

NRRCシンポジウム2026 レベル2PRA手法の開発と実機の適用状況

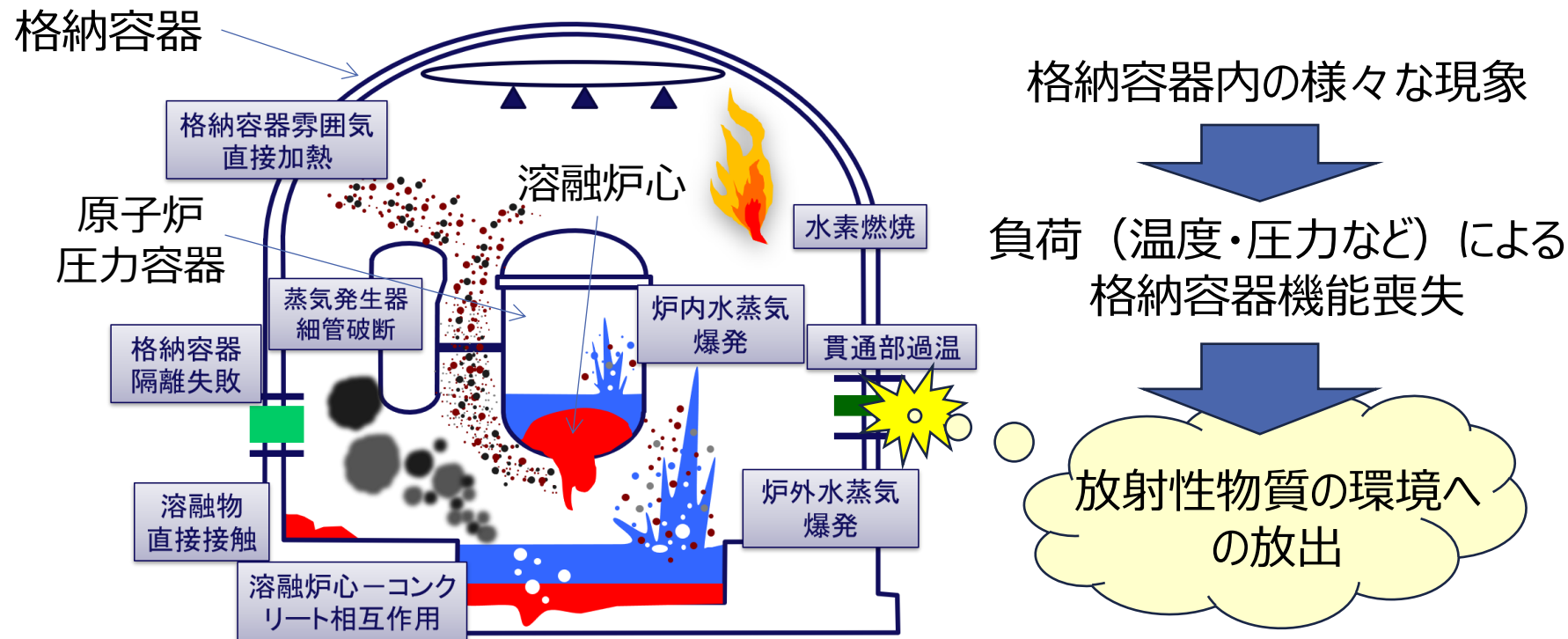
原子力リスク研究センター
中村 康一

目 次

1. レベル2PRAの概要
 2. レベル2PRAモデルの構成
 3. レベル2PRAの背景と課題
 4. 課題解決への取り組み
 5. 研究成果
 - (1) 格納容器機能喪失頻度における格納容器フラジリティ評価の導入
 - (2) 格納容器漏えい個所における粒子状物質除去効果の評価手法の確立
 - (3) 構築した評価手法の性能確認
 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.レベル2PRAの概要

- 炉心損傷に至る事故シナリオの内、事象がさらに進展しプラントの放射性物質の閉じ込め機能の喪失に至る発生頻度（格納容器機能喪失頻度）と環境へ放出される放射性物質の種類や形態、放出量、放出のタイミングなど（いわゆるソースターム）を評価する

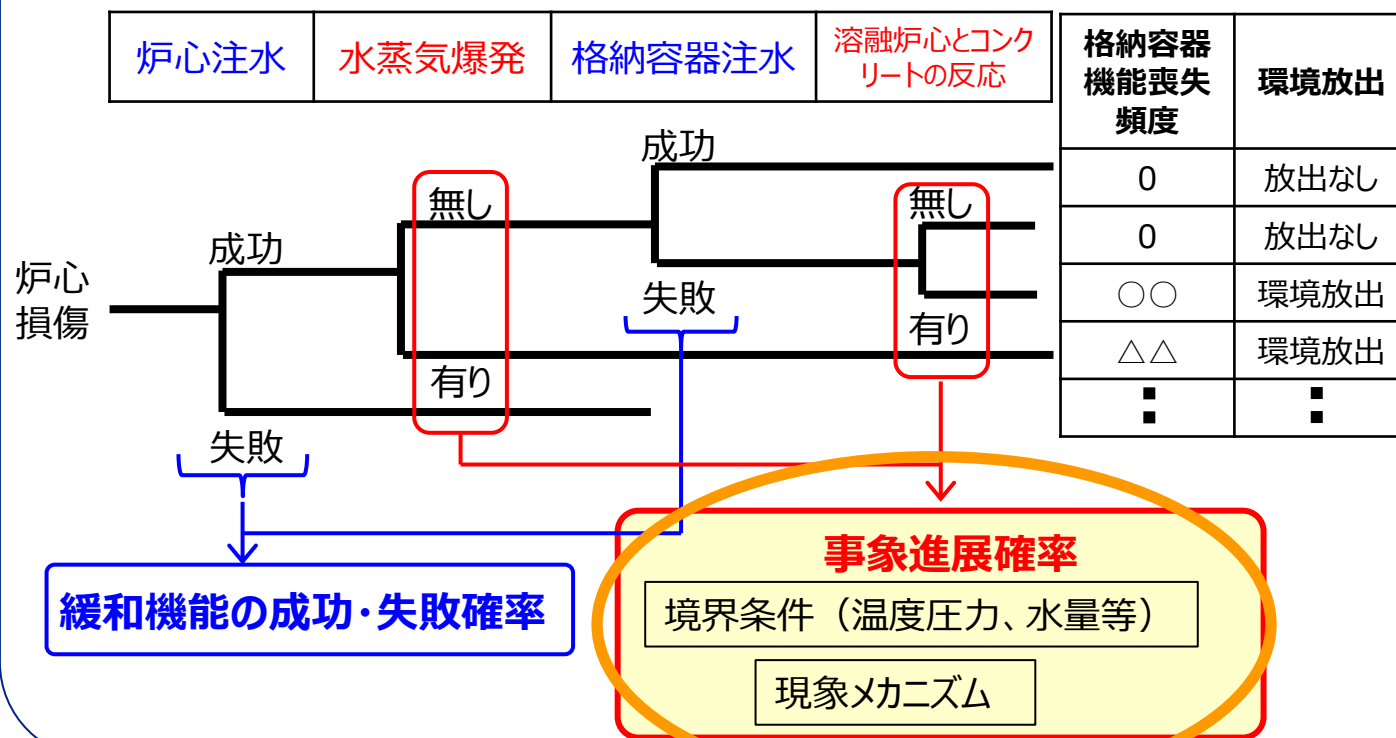


このような、設計基準よりも過酷であり、重大な炉心損傷を伴う事故をシビアアクシデントと言う

2.レベル2PRAモデルの構成

- 事象の展開を分岐図で表すイベントツリーを使った格納容器機能喪失頻度の評価
- 事故進展解析コード*1を使ったソースターム評価

格納容器機能喪失頻度の評価 (格納容器イベントツリー)



*1 原子力発電所の事故時のプラント内の事象進展及び放射性物質の放出量を解析する計算プログラム

ソースターム評価



格納容器内の放射性物質挙動
 溶融炉心からの放出
 粒子状物質挙動

格納容器からの放出・建屋内挙動
 格納容器漏えい箇所における除去
 建屋内挙動*2

*2 建屋を経由せず格納容器から環境に放出される場合もある。

3.レベル2PRAの背景と課題

■背景

- 東京電力福島第一原子力発電所事故を受けて、住民避難や帰還困難区域の設定につながった放射性セシウムの大量放出リスクを把握することの重要性が明らかになった^[1]
- レベル2PRAは放射性セシウムの大量放出リスクの大きさとその原因を同定できるツールである
- 一方で、その評価には多くの不確実さが介在し、現状では簡略的かつ保守的な方法が適用されている
- 原子力学会レベル2PRA標準^[2]では、これらの不確実さに対し合理的な手法により評価することが要求されており、不確実さを含む最良推定値を評価可能な手法整備が必要

■解決すべき課題

- レベル2PRAにおける格納容器機能喪失頻度評価やソースターム評価において、簡略的または保守的であるため、発電所のリスクの所在とその大きさを正確に把握するために必要な不確実さを含む最良推定値を得られない課題があった

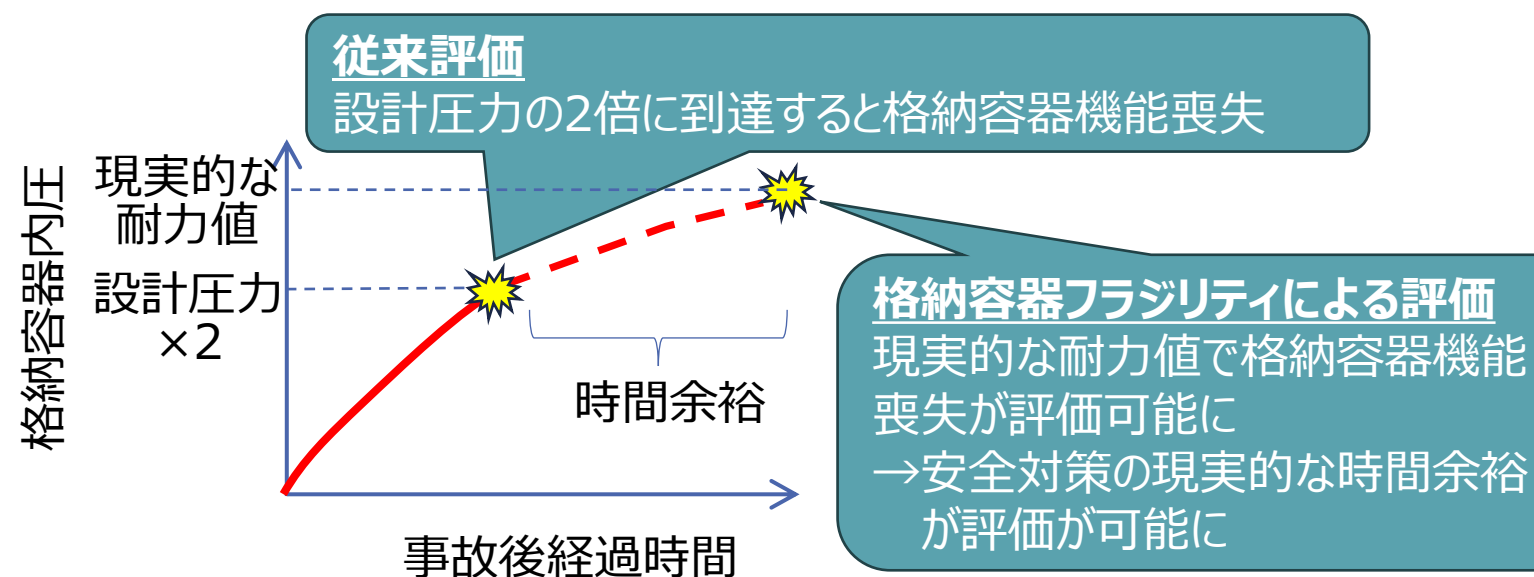
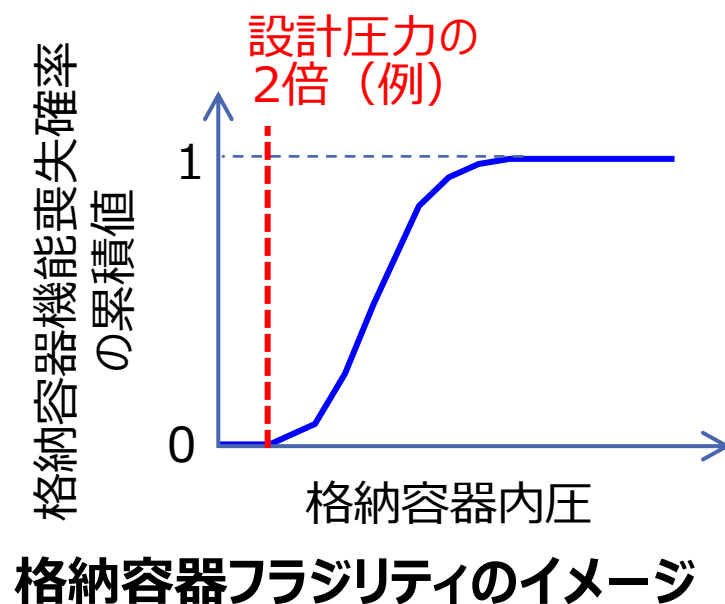
4.課題解決への取り組み

■レベル2 PRAにおける格納容器機能喪失頻度評価やソースターム評価において、簡略的または保守的であるため、発電所のリスクの所在とその大きさを正確に把握するために必要な不確実さを含む最良推定値を得られない課題があった

- シビアアクシデント現象に対する合理的な不確実さ評価手法の確立
- 格納容器機能喪失頻度における格納容器フラジリティ評価の導入 ⇒【研究成果（1）】
- 建屋内における粒子状放射性物質挙動の評価手法の確立
- 格納容器漏えい個所における粒子状物質除去効果の評価手法の確立
⇒【研究成果（2）】
- 構築した評価手法の性能確認 ⇒【研究成果（3）】

5.研究成果（1）格納容器機能喪失頻度における格納容器フラジリティ評価の導入

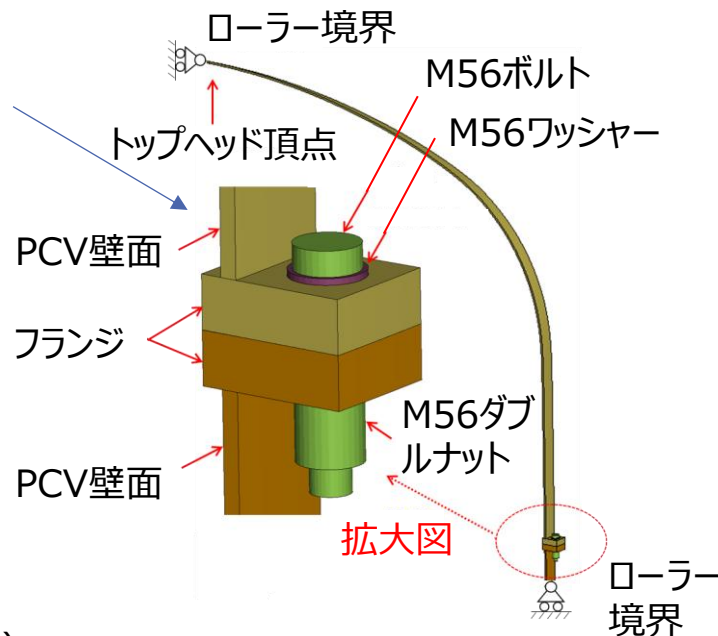
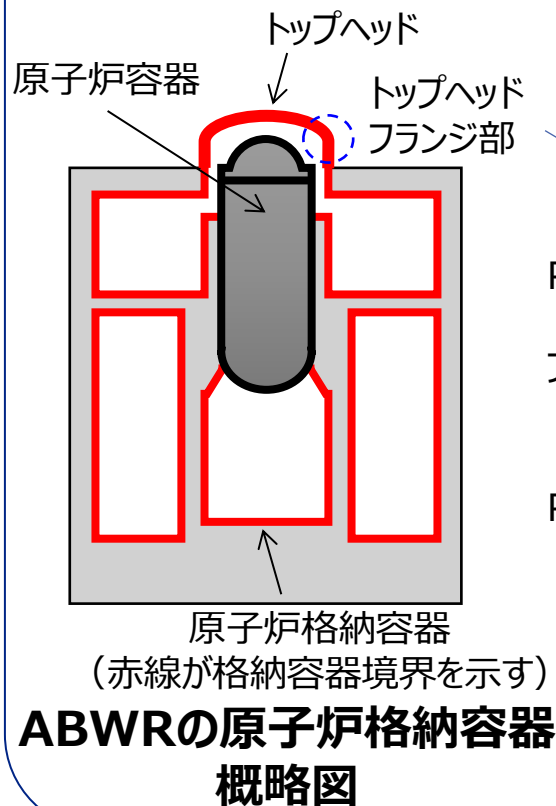
- 現状のレベル2PRAでは、格納容器温度が200℃に到達、又は格納容器圧力が設計圧力の2倍に到達すると格納容器機能喪失とみなす^[3]、実力値に対し保守的な値が適用されている
- 負荷の大きさ（温度や圧力など）に対し、格納容器機能喪失に至る確率を累積分布関数で表した曲線（格納容器フラジリティ）（左図）を適用することで、従来評価と比較して安全対策の時間余裕を考慮することなど、より現実的評価が可能となる（右図）



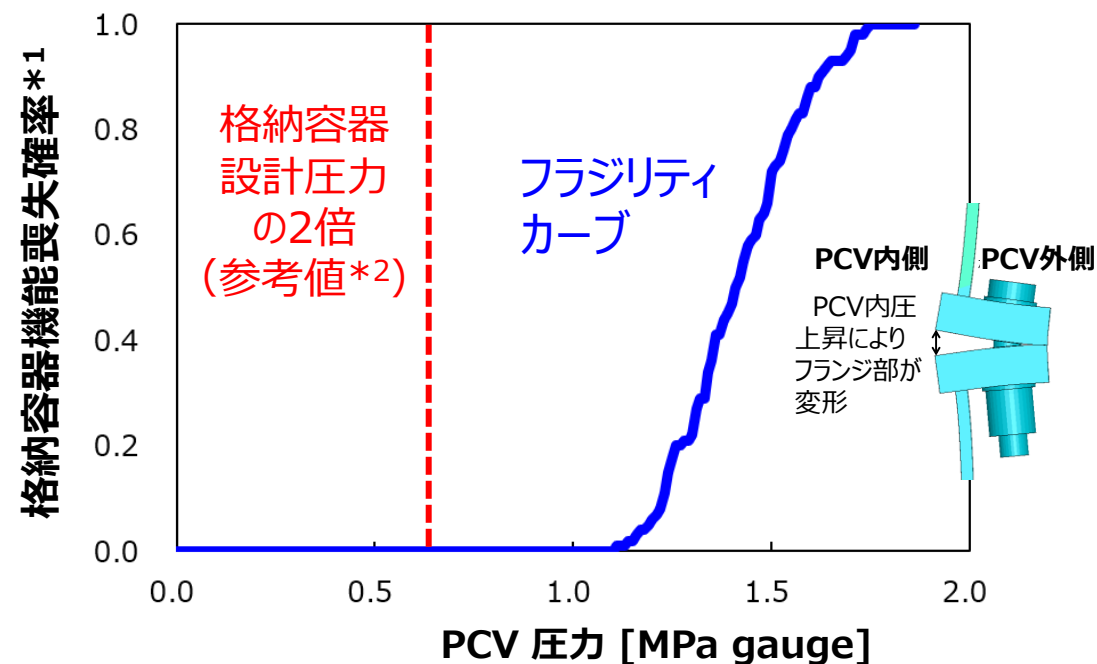
従来評価と格納容器フラジリティを適用した評価の比較

5.研究成果（1）格納容器機能喪失頻度における格納容器フラジリティ評価の導入

- BWRの原子炉格納容器（PCV）の過圧破損の評価における代表箇所であるトップヘッド（左図）を対象に、代表的なシナリオ条件下における構造解析を実施し、格納容器フラジリティカーブを作成した（右図）^[4]
- 同型のトップヘッドに適用可能なフラジリティカーブを構築し、異なる漏えい個所におけるフラジリティカーブを作成する上で応用可能な事例を構築した



トップヘッドのフランジ部の構造解析用モデル^[4]



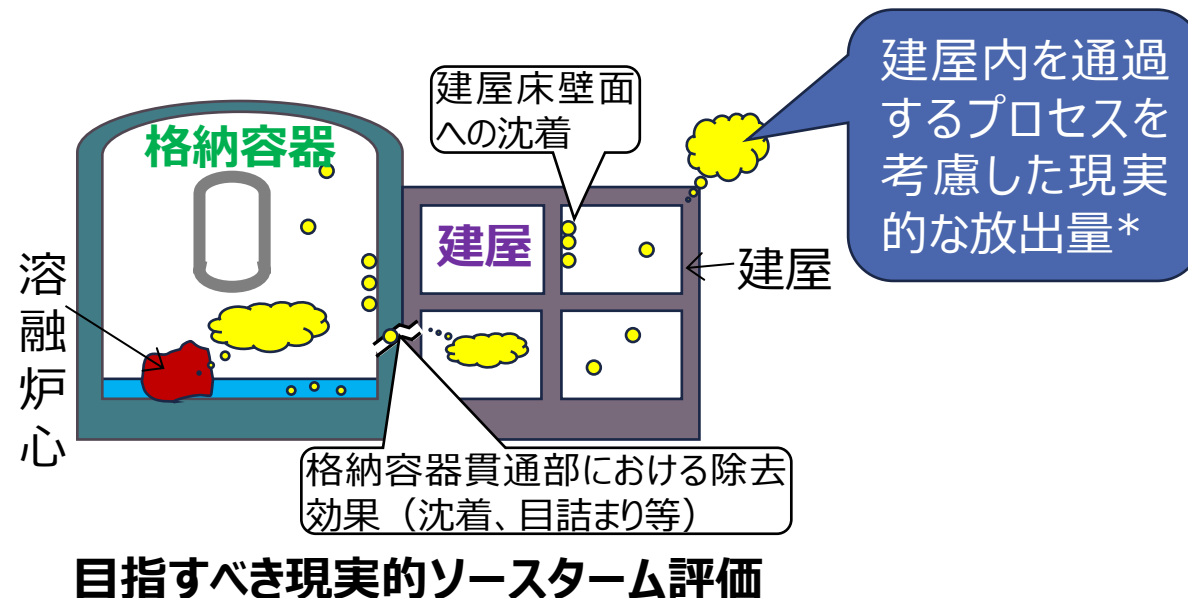
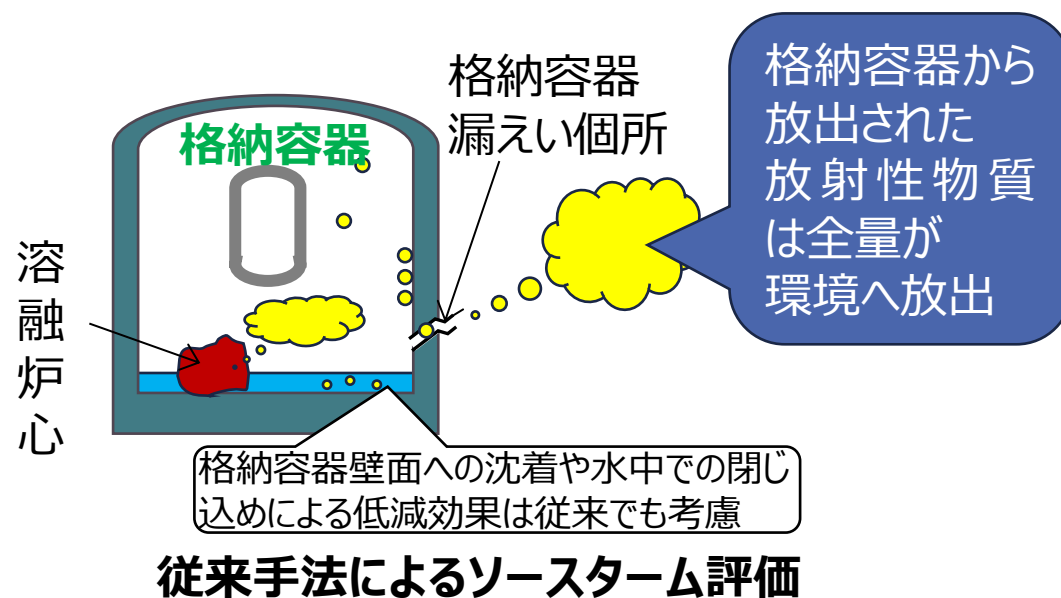
PCV内圧に対する格納容器機能喪失確率^[4]

*1 PCV内圧上昇によりフランジ変形量が5mmに到達（図中挿絵の状態）した場合に、格納容器機能喪失に至ると仮定

*2 0.62MPa gauge : ABWRの参考値

5.研究成果（2）格納容器漏えい個所における粒子状物質の除去効果の評価手法の確立

- 従来のソースターム解析は、格納容器から放出された放射性物質の全量が環境へ放出する想定に基づく評価が行われてきた
- 一方、放射性セシウムは粒子状で振る舞うことから、狭い流路となる格納容器の漏えい個所において、大量に沈着や目詰まりを引き起こし、結果として環境への放出量は低減されることが報告されている^[3]
- 現実的なソースターム評価を目指し、格納容器漏えい個所における粒子状物質除去効果を定量的に評価する必要がある

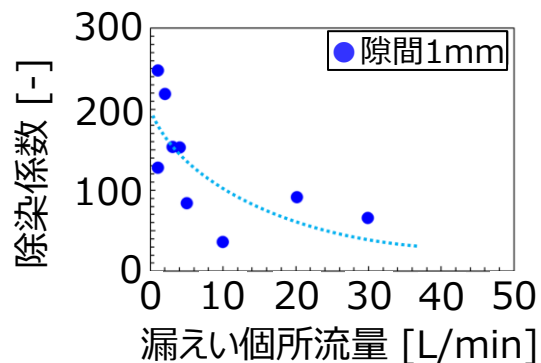


*建屋を経由せず格納容器から環境に放出される場合もある

5.研究成果（2）格納容器漏えい個所における粒子状物質の除去効果の評価手法の確立

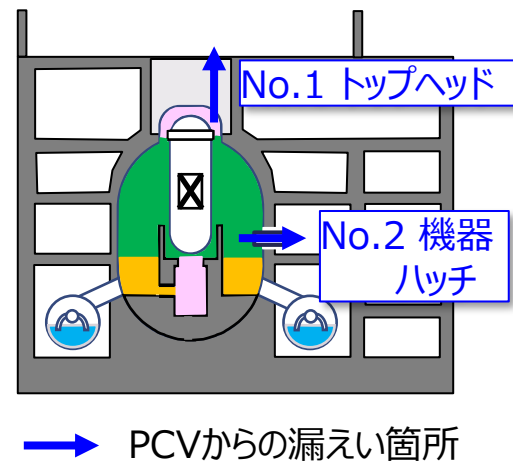
- 想定される格納容器漏えい個所（機器ハッチ）を想定したセシウム除去効果試験を実施し、セシウムの除去性能を示す除染係数^{*1}の評価式を構築した^{[4][5]}
- 実験で得た除染係数を事故進展解析コードMAAPに適用する解析事例を構築し、事故時の放出経路に応じたソースターム解析手法を確立した

実験による除染係数測定
(対象：フランジタイプの
漏えい個所) ^[5]

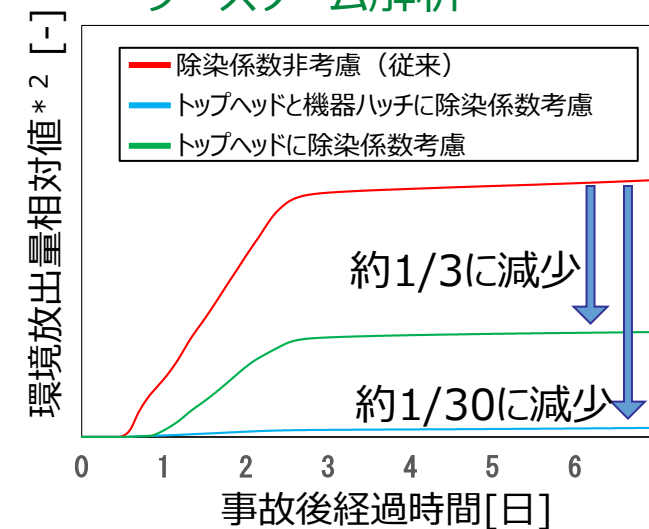


除染係数は流速により変化

実験結果をMAAP
5.06に反映^[4]



ソースターム解析^[4]



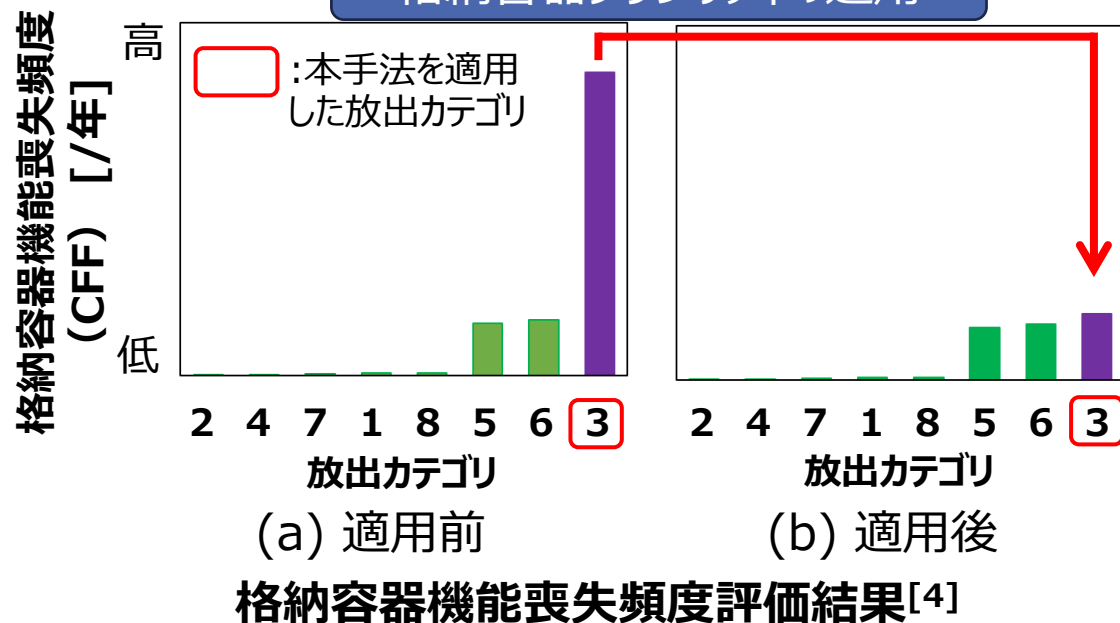
* 1 格納容器漏えい個所から流出するセシウム濃度に対する流入する濃度の比率
除染係数大きいことはより多くのセシウムが格納容器漏えい個所で除去されることを示す

* 2 原子炉停止直後の炉心Cs内蔵量に対する、
環境に放出されたCs量の割合

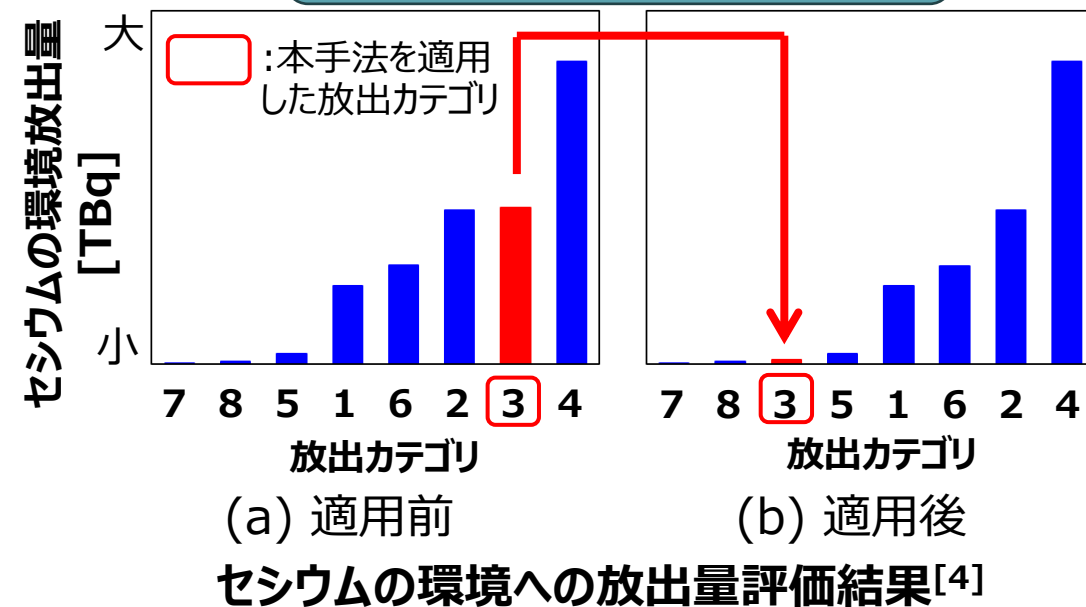
5.研究成果（3）構築した評価手法の性能確認

- レベル2PRAのモデルプラント評価^[6]の一部に、構築した手法を適用し、再評価を実施した
- 格納容器機能喪失頻度及びセシウム環境放出量が相対的に大きい放出カテゴリ*を対象に、再評価を実施した結果、従来の結果から大きくリスク値が変化することを確認した
- この結果は、従来の結果に大きな保守性が含まれ、本研究で構築した手法を適用することで合理的な評価が可能であることを示す

格納容器フラジリティの適用



建屋、格納容器漏えい個所における放射性物質の除去効果



*レベル2PRAで評価対象とする事故シナリオを放射性物質の放出特性に応じて分類したグループ

6. 現状の到達点と今後の取り組み

■ 現状の到達点

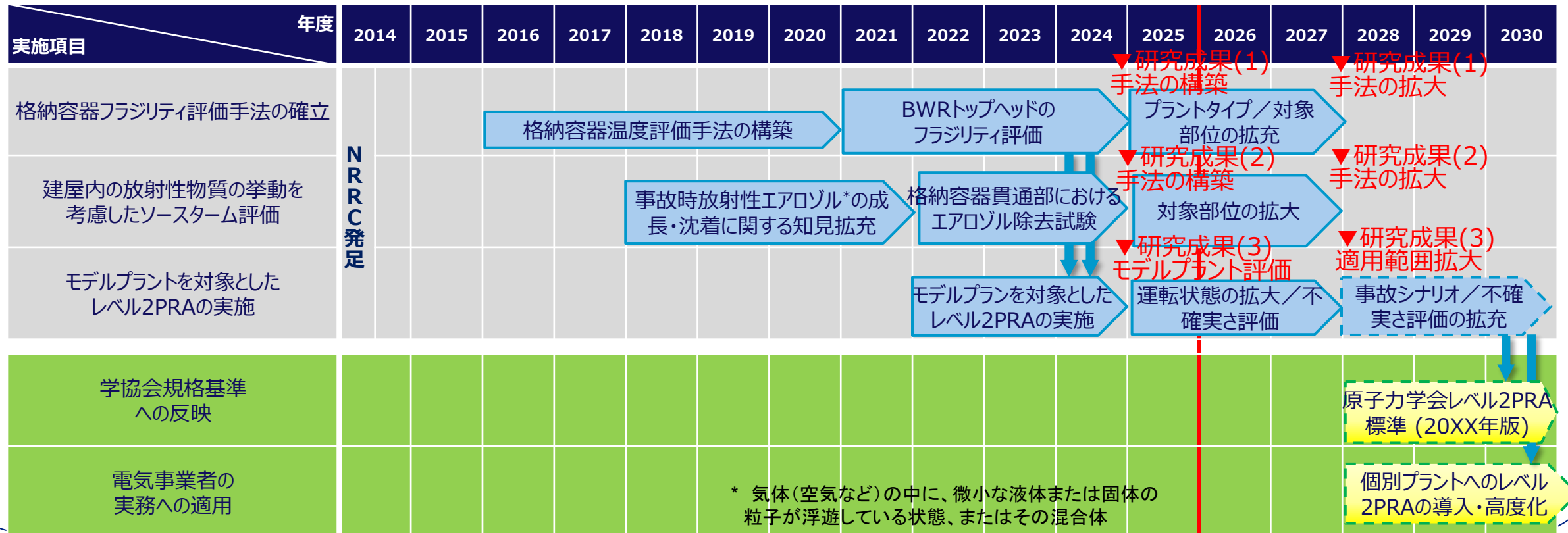
- RIDMにおいて説明性が高いレベル2PRAの実現にあたり、結果に大きな影響度を持つ格納容器フラジリティ及び格納容器漏えい個所における粒子状物質の除去効果に関する評価手法を構築した
- レベル2PRAのモデルプラント評価に構築した手法を適用し再評価を実施した
- 構築した手法により、従来の結果から大きく保守性が改善されることを確認し、レベル2PRAの最良推定値を得られる目途を得た

■ 今後の取り組み

- 電気事業者が本研究で構築した手法を活用していくために、適用範囲（運転モード、事故シナリオ）の拡大を図る
- さらに、合理的なレベル2PRAの実現のために残された以下に取り組む
 - 説明性のあるソースタームの分布幅の定量化手法を確立する
 - シビアアクシデント現象（溶融炉心コンクリート反応、水素爆轟等）及び放射性物質の配管内沈着挙動等の知見拡充に取り組むとともに、分布幅を含む評価手法を確立する

【付録】これまで得られた成果

- 格納容器機能喪失頻度及びソースタームの合理的評価において、結果への影響度が大きい格納容器フラジリティ評価及び建屋内の放射性物質挙動評価について手法を確立し、合理的なレベル2PRA実現するための目途を得た



【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
レベル2 PRAにおける格納容器機能喪失頻度評価やソースターム評価において、簡略的または保守的であるため、発電所のリスクの所在とその大きさを正確に把握するために必要な不確実さを含む最良推定値を得られない課題があった	シビアアクシデント現象発生確率の評価手法の確立	2027年まで実施
	格納容器フラジリティ評価手法の確立	2027年まで実施
	AI・機械学習を活用した事故進展解析手法の高度化	2025年から実施
	出力運転中を対象としたレベル2PRAのモデルプラント評価	2030年に完了
	停止時を対象としたレベル2PRAのモデルプラント評価	2030年に完了
	建屋内エアロゾル状放射性物質の挙動評価手法の確立	2025年に完了
	プールスクラビングによる放射性物質の除去効果の確立	2027年まで実施
	格納容器漏えい個所におけるエアロゾル除去効果の評価手法の確立	2027年まで実施
	配管内エアロゾル除去効果の評価手法確立	2025年から実施
	出力運転中を対象としたレベル2PRAのモデルプラント評価	2030年に完了
	停止時を対象としたレベル2PRAのモデルプラント評価	2030年から実施

【参考】参考文献・資料

- [1] 東京電力福島原子力発電所における事故調査・検証委員会、「国会事故調 報告書」、平成24年9月12日
- [2] 日本原子力学会標準 原子力発電所の出力運転状態を対象とした確率論的リスク評価に関する実施基準（レベル2 PRA編）：2022（AESJ-SC-RK012：2022）
- [3] 原子力発電技術機構、「重要構造物安全評価（原子炉格納容器信頼性実証事業）に関する 総括報告書」、平成15年3月
- [4] 中村、渡辺、佐竹、西 他、「出力運転時のレベル2 PRA高度化（シリーズ発表4件）」、1I09～1I12、日本原子力学会2025年秋の大会、2025年9月10日～12日、北九州国際会議場
- [5] K. Nakamura, “The development of analytical models for realistic evaluation of fission products release and establishment of the foundation to implement level 2 PRA”, ICONE29, Shenzhen, China and Virtual August 8-12, 2022
- [6] 電中研報告 NR25010「津波PRAレベル1・レベル2の一貫した津波PRAに関する評価技術の開発」
- [7] 電中研報告 NR24012「蒸気発生器伝熱管破断時の注水スクラビングによるFP低減効果を評価するためのプロセス構築－APIを用いたSGスクラビングモデルのMAAP実装－」