

リスク部会・HMS部会 合同セッション
確率論的リスク評価における人間信頼性解析
(2)人間信頼性解析手法に関する課題と取り組み

桐本 順広¹

¹電力中央研究所 原子力リスク研究センター

2019年3月20日

茨城大学 水戸キャンパス

概要

- 人間信頼性解析(HRA)の概要と課題
- NRRRCにおけるHRA研究の概要
 - ✓ HRAガイドの開発
 - ✓ 可搬型機器のHRA
- 人的過誤事象データの収集と活用
- まとめ

人間信頼性解析(HRA : Human Reliability Analysis)とは

人的過誤事象(HFE : Human Failure Event)

- 事故などにつながる要因となった人間の行為、あるいは期待される標準行為や手順からの逸脱行為による期待される機能の失敗

人間信頼性解析(HRA : Human Reliability Analysis)

- HFEが発生するための行動影響因子や環境因子、発生に至る文脈を定性的な分析で明確にし、
- 定性分析結果を元に、HFEを、認知失敗・診断失敗と実行失敗が発生する確率として定量的に求める手法。

→ 人的過誤はPRAロジック・モデルに組み込まれる。

PRAにおける人間信頼性解析(HRA)

• 人間信頼性解析で対象とするタスク

原子力発電所内で行なわれる作業や緩和操作(タスク)は実施する時期によって、事故発生前と事故発生後、起因事象となる人的影響の3つに大きく分けられる。

事故発生前のタスク

定期的保守、修理保守、計器校正、定例試験などの作業における
“し忘れ”や“間違った操作”

起因事象となるタスク

機器の操作ミスや系統構成ミス、作業による結果が、冷却材流出や電源喪失等の起因事象に直接結びつくような人的過誤

事故発生後のタスク

事故発生への対処としてとられるタスクであり、発生事象の“キュー(きっかけ)の認知”“対応手順に入る際の診断”“手動起動(非自動化システム)操作”、“回復操作”“自動起動のバックアップ操作”、など

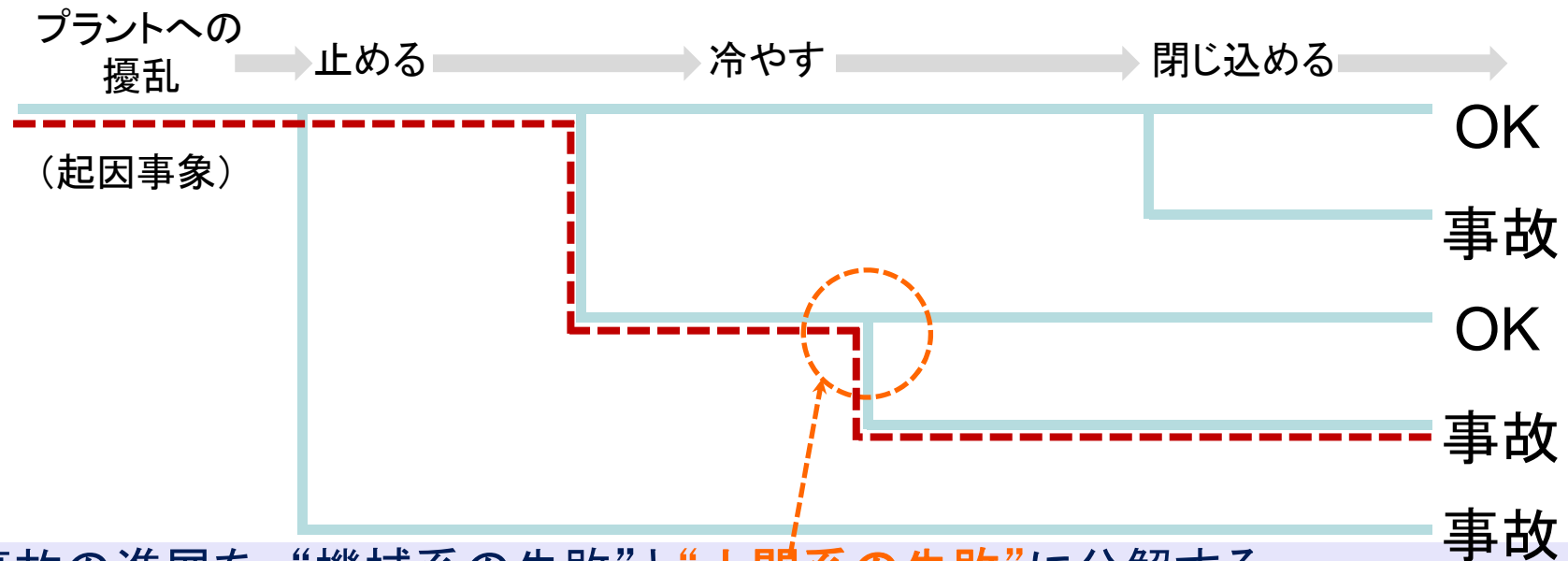
“人的過誤”評価手法のなりたち(第一世代)

スリーマイルアイランド原子力発電所2号機(TMI-2)事故(1979)

水位計読みの誤判断により、**運転員が**非常用炉心冷却装置を**手動で**停止

- 確率論的リスク評価 (probabilistic risk assessment, PRA) での人間信頼解析 (human reliability analysis, HRA)

PRAイベントツリーの中の人的行為



事故の進展を、“機械系の失敗”と“**人間系の失敗**”に分解する。

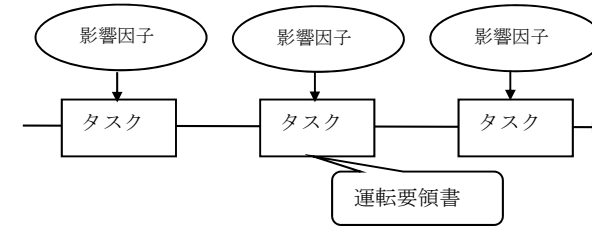
- 機械系の失敗は 故障率/故障確率 (偶発故障) を考える
- 人間系の失敗**も機械と同様、“ある確率で失敗する”と想定 (**人的過誤確率**)

近年の人間信頼性評価モデルの転換と課題

● 第一世代手法(THERP等, 1980年代~)

- 人間が手順に準拠して規範的行動を取る時の、人間信頼性が一様な確率分布に従う範囲で、背後因子の変化が人間信頼性にもたらす影響を考慮して評価

→ 評価モデルと人的過誤確率の表に現在も依存したまま停滞



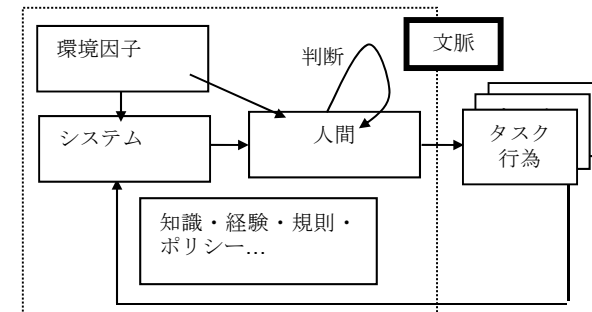
第一世代HRAの評価概念の例

● 第二世代手法

(ATHEANA, CREAM, 等, 2000年代~)

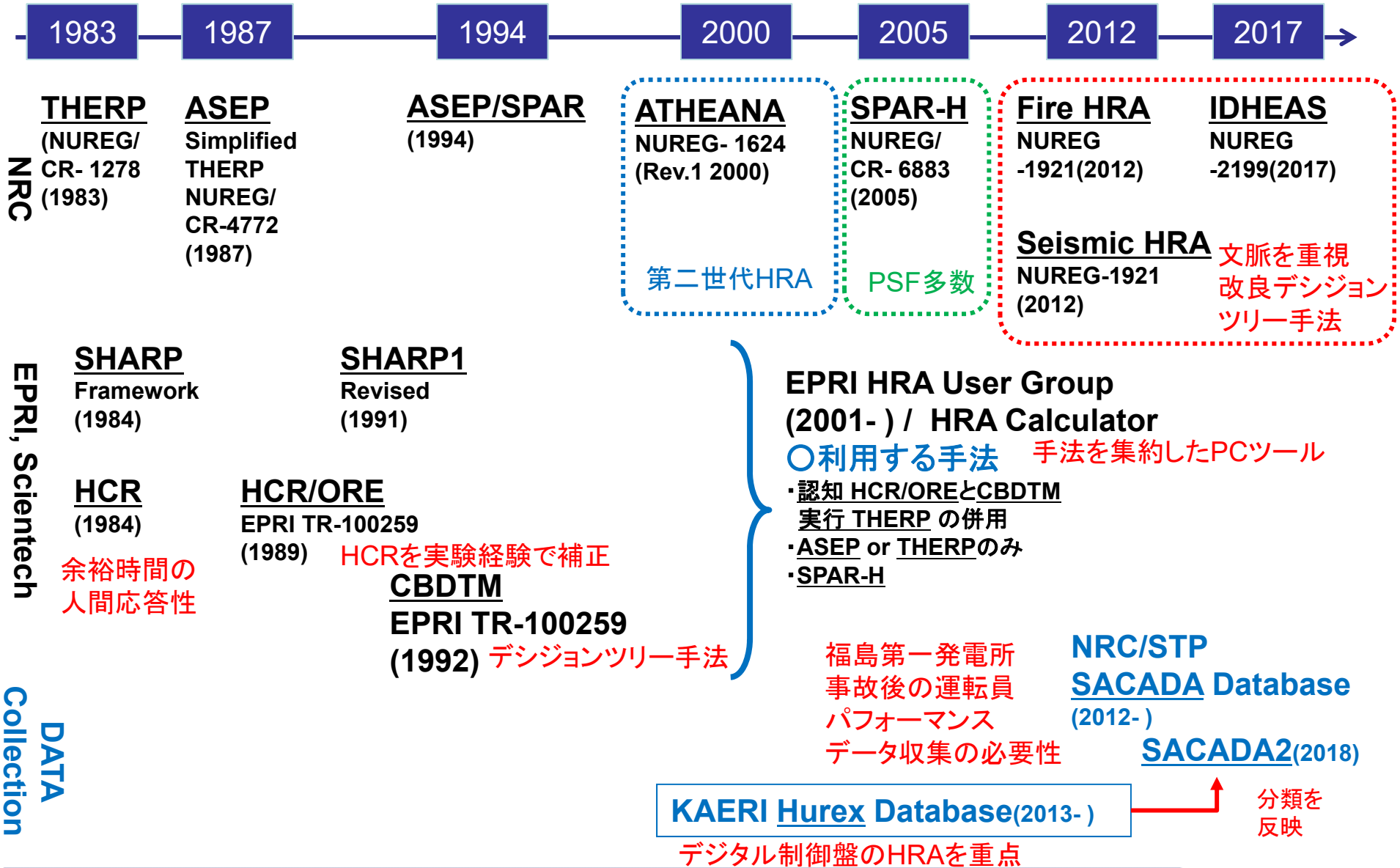
- 実際の人間の行動が、その作業の環境や物事の前後関係(文脈: Context)に依存すると考えられ、そのような条件で人間信頼性が大きく失われる背後因子の状態を評価

→ 一方で、専門家判断に依存するため、分析が難しく定量化結果が安定しない



第二世代HRAの評価概念の例

HRAの歴史(主に米国)



HRAにおける人的過誤事象の定性分析と 人的過誤率の定量化手法による推定

叙事知を用いた定性分析

「タスク」のHEP(人的過誤率)[※]算出に利用する定量化手法の決定

時間進展情報(時間進展図)・タスク関連情報(運転員応答図)・利用する定量化手法に応じた行動形成因子(PSF)などの情報の収集・集約

※HFE(人的過誤事象)の発生確率

定量化手法によるHEP算出

| タスクのタイプ | 対応する定量化手法 |
|--------------------|---------------|
| 認知／診断タスク{知覚・把握・決定} | HCR/ORE、CBDTM |
| 実行タスク{操作・作業実行} | THERP |

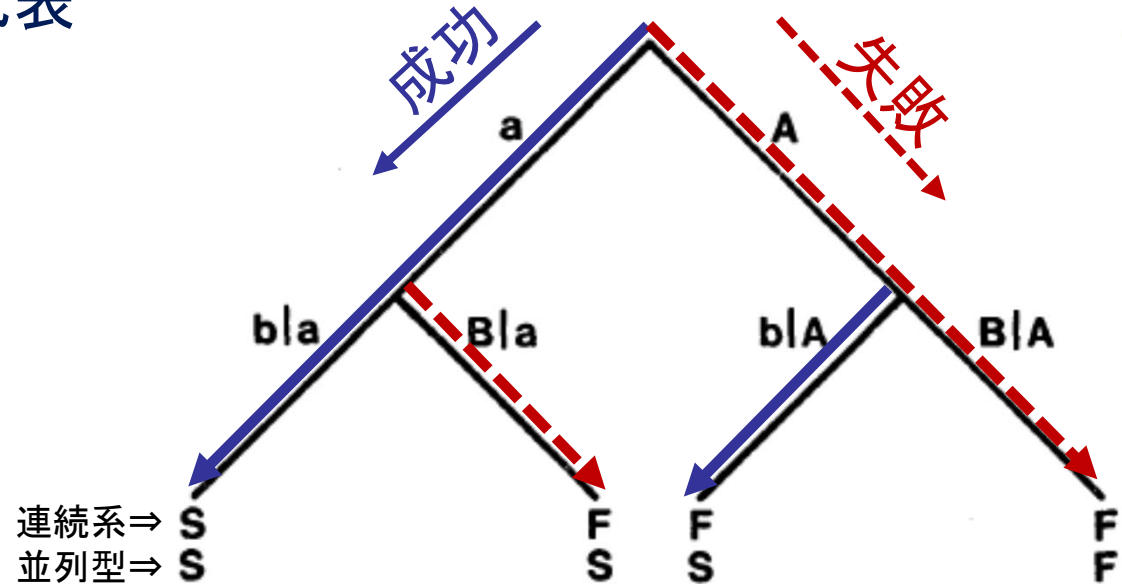
実行失敗の評価手法:THERP

- THERP, the technique for human error-rate prediction
- “第一世代”手法の代表
- 実行(操作)失敗

“人的過誤確率”算出のために
データベーステーブルが
必要になる

- ・訓練シミュレータのデータ
- ・フィールド(経験)データ
- ・運転操作コンピュータモデル
-etc.

加えて、操作の余裕時間を元に時間信頼性曲線により短時間操作のエラーを表現



システムの成功:S、失敗:F

| | | | | |
|---------|-----|-----|-----|-----|
| | 成功 | | 失敗 | |
| タスク 'A' | a | | A | |
| タスク 'B' | 成功 | 失敗 | 成功 | 失敗 |
| | b a | B a | b A | B A |

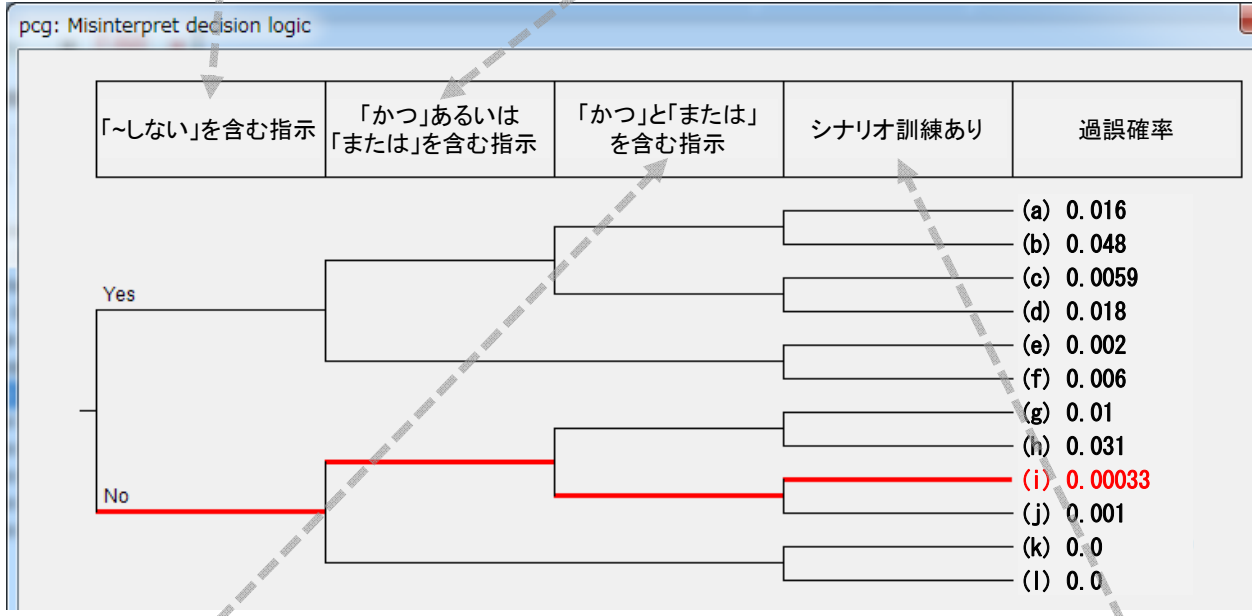
NUREG/CR-1278(1983)

認知失敗の評価手法: デシジョンツリー評価

「決定ロジックの誤解」 “Misinterpret decision logic”

Q. 手順書に「~しない」という指示を含むステップはあるか？
 A. ない(手順書を確認) ⇒ ‘No’

Q. 手順書に「かつ」あるいは「または」という指示を含むステップはあるか？
 A. ある(手順書を確認) ⇒ ‘Yes’



認知・診断失敗に関する全8つのデシジョンツリーの選択を失敗メカニズムの定性分析結果に基づいて行う

Q. 手順書に「かつ」と「または」を両方含む複雑な手順を含むステップはあるか？
 A. ない(手順書を確認) ⇒ ‘No’

Q. 運転員は当該シナリオに対し訓練されているか？
 A. されている(訓練見学より確認) ⇒ ‘Yes’

CBDTM (Cause-Based Decision Tree Method)

IAEA HRA Safety Report 技術会議 (2017/11/13-17) HRA課題のパネルディスカッションのトピックス概要

1. **人間と組織の要因 (Human and organisational factors)**
→ ヒューマンファクター、レジリエンス、安全文化、人間信頼性の相互関係
2. **マルチユニット(MU)の文脈 (Multi-unit context)**
→ 異なるクルーの間における依存性、外部事象および内的事象のハザードと作業負荷、リソースの課題
3. **長時間事象のHRA (Long-time windows)**
→ 緊急対応チームの介入、長期的な行動(追加の作業負荷)の場合に考慮すべき追加要因、HEP値の制限
4. **重大事故(以外も含む)の文脈によるHRA (HRA in the context of severe accident)**
→ SAMGアクションのモデリング、可搬型機器、L1とL2PSA間の依存関係
5. **HRAへのデータサポート (Data support to HRA)**
→ 適用可能なデータ(運転経験(OPEX)とシミュレータ訓練データ活用)、デジタルMCRへの対応、行動形成因子への理解向上

- 人間信頼性解析 (HRA) の概要と課題
- **NRRCにおけるHRA研究の概要**
 - ✓ HRAガイドの開発
 - ✓ 可搬型機器のHRA
- 人的過誤事象データの収集と活用
- まとめ

NRRCのHRA研究

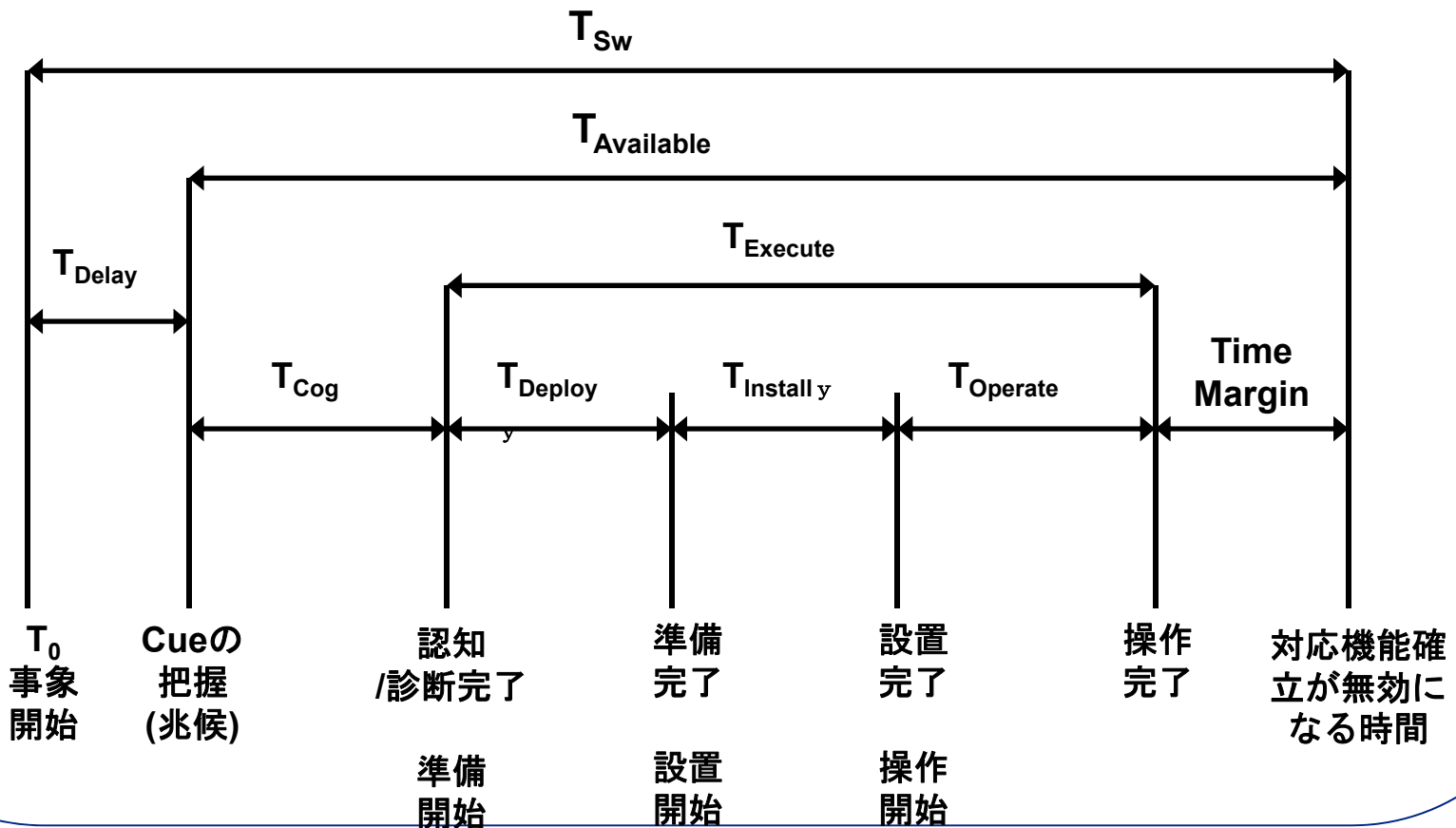
- **HRAガイドの開発** (公開版2018年度報告書発行 予定)
定性分析には文脈を重視する分析プロセス(叙事知(Narrative))を導入。定量化手法は欧米と同等の手法等を用いるHRAガイドを開発する。
また、外的事象PRA特有の人的過誤事象(HFE)の分析モデルの評価方法例を附属書として追加し、過酷状況下HRA手法への対応を行う。
- **外的事象PRAに用いるHRA分析モデルの整備** (2017~)
HRAガイドを用いた外的事象特有の人的過誤事象(HFE)の分析モデルの検討と開発。(検討課題:屋外機器操作のシナリオ/長時間操作/多重タスク/時間不確かさ分析の検討、地震・津波特有HFE事象の評価事例検討 等)
- **新定量化手法の開発**
 - HRA定量化手法の最新知見の調査、過酷状況下HRA手法の開発
- **国内実情を反映した人的過誤DBの検討**
 - 訓練部門でのデータ収集に対する国内実情の把握とHRA活用の検討
 - 人的過誤事象DBの国際連携の検討

“叙事知 (Narrative)”とは

- HRA/PRAにおける定性分析手法の概念
 - # 叙事(事実の記述) + 知識・知悉 (Narrativeの造語訳)
- **人的過誤を含む事象の進展経緯の記述**
 - 事故進展の物理的解析結果、運転員インタビュー、プラント情報等などの事実に基づいた事故/人的過誤に至る文脈の叙述結果とその背景情報を記述する。
 - 収集する情報の3つの形式:
 - 時間進展情報(操作に必要な時間等)
 - タスク構造情報(プラント条件、兆候など)
 - 行動形成因子(警報の見やすさ、手順書のわかりやすさ等)
- **追加要素: 逸脱シナリオ、新規HFEの検討**
 - プラント状況により発生可能性のある別途の人的過誤事象や変形シナリオの特定、及びPRAのシナリオへのフィードバックを行う

時間進展分析(タイムラインの作成)

事象の発生から、兆候の発生時間、事象の認知に要する時間、操作実行時間、機能確立までの余裕時間、を実際の操作担当者等への聞き取りにより現実的な時間を構成



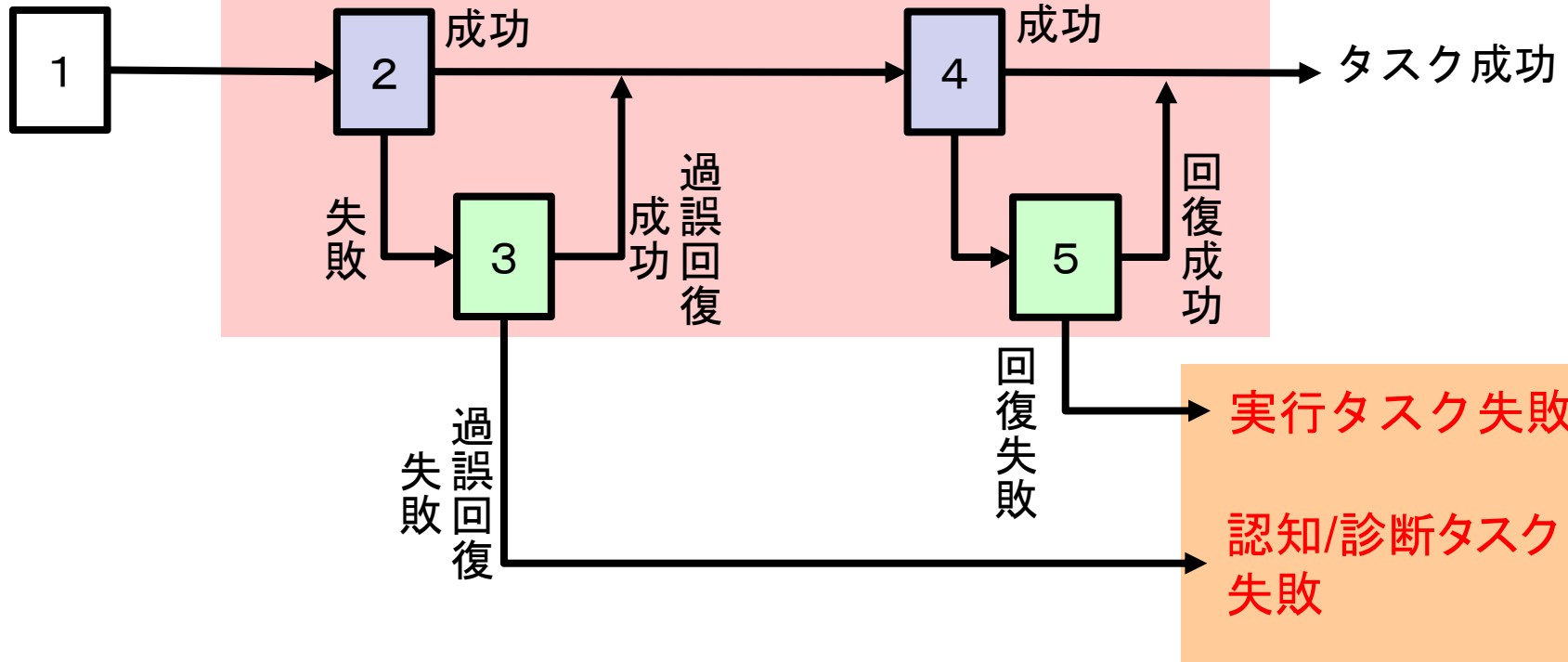
タスク構造情報: 運転員応答図(NUREG-2199 を改変)

タスク (認知/診断+実行)

事象発生
プラント条件
○○○○
.....

認知/診断タスク
{兆候の把握、手順書の
エントリー、操作・作業
の決定}

実行タスク
{操作・作業の実施}



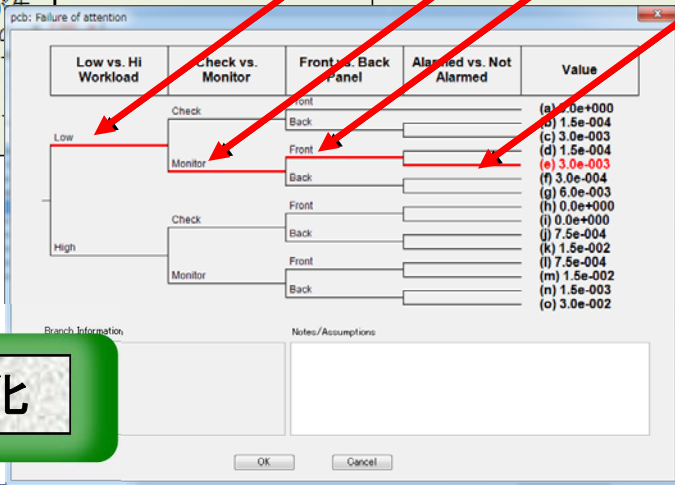
この和がタスクのHEP

インタビューからの行動形成因子情報の入力

使い易さの観点から、分析のインタビューを効率的に実施する質問リストを提供。
 (例題の追加、入力データとの対応、判断基準等を補足。)

叙事知

| No. | HRA Calculatorの入力必要項目 (手順書名・改訂バージョン、認知/診断部分に該当する手順、実行部分に該当する手順は除く) | ①手順書からの情報 | ②中央制御室・シミュレーター訓練の観察結果 | ③運転員のインストラクターへの聞き取り結果 |
|-----|--|-----------|--|--|
| 13 | 当該操作を実施するために必要なキューが運転員に対して出される際の運転員の状況としては、作業負荷が高いまたは混乱が生じている状況ですか（高い作業負荷または混乱は、運転員の注意力の低下（必要な情報の確認漏れ）を招く）。 | — | — | 役割を明確に指定するため、混乱は生じない。最初の事故警報発信時点においても、混乱はない。 |
| 14 | 当該操作を実施するために必要なパラメーターは、1回の確認でよいか、又は連続的な監視が必要か、いずれですか。 | — | 事前のシミュレータ訓練にて、手順書1つを参照していることを確認 | 手順書へのエントリーまでを考慮した場合は1回、F&Bの実施直前までの操作手順を考慮すると連続監視となる。 |
| 15 | 当該操作を実施するために必要なパラメーターの確認は、運転員が中央制御盤の前面パネルで実施可能ですか。あるいは、中央制御盤のパネル前面エリアから離れる必要がありますか。 | — | 事前のシミュレータ訓練にて、必要なパラメーターの確認が中央制御盤の前面パネルにて実施されていることを確認 | — |
| 16 | (No.13でキューが出される際に作業負荷が高い又は混乱が生じる、No.14で連続的な監視が必要、No.15でパラメーターの確認のためにパネル全面エリアから離れる必要がある、のいかに合致する場合に必要な質問) 当該操作を実施するために必要なキューは、警報ですか、とも計器等の監視ですか。 | | | 手順書へのエントリー時には警報になる。また、操作実施前にも警報が作動するが、操作直前ではない。 |



HRA 定量化

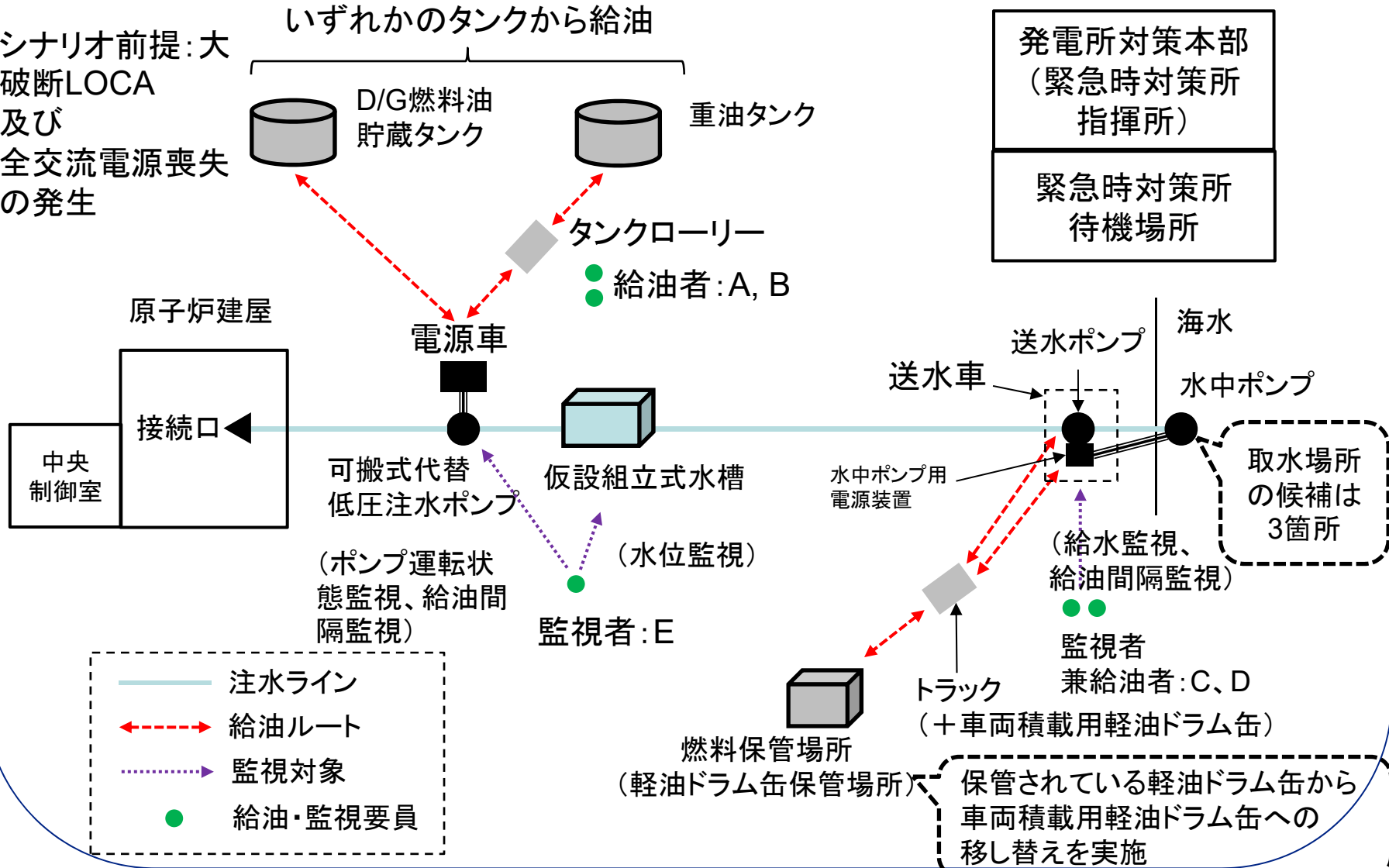
附属書の記載：過酷事故状況下HRA分析モデル

| 【附属書】過酷状況評価モデル・ノウハウ | 【付録】評価例 {利用している 分析モデル・ノウハウ} |
|--|--|
| A. 認知／診断タスク関連 ① <u>定量化手法の選択方法</u> ② <u>対数正規分布の標準偏差σの決め方</u> | I .PWRのF&B操作 {A-①,B-①,②,③,⑤,⑥} |
| B. 実行タスク：THERP手法関連 ① <u>実行タスクのHEP算出の全体像</u> ② <u>叙事知情報収集・集約方法例</u> ③ <u>我が国の実情に合わせた推定HEP表の読み替え例</u> ④ <u>現場操作・作業に合わせた推定HEP表の読み替え例</u> ⑤ <u>ストレスレベルの評価方法例</u> ⑥ <u>従属性・過誤回復効果の評価方法例</u> ⑦ <u>反復作業の習熟効果の評価方法例</u> | II .可搬式の緩和設備活用作業の評価方法例 {全て} III .建屋退避時の水密扉誤開放の評価方法例 {A-①,B-④,⑤} |
| C. 指示・報告・連絡の受発信関連 ① <u>指示・報告・連絡の受信の評価方法例</u> ② <u>指示・報告・連絡の発信の評価方法例</u> | |

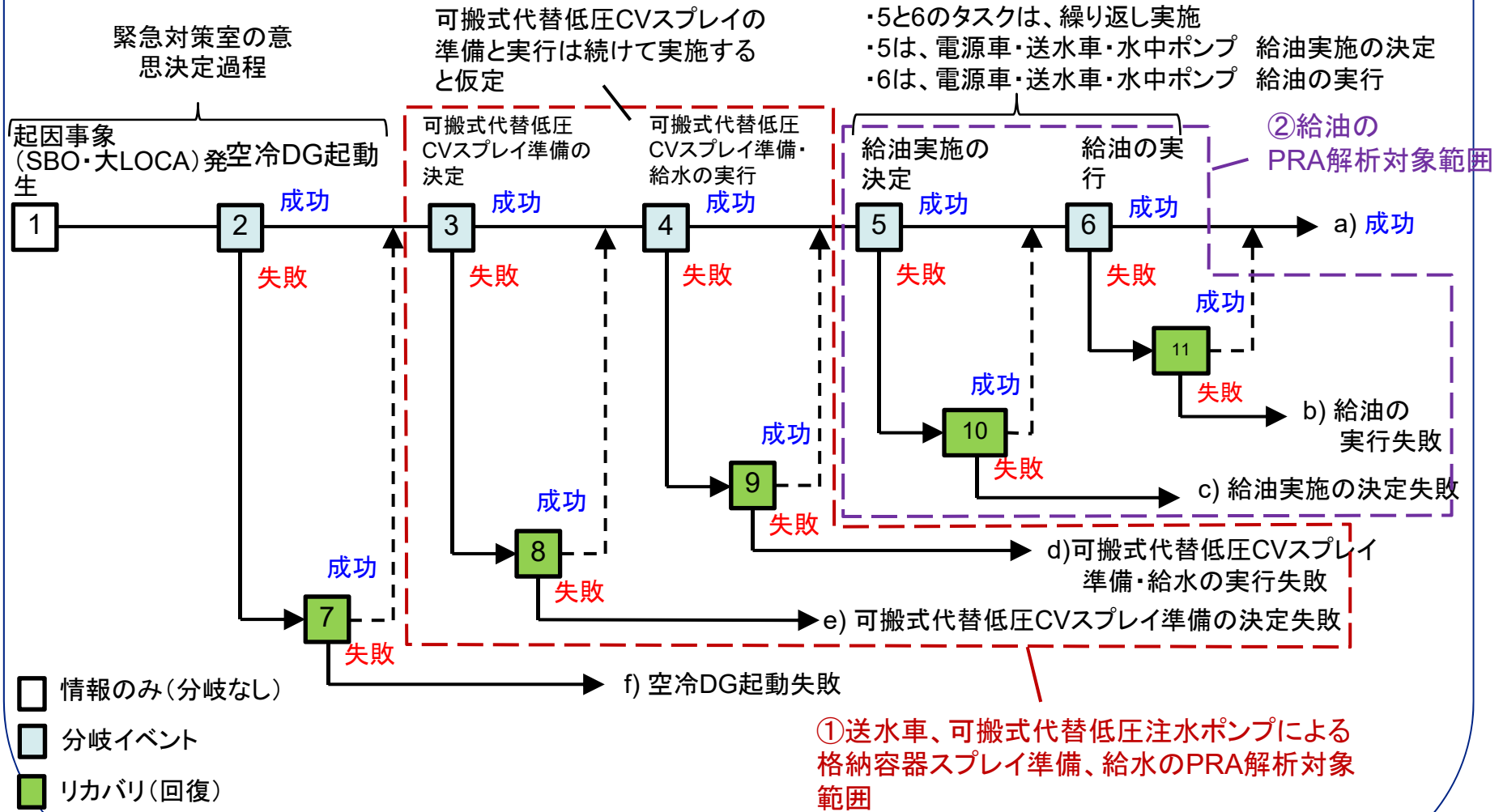
- 人間信頼性解析 (HRA) の概要と課題
- **NRRCにおけるHRA研究の概要**
 - ✓ HRAガイドの開発
 - ✓ **可搬型機器のHRA**
- 人的過誤事象データの収集と活用
- まとめ

可搬型機器HRAの試評価：可搬式代替低圧注水ポンプによる格納容器スプレイ操作の給水ライン・燃料補給のHRAの検討

シナリオ前提：大破断LOCA及び全交流電源喪失の発生



可搬式代替低圧注水ポンプによる格納容器スプレイの準備、実施、燃料の給油のCRD



同時並行作業のダイアグラム(簡略図例)

| 時間 | 緊対 | 可搬型 取水ポンプ | 可搬型 注水ポンプ | ホース展張 | 燃料自動 供給装置 (取水側) | 燃料自動 供給装置 (注水側) | 燃料補給 (取水側) | 燃料補給 (注水側) |
|------|----------|--------------|--------------|-------|-----------------------|-----------------------|---------------|---------------|
| 1時間 | 設置 判断 | | | | | | | |
| | | 道路啓開 | 道路啓開 | 道路啓開 | 道路啓開 | 道路啓開 | 道路啓開 | 道路啓開 |
| 6時間 | | 設置作業 | 設置作業 | 設置作業 | | | | |
| | | | | | 設置作業 | 設置作業 | | |
| 10時間 | 実行 判断 | | | | | | | |
| | | 実行操作 | 実行操作 | | | | | |
| 11時間 | | | | | | | 作業 | 作業 |
| 20時間 | | | | | | | 作業 | 作業 |
| 30時間 | | | | | | | 作業 | 作業 |

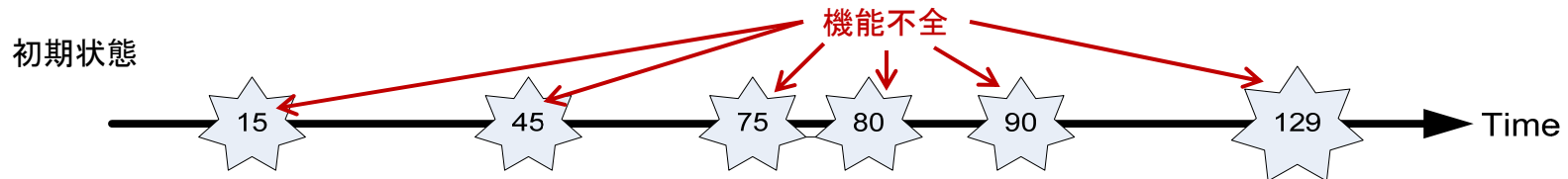
- 人間信頼性解析 (HRA) の概要と課題
- NRRRC における HRA 研究の概要
 - ✓ HRA ガイドの開発
 - ✓ 可搬型機器の HRA
- 人的過誤事象データの収集と活用
- まとめ

HRA Society ワークショップ “データ収集” での状況

- データ収集の動向
 - シミュレータ訓練を対象としたオブジェクトレベル(米国:SACADA)とタスクレベル(韓国:HuREX)のデータ
 - : とともに20,000を超えるデータポイントを収集
- * PSAM14 Workshop of HRA Society, UCLA, Sep 2018
- データ源としての運用経験情報
 - ICDE(OECD/NEAの国際共通原因故障データ交換)のCCF(共通原因)データは30-50%がHRAに関連
- 将来のニーズ
 - 依存関係データ
 - デジタルシステムのHRA、FLEX機器
 - 火災、洪水(津波)または地震PRAのHRA
 - 国際協力

SACADAのデータユニットとデータポイント

- 原則として、データユニットは、運転員のシミュレータ訓練プログラムの訓練目的要素となる。



データ
ユニット

| ECW 1A喪失 | |
|----------|--|
| 役割 | 期待する対応 |
| 運転員 | AトレンのEW流量の喪失を認識 |
| 運転員 | ECW ポンプ1Aの確保 |
| 当直長 | D/G自動トリップの前に手動でD/Gをトリップ |
| 運転員 | CCP 1Aが稼働していることを確認 |
| 運転員 | 自然循環を確認 |
| 当直長 | 冷却の必要性を判断 |
| 当直長 | EW構造の損傷によりアラートHA1 / EAL2を宣言するか、エスカレーションが適切であることを通知 |

- データポイントは、1人の運転員が1つの訓練要素での1回の試行数を数える。

出典:NRC HRA Data Workshop : 2018 / 3 / 15-16, U.S. NRC HQs

データポイントの内容: 文脈とパフォーマンス結果

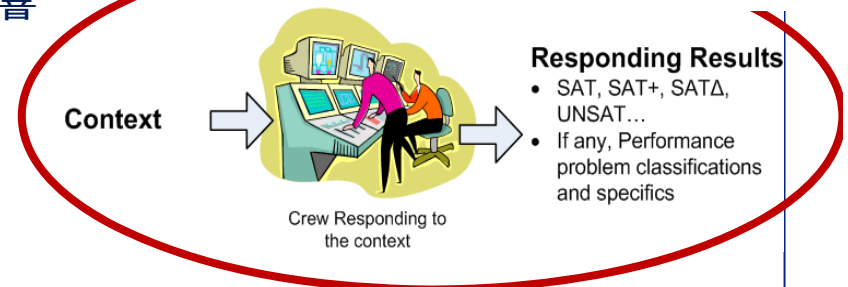
• 文脈 (予め指定された内容)

- 認知型データユニット: 検出、理解、対応計画(決定)、行動、外部コミュニケーション
- 認知タイプに応じてグループ化されたパフォーマンス影響因子(PIF)

• パフォーマンス結果(遡及的に記録)

- パフォーマンスの性質(SAT, UNSAT, and SATΔ, etc.)
- UNSATとSATΔのデータポイントに含まれる情報:
 - パフォーマンス不足の種類とシナリオへの影響
 - 行動影響因子 (PIF)
 - エラーの回復
 - 修復

データポイントの内容



※ SAT (Satisfactory results) 、 UNSAT (Unsatisfactory results)

分類(Taxonomy)は the Journal of Reliability Engineering and System Safety 125 (2014) 117-133 “The SACADA database for human reliability and human performance”を利用することができる。

出典: NRC HRA Data Workshop : 2018 / 3 / 15-16, U.S. NRC HQs

まとめ

■人間信頼性解析(HRA)では、コミッションエラーの取扱、重大事故時の過酷状況下の対応、組織要因、マルチユニットなどに対する解析手法、またデータ収集等の課題が認識されている。

■原子力リスク研究センター(NRRC)では、HRAの国際的な手法開発の動向を把握し、定性分析における叙事知に重点を置いたHRAガイドを開発した。

■HRAガイドを外的事象PRAのHRAに適用し、定量化手法の課題点抽出およびモデル化手法の検討を実施することで、従来の定量化手法の改善/拡張方法を検討した。

■訓練シミュレータ等からの人的過誤事象をデータベース化する試みが米国NRCのSACADA、韓国KAERIのHuREX等で始まっており、国際連携の枠組み構築を視野に入れた国内データの収集について検討が必要となる。

Thank you!



Questions?

略語集

- HFE : Human Failure Event 人的過誤事象
- HEPs : Human error Probabilities 人的過誤確率
- CBDTM : the Cause-Based Decision Tree Method 原因ベースのデシジョンツリー手法
 - 8つのデシジョンツリーから認知失敗をモデル化する
- HCR/ORE : Human Cognitive Reliability/Operator Reliability Experiment 人間認知信頼性/運転員信頼性実験法
 - 時間信頼性相関を正規化 (アベイラブル時間/要求時間の関数)
- IDHEAS : Integrated Decision-Tree Human Event Analysis System 統合デシジョンツリー 人的事象分析システム
- CRT : Crew Response Tree 運転員応答ツリー (IDHEAS)
- CFM : Crew Failure Mode 運転員失敗モード (IDHEAS)
- EOP, AOP : Emergency Operating Procedures, Abnormal Operating Procedures
 - 事故処理内規(第2部)にあたる。
- PIF : Performance Influencing Factors 行動影響因子 (IDHEAS)
- PSF : Performance Shaping Factors 行動形成因子 (THERP)

人間信頼性解析手法の研究の必要性

- ・現在の人間信頼性評価は、想定事故シナリオ及び対応手順中で、認知・診断などの判断、及び人的操作の記載対する人間の応答の不備を扱う。
 - 明示的に扱えるのはEOO(オMISSIONエラー:すべきことをしない)であり、EOC(コミッションエラー:間違った、余計なことをする)は明確には扱えない。
- ・深層防護を破る人的過誤には当事者エラーと組織エラーとして扱うべき対象があるが、現行のリスク評価ではほぼ前者のみで、後者は影響因子として考慮。
- ・福島第一原子力発電所事故の経験から、人間が過酷状況下におかれた場合の意思決定、現場の訓練や実務に有効なフィードバックが得られる人間信頼性評価手法の体系化が重要。
- ・プラント設計と事故時の物理的挙動解析、安全システムの動作や保守状況、人間応答に関する行動/認知心理学的分析等を総合的に扱う人間信頼性評価の研究も課題。