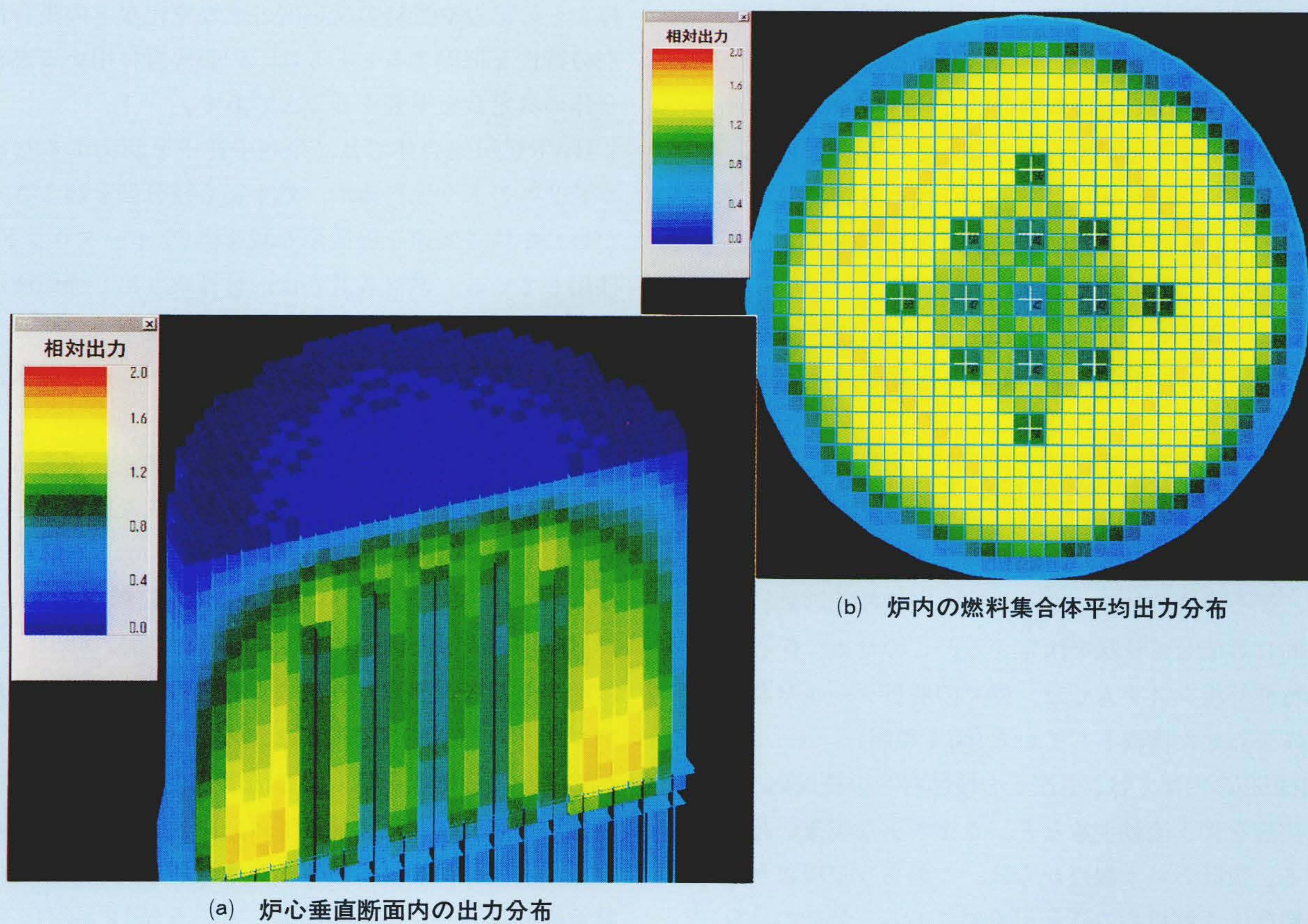


炉心核熱水力特性解析システム

Nuclear Thermal Hydraulic Analysis for Reactor Cores

丸山博見 *Hiromi Maruyama* 石井佳彦 *Yoshihiko Ishii*
西田浩二 *Kôji Nishida* 持田貴顕 *Takaaki Mochida*



三次元炉心シミュレータによる出力分布解析例

炉心内の出力分布は、燃料健全性の観点から重要な項目である。三次元炉心シミュレータでは、燃料集合体核特性解析プログラムで作成した反応断面積を使用して炉内の出力分布を計算する。

高燃焼度炉心燃料の開発や、軽水炉でのプルトニウム利用など、BWR(Boiling Water Reactor：沸騰水型原子炉)での炉心燃料設計の高度化が、着実に進んでいる。一方、炉心解析技術の進展は、新しい炉心燃料設計で生じる物理現象をより深く理解し、従来の手法と合わせて多角的に設計を把握するという観点から、設計の高度化を支える重要な要素となっている。

日立製作所は、炉心燃料設計に適用する解析手法の改良・開発に早期に着手し、炉心運転管理の実績を着実に反映しながら、より精度が高く、より信頼性の高い炉心

核熱水力解析技術を独自に開発してきた。特に最近では、計算機の進歩を背景に、モンテカルロ法による燃料集合体核特性解析、燃料集合体内の沸騰現象を扱うサブチャンネル解析、炉心の燃焼特性や動特性を評価する三次元炉心解析など、より詳細な解析手法に基づく解析プログラムを開発し、これらを有機的に結合して炉心核熱水力特性解析システムを構築している。現在、このシステムを炉心燃料設計の高度化に適用し、設計の信頼性を確保するために活用している。

1. はじめに

原子炉炉心核熱水力の分野では、計算機を利用したシミュレーションが不可欠であり、計算機の利用技術進歩を促す原動力であった。

最近の計算機環境の著しい進展は、いっそう精度の高い計算手法の利用を可能にしてきた。一方、高燃焼度炉心燃料の開発や軽水炉でのプルトニウム利用など、炉心燃料設計の高度化が進んでいる。この設計の高度化では、新しい炉心燃料構成で起こる複合的な物理現象を、解析を通して理解することが不可欠となっている。さらに、高精度のシミュレーションは、実験に代わる物理現象の把握方法としても注目され、製品設計開発でも広く使われるようになってきている。

ここでは、BWR(Boiling Water Reactor：沸騰水型原子炉)炉心核熱水力特性解析技術の特徴と最近の進展について述べる。

2. 炉心核熱水力特性解析システム

燃料設計や炉心設計では、燃料集合体の核特性、熱流動特性、炉心の燃焼特性、さらには安定性などの動特性を総合的に評価して仕様を決定する。このため、炉心核熱水力特性解析システムでは、種々の解析ツールを有機的に組み合わせた構成としている(図1参照)。

BWR炉心の内部では、中性子と核燃料との核反応、冷却材の沸騰を伴う流動現象など、さまざまな現象が起こっている。設計という観点からは、このような現象を短時間に精度よく解析することが重要である。最近の計算機の進歩により、このような複雑な現象をより忠実な解

析モデルを使って実用的な計算時間で解析することが可能となり、従来の解析手法と合わせて、多角的に現象を把握できるようになっている。

3. 燃料集合体核熱水力特性解析手法

3.1 モンテカルロ法による燃料集合体核特性解析

燃料集合体核特性解析の目的は、燃料集合体内の燃料棒ごとの出力や燃料の反応度の燃焼変化などの集合体個別の特性を把握するとともに、炉心解析に用いる燃料集合体の核定数を準備することである。

BWR燃料集合体では、余剰中性子を制御するためのガドリニア入り燃料棒や、効率よく核分裂を起こさせるために中性子減速を促進する減速棒(ウォーターロッド)を採用している。燃料設計では、目標取り出し燃焼度に合った燃料の濃縮度やプルトニウム富化度を決定するとともに、安全性、経済性を高めるために、これらの最適仕様を決めることが重要となる。

モンテカルロ法には、形状や反応を厳密に扱えるという特徴がある。このため、ガドリニア入り燃料棒やウォーターロッドが中性子に与える影響を精度よく解析できる。しかし、モンテカルロ法を設計に適用するためには、計算時間が大きな課題である。

開発したモンテカルロ法による燃料集合体核特性解析プログラム“VMONT”¹⁾では、スーパーコンピュータのベクトル処理機能を最大限に活用して高速化し、設計への適用を可能にした。最近では、中性子間の相互作用がなく、並列化が容易であるという長所を生かして、並列計算機向けバージョンも開発している(図2参照)。

さらに、モンテカルロ法では、形状を拡張することが

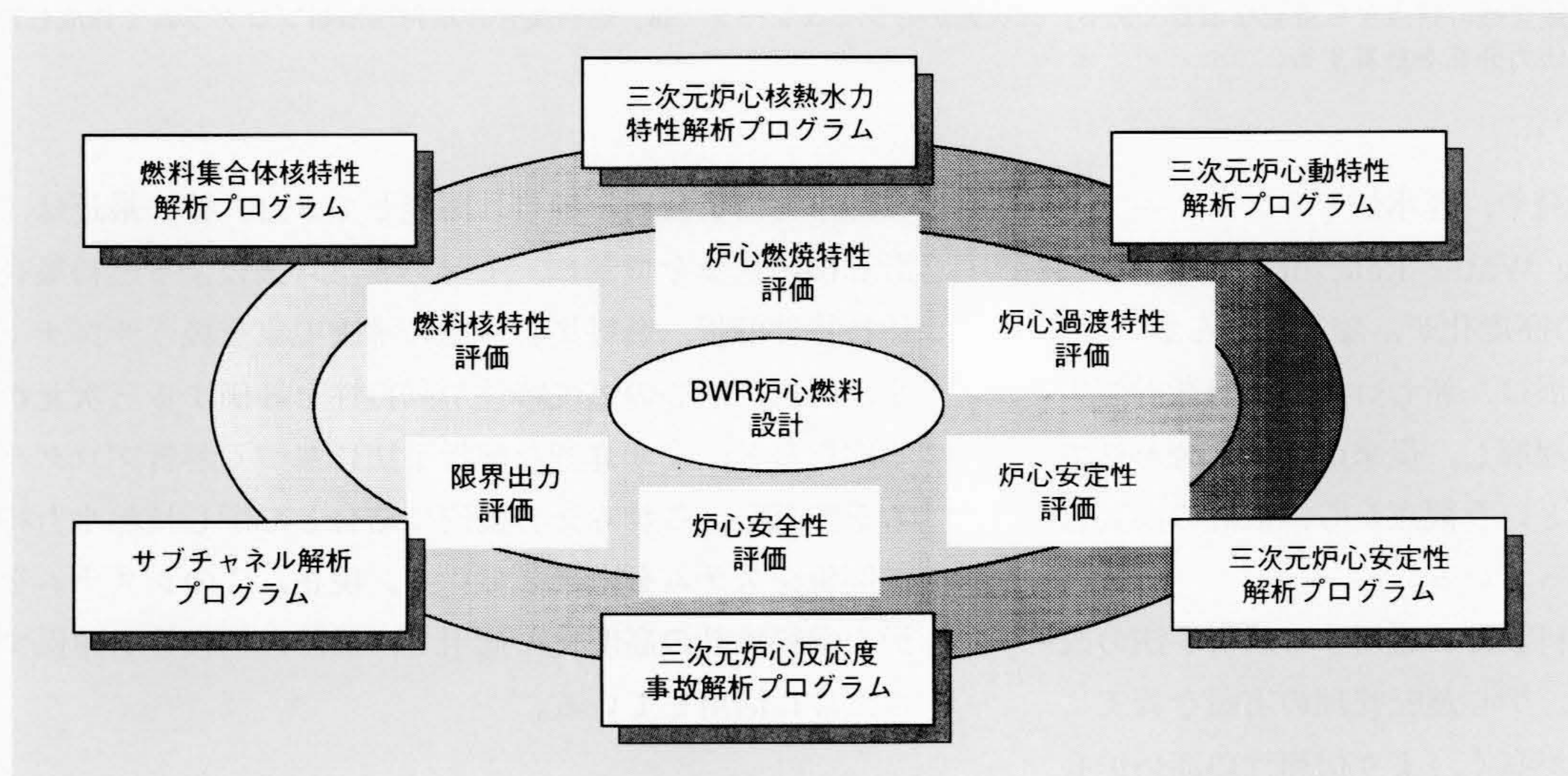
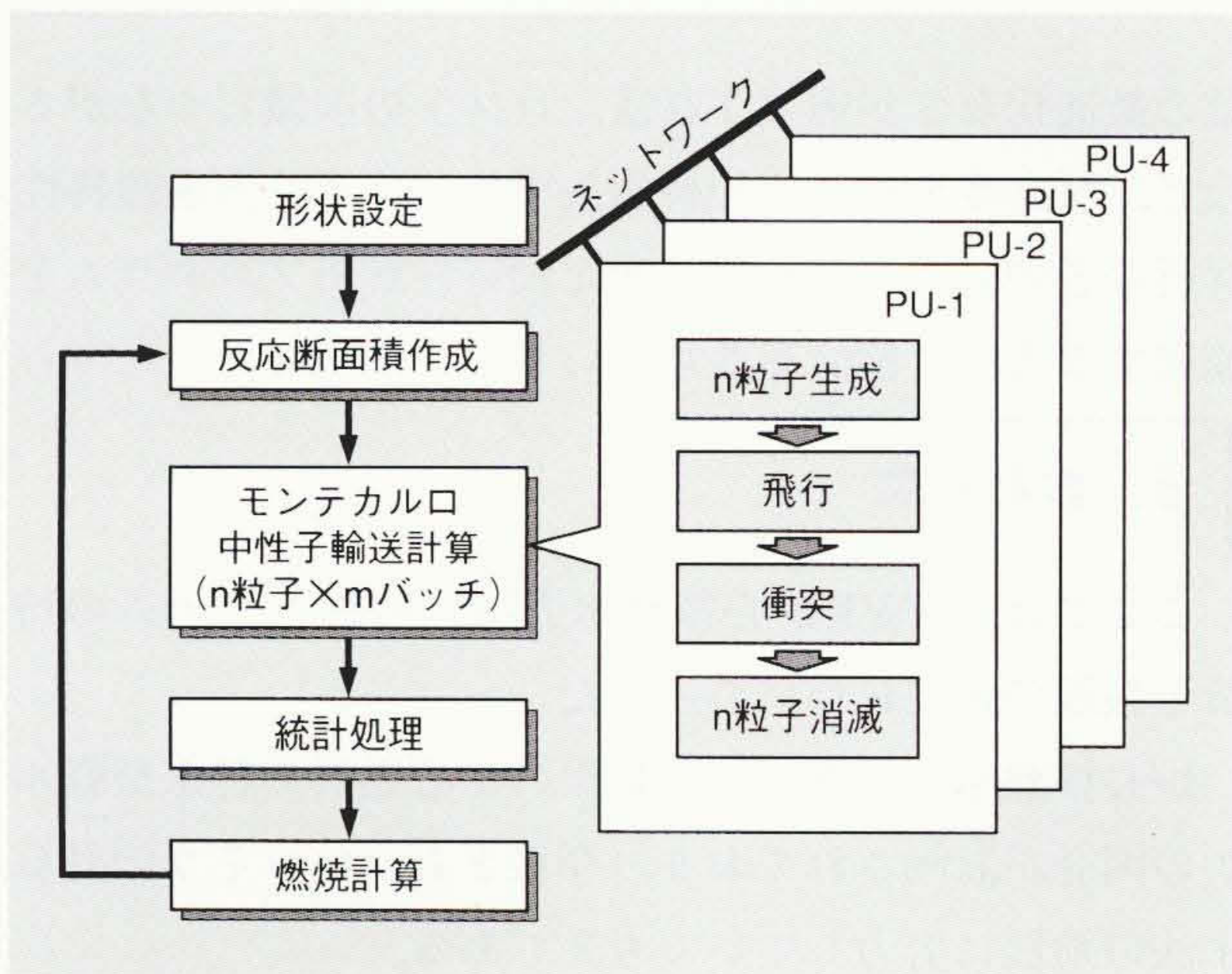


図1 BWR炉心核熱水力特性解析システム

新しい炉心燃料の設計に必要な解析を実行する解析プログラムを有機的に結合してシステムを構成する。



注：略語説明 PU(プロセッサ)

図2 並列処理型モンテカルロ燃料集合体核特性解析プログラム

多数の中性子を複数のプロセッサに分けて計算し、結果を集めて統計処理することにより、90%以上の並列化効率を実現している。

容易にできる。最近の炉心では、燃料集合体間の濃縮度差や燃焼度差が拡大し、隣接燃料の及ぼす影響が重要になっている。そのため、上記の特徴を生かして、複数の燃料集合体を組み合わせた体系を解析するマルチバンドル解析機能をVMONTに加え、燃料が燃焼する間に受ける隣接燃料の影響を評価できるようにした。これにより、隣接燃料の影響を考慮した燃料最適化が可能となった。

3.2 サブチャネル解析による限界出力評価

燃料集合体の開発では、その成立性にかかわる限界出力を評価する技術が必要である。集合体内は高温高压の条件下で蒸気・水が複雑に流れる場であるため、従来は実規模の試験データから実験式を導く手法が主流であっ

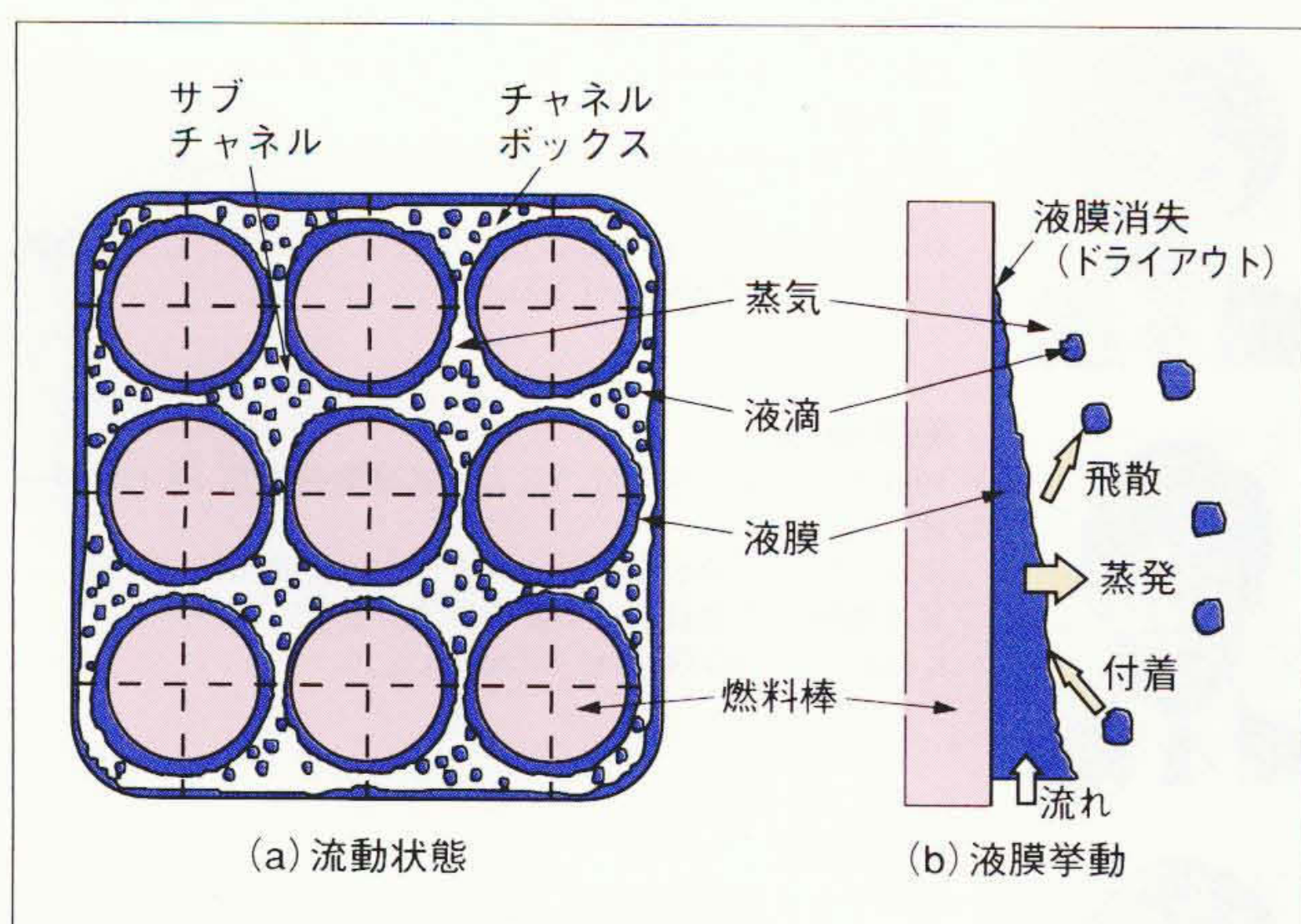


図3 集合体内の二相流動

沸騰によって蒸気が多くなると壁面に液膜が形成され、サブチャネル中央に液滴を含む蒸気が流れる。液膜流量は、液膜の蒸発、液滴の飛散、および付着によって変化する。

た。この手法では燃料体開発のたびに試験が必要であったため、燃料棒表面上の液膜が消失する過程をシミュレーションして限界出力を予測するサブチャネル解析プログラム“SILFEED²⁾”を開発した。

サブチャネル解析では、集合体内を燃料棒とチャネルボックスの壁面に囲まれた小さい流路(サブチャネル)に分割する(図3参照)。燃料の発熱によって沸騰が進み、蒸気の割合が大きくなると、燃料棒表面を流れる液膜や、液滴を含む蒸気から構成する流動様式になる。限界出力とは、燃料棒表面の液膜の蒸発、液膜からの液滴の飛散、および蒸気中の液滴の再付着を考慮して求めた液膜消失(ドライアウト)が発生する直前の熱出力である。この手法は種々の実規模試験データで検証しており、現行炉、次期炉、および次世代炉の炉心燃料開発に活用している。

4. 炉心核熱水力特性解析手法

4.1 ノード法に基づく三次元炉心核熱水力特性解析

BWRでは燃料集合体内で沸騰が起き、発生した蒸気は蓄積して下流(集合体の上方)に行くほど多くなる。燃料集合体の出力と蒸気量は相互に作用を及ぼすため、BWR燃料の設計や炉心の運転管理には、核特性解析と熱水力特性解析を結合した三次元解析が必要になる。日立製作所は、最近の計算機性能の向上を反映して、より精度の高い炉心特性解析手法を開発した。

三次元炉心シミュレータ“COSNEX¹⁾”は、取り扱う中性子エネルギーを従来の擬似2群から3群に増やし、中性子のエネルギー分布が燃料の燃焼に及ぼす効果を考慮するものである。また、計算メッシュ間隔を細かくすると同等の効果のある、多項式展開ノード法を採用した。この方法は、計算のために分割した小領域(ノード)内の中性子束分布に拡散方程式の近似解を当てはめて解く方法(図4参照)であり、運転期間中の炉心の出力分布を精度良く評価できる。また、従来は複数の代表的な出力の燃料集合体だけを対象としていた詳細熱水力特性解析の対象を全燃料集合体に広げ、集合体の熱水力的な健全性を評価している。

新しい手法の適用で、より精度の高い解析が可能となり、炉心構成の最適化に役立っている。

4.2 三次元炉心動特性解析

事故時や異常な過渡変化時のプラントの挙動を評価する動特性解析・安定性解析に対しても、プラントや燃料の高度化に対応した柔軟性、高精度化が望まれていた。現在では、計算機の進展により、三次元炉心動特性解析

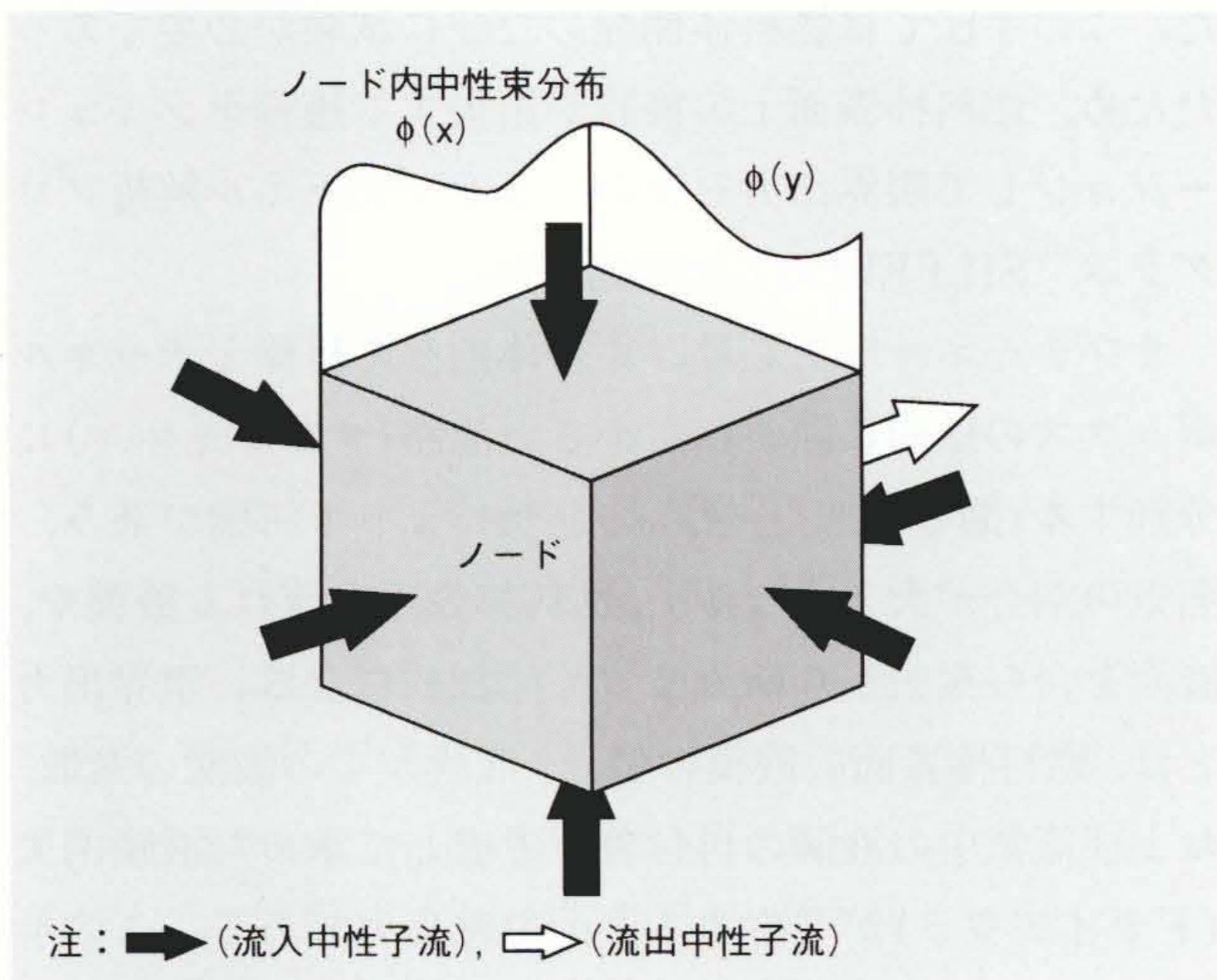
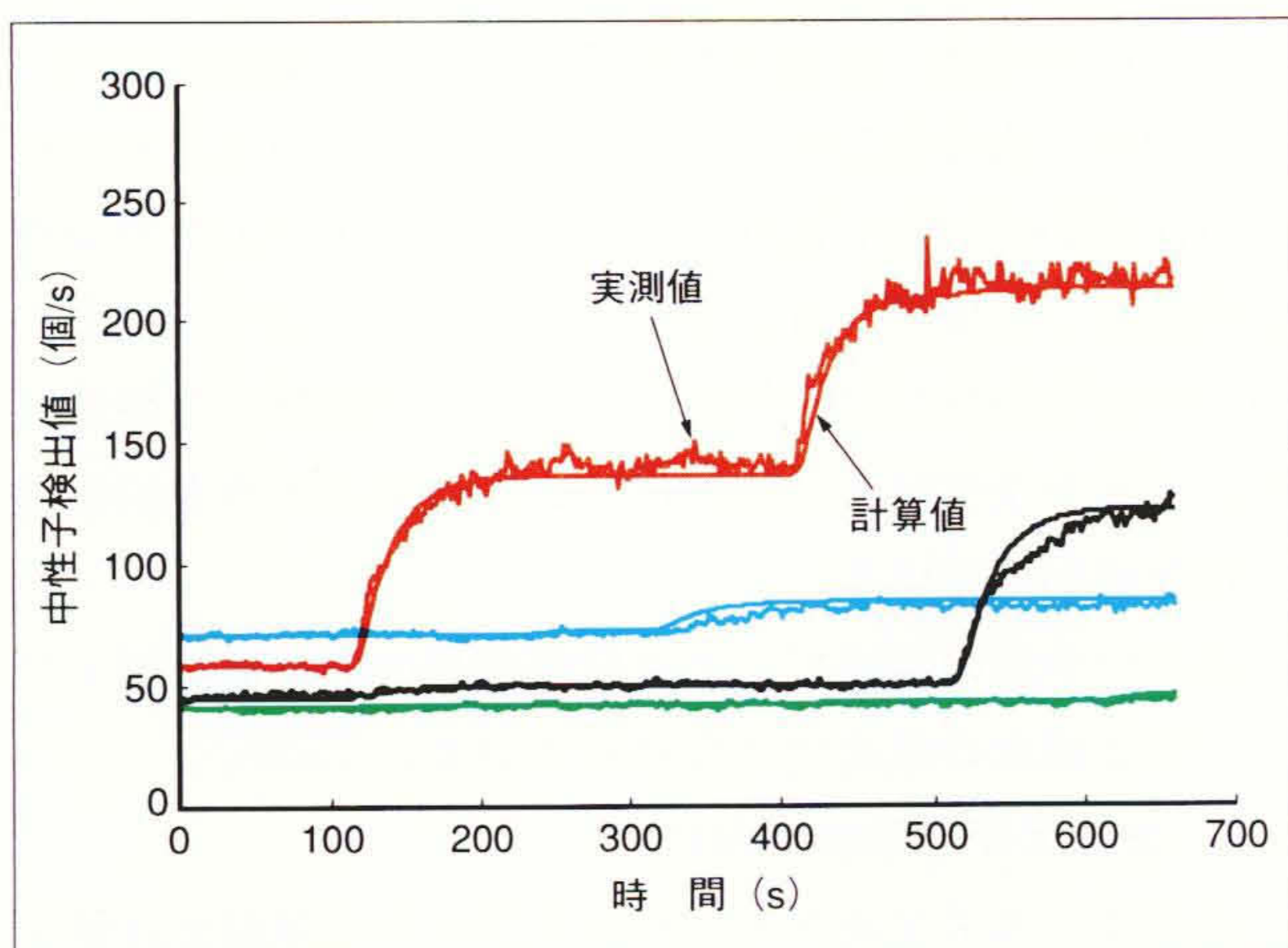


図4 多項式展開ノード法

多項式展開ノード法は、炉心を多数のノードから構成し、ノード表面の流入中性子流に対する流出中性子流の応答関係を求めて、炉心の中性子束分布を計算する手法である。応答関係は、一次元化したノード内の中性子束分布を多項式で近似し、拡散理論を使って導出している。

による詳細な評価が可能になっている。また、制御装置の開発にも三次元解析が利用され、COSNEXに動特性解析機能を付加したSTAND³⁾は、外部中性子源を持つ未臨界炉心にも適用できる特徴を生かして、ABWR(改良型沸騰水型原子炉)起動時の制御棒操作自動制御装置の開発に役立った(図5参照)。

これまでの三次元動特性解析は、許認可解析が十分な安全裕度を持つことを保証するバックアップ計算として位置づけられていた。しかし、詳細評価によって設備容



資料提供：北陸電力株式会社

図5 起動時の中性子検出器出力の計算値と実測値

操作する制御棒と検出器の相対関係により、4個の検出器の応答が異なる様子が三次元解析によって模擬されている。

量の最適化などが実現すれば、コストの削減につながる。反度事故や冷却材喪失事故、プラント過渡特性解析などの許認可解析に三次元動特性解析プログラムを適用する方向で検討を進めている。

5. おわりに

ここでは、BWR炉心核熱水力特性解析システムの特徴と最近の進展について述べた。

炉心核熱水力解析では、新型の炉心燃料や将来型軽水炉の開発が計画されており、今後とも、いっそうの計算手法の進展に努力していく考えである。

参考文献

- 1) H. Maruyama, et al.: Development of an Advanced Core Analysis System for Boiling Water Reactor Designs, Nucl. Technol., Vol.118, 1(1997)
- 2) K. Nishida, et al.: Spacer Effect on Liquid Film Flow and Critical Power in BWR Fuel Bundles, J. Nucl. Sci. Technol., Vol.31, 213(1994)
- 3) Y. Ishii, et al.: Kinetic Analysis Program Based on a Nodal Expansion Method for Critical and Subcritical Reactors, Proc. PHYSOR96, J-90, Mito, Japan(1996)

執筆者紹介



丸山博見

1974年日立製作所入社、電力・電機開発本部 原子力第一部 所属
現在、原子炉の炉心解析手法の研究開発に従事
日本物理学会会員、日本応用数理学会会員、日本原子力学会会員
E-mail: hiromi@erl.hitachi.co.jp



西田浩二

1987年日立製作所入社、電力・電機開発本部 原子力第一部 所属
現在、原子炉の熱流動解析手法の研究開発に従事
工学博士
日本機械学会会員、日本伝熱学会会員、日本原子力学会会員
E-mail: knishida@erl.hitachi.co.jp



石井佳彦

1981年日立製作所入社、電力・電機開発本部 原子力第一部 所属
現在、原子炉の炉心設計、解析手法の研究開発に従事
日本機械学会会員、日本原子力学会会員
E-mail: yoshihik@erl.hitachi.co.jp



持田貴顕

1980年日立製作所入社、日立工場 原子力計画部 所属
現在、沸騰水型原子炉の燃料管理、炉心設計に従事
工学博士
日本原子力学会会員、米国原子力学会会員
E-mail: mochida@cm.hitachi.co.jp