AESJ 2022年秋の大会 企画セッション
「3G_PL」 標準委員会
『リスク情報活用にかかる標準整備への研究成果の活用』

NRRCにおける研究成果と標準等への反映等の関わり

古田泰、桐本順広、橋本和典、桜本一夫
furuta3859@criepi.denken.or.jp, kirimoto@criepi.denken.or.jp,
k-hashi@criepi.denken.or.jp, sakuramoto3957@criepi.denken.or.

(一財)電力中央研究所
原子力リスク研究センター（NRRC）
2022年9月9日

© CRIEPI

1. 原子力リスク研究センター(NRRC)設立の経緯

福島第一原子力発電所事故を踏まえた反省

・原子力のリスクと正面から向き合う意識と仕組が不足

・大地震、大津波など低頻度だが影響が大きな事象への対応が不十分

リスクを直視し、規制遵守に留まることなく安全性を追求する意識と仕組が必要

各事業者のリスクマネジメント強化

・社内体制整備

・リスク評価の充実（確率論的リスク評価：PRA [Probabilistic Risk Assessment] の活用）

・リスク情報の積極的利用　等

〔 2014.6　各社「戦略・アクションプラン」公表 〕

各事業者が継続的に実施

〔 2020.6　同プラン改訂 〕

低頻度事象に伴うリスクの低減

・技術課題解決（発生メカニズム、応答、対策）

・決定論的手法と確率論的手法の効果的な組合せ

・一元的研究開発体制構築

→ 現場適用＆フィードバックを促進　等

NRRCの設置 2014.10.1

2016.07「リスク情報活用推進チーム」設置

2. NRRC　－ビジョン・ミッションと体制－

【ビジョン】
PRA手法及びリスクマネジメント手法の**国際的な**中核的研究拠点（センター・オブ・エクセレンス）となり、それによって、あらゆる利害関係者から信頼を得る。

【ミッション】
確率論的リスク評価(PRA)、リスク情報を活用した意思決定、リスクコミュニケーションの最新手法を開発し用いることで、原子力事業者及び原子力産業界による、原子力施設の安全性向上のためのたゆまぬ取り組みを支援する。

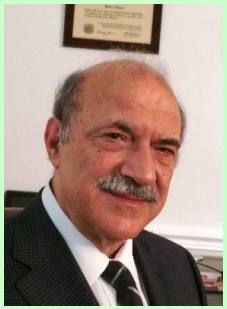
＜諮問体制＞

センター顧問
Dr. R. A. Meserve
（元米国原子力規制委員長）

技術諮問委員会
（委員長：Mr. John W. Stetkar）

＜内部体制＞

センター所長
Dr. G. Apostolakis
（前米国原子力規制委員）



- 企画運営チーム（約15名）
- リスク情報活用推進チーム（約10名）
- リスク評価研究チーム（約50名）
- 自然外部事象研究チーム（約65名）

＜会議体制＞
（事業者・産業界含む）

- **社長(CEO)との対話**
  CEO = Chief Executive Officer
- **原子力経営責任者会議（CNO会議）**
  CNO = Chief Nuclear Officer

技術会議
- ワーキンググループ1（リスク評価分野）
- ワーキンググループ2（自然外部事象分野）

安全性向上を支えるリスク研究開発

- 低頻度だが大きな被害をもたらし得る事象のさらなる解明と対策立案
- 従来の決定論的な手法に加えてリスク情報を活用する手法を適用

研究開発項目

1 事象評価技術

応用 フィードバック

1) シビアアクシデント(SA)*
2) 活断層
3) 地震動
4) 断層変位
5) 地盤・斜面・土木構造物耐震
6) 建屋・機器耐震
7) 津波
8) 火山
9) 強風等極端気象
10) 内部火災・内部溢水

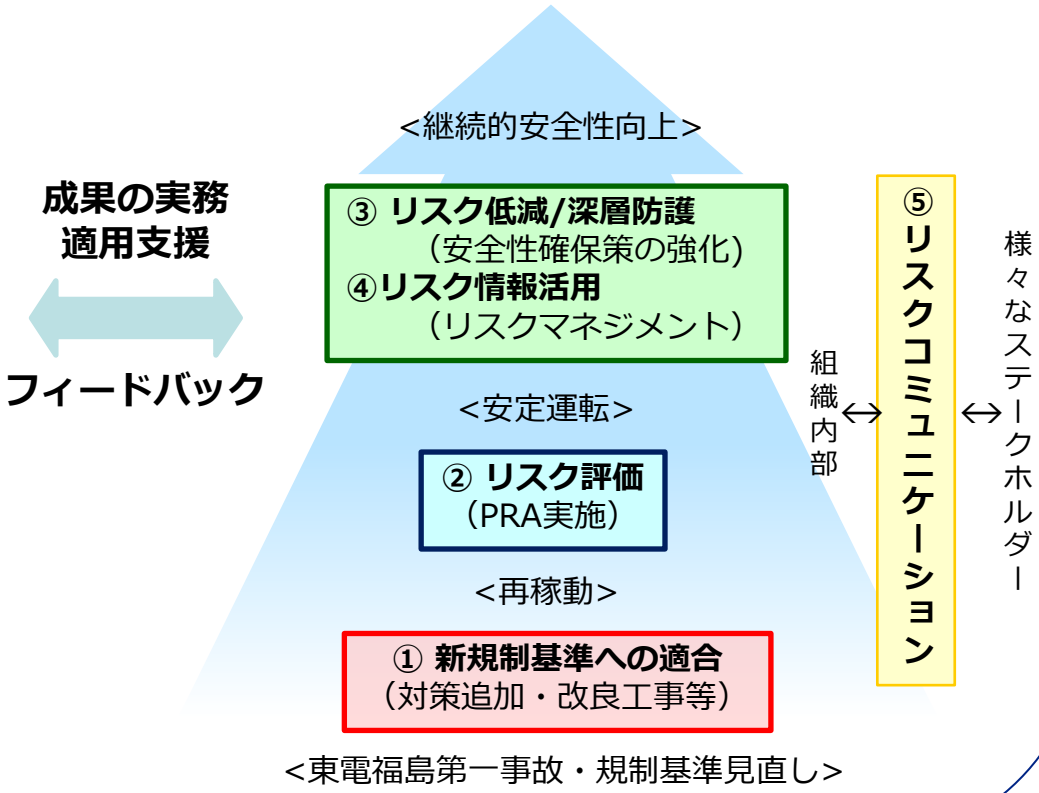
*炉心の著しい損傷を伴う重大事故

2 リスク評価技術

1) PRA手法（内的・外的事象）
2)人間信頼性(HRA)
3)環境放出時影響

3 リスクコミュニケーション

継続的安全性向上の取り組み



NRRCのPRA技術の改良開発状況

専用研究は不要 / 研究開発開始予定 / 研究開発中 / モデルプロジェクト実施中

		レベル１	レベル２	レベル３
内的事象	出力運転時PRA	2017年 内的事象HRAガイド 2019年 ピアレビューガイド 2019年 MUPRA* ｹｰｽｽﾀﾃﾞｨ 2021年 PRA実施ガイド 2021年 ピアレビュー実施 ＊ マルチユニットPRA	2019年 過酷状況下HRAガイド 2019年 FCVSモデル高度化MAAP 2021年 最適FP放出評価法 2021年～ レベル2PRA試行（モデルプラント） 2024年 レベル2PRA実施ガイド	2019年 WinMACCS利用ガイド 2021年～ 仮想モデルプラント試行 2023年 WinMACCS利用ガイド改訂
	停止時PRA			
	火災・溢水PRA	2019～2021年 2018年度版ガイドに基づく溢水PRA（モデルプラント） 2023年 2018年度版溢水PRA実施ガイド改訂 2019年 火災PRA実施ガイド 2020年 火災モデル・火災発生頻度整備 2021～2023年 火災PRA（モデルプラント）		
外的事象	地震PRA	2020年 SSHACプロセス導入 2019年～ 地震PRAモデルプラント (随時）ハザード・フラジリティ評価高度化		
	津波PRA	2017～2020年 津波PRAモデルプラント		
	マルチハザードPRA	2021～2025年 地震・津波重畳PRAモデルプラント		
	上記以外の外部事象（竜巻・強風、火山）	2020年～ 強風PRAモデルプラント（計画中） 2022年～ 降灰PRAモデルプラント（計画中）		

原子力学会リスク関連標準への反映実績例

従来研究の活用、人的支援の実施

◆ 内的事象レベル1PRA及びPRAパラメータ推定

- 内的事象レベル1PRA標準（2022年7月）
  → 運転時・停止時、階層化標準検討の素案検討他
- パラメータ推定標準
  → PRAパラメータのデータ収集技術やパラメータのベイズ推定技術等を開発、国内の機器故障率推定に応用

NRRCでの目的志向の研究開発成果の反映

◆ 断層変位PRAの評価手法の開発

→ ハザード評価：断層変位の定量評価手法

→ フラジリティ評価：断層変位に対する構造物および機器の設計条件の設定とそのフラジリティ評価結果

→ 断層変位PRAにおける事故シナリオと事故シーケンス解析

◆ 地震PRAでの地震ハザード評価

→ 地震ハザード解析専門家委員会(SSHAC : Senior Seismic Hazard Analysis Committee)の手順を用いた確率論的地震ハザード分析（PSHA）に対する実施

内的事象レベル1PRA

従来研究からの技術支援

◆ リスク専門部会　レベル1PRA分科会における運転時、停止時を含めた内的事象レベル1PRA標準の統合化、標準の階層化の検討支援及び人的貢献

- 副主査、幹事、委員参加（レベル1PRA分科会）による人的/技術支援を実施
  - “原子力発電所の内的事象を起因とした確率論的リスク評価に関する基準（レベル1PRA 編）：2022”, AESJ-SC-RK010:2022
  - “原子力発電所の内的事象を起因とした確率論的リスク評価に関する指針（レベル1PRA 編）：2022”, AESJ-SC-RK011:2022

NRRCによる現在のPRA技術基盤支援の例

・外部専門家によるパイロットプラント(柏崎刈羽7号、伊方3号)プロジェクトのレビュー(評価・助言)
・外部専門家レビュー結果の他社共有(ガイド化)
- 対象ハザードと評価レベルを順次拡大
- 解析モデルの精緻化、データ信頼性の向上

⇒ **パイロットプラントの知見を他プラントへ展開**

PRAパラメータ推定

従来研究からの技術支援

◆ PRAパラメータ推定に関して、PRAの機器故障率等のパラメータ推定に関わるデータ収集技術やパラメータのベイズ推定技術等を電中研で開発し、パラメータ推定標準(AESJ-SC-RK001：2015)における要求事項記載や附属書での評価事例記載に活用

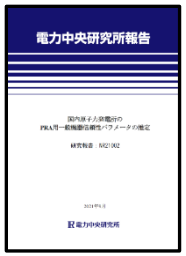
○ 関連成果報告

- 原子力発電所に関する確率論的安全評価用の機器故障率の算出 -(1982年度～1997年度16カ年49基データ改訂版)- 電中研報告P00001，2001.2
  https://criepi.denken.or.jp/hokokusho/pb/reportDetail?reportNoUkCode=P00001
- ベイズ統計による原子力発電所の信頼性パラメータ評価手法 ーー機器時間故障率・デマンド故障確率のベイズ更新ー電中研報告L05019，2006.7
  https://criepi.denken.or.jp/hokokusho/pb/reportDetail?reportNoUkCode=L05019
- 階層ベイズモデルを用いたデマンド故障確率推定のための事前分布選択指針 電中研報告L07005，2008.6
  https://criepi.denken.or.jp/hokokusho/pb/reportDetail?reportNoUkCode=L07005
- “故障件数の不確実さを考慮した国内一般機器故障率の推定(1982～2010年度29ヵ年56基データ)”，原子力安全推進協会，JANSI-CFR-02，2016.6
  https://www.genanshin.jp/archive/failure_rate/data/JANSI-CFR-02.pdf 他

NRRCによる現在のPRAパラメータ推定に関する技術基盤支援

・機器信頼性パラメータ整備の高度化

- **PRAを対象機器を特定した機器信頼性データ収集とPRA用パラメータの整備**
  - **PRAのためのデータ収集実施ガイド**
  - **国内原子力発電所のPRA用一般機器信頼性パラメータの推定**

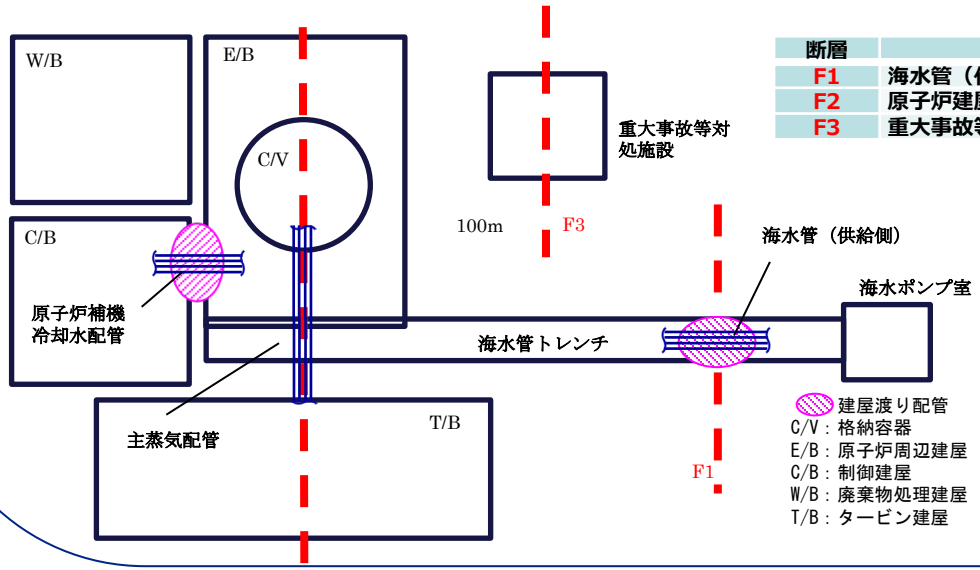


電中研報告NR21002 2021年9月発行

https://criepi.denken.or.jp/hokokusho/pb/reportDetail?reportNoUkCode=NR21002

断層変位PRAの評価手法の開発

- 個別要素技術を統合し、断層変位PRA手法を開発
  - 確率論的断層変位ハザード評価に関しては米国/日本で既に手法は開発済
  - フラジリティ評価手法開発及び事故シナリオ評価検討、これらに基づくCDFの試評価を実施
  - 特に、断層変位が生じた場合のプラント挙動の分析に重点
  - 一方、フラジリティ評価については、実験的検討も含め現実的耐力を評価しつつ（電力事業者実施のセンター共研）、地震PRAと比較して実績がないことから、フラジリティ評価手法の検証を可能な範囲で実施



断層	断層位置
F1	海水管（供給側）横断
F2	原子炉建屋中央直下
F3	重大事故等対処施設直下

- ○ 仮想PWRモデルによる評価
  - 仮想的なPWRプラントとして建屋、渡り配管を想定
  - 断層変位としては、F1～F3を想定

地震PRAでの地震ハザード評価

国内プラントを対象とした、地震ハザード解析専門家委員会(SSHAC : Senior Seismic Hazard Analysis Committee)の手順を用いた確率論的地震ハザード分析（PSHA）

- 米国で1990年代後半に確率論的地震動評価のガイドを検討・策定、その後米国内外の実務経験を踏まえ、SSHACガイド(NUREG-2117(2012)、NUREG-2213(2018))が発刊
- 日本では四国電力伊方発電所でSSHACレベル3で実施
- SSHACガイドの特徴は、地震動評価に関する技術的な検討項目を規定しているのではなく、検討手順(特に不確実さ評価に関する専門家活用に関して)の標準化に力点

  - **確率論的地震動ハザード評価の高度化に関する調査･分析 －米国SSHACガイドラインの適用に向けて－**

    電中研報告O15008　2016年7月発行

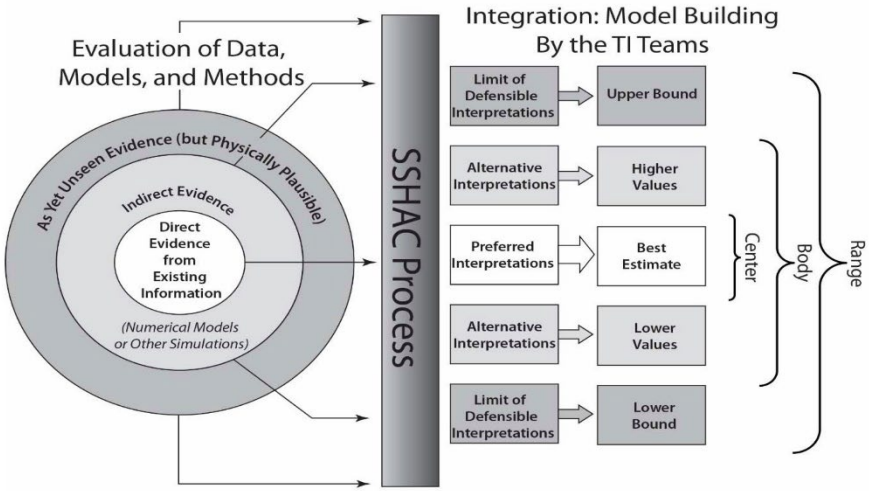
    https://criepi.denken.or.jp/hokokusho/pb/reportDetail?reportNoUkCode=O15008

地震PRAでの地震ハザード評価
SSHACにおける重要な概念:CBR of TDI

- Center, Body, Range of Technically Defensible Interpretation：技術的に抗弁性が高い(主張可能な)、モデルやパラメータの分布系の再現に力点

- SSHACでは、検討チーム(Technical Integrator Team)(SSHACレベル3では、5-7名×2team(震源要素/地震動))が、

a. 全ての入手可能な知見・データを関係者間で共有したうえで、
b. 相反する学説のうち、結果に大きく影響を与える可能性があるものについて、当事者間同士の議論等も実施し(Workshop)、当該の学説を支持するデータ、モデルの確からしさを吟味し、teamとしてLogic Treeの分岐/重みの設定を実施
c. ピアレビューは、終了後一括ではなく、全検討過程について、参加型のピアレビューが要求事項，レビューアーがTIチームの判断根拠を確認
d. TI チームの判断過程を含め、検討条件、内容、結果の克明な文書化及び公開を要求 (伊方SSHACプロジェクトでは1400頁以上の報告書を作成、公開)



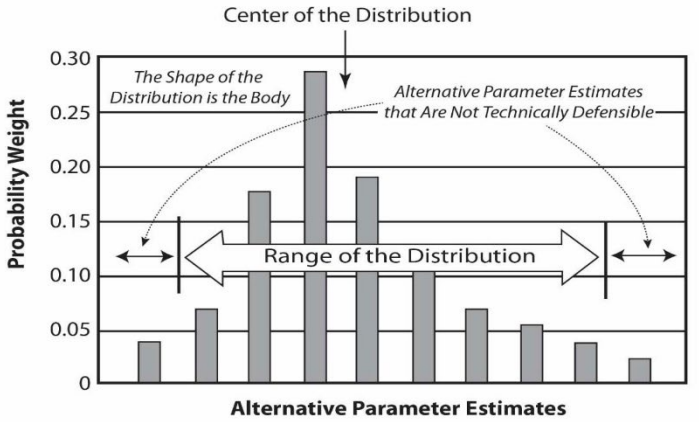


図　出典：NUREG-2213

標準における活用が期待できる研究成果

◆ 火災、溢水実施PRAガイド

→ モデルプラントでの評価とともに火災PRA実施ガイド、溢水PRA実施ガイドを開発

→ 火災PRA、溢水PRA標準改定時での技術内容の活用、実用性の向上、実施手順（技術レポート）としての活用

◆ 資源エネルギー庁の委託事業による地震PRA・津波PRA・地震津波重畳PRAの技術開発研究

→ 実機プラントを対象に地震PRA（2014～2016年度）、津波PRA（2017～2020年度）についてPRAの整備と評価技術の開発が研究プロジェクトとして行われてきた。現在（2021年度～）はこれらの技術開発を受けて地震津波重畳PRAの実施

→ 開発手法及び従来からの外部事象研究から標準規格での技術内容の活用

◆ 人間信頼性解析（HRA）の定性分析ガイド

→ 事故時の緩和シナリオにおける人的対応の影響をより現実的な評価とするために、定性分析の過程を重視したHRA定性分析ガイドを開発

→ 内的事象レベル1のみならず、レベル2や外的事象など様々なPRAでも必要となるため、具体的な実施方法として活用

等、様々な研究からの成果活用を一つの目的として実施している。

火災PRAガイド

◆ 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 (2020年6月）

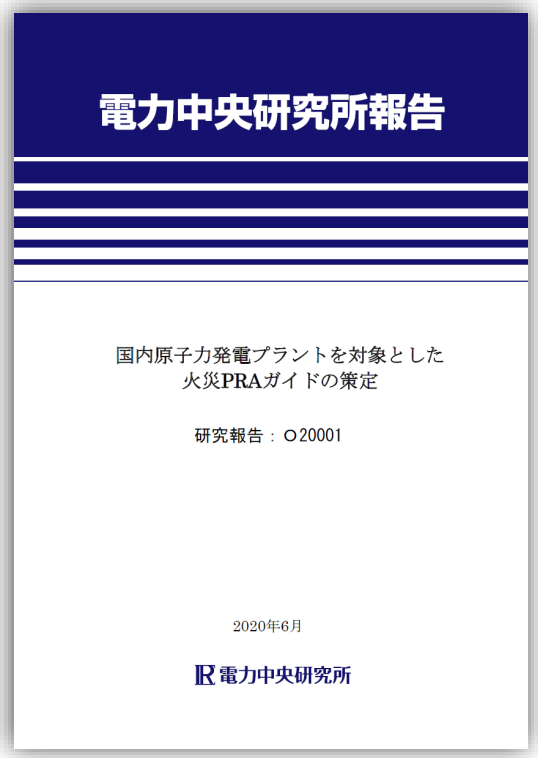
- https://criepi.denken.or.jp/jp/kenkikaku/report/detail/O20001.html
- 著者　内田剛志、白井孝治、池 正熏、George Apostolakis、 Mardy Kazarians

◆ 構成

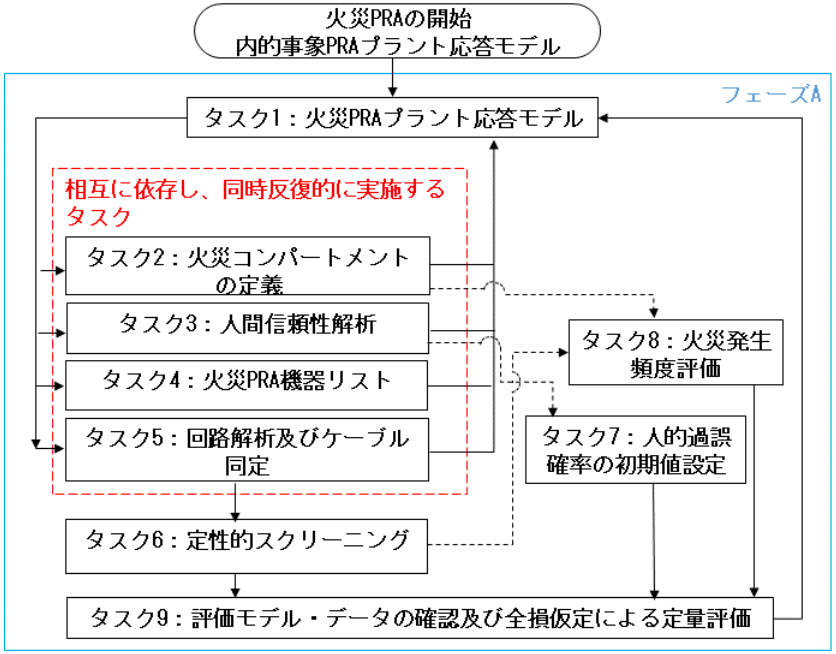
- 概論
- Fire PRA Guide -An Update of NUREG/CR-6850 for Use by the Japanese Nuclear Industry（690ページ）
- 火災PRAガイド-国内原子力産業界のためのNUREG/CR-6850の更新-

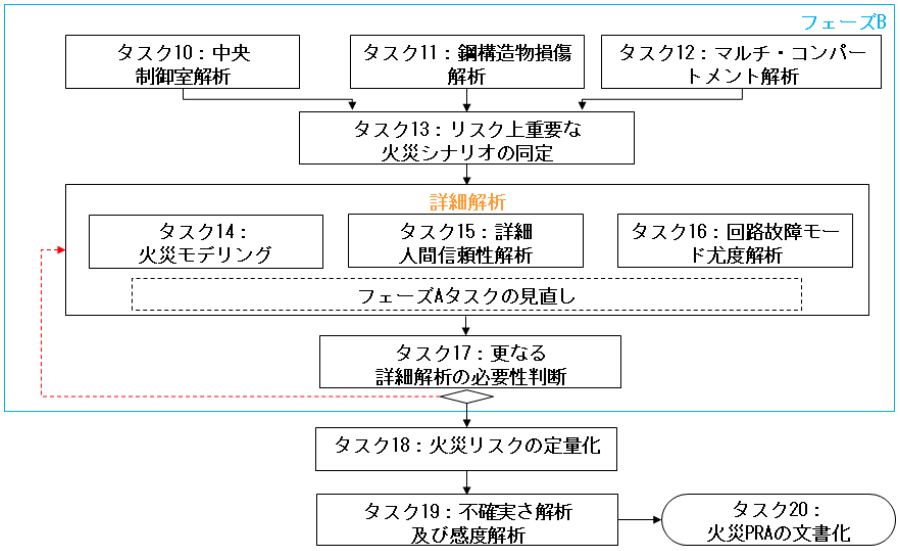
◆ 内容

- 火災PRA手法を20タスクに分割し、実施方法及び留意・推奨事項を記載
- 付属書にて、評価例や詳細評価手法等を記載



火災PRAガイド　実施手順の概要





- **フェーズA：**
  - タスク1を中核とし、タスク2～5を反復的（iterative)に実施し、内部火災プラント応答モデル及び火災シナリオを構築
  - パラメータの定量化（火災発生頻度：タスク8, 人的過誤確率初期値：タスク7）
  - 全損仮定による火災シナリオ定量化（タスク9）

- **フェーズB：**
  - 特殊な火災シナリオの同定
    - ✓ 中央制御室火災（タスク10）
    - ✓ 鋼構造物損傷（タスク11）
    - ✓ マルチ・コンパートメント火災（タスク12
  - 詳細解析：
    - ✓ 火災モデリング（タスク14），
    - ✓ 火災時の人的過誤事象分析（タスク15），
    - ✓ 火災影響による回路誤作動確率定量化（タスク16）
  - タスク17で更なる詳細解析の必要性判断

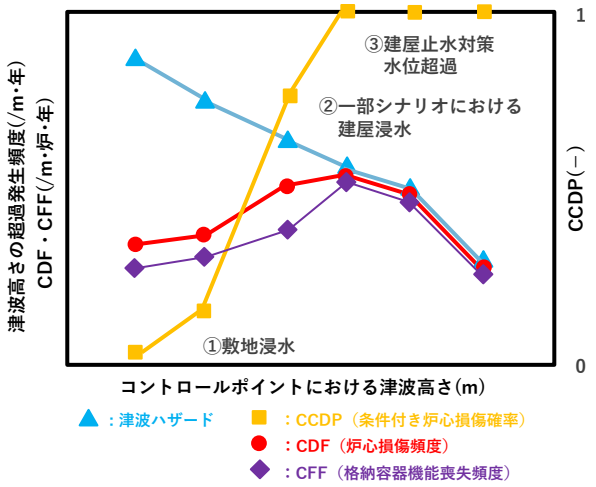
地震PRA・津波PRA・地震津波重畳PRAの技術開発研究（例：津波PRA）

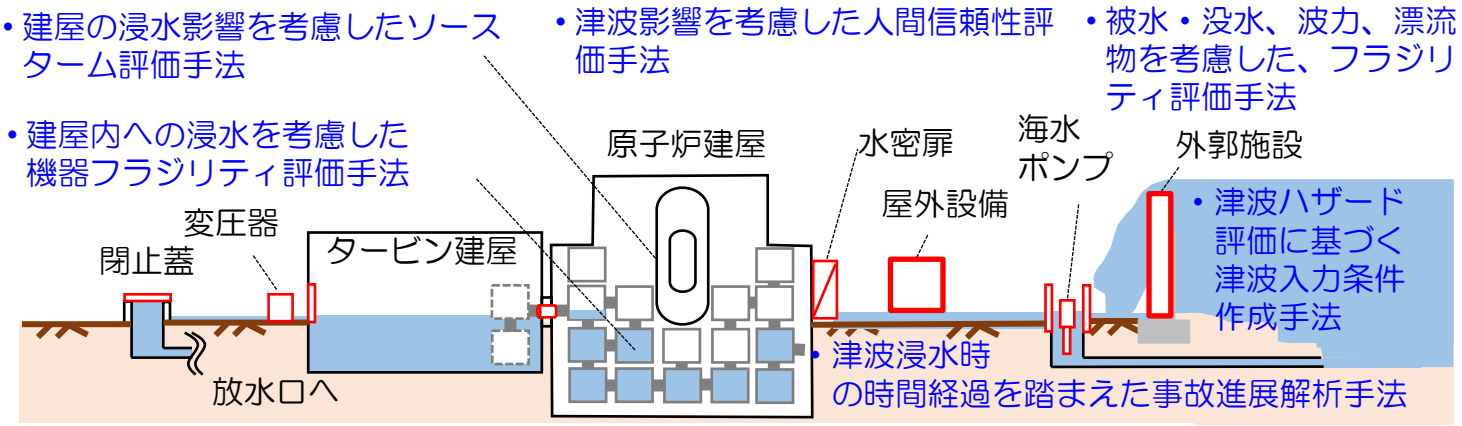
資源エネルギー庁の委託事業を中核に、NRRCの研究成果を反映

（地震PRA：2014～2016年度、津波PRA：2017～2020年度、地震津波重畳PRA：2021年度～）

- 敷地内及び建屋内への浸水挙動の不確実さを考慮し、より、best estimateなフラジリティ評価が実施可能
- 人間信頼性評価や津波影響を考慮した事故進展解析により、津波高さに応じた事故シナリオの特徴を反映した炉心損傷頻度、格納容器機能喪失頻度及びソースターム（核分裂生成物(FP)放出量）のリスクプロファイルが取得可能

➢ 津波高さに応じたリスクプロファイル（イメージ）





プラントイメージとレベル1・2津波PRA技術の主な要素

人間信頼性解析（HRA）の定性分析ガイド

- ✓ 地震や津波等の過酷状況下で必要となる緩和操作に対するHRA手法が必要
- ✓ HRAで重要な人間特性や状況を含む定性分析に関する実用的なガイドの開発

電中研報告O20003　2021年4月発行

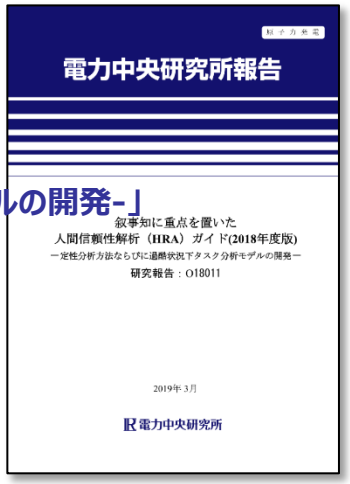
「叙事知に重点を置いた人間信頼性解析（HRA）の定性分析ガイド(2020年度版)

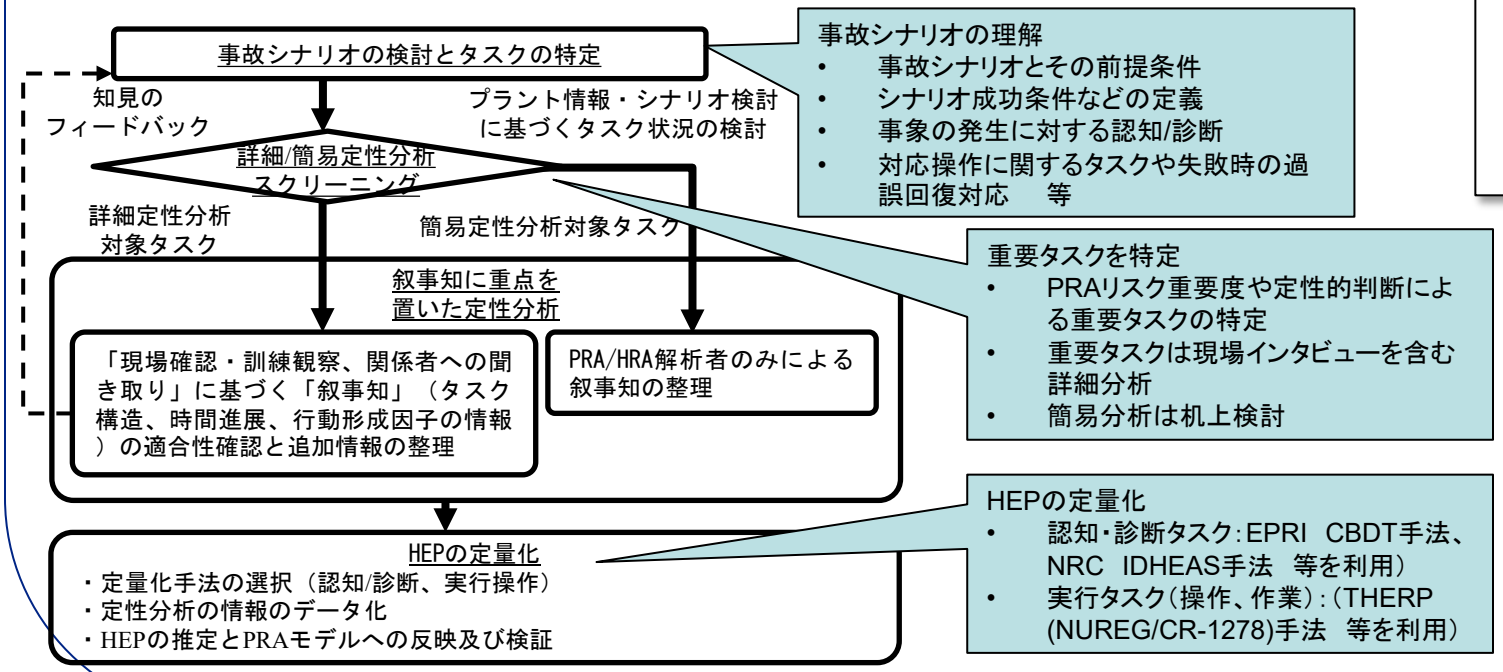
https://criepi.denken.or.jp/jp/kenkikaku/report/detail/O20003.html

電中研報告O18011　2019年3月発行

「叙事知に重点を置いた人間信頼性解析（HRA）ガイド　–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-」

https://criepi.denken.or.jp/jp/kenkikaku/report/detail/O18011.html





事故シナリオの理解
- 事故シナリオとその前提条件
- シナリオ成功条件などの定義
- 事象の発生に対する認知/診断
- 対応操作に関するタスクや失敗時の過誤回復対応　等

重要タスクを特定
- PRAリスク重要度や定性的判断による重要タスクの特定
- 重要タスクは現場インタビューを含む詳細分析
- 簡易分析は机上検討

HEPの定量化
- 認知・診断タスク：EPRI　CBDT手法、NRC　IDHEAS手法　等を利用）
- 実行タスク（操作、作業）：（THERP (NUREG/CR-1278)手法　等を利用）

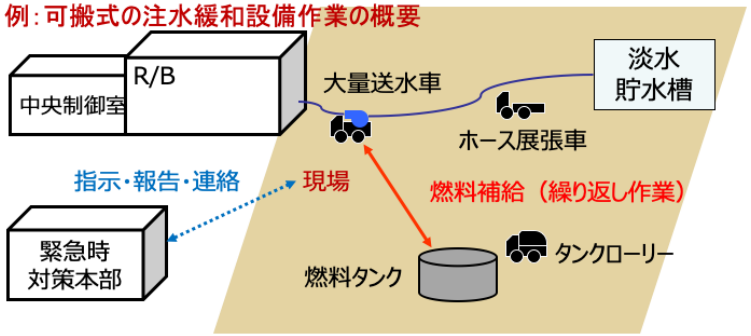
叙事知（Narrative）：　プラント固有，シナリオ固有の状況に関する情報

詳細な定性分析に基づく人間信頼性解析(HRA)の適用による外的事象PRAにおける人的過誤事象の評価手法

➢ 提案手法による評価例

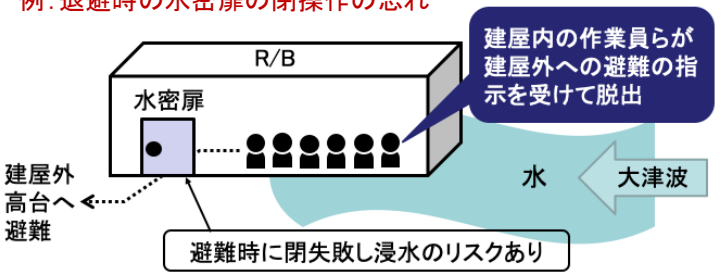
➢ 可搬式注水緩和設備作業の人的過誤評価モデル

例：可搬式の注水緩和設備作業の概要



➢ 水密扉の閉操作の人的過誤評価モデル

例：退避時の水密扉の閉操作の忘れ



➢ 実行タスクステップ集約表による分析例

ステップ整理番号	手順書情報		HEP評価ステップ		評価対象外	HEP値表の選定用情報	PSF・過誤回復・従属性情報
	項目	操作内容	必須	過誤回復			
1	a	■スイッチを操作	●			スイッチ識別明確	運転員A/一般/習熟高
2	b	□ランプ確認		●		ランプ識別明確	運転員C/主任/習熟高
3	c	▲へ移動			●	要員移動のみ	-
4	d	○弁を操作	●			ロータリスイッチ（標準）	運転員A/一般/習熟高

➢ 水密扉の閉操作のHEP評価手法

水密扉閉失敗発生までのモデル化
- モデル化対象者＝①建屋内部の作業チーム
- 建屋外への避難行動のモデル化

②避難放送を聞き、
③建屋外への避難を選択し、
④避難経路を選択し、
⑤扉の開閉操作を行う

下記5項目の乗算で求める

①建屋内滞在確率（X）	②避難放送の聞き取り成功確率（A）
③建屋外避難の選択確率（Y）	⑤評価対象扉の閉失敗確率（B）
④評価対象扉の選択確率（Z）	
プラント情報の収集	THERPの読み替え

以下の観点で外的事象PRAでも実用的なHRAが可能
- 複数の実施チームと実施場所のモデル化
- 屋外操作やリカバリーのHEP
- 外部ハザードのストレスレベルの扱い
- 水密扉の閉操作等の評価方法　等

© CRIEPI 2015

CRIEPI Central Research Institute of Electric Power Industry

リスク関連標準とNRRCの研究成果

標準規格	委員参加 三役● 委員◎	NRRC研究 成果反映（実績）	NRRC研究 成果反映 (予定)
内的事象レベル1PRA標準	●	・「人間信頼性解析手法の開発」の成果である「人間信頼性解析（HRA）ガイド」での定性分析の高度化、近年のHRA定量化手法などを附属書に反映。	
レベル2PRA標準（地震、津波拡張）	●	・レベル1PRAとレベル2PRAのインターフェイスの手法を附属書に反映	
レベル3PRA標準	●	-	-
PRAパラメータ推定標準	●	・NIC,JANTIを通じて行った一般機器故障率のデータ収集とベイズ推定の評価手法を反映	・「内的レベル1PRA手法改良」において「国内原子力発電所のPRA用一般機器信頼性パラメータの推定」を発刊。今後の国内PRA用のパラメータ推定の評価事例として活用
地震PRA標準	◎	・SSHACプロセスに基づく地震ハザード評価手法	・「地震PRA・津波PRAの高度化」における開発技術を改定時に反映 ・HRAの定性分析手法（NRRC HRAガイド）
断層変位PRA標準	●	・「断層変位評価に関する取組」により、断層変位ハザード評価手法とフラジリティ評価、PRAモデル構築に関する内容が標準策定に活用された。	
津波PRA標準 同適用事例集	●	・ハザード評価の最新知見を規格及び附属書、解説に反映	・国プロ研究の「地震PRA・津波PRAの高度化」における開発技術を改定時に反映

リスク関連標準とNRRCの研究成果

標準規格	委員参加 三役● 委員◎	NRRC研究 成果反映（実績）	NRRC研究 成果反映 (予定)
内部火災PRA標準	◎	-	・「内部火災リスク評価手法整備・火災防護」で開発した「内部火災PRA実施ガイド」を次回改定時に活用 ・内部火災における一般化したHRA評価事例を活用
内的溢水PRA標準	◎	-	・「内部溢水リスク評価手法整備護」で開発する「内部溢水PRA実施ガイド」を次回改定時に活用 ・内部溢水における一般化したHRA評価事例を活用
外部ハザードのリスク評価手法選定標準	●	-	・改定案検討に際し、「PRA学会標準の整備支援およびPRA人材育成」により標準案検討を支援
核燃料施設リスク評価標準	◎	-	-
PRA品質確保標準（PRA共通事項標準）	●	-	・PRA品質確保標準から共通事項標準への新規標準への変更にあたり、「PRA学会標準の整備支援およびPRA人材育成」により品質確保PRA分科会の主査及び委員として方針作成や標準素案を検討
リスク評価の共通用語標準	●	・分科会の主査及び委員として方針作成や標準素案作成、策定を支援	
IRIDM標準	PRA品質確保分科会でレビュー	・品質確保PRA分科会の主査及び委員としてリスク評価関連に記載のレビューを実施	

標準活用のための方策について

- NRRCの研究開発は継続的安全性向上の取り組みのための成果の実務適用支援とまたそれらから得られるフィードバックにより、実用性の高い技術開発を目的として実施
- PRA実施、レベル2PRA、火災、HRA等の実用的な実施ガイドの開発、これらを実機適用したモデルプラント評価により応用を重ねることによる技術向上を図る
- 成果を電中研報告書や学術論文等で公知化
  → 原子力学会のリスク関連規格改定時における要求事項への反映、具体的な評価事例として標準規格から参照可能な技術レポートとして活用が可能

- 今後も産業界や学会のニーズを汲み取りながら実用的な研究開発を進めていくことで、学会の標準もより活用しやすいものとなるように連携していくことが重要