

東海再処理施設における確率論的安全評価の適用

(技術報告)

2004年3月

核燃料サイクル開発機構
東 海 事 業 所

本資料の全部または一部を複写・複製・転写する場合は、下記にお問い合わせください。

〒319-1184 茨城県那珂郡東海村村松4番地49

核燃料サイクル開発機構

技術展開部 技術協力課

電 話：029-282-1122（代表）

ファックス：029-282-7980

電子メール：jserv@jnc.go.jp

Inquiries about copyright and reproduction should be addressed to :

Technical Cooperation Section,

Technology Management Division,

Japan Nuclear Cycle Development Institute

4-49 Muramatsu, Tokai-mura, Naka-gun, Ibaraki, 319-1184

Japan

© 核燃料サイクル開発機構 (Japan Nuclear Cycle Development Institute)

2004

東海再処理施設における確率論的安全評価の適用
(技術報告)

中野 貴文¹ 石田 倫彦² 森本 和幸³ 稲野 昌利² 野尻 一郎²

要 旨

東海再処理施設において、定期的に施設の安全性を確認する必要があるとの観点から、2001年から2003年にかけて施設の安全性を包括的に評価する「定期安全レビュー」を実施した。

この定期安全レビューの一環として、施設の特性に応じた対策の措置状況を把握するため、確率論的安全評価手法を用いた事故発生防止上の設備・機器等の相対的な重要度把握を実施した。

同評価においては、東海再処理施設の安全性確認作業で抽出された事故シナリオのうち、周辺環境への影響が大きいと考えられるウラン、プルトニウム、高放射性廃液にかかる事故シナリオを評価対象とし、安全機能及び共通原因故障等を考慮した詳細な事故シナリオの記述をイベントツリー手法により行った。イベントツリーを定量化するにあたり、フォールトツリー解析、人間信頼性解析及び信頼性データベースの構築などを実施した。次に、事故発生防止上の設備・機器等の相対的な重要度を把握するため、原子炉のPSAで一般的に用いられている重要度評価指標 (Fussell-Vesely、Risk Achievement Worth) を用い、重要度評価を実施した。

この結果、各発生防止策について安全上の特徴を踏まえた相対的な重要度を把握することができたとともに、東海再処理施設の安全性向上に資するための知見を得ることができた。

¹ 再処理センター 施設管理部 施設保全2課

² 再処理センター 技術部 技術開発課

³ 再処理センター 处理部 化学処理第2課

PSA Application on the Tokai Reprocessing Plant
(Technical Document)

Takafumi NAKANO¹ Michihiko ISHIDA² Kazuyuki MORIMOTO³
Masatoshi INANO² Ichiro NOJIRI²

ABSTRACT

Periodic Safety Review (PSR) of Tokai Reprocessing Plant (TRP) has been carrying out to obtain an overall view of actual plant safety. As a part of the PSR, Probabilistic Safety Assessment (PSA) methodology has been applied to evaluate the relative importance of safety functions that prevent the progress of event causing to postulate accidents.

Based on results of the safety reassessments of TRP that was carried out in 1999, event trees have been developed to model sequences of postulate accidents.

The event trees have been quantified by using results of fault tree analysis and human reliability analysis by using THERP technique. Reliability data generally used in PSA of nuclear power plants were mainly used. Operating experiences of TRP have also been utilized to evaluate both component/system reliability and human reliability.

The relative importance of safety functions was evaluated by using two major importance measures, Fussell-Vesely and Risk Achievement Worth both generally used in PSA of nuclear power plant.

Through these evaluations, some useful insights into the safety of TRP would be provided. The results of the relative importance measures would be utilized to qualify TRP component/equipment important to safety.

¹ Equipment Maintenance Section, Technical Service Division, Tokai Reprocessing Center

² Technology Development Section, Technology Co-ordination Division, Tokai Reprocessing Center

³ Extraction and Plutonium Treatment Section, Reprocessing Operation Division, Tokai Reprocessing Center

目 次

1. はじめに	.....	1
2. 評価事象の選定	.....	1
2.1 「安全性確認」における異常事象の検討	.....	1
2.2 評価対象事象の選定	.....	2
3. 評価手法	.....	3
3.1 評価に用いる手法の選定	.....	3
3.2 評価手順	.....	4
4. 評価結果	.....	17
4.1 抽出器における有機溶媒の引火点超過	.....	17
4.2 ウラン蒸発缶における熱的制限値超過	.....	39
4.3 プルトニウム蒸発缶における熱的制限値超過	.....	53
4.4 高放射性廃液蒸発缶における熱的制限値超過	.....	66
4.5 高放射性廃液蒸発缶におけるホルムアルデヒド ガス発生	.....	82
4.6 高放射性廃液蒸発缶におけるホルムアルデヒド の蓄積	.....	96
4.7 焙焼還元炉における水素爆発	.....	109
4.8 圧縮空気の供給停止	.....	118
4.9 施設の全停電	.....	134
4.10 誤移送による臨界	.....	151
5. おわりに	.....	164
参考文献	.....	165
付録 1 ヒューマンエラー発生確率の設定	.....	付-1(1)
付録 2 東海再処理施設の実績を用いた故障率の設定方 法	.....	付-2(1)
付録 3 重要度評価結果の活用について	.....	付-3(1)
付録 4 分析操作の失敗確率の算出について	.....	付-4(1)
付録 5 国外の核燃料施設における安全目標について	.....	付-5(1)

1. はじめに

原子力施設の安全性を定量的に評価するための確率論的安全評価（以下「PSA」という）は、原子力施設で発生する可能性がある異常事象を想定し、その後の事象進展の確率を設備構成や故障率等をもとに推定、評価するものである。PSAを通して、原子力施設の安全を担保している設備機能や運転管理の役割を定量的に把握することは、安全性を向上させる上で有用である。

国内の各発電炉においては、定期安全レビューにおいて確率論的安全評価を実施しており、炉心損傷の発生確率が「原子力発電プラントの基本安全原則（INSAG-3）」（IAEA国際原子力安全諮問委員会、1988）が示す目標を十分に下回っていることを確認している。

東海再処理施設及びその他の国内の核燃料施設においては、想定される事象が多岐に渡ること、PSAに必要なデータが不足していること及び事故の規模が発電炉と比較して小さいと考えられること等の理由により、実施されていなかった。

本 PSA は、東海再処理施設の定期安全レビューの一環として実施したものであり、東海再処理施設において想定される異常事象を確率論的に評価し、その発生確率を求めるとともに発電炉の PSA で用いられる重要度評価の指標を用いて、事故の発生を防止する対策（以下「発生防止策」という）の相対的な重要度を把握することを目的とし実施した。

2. 評価対象事象の選定

東海再処理施設においては、平成9年3月11日に発生したアスファルト固化処理施設の火災爆発事故に鑑み、最新の知見を取り入れて火災・爆発等に対する安全性を確保すべきとの観点から、自主保安活動の一環として「東海再処理施設の安全性確認」(以下「安全性確認」という)を実施し、異常事象の洗い出し、事象進展の検討及び発生防止策の妥当性等を評価した。^{1), 2)}

本 PSA では、「安全性確認」において検討された異常事象を参考に、評価対象事象を選定した。以下に「安全性確認」における異常事象の検討の概要及び評価対象事象の選定の手順を示す。

2.1 「安全性確認」における異常事象の検討

「安全性確認」では、「東海再処理施設の事故の発生防止策の検討」の中でも、再処理施設の各工程で想定される異常事象を摘出した。ここでは、まず、評価すべき工程を選定した。内蔵放射能量の多い工程、可燃性又は熱的不安定物質を扱う工程又は臨界管理が必要な工程を対象とした。

柱文は論外管理が必要な性質である。溶解工程以降の化学処理工程については、化学プラントの潜在的な危険性を明らかにするための手法である HAZOP (Hazard and Operability Study) を用いて異常事象とその考え方の原因の抽出を実施した。

また、圧縮空気、冷却水、電気を供給していることから、その変動により各工程に影響を及ぼす恐れのあるユーティリティ設備及び受入・貯蔵工程については、機器類に対して考えられる故障によるシステムへの潜在的な影響等を評価する FMEA (Failure Mode and Effect Analysis) を用いて異常事象とその考えられる原因の摘出を実施した。

これらのこと象について、その重要性を判断するために発生防止策が全て機能しないとして最終的に至る事象進展の結果を推定し、事象進展フローを作成した。

さらに、ウラン及びプルトニウムの移動に対する臨界安全に係る運転管理の妥当性を確認するために、形状管理機器から濃度管理機器等への誤移送による臨界事象の検討も実施した。

2.2 評価対象事象の選定

本 PSAにおいては、「安全性確認」において検討された異常事象の中から、代表となる事象を以下に示す考え方へ従い選定し、評価対象事象とした。

- (1) 「安全性確認」では、ウラン、プルトニウム及び高放射性廃液を扱わない工程であっても、可燃性又は熱的不安定物質を取り扱う場合には評価対象工程としていたが、これらの工程は、仮に事故が発生したとしても放射線的影響が極めて少ないと今後は評価対象外とした。
- (2) 「安全性確認」において検討された異常事象のうち、火災、爆発及び臨界に至る可能性がある事象を評価対象事象とした。
- (3) 圧縮空気の停止又は施設の全停電に至る事象については、水素掃気の停止に伴う水素濃度上昇に進展する可能性があることから評価対象とした。

この考え方へ従って選定した評価対象事象を以下に示す。

- ① 抽出器における有機溶媒の引火点超過
- ② ウラン溶液蒸発缶における熱的制限値超過
- ③ プルトニウム溶液蒸発缶における熱的制限値超過
- ④ 高放射性廃液蒸発缶における熱的制限値超過
- ⑤ 高放射性廃液蒸発缶におけるホルムアルデヒドガス発生
- ⑥ 高放射性廃液蒸発缶におけるホルムアルデヒドの蓄積
- ⑦ 焙焼還元炉における水素濃度の異常上昇
- ⑧ 圧縮空気の供給停止
- ⑨ 施設の全停電
- ⑩ 誤移送による臨界

3. 評価手法

PSA とは、火災、爆発、臨界等に至る事故シーケンス(事故の発生に至る故障の組合せ)を展開し、プラントの設計、運転を分析して、その発生確率を算出するとともにその基本的原因を見出すものである。

PSA の事故シーケンス記述及び定量化手法は、最も一般的なイベントツリー及びフォールトツリーを用いた手法を選定した。その後に以下の作業を行った。

- (1) プラントの構成/特性の調査
- (2) イベントツリーの作成
- (3) システムのモデル化
- (4) 従属故障の解析
- (5) 人間信頼性解析
- (6) 機器故障率データベースの設定
- (7) 事故シーケンスの定量化
- (8) 重要度評価

上記(1)、(2)については、基本的に平成11年に実施した「安全性確認」で HAZOP 及び FMEA を実施した結果を参考にした。

本章では、PSA を実施するにおいて、評価で用いる手法の選定、評価手順について記述する。

3.1 評価で用いる手法の選定

事故シーケンスの解析は、事故進展解析及びシステム解析より成り立っている。事故進展解析は、対象とするシステムに異常事象が発生した場合、その異常事象がどのように進展して事故に至るかを評価するものである。システム解析は、事故進展解析においてその事象の進展を防止する機器や運転員の対応操作の信頼性を評価するものである。

原子炉施設の炉心損傷を対象としたシステム信頼性評価及び炉心損傷確立評価までを行うレベル1PSAにおいて、事故シーケンス解析手法として一般に用いられている手法は、事象進展解析にイベントツリー、システム解析にフォールトツリーである。今回、東海再処理施設のPSAを実施するにおいても、これまでの安全研究で検討された結果から、事故シーケンス定量化手法として原子炉のPSAと同様、事象進展解析にイベントツリー、システム解析にフォールトツリーを用いて評価を行った。イベントツリー、フォールトツリーの作成・定量化については、国内外のPSA手法を参考にした^{3), 4), 5)}。

従属故障の取扱いについては、共通機器の故障による複数機器あるいは系統の同時故障及び機能喪失については、フォールトツリーで洗い出しを行いイベントツリーで表現することとし、製造工程での問題などによる同時故障(共通原因故障)は、最も一般的で使用実績のあるβファクタ法⁴⁾を採用して評価した。

また、ヒューマンエラーの発生確率については、発電炉のPSAで用いられているTHERP手法⁶⁾を用いて人間信頼性解析を実施し算出した。

3.2 評価手順

本PSAでは、3.1で述べたイベントツリー/フォールトツリー手法を用いて、選定した各評価事象の安全機能及び運転員の対応操作（以下、まとめて「事故発生防止策」という）の特徴及び重要度の把握を行った。

本評価ではまず、「安全性確認」で作成した事象進展フローを参考にイベントツリーを作成した。作成したイベントツリーの各要素（以下「ヘッディング」という）に対しては、フォールトツリーを用いてシステムのモデル化を行い、機器故障率データとヒューマンエラーの発生確率を用いて定量化を行った。ただし、起因事象については、可能な限り東海再処理施設の実績を用いた。

また、本評価では起因事象と事故発生防止策の間または事故発生防止策と事故発生防止策の間に共有する機器等が存在するか調査を行った。

次に、フォールトツリーの定量結果、ヒューマンエラーの発生確率及び機器故障率データを用いてイベントツリーの定量化を行った。

続いて事故発生防止策の重要度を把握するために重要度評価を行った。重要度評価は、発電炉のPSAで用いられている重要度評価指標、Fussel-Vesely法⁴⁾（以下「FV指標」という）及びリスク増加価値⁴⁾（Risk Achievement Worth：以下「RAW指標」という）を用いて行った。

評価手順は図3-1に示した。以下に評価手法の詳細を示す。

① プラントの構成及び特性の調査

評価対象である工程の機器の構成、運転方法等について、運転要領書、工程系統図、計装系統図及び運転員、保全員とのディスカッションを行うことにより、プラントの構成及び特性の調査を行った。

② 起因事象の選定

起因事象の選定においては、安全性確認で作成した事象進展フローの起因事象を基本的に用いた。

③ イベントツリーの作成

イベントツリーとは、起因事象を出発点に、事象がどのように進展して最終状態に至るかを、ほぼ時系列的に解析していく樹木状の論理構造図のことである。イベントツリーは、プラントの状態を考慮に入れながら、起因事象に応答する安全機能及び運転員の対応操作の成功または失敗を組合せながら展開する。

本評価におけるイベントツリーの作成では、「安全性確認」で作成した事象進展フローを参考に①の情報を追加して起因事象及び事故発生防止策をヘッディングに配置した。その後、起因事象に対して各事故発生防止策が成功した場合と失敗した場合を想定しながら、それ以降の事象進展を検討することにより、イベントツリーの作成を行った。

イベントツリーの作成方法の概要を図3-2に示した。

④ システムのモデル化

起因事象の発生確率及びイベントツリーの各事故発生防止策における分岐確率を算出するためにフォールトツリー手法を用いてシステムのモデル化を行った。フォールトツリー手法は、評価対象システムや機器において発生しては困る事象の要因を摘出するための手法である。つまり、フォールトツリーとは、解析対象の事象

(一般に失敗事象)を頂上において、その事象が生じるための要因を次々と図式展開し、それぞれの間を成功または失敗のゲート(ANDゲートまたはORゲート)で結合していく論理構造図のことである。

本評価におけるフォールトツリーの作成では、イベントツリーの各ヘッディングの機能喪失を頂上事象とし、その発生要因の洗い出しを設計図書、運転要領書等を用いて行った。

⑤ 従属故障の解析

従属故障とは、機器の故障または運転員の誤操作等の单一要因によって複数の機器等が同時に故障することが想定されることを言う。

想定した従属故障は、下記の2種類に分けられる。

- 1) 機器間で共有している部品、機器及び設備(以下、「共有機器」という)である。例えば、加熱蒸気を止めることによって、事故の発生を防止できる事象で、発生防止策-1が作動した際に閉止する加熱蒸気系に設置されている弁と発生防止策-2が作動した際に閉止する加熱蒸気系に設置されている弁が同じである場合は、その閉止する弁が閉止しなかった場合、発生防止策-1及び発生防止策-2とも機能しないと評価する。
- 2) 同種の機器において、製造過程、振動等の環境要因及びメンテナンス時のミス等による原因で同様の故障モードで故障する。つまり、共通原因故障及び共通モード故障と言われるものである。ただし、運転中の機器の故障と待機中の機器の起動失敗は、運転モードが異なるので考慮しない。

以上2種類の従属故障の評価方法を以下に示す。

- 1) イベントツリーのヘッディングに共有機器を配置し評価した。
- 2) 原子炉のPSAで一般的に用いられている β ファクタ法⁴⁾を用いてフォールトツリー上で評価した。使用した β ファクタは、原子炉で使用実績のある文献7の値を用いた。使用した β ファクタ値を表3-1に示した。

⑥ 人間信頼性解析

ヒューマンエラーとしては、事象発生後の運転員の手動操作失敗や、運転員が対応可能なバックアップ操作の失敗を考慮した。また、事象発生前のヒューマンエラーとしては、保守・点検時における作業終了後、その系統あるいは機器を正しい状態に復帰させる際の復旧失敗を考慮した。具体的には、弁の開け忘れや閉め忘れ、誤設定等である。

ヒューマンエラーの発生確率の設定方法は、発電炉のPSAで用いられているヒューマンエラーハンドブック⁵⁾記載のTHERP手法(Technique for Human Error Rate Prediction)を用い人間信頼性解析を実施することにより設定した。THERP手法は、評価対象とする一連の操作に対し、人の行動に関するイベントツリー(以下「HRAイベントツリー」という)を作成し、ストレスレベルや作業間の従属性と各操作に対する回復要素を考慮した人的過誤率を用いて、操作全体でのヒューマンエラーの発生確率を算出する方法である。

THERP手法を用いた人間信頼性解析の手順のフローを図3-3、使用した人的過誤

率の例を表 3-2 に示した。また、THERP 手法の概要を図 3-4 に示した。

以下に図 3-3 に沿って解析手順を説明する。

タスク（一連の操作全てをまとめて「タスク」ということとする）の分析とは、一連の操作の流れを個々の機器操作、表示データの読み取り等より要素的な作業（以下、「サブタスク」という）に分解することである。ただし、「書類の記載ミス」については、運転要領書やチェックリストを作成する際多重のチェックを実施していること、実際に使用され記載ミスがないことを確認していることから、考慮しないこととした。

HRA イベントツリーの構築とは、タスク分析の結果に基づいて、運転員の操作の過程をサブタスクの系列からなるイベントツリーを作成することである。HRA イベントツリーでは、それぞれのサブタスクに成功と失敗の分岐を設ける。（図 3-4 参照）HRA イベントツリーの詳細は、付録 1 を参照されたい。

PSF とは、Performance Shaping Factor の略であり、運転操作時に使用するチェックリストまたは口頭指示の項目数、6 ヶ月以上の運転経験の有無、4 段階に区分した運転員のストレスレベル、操作する機器等とのマンマシンインターフェイスを考慮することである。今回の評価では、以下のように定義した。

- 1) 運転員の運転経験については、6 ヶ月以上の運転経験有りとして評価
- 2) 「低い」、「適切」、「高い」、「非常に高い」の 4 段階に区分されるストレスレベルについては、通常運転の操作時は「適切」、警報が吹鳴してからの対応操作等の緊急時は「高い」として評価
- 3) 運転時に使用するチェックリスト等は、実際に使用している運転要領書、チェックリストを基に項目数を評価
- 4) マンマシンインターフェイスについては、実際に操作する機器等を調査して評価

人的従属性については、サブタスクの失敗または成功の間の従属性は、人間信頼性解析の結果に大きな影響をもっているので、それを適切にとりわけ過小評価に陥らないように注意しながら評価する必要がある。一般的に従属性が全くない（完全独立）ということがむしろ稀なので、完全独立の明白な根拠がない限りは従属性の存在を仮定して評価する必要がある。

従属性のタイプとしては、ある作業の実行とその作業を他の人間がチェックする等の異なった人間による行為間の従属性と連続して隣接する弁を操作する等の同一の人間による行為間の従属性がある。

従属性のレベルは、完全独立 (ZD; Zero Dependence)、低従属 (LD; Low Dependence)、中従属 (MD; Moderate Dependence)、高従属 (HD; High Dependence)、完全従属 (CD; Complete Dependence) の 5 段階で評価する。従属性のレベルを評価するため的一般的指針を以下に示した。

- 1) 評価対象の要素的作業に対する直前に先行するサブタスクの影響を評価する。従属性のレベルは、一連の行為の間を通じて一定とは限らない。
- 2) 従属性の 2 つのレベル間で選択に迷う場合は、保守的評価を行うために、高い従属性レベルを使用する。
- 3) サブタスク間の位置関係及び時間的間隔を調査する。位置及び時間が近接しているほど、そのサブタスク間の従属性は高い。例えば、位置が隣接している表示または操作器具を操作したり、同時にそれらを操作しなければならな

いようなサブタスク間の従属性は高い。

- 4) サブタスク間の機能的関係を調査する。機能的関係が強いほど従属性は高くなる。例えば、同一のサブシステムに係るサブタスク間の従属性は、異なったサブシステムに係るサブタスク間の従属性より高い。
- 5) すべての関連要因についての運転員間の類似性を調査する。地位、訓練、責任や他の多くの社会的・心理的要因における類似性が高いほど、運転員間の従属性は高くなる。
- 6) 運転員間の従属性に対するストレスの効果を評価する。ストレスの増加とともに従属性は高くなり、特に経験が浅い運転員の経験の深い運転員への従属性は高まる。
- 7) 2つのサブタスクの結合失敗確率が過小評価と考えられる場合は、従属性のレベルを再検討する。例えば、1人が他人をチェックするケースにおいて、2つのサブタスクの結合失敗確率が 10^{-6} 以下になった場合、及び同一人物によって遂行される2つの関連するサブタスクの結合失敗確率が 10^{-5} 以下になった場合は、仮定した従属性レベルを再検討する必要がある。

それぞれの従属レベルにおける条件付き確率は表3-3の式を用いて求めた。

回復要素とは、サブタスクの遂行において人的過誤を犯した場合でも、それによってシステムにもたらされる影響等を検知してその過誤から回復することにより、結果的にタスク成功経路に立ち戻ることが可能な場合には、その効果を評価する。例えば、サブタスクの実行者以外の人間によるチェック、人的過誤によりプラントの状態が本来あるべき姿から逸脱することにより警報が吹鳴する場合、警報によるプラント状態の異常の検知等を考慮する。

タスクの成功または失敗確率の評価とは、タスクがサブタスクの成功または失敗の分岐によって構成されるHRAイベントツリーとして表現されているので、個々の経路が最終的にタスクの成功または失敗をもたらすか評価する。その失敗する確率を加算して、その対応操作等のヒューマンエラーの発生確率として設定した。

本解析では、通常運転時及び緊急時に使用される運転要領書やチェックリストを基に運転操作や対応操作のヒューマンエラーを算出した。

THERP手法については、付録1に一例を用いた説明を記載した。

この人間信頼性解析で算出したヒューマンエラーの発生確率は、イベントツリーで対応する事故発生防止策の失敗確率またはフォールトツリーでの基事象の確率として用いた。

⑦ 機器故障率データベースの設定

機器故障率データの設定においては、基本的に発電炉のPSAで用いられている公開データ^{7),8)}を用いることとするが、東海再処理施設の運転・保守実績を調査し算出した施設固有のデータも可能な限り採用した。機器故障率の詳細な算出方法については、付録2に記載した。また、機器故障率データベースの一覧を表3-4に示した。発電炉の公開データとしては、LER、IREP、NREP等のデータが存在するが、PSAで採用された実績、発表年から、NUREG/CR-2815(NREP)、IEEE Std-500(1984)を採用した。

ただし、機器の修復時間については、今回PSAを実施した目的が事故発生防止策の重要度の把握であり発生確率を求めることがないことから考慮していないが、こ

れは、結果として安全側の評価となる。

機器故障率データは、イベントツリーで対応する事故発生防止策の失敗確率またはフォールトツリーでの基事象の確率として用いた。

⑧ 事故シーケンスの定量化

設定した機器故障率データベース及びヒューマンエラーの発生確率を用いて、モデル化したフォールトツリーの定量化を行い、起因事象の発生確率及びイベントツリーの分岐確率を求めた。

起因事象については、基本的に東海再処理施設の運転・保守実績を用いて算出した結果を用いたが、ヒューマンエラー等の実績の調査が困難なものについては、⑥記載の THERP 手法よりヒューマンエラーの発生確率を設定し、フォールトツリーを用いて定量化した。

イベントツリーの定量化は、システムをモデル化したフォールトツリーの定量結果、機器故障率データベース及びヒューマンエラーの発生確率をイベントツリーの分岐確率として定量化を行った。

イベントツリーの定量化の概要を図 3-5 に示した。

⑨ 重要度評価

①～⑧では、起因事象に対して、施設の安全を確保するために必要な事故発生防止策の成功又は失敗の組合せによって事象の進展を評価し、溶媒火災、臨界等の最終到達事象の発生確率を評価した。この事象進展を考えると発生防止策の機能喪失といった基事象の発生確率に応じて、最終到達事象の発生確率が変動する。

重要度の評価手法は、基事象の生起確率を変動させ、その変化が最終到達事象に及ぼす影響の程度によって、各基事象の寄与度を求めるものである。

重要度評価の結果については、発電炉と同様にFV指標とRAW指標の二次元で各事故発生防止策を整理し重要度を把握することとした。本評価では、フォールトツリーの基事象毎に重要度評価を実施すると複雑になるためイベントツリーのヘッディングを対象（基事象）として重要度評価を実施した。

以下にFV指標及びRAW指標の特徴と計算方法、重要度の把握結果の活用方法を述べる。

1) FV指標

FV指標の特徴は、着目している基事象の信頼性向上による影響を評価しやすい重要度であり、発生防止策に何らかの改良を行ってリスク低減化を図ろうとする時に注目すべき機器等の候補を同定するものとして有用である。

FV指標は、次式で算出される。

$$FV = \frac{P(\text{最終到達事象}) - P(\text{最終到達事象}/A=0)}{P(\text{最終到達事象})}$$

ただし、

$P(\text{最終到達事象})$: 最終到達事象の発生確率

$P(\text{最終到達事象}/A=0)$: 基事象Aの生起確率が0の場合の最終到達事象の発生確率

FV指標とは、基事象の生起確率を0と仮定したとき最終到達事象の発生確率がどれだけ減少するかを表す指標である。

2) RAW指標

RAW指標の特徴は、着目している基事象の信頼性低下の影響を評価しやすい重要度であり、例えば基事象に関わる信頼性がリスク低減にどれだけ寄与しているかを表すものであることから、点検・定例試験等の計画作成の参考として有用である。

RAW指標は、次式で計算される。

$$\text{RAW} = \frac{P(\text{最終到達事象}/A=1)}{P(\text{最終到達事象})}$$

ただし、

$P(\text{最終到達事象}/A=1)$: 基事象Aの生起確率が1の場合の最終到達事象の発生確率

RAW指標は、基事象の生起確率を1と仮定したとき最終到達事象の発生確率がどれだけ増加するかを表す指標である。

3) 重要度の把握結果の活用方法

重要度の把握結果の活用方法としては、二次元で整理された発生防止策のうち、FV指標、RAW指標ともに相対的に大きいものは、運用管理等の検討を行う上で、現状の最終到達事象の発生確率を維持する観点、また、必要に応じて現状の最終到達事象の発生確率をさらに改善する観点のどちらにおいても、相対的に注目すべき発生防止策であると考えられる。

FV指標は相対的に大きいが、RAW指標は相対的に小さい発生防止策は、必要に応じて現状の最終到達事象の発生確率をさらに改善する観点からは、相対的に注目すべき安全機能であるが、現状の最終到達事象の発生確率の維持への寄与は小さい。一方、RAW指標は相対的に大きいが、FV指標は相対的に小さい発生防止策は、現状の最終到達事象の発生確率を維持する観点からは、相対的に注目すべき安全機能であるが、今後、必要に応じて現状の最終到達事象の発生確率をさらに改善する観点からは、寄与の小さい発生防止策である。

運用管理の最適化等の検討を行う上では、このような重要度の把握結果を参照していくことが考えられる。重要度評価結果の活用について付録3に記載した。

表 3-1 使用した β ファクタ値

機 器	β ファクタ値
非常用ディーゼル発電機 起動失敗	0.0208

表 3-2 人的過誤率の例

エラー モード	人的過誤率	
	メディアン	エラーファクター [EF] *
チェック欄のある手順書が正しく使用される場合		
(1) 短いリスト \leq 10 項目	0.001	3
(2) 長いリスト > 10 項目	0.003	3
現場手動弁の選択過誤	0.003	3
明瞭にラベリングされているが、サイズ、形状、弁の状態またはタグ存在のいずれか 1 つが類似している 2 以上の弁から成るグループの一部		
他人が犯した過誤を点検者が発見できない確率		
通常作業の点検 (1) 点検者は書面を使用	0.1	5
(2) 点検者は書面を使用しない	0.2	5

NUREG/CR-1278 Handbook of Human-Reliability Analysis with Emphasis on Nuclear Power Plant Applications に基づく

a.EF とは、人間過誤率データの不確実さを表す数値であり、(メディアン値×EF) 及び (メディアン値/EF) によって、それぞれ人間過誤率の上限値と下限値が与えられる。タギングレベル等によって、上下限値が用いられる。

表 3-3 従属性レベルの条件付き確率の算出式

従属性のレベル	成功 (一つ前のサブタスクに成功すれば、このサブタスクに成功する確率)	失敗 (一つ前のサブタスクに失敗すれば、このサブタスクに失敗する確率)
ZD	n	N
LD	(1+19n)/20	(1+19N)/20
MD	(1+6n)/7	(1+6N)/7
HD	(1+n)/2	(1+N)/2
CD	1	1

ZD (Zero Dependence) : 完全独立

LD (Low Dependence) : 低従属

MD (Moderate Dependence) : 中従属

HD (High Dependence) : 高従属

CD (Complete Dependence) : 完全従属

n : サブタスクに成功する確率

N : サブタスクに失敗する確率

表 3-4 機器故障率データベースの一覧

機 器	故障モード	故障率データ*		備 考
		平均値 (/h) ^a	平均値 (/d)	
制御回路（シーケンサ）	故障	5.79E-06	-	東海再処理施設の実績 ^b
水素濃度計	故障	1.64E-05	-	東海再処理施設の実績
圧力検出系配管	閉塞	1.29E-05	-	東海再処理施設の実績 (ウラン溶液蒸発缶)
圧力検出系配管	閉塞	5.93E-04	-	東海再処理施設の実績 (ブルトニウム溶液蒸発缶)
圧力検出系配管（加熱蒸気）	閉塞	7.45E-06	-	東海再処理施設の実績 (高放射性廃液蒸発缶)
検出系配管（液面下限警報装置）	閉塞	4.17E-03	-	東海再処理施設の実績 (高放射性廃液蒸発缶)
膨張式温度計	故障	7.45E-06	-	東海再処理施設の実績
空気圧縮機（スクリュー）	起動失敗	-	1.10E-04	東海再処理施設の実績
空気圧縮機（レシプロ）	起動失敗	-	5.05E-04	東海再処理施設の実績
圧縮空気作動弁(調節弁)	故障	1.00E-05	-	NUREG/CR-2815
電磁弁	故障	2.00E-06	-	NUREG/CR-2815
温度検出部	故障	1.79E-06	-	IEEE std-500(1984)
圧力スイッチ	故障	-	1.01E-06	IEEE std-500(1984)
警報回路	故障	1.02E-06	-	IEEE std-500(1984)
変換器	故障	2.39E-06	-	IEEE std-500(1984)
制御回路（リレー式）	故障	1.70E-06	-	IEEE std-500(1984) ^d
調節計	故障	7.10E-07	-	IEEE std-500(1984)
安全弁	故障	2.27E-06	-	IEEE std-500(1984)
非常用発電機	起動失敗	2.03E-05	-	IEEE std-500(1984)
受電遮断機,接触器	故障	-	2.30E-03	IEEE std-500(1984)

a.1/h=回/時間, 1/d=回/要求 (demand)

b.制御回路（シーケンサ）の故障率は、使用年数3年、台数4台、故障実績0件、運転時間300日/年より、
下記の式で算出した。

$$\text{故障率 (/h)} = 0.5 / (3 \times 300 \times 24 \times 4)$$

c.デマンド当たりの故障率を算出する場合は、時間当たりの故障率に機器の健全性の確認が行われる点検周期に0.5をかけて評価。

d.リレーの故障率1.70E-7を10倍して使用。

安全性確認の結果を参考

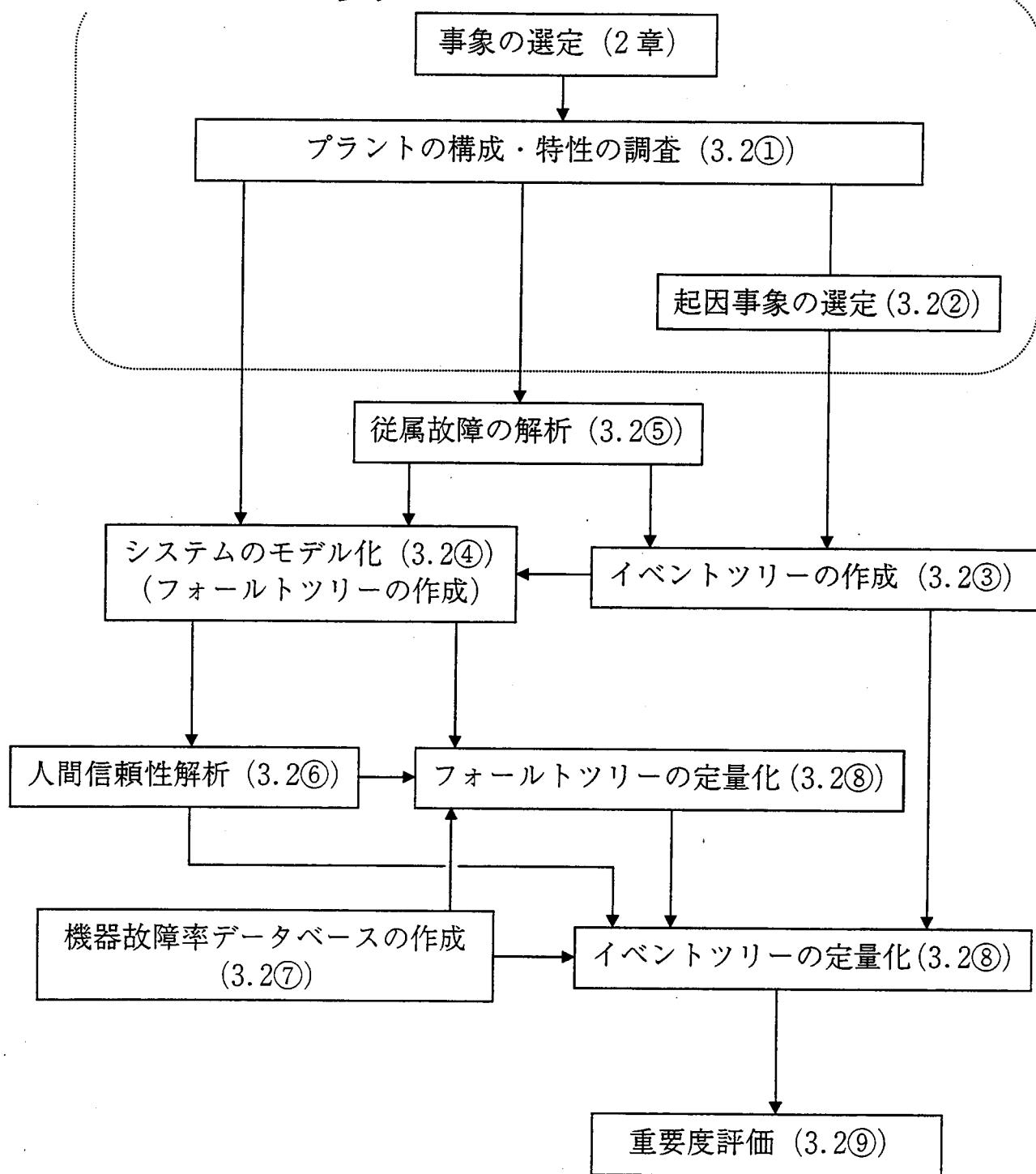
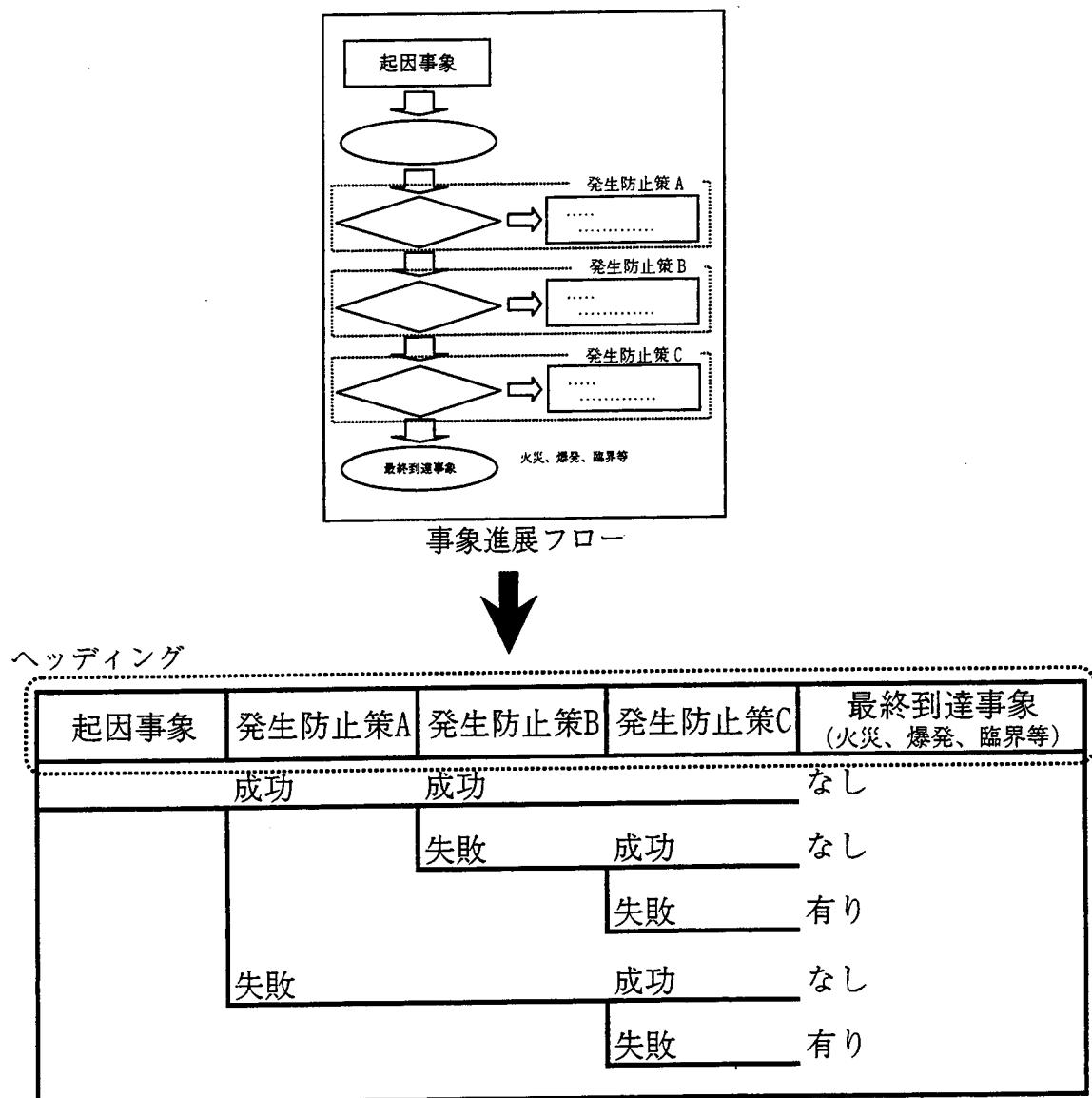
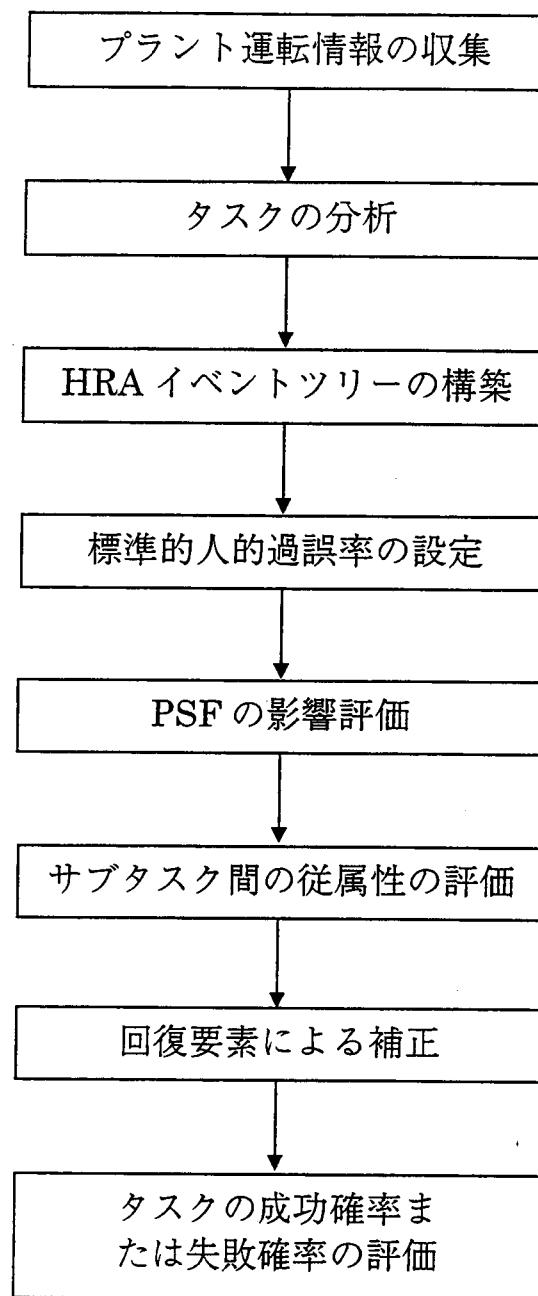


図3-1 評価手順



事象進展フローを参考に起因事象に対して各発生防止策が成功した場合と失敗した場合を想定しながら、火災、爆発、臨界等の最終到達事象の事象進展を検討することにより作成した。

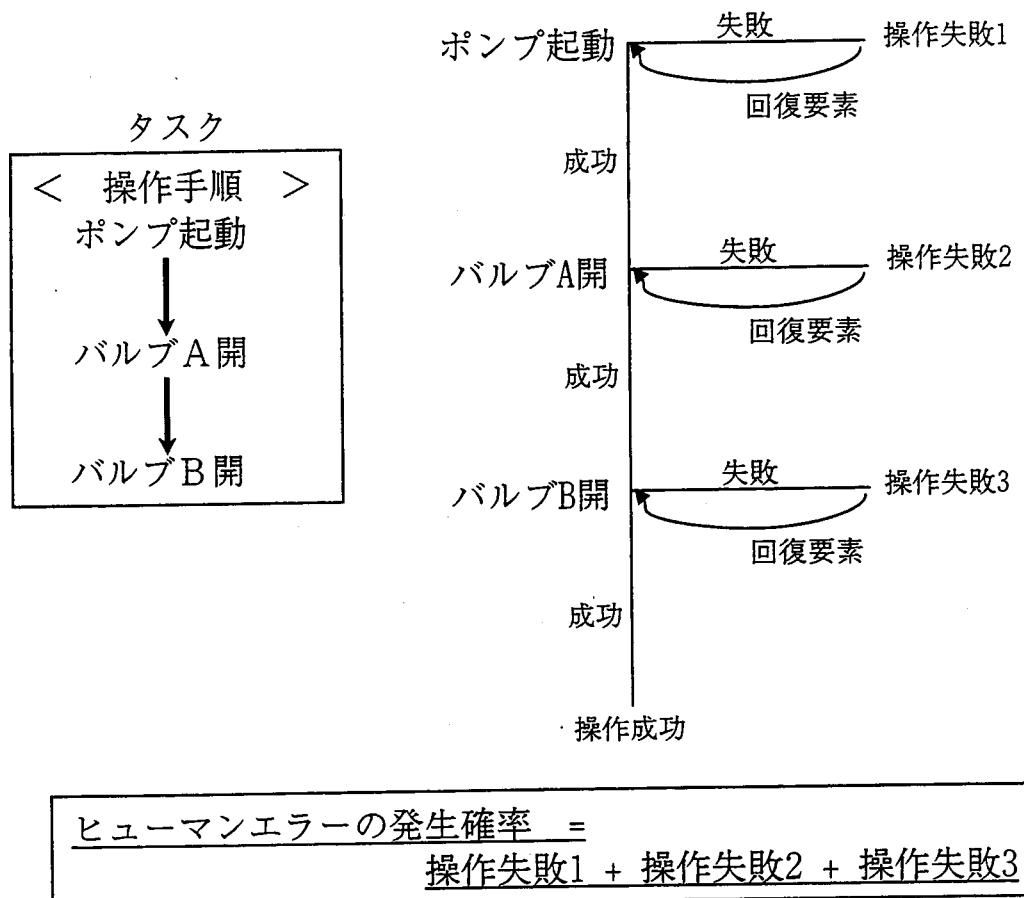
図 3-2 イベントツリーの作成方法の概要



HRA イベントツリー：人の行動に関するイベントツリー

PSF(Performance Shaping Factor)：経験、ストレス等の行動形成因子

図 3-3 人間信頼性解析の手順のフロー



ヒューマンエラーの発生確率は、THERP 手法を用いて人間信頼性解析を実施することにより求めた。THERP 手法は、評価対象とする一連の操作に対して、人の行動に関するイベントツリー（HRA イベントツリー）を作成し、ストレスレベルや作業間の従属性を考慮した人的過誤率を用いて操作全体でのヒューマンエラーの発生確率を求める方法である。

図 3-4 THERP 手法の概要

起因事象	発生防止策A	発生防止策B	発生防止策C	最終到達事象 (火災、爆発、臨界等)
	成功	成功		なし
起因事象の発生確率 I (h^{-1})		失敗	成功	なし
		発生防止策Bが機能しない確率 III		
			失敗	有り
			発生防止策Cが機能しない確率 IV	$I \times III \times IV = P_1 (\text{h}^{-1})$
	失敗		成功	なし
発生防止策Aが機能しない確率 II			失敗	有り
			発生防止策Cが機能しない確率 IV	$I \times II \times IV = P_2 (\text{h}^{-1})$

$$\boxed{\text{最終到達事象の発生確率} = P_1 + P_2}$$

フォールトツリーの定量結果、機器故障率データ、ヒューマンエラーの発生確率を用いてイベントツリーの起因事象及び各分岐確率を求め定量化を行った。

図 3-5 イベントツリーの定量化の概要

4. 評価結果

選定した 10 事象について、3 章に記述した評価手法を用いて評価した結果を下記の順で示す。

- 4.1 抽出器における有機溶媒の引火点超過
- 4.2 ウラン溶液蒸発缶における熱的制限値超過
- 4.3 プルトニウム溶液蒸発缶における熱的制限値超過
- 4.4 高放射性廃液蒸発缶における熱的制限値超過
- 4.5 高放射性廃液蒸発缶におけるホルムアルデヒドガス発生
- 4.6 高放射性廃液蒸発缶におけるホルムアルデヒドの蓄積
- 4.7 焼焼還元炉における水素濃度の異常上昇
- 4.8 圧縮空気の供給停止
- 4.9 施設の全停電
- 4.10 誤移送による臨界

4.1 抽出器における有機溶媒の引火点超過

- (1) ウランストリップ液温度上昇に伴うノルマルドデカンの引火点超過による有機溶媒火災の可能性
- (2) 温水の温度上昇に伴うノルマルドデカンの引火点超過による有機溶媒火災の可能性

[ウランストリップ液温度上昇に伴うノルマルドデカンの引火点超過]

4.1.1 概要

東海再処理施設の抽出工程では、PUREX 法による溶媒抽出を行っているため、有機溶媒 (TBP とノルマルドデカン) を使用している。引火点は TBP が 146°C、ノルマルドデカンが 74°C であることから、使用に際し、ノルマルドデカンの引火点 74°C を十分下回った環境で使用・管理している。分離第 2、分離第 5 及びウラン精製第 2 抽出器においては、有機相中のウランを水相中に逆抽出するためのウランストリップ液を供給している。ウランストリップ液は、逆抽出促進のため、試薬調整工程において酸濃度調整及び蒸気により加熱温度調整された後、抽出器に供給される。

試薬調整工程においてウランストリップ液の温度調整に失敗し、ノルマルドデカンの引火点を超える温度のウランストリップ液が供給された場合、抽出器内において有機溶媒の引火点を超過する可能性がある。

このため、抽出器における溶媒火災の発生防止策として以下の措置を講じている (図 4.1-1)。

- ・ 第 1 ストリップ調整槽に 2 系統設置されている温度上限操作上限警報 (TO+A+) により、ストリップ液温度の異常上昇を検知し、加熱蒸気の供給を自動的に停止する。

なお、引火点を超過した場合でも、機器及び配管を接地することにより抽出器内における静電気の蓄積による放電の発生を防止しており、着火源を排除していることから直ちに火災が発生するものではない。

4.1.2 評価結果

3.の評価手法に従い、事故発生防止策の特徴及び重要度の把握を以下のように実施した。

1) イベントツリーの作成

図 4.1-2 に作成したイベントツリーを示す。

起因事象として、抽出器へ供給しているウランストリップ液の温度上昇を考慮した。

起因事象が発生した際の事故発生防止策として、ウランストリップ液の温度が異常に上昇した際に作動する、温度上限操作上限警報による加熱蒸気自動停止機能を考慮した。ただし、起因事象の原因事象の一つである、温度調節計(TIC19.1)温度検出部と発生防止策の温度上限操作上限警報の一方の温度検出部が共通であることから、イベントツリー上では、同温度検出部の故障を起因事象とする事象進展と、それ以外の部位の故障の事象進展を別シナリオとして記載している。

2) フォールトツリーの作成

イベントツリーで考慮した起因事象及び各発生防止策に対し、図 4.1-3、4.1-4 に示すフォールトツリーを作成した。起因事象のウランストリップ液の温度上昇に係るフォールトツリーにおいては、加熱蒸気供給系の調節計や手動弁の故障及び運転員による誤操作を考慮した。また、イベントツリーの作成において、従属故障に起因する事故シーケンスを分けて記載したため、フォールトツリーも従属故障部とそれ以外で分けて作成した。

3) 定量化

① 起因事象発生確率の算出

定量化に用いた故障率を表 4.1-1 に示す。加熱蒸気系の調節弁の故障については、東海再処理施設の設備保全履歴より、過去 5 回の事後保全が実施されていることがわかったため、抽出器の平均運転時間と故障回数より、調節弁の故障確率を算出した。また、バイパス弁の誤操作及び調節計の誤設定については、図 4.1-5 及び図 4.1-6 に示す人間信頼性解析を実施することにより、作業 1 回あたりの失敗確率を算出し、それと工程運転中の操作頻度を用い時間当たりの発生確率を算出した。

② 発生防止策の失敗確率の算出

定量化に用いた故障率を表 4.1-1 に示す。また人間信頼性解析は図 4.1-5 と同様である。

③ イベントツリーの定量化

①、②で算出した値を用い、イベントツリーの定量化を行った。この結果、ウランストリップ液の温度上昇に伴い抽出器において有機溶媒が引火点を超過する確率は、 $7.68E-04(y)$ となった。なお、引火点を超過した場合でも、機器及び配管を接地することにより抽出器内における静電気の蓄積による放電の発生を防止しており、着火源を排除していることから、直ちに火災が発生するものではない。

4) 重要度評価

定量化したイベントツリーの各発生防止策の重要度を把握するため、重要度評価を実施した。重要度の把握結果を図 4.1-7 に示す。同結果より、FV,RAW の各指標において以下のような特徴が見られた。

① FV 指標

温度上限操作上限警報 (TO+A+19.4) 及び温度上限操作上限警報 (TO+A+19.3) の温度検出部が相対的に高い値を示した。

② RAW 指標

温度上限操作上限警報 (TO+A+19.4) が若干相対的に高い値を示した。

4.1.3 発生防止策の特徴及び重要度の把握結果

PSA 手法を用いた事故シーケンスの定量化及び同結果に基づく重要度の把握を実施した結果、以下のような知見が得られた。

発生防止策の特徴として、起因事象と発生防止策の一部に従属故障が存在することが挙げられる。第 1 ストリップ調整槽の温度調節計(TIC19.1)の温度検出部が故障することにより、発生防止策の 1 つである温度上限操作上限警報(TO+A+19.3)が機能喪失に陥る可能性があるが、その場合においても、もう一方の温度上限操作上限警報(TO+A+19.4)により事象の進展を防止することができる。

重要度の把握結果より、抽出器において有機溶媒の温度が引火点を超過するような事象の発生防止上最も重要な役割を果たしているのは、温度上限操作上限警報(TO+A+19.4)であることがわかった。同操作は従属故障を持っていないため、いずれの事故シーケンスにおいても発生防止策として期待でき、そのため各指標で重要度が高くなっている。

4.1.4 まとめ

試薬調整工程の第 1 ストリップ調整槽から高温のウランストリップ液が抽出器に供給された場合に有機溶媒の温度が引火点を超過する可能性がある。この可能性について、PSA 手法を用いた事故発生防止策の特徴及び重要度の把握を実施した結果、以下の知見が得られた。

- ・ 抽出器において、有機溶媒の温度が引火点を超過するような事象に至る確率は、 $7.68E-04(y)$ となった。なお、引火点を超過した場合でも、機器及び配管を接地することにより抽出器内における静電気の蓄積による放電の発生を防止しており、着火源を排除していることから、直ちに火災が発生するものではない。
- ・ 重要度評価を実施した結果、温度上限操作上限警報の一方が事故発生防止上重要な役割を果たしていることが明らかとなった。

[温水の温度上昇に伴うノルマルドデカンの引火点超過]

4.1.5 概要

東海再処理施設の抽出工程では、PUREX 法による溶媒抽出を行っているため、有機溶媒 (TBP とノルマルドデカン) を使用している。引火点は TBP が 146°C、ノルマルドデカンが 74°C であることから、使用に際し、ノルマルドデカンの引火点 74°C を十分下回った環境で使用・管理している。分離第 1 サイクル、分離第 2 サイクル及びウラン精製工程の溶媒洗浄器は、放射線劣化や加水分解などにより生成した溶媒劣化生成物を取り除くため設置されている。溶媒洗浄器自体は、洗浄効率を高めるため

温水により約 60℃に加熱されている。温水は加熱流体工程において、蒸気により加熱温度調整された後、溶媒洗浄器に供給される。

加熱流体工程において温水の温度調整に失敗し、ノルマルドデカンの引火点を超える温度の温水が供給された場合、溶媒洗浄器内において溶媒火災となる可能性がある。

このため、溶媒洗浄器における溶媒火災の発生防止策として以下の措置を講じている(図 4.1-8)。

- 温水器に 2 系統設置されている温度上限操作上限警報 (TO+A+) により、温水 温度の異常上昇を検知し、温水の供給を自動的に停止する。

なお、引火点を超過した場合でも、機器及び配管を接地することにより抽出器内における静電気の蓄積による放電の発生を防止しており、着火源を排除していることから、直ちに火災が発生するものではない。

4.1.6 評価結果

3.の評価手法に従い、事故発生防止策の特徴及び重要度の把握を以下のように実施した。

1) イベントツリーの作成

図 4.1-9 に作成したイベントツリーを示す。

起因事象として、溶媒洗浄器に供給している温水の温度上昇を考慮した。

起因事象に対しての事故発生防止策として、溶媒洗浄器へ供給する温水の温度が異常に上昇した際に作動する、温度上限操作上限警報による温水供給の自動停止機能を考慮した。ただし、起因事象の原因の一つである、温度調節計(TIC)温度検出部と発生防止策である温度上限操作上限警報 (TO+A+50.2) の温度検出部が共通であるため、イベントツリー上では、同温度検出部の故障を起因事象とする事象進展と、それ以外の部位の故障による事象進展を別シナリオとして記載している。

2) フォールトツリーの作成

イベントツリーで考慮した起因事象及び各発生防止策に対し、図 4.1-10 に示すフォールトツリーを作成した。起因事象である温水の温度上昇に係るフォールトツリーにおいては、加熱蒸気供給系の調節計の故障、運転員による誤操作等を考慮した。また、イベントツリーの作成において、従属故障に起因する事故シケンスを分けて記載したため、フォールトツリーも従属故障部とそれ以外で分けて作成した。

3) 定量化

① 起因事象発生確率の算出

定量化に用いた故障率を表 4.1-2 に示す。圧力指示調節計、温度指示調節計及び加熱蒸気系の各調節弁の故障については、東海再処理施設の設備保全履歴より、故障履歴がないことを確認した。このため、3 章及び付録 2 で述べている「東海再処理施設の実績を用いた故障率の設定方法」より、溶媒洗浄器の平均運転時間と故障回数 0.5 から故障率を算出した。また、バイパス弁の誤操作開、調節計の誤設定及び圧力指示調節計の校正終了時に検出系配管にある手動弁の開忘れについては、図 4.1-11 及び図 4.1-12 に示す人間頼性解析を実施することにより、作

業 1 回あたりの失敗確率を算出し、それと工程運転中の操作頻度を用い時間当たりの発生確率を算出した。

② 発生防止策の失敗確率の算出

定量化に用いた故障率を表 4.1-2 に示す。また発生防止策に係る人間信頼性解析を図 4.1-13 に示す。

③ 定量化

①、②で算出した値を用い、イベントツリーの定量化を行った。この結果、温水の温度上昇に伴い抽出器において有機溶媒が引火点を超過する確率は、 $6.00E-03(y)$ となった。なお、引火点を超過した場合でも、機器及び配管を接地することにより抽出器内における静電気の蓄積による放電の発生を防止しており、着火源を排除していることから、直ちに火災が発生するものではない。

4) 重要度評価

定量化したイベントツリーの各発生防止策の重要度を把握するため、重要度評価を実施した。重要度の把握結果を図 4.1-14 に示す。同結果より、FV,RAW の各指標において以下のような特徴が見られた。

1) FV 指標

温度上限操作上限警報間の従属故障部である制御回路及び接触器、温度上限操作上限警報と起因事象間の従属故障部である温度検出部、温度上限操作上限警報 (TO+A+50.3) の温度検出部が相対的に高い値を示した。

2) RAW 指標

温度上限操作上限警報間の従属故障部である制御回路及び接触器が相対的に高い値を示した。

4.1.7 発生防止策の特徴及び重要度の把握結果

PSA 手法を用いた事故シーケンスの定量化及び同結果に基づく重要度の把握を実施した結果、以下のような知見が得られた。

発生防止策の特徴として、起因事象と発生防止策の一部に従属故障が存在することが挙げられる。すなわち、温水の加熱する加熱蒸気を調整する温度調節計(TIC)の温度検出部が故障することにより、発生防止策の 1 つである温度上限操作上限警報 (TO+A+50.2)が機能喪失に陥る可能性があるが、その場合においても、もう一方の温度上限操作上限警報(TO+A+50.3)により事象の進展を防止することができる。

また、二系統化されている発生防止策間にも制御回路及び接触器の従属故障が存在することも特徴として挙げられる。

重要度の把握結果より、溶媒洗浄器において有機溶媒の温度が引火点を超過するような事象の発生防止上重要な役割を果たしているのは、発生防止策である温度上限操作上限警報(TO+A+)の制御回路であることがわかった。この制御回路は、発生防止策間の従属故障であるため、故障した場合には発生防止機能が機能しないことになる。そのため各指標で重要度が高くなっている。

4.1.8 まとめ

加熱流体工程の温水器から、高温の温水が溶媒洗浄器に供給された場合に有機溶媒の温度が引火点を超過する可能性がある。この可能性について、PSA 手法を用いた事

故発生防止策の特徴及び重要度の把握を実施した結果、以下の知見が得られた。

- ・ 溶媒洗浄器において、有機溶媒の温度が引火点を超過するような事象に至る確率は、 $6.00E-03(y)$ となった。なお、引火点を超過した場合でも、機器及び配管を接地することにより抽出器内における静電気の蓄積による放電の発生を防止しており、着火源を排除していることから、直ちに火災が発生するものではない。
- ・ 重要度評価を実施した結果、温度上限操作上限警報 (TO+A+50.2) と温度上限操作上限警報 (TO+A+50.3) の従属故障部である制御回路が事故発生防止上重要な役割を果たしていることが明らかとなった。

表4.1-1 故障率・過誤率一覧表

基事象番号	不全モード		故障率データ			近隣操作回数、 使用回数 [/y]	試験間隔、点検周 期 [/h]	故障率
	機器グループ種別	故障モード	[/h]	[/d]	出典			
FT-1 01	運転員	バイパス弁(20ITC19.1)の異常	3.00E-03	NUREG/CR-1278 20-7-2	10	※ 1	7200	※ 4 4.17E-06 /h
FT-1 02	運転員	開閉弁(20ITC19.1)の異常	1.00E-03	図4.1-5 HRA-1	1回/週	※ 2	120	※ 2 8.33E-06 /h
FT-1 03	20ITC19.1	故障	1.02E-04	実績データより算出				1.02E-04 /h
FT-1 04	保守員	熱電対の端子接続間違い	3.00E-03	図4.1-6 HRA-2	1	※ 3	7200	※ 4 4.17E-07 /h
FT-1 05	温度検出部	故障	3.00E-06	IEEE std. 500(1984)				3.00E-06 /h
FT-2 01	蒸気供給弁	故障	1.00E-05	NUREG/CR-2815			168	※ 2 8.40E-04 /d
FT-2 02	制御回路	故障	1.70E-06	リレーの故障率1.7E-7を10倍して使用			8760	※ 5 7.45E-03 /d
FT-2 03	警報回路	故障	1.02E-06	IEEE std. 500(1984)			8	※ 6 4.08E-06 /d
FT-3 01	蒸気供給弁	故障	1.00E-05	NUREG/CR-2815			168	※ 2 8.40E-04 /d
FT-3 02	制御回路	故障	1.70E-06	リレーの故障率1.7E-7を10倍して使用			8760	※ 5 7.45E-03 /d
FT-3 03	警報回路	故障	1.02E-06	IEEE std. 500(1984)			8	※ 6 4.08E-06 /d
FT-3 04	保守員	熱電対の端子接続間違い	3.00E-03	図4.1-6 HRA-2				3.00E-03 /d
FT-3 05	温度検出部	故障	3.00E-06	IEEE std. 500(1984)			8760	※ 5 1.31E-02 /d

※ 1 バイパス弁は通常操作されず、工程運転時においては対象機器周辺での近隣操作もないが、評価上近隣操作回数を10回／年とした。

※ 2 運転中は、1回／週の頻度で操作される。

※ 3 熱電対は、定期検査時にのみ操作されると考え、操作回数を1回／年としている。

※ 4 工程運転期間を考慮する（年間300日運転×24時間=7200時）

※ 5 年1回の定期検査における検知を考慮する（365日×24時間=8760時間）

※ 6 直1回の現場巡視点検を考慮する。

表4.1-2 故障率・過誤率一覧表

基事象番号	不全モード		故障率データ			近隣操作回数、 使用回数 [回]	試験間隔、点検 周期 [h]	故障率
	機器グループ種別	故障モード	[/h]	[/d]	出典			
FT-1 01	保守員	282PIC50検出系手動弁の点検時間忘れ		1.96E-02	図4.1-12 HRA-2	1	7200	2.72E-06 /h
FT-1 02	圧力指示調節計	故障			東海再処理施設の実績	故障実績なし (0.5)	180000	2.78E-06 /h
FT-1 03	温度指示調節計	故障			東海再処理施設の実績	故障実績なし (0.5)	180000	2.78E-06 /h
FT-1 04	運転員	TIC50バス弁の誤操作開		3.00E-03	THFRP 20.13(2)	10	7200	4.17E-06 /h
FT-1 05	運転員	282PIC50調節計の誤設定		1.00E-03	図4.1-11 HRA-1	1回/週	120	8.33E-06 /h
FT-1 06	運転員	TIC50バス弁の誤操作開		3.00E-03	THFRP 20.13(2)	10	7200	4.17E-06 /h
FT-2 01	温度検出器	故障	3.00E-06		IEEE STD-500 (1984)		4	3.00E-06 /d ²
FT-2 02	保守員	校正時に検出器の電子部品の誤動作		3.00E-03	図4.1-13 HRA-3	1	8760	3.42E-07 /h
ET 01	警報回路	故障	1.02E-06		IEEE STD-500 (1984)		24	1.22E-05 /d ²
ET 02	制御回路 (シーケンサ)		5.79E-06		東海再処理施設の実績		8760	2.54E-02 /d ²
ET 03	発触器 (MCC)		2.30E-03		IEEE STD-500 (1984)			2.30E-03 /d
FT-3 01	温度検出器		3.00E-06		IEEE STD-500 (1984)		8760	1.31E-02 /d ²
FT-3 02	保守員	校正時に検出器の電子部品の誤動作		3.00E-03	図4.1-13 HRA-3	1	8760	3.00E-03 /d

2キャンペーン年間300日運転と仮定

デマンド当りの故障率は、時間当たりの故障率に点検周期/2をかけて算出

FT-2 01は、TIC50の指示値のログシート記入が4時間に1回有り、検出部の健全性を確認できる。

警報回路は、1日に1回の警報テストで健全性を確認している。

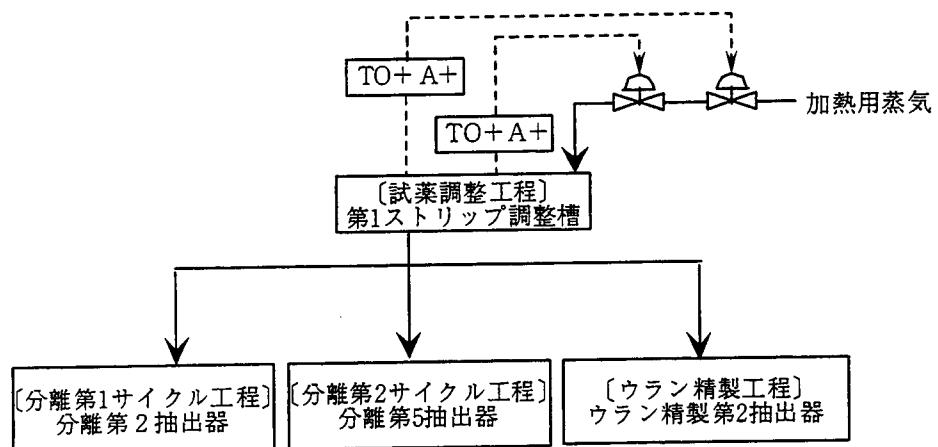
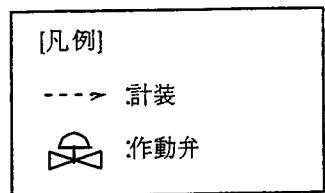


図4.1-1 発生防止策概要図

起因事象		発生防止策-1		発生防止策-2		有機溶媒の引火点超過	発生確率
第1ストリップ調整槽への蒸気供給量増大		温度上限操作上限警報(TO+A+19.3)による蒸気自動供給停止		温度上限操作上限警報(TO+A+19.4)による蒸気自動供給停止			
温度検出部以外	温度検出部(従属性障)	温度検出部(従属性障)	温度検出部以外				
成功							なし
1.15E-04 (/h)		失敗		成功		なし	
		8.29E-03		失敗		有り	2.32E-08 (/h)
				2.44E-02			
3.42E-06 (/h)		1.00E+00		成功		なし	
				失敗		有り	8.35E-08
				2.44E-02			
合計							1.07E-07 (/h)

発生確率 7.68E-04 (/y)

イベントツリー分岐確率算出根拠

事象の種類	基本確率	単位	基本確率算出根拠	従属性	事象発生確率(分岐確率)
起因事象					
検出部異常以外	1.15E-04	/h	図4.1-3 FT-1-1	-	1.15E-04 /h
検出部異常	3.42E-06	/h	図4.1-3 FT-1-2	-	3.42E-06 /h
発生防止策-1	8.29E-03	/d	図4.1-4 FT-2	-	8.29E-03 /d
発生防止策-2	2.44E-02	/d	図4.1-4 FT-3	-	2.44E-02 /d

※検出部の異常に伴う蒸気供給量増大は、起因事象と発生防止策-1で共通原因故障となるため、起因事象として検出部の異常とそれ以外に区別して発生確率を算出した。

※着火源は、定量的に発生確率を設定することが困難なことから、保守側に1とした。

図4.1-2 イベントツリー

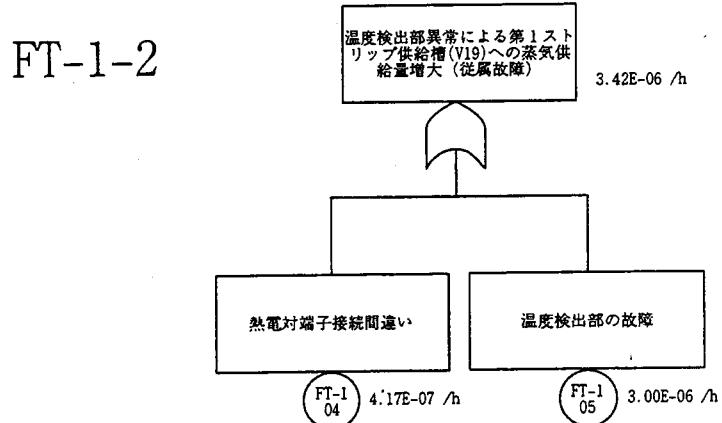
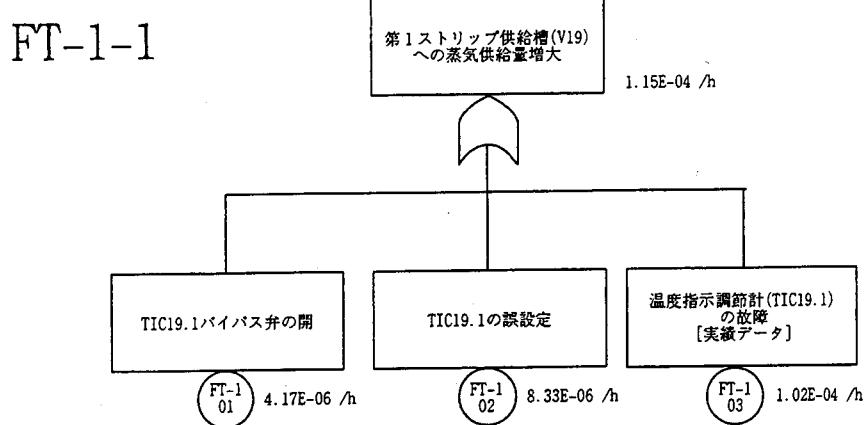


図4.1-3 起因事象のフォールトツリー

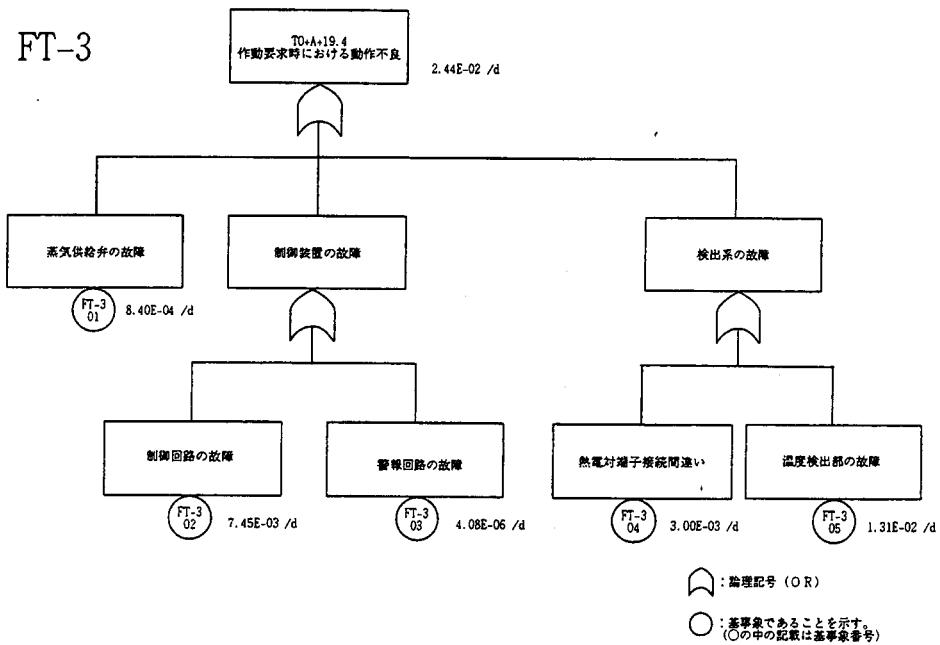
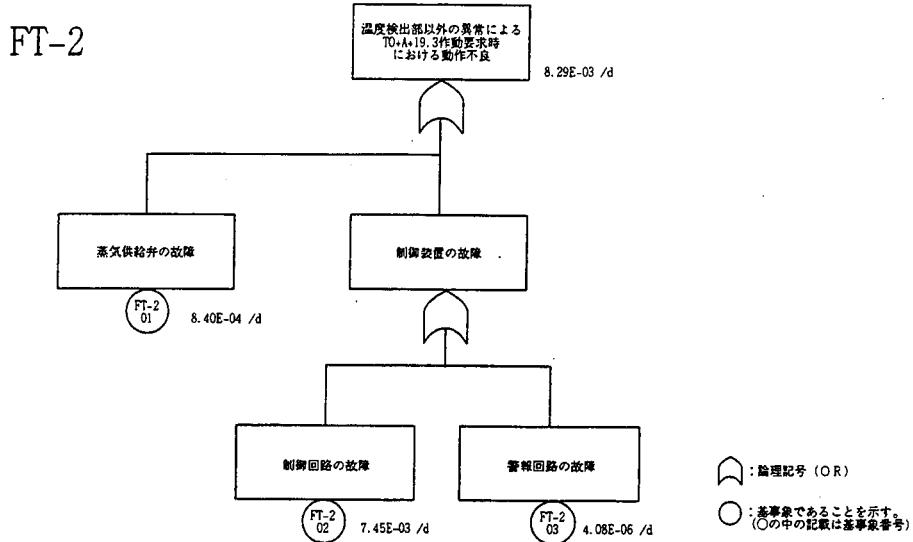


図4.1-4 発生防止策のフォールトツリー

1.00E-02	1.00E-03	1.00E-05
\$ -1	A-C	失敗
	成功	
5.00E-01	1.00E-03	4.95E-04
\$ -2	A-C	失敗
	成功	
1.00E-03	4.95E-04	
A-C	失敗	
	成功	

操作手順		
A 調節計の誤設定		
分岐番号	エラー番号	人的過誤率
\$ -1	\$-1	1.00E-02
\$ -2	\$-2	5.00E-01
A-C	A-1	1.00E-03
Total		1.00E-03 /d

人的過誤率表

エラー番号	エラー内容	表番号 項目番号 (NUREG/CR-1278)	NHEP	EF	タギングレベル因子	ストレス・経験因子	回復要素	BHEP ※ 1	従属性	CHEP
\$ - 1	運転管理に従わず、手順書を使用しない。	第20- 6表 (3)	1.00E-02	3				1.00E-02		1.00E-02
\$ - 2	運転管理に従わず、チェックリストを使用しない。	第20- 6表 (8)	5.00E-01	5				5.00E-01		5.00E-01
A - 1	間違った設定にセットする。	第20-12表 (9)	1.00E-03	10				1.00E-03		1.00E-03

※ 1

BHEP=NHEP* (ストレス・経験因子) * (タギングレベル因子) * { (回復要素) * (ストレス・経験因子) }

図4.1-5 人間信頼性解析結果 (HRA-1)

操作手順		
A 校正作業後の熱電対端子の接続		
5.00E-02 3.00E-03 1.50E-04 \$ - 1 A-C 失敗	成功	
5.00E-01 3.00E-03 1.43E-03 \$ - 2 A-C 失敗	成功	
3.00E-03 1.43E-03 A-C 失敗	成功	
		分岐番号 エラー番号 人的過誤率
		\$ - 1 \$-1 5.00E-02
		\$ - 2 \$-2 5.00E-01
		A-C A- 1 3.00E-03
	Total 3.00E-03 /d	

人的過誤率表

エラー番号	エラー内容	表番号 項目番号 (HRA-CR-12B)	NHEP	EF	タギング レベル 因子	ストレ ス・経験 因子	回復要 素	BHEP ※1	従属性	CHEP ※2
\$ - 1	運転管理に従わず、手順書 を使用しない。	第20- 6表 (6)	5.00E-02	5				5.00E-02		5.00E-02
\$ - 2	運転管理に従わず、チェック リストを使用しない。	第20- 6表 (8)	5.00E-01	5				5.00E-01		5.00E-01
A - 1	コネクターを間違って接続 する。	第20-12表 (13)	3.00E-03	3				3.00E-03		3.00E-03

※1 $BHEP = NHEP * (\text{ストレス} \cdot \text{経験因子}) * (\text{タギングレベル因子}) * |(\text{回復要素}) * (\text{ストレス} \cdot \text{経験因子})|$

※2

従属性L Dの場合

 $CHEP = (1+19*BHEP)/20$

従属性M Dの場合

 $CHEP = (1+6*BHEP)/7$

従属性H Dの場合

 $CHEP = (1+1*BHEP)/2$

図4.1-6 人間信頼性解析結果(HRA-2)

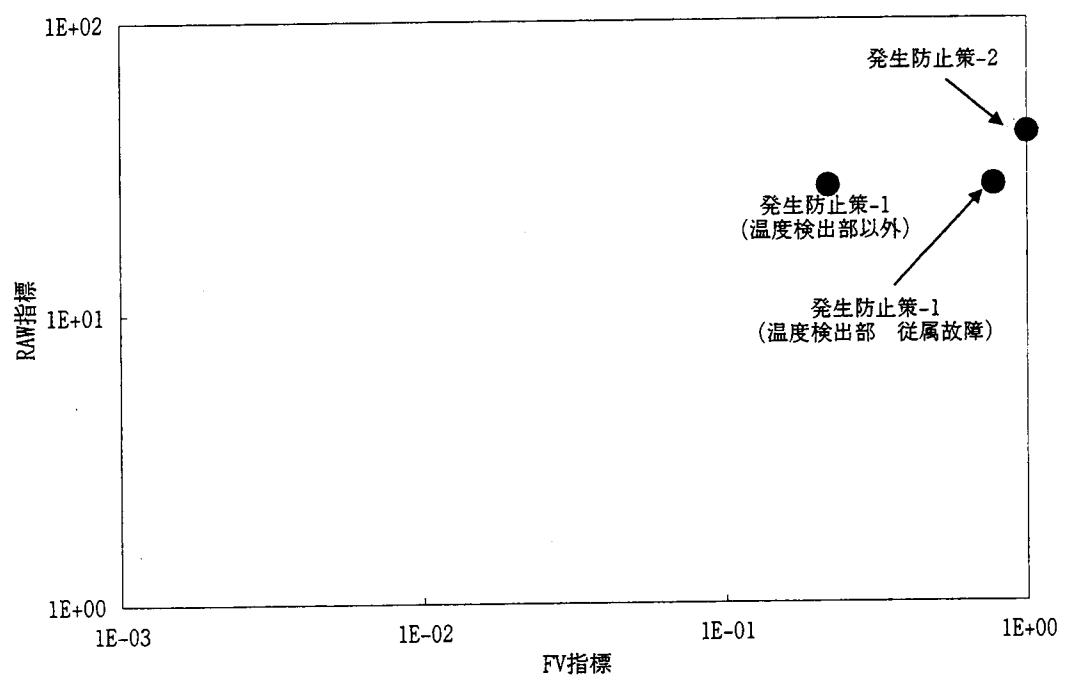


図4.1-7 重要度の把握結果

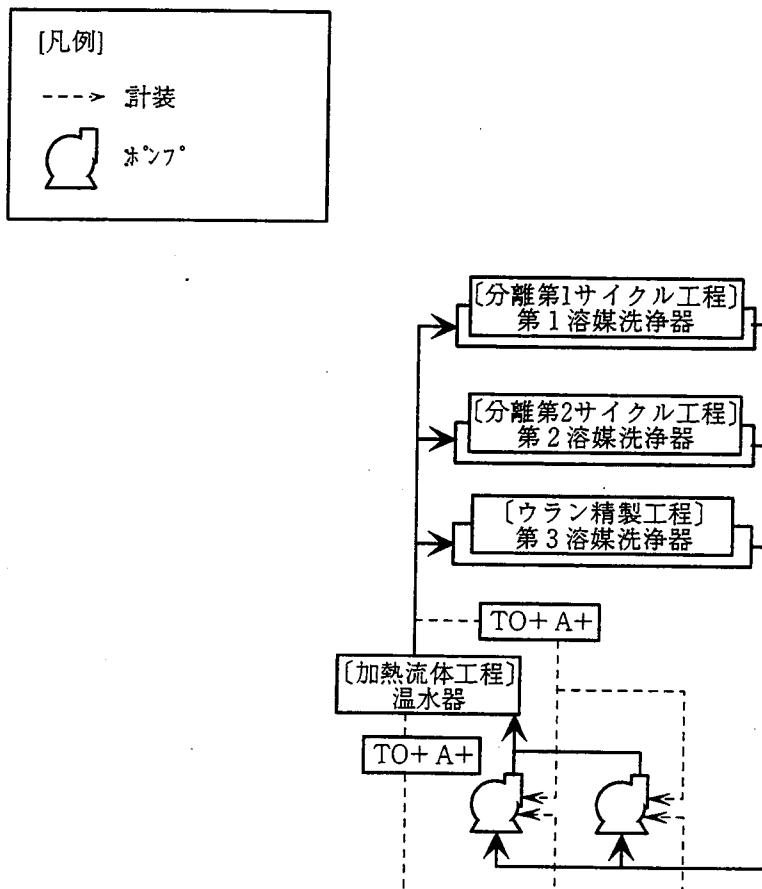


図4.1-8 発生防止策概要図

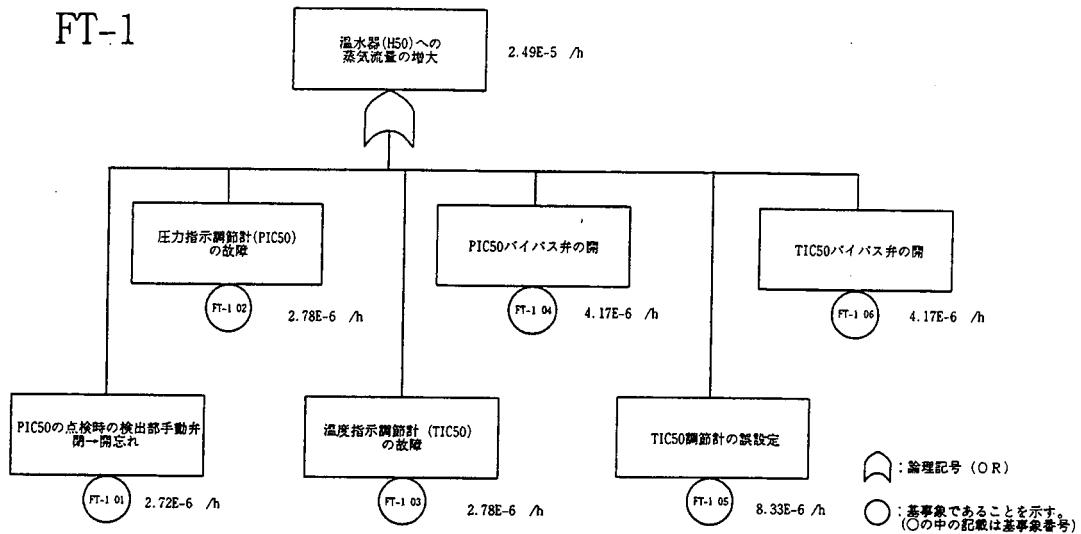
起因事象	発生防止策-1				発生防止策-2				有機溶媒の引火点超過 発生確率
	温度検出部 (従属性)	警報回路	制御回路 (従属性)	接触器 (従属性)	温度検出部	警報回路	制御回路 (従属性)	接触器 (従属性)	
温水器への蒸気供給量の増大	温度上限操作上限警報(TO+A+50.2)				温度上限操作上限警報(TO+A+50.3)				
温度検出部以外 (従属性)	温度検出部 (従属性)	警報回路	制御回路 (従属性)	接触器 (従属性)	温度検出部	警報回路	制御回路 (従属性)	接触器 (従属性)	
2.49E-05 (/h)	成功	成功	成功						なし
			失敗						有り 5.59E-08 (/h)
			失敗	2.30E-03					有り 6.33E-07 (/h)
			失敗	2.54E-02					なし
	1.22E-05				成功	成功	成功	成功	有り 6.73E-13 (/h)
							失敗	2.30E-03	有り 7.62E-12 (/h)
							失敗	2.54E-02	有り 3.68E-15 (/h)
							失敗	1.22E-05	有り 4.93E-12 (/h)
					失敗				なし
					1.61E-02	成功	成功	成功	有り 7.37E-09 (/h)
3.34E-06 (/h)								失敗	有り 8.34E-08 (/h)
							失敗	2.30E-03	有り 4.03E-11 (/h)
							失敗	2.54E-02	有り 5.39E-08 (/h)
							失敗	1.22E-05	合計 8.33E-07 (/h)
									事象発生確率 6.00E-03 (/y)

イベントツリー一分岐確率算出根拠

事象の種類	基本確率	単位	基本確率算出根拠	従属性	事象発生確率 (分岐確率)
起因事象					
温度検出部以外	2.49E-05	/h	図4.1-10 FT-1	-	2.49E-05 /h
温度検出部 (従属性 1)	3.34E-06	/h	図4.1-10 FT-2	-	3.34E-06 /h
発生防止策-1					
警報回路	1.22E-05	/d	表4.1-2 ET 01	-	1.22E-05 /d
制御回路	2.54E-02	/d	表4.1-2 ET 02	-	2.54E-02 /d
接触器	2.30E-03	/d	表4.1-2 ET 03	-	2.30E-03 /d
発生防止策-2					
TO+A+50.3の温度検出部	1.61E-02	/d	図4.1-10 FT-3	-	1.61E-02 /d
警報回路	1.22E-05	/d	表4.1-2 ET 01	-	1.22E-05 /d
制御回路	2.54E-02	/d	表4.1-2 ET 02	-	2.54E-02 /d
接触器	2.30E-03	/d	表4.1-2 ET 03	-	2.30E-03 /d

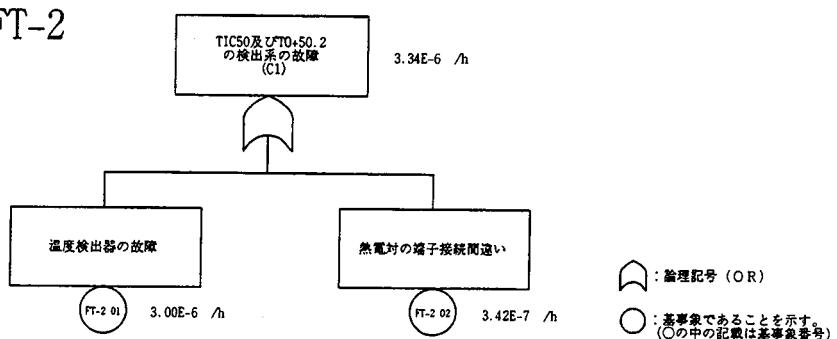
図4.1-9 イベントツリー

FT-1



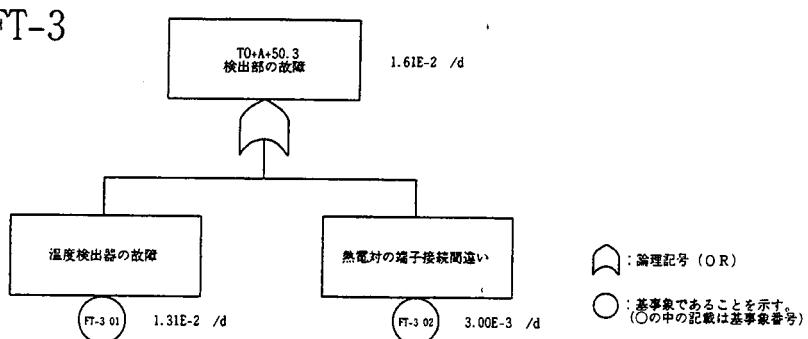
起因事象-1のフォールトツリー

FT-2



起因事象-2のフォールトツリー

FT-3



発生防止策-2 (T0+A+50.3温度検出部) のフォールトツリー

図4.1-10 起因事象及び各発生防止策のフォールトツリー

1.00E-02	1.00E-03	1.00E-05	操作手順	
\$ - 1	A-C	失敗		
		成功		
5.00E-01	1.00E-03	4.95E-04	A 調節計の誤設定	
\$ - 2	A-C	失敗		
		成功		
1.00E-03		4.95E-04		
A-C		失敗		
		成功		
			Total	1.00E-03 /d

人的過誤率表										
エラー番号	エラー内容 ※1	表番号 項目番号 (HRC/OC-126)	NHEP	EF	タギングレベル因子	ストレス・経験因子	回復要素	BHEP ※2	従属性	CHEP
\$ - 1	運転管理に従わず、手順書を使用しない。	第20-6表 (3)	1.00E-02	3				1.00E-02		1.00E-02
\$ - 2	運転管理に従わず、チェックリストを使用しない。	第20-6表 (8)	5.00E-01	5				5.00E-01		5.00E-01
A - 2	スイッチを間違った設定にセットする。	第20-12表 (9)	1.00E-03	10				1.00E-03		1.00E-03

※1 「タスクの開始に失敗する」「スイッチ操作を忘れる」等のオミッションエラーに関しては、起因事象が発生しない結果となるため、考慮対象外とした。

※2 $BHEP = NHEP * (\text{ストレス} \cdot \text{経験因子}) * (\text{タギングレベル因子}) * [(\text{回復要素}) * (\text{ストレス} \cdot \text{経験因子})]$

図4.1-11 人間信頼性解析結果(HRA-1)

5.00E-02	1.00E-02	5.00E-04
\$ -1	A-0(1)	失敗
1.30E-02	6.44E-04	
A-C	失敗	

成功

5.00E-01	1.00E-02	4.75E-03
\$ -2	A-0(2)	失敗
1.30E-02	6.11E-03	
A-C	失敗	

成功

3.00E-03	1.43E-03
A-0(3)	失敗

1.30E-02	6.16E-03
A-C	失敗

成功

操作手順		
A 校正作業後の検出系手動弁の開忘れ		

分岐番号	エラー番号	人的過誤率
\$ -1	\$-1	5.00E-02
\$ -2	\$-2	5.00E-01
A-0(1)	A-3	1.00E-02
A-0(2)	A-2	1.00E-02
A-0(3)	A-1	3.00E-03
A-C	A-4,5	1.30E-02

Total	1.96E-02 /d
-------	-------------

人的過誤率表

エラー番号	エラー内容※1	表番号 項目番号 (NUREG-GR-1278)	NHEP	EF	タギングレベル因子	ストレス・経験因子	回復要素	BHEP ※1	従属性	CHEP ※2
\$ -1	運転管理に従わず、手順書を使用しない。	第20- 6表 (6)	5.00E-02	5				5.00E-02		5.00E-02
\$ -2	運転管理に従わず、チェックリストを使用しない。	第20- 6表 (8)	5.00E-01	5				5.00E-01		5.00E-01
A-1	チェックリストを適切に使用した場合に手順書の実施項目を省いてしまう。	第20- 6表 (2)	3.00E-03	3				3.00E-03		3.00E-03
A-2	チェックリストを適切に使用しなかった場合に手順書の実施項目を省いてしまう。	第20- 6表 (4)	1.00E-02	3				1.00E-02		1.00E-02
A-3	手順書の使用を怠った場合、手順書中の実施項目を省いてしまう。	第20- 7表 (6)	1.00E-02	5				1.00E-02		1.00E-02
A-4	間違った手動弁を選択する。	第20-12表 (2)	3.00E-03	3				3.00E-03		3.00E-03
A-5	固着した手動弁にきずかない。(上昇システムなし、開度表示なし)	第20-14表 (4)	1.00E-02	3				1.00E-02		1.00E-02

※1 「タスクの開始に失敗する」等のオミッショングエラーに関しては、起因事象が発生しない結果となるため、考慮対象外とした。
 ※2 BHEP=NHEP*(ストレス・経験因子)*(タギングレベル因子)*(回復要素)*(ストレス・経験因子)

図4.1-12 人間信頼性解析結果(HRA-2)

5.00E-02	3.00E-03	1.50E-04
\$ - 1	A-C	失敗
成功		

5.00E-01	3.00E-03	1.43E-03
\$ - 2	A-C	失敗
成功		

3.00E-03	1.43E-03	
A-C	失敗	
成功		

操作手順		
A 校正作業後の熱電対端子の接続		
分岐番号	エラー番号	人的過誤率
\$ - 1	\$-1	5.00E-02
\$ - 2	\$-2	5.00E-01
A-C	A-1	3.00E-03
Total		3.00E-03 /d

人的過誤率表

エラー番号	エラー内容	表番号 項目番号 (NUREG-CR-1276)	NHEP	EF	タギングレベル因子	ストレス・経験因子	回復要素	BHEP ※ 1	従属性	CHEP
\$ - 1	運転管理に従わず、手順書を使用しない。	第20-6表(6)	5.00E-02	5				5.00E-02		5.00E-02
\$ - 2	運転管理に従わず、チェックリストを使用しない。	第20-6表(8)	5.00E-01	5				5.00E-01		5.00E-01
A - 1	コネクターを間違って接続する。	第20-12表(13)	3.00E-03	3				3.00E-03		3.00E-03

※ 1
 $BHEP = NHEP * (\text{ストレス} \cdot \text{経験因子}) * (\text{タギングレベル因子}) * ((\text{回復要素}) * (\text{ストレス} \cdot \text{経験因子}))$

図4.1-13 人間信頼性解析結果(HRA-3)

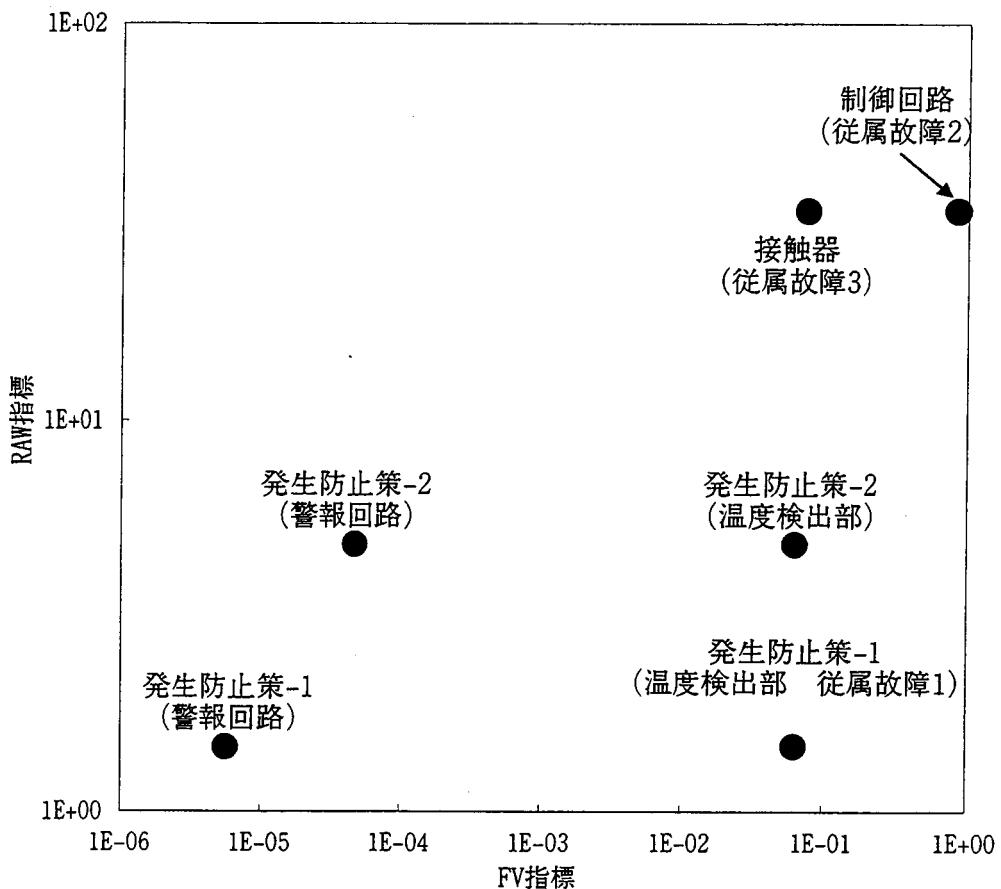


図4.1-14 重要度の把握結果

4.2 ウラン溶液蒸発缶における熱的制限値超過

4.2.1 概要

ウラン精製工程で精製されたウランを含む水相（硝酸ウラニル溶液）は、希釀剤洗浄器で洗浄した後、ウラン溶液濃縮工程の中間貯槽に受け入れ、連続的にウラン溶液蒸発缶（第1段）に供給し、蒸発濃縮される。

ウラン溶液蒸発缶（第1段）内の濃縮液は、一定のウラン濃度に保ちながら連続的に抜き出し、ウラン濃度等の検査後、ウラン脱硝工程に送液される。

同蒸発缶において、加熱蒸気圧力が上昇した場合、硝酸ウラニル溶液が過剰濃縮され熱的制限値を超過し、TBPと硝酸の反応による爆発の可能性がある。

このため、ウラン溶液蒸発缶におけるTBPと硝酸の反応による爆発の発生防止策として、以下の対策を講じている(図4.2-1)。

- ・ ウラン溶液蒸発缶加熱蒸気系の温度上限警報(TA+)により、加熱蒸気温度の異常上昇を検知し、運転員の対応により蒸発缶の運転を停止する。
- ・ ウラン溶液蒸発缶加熱蒸気系の圧力上限操作上限警報(PO+A+)により、加熱蒸気圧力の異常上昇を検知し、加熱蒸気の供給を自動的に停止する。
- ・ ウラン溶液蒸発缶の温度指示記録上限緊急操作(TIRP+)により、蒸発缶内液温の異常上昇を検知し、加熱蒸気の供給を自動的に停止する。

なお、ウラン溶液蒸発缶への給液については、希釀剤洗浄器で溶液に同伴又は溶解しているTBP等を除去していること及び給液系に中間貯槽を設け貯槽底部から溶液を抜き出すことによりTBP等を除去していることから、熱的制限値を超過した場合でも、それだけで爆発に至るものではない。

4.2.2 評価結果

3.の評価手法に従い、事故発生防止策の特徴及び重要度の把握を以下のように実施した。

1) イベントツリーの作成

図4.2-2に作成したイベントツリーを示す。

起因事象として、ウラン溶液蒸発缶加熱蒸気の温度上昇を考慮した。

事故発生防止策として、加熱蒸気の圧力上限操作上限警報による自動停止、加熱蒸気温度上限警報に伴う運転員の対応操作、及び蒸発缶内液の温度指示記録上限緊急操作による自動停止を考慮した。圧力上限操作上限警報と温度上限警報の一部及び温度上限警報と温度指示記録上限緊急操作の一部に従属故障が存在しているためそれを考慮した。

2) フォールトツリーの作成

イベントツリーで考慮した起因事象及び各発生防止策に対し、図4.2-3～4.2-4に示すフォールトツリーを作成した。起因事象のウラン溶液蒸発缶の加熱蒸気温度上昇については、加熱蒸気供給系の調節計の故障及び運転員による手動弁の誤操作等を考慮した。

3) 定量化

① 起因事象発生確率の算出

定量化に用いた故障率を表4.2-1に示す。加熱蒸気系の圧力調節計の故障につ

② 発生防止策の失敗確率の算出

各発生防止策の定量化に用いた故障率を表 4.2-1 に示す。このうち、ヒューマンエラーに関する部分は図 4.2-6～4.2-8 に示す人間信頼性解析を実施した。

③ イベントツリーの定量化

①、②で算出した値を用い、イベントツリーの定量化を行った。この結果、ウラン溶液蒸発缶において熱的制限値を超過する事象の発生確率は、 $2.02E-05(y)$ となった。なお、ウラン溶液蒸発缶への給液については、希釀剤洗浄器で溶液に同伴又は溶解している TBP 等を除去していること及び給液系に中間貯槽を設け貯槽底部から溶液を抜き出すことにより TBP 等を除去していることから、熱的制限値を超過した場合でも、それだけで爆発に至るものではない。

4) 重要度評価

定量化したイベントツリーの各発生防止策の重要度を把握するため、重要度評価を実施した。重要度の把握結果を図 4.2-9 に示す。同結果より、FV,RAW の各指標において以下のような特徴が見られた。

① FV 指標

温度上限警報、温度指示記録上限緊急操作及び圧力上限操作上限警報が相対的に高い値を示した。

② RAW 指標

温度指示記録上限緊急操作が相対的に高い値を示した。

4.2.3 発生防止策の特徴及び重要度の把握結果

PSA 手法を用いた事故シーケンスの定量化及び同結果に基づく重要度の把握を実施した結果、以下のような知見が得られた。

発生防止策の特徴として、多重の防止策の存在が挙げられる。仮に加熱蒸気の圧力が上昇しても圧力上限操作上限警報により、直ちに加熱蒸気圧力を自動的に低下させることができ、万一圧力上限操作上限警報が故障していたとしても、加熱蒸気温度上限警報により運転員に異常を周知し、運転員は手順書に従った操作を実施することにより速やかに対処することができる。さらに、運転員が警報を見逃した場合においても、蒸発缶内液温度上昇に伴い温度上限緊急操作が作動し、加熱蒸気の供給を自動的に停止させることができる。

重要度の把握結果より、ウラン溶液蒸発缶内における TBP と硝酸の分解反応に伴う爆発の発生防止上最も重要な役割を果たしているのは、温度指示記録上限緊急操作であることがわかった。同緊急操作は、蒸発缶内の液温度が設定値以上になった際に作動するものであり、いずれの事故シーケンスにおいても発生防止策として期待でき、そのため各指標で重要度が高くなっている。

4.2.4 まとめ

ウラン溶液蒸発缶の加熱蒸気温度が異常に上昇した場合の、ウラン溶液蒸発缶にお

ける TBP と硝酸の急激な分解反応に伴う爆発の可能性について PSA 手法を用いた事故発生防止策の特徴及び重要度の把握を実施した結果、以下の知見が得られた。

- ・ ウラン溶液蒸発缶において熱的制限値を超過する事象の発生確率は、 $2.02E\cdot 5(1/y)$ となった。なお、ウラン溶液蒸発缶への給液については、希釀剤洗浄器で溶液に同伴又は溶解している TBP 等を除去していること及び給液系に中間貯槽を設け貯槽底部から溶液を抜き出すことにより TBP 等を除去していることから、熱的制限値を超過した場合でも、それだけで爆発に至るものではない。
- ・ 重要度評価を実施した結果、蒸発缶内液の温度指示記録上限緊急操作が事故発生防止上重要な役割を果たしていることが明かとなった。

表4.2-1 故障率・過誤率一覧表

基事象番号	不全モード		故障率データ			近隣操作回数、 使用回数 [/y]	試験間隔、点検 周期 [/h]	故障率
	機器グループ種別	故障モード	[/h]	[/d]	出典			
FT-1 01	263PIC11	故障	3.56E-05	-	東海再処理施設の実績			3.56E-05 /h
FT-1 02	保守員	手動弁開操作忘れ	-	1.96E-02	図4.2-5 HRA-1	1	7200	2.72E-06 /h
FT-1 03	運転員	バイパス手動弁の操作による開閉	-	3.00E-03	NUREG/CR1278 20-13	10	7200	4.17E-06 /h
FT-2 01	制御回路(シーケンサ)	故障	5.79E-06	-	東海再処理施設の実績		8760	2.54E-02 /d
FT-2 02	圧力スイッチ	故障	-	1.01E-06	IEEE std-500(1984) pg556			1.01E-06 /d
FT-2 03	保守員	手動弁開操作忘れ	-	1.96E-02	図4.2-5 HRA-1			1.96E-02 /d
FT-2 04	圧力検出配管	閉塞	8.90E-06	-	東海再処理施設の実績		2700	1.20E-02 /d
FT-3 01	保守員	膨張式温度計設定ミス	-	1.00E-03	図4.2-6 HRA-2			1.00E-03 /d
FT-3 02	警報回路	故障	1.02E-06	-	IEEE std-500(1984) pg37	8		4.08E-06 /d
FT-3 03	膨張式温度計	故障	8.11E-06	-	東海再処理施設の実績		8760	3.55E-02 /d
FT-4 01	警報設定器	故障	1.02E-06	-	IEEE std-500(1984) pg37		8760	4.47E-03 /d
FT-4 02	熱電対	故障	3.00E-06	-	IEEE std-500(1984) pg528		8760	1.31E-02 /d
FT-4 03	保守員	熱電対端子接続ミス	-	3.00E-03	図4.2-7 HRA-3			3.00E-03 /d
FT-4 04	制御回路	故障	1.70E-06	-	IEEE std-500(1984) pg150		8760	7.45E-03 /d
ET 01	調節弁	故障	1.00E-05	-	NUREG/CR-2815		168	8.40E-04 /d
ET 02	運転員	加熱蒸気停止操作	-	3.87E-03	図4.2-8 HRA-4			3.87E-03 /d
ET 03	圧空作動弁	故障	1.00E-05	-	NUREG/CR-2815		168	8.40E-04 /d

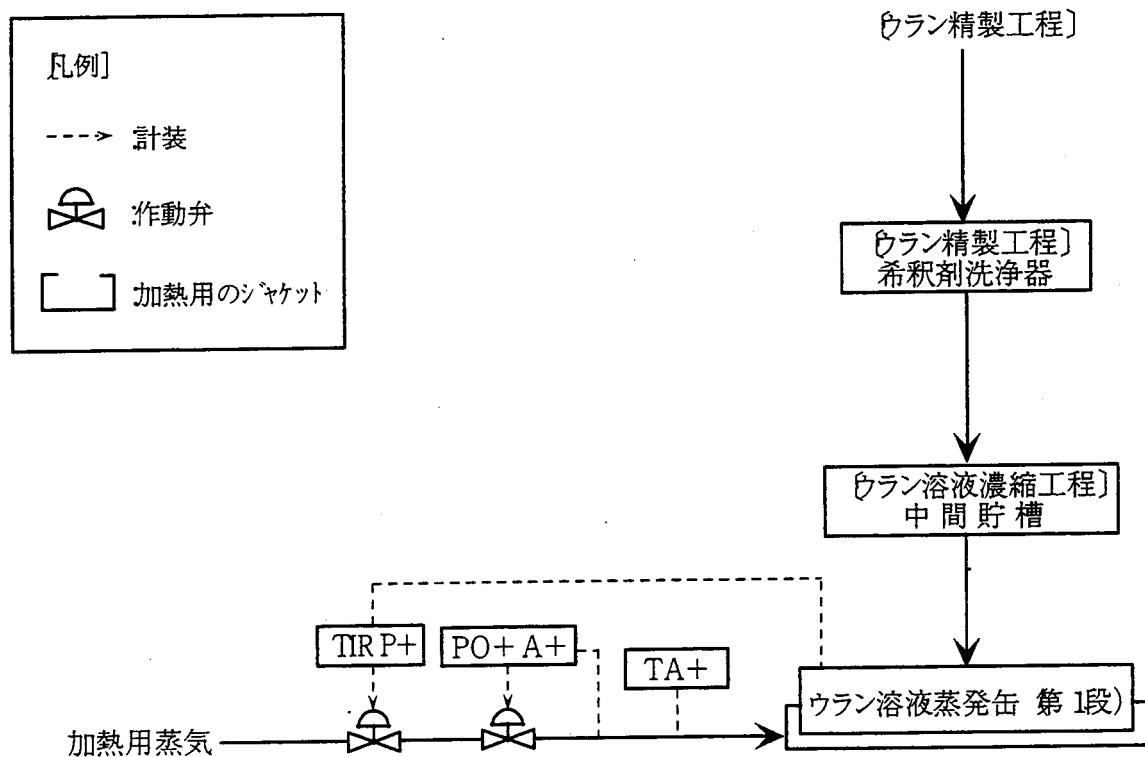


図 4.2-1 発生防止策概要図

起因事象	発生防止策-1		発生防止策-2			発生防止策-3		熱的制限 値超過の 可能性	発生確率		
	圧力上限操作上限警報 (P0+A+)による自動停止	温度上限警報(TA+)の発報に伴う加熱蒸気の停止操作	検出部及び制御回路の作動 (従属故障1)	TA+の作動	警報の確認及び加熱蒸気の停止操作	調節弁の作動 (従属故障1)	圧空作動弁の作動 (従属故障2)	検出部及び制御回路の作動 (従属故障1)	圧空作動弁の作動 (従属故障2)		
蒸発缶加熱蒸気温度上昇	成功	成功								なし	
4.25E-05 (/h)	失敗	成功	成功	成功	失敗	失敗	失敗	失敗	失敗	なし	
	8.40E-04				8.40E-04					なし	
						失敗	失敗	失敗	失敗	有り	2.72E-11 (/h)
						3.87E-03	3.87E-03	3.87E-03	3.87E-03	なし	
							失敗	失敗	失敗	有り	1.03E-13 (/h)
							2.78E-02	2.78E-02	2.78E-02	有り	3.49E-12 (/h)
							成功	成功	成功	なし	
							失敗	失敗	失敗	有り	1.00E-12 (/h)
							失敗	失敗	失敗	有り	3.42E-11 (/h)
							2.78E-02	2.78E-02	2.78E-02	なし	
	失敗	成功	成功	成功	失敗	失敗	失敗	失敗	失敗	なし	
5.59E-02					8.40E-04	失敗	失敗	失敗	失敗	なし	
						8.40E-04	8.40E-04	8.40E-04	8.40E-04	有り	1.61E-12 (/h)
							失敗	失敗	失敗	なし	
							3.87E-03	3.87E-03	3.87E-03	有り	7.23E-12 (/h)
								失敗	失敗	有り	2.46E-10 (/h)
								2.78E-02	2.78E-02	なし	
								成功	成功	有り	7.07E-11 (/h)
								失敗	失敗	有り	2.41E-09 (/h)
								失敗	失敗	合計	2.80E-09 (/h)
										事象発生確率	2.02E-05 (/v)

イベントツリー一分岐確率算出根拠

事象の種類	基本確率	単位	基本確率 算出根拠	従属性	事象発生確率 (分岐確率)
起因事象	4.25E-05	/h	図4.2-3 FT-1	-	4.25E-05 /h
発生防止策-1 検出部及び制御回路の作動 調節弁の作動	5.59E-02 8.40E-04	/d	図4.2-4 FT-2 表4.2-1 ET 01	-	5.59E-02 /d 8.40E-04 /d
発生防止策-2 263TA+11による検知及び 警報装置の作動 警報の確認及び加熱蒸気の停止操作 調節弁の作動 圧空作動弁の作動	3.65E-02 3.87E-03 8.40E-04 8.40E-04	/d	図4.2-4 FT-3 表4.2-1 ET 02 表4.2-1 ET 01 表4.2-1 ET 03	-	3.65E-02 /d 3.87E-03 /d 8.40E-04 /d 8.40E-04 /d
発生防止策-3 検出部及び制御回路の作動 圧空作動弁の作動	2.78E-02 8.40E-04	/d	図4.2-4 FT-4 表4.2-1 ET 03	-	2.78E-02 /d 8.40E-04 /d

図4.2-2 イベントツリー

FT-1

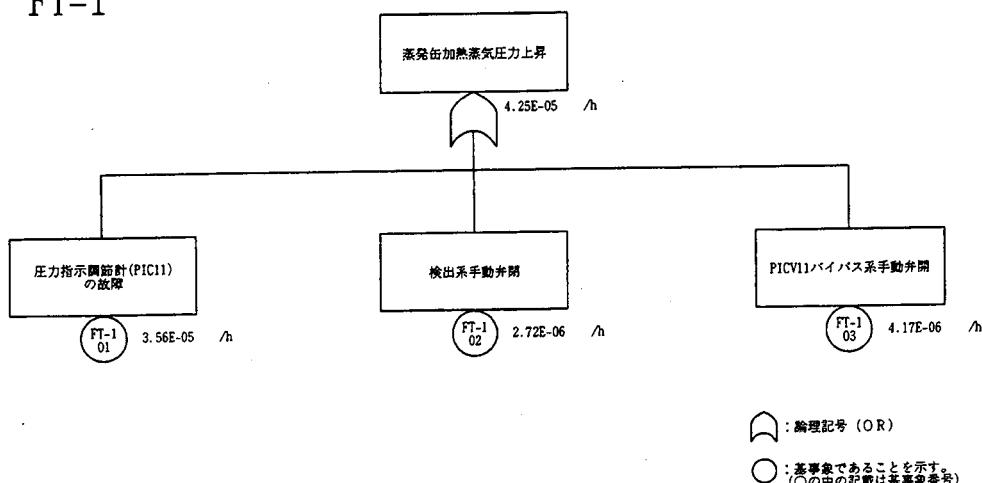


図4.2-3 起因事象のフォールトツリー

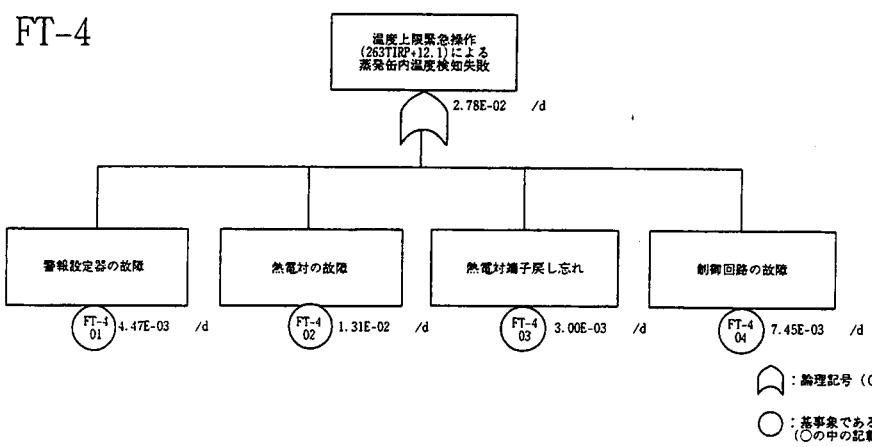
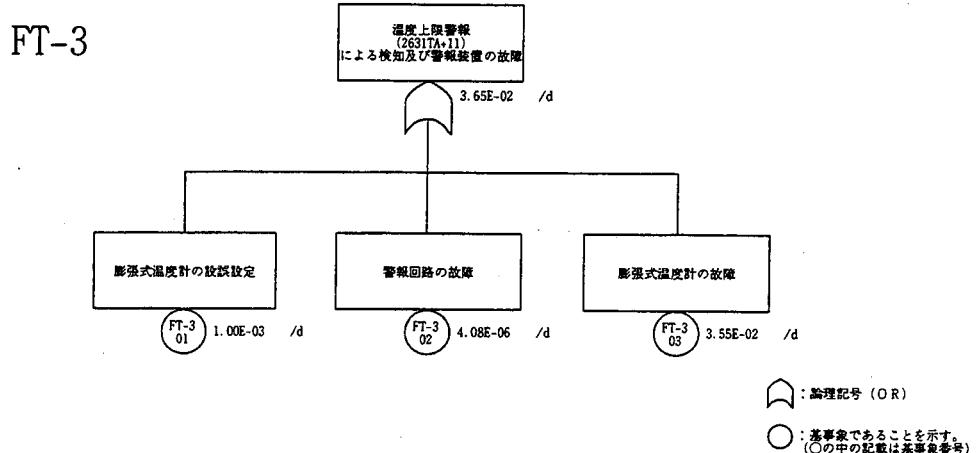
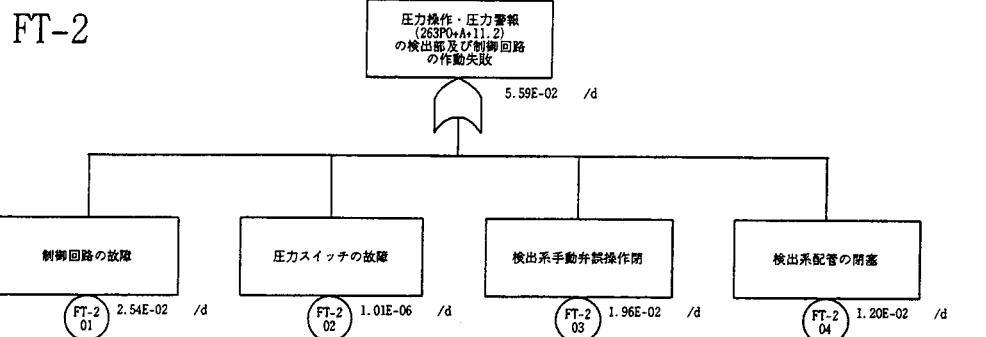


図4.2-4 発生防止策-1～3のフォールトツリー

5.00E-02 1.00E-02 5.00E-04
\$ -1 A-0(1) 失敗

1.30E-02 6.42E-04
A-C 失敗
成功

5.00E-01 1.00E-02 4.75E-03
\$ -2 A-0(2) 失敗

1.30E-02 6.10E-03
A-C 失敗
成功

3.00E-03 1.43E-03
A-0(3) 失敗

1.30E-02 6.14E-03
A-C 失敗
成功

操作手順		
A 校正作業後の検出系手動弁の開忘れ		

分岐番号	エラー番号	人的過誤率
\$ -1	\$-1	5.00E-02
\$ -2	\$-2	5.00E-01
A-0(1)	A-3	1.00E-02
A-0(2)	A-2	1.00E-02
A-0(3)	A-1	3.00E-03
A-C	A-4, 5	1.30E-02

Total	1.96E-02 /d
-------	-------------

人的過誤率表

エラー番号	エラー内容	表番号 項目番号 (NUREG/CR-1278)	NHEP	EF	タギングレベル・因子	ストレス・経験因子	回復要素	BHEP ※ 1	従属性	CHEP ※ 2
\$ -1	運転管理に従わず、手順書を使用しない。	第20- 6表 (6)	5.00E-02	5				5.00E-02		5.00E-02
\$ -2	運転管理に従わず、チェックリストを使用しない。	第20- 6表 (8)	5.00E-01	5				5.00E-01		5.00E-01
A -1	チェックリストを適切に使用した場合に手順書の実施項目を省いてしまう。	第20- 6表 (2)	3.00E-03	3				3.00E-03		3.00E-03
A -2	チェックリストを適切に使用しなかった場合に手順書の実施項目を省いてしまう。	第20- 6表 (4)	1.00E-02	3				1.00E-02		1.00E-02
A -3	手順書の使用を怠った場合、手順書中の実施項目を省いてしまう。	第20- 7表 (6)	1.00E-02	5				1.00E-02		1.00E-02
A -4	間違った手動弁を選択する。	第20-12表 (2)	3.00E-03	3				3.00E-03		3.00E-03

図4.2-5 人間信頼性解析結果(HRA-1)

1.00E-02	1.00E-03	1.00E-05
\$ - 1	A-C	失敗
	成功	
5.00E-01	1.00E-03	4.95E-04
\$ - 2	A-C	失敗
	成功	
1.00E-03	4.95E-04	
A-C	失敗	
	成功	

操作手順		
膨張式温度計の誤設定		
分岐番号	エラー番号	人的過誤率
\$ - 1	\$-1	1.00E-02
\$ - 2	\$-2	5.00E-01
A-C	A-1, 2	1.00E-03
Total		1.00E-03 /d

人的過誤率表

エラー番号	エラー内容	表番号 項目番号 (NUREG/CR-1278)	NHEP	EF	タギング レベル 因子	ストレ ス・経験 因子	回復 要素	BHEP ※ 1	従属性	CHEP ※ 2
\$ - 1	運転管理に従わず、手順書を使用しない。	第20- 6表 (3)	1.00E-02	3				1.00E-02		1.00E-02
\$ - 2	運転管理に従わず、チェックリストを使用しない。	第20- 6表 (8)	5.00E-01	5				5.00E-01		5.00E-01
A - 2	スイッチを間違った方向に操作する。	第20-12表 (9)	1.00E-03	10				1.00E-03		1.00E-03

※ 1

 $BHEP = NHEP * (\text{ストレス} \cdot \text{経験因子}) * (\text{タギングレベル因子}) * [(\text{回復要素}) * (\text{ストレス} \cdot \text{経験因子})]$

※ 2

従属性 L D の場合

 $CHEP = (1+19*BHEP)/20$

従属性 M D の場合

 $CHEP = (1+6*BHEP)/7$

従属性 H D の場合

 $CHEP = (1+1*BHEP)/2$

図4.2-6 人間信頼性解析結果 (HRA-2)

5.00E-02	3.00E-03	1.50E-04
\$ - 1	A-C	失敗
成功		
5.00E-01	3.00E-03	1.43E-03
\$ - 2	A-C	失敗
成功		
3.00E-03	1.43E-03	
A-C		失敗
成功		

操作手順		
A 校正作業後の熱電対端子の接続		
分岐番号	エラー番号	人的過誤率
\$ - 1	\$-0	5.00E-02
\$ - 2	\$-1	5.00E-01
A-C	A-1	3.00E-03
Total		3.00E-03 /d

人的過誤率表										
エラー番号	エラー内容	表番号 項目番号 (HONLIC-CT-127)	NHEP	EF	タギング グレーブル 因子	ストレス・経験因子	回復要素	BHEP ※ 1	従属性	CHEP ※ 2
\$ - 0	運転管理に従わず、手順書を使用しない。	第20- 6表 (6)	5.00E-02	5				5.00E-02		5.00E-02
\$ - 1	運転管理に従わず、チェックリストを使用しない。	第20- 6表 (8)	5.00E-01	5				5.00E-01		5.00E-01
A - 1	コネクターを間違って接続する。	第20-12表 (13)	3.00E-03	3				3.00E-03		3.00E-03

※ 1 $BHEP = NHEP \times (\text{ストレス} \cdot \text{経験因子}) \times (\text{タギングレベル因子}) \times [(\text{回復要素}) \times (\text{ストレス} \cdot \text{経験因子})]$

※ 2 従属性 L D の場合
 $CHEP = (1+19 \times BHEP) / 20$

従属性 M D の場合
 $CHEP = (1+6 \times BHEP) / 7$

従属性 H D の場合
 $CHEP = (1+1 \times BHEP) / 2$

図4.2-7 人間信頼性解析結果(HRA-3)

			5.00E-06	5.00E-06
A - 1	失敗			
1.00E-02	4.00E-03	5.02E-01	5.00E-01	1.00E-05
\$ - 1	B - O (1)	C - O (1)	D - O (1)	失敗
			7.50E-01	7.53E-06
			D - C (1)	失敗
			成功	
			7.50E-01	5.00E-01
		C - C (1)	D - O (1)	失敗
			成功	
			7.50E-01	5.60E-06
			D - C (1)	失敗
			成功	
2.44E-03	5.02E-01	5.00E-01	6.10E-06	
B - C (1)		C - O (1)	D - O (1)	失敗
成功			7.50E-01	4.57E-06
			D - C (1)	失敗
			成功	
			7.50E-01	5.00E-01
		C - C (1)	D - O (1)	失敗
			成功	
			7.50E-01	3.40E-06
			D - C (1)	失敗
			成功	
5.00E-01	4.00E-03	5.02E-01	5.02E-01	4.99E-04
\$ - 2	B - O (2)	C - O (2)	D - O (2)	失敗
			7.50E-01	3.71E-04
			D - C (2)	失敗
			成功	
			7.50E-01	5.02E-01
		C - C (2)	D - O (2)	失敗
			成功	
			7.50E-01	2.76E-04
			D - C (2)	失敗
			成功	
2.44E-03	5.02E-01	5.02E-01	3.03E-04	
B - C (2)		C - O (2)	D - O (2)	失敗
成功			7.50E-01	2.25E-04
			D - C (2)	失敗
			成功	
			7.50E-01	5.02E-01
		C - C (2)	D - O (2)	失敗
			成功	
			7.50E-01	1.68E-04
			D - C (2)	失敗
			成功	
1.20E-03	5.01E-01	5.01E-01	1.49E-04	
B - O (3)		C - O (3)	D - O (3)	失敗
			7.50E-01	1.11E-04
			D - C (3)	失敗
			成功	
			7.50E-01	5.01E-01
		C - C (3)	D - O (3)	失敗
			成功	
			7.50E-01	8.34E-05
			D - C (3)	失敗
			成功	
2.44E-03	5.01E-01	5.01E-01	3.02E-04	
B - C (3)		C - O (3)	D - O (3)	失敗
成功			7.50E-01	2.26E-04
			D - C (3)	失敗
			成功	
			7.50E-01	5.01E-01
		C - C (3)	D - O (3)	失敗
			成功	
			7.50E-01	1.69E-04
			D - C (3)	失敗
			成功	

操作手順		
A	2 6 3 T A + 1 1 の確認	↓
B	加熱蒸気系調節計 (2 6 3 F H 1 2 . 1) の手動操作による加熱蒸気停止操作	↓
C	加熱蒸気系調節弁 (2 6 3 F H V 1 2 . 1) の閉操作	↓
D	加熱蒸気系圧空作動弁 (2 6 3 W 1 0 3) の閉操作	

分歧番号	エラー番号	人的過誤率
A - 1	A - 1	5.00E-06
\$ - 1	\$ - 1	1.00E-02
\$ - 2	\$ - 2	5.00E-01
B - O (1)	B - 3	4.00E-03
B - C (1)	B - 4, 5, 6	2.44E-03
C - O (1)	C - 3	5.02E-01
C - C (1)	C - 4, 5	7.50E-01
D - O (1)	D - 3	5.00E-01
D - C (1)	D - 4, 5	7.50E-01
B - O (2)	B - 2	4.00E-03
B - C (2)	B - 4, 5, 6	2.44E-03
C - O (2)	C - 2	5.02E-01
C - C (2)	C - 4, 5	7.50E-01
D - O (2)	D - 2	5.02E-01
D - C (2)	D - 4, 5	7.50E-01
B - O (3)	B - 1	1.20E-03
B - C (3)	B - 4, 5, 6	2.44E-03
C - O (3)	C - 1	5.01E-01
C - C (3)	C - 4, 5	7.50E-01
D - O (3)	D - 1	5.01E-01
D - C (3)	D - 4, 5	7.50E-01

Total	3.87E-03 /d
-------	-------------

図4.2-8 人間信頼性解析結果
(HRA-4 加熱蒸気停止操作) [1/2]

人的過誤率表

エラー番号	エラー内容	表番号 項目番号 (NREG/CR-127)	NHEP	EF	タギング レベル 因子	ストレス・経験因子	回復要素	BHEP ※1	従属性	CHEP ※2
\$-1	運転管理に従わず、手順書を使用しない。	第20-6表(5)	1.00E-02	3				1.00E-02		1.00E-02
\$-2	運転管理に従わず、チェックリストを使用しない。	第20-6表(8)	5.00E-01	5				5.00E-01		5.00E-01
A-1	警報に気付かない。	第20-23表(1)	1.00E-04	10			5.00E-02 ※4	5.00E-06		5.00E-06
B-1	チェックリストを適切に使用した場合に手順書中の実施項目を省いてしまう。	第20-7表(2)	3.00E-03	3		2※3	1.00E-01 ※5	1.20E-03		1.20E-03
B-2	チェックリストを適切に使用しなかった場合に手順書中の実施項目を省いてしまう。	第20-7表(4)	1.00E-02	3		2※3	1.00E-01 ※5	4.00E-03		4.00E-03
B-3	手順書の使用を忘了場合、手順書中の実施項目を省いてしまう。	第20-7表(6)	1.00E-02	5		2※3	1.00E-01 ※5	4.00E-03		4.00E-03
B-4	間違えたスイッチを選択する。	第20-12表(2)	3.00E-03	10		2※3	1.00E-01 ※5	1.20E-03		1.20E-03
B-5	スイッチを間違えた方向に操作する。	第20-12表(8)	1.00E-04	10		2※3	1.00E-01 ※5	4.00E-05		4.00E-05
B-6	機器等の状態を完全に変更しきらない。	第20-12表(12)	3.00E-03	3		2※3	1.00E-01 ※5	1.20E-03		1.20E-03
C-1	チェックリストを適切に使用した場合に手順書中の実施項目を省いてしまう。	第20-7表(2)	3.00E-03	3		2※3	1.00E-01 ※5	1.20E-03	HD	5.01E-01
C-2	チェックリストを適切に使用しなかった場合に手順書中の実施項目を省いてしまう。	第20-7表(4)	1.00E-02	3		2※3	1.00E-01 ※5	4.00E-03	HD	5.02E-01
C-3	手順書の使用を忘了場合、手順書中の実施項目を省いてしまう。	第20-7表(6)	1.00E-02	5		2※3	1.00E-01 ※5	4.00E-03	HD	5.02E-01
C-4	間違えたスイッチを選択する。	第20-12表(2)	3.00E-03	10		2※3	1.00E-01 ※5	1.20E-03	HD	5.01E-01
C-5	スイッチを間違えた方向に操作する。	第20-12表(8)	1.00E-04	10		2※3	1.00E-01 ※5	4.00E-05	HD	5.00E-01
D-1	チェックリストを適切に使用した場合に手順書中の実施項目を省いてしまう。	第20-7表(2)	3.00E-03	3		2※3	1.00E-01 ※5	1.20E-03	HD	5.01E-01
D-2	チェックリストを適切に使用しなかった場合に手順書中の実施項目を省いてしまう。	第20-7表(4)	1.00E-02	3		2※3	1.00E-01 ※5	4.00E-03	HD	5.02E-01
D-3	手順書の使用を忘了場合、手順書中の実施項目を省いてしまう。	第20-7表(6)	1.00E-02	5		2※3	1.00E-01 ※5	4.00E-03	HD	5.02E-01
D-4	間違えたスイッチを選択する。	第20-12表(2)	5.00E-04	10		2※3	1.00E-01 ※5	2.00E-04	HD	5.00E-01
D-5	スイッチを間違えた方向に操作する。	第20-12表(8)	1.00E-04	10		2※3	1.00E-01 ※5	4.00E-05	HD	5.00E-01

※1 $BHEP = NHEP * (\text{ストレス} \cdot \text{経験因子}) * (\text{タギングレベル因子}) * |(\text{回復要素}) * (\text{ストレス} \cdot \text{経験因子})|$

※2 従属性L Dの場合
 $CHEP = (1+19*BHEP)/20$

従属性M Dの場合
 $CHEP = (1+6*BHEP)/7$

従属性H Dの場合
 $CHEP = (1+1*BHEP)/2$

※3 熟練者、比較的高いストレス、ステップバイステップ作業（第20-16表(4):×2）を想定

※4 警報に対する、短期間での単一の点検（第20-22表(3):0.05）を考慮

※5 肩越しの検査（第20-22表(1):0.1）を考慮

図4.2-8 人間信頼性解析結果 (HRA-4 加熱蒸気停止操作) [2/2]

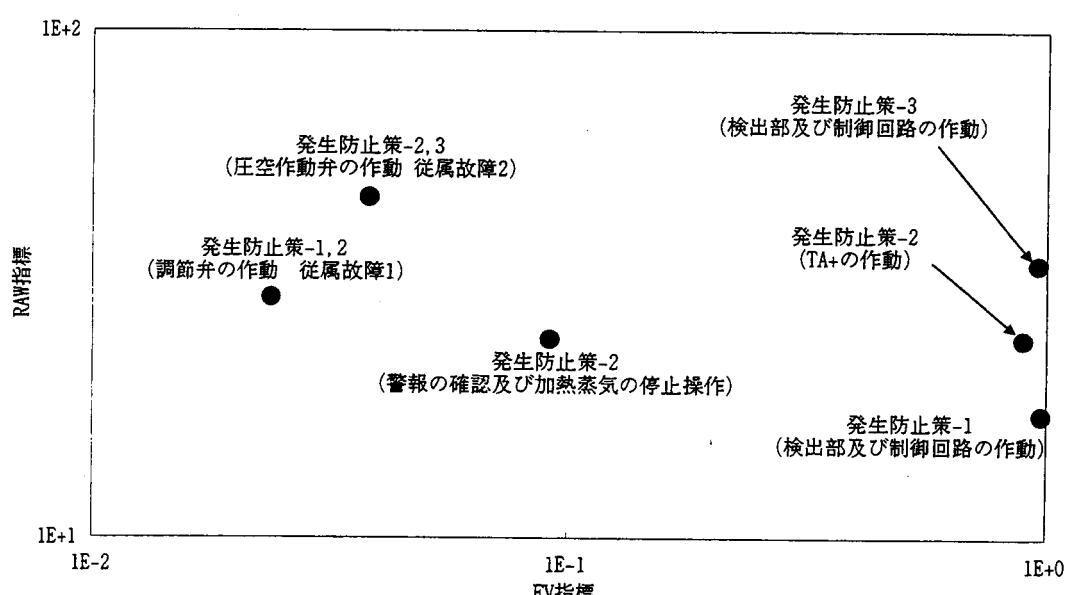


図4.2-9 重要度の把握結果

4.3 プルトニウム溶液蒸発缶における熱的制限値超過

4.3.1 概要

プルトニウム溶液蒸発缶では、プルトニウム精製工程で精製された硝酸プルトニウム溶液を蒸発濃縮する。濃縮運転はバッチ式で低濃度の溶液を連続供給しながら所定の濃度まで加熱濃縮したのちプルトニウム製品貯槽へ送液する。

同蒸発缶において、加熱蒸気圧力の上昇並びに缶内に多量の TBP の存在を仮定すると、硝酸プルトニウム溶液の過剰濃縮に伴い、TBP と硝酸の反応による爆発の可能性がある。

このため、プルトニウム溶液蒸発缶における TBP と硝酸の反応による爆発の発生防止策として以下の対策を講じている(図 4.3-1)。

- ・ プルトニウム溶液蒸発缶加熱蒸気系の温度記録上限警報(TRA+)により、加熱蒸気温度の異常上昇を検知し、運転員の対応により蒸発缶の運転を停止する。
- ・ プルトニウム溶液蒸発缶の温度記録上限緊急操作(TRP+)により、蒸発缶内液温の異常上昇を検知し、加熱蒸気及び溶液の供給を自動的に停止する。
- ・ プルトニウム溶液蒸発缶の密度上限警報 (DA+) により、蒸発缶内液密度の異常上昇を検知し、運転員の対応により蒸発缶の運転を停止する。
- ・ プルトニウム溶液蒸発缶の加熱蒸気圧力が異常に上昇した場合、蒸気系の安全弁の作動により減圧する。

なお、プルトニウム溶液蒸発缶への給液については、希釀剤洗浄器で溶液に同伴又は溶解している TBP 等を除去していること及び給液系に中間貯槽を設け貯槽底部から溶液を抜き出すことにより TBP 等を除去していることから、熱的制限値を超過した場合でも、それだけで爆発に至るものではない。

4.3.2 評価結果

3.の評価手法に従い、事故発生防止策の特徴及び重要度の把握を以下のように実施した。

1) イベントツリーの作成

図 4.3-2 に作成したイベントツリーを示す。

起因事象として、プルトニウム溶液蒸発缶加熱蒸気の温度上昇を考慮した。

事故発生防止策として安全弁の作動、加熱蒸気温度上限警報に伴う運転員の対応、蒸発缶内液密度上限警報に伴う運転員の対応、及び蒸発缶内液温度上限緊急操作による自動停止を考慮した。加熱蒸気温度上限警報と蒸発缶内液密度上限警報の一部に従属故障が存在するため、温度上限警報が故障した場合は、液密度上限警報の機能も同時に損なわれるとした。また、加熱蒸気温度上限警報と蒸発缶内温度上限緊急操作の一部に従属故障が存在するため、温度上限警報が故障した場合は、温度上限緊急操作の機能も同時に損なわれるとした。

2) フォールトツリーの作成

イベントツリーで考慮した起因事象及び各発生防止策に対し、図 4.3-3, 4.3-4 に示すフォールトツリーを作成した。起因事象のプルトニウム溶液蒸発缶の加熱蒸気温度上昇については、加熱蒸気供給系の調節計の故障及び運転員による手動弁の誤操作等を考慮した。

3) 定量化

① 起因事象発生確率の算出

定量化に用いた故障率を表 4.3-1 に示す。加熱蒸気系の圧力調節計の故障については、東海再処理施設の設備保全履歴より、蒸発缶の運転時間と故障回数から算出した。また、手動弁開操作忘れについては、図 4.3-5 に示す人間信頼性解析を実施することにより、作業 1 回あたりの失敗確率を算出し、それと工程運転中の操作頻度を用い時間当たりの発生確率を算出した。

② 発生防止策の失敗確率の算出

各発生防止策の定量化に用いた故障率を表 4.3-1 に示す。機器の故障率については、主に公開データの値を用いており、ヒューマンエラーに関する部分は図 4.3-6, 4.3-7 に示す人間信頼性解析を実施した。また、圧力検出配管の閉塞に関しては、東海再処理施設の設備保全履歴より算出した。

③ イベントツリーの定量化

①、②で算出した値を用い、イベントツリーの定量化を行った。この結果、プルトニウム溶液蒸発缶において熱的制限値を超過する事象の発生確率は、 $6.12E-09/(y)$ となった。なお、プルトニウム溶液蒸発缶への給液については、希釈剤洗浄器で溶液に同伴又は溶解している TBP 等を除去していること及び給液系に中間貯槽を設け貯槽底部から溶液を抜き出すことにより TBP 等を除去していることから、熱的制限値を超過した場合でも、それだけで爆発に至るものではない。

4) 重要度評価

定量化したイベントツリーの各発生防止策の重要度を把握するため、重要度評価を実施した。重要度の把握結果を図 4.3-8 に示す。同結果より、FV, RAW の各指標において以下のような特徴が見られた。

① FV 指標

安全弁の作動、従属故障である圧空作動弁の作動及び調節弁の作動が相対的に高い値を示した。

② RAW 指標

従属故障である警報装置の作動が相対的に高い値を示した。

4.3.3 発生防止策の特徴及び重要度の把握結果

PSA 手法を用いた事故シーケンスの定量化及び同結果に基づく重要度の把握を実施した結果、以下のような知見が得られた。

発生防止策の特徴として、多重の防止策の存在が挙げられる。仮に加熱蒸気の圧力が上昇しても安全弁が作動することにより、加熱蒸気圧力を低下させることができる。また、万一安全弁が故障していたとしても加熱蒸気温度上限警報により運転員に異常を周知し、運転員は手順書に従った操作を実施することにより速やかに対処することができる。加熱蒸気温度上限警報と蒸発缶内液密度上限警報の一部に従属故障が存在するため、両方の警報装置の機能が一度に損なわれる可能性もあるが、その場合においても、蒸発缶内液温度上昇に伴い温度上限緊急操作が作動し、加熱蒸気の供給を自動的に停止させることができる。

重要度の把握結果より、プルトニウム溶液蒸発缶内におけるTBPと硝酸の分解反応に伴う爆発の発生防止上安全弁の作動、温度上限緊急操作、警報装置の作動が重要な役割を果たしていることがわかった。

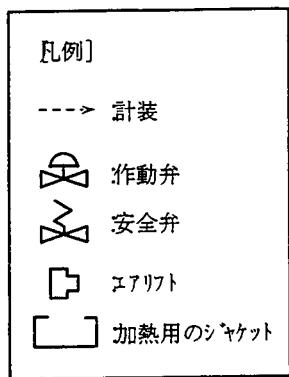
4.3.4 まとめ

プルトニウム溶液蒸発缶の加熱蒸気温度が異常に上昇した場合の、プルトニウム溶液蒸発缶におけるTBPと硝酸の急激な分解反応に伴う爆発の可能性についてPSA手法を用いた事故発生防止策の特徴及び重要度の把握を実施した結果、以下の知見が得られた。

- ・ プルトニウム溶液蒸発缶において熱的制限値を超過する事象の発生確率は、 $6.12E-09(1/y)$ となった。なお、プルトニウム溶液蒸発缶への給液については、希釀剤洗浄器で溶液に同伴又は溶解しているTBP等を除去していること及び給液系に中間貯槽を設け貯槽底部から溶液を抜き出すことによりTBP等を除去していることから、熱的制限値を超過した場合でも、それだけで爆発に至るものではない。
- ・ 重要度評価を実施した結果、安全弁の作動、従属故障である警報装置の作動、調節弁の作動及び圧空作動弁の作動が重要な役割を果たしていることが明らかとなった。

表4.3-1 故障率・過誤率一覧表

基事象番号	不全モード		故障率データ			近隣操作回数、 使用回数 [/y]	試験間 隔、点検 周期 [h]	故障率
	機器グループ種別	故障モード	[/h]	[/d]	出典			
FT-1 01	266PIC20.2	故障	1.03E-04		東海再処理施設の実績			1.03E-04 /h
FT-1 02	保守員	手動弁開操作忘れ	-	1.96E-03	図4.3-5 HRA-1	2	7200	5.43E-07 /h
FT-1 03	運転員	バイパス手動弁の誤操作による開	-	3.00E-03	NUREG/CR1278 20-13	10	7200	4.17E-06 /h
FT-2 01	熱電対	故障	3.00E-06	-	IEEE std-500(1984)		2	3.00E-06 /d
FT-2 02	保守員	熱電対端子接続ミス	-	3.00E-04	図4.3-6 HRA-2			3.00E-04 /d
FT-3 01	保守員	手動弁開操作忘れ	-	1.96E-03	図4.3-5 HRA-1			1.96E-03 /d
FT-3 02	圧力スイッチ	故障	-	1.01E-06	IEEE std-500(1984)			1.01E-06 /d
FT-3 03	圧力検出配管	閉塞	5.93E-04	-	東海再処理施設の実績		8	2.37E-03 /d
FT-4 01	制御回路	故障	1.70E-06	-	IEEE std-500(1984)		8760	7.45E-03 /d
FT-4 02	警報設定器	故障	1.02E-06	-	IEEE std-500(1984)		8760	4.47E-03 /d
FT-4 03	熱電対	故障	3.00E-06	-	IEEE std-500(1984)		0.5	7.50E-07 /d
FT-4 04	保守員	熱電対端子接続ミス	-	3.00E-04	図4.3-6 HRA-2			3.00E-04 /d
ET 01	安全弁	FAIL TO OPEN	2.27E-06	-	IEEE std-500(1984)		8760	9.94E-03 /d
ET 02	警報回路	故障	1.02E-06	-	IEEE std-500(1984)		8	4.08E-06 /d
ET 03	調節弁	FAIL TO OPERATE	1.00E-05	-	NUREG/CR-2815		168	8.40E-04 /d
ET 04	圧空作動弁	FAIL TO OPERATE	1.00E-05	-	NUREG/CR-2815		168	8.40E-04 /d



[プルトニウム精製工程]

[プルトニウム精製工程]
希釀剤洗浄器

[プルトニウム溶液濃縮工程]
中間貯槽

プルトニウム溶液蒸発缶

TRP+

DA+

TRA+

加熱用蒸気

圧縮空気

資料 4.3-1 発生防止策概要図

イベントツリー分岐確率算出根拠

事象の種類	基本確率	単位	基本確率 算出根拠	従属性	事象発生確率 (分岐確率)
起因事象	1.08E-04	/h	図4.3-3 FT-1	-	1.08E-04 /h
発生防止策-1	9.94E-03	/d	表4.3-1 ET 01	-	9.94E-03 /d
発生防止策-2					
266TRA-20.1による加熱蒸気温度異常の検知	3.03E-04	/d	図4.3-4 FT-2	-	3.03E-04 /d
警報装置の作動 (従属故障)	4.08E-06	/d	表4.3-1 ET 02	-	4.08E-06 /d
警報の確認及び加熱蒸気の停止操作	2.71E-04	/d	図4.3-7 HRA-3	-	2.71E-04 /d
調節弁の作動	8.40E-04	/d	表4.3-1 ET 03	-	8.40E-04 /d
圧空作動弁の作動	8.40E-04	/d	表4.3-1 ET 04	-	8.40E-04 /d
発生防止策-3				-	-
266DA-20.2による蒸発缶内液密度異常の検知	4.32E-03	/d	図4.3-4 FT-3	-	4.32E-03 /d
警報装置の作動 (従属故障)	4.08E-06	/d	表4.3-1 ET 02	-	4.08E-06 /d
警報の確認及び加熱蒸気の停止操作	2.71E-04	/d	図4.3-7 HRA-3	-	2.71E-04 /d
調節弁の作動	8.40E-04	/d	表4.3-1 ET 03	-	8.40E-04 /d
圧空作動弁の作動	8.40E-04	/d	表4.3-1 ET 04	-	8.40E-04 /d
発生防止策-4				-	-
検出部及び制御回路の作動	1.22E-02	/d	図4.3-4 FT-4	-	1.22E-02 /d
圧空作動弁の作動	8.40E-04	/d	表4.3-1 ET 04	-	8.40E-04 /d

図4.3-2 イベントツリー

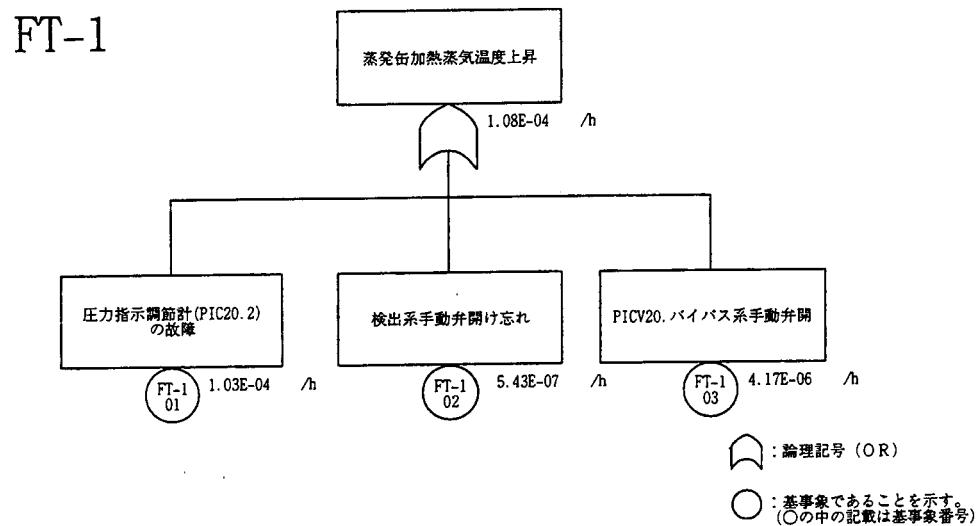
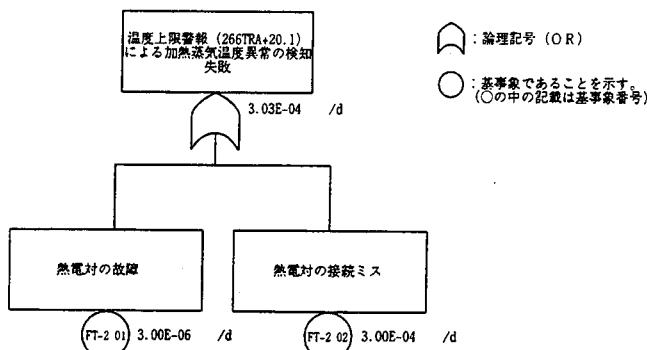


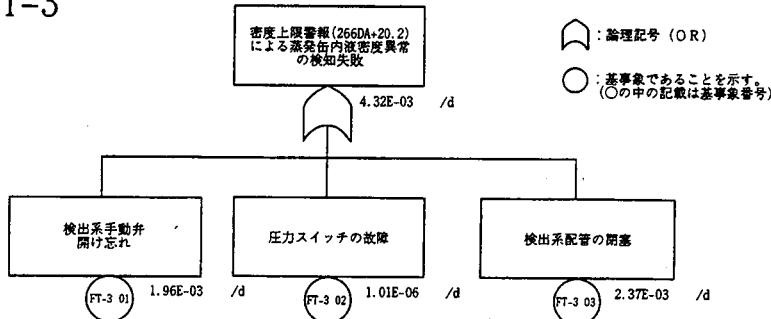
図4.3-3 起因事象のフォールトツリー

FT-2



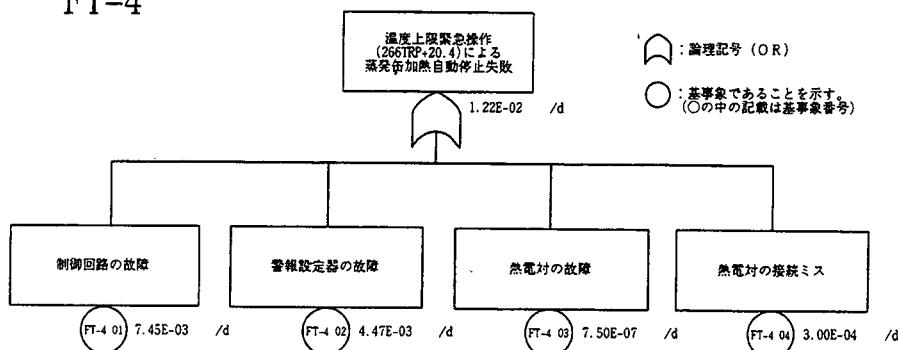
発生防止策-2のフォールトツリー

FT-3



発生防止策-3のフォールトツリー

FT-4



発生防止策-4のフォールトツリー

図4.3-4 発生防止策のフォールトツリー

5.00E-02	1.00E-02	5.00E-04
\$ -1	A-0(1)	失敗
1.30E-02	6.42E-04	
A-C		失敗
成功		
5.00E-01	1.00E-02	4.75E-03
\$ -2	A-0(2)	失敗
1.30E-02	6.10E-03	
A-C		失敗
成功		
3.00E-03	1.43E-03	
A-0(3)		失敗
1.30E-02	6.14E-03	
A-C		失敗
成功		

操作手順	
A 校正作業後の検出系手動弁の開忘れ	

分岐番号	エラー番号	人的過誤率
\$ -1	\$-1	5.00E-02
\$ -2	\$-2	5.00E-01
A-0(1)	A-3	1.00E-02
A-0(2)	A-2	1.00E-02
A-0(3)	A-1	3.00E-03
A-C	A-4,5	1.30E-02

蒸発缶の準備運転時のパラメータチェックで異常を発見できる可能性があるため、回復要素を0.1考慮し、評価では下記の値を用いる。

Total	1.96E-03 /d
-------	-------------

人的過誤率表

エラー番号	エラー内容	表番号 項目番号 (NUREG-1271)	NHEP	EF	タギング レベル 因子	ストレス・経験因子	回復 要素	BHEP ※1	従属性	CHEP ※2
\$ -1	運転管理に従わず、手順書を使用しない。	第20- 6表 (6)	5.00E-02	5				5.00E-02		5.00E-02
\$ -2	運転管理に従わず、チェックリストを使用しない。	第20- 6表 (8)	5.00E-01	5				5.00E-01		5.00E-01
A-1	チェックリストを適切に使用した場合に手順書の実施項目を省いてしまう	第20- 6表 (2)	3.00E-03	3				3.00E-03		3.00E-03
A-2	チェックリストを適切に使用しなかった場合に手順書の実施項目を省いてしまう	第20- 6表 (4)	1.00E-02	3				1.00E-02		1.00E-02
A-3	手順書の使用を怠った場合、手順書中の実施項目を省いてしまう	第20- 7表 (6)	1.00E-02	5				1.00E-02		1.00E-02
A-4	間違った手動弁を選択する。	第20-12表 (2)	3.00E-03	3				3.00E-03		3.00E-03

図4.3-5 人間信頼性解析結果 (HRA-1)

5.00E-02	3.00E-03	1.50E-04
\$ - 1	A-C	失敗
	成功	
5.00E-01	3.00E-03	1.43E-03
\$ - 2	A-C	失敗
	成功	
3.00E-03	1.43E-03	
A-C	失敗	
	成功	

操作手順		
A 校正作業後の熱電対端子の接続		

分岐番号	エラー番号	人的過誤率
\$ - 1	\$-1	5.00E-02
\$ - 2	\$-2	5.00E-01
A-C	A-1	3.00E-03

蒸発缶の準備運転時のパラメータチェックで異常を発見できる可能性があるため、回復要素を0.1考慮し、評価では下記の値を用いる。

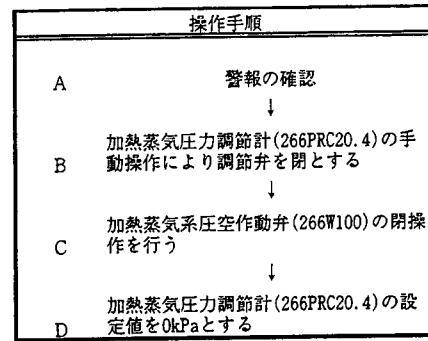
Total	3.00E-04 /d
-------	-------------

人的過誤率表

エラー番号	エラー内容	表番号 項目番号 (NUREC/CN-1278)	NHEP	EF	タキングレベル因子	ストレス・経験因子	回復要素	BHEP ※1	従属性	CHEP ※2
\$ - 1	運転管理に従わず、手順書を使用しない。	第20-6表(6)	5.00E-02	5				5.00E-02		5.00E-02
\$ - 2	運転管理に従わず、チェックリストを使用しない。	第20-6表(8)	5.00E-01	5				5.00E-01		5.00E-01
A - 1	コネクターを間違って接続する。	第20-12表(13)	3.00E-03	3				3.00E-03		3.00E-03

図4.3-6 人間信頼性解析結果 (HRA-2)

		5.00E-06	5.00E-06	
A - 1				
5.00E-03	2.40E-04	5.00E-01	5.00E-01	3.00E-07
\$ - 1	B - O (1)	C - O (1)	D - O (1) F	
			8.75E-01	2.63E-07
			D - C (1) F	
		S		
		8.75E-01	5.00E-01	2.62E-07
		C - C (1)	D - O (1) F	
		S	8.75E-01	2.30E-07
			D - C (1) F	
		S		
1.46E-04	5.00E-01	5.00E-01		1.83E-07
B - C (1)	C - O (1)	D - O (1) F		
S		8.75E-01	1.60E-07	
		D - C (1) F		
		S		
		8.75E-01	5.00E-01	1.60E-07
		C - C (1)	D - O (1) F	
		S	8.75E-01	1.40E-07
			D - C (1) F	
		S		
5.00E-01	2.40E-04	5.00E-01	5.00E-01	2.99E-05
\$ - 2	B - O (2)	C - O (2)	D - O (2) F	
		8.75E-01	2.61E-05	
		D - C (2) F		
		S		
		8.75E-01	5.00E-01	2.61E-05
		C - C (2)	D - O (2) F	
		S	8.75E-01	2.28E-05
			D - C (2) F	
		S		
1.46E-04	5.00E-01	5.00E-01		1.82E-05
B - C (2)	C - O (2)	D - O (2) F		
S		8.75E-01	1.59E-05	
		D - C (2) F		
		S		
		8.75E-01	5.00E-01	1.59E-05
		C - C (2)	D - O (2) F	
		S	8.75E-01	1.39E-05
			D - C (2) F	
		S		
7.20E-05	5.00E-01	5.00E-01		8.96E-06
B - O (3)	C - O (3)	D - O (3) F		
		8.75E-01	7.84E-06	
		D - C (3) F		
		S		
		8.75E-01	5.00E-01	7.84E-06
		C - C (3)	D - O (3) F	
		S	8.75E-01	6.86E-06
			D - C (3) F	
		S		
1.46E-04	5.00E-01	5.00E-01		1.82E-05
B - C (3)	C - O (3)	D - O (3) F		
S		8.75E-01	1.59E-05	
		D - C (3) F		
		S		
		8.75E-01	5.00E-01	1.59E-05
		C - C (3)	D - O (3) F	
		S	8.75E-01	1.39E-05
			D - C (3) F	
		S		



分岐番号	エラー番号	人的過誤率
\$ - 1	\$-1	5.00E-03
\$ - 2	\$-2	5.00E-01
A - 1	A-1	5.00E-06
B - O (1)	B-4	2.40E-04
B - C (1)	B-5.6.7	1.46E-04
C - O (1)	C-4	5.00E-01
C - C (1)	C-5.6.7	8.75E-01
D - O (1)	D-4	5.00E-01
D - C (1)	D-5.6.7	8.75E-01
B - O (2)	B-3	2.40E-04
B - C (2)	B-5.6.7	1.46E-04
C - O (2)	C-3	5.00E-01
C - C (2)	C-5.6.7	8.75E-01
D - O (2)	D-3	5.00E-01
D - C (2)	D-5.6.7	8.75E-01
B - O (3)	B-2	7.20E-05
B - C (3)	B-5.6.7	1.46E-04
C - O (3)	C-2	5.00E-01
C - C (3)	C-5.6.7	8.75E-01
D - O (3)	D-2	5.00E-01
D - C (3)	D-5.6.7	8.75E-01

Total	2.71E-04
-------	----------

図4.3-7 人間信頼性解析結果
(HRA-3 警報の確認及び
加熱蒸気停止操作) [1/2]

人的過誤率表

エラー番号	エラー内容	表番号 項目番号 (NUREG/CR-1218)	NHEP	EF	タギング レベル 因子	ストレ ス・経験 因子	回復要素	BHEP ※1	従属性	CHEP ※2
\$ - 1	運転管理に従わず、手順書を使用しない。	第20-6表(4)	5.00E-03	3				5.00E-03		5.00E-03
\$ - 2	運転管理に従わず、チェックリストを使用しない。	第20-6表(8)	5.00E-01	5				5.00E-01		5.00E-01
A - 1	警報に気付かない。	第20-23表(1)	1.00E-04	10			5.00E-02 ※4	5.00E-06		5.00E-06
B - 2	チェックリストを適切に使用した場合に手順書中の実施項目を省いてしまう。	第20-7表(2)	3.00E-03	3		2 ※3	6.00E-03 ※5	7.20E-05		7.20E-05
B - 3	チェックリストを適切に使用しなかつた場合に手順書中の実施項目を省いてしまう。	第20-7表(4)	1.00E-02	3		2 ※3	6.00E-03 ※5	2.40E-04		2.40E-04
B - 4	手順書の使用を忘了場合、手順書中の実施項目を省いてしまう。	第20-7表(6)	1.00E-02	5		2 ※3	6.00E-03 ※5	2.40E-04		2.40E-04
B - 5	間違えたスイッチを選択する。	第20-12表(2)	3.00E-03	10		2 ※3	6.00E-03 ※5	7.20E-05		7.20E-05
B - 6	スイッチを間違えた方向に操作する。	第20-12表(8)	1.00E-04	10		2 ※3	6.00E-03 ※5	2.40E-06		2.40E-06
B - 7	機器等の状態を完全に変更しきらない。	第20-12表(12)	3.00E-03	3		2 ※3	6.00E-03 ※5	7.20E-05		7.20E-05
C - 2	チェックリストを適切に使用した場合に手順書中の実施項目を省いてしまう。	第20-7表(2)	3.00E-03	3		2 ※3	6.00E-03 ※5	7.20E-05	HD	5.00E-01
C - 3	チェックリストを適切に使用しなかつた場合に手順書中の実施項目を省いてしまう。	第20-7表(4)	1.00E-02	3		2 ※3	6.00E-03 ※5	2.40E-04	HD	5.00E-01
C - 4	手順書の使用を忘了場合、手順書中の実施項目を省いてしまう。	第20-7表(6)	1.00E-02	5		2 ※3	6.00E-03 ※5	2.40E-04	HD	5.00E-01
C - 5	間違えたスイッチを選択する。	第20-12表(2)	3.00E-03	10		2 ※3	6.00E-03 ※5	7.20E-05	HD	5.00E-01
C - 6	スイッチを間違えた方向に操作する。	第20-12表(8)	1.00E-04	10		2 ※3	6.00E-03 ※5	2.40E-06	HD	5.00E-01
C - 7	機器等の状態を完全に変更しきらない。	第20-12表(12)	3.00E-03	3		2 ※3	6.00E-03 ※5	7.20E-05	HD	5.00E-01
D - 2	チェックリストを適切に使用した場合に手順書中の実施項目を省いてしまう。	第20-7表(2)	3.00E-03	3		2 ※3	6.00E-03 ※5	7.20E-05	HD	5.00E-01
D - 3	チェックリストを適切に使用しなかつた場合に手順書中の実施項目を省いてしまう。	第20-7表(4)	1.00E-02	3		2 ※3	6.00E-03 ※5	2.40E-04	HD	5.00E-01
D - 4	手順書の使用を忘了場合、手順書中の実施項目を省いてしまう。	第20-7表(6)	1.00E-02	5		2 ※3	6.00E-03 ※5	2.40E-04	HD	5.00E-01
D - 5	間違えたスイッチを選択する。	第20-12表(2)	3.00E-03	10		2 ※3	6.00E-03 ※5	7.20E-05	HD	5.00E-01
D - 6	スイッチを間違えた方向に操作する。	第20-12表(8)	1.00E-04	10		2 ※3	6.00E-03 ※5	2.40E-06	HD	5.00E-01
D - 7	機器等の状態を完全に変更しきらない。	第20-12表(12)	3.00E-03	3		2 ※3	6.00E-03 ※5	7.20E-05	HD	5.00E-01

※ 1

 $BHEP = NHEP * (\text{ストレス} \cdot \text{経験因子}) * (\text{タギングレベル因子}) * |(\text{回復要素}) * (\text{ストレス} \cdot \text{経験因子})|$

※ 2

従属性 L Dの場合

$$CHEP = 1 - (1 + 19 * (1 - BHEP)) / 20$$

従属性 M Dの場合

$$CHEP = 1 - (1 + 6 * (1 - BHEP)) / 7$$

従属性 H Dの場合

$$CHEP = 1 - (1 + (1 - BHEP)) / 2$$

※ 3

熟練者、比較的高いストレス、ステップバイステップ作業（第20-16表 (4):×2）を想定

※ 4

警報に対する、短期間での単一の点検（第20-22表 (3):0.05）を考慮

※ 5

記録計の確認による回復を考慮（第20-11表 (6):0.006）

図4.3-7 人間信頼性解析結果(HRA-3 警報の確認及び加熱蒸気停止操作)[2/2]

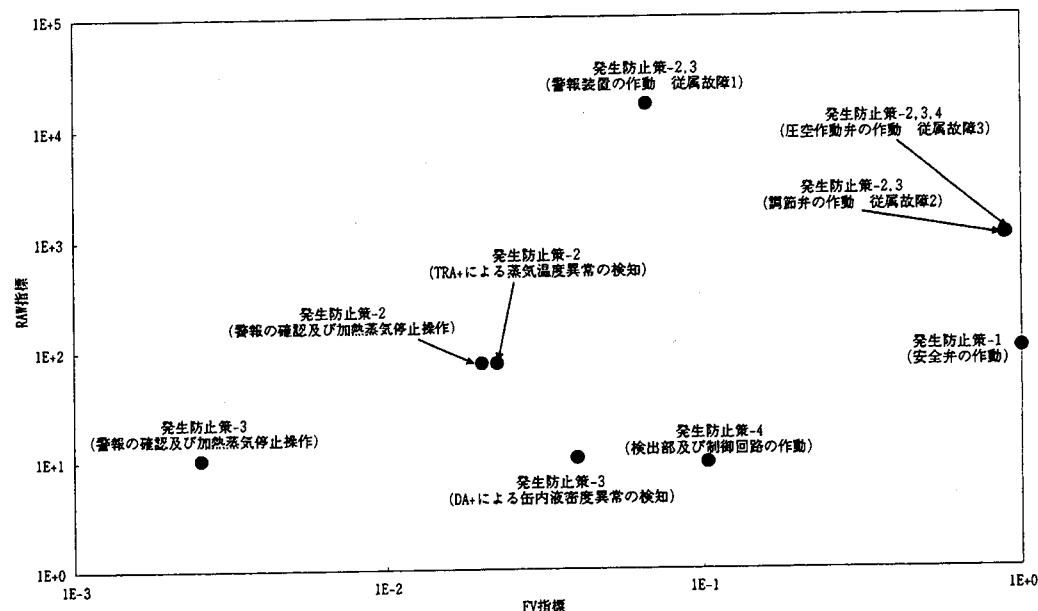


図4.3-8 重要度の把握結果

4.4 高放射性廃液蒸発缶における熱的制限値超過

4.4.1 概要

高放射性廃液濃縮工程の高放射性廃液蒸発缶では、分離第1サイクル工程の分離第1抽出器からの水相、第1溶媒洗浄器からの溶媒洗浄廃液、及び酸回収工程の酸回収蒸発缶の濃縮液を受入れ、ホルマリン溶液を加えて硝酸を分解しながら加熱濃縮する。

同蒸発缶において、加熱蒸気圧力の上昇並びに缶内に多量のTBPの存在を仮定すると、廃液の過剰濃縮に伴い、TBPと硝酸の反応による爆発の可能性がある。

このため、高放射性廃液蒸発缶におけるTBPと硝酸の反応による爆発の発生防止策として以下の対策を講じている(図4.4-1)。

- ・ 高放射性廃液蒸発缶加熱蒸気系の温度上限警報(TA+)により、加熱蒸気温度の異常上昇を検知し、運転員の対応により蒸発缶の運転を停止する。
- ・ 高放射性廃液蒸発缶の液面下限警報(LA-)により、蒸発缶液位の異常低下を検知し、運転員の対応により運転を停止する。
- ・ 高放射性廃液蒸発缶の温度上限操作上限警報(TO+A+)により、缶内液温度の異常上昇を検知し、加熱蒸気の供給を自動的に停止する。
- ・ 高放射性廃液蒸発缶加熱蒸気系の圧力上限操作上限警報(PO+A+)により、加熱蒸気圧力の異常上昇を検知し、加熱蒸気の供給を自動的に停止する。

なお、高放射性廃液蒸発缶への給液については、希釀剤洗浄器で溶液に同伴又は溶解しているTBP等を除去していること及び給液系に中間貯槽を設け貯槽底部から溶液を抜き出すことによりTBP等を除去していることから、熱的制限値を超過した場合でも、それだけで爆発に至るものではない。

4.4.2 評価結果

3.の評価手法に従い、事故発生防止策の特徴及び重要度の把握を以下のように実施した。

1) イベントツリーの作成

図4.4-2に作成したイベントツリーを示す。

起因事象として、高放射性廃液蒸発缶加熱蒸気の温度上昇を考慮した。

事故発生防止策として、加熱蒸気の圧力上限操作上限警報による自動停止、加熱蒸気の温度上限警報に伴う運転員の対応操作、蒸発缶内の液面下限警報に伴う運転員の対応操作、及び蒸発缶内液の温度上限操作上限警報による自動停止を考慮した。

圧力上限操作上限警報と温度上限操作上限警報の制御回路、また加熱蒸気の温度上限警報と蒸発缶内の液位下限警報の警報装置にそれぞれ従属故障が存在するため、これらを考慮しイベントツリーの作成を行った。

2) フォールトツリーの作成

イベントツリーで考慮した起因事象及び各発生防止策に対し、図4.4-3~4.4-7に示すフォールトツリーを作成した。起因事象の高放射性廃液蒸発缶の加熱蒸気温度上昇については、加熱蒸気供給系の調節計の故障及び運転員による誤操作を考慮した。

3) 定量化

① 起因事象発生確率の算出

定量化に用いた故障率を表4.4-1に示す。加熱蒸気系の圧力調節計の故障につい

ては、東海再処理施設の設備保全履歴より、蒸発缶の運転時間と故障回数から算出した。また、手動弁開操作忘れについては、図 4.4-8 に示す人間信頼性解析を実施することにより、作業 1 回あたりの失敗確率を算出し、それと工程運転中の操作頻度を想定し時間当たりの発生確率を算出した。

② 発生防止策の失敗確率の算出

各発生防止策の定量化に用いた故障率を表 4.4-1 に示す。機器の故障率については、主に公開データの値を用いており、ヒューマンエラーに関する部分は図 4.4-9 ~ 4.4-11 に示す人間信頼性解析を実施した。また、圧力検出配管の閉塞に関しては、東海再処理施設の設備保全履歴より算出した。

③ イベントツリーの定量化

①、②で算出した値を用い、イベントツリーの定量化を行った。この結果、高放射性廃液蒸発缶において熱的制限値を超過する事象の発生確率は、 $4.32E-06(y)$ となった。なお、高放射性廃液蒸発缶への給液については、希釀剤洗浄器で溶液に同伴又は溶解している TBP 等を除去していること及び給液系に中間貯槽を設け貯槽底部から溶液を抜き出すことにより TBP 等を除去していることから、熱的制限値を超過した場合でも、それだけで爆発に至るものではない。

4) 重要度評価

定量化したイベントツリーの各発生防止策の重要度を把握するため、重要度評価を実施した。重要度の把握結果を図 4.4-12 に示す。同結果より、FV,RAW の各指標において以下のような特徴が見られた。

① FV 指標

温度上限警報及び従属故障である制御回路の作動が相対的に高い値を示した。

② RAW 指標

従属故障である警報装置の作動が相対的に高い値を示した。

4.4.3 発生防止策の特徴及び重要度の把握結果

PSA 手法を用いた事故シーケンスの定量化及び同結果に基づく重要度の把握を実施した結果、以下のような知見が得られた。

発生防止策の特徴として、従属故障及び多重の防止策の存在が挙げられる。圧力上限操作上限警報と温度上限操作上限警報の一部、また加熱蒸気の温度上限警報と蒸発缶内の液位下限警報の一部にそれぞれ従属故障が存在するため、これらの機能が同時に損なわれることも考えられるが、その場合においても多重の防止策の存在により、加熱蒸気の供給を停止させることが可能である。

重要度の把握結果より、高放射性廃液蒸発缶における TBP と硝酸の分解反応に伴う爆発の発生防止上、温度上限警報による蒸気温度異常の検知、従属故障である制御回路及び警報装置の作動が重要な役割を果たしていることがわかった。

4.4.4 まとめ

高放射性廃液蒸発缶の加熱蒸気温度が異常に上昇した場合の、高放射性廃液蒸発缶における TBP と硝酸の急激な分解反応に伴う爆発の可能性について PSA 手法を用いた事故発生防止策の特徴及び重要度の把握を実施した結果、以下の知見が得られた。

- ・ 高放射性廃液蒸発缶において熱的制限値を超過する事象の発生確率は、

4.32E-06(/y)となった。

- 重要度評価を実施した結果、温度上限警報による蒸気温度異常の検知、従属故障である制御回路及び警報装置が重要な役割を果たしていることが明らかとなつた。なお、高放射性廃液蒸発缶への給液については、希釀剤洗浄器で溶液に同伴又は溶解しているTBP等を除去していること及び給液系に中間貯槽を設け貯槽底部から溶液を抜き出すことによりTBP等を除去していることから、熱的制限値を超過した場合でも、それだけで爆発に至るものではない。

表4.4-1 故障率・過誤率一覧表

基事象番号	不全モード		故障率データ			近隣操作回数、使用回数 [/y]	試験間隔、点検周期 [h]	故障率
	機器グループ種別	故障モード	[/h]	[/d]	出典			
FT-1 01	271PIC10.5	故障	5.96E-05	-	東海再処理施設の実績			5.96E-05 /h
FT-1 02	保守員	手動弁開操作忘れ	-	1.96E-02	図4.4-8 HRA-1	2	7200	5.43E-06 /h
FT-2 01	圧力スイッチ	故障	-	1.01E-06	IEEE std-500(1984)			1.01E-06 /d
FT-2 02	保守員	手動弁開操作忘れ	-	1.96E-02	図4.4-8 HRA-1			1.96E-02 /d
FT-2 03	圧力検出配管	閉塞	7.45E-06	-	東海再処理施設の実績		3600	1.34E-02 /d
FT-3 01	保守員	膨張式温度計設定ミス	-	1.00E-03	図4.4-9 HRA-2			1.00E-03 /d
FT-3 02	膨張式温度計	故障	8.11E-06	-	東海再処理施設の実績		8760	3.55E-02 /d
FT-4 01	圧力スイッチ	故障	-	1.01E-06	IEEE std-500(1984)			1.01E-06 /d
FT-4 02	検出配管	閉塞	4.17E-03	-	東海再処理施設の実績	2		4.17E-03 /d
FT-5 01	警報設定器	故障	1.02E-06	-	IEEE std-500(1984)		8760	4.47E-03 /d
FT-5 02	熱電対	故障	3.00E-06	-	IEEE std-500(1984)		8760	1.31E-02 /d
FT-5 03	保守員	熱電対端子接続ミス	-	3.00E-03	図4.4-10 HRA-3			3.00E-03 /d
ET 01	制御回路(シーケンサ)	故障	5.79E-06	-	東海再処理施設の実績		8760	2.54E-02 /d
ET 02	圧空作動弁	故障	1.00E-05	-	NUREG/CR2815		168	8.40E-04 /d
ET 03	運転員	加熱蒸気の停止操作	-	3.87E-03	図4.4-11 HRA-4			3.87E-03 /d
ET 04	調節弁	故障	1.00E-05	-	NUREG/CR2815		168	8.40E-04 /d
ET 05	警報回路	故障	1.02E-06	-	IEEE std-500(1984)	8		4.08E-06 /d

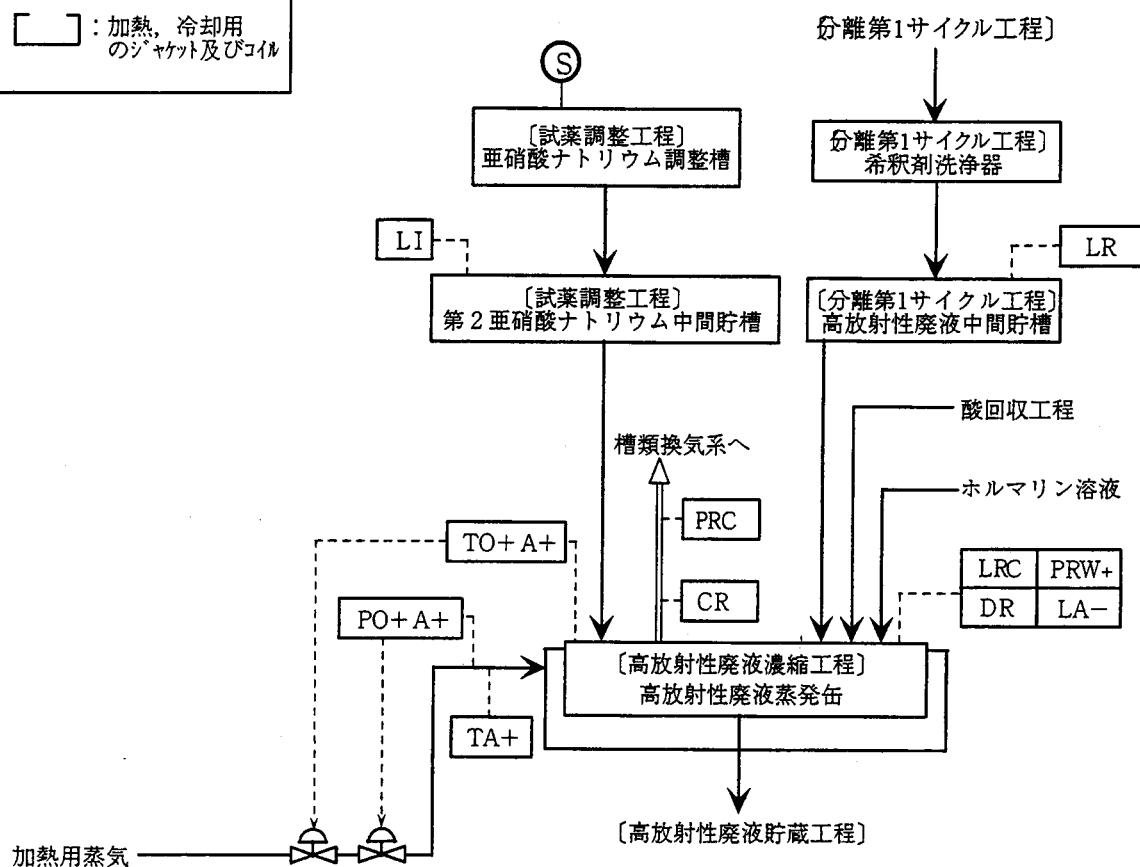
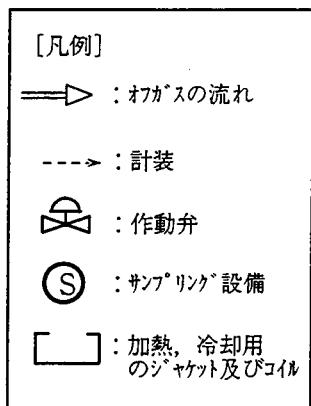


図 4.4-1 発生防止策概要図

図4.4-2 イベントツリー [1/2]

イベントツリーの分岐確率算出根拠

事象の種類	基本確率	単位	基本確率 算出根拠	従属性	事象発生確率 (分岐確率)
起因事象	6.50E-05	/h	図4.4-3 FT-1	-	6.50E-05 /h
発生防止策-1					
蒸気温度の検知	3.27E-02	/d	図4.4-4 FT-2	-	3.27E-02 /d
制御回路の作動	2.54E-02	/d	表4.4-1 ET 01	-	2.54E-02 /d
圧空作動弁の作動	8.40E-04	/d	資料4.4-8 ET 02	-	8.40E-04 /d
発生防止策-2					
蒸気温度の検知	3.65E-02	/d	図4.4-5 FT-3	-	3.65E-02 /d
警報装置の作動	4.08E-06	/d	表4.4-1 ET 05	-	4.08E-06 /d
警報の確認及び加熱蒸気の停止操作	3.87E-03	/d	表4.4-1 ET 03	-	3.87E-03 /d
圧空作動弁の作動	8.40E-04	/d	表4.4-1 ET 02	-	8.40E-04 /d
調節弁の作動	8.40E-04	/d	表4.4-1 ET 04	-	8.40E-04 /d
発生防止策-3					
液面低下の検知	4.17E-03	/d	図4.4-6 FT-4	-	4.17E-03 /d
警報装置の作動	4.08E-06	/d	表4.4-1 ET 05	-	4.08E-06 /d
警報の確認及び加熱蒸気の停止操作	3.87E-03	/d	図4.4-11 HRA-4	-	3.87E-03 /d
圧空作動弁の作動	8.40E-04	/d	表4.4-1 ET 02	-	8.40E-04 /d
調節弁の作動	8.40E-04	/d	表4.4-1 ET 04	-	8.40E-04 /d
発生防止策-4					
蒸気温度の検知	2.05E-02	/d	図4.4-7 FT-5	-	2.05E-02 /d
制御回路の作動	2.54E-02	/d	表4.4-1 ET 01	-	2.54E-02 /d
調節弁の作動	8.40E-04	/d	表4.4-1 ET 04	-	8.40E-04 /d

図4.4-2 イベントツリー [2/2]

FT-1

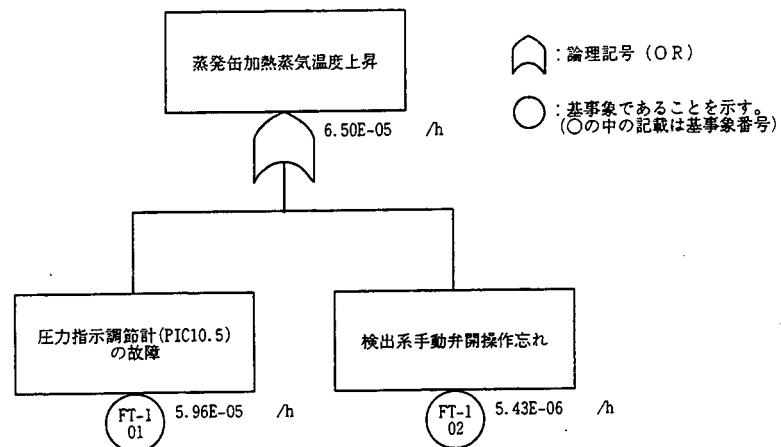


図4.4-3 起因果事象のフォールトツリー

FT-2

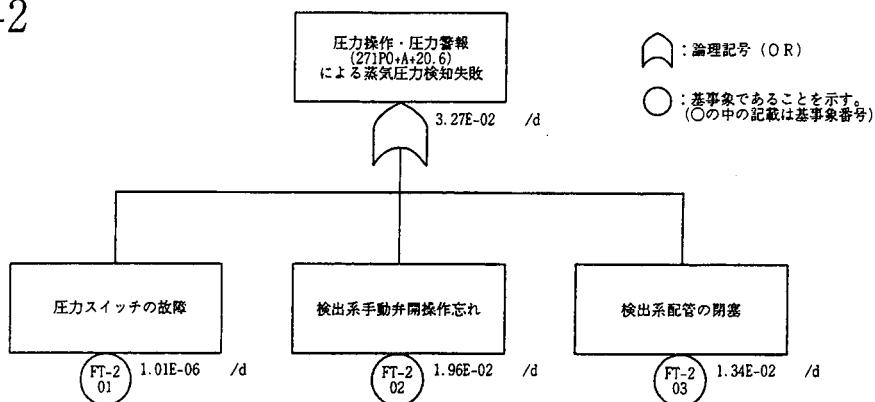


図4.4-4 発生防止策-1のフォールトツリー

FT-3

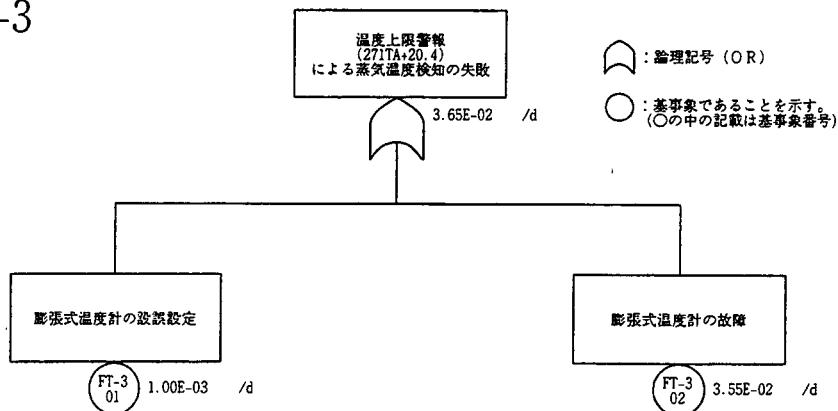


図4.4-5 発生防止策-2のフォールトツリー

FT-4

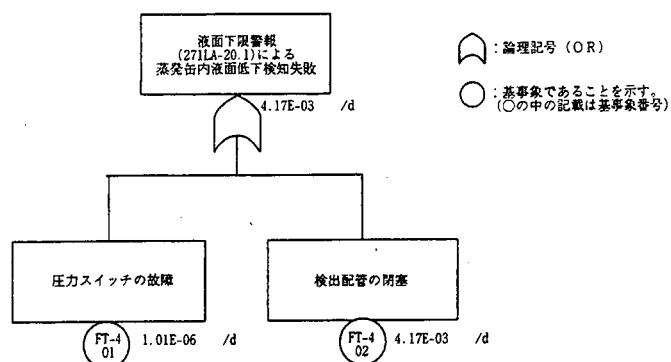


図4.4-6 発生防止策-3のフォールトツリー

FT-5

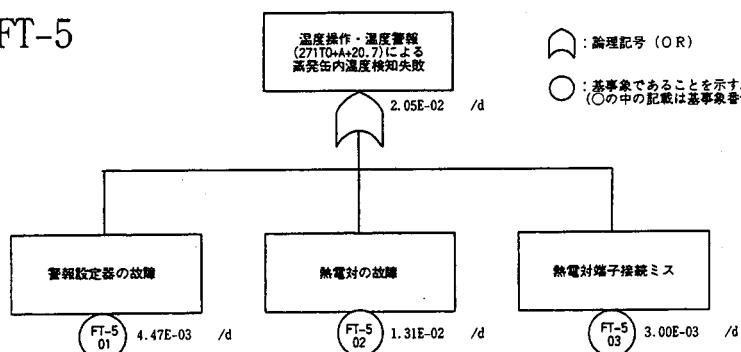


図4.4-7 発生防止策-4のフォールトツリー

5.00E-02	1.00E-02	5.00E-04
\$ -1	A-0(1)	失敗
1.30E-02	6.42E-04	
A-C	失敗	

成功

操作手順		
A 校正作業後の検出系手動弁の開忘れ		

5.00E-01	1.00E-02	4.75E-03
\$ -2	A-0(2)	失敗
1.30E-02	6.10E-03	
A-C	失敗	

成功

3.00E-03	1.43E-03	Total	1.96E-02 /d
A-0(3)	失敗		
1.30E-02	6.14E-03		
A-C	失敗		

成功

分岐番号	エラー番号	人的過誤率
\$ -1	\$-1	5.00E-02
\$ -2	\$-2	5.00E-01
A-0(1)	A-3	1.00E-02
A-0(2)	A-2	1.00E-02
A-0(3)	A-1	3.00E-03
A-C	A-4,5	1.30E-02

Total	1.96E-02 /d
-------	-------------

人的過誤率表

エラー番号	エラー内容	表番号 項目番号 (NUREG/CR-1278)	NHEP	EF	タキン グレベ ル・因 子	ストレ ス・経 験因子	回復 要素	BHEP ※ 1	従属性	CHEP ※ 2
\$ -1	運転管理に従わず、手順書を使用しない。	第20-6表(6)	5.00E-02	5				5.00E-02		5.00E-02
\$ -2	運転管理に従わず、チェックリストを使用しない。	第20-6表(8)	5.00E-01	5				5.00E-01		5.00E-01
A-1	チェックリストを適切に使用した場合に手順書の実施項目を省いてしまう。	第20-6表(2)	3.00E-03	3				3.00E-03		3.00E-03
A-2	チェックリストを適切に使用しなかつた場合に手順書の実施項目を省いてしまう。	第20-6表(4)	1.00E-02	3				1.00E-02		1.00E-02
A-3	手順書の使用を怠った場合、手順書中の実施項目を省いてしまう。	第20-7表(6)	1.00E-02	5				1.00E-02		1.00E-02
A-4	間違った手動弁を選択する。	第20-12表(2)	3.00E-03	3				3.00E-03		3.00E-03

図4.4-8 人間信頼性解析結果(HRA-1)

1.00E-02	1.00E-03	1.00E-05
\$ - 1	A-C	失敗
	成功	
5.00E-01	1.00E-03	4.95E-04
\$ - 2	A-C	失敗
	成功	
1.00E-03	4.95E-04	
A-C	失敗	
	成功	

操作手順		
A 膨張式温度計の誤設定		
分岐番号	エラー番号	人的過誤率
	\$ - 1	1.00E-02
	\$ - 2	5.00E-01
	A-C	1.00E-03
Total		1.00E-03 /d

人的過誤率表

エラー番号	エラー内容	表番号 項目番号 (NUREG/CR-1278)	NHEP	EF	タギング レベル 因子	ストレ ス・経験 因子	回復 要素	BHEP ※1	従属性	CHEP ※2
\$ - 1	運転管理に従わず、手順書を使用しない。	第20-6表(3)	1.00E-02	3				1.00E-02		1.00E-02
\$ - 2	運転管理に従わず、チェックリストを使用しない。	第20-6表(8)	5.00E-01	5				5.00E-01		5.00E-01
A - 2	スイッチを間違った方向に操作する。	第20-12表(9)	1.00E-03	10				1.00E-03		1.00E-03

※1
 $BHEP = NHEP * (\text{ストレス} \cdot \text{経験因子}) * (\text{タギングレベル因子}) * [(\text{回復要素}) * (\text{ストレス} \cdot \text{経験因子})]$

※2
 従属性 L Dの場合
 $CHEP = (1+19*BHEP)/20$
 従属性 M Dの場合
 $CHEP = (1+6*BHEP)/7$
 従属性 H Dの場合
 $CHEP = (1+1*BHEP)/2$

図4.4-9 人間信頼性解析結果 (HRA-2)

5.00E-02	3.00E-03	1.50E-04
\$ - 1	A-C	失敗
	成功	
5.00E-01	3.00E-03	1.43E-03
\$ - 2	A-C	失敗
	成功	
3.00E-03	1.43E-03	
A-C	失敗	
	成功	

操作手順		
A 校正作業後の熱電対端子の接続		
分歧番号	エラー番号	人的過誤率
\$ - 1	\$-1	5.00E-02
\$ - 2	\$-2	5.00E-01
A-C	A-1	3.00E-03
Total		3.00E-03 /d

人的過誤率表

エラー番号	エラー内容	表番号 項目番号 (IUREC/CR-1278)	NHEP	EF	タギングレベル因子	ストレス・経験因子	回復要素	BHEP ※1	従属性	CHEP ※2
\$ - 1	運転管理に従わず、手順書を使用しない。	第20- 6表 (6)	5.00E-02	5				5.00E-02		5.00E-02
\$ - 2	運転管理に従わず、チェックリストを使用しない。	第20- 6表 (8)	5.00E-01	5				5.00E-01		5.00E-01
A - 1	コネクターを間違って接続する。	第20-12表 (13)	3.00E-03	3				3.00E-03		3.00E-03

※ 1 BHEP=NHEP* (ストレス・経験因子) * (タギングレベル因子) * [(回復要素) * (ストレス・経験因子)]

※ 2 従属性 L Dの場合
 CHEP=(1+19*BHEP)/20
 従属性 M Dの場合
 CHEP=(1+6*BHEP)/7
 従属性 H Dの場合
 CHEP=(1+1*BHEP)/2

図4.4-10 人間信頼性解析結果(HRA-3)

		5.00E-06	5.00E-06	
A - 1		失敗		
1.00E-02	4.00E-03	5.02E-01	5.00E-01	1.00E-05
\$ - 1	B - O (1)	C - O (1)	D - O (1)	失敗
			7.50E-01	7.53E-06
			D - C (1)	失敗
			成功	
		7.50E-01	5.00E-01	7.47E-06
		C - C (1)	D - O (1)	失敗
		成功	7.50E-01	5.60E-06
			D - C (1)	失敗
			成功	
2.44E-03	5.02E-01	5.00E-01	6.10E-06	
B - C (1)	C - O (1)	D - O (1)	失敗	
成功			7.50E-01	4.57E-06
			D - C (1)	失敗
			成功	
	7.50E-01	5.00E-01	4.54E-06	
	C - C (1)	D - O (1)	失敗	
成功			7.50E-01	3.40E-06
			D - C (1)	失敗
			成功	
5.00E-01	4.00E-03	5.02E-01	5.02E-01	4.99E-04
\$ - 2	B - O (2)	C - O (2)	D - O (2)	失敗
			7.50E-01	3.71E-04
			D - C (2)	失敗
			成功	
	7.50E-01	5.02E-01	3.71E-04	
	C - C (2)	D - O (2)	失敗	
成功			7.50E-01	2.76E-04
			D - C (2)	失敗
			成功	
2.44E-03	5.02E-01	5.02E-01	3.03E-04	
B - C (2)	C - O (2)	D - O (2)	失敗	
成功			7.50E-01	2.25E-04
			D - C (2)	失敗
			成功	
	7.50E-01	5.02E-01	2.26E-04	
	C - C (2)	D - O (2)	失敗	
成功			7.50E-01	1.68E-04
			D - C (2)	失敗
			成功	
1.20E-03	5.01E-01	5.01E-01	1.49E-04	
B - O (3)	C - O (3)	D - O (3)	失敗	
			7.50E-01	1.11E-04
			D - C (3)	失敗
			成功	
	7.50E-01	5.01E-01	1.11E-04	
	C - C (3)	D - O (3)	失敗	
成功			7.50E-01	8.34E-05
			D - C (3)	失敗
			成功	
2.44E-03	5.01E-01	5.01E-01	3.02E-04	
B - C (3)	C - O (3)	D - O (3)	失敗	
成功			7.50E-01	2.26E-04
			D - C (3)	失敗
			成功	
	7.50E-01	5.01E-01	2.26E-04	
	C - C (3)	D - O (3)	失敗	
成功			7.50E-01	1.69E-04
			D - C (3)	失敗
			成功	

操作手順		
A	2 7 1 T A + 2 0 . 4 の確認	↓
B	加熱蒸気系調節計 (2 7 1 L R C 2 0 . 1) の手動操作による加熱蒸気停止操作	↓
C	加熱蒸気系調節弁 (2 7 1 L R C V 2 0 . 1) の閉操作	↓
D	加熱蒸気系圧空作動弁 (2 7 1 W 1 0 4) の閉操作	

分歧番号	エラー番号	人的過誤率
A - 1	A - 1	5.00E-06
\$ - 1	\$ - 1	1.00E-02
\$ - 2	\$ - 2	5.00E-01
B - O (1)	B - 3	4.00E-03
B - C (1)	B - 4, 5, 6	2.44E-03
C - O (1)	C - 3	5.02E-01
C - C (1)	C - 4, 5	7.50E-01
D - O (1)	D - 3	5.00E-01
D - C (1)	D - 4, 5	7.50E-01
B - O (2)	B - 2	4.00E-03
B - C (2)	B - 4, 5, 6	2.44E-03
C - O (2)	C - 2	5.02E-01
C - C (2)	C - 4, 5	7.50E-01
D - O (2)	D - 2	5.02E-01
D - C (2)	D - 4, 5	7.50E-01
B - O (3)	B - 1	1.20E-03
B - C (3)	B - 4, 5, 6	2.44E-03
C - O (3)	C - 1	5.01E-01
C - C (3)	C - 4, 5	7.50E-01
D - O (3)	D - 1	5.01E-01
D - C (3)	D - 4, 5	7.50E-01
Total		3.87E-03 /d

図4.4-11 人間信頼性解析結果
(HRA-4 警報の確認及び
加熱蒸気停止操作) [1/2]

人的過誤率表

エラー番号	エラー内容	表番号 項目番号 (NUSGCR-127)	NHEP	EF	タギング レベル 因子	ストレ ス・経 験因子	回復要素	BHEP ※ 1	従属性	CHEP ※ 2
\$ -1	運転管理に従わず、手順書を使用しない。	第20- 6表 (5)	1.00E-02	3				1.00E-02		1.00E-02
\$ -2	運転管理に従わず、チェックリストを使用しない。	第20- 6表 (8)	5.00E-01	5				5.00E-01		5.00E-01
A - 1	警報に気付かない。	第20-23表 (1)	1.00E-04	10			5.00E-02 ※ 4	5.00E-06		5.00E-06
B - 1	チェックリストを適切に使用した場合に手順書中の実施項目を省いてしまう。	第20- 7表 (2)	3.00E-03	3		2 ※ 3	1.00E-01 ※ 5	1.20E-03		1.20E-03
B - 2	チェックリストを適切に使用しなかった場合に手順書中の実施項目を省いてしまう。	第20- 7表 (4)	1.00E-02	3		2 ※ 3	1.00E-01 ※ 5	4.00E-03		4.00E-03
B - 3	手順書の使用を怠った場合、手順書中の実施項目を省いてしまう。	第20- 7表 (6)	1.00E-02	5		2 ※ 3	1.00E-01 ※ 5	4.00E-03		4.00E-03
B - 4	間違えたスイッチを選択する。	第20-12表 (2)	3.00E-03	10		2 ※ 3	1.00E-01 ※ 5	1.20E-03		1.20E-03
B - 5	スイッチを間違えた方向に操作する。	第20-12表 (8)	1.00E-04	10		2 ※ 3	1.00E-01 ※ 5	4.00E-05		4.00E-05
B - 6	機器等の状態を完全に変更しきらない。	第20-12表 (12)	3.00E-03	3		2 ※ 3	1.00E-01 ※ 5	1.20E-03		1.20E-03
C - 1	チェックリストを適切に使用した場合に手順書中の実施項目を省いてしまう。	第20- 7表 (2)	3.00E-03	3		2 ※ 3	1.00E-01 ※ 5	1.20E-03	HD	5.01E-01
C - 2	チェックリストを適切に使用しなかった場合に手順書中の実施項目を省いてしまう。	第20- 7表 (4)	1.00E-02	3		2 ※ 3	1.00E-01 ※ 5	4.00E-03	HD	5.02E-01
C - 3	手順書の使用を怠った場合、手順書中の実施項目を省いてしまう。	第20- 7表 (6)	1.00E-02	5		2 ※ 3	1.00E-01 ※ 5	4.00E-03	HD	5.02E-01
C - 4	間違えたスイッチを選択する。	第20-12表 (2)	3.00E-03	10		2 ※ 3	1.00E-01 ※ 5	1.20E-03	HD	5.01E-01
C - 5	スイッチを間違えた方向に操作する。	第20-12表 (8)	1.00E-04	10		2 ※ 3	1.00E-01 ※ 5	4.00E-05	HD	5.00E-01
D - 1	チェックリストを適切に使用した場合に手順書中の実施項目を省いてしまう。	第20- 7表 (2)	3.00E-03	3		2 ※ 3	1.00E-01 ※ 5	1.20E-03	HD	5.01E-01
D - 2	チェックリストを適切に使用しなかった場合に手順書中の実施項目を省いてしまう。	第20- 7表 (4)	1.00E-02	3		2 ※ 3	1.00E-01 ※ 5	4.00E-03	HD	5.02E-01
D - 3	手順書の使用を怠った場合、手順書中の実施項目を省いてしまう。	第20- 7表 (6)	1.00E-02	5		2 ※ 3	1.00E-01 ※ 5	4.00E-03	HD	5.02E-01
D - 4	間違えたスイッチを選択する。	第20-12表 (2)	5.00E-04	10		2 ※ 3	1.00E-01 ※ 5	2.00E-04	HD	5.00E-01
D - 5	スイッチを間違えた方向に操作する。	第20-12表 (8)	1.00E-04	10		2 ※ 3	1.00E-01 ※ 5	4.00E-05	HD	5.00E-01

※ 1 BHEP=NHEP * (ストレス・経験因子) * (タギングレベル因子) * !(回復要素) * (ストレス・経験因子)

※ 2 従属性L Dの場合
CHEP-(1+19*BHEP)/20
従属性M Dの場合
CHEP-(1+6*BHEP)/7
従属性H Dの場合
CHEP-(1+1*BHEP)/2

※ 3 熟練者、比較的高いストレス、ステップバイステップ作業（第20-16表 (4):×2）を想定

※ 4 警報に対する、短期間での単一の点検（第20-22表 (3):0.05）を考慮

※ 5 肩越しの検査（第20-22表 (1):0.1）を考慮

図4.4-11 人間信頼性解析結果
(HRA-4 警報の確認及び加熱蒸気停止操作) [2/2]

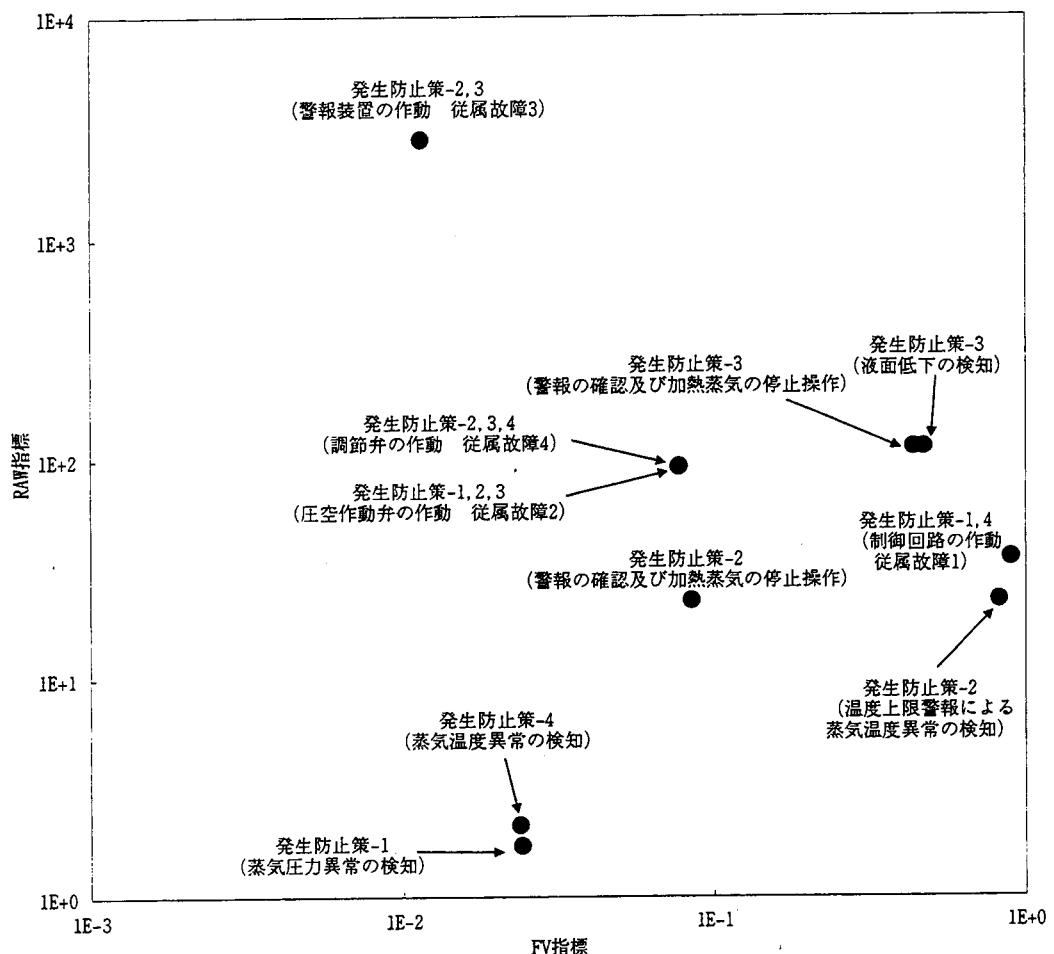


図4.4-12 重要度の把握結果

4.5 高放射性廃液蒸発缶におけるホルムアルデヒドガス発生

4.5.1 概要

高放射性廃液濃縮工程の高放射性廃液蒸発缶では、分離第1サイクル工程の分離第1抽出器からの水相、第1溶媒洗浄器からの溶媒洗浄廃液、及び酸回収工程の酸回収蒸発缶の濃縮液を受入れ、ホルマリン溶液を加えて硝酸を分解しながら加熱濃縮する。

高放射性廃液蒸発缶においてホルマリン溶液を加えて硝酸を分解し、缶内酸濃度を一定に保っている。この際、ホルムアルデヒドガス発生を防止するため、ホルマリン溶液供給端は液浸としている。しかし、何らかの原因により、蒸発缶において過度の液量減少が発生し、ホルマリン溶液供給端が露出すると、ホルムアルデヒドガス発生による爆発の可能性がある。

このため、高放射性廃液蒸発缶におけるホルムアルデヒドガス発生による爆発の発生防止策として以下の対策を講じている(図4.5-1)。

- 定期的に高放射性廃液蒸発缶内の液位を確認し、液位が通常範囲を超えて低下した場合は、運転を停止する。
- 高放射性廃液蒸発缶の液面下限警報(LA-)により、蒸発缶液位の異常低下を検知し、運転員の対応により蒸発缶の運転を停止する。

なお、ホルムアルデヒドガスが発生した場合でも、機器及び配管を接地することにより静電気の蓄積による放電の発生を防止しており、着火源を排除していることから、直ちに爆発に至るものではない。

4.5.2 評価結果

3.の評価手法に従い、事故発生防止策の特徴及び重要度の把握を以下のように実施した。

1) イベントツリーの作成

図4.5-2に作成したイベントツリーを示す。

起因事象として、高放射性廃液蒸発缶への廃液供給量の減少を考慮した。

事故発生防止策として、送液側及び受入側運転員による定期的なログシート記入に伴う検知・対応、及び蒸発缶内液面下限警報に伴う運転員の対応を考慮した。

2) フォールトツリーの作成

イベントツリーで考慮した起因事象及び各発生防止策に対し、図4.5-3,4.5-4に示すフォールトツリーを作成した。起因事象の高放射性廃液蒸発缶への廃液供給量の低下については、配管及びストレーナの閉塞、圧空弁の故障、運転員の誤操作等を考慮した。

3) 定量化

① 起因事象発生確率の算出

定量化に用いた故障率を表4.5-1に示す。配管及びストレーナの閉塞に関しては、東海再処理施設の設備保全履歴より、蒸発缶の運転時間と故障回数から算出した。また、調節計の誤設定等については、図4.5-5,4.5-6に示す人間信頼性解析を実施することにより、作業1回あたりの失敗確率を算出し、それと工程運転中の操作頻度を想定し時間当たりの発生確率を算出した。

② 発生防止策の失敗確率の算出

各発生防止策の定量化に用いた故障率を表 4.5-1 に示す。機器の故障に関しては、主に公開データの値を用いており、ヒューマンエラーに関する部分は図 4.5-7 ~ 4.5-9 に示す人間信頼性解析を実施した。また、圧力検出配管の閉塞に関しては、東海再処理施設の設備保全履歴より算出した。

③ イベントツリーの定量化

①、②で算出した値を用い、イベントツリーの定量化を行った。この結果、高放射性廃液蒸発缶におけるホルムアルデヒドガス発生の発生確率は、 $7.64E-05(y)$ となった。なお、ホルムアルデヒドガスが発生した場合でも、機器及び配管を接地することにより静電気の蓄積による放電の発生を防止しており、着火源を排除していることから、直ちに爆発に至るものではない。

4) 重要度評価

定量化したイベントツリーの各発生防止策の重要度を把握するため、重要度評価を実施した。重要度の把握結果を図 4.5-10 に示す。同結果より、FV,RAW の各指標において以下のような特徴が見られた。

① FV 指標

液位下限警報による蒸発缶液位低下の検知及びホルマリン供給停止操作が相対的に高い値を示した。

② RAW 指標

ホルマリン供給停止操作が相対的に高い値を示した。

4.5.3 発生防止策の特徴及び重要度の把握結果

PSA 手法を用いた事故シーケンスの定量化及び同結果に基づく重要度の把握を実施した結果、以下のような知見が得られた。

事故発生防止策の特徴としては、事象の進展が比較的緩慢であることから、運転員による対応操作に期待できる点である。まず、2時間毎のログシート記入時に異常を見出し、その後運転員が手順書に従って対応することができる。仮にログシート記入時に運転員が異常を見逃したとしても、液面下限警報により蒸発缶内液位の異常低下を検知でき、手順書に従った操作を実施することにより事故を未然に防止することが可能である。

重要度の把握結果より、高放射性廃液蒸発缶におけるホルムアルデヒドガス発生の防止上、液面下限警報による蒸発缶の液位低下の検知及びホルマリン供給停止操作が重要な役割を果たしていることがわかった。

4.5.4 まとめ

高放射性廃液蒸発缶の液位が異常に低下した場合の、高放射性廃液蒸発缶におけるホルムアルデヒドガス発生の可能性について PSA 手法を用いた事故発生防止策の特徴及び重要度の把握を実施した結果、以下の知見が得られた。

- ・ 高放射性廃液蒸発缶におけるホルムアルデヒドガス発生の発生確率は、 $7.64E-05(y)$ となった。なお、ホルムアルデヒドガスが発生した場合でも、機器及び配管を接地することにより静電気の蓄積による放電の発生を防止しており、着火源を排除していることから、直ちに爆発に至るものではない。
- ・ 事故発生防止策の特徴として、多重の事故発生防止策の存在が明らかとなった。

- ・重要度評価を実施した結果、液面下限警報による蒸発缶の液位低下の検知及びホルマリン供給停止操作が重要な役割を果たしていることが明らかとなった。

表4.5-1 故障率・過誤率一覧表

基事象番号	不全モード		故障率データ			近隣操作回数、 使用回数 [/y]	試験間隔、点検 周期 [h]	故障率
	機器グループ種別	故障モード	[/h]	[/d]	出典			
FT-1 01	高放射性廃液配管	閉塞	5.66E-03	-	東海再処理施設の実績			5.66E-03 /h
FT-1 02	圧空作動弁	故障	1.00E-05	-	NUREG/CR-2815			1.00E-05 /h
FT-1 03	ストレーナ	閉塞	7.45E-06	-	東海再処理施設の実績			7.45E-06 /h
FT-1 04	運転員	バイパス手動弁の誤操作による開	-	3.00E-03	NUREG/CR-1278 第20-13表	10	7200	4.17E-06 /h
FT-1 05	運転員	調節計の誤設定	-	1.00E-03	図4.5-5 HRA-1	60	7200	8.33E-06 /h
FT-1 06	運転員	手動弁の誤操作による閉	-	1.96E-02	図4.5-6 HRA-2	60	7200	1.63E-04 /h
FT-1 07	運転員	圧空作動弁の誤操作による閉	-	5.00E-04	NUREG/CR-1278 第20-12表	60	7200	4.17E-06 /h
FT-2 01	圧力スイッチ	故障	-	1.01E-06	IEEE std-500(1984)			1.01E-06 /d
FT-2 02	検出配管	閉塞	4.17E-03	-	東海再処理施設の実績		2	4.17E-03 /d
ET 01	運転員	ログシート記入による液位低下の検知	-	4.93E-03	図4.5-7 HRA-3			4.93E-03 /d
ET 02	運転員	ログシート記入による液位低下の検知	-	1.29E-02	図4.5-8 HRA-4			1.29E-02 /d
ET 03	運転員	ホルマリン供給及び加熱蒸気の停止操作	-	3.37E-04	図4.5-9 HRA-5			3.37E-04 /d
ET 04	ブザー表示灯警報回路	故障	1.02E-06	-	IEEE std-500(1984)		8	4.08E-06 /d
ET 05	警報の確認	確認失敗	-	5.00E-06	NUREG/CR1278 第20-23表(1) (RF: 0.05, 第20-22表(3))			5.00E-06 /d

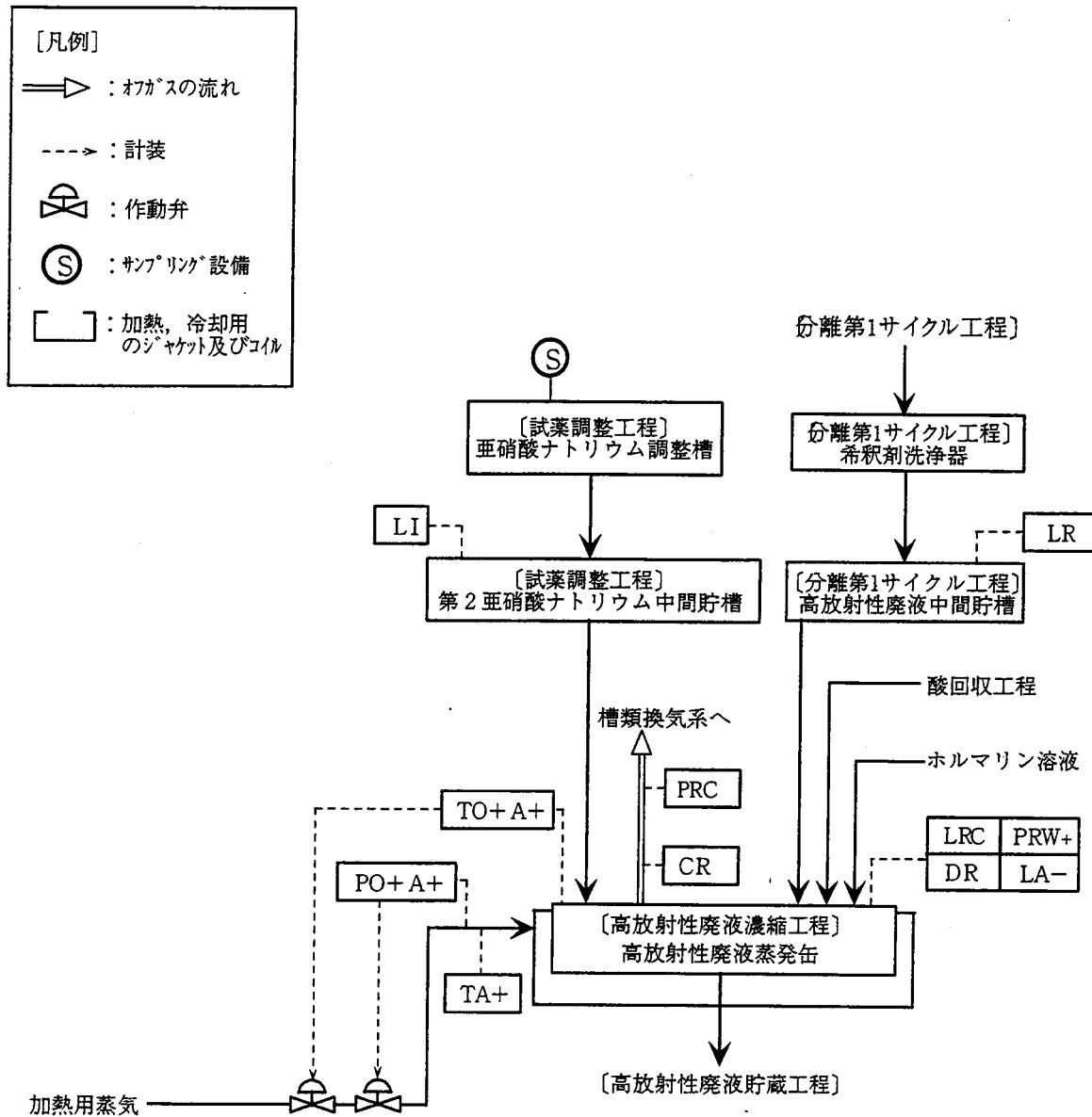


図 4.5-1 発生防止策概要図

起因事象	発生防止策-1			発生防止策-2				ホルムアルデヒドガス発生 発生確率の可能性
	ログシート記入による運転員の蒸発缶液位低下の検知	受入側運転員による検知	送液側運転員による検知	ホルマリン供給停止操作及び加熱蒸気供給停止操作	LA-による蒸発缶液位低下の検知	警報装置の作動	警報の確認	
蒸発缶への廃液供給量の低下								
5.86E-03 (/h)	成功	成功						なし
			失敗	成功	成功	失敗		なし
			3.37E-04			3.37E-04		有り 6.58E-10
						失敗		有り 9.77E-12
						5.00E-06		有り 7.97E-12
						失敗		有り 8.19E-09
						4.08E-06		なし
						失敗		なし
						4.17E-03		なし
4.95E-03	失敗	成功	成功					有り 3.24E-12
	3.37E-04							有り 4.80E-14
								有り 3.92E-14
								有り 4.03E-11
1.29E-02	失敗	成功	成功					なし
	1.29E-02							有り 1.26E-10
								有り 1.87E-12
								有り 1.53E-12
								有り 1.57E-09
							合計	1.06E-08

事象発生確率 7.64E-05 (/v)

イベントツリーの分岐確率算出根拠

事象の種類	基本確率	単位	基本確率 算出根拠	従属性	事象発生確率 (分岐確率)
起因事象	5.86E-03	/h	図4.5-3 FT-1	-	5.86E-03 /h
発生防止策-1 ログシート記入による運転員の蒸発缶液位低下の検知 (受入側運転員による検知)	4.95E-03	/d	表4.5-1 ET 01	-	4.95E-03 /d
ログシート記入による運転員の蒸発缶液位低下の検知 (送液側運転員による検知)	1.29E-02	/d	表4.5-1 ET 02	-	1.29E-02 /d
ホルマリン及び加熱蒸気供給停止操作	3.37E-04	/d	表4.5-1 ET 03	-	3.37E-04 /d
発生防止策-2 LA-20.2による蒸発缶液位低下の検知	4.17E-03	/d	図4.5-4 FT-2	-	4.17E-03 /d
警報装置の作動	4.08E-06	/d	表4.5-1 ET 04	-	4.08E-06 /d
警報の確認	5.00E-06	/d	表4.5-1 ET 05	-	5.00E-06 /d
ホルマリン及び加熱蒸気供給停止操作	3.37E-04	/d	表4.5-1 ET 03	-	3.37E-04 /d

図4.5-2 イベントツリー

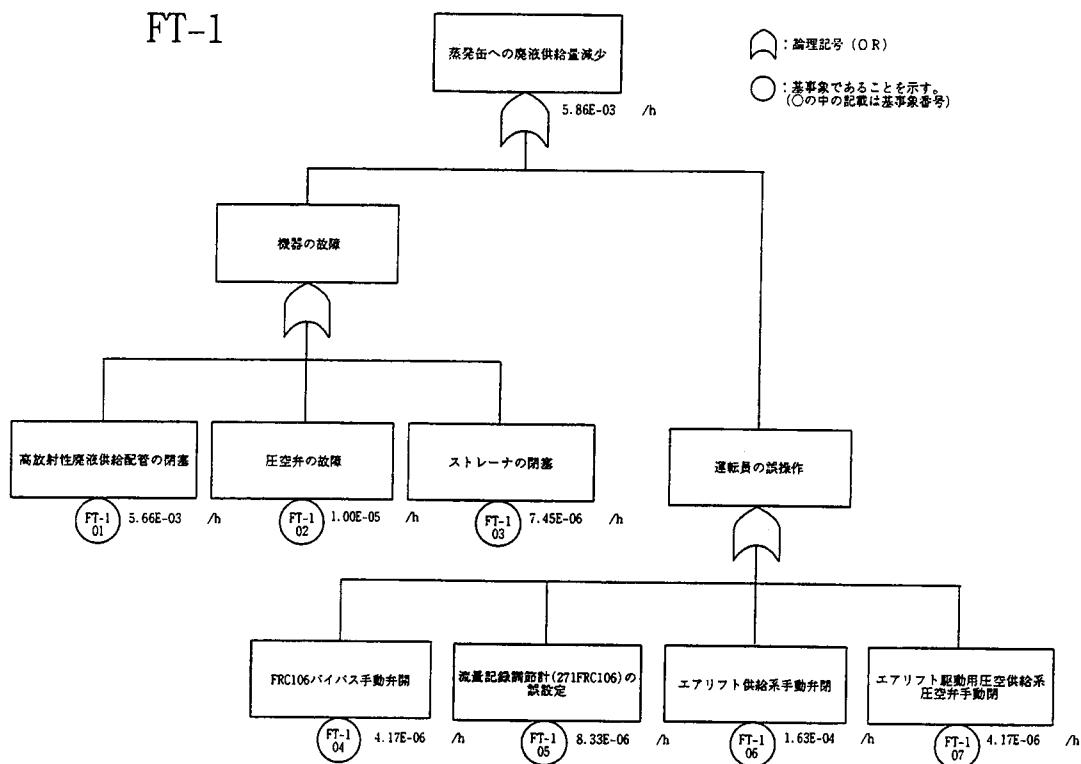


図4.5-3 起因事象のフォールトツリー

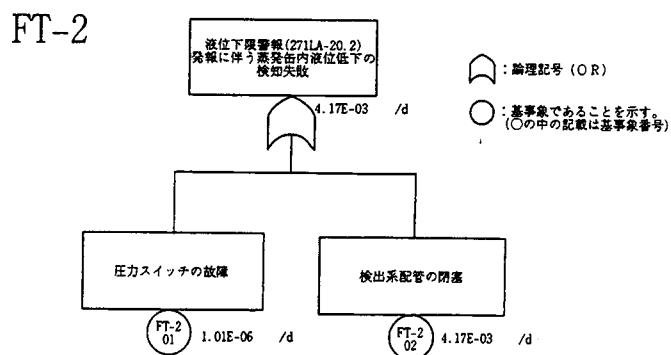


図4.5-4 発生防止策-2のフォールトツリー

1.00E-02	1.00E-03	1.00E-05
\$ - 1	A-C	失敗
	成功	
5.00E-01	1.00E-03	4.95E-04
\$ - 2	A-C	失敗
	成功	
1.00E-03	4.95E-04	
A-C	失敗	
	成功	

操作手順		
A 調節計の誤設定		
分岐番号	エラー番号	人的過誤率
\$ - 1	\$ - 1	1.00E-02
\$ - 2	\$ - 2	5.00E-01
A-C	A-2	1.00E-03
Total		1.00E-03 /d

人的過誤率表

エラー番号	エラー内容	表番号 項目番号 (NUREG-CP-1278)	NHEP	EF	タギング レベル 因子	ストレ ス・経験 因子	回復 要素	BHEP ※ 1	従属性	CHEP ※ 2
\$ - 1.	運転管理に従わず、手順書を使用しない。	第20- 6表 (3)	1.00E-02	3				1.00E-02		1.00E-02
\$ - 2	運転管理に従わず、チェックリストを使用しない。	第20- 6表 (8)	5.00E-01	5				5.00E-01		5.00E-01
A - 2	スイッチを間違った方向に操作する。	第20-12表 (9)	1.00E-03	10				1.00E-03		1.00E-03

※ 1
 $BHEP = NHEP * (\text{ストレス} \cdot \text{経験因子}) * (\text{タギングレベル因子}) * [(\text{回復要素}) * (\text{ストレス} \cdot \text{経験因子})]$

※ 2
 従属性 LD の場合
 $CHEP = (1+19*BHEP)/20$
 従属性 MD の場合
 $CHEP = (1+6*BHEP)/7$
 従属性 HD の場合
 $CHEP = (1+1*BHEP)/2$

図4.5-5 人間信頼性解析結果 (HRA-1)

5.00E-02	1.00E-02	5.00E-04	操作手順		
\$ -1	A-0(1)	失敗	A 運転員による手動弁の開		
	1.30E-02	6.42E-04			
	A-C	失敗			
	成功				
5.00E-01	1.00E-02	4.75E-03			
\$ -2	A-0(2)	失敗			
	1.30E-02	6.10E-03			
	A-C	失敗			
	成功				
3.00E-03	1.43E-03		Total	1.96E-02	/d
A-0(3)	失敗				
1.30E-02	6.14E-03				
A-C	失敗				
	成功				

人的過誤率表

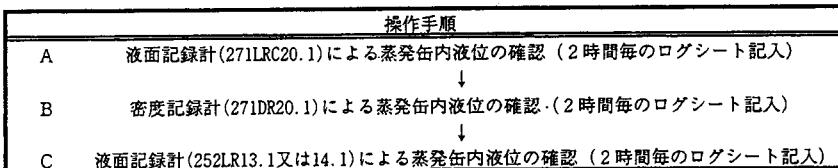
エラー番号	エラー内容	表番号 項目番号 (M&SLCR-127)	NHEP	EF	タギング レベル 因子	ストレ ス・経験 因子	回復要素	BHEP ※1	従属性	CHEP ※2
\$ - 1	運転管理に従わず、手順書を使用しない。	第20- 6表 (6)	5.00E-02	5				5.00E-02		5.00E-02
\$ - 2	運転管理に従わず、チェックリストを使用しない。	第20- 6表 (8)	5.00E-01	5				5.00E-01		5.00E-01
A - 1	チェックリストを適切に使用した場合に手順書の実施項目を省いてしまう。	第20- 6表 (2)	3.00E-03	3				3.00E-03		3.00E-03
A - 2	チェックリストを適切に使用しなかった場合に手順書の実施項目を省いてしまう。	第20- 6表 (4)	1.00E-02	3				1.00E-02		1.00E-02
A - 3	手順書の使用を怠った場合、手順書中の実施項目を省いてしまう。	第20- 7表 (6)	1.00E-02	5				1.00E-02		1.00E-02
A - 4	間違った手動弁を選択する。	第20-12表 (2)	3.00E-03	3				3.00E-03		3.00E-03

図4.5-6 人間信頼性解析結果(HRA-2)

$1.00E-03$	$1.00E-03$		
$\$ - 1$	F		
$3.00E-03$	$5.02E-01$	$1.45E-01$	$2.19E-04$
A-O	B-O	C-O	F
		$2.72E-01$	$3.49E-04$
		C-C	F
		S	
	$7.52E-01$	$1.45E-01$	$1.63E-04$
	B-C	C-O	F
	S	$2.72E-01$	$2.61E-04$
		C-C	F
		S	
$8.98E-03$	$5.02E-01$	$1.45E-01$	$6.52E-04$
A-C	B-O	C-O	F
S		$2.72E-01$	$1.04E-03$
		C-C	F
		S	
	$7.52E-01$	$1.45E-01$	$4.88E-04$
	B-C	C-O	F
	S	$2.72E-01$	$7.80E-04$
		C-C	F
		S	

\$ - 1	\$-1	1.00E-03
A - O	A-1	3.00E-03
A - C	A-2.3	8.98E-03
B - O	A-1	5.02E-01
B - C	A-2.3	7.52E-01
C - O	A-1	1.45E-01
C - C	A-2.3	2.72E-01

Total	4.95E-03
-------	----------



人的過誤率表

エラー番号	エラー内容	表番号 項目番号 (NHEP/C-1278)	NHEP	EF	タギング レベル 因子	ストレス・経験因子	回復要要素	BHEP ※1	従属性	CHEP ※2
\$-1	タスクの開始に失敗する。	第20-8表(1)	1.00E-03	3				1.00E-03		1.00E-03
A-1	チェックリストを適切に使用した場合に手順書中の実施項目を省いてしまう。	第20-7表(2)	3.00E-03	3				3.00E-03		3.00E-03
A-2	間違えた計器のログシートをとる。	第20-9表(4)	3.00E-03	3				3.00E-03		3.00E-03
A-3	値のチェックミス	第20-11表(6)	6.00E-03	3				6.00E-03		6.00E-03
B-1	チェックリストを適切に使用した場合に手順書中の実施項目を省いてしまう。	第20-7表(2)	3.00E-03	3				3.00E-03	HD	5.02E-01
B-2	間違えた計器のログシートをとる。	第20-9表(4)	3.00E-03	3				3.00E-03	HD	5.02E-01
B-3	値のチェックミス	第20-11表(6)	6.00E-03	3				6.00E-03	HD	5.03E-01
C-1	チェックリストを適切に使用した場合に手順書中の実施項目を省いてしまう。	第20-7表(2)	3.00E-03	3				3.00E-03	MD	1.45E-01
C-2	間違えた計器のログシートをとる。	第20-9表(4)	3.00E-03	3				3.00E-03	MD	1.45E-01
C-3	値を読み間違える。	第20-11表(6)	6.00E-03	3				6.00E-03	MD	1.48E-01

1 BHEP=NHEP (ストレス・経験因子) * (タギングレベル因子) * { (回復要素) * (ストレス・経験因子) }

※2 従属性 L D の場合
 $CHEP = (1+19*BHEP)/20$
 従属性 M D の場合
 $CHEP = (1+6*BHEP)/7$
 従属性 H D の場合
 $CHEP = (1+1*BHEP)/2$

図4-5-7 人間信頼性解析結果 (HRA-3)

1.00E-03	1.00E-03
\$ - 1	F
3.00E-03	3.00E-03
A - O	F
8.98E-03	8.95E-03
A - C	F
S	

\$ - 1	\$-1	1.00E-03
A - O	A-1	3.00E-03
A - C	A-2, 3	8.98E-03
Total		1.29E-02

操作手順	
A 液面記録計(252LR13.1又は14.1)による蒸発缶内液位の確認(2時間毎のログシート記入)	

人的過誤率表

エラー番号	エラー内容	表番号 項目番号 (NUREG-04-1276)	NHEP	EF	タギング レベル 因子	ストレス ・経験 因子	回復要素	BHEP ※1	従属性	CHEP ※2
\$ - 1	タスクの開始に失敗する。	第20-8表(1)	1.00E-03	3				1.00E-03		1.00E-03
A - 1	チェックリストを適切に使用した場合に手順書中の実施項目を省いてしまう。	第20-7表(2)	3.00E-03	3				3.00E-03		3.00E-03
A - 2	間違えた計器のログシートをとる。	第20-9表(4)	3.00E-03	3				3.00E-03		3.00E-03
A - 3	値のチェックミス	第20-11表(6)	6.00E-03	3				6.00E-03		6.00E-03

※1 $BHEP = NHEP * (\text{ストレス} \cdot \text{経験因子}) * (\text{タギングレベル因子}) * [(\text{回復要素}) * (\text{ストレス} \cdot \text{経験因子})]$

※2
 従属性L Dの場合
 $CHEP = (1+19*BHEP)/20$
 従属性M Dの場合
 $CHEP = (1+6*BHEP)/7$
 従属性H Dの場合
 $CHEP = (1+1*BHEP)/2$

図4.5-8 人間信頼性解析結果 (HRA-4)

	$5.00E-03$	$2.00E-02$	$5.10E-01$	$5.10E-01$	$5.10E-01$	$5.10E-01$	$5.38E-02$	$5.02E-01$	$5.02E-01$	$4.30E-06$
S - 1	A - O (1)	B - O (1)	C - O (1)	D - O (1)	E - O (1)	F - O (1)	G - O (1)	H - O (1)	I - O (1)	J - O (1) F
	2.44E-03	7.51E-01	7.51E-01	7.51E-01	7.51E-01	7.51E-01	7.51E-01	1.45E-01	7.50E-01	7.50E-01 3.20E-06
	A - C (1)	B - C (1)	C - C (1)	D - C (1)	E - C (1)	F - C (1)	G - C (1)	H - C (1)	I - C (1)	J - C (1) F
S	S	S	S	S	S	S	S	S	S	S
$5.00E-01$	$4.00E-03$	$5.02E-01$	$5.02E-01$	$5.02E-01$	$5.02E-01$	$5.02E-01$	$5.38E-02$	$5.02E-01$	$5.02E-01$	$1.21E-04$
S - 2	A - O (2)	B - O (2)	C - O (2)	D - O (2)	E - O (2)	F - O (2)	G - O (2)	H - O (2)	I - O (2)	J - O (2) F
	2.44E-03	7.51E-01	7.51E-01	7.51E-01	7.51E-01	7.51E-01	7.51E-01	1.45E-01	7.50E-01	7.50E-01 9.03E-05
	A - C (2)	B - C (2)	C - C (2)	D - C (2)	E - C (2)	F - C (2)	G - C (2)	H - C (2)	I - C (2)	J - C (2) F
S	S	S	S	S	S	S	S	S	S	S
$1.20E-03$	$5.01E-01$	$5.01E-01$	$5.01E-01$	$5.01E-01$	$5.01E-01$	$5.01E-01$	$5.11E-02$	$5.01E-01$	$5.01E-01$	$6.74E-05$
A - O (3)	B - O (3)	C - O (3)	D - O (3)	E - O (3)	F - O (3)	G - O (3)	H - O (3)	I - O (3)	J - O (3)	J - O (3) F
	2.44E-03	7.51E-01	7.51E-01	7.51E-01	7.51E-01	7.51E-01	7.51E-01	1.45E-01	7.50E-01	7.50E-01 5.04E-05
	A - C (3)	B - C (3)	C - C (3)	D - C (3)	E - C (3)	F - C (3)	G - C (3)	H - C (3)	I - C (3)	J - C (3) F
S	S	S	S	S	S	S	S	S	S	S
操作手順										
A	ホルマリン供給系手動弁 (271W106) の開操作									
	↓									
B	ホルマリン供給系手動弁 (271W452) の閉操作									
	↓									
C	ホルマリン供給系手動弁 (271W483) の閉操作									
	↓									
D	ホルマリン供給系手動弁 (271W484) の閉操作									
	↓									
E	ホルマリン供給系手動弁 (271W455) の閉操作									
	↓									
F	ホルマリン供給系手動弁 (271W486) の閉操作									
	↓									
G	ホルマリン供給系手動弁 (271W497) の閉操作									
	↓									
H	加熱蒸気系調節弁 (271LRC 20. 1) の手動操作による加熱蒸気停止操作									
	↓									
I	加熱蒸気系調節弁 (271LRCV 20. 1) の閉操作									
	↓									
J	加熱蒸気系空手動弁 (271W104) の閉操作									
	↓									
分析結果										
	ヒー-音響	人の過誤	ヒー-音響	人の過誤	ヒー-音響	人の過誤	ヒー-音響	人の過誤	ヒー-音響	人の過誤
S - 1	I - 1	$5.00E-03$	A - O (2)	A - 2	$4.00E-03$	A - O (3)	A - 1	$1.20E-03$		
S - 2	I - 2	$5.00E-01$	A - C (2)	A - 4, 5, 6	$2.44E-03$	A - C (3)	A - 4, 5, 6	$2.44E-03$		
A - O (1)	A - 3	$2.44E-03$	B - O (2)	B - 2	$5.02E-01$	B - O (3)	B - 1	$5.01E-01$		
A - C (1)	A - 5, 6	$2.44E-03$	B - C (2)	B - 5	$7.51E-01$	B - C (3)	B - 4, 5	$7.51E-01$		
B - O (1)	B - 3	$5.00E-01$	C - O (2)	C - 2	$5.02E-01$	C - O (3)	C - 1	$5.01E-01$		
B - C (1)	B - 4, 5	$7.51E-01$	C - C (2)	C - 5	$7.51E-01$	C - C (3)	C - 4, 5	$7.51E-01$		
C - O (1)	C - 3	$5.00E-01$	D - O (2)	D - 2	$5.02E-01$	D - O (3)	D - 1	$5.01E-01$		
C - C (1)	C - 4, 5	$7.51E-01$	D - C (2)	D - 5	$7.51E-01$	D - C (3)	D - 4, 5	$7.51E-01$		
D - O (1)	D - 3	$5.00E-01$	E - O (2)	E - 2	$5.02E-01$	E - O (3)	E - 1	$5.01E-01$		
D - C (1)	D - 4, 5	$7.51E-01$	E - C (2)	E - 5	$7.51E-01$	E - C (3)	E - 4, 5	$7.51E-01$		
E - O (1)	E - 3	$5.00E-01$	F - O (2)	F - 2	$5.02E-01$	F - O (3)	F - 1	$5.01E-01$		
F - C (1)	F - 4, 5	$7.51E-01$	F - C (2)	F - 5	$7.51E-01$	F - C (3)	F - 4, 5	$7.51E-01$		
F - O (1)	F - 3	$5.00E-01$	G - O (2)	G - 2	$5.02E-01$	G - O (3)	G - 1	$5.01E-01$		
F - C (1)	F - 4, 5	$7.51E-01$	G - C (2)	G - 5	$7.51E-01$	G - C (3)	G - 4, 5	$7.51E-01$		
G - O (1)	G - 3	$5.00E-01$	H - O (2)	H - 2	$5.38E-02$	H - O (3)	H - 1	$5.11E-02$		
G - C (1)	G - 4, 5	$7.51E-01$	H - C (2)	H - 5, 6	$1.45E-01$	H - C (3)	H - 4, 5, 6	$1.45E-01$		
H - O (1)	H - 3	$5.38E-02$	I - O (2)	I - 2	$5.02E-01$	I - O (3)	I - 1	$5.01E-01$		
H - C (1)	H - 4, 5	$1.45E-01$	I - C (2)	I - 4, 5	$7.50E-01$	I - C (3)	I - 4, 5	$7.50E-01$		
I - O (1)	I - 3	$5.02E-01$	J - O (2)	J - 2	$5.02E-01$	J - O (3)	J - 1	$5.01E-01$		
I - C (1)	I - 4, 5	$7.50E-01$	J - C (2)	J - 4, 5	$7.50E-01$	J - C (3)	J - 4, 5	$7.50E-01$		
	$-O (1)$	-3	$5.02E-01$							
	$-C (1)$	$-4, 5$	$7.50E-01$							
	Total									3.37E-04

図4.5-9 人間信頼性解析結果 (HRA-5) [1/2]

人的過誤率表

エラー番号	エラー内容	表番号 項目番号 (HRA-5-12)	NHEP	EF	タギング レベル 因子	ストレ ス・経験 因子	回復要素	BHEP #1	従属性	CHEP #2
S-1	運転管理に従わず、手順書を使用しない。	第20-5表(4)	5.00E-03	3				5.10E-03		5.00E-03
S-2	運転管理に従わず、チェックリストを使用しない。	第20-5表(8)	5.00E-01	5				5.00E-01		5.00E-01
A-1	チェックリストを適切に使用した場合に手順書中の実施項目を省いてしまう。	第20-7表(2)	3.00E-03	3		2※3	0.1※4	1.20E-03	1.20E-03	
A-2	チェックリストを適切に使用しなかった場合に手順書中の実施項目を省いてしまう。	第20-7表(4)	1.00E-02	3		2※3	0.1※4	4.00E-03	4.00E-03	
A-3	手順書の使用を怠った場合、手順書中の実施項目を省いてしまう。	第20-7表(6)	5.00E-02	5		2※3	0.1※4	2.00E-02	2.00E-02	
A-4	間違えたスイッチを選択する。	第20-12表(2)	3.00E-03	10		2※3	0.1※4	1.20E-03	1.20E-03	
A-5	スイッチを間違えた方向に操作する。	第20-12表(8)	1.00E-04	10		2※3	0.1※4	4.00E-05	4.00E-05	
A-6	機器等の状態を完全に察知しない。	第20-12表(12)	3.00E-03	3		2※3	0.1※4	1.20E-03	1.20E-03	
B-1	チェックリストを適切に使用した場合に手順書中の実施項目を省いてしまう。	第20-7表(2)	3.00E-03	3		2※3	0.1※4	1.20E-03	HD	5.01E-01
B-2	チェックリストを適切に使用しなかった場合に手順書中の実施項目を省いてしまう。	第20-7表(4)	1.00E-02	3		2※3	0.1※4	4.00E-03	HD	5.02E-01
B-3	手順書の使用を怠った場合、手順書中の実施項目を省いてしまう。	第20-7表(6)	5.00E-02	5		2※3	0.1※4	2.00E-02	HD	5.10E-01
B-4	間違えた手動弁を選択する。(ラベリングは明瞭、周囲に類似の弁がある。)	第20-13表(2)	3.00E-03	3		2※3	0.1※4	1.20E-03	HD	5.01E-01
B-5	手動弁の操作を失敗する。 (上昇システム、圧度表示ともになし)	第20-14表(4)	1.00E-02	3		2※3	0.1※4	4.00E-03	HD	5.02E-01
C-1	チェックリストを適切に使用した場合に手順書中の実施項目を省いてしまう。	第20-7表(2)	3.00E-03	3		2※3	0.1※4	1.20E-03	HD	5.01E-01
C-2	チェックリストを適切に使用しなかった場合に手順書中の実施項目を省いてしまう。	第20-7表(4)	1.00E-02	3		2※3	0.1※4	4.00E-03	HD	5.02E-01
C-3	手順書の使用を怠った場合、手順書中の実施項目を省いてしまう。	第20-7表(6)	5.00E-02	5		2※3	0.1※4	2.00E-02	HD	5.10E-01
C-4	間違えた手動弁を選択する。(ラベリングは明瞭、周囲に類似の弁がある。)	第20-13表(2)	3.00E-03	3		2※3	0.1※4	1.20E-03	HD	5.01E-01
C-5	手動弁の操作を失敗する。 (上昇システム、圧度表示ともになし)	第20-14表(4)	1.00E-02	3		2※3	0.1※4	4.00E-03	HD	5.02E-01
D-1	チェックリストを適切に使用した場合に手順書中の実施項目を省いてしまう。	第20-7表(2)	3.00E-03	3		2※3	0.1※4	1.20E-03	HD	5.01E-01
D-2	チェックリストを適切に使用しなかった場合に手順書中の実施項目を省いてしまう。	第20-7表(4)	1.00E-02	3		2※3	0.1※4	4.00E-03	HD	5.02E-01
D-3	手順書の使用を怠った場合、手順書中の実施項目を省いてしまう。	第20-7表(6)	5.00E-02	5		2※3	0.1※4	2.00E-02	HD	5.10E-01
D-4	間違えた手動弁を選択する。(ラベリングは明瞭、周囲に類似の弁がある。)	第20-13表(2)	3.00E-03	3		2※3	0.1※4	1.20E-03	HD	5.01E-01
D-5	手動弁の操作を失敗する。 (上昇システム、圧度表示ともになし)	第20-14表(4)	1.00E-02	3		2※3	0.1※4	4.00E-03	HD	5.02E-01
E-1	チェックリストを適切に使用した場合に手順書中の実施項目を省いてしまう。	第20-7表(2)	3.00E-03	3		2※3	0.1※4	1.20E-03	HD	5.01E-01
E-2	チェックリストを適切に使用しなかった場合に手順書中の実施項目を省いてしまう。	第20-7表(4)	1.00E-02	3		2※3	0.1※4	4.00E-03	HD	5.02E-01
E-3	手順書の使用を怠った場合、手順書中の実施項目を省いてしまう。	第20-7表(6)	5.00E-02	5		2※3	0.1※4	2.00E-02	HD	5.10E-01
E-4	間違えた手動弁を選択する。(ラベリングは明瞭、周囲に類似の弁がある。)	第20-13表(2)	3.00E-03	3		2※3	0.1※4	1.20E-03	HD	5.01E-01
E-5	手動弁の操作を失敗する。 (上昇システム、圧度表示ともになし)	第20-14表(4)	1.00E-02	3		2※3	0.1※4	4.00E-03	HD	5.02E-01
F-1	チェックリストを適切に使用した場合に手順書中の実施項目を省いてしまう。	第20-7表(2)	3.00E-03	3		2※3	0.1※4	1.20E-03	HD	5.01E-01
F-2	チェックリストを適切に使用しなかった場合に手順書中の実施項目を省いてしまう。	第20-7表(4)	1.00E-02	3		2※3	0.1※4	4.00E-03	HD	5.02E-01
F-3	手順書の使用を怠った場合、手順書中の実施項目を省いてしまう。	第20-7表(6)	5.00E-02	5		2※3	0.1※4	2.00E-02	HD	5.10E-01
F-4	間違えた手動弁を選択する。(ラベリングは明瞭、周囲に類似の弁がある。)	第20-13表(2)	3.00E-03	3		2※3	0.1※4	1.20E-03	HD	5.01E-01
F-5	手動弁の操作を失敗する。 (上昇システム、圧度表示ともになし)	第20-14表(4)	1.00E-02	3		2※3	0.1※4	4.00E-03	HD	5.02E-01
G-1	チェックリストを適切に使用した場合に手順書中の実施項目を省いてしまう。	第20-7表(2)	3.00E-03	3		2※3	0.1※4	1.20E-03	HD	5.01E-01
G-2	チェックリストを適切に使用しなかった場合に手順書中の実施項目を省いてしまう。	第20-7表(4)	1.00E-02	3		2※3	0.1※4	4.00E-03	HD	5.02E-01
G-3	手順書の使用を怠った場合、手順書中の実施項目を省いてしまう。	第20-7表(6)	5.00E-02	5		2※3	0.1※4	2.00E-02	HD	5.10E-01
G-4	間違えた手動弁を選択する。(ラベリングは明瞭、周囲に類似の弁がある。)	第20-13表(2)	3.00E-03	3		2※3	0.1※4	1.20E-03	HD	5.01E-01
G-5	手動弁の操作に失敗する。 (上昇システム、圧度表示ともになし)	第20-14表(4)	1.00E-02	3		2※3	0.1※4	4.00E-03	HD	5.02E-01
H-1	チェックリストを適切に使用した場合に手順書中の実施項目を省いてしまう。	第20-7表(2)	3.00E-03	3		2※3	0.1※4	1.20E-03	LD	5.11E-02
H-2	チェックリストを適切に使用しなかった場合に手順書中の実施項目を省いてしまう。	第20-7表(4)	1.00E-02	3		2※3	0.1※4	4.00E-03	LD	5.38E-02
H-3	手順書の使用を怠った場合、手順書中の実施項目を省いてしまう。	第20-7表(6)	5.00E-02	5		2※3	0.1※4	2.00E-02	LD	5.38E-02
H-4	間違えたスイッチを選択する。	第20-12表(2)	3.00E-03	10		2※3	0.1※4	1.20E-03	LD	5.11E-02
H-5	スイッチを間違えた方向に操作する。	第20-12表(4)	1.00E-04	10		2※3	0.1※4	4.00E-05	LD	5.00E-02
H-6	機器等の状態を完全に察知しない。	第20-12表(8)	3.00E-03	3		2※3	0.1※4	1.20E-03	LD	5.11E-02
I-1	チェックリストを適切に使用した場合に手順書中の実施項目を省いてしまう。	第20-7表(2)	3.00E-03	3		2※3	0.1※4	1.20E-03	HD	5.01E-01
I-2	チェックリストを適切に使用しなかった場合に手順書中の実施項目を省いてしまう。	第20-7表(4)	1.00E-02	3		2※3	0.1※4	4.00E-03	HD	5.02E-01
I-3	手順書の使用を怠った場合、手順書中の実施項目を省いてしまう。	第20-7表(6)	5.00E-02	5		2※3	0.1※4	2.00E-02	HD	5.02E-01
I-4	間違えたスイッチを選択する。	第20-12表(2)	3.00E-03	10		2※3	0.1※4	1.20E-03	HD	5.01E-01
I-5	スイッチを間違えた方向に操作する。	第20-12表(4)	1.00E-04	10		2※3	0.1※4	4.00E-05	HD	5.00E-01
J-1	チェックリストを適切に使用した場合に手順書中の実施項目を省いてしまう。	第20-7表(2)	3.00E-03	3		2※3	0.1※4	1.20E-03	HD	5.01E-01
J-2	チェックリストを適切に使用しなかった場合に手順書中の実施項目を省いてしまう。	第20-7表(4)	1.00E-02	3		2※3	0.1※4	4.00E-03	HD	5.02E-01
J-3	手順書の使用を怠った場合、手順書中の実施項目を省いてしまう。	第20-7表(6)	5.00E-02	5		2※3	0.1※4	2.00E-02	HD	5.02E-01
J-4	間違えたスイッチを選択する。	第20-12表(2)	5.00E-04	10		2※3	0.1※4	2.00E-04	HD	5.00E-01
J-5	スイッチを間違えた方向に操作する。	第20-12表(8)	1.00E-04	10		2※3	0.1※4	4.00E-05	HD	5.00E-01

※1 BHEP+NHEP (ストレス・経験因子) × (タギングレベル因子) × (回復要素) × (ストレス・経験因子)

※2 従属性 LD の場合

(CHEP×(1.19×BHEP))/20

従属性 MD の場合

(CHEP×(1.6×BHEP))/7

従属性 JD の場合

(CHEP×(1.1×BHEP))/2

※3 熟練者、比較的高いストレス、ステップバイステップ作業 (第20-16表 (4):×2) を想定

※4 履歴の検査 (第20-22表 (1):0.1) を考慮

図4.5-9 人間信頼性解析結果(HRA-5) [2/2]

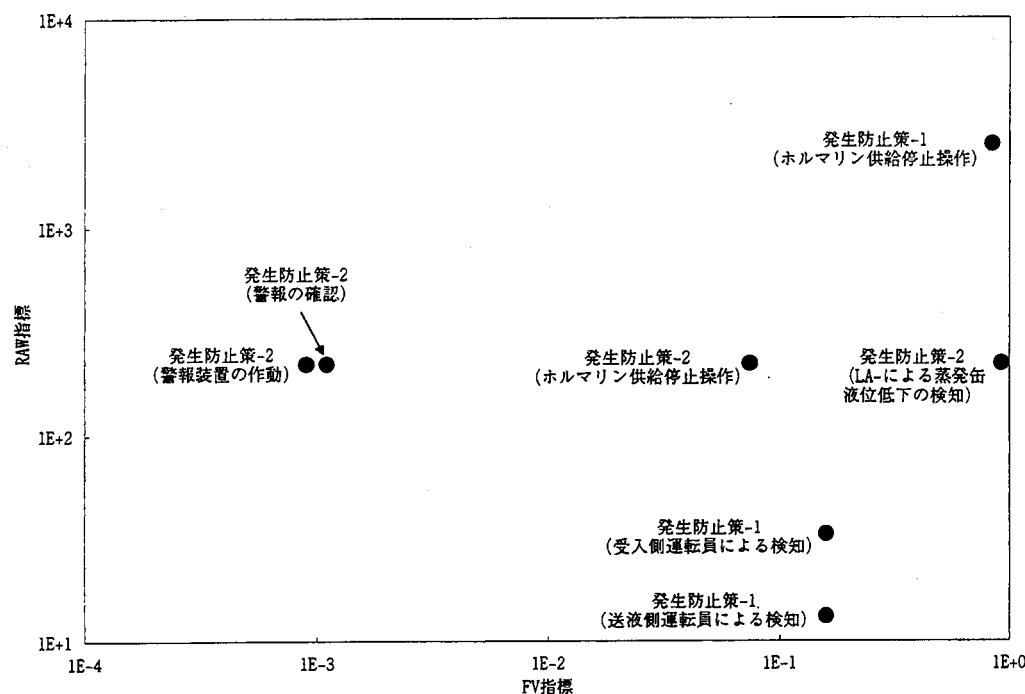


図4.5-10 重要度の把握結果

4.6 高放射性廃液蒸発缶におけるホルムアルデヒドの蓄積

4.6.1 概要

高放射性廃液濃縮工程の高放射性廃液蒸発缶では、分離第1サイクル工程の分離第1抽出器からの水相、第1溶媒洗浄器からの溶媒洗浄廃液、及び酸回収工程の酸回収蒸発缶の濃縮液を受入れ、ホルマリン溶液を加えて硝酸を分解しながら加熱濃縮する。

蒸発缶の運転開始時においては、ホルムアルデヒドと硝酸との分解反応が速やかに開始するよう、亜硝酸ナトリウム溶液を少量供給している。しかし、何らかの原因により亜硝酸ナトリウムが供給されずに運転を開始・継続した場合、蒸発缶内に未反応のホルムアルデヒドが多量蓄積し、ある時点において急激に分解反応が始まることにより爆発する可能性がある。

このため、高放射性廃液蒸発缶におけるホルムアルデヒド蓄積による爆発の発生防止策として以下の対策を講じている(図 4.6-1)。

- ・ 亜硝酸ナトリウム溶液供給時には、試薬調整工程の第2亜硝酸ナトリウム中間貯槽の液位低下を確認する。
- ・ ホルムアルデヒドと硝酸の分解反応が正常に開始すると、オフガス凝縮液酸濃度の変化に伴い電導度が上昇するほか、蒸発缶内圧力等の指示値に変動が見られるため、亜硝酸ナトリウム供給時には、電導度計等の指示値を確認する。亜硝酸ナトリウム供給後、一定時間経過しても電導度計等の指示値に変動が見られない場合は、直ちに蒸発缶の運転を停止する。

4.6.2 評価結果

3.の評価手法に従い、事故発生防止策の特徴及び重要度の把握を以下のように実施した。

1) イベントツリーの作成

図 4.6-2 に作成したイベントツリーを示す。

起因事象として、高放射性廃液蒸発缶運転開始時の亜硝酸ナトリウム溶液の供給不足を考慮した。

事故発生防止策として、運転員による電導度計等の指示値確認に伴う硝酸分解反応の遅れ検知及び対応を考慮した。

2) フォールトツリーの作成

イベントツリーで考慮した起因事象に対し、図 4.6-3 に示すフォールトツリーを作成した。起因事象の高放射性廃液蒸発缶への亜硝酸ナトリウム溶液供給不足については、キャンペーン開始時に行う亜硝酸ナトリウムの調整時における操作ミス及び蒸発缶へ亜硝酸ナトリウムを供給する際の操作ミスを考慮した。

また、亜硝酸ナトリウムの調整時に実施するサンプリング及び分析操作に対し、図 4.6-4 に示すフォールトツリーを作成した。このサンプリング及び分析操作に対する評価結果は、次項の人間信頼性解析において回復要素として考慮した。

3) 定量化

① 起因事象発生確率の算出

亜硝酸ナトリウムの供給量不足となる原因是、いずれもヒューマンエラーのため、フォールトツリーの各基事象に対し、図 4.6-5, 4.6-6 示した人間信頼性解析を

実施した。これにより、作業 1 回あたりの失敗確率を算出し、それと工程運転中の操作頻度を想定し時間当たりの発生確率を算出した。

② 発生防止策の失敗確率の算出

イベントツリーで考慮した発生防止策として、運転員の検知・対応を考慮しているため、発生防止策の各要素に対し、図 4.6-7, 4.6-8 示した人間信頼性解析を実施した。

③ イベントツリーの定量化

①、②で算出した値を用い、イベントツリーの定量化を行った。この結果、高放射性廃液蒸発缶におけるホルマリンの蓄積の発生確率は、 $5.44E-06(/y)$ となつた。

4) 重要度評価

定量化したイベントツリーの各発生防止策の重要度を把握するため、重要度評価を実施した。重要度の把握結果を図 4.6-9 に示す。同結果より、FV, RAW の各指標において以下のような特徴が見られた。

① FV 指標

運転員による硝酸分解反応遅れ検知が相対的に高い値を示した。

② RAW 指標

運転員による硝酸分解反応遅れ検知及びホルマリン供給停止操作の両方とも同様の値となつた。

4.6.3 発生防止策の特徴及び重要度の把握結果

PSA 手法を用いた事故シーケンスの定量化及び同結果に基づく重要度の把握を実施した結果、以下のような知見が得られた。

事故発生防止策の特徴としては、蒸発缶の運転開始時は運転員が複数計器を連続的にモニタリングしているため、運転員の対応を期待できる点である。仮に 1 つの計器の異常を見逃したとしても、他の計器で異常を検知することができ、運転員は手順書に従い対応することができる。

重要度の把握結果より、高放射性廃液蒸発缶におけるホルムアルデヒドの蓄積に伴う急激な反応による爆発の発生防止上、運転員による硝酸分解反応遅れ検知及びホルマリン供給停止操作の両方とも重要な役割を果たしていることがわかった。

4.6.4まとめ

高放射性廃液蒸発缶運転開始時の亜硝酸ナトリウムの供給不足によるホルムアルデヒドの蓄積に伴う急激な反応による爆発の可能性について PSA 手法を用いた事故発生防止策の特徴及び重要度の把握を実施した結果、以下の知見が得られた。

- ・ 高放射性廃液蒸発缶におけるホルムアルデヒド蓄積の発生確率は、 $5.44E-06(/y)$ となつた。
- ・ 重要度評価を実施した結果、運転員による硝酸分解反応遅れ検知及びホルマリン供給停止操作の両方とも重要な役割を果たしていることが明らかとなつた。

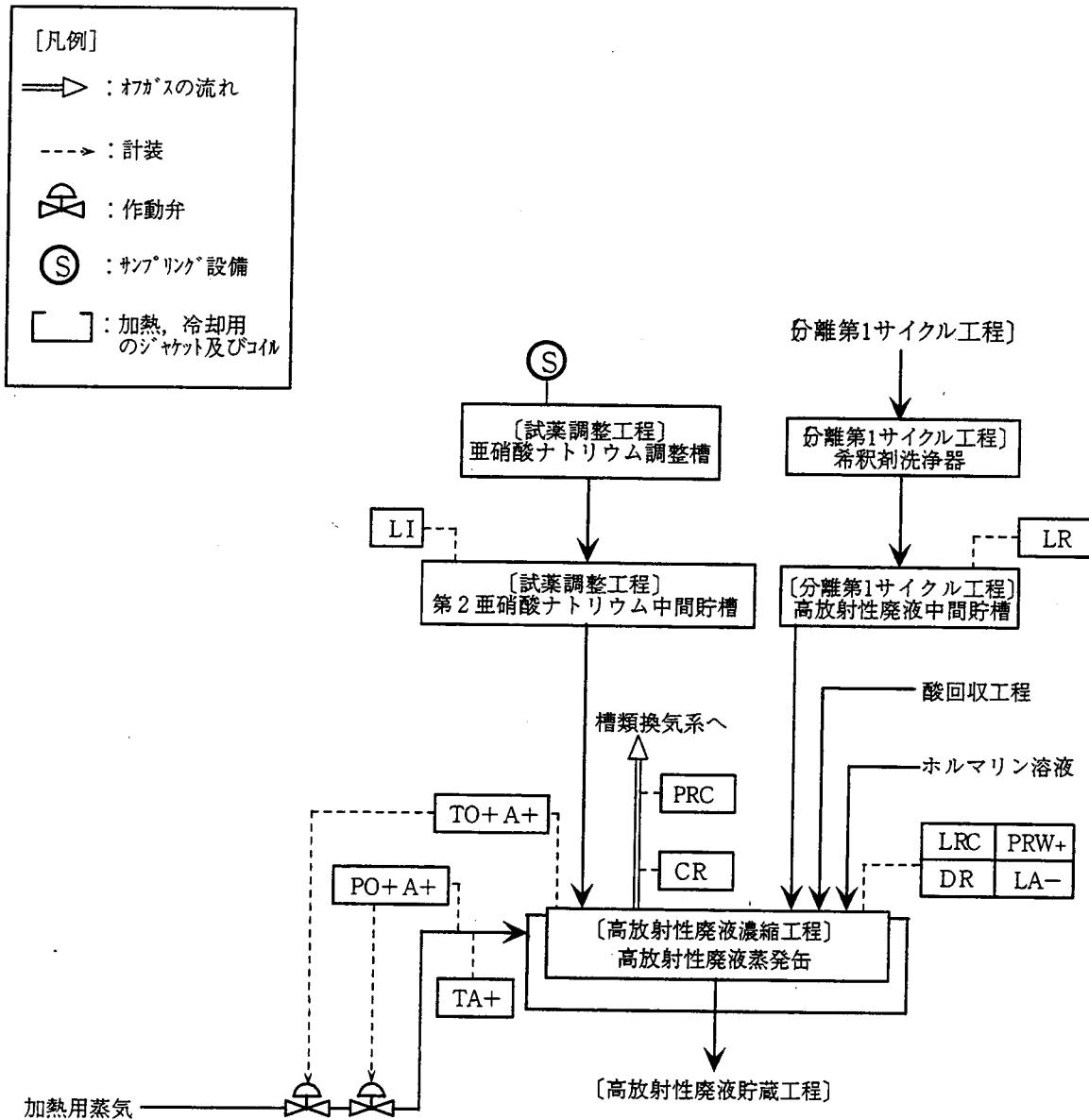


図 4.6-1 発生防止策概要図

起因事象	発生防止策-1		ホルムアルデヒドの蓄積の可能性	発生確率
	電導度計等の指示値確認による硝酸分解反応の遅れ検知及び対応	硝酸分解反応の遅れ検知		
蒸発缶への 亜硝酸ナトリウム溶 液給液不足	ホルマリン供給 停止操作			
3.46E-07 (/h)	成功	成功	なし	
		失敗 3.37E-04	有り	1.16E-10 (/h)
	失敗 1.85E-03		有り	6.40E-10 (/h)
			合計	7.56E-10 (/h)

事象発生確率 5.44E-06 (/y)

イベントツリーの分岐確率算出根拠

事象の種類	基本確率	単位	基本確率 算出根拠	従属性	事象発生確率 (分岐確率)
起因事象	3.46E-07	/h	図4.6-3 FT-1	-	3.46E-07 /h
発生防止策-1 硝酸分解反応の遅れ検知 ホルマリン供給停止操作	1.85E-03 3.37E-04	/d /d	図4.6-7 HRA-3 図4.6-8 HRA-4	- -	1.85E-03 /d 3.37E-04 /d

図4.6-2 イベントツリー

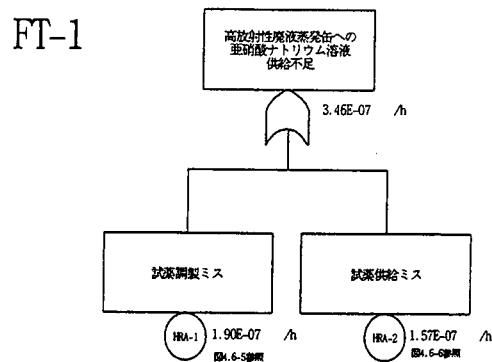


図4.6-3 起因事象のフォールトツリー

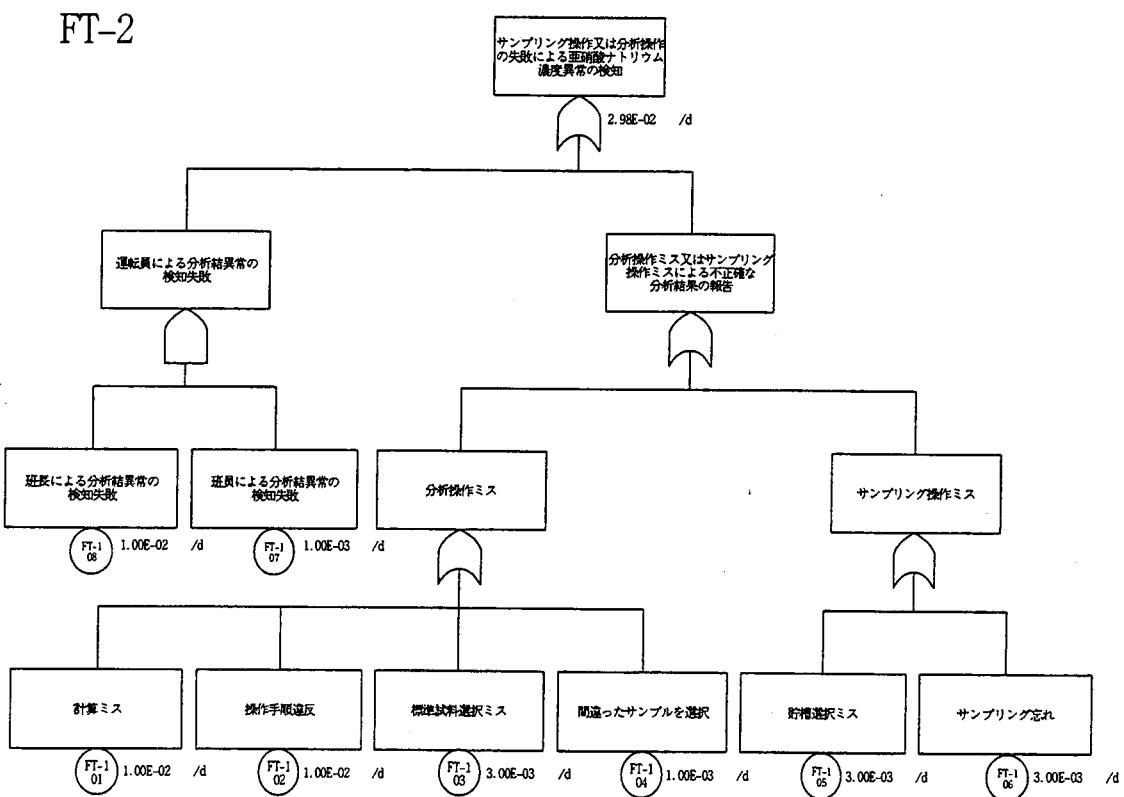


図4.6-4 サンプリング・分析操作のフォールトツリー

	5.00E-03	1.49E-03	7.44E-06
\$ - 1	A - O (1) F		
	1.79E-04	8.92E-07	
	A - C F		
	7.65E-05	3.82E-07	
	B - C F		
	S		
	5.00E-01	2.98E-04	1.48E-04
\$ - 2	A - O (2) F		
	1.79E-04	8.88E-05	
	A - C F		
	7.65E-05	3.81E-05	
	B - C F		
	S		
	8.93E-05	4.44E-05	
	A - O (3) F		
	1.79E-04	8.88E-05	
	A - C F		
	7.65E-05	3.81E-05	
	B - C F		
	S		

分岐番号	エラー番号	人的過誤率
\$ - 1	\$-1	5.00E-03
\$ - 2	\$-2	5.00E-01
A - O (1)	A-4	1.49E-03
A - O (2)	A-3	2.98E-04
A - O (3)	A-2	8.93E-05
A - C	A-5,6	1.79E-04
B - C	B-1	7.65E-05

Total	4.55E-04 /d
	1.90E-07 /h

各キャンペーン前に1回調整することを考慮。
4.55E-4 (/d) × 1回/100日 × 24h

操作手順	
A	所定量の亜硝酸ナトリウムを投入する ↓
B	所定の量の水を供給する

人的過誤率表

エラー番号	エラー内容	表番号 項目番号 (NHEP/EF/CHEP)	NHEP	EF	タギングレベル因子	ストレス・経験因子	回復要素	BHEP ※1	従属性	CHEP ※2
\$ - 1	運転者に従わず、手順書を使用しない。	第20-6表(4)	5.00E-03	3				5.00E-03		5.00E-03
\$ - 2	運転管理に従わず、チェックリストを使用しない。	第20-6表(8)	5.00E-01	5				5.00E-01		5.00E-01
A - 2	チェックリストを適切に使用した場合に手順書中の実施項目を省いてしまう。	第20-7表(2)	3.00E-03	3			2.98E-02 ※3	8.93E-05		8.93E-05
A - 3	チェックリストを適切に使用しなかった場合に手順書中の実施項目を省いてしまう。	第20-7表(4)	1.00E-02	3			2.98E-02 ※3	2.98E-04		2.98E-04
A - 4	手順書の使用を怠った場合、手順書中の実施項目を省いてしまう。	第20-7表(6)	5.00E-02	5			2.98E-02 ※3	1.49E-03		1.49E-03
A - 5	準備する亜硝酸ナトリウムの数量を間違える。	第20-11表(4)	3.00E-03	3			2.98E-02 ※3	8.93E-05		8.93E-05
A - 6	亜硝酸ナトリウム以外の薬品を準備する。	第20-13表(2)	3.00E-03	3			2.98E-02 ※3	8.93E-05		8.93E-05
B - 1	水の供給量を間違える。	第20-11表(4)	3.00E-03	3			2.98E-02 ※3	8.93E-05 MD		7.65E-05

※1 BHEP=NHEP* (ストレス・経験因子) * (タギングレベル因子) * !(回復要素) * (ストレス・経験因子)

※2 従属性L Dの場合
CHEP=1-(1+9*(1-BHEP))/20
従属性M Dの場合
CHEP=1-(1+6*(1-BHEP))/7
従属性H Dの場合
CHEP=1-(1+(1-BHEP))/2

※3 サンプリング・分析による回復 (2.98E-02:図4.6-4 FT-2参照) を考慮

図4.6-5 人間信頼性解析結果 (HRA-1)

操作手順	
A	亜硝酸ナトリウム供給系の圧空作動弁(201W151)の開操作
B	亜硝酸ナトリウム供給系の手動弁(201W705)の開操作
C	亜硝酸ナトリウム供給系のクイックコネクタの接続
D	亜硝酸ナトリウム供給系の手動弁(271W481)の開操作
E	亜硝酸ナトリウム供給系の手動弁(271W479)の開操作

分岐番号	エラー番号	人的過誤率
\$ - 1	\$-1	5.00E-03
\$ - 2	\$-2	5.00E-01
A - O (1)	A-4	1.50E-05
A - O (2)	A-3	3.00E-06
A - C	A-2	9.00E-07
B - O (1)	B-4	1.29E-05
B - O (2)	B-3	2.57E-06
B - C	B-2	3.34E-06
C - O (1)	C-4	7.50E-08
C - O (2)	C-3	1.49E-06
C - C	C-2	9.10E-07
D - O (1)	D-4	6.43E-08
D - O (2)	D-3	1.28E-06
D - C	D-2	1.66E-06
E - O (1)	E-4	1.67E-08
E - O (2)	E-3	2.28E-06
E - C	E-2	3.40E-06
S	S	S

Total	1.88E-05 /d
	1.57E-07 /h

各キャンペーンで20回実施するとして計算した。
1.88E-5(d) × 20回/100日 × 24h

図4.6-6 人間信頼性解析結果 (HRA-2) [1/2]

人的過誤率表

エラー番号	エラー内容	表番号 項目番号 (UNEC-CR-1278)	NHEP	EF	タギング レベル 因子	ストレス・経験因子	回復要素	BHEP ※1	従属性	CHEP ※2
\$ - 1	運転管理に従わず、手順書を使用しない。	第20-6表(4)	5.00E-03	3				5.00E-03		5.00E-03
\$ - 2	運転管理に従わず、チェックリストを使用しない。	第20-6表(8)	5.00E-01	5				5.00E-01		5.00E-01
A - 2	チェックリストを適切に使用した場合に手順書中の実施項目を省いてしまう。	第20-7表(2)	3.00E-03	3			3.00E-04 ※3	9.00E-07		9.00E-07
A - 3	チェックリストを適切に使用しなかった場合に手順書中の実施項目を省いてしまう。	第20-7表(4)	1.00E-02	3			3.00E-04 ※3	3.00E-06		3.00E-06
A - 4	手順書の使用を忘了場合、手順書中の実施項目を省いてしまう。	第20-7表(6)	5.00E-02	5			3.00E-04 ※3	1.50E-05		1.50E-05
A - 5	201W151選択ミス	第20-12表(2)	3.00E-03	10			3.00E-04 ※3	9.00E-07		9.00E-07
A - 6	201W151開操作失敗（間違えた方向）	第20-12表(8)	1.00E-04	10			3.00E-04 ※3	3.00E-08		3.00E-08
A - 7	201W151開操作失敗（変更しきらない）	第20-12表(12)	3.00E-03	3			3.00E-04 ※3	9.00E-07		9.00E-07
B - 2	チェックリストを適切に使用した場合に手順書中の実施項目を省いてしまう。	第20-7表(2)	3.00E-03	3			3.00E-04 ※3	9.00E-07	MD	7.71E-07
B - 3	チェックリストを適切に使用しなかった場合に手順書中の実施項目を省いてしまう。	第20-7表(4)	1.00E-02	3			3.00E-04 ※3	3.00E-06	MD	2.57E-06
B - 4	手順書の使用を忘了場合、手順書中の実施項目を省いてしまう。	第20-7表(6)	5.00E-02	5			3.00E-04 ※3	1.50E-05	MD	1.29E-05
B - 5	201W705選択ミス	第20-13表(2)	3.00E-03	3			3.00E-04 ※3	9.00E-07	MD	7.71E-07
B - 6	201W705開操作失敗	第20-14表(4)	1.00E-02	3			3.00E-04 ※3	3.00E-06	MD	2.57E-06
C - 2	チェックリストを適切に使用した場合に手順書中の実施項目を省いてしまう。	第20-7表(2)	3.00E-03	3			3.00E-04 ※3	9.00E-07	MD	7.71E-07
C - 3	チェックリストを適切に使用しなかった場合に手順書中の実施項目を省いてしまう。	第20-7表(4)	1.00E-02	3			3.00E-04 ※3	3.00E-06	MD	2.57E-06
C - 4	手順書の使用を忘了場合、手順書中の実施項目を省いてしまう。	第20-7表(6)	5.00E-02	5			3.00E-04 ※3	1.50E-05	MD	1.29E-05
C - 5	クイックの接続対象間違い	第20-11表(4)	3.00E-03	3			3.00E-04 ※3	9.00E-07	MD	7.71E-07
C - 6	クイックの接続不十分	第20-11表(4)	3.00E-03	3			3.00E-04 ※3	9.00E-07	MD	7.71E-07
D - 2	チェックリストを適切に使用した場合に手順書中の実施項目を省いてしまう。	第20-7表(2)	3.00E-03	3			3.00E-04 ※3	9.00E-07	MD	7.71E-07
D - 3	チェックリストを適切に使用しなかった場合に手順書中の実施項目を省いてしまう。	第20-7表(4)	1.00E-02	3			3.00E-04 ※3	3.00E-06	MD	2.57E-06
D - 4	手順書の使用を忘了場合、手順書中の実施項目を省いてしまう。	第20-7表(6)	5.00E-02	5			3.00E-04 ※3	1.50E-05	MD	1.29E-05
D - 5	271W481選択ミス	第20-13表(2)	3.00E-03	3			3.00E-04 ※3	9.00E-07	MD	7.71E-07
D - 6	271W481開操作ミス	第20-14表(4)	1.00E-02	3			3.00E-04 ※3	3.00E-06	MD	2.57E-06
E - 2	チェックリストを適切に使用した場合に手順書中の実施項目を省いてしまう。	第20-7表(2)	3.00E-03	3			3.00E-04 ※3	9.00E-07	MD	7.71E-07
E - 3	チェックリストを適切に使用しなかった場合に手順書中の実施項目を省いてしまう。	第20-7表(4)	1.00E-02	3			3.00E-04 ※3	3.00E-06	MD	2.57E-06
E - 4	手順書の使用を忘了場合、手順書中の実施項目を省いてしまう。	第20-7表(6)	5.00E-02	5			3.00E-04 ※3	1.50E-05	MD	1.29E-05
E - 5	271W479選択ミス	第20-13表(2)	3.00E-03	3			3.00E-04 ※3	9.00E-07	MD	7.71E-07
E - 6	271W479開操作ミス	第20-14表(4)	1.00E-02	3			3.00E-04 ※3	3.00E-06	MD	2.57E-06

※ 1 BHEP=NHEP * (ストレス・経験因子) * (タギングレベル因子) * !(回復要素) * (ストレス・経験因子)

※ 2 従属性 LD の場合

$$CHEP=1-(1+19*(1-BHEP))/20$$

従属性 MD の場合

$$CHEP=1-(1+6*(1-BHEP))/7$$

従属性 HD の場合

$$CHEP=1-(1+(1-BHEP))/2$$

※ 3 液面指示計の確認による回復を考慮 (作業者 第20-11表(4):0.003、班長 第20-22表(1):0.1)

図4.6-6 人間信頼性解析結果(HRA-2) [2/2]

5.00E-03	5.00E-03	5.03E-01	5.03E-01	5.03E-01	1.14E-05
\$ - 1	A - O (1)	B - O (1)	C - O (1)	D - O (1)	F
	9.00E-04	7.50E-01	7.50E-01	7.50E-01	1.70E-05
	A - C (1)	B - C (1)	C - C (1)	D - C (1)	F
	S	S	S	S	
5.00E-01	1.00E-03	5.01E-01	5.01E-01	5.01E-01	3.62E-04
\$ - 2	A - O (2)	B - O (2)	C - O (2)	D - O (2)	F
	9.00E-04	7.50E-01	7.50E-01	7.50E-01	5.43E-04
	A - C (2)	B - C (2)	C - C (2)	D - C (2)	F
	S	S	S	S	
3.00E-04	5.00E-01	5.00E-01	5.00E-01	5.00E-01	2.29E-04
A - O (3)	B - O (3)	C - O (3)	D - O (3)	F	
9.00E-04	7.50E-01	7.50E-01	7.50E-01	D - C (3)	F
A - C (3)	B - C (3)	C - C (3)			
S	S	S			

操作手順	
A	電導度記録計(271CR12)による硝酸分解反応の確認 ↓
B	圧力記録計(271PRC20.1)による硝酸分解反応の確認 ↓
C	圧力記録計(271PRW+20.2)による硝酸分解反応の確認 ↓
D	密度記録計(271DR20)による硝酸分解反応の確認

分岐番号	エラー番号	人的過誤率
\$ - 1	\$-1	5.00E-03
\$ - 2	\$-2	5.00E-01
A - O (1)	A-4	5.00E-03
A - C (1)	A-5, 6	9.00E-04
B - O (1)	B-4	5.03E-01
B - C (1)	B-5, 6	7.50E-01
C - O (1)	C-4	5.03E-01
C - C (1)	C-5, 6	7.50E-01
D - O (1)	D-4	5.03E-01
D - C (1)	D-5, 6	7.50E-01
A - O (2)	A-3	1.00E-03
A - C (2)	A-5, 6	9.00E-04
B - O (2)	B-3	5.01E-01
B - C (2)	B-5, 6	7.50E-01
C - O (2)	C-3	5.01E-01
C - C (2)	C-5, 6	7.50E-01
D - O (2)	D-3	5.01E-01
D - C (2)	D-5, 6	7.50E-01
A - O (3)	A-2	3.00E-04
A - C (3)	A-5, 6	9.00E-04
B - O (3)	B-2	5.00E-01
B - C (3)	B-5, 6	7.50E-01
C - O (3)	C-2	5.00E-01
C - C (3)	C-5, 6	7.50E-01
D - O (3)	D-2	5.00E-01
D - C (3)	D-5, 6	7.50E-01

Total	1.85E-03
-------	----------

図4.6-7 人間信頼性解析結果 (HRA-3) [1/2]

人的過誤率表

エラー番号	エラー内容	表番号 項目番号 (NREC CR-127)	NHEP	EF	タギング レベル 因子	ストレス・経験 因子	回復要 素	BHEP ※1	従属性	CHEP ※2
\$ - 1	運転管理に従わず、手順書を使用しない。	第20-6表(4)	5.00E-03	3				5.00E-03		5.00E-03
\$ - 2	運転管理に従わず、チェックリストを使用しない。	第20-6表(8)	5.00E-01	5				5.00E-01		5.00E-01
A - 2	チェックリストを適切に使用した場合に手順書中の実施項目を省いてしまう。	第20-7表(2)	3.00E-03	3			0.1*3	3.00E-04		3.00E-04
A - 3	チェックリストを適切に使用しなかつた場合に手順書中の実施項目を省いてしまう。	第20-7表(4)	1.00E-02	3			0.1*3	1.00E-03		1.00E-03
A - 4	手順書の使用を怠った場合、手順書中の実施項目を省いてしまう。	第20-7表(6)	5.00E-02	5			0.1*3	5.00E-03		5.00E-03
A - 5	間違えた計器の値を見る。	第20-9表(4)	3.00E-03	3			0.1*3	3.00E-04		3.00E-04
A - 6	値のチェックミス	第20-11表(6)	6.00E-03	3			0.1*3	6.00E-04		6.00E-04
B - 2	チェックリストを適切に使用した場合に手順書中の実施項目を省いてしまう。	第20-7表(2)	3.00E-03	3			0.1*3	3.00E-04	HD	5.00E-01
B - 3	チェックリストを適切に使用しなかつた場合に手順書中の実施項目を省いてしまう。	第20-7表(4)	1.00E-02	3			0.1*3	1.00E-03	HD	5.01E-01
B - 4	手順書の使用を怠った場合、手順書中の実施項目を省いてしまう。	第20-7表(6)	5.00E-02	5			0.1*3	5.00E-03	HD	5.03E-01
B - 5	間違えた計器の値を見る。	第20-9表(4)	3.00E-03	3			0.1*3	3.00E-04	HD	5.00E-01
B - 6	値のチェックミス	第20-11表(6)	6.00E-03	3			0.1*3	6.00E-04	HD	5.00E-01
C - 2	チェックリストを適切に使用した場合に手順書中の実施項目を省いてしまう。	第20-7表(2)	3.00E-03	3			0.1*3	3.00E-04	HD	5.00E-01
C - 3	チェックリストを適切に使用しなかつた場合に手順書中の実施項目を省いてしまう。	第20-7表(4)	1.00E-02	3			0.1*3	1.00E-03	HD	5.01E-01
C - 4	手順書の使用を怠った場合、手順書中の実施項目を省いてしまう。	第20-7表(6)	5.00E-02	5			0.1*3	5.00E-03	HD	5.03E-01
C - 5	間違えた計器の値を見る。	第20-9表(4)	3.00E-03	3			0.1*3	3.00E-04	HD	5.00E-01
C - 6	値のチェックミス	第20-11表(6)	6.00E-03	3			0.1*3	6.00E-04	HD	5.00E-01
D - 2	チェックリストを適切に使用した場合に手順書中の実施項目を省いてしまう。	第20-7表(2)	3.00E-03	3			0.1*3	3.00E-04	HD	5.00E-01
D - 3	チェックリストを適切に使用しなかつた場合に手順書中の実施項目を省いてしまう。	第20-7表(4)	1.00E-02	3			0.1*3	1.00E-03	HD	5.01E-01
D - 4	手順書の使用を怠った場合、手順書中の実施項目を省いてしまう。	第20-7表(6)	5.00E-02	5			0.1*3	5.00E-03	HD	5.03E-01
D - 5	間違えた計器の値を見る。	第20-9表(4)	3.00E-03	3			0.1*3	3.00E-04	HD	5.00E-01
D - 6	値のチェックミス	第20-11表(6)	6.00E-03	3			0.1*3	6.00E-04	HD	5.00E-01

※ 1

BHEP=NHEP* (ストレス・経験因子) * (タギングレベル因子) * {(回復要素) * (ストレス・経験因子)}

※ 2

従属性 L D の場合

CHEP=(1+19*BHEP)/20

従属性 M D の場合

CHEP=(1+6*BHEP)/7

従属性 H D の場合

CHEP=(1+1*BHEP)/2

※ 3

肩越しの検査 (第20-22表 (1):0.1) を考慮

図4.6-7 人間信頼性解析結果(HRA-3) [2/2]

5.00E-03	2.00E-02	5.10E-01	5.10E-01	5.10E-01	5.10E-01	5.10E-01	5.10E-01	5.38E-02	5.02E-01	5.02E-01	4.30E-06
\$ - 1	A - O (1)	B - O (1)	C - O (1)	D - O (1)	E - O (1)	F - O (1)	G - O (1)	H - O (1)	I - O (1)	J - O (1)	F
2.44E-03	7.51E-01	7.50E-01	7.50E-01	3.20E-06							
A - C (1)	B - C (1)	C - C (1)	D - C (1)	E - C (1)	F - C (1)	G - C (1)	H - C (1)	I - C (1)	J - C (1)	J - C (1)	F
S	S	S	S	S	S	S	S	S	S	S	
5.00E-01	4.00E-03	5.02E-01	5.02E-01	5.02E-01	5.02E-01	5.02E-01	5.02E-01	5.38E-02	5.02E-01	5.02E-01	1.21E-04
\$ - 2	A - O (2)	B - O (2)	C - O (2)	D - O (2)	E - O (2)	F - O (2)	G - O (2)	H - O (2)	I - O (2)	J - O (2)	F
2.44E-03	7.51E-01	7.50E-01	7.50E-01	9.03E-05							
A - C (2)	B - C (2)	C - C (2)	D - C (2)	E - C (2)	F - C (2)	G - C (2)	H - C (2)	I - C (2)	J - C (2)	J - C (2)	F
S	S	S	S	S	S	S	S	S	S	S	
1.20E-03	5.01E-01	5.11E-02	5.01E-01	5.01E-01	6.74E-05						
A - O (3)	B - O (3)	C - O (3)	D - O (3)	E - O (3)	F - O (3)	G - O (3)	H - O (3)	I - O (3)	J - O (3)	J - O (3)	F
2.44E-03	7.51E-01	7.51E-01	7.51E-01	7.51E-01	7.51E-01	7.51E-01	7.51E-01	7.51E-01	7.50E-01	7.50E-01	5.04E-05
A - C (3)	B - C (3)	C - C (3)	D - C (3)	E - C (3)	F - C (3)	G - C (3)	H - C (3)	I - C (3)	J - C (3)	J - C (3)	F
S	S	S	S	S	S	S	S	S	S	S	

操作手順		分岐番号	エラー番号	人的過誤率	分岐番号	エラー番号	人的過誤率	分岐番号	エラー番号	人的過誤率	
A ホルマリン供給系圧空作動弁 (271W106) の閉操作		\$ - 1	I - 1	5.00E-03	A - O (2)	A - 2	4.00E-03	A - O (3)	A - 1	1.20E-03	
	↓	\$ - 2	I - 2	5.00E-01	A - C (2)	A - 4..5..6	2.44E-03	A - C (3)	A - 4..5..6	2.44E-03	
B ホルマリン供給系手動弁 (271W482) の閉操作		A - O (1)	A - 3	2.00E-02	B - O (2)	B - 2	5.02E-01	B - O (3)	B - 1	5.01E-01	
	↓	A - C (1)	A - 4..5..6	2.44E-03	B - C (2)	B - 4..5	7.51E-01	B - C (3)	B - 4..5	7.51E-01	
C ホルマリン供給系手動弁 (271W483) の閉操作		B - O (1)	B - 3	5.10E-01	C - O (2)	C - 2	5.02E-01	C - O (3)	C - 1	5.01E-01	
	↓	R - C (1)	B - 4..5	7.51E-01	C - C (2)	C - 4..5	7.51E-01	C - C (3)	C - 4..5	7.51E-01	
D ホルマリン供給系手動弁 (271W484) の閉操作		C - O (1)	C - 3	5.10E-01	D - O (2)	D - 2	5.02E-01	D - O (3)	D - 1	5.01E-01	
	↓	C - C (1)	C - 4..5	7.51E-01	D - C (2)	D - 4..5	7.51E-01	D - C (3)	D - 4..5	7.51E-01	
E ホルマリン供給系手動弁 (271W485) の閉操作		D - O (1)	D - 3	5.10E-01	E - O (2)	E - 2	5.02E-01	E - O (3)	E - 1	5.01E-01	
	↓	D - C (1)	D - 4..5	7.51E-01	E - C (2)	E - 4..5	7.51E-01	E - C (3)	E - 4..5	7.51E-01	
F ホルマリン供給系手動弁 (271W486) の閉操作		E - O (1)	E - 3	5.10E-01	F - O (2)	F - 2	5.02E-01	F - O (3)	F - 1	5.01E-01	
	↓	E - C (1)	E - 4..5	7.51E-01	F - C (2)	F - 4..5	7.51E-01	F - C (3)	F - 4..5	7.51E-01	
G ホルマリン供給系手動弁 (271W497) の閉操作		F - O (1)	F - 3	5.10E-01	G - O (2)	G - 2	5.02E-01	G - O (3)	G - 1	5.01E-01	
	↓	F - C (1)	F - 4..5	7.51E-01	G - C (2)	G - 4..5	7.51E-01	G - C (3)	G - 4..5	7.51E-01	
H 加熱蒸気系調節弁 (271LRC20.1) の手動操作による 加熱蒸気停止操作		G - O (1)	G - 3	5.10E-01	H - O (2)	H - 2	5.38E-02	H - O (3)	H - 1	5.11E-02	
	↓	G - C (1)	G - 4..5	7.51E-01	H - C (2)	H - 4..5..6	1.45E-01	H - C (3)	H - 4..5..6	1.45E-01	
I 加熱蒸気系調節弁 (271LRCV20.1) の閉操作		H - O (1)	H - 3	5.38E-02	I - O (2)	I - 2	5.02E-01	I - O (3)	I - 1	5.01E-01	
	↓	H - C (1)	H - 4..5..6	1.45E-01	I - C (2)	I - 4..5	7.50E-01	I - C (3)	I - 4..5	7.50E-01	
J 加熱蒸気系圧空作動弁 (271W104) の閉操作		I - O (1)	I - 3	5.02E-01	I - O (2)	I - 2	5.02E-01	I - O (3)	I - 1	5.01E-01	
	↓	I - C (1)	I - 4..5	7.50E-01	I - C (2)	I - 4..5	7.50E-01	I - C (3)	I - 4..5	7.50E-01	
J - O (1)	J - 3	5.02E-01						Total		3.37E-04	
J - C (1)	J - 4..5	7.50E-01									

図4.6-8 人間信頼性解析結果 (HRA-4) [1/2]

人的過誤率

エラー番号	エラー内容	委嘱号 項目番号 (HREC-Q-127)	NHEP	EF	タギング レベル 因子	ストレス・経験 因子	回復要素	BHEP ※1	従属性	CHEP ※2
S-1	進捗管理に従わず、手順書を使用しない。	第20-6表(4)	5.00E-03	3				5.00E-03		5.00E-03
S-2	進捗管理に従わざ、チェックリストを使用しない。	第20-6表(8)	5.00E-01	5				5.00E-01		5.00E-01
A-1	チェックリストを適切に使用した場合に手順書中の実施項目を省いてしまう。	第20-7表(2)	3.00E-03	3		2 * 3	0.1 * 4	1.20E-03		1.20E-03
A-2	チェックリストを適切に使用しなかった場合に手順書中の実施項目を省いてしまう。	第20-7表(4)	1.00E-02	3		2 * 3	0.1 * 4	4.00E-03		4.00E-03
A-3	手順書の使用を怠った場合、手順書中の実施項目を省いてしまう。	第20-7表(6)	5.00E-02	5		2 * 3	0.1 * 4	2.00E-02		2.00E-02
A-4	間違えたスイッチを選択する。	第20-12表(2)	3.00E-03	10		2 * 3	0.1 * 4	1.20E-03		1.20E-03
A-5	スイッチを間違えた方向に操作する。	第20-12表(6)	1.00E-04	10		2 * 3	0.1 * 4	4.00E-05		4.00E-05
A-6	機器等の状態を完全に変更しきらない。	第20-12表(12)	3.00E-03	3		2 * 3	0.1 * 4	1.20E-03		1.20E-03
B-1	チェックリストを適切に使用した場合に手順書中の実施項目を省いてしまう。	第20-7表(2)	3.00E-03	3		2 * 3	0.1 * 4	1.20E-03	HD	5.01E-01
B-2	チェックリストを適切に使用しなかった場合に手順書中の実施項目を省いてしまう。	第20-7表(4)	1.00E-02	3		2 * 3	0.1 * 4	4.00E-03	HD	5.02E-01
B-3	手順書の使用を怠った場合、手順書中の実施項目を省いてしまう。	第20-7表(6)	5.00E-02	5		2 * 3	0.1 * 4	2.00E-02	HD	5.10E-01
B-4	間違えた手動弁を選択する。ラベリングは明瞭、周囲に類似の弁がある。	第20-13表(2)	3.00E-03	3		2 * 3	0.1 * 4	1.20E-03	HD	5.01E-01
B-5	手動弁の操作に失敗する。(上昇システム、開度表示とともになし)	第20-14表(4)	1.00E-02	3		2 * 3	0.1 * 4	4.00E-03	HD	5.02E-01
C-1	チェックリストを適切に使用した場合に手順書中の実施項目を省いてしまう。	第20-7表(2)	3.00E-03	3		2 * 3	0.1 * 4	1.20E-03	HD	5.01E-01
C-2	チェックリストを適切に使用しなかった場合に手順書中の実施項目を省いてしまう。	第20-7表(4)	1.00E-02	3		2 * 3	0.1 * 4	4.00E-03	HD	5.02E-01
C-3	手順書の使用を怠った場合、手順書中の実施項目を省いてしまう。	第20-7表(6)	5.00E-02	5		2 * 3	0.1 * 4	2.00E-02	HD	5.10E-01
C-4	間違えた手動弁を選択する。ラベリングは明瞭、周囲に類似の弁がある。	第20-13表(2)	3.00E-03	3		2 * 3	0.1 * 4	1.20E-03	HD	5.01E-01
C-5	手動弁の操作に失敗する。(上昇システム、開度表示とともになし)	第20-14表(4)	1.00E-02	3		2 * 3	0.1 * 4	4.00E-03	HD	5.02E-01
D-1	チェックリストを適切に使用した場合に手順書中の実施項目を省いてしまう。	第20-7表(2)	3.00E-03	3		2 * 3	0.1 * 4	1.20E-03	HD	5.01E-01
D-2	チェックリストを適切に使用しなかった場合に手順書中の実施項目を省いてしまう。	第20-7表(4)	1.00E-02	3		2 * 3	0.1 * 4	4.00E-03	HD	5.02E-01
D-3	手順書の使用を怠った場合、手順書中の実施項目を省いてしまう。	第20-7表(6)	5.00E-02	5		2 * 3	0.1 * 4	2.00E-02	HD	5.10E-01
D-4	間違えた手動弁を選択する。ラベリングは明瞭、周囲に類似の弁がある。	第20-13表(2)	3.00E-03	3		2 * 3	0.1 * 4	1.20E-03	HD	5.01E-01
D-5	手動弁の操作に失敗する。(上昇システム、開度表示とともになし)	第20-14表(4)	1.00E-02	3		2 * 3	0.1 * 4	4.00E-03	HD	5.02E-01
E-1	チェックリストを適切に使用した場合に手順書中の実施項目を省いてしまう。	第20-7表(2)	3.00E-03	3		2 * 3	0.1 * 4	1.20E-03	HD	5.01E-01
E-2	チェックリストを適切に使用しなかった場合に手順書中の実施項目を省いてしまう。	第20-7表(4)	1.00E-02	3		2 * 3	0.1 * 4	4.00E-03	HD	5.02E-01
E-3	手順書の使用を怠った場合、手順書中の実施項目を省いてしまう。	第20-7表(6)	5.00E-02	5		2 * 3	0.1 * 4	2.00E-02	HD	5.10E-01
E-4	間違えた手動弁を選択する。ラベリングは明瞭、周囲に類似の弁がある。	第20-13表(2)	3.00E-03	3		2 * 3	0.1 * 4	1.20E-03	HD	5.01E-01
E-5	手動弁の操作に失敗する。(上昇システム、開度表示とともになし)	第20-14表(4)	1.00E-02	3		2 * 3	0.1 * 4	4.00E-03	HD	5.02E-01
F-1	チェックリストを適切に使用した場合に手順書中の実施項目を省いてしまう。	第20-7表(2)	3.00E-03	3		2 * 3	0.1 * 4	1.20E-03	HD	5.01E-01
F-2	チェックリストを適切に使用しなかった場合に手順書中の実施項目を省いてしまう。	第20-7表(4)	1.00E-02	3		2 * 3	0.1 * 4	4.00E-03	HD	5.02E-01
F-3	手順書の使用を怠った場合、手順書中の実施項目を省いてしまう。	第20-7表(6)	5.00E-02	5		2 * 3	0.1 * 4	2.00E-02	HD	5.10E-01
F-4	間違えた手動弁を選択する。ラベリングは明瞭、周囲に類似の弁がある。	第20-13表(2)	3.00E-03	3		2 * 3	0.1 * 4	1.20E-03	HD	5.01E-01
F-5	手動弁の操作に失敗する。(上昇システム、開度表示とともになし)	第20-14表(4)	1.00E-02	3		2 * 3	0.1 * 4	4.00E-03	HD	5.02E-01
G-1	チェックリストを適切に使用した場合に手順書中の実施項目を省いてしまう。	第20-7表(2)	3.00E-03	3		2 * 3	0.1 * 4	1.20E-03	HD	5.01E-01
G-2	チェックリストを適切に使用しなかった場合に手順書中の実施項目を省いてしまう。	第20-7表(4)	1.00E-02	3		2 * 3	0.1 * 4	4.00E-03	HD	5.02E-01
G-3	手順書の使用を怠った場合、手順書中の実施項目を省いてしまう。	第20-7表(6)	5.00E-02	5		2 * 3	0.1 * 4	2.00E-02	HD	5.10E-01
G-4	間違えた手動弁を選択する。ラベリングは明瞭、周囲に類似の弁がある。	第20-13表(2)	3.00E-03	3		2 * 3	0.1 * 4	1.20E-03	HD	5.01E-01
G-5	手動弁の操作に失敗する。(上昇システム、開度表示とともになし)	第20-14表(4)	1.00E-02	3		2 * 3	0.1 * 4	4.00E-03	HD	5.02E-01
H-1	チェックリストを適切に使用した場合に手順書中の実施項目を省いてしまう。	第20-7表(2)	3.00E-03	3		2 * 3	0.1 * 4	1.20E-03	LD	5.11E-02
H-2	チェックリストを適切に使用しなかった場合に手順書中の実施項目を省いてしまう。	第20-7表(4)	1.00E-02	3		2 * 3	0.1 * 4	4.00E-03	LD	5.38E-02
H-3	手順書の使用を怠った場合、手順書中の実施項目を省いてしまう。	第20-7表(6)	1.00E-02	5		2 * 3	0.1 * 4	4.00E-03	LD	5.38E-02
H-4	間違えたスイッチを選択する。	第20-12表(2)	3.00E-03	10		2 * 3	0.1 * 4	1.20E-03	LD	5.11E-02
H-5	スイッチを間違えた方向に操作する。	第20-12表(8)	1.00E-04	10		2 * 3	0.1 * 4	4.00E-05	LD	5.00E-02
H-6	機器等の状態を完全に変更しきらない。	第20-12表(12)	3.00E-03	3		2 * 3	0.1 * 4	1.20E-03	LD	5.11E-02
I-1	チェックリストを適切に使用した場合に手順書中の実施項目を省いてしまう。	第20-7表(2)	3.00E-03	3		2 * 3	0.1 * 4	1.20E-03	HD	5.01E-01
I-2	チェックリストを適切に使用しなかった場合に手順書中の実施項目を省いてしまう。	第20-7表(4)	1.00E-02	3		2 * 3	0.1 * 4	4.00E-03	HD	5.02E-01
I-3	手順書の使用を怠った場合、手順書中の実施項目を省いてしまう。	第20-7表(6)	1.00E-02	5		2 * 3	0.1 * 4	4.00E-03	HD	5.02E-01
I-4	間違えたスイッチを選択する。	第20-12表(2)	3.00E-03	10		2 * 3	0.1 * 4	1.20E-03	HD	5.01E-01
I-5	スイッチを間違えた方向に操作する。	第20-12表(8)	1.00E-04	10		2 * 3	0.1 * 4	4.00E-05	HD	5.00E-01
J-1	チェックリストを適切に使用した場合に手順書中の実施項目を省いてしまう。	第20-7表(2)	3.00E-03	3		2 * 3	0.1 * 4	1.20E-03	HD	5.01E-01
J-2	チェックリストを適切に使用しなかった場合に手順書中の実施項目を省いてしまう。	第20-7表(4)	1.00E-02	3		2 * 3	0.1 * 4	4.00E-03	HD	5.02E-01
J-3	手順書の使用を怠った場合、手順書中の実施項目を省いてしまう。	第20-7表(6)	1.00E-02	5		2 * 3	0.1 * 4	4.00E-03	HD	5.02E-01
J-4	間違えたスイッチを選択する。	第20-12表(2)	5.00E-04	10		2 * 3	0.1 * 4	2.00E-04	HD	5.00E-01
J-5	スイッチを間違えた方向に操作する。	第20-12表(8)	1.00E-04	10		2 * 3	0.1 * 4	4.00E-05	HD	5.00E-01

※1 BHEP+NHEP* (ストレス・経験因子) * (タギングレベル因子) * (回復要素) * (ストレス・経験因子)

※2 従属性 LD の場合
CHEP*(1+19*BHEP)/20従属性 MD の場合
CHEP*(1+6*BHEP)/7従属性 HD の場合
CHEP*(1+1*BHEP)/2

※3 熟練者、比較的高いストレス、ステップバイステップ作業 (第20-16表 (4):×2) を想定

※4 肩越しの検査 (第20-22表 (1):0.1) を考慮

図4.6-8 人間信頼性解析 (HRA-4) [2/2]

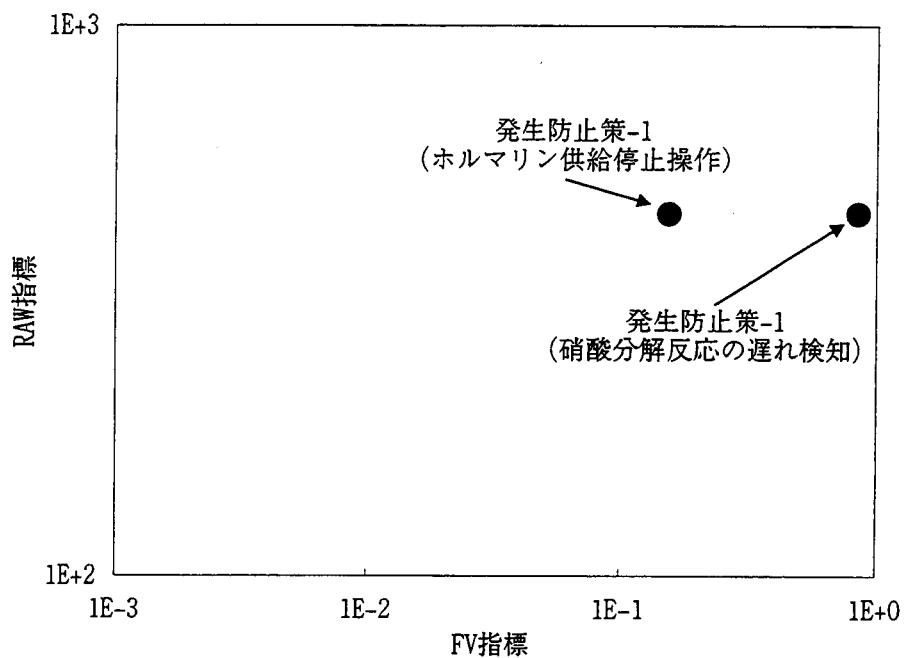


図4.6-9 重要度の把握結果

4.7 培焼還元炉における水素濃度の異常上昇

4.7.1 概要

プルトニウム転換技術開発施設の培焼還元工程は、脱硝工程でウラン及びプルトニウムの硝酸溶液にマイクロ波を用いて加熱・分解したのちに得られる酸化物粉末中のウラン酸化物の化学形態を三酸化ウラン (UO_3) から二酸化ウラン (UO_2) とする工程である。

培焼還元工程では、水素ガスを用いてウラン酸化物の還元を行っている。水素ガスは、酸素と混合すると爆発する可能性があるため、還元ガスとして使用している水素ガスと空気がいかなる比率で混合しても爆発しないように水素ガスを窒素ガスで希釈している。

しかし、還元ガスとして使用する窒素・水素混合ガス（以下「NH 混合ガス」という）中の水素濃度が異常上昇した場合（水素濃度 6.4%以上）に、空気と混合することによって爆発の可能性がある。

このため、培焼還元炉における水素爆発の発生防止策として以下の対策を講じている（図 4.7-1）。

- ・ NH ガス中間槽の水素濃度上限操作上限警報($\text{H}_2\text{O}+\text{A+}$)により、濃度高を検知し NH 混合ガスの供給を自動停止する。
- ・ NH ガス中間槽の水素濃度上限緊急操作($\text{H}_2\text{P+}$)により水素濃度高を検知し、培焼還元炉への NH 混合ガスの供給を自動停止する。

なお、通常、培焼還元炉の運転中は培焼還元炉内に酸素が存在しないことから、水素濃度が異常上昇した場合でも、直ちに爆発が発生するものではない。

4.7.2 評価結果

3.の評価手法に従い、事故発生防止策の特徴及び重要度の把握を以下のように実施した。

1) イベントツリーの作成

図 4.7-2 に作成したイベントツリーを示す。

起因事象として、還元ガス中の水素濃度の異常上昇を考慮した。

起因事象に対しての事故発生防止策としては、培焼還元炉へ供給する NH 混合ガスの水素濃度が異常に上昇した際に作動する、水素ガス濃度上限操作上限警報による NH 混合ガスの供給自動停止機能、水素ガス濃度上限緊急操作による NH 混合ガスの供給自動停止機能を考慮した。

2) フォールトツリーの作成

イベントツリーで考慮した起因事象及び各発生防止策に対し、図 4.7-3 に示すフォールトツリーを作成した。

3) 定量化

① 起因事象発生確率の算出

定量化に用いた故障率を表 4.7-1 に示す。水素ガス流量調節計、窒素ガス流量調節計、及び調節弁の故障については、東海再処理施設プルトニウム転換技術開発施設の設備保全履歴より、故障履歴がないことを確認した。このため、3 章及

び付録 2 で述べている「0 件故障の取扱い」より、焙焼還元工程の平均運転時間と故障回数 0.5 から故障率を算出した。

また、調節計の誤設定については、図 4.7-4 に示す人間信頼性解析を実施することにより、作業 1 回あたりの失敗確率を算出し、それと工程運転中の操作頻度を用い時間当たりの発生確率を算出した。

② 発生防止策の失敗確率の算出

定量化に用いた故障率を表 4.7-1 に示す。

③ イベントツリーの定量化

①、②で算出した値を用い、イベントツリーの定量化を行った。この結果、焙焼還元炉における水素濃度の異常上昇の発生確率は、 $6.96E-06(y)$ となった。なお、通常、焙焼還元炉の運転中は焙焼還元炉内に酸素が存在しないことから、水素濃度が異常上昇した場合でも、直ちに爆発が発生するものではない。

4) 重要度評価

定量化したイベントツリーの各発生防止策の重要度を把握するため、重要度評価を実施した。重要度の把握結果を図 4.7-5 に示す。同結果より、FV,RAW の各指標において以下のような特徴が見られた。

① FV 指標

水素ガス濃度上限緊急操作、水素ガス濃度上限操作上限警報のどちらか一方が作動すれば水素爆発を防止できる。そのため、水素ガス濃度上限緊急操作及び水素ガス濃度上限操作上限警報ともに 1 を示した。

② RAW 指標

水素ガス濃度上限緊急操作が水素ガス濃度上限操作上限警報に比べて相対的に若干高い値を示した。

4.7.3 発生防止策の特徴及び重要度の把握結果

PSA 手法を用いた事故シーケンスの定量化及び同結果に基づく重要度の把握を実施した結果、以下のようないし見が得られた。

発生防止策の特徴として、水素ガス濃度上限緊急操作と水素ガス濃度上限操作上限警報の 2 系統化されていることが挙げられる。故に仮に 1 系統が作動しない場合でも他系統で NH 混合ガスの供給を自動停止させることが可能である。事故シーケンスは 1 通りであり、水素ガス濃度上限緊急操作及び水素ガス濃度上限操作上限警報が作動しない場合に発生する可能性があることが分かった。

重要度の把握結果より、水素ガス濃度上限緊急操作及び水素ガス濃度上限操作上限警報ともに水素爆発の発生を防止する上で重要な役割を果たしていることがわかった。

4.7.4 まとめ

高濃度の水素ガスを含む NH 混合ガスが焙焼還元炉に供給された場合に水素爆発にいたる可能性について、PSA 手法を用いた事故発生防止策の特徴及び重要度の把握を実施した結果、以下の知見が得られた。

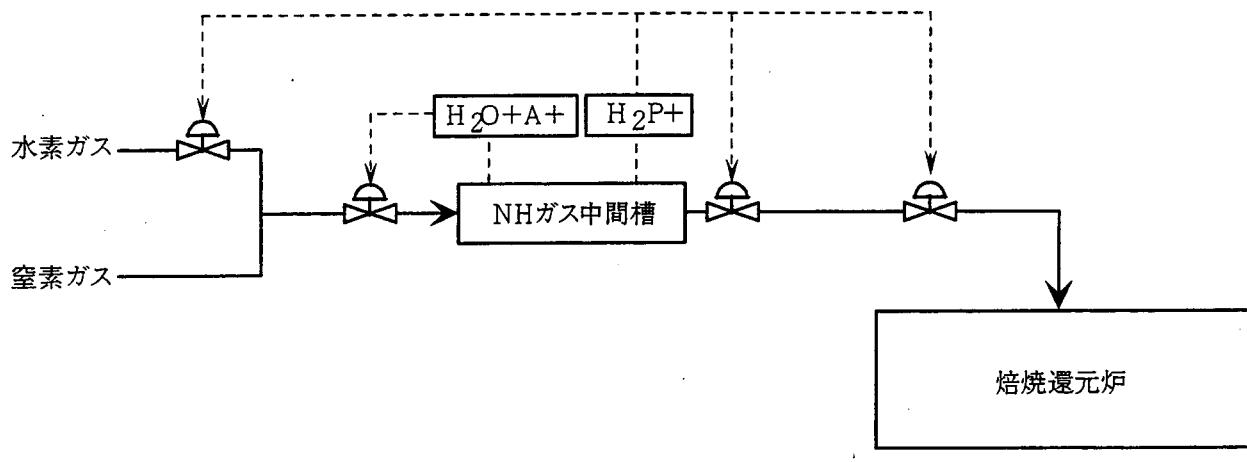
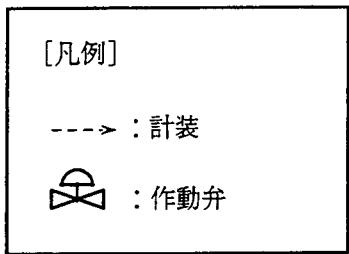
- ・ 焙焼還元炉における水素濃度の異常上昇の発生確率は、 $6.96E-06 (y)$ となった。なお、通常、焙焼還元炉の運転中は焙焼還元炉内に酸素が存在しないことから、

- 水素濃度が異常上昇した場合でも、直ちに爆発が発生するものではない。
- 重要度評価を実施した結果、RAW 指標において水素ガス濃度上限緊急操作が水素ガス濃度上限操作上限警報に比べて相対的に若干高い値を示した。

表4.7-1 故障率・過誤率一覧表

基事象番号	不全モード		故障率データ			近隣操作回数、使用回数 [/y]	試験間隔、点検周期 [/h]	故障率
	機器グループ種別	故障モード	[/h]	[/d]	出典			
FT-1 01	水素流量測定計 (FICS41-1)	動作不良			東海再処理施設の実績	故障実績なし (0.5)	30400	1.64E-05 /h
FT-1 02	水素流量測定計 (FIS32-1)	動作不良					30400	1.64E-05 /h
FT-1 03	流量測定弁 (W101)	動作不良					30400	1.64E-05 /h
FT-1 04	運転員	流量比率設定(FICS41-1)の誤設定		1.00E-03	図4.7-4 HRA-1	12	※ 1600	7.50E-06 /h
FT-2 01	圧空作動弁 (W102)	故障	1.00E-05		NUREG/CR2815		720	3.60E-03 /d
FT-2 02	変換器		2.39E-06		IEEE STD-500 (1984)		720	8.60E-04 /d
FT-2 03	水素濃度計		1.64E-05		東海再処理施設の実績		720	5.90E-03 /d
FT-2 04	警報回路		1.02E-06		IEEE STD-500 (1984)		720	3.67E-04 /d
FT-3 01	圧空作動弁	故障	1.00E-05		NUREG/CR2815		720	3.60E-03 /d
FT-3 02	電磁弁		2.00E-06		NUREG/CR2815		24	2.40E-05 /d
FT-3 03	変換器		2.39E-06		IEEE STD-500 (1984)		720	8.60E-04 /d
FT-3 04	水素濃度計		1.64E-05		東海再処理施設の実績		720	5.90E-03 /d
FT-3 05	警報回路		1.02E-06		IEEE STD-500 (1984)		720	3.67E-04 /d

※ 年間2キャンペーンの200日運転、1日8時間の還元と仮定。



焙焼還元工程)

図 4.7-1 発生防止策概要図

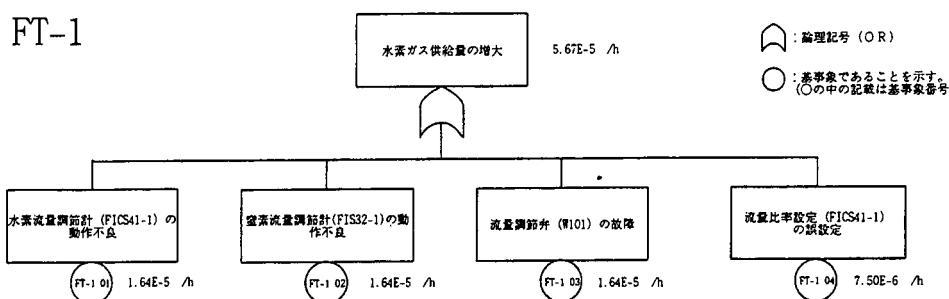
起因事象	発生防止策-1	発生防止策-2	水素濃度の異常上昇		発生確率
NH混合ガス中間貯槽への水素ガス供給量の増大	水素ガス濃度上限操作 上限警報の作動による NH混合ガス供給自動停止	水素ガス濃度上限緊急操作の作動による NH混合ガス供給自動停止			
5.68E-05 (/h)	成功		なし		
	失敗	成功	なし		
	1.07E-02		有り	4.35E-09 (/h)	
		失敗			
		7.13E-03			
事象発生頻度		合計	6.96E-06 (/y)		

イベントツリーの分岐確率算出根拠

事象の種類	基本確率	単位	基本確率 算出根拠	従属性	事象発生確率 (分岐確率)
起因事象	5.68E-05	/h	図4.7-3 FT-1	-	5.68E-05 /h
発生防止策-1	1.07E-02	/d	図4.7-3 FT-2	-	1.07E-02 /d
発生防止策-2	7.13E-03	/d	図4.7-3 FT-3	-	7.13E-03 /d

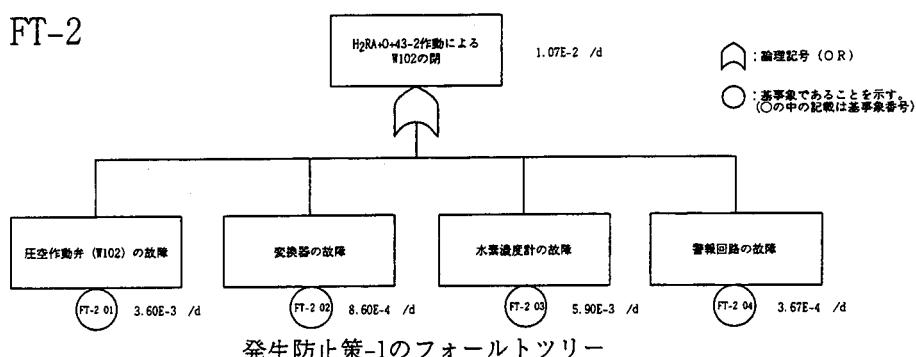
図4.7-2 イベントツリー

FT-1



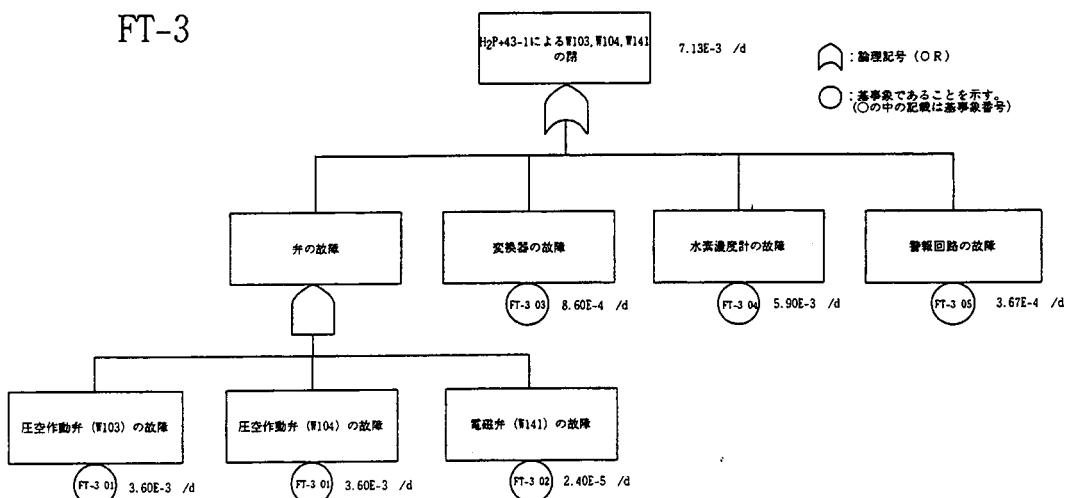
起因事象のフォールトツリー

FT-2



発生防止策-1のフォールトツリー

FT-3



発生防止策-2のフォールトツリー

図4.7-3 起因事象及び発生防止策のフォールトツリー

1.00E-02	1.00E-03	1.00E-05			操作手順		
\$ - 2	A-C	失敗			A 流量比率設定の誤設定		
	成功						
5.00E-01	1.00E-03	4.95E-04					
\$ - 3	A-C	失敗					
	成功						
1.00E-03	4.95E-04						
A-C	失敗						
	成功						
			Total		1.00E-03 /d		

人的過誤率表

エラー番号	エラー内容	表番号 項目番号 (NUREC/CR-1278)	NHEP	EF	タギング レベル 因子	ストレス・ 経験因子	回復要素	BHEP ※ 1	従属性	CHEP ※ 2
\$ - 1	運転管理に従わず、手順書を使用しない。	第20-6表(3)	1.00E-02	3				1.00E-02		1.00E-02
\$ - 2	運転管理に従わず、チェックリストを使用しない。	第20-6表(8)	5.00E-01	5				5.00E-01		5.00E-01
A - 2	スイッチを間違った設置にセットする。	第20-12表(8)	1.00E-03	10				1.00E-03		1.00E-03

※ 1

 $BHEP = NHEP * (\text{ストレス} \cdot \text{経験因子}) * (\text{タギングレベル因子}) * |(\text{回復要素}) * (\text{ストレス} \cdot \text{経験因子})|$

※ 2

従属性 LD の場合

$$CHEP = (1+19*BHEP)/20$$

従属性 MD の場合

$$CHEP = (1+6*BHEP)/7$$

従属性 HD の場合

$$CHEP = (1+1*BHEP)/2$$

図4.7-4 人間信頼性解析結果 (HRA-1)

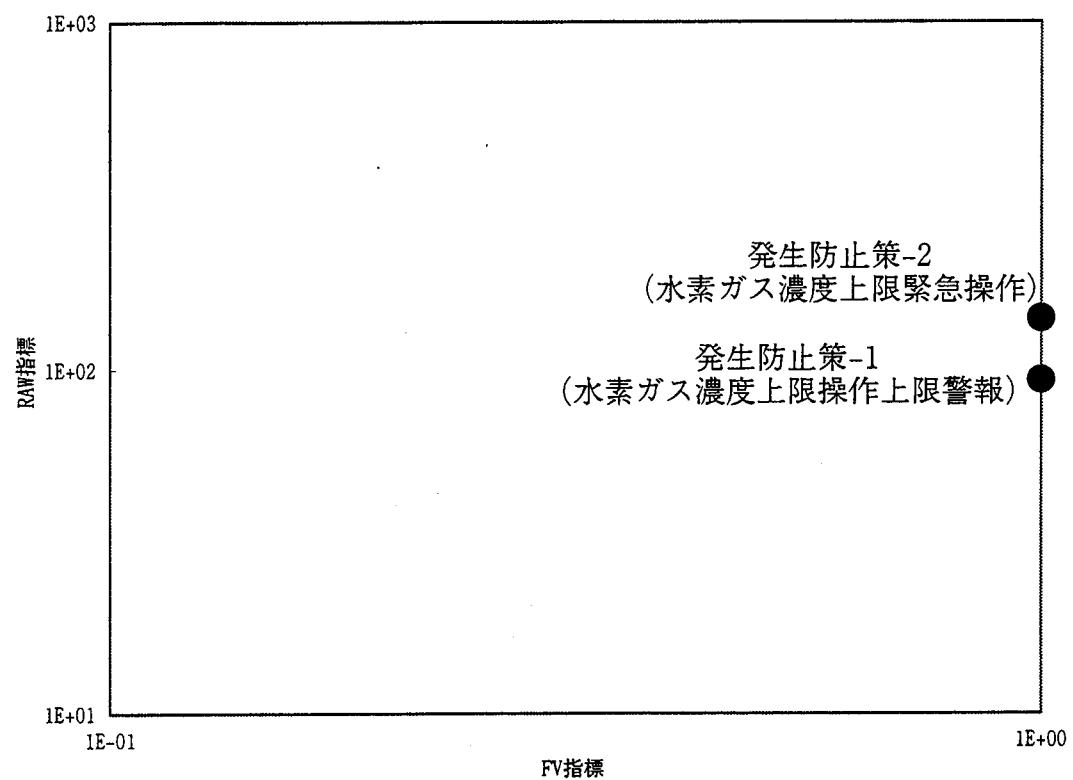


図4.7-5 重要度の把握結果

4.8 圧空の供給停止

[分離精製工場]

4.8.1 概要

分離精製工場、廃棄物処理場等で使用する圧縮空気は分析所地下の空気圧縮機で製造する。圧縮空気は冷却器、脱湿装置等をへて動力用、水素掃気用、攪拌用、計装用等に区分し、一部は圧縮空気貯槽に貯蔵され、負荷側に供給される。

空気圧縮機が故障または停止した場合に水素掃気用圧空が停止することによる水素爆発の可能性がある。

このため、圧縮空気の供給停止の発生防止策として以下の対策を講じている。(図4.8-1)

- ・ 分離精製工場圧縮空気設備には4基の空気圧縮機があり2基を常時運転している。もし、空気圧縮機が故障した場合、予備の空気圧縮機を起動し、圧縮空気の供給を継続する。
- ・ 分析所地下の圧空貯槽の圧力下限警報(PA-)により、圧力の異常低下を検知した場合、手動により予備の空気圧縮機を起動する。

4.8.2 評価結果

3.の評価手法に従い、事故発生防止策の特徴及び重要度の把握を以下のように実施した。

1) イベントツリーの作成

図4.8-2に作成したイベントツリーを示す。

今回の評価では、空気圧縮機の故障または停止した場合を起因事象とした。

起因事象に対しての事故発生防止策としては、圧縮空気圧力が低下した際に作動する、圧力下限警報の発報による運転員の検知と対応(手動による予備空気圧縮機の起動)を考慮した。

2) 定量化

① 起因事象発生確率の算出

定量化に用いた故障率を表4.8-1に示す。空気圧縮機の故障については、東海再処理施設の設備保全履歴より、故障履歴がないことを確認した。このため、3章及び付録2で述べている「東海再処理施設の実績を用いた故障率の設定方法」より、空気圧縮機1台当たりの稼働時間と故障回数0.5から故障率を算出した。

② 発生防止策の失敗確率の算出

定量化に用いた故障率を表4.8-1に示す。また、手動による空気圧縮機の切替作業のヒューマンエラー発生確率を設定した人間信頼性解析は図4.8-3に示す。

③ イベントツリーの定量化

①、②で算出した値を用い、イベントツリーの定量化を行った。この結果、分離精製工場における圧縮空気の供給停止の発生確率は、9.54E-06(y)となった。

3) 重要度評価

定量化したイベントツリーの各発生防止策の重要度を把握するため、重要度評価を

実施した。重要度の把握結果を図 4.8-4 に示す。同結果より、FV,RAW の各指標において以下のような特徴が見られた。

① FV 指標

予備の空気圧縮機の起動及び従属故障である警報回路が相対的に高い値を示した。

② RAW 指標

予備の空気圧縮機の起動及び従属故障である警報回路が相対的に高い値を示した。

4.8.3 発生防止策の特徴及び重要度の把握結果

PSA 手法を用いた事故シーケンスの定量化及び同結果に基づく重要度の把握を実施した結果、以下のようないし見が得られた。

発生防止策の特徴としては、発生防止策間に従属故障が存在することである。また、仮に予備圧縮機の起動操作を失敗したとしても、複数の圧空貯槽により圧空喪失に至るまでの時間的余裕があるため、2 度目の予備圧縮機起動操作に成功すれば圧空を回復することができる。

重要度の把握結果より、圧縮空気の供給停止の発生防止上最も重要な役割を果たしているのは、予備の空気圧縮機の起動と警報回路であることがわかった。

4.8.4 まとめ

分離精製工場の圧縮空気製造設備の空気圧縮機が故障または停止した場合の圧縮空気の供給停止の可能性について、PSA 手法を用いた事故発生防止策の特徴及び重要度の把握を実施した結果、以下の知見が得られた。

- ・ 分離精製工場における圧縮空気の供給停止の発生確率は、9.54E-06(/y)となった。
- ・ 重要度評価を実施した結果、予備の空気圧縮機の起動及び従属故障である警報回路が事故発生防止上重要な役割を果たしていることが明かとなった。

[高放射性廃液貯蔵場]

4.8.5 概要

高放射性廃液貯蔵場で使用する圧縮空気は、高放射性廃液貯蔵場内に設置された空気圧縮機で製造し、圧空貯槽をへたのち、減圧弁により圧力を調整し、除湿器、圧空貯槽をへてエアリフト駆動用、計装用、攪拌用、水素掃気用等に区分し、負荷側に供給される。

空気圧縮機が故障または停止した場合に水素掃気用圧空が停止することによる水素爆発の可能性がある。

このため、圧縮空気の供給停止の発生防止策として以下の対策を講じている。(図 4.8-5)

- ・ 高放射性廃液貯蔵場圧縮空気設備には 2 基の空気圧縮機があり 1 基を常時運転としている。空気圧縮機が故障または停止した場合には、空気圧縮機の異常信号を受け自動切替回路が作動し、予備の空気圧縮機を自動起動することにより圧縮空気の供給を継続する。
- ・ 空気圧縮機が故障または停止した場合には、空気圧縮機の異常信号を受け警報が発報する。その警報により空気圧縮機の異常検知した場合、手動により予備の空気圧縮機を起動する。

- ・高放射性廃液貯蔵場圧縮空気設備の各圧空貯槽の圧力下限警報（PA-）により圧力の異常低下を検知した場合、手動により予備の空気圧縮機を起動する。

4.8.6 評価結果

3.の評価手法に従い、事故発生防止策の特徴及び重要度の把握を以下のように実施した。

1) イベントツリーの作成

図 4.8-6 に作成したイベントツリーを示す。

今回の評価では、空気圧縮機の故障または停止した場合を起因事象とした。

起因事象に対しての事故発生防止策としては、圧縮機の異常信号を受け予備圧縮機に自動的に切替える圧縮機自動切替回路の作動、空気圧縮機の異常警報の発報による運転員の検知と対応、圧縮空気圧力が低下した際に作動する圧力下限警報の発報による運転員の検知と対応（手動による予備空気圧縮機の起動）を考慮した。

ただし、起因事象である空気圧縮機が故障した場合に、圧縮機の異常信号を発信しない場合があることが、「安全性確認」で明らかとなっている。このため、イベントツリー上では、圧縮機の異常信号を発信する空気圧縮機の故障または停止を起因事象とする事象進展と、異常信号を発信しない故障の事象進展を別シナリオとして記載した。

2) 定量化

① 起因事象発生確率の算出

定量化に用いた故障率を表 4.8-2 に示す。空気圧縮機の故障については、東海再処理施設の設備保全履歴より、故障履歴がないことを確認した。このため、3 章及び付録 2 で述べている「東海再処理施設の実績を用いた故障率の設定方法」より、空気圧縮機 1 台当たりの稼働時間と故障回数 0.5 から故障率を算出した。

② 発生防止策の失敗確率の算出

定量化に用いた故障率を表 4.8-2 に示す。また、手動による空気圧縮機の切替作業のヒューマンエラー発生確率を設定した人間信頼性解析は図 4.8-7 に示す。

③ イベントツリーの定量化

①、②で算出した値を用い、イベントツリーの定量化を行った。この結果、分離精製工場における圧縮空気の供給停止の発生確率は、 $2.67E-05(1/y)$ となった。

3) 重要度評価

定量化したイベントツリーの各発生防止策の重要度を把握するため、重要度評価を実施した。重要度の把握結果を図 4.8-8 に示す。同結果より、FV,RAW の各指標において以下のような特徴が見られた。

① FV 指標

圧縮機自動切替回路作動による予備空気圧縮機の起動、予備の空気圧縮機の起動及び従属故障である警報回路が相対的に高い値を示した。

② RAW 指標

予備の空気圧縮機の起動及び従属故障である警報回路が相対的に高い値を示した。

4.8.7 発生防止策の特徴及び重要度の把握結果

PSA 手法を用いた事故シーケンスの定量化及び同結果に基づく重要度の把握を実施した結果、以下のような知見が得られた。

発生防止策の特徴としては、発生防止策間に従属故障が存在することである。また、仮に予備の空気圧縮機の起動操作を失敗したとしても、複数の圧空貯槽により圧空喪失に至るまでの時間的余裕があるため、2度目の予備の空気圧縮機の起動操作に成功すれば圧空を回復することができる。

重要度の把握結果より、圧縮空気の供給停止の発生防止上最も重要な役割を果たしているのは、予備の空気圧縮機の起動及び従属故障である警報回路であることがわかった。

4.8.8 まとめ

高放射性廃液貯槽の圧縮空気製造設備の空気圧縮機が故障または停止した場合の圧縮空気の供給停止の可能性について、PSA 手法を用いた事故発生防止策の特徴及び重要度の把握を実施した結果、以下の知見が得られた。

- ・ 高放射性廃液貯槽における圧縮空気の供給停止の発生確率は、 $2.67E-05(y)$ となつた。
- ・ 重要度評価を実施した結果、予備の空気圧縮機の起動が事故発生防止上重要な役割を果たしていることが明らかとなった。

表4.8-1 故障率・過誤率一覧表

基事象番号	不全モード		故障率データ			近隣操作回数、 使用回数 [/y]	試験間隔、点検 周期 [/h]	故障率
	機器グループ 種別	故障モード	[/h]	[/d]	出典			
ET 01	空気圧縮機	故障または停止	2.28E-06		東海再処理施設の実績 (0件)			2.28E-06 /h
ET 02	圧力スイッチ	故障	-	1.01E-06	IEEE STD-500(1984)			1.01E-06 /d
ET 03	警報回路		1.02E-06	-	IEEE STD-500(1984)		720	3.67E-04 /d*
ET 04	運転員	手動切替え作業	-	2.98E-03	図4.8-3 HRA-1			2.98E-03 /d
ET 05	予備の 空気圧縮機	起動失敗	-	1.10E-04	東海再処理施設の実績 (0件)			1.10E-04 /d

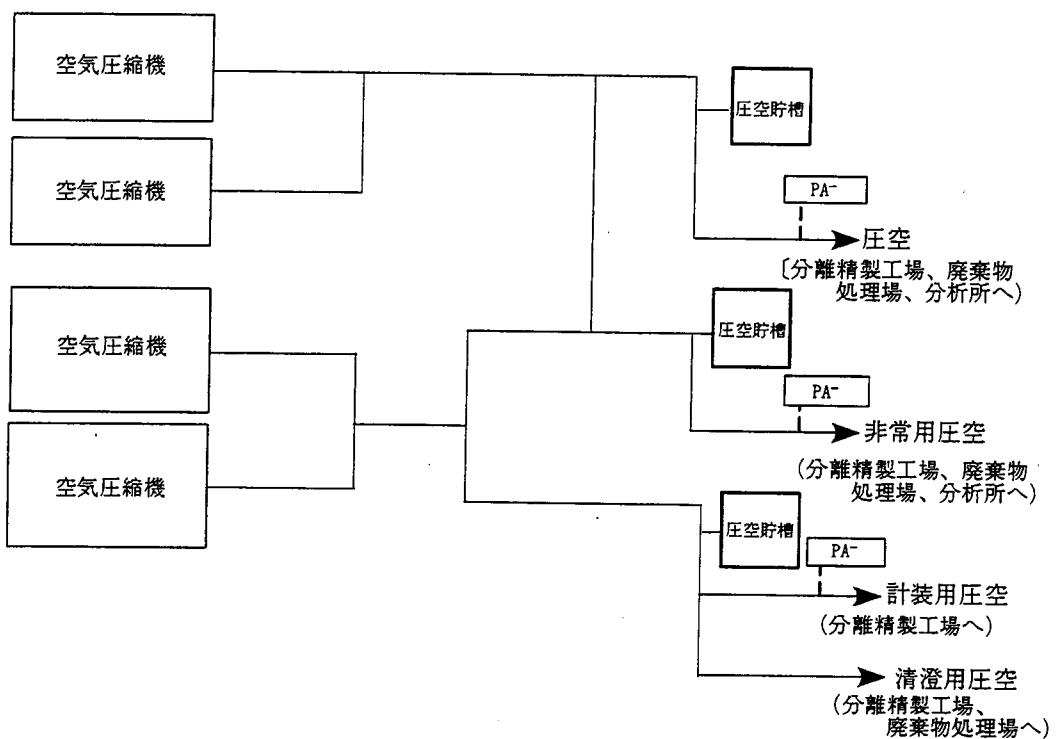
2キャンペーン年間300日運転と仮定

デマンド当たりの故障率は、時間当たりの故障率に点検周期/2をかけて評価

表4.8-2 故障率・過誤率一覧表

基事象番号	不全モード		故障率データ			近傍操作回数、 使用回数 [/y]	試験間隔、点検 周期 [/h]	故障率
	機器グループ 種別	故障モード	[/h]	[/d]	出典			
ET 01	空気圧縮機	故障または停止	3.00E-06	-	東海再処理施設の実績 (0件)			3.00E-06 /h
ET 02	圧縮機自動切替回路	故障	1.70E-06	-	IEEE STD-500 (1984; リレー10個と仮定)		8760	7.45E-03 /d*
ET 03	警報回路	故障	1.02E-06	-	IEEE STD-500(1984)		8	4.08E-06 /d*
ET 04	運転員	手動切替え作業	-	6.63E-04	図4.8-7 HRA-1			6.63E-04 /d
ET 05	圧力スイッチ	故障	-	1.01E-06	IEEE STD-500(1984)			1.01E-06 /d
ET 06	予備の空気圧縮機	起動失敗	-	5.05E-04	東海再処理施設の実績 (0件)			5.05E-04 /d

2キャンペーン年間300日運転と仮定
* デマンド当たりの故障率は、時間当たりの故障率に点検周期/2をかけて評価



資料4.8-1 発生防止策概要図
[分離精製工場]

起因事象	発生防止策-1			発生防止策-2			発生防止策-3			予備の空気圧縮機の起動	空気圧縮機の喪失の可能性	発生確率
	圧縮空気貯槽の圧力下限警報 (PA-) の発報 (1回目) 及び運転員の検知・対応	圧縮空気貯槽の圧力下限警報 (PA-) の発報 (2回目) 及び運転員の検知・対応	圧縮空気貯槽の圧力下限警報 (PA-) の発報 (3回目) 及び運転員の検知・対応	圧力スイッチ (PA-)	警報回路 (従属性障害)	運転員の検知・手動切替作業	圧力スイッチ (PA-)	警報回路 (従属性障害)	運転員の検知・手動切替作業			
空気圧縮機の故障または停止	圧力スイッチ (PA-)	警報回路 (従属性障害)	運転員の検知・手動切替作業	圧力スイッチ (PA-)	警報回路 (従属性障害)	運転員の検知・手動切替作業	圧力スイッチ (PA-)	警報回路 (従属性障害)	運転員の検知・手動切替作業	成功	なし	なし
2.28E-06/h	成功	成功	成功	失敗	失敗	失敗	失敗	失敗	失敗	失敗	あり	2.49E-10 (h)
				2.98E-03	成功	成功	失敗	失敗	失敗	失敗	なし	7.44E-13 (h)
					2.98E-03	失敗	失敗	失敗	失敗	失敗	あり	2.22E-15 (h)
						失敗	失敗	失敗	失敗	失敗	あり	6.05E-14 (h)
							失敗	失敗	失敗	失敗	あり	2.05E-17 (h)
							失敗	失敗	失敗	失敗	なし	7.51E-19 (h)
								失敗	失敗	失敗	あり	2.05E-17 (h)
								失敗	失敗	失敗	あり	6.94E-21 (h)
									失敗	失敗	あり	8.38E-10 (h)
									失敗	失敗	なし	2.52E-16 (h)
									失敗	失敗	あり	7.51E-19 (h)
									失敗	失敗	あり	2.05E-17 (h)
									失敗	失敗	あり	6.94E-21 (h)
									失敗	失敗	あり	8.47E-16 (h)
									失敗	失敗	なし	2.54E-22 (h)
									失敗	失敗	あり	6.94E-21 (h)
									失敗	失敗	あり	8.55E-22 (h)
									失敗	失敗	あり	2.35E-24 (h)
									失敗	失敗	計	1.09E-09 (h)
											事象発生確率	9.54E-06 /v

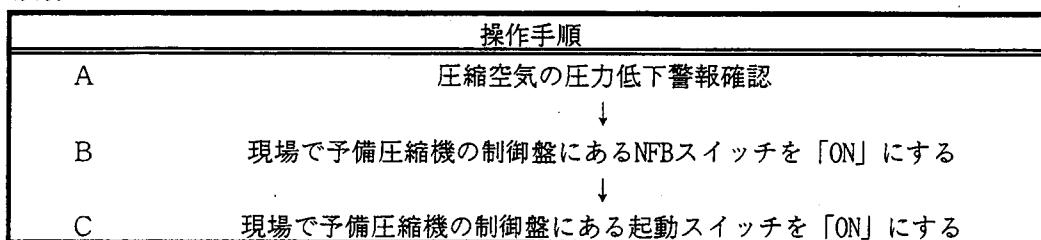
イベントツリーの分岐確率算出根拠

事象の種類	基本確率	単位	基本確率 算出根拠	従属性	事象発生確率 (分岐確率)
起因事象	2.28E-06	/h	表4.8-1 ET01	-	2.28E-06 /h
発生防止策-1 圧力スイッチ 警報回路 運転員の検知・手動切替作業	1.01E-06 3.67E-04 2.98E-03	/d /d /d	表4.8-1 ET 02 表4.8-1 ET 03 表4.8-1 ET 04	- - -	1.01E-06 /d 3.67E-04 /d 2.98E-03 /d
発生防止策-2 圧力スイッチ 警報回路 運転員の検知・手動切替作業	1.01E-06 3.67E-04 2.98E-03	/d /d /d	表4.8-1 ET 02 表4.8-1 ET 03 表4.8-1 ET 04	- - -	1.01E-06 /d 3.67E-04 /d 2.98E-03 /d
発生防止策-3 圧力スイッチ 警報回路 運転員の検知・手動切替作業 子備の空気圧縮機の起動	1.01E-06 3.67E-04 2.98E-03 1.10E-04	/d /d /d /d	表4.8-1 ET 02 表4.8-1 ET 03 表4.8-1 ET 04 表4.8-1 ET 05	- - - -	1.01E-06 /d 3.67E-04 /d 2.98E-03 /d 1.10E-04 /d

図4.8-2 イベントツリー

		1.00E-04
A - 1		失敗
		1.00E-04
5.00E-03	2.00E-03	1.00E-05
\$ - 1	B - O (1)	失敗
	6.20E-04	3.09E-06
	B - C (1)	失敗
	1.00E-03	4.99E-06
	C - O (1)	失敗
	3.10E-04	1.54E-06
	C - C (1)	失敗
		成功
		5.00E-01
\$ - 2	B - O (2)	失敗
	6.20E-04	3.08E-04
	B - C (2)	失敗
	1.00E-03	4.96E-04
	C - O (2)	失敗
	3.10E-04	1.54E-04
	C - C (2)	失敗
		成功
		6.00E-04
	B - O (3)	失敗
	6.20E-04	3.08E-04
	B - C (3)	失敗
	3.00E-04	1.49E-04
	C - O (3)	失敗
	3.10E-04	1.54E-04
	C - C (3)	失敗
		成功

分歧番号	エラー番号	人的過誤率
A - 1	A - 1	1.00E-04
\$ - 1	\$ - 1	5.00E-03
\$ - 2	\$ - 2	5.00E-01
B - O (1)	B - 3	2.00E-03
B - C (1)	B - 4, 5, 6	6.20E-04
C - O (1)	C - 3	1.00E-03
C - C (1)	C - 4, 5, 6	3.10E-04
B - O (2)	B - 2	2.00E-03
B - C (2)	B - 4, 5, 6	6.20E-04
C - O (2)	C - 2	1.00E-03
C - C (2)	C - 4, 5, 6	3.10E-04
B - O (3)	B - 1	6.00E-04
B - C (3)	B - 4, 5, 6	6.20E-04
C - O (3)	C - 1	3.00E-04
C - C (3)	C - 4, 5, 6	3.10E-04



Total 2.98E-03 /d

図4.8-3 人間信頼性解析結果 (HRA-1) [1/2]

人的過誤率表

エラー番号	エラー内容	表番号 項目番号 (オブジェクト)	NHEP	EF	タギング レベル 因子	ストレ ス・経験 因子	回復要素	BHEP ※1	従属性	CHEP ※2
S-1	運転管理に従わず、手順書を使用しない。	第20-6表(4)	5.00E-03	10				5.00E-03		5.00E-03
S-2	運転管理に従わず、チェックリストを使用しない。	第20-6表(8)	5.00E-01	5				5.00E-01		5.00E-01
A-1	警報に気付かない。	第20-23表(1)	1.00E-04	10				1.00E-04		1.00E-04
B-1	チェックリストを適切に使用した場合に手順書中の実施項目を省いてしまう。	第20-7表(2)	3.00E-03	3		2*3	5.00E-02 *4	6.00E-04		6.00E-04
B-2	チェックリストを適切に使用しなかった場合に手順書中の実施項目を省いてしまう。	第20-7表(4)	1.00E-02	3		2*3	5.00E-02 *4	2.00E-03		2.00E-03
B-3	手順書の使用を忘った場合、手順書中の実施項目を省いてしまう。	第20-7表(6)	1.00E-02	5		2*3	5.00E-02 *4	2.00E-03		2.00E-03
B-4	間違えたスイッチを選択する。	第20-12表(2)	3.00E-03	3		2*3	5.00E-02 *4	6.00E-04		6.00E-04
B-5	スイッチを間違った方向に操作する。	第20-12表(8)	1.00E-04	10		2*3	5.00E-02 *4	2.00E-05		2.00E-05
C-1	チェックリストを適切に使用した場合に手順書中の実施項目を省いてしまう。	第20-7表(2)	3.00E-03	3		2*3	5.00E-02 *4	6.00E-04	HD	3.00E-04
C-2	チェックリストを適切に使用しなかった場合に手順書中の実施項目を省いてしまう。	第20-7表(4)	1.00E-02	3		2*3	5.00E-02 *4	2.00E-03	HD	1.00E-03
C-3	手順書の使用を忘った場合、手順書中の実施項目を省いてしまう。	第20-7表(6)	1.00E-02	5		2*3	5.00E-02 *4	2.00E-03	HD	1.00E-03
C-4	間違えたスイッチを選択する。	第20-12表(2)	3.00E-03	10		2*3	5.00E-02 *4	6.00E-04	HD	3.00E-04
C-5	スイッチを間違えた方向に操作する。	第20-12表(8)	1.00E-04	10		2*3	5.00E-02 *4	2.00E-05	HD	1.00E-05

※1 $BHEP = NHEP \times (\text{ストレス・経験因子})^* \times (\text{タギングレベル因子})^* \times |(\text{回復要素})^* \times (\text{ストレス・経験因子})|$

※2 従属性L Dの場合
 $CEP = (1+19*BHEP)/20$
 従属性M Dの場合
 $CEP = (1+6*BHEP)/7$
 従属性H Dの場合
 $CEP = (1+1*BHEP)/2$

※3 熟練者、比較的高いストレス、ステップバイステップ作業（第20-16表 (4):×2）を想定

※4 タスクB,Cについては、現場で予備機が正常に起動しているか点検する項目があるため、自分自身による「特に要請された点検」を考慮

図4.8-3 人間信頼性解析 (HRA-1) [2/2]

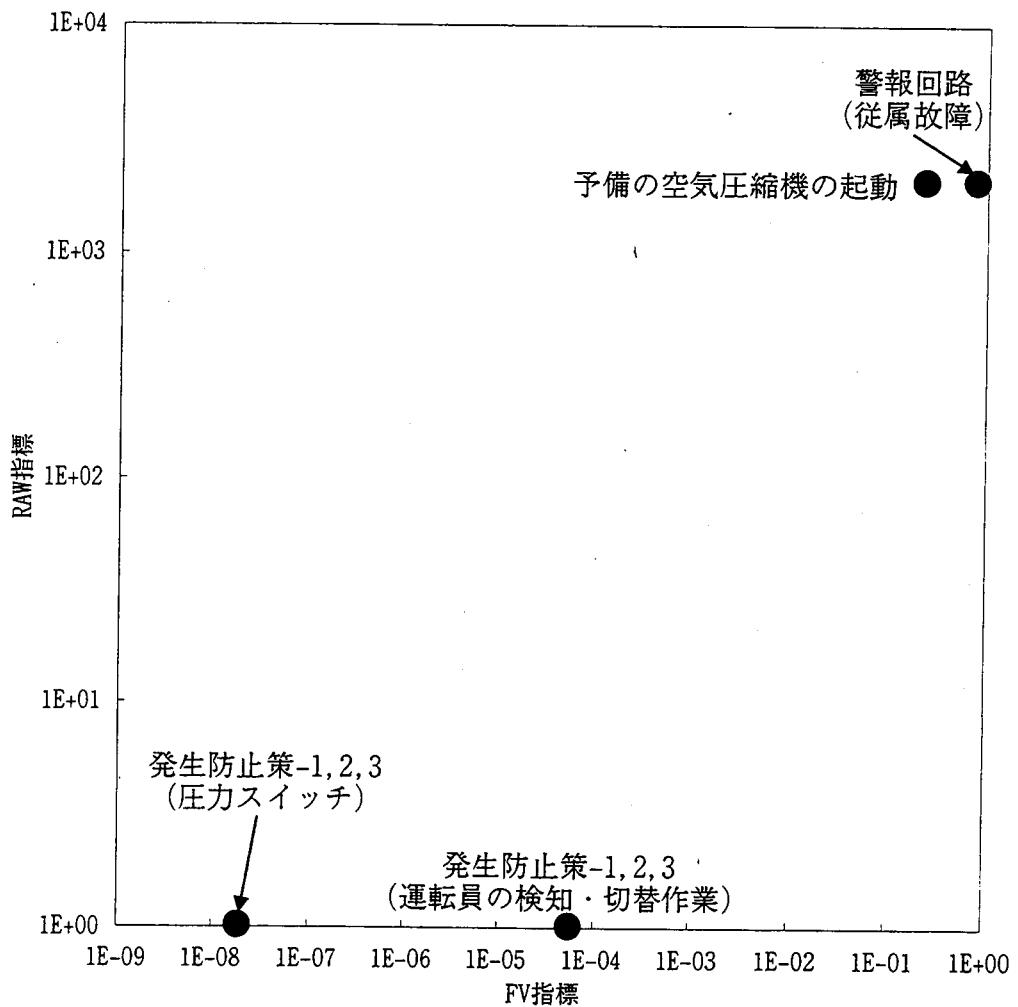


図4.8-4 重要度の把握結果

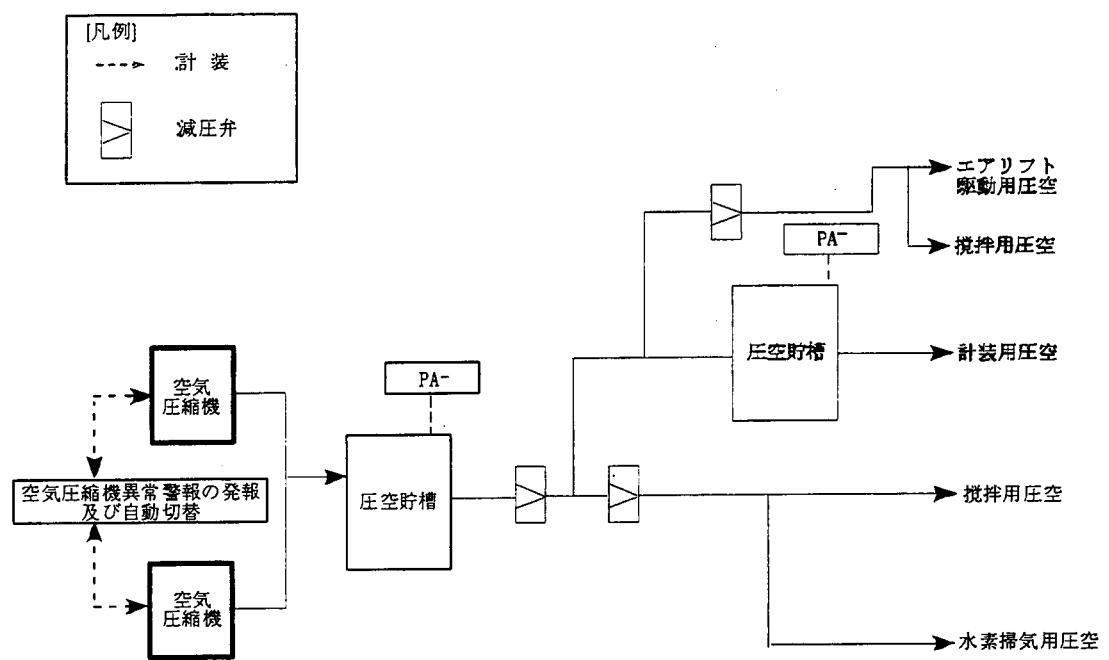


図4.8-5 発生防止策概要図

起因事象	発生防止策-1			発生防止策-2			発生防止策-3			子備の空気圧縮機の起動	圧縮空気漏失の可能性	発生確率		
	空気圧縮機異常警報及び空気圧縮機の自動切替	圧縮空気貯槽 (PA-) の発報 (1回目) 及び運転員の検知・対応	圧縮空気貯槽 (PA-) の発報 (2回目) 及び運転員の検知・対応	空気圧縮機自動切替回路の作業による子備の空気圧縮機の起動	運転員の検知・手動切替作業	圧力スイッチ (PA-)	警報回路 (従属性)	運転員の検知・手動切替作業	圧力スイッチ (PA-)	警報回路 (従属性)	運転員の検知・手動切替作業			
主電動機過負荷の発生 その他の(警報を発報しない故障)	空気圧縮機自動切替回路の作業による子備の空気圧縮機の起動	警報回路 (従属性)	運転員の検知・手動切替作業	圧力スイッチ (PA-)	警報回路 (従属性)	運転員の検知・手動切替作業	圧力スイッチ (PA-)	警報回路 (従属性)	運転員の検知・手動切替作業	圧力スイッチ (PA-)	警報回路 (従属性)	運転員の検知・手動切替作業	なし	なし
3.00E-06 (/h)	成功												なし	あり 1.50E-09 (/h)
													あり	5.05E-04
													なし	なし
													あり	1.13E-11 (/h)
													あり	5.05E-04
													なし	なし
													あり	7.48E-15 (/h)
													あり	5.05E-04
													なし	なし
													あり	4.96E-18 (/h)
													あり	6.51E-18 (/h)
													あり	9.92E-21 (/h)
													なし	なし
													あり	7.55E-21 (/h)
													あり	9.92E-21 (/h)
													あり	1.51E-23 (/h)
													あり	9.13E-14 (/h)
													なし	なし
4.08E-06	失敗												あり	1.52E-09 (/h)
													なし	なし
													あり	1.00E-12 (/h)
													あり	1.32E-12 (/h)
													あり	2.01E-15 (/h)
													あり	1.23E-11 (/h)
													なし	なし
													あり	1.53E-15 (/h)
													あり	2.01E-15 (/h)
													あり	1.24E-17 (/h)
													あり	3.06E-18 (/h)
													計	3.05E-09 (/h)
													要因発生確率	2.67E-05 /v

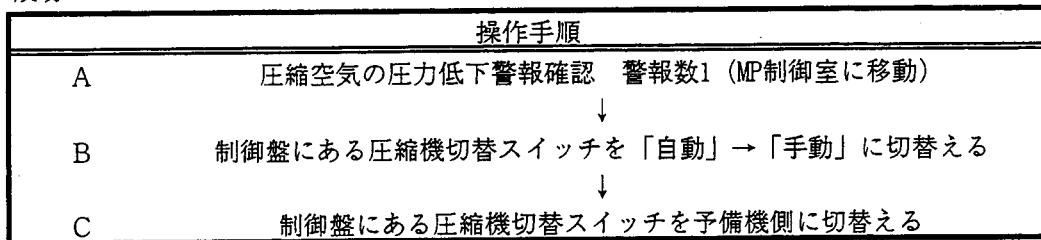
イベントツリーの分岐確率算出根拠

事象の種類	基本確率	単位	基本確率 算出根拠	従属性	事象発生確率 (分岐確率)
起因事象-1 起因事象-2	3.00E-06 3.00E-06	/h	表4.8-2 ET 01 表4.8-2 ET 01	-	3.00E-06 /h 3.00E-06 /h
発生防止策-1 圧縮機自動切替回路 警報回路 運転員の検知・手動切替作業	7.45E-03 4.08E-06 6.63E-04	/d	表4.8-2 ET 02 表4.8-2 ET 03 表4.8-2 ET 04	-	7.45E-03 /d 4.08E-06 /d 6.63E-04 /d
発生防止策-2 圧力スイッチ 警報回路 運転員の検知・手動切替作業	1.01E-06 4.08E-06 6.63E-04	/d	表4.8-2 ET 05 表4.8-2 ET 03 表4.8-2 ET 04	-	1.01E-06 /d 4.08E-06 /d 6.63E-04 /d
発生防止策-3 圧力スイッチ 警報回路 運転員の検知・手動切替作業 子備の空気圧縮機の起動	1.01E-06 4.08E-06 6.63E-04 5.05E-04	/d	表4.8-2 ET 05 表4.8-2 ET 03 表4.8-2 ET 04 表4.8-2 ET 06	-	1.01E-06 /d 4.08E-06 /d 6.63E-04 /d 5.05E-04 /d

図4.8-6 イベントツリー

		5.00E-06
A - 1		失敗
5.00E-03	4.56E-04	2.28E-06
\$ - 1	B - O (1)	失敗
	1.41E-04	7.06E-07
	B - C (1)	失敗
	2.28E-04	1.14E-06
	C - O (1)	失敗
	7.07E-05	3.53E-07
	C - C (1)	失敗
5.00E-01	4.56E-04	2.27E-04
\$ - 2	B - O (2)	失敗
	1.41E-04	7.03E-05
	B - C (2)	失敗
	2.28E-04	1.13E-04
	C - O (2)	失敗
	7.07E-05	3.51E-05
	C - C (2)	失敗
		成功
1.37E-04		6.81E-05
B - O (3)		失敗
1.41E-04		7.03E-05
B - C (3)		失敗
6.84E-05		3.40E-05
C - O (3)		失敗
7.07E-05		3.52E-05
C - C (3)		失敗
		成功

分歧番号	エラー番号	人的過誤率
A - 1	A - 1	5.00E-06
\$ - 1	\$ - 1	5.00E-03
\$ - 2	\$ - 2	5.00E-01
B - O (1)	B - 3	4.56E-04
B - C (1)	B - 4, 5, 6	1.41E-04
C - O (1)	C - 3	2.28E-04
C - C (1)	C - 4, 5, 6	7.07E-05
B - O (2)	B - 2	4.56E-04
B - C (2)	B - 4, 5, 6	1.41E-04
C - O (2)	C - 2	2.28E-04
C - C (2)	C - 4, 5, 6	7.07E-05
B - O (3)	B - 1	1.37E-04
B - C (3)	B - 4, 5, 6	1.41E-04
C - O (3)	C - 1	6.84E-05
C - C (3)	C - 4, 5, 6	7.07E-05



Total	6.63E-04 /d
-------	-------------

図4.8-7 人間信頼性解析結果 (HRA-1) [1/2]

人的過誤率表

エラー番号	エラー内容	表番号 項目番号 (HRA-12-178)	NHEP	EF	タギング レベル 因子	ストレ ス・経験 因子	回復要素	BHEP ※1	従属性	CHEP ※2
S-1	運転管理に従わず、手順書を使用しない。	第20-6表(4)	5.00E-03	10				5.00E-03		5.00E-03
S-2	運転管理に従わず、チェックリストを使用しない。	第20-6表(8)	5.00E-01	5				5.00E-01		5.00E-01
A-1	警報に気付かない。	第20-23表(1)	1.00E-04	10			5.00E-02 ※5	5.00E-06		5.00E-06
B-1	チェックリストを適切に使用した場合に手順書中の実施項目を省いてしまう。	第20-7表(2)	3.00E-03	3		2※3	1.14E-02 ※4	1.37E-04		1.37E-04
B-2	チェックリストを適切に使用しなかった場合に手順書中の実施項目を省いてしまう。	第20-7表(4)	1.00E-02	3		2※3	1.14E-02 ※4	4.56E-04		4.56E-04
B-3	手順書の使用を怠った場合、手順書中の実施項目を省いてしまう。	第20-7表(6)	1.00E-02	5		2※3	1.14E-02 ※4	4.56E-04		4.56E-04
B-4	間違えたスイッチを選択する。	第20-12表(2)	3.00E-03	3		2※3	1.14E-02 ※4	1.37E-04		1.37E-04
B-5	スイッチを間違った方向に操作する。	第20-12表(8)	1.00E-04	10		2※3	1.14E-02 ※4	4.56E-06		4.56E-06
C-1	チェックリストを適切に使用した場合に手順書中の実施項目を省いてしまう。	第20-7表(2)	3.00E-03	3		2※3	1.14E-02 ※4	1.37E-04	HD	6.84E-05
C-2	チェックリストを適切に使用しなかった場合に手順書中の実施項目を省いてしまう。	第20-7表(4)	1.00E-02	3		2※3	1.14E-02 ※4	4.56E-04	HD	2.28E-04
C-3	手順書の使用を怠った場合、手順書中の実施項目を省いてしまう。	第20-7表(6)	1.00E-02	5		2※3	1.14E-02 ※4	4.56E-04	HD	2.28E-04
C-4	間違えたスイッチを選択する。	第20-12表(2)	3.00E-03	10		2※3	1.14E-02 ※4	1.37E-04	HD	6.84E-05
C-5	スイッチを間違えた方向に操作する。	第20-12表(8)	1.00E-04	10		2※3	1.14E-02 ※4	4.56E-06	HD	2.28E-06

※1 BHEP=NHEP* (ストレス・経験因子) * (タギングレベル因子) * !(回復要素) * (ストレス・経験因子)!

※2 従属性L Dの場合

CHEP=(1+19*BHEP)/20

従属性M Dの場合

CHEP=(1+6*BHEP)/7

従属性H Dの場合

CHEP=(1+1*BHEP)/2

※3 熟練者、比較的高いストレス、ステップバイステップ作業（第20-16表 (4):×2）を想定

※4 肩越しの検査（第20-22表 (1):0.1 従属性 MD）及び自分自身による「特に要請された点検」を考慮

※5 20-22(3)警報に対する短期間で単一の点検

図4.8-7 人間信頼性解析 (HRA-1) [2/2]

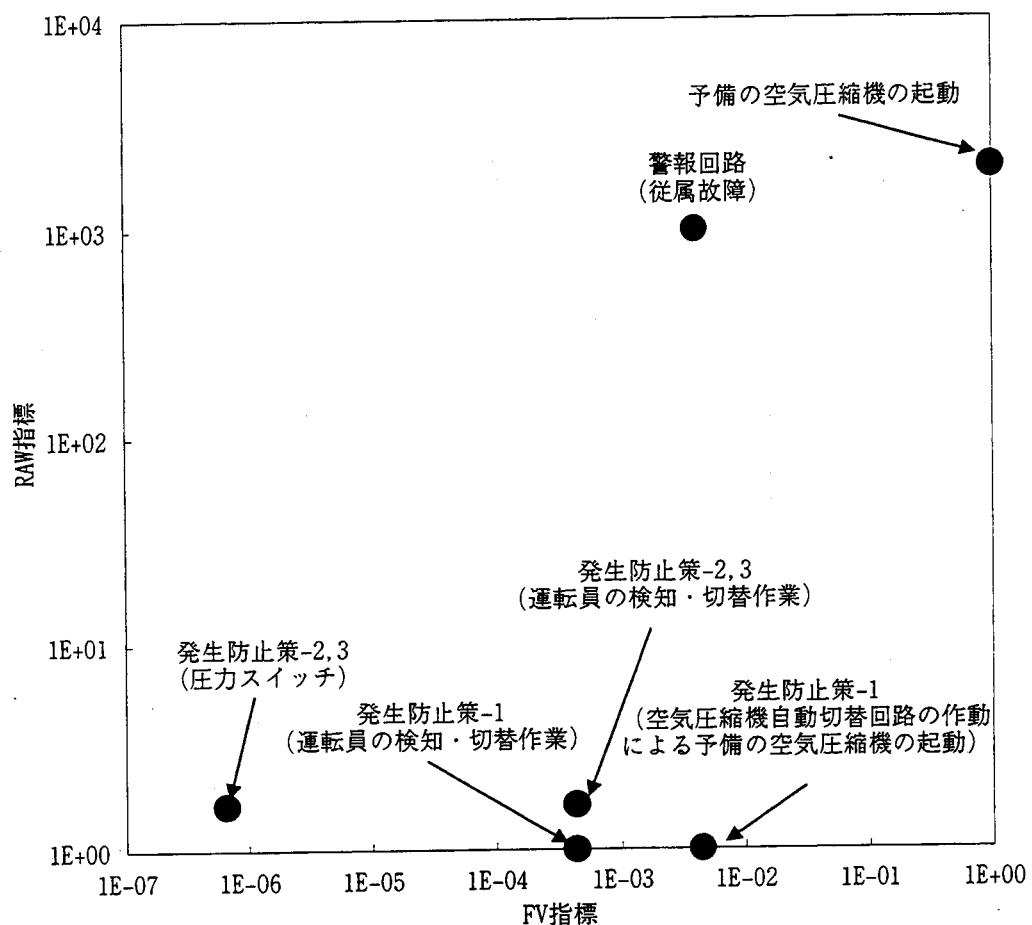


図4.8-8 重要度の把握結果

4.9 施設の全停電

4.9.1 概要

東海再処理施設では、独立した2系統の外部電源を特高変電所で受電したのち、開閉所及び変電所へ電源を配電、降圧してから各施設に給電している。

特高変電所からの外部電源の停電、負荷における過電流又は地絡が発生した場合、施設の全停電に至る可能性がある。「安全性確認」では、施設の全停電に至る事象として、4種類の事象進展を検討している。

このため、施設の全停電の発生防止策として以下の対策を講じている(図4.9-1)。

- ・電源設備には、停電、過電流及び地絡に対する保護機能を設けており、系統切替による復電や故障箇所の切り離しによる影響範囲の極小化等を図っている。
- ・保護機能による系統切換に失敗した場合は、手動により系統切替を実施する。
- ・外部電源が停電した場合は、開閉所や変電所に設置された非常用発電機が自動で起動し給電を行う。非常用発電機が自動で起動しなかった場合は、手動により起動する。

4.9.2 評価結果

3.の評価手法に従い、事故発生防止策の特徴及び重要度の把握を以下のように実施した。

1) イベントツリーの作成

図4.9-2～4.9-5に作成したイベントツリーを示す。

起因事象として、以下に示す4つが考えられる。

- ・外部電源1号系の停電
- ・1号系負荷における過電流
- ・1号系負荷における地絡
- ・2号系負荷における地絡

起因事象毎に4つのイベントツリーを作成した。

事故発生防止策として、不足電圧リレー、過電流リレー又は地絡リレーの作動に伴う自動系統切換、運転員の手動による系統切換及び運転員の手動による非常用発電機の起動を考慮した。

2) フォールトツリーの作成

イベントツリーで考慮した発生防止策に対し、図4.9-6に示すフォールトツリーを作成した。

3) 定量化

① 起因事象発生確率の算出

外部電源の片側系統の停電、負荷における過電流及び地絡については、これまでに、実績がない。

しかし、年1回の定期点検の際には、片側系統の停電、負荷における過電流及び地絡といった起因事象と同じ状況をつくり、保護機能の確認を実施している。

そこで、年間1回の頻度で起因事象が発生することとした。

② 発生防止策の失敗確率の算出

定量化に用いた故障率を表 4.9-1 に示す。また、手動による遮断器の切替作業及び手動による非常用発電機の起動作業のヒューマンエラー発生確率を設定した人間信頼性解析は図 4.9-7,4.9-8 に示す。

③ イベントツリーの定量化

①、②で算出した値を用い、イベントツリーの定量化を行った。この結果、施設の全停電の発生確率は、最も高いもので $1.92E-09(y)$ となった。

4) 重要度評価

定量化したイベントツリーの各発生防止策の重要度を把握するため、重要度評価を実施した。重要度の把握結果を図 4.9-9～4.6-12 に示す。同結果より、FV,RAW の各指標において以下のような特徴が見られた。

① FV 指標

1 回目の事象の診断並びに不足電圧リレー、過電流リレー及び地絡リレーの作動に伴う自動系統切換が相対的に高い値を示した。

② RAW 指標

1 回目の事象の診断が相対的に高い値を示した。

4.9.3 発生防止策の特徴及び重要度の把握結果

PSA 手法を用いた事故シーケンスの定量化及び同結果に基づく重要度の把握を実施した結果、以下のような知見が得られた。

事象発生防止策の特徴としては、多重の防止策が存在することである。仮に外部電源の停電、過電流又は地絡が発生したとしても、不足電圧リレー等の作動により自動的に系統を切換え、復電が可能である。また、自動切替に失敗した場合においても、運転員が手順書に従い、手動での系統切換及び非常用発電機の起動を行い施設の全停電を早期に回復することができる。

重要度の把握結果より、施設の全停電の発生防止上最も重要な役割を果たしているのは、運転員による事象の診断であることがわかった。

4.9.4 まとめ

施設の全停電について、PSA 手法を用いた事故発生防止策の特徴及び重要度の把握を実施した結果、以下の知見が得られた。

- ・ 施設の全停電の発生確率は、最も高いもので $1.92E-09(y)$ となった。
- ・ 重要度評価結果を実施した結果、運転員による事象の診断が重要な役割を果たしていることが明らかになった。

表4.9-1 故障率・過誤率一覧表

基事象番号	不全モード		故障率データ			近隣操作回数、使用回数 [/y]	試験間隔、点検周期 [/h]	故障率
	機器グループ 種別	故障モード	[/h]	[/d]	出典			
ET 01	負荷	過電流	1.14E-04		実績値(定検時(年1回)を想定)			1.14E-04 /h
FT-1 01	不足電圧 继電器	故障	-	2.30E-03	IEEE std-500(1984)			2.30E-03 /d
FT-1 02	制御回路 (リレー式)	故障	1.70E-06	-	IEEE std-500(1984)		8760	7.45E-03 /d
FT-1 03, 04, 05	遮断器	故障	-	2.30E-03	IEEE std-500(1984)			2.30E-03 /d
ET 02	事象の診断	診断失敗	-	1.00E-07	NUREG/CR-1278 第20-3表(4) (RF: 第20-23表(1))			1.00E-07 /d
FT-2 02 ET 03	非常用 発電機	CCFによる 起動失敗	2.03E-05	-	IEEE std-500(1984) × β ファクタ値		168	3.55E-05 /d
FT-2 01 ET 04	非常用 発電機	起動失敗	2.03E-05	-	IEEE std-500(1984)		168	1.71E-03 /d

* 非常用発電機の起動失敗確率に β ファクタ値 0.0208 をかけて算出した。その β ファクタ値は、NUREG-1150 の値を用いた。

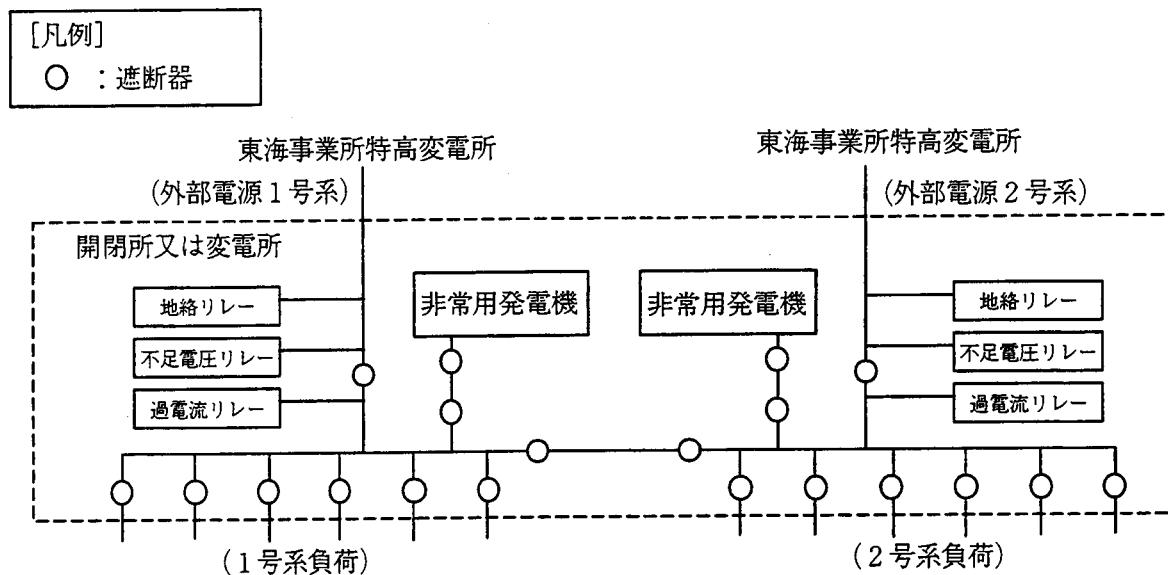


図 4.9-1 発生防止策概要図

起因事象	発生防止策-1		発生防止策-2		発生防止策-3				発生防止策-4				施設全停電の可能性	発生確率
	不足電圧リレー作動に伴う系統の自動切換	手動操作による系統の切換	1号系非常用発電機の手動起動				2号系非常用発電機の手動起動							
	事象の診断	手動による系統の切換操作	事象の診断	手動による非常用発電機の起動操作	共通原因故障 (CCF) による非常用発電機の起動失敗 (従属性)	非常用発電機の起動	事象の診断	手動による非常用発電機の起動操作	共通原因故障 (CCF) による非常用発電機の起動失敗 (従属性)	非常用発電機の起動				
外部電源1号系より給電中に、外部電源の1号系のみが停電する。	成功	失敗	成功	成功	失敗	成功	失敗	成功	失敗	成功	失敗	なし	なし	なし
1.14E-04 (/h)	1.65E-02	2.32E-05	2.32E-05	1.71E-03	1.71E-03	1.71E-03	1.86E-05	1.86E-05	1.86E-05	1.71E-03	1.71E-03	1.28E-16 (/h)	1.39E-18 (/h)	7.48E-21 (/h)
				失敗	失敗	失敗	失敗	失敗	失敗	失敗	失敗	なし	あり	1.56E-15 (/h)
				失敗	失敗	失敗	失敗	失敗	失敗	失敗	失敗	なし	あり	1.39E-18 (/h)
				失敗	失敗	失敗	失敗	失敗	失敗	失敗	失敗	なし	あり	2.90E-20 (/h)
				失敗	失敗	失敗	失敗	失敗	失敗	失敗	失敗	なし	あり	1.52E-20 (/h)
				失敗	失敗	失敗	失敗	失敗	失敗	失敗	失敗	なし	あり	8.17E-23 (/h)
				失敗	失敗	失敗	失敗	失敗	失敗	失敗	失敗	なし	あり	4.39E-18 (/h)
				失敗	失敗	失敗	失敗	失敗	失敗	失敗	失敗	なし	あり	1.89E-13 (/h)
				失敗	失敗	失敗	失敗	失敗	失敗	失敗	失敗	合計		1.91E-13 (/h)
												事象発生確率	1.37E-09	(/v)

イベントツリーの分岐確率算出根拠

事象の種類	基本確率	単位	基本確率算出根拠	従属性	事象発生確率(分岐確率)
起因事象	1.14E-04	/h	表4.9-1 ET 01	-	1.14E-04 /h
発生防止策-1	1.65E-02	/d	図4.9-6 FT-1	-	1.65E-02 /d
発生防止策-2 事象の診断 手動による1号系遮断器の開放及び2号系遮断器の投入	1.00E-07 2.32E-05	/d /d	表4.9-1 ET 02 図4.9-7 HRA-1	- -	1.00E-07 /d 2.32E-05 /d
発生防止策-3 事象の診断 手動による非常用発電機の起動操作 共通原因故障 (CCF) による非常用発電機の起動失敗 非常用発電機の起動	1.00E-07 1.86E-05 3.55E-05 1.74E-03	/d /d /d /d	表4.9-1 ET 02 図4.9-8 HRA-2 表4.9-1 ET 03 表4.9-1 ET 04	- - - -	1.00E-07 /d 1.86E-05 /d 3.55E-05 /d 1.74E-03 /d
発生防止策-4 事象の診断 手動による非常用発電機の起動操作 共通原因故障 (CCF) による非常用発電機の起動失敗 非常用発電機の起動	1.00E-07 1.86E-05 3.55E-05 1.71E-03	/d /d /d /d	表4.9-1 ET 02 図4.9-8 HRA-2 表4.9-1 ET 03 表4.9-1 ET 04	- - - -	1.00E-07 /d 1.86E-05 /d 3.55E-05 /d 1.71E-03 /d

図4.9-2 イベントツリー

起因事象	発生防止策-1	発生防止策-2			発生防止策-3			施設全停電の可能性	発生確率
		手動操作による系統の切換	2号系非常用発電機の手動起動	事象の診断	手動による系統の切換操作	手動による非常用発電機の起動操作	非常用発電機の起動		
外部電源1号系より給電中に、1号系に過電流が発生	過電流リレー作動に伴う系統の自動切換								
1.14E-04 (/h)	成功	失敗	成功	成功	失敗	成功	成功	なし	
	1.65E-02	2.32E-05			失敗	1.86E-05	失敗	有り	7.64E-14 (/h)
					失敗	1.00E-07	失敗	有り	8.17E-16 (/h)
					失敗	1.00E-07	失敗	有り	4.39E-18 (/h)
								有り	1.89E-13 (/h)
								合計	2.66E-13 (/h)
								事象発生確率	1.92E-09 (/y)

イベントツリーの分岐確率算出根拠

事象の種類	基本確率	単位	基本確率 算出根拠	従属性	事象発生確率 (分岐確率)
起因事象	1.14E-04	/h	表4.9-1 ET 01	-	1.14E-04 /h
発生防止策-1	1.65E-02	/d	図4.9-6 FT-1	-	1.65E-02 /d
発生防止策-2 事象の診断 手動による1号系遮断器の開放及び 2号系遮断器の投入	1.00E-07 2.32E-05	/d	表4.9-1 ET 02 図4.9-7 HRA-1	-	1.00E-07 /d 2.32E-05 /d
発生防止策-3 事象の診断 手動による非常用発電機の起動操作 非常用発電機の起動	1.00E-07 1.86E-05 1.74E-03	/d	表4.9-1 ET 02 図4.9-8 HRA-2 図4.9-6 FT-2	-	1.00E-07 /d 1.86E-05 /d 1.74E-03 /d

図4.9-3 イベントツリー

起因事象	発生防止策-1	発生防止策-2		発生防止策-3			施設全停電の可能性	発生確率
		手動操作による系統の切換		2号系非常用発電機の手動起動				
外部電源1号系より給電中に、1号系に地絡が発生	地絡リレー作動に伴う系統の自動切換	事象の診断	手動による系統の切換操作	事象の診断	手動による非常用発電機の起動操作	非常用発電機の起動		
成功								
1.14E-04 (/h)	失敗	成功	成功				なし	
	1.65E-02			失敗	成功	成功	なし	
				2.32E-05			有り	7.64E-14 (/h)
						失敗	有り	8.17E-16 (/h)
						失敗	有り	4.39E-18 (/h)
						失敗	有り	1.89E-13 (/h)
						失敗	合計	2.66E-13 (/h)
							事象発生確率	1.92E-09 (/y)

イベントツリーの分岐確率算出根拠

事象の種類	基本確率	単位	基本確率 算出根拠	従属性	事象発生確率 (分岐確率)
起因事象	1.14E-04	/h	表4.9-1 ET 01	-	1.14E-04 /h
発生防止策-1	1.65E-02	/d	図4.9-6 FT-1	-	1.65E-02 /d
発生防止策-2 事象の診断 手動による1号系遮断器の開放及び 2号系遮断器の投入	1.00E-07 2.32E-05	/d	表4.9-1 ET 02 図4.9-7 HRA-1	-	1.00E-07 /d 2.32E-05 /d
発生防止策-3 事象の診断 手動による非常用発電機の起動操作 非常用発電機の起動	1.00E-07 1.86E-05 1.74E-03	/d	表4.9-1 ET 02 図4.9-8 HRA-2 図4.9-6 FT-2	-	1.00E-07 /d 1.86E-05 /d 1.74E-03 /d

図4.9-4 イベントツリー

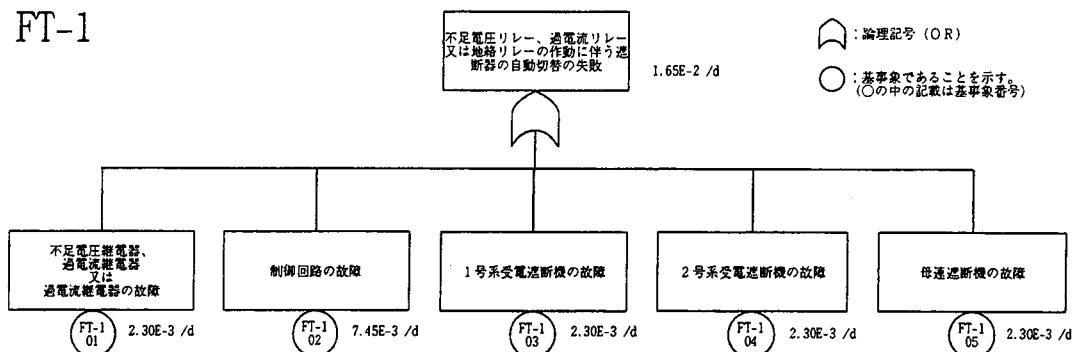
起因事象	発生防止策-1	発生防止策-2			発生防止策-3		施設全停電の可能性	発生確率
		事象の診断	手動による非常用発電機の起動操作	非常用発電機の起動	事象の診断	手動による系統の切換操作		
外部電源1号系より給電中に、2号系に地絡が発生	地絡リレー作動に伴う系統の自動切換	1号系非常用発電機の手動起動		手動操作による外部電源の復電操作				
1.14E-04 (/h)	成功						なし	
	失敗	成功	成功	成功			なし	
1.65E-02				失敗	成功	成功	なし	
				1.74E-03			有り	7.64E-14 (/h)
					失敗	2.32E-05	有り	3.29E-16 (/h)
					失敗	1.00E-07	なし	
				1.86E-05			有り	8.17E-16 (/h)
					失敗	2.32E-05	有り	3.52E-18 (/h)
					失敗	1.00E-07	有り	1.89E-13 (/h)
				1.00E-07			合計	2.66E-13 (/h)
							事象発生確率	1.92E-09 (/y)

イベントツリーの分岐確率算出根拠

事象の種類	基本確率	単位	基本確率 算出根拠	従属性	事象発生確率 (分岐確率)
起因事象	1.14E-04	/h	表4.9-1 ET 01	-	1.14E-04 /h
発生防止策-1	1.65E-02	/d	図4.9-6 FT-1	-	1.65E-02 /d
発生防止策-2 事象の診断 手動による非常用発電機の起動操作 非常用発電機の起動	1.00E-07 1.86E-05 1.74E-03	/d /d /d	表4.9-1 ET 02 図4.9-8 HRA-2 図4.9-6 FT-2	- - -	1.00E-07 /d 1.86E-05 /d 1.74E-03 /d
発生防止策-3 事象の診断 手動による1号系遮断器の開放及び 2号系遮断器の投入	1.00E-07 2.32E-05	/d /d	表4.9-1 ET 02 図4.9-7 HRA-1	- -	1.00E-07 /d 2.32E-05 /d

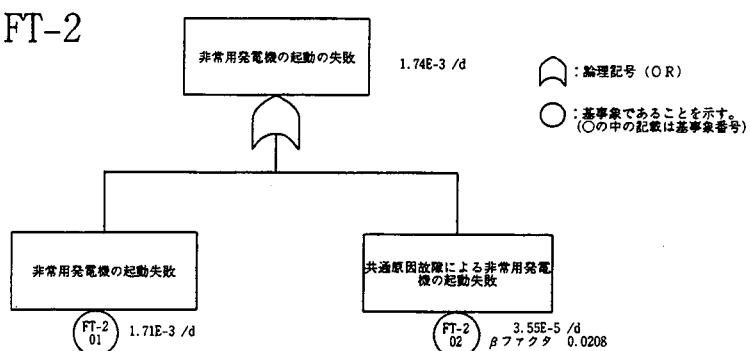
図4.9-5 イベントツリー

FT-1



発生防止策-1のフォールトツリー

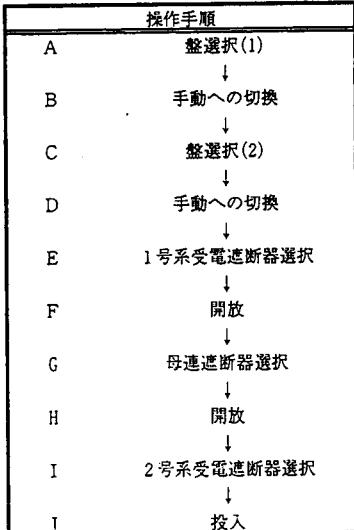
FT-2



発生防止策-3のフォールトツリー

図4.9-6 発生防止策のフォールトツリー

5.00E-03		4.00E-06	2.00E-08
\$ - 1		A - O (1) F	
		1.20E-06	6.00E-09
		A - C (1) F	
1.18E-06	4.00E-06	4.69E-12	3.80E-06
\$ - 2		A - O (2) F	B - O (1) F
		1.20E-06	1.41E-12
		A - C (2) F	B - C (1) F
1.20E-06	1.19E-06	3.80E-06	3.80E-06
A - O (3) F		4.45E-12	1.90E-08
1.20E-06	1.19E-06	B - O (2) F	C - O (1) F
A - C (3) F		1.18E-06	5.89E-09
1.14E-06	1.13E-06	B - C (2) F	C - C (1) F
B - O (3) F		3.80E-06	4.45E-12
1.18E-06	1.17E-06	C - O (2) F	D - O (1) F
B - C (3) F		1.14E-06	1.38E-12
1.14E-06	1.13E-06	C - C (2) F	D - C (1) F
C - O (3) F		3.80E-06	4.45E-12
1.14E-06	1.13E-06	D - O (2) F	E - O (1) F
D - O (3) F		1.18E-06	1.38E-12
1.18E-06	1.17E-06	D - C (2) F	E - C (1) F
D - C (3) F		3.80E-06	4.45E-12
1.14E-06	1.13E-06	F - O (2) F	F - C (1) F
E - O (3) F		1.14E-06	1.34E-12
1.14E-06	1.13E-06	E - C (2) F	F - C (1) F
F - O (3) F		3.80E-06	4.45E-12
1.18E-06	1.17E-06	G - O (2) F	G - O (1) F
F - C (3) F		1.14E-06	1.38E-12
1.14E-06	1.13E-06	G - C (2) F	H - C (1) F
G - O (3) F		3.80E-06	4.45E-12
1.14E-06	1.13E-06	H - O (2) F	I - O (1) F
H - C (3) F		1.18E-06	1.38E-12
1.14E-06	1.13E-06	H - C (2) F	I - C (1) F
I - O (3) F		3.80E-06	4.45E-12
1.14E-06	1.13E-06	J - O (2) F	J - O (1) F
J - C (3) F		1.18E-06	1.38E-12
S			S



分岐番号	エラー番号	人の過誤率
\$ - 1	\$-1	5.00E-03
\$ - 2	\$-2	5.00E-01
A - O (1)	A-3	4.00E-06
A - C (1)	A-4	1.20E-06
B - O (1)	B-3	3.80E-06
B - C (1)	B-4.5	1.18E-06
C - O (1)	C-3	3.80E-06
C - C (1)	C-4	1.14E-06
D - O (1)	D-3	3.80E-06
D - C (1)	D-4.5	1.18E-06
E - O (1)	E-3	3.80E-06
E - C (1)	E-4	1.14E-06
F - O (1)	F-3	3.80E-06
F - C (1)	F-4.5	1.18E-06
G - O (1)	G-3	3.80E-06
G - C (1)	G-4	1.14E-06
H - O (1)	H-3	3.80E-06
H - C (1)	H-4.5	1.18E-06
I - O (1)	I-3	3.80E-06
I - C (1)	I-4	1.14E-06
J - O (1)	J-3	3.80E-06
J - C (1)	J-4.5	1.18E-06
A - O (2)	A-2	4.00E-06
A - C (2)	A-4	1.20E-06
B - O (2)	B-2	3.80E-06
B - C (2)	B-4.5	1.18E-06
C - O (2)	C-2	3.80E-06
C - C (2)	C-4	1.14E-06
D - O (2)	D-2	3.80E-06
D - C (2)	D-4.5	1.18E-06
E - O (2)	E-2	3.80E-06
E - C (2)	E-4	1.14E-06
F - O (2)	F-2	3.80E-06
F - C (2)	F-4.5	1.18E-06
G - O (2)	G-2	3.80E-06
G - C (2)	G-4	1.14E-06
H - O (2)	H-2	3.80E-06
H - C (2)	H-4.5	1.18E-06
I - O (2)	I-2	3.80E-06
I - C (2)	I-4	1.14E-06
J - O (2)	J-2	3.80E-06
J - C (2)	J-4.5	1.18E-06
A - O (3)	A-1	1.20E-06
A - C (3)	A-4	1.20E-06
B - O (3)	B-1	1.14E-06
B - C (3)	B-4.5	1.18E-06
C - O (3)	C-1	1.14E-06
C - C (3)	C-4	1.14E-06
D - O (3)	D-1	1.14E-06
D - C (3)	D-4.5	1.18E-06
E - O (3)	E-1	1.14E-06
E - C (3)	E-4	1.14E-06
F - O (3)	F-1	1.14E-06
F - C (3)	F-4.5	1.18E-06
G - O (3)	G-1	1.14E-06
G - C (3)	G-4	1.14E-06
H - O (3)	H-1	1.14E-06
H - C (3)	H-4.5	1.18E-06
I - O (3)	I-1	1.14E-06
I - C (3)	I-4	1.14E-06
I - O (3)	I-1	1.14E-06
J - C (3)	J-4.5	1.18E-06
Total	2.32E-05	

図4.9-7 人間信頼性解析結果 (HRA-1) [1/2]

人的過誤率表

エラー番号	エラー内容	表番号 (NUREG-04.17b)	NHEP	EF	タギング レベル 因子	ストレス・経験 因子	回復要素	BHEP ※1	従属性	CHEP ※2
\$-1	運転管理に従わず、手順書を使用しない。	第20-6表(4)	5.00E-03	3				5.00E-03		5.00E-03
\$-2	運転管理に従わず、チェックリストを使用しない。	第2-6表(8)	5.00E-01	5				5.00E-01		5.00E-01
A-1	チェックリストを適切に使用した場合に手順書中の実施項目を省いてしまう。	第20-7表(2)	3.00E-03	3	2	*3	1.00E-04	*4	1.20E-06	1.20E-06
A-2	チェックリストを適切に使用しなかった場合に手順書中の実施項目を省いてしまう。	第20-7表(4)	1.00E-02	3	2	*3	1.00E-04	*4	4.00E-06	4.00E-06
A-3	手順書の使用を怠った場合、手順書中の実施項目を省いてしまう。	第20-7表(6)	1.00E-02	5	2	*3	1.00E-04	*4	4.00E-06	4.00E-06
A-4	間違えたスイッチを選択する。	第20-12表(2)	3.00E-03	10	2	*3	1.00E-04	*4	1.20E-06	1.20E-06
B-1	チェックリストを適切に使用した場合に手順書中の実施項目を省いてしまう。	第20-7表(2)	3.00E-03	3	2	*3	1.00E-04	*4	1.20E-06	L D
B-2	チェックリストを適切に使用しなかった場合に手順書中の実施項目を省いてしまう。	第20-7表(4)	1.00E-02	3	2	*3	1.00E-04	*4	4.00E-06	L D
B-3	手順書の使用を怠った場合、手順書中の実施項目を省いてしまう。	第20-7表(6)	1.00E-02	5	2	*3	1.00E-04	*4	4.00E-06	L D
B-4	間違えたスイッチを選択する。	第20-12表(2)	3.00E-03	10	2	*3	1.00E-04	*4	1.20E-06	L D
B-5	スイッチを間違えた方向に操作する。	第20-12表(8)	1.00E-04	10	2	*3	1.00E-04	*4	4.00E-08	L D
C-1	チェックリストを適切に使用した場合に手順書中の実施項目を省いてしまう。	第20-7表(2)	3.00E-03	3	2	*3	1.00E-04	*4	1.20E-06	L D
C-2	チェックリストを適切に使用しなかった場合に手順書中の実施項目を省いてしまう。	第20-7表(4)	1.00E-02	3	2	*3	1.00E-04	*4	4.00E-06	L D
C-3	手順書の使用を怠った場合、手順書中の実施項目を省いてしまう。	第20-7表(6)	1.00E-02	5	2	*3	1.00E-04	*4	4.00E-06	L D
C-4	間違えたスイッチを選択する。	第20-12表(2)	3.00E-03	10	2	*3	1.00E-04	*4	1.20E-06	L D
D-1	チェックリストを適切に使用した場合に手順書中の実施項目を省いてしまう。	第20-7表(2)	3.00E-03	3	2	*3	1.00E-04	*4	1.20E-06	L D
D-2	チェックリストを適切に使用しなかった場合に手順書中の実施項目を省いてしまう。	第20-7表(4)	1.00E-02	3	2	*3	1.00E-04	*4	4.00E-06	L D
D-3	手順書の使用を怠った場合、手順書中の実施項目を省いてしまう。	第20-7表(6)	1.00E-02	5	2	*3	1.00E-04	*4	4.00E-06	L D
D-4	間違えたスイッチを選択する。	第20-12表(2)	3.00E-03	10	2	*3	1.00E-04	*4	1.20E-06	L D
D-5	スイッチを間違えた方向に操作する。	第20-12表(8)	1.00E-04	10	2	*3	1.00E-04	*4	4.00E-08	L D
E-1	チェックリストを適切に使用した場合に手順書中の実施項目を省いてしまう。	第20-7表(2)	3.00E-03	3	2	*3	1.00E-04	*4	1.20E-06	L D
E-2	チェックリストを適切に使用しなかった場合に手順書中の実施項目を省いてしまう。	第20-7表(4)	1.00E-02	3	2	*3	1.00E-04	*4	4.00E-06	L D
E-3	手順書の使用を怠った場合、手順書中の実施項目を省いてしまう。	第20-7表(6)	1.00E-02	5	2	*3	1.00E-04	*4	4.00E-06	L D
E-4	間違えたスイッチを選択する。	第20-12表(2)	3.00E-03	10	2	*3	1.00E-04	*4	1.20E-06	L D
F-1	チェックリストを適切に使用した場合に手順書中の実施項目を省いてしまう。	第20-7表(2)	3.00E-03	3	2	*3	1.00E-04	*4	1.20E-06	L D
F-2	チェックリストを適切に使用しなかった場合に手順書中の実施項目を省いてしまう。	第20-7表(4)	1.00E-02	3	2	*3	1.00E-04	*4	4.00E-06	L D
F-3	手順書の使用を怠った場合、手順書中の実施項目を省いてしまう。	第20-7表(6)	1.00E-02	5	2	*3	1.00E-04	*4	4.00E-06	L D
F-4	間違えたスイッチを選択する。	第20-12表(2)	3.00E-03	10	2	*3	1.00E-04	*4	1.20E-06	L D
F-5	スイッチを間違えた方向に操作する。	第20-12表(8)	1.00E-04	10	2	*3	1.00E-04	*4	4.00E-08	L D
G-1	チェックリストを適切に使用した場合に手順書中の実施項目を省いてしまう。	第20-7表(2)	3.00E-03	3	2	*3	1.00E-04	*4	1.20E-06	L D
G-2	チェックリストを適切に使用しなかった場合に手順書中の実施項目を省いてしまう。	第20-7表(4)	1.00E-02	3	2	*3	1.00E-04	*4	4.00E-06	L D
G-3	手順書の使用を怠った場合、手順書中の実施項目を省いてしまう。	第20-7表(6)	1.00E-02	5	2	*3	1.00E-04	*4	4.00E-06	L D
G-4	間違えたスイッチを選択する。	第20-12表(2)	3.00E-03	10	2	*3	1.00E-04	*4	1.20E-06	L D
H-1	チェックリストを適切に使用した場合に手順書中の実施項目を省いてしまう。	第20-7表(2)	3.00E-03	3	2	*3	1.00E-04	*4	1.20E-06	L D
H-2	チェックリストを適切に使用しなかった場合に手順書中の実施項目を省いてしまう。	第20-7表(4)	1.00E-02	3	2	*3	1.00E-04	*4	4.00E-06	L D
H-3	手順書の使用を怠った場合、手順書中の実施項目を省いてしまう。	第20-7表(6)	1.00E-02	5	2	*3	1.00E-04	*4	4.00E-06	L D
H-4	間違えたスイッチを選択する。	第20-12表(2)	3.00E-03	10	2	*3	1.00E-04	*4	1.20E-06	L D
H-5	スイッチを間違えた方向に操作する。	第20-12表(8)	1.00E-04	10	2	*3	1.00E-04	*4	4.00E-08	L D
I-1	チェックリストを適切に使用した場合に手順書中の実施項目を省いてしまう。	第20-7表(2)	3.00E-03	3	2	*3	1.00E-04	*4	1.20E-06	L D
I-2	チェックリストを適切に使用しなかった場合に手順書中の実施項目を省いてしまう。	第20-7表(4)	1.00E-02	3	2	*3	1.00E-04	*4	4.00E-06	L D
I-3	手順書の使用を怠った場合、手順書中の実施項目を省いてしまう。	第20-7表(6)	1.00E-02	5	2	*3	1.00E-04	*4	4.00E-06	L D
I-4	間違えたスイッチを選択する。	第20-12表(2)	3.00E-03	10	2	*3	1.00E-04	*4	1.20E-06	L D
J-1	チェックリストを適切に使用した場合に手順書中の実施項目を省いてしまう。	第20-7表(2)	3.00E-03	3	2	*3	1.00E-04	*4	1.20E-06	L D
J-2	チェックリストを適切に使用しなかった場合に手順書中の実施項目を省いてしまう。	第20-7表(4)	1.00E-02	3	2	*3	1.00E-04	*4	4.00E-06	L D
J-3	手順書の使用を怠った場合、手順書中の実施項目を省いてしまう。	第20-7表(6)	1.00E-02	5	2	*3	1.00E-04	*4	4.00E-06	L D
J-4	間違えたスイッチを選択する。	第20-12表(2)	3.00E-03	10	2	*3	1.00E-04	*4	1.20E-06	L D
J-5	スイッチを間違えた方向に操作する。	第20-12表(8)	1.00E-04	10	2	*3	1.00E-04	*4	4.00E-08	L D

* 1 BHEP=NHEP* (ストレス・経験因子) * (タギングレベル因子) * !(回復要素) * (ストレス・経験因子)
 * 2 従属性 L D の場合

$$\text{CHEP} = 1 - (1 + 19 * (1 - \text{BHEP})) / 20$$

従属性 M D の場合

$$\text{CHEP} = 1 - (1 + 6 * (1 - \text{BHEP})) / 7$$

従属性 H D の場合

$$\text{CHEP} = 1 - (1 + 1 * (1 - \text{BHEP})) / 2$$

* 3

熟練者、比較的高いストレス、ステップバイステップ作業 (第20-16表 (4):×2) を想定

* 4

警報による回復を考慮 (第20-23表 (1):0.0001)

図4.9-7 人間信頼性解析結果(HRA-1) [2/2]

分岐番号	エラー番号	人の過誤率
\$ - 1	\$-1	5.00E-03
\$ - 2	\$-2	5.00E-01
A - O (1)	A-4	4.00E-06
A - C (1)	A-5	1.20E-06
B - O (1)	B-4	3.80E-06
B - C (1)	B-5, 6	1.18E-06
C - O (1)	C-4	3.80E-06
C - C (1)	C-5	1.14E-06
D - O (1)	D-4	3.80E-06
D - C (1)	D-5, 6	1.18E-06
E - O (1)	E-4	3.80E-06
E - C (1)	E-5	1.14E-06
F - O (1)	F-4	3.80E-06
F - C (1)	F-5, 6	1.18E-06
G - O (1)	G-4	3.80E-06
G - C (1)	G-5	1.14E-06
H - O (1)	H-4	3.80E-06
H - C (1)	H-5, 6	1.18E-06
A - O (2)	A-3	4.00E-06
A - C (2)	A-5	1.20E-06
B - O (2)	B-3	3.80E-06
B - C (2)	B-5, 6	1.18E-06
C - O (2)	C-3	3.80E-06
C - C (2)	C-5	1.14E-06
D - O (2)	D-3	3.80E-06
D - C (2)	D-5, 6	1.18E-06
E - O (2)	E-3	3.80E-06
E - C (2)	E-5	1.14E-06
F - O (2)	F-3	3.80E-06
F - C (2)	F-5, 6	1.18E-06
G - O (2)	G-3	3.80E-06
G - C (2)	G-5	1.14E-06
H - O (2)	H-3	3.80E-06
H - C (2)	H-5, 6	1.18E-06
A - O (3)	A-2	1.20E-06
A - C (3)	A-5	1.20E-06
B - O (3)	B-2	1.14E-06
B - C (3)	B-5, 6	1.18E-06
C - O (3)	C-2	1.14E-06
C - C (3)	C-5	1.14E-06
D - O (3)	D-2	1.14E-06
D - C (3)	D-5, 6	1.18E-06
E - O (3)	E-2	1.14E-06
E - C (3)	E-5	1.14E-06
F - O (3)	F-2	1.14E-06
F - C (3)	F-5, 6	1.18E-06
G - O (3)	G-2	1.14E-06
G - C (3)	G-5	1.14E-06
H - O (3)	H-2	1.14E-06
H - C (3)	H-5, 6	1.18E-06

図4.9-8 人間信頼性解析結果 (HRA-2) [1/2]

人的過誤率表

エラー番号	エラー内容	表番号 項目番号 (NHEP-CR-1278)	NHEP	EF	タギング レベル 因子	ストレス・経験 因子	回復要素	BHEP ※1	従属性	CHEP ※2
\$-1	運転管理に従わず、手順書を使用しない。	第20-6表(4)	5.00E-03	3				5.00E-03		5.00E-03
\$-2	運転管理に従わず、チェックリストを使用しない。	第20-6表(8)	5.00E-01	5				5.00E-01		5.00E-01
A-2	チェックリストを適切に使用した場合に手順書中の実施項目を省いてしまう。	第20-7表(2)	3.00E-03	3	2	※3	1.00E-04	※4	1.20E-06	1.20E-06
A-3	チェックリストを適切に使用しなかった場合に手順書中の実施項目を省いてしまう。	第20-7表(4)	1.00E-02	3	2	※3	1.00E-04	※4	4.00E-06	4.00E-06
A-4	手順書の使用を怠った場合、手順書中の実施項目を省いてしまう。	第20-7表(6)	1.00E-02	5	2	※3	1.00E-04	※4	4.00E-06	4.00E-06
A-5	間違えたスイッチを選択する。	第20-12表(2)	3.00E-03	10	2	※3	1.00E-04	※4	1.20E-06	1.20E-06
B-2	チェックリストを適切に使用した場合に手順書中の実施項目を省いてしまう。	第20-7表(2)	3.00E-03	3	2	※3	1.00E-04	※4	1.20E-06	1.14E-06
B-3	チェックリストを適切に使用しなかった場合に手順書中の実施項目を省いてしまう。	第20-7表(4)	1.00E-02	3	2	※3	1.00E-04	※4	4.00E-06	3.80E-06
B-4	手順書の使用を怠った場合、手順書中の実施項目を省いてしまう。	第20-7表(6)	1.00E-02	5	2	※3	1.00E-04	※4	4.00E-06	3.80E-06
B-5	間違えたスイッチを選択する。	第20-12表(2)	3.00E-03	10	2	※3	1.00E-04	※4	1.20E-06	1.14E-06
B-6	スイッチを間違えた方向に操作する。	第20-12表(8)	1.00E-04	10	2	※3	1.00E-04	※4	4.00E-08	3.80E-08
C-2	チェックリストを適切に使用した場合に手順書中の実施項目を省いてしまう。	第20-7表(2)	3.00E-03	3	2	※3	1.00E-04	※4	1.20E-06	1.14E-06
C-3	チェックリストを適切に使用しなかった場合に手順書中の実施項目を省いてしまう。	第20-7表(4)	1.00E-02	3	2	※3	1.00E-04	※4	4.00E-06	3.80E-06
C-4	手順書の使用を怠った場合、手順書中の実施項目を省いてしまう。	第20-7表(6)	1.00E-02	5	2	※3	1.00E-04	※4	4.00E-06	3.80E-06
C-5	間違えたスイッチを選択する。	第20-12表(2)	3.00E-03	10	2	※3	1.00E-04	※4	1.20E-06	1.14E-06
D-2	チェックリストを適切に使用した場合に手順書中の実施項目を省いてしまう。	第20-7表(2)	3.00E-03	3	2	※3	1.00E-04	※4	1.20E-06	1.14E-06
D-3	チェックリストを適切に使用しなかった場合に手順書中の実施項目を省いてしまう。	第20-7表(4)	1.00E-02	3	2	※3	1.00E-04	※4	4.00E-06	3.80E-06
D-4	手順書の使用を怠った場合、手順書中の実施項目を省いてしまう。	第20-7表(6)	1.00E-02	5	2	※3	1.00E-04	※4	4.00E-06	3.80E-06
D-5	間違えたスイッチを選択する。	第20-12表(2)	3.00E-03	10	2	※3	1.00E-04	※4	1.20E-06	1.14E-06
D-6	スイッチを間違えた方向に操作する。	第20-12表(8)	1.00E-04	10	2	※3	1.00E-04	※4	4.00E-08	3.80E-08
E-2	チェックリストを適切に使用した場合に手順書中の実施項目を省いてしまう。	第20-7表(2)	3.00E-03	3	2	※3	1.00E-04	※4	1.20E-06	1.14E-06
E-3	チェックリストを適切に使用しなかった場合に手順書中の実施項目を省いてしまう。	第20-7表(4)	1.00E-02	3	2	※3	1.00E-04	※4	4.00E-06	3.80E-06
E-4	手順書の使用を怠った場合、手順書中の実施項目を省いてしまう。	第20-7表(6)	1.00E-02	5	2	※3	1.00E-04	※4	4.00E-06	3.80E-06
E-5	間違えたスイッチを選択する。	第20-12表(2)	3.00E-03	10	2	※3	1.00E-04	※4	1.20E-06	1.14E-06
F-2	チェックリストを適切に使用した場合に手順書中の実施項目を省いてしまう。	第20-7表(2)	3.00E-03	3	2	※3	1.00E-04	※4	1.20E-06	1.14E-06
F-3	チェックリストを適切に使用しなかった場合に手順書中の実施項目を省いてしまう。	第20-7表(4)	1.00E-02	3	2	※3	1.00E-04	※4	4.00E-06	3.80E-06
F-4	手順書の使用を怠った場合、手順書中の実施項目を省いてしまう。	第20-7表(6)	1.00E-02	5	2	※3	1.00E-04	※4	4.00E-06	3.80E-06
F-5	間違えたスイッチを選択する。	第20-12表(2)	3.00E-03	10	2	※3	1.00E-04	※4	1.20E-06	1.14E-06
F-6	スイッチを間違えた方向に操作する。	第20-12表(8)	1.00E-04	10	2	※3	1.00E-04	※4	4.00E-08	3.80E-08
G-2	チェックリストを適切に使用した場合に手順書中の実施項目を省いてしまう。	第20-7表(2)	3.00E-03	3	2	※3	1.00E-04	※4	1.20E-06	1.14E-06
G-3	チェックリストを適切に使用しなかった場合に手順書中の実施項目を省いてしまう。	第20-7表(4)	1.00E-02	3	2	※3	1.00E-04	※4	4.00E-06	3.80E-06
G-4	手順書の使用を怠った場合、手順書中の実施項目を省いてしまう。	第20-7表(6)	1.00E-02	5	2	※3	1.00E-04	※4	4.00E-06	3.80E-06
G-5	間違えたスイッチを選択する。	第20-12表(2)	3.00E-03	10	2	※3	1.00E-04	※4	1.20E-06	1.14E-06
H-2	チェックリストを適切に使用した場合に手順書中の実施項目を省いてしまう。	第20-7表(2)	3.00E-03	3	2	※3	1.00E-04	※4	1.20E-06	1.14E-06
H-3	チェックリストを適切に使用しなかった場合に手順書中の実施項目を省いてしまう。	第20-7表(4)	1.00E-02	3	2	※3	1.00E-04	※4	4.00E-06	3.80E-06
H-4	手順書の使用を怠った場合、手順書中の実施項目を省いてしまう。	第20-7表(6)	1.00E-02	5	2	※3	1.00E-04	※4	4.00E-06	3.80E-06
H-5	間違えたスイッチを選択する。	第20-12表(2)	3.00E-03	10	2	※3	1.00E-04	※4	1.20E-06	1.14E-06
H-6	スイッチを間違えた方向に操作する。	第20-12表(8)	1.00E-04	10	2	※3	1.00E-04	※4	4.00E-08	3.80E-08

* 1 $BHEP = NHEP * (\text{ストレス} \cdot \text{経験因子}) * (\text{タギングレベル因子}) * \{\text{回復要素}\} * (\text{ストレス} \cdot \text{経験因子})$

* 2 従属性 L D の場合
 $CHEP = 1 - (1 + 9 * (1 - BHEP)) / 20$

従属性 M D の場合
 $CHEP = 1 - (1 + 6 * (1 - BHEP)) / 7$

従属性 H D の場合
 $CHEP = 1 - (1 + 1 * (1 - BHEP)) / 2$

* 3 熟練者、比較的高いストレス、ステップバイステップ作業（第20-16表 (4) : X2）を想定

* 4 警報による回復を考慮（第20-23表 (1) : 0.0001）

図4.9-8 人間信頼性解析結果(HRA-2) [2/2]

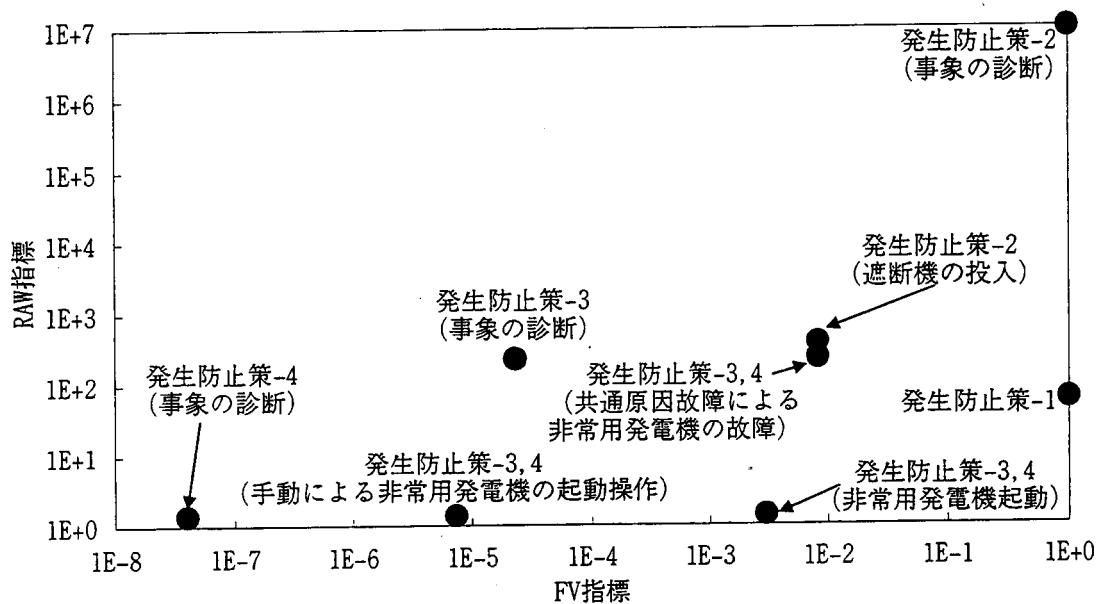


図4.9-9 重要度の把握結果

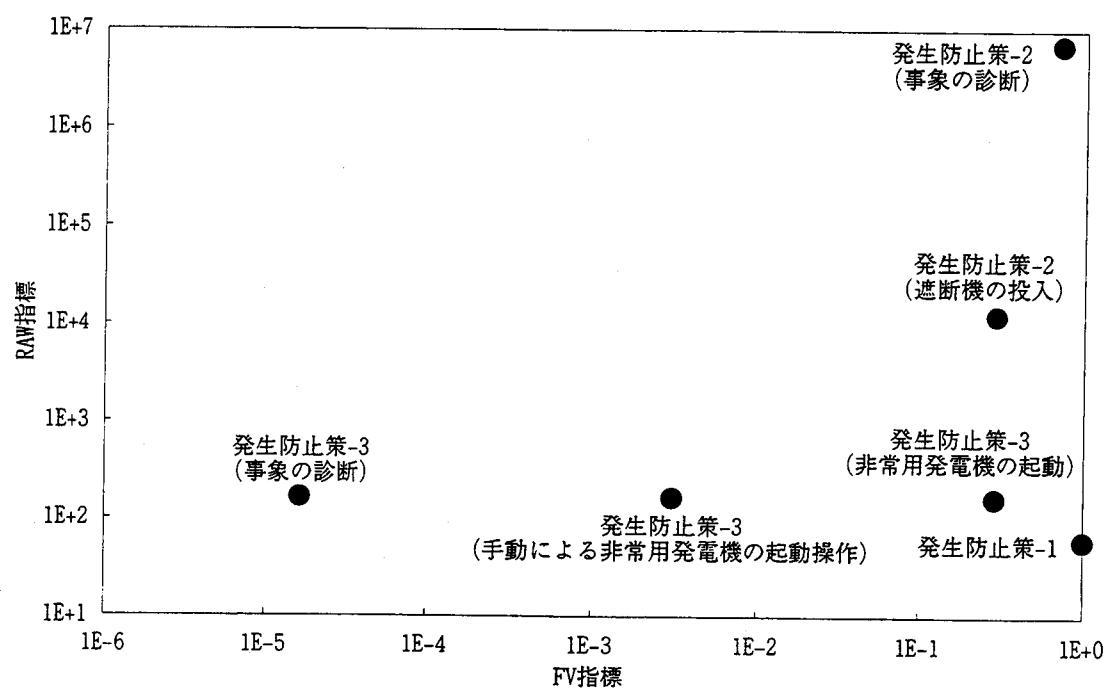


図4.9-10 重要度の把握結果

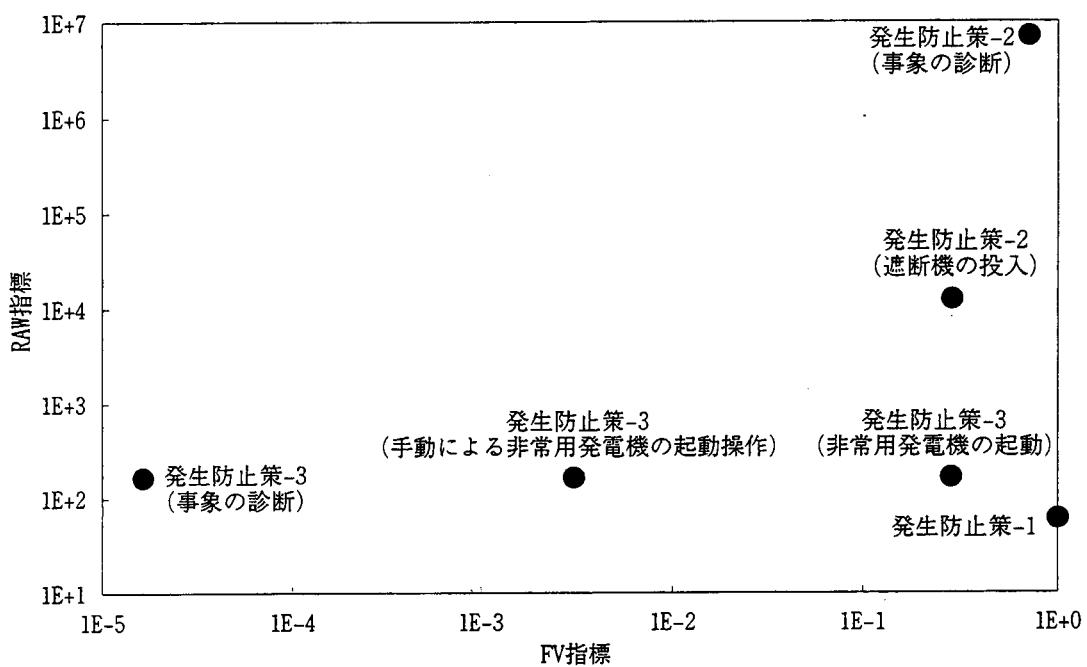


図4.9-11 重要度の把握結果

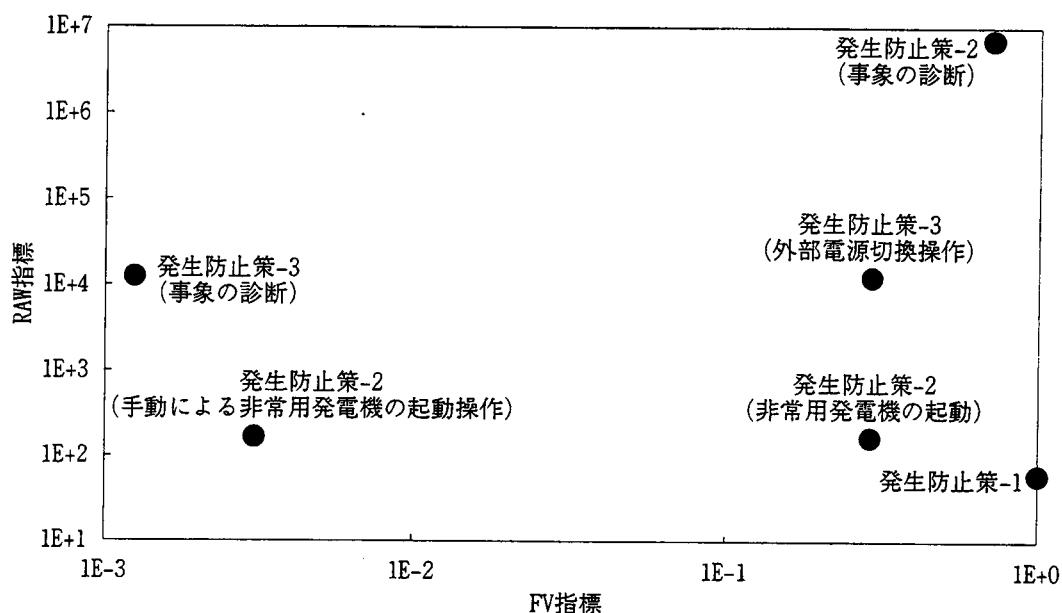


図4.9-12 重要度の把握結果

4.10 誤移送による臨界

4.10.1 概要

東海再処理施設における臨界事故の防止は、臨界安全設計により確保することを基本としており、形状寸法制限、濃度制限、質量制限、中性子吸収材の使用及びこれらの組み合わせによって行っている。また、必要に応じてインターロックや安全錠を設けることにより機器の单一故障や運転員の単一誤操作を想定しても臨界にならないよう設計している。

本評価においては、リワーク工程のプルトニウム溶液受槽からプルトニウム精製工程の調整槽へ高濃度プルトニウム溶液を誤移送し臨界となる事象を評価対象とした。リワーク工程は、装置の除染や溢流操作等により生ずる溶液を受入れ、液組成確認した後、ウラン、プルトニウムを回収するため関連工程へ送液するか、必要に応じて一時貯蔵または廃棄を行う工程である。リワーク工程のプルトニウム溶液受槽に受け入れた溶液は、液組成確認後、送液基準に従い送液する。何らかの理由により高濃度のプルトニウム溶液がプルトニウム溶液受槽（全濃度安全形状寸法）に流入し、運転員がそれに気付かずプルトニウム溶液受槽からプルトニウム精製工程の調整槽（濃度制限）へ送液すると、調整槽において臨界となる可能性がある。

このため、リワーク工程のプルトニウム溶液受槽においては、臨界の発生防止策として以下の手段を講じている(図 4.10-1)。

- ・ プルトニウム溶液受槽からプルトニウム精製工程の調整槽への溶液移送に際しては、送液前に最低 2 度液組成確認を実施し、プルトニウム濃度の確認を行っている。
- ・ プルトニウム溶液受槽の受入溶液を調整槽に戻す際に実施する溶媒溢流除去操作により、受入溶液が希釈される。

4.10.2 評価結果

3.の評価手法に従い、事故発生防止策の特徴及び重要度の把握を以下のように実施した。

1) イベントツリーの作成

図 4.10-2 に作成したイベントツリーを示す。

起因事象として、運転員の誤操作により、プルトニウム濃縮工程からリワーク工程のプルトニウム溶液受槽に高濃度のプルトニウムが流入してくることを想定した。

事故発生防止策として、リワーク工程への溶液受入後の液組成確認による異常の検知・対応、抽出工程に液を戻す場合に実施する溶媒溢流除去操作、及び送液前の 2 度の液組成確認による異常の検知・対応を考慮した。

2 度の液組成確認行為のうち、試料採取については、時間を置いて 2 度実施することとなっているため、分析結果異常の検知は 2 度期待している。しかし、試料採取は同じ運転員が実施する可能性が高いこと等から 1 度目と 2 度目の液組成確認行為間の従属性を高に設定した。また、1 度目の分析結果を見て対応するのではなく、2 回の分析結果を見て異常かどうか判断するため、対応操作としては 1 度だけ期待した。

2) フォールトツリーの作成

イベントツリーで考慮した各発生防止策に対し、フォールトツリー解析及び人間信頼性解析を実施した。発生防止策-1,3 は貯槽内の液組成確認による検知であり、サンプル採取時、分析時及び分析結果確認時に予想されるヒューマンエラーをフォールトツリーにより記述した（図 4.10-3）。また、液組成確認後の対応操作については、プルトニウム溶液受槽における希釈操作を考慮し、HRA イベントツリーを用いて記述した（図 4.10-4）。同様に溶媒溢流除去操作についても、運転要領書に従い HRA イベントツリーを用いて記述した（図 4.10-5）。プルトニウム溶液受槽からプルトニウム精製工程の調整槽へ送液する系統には施錠弁が設けられており、開錠する際には複数の承認を得る必要がある。複数の承認者による分析結果の異常検知をフォールトツリーにより記述した（図 4.10-6）。

3) 定量化

① 起因事象発生確率の算出

起因事象である高濃度プルトニウム溶液が流入するシナリオは、プルトニウム濃縮液受槽におけるプルトニウム濃度の誤認や弁の内通によるものなど、数多く考えられ、これらをフォールトツリー手法と信頼性データなどで定量化して起因事象の発生頻度を算出することも可能であるが、ここではリワーク工程の過去の運転実績より、プルトニウム溶液受槽に高濃度のプルトニウム溶液が流入する確率を算出した。

高濃度のプルトニウム溶液が流入するのは、プルトニウム溶液蒸発缶から抜き出した濃縮液を誤ってリワーク工程に送液してしまうのが最も可能性が高いと判断し、プルトニウム溶液蒸発缶の運転時間とリワーク工程へ高濃度のプルトニウム溶液の流入した実績データから算出した。

その結果、リワーク工程へ高濃度のプルトニウム溶液が流入した履歴がないことから、3 章及び付録 3 で述べている「東海再処理施設の実績を用いた故障率の設定方法」より、プルトニウム溶液蒸発缶の累積運転時間と故障回数 0.5 から起因事象発生確率を算出した。

② 発生防止策の失敗確率の算出

作成したフォールトツリーの定量化に用いた故障率を表 4.10-1 に示す。

③ イベントツリーの定量化

①、②で算出した値を用い、イベントツリーの定量化を行った。この結果、誤移送による臨界の発生確率は、 $1.31E-07(y)$ となった。

4) 重要度評価

定量化したイベントツリーの各発生防止策の重要度を把握するため、重要度評価を実施した。重要度の把握結果を図 4.10-7 に示す。同結果より、FV,RAW の各指標において以下のような特徴が見られた。

① FV 指標

プルトニウム溶液受槽における液組成確認及び溶媒溢流除去操作が相対的に高い値を示した。

② RAW 指標

プルトニウム溶液受槽における溶媒溢流除去操作が相対的に高い値を示した。

4.10.3 発生防止策の特徴及び重要度の把握結果

PSA 手法を用いた事故シーケンスの定量化及び同結果に基づく重要度の把握を実施した結果、以下のような知見が得られた。

発生防止策の特徴としては、液組成確認及び溶媒溢流除去操作による多重の防止策の存在である。仮に液組成確認に失敗しても、溶媒溢流除去操作により受入溶液を臨界の危険性が無い濃度まで希釈することが可能であること、また送液前の液組成確認は時間を置いて 2 度実施されるため、仮に 1 度失敗しても 2 度目の液組成確認に成功すれば、高濃度プルトニウム溶液の送液を防止することが可能である。

重要度の評価結果より、誤移送に伴う臨界の発生防止上最も重要な役割を果たしているのは、溶媒溢流除去操作であることがわかった。同操作は、本来臨界安全の観点から実施している操作ではないが、評価を実施した結果、臨界安全上重要な操作に位置づけられることが分かった。

4.10.4 まとめ

リワーク工程のプルトニウム溶液受槽からプルトニウム精製工程の調整槽へ高濃度の Pu 溶液が送液された場合の臨界事故発生の可能性について PSA 手法を用いた事故発生防止策の特徴及び重要度の把握を実施した結果、以下の知見が得られた。

- ・誤移送に伴う臨界事故の発生頻度は、 $1.31E-07(y)$ となった。
- ・臨界事故シーケンス上に多重の防止機能が存在することが明らかとなった。
- ・重要度評価を実施した結果、溶媒溢流除去操作が事故発生防止上重要な役割を果たしていることが明らかとなった。

表4.10-1 故障率・過誤率一覧表

基事象番号	不全モード		故障率データ			近隣操作回数、使用回数 [/y]	試験間隔、点検周期 [/h]	故障率
	機器グループ種別	故障モード	[/h]	[/d]	出典			
FT-1 01	運転員	276V20分析結果読み取りミス(分析結果は正常)		1.00E-03	NUREG/CR-1278 第20-10表(9)			1.00E-03 /d
FT-1 02	運転員	276V20内Pu量算出ミス		1.00E-02	NUREG/CR-1278 第20-10表(10)			1.00E-02 /d
FT-1 03	分析員	計算ミス		1.00E-02	NUREG/CR-1278 第20-10表(10)			1.00E-02 /d
FT-1 04	分析員	標準試料選択ミス		3.00E-03	NUREG/CR-1278 第20-7表(2)			3.00E-03 /d
FT-1 05	分析員	間違ったサンプルを選択		1.00E-03	NUREG/CR-1278 第20-10表(9)			1.00E-03 /d
FT-1 06	分析員	操作手順違反		1.00E-02	NUREG/CR-1278 第20-6表(3)			1.00E-02 /d
FT-1 07	運転員	攪拌時間の計測ミス		3.00E-03	NUREG/CR-1278 第20-10表(1)			3.00E-03 /d
FT-1 08	運転員	手順に従わない(短時間で攪拌終了)		1.00E-02	NUREG/CR-1278 第20-6表(3)			1.00E-02 /d
FT-1 09	運転員	ニードル選択ミス		3.00E-03	NUREG/CR-1278 第20-12表(2)			3.00E-03 /d
FT-1 10	運転員	攪拌開始用スイッチ選択ミス		3.00E-03	NUREG/CR-1278 第20-12表(2)			3.00E-03 /d
FT-2 01	当直長	分析結果異常の検知失敗		5.00E-01	NUREG/CR-1278 第20-22表(8)			5.00E-01 /d
FT-2 02	課長	分析結果異常の検知失敗		5.00E-01	NUREG/CR-1278 第20-22表(8)			5.00E-01 /d
FT-2 03	TL	分析結果異常の検知失敗		1.00E-01	NUREG/CR-1278 第20-22表(1)			1.00E-01 /d
FT-2 04	運転員	分析結果異常見落とし		5.00E-02	NUREG/CR-1278 第20-10表(11)			5.00E-02 /d

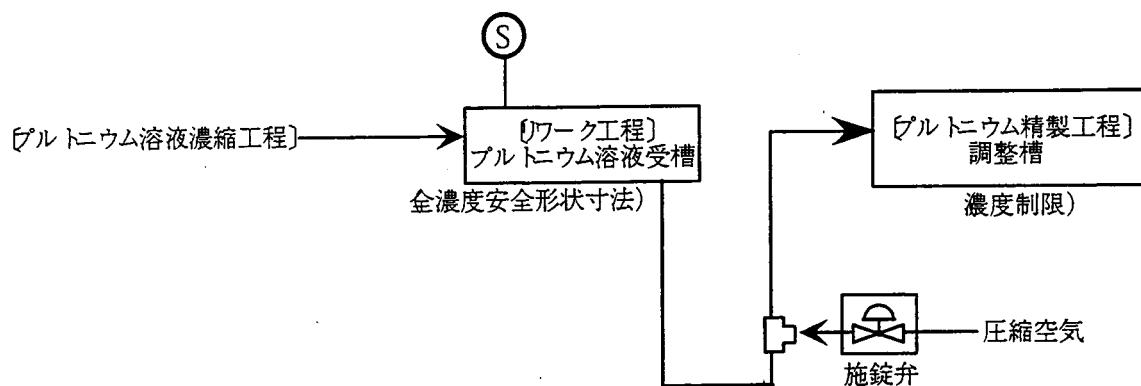
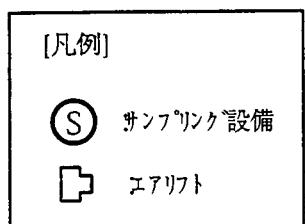


図 4.10-1 発生防止策概要図

起因事象	発生防止策-1		発生防止策-2		発生防止策-3		発生防止策-4		臨界の可能性	発生確率
	ブルトニウム溶液受槽における液組成確認による濃度異常の検知	濃度異常検知後の対応	溶媒溢流除去操作による希釈	送液前のブルトニウム溶液受槽における2度の液組成確認による濃度異常の検知	濃度異常検知後の対応	送液前の施錠弁解錠時の複数承認による濃度異常の検知に伴う送液中止				
ブルトニウム溶液受槽への高濃度ブルトニウム溶液の流入	成功	成功	失敗	成功	失敗	成功	失敗	成功	なし	
	1.30E-05 (/h)	5.64E-03	1.08E-03	4.71E-02	5.64E-03	1.25E-03	5.64E-03	1.25E-03	なし	5.07E-16 (/h)
									有り	1.19E-17 (/h)
									有り	1.86E-12 (/h)
									なし	
									有り	4.44E-15 (/h)
									有り	1.05E-16 (/h)
									有り	1.63E-11 (/h)
									合計	1.82E-11 (/h)

事象発生確率 1.31E-07 (/y)

イベントツリーの分岐確率算出根拠

事象の種類	基本確率	単位	基本確率 算出根拠	従属性	事象発生確率 (分岐確率)
起因事象	1.30E-05	/h	実績より算出	-	1.30E-05 /h
発生防止策-1 検知 対応	4.71E-02 5.64E-03	/d	図4.10-3 FT-1 図4.10-4 HRA-1	-	4.71E-02 /d 5.64E-03 /d
発生防止策-2	1.08E-03	/d	図4.10-5 HRA-2	-	1.08E-03 /d
発生防止策-3 検知(1回目) 検知(2回目) 対応	4.71E-02 4.71E-02 5.64E-03	/d	図4.10-3 FT-1 図4.10-4 HRA-1	- HD	4.71E-02 /d 5.24E-01 /d 5.64E-03 /d
発生防止策-4	1.25E-03	/d	図4.10-6 FT-2	-	1.25E-03 /d

図4.10-2 イベントツリー

FT-1

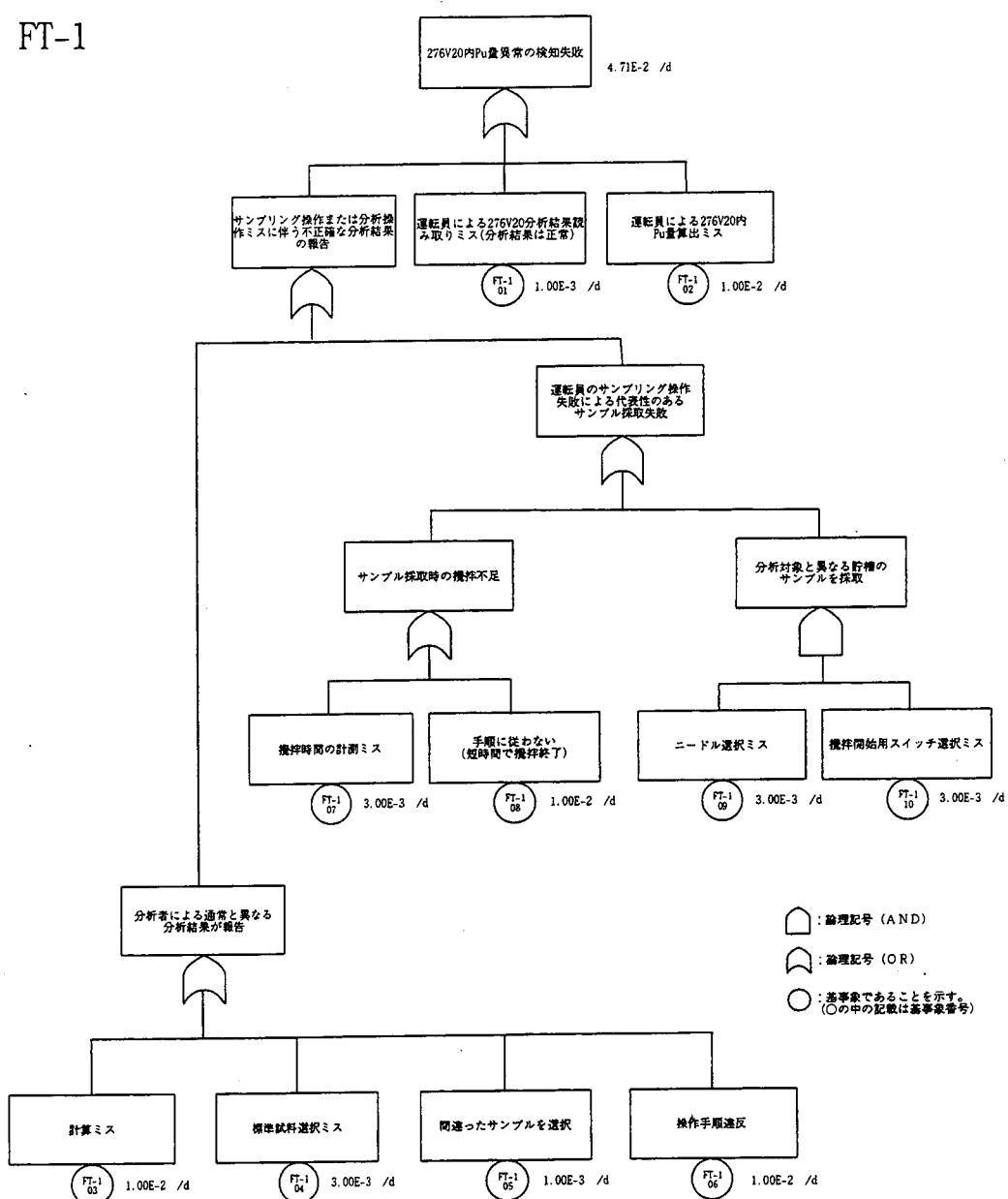
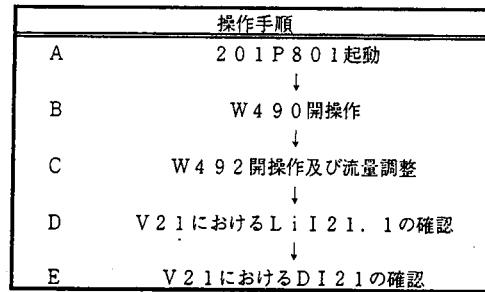


図4.10-3 発生防止策-1,3のフォールトツリー

	6.00E-04	6.00E-04	
\$ - 1	失敗		
	6.00E-04	6.00E-04	
\$ - 2	失敗		
	4.00E-02	4.00E-04	1.60E-05
\$ - 3	A-O(1)	失敗	
	1.24E-04	4.96E-06	
	A-C(1)	失敗	
	3.43E-04	1.37E-05	
	B-O(1)	失敗	
	1.37E-04	5.49E-06	
	B-C(1)	失敗	
	3.43E-04	1.37E-05	
	C-O(1)	失敗	
	1.37E-04	5.49E-06	
	C-C(1)	失敗	
	3.80E-03	5.02E-01	9.91E-05
D-O(1)	E-O(1)	失敗	
1.14E-03	7.51E-01	7.38E-05	
D-C(1)	E-C(1)	失敗	
成功	成功		
	5.00E-01	4.00E-04	2.00E-04
\$ - 4	A-O(2)	失敗	
	1.24E-04	6.20E-05	
	A-C(2)	失敗	
	3.43E-04	1.71E-04	
	B-O(2)	失敗	
	1.37E-04	6.86E-05	
	B-C(2)	失敗	
	3.43E-04	1.71E-04	
	C-O(2)	失敗	
	1.37E-04	6.86E-05	
	C-C(2)	失敗	
	3.80E-03	5.02E-01	1.24E-03
D-O(2)	E-O(2)	失敗	
1.14E-03	7.51E-01	9.22E-04	
D-C(2)	E-C(2)	失敗	
成功	成功		
	1.20E-04	5.75E-05	
A-O(3)	失敗		
	1.24E-04	5.94E-05	
A-C(3)	失敗		
	1.03E-04	4.93E-05	
B-O(3)	失敗		
	1.37E-04	6.57E-05	
B-C(3)	失敗		
	1.03E-04	4.93E-05	
C-O(3)	失敗		
	1.37E-04	6.57E-05	
C-C(3)	失敗		
	1.14E-03	5.01E-01	5.47E-04
D-O(3)	E-O(3)	失敗	
1.14E-03	7.51E-01	4.10E-04	
D-C(3)	E-C(3)	失敗	
成功	成功		



分岐番号	エラー番号	人的過誤率
\$ - 1	\$-1	6.00E-04
\$ - 2	\$-2	6.00E-04
\$ - 3	\$-3	4.00E-02
\$ - 4	\$-4	5.00E-01
A - O (1)	A-3	4.00E-04
A - C (1)	A-4.5	1.24E-04
B - O (1)	B-3	3.43E-04
B - C (1)	B-4.5	1.37E-04
C - O (1)	C-3	3.43E-04
C - C (1)	C-4.5	1.37E-04
D - O (1)	D-3	3.80E-03
D - C (1)	D-4	1.14E-03
E - O (1)	E-3	5.02E-01
E - C (1)	E-4.5	7.51E-01
A - O (2)	A-2	4.00E-04
A - C (2)	A-4.5	1.24E-04
B - O (2)	B-2	3.43E-04
B - C (2)	B-4.5	1.37E-04
C - O (2)	C-2	3.43E-04
C - C (2)	C-4.5	1.37E-04
D - O (2)	D-2	3.80E-03
D - C (2)	D-4	1.14E-03
E - O (2)	E-2	5.02E-01
E - C (2)	E-4.5	7.51E-01
A - O (3)	A-1	1.20E-04
A - C (3)	A-4.5	1.24E-04
B - O (3)	B-1	1.03E-04
B - C (3)	B-4.5	1.37E-04
C - O (3)	C-1	1.03E-04
C - C (3)	C-4.5	1.37E-04
D - O (3)	D-1	1.14E-03
D - C (3)	D-4	1.14E-03
E - O (3)	E-1	5.01E-01
E - C (3)	E-4.5	7.51E-01

Total	5.64E-03 /d
-------	-------------

図4.10-4 人間信頼性解析結果 (HRA-1) [1/2]

人間過誤率表

エラー番号	エラー内容	表番号 項目番号 (MREC-CR-1276)	NHEP	EF	タギング レベル 因子	ストレス・経験 因子※3	回復要素	BHEP ※1	従属性	CHEP ※2
\$ - 1	運転指示書を作成する際に記載する内容を間違える。	第20- 5表 (1)	3.00E-03	5		2	5.00E-02 ※4	6.00E-04		6.00E-04
\$ - 2	運転指示書を作成する際に記載すべき内容を書き落とす。	第20- 5表 (3)	3.00E-03	5		2	5.00E-02 ※4	6.00E-04		6.00E-04
\$ - 3	運転管理に従わず、手順書を使用しない。	第20- 6表 (3)	1.00E-02	3		2		4.00E-02		4.00E-02
\$ - 4	運転管理に従わず、チェックリストを使用しない。	第20- 6表 (8)	5.00E-01	5		2		5.00E-01		5.00E-01
A - 1	チェックリストを適切に使用した場合に手順書中の実施項目を省いてしまう。	第20- 7表 (2)	3.00E-03	3		2	1.00E-02 ※5	1.20E-04		1.20E-04
A - 2	チェックリストを適切に使用しなかった場合に手順書中の実施項目を省いてしまう。	第20- 7表 (4)	1.00E-02	3		2	1.00E-02 ※5	4.00E-04		4.00E-04
A - 3	手順書の使用を怠った場合、手順書中の実施項目を省いてしまう。	第20- 7表 (6)	1.00E-02	5		2	1.00E-02 ※5	4.00E-04		4.00E-04
A - 4	間違えたスイッチを選択する。	第20-12表 (2)	3.00E-03	3		2	1.00E-02 ※5	1.20E-04		1.20E-04
A - 5	スイッチを間違えた方向に操作する。	第20-12表 (8)	1.00E-04	10		2	1.00E-02 ※5	4.00E-06		4.00E-06
B - 1	チェックリストを適切に使用した場合に手順書中の実施項目を省いてしまう。	第20- 7表 (2)	3.00E-03	3		2	1.00E-02 ※5	1.20E-04	MD	1.03E-04
B - 2	チェックリストを適切に使用しなかった場合に手順書中の実施項目を省いてしまう。	第20- 7表 (4)	1.00E-02	3		2	1.00E-02 ※5	4.00E-04	MD	3.43E-04
B - 3	手順書の使用を怠った場合、手順書中の実施項目を省いてしまう。	第20- 7表 (6)	1.00E-02	5		2	1.00E-02 ※5	4.00E-04	MD	3.43E-04
B - 4	間違った手動弁を選択する。	第20-13表 (2)	3.00E-03	3		2	1.00E-02 ※5	1.20E-04	MD	1.03E-04
B - 5	手動弁の操作に失敗する。	第20-14表 (1)	1.00E-03	3		2	1.00E-02 ※5	4.00E-05	MD	3.43E-05
C - 1	チェックリストを適切に使用した場合に手順書中の実施項目を省いてしまう。	第20- 7表 (2)	3.00E-03	3		2	1.00E-02 ※5	1.20E-04	MD	1.03E-04
C - 2	チェックリストを適切に使用しなかった場合に手順書中の実施項目を省いてしまう。	第20- 7表 (4)	1.00E-02	3		2	1.00E-02 ※5	4.00E-04	MD	3.43E-04
C - 3	手順書の使用を怠った場合、手順書中の実施項目を省いてしまう。	第20- 7表 (6)	1.00E-02	5		2	1.00E-02 ※5	4.00E-04	MD	3.43E-04
C - 4	間違った手動弁を選択する。	第20-13表 (2)	3.00E-03	3		2	1.00E-02 ※5	1.20E-04	MD	1.03E-04
C - 5	手動弁の操作に失敗する。	第20-14表 (1)	1.00E-03	3		2	1.00E-02 ※5	4.00E-05	MD	3.43E-05
D - 1	チェックリストを適切に使用した場合に手順書中の実施項目を省いてしまう。	第20- 7表 (2)	3.00E-03	3		2	1.00E-01 ※6	1.20E-03	LD	1.14E-03
D - 2	チェックリストを適切に使用しなかった場合に手順書中の実施項目を省いてしまう。	第20- 7表 (4)	1.00E-02	3		2	1.00E-01 ※6	4.00E-03	LD	3.80E-03
D - 3	手順書の使用を怠った場合、手順書中の実施項目を省いてしまう。	第20- 7表 (6)	1.00E-02	5		2	1.00E-01 ※6	4.00E-03	LD	3.80E-03
D - 4	ディスプレイからの定量的な情報の読み取りにエラーを犯す。	第20-10表 (1)	3.00E-03	3		2	1.00E-01 ※6	1.20E-03	LD	1.14E-03
E - 1	チェックリストを適切に使用した場合に手順書中の実施項目を省いてしまう。	第20- 7表 (2)	3.00E-03	3		2	1.00E-01 ※6	1.20E-03	HD	5.01E-01
E - 2	チェックリストを適切に使用しなかった場合に手順書中の実施項目を省いてしまう。	第20- 7表 (4)	1.00E-02	3		2	1.00E-01 ※6	4.00E-03	HD	5.02E-01
E - 3	手順書の使用を怠った場合、手順書中の実施項目を省いてしまう。	第20- 7表 (6)	1.00E-02	5		2	1.00E-01 ※6	4.00E-03	HD	5.02E-01
E - 4	ディスプレイの選択にエラーを犯す	第20- 9表 (4)	3.00E-03	3		2	1.00E-01 ※6	1.20E-03	HD	5.01E-01
E - 5	ディスプレイからの定量的な情報の読み取りにエラーを犯す。	第20-10表 (1)	3.00E-03	3		2	1.00E-01 ※6	1.20E-03	HD	5.01E-01

※ 1 BHEP=NHEP * (ストレス・経験因子) * (タギングレベル因子) * |(回復要素) * (ストレス・経験因子)|

※ 2 従属性 L D の場合
CHEP=(1+19*BHEP)/20

従属性 M D の場合
CHEP=(1+6*BHEP)/7

従属性 H D の場合
CHEP=(1+1*BHEP)/2

※ 3 P S F の考え方
熟練者、高いストレス、ステップバイステップ作業を想定。

回復要素の考え方

※ 4 運転指示書を作成した後、TL及び課長のチェックが入ることを期待し、回復要素を以下のように設定した

TLによる確認	第20- 22表(1)	0.1
課長による確認(2人以上の点検者)	第20- 22表(8)	0.5
	回復要素	0.05

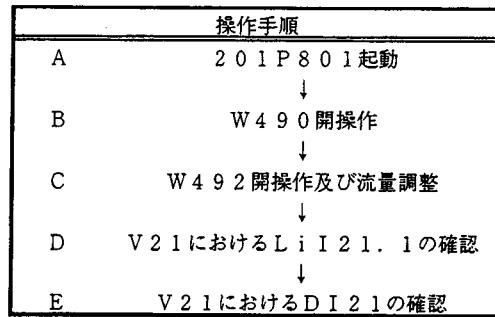
※ 5 ポンプの起動及びバルブ操作については、V20の液位増加確認(チャートレコーダ)により確認できるものとする。

別の計器の指示を読み取る	0.006 第20-11 (6)
液位確認忘れ	0.003 第20- 7 (2)
合計	0.01

※6 V21における密度等の確認行為に対しては、肩越しの検査(第20-22表(1):0.1)を考慮した。

図4.10-4 人間信頼性解析結果(HRA-1) [2/2]

1.00E-02	1.00E-04	1.00E-06
\$ - 1	A-0(1)	失敗
3.10E-05	3.10E-07	
A-C(1)	失敗	
8.57E-05	8.57E-07	
B-0(1)	失敗	
3.43E-05	3.43E-07	
B-C(1)	失敗	
8.57E-05	8.57E-07	
C-0(1)	失敗	
3.43E-05	3.43E-07	
C-C(1)	失敗	
9.50E-04	5.01E-01	6.18E-06
D-0(1)	E-0(1)	失敗
2.85E-04	7.50E-01	4.63E-06
D-C(1)	E-C(1)	失敗
成功	成功	
5.00E-01	1.00E-04	5.00E-05
\$ - 2	A-0(2)	失敗
3.10E-05	1.55E-05	
A-C(2)	失敗	
8.57E-05	4.29E-05	
B-0(2)	失敗	
3.43E-05	1.71E-05	
B-C(2)	失敗	
8.57E-05	4.29E-05	
C-0(2)	失敗	
3.43E-05	1.71E-05	
C-C(2)	失敗	
9.50E-04	5.01E-01	3.09E-04
D-0(2)	E-0(2)	失敗
2.85E-04	7.50E-01	2.31E-04
D-C(2)	E-C(2)	失敗
成功	成功	
3.00E-05	1.49E-05	
A-0(3)	失敗	
3.10E-05	1.53E-05	
A-C(3)	失敗	
2.57E-05	1.27E-05	
B-0(3)	失敗	
3.43E-05	1.70E-05	
B-C(3)	失敗	
2.57E-05	1.27E-05	
C-0(3)	失敗	
3.43E-05	1.70E-05	
C-C(3)	失敗	
2.85E-04	5.00E-01	1.41E-04
D-0(3)	E-0(3)	失敗
2.85E-04	7.50E-01	1.06E-04
D-C(3)	E-C(3)	失敗
成功	成功	



分歧番号	エラー番号	人的過誤率
\$ - 1	\$-1	1.00E-02
\$ - 2	\$-2	5.00E-01
A - O (1)	A-3	1.00E-04
A - C (1)	A-4,5	3.10E-05
B - O (1)	B-3	8.57E-05
B - C (1)	B-4,5	3.43E-05
C - O (1)	C-3	8.57E-05
C - C (1)	C-4,5	3.43E-05
D - O (1)	D-3	9.50E-04
D - C (1)	D-4	2.85E-04
E - O (1)	E-3	5.01E-01
E - C (1)	E-4,5	7.50E-01
A - O (2)	A-2	1.00E-04
A - C (2)	A-4,5	3.10E-05
B - O (2)	B-2	8.57E-05
B - C (2)	B-4,5	3.43E-05
C - O (2)	C-2	8.57E-05
C - C (2)	C-4,5	3.43E-05
D - O (2)	D-2	9.50E-04
D - C (2)	D-4	2.85E-04
E - O (2)	E-2	5.01E-01
E - C (2)	E-4,5	7.50E-01
A - O (3)	A-1	3.00E-05
A - C (3)	A-4,5	3.10E-05
B - O (3)	B-1	2.57E-05
B - C (3)	B-4,5	3.43E-05
C - O (3)	C-1	2.57E-05
C - C (3)	C-4,5	3.43E-05
D - O (3)	D-1	2.85E-04
D - C (3)	D-4	2.85E-04
E - O (3)	E-1	5.00E-01
E - C (3)	E-4,5	7.50E-01

Total	1.08E-03 /d
-------	-------------

図4.10-5 人間信頼性解析結果 (HRA-2) [1/2]

人間過誤率表

エラー番号	エラー内容	表番号 項目番号 (NUREG-01-1276)	NHEP	EF	タギング レベル 因子	ストレ ス・経験 因子※3	回復要素	BHEP ※1	従属性	CHEP ※2
\$ - 1	運転管理に従わず、手順書を使用しない。	第20- 6表 (3)	1.00E-02	3		1		1.00E-02		1.00E-02
\$ - 2	運転管理に従わず、チェックリストを使用しない。	第20- 6表 (6)	5.00E-01	5		1		5.00E-01		5.00E-01
A - 1	チェックリストを適切に使用した場合に手順書中の実施項目を省いてしまう。	第20- 7表 (2)	3.00E-03	3		1	1.00E-02 * 4	3.00E-05		3.00E-05
A - 2	チェックリストを適切に使用しなかつた場合に手順書中の実施項目を省いてしまう。	第20- 7表 (4)	1.00E-02	3		1	1.00E-02 * 4	1.00E-04		1.00E-04
A - 3	手順書の使用を怠った場合、手順書中の実施項目を省いてしまう。	第20- 7表 (6)	1.00E-02	5		1	1.00E-02 * 4	1.00E-04		1.00E-04
A - 4	間違えたスイッチを選択する。	第20-12表 (2)	3.00E-03	3		1	1.00E-02 * 4	3.00E-05		3.00E-05
A - 5	スイッチを間違えた方向に操作する。	第20-12表 (8)	1.00E-04	10		1	1.00E-02 * 4	1.00E-06		1.00E-06
B - 1	チェックリストを適切に使用した場合に手順書中の実施項目を省いてしまう。	第20- 7表 (2)	3.00E-03	3		1	1.00E-02 * 4	3.00E-05	MD	2.57E-05
B - 2	チェックリストを適切に使用しなかつた場合に手順書中の実施項目を省いてしまう。	第20- 7表 (4)	1.00E-02	3		1	1.00E-02 * 4	1.00E-04	MD	8.57E-05
B - 3	手順書の使用を怠った場合、手順書中の実施項目を省いてしまう。	第20- 7表 (6)	1.00E-02	5		1	1.00E-02 * 4	1.00E-04	MD	8.57E-05
B - 4	間違った手動弁を選択する。	第20-13表 (2)	3.00E-03	3		1	1.00E-02 * 4	3.00E-05	MD	2.57E-05
B - 5	手動弁の操作に失敗する。	第20-14表 (1)	1.00E-03	3		1	1.00E-02 * 4	1.00E-05	MD	8.57E-06
C - 1	チェックリストを適切に使用した場合に手順書中の実施項目を省いてしまう。	第20- 7表 (2)	3.00E-03	3		1	1.00E-02 * 4	3.00E-05	MD	2.57E-05
C - 2	チェックリストを適切に使用しなかつた場合に手順書中の実施項目を省いてしまう。	第20- 7表 (4)	1.00E-02	3		1	1.00E-02 * 4	1.00E-04	MD	8.57E-05
C - 3	手順書の使用を怠った場合、手順書中の実施項目を省いてしまう。	第20- 7表 (6)	1.00E-02	5		1	1.00E-02 * 4	1.00E-04	MD	8.57E-05
C - 4	間違った手動弁を選択する。	第20-13表 (2)	3.00E-03	3		1	1.00E-02 * 4	3.00E-05	MD	2.57E-05
C - 5	手動弁の操作に失敗する。	第20-14表 (1)	1.00E-03	3		1	1.00E-02 * 4	1.00E-05	MD	8.57E-06
D - 1	チェックリストを適切に使用した場合に手順書中の実施項目を省いてしまう。	第20- 7表 (2)	3.00E-03	3		1	1.00E-01 * 5	3.00E-04	LD	2.85E-04
D - 2	チェックリストを適切に使用しなかつた場合に手順書中の実施項目を省いてしまう。	第20- 7表 (4)	1.00E-02	3		1	1.00E-01 * 5	1.00E-03	LD	9.50E-04
D - 3	手順書の使用を怠った場合、手順書中の実施項目を省いてしまう。	第20- 7表 (6)	1.00E-02	5		1	1.00E-01 * 5	1.00E-03	LD	9.50E-04
D - 4	ディスプレイから定量的な情報の読み取りにエラーを犯す。	第20-10表 (1)	3.00E-03	3		1	1.00E-01 * 5	3.00E-04	LD	2.85E-04
E - 1	チェックリストを適切に使用した場合に手順書中の実施項目を省いてしまう。	第20- 7表 (2)	3.00E-03	3		1	1.00E-01 * 5	3.00E-04	HD	5.00E-01
E - 2	チェックリストを適切に使用しなかつた場合に手順書中の実施項目を省いてしまう。	第20- 7表 (4)	1.00E-02	3		1	1.00E-01 * 5	1.00E-03	HD	5.01E-01
E - 3	手順書の使用を怠った場合、手順書中の実施項目を省いてしまう。	第20- 7表 (6)	1.00E-02	5		1	1.00E-01 * 5	1.00E-03	HD	5.01E-01
E - 4	ディスプレイの選択にエラーを犯す。	第20- 9表 (4)	3.00E-03	3		1	1.00E-01 * 5	3.00E-04	HD	5.00E-01
E - 5	ディスプレイからの定量的な情報の読み取りにエラーを犯す。	第20-10表 (1)	3.00E-03	3		1	1.00E-01 * 5	3.00E-04	HD	5.00E-01

* 1 BHEP-NHEP* (ストレス・経験因子) * (タギングレベル因子) * !(回復要素) * (ストレス・経験因子)!

* 2 従属性 L D の場合

$$\text{CHEP} = (1+19^*\text{BHEP})/20$$

従属性 M D の場合

$$\text{CHEP} = (1+6^*\text{BHEP})/7$$

従属性 H D の場合

$$\text{CHEP} = (1+1^*\text{BHEP})/2$$

* 3 P S F の考え方

熟練者、通常のストレス、ステップバイステップ作業を想定。

回復要素の考え方

* 4 ポンプの起動及びバルブ操作については、V20の液位増加確認（チャートレコーダ）により確認できるものとする。

別の計器の指示を読み取る	0.006 第20-11 (6)
液位確認忘れ	0.003 第20- 7 (2)
合計	0.01

* 5 V21における密度等の確認行為に対しては、肩越しの検査（第20-22表 (1):0.1）を考慮した。

図4.10-5 人間信頼性解析結果(HRA-2) [2/2]

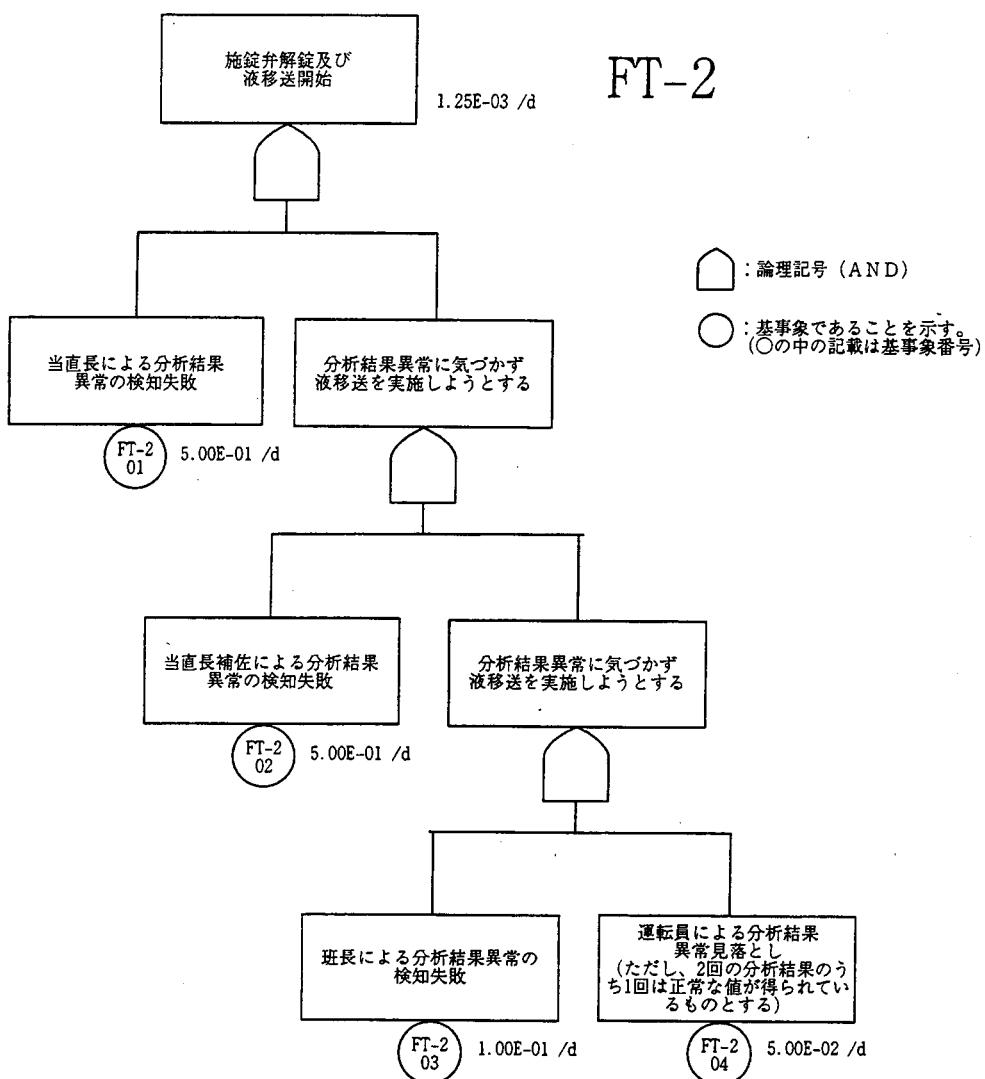


図4.10-6 発生防止策-4のフォルトツリー

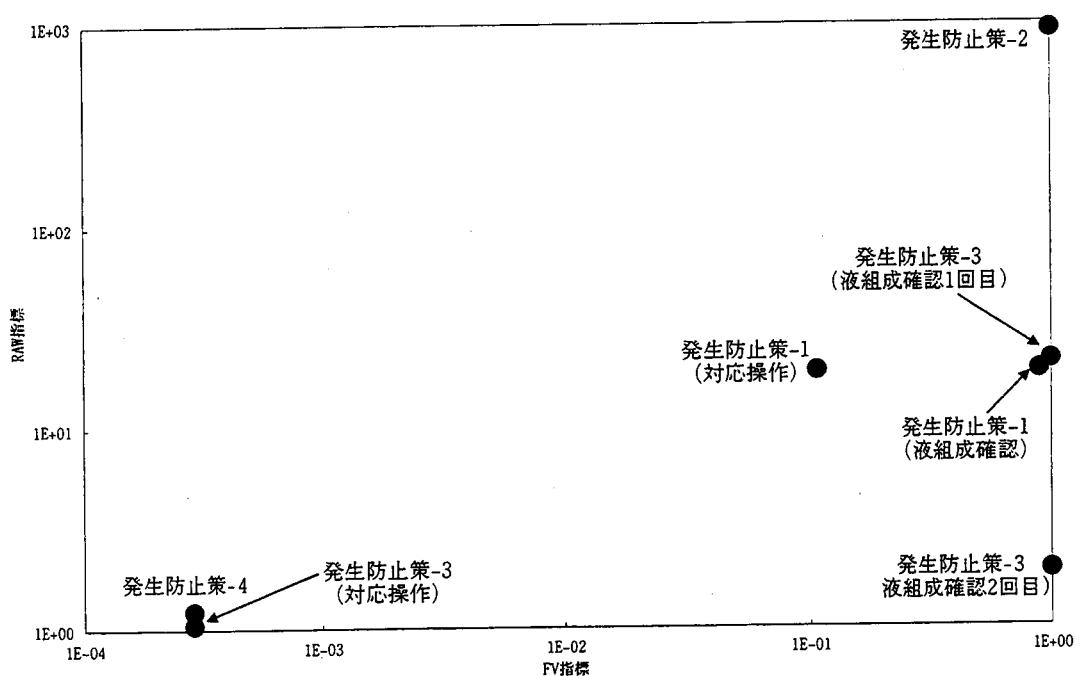


図4.10-7 重要度の把握結果

5. おわりに

PSAを用い、火災、爆発、臨界等の重大な事故に至る可能性のある事象について発生確率の算出及び発生確率への寄与の観点から、東海再処理施設の機能、系統、機器などの相対的な重要度の把握を実施した。

この発生防止策の重要度の把握結果から、今後の保守・点検の優先順位付け等に利用することが考えられる。

また現在、原子力安全委員会の安全目標専門部会において検討が進められている安全目標が具体的に策定された際には、それに準拠するための設備改善や要領書の改訂等が必要となる可能性があるが、その場合においても、本評価結果を東海再処理施設の運用管理の最適化等のための参考情報として活用することにより、施設の安全性を合理的かつ効果的に向上させることができると予想される。参考として付録5に「国外の核燃料施設における安全目標」について記載した。

なお、核燃料サイクル開発機構では、これまでに安全研究で確率論的安全評価手法を再処理施設へ適用するための事例研究や信頼性データの収集・整備を実施してきており、今回の評価にもその知見は生かすことができた。更に、これらの評価手法の検討やデータベースの更なる充実化を行うことで、より現実のプラントに即した評価を行うことが可能であると予想される。

これからも東海再処理施設における、さらなる PSA 技術の成熟に対する努力を継続し、PSA の有効な活用を図って行きたいと考える。

参考文献

- 1) 中村博文,他：“東海再処理施設の事故の発生防止策の検討”, JNC TN8410 99-004 (1999)
- 2) 須藤俊幸,他：“東海再処理施設の臨界安全、遮蔽設計基本データの確認”, JNC TN8410 99-003 (1999)
- 3) American Nuclear Society: “PRA PROCEDURES GUIDE”, NUREG/CR-2300 (1983)
- 4) (財)原子力安全研究協会：“確率論的安全評価（PSA）実施手順に関する調査検討－レベル1 PSA、内的事象－”, (1992)
- 5) Haasl,D.F., Roberts,N.H., Vesely,W.E., Goldberg,F.F.: “Fault Tree handbook”, NUREG-0492 (1981)
- 6) A. D. Swain, H. F. Guttman :“Handbook of Human-Reliability Analysis with Emphasis on Nuclear Power Plant Application, Final Report”, NUREG/CR-1278 (1983)
- 7) “Probabilistic Safety Analysis Procedures Guide” NUREG/CR-2815 (1985)
- 8) “IEEE Guide to the Collection and Presentation of Electrical, Electronics, Sensing Component, and Mechanical Equipment Reliability Data for Nuclear-Power Generating Stations” IEEE Std 500 (1984)

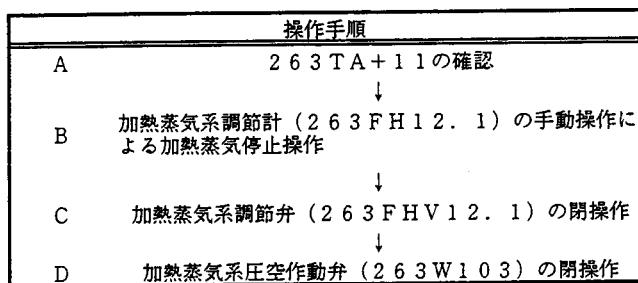
付録1 ヒューマンエラーの発生確率の設定

「ウラン溶液蒸発缶加熱蒸気の停止操作」の失敗確率を、ヒューマンエラーハンドブック¹⁾記載の THERP 手法 (Technique for Human Error Rate Prediction)により評価した。

1. タスクの分析

評価対象のタスクは、「ウラン溶液蒸発缶加熱蒸気の停止操作」である。このタスクは、ウラン溶液蒸発缶加熱蒸気の温度上限警報 (263TA+11) の発報に気がついた運転員が、加熱蒸気配管に設置されたバルブを、制御盤からの3通りの操作により閉じ、加熱蒸気を停止するものであり、以下のように4つのサブタスクに分解することができる。

表-1 サブタスクへの分解



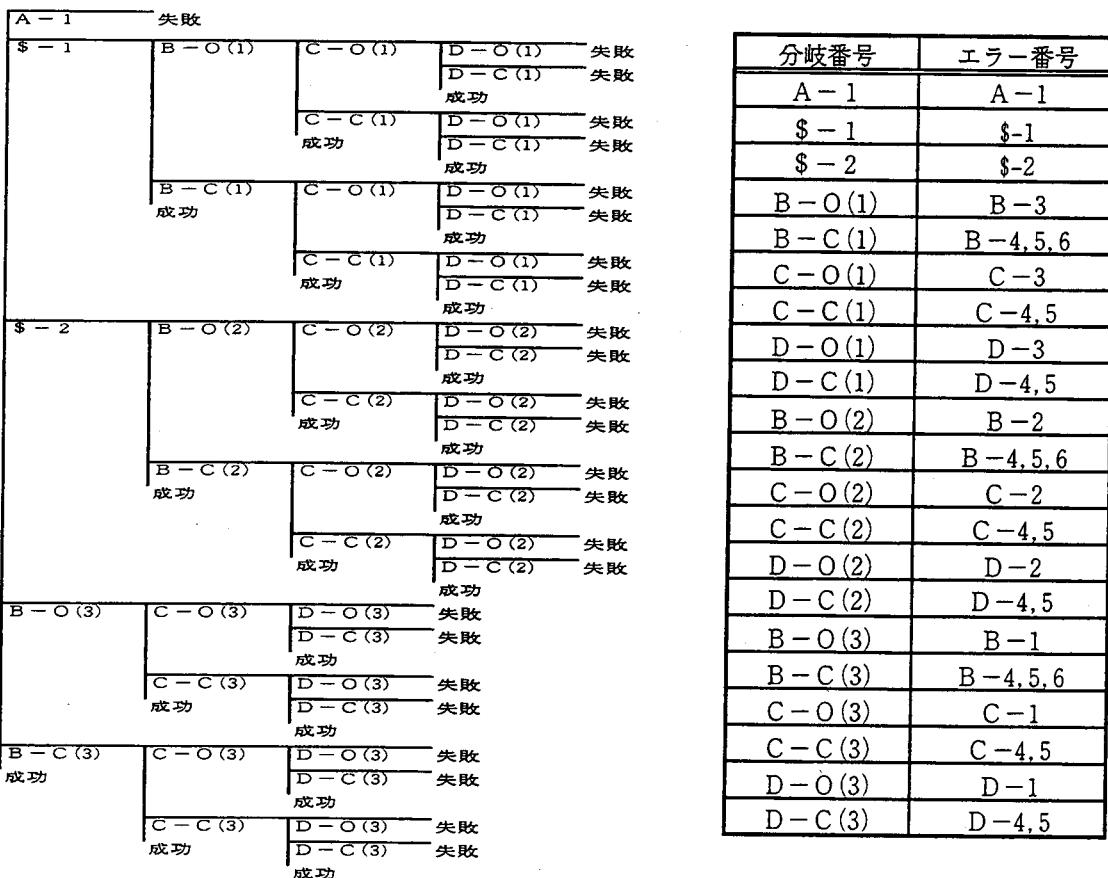
さらに、各タスクについて、想定されるポテンシャルエラーを設定した結果を表-2に示す。

表-2 ポテンシャルエラー

サブタスク	エラー番号	ポテンシャルエラーの内容
共通	\$-1	運転管理に従わず、手順書を使用しない。
	\$-2	運転管理に従わず、チェックリストを使用しない。
A	A-1	警報に気付かない。
B	B-1	チェックリストを適切に使用した場合に手順書中の実施項目を省いてしまう。
	B-2	チェックリストを適切に使用しなかった場合に手順書中の実施項目を省いてしまう。
	B-3	手順書の使用を怠った場合、手順書中の実施項目を省いてしまう。
	B-4	間違えたスイッチを選択する。
	B-5	スイッチを間違えた方向に操作する。
	B-6	機器等の状態を完全に変更しきらない。
C	C-1	チェックリストを適切に使用した場合に手順書中の実施項目を省いてしまう。
	C-2	チェックリストを適切に使用しなかった場合に手順書中の実施項目を省いてしまう。
	C-3	手順書の使用を怠った場合、手順書中の実施項目を省いてしまう。
	C-4	間違えたスイッチを選択する。
	C-5	スイッチを間違えた方向に操作する。
D	D-1	チェックリストを適切に使用した場合に手順書中の実施項目を省いてしまう。
	D-2	チェックリストを適切に使用しなかった場合に手順書中の実施項目を省いてしまう。
	D-3	手順書の使用を怠った場合、手順書中の実施項目を省いてしまう。
	D-4	間違えたスイッチを選択する。
	D-5	スイッチを間違えた方向に操作する。

2. HRA イベントツリーの構築

サブタスクAは、警報の確認であり、これに失敗すると、運転員は異常に気がつかないことから、それだけでこのタスク全体が失敗に終わる。このサブタスクAに成功した場合、つまり、警報に気が付いた場合は、引き続きB～Cの3つのサブタスクを実施するが、これら3つのサブタスクのうちどれか1つでも成功すれば、加熱蒸気が停止し、このタスクは成功に終わる。これをHRAイベントツリーで表現したものを図-1に示す。なお、このHRAイベントツリーは、各ポテンシャルエラーをサブタスク毎に、操作忘れ(omission error)、誤操作(commission error)にまとめ、簡略化したものである。



B - O, C - O, D - O : omission error

B - C, C - C, D - C : commission error

図-1 HRA イベントツリー

3. 標準的的人的過誤率ノミナル値の設定

各ポテンシャルエラーの標準的的人的過誤率を人間信頼性ハンドブック記載のデータベースを参照し設定した結果を表-3に示す。

表-3 標準的的人的過誤率の設定

エラー番号	エラー内容	表番号 項目番号 (NUREG/CR-1278)	NHEP	EF
\$-1	運転管理に従わず、手順書を使用しない。	第20-6表(5)	1.00E-02	3
\$-2	運転管理に従わず、チェックリストを使用しない。	第20-6表(8)	5.00E-01	5
A-1	警報に気付かない。	第20-23表(1)	1.00E-04	10
B-1	チェックリストを適切に使用した場合に手順書中の実施項目を省いてしまう。	第20-7表(2)	3.00E-03	3
B-2	チェックリストを適切に使用しなかった場合に手順書中の実施項目を省いてしまう。	第20-7表(4)	1.00E-02	3
B-3	手順書の使用を忘了場合、手順書中の実施項目を省いてしまう。	第20-7表(6)	1.00E-02	5
B-4	間違えたスイッチを選択する。	第20-12表(2)	3.00E-03	10
B-5	スイッチを間違えた方向に操作する。	第20-12表(8)	1.00E-04	10
B-6	機器等の状態を完全に変更しきらない。	第20-12表(12)	3.00E-03	3
C-1	チェックリストを適切に使用した場合に手順書中の実施項目を省いてしまう。	第20-7表(2)	3.00E-03	3
C-2	チェックリストを適切に使用しなかった場合に手順書中の実施項目を省いてしまう。	第20-7表(4)	1.00E-02	3
C-3	手順書の使用を忘了場合、手順書中の実施項目を省いてしまう。	第20-7表(6)	1.00E-02	5
C-4	間違えたスイッチを選択する。	第20-12表(2)	3.00E-03	10
C-5	スイッチを間違えた方向に操作する。	第20-12表(8)	1.00E-04	10
D-1	チェックリストを適切に使用した場合に手順書中の実施項目を省いてしまう。	第20-7表(2)	3.00E-03	3
D-2	チェックリストを適切に使用しなかった場合に手順書中の実施項目を省いてしまう。	第20-7表(4)	1.00E-02	3
D-3	手順書の使用を忘了場合、手順書中の実施項目を省いてしまう。	第20-7表(6)	1.00E-02	5
D-4	間違えたスイッチを選択する。	第20-12表(2)	5.00E-04	10
D-5	スイッチを間違えた方向に操作する。	第20-12表(8)	1.00E-04	10

4. PSF の影響評価、サブタスク間の従属性評価、回復要素による補正

各ポテンシャルエラーの人的過誤率について、経験、ストレス等の行動形成因子 (PSF) の影響、サブタスク間の従属性を評価した。また、誤操作を他の作業員のチェック、警報装置の作動等により回復できる可能性がある場合は、これら回復要素による補正を行った。これらの結果を表-4に示す。

表-4 PSF、従属性、回復要素の評価結果

エラー番号	エラー内容	表番号 項目番号 (NHEP-CR-1278)	NHEP	EF	タギング レベル 因子	ストレス・経験因子	回復要素	BHEP ※1	従属性	CHEP ※2
\$-1	運転管理に従わず、手順書を使用しない。	第20-6表(5)	1.00E-02	3				1.00E-02		1.00E-02
\$-2	運転管理に従わず、チェックリストを使用しない。	第20-6表(8)	5.00E-01	5				5.00E-01		5.00E-01
A-1	警報に気付かない。	第20-23表(1)	1.00E-04	10			5.00E-02 ※4	5.00E-06		5.00E-06
B-1	チェックリストを適切に使用した場合に手順書中の実施項目を省いてしまう。	第20-7表(2)	3.00E-03	3		2※3	1.00E-01 ※5	1.20E-03		1.20E-03
B-2	チェックリストを適切に使用しなかった場合に手順書中の実施項目を省いてしまう。	第20-7表(4)	1.00E-02	3		2※3	1.00E-01 ※5	4.00E-03		4.00E-03
B-3	手順書の使用を怠った場合、手順書中の実施項目を省いてしまう。	第20-7表(6)	1.00E-02	5		2※3	1.00E-01 ※5	4.00E-03		4.00E-03
B-4	間違えたスイッチを選択する。	第20-12表(2)	3.00E-03	10		2※3	1.00E-01 ※5	1.20E-03		1.20E-03
B-5	スイッチを間違えた方向に操作する。	第20-12表(8)	1.00E-04	10		2※3	1.00E-01 ※5	4.00E-05		4.00E-05
B-6	機器等の状態を完全に変更しきらない。	第20-12表(12)	3.00E-03	3		2※3	1.00E-01 ※5	1.20E-03		1.20E-03
C-1	チェックリストを適切に使用した場合に手順書中の実施項目を省いてしまう。	第20-7表(2)	3.00E-03	3		2※3	1.00E-01 ※5	1.20E-03	HD	5.01E-01
C-2	チェックリストを適切に使用しなかった場合に手順書中の実施項目を省いてしまう。	第20-7表(4)	1.00E-02	3		2※3	1.00E-01 ※5	4.00E-03	HD	5.02E-01
C-3	手順書の使用を怠った場合、手順書中の実施項目を省いてしまう。	第20-7表(6)	1.00E-02	5		2※3	1.00E-01 ※5	4.00E-03	HD	5.02E-01
C-4	間違えたスイッチを選択する。	第20-12表(2)	3.00E-03	10		2※3	1.00E-01 ※5	1.20E-03	HD	5.01E-01
C-5	スイッチを間違えた方向に操作する。	第20-12表(8)	1.00E-04	10		2※3	1.00E-01 ※5	4.00E-05	HD	5.00E-01
D-1	チェックリストを適切に使用した場合に手順書中の実施項目を省いてしまう。	第20-7表(2)	3.00E-03	3		2※3	1.00E-01 ※5	1.20E-03	HD	5.01E-01
D-2	チェックリストを適切に使用しなかった場合に手順書中の実施項目を省いてしまう。	第20-7表(4)	1.00E-02	3		2※3	1.00E-01 ※5	4.00E-03	HD	5.02E-01
D-3	手順書の使用を怠った場合、手順書中の実施項目を省いてしまう。	第20-7表(6)	1.00E-02	5		2※3	1.00E-01 ※5	4.00E-03	HD	5.02E-01
D-4	間違えたスイッチを選択する。	第20-12表(2)	5.00E-04	10		2※3	1.00E-01 ※5	2.00E-04	HD	5.00E-01
D-5	スイッチを間違えた方向に操作する。	第20-12表(8)	1.00E-04	10		2※3	1.00E-01 ※5	4.00E-05	HD	5.00E-01

※1

BHEP-NHEP* (ストレス・経験因子) * (タギングレベル因子) * [(回復要素) * (ストレス・経験因子)]

※2

従属性L Dの場合

CHEP=(1+19*BHEP)/20

従属性M Dの場合

CHEP=(1+6*BHEP)/7

従属性H Dの場合

CHEP=(1+1*BHEP)/2

※3

熟練者、比較的高いストレス、ステップバイステップ作業（第20-16表(4):×2）を想定

※4

警報に対する、短期間での単一の点検（第20-22表(3):0.05）を考慮

※5

肩越しの検査（第20-22表(1):0.1）を考慮

5. タスクの失敗確率の評価

各ポテンシャルエラーの過誤率を HRA イベントツリーにあてはめて一連のタスクの失敗確率を算出した。結果を図-2 に示す。

A - 1				失敗	5.00E-06
1.00E-02	4.00E-03	5.02E-01	5.00E-01	1.00E-05	
\$ - 1	B - O (1)	C - O (1)	D - O (1)	失敗	
			7.50E-01	7.53E-06	
			D - C (1)	失敗	
			成功		
		7.50E-01	5.00E-01	7.47E-06	
		C - C (1)	D - O (1)	失敗	
		成功	7.50E-01	5.60E-06	
			D - C (1)	失敗	
			成功		
2.44E-03	5.02E-01	5.00E-01	6.10E-06		
B - C (1)		C - O (1)	D - O (1)	失敗	
成功			7.50E-01	4.57E-06	
			D - C (1)	失敗	
			成功		
	7.50E-01	5.00E-01	4.54E-06		
C - C (1)		D - O (1)	失敗		
成功			7.50E-01	3.40E-06	
			D - C (1)	失敗	
			成功		
5.00E-01	4.00E-03	5.02E-01	5.02E-01	4.99E-04	
\$ - 2	B - O (2)	C - O (2)	D - O (2)	失敗	
			7.50E-01	3.71E-04	
			D - C (2)	失敗	
			成功		
	7.50E-01	5.02E-01	3.71E-04		
C - C (2)		D - O (2)	失敗		
成功			7.50E-01	2.76E-04	
			D - C (2)	失敗	
			成功		
2.44E-03	5.02E-01	5.02E-01	3.03E-04		
B - C (2)		C - O (2)	D - O (2)	失敗	
成功			7.50E-01	2.25E-04	
			D - C (2)	失敗	
			成功		
	7.50E-01	5.02E-01	2.26E-04		
C - C (2)		D - O (2)	失敗		
成功			7.50E-01	1.68E-04	
			D - C (2)	失敗	
			成功		
1.20E-03	5.01E-01	5.01E-01	1.49E-04		
B - O (3)		C - O (3)	D - O (3)	失敗	
			7.50E-01	1.11E-04	
			D - C (3)	失敗	
			成功		
	7.50E-01	5.01E-01	1.11E-04		
C - C (3)		D - O (3)	失敗		
成功			7.50E-01	8.34E-05	
			D - C (3)	失敗	
			成功		
2.44E-03	5.01E-01	5.01E-01	3.02E-04		
B - C (3)		C - O (3)	D - O (3)	失敗	
成功			7.50E-01	2.26E-04	
			D - C (3)	失敗	
			成功		
	7.50E-01	5.01E-01	2.26E-04		
C - C (3)		D - O (3)	失敗		
成功			7.50E-01	1.69E-04	
			D - C (3)	失敗	
			成功		
				Total	3.87E-03 /d

図-2 タスクの失敗確率の算出結果

参考文献

- 1) A. D. Swain, H. F. Guttman, "Handbook of Human-Reliability Analysis with Emphasis on Nuclear Power Plant Application, Final Report", NUREG/CR-1278 (1983)

付録 2 東海再処理施設の実績を用いた故障率の設定方法

今回の東海再処理施設における確率論的安全評価（以下、「PSA」という）で用いた機器故障率は、起因事象については全て実績を用い、発生防止策についても可能な限り運転・保守実績を調査し、用いることとした。

その東海再処理施設の故障実績から故障率を設定する方法としては、発電炉の PSA の方法と同様に以下の式を用いた。

$n > 0$ の場合

$$\left. \begin{array}{l} \text{平均値} \quad \lambda = \frac{n}{T} \\ \text{下限値} \quad \lambda_l = \frac{\chi^2(2n, 1 - \frac{\alpha}{2})}{2T} \\ \text{上限値} \quad \lambda_u = \frac{\chi^2(2n + 2, \frac{\alpha}{2})}{2T} \end{array} \right\} \dots(1)$$

$n = 0$ の場合

$$\left. \begin{array}{l} \text{平均値} \quad \lambda = \frac{0.5}{T} \\ \text{上限値} \quad \lambda_u = \frac{\chi^2(2n + 2, \alpha)}{2T} \end{array} \right\}$$

λ : 故障率

n : 故障数

T : 運転時間または総デマンド回数

λ_l : 下限値

λ_u : 上限値

α : 不信頼度

また、東海再処理施設の実績及び発電炉の PSA で用いられている故障率データを用いる際に、時間当たりの故障率からデマンド当たりの故障率を算出する場合は下記の式を用いた。

$$\lambda_d = 0.5 \times \lambda_h \times T$$

λ_d : デマンド当たりの故障率

λ_h : 時間当たりの故障率

T : 点検周期または試験周期

デマンド当たりの故障率から時間当たりの故障率を算出する場合は、下記の式を用いた。

$$\lambda_h = \beta \times \lambda_d \times T$$

β : T 時間あたりの総デマンド数

また、東海再処理施設の運転実績から機器故障率を設定する場合、故障実績が 0 件である場合がある。特に機器の品質が良好で予防保全が適切な場合、あるいは使用実績が少ない（短い）場合に、これらの機器に対し故障件数が 0 件となる場合が多く起りえる。

このような機器故障件数が 0 件である場合の取扱いについては、（財）原子力安全研究協会「PSA 用故障率データに関する調査」¹⁾ に WASH-1400²⁾、NUREG のレポート^{3),4)} 等を参考に海外の取扱いを調査した結果が示されているが、標準となる取扱いがあるわけではなく、 χ^2 分布で推定した上限値は○○であるという推定値を用いている場合が多いとなっている。ただし、 χ^2 分布の信頼水準については、統一されていない。

また、国内の文献として塩見著の「信頼性工学入門」（1979 年）⁵⁾ では、故障件数が 0 の場合は正確に故障率を推定することないと断り、最良推定値として $\lambda = 0.5/T$ としても良いと述べているが、これに従えば、故障件数=0.5 と設定することとなる。これは現在までの運転経過時間 T で故障が発生せず、将来の T 時間継続運転において 1 件の故障が確率 1 で生じると仮定することと同等であり、将来の運転時間の効果を考慮したものと考えられる。電力中央研究所「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～1997 年度 16 カ年 49 基データ 改訂版）」⁶⁾ は、この方法を採用して機器故障率を算出している。

この方法の妥当性を（財）原子力安全研究協会「PSA 用故障率データに関する調査」で次のように述べている。

故障率の 90% 上限値 λ_u （故障件数が 0 の場合、信頼区間の上限を 90% と設定）は、(1) に示す式により以下で与えられる。仮に λ_u が国内機器故障率の母集団

の 90% とみなし、母集団が対数正規分布に従い、母集団のエラーファクター $EF = 30$ と仮定すると、これより最尤推定値 λ が $\lambda = 0.65/T$ となる。

$$\begin{aligned}\lambda_u &= \frac{\chi^2(2,0.90)}{2T} \\ \lambda &= \frac{\lambda_u}{EF} \times \exp\left[\left(\frac{\ln EF}{1.645}\right)^2 / 2\right] \\ &= \left[\left(\frac{4.61}{2T \times 30}\right)\right] \times \exp\left[\left(\frac{\ln 30}{1.645}\right)^2 / 2\right] \quad \doteq \quad \frac{0.65}{T}\end{aligned}$$

この $\lambda = 0.65/T$ の値は、塩見著の「信頼性工学入門」で最良推定値としていること及び電中研で採用している $\lambda = 0.5/T$ と誤差の範囲で同様な値であり、この算出方法 $\lambda = 0.5/T$ は妥当と考えられるとしている。

このように、機器故障件数が 0 件の場合の取扱いについては、標準となる取扱いが決まっているわけではなく、 χ^2 分布で推定した上限値は○○であるという表記が一般的である。しかし、「PSA 用故障率データに関する調査」で述べられている χ^2 分布で推定した上限値と $\lambda = 0.5/T$ で算出した値は、誤差の範囲で同様な値であるとしている。

これらより、故障実績が 0 件の場合は、発電炉の PSA で $\lambda = 0.5/T$ を用いていること及び国内の PSA の手順書である参考文献 1) で $\lambda = 0.5/T$ を妥当と判断していることから、東海再処理施設の故障実績から故障率を算出する際に故障実績が 0 件の場合は、便宜的に $\lambda = 0.5/T$ を用いて評価することとした。

このような方法により設定した故障率を表-1 に示す。

表-1 東海再処理施設の実績から設定した故障率

機器	故障モード	東海再処理施設の実績			機器故障率	
		故障回数	運転時間	運転回数	(h)	(d)
圧力調節計 溫水器加熱蒸気)	故障	0	180000		2.78E-06	
圧力調節計 ウラン溶液蒸発缶加熱蒸気)	故障	2	56200		3.56E-05	
圧力調節計 ヴルトニウム溶液蒸発缶加熱蒸気)	故障	4	38800		1.03E-04	
圧力調節計 高放射性廃液蒸発缶加熱蒸気)	故障	4	67100		5.96E-05	
温度調節計 第1ストリップ調整槽加熱蒸気)	故障	5	49000		1.02E-04	
温度調節計 溫水器加熱蒸気)	故障	0	180000		2.78E-06	
圧力検出配管(ウラン溶液蒸発缶加熱蒸気)	閉塞	0	56200		8.90E-06	
圧力検出配管(バルトニウム溶液蒸発缶加熱蒸気)	閉塞	23	38800		5.93E-04	
圧力検出配管(高放射性廃液蒸発缶加熱蒸気)	閉塞	0	67100		7.45E-06	
検出配管(高放射性廃液蒸発缶液面計)	閉塞	280	67100		4.17E-03	
シーケンサ	故障	0	86400		5.79E-06	
膨張式温度計	故障	1	123300		8.11E-06	
高放射性廃液配管	閉塞	13	2297		5.66E-03	
ストレーナ(アリフト圧縮空気系)	閉塞	0	67100		7.45E-06	
水素流量調節計(培焼還元工程)	故障	0	30400		1.64E-05	
窒素流量調節計(培焼還元工程)	故障	0	30400		1.64E-05	
流量調節弁(培焼還元工程)	故障	0	30400		1.64E-05	
空気圧縮機(分析所)	故障または停止	0	219000		2.28E-06	
空気圧縮機(高放射性廃液貯蔵場)	故障または停止	0	166440		3.00E-06	
予備の空気圧縮機(分析所)	起動失敗	0		4562.5		1.10E-04
予備の空気圧縮機(高放射性廃液貯蔵場)	起動失敗	0		990.7143		5.05E-04
負荷	過電流等	1	8760		1.14E-04	

参考文献

- 1) (財)原子力安全研究協会、「PSA用故障率データに関する調査」、(1997)
- 2) USNRC, "Reactor Safety Study: An Assessment of Accident Risks in U.S.Commercial Nuclear Power Plants", WASH-1400, NUREG75/014,(1975)
- 3) USNRC, "Data Summaries of Licensee Event Reports of Pumps at U.S.Commercial Nuclear Power Plant", NUREG/CR-1205(1982)
- 4) USNRC, "Data Summaries of Licensee Event Reports of Pumps at U.S.Commercial Nuclear Power Plant", NUREG/CR-1363 Rev.1, (1982)
- 5) 塩見弘、「信頼性工学入門」改訂二版、(1979)
- 6) P00001、(財)電力中央研究所、「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)」、(2000)

付録3 重要度評価結果の活用について

1. はじめに

確率論的安全評価手法を用いた事故発生防止策の重要度評価結果に基づき、施設の設備改造や要領書の改訂を実施することで、東海再処理施設の安全性を合理的かつ効果的に向上させることが可能である。

ここでは重要度評価結果に基づき、東海再処理施設の安全性及び信頼性を向上させるための課題の抽出及び必要な対策の立案を実施するとともに、対策実施後の事故発生頻度への影響等について、「温水の温度上昇に伴うノルマルドデカンの引火点超過による有機溶媒火災の可能性」を例に検討を実施した。

2. 課題の抽出及び対策の立案

「温水の温度上昇に伴うノルマルドデカンの引火点超過による有機溶媒火災の可能性」に係る重要度評価結果は、資料 5.1.1-16 に示す通りである。

先述の通り、FV 指標は着目している基事象の信頼性向上による影響を評価しやすい重要度であり、事故発生防止策に何らかの改良を行ってリスク低減化を図ろうとする時に注目すべき機器等の候補を同定するものとして有用であるため、FV 指標に着目して課題の抽出を実施した。

資料 5.1.1-16 より、FV 指標が相対的に高いのは、制御回路、接触器及び発生防止策-1, 2 の温度検出部である。特徴としては、制御回路と接触器は発生防止策-1, 2 間で共通であり、発生防止策-1 の温度検出部と起因事象の一部とが共通であること、また、各機器・設備の故障率の観点から、点検頻度が年 1 回程度と比較的長期間であることが挙げられる。

抽出したこれらの課題に対し、以下のような対策の立案を行った。

- ① 温度検出部、制御回路及び接触器を 2 系統化する。
- ② 各機器・設備の点検間隔を年 1 回から月 1 回に変更する。

3. 対策実施前後の発生頻度比較

立案した対策実施後の事象発生頻度を以下にまとめた。

改善項目	改善率※
①従属箇所の2系統化	79.6%
②点検頻度の変更	93.5%
①+②の両方を改善	99.7%

※改善率=(改善前の値-改善後の値)/改善前の値

対策実施前後の発生頻度を比較した結果、①、②の単独の改善においては、系統を独立化するよりも、点検頻度を年1回から、月1回に変更する方が効果的であることがわかった。また、両方の改善を実施すると事故発生頻度は現在より2桁程度減少することがわかった。

現在の溶媒火災の発生頻度は、 $6 \times 10^{-3} (/y)$ であるが、上記改善を実施することで、 $2 \times 10^{-5} (/y)$ 程度まで減少する。溶媒火災事象による周辺環境への影響評価を実施していないため、この値の妥当性は評価できないが、例えば、原子炉の炉心損傷頻度の目標値は既設炉に対し 10^4 /炉年、新設炉に対し 10^5 /炉年となっており、炉心損傷頻度と溶媒火災を影響度を同等と考えると、改善により十分安全なレベルまで発生頻度を低下させることが可能であると考える。

4. まとめ

確率論的安全評価を用いた重要度評価結果を用い、施設の安全性を向上させるための課題の抽出及び対策の立案を実施し、それらの対策実施後の事故発生頻度への影響を評価した結果、効果的に事故発生頻度を低減させることができることが示された。

付録4 分析操作の失敗確率の算出について

本評価において、分析操作に伴う液組成確認の失敗確率の算出にあたっては、以下のような検討を実施した。

1. Savannah River Plant (SRP) における評価方法の調査¹（文献1要約）
1976~1983年の8年間の分析結果に関して、以下の観点で絞込みを行った。
 - ・不正確な分析結果が得られた。
 - ・その分析結果が工程運転上用いられた。
 その結果、20件の事象が抽出された。これは発生確率にすると、
 $2.6 / 100000 = 2.6E-5 (/d)$
 である。
 SRPにおける1日あたりの分析件数は、約1000件程度である。

20事象の原因の内訳

装置の故障	2件	10%
分析者のミス		
試薬や標準資料が古い。更新されていない。	3件	15%
試薬・標準資料のラベリングミス	1件	5%
手順に従わない	8件	40%
計算ミス	5件	25%
間違ったサンプルを分析	1件	5%

分析ミスが発生する要因解析としては、表からも明らかなようにヒューマンエラーに関するものが90%を占める。

ヒューマンエラーの発生過程は以下のように推定される。

- ①分析者は、重複分析を実施し、不注意により不正確な値を報告してしまう。
- ②分析監督者は、分析者のエラーを発見し損なう。（チェックには分析方法及び計算ミスの両方を含む）
- ③コントロールルームの運転員は、分析所から送られてきた結果中の分析ミスを発見できない。（チェックには、通常と異なる値を見逃し、運転管理値から外れていることを見逃すことを含む）

これらの原因に対し、HEP の値を当てはめ、検討を行った。

エラー記述	通常値	下限値	出典 (NUREG/CR-1278)
正しい標準資料の使用に失敗	0.003	0.001	15-3-3
手順に従わない	0.01	0.003	16-1-3
計算ミス	0.01	0.003	11-3-10
別のサンプルを分析	0.001	0.0003	20-10-9
	0.024	0.0073	
監督者のチェックミス	0.1	0.02	19-1-1
運転員のチェックミス	0.5	0.1	19-1-8
合計	0.0012	0.000015	
	1.2E-3	1.6E-5	

実績値は 2.6E-5 であり、これは HEP 解析値の下限値を使用した場合とは等しい。これは、実績調査の段階で、影響が出ていない分析ミスや分析ミスとして検出されなかった事象があるためと考えられるが、それらを調査することは不可能である。

これらの不確実性を考慮すると、HEP の分析結果は、概ね正しいと考えられ、評価などに用いる場合には HEP の値 (1.2E-3) を用いることが望ましい。

2. 定期安全レビューにおける分析ミスの発生確率について

以上のレポートを参考に、本 PSA では以下の考え方従い分析ミスの発生確率を設定した。

分析操作を一連の各タスクに分割して評価することも理論的には可能と思われるが、各タスクに想定される人的過誤率のデータが揃っておらず、手法の不確定さを考え合わせると得策とは言い難い。そこで、本評価においては、1. の Savannah River Plant の HEP 解析手法をベースに東海再処理における分析操作の FTA 解析を行い、分析ミスの発生確率を設定する。

分析操作は各工程によって微妙に異なるが、基本的な操作は共通する部分が多い。そこで、一連のサンプリング手順をサンプル採取とサンプルの分析に大きく二分し、それぞれ FTA 解析を行った。

まずサンプル採取操作にかかる FTA についてであるが、ここではサンプルの採取方法としてエアリフトタイプを考慮した。

以下に一般的なサンプル操作手順と考えられる誤操作をまとめる。

一般的なサンプル採取手順	考えられる誤操作
① ジャグに分析依頼番号を記載する。	分析番号記載せず 分析番号記載間違い →分析番号の記載されていない ジャグは分析されないため、考慮対象外とした。
② ジャグをニードルに刺す。	別の貯槽サンプリング用ニードルに刺す。
③ 攪拌用圧空スイッチを押して液を循環する。	圧空スイッチの選択ミス
④ 循環時間は 10~15 分行う。	循環時間不足（時間測定ミス、怠慢）
⑤ 停止操作	
⑥ 気送管で分析所へ気送	

一方、分析所で分析する際に考えられる誤操作を、SRP レポートを参考に以下に示す。

- 標準試料の選択に失敗。
- 分析手順に従わない。
- 分析員の計算ミス
- サンプルの取り間違い

また、分析結果については、分析班長及び分析結果を受け取った運転員の確認があると考え、点検者として期待している。

3. その他の要因

正常なサンプリングや分析操作を実施していても、運転員が分析結果を誤認してしまう可能性もある。ここでは、分析ミスやサンプリングミス以外の要因を検討する。

通常運転中は、分析結果を工程担当の運転員が受け取り、運転管理方法に従って運転パラメータの変更や液移送を実施している。しかし、その結果を見誤ったり転記ミスした場合、間違った値を用いた運転管理が行われる可能性がある。

運転員のミスが考えられるポイントとしては、

- ・ 分析結果を用いて貯槽内の核物質量の算出などを間違える。

- ・ 分析結果の数字又は単位を見間違える。

などが挙げられる。

4. フォールトツリー解析の実施

以上の検討より、液組成確認失敗にかかるFTを図-1のように作成した。算出に用いた人的過誤率を表1にまとめる。記載値は、いずれも「ヒューマンエラーハンドブック」(NUREG/CR-1278)に掲った。

その結果、液組成確認の失敗確率は、4.71E-2(/d)となった。

実際に液移送する際には、同結果を用いて送液先貯槽の選定を行ったり、希釀操作を実施することとなるが、臨界の危険性を伴う液移送については、班長、当直長補佐及び当直長の承認を得る必要があるため、分析結果がプロセスの運転状況と大きく異なるようであれば、検知される可能性が高いと考える。

6. 分析装置の故障を考慮しなかった理由について

本評価においては、FTA 解析を実施する際に、分析機器の故障は考慮対象外としている。その理由としては、以下の項目が挙げられる。

- ・ 人間の誤操作の確率に対し、分析装置の故障率は非常に小さい。
- ・ 分析装置の校正、点検については、日常的に実施している。
- ・ 送液操作は複数直にまたがる可能性が高く、分析装置の異常に気づく可能性は高い。
- ・ SRP の分析ミスの調査においても、分析ミスの 90%が人間の誤操作によるものであったため、その後の評価においては、装置の故障を分析ミスの原因として考慮していない。

分析機器の故障は、共通原因故障にもなりかねないため考慮することは重要と考えるが、仮に、図-1 の FTA で分析機器の故障を考慮したとしても、支配的な影響を及ぼしているのは運転員の分析結果の読み間違いや、計算ミスであり、分析機器の故障は評価上無視できる程度である。ちなみに化学プラントにおける分析機器の故障率は RELIAS / JNC データベースの 95%信頼値で $8.06E-4(/h)$ である。この値と日常の点検及び校正操作に伴う回復要素を考慮すると、分析 1 回あたりの失敗確率は $10^{-6}(/d)$ 程度と考えられ、人的過誤率 (~ 0.003) と比較して十分小さいことが分かる。

¹ Perkins W.C. : "Probability of Process Laboratory Errors Affecting Reprocessing Operations" DP-MS-85-80(CONF-860415-5)

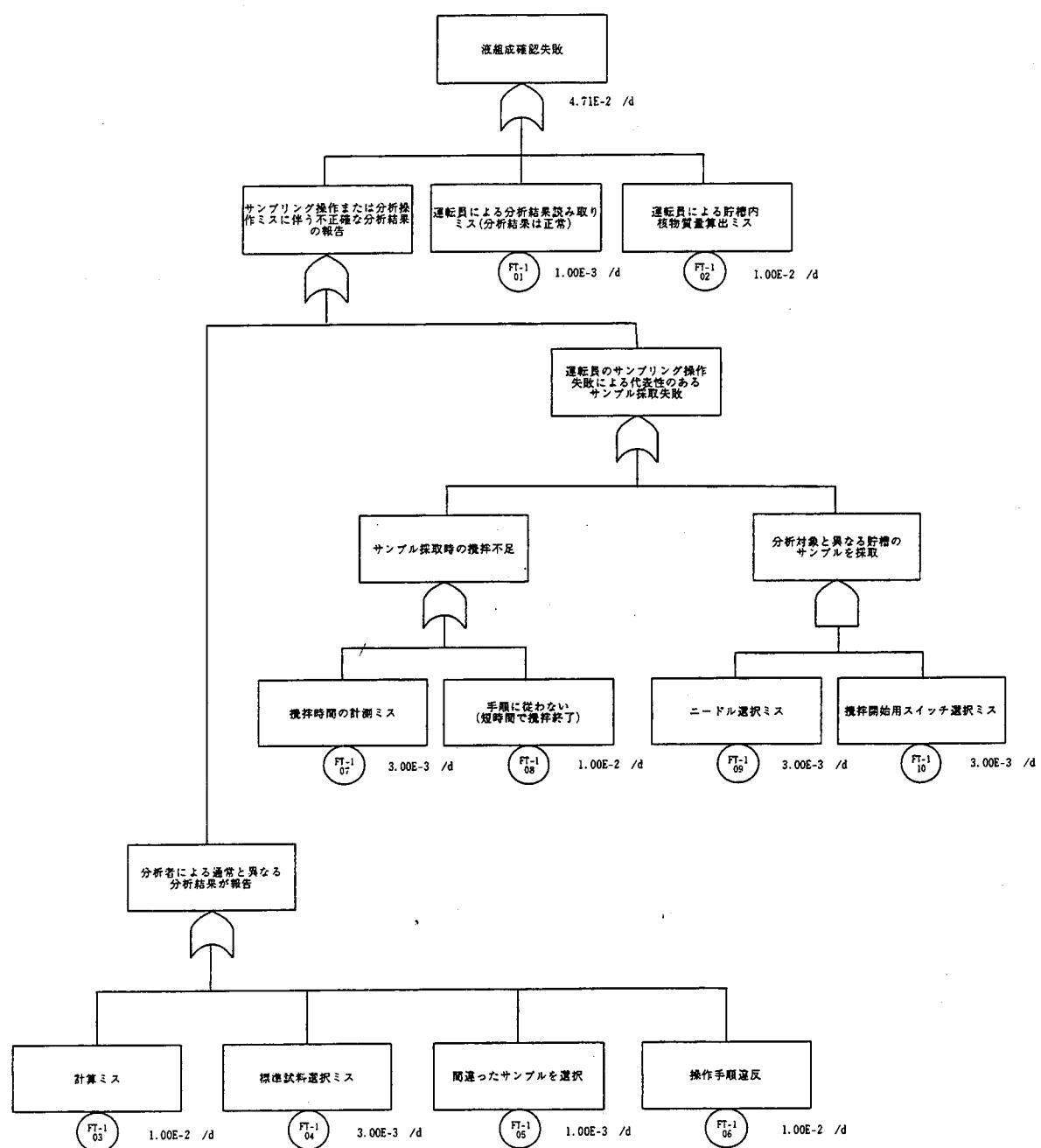


図1 液組成確認失敗にかかるフォールトツリー

表1 人的過誤率一覧表

基事象番号	不全モード		故障率データ			近隣操作回数、使用回数 [/y]	試験間隔、点検周期 [/h]	故障率
	機器グループ種別	故障モード	/h]	[/d]	出展			
FT-1 01	運転員	276V20分析結果読み取りミス(分析結果は正常)		1.00E-03	NUREG/CR-1278 第20-10表(9)			1.00E-03 /d
FT-1 02	運転員	276V20内Pu量算出ミス		1.00E-02	NUREG/CR-1278 第20-10表(10)			1.00E-02 /d
FT-1 03	分析員	計算ミス		1.00E-02	NUREG/CR-1278 第20-10表(10)			1.00E-02 /d
FT-1 04	分析員	標準試料選択ミス		3.00E-03	NUREG/CR-1278 第20-7表(2)			3.00E-03 /d
FT-1 05	分析員	間違ったサンプルを選択		1.00E-03	NUREG/CR-1278 第20-10表(9)			1.00E-03 /d
FT-1 06	分析員	操作手順違反		1.00E-02	NUREG/CR-1278 第20-6表(3)			1.00E-02 /d
FT-1 07	運転員	搅拌時間の計測ミス		3.00E-03	NUREG/CR-1278 第20-10表(1)			3.00E-03 /d
FT-1 08	運転員	手順に従わない(短時間で搅拌終了)		1.00E-02	NUREG/CR-1278 第20-6表(3)			1.00E-02 /d
FT-1 09	運転員	ニードル選択ミス		3.00E-03	NUREG/CR-1278 第20-12表(2)			3.00E-03 /d
FT-1 10	運転員	搅拌開始用スイッチ選択ミス		3.00E-03	NUREG/CR-1278 第20-12表(2)			3.00E-03 /d

付録5 国外の核燃料施設における安全目標について

IAEA-TECDOC-1267¹⁾記載の国外の核燃料施設における安全目標値を以下にまとめる。

[カナダ]

個人最大被ばく線量：

実効線量(mSv)	推定頻度(／年)	
	上限	下限
0.1~0.5	3.0×10^{-1}	3.0×10^{-2}
0.5~5.0	3.0×10^{-2}	3.0×10^{-4}
5~100	1.0×10^{-4}	1.0×10^{-6}

集団被ばく線量：

実効線量(人 Sv)	推定頻度(／年)	
	上限	下限
0.1~1.0	3.0×10^{-1}	3.0×10^{-2}
1.0~10	3.0×10^{-2}	3.0×10^{-4}
10~100	1.0×10^{-4}	1.0×10^{-6}

[フランス]

カテゴリー	最大実効線量(mSv)	予想頻度(／年)	
		上限	下限
1	<0.05	通常運転状態(> 10^{-1})	
2	<0.5	10^{-1}	10^{-3}
3	<5	10^{-3}	10^{-5}
4	<150	10^{-5}	10^{-7}
5		10^{-7} 未満	

[ドイツ]

最大実効線量(mSv)	推定頻度(／年)	
	上限	下限
<1.5	1	10^{-2}
<50	10^{-2}	10^{-5}
>50	10^{-5} 未満	

[ICRP]

最大実効線量(mSv)	推定頻度(/年)	
	上限	下限
<50	10^{-1}	10^{-2}
1-500	10^{-2}	10^{-5}
200-5000	10^{-5}	10^{-6}
>2000	10^{-6} 未満	

[南アフリカ]

公衆へのリスク

最大線量 (mSv)	推定頻度(/年)	
	上限	下限
0.25	1	$>10^{-2}$
50	10^{-2}	10^{-6}

従業員へのリスク

最大線量 (mSv)	推定頻度(/年)	
	上限	下限
20	1	$>10^{-2}$
500	10^{-2}	10^{-6}

[スイス]

最大線量 (mSv)	推定頻度(/年)	
	上限	下限
<0.2	10^{-1}	10^{-2}
<1	10^{-2}	10^{-4}
<100	10^{-4}	10^{-6}
>100	10^{-6} 未満	

[英国]

公衆へのリスク

最大線量 (mSv)	推定頻度(/年)	
	制限値	目標値
0.1~1	1	10^{-2}
1~10	10^{-1}	10^{-3}
10~100	10^{-2}	10^{-4}
100~1000	10^{-3}	10^{-5}
>1000	10^{-4}	10^{-6}

従業員へのリスク

制限値： 10^{-4} (/年)目標値： 10^{-6} (/年)

大量の放射性物質の放出基準

大量の放射性物質の放出とは、ヨウ素 131 で 10000TBq、又はセシウム 137 で 200TBq 以上の放射性物質を放出する事象である。

制限値： 10^{-5} (/年)目標値： 10^{-7} (/年)

施設損傷基準

施設に重大な損傷を生じ、計画外経路から放射性物質が放出されるような事象。

制限値： 10^{-4} (/年)目標値： 10^{-6} (/年)

臨界事象

制限値： 10^{-3} (/年)目標値： 10^{-4} (/年)

[1] IAEA TECDOC-1267, "Procedures for conducting probabilistic safety assessment for non-reactor nuclear facilities." (2002)