

研究室だより

## 核設計技術開発グループって、何をしているの？

日本原子力研究開発機構  
原子力基礎工学研究部門  
核工学・炉工学ユニット  
核設計技術開発グループ  
岡嶋 成晃  
okajima.shigeaki@jaea.go.jp

### はじめに

日本原子力研究開発機構の発足（2005年10月1日）以来、私たちのグループは、新しい組織のもとで、グループが所属する核工学・炉工学ユニットの目標である原子力エネルギーシステム開発を支える最先端核物理・炉心設計技術の開発を目指しています。具体的には、軽水炉の高性能化や革新的原子炉の開発・実用化に向けて、新規大規模モックアップ臨界試験を必要としない技術体系を確立するため、炉物理解析コードシステムの開発や既存の臨界実験データを活用した核設計の予測精度評価システムの開発を進めています（図1参照）。以下では、これまでの活動について紹介します。

### 高精度炉物理解析コードシステムの開発

このシステムは、計算手法による誤差の低減を目指して、既存の原子炉概念を対象とした近似的な解析手法を用いることなく、多様な燃料・形状を有する次世代原子力システムに適用できる高精度炉物理解析コードシステムを開発することを目的としています。これまでに、以下の要素コードやコードシステムを開発しました。

#### ① SRACシステム最終版（SRAC2006）の公開<sup>(1)</sup>

様々なタイプの原子炉の炉心解析に適用できる核計算コードシステムであるSRACは、利用の手引き（第2版）発行の1986年以降、多くの機能及びライブラリーデータの追加と修正を行ってきました。その結果、総合核計算コードシステムとして完成しました。そこで、SRACの最終版として公開するとともに、SRACの開発に終止符を打ち、新たな炉心解析コードシステムの開発に取り組むことにしました。

#### ② モジュラー構成の炉心解析コードシステム MOSRA の開発<sup>(2)</sup>

多様な原子炉の核特性解析に適用するため、拡張性と保守性に優れたモジュラー構成の炉心解析コードシステム MOSRA を開発しました。MOSRA のモジュールを使用して、多次元核熱結合炉心燃焼計算、多次元中性子輸送・拡散計算、3次元感度解析などの広範囲な解析が可能となりました。現在も、モジュール開発を実施しており、コードシステムのさらなる充実化を図っています。

### ③ 詳細計算手法の開発

#### a. 特性曲線法 (MOC 法) に基づく複雑集合体解析コードの開発<sup>(3)</sup>

革新的な原子炉の検討には、従来炉に比べ炉心構成物の幾何形状や配置の複雑さが増加するため、正確な幾何形状表現を備えた高精度の中性子輸送解析が必要です。そこで、特性曲線法 (MOC 法) に基づく複雑集合体解析コードを開発しています。これは、球、円柱、角柱等の基本形状の和、差、交わり等の集合演算により組合せて、複雑な幾何形状を表現するようにし、この組合せ幾何形状において MOC 法に使用する中性子飛行軌跡追跡データを作成するコードを開発しました。開発したコードは、モンテカルロ法と同等の幾何形状表現能力をもつ実用性の高い決定論的輸送計算コードです。

#### b. 連続エネルギーモンテカルロコード MVP の改良<sup>(4),(5)</sup>

連続エネルギーモンテカルロ法は、多数の中性子の飛行を物理法則に従って忠実に追跡するものであり、核設計コードに比べると計算コストは大きいですが、現在最も信頼性が高い手法です。特に、幾何形状表現能力が高い上に、エネルギー、空間、飛行方向といった連続な物理量を離散化しないでそのまま扱えることがこの手法の大きな特長です。しかし、反応度価値のような摂動計算の精度向上が積年の課題でした。この課題を解決するために、従来の計算アルゴリズムである微分演算子サンプリング法について検討し、テイラー級数に展開された高次の項を考慮することによって、計算精度の向上を図りました。

#### c. 多群断面積計算手法の高度化

複雑化する燃料集合体に対する核設計計算や炉心燃焼管理への対応として、前述の連続エネルギーモンテカルロ法の優れた特長を活かして、従来の MVP ではできなかった散乱行列を含む多群断面積セット作成機能を開発し、少数群定数を作成できるようにしました。<sup>(6)</sup>具体的には、弾性散乱、非弾性散乱、 $(n,2n)$  反応に対する微視的または巨視的な散乱行列を、5次の高次モーメントまで評価することができます。これによって、拡散炉心計算または高次輸送炉心計算に必要な多群断面積セットを高精度な連続エネルギーモンテカルロ法で作成することが可能となりました。今後、MVP で作成した多群断面積セットを、核熱結合炉心計算、炉心燃焼計算、空間依存動特性計算、感度解析計算などに広く利用できるように計画しています。

また、多群ライブラリを用いた原子炉計算において、エネルギー群数を増加させることなく計算精度を向上させるため、多群ライブラリに対して行う改良の方策について提案しています。<sup>(7)</sup>

#### d. その他

最新の核データJEFF-3.1（欧州）及びENDF/B-VII.0（米国）に基づくMVP用ライブラリを作成し公開しました。このMVPライブラリや上述の作成したライブラリは、JENDL-4開発のための核データ積分テストに利用されています。<sup>(8)</sup>

また、外部資金によって、解析法の整備やベンチマーク解析を実施しています。たとえば、JST 公募研究として、「軽水冷却スーパー高速炉に関する研究開発」（東大総括代表）において軽水冷却スーパー高速炉に適用する核変換性能解析法の整備を行ったり<sup>(9)</sup>、「高強度パルス中性子源を用いた革新的原子炉用核データの研究開発」（北大総括代表）においてMOSRAやMVPを利用して多様な炉物理実験のベンチマーク解析と断面積感度解析を実施しています。

#### 核設計誤差評価システムの開発

このシステムは、既存の炉物理実験データを有効活用し、設計体系の核特性予測誤差を客観的かつ定量的に評価することを目的としています。そのため、システム開発の要件は大きく2つの要素から成ります。一方は、信頼度の高い炉物理実験データの充実であり、他方は、核特性予測誤差を客観的かつ定量的に評価する手法の開発と、誤差評価システムの構築です。最終的に目指すのは、実機炉心の高性能化及び実規模モックアップ実験の削減に役立てることです。

炉物理実験データの充実では、原子力機構が所有する臨界実験装置（FCAとTCA）を用いた実験によって、これまでに、以下のような実験データを取得しました。文部科学省公募特会事業「燃料無交換炉心のための新型制御方式に関する技術開発」（電中研総括代表）の一環として、FCAを用いて、反射体制御炉心の臨界性、反射体反応度、Naボイド反応度などの核特性データを取得しました。<sup>(10)</sup>また、文科省公募研究「強い核拡散抵抗性を有するPuを生産する革新的原子炉技術開発」（東工大総括代表）の一部として、Np-237サンプルの置換反応度値測定データを、スペクトルを系統的に変更した6つのTCA炉心、2つのFCA炉心において取得しました。<sup>(11)</sup>さらに、TCAの6炉心では、Am-241サンプル置換反応度値測定データを取得しました。JNESからの受託研究として、「軽水炉MOX炉心ドップラー反応度測定調査」を実施しています。その他に、JST公募事業の「マイクロ炉物理に基づく反応度係数の高精度測定手法と解析手法の開発」（榎東芝総括代表）に関して、NCAにおいて、核燃料ピン内の詳細な反応率分布測定手法と決定論的手法の評価法の検討を行っています。このように、臨界実験装置FCAの特徴を活かして、革新的原子力システムを対象とした核特性に関するベンチマークデータを取得しています。これには、外部資金を獲得して炉物理実験を実施し、既存の実験データと合わせて、炉物理実験データベースの充実化を図っています。

一方、核特性予測誤差を評価する手法の開発と誤差評価システムの構築では、従来のバイアス因子法を拡張した新たな不確かさ評価手法（拡張バイアス因子法）を導出する<sup>(12)</sup>

とともに、その手法を根幹とした誤差評価システムの構築を目指して、①3次元体系断面積感度解析コード、②燃料等の重量及び組成比のばらつきに起因する計算誤差評価手法<sup>(13)</sup>を開発し、そして③複数の実験値間の相関評価システムを作成しました。

拡張バイアス因子法は、過去に蓄積された多数の実験を活用して、複数の累乗化した実験値の積によりモックアップ実験に相当する実験値を仮想的に構築することによって、設計値の不確かさの低減を図る新たな評価手法です。評価に用いる実験を追加する毎に設計値の不確かさが必ず低減することが、大きな特長であり、モックアップ臨界実験の実施が困難な状況に対応可能な不確かさ評価手法です。

3次元体系断面積感度解析コードは、熱エネルギー領域を多群化した解析及び3次元体系での解析を可能とする感度解析コードであり、これまで解析困難であった、非均質大型炉心の革新的水冷却炉心や水素を含有したFCA実験炉心などの感度解析が実施可能です。

燃料等の重量及び組成比のばらつきに起因する計算誤差評価手法とは、これまで考慮できなかった解析のモデル化に伴う計算誤差を評価するためのものであり、燃料等の重量及び組成比のばらつきに起因する原子数共分散の評価方法と、断面積感度係数を活用した原子数感度係数の評価方法を考案しました。

複数の実験値間の相関評価システムは、実験値の誤差要因を基に、誤差要因毎の相関を入力して、実験値間の相関を評価するシステムであり、実験値間の相関の現実的な評価を行います。

これらのプロトタイプコードシステムを作成し、革新的水冷却炉を模擬したFCA臨界実験を活用して、拡張バイアス因子法を革新的水冷却炉核設計に適用し、核設計予測値の信頼度を大幅に向上できることを実証しました。<sup>(14)</sup>

## おわりに

次年度以降は、これらの活動を継続する共に、今後、このシステムの完成とマニュアルの整備を行って、多くの方々に利用に供していくようにしたいと考えています。また、取得した実験データは、積極的利用を図って、JENDL-4の開発等に役立てていきたいと考えています。ここで紹介した活動は、現在、9名の研究員で行っています。何か、ご質問、機能の追加等のご要望があれば、ご連絡ください。今後も、皆様のご支援をお願いします。

## 参考文献

- (1) 奥村啓介、久語輝彦、金子邦夫、他：「SRAC2006：A Comprehensive Neutronics Calculation Code System」*JAEA-Data/Code 2007-004* (2007).
- (2) 奥村啓介、久語輝彦、中野佳洋、他：「モジュラー型炉心解析コードシステムMOSRAの開発」日本原子力学会 2008春の年会.

- (3) T. Kugo, T. Mori: “Benchmark Solution for Unstructured Geometry PWR Problem by Method of Characteristics using Combinatorial Geometry”, *Proceedings of M&C2005*, Paper 054, Avignon, France, Sep. 12-15, (2005).
- (4) Y. Nagaya and T. Mori: “Impact of Perturbed Fission Source on the Effective Multiplication Factor in Monte Carlo Criticality Calculations”, *J. Nucl. Sci. Technol.*, vol.42, No.5, pp428-441 (2005).
- (5) 長家康展、森貴正：「微分演算子サンプリング法を用いた実効倍増率の変化量に対するテイラー展開高次項の評価」日本原子力学会 2007春の年会.
- (6) 長家康展、奥村啓介、森貴正：「MVPコードへの散乱行列高次モーメント評価手法の導入」日本原子力学会 2007年秋の大会.
- (7) 千葉豪、奥村啓介：「原子炉計算用多群ライブラリの精度向上方策の検討」日本原子力学会 2008春の年会.
- (8) 千葉豪、奥村啓介：「マイナーアクチニド核データの積分テスト」日本原子力学会 2007年秋の大会.
- (9) 奥村啓介、森貴正：「軽水冷却スーパー高速炉の研究開発；6.核変換性の解析用定数ライブラリの開発」日本原子力学会 2007年秋の大会.
- (10) Okajima, Fukushima et.al.: “Development of Neutronics Analysis Technique for Non-refueling Core (Part 1: Experiment)”, *Trans. Am. Nucl. Soc.*, vol.93, pp54-55 (2005).
- (11) 桜井健、森貴正、須崎武則、他：「T C A軽水減速ウラン炉心におけるNP-237サンプル反応度価値の測定と解析」日本原子力学会 2007年秋の大会.
- (12) T. Kugo, T. Mori and T. Takeda: “Theoretical Study on New Bias Factor Methods to Effectively Use Critical Experiments for Improvement of Prediction Accuracy of Neutronic Characteristics,” *J. Nucl. Sci. and Technol.* vol.44, No.12, pp1509-1517 (2007).
- (13) 小嶋健介、久語輝彦、安藤真樹、他：「F C A実験解析における燃料板等の重量及び組成比のばらつきに起因する不確かさ評価」日本原子力学会 2007年秋の大会.
- (14) T. Kugo, K. Kojima, M Andoh, T. Mori and T. Takeda: “Application of Bias Factor Method with Use of Exponentiated Experimental Value to Prediction Uncertainty Reduction in Coolant Void Reactivity of Breeding Light Water Reactor,” *J. Power and Engineering Systems*, vol.2, No.1 (2008).

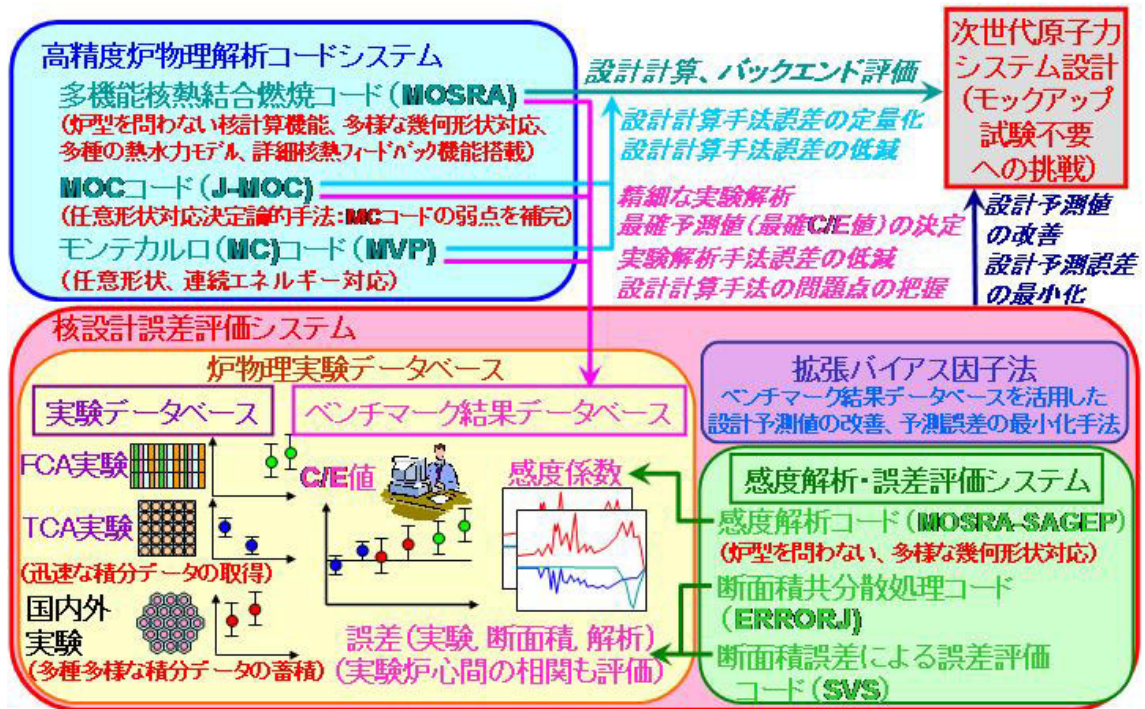


図1 核設計の予測精度評価システム  
 (大規模モックアップ臨界試験を必要としない技術体系)