

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

研究代表者 菅 太郎 三菱重工業株式会社炉心技術課
 参画機関 三菱重工業株式会社、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、平成21年度から24年度までの4カ年の計画で実施した。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	炉心特性データの作成 ／設計条件等の整理							
(2) 検討パラメータに対する応答特性解析		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			応答特性定式化/ アルゴリズム組合せ検討／予備計算					
(2) 最適アルゴリズムの検討					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					プログラム作成/ 試算の反映			
(2) 試算問題の設定						問題設定/ 応答特性評価		
(3) 実用炉等への適用性検討						試算／妥当性確認		

本工程に従って、平成24年度に実施項目II及びIIIの検討を行い、当初の目的を達成した。以下に、主な成果となる実施項目III「実用炉等への適用性検討」の結果について述べる。

(1) プログラムの試作

平成22～23年度の検討を踏まえ、複数の最適アルゴリズムの組合せによる評価を行うため、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FBRの燃料配置 (燃料交換パターン) の最適設定プログラムを作成した。

最適化における目的関数は、燃料配置に対する感度等を考慮して出力分布とし、その平坦化を図るものとした。具体的には、基準とする燃料配置における最大値との比で定義した燃料要素最大出力比で与える。

また、炉心が大型で多数の燃料集合体から構成される実用炉に対しては、目的関数を厳密

な炉心計算で求める方法では、現実的な時間で最適化ができないことが分かった。このため、平成24年度には、炉心計算を行わずに出力分布を予測する簡易計算について検討し、この機能をプログラムに追加した。

(2) 試計算問題の設定

① 設計条件設定

燃料配置最適設定手法の適用性の検討のため、これまでの設計例を踏まえ、炉心仕様や燃料仕様等に基づく原子数密度や「もんじゅ」で5サイクル、実用炉で4サイクルからなる平衡炉心の炉心状態等の炉心計算用のデータを作成した。図1に「もんじゅ」及び実用炉の炉心構成を示す。

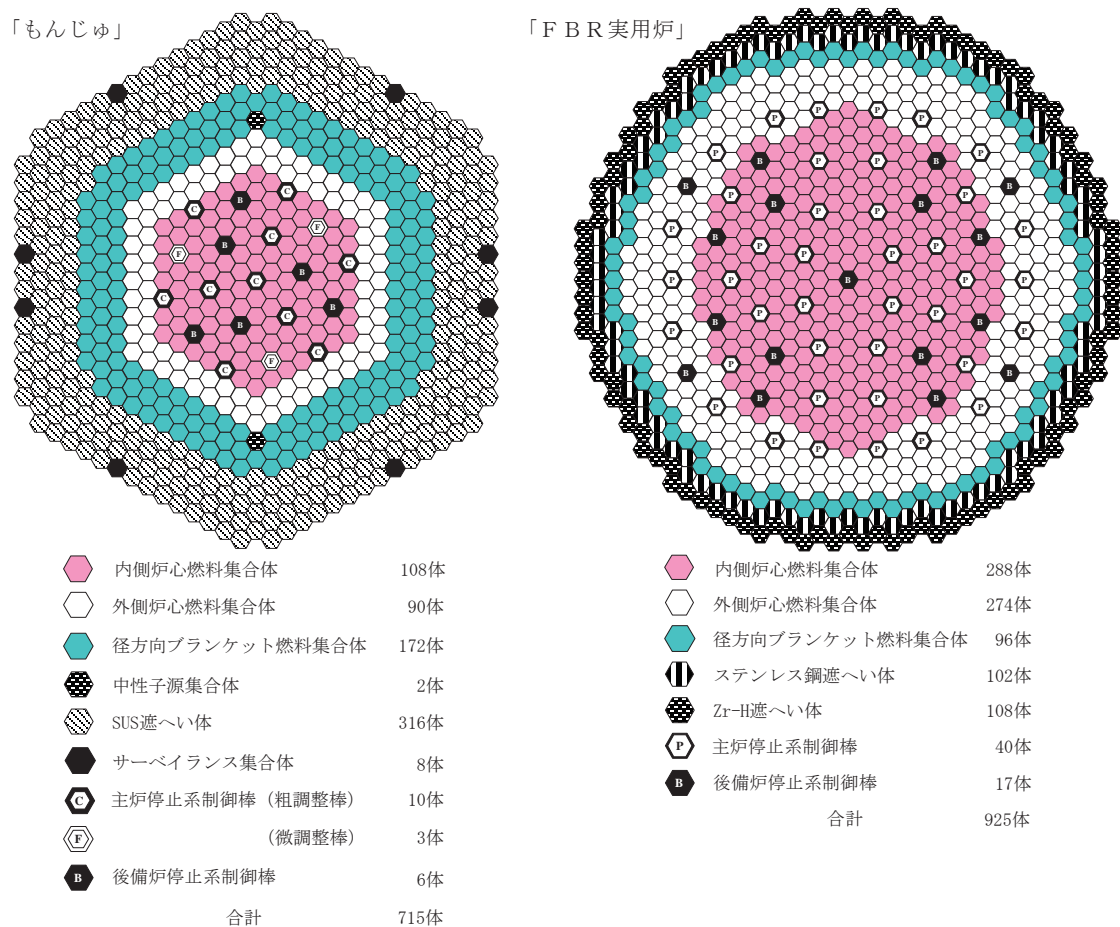


図1 「もんじゅ」及びFBR実用炉の炉心構成

② 応答特性評価

燃料配置最適設定プログラムの解析に必要な検討パラメータと目的関数の応答特性を炉心解析により求め、入力データとして整備した。具体的には、「もんじゅ」及び実用炉を対象として、出力分布の簡易計算に必要となる燃料配置に対する出力分布の応答特性を、個々の集合体位置での燃料交換時期を一つ一つ変更した多数の燃料配置に対する炉心計算で得られた出力分布を用いて算出した。

(3) 実用炉等への適用性検討

① 燃料配置最適化解析

燃料配置最適設定プログラムを用いて、「もんじゅ」及び実用炉を対象とした燃料配置最

適化解析を行い、基準の燃料配置に対し改善された解を得た。

まず、目的関数である燃料要素最大出力比を炉心計算で厳密に求める方法で最適化した場合の解析結果を図 2 及び 3 に示す。「もんじゅ」に対しては、各最適アルゴリズムを個々に使った場合、あるいは、遺伝的アルゴリズム (GA) と山登り法 (LS) を組み合わせた場合の双方とも、設計者がマニュアルで作成した基準の燃料配置に対して改善 (燃料要素最大出力比 < 1.0) が見られる。

一方、実用炉では、現実的な計算時間 (一週間程度) では山登り法 (LS) を途中で打ち切るまでの解析しかできず、基準の燃料配置より優れた解は得られないことが分かった。

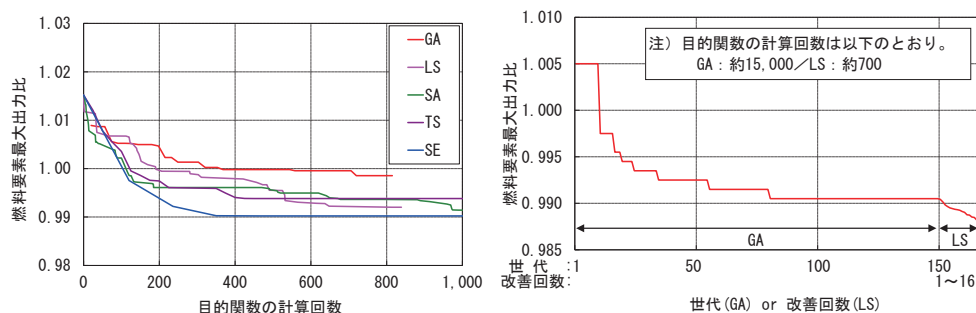


図 2 「もんじゅ」に対する燃料配置最適化解析の結果
(目的関数を炉心計算で求めた場合)

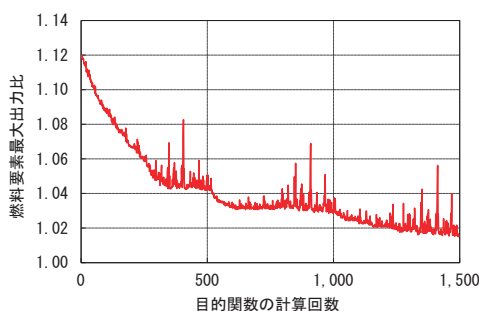


図 3 実用炉に対する燃料配置最適化解析の結果
(LS/目的関数を炉心計算で求めた場合)

次に、簡易計算で得られる燃料要素最大出力比を目的関数とした初期探索を行い、それにより選別された優良解の近傍を、厳密な炉心計算で得られる目的関数に基づき探索した。この簡易計算を用いた最適化の流れを以下に示す。

- 第 1 ステップ：
 - ・ ランダムな初期解から開始し、簡易計算により目的関数を評価し、5 種類の最適アルゴリズムを用いて探索
 - ・ 得られた複数個の有望解に対し、炉心計算により目的関数を評価し、最良解を選定
- 第 2 ステップ：
 - ・ 第 1 ステップの最良解から開始し、第 1 ステップと同じ手順で探索
- 第 3 ステップ：
 - ・ 第 2 ステップの最良解から開始し、目的関数の評価を炉心計算として、近傍探索を実施 (ここでは、炉心計算を伴い計算時間が問題となるため、探索範囲を限定した山登り法 (LS) を用いた。)

この結果を図 4 及び 5 に示す。「もんじゅ」及び実用炉ともに、基準の燃料配置に対して燃料要素最大出力比が 1% 程度改善され、最適化された燃料配置が得られることが分かる。

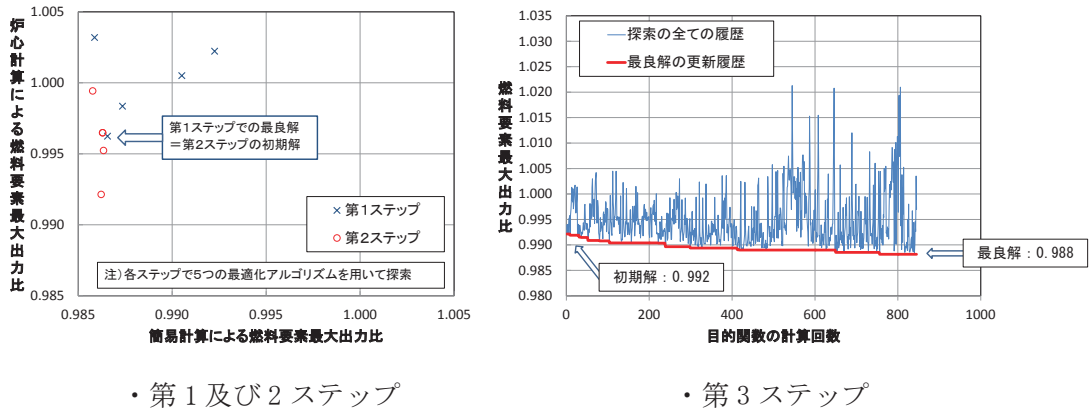


図4 「もんじゅ」に対する燃料配置最適化解析の結果（簡易計算を用いた最適化）

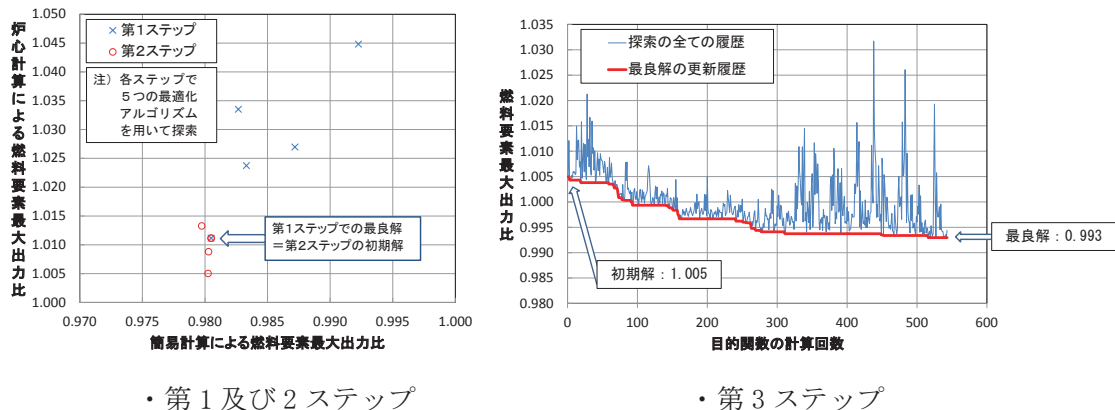


図5 実用炉に対する燃料配置最適化解析の結果（簡易計算を用いた最適化）

② 適用性検討

燃料配置最適化解析により得られた出力分布の平坦化の効果は約1%であり、これは、核分裂核種の燃焼減損による出力の変動（～20%）に対して有意であり、運転サイクル期間の延長による高燃焼度化につなげられると考えられる。

また、炉心が大型で多数の集合体から構成される実用炉においても1週間程度の最適化解析により有意な結果が得られることから、開発された燃料配置最適設定手法は「もんじゅ」及び実用炉級のFBRに適用可能であることが確認された。

3. 今後の展望

本事業で実施された研究開発により、FBRにおける燃料配置最適化の効果が定量的に明らかとなるとともに、特に、電気出力が150万kWで燃料集合体数が500体を超える大型の実用炉に対しても、評価方法の工夫により、現実的な時間で最適化解析が可能であることが示された。

今後、開発された燃料配置最適設定手法は、「もんじゅ」の運転や実用炉の設計に適用して行くことにより実用性を向上させる必要がある。特に、実際の運転に当たっては、燃料のTRU組成の変動やトラブル等による運転計画の変更等に対応するための機能が必要と考えられる。

また、本手法は、FBRの将来的な炉心運用の変更、例えば、シャッフリングを含む燃料交換や出力分布制御のための制御棒運用等への応用が可能であり、FBRの更なる性能向上や安全裕度拡大のために活用されることが期待される。