

FBR 燃料・炉心設計の特徴を考慮した燃料配置最適設定手法の開発

(受託者) 三菱重工業株式会社

(研究代表者) 菅 太郎 炉心技術課

(再委託先) 国立大学法人大阪大学、学校法人五島育英会東京都市大学

(研究開発期間) 平成21年度～24年度

1. 研究開発の背景とねらい

高速増殖炉（以下「FBR」という。）の経済性向上のためには、多くの燃料を燃焼度制限まで効率よく使い、取出平均燃焼度を向上させることが重要であり、そのためには炉心内での燃料配置の最適化が必要である。軽水炉では燃料配置最適化の研究が精力的に行われ、計算機による最適化ツールも開発されていることも踏まえ、本研究では、「もんじゅ」を例として、FBRにおける燃料配置最適化の手法を開発し、実用炉への適用性を検討することを目的とする。

2. 研究開発成果

本事業は、上記の目的を達成するため、平成21年度から24年度までの4ヵ年で実施する計画である。表1に事業全体の計画工程を示す。

表1 本事業の全体計画工程

実施項目	平成21年度	平成22年度		平成23年度		平成24年度	
	下期	上期	下期	上期	下期	上期	下期
I. 目的関数の特性検討 (1) 設計条件、制約条件及び設計目標の選定 (2) 検討パラメータに対する応答特性解析		炉心特性データの作成 ／設計条件等の整理	検討パラメータに対する目的関数の応答特性解析				
II. 最適アルゴリズムの検討 (1) 最適化基礎理論の適用性検討 (2) 最適アルゴリズムの検討			応答特性定式化/ アルゴリズム組合せ検討/予備計算			プログラム仕様作成/ 試算の反映	
III. 実用炉等への適用性検討 (1) プログラムの試作 (2) 試算問題の設定 (3) 実用炉等への適用性検討						プログラム作成/ 試算の反映	問題設定/ 応答特性評価 試算/妥当性確認

平成23年度までに実施項目I及びII、また、実施項目IIIの内、(1)プログラムの試作を実施した。以下にこれまでの主な成果について述べる。

2.1 最適アルゴリズムの検討

(1) 最適化基礎理論の適用性検討

① 応答特性検討

平成22年度にまとめた検討パラメータ（燃料交換パターンやPu富化度等）と目的関数（取出平均燃焼度や燃料最高線出力密度等の炉心特性値）の炉物理的な相関関係に基づく応答特性の定式化方法について、燃料配置（燃料交換パターン）の最適アルゴリズムへの適用に必要な高精度化及び高速化のための方策を検討した。

検討パラメータと目的関数の厳密な応答特性は詳細な炉心計算により得られるが、炉心計算モデルを簡略化することによる目的関数評価の高精度化及び高速化のための方策を検討

した。この結果、実用的な計算精度及び計算時間で目的関数の評価ができることを確認した。

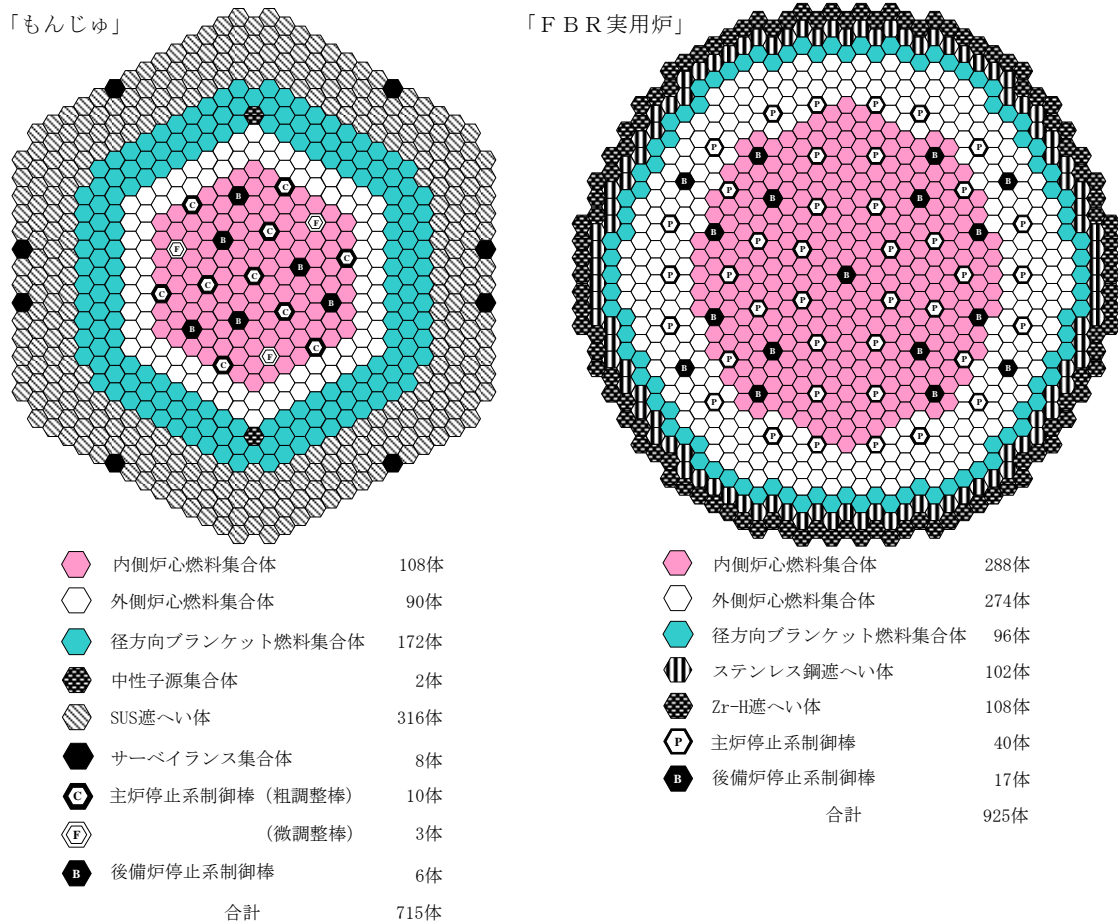


図1 「もんじゅ」及びFBR実用炉の炉心構成

また、目的関数である出力分布の予測を高速化するための方策を検討した。その結果、炉心計算を伴わない出力分布の簡易予測法により燃料配置の広範囲な探索が可能となり、排除すべき燃料配置を抽出するのに有効であることを確認した。図2に「もんじゅ」における簡易予測法による予測値と炉心計算値（3次元拡散燃焼計算）との関係を示す。

② 組合せ検討

平成22年度に抽出したFBRの燃料・炉心設計の特徴に適合する最適化基礎理論の組合せに加えて、最新の最適化基礎理論や複数の目的関数を最小化あるいは最大化する多目的最適化手法の適用性を検討し、燃料配置の最適アルゴリズムの組合せを選定した。

平成22年度に検討した局所探索法（山登り法：LS、焼き鈍し法：SA、タブー探索法：TS）や遺伝的アルゴリズム（GA）に加えて、最新の最適化基礎理論である確率的進化手法（SE）について、FBRの燃料配置最適化問題への適用性を検討した。検討のための最適化の試計算の例を図3に示す。この結果、遺伝的アルゴリズムは大局的な探索ができること、また、確率的進化手法を含む局所探索法はいずれ

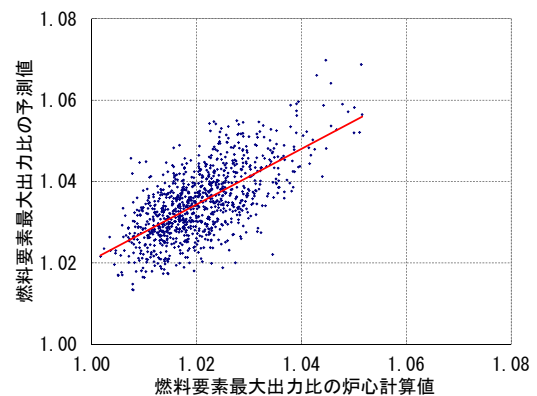


図2 簡易予測法と炉心計算との関係

も特定の燃料配置の近傍を詳細に探索できることが分かった。また、多目的最適化手法について、遺伝的アルゴリズムを用いて、複数の目的関数をランダムに与える重み係数で線形結合し、逐次重み係数を変化させながら探索を行う手法の適用性を検討した。

これらの検討に基づき、燃料配置の最適化に適合する有望な最適化基礎理論の組合せとして、最適化の初期段階に遺伝的アルゴリズムを用いて大局的な探索を行い、その後、その近傍を適切な局所探索法を用いて詳細に探索する組合せを選定した。

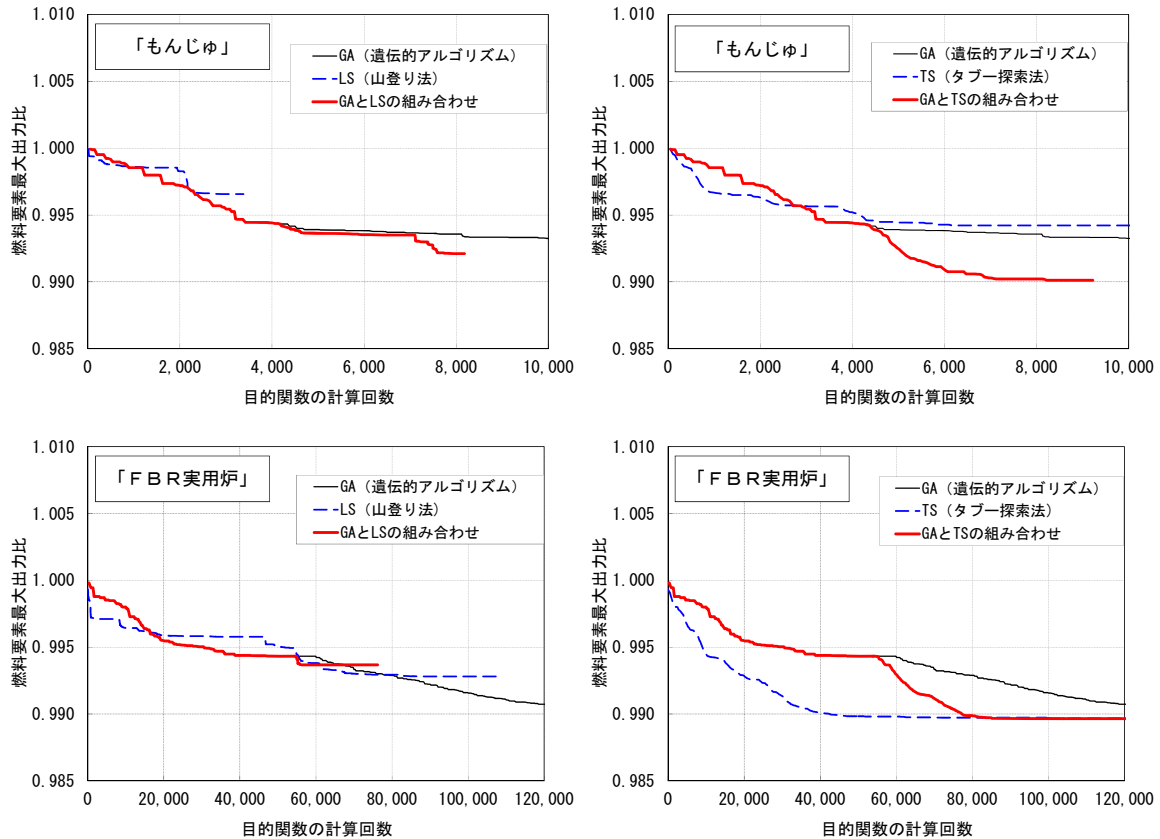


図3 最適化基礎理論による模擬出力分布平坦化問題の試計算例

③ 予備解析

上記②で選定された最適アルゴリズムの組合せに基づき、「もんじゅ」を対象とした燃料配置の最適解析を実施し、計算精度や計算速度の観点からFBRの燃料配置最適化への適用性を評価した。

各流量領域での最大燃料要素出力を目的関数とした燃料配置最適解析を実施した。その結果、遺伝的アルゴリズムと局所探索法の組合せ、また、個々の最適化基礎理論を単独で用いた場合のいずれも、基準となる燃料配置と比べ各流量領域の最大燃料要素出力を低減できることを確認した。また、計算精度及び計算速度の観点からFBRの燃料配置最適化に適用できる見通しを得た。解析例を図4に示す。

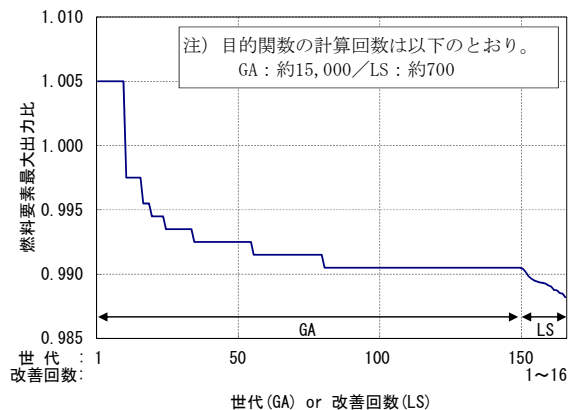


図4 燃料配置最適化による最大出力の低減

(2) 最適アルゴリズムの検討

① 基本仕様策定

上記(1)②で選定された最適アルゴリズムの組合せに基づき、FBRの燃料配置最適設定プログラムのアルゴリズムについて、基本仕様を策定した。

選定された最適アルゴリズムの組合せによる評価を可能とするため、遺伝的アルゴリズム (GA) と 4 つの局所探索法 (山登り法 (LS)、焼き鈍し法 (SA)、タブー探索法 (TS)、確率的進化手法 (SE)) を柔軟に選択できるプログラムの基本仕様として、入力データ仕様等を策定した。

② 基本仕様確認

上記(1)①で検討された応答特性の定式化方法に基づき、燃料配置最適設定プログラムに採用すべき目的関数の効率的な評価方法を選定し、要求性能 (計算精度や計算速度) を満たすことを確認した。

「もんじゅ」の燃料配置最適化問題に対しては、炉心計算モデルの簡略化及び平成22年度に検討した中性子束変化の補正法を用いることにより、1万通り程度の燃料配置の探索を実用的な計算精度及び計算速度で実施可能であることを確認した。

また、大型炉心であるFBR実用炉への適用に対しては、上記(1)①で検討した出力分布の簡易予測法を用いることにより、100万通り程度の膨大な燃料配置を探索し (図5)、比較的優良な解の抽出に有効であることを確認した (図6)。

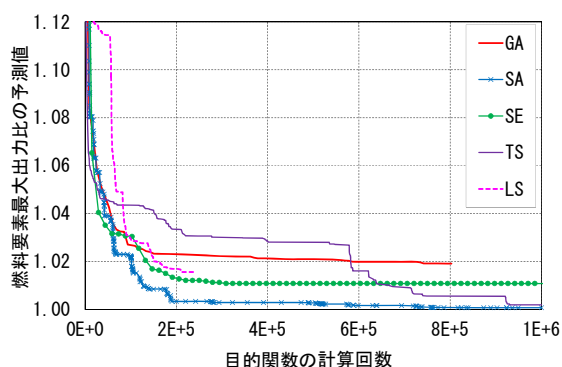


図5 予測値による最適化 (FBR実用炉)

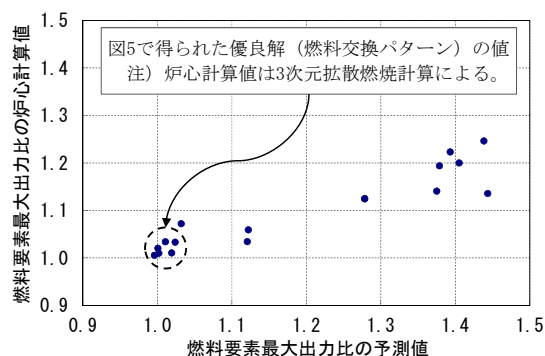


図6 炉心計算による確認 (FBR実用炉)

2.2 実用炉等への適用性検討

(1) プログラムの試作

策定された最適アルゴリズムの基本仕様に基づき、FBRの燃料配置最適設定プログラムを試作した。試作されたプログラムを用いて「もんじゅ」の燃料配置最適化問題を解析した結果、所定の機能が正しく動作することを確認した。

3. 今後の展望

今後、より広範囲の探索を可能にするとともに、「もんじゅ」より燃料集合体数が大幅に多いFBR実用炉での燃料配置最適化を行うため、最適化基礎理論における探索強化策及び目的関数の評価時間の短縮化を検討し、それらを反映したFBRの燃料配置最適設定手法による試計算を通して、平成24年度にFBR実用炉等への適用性を明らかにする。