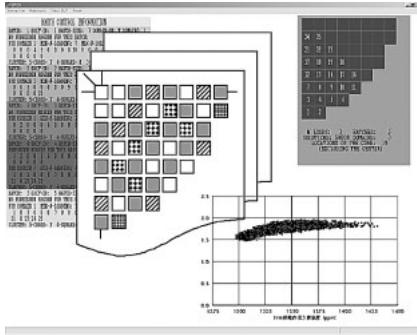


PWR燃料装荷パターン決定システム (Pearls™) の開発

Development of PWR Fuel Loading Pattern Search Tool (Pearls™)

左 藤 大 介*1
Daisuke Sato



1. はじめに

PWRでは約1年に一度炉心に装荷する燃料の約1/3を交換し、次に装荷する新燃料と継続使用燃料の配置(燃料装荷パターン)を決定する取替炉心設計を行っている。燃料装荷パターンの決定では、典型的なPWRを考えた場合、1/4対称性を考慮してもその組み合わせは約 10^{46} 通りとなり天文学的な数字となる。取替炉心設計では、限られた時間の中で、経済性・安全性に関する様々な制約条件を満足し、最適な燃料装荷パターンを決定する必要がある。現状では、設計者がこれまでの経験に基づきトライアンドエラーで検討を行っているが、高燃焼度燃料やMOX燃料の導入など炉心の高性能化に伴い制約条件の複雑化に対応する必要が生じている。そこで、様々な制約条件を考慮しながら客観的に広範囲の燃料装荷パターン探索を行うことを可能とする手法を用いたPWR燃料装荷パターン決定システム(Pearls™)¹⁾²⁾を開発した。

2. Pearls™の原理

一般的に、燃料装荷パターン探索は以下に示す3つのステップから構成されており、

燃料配置の決定(シャッフリング)により燃料装荷パターンを作成する。

炉心計算を行い中性子束・出力分布等を計算する。経済性・安全性の制約条件を満足しているかを判断する。

Pearls™ではに着目し、効率よく燃料装荷パターンを作成する手法を用いている。

炉心に装荷する新燃料や継続使用燃料は、その特性に応じて数種類のグループ燃料(Batch)に纏めることができる(図1)。燃料装荷パターン探索では、新燃料グループと最も燃焼の進んだ燃料グループの配置を決定することが重要であり、グループ燃料の配置(BLP: Batch Loading Pattern)が大まかな炉心特性

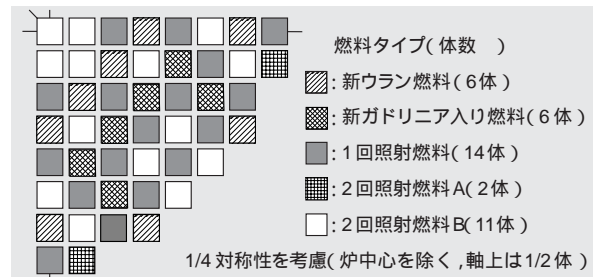


図1 典型的なPWRにおけるグループ燃料(Batch)とグループ燃料配置(BLP)の例 Pearls™で用いているBatchとBLPの概念を示す。

を決定している。現状、設計者はBLPを決定した後、より細かい燃料の配置(シャッフリング)をトライアンドエラーで行っているが、候補となるBLPは数多く存在し、全てのBLPについてシャッフリングを行うことは非常に困難である。

そこで、Pearls™では、はじめに数種類のBatch燃料より構成される燃料装荷パターン(BLP)を、装荷位置に関する制約条件を考慮して“全て”数え上げる。次に、各Batchをより細かいBatchに再分割し、個々の燃料まで再分割を繰り返すことで、燃料装荷パターンを決定している。

各Batchをより細かいBatchに再分割する場合、Batchに属する個々の燃料(N体)の燃焼度の組み合わせ(シャッフリング)は $N!$ 通り存在し、非常に多くの組み合わせを考慮する必要がある。この問題を解決するためPearls™では線型計画法+Branch&Bound法を導入した。Batchに属するN体の燃料配置(燃料装荷パターン)は、上述のように $N!$ 通りの組み合わせがある。ここで、Batchに属する燃料から任意の燃焼度を持つ燃料を構成し、仮想的な燃料装荷パターンを作成できると仮定すると、図2に概念的に示すように、 $N!$ 個の整数解を包含する実数解の集合(図中の破線)となる。燃料装荷パターンの優劣を判定する炉心特性パラメータを定めると、線型計

*1 原子力事業本部原子力技術センター炉心技術部

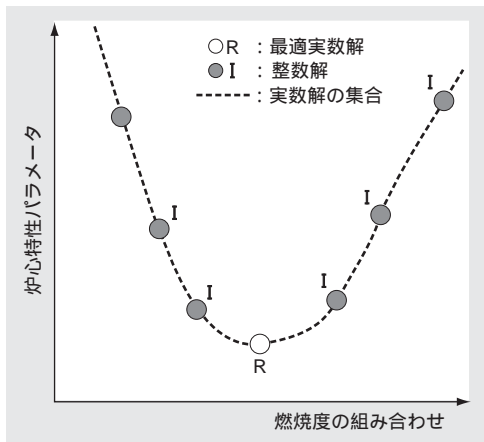


図2 燃料装荷パターン（燃焼度の組み合わせ）と炉心特性の関係 Pearls™で用いている線型計画法+B&B法を用いたパターン探索の概念を示す。

画法を用いることで最適実数解（図中のR）を容易に決定することができる。実際に、 $N!$ 個の整数解の検討を行ったとしても、その結果は最適解を上回ることができないことから、最適解が制約条件を満足できなかった場合、そのBLPIに属する全てのシャッフリング（整数解）探索を切り捨てることができる（B&B法）。さらに、線型計画法を用いることで、出力分布や燃焼度分布など線型性を有する炉心特性を定式化して容易に取り扱うことができ、様々な制約条件に柔軟に対応することができる。このようにして、Pearls™では燃料装荷パターン探索に対して、線型計画法+B&B法を適用することで無駄な探索を排除し、非常に効率の良いパターン探索を実現した。

3. Pearls™の適用結果

典型的なPWR炉心に本手法を適用し、燃料装荷パターン探索を行った結果を図3に示す。安全性の指標として出力ピーキング(F_H)の最大値を、経済性の指標としてサイクル末期のほう素濃度を選択し、設計者が作成した燃料装荷パターンと本手法による結果を比較した。図3より設計者が作成した燃料装荷パターンと比較して、経済性・安全性の観点で同等またはそれ以上の燃料装荷パターンを決定することができ、本手法の妥当性及び有効性を確認した。

4. ま と め

PWR燃料装荷パターン探索において、天文学的な組み合わせの中から最適解を探索する手法として、グループ燃料内の組み合わせ問題に対して線型計画法+B&B法を適用し、効率の良いパターン探索を可能とするPWR燃料装荷パターン決定システム（Pearls™）を開発した。本システムをPWR燃料装荷パターン探

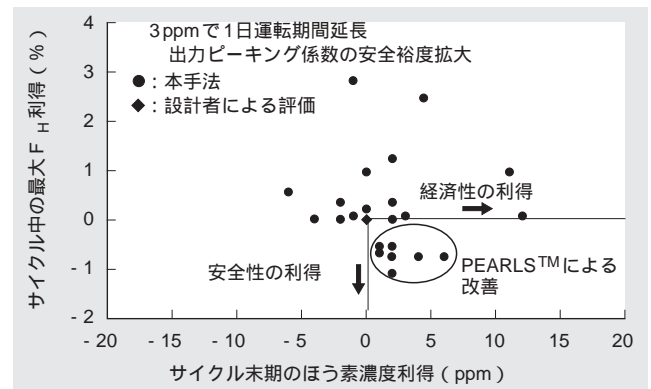


図3 典型的なPWR炉心に対するPearls™の適用結果 設計者の評価結果と比較することでPearls™の優位性を示す。

索に適用することで、高燃焼度燃料やMOX燃料の導入など炉心の高性能化に伴い複雑化する制約条件に柔軟に対応することができ、経済性・安全性の観点で優れた燃料装荷パターンを短期間で効率よく決定することが可能となった。これにより、燃料装荷パターン作成のための期間を短縮することで稼働率向上にもつながり、限られた燃料資源の有効利用として社会に貢献することができる。

今後、制約条件を容易に取り込むことが可能な特徴を生かし、取替炉心設計において熱水力、燃料健全性評価を考慮することで、炉心の能力を最大限に発揮させる取替炉心設計が可能となる。また、Pearls™で使用している最適パターン探索法は、他の分野にも適用可能であり、応用分野について検討を行う予定である。

注：Pearls™はWestinghouse Electric Company (WH) / Mitsubishi Heavy Industries (MHI) 及びWH/ Shanghai Nuclear Engineering Research and Design Institute (SNERDI) それぞれの共同開発プロジェクトに基づき、MHI, SNERDI参加のもとWHにおいて開発を行った。

参 考 文 献

- (1) Y.A.Chao et al, "Loading Pattern Search by Branching and Bounding Batch Patterns Enumerated Under Constraints", Proceedings of PHYSOR2002, Seoul, Korea, October 7-10 (2002)
- (2) H.Q.Lam et al, "LP-fun Applications to Reload Design", Proceedings of Advances in Nuclear Fuel Management III, Hilton Head, South Carolina, October 5-8 (2003)



左藤 大介