

連続エネルギーモンテカルロコード MVP の参照コードとしての利用例

森本 達也*

Examples of using continuous-energy Monte Carlo code MVP as a reference code

Tatsuya Morimoto*

連続エネルギーモンテカルロコード MVP は、日本原子力研究開発機構（JAEA）が開発した高速かつ高精度な中性子・光子輸送モンテカルロ計算を実現するコードである。筆者は MVP を用いた BWR 核特性解析の経験があり、さまざまな条件で決定論コードとの比較を実施してきた。本稿では、筆者のこれまでの経験に基づいて、MVP の参照コードとしての代表的な利用例を 2 つ紹介する。

Key word: ABWR 全炉心、BWR 燃料集合体、MVP、MVP-BURN、Verification、Validation

1. はじめに

原子炉の核特性解析の中核は、炉心部の中性子輸送方程式を解くことであり、一般的に、炉心計算（3 次元拡散計算）とそれに核定数を供給する格子計算（2 次元輸送計算）の 2 段階で実施される。BWR の核特性解析の流れを図 1 に示す。

BWR では、減速材（＝冷却材）が沸騰するので炉心軸方向にボイド率分布が発生することや、制御棒が部分挿入状態となることから、炉心計算を 3 次元で実施する必要がある。炉心部は燃料集合体や制御棒などで構成され、それらの種類・数が多く非均質性が高い。さらに、温度分布やボイド率分布もあり、燃焼が進めば燃焼度分布も発生する。そのような複雑な炉心部を詳細に模擬して炉心計算を行うには、膨大な空間分割（空間分布の離散化）が必要となる。よって、許容可能な精度および時間で計算結果を得るために、通常、炉心径方向を燃料集合体の格子配列（燃料バンドルセルの格子系）に、炉心軸方向を十数 cm 程度の等間隔に分割した直方体領域（ノード）を、空間離散化の最小単位として炉心計算を実施する。

このような大まかな空間離散化をする炉心計算では、インプットとして、1 つの燃料集合体を

含む 2 次元断面（燃料バンドルセル）で均質化された核定数が必要となる。また、実際の中性子挙動は連続的にエネルギー依存しているが、炉心計算におけるエネルギー群構造（エネルギー分布の離散化）も空間分割と同様の理由でなるべく少数であることが望まれる。それは通常、0～20 MeV の範囲を 2～4 群に分割する。その燃料集合体均質少数エネルギー群核定数を作成することが、格子計算の主な役割である。燃料集合体種類、濃縮度・富化度分布、ボイド率、温度、制御棒有無、燃焼度などに依存した核定数を格子計算で作成し、その核定数を各ノードに割り当てて炉心計算を実施する。

炉心計算は、通常、中性子の角度依存性が小さいと近似して輸送方程式から導出される拡散方程式を解く。輸送計算は中性子輸送の角度依存性を正確に計算するが、拡散計算は正味の中性子流を中性子束勾配の高いほうから低いほうへの流れのみとしているので、非均質な体系（特に、強い吸収材やボイドの近傍）では精度が悪くなる（ただし、輸送計算より計算コストは低い）。よって、輸送計算は、炉心部の非均質性を精度よく考慮する上で格子計算には必須である。一方、炉心計算では、非均質性の影響は核定数に反映されているので、拡散計算でも必要な精度が得られる。ただし、複雑な炉心部のあらゆる状態を事前に考慮して核定数を作成しておくことは現実的に不

*アドバンスソフト株式会社 第 4 事業部

4th Computational Science and Engineering Group, AdvanceSoft Corporation

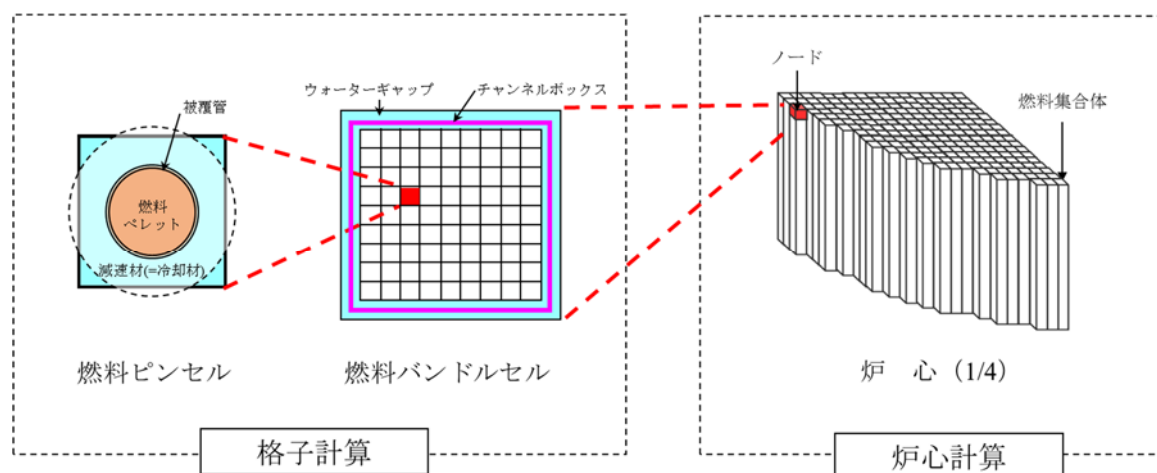


図 1 BWR の核特性解析の流れ

可能なため、炉心計算で得られる大局的な中性子束分布を使用して、炉内における燃料棒ごとの非均質中性子束分布を再構築して核定数を補正する必要がある。[1]

以上のように、原子炉の核特性解析の計算モデルには、大まかな離散化や均質化といった大胆な近似がある。計算値・実測値に基づく各種補正や保守的な設計目標値の設定により、原子炉を運転していく上で必要な精度は現状でも確保されているが、核特性が原子炉制御の根幹である以上は、計算モデルに起因する不確かさの検証は原子力安全の観点から今後も常に重要である。

2. MVP の概要

モンテカルロ法は位相空間を離散化する必要がないため、計算モデル起因の不確かさが決定論的手法に比べて極めて小さい。このような利点から、3次元の複雑な体系における中性子や光子などの輸送計算にはモンテカルロ法が用いられることが多く、核特性解析などの分野では、高精度の参照解を得る方法として用いられるとともに、実験解析や詳細な設計を行う手段として用いられている。[2][3][4]

高速かつ高精度な中性子・光子輸送モンテカルロ計算を実現するため、JAEA において、2つのモンテカルロコード MVP (連続エネルギー法) と GMVP (多群法) が開発されてきた。これらのコードはベクトル型アルゴリズムを採用し、ベクトル計算機用に開発されてきたが、標準並列化ライ

ブラリーMPI を用いた並列計算にも対応しており、一般の計算機環境でもモンテカルロ計算の高速化が可能である。両コードは正確な物理モデル、詳細な幾何形状表現法、分散低減法など、実用コードとして十分な機能を有している。これらのコードの第1版は1994年、第2版は2005年に公開されている。[3][4]

現在β版が限定配布されている最新の第3版では、特に原子炉の核特性解析分野におけるモンテカルロ法の適用範囲をさらに拡張するために、実効増倍率、中性子束、反応率以外の炉物理パラメータについてモンテカルロ法で参照解を計算する以下の手法が、MVP に実装された。

- ・ 実効増倍率に対する摂動計算手法
- ・ 厳密共鳴弾性散乱モデル
- ・ 動特性パラメータ計算機能
- ・ 光核反応モデル
- ・ 遅発中性子のシミュレーション
- ・ 多群定数生成機能

また、大規模モンテカルロ計算による原子炉の詳細解析(全炉心体系で燃料棒単位の出力分布を計算)もメモリーの点から可能となっている。[4]

以上より、MVP 第3版では、核特性解析における参照コードとしての利用価値がますます高まっているといえる。ただし、統計的手法であるので解にばらつきがあることや、固有値分散の過小評価、燃焼に伴う統計誤差の伝播、解の精度を上

げるために試行回数を増やさなければならず計算時間がかかるなど[3][4][5]、万能ではないということに留意しておく必要もある。

3. 参照コードとしての利用例

これまでの筆者の解析業務経験から、代表例として「BWR 燃料集合体核特性解析」と「ABWR 全炉心核特性解析」における MVP 利用例を紹介する。

3.1. BWR 燃料集合体核特性解析

先述したように、格子計算は燃料バンドルセル 2 次元体系で実施される。炉心計算のインプットとなる核定数を作成するための仮想的な無限体系であるため、また、運転・停止中のあらゆる炉心状態を網羅して実験値と比較することは非現実的であるため、MVP が実験値の代替として有効である。

そこで、ある決定論コードの現実的な適用範囲を網羅するように、燃料集合体種類、制御棒種類、燃料温度、減速材温度、ボイド率、ボロン濃度、燃焼度をさまざまに変更して、決定論コードと MVP の結果（無限増倍率、燃料棒ごとの核分裂反応率など）を比較し、決定論コードの計算モデルやユーザーによる燃料集合体モデル化の妥当性を確認した。計算ケースが膨大となるため、同じ計算条件に基づいて決定論コードと MVP の入力ファイルを自動作成できるツールも作成した。対象とした燃料集合体（ウラン、MOX）と制御棒の種類は以下の通りである。

- ・ 8×8 燃料集合体（ステップ 1、2）
- ・ 9×9 燃料集合体（ステップ 3A、3B）
- ・ 10×10 燃料集合体
- ・ ボロンカーバイドチューブの制御棒
- ・ ハフニウムの板型、フラットチューブ型、棒型の制御棒
- ・ ボロンカーバイドとハフニウムのハイブリッド型の制御棒（複数種類）

MVP による BWR 燃料集合体モデル化のイメー



図 2 MVP による BWR 燃料集合体モデル化のイメージ

ジを図 2 に示す。最新の一般的な決定論コードは、燃料集合体の幾何形状を詳細に模擬できるため、MVP での幾何形状モデル化と大差はない。ただし、制御棒に関してはフラットチューブ型やハイブリッド型など比較的複雑な機械設計もあるため、決定論コードでは均質化などの工夫が必要である。特にその妥当性確認において、MVP は有効であった。

決定論コードによる BWR 燃料集合体核特性の燃焼変化の妥当性は、MVP に燃焼計算モジュールが結合された MVP-BURN[5] との比較によって確認した。燃焼計算モデルや燃料核設計の妥当性確認はもちろん、燃焼変化が大きいガドリニア入り燃料棒の燃料領域分割方法の妥当性確認にも、MVP-BURN は有効であった。

3.2. ABWR 全炉心核特性解析

原子炉の核特性を解析する技術者にとって、複雑な原子炉を可能な限り近似をなくしてありのままシミュレーションしたいというのは、ある意味根源的な欲求ではないかと思う。もちろん、速やかに結果を確認・評価したいという業務上の現実的な欲求もあるため、コストの観点から今後も決定論コードは主役であり続けるだろう。

大規模モンテカルロ計算による原子炉の詳細解析として、ABWR の起動試験時の局所臨界および初臨界試験解析を MVP で実施した。MVP による ABWR 全炉心体系モデル化のイメージを図 3 に示す。MVP によるモデル化では、炉心部を構成する燃料集合体および制御棒については、径方

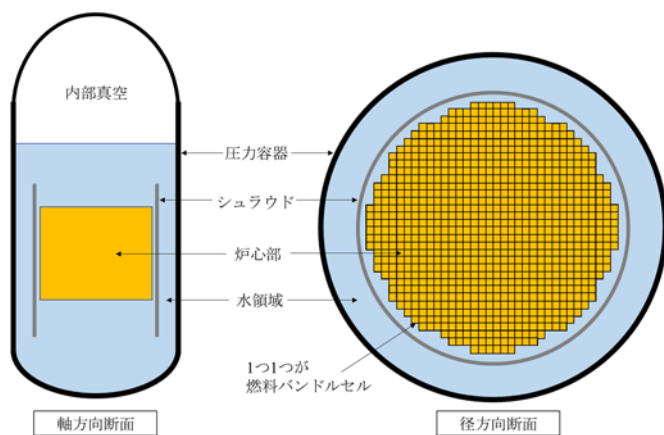


図3 MVPによるABWR全炉心体系モデル化のイメージ

向・軸方向ともに必要な範囲で可能な限り詳細に模擬した。また、複数の燃料集合体種類およびその装荷パターン、複数の制御棒種類およびその配置パターンのさまざまな組み合わせに簡単に対応できるように、MVPの入力データの作り方（格子データの作り方や制御棒引抜方法など）を工夫した。さらに、臨界試験とは直接関係ないが、核分裂反応率の燃料棒単位での軸方向分布も確認できるようにタリー領域を設定した。

局所臨界および初臨界試験は、決定論コードによる事前予測に基づいて計画・実施され、計算値と測定値を比較することでコードの計算モデルや臨界固有値設定の妥当性を確認する。試験前に決定論コードとMVPを比較して、臨界パターンが計算値と測定値でどのように・どの程度ずれる可能性があるかを把握しておくことは、決定論コードによる予測精度向上や円滑な試験実施に有効だと考えられる。また、当然のことながら、決定論コードの炉心計算モデルの妥当性確認としても有効である。

4. 今後の利用可能性

近年、原子炉の安全性向上のために、不確かさを考慮した最適評価（BEPU：Best Estimate Plus Uncertainty）の研究・導入が国内外で進められている[6][7][8]。最新のMVP第3版では、実効増倍率に対する摂動計算手法、動特性パラメータ計算機能、多群定数生成機能などが実装されたので[4]、それらの機能を使用して不確かさ評価を実施す

ることで、既存の決定論コードによる不確かさ評価の信頼性向上が期待できる。

また、MVP第3版ではメモリの観点から大規模体系での詳細解析が可能となっているため[4]、BWR全炉心体系で特定の炉心状態における燃料棒単位の径方向・軸方向出力分布（核分裂反応率分布）の参照解が得られると考えられる。決定論コードの炉心計算モデルの妥当性を確認する際は、実際の測定値との比較が最も重要であるが、適用範囲の網羅性という観点からは、モンテカルロコードによる補足が重要である。

参考文献

- [1] (社)日本原子力学会「第28回 炉物理夏期セミナーテキスト」(1996)
- [2] 異、炉物理分野における解析コードV&Vの現状、日本原子力学会2016年春の年会
- [3] Y. Nagaya, et al. JAERI 1348 (2005).
- [4] Y. Nagaya, et al. JAEA-Data/Code 2016-019 (2017).
- [5] K. Okumura, et al. J. Nucl. Sci. Technol. 37, (2000) 128–138
- [6] (社)日本原子力学会、統計的安全評価の実施基準、AESJ-SC-S001 (2008)
- [7] T. Torige, I. Kinoshita, M. Yamada, INSS JOURNAL Vol. 24 2017 C-4, 221–229
- [8] 藤田、酒井、山本、核特性分野における不確かさ評価、原子力規制委員会 第11回研究報告会 (2018)

※ 技術情報誌アドバンスシミュレーションは、アドバンスソフト株式会社 ホームページのシミュレーション図書館から、PDFファイルがダウンロードできます。（ダウンロードしていただくには、アドバンス/シミュレーションフォーラム会員登録が必要です。）