

名古屋大学工学研究科 総合エネルギー工学専攻
エネルギー安全工学講座

原子核エネルギー制御工学グループ

山本章夫(教授)、遠藤知弘(准教授)
博士後期課程 2 名、博士前期課程 8 名、学部 4 名 (2023 年度の実績)

研究分野と研究方針

【概要】

当研究室が主な研究対象としている「原子炉物理」は、「核分裂を制御する」ことを目的とした、原子力安全の最も根幹を司る学術分野である。

原子力発電の中核技術である「原子炉物理」を中心として、データサイエンス、AI や計算科学技術を活用しつつ、日本・世界の原子力発電技術について世界最高水準の安全性を追求するための幅広い研究を行っている。稼働中の軽水炉に極めて密接した実用化研究から、原理的な安全性を持つ革新型安全炉の開発など、将来を見据えた研究まで、幅広い時間軸を対象としつつ、データサイエンスの手法を駆使して研究テーマに取り組んでいる。

【キーワード】

データサイエンス、原子炉物理、計算科学、AI、機械学習、データ同化、ブートストラップ、逆推定、大規模計算機シミュレーション、不確かさ、安全性向上、人的因子、デジタルトリプレット、原子力プラント安全解析、確率論的リスク評価、過酷事故解析、並列計算、最適化、マルチフィジックス、マルチスケール、高温ガス炉、革新型安全炉、宇宙炉、未臨界度測定、臨界安全、燃料デブリ、廃止措置

【主な研究と内容】

(A) 原子炉の高精度解析技術

原子炉の安全性は、設計計算により確保される。従って、革新的な原子炉、および現行軽水炉の炉心挙動を正確に予測することは、安全性を確保する観点から重要である。そこで、機械学習/AI などのデータサイエンス、並列計算など「計算科学」をフルに活用するとともに新しい計算アルゴリズムを開発するなど、高精度・高効率な解析手法の研究に取り組んでいる。また、原子炉解析手法を他分野に応用する研究にも取り組んでいる。本研究室で開発した数値計算手法や計算プログラムは、産業界や研究機関でも活用されている。

(B) 原子炉の安全性評価手法

原子炉の設計にあたっては、様々な条件を安全側に仮定する。これは安全余裕と呼ばれる。安全余裕がどの程度存在するのか(定量化)は、原子炉の安全性を考える上で大変重要な課題である。我々は、解

析の入力となる断面積データや計算の近似などの「不確かさ」が安全余裕にどの程度影響を与えるかについて、定量的な評価を行う研究を進めている。この不確かさ評価は、世界的に高い関心を持って様々な研究が進められているが、当研究室では、実機に適用できる研究成果で世界をリードしている。原子炉のリスクを評価する確率論的リスク評価、原子力プラントの安全解析、動力炉のシビアアクシデント解析、人的過誤、核融合施設の安全の考え方などについても、研究テーマとして取り組んでいる。

(C) 未臨界度の測定技術

核燃料を取り扱う施設では、意図しない連鎖反応を防ぐために、未臨界性の担保が極めて重要で、原子力安全の一つの基盤となる。理論・測定・数値解析を上手く融合させることで、実測に適した未臨界度測定手法の確立を目指している。未臨界度測定手法として、中性子の密度が時間とともに「ゆらぐ」現象に着目している。この「ゆらぎ」は、経済学(例えば株価の変動)など他の分野でも幅広く見られる一般的な現象である。福島第一の溶融燃料の未臨界度測定などにも利用できる可能性があり、事故対応に貢献できると期待している。また、軽水炉における燃料取り扱い時の未臨界度監視技術の開発を行っている。

(D) 加速器によって駆動される未臨界システム(加速器駆動システム)

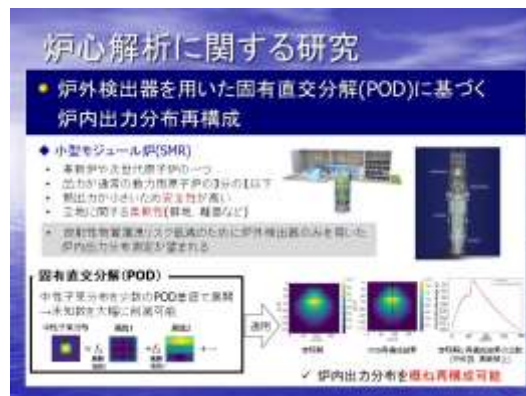
大電流陽子加速器と未臨界炉心とを組み合わせた加速器駆動システム(ADS)は、エネルギーを生成しつつ、長半減期の核燃料廃棄物を核変換できる将来のシステムとして、期待を集めている。この核変換システムは未臨界炉をベースとするので、加速器を止めて中性子の発生を止めれば、体系の核分裂出力が下がる安全性の高いシステムである。しかし、炉心内の未臨界状態を常に監視する装置の開発が必要となる。そこで中性子集団の挙動を確率過程論に基づいて理論解析し、それを実験やモンテカルロ・シミュレーションで確かめる手段で、ADSの未臨界を測定する手法の開発を目指している。

2023 年度の研究・教育の概要

【炉外検出器を用いた POD に基づく炉内出力分布再構成】

小型モジュール炉(SMR)では、原子炉圧力容器に貫通孔を取り付ける必要のない炉外検出器による炉内出力分布測定が望まれている。しかし、検出器を炉外のみを設置する場合、炉外検出器の設置場所や設置数は限られると予想されるため、妥当な炉内出力分布を推定する手法の開発が重要である。本研究では、炉外検出器によって出力($\propto$ 中性子束)分布を再構成する方法論として、固有直交分解(POD)に基づく次元削減に注目した。PODとは少数の基底とその展開係数で解を表すことで、解の自由度を大幅に減少させ効率よく解を得る手法である。

中性子束分布を POD 基底と展開係数で表すことで、推定すべき未知数を炉心体系の空間メッシュ数から POD の展開係数の数まで削減することができ、少数個の炉外検出器による測定結果から炉内中性子束分布を効率良く再構成できると考えた。提案手法について、SMR 炉心を模擬した体系でのエネルギー2群・固有値計算に基づく検証計算を実施した。結果として、炉心外周部で出力分布にピークが現れるよう

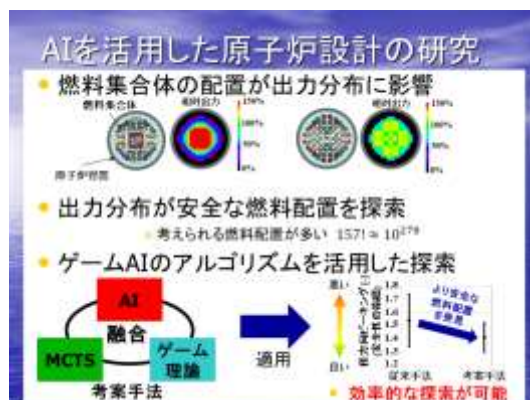


な条件であれば、燃料炉外検出器のみを用いて炉内中性子束分布を概ね再構成可能であることを明らかにした。

【ゲーム AI と深層学習を用いた燃料配置の最適化】

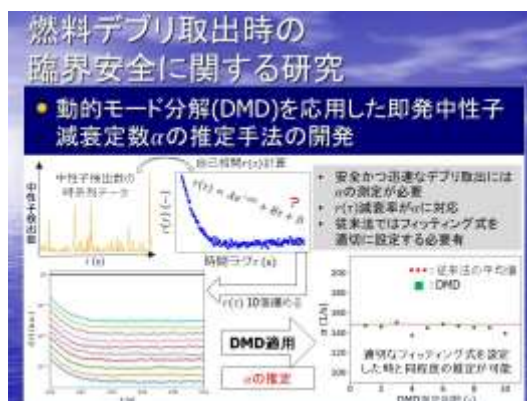
軽水炉では、原子炉の安全性および経済性の観点から、炉心に装荷する燃料集合体の配置を最適化する必要がある。従来の燃料配置最適化手法ではランダムな探索が行われているが、安全性の制約を満たさない燃料配置が多く生成し、良好な燃料配置を見つけるまでに多くの時間が必要であるという課題があった。本研究では、少ない燃料配置生成回数で良好な燃料配置を見つけるために、新たなアプローチとして、囲碁や将棋などのゲーム AI で使用されているモンテカルロ木探索(Monte Carlo Tree Search, MCTS)

と深層学習を用いた最適化手法を考案した。900 MWe 級の PWR 炉心の燃料配置最適化を対象として提案手法の有効性について検討し、従来手法である焼きなまし法よりも少ない燃料配置生成回数で良好な燃料配置を発見できる見込みを得ることができた。



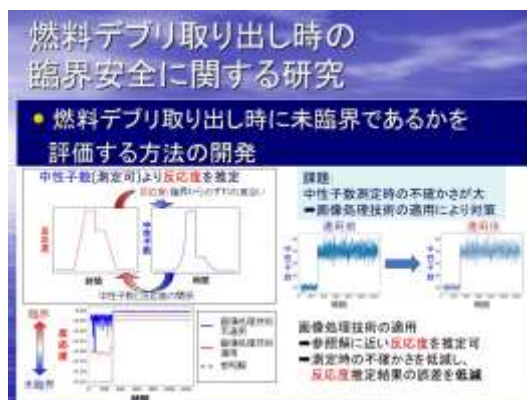
【燃料デブリ取出時の未臨界度測定に向けた自己相関法に関する検討】

東京電力福島第一原子力発電所(1F)の燃料デブリ取出を安全かつ確実に遂行するためには、臨界近接監視手法あるいは未臨界度測定が重要となる。本研究では、1F 燃料デブリ取出作業前の未臨界度測定法として、自己相関法に着目し、以下 2 点の検討を実施した:①Circular Block Bootstrap(CBB)法を利用することで、限られた炉雑音測定結果から自己相関法による即発中性子減衰定数 α の統計的不確かさ評価が可能であることを確認した。②動的モード分解(dynamic mode decomposition)を利用することで、フィッティング式やフィッティングパラメータ初期値を経験的に与えることなく、データ駆動型の方法論で基本モード成分の α を推定できることを明らかにした。



【低中性子計数率条件下で利用可能な未臨界度監視法に関する検討】

1F 燃料デブリ取出作業時の臨界近接監視を考えた場合、①反応度の推定に必要な情報(一点炉動特性パラメータ)が不明であること、②使用可能な中性子検出器の制限による検出効率の低下が課題となっている。本研究では、以上の課題を解決するため、①改良型単純フィードバック法と最小二乗逆動特性を組み合わせた臨界近接監視手法の考案、②画像処理分野で活用されているエッジ保存



平滑化フィルタの 1 つであるバイラテラルフィルタの適用、について検討を実施した。結果として、バイラテラルフィルタを適用することで中性子計数率の統計的不確かさを低減でき、最小二乗逆動特性法による外部中性子源実効強度の誤差を低減することができ、中性子計数率の測定データのみから提案手法によりドル単位反応度が推定できる見込みを得た。

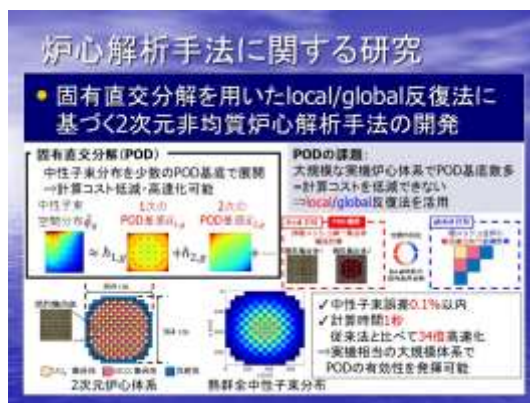
【POD 動特性計算による教育用 3 次元リアルタイム炉心シミュレータ Ikaros3D の開発】

限られた炉物理実験の機会を効果的に活用する方策の 1 つとしてデジタルトリプレットの考え方に注目し、本研究 Gr では教育用シミュレータの開発を行ってきた。より発展的な実験的炉物理実験の教育を考えた場合、検出器位置によって測定結果が異なる、といった空間依存性に関する考察が可能な教育ツールの整備が必要となる。以上の課題を解決するため、POD に基づいた次元削減した炉心動特性計算と、Unity によって開発した GUI を組み合わせることで、近大炉(UTR-KINKI)を単純化した 2 分割炉心を対象とした 3 次元リアルタイム炉心シミュレータ Ikaros3D を新たに開発した。開発した Ikaros3D については、近大炉院生実験のための教育用ツールの 1 つとして利用できるよう、山本章夫研究室の HP(<https://www.fermi.energy.nagoya-u.ac.jp/Ikaros3D.html>)より公開している。



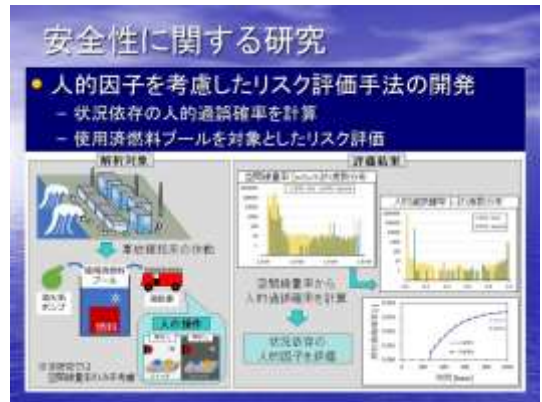
【POD を用いた local/global 反復法に基づく非均質 SP3 輸送計算手法の開発】

燃料装荷パターンの最適化に利用する炉心解析手法の高速化として、POD による次元削減を活用した手法について検討を進めてきた。従来の POD 炉心解析手法の場合には、以下で挙げる課題があった：①あらゆる燃料装荷パターンに対して pin-by-pin レベルの詳細計算を考えた場合、POD 基底の展開次数が膨大となり POD による次元削減の利点が発揮できなくなる、②MOC など典型的な輸送計算を考えた場合、行列演算を用いずに全中性子束を評価するため、行列演算で次元削減する方式による POD 次元削減が直接適用できない。以上の課題を解決するため、本研究では、①詳細メッシュによる単一集合体体系における輸送計算(local 計算)と p-CMFD 法による粗メッシュ全炉心計算(global 計算)を、収束条件を満足するまで反復する手法を採用した上で、②SP3 輸送計算による local 計算に対して POD を適用する、という方法論を新たに考案した。本研究の成果として、従来法(pin-by-pin 詳細メッシュ SP₃ 輸送計算 + 拡散加速法)を高精度に再現可能かつ、極めて高速な非均質炉心解析手法を世界に先駆けて開発することができた。



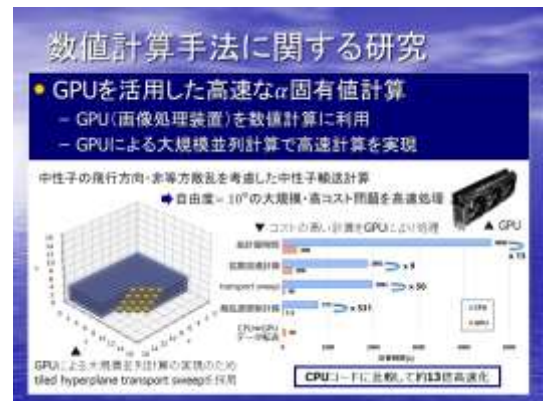
【使用済燃料プールにおける時間依存の人的因子を考慮したリスク評価手法の開発】

原子力施設を対象としたリスク評価を行うには、設備・機器の信頼性だけではなく、システム中における人間の信頼性である人的因子の評価(Human Reliability Analysis, HRA)が必要である。原子力施設に対してリスク評価を実施する場合、従来、イベントツリー法が主として用いられているが、事故進展に伴い空間線量率が高くなる等、環境条件の変化に伴う時間依存性を考慮することが困難である。以上の課題を解決するため、作業状況依存の人的因子を評価する SPAR-H 法と連続マルコフ過程モンテカルロ法(Continuous Markov chain Monte Carlo method, CMMC 法)を組み合わせた手法を新たに考案した。さらに、ファジー推論 HRA 手法の結果を再現するように、SPAR-H 法で用いる各パラメータをベイズ推定により改良した上で、1F 事故当時の状況を想定した使用済燃料プールを対象としたリスク評価の試解析を実施した。



【GPGPU を用いた決定論的手法に基づく α 固有値計算の高速化】

本研究室では、核燃料を含まない単純な中性子非増倍体系でも測定可能な即発中性子減衰定数 α を活用したデータ同化により、核データ起因の核特性不確かさの内訳として、特定核種の寄与を選択的に改善する方法論について検討を進めている。その実現に向けて、本研究では GPU を活用した決定論的手法(S_N 法)による α 固有値計算コードの開発に取り組んだ。具体的には、①非等方散乱を高精度かつ効率良く取り扱うため icosahedral 分点(20 面体の回転対称性に基づいて求められた角度分点)の利用、②transport sweep の数値計算不安定性を解消するため仮想散乱源の活用、③GPU による大規模並列計算を実現するため tiled hyperplane transport sweep の採用、④不可分操作回数を削減した非等方散乱中性子源計算アルゴリズムの考案、など様々な工夫を行った。結果として、 S_N 法に基づいて極めて高速に α 固有値を計算できる GPU 計算コードを開発することができた。



【次元削減スパースモデリング法に基づく感度係数評価手法の開発】

スパースモデリング手法の一つである lasso 回帰と、自由度削減のための Reduced Order Modeling (ROM) に着目し、炉心解析の信頼性を確立する上で重要な核データ起因不確かさの定量評価及び低減のための感度係数評価を効率的に行う手法(ROM-Lasso 法)を新たに開発した。ROM-Lasso 法では、感度係数を少ない自由度で表現可能な active subspace (AS) 基底で展開し、展開係数のスパース性に着目した lasso 回帰分析によって AS 展開係数を推定する。ここで AS 基底は、より計算コストの少ない低次元モデルを利用して網羅的に求めた感度係数行列データに基づいて構築する。その後、高い計算コストを要する高次元モデルにおいて、評価対象について入力核データに関する少数回のランダムサンプリング計算を実施し、高次元モデル計算の感度係数ベクトルを AS 基底で展開しスパースに展開係数を求めることで、感度解析全体の計算コストを低減することができる。

ROM-Lasso 法の有効性について検討するため、加速器駆動システム(ADS)の 1 サイクル燃焼解析を対象として検討を実施した。結果として、高次元モデルの感度係数評価に必要な forward 計算回数として、直接摂動法では 13510 回必要であったが、ROM-Lasso 法により 30 回まで大幅に低減できた。ここで、提案手法では、複雑な随伴計算(例:核種の燃焼効果を考慮する場合には、随伴燃焼方程式に基づいた燃焼感度解析も別途必要)に頼ることなく、通常の計算(forward 計算)により複数の核特性に関する感度を同時解析が可能であるという利点も備えている点も強調しておく。

さらに、提案手法により推定した感度解析結果の応用例として、京都大学臨界集合体実験装置(KUCA)で測定した鉛およびビスマスサンプル置換反応度測定結果を活用したデータ同化により、ADS 冷却材ボイド反応度の核データ起因不確かさを低減できることも実証した。

【本年度の研究成果発表の概要】

	国内会議発表	国際会議発表	国際会議予稿	学術論文
教員	7	6	3	6
学生	19	11	11	4

本年度の卒業論文・修士論文・博士論文のタイトル

【卒業論文】

- ・炉外検出器信号を用いた固有直交分解に基づく炉内出力分布再構成法
- ・ゲーム AI と深層学習を用いた燃料配置の最適化
- ・燃料デブリ取出時の未臨界度測定に向けた自己相関法に関する検討
- ・低中性子計数率条件下で利用可能な未臨界度監視法に関する検討

【修士論文】

- ・空間依存性を考慮した教育用リアルタイム炉心シミュレータ開発
- ・固有直交分解を用いた local/global 反復法に基づく 2 次元非均質炉心解析手法の開発
- ・使用済燃料プールにおける時間依存の人的因子を考慮したリスク評価手法の開発
- ・GPGPU を用いた決定論的手法に基づく α 固有値計算の高速化

【博士論文】

- ・炉心解析における感度係数評価に向けた次元削減スパースモデリング法の開発

その他・特記事項

- ・M&C2023, Best student paper award、M1 原田善成、受賞対象「Uncertainty quantification of prompt neutron decay constant α due to thermal neutron scattering law of water」、2023 年 8 月 17 日
- ・日本原子力学会 2023 年秋の大会学生ポスターセッション最優秀賞、M2 森下裕貴、「事故シナリオにおける時間依存の人的因子を考慮したリスク評価手法の開発」、2023 年 9 月 6 日

- ICNC2023, Exceptional posters、M1 原田善成、受賞対象「Data assimilation using prompt neutron decay constant α for water to uncertainties due to thermal neutron scattering law」、2023 年 10 月 5 日
- 日本原子力学会中部支部奨励賞、B4 森部太陽、受賞対象「改良型単純フィードバック法を用いた未臨界監視法の検討」、2023 年 12 月 15 日
- 日本原子力学会フェロー賞 M2 森下裕貴、2024 年 3 月 27 日
- 第 56 回日本原子力学会賞 論文賞 D1 丸山修平、遠藤知弘、山本章夫、受賞対象「Uncertainty reduction of sodium void reactivity using data from a sodium shielding experiment」、2024 年 3 月 27 日