

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6名、学部4名(2022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。

2022 年度の研究・教育の概要

【データ駆動型の POD 中性子輸送計算手法の開発】

炉物理計算分野において炉心解析コストを低減する手法として、近年、固有直交分解(Proper Orthogonal Decomposition, POD)が近年注目されている。POD を利用することで、中性子束分布を少数の POD 基底とその展開係数で表現でき、このような次元削減を行うことにより、低計算コストで精度良い数値解が得られる可能性がある。ただし、中性子飛行方向を厳密に扱う中性子輸送計算(S_N 法や MOC など)を使用した場合、中性子漏洩に関する項を全中性子束 ϕ に関する行列形式で直接表現できないため、拡散計算の POD 計算で従来用いられてきた「Sandwich 法」が適用できない課題があった。この課題を解決するため、データ駆動型の POD 輸送計算手法を新たに考案した。具体的には、複数回の中性子輸送計算により①入力条件(外部源)を POD で圧縮した入力データ行列、および②出力結果(ϕ)を POD で圧縮した出力データ行列を事前準備し、一般化逆行列を用いることで中性子漏洩項の圧縮係数行列を推定する方法を編み出した。検証計算として、1次元平板・均質体系に対して本手法を適用し、参照解(MOC)と比較することで、POD 輸送計算結果の妥当性を確認できた。

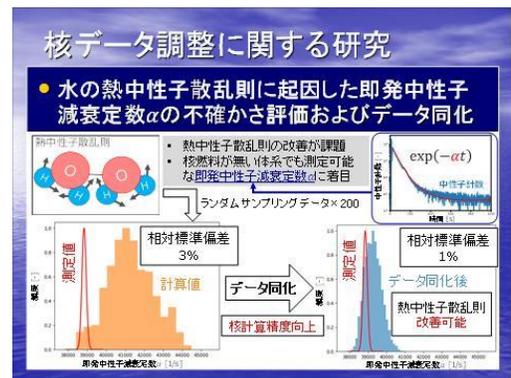
【POD とモンテカルロ法を組み合わせた深層透過計算】

原子炉周りの遮蔽計算など、中性子束の大きさが数桁低下するような深層透過計算では、モンテカルロ法は大きな統計誤差を伴う。しかし、モンテカルロ法の統計誤差を低減するためには追跡する中性子ヒストリー数を増やす必要があるため、計算コストが増加せざるを得ない。一方で、決定論的手法を用いれば統計誤差は発生しないが、空間・角度・エネルギーの離散化に起因する系統的な誤差が発生する。以上で述べた両手法の欠点を補うハイブリッド手法として、少数個の POD 基底展開により、モンテカルロ法で求める中性子束を効率良く推定する方法を新たに考案した。提案手法では、まず、基準断面積を摂動させた条件で決定論的手法に基づく深層透過計算を複数回実施することで、中性子束の snapshot データを求め、特異値分解により POD 基底を求める。こうして評価した POD 基底を用いて、モンテカルロ法の計算結果として中性子束に関する POD 展開係数を求め、少数個の POD 展開係数と基底の足し合わせにより中性子束を再構成する。提案手法の有効性を確認するため、1 次元平板の鉄体系を対象とした遮蔽計算を実施し、①モンテカルロ法(MCNP コードによる連続エネルギー輸送計算)、②決定論的手法(GENESIS コードによるエネルギー多群 MOC 計算)の結果と比較することで、提案手法により系統誤差と統計誤差を低減できることを確認した。

【水の熱中性子散乱則に起因した不確かさ評価】

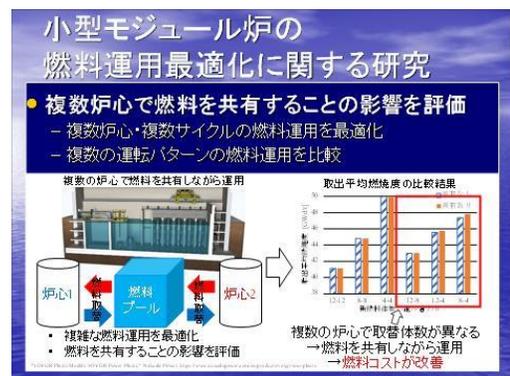
軽水炉のような、減速材として軽水を利用した体系の核計算では、熱中性子散乱則(TSL)が、核特性計算結果の予測精度に大きな影響を与えるため、TSL データの不確かさによって核特性計算結果にも不確かさが生じることとなる。本研究では、水の TSL データのみを選択的に改善するための検討として、水槽体系のパルス中性子実験で測定可能な核特性(即発中性子減衰定数 α)に注目し、水の TSL データの不確かさに起因した α の不確かさ評価およびデータ同化を実施した。

具体的には、TENDL-2021 で公開されている水の TSL ランダムサンプリングデータ(LEAPR 形式ファイル)を活用し、国産の評価済み核データ処理コード FRENDY および本研究室で開発したエネルギー多群 α 固有値計算コードにより、データ同化前の TSL データに起因した α の不確かさをランダムサンプリング法により推定した。さらに、過去の水槽パルス中性子実験で得られた α 測定結果を用いて、Bayesian Monte Carlo(BMC)に基づいてデータ同化を行うことで、異なる寸法の水槽体系で計算した水の TSL データ起因の α 不確かさを低減できることを明らかにした。本研究成果により、水槽体系で取得した α 測定結果を活用したデータ同化により、水の TSL データそのものについても改善できる見込みを得た。



【SMR における燃料運用に関する検討】

軽水型小型モジュール炉(SMR)では、既存の大型軽水炉と比較して、工期の短さなどの利点がある。一方、炉心形状が小さいため、中性子の漏えい量が大きくなることから、SMR には燃料コストが高くなる、という課題がある。ここで、SMR の場合には、1つの原子炉建屋内に複数の SMR を設置し、それらで使用した燃料を同じ燃料プールで共有し異なる SMR で装荷することで、自由度の高い燃料運用を考えることがで



きる。そこで本研究では、①複数 SMR 炉心で燃料を共有しない場合と②燃料を共有する場合について、取出平均燃焼度を比較し、燃料貯蔵プールを共有することの有効性を評価した。ただし 2022 年度の検討では、複数炉心・複数サイクルにおいて、燃料装荷パターンを同時に最適化することは計算時間の点から困難であったため、燃焼度が同程度の燃料をグループ化し、各燃料グループの出力分担を最適化することで検討を実施した。結果として、複数炉心の燃料運用において、各炉心における取替燃料体数が異なる運用をする場合には、取出平均燃焼度を高くすることができ、燃料サイクルコストを改善できる可能性を明らかにした。

【反射屈折現象を考慮した光輸送計算に対する中性子輸送計算手法の応用】

医用工学分野において、近赤外線を用いた生体イメージング技術の一種である拡散光トモグラフィの実用化が望まれている。ここで、光輸送と中性子輸送の支配方程式が類似しているため、炉物理計算分野で考案され活用されてきた種々の中性子輸送計算手法を応用することで、効率的な(高速かつ精度良い)光輸送計算を実現でき、拡散光トモグラフィの開発に貢献できる可能性がある。ただし、光輸送計算では、屈折率の異なる物質境界面において生じる「光の反射屈折現象」を適切に考慮する必要がある。そこで本研究では、以下に挙げるような一連の検討を実施した：①反射屈折現象を考慮した厳密な光輸送計算コード(MOC)の開発。②炉物理計算分野で活用されている「拡散加速法」を用いた光輸送計算の高速化。③内部境界面における実効的な光反射率を利用した光拡散計算手法に関する検討。①については、光輸送計算用のモンテカルロコード MCML との比較を通じて妥当性を確認した。②については、光輸送計算においても、高速化を図れることを確認した。③については、これまでに提案されている境界条件の取扱法(Haskel 法、Aronson 法)と比較し、妥当性を確認した。

【外れ値に対してロバストな核データ調整法に関する検討】

核データ調整とは、積分実験で得られた実験データに基づいて、数値計算の入力として用いる「核データ」の不確かさを低減する手法である。従来の核データ調整には、仮に実験データに外れ値が含まれている場合には、その外れ値が調整後の核データに影響を及ぼすという課題があり、従来は分析者が工学的に判断して外れ値を除外する、などの対策がとられてきた。以上の課題を解決するため、本研究では M 推定を適用したロバストな核データ調整法を新たに考案した。M 推定を適用した核データ調整法では、まず計算値と測定値の差異から各測定値の加重(重要度)行列 \mathbf{W} を求め、得られた加重行列 \mathbf{W} を含んだ加重付き核データ調整式に基づいて調整を行う。提案手法の妥当性については、Pu 臨界実験体系を想定した双子実験によって確認を行い、得られた成果を公表した(DOI: 10.1051/epjconf/202328100006)。

【POD を用いた時間依存非均質輸送計算の高速化】

炉心解析は従来、複雑な中性子核反応のエネルギー依存性や体系の幾何形状を限られた計算機資源で効率良く取り扱うために、単一の燃料集合体内における中性子の挙動を詳細に取り扱い集合均質化断面積を計算する「集合体計算」と、集合体計算で得られた均質化断面積をもとに炉心全体の核特性を評価する「炉心計算」の 2 段階で構成されてきた。しかし、従来の集合体計算では隣接する燃料集合体との中性子のやり取りを考慮できておらず、得られた均質化断面積に含まれる 2 段階手法起因の近似誤差が、計算精度悪化の要因となっている。ゆえに、燃料集合体の幾何形状を均質化することなく炉心全体の核特性を予測する高忠実度シミュレーションが注目されている。しかし、高忠実度シミュレーションは近年の計算機性能の向上をもってしても膨大な計算時間を要することから、商用炉の設計解析や事故時の安

全性評価、炉心監視等のリアルタイム性が要求されるアプリケーションに対する適用は極めて困難であった。そこで本研究では、事故時の安全性評価における安全余裕の定量化等の観点で重要であり、炉心解析における高忠実度シミュレーションの中でも特に計算コストが高い Characteristics 法を用いた時間依存輸送計算を対象として、解析手法の高度化を実施した。具体的には、Multigrid Amplitude Function 法、Linear Source 近似、POD を用いることによる MOC 動特性計算の高速化に取り組み、オンライン炉心監視など、リアルタイム性を予想される用途に詳細炉心計算が適用可能であることを示した。

【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	5	3	4	5
学生	19	5	3	7

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】

- ・固有直交分解を利用したデータ駆動型中性子輸送計算手法の開発
- ・水の熱中性子散乱則に起因した即発中性子減衰定数 α の不確かさ評価およびデータ同化
- ・POD とモンテカルロ法を組み合わせた深層透過計算
- ・SMR における複数炉心の燃料運用の検討

【修士論文】

- ・反射屈折現象を考慮した光輸送計算に対する中性子輸送計算手法の応用
- ・情報科学的手法に基づくロバスト核データ調整法の開発

【博士論文】

- ・キャラクタースティクス法を用いた時間依存輸送計算の効率改善

その他・特記事項

- ・日本原子力学会フェロー賞 M2 福井悠平、2023年3月14日
- ・日本原子力学会フェロー賞 B4 山下芳輝、2023年3月14日
- ・日本原子力学会中部支部奨励賞、B4 原田善成、受賞対象「水の熱中性子散乱則に起因した即発中性子減衰定数 α の不確かさ評価」、2022年12月16日