

## リスク論の観点から見る原子炉の運転についての安全確保の考え方 -廃棄物の安全評価におけるバリデーションと共通する課題は何か-

糸井達哉\*1

本稿では、廃棄物管理のバリデーション・性能担保の考え方に関する議論に資することを目的として、原子力発電所における安全確保の基本的考え方や安全評価における妥当性確保の考え方について、主にリスク論、確率論的リスク評価に関する考え方を対象に例示的に取り上げて議論し、次の点は共通的であると考えられることを指摘した。1) 個々の特性評価は可能な限り妥当性を確保する努力が可能であること、2) 将来の安全性の評価に関する Validation は困難であり、ピアレビューを含めた適切なプロセスによりバイアスを排した評価を目指す必要があること、3) 利用目的（意思決定など）に応じた水準での評価を行うこと、4) モニタリングに基づく性能の監視と更新を含めた定期的な更新が必要であること

**Keywords:** 原子力安全, 廃棄物マネジメント, リスク論, 地震リスク

### 1 はじめに

放射性廃棄物の安全に関する議論は、その時間的なスケールや安全確保に関する対処法などの違いから原子力発電所の安全に対する議論と根本的に異なると考える関係者も多い。一方、工学システムの安全を議論するという意味で共通する部分も多分にあると考えられる。本稿では、廃棄物の安全評価のバリデーションの考え方に関する議論に資することを目的として、原子力発電所における安全確保の基本的考え方や安全評価における妥当性確保の考え方について、主にリスク論、確率論的リスク評価に関する考え方を対象に例示的に取り上げて議論する。

### 2 原子力発電所の安全確保の考え方と安全確保とリスク論

#### 2.1 原子力発電所の安全確保とリスク論

原子力発電所の安全確保の基本的考え方については、様々論じられているが、本章では筆者もとりまじめに関わった文献[1]における考え方を述べる。

原子力発電所を含めた工学システムの安全は、対策を実施し維持する枠組みを作るだけでは達成できない。また、事故のリスクがゼロであることを完全には実現できない、あるいは、証明できないことを踏まえれば、合理的に達成可能な範囲でリスクを小さく保つ努力が不可欠である。この際、設備などのハードウェアだけでなく、人・組織の劣化、設計や仕組みの陳腐化、認識していなかった未知の事象の発生などの要因、あるいはそれらの組み合わせが安全へ与える影響を継続的に注視することが重要である。以上のように、固定化した仕組みで同じことを繰り返すことに陥らず、常に問い続ける姿勢を持ったマネジメントの仕組みを構築し、その仕組みの中で、リスクの把握と対処に関わる欠けの発見の試みを継続し適切に対処することが原子力発電所を含めた工学システムの運用において重要となる。

また、リスクを考える際には、不確かな事象を扱うことが避けられないという前提を認識することが重要である。不確かさは、原因を基準にすると、認識論的不確かさ（Epistemic uncertainty）と偶発的不確かさ（Aleatory uncertainty）に分類され、それぞれ不確かさの意味も異なってくる。このうち、認識論的不確かさの取り扱いがリスクのマネジメントにおいて重要である。認識論的不確かさは現状の知識、情報の欠落によって生じるものである。この際、現状の知識や情報の欠落はなるべくないように最善の努力をすることは重要であるが、一方で、完全な知識や情報が得られているという前提での将来を予測しリスクに対処することは現実的ではないということと同時に認識することが必要となる。

原子力発電所の安全確保に関連して、安全設計・管理において決定論的に安全率を大きく設定することでリスクの根源である不確かさに対処することに多くのリソースを割いている現状で、リスク論的な対処を追加することは必ずしも現実的ではないという議論も散見される。リスク論と決定論の差異は不確かさの扱いにある。以下では、その観点に着目してリスク論の重要性を議論する。

リスク論は、不確かさを不確かなままに扱おうとするものであり、決定論は安全率という保守的な評価（例えば、最大荷重の組み合わせを荷重要件とするなど）により不確かさを包含して考慮しようとするものである。リスク論は、将来において安全確保が損なわれうる現実的な可能性をそこに内在する不確かさを含めて明示的に把握する（より具体的には、漠然としたレベルでしか把握できていない将来の状況を、そのまま認識し、対象をあるがままに表現することにつながる。このような情報は、決定論など他の観点からの分析と相補的に、さらには協調する形で安全確保や関連する意思決定、その説明性向上などに有用な情報として活用できる。以上のように、原子力発電所の安全確保は、リスク論と決定論の協調によりこのようなリスクの把握と対処に関わる欠けの発見の試みを継続すること、つまり、リスクを監視、把握、評価し、対処することによって実現する。つまり、単純にリスクを科学的に分析するだけでなく、安全達成の目標を阻害する要因を発見し、効果的な対策を検討し実行することが必要となる。我が国においては、2011年の福島第一原子力発電所事故後の議論により、このような共通認識が醸成されつつある。

Approach to safety assurance for nuclear reactor operation by Tatsuya ITOI (ittoi@g.ecc.u-tokyo.ac.jp)

\*1 東京大学大学院工学系研究科

School of Engineering, The University of Tokyo

〒113-8656 東京都文京区本郷 7-3-1

本稿は、日本原子力学会 2023 年秋の大会バックエンド部会セッションにおける講演内容に加筆したものである。

## 2.2 確率論的地震リスク評価の活用における分野横断的枠組みの重要性

以上のような安全確保を支える評価手法のひとつであるリスク評価のひとつである確率論的リスク評価（PRA）は起こりうる事故を可能な限り探索する分析ツールである。原子力施設の敷地外、あるいは、敷地境界内において原子力施設の運転に直接関わらない部分に端を発し、施設における事故の誘因となる可能性がある事象（地震（地震動、断層変位、地盤変状）、津波、洪水、火山などの自然ハザードと、航空機落下やサイバーテロなどの人為ハザードがある）を外部的ハザードと呼ぶ。特定の外部ハザードが発端となる事故に着目して分析する PRA、例えば地震 PRA は、将来起こる地震の揺れの可能性を評価する地震動ハザード評価、建屋・機器・配管などが揺れに対してどの程度強いかを評価する地震脆弱性評価、どのような事故に進展するかを分析する事故シーケンス評価からなる。それぞれの評価・分析は、それぞれの専門分野における最新知見に基づいて実施されることになる。PRA を含めたリスク評価は、複数の分野の評価結果を統合するものであるため、ここに理解の溝が生じることは一般には避けられない。一方、リスク評価結果が有効に活用され意思決定が適切に行われるためには、異なるレベルの間で、必要な情報のやり取りが適切になされ、適切な条件や仮定に基づきリスク評価がなされること、結果の解釈などに致命的な齟齬が生じないように枠組みを構築することが必要である（Fig.1 参照）。例えば、意思決定者は、分析者に対して評価に必要な要件等の情報が伝えられるとともに、分析者側からは、与えられた要件に対する分析者としての考え方に加えて、個々の分析結果に含まれる不確かさとその要因、さらには、分析における前提条件（評価範囲なども含む）について、意思決定における文脈にあった形で伝えることなどがその前提として最低限必要となると考えられる。上述した認識論的不確かさに関する情報も伝えるべき情報に含まれる。

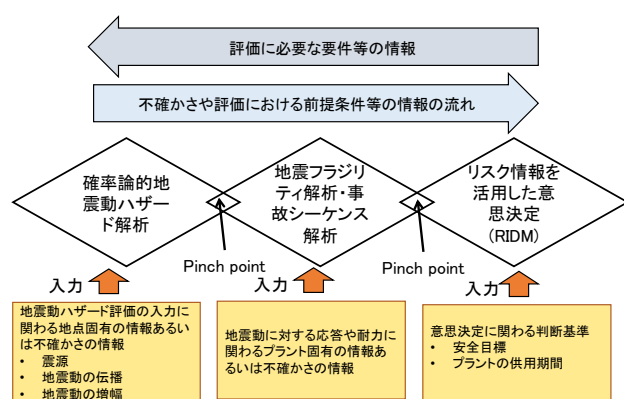


Fig.1 Interdisciplinary aspects of decision-making in seismic risk assessment[1]

## 3 確率論的リスク評価における妥当性確保の考え方

### 3.1 確率論的リスク評価における認識論的不確かさの取り扱いの重要性

本章では、地震 PRA のうち、特に認識論的不確かさの適切な取り扱いが重要となる地震動ハザード評価を対象に、評価の妥当性確保の考え方について現状と課題を述べる。

まず、前章の議論を踏まえると、PRA では不確かさがあることを前提とすること、その上で、最も良い評価手法を選択し、最善評価を行うことを目指すことに加えて、妥当な評価が可能な手法や解釈が複数ありうることを前提にその範囲を明らかにした上で、それらの違いが、PRA の結果にどのような違いをもたらすか、意思決定に必要な情報として明らかにすることが PRA における認識論的不確かさの評価であると言える。

### 3.2 確率論的地震動ハザード評価の評価プロセス

#### 3.2.1 標準的な評価プロセスの概要

一例として、確率論的地震動ハザード評価（PSHA）に着目し、米国において 1980 年代後半に実施された特性サイトでの評価について述べる。ここでは PSHA が、2 つの研究機関により独立に実施されたが、特に、認識論的不確かさの評価結果において、両者に大きな相違があることが評価手法の妥当性という観点で課題となった。これを受けて評価プロセスに関する指針を含むガイドが 1997 年にとりまとめられた[2,3]。ガイドでは、上述した複数の妥当な手法や解釈について、最善のものに加えてそれらの分布や範囲（Center, Body and Range of Technically Defensible Interpretations）を把握し、それを適切に文書化することを、複数の専門家が参加する構造化されたプロセスとして実現できるとしている。具体的には、次の 5 つの項目が重要であるとしている[4]。

- ・ プロセスに参加する関係者の役割（責任や役割に応じて必要とされる参加者の資質を含む）を明確にすること
- ・ 個々の特性評価に関連しうる利用可能なすべてのデータ、モデル、手法を客観的に評価すること、また、追加のデータが必要な場合にはそれを収集することや利用可能なデータの限界や理想とのギャップ、解像度や不確かさを把握すること
- ・ 上記で評価したデータ、モデル、手法を用いて、現状の最新知見を踏まえた最良推定と認識論的不確かさを反映した形でハザード評価として統合すること（現状の最新知見を踏まえた最良推定には、偶発的不確かさに関する最良推定も含む。また、ここに感度解析の実施も含む）
- ・ 評価したデータ、モデル、手法や、統合の過程の妥当性を示す詳細な記述を含める形で、評価結果を再現可能なように文書化すること
- ・ 参加型のピアレビューにより、以上のすべての過程にバイアスがないこと、データ、モデル、手法を用いた統合結果が、最善の評価に加えてそれらの分布や範囲を把握できているかを確認すること。

### 3.2.2 評価の更新

このような評価プロセスに基づき実施された評価は、ある時点における知見に基づく評価に過ぎない。一方、利用可能なデータ、モデル、手法は新しい知見により日々更新される。このため、いずれかのタイミングで評価の更新が必要になり、評価結果はどの程度の期間有効なのか？どの程度で更新が必要になるのか？などが現実的な問題となる。文献[4]では、10年程度の周期での定期的な更新に加えて、新たに明らかになったデータ、モデル、手法に関する知見の重要度に応じた更新の必要性について議論されている。

### 3.2.3 我が国における課題に関する考察

このような評価プロセスは、問題の特性に合わせて様々な形式がありうると考えられるが、将来の安全性の評価に関する Validation は困難であること、一方で、個々の特性評価については、可能な限り妥当性を確保する努力をすること、個々の特性評価を安全性の評価結果として統合する際には、ピアレビューを含めた適切なプロセスによりバイアスを排した評価を行うことなどは、地震ハザード評価以外の多くの安全評価に共通する考えであると考えられる。また、前章で議論した継続的なリスクの監視、把握、評価は、このように困難な Validation を継続的な努力の積み重ねにより実現することにもつながるものであると考えられる。一方、我が国の PRA を含めた安全評価の実務においては十分に定着していない部分もあると考えられ、今後の課題であると考えられる[5]。

## 4 まとめ

本稿では、廃棄物管理のバリデーション・性能担保の考え方に関する議論に資することを目的に、原子力発電所における安全確保の基本的考え方とリスク論、確率論的地震動ハザード評価における妥当性確保の考え方について議論した。

このような評価プロセスは、問題の特性に合わせて様々な形式がありうると考えられるが、これらは、確率論的な評価以外の安全評価にも共通するものを多く含むと考えられ、特に、次の点は共通であると考えられた。

- ・ 個々の要素に関する評価は、可能な限り妥当性を確保する努力が可能であり、また、必要であること
- ・ 将来の安全性の評価に関する Validation は困難であるが、ピアレビューを含めた適切なプロセスによりバイアスを排した評価を行うことで妥当性を確保することが一般に行われていること
- ・ 利用目的（意思決定など）に応じた水準での評価を行うこと
- ・ モニタリングに基づく性能の監視と更新を含めた定期的な更新が必要であること

## 参考文献

- [1] 日本原子力学会: リスク評価の理解のために(第2版). 標準委員会 技術レポート: AESJ-SC-TR011: 2020, 日本原子力学会 (2020).

- [2] Senior Seismic Hazard Analysis Committee (SSHAC): Recommendations for Probabilistic Seismic Hazard Analysis: Guidance on Uncertainty and Use of Experts. NUREG/CR-6372 UCRL-ID-122160 Vol.1, USNRC (1997).
- [3] 酒井俊朗: 確率論的地震動ハザード評価の高度化に関する調査・分析 一米国 SSHAC ガイドラインの適用に向けて一. 電力中央研究所報告 研究報告: O15008, 電力中央研究所 (2016).
- [4] Ake, J., Munson, C., Stamatakos, J., Juckett, M., Coppersmith, K., Bommer, J.: Updated Implementation Guidelines for SSHAC Hazard Studies. NUREG-2213, USNRC (2018).
- [5] 酒井俊朗, 湯山安由美, 糸井達哉, 宮腰淳一: 伊方 SSHAC プロジェクトを踏まえた PSHA 実務ガイドの策定. 電力中央研究所報告 研究報告: NR22002, 電力中央研究所 (2023).