

ゲーム AI と深層学習を用いた燃料配置の最適化

山本研究室 笠間 陸斗

1. 緒言 炉心内には異なる種類の燃料集合体が存在し、燃料集合体の配置が原子炉の安全性および経済性に影響を与える。従来の燃料配置最適化手法ではランダムな探索が行われているが、安全性の制約を満たさない燃料配置が多く生成し、良好な燃料配置を見つけるまでに多くの時間が必要であるという課題がある。本研究では、少ない炉心特性計算回数で良好な燃料配置を見つけるために、囲碁や将棋などのゲーム AI で使用されているモンテカルロ木探索 (MCTS) [1] と深層学習 [2] を用いた最適化手法を考案した。

2. 手法 燃料配置の最適化を炉心に 1 体ずつ追加 (装荷) する手順のゲームとみなす。MCTS と深層学習を用いた燃料配置最適化を図 1 に示す。MCTS はグラフ理論における木を構築しながら探索を行う。MCTS のシミュレーションでは、図 1 に示すような木の末端 (葉) である燃料配置から炉心が燃料集合体で満たされた完全な燃料配置になるまで燃料を装荷し、炉心特性を計算する。装荷する燃料集合体は、良好な燃料配置にする手順を学習したニューラルネットワーク (NN) によって決定される。

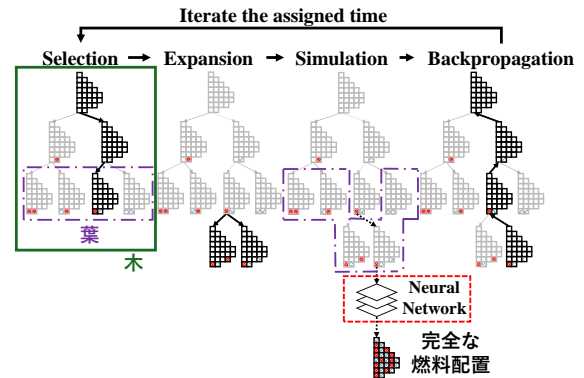


図1 MCTSと深層学習による燃料配置最適化

3. 数値実験方法 900 MWe 級の PWR 炉心の燃料配置最適化を想定する。炉心の 1/8 対称性を仮定すると、図 2 に示す炉心に 26 体の燃料集合体を装荷し続けるゲームとなる。最適化は MCTS と NN を用いた手法 (N-MCTS)、従来手法である焼きなまし法 (SA) の 2 つの手法で行う。NN が事前に学習するデータは、従来手法で最適化された燃料配置である。N-MCTS の汎化性能および最適化性能を評価するために、学習とは異なる 100 種類の燃料構成を最適化に用いる。最適化の目的は、1000 回の炉心計算回数で径方向ピーキング係数 (炉心平均出力を 1 としたとき、燃料集合体出力の最大値) を最小化することである。径方向ピーキング係数が小さいほど、熱出力の偏りがなく安全であることを意味する。

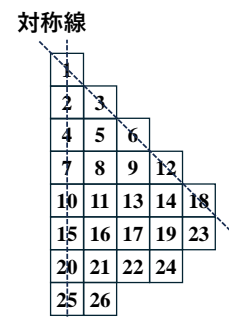


図2 最適化を行う炉心体系

4. 結果 最適化 100 試行中 88 試行で N-MCTS は SA より小さい径方向ピーキング係数を得ることができた。ゆえに、本研究で新たに考案した N-MCTS を用いることで、少ない炉心特性計算回数で従来手法よりも良好な燃料装荷パターンを発見できる。ある 1 試行で得られた最小の径方向ピーキング係数の推移を図 3 に示す。考案手法の場合、NN を活用することで良好な燃料配置になるような燃料装荷が行われるため、最適化初期から径方向ピーキング係数が小さい燃料配置を得ることができる。

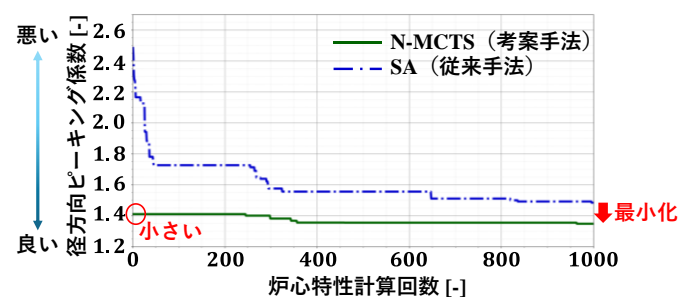


図3 最小の径方向ピーキング係数の推移

参考文献 [1] R. Coulom, *Computers and Games*, **4630**, pp. 72–83, doi: 10.1007/978-3-540-75538-8_7; [2] G. E. Hinton, S. Osindero, and Y. W. Teh, *Neural Computation*, **18**(7), pp. 1527–1554, doi: 10.1162/neco.2006.18.7.1527.

口頭発表 1. 笠間陸斗, 遠藤知弘, 山本章夫, 第55回日本原子力学会中部支部研究発表会, R19, 12月14–15日, 2023.

2. 笠間陸斗, 山本章夫, 遠藤知弘, 日本原子力学会2024春の年会, 3M07, 3月26–28日, 2024. (発表予定)

3. R. Kasama, A. Yamamoto, T. Endo, *PHYSOR 2024*, Apr. 21–24, 2024. (accepted)

4. R. Kasama, A. Yamamoto, T. Endo, *2024 ANS Annu. Conf.*, Jun. 9–12, 2024. (submitted)