と超多群計算の統合手法では、燃料集合体内に格子状に配列されている燃料棒の内部を複数の領域に分割しない場合、広範な中性子エネルギー分布条件に対して実効断面積を超多群計算相当の精度で高速に算出できるが、燃料棒内部を複数の領域に分割した体系には対応できないという課題があった。

本研究では第 3 章の研究成果に対し、燃料棒内部を複数の領域に分割した体系を効率的に取り扱うことが可能なサブグループ法を組み込むことで、多領域体系にも適用可能な実効断面積計算手法の開発に成功した。炉心核計算の分野で一般的に採用されている多段階手法の考え方を実効断面積計算部単体に取り込み、「簡易幾何形状+詳細中性子エネルギー分割」と「詳細幾何形状+簡易中性子エネルギー分割」の計算を組み合わせた 2 段階の実効断面積計算法を構築した。

第 1 段階計算では、第 3 章の研究成果に基づいて簡易幾何形状での詳細中性子エネルギー分布を算出し、これを重みとして中性子反応断面積の大きさに応じた中性子エネルギー

分割単位での断面積(サブグループ断面積)を作成する。第 2 段階計算では、サブグループ断面積を入力とした詳細幾何形状での簡易中性子エネルギー分布を算出し、これを重みとして最終的に集合体内の詳細幾何形状及び詳細中性子エネルギー分布を考慮した実効断面積を算出する。第 1 段階計算は「等価原理」+「超多群計算」、第 2 段階計算は「サブグループ法」に対応しており、従来 3 手法の課題を理論的に補完し合う実効断面積計算手法を確立した。

連続エネルギーモンテカルロ法による解析結果との比較により、燃料棒内を複数の領域に分割した体系において、燃料棒内の組成分布や温度分布を考慮する場合を含め、高精度な実効断面積計算が可能となることを示した。また、これまで効率的な取り扱いが困難であった、燃料棒内を径方向及び方位角方向双方に分割した体系についても、高精度な実効断面積計算を可能とした。

最後に第 5 章では、第 1 章から第 4 章における要点を示すとともに、各章で得られた成果をまとめ、本論文の総括とした。本研究の成果によって、従来の実機軽水炉の炉心解析における格子計算が有していた計算精度及び計算効率に対する課題を解決し、新たに開発した実効断面積計算手法の実機軽水炉炉心解析への適用性を示した。第 2,4 章の研究成果を通じて「任意幾何形状の取り扱い」を、第 3,4 章の研究成果を通じて「広範な中性子エネルギー分布条件の取り扱い」を実現し、実効断面積計算手法の開発を通じた軽水炉炉心解析手法の高度化により、原子力に求められる安全性向上活動に資する解析技術を確立できた。