

NRRCシンポジウム2026 竜巻PRA手法の開発

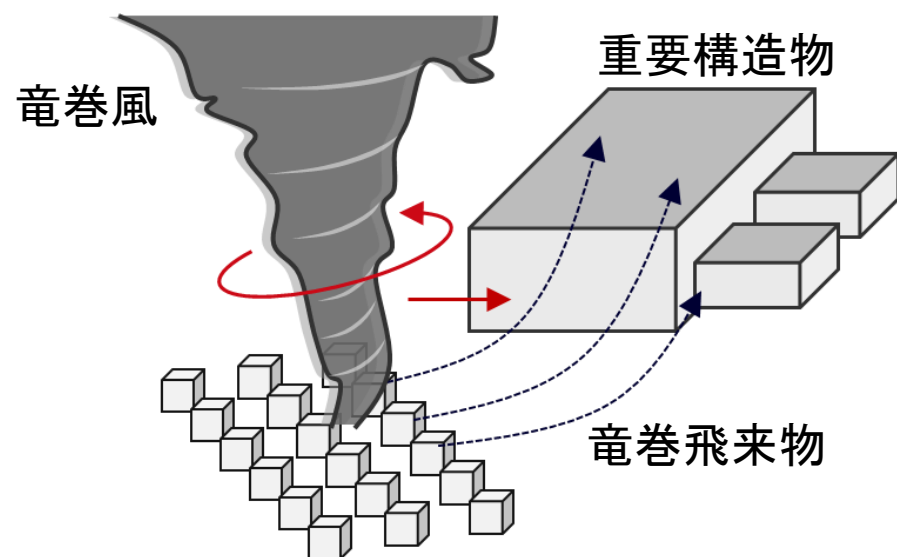
原子力リスク研究センター
野原 大輔

目 次

1. 竜巻事象への対応
 2. 竜巻PRAの課題と課題解決への取り組み
 3. 竜巻PRAモデルの構築
 4. 竜巻PRAの研究開発状況
 - (1) 竜巻風速ハザード評価
 - (2) 飛来物ハザード評価
 - (3) フラジリティ評価
 5. 今後の取り組み
- 【付録】 ロードマップ

1.竜巻事象への対応

- 日本では毎年竜巻被害が発生しており、原子力発電所でも飛来物への防護が重要な課題となってきた
- 新規制基準への対応として鋼板・鋼線ネット等による飛来物防護設備が導入されてきたが、これは設計竜巻を対象とした決定論的な対応であり、竜巻がプラントに与えるリスクは十分に評価されていなかった
- 竜巻による被害が著しい米国では、High-Wind Risk Assessment Guidelines (EPRI)などに基づき、竜巻やハリケーンを対象とした強風PRAのプラント適用が進められてきた^[1]
- 一方、日本では、竜巻による事故シナリオやプラントリスクを定量的に評価するPRA手法は整備されていない

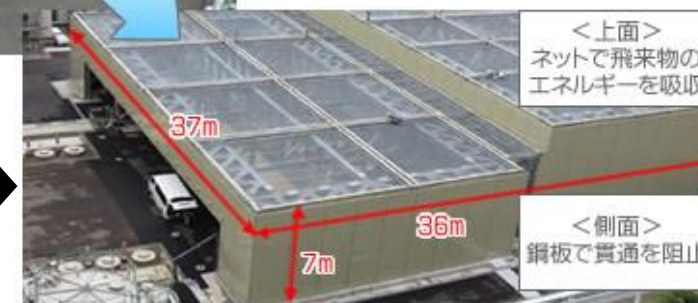


竜巻飛来物による被害のイメージ



対策前

対策後



高浜発電所での飛来物防護設備の設置例

2.竜巻PRAの課題と課題解決への取り組み

■解決すべき課題

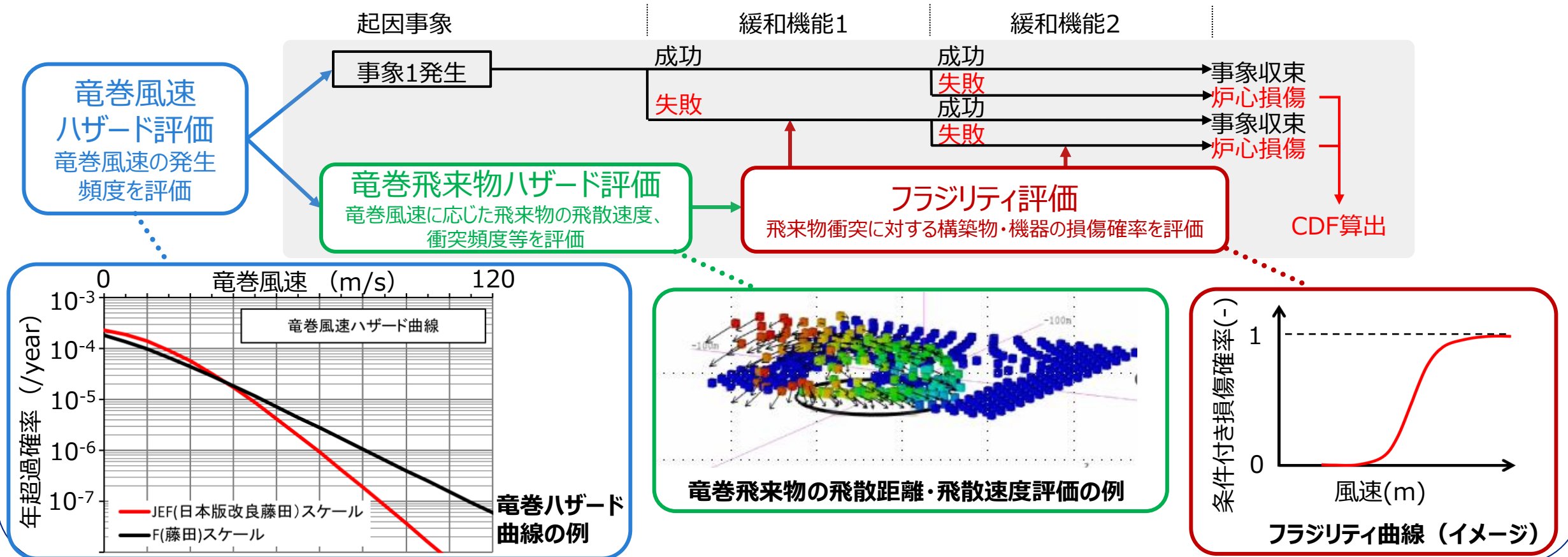
- 竜巻のような低頻度・高影響事象について、機器損傷やプラントリスクの評価に結びつける竜巻PRA手法が整備されていなかった
- 日本固有の竜巻発生特性や、鋼板・鋼線ネット等の飛来物防護設備による防護効果を考慮する必要があり、米国手法をそのまま適用することは困難であった

■問題解決への取り組み

- NRRCがこれまで整備してきた竜巻風速ハザード評価、飛来物ハザード評価、および飛来物防護設備の性能評価に関する知見を活用して、国内プラントに適用可能な日本版竜巻PRA手法を構築する

3.竜巻PRAモデルの構築

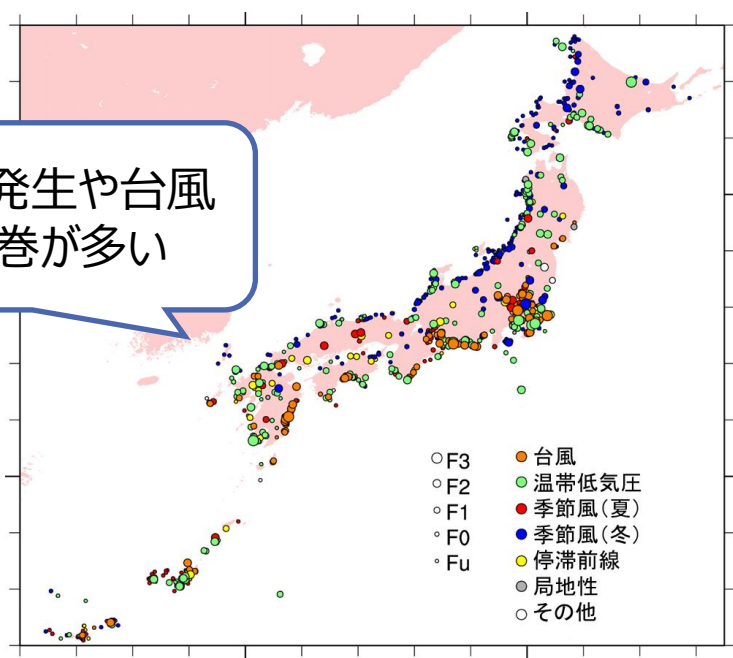
- 竜巻PRAモデルは、内的事象PRAモデルをベースとして、竜巻風速ハザード評価、飛来物ハザード評価、フラジリティ評価の結果を、機器リストの選定や起因事象および機器損傷確率に反映して構築する^[2]
- 構築したモデルにより、竜巻による事故シナリオとプラントリスクを定量的に評価する



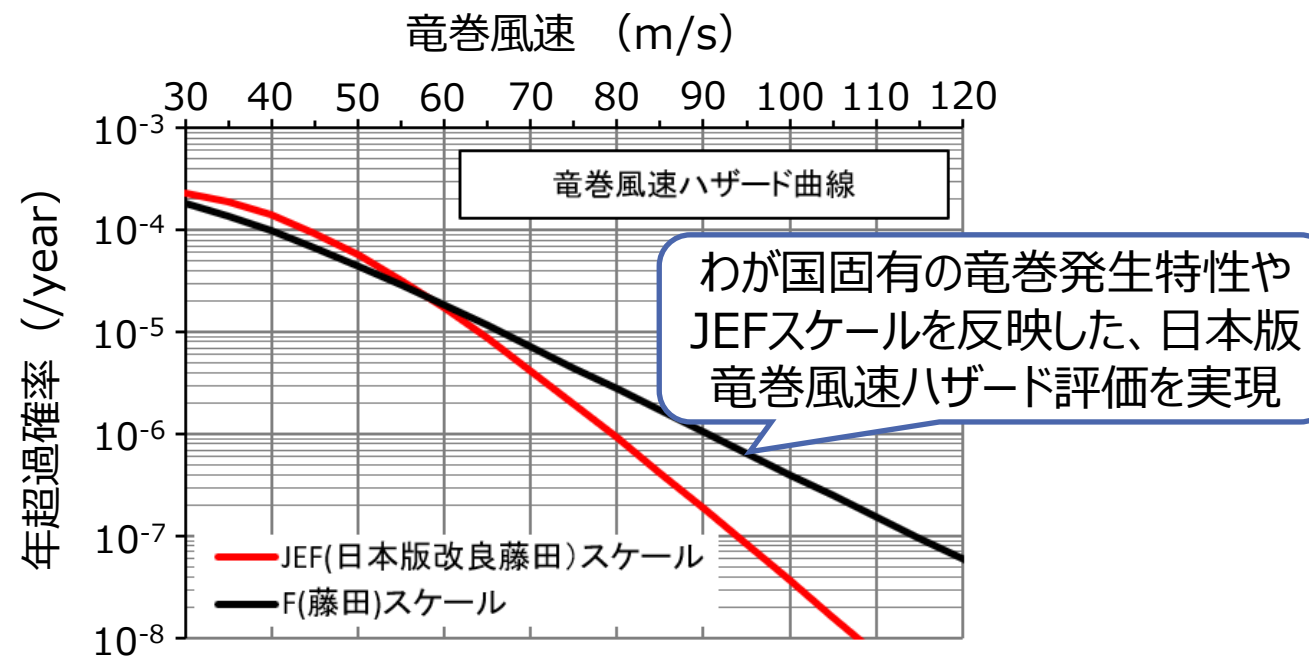
4.竜巻PRAの研究開発状況（1）竜巻風速ハザード評価

- わが国では竜巻は海岸線付近で多く発生し、太平洋側では台風を起因とする事例が多いなど、米国とは異なる発生特性を有する
- 国内での竜巻の発生特性を考慮した竜巻風速ハザード曲線の算定に加え、日本版改良藤田（JEF）スケールへの対応や、観測データの不確かさを考慮した評価ツール（TOWLA-CL）を開発してきた[3]-[5]

沿岸部での発生や台風
起因の竜巻が多い



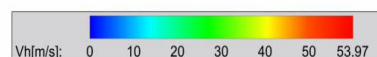
竜巻の発生分布とその要因



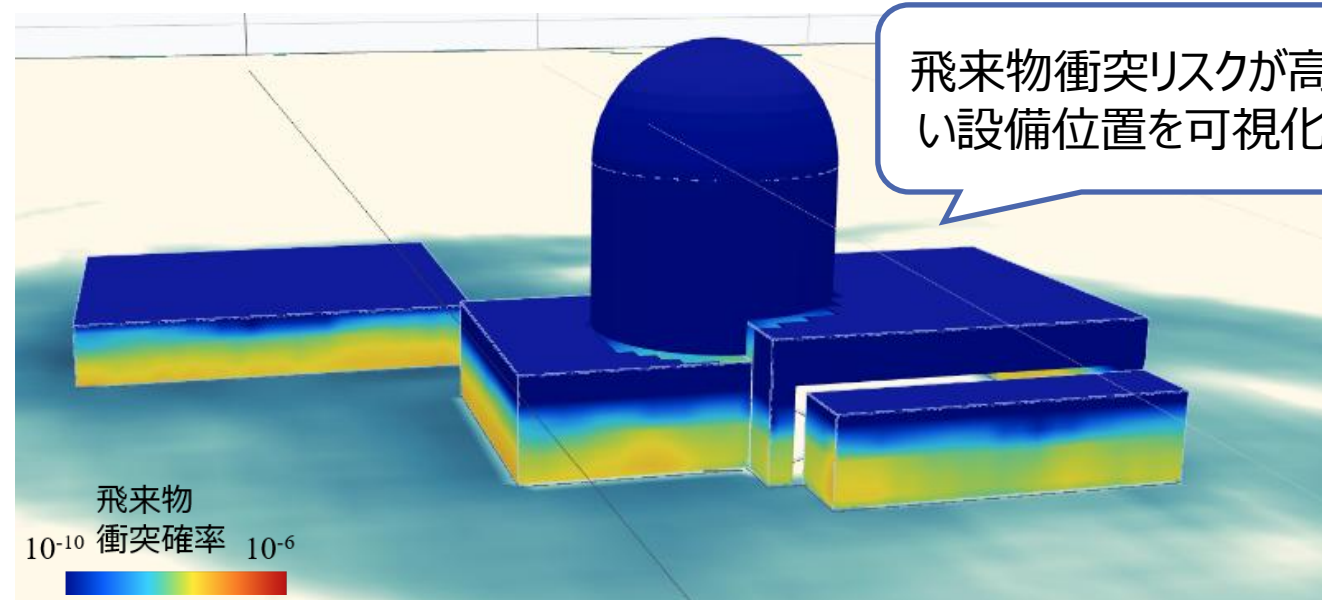
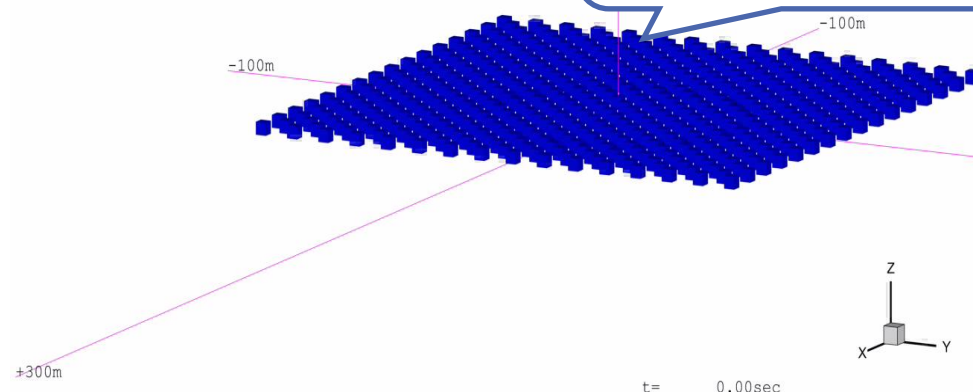
竜巻風速ハザード評価の例

4.竜巻PRAの研究開発状況（2）飛来物ハザード評価

- 竜巻風速場および飛来物の運動を評価するツール（TONBOS）を開発した^[6]
- TONBOSの拡張により、飛来物の衝突位置・衝突時刻・衝突速度等の詳細な衝突情報を取得できるようになった^{[7]-[9]}
- 衝突情報により、構築物や機器への飛来物衝突確率などの飛来物ハザード評価が可能になった



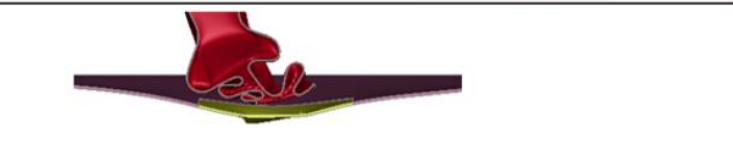
竜巻の移動に伴う飛来物の浮上・飛行軌跡を評価

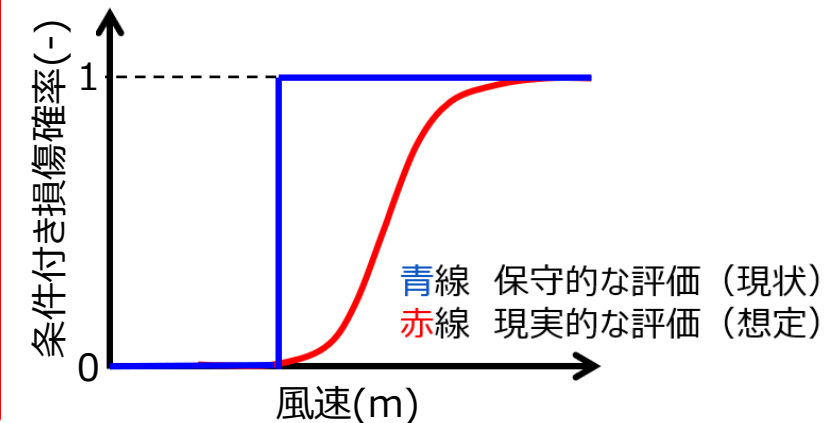


構築物への飛来物衝突確率の例

4.竜巻PRAの研究開発状況（3）フラジリティ評価

- 現状の竜巻による損傷評価では、竜巻風速が設計竜巻風速を超えると損傷するとした簡易的かつ保守的な評価を用いている
- 飛来物防護設備の耐衝撃性能は衝突実験により評価してきたが、実験結果を再現する数値シミュレーション技術の構築により、多様な条件でのシミュレーションが可能となった^[10,11]
- 数値シミュレーションの結果も活用して飛来物衝突に関する不確かさを評価し、飛来物防護設備の性能を考慮したフラジリティ評価手法の開発を進めている

時刻	貫通の例（飛来物速度73m/s）	非貫通の例（飛来物速度72m/s）
衝突中		
解析終了時		



数値シミュレーションによる鋼板の耐衝撃性能評価の例

飛来物衝突評価結果を風速
ベースのフラジリティ曲線へ反映

5.今後の取り組み

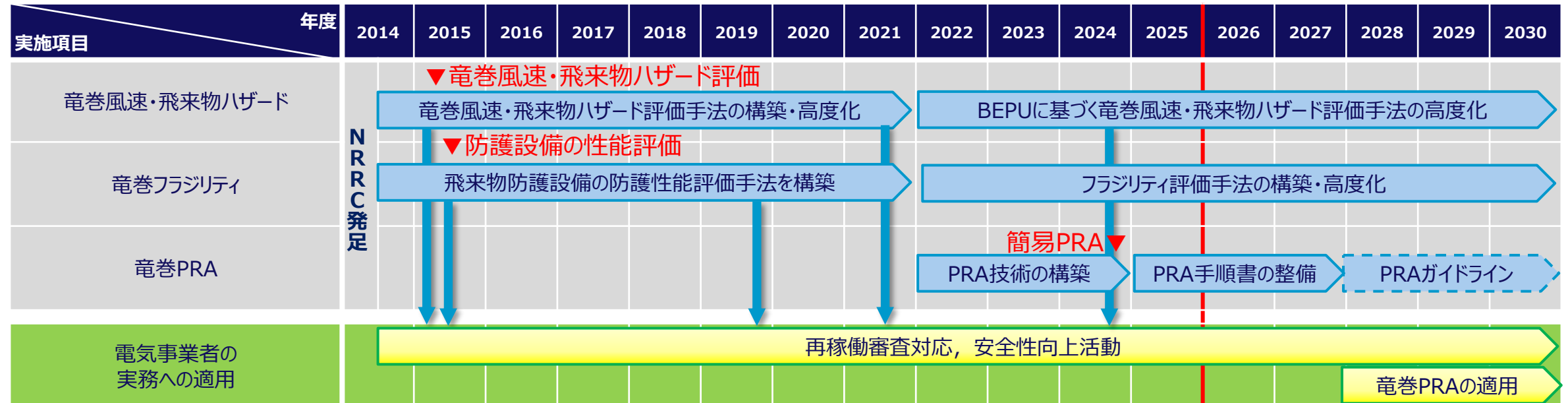
現状の到達点

- 日本固有の竜巻発生特性を考慮した竜巻風速ハザード評価手法を構築した
- 竜巻による飛来物の浮上や飛散挙動を評価するツールを開発し、構築物や機器への飛来物衝突評価手法を開発した
- わが国特有の飛来物防護設備の耐衝撃性能について、飛来物衝突実験およびそれを精度よく再現する数値シミュレーションを用いた評価技術を整備した

今後の取り組み

- 飛来物防護設備の性能を反映したフラジリティ評価手法を構築し、構築物・機器損傷確率評価の高度化を図る
- 実機情報に基づいた竜巻PRAの試評価を行い、日本版竜巻PRA手法を構築する

【付録】ロードマップ^o



【付録】参考文献

- [1] Electric Power Research Institute, High-Wind Risk Assessment Guidelines, EPRI Report 3002003107, 2015.
- [2] Hattori Y., Murakami T., Fujiwara K., Nohara D., Namba K., Eguchi Y., Imai S. and Kunimasa T., A Tornado PRA Methodology with a Probabilistic Tornado Hazard Assessment, PSAM17&ASRAM2024, 2024.
- [3] 平口博丸, 野原大輔, 江口譲, 服部康男, 杉本聡一郎, 竜巻風速ハザード曲線の統計的信頼限界の推定法 (その2), 電力中央研究所報告, NR22001, 2022.
- [4] 平口博丸, 野原大輔, 杉本聡一郎, 江口譲, 服部康男, 竜巻風速ハザード曲線の統計的信頼限界の推定法, 電力中央研究所報告, O19005, 2020.
- [5] 平口博丸, 野原大輔, 杉本聡一郎, 江口譲, 服部康男, 沿岸立地原子力発電所の竜巻風速ハザードモデルTOWLAの開発, 電力中央研究所報告, O15005, 2016.
- [6] 江口譲, 杉本聡一郎, 服部康男, 平口博丸, 竜巻による物体の浮上・飛来解析コードTONBOSの開発, 電力中央研究所報告, N14002, 2014.
- [7] 村上貴裕, 江口譲, 藤原広太, 服部康男, 竜巻飛来物衝突評価ツールTONBOS-MIEの開発, 電力中央研究所報告, NR24004, 2025.
- [8] 江口譲, 服部康男, 竜巻飛来物の年衝突確率評価コードTOMAXI-proの開発, 電力中央研究所報告, NR21004, 2022.
- [9] 江口譲, 服部康男, 確率論的強風飛来物解析コードTONBOS-proの開発, 電力中央研究所報告, O20004, 2021.
- [10] 南波宏介, 佐多大地, 竜巻飛来物衝突を受ける鋼板の耐貫通性能に関する研究－BRL式の適用性に関する基礎検討－, 電力中央研究所報告, O19003, 2020.
- [11] 南波宏介, 白井孝治, 坂本裕子, 近藤俊介, 高強度金網を用いた竜巻飛来物対策工の合理的な衝撃応答評価手法, 電力中央研究所報告, O01, 2016.

NRRCシンポジウム2026 火山PRA手法の開発

原子力リスク研究センター
土志田 潔

目 次

1. 火山噴火に伴う降灰事象とプラント応答・対処
 2. 降灰PRAの課題と課題解決への取り組み
 3. 各国の基準・指針類と降灰PRAの先行事例
 4. 降灰PRAモデルの構築
 5. 降灰PRAの研究開発状況
 - (1) 評価対象設備の選定
 - (2) ハザード評価の精度向上
 6. 今後の取り組み
- 【付録】ロードマップ

1. 火山噴火に伴う降灰事象とプラント応答・対処

◆国内では、火山噴火現象のうち、噴出物が原子力発電所まで到達する現象は概ね降下火山灰(降灰)に限られる

➤降灰は他の事象と比べ長期化する

◆降灰による発電所設備の応答と対処

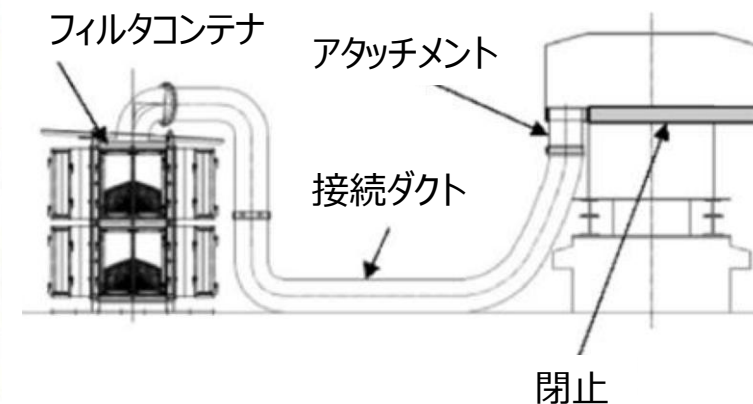
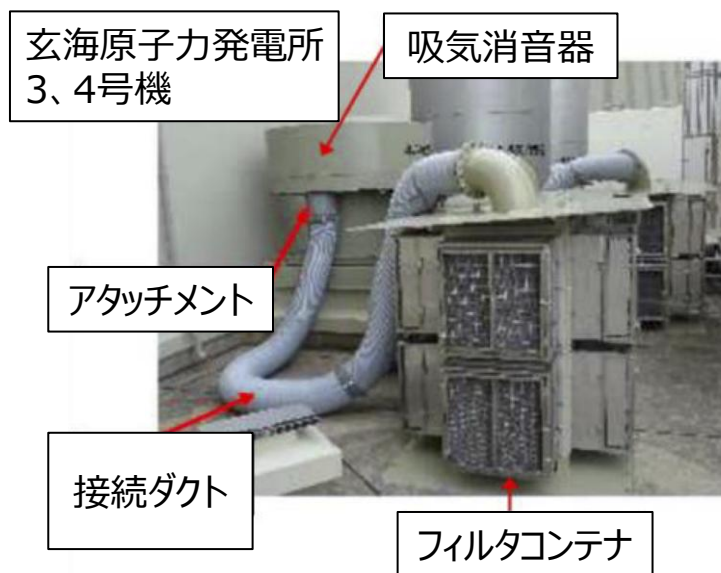
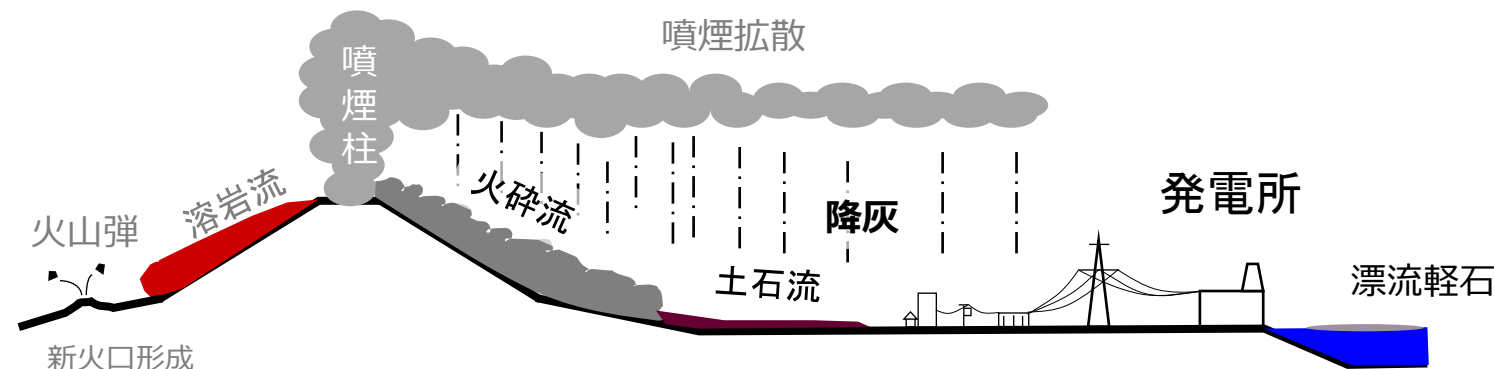
➤設備が壊れるまで放置せず作業により対処する

・建屋屋根の荷重増加

→ 除灰作業

・外部電源喪失、非常用ディーゼル発電機の運転による吸気フィルタの閉塞

→ プレフィルタ設置、フィルタ交換・清掃



吸気設備の降灰対策プレフィルタ例 [1]

2. 降灰PRAの課題と課題解決への取り組み

■ 背景

- 降灰事象は非常用ディーゼル発電機等の吸気設備への影響が大きい
- 新規規制基準では、主に短時間で多量の降灰が積もる事象を想定し、原子力発電所の評価・対策を実施している
- 降灰事象に係る残余のリスクを見出すためには、事象の長期化を含めたリスク評価を行う必要がある
- 降灰PRAは国内外で先行実績が無い

■ 解決すべき課題

- 降灰事象に対する原子力発電所のリスクが定量的に示されていなかった

■ 課題解決への取り組み

- 降灰PRA手法の構築とガイドラインの整備
- 降灰履歴データベースの更新によるハザード評価の精度向上

3. 各国の基準・指針類と降灰PRAの先行事例

◆国内、IAEAの基準・指針類(表)

- PRAの規定無し

◆米国NRC火山評価ガイド RG 4.26 [2]

- PRA、SSHACを規定するが評価手法は記述せず
- 設備対策の工学的評価による代替経路を規定
- 新規立地地点の審査では新火口の形成が論点

◆高速炉の降灰PRA [3]

- 複数の除熱設備を評価

◆原子力規制庁による降灰等のPRA [4]

- 対処作業、事象の長期化を評価せず

→降灰PRAモデルの手本となる評価事例、ガイド類は無く、
モデル構築を対象設備の選定から開始する必要がある

基準・指針	ハザード 評価手法	影響評価 を行う ハザード水準	注記
IAEA SSG-21 TECDOC-1795 TECDOC-2113*	確率論的 決定論的	記載なし	*降灰を扱う(設備影響, 規制ガイド類、軽減策)
JEAG 4625 (日本電気協会 技術指針)	決定論的*	設計基準	*次期改定で降灰ハザード 曲線を参考資料に掲載
規制庁火山評価 ガイド	決定論的	設計基準*	*保安規定等で一部の重 大事故等対処設備を評価
NRC RG 4.26 米国	確率論的 決定論的 (SSHAC, PRA)*	設計基準 設計基準超	*工学的評価を優先する 経路有り

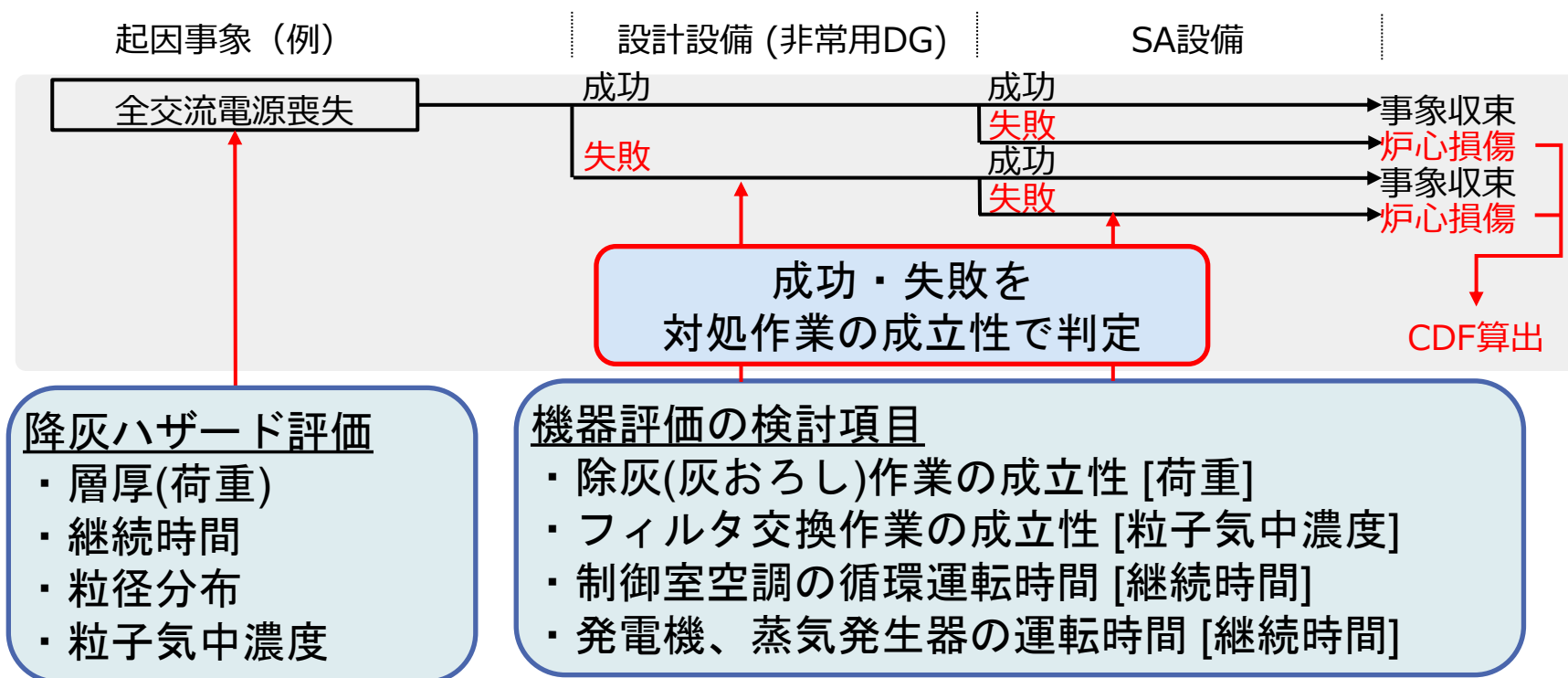
各国基準・指針類の降灰ハザード評価

4. 降灰PRAモデルの構築

◆ 内的事象PRAモデルをベースに、降灰特有の考慮事項（ハザード評価等）を反映

➤ 設備ごとに評価する降灰ハザードの種類が異なる

➤ 機器の機能喪失確率は、フラジリティ評価に加えて作業等による対処可能性を考慮



5.降灰PRAの研究開発状況 (1)評価対象設備の選定

- ◆降灰に応答する設備の中から、PRAモデルに盛り込むべきものを抽出する
- 新規制基準適合性審査等での抽出結果を活用する
- 粒子気中濃度が大きい事象は、設計または作業で対応済
- 設計超過事象には、重大事故等対処設備が使用される

→ 主に重大事故等対処設備のうち、降灰事象が長期化した場合に応答する設備が抽出されると予想

設備の種類	応答する降灰事象の特性	設計事象への対処	設計事象の評価項目	設計超過事象への対処	設計超過事象の評価項目
建屋屋根	層厚(荷重)	(不要)	建築基準	除灰作業	作業成立性
		対応済		未対応(一部の発電所)	
非常用ディーゼル発電機	粒子気中濃度	フィルタ交換	作業成立性(24時間)	(重大事故等対処設備を使用)	(重大事故等対処設備を評価)
	継続時間	運転	燃料備蓄量(7日間)		
重大事故等対処設備	粒子気中濃度	(使用せず)	(対象外)	フィルタ交換	作業成立性
	継続時間			使用	燃料備蓄量 水備蓄量

高濃度事象は対応済
長期化は未対応

設計超過降灰事象への設備の対応状況 (概念図)

5.降灰PRAの研究開発状況 (2)ハザード評価の精度向上

◆当所は降灰履歴データベースと降灰層厚ハザード評価ツールを開発、公開

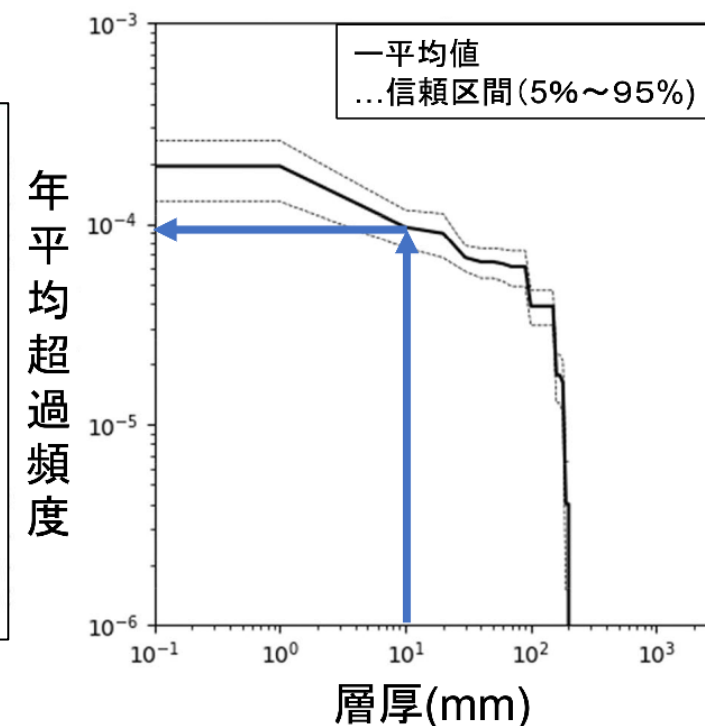
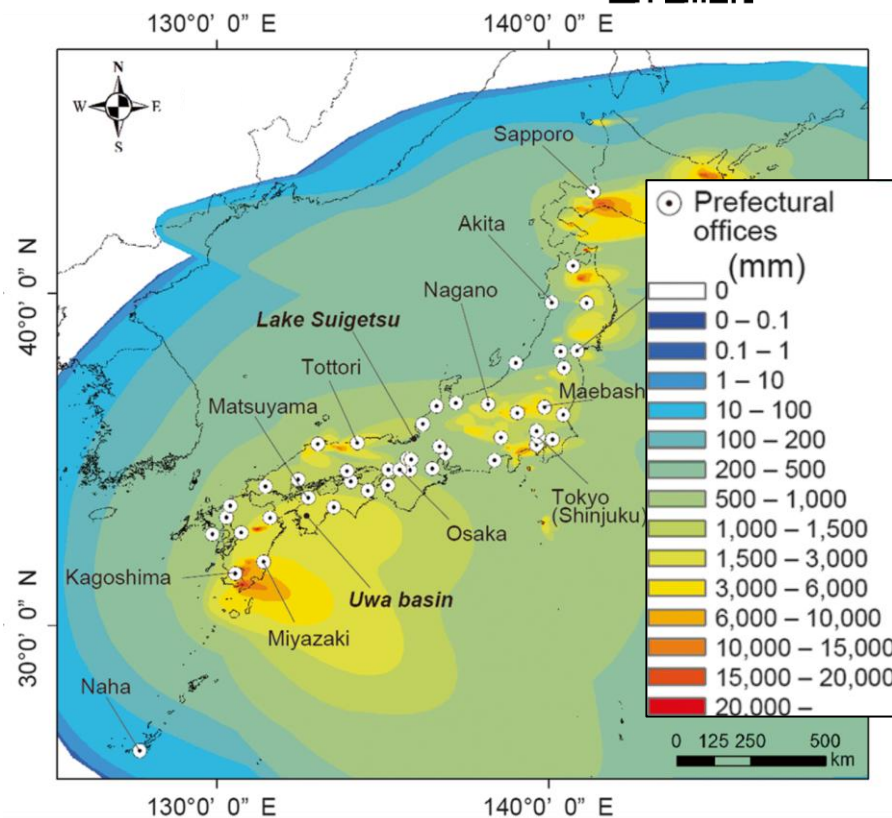
➤全国の任意の地点の座標を指定し、降灰履歴と降灰層厚ハザード曲線を取得可能

→ 降灰PRAのハザード評価に使用

◆評価精度向上のため、降灰層厚の補間方式を改善し降灰履歴データベースを更新中



QRコードから
降灰評価ツールに接続



全国の降灰分布図と評価ツールで取得したハザード曲線 [5]

6.今後の取り組み

➤現在の到達点

- 降灰PRAモデルの開発方針を決定

➤今後の取り組み

- 降灰PRAモデルを構築し、実際の発電所に適用し評価を試行する
- 試行結果を反映したガイドライン文書を作成する
- 開発した降灰ハザード評価手法、機器脆弱性評価手法を、論文等で公表し、安全性向上評価への適用を可能とする
- 開発した各種の評価手法を、降灰PRAモデルに反映させる

【参考】ロードマップ



【付録】参考文献

- [1] IAEA, 2026, Volcanic tephra fallout hazard assessment and the associated design and operational considerations for nuclear installations. IAEA-TECDOC Series No. 2113.
- [2] U.S. NRC, 2023, Volcanic hazards assessment for proposed nuclear power reactor sites, RG 4.26, Rev. 1.
- [3] Yamano, H. et al., 2018, Development of probabilistic risk assessment methodology against volcanic eruption for sodium-cooled fast reactors. J. Risk and Uncertainty in Engineering Systems, Part B: Mechanical Engineering, 4, 030902.
- [4] 濱田義兼ほか, 2022, 規制へのPRAの活用のための手法開発及び適用に関する研究. 安全研究成果報告 RREP-2022-2002.
- [5] 上澤真平ほか, 2024, 降下テフラ分布図データベースに基づく降下テフラハザード評価 Webブラウザ版 GUIアプリの開発とその活用法. 火山, 69, 155-162.