

## 「原子力安全分野におけるリスク研究の情勢と展望」

2026年6月22日

キャノングローバル戦略研究所 渡辺凜

(企画・レポート文責)

### 【企画概要】

原子力エネルギーの活用には多くの課題がある。特に、安全確保のための取り組みについて、ハード面のみならず、リスクの分析や、専門的に得られる知見を活かした意思決定のための思想や戦略、産業界や行政を含む制度設計、人材論について、包括的な視点で検討することが重要だと考えられる。これは、福島事故から安全に関する教訓を導くことにもつながるはずだ。

本セミナーでは、原子力発電システムを対象としたリスク分析の手法開発とリスク情報活用的高度化を専門とするピッツバーグ大学の櫻原達也氏を講師とし、参加者とともに、国内の議論の呼び水となるような論点の抽出を目指したディスカッションを行う。

### 【講師紹介】

櫻原達也氏

Assistant Professor, Department of Mechanical Engineering and Materials Science

Associate Director, Stephen R. Tritch Nuclear Engineering Program

Swanson School of Engineering, University of Pittsburgh

2011年東京大学工学部システム創成学科卒業。2013年同大学院工学系研究科原子力国際専攻修士課程修了後、渡米。2018年イリノイ大学アーバナシャンペーン校原子力工学専攻にて博士号取得。同大学でのポスドク・特任助教を経て、2024年よりピッツバーグ大学に着任。専門は原子力安全工学および確率論的リスク評価、リスク情報活用。2022年には国際PSAM協会よりGeorge Apostolakis Fellowshipを受賞。

### 【本レポートの目次】

1. 本セミナーの成果：原子力安全に関して検討していくべき論点
2. 講演1概要：PRA手法の原子力安全確保への活用の課題とそれに対する研究の一例
3. ディスカッション1概要
4. 講演2概要：原子力安全確保に向けた人材育成の論点
5. ディスカッション2概要
6. 終了後に行った参加者アンケートの概要

## 1. 本セミナーの成果：原子力安全に関して検討していくべき論点

以下は、講演およびディスカッションを振り返って企画者が抽出した、原子力安全やそのための人材育成に関する論点である。既に議論されている内容も含め、これらの論点について検討・整理していくことが、原子力安全をめぐる国内の議論を深化させることにつながると考えられる。

- 現在の日本の産業界や規制における認識の確認
  - PRA のメリットは何か、PRA に取り組む目的意識や実務上の課題認識
  - PRA を含むリスク情報活用のメリットは何か、活用を進めることで原子力利用のあり方をどう改善したいのか
- 日本における PRA などのリスク情報の意思決定への活用を阻む要因は何か
  - 過去に進まなかった経緯や、今後予想される課題
  - 事業者、規制、そしてより広い社会・政治・経済・法制・組織論的文脈での検証
- 日本でリスク情報活用が進まない場合、どのような弊害が生じうるか
- 日本の原子力安全の考え方の全体像に対し、PRA を含むリスク情報活用はどのように位置づけるべきか
- 大学で、原子力系、非原子力系の学生にどのように原子力業界やリスク研究に興味を持ってもらうか
  - 原子力関連で既に働いている若手を含め、何が興味や就職を検討する際のポイントか（収入、会社の業績、会社との人的つながり、事故に対する印象、使命感、STEM 分野の能力や親近感、大学で学んだ専門性を活かせるか、が挙げた）



## 2. 講演 1 の要点

※講演スライドの一部は、本レポートとともに HP にアップロードされている。

### 確率論的リスク評価 (PRA) およびリスク研究の情勢と展望

- **PRA の概要:** 原子力分野における確率論的リスク評価 (PRA) は、イベントツリーやフォールトツリー解析などの手法を用いて、シナリオ発生確率と影響を定量的に評価する手法である。米国では、1998 年に規制機関が採用した Risk Informed Approach にもとづき、PRA 手法以前から存在する安全に関する指針 (深層防護や安全裕度等) と併せて、PRA の計算結果が安全に関する意思決定のために参照されている。
- **PRA に関する学術研究のトレンド:** 発表された論文数に基づけば、2025 年の研究の半数強が AI や機械学習の応用を含む PRA 手法の高度化であり、2-3 割が先進炉を含む新規適用分野に関する研究である。他方で、2015 年と比較すると、PRA における不確かさの定量化に関する研究は 1 割程度あったが、2025 年には大きく減っている。
- **実務との乖離:** 年間 200-300 件単位で PRA の手法改良や高度化に関する研究が発表される一方で、産業界や規制の実務では 1970 年代半ばに確立されたイベントツリーやフォールトツリーの手法が依然として主流であり、高度な手法の社会実装が進んでいない現状がある。このギャップに研究者として関心がある。

### 先進炉分野を中心とした PRA 懐疑論と米国の規制枠組みにおける判断

- **産業界の PRA 懐疑論:** 新型炉の規制の文脈において、PRA は決定論的な安全設計の後に、妥当性確認のため補完的に用いるべきとする意見や、そもそも PRA 自体を要求すべきではないという意見など、産業界の意見は分かれている。
- **新型炉適用の課題:** 新型炉には既設炉のような詳細な設計データや統計データが存在しないため、詳細な PRA モデルの構築が困難である。また、シミュレーションに基づく PRA 構築の手法も学術的には存在するが、全ての事故シナリオを網羅的に計算するには膨大な時間とコストがかかり、メーカーが目指す許認可取得のタイムラインと整合しない。また、Verification & Validation (検証および妥当性確認) の負担も大きい。さらに、新型炉は従来の大型軽水炉と比べてリスクが桁違いに低い設計であり、そもそも詳細なリスクの定量的評価を行うことの意義を疑問視する声もある。
- **米国の規制枠組み 10 CFR Part 53 での最終的な判断:** 新型炉の規制に関して注目され、2026 年 3 月に正式に採択された規制枠組み“Title 10 of the Code of Federal Regulations (10 CFR) Part 53”においては、新型炉規制において PRA の実施は義務化されず、PRA 以外の体系化されたリスク評価 (Systematic Risk Evaluations; SREs) や、PRA と SRE の組み合わせから事業者が選ぶことが可能なルールとな

った。

#### これから求められる PRA 研究の方向性に関する私見

- **橋渡し研究の必要性:** 先端的な研究と実社会の意思決定への応用の間にあるギャップを埋めるため、学术界は手法の高度化だけでなく、意思決定への応用の課題の特定と解決に向けた研究に投資するべきである。また、AI や機械学習の応用についても、原子力規制で要求される精度の高さなど、実務上の課題を精査し、ガイドライン作成等に向けた研究を行うことが考えられる。さらに、多数の PRA 手法の中から、適切な手法を選ぶためのフローの作成や、実務者へのスキル移転など、実際の現場職員が利用することを踏まえた「橋渡し」的な研究に注力すべきである。
- **定性的知識の活用:** 実用的な PRA 研究の方向性の一例として、当研究室の試みを紹介する。ベイジアンネットワークを活用した PRA について、これまで定量的評価に必要な条件付き確率が膨大であるという「次元の呪い」によって、実践的な適用が阻まれていた。そこで、「定性的確率ネットワーク理論 (Qualitative Probabilistic Network Theory)」に基づき、要素間の相互作用に関する定性的な知識を取り入れることで、膨大な数の (多くは稀な) 事象に関する条件付き確率の推定をせず、リスク評価を行う手法を開発している。
- このアプローチでは、たとえば「その空間の床面積が広いほど温度が下がりやすく、火災による電気ケーブルの損傷が起こりにくい」といった要素間の相互作用に関する正負の定性的な影響をもとに、フォルトツリー同様の構造をベイジアンネットワークとしてモデル化する。このため、詳細な設計が確定していない新型炉などでも活用しやすいと考えられる。
- **予備的な検証結果:** こうした定性的知識に基づく火災リスクのモデルで予備的な解析を行った結果、既存の火災 PRA のモデルと比べ、不確実性は大きくなるが、近い推定値が得られたことは興味深い。あくまで予備的な結果だが、たとえば火災区画内の全ての電気ケーブルの損傷確率を 1 とするような保守的な想定に基づく評価に比べれば、より高い精度での評価が今後、可能になるのではないかと考えられる。
- **研究の意義:** 定性的な知識をモデルの構築に取り入れることは、リスク研究の文脈で次のような意義があると考えられる。
  - データが乏しい、または入手するための時間やコストが大きい場合でも確率論的なリスク評価が可能になる (極低確率・高影響ハザードの理解やマネジメント、先進炉、等)。
  - 既存の PRA モデルの活用の合理化: 時間やコストをかけた詳細な分析が求められる部分を特定するため、より簡易な定性的知識を取り入れたモデルでスクリーニングを行うことで、不要な複雑さやコストを低減できる。

### 3. ディスカッション 1

- **定性的手法と定量的手法の接合の可能性**
  - 提案された定性的な手法を、従来の定量的な PRA に部分的に組み込むことは可能か、またどのような意義があるか。
  - ベイジアンネットワークの枠組みを活用すれば、定量的評価で得られた新しいデータに基づいて条件付き確率をアップデートしたり、フォールトツリーやイベントツリーの一部を置き換えたりと、柔軟に対応することが可能である。
- **評価におけるハザードそのものがもつ不確かさの扱い**
  - ハザードにも、たとえばどの程度影響として効いてくるのか、といった不確かさが存在するが、それはどう扱うのか。
  - 複数の可能性が考えられる。特定のハザードの影響の程度が不明確な場合、今回紹介したモデルでは範囲に幅を持たせて表現することが考えられる。また、複数のエビデンスが矛盾している場合など、確率論的に定量化することが難しい不確かさに対しては、確率論的な表現に固執せず、Possibility Theory や情報理論等の他の考え方と組み合わせて対応していくことが考えられる。
- **米国の温度感および日米の違い**
  - 米国における規制側と産業界、あるいは学术界の PRA に対する温度差や、日米間のリスク情報活用の最大の違いは何か。
  - 米国の新型炉開発では、NRC は PRA を推進したい一方、産業界からは反発もある。日米の違いについては、あまり有益な比較にならない気がする。PRA やリスクインフォームドについて、米国は 50 年の歴史があり産業界主導で効率化に活かしてきた一方、日本は歴史が浅い。時間をかけても、日本に適したシステムを構築していくべきだと思う。
- **日本の現状に対する歴史的背景と留意点**
  - 日本は 20 年以上前から問題意識はあり、2003 年に原子力安全委員会でリスク情報を活用した規制に関するポリシーペーパーも書かれている。にもかかわらず、進展が遅い。これはなぜかをきちんと検証する必要がある。
  - 米国の新型炉の規制に対する産業界の要望などは、もっともらしいと思う一方で、設計や規模、事業者の違いなどの文脈の違いを無視して安易に日本で同じ見方に乗じるべきではないと思う。
- **PRA 導入の動機に関する日米の違い**
  - 米国で働いているが、先進・小型炉の事業者と従来の大型炉の事業者の違いはそのとおりだと感じる。日本がキャッチアップしようとしているのは、従来の大型炉事業者の方だと理解しているが、彼らは PRA によるコスト削減やリソースの集中、設備利用率向上も大きなメリットとして認め、リスク情報活用を積極的に進めてきた。他方日本ではコスト削減を掲げる

ことに抵抗があり、「安全向上」のみが強調されるため、事業者としてのメリットを意識しづらい点が推進を阻んでいるのではないか。たとえば、重要度分類の発想で、安全上の重要度が高いところへのリソースの集中、といったことから取り入れられる可能性があるのではないか。

- その通りであり、手法の改良だけでなく、PRA が活用されるような制度設計や産業界のシステム構築に焦点を当てて検討していく必要がある。

- **米国規制枠組み 10 CFR Part 53 に対する印象**

- 10 CFR Part 53 はリスク情報をかなり重く扱った、挑戦的な規制枠組みである印象を受けるが、どう評価するか。
- 実際には産業界のコメントが反映され、リスク情報活用に関しては柔軟性をもった、曖昧な形に落ち着いている。むしろ、柔軟性が高すぎるために、使うのが難しくなっている可能性があり、今後の事例を注視していく必要があると思う。

- **実用に関して有望な新しいリスク評価手法**

- PRA 手法の中で、実用に関して有望な新しい手法はあるか。
- イベントツリー分析、フォルトツリー分析にすぐに代わるような手法があるとは思えず、少なくとも 10 年程度は状況は変わらないのではないか。

#### 4. 講演 2 の要点

- 原子力安全確保のための人材不足については、大学の入口と出口それぞれで課題があると考えられる。
- 入口の課題
  - 優秀な学生がなかなか原子力系に来ない（情報系、核融合系などに行ってしまう）
  - 留学生が半分近くを占める（2011 年の福島事故後から増えた）
  - →原子力の修士号や博士号だけでなく、米国のマイナー制度のような制度を活用できないか
    - 10 科目程度の講義の履修で、修士号には満たない「原子力のマイナー」を取得できる
    - 日本でも一部大学で副専攻制度あり
- 出口の課題
  - 原子力系の学生の多くが、AI やコンサルなど就職（原子力系にいかない）
  - 留学生は本人の希望や能力に関わらず、日本での原子力系への就職が困難
  - →原子力系への就職を考えてもらう工夫
    - 在学中からの学生と企業のパイプライン：ピッツバーグは、近くにウェスティングハウス本社があり、学生が 1-2 年生からインターンに行き、それが単位としても認められる
    - 出口の手前からつながりを深めておくことが考えられる

## 5. ディスカッション 2

### • 学生や人材の確保

- 原子力系の専攻に拘らず、機械工学や材料工学など広範な分野から人材を惹きつけるべきである。
- 米国の原子力企業は、日本に比べると原子力系の専攻出身者の割合はずっと少ない
- 副専攻制度以外にも、オンラインプラットフォームなど EdTech を活用した Micro-credential の導入は、海外の有名大では大学の財政にも貢献し、成功しているケースがある。履修をきっかけに、後々、原子力系の仕事に関わってくれる人を増やせるかもしれない。教育の柔軟性を高めるのは時代の流れではないか。
- Professional Master 課程というのも全米では 10 数個程度はあり、たとえばピッツバーグ大では毎年 5-6 人が修了している。フルオンラインで、ほとんどの学生が社会人である。オンラインコースを通じて、大学にも多くの学費が入るので、それを使って設備をさらにアップグレードできる。
  - 米国の業界では日本よりも修士号取得者の割合が低い（通常の Research Master 課程より低くても）Professional 区分の取得意義が大きいのではないか。
- 米国では早期（幼稚園～高校）の STEM 教育の重要性が認識され、学会なども積極的にアウトリーチをしている。
- 重工業の中では原子力産業の給与は高めであるが、AI や IT 系に比べると劣る。原子力産業が「選択肢」として選ばれるためには、業界全体が先進的な取り組みを見せることが重要ではないか。
- 人材不足を論じるとき、量と質を区別することが重要ではないか。冒頭の議論はどちらか。
  - 冒頭の日本の議論については、量も質もどちらも念頭にある。
  - 原子力産業協会の調査で、2023 年度は国内の原子力系学部の 20% しか原子力系にいなかったが、近年は 30-40% に増えているというデータを見たことがある。高専生もいることを踏まえれば、量はそこまで深刻ではないのかもしれない。
  - 質については、原子力業界をどう見ているかがポイントになると思う。たとえば、今現役の学生は福島事故の印象があまり強くない。一方で、株式相場をみると原子力系は比較的好調であり、そうした指標に敏感な現在の学生は一定程度、原子力系に来てくれるのかもしれない。
  - 日本人材の不足は、長い目で見れば必ず起こる。問題は「いつ、持続不能レベルまで不足するか」ではないか。業界全体、また国レベルで、ドメスティックな人材確保を今のうちから検討するべきで

はないか。そもそも、就業者の国籍によって、品質保証などの安全リスクやセキュリティリスクを管理しようという戦略に限界を感じる。国籍による扱いの違いも、具体的にどのようなリスクがあるのか、具体的な検討を通じてデリスクング戦略を検討しておくべきではないか。

- 国籍による選別は企業の問題ではなく、国家、また国家間協定レベルの問題であり、簡単には（また企業だけでは）変えられない。

#### ● 大学の意義

- 日本は100%OJTのような習慣があるが、米国ではどうか。
  - 米国でも大学教育、特に学部教育は社会人としての基礎的なスキルの習得がメインであり、仕事内容に直結する事例は少数だと考えられる。
- むしろ、大学は興味を広げてもらい、原子力分野についても知ってもらう入口としての役割が重要ではないか。

#### ● 米国の学生のトレンド

- トランプ政権の政策の追い風もあり、学生の関心は高まっていると思う。たとえばウェスティングハウス社でも、2-3年前に比べれば採用数は2倍、3倍程度に増えているのではないか。
- 原子力を選ぶ理由としては、社会的意義や使命感よりも「クール」と感じられるか、といった感覚的な部分が大きいのではないか。ただ、同じピッツバーグでも海軍の原子力研究所に就職するような学生は国防に貢献することを志していると感じた。
- 先進炉開発などを行っている事業者と、伝統的な原子力事業者やメーカーは、年齢層以外では属性に大きな違いは感じられない。むしろ、新しい企業の方が、防衛関連の予算を受託しているといった事情で、永住権があっても国籍がなければ採用しない等、伝統的な事業者よりも留学生等にとっては条件が厳しい。

#### ● AI時代の人材育成

- AI活用が進む中で、どのような人材を育てるべきかが問われているのではないか。
- PRAのような高度な解析については、時間短縮になっても、精度や本質的な判断力の観点から、必要な人間の専門家の数は変わらないと思う。むしろ、「本質を見抜く力」や「直感」を鍛える教育が求められる。

#### ● Workforce（現場技術者）確保の重要性

- 米国で今進んでいるのは全て机上の話であり、ものづくりの大変さはまた別である。膨大な小型炉、マイクロ炉建設予定により溶接工等の現場ワーカー不足が注目されている。ただし、米国でもこれまで有効な対策を打っているとは言えない状況ではないか。

- データセンター建設のラッシュも重なり、現場技術者の獲得競争が熾烈になっている。たとえばIT職よりも技術者の給与が高いという報道もある。
  - この問題については、コミュニティカレッジや、アプレンティス（見習い工）制度の活用などが議論されている。
  - 米国では大学の学位がなくても、溶接工や電気工の資格を持って原子力建設に携われれば、それなりの給料が得られる、という点が日本と比べても特徴的ではないか。中流家庭において生活水準を高められる、というアピールポイントになっている。
- **RARE Lab** について
    - ピッツバーグ大に原子力専攻はなく、プログラムがあり、Certificationを付与できるだけ。
    - 櫻原研は機械工学、材料工学系のバックグラウンドの人が集まっている。
    - 総合大学としては、機械工学、材料工学、電気工学といった可能な限り幅広い工学分野の学生に、原子力に興味をもつきっかけを作ることが役割だと捉えている。
    - アメリカの大学は日本で思われている以上に柔軟性があり、留学生の受け入れはもちろん、日本側のカウンターパートがいればオンラインでの指導等も可能なので積極的に検討、告知してもらいたい。



## 7. 参加者アンケートの概要

- リスク分析手法の研究発表だけでなく、リスク情報活用に関する日米の現状や比較を知ることができ、勉強になった。PRA の歴史的背景から最近の米国の規制における動向、さらには米国の原子力人材育成の現状まで、学術・実務の両面から状況を理解することができた。
- 活用が進んでいるとされる米国においても、最新の研究成果がそのまま実務に取り入れられているわけではなく、20～30年前の手法が主流である事実には驚かされた。
- 現状では PRA の活用には膨大なリソースが求められ、実務の観点から実効性に疑問を覚える部分もある。「学術的研究と業界の橋渡しとなる活動」が必要という見方に大いに賛同する。
- 福島事故以降の日本では、国内の規制・審査体制は一新されたものの、人材不足の影響もあり、安全確保やリスク情報活用はずっと停滞しているように感じる。
- 日本で 2003 年頃からリスク情報活用に関する検討がなされていたにも関わらず、なぜその後の検討や導入が進まなかったのかを知りたいと思った。
- リスク情報あるいは PRA を使う実務上のメリットについてもっと知りたい。
- ディスカッションの軸が「日米両方の比較」なのか「日本への展望」なのか、焦点がやや不明瞭だった。
- 普段の業務とは異なる切り口や、多様な視点から議論することができ、刺激的で貴重な機会となった。
- 事業者や研究機関、シンクタンク、規制者が一同に会してディスカッションできる機会は貴重なので、今後も同様のセミナーを続けてほしい。
- 今回のようなテーマについて、原子力関係者以外の人の意見も聞いてみたい。