

# F B R 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、学校法人東海大学

(研究開発期間) 平成 2 1 年度～ 2 4 年度

## 1. 研究開発の背景とねらい

高速増殖炉（以下「F B R」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、F B R 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 2 1 年度から 2 4 年度までの 4 ヶ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 ／試計算の反映	
III. 実用炉等への適用性検討 (1) プログラムの試作 (2) 試計算問題の設定 (3) 実用炉等への適用性検討						プログラム作成 ／試計算の反映	問題設定 ／応答特性評価 試計算／妥当性確認

平成 2 2 年度までに実施項目 I の目的関数の特性検討、また、実施項目 II の内、(1) 最適化基礎理論の適用性検討を実施した。以下に平成 2 2 年度の成果を中心にまとめる。

### 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

##### ① 炉心特性データの作成

平成 2 1 年度に作成した「もんじゅ」及び「F B R 実用炉」を代表炉心（図 1）とした燃料配置の最適化で考慮する炉心の設計条件等を設定するために必要となる出力分布等の炉心特性データに加えて、改良設計データとして、ブランケット燃料集合体のシャッフリングや FaCT プロジェクトで提案されている改良内部ダクト燃料集合体の装荷時の内部ダクトの方向を反映した出力分布等の炉心特性データを解析評価に基づき作成した。

これらの炉心特性データから、ブランケット領域での最高線出力密度等を低減するのに

ランケット燃料集合体のシャッフリングが効果的であることが分かった。また、改良内部ダクト燃料集合体の装荷時の内部ダクトの方向については、例えば、集合体内において相対的に中性子束の高い位置に内部ダクトが置かれるように装荷できれば装荷できない場合より最高線出力密度等を低減できる可能性がある。更に、炉心内の低出力領域にある炉心燃料集合体を1回の燃料交換時に集中的に燃料交換するバッチ集中型とした場合にも、既存の設計で採用されているバッチ分散型の燃料交換と同等以上の出力分布の平坦化が可能であることが示された。

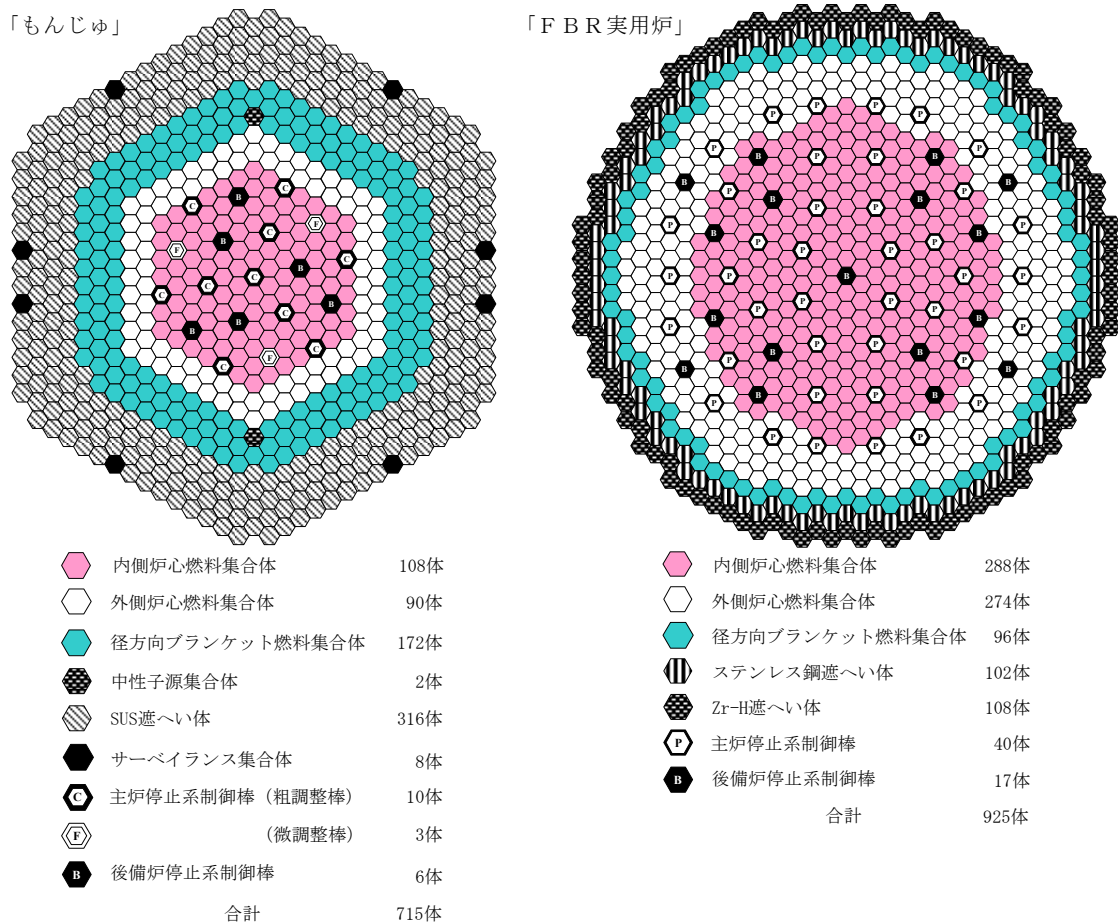


図1 代表炉心の炉心構成

## ② 設計条件等の整理

### a. 設計条件等の選定

FBRの燃料・炉心設計で考慮する設計条件、制約条件、設計目標として平成21年度に選定したものに加えて、①で作成された改良設計に基づく炉心特性データから、ブランケット燃料集合体のシャッフリング及び改良内部ダクト燃料集合体の装荷時の内部ダクトの方向を設計条件に選定した。

選定された設計条件等の中から、燃料配置の最適化において最大化あるいは最小化を図る炉心特性値（目的関数）として、設計目標である取出平均燃焼度及び増殖比並びに制約条件である最高線出力密度や最高燃焼度等を選定した。また、燃料配置の最適化において変数とする検討パラメータとして、ブランケット燃料集合体のシャッフリング等を含む燃料配置、新燃料として装荷される炉心燃料集合体のPu富化度及びPu同位体組成、制御棒挿入パターン

ン及び運転サイクル長を選定した。

#### b. 検討パラメータと目的関数の分類

②a. で選定された設計条件等の各項目間の炉物理的な関係を定性的に検討し、燃料配置の最適化において変数とする検討パラメータ（燃料配置や 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）に分類した。

経済性の指標となる取出平均燃焼度の最大化のためには運転サイクル長を増大させることが最も効果的であるが、炉物理的な関係から、燃料健全性を担保するための制約条件である燃料最高線出力密度等が悪化する。このため、最も重要な目的関数を最高線出力密度等の出力分布として、基本的な検討パラメータである燃料配置を最適化することとした。また、Pu 富化度や制御棒挿入パターンについては、燃料配置と組み合わせて最適化効果を高める検討パラメータに分類した。なお、Pu 同位体組成は、FBR の炉心特性に与える影響が大きいことため、検討パラメータとして想定される組成範囲の中で燃料配置最適化への影響を確認することとした。

#### (2) 検討パラメータに対する応答解析

「もんじゅ」及び「FBR 実用炉」を対象として、(1)②b. で整理された検討パラメータの目的関数に対する感度を解析し、応答特性としてまとめた。

燃料配置最適化の検討パラメータである燃料配置や、運転サイクル長及び制御棒挿入パターンの目的関数である最高線出力密度等に対する感度を解析し、応答特性としてまとめた。これらの応答特性から、燃料配置の最高線出力密度等（出力分布）に対する感度は制御棒挿入パターン等の他の検討パラメータと比べて小さいことが分かった。

## 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

#### ① 応答特性検討

I. (2) で示されたように、燃料配置の最高線出力密度等（出力分布）に対する感度が比較的小さいことに着目し、サイクル初期等の代表的な時点において、基準となる燃料配置から配置を変更した場合の中性子束の変化を補正因子として求め、これを用いて変更後の出力分布を予測する定式化方法をまとめた。これにより、燃料配置最適化において最高線出力密度等（出力分布）の評価に要する時間を短縮し、燃料配置を変更した多数の評価を行える見通しを得た。

#### ② 組合せ検討

一般的な最適化基礎理論である局所探索法（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）について、FBR の燃料配置最適化への適用性を検討した。検討は、基準となる燃料配置での「もんじゅ」及びFBR 実用炉の平衡サイクルの集合体出力等の履歴を基に燃料配置の異なる炉心の出力分布を作成し、燃料配置を変えて燃料要素最大出力（目的関数）を最小化させるものである。計算結果の一例を図 2 に示す。これにより、遺伝的アルゴリズムは膨大な燃料配置の中から特徴の異なる複数の良好な燃料配置を求められること、また、局所探索法は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。この結果から、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抽出した。

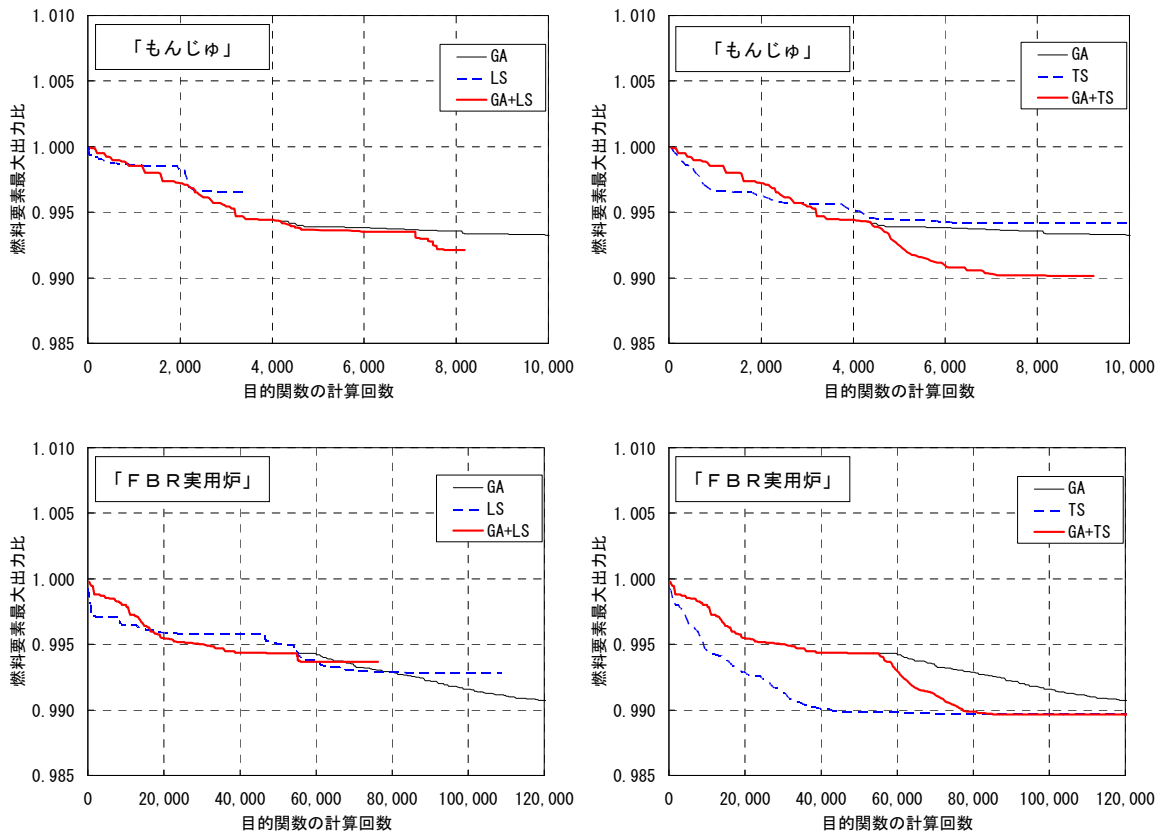


図2 最適化基礎理論による模擬出力分布平坦化問題の計算例

### ③ 予備解析

Ⅱ. (1)②で抽出された最適化基礎理論の組合せに基づき、「もんじゅ」を対象とした燃料配置最適化の予備解析を実施し、最適化の効果等のFBR炉心特性評価への適用性を評価した。具体的には、制約条件である炉心燃料要素の被覆管最高温度を決定する各流量領域での燃料要素最大出力を目的関数とした燃料配置最適化解析を実施した。その結果、遺伝的アルゴリズムと局所探索法の組合せにより、基準となる燃料配置と比べ燃料要素最大出力を1%程度以上低減できることが確認され(図3)、FBRの炉心特性評価に適用できる見通しを得た。

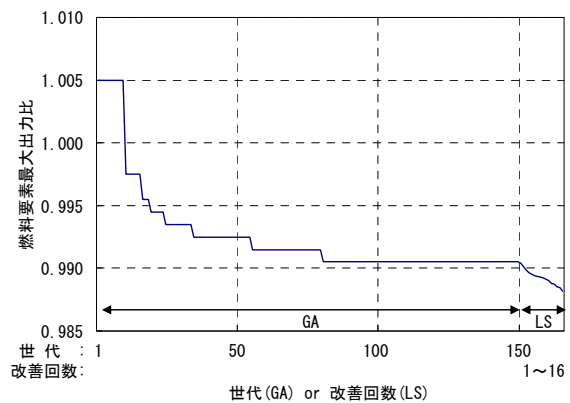


図3 燃料配置最適化による最大出力の低減

### 3. 今後の展望

現在、実施中の最適化アルゴリズムの検討では、平成22年度に検討対象としなかった焼き鈍し法等の最適化基礎理論の適用性を検討するとともに、「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場合の課題である目的関数の評価時間の短縮化を検討し、平成24年度にFBRにおける燃料配置最適設定手法を開発して、FBR実用炉への適用性を検討する。