

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5名、学部4名(2021年度の実績)

研究分野と研究方針

【概要】

原子力発電の中核技術である「原子炉物理」を中核分野として、データサイエンスと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研究を行っている。

日本の基幹電源の一つである原子力発電の安全性と信頼性は、福島第一原子力発電所の事故により、大きな疑問が投げかけられた。我々が主たる研究対象としている原子炉物理は、「核分裂を制御する」という、原子力安全のもっとも根幹をつかさどる学術分野であることを改めて認識し、原子炉物理を通じて、世界最高水準の原子力安全を実現するための研究を遂行する。原子力の安全性の向上は、今後の日本および世界に対する大きな貢献となる。

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む。

【キーワード】

データサイエンス、計算科学、機械学習、データ同化、ブートストラップ、逆推定、光トモグラフィ(医療応用)、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、革新型安全炉、宇宙炉、未臨界度測定、臨界安全、加速器駆動システム、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原子炉(加速器駆動未臨界炉)

大電流陽子加速器と未臨界原子炉とを組み合わせた原子炉は、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原子炉として、期待を集めている。この炉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、原子炉の核分裂出力が下がる安全性の高い炉である。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、原子炉の未臨界を測定する手法の開発を目指している。

2021年度の研究・教育の概要

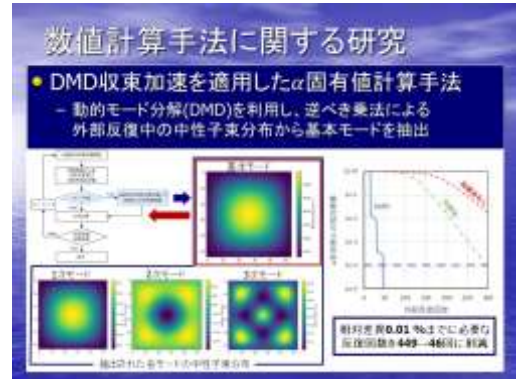
【汎用臨界集合体シミュレータの開発】

2022年現在、日本において臨界実験に関する教育を実施可能な施設は近畿大学原子炉(UTR-KINKI)のみであり、炉物理初学者がこのような実験装置を利用する機会は限られて極めて貴重な状況となっている。そこで、将来的な炉物理デジタルトリプレット教材の開発・整備に向けて、2021年はゲームエンジンUnityを使用した汎用臨界集合体シミュレータの開発に取り組んだ。試作した汎用臨界集合体シミュレータを用いて、UTR-KINKIで実施可能な臨界実験や、商業用軽水炉における炉物理試験(希釈法)を模擬した仮想数値実験を行うことで、実際に炉物理実験・炉物理試験が模擬できるか確認した。



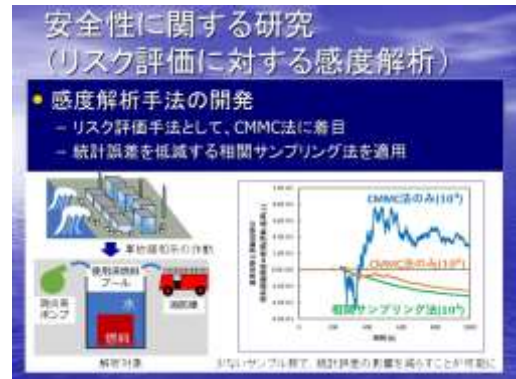
【DMD 収束加速法を適用した α 固有値計算手法】

国内外において臨界実験の実施が将来的に難しくなりつつある状況を見据え、核燃料が含まれていない中性子非増倍体系(例:水)においても実測可能な核特性である「即発中性子減衰定数 α 」に着目し、時定数に関する固有値 α の数値解析コードの開発を進めている。今年度は、べき乗法による α 固有値計算の収束加速法として、動的モード分解(DMD)の適用可能性について検討を実施した。あわせて2021年12月に公開された日本国産の最新評価済み核データ JENDL-5に基づいて、パルス中性子法によって測定された水体系の α 固有値計算を実施し Validation 作業も実施した。



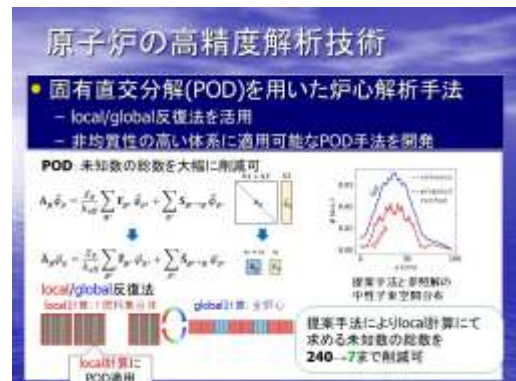
【マルチユニットの影響を考慮したリスク評価結果の感度解析に対する相関サンプリング法の応用】

原子炉の過酷事故時のリスク評価手法として、複数の原子炉ユニット(マルチユニット)間の相互作用を考慮可能な、連続マルコフ過程モンテカルロ法(CMMC)法が注目されている。しかし、CMMC法はモンテカルロ法(乱数)に基づいた手法であるため、計算で用いる入力パラメータの変化がリスク評価結果に与える影響(感度解析)を実施する際には、統計誤差の影響が課題となっていた。そこで、中性子輸送計算におけるモンテカルロ法で用いられている相関サンプリング法に注目することで、CMMC方によるリスク評価結果の感度解析を少ないサンプルサイズで統計精度良く推定可能な手法を新たに考案した。



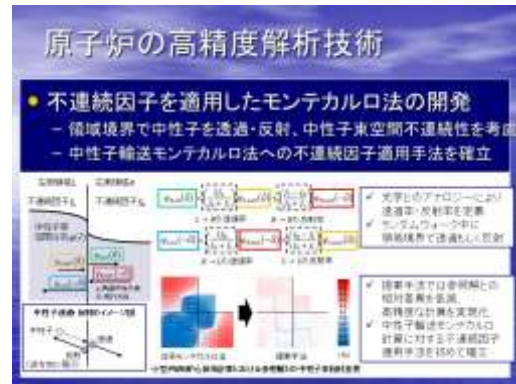
【固有直交分解を用いた非均質炉心計算手法】

原子炉を安全に、かつ装荷する新燃料体をより少なく(使用済燃料を少なく)運転するためには、最適な燃料装荷パターンの探索が重要となる。このような装荷パターン探索のため膨大な回数の炉心解析を実施するには、低計算コストで高精度な炉心計算を実現可能な手法の開発が重要となる。このような数値解析手法として、近年の炉物理計算では、固有直交分解(POD)が注目されている。ただし、PODを燃料棒単位で非均質な炉心体系に対してそのまま適用する場合、多くのPOD展開次数が必要となるという課題があった。この課題を解決するために、集合体計算(local計算)と炉心計算(global計算)による反復を繰り返す local/global 反復法に注目し、local/global 反復に対してPODを適用した新たな数値解析手法を考案し、解くべき未知数の大幅な削減が可能である見込みを得ることができた。



【不連続因子を用いた中性子輸送計算手法に関する研究】

計算コストを抑えながら高精度な解を得るための手法として、中性子輸送計算では「不連続因子」と呼ばれる量が有効活用されている。不連続因子は、従来、決定論的手法(空間メッシュや中性子飛行方向を離散化して解く方法)においてのみ用いられている手法であったが、確率論的手法(乱数を用いて中性子の飛行、核反応を模擬したシミュレーション)に対して不連続因子を考慮した計算理論・アルゴリズムはこれまで実現できていなかった。そこで本研究では、中性子輸送計算と光輸送計算の類似性に注目し、光の透過・反射のような形で、物質境界面において中性子の一部を透過・反射させることによって、不連続因子を考慮した中性子輸送モンテカルロ計算を新たに考案した。



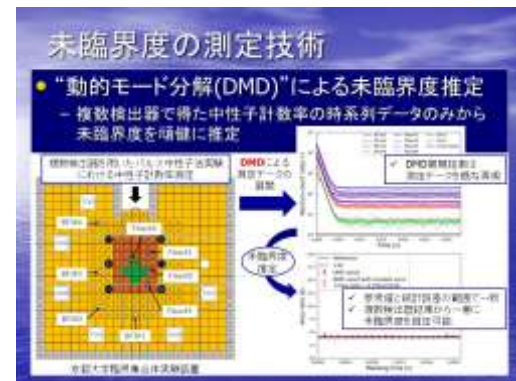
【固有安全性を向上させた高速炉最適化設計】

次世代型原子炉の一つとして開発が進められているナトリウム(Na)冷却高速炉において、固有安全性を向上させるためには、Na ボイド反応度が負となるように炉心を設計する必要がある。このような課題に対して、従来は設計者の工学的知見に基づく形で最適な設計がなされてきたが、様々な変数(核種組成、寸法、形状)を大域的に探索する試みが行われておらず検討の余地が残されていた。そこで、この課題を解決するために、工学的知見に基づくことなく、固有安全性を有する高速炉の最適な燃料組成・炉心寸法を探索する手法・アルゴリズムの開発を行った。



【未臨界度測定手法への DMD 応用】

長寿命放射性核種の核変換を目的とした加速器駆動システム(ADS)の開発や、1F 燃料デブリの安全な取り出しに向けて、万が一の反応度事故に備えるため体系の未臨界度を監視可能な技術が求められている。未臨界体系の場合、体系の未臨界が深く(実効増倍率が 1 より小さくなるほど)基本モード成分だけでなく、高次モード成分の影響が大きくなる。従って、未臨界実験手法の課題として、事前の数値解析に頼ることなく、測定結果のみから基本モード成分に対応する体系固有の情報を頑健に推定することが容易でない、という課題があった。そこで、データ駆動型のアルゴリズムである DMD に注目し、複数個の配置した検出器信号の測定結果のみから、測定結果の時系列データから基本モード成分のみを選択的に抽出する手法を考案し、実際の未臨界実験結果を通じて提案手法の有効性を実証した。



【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	4	4	7	2
学生	10	6	6	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】

- ・実験的炉物理教育のためのデジタルトリプレット開発 汎用臨界集合体シミュレータの作成
- ・固有直交分解を用いた local/global 反復法に基づく詳細炉心解析手法の開発
- ・連続マルコフ過程モンテカルロ法と相関サンプリング法を用いた使用済燃料プールにおけるリスク評価の感度解析
- ・動的モード分解収束加速法を適用した即発中性子減衰定数 α の固有値計算手法の開発

【修士論文】

- ・固有安全性を有する高速炉の設計最適化手法の開発
- ・不連続因子を用いた中性子輸送計算手法に関する研究
- ・炉物理実験手法に対する Dynamic Mode Decomposition の応用

【博士論文】

- ・上空における放射線測定値の解析手法に関する研究

その他・特記事項

- ・第 54 回日本原子力学会賞 特賞・技術賞 山本章夫、受賞対象「純国産次世代核データ処理システム FRENDY における中性子多群断面積作成機能の開発」、2022 年 3 月 18 日
- ・当研究室と日本原子力研究開発機構で開発した多群中性子断面積処理機能を核データ処理コード FRENDY 第 2 版に組み込み、公開(https://rpg.jaea.go.jp/main/ja/program_frendy/)
- ・日本原子力学会フェロー賞 M2 西岡楓賀、B4 伊藤雅人、2022 年 3 月 18 日
- ・日本原子力学会中部支部奨励賞、B2 山口響、受賞対象「動的モード分解による即発中性子減衰定数 α 固有値計算の収束加速」、2021 年 12 月 17 日