

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3名、博士前期課程6名、学部3名(2019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、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て研究テーマに取り組む。

【キーワード】

計算科学、機械学習、データ同化、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、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、加速器駆動未臨界炉、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、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。

(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。

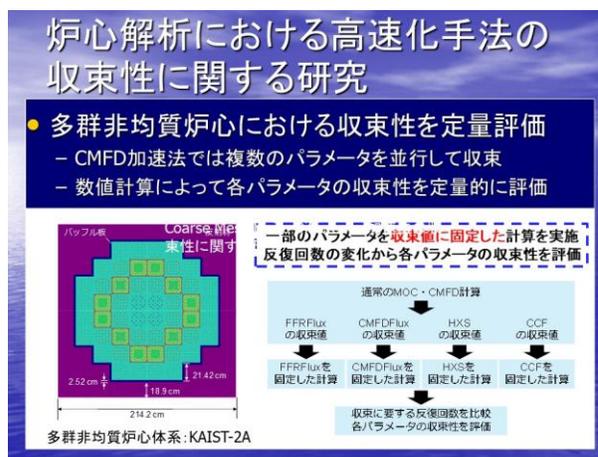
(D) 加速器によって駆動される未臨界原子炉(加速器駆動未臨界炉)

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。

2019年度の研究・教育の概要

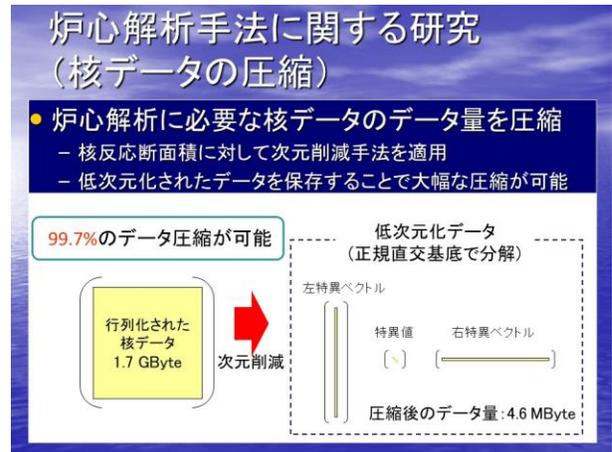
【CMFD 加速法の収束性に関する研究】

中性子輸送計算手法の一つである Method of Characteristics(MOC)は高い計算精度を有するものの、非常に多くの計算時間を要する。従って、MOCによる反復計算の収束を加速するため、粗メッシュ単位の計算を活用する方法として、Coarse Mesh Finite Difference (CMFD)加速法が適用されている。CMFD 加速法の収束性に関する研究は、線形化フーリエ解析によって従来評価されてきた。しかし、従来手法では、簡易な計算条件で検討されており、CMFD 反復計算における均質化断面積や中性子流補正係数の更新が、収束性に与える寄与を評価できていなかった。本年度の研究では、現実的な解析体系である多群非均質体系(KAIST-2A ベンチマーク問題)を対象として MOC 計算を実施し、CMFD 反復計算で現れる種々のパラメータのうち、粗メッシュ内における相対的な中性子束空間分布が、CMFD 加速法の収束性にとって支配的な影響であり、それ以外のパラメータの寄与は小さいことを解明した。



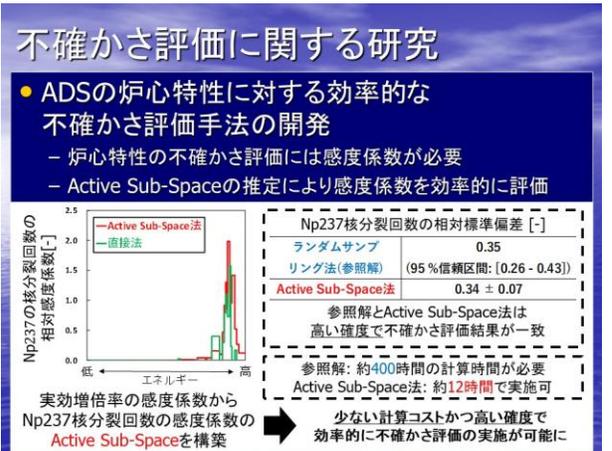
【炉心解析用断面積圧縮法】

原子炉核特性の詳細な解析を実施するためには、中性子エネルギーを多数個の群に分割し、空間的に解像度の高い解析を実施する必要がある。また、原子炉内で生成・消滅する多数の核種が核特性に影響を与えることを考えると、これら核種のそれぞれについて、核反応断面積を取り扱う必要がある。結果として、炉心解析に必要とされる断面積のデータサイズは、解析が詳細になるほど指数関数的に増大していく。この断面積データの容量を圧縮する手法として、断面積行列に対して特異値分解を適用する手法について検討を進めている。本年度の研究では、圧縮後データに基づく炉定数テーブル内挿法について検討を行い、計算精度を保ちつつ効率的かつ大幅にデータ圧縮が可能であることを確認した。



【核データ起因不確かさ評価】

炉心計算では、実効増倍率などの炉心核特性を評価するが、入力パラメータの一つである評価済み核データが持つ不確かさ(共分散)に起因して炉心核特性の数値解析結果にも不確かさが生じざるを得ない。長寿命核種の核変換処理技術として研究開発がなされている加速器駆動システム(ADS)を対象として、連続エネルギーモンテカルロ計算コードに基づいて任意の炉心核特性(例:核変換率)について不確かさ評価を実施する場合、従来の直接摂動法(1個1個の入力パラメータを微小変動させ、核特性の変動量を調べる方法)では非常に多くの計算時間を要するという課題があった。そこで本年度の研究では、炉心核特性の感度係数ベクトルを実効的な部分空間(Active Subspace)内で展開し、Active Subspace 方向の感度係数に基づいて効率良く不確かさ評価を実施する手法(Active Subspace 法)に注目した。粒子輸送計算コード PHITS による ADS 解析結果を対象として、Active Subspace 法を適用することで、少ない計算コストかつ高確度で不確かさ評価が実施できる見込みを得た。



【低次元化モデルを活用した統計的手法に基づく安全評価】

近年、原子炉の安全解析分野では、事故時の物理現象を高い精度で推定する最適評価コード(安全解析コード)による解析を多数回実施することで、統計的な評価値を算出する手法が注目されてきている。しかしながら、安全解析コードによる1回あたりの計算コストは非常に高く、多数の解析結果を取得することは困難である。そこで、安全解析コードの代わりに解析結果を高速に計算するモデルとして、特異値分解法に基づいた低次元化モデル(Reduced Order Modeling, ROM)に注目し、ROMに基づく効率的な評価手法構築について検討を進めてきた。本年度の研究では、統計的手法に基づく安全評価(統計的安全評価および確率的安全余裕評価)を対象として、特異値分解法に基づくROMの適用性を調査し、現実的な計算コストで安全評価が実現できることを確認した。

【未臨界監視技術】

福島第一燃料デブリの取り出し時や、②軽水炉における燃料シャッフリング時において、適用可能な未臨界度測定技術の開発として以下の内容に取り組んだ。

未臨界体系における一般的な過渡変化における未臨界監視の課題として、未臨界度だけでなく外部中性子源強度や一点炉動特性パラメータも同時に変化し得る点、その時間変化も必ずしもステップ状とはみなせない点が挙げられる。以上を踏まえ、任意の状態変化に対して中性子計数率の時間変化の測定結果のみから状態変化後のドル単位未臨界度を測定する手法として、時間領域分割積分法(Time-Domain Decomposition-based Integral method, TDDI法)を新たに考案した。近畿大学原子炉および京都大学臨界集合体実験装置において未臨界過渡変化実験を実施し、TDDI法の有効性を実証した。

また、近年の我々研究グループの成果として、基本モードの即発中性子減衰定数の測定結果を用いたデータ同化手法(例:バイアス因子法、炉定数調整法)により、核データ起因の炉心特性不確かさ低減が可能であることを示している。ただし、体系固有の基本モード成分に相当する即発中性子減衰定数を推定する方法論については、未だ検討の余地が残されていた。そこで、体系情報に依ることなく、炉内に配置した複数個の中性子計数率測定データから基本

安全性に関する研究 (統計的な手法に基づく安全評価)

- 原子炉プラントの事故進展を高速に予測
 - 解析結果を高速に推定する低次元モデル(ROM)の開発
 - 現実的な計算機資源で統計的な手法に基づく安全評価を実現

統計的安全評価への適用例: 中破断LOCA事象

BWRにおける事故シナリオ例

崩壊熱とSRV開操作の時間の不確かさに注目

ROMによる安全評価パラメータの推定

燃料被覆管最高温度の最高値(MPCT)の95%累積確率点

ROM 79.9% (信頼区間)

高速かつ高精度に推定

安全性に関する研究 (未臨界監視)

- 中性子計数率から未臨界度を予測
 - 未臨界度推定手法として“TDDI法”を新たに考案
 - 任意の状態変化に対応して未臨界度を推定可能

実験データにTDDI法を適用

未臨界度の推定結果

参照値 [S] vs 推定値 [S]

安全性に関する研究(未臨界監視)

- 即発中性子減衰定数 α 測定手法の開発
 - “Dynamic Mode Decomposition”を用いた未臨界度推定
 - 複数検出器の中性子計数結果から即発中性子減衰定数 α を推定することが可能

高次モード成分の影響を軽減した形で即発中性子減衰定数 α の推定に成功

α [1/s] vs time [$\times 10^{-6}$ sec]

実験炉心体系 (2019年10月23日撮影)

モード成分の時定数を抽出する手法として、データ駆動型の方法である動的モード分解(Dynamic Mode Decomposition, DMD)の適用性について検討した。パルス中性子法を模擬した仮想数値実験、および京都大学臨界集合体実験装置において実施したパルス中性子実験の試解析を通じて、DMDにより基本モード成分の即発中性子減衰定数を頑健に推定できる見込みを得た。

【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	7	8	10
学生	9	13	15	1

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】

- ・加速器駆動システムの炉心特性に対する効率的な不確かさ評価手法の開発
- ・Method of Characteristics における Coarse Mesh Finite Difference 加速法の収束性に関する研究
- ・Dynamic Mode Decomposition を用いた即発中性子減衰定数 α 測定手法の開発

【修士論文】

- ・時間領域分割積分法によるドル単位未臨界度測定
- ・特異値分解法を用いた安全解析コードの低次元化モデルの開発
- ・次元削減を用いた炉心解析用断面積テーブルの圧縮

【博士論文】

- ・直接応答行列法による BWR 炉心解析手法の開発

その他・特記事項

- ・JNST Most Popular Article Award 2019 遠藤知弘、山本章夫、受賞対象「Sensitivity analysis of prompt neutron decay constant using perturbation theory」、2020年3月17日
- ・日本原子力学会フェロー賞 B4 大島吉貴、2020年3月17日
- ・日本原子力学会中部支部奨励賞、大島吉貴、受賞対象「多群均質体系における CMFD 加速法の収束に関する各パラメータの影響」、2019年12月10日
- ・RPHA19 Best Student Award、松下柁輝、受賞対象「Application of surrogate modeling with singular value decomposition for design basis accident aiming statistical safety analysis」、2019年12月3日
- ・RPHA19 Best Student Award、林卓人、受賞対象「Estimated criticality lower-limit multiplication factor considering neutronic similarity and uncertainties of effective multiplication factor using the bootstrap method (1) Theory」、2019年12月3日