

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(助教)  
博士後期課程2名、博士前期課程6名、学部4名

---

## 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、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、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。

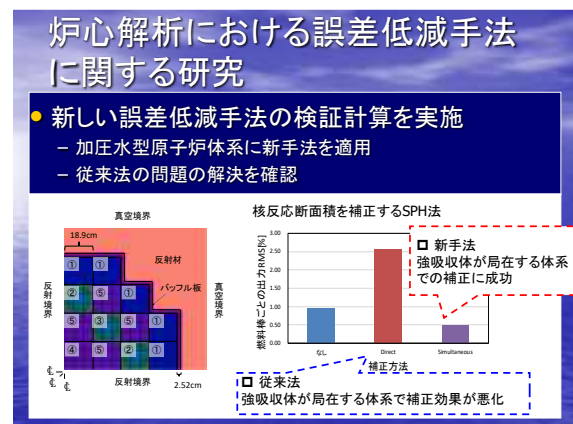
### (D) 加速器によって駆動される未臨界原子炉(加速器駆動未臨界炉)

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。

## 2018年度の研究・教育の概要

### 【離散化誤差低減手法】

炉心解析におけるエネルギー・空間・中性子飛行方向の離散化誤差を低減するために SPH 法が用いられるが、局所的に強吸収体が存在する場合には、SPH 因子を求めるための反復計算が収束しない問題点がある。そこで、この点に対処すべく、SPH 法の改良を行った。従来は、全断面積に SPH 因子を乗じる形で補正を行っていたが、全断面積を SPH 因子で割る手法を用いることにより、より精度の高い補正が出来ることを明らかにした。



### 【炉心解析不確かさ評価】

炉心解析では、入力データとして用いる核データに起因する不確かさが存在する。この不確かさを評価する手法として、ランダムサンプリング法があるが、従来は、決定論的な炉心解析手法に対してのみランダムサンプリング

法の適用がなされていた。そこで、計算精度の高い連続エネルギーモンテカルロ法に対してランダムサンプリング法を行える手法を開発した。本手法を臨界実験 Godiva 体系に適用し、SCALE6.2 を用いて評価した結果と比較することで、断面積起因の不確かさを適切に評価できることを確認した。また、この結果を用いて、バイアス因子法を適用できることを示した。

沸騰水型軽水炉(BWR)の炉心特性予測値の不確かさの定量評価と、バイアス因子法を用いた不確かさ低減を行った。Peach Bottom 2号機を対象として、核データ及びボイド相関式に起因する炉心特性の不確かさを定量化した。また、この結果を用いて運転中の実効増倍率予測値にバイアス因子法を適用した結果、さらに不確かさを考慮すべきパラメータが存在する可能性を示唆する結果が得られた。

### 【未臨界度監視・臨界安全評価手法】

福島第一原子力発電所の燃料デブリ取り出し作業にあたっては、意図しない核分裂の連鎖反応が発生しないよう、注意深く臨界管理を行う必要がある。このため、作業している体系が臨界からどの程度離れているかの指標となる未臨界度を監視する必要がある。未臨界度監視手法には様々な手法があるが、本研究では、最もデータを得やすい中性子計数率のみを用いて、逆推定手法の一つである粒子フィルタ法により、未臨界度を連続監視する手法を開発した。

核燃料の管理を行う際、意図しない核分裂の連鎖反応を防止することは重要である。このため、体系が臨界に到達しない判断基準となる推定臨界下限増倍率を高い信頼度で評価する必要がある。従来、推定臨界下限増倍率を評価する場合には、計算誤差の確率分布として正規分布を仮定していたが、対象とする体系によっては、正規分布の仮定が適切でない場合もある。このような場合にも汎用的に推定臨界下限増倍率を計算する手法を、統計的な手法の一つであるブートストラップ法を用いることで開発した。数値的なベンチマーク計算を通じて、開発した手法の妥当性を確認した。

### 不確かさ評価に関する研究 (核データ起因不確かさ評価)

- 汎用性の高い不確かさ評価ツールの開発
  - 確率論手法炉心計算コードにランダムサンプリングを適用
  - 正確度の高い不確かさ評価が可能

不確かさ評価を適用する解析手法  
 離散化・近似が多い手法 (CASMO)  
 ↓  
 連続量・近似が少ない解析手法 (MCNP)  
**正確度の高い、汎用的な不確かさ評価を実現**

### 安全性に関する研究 (炉心特性予測値の信頼性向上)

- 炉心解析の不確かさ評価および低減
  - ランダムサンプリング法による不確かさ評価
  - バイアス因子法による不確かさ低減

不確かさ評価  
 不確かさ低減  
 実験が得られている体系の実験値と計算値のバイアスから設計する体系のバイアスを予測

### 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
  - “粒子フィルタ法”を用いた未臨界度推定
  - 不確かさ範囲内で参照値を推定

実験で得られた測定データ  
 未臨界度の逆推定結果

### 燃料デブリの臨界安全評価方法に関する研究

- 合理的な未臨界上限値推定方法の開発
  - 推定臨界下限増倍率の計算にブートストラップ法を適用
  - 任意の確率分布に対し評価可能

推定臨界下限増倍率は未臨界と判断できる実効増倍率の上限界  
 従来は、ベンチマークの真度分布を正規分布と仮定し計算  
 推定手法にブートストラップ法を適用  
 →もっともらしい解  
**燃料デブリ取出の安全確保に貢献**

【革新炉の設計に関する検討】

社会からの受容性が高い革新炉の設計の考え方及び技術要件について、社会的調査(アンケート及び対話的インタビュー)を通じて得られた情報を入力として検討を行った。その結果、現在の新型炉の設計で考慮されている設計方針の妥当性を確認するとともに、これまでの研究開発ではあまり注目されてこなかった設計方針について明らかにした。

社会的受容性の高い  
新型炉に関する研究

- 社会的ニーズを起点とした設計や安全対策を検討
  - アンケートや対話より得たニーズを技術要件に落とし込み
  - 社会的ニーズを起点とした開発の必要性を確認

アンケート型調査 (社会の意見や考えを把握) | 対話型調査 (具体的な社会的ニーズを把握)

アンケートの結果 | 対話の様子 | 対話より得られた具体的なニーズ

【深層防護の概念を用いた検討】

社会的ニーズを起点とした  
新型炉開発の必要性

- 新型炉に採用されている設計方針の妥当性を再確認
- 研究開発であまり焦点を当ててこなかった部分を確認

【解析手法起因の不確かさ評価】

炉心解析において、計算結果に不確かさを与える因子として、入力データの不確かさ及び解析手法の不確かさがある。解析手法の不確かさを評価する手法は、これまで十分に検討がなされてこなかったが、本研究では、解析に使用しているパラメータと計算誤差の相関を用いることにより、計算誤差を推定する手法を開発した。計算誤差の学習には、地球統計学で用いられているクリギング法と主成分分析を用いた。本手法により、通常運転時から過酷事故条件までを含む幅広い条件で計算誤差の予測を行えることを明らかにした。

安全性に関する研究  
(不確かさ評価)

- 核特性解析手法に起因する誤差を予測
  - 解析手法起因の誤差予測は困難
  - 解析結果の他のパラメータから予測

誤差と解析結果の特長量を抽出

詳細計算  
・正確度が高い  
・大型体系では困難

簡易計算  
・正確度が低い  
・高速

2つの計算コードの  
解析結果の差異に注目

解析結果の差異をモデル化

【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	8	8	10
学生	10	9	9	2

研究成果発表の詳細については、以下に記載。

<http://www.fermi.energy.nagoya-u.ac.jp/research.html>

## 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】

- ・微積分型輸送方程式における SPH 法の適用性に関する検討
- ・社会的受容性の高い新型炉の概念に関する研究
- ・FRENDY を用いた ACE 形式断面積のランダムサンプリング実装
- ・Bootstrap 法を用いた推定臨界下限増倍率の算出方法

### 【修士論文】

- ・ランダムサンプリング法を用いた不確かさ低減手法による BWR 炉心特性予測値の信頼性向上
- ・粒子フィルタ法を用いた未臨界度監視に関する研究
- ・核特性解析における解析手法起因誤差推定に関する研究

## その他・特記事項

- ・第 51 回日本原子力学会賞 論文賞 山本章夫、受賞対象「Radially and azimuthally dependent resonance self-shielding treatment for general multi-region geometry based on a unified theory」、2019 年 3 月 22 日
- ・日本原子力学会フェロー賞 B4 近藤諒一、2019 年 3 月 22 日