

## 新燃料全数探索と燃焼燃料局所探索を組み合わせた燃料装荷パターンの最適化

エネルギー量子制御工学グループ（山本研究室）石黒諭美

**背景・目的** 原子炉の運転において燃料集合体は定期検査の際に取り出され、よく燃焼した集合体から 1/3 程度が新燃料と交換される。そのため原子炉においては燃焼度の異なる燃料が炉心に混在している。したがって、燃料集合体ごとの特性を考慮しつつ炉心内の燃料配置を設計する必要がある。この際、適切な燃料配置を決定することは、安全性及び経済性の観点から非常に重要である。燃料装荷パターンの探索は通常、エンジニアの広範囲にわたる試行錯誤にて行われることが多い。燃料装荷パターン最適化は、組み合わせ最適化問題の範疇に所属する問題である。しかしながら燃料集合体の組み合わせ総数が膨大であり探索空間が広いことから、全数探索は非現実的である。したがって、これまでは焼きなまし法を初めとする確率的探索法など、さまざまな手法が試みられてきた。しかしながらこれらのいずれの方法も、解空間を網羅的にカバーすることは難しいという問題が残っていた。そこで、本研究では分割統治法に基づき、有望な解空間を優先的に探索することで効率よく全体の解を得ることを狙いとした、全数探索の網羅性をできるだけ活かした最適化手法を提案する。本研究では、新燃料全数探索および燃焼燃料局所探索を用いた燃料装荷パターン最適化手法の性能評価を行うことを目的とする。

**提案手法** 新燃料は炉心特性に対する影響が強いことから、新燃料配置の取りうる配置は全て考慮し、網羅性を担保するものとする。これにより解空間を各新燃料配置ごとに分割することができる。ここで、分割した解空間内の探索手法として直接探索を用いた Multi-start Local search (MSLS)、総当たり 2 体交換を用いた MSLS、全数探索の 3 種の手法を実行し比較した。直接探索とは解空間の多峰性への対応能力がある一方で局所解を判別する能力がない探索手法であり、総当たり 2 体交換とは解空間の多峰性への対応能力はないが、局所解を必ず得る手法である。この 2 つの手法それぞれについて複数の探索開始箇所から実施する手法が直接探索を用いた MSLS 並びに総当たり 2 体交換を用いた MSLS である。また、全数探索は全ての燃料配置について計算を行う手法であるため、確実に最適解を得ることができるメリットがある一方で体系によっては計算コストが実行不可能なほど大きくなるというデメリットがある。

**検証計算** 3 ループ PWR 炉心を対象に提案手法 3 種を実施し、結果を比較した。炉心特性については 2 群拡散計算を用いて燃焼計算を実施し評価した。目的関数は燃焼を通じた出力ピーキング係数の最大値とし、目的関数が小さくなる燃料配置を探索した。ただし、ここで燃焼燃料について、燃焼燃料の種類が多く全数探索が困難であることから、類似した燃料を同一とみなし燃焼燃料の種類を減らすバッチ分け<sup>2)</sup>を行った比較的単純な燃料構成を用意した。

**計算結果** Gd 新燃料配置ごとに燃焼燃料のバッチわけありの体系にて各探索を実施した結果得られた炉心の出力ピーキング係数のヒストグラム(全数 1815)を図 1 に示す。今回の計算条件にて全数探索とその他の手法についてどの程度最適解に到達できるかを比較した結果、今回用いた手法では分割した解空間内の探索が不十分であることが分かった。従って、今後は分割した解空間内で行う局所探索をより詳細に行う、又は新燃料を用いた解空間の分割をより細かい分割とした上で局所探索を行う必要があることが分かった。

**今後の課題** 燃焼燃料バッチ分け全数探索によって解空間をより細かく分割した上で局所探索を実施する手法の開発を行う必要があると考えられる。

### 参考文献

- [1] K. ISHITANI, M. ADACHI, J. UENO, A. YAMAMOTO, "Development of Multi-Stage Stochastic PWR Loading Pattern Search Code SAMPLS," Advances in Nuclear Fuel Management IV (ANFM 2009) Hilton Head Island, South Carolina, USA, April 12-15, 2009, (2009) [CD-ROM]
- [2] Y. A. CHAO, et al., "Loading Pattern Search by Branching and Bounding Batch Patterns Enumerated Under Constraints," Proc. PHYSOR2002, Seoul, Korea, October 7-10, 2002 (2002) (CD-ROM).

### 公刊論文

- 1) 石黒諭美, 他, "新燃料全数探索および局所反復探索を用いた燃料装荷パターン最適化," 日本原子力学会春 2016 年春の年会 (2016).
- 2) 石黒諭美, 他, "Comparison of Fuel Loading Pattern Optimization Results using Exhaustive Search for Fresh Fuels and Local Search for Burned Fuels," American Nuclear Society Winter Meeting (2016).
- 3) 石黒諭美, 他, "新燃料全数探索及び燃焼燃料局所探索を組み合わせた燃料装荷パターン最適化の性能比較," 日本原子力学会 2016 年秋の大会 (2016).

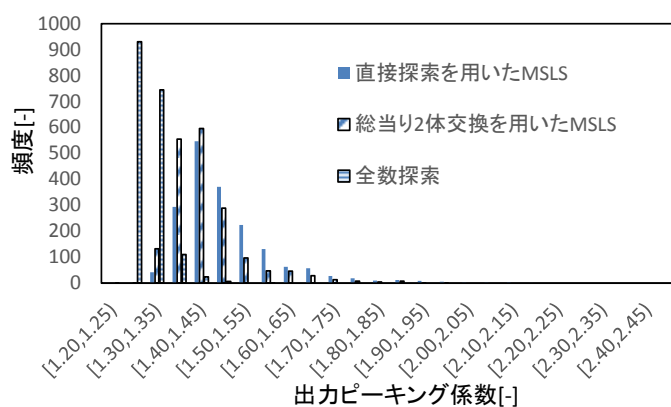


図 1 各探索手法を用いた探索結果