



# アドバンス・シミュレーション・ニュース

## No.5 (2023年9月29日発行)

### 第5回アドバンス・シミュレーション・セミナー2023 開催報告

#### 東京大学大学院 工学系研究科 原子力国際専攻

#### 教授 笠原 直人 様

### 「原子力安全に必要となる計算科学技術への期待」

アドバンス・シミュレーション・ニュースは、アドバンスソフト株式会社が2021年度から、我が国における計算科学技術の振興を目的として、幅広い分野の最先端研究を対象として開催している「アドバンス・シミュレーション・セミナー」の開催報告と今後の開催予定をご案内するサービスです。

本セミナーで紹介される多種多様な最先端研究をきっかけに、企業の研究開発を担う技術者の方が新たな視点を持つこと、最先端研究を産業に応用する起点となること、長期的には計算科学シミュレーション分野の裾野が広がること等を期待しています。

#### 開催概要

- 日時：2023年8月3日（木）14:00～15:30
- 開催方法：オンラインセミナー（Zoomにて開催）
- 主催：アドバンスソフト株式会社 出版事業部
- 講演概要

設計とは想定した事象に対する備えであり、我が国の原子力発電所は、事故を起こさないことに細心の注意を払ってきた。福島第一原子力発電所事故を教訓として、想定を超える事象に対して事故が起こった後の、影響緩和やレジリエンスの重要性が認識されるようになった。こうした対策に



は、事故や破損から安全性能喪失までに至る進展挙動の予測が前提になる。設計用の破損以前までの保守的解析法では不十分であり、非線形挙動をベストエスティメートする必要が出てくる。実験による再現は規模や安全性の面から制限が大きく、実機予測は計算科学が必要となる。大学での関連研究の紹介と共に将来への期待を述べる。

#### ご講演内容

本稿は、2023年8月3日に開催した「アドバンス・シミュレーション・セミナー2023」において、笠原 直人 様にご講演いただいた内容をアドバンスソフトがまとめたものです。

#### 1. 講演内容

##### 1.1. はじめに

アドバンス・シミュレーション・セミナー2023の第5回では東京大学大学院工学系研究科原子力国際専攻の笠原先生より、「原子力安全に必要となる計算科学技術への期待」というタイトルでご講演いただいた。ご講演は、事故から学んだ原子力安全、及び、次世代革新炉の開発に関する話題から始まった。そ

の後、原子力安全のニーズと、それに応えるための大学での研究例として原子力プラントにおける受動安全構造の紹介があった。最後にこれらを踏まえた計算科学への期待をお話になった。ここではそのご講演の内容を紹介する。

### 1.2. 事故から学んだ原子力安全

ご講演は、我々人類が経験した3つの大きな原子力発電所事故を教訓として、原子力安全に対する考え方がどのように変化して来たかというお話で始まった。

スリーマイルアイランド原子力発電所事故では、設計上の問題というよりは保守点検の不備や運転員の不適切な対応が原因で事故が発生した。その結果、固有の安全性に裏付けされ、先端技術でバックアップされた安全性の大切さを再認識するとともに、運転安全を含めて安全性を議論することが重要であることが認識された。

チェルノブイリ原子力発電所事故では、原子炉の構造に設計上の問題点があったこと、運転員が運転規則を違反したこと、運転にあたっての組織的な問題があったことなど、安全性に対しての文化が欠如していたことが浮き彫りになった。

福島第一原子力発電所事故については、地震発生直後に原子炉を停止させることには成功したものの、その後の津波の襲来によって全電源を喪失し、崩壊熱(残留熱)の除去や核分裂生成物の閉じ込めに失敗した経緯が詳しく述べられた。その結果から、従来の設計想定事象に加え、設計想定を超える事象に対する対策も重視し、全体のリスクを合理的に低減する方法を考え続ける必要があると気づくこととなった。

### 1.3. 次世代革新炉の開発

一方で、カーボンニュートラルという点からの環境への影響の緩和や、ロシアとウクライナの戦争で顕在化した経済面やエネルギー供給の安全保障と言った問題から次世代革新炉への期待が高まっていることが紹介された。革新炉の一つである高速炉ではこれまでの軽水炉では燃料として利用できなかったウラン238をプルトニウムに変換しエネルギー源として利用することができる。これにより利用可能な資源の量が何十倍にもなり、長期のエネルギー安全保障が実現可能である。また、使用済燃料を再処理して再利用可能な物質を取り出す核燃料サイクルと組み合わせることで、放射性廃棄物の環境への負荷も大幅に減らすことができる。その他にも、高温ガス炉や熔融塩炉、小型軽水炉/革新炉などの開発が進められており、アメリカ、イギリス、カナダでは大型予算が組まれている。日本でも原子力イノベーションの創出に向けて、Nuclear Energy X Innovation Promotion (NEXIP)と呼ばれる支援プログラムが進められている。

### 1.4. 原子力安全のニーズ

このような背景から、原子力発電所の安全性を高める方法として、設計想定事象(Design Basis Events; DBE)と設計想定を超える事象(Beyond Design Basis Events; BDBE)の全体を通してリスクを評価すること、リスクを許容レベル以下に抑制することを目指すようになった。つまり、DBEに対して事故の発生や機器単体の破損を防止するという従来の考え方に加えて、BDBEに対しては可搬設備や緊急時対策などのシステム面で事故発生後の影響緩和を計画し、外部からのエネルギーや操作を必要としない受動安全機能を備えた新しい設備を利用するようになってきている。これらに加えて、BDBE発生時に破損が生じても破損影響の拡大を受動的に抑制できる機器構造を考えることもできるのではと述べられた。

また、非国家集団やテロリストなどの脅威からの対策である核セキュリティにおいても原子力安全と同様に、異常発生後の影響緩和を図る考え方を取ることができるだろうと述べられた。このときに重要となるのがプラントの異常を早期に検知し識別することである。これにはプラント内に設置されたセンサーからの大量のデータを学習させたAIに正常な状態と異常な状態とを判断させるアイデアが有効と考えられる。それにより、その後の脅威を遅延させて影響を緩和し対抗策を取ることを可能とする。核セキュリティにおいても想定外の脅威に対する対策を立てることは難しいが、強化学習などの最新技術を用いて机上訓練をできる限り行い、人とハードを最適に組み合わせた対応案を導き出す手法が有効になるだろうと紹介された。

### 1.5. 大学研究の紹介

その後は、構造強度という視点からBDBEに対する原子力安全へ貢献できる可能性として、大学での研究成果をご紹介いただいた。システム安全と組み合わせるレジリエンス(回復力)を高めるという考え方から、その一部が破損しても全体としては破局的な壊れ方を起こさない、もしくは、破局に至るまでの時間を非常に長くできる機器構造が望まれる。このような受動安全構造について、原子力以外の産業分野からヒントを得ながらご研究をされている。

研究成果の一つ目では、高速炉のような高温であることを特徴とする原子炉で、冷却機能の喪失により超高温状態に陥り材料が軟化した際に、変形により荷重が再配分され破断を防止する受動安全構造が紹介された。具体的には原子炉容器が自重等で変形して下部鏡が床などへ接触することで胴部の荷重が解放され破断を防止するものである。このアイデアが実現できるのは、下部鏡が床接触により座屈しても直ぐには破壊しない場合であり、それを検証するための球殻に対する座屈試験が紹介された。試験により、荷重が座屈強度に達しても飛び移り座屈が



生じて、変形してもすぐには破壊しないことがわかった。これらの実験結果に対して、非弾性材料構成式と有限要素解析コードを組み合わせた構造解析を実施し、マルチリニア移動硬化則に基づいた構成式を用いることで実験結果を非常によく再現できることが示された。

研究成果の二つ目として、地震荷重に対して受動安全性が生じる構造に関する実験と有限要素解析の結果を述べられた。これは構造が一部破損することによって、まずは剛構造から柔構造へと飛び移り、その後に破損が進展しても、荷重に対する応答が遅れるために力が伝わりにくくなり、破断が受動的に抑制されるという考え方に基づくご研究である。実験は薄肉円筒試験体に対して水平方向へ振動荷重を加えることで行われた。ある程度の荷重を加えると円筒上部で座屈が生じ、条件によっては亀裂が発生することもあったが、座屈後挙動は安定しており崩壊に至ることはなかった。また、加振させている振動台と円筒試験体との間は座屈後に位相遅れが生じた。実験の様子は動画でも紹介された。有限要素解析の結果は応答絶対加速度や座屈後の形状などの点で実験を良く模擬できており、座屈後にエネルギーの入力がおこりにくくなったことが安定性の要因であることも確かめられた。過大地震発生時に生じうる座屈後の安定性と亀裂の発生を評価するためには、容器全体の座屈後の応答だけでなく、局所的なひずみを予測できるかどうかも重要になるが、後者に対して粗いメッシュの動的全体モデルと細かいメッシュの静的局部モデルを組み合わせた解析法も紹介された。

最後に、核セキュリティ対策の強化に対して、通常の実験に見せかけた攻撃を行う内部脅威者を画像AIと言語AIの技術を融合させて検知するシステムや、安全とセキュリティの両者を統合したリアルタイム最適対応システムの研究を精力的に進めていることをお話された。

### 1.6. 計算科学への期待

ご講演のまとめとして、原子力安全に対する計算科学への期待をお話された。最も重要なのは、設計想定事象に対しては従来どおり破損の防止を念頭におくべきであるが、設計想定を超える事象に対しては事故の影響を緩和することへと思想を転換する必要があることだと改めて述べられた。それには、設計と同様の保守的な予測や評価をやめ、現実的な破損の規模や影響度、破損度挙動を正確に把握することから始める必要があり、実現象を高精度に予測できる解析技術とその検証法が鍵になると述べられた。一方で、想定を超える事象まで含めたリスク評価や核セキュリティ対策に対しては、膨大なパラメータ解析を高速に実行する必要があり、AIやDX技術の活用が期待されると述べられた。

## 2. 聴講における感想（アドバンスソフト）

原子力発電所の安全性において、機器単体や設備集合などは破損してはならないというような従来の思想から転換して、部分的には破損しても、破局的な事故には拡大しないようなシステム構築を行っていくことが現実的であり重要であるというお考えが強く伝わってきたご講演だった。そしてその実現のためには精度の高い解析技術を確立することや、多種多様な条件下のプラント挙動を高速に予測できるDX技術を活用することが必要であり、我々計算科学に携わる者への使命だと感じられた。また、従来からの思想を転換する機会として他産業と交流し、そこでの事例を学ぶのがよいだろうとのご指摘は大いに参考となった。

### 【ご経歴・研究内容】

1984年東京大学大学院修士課程修了後、動力炉・核燃料開発事業団入社、高速増殖炉の構造設計評価法の研究開発に従事。「もんじゅ」Na漏洩事故時には原因究明に関わる。1999年よりフランス原子力庁客員研究員。2008年に日本原子力研究開発機構から東京大学に移籍。福島第一原子力発電所事故時には専攻長として対策を支援。2022年より日本機械学会発電用設備規格委員長。

## 参加者

申込者は88名、当日の参加者は63名であった。参加者の内訳は、企業が48名、公的機関が13名、教育機関が2名であった。主な業種は、「エネルギー（電力・石油・ガス・原子力）」、「材料/素材」、「ソフトウェア」であった。

## 参加者のご意見

○丁寧な説明で分かりやすかったです。また、座屈などでは動画があり、挙動がよく理解できました。

## 公開資料

ご講演のYouTube動画は、右のQRコードからご覧いただくことができます。



ご講演の資料は、右のQRコードの「ダウンロードする」からログイン後、ダウンロードすることができます。ログインアカウントをお持ちでない方は、「ダウンロードする」から新規メンバー登録後、ログインしてダウンロードすることができます。



## 今後の開催予定

アドバンス・シミュレーション・セミナー

2023 の開催予定

<https://www.advancesoft.jp/seminar/11637/>

No	日程 受付状況	内容	テーマ
第1回	4月21日(金) 終了	「防災・インフラ分野でのシミュレーションへの期待と課題」 国立研究開発法人 海洋研究開発機構 付加価値情報創生部門 部門長 堀 宗朗 様	防災・インフラ
第2回	5月19日(金) 終了	「半導体デバイスの歴史と展望」 IEEE LIFE FELLOW 広島大学 名誉教授 角南 英夫 様	半導体
第3回	6月22日(木) 終了	特別セミナー 「複雑流動現象の数値シミュレーション」 大阪大学 基礎工学研究科 機能創成専攻 教授 後藤 晋 様 ----- 「機械学習による流体解析の拡張」 University of California, Los Angeles (UCLA) 教授 平 邦彦 様	複雑流動・機械学習
第4回	7月21日(金) 終了	「GPU スパコンによる混相流シミュレーション・流体構造 連成のシミュレーション」 東京工業大学 学術国際情報センター 教授 青木 尊之 様	流体・HPC
第5回	8月3日(木) 終了	「原子力安全に必要となる計算科学技術への期待」 東京大学大学院 工学系研究科 原子力国際専攻 教授 笠原 直人 様	原子力安全
第6回	8月28日(月) 終了	「サイバー空間の脆弱性と AI：エコーチェンバー、ディープ フェイク、ChatGPT の社会的影響」 東京工業大学 環境・社会理工学院 イノベーション科学系 准教授 笹原 和俊 様	生成 AI
第7回	9月14日(木) 終了	「量子コンピュータと量子アニーリングマシン：基礎から最 先端まで」 国立研究開発法人 産業技術総合研究所 新原理コンピューティング研究センター 副研究センター長 川畑 史郎 様	量子コンピュータ
第8回	10月6日(金) 受付中 	「爆轟から見える CAE の方向性」 青山学院大学 理工学部 名誉教授 林 光一 様	爆轟
第9回	11月10日(金) 準備中	「都市のデジタルツイン」 国立研究開発法人 産業技術総合研究所 デジタルアーキテクチャ研究センター 総括研究主幹 中村 良介 様	デジタルツイン
第10回	12月15日(金) 準備中	「計算物質科学による 2.5 次元物質科学研究：原子層物質複 合構造体と外場」 筑波大学 数理物質系 教授 岡田 晋 様	ナノ

## 【お問い合わせ先】

アドバンスソフト株式会社 出版事業部  
〒101-0062 東京都千代田区神田駿河台四丁目3番地 新お茶の水ビルディング 17 階西  
TEL : 03-6826-3971 FAX : 03-5283-6580 E-mail : office@advancesoft.jp  
<https://www.advancesoft.jp/>

当社では随時人材の募集も行っております。  
<https://www.advancesoft.jp/recruit/>

Advantage Soft

