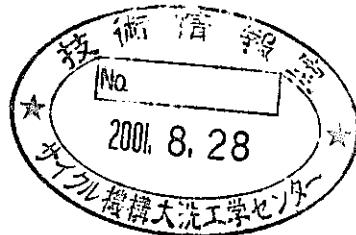


分置

JNC TJ8400 2001-016

システム解析手法の高度化研究（IV）

（核燃料サイクル開発機構 研究委託内容報告書）



2001年3月

岡山大学

本資料の全部または一部を複写・複製・転載する場合は、下記にお問い合わせ下さい。

〒319-1194 茨城県那珂郡東海村大字村松 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

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-ken, 319-1194
Japan

© 燃料サイクル開発機構 (Japan Nuclear Cycle Development Institute)
2001

2001年3月

システム解析手法の高度化研究（IV）

鈴木和彦*，島田行恭*

要 旨

これまでの受託研究報告書では、計算機を利用した HAZOP 解析システムを提案し、再処理プラントの高放射性廃液濃縮工程を対象として、HAZOP 解析システムによる解析を実施した。HAZOP 解析システムを用いることにより、これまでの人手による解析結果と比較して、より短い時間で、より詳細な解析結果が得られることを確認している。

本報告書では、危険評価と独立防御層概念に基づく安全設計に関する調査をまとめた。また、これまで開発した HAZOP 解析システムに対して、知識ベースの拡張、保守が容易であるユーザフレンドリーなシステムとするために、基本モデル作成ツール及び内部状態モデルを加える。この HAZOP 解析システムを新たにプルトニウム濃縮工程の解析に適用し、解析結果を考察した。さらに、安全設計に対する今後の展望として、安全設計統合化環境構築のための危険評価システムを提案する。これより、システム安全設計、評価に関する情報をインターネット上に分散する情報源から利用することが可能となる。

※ 本報告書は、岡山大学が核燃料サイクル開発機構の委託により実施した研究の成果である。

開発機構担当部課室：東海事業所 安全管理部 安全研究グループ

* 岡山大学

JNC TJ8400 2001-016
March 2001

Research on Advanced System Safety Assessment Procedures (IV)

Kazuhiko Suzuki* and Yukiyasu Shimada*

Abstract

The past research reports in the area of safety engineering proposed the Computer-aided HAZOP system to be applied to Nuclear Reprocessing Facilities. Automated HAZOP system has great advantage compared with human analysts in terms of accuracy of the results, and time required to conduct HAZOP studies.

This report surveys the literature on risk assessment and safety design based on the concept of independent protection layers (IPLs). Furthermore, to improve HAZOP System, tool is proposed to construct the basic model and the internal state model. Such HAZOP system is applied to analyze two kinds of processes, where the ability of the proposed system is verified. In addition, risk assessment support system is proposed to integrate safety design environment and assessment result to be used by other plants as well as to enable the underline plant to use other plants' information. This technique can be implemented using web-based safety information systems.

※ Work performed by Okayama University under contract with Japan Nuclear Cycle Development Institute

JNC Liaison : Safety Study Group, Environment and Safety Division, Tokai works

* Okayama University

目次

1.	はじめに · · · · ·	1
2.	危険評価の枠組み · · · · ·	2
3.	独立防御層 · · · · ·	4
4.	安全計装システム · · · · ·	6
4.1	安全計装システムの規格化 · · · · ·	6
4.2	安全計装システムの健全性水準 · · · · ·	6
4.3	安全計装システムの基本構造 · · · · ·	7
4.4	SIS の信頼性解析 · · · · ·	8
5.	安全設計 · · · · ·	9
5.1	独立防御層設計と危険評価 · · · · ·	9
5.2	定性的危険評価情報と安全設計 · · · · ·	11
5.3	定量的危険評価情報と安全設計 · · · · ·	13
5.3.1	IPL3 設計 · · · · ·	13
5.3.2	IPL4 設計 · · · · ·	14
5.3.3	IPL5 設計 · · · · ·	14
6.	HAZOP 解析システム · · · · ·	16
6.1	概要 · · · · ·	16
6.2	一般的知識ベース · · · · ·	17
6.2.1	一般的知識ベースの構成 · · · · ·	17
6.2.2	基本モデル作成ツール · · · · ·	18
6.2.3	内部状態モデル · · · · ·	20
6.2.4	一般的知識ベース構築例 · · · · ·	22
6.3	固有知識ベース · · · · ·	24
6.3.1	構成要素アイコン · · · · ·	25
6.3.2	プラント構造情報の入力 · · · · ·	26
6.4	HAZOP 解析エンジン · · · · ·	27
6.4.1	「ずれ」の想定 · · · · ·	28
6.4.2	構成要素内部の異常伝播解析 · · · · ·	29
6.5	解析結果の出力 · · · · ·	32

6.6 解析例 ······	3 3
6.6.1 高放射性廃液濃縮工程に対する HAZOP 解析結果 ······	3 3
6.6.2 プルトニウム濃縮工程に対する HAZOP 解析結果 ······	4 2
6.6.3 考察 ······	5 9
7. 危険評価統合環境 ······	6 0
7.1 システム概要 ······	6 0
7.2 解析例 ······	6 2
8. おわりに ······	6 9
参考文献 ······	7 0

図・表目次

図リスト

図 2.1	危険評価の枠組み	3
図 3.1	独立防護階層 (IPL) の概念	5
図 4.1	SIS の健全性水準 (SIL) の決定例	7
図 4.2	SIS 構造の概念図	8
図 5.1	IPL とイベントツリー	10
図 5.2	IPL 設計	11
図 5.3	IPL3 設計と危険評価情報	14
図 5.4	IPL4 設計と危険評価情報	15
図 5.5	IPL5 設計と危険評価情報	15
図 6.1	HAZOP 解析システムの概要	17
図 6.2	一般的知識ベースの構成	18
図 6.3	基本モデル作成ツール	19
図 6.4	伝播構造決定	19
図 6.5	基本モデル作成ツールを用いた基本モデル 1 の構築例	20
図 6.6	基本モデル作成ツールを用いた基本モデル 2 の構築例	20
図 6.7	内部状態モデルへの情報の格納例	21
図 6.8	基本モデル作成ツール及び内部状態モデルを用いた知識ベース構築例	23
図 6.9	INLET のリスト	24
図 6.10	固有知識ベースにおけるリストの格納例	25
図 6.11	構成要素アイコンの例	26
図 6.12	プラントモデル	26
図 6.13	解析手順の概要	27
図 6.14	「ずれ」の想定画面	28
図 6.15	配管の固有知識ベース	29
図 6.16	解析ポイント探索	30
図 6.17	リスト A の格納例	30
図 6.18	ポイント名とリストとの対応付け	30
図 6.19	状態異常の情報の流れ	31
図 6.20	解析結果の表現形式	32
図 6.21	解析結果の例	33
図 6.22	高放射性廃液濃縮工程概要図	34
図 6.23	プルトニウム濃縮工程概要図	43

図 7.1	危険評価システム	60
図 7.2	危険評価実行手順	61
図 7.3	HDS プロセスの概要	62
図 7.4	解析対象	63
図 7.5	プロセスフローの作成と情報の入力	64
図 7.6	蒸留塔内温度、圧力挙動	65
図 7.7	F&E/I 計算手順	65
図 7.8	Dow 法解析モジュールへのデータ入力	67

表リスト

表 4.1	低頻度作動要求に対する健全性水準 (SIL)	7
表 5.1	発生頻度のランク分けの例	12
表 5.2	被害度のランク分けの例	12
表 5.3	リスクマトリクスの例	13
表 5.4	リスクレベルに応じた対応策の例	13
表 6.1	「空気分離器で高放射性廃液の流量なし」に対する HAZOP 解析結果	35
表 6.2	「エアリフトで高放射性廃液の濃度上昇」に対する HAZOP 解析結果	36
表 6.3	「高放射性廃液蒸発缶で高放射性廃液の流量増加」に対する HAZOP 解析結果	37
表 6.4	「高放射性廃液蒸発缶で蒸気流量増加」に対する HAZOP 解析結果	38
表 6.5	「高放射性廃液蒸発缶でホルマリンの流量増加」に対する HAZOP 解析結果	39
表 6.6	「空気吹き込み塔で硝酸溶液の流量減少」に対する HAZOP 解析結果	40
表 6.7	「ポンプで硝酸溶液の濃度低下」に対する HAZOP 解析結果	41
表 6.8	「アリフトでプルトニウム溶液の流量なし」に対する HAZOP 解析結果	44
表 6.9	「エアリフトでプルトニウム溶液の流量減少」に対する HAZOP 解析結果	45
表 6.10	「エアリフトで圧縮空気の流量なし」に対する HAZOP 解析結果	46
表 6.11	「エアリフトで圧縮空気の流量減少」に対する HAZOP 解析結果	47
表 6.12	「エアリフトで圧縮空気の流量増加」に対する HAZOP 解析結果	48
表 6.13	「洗浄塔でオフガスの流量なし」に対する HAZOP 解析結果	49
表 6.14	「洗浄塔でオフガスの流量減少」に対する HAZOP 解析結果	50
表 6.15	「洗浄塔でオフガスの流量増加」に対する HAZOP 解析結果	51
表 6.16	「洗浄塔でスクラブ液の流量なし」に対する HAZOP 解析結果	52
表 6.17	「冷却器で冷却水の流量なし」に対する HAZOP 解析結果	53
表 6.18	「冷却器で冷却水の流量減少」に対する HAZOP 解析結果	54
表 6.19	「冷却器で蒸気凝縮水の流量なし」に対する HAZOP 解析結果	55
表 6.20	「冷却器の蒸気凝縮水の流量減少」に対する HAZOP 解析結果	56

表 6.21 「溢流ポットの蒸気凝縮水の流量なし」に対する HAZOP 解析結果 ······	5 7
表 6.22 「溢流ポットの蒸気凝縮水の流量減少」に対する HAZOP 解析結果 ······	5 8
表 7.1 F&EI の大きさとハザードの大きさの関係 ······ ······ ······	6 6

1. はじめに

原子力施設での放射性物質の漏洩など、プロセスの信頼性、安全性に関する問題は社会的にも大きな関心を集めしており、各企業の重要な課題となっている。このようなプラントの安全確保と災害防止のために、事故原因や影響を明らかにする様々な危険評価手法と安全設計に関する概念が提案されている^{1) - 8)}。これまでの受託研究報告書では、計算機を利用した HAZOP 解析システムを提案し、再処理プラントの高放射性廃液濃縮工程を対象として解析を実施した^{9) - 10)}。HAZOP 解析システムを用いることにより、これまでの入手による解析結果と比較して、より短い時間で、より詳細な解析結果が得られることを確認している。

本報告書では、危険評価と独立防御層概念に基づく安全設計に関する調査結果をまとめる。また、これまで開発した HAZOP 解析システムに対して、知識ベースの拡張、保守が容易であるユーザフレンドリーなシステムとするために、基本モデル作成ツール及び内部状態モデルを加える。この HAZOP 解析システムを高放射性廃液濃縮工程とプルトニウム濃縮工程の解析に適用し、解析結果を考察する。

一方、IT を利用したエンジニアリング環境の構築により、システム安全設計、評価に関わる情報をインターネット上に分散する情報源から統合利用する環境が整備されはじめている。これより、専門家の集合がより広い観点から技術評価を行いながら、高度な技術を創生することができ、さらに、技術基盤、知的基盤、人的基盤、社会基盤の有機的結合により、生産技術を発展させていくことが期待される。ここでは、このような統合化安全設計環境における危険評価システムを提案する。

第 2 章では危険評価の枠組みについて説明する。第 3 章では独立防御層、第 4 章では安全計装システムについて説明する。第 5 章では危険評価と独立防御層の概念に基づく安全設計について説明する。第 6 章では HAZOP 解析システムの改良点を説明し、具体例への適用結果を考察する。第 7 章では統合的危険評価システムの開発について説明する。

2. 危険評価の枠組み

危険評価の枠組みは、図2.1に示すように次の項目から構成されている。

① 目的設定：

評価目的及び範囲、詳細さを設定する。評価目的としては、リスク低減のための手段の評価、安全に対する投資の最適化、経済的なリスク評価、従業員のリスク評価、公衆のリスク評価などが挙げられる。

② システム記述：

解析の対象となるプラント情報を収集する。P&FD、運転及び保守手順書、技術仕様書、取り扱い物質物性などを必要とする。

③ ハザード同定：

定量的危険評価において最も重要なステップである。危険物質の存在に加えて、プロセス異常、ヒューマンエラー、あるいは外部事象などの起因事象により、危険な状態が発生し、場合によっては周辺に影響を与えるような事故に発展する。従って、ハザード同定では、プロセス及び化学反応の特徴、設備・系統などの情報を基に、危険な状態に至る起因事象を特定する。また、危険な状態がどのような事故に発展する可能性があり、その結果としてどのような事象（例えば、火災、爆発）が起こり得るかを検討する。ハザード同定のためには、チェックリスト、What-if 解析、HAZOP、FMEAなどの手法が利用される。

④ 影響評価：

事故の影響を定量的に評価する。拡散モデル、爆発モデル及び火災モデルなどの物理モデルを用いて解析するが、風向きや風速、危険物質のインベントリー、放出から爆発までの経過時間など複数のケースに分けられる。各ケースについて、従業員、地域住民、建築物などに対する影響が評価される。

⑤ 発生頻度評価：

事故の発生頻度、その後の事故進展確率を評価する。事故の発生頻度は、過去の記録や故障率の経験値を用いたフォールトツリー、イベントツリーのような事故シーケンスモデルを用いて求める。

⑥ リスク解析：

事故の影響と発生頻度を統合してリスクという指標を算出する。選定されたすべての事故シーケンスに対してリスクを計算し、それらを合計することにより全リスクの値を求める。リスクの指標として、リスク等高線（個人に対するリスク）、F-N曲線（社会的リスク）などがある。

⑦ リスク評価：

リスク評価に基づいて、リスクの低減などを目的とした意志決定を行うために、リスク低減のための手段の比較やランクづけ、費用一便益分析を行う。

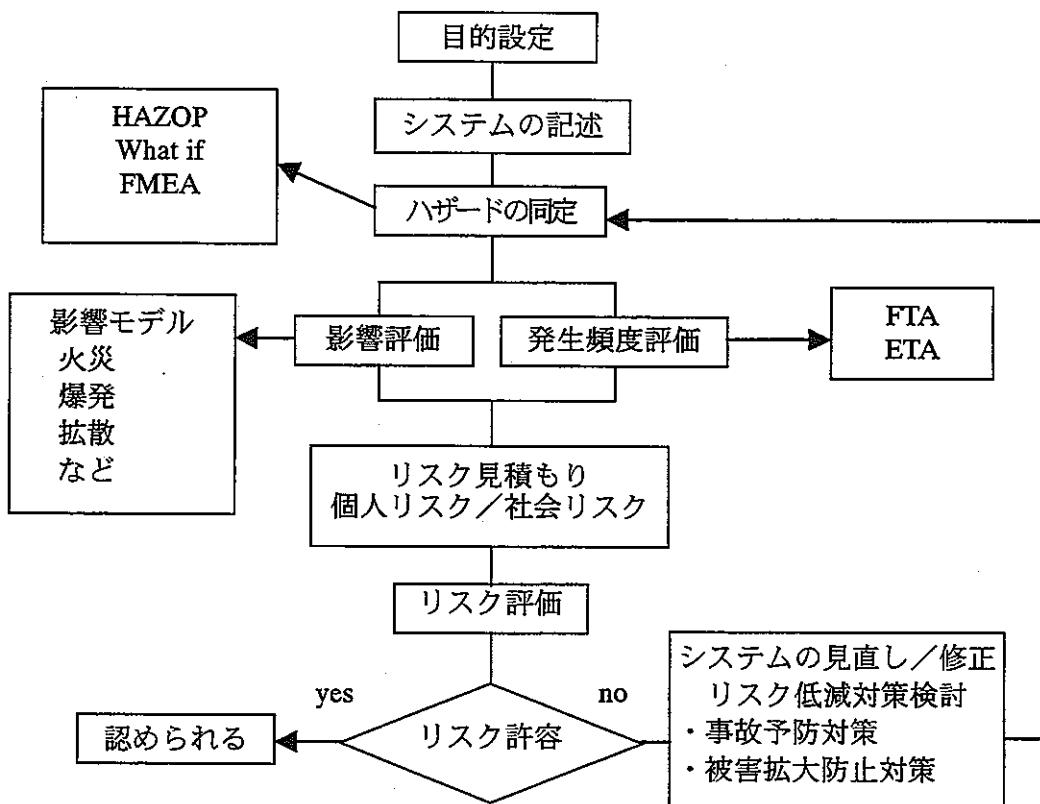


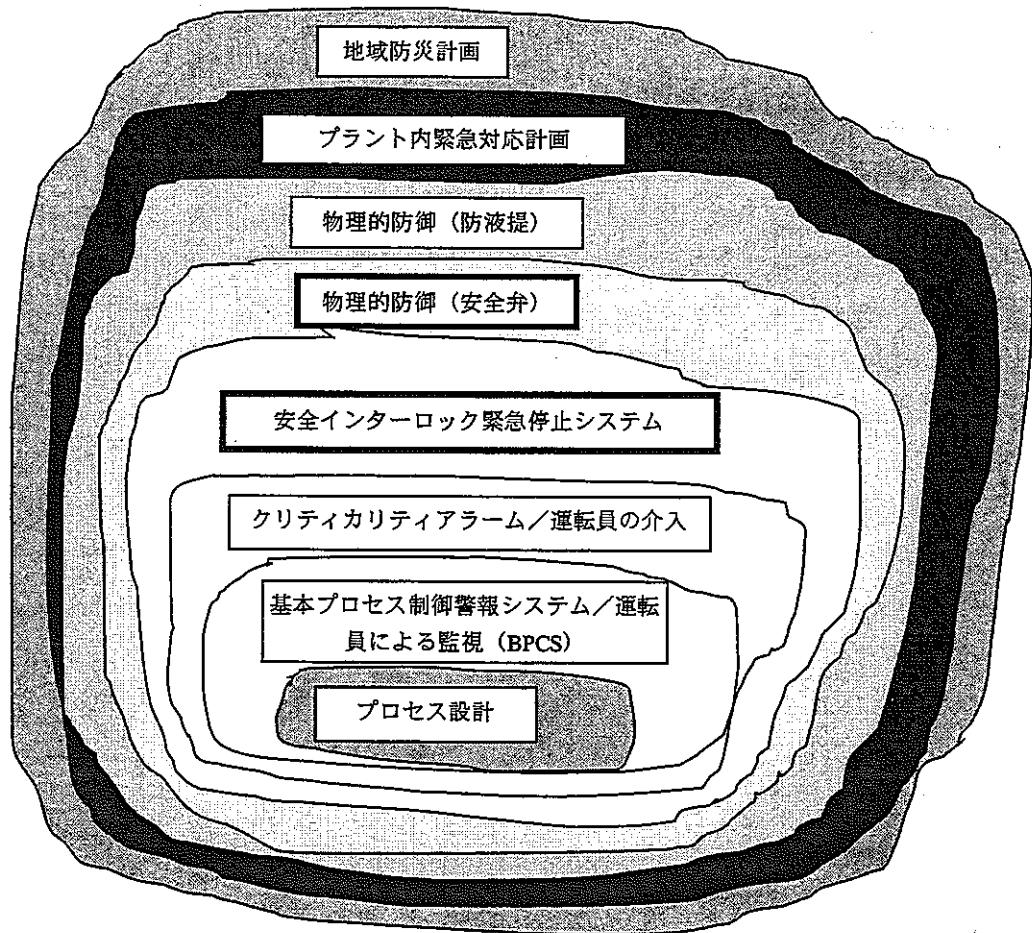
図 2.1 危険評価の枠組み

3. 独立防御層

化学プラントは、従来から多重防御の思想に基づいて安全対策が講じられてきた。すなわち、図3.1に示すように多重の独立した防御システムによって潜在的な危険を未然に防ごうとするものであり、これらの防御層を独立防御層（Independent Protection Layer : IPL）と呼ぶ。

第1層はプロセス設計における本質安全の領域（Inherent Safer Plant の実現）である。同じ目的のプロセスでも運転温度、圧力をより下げられないか、危険物の滞留時間を最小化できないか、といった検討がこれにあたる。第2層は基本制御プロセスの領域であり、DCSなど通常運転時のプラント監視を主目的とする。この階層では、プロセス値が設定値から逸脱した際に警報を発して、運転員の介入を要求する。第3層は第2層における警告とは区別される重要な警報を発し、運転員もしくはシステムの介入を促すことで、緊急状態に陥ることを防ぐ階層である。この階層までは運転員の介入のために必要な時間的余裕がある場合に適用される。第4層は運転員やシステムの介入が間に合わない場合に、自動的かつ安全に停止させるための階層である。計装によるプロセス安全システムや緊急停止装置などがこの領域に入る。ここでは、運転員が介入するだけの余裕が無いため、自動的にプラントを安全に停止させることになる。すなわち、安全計装システム（SIS）による防御層である。第5層は物理的防御層であり、圧力逃し弁などの過圧防御システムが含まれる。第6層も物理的防御層であるが、液漏洩を局所化するための防液堤などが含まれる。第7層は事業部内の緊急時対応計画による階層であり、第8層は地域住民・公共施設における緊急時対応計画である。

これらの防御システムはお互いに独立であり、仮に内側の防御層が損なわれても、その外側の防御層が機能することにより、事故を未然に防止する、あるいは拡大を防ぐ。また、プロセス異常はできる限り、初期の段階に内側の防御層により緩和、あるいは防止する。



- | | |
|------------|----------------------------------|
| 第1層 (IPL1) | プロセス設計 (本質安全) |
| 第2層 (IPL2) | 基本プロセス制御, プロセスアラーム, 運転員による監視 |
| 第3層 (IPL3) | クリティカルアラーム「重要警報」, 運転員による監視, 手動介入 |
| 第4層 (IPL4) | 自動安全計装システム |
| 第5層 (IPL5) | 物理的防護 (安全弁, 破裂版) |
| 第6層 (IPL6) | 物理的防護 (防液堤) |
| 第7層 (IPL7) | プラント内緊急対応計画 |
| 第8層 (IPL8) | 地域防災計画 |

図 3.1 独立防御層 (IPL) の概念

4. 安全計装システム

4.1 安全計装システムの規格化

安全計装システム (Safety Instrumented System : SIS) は、図 3.1 の独立防御層の第4層であり、プラントの安全性を確保するために重要な役割を果たしている。米国では、ISA（米国計測器工業会）の SP84 委員会が化学プロセス産業の安全計装システムの安全規格案を作成する作業を開始した。現在ではヨーロッパ主導の IEC とも連携を図り、その成果が IEC 規格案にも取り入れられつつある。また ISA は AIChE (米国化学工学会) の CCPS (化学プロセス安全センター) が 1987 年～1993 年に実施したプロジェクトにも参画し、“Guidelines for Automation of Chemical Process” を発刊した。

ISA では、「安全計装システムとは、センサ、ロジックソルバー、及び制御端より構成し、予め定められた状態が侵害された時に、プロセスを安全な状態にすることを目的とするもの」と定義し、「緊急停止システム (Emergency Shutdown System), 安全停止システム (Safety Shutdown System) 及び安全インターロックシステム (Safety Interlock System)」を含むとされている。

一方、IEC61508 は ISA-S84.0 とは異なり、汎用的な「電気・電子・プログラマブル電子安全関連系の機能安全」について規定したものである。IEC 規格では、分野別規格として、ISA-S84.01 に相当するものとして、プロセスプラントに特化した IEC61511 - Functional Safety: Safety Instrumented Systems for the Process Industry の作業も進められている。実態としては、ISA-S84.01 と同じものとなると言われている。

4.2 安全計装システムの健全性水準

SIS の水準を区分する基準として、健全性水準 (Safety Integrity Level : SIL) が定義されている。ISA-S84.01 の定義では、「安全計装システムとは、予め定められた状態が侵害されたときに、プロセスを安全な状態にすることを目的とするもの」であるため、目標機能失敗尺度として作動要求あたりに設計機能の実行に失敗する平均確率 (Probability of Failure on Demand: PFDavg) を使用する。これは通常待機状態にあるシステムが、作動要求時に機能しない確率を表しており、信頼性を維持するための試験間隔の影響を受ける。

表 4.1 に ISA-S84.01 と IEC61508 による低頻度作動要求に対する SIL の目標故障確率を示す。この SIL 目標の設定に当たっては、ハザード解析の結果から判明したハザードによる損害規模、予想ハザード発生頻度、並びに SIS を含まない IPL の有効性に応じて決定する。図 4.1 に SIL 決定方法の一例を示す。図 4.1 のマトリクス内の数字は SIL を表している。各防御層が有効、すなわち SIS 以外の安全対策が十分有効であれば、設備全体でリスクが低減されており、SIL は低くて良い、あるいは SIS そのものが不要の場合もあり得る。

表 4.1 低頻度作動要求に対する健全性水準 (SIL)

健全性水準 (SIL)	作動要求発生時に故障している確率 (PFDavg)	
	ISA S84.01-1996	IEC61508
1	$10^{-1} > PFDavg \geq 10^{-2}$	$10^{-1} > PFDavg \geq 10^{-2}$
2	$10^{-2} > PFDavg \geq 10^{-3}$	$10^{-2} > PFDavg \geq 10^{-3}$
3	$10^{-3} > PFDavg \geq 10^{-4}$	$10^{-3} > PFDavg \geq 10^{-4}$
4	基準無し	$10^{-4} > PFDavg \geq 10^{-5}$

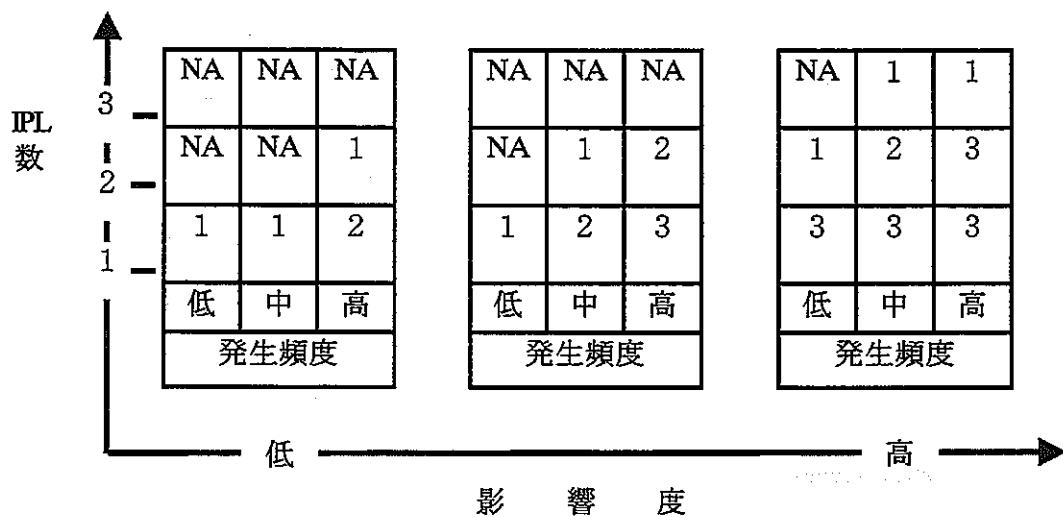
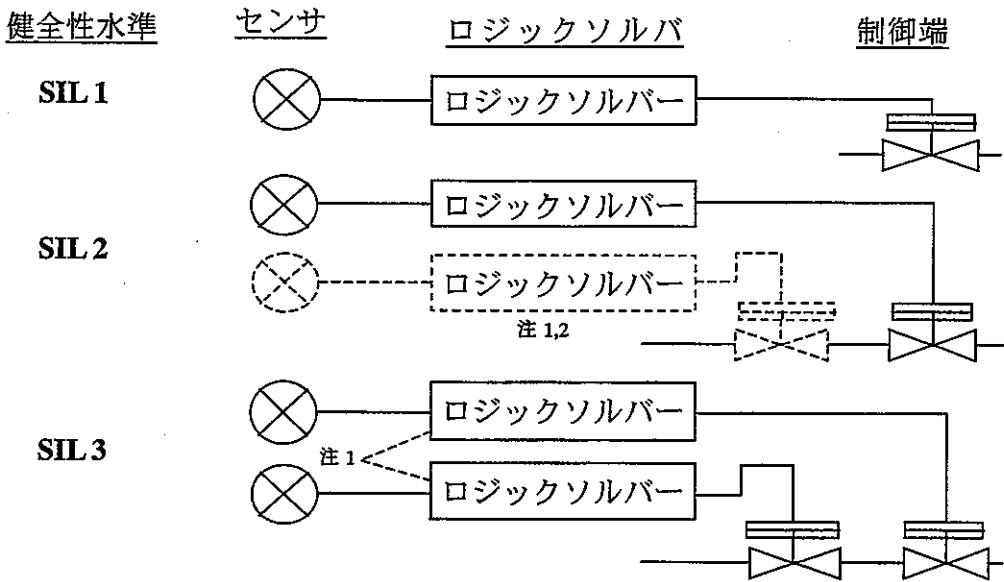


図 4.1 SIS の健全性水準 (SIL) の決定例

4.3 安全計装システムの基本構造

SIS 設計では、SIS 健全性水準に基づいて、達成すべき性能、安全性、SIS のアペイラビリティを満たすセンサ、I/O、ロジックソルバー、制御端、通信、マンーマシンインターフェース、電源などによりシステムを構築する。安全計装システムは通常は待機状態にあるため、その期間に非明示故障が発生した場合は次の点検あるいは作動要求があるまで故障が顕在化されない。従って、作動要求時に確実に機能果たすことを保証するためには、定期的なテストとメンテナンスが不可欠となる。また、システムに組み込まれたソフトウェアの信頼性についても評価・検証が必要となる場合がある。図 4.2 に 3 段階の SIL に応じた基本構成概念を示す。SIL1 では、SIS の冗長性は要求されず、単一のセンサ、ロジックソルバー、制御端から構成されている。SIL2 では、必ずしも完全な冗長性は要求されない。センサ／ロジックソルバー／制御端のいずれかに冗長化を施す。SIL3においては、SIS は完全に冗長化し、SIL 要求を満たす構造とする。



- 注1：冗長化されたセンサの値は、各ロジックソルバー、BPCSに送り、SISの機能を診断するために利用する。
 注2：アベイラビリティ及び信頼度に応じて、センサ、ロジックソルバー、制御端を冗長化する場合がある。

図 4.2 SIS 構造の概念図

4.4 SIS の信頼性解析

SIS の設計においては、SIS の信頼性を解析し、目標 SIL の故障確率を満足していることを確認しておく必要がある。低頻度作動要求モードに対しては、PFD_{avg} を評価尺度として用い、式(4.1)により求める。

$$PFD_{avg} = \sum PFD_S + \sum PFD_{LS} + \sum PFD_{FE} \quad (4.1)$$

PFD_{avg} : SIS の平均 PFD (Probability of Failure on Demand)

PFD_S : センサ・トランスミッター (Sensor: S) の PFD

PFD_{LS} : ロジックソルバー (Logic Solver: LS) の PFD

PFD_{FE} : 制御端 (Final Element: FE) の PFD

通常この信頼性解析はフォールトツリー解析 (FTA) により行われるが、この設計段階での目標設定では、表計算などから得られる標準値を用いる簡易手法でも十分である。しかし、最終検証においては、FTA を用いて解析を実施するケースが実際的である。特に、SIL3 のように高度の信頼性を要求される場合には必須である。この際、センサ・トランスミッター及び制御端の PFD データは既存の故障率データベースから得られるデータ入手することも可能であるが、ロジックソルバーについてはメーカーなどからデータ入手しなければならない。

5. 安全設計

5.1 独立防御層設計と危険評価

一般的には、独立防御層（IPL）の設計は、次のような段階を経て実施される。

- ① 人、環境、施設への影響事象を明らかにし、さらに影響度（被害度：Severity）を分類する。
- ② 影響事象に対する原因事象を列挙する。
- ③ 原因事象の発生頻度を見積もる。各原因一影響事象に対して、リスク減少のために設置すべき IPL を列挙する。
- ④ それぞれの IPL において、作動要求時の失敗確率を決定する。
- ⑤ 原因一影響事象（事故シーケンス）に対して、初期事象と各 IPL の PFDavg の積（Likelihood）を求め、IPL によるリスク抑制結果を算出する。
- ⑥ 前段階で算出したリスクを、許容リスク（目標リスク）と比較する。リスクが許容値を満足しない場合は、さらに IPL の追加、安全計装システムの健全性水準向上、プロセス設計の変更などの対策を実施する。

前述のように、IPL 設計において、最初にプロセス内で起こりうる影響事象、影響度、その原因事象を明らかにするが、これらは図 2.1 に示した危険評価におけるハザード同定に相当し、HAZOP などの手法が適用される。典型的な影響事象の例としては、容器の圧力異常などによる破裂、漏れによる毒性物質の拡散、可燃性物質の漏洩による火災、爆発などがあり、これら影響事象は、設備内の従業員や周辺住民を傷つける、あるいは死亡させる恐れがある。また、環境への影響、設備の損失、さらに経済への影響も起こり得る。これら影響事象はその被害度により分類される。すなわち、どれだけの人間が影響を受けるか、影響の範囲はどれだけ大きいか、事象による設備の停止時間、さらに経済的損失はどの程度かにより影響度を分類する。

プロセス内に潜在する危険に関する情報により、設置すべき防御層を決定し、事故シーケンスに対する防御層の効果を定量的に評価する。図 5.1 に IPL と影響事象発生確率の関係を記述したイベントツリーを示す。図 5.1 において、一番下側の経路（波線矢印）は、設備における最悪のシナリオであり、すべての防御層がその機能を果たさない場合である。すなわち、万一、すべての防御層が失敗した場合、影響度は大であるが、その確率は、各防御層を通過するごとに、減少することがわかる。図 5.1 の矢印の太さが確率の大きさを表している。すなわち、最悪の影響事象の発生確率（Likelihood）はすべての防御層が失敗した場合であり、式 (5.1) で与えられる。

$$\text{影響事象発生確率} = P_0 P_1 P_2 P_3 \quad (5.1)$$

さらに、この事象に対する影響モデル（火災、爆発、拡散モデル）を用いて、リスクを定量的に算定する。この結果をリスク目標値と比較し、目標を満足しない場合は、独立防御層の信頼性向上、追加などの対策を講じる。

図 5.2 に IPL 設計の概略を示す。ここでは、安全系の設計を IPL 設計の概念に基づきまとめる。

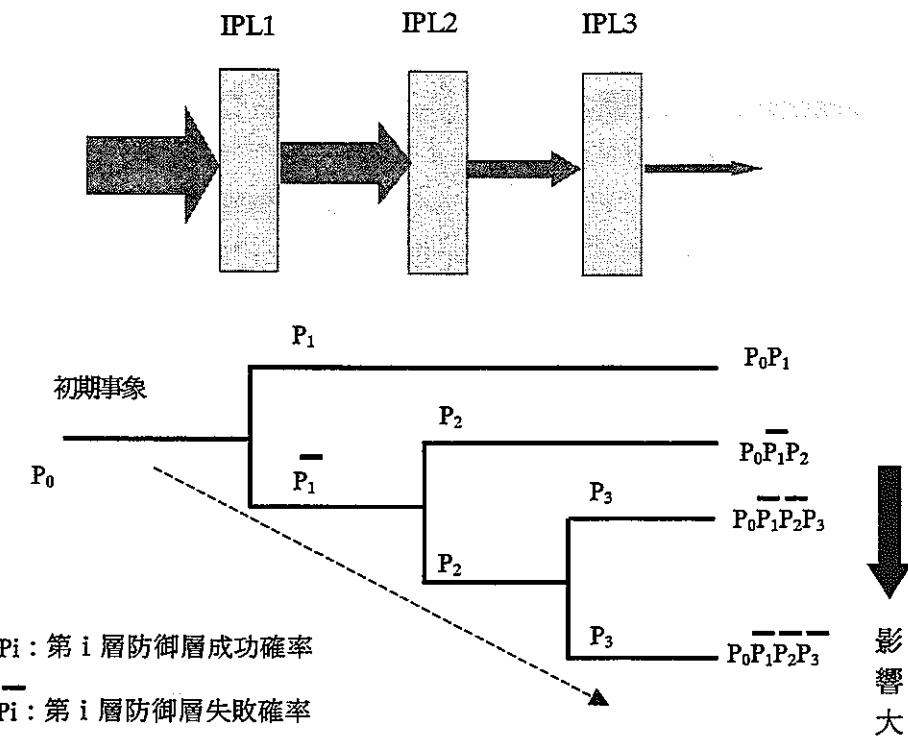


図 5.1 IPL とイベントツリー

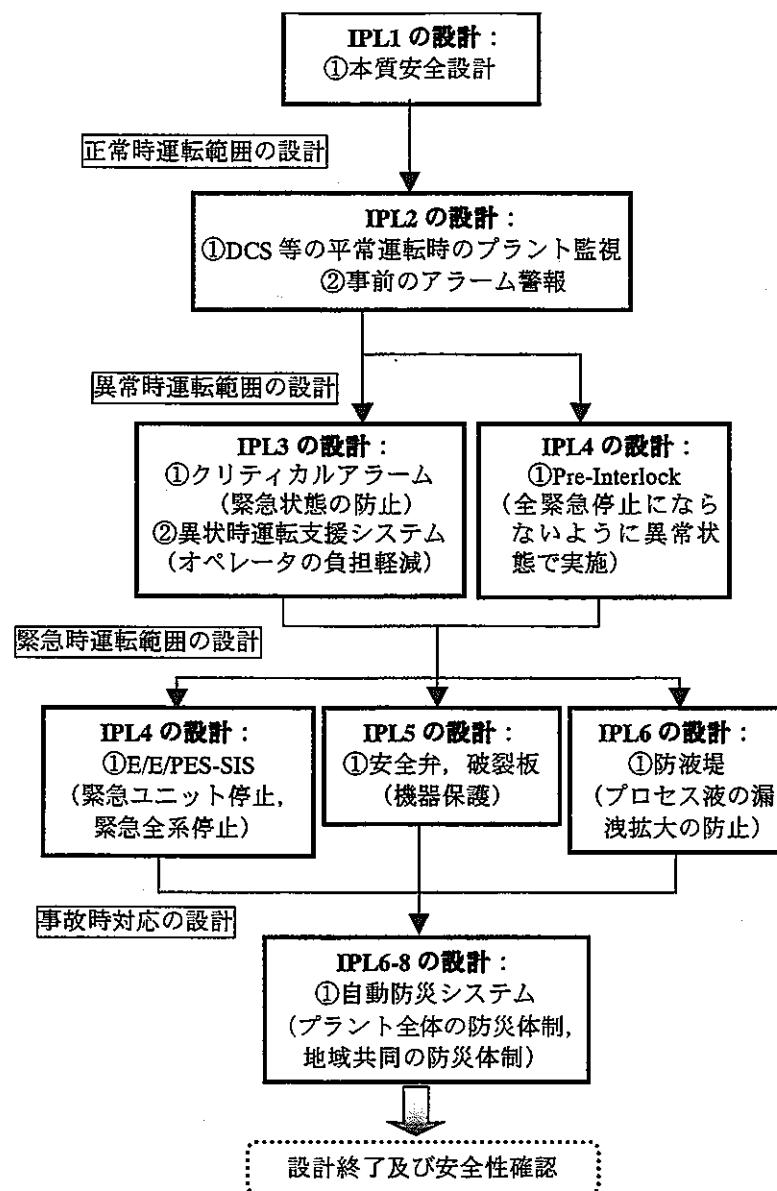


図 5.2 IPL 設計

5.2 定性的危険評価情報と安全設計

IPL 設計において、IPL4 すなわち安全計装システム（SIS）では、表 4.1 に示した SIL を決定する。一般的には、HAZOPなどの手法によりハザード解析を実施し、表 5.1 及び表 5.2 に示す定性的な発生頻度（Likelihood）と被害度（Severity）を推定する。この結果を基に Hazardous Event のリスクレベル（Risk Level）を決定し、SIL 目標を設定する。リスクレベルを求める方法としては、表 5.3 に示すリスクマトリクス（Risk Matrix）法がある。リスクマトリクス法は、被害度と発生頻度を基に、その相互関係からリスクレベルを求める方法である。リスクレベルに対して表 5.4 に示すようなリスク低減対策、SIL を決定する。

表 5.1 発生頻度のランク分けの例

レベル	発生頻度	定義
A	Frequent (頻繁)	プラントの一生において何回も起こり得る
B	Probable (起こり得る)	プラントの一生において数回考えられる
C	Possible (可能性がある)	プラントの一生において 1 回程度は考えられる
D	Impossible (起こり得ない)	複数の類似プラントがある場合、1 回程度は考えられる
E	Incredible (きわめて起こり難い)	複数の類似プラントの一生を通して考えられない

表 5.2 被害度のランク分けの例

カテゴリー	ハザードの程度	想定される結果	例
I	Catastrophic (破局的)	<ul style="list-style-type: none"> 複数の死亡、10 人以上の重傷者 プラント装置の壊滅的な損傷 長期間にわたる環境への壊滅的な大きなインパクト 	<ul style="list-style-type: none"> 毒性物質の大量流出につながる大型機器損傷 大型反応器の暴走反応による高圧力での破損
II	Critical (危機的)	<ul style="list-style-type: none"> 1人の死亡、10 人以下の重傷者 プラント装置の重大な損傷 環境、地域社会への重大なインパクト 	<ul style="list-style-type: none"> 毒性物質の小規模流出につながる機器損傷 大型加熱炉のチューブ損傷による炉内火災
III	Significant (重大)	<ul style="list-style-type: none"> 軽傷者 中程度の機器の損傷、プラント操業への若干の影響 環境、地域社会への局所的で軽微なインパクト 	<ul style="list-style-type: none"> 可燃性物質の中規模流出につながる機器損傷 機器・容器の損傷
IV	Minor (軽微)	<ul style="list-style-type: none"> 応急措置程度の障害 機器の損傷、プラント操業への影響ほとんどなし 環境へのインパクトほとんどなし 	<ul style="list-style-type: none"> 薬品による人身障害 非危険性物質を扱う機器損傷

表5.3 リスクマトリクスの例

Likelihood	Severity			
	I	II	III	IV
A	1	1	2	3
B	1	2	3	4
C	2	3	4	5
D	3	4	5	5
E	4	5	5	5

(1~5:リスクレベル)

表5.4 リスクレベルに応じた対応策の例

リスク レベル	リスクの程度	リスク低減対策の要否
1	極めて高い	・ 本質安全化策の検討、設計変更などのアクションが必要
2	高い	・ 優先度の高い技術的な安全策が必要
3	中程度	・ 修正アクションが限定的に必要 ・ 技術的あるいは手順書による対応策が必要
4	低い	・ 高度のリスク低減対策は必要ない ・ 可能なら若干の修正あるいは設計変更が必要
5	極めて低い	・ リスク低減対策は特に必要ない

5.3 定量的危険評価情報と安全設計

4.2 節で示したように、HAZOP などの定性的危険評価情報を基に、SIS の健全性水準 (SIL) を決定することができる。しかし、IPL3 では異常時に対応するための操作設計、IPL4 では緊急遮断系設計を実施する必要があり、以下に示すような、より詳細なプロセス異常情報を必要とする。ここでは、IPL3、IPL4、IPL5 の設計と危険評価情報の関係を示す。

5.3.1 IPL3 設計

異常の検知手段があり、運転員による異常時対応の時間的余裕がある場合には、IPL3 により異常を防ぐことが可能である。図 5.3 に IPL3 設計と危険評価情報の関係を示す。図 5.3 に示すように、IPL3 の設計にはセンサの設置箇所、アラーム設定値、異常時対応操作設計が含まれる。IPL3 設計で利用する情報は主に Trigger (原因事象) , Propagation Path (異常伝播経路) , Propagation Speed (異常伝播速度) , State Variable Information (状態変数情報) である。

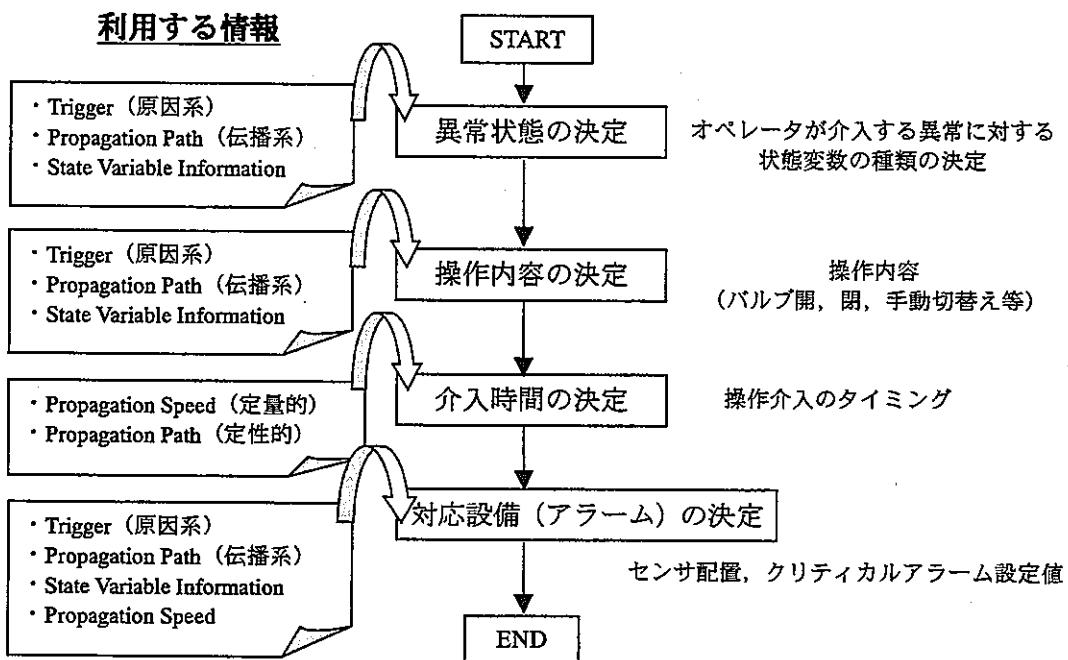


図 5.3 IPL3 設計と危険評価情報

5.3.2 IPL4 設計

運転員介入までの時間的余裕がない場合、あるいは異常の検知手段がない異常に対しては IPL4 で防御する。IPL4 の設計は E/E/PES-SIS による緊急全系停止、緊急ユニット停止を目的としている。図 5.4 に IPL4 の設計手順を示すが、SIL、インターロック用センサ配置などの設計を含む。IPL4 の設計には主に Trigger, Propagation Path, Propagation Speed, State Variable Information を利用する。SIL を決定するには Severity (被害度), Likelihood (発生頻度), Risk Level, Propagation Speed を利用する。SIS の設計には PFD, SIL, Failure Rate (故障率データ) が必要である。

5.3.3 IPL5 設計

IPL5 は IPL4 で防御に失敗したとき、安全弁、破裂板などにより機器を保護する。IPL6 は IPL5 が作動したときのプロセス流体の漏洩や機器破裂などを想定した場合の拡大防止を目的としているが、IPL6 設計についてはここでは省略する。図 5.5 に IPL5 の設計手順と危険評価情報の関係を示す。IPL5 設計には主に Trigger, Hazardous Event (ハザード), Propagation Path, Propagation Speed, State Variable Information に関する情報を利用する。

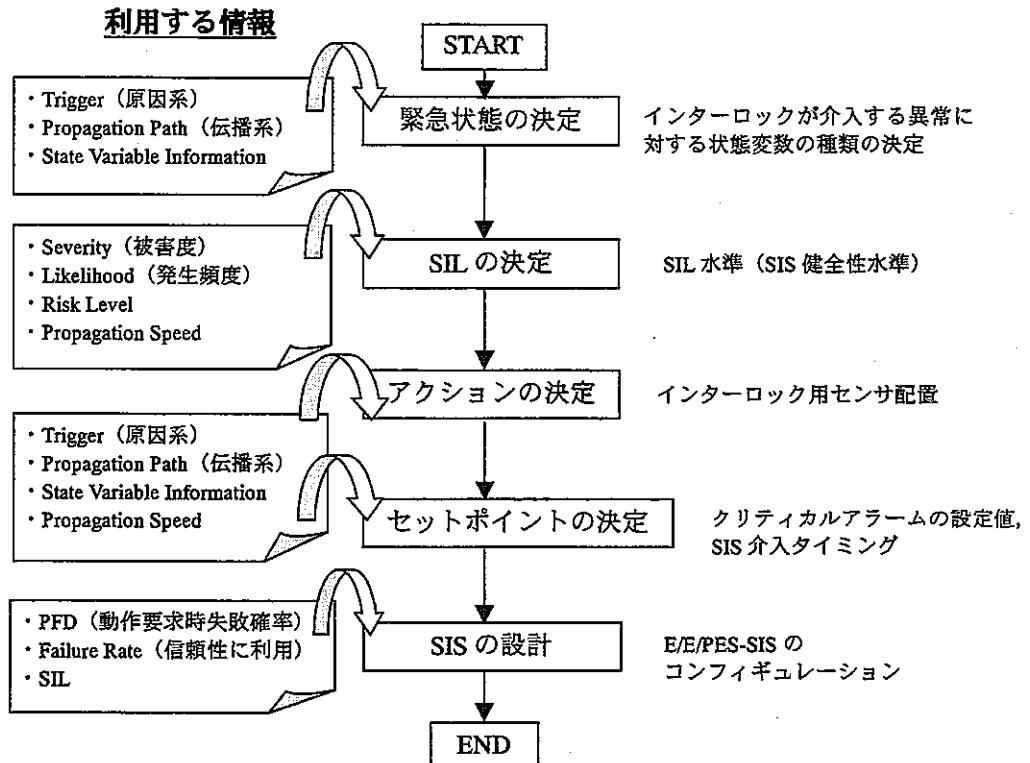


図 5.4 IPL4 設計と危険評価情報

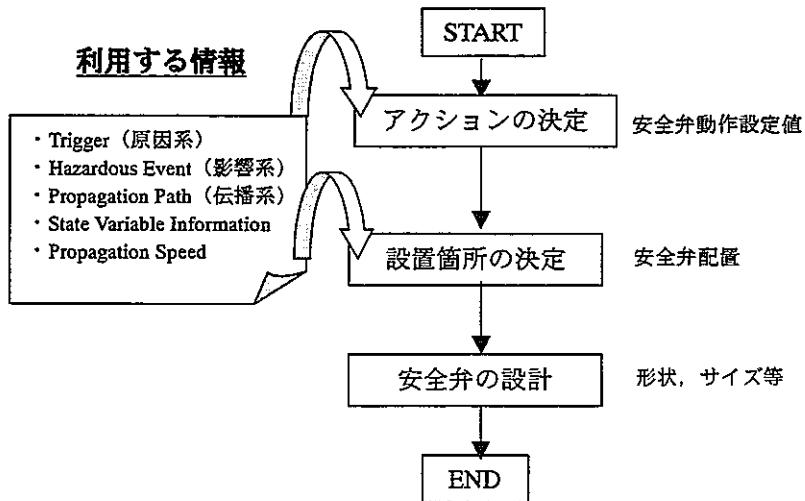


図 5.5 IPL5 設計と危険評価情報

6. HAZOP 解析システム

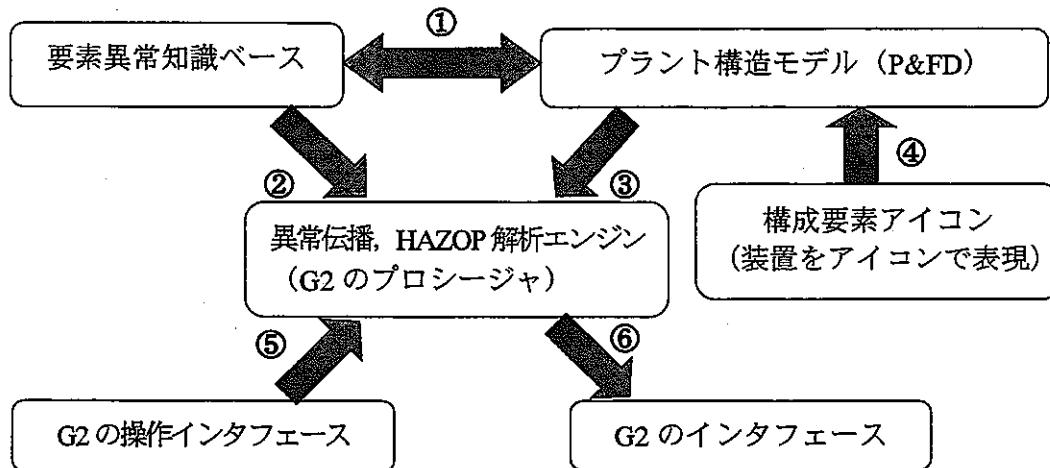
6.1 概要

独立防御層（IPL）の設計は、プロセスハザード、被害度、発生頻度を系統的に解析、評価することにより実現される。HAZOP 解析システムによる出力結果は、IPL 設計におけるハザード同定などに利用する。プロセス異常は、引き金事象を出発点として、プロセス内を伝播し、事故に至る。本システムによる解析結果として、「初期事象とずれ」、「ずれによる装置への影響」、「外部環境への影響」を HAZOP ワークシートの形式で出力される。

図 6.1 に HAZOP 解析システムの概要を示す。本システムは、要素異常知識ベース、構成要素アイコン、プラントモデル、HAZOP 解析エンジン、インターフェースにより構成され、知的情報処理ソフト G2 により開発した。プラント構成装置をアイコン化し、この要素アイコンを結合してプラントモデル（P&FD）を入力する。要素異常知識ベースには、構成要素アイコンに対応した装置異常、故障などの情報を格納している。HAZOP 解析エンジンは、プラントモデルと要素異常知識ベース、G2 のインターフェースから入力された異常状態（ずれ）を参照し、HAZOP 解析を実施する。図 6.1 に示すプロシージャは、G2 構造化自然言語を用いて書かれた文であり、G2 はプロシージャのルールに基づいて解析を行う。HAZOP 解析の結果は G2 内に保持され、必要に応じて G2 のインターフェース上に表示される。

HAZOP 解析システムは知識ベースの参照が容易で、解析結果を正確かつ必要十分に出力する必要がある。また、解析者が視覚的に理解しやすいように GUI (Graphical User Interface) に優れたシステムであることが望ましい。G2 を用いてシステムを開発することにより、解析者は簡単な操作で解析を実施することが可能となる。

昨年度までの HAZOP 解析システムでは、オブジェクト指向の特徴を生かし、クラス、インスタンス、属性といった概念に基づいて知識ベースを作成していた。しかし、この場合、システム内に格納されている知識ベースの構造（形式）を十分に理解しておかなければ、データの追加、保守、モデル作成などが困難であった。本研究では、よりユーザフレンドリーな HAZOP 解析システムとするために、基本モデル作成ツールと内部状態モデルの考えを加え、知識ベースの拡張、保守をサポートする機能を加えた。



- ① プラント構造モデルと要素異常知識ベースを関連付ける。
- ② 要素異常知識ベースの異常情報（要素故障、反応異常）をプロシージャに入力する。
- ③ プラント構造（P&FD）情報をプロシージャに渡す。
- ④ 構成要素を示すアイコンを提供する。
- ⑤ G2 のインターフェースから入力されたプロセス異常の情報をプロシージャに入力する。
- ⑥ HAZOP 解析の結果を G2 のインターフェース上に表示する。

図 6.1 HAZOP 解析システムの概要

6.2 一般的知識ベース

6.2.1 一般的知識ベースの構成

一般的知識ベースは、異常伝播に関する情報を基本モデル作成ツール、内部状態モデルを用いて構築する。基本モデル作成ツールは装置の異常伝播構造を構築するためのものであり、内部状態モデルはプロセス変数、故障モードなどの具体的な因果関係を示すものである。

装置クラス、基本モデル作成ツール、内部状態モデルはそれぞれ独立したものであるが、本システムでは、装置クラスを上位クラスとおき、そのインスタンスのサブワークスペースに異常伝播情報を格納することにより、関連付けを行う。また、基本モデル作成ツールと内部状態モデルは視覚的に分かりやすいアイコンとして表現している。図 6.2 に一般的知識ベースの構成を示す。

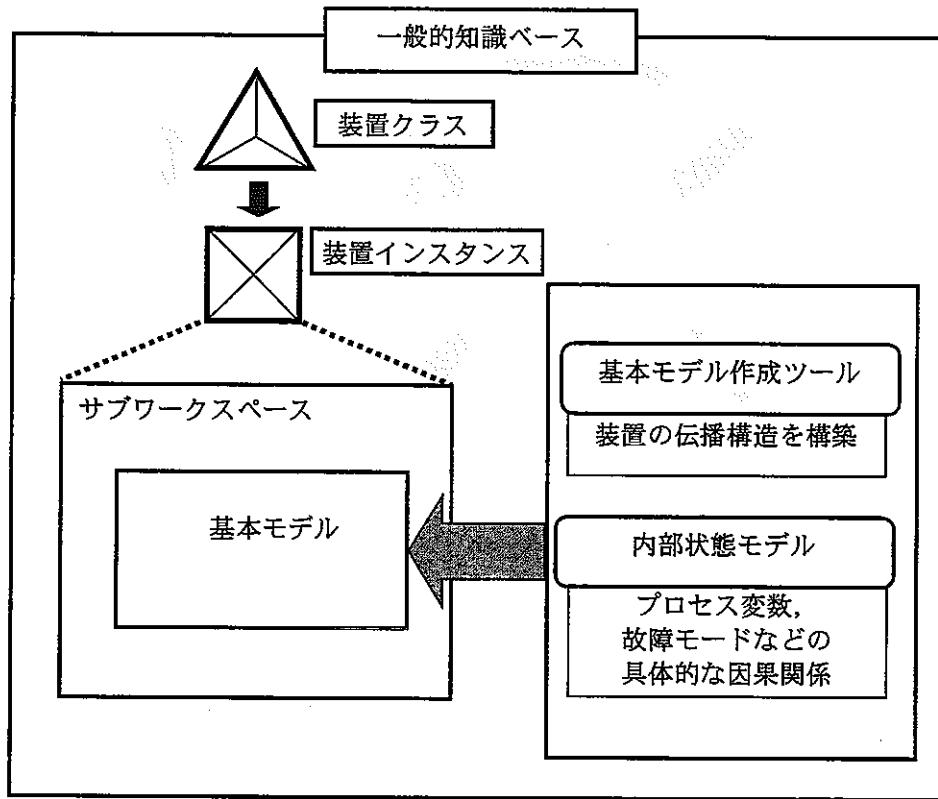


図 6.2 一般的知識ベースの構成

6.2.2 基本モデル作成ツール

基本モデルは、影響系を基準に構成要素の異常伝播構造をモデル化したものであり、図 6.3 に示す基本モデル作成ツールのアイコンは、ポイントごとの情報の格納場所である。これは基本モデルに基づきポイントをアイコンとしたものである。各ポイントのクラスのインスタンス（図 6.3 のアイコン）をコネクションで接続することにより様々なポイントのモデルを構築することができ、モデル変更に柔軟に対応する。これより、一般的知識ベースに新たな装置が追加される場合でも、容易に基本モデルを作成することができる。

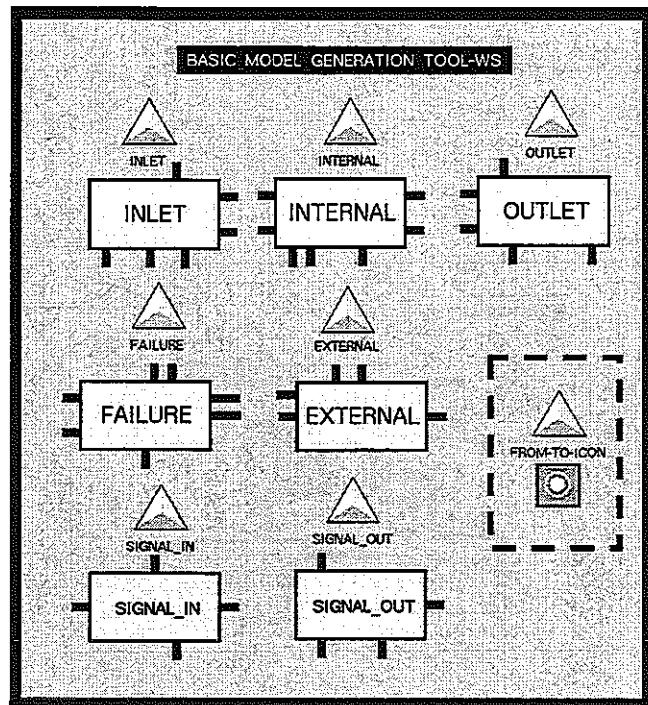


図 6.3 基本モデル作成ツール

図 6.3 に示したポイントのアイコンにより装置の持つポイントをモデル化する。本システムではポイントのサブワークスペースに次の伝播先を指定しなければならない。図 6.3 中の点線で囲まれたアイコンは基本モデルのポイント間の矢印に対応し、伝播構造を決定する。この場合もクラス定義されているため、必要に応じてインスタンスを作成することができる。図 6.4 に示すように、アイコンの「From to」の属性欄に次の伝播先のポイント名を記入する。図 6.4 では、Inlet のポイントから「internal」へ伝播させるために「From to」に「internal」と入力している。

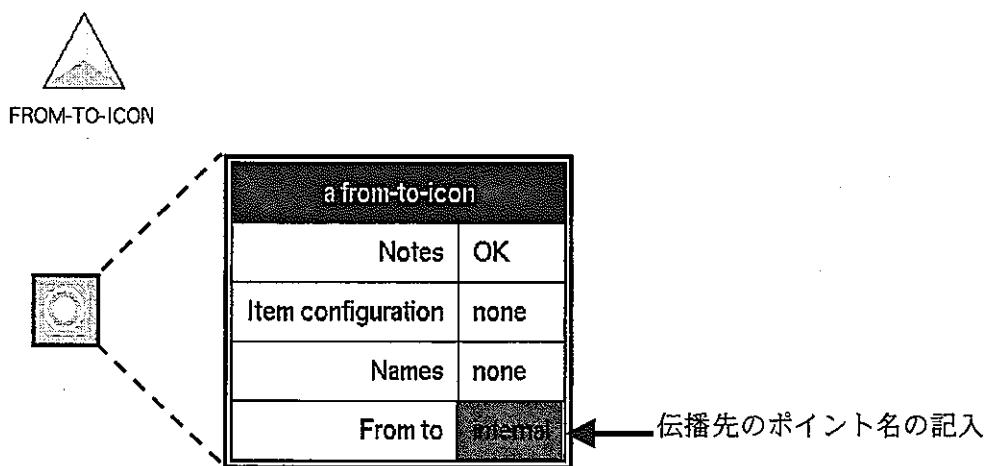


図 6.4 伝播構造決定

基本モデル作成ツールの各ポイントのクラスからインスタンスを作成し、構成要素インスタンスのサブワークスペース上に移す。コネクションを接続することにより、ポイントの基本モデルを構築することができる。図 6.5 に基本モデル作成ツールを用いた基本モデル 1 の構築例、図 6.6 に基本モデル作成ツールを用いた基本モデル 2 の構築例を示す。

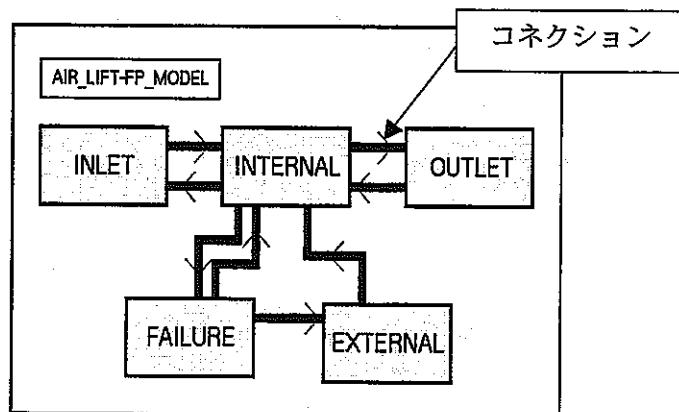


図 6.5 基本モデル作成ツールを用いた基本モデル 1 の構築例

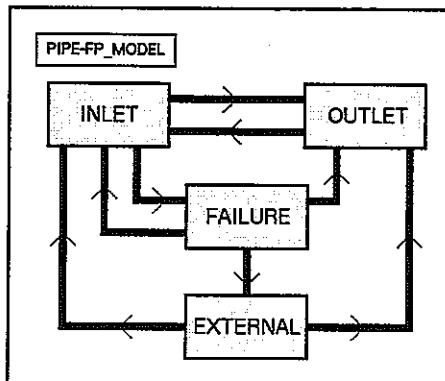


図 6.6 基本モデル作成ツールを用いた基本モデル 2 の構築例

6.2.3 内部状態モデル

プラントはバルブ、ポンプ、反応装置、加熱、冷却装置などの周辺装置から構成され、数多くの構成要素を有している。これらプラントの構成要素ごとの「ずれ」→「ずれ」、「故障」→「ずれ」、「ずれ」→「故障」、「外部環境」→「ずれ」などの関係は、要素の設置個所、あるいはプラントの種類に依存せず、多くの場合共通であり、これらの関係を形式化することができる。

6.2.2 項では基本モデル作成ツールを用いてプラント構成要素の伝播構造の構築例を示した。構成要素ごとに伝播構造に基づいたプロセス変数、故障モードなどの具体的な因果関係を明確にし、異常伝播によるプロセスの状態、構成要素の内部に異常が発生した状態などをモデル化する。ここでは、このモデルを内部状態モデルと呼ぶ。

内部状態モデルは配列を用いて構築する。配列とは G2 の知識ベースにおいて情報を格納する場所となるものである。昨年度の HAZOP 解析システムでは、これを伝播構造クラスの属性として定義していたために不必要的ものまで定義されていた。また原因用、影響用の配列クラスを用いたために知識ベースが複雑になり、解析に必要な情報の追加、修正が困難であった。

内部状態モデル（配列）と伝播構造は独立しているが、基本モデル作成ツールで構築した伝播構造のサブワークスペース上に格納することにより、基本モデルと内部状態モデルを関連付けることができる。

新たに配列クラスに「Zure」という属性欄を設けることにより、1 つの配列クラスのインスタンスを用いて、状態異常や故障を引き起こす情報、状態異常や故障が引き起こされる情報という 2 つの異常に関する情報を格納することが可能となる。これより知識ベースを簡素化することができ、知識の追加、修正が容易となる。

図 6.7 に内部状態モデルへの情報の格納例を示す。「Zure」の属性欄には「Initial values」を引き起こす状態異常や故障モードに関する情報を格納する。また、「Initial Values」には「Zure」により引き起こされる状態異常や故障モードに関する情報を入力する。

The table data is as follows:

a.waste_array	
Notes	OK
Item configuration	none
Names	none
Array length	6
Element type	symbol
Initial values	[Redacted]
Array is permanent	no
Material	waste
Zure	[Redacted]

図 6.7 内部状態モデルへの情報の格納例

6.2.4 一般的知識ベース構築例

一般的知識ベースは、一般的知識ベースのクラス構造に基づき、各インスタンスのサブワークスペース上に基本モデル作成ツール及び内部状態モデルを用いて、異常伝播に関する情報を格納する。

基本モデル作成ツール及び内部状態モデルを用いた一般的知識ベース構築例について説明する。図 6.8 に基本モデル作成ツール及び内部状態モデルを用いた知識ベース構築例を示す。

- ① 各装置インスタンスを作成し、それぞれの装置のアイコンにサブワークスペースを作成する。
- ② 図 6.3 の基本モデル作成ツールのワークスペースからポイントのアイコンを装置のインスタンス（アイコン）のサブワークスペースに移し、各アイコンを接続することにより、基本モデルを作成する。
- ③ ポイントのサブワークスペースを作成し、図 6.3 の点線で囲まれたアイコンを用いて伝播構造を決定する。
- ④ ③で作成したサブワークスペース上に内部状態モデルのアイコンを作成することにより基本モデルを構築する。

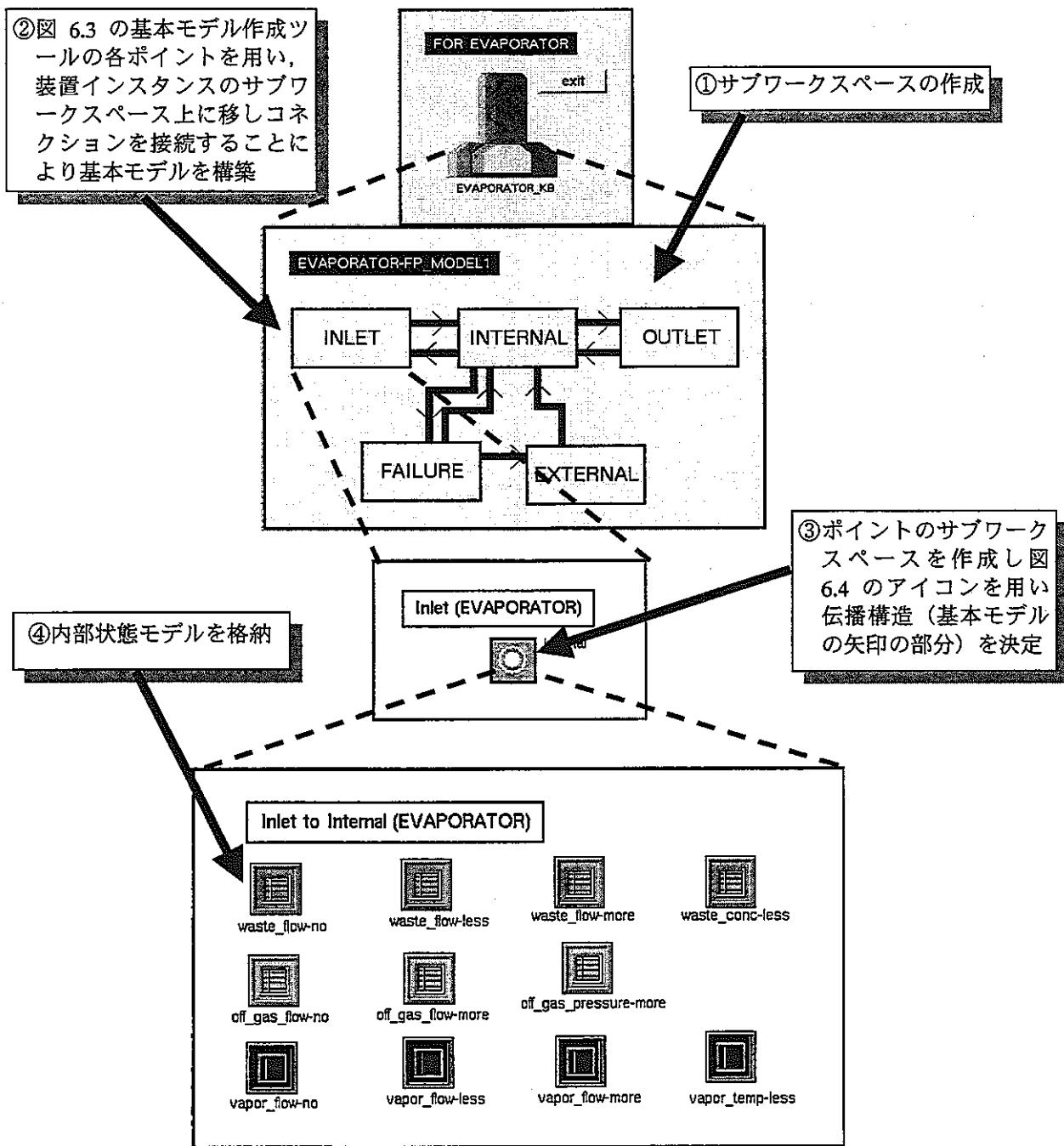


図 6.8 基本モデル作成ツール及び内部状態モデルを用いた知識ベース構築例

6.3 固有知識ベース

固有知識ベースには装置名、装置を表すアイコン、装置の接続の情報、配管を流れる物質名など、対象プラントの固有の情報を格納する。ユーザは対象プラントの P&ID やフローシートを基に各装置クラスに装置名や接続についての情報をアイコンにより入力する。これより専門家でなくとも容易に固有知識ベースの構築が可能である。固有知識ベースの構築手順は次の通りである。

- ① 対象プラントに含まれる装置の装置クラスを作成し、装置を表すアイコン、配管を流れる物質についての情報をユーザが入力する。
- ② 各装置クラスからインスタンスを作成し、そのプラントにおいて一意の装置名を付け、 HAZOP 解析システム内の解析ワークスペース上に配置し、配管を接続する。
- ③ 装置インスタンスのサブワークスペース上に一般的知識ベースの基本モデル作成ツールで使用したポイントと対応するリストを格納する。本システムでは図 6.9 に示すように各ポイントに対して原因用、影響用のリストを設けている。また、それぞれについてクラスを作成しているので、いくつでもインスタンスを作成することができる。図 6.9 は INLET についてのリストのみ示しているが、他のポイントについても固有知識ベースに用意されている。ここでリストとは、解析実行時に情報を格納するためのものであり、本システムでは異常伝播解析に必要なものである。

図 6.9 に INLET のリスト、図 6.10 に固有知識ベースにおけるリストの格納例を示す。本研究では、一般的知識ベースにおいて配管の知識ベースは基本モデル 2 としており、「INLET」、「OUTLET」、「FAILURE」、「EXTERNAL」の基本モデル作成ツールのポイントを使用した。このため、そのポイントと対応する原因用、影響用のリストを固有知識ベースのサブワークスペース上に配置する。

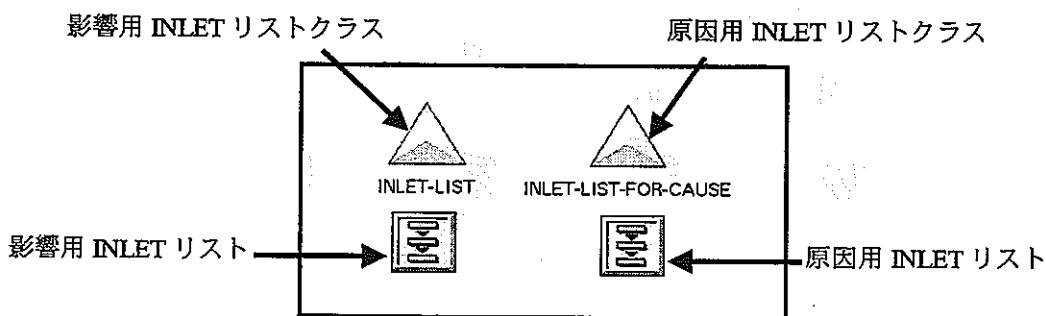


図 6.9 INLET のリスト

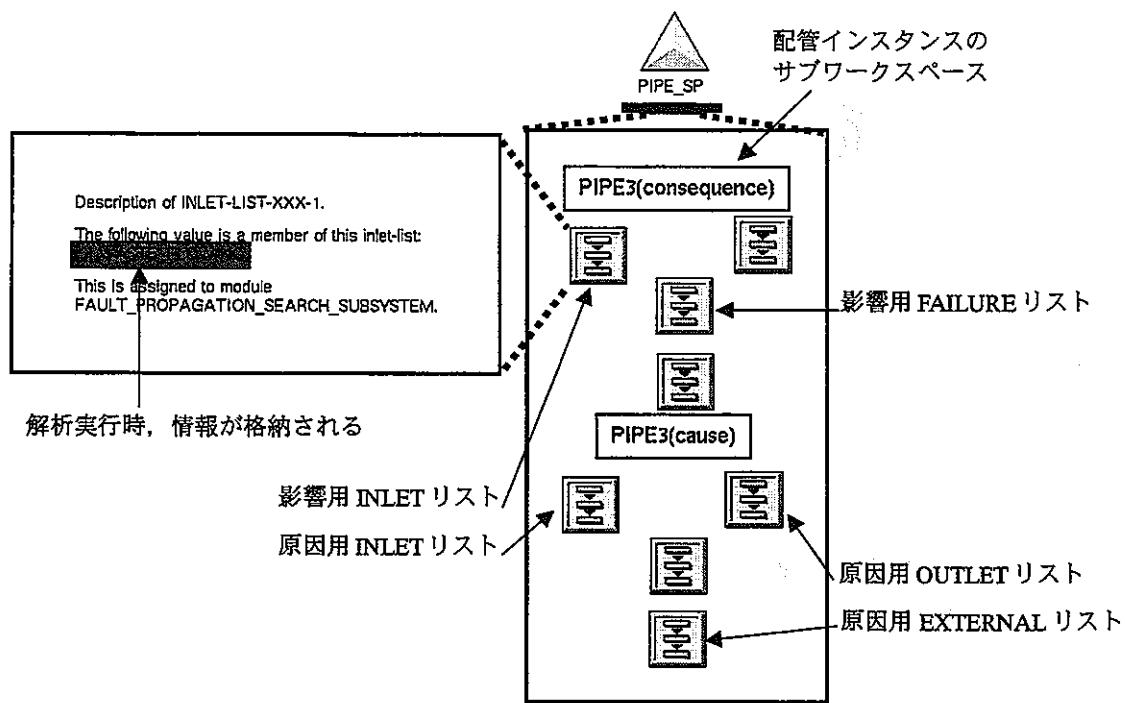


図 6.10 固有知識ベースにおけるリストの格納例

以上のように固有知識ベースを作成し、HAZOP 解析に利用する。HAZOP 解析では、固有知識ベース内の各装置を接続している配管インスタンスを直接指定することにより、[ずれ] の想定を行う。

6.3.1 構成要素アイコン

構成要素アイコンは、装置を視覚的に分かりやすいアイコンで表現したものであり、ユーザが固有知識ベースを作成する際に利用する。また、構成要素アイコンを接続することによりプラントモデルを表現することができる。HAZOP 解析エンジンでは固有知識ベースにおける構成要素アイコンを認識することにより、一般的知識ベースの探索を行う。図 6.11 に構成要素アイコンの例を示す。

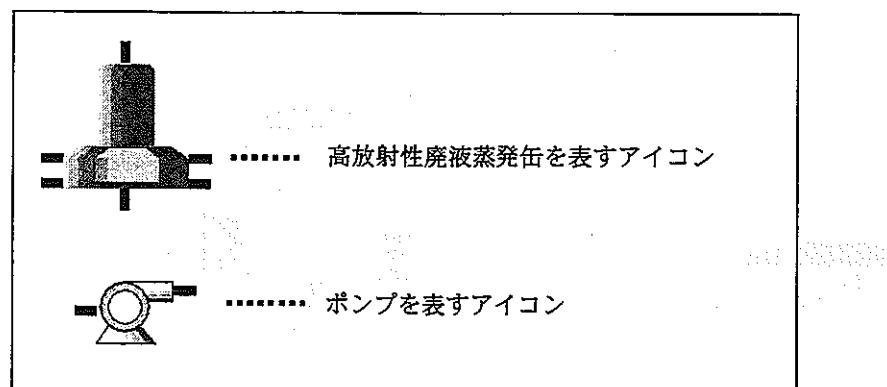


図 6.11 構成要素アイコンの例

6.3.2 プラント構造情報の入力

固有知識ベースを作成することにより、G2 上にプラントモデルを表現する。図 6.12 にプラントモデルの例を示す。

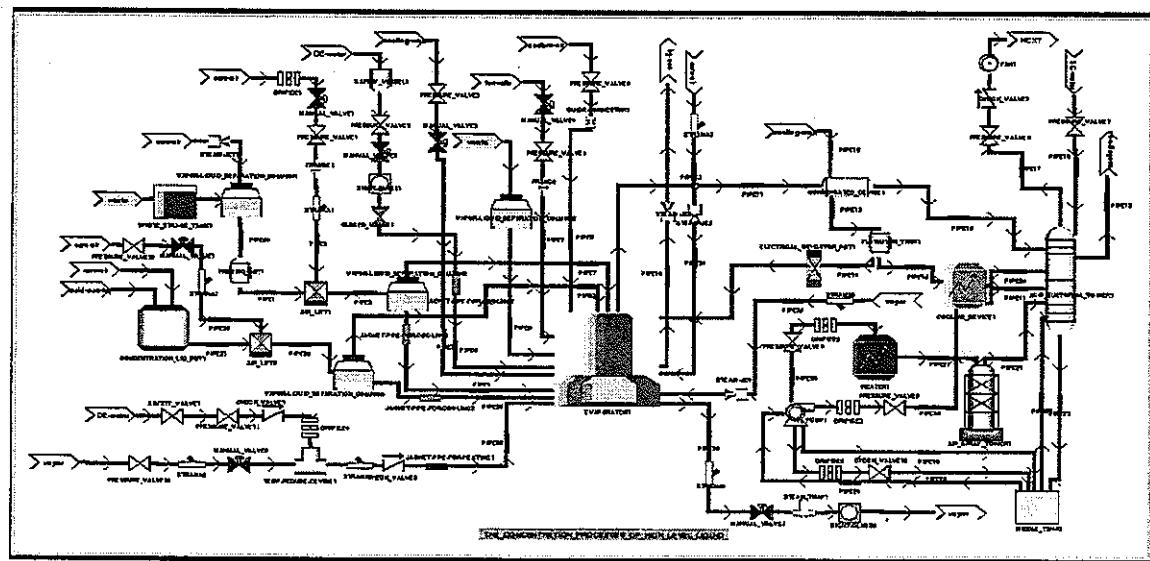


図 6.12 プラントモデル

6.4 HAZOP 解析エンジン

HAZOP 解析エンジンでは、固有知識ベースからプラント内の構成要素の接続状況、構造を認識し、一般的知識ベースに格納されている基本モデルに基づき構成要素内の異常伝播解析を実施する。図 6.13 に HAZOP 解析手順の概要を示す。

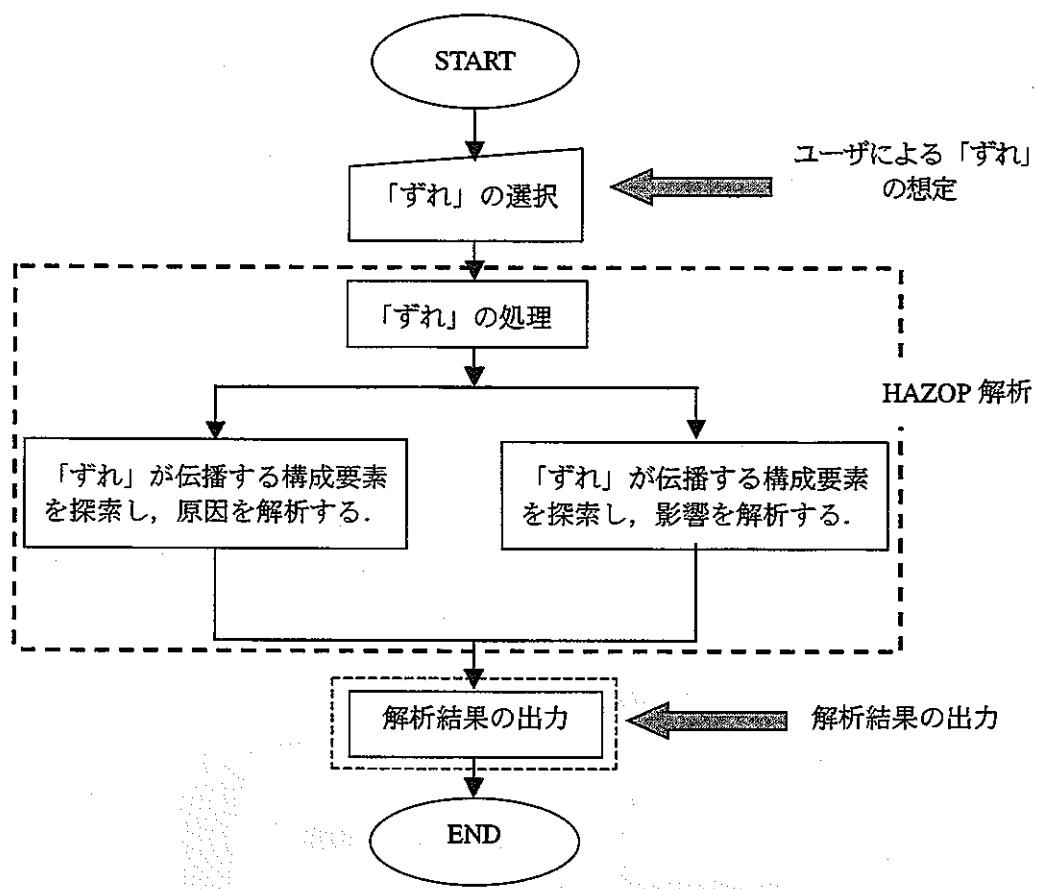


図 6.13 解析手順の概要

6.4.1 「ずれ」の想定

図 6.14 に「ずれ」の想定画面を示す。ユーザは、固有知識ベースで構築した配管インスタンスを選択する。次に「select」を選択すると「DEVIATIONS」の選択画面が表示され、プロセス変数、手引き用語の選択により、「ずれ」を想定することができる。

ユーザはプロセス変数、手引き用語を選択するが、HAZOP 解析を行うためには、さらに物質に関する情報が必要となる。昨年度の研究では、ユーザは扱っている物質を認識しておく必要があった。改良したシステムでは、固有知識ベース構築の際、ユーザが配管インスタンスの「Substances」の属性欄へ扱う物質に関する情報をあらかじめ入力しておく。これより、解析エンジンは自動的に物質名を判断し、「[物質名]_[プロセス変数]_[手引き用語]」という形式で処理を行う。図 6.15 に配管の固有知識ベースを示す。

HAZOP 解析エンジンでは、想定された「ずれ」の情報を受け取り、プラントの構造を認識する。プラントの構造に基づき、各構成要素の情報を一般的知識ベースから参照することにより、HAZOP 解析を実施する。固有知識ベースと一般的知識ベースの対応付けは、例えば図 6.15 に示すように「KB reference」の属性欄に、一般的知識ベースの名称を固有知識ベースに入力しておくことにより実施される。また、HAZOP 解析は構成要素の基本モデルを認識するとともに、隣接した構成要素を認識することにより実施する。以上の処理を繰り返すことにより HAZOP 解析を行う。

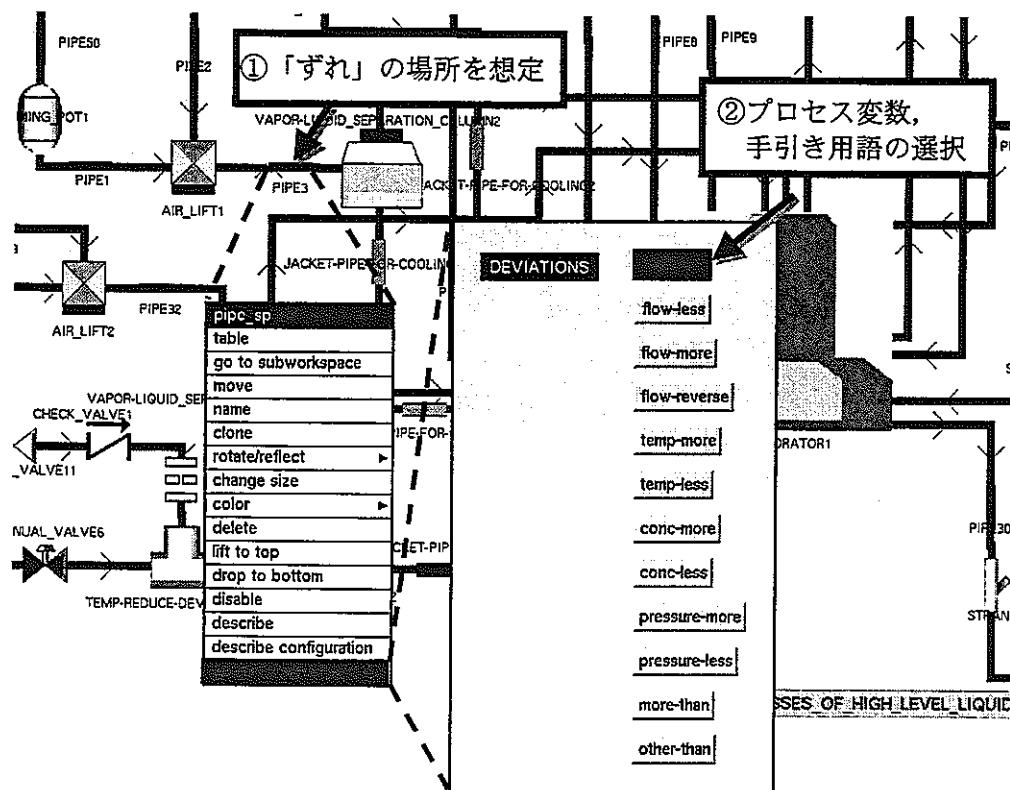


図 6.14 「ずれ」の想定画面

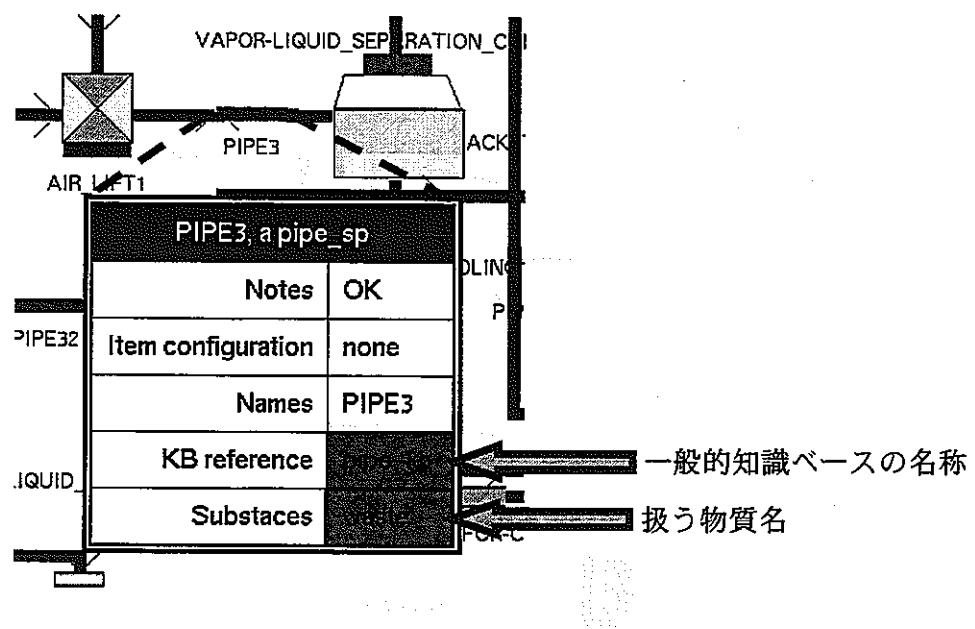


図 6.15 配管の固有知識ベース

6.4.2 構成要素内部の異常伝播解析

基本モデルに基づいた構成要素内部での異常伝播の解析方法について説明する。HAZOP は影響系の解析、原因系の解析に分けることができる。以下に、本システムによる構成要素内部での異常伝播の解析方法を説明する。

(I) 影響解析における構成要素内での異常伝播の解析手順

基本モデル作成ツールにより構築された異常伝播構造に基づき解析を行う。影響解析では「ずれ」を想定した配管の「INLET」から解析を実施する。実行時には 6.3 節で説明した固有知識ベースのアイコンにおけるサブワークスペース上の影響用リストを用いる。これは解析実行時に状態異常や故障モードに関する情報を格納する場所である。リストには未解析のポイント名が入るリスト A を用いる。これは、前者のリスト群とは異なるものである。

- ① ポイントのコネクションの入力から「ずれ」が伝播してくる。
- ② ポイントの出力のコネクションを探索する（これは、ポイントのサブワークスペース上にある伝播先決定アイコンの属性欄を参照することを意味する）。図 6.16 に次の解析ポイント探索を示す。
- ③ ②でコネクションを探索した先のポイント名をリスト A に格納する（参照した伝播先決定アイコンの属性欄のポイント名をリスト A に格納する）。格納されたポイント名は、次の解析ポイントとなる。図 6.17 にリスト A の格納例を示す。
- ④ ②で探索したポイント名と対応する固有知識ベースのサブワークスペース上にある影響用リストと対応付ける。図 6.18 にポイント名とリストとの対応付けを示す。

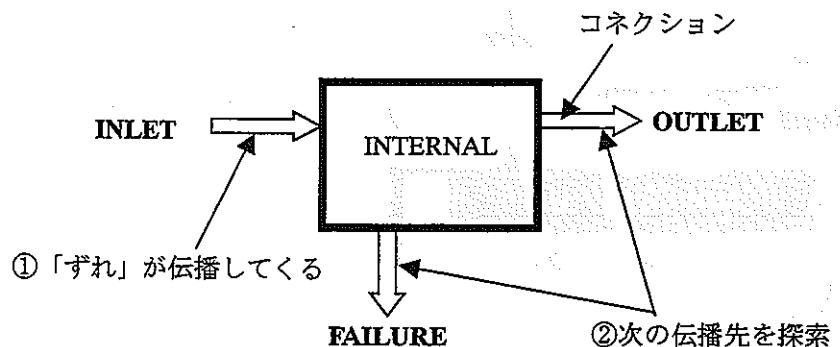


図 6.16 解析ポイント探索

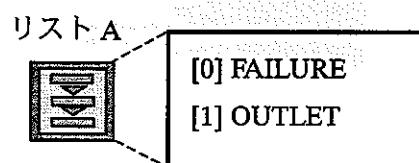


図 6.17 リスト A の格納例

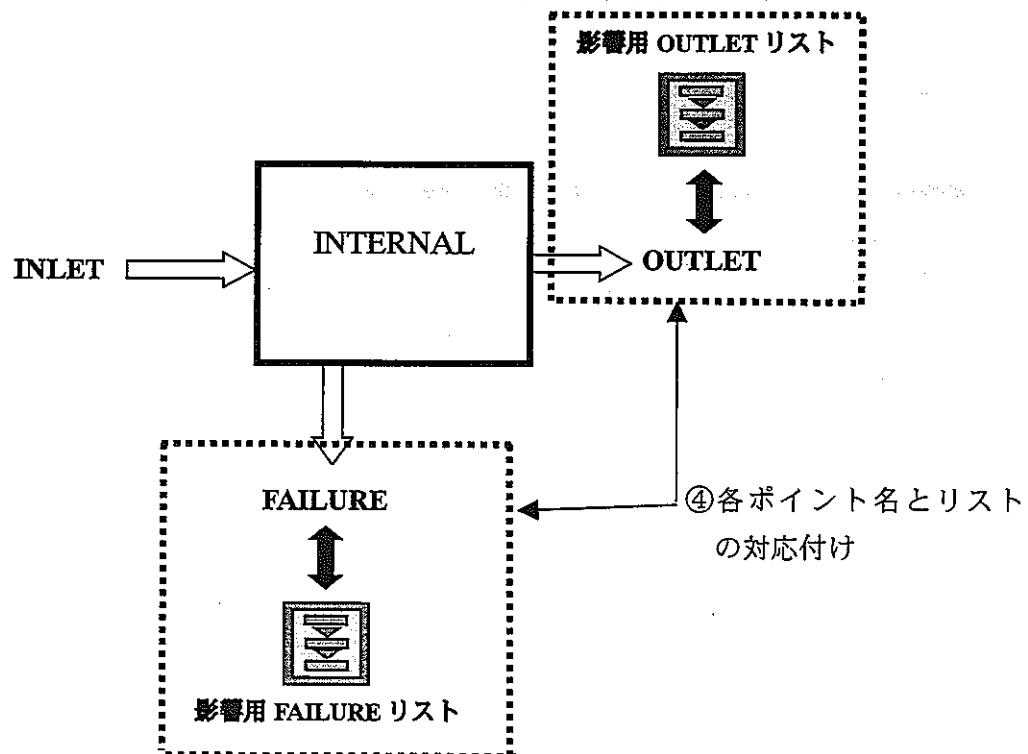


図 6.18 ポイント名とリストとの対応付け

⑤ 影響用 INTERNAL リストに格納されている状態異常に関する情報について、リスト A を参照する。それぞれの伝播先決定アイコンのサブワークスペース内に格納されている内部状態モデルの「Zure」をすべて探索し、一致するものがあれば④で対応付けたリストへ「Initial values」の状態異常に関する情報を格納する。

基本モデルでは、同一のポイントに戻ってくる異常伝播もあり、1度解析したポイントのリストに新たに情報が追加される場合がある。この場合も同様に、すべての内部状態モデルについて探索することにより、解析もれを防ぐことができる。また、同一情報が重複してリストに格納されないように処理が行われる。図 6.19 に状態異常の情報の流れを示す。

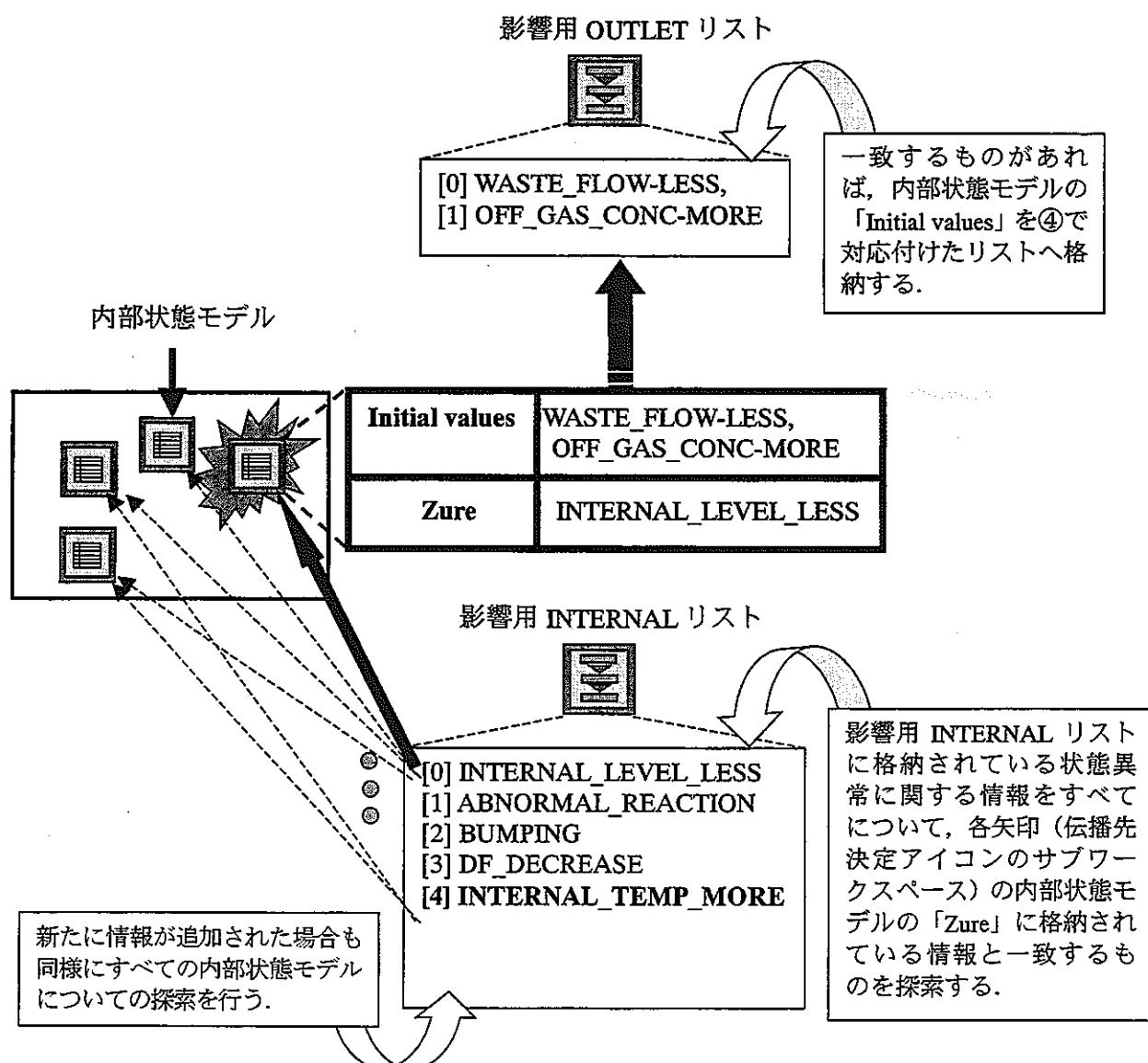


図 6.19 状態異常の情報の流れ

以上の手順を繰り返すことにより、構成要素内の異常伝播解析を実施する。また、影響用の OUTLET リストに状態異常が入力された場合、構成要素間の異常伝播解析を行う。構成要素間の影響系の異常伝播解析では、OUTLET に入力された状態異常を、隣接する構成要素の INLET のリストへ入力することにより、プラント全体の影響解析を行う。

(II) 原因解析における構成要素内での異常伝播の解析手順

原因解析も影響解析と同様に基本モデル作成ツールにより構築された伝播構造に基づき解析を行う。影響解析では「ずれ」を想定した配管の「OUTLET」から解析を実施する。また、解析時には 6.3 節で説明した固有知識ベースのアイコンにおけるサブワークスペース上の原因用リストを用いる。リストには未解析のポイント名が入る原因用のリストを用いる。

解析手順は、影響解析の逆となる。また、内部状態モデルを探索するとき、影響解析では「Zure」を参照して「Initial values」の欄に出力するのに対して、原因解析では、「Initial values」を参照して「Zure」を出力する。また、原因用の OUTLET リストへ状態異常が入力された場合、構成要素間の異常伝播解析へと移る。構成要素間の原因系の異常伝播解析では、INLET に入力された状態異常を隣接する構成要素の OUTLET のリストへ入力することにより、プラント全体の原因解析を行う。

6.5 解析結果の出力

HAZOP 解析システムで解析された「ずれ」に対する影響と原因を解析結果として表示する。解析結果は、「first deviation」の欄に想定したずれと、想定した配管名が「[「ずれ」 at 「構成要素名」]」という形式で出力される。原因は「cause」、影響は「consequence」の欄へそれぞれ表示する。原因、影響は図 6.20 に示す形式で表示する。図 6.21 に解析結果の例を示す。

「構成要素名」 「(Internal or failure or External) : (原因 or 影響)」

図 6.20 解析結果の表現形式

HAZOP DISPLAY	
first deviation	
cause	consequence
PIPE3 Failure : CHOKE Failure : BREAKAGE External : LEAK	VAPOR-LIQUID_SEPARATION_COLUMN2 Internal : WASTE_FLOW_NO Internal : OFF_GAS_FLOW_NO
AIR_LIFT1 Internal : COM_AIR_FLOW_NO Internal : WASTE_FLOW_NO	EVAPORATOR1 Internal : INTERNAL_AND_OVERHEAD_NEGATIVE_PRESSURE_SHALLOW Internal : WASTE_FLOW_NO Internal : INTERNAL_LEVEL_LESS Internal : CON_WASTE_ACID_LESS Internal : FORMALDEHYDE_ACCUMULATION Internal : ABNORMALREACTION Internal : BUMPING Internal : DF_DECREASE Failure : COOLING_FUNCTION_LOST
PIPE2 Failure : CHOKE Failure : BREAKAGE	CONDENSATED_DEVICE1 Internal : OFF_GAS_CONC_MORE Internal : INTERNAL_ACID_MORE Internal : INTERNAL_RADIOACTIVE_SUB_CONC_MORE Internal : INTERNAL_H2_CONC_MORE
PIPE1 Failure : CHOKE Failure : BREAKAGE External : LEAK	ACID_SUCTION_TOWER1 Internal : OFF_GAS_CONC_MORE Internal : INTERNAL_CLEANING_WATER_ACID_MORE Internal : RADIOACTIVE_SUB_CONC_MORE
STRANA1 Failure : CHOKE	FAN1 Internal : OFF_GAS_CONC_MORE
PRIMING_POT1 Internal : DEPLETE Internal : WASTE_FLOW_NO	
PIPE50 Failure : CHOKE Failure : BREAKAGE External : LEAK	
VAPOR-LIQUID_SEPARATION_COLUMN1 Internal : WASTE_FLOW_NO	

図 6.21 解析結果の例

6.6 解析例

開発した HAZOP 解析システムを高放射性廃液濃縮工程とプルトニウム濃縮工程に適用し、核燃料サイクル開発機構による解析結果と比較した。解析結果の比較の対象として核燃料サイクル開発機構により実際された HAZOP 解析結果を用いた¹¹⁾。

6.6.1 高放射性廃液濃縮工程に対する HAZOP 解析結果

図 6.22 に高放射性廃液濃縮工程の概略図を示す。高放射性廃液濃縮工程では、高放射性廃液中間貯槽で貯えられている高放射性廃液を空気分離器で高放射性廃液とオフガス（廃気）に分離し、高放射性廃液蒸発缶で高放射性廃液にホルマリン溶液を加えて硝酸溶液を分解、加熱濃縮する。高放射性廃液蒸発缶の塔頂から出るオフガスは凝縮器で凝縮された後、酸吸収塔に送られる。酸吸収塔では硝酸溶液の分解により発生する亜硝酸ガスを空気吹き込み塔から送られる空気により酸化し、硝酸溶液となり次工程に送られるまで中間貯槽で貯えられる。

高放射性廃液濃縮工程に対する解析結果を表 6.1～表 6.7 に示す。

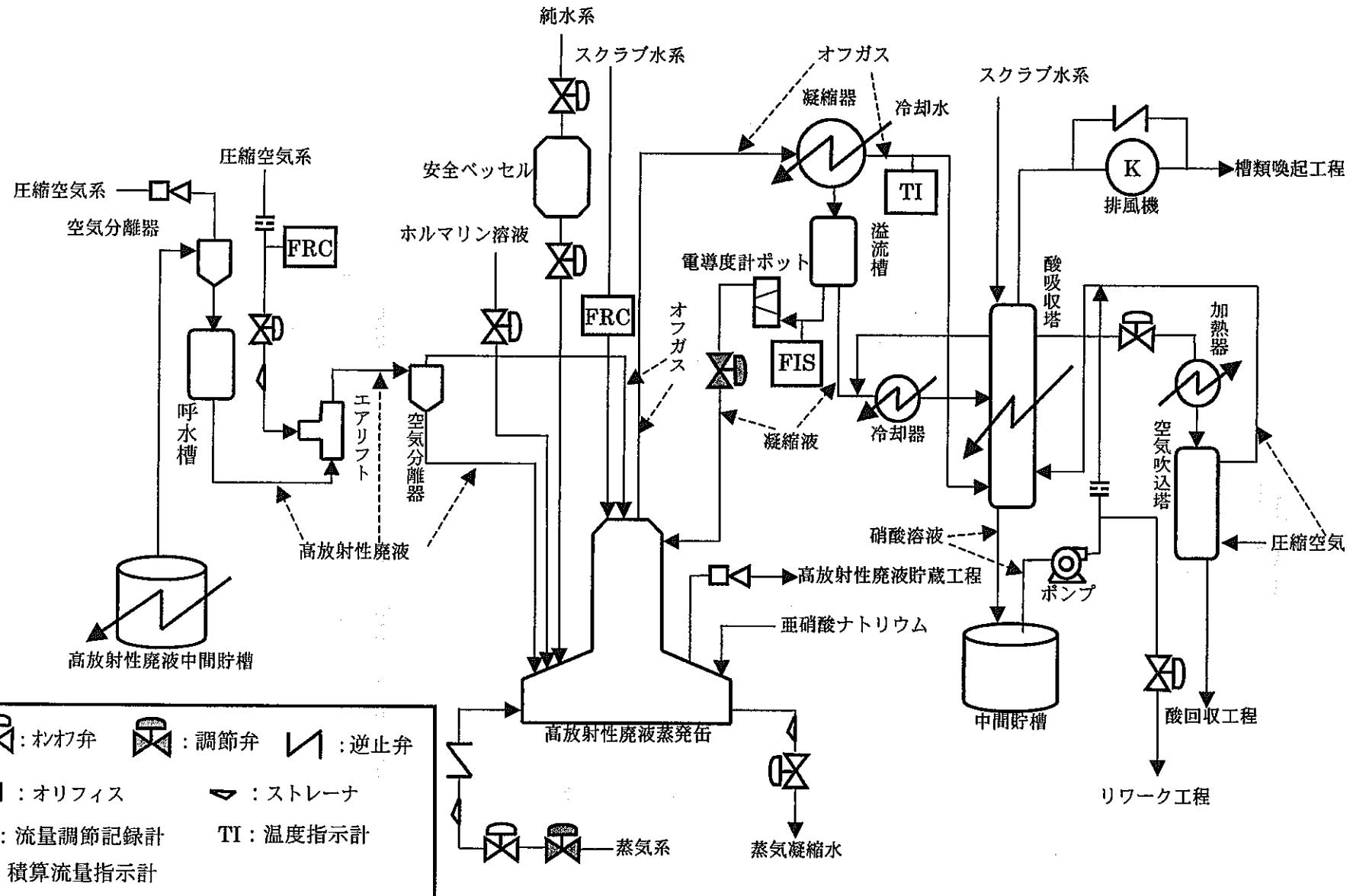


図 6.22 高放射性廃液濃縮工程概要図

表 6.1 「空気分離器で高放射性廃液の流量なし」に対する HAZOP 解析結果

(a) 核燃料サイクル開発機構による HAZOP 解析結果

工程	高放射性廃液濃縮工程
機器名	気液分離器
「ずれ」	高放射性廃液の流量なし
考えられる原因	エアリフトからの高放射性廃液流入なし 配管の閉塞 配管の破損 エアリフト内部の閉塞 エアリフト本体の破損
起こり得る影響	気液分離器への高放射性廃液流入なし 気液分離器への圧縮空気流入なし

(b) 本システムによる HAZOP 自動解析結果

工程	高放射性廃液濃縮工程
機器名	気液分離器
「ずれ」	高放射性廃液の流量なし
考えられる原因	配管の閉塞 配管の破損 エアリフト内部の閉塞 エアリフト本体の破損 吸水槽の破損 呼水槽の液位なし
起こり得る影響	気液分離器の液位減少 高放射性廃液蒸発缶の液位減少 高放射性廃液蒸発缶の濃縮廃液酸度低下 高放射性廃液蒸発缶ホルムアルデヒド蓄積 高放射性廃液蒸発缶の異常反応 高放射性廃液蒸発缶の突沸 高放射性廃液蒸発缶のDF 低下 高放射性廃液蒸発缶の爆発の可能性

表 6.2 「エアリフトで高放射性廃液の濃度上昇」に対する HAZOP 解析結果

(a) 核燃料サイクル開発機構による HAZOP 解析結果

工程	高放射性廃液濃縮工程
機器名	エアリフト
「ずれ」	高放射性廃液の濃度上昇
考えられる原因	プライミングポットからの濃度が上昇した高放射性廃液流入
起こり得る影響	エアリフトへの濃度が上昇した高放射性廃液流入

(b) 本システムによる HAZOP 自動解析結果

工程	高放射性廃液濃縮工程
機器名	エアリフト
「ずれ」	高放射性廃液の濃度上昇
考えられる原因	プライミングポットからの濃度が上昇した高放射性廃液流入
起こり得る影響	エアリフトへの濃度が上昇した高放射性廃液流入 気液分離器の高放射性廃液濃度上昇 高放射性廃液蒸発缶の濃縮廃濃度上昇 高放射性廃液蒸発缶の加熱コイルの腐食 高放射性廃液蒸発缶の腐食による故障 高放射性廃液蒸発缶の放射性物質量増加 高放射性廃液蒸発缶の水素発生量増加 高放射性廃液蒸発缶の爆発の可能性

表 6.3 「高放射性廃液蒸発缶で高放射性廃液の流量増加」に対する HAZOP 解析結果

(a) 核燃料サイクル開発機構による HAZOP 解析結果

工程	高放射性廃液濃縮工程
機器名	高放射性廃液蒸発缶
「ずれ」	高放射性廃液の流量増加
考えられる原因	気液分離器からの高放射性廃液流入量増加
起こり得る影響	高放射性廃液蒸発缶への高放射性廃液流入量増加 高放射性廃液蒸発缶の液位上昇 高放射性廃液蒸発缶の濃縮廃液酸度上昇

(b) 本システムによる HAZOP 自動解析結果

工程	高放射性廃液濃縮工程
機器名	高放射性廃液蒸発缶
「ずれ」	高放射性廃液の流量増加
考えられる原因	気液分離器の液位上昇 エアリフトの液位上昇 吸水槽の液位上昇 吸水槽本体の故障 圧空弁の故障 誤操作による手動弁開 誤操作による圧空弁開け過ぎ 誤操作によるバイパス弁開 圧縮空気系からの圧縮空気流量増加
起こり得る影響	高放射性廃液蒸発缶の液位上昇 高放射性廃液蒸発缶の濃縮廃液酸度上昇 加熱コイルの加熱機能喪失または低下

表 6.4 「高放射性廃液蒸発缶で蒸気流量増加」に対する HAZOP 解析結果

(a) 核燃料サイクル開発機構による HAZOP 解析結果

工程	高放射性廃液濃縮工程
機器名	高放射性廃液蒸発缶
「ずれ」	蒸気流量増加
考えられる原因	減温装置からの蒸気流量増加
起こり得る影響	高放射性廃液蒸発缶加熱コイルへの蒸気流量増加 高放射性廃液蒸発缶加熱コイルの加熱機能向上による処理量増加 高放射性廃液蒸発缶内の液位低下 高放射性廃液蒸発缶内濃縮廃液の温度上昇 高放射性廃液蒸発缶内の負圧変動 高放射性廃液蒸発缶塔頂部の負圧変動 高放射性廃液蒸発缶内の DF 低下 加熱蒸気温度が 135 度を越える可能性あり

(b) 本システムによる HAZOP 自動解析結果

工程	高放射性廃液濃縮工程
機器名	高放射性廃液蒸発缶
「ずれ」	蒸気流量増加
考えられる原因	減温装置からの蒸気流量増加 誤操作による手動弁開 誤操作によるバイパス弁開 誤操作による圧力弁の開け過ぎ
起こり得る影響	高放射性廃液蒸発缶加熱コイルの加熱機能向上による処理量増加 高放射性廃液蒸発缶内の液位低下 高放射性廃液蒸発缶内濃縮廃液の温度上昇 高放射性廃液蒸発缶内の負圧変動 高放射性廃液蒸発缶塔頂部の負圧変動 高放射性廃液蒸発缶内の DF 低下 加熱蒸気温度が 135 度を越える可能性あり 接続部からの漏れ 冷却用ジャケットパイプから冷却水混入 放射性物質の漏れ 蒸気系へ流量増加

表 6.5 「高放射性廃液蒸発缶でホルマリンの流量増加」に対する HAZOP 解析結果

(a) 核燃料サイクル開発機構による HAZOP 解析結果

工程	高放射性廃液濃縮工程
機器名	高放射性廃液蒸発缶
「ずれ」	ホルマリン溶液の流量増加
考えられる原因	気液分離器からのホルマリン溶液流入増加 誤操作による手動弁開け過ぎ 誤操作によるバイパス弁開
起こり得る影響	高放射性廃液蒸発缶へのホルマリン溶液流入量増加 高放射性廃液蒸発缶内のアルデヒド蓄積 高放射性廃液蒸発缶内の異常反応 高放射性廃液蒸発缶内の突沸 高放射性廃液蒸発缶内の DF 低下 窒素酸化物の発生量増加 高放射性廃液蒸発缶内濃縮廃液酸度低下

(b) 本システムによる HAZOP 自動解析結果

工程	高放射性廃液濃縮工程
機器名	高放射性廃液蒸発缶
「ずれ」	ホルマリン溶液の流量増加
考えられる原因	誤操作による手動弁開け過ぎ 誤操作によるバイパス弁開け過ぎ ホルマリン系からのホルマリン溶液流量増加
起こり得る影響	高放射性廃液蒸発缶へのホルマリン溶液流入量増加 高放射性廃液蒸発缶内のアルデヒド蓄積 高放射性廃液蒸発缶内の異常反応 高放射性廃液蒸発缶内の突沸 高放射性廃液蒸発缶内の DF 低下 窒素酸化物の発生量増加 高放射性廃液蒸発缶内濃縮廃液酸度低下 高放射性廃液蒸発缶の火災・爆発の可能性

表 6.6 「空気吹き込み塔で硝酸溶液の流量減少」に対する HAZOP 解析結果

(a) 核燃料サイクル開発機構による HAZOP 解析結果

工程	高放射性廃液濃縮工程
機器名	空気吹き込み塔
「ずれ」	硝酸溶液の流量減少
考えられる原因	ポンプからの硝酸溶液流入減少 配管の部分的閉塞 配管の破損 ポンプの送液機能低下 フランジ接続部からの漏洩 オリフィスの閉塞 圧空弁の故障 圧縮空気系計装エア圧力不足による圧空弁開度不足
起こり得る影響	空気吹き込み塔への硝酸溶液流入減少

(b) 本システムによる HAZOP 自動解析結果

工程	高放射性廃液濃縮工程
機器名	空気吹き込み塔
「ずれ」	硝酸溶液の流量減少
考えられる原因	圧空弁からの硝酸溶液流入減少 圧空弁の故障 オリフィスの閉塞 圧空弁の接続部からの漏洩 圧空弁開度不足 配管の部分的閉塞 配管の破損 誤操作による圧空弁閉 ポンプの送液機能喪失 中間貯槽の内部液位低下 中間貯槽の故障 中間貯槽の出口部閉塞 中間貯槽の配管閉塞・破損 酸吸收塔の故障 酸吸收塔の配管の閉塞・破損 酸吸收塔の底部閉塞
起こり得る影響	なし

表 6.7 「ポンプで硝酸溶液の濃度低下」に対する HAZOP 解析結果

(a) 核燃料サイクル開発機構による HAZOP 解析結果

工程	高放射性廃液濃縮工程
機器名	ポンプ
「ずれ」	硝酸溶液の濃度低下
考えられる原因	中間貯槽からの濃度が低下した硝酸溶液流入
起り得る影響	ポンプへの濃度が低下した硝酸溶液流入

(b) 本システムによる HAZOP 自動解析結果

工程	高放射性廃液濃縮工程
機器名	ポンプ
「ずれ」	硝酸溶液の濃度低下
考えられる原因	中間貯槽からの濃度が低下した硝酸溶液流入 中間貯槽内部の硝酸溶液の濃度低下 酸吸收塔の機能低下 酸吸收塔の配管の破損 冷却器の配管の部分的閉塞・破損 冷却器の機能喪失・低下 凝縮器の凝縮液の酸度低下 凝縮器の配管の部分的閉塞 凝縮器の送液機能喪失・低下 凝縮器本体の破損 凝縮器の内部温度上昇 溢流槽の配管の部分的閉塞 溢流槽本体の破損 溢流槽の内部の液位低下 溢流槽の底部閉塞 溢流槽の内部温度上昇
起り得る影響	中間貯槽硝酸濃度低下 加熱器硝酸濃度低下 冷却器硝酸濃度低下

6.6.2 プルトニウム濃縮工程に対する HAZOP 解析結果

図 6.23 にプルトニウム濃縮工程の概要図を示す。プルトニウム精製工程のプルトニウム精製第 2 抽出器などで精製された硝酸プルトニウム溶液は、希釀洗浄機へ送られ、希釀剤（ノルマルドデカン）により水相に同伴したリン酸トリブチル（TBP）を洗浄除去したのち、プルトニウム中間貯槽へ送り、プルトニウム溶液蒸発缶において蒸発濃縮する。プルトニウム溶液蒸発缶の加熱部からの気相は、プルトニウム溶液蒸発缶の塔部において泡鐘棚段で硝酸と向流接触させることで気相中に含まれるプルトニウムを除去した後に、凝縮器で凝縮する。また、凝縮器を経たプルトニウム溶液蒸発缶からの廃気は、洗浄塔においてさらに硝酸で洗浄したのちに、放射性廃棄物施設へと送られる。

プルトニウム濃縮工程に対する解析結果を表 6.8～表 6.22 に示す。

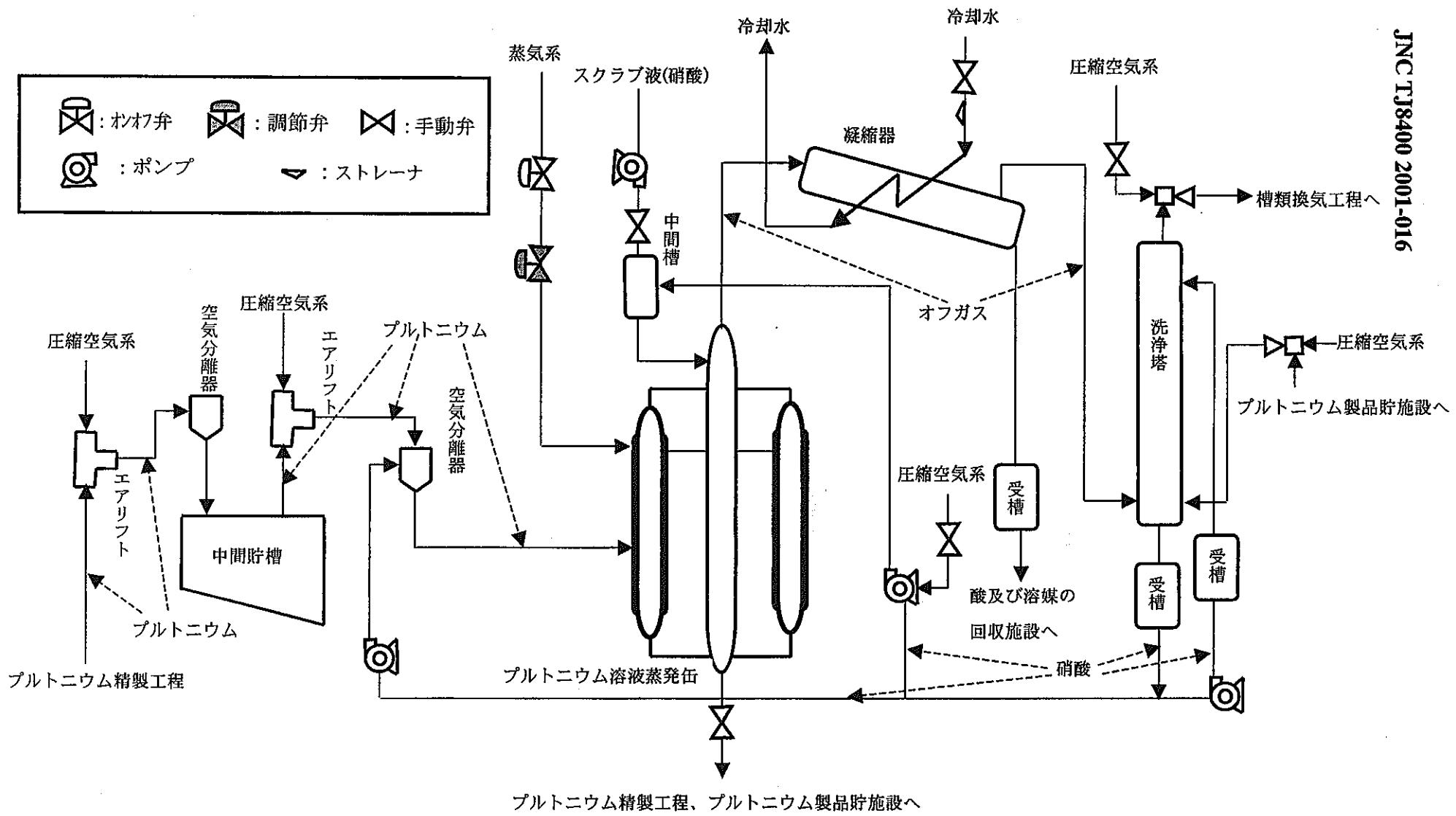


図 6.23 プルトニウム濃縮工程概要図

表 6.8 「アリフトでプルトニウム溶液の流量なし」に対する HAZOP 解析結果

(a) 核燃料サイクル開発機構による HAZOP 解析結果

工程	プルトニウム溶液濃縮工程
機器名	エアリフト
「ずれ」	プルトニウムの流量なし
考えられる原因	機器、配管の破損 機器、配管の閉塞 中間貯槽が空 エアリフト吸い込み口付近におけるエアロック
起こり得る影響	中間貯槽へのプルトニウム溶液の流量がなく、液移送不可 中間貯槽の液位上昇 セル内へのプルトニウム溶液漏洩

(b) 本システムによる HAZOP 自動解析結果

工程	プルトニウム溶液濃縮工程
機器名	エアリフト
「ずれ」	プルトニウムの流量なし
考えられる原因	配管の破損 配管の閉塞 中間貯槽の液位減少 中間貯槽の破損 中間貯槽の出口部閉塞 気液分離器の液位減少 気液分離器の破損 気液分離器の下部の閉塞
起こり得る影響	エアリフトの送液機能喪失 エアリフトの液位低下

表 6.9 「エアリフトでプルトニウム溶液の流量減少」に対する HAZOP 解析結果

(a) 核燃料サイクル開発機構による HAZOP 解析結果

工程	プルトニウム溶液濃縮工程
機器名	エアリフト
「ずれ」	プルトニウムの流量減少
考えられる原因	機器、配管の破損 機器、配管の部分閉塞 エアリフト吸い込み口付近におけるエアロック
起こり得る影響	中間貯槽へのプルトニウム溶液の流量がなく、液移送量減少 中間貯槽の液位低下率現象 セル内へのプルトニウム溶液漏洩

(b) 本システムによる HAZOP 自動解析結果

工程	プルトニウム溶液濃縮工程
機器名	エアリフト
「ずれ」	プルトニウムの流量減少
考えられる原因	配管の破損 配管の部分的閉塞 中間貯槽の液位減少 中間貯槽の破損 中間貯槽の出口部の部分的閉塞 気液分離器の液位減少 気液分離器の破損 気液分離器の下部の部分的閉塞
起こり得る影響	エアリフトの送液機能低下 エアリフトの液位低下

表 6.10 「エアリフトで圧縮空気の流量なし」に対する HAZOP 解析結果

(a) 核燃料サイクル開発機構による HAZOP 解析結果

工程	プルトニウム溶液濃縮工程
機器名	エアリフト
「ずれ」	圧縮空気の流量なし
考えられる原因	配管、流量計などの破損 配管、ストレーナの閉塞 ユーティリティ系の異常 手動弁閉（誤操作）
起こり得る影響	エアリフトへの圧縮空気の流量がなく、液移送不可 ドリップトレインラインへのプルトニウム溶液漏洩 配管敷設区域への圧空漏洩

(b) 本システムによる HAZOP 自動解析結果

工程	プルトニウム溶液濃縮工程
機器名	エアリフト
「ずれ」	圧縮空気の流量なし
考えられる原因	配管の破損 配管の閉塞 ストレーナの閉塞 誤操作による手動弁の閉 圧縮空気系からの圧縮空気の流量なし
起こり得る影響	エアリフトの内部圧力低下 エアリフトの送液機能低下

表 6.11 「エアリフトで圧縮空気の流量減少」に対する HAZOP 解析結果

(a) 核燃料サイクル開発機構による HAZOP 解析結果

工程	プルトニウム溶液濃縮工程
機器名	エアリフト
「ずれ」	圧縮空気の流量減少
考えられる原因	圧空配管、流量計などの破損 圧空配管、ストレーナの閉塞 ユーティリティ系の異常 手動弁の不十分な開度（誤操作）
起こり得る影響	エアリフトへの圧縮空気の流量が少なく、液移送量も減少 ドリップトレイドレンラインへのプルトニウム溶液漏洩 配管敷設区域への圧空漏洩

(b) 本システムによる HAZOP 自動解析結果

工程	プルトニウム溶液濃縮工程
機器名	エアリフト
「ずれ」	圧縮空気の流量減少
考えられる原因	配管の部分的閉塞 配管の破損 ストレーナの部分的閉塞 誤操作による手動弁の開度不足 圧縮空気系からの圧縮空気の流量減少
起こり得る影響	エアリフトの内部圧力低下 エアリフトの送液機能低下

表 6.12 「エアリフトで圧縮空気の流量増加」に対する HAZOP 解析結果

(a) 核燃料サイクル開発機構による HAZOP 解析結果

工程	プルトニウム溶液濃縮工程
機器名	エアリフト
「ずれ」	圧縮空気の流量増加
考えられる原因	手動弁の開け過ぎ（誤操作） ユーティリティ系の異常
起こり得る影響	（ピーク値まで液移送量は増大するが、ピーク値以上で減少する） 液移送量増大 液移送量減少 エアリフト内プルトニウム溶液中の圧空量増大

(b) 本システムによる HAZOP 自動解析結果

工程	プルトニウム溶液濃縮工程
機器名	エアリフト
「ずれ」	圧縮空気の流量増加
考えられる原因	誤操作による手動弁開け過ぎ 圧縮空気系からの圧縮空気の流量増加
起こり得る影響	エアリフト内部圧力増加 エアリフト内液位上昇 エアリフトの送液機能低下 エアリフトの送液機能向上

表 6.13 「洗浄塔でオフガスの流量なし」に対する HAZOP 解析結果

(a) 核燃料サイクル開発機構による HAZOP 解析結果

工程	プルトニウム製品貯蔵工程
機器名	オフガス
「ずれ」	オフガスの流量なし
考えられる原因	配管の閉塞
起こり得る影響	洗浄塔へのオフガス流入なし→洗浄塔の負圧が深くなる可能性がある

(b) 本システムによる HAZOP 自動解析結果

工程	プルトニウム製品貯蔵工程
機器名	オフガス
「ずれ」	オフガスの流量なし
考えられる原因	配管の閉塞 配管の破損 凝縮器の内部圧力低下 凝縮器の温度低下 凝縮器のペント系配管出口部の部分的閉塞 誤操作による手動弁の開け過ぎ 冷却水系からの冷却水流量増加
起こり得る影響	洗浄塔の内部温度低下 洗浄塔の内部圧力低下 洗浄塔の凝縮液酸度低下 洗浄塔の内部負圧変化 洗浄塔のオフガス空気混入 洗浄塔のペント系配管へオフガス逆流 中間貯槽の液位低下 ポンプの空運転 ポンプの故障

表 6.14 「洗浄塔でオフガスの流量減少」に対する HAZOP 解析結果

(a) 核燃料サイクル開発機構による HAZOP 解析結果

工程	プルトニウム製品貯蔵工程
機器名	オフガス
「ずれ」	オフガスの流量減少
考えられる原因	配管の部分閉塞 関連機器からのオフガス供給量減少
起り得る影響	洗浄塔へのオフガス流入減少→洗浄塔の負圧が深くなる可能性がある

(b) 本システムによる HAZOP 自動解析結果

工程	プルトニウム製品貯蔵工程
機器名	オフガス
「ずれ」	オフガスの流量なし
考えられる原因	配管の閉塞 配管の破損 凝縮器の内部圧力低下 凝縮器の温度低下 凝縮器のベント系配管出口部の部分的閉塞 誤操作による手動弁の開け過ぎ 冷却水系からの冷却水流量増加
起り得る影響	洗浄塔の内部温度低下 洗浄塔の内部圧力低下 洗浄塔の凝縮液酸度低下 洗浄塔の内部負圧変化 洗浄塔のオフガス空気混入 洗浄塔のベント系配管へオフガス逆流 中間貯槽の液位低下 ポンプの空運転 ポンプの故障

表 6.15 「洗浄塔でオフガスの流量増加」に対する HAZOP 解析結果

(a) 核燃料サイクル開発機構による HAZOP 解析結果

工程	プルトニウム製品貯蔵工程
機器名	オフガス
「ずれ」	オフガスの流量増加
考えられる原因	配管の破損 関連機器からのオフガス供給増大 各グローブボックス及び各セルなどのドリップトレイドレンラインの水封破壊によるセル換気との接続
起り得る影響	セル内空気が洗浄塔へ流入 洗浄塔の負圧が浅くなる 洗浄塔へのオフガス流入量増大

(b) 本システムによる HAZOP 自動解析結果

工程	プルトニウム製品貯蔵工程
機器名	オフガス
「ずれ」	オフガスの流量増加
考えられる原因	配管の閉塞, 部分的閉塞 配管の破損 凝縮器の内部温度上昇 ストレーナの閉塞, 部分的閉塞 誤操作による手動弁の開度不足 誤操作による手動弁閉 冷却水系からの冷却水流量なし, 減少
起り得る影響	洗浄塔の内部温度低下 洗浄塔の内部圧力増加 洗浄塔の酸度上昇 洗浄塔の負圧が浅くなる 中間貯槽の液位上昇

表 6.16 「洗浄塔でスクラップ液の流量なし」に対する HAZOP 解析結果

(a) 核燃料サイクル開発機構による HAZOP 解析結果

工程	プルトニウム製品貯蔵工程
機器名	洗浄塔
「ずれ」	スクラップ液の流量なし
考えられる原因	配管の破損 配管の閉塞 ポンプの故障及びストローク調整ミス タンクが空
起こり得る影響	洗浄塔にスクラップ液流量なし 洗浄効率の回復不可 配管敷設区域へのスクラップ液の漏洩

(b) 本システムによる HAZOP 自動解析結果

工程	プルトニウム製品貯蔵工程
機器名	洗浄塔
「ずれ」	スクラップ液の流量なし
考えられる原因	配管の破損 配管の閉塞 誤操作によるポンプの停止 ポンプの送液機能喪失
起こり得る影響	洗浄塔の内部の酸度上昇 洗浄塔の放射性物質移行量増加 洗浄塔の頭頂部と下部の圧力低下

表 6.17 「冷却器で冷却水の流量なし」に対する HAZOP 解析結果

(a) 核燃料サイクル開発機構による HAZOP 解析結果

工程	プルトニウム溶液濃縮工程
機器名	冷却器
「ずれ」	冷却水の流量なし
考えられる原因	配管、ストレーナなどの閉塞 手動弁の閉（誤操作） ユーティリティ系の異常
起こり得る影響	冷却器への冷却水の流入がなく、蒸気凝縮水を冷却できない

(b) 本システムによる HAZOP 自動解析結果

工程	プルトニウム溶液濃縮工程
機器名	冷却器
「ずれ」	冷却水の流量なし
考えられる原因	配管の閉塞 配管の破損 オリフィスの閉塞 ストレーナの閉塞 誤操作による手動弁の閉 冷却水系からの冷却水の流量なし
起こり得る影響	冷却器の内部温度上昇 冷却器の機能低下

表 6.18 「冷却器で冷却水の流量減少」に対する HAZOP 解析結果

(a) 核燃料サイクル開発機構による HAZOP 解析結果

工程	プルトニウム溶液濃縮工程
機器名	冷却器
「ずれ」	冷却水の流量減少
考えられる原因	配管の破損 配管、ストレーナなどの部分閉塞 手動弁の不十分な開(誤操作) ユーティリティ系の異常
起こり得る影響	冷却器への冷却水の流入が少なく、凝縮水の冷却効率低下 配管敷設区域への冷却水漏洩

(b) 本システムによる HAZOP 自動解析結果

工程	プルトニウム溶液濃縮工程
機器名	冷却器
「ずれ」	冷却水の流量なし
考えられる原因	配管の部分的閉塞 配管の破損 オリフィスの部分的閉塞 ストレーナの部分的閉塞 誤操作による手動弁の開度不足 冷却水系からの冷却水の流量減少
起こり得る影響	冷却器の内部温度上昇 冷却器の機能低下

表 6.19 「冷却器で蒸気凝縮水の流量なし」に対する HAZOP 解析結果

(a) 核燃料サイクル開発機構による HAZOP 解析結果

工程	プルトニウム溶液濃縮工程
機器名	冷却器
「ずれ」	蒸気凝縮水の流量なし
考えられる原因	機器、配管の破損 配管、ストレーナなどの閉塞 手動弁の閉(誤操作) 遮断弁の閉(誤操作) スチームトラップの作動不良 手動弁の開(誤操作)
起こり得る影響	冷却器への蒸気凝縮水の流入なし 蒸発缶の加熱不可 配管敷設区域への蒸気凝縮水漏洩 αRP^+ を経由しないで次の工程へ蒸気凝縮水が流出

(b) 本システムによる HAZOP 自動解析結果

工程	プルトニウム溶液濃縮工程
機器名	冷却器
「ずれ」	蒸気凝縮水の流量なし
考えられる原因	配管の破損 配管の閉塞 サイトグラスの破損 スチームトラップの機能低下 ストレーナの閉塞 誤操作による手動弁の閉 誤操作による施錠弁の閉 プルトニウム溶液蒸発缶の液位上昇 プルトニウム溶液蒸発缶の液位低下 プルトニウム溶液蒸発缶の加熱コイル閉塞、破損
起こり得る影響	冷却器への蒸気凝縮水の流入なし

表 6.20 「冷却器の蒸気凝縮水の流量減少」に対する HAZOP 解析結果

(a) 核燃料サイクル開発機構による HAZOP 解析結果

工程	プルトニウム溶液濃縮工程
機器名	冷却器
「ずれ」	蒸気凝縮水の流量減少
考えられる原因	機器、配管の破損 配管、ストレーナなどの部分閉塞 手動弁の不十分な開（誤操作） 遮断弁の不十分な開（誤操作） スチームトラップの作動不良 手動弁の不十分な閉（誤操作）
起こり得る影響	冷却器への蒸気凝縮水の流入量減少 蒸発缶の処理能力低下 配管敷設区域への蒸気凝縮水漏洩 αRP^+ を経由しないで次の工程へ蒸気凝縮水が流出する可能性あり

(b) 本システムによる HAZOP 自動解析結果

工程	プルトニウム溶液濃縮工程
機器名	冷却器
「ずれ」	蒸気凝縮水の流量なし
考えられる原因	配管の破損 配管の部分的閉塞 スチームトラップの機能低下 ストレーナの部分的閉塞 誤操作による手動弁の開度不足 誤操作による施錠弁の開度不足 プルトニウム溶液蒸発缶の液位上昇 プルトニウム溶液蒸発缶の液位低下 プルトニウム溶液蒸発缶の加熱コイル閉塞、破損
起こり得る影響	冷却器への蒸気凝縮水の流入減少

表 6.21 「溢流ポットの蒸気凝縮水の流量なし」に対する HAZOP 解析結果

(a) 核燃料サイクル開発機構による HAZOP 解析結果

工程	プルトニウム溶液濃縮工程
機器名	溢流ポット
「ずれ」	蒸気凝縮水の流量なし
考えられる原因	配管の破損 配管の閉塞 冷却器からの蒸気凝縮水の供給なし
起こり得る影響	溢流ポットへ蒸気凝縮水の流量がなく液移送不可 ドリップトレイドレンラインへの蒸気凝縮水漏洩

(b) 本システムによる HAZOP 自動解析結果

工程	プルトニウム溶液濃縮工程
機器名	溢流ポット
「ずれ」	蒸気凝縮水の流量なし
考えられる原因	配管の破損 配管の閉塞 冷却器からの蒸気凝縮水の供給なし
起こり得る影響	溢流ポットの液位低下 次の工程へ蒸気凝縮水の流量なし

表 6.22 「溢流ポットの蒸気凝縮水の流量減少」に対する HAZOP 解析結果

(a) 核燃料サイクル開発機構による HAZOP 解析結果

工程	プルトニウム溶液濃縮工程
機器名	溢流ポット
「ずれ」	蒸気凝縮水の流量減少
考えられる原因	配管の破損 配管の部分閉塞 冷却器からの蒸気凝縮水の供給量減少
起り得る影響	溢流ポットへ蒸気凝縮水の流量がなく液移送量減少 ドリップトレーデンラインへの蒸気凝縮水漏洩

(b) 本システムによる HAZOP 自動解析結果

工程	プルトニウム溶液濃縮工程
機器名	溢流ポット
「ずれ」	蒸気凝縮水の流量減少
考えられる原因	配管の破損 配管の部分閉塞 冷却器からの蒸気凝縮水の供給量減少
起り得る影響	溢流ポットの液位低下 次の工程へ蒸気凝縮水の流量減少

6.6.3 考察

今回改良した HAZOP 解析システムを高放射性廃液処理工程に適用した結果、昨年同様、核燃料サイクル開発機構で実施された HAZOP 解析結果よりも詳細な解析結果を得ることができた。これは要素の基本モデルを基に、プラント内の異常伝播構造を考慮に入れた解析を行っているためである。また、解析結果は、昨年度までに提案した HAZOP 解析システムによるものとほぼ同じであった。これは一般的知識ベースの内容自体は変更されていないためである。

新規例題として、プルトニウム濃縮工程に適用した。今回の解析では、高放射性廃液濃縮工程の解析に用いたデータをプルトニウム濃縮工程の解析にどの程度適用できるか（再利用可能か）を調べた。解析結果として、原因・影響の欄には、機器の故障や操作ミスに関する異常、前後工程へ伝播する異常については出力されているが、物質の異常に関しては出力されていない。例えば、表 6.19 の冷却器での蒸気凝縮水の流量に関する異常についての解析では、蒸発缶内での反応に関する影響は出力されていない。その他の解析結果についても同様に、核燃料サイクル開発機構による解析結果と比べ、ずれに対する影響の欄の結果は少ない。解析結果が不十分であることの原因として、プルトニウム濃縮工程に関連する物質の情報が固有知識ベースに格納されていなかったことが挙げられる。この点については物質異常に関するデータベースを拡張追加しておくことにより解決可能である。

問題点をまとめると、プラントの設計変更などが行われる場合、プラント固有の反応に関する情報や一般的知識ベースに存在しない装置に関する情報を追加しなければならない。また現在の HAZOP システムでは、異常伝播解析を行う際に同一の異常伝播経路を探索する場合があり、重複した解析結果が出力される場合もあった。これらは解析のための探索ルールを改良することにより解決可能である。

7. 危険評価統合環境

7.1 システム概要

5章で述べたように、安全設計を系統的に実施するために、従来のように、HAZOP, FTA, ETA から得られる危険評価情報では不十分である。すなわち、異常時対応操作を含めた安全系を設計するためには、異常伝播速度が重要な要素であり、異常時プロセス挙動を動的にモデル化するためのダイナミックシミュレータが必要であり、図 7.1 に示すように、ハザード解析システム（HAZOP 解析システム）、ダイナミックシミュレータ、発生頻度解析システム（FTA, ETA システム）、影響度解析システム（DOW 法解析システム）を各モジュールとした統合危険評価システムを開発する必要がある。また、今後、IT を活用して、ネットワークを通じての安全系設計共同作業環境、情報の共有化などの必要性が強まることが考えられ、危険評価手法の自動化、統合的危険評価システムの開発が重要となる。

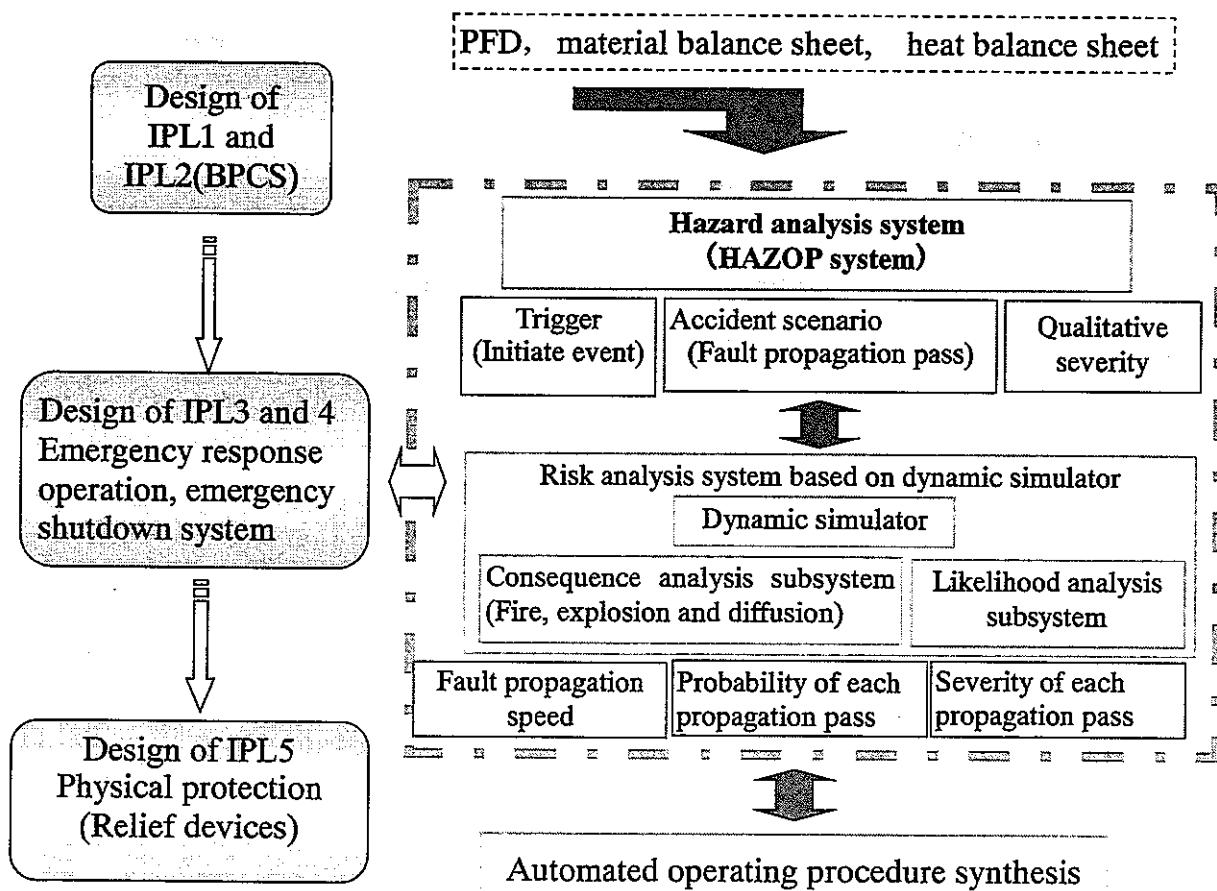


図 7.1 危険評価システム

このシステムは図 7.2 に示す手順で危険評価を実行する。図 7.2 に示すように、最初に解析対象プロセスに関する情報を入力する。このプロセスに対して、HAZARD 解析モジュールで HAZOP 解析を実行し、原因事象、定性的重要な度、定性的発生頻度を推定し、重大事故事象を抽出する。この重大事故の引き金事象を Trigger として、プロセス異常時の挙動をシミュレートする。シミュレーションにより得られるパラメータ（温度、圧力など）変動値と設備の許容値を比較し、装置が破損するかどうかの判定を行う。温度又は圧力が許容値を超えない場合はシミュレーションを続行する。許容値を超えた場合は被害度と発生確率の解析を行い、リスクを算出する。

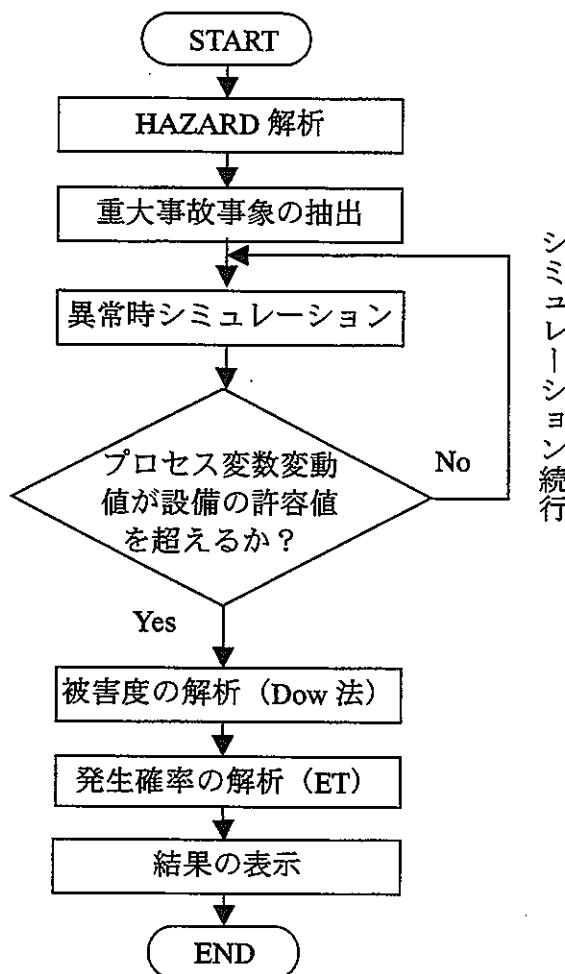


図 7.2 危険評価実行手順

7.2 解析例

図 7.3 に示す HDS (HydrogenDesulfurization System) プロセスを解析対象とした。HDS プロセスは、水素との反応を通じてディーゼルから硫黄を除去するプロセスであり、反応、分離などの機能ごとに、Feed Area, Reaction Area, First Separation Area, Second Separation Area に大きく分けられる。

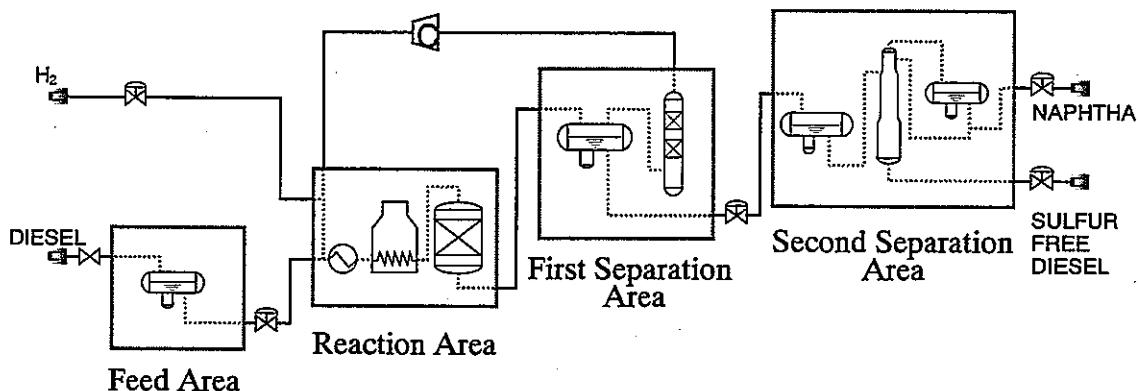


図 7.3 HDS プロセスの概要

Feed Area は Feed Surge Drum と Feed Pump などにより構成される。ここでは原油蒸留ユニットからの Diesel が Feed Surge Drum に入り、Feed Pump により Reaction Area へと送られる。

Reaction Area は Reactor Effluent Exchanger, Reactor Charge Furnace, Reactor と Cooler などで構成される。ここで Diesel は濃い水素のガスと混合され、Reactor Effluent Exchanger と Reactor Charge Furnace で脱硫反応に必要な温度まで加熱される。その後 Reactor で水素が硫黄化合物と反応し、 H_2S と液体生成物の形となる。Reactor の廃液は冷却され、First Separation Area に送られる。

First Separation Area は主に High-Pressure Separator, Amine Scrubber, Compressor から構成される。冷却された Reactor の廃液は Reactor Effluent Condenser により凝縮され、High-Pressure Separator でガスと液体の最初の分離が行われる。High-Pressure Separator からの濃い水素ガス混合物は原料としてリサイクルされる前に Amine Scrubber に送られ、 H_2S が除去される。未反応の水素は遠心性の Compressor を通して再利用され、供給原料と混合される。High-Pressure Separator からの液体は Second Separation Area に送られる。

Second Separation Area は Low-Pressure Separator, Stripper, Stripper Bottoms Pump, Stripper Overhead Condenser, Stripper Overhead Receiver と Reflux Pump などで構成される。

本報告書では、図 7.4 に示す Second Separation Area についての解析例を示す。Second Separation Area では Low-Pressure Separator からの液体は Stripper へと流れる。Stripper では残留している H_2S が除去され、Diesel の特性が制御される。Stripper Overhead は Stripper Overhead Condenser において空気により部分的に凝縮され、Stripper Overhead Receiver に流れる。

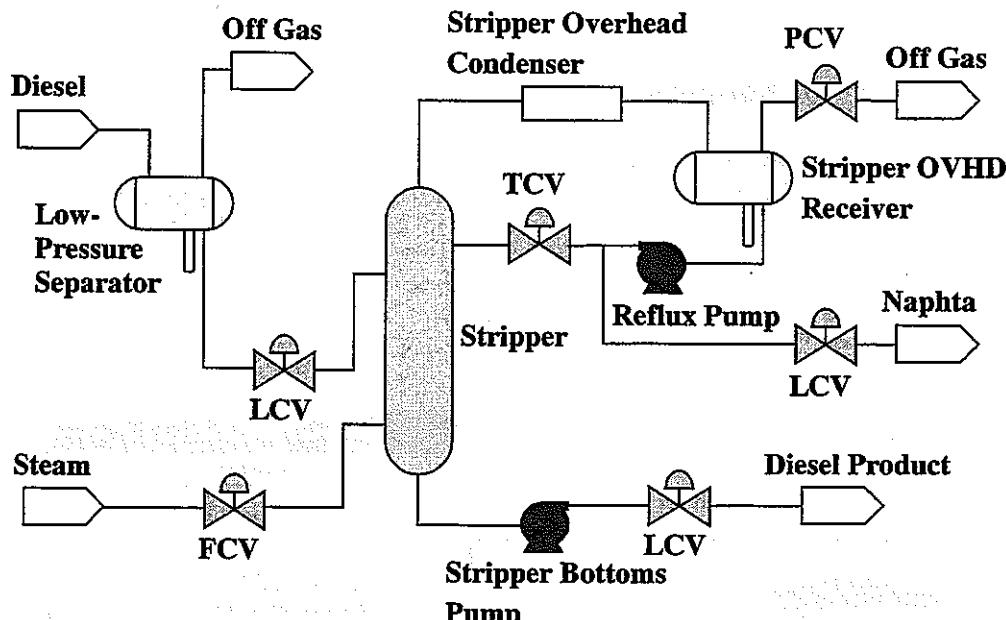


図 7.4 解析対象

Stripper Overhead Receiver からの液体の一部は Stripper の最後部に還流として戻り、残りは Wild Naphtha として取り出される。製品は脱硫され、Stripper 底部から取り出される。

このプロセスの危険評価を実施するために、図 7.5 に示すように、危険評価システムの Specific KB に、プロセス流体に関する情報、プロセスフロー、構成要素に関する情報を入力する。このプロセスフローシートに対して、ずれ (Deviation) を設定する。システムは HAZOP 解析を実行し、異常（ずれ）の原因と影響事象を HAZOP の表形式で出力する。この結果を基に、重大事故事象を抽出する。HAZOP 解析の結果より得られた重大事故事象の原因（装置故障）を引き金としてダイナミックシミュレータを起動する。

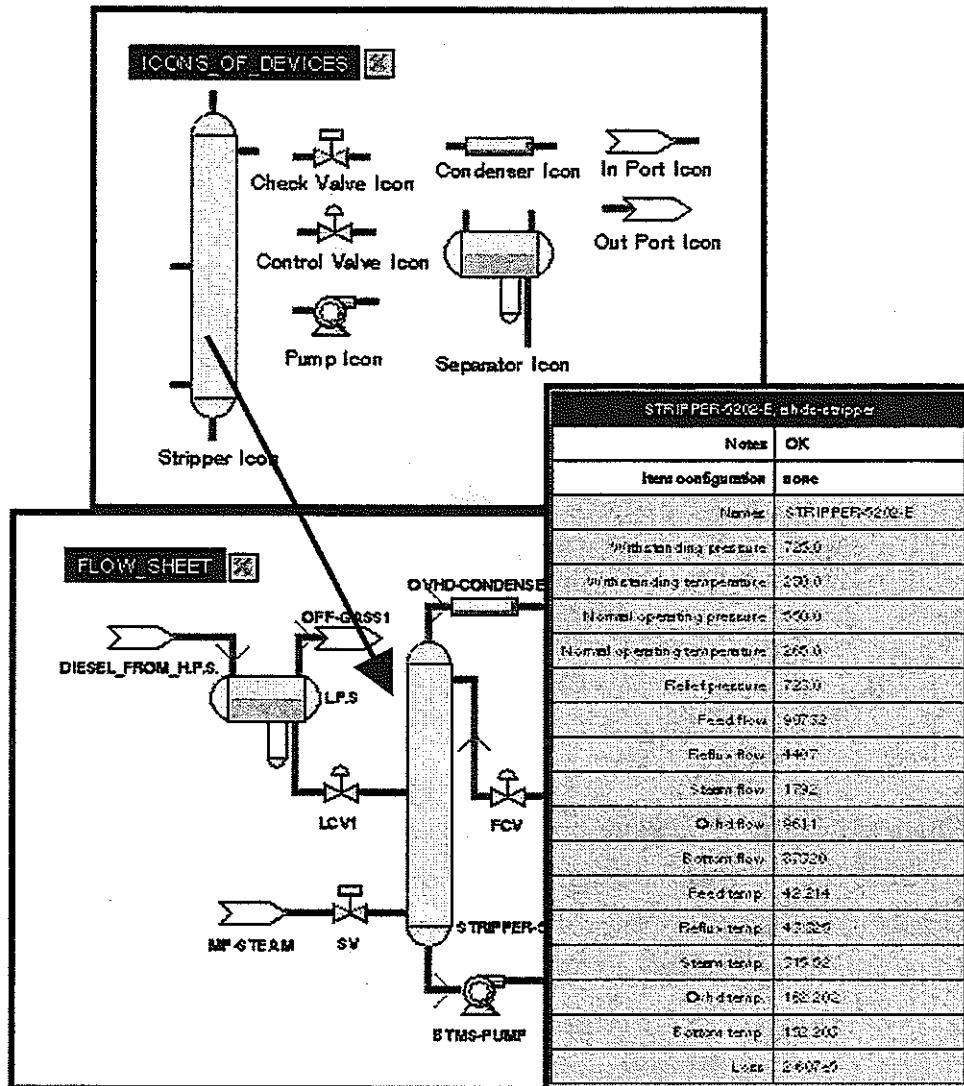


図 7.5 プロセスフローの作成と情報の入力

ここでは “蒸留塔のフィード流量を制御しているバルブ LCV1 の故障により流量が正常時の 10%減少する” という引き金事象が発生している場合、全保護システムが失敗するという事故シナリオを想定する。ダイナミックシミュレータを起動し、異常時の動的な挙動を求める。図 7.6 に蒸留塔内の温度及び圧力の挙動を示す。図 7.6 中で、①Simulation Time はシミュレーションの開始から終了までの時間、②Trigger は想定した引き金事象、③Probability は事故事象発生確率、④Fire and Explosion Index は F&EI の値を示す。

すべての安全設備が作動しない場合、蒸留塔内圧力は許容値を超え、爆発する可能性がある。この事故による災害影響度を Dow 法により算出する¹²⁾。Dow 法は Fire and Explosion Index (F&EI) を影響の大きさ、すなわち被害度として算出する方法である。

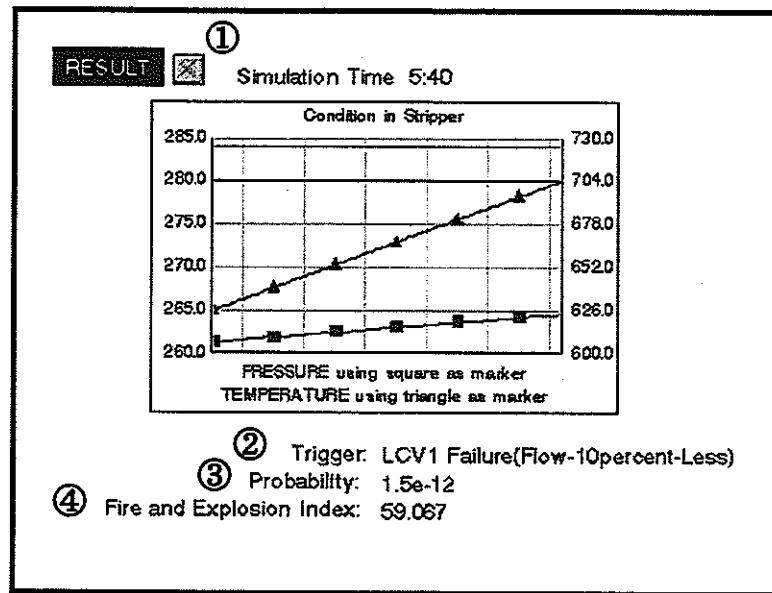


図 7.6 蒸留塔内温度、圧力挙動

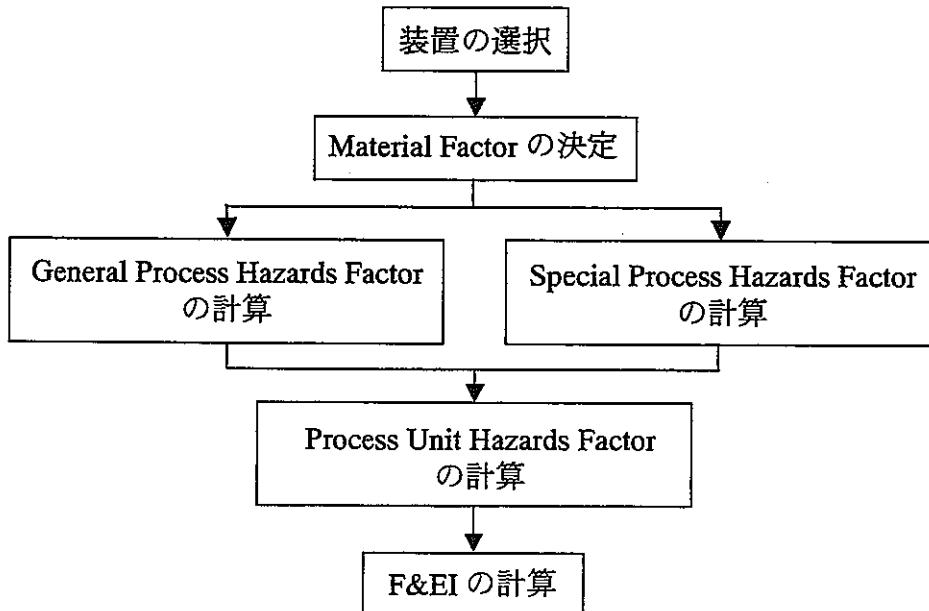


図 7.7 F&EI 計算手順

図 7.7 に示すように、最初にプロセスにとって重要な装置、あるいは火災・爆発による衝撃が最大であると考えられる装置を選択し、プロセス流体の Material Factor を決定する。Material Factor は燃焼又は化学反応による火炎や爆発のエネルギーの大きさを表す指標である。次にプロセスの設備、物質、操作などに対してペナルティを決定し、ペナルティの合計から General Process Hazards

Factor と Special Process Hazards Factor を算出する。これらの値から Process Unit Hazards Factor を計算し、これと Material Factor の積により F&EI の値を得る。表 7.1 に F&EI の大きさとハザードの大きさの関係を示す。F&EI を計算する過程で得られる情報は Fire & Explosion Index Form にまとめる。

General Process Hazards は、ほとんどのプロセスの状況に当てはめることができ、火災や爆発事故において、重大な影響を与える特性である。これらについてのペナルティと Base Factor との和として General Process Hazards Factor が得られる。

Special Process Hazards は火災や爆発事故の主要原因となるプロセス固有の特性である。これらについてのペナルティと Base Factor との和として、Special Process Hazards Factor を得る。

危険評価システムでは、図 7.7 に示すように、プロセスハザード入力フォームの値からペナルティを算出し、それらの合計から General Process Hazards Factor と Special Process Hazards Factor を求める（図中①）。これらの値から Process Unit Hazards Factor を求め（図中②）、Material Factor との積により F&EI の値を得る（図中③）。解析の結果、図 7.8 に示すように、59.067 の値を得ることができ、この場合、ハザードの大きさは Light と判定される。

表 7.1 F&EI の大きさとハザードの大きさの関係

F&EI INDEX RANGE	DEGREE OF HAZARD
1 - 60	Light
61 - 96	Moderate
97 - 127	Intermediate
128 - 158	Heavy
158 - up	Severe

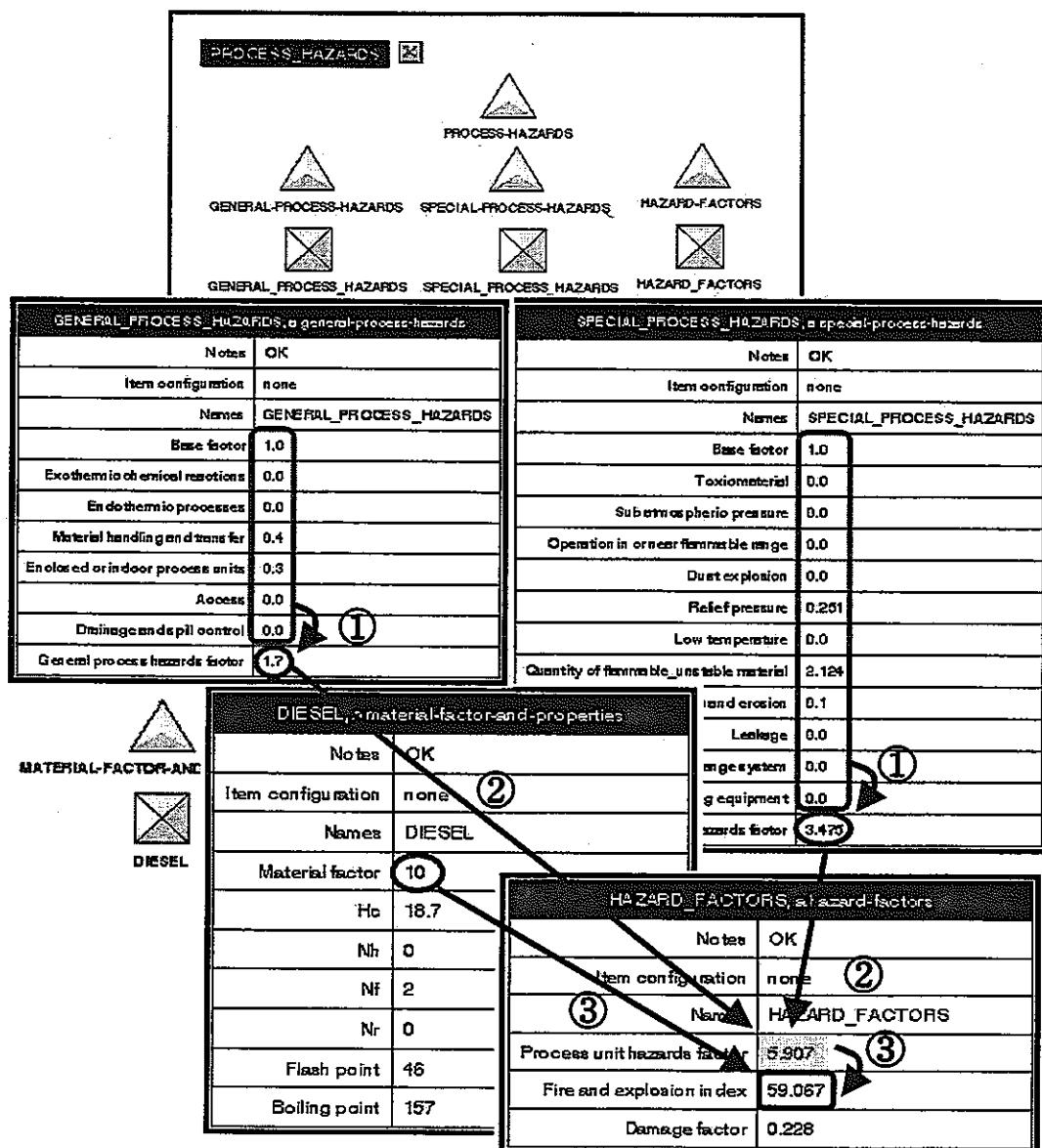


図 7.8 Dow 法解析モジュールへのデータ入力

次にこの事象の発生頻度をイベント・ツリー解析により求める。初期事象（引き金事象：蒸留塔のフィード流量を制御しているバルブ LCV1 の故障により流量が正常時の 10%減少）の発生確率を算出する。ここでは、この事象の原因事象の発生確率から式（7.1）により簡易的に求めた。

$$\begin{aligned}
 \text{引き金事象が発生する確率} &= \sum_{i=1}^n P_{ui} \\
 &= P_{u_1} + P_{u_2} + \cdots + P_{u_n} \\
 &= 2.994e-4 + 2.5e-7 + 3.1e-7 \\
 &= 2.999e-4
 \end{aligned} \tag{7.1}$$

全保護システムが作動に失敗する確率は、各保護システムのアンアベイラビリティの積により算出する。各保護システムのアンアベイラビリティを P_{pi} とし、式（7.2）により求める。

$$\begin{aligned}
 \text{全保護システムのアンアベイラビリティ} &= \prod_{i=1}^n P_{pi} \\
 &= P_{p_1} * P_{p_2} * \cdots * P_{p_n} \\
 &= 0.005 * 0.001 * 0.001 \\
 &= 5e-9
 \end{aligned} \tag{7.2}$$

事故事象の発生確率は、式（7.3）に示すように、初期事象発生確率と全保護システムの失敗確率の積で求める。

$$\begin{aligned}
 \text{事象の発生確率} &= \sum_{i=1}^n P_{ui} * \prod_{i=1}^n P_{pi} \\
 &= 2.999e-4 * 5e-9 \\
 &= 1.5e-12
 \end{aligned} \tag{7.3}$$

これより、最悪の事故シナリオに対する発生確率を算出した。

以上の解析により、“蒸留塔のフィード流量を制御しているバルブ LCV1 の故障により流量が正常時の 10%減少する”という引き金事象発生に対して、安全系がすべて作動失敗した場合のプロセス挙動、被害度、発生頻度を解析した。これらの結果は図 7.8 のように表示される。

今回報告した危険評価システムは、HAZOP 解析システムモジュール、Dow 法解析モジュール、異常時挙動解析モジュール（ダイナミックシミュレータ）、イベント・ツリー解析モジュールを G2 により構築し、統合したシステムである。各モジュールについて、現時点では実用上多くの課題を有しているが、今後安全設計のための統合化環境構築のために、危険評価システムの電子化、統合化が必要不可欠であると考える。

8. おわりに

本報告書では、危険評価と独立防御層概念に基づく安全設計に関する調査をまとめた。また、昨年度までに開発した HAZOP 解析システムに対して、さらにユーザフレンドなシステムとするために、知識ベースの拡張、保守を容易にするための機能を加えた。改良された HAZOP 解析システムを昨年度と同じ対象である高放射性廃液濃縮工程と新しくプルトニウム溶液濃縮工程の解析に適用し、解析結果を考察した。さらに、安全設計に対する今後の展望として、安全設計統合化環境構築のための危険評価システムを提案した。これより、システム安全設計、評価に関わる情報をインターネット上に分散する情報源から統合利用することが可能となる。これら IT を利用したエンジニアリング環境を構築することにより異なる領域の融合が可能であり、専門家の集合がより広い観点から技術評価を行いながら、高度な技術を創生することが可能となる。さらに、技術基盤、知的基盤、人的基盤、社会基盤を有機的に結合することが可能となり、今後の生産技術に対する貢献が期待できる。

このようなネットワーク環境を利用しての共同作業を実施するためには、各種情報の標準化、共有化が重要である。標準化データモデルを利用すれば、設備の設計、評価、運転に関する最新の情報（他の設備での事故事例に対する安全対策も含む）を設備設計時から考慮することができ、より有用な安全対策を行うことが可能となる。また、これによりこれまでに高度なエンジニアリング環境構築の阻害要因であった、業務間でのリンク、情報の整合性、情報授受のスピードなどの問題を解決することが可能となる。すなわち、情報の再利用、共有、整合性を確保しながら情報交換を迅速に進めるため技術基盤を構築することが可能となる。

参考文献

- 1) Center for Chemical Process Safety of the AIChE Guidelines for Safety Automation of Chemical Processes (1994)
- 2) 東洋エンジニアリング（株），安全防御層の設計流れと活用環境 (1999)
- 3) (社)日本電気計測器工業会, JIS (案) 電気・電子・プログラマブル電子安全関連系の機能安全 JIS C0508-6 (IEC61508)
- 4) American National Standard, ANSI/ISA-S84.01-1996, Application of Safety Instrumented Systems for the Process Industries (1997)
- 5) Arthur M. Dowell III, Layer of Protection Analysis for Determining Safety Integrity Level (1998)
- 6) Lawrence Beckman, Determining the Required Safety Integrity Level for Your Process (1998)
- 7) Angela E. Summers, Techniques for Assigning a Target Safety Integrity Level (1998)
- 8) Paris Stavrianidis, Kumar Bhimavarapu, Performance based Standards, Safety Instrumented Functions and Safety Integrity Levels (2000)
- 9) JNC TJ1400 99-003, システム解析手法の高度化研究（II）：岡山大学工学部システム工学科 (1999)
- 10) JNC TJ8400 2000-52, システム解析手法の高度化研究（III）：岡山大学工学部システム工学科 (2000)
- 11) JNC ZN8450 99-002, 高放射性廃液濃縮工程及びプルトニウム濃縮工程の HAZOP 評価結果（データ集・記録集）, 核燃料サイクル開発機構 東海事業所 (1999)
- 12) AIChE, Hazard Classification Guide 7th Ed., Dow's Fire & Explosion Index (1998)