

ARKADIA における炉心設計最適化プロセスの整備
(3)ベイズ最適化を用いた炉心設計の複数制約条件付き多目的最適化検討

Development of core design optimization process in ARKADIA

(3) Study on multi-objective optimization with multiple constraints of core design using Bayesian optimization

*桑垣 一紀¹, 浜瀬 枝里菜¹, 横山 賢治¹, 堂田 哲広¹, 田中 正暁¹

¹JAEA

設計支援ツール ARKADIA-Design の機能として開発を進めている炉心設計最適化プロセスを用いて、ナトリウム冷却高速炉を対象に多目的最適化を実行し、本プロセスの適用見込みを確認した結果について報告する。

キーワード：炉心設計，多目的最適化，ベイズ最適化，ナトリウム冷却高速炉

1. 緒言 ARKADIA-Design^[1]での開発機能の 1 つとして、核-熱流力-燃料健全性評価-プラント動特性解析の連携解析とベイズ最適化手法^[2]を組み合わせた、炉心設計最適化プロセス（図 1）を整備している^[3,4]。本検討では炉心設計解析（核-熱流力-燃料健全性評価）に焦点を当て、最適化目的を単目的^[4]から多目的へ拡張し、ナトリウム冷却高速炉（均質 2 領域炉心）を対象に本プロセスの適用見込みを確認した結果を報告する。

2. 均質 2 領域炉心の複数制約条件付き多目的最適化検討

2-1. 最適化問題の設定 本検討では、3 目的最適化問題を設定した。目的関数は、取出平均燃焼度（最大化）、増殖比（最大化）、プルトニウム（Pu）フィッサイル重量（最小化）とした。また、設計変数として炉心高さ、サイクル長さ、燃料ピン径（ D ）、燃料ピンの配列ピッチ（ P ）とピン径の比（ P/D ）の 4 変数、制約条件として、Pu 富化度、最大線出力、最大高速中性子照射量、燃焼反応度、圧力損失、累積損傷和（CDF）値の 6 制約を設定した。

2-2. 炉心設計解析の概要 炉心設計の連携解析の手順として、まず 2 次元 RZ 体系の核設計解析を行い、目的関数及び制約条件に加えて、評価対象となる燃料集合体の出力分布を算出する。続いて、対象集合体に対して熱流力設計解析を実施し、被覆管の肉厚中心温度が制限値（700℃）となる必要最小流量を反復計算により算出し、最小流量時の被覆管温度分布と圧力損失を評価する。燃料健全性評価では、流量配分区域毎に最も照射条件が厳しい燃料ピンの CDF 値評価が必要となるが、本検討では、評価対象を出力が最も高くなる炉心中心の燃料集合体と暫定し、CDF 値の評価を簡略化した。対象集合体内で照射条件が最も厳しくなる燃料ピンを抽出し、核設計解析で求めた出力分布及び熱流力設計解析で求めた被覆管温度分布から CDF 値を算出した。この際、製造公差及び被覆管温度不確かさ（工学的安全係数）を統計処理により加味した。

2-3. 多目的最適化の実行結果 トレードオフの関係にある複数の目的関数を同時に考慮する多目的最適化問題では、最適解が一意には決定できず、パレート解と呼ばれる解の集合を得ることが目標となる。設定した最適化問題に本プロセスを適用し、図 2 に示すパレート解集合が得られた。3 つの目的関数間のトレードオフにより、パレート解集合が 2 次元曲面状に存在することが確認できる。今後、指定した各目的関数の重要度（重みづけ）を元にパレート解を抽出する機能や、目的関数と設計変数に対する相関分析機能を実装し、パレート解同士を比較した設計検討を実現する。また、他手法（遺伝的アルゴリズム等）でも同様の問題を解き、パレート解集合の精度や計算コストの比較により性能評価を行い、炉心設計最適化に適したアルゴリズムを評価する。

3. 結言 ナトリウム冷却高速炉の均質 2 領域炉心を対象に 6 制約条件付き 4 変数 3 目的最適化問題を設定し、核-熱流力-燃料健全性評価の連携解析機能とベイズ最適化を組み合わせた最適化プロセスによりパレート解集合が算出できることを確認し、本プロセスによる実炉心設計での多目的最適化実行へ見込みを得た。

参考文献 [1] H. Ohshima, et al., J. of Nuclear Rad. Sci., vol. 9 (2023). [2] D. R. Jones, et al., J. Global Optimization, vol. 13 (1998). [3] 浜瀬他、日本原子力学会 2024 年春の年会、2M13. [4] 桑垣他、同左、2M14.

*Kazuki Kuwagaki¹, Erina Hamase¹, Kenji Yokoyama¹, Norihiro Doda¹, and Masaaki Tanaka¹ ¹Japan Atomic Energy Agency

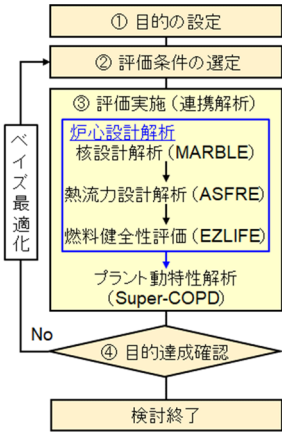


図 1 最適化プロセスのフロー^[3]

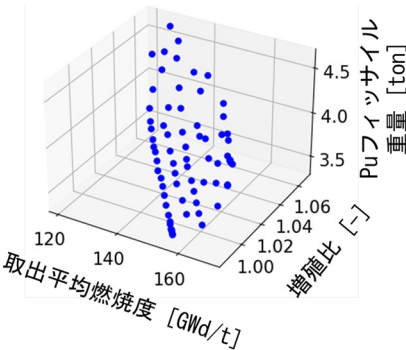


図 2 パレート解集合