

本資料は 年 月 日付けで登録区分、
変更する。

01.10.-4

[技術情報室]

システム解析手法調査研究 (II)

(動力炉・核燃料開発事業団 受託研究成果報告書)

1996年3月

岡山大学工学部機械工学科

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ください。

〒319-1184 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, 319-1184
Japan

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

この資料は、動燃事業団社内における検討を目的とする社内資料です。ついては、複製、転載、引用等を行わないよう、また第三者への開示又は内容漏洩がないよう管理して下さい。また今回の開示目的以外のことには使用しないよう注意して下さい。

本資料についての問い合わせは下記に願います。

〒319-11 茨城県那珂郡東海村大字村松4-33
動力炉・核燃料開発事業団
東海事業所
技術開発推進部・技術管理室

システム解析手法調査研究（Ⅱ）

佐山隼敏^{*}、鈴木和彦^{*}、島田行恭^{*}

要 旨

HAZOP は、国内外において数多くのプラントプロセスに適用され、その有用性が高く評価されている。しかし、実プラントの解析を進めるためには多大の労力と時間を要する。このような問題に対して、計算機により HAZOP を支援するためのシステムが提案されている。

本報告書では、動力炉・核燃料開発事業団の委託により（株）三菱総合研究所が開発した HAZOP 支援システムをいくつかのプラントに適用し、支援システムの汎用性を確認するとともにいくつかの問題点を提示する。プロセスプラントには制御回路などの電気回路を含むが、これら回路に対する HAZOP の手順を示す。さらに、システム工学の入出力の概念を基礎とし、論理型人工知能言語 Prolog を用いて開発した HAZOP 自動解析システムについて報告する。異常の因果関係の分類を行い、要素の異常に関するデータをデシジョンテーブルにより整理し、データベースとして計算機に格納しておく。知識ベースとして計算機に入力する対象プロセス固有の情報を基に、ずれに対する原因、影響をデータベースの検索により取り出し、HAZOP の解析結果として出力する手法である。

※ 本報告書は、佐山隼敏が動力炉・核燃料開発事業団の委託により実施した研究の成果である。

契約番号：060D0129

事業団担当部課室：東海事業所 安全管理部 安全技術課 野尻一郎

※岡山大学工学部機械工学科



Surveys of System Safety Assessment Methods (II)

Hayatoshi Sayama *, Kazuhiko Suzuki * and Yukiyasu Shimada *

Abstract

In recent years HAZOP has become recognized as an essential part of process design. HAZOP usually constitutes a significant part of the design effort at various stage of flowsheet development, and requires the involvement of an experienced, interdisciplinary team of engineers. Hence, it is desirable to reduce the time and engineering cost associated with HAZOP. One way of doing this would be to incorporate the knowledge used by human experts into an intelligent computer system, an expert system. A system of this type could permit an engineer, knowledgeable only about the process, to perform a complete HAZOP, in much less time than previously required for the group effort.

The HAZOP support system, which is developed by MITSUBISHI RESEARCH INSTITUTE, is tested on chemical plants and nuclear fuel reprocessing plants. Problems of this system are discussed in this report. HAZOP which was developed at ICI, U. K. has the feature of focussing on the deviations in a pipeline joining two main plant items, but some difficulties in analysis of auxiliary facilities such as control circuits. This report presents a new systematic procedures of HAZOP to examine the nuclear fuel reprocessing plant more fully. The improved technique is based on application of the input-output relation in the system engineering to the main plant item, and the concept of the deviations is defined more clearly by using the control and state variables. By defining the procedures of improved HAZOP, it could be possible to examine the application of HAZOP to nuclear fuel reprocessing plant and develop the computer-aided HAZOP.

This report also presents an algorithm for application of knowledge engineering to automated HAZOP. The development of the expert system for HAZOP first required the consideration of the types of knowledge required for the study, and how this information could be incorporated into the system. The knowledge required to perform HAZOP can be separated into two types; (1) the generic knowledge, (2) the plant specific knowledge. These knowledge interact with each other to perform HAZOP analysis.

※ Work performed by Hayatoshi Sayama, Kazuhiko Suzuki and Yukiyasu Shimada under contract with Power Reactor and Nuclear Fuel Development Corporation

PNC Liaison.....Safety Technology Development Section, Health and Safety Division,
Tokai works, Ichiro Nojiri

※※ Department of Mechanical Engineering , Faculty of Engineering,
Okayama University

目 次

1. はじめに	1
2. HAZOP 支援システム	3
2.1. HAZOP 支援システムの構成	3
2.1.1. モジュール 1	5
2.1.2. モジュール 2	7
2.1.3. モジュール 3	8
2.1.4. モジュール 4	8
2.2. HAZOP 支援システムにおける HAZOP の解析手順	8
2.3. 解析レベル	10
3. HAZOP 支援システムの汎用性の向上	12
3.1. HAZOP 支援システムの長所と短所	12
3.2. 変数に着目した解析	14
3.3. 回路系に対する解析	15
4. 応用例（化学プラント）	19
4.1. オレフィン二量化プラントの原料移送部	19
4.1.1. 支援システムによる解析	19
4.1.2. 回路系に対する解析	27
4.2. 解析結果の検討	34
5. 応用例（再処理プラント）	36
5.1. 高レベル廃液貯槽冷却システム	36
5.1.1. 支援システムによる解析	36
5.1.2. 回路系に対する解析（付属要素解析）	45
5.1.3. 解析結果の検討	51

5.2. プルトニウム精製施設	52
5.2.1. 支援システムによる解析	52
5.2.2. 解析結果の検討	60
6. Prolog によるオペラビリティ・スタディ自動解析システム	61
6.1. オペラビリティ・スタディ自動解析システムの構成	61
6.1.1. データベース	62
6.1.2. 知識ベース	68
6.2. 推論機構	72
6.2.1. ずれの想定	73
6.2.2. 原因式・影響式作成	74
6.2.3. 解析結果出力	78
7. おわりに	81
参考文献	82
付録	83

図・表目次

図リスト

図 2.1	HAZOP 支援システムの全体構成	4
図 2.2	モジュール1の入力手順の概要	5
図 2.3	機器配置画面	6
図 2.4	モジュール2の入力手順の概要	7
図 2.5	HAZOP 支援のフローシート	9
図 2.6	HAZOP の解析レベル	10
図 2.7	解析レベルの比較	11
図 3.1	変数に着目した解析原理	15
図 3.2	ポンプ系の構造図	16
図 3.3	ポンプ系の入出力関係	17
図 3.4	ポンプ系の操作量の流れ	17
図 4.1	オレフィン二量化プラントの原料移送部	19
図 4.2	流量制御系の構造図	27
図 4.3	流量制御系の入出力関係	28
図 4.4	流量制御系の操作量の流れ	28
図 4.5	液位制御系の構造図	30
図 4.6	液位制御系の入出力関係	31
図 4.7	液位制御系の操作量の流れ	31
図 5.1	高レベル廃液貯槽冷却システム	36
図 5.2	冷却システムの入力図	37
図 5.3	熱交換器の入力様式	37
図 5.4	エアフィンクーラーの構造図	46
図 5.5	エアフィンクーラーの入出力関係	47
図 5.6	エアフィンクーラーの操作量の流れ	47
図 5.7	高レベル廃液貯槽および冷却コイル	49
図 5.8	プルトニウム精製施設	52
図 5.9	簡略化したプルトニウム精製施設	53
図 6.1	HAZOP 自動解析システムの構成	61

図 6.2	多段攪拌槽の異常伝播の基本構造	63
図 6.3	デシジョンテーブルの分類	63
図 6.4	配管系	66
図 6.5	ソルベイプロセス	70
図 6.6	HAZOP 自動解析の流れ	73
図 6.7	ずれの想定	74
図 6.8	解析結果出力	79
図 6.9	HAZOP 自動解析結果	80

表リスト

表 2.1	HAZOP 支援システム内に準備されている各項目	10
表 3.1	変数の分類	14
表 3.2	プロセス変数の分類	14
表 3.3	ポンプ系の構成	16
表 3.4	ポンプ系に対するプロセス変数ごとの解析結果	18
表 4.1	オレフィン二量化プラントの原料移送部の解析結果	20
表 4.2	流量制御系の構成	27
表 4.3	流量制御系に対するプロセス変数ごとの解析結果	29
表 4.4	液位制御系の構成	30
表 4.5	液位制御系に対するプロセス変数ごとの解析結果	33
表 4.6	Venkatasubramanian による報告	35
表 4.7	Kletz による報告	35
表 5.1	高レベル廃液貯槽冷却システムの解析結果	38
表 5.2	エアフィンクーラーの構成	46
表 5.3	エアフィンクーラーに対するプロセス変数 ごとの解析結果	48
表 5.4	冷却コイルに対するプロセス変数ごとの解析結果	50
表 5.5	プルトニウム精製施設の一部の解析結果	54
表 6.1	デシジョンテーブルの分類	64
表 6.2	デシジョンテーブルの例	67
表 6.3	知識ベース (連続プロセス)	69

1. はじめに

HAZOP は、定性的な安全評価手法の 1 つであり、その有用性は広く知られている。この手法では、様々な分野の専門家によって構成されたグループが、討論を重ねながらプロセス内のずれについて、その原因および影響を組織的に明らかにする。しかし、対象とするプロセスの構造によっては、多くの人手と時間を必要とする。また、各分野の専門家がいなければ、それを実施することは困難であるという問題がある。

近年このような問題に対して、HAZOP にコンピュータを積極的に利用するという考え方が提案されこれまでに幾つかの研究例が報告されている。

Lihou は、HAZOP の解析結果をコード化し、コンピュータに蓄えておく手法を提案した^{1,2)}。この手法は、HAZOP によって得られた情報を簡単なアルファベットと数字を用いてコード化し、ずれに対する原因を原因式、影響を徴候式として表現したものをコンピュータに入力するものである。こうすることで、その情報を必要に応じて利用することを可能にした。Weatherill らは解析者との対話形式を用いた HAZOP エキスパートシステムを提案している³⁾。また Venkatasubramanian らは、プロセスの一般的解析モデルとプロセス固有の情報を知識ベースとして格納しておき、解析者が GUI を用いて解析する手法を提案した^{4,5)}。この内一般的解析モデルとしては、対象をユニットごとに分割し、各ユニットにおいてプロセスのずれ、原因解析法、影響解析法、ずれの相互関係を格納している。またプロセス固有の情報としては、プロセスの原料・特性、P&IDs を格納している。これらの情報を HAZOP インターフェースエンジンで取り出しながら、解析者とそのシステムがインターフェース上で解析を進めるものである。

本稿では、動力炉・核燃料開発事業団の委託により（株）三菱総合研究所が開発した HAZOP 支援システム⁶⁾（本稿では以下 HAZOP 支援システムと呼ぶことにする。）を化学プラント（オレフィン二量化プラント）、再処理プラントの高レベル廃液貯槽冷却システム及びプルトニウム精製施設に適用し、支援システムの汎用性を確認すると同時に、問題の提示を行う。

電気回路は、システムの安全性に重大な影響を与え、その安全性を解析、評価することは重要である。FTA 等の他の安全評価手法では、解析対象に取り上げることができるが、HAZOP は配管を重要視した手法であり、電気回路に対してはその手順は確立されていない。ここでは、ポンプや電動弁に組み込まれているモータに代表される駆動部回路およびセンサで値を読み取り、調節器（コントローラ）で制御を行う制御回路に着目する。これらを、従来の HAZOP に基づいて解析しようとしても、そのための手法がこれまでに開発されていなかったため、解析を実施することが困難であった。本支援システムを用いて解析を実施し、回路に対する HAZOP を付属させることでより詳細な結果を得る。

また本稿では、システム工学の入出力の概念⁷⁾を基礎とし、論理型人工知能言語 Prolog を用いて開発した HAZOP 自動解析システム（本稿では、（株）三菱総研が開発したシス

テムと区別するため、以下ではオペラビリティ・スタディ自動解析システムと呼ぶことにする。) について報告する。システム工学の入出力の概念を適用することにより、化学プロセスを構成する様々な要素の異常に関するデータをデシジョンテーブルを用いて整理し、自動解析のためのデータベースとして作成しておく。解析時には、対象プロセス固有の情報であるプロセスの構造や反応の情報を知識ベースとして計算機に入力することにより、HAZOP を実施するシステムである。

2. HAZOP 支援システム

HAZOP 支援システムは、動力炉・核燃料開発事業団の委託により(株)三菱総合研究所が予備解析に利用可能なプロトタイプとして開発したものである⁶⁾。ここでいう予備解析とは、支援システムの機能を確認するために、安全評価を実施することを意味し、対象とするシステムは、再処理施設の工程のうちの小規模な設備である。

また HAZOP 支援システムは、プログラム言語の中心に MS-Fortran を用い、MS-C およびアセンブラによって補助されたプログラムであり、DOS/IV マシン上で動作する DOS アプリケーションである。

2.1. HAZOP 支援システムの構成

HAZOP 支援システムは、4つのモジュールで構成されている。

モジュール1：HAZOP 実施支援用系統図入力モジュール

モジュール2：セグメントの設定と流体の設定モジュール

モジュール3：HAZOP 実施支援モジュール

モジュール4：HAZOP 実施結果の統合モジュール

ここで、実際に HAZOP による解析を実施しているのはモジュール3であり、その他のモジュールはそれを補助するためのものである。HAZOP 支援システム全体の構成を図 2.1に示す。各モジュールに関して、以下で説明を加える。

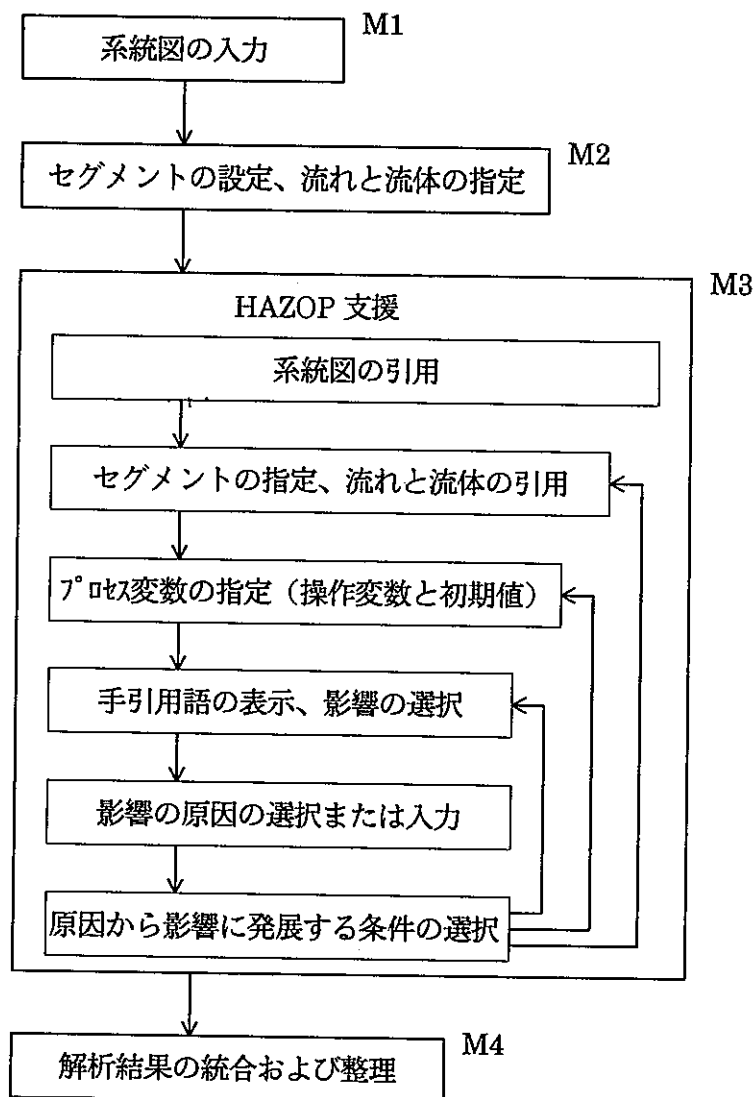


図 2.1 HAZOP 支援システムの全体構成

2.1.1. モジュール 1

モジュール 1 は、HAZOP 実施支援用系統図入力モジュールである。HAZOP 支援システムでは、系統図を基本入力として利用する。このために、コンピュータのグラフィックス機能を使う。入力の媒体としてマウスを利用し、機器や配管の配置を行う。ここで入力した系統図は、HAZOP による解析対象の境界を定義するものとなる。

本モジュールにおける入力手順の概要を図 2.2 に示す。また、機器（コンポーネント）の配置において、HAZOP 支援システム内にあらかじめ準備されている機器を図 2.3 に示す。

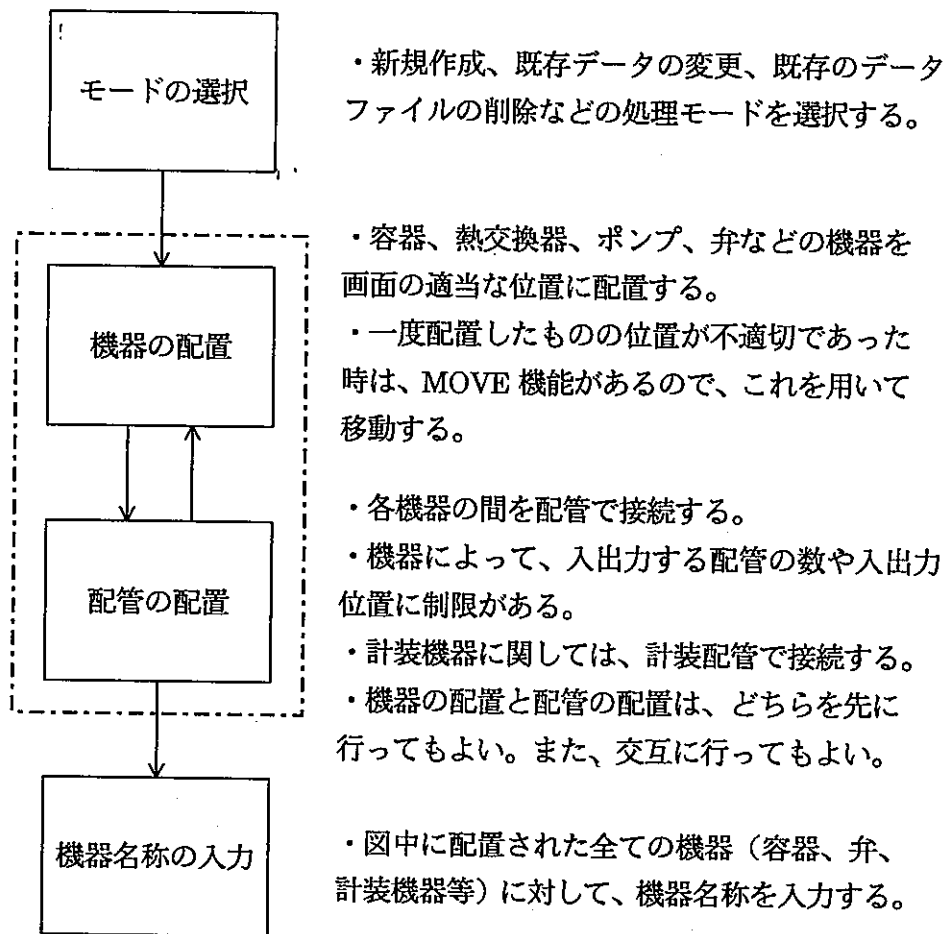


図 2.2 モジュール 1 の入力手順の概要

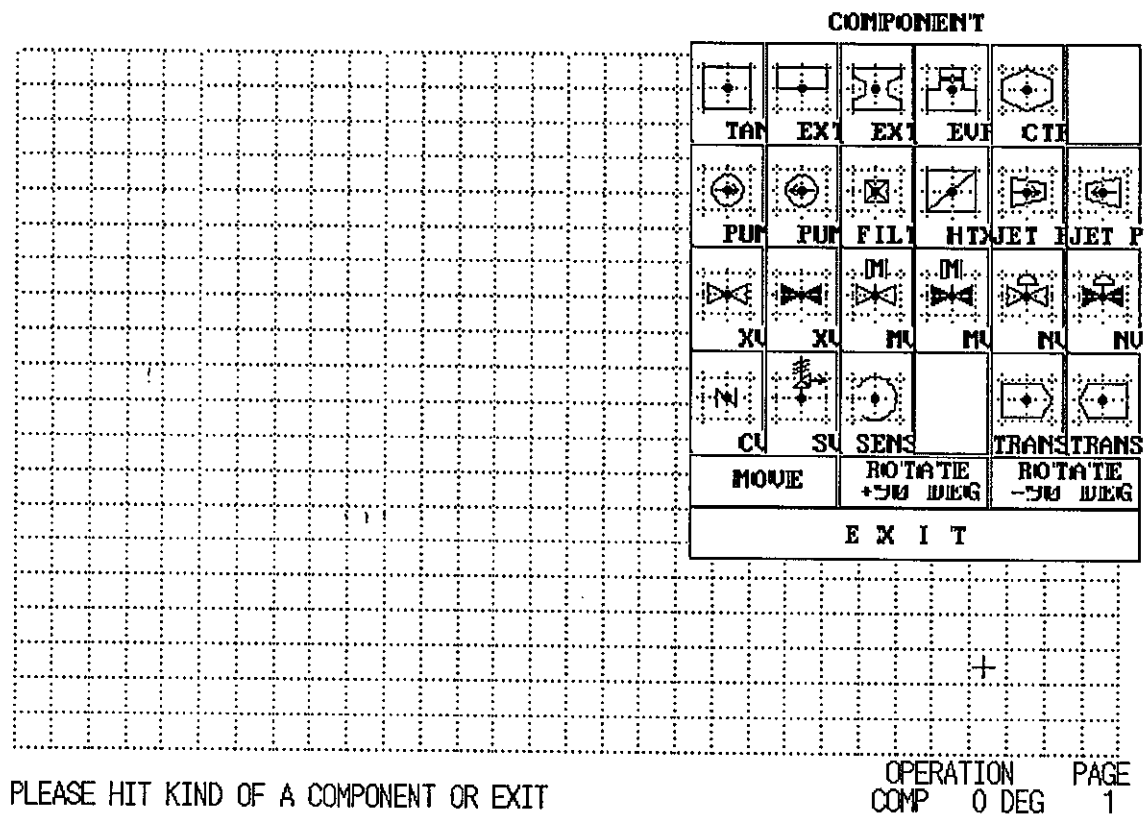


図 2.3 機器配置画面

マウスを用いて、画面のグリッド上に機器および配管を配置し、系統図を作成する。図 2.3は、HAZOP 支援システムのインターフェース（操作画面）の一場面である。インターフェースの右上に並べられているのが準備されている機器である。

2.1.2. モジュール 2

モジュール 2 は、セグメントと流体の設定モジュールである。HAZOP 実施のためには、まずセグメントを設定し、それらに番号を付ける必要がある。また、プロセス量のずれの原因や影響の解析に必要となる流体の流れ方向、およびその種類を入力する。本モジュールにおける入力手順の概要を 図 2.4 に示す。

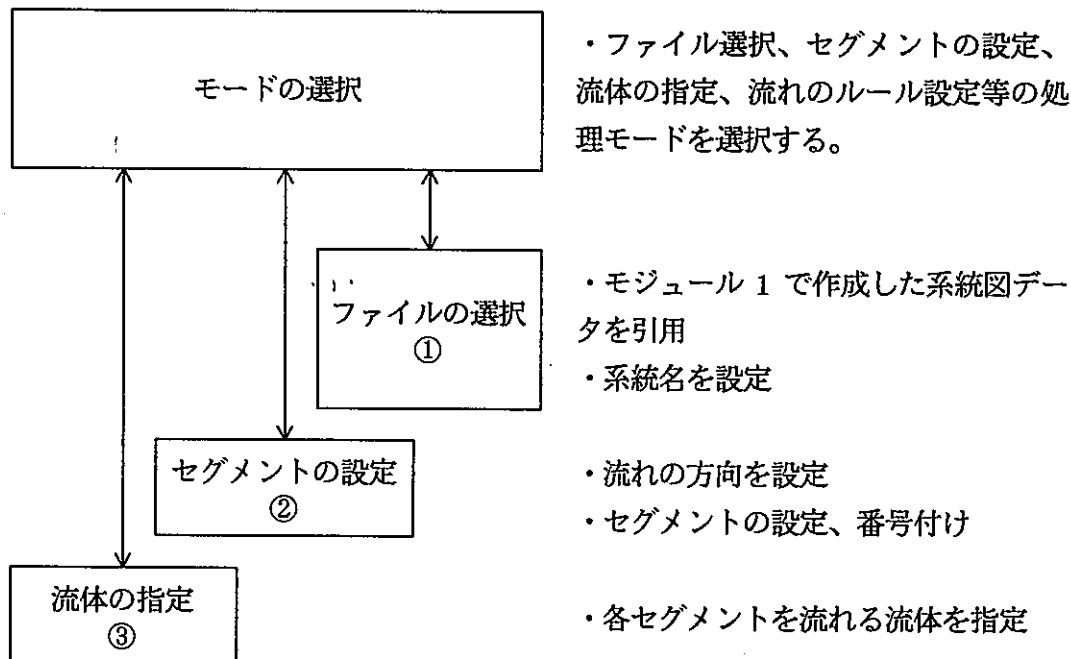


図 2.4 モジュール 2 の入力手順の概要

モジュール 2 では、モード選択画面より順次①～③の処理を行い、そのデータを保存する。

①ファイルの選択

ここでは、モジュール 1 で作成した系統図データを読み込み、その系統または工程の名称を選択する。

②セグメントの設定と流れの設定

セグメントの設定は、ほぼ自動的に行われる。セグメントとして認識されるものは、配管要素と機器の一部（塔、タンク等）であり、残りの機器（ポンプ、弁、フィルター、熱交換器等）は、配管セグメント上に存在する機器として認識される。セグメントは、最上流セグメントを解析者が指定することにより、支援システムが下流へ向かってセグメント番号を順に付けていく。

また、流れの設定は半自動で行われる。これにより、セグメント同士の関係

が明らかになる。ここで半自動とは、ポンプのような系統図から明らかに流体の流れる方向が判別できるような機器が存在している場合には、これに基づいて自動的に流れの方向を決定するが、系統図からの情報だけでは判別できない箇所では、解析者が決定し、入力することである。

③流体の指定

ここでは、系統図中の各セグメント内をどの流体が流れるかを指定する。指定できる流体は 23 種で、これらは HAZOP 支援システム内にあらかじめ準備されている。

2.1.3. モジュール 3

モジュール 3 は、HAZOP 実施支援モジュールである。実際に HAZOP による解析の支援を行うのが本モジュールである。モジュール 1, 2 で作成した系統図を利用して、上流セグメントから順に各セグメントごとにプロセス変数と手引用語を選び、解析を実施する。解析は、影響、原因、条件の順に実施（選択）する。これらは、数種類ずつ表示され、解析者が選択することによって解析が進行する。この詳細は、2.2 節で示す。

2.1.4. モジュール 4

モジュール 4 は、HAZOP による解析の結果（モジュール 3 の結果）を表形式に統合するためのモジュールである。作成された表の項目は記号化されており、その内容は各項目の解説として別のファイルに作成される。

2.2. HAZOP 支援システムにおける HAZOP の解析手順

HAZOP 支援システムでは、解析は選択式会話形式で進められる。解析者は、支援システムが幾つか列挙した選択肢の中から適するものを選び出す。それを受けて、支援システムが次に必要な情報を列挙する。この流れを図 2.5 に示す。すなわち、これは支援システムのモジュール 3 部分のフローシートである。

ここで、モジュール 3 における解析手順とその操作を順を追って説明する。モジュール 3 では、まず、モジュール 1・2 において入力した系統図を引用する。次に、どのセグメントにおいて解析を実施するかを指定する。セグメントは上流部から順に番号を付けている

ので、セグメント NO.1 から解析を進める。その指定したセグメントにおいて、どのプロセス変数について解析するかを決定する。プロセス変数の決定により、その変数に適用される手引用語が列挙され、その中から解析する手引用語を指定する。プロセス変数と手引用語の組み合わせにより、考えられるずれが想定され、そのずれにおいてシステムに対す

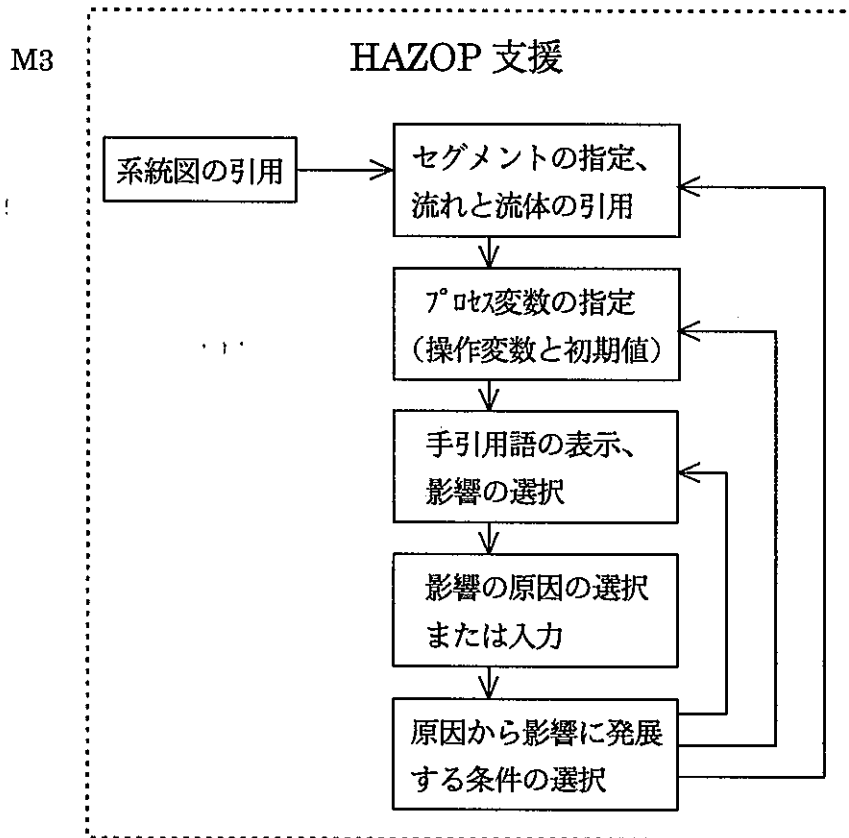


図 2.5 HAZOP 支援のフローシート

る影響を考慮し、HAZOP 支援システム内に準備されている 5 つの中から選択する。その選択した影響の原因として考えられるものを同じく準備されている 5 つの中から選択する。原因を選択の後、不具合と考えられる機器もしくは系（システム）の名称を入力する。さらに、その原因から影響に発展するための条件が存在すれば、同じく準備されている 3 つの中から選択し、その条件に関わる装置名（または系）を入力する。ここまでの入力が終われば、一通りの項目が完成するが、さらに考えられる影響、原因、条件が存在すれば、それらを入力することができる。また、同じセグメントに複数のプロセス変数および手引用語を設定することが可能である。これを全てのセグメントに対して実施する。

表 2.1 に影響、原因、条件として、HAZOP 支援システム内に準備されている項目を示す。

表 2.1 HAZOP 支援システム内に準備されている各項目

影響	原因	条件
火災の発生 爆発の発生 漏洩事故の発生 臨界事故の発生 変動の波及	セグメント上の機器の不具合 制御系の不具合 冷却系の不具合 加熱系の不具合 変動の波及	検知失敗（計測系） —異常の放置 制御失敗（制御系故障） 安全系の動作失敗

2.3.解析レベル

安全解析を実施する際の基本的な考えの1つに、解析レベルがある⁸⁾。ある事象が、どの解析レベルに属するかを明らかにすれば、その事象の要因および結果が比較的容易に導くことができる。例として、図 2.6に HAZOP における解析レベルを示す。

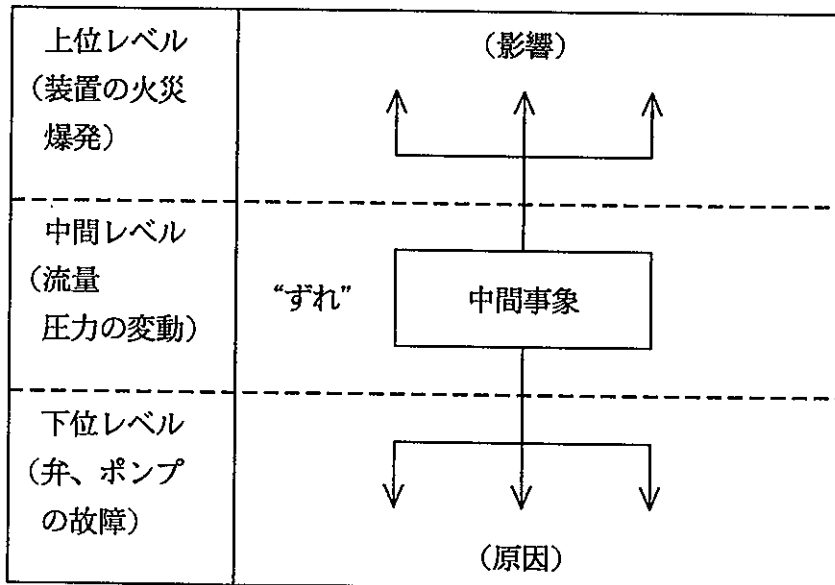


図 2.6 HAZOP の解析レベル

HAZOP 支援システムは、HAZOP による解析をベースにしなが、影響と原因の関係が通常の HAZOP による解析とは異なる。中間事象（ずれ）を中心に考えなければならないが、ずれを明示しない仕組みになっている。このことを解析レベルに基づいて表すと

図 2.7 のようになる。図中の矢印の向きは解析方向を表している。ここには、参考のために FTA の図もあわせて示す。HAZOP 支援システムの解析レベルと解析方向は、HAZOP と FTA の中間に位置すると言ってもよい。

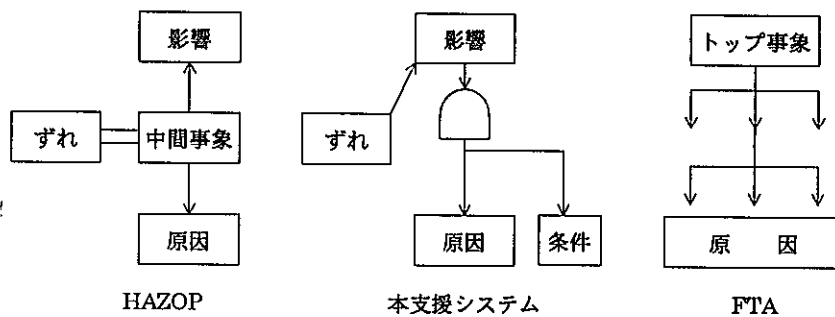


図 2.7 解析レベルの比較

3. HAZOP 支援システムの汎用性の向上

HAZOP 支援システムは、HAZOP を用いた安全評価支援システムのプロトタイプとして、予備解析を目的に作成されたものである。その機能および解析における操作等は、2章に示した。しかし、様々な対象を扱えなければ、支援システムとして活用できるとは言い難い。HAZOP 支援システムを活用するためには、予備解析を超える対象プラントに対する解析可能範囲を明らかにする必要がある。そして、HAZOP 支援システムの汎用性を向上させるには何が不足しているかを明確にしなければならない。

また、HAZOP 支援システムは、従来の HAZOP に準じて作成されたものである。そのため、配管系を対象として解析を実施している。しかし、より要素的な故障を解析したり、配管系以外の機器を評価するなど、詳細な結果を得るためには十分ではない。ここでは、HAZOP 支援システムの特徴を明らかにするとともに、汎用性を向上させるために制御回路や駆動部回路といった電気回路にも適用可能な解析手順を提案する。

3.1. HAZOP 支援システムの長所と短所

HAZOP 支援システムは、予備解析を目的に作成されたものである。解析者を支援するために使い易さを考え、グラフィックス機能を用い、またマウスを多用することで入力の手間を単純化を行っている。しかし、解析を実施すると様々な問題が明らかになった。以下に HAZOP 支援システムの特徴を列挙する。

長所

- 系統図の利用およびグラフィカルな操作画面。
- セグメントの自動設定。
- 選択式解析のため簡単な入力手順。（マウスを中心に使用）
- 原因事象の充実。（準備済みの機器に関してのみ）
- 各セグメント同士間の変動の波及を明確に示す。

まず長所について述べると、入力方法に工夫がみられる。解析を実施する際に図を利用することは、解析者にとって利点である。プログラム化された文字による入力は取り扱いが難しく、解析者の混乱をまねきやすい。その点で HAZOP 支援システムは系統図を利用し、セグメントの設定を図上で自動的に行う。解析者は、この図を見ながら解析を進めることができるので理解しやすい。

また原因事象については、各機器に関して故障のパターンを考慮しており、その要素故障を数多く格納できている。さらに変動の波及もよく考慮されている。

短所

- プロセス変数の選択肢が限られる。（操作変数として圧力を選べない）
- 影響の選定に柔軟性が欠ける。（影響の選択肢が少ない（5項目））
- 準備されていない機器（特殊な機器）を扱えない。
- ずれを出力できない。
- 解析順序の不当性。（原因の考慮で影響を除けない）
- 条件を原因とは別に扱う必要性。
- 配管の配置によっては解析を実施できないものが存在する。
（並列システムおよびループシステム）

次に短所について述べる。これらの短所は、重要性の問題を考えれば全てが解決される必要はない。重要なことは、入力 simplicity を犠牲にすることなく、汎用性を向上させなければならないことである。HAZOP 支援システムでは系統図入力を簡単にするために、機器を HAZOP 支援システム内に準備した結果、逆に準備していない機器に対する解析ができなくなり、汎用性を欠いた。同様に、影響の選定も 5 項目に限った結果、入力はいややすいが汎用性に欠けるものとなった。

しかし、支援システムとしての役割を考えると、配管系に対する原因の選定および出力は、かなり充実していると言える。そのため、表形式にまとめられた結果は HAZOP の解析結果として通用すると考えられる。

そこで、様々な対象システムを解析できるようにするには最低限、次のような問題点を解決する必要があると考える。

問題点

- 準備されていない機器を扱えない。
- 並列およびループのあるシステムは解析できない。

また、HAZOP 自体を考えても、配管系の機器以外のものを解析することが困難である。そこで、HAZOP 支援システムにおいて準備されていない機器を扱うと同時に、配管系の機器以外をも解析できる手法を提案することで汎用性の向上を目指す。HAZOP 支援システムの長所を活かして、短所および HAZOP 自体の問題点を補うために回路系に対する解析手順を提案する。そのためには、変数の扱いが重要になる。まず変数の分類を行い、HAZOP の解析に役立てる。

3.2. 変数に着目した解析

プラントやシステムを工学的に解析するためには、その中の状態を全て把握しなければならない。そのために、まずシステムをモデル化する。そのモデル内の状態量を表す変数をその扱いや性質上の関係により、分類したものを表 3.1 に示す。これは、右の欄の変数が左の欄の中に含まれることを意味している。

表 3.1 変数の分類

モデル内の 状態量	入力変数	操作変数
		状態変数の初期値
	出力変数	操作変数
		状態変数

ここで「入力変数」は、ある系またはセグメントにおいて初期条件として入力される状態量を意味し、「出力変数」は、その入力条件および物理則等から定常状態の結果として、または制御の結果として出力される状態量を意味する。さらにこれらの変数のうち、状態量を容易に操作することのできるものを「操作変数」と呼び、その他の容易に操作できない状態量と区別する。一方、容易に操作できない状態量は入力時にはその初期値を必要とするので、入力変数の中に「状態変数の初期値」として区分している。また、出力時にはモデル内の状態量の値を表す変数として、「状態変数」として区分している。

ここでは、システム内の各変数を表 3.1 に従って分類することで、解析をより容易に実施する。すなわち、1つの系もしくはセグメントにおいて入出力を明示し、さらに HAZOP において、手引用語との組み合わせが考えられる操作変数を明確にする。

従来から、HAZOP の解析対象とされてきたプロセスシステム内の代表的な状態量を操作変数と状態変数に区分し、表 3.2 に示す。

表 3.2 プロセス変数の分類

操作変数	流量, 圧力
状態変数	温度, 濃度, 液位

HAZOP による解析を実施する際には、この変数の分類をまず行うべきである。そうすることで、どのプロセス変数に関する事象が原因、影響各々に関わってくるかが明らかになり、より解析をスムーズに実施できる。このことは、コンピュータ内に知識を格納する際にも大いに役立つ。

これらの変数の分類に着目して HAZOP の解析原理を表すと、図 3.1 のようになる。ここでプロセス変数とは、プロセス内の状態を表す変数であると同時に、手引用語との組み合わせによりずれを想定することが容易な変数である。すなわち、プロセス変数には操作変数を取り上げるべきである。

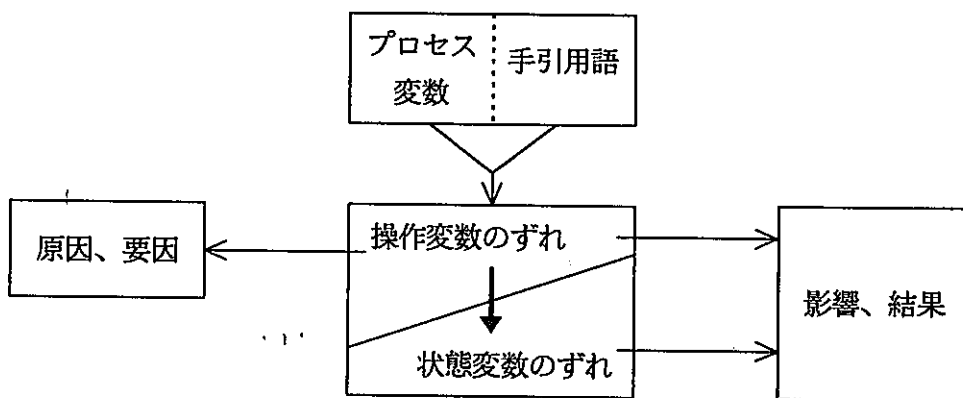


図 3.1 変数に着目した解析原理

3.3. 回路系に対する解析

HAZOP 支援システムは、従来の HAZOP による解析をコンピュータで支援するように開発したものである。そのため、解析の対象は配管系に限られている。しかし、FTA 等の他の安全評価手法では、プロセスシステムに限って解析を実施しているわけではない。近年のシステムは、電気によって動いているといっても過言ではない。そのため、安全解析の対象として電気回路を取り上げることは必要不可欠である。こういった電気回路を考慮した解析を進めるには、従来の HAZOP では困難であった。すなわち、このような配管系以外の対象を解析する手順が今までに開発されていなかった。

そこでここでは、モータを動かすための駆動部回路やバルブを調節して流量などを制御するための制御回路に着目し、これらを HAZOP で解析する。そのための解析手順を新たに提案し、HAZOP 支援システムの解析結果に付属させることにより、より詳細な HAZOP の解析結果を得る。

この新たに提案する回路系に対する解析手順では、ある機器に対して、2.2 節で述べた変数の分類を実施し、操作変数として扱える変数をプロセス変数として解析を実施する。まず操作量の流れに着目し、ずれをどのように取るかを明確にする。そして、解析結果をそのプロセス変数ごとの表にまとめる。

ここでポンプを例にとり、回路系に対する解析を実施する。

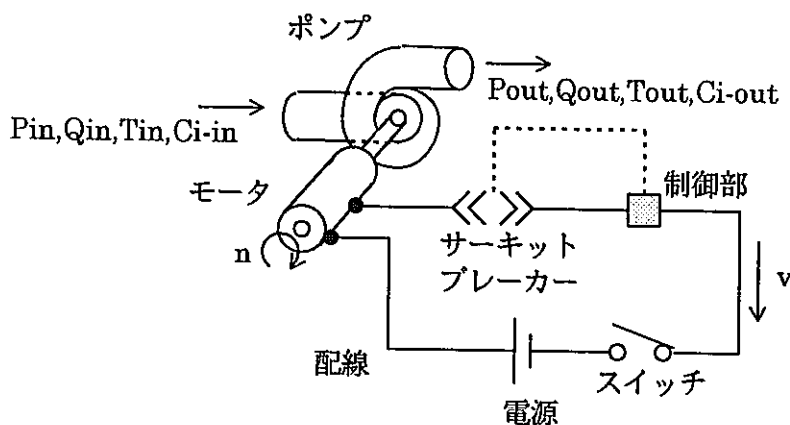


図 3.2 ポンプ系の構造図

図 3.2 に、ポンプ系の構造図を示す。制御部により電圧を決定し、モータを回すことでポンプにより流体を移送する。ポンプ系は配管部と駆動部に分けることができる。これらは表 3.3 に示すような構成であると考え、ここで HAZOP の欄には、用いる解析の手法を示す。それぞれの説明を以下に示す。

- 「従来手法」……従来通り、ずれを配管内のプロセス量のずれと考えると、解析を実施する場合。
- 「提案手法」……回路系に着目し、プロセス量以外のものにずれを考える場合。3.2節の変数の分類を行うことで、プロセス変数に何を取り上げるかを明らかにする。

表 3.3 ポンプ系の構成

グループ名	構成機器	変数	変数の説明	HAZOP
配管部	配管 ポンプ	P	流体の圧力	従来手法 (配管系)
		Q	流体の流量	
		T	流体の温度	
		Ci	流体の濃度	
駆動部	モータ 配線 電源 ブレーカー 制御部 スイッチ	n	モータの回転数	提案手法 (回路系)
		v	配線における電圧	

変数の添字 (in : ポンプ上流の変数 out : ポンプ下流の変数)

HAZOP による解析に先立ち、この系の状態量を表す変数を分類し、それらの関係を明示する。状態量を表す変数の関係を図 3.3 に示す。入力変数は各部に対して、出力変数は系全体に対して示す。

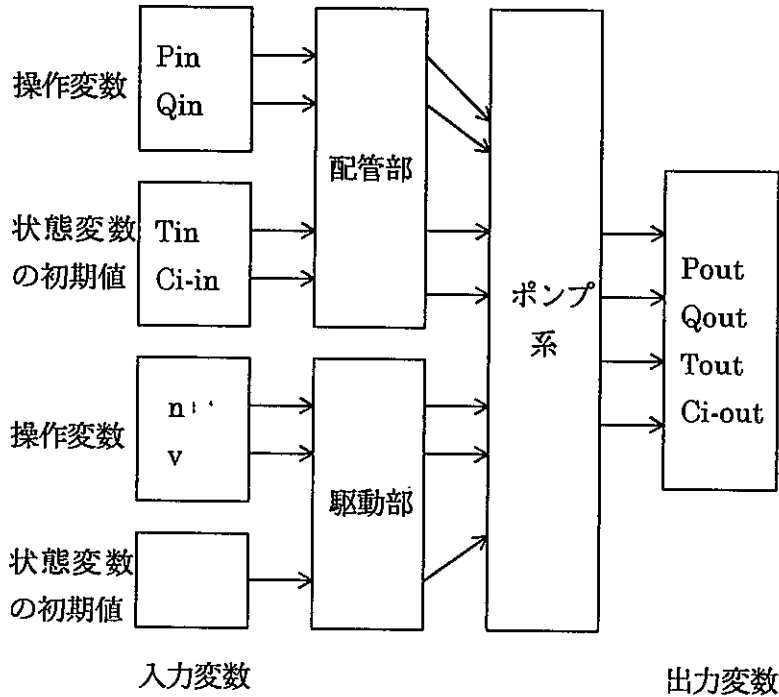


図 3.3 ポンプ系の入出力関係

ここで、操作変数に分類された変数の流れと最終的に決定される出力変数の関係を表すと、図 3.4 のように考えることができる。

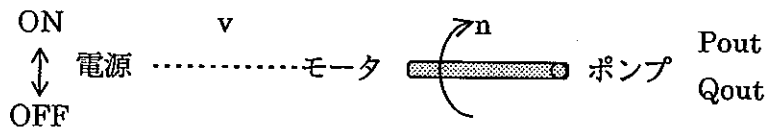


図 3.4 ポンプ系の操作量の流れ

これらの変数の関係を考慮して、表 3.4 にポンプ系に対するプロセス変数ごとの HAZOP の解析結果を示す。ここでプロセス変数ごととは、ポンプの配管部（流量、圧力）、機構部（回転数）、配線部（電圧）を表し、それぞれの HAZOP の結果を別々の表にまとめる。これらの表は、操作量の流れの順に作成し、その影響欄に示す番号は、直下の表のずれの部分に示す同じ番号の欄につながりがあることを意味している。

表 3.4 ポンプ系に対するプロセス変数ごとの解析結果

手引用語	ずれ	原因	影響
------	----	----	----

配線部 (プロセス変数: 電圧, v)

NONE	電圧無し	停電, 電源部故障 スイッチ入れず (誤操作) サーキットブレーカーの落下 制御部の故障, 配線の断絶	モータが駆動しない①
MORE	電圧増加	制御部の異常	モータの焼き切れ②, ④ サーキットブレーカーの落下①
LESS	電圧減少	配線のショート (漏電) 電源部の異常	モータの回転数の減少③, ⑤

機構部 (プロセス変数: 回転数, n)

NONE	回転しない①	モータへの供給電圧が0 モータ本体の故障 モータ軸の故障 回転翼のずれ, 引っ掛かり	液体を移送しない①
MORE	回転数が高い②, ④	モータへの供給電圧の増加	ポンプの過剰運転②, ④ モータのオーバーヒート②, ④
LESS	回転数が低い③, ⑤	モータへの供給電圧の減少 モータ軸の異常	ポンプの性能低下③, ⑤

配管部 (プロセス変数: 圧力, P_{out})

MORE	圧力増加④	ポンプの過剰運転	(異常高圧による) 配管系の破損
LESS	圧力減少⑤	ポンプの性能低下	キャビテーションの発生

配管部 (プロセス変数: 流量, Q_{out})

NONE	流量無し①	配管の完全閉塞 配管の破裂	液体を移送しない 液体の喪失
MORE	流量増加②	ポンプの過剰運転	配管系の破損 キャビテーションの発生
LESS	流量減少③	配管からの漏れ ポンプの性能低下	液体の移送量が少ない

4. 応用例（化学プラント）

本章では HAZOP 支援システムを用い、化学プラントに対する解析実施例を示す。

4.1. オレフィン二量化プラントの原料移送部

4.1.1. 支援システムによる解析

図 4.1 にオレフィン二量化プラントの一部を簡略化したものを示す^{4. 9)}。このシステムは、様々な機器要素を含み、規模もそれ程大きくないため、解析の例題として適している。

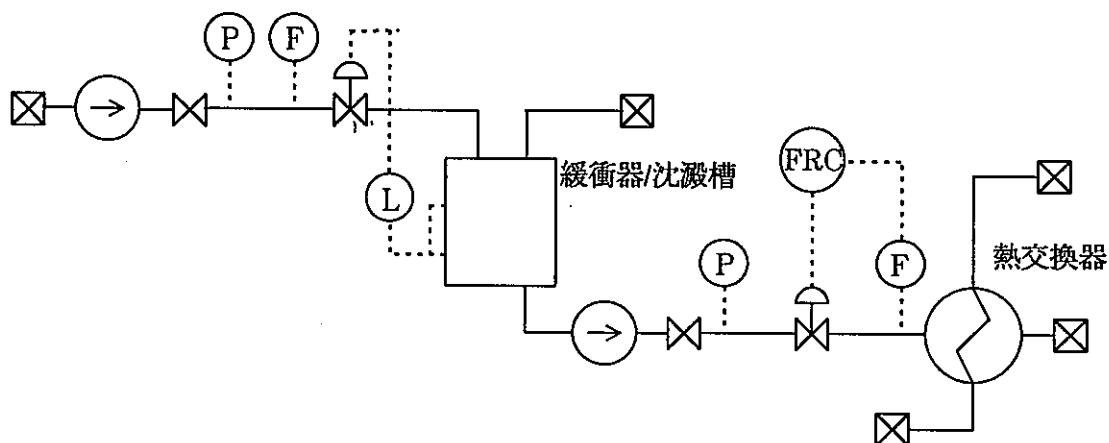


図 4.1 オレフィン二量化プラントの原料移送部

このシステムは、炭化水素と窒素を沈澱槽内に供給し、生じた原料を熱交換器で加熱して反応器へ送るものである。

それぞれのセンサ類の名称を以下に示す。

P：圧力計（プレッシャーゲージ）

F：流量計（フローインジケータ）

L：液位制御器（レベルコントローラ）

FRC：流量制御器（フローコントローラ）

このプラントを HAZOP 支援システムを用いて解析した結果を表 4.1 に示す。また、各表の項目の説明は、付録 1 に示す。ただし、HAZOP 支援システムの制約のため、圧力計は省略し、また各流体名も近いと考えられるもので代用している。

表 4.1.3 オレフィン二量化プラントの原料移送部の解析結果 (3)

SEGMENT NO. ; S02 FLUID ; NOx PROCESS PARAMETER ; FLOW				
<GUID WORD>	<DEVIATION>	<CONSEQUENCES>	<CAUSES>	<CONDITION>
		A. FIRE B. EXPLOSION C. LEAK D. CRITICALITY E. EXTENSION	1. COMPONENT FAILURE 2. CONTROL SYSTEM FAILURE 3. COOLING SYSTEM FAILURE 4. HEATING SYSTEM FAILURE 5. EXTENSION	1. DETECTION FAILURE 2. CONTROL SYSTEM FAILURE 3. SAFETY SYSTEM FAILURE
NONE MORE OF LESS OF		C E E E	5. S02-NX-F-NON-EXI 5. S02-NX-F-NON-EXI 5. S02-NX-F-MOF-EXI 5. S02-NX-F-LOF-EXI	

表 4.1.4 オレフィン二量化プラントの原料移送部の解析結果 (4)

SEGMENT NO. ; S03 FLUID ; DISSOLUTION SOLUTION PROCESS PARAMETER ; FLOW				
<GUID WORD>	<DEVIATION>	<CONSEQUENCES>	<CAUSES>	<CONDITION>
		A. FIRE B. EXPLOSION C. LEAK D. CRITICALITY E. EXTENSION	1. COMPONENT FAILURE 2. CONTROL SYSTEM FAILURE 3. COOLING SYSTEM FAILURE 4. HEATING SYSTEM FAILURE 5. EXTENSION	1. DETECTION FAILURE 2. CONTROL SYSTEM FAILURE 3. SAFETY SYSTEM FAILURE
NONE		C	1. SETTLING-TKR-LF PIPE-S03-PLO-LF PIPE-S03-POC-LF 2. FAIL-CS-LVCOTL 5. S03-DS-F-NON-EXI +S01-OS-F-NON-EXO +S02-NX-F-NON-EXO	
MORE OF		E	1. SETTLING-TKR-LF PIPE-S03-PLO-LF PIPE-S03-POC-LF 2. FAIL-CS-LVCOTL 5. S03-DS-F-NON-EXI +S01-OS-F-NON-EXO +S02-NX-F-NON-EXO	
LESS OF		E	2. FAIL-CS-LVCOTL 5. S03-DS-F-MOF-EXI +S01-OS-F-MOF-EXO +S02-NX-F-MOF-EXO	
		C	1. SETTLING-TKR-LF PIPE-S03-PLO-LF PIPE-S03-POC-LF	
* MORE *			+S02-NX-F-LOF-EXO	

表 4.1.5 オレフィン二量化プラントの原料移送部の解析結果（5）

<GUID WORD>	<DEVIATION>	<CONSEQUENCES>	<CAUSES>	<CONDITION>
LESS OF		C E	5. S03-DS-F-LOF-EXI +S01-OS-F-LOF-EXO +S02-NX-F-LOF-EXO 1. SETTLING-TKR-LF PIPE-S03-PLO-LF PIPE-S03-POC-LF 5. S03-DS-F-LOF-EXI +S01-OS-F-LOF-EXO +S02-NX-F-LOF-EXO	

表 4.1.6 オレフィン二量化プラントの原料移送部の解析結果（6）

SEGMENT NO. : S04 FLUID : DISSOLUTION SOLUTION PROCESS PARAMETER : FLOW				
<GUID WORD>	<DEVIATION>	<CONSEQUENCES>	<CAUSES>	<CONDITION>
		A. FIRE B. EXPLOSION C. LEAK D. CRITICALITY E. EXTENSION	1. COMPONENT FAILURE 2. CONTROL SYSTEM FAILURE 3. COOLING SYSTEM FAILURE 4. HEATING SYSTEM FAILURE 5. EXTENSION	1. DETECTION FAILURE 2. CONTROL SYSTEM FAILURE 3. SAFETY SYSTEM FAILURE
NONE		C	1. PUMP2 -PSS-LF PUMP2 -PRS-LF PUMP2 -EPS-SF PUMP2 -SIG-SF PUMP2 -CNT-LF V2 -XOC-LF V2 -XLO-LF NV2 -NOC-LF NV2 -NLO-LF HEXCHANG-HXC-LF PIPE-S04-PLO-LF PIPE-S04-POC-LF 2. FAIL-CS-FLOWCOTL 4. FAIL-HS-HEXCHANG 5. S04-DS-F-NON-EXI +S03-DS-F-NON-EXO	1. FAIL-DS-FI2
* MORE *			HEXCHANG-HXC-LF	

表 4.1.7 オレフィン二量化プラントの原料移送部の解析結果 (7)

<GUID WORD>	<DEVIATION>	<CONSEQUENCES>	<CAUSES>	<CONDITION>
NONE		E	1. PUMP2 -PSS-LF PUMP2 -PRS-LF PUMP2 -EPS-SF PUMP2 -SIG-SF PUMP2 -CNT-LF V2 -XOC-LF V2 -XLO-LF NV2 -NOC-LF NV2 -NLO-LF HEXCHANG-HXC-LF PIPE-S04-PLO-LF PIPE-S04-POC-LF 2. FAIL-CS-FLOWCOTL 4. FAIL-HS-HEXCHANG 5. S04-DS-F-NON-EXI +S03-DS-F-NON-EXO	1. FAIL-DS-FI2
MORE OF		E	1. PUMP2 -PRS-LF PUMP2 -CNT-LF 2. FAIL-CS-FLOWCOTL 4. FAIL-HS-HEXCHANG 5. S04-DS-F-MOF-EXI +S03-DS-F-MOF-EXO	1. FAIL-DS-FI2
LESS OF		C	1. PUMP2 -PRS-LF PUMP2 -CNT-LF V2 -XOC-LF V2 -XLO-LF NV2 -NOC-LF NV2 -NLO-LF HEXCHANG-HXC-LF PIPE-S04-PLO-LF PIPE-S04-POC-LF 2. FAIL-CS-FLOWCOTL 4. FAIL-HS-HEXCHANG 5. S04-DS-F-LOF-EXI +S03-DS-F-MOF-EXO	1. FAIL-DS-FI2 1. FAIL-DS-FI2
* MORE *			V2 -XOC-LF	

表 4.1.8 オレフィン二量化プラントの原料移送部の解析結果（8）

<GUID WORD>	<DEVIATION>	<CONSEQUENCES>	<CAUSES>	<CONDITION>
LESS OF		E	1. PUMP2 -PRS-LF PUMP2 -CNT-LF V2 -XOC-LF V2 -XLO-LF NV2 -NOC-LF NV2 -NLO-LF HEXCHANG-HXC-LF PIPE-S04-PLO-LF PIPE-S04-POC-LF 2. FAIL-CS-FLOWCOTL 4. FAIL-HS-HEXCHANG 5. S04-DS-F-LOF-EXI +S03-DS-F-LOF-EXO	1. FAIL-DS-FI2

表 4.1.9 オレフィン二量化プラントの原料移送部の解析結果（9）

SEGMENT NO. ; S05 FLUID ; STEAM PROCESS PARAMETER ; FLOW		<CONSEQUENCES>	<CAUSES>	<CONDITION>
<GUID WORD>	<DEVIATION>	A. FIRE B. EXPLOSION C. LEAK D. CRITICALITY E. EXTENSION	1. COMPONENT FAILURE 2. CONTROL SYSTEM FAILURE 3. COOLING SYSTEM FAILURE 4. HEATING SYSTEM FAILURE 5. EXTENSION	1. DETECTION FAILURE 2. CONTROL SYSTEM FAILURE 3. SAFETY SYSTEM FAILURE
NONE		E	5. S05-ST-F-NON-EXI	
MORE OF		E	5. S05-ST-F-MOF-EXI	
LESS OF		E	5. S05-ST-F-LOF-EXI	

4.1.2. 回路系に対する解析

ここでは、回路系に対する解析を実施する。オレフィン二量化プラントの原料移送部の解析にあたり、この回路系に対する解析手順によって結果を求める必要のある機器は、以下のものである。

- A. 流量制御系
- B. 液位制御系
- C. ポンプ系

このうち、ポンプ系に対する解析は、3.3 節に例として示したものと同様である。流量制御系および液位制御系に対する解析を以下に示す。

A. 流量制御系の解析

配管に空気圧によって制御される弁を付け、それを流量調節器（コントローラ）とつないで流量を制御する。¹⁹⁾

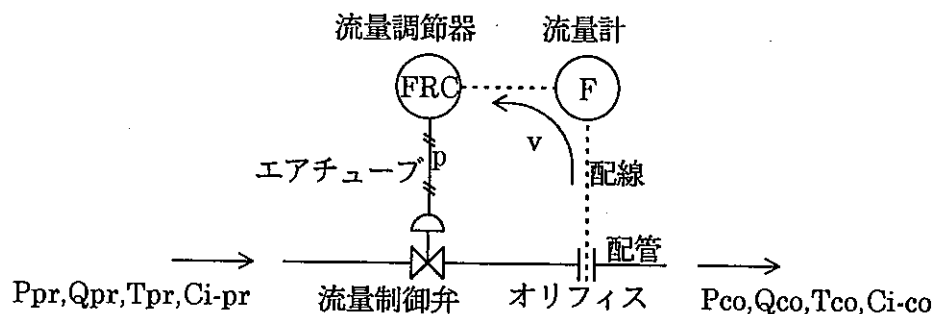


図 4.2 流量制御系の構造図

図 4.2 において、流量制御系は配管部と制御回路部に分けることができる。これらは表 4.2 のような構成であると考えられる。

表 4.2 流量制御系の構成

グループ名	構成機器	変数	変数の説明	HAZOP
配管部	配管	P	流体の圧力	従来手法 (配管系)
	制御弁	Q	流体の流量	
	オリフィス	T	流体の温度	
	(流量センサ)	Ci	流体の濃度	
制御回路部	エアチューブ	p	エアチューブ内の実際の圧力	提案手法 (回路系)
	配線	p0	エアチューブ内の圧力の初期値	
	調節器	Δp	エアチューブ内の圧力の操作目標量	
	流量計	v	配線における電圧	

変数の添字 (pr : 制御前の変数 co : 制御後の変数)

状態量を表す変数の関係を図 4.3 に示す。

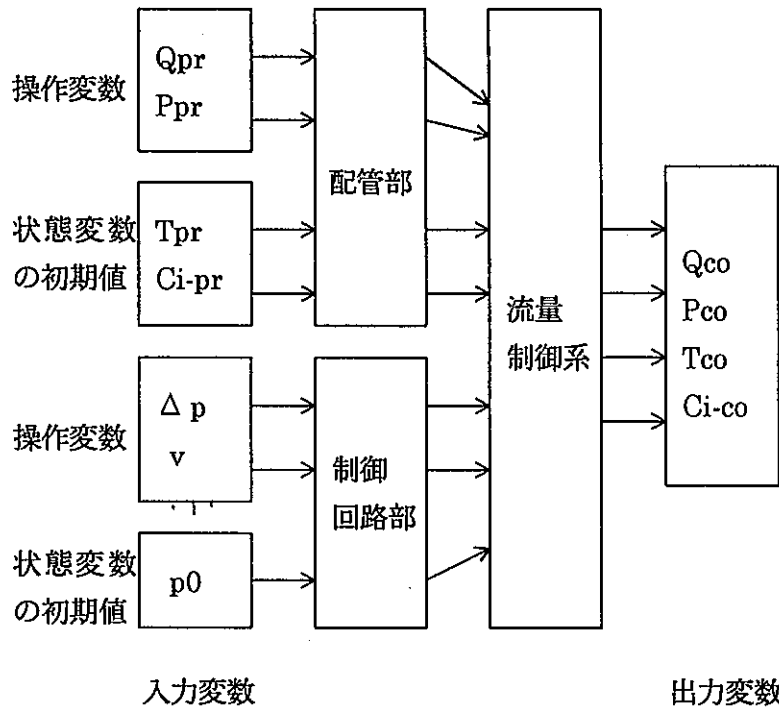


図 4.3 流量制御系の入出力関係

ここで、操作変数に分類された変数の流れと最終的に決定される出力変数の関係を表すと、図 4.4 のように考えることができる。制御回路部は、プロセス変数の違いにより配線部と動力伝達部（エアチューブ）に分割できる。すなわち、電圧 v をプロセス変数と考える部分と、圧力 $p (=p_0 + \Delta p)$ をプロセス変数と考える部分に区分できる。

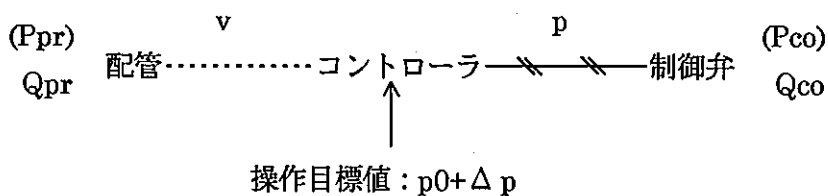


図 4.4 流量制御系の操作量の流れ

表 4.3に流量制御系に対するプロセス変数ごとの HAZOP の解析結果を示す。これら各々の部分に対する HAZOP の結果を配管部とは別の表にまとめる。ここでは、操作量の流れの順に表を作成している。また影響欄の番号は、直下の表のずれの部分に示す同じ番号の欄につながりがあることを示す。

表 4.3 流量制御系に対するプロセス変数ごとの解析結果

手引用語	ずれ	原因	影響
------	----	----	----

配線部 (プロセス変数: 検知電圧, v)

NONE	電圧無し	停電, 電源部故障 オリフィスの故障 (異常) 制御部の故障 配線の断絶	流量の誤認 (流量無しと誤認) ② 着火元の発生
MORE	電圧増加	制御部の異常	流量の誤認 (必要未満) ①, ③
LESS	電圧減少	配線のショート (漏電) 電源部の異常	着火元の発生 流量の誤認 (必要以上) ②
OTHE R	誤電圧 (誤信号)	検知部 (流量センサ) の異常	流量の誤認①, ②, ③

動力伝達部 (プロセス変数: 圧力, $p=p+\Delta p$)

MORE	圧力増加 ②	調節器の異常 (高出力), 電圧異常	バルブの開きすぎ②
LESS	圧力減少 ①, ③	チューブの漏れ, 破裂, 閉塞 調節器の異常 (低出力), 電圧異常	バルブが開き足らず③ バルブが開かない①

配管部 (プロセス変数: 流量, Q_{co})

NONE	流量無し ①	配管の完全閉塞, 破裂 制御弁への供給圧力が定格以下 制御弁本体の故障 (作動しない) 弁機構のずれ, 引っ掛かり (閉塞)	原料を移送しない (システムの停止)
MORE	流量増加 ②	調節器の故障 制御弁の開放故障 制御弁への供給圧力の増加	配管系の破損 必要量以上の原料移送
LESS	流量減少 ③	配管からの漏れ 制御弁への供給圧力の減少 弁機構部の異常, 外部漏洩	システムの性能低下 (生産量減少)

B. 液位制御系の解析

配管に空気圧によって制御される弁を付け、それを液位調節器（コントローラ）とつないで下流セグメントであるタンクの液位を制御する。

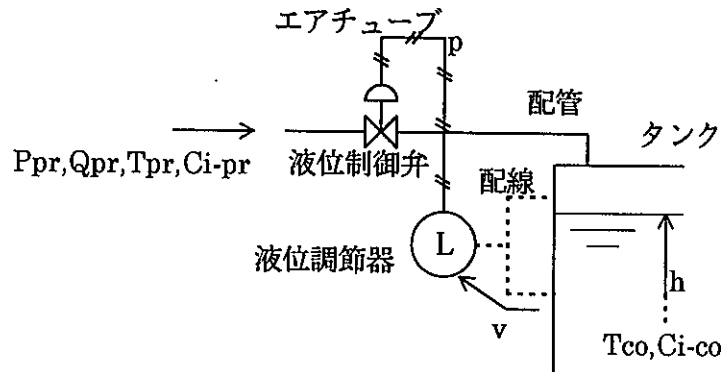


図 4.5 液位制御系の構造図

図 4.5 において、液位制御系は配管部と制御回路部とタンク部に分けることができる。これらは表 4.4 のような構成であると考えられる。配管部とタンク部は、HAZOP 支援システムにおいて別のセグメントとして認識されるため、分けて考えている。

表 4.4 液位制御系の構成

グループ名	構成機器	変数	変数の説明	HAZOP
配管部 添字 -pi (pipe の略)	配管 制御弁	P Q T Ci	流体の圧力 流体の流量 流体の温度 流体の濃度	従来手法 (配管系)
制御回路部	エアチューブ 配線 調節器	p p0 Δp v	エアチューブ内の実際の圧力 エアチューブ内の圧力の初期値 エアチューブ内の圧力の操作目標量 配線における電圧	提案手法 (回路系)
タンク部 添字 -t (tank の略)	タンク 液位センサ	T Ci h h0 Δh	流体の温度 流体の濃度 タンク内の液位 タンク内の液位の初期値 タンク内の液位の操作目標量	従来手法 (配管系)

変数の添字 (pr : 制御前の変数 co : 制御後の変数)

状態量を表す変数の関係を図 4.6 に示す。

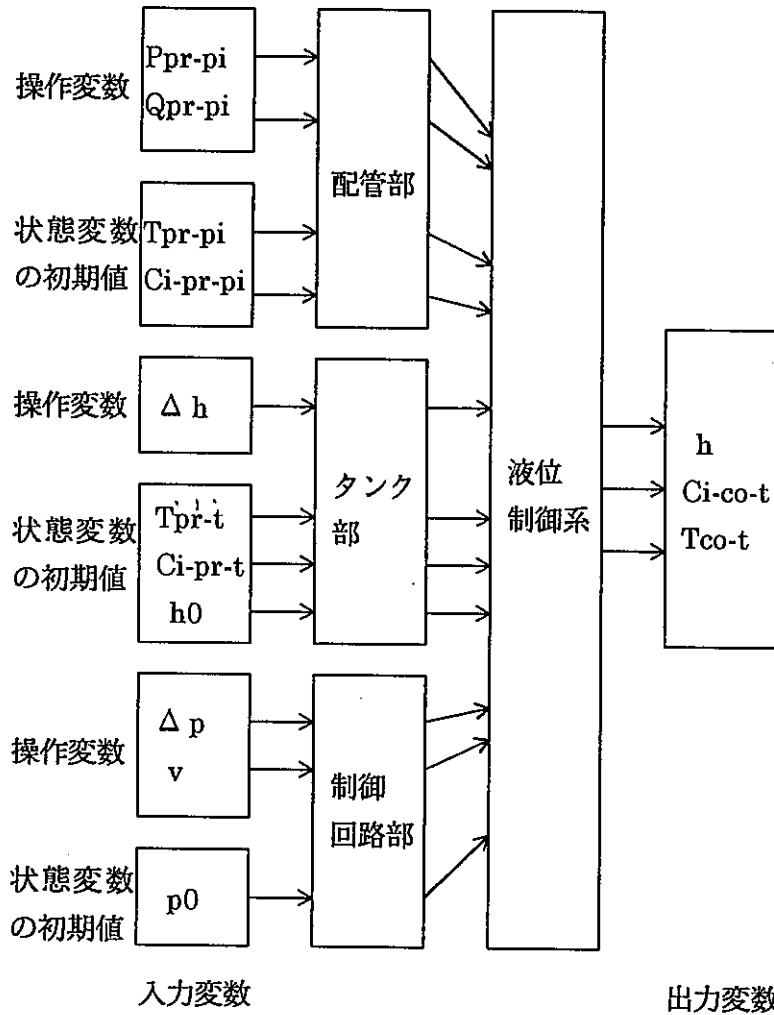


図 4.6 液位制御系の入出力関係

ここで、操作変数に分類された変数の流れと最終的に決定される出力変数の関係を表すと、図 4.7 のように考えることができる。

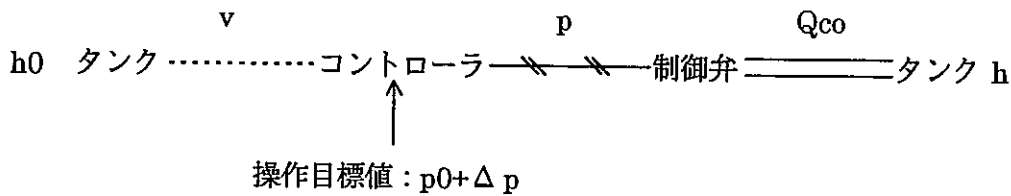


図 4.7 液位制御系の操作量の流れ

制御回路部は、プロセス変数の違いにより配線部と動力伝達部（エアチューブ）に分割できる。すなわち、電圧 v をプロセス変数と考える部分と、圧力 p ($=p_0+\Delta p$) をプロセス変数と考える部分に区分できる。さらに、セグメントの違いからタンク入口部の配管流量（制御後の流量を Q_{co} とする）をプロセス変数と考える部分を配管部として区分する。

流量制御系と大きく異なるのは、2つのセグメントにまたがった制御系であるため、操作量の流れにおいてこのように配管系に着目すべき部分が存在するという点である。このことが、より変数の扱いを困難にし、解析を難しくしている。

表 4 に液位制御系に対するプロセス変数ごとの HAZOP の解析結果を示す。これら各々の部分に対する HAZOP の結果をタンク部とは別の表にまとめる。ここでは、操作量の流れの順に表を作成している。また影響欄の番号は、直下の表のずれの部分に示す同じ番号の欄につながりがあることを示す。

ただし、タンクの液位 h は、制御前の液位 h_0 と制御目標量 Δh により、 $h=h_0+\Delta h$ と考えることができる。この内、 Δh は液位の操作量であるが、操作目標とする変化量を意味している。

表 4.5 液位制御系に対するプロセス変数ごとの解析結果

手引用語	ずれ	原因	影響
------	----	----	----

配線部 (プロセス変数: 検知電圧, v)

NONE	電圧無し	停電, 電源部故障 制御部故障 配線の断絶	液位の誤認 (タンクが空と誤認) ② 着火元の発生
MORE	電圧増加	制御部異常	液位の誤認①, ③
LESS	電圧減少	配線のショート (漏電) 電源部の異常	着火元の発生 液位の誤認②
OTHE R	誤電圧 (誤信号)	検知部 (液位センサ) の異常	液位の誤認①, ②, ③

動力伝達部 (プロセス変数: 圧力, $p=p+\Delta p$)

MORE	圧力増加 ②	調節器の異常 (高出力), 電圧異常	バルブの開きすぎ②
LESS	圧力減少 ①, ③	チューブの漏れ, 破裂, 閉塞 調節器の異常 (低出力), 電圧異常	バルブが開き足らず③ バルブが開かない①

配管部 (プロセス変数: 流量, Q_{co})

NONE	流量無し ①	配管の完全閉塞, 破裂 制御弁の故障 (機構) 制御弁への供給圧力が定格以下	タンク内の原料の喪失① 原料を移送しない
MORE	流量増加 ②	調整器の故障 制御弁の開放故障 制御弁への供給圧力の増加	配管の破損 タンクの液位上昇②
LESS	流量減少 ③	配管からの漏れ 弁機構部の異常	システムの性能低下③

タンク部 (プロセス変数: 液位, $h=h_0+\Delta h$)

NONE	液位無し ①, ③	制御弁の閉塞故障 配管の破裂 (供給無し)	タンクが空 (システムの停止)
MORE	液位上昇 ②	制御弁の開放故障	配管への逆流
LESS	液位低下 ③	制御弁の外部漏洩 配管からの漏れ	システムの性能低下

4.2. 解析結果の検討

ここでは、オレフィン二量化プラントの原料移送部に対する解析結果の検討を行う。HAZOP 支援システムで得られた結果および回路系に対する解析で明らかになった事柄をあわせて考察する。

まず、支援システムで得られた結果では次のようなことが言える。表 4.1.1, 表 4.1.2, 表 4.1.6, 表 4.1.7, 表 4.1.8 に示すように機器が多く配置されている配管セグメントでは、各機器における原因事象を十分に列挙することができている。また、調節器（流量および液位）、制御弁などの制御システムにおける故障を条件事象として列挙することもできている。しかし、この解析対象は化学プラントであるため、放射能に関わる事象の選択肢を選べない。そのため、影響事象の選択はさらに限らざるをえなかった。一方、配管セグメントでないもの（ここでは、緩衝器のセグメント NO.3）に対しても、表 4.1.4, 表 4.1.5 に示すようにかなり充実した原因事象の列挙が行えている。しかし、タンク類であるセグメントの原因事象に配管の故障（PIPE-S03-PLO-LF 他）が列挙されるのは、問題点の 1 つと言える。さらに、表 4.1.3, 表 4.1.9 に示すように配管上に機器のないセグメントでは、機器の故障を考えないため、プロセス量の変動の波及のみを異常（原因事象および影響事象）とみなすことしかできない。

次に、回路系に対する解析では、制御回路を中心に解析した。配線における電圧と調節器が弁を制御するためのエアの圧力にずれを想定することにより、解析を可能にした。このようにどの変数にずれを想定すべきかを明らかにするなど、変数の分類を行うことで解析を円滑に進めることができた。この手順で得た結果は、FTA で評価した結果と比較しても同等の要素故障まで解析を進めているといえる。また、ポンプ系の解析では、従来の研究で実施された連続攪拌反応槽の解析結果を参考にし、ポンプ（モータ）の回転数にずれを想定した。さらに制御回路同様、配線の電圧にずれを想定し、解析を実施した。

回路系およびポンプ系に対する結果は、支援システムで得られた結果のうち、制御系の故障（原因事象および条件事象における項目 FAIL-CS-LVCOTL 他）およびポンプの故障の各項目（PUMP1-PSS-LF 他）とのつながりが明確である。すなわち、流量制御系およびポンプ系は、支援システムの結果の一部として組み込みが容易であり、全体を 1 つの結果として扱える。ただし液位制御系に対する結果は、簡単には組み込めない。先にも述べたとおり、2 つのセグメントにまたがっているからである。そのため、制御量の流れの一部に配管流量が関わってくる。配管流量に対するずれは、すでに支援システムで考慮されており、ここで再び解析を実施すると重複することになる。しかし、制御に関するずれのみを回路系の一部とみなして解析することが重要である。そのため、支援システムの結果に組み込む時に、その配管部の結果の欄を検討しながら書き直す必要がある。この液位制御系のように 2 つのセグメントにまたがった回路系に対する解析では、その扱いを注意すべきことがわかった。

ここで、この解析結果を従来の研究による解析結果と比較検討する。このオレフィン二量化プラントの原料移送部を解析対象としている報告として、Venkatasubramanian による報告¹¹⁾と Kletz による報告²⁰⁾を参照した。ここに示すのは、ずれに「流量なし」を想定した時の原因、影響の事象であり、HAZOP 支援システムの解析結果では、表 4.1.1、表 4.1.2 に示してある。これは、表 4. および表 4. と比較しても、同等の結果を得ていると言える。

表 4.6 Venkatasubramanian による報告

原因事象	影響事象
中間貯蔵庫に利用できる炭化水素なし ポンプ 1 の故障 ライン封鎖、あるいは LCV 故障-閉塞 ライン分断	反応セクションへの原料供給損失と出力低下 流量なしの状況の下で熱交換器にポリマー形成 ポンプ 1 オーバーヒート 炭化水素流出 ポンプ 2 オーバーヒート

表 4.7 Kletz による報告

原因事象	影響事象
中間貯蔵庫に炭化水素がない J1 ポンプの故障 (モータの故障、羽根車の腐蝕等) 配管の詰まり、LCV を誤って閉めた、 誤ってバルブを閉めた 配管破裂	反応部の原料と出力の減少、 熱交換器においてポリマーの形成 J1 ポンプが過熱 近接した公道への炭化水素の流出

総じて、回路系に対する解析を含めた HAZOP 支援システムによる全体の解析結果は、化学プラントを対象にすることも可能であると言える。すなわち、HAZOP 支援システムおよび回路系に対する HAZOP の解析手順は、化学プラントに対してどちらも有用であることが明らかになった。しかし、化学プラントを HAZOP 支援システムで解析するには、先に述べたようにまだ問題となる点も残されている。

5. 応用例（再処理プラント）

本章では HAZOP 支援システムを用い、原子力関連プラントに対する解析実施例を示す。

5.1. 高レベル廃液貯槽冷却システム

5.1.1. 支援システムによる解析

再処理プラントの高レベル廃液貯槽の冷却システム¹⁰⁾を解析対象システムとして取り上げる。そのシステムを解析用に簡略化したものが図 5.1 である。

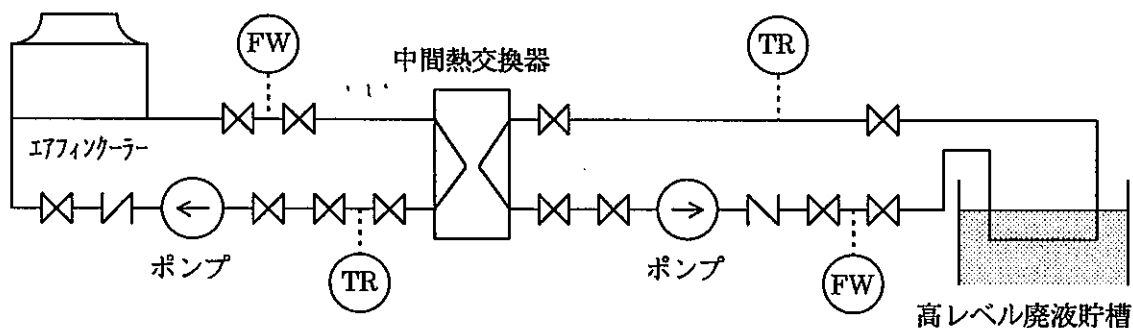


図 5.1 高レベル廃液貯槽冷却システム

この冷却システムは、高レベル廃液貯槽内の廃液の熱を 2 つのループで構成された冷却配管によりエアフィンクーラーから排出するものである。

それぞれのセンサ類の名称を以下に示す。

FW：流量計

TR：温度計

ここで対象システムは、2 つのループによって構成されているが、HAZOP 支援システムでは、このループを解析することができない。そのため、1 つのループをタンクからタンクへの配管として代用する。また、バルブも同じセグメント上では、結果に反映される意味合いが乏しいため、最低限の数で代用している。（センサ類も省略する。）

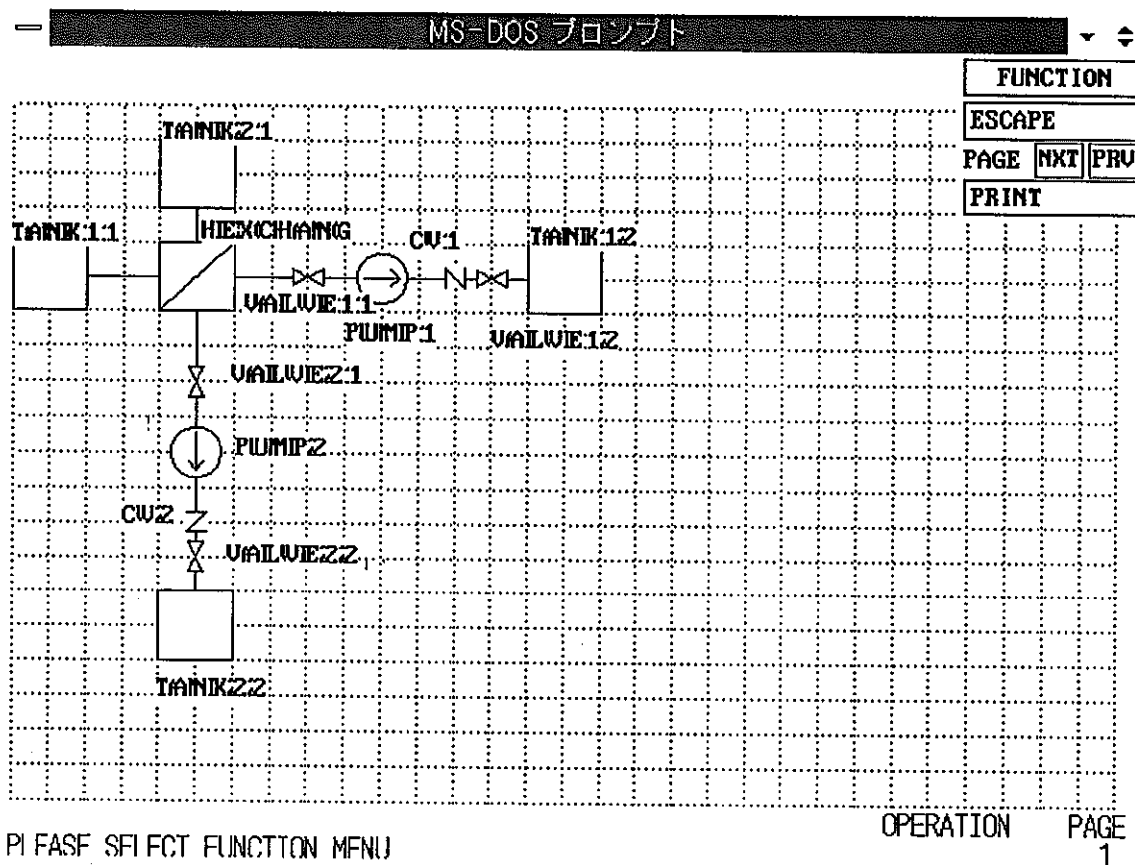


図 5.2 冷却システムの入力図

HAZOP 支援システムの動作を考慮して、変更した冷却システムを図 5.2に示す。これは、HAZOP 支援システムのインターフェースにおける入力図である。

ここで熱交換器は、図 5.3に示すような入力様式である。互いに混ざり合わない2本の配管上に熱交換器を配置している。すなわち、熱交換器は配管セグメント上の機器である。このプラントをHAZOP 支援システムを用いて解析した結果を表 5.1に示す。

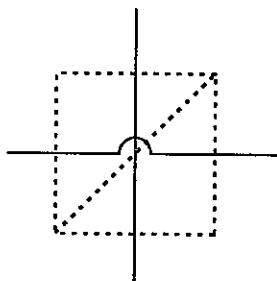


図 5.3 熱交換器の入力様式

表 5.1.1 高レベル廃液貯槽冷却システムの解析結果 (1)

SEGMENT NO. ; S01 FLUID ; CHILLED WATER PROCESS PARAMETER ; FLOW				
<GUID WORD>	<DEVIATION>	<CONSEQUENCES>	<CAUSES>	<CONDITION>
		A. FIRE B. EXPLOSION C. LEAK D. CRITICALITY E. EXTENSION	1. COMPONENT FAILURE 2. CONTROL SYSTEM FAILURE 3. COOLING SYSTEM FAILURE 4. HEATING SYSTEM FAILURE 5. EXTENSION	1. DETECTION FAILURE 2. CONTROL SYSTEM FAILURE 3. SAFETY SYSTEM FAILURE
NONE		E	5. S01-CW-F-NON-EXI	1

表 5.1.2 高レベル廃液貯槽冷却システムの解析結果 (2)

SEGMENT NO. ; S02 FLUID ; CHILLED WATER PROCESS PARAMETER ; FLOW				
<GUID WORD>	<DEVIATION>	<CONSEQUENCES>	<CAUSES>	<CONDITION>
		A. FIRE B. EXPLOSION C. LEAK D. CRITICALITY E. EXTENSION	1. COMPONENT FAILURE 2. CONTROL SYSTEM FAILURE 3. COOLING SYSTEM FAILURE 4. HEATING SYSTEM FAILURE 5. EXTENSION	1. DETECTION FAILURE 2. CONTROL SYSTEM FAILURE 3. SAFETY SYSTEM FAILURE
NONE		E	5. S02-CW-F-NON-EXI +S01-CW-F-NON-EXO	
MORE OF		C	1. PUMP1 -PRS-LF PUMP1 -CNT-LF CV1 -COO-LF CV1 -CCO-LF 5. S02-CW-F-MOF-EXI +S01-CW-F-NON-EXO	
		E	1. PUMP1 -PRS-LF PUMP1 -CNT-LF CV1 -COO-LF CV1 -CCO-LF 5. S02-CW-F-MOF-EXI +S01-CW-F-NON-EXO	
* MORE *			PIPE-S02-PLO-LF	

表 5.1.3 高レベル廃液貯槽冷却システムの解析結果 (3)

<GUID WORD>	<DEVIATION>	<CONSEQUENCES>	<CAUSES>	<CONDITION>
LESS OF		C	1. HEXCHANG-HXC-LF PUMP1 -PRS-LF PUMP1 -CNT-LF CV1 -CCC-LF CV1 -CLO-LF VALVE12 -XOC-LF VALVE12 -XLO-LF VALVE11 -XOC-LF VALVE11 -XLO-LF PIPE-S02-PLO-LF PIPE-S02-POC-LF 5. S02-CW-F-LOF-EXI +S01-CW-F-NON-EXO	
REVERSE		E	1. HEXCHANG-HXC-LF PUMP1 -PRS-LF PUMP1 -CNT-LF CV1 -CCC-LF CV1 -CLO-LF VALVE12 -XOC-LF VALVE12 -XLO-LF VALVE11 -XOC-LF VALVE11 -XLO-LF PIPE-S02-PLO-LF PIPE-S02-POC-LF 5. S02-CW-F-LOF-EXI +S01-CW-F-NON-EXO	
		E	5. S02-CW-F-REV-EXI +S01-CW-F-NON-EXO	

表 5.1.4 高レベル廃液貯槽冷却システムの解析結果 (4)

SEGMENT NO. ; S03 FLUID ; CHILLED WATER PROCESS PARAMETER ; FLOW				
<GUID WORD>	<DEVIATION>	<CONSEQUENCES>	<CAUSES>	<CONDITION>
		A. FIRE B. EXPLOSION C. LEAK D. CRITICALITY E. EXTENSION	1. COMPONENT FAILURE 2. CONTROL SYSTEM FAILURE 3. COOLING SYSTEM FAILURE 4. HEATING SYSTEM FAILURE 5. EXTENSION	1. DETECTION FAILURE 2. CONTROL SYSTEM FAILURE 3. SAFETY SYSTEM FAILURE
REVERSE		E	5. S03-CW-F-REV-EXI +S02-CW-F-NON-EXO +S02-CW-F-MOF-EXO +S02-CW-F-LOF-EXO +S02-CW-F-REV-EXO	

表 5.1.5 高レベル廃液貯槽冷却システムの解析結果 (5)

SEGMENT NO. ; S04 FLUID ; CHILLED WATER PROCESS PARAMETER ; FLOW				
<GUID WORD>	<DEVIATION>	<CONSEQUENCES>	<CAUSES>	<CONDITION>
		A. FIRE B. EXPLOSION C. LEAK D. CRITICALITY E. EXTENSION	1. COMPONENT FAILURE 2. CONTROL SYSTEM FAILURE 3. COOLING SYSTEM FAILURE 4. HEATING SYSTEM FAILURE 5. EXTENSION	1. DETECTION FAILURE 2. CONTROL SYSTEM FAILURE 3. SAFETY SYSTEM FAILURE
NONE		E	5. S04-CW-F-NON-EXI	

表 5.1.6 高レベル廃液貯槽冷却システムの解析結果 (6)

SEGMENT NO. : S05 FLUID : CHILLED WATER PROCESS PARAMETER : TEMPERATURE				
<GUID WORD>	<DEVIATION>	<CONSEQUENCES>	<CAUSES>	<CONDITION>
		A. FIRE B. EXPLOSION C. LEAK D. CRITICALITY E. EXTENSION	1. COMPONENT FAILURE 2. CONTROL SYSTEM FAILURE 3. COOLING SYSTEM FAILURE 4. HEATING SYSTEM FAILURE 5. EXTENSION	1. DETECTION FAILURE 2. CONTROL SYSTEM FAILURE 3. SAFETY SYSTEM FAILURE
MORE OF		B D E	1. HEXCHANG-HXR-LF HEXCHANG-HXC-LF HEXCHANG-COL-SF PUMP2 -PRS-LF PUMP2 -CNT-LF CV2 -CCO-LF 3 5. S05-CW-T-MOF-EXI +S04-CW-F-NON-EXO 1. HEXCHANG-HXR-LF HEXCHANG-HXC-LF HEXCHANG-COL-SF PUMP2 -PRS-LF PUMP2 -CNT-LF CV2 -CCO-LF 3 5. S05-CW-T-MOF-EXI +S04-CW-F-NON-EXO 5. S05-CW-T-MOF-EXI +S04-CW-F-NON-EXO	

表 5.1.7 高レベル廃液貯槽冷却システムの解析結果 (7)

SEGMENT NO. : S05 FLUID : CHILLED WATER PROCESS PARAMETER : FLOW				
<GUID WORD>	<DEVIATION>	<CONSEQUENCES>	<CAUSES>	<CONDITION>
		A. FIRE B. EXPLOSION C. LEAK D. CRITICALITY E. EXTENSION	1. COMPONENT FAILURE 2. CONTROL SYSTEM FAILURE 3. COOLING SYSTEM FAILURE 4. HEATING SYSTEM FAILURE 5. EXTENSION	1. DETECTION FAILURE 2. CONTROL SYSTEM FAILURE 3. SAFETY SYSTEM FAILURE
NONE		E	1. HEXCHANG-HXC-LF PUMP2 -PSS-LF PUMP2 -PRS-LF PUMP2 -EPS-SF PUMP2 -SIG-SF PUMP2 -CNT-LF CV2 -CCC-LF CV2 -CLO-LF VALVE22 -XOC-LF VALVE22 -XLO-LF VALVE21 -XOC-LF VALVE21 -XLO-LF PIPE-S05-PLO-LF PIPE-S05-POC-LF 5. S05-CW-F-NON-EXI +S04-CW-F-NON-EXO	
MORE OF		C	1. PUMP2 -PRS-LF PUMP2 -CNT-LF CV2 -COO-LF CV2 -CCO-LF 5. S05-CW-F-MOF-EXI +S04-CW-F-NON-EXO	
* MORE *			CV2 -COO-LF	

表 5.1.8 高レベル廃液貯槽冷却システムの解析結果 (8)

<GUID WORD>	<DEVIATION>	<CONSEQUENCES>	<CAUSES>	<CONDITION>
MORE OF		E	1. PUMP2 -PRS-LF PUMP2 -CNT-LF CV2 -COO-LF CV2 -CCO-LF 5. S05-CW-F-MOF-EXI +S04-CW-F-NON-EXO	
LESS OF		C	1. HEXCHANG-HXC-LF PUMP2 -PRS-LF PUMP2 -CNT-LF CV2 -CCC-LF CV2 -CLO-LF VALVE22 -XOC-LF VALVE22 -XLO-LF VALVE21 -XOC-LF VALVE21 -XLO-LF PIPE-S05-PLO-LF PIPE-S05-POC-LF 5. S05-CW-F-LOF-EXI +S04-CW-F-NON-EXO	
		E	1. HEXCHANG-HXC-LF PUMP2 -PRS-LF PUMP2 -CNT-LF CV2 -CCC-LF CV2 -CLO-LF VALVE22 -XOC-LF VALVE22 -XLO-LF VALVE21 -XOC-LF VALVE21 -XLO-LF PIPE-S05-PLO-LF PIPE-S05-POC-LF 5. S05-CW-F-LOF-EXI +S04-CW-F-NON-EXO	
REVERSE		E	5. S05-CW-F-REV-EXI +S04-CW-F-NON-EXO	

表 5.1.9 高レベル廃液貯槽冷却システムの解析結果 (9)

SEGMENT NO. : S06 FLUID : CHILLED WATER PROCESS PARAMETER : FLOW				
<GUID WORD>	<DEVIATION>	<CONSEQUENCES>	<CAUSES>	<CONDITION>
		A. FIRE B. EXPLOSION C. LEAK D. CRITICALITY E. EXTENSION	1. COMPONENT FAILURE 2. CONTROL SYSTEM FAILURE 3. COOLING SYSTEM FAILURE 4. HEATING SYSTEM FAILURE 5. EXTENSION	1. DETECTION FAILURE 2. CONTROL SYSTEM FAILURE 3. SAFETY SYSTEM FAILURE
REVERSE		E	5. S06-CW-F-REV-EXI +S05-CW-T-MOF-EXO +S05-CW-F-NON-EXO +S05-CW-F-MOF-EXO +S05-CW-F-LOF-EXO +S05-CW-F-REV-EXO	

5.1.2. 回路系に対する解析（付属要素解析）

ここでは、回路系に対する解析を実施する。解析対象に選んだ「高レベル廃液貯槽冷却システム」には、エアフィンクーラー、冷却コイルといった特殊な付属要素（システムコンポーネント）が組み込まれている。これらは、HAZOP 支援システム内にあらかじめ準備されている機器には、代用できるものが無いため、支援システムによる解析とは別に HAZOP を実施する。すなわち、HAZOP 支援システムにおける解析可能範囲を超えている。そのため、高レベル廃液貯槽冷却システムの解析にあたり、この回路系に対する解析手順によって結果を求める必要のある機器は、以下のものである。

- A. エアフィンクーラー
- B. 冷却コイル
- C. ポンプ系

このうち、ポンプ系に対する解析は、3.3 節で示したものと同様である。また、冷却コイルは、回路系とは言えないが、影響事象の違いにより分類した解析を必要とするものであるため、ここで解析を実施する。以下にエアフィンクーラーおよび冷却コイルに対する解析を示す。

A. エアフィンクーラーの解析

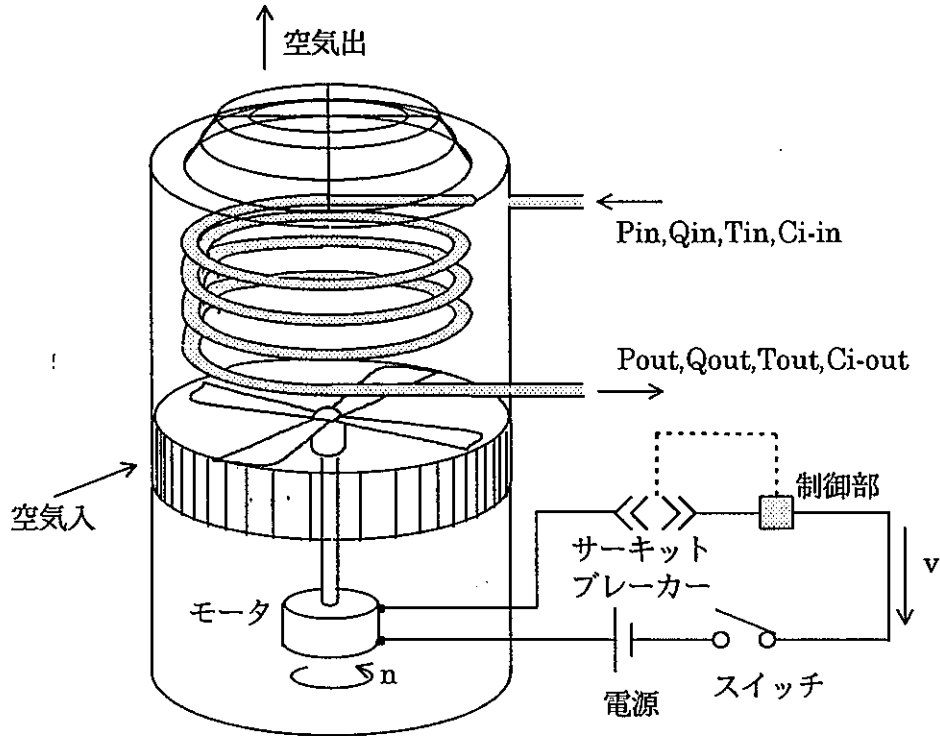


図 5.4 エアフィンクーラーの構造図

図 5.4 に、エアフィンクーラー (AFC) の構造図を示す。エアフィンクーラーは、いわゆるラジエーターのようなもので、液体 (冷媒) の入った配管にファンで空気を当てて冷やすものである。エアフィンクーラーは、配管部と駆動部に分けることができる。これらは表 5.2 のような構成であると考えられる。

表 5.2 エアフィンクーラーの構成

グループ名	構成機器	変数	変数の説明	HAZOP
配管部	配管	P	流体の圧力	従来手法 (配管系)
		Q	流体の流量	
		T	流体の温度	
		Ci	流体の濃度	
駆動部	モータ	n	モータの回転数	提案手法 (回路系)
	配線	v	配線における電圧	
	電源	t	外気温	
	制御部			

変数の添字 (in : ポンプ上流の変数 out : ポンプ下流の変数)

状態量を表す変数の関係を図 5.5 に示す。

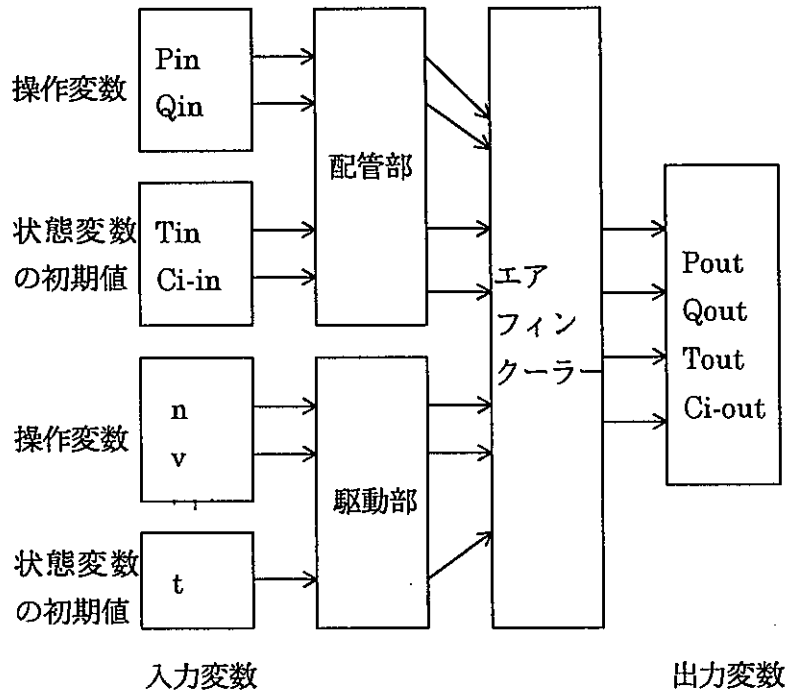


図 5.5 エアフィンクーラーの入出力関係

ここで、操作変数に分類された変数の流れと最終的に決定される出力変数の関係を表すと、図 5.6 のように考えることができる。駆動部は、プロセス変数の違いにより配線部と機構部（モータ軸）に分割できる。すなわち、電圧 v をプロセス変数と考える部分と、回転数 n をプロセス変数と考える部分に区分できる。

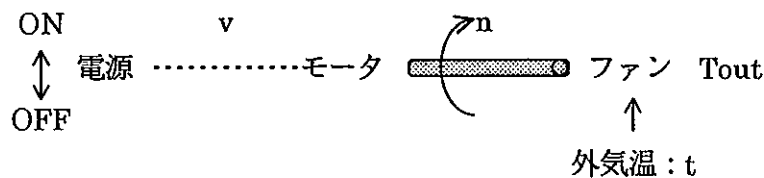


図 5.6 エアフィンクーラーの操作量の流れ

表 5.3 にポンプ系に対するプロセス変数ごとの HAZOP の解析結果を示す。これら各々の部分に対するプロセス変数ごとの HAZOP の結果を配管部とは別の表にまとめる。ここでは、操作量の流れの順に表を作成している。また影響欄の番号は、直下の表のずれの部分に示す同じ番号の欄につながりがあることを示す。

表 5.3 エアフィンクーラーに対するプロセス変数ごとの解析結果

手引用語	ずれ	原因	影響
------	----	----	----

配線部 (プロセス変数: 電圧, v)

NONE	電圧無し	停電, 電源部故障 スイッチ入れず (誤操作) サーキットブレーカーの落下 制御部故障, 配線の断線	モータが駆動しない①
MORE	電圧増加	制御部故障	モータの焼き切れ サーキットブレーカーの落下①
LESS	電圧減少	配線のショート (漏電) 電源の異常	モータの回転数の減少②

機構部 (プロセス変数: 回転数, n)

NONE	ファンが回らない①	モータへの供給電圧が0 モータ本体の故障 モータ軸の故障 ファンのずれ, 引っ掛かり	液体 (冷媒) の温度上昇
LESS	ファンの回転数が低い②	モータへの供給電圧の減少 モータ軸の異常	液体 (冷媒) の温度上昇

配管部 (プロセス変数: 流量, Q_{out})

NONE	流量無し	配管の完全閉塞 配管の破裂	液体 (冷媒) の停止による温度上昇 液体 (冷媒) の喪失による温度上昇
MORE	流量増加	上流においてポンプの過剰運転	配管系の破損
LESS	流量減少	配管からの漏れ 上流においてポンプの性能低下	液体 (冷媒) の循環不足による温度上昇

B. 冷却コイルの解析

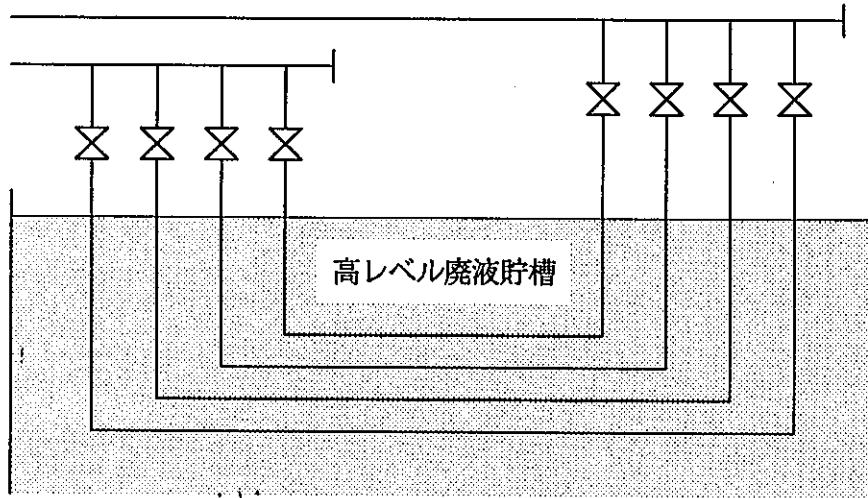


図 5.7 高レベル廃液貯槽および冷却コイル

図 5.7 に高レベル廃液貯槽およびその冷却コイルの構造を示す。この HAZOP による解析を実施するにあたり、冷却コイルそのものは配管と同様の構造であるとみなし、その環境（周囲の状態）の特徴から考えられる影響ごとに分割して解析を実施する。

- a) 高レベル廃液の液面よりも上の部分
- b) 高レベル廃液の液面よりも下の部分

これら各々の部分を配管部（レベル上）、配管部（レベル下）と呼び、HAZOP による解析結果を別々の表に示す。この結果を表 5.4に示す。

表 5.4 冷却コイルに対するプロセス変数ごとの解析結果

手引用語	ずれ	原因	影響
------	----	----	----

配管部 (レベル上) (プロセス変数: 流量, Q)

NONE	流量無し	配管の完全閉塞 配管の破裂 バルブの閉塞故障	高レベル廃液の不冷却 液体 (冷媒) の喪失
MORE	流量増加	上流においてポンプの過剰運転	配管系の破損
LESS	流量減少	配管からの漏れ バルブからの漏れ 上流においてポンプの性能低下	冷却性能の低下 液体 (冷媒) の移送量が少ない

配管部 (レベル下) (プロセス変数: 流量, Q)

NONE	流量無し	配管の完全閉塞 配管の破裂 バルブの閉塞故障	高レベル廃液の不冷却 液体 (冷媒) の喪失 冷却管への廃液の流入
MORE	流量増加	上流においてポンプの過剰運転	配管系の破損
LESS	流量減少	配管からの漏れ バルブからの漏れ 上流においてポンプの性能低下	冷却性能の低下 液体 (冷媒) の移送量が少ない 冷却管への廃液の流入

5.1.3. 解析結果の検討

ここでは、高レベル廃液貯槽冷却システムに対する解析結果の検討を行う。HAZOP 支援システムで得られた結果および回路系に対する解析で明らかになった事柄をあわせて考察する。しかし、このような原子力発電所および放射能廃棄物のための施設は、近年になって建築が進んだことと、その重要性の観点から解析事例の報告はほとんど公開されていない。したがって、それらの安全評価のために HAZOP を適用した報告もほとんど無い。そのため、従来の報告事例である化学プラントとの比較検討に限られる。以下では、4 章で示した化学プラントの解析結果を参考にして検討を進める。

まず、支援システムによる結果では、その機能により入力図を図 5.2 のように変更せざるをえなかった。そのため、表 5.1.1, 表 5.1.4, 表 5.1.5, 表 5.1.9 に示すセグメント NO.1,3,4,6 の各タンクにおける解析結果は、本来の解析対象には存在しない機器である。すなわち、着目すべき解析結果は、表 5.1.2, 表 5.1.3, 表 5.1.6, 表 5.1.7, 表 5.1.9 に示すセグメント NO.2 および 5 の配管セグメントである。この部分の結果は、充実した原因事象の列挙が行えている。また、この解析対象は冷却システムであるため、影響として考えるべき事象（選択肢）は少ない。その中で、冷却システムが働かなくなり、熱を廃棄できないという異常は、表 5.1.6 に示すようにセグメント No.5 において「爆発事故の発生」を考慮することで解析している。また、制御系が存在しないので条件事象への出力はない。この条件事象とは、原因事象を助長して影響事象に及ぼせるものなので、必ずしも存在するとは限らない。

次に、回路系に対する解析では、エアフィンクーラーおよびポンプ（ポンプは 3.3 節を参照）に対する解析を実施した。エアフィンクーラーは、モータでファンを回す機能であるため、ポンプの解析過程と類似している。ただし、エアフィンクーラーでは、空気（外気）の温度が関係する。それを媒体として配管内の流体温度を制御する。温度は、ポンプ内における流体の流量と異なり、操作が容易でない。もちろん、操作変数として取り上げられないため、そこにずれを考慮してはいない。そのため、結果の表において事象の関連がなく、ポンプ系よりも不明瞭な結果となった。

また同様に考えることで、冷却コイルの特殊な影響を列挙することができた。このように、支援システムでの結果以外に影響が考えられる場合、回路系に対する解析手順のように変数の分類を考慮した HAZOP を実施することが望ましいことがわかった。

総じて、化学プラントに適用した場合と同等のことが言える。再処理プラントでは、影響を考える際に化学プラントよりも重要と考えるべき事柄が増える。放射能が存在するためである。その点においては、予備解析の対象が再処理プラントである HAZOP 支援システムは、考慮できているといえる。選択肢の中に漏洩事故の発生、臨界事故の発生が存在するのは、そのためである。この解析では、セグメント No.5 において、プロセス変数に温度を取るにより確かめている。

5.2. プルトニウム精製施設

5.2.1. 支援システムによる解析

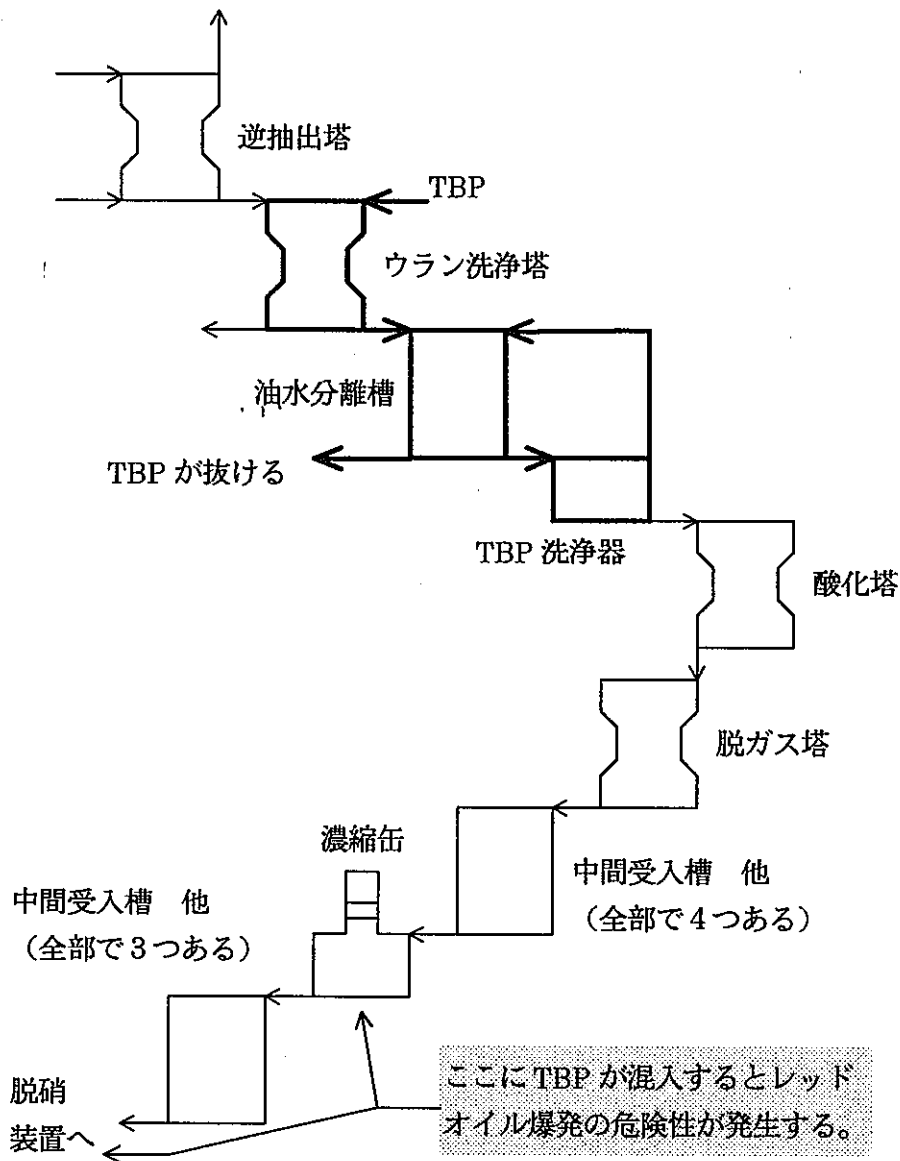


図 5.8 プルトニウム精製施設

プルトニウム精製施設のフローシート¹¹⁾は、途中の受入槽などを省略し、TBPの出入りに着目しただけの機器によって構成すると図5.8のようになる。これをHAZOP支援システムによって解析を実施しようとする、セグメント数が25個となり、膨大な解析結果となる。

また、ポンプやバルブなどの配管上の機器についての資料がないため、解析対象に忠実な解析ができない可能性が高い。さらに、油水分離槽とTBP洗浄器の間にループがある

ため、HAZOP 支援システムでの解析は難しい。ループを切り離してフローシートを作る必要があると考え、図 5.9 のように変更した。

この解析対象システムでは、図 5.8 にも示したとおり、レッドオイル爆発を最も警戒しなければならない。その発生は、TBP の流出に起因する。TBP は約 150°C 以上に熱せられると錯体が急激な分解反応を起こし、爆発する。この TBP を熱する機器として、このプロセス中の濃縮缶と脱硫装置が考えられる。しかし、解析の簡略化を考え、図 5.9 のように変更したため、それらの機器について解析ができなくなった。そこで、TBP が流れ出てはならない基準を厳しく解釈し、図 5.9 の最下流セグメントである TBP 洗浄器の出口に着目する。ここを TBP が流れた時、影響としてレッドオイル爆発が起きると考える。この大きさの解析対象であれば、セグメント数が 10 となり解析を実施することができる。

この対象プラントに対する HAZOP 支援システムによる解析結果を表 5.5 に示す。また、図 5.9 の太線部は、TBP が含まれていてもよいことを意味している。

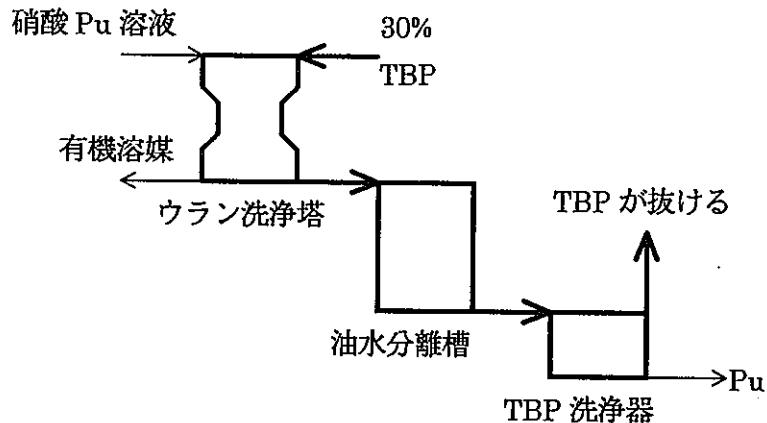


図 5.9 簡略化したプルトニウム精製施設

表 5.5.1 プルトニウム精製施設の一部の解析結果 (1)

SEGMENT NO. ; S01 FLUID ; PLUTONIUM NITRATE SOLUTION PROCESS PARAMETER ; FLOW				
<GUID WORD>	<DEVIATION>	<CONSEQUENCES>	<CAUSES>	<CONDITION>
		A. FIRE B. EXPLOSION C. LEAK D. CRITICALITY E. EXTENSION	1. COMPONENT FAILURE 2. CONTROL SYSTEM FAILURE 3. COOLING SYSTEM FAILURE 4. HEATING SYSTEM FAILURE 5. EXTENSION	1. DETECTION FAILURE 2. CONTROL SYSTEM FAILURE 3. SAFETY SYSTEM FAILURE
MORE OF		D E	5. S01-PN-F-MOF-EXI 5. S01-PN-F-MOF-EXI	

表 5.5.2 プルトニウム精製施設の一部の解析結果 (2)

SEGMENT NO. ; S02 FLUID ; TBP PROCESS PARAMETER ; FLOW				
<GUID WORD>	<DEVIATION>	<CONSEQUENCES>	<CAUSES>	<CONDITION>
		A. FIRE B. EXPLOSION C. LEAK D. CRITICALITY E. EXTENSION	1. COMPONENT FAILURE 2. CONTROL SYSTEM FAILURE 3. COOLING SYSTEM FAILURE 4. HEATING SYSTEM FAILURE 5. EXTENSION	1. DETECTION FAILURE 2. CONTROL SYSTEM FAILURE 3. SAFETY SYSTEM FAILURE
NONE		D E	5. S02-TB-F-NON-EXI 5. S02-TB-F-NON-EXI	
LESS OF		D E	5. S02-TB-F-LOF-EXI 5. S02-TB-F-LOF-EXI	

表 5.5.3 プルトニウム精製施設の一部の解析結果 (3)

SEGMENT NO. : S03 FLUID : PLUTONIUM NITRATE SOLUTION PROCESS PARAMETER : FLOW				
<GUID WORD>	<DEVIATION>	<CONSEQUENCES>	<CAUSES>	<CONDITION>
		A. FIRE B. EXPLOSION C. LEAK D. CRITICALITY E. EXTENSION	1. COMPONENT FAILURE 2. CONTROL SYSTEM FAILURE 3. COOLING SYSTEM FAILURE 4. HEATING SYSTEM FAILURE 5. EXTENSION	1. DETECTION FAILURE 2. CONTROL SYSTEM FAILURE 3. SAFETY SYSTEM FAILURE
MORE OF		D E	5. S03-PN-F-MOF-EXI +S01-PN-F-MOF-EXO 5. S03-PN-F-MOF-EXI +S01-PN-F-MOF-EXO	

表 5.5.4 プルトニウム精製施設の一部の解析結果 (4)

SEGMENT NO. : S04 FLUID : ORGANIC SOLVENT PROCESS PARAMETER : FLOW				
<GUID WORD>	<DEVIATION>	<CONSEQUENCES>	<CAUSES>	<CONDITION>
		A. FIRE B. EXPLOSION C. LEAK D. CRITICALITY E. EXTENSION	1. COMPONENT FAILURE 2. CONTROL SYSTEM FAILURE 3. COOLING SYSTEM FAILURE 4. HEATING SYSTEM FAILURE 5. EXTENSION	1. DETECTION FAILURE 2. CONTROL SYSTEM FAILURE 3. SAFETY SYSTEM FAILURE
NONE		E	5. S04-OS-F-NON-EXI +S03-PN-F-MOF-EXO	

表 5.5.5 プルトニウム精製施設の一部の解析結果 (5)

SEGMENT NO. ; S05 FLUID ; PLUTONIUM NITRATE SOLUTION PROCESS PARAMETER ; FLOW				
<GUID WORD>	<DEVIATION>	<CONSEQUENCES>	<CAUSES>	<CONDITION>
		A. FIRE B. EXPLOSION C. LEAK D. CRITICALITY E. EXTENSION	1. COMPONENT FAILURE 2. CONTROL SYSTEM FAILURE 3. COOLING SYSTEM FAILURE 4. HEATING SYSTEM FAILURE 5. EXTENSION	1. DETECTION FAILURE 2. CONTROL SYSTEM FAILURE 3. SAFETY SYSTEM FAILURE
MORE OF		D E	5. S05-PN-F-MOF-EXI +S03-PN-F-MOF-EXO 5. S05-PN-F-MOF-EXI +S03-PN-F-MOF-EXO	

表 5.5.6 プルトニウム精製施設の一部の解析結果 (6)

SEGMENT NO. ; S06 FLUID ; PLUTONIUM NITRATE SOLUTION PROCESS PARAMETER ; FLOW				
<GUID WORD>	<DEVIATION>	<CONSEQUENCES>	<CAUSES>	<CONDITION>
		A. FIRE B. EXPLOSION C. LEAK D. CRITICALITY E. EXTENSION	1. COMPONENT FAILURE 2. CONTROL SYSTEM FAILURE 3. COOLING SYSTEM FAILURE 4. HEATING SYSTEM FAILURE 5. EXTENSION	1. DETECTION FAILURE 2. CONTROL SYSTEM FAILURE 3. SAFETY SYSTEM FAILURE
MORE OF		D E	1 5. S06-PN-F-MOF-EXI +S05-PN-F-MOF-EXO 5. S06-PN-F-MOF-EXI +S05-PN-F-MOF-EXO	

表 5.5.7 プルトニウム精製施設の一部の解析結果 (7)

SEGMENT NO. ; S07 FLUID ; PLUTONIUM NITRATE SOLUTION PROCESS PARAMETER ; FLOW				
<GUID WORD>	<DEVIATION>	<CONSEQUENCES>	<CAUSES>	<CONDITION>
		A. FIRE B. EXPLOSION C. LEAK D. CRITICALITY E. EXTENSION	1. COMPONENT FAILURE 2. CONTROL SYSTEM FAILURE 3. COOLING SYSTEM FAILURE 4. HEATING SYSTEM FAILURE 5. EXTENSION	1. DETECTION FAILURE 2. CONTROL SYSTEM FAILURE 3. SAFETY SYSTEM FAILURE
MORE OF		D E	5. S07-PN-F-MOF-EXI +S06-PN-F-MOF-EXO 5. S07-PN-F-MOF-EXI +S06-PN-F-MOF-EXO	

表 5.5.8 プルトニウム精製施設の一部の解析結果 (8)

SEGMENT NO. ; S08 FLUID ; PLUTONIUM NITRATE SOLUTION PROCESS PARAMETER ; FLOW				
<GUID WORD>	<DEVIATION>	<CONSEQUENCES>	<CAUSES>	<CONDITION>
		A. FIRE B. EXPLOSION C. LEAK D. CRITICALITY E. EXTENSION	1. COMPONENT FAILURE 2. CONTROL SYSTEM FAILURE 3. COOLING SYSTEM FAILURE 4. HEATING SYSTEM FAILURE 5. EXTENSION	1. DETECTION FAILURE 2. CONTROL SYSTEM FAILURE 3. SAFETY SYSTEM FAILURE
MORE OF		D E	1 5. S08-PN-F-MOF-EXI +S07-PN-F-MOF-EXO 5. S08-PN-F-MOF-EXI +S07-PN-F-MOF-EXO	

表 5.5.9 プルトニウム精製施設の一部の解析結果 (9)

SEGMENT NO. ; S09 FLUID ; PLUTONIUM NITRATE SOLUTION PROCESS PARAMETER ; FLOW				
<GUIDE WORD>	<DEVIATION>	<CONSEQUENCES>	<CAUSES>	<CONDITION>
		A. FIRE B. EXPLOSION C. LEAK D. CRITICALITY E. EXTENSION	1. COMPONENT FAILURE 2. CONTROL SYSTEM FAILURE 3. COOLING SYSTEM FAILURE 4. HEATING SYSTEM FAILURE 5. EXTENSION	1. DETECTION FAILURE 2. CONTROL SYSTEM FAILURE 3. SAFETY SYSTEM FAILURE
MORE OF		D E	5. S09-PN-F-MOF-EXI +S08-PN-F-MOF-EXO 5. S09-PN-F-MOF-EXI +S08-PN-F-MOF-EXO	

表 5.5.10 プルトニウム精製施設の一部の解析結果 (10)

SEGMENT NO. ; S09 FLUID ; PLUTONIUM NITRATE SOLUTION PROCESS PARAMETER ; CONCENTRATION				
<GUIDE WORD>	<DEVIATION>	<CONSEQUENCES>	<CAUSES>	<CONDITION>
		A. FIRE B. EXPLOSION C. LEAK D. CRITICALITY E. EXTENSION	1. COMPONENT FAILURE 2. CONTROL SYSTEM FAILURE 3. COOLING SYSTEM FAILURE 4. HEATING SYSTEM FAILURE 5. EXTENSION	1. DETECTION FAILURE 2. CONTROL SYSTEM FAILURE 3. SAFETY SYSTEM FAILURE
MORE THAN		B E	1 5. S09-PN-C-MTN-EXI +S08-PN-F-MOF-EXO 5. S09-PN-C-MTN-EXI +S08-PN-F-MOF-EXO	

表 5.5.11 プルトニウム精製施設の一部の解析結果 (1 1)

SEGMENT NO. ; S10 FLUID ; TBP PROCESS PARAMETER ; FLOW				
<GUID WORD>	<DEVIATION>	<CONSEQUENCES>	<CAUSES>	<CONDITION>
		A. FIRE B. EXPLOSION C. LEAK D. CRITICALITY E. EXTENSION	1. COMPONENT FAILURE 2. CONTROL SYSTEM FAILURE 3. COOLING SYSTEM FAILURE 4. HEATING SYSTEM FAILURE 5. EXTENSION	1. DETECTION FAILURE 2. CONTROL SYSTEM FAILURE 3. SAFETY SYSTEM FAILURE
NONE		B	1. PIPE-S10-PLO-LF PIPE-S10-POC-LF 5. S10-TB-F-NON-EXI +S08-PN-F-MOF-EXO	
LESS OF		E B	5. S10-TB-F-NON-EXI +S08-PN-F-MOF-EXO 1. PIPE-S10-PLO-LF PIPE-S10-POC-LF 5. S10-TB-F-LOF-EXI +S08-PN-F-MOF-EXO	

表 5.5.12 プルトニウム精製施設の一部の解析結果 (1 2)

SEGMENT NO. ; S10 FLUID ; TBP PROCESS PARAMETER ; CONCENTRATION				
<GUID WORD>	<DEVIATION>	<CONSEQUENCES>	<CAUSES>	<CONDITION>
		A. FIRE B. EXPLOSION C. LEAK D. CRITICALITY E. EXTENSION	1. COMPONENT FAILURE 2. CONTROL SYSTEM FAILURE 3. COOLING SYSTEM FAILURE 4. HEATING SYSTEM FAILURE 5. EXTENSION	1. DETECTION FAILURE 2. CONTROL SYSTEM FAILURE 3. SAFETY SYSTEM FAILURE
PART OF		B	5. S10-TB-C-POF-EXI +S08-PN-F-MOF-EXO	

5.2.2. 解析結果の検討

ここでは、プルトニウム精製施設に対する解析結果の検討を行う。このような原子力発電所に関係した施設は、その重要性から、様々な角度からの解析の結果報告がほとんど公開されていない。それは、安全評価に関しても言える。そのため、従来の研究との比較検討はできないが、本研究の解析結果からわかったことを検討する。

この解析対象は、HAZOP 支援システムで考慮した予備解析の対象システムと類似している。この解析の際、実際のシステムを図 5.9 のように大幅に縮小して入力したが、このことが HAZOP 支援システムの問題点を新たに明確にした。

HAZOP は元々、膨大な解析結果を出力する安全評価手法である。近年の大型化・複雑化したシステムを対象とするためには、対象システムを分割して解析を進める必要がある。しかし、分割を行うと変動の波及を考慮することが難しくなる。そこで、まず機器を省略することで縮小した対象の結果を考え、変動の波及および機器の相互関係を把握する。その上で、分割した部分を順に詳しく解析する。この解析対象で言えば、レッドオイル爆発という最も危険な影響事象を考え、上流における変動の波及として TBP の流出を考慮した。その結果、対象を縮小して解析することができた。しかし、縮小するという事は、事象の関連の見落としを招きやすくする。そこを注意する必要がある、HAZOP 支援システムでもこの点を考慮できるように改良すべきである。

ここで示した解析は、分割したシステムに対する解析の一部と考えてよい。表 5.5 に示した解析結果は、配管セグメント上の機器が無いこともあり、2 つの前例のような機器故障の列挙はない。しかし、変動の波及を中心に、充実した解析結果を得ることができている。

6. Prologによるオペラビリティ・スタディ自動解析システム

本章では、システム工学の入出力の概念を基礎とし、計算機によりオペラビリティ・スタディを実施する手法を提案する。さらに論理型人工知能言語 Prolog を用いてオペラビリティ・スタディ自動解析システムを開発した。ここでは、システム工学の入出力の概念を適用することにより、化学プロセスを構成する様々な要素の異常に関するデータをデシジョンテーブルを用いて整理し、自動解析のためのデータベースとして作成しておく。解析時には、対象プロセス固有の情報であるプロセスの構造や反応の情報を知識ベースとして計算機に入力することにより、オペラビリティ・スタディを実施する。

本章で提案する手法を、ソルベイプロセスに適用し、オペラビリティ・スタディ自動解析を行い、手法の有用性を明らかにする。

6.1. オペラビリティ・スタディ自動解析システムの構成

図 6.1 にオペラビリティ・スタディ自動解析システムの構成を示す。自動解析に必要な情報を①データベース、②知識ベースに入力し、③推論機構で、この2種類の情報を基にオペラビリティ・スタディを実施する。

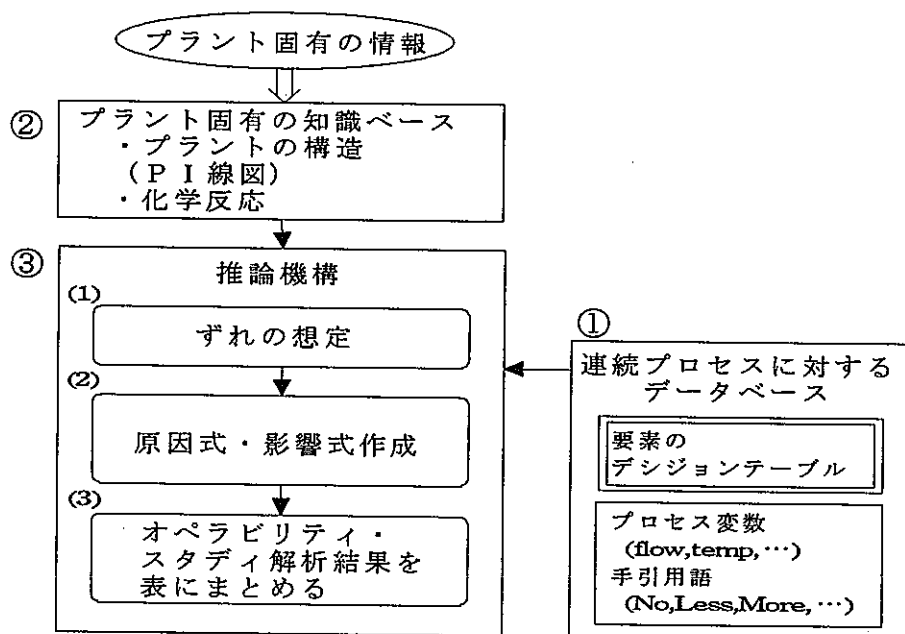


図 6.1 オペラビリティ・スタディ自動解析システムの構成

6.1.1. データベース

データベースには、オペラビリティ・スタディ実施のための一般的な知識として、(1) 手引用語とプロセス変数、(2) 要素の異常に関するデータが格納されている。ずれの想定、ずれの原因、結果・影響を解析する際に、データベース内のこれらの知識を利用する。

(1) 手引用語とプロセス変数

オペラビリティ・スタディは、手引用語と流量(flow)、圧力(pressure)、温度(temperature)、濃度(concentration)などのプロセス変数を用いて、解析すべき異常(ずれ)を想定する。これらの手引用語とプロセス変数を Prolog 処理系の表現形式を用いて表わし、データベースに格納しておく。自動解析の際には、それぞれのプロセス変数に対して手引用語を適用し、ずれを想定する。例えば、配管部の変数として flow を選定し、手引用語 less を適用すれば、“流量が少ない(flow less)”というずれを想定することができる。

(2) 要素の異常に関するデータの格納

化学プロセスは、①バルブ、ポンプから構成される配管、②反応装置、③加熱、冷却装置などの周辺装置により構成され、数多くの構成要素を有している。これら化学プロセスを構成する要素の故障モードと変数の異常(ずれ)の関係は、要素の設置個所またはプラントの種類によらず、多くの場合共通である。ここではこのような要素の故障モードとずれの関係をあらかじめデシジョンテーブルの形式を用いて整理し、オペラビリティ・スタディ自動解析システムのデータベースに格納しておく。データベース内のデシジョンテーブルに対して、後述の知識ベースの情報に従い検索し、対象プロセスのずれと原因、影響の関係を逐次求める。

デシジョンテーブルはシステム構成要素の入力、出力及び内部状態の関係を表現したものであり、次の特徴を有する。

- 1) 入力状態、内部状態及び出力状態の論理的関係を表現することができる。
- 2) 入出力数に制限がないため、多入力あるいは多出力の複雑な要素でもモデル化できる。
- 3) 入力状態、内部状態及び出力状態が区別されており、各要素の状態が簡単に記号化でき、計算機での処理が容易である。

図 6.2 に多段攪拌槽の異常伝播の基本的な構造を示す⁷⁾。連続プロセスは、いくつかの反応装置が配管により結合しており、配管はバルブ、ポンプなどの構成要素を含む。また、反応装置は加熱、冷却装置などの周辺装置及びこれらの装置を構成する要素からなる。このような連続プロセスの異常伝播は図 6.2 の矢印と番号で示すように、10 種類に分類できる。

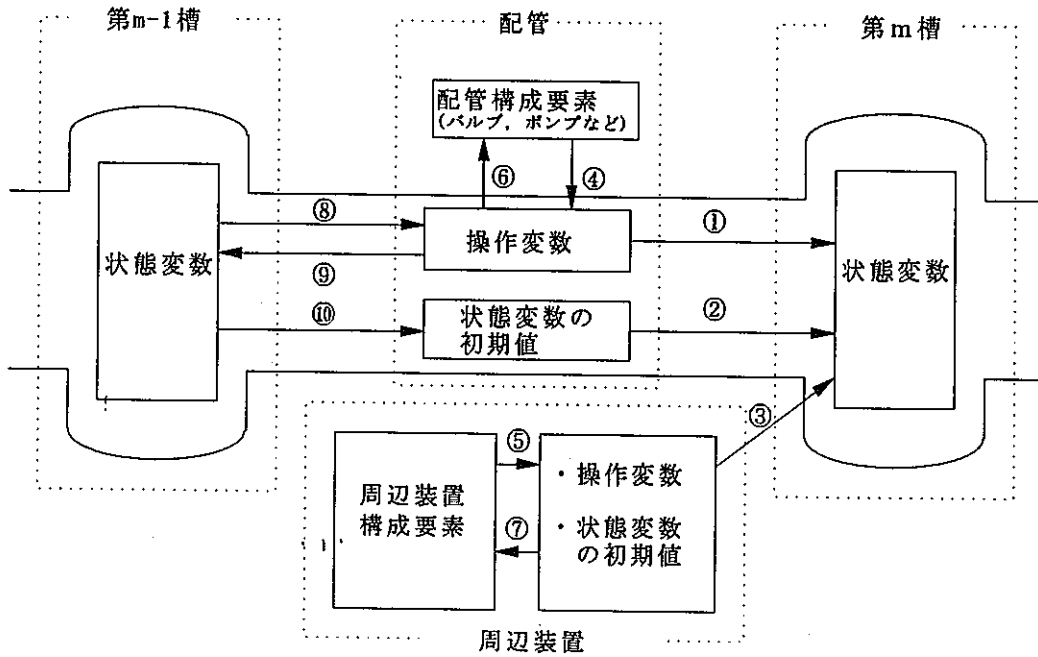


図 6.2 多段攪拌槽の異常伝播の基本構造

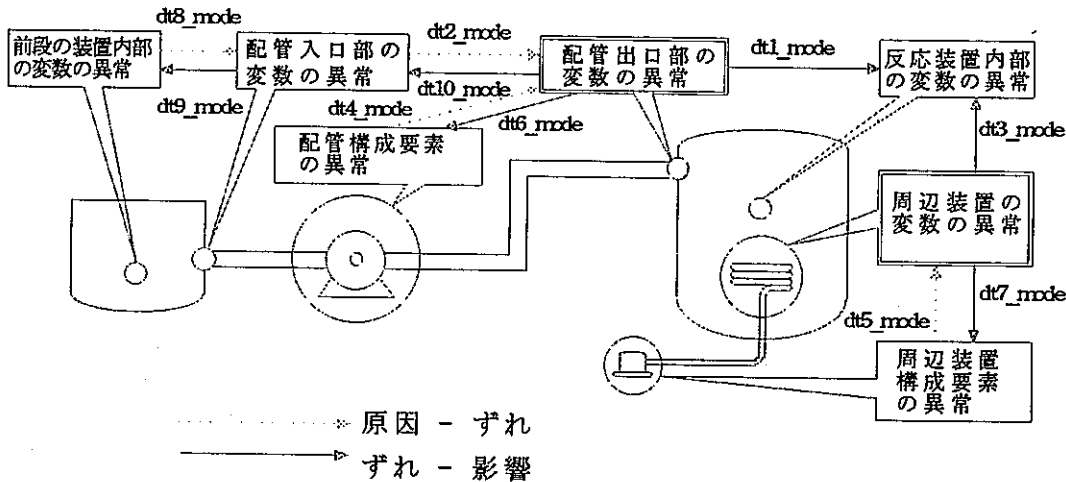


図 6.3 デジジョンテーブルの分類

図 6.2 の異常伝播の構造に基づき、配管、周辺装置及び反応装置における異常の因果関係を、図 6.3 に示す 10 種類のデジジョンテーブルにより表現する。表 6.1 にデジジョンテーブルと異常伝播の関係を示す。表 6.1 に示すように、配管、周辺装置及び反応装置の変数の状態を入力状態と出力状態の項に記入し、要素の異常を内部状態の項に記入する。以下では 10 種類のデジジョンテーブルについて説明する。

表 6.1 デシジョンテーブルの分類

分類	入力状態	内部状態	出力状態	図 6.2の 異常伝播 の番号
dt1_mode	配管出口部の 変数の異常	—————	反応装置内部 の変数の異常	① ②
dt2_mode	配管入口部の 変数の異常	—————	配管出口部の 変数の異常	—————
dt3_mode	周辺装置の 変数の異常	—————	反応装置内部 の変数の異常	③
dt4_mode	—————	配管構成要素 の異常	配管出口部の 変数の異常	④
dt5_mode	—————	周辺装置構成要素 の異常	周辺装置の変数 の異常	⑤
dt6_mode	配管出口部の 変数の異常	配管構成要素 の異常	—————	⑥
dt7_mode	周辺装置の 変数の異常	周辺装置構成要素 の異常	—————	⑦
dt8_mode	前段の装置内部 の変数の異常	—————	配管入口部の 変数の異常	⑧ ⑩
dt9_mode	配管入口部の 変数の異常	—————	前段の装置内部 の変数の異常	⑨
dt10_mode	配管出口部の 変数の異常	—————	配管入口部の 変数の異常	—————

(I) dt1_mode のデシジョンテーブル

配管出口部の変数の異常を入力状態の項に記入し、これに対する反応装置内部の変数の状態を出力状態の項に記入したものであり、図 6.2 の異常伝播①②に対応する。図 6.2 の異常伝播の分類では、①操作変数に関する異常伝播と②状態変数の初期値に関する異常伝播の 2 種類が存在するが、ここではまとめて配管出口部の変数としている。

(II) dt2_mode のデシジョンテーブル

配管入口部の変数の異常を入力状態の項に記入し、これに対する配管出口部の変数の状態を出力状態の項に記入したものである。図 6.2 では反応装置内部、配管及び周辺装置の間の変数の状態と故障モードの関係を異常伝播の構造として表わしているために、配管入口部から出口部への異常伝播を記述していないが、ここではこの異常伝播を dt2_mode のデシジョンテーブルとして加えた。

(III) dt3_mode のデシジョンテーブル

周辺装置の変数の異常を入力状態の項に記入し、これに対する反応装置内部の変数の状態を出力状態の項に記入したものであり、図 6.2 の異常伝播③に対応する。

(IV) dt4_mode のデシジョンテーブル

配管構成要素の異常を内部状態の項に記入し、これに対する配管出口部の変数の状態を出力状態の項に記入したものであり、図 6.2 の異常伝播④に対応する。

(V) dt5_mode のデシジョンテーブル

周辺装置構成要素の異常を内部状態の項に記入し、これに対する周辺装置の変数の状態を出力状態の項に記入したものであり、図 6.2 の異常伝播⑤に対応する。

(VI) dt6_mode のデシジョンテーブル

配管出口部の変数の異常を入力状態の項に記入し、これに対する配管構成要素の異常を内部状態の項に記入したものであり、図 6.2 の異常伝播⑥に対応する。

(VII) dt7_mode のデシジョンテーブル

周辺装置の変数の異常を入力状態の項に記入し、これに対する周辺装置構成要素の異常を出力状態の項に記入したものであり、図 6.2 の異常伝播⑦に対応する。

(VIII) dt8_mode のデシジョンテーブル

前段の装置内部の変数の異常を入力状態の項に記入し、これに対する配管入口部の変数の状態を出力状態の項に記入したものであり、図 6.2 の異常伝播⑧⑩に対応する。ここでも操作変数と状態変数の初期値の 2 種類の変数をまとめ、配管入口部の変数としている。

(IX) dt9_mode のデシジョンテーブル

配管入口部の変数の異常を入力状態の項に記入し、これに対する前段の装置内部の変数の状態を出力状態の項に記入したものであり、図 6.2 の異常伝播⑨に対応する。

(X) dt10_mode のデシジョンテーブル

配管出口部の変数の異常を入力状態の項に記入し、これに対する配管入口部の変数の状態を出力状態の項に記入したものである。dt10_mode のデシジョンテーブルも dt2_mode

の場合と同様に、ここで追加したものである。

以上の 10 種類のデシジョンテーブルを用いて、要素の異常に関するデータを整理しておく。

デシジョンテーブル作成の例として、図 6.4 に示す配管系を考える。この系はポンプが設置された原料移送管と反応装置であり、移送流体 F は液体(liq)である。流体 F は配管を通じて反応装置へ移送される。図 6.3 及び表 6.1 の分類より、この系の異常状態は次の 3 種類のデシジョンテーブルで表わすことができる。

- 1) 配管入口部と配管出口部の変数の異常の関係(dt2_mode)
- 2) 配管構成要素の異常と配管出口部の変数の異常の関係(dt4_mode)
- 3) 配管出口部と反応装置内部の変数の異常の関係(dt1_mode)

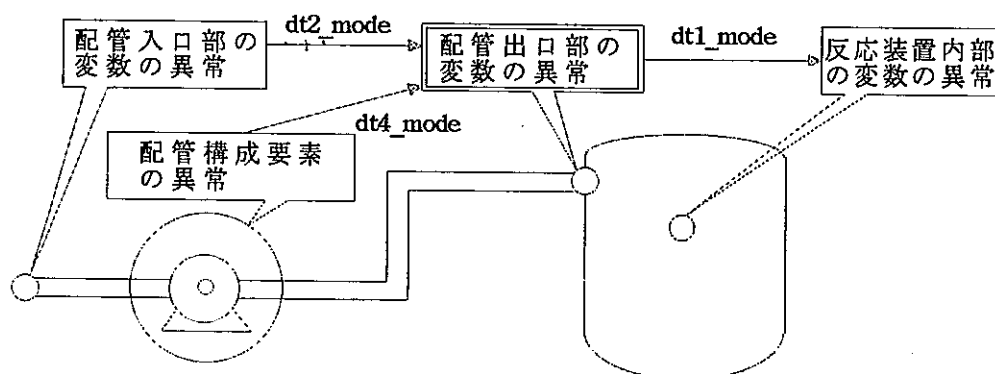


図 6.4 配管系

表 6.2(a)に示すように、dt2_mode は配管構成要素(内部状態)が正常(good)である場合の配管入口部と配管出口部の変数の異常の関係を表わしている。すなわち、入力状態として配管入口部の操作変数(流量(flow), 圧力(pressure)), 状態変数の初期値(温度(temperature), 濃度(concentration))の異常を考え、出力状態として配管出口部の変数に与える影響を、デシジョンテーブルの形式で表現したものである。

表 6.2(a)の dt2_mode のデシジョンテーブルを Prolog 処理系で表現し、その一部を以下に示す。述語名は dt2_mode とし、五つの引数を用いる。第 1 引数は配管入口部のノード番号(N), 第 2 引数は入力状態, 第 3 引数は気体, 液体の区別を表わす。第 4 引数は流体(F), 第 5 引数は出力状態を表わす。

```
dt2_mode([N],[node(N,[flow,no])],liq,F,[flow,no]).
dt2_mode([N],[node(N,[flow,less])],liq,F,[flow,less]).
dt2_mode([N],[node(N,[flow,more])],liq,F,[flow,more]).
```

dt2_mode([N],[node(N,[press,less]),liq,F,[press,less]).

dt2_mode([N],[node(N,[press,more]),liq,F,[press,more]).

表 6.2 デシジョンテーブルの例

(a) dt2_mode

配管入口部の変数の異常 → 配管出口部の変数の異常

入力状態		内部状態	出力状態			
			Flow	Press.	Temp.	Conc.
flow	no	good	no	—	—	—
flow	less	good	less	—	—	—
flow	more	good	more	—	—	—
press	less	good	—	less	—	—
press	more	good	—	more	—	—
temp	less	good	—	—	less	—
temp	more	good	—	—	more	—
conc	no	good	—	—	—	no
conc	less	good	—	—	—	less
conc	more	good	—	—	—	more

(b) dt4_mode

配管構成要素 (ポンプ) の異常 → 配管出口部の変数の異常

入力状態	内部状態	出力状態
normal	failure	flow no
normal	stroke_too_short	flow less
normal	stroke_too_long	flow more

(c) dt1_mode

配管出口部の変数の異常 → 反応装置内部の変数の異常
(発熱膨張反応)

入力状態		内部状態	出力状態			
			Level	Press.	Temp.	Conc.
flow	no	good	no	less	less	no
flow	less	good	less	less	less	less
flow	more	good	more	more	more	more
temp	less	good	—	less	less	less
temp	more	good	—	more	more	more
conc	no	good	—	less	less	no
conc	less	good	—	less	less	less
conc	more	good	—	more	more	more

dt4_mode は表 6.2(b)に示すように、配管構成要素の異常と配管出口部の変数の異常の関係を表わしている。内部状態の項には、ポンプの異常として、1)ポンプの故障(failure)、2)ポンプの輸送量低(stroke_too_short)、3)ポンプの輸送量高(stroke_too_long)を記入し、これらの異常が配管出口部の変数に与える影響をデシジョンテーブルの形式で表現する。配管入口部と配管出口部の変数の異常の関係は、前述のように dt2_mode としてまとめてあり、ここでは入力状態を正常(normal)としている。

dt1_mode は表 6.2(c)に示すように、配管出口部と反応装置内部の変数の異常の関係を表わしている。連続プロセスのオペラビリティ・スタディでは、配管で発生したプロセス変数の異常(ずれ)が、反応装置内にどのような影響を与えるかを解析することが重要である。ここでは配管出口部の変数の異常を入力状態、反応装置内部の変数の異常を出力状態と設定する。

反応装置では、反応の種類(発熱、吸熱、膨張、収縮)、反応物質(原料、触媒、気体、液体)により様々な異常が発生すると考えられる。これらの反応状態の組合せを考慮に入れ、反応装置内での異常に関するデータを作成する。表 6.2(c)は原料(液体)が反応装置に移送され、反応装置内の反応が発熱膨張反応である場合のデシジョンテーブルを示している。表 6.2(b)の dt4_mode 及び表 6.2(c)の dt1_mode のデシジョンテーブルについても、前述の dt2_mode の場合と同様に Prolog 処理系を用いて表現し、計算機に格納する。

図 6.3 に示す 10 種類のデシジョンテーブルを用いて、化学プロセスを構成する様々な要素の異常の因果関係を整理し、計算機に格納しておく。このときデシジョンテーブルは、要素で起こりうるすべての異常を考慮し、記述するため、一つの要素について入力状態、内部状態の組み合わせの数が多く、データ操作が複雑であるなどの問題点がある。これに対しては、Prolog のリスト処理機能を応用することにより解決が可能である。

6.1.2. 知識ベース

計算機によりオペラビリティ・スタディを実施するためには、対象プロセスに固有な情報を入力する必要がある。表 6.3 に示すように、知識ベースとして計算機に入力すべき対象プロセスに固有な情報として次の 3 種類を考える。

- (1)プロセスの構造に関する情報
- (2)反応に関する情報
- (3)その他の情報

(1)は配管や周辺装置及びそれらを構成する要素の接続状態を表わし、(2)は反応装置内での反応の種類を表わしている。(3)は計算機での解析のために設置したノード番号及びその他の装置(タンク、シリンダ)に関する情報である。ここでは図 6.5 のソルベイプロセス¹⁾を例として、知識ベース(1)、(2)について説明する。

表 6.3 知識ベース (連続プロセス)

		述語名	引数	1	2	3	4	5	6
(1)	① 配管	line	6	番号	'c'	入口側 設定点	出口側 設定点	構成要素	液体 or 気体
	② 周辺装置	device	4	番号	名前	設定装置	構成要素	-	-
(2)	① 反応装置	column	4	名前	反応番号	内部気体	内部液体	-	-
	② 化学反応	reaction	5	反応番号	反応物質	生成物質	温度変化	圧力変化	-
(3)	① ノード	node	3	番号	設定点	通過流体	-	-	-
	② その他	other	2	名前	物質名	-	-	-	-

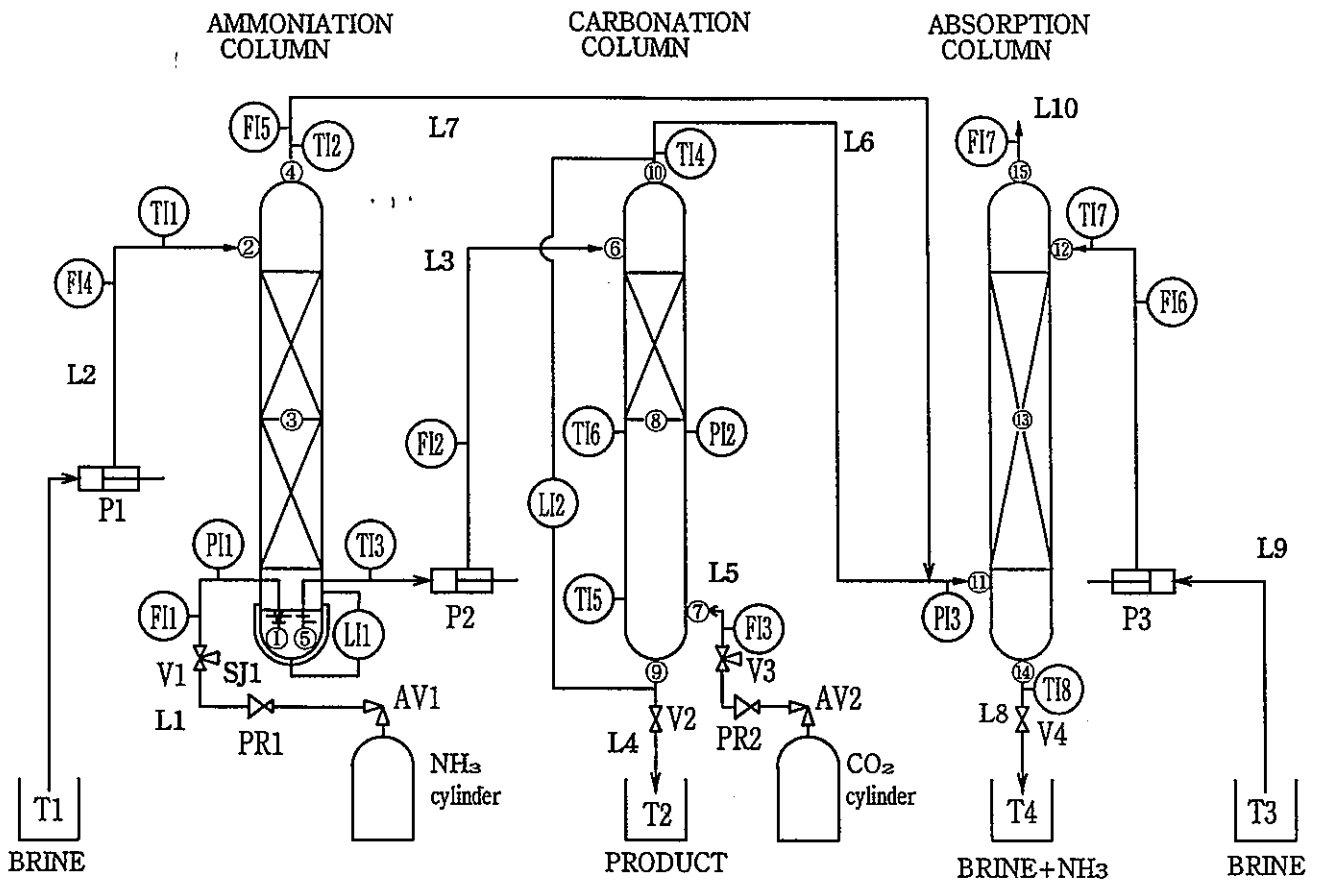
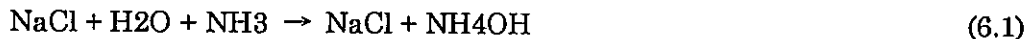
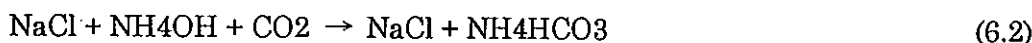


図 6.5 ソルバイプロセス

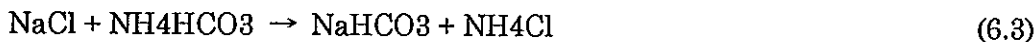
ソルベイプロセスは、アンモニア吸収塔、炭化塔、回収塔の三つの反応装置、タンク、高圧シリンダ、これらを結合する 10 本の配管により構成される。アンモニア吸収塔では(6.1)式に示すように、飽和食塩水がアンモニア気体と接触し、飽和アンモニア水をつくる。



飽和食塩水はタンクより、アンモニアは高圧シリンダより、それぞれアンモニア吸収塔に送られる。(6.1)式は発熱反応であるため、アンモニア吸収塔には冷却ジャケットが設置されている。ここで合成される飽和アンモニア水溶液は配管 3 を通じて炭化塔へ移送される。炭化塔では、(6.2)式に示すように、飽和アンモニア水溶液が二酸化炭素と反応し、重炭酸アンモニウム(NH_4HCO_3)を生成する。



(6.2)式の生成物は(6.3)式に示すように、ただちに二重分解し、重炭酸ナトリウム(NaHCO_3)を生成する。



ここで、図 6.5 では以下の記号を用いている。

L:配管 T:タンク P:ポンプ V:バルブ AV:アングルバルブ
 FI:流量指示器 TI:温度指示器 LI:液位指示器 PI:圧力指示器
 PR:圧力調節器 SJ:ジャケット

それぞれの記号に番号を添えて、要素の区別を行う。また、各要素の結合点を①～⑮の番号で表わし、この点をノードと呼ぶ。

(1) プロセスの構造に関する情報

プロセスの構造に関する情報は表 6.3 の項目(1)に示すように、①配管の構造、②周辺装置の構造に分類し、個々の配管または周辺装置について、要素とその接続状態をモデル化する。

例えば、図 6.5 のソルベイプロセスの配管 3 (L3)は、ノード 5 と 6 を接続しており、ポンプ 2、流量指示器 2、温度指示器 3 及び配管 3 から構成されている。また、この配管を通じて液体が移送されている。この情報を①配管の構造として以下の形で表わし、自動解析システムに入力する。

```
line(3,ct,[5],[6],[pump(2),flow_ind(2),temp_ind(3),line(3)],liq).
```

また、アンモニア吸収塔に設置されている冷却ジャケットは、バルブ d1、ポンプ d1 及び配管 d1 により構成されている。これらを②周辺装置の構造として以下の形で表わす。

```
device(d1,cooling_device(d1),[col,ammoniation],[valve(d1),pump(d1),line(d1)]).
```

このようにソルベイプロセスを構成するすべての配管及び周辺装置について、その構造を知識ベースとして自動解析システムに入力する。

(2) 反応に関する情報

配管あるいは周辺装置におけるずれは、反応の種類や反応物質により、反応装置内に様々な影響を与える。ここでは反応に関する情報を表 6.3 の項目(2)に示すように、①反応装置の情報、②化学反応の情報の2種類に分類する。①では反応装置内の気体と液体、②では反応物質、生成物質、温度変化(発熱、吸熱)、圧力変化(膨張、収縮)の情報を与える。これにより配管や周辺装置での異常が、反応装置での反応にどのような影響を与えるかを解析することができる。

例えば、ソルベイプロセスのアンモニア吸収塔では、(6.1)式の反応が起こり、塔内に存在する気体はアンモニア(NH₃)であり、液体は塩化ナトリウム(NaCl)、水酸化ナトリウム(NH₄OH)及び水(H₂O)である。これらの情報を①反応装置の情報として以下の形で表わす。

```
column(ammoniation,['R1'],['NH3'],['NaCl_sol','NH4OH_sol','H2O'],)
```

ここで、R1 はアンモニア吸収塔で、(6.1)式の反応が起こることを示している。また(6.1)式の反応は、反応物質が[H₂O, NaCl_sol, NH₃]、生成物質が[NaCl_sol, NH₄OH_sol]であり、発熱(exo)、収縮(con)反応である。これらを②化学反応の情報として以下の形で表わす。

```
reaction('R1',['H2O','NaCl_sol','NH3'],['NaCl_sol','NH4OH_sol'],exo,con).
```

同様に他の反応装置や化学反応についても Prolog 処理系を用いて表現し、知識ベースとして自動解析システムに入力する。

6.2. 推論機構

推論機構では知識ベースの情報を基にデータベースを検索し、オペラビリティ・スタディ自動解析を行う。図 6.6 にオペラビリティ・スタディ自動解析の流れを示すが、おもに次の三つの手順により解析を進める。

- (1) ずれの想定
- (2) 原因式・影響式作成
- (3) 解析結果の出力

ここでは図 6.5 のソルベイプロセスの配管 3 の解析を例として取り上げ、推論過程を示す。

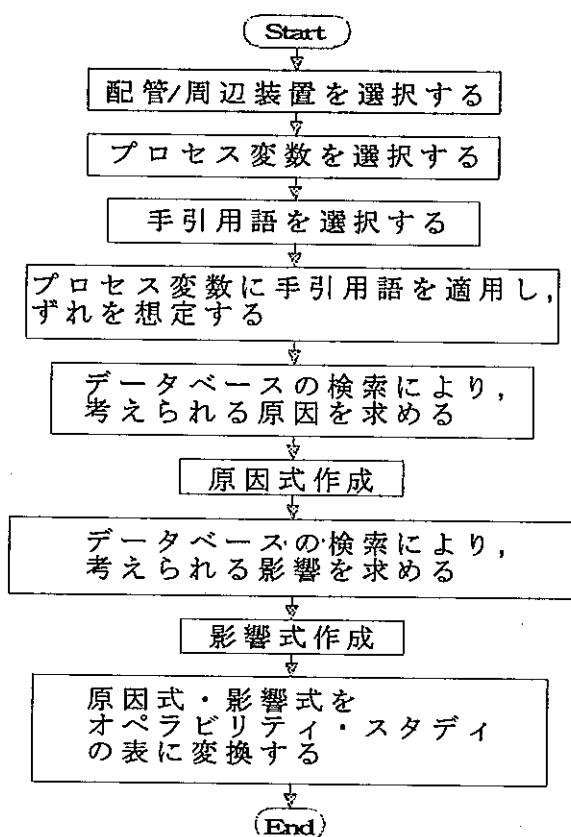


図 6.6 オペラビリティ・スタディ自動解析の流れ

6.2.1. ずれの想定

知識ベースとして入力したプロセスの構造及び反応に関する情報を基に、自動解析システムはずれを想定するために、図 6.7 に示す形式で質問を行う。解析者は質問に対して、解析する配管番号、プロセス変数及び手引用語を選定し、入力する。ここでは配管 3 を選定し、プロセス変数として flow、手引用語として less を適用した場合について述べる。知識ベースの情報から配管 3 では、流体 F=[NaCl_sol, NH4OH_sol, H2O]が移送されていることが分かる。これより、次のずれを想定することができる。

“配管 3 の [NaCl_sol, NH4OH_sol, H2O] の流量が少ない”
`line(3,flow,less,['NaCl_sol','NH4OH_sol','H2O']).`

Please input a line number.

Line number(1,2,3,4,5,6,7,8,9,10) : 3.

Please input a property word number.

(1) flow, (2) press., (3) temp., (4) conc. : 1.

! Please input a guide word number.

(1) no, (2) less, (3) more, (4) reverse, (5) other_than : 2.

Deviation : Line(3,flow,less).

図 6.7 ずれの想定

6.2.2. 原因式・影響式作成

オペラビリティ・スタディ自動解析システムは、知識ベースの情報を基にデータベースを検索し、ずれに対する原因、影響を求める。図 6.3 に示すように、配管及び周辺装置におけるずれの伝播は、原因系(点線の矢印)と影響系(実線の矢印)に分けられる。原因系はずれとその原因の関係を示したものであり、図 6.3 の点線の矢印で示すデシジョンテーブル(dt2_mode, dt4_mode, dt5_mode, dt8_mode)を検索することにより、ずれの原因を求める。また影響系はずれとその影響の関係を表わしたものであり、図 6.3 の実線の矢印で示すデシジョンテーブル(dt1_mode, dt3_mode, dt6_mode, dt7_mode, dt9_mode, dt10_mode)を検索することにより、ずれの影響を求める。以下では、前節で想定したずれ“配管 3 の流量が少ない”の原因、影響の解析過程を示す。

(1) 原因式作成

図 6.3 に示すように、配管において発生するずれの原因は、配管入口部での変数の異常と配管構成要素の異常にあると考えられ、それぞれ dt2_mode, dt4_mode のデシジョンテーブルとしてデータベースに格納されている。さらに配管入口部での変数の異常の原因は、前段の反応装置内部での変数の異常であり、この情報は dt8_mode として表わされている。

① dt2_mode の検索(配管入口部での変数の異常)

dt2_mode のデシジョンテーブルについて、出力状態の項が[flow,less](流量が少ない)であるデータを検索により求める。ここでは、次のデータが相当する。

dt2_mode([N],[node(N,[flow,less]),liq,F,[flow,less]).

また知識ベースの情報より，配管 3 の入口部はノード 5 (N=5)であり，流体 F=[NaCl_sol, NH4OH_sol, H2O]が移送されている．これよりずれ発生の原因の一つとして，配管入口部の変数の異常，すなわち “1)ノード 5 の[NaCl_sol, NH4OH_sol, H2O]の流量少” ，

[node(5,flow,less,['NaCl_sol','NH4OH_sol','H2O'])].

を得る．

② dt4_mode の検索(配管構成要素の異常)

配管の情報より，配管 3 には構成要素としてポンプ 2 が設置されている(流量指示器 2, 温度指示器 3, 配管 3 についてはここでは省略する)．従って，dt4_mode のポンプについてのデシジョンテーブルを検索し，出力状態の項に[flow,less]を有するデータを求める．ここでは次のデータが相当する．

dt4_mode([pump(E,stroke_too_short)],pump(E),liq,F,[flow,less]).

これよりずれ発生の原因として，構成要素であるポンプ 2 の異常，すなわち “2)ポンプ 2 の輸送量低” ，

[pump(2,stroke_too_short)].

を得る．

③ dt8_mode の検索(前段の装置内部での変数の異常)

①で求められた配管入口部での変数の異常 “1)ノード 5 の[NaCl_sol, NH4OH_sol, H2O]の流量少” の原因は，dt8_mode のデシジョンテーブルより求められる．ここでは出力状態の項に[flow,less]を有する次のデータを検索により求める．

dt8_mode([column(C,level,less,Fq)], [col,C],liq,[Fa,Fg,Fq],[flow,less]).

また，ノード 5 は前段の装置であるアンモニア吸収塔(C,ammoniation)に設置されており，液体は Fq=[NaCl_sol, NH4OH_sol]である．これよりずれ発生の原因として，“3)吸収塔の[NaCl_sol, NH4OH_sol]の液位低下” ，

[column(ammoniation, level, less, ['NaCl_sol','NH4OH_sol'])].

を得る．

以上①～③の検索により，“配管 3 の[NaCl_sol, NH4OH_sol, H2O]の流量が少ない”というずれの原因として、

- 1) ノード 5 の[NaCl_sol, NH4OH_sol, H2O]の流量少
- 2) ポンプ 2 の輸送量低
- 3) 吸収塔の[NaCl_sol, NH4OH_sol]の液位低下

が明らかにされた。ずれとこれら三つの原因の関係を原因式という形で記述する。Prolog 処理系では cause という述語を用いて図 6.8(a)のように表わし、計算機に格納する。

(2) 影響式作成

図 6.3 に示すずれの伝播構造より、配管におけるずれは、反応装置内部の変数、配管構成要素及び配管入口部の変数へ影響を与えると考えられる。これらのずれと影響の関係はそれぞれ dt1_mode, dt6_mode, dt10_mode としてデータベースに格納されている。さらに配管入口部での異常は、前段の反応装置内部の変数にも影響を与え、この情報は dt9_mode として表わされている。

影響の解析では、反応装置内での反応の種類(発熱、吸熱、膨張、圧縮)及び反応物質(気体、液体など)による様々な異常を考える。自動解析システムには、反応の種類や反応物質など、反応に関する情報が知識ベースとして入力されており、影響式作成ではこれらの情報を基に、解析を行う。

① dt1_mode の検索(反応装置内部の変数への影響)

配管におけるずれの影響として、入力状態の項が[flow,less]であるデータを、dt1_mode のデシジョンテーブルを検索することにより求める。配管 3 はノード 6 で炭化塔(C,carbonation)に接続されており、流体[NaCl_sol, NH4OH_sol, H2O]は原料である。また、炭化塔では(6.2)式、(6.3)式の発熱膨張反応が起こり、生成物質は $Fa=[NaHCO_3, NH_4Cl_sol]$ であり、次のデータが相当する。

$dt1_mode([flow,less,F],[col,C],_[_],_[_],_[_],[Fa,Fg,Fq,Fw],[column(C,conc,less,Fa)])$.

これより反応装置内部への影響は，“1)炭化塔の生成物質[NaHCO₃,NH₄Cl_sol]の濃度低下”、

$[column(carbonation,conc,less,['NaHCO_3','NH_4Cl_sol'])]$.

となる。

② dt6_mode の検索(配管構成要素への影響)

配管 3 にはポンプ 2 が設置されており、ポンプへの影響を求める。dt6_mode のデシジョンテーブルに対して入力状態の項が[flow,less]であるデータを検索により求める。ここでは、

dt6_mode([flow,less],pump(E),S,[pump(E,cavitation)]).

というデータが相当し、その結果ポンプ2への影響は、“2)ポンプ2のキャビテーション”、

[pump(2,cavitation)].

となる。

③ dt10_mode の検索(配管入口部の変数への影響)

配管におけるずれの影響として、入力状態の項が[flow,less]であるデータを dt10_mode のデシジョンテーブルを検索することにより求める。ここでは、

dt10_mode([flow,less],[N],liq,[node(N,[flow,less])]).

というデータが相当し、配管入口部への影響は、“3)ノード5の[NaCl_sol,NH4OH_sol,H2O]の流量少”、

[node(5,flow,less,['NaCl_sol','NH4OH_sol','H2O'])].

となる。

④ dt9_mode の検索(前段の装置内部の変数への影響)

③で求めた配管入口部での変数の異常“ノード5の[NaCl_sol,NH4OH_sol,H2O]の流量少”に対して、dt9_mode のデシジョンテーブルを検索することにより、前段の装置内部の変数への影響を求めることができる。ここでは入力状態の項に[flow,less]を有する次のデータを検索により求める。

dt9_mode([flow,less],[col,C],liq,[Fa,Fg,Fq],[column(C,level,more,Fq)]).

これよりずれの影響として“4)吸収塔の[NaCl_sol,NH4OH_sol]の液位増加”、

[column(ammoniation,level,more,['NaCl_sol','NH4OH_sol'])].

という結果を得る。

以上①～④の検索により、“配管3の[NaCl_sol,NH4OH_sol,H2O]の流量が少ない”というずれの影響として、

1)炭化塔の生成物質[NaHCO3,NH4Cl_sol]の濃度低下

- 2)ポンプ2のキャビテーション
 - 3)ノード5の[NaCl_sol, NH4OH_sol, H2O]の流量少
 - 4)吸収塔の[NaCl_sol, NH4OH_sol]の液位増加
- が明らかにされた。ずれとこれらの四つの影響の関係を影響式として記述する。Prolog 処理系では consequence という述語を用いて図 6.8(b)のように表わし、計算機に格納する。

6.2.3. 解析結果出力

図 6.8(c)に示すように原因式、影響式をまとめ、オペラビリティ・スタディのずれに対する原因・影響の関係に変換する。ここでは、配管でのずれの解析について説明したが、周辺装置についても同様に解析を行う。

その他の配管、周辺装置についても同様に、自動解析を行い、ソルベイプロセスの主要な配管9本と周辺装置である冷却ジャケットに対するオペラビリティ・スタディ解析結果を得た。図 6.9 にソルベイプロセスの配管 2、配管 3 及び冷却装置に対する解析結果を示す。配管における原因としては、主にその構成要素の異常が中心となる。影響としては、反応の種類、反応物質などの情報を詳細に分類し、知識ベースとして入力したことにより、反応装置内で起こる異常(圧力、温度、濃度の異常など)が求められている。さらに、周辺装置についても同様な解析結果を得ることができた。

```
cause(line(3,flow,less,['NaCl_sol','NH4OH_sol','H2O']),
      [node(5,flow,less,['NaCl_sol','NH4OH_sol','H2O']),
       pump(2,stroke_too_short),
       column(ammoniation,level,less,['NaCl_sol','NH4OH_sol'])]).
```

(a) 原因式

```
consequence(line(3,flow,less,['NaCl_sol','NH4OH_sol','H2O']),
            [column(carbonation,conc,less,['NaHCO3','NH4Cl_sol']),
             pump(2,cavitation),
             node(5,flow,less,['NaCl_sol','NH4OH_sol','H2O']),
             column(ammoniation,level,more,['NaCl_sol','NH4OH_sol'])]).
```

(b) 影響式

DEVIATION:line(3,flow,less,['NaCl_sol','NH4OH_sol','H2O']).	
CAUSE	CONSEQUENCE
node(5,flow,less, ['NaCl_sol','NH4OH_sol','H2O'] pump(2,stroke_too_short) column(ammoniation,level,less, ['NaCl_sol','NH4OH_sol'])	column(carbonation,conc,less, ['NaHCO3','NH4Cl_sol']) pump(2,cavitation) node(5,flow,less, ['NaCl_sol','NH4OH_sol','H2O']) column(ammoniation,level,more, ['NaCl_sol','NH4OH_sol'])

(c) オペラビリティ・スタディ

図 6.8 解析結果出力

LINE 2 flow less

DEVIATION:line(2,flow,less,['NaCl_sol','H2O']).	
CAUSE	CONSEQUENCE
tank(1,level,less,['NaCl_sol','H2O']) flow_indicator(4,failure) flow_indicator(4,indicating_too_high) pump(1,failure) pump(1,stroke_too_short) line(2,cracked) line(2,partly_blocked)	pump(1,cavitation) column(ammoniation,press,more,['NH3']) column(ammoniation,temp,less,['NH3','NaCl_sol','NH4OH_sol','H2O']) column(ammoniation,level,less,['NaCl_sol','NH4OH_sol','H2O']) column(ammoniation,conc,less,['NaCl_sol','NH4OH_sol']) tank(1,level,more,['NaCl_sol','H2O'])

LINE 3 flow less

DEVIATION:line(3,flow,less,['NaCl_sol','NH4OH_sol','H2O']).	
CAUSE	CONSEQUENCE
column(ammoniation,level,less,['NaCl_sol','NH4OH_sol','H2O']) flow_indicator(2,failure) flow_indicator(2,indicating_too_high) pump(2,failure) pump(2,stroke_too_short) line(3,cracked) line(3,partly_blocked)	pump(2,cavitation) column(carbonation,temp,less,['CO2','NaCl_sol','NH4Cl_sol','H2O','NaHCO3']) column(carbonation,level,less,['NaCl_sol','NH4Cl_sol','H2O','NaHCO3']) column(carbonation,press,more,['CO2']) column(carbonation,conc,less,['NaHCO3','NH4Cl_sol','NaCl_sol','NH4OH_sol','NH4HCO3']) column(ammoniation,level,more,['NaCl_sol','NH4OH_sol','H2O'])

DEVICE d1 temp more

DEVIATION:device(d1,temp,more).	
CAUSE	CONSEQUENCE
coolwater_tank(d1,temp,more)	column(ammoniation,temp,more,['NH3','NaCl_sol','NH4OH_sol','H2O']) column(ammoniation,press,more,['NH3']) column(ammoniation,conc,less,['NH4OH_sol'])

図 6.9 オペラビリティ・スタディ自動解析結果

7. おわりに

本稿では、動力炉・核燃料開発事業団の委託により（株）三菱総合研究所が作成した HAZOP 支援システムを⁶⁾ 化学プラント（オレフィン二量化プラントの原料移送部）、再処理プラントの高レベル廃液貯槽冷却システム及びプルトニウム精製施設に適用し、支援システムの汎用性を確認すると同時に、問題の提示を行った。

システムを構成する制御回路などの電気回路は、システム全体の安全性に重大な影響を与えるため、その安全評価を実施することは重要である。FTA 等の安全評価手法では、電気回路を解析対象に取り上げることができるが、HAZOP は配管を重要視した手法であり、電気回路に対してはその解析手順が確立されていない。ここでは、ポンプや電動弁に組み込まれているモータ駆動部回路および制御回路に着目した。これらの回路について従来の HAZOP により解析しようとしても、そのための手法がこれまでに開発されていおらず、解析が困難であった。HAZOP 支援システムは、従来の HAZOP を基礎としており、回路系に対する解析には対応していない上、予備解析を目的としたシステムであるため、様々なプロセスシステムを対象とした解析にも十分対応しているとは言い難い。そこで、FTA 等の他の安全評価手法の解析結果と同様の事象を HAZOP で出力するために、回路系に対しても HAZOP を実施できるように新しい解析手順を提案した。さらに、HAZOP 支援システムに、回路に対する HAZOP 解析機能を付属させることで、より詳細な結果を得ることを可能にした。この手法は、①システムのモデル化、②モデル内の変数の分類、③ HAZOP の実施という手順で行われる。

また、本稿では、システム工学の入出力の概念を基礎とし、論理型人工知能言語 Prolog を用いて開発したオペラビリティ・スタディ自動解析システムについて報告した。連続プロセスを対象として、異常の因果関係の分類を行い、要素の異常に関するデータをデシジョンテーブルにより整理し、データベースとして計算機に格納しておく。知識ベースとして計算機に入力する対象プロセス固有の情報を基に、ずれに対する原因、影響をデータベースの検索により取り出し、オペラビリティ・スタディの解析結果として出力する手法である。

応用例としてソルベイプロセスに適用した。ソルベイプロセスの主要な配管 9 本と周辺装置である冷却ジャケットに対して自動解析を行い、93 のずれについて、オペラビリティ・スタディ解析結果を得た。自動解析の結果は、人手による解析結果と一致しており、解析漏れなどを防ぐことができている。また解析結果は、計算機内に蓄積されており、フォールト・ツリー生成や異常診断に必要な情報として利用することができる。

参考文献

- 1) Lihou, D.A.: Computer-Aided Operability Studies for Loss Control; Proc. of 3rd International Symposium on Loss Prevention and Safety Promotion in the Process Industries, pp.579~613 (1980)
- 2) Jones, M.C. and D.A.Lihou: CAFOS-The Computer Aid for Operability Studies; I.Chem.E.Symposium Series, Inst. of Chem.Eng., No.97, pp.249~260 (1986)
- 3) Weatherill, T. and I.T.Cameron: A Prototype Expert System for Hazard and Operability Study, Comp.Chem.Eng., Vol.13, No.11/12, pp.1229~1234 (1989)
- 4) Venkatasubramanian, V. and R. Vaidhyanathan: A Knowledge-Based Framework for Automating HAZOP Analysis, AIChE J., Vol.40, No.3, pp.496~505 (1994)
- 5) Venkatasubramanian, V. and R. Vaidhyanathan: HAZOPEXpert: A Knowledge-Based System for HAZOP Analysis, Proc. of PSE '94, pp.1117~1122 (1994)
- 6) (株)三菱総合研究所 安全工学研究部:再処理施設の確率論的安全評価支援システムの開発(Ⅲ)報告書, (1994)
- 7) 鈴木和彦, 亀山嘉正, 佐山隼敏: 連続プロセスに対する改良されたオペラビリティ・スタディ, 安全工学, Vol.27, No.3, pp.141~149 (1988)
- 8) 佐山隼敏: プロセス安全性診断の最近の動向、プロセスの安全性評価と対策の最前線, 化学工学会関西支部編, p42(1994)
- 9) Kletz, T.A.: HAZOP & HAZAN, Identifying and Assessing Process Industry Hazards 3rd Ed., The Institution of Chemical Engineers, England (1992)
- 10) Nojiri, I. and O.Narita: PSA Application Study for the HAW storage Process of a Model Reprocessing Plant, Proc. of PSA' 95, pp.1040~1048(1995)
- 11) 松岡伸吾: 六ヶ所再処理施設の安全設計と安全評価, 日本原子力学会誌, Vol35, No10, p.864(1993)

付 録

HAZOP 支援システムにおける解析結果では、表のスペースおよびデータの変換利用を考慮して、事象を全て記号化して表す。ここでは、その中でも原因の項目における「セグメント上の機器の不具合」に含まれる事象の説明を示す。各機器に関して事象名（表に示される記号）とその内容を示す。ここで、表の事象名内の小文字部分はそれぞれ compiden は、機器名（コンポーネントアイデンティファイ）sgn は、セグメント番号（セグメントナンバー）のことを示す。

機器	事象名	内容
TANK	; compiden-TKR-LF	: 槽、容器の破損
	; compiden-COL-SF	: 冷却系の故障
	; compiden-HTS-SF	: 加熱系の破損
EXT	; compiden-EXR-LF	: 抽出器、洗浄器、塔の破損
EVP	; compiden-EVR-LF	: 濃縮缶、蒸発缶の破損
	; compiden-HTS-SF	: 加熱系の故障
CTF	; compiden-CNT-LF	: 遠心分離機、清澄機の破損
	; compiden-EPS-SF	: 電源系の故障
	; compiden-CNT-LF	: 制御回路の故障
PUMP	; compiden-PSS-LF	: 待機ポンプの起動失敗
	; compiden-PRS-LF	: 動作中ポンプの運転失敗
	; compiden-EPS-SF	: 電源系の故障
	; compiden-SIG-SF	: 起動信号の故障
	; compiden-CNT-LF	: 制御回路の故障
J-PUMP	; compiden-JRS-LF	: ジェットポンプの破損
	; compiden-JRC-LF	: ジェットポンプの閉塞
	; compiden-STS-SF	: 蒸気供給系の故障
FILTER	; compiden-FLC-LF	: フィルターの閉塞
HTX	; compiden-HXR-LF	: 熱交換器の破損
	; compiden-HXC-LF	: 熱交換器細管の閉塞
	; compiden-COL-SF	: 冷却系の故障
XV (NO)	; compiden-XOC-LF	: 手動弁の閉塞（開維持失敗）
	; compiden-XLO-LF	: 手動弁の外部リーク
XV (NC)	; compiden-XCO-LF	: 手動弁の内部リーク
	; compiden-XLO-LF	: 手動弁の外部リーク

MV (NO)	; compiden-MOC-LF	: 電動弁の閉塞 (開維持失敗)
	; compiden-MLO-LF	: 電動弁の外部リーク
MV (NC)	; compiden-MCO-LF	: 電動弁の内部リーク
	; compiden-MLO-LF	: 電動弁の外部リーク
NV (NO)	; compiden-NOC-LF	: 空気作動弁の閉塞 (開維持失敗)
	; compiden-NLO-LF	: 空気作動弁の外部リーク
NV (NC)	; compiden-NCO-LF	: 空気作動弁の内部リーク
	; compiden-NLO-LF	: 空気作動弁の外部リーク
GV	; compiden-CCC-LF	: 逆止弁の開失敗
	; compiden-CLO-LF	: 逆止弁の外部リーク
	; compiden-CCO-LF	: 逆止弁の内部リーク
	; compiden-COO-LF	: 逆止弁の閉失敗
SV	; compiden-SCC-LF	: 安全弁の開失敗
	; compiden-SOO-LF	: 安全弁の再閉止失敗
PIPE	; PIPE- sgn-PLO-LF	: 配管の破損、外部リーク
	; PIPE- sgn-POC-LF	: 配管の閉塞