

<炉物理部会 優秀講演賞 記念寄稿>

炉心設計最適化システムの開発

国立研究開発法人 日本原子力研究開発機構
高速炉研究開発部 炉心設計グループ
桑垣 一紀

はじめに

この度は炉物理部会優秀講演賞にご選出頂き、誠にありがとうございます。このような機会を設けて頂いた炉物理部会の皆様に御礼申し上げます。また、本研究を進める上で、ご指導やご助力を賜りました日本原子力研究開発機構の横山 賢治氏、浜瀬 枝里菜氏、堂田 哲広氏、田中 正暁氏、大木 繁夫氏、株式会社 NESI の神 智之氏、曾我 彰氏にも、この場をお借りして御礼申し上げます。

受賞の対象となった研究の概要

原子力機構で開発が進められている「AI 支援型革新炉ライフサイクル最適化手法 (ARKADIA)」の機能整備の一環として、炉心設計を自動で最適化するシステムの開発を進めています (ARKADIA の概要については文献[1,2]に纏められています)。この炉心設計最適化システムと従来手法の比較を図 1 に示します。炉心設計では、多数の設計変数を考慮しながら、複数の制約条件を満たす範囲で、目標とする炉心性能を実現するように設計変数を調整する必要がありますが、これらの変数と特性は複雑な相関を持っています。従来は基本的に、設計者が経験や蓄積された知見をもとに、この複雑な相関関係を考慮しながら変数調整を行っていましたが、これは時間のかかる困難な作業となっていました。また、各解析を個別に行うため、解析間で取合条件を設定する必要があり、設計空間の過度な制限 (過度な保守性) が介在していました。

これらの課題を解決するため、個別で実施していた核設計-熱流体力設計-燃料健全性評価-プラント動特性解析を連携し、さらに最適化アルゴリズム (ベイズ最適化[3]) を組み合わせることで、炉心性能を最大化させる設計変数を自動で算出するシステムの構築を目指しています。これにより、従来手法と比べ、炉心設計にかかる期間を数か月~年単位から週単位の短縮することが可能となります。また、解析間での取合条件の設定が不要となり、過度な保守性を排除できます。

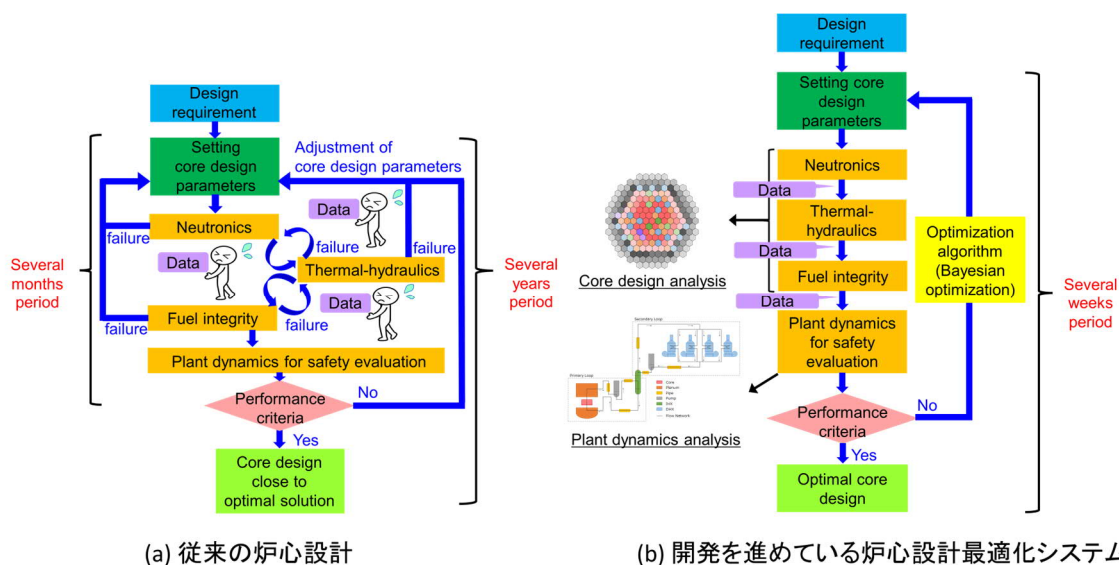


図 1 : 従来の炉心設計と開発を進めている炉心設計最適化システムのフローチャート [4]

これまでに、連携解析とベイズ最適化を組み合わせた機能のプロトタイプを整備が完了し、炉心設計最適化の例題に対して適用検討を実施しています。受賞の対象となった研究は、この適用検討に関するものです[5]。

最適化には、目的関数が一つの単目的最適化と、目的関数が複数ある多目的最適化があります。開発しているシステムでは、この両方に対応できるように整備を進めていますが、本研究では多目的最適化を対象としました。図 2 に単目的/多目的最適化の概念図を示します。単目的の場合は、イメージが容易で、図 2(b)にあるように、ある目的関数が最小になる変数を求めることが目標となります。一方で、多目的最適化では、トレードオフの関係にある目的関数が複数あるため、最適解を一意に決定することができず、パレート最適解 (Pareto solution、以下 PS) と呼ばれる解の集合が求められます (図 2(a))。

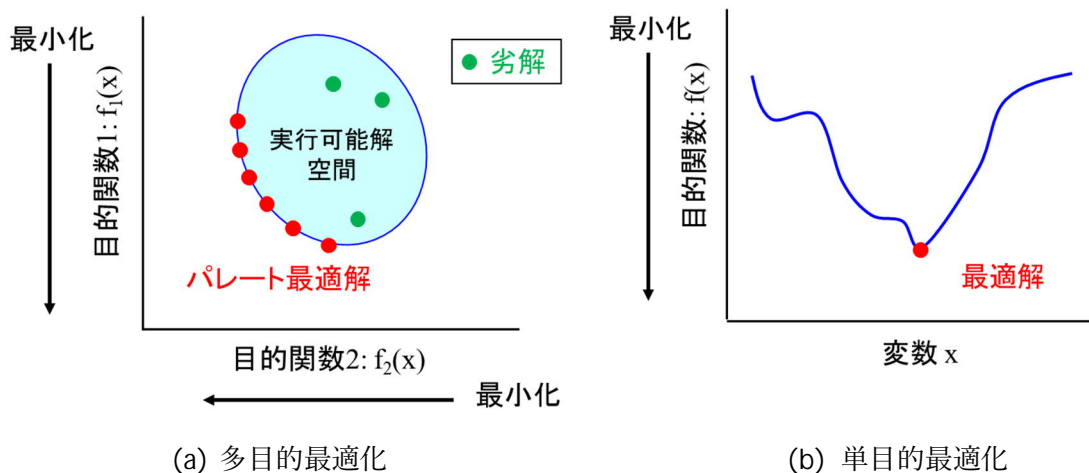


図 2 : 多目的最適化と単目的最適化の概念図

まずは設計変数の少ない簡易的な例題として、7変数の7制約条件付き3目的最適化問題を設定しました。目的関数は取出平均燃焼度(最大化)、増殖比(最大化)、初装荷核分裂性プルトニウム(Puf)重量(最小化)としました。設定した問題に最適化システムを適用した結果、図3(a)に示すPS集合が得られました。先ほどの図2の例では、目的関数が二つだったため、PS集合が線上に分布していましたが、今回解いた問題は目的関数が三つあるため、面上の分布となっています。図3(b)-(d)は、図3(a)に示した3次元目的関数空間のPS集合を、各目的関数の組み合わせごとに、2次元平面に投影したものになっています。これらの図から、目的関数どうしのトレードオフの関係が読み取れます。例えば増殖比は燃焼度及びPuf重量と負の相関があることがわかり、増殖比を高める場合はこれらの炉心特性(他の2つの目的関数)を犠牲にする必要があることを示しています。燃焼度とPuf重量は正の相関があるため、一方を向上させると、もう一方も向上する傾向にあります。

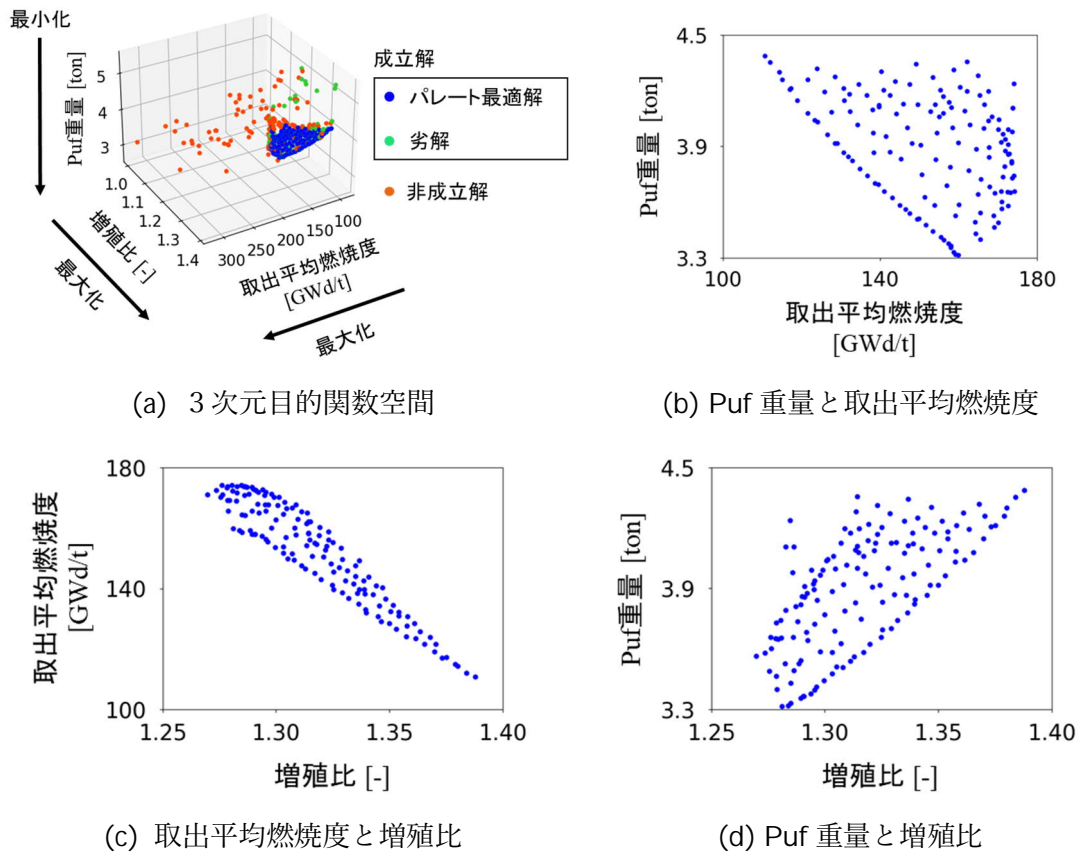


図3：多目的最適化問題を解いて得られたパレート最適解集合[6]

このようにPS集合には目的関数どうしのトレードオフの情報が含まれています。また、PS集合は、制約条件を考慮しながら、一つの目的関数を改善する際に他の目的関数の犠牲が最小限になるように変数調整を行った結果となっています。そのため、このような変数調整を行った際の、目的関数、制約条件、設計変数間の相関関係の情報も含まれています。こ

これらの情報を定量化するため、PS 集合に対して、スピアマンの相関係数[7]を評価する機能を整備しました。この機能を実行した結果を図 4 に示します。

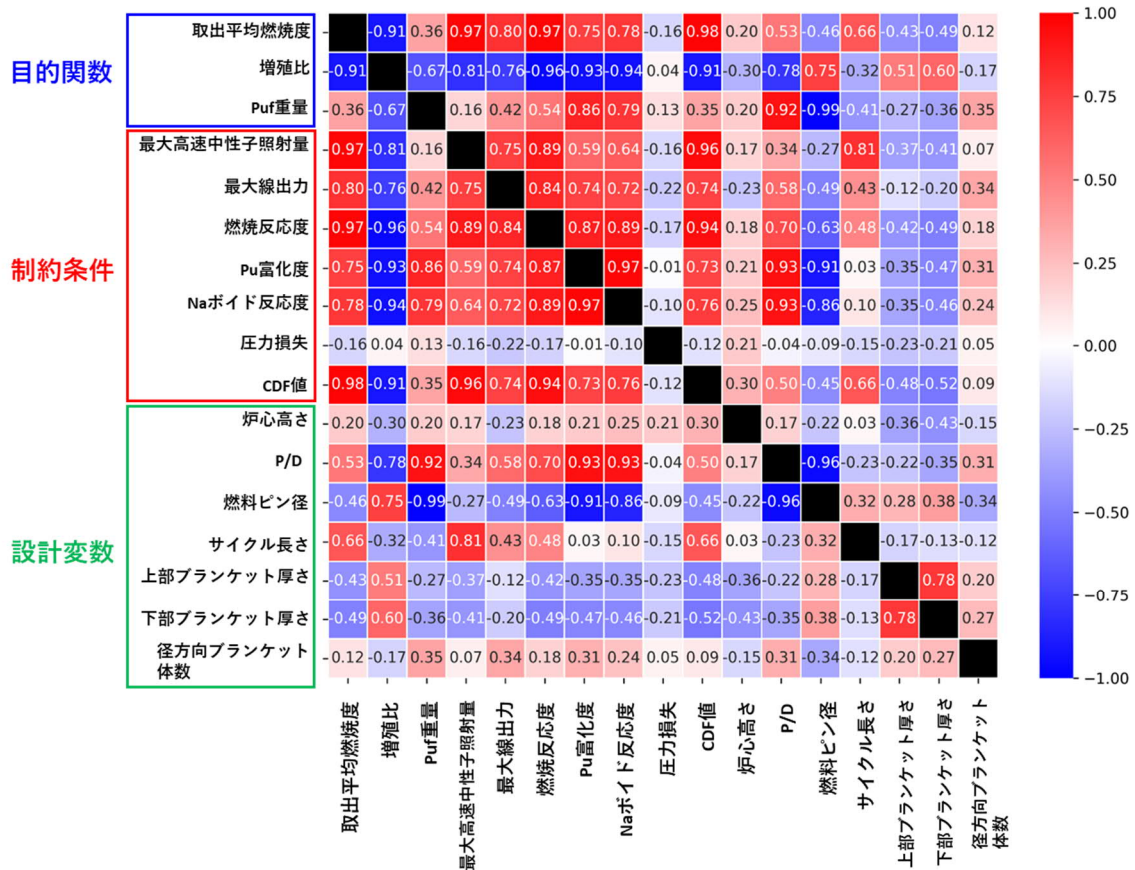


図 4：パレート最適解集合に対するスピアマンの相関係数マップ[5]

図 4 からは様々な情報が読み取れます。例えば、増殖比は燃焼度及び Puf 重量との相関係数がそれぞれ-0.91、-0.67 という負の相関があり、図 3 の結果と整合しています。また、燃焼度は高速中性子照射量、燃焼反応度、累積損傷和 (CDF) 値との相関が 1 に近い値 (強い正の相関) となっており経験則と整合しています。

多目的最適化と相関分析により、これまで設計者が炉心設計をする際に経験則として考慮していた、多数の設計変数と炉心特性から成る相関関係を定量化し、炉心設計における複雑な相関関係の網羅的な分析が可能となりました。今後は、設計変数を増やしたより複雑な問題や、代理モデルの活用による計算コストの削減等に取り組む予定です。これまでの研究の詳細につきましては、文献[6, 8]に纏めましたので、興味を持っていただいた方は是非ご覧ください。

おわりに

冒頭でも申し上げましたが、本研究を進めるにあたり、共同研究者や協力会社の方々から多くのご助言やご助力を賜りました。この場を借りて改めて深く感謝申し上げます。私は何をするにも、最も効率的な方法は何か、最適な組合せはどれか、と考える傾向があるため、最適化理論に関する本研究は自分の性分や興味と重なり、楽しく取り組むことができました。今後も本研究に注力するとともに、原子力分野の発展に貢献できるように、研鑽を積んでまいります。引き続きご指導、ご鞭撻のほどよろしく願いいたします。

参考文献

- [1] H. Ohshima, et al., "ARKADIA - For the Innovation of Advanced Nuclear Reactor Design", J. Nucl. Radiat. Sci., Vol. 9, NERS-21-1157, 2022.
- [2] M. Tanaka, et al., "Development of element functions and design optimization procedures for knowledge- and AI-aided advanced reactor lifecycle optimization method, ARKADIA", Mechanical Engineering Journal, Vol. 11, Issue 2 (2024).
- [3] J. R. Donald, et al., "Efficient global optimization of expensive black-box functions", J. of Global Optimization, Vol. 13, pp.455-492, 1998.
- [4] E. Hamase et al., "Development of optimization process for core design by Bayesian optimization - investigation of applicability and effectiveness for optimization process with integrated analysis between neutronics and plant dynamics -", Mech. Eng. J., Vol. 11, No. 2, 2024.
- [5] 桑垣 一紀, 浜瀬 枝里菜, 横山 賢治, 堂田 哲広, 田中 正暁, "ARKADIA における炉心設計最適化プロセスの整備 (4) 相関係数を用いた多目的最適化結果の分析", 日本原子力学会 2025 年秋の大会, 2N22.
- [6] K. Kuwagaki, E. Hamase, N. Doda, K. Yokoyama and M. Tanaka, "Preliminary Study for Multi-objective Core Design Optimization Using Bayesian Optimization", The International Conference on Physics of Reactors (PHYSOR 2026), Torino, Italy, April 19 – 23, 2026. [accepted]
- [7] C. Spearman, "'Footrule' for measuring correlation", Br. J. Psychol., pp. 89-108, 1906.
- [8] K. Kuwagaki, E. Hamase, N. Doda, K. Yokoyama and M. Tanaka, "Development of core design optimization process: Feasibility study of multivariable optimization via integrated sequential analyses of neutronics, thermal-hydraulics, and fuel integrity evaluation", Ann. Nucl. Energy, Vol. 225, 2025.