

NRRCシンポジウム2026

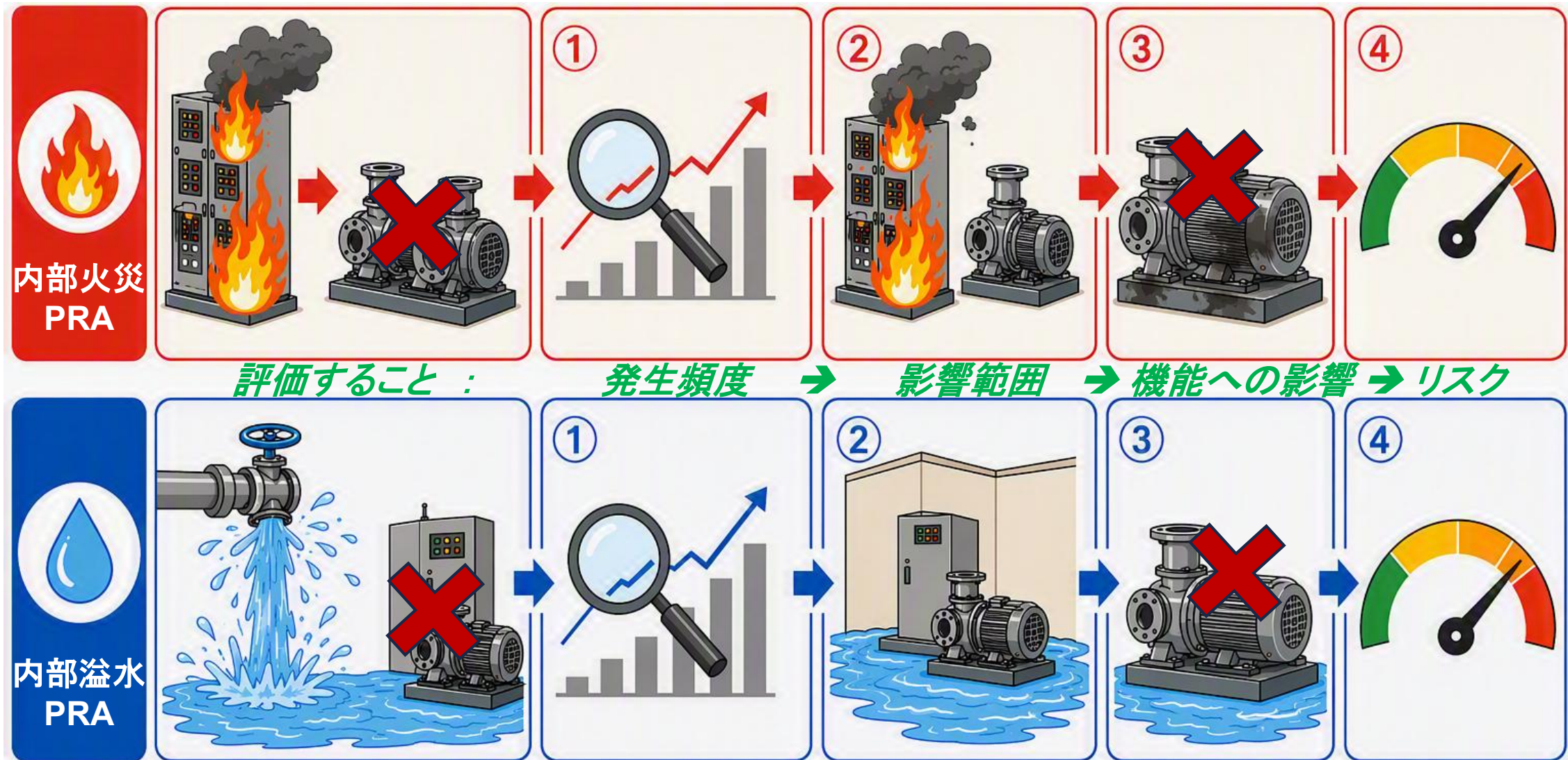
内部火災PRA、内部溢水PRA手法の開発と実機の適用状況

原子力リスク研究センター
鈴木 求

目 次

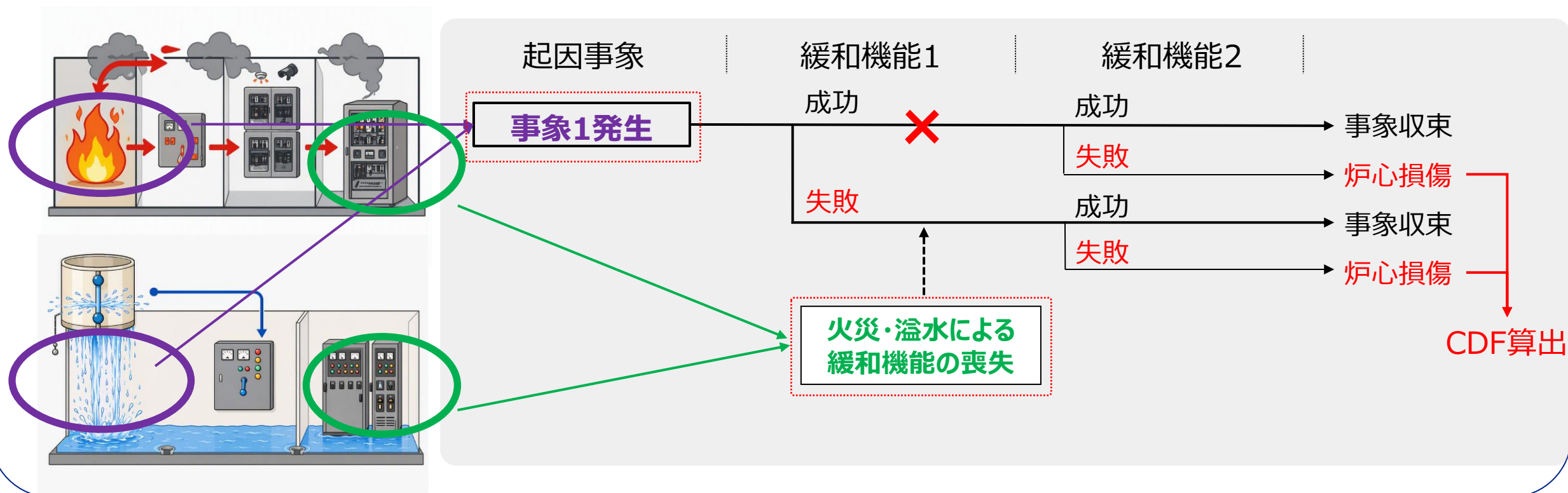
1. 内部火災・内部溢水PRAの概要
 2. 内部火災・内部溢水PRAモデルの構成
 3. 内部火災・内部溢水PRAの背景と課題
 4. 内部火災PRAの課題解決への取り組み
 5. 内部火災PRAの研究成果
 - (1) PRA実施ガイドの策定
 - (2) 火災発生頻度一般分布の整備
 - (3) PRAに必要な各種評価手法の整備
 - (4) 実機情報に基づいた評価
 6. 内部火災PRAの現状の到達点と今後の取り組み
 7. 内部溢水PRAの課題解決への取り組み
 8. 内部溢水PRAの研究成果
 - (1) ガイド作成に向けた実機情報に基づく評価
 - (2) PRAに必要な各種評価手法の整備 (A)
 - (3) PRAに必要な各種評価手法の整備 (B)
 - (4) PRA実施ガイドの策定
 9. 内部溢水PRAの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. 内部火災・内部溢水PRAの概要



2. 内部火災・内部溢水PRAモデルの構成

- 内部火災PRAモデル、内部溢水PRAモデルは、内的事象PRAモデルをベースとして、火災事象特有の考慮事項（火災による損傷、人間信頼性）、溢水事象特有の考慮事項（溢水による没水、スプレーによる被水、蒸気影響、人間信頼性）を反映
- 火災発生頻度は火災事例データ、溢水発生頻度は配管破断頻度データに基づいた数値を用いる



3. 内部火災・内部溢水PRAの背景と課題

■背景

- 内部火災と内部溢水は、原子力発電所において比較的风险が高い事象であることが、海外の知見として認識
- 米国では米国原子力学会のPRA実施基準^[1]に加え、産業界からガイドライン（内部溢水PRA^[2]：2009年、内部火災PRA^[3]：2012年）が発行
- 日本では日本原子力学会の実施基準（内部溢水PRA^[4]：2012年、内部火災PRA^[5]：2014年）が発行
- 日本においては実践的な手法はまだ成熟していない状況であった

■解決すべき課題

- 国内プラント状況を反映し、効果的・効率的に内部火災・内部溢水PRAを実施するためのガイドラインと関連するデータや知見・実践的な手法が整備されていなかった

4. 内部火災PRAの課題解決への取り組み

- **内部火災PRAガイドの策定**

- 国内プラントの内部火災PRAに向けた、PRA実施ガイドを策定

⇒【研究成果（1）】

- **火災発生頻度の整備**

- 国内事例に基づくパラメータを用いた評価を可能とするため、国内プラントのデータを収集し火災発生頻度を推定

⇒【研究成果（2）】

- **実践的な評価に向けた各種手法の整備**

- 火災モデルの整備
- 火災試験によるデータの蓄積

⇒【研究成果（3）】

- **実機情報に基づく評価**

- ガイドへのフィードバックの知見を得るための実機情報に基づく評価

⇒【研究成果（4） 進行中】

- **PRAガイドの更新**

⇒【今後の取り組み】

5.内部火災PRAの研究成果（1）PRA実施ガイドの策定

- 国内原子力発電プラントの火災PRAの効果的・効率的な実施に資する内部火災PRAガイド^[6]の策定
 - 米国の包括的な火災PRAガイド（NUREG/CR-6850）を出発点として、発刊時までの最新の技術的知見を反映した実践的な火災PRAガイド

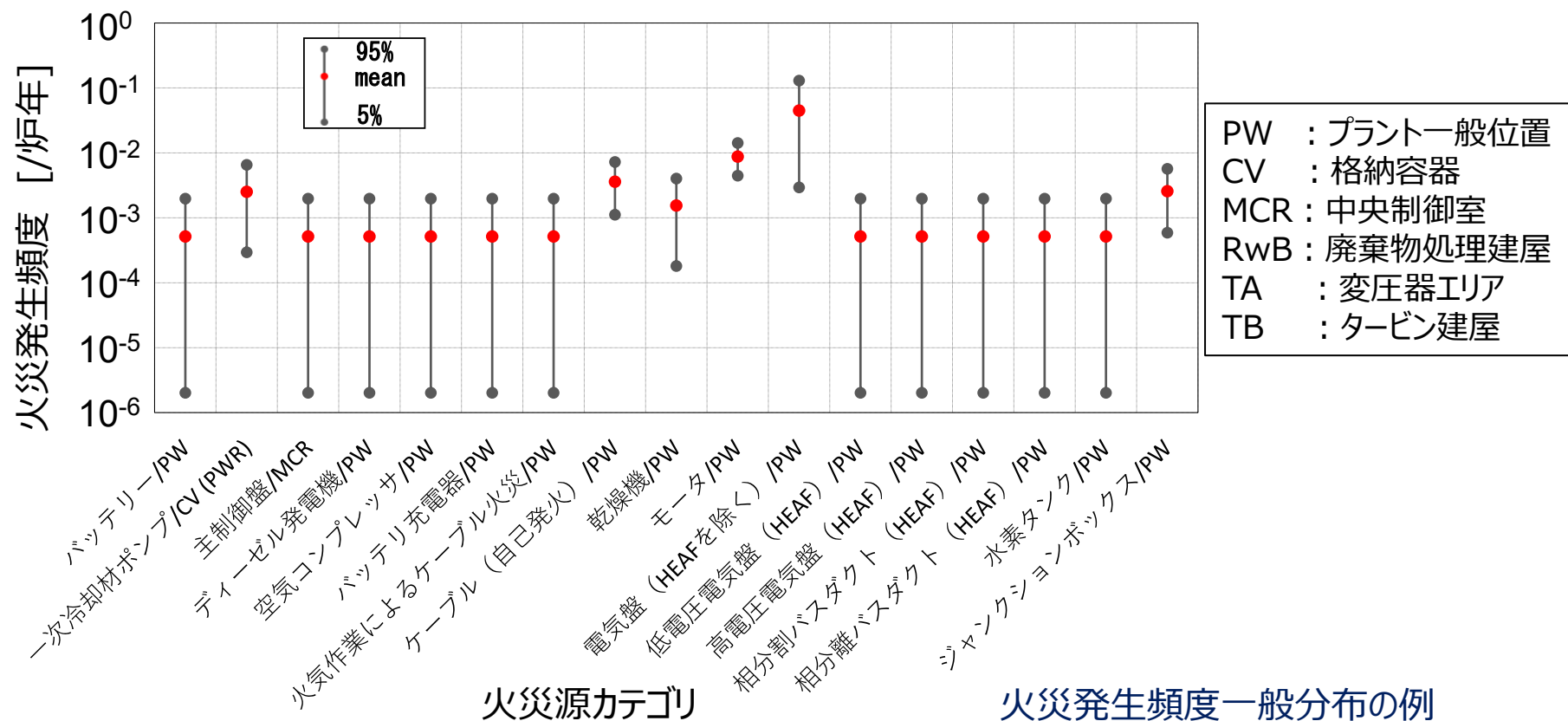
フェーズA プラント応答モデル及びシナリオを構築	タスク 1：火災PRAプラント応答モデル タスク 2：火災コンパートメントの定義 タスク 3：人間信頼性解析 タスク 4：火災PRA機器リスト タスク 5：回路解析及びケーブル同定 タスク 6：定性的スクリーニング タスク 7：人的過誤確率の初期値設定 タスク 8：火災発生頻度評価 タスク 9：評価・モデルデータの確認及び全損仮定による定量評価
フェーズB 火災リスクの定量化	タスク10：中央制御室解析 タスク11：鋼構造物損傷解析 タスク12：マルチ・コンパートメント解析 タスク13：リスク上重要火災シナリオの同定 タスク14：火災モデリング タスク15：詳細人間信頼性解析 タスク16：回路故障モード尤度解析 タスク17：更なる詳細解析の必要性判断 タスク18：火災リスクの定量化 タスク19：不確かさ解析及び感度解析 タスク20：火災PRAの文書化



5.内部火災PRAの研究成果（2）火災発生頻度一般分布の整備

・国内データに基づく火災発生頻度一般分布^[7]の公刊

- 国内原子力発電所における火災事例情報を収集・分析
- 出力運転時に内部火災PRAに適用可能な火災発生頻度一般分布を定量化
- 米国EPRIの手法を適用した場合と顕著な差はないことを確認



電力中央研究所報告

国内原子力発電プラントにおける
火災発生頻度一般分布の推定

研究報告 : NR21003

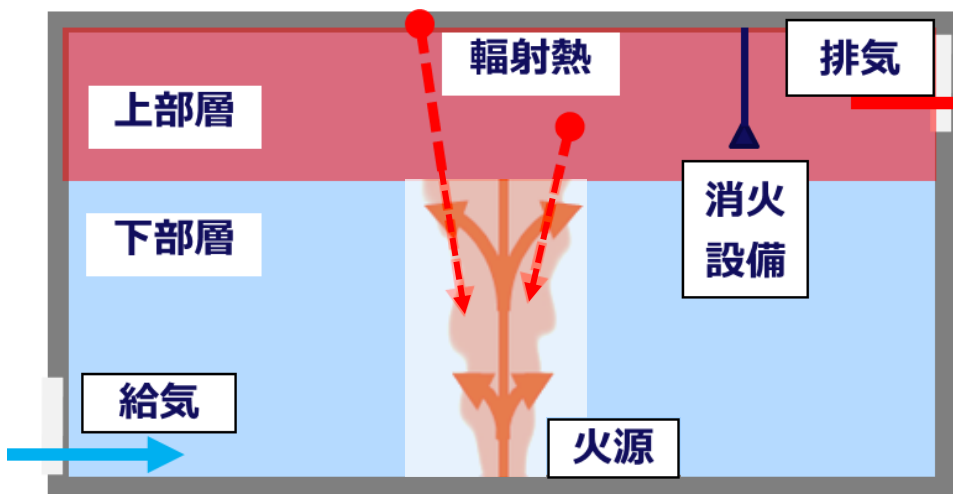
2022年3月

電力中央研究所

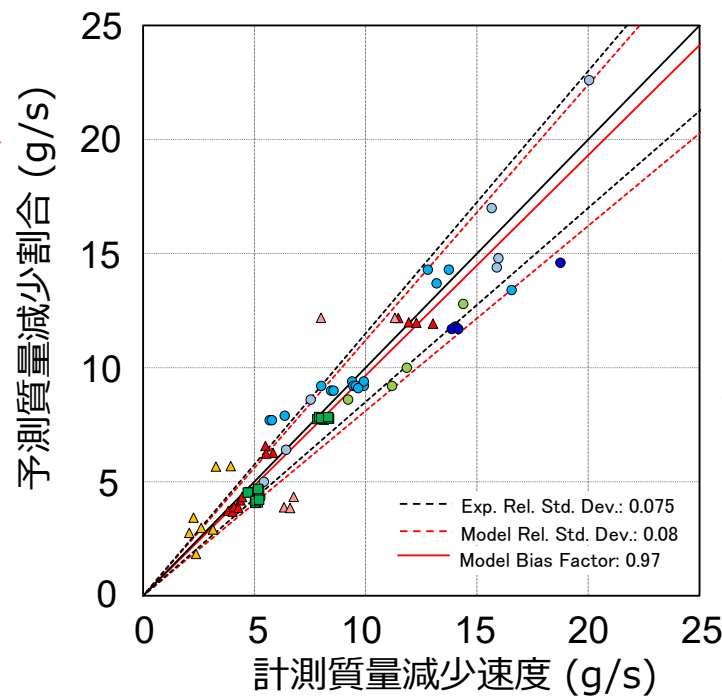
5.内部火災PRAの研究成果（3）PRAに必要な各種評価手法の整備

原子力発電所における機械式空調の換気制限下における火災進展予測を行うための計算コードBRI2-CRIEPIの開発^[8]

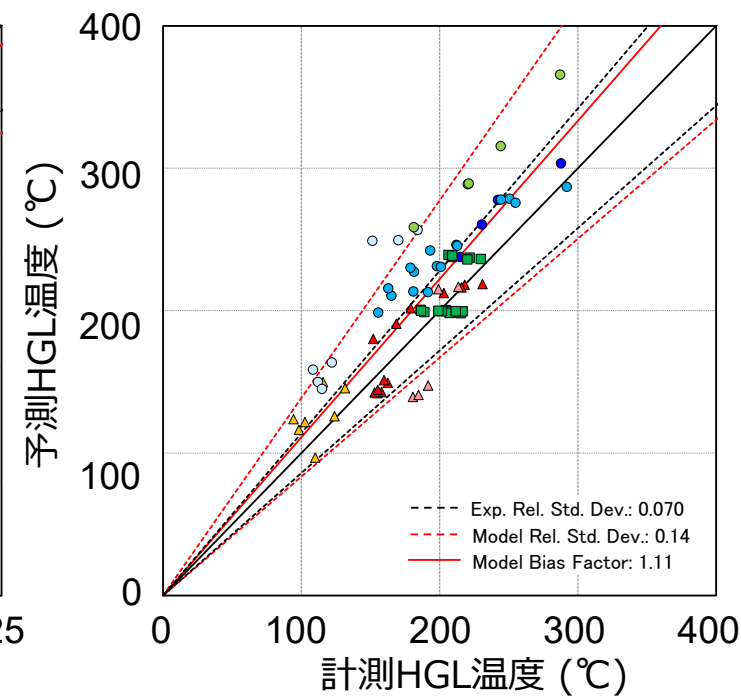
- 二層ゾーンモデルを採用したことにより高速に火災進展予測を実施可能
- OECD/NEAなど火災試験に基づく検証及び妥当性確認（V&V）を広く実施



二層ゾーンモデルコードの概念図



質量減少速度(MLR)

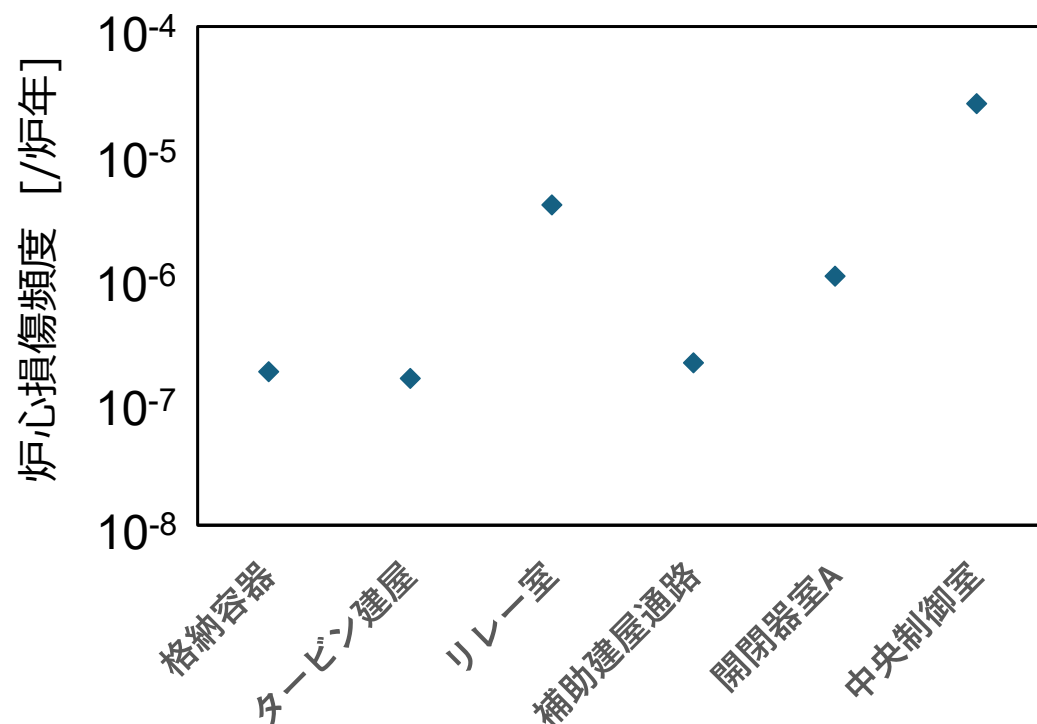


高温層温度 (HGL-Temperature)

BRI2-CRIEPIのV&V結果^[9]

5.内部火災PRAの研究成果（４） 実機情報に基づいた評価

- 策定した内部火災PRAガイドを用い、実機情報に基づいた内部火災PRAを実施中[10]
 - 全損評価解析*・詳細解析**の2段階で評価のタスクを整理
 - 詳細解析で定量化したCDFから寄与が大きい火災源や火災シナリオを同定し、ガイドへの知見を取得



*全損評価解析：

火災コンパートメントにおいて発生した火災により火災コンパートメント内部の全てのケーブル及び機器が損傷すると仮定した解析

**詳細解析：

火災コンパートメントにおいて発生した火災の位置・発熱速度、影響を受けるケーブル及び機器の位置特性などを考慮した詳細な解析

実機情報に基づいた内部火災PRAにおけるCDF（文献[10]を基に作成）

6. 内部火災PRAの現状の到達点と今後の取り組み

■現状の到達点

- 内部火災PRA実施ガイドを策定し、内部火災PRAを実施する体系が整いつつある
- 一方で、内部火災PRAの実施に係るリソースが膨大であることが確認されており、課題となっている

■今後の取り組み

- 内部火災PRAガイドの次回更新（～2029年度）
 - 実機プラントにおける適用結果、国内外の最新知見を反映
- 実機情報に基づく評価の知見を踏まえた効率化の検討（～2029年度）
 - 適用結果を踏まえたガイド記載内容の過不足を踏まえて次回改訂版に反映

7. 内部溢水PRAの課題解決への取り組み

- **実機情報に基づく評価**

- ガイド作成の知見を得るための実機情報に基づく評価

⇒【研究成果（１）】

- **実践的な評価に向けた各種手法の整備**

- 溢水事象を停止する作業員の操作の成功／失敗を評価する手法
- 建屋内で溢水が周囲の機器に対して影響が及ぶ範囲を評価する手法
- 建屋内の区画間の扉の水密性能を評価する手法
- 溢水の伝播による建屋内の各区画の水位を評価する手法

⇒【研究成果（２）】

⇒【研究成果（３）】

- **内部溢水PRAガイドの策定**

- 国内プラントの内部溢水PRAに向けた、PRA実施ガイドを策定
- 実機プラントにおけるPRA実施ガイドの適用

⇒【研究成果（４）】

⇒【今後の取り組み】

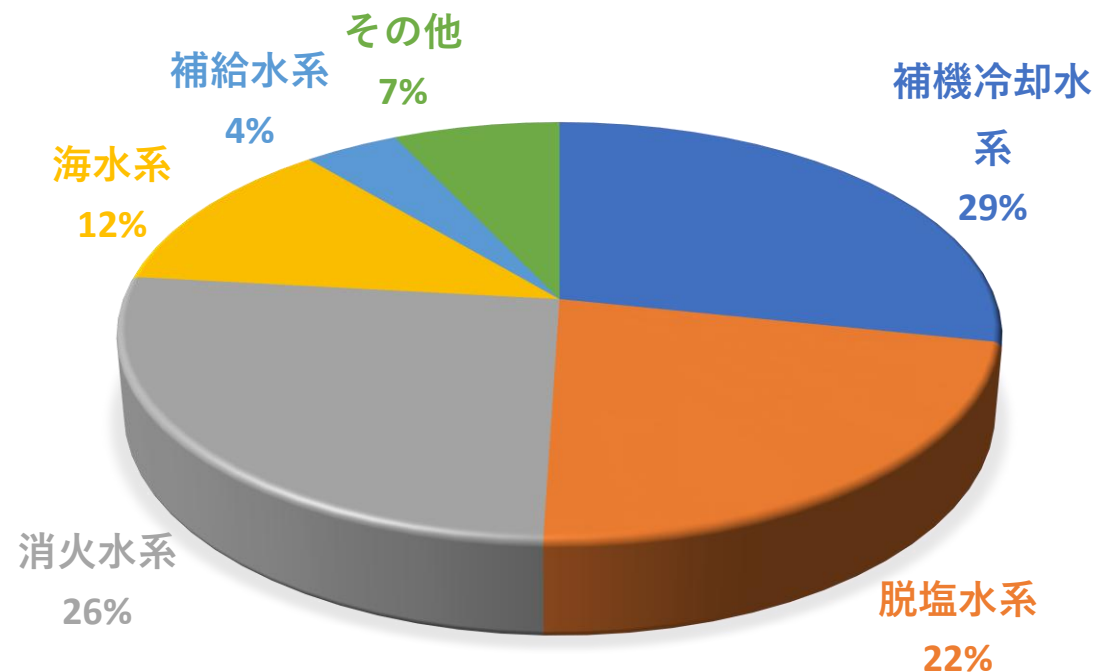
- **溢水発生頻度の整備**

- 国内事例に基づくパラメータを用いた評価を可能とするため、国内プラントのデータを収集し溢水発生頻度を推定

⇒【今後の取り組み】

8.内部溢水PRAの研究成果（１）ガイド作成に向けた実機情報に基づく評価

- 内部溢水PRAガイド作成に向けた知見を得るために実機情報に基づく評価^[11]を実施
 - 米国の手法と溢水発生頻度を参照し、国内実機情報に基づいた内部溢水PRAを実施
 - 定性解析・スクリーニング解析・詳細解析の3段階で評価のタスクを整理
 - 詳細解析で定量化したCDFへの寄与が大きい溢水源や溢水シナリオを同定し、ガイドへの知見を取得
- ガイド作成に向けた教訓
 - A) “Plant as is”に関する情報を把握するためのワークダウンの徹底
 - B) 溢水隔離及びプラントの安全な停止に関するHRA
 - C) 内部溢水PRAの効率化に向けたスクリーニング分析
 - D) 溢水発生源の包括的な特定
 - E) 現実的な溢水の伝播経路
 - F) 飛散シナリオにおける影響範囲（ZOI）



実機情報に基づく内部溢水PRAによりCDFに対する
溢水源の寄与割合（文献[11]を基に作成）

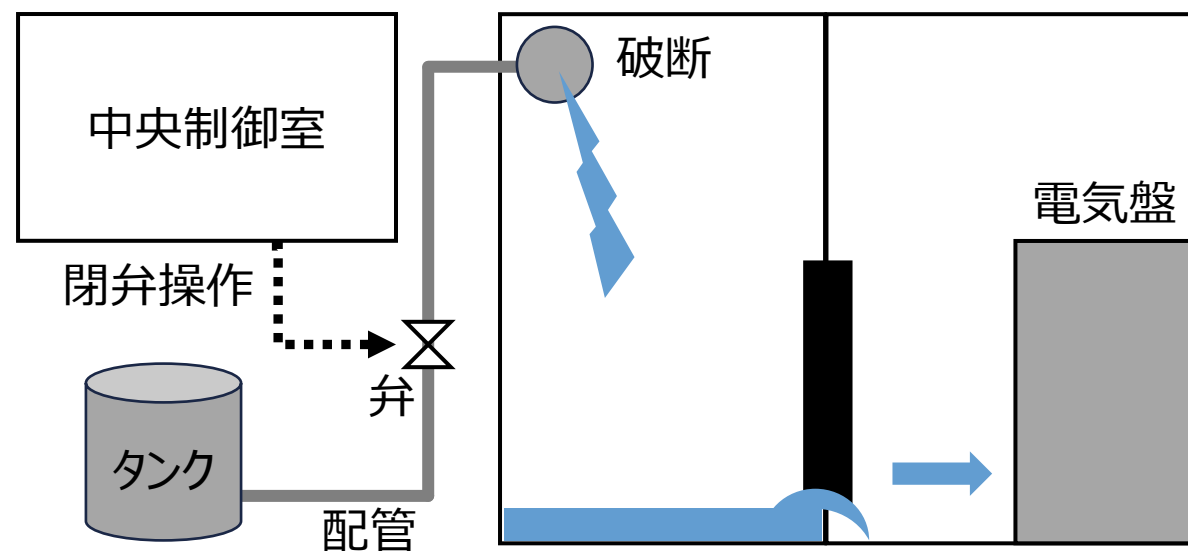
8.内部溢水PRAの研究成果（2）PRAに必要な各種評価手法の整備（A）

・内部溢水事象における特有の対応操作に関するHRA手法を整備

- 当所の詳細人間信頼性評価^[12]の知見を活用し、内部溢水事象における特有の対応操作（例：溢水停止操作）について溢水事象発生に対する運転員の認知／診断タスクに対する評価、溢水停止操作の手順作成から弁閉操作等の実行タスクに対する評価を実施
- 特有の対応操作に関する人的過誤確率（HFE）を推定

溢水停止操作の流れ

- ① 内部溢水発生の可能性の認知/判断
- ② 内部溢水発生個所の特定
- ③ 溢水停止操作の手順書の作成
- ④ 溢水停止操作/実行

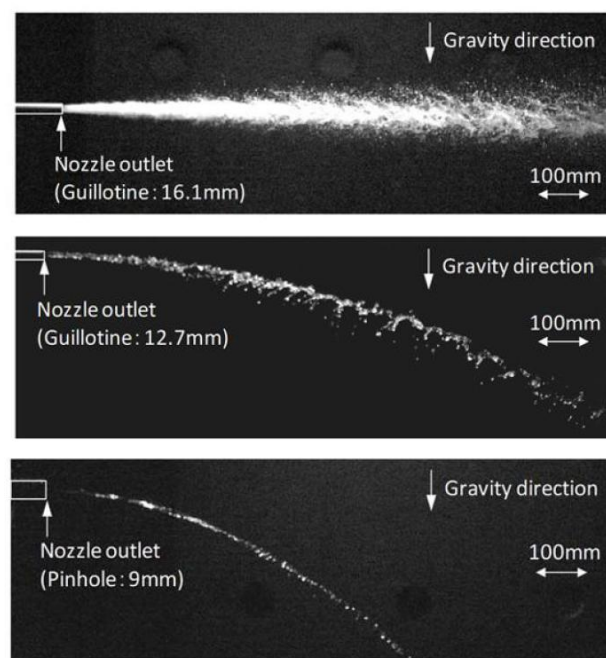


内部溢水と溢水停止操作のイメージ^[12]

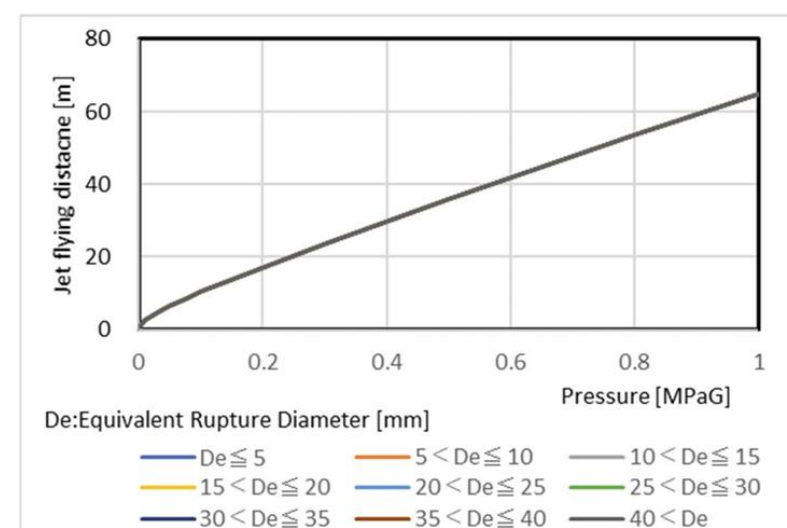
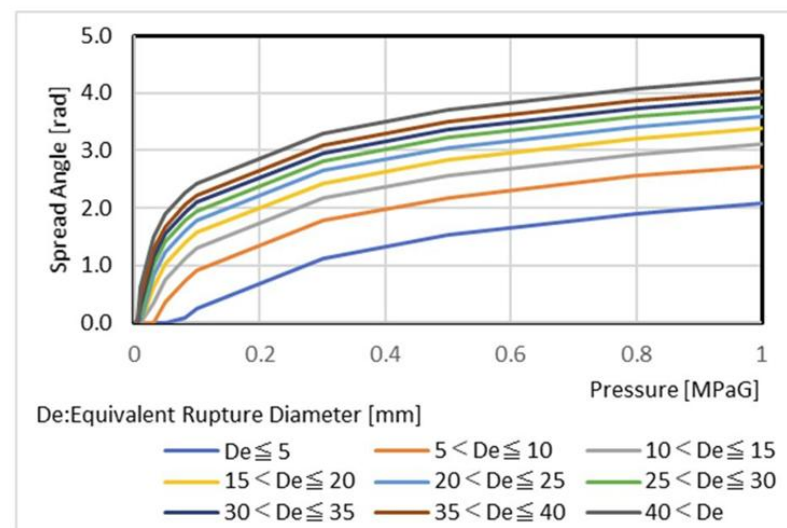
8.内部溢水PRAの研究成果（3）PRAに必要な各種評価手法の整備（B）

● 噴流実験による溢水影響範囲の評価手法を整備

- ピンホールおよびギロチン破断を模擬したノズルを用いて水噴流実験を行い、流れの可視解析に基づき、噴流の拡がり角度と到達距離を推定する式を提案
- PRAで考慮する機器の機能喪失に及ぼす溢水によるスプレイの影響範囲の現実的な評価に活用



水噴流実験における可視化の例^[13]



溢水によるスプレイの影響範囲の早見図^[14]

8.内部洪水PRAの研究成果（4）PRA実施ガイドの策定

・ 内部洪水PRAガイド（2025年版）^[15]の公刊

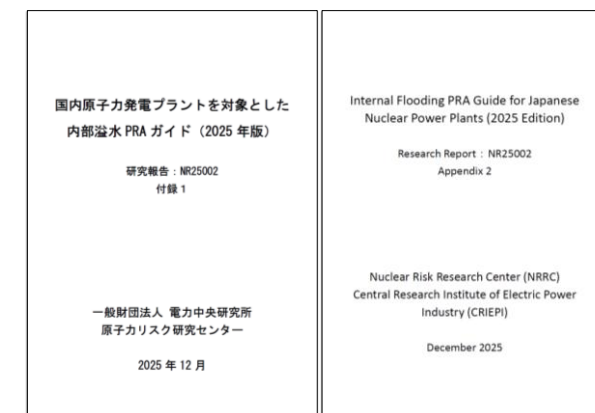
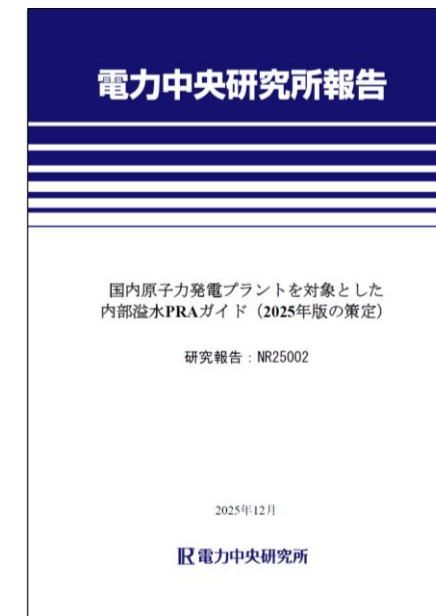
- 報告書本文、ガイド（和文、英文）の構成
- 実機情報に基づく評価【研究成果(1)】のフィードバックを反映
- より現実的な評価に向けた各種手法【研究成果(2)】を反映
- 米国の内部洪水PRA専門家レビューを受け、国際的な実務知見を反映

内部洪水PRA実施ガイドの主な構成

フェーズA：定性的解析 保守的仮定に基づくシナリオの設定 やスクリーニング	タスク 1：プラント境界、洪水エリア及びSSC（構築物、系統及び機器）の定義 タスク 2：内部洪水シナリオ タスク 3：ウォークダウン タスク 4：定性的スクリーニング
フェーズB：定量的解析 フェーズAでスクリーンアウトされな かったシナリオを詳細に解析	タスク 5：内部洪水伝播イベントツリー タスク 6：内部洪水シナリオ発生頻度と洪水流量 タスク 7：機器損傷確率 タスク 8：内部洪水損傷状態特性 タスク 9：内部洪水PRAプラント応答モデル タスク10：運転員行動分析 タスク11：内部洪水リスクの定量化 タスク12：保守性緩和 タスク13：内部洪水PRAにおける不確かさ解析 タスク14：内部洪水PRA最終報告書

内部洪水用PRM作成のた
めの準備作業タスクを明
示的に構成
（附属書Bで事例を詳述）

内部洪水用プラント応答
モデルの実行タスク



9.内部溢水PRAの現状の到達点と今後の取り組み

■現状の到達点

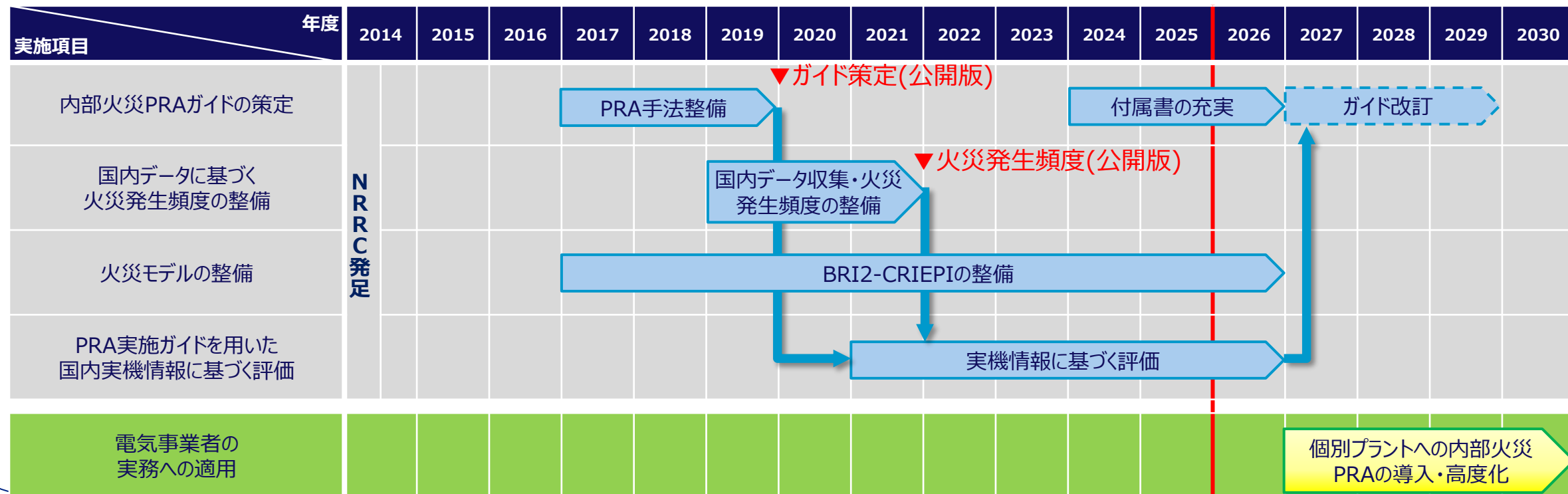
- 事業者の実務者が、内部溢水PRA実施ガイドを参照することにより、個別プラント状況を反映した品質の高い内部溢水PRAを、効果的・効率的に実施可能となった

■今後の取り組み

- 国内事例の最新データに基づく溢水発生頻度の整備（～2027年3月）
 - 以後も定期的に国内データを収集し溢水発生頻度を更新予定
- 実機プラントにおけるガイド改訂版（2025年版）の適用性確認（～2029年度）
 - 適用結果を踏まえたガイド記載内容の過不足を踏まえて次回改訂版に反映
- 内部溢水PRAガイドの次回改訂（2029年度～）
 - 実機プラント・個別プラントにおける適用結果、国内外の最新知見を反映

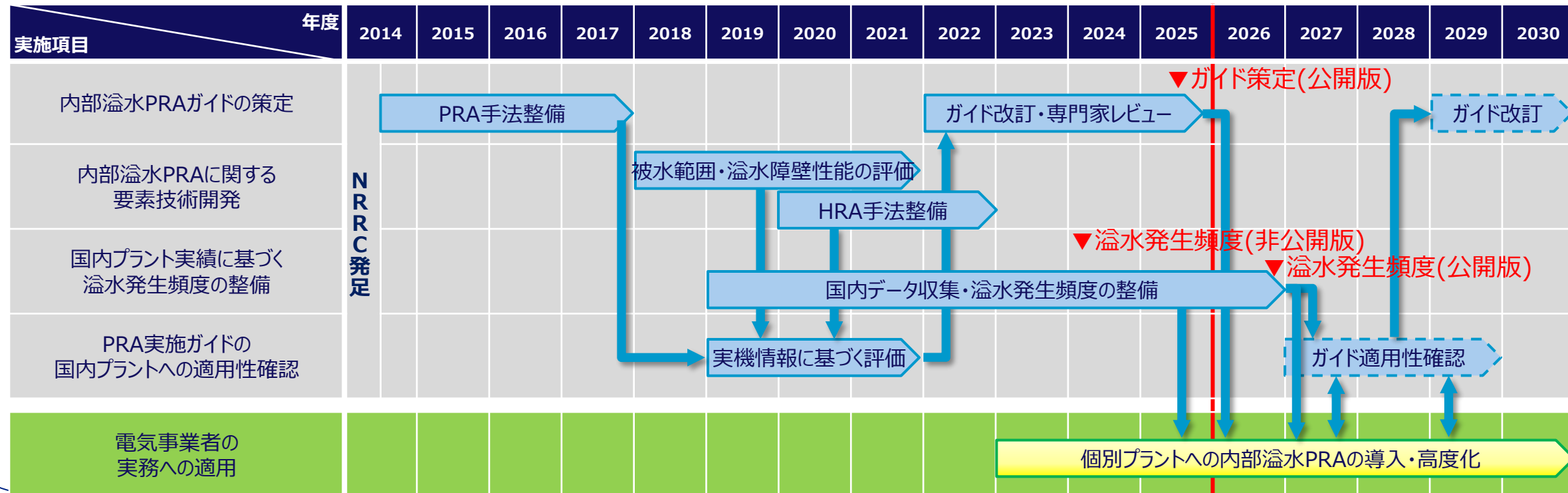
【付録】これまで得られた成果（内部火災PRA）

- 国内プラントを用いた定性解析・詳細解析等を通じてガイド作成に向けた知見を取得
- より現実的な評価に向けた各種個別要素に対する評価手法を整備



【付録】これまで得られた成果（内部洪水PRA）

- 国内プラントを用いた定性解析・詳細解析等を通じてガイド作成に向けた知見を取得
- より現実的な評価に向けた各種個別要素に対する評価手法を整備
- 世界水準に比肩する内部洪水PRAガイドを策定
 - 当所研究成果や国内外の最新知見を反映し海外専門家レビューを経て2025年12月に公開



【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
内部溢水PRAの実施に向けたガイドライン等が国内で未整備	ガイド作成に向けた実機情報に基づく評価	2021年度に完了
	実践的な評価に向けた各種手法の整備	2022年度に完了
	内部溢水PRA実施ガイドの策定	2025年度に完了
	国内プラント事例に基づく溢水発生頻度の推定	2026年度まで実施
	実機プラントにおけるガイドの適用性確認	2030年度まで実施
内部火災PRAの実施に向けたガイドライン等が国内で未整備	内部火災PRA実施ガイドの策定	2019年度に完了
	国内プラント事例に基づく火災発生頻度の推定	2027年度まで実施
	実践的な評価に向けた各種手法の整備	2026年度まで実施
	ガイド作成に向けた実機情報に基づく評価	2026年度まで実施
	ガイドの改訂	2029年度まで実施

【付録】参考文献・資料

- [1] ASME/ANS RA-Sa-2009, “Standard for Level 1/Large Early Release Frequency Probabilistic Risk Assessment for Nuclear Power Plant Applications (Addenda to ASME/ANS RA-S-2008)”, ASME/ANS RA-Sa-2009
- [2] “Guidelines for Performance of Internal Flooding Probabilistic Risk Assessment”, EPRI1019194, 2009
- [3] “EPRI/NRC-RES Fire PRA Methodology for Nuclear Power Facilities Volume 1: Summary & Overview, Volume 2: Detailed Methodology”, EPRI1011989, 2005.
- [4] “原子力発電所の内部溢水を起因とした確率論的リスク評価に関する実施基準：2012”, AESJ-SC-RK005：2012, 日本原子力学会, 2012.
- [5] “原子力発電所の内部火災を起因とした確率論的リスク評価に関する実施基準：2014”, AESJ-SC-RK007：2014, 日本原子力学会, 2014.
- [6] 内田剛志, 白井孝治, 池正熏, 田坂光司, George Apostolakis, Mardy Kazarians, “国内原子力発電プラントを対象とした火災PRAガイドの策定”, 電力中央研究所報告 O20001, 2020.
- [7] 内田剛志, 長田泰典, 吉田智朗, 白井孝治, “国内原子力発電プラントにおける火災発生頻度一般分布の推定”, 電力中央研究所報告 NR21003, 2022.
- [8] Shirai, K., Ji, J., Tasaka, K. and Udagawa, T., “Development of two-layer zone model BRI2-CRIEPI applicable to fire PRA for nuclear power plants”, Fire Safety Journal, Vol. 141, 2023.
- [9] K. Shirai, T. Udagawa, “Verification of updated Two-layer Zone Model BRI2-CRIEPI Applicable to Fire PRA for Nuclear Power Plants”, Proc. of PSAM18, Jul. 19-24, Pittsburgh, PA, 2026.
- [10] T.Uchida, K.Shirai, M.Suzuki, K.Nonose, J.Ji, “Fire PRA for a Model Plant at NRRC”, Proc. of PSAM17 & ASRAM2024, Oct. 7-11, Sendai, Japan
- [11] T.Uchida, K.Shirai, K.Nonose, M.Suzuki, J.Ji, “Lessons Learned From an Internal Flooding Pra for a Model Plant”, Asian Symposium on Risk Assessment and Management 2022 (ASRAM 2022), Daejeon, Korea
- [12] 桐本順広, 野々瀬晃平, 弘津祐子, 佐相邦英, “叙事知に重点を置いた人間信頼性評価（HRA）ガイド（2018年度版）—定性分析方法ならびに過酷状況下タスク分析モデルの開発—”, 電力中央研究所報告 O18011, 2019.
- [13] 渡辺瞬, 湯浅朋久, 森田良, “流動可視化手法を用いた水平気中水噴流の飛散挙動評価”, 日本機械学会論文集, Vol.86, No.889, 2020
- [14] 野々瀬晃平, 桐本順広, 佐相邦英, 武田大介, G. Apostlakis, “叙事知に重点を置いた人間信頼性評価（HRA）の定性分析ガイド（2023年度版）”, 電力中央研究所報告 NR23005, 2024.
- [15] 白井孝治, 永井大地, 鈴木求, 野々瀬晃平, 内田剛志, “国内原子力発電プラントを対象とした内部溢水PRAガイド（2025年版の策定）”, 電力中央研究所報告 NR25002, 2025.