

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4名(2020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】

原子炉物理、データサイエンス、計算科学、機械学習、データ同化、大規模計算機シミュレーション、マルチフィジクス、マルチスケール、安全性、不確かさ、リスク、並列計算、最適化、革新型安全炉、宇宙炉、未臨界度測定、加速器駆動未臨界炉

【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。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。

(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。

2020年度の研究・教育の概要

【中性子輸送計算手法の応用】

光画像診断のための近赤外線を用いた拡散光トモグラフィ技術に注目し、異分野融合テーマとして、原子炉物理学の数値解析技術を「生体内を伝搬する光の挙動を記述する輻射輸送方程式」の数値解析技術に対して応用するための研究に取り組んだ。

今年度の研究では、生体組織内の光伝播を模擬した1次元平板体系ならびに多次元体系ベンチマーク問題に対して、名大にて開発された Legendre polynomial Expansion of Angular Flux (LEAF)法に基づく3次元多群非均質輸送計算コード GENESIS を活用した計算を実施することで、中性子輸送計算において活用されている数値解析技術(①空間メッシュ内における光子束・散乱光子源の空間分布に対するルジャンドル多項式関数展開、および②非等方散乱源に対する輸送補正)が、散乱係数が大きく前方散乱の強い生体模擬体系における計算コスト低減に有効であることを確認した。

中性子輸送計算手法の応用

- 生体内の光空間分布の推定
 - 原子炉内の中性子空間分布を推定する手法を応用
 - 光輸送解析への中性子輸送計算手法の適用性を確認

支配方程式の類似

○ 光輸送方程式

$$[\boldsymbol{\Omega} \cdot \nabla + \mu_a(r) + \mu_s(r)]I(r, \boldsymbol{\Omega}) = \mu_s(r) \int p(\boldsymbol{\Omega}, \boldsymbol{\Omega}')I(r, \boldsymbol{\Omega}')d\boldsymbol{\Omega}' + q(r, \boldsymbol{\Omega})$$

○ 中性子輸送方程式

$$[\boldsymbol{\Omega} \cdot \nabla + \Sigma_a(r) + \Sigma_s(r)]\psi(r, \boldsymbol{\Omega}) = \int \Sigma_s(r, \boldsymbol{\Omega}' \rightarrow \boldsymbol{\Omega})\psi(r, \boldsymbol{\Omega}')d\boldsymbol{\Omega}' + q(r, \boldsymbol{\Omega})$$

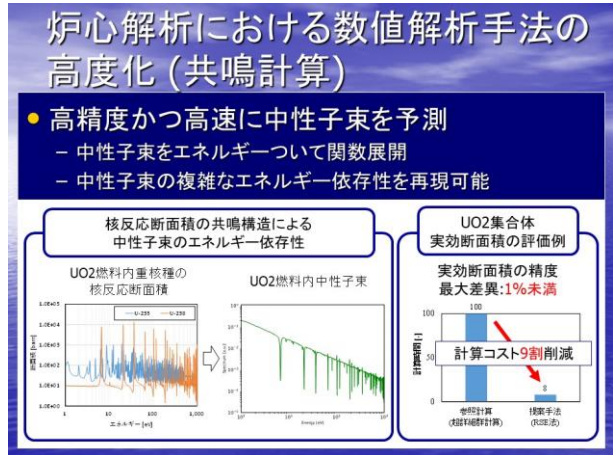
生体を模擬した体系
光源 0.5mm
生体組織 10mm
中性子輸送解析
光子束空間分布解析結果

・光輸送を再現する散乱断面積 $\Sigma_s(r, \boldsymbol{\Omega}' \rightarrow \boldsymbol{\Omega})$ の設定
 ・光輸送に適した中性子輸送計算手法の選定
 → 中性子輸送計算手法を応用して光輸送解析が可能

【中性子束のエネルギーに関する基底展開に基づく共鳴計算手法の開発】

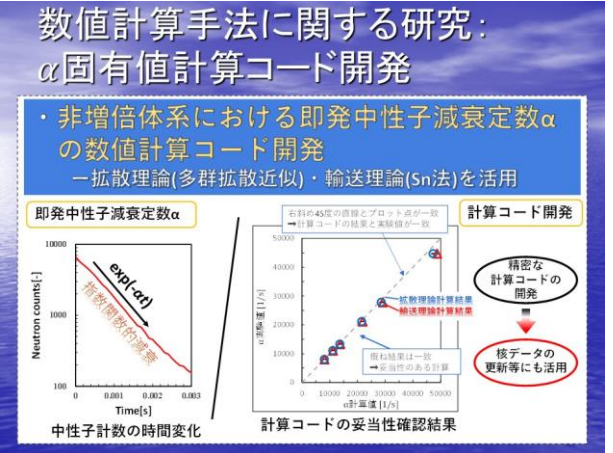
決定論的手法に基づく炉物理計算においては、反応率保存の原理に基づいた多段階解析手法により3次元炉心解析を実施しており、その高精度な炉心解析を実現するためには、その入力として必要となるエネルギー多群の実効断面積を精度良く評価することが重要となる。共鳴領域における中性子束エネルギースペクトルを、データ駆動型のアプローチで推定された少数個の関数形で展開することで、高精度かつ効率良く実効断面積を求める手法として、

Resonance calculation using energy Spectrum Expansion (RSE) 法を開発した。共鳴干渉効果が現れる燃料集合体体系など、実際の原子炉炉心解析における典型的な計算条件に対して提案手法を適用し、超詳細群減速計算によって得られた実効断面積の参照解とRSE法による推定結果の差異が小さいことを確認し、本研究で開発したRSE法によって計算コストを大幅に低減できることも確認できた。



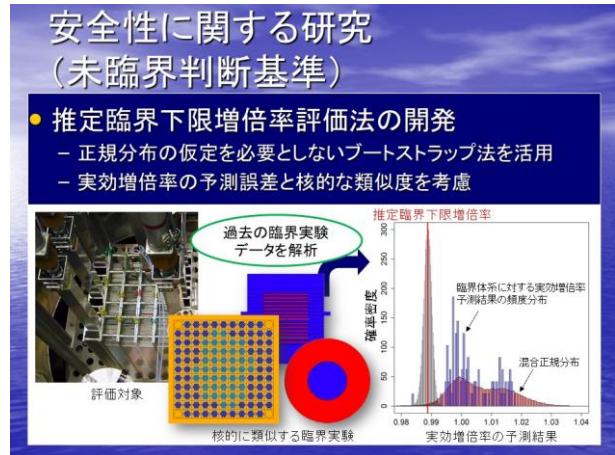
【決定論的手法に基づく α 固有値計算コード開発】

国内外において臨界実験の実施が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、パルス中性子法や炉雑音解析手法といった方法で測定可能な「即発中性子減衰定数 α 」という核特性値を活用したデータ同化(測定値を取り入れて、入力核データや数値解析結果のバイアス・不確かさを低減する手法)の実現に向け、決定論的手法に基づいた α 固有値計算コードの開発を行った。今年度の研究では、軽水のみから成る均質体系を対象として、①拡散近似と形状バックリング近似に基づくエネルギー多群の α 固有値計算コード、および②一点炉加速法と S_N 輸送計算法に基づく α 固有値計算コードの2つを試作した。過去に実施された水槽を対象としたパルス中性子実験で測定された α 実験値と、開発した計算コードによって得られた α 計算値がほぼ等しいことを確認することで、開発した計算コードの妥当性確認(Validation)を実施することができた。



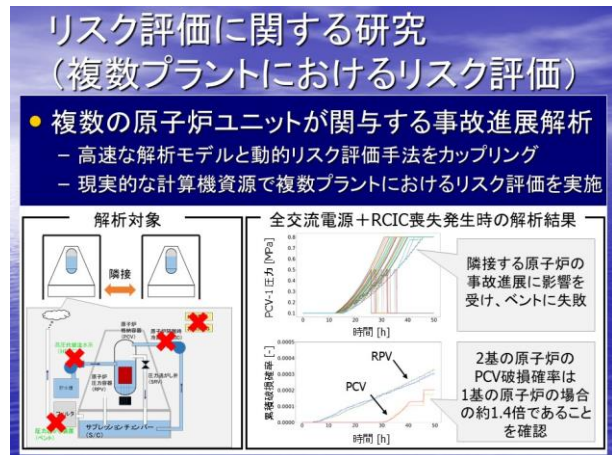
【ブートストラップ法に基づいた未臨界判定基準の評価法】

福島第一原子力発電所事故で発生した燃料デブリなど、核燃料物質を未臨界状態で安全に取り扱うためには、数値計算によって実効中性子増倍率 k_{eff} を予測することが重要である。しかし、予測結果は、様々な要因により不確かさを持つため、不確かさを考慮した上で未臨界と判断できる基準(推定臨界下限増倍率)を適切に設定する必要がある。本研究では、①未臨界判定で使用する過去臨界実験ベンチマークに存在する k_{eff} 実験不確かさ、②核データ起因の k_{eff} 不確かさ、③対象体系と過去臨界実験間の核データ不確かさに起因した核的相関、といった3つの効果を考慮した「ブートストラップ法」に基づく推定臨界下限増倍率の評価手法を新たに考案した。京都大学臨界集合体実験装置(KUCA)における実際の未臨界炉心を対象として、提案手法により未臨界判定ができることを確認することで、提案手法の妥当性を確認した。また、燃料デブリ模擬体系に対して提案手法を適用することで、減速材対燃料体積比や減速材の種類(水・コンクリート)が推定臨界下限増倍率の評価結果に与える影響についても調査した。



【複数原子炉ユニットのリスク評価】

複数の原子炉ユニットが同時多発的に被害を受けたことで事故対応が困難となった福島第一原子力発電所事故を契機として、複数の原子炉ユニット(マルチユニット)が関与したリスク評価について国際的にも関心が高まっている。マルチユニットの相互作用を考慮したリスク評価を実施するためには、事故シナリオ分岐事象の発生確率について、時間依存性やユニット間の依存性を考慮することが必要となる。そこで本研究では、事故進展を動的に取り扱うことができる手法として、連続マルコフ過程モンテカルロ(CMMC)法に注目し、①高速に事故進展を予測可能な簡易解析コードと②CMMC法を組み合わせることで、マルチユニットリスク評価に対するCMMC法の適用性について検討を実施した。全交流電源+注水機能喪失時における原子炉事故進展を高速に解析する簡易コードを作成した上で、複数の原子炉ユニットを対象として、それぞれの原子炉状態に応じてベント失敗確率を変化させて、提案手法によりユニット間の相互作用を考慮した形で事故進展に伴う各原子炉のRPVやPCV破損確率の時間変化が推定できることを確認し、現実的な計算コストでマルチユニットのリスク評価を実施するための方法論を構築することができた。



【本年度の研究発表の概要】

	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	2	4	6
学生	10	3	4	8

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】

- ・PHITS による水槽パルス中性子実験の数値解析および不確かさ評価
- ・光輸送解析への中性子輸送計算手法の適用性に関する検討
- ・水体系における即発中性子減衰定数の決定論的数値解析手法に関する検討
- ・連続エネルギーモンテカルロ計算に基づく予測モデルを用いた Bayesian Monte-Carlo 法による次元削減核データ調整法の検討

【修士論文】

- ・エネルギーに関する中性子束の展開基底を用いた共鳴計算手法に関する研究
- ・マルチユニットリスク評価への連続マルコフ過程モンテカルロ法の適用
- ・ブートストラップ法を用いた推定臨界下限増倍率評価法の開発及び適用

その他・特記事項

- ・日本原子力学会 計算科学技術部会 功績賞:山本章夫、2021年3月18日
- ・JNST Most Popular Article Award 2020 遠藤知弘、山本章夫、受賞対象「Experimental validation of unique combination numbers for third- and fourth-order neutron correlation factors of zero-power reactor noise」、2021年3月17日
- ・日本原子力学会フェロー賞 M2 林卓人、2021年3月17日
- ・日本原子力学会 リスク部会賞(奨励賞)、澤田憲人、受賞対象「CMMC 法による複数機器間の相関を考慮した PRA に関する検討」、2021年1月18日
- ・日本原子力学会中部支部奨励賞、野口晃広、受賞対象「水体系における即発中性子減衰定数の数値解析手法に関する検討」、2020年12月18日