

# 認知的分析モデルを用いた アクシデントマネジメントの意思決定過誤率の定量化 Quantification of a Decision-making Failure Probability of the Accident Management Using Cognitive Analysis Model

吉田 至孝 (Yoshitaka Yoshida)\* 大谷 昌徳 (Masanori Ohtani)\*+ 藤田 祐志 (Yushi Fujita)†

**要約** 原子力発電所では、シビアアクシデントに対する確率論的安全評価 (PSA) を通して多くの知見が得られ、アクシデントマネジメント (AM) が整備されている。AMの有効性は、PSAの中で緊急時組織の意思決定過誤率と運転員の操作に係る人的過誤率およびAM設備の成功基準と信頼性を用いて評価する必要がある。しかし、緊急時組織の意思決定過誤は知識ベースの誤りを扱うことから、これまでPSAで取り扱える適切な定量化手法がなかった。

本研究では、認知的分析モデルを用いて、原子力発電所のシビアアクシデント時に格納容器防護の観点から実施されるAMの緊急時組織における意思決定過誤率を定量化する手法を新たに開発し試評価を行った。その結果、(1)標準過誤率とエラーファクタを選択することにより、人間信頼性工学の専門家でない者がPSA評価に適した形で定量化できた。(2)代表的なPWRプラントのシビアアクシデント事象進展解析に基づき試評価を実施した結果、対象となった6種類のAMの意思決定過誤率は、スクリーニング手法で0.23~0.41、詳細手法で0.10~0.19の範囲にあり、保守的な仮定を感度解析した結果、過誤率はさらに50%程度低下した。(3)スクリーニング手法で得られる過誤率は理論上99%の確率で詳細手法の過誤率を上回り、今回の試評価で対象としたAMの過誤率は100%上回った。これより、本手法のスクリーニング評価結果は、詳細評価結果より保守的な過誤率を得ることができ、PSAに求められるスクリーニング性能を満足していることがわかった。

**キーワード** 加圧水型軽水炉, 人間信頼性解析, 認知信頼度, シビアアクシデント, PSA, アクシデントマネジメント, CREAM, 意思決定

**Abstract** In the nuclear power plant, much knowledge is acquired through probabilistic safety assessment (PSA) of a severe accident, and accident management (AM) is prepared. It is necessary to evaluate the effectiveness of AM using the decision-making failure probability of an emergency organization, operation failure probability of operators, success criteria of AM and reliability of AM equipments in PSA. However, there has been no suitable qualification method for PSA so far to obtain the decision-making failure probability, because the decision-making failure of an emergency organization treats the knowledge based error.

In this work, we developed a new method for quantification of the decision-making failure probability of an emergency organization using cognitive analysis model, which decided an AM strategy, in a nuclear power plant at the severe accident, and tried to apply it to a typical pressurized water reactor (PWR) plant. As a result: (1) It could quantify the decision-making failure probability adjusted to PSA for general analysts, who do not necessarily possess professional human factors knowledge, by choosing the suitable value of a basic failure probability and an error-factor. (2) The decision-making failure probabilities of six AMs were in the range of 0.23 to 0.41 using the screening evaluation method and in the range of 0.10 to 0.19 using the detailed evaluation method as the result of trial evaluation based on severe accident analysis of a typical PWR plant, and a result of sensitivity analysis of the conservative assumption, failure probability decreased about 50%. (3) The failure probability using the screening evaluation method exceeded that using detailed evaluation method by 99% of probability theoretically, and the failure probability of AM in this study exceeded 100%. From this result, it was shown that the decision-making failure probability was more conservative than the detailed evaluation method, and the screening evaluation method satisfied the screening performance required by PSA.

**Keywords** pressurized water reactor, human reliability analysis, cognitive reliability, severe accident, PSA, accident management, CREAM, decision making

\* (株)原子力安全システム研究所 技術システム研究所

\*+ 現在 関西電力(株) 若狭支社

† (株)テクノバ

## 1. 緒言

我が国の原子力発電所は、従来からの決定論的手法により講じられた厳格な安全規制、安全管理により十分な安全性が確保されている。しかしながら、近年、設計で考慮してきた事故の範囲を遙かに超え、炉心が大きく損傷するような苛酷事故(シビアアクシデント)に対して、確率論的安全評価(PSA)を通して多くの知見が得られ、原子力発電所の安全をより確かなものにするために対応策(アクシデントマネジメント)が整備<sup>(1)</sup>されている。アクシデントマネジメント(AM)の整備は、現状で十分に小さいリスクをさらに低減するもので、電気事業者が念のために行う措置と位置づけられている<sup>(2)</sup>。

AMには、設計基準事象を超え炉心が大きく損傷する恐れのある事態が万一発生したとしても、現在の設計に含まれる安全余裕や安全設計上想定した本来の機能以外にも期待し得るまたはそうした事態に備えて新規に設置した機器によって、それが(1)シビアアクシデントに拡大するのを防止する(フェーズⅠのAM)ため、もしくは(2)シビアアクシデントに拡大した場合にもその影響を緩和する(フェーズⅡのAM)ために取られる措置の2種類がある<sup>(2)</sup>。それぞれ、フェーズⅠAMは炉心損傷頻度を求めるPSA(レベル1 PSA<sup>(3)</sup>)の知見から、フェーズⅡAMは格納容器破損頻度を求めるPSA(レベル1.5PSA<sup>(4)</sup>)の知見から抽出されている。AMは、PSAから得られた知見に基づき、現有設備を最大限に活用して整備される施策である。故に、AMが整備された現段階においては、現状で十分に小さくなっているリスクが、さらにどの程度低減されたかに関心が移る。

フェーズⅠAMは、操作手順書が整備され、これを運転員が実行する。フェーズⅠAMの有効性は、判断基準や具体的操作手順が明確であるため、レベル1 PSAの中で運転員の人的過誤率、AM設備の成功基準および信頼性を用いて評価できる。

一方、フェーズⅡAMは、格納容器内での物理現象の不確実さやAMが物理現象に与える正負効果の判断の難しさから、アクシデントマネジメントガイドライン(AMG)が整備され、これに基づき発電所の緊急時組織が意思決定を行い、運転員が機器操作を行う。フェーズⅡAMの有効性は、レベル1.5PSAの中で緊急時組織の意思決定過誤率および運転員の操作に係る人的過誤率、AM設備の成功基準および信頼性を用いて評価する必要がある。緊急時組織の意思決定過誤

は、AMGに基づき複雑な事象進展をモニタリングし、AMの採否と実施タイミングを判断して運転員に操作を指示するまでの認知・判断プロセスで発生する知識ベースの過誤(knowledge based error)を扱う。これまでPSA評価で使用されてきたTHERP<sup>(5)</sup>手法のような第一世代人間信頼性解析(HRA)は、緊急時組織の意思決定過誤を評価するには不十分であると考えられる。近年諸外国では、第一世代HRA手法の不完全さが広く認識されて部分的な修正提案がなされ、1990年代に入って米国のATHEANA<sup>(6)</sup>、仏国のMELMOS<sup>(7)</sup>、スウェーデンのCREAM<sup>(8)</sup>をはじめとするより根本的な見直しを含んだ第二世代HRA手法が研究・発表されている。

そこで本研究では、これら第二世代HRA手法の中から評価のためのリソースが少なくかつ詳細手法とスクリーニング手法という考え方を持つCREAMに着目して、フェーズⅡAMの採否に係る緊急時組織の意思決定過誤率を定量化する際における問題点を改良し、PSA評価者が取り扱えるよう工夫した手順を作成するとともに、加圧水型軽水炉を対象とした試評価を実施した。

## 2. 評価手順

### 2.1 CREAMの概要

本手法の提唱者E. Hollnagelは、従来から第一世代HRA手法における機械論的な要素還元主義の考え方や、エラー生起確率へのperformance shaping factor (PSF)の個別的寄与の線形結合のような定量化方式を批判し、認知的な分析とモデル化の必要性を強調<sup>(9)</sup>している。CREAM<sup>(8)</sup>はその第一世代HRA批判をベースとして、認知的側面を積極的に取り入れたHRA手法である。その特徴は、人間の行動がなされる環境または状況の特徴付けにPSFではなく、common performance conditions(CPC)という新しい概念を導入して定性解析の質を高める工夫をし、直面する状況に応じて認知情報処理制御モードを混乱状態(scrambled)、機能主義的(opportunistic)、戦術的(tactical)、戦略的(strategic)の4つに分類してその制御モード間で信頼性が異なると考えるものである。

以下に4つの認知情報処理制御モードの概念を示す。

- (1) 混乱状態：状況が未知であったり、思考が麻痺するようなパニック状態
- (2) 機能主義的：部分的な状況理解のもとで経験的

または習慣的な判断が下される状態

- (3) 戦術的：既知の理解に基づく限定された領域で判断が下される状態
- (4) 戦略的：グローバルな状況理解のもとで保持する知見により高度な判断が下される状態

これらの認知情報処理制御モードはCPCの組み合わせによって選択される。CPCは、以下に示すように9種類が提案されており、CPC間に依存関係が定義されている。

- (1) 組織因子 (adequacy of organization)
- (2) 作業環境 (working conditions)
- (3) マンマシンインターフェース (adequacy of man machine interface and operational support)
- (4) 運転手順書 (availability of procedures / plans)
- (5) 同時に達成する目標 (number of simultaneous goals)
- (6) 時間余裕 (available time)
- (7) 時間帯 (time of day)
- (8) 訓練・経験 (adequacy of training and experience)
- (9) クルー協調 (crew collaboration quality)

CREAMの評価にはスクリーニング手法 (basic method)と詳細手法(extended method)があり、その手順の概要を図1に示す。このうち、スクリーニング手法は、CPC評価結果のプラスの影響数とマイナスの影響数のマトリックスにより、該当する認知情報処理制御モードが決定され、その認知情報処理制御モード毎に適用過誤率が幅を持って定められている。また、詳細手法では、認知機能の過誤のタイプ (cognitive function/generic failure type)毎に基準過誤率と5%信頼度下限および95%信頼度上限過誤率が定められ、CPC評価結果に基づき、認知機能別に重み係数で補正する方法が採用されている。

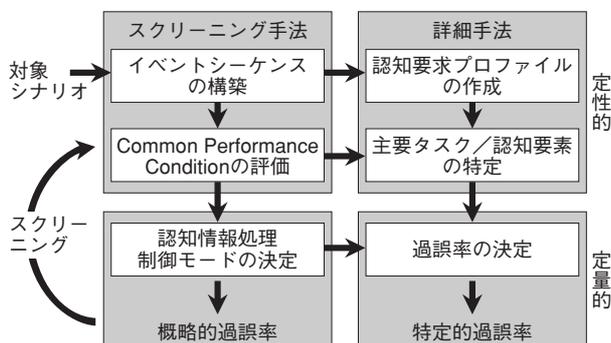


図1 CREAMのスクリーニング手法と詳細手法

## 2.2 アクシデントマネジメントガイドライン (AMG) の特徴

原子力発電所の緊急時組織（災害対策本部）は、電気事業者が公表している防災業務計画の概要<sup>(10)-(11)</sup>によると以下に示すような職務を持ち、原子力防災管理者によってこれら全般にわたる対応が並行して実行される。

- (1) 事故状況の収集と報告（通報連絡）の実施
- (2) 発電所内での避難誘導および発電所構内立入り制限
- (3) 放射能影響範囲の推定
- (4) 緊急時医療（救助、応急措置）
- (5) 汚染拡大の防止
- (6) 発電所退避者および防災対策活動を行う要員の線量当量評価
- (7) 現地プレスセンターの開設、記者発表
- (8) 応急復旧
- (9) 災害発生または拡大防止のための資機材の調達
- (10) 国、関係自治体への必要な要員の派遣、資機材の貸与その他必要な措置

設計で想定された範囲を大きく超える事象が発生した段階では、災害発生または拡大防止のための措置としてAMが実施される。特に、炉心損傷後の複雑な事象進展を取り扱うフェーズⅡAMについては、プラントの安全確保および公衆への影響緩和の観点から、当面の脅威からの回避と長期的な事故収束を図るため、以下の点に留意しながら適切なAMを選択する必要がある。

- (1) シビアアクシデント現象の不確実さが伴い、常に最新の知見を反映すること
- (2) 事象進展に伴うAMのシビアアクシデント現象に対する正と負の効果を適切に判断すること
- (3) 選択したAMの事故収束に対する総合的なリスク（早期大規模放出の可能性、強い放射線場の出現や計器類の水没などによる多様な収束手段の喪失）を認知し、幅広い評価に基づき判断すること

これらは、時々刻々と変化するプラント状況や周辺要因により、それぞれの影響度合いが常に異なってくることから、従来から用いられている定型的な操作手順書のみで対応することが困難である。そこで、AMG<sup>(12)</sup>は、

- (1) 緊急時組織がAMの選択・実行に係る意思決定を行うためのガイドライン

- (2) その知識データベース
- (3) 運転員が選択されたAMの機器操作を実施するための操作手順書の3つから構成される。

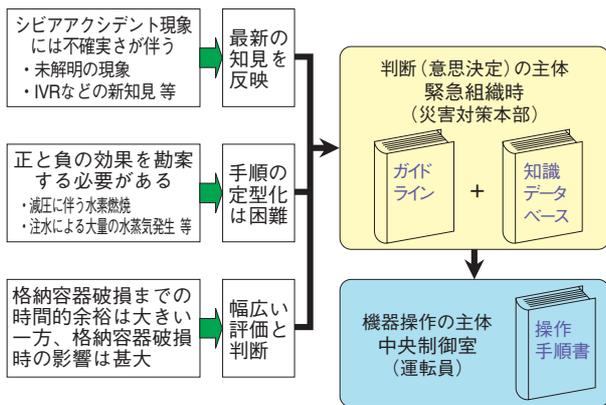


図2 AM適用上考慮すべき事項およびAMGの構成

緊急時組織がAMGに基づきAMを選択する際に考慮されるべき意思決定要素を整理した結果を図3に示す。緊急時組織は、(1)シビアアクシデント状況下における設備、(2)プラント監視計器、(3)環境放射線、(4)災害救助、(5)復旧作業、(6)通報連絡、(7)避難・退避の各状況を把握し、これから選択しようとするAMが、(1)プラント安全確保のための機能、(2)シビアアクシデントにより発生する物理現象、(3)格納容器からの放射性物質放出、(4)格納容器外における高放射線区域、(5)復旧作業員への影響、(6)多様な監視手段、(7)多様な緩和手段、(8)保有資源の消耗などに与える影響をプラス効果とマイナス効果に整理し、プラス効果が高くマイナス効果が小さいAMの中から適切なものを選択することとなると考えられる。

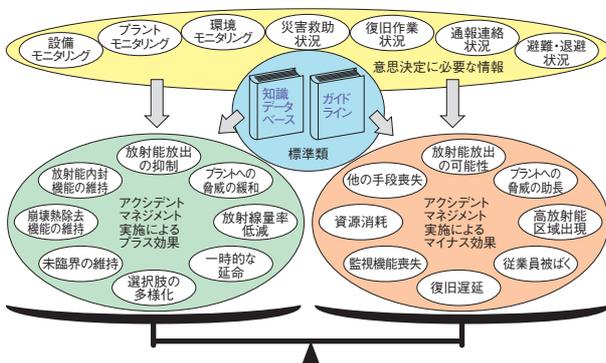


図3 AM選択上考慮される要素

### 2.3 CREAM適用上の課題

CREAMは、認知情報処理モードという新しい概念により、組織の過誤率を比較的容易に評価できる手法である。特にCPCの導入は、評価者が何に注目して評価すべきかを明瞭に示し、その定性的評価結果を定量値に換算させるものである。しかし、その評価手順をトレースしていくとPSAへの適用に際して、いくつか問題点を抱えていることがわかった。

まず第1に、スクリーニング手法と詳細手法を用いて同一の意思決定に対する過誤率を評価した場合、認知情報処理制御モードが「戦略的」に近づくにつれてスクリーニング手法で得られる過誤率が小さく評価される傾向を示す。これは、詳細手法の基準過誤率が大きめに設定され、CPCによる認知機能別重み係数による補正効果が小さいことによるものである。第2に、スクリーニング手法で得られる認知情報処理制御モード別の過誤率には大きな幅があり、認知情報処理制御モード間で大きく重複している。これは、レベル1.5PSA評価上の取り扱いを困難にする。第3に、詳細手法の特徴である、各タスクに含まれた認知機能の分析結果に基づく信頼性評価において、AMGに記載された認知機能は複数存在し、そのうちのどれだけのタスクを主要タスクとするかによって、過誤率の評価結果に大きな影響を与える。これは、評価者に強く依存する。

この他に、AMGによる緊急時組織の意思決定過誤率を評価し、レベル1.5PSAで用いるという観点から、次の点を考慮すべきと考えられる。

- (1) 設定されているCPCがAMGに基づく緊急時組織の過誤率評価上適切かどうか、特に管理組織面からの検討が必要であること。
- (2) CPC評価は、人間信頼性工学に精通した専門家ではない者でも適切な評価ができるようにすること。
- (3) AMの意思決定は、高度な状況判断に基づき極めて認知レベルの高い状況下で実施され、それぞれの意思決定場面の前後に強い従属関係を考慮する必要がある。

### 2.4 モデリングの概念

CREAMを用いて定量的な過誤率を取得するには、スクリーニング手法と詳細手法の過誤率設定概念を統一した形で付与でき、レベル1.5PSAで容易に取り

扱える過誤率であることが必要である。

そこで著者らは、過誤率が体系的に整理され、HRA評価で最もよく用いられているTHERP<sup>(5)</sup>により基準となる過誤率（標準過誤率）を設定し、CREAM手法により認知情報処理制御モードの概念で補正する方法を提案する。具体的には、THERP Table20-1の中央制御室における異常認知から時間内に措置を必要とする場合の過誤率から、診断時間余裕および診断すべき項目の数等に基づき評価に適切なものを選択して、標準過誤率および標準過誤率と5%信頼区間過誤率の比（エラーファクタ）を設定する。エラーファクタは、緊急時組織の評価条件に合わせて調整しても良い。標準過誤率は、詳細手法の主要タスク／認知機能の過誤率を設定する際にバックアップ効果を設定するために使用する。エラーファクタは、CREAMで補正する過誤率の上限と下限を定めるために使用する。

## 2.5 CPCの選定および評価基準

CPCの適用にあたり、緊急時組織が意思決定を行う上で考慮すべき因子が前述した9種類で適切であるかどうかをOECD/NEAによる管理組織因子に係わる検討<sup>(13)</sup>を参考にして評価した。この文献では、(1)管理組織因子として外部の影響、(2)ゴールと戦略、(3)管理機能と監査、(4)資源配分、(5)人的資源管理、(6)訓練、(7)仕事の連携、(8)組織内知識、(9)手順化、(10)組織文化、(11)組織における学習、(12)コミュニケーションの12の因子を取り上げている。そこで、本研究で取り扱う緊急時組織を想定し、緊急事態が発生している間、直接的に影響を与える可能性があるものと、より日常的な組織管理にかかわり間接的に影響を与える可能性があるものに整理すると、直接的に影響を与える可能性がある因子はコミュニケーション、残りは間接的に影響を与える可能性がある因子に分類できる。間接的に影響を与える可能性がある因子についてはCPCの各因子を評価する際に考慮できるものであるが、直接的に影響を与える因子については独立したCPCとして評価する必要がある。このため、新たにコミュニケーションを追加し10種類のCPCで評価を行うこととした。

各CPCはCREAMの考え方に従って、想定した標準過誤率の概念で発揮されるパフォーマンス通りの状態（0状態）に対して、パフォーマンスを向上する効果がある状態（+状態）、パフォーマンスを

悪化させる状態（-状態）に分類できるよう表1に示す評価項目を設定し、事実確認に基づく評価となるよう設計することにより、人間信頼性工学に精通した専門家ではない者が取り扱えるものとした。ただし、時間帯（昼・夜および平日・休日の影響）およびクルー協調（緊急時に集まった人で構成される組織運営）は、緊急時組織が編成される時期に大きく依存するため、-状態で評価し感度解析項目として取り扱った。

表1 CPCの評価項目

CPC		評価項目
1	組織因子	体制・役割分担の明確さ 外部組織による支援・連絡体制
2	作業環境	温度湿度等環境条件 設備配置の機能性
3	マンマシン インターフェース	プラントパラメータへのアクセス性 判断に必要な機器類の視認性 ヒューマンエラー防止への配慮
4	運転手順書	指揮命令系統の明確さ 判断基準の明確さ 適用条件に対する妥当性 評価シナリオに対する妥当性 用語・表現の整合性 当該部分へのアクセスの容易さ
5	同時に達成する目標	タスクの複雑さ
6	時間余裕	判断までの時間余裕
7	時間帯	昼・夜および平日・休日の違い
8	訓練・経験	訓練頻度 演習・ドリルの実施状況 関係者の意識レベル 訓練シナリオの現実味
9	クルー協調	集合した要員の協調性
10	コミュニケーション	連絡手段の充実度 連絡方法・手順の明確さ

個々に評価されたCPCは、他のCPCにより影響を受けて+状態や-状態に変化する可能性が考えられる。例えば、クルーの協調は組織の役割分担が不明確な場合や、訓練や経験も少ない場合は、いかに協調性があってもCPC評価結果を-状態の方向へシフトさせるであろう。このような相互依存関係が各CPCに存在すると考えられることから、表示の評価項目が他のCPCに与える影響を考慮して表2に示すように依存関係を定義した。

CREAMオリジナルでは、CPCの依存関係を補正する際は、各CPCは等価であるとし、依存性を持つCPCの数-1個（依存性を持つCPCが2個以下の場合全て）が同方向（+又は-状態）を示すとき、当該CPCが0状態に限り依存性を持つCPCと同方向へ補正すると定義している。しかし、CPCが過誤率に与える影響度合いは等価ではなく、依存性を持つCPCは当該CPCが0状態以外でも影響を与えると考えられ

る。よって、補正する際には各CPCの持つ過誤へ影響度合いの違いを考慮し、当該CPCが0状態以外でも依存性を持つCPCの半数以上が同方向を示すとき、当該CPCを同方向へ補正することとした。影響度合いの大きさは、後述する詳細手法のCPC認知機能別重み係数を基準として用いることとした。具体的には、表3に示す値を(1)式で補正する。

表2 各CPCの相互依存性

CPC		影響を与えるCPC									
		組織因子	作業環境	マンマシンインターフェース	運転手順書	同時に達成する目標	時間余裕	時間帯	訓練・経験	クルー協調	コミュニケーション
影響を受けるCPC	組織因子										
	作業環境										
	マンマシンインターフェース										
	運転手順書	○									
	同時に達成する目標	○			○						○
	時間余裕	○			○	○		○	○	○	○
	時間帯										
	訓練・経験										
	クルー協調	○								○	
	コミュニケーション	○								○	○

○:依存関係あり

表3 各CPC影響度合いの大きさ

CPC	影響度合いの大きさ				
	スクリーニング手法	詳細手法			
		観察	解釈	計画	実行
組織因子	1.3	1.0	1.0	1.6	1.6
作業環境	1.45	1.6	1.6	1.0	1.6
マンマシンインターフェース	2.1	3.2	1.0	1.0	3.2
運転手順書	1.85	1.6	1.0	3.2	1.6
同時に達成する目標	1.6	1.4	1.4	2.2	1.4
時間余裕	3.2	3.2	3.2	3.2	3.2
時間帯	1.1	1.1	1.1	1.1	1.1
訓練・経験	2.4	1.6	3.2	3.2	1.6
クルー協調	2.3	2.0	2.0	2.0	3.2
コミュニケーション	1.5	2.0	1.0	1.0	2.0

$$\frac{|\sum C_j V_j|}{2} \geq \sum V_j \text{ と } \sum C_j V_j \geq V_i \text{ が成り立つとき} \dots\dots\dots (1-1)$$

$C_i = +$ 状態  $\rightarrow +$ 状態, 0状態  $\rightarrow +$ 状態,  $-$ 状態  $\rightarrow 0$ 状態に補正

$$\frac{|\sum C_j V_j|}{2} \geq \sum V_j \text{ と } \sum C_j V_j \leq V_i \text{ が成り立つとき} \dots\dots\dots (1-2)$$

$C_j = +$ 状態  $\rightarrow 0$ 状態, 0状態  $\rightarrow -$ 状態,  $-$ 状態  $\rightarrow -$ 状態に補正

C: CPC評価結果

V: 影響度合いの大きさ

i: 影響を受けるCPC

j: 影響を与えるCPC

## 2.6 スクリーニング手法

スクリーニングという行為の目的は、評価すべき対象の中でより効果的な部分に人的資源を集中させ生産性を向上させることである。PSAで用いる人的過誤率は、一般にスクリーニング手法により得られた値を使って影響を把握し、結果に大きく影響を与える操作等は詳細手法により求める。このため、スクリーニング手法で得られる過誤率は、詳細手法で得られる過誤率より大きい値である必要がある。そこで、スクリーニング用基準過誤率は、標準過誤率を1.7倍するものとした。これは、スクリーニング評価の過誤率が99%の確率で詳細手法の過誤率を上回ることを意味する。

CREAMのスクリーニング手法は、CPCの評価から直接過誤率を算出できる特徴を持っていることから、PSA評価においても活用しやすい手法である。しかしながら、得られる認知情報処理制御モード別の過誤率には大きな幅があり、認知情報処理制御モード間で大きく重複していることから、筆者らは、図4に示す扇形過誤率を定義し、スクリーニング基準過誤率( $E_{Base}$ )およびエラーファクタ( $E_f$ )を設定して、CPC評価結果から(2)式により過誤率( $E_{screening}$ )を計算する方法を提案する。ここで用いるウェイトで補正したCPCの数とは、CPC相互に依存関係が存在すること、さらに緊急時組織の意思決定に対して与える影響度合いがそれぞれ異なると考えられることから、表2に示す依存関係の補正を(1)式により実施後、表3に示す影響度合いの大きさを乗じたものである。

$$E_{screening} = E_{Base} 10^{\frac{R}{R_{max}} \log E_f} \dots\dots\dots (2)$$

$$R = \left( \frac{\pi}{4} - \tan^{-1} \frac{N_+}{N_-} \right) \sqrt{N_+^2 + N_-^2} \quad N_- \neq 0$$

$$R = -\frac{\pi}{4} N_+ \quad N_- = 0$$

$$R_{max} = \frac{\pi}{4} N_{max}$$

$N_+$ : 評価結果が+状態のウェイト補正したCPCの数,  
 $N_-$ : 評価結果が-状態のウェイト補正したCPCの数,  
 $N_{max}$ : ウェイト補正したCPCの総数,  
 $E_f$ : エラーファクタ,

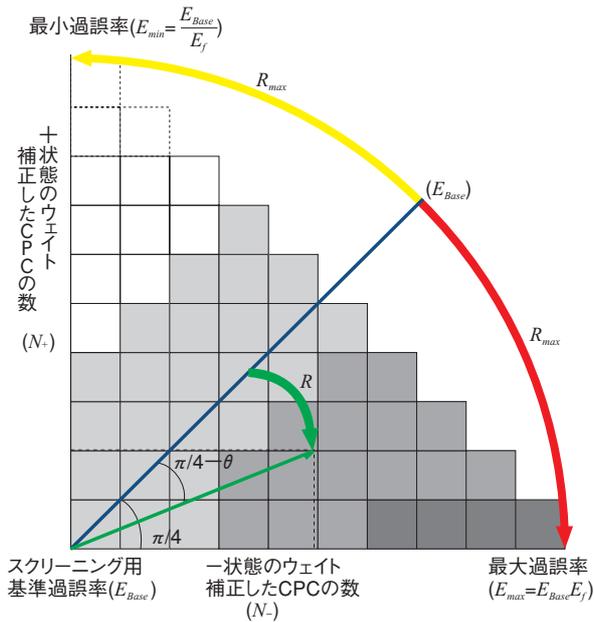


図4 スクリーニング手法の過誤率評価

CPCの評価結果により(1)混乱状態, (2)機能主義的, (3)戦術的, (4)戦略的の4つの認知情報処理制御モードのいずれに該当するかを判別して過誤率を算出する考え方では, これらの境界線で不連続状態が発生し, 過誤率が大きく重複する問題があった. 本計算手法は, 認知情報処理制御モードはCPC評価空間の中で連続的に変化するのが自然であるとの考え方のもとで, ウェイト補正した全CPCが0となる場合から+状態と-状態がバランスした線上にある過誤率はスクリーニング用基準過誤率で定義されるものとし, +状態あるいは-状態に振れた場合に円弧の長さに相当する量をエラーファクタで補正する方法である.

## 2.7 詳細手法

CREAM詳細手法の特徴は, 手順に書かれた各タスクに含まれる認知機能を分析し, 主要なタスクの認知機能について信頼性を評価する点にある. CREAMでは, (1)協調する (Co-ordinate), (2)会話する (Communicate), (3)比較する (Compare), (4)分析する (Diagnose), (5)評価する (Evaluate), (6)実行する

(Execute), (7)同定する (Identify), (8)維持する (Maintain), (9)監視する (Monitor), (10)観察する (Observe), (11)計画する (Plan), (12)記録する (Record), (13)規制する (Regulate), (14)スキャンする (Scan), (15)検証する (Verify)の15種類のタスクが, (1)観察 (Observation), (2)解釈 (Interpretation), (3)計画 (Planning), (4)実行 (Execution)の4つ認知機能に関連づけられ, 各認知機能に対して過誤の形式を定め過誤率が定量化されている. 実際にこれを行うと, 手順に書かれた各タスクの認知機能が複数存在し, どれを主要なタスクの認知機能とするかについて明確な判断基準がないといった問題に遭遇する. 緊急時組織がAMGに基づく意思決定を行う際には, まず, 第1ステップとして「状況の認知」を, 第2ステップとして「実行の判断」を行う形式が採用されている. そこでこの問題を解決するために, 状況の認知と実行の判断について, 表4のとおりAMGに適合したタスクを絞り込んだ. 主要タスクは, 状況の認知が(1)パラメータの監視と(2)設備状態の監視に, 実行の判断が(3)正負効果の評価, (4)採否の決定, (5)実行の指示に分類できることから, これら5つからそれぞれ1つ最も人的過誤に影響を与えるタスクを割り当てることとした.

表4 AMGの主要タスクと認知機能の関係

主要タスク	個別タスク		認知機能			
			観察	解釈	計画	実行
状況の認知	パラメータの監視	直接的監視 バックアップ計器あり	●			
		直接的監視 バックアップ計器なし	●			
	間接的な監視		●			
設備状態の監視	使える機器の把握	●				
	稼働中機器の把握	●				
実行の判断	正負効果の評価			●		
	採否の決定	複数手段からの選択			●	
		しきい値による伝達		●		
	実行の指示	複雑な指示の伝達				●
期限付き指示の伝達					●	

CREAMの過誤率は, 認知機能の過誤のタイプに対して基準値, 95%信頼区間(上限), 5%信頼区間(下限)で与えられている. 著者らのモデルで用いる各タ

スクの過誤率は、この値の中からモデリングの概念で述べた標準過誤率の設定根拠を念頭において適切なものを選択し、緊急時組織の自己管理機能によるバックアップ効果を考慮して補正した値を用いる。

CREAMオリジナルでは、主要タスクに対する過誤率は、CPC評価結果に基づき認知情報処理制御モード別および認知機能別に重み係数で補正する方式が採用されている。認知情報処理制御モード別に与えられている重み係数は表5に、コミュニケーションを追加した認知機能別重み係数は表6に示す。認知情報処理制御モードで補正を行うと認知情報処理制御モードの境界において本来連続的な変化であるべき過誤率に不連続な段差が生じることから、著者らのモデルは標準過誤率に対するエラーファクタを用いて補正するモデルを提案する。具体的には、認知機能別に与えられる重み係数を(3)式により補正する。

表5 認知情報処理制御モード別重み係数

認知情報処理制御モード	平均補正計数
混乱状態	23
機能主義的	7.5
戦術的	1.9
戦略的	0.94

CREAM<sup>(8)</sup>より引用

$$W_{new+}(k,l) = \frac{W_+(k,l)}{\frac{1}{m} \sum_{k=1}^m W_+(k,l)} \log \frac{1}{E_f} \quad \dots\dots\dots (3-1)$$

$$W_{new-}(k,l) = \frac{W_-(k,l)}{\frac{1}{m} \sum_{k=1}^m W_-(k,l)} \log E_f \quad \dots\dots\dots (3-2)$$

$$W_{new0}(k,l) = W_0(k,l) = 0 \quad \dots\dots\dots (3-3)$$

- $W_+$  : CREAM+状態の認知機能別重み係数,
- $W_-$  : CREAM-状態の認知機能別重み係数,
- $W_0$  : CREAM0状態の認知機能別重み係数,
- $W_{new+}$  : 補正後の+状態の認知機能別重み係数,
- $W_{new-}$  : 補正後の-状態の認知機能別重み係数,
- $W_{new0}$  : 補正後の0状態の認知機能別重み係数,
- $k$  : CRCの種類,
- $l$  : 認知機能の種類,
- $m$  : CPCの数,

表6 CPCの認知機能別重み係数

CPC	CPC 評点	認知機能			
		観察	解釈	計画	実行
組織因子	+	1.0	1.0	0.8	0.8
	0	1.0	1.0	1.0	1.0
	-	1.0	1.0	2.0	2.0
作業環境	+	0.8	0.8	1.0	0.8
	0	1.0	1.0	1.0	1.0
	-	2.0	2.0	1.0	2.0
マンマシン インターフェース	+	0.5	1.0	1.0	0.5
	0	1.0	1.0	1.0	1.0
	-	5.0	1.0	1.0	5.0
運転手順書	+	0.8	1.0	0.5	0.8
	0	1.0	1.0	1.0	1.0
	-	2.0	1.0	5.0	2.0
同時に達成する目標	+	1.0	1.0	1.0	1.0
	0	1.0	1.0	1.0	1.0
	-	2.0	2.0	5.0	2.0
時間余裕	+	0.5	0.5	0.5	0.5
	0	1.0	1.0	1.0	1.0
	-	5.0	5.0	5.0	5.0
時間帯	+	1.0	1.0	1.0	1.0
	0	1.0	1.0	1.0	1.0
	-	1.2	1.2	1.2	1.2
訓練・経験	+	0.8	0.5	0.5	0.8
	0	1.0	1.0	1.0	1.0
	-	2.0	5.0	5.0	2.0
クルー協調	+	0.5	0.5	0.5	0.5
	0	1.0	1.0	1.0	1.0
	-	2.0	2.0	2.0	5.0
コミュニケーション	+	0.5	1.0	1.0	0.5
	0	1.0	1.0	1.0	1.0
	-	2.0	1.0	1.0	2.0

コミュニケーション以外はCREAM<sup>(8)</sup>より引用

(1)式を用いて相互依存関係を補正したCPCを用いて、(4)式により認知機能別重み係数を得る。詳細手法の過誤率( $E_{extend}$ )は、(5)式により5つの主要タスクの過誤率に認知機能別重み係数を乗じたものの和として与えられる。

$$W_e(l) = 10^x \quad \dots\dots\dots (4)$$

$$x = \frac{1}{m} \sum_{k=1}^m W_i(k,l)$$

- $C_i(k)$  が+状態のとき,  $W_i(k,l) = W_{new+}(k,l)$ ,
- $C_i(k)$  が-状態のとき,  $W_i(k,l) = W_{new-}(k,l)$ ,
- $C_i(k)$  が0状態のとき,  $W_i(k,l) = W_{new0}(k,l)$ ,
- $W_e$  : 認知機能に対する過誤率重み係数,
- $C_i$  : 依存関係を補正したCPC評価結果,
- $W_i$  : CPC毎に得られた重み係数,

$$E_{extend} = \sum_{t=1}^5 E_{task}(t,l) W_e(l) \quad \dots\dots\dots (5)$$

- $E_{task}$  : 主要タスクの過誤率
- $t$  : 主要タスク

このように著者らのモデルは、CREAM本来の各タスクに含まれる認知機能を分析し主要タスクの認知機能について信頼性を評価する点を尊重しながら、標準過誤率とエラーファクタを用いたモデリングにより、スクリーニング手法と共通の考え方を導入し、AMの意思決定過誤率を評価する上で人間信頼性工学の専門家でない者でも取り扱えるようにした。

### 2.8 意思決定間の従属性モデル

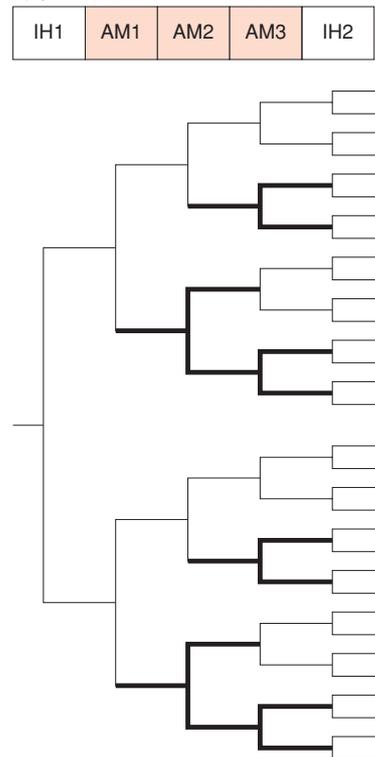
人間は物事の前後関係（文脈）に依存してふるまうことが知られており、文脈は人間と周辺の状況の相互干渉により、時間と共に次第に醸成される。AMの意思決定は、シビアアクシデント時の物理現象に関する知見の限界による高度な状況判断に基づき、極めて認知レベルの高い状況下で実施され、それぞれの意思決定場面の前後に強い従属関係を考慮する必要がある。しかしながら、CREAMの中には従属関係を考慮するモデルがないので、AMの意思決定特有の従属性モデルを付け加えることとした。AMの意思決定は、シビアアクシデント現象の進展に伴い時系列的に実施される。PSAではイベントツリーを作成する時に時系列的な物理現象の発生に対して適切なタイミングで緩和操作のイベントヘッディングを加えており、意思決定の前後関係はイベントツリーに表すことが可能と考えられる。そこで、著者らは、図5に示すようにAMの経時性を考慮したイベントツリーの太線部に対して、(6)式に基づき意思決定の従属性を考慮した過誤率を付与するモデルを提案する。従属性補正係数は、THERPなどから従属性の強さを考慮して定める。

$$E_c(n) = E_c(n-1)E_{dep}(n) + [1 - E_c(n-1)]E_{cog}(n) \dots \dots \dots (6)$$

$$E_{dep}(n) = \frac{1 + (K-1)E_{cog}(n)}{K}$$

- $E_c$ : 従属性を考慮した意思決定過誤率
- $E_{cog}$ : 従属性を考慮しない意思決定過誤率
- $K$ : 従属性補正係数
- $n$ :  $n$ 番目のAM
- $n-1$ :  $n$ 番目より1つ前のAM

時系列に沿ったイベントヘッディング



太線:前のAM失敗による従属性を考慮  
図5 イベントツリーにおける従属性の考慮

### 3. PWRプラントにおける試験的評価

上述した手法を用い、代表的な加圧水型軽水炉（PWR）プラントの緊急時組織を対象に、「冷却材喪失事故（小破断LOCA）時非常用炉心冷却系（ECCS）および格納容器スプレイ系が起動失敗する事象」および「蒸気発生器への全給水が喪失時ECCSが起動失敗し格納容器スプレイ系が再循環失敗する事象」を想定して試評価を行った。これら2つの事象は、整備されたAMのほとんどを実行する必要があり、両者にはAMの意思決定までの時間余裕に差があることからAMの特徴を捉えやすいと考えられる。

#### 3.1 過誤率設定

標準的な緊急時組織は、AMGの特徴で述べたとおり多くの職務を持ち、情報収集・分析、手段の選択・意思決定、実行の指示、関連箇所への連絡等一連の職務がある。これらを遂行する目安となる時間間隔を30分程度としている。つまり、30分程度に1回は緊急時組織の活動に係る全般的な意思決定が繰り返されていると考えることができる。

そこで標準過誤率は、THERP<sup>(5)</sup>表20-1より、複数

診断時における時間余裕30分の場合の過誤率0.1を採用した。この場合、THERPではエラーファクタが10とされている。しかし、緊急時組織内部において状況の認知と実行の判断の各段階でチェックが行われ、単純過誤が検知されやすい反面で時間的余裕を失うような相互干渉効果が考えられるため、過誤率の上下限の幅が狭まると考えエラーファクタを5とした。スクリーニング手法で用いるスクリーニング用基

準過誤率は、標準過誤率の1.7倍である0.17とした。

詳細手法では表4に示すタスクに対して過誤率を設定する。各タスクの過誤率は、AMGの特徴を考えCREAM<sup>(8)</sup>表9の中で与えられる過誤率から最も適切と考えられるものを選択し、緊急時組織の自己管理機能によるバックアップ効果をTHERP<sup>(5)</sup>表20-17による依存性の強さ等を考慮して補正した。このようにして設定した詳細手法の過誤率を表7に示す。

表7 詳細手法で使用する過誤率

主要タスク	個別タスク		認知機能	CREAM <sup>(8)</sup> から引用した過誤率		バックアップ効果				適用過誤率		
				過誤の形式	適用過誤率	依存性の強さ	本部首脳	中央制御室	低減率			
状況の認知	パラメータの監視	な直監視的	バックアップ計器あり	観察	間違っただけで確認する	基準	1.0E-03	低	○	○	2.6E-03	2.6E-06
			バックアップ計器なし	観察	認識を誤る	基準	7.0E-02	中	○	○	4.1E-02	2.9E-03
			間接的な監視	解釈	解釈が遅れる	基準	1.0E-01	低	○	×	1.5E-01	1.5E-02
	設備状態の監視	使える機器の把握	観察	間違っただけで確認する	基準	8.0E-03	中	○	×	2.1E-01	1.7E-02	
		稼働中機器の把握	観察	認識を誤る	基準	1.0E-03	低	○	×	5.1E-02	5.1E-05	
実行の判断	正負効果の評価		解釈	診断を誤る	基準	2.0E-01	中	○	×	3.1E-01	6.3E-02	
	採否の決定	複数手段からの選択	計画	優先度を誤る	基準	1.0E-02	中	○	×	1.5E-01	1.5E-03	
		しきい値による伝達	解釈	意思決定を誤る	基準	1.0E-02	低	○	×	6.0E-02	6.0E-04	
	実行の指示	複雑な指示の伝達	実行	実行を失敗する	基準	3.0E-02	高	○	×	5.2E-01	1.5E-02	
		期限付き指示の伝達	実行	間違っただけに実行する	基準	3.0E-03	低	○	○	2.8E-03	8.4E-06	

### 3.2 代表シーケンスの試評価

緊急時組織が置かれた状況下を想定する際にプラント挙動を把握しておくことが重要である。そこで、代表的なPWRプラントの「小破断LOCA時ECCSおよび格納容器スプレイ起動失敗シーケンス(S2DC)」と「SGへの全給水喪失時ECCS起動失敗および格納容器スプレイ再循環失敗シーケンス(TMLF)」をMAAP4コード<sup>(14)(16)</sup>により解析した。結果を表8および図5～11に示す。

表8 主要事象シーケンス

主要事象	発生時刻	
	S2DC	TMLF
起因事象発生	0秒	0秒
原子炉停止	2.7分	65秒
炉心露出	56分	59分
炉新損傷	1.4時間	1.5時間
蓄圧注入	1.5時間	2.7時間
原子炉容器破損	5.0時間	2.7時間
格納容器スプレイ起動	—	2.7時間
格納容器スプレイ再循環切替失敗	—	4.2時間
格納容器最高使用圧力到達	21.5時間	22.9時間

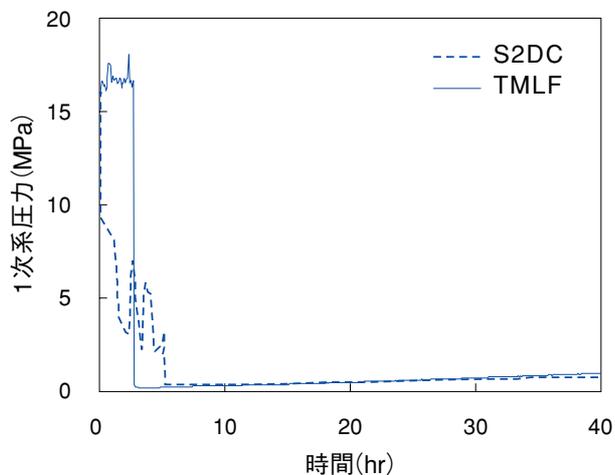


図6 1次系圧力の解析結果

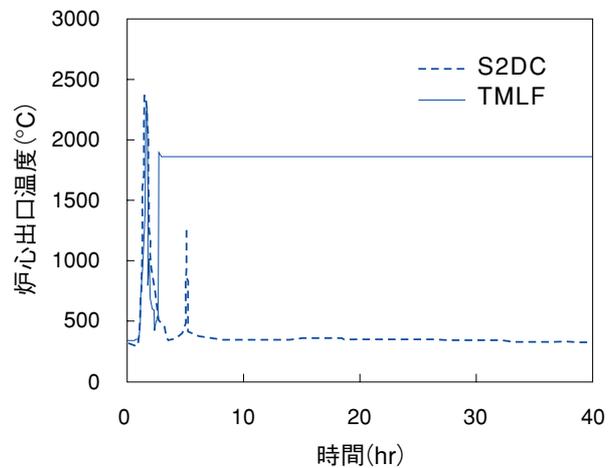


図7 炉心温度の解析結果

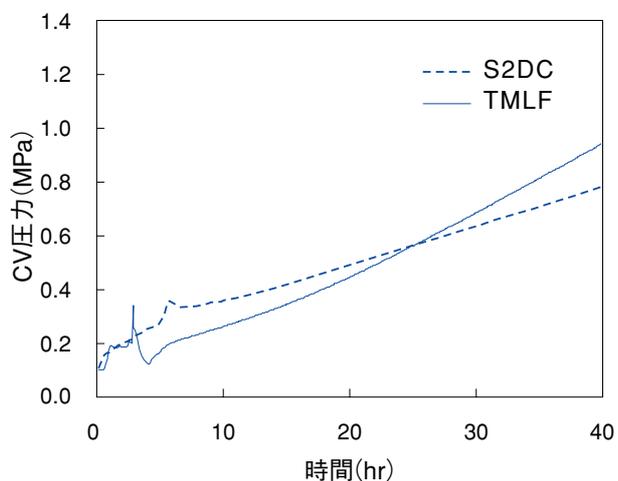


図8 格納容器圧力の解析結果

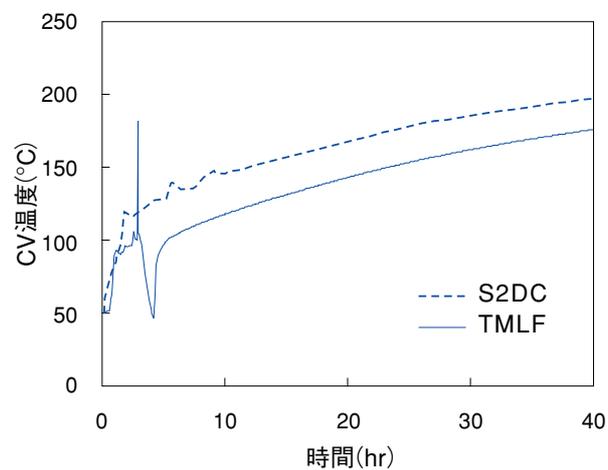


図9 格納容器内温度の解析結果

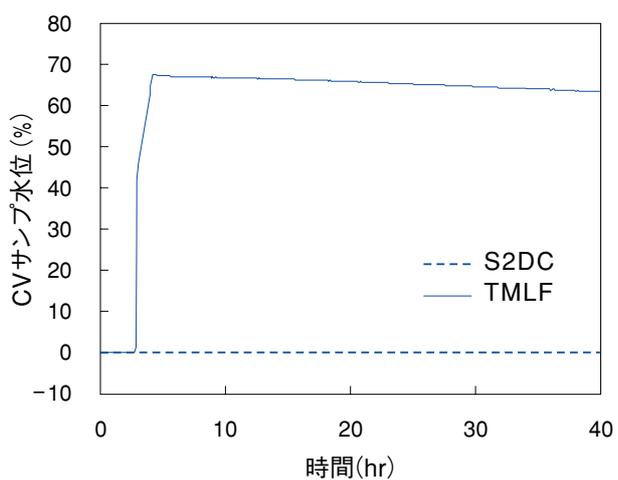


図10 格納容器サンプル水位の解析結果

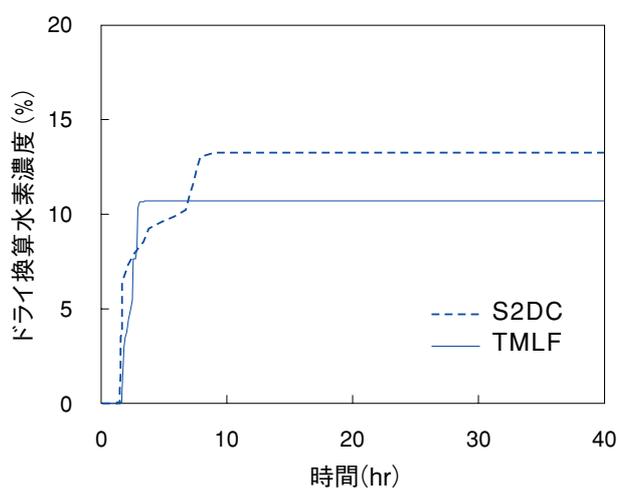


図11 格納容器内ドライ換算水素濃度の解析結果

この解析結果に基づき、プラントに脅威を与えるパラメータからAMを選択する際における達成目標を抽出した。その結果、(1)1次系圧力の観点から炉心溶融物（デブリ）の飛散防止、(2)炉内温度の観点から炉心溶融進展停止、(3)格納容器圧力の観点から格納容器の減圧、(4)格納容器温度および格納容器サンプル水位の観点からデブリの冷却、(5)水素濃度の観点から水素燃焼抑制の5項目が抽出された。デブリの飛散防止に対しては1次系の減圧、炉心溶融進展停

止に対しては1次系注水、格納容器の減圧に対しては格納容器液相部への蓄熱または格納容器外への排熱、デブリの冷却に対しては格納容器内注水、水素燃焼抑制に対しては水素濃度制御のAMが対応する手段として用意されている。AMGの適用は、炉心損傷を検知してから後なので、炉心損傷時点からそれぞれのAMを実行しなければならない時点までの時間余裕を求めた結果を表9に示す。

表9 AMの炉心損傷からの時間余裕および同時に達成すべき目標

達成目標	アクシデントマネジメント	判断時間余裕		同時に達成する目標				
		S2DC	TMLF	デブリ飛散防止	溶融進展停止	格納容器減圧	デブリ冷却	水素燃焼防止
デブリ飛散防止	1次系減圧	20~40分	<20分	●	●	●	●	—
溶融進展停止	1次系注水	>40分	20~40分	●	●	●	●	—
格納容器減圧	格納容器液相部への蓄熱	>40分	>40分	●	●	●	●	●
	格納容器外への排熱	>40分	>40分	●	●	●	●	●
デブリ冷却	格納容器内注水	>40分	<20分	●	●	●	●	—
水素燃焼防止	水素濃度制御	<20分	<20分	—	—	●	—	—

時間余裕のCPCは、THERP<sup>(5)</sup>表20-1より、時間余裕30分の基準過誤率と時間余裕20分の下限過誤率および時間余裕40分の上限過誤率が同一であることから、時間余裕20分以下は-状態、20~40分は0状態、40分以上は+状態とした

次に、標準的な緊急時組織のCPC評価を行った結果を示す。想定した緊急時組織は原子力災害対策特別措置法に基づく原子力防災業務計画で定められた組織とし、環境条件等については設備等が充実・強化される前の状態を想定した。S2DCおよびTMLFのCPC評価結果を表10に示す。なお、時間帯とクルー協調のCPCは、異常事象の発生時刻および招集される要員が特定できないことから-状態と評価し、感度解析を実施することとした。

表10 CPC素評点の評価結果

CPC	素評点											
	S2DC					TMLF						
	格納容器液相部への蓄熱	格納容器外への排熱	水素濃度制御	1次系の減圧	1次系注水	格納容器内注水	格納容器液相部への蓄熱	格納容器外への排熱	水素濃度制御	1次系の減圧	1次系注水	格納容器内注水
1 組織因子	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+
2 作業環境	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
3 マンマシン インターフェース	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
4 運転手順書	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
5 同時に達成する 目標	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
6 時間余裕	+	+	-	0	+	+	+	+	-	-	0	-
7 時間帯	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
8 訓練・経験	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
9 クルー協調	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
10 コミュニケーション	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-

(1)スクリーニング手法による試評価

CPCの+状態と-状態の数は、CPC素評価結果に基づき、CPC相互の依存性および影響度合いの大きさによるウェイトで補正して求める。「小破断LOCA時ECCSおよび格納容器スプレイ起動失敗

シーケンス (S2DC)」および「SGへの全給水喪失時 ECCS起動失敗および格納容器スプレイ再循環失敗シーケンス (TMLF)」のCPC補正結果を表11に示す。

この+状態と-状態の数から(2)式を用いて過誤率を得た。

表11 スクリーニング手法のCPC補正結果

CPC	重み	CPC補正結果											
		S2DC						TMLF					
		格納容器液相部への蓄熱	格納容器外への排熱	水素濃度制御	1次系の減圧	1次系注水	格納容器内注水	格納容器液相部への蓄熱	格納容器外への排熱	水素濃度制御	1次系の減圧	1次系注水	格納容器内注水
1 組織因子	1.3	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+
2 作業環境	1.45	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
3 マンマシンインターフェース	2.1	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
4 運転手順書	1.85	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
5 同時に達成する目標	1.6	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
6 時間余裕	3.2	+	+	-	0	+	+	+	+	-	-	0	-
7 時間帯	1.1	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
8 訓練・経験	2.4	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
9 クルー協調	2.3	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
10 コミュニケーション	1.5	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
評価結果が+状態のウェイト補正したCPCの数 $N_+$		5.1	5.1	4.0	4.0	5.1	5.1	5.1	5.1	4.0	4.0	4.0	4.0
評価結果が-状態のウェイト補正したCPCの数 $N_-$		9.3	9.3	10.4	9.3	9.3	9.3	9.3	9.3	10.4	10.4	9.3	10.4
ウェイト補正したCPCの総数 $N_{max}$	18.8												

小破断LOCA時ECCSおよび格納容器スプレイ起動失敗シーケンス (S2DC) の格納容器液相部への蓄熱のAMに対して、+状態のCPCは5.1、-状態のCPCは9.3と評価され、総CPC数は18.8であることから、(7)式よりスクリーニング評価による過誤率は0.23となった。

$$E_{screening} = E_{Base} 10^{\frac{R}{R_{max}} f} = E_{Base} 10^{0.14} \approx 0.23 \quad \dots\dots (7)$$

$$R = \left( \frac{\pi}{4} - \tan^{-1} \frac{N_+}{N_-} \right) \sqrt{N_+^2 + N_-^2} = 3.01$$

$$R_{max} = \frac{\pi}{4} N_{max} = 14.8$$

$$f = \log(E_j) = 0.70$$

その他のAMについても同様に計算した結果を表12に示す。

表12 スクリーニング手法の過誤率試評価結果

AM	S2DC	TMLF
格納容器液相部への蓄熱	2.3E-01	2.3E-01
格納容器外への排熱	2.3E-01	2.3E-01
水素濃度制御	4.1E-01	4.1E-01
1次系の減圧	3.1E-01	4.1E-01
1次系注水	2.3E-01	3.1E-01
格納容器内注水	2.3E-01	4.1E-01

(2) 詳細手法による試評価

詳細手法では、各AMについてAMGに記述された内容に基づき主要タスクを抽出して過誤率を特定し、CPC評価結果から求めた過誤率重み係数を乗じて算出する。

① AMの主要タスク選定

評価対象AMの主要タスクは、AMGに記述された内

容に基づき、表4から選択する。「パラメータの監視」のタスクについては、シビアアクシデント状況下における監視計器の信頼性が人的過誤に影響するため、評価対象AMで使用する計器に多様なバックアップがあるかどうかにより、当該AMの主要タスクとして分類した。但し、水素濃度監視については、直接監視できる計器がなく、定期的なサンプリングと格納容器圧力から推定されるため、専用に設定したタスクを主要タスクとした。「設備状態の監視」のタスクについては、機器の作動を目的としたAMと機器の停止を目的としたAMにより、当該AMの主要タスクとし

て分類した。「正負効果の評価」は、AMGに共通して要求されており、全てのAMの主要タスクとした。「採否の決定」のタスクについては、評価対象AMが複数手段から選択される状態にあるかどうかにより主要タスクを分類した。「実行の指示」のタスクについては、評価対象AMが複雑な手順を要求するものであるかどうかにより主要タスクを分類した。これらをまとめた結果および主要タスクの単純合計過誤率（CPCが全て0状態であった場合における各AMの過誤率）を表13に示す。

表13 各AMの主要タスク

主要タスク		個別タスク		認知機能	適用過誤率	1次系の減圧	1次系注水	格納容器内注水	格納容器液相部への蓄熱	格納容器外への排熱	水素濃度制御
状況の認知	パラメータの監視	な直接的	バックアップ計画あり	観察	2.6E-06	●	●	●		●	
			バックアップ計画なし	観察	2.9E-03				●		
		間接的な監視	解釈	1.5E-02							●
設備状態の監視	使える機器の把握	観察	1.7E-02	●	●	●	●	●	●		
	稼働中機器の把握	観察	5.1E-05								●
実行の判断	正負効果の評価		解釈	6.3E-02	●	●	●	●	●	●	●
	採否の決定	複数手段からの選択	計画	1.5E-03	●	●	●	●	●	●	
		しきい値による選択	解釈	6.0E-04							●
	実行の指示	複雑な指示の伝達	実行	1.5E-02			●	●	●	●	
期限付き指示の伝達		実行	8.4E-06	●	●					●	
主要タスクの単純合計過誤率						0.081	0.081	0.097	0.100	0.097	0.078

② CPC評価結果による認知機能に対する過誤率重み係数の算出  
AMの主要タスクに対して得られた過誤率をCPC評価結果により補正する。表10に示すCPCの素評価結果をCPC相互の依存関係に基づき認知機能別に(1)式で補正した結果を表14に示す。次に、S2DCの格納容

器液相部への蓄熱とTMLFの格納容器内注水を例に、表6に示した認知機能別重み係数を(3)式を用いてエラーファクタで補正した結果を表15に示す。CPC依存関係補正結果から表15を用いて認知機能別重み係数を抽出し、(4)式により認知機能に対する過誤率重み係数を求めた結果を表16に示す。

表14 認知機能別のCPC依存関係補正結果

CPC	S2DCの 格納容器液相部への蓄熱					TMLFの格納容器内注入				
	素評点	CPCの依存性補正結果				素評点	CPCの依存性補正結果			
		観察	解釈	計画	実行		観察	解釈	計画	実行
1 組織因子	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+
2 作業環境	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
3 マンマシンインターフェース	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
4 運転手順書	0	0	+	0	+	0	0	+	0	+
5 同時に達成する目標	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
6 時間余裕	+	0	+	+	+	-	-	-	-	-
7 時間帯	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
8 訓練・経験	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
9 クルー協調	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
10 コミュニケーション	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-

表15 エラーファクタで補正した認知機能別重み係数

CPC	CPC 評点	認知機能			
		観察	解釈	計画	実行
組織因子	+	-0.945	-0.842	-0.717	-0.777
	0	0	0	0	0
	-	0.289	0.330	0.496	0.496
作業環境	+	-0.756	-0.674	-0.896	-0.777
	0	0	0	0	0
	-	0.578	0.659	0.248	0.496
マンマシンインターフェース	+	-0.472	-0.842	-0.896	-0.485
	0	0	0	0	0
	-	1.444	0.330	0.248	1.239
運転手順書	+	-0.756	-0.842	-0.448	-0.777
	0	0	0	0	0
	-	0.578	0.330	1.239	0.496
同時に達成する目標	+	-0.945	-0.842	-0.896	-0.971
	0	0	0	0	0
	-	0.578	0.659	1.239	0.496
時間余裕	+	-0.472	-0.421	-0.448	-0.485
	0	0	0	0	0
	-	1.444	1.649	1.239	1.239
時間帯	+	-0.945	-0.842	-0.896	-0.971
	0	0	0	0	0
	-	0.347	0.396	0.297	0.297
訓練・経験	+	-0.756	-0.421	-0.448	-0.777
	0	0	0	0	0
	-	0.578	1.649	1.239	0.496
クルー協調	+	-0.472	-0.421	-0.448	-0.485
	0	0	0	0	0
	-	0.578	0.659	0.496	1.239
コミュニケーション	+	-0.472	-0.842	-0.896	-0.485
	0	0	0	0	0
	-	0.578	0.330	0.248	0.496

表16 認知機能に対する過誤率重み係数

CPC		S2DCの 格納容器液相部への蓄熱				TMLFの格納容器内注水			
		観察	解釈	計画	実行	観察	解釈	計画	実行
1	組織因子	-0.945	-0.842	-0.717	-0.777	-0.945	-0.842	-0.717	-0.777
2	作業環境	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
3	マンマシンインターフェース	1.444	0.330	0.248	1.239	1.444	0.330	0.248	1.239
4	運転手順書	0.000	-0.842	0.000	-0.777	0.000	-0.842	0.000	-0.777
5	同時に達成する目標	0.578	0.659	1.239	0.496	0.578	0.659	1.239	0.496
6	時間余裕	0.000	-0.421	-0.448	-0.485	1.444	1.649	1.239	1.239
7	時間帯	0.347	0.396	0.297	0.297	0.347	0.396	0.297	0.297
8	訓練・経験	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
9	クルー協調	0.578	0.659	0.496	1.239	0.578	0.659	0.496	1.239
10	コミュニケーション	0.578	0.330	0.248	0.496	0.578	0.330	0.248	0.496
$W_e(l)$		1.81	1.06	1.37	1.49	2.53	1.71	2.02	2.21

③ 各AMの意思決定過誤率

各AMの意思決定過誤率は、表4に示したAMの主要タスクに対する認知機能の対応関係から、(5)式により該当する認知機能に対する過誤率重み係数を乗じて求めた。詳細手法による過誤率計算結果を表17に示す。過誤率は、S2DCのAMは0.10~0.13（スクリーニング手法0.23~0.41）、TMLFのAMは0.12~0.19（スクリーニング手法0.23~0.41）となった。

表17 詳細手法による過誤率計算結果

AM	S2DC	TMLF
格納容器液相部への蓄熱	1.3E-01	1.3E-01
格納容器外への排熱	1.2E-01	1.2E-01
水素濃度制御	1.3E-01	1.3E-01
1次系の減圧	1.2E-01	1.5E-01
1次系注水	1.0E-01	1.2E-01
格納容器内注水	1.2E-01	1.9E-01

(3) 時間帯およびクルー協調の感度解析

時間帯およびクルー協調については、発生した事象が昼間か夜間かさらに平日か休日かによって集合する要員数や要員の資質に差がでると考えられる。しかしながら、PSA評価において事象発生時刻を特定することは不可能であり、保守的に-状態として評価してきた。そこで、時間帯やクルー協調が+状態

である場合に、過誤率へ与える感度を評価した。表18に時間帯およびクルー協調の感度解析結果を示す。この結果から、時間帯およびクルー協調が+状態と評価される条件が成立すれば、両者が-状態と評価した場合に比べて過誤率は41~51%程度小さくなった。

表18 時間帯およびクルー協調の感度解析結果

AM	S2DC				TMLF			
	スクリーニング手法		詳細手法		スクリーニング手法		詳細手法	
	感度解析結果	-状態からの低減率	感度解析結果	-状態からの低減率	感度解析結果	-状態からの低減率	感度解析結果	-状態からの低減率
格納容器液相部への蓄熱	1.2E-01	48%	6.7E-02	47%	1.2E-01	48%	6.7E-02	47%
格納容器外への排熱	1.2E-01	48%	6.5E-02	47%	1.2E-01	48%	6.5E-02	47%
水素濃度制御	2.0E-01	51%	7.9E-02	41%	2.0E-01	51%	7.9E-02	41%
1次系の減圧	1.6E-01	49%	6.0E-02	49%	2.0E-01	51%	8.7E-02	43%
1次系注水	1.2E-01	48%	5.4E-02	45%	1.6E-01	49%	6.0E-02	49%
格納容器内注水	1.2E-01	48%	6.5E-02	47%	2.0E-01	51%	1.0E-01	46%

$$\text{「-状態からの低減率」} = (\text{「-状態の評価結果」} - \text{「+状態の評価結果」}) / \text{「-状態の評価結果」}$$

(4) エラーファクタを変更した場合の感度解析

本手法では、標準過誤率に対してエラーファクタをどのように設定するかが補正を行う際に重要となっている。そこで、エラーファクタをTHERP<sup>(5)</sup>表20-1から引用した値である10とした場合に過誤率に与える感度を評価した。ここで、エラーファクタの変

更によりスクリーニング手法の最大過誤率が1を超えるモデルとなるが、過誤率の上限は1とした。表19にエラーファクタを変更した場合の感度解析結果を示す。この結果から、エラーファクタを5から10に変更しても過誤率の変化は11~46%程度であった。

表19 エラーファクタを変更した場合の感度解析結果

AM	S2DC				TMLF			
	スクリーニング手法		詳細手法		スクリーニング手法		詳細手法	
	感度解析結果	エラーファクタ5増減率	感度解析結果	エラーファクタ5増減率	感度解析結果	エラーファクタ5増減率	感度解析結果	エラーファクタ5増減率
格納容器液相部への蓄熱	2.7E-01	15%	1.4E-01	13%	2.7E-01	15%	1.4E-01	13%
格納容器外への排熱	2.7E-01	15%	1.4E-01	13%	2.7E-01	15%	1.4E-01	13%
水素濃度制御	5.9E-01	46%	1.7E-01	26%	5.9E-01	46%	1.7E-01	26%
1次系の減圧	4.0E-01	30%	1.5E-01	22%	5.9E-01	46%	2.0E-01	33%
1次系注水	2.7E-01	15%	1.1E-01	11%	4.0E-01	30%	1.5E-01	28%
格納容器内注水	2.7E-01	15%	1.4E-01	13%	5.9E-01	46%	2.5E-01	28%

$$「エラーファクタ5増減率」=（「エラーファクタ10結果」-「エラーファクタ5結果」）/「エラーファクタ5結果」$$

(5) 評価者間の偏差の観察

CPC評価のばらつきの影響を見るため、(株)原子力安全システム研究所に所属するPSA解析経験者5名による試評価を実施した。S2DCシーケンスを対象にして、スクリーニング手法と詳細手法による各評価者が過誤率を計算した結果を図12に示す。これよ

り平均値および標準偏差を計算した結果を表20に示す。各評価者による標準偏差と平均値の比は、スクリーニング手法で15~27%程度、詳細手法で17~28%程度であった。

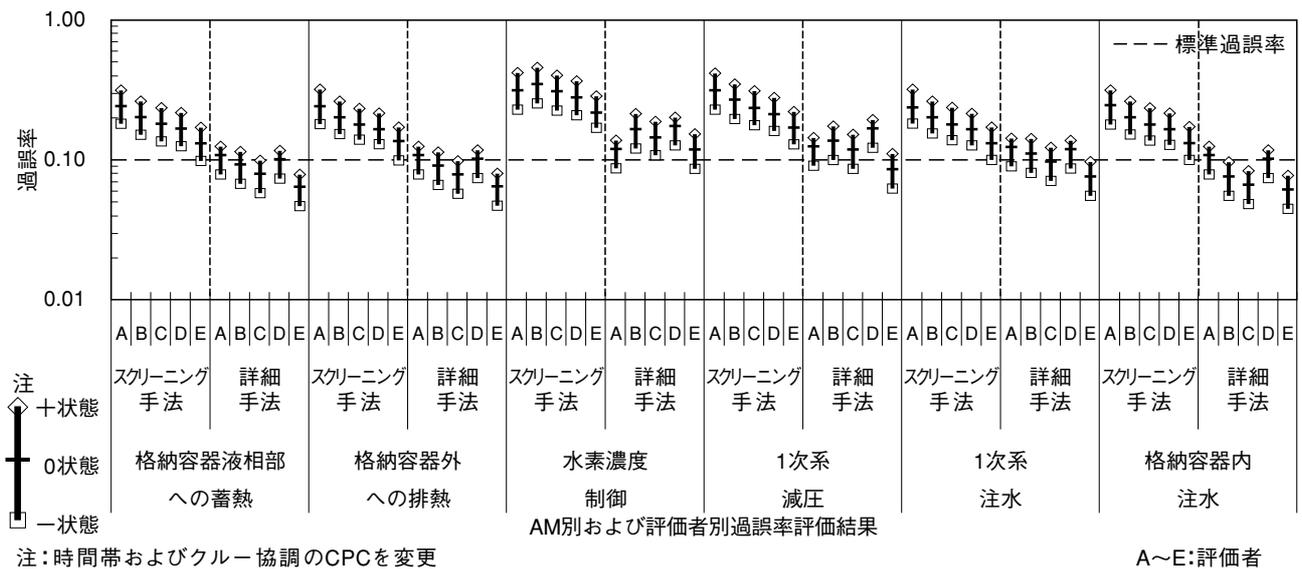


図12 過誤率評価結果のバラツキ

表20 評価者間の平均値と標準偏差

		S2DCに対する評価者間の偏差								
		最大値			中間値			最小値		
		平均 $\mu$	差 $\sigma$	割合 $\sigma/\mu$	平均 $\mu$	差 $\sigma$	割合 $\sigma/\mu$	平均 $\mu$	差 $\sigma$	割合 $\sigma/\mu$
スクリーニング手法	格納容器液相部への蓄熱	2.4E-01	5.5E-02	23%	1.8E-01	4.0E-02	22%	1.4E-01	3.0E-02	22%
	格納容器外への排熱	2.4E-01	5.5E-02	23%	1.8E-01	4.0E-02	22%	1.4E-01	3.0E-02	22%
	水素濃度制御	3.9E-01	6.6E-02	17%	2.9E-01	4.8E-02	17%	2.2E-01	3.3E-02	15%
	1次系の減圧	3.2E-01	7.4E-02	23%	2.4E-01	5.4E-02	23%	1.8E-01	3.8E-02	21%
	1次系注水	2.4E-01	5.5E-02	23%	1.8E-01	4.0E-02	22%	1.4E-01	3.0E-02	22%
	格納容器内注水	2.0E-01	5.5E-02	27%	1.5E-01	4.0E-02	26%	1.2E-01	3.0E-02	26%
詳細手法	格納容器液相部への蓄熱	1.1E-01	1.8E-02	17%	9.0E-02	2.0E-02	22%	6.5E-02	1.3E-02	20%
	格納容器外への排熱	1.1E-01	1.8E-02	17%	9.0E-02	2.0E-02	22%	6.5E-02	1.3E-02	20%
	水素濃度制御	1.8E-01	3.2E-02	18%	1.5E-01	2.6E-02	17%	1.1E-01	1.8E-02	17%
	1次系の減圧	1.5E-01	3.0E-02	20%	1.3E-01	2.9E-02	23%	9.1E-02	2.0E-02	22%
	1次系注水	1.1E-01	1.9E-02	18%	8.7E-02	2.0E-02	23%	6.3E-02	1.3E-02	21%
	格納容器内注水	9.9E-02	2.0E-02	20%	8.4E-02	2.4E-02	28%	6.1E-02	1.5E-02	25%

最大値：時間帯とクルー協調のCPCを「-状態」とした場合  
 中間値：時間帯とクルー協調のCPCを「0状態」とした場合  
 最小値：時間帯とクルー協調のCPCを「+状態」とした場合

## 4. 考察

### 4.1 過誤率評価結果

認知的分析モデルにより、緊急時組織がAMの意思決定を行う際の人的過誤率を定量化する手法を開発した。S2DCおよびTMLFシーケンスについてスクリーニング手法と詳細手法により試評価を実施した。

スクリーニング手法では、CPCの相互依存性と影響度合いを考慮した結果+状態と-状態が等しい場合にスクリーニング用基準過誤率が与えられ、エラーファクタに基づき+状態が多い場合は過誤率は小さく-状態が多い場合は過誤率は大きくなるよう補正される。試評価では全てのAMは、評価結果が-状態のウェイト補正したCPC数が+状態のウェイト補正したCPC数より多いと評価されたことからスクリーニング用基準過誤率0.17より大きな値となった。

詳細手法では、AMGの記述から主要タスクを同定し、主要タスクの認知機能毎にCPCの相互依存性と影響度合いを考慮して補正することから、補正後のCPCが全て0状態である場合に主要タスクの単純合計過誤率が与えられ、認知機能毎にCPCが+状態の場合は過誤率が小さくなるように、-状態の場合は過誤率が大きくなるように補正される。試評価では、全ての認知機能がパフォーマンスを悪化させると評価され、全てのAMは主要タスクの単純合計過誤率より大きな値となった。

ここで注意しなければならないものは、CPCのうち「時間帯」と「クルー協調」については、現実の事態に直面しないと評価できないという点である。「時間帯」は深夜に発生すれば人のパフォーマンスが低下するし、「クルー協調」も正月や連休などで人の集まりが悪い状態ではパフォーマンスが低下するであろう。PSA評価上は、これらのCPCを-状態として評価しておくことが妥当と考えられる。そこでこれらのCPCを+状態とした場合の感度解析を行った結果、スクリーニング手法では、水素濃度制御を除くAMがスクリーニング用基準過誤率より小さな値となり、詳細手法では、半数のAMが主要タスクの単純合計過誤率より小さな値となった。スクリーニング手法および詳細手法ともに「時間帯」と「クルー協調」のCPCを+状態とした評価では過誤率は50%程度小さくなることから、より現実的な評価を行う場合は、+状態、0状態、-状態の過誤率を計算し、0状態を中心としてエラーファクタを持つ過誤率とする等の工夫が必要であろう。

CREAMは、評価者に依存する傾向があることを述べたが、本手法はPSA解析者が取り扱えるレベルとすることを目標とした。そこで著者を含む5名のPSA解析経験者による試評価を実施した結果、得られた過誤率の平均値に対して標準偏差は、スクリーニング手法で平均22%程度、詳細手法で平均20%程度に収まった。

## 4.2 スクリーニング評価モデルの性能

PSA評価においては、必要なリソースを最小にする観点からスクリーニングが行われることが多い。その考え方は、概略的な分析に基づき保守的な値を用いることにより全体リスクに与える影響を評価して、影響が大きい場合のみ詳細に評価するというものが一般的であろう。例えば、操作を対象とする人的過誤率の評価では、操作者にかかるストレス環境とバックアップ効果の2つを条件として保守的な過誤率を一括して与えるというものが挙げられる。このような方法は、PSA評価の生産性を飛躍的に向上させることから、過誤率を評価するためのモデルに求められる重要な要件であると考えられる。よって、スクリーニング手法に求められるものは、詳細手法に対して常に保守的な値が得られることであると言える。

本手法でも、スクリーニング手法と詳細手法を提供しているが、この点について試評価結果から考察する。CPCが全て0状態であれば、スクリーニング手法はスクリーニング用基準過誤率（標準過誤率の1.7倍）となり、詳細手法は主要タスクの単純合計過

誤率となる。このことから詳細手法の過誤率設定には標準過誤率を意識した設定が重要であることは言うまでもない。図13は、スクリーニング用基準過誤率を設定するために、全てのCPCの組み合わせに対してスクリーニング手法の  $10^{\frac{R}{R_{max}} \log E_f}$  と詳細手法の  $W_e(l)$  を求め、グラフ化したものである。これからわかるように、スクリーニング手法による過誤率は、パフォーマンスを向上させる方向に補正した場合、詳細手法による認知機能別過誤率より最大2.1倍程度大きくなる可能性がある。このため、スクリーニング手法では、標準過誤率を1.7倍してスクリーニング用基準過誤率とすることにより、表21に示すとおり99%以上の確率で詳細手法の過誤率を上回ることを保証した。実際には、詳細手法の過誤率は、認知機能の組み合わせにより得られるため、今回試評価で用いたモデルを使って評価すると図14に示すようにスクリーニング手法で得られる過誤率は詳細手法で得られる過誤率を100%上回る。これより明らかなように、本手法のスクリーニング評価結果は、詳細評価結果より保守的な過誤率を得ることができ、PSAに求められるスクリーニング性能を満足していると考えられる。

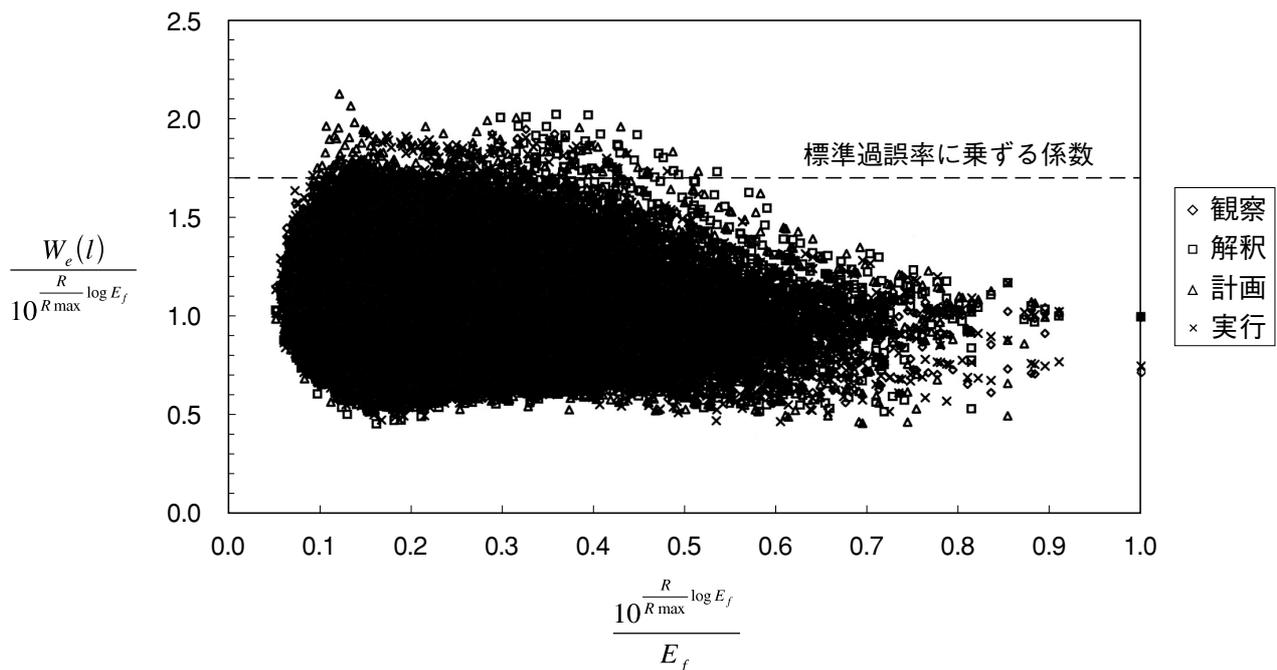


図13  $10^{\frac{R}{R_{max}} \log E_f}$  と  $W_e(l)$  の比較

表21 スクリーニング手法が詳細手法の過誤率を上回る割合

	観察	解釈	計画	実行
$\frac{W_e(t)}{10^{\frac{R}{R_{max}} \log E_f}} > 1.7$ の割合	0.04%	0.20%	0.47%	0.37%

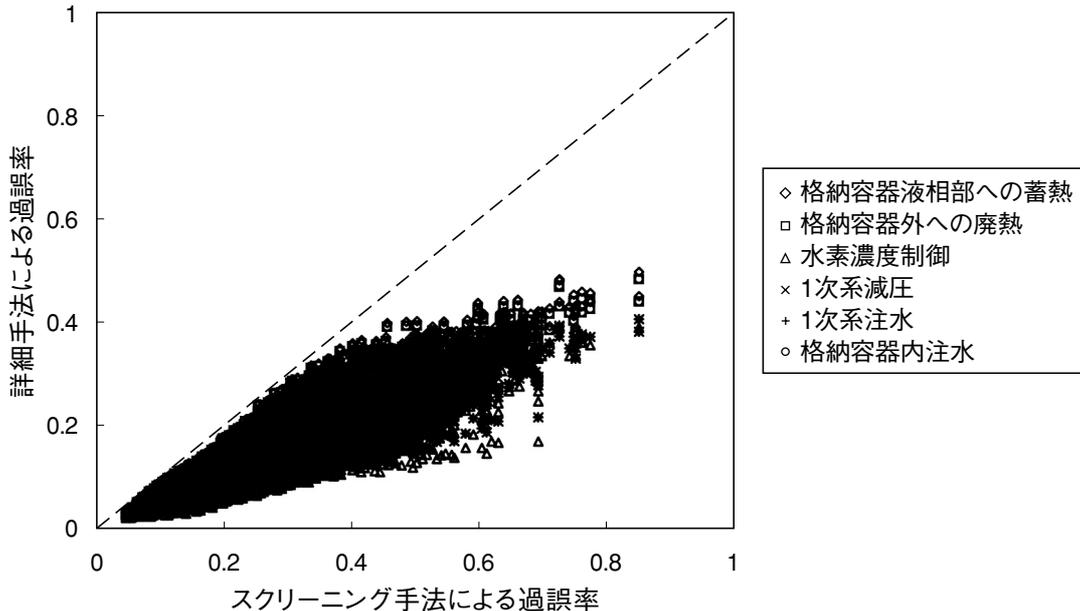


図14 スクリーニング手法と詳細手法の過誤率の比較

### 4.3 モデルの汎用性

本手法は、評価対象となる緊急時組織の活動形態に合わせて、利用者がTHERPなどから標準過誤率とエラーファクタを設定し、CREAMの認知情報処理制御モードの概念で標準過誤率を補正するものである。この際、評価対象が置かれている状況から適切な標準過誤率とエラーファクタを選択するとともに、認知情報処理制御モードを評価するためのCPC評価の基準点（0状態）を標準過誤率から設定することが重要である。標準過誤率およびエラーファクタの真値がどこにあるのかという面での議論は参考文献に委ねるとして、適切な文献からこれら2つのパラメータを抽出することにより、本手法はCREAMの概念を忠実に適用して一意的に過誤率を算出することができる。

今回は、PSA評価で最も利用されているTHERPから標準過誤率を抽出し、エラーファクタについては、緊急時組織内部において情報の確認、手段の選択の各段階でチェックが行われることおよび中央制御室に実行を指示する際の内容の伝達時において、意思

決定の精度を高める方向に作用するとともに時間的余裕を失うような相互干渉効果が考えられることから、THERPで与えられるエラーファクタより小さくなると考えた。しかし、THERPで与えられるエラーファクタをそのまま使うべきと考えるPSA解析者も多いと想定されることから、エラーファクタを5から10へ変更した場合に過誤率に与える影響を評価した。試評価が対象とした範囲においては、過誤率の増減はスクリーニング手法で15～46%、詳細手法で11～33%であり、エラーファクタの変更が過誤率に与える影響は小さいと考えられる。しかし、CPC評価結果が+状態または-状態に偏っている場合は、エラーファクタの変更が過誤率に与える影響が大きくなる傾向を示すので注意が必要である。

本報では、AMの意思決定を行う緊急時組織を対象として手法を述べたが、本手法はCREAMが元々持っている汎用性を継承しており、他の分野においても応用可能であると考えられる。

## 5. 結言

本研究では、CREAMを用いたAMの意思決定過誤率評価手法について、試評価を行い結果を考察した。以下に得られた成果を示す。

- (1) 認知的分析モデルを用いてAMを行う緊急時組織の意思決定過誤率を、標準過誤率とエラーファクタを選択することにより、人間信頼性工学の専門家でない者がPSA評価に適した形で定量化できる手法を開発した。
- (2) 代表的なPWRプラントのシビアアクシデント事象進展解析に基づき試評価を実施した結果、対象となった6種類のAMの意思決定過誤率は、スクリーニング手法で0.23~0.41、詳細手法で0.10~0.19の範囲にあり、「時間帯」および「クルー協調」のCPCを+状態とすると過誤率は50%程度低下することを示した。
- (3) スクリーニング手法で得られる過誤率は理論上99%の確率で詳細手法の過誤率を上回る。実際には、詳細手法の過誤率は認知機能の組み合わせから得られるため、今回の試評価で対象としたAMの過誤率は、スクリーニング手法の結果が詳細手法の結果を100%上回った。これより明らかなように、本手法のスクリーニング評価結果は、詳細評価結果より保守的な過誤率を得ることができ、PSAに求められるスクリーニング性能を満足していることを示した。
- (4) 本手法は、CREAMが元々持っている汎用性を継承しており、他の分野にも応用できる汎用性を持つと考えられる。

## 文献

- (1) 原子力発電所のアクシデントマネジメント「安全」をより確かなものに、通商産業省資源エネルギー庁パンフレット
- (2) “発電用軽水型原子炉施設におけるシビアアクシデント対策としてのアクシデントマネジメントについて”，原子力安全委員会安全審査指針集改訂10版, 1194-1217, 大成出版, (2000).
- (3) PSA実施手順調査検討専門委員会: 確率論的安全評価(PSA)実施手順に関する調査検討ーレベル1 PSA, 内の事象一, 原子力安全研究協会, (1992)
- (4) PSA実施手順調査検討専門委員会: 確率論的安全評価(PSA)実施手順に関する調査検討ーレベル2 PSA, 内の事象一, 原子力安全研究協会, (1992)
- (5) A. D. Swain, H. E. Guttman: *Handbook of Human Reliability Analysis with Emphasis on Nuclear Power Plant Applications*, NUREG/CR-1278, US-NRC, (1983).
- (6) S. E. Cooper, A. Ramey-Smith, et al.: *A Technique for Human Error Analysis (AHTEANA)*, NUREG/CR-6350, US-NRC, (1996)
- (7) C. Bieder, P. Le-Bot, E. Desmares, J-L Bonnet: “MELMOS:EDF’s new Advanced HRA Method”, PSAM 4, New York City, (1998)
- (8) E. Hollnagel: *Cognitive reliability and error analysis method – CREAM*, Elsevier, Oxford, UK, (1998)
- (9) E. Hollnagel: *Human Reliability Analysis Context and Control*, Academic Press, Harcourt Brace & Co., (1993).
- (10) 関西電力(株): “関西電力の原子力事業者防災業務計画の概要”, 関西電力若狭支社ホームページ, 原子力トピックス, (<http://www.kepco.co.jp/wakasa/topics/bousai/bousai.htm>)
- (11) 東京電力(株): “原子力事業者防災業務計画の作成について”, 東京電力ホームページ, 原子力情報トピックス, (<http://www.tepco.co.jp>)
- (12) 関西電力(株): “美浜発電所, 高浜発電所及び大飯発電所のアクシデントマネジメント整備報告書並びにアクシデントマネジメント整備有効性評価報告書の概要”, 関西電力 5/29付報道発表, (2002)
- (13) NEA/CSNI, “Identification and Assessment of Organizational Factors Related to the Safety of NPPs”, NEA/CSNI/R (98) 17 Vol. 1 & 2, (1999).
- (14) Leonard M. T., Ashbaugh S. G., Cole R. K., Bergeron K.D., Nagashima K.: “SAND-96 -2053-C A Direct Comparison of MERCOR 1. 8. 3 and MAAP 4 Results for several PWR&BWR Accident Sequence” (1996)
- (15) Hammersley R.J., Godin-jacqmin L. J., Leaver D., Li J., Sher R.: “Aerosol Deposition in Reactor Containments; A Comparison of Nauahygros and MAAP 4” *Trans American Nuclear Soc.* Vol.69 (1993)
- (16) Song Y. M.: “A Review of MAAP4 Code Structure and Core T/H Model” KAERI-TR -1003-98(1998)
- (17) 吉田至孝, 大谷昌徳: 日本原子力学会2001年秋の大会要旨集, I33, (2001).
- (18) 吉田至孝, 飯塚弘之: 日本原子力学会2002年春の年会要旨集, J19, (2002).
- (19) Y. Fujita, E. Hollnagel: From error probabilities to

control modes: Quantification of context effects on performance. In Proceedings of "Building the new HRA: Strengthening the link between experience and HRA," OECD/NEA, (2002).

- (20) 塩見弘: 人間信頼性工学入門, 日科技連出版, (1996).
- (21) J.C.Williams: "Human Reliability Data —The State of the Art & the Possibility", Proc. Reliability '89, Vol. 1, (1989).
- (22) D. I. Gertman, H. S. Blackman: *Human Reliability & Safety Analysis Data Handbook*, John Wiley & Sons, (1994).