



令和4年度
原子力規制庁技術基盤グループ-原子力機構安全研究・防災支援部門
合同研究成果報告会

確率論的リスク評価のための 人間信頼性解析手法の開発

令和4年11月22日

原子力規制委員会 原子力規制庁
技術基盤グループ シビアアクシデント研究部門
リスク評価班
西小野 華乃子

nishiono_kanoko_yg4@nra.go.jp



目次

1. 規制での確率論的リスク評価の活用と課題
2. 人間信頼性解析と歴史
3. 人間信頼性評価手法開発プロジェクトのビジョン
4. 平成29年度から令和3年度までの取り組み
 - i. 手法の選定
 - ii. 曖昧さ低減に向けた取り組み
 - iii. ツール開発
5. 今後の研究計画
6. 結論



1. 規制での確率論的リスク評価の活用と課題

【背景】

- 原子炉施設で発生する事故のうち80%が人的過誤に起因する(USDOE, 2009)
- 炉心損傷に至る事象において、運転員の過誤の影響は大きい
- 既存の手法(THERP手法、EPRI手法)では人的過誤と作業環境の変化の因果関係のモデル化が不十分であり、人的過誤の原因分析が難しい

【課題】

人的過誤の課題が見つかったとしても、劣化状態、原因、有用な対策について定量的な指標を基に議論することが難しい。

人的過誤による炉心損傷リスク低減に向けた、現実的かつ詳細に人的過誤確率を評価できる手法の開発が必要



人間信頼性評価の活用イメージ

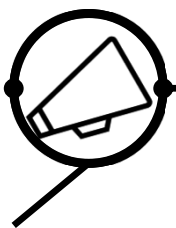
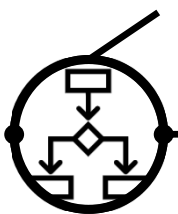
人的過誤に繋がる

事象発見

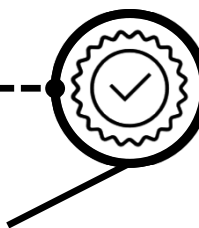
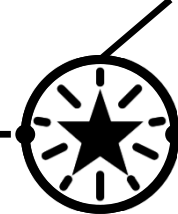


評価結果を基に

有意な劣化の有無を判断



対応策をとる



人間信頼性解析により、原子力安全の劣化程度と原因を分析

分析結果を事業者へ通知

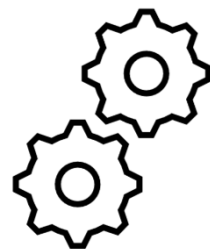
人間信頼性解析により、安全性の向上を確認

機能要求事項:

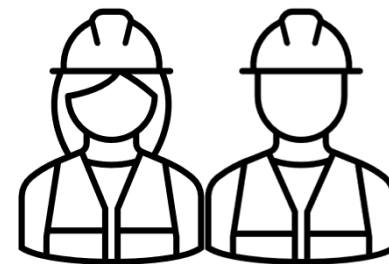
- ★ 解析条件の設定が容易 ⇨ 専門家判断が不要
- ★ 解析過程が追跡可能
- ★ 様々な事象に適応可能



人間信頼性解析とは？



機器・システム



運転員

人間信頼性解析＝運転員の人為的ミスのリスク評価

人的過誤の同定 → 人的過誤の特徴整理 → リスクの定量化

どんな運転員操作がある？
操作？認知？

作業環境の変化による影響は？
前後の操作との関係は？

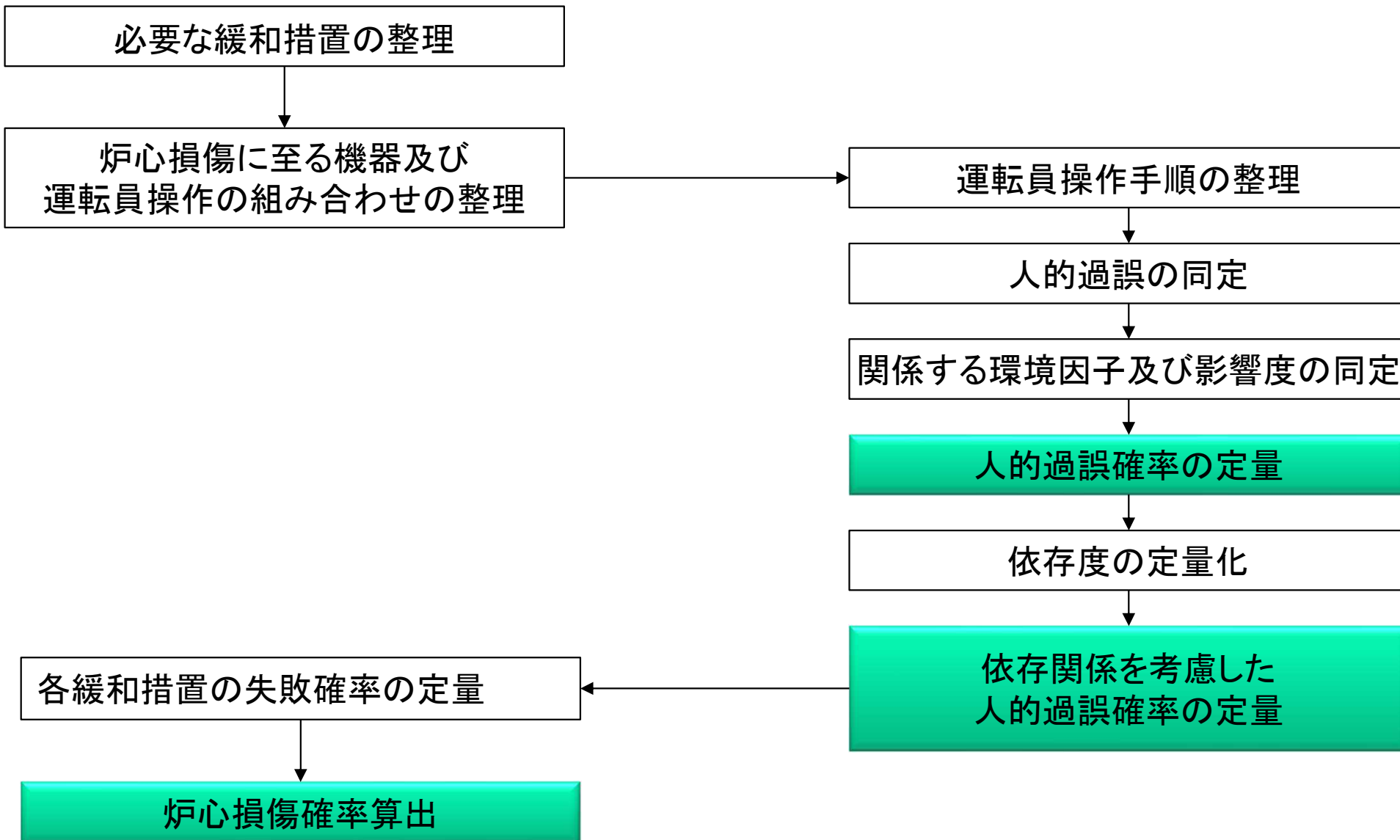
操作の失敗確率は？
環境因子の影響度評価
前後の操作の影響度評価



確率論的リスク評価と人間信頼性評価の関係

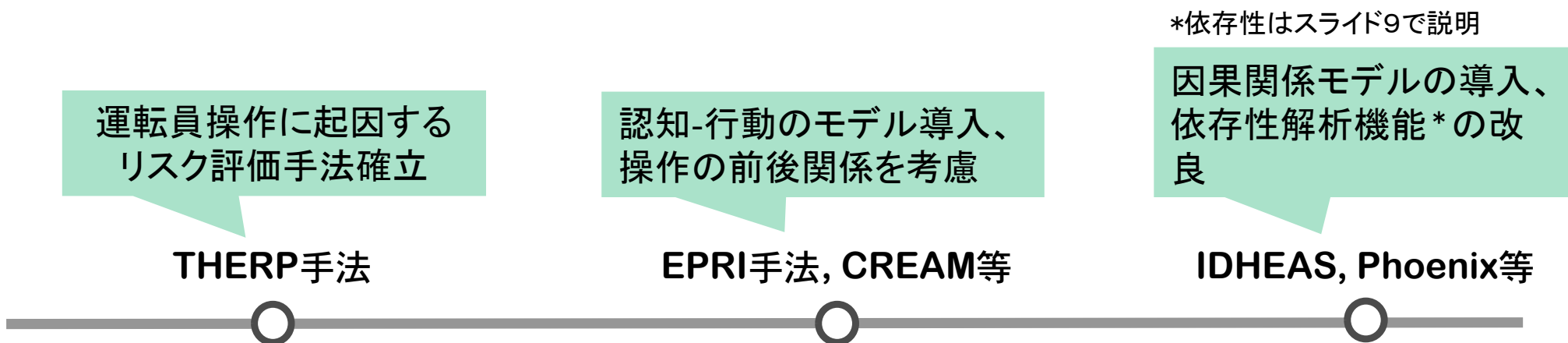
確率論的リスク評価

人間信頼性評価





人間信頼性解析手法開発の歴史



- Swain博士が初期のTHERP手法を発表(1962)
- THERP手法を原子力発電所のリスク評価に適用(1969)
- スリーマイル島事故を受けて改良(1983)

より現実的な評価に向け、
さらなる改良が必要



人間信頼性解析手法開発プロジェクト

手法開発と確率論的リスク評価への適用といった
二つのプロジェクトから成り立っている。

人間信頼性解析手法の開発

今回の発表

- i. 手法の選定
- ii. 曖昧さ低減に向けた取り組み
- iii. ツールの開発

妥当性確認

環境因子の整理

確率論的リスク評価への適用

従来のリスク評価

インターフェース開発

動的リスク評価

時間の概念の導入

機器の失敗確率の導入

デジタル制御盤、機器への適応

外部事象への機能拡張



i. 手法の選定

- Phoenix、THERP、IDHEAS、EPRI HRA Calculatorの4種で比較を行った。
- 以下の理由によりPhoenix手法が選定された：
 - 確率論的リスク評価のモデルに基づく人的過誤の同定
 - 炉心損傷に至る運転員操作の組み合わせを抽出できる
 - 因果関係モデルを持っており、人的過誤の原因分析への活用が見込まれる
 - 因果関係モデルに基づく人的過誤間の関係性の分析(依存性分析)

	Phoenix	THERP	EPRI HRA Calculator	IDHEAS
確率論的リスク評価との親和性	○	△	△	△
ツールの使いやすさ	○	△	△	△
解析条件の追跡性	○	×	×	○
原因分析機能	○	×	×	○
依存性解析機能	○	△	△	△



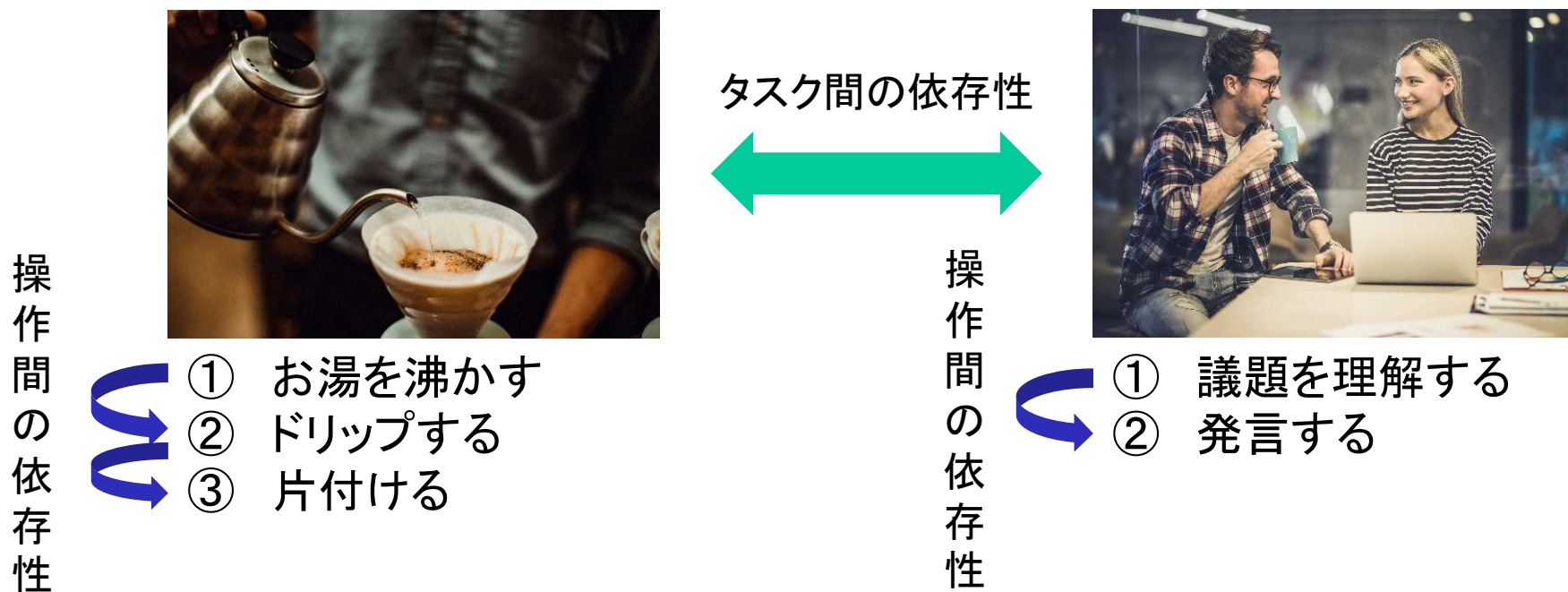
ii. 曖昧さ低減に向けた取り組み: 依存性解析

依存性解析＝

一つ前の操作が次の操作にもたらす影響の評価

- ① タスク間の依存性
- ② 操作間の依存性

例えば、コーヒーを入れてから打ち合わせをする場合





ii. 曖昧さ低減に向けた取り組み: 依存性解析 (Cont.)

依存性の主観的な判断は、
人間信頼性評価と確率論的リスク評価の結果に
違いをもたらす可能性がある (Cepin, M, 2008)

従来手法: Joint HEP

- THERP手法開発以降、約60年間様々なHRA手法用いられてきた
- タスク間の依存性を評価する
- 依存度の定量化においてプラント設計やヒューマンファクターの**専門家判断**を要する



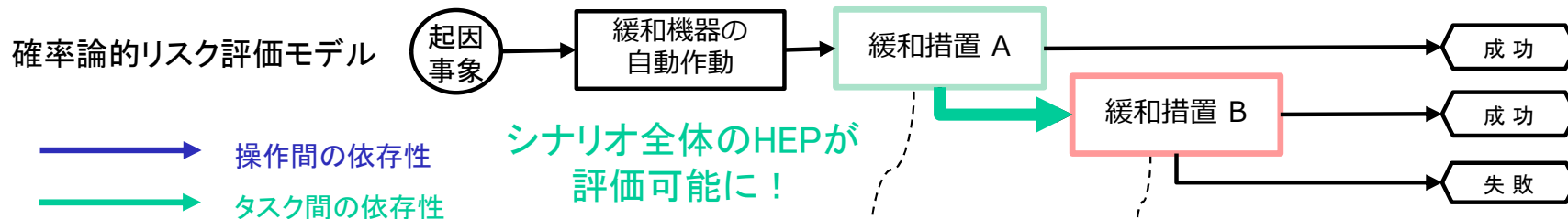
ベイジアン・ビリーフ・ネットワーク による図示法

- 人的過誤の因果関係性を図化できる
- タスク間、操作間の依存性を考慮可能
- ベイズ更新により事故進展を考慮して人的過誤確率を算出できる
⇒主観的判断の低減
解析条件が追跡可能

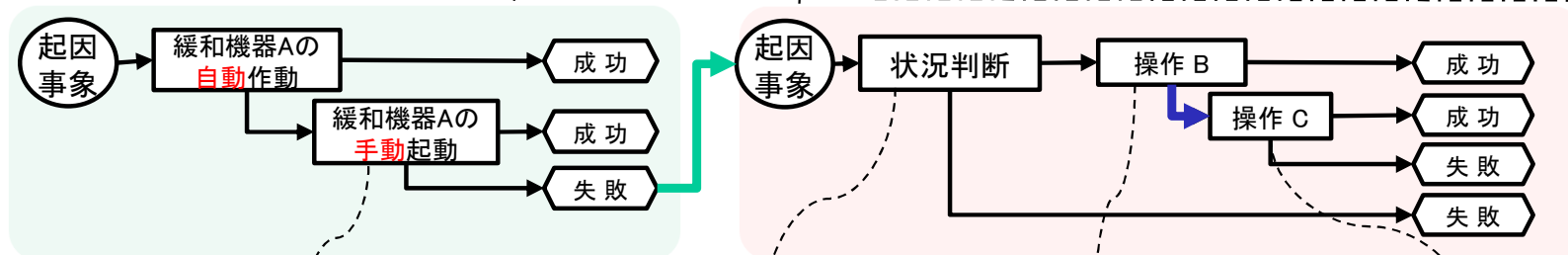


iii. ベイジアン・ビリーフ・ネットワークを用いた 依存関係のモデル化機能の追加

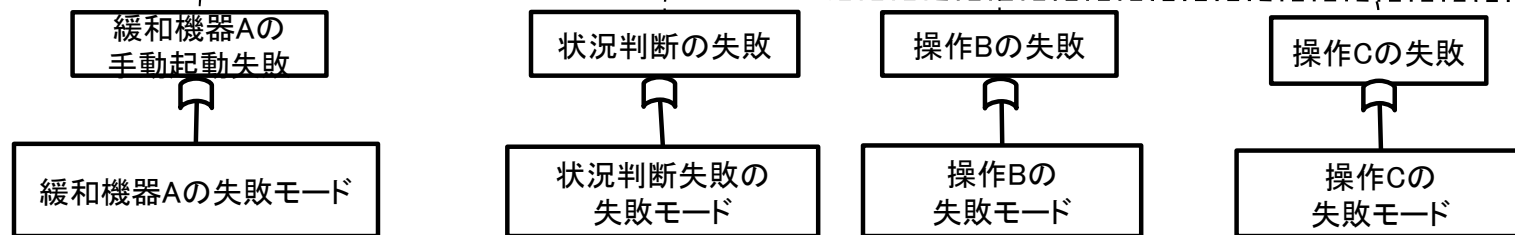
運転員交代は無し、手順書は緩和措置Aから変更



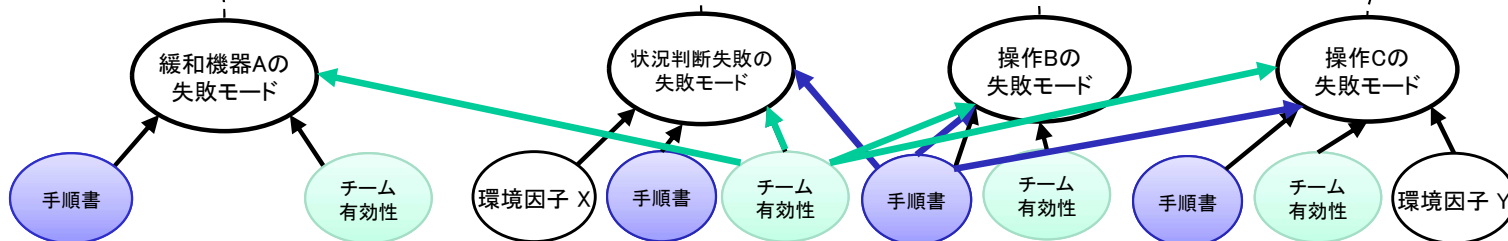
人的過誤の同定



人的過誤の分類



因果関係モデルの構築



参考:

NISHIONO, K et al. (2021) "Dependency Analysis within Human Failure Events for Nuclear Power Plant: Comparison between Phoenix and SPAR-H", PSAM16 proceedings

Ramos, M et al. (2021) "Phoenix Human Reliability Analysis Method: Application to a Feed and Bleed Operation", PSA2021 proceedings



今後の研究計画: Phoenixの妥当性検討

実験値との比較

- シミュレータを用いた実証実験とPhoenixの評価結果を比較

他の人間信頼性評価手法との結果の比較

- Phoenixと既存の手法での結果のばらつきとその要因分析

解析者ごとの結果のばらつき

- 異なる解析チームに同様のシナリオで解析を実施してもらい、解析条件の違いと結果のばらつきを比較する。



今後の研究計画: Phoenixの確率論的リスク評価への適用

従来のリスク評価手法

- ET/FTとのインターフェース開発

動的リスク評価手法

- Phoenixの環境因子等への時間的概念の導入

Phoenixの改良

- 機器の失敗確率の導入
- デジタル制御盤、機器への適応
- 外部事象への機能拡張



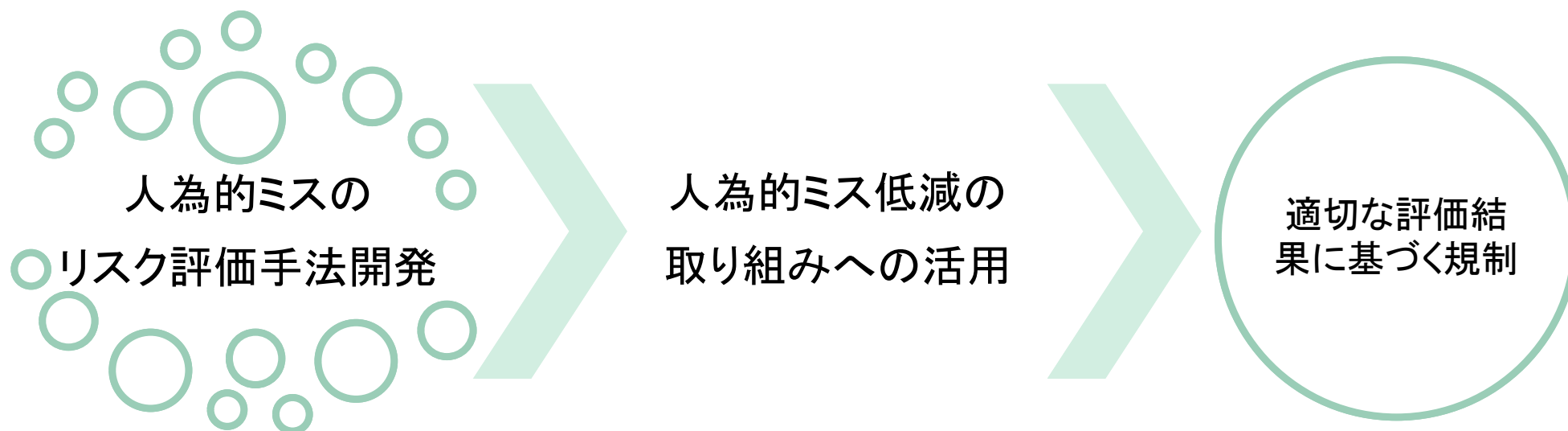
結論

- 原子炉施設の人為的ミスの低減に向け、定量的なリスク指標を基にした議論及び原因分析をするべく、現実的かつ詳細に人的過誤確率を評価できる人間信頼性評価手法の開発を進めている。
- 確率論的リスク評価と親和性が高く、因果関係モデルを有するPhoenix手法の改良を進めた。
- 操作間の依存性考慮機能追加により、より現実的な評価が可能となった。
- 今後は、手法の妥当性検討と確率論的リスク評価への導入を進める。



参考文献

- INTERNATIONAL ATOMIC ENERGY AGENCY, Managing Human Resources in the Field of Nuclear Energy, IAEA Nuclear Energy Series No. NG-G-2.1, IAEA, Vienna (2009).
- UNITED STATES DEPARTMENT OF ENERGY, Human Performance Improvement Handbook, Vol. 1: Concepts and Principles, DOE Standard DOE-HDBK-1028-2009, USDOE, Washington, DC (2009).
- Anthony J. Spurgin (2010), “Human Reliability Assessment theory and practice”, CRC Press
- Ronald L. Boring, (2012), “Fifty Years of THERP and Human Reliability Analysis”, PSAM11 proceedings
- 濱口義兼 et al., (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”, 安全研究成果報告書
- Nishiono, K., Ramos, M., Hamaguchi, Y., Mosleh, A. (2021) “Dependency Analysis within Human Failure Events for Nuclear Power Plant: Comparison between Phoenix and SPAR-H”, PSAM16 proceedings
- Ramos, M., Nishiono, K., Ueda, H., Hamaguchi, Y., Mosleh, A., (2021) “Phoenix Human Reliability Analysis Method: Application to a Feed and Bleed Operation”, PSA2021 proceedings



原子力規制委員会 原子力規制庁
技術基盤グループ シビアアクシデント研究部門 リスク評価班
西小野 華乃子

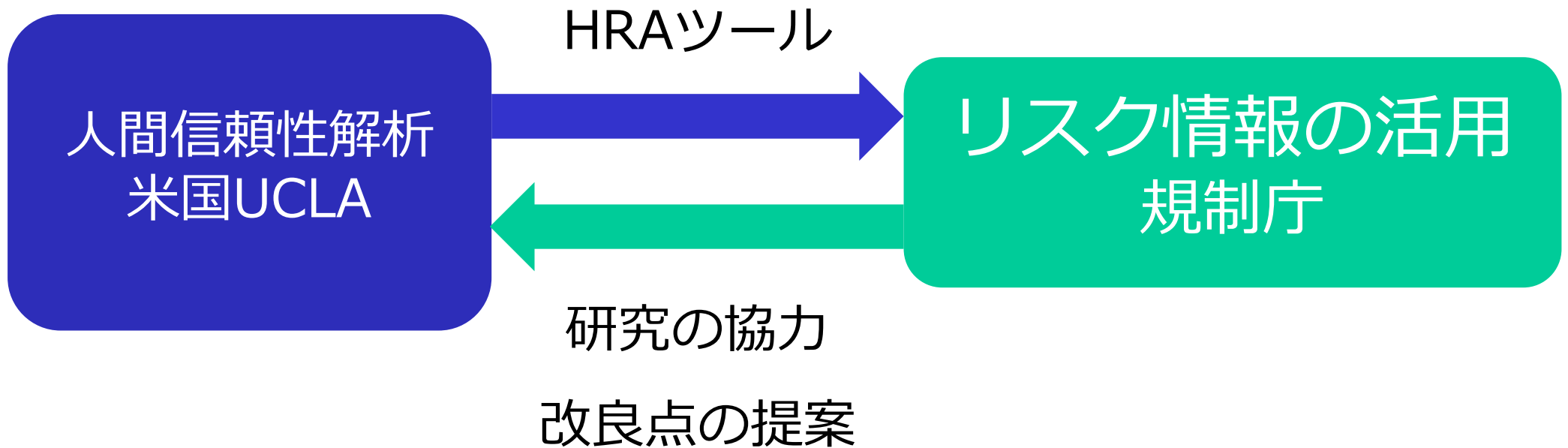
nishiono_kanoko_yg4@nra.go.jp

※本資料で示した内容は著者等の見解であり、
原子力規制委員会の見解を示したものではありません





プロジェクト体制





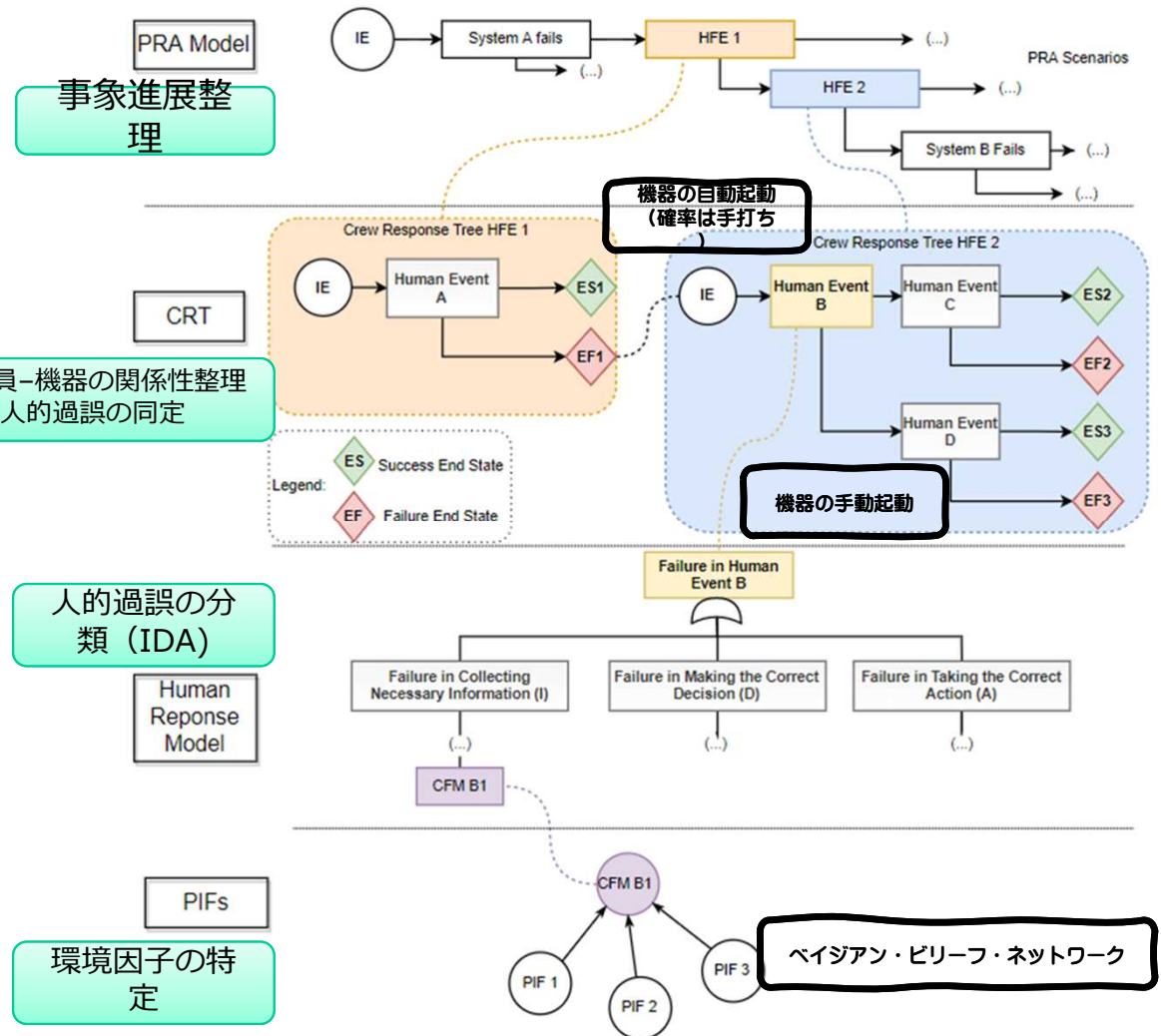
HCR/ORE vs CBDTM

- 共に認知に関する人的過誤確率を算出する手法
- CBDTMは環境因子に重点を置いているのに対し、HCR/OREは時間的要素に重点を置いている。
- CBDTMは実験データをもとに決定した環境因子をもとに認知の過誤を定量化する。
- 考慮される環境因子は大きく分けて①プラント情報と運転員間のインターフェースの失敗、②手順書と運転員間のインターフェースの失敗の2種に分けられる。
- HCR/OREはシミュレータデータをもとに時間と認知過誤の関係性を整理した認知過誤曲線をもとに定量化する。



Phoenix手法とは

- 因果関係モデル、IDAモデルに基づくHRA手法
- 特徴**
- Yes/No質問で解析条件設定可能
- PRAのイベントツリーを元に人的過誤の同定と分類を行う
- 人的過誤—環境要因の因果関係モデルが整理されている
- HEPにタスク間及び操作間の依存性、及び機器故障率を考慮したHEPの算出が可能
- IDAが組み合わさっている事象のHEPも算出可能



出典 : Ramos, M et al. (2021) "Phoenix Human Reliability Analysis Method: Application to a Feed and Bleed Operation", PSAM2021 proceedings



i 既存の手法の特徴整理 (H30-R1年度)

手法の選定のために解析対象となる内部事象及び外部事象を対象に解析結果の特徴を整理した。

- THERP
- EPRI HRA Calculator:
THERP + CBDTM* また HCR/ORE**
- IDHEAS
- Phoenix

時間の余裕が
あまりない操作

*CBDTM: Cause-Based Decision Tree Method
**HCR/ORE: Human Cognitive Reliability/Operator
Reliability Experiment

内部事象シナリオの試解析

大破断LOCA時の
代替再循環切替操作

外部事象シナリオの試解析

地震発生時の大破断LOCA***時の
代替再循環切替操作

***LOCA:
Loss-of-Coolant Accident
配管の破損等によって軽水が
流出し、炉心の冷却機能が損
なわれる事故

①内部事象の算出結果の比較

②外部事象での算出結果の比較



既存の手法の特徴整理 (H30-R1) Conc.

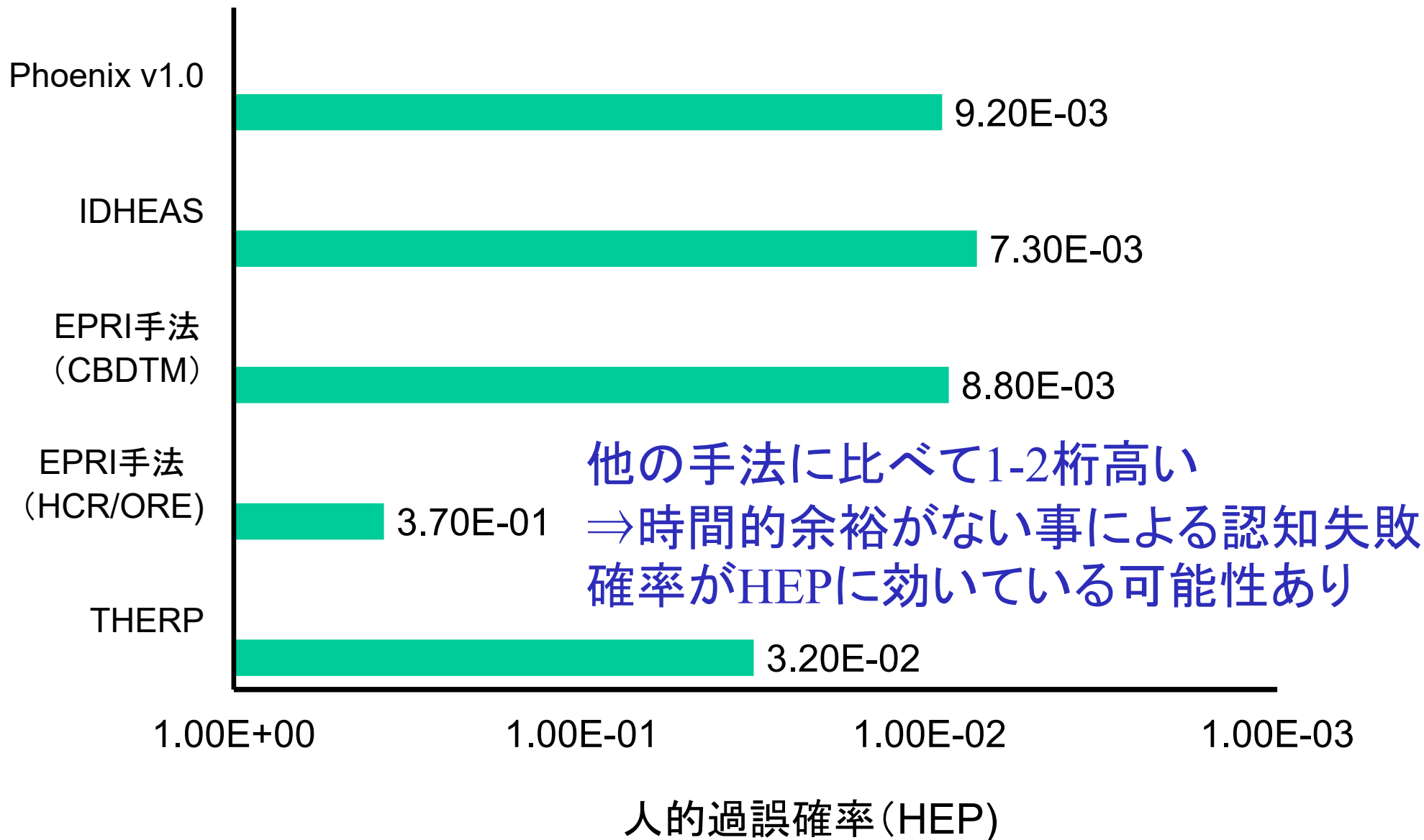
- 内部事象は、大破断LOCA時の代替再循環を対象とした解析においては、HCR/OREを用いたEPRI手法の結果が他の手法に比べて1-2桁高く算出された。
- どの手法でも内部事象に比べて外部事象の方が1桁以上人的過誤確率は増加した。
- 外部事象の考慮手法の比較では、IDHEASはどの手法を用いても大きな差異は見られなかったのに対し、CBDTMを用いたEPRI手法では環境因子の影響度を増加させた場合が他の方法に比べて高かった。
- 他の解析シナリオでも解析を行い、傾向の分析を行うことが重要である。

手法	代替再循環切替操作に係る人的過誤確率			
	内部事象	外部事象		
		環境因子の影響度を増加させた	HEP算出時の環境因子重み付けの分岐を追加	HEP算出時に地震を考慮する項目を追加
THERP(操作+認知)	3.2×10^{-2}	1.2×10^{-1}	-	-
EPRI手法(HCR/ORE)(認知)	3.7×10^{-1}	- 1.0を超えたため対象外	-	-
EPRI手法(CBDTM)(操作+認知)	8.8×10^{-3}	1.3×10^{-1}	1.5×10^{-2}	1.5×10^{-2}
IDHEAS(操作+認知)	7.3×10^{-3}	7.3×10^{-2}	7.1×10^{-2}	7.1×10^{-2}
Phoenix v1.0 ⁱⁱ (操作+認知)	9.2×10^{-3}	4.2×10^{-2}	-	-



結果①: 内部事象シナリオの試解析結果の比較

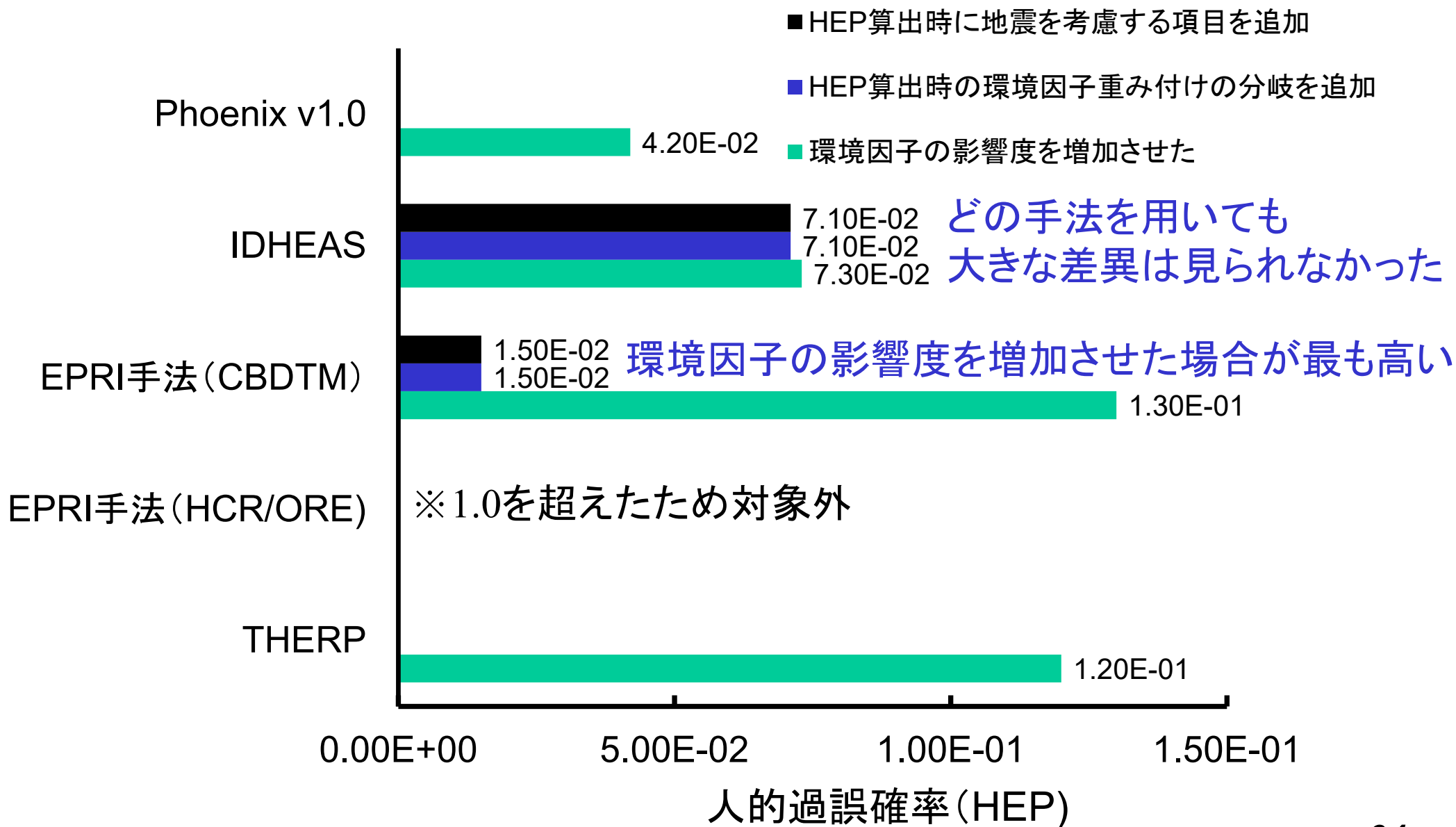
大破断LOCA時の代替再循環操作の人的過誤確率





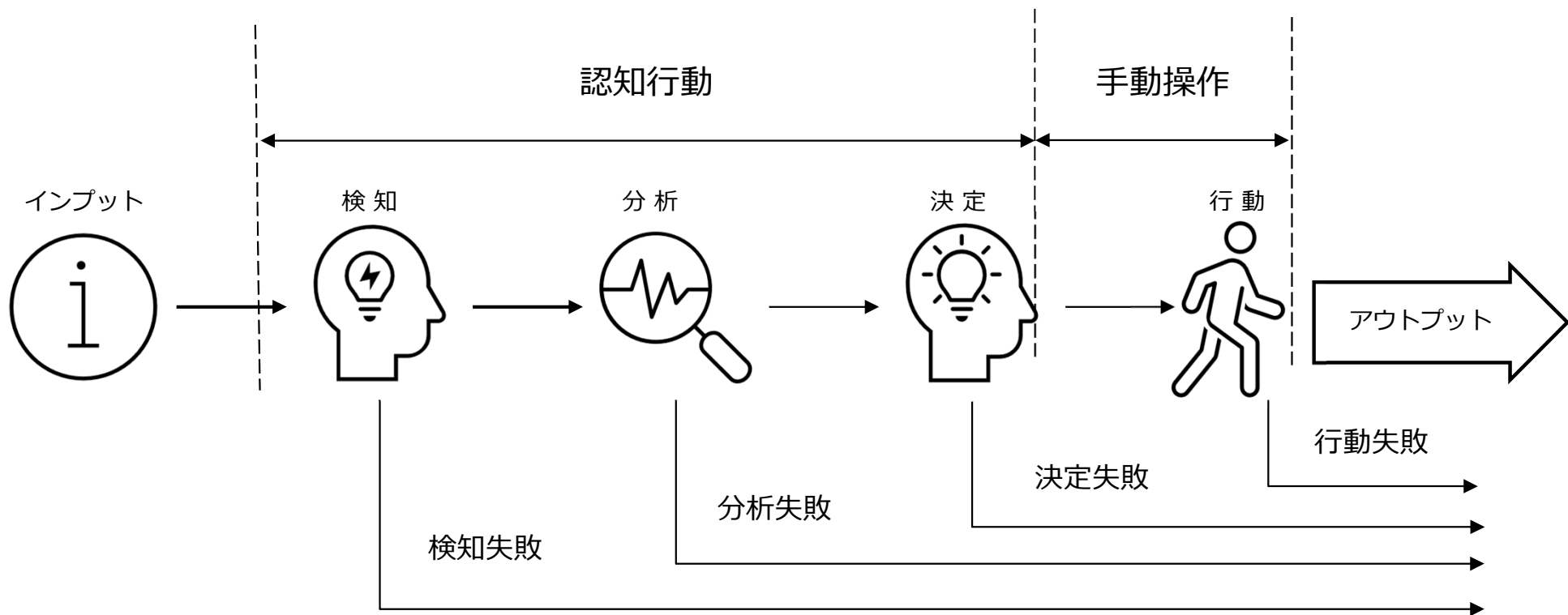
結果②: 外部事象シナリオの試解析結果の比較

地震発生時の大破断LOCA発生時の代替再循環切替操作に係る人的過誤確率





中央制御室での運転員の行動モデル



参考: Anthony J. Spurgin (2010), "Human Reliability Assessment theory and practice", CRC Press