

NRRCシンポジウム2026 地震PRA手法の開発と実機の適用状況

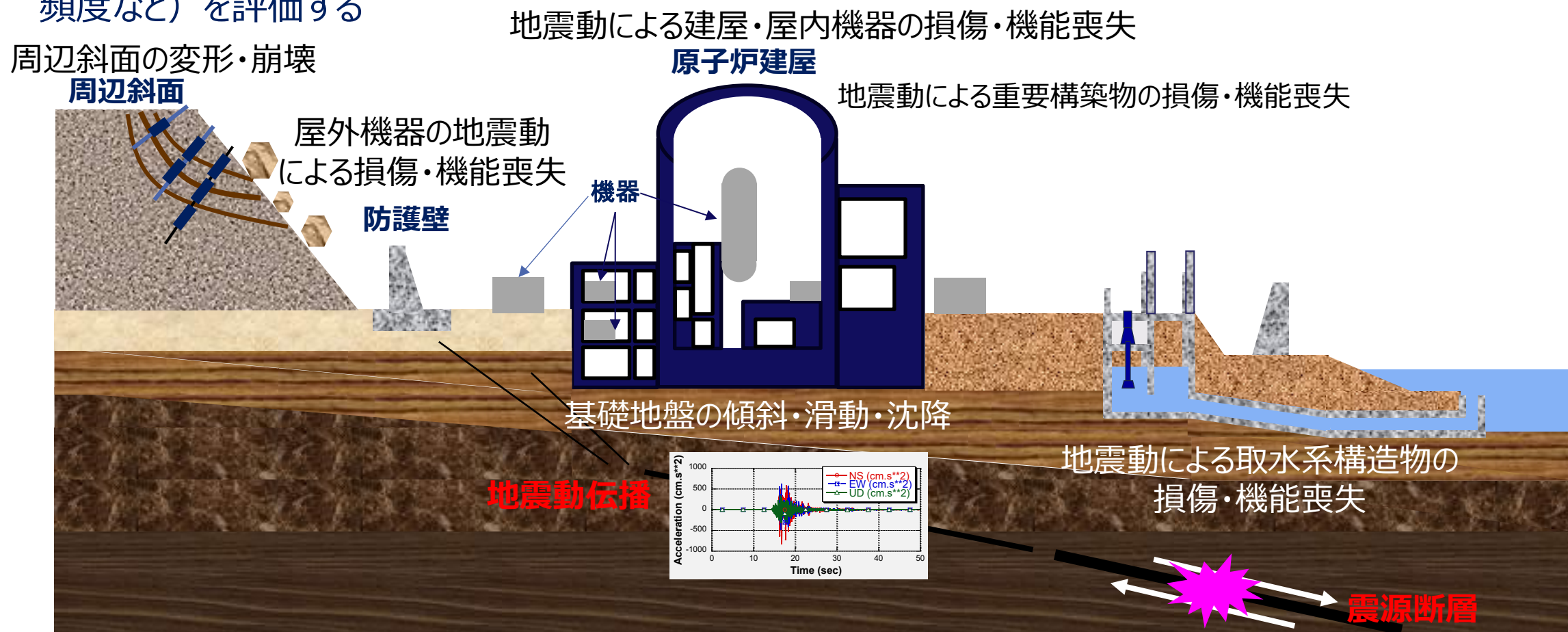
原子力リスク研究センター
中島 正人

目 次

1. 地震PRAの概要
 2. 地震PRAモデルの構成
 3. 地震PRAの背景と課題
 4. 課題解決への取り組み
 5. 研究成果
 - (1) 伊方SSHACプロジェクトを受けた地震ハザード評価手法の改良・開発
 - (2) より現実的な地震フラジリティ評価手法の開発
 6. 現状の到達点と今後の取り組み
- 【付録】これまで得られた成果
- 【付録】取り組みの進捗状況

1.地震PRAの概要

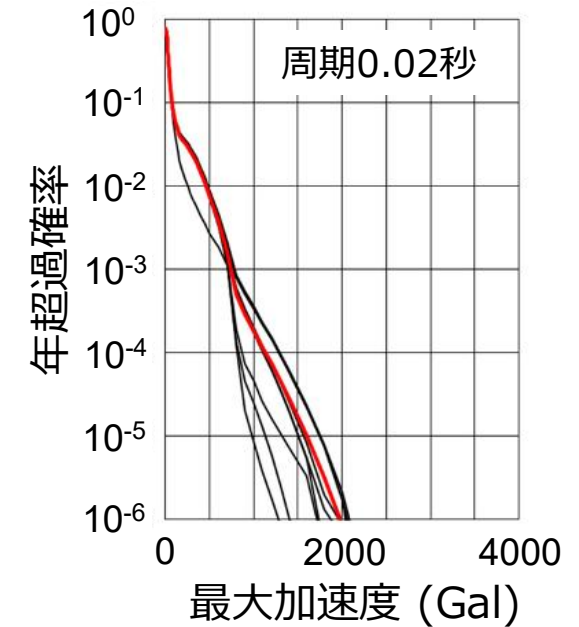
- 地震（地震動）によって基礎地盤・建屋・機器・構築物の揺れ、あるいは地震によって誘因される影響（周辺斜面崩壊による影響等）により生じる損傷・機能喪失等に起因するプラントのリスク（炉心損傷頻度など）を評価する



2.地震PRAモデルの構成

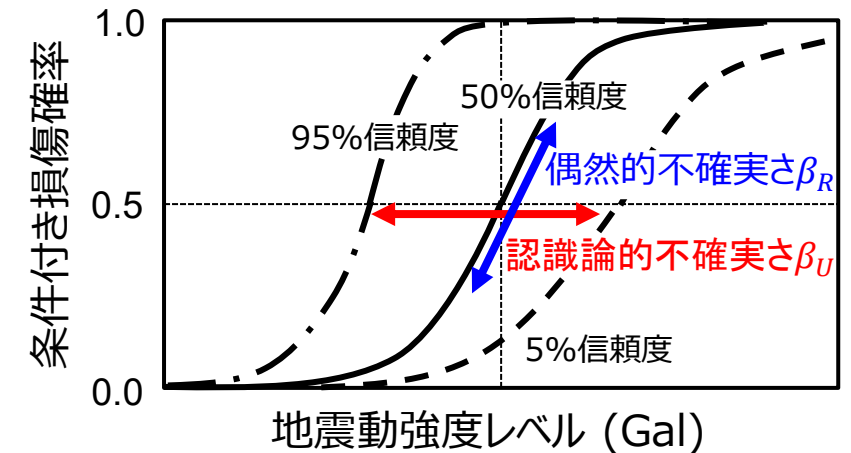
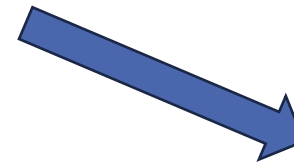
- 地震ハザード評価

- 対象地点に将来影響を与える可能性がある地震による地震動（揺れ）と発生頻度（起こり易さ）の関係を評価



- 地震フラジリティ評価

- 地震による揺れの強さと、発電所の機器・構築物が損傷する／機能を失う、条件付き損傷確率を評価

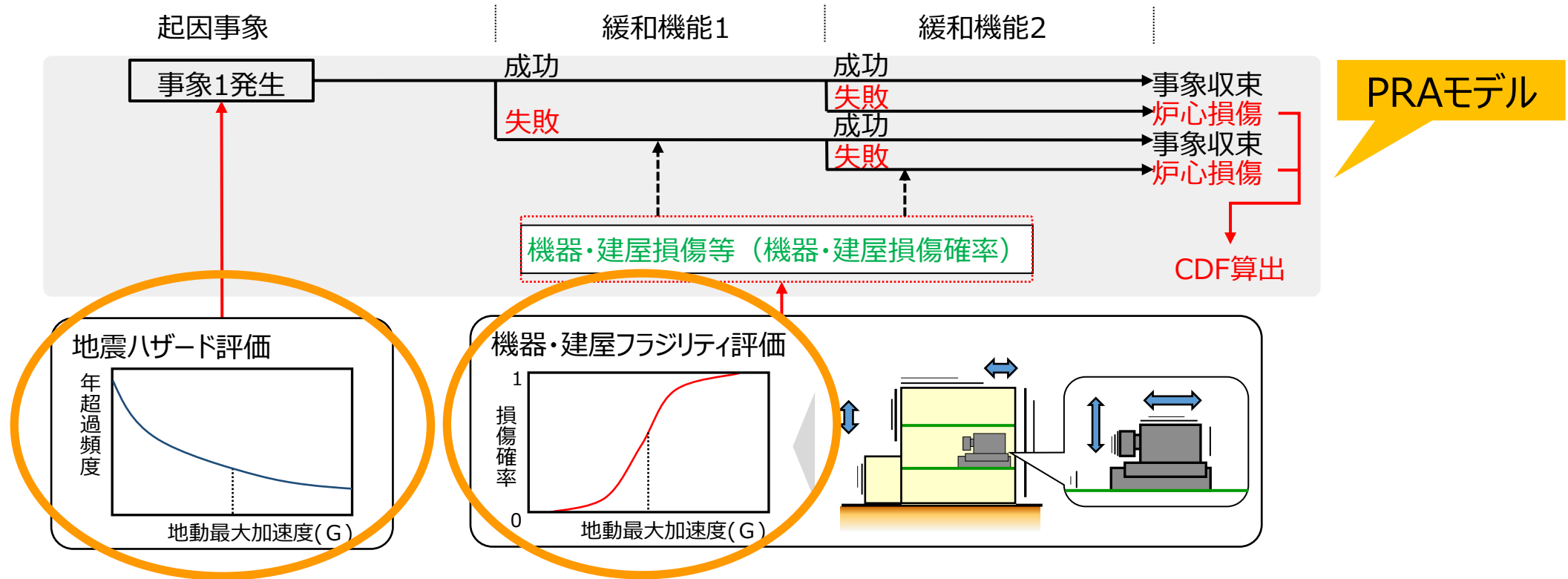


- 事故シーケンス評価

- 地震の揺れの大きさ毎に、発電所の安全上重要な機器・構築物及び設備・機器が機能を失った場合の影響（事故シナリオ）と炉心損傷の発生頻度を評価

2.地震PRAモデルの構成

- 地震PRAモデルは、内的事象PRAモデルをベースとして、地震特有の考慮事項（地震ハザード評価、機器・建屋フラジリティ評価）を反映



- 地震PRAの特徴として、炉心損傷直結*事象のリスクへの影響が大きい

* 炉心損傷直結：緩和機能が全て働かず、機器・構築物の損傷がそのまま炉心損傷に繋がること

3.地震PRAの背景と課題

■背景

- 米国においては、地震PRAは、1990年代に外的事象に対する個別プラント評価（IPEEE）を通して実機適用された。2011年の東京電力福島第一原子力発電所事故以降の米国原子力規制委員会の指示に基づいて、地震ハザード評価手法などを改良した地震PRAが再実施されている。
- 我が国においては、事業者は、日本原子力学会地震PRA実施基準に基づき、新規制基準で求められた安全性向上評価届出などにおいて地震PRAを実施している

我が国は世界でも有数な高地震帯に位置している。そのためリスク情報／インサイトを得るためには、地震国であることを踏まえて各プラントの立地の特徴を踏まえた、より現実的／説明性が高い評価技術を整備することが重要である

■解決すべき課題

- 地震PRAをRIDMで活用にするにあたって、各原子力発電所の立地の特徴を踏まえて、評価が保守的であることや評価の説明性が不足している（認識論的不確実さ*を評価していない箇所があり、その箇所は不確実さを十分説明できていない）ことなどの課題があった

*認識論的不確実さ：現象に対する知識やデータの不足により生じる不確実さ
研究が進展すれば将来減らす、あるいは解決することが可能である

4.課題解決への取り組み

国内でのリスク情報活用導入に向け、国際的水準の技術を取り入れて、各原子力発電所の立地の特徴を踏まえた評価手法を構築するため、以下の研究に取り組んでいる

■ PRAモデルの説明性の向上

- ・ 特に地震ハザード評価において、不確かさ評価・説明性が十分ではない部分がある

→地震ハザード評価に関わる認識論的不確実さをより正確に評価するため、地震動モデルの改良を図った

⇒【研究成果（1）】

■ PRAモデルにおける保守的な評価の改善

- ・ 地震フラジリティ評価において、構築物・機器の現実的な応答（変形、応力等）評価、耐力（抵抗する強さ）評価が未だ十分に反映されておらず保守的なモデルとなっており、地震に起因する炉心損傷頻度を大きく支配する場合がある

→基礎地盤のフラジリティ評価手法を改良を図り、**炉心損傷直結**の問題を解決を図った ⇒【研究成果（2）】

- ・ 実プラントの特徴を備えた原子力発電所モデルにハザード評価、フラジリティ評価の改良結果等を入力して、地震に対するリスクの定量化および分析を実施

⇒【研究成果（2）】

- 地震PRA高度化に関しては他にも課題があり、今回はNRRCが取り組んできた2項目のみ説明する

5.研究成果（1）伊方SSHACプロジェクトを受けた 地震ハザード評価手法の改良・開発

■ SSHAC手法の目的・概要

- 1980年代に米国で実施された地震ハザード評価で認識された課題解決のため米国原子力規制委員会 U.S.NRC、米国エネルギー省DOE、米国電力研究所EPRIが共同で設置した委員会（委員会名称：**SSHAC***）が構築した地震ハザード評価の検討手法、対象の重要度に応じてレベルは1～4の4段階に分かれ、US.NRCはレベル3以上の検討実施を要求
- バイアスを排除し科学的証拠に基づく客観的評価の実施を可能な限り実現するため、検討に加わる専門家の資質、責任と役割、検討手順（ワークショップの開催内容や回数を規定）等を明確化、また、検討内容の完全な文書化と参加型のピアレビューを要求事項としている

***SSHAC**（**S**enior **S**eismic **H**azard **A**nalys_is **C**ommittee）：地震ハザード評価において、多数の専門家の知見や不確定性を客観的かつ体系的に統合・集約するための手順・方法論

■ 伊方SSHACプロジェクト

- **実施期間**：2016年3月～2020年4月
- **特徴**：国内初のSSHACガイドライン適用プロジェクト（四国電力/NRRC協働プロジェクト）、国内外の有識者20名から検討チームを結成、2021年度日本原子力学会から検討成果に対して学会賞（貢献賞）を受賞
- **NRRCの貢献**：SSHACガイドラインに基づく的確なプロジェクトのマネジメントを実施するとともに、地震動モデルの定量的選択に関する研究成果を提供、採用される等、関連研究成果を検討に供することで技術的側面で支援

5.研究成果（1）伊方SSHACプロジェクトを受けた 地震ハザード評価手法の改良・開発

■ 確率論的地震ハザード評価に関する課題（十分では無い点）

- ・認識論的不確実さ評価は十分ではない点有り
- ・地震動モデル：少数の限定的な地震動モデル（地震動予測式）のみ採用



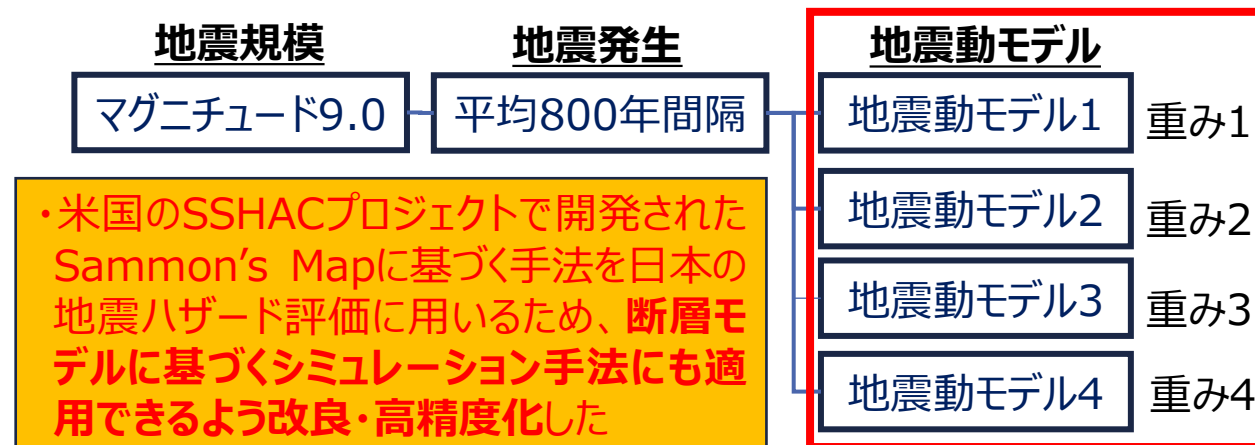
■ NRRCの検討

伊方SSHACプロジェクトにおいて技術的支援を実施。プロジェクトで分析・特定された、確率論的地震ハザード評価に関する、改良・精度向上が必要な課題／未着手課題のうち、**地震動モデルの認識論的不確実さ評価の精度向上・実用化**を目的とした検討を実施してきた[1][2][3]

➤ 地震動モデルの定量的選択方法の 改良・実務への適用性向上

➤ 地震動強度の新しいばらつきモデルの 開発

地震動モデルの定量的選択とは、「対象地点の地震ハザード評価において、どの地震動モデルを選んで、各モデルにどれだけの重みを与えるか」を意味する



地震動モデルに関して構築したロジックツリー

5.研究成果（2）より現実的な地震フラジリティ評価手法の開発

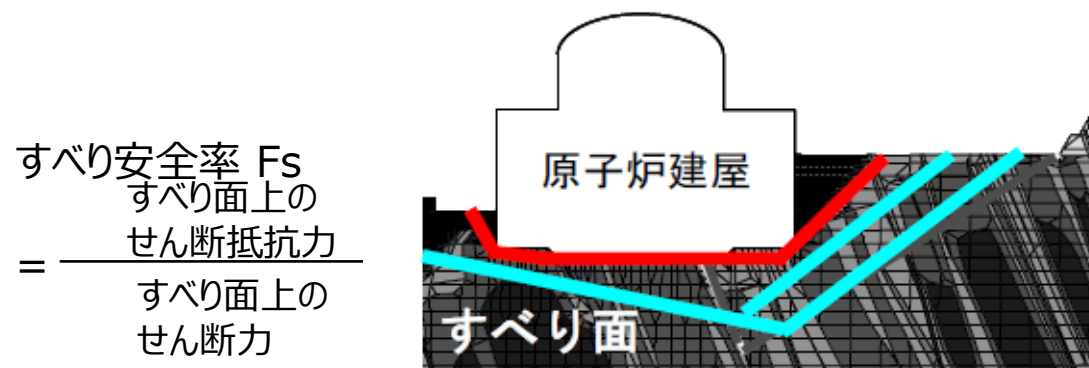
地震PRAにおける基礎地盤フラジリティ評価の問題解決

- 原子炉建屋あるいは原子炉建屋を支持している基礎地盤が損傷に至ることで、建屋内の原子炉格納容器、原子炉圧力容器等の機器及び構造物が大規模な損傷を受ける可能性があり、直接炉心損傷に至る事故シナリオとして扱われている

非線形解析・変形量による基礎地盤フラジリティ評価

現状：

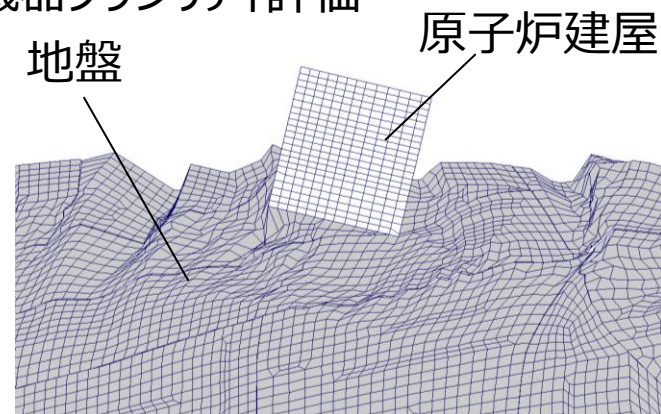
破壊を考慮しない弾性解析＋安全率評価
⇒炉心損傷直結



すべりの有無を評価するのみで、建屋・機器への作用を評価できない

将来（提案手法）[4][5]：

破壊を考慮する非線形解析＋変形量評価
⇒建屋・機器フラジリティ評価



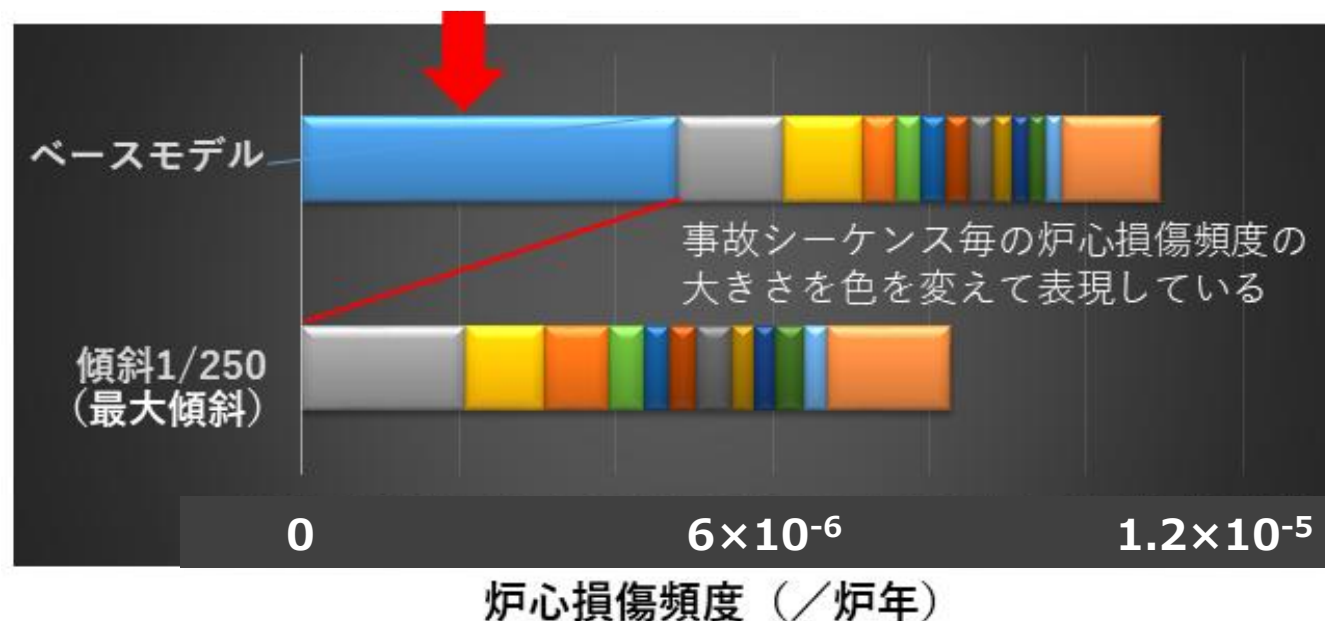
変形倍率：
100倍で表示

非線形解析により地盤の変形を予測する
地盤の変形による建屋の傾斜を評価
→傾斜による機器の損傷を評価

5.研究成果（2）より現実的な地震フラジリティ評価手法の開発

- ◆BWRプラントの実機情報に基づき、改良したフラジリティ評価手法を用いて、地震に起因するプラントのリスク（炉心損傷頻度）を評価した
- ◆保守的なPRAモデルにより、本当は支配的ではないシーケンスが大きく表れていた（リスクプロファイル*が歪んでいた）が、より現実的な基礎地盤フラジリティ評価により、地震に対して重要なシナリオが、より正確に把握出来るようになることが確認できた

基礎地盤損傷に関するシーケンス



事故シーケンスに注目したリスクプロファイルの変化

***リスクプロファイル：**
潜在的にリスクを生じさせる事項を漏れなく洗い出し、その発生頻度と影響度を分類・定量化したもの

■ 結果：

- 最大傾斜（1/250, 1/500）のフラジリティを入力した炉心損傷頻度はベースケースの炉心損傷頻度よりも小
- 傾斜を考慮したフラジリティを用いることで炉心損傷直結問題の解決に寄与した

6. 現状の到達点と今後の取り組み

■ 現状の到達点

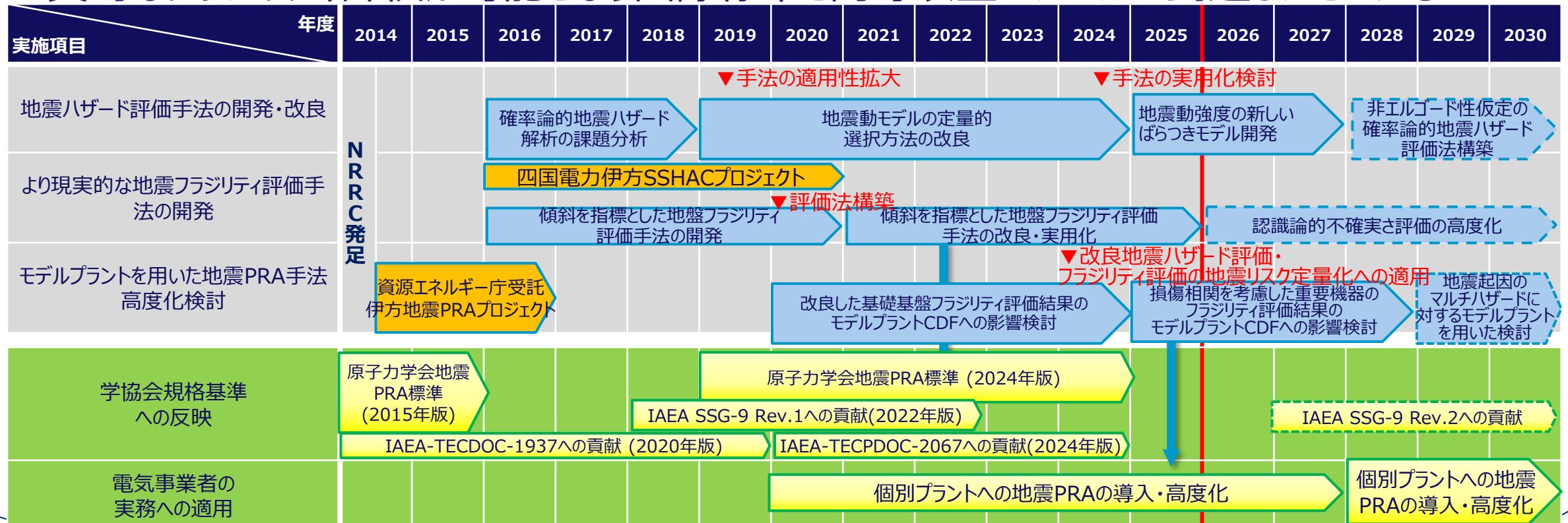
- ・各原子力発電所の立地の特徴を踏まえて、保守性を低減、不確実さ評価に関する説明性を向上し、リスク情報活用を現実的なPRAモデルとしてサポート可能なレベルに到達
- ＊ 日本原子力学会による地震PRA標準が2024年に更新されて、規格・基準面からの整備も進んだ

■ 今後の取り組み

- ・ 複数サイトの地震ハザード評価を効率的かつ同時に実施する手法の日本への適用性検討、高地震帯の地震ハザード評価に必要な技術（地震動強度の新しいばらつきモデル）の改良・開発
- ・ 事業者による実機評価の課題を踏まえ、レベル1.5地震PRAにスコープを拡大
- ・ 実機の地震PRA実施を技術的に支援するための、NRRC地震PRAガイドライン案作成
- ・ 地震起因の複合・重畳ハザードに対するPRA手法の構築

【付録】これまで得られた成果

- 地震ハザード評価：伊方SSHACプロジェクトで指摘された今後の課題のうち地震動モデルの認識論的不確実さ評価において国際標準と同等以上のレベルに到達したといえる
- 基礎地盤の地震フラジリティ評価：変形量を指標とした非線形解析の導入により、より現実的なフラジリティ評価が可能となり国際標準と同等以上のレベルに到達したといえる



【付録】取り組みの進捗状況

解決すべき課題	取り組み内容	進捗状況
地震ハザード評価の改良	地震動モデルの定量的選択方法の改良	- 定量的選択方法は、日本における確率論的地震ハザード解析実施のために、十分改良・高度化された - 実務への適用のために、あと数箇所技術的事項の回路湯が必要である
	地震動モデルの新しいばらつきモデルの開発	実施中（取組中）
地震 fragility 評価の改良	基礎地盤の fragility 評価の改良	- fragility 評価手法の改良はほぼ完成 - 認識論的不確実さ評価の必要性は残っている
	現実的な耐力と応答に基づく、機器・配管系の地震 fragility 評価の改良	- 実施中（取組中） - 実務への適用のため、非線形効果を考慮した fragility 評価の簡易法も開発中である
	損傷相関を考慮した機器の地震 fragility 評価の開発	実施中（取組中）

【付録】成果に係る主な参考文献

■ 地震ハザード評価

- [1] Nakajima, M. and Abrahamson, N.: Enhancement of Sammon's Map Representation of Fault Rupture Model for Probabilistic Seismic Hazard Analysis," Transactions of SMiRT-26, (26th International Conference on Structural Mechanics in Reactor Technology) Potsdam, Germany, July 2022.
- [2] 酒井俊朗他：伊方SSHACプロジェクトを踏まえたPSHA実務ガイドの策定，電力中央研究所研究報告書 NR22002, 2022.
- [3] International Atomic Energy Agency: Evaluation of Probabilistic Seismic Hazard Analysis (PSHA) for Nuclear Installations Based on Observational Data, IAEA-TECDOC-2067, 2024.

■ 基礎地盤フラジリティ評価

- [4] 土木学会原子力土木委員会：原子力発電所の基礎地盤及び周辺斜面の安定性評価技術＜技術資料＞「2020年度版」，2021.
- [5] Sawada, M., Nakajima, M., Yoshida, T. and Ishimaru, M.: Fragility assessment of nuclear power plant foundation ground through dynamic nonlinear analysis and deformation-based verification, ARMS2026 International Symposium- The 14th Asian Rock Mechanics Symposium: Rock Mechanics, 2026.