

PNC IJ1612 95-001

分置

社内資料

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

(動力炉・核燃料開発事業団 受託研究成果報告書)

1995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。

〒319-111 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

佐山隼敏*、鈴木和彦*、島田行恭*

要 旨

近年、石油・化学コンビナートが大型化、複雑化し、その安全性の問題が、社会的に大きな関心を集めている。特に、ユニオンカーバイド社ボパール工場でのメチルイソシアネートガス漏出事故、また、チェルノブイリ原子力発電所での事故による大量の放射性物質の漏出事故は、まだ記憶に新しい。したがって、実用的な安全解析手法を開発し、確立する必要がある。

本報告書は、原子力発電所、化学プラントに広く適用されているシステム安全解析手法とその応用に関する研究の現状について調査し、纏めたものである。また、システム潜在危険の同定（ハザード同定）手法としてオペラビリティ・スタディがある。本稿では、この手法の問題点とともにシステム工学に基づく改良オペラビリティ・スタディの基礎となる考え方を示す。この方法では、主要装置の変数を入力と出力に分類したが、これによりプラントのずれを明確に定義することができる。オペラビリティ・スタディの手順を確立することにより、この手法を原子力燃料再処理施設へ適用することが可能になる。さらに、計算機によるオペラビリティ・スタディ自動解析システムの開発が可能となる。

※ 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

Hayatoshi Sayama *, Kazuhiko Suzuki * and Yukiyasu Shimada *

Abstract

In recent years, chemical plants have grown larger, run at higher temperatures and pressures, and some have become complex and sophisticated. These factors have led to increase in risks associated with plants. The events such as the Chernobyl nuclear accident, and chemical spills at Bhopal, India are prime examples of complex-system failures. Therefore, it is important to establish methods used to identify and assess the significance of hazardous situations found in process operations or activities involving hazardous chemicals.

This report surveys the literature on the system safety assessment methods and their applications, which are widely used for the safety assessment of nuclear plants and chemical plants. This paper also presents an improved technique of Operability Study which can identify hazards and operating problems for continuous plants in process systems.

A technique of Operability Study 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 heating units or stirrers. 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 Operability Study, it could be possible to examine the application of Operability Study to nuclear fuel reprocessing plant and develop the computer-aided Operability Study System.

※ 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	安全解析の歴史と手法	3
3	安全解析とその応用に関する従来の研究	8
3.1	オペラビリティ・スタディに関する従来の研究	8
3.2	フォールト・ツリー生成法に関する従来の研究	9
3.3	安全解析の基づく異常診断に関する従来の研究	12
4	オペラビリティ・スタディの改良	14
4.1	オペラビリティ・スタディの原理と手順	14
4.1.1	オペラビリティ・スタディの原理	14
4.1.2	解析手順	16
4.2	システム工学に基づくオペラビリティ・スタディ	16
4.2.1	システム工学とオペラビリティ・スタディ	16
4.2.2	反応装置の入出力関係	18
4.2.3	オペラビリティ・スタディの実施	20
5	安全解析は役に立つのか	23
6	生産技術の重要性	24
7	品質管理と安全管理	26
8	階層型安全解析の提案	28
9	再処理施設 P S A 支援システムの適用に関する検討 および今後の課題	31
10	おわりに	32
	参考文献	33

図・表目次

図リスト

図 2. 1	確率論的安全評価の手順	4
図 2. 2	安全評価の手法	6
図 2. 3	帰納法と演繹法	6
図 4. 1	オペラビリティ・スタディの問題発見の過程	15
図 4. 2	ずれと影響の関係	17
図 4. 3	システムの概念	17
図 4. 4	連続攪拌反応槽	19
図 4. 5	変数の分類	19
図 6. 1	生産技術とその要素	25
図 7. 1	設備の入出力の関係	27
図 7. 2	管理の階層レベル	27
図 8. 1	階層型安全評価	30

表リスト

表 4. 1	手引き用語一覧とその説明	15
表 4. 2	原料流量 h (操作変数) の オペラビリティ・スタディ	21
表 4. 3	冷却水流量 h_c (操作変数) の オペラビリティ・スタディ	22
第 4. 4	攪拌機の回転数 n (操作変数) の オペラビリティ・スタディ	22

1 はじめに

最近、石油・化学コンビナート、および原子力発電所の安全問題が、社会的に大きな関心を集めている。化学プラントでは、火災、爆発、有害物質の漏洩、原子炉では放射性物質の漏出など、大規模災害発生危険性が存在することがその一因であろう。特に、ユニオンカーバイド社ボパール工場でのメチルイソシアネートガス漏出事故による2000人以上の地域住民の死亡（1984年、インド）、また、チェルノブイリ原子力発電所での事故による大量の放射生物質の漏出と、これに伴うヨーロッパ諸国への大きな衝撃（1986年、ソ連）は、まだ記憶に新しい。

我国では、ヨーロッパ諸国と同様に、各種の工場が人口密集地域の近くに位置している場合が多く、工場の産業災害により、周辺の住民が損失を受ける可能性がある。したがって、各企業においても安全確保と災害防止のための、十分な対策を講ずる必要に迫られており、実用的な安全解析手法を開発し、確立することが強く要望されている。

一般に、安全解析の役割はつぎの二点に集約できるであろう。第一は、設計の段階からプラントの安全解析を実施し、その結果に基づいて改良を加える、あるいはプロセス全体の中の弱点を明らかにして、対策を講ずることである。第二は、エネルギー源としての石炭、石油、LNGおよび原子力発電所の安全解析を実施して、各システムのリスクを明らかにし、将来のエネルギー源の情報を求めることである。

1970年代の後半から、安全解析は工学的立場のみならず社会的立場からも要求されており、次第に体系化されるにいたった。しかし、大規模システムの安全解析には多くの費用と時間を必要とし、その実施例も数少ないために、次のような問題点が考えられる。

- (a) 現在の安全解析は役に立つのか。
- (b) 安全解析は企業の安全活動に定着しているのか。
- (c) 大規模システムの安全解析（リスクアセスメント）は社会的に受け入れられているのか。
- (d) 企業は安全解析に何を求めているのか。
- (e) 将来の安全解析はどのようなになるのか。どこまでマイクロに解析すれば良いのか。
- (f) アメリカ、ヨーロッパで開発された安全解析の考え方は、我国の思考方式と両立するのか。

本稿では、安全解析（オペラビリティ・スタディ、フォールト・ツリー生成

法)の現状を調査するとともに、オペラビリティ・スタディの問題点、システム工学を応用したオペラビリティ・スタディについて述べる。また、安全解析を基礎とする異常診断法の現状について報告する。

2 安全解析の歴史と手法¹⁾

1974年にアメリカ原子力委員会は、原子力発電所のリスク評価に関する報告書 WASH-1400を公表した²⁾。この研究は原子力委員会の援助により、2年間で300万ドルの費用を投じて完成したものである。この研究では、原子炉の事故の全スペクトルについてリスクの評価を行い、事故の発生を確率的に評価し、それが公衆に与える影響を明らかにしている。この報告で採用している手法はフォールト・ツリーとイベント・ツリー解析法であり、これらの手法によりモデル化し、故障率のデータを入力して、リスクを定量的に評価している。その結果、100基の原子力発電所のリスクは、いん石落下で人が死亡する確率と同じレベルであるとされている。

この研究報告は、大規模システムの安全解析の最初の事例であり、その後の安全解析の方向を決定したものである。この方法を用いて LNG のリスク解析、化学コンビナートの安全解析がアメリカ、ヨーロッパ各国で発表されている。

イギリスでは1960年代半ばより、原子力発電所の故障データの収集、データバンクの設立、その活用、充実に努力している。イギリスにおいても1970年代後半から化学プラントの事故が多発したために、原子力、化学工場を管理する Health and Safety Commission が設立され、ロンドン近くの Canvey コンビナートの安全解析を1978年に実施した³⁾。オランダにおいても、RIJNMOND コンビナートの化学プラントに対してイギリスの企業が安全解析を実施し、それを公表している⁴⁾。

図2.1に安全評価の手順^{5)・6)}を示すが、ここで用語の定義について簡単に述べておく。ハザード(潜在危険)とは、危険の源であり、生命、財産に損害を与える恐れのある物理的状態のことである。可燃性物質、有毒物質、反応性物質は危険物(danger)であり、それがタンクに貯蔵されているのがハザードである。一方、リスクとは、(ハザード)/(安全対策)と考えてもよい。ある時間範囲において、ハザードがあるレベルで実際に危険な事態となる確率である。道路が凍結すれば、自動車事故を起こす確率は大きくなるが、これをリスクが高くなるという。

安全評価は、つぎの四つの段階を経て実行される。

(1) ハザード同定：対象プロセスに潜在するハザードを見いだす。

予備的ハザード解析、オペラビリティ・スタディ、FMEAなどの手法を用いて対象システムに潜在するハザードを明らかにする。ハザードを同定した後、火災、爆発、毒性物質あるいは反応性物質の漏洩などハザードに関連する事故を想定できる。さらに、事故の起因事象(ポンプ、バルブ故障、配管や容器の

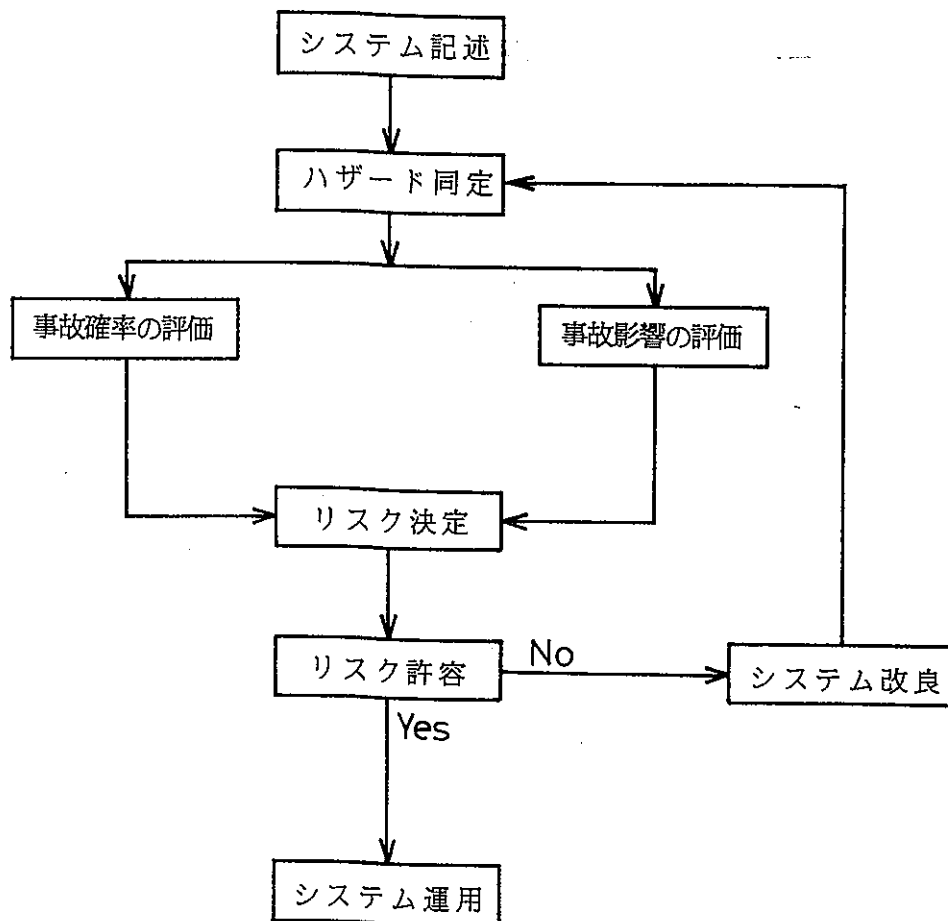


図 2. 1 確率論的安全評価の手順

破断、人間エラーなど)を明らかにするとともに、起因事象に対するプロセスの応答(異常の伝播、安全系の作動)、すなわち事故シーケンスを検討する。それぞれの事故シーケンスが明らかにされれば、安全評価の手順は(2)に進む。

(2) 事故による影響評価：事故シーケンスは一般的には複数個存在し、その影響の規模にも相違がある。安全評価のこの段階では、事故シーケンスによる影響の程度を評価する。

(3) 事故確率の計算：事故シーケンスの発生確率を求める。なお、安全評価の(2)の段階で影響の大きさが許容の範囲を越えた事故シーケンスに対して、事故確率を計算する場合が多い。

(4) リスクの評価：リスクの許容レベルを設定し、許容できないリスクに対して、リスクの低減を行う。

安全評価のために開発されている代表的手法を以下に示す。

- (1) 予備的ハザード解析 (PHA; Preliminary Hazard Analysis) ^{5, 6)}
- (2) オペラビリティ・スタディ (OS; Operability Study) ^{5~9, 19, 21, 22)}
- (3) 故障モード・影響・致命度解析 (FMECA; Failure Modes, Effects and Criticality Analysis) ^{5~7, 10, 11)}
- (4) フォールト・ツリー解析 (FTA; Fault Tree Analysis) ^{5~7, 10, 12, 15)}
- (5) イベント・ツリー解析 (ETA; Event Tree Analysis) ^{5~7, 16)}
- (6) 管理上の手落ちとリスク・ツリー (MORT; The Management Oversight and Risk Tree) ^{17, 18)}

図2. 2では、それぞれの手法の解析原理、解析結果、システムの中のどのレベルから解析を進めるか等について示している。ここで演繹法と帰納法について簡単に述べておく。帰納法とは、個々の具体的事柄から、一般的な命題や法則を導き出す方法である。一方、演繹法とは、一般的な法則や命題から個別的事実を推論する方法であり、この関係を図2. 3に示す。帰納法とは、山のすそ(事実)から頂上(結果)を見る立場であり、演繹法は、山の頂上(結果)から山のすそ(事実)を見る立場であることが分かる。

これらの手法に共通しているのは、正常状態あるいは設計の基準値からの“ズレ”(偏差) deviationを考え、その原因と影響を明らかにしようとしている点である。FMECAは要素故障から出発して、帰納法的に進めている。一方、フォールト・ツリー解析は、システム全体を支配する事象から出発して、要素故障にまで至っている。オペラビリティ・スタディは、この2つの手法の中間的なものであり、とくに対策まで含めている。各手法の詳細については、ここでは省略するが問題に適した手法を選定することが重要である。

システム安全評価において、ハザード同定、すなわちシステムの潜在危険を

手法	P M 分析	オペラビリティ スタディ	FMECA	フォールト ツリー解析	イベントツリー 解析
解析原理	演繹法	演繹、帰納法	帰納法	演繹法	帰納法
解析結果	定性的	定性的	定性、定量的	定量的	定量的
上位レベル (装置の火災 爆発)		(影響、結果)	(影響)	トップ事象	
中間レベル (流量 圧力の変動)	"ズレ"	中間事象		引き金事象	
下位レベル (弁、ポンプ の故障)	慢性ロス	(原因) (対策)	要素故障	(原因)	
異常現象	微欠陥		(故障モード)		

図 2. 2 安全評価の手法

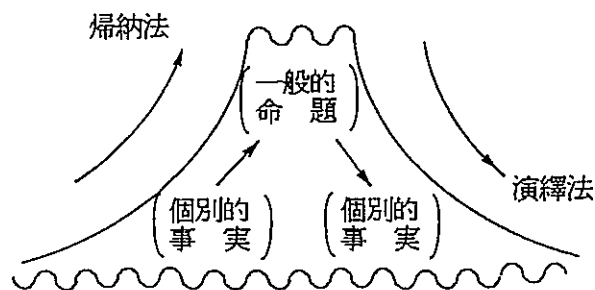


図 2. 3 帰納法と演繹法

明らかにすることは、極めて重要である。上記の手法の中で、ハザード同定に用いられるのは、予備的ハザード解析、オペラビリティ・スタディ、故障モード・影響・致命度解析である。

故障モード・影響・致命度解析（FMECA）は、システム設計の段階で考えられるあらゆる故障を取り上げ、その故障モードを明らかにしたのち、システムに及ぼす影響を解析し、安全に致命的な故障箇所を識別し、故障影響の致命度と発生確率により、各故障に順位をつける手法である。この手法は、設備またはその構成部品に着目しているため、機械工場、組立産業などの設備の故障解析に適している。

一方、オペラビリティ・スタディは、FMECAと同じように定性的解析手法であるが、配管で接続されたシステムに対して、個々の部品の機能が配管の流れに与える影響を明らかにし、配管を一つのシステムとして解析することに特徴があり、石油、化学プラントなどの装置産業を対象とする手法である。この手法は、プラントを構成する全ての装置に対して、ハザードおよび運転上の問題を組織的に明らかにすることが可能である。

3 安全解析とその応用に関する従来の研究

3. 1 オペラビリティ・スタディに関する従来の研究

オペラビリティ・スタディ (Operability Study) は1970年代の初めに、イギリスのICI社で開発された定性的な危険度評価手法である。この手法の基礎となる考え方は、プラント、プロセス内の配管内の“ずれ (Deviation)”を取り上げ、その原因及びシステムに及ぼす影響と対策について順次検討することである。これによりプラント、プロセスにおける潜在的な危険性を明らかにし、その影響を評価するとともに、必要な対策を講ずることが可能である^{5~9, 19, 21, 22)}。

1977年、イギリスのCIA(Cheical Industries Association)より、オペラビリティ・スタディをわかりやすく解説した手引書が発刊された⁹⁾。1983年、Kletzもオペラビリティ・スタディの解説書を発表している^{20, 22)}。この方法を大規模なシステムに適用した事例はあまり公表されていないが、この手法を応用した事例としては、ソルベイ法²³⁾、酸化エチレンプラント²⁴⁾、ヒートポンプシステム²⁵⁾等の解析例が発表されている。Ozogは、ハザード同定とリスク解析の問題について検討しており、フォールト・ツリーのトップ事象決定に、オペラビリティ・スタディを用いた例を示している²⁶⁾。英国を中心としたヨーロッパ諸国において、本手法は活用されているが、米国ではこの手法はほとんど利用されず、報告例はきわめて少ない。1984年に、Laiらはグレンエレベーターの粉塵爆発の問題に対して、オペラビリティ・スタディの適用例を報告している²⁷⁾。国内では、1975年より岡山県保安防災研究会により、コンビナートの危険度評価法の一つとして取り上げられ、大規模プラントへの応用例も1978年²⁸⁾、1980年²⁹⁾に発表され、その一部は1980年に紹介されている³⁰⁾。

また、オペラビリティ・スタディが回分プロセスに適用可能であることを明らかにし、簡単な応用例を示したのはCIAより発刊された手引き書が最初であろう⁹⁾。その例は、回分プロセスの原料供給部であり、エゼクタを用いて計量容器を減圧にし、次にドラムから原料Cを100ℓ移送する設備である。計量容器から空気を排気する際のずれ、計量容器に原料Cを100ℓ充填する際のずれ、計量容器から反応容器に原料Cを100ℓ移送する際のずれなどを検討している。対象は回分プロセスであるが、解析の内容は連続プロセスの原料供給部とほとんど変わりはない。

岡山県保安防災研究会においても、回分式反応プラントのオペラビリティ・スタディを検討している^{28, 29)}が、原料仕込みラインと蒸気凝縮ラインを対象としている。ICI社の製薬部のKnowltonは、8年間にわたって新設の回分プロ

セスに対してオペラビリティ・スタディを実施した結果、きわめて有効であった事例を示している³¹⁾。しかし、ここでも回分プロセスの脱気、原料の仕込み工程だけを対象としている。

以上述べたように、これまでに回分プロセスに対して、オペラビリティ・スタディの適用例は数例発表されている。しかし、いずれも原料仕込み、取り出しについて検討しており、実際上は連続プロセスに対する手順を回分プロセスに適用したにすぎない。回分プロセスに対するオペラビリティ・スタディをいかに実施するかという問題は、いまだに組織的には研究されていない。

鈴木らは従来のオペラビリティ・スタディに対して、その問題点を明らかにするとともに、システム工学の入出力の概念を適用して、改良されたオペラビリティ・スタディを提案している³²⁾。この手法では、装置が結合された多段システムに対して、ずれの影響、相互干渉を明確にし、プロセス内で発生すると思われる異常(ずれ)の伝播構造を詳細に分類することができる。また、回分プロセスに対して適用するため、プロセスの運転開始から終了までを操作形式により区分し、それぞれの時間区分毎に入出力の関係を明らかにしている³³⁾。

オペラビリティ・スタディは、国内外において数多くの化学プラント、プロセスに適用され、その有用性は高く評価されているが、実プラントの解析を進めるためには、複数の専門家から構成されるグループにより、多大な時間と労力を必要とする。このような問題に対して、計算機によりオペラビリティ・スタディを支援するシステムが提案されている。Lihouらはオペラビリティ・スタディの解析結果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、影響の関係を計算機に入力し、配管系の解析に利用した^{23, 34)}。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³⁵⁾。Venkatasubramanianらは、フレーム表現を用いて、配管や熱交換器の解析結果をモデル化し、簡単なプロセスへ適用した例を報告している^{36, 37)}。これらの研究は、いずれも配管部を重視した連続プロセスに対する解析支援システムであり、回分プロセスに適用した報告例はきわめて少ない。

3. 2 フォールト・ツリー生成法に関する従来の研究

1961年に、アメリカ空軍はミニットマンミサイル打ち上げ制御システムの研究をベル電話研究所に委託した³⁸⁾。その過程で、初めてフォールト・ツリー解析法を開発した。その後ボーイング社の研究者は、この方法をさらに発展させ、1969年には定性的および定量的解析に必要な計算機コードを開発し、航空、宇宙産業の問題に適用した³⁹⁾。その後、フォールト・ツリー解析は、航空、

宇宙工学から原子炉の信頼性、安全性工学へと応用の範囲が広がり、1974年のラスムッセン報告²⁾は、これまでの研究成果を集大成したものといえる。現在では、化学産業をはじめとする各分野にもフォールト・ツリー解析が適用されつつあり、特に人間を含む問題にも適用可能と考えられることから、システムの信頼性、安全性の問題を解析するために、最も有力な方法の一つである。しかし、フォールト・ツリー解析で困難な問題は、いかにしてフォールト・ツリーを生成するかという点である。

1972年に、Browningは反応器の温度を制御するための流量制御回路及び暴走反応を防ぐために流量を緊急遮断する保護計装システムのフォールト・ツリーを発表した⁴⁰⁾。この論文では、Browningはツリー生成の詳細については述べず、ツリーの最終形のみを示しているために、ツリー展開の内容が不明である。その後、フォールト・ツリー生成のアルゴリズムはいくつか提案されているが、代表的なアルゴリズムとしては、(1)ミニツリーを用いる方法、(2)有向グラフを用いる方法、(3)デシジョンテーブルを用いる方法がある。

ミニツリーを用いる方法としては、1973年に、Fussellは電気回路に対して、フォールト・ツリーを自動的に生成する方法論を提案した^{41, 42)}。電気回路の故障モードを分離し、回路を分割することにより、ツリー生成の論理が明らかとなった。そして、各要素に対するミニフォールト・ツリーをあらかじめ生成しておき、これを編集して全体のツリーを合成する手順を明確にしている。その後Taylor(1982)⁴³⁾、Lees(1986)^{44~47)}、(1988)⁴⁸⁾、(1993)^{49~54)}がミニツリーを用いた、化学プロセスに対するフォールト・ツリー自動生成法を報告している。

1974年に、Powersらは化学プロセスに対するフォールト・ツリー生成のために、グラフ理論の適用が可能であることを示した⁵⁵⁾。Powersらにより提案された、有向グラフによるツリー生成法は、プロセスの状態を有向グラフで表現し、そのグラフに故障モードを記入して、ツリーを生成する方法である。この方法を高温硝酸冷却システムに適用し、ツリー生成例を報告している⁵⁶⁾。その後いくつかの応用例が報告されているが、Cummingsらは、1983年に電力分配回路に対するフォールト・ツリー生成例を示している⁵⁷⁾。また、Powersらのツリーに対しては多くの議論が行われた^{58~62)}。Allenは、Powersらのアルゴリズムに対して、ゲインの表示、変数の表示に改良を加えたアルゴリズムを示している(1980)⁶³⁾。Powersらの方法は、プロセスを構成する要素を一つの単位として有向グラフを求めたのに対して、Shafaghiらはプロセスを制御回路単位に分割して、制御回路を一つの単位として有向グラフを求め、このグラフを用いてフォールト・ツリーを生成する方法を提案している(1984)^{64, 65)}。

また、1986年には Kumamoto らは、有向グラフの考え方を基礎として、制御回路に対するフォールト・ツリー生成法を提案している⁶⁶⁾。単一の制御回路及び制御回路結合形に対して、外乱、要素故障の種類とその影響を分類し、フォールト・ツリーのトップ構造を表す演算子を求めている。

計算機によるフォールト・ツリー自動生成としては、1976年に Salem、Apostolakis らは、デシジョンテーブルを用いたフォールト・ツリー生成法を提案し、フォールト・ツリー自動生成コード CAT(Computer Automated Tree)を開発した(1976)⁶⁷⁾、(1977)⁶⁸⁾。デシジョンテーブル法は、各要素の入力、出力、内部モードの状態をデシジョンテーブルを用いて表し、この表に基づいてツリーを生成する。デシジョンテーブルを用いれば、各要素の機能は詳細に規定することができるが、CATコードでは、複雑な形式で結合された化学プラントに対して、その結合方式に適用することは不可能であった。

これらの方法に対して、佐山は故障モードブロック線図を用いたフォールト・ツリー生成法の基礎を提案した(1981)⁶⁹⁾、(1982)⁷⁰⁾。この方法は、有向グラフと自動制御のブロック線図の考え方を基礎とし、各要素についてはデシジョンテーブルを用いて解析する。種々の故障モードを記入したブロック線図を生成し、この線図より逐次的にツリーを展開する方法である。さらに、単一の制御回路、遮断回路のフォールト・ツリーのトップ構造を演算子としてまとめ、演算子を組み合わせることにより回路が複雑に結合したシステムに対するフォールト・ツリー生成法を提案している(1982)⁷¹⁾、(1983)^{72, 73)}。

知識工学の目的は、問題解決の対象となる領域に関する専門的知識や専門家が持つ経験的知識を形式化し、知的情報処理システムを実現することにある。知識工学の発展により、種々の問題に対してその応用が試みられており、いくつかの適用例が報告されている。

知識工学によるフォールト・ツリー生成法としては、1985年に Garribba らにより、電気回路のフォールト・ツリー構成エキスパートシステムが提案されている⁷⁶⁾。1988年に熊本らは、次のような方法を提案している⁷⁷⁾。GO法に類似した方法を用いて、対象システムをモデル化し、システムに対する事実型知識を生成する。また、専門家の原因探索のノウハウ及び論理的探索指針に基づき、ルール型知識を生成する。これらの知識を基に、再起的な AND / OR グラフ探索により、フォールト・ツリーを生成する方法である。

1989年に鈴木らは、(1)オペラビリティ・スタディと(2)デシジョンテーブルを用いたフォールト・ツリー自動生成法を提案している^{78, 79)}。(1)はオペラビリティ・スタディから得られる危険度評価に関する部分的知識を、異常伝播の構造を基に結合し、対象とするシステムのフォールト・ツリーを生成する

方法である。(2)はプラントの知識表現としてデシジョンテーブルを用い、フォールト・ツリーを自動生成する方法を示した。システム構成要素に関する知識の入力、出力、内部状態の関係をデシジョンテーブルで表現する。この知識に対して情報探索し、対象とするシステムのツリーを生成する方法である。1993年には、知識工学のフレームを用いたフォールト・ツリー自動生成法を提案している⁸⁰⁾。対象プロセスをフレームを用いて階層的に表現し、構造フレームとして計算機に格納する。制御回路、遮断回路のツリーの基本構造をツリー演算子として表し、構造フレームの情報を基に演算子を結合し、対象プロセスのツリーのトップ構造を決定する。トップ構造の下位について、ミニツリーを用いて、要素レベルのツリーを順次展開する。

3. 3 安全解析に基づく異常診断に関する従来の研究

異常診断に関しては、これまでに数多くの論文が報告されているが、Berenblutらにより提案された方法がよく知られている⁸¹⁾。この方法は、デシジョンテーブルを基礎としたものであり、タンク結合システムに対して異常診断例を示している。異常診断法は、対象システムの特徴や診断目的により分類されるが、その1つの方法として、異常の因果関係モデルを利用する方法がある。因果関係モデルの代表的なものとして、(1)符号付有向グラフ、(2)フォールト・ツリーなどがある。松山、大島らにより提案された符号付有向グラフによる異常診断法^{82, 83)}は、プラントの各状態変数を節点に対応させ、それらの間に存在する因果関係を符号付有向グラフにより定性的に表現し、そのグラフの構造を基に、プロセス異常の原因を推定する方法である。

フォールト・ツリーを用いた異常診断法としては、1977年に Lambert らにより、フォールト・ツリーのインポートانسを利用して、診断する方法が提案されている⁸⁴⁾。この方法では、フォールト・ツリーの論理構造と基本事象の発生確率を用いる。プロセスの危険度の高い順にチェックリストを作成し、原因を推定するという方法である。Powers らにより提案された方法⁸⁵⁾も、フォールト・ツリーの確率データを用いて診断順序を決定するものであり、Lambert らによる方法と類似している。その後、1988年に Powers らは再びフォールト・ツリーに基づく異常診断法を提案している⁸⁶⁾。有向グラフを用いて生成したフォールト・ツリーを基にして、プロセス異常(トップ事象)とプロセス運転情報(センサ出力、制御信号、バルブ開度)の関係を示すツリー(故障検出ツリー)を生成している。このツリーのミニマルカットセットを用いて診断する方法である。

知識工学とフォールト・ツリーに基づく異常診断法としては、冬木らは、Lapp と Powers のフォールト・ツリーの演算子を用い、複数の異常事象の入力に対して、関連する事象を対話的に確認し、その原因を推定する方法を提案している⁸⁷⁾。1987年に、Rich らは、機械間の物理的関係とプロセス各部の状態をフレームモデルにより表現し、フォールト・ツリーの事象間の関係をプロダクションルールで表し、異常項目の探索を行う方法を提案している⁸⁸⁾。

これらの研究において、異常診断におけるフォールト・ツリーの有用性は明らかにされているが、フォールト・ツリー生成が困難であり、対象プロセスの改良、変更などに対しても柔軟な対応が困難であるという問題点も残されている。

1989年に、鈴木らは、フォールト・ツリーのミニマルカットセットにより、対象プロセスの異常伝播の構造を明らかに、異常診断を行うために検出すべき状態量及び測定個所を選定し、診断に必要な最小限のセンサ配置を決定できる方法を提案した⁸⁹⁾。さらに、プロセス異常時(トップ事象発生時)のセンサ配置個所における状態量を知識ベースとして格納し、異常診断を行うエキスパートシステムを構築する方法を提案している⁹⁰⁾。1992年には、フォールト・ツリーのトップ事象近傍の情報を用いて、プロダクションルールを作成し、プロセス異常時の変数をパターンとして表現し、これらの情報を用いて診断する方法を提案している^{91, 92)}。さらに、佐山、島田らはニューラルネットワークとフォールト・ツリーを用いた異常診断法を提案している^{93, 94)}。ニューラルネットワークは、学習能力を有し、パターン認識の能力に優れているという特徴を有する。フォールト・ツリーの情報を基にプロセス異常情報をパターンの形式で表現し、これらをニューラルネットワークに対する学習データとする。プロセス運転データを、ニューラルネットワークの入力層に入力し、出力層より診断結果を得るという方法である。

4 オペラビリティ・スタディの改良

4. 1 オペラビリティ・スタディの原理と手順

4. 1. 1 オペラビリティ・スタディの原理

ここでは、オペラビリティ・スタディの原理と応用上の問題点を中心として解説する。装置産業では、タンク、熱交換器、塔、反応器などが配管で接続されているので、プロセスの状態を表わす温度、圧力、流量、組成などの情報は、配管から取り出すことができる。すなわち、プラントの機器で発生した異常は、すべて配管部で検知することができることに着目している点が、特徴的である。この手法は装置産業だけでなく、電流、空気、油、水などの流れている部分にも適用できるので、油圧制御、空気計装の設備上の故障解析にも有用である。

オペラビリティ・スタディでは、二つ以上の事象の組み合わせは考えない。すなわち、単独で大きな損害を与えるリスクを重視している。したがって、オペラビリティ・スタディだけで危険度評価が完成するものではなく、むしろ危険要因の選定、トップ事象の決定のための予備段階での解析と考えられる。それぞれのプラントにおいて危険要因は数多くあるが、オペラビリティ・スタディにより、そのリスクの大きさが明らかになり、重要な危険事象を限定することができる。この結果を、フォールト・ツリー解析に適用すれば、ツリーの定性的解析へと連続的に移行することができ、同時にフォールト・ツリー解析におけるトップ事象の選定という、困難な問題も解決できることになる。

オペラビリティ・スタディは、安全、または運転基準の改定など運転上の問題に適用できる。この手法は、ある基準となる設計または運転条件からの“ずれ (deviation)” に注目する。例えば、プロセスにおけるある一つの“ずれ” (流れない) を考える。次にその原因 (バルブの誤閉止、フィルターの閉塞) とシステムに及ぼす影響 (ポンプの加熱、暴走反応、出力の喪失) につき、順次検討を加える。これにより、潜在する問題が明らかとなる。正常状態からの“ずれ” を組織的にチェックするには、表 4. 1 に示す手引き用語を用いて、チェックリスト的に行うことが効果的である。このような問題発見の過程を図 4. 1 に示す。

小規模災害、または運転上の問題に対しては、従来の経験に基づいて、必要な対策を講ずることができる。しかし、大規模な災害についてはフォールト・ツリー解析による定量的解析を行えば、有効な対策をたて易くなる。例えば、許容できる範囲内の安全が確保できるか否か、現行の基準を満たすには設計変更が必要か否か、等が明らかとなる。

表 4. 1 手引き用語一覧とその説明

手引き用語	説 明
NONE	正常時には順流があるべきだが、それが無い。たとえば、流れがない、または逆流がある
MORE	正常時よりも関連する物理的特性値が増加する。たとえば、流量が増加、高温、高圧、高粘度など。
LESS	正常時よりも関連する物理的特性値が減少する。たとえば、流量が減少、低温、低圧など。
PART OF	正常時と比較して、システムの組成が異なる。たとえば、成分の比が異なる、ある成分がなくなるなど。
MORE THAN	正常時よりも、システムに存在する成分の数が増加する。たとえば、相の数が増加する（気相、固相）、不純物が存在する（空気、水、酸、腐食生成物）など。
OTHER	通常の運転とは異なって起こりうるものすべて。たとえば、起動、停止、高生産量運転、低生産量運転、運転方式の変更、プラントユーティリティの故障保守、触媒の変化など。

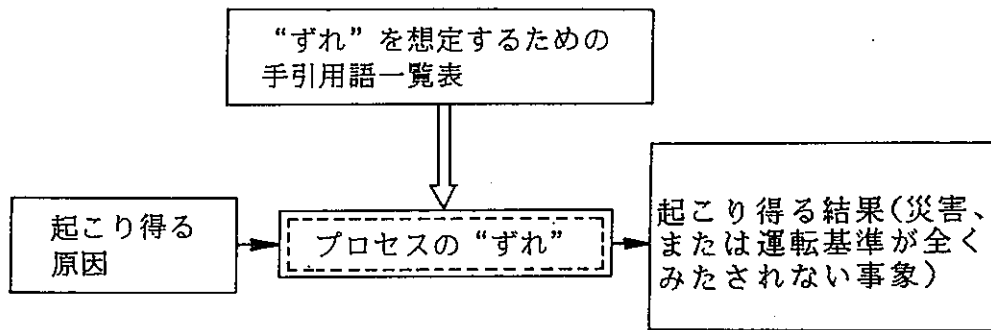


図 4. 1 オペラビリティ・スタディの問題発見の過程

4. 1. 2 解析手順

最初に、対象とするプラントの配管と計装に関する図面を準備し、運転と設計の条件、ならびに仕様を明らかにすることである。解析を進めるに際しては、絶対に頭の中だけで考えてはならない。それは他人から見ると、どのように考えているのか、なぜそのように考えるのかという過程が、理解できないからである。必ず、図や平易なイラストに基づいて、目で見える形で討論を進めていくことが重要である。目で見える図や表およびイラストで表現できないことは、解析できないと考えて、必ず全員参加のレベルで考え方を調整させながら進めることである。そのためには、図4. 2に示すように“ずれ”と影響の関係を明らかにすることも大切である。まず、範囲を明確にし、その範囲内の“ずれ”に集中して取り組むが、そのときにはこのような簡単なイラスト図を書いておくとよい。次に、影響については、その“ずれ”が範囲内に与える影響か、次の範囲にまで及ぼす影響か、これらを区別して討論することが重要である。

図4. 2の下部には、この配管内の圧力勾配を示す線図が示してある。圧力の“ずれ”を検討する際に、このような線図を準備することが、プロセスの理解を深めると同時に、この線図を用いて、“ずれ”を一つずつ取り扱うことにより、全員の理解を確かめながら、解析を進めることができる。オペラビリティ・スタディでは、ある容器に入る配管の1本ずつを取り上げて、手引き用語を適用する。これにより、その部分における“ずれ”とその原因ならびに結果・影響および対策を求める。この手順を、その容器に入るすべての管に繰り返し適用する。

4. 2 システム工学に基づくオペラビリティ・スタディ

4. 2. 1 システム工学とオペラビリティ・スタディ

ここでは、システム工学に基づくオペラビリティ・スタディ^{32, 33)}を紹介する。システム工学的な入出力関係を装置に適用することにより、従来のオペラビリティ・スタディのずれの概念を拡張したものである。

図4. 3にシステム概念図を示す。システムとは、いくつかの要素（人間、機械、部品、情報など）が、ある目的を達成するために、ある規則にしたがって組み合わされたものということができる。システムには、図4. 3(a)に示すように入力と出力が存在する。これらの入出力は、システムに固有の関係で結ばれている。例えば、図4. 3(b)の生産システムでは、代表的な入力、原料と機械および労働であり、出力は製品であろう。ここで、製品の品質を例に入出力の関係を考える。

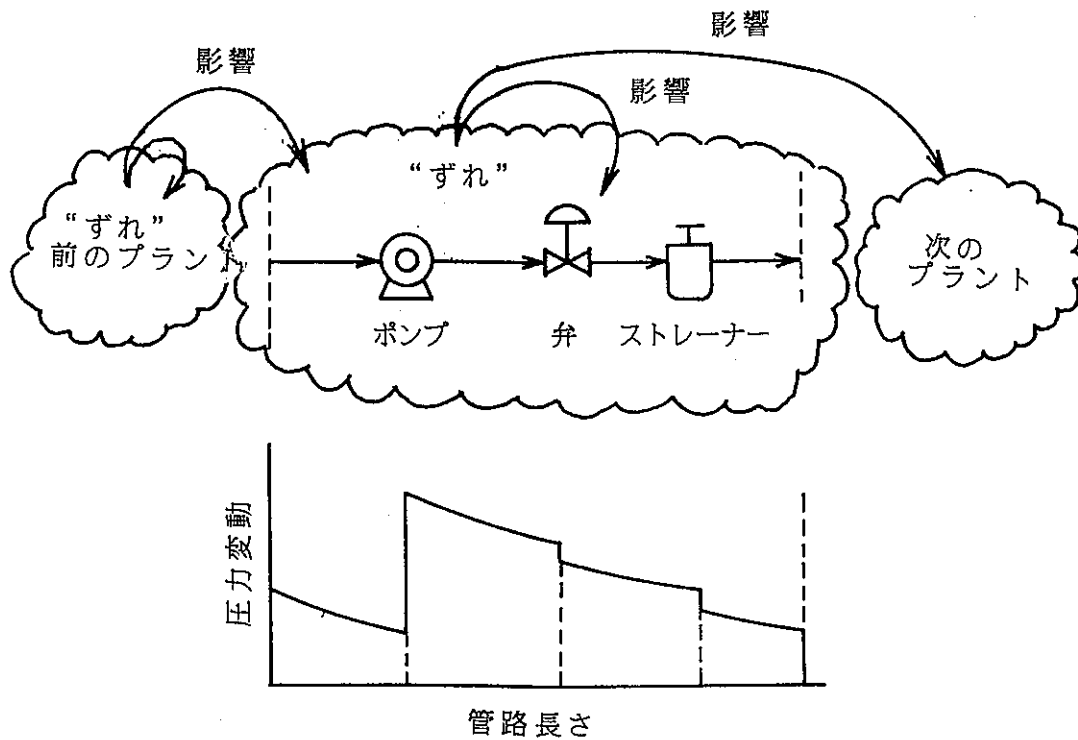
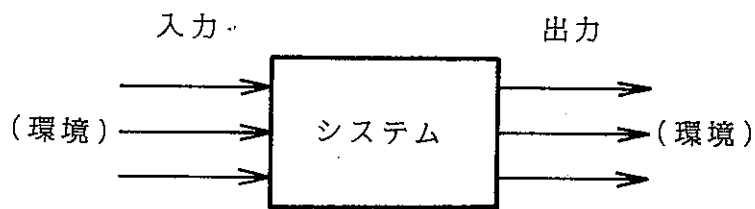
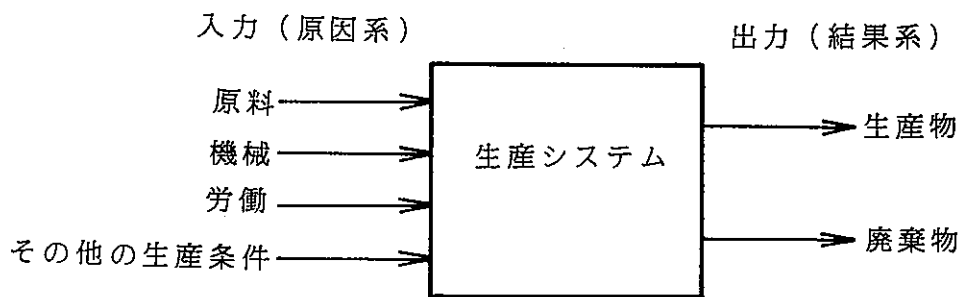


図4. 2 ずれと影響の関係



(a) システムのブロック図



(b) 生産システム

図4. 3 システムの概念

いずれの企業でも、「品質のバラツキ」や「クレームの発生」をいかにするかという点に大きな関心がある。図4. 3 (b) に示すように、品質は出力であり、結果系に存在するものである。したがって、「品質がバラツク」というのは正しくない。品質それ自体は、自由自在には変動できないのである。原料や機械および労働という入力、すなわち原因系がバラツクから、その結果として品質も正直にバラツクのである。一般に、運転員、設計者は製品の品質に関心があり、出力系の品質に着目して問題解決を計ろうとする。しかし、結果系に限定していくら努力しても成果はあがらない。重要なのはむしろ原因系のほうである。

オペラビリティ・スタディを、実プラントに適用して解析を進める過程においても、前述の「品質」と同様な問題点が生じている。すなわち、設計者や運転員の関心は、結果系の反応容器内の濃度や温度の状態である。これらのずれは出口の配管において現れる。出口配管の温度や濃度のずれを出発点として、その原因を求めるためにオペラビリティ・スタディを実施することが考えられるが、これは結果系に着目して解析しようとしており、失敗するケースが多い。その理由を次の4. 2. 2節に詳しく説明する。

4. 2. 2 反応装置の入出力関係

図4. 4に示すような容積 V の連続攪拌反応槽を考える。連続操作であるから、反応物質は槽に一定流量で供給されるとともに、槽から排出され、また槽内の温度と濃度も一定に保たれている。この反応装置に対する物質収支と、熱収支はそれぞれ次式で表わされる。

$$v(C_{A0} - C_A) = V(-k) \quad (1)$$

$$vC_p\rho(t_0 - t) - UA(t - t_c) + (-\Delta H)(-k)V = 0 \quad (2)$$

ここで、 v は反応物質の流量(体積供給速度)、 C_{A0} は反応物質入口濃度、 V は反応槽の容積、 C_A と t はそれぞれ反応槽内の濃度と温度、 A は伝熱面積である。 k は反応速度、 U は総括伝熱係数、 ΔH は反応熱、 C_p と ρ はそれぞれ反応物質の平均比熱と平均密度、 t_0 は反応物質の入口温度、 t_c は冷却水温度である。攪拌機の回転数 n と伝熱係数 U の関係式および冷却装置での熱収支式は省略した。

この反応装置の入力と出力について整理すると、入力は入口側配管からの反応物質の流量 v 、濃度 C_{A0} 、温度 t_0 である。冷却装置からの入力、冷却水流量 v_c 、冷却水温度 t_{c0} である。なお、加熱が行われる場合の入力は温水流量 v_H 、温水温度 t_{H0} である。攪拌装置からの入力、攪拌機回転数 n である。これら入力の中で、 C_{A0} 、 t_0 、 t_{c0} 、 t_{H0} は前段の状態変数(初期値)であり、 v 、

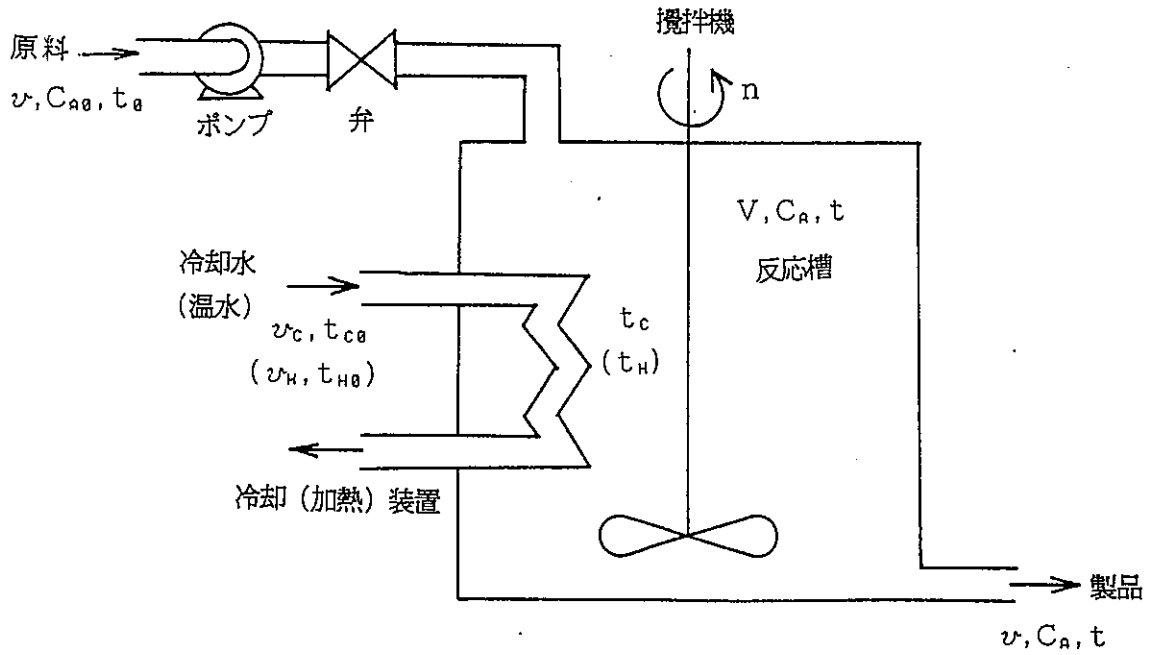


図 4. 4 連続攪拌反応槽

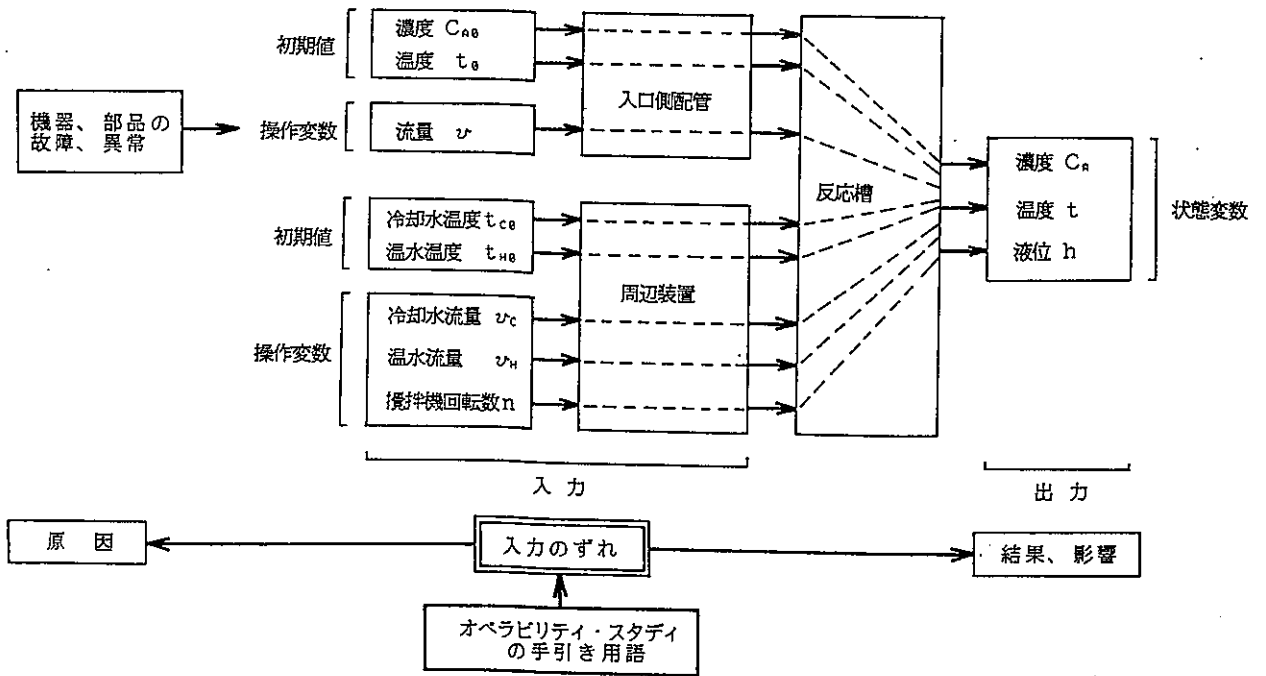


図 4. 5 変数の分類

v_c 、 v_H と n は操作変数である。一方、出力は槽内および出口配管の濃度 C_A と温度 t であり、いずれもこの段の状態変数である。

(1) と (2) 式より、 C_A と t に対する解析解を求めようとする、反応速度式、伝熱係数式等を仮定する必要があるが、ここでは解の具体的な形よりも、入出力の関係を求めることのほうが重要である。(1) と (2) 式より、入出力の一般的関係は次式で表すことができる。

$$C_A = f_1(C_{A0}, t_0, t_{c0}, t_{H0}, v, v_c, v_H, n) \quad (3)$$

$$t = f_2(C_{A0}, t_0, t_{c0}, t_{H0}, v, v_c, v_H, n) \quad (4)$$

上式において右辺が入力、左辺が出力であり、 f_1 と f_2 は関数関係を示している。この反応装置の入出力関係をさらに分類すると、図 4. 5 のように図示できる。なおここでは液位も考えている。

(3)、(4) 式において、右辺に含まれる入力の一つのずれ、例えば $C_{A0} \rightarrow C_{A0} + \Delta C_{A0}$ に対して、左辺の出力のずれを考えれば、次式となる。

$$C_A + \Delta C_A = f_1(C_{A0} + \Delta C_{A0}, t_0, t_{c0}, t_{H0}, v, v_c, v_H, n) \quad (5)$$

$$t + \Delta t = f_2(C_{A0} + \Delta C_{A0}, t_0, t_{c0}, t_{H0}, v, v_c, v_H, n) \quad (6)$$

上式は、 $C_{A0} \rightarrow C_{A0} + \Delta C_{A0}$ という入力のずれが発生した結果、 $C_A \rightarrow C_A + \Delta C_A$ 、 $t \rightarrow t + \Delta t$ という出力のずれが発生することを示している。 C_{A0} 以外の入力のずれについても、出力に与える影響を順次検討することにより、図 4. 4 に示すようなプロセスに対して、(5)、(6) 式と同様に、入力のずれに対する出力のずれの対応が明らかにできる。

一方、(3) と (4) 式の左辺の出力について、そのずれの原因を求める場合を検討する。すなわち、これは出口配管の温度、濃度のずれを出発点としてオペラビリティ・スタディを実施する場合に相当する。(3) と (4) 式において、 $C_A \rightarrow C_A + \Delta C_A$ あるいは $t \rightarrow t + \Delta t$ となる場合を調べるには、右辺の全ての変数のずれを考える必要があり、これはオペラビリティ・スタディというよりも、むしろフォールト・ツリー的な考え方であることがわかる。一般に、出力のずれを調べるためには、すべての入力のずれを検討する必要がある。したがって、出口温度や濃度のずれを想定することは、オペラビリティ・スタディには適していない。

4. 2. 3 オペラビリティ・スタディの実施

オペラビリティ・スタディを実施する場合、対象プロセスの変数を図 4. 5 に示すように、入力と出力に分類することが重要である。オペラビリティ・スタディの手引き用語を入力のずれに適用し、ずれを引き起こす要素故障などの故障や異常を原因として探索する。入力のずれにより出力(状態変数)に影響

が現れるので、それを起こり得る結果・影響とする。

図4. 4の反応槽を例として、オペラビリティ・スタディの実施例を示す。図4. 5の入力に対して手引き用語を適用する。一例として、原料流量 v 、冷却水流量 v_c 、攪拌機回転数 n に対する解析結果を表4. 2、表4. 3、表4. 4に示す。結果・影響の欄には、異常の種類（変数のずれ、要素の異常）とその発生箇所（反応槽、要素）について分類した形で示した。

表4. 2 原料流量 v （操作変数）のオペラビリティ・スタディ

GUIDE WORD 手引き用語	DEVIATION “ずれ”	POSSIBLE CAUSES 考えられる原因	CONSEQUENCES 起り得る結果・影響
NONE	原料を移送しない	①要素の異常 1. 原料ポンプ故障 2. 原料配管破断 3. 原料バルブ閉止	1)反応槽の状態変数のずれ 1. 反応槽内で原料濃度が低くなり異常反応。 製品に不良が起こる。 2. 反応槽の液位の低下 2)要素の異常 1. ポンプのキャビテーション 2. ポンプ過熱
MORE	原料を多量に移送する	①要素の異常 1. ポンプ流量過大 2. バルブ開度大	1)反応槽状態変数のずれ 1. 反応槽で原料が過剰となり、製品の不良が起こる。 2. 反応槽の液位が上昇 (反応槽でオーバーフロー)
LESS	原料の移送量が少ない	①要素の異常 1. ポンプの吐出圧力が小 2. バルブ開度が小	NONEの場合と同じ (但し、2)の1, 2 は除く)

表 4. 3 冷却水流量ひ。(操作変数)のオペラビリティ・スタディ

GUIDE WORD 手引き用語	DEVIATION “ずれ”	POSSIBLE CAUSES 考えられる原因	CONSEQUENCES 起り得る結果・影響
NONE	冷却水が流れない	①要素の異常 1. 冷却水槽の漏洩 (冷却水槽が空) 2. 冷却水ポンプ故障 3. 冷却水配管破断 4. 冷却水バルブ閉止	1)反応槽状態変数のずれ 1. 冷却能力が低下し、反応槽内の温度が上昇し、異常反応が起こる。 製品の不良が起こる。 2)要素の異常 1. 冷却水ポンプのキャビテーション 2. 冷却水ポンプ過熱
MORE	冷却水が多量に流れる	①要素の異常 1. 冷却水ポンプの吐出圧力が大 2. 冷却水バルブの開度大	1)反応状態変数のずれ 1. 反応槽内の温度が下がり、反応速度が小となる。 製品の不良が起こる。
LESS	冷却水が少量だけ流れる	①要素の異常 1. 冷却水ポンプの吐出圧力が小 2. 冷却水バルブの開度小	NONEの場合と同じ

表 4. 4 攪拌機の回転数 n (操作変数)のオペラビリティ・スタディ

GUIDE WORD 手引き用語	DEVIATION “ずれ”	POSSIBLE CAUSES 考えられる原因	CONSEQUENCES 起り得る結果・影響
NONE	攪拌機が動かない	①要素の異常 1. 停電 2. 電源部故障 3. 攪拌機モータ故障 4. 動力伝達系統の故障 5. 攪拌翼がずれる	1)反応槽の状態変数のずれ 1. 冷却能力が低下し局所的に反応が進む。反応槽内の温度が上昇し、異常反応が起こる。 製品の不良が起こる。
MORE	攪拌機の回転数が大	①要素の異常 1. 攪拌機モータへの電圧が高い	1)反応槽の状態変数のずれ 1. 冷却能力が上がり、異常反応が起こる。 2)要素の異常 攪拌翼が破損
LESS	攪拌機の回転数が小	①要素の異常 1. 攪拌機モータへの電圧が低い	NONEの場合と同じ

5 安全解析は役に立つのか

1979年3月アメリカのスリーマイル島原子力発電所で事故が発生した。1974年のWASH-1400の報告書の結論はあまりにも楽観的であるという意見が強くなり、安全解析は役に立つのか疑問視されるに至った。その後も、アメリカ、ヨーロッパでは石油・化学工場、原子力発電所の大規模な事故が発生し、それぞれの国で安全解析が実施されている。

システムの安全解析を行う立場、観点は国によって異なっている。アメリカ、ヨーロッパでは、政府、企業経営層のリーダーの立場から、社会のコンセンサスを求めるために、トップダウン的に安全解析を実施して、その結果は一般に公開されている。また、安全解析を実施すれば、保険額も低くなるという、企業経営にも利点はあるが、オペレータを教育して、ミスオペを低下させるよりも、コンピュータを用いた自動化により、安全を向上させる傾向が強い。このようなトップダウン的なアプローチからは、安全解析は有効であり、一種の免罪符の役割をはたしている。

一方、日本では安全解析の結果は単に紙の上での数字に過ぎず、実際に事故0であることが要求される。WASH-1400では、原子力発電所の事故は、いん石落下の事故と同じレベルで起こり得ることを示したが、日本では、これをほとんど起こらないと理解して、WASH-1400を批判したのである。したがって、トップダウン的よりも、ボトムアップ的アプローチが必要である。安全解析により、システム全体の弱点が明らかとなり、そのレベルアップのために、ソフト、ハードの改善を行い、さらにオペレータのミスオペ0となる改善も小集団活動で可能となる。したがって、日本では、トップダウンの安全解析だけでは評価されず、ボトムアップの安全解析が必要とされるのである。

6 生産技術の重要性^{95~99)}

第2次大戦後、アメリカよりSQC (Statistical Quality Control)(統計的品質管理)が導入され、日本では品質向上のためにTQC (Total Quality Control)として体系化された。1950年以降にアメリカより導入された保全管理の各手法を、日本的経営、工場管理に適合するように体系化したものが、TPM (Total Productive Maintenance)である。TPMは一つの手法ではなく、目的用語であり、事後保全 (Breakdown Maintenance)、予防保全 (Preventive Maintenance)、改良保全 (Corrective Maintenance)、保全予防 (Maintenance Prevention)などの手法を統合している。TQCもTPMも、「企業の体質改善」を目的としている点は同じである。TQCでは、「管理の体系化」を中心とするのに対して、TPMでは、「設備をあるべき姿に改善する」ことに注目している。

TQC、TPMは海外から導入された技術であるが、トヨタ生産方式、JIT (Just in time) は日本で開発された生産方式である。その内容はアンドン、カンバン、ポカヨケ、シングル段取、一個流し、平準化など多品種少量生産方式として最も有用であり、加工組立工業の全ての分野で用いられている。

TQC、TPMとJITは日本で完成された3大手法とも言われ、図6.1に示すように、生産技術を構成している。またアメリカでは、JITはリーン生産方式 (Lean production system) と呼ばれている。これらの手法に共通しているのは、大学で開発されたものではない、実践的手法である、設計よりも現場を志向している、そして、改善を目的とした手法であり、世界中でその有効性が認められていることである。

1986年にアメリカのMITは30人の教授から構成される産業生産性調査委員会を発足させ、1990年に報告書を提出した¹⁰⁰⁾。“Made in America”という書名も、かつての“Made in Japan”、すなわち安物に対する皮肉であろうか。この調査では、「米国産業界はなぜ生産競争力を失ったか」という問題に対して、生産プロセスの重視、新経営指標、生産技術の活用、FMS、そして生産プロセスの技術革新が生産の基盤として重要であることを提言している。MITの他のグループは¹⁰¹⁾、5年間500万ドルの費用で、世界各国の自動車産業の生産性を調査し、日本で開発された生産方式をリーン生産方式と呼び、この方式が最も優れていることを示した。Leanとはムダのないという意味であり、JIT、TQC、TPMを含む生産方式を米国で活用すべきことを示している。

このように、アメリカでは、政府・大学ともに自国の生産技術の問題点を明らかにし、そのレベルアップの必要性を認めている。しかし、目標は明らかにならなかったが、それをいかにして達成するかというアプローチが不明確である。実

際には、工場管理層、大学と工場の現場の相互理解が必要であるが、これをいかに実現するかが将来の問題であり、安全解析のアプローチと同様なパターンになっていることが分かる。

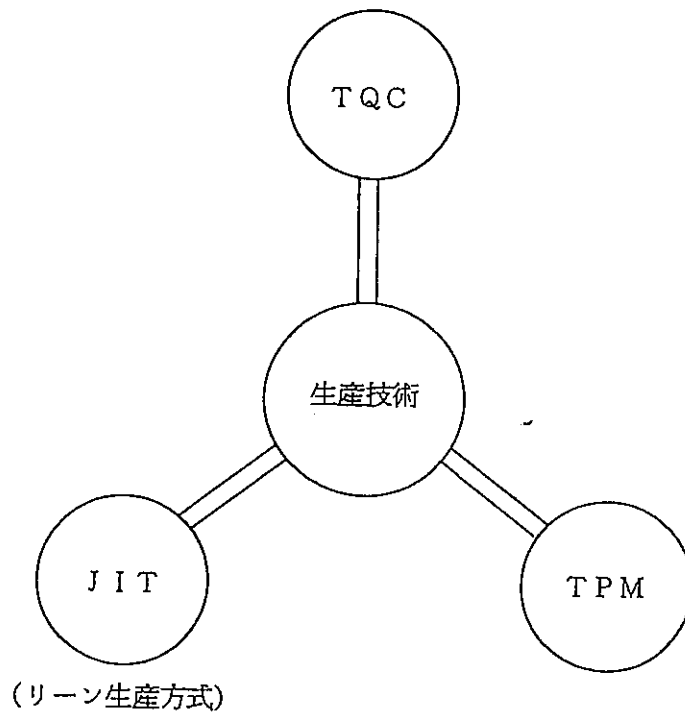


図 6. 1 生産技術とその要素

7 品質管理と安全管理

ある工場、企業の安全のレベルは、その工場、企業の総合した技術レベルを反映したものであろう。安全成績のみ優れているが、他の指標が劣っている例はまず考えられず、逆に経営上の指標はすばらしいが、安全成績のみが悪く、しかもその工場、企業のモットーが「安全第一」という場合が多い。

生産改善活動による期待成果としては、生産量（P. Production）、品質（Q. Quality）、コスト（C. Cost）、納期（D. Delivery）、安全（S. Safety）、作業意欲（M. Morale）がある。図7. 1に示すように、品質、安全はともに出力で、結果系であり、直接に改善することはできない。設備の入力である故障、チョコ停が発生するので、その結果として品質、安全も影響を受ける。

しかし、工場、企業では、品質管理のための教育、小集団活動は全社、全工場を通じて活発に行われているが、安全管理のための活動は、現場中心に行われているに過ぎない。工場の安全管理を推進するために、「危険予知訓練（KYT）」、「ヒヤリハット」、「指差呼称」の3種の手法が用いられているが、安全解析により系統的に解析する例は少ない。企業で必要とされるのは、図7. 2に示す管理技術であり、原因系から、結果系に向けて構築すべきである。生産管理システムを構築しても、故障、チョコ停、欠品が続発すれば、生産管理は十分に機能を果たさないことになる。生産管理は情報の流れを管理するが、設備管理は部品の流れを管理するものであり、モノと情報の流れを同期化することにより、目で見える管理が可能となる。

このように安全管理は、それまでの管理技術を総合化したものであり、安全管理のレベルを向上するには、その他の管理技術のレベルを向上させることが必要である。

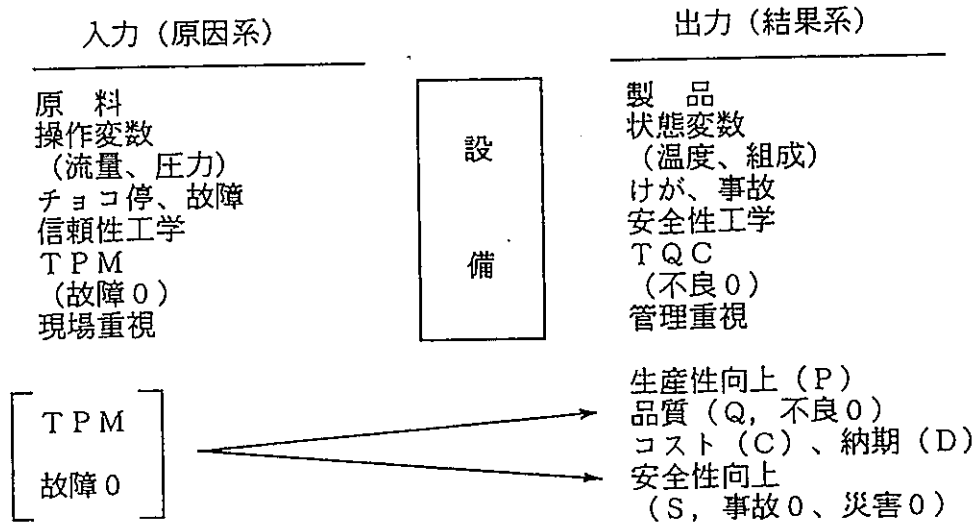


図7. 1 設備の入出力の関係

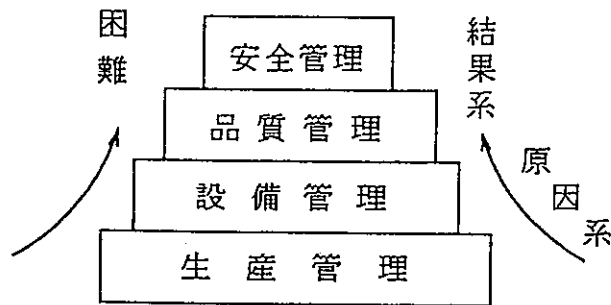


図7. 2 管理の階層レベル

8 階層型安全解析の提案

以上述べた様に、安全解析には二つのアプローチがあることが分かる。一つは、アメリカ、ヨーロッパの安全解析のアプローチである。快適な室内で優秀な技術者が、故障率のデータを統計的に処理し、コンピュータでF Tを作成し、定量的安全解析より、厚い報告書を作成する。そのアプローチは大局的、戦略的、論理的であるが、実際の現場とは遊離したものであり、管理者は現場を知らない。技術者として関心があるのは、工場内の故障のデータを収集して、データバンクを構築し、そのデータがどのような統計モデルとして表現されるのか、平均値、分散はどうかという統計学的な問題である。設備の故障については現場にまかせているので、いかにして低減するかは技術者の仕事ではない。

しかし、アメリカ、ヨーロッパには安全を専門とするコンサルタントが多数活躍しており、現場の経験も豊富で、実際に役立つ改善を指示していることも忘れてはならない。

もう一つの安全解析のアプローチは、日本の現場重視型である。“自分の安全は自分で守る”として、オペレータは自分の担当する設備に小改善を加える。作業の能率を下げることなく、作業を確実に、早く、安全にするために、きめ細かい改善を行う。とくに、ポカヨケ（Fool-proof）には、様々な形式があり、それらはすべて現場のオペレータの手作りであり、長年の汗の結晶というべき対策が数多くある。日本のアプローチは、局所的、戦術的、倫理的であるが、工夫、対策が系統化されておらず、理論的裏付けにも欠ける点がある。管理者は現場に密着し、現場の改善に努力しているが、現場のことしか知らず、システムの思考力は乏しい。技術者が故障のデータを集めて、処理しようとしても、そのような工場の恥になることは外部に発表するな、そのような時間があれば現場で故障を低減しろといわれるであろう。したがって、国内で大規模な故障データバンクを構築することは不可能に近く、安全解析の故障率のデータは国外のデータを借用することになる。

このように安全解析には、トップダウン型とボトムアップ型の二種類があるが、これらを融合して、一つのシステムとすることが必要であろう。ここでは、この統合した安全解析を「階層型安全解析」と呼ぶ。図8. 1に示すように、全体は3個のサブシステムから構成され、企業、工場を上位レベルとし、次にプロセス、プラントを中間レベル、そして設備、機器を下位レベルとする。

最初に重要なことは、この階層型安全解析を常に全てのレベルで行う必要はないことである。問題により、下位レベルで十分な場合もあり、それが中間レベルに与える影響を明らかにすることである。安全解析は自己完結的でなく、

上位、下位に与える影響を知ることが重要である。

図8.1の上位レベルでは、企業、工場全体の安全解析により、安全上の弱点を明らかにする。手法としてはFTA、ETAを用い、プラント、プロセスの故障、トラブルデータから、弱点を明示し、全体としての対策を考える。

中間レベルはプロセス、プラントを対象とし、各部位で発生する種々のトラブル、故障に対してFMEA、OSを用いて安全・信頼性解析を実施し、その対策を検討する。プロセス、プラントでは、トラブルの発生する個所はほとんど決まっていて、それは難しい、金がない、人がいないという理由で放置されている場合が多い。プラントの一部の改造、設計変更による潜在リスクを摘出し、その影響を明らかにする必要がある。

下位レベルは設備、機器を対象とするが、FMEA、PM分析を用いて解析すると同時に、小集団活動による改善が重要である。アメリカのある研究所ではオペレータが誤操作をする確率を求め、そのモデルを作り、誤操作の影響を調べている。日本では、オペレータの誤操作を防ぐために、教育の普及、環境の改善、目で見える管理、ポカヨケの工夫により誤操作の低減に努力している。下位レベルでは、これまでの日本の小集団活動により成果を上げることが可能である。

図8.1に示す安全解析を用いて、トップダウンとボトムアップのアプローチを繰り返すことにより、問題点を明らかにすることが重要である。安全解析の役割は、弱点、問題点を明確にして、その対策を種々検討することであり、直ちに対策を講じて、安全を向上させるのはつぎの段階である。

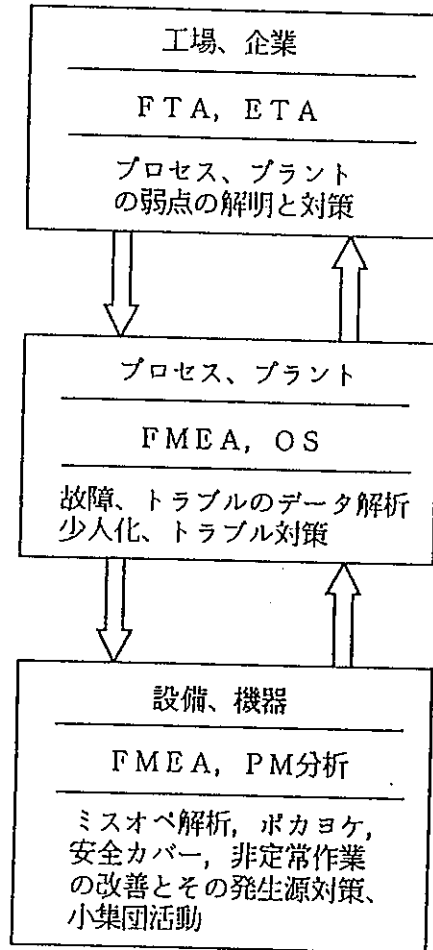


図 8. 1 階層型安全評価

9 再処理施設 P S A 支援システムの適用に関する検討および今後の課題

3. 1 オペラビリティ・スタディに関する従来の研究に示すように、この手法は、これまでに数多くのプラント、プロセスに対する適用例が報告されその有用性が認められている。しかし、オペラビリティ・スタディをプラントを構成する全ての配管に対して、そのずれと原因、結果・影響、対策を検討するため、多大の時間と労力を必要とする。この問題に対して、オペラビリティ・スタディに計算機を用いるという考え方が提案されている^{23, 34~37)}。島田、佐山、鈴木らは、知識工学的情報処理を応用して計算機によるオペラビリティ・スタディ自動解析システムの基礎を提案した¹⁰³⁾。

原子力関連施設に関してこれまでオペラビリティ・スタディを用いて安全評価を実施した報告例は極めて少ない。したがって、原子力燃料再処理施設に対してオペラビリティ・スタディ実施し、その問題点を明らかにするとともに、今後は計算機による自動解析システムの確立を目指す必要がある。現存の、再処理施設 P S A 支援システム、及び本研究室で提案するオペラビリティ・スタディ自動解析システムを用いて、原子力燃料再処理プラント、いくつかの化学プラントに対してオペラビリティ・スタディ実施し、両システムの比較検討を行う。これにより実用的な P S A 支援システムを構築する。

再処理施設には、連続プロセスとともに、いくつかの回分プロセスを含む。オペラビリティ・スタディは連続プロセスの配管系のずれを解析の対象とした手法であり、回分プロセスの反応操作のように、配管を通じて原料、製品などの物資が出入りしない場合について解析の手順が明確にされていない。今後は、回分操作を含むプロセスに対するオペラビリティ・スタディ自動解析システムについてもその可能性を検討する。

10 おわりに

プラントの生産性と安全を向上させることは極めて重要な問題である。これらの問題に対しては、“プラントのあるべき姿”を考え、そこからの差異を明確にし、実現に努力することが重要である。これはKT法¹⁰⁴⁾（ケプナー・トリゴ法）と同様な考え方に基づくものであり、オペラビリティ・スタディの基礎となる方法論である。

ここでは、安全解析に関する従来の研究の概要を示すとともに、オペラビリティ・スタディを中心として、その基礎から応用上の問題について述べた。安全評価においても、プラント設計の場合と同様に論理的思考が必要である。対象とするプラントに対してシステム工学的な考え方を導入し、変数を入力（原因系）と出力（結果系）に分類し、オペラビリティ・スタディの解析手続きを明確にした。これによりオペラビリティ・スタディ自動解析システムの開発が可能となる。オペラビリティ・スタディ自動解析システムを構築するためにはまだ多くの解決すべき問題点が残されており、今後のさらなる研究開発が望まれる。

参考文献

- 1) 佐山隼敏：第5章 信頼性工学と故障解析、メンテナンス便覧、日本プラントメンテナンス協会 (1991)
- 2) U. S. Nuclear Regulatory Commission: Reactor Safety Study – An Assessment of Accident Risks in U. S. Commercial Nuclear Power Plant, WASH-1400 (NUREG-75/014) (1975)
- 3) Health and Safety Executive: “ Canvey: an investigation of potential hazards from operations in the Canvey Island/Thurrock area ” HMSO (1978)
- 4) Central Environmental Control Agency Rijnmond: “ Risk Analysis of Potentially Hazardous Industrial Objects in the Rijnmond Area, A Pilot Study ” , D. Reidel Publishing Company (1982)
- 5) The Center for Chemical Process Safety of AIChE. : “ Guidelines for Hazard Evaluation Procedures ” , AIChE. (1985)
- 6) The Center for Chemical Process Safety of AIChE: “ Guidelines for Hazard Evaluation Procedures 2nd Ed ” , AIChE. (1992)
- 7) 化学工学協会編： “化学プラントの安全対策” , 第1巻 第4章 事故の予測と解析 (佐山隼敏) 丸善, pp.185~261 (1978)
- 8) Lawley, H. G. : Operability Studies and Hazard Analysis, Chem. Eng. Prog. , Vol. 70, No. 4, pp. 45~56 (1974)
- 9) Chemical Industry Safety and Health Council: “ A Guide to Hazard and Operability Studies ” , Chemical Industries Association, London (1977)
- 10) 鈴木, 牧野, 石坂： “ F M E A ・ F T A 実施法 ” , 日科技連出版社 (1982)
- 11) Jordan, W. E. : Failure Modes, Effects and Criticality Analysis, 1972 Proceedings Annual Reliability and Maintainability Symposium, p. 30 (1972)
- 12) 井上威恭監修, 総合安全工学研究所編： “ F T A 安全工学 ” (1979)
- 13) Roberts, N. H. , D. F. Haasl, W. E. Vesely & F. F. Golderg: “ Fault Tree Handbook ” , NUREG-0492 (1980)
- 14) Henley, E. J. , H. Kumamoto: “ Reliability Engineering and Risk Assessment ” , Prentice-Hall (1981)
- 15) 佐山, 井上：フォールト・ツリー解析—その基礎と応用, 計測と制御, Vol. 20, No. 2, pp. 226~235 (1981)
- 16) McCormic, N. J. : “ Reliability and Risk Analysis ” , Academic Press (1981)
- 17) Johnson, W. G. : “ MORT Safety Assurance Systems ” , pp. 154~227 (1980)

Marcel Dekker Inc.

- 18) 佐山：管理上の手落ちとリスクツリー，PETROTECH 7-10，pp.879～884 (1984)
- 19) Lees, F. P. : “ Loss Prevention in the Process Industries ” ， pp.134～174, Butterworths (1980)
- 20) Kletz, T. A. : “ HAZOP & HAZAN, Notes on the Identification and Assessment of Hazards ” ， The Institution of Chemical Engineers, England (1983)
- 21) Kletz, T. A. : Eliminating Potential Process Hazards, Chem. Eng. , April 1, pp. 48～59 (1985)
- 22) Kletz T. A. : HAZOP & HAZAN, Identifying and Assessing Process Industry Hazards 3rd Ed. , The Institution of Chemical Engineers, England (1992)
- 23) 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)
- 24) Piccinini N. and Levy G. : Ethylene Oxide Reactor: Safety According to Operability Analysis, The Canadian Journal of Chemical Engineering, Vol.62, No.8, p.547 (1984)
- 25) Shafaghi, A. : Application of a Hazard & Operability Study to Hazard Evaluation of an Absorption Heat Pump, IEEE Trans. on Reliab, R-37-2, pp.159～166(1988)
- 26) Ozog, H: Hazard Identification Analysis and Control, Chem. Eng. , Feb 18, pp. 161～170 (1985)
- 27) Lai, F. S. , D. F. Aldis, Y. Kameyama, H. Sayama, L. T. Fan: Operability Study of a Grain Processing and Handling Facility, Transactions the ASAE, 27-1, pp.222～228 (1984)
- 28) 岡山県保安防災研究会：“保安防災モデルに関する調査研究報告書－Ⅱ”，(1978)
- 29) 岡山県保安防災研究会：“オペラビリティ・スタディに関する調査研究報告書”，(1980)
- 30) 佐山：化学プラントの危険度評価（Ⅰ）－オペラビリティ・スタディ，安全工学，Vol.19, No.2, pp.93～98 (1980)
- 31) Knowlton, R. E. : Hazop and Its Contribution To Plant Operability, Design'79, IChem E, pp.N1.1～N1.15 (1979)
- 32) 鈴木，亀山，佐山：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)
- 33) 鈴木，亀山，佐山：回分プロセスに対するオペラビリティ・スタディの開

- 発とその応用, 安全工学, Vol. 27, No. 4, pp. 208~217
(1988)
- 34) M. C. Jones and D. A. Lihou: CAFOS—The Computer Aid for Operability Studies, I. Chem. E. Symposium Series, No. 97 (1986)
- 35) T. Weatherill and I. T. Cameron: A Prototype Expert System for HAZARD and Operability Study, Comput. Chem. Eng., Vol. 13, No. 11/12, pp. 1229~1234 (1989)
- 36) V. Venkatasubramanian and R. Vaidhyanathan: HAZOPExpert: A Knowledge—Based System for HAZOP Analysis, Proc. of PSE '94, pp. 1117~1122 (1994)
- 37) V. Venkatasubramanian and R. Vaidhyanathan: Knowledge—Based Framework for Automating HAZOP Analysis, AIChE J., Vol. 40, pp. 496~505 (1994)
- 38) Bell Telephone Laboratories: Launch Contorl Safety Study, Section VII, Vol. 1, Bell Telephone Labs., Murray Hill, NJUSA (1961)
- 39) The Boeing Company: System Safety Engineering Analysis Handbook, NASA—CR 131886 (1969)
- 40) Browning, R. L. : Loss Analysis Improves Process Protective Instrumentation, Instrument Technology, Vol. 19, No. 10, p. 27 (1972)
- 41) Fussell, J. B. : A Formal Methodology for Fault Tree Construction, Nuclear Science and Engineering, No. 52, p. 421 (1973)
- 42) Fussell, J. B. : Synthetic Tree Model — A Formal Methodology for Fault Tree Construction, ANCR—1098 (1973)
- 43) Taylor, J. R. : An Algorithm For Fault—Tree Construction, IEEE Trans. on Reliab., R—31—2 (1982)
- 44) Kelly, B. E. and F. P. Lees: The Propagation of Faults in Process Plants — 1. Modelling of Fault Propagation, Relia. Eng., Vol. 16, pp. 3~38 (1986)
- 45) Kelly, B. E. and F. P. Lees: The Propagation of Faults in Process Plants — 2. Fault Tree Synthesis, Relia. Eng., Vol. 16, pp. . 39~62 (1986)
- 46) Kelly, B. E. and F. P. Lees: The Propagation of Faults in Process Plants — 3. An Interactive, Computer—Based Facility, Relia. Eng., Vol. 16, pp. 63~86 (1986)
- 47) Kelly, B. E. and F. P. Lees: The Propagation of Faults in Process Plants — 4. Fault Tree Synthesis of a Pump System Changeover Sequence, Relia. Eng., Vol. 16, pp. 87~108 (1986)
- 48) J. S. Mullhi, M. L. Ang, F. P. Lees and J. D. Andrews: The Propagation of Faults in Process Plants — 5. Fault Tree Synthesis for a Butane Vaporiser System, Relia. Eng. and System Safety, Vol. 23, pp. 31~49 (1988)

- 49) Lees, F. P. : The Propagation of Faults in Process Plants – Introduction, Relia. Eng. and System Safety, Vol. 39, p. 171 (1993)
- 50) Hunt, A. , B. E. Kelly, J. S. Mullhi, F. P. Lees and A. G. Rushton: The Propagation of Faults in Process Plants – 6. Overview of, and modelling for, fault tree synthesis, Relia. Eng. and System Safety, Vol. 39, pp. 173~194 (1993)
- 51) Hunt, A. , B. E. Kelly, J. S. Mullhi, F. P. Lees and A. G. Rushton: The Propagation of Faults in Process Plants –7. Divider and header units in fault tree synthesis, Relia. Eng. and System Safety, Vol. 39, pp. 195~209 (1993)
- 52) Hunt, A. , B. E. Kelly, J. S. Mullhi, F. P. Lees and A. G. Rushton: The Propagation of Faults in Process Plants –8. Control systems in fault tree synthesis, Relia. Eng. and System Safety, Vol. 39, pp. 211~227 (1993)
- 53) Hunt, A. , B. E. Kelly, J. S. Mullhi, F. P. Lees and A. G. Rushton: The Propagation of Faults in Process Plants –9. Trip systems in fault tree synthesis, Relia. Eng. and System Safety, Vol. 39, pp. 229~241 (1993)
- 54) Hunt, A. , B. E. Kelly, J. S. Mullhi, F. P. Lees and A. G. Rushton: The Propagation of Faults in Process Plants –10. Fault tree synthesis–2, Relia. Eng. and System Safety, Vol. 39, p. 242 (1993)
- 55) Powers, G. J. and F. C. Thompkins, Jr. : Fault Tree Synthesis for Chemical Processes, AIChE J. , Vol. 20, No. 2, p. 376 (1974)
- 56) Lapp, S. A. and G. J. Powers: Computer–aided Synthesis of Fault–Tree, IEEE Trans. on Reliab. , R–26–12, p. 316 (1977)
- 57) Cummings, D. L. , S. A. Lapp and G. J. Powers: Fault Tree Synthesis From a Directed Graph Model for a Power Distribution Network, IEEE Trans. on Reliab. , R–32–2, p. 140 (1983)
- 58) Henry, E. J. and H. Kumamoto: Comment on, Computer–aided Synthesis of FaultTrees, IEEE Trans. on Reliab. , R–26–5 (1977)
- 59) Shaeiwitz, J. A. , S. A. Lapp and G. J. Powers: Fault Tree Analysis of Sequential Systems, Ind. Eng. Chem. , Process Des. Dev. , Vol. 16, No. 4, p. 529 (1977)
- 60) Locks, M. O. : Synthesis of Fault Trees, An Example of Noncoherence, IEEE Trans. on Reliab. , R–28–1 (1979)
- 61) Lambert, H. E. : Comments on the Lapp–Powers, Computer–aided Synthesis of Fault Trees, IEEE Trans. on Reliab. , R–28–1, p. 6 (1979)
- 62) Lapp, S. A. and G. J. Powers: Update of Lapp–Powers Fault–Tree Synthesis Algorithm, IEEE Trans. on Reliab. , R–28–1, p. 12 (1979)
- 63) Allen, D. J. and M. S. Rao: New Algorithms for the Synthesis and Analysis of Fault

- Tree, *Ind. Eng. Chem. Fundam.*, Vol. 19, No. 1, p. 79 (1980)
- 64) Shafaghi, A., P. K. Andow and F. P. Lees: Fault Tree Synthesis Based on Control Loop Structure, *Chem. Eng. Res. Des.*, Vol. 62, p. 101 (1984)
- 65) Shafaghi, A., F. P. Lees and P. K. Andow: An Illustrative Example of Fault Tree Synthesis Based on Control Loop Structure, *Reliab. Eng.*, Vol. 8, p. 193 (1984)
- 66) Kumamoto, H. and E. J. Henley: Automated Fault Tree Synthesis by Disturbance Analysis, *Ind. Eng. Chem. Fundam.*, Vol. 25, No. 2, p. 233 (1986)
- 67) Salem, S. L., G. E. Apostolakis and D. Okrent: A Computer-oriented Approach to Fault Tree Construction, EPRI NP-288, Electric Power Research Institute (1976)
- 68) Salem, S. L., G. E. Apostolakis and D. Okrent: A New Methodology for Computer-Aided Construction of Fault Trees, *Annals of Nuclear Energy*, No. 4, p. 417(1977)
- 69) 佐山: プロセスシステムのフォールト・ツリー作成法に関する研究 - 第1報 基本アルゴリズムとその応用, *安全工学*, Vol. 20, No. 5, p. 286 (1981)
- 70) 佐山: プロセスシステムのフォールト・ツリー作成法に関する研究 - 第2報 2個の離散値を有する変数, *安全工学*, Vol. 21, No. 1, p. 17 (1982)
- 71) 佐山, 鈴木: プロセスシステムのフォールト・ツリー作成法に関する研究 - 第3報 フィードバックとフィードフォワード制御回路結合系, *安全工学*, Vol. 21, No. 3, p. 148 (1982)
- 72) 佐山, 鈴木: プロセスシステムのフォールト・ツリー作成法に関する研究 - 第4報 制御回路と保護計装回路(しゃ断回路、安全弁)の結合系, *安全工学*, Vol. 22, No. 2, p. 96 (1983)
- 73) 鈴木, 亀山, 佐山: プロセスシステムのフォールト・ツリー作成法に関する研究 - 第5報 複雑な構造を有するシステムのフォールト・ツリー作成, *安全工学*, Vol. 22, No. 4, p. 204 (1983)
- 74) 鈴木, 亀山, 佐山, 渡辺, 及川, 阿部: シーケンス制御回路を含むシステムのフォールト・ツリー作成法 - 基本アルゴリズムの展開, システムと制御, Vol. 30, No. 2, pp. 109~119 (1986)
- 75) 鈴木, 島田, 佐山, 渡辺, 阿部: シーケンス制御回路を含むシステムのフォールト・ツリー作成法 - 実プラントへの応用, *日本設備管理学会誌*, Vol. 3, No. 3, pp. 6~16 (1992)
- 76) Garribba, S., E. Guagnini, and P. Mussio: An Expert System for Fault Tree

- Construction, 1985 Proc. of Annual Reliability and Maintainability Symposium, p. 82 (1985)
- 77) 熊本, 山品, 坂本: AND/OR グラフの再帰的探索に基づくフォールトツリーの自動生成, 計測自動制御学会「あいまい情報処理と知的システム制御」講演論文集, p. 91 (1988)
- 78) 鈴木, 亀山, 佐山: オペラビリティ・スタディと知識工学的手法によるフォールト・ツリー自動生成法, 安全工学, Vol. 28, No. 4, pp. 202~210 (1989)
- 79) 鈴木, 亀山, 佐山: デシジョンテーブルと知識工学によるフォールト・ツリー自動生成法, 安全工学, Vol. 28, No. 5, pp. 291~303 (1989)
- 80) 島田, 鈴木, 佐山, 楊: フレームを用いたフォールトツリー自動生成システム, 安全工学, Vol. 32, No. 5, pp. 313~321 (1993)
- 81) Berenblut, B. J. and H. B. Whiehouse: A Method for Monitoring Process Plant Based on a Decision Table Analysis, The Chem. Engr., (Mar.), p. 175 (1977)
- 82) 潮崎, 松山, 田野, 大島: 符号付き有効グラフを用いた化学プロセスの異常診断法 - 5段階パターンへの拡張, 化学工学論文集, Vol. 10, No. 2, p. 233 (1984)
- 83) 柘植, 潮崎, 松山, 大島, 井口, 淵上, 松下: 化学プロセス用異常診断システムの実用化実験, 化学工学論文集, Vol. 10, No. 2, p. 240 (1984)
- 84) Lambert, H. E. and G. Yadigaroglu: Fault Trees for Diagnosis of System Fault Conditions, Nuclear Sci. Eng., 62, p. 20 (1977)
- 85) Tegue, T. L. and G. J. Powers: Diagnosis Procedures from Fault Trees, DRC-06-6-79, (1979)
- 86) Ulrich, N. H. and G. J. Powers: On-Line Hazard Aversion and Fault Diagnosis in Chemical Processes: The Diagraph + Fault-Tree Method, IEEE Trans. on Reliab., R-37-2, p. 171 (1988)
- 87) 冬木, 大野, 伊藤: フォールトツリーを利用した化学プラントの故障診断, 安全工学, Vol. 23, No. 5, p. 285 (1983)
- 88) Rich, S. H. and V. Venkatasubramanian: Model-based Reasoning in Diagnostic Expert Systems for Chemical Process Plants, Comput. Chem. Engng., Vol. 11, No. 2, pp. 111~122 (1987)
- 89) 鈴木, 亀山, 佐山: フォールトツリーを用いたプロセス異常診断法に関する研究 - 第1報 異常診断のためのセンサ配置, 日本設備管理学会誌, Vol. 1, No. 2, pp. 13~20 (1990)
- 90) 鈴木, 島田, 亀山, 佐山: フォールトツリーを用いたプロセス異常診断法

- に関する研究 - 第2報 異常診断エキスパートシステムの開発, 日本設備管理学会誌, Vol. 2, No. 1, pp. 11~20 (1990)
- 91) 鈴木, 島田, 佐山: フォールトツリーを用いた異常診断エキスパートシステムの開発, 安全工学, Vol. 31, No. 2, pp. 100~109 (1992)
- 92) Y. Shimada, Z. Yang, J. Song, K. Suzuki and H. Sayama: Fault Diagnostic Expert System Using Information from Fault Tree Analysis, Proc. of APCCHE & CHEMECA 93, Vol. 2, pp. 441~446 (1993)
- 93) Y. Shimada, K. Suzuki and H. Sayama: Process Fault Diagnosis using Neural Network and Fault Tree Analysis Information, Memoirs of Okayama University, Vol. 27, No. 1, pp. 33~44 (1992)
- 94) H. Sayama, Y. Shimada, Z. Yang, J. Song and K. Suzuki: Artificial Neural Network Approach to Process Fault Diagnosis, Proc. of The Second ASIAN/PACIFIC International Symposium on Instrumentation Measurement and Automatic control, pp. 8~13 (1993)
- 95) 中嶋清一監修: T P M展開プログラム, 日本プラントメンテナンス協会 (1982)
- 96) 鈴木徳太郎: T P Mの新展開, 日本プラントメンテナンス協会 (1989)
- 97) 佐山: 装置工業における T P M推進のポイント, プラントエンジニア, Vol. 21, No. 6, p. 29 (1989)
- 98) 佐山: T P Mと安全, 安全, Vol. 41, No. 2, p. 8 (1990)
- 99) 佐山: 装置工業における生産保全技術, 精密工学会誌, Vol. 57, No. 3 p. 27 (1991)
- 100) 佐山: 機械工業における T P Mの現状と動向, 機械の研究, Vol. 44, No. 6, p. 10 (1992)
- 101) ダートウズほか (依田直也訳): Made in America, 草思社 (1990)
- 102) ウォマックほか (沢田 博訳): リーン生産方式が世界の自動車産業をこう変える, 経済界 (1990)
- 103) Y. Shimada, Z. Yang, J. Song, K. Suzuki and H. Sayama: Computer-aided Operability Study, Proc. of PSE'94, Vol. 1, pp. 291~296 (1994)
- 104) C. H. ケプナー, B. B. トリゴー (上野一郎監訳): “新・管理者の判断力 (The New Rational Manager)”, 産業能率大学 (1985), 27-4, pp. 208~217 (1988)