

報告番号	甲 第	号
------	-----	---

## 主 論 文 の 要 旨

論文題目 Study on the Development of New BWR Core Analysis Scheme Based on the Continuous Energy Monte Carlo Burn-up Calculation Method (連続エネルギーモンテカルロ計算コードを用いたBWR炉心解析手法の開発)

氏 名 東條 匡志

## 論 文 内 容 の 要 旨

連続エネルギーモンテカルロ燃焼計算を用いたBWR炉心解析手法を新たに開発した。

地球環境問題や、エネルギー資源問題などへの対策として、原子力発電はベース電源として着実に運転をしつつ、高い経済性を確保することが求められている。このような中、原子燃料費は、稼働中の原子力発電所の経済性を左右する大きなコスト要因の一つである。

原子燃料費は、少ない燃料体数で原子炉を効率よく運転することや、より多くのエネルギーを燃料から引き出すことが可能な新型の燃料を開発することで、節約することが可能である。効率的な燃料の運用を行うためには、高い計算精度を有する炉心解析手法によって、高効率、すなわち燃料取り替え体数の少ない取替炉心を設計することや、効率的な運転計画を立案することが必要である。また、より効率のよい新型燃料を設計するためには、やはり高い計算精度を有する炉心解析手法が必要である。このような目的のため、BWR炉心解析手法に対しては、更なる計算精度の向上が求められている。

連続エネルギーモンテカルロ計算は、エネルギーや幾何形状の離散化誤差が少なく、高い計算精度を有する。しかし、確率論的手法であるモンテカルロ法の計算結果には、ばらつきが存在する。このため、モンテカルロ計算を燃焼計算に適用した場合には、核種の個数密度を介して年少後の計算結果に伝播し、最終的な計算結果のばらつきを過小評価してしまう懸念がある。また、現在の連続エネルギーモンテカルロ計算コードでは、拡散係数や減速断面積、実効遅発中性子などを計算結果から直接得ることが出来ない。これらの誤差伝播問題や、直接計算することができないパラメータなどの問題のため、これまで連続エネルギーモンテカルロ燃焼計算が商業BWR炉心解析に適用されることはなかった。

以下に示す各種の検討の結果、連続エネルギーモンテカルロ燃焼計算を、商業BWR集合体計算に適用する新たなBWR炉心解析手法を提案した。さらに、提案した方法を用いて、実機BWRの追跡計算に適用することで、その有効性を確認した。

また、モンテカルロ計算の特徴である3次元計算が可能な特長を生かし、軸方向非均質

領域に対する新たな3次元ピン出力再構築手法も提案した。これにより、BWR炉心の軸方向非均質領域の解析に適用し、再構築後の予測ピン出力の計算精度を大きく改善することが可能であることを確認した。

本研究の詳細を以下に述べる。

(1) 連続エネルギーモンテカルロ燃焼計算をBWR集合体計算に適用した場合の、誤差伝播の影響について(第2章)

モンテカルロ計算は、乱数にもとづく試行を多数回を行い、その結果から中性子の分布や、増倍率などを計算する確率論的な手法である。連続エネルギーモンテカルロ計算は、エネルギーや幾何形状の取り扱いにおいて、離散化誤差が少なく、十分な計算時間を掛けた場合には、高い計算精度を有している。しかし、確率論的な手法であるモンテカルロ計算には、試行回数に依存した統計的なばらつきが存在する。この様なモンテカルロ計算を、燃焼計算に適用した場合、核種の個数密度を介して統計誤差が伝播し、多数ステップの燃焼計算後の統計的な予測に基づくばらつきは、実際に発生するばらつきを過小評価している可能性が懸念される。これは商業炉心解析に、連続エネルギーモンテカルロ燃焼計算を適用する際の、大きな障害である。本研究では、燃焼モンテカルロ計算における誤差伝播のメカニズムを明らかにし、その影響をはじめて定量的に評価した。

燃焼計算の過程において、モンテカルロ計算結果における核種毎の反応率の統計的なばらつきは、それらの核種の個数密度にばらつきを発生させる。モンテカルロ計算における反応率のばらつきは、正規分布に従う。一方、核種の燃焼は、exp関数に従うことになるため、燃焼計算後の個数密度のばらつきは、対数を取ると正規分布となる、いわゆる対数正規分布に従うばらつきとなることが予想される。本研究では、このばらつきの発生メカニズムを、数式にて定量的に予測した。さらに、初期乱数のみを変化させた多数回のモンテカルロ燃焼計算を実施し、実際に個数密度に発生するばらつきを把握した。これらの結果から、予測した個数密度のばらつきが、実際に個数密度に発生するばらつきと一致することを、定量的に確認することで、その誤差伝播によるばらつき発生の予測式の妥当性を確認した。これらの検討の結果、現在のBWRの現実的な燃焼期間である60GWd/tまでは、誤差伝播は、大きな影響を及ぼさないことを確認した。

また、本章においては、燃焼モンテカルロ計算における、燃焼度点とヒストリー数の関係についても明確にした。モンテカルロ燃焼計算の総計算時間を一定とした場合、燃焼度点数とヒストリー数はトレードオフの関係になる。このため、燃焼度点数とヒストリー数をどのように設定するかは、計算精度を左右する重要な要素と見做す。本章では、ランダムウォークモデルを用いた仮定により、燃焼度点数が個数密度のばらつきにおよぼす影響を求めた。さらに、感度解析により、最終的な計算結果(無限増倍率など)への定量的な影響についても、合わせて評価した。これらの結果から、通常の集合体計算などに燃焼モンテカルロ計算を適用する場合には、中性子ヒストリー数が燃焼度点数よりも重要であり、PIE解析などの個数密度に着目する場合には、燃焼度点数が重要になることを明確にした。

(2) モンテカルロ燃焼計算によるBWR集合体計算の温度分布と燃焼領域分割の影響について

て(第3章)

これまでのモンテカルロ燃焼計算においては、従来の決定論的手法において用いられてきた条件と同じ温度/領域分割条件を、経験的に適用してきた。連続エネルギーモンテカルロ燃焼計算には、計算領域毎の温度や燃焼領域分割の条件を柔軟に設定できる利点がある。この利点を生かして、温度分布の考慮や、燃焼領域分割の影響を定量的に評価することで、モンテカルロ燃焼計算を実施する際の最適な計算条件を検討した。検討の結果、温度分布の影響はそれほど小さくなく、体積平均温度を用いる従来の方法は、十分に妥当であることを確認した。また、燃焼領域の分割方法については、Gd 燃料棒については、Gd 濃度の低い燃料の場合は、リング状分割のみでも問題は無いものの、将来予想される高濃度 Gd 燃料棒、Gd 燃料棒同士の隣接状況などでは、週方向ごとの Gd 燃焼速度の差を考慮する必要があり、このような場合は周方向領域分割が望ましいことがわかった。

(3) 連続エネルギー燃焼モンテカルロ計算の BWR 集合体計算への適用について(第4章)

現在の連続エネルギーモンテカルロ計算コードでは、炉心解析に必要な拡散係数や減速断面積、実効遅発中性子割合などを、計算結果から直接得る事が出来ない。本章では、連続エネルギーモンテカルロ計算によって得られる各種のパラメータから、適切な近似や過程にもとづき、上記のパラメータを算出する方法を提案した。さらに、提案した方法により、実機 BWR 燃料の核定数を作成した。作成した核定数を、従来の決定論的手法にもとづく集合体計算コードのより作成した核定数と比較することで、妥当な定数であることを確認した。加えて、作成した定数を用いた、商業 BWR の実機追跡計算を実施し、実機オンラインの値と比較することで、本手法が BWR 炉心解析に適用が可能であることを確認した。本研究は、連続エネルギーモンテカルロ燃焼計算を、実機 BWR 炉心解析へ適用した、世界で初めての例である。

(4) 3次元燃料棒出力再構築法による軸方向非均質領域の解析について(第5章)

モンテカルロ計算コードは、従来の決定論的手法にもとづく集合体計算コードとは異なり、軸方向に非均質な領域に対しても、直接3次元計算できる特色がある。この特色を生かして、3次元燃料棒出力再構築法を新たに提案した。この方法では、事前にさまざまな条件において、軸方向に非均質な領域のモンテカルロ計算による詳細3次元解析を実施する。さらに、同一の領域に対して、2次元無限格子計算にもとづく集合体核定数と、それを用いた3次元炉心計算コード(従来手法)による評価も実施する。これらの2つの手法による計算結果から、軸方向非均質領域に対する、3次元炉心計算コードによるピン出力再構築結果の、補正量を算出しておく。この補正量を用いて、BWRの軸方向非均質領域を計算すれば、計算結果のピン出力予測精度を向上できることとなる。本章では、実際にBWRの制御棒上端領域に本手法を適用し、ピン出力予測精度が向上することを確認した。本手法は、これまでの炉心計算コードにそのまま適用することも可能であり、その利用価値は大きい。

上記の(1)から(4)に示す各種の検討の結果、連続エネルギーモンテカルロ燃焼計算を用いた新たな炉心解析手法を開発した。このBWR炉心解析手法は、従来の決定論的計算手法とはまったく異なる独立した手法である。計算時間の点では従来手法に劣るものの、

エネルギーや幾何形状の離散化誤差の少ない本手法は、高い精度を有している。短時間での集合体計算の必要のある燃料設計への適用には適さないものの、十分な計算時間を有する炉心管理や、従来の経験を超えるような新型燃料開発時における参照解提供など、本手法は高い利用価値がある解析手法である。

今回提案した手法と同様の手法による炉心解析手法は、国内外の他の組織においても採用されつつある。このことは、本手法の有効性が、広く認知されつつあることを示している。