

NRRCシンポジウム2026 津波PRA手法の開発と実機の適用状況

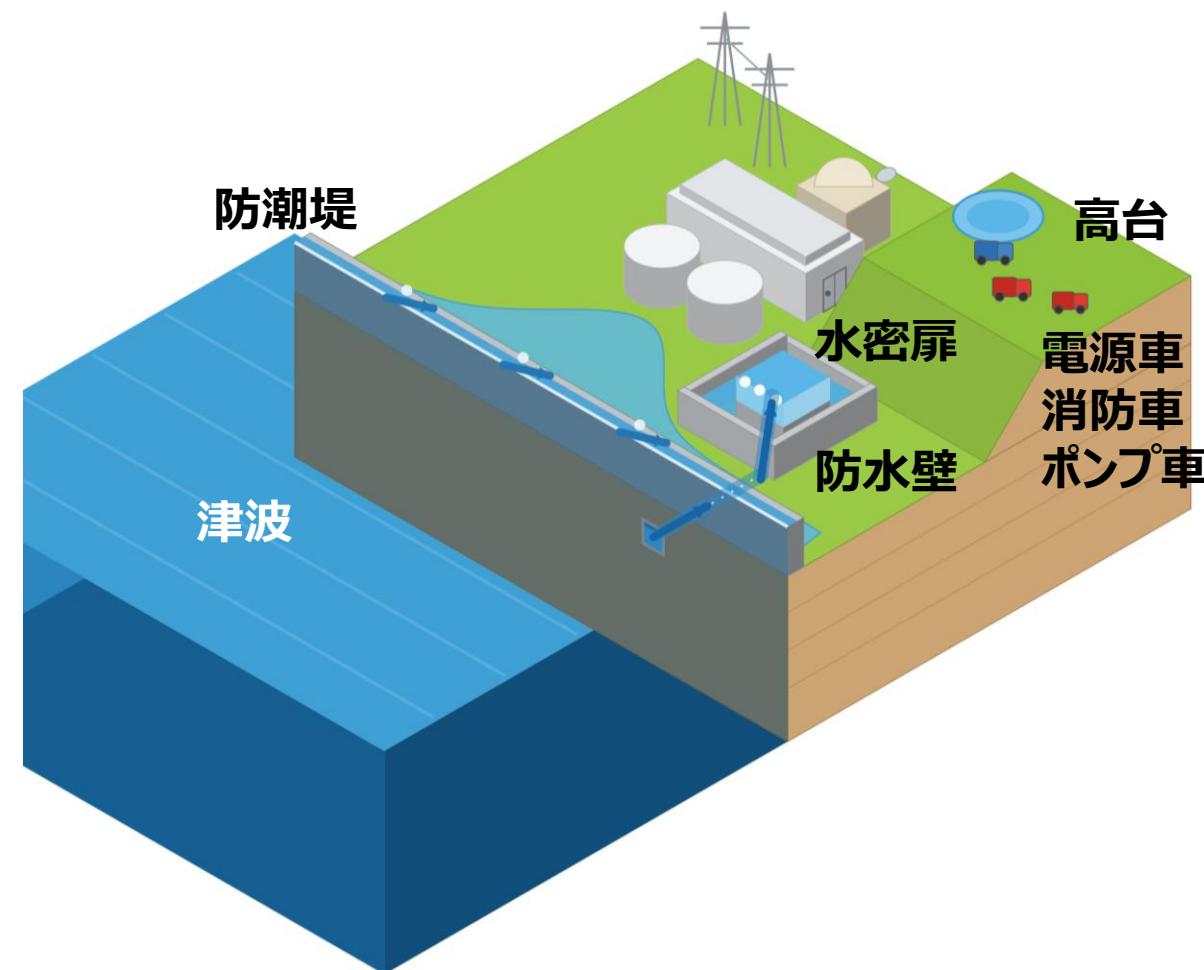
原子力リスク研究センター
木原 直人

目 次

1. 津波PRAの概要
 2. 津波PRAモデルの構成
 3. 津波PRAの背景と課題
 4. 課題解決への取り組み
 5. 研究成果
 - (1) サイトの特徴を反映可能な敷地内浸水評価手法の提案
 - (2) 現実的な事故シナリオに対する津波PRAの実施
 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.津波PRAの概要

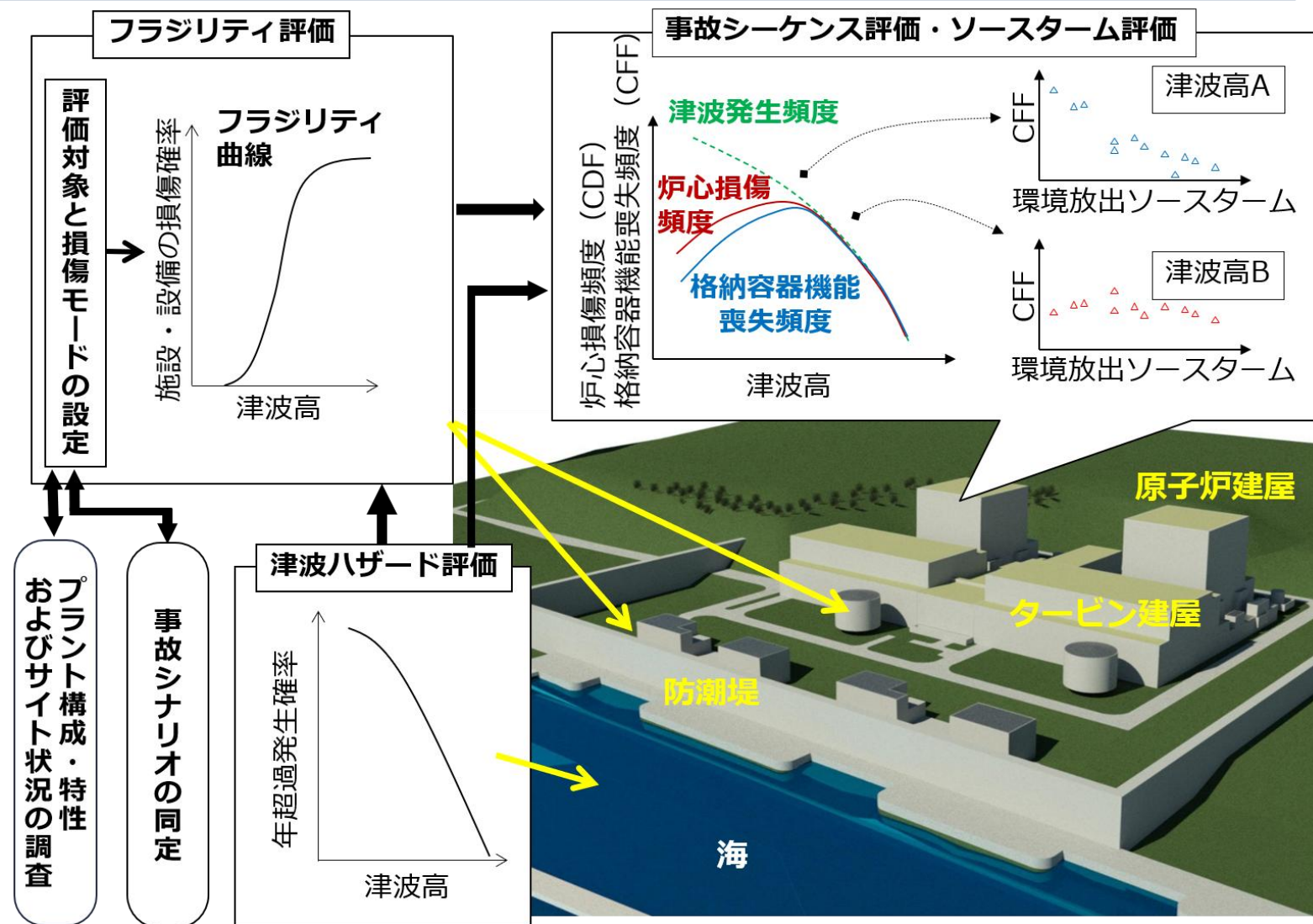
- 津波PRAは地震PRAに類似した枠組みで実施される
- 種々の不確かさを体系的に考慮して、施設の供用期間中にサイトに襲来する可能性がある津波によって引き起こされるプラントのリスク（炉心損傷頻度など）を評価する
- 設備や機器の損傷の評価に当たっては、津波特有の事項として、敷地内および建屋内の浸水による被水・没水による電気機器の機能損傷や、津波波力作用や漂流物衝突によるタンク等の設備の物理損傷を考慮する。



津波PRAで対象とする津波による敷地浸水と津波対策のイメージ

2.津波PRAモデルの構成

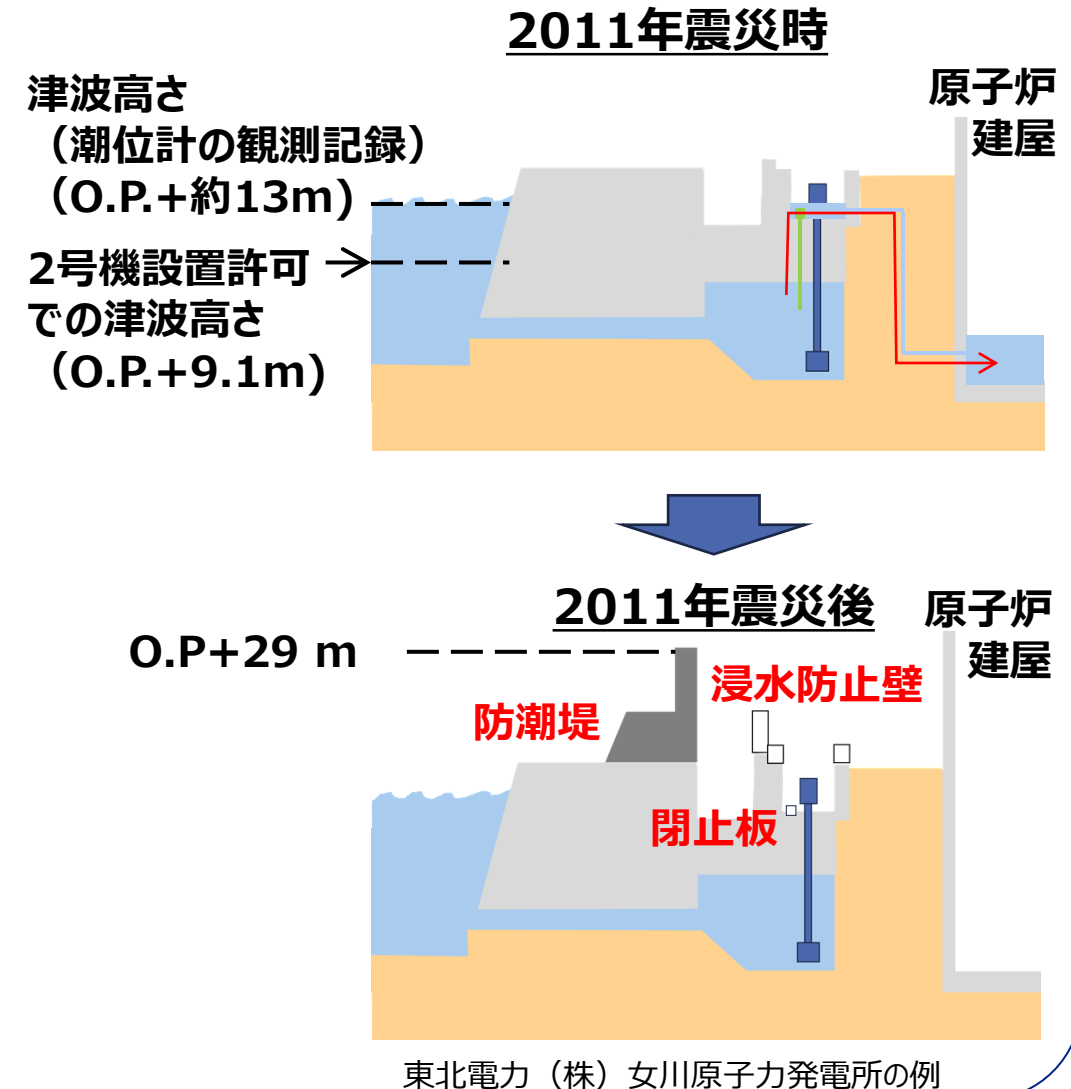
- ①敷地前面に到達する津波の高さと頻度の関係を評価する**津波ハザード評価**
- ②津波防護施設や屋外機器、建屋内機器が津波によって損傷する確率を評価する**脆弱性評価**
- ③津波によるプラントのリスク（炉心損傷頻度など）を評価する**事故シーケンス評価**
- ④格納容器の機能喪失により放射性物質が格納容器あるいは原子炉建屋から放出される際の、放出タイミング、放出される物質の核種・量を推定する**ソースターム評価**



3.津波PRAの背景と課題

■なぜ津波PRAが必要か

- 2011年東北地方太平洋沖地震津波による福島第一原子力発電所の事故の**教訓**として、**津波に対するリスク評価、および、想定を超える津波に対する対策が不十分**であったことが示された
- 津波に対するプラントの脆弱点を把握し、安全性の向上に資するリスク情報を取得するため、津波PRAを実施し、これにより津波に対する対策の強化が図られる
- 我が国は世界でも有数な高地震帯に位置しており、原子力発電所は津波の影響を受けやすい沿岸部に立地している。そのためリスク情報／インサイトを得るためには、**各プラントの立地の特徴を踏まえた、現実的な評価を可能とする評価技術の整備が必要**である



3.津波PRAの背景と課題

■背景

- 2011年以前に津波PRAが実務実施された事例はなかった
- 福島第一原子力発電所の事故を機に、内的事象PRAや地震PRAを参考にして日本原子力学会による津波PRA標準が整備されたが、津波PRAの研究開発の歴史は浅く、評価手法が未成熟であった
- 実務においても津波PRAが実施されるようになったが、防潮堤や水密扉などの津波防護施設や浸水防護施設の効果が考慮されていない簡便な評価であった

■解決すべき課題

- RIDMで活用するにあたって、評価が保守的であることや各原子力発電所の立地の特徴を踏まえた現実的な評価でないことなどの課題があった

4.課題解決への取り組み

■現実的なリスクや詳細な事故シナリオを把握できる評価に向けて、プラントの特徴を踏まえた現実的な津波PRA手法の構築と評価事例の蓄積が必要

- 従来の津波PRAでは、主要評価（ハザード評価、フラジリティ評価、事故シーケンス評価）がそれぞれ個別独立に実施され、評価間で共有される情報が限定的であり、例えば、ハザード評価における不確かさである波源の違いが、敷地内の浸水や建屋内の浸水の評価に反映されていなかった
- 防潮堤や水密扉などの津波防護施設や浸水防護施設の効果を考慮せず、建屋内の機器に対しても敷地浸水高さを基準に機器損傷が判定され、建屋内に浸水すると炉心が損傷するなど、簡便な評価であった
- 建屋内の浸水が放射性物質の移行に対して与える影響を考慮したレベル2 PRAの実施経験がなかった

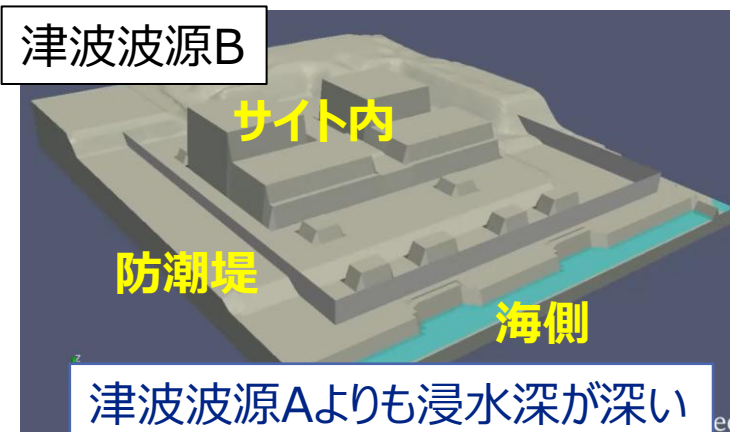
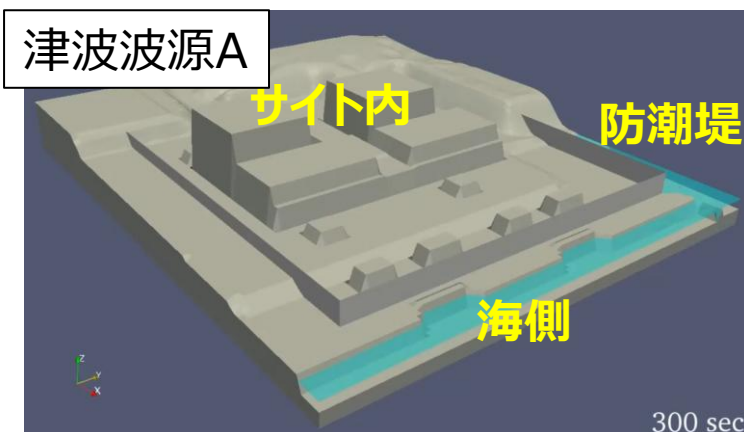


- ハザード評価とフラジリティ評価の接続部となる、サイトの特徴を反映可能な敷地内浸水評価手法の提案 ⇒【研究成果（1）】
- 現実的な事故シナリオに対するレベル1～レベル2津波PRAの実施による知見の蓄積 ⇒【研究成果（2）】

5.研究成果（1）サイトの特徴を反映可能な敷地内浸水評価手法の提案

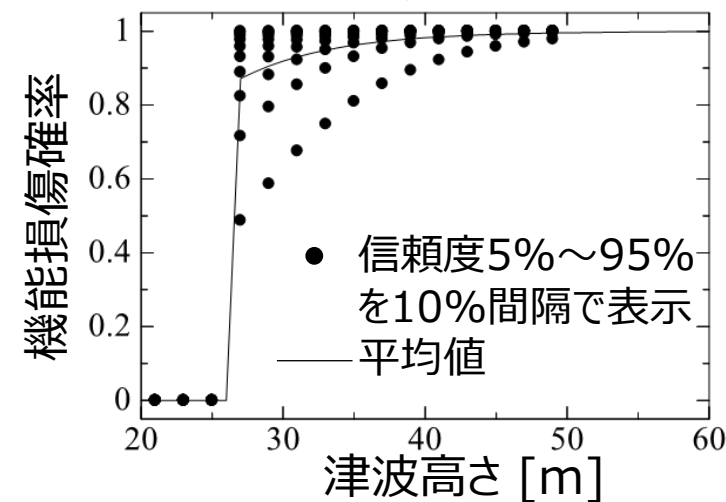
●設計基準を超える津波による敷地内の浸水に対して、防潮堤などの津波防護機能を考慮して、ハザード評価～フラジリティ評価を接続する手法を提案^[1]

- ✓敷地内浸水評価を通じてハザード評価とフラジリティ評価が接続する
- ✓敷地内浸水シミュレーションを実施することで、津波PRAの不確かさのうち、占める割合が支配的な津波ハザード評価の情報を、より詳細にフラジリティ評価や事故シーケンス評価に反映できる
- ✓また、津波防護機能や敷地内配置を考慮した敷地内浸水評価結果を後続の評価に反映できる

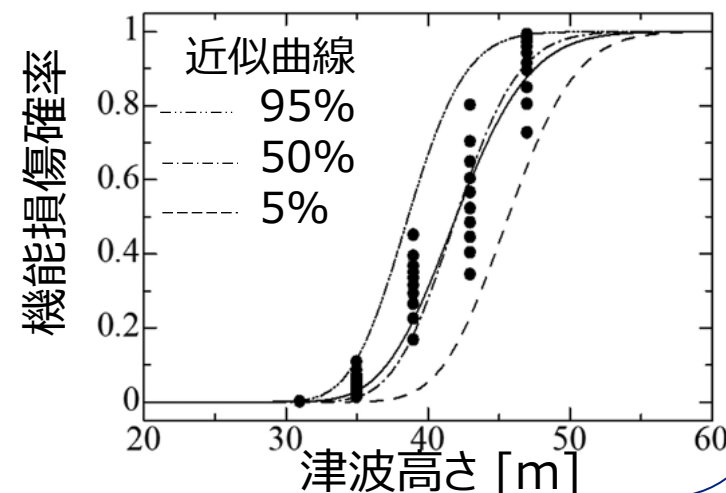


敷地内浸水シミュレーション
敷地前面での津波高さが同じだが、津波波源が異なる

敷地前面津波高さに基づく敷地内浸水評価



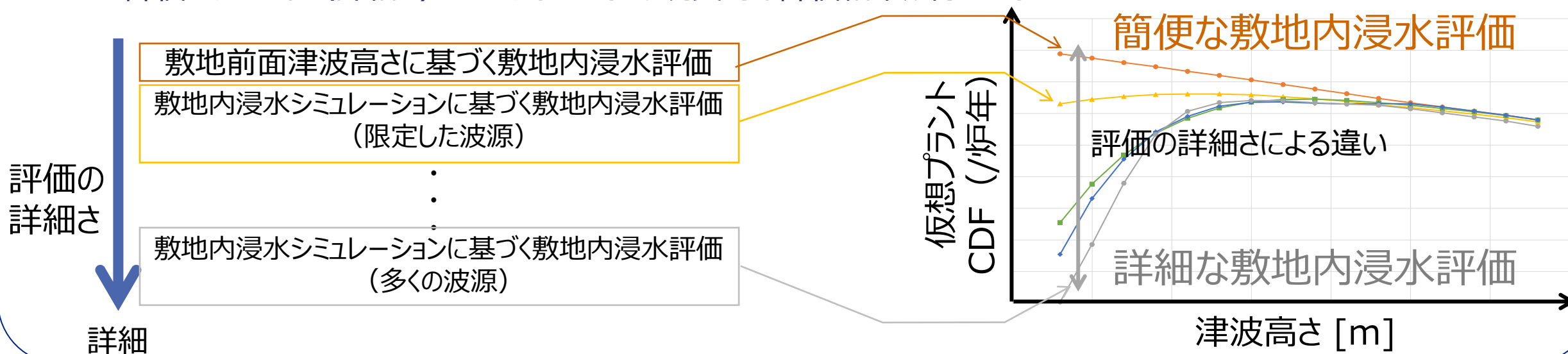
敷地内浸水をシミュレーションした評価



5.研究成果（1）サイトの特徴を反映可能な敷地内浸水評価手法の提案

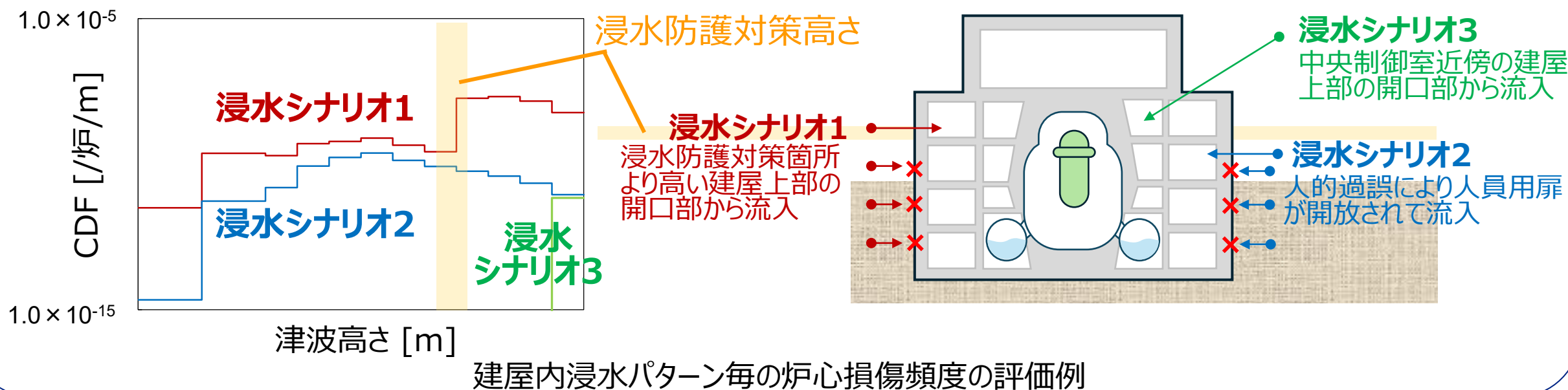
■想定される津波リスクレベルに応じて評価の詳細さを選択するGraded Approachに基づくリスク評価のフレームワークを提案〔2〕

- ✓ 日本国内の原子力発電所では、津波のハザードレベルやリスクレベルがサイト間で顕著に異なる
- ✓ サイトの津波ハザードレベルや想定されるリスクレベル、また、津波PRAを通じて得たいリスク情報を踏まえて、評価の詳細さを選択することが合理的。（⇔ 簡便な評価によって推定された津波リスクが低いのであれば、詳細に評価するのは非合理的）したがって、Graded Approachに基づくリスク評価のフレームワークが効果的
- ✓ 敷地内浸水シミュレーションを用いない簡便な手法では低い津波高さにおいてCDFが高めに評価され、敷地内浸水評価のグレード（詳細さ）を上げることでより現実的な評価結果が得られる



5.研究成果（２）現実的な事故シナリオに対する津波PRAの実施

- 実プラント情報を活用してサイトや主要な建屋への津波浸水経路と起因事象を踏まえてシナリオ分類したレベル１～レベル２津波PRAを実施^[3]
 - 建屋内の浸水シナリオを詳細化させることにより、従来の津波PRAでは特定できなかった下記を考慮したリスク情報（リスク重要度の高い機器、起因事象、シナリオ）を明らかにすることが可能となる
 - 浸水経路
 - 建屋内の浸水防護対策の効果

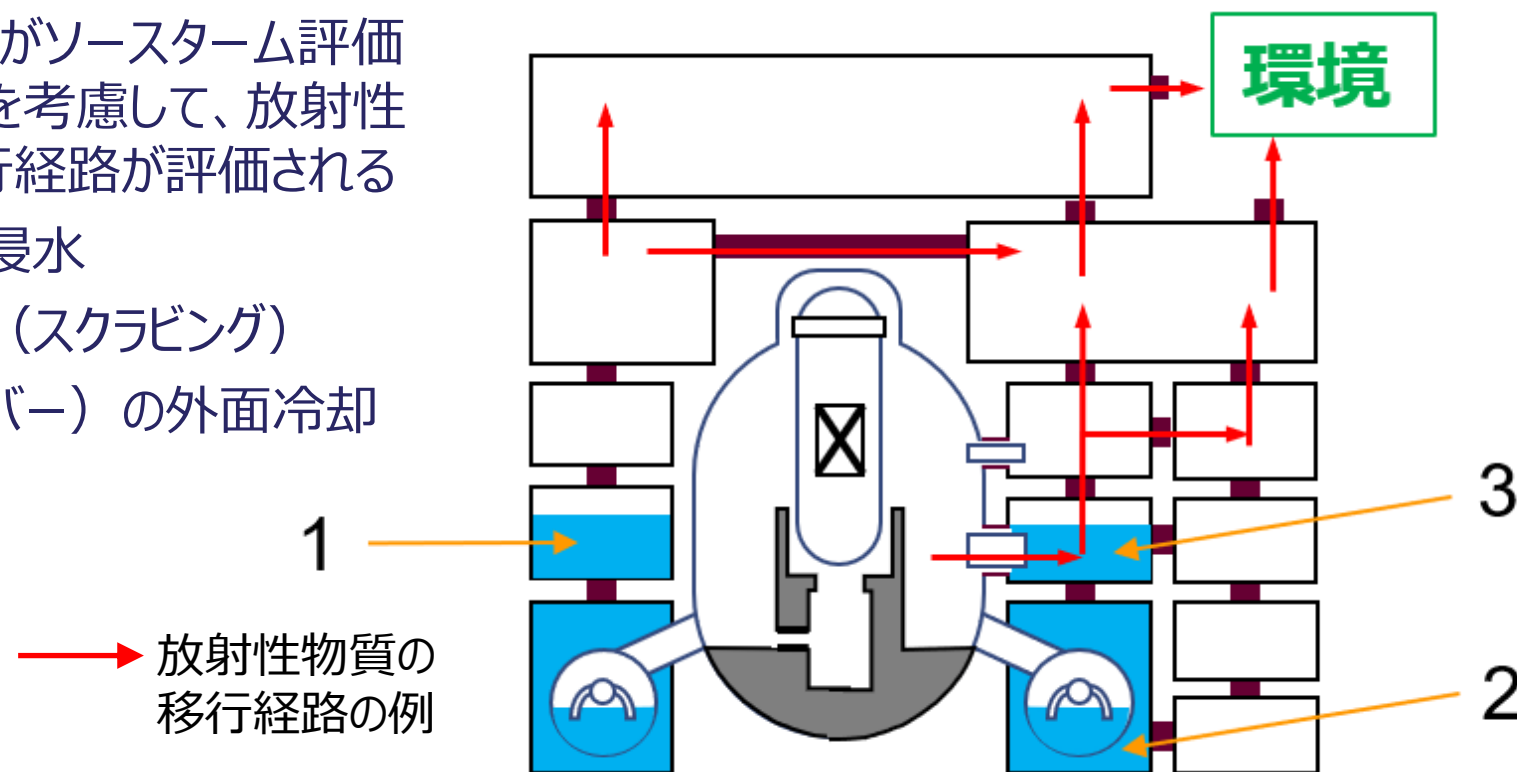


5.研究成果（2）現実的な事故シナリオに対する津波PRAの実施

- 建屋内の浸水シナリオを反映させたレベル2PRAによりプラント固有の評価とすることで、より現実的な評価を実施

詳細に評価された建屋内浸水状況がソースターム評価にも反映され、下記現象による影響を考慮して、放射性物質の放出タイミング、放出量、移行経路が評価される

1. 建屋内浸水解析結果に基づく浸水
2. 海水による放射性物質の捕獲（スクラビング）
3. 格納容器（サプレッションチェンバー）の外面冷却



原子炉建屋内浸水を考慮したソースターム評価のイメージ

6. 現状の到達点と今後の取り組み

■ 現状の到達点

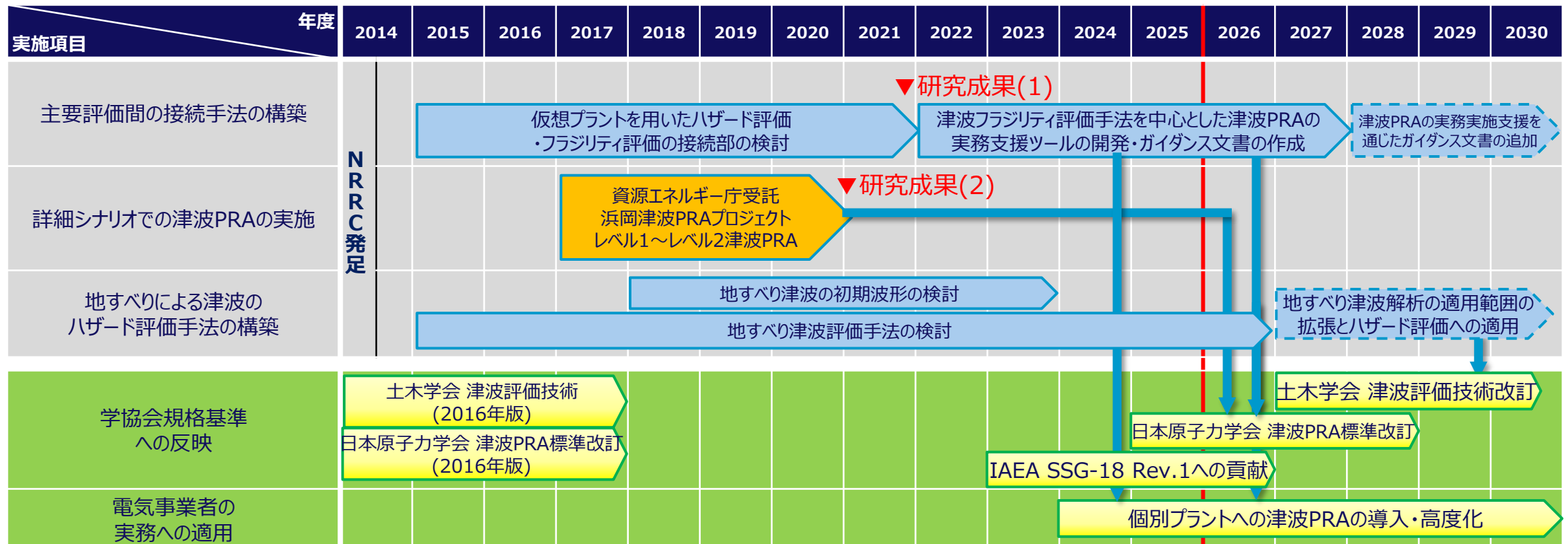
- サイト/プラントの特徴を踏まえて、より現実的にリスクや詳細な事故シナリオを把握できるレベル1～レベル2津波PRAの実施が可能となった

■ 今後の取り組み

- 津波PRAの知見や研究成果が取り纏められたガイダンス文書の作成（日本原子力学会）
- 地すべり津波の確率論的ハザード評価手法の体系化（土木学会）^[4]
- フラジリティ評価における津波漂流物の衝突影響および建屋内浸水の詳細評価手法の開発

【付録】これまで得られた成果

- 敷地内浸水評価手法の導入によるハザード評価と後続評価間の接続手法の構築
- サイトや主要な建屋への津波浸水経路と起因事象を踏まえてシナリオ分類した津波PRA評価を実施
- 検討を通じて蓄積された知見を電中研報告等を通じて事業者と共有



【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
主要評価の 接続手法	敷地内浸水の評価手法の構築	2021年に完了
	建屋内浸水の解析技術の高度化	実施中
地すべり津波 ハザード評価	地すべり津波の確率論的ハザード評価手法の構築	実施中
詳細な事故シナリオ の津波PRA	モデルプラントに対する広範な事故シナリオを 対象としたレベル1～レベル2津波PRAの実施	2020年に完了



完了した内容は、日本原子力学会の津波PRA標準や、
土木学会の津波評価技術の改訂に反映させる計画

【付録】成果に係る主な参考文献

【ハザード評価～フラジリティ評価・事故シーケンス評価間の接続】

- [1] Takahashi et al., Uncertainty quantification of tsunami parameters for tsunami fragility assessment based on tsunami hazard assessment and inundation simulation, PSAM, (2020)
- [2] Kihara et al., Tsunami flooding analysis graded-approach framework for tsunami probabilistic risk assessment, J. Nucl. Sci. Technol., 60, 1454–1480 (2023)

【津波PRA】

- [3] 山田ら, 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, 電中研報告, NR25010, (2026)

【ハザード評価】

- [4] 土木学会 原子力土木委員会 津波評価小委員会, 原子力発電所の津波評価技術2016, (2016)