

JAERI - M
90-210

原子力発電プラントの異常事象における
人的因子の事例分析
(平成元年度事例分析)

1990年11月

松本 潔・堀部 保弘*・田辺 文也

JAERI-Mレポートは、日本原子力研究所が不定期に公刊している研究報告書です。
入手の間合わせは、日本原子力研究所技術情報部情報資料課（〒319-11茨城県那珂郡東海村）あて、お申しこしてください。なお、このほかに財団法人原子力弘済会資料センター（〒319-11茨城県那珂郡東海村日本原子力研究所内）で複写による実費頒布をおこなっております。

JAERI-M reports are issued irregularly.

Inquiries about availability of the reports should be addressed to Information Division, Department of Technical Information, Japan Atomic Energy Research Institute, Tokaimura, Naka-gun, Ibaraki-ken 319-11, Japan.

© Japan Atomic Energy Research Institute, 1991

編集兼発行 日本原子力研究所
印 刷 株原子力資料サービス

原子力発電プラントの異常事象における人的因子の事例分析
(平成元年度事例分析)

日本原子力研究所東海研究所原子炉安全工学部

松本 潔・堀部 保弘*・田辺 文也

(1990年10月26日受理)

TMI, チェルノブイル両事故をはじめとして原子力施設の事故・故障の発生, 進展において, 人間の関与が重要な役割を果たしていることが少なくない。従って, 原子力施設の安全確保のためには, 人的過誤の発生防止を図り, 万一人的過誤が発生しても早期に検知し, 適切な回復措置を講ずることができることが肝要である。このためには人的過誤発生の原因, 機構の解明が必要である。そこで, 人的過誤発生機構の解明に資することを目的として, 原子力発電プラントの事故・故障等異常事象における人的因子の関わりを, 米国で発生した7件の異常事象について, 運転員の行動を中心に人的因子の観点からの分析を行った。

Human Factors Analyses of Nuclear Power Plant Incidents
(Report on the Analyses Performed in 1989)

Kiyoshi MATSUMOTO, Yasuhiro HORIBE* and Fumiya TANABE

Department of Reactor Safety Research
Tokai Research Establishment
Japan Atomic Energy Research Institute
Tokai-mura, Naka-gun, Ibaraki-ken

(Received October 26, 1990)

Human action plays vital role in occurrence and progression of many nuclear power plant incidents such as occurred in TMI-2 and Chernobyl reactors. Therefore, it is essential for ensuring safety of nuclear facilities to prevent occurrence of human error and to take proper recovery action if it occurs. It is necessary to have deep understanding of causes and mechanism of human error. For this purpose, we analysed operators behavior in seven U.S. nuclear power plant incidents from the view point of human factors.

Keywords: Human Factor, Human Error, Analysis, Incident, Nuclear Power Plant

* Mitsubishi Research Institute, Inc.

目 次

1. はじめに	1
2. 人的因子に関する分析	2
2.1 Oyster Creek 事象	2
2.2 North Anna 事象	31
2.3 Oconee 事象	65
2.4 Davis Besse 事象	85
2.5 San Onofre 事象	127
2.6 Rancho Seco 事象	167
2.7 Prairie Island 事象	196
3. まとめ	204
参考文献	205
付録 Rasmussen の分析手法の概要	206

Contents

1. Introduction	1
2. Human Factors Analyses	2
2.1 Loss of Feed Water at Oyster Creek on 5/2/1979	2
2.2 Excessive Cooldown Following Automatic Safety Injection at North Anna on 9/25/1979	31
2.3 Loss of Instrumentation Followed by Excessive Cooldown at Oconee on 11/30/1979	65
2.4 Loss of Main and Auxiliary Feedwater at Davis Besse on 6/9/1985	85
2.5 Loss of Power and Water Hammer at San Onofre-1 on 11/21/1985	127
2.6 Loss of Integrated Control System Power and Overcooling at Rancho Seco on 12/26/1985	167
2.7 Steam Tube Rupture at Prairie Island on 10/2/1979	196
3. Concluding Remarks	204
References	205
Appendix Overview of Rasmussen's Method	206

1. はじめに

TMI、チェルノブイル両事故をはじめとする原子力施設の事故・故障の発生、進展において、人的過誤が重要な役割を果たしている。したがって、原子力施設の安全性の一層の向上のためには、人的過誤の低減ないしはその影響緩和が肝要であり、このためには人的過誤発生の原因、機構の解明が必要である。

そこで、原研では、人的過誤発生機構の解明に資することを目的として、原子力プラントの事故・故障事例における人的因子の係わりを詳細に分析している。

本報告書は、平成元年度に行った、米国内の原子力発電プラントにおける事故事例7件について分析を行った結果を報告するものである。

人的因子に関する事例分析の対象を選ぶに当たり、異常事象でプラント及び運転員の応答が比較的詳しく報告されている以下の事象を選んだ。

- | | | |
|----------------------|---------------------|----------------------------|
| 1) Oyster Creek 事象 | (給水喪失) | 1979年 5月 2日 ⁽¹⁾ |
| 2) North Anna 事象 | (安全注入系作動に続く過冷却) | 1979年 9月25日 ⁽¹⁾ |
| 3) Oconee 事象 | (制御系機能喪失に続く過冷却) | 1979年11月30日 ⁽¹⁾ |
| 4) Davis Besse 事象 | (主給水系及び補助給水系の喪失) | 1985年 6月 9日 ⁽²⁾ |
| 5) San Onofre-1 事象 | (電源喪失とウォータハンマ) | 1985年11月21日 ⁽³⁾ |
| 6) Rancho Seco 事象 | (統合制御システムの電源喪失と過冷却) | 1985年12月26日 ⁽⁴⁾ |
| 7) Prairie Island 事象 | (蒸気発生器伝熱管破損) | 1979年10月 2日 ⁽¹⁾ |

本報告書では、米国の原子力発電プラントで発生したこれらの各異常事象について、事故の経過を運転員のふるまいを中心に整理し、その結果を基に、人的因子の観点にたつて、人的過誤の原因、機構及び影響因子等の分析を行った。分析手法としては、人間の意志決定の情報処理プロセス及び処理能力の限界、心理状態に影響を与える要因等に注目し人間の機能不全を分析するRasmussenの手法を用いた。

尚、本手法の概要は付録にまとめてあるので参照されたい。

2. 人的因子に関する分析

2. 1 Oyster Creek 事象

Oyster Creek炉における1979年5月2日の事象について、参考文献(1)をもとに、以下に概要とクロノロジーをまとめる。

Oyster Creek は、GE社製のBWRである。システムの概念を図2. 1. 1に示す。ここで、注意しておきたいことは、このBWRは古いタイプのものであり、再循環系はあるものの、ジェットポンプは無く、ダウンコマ（アニュラス部）と下部プレナムは再循環系でのみつながっているということである。

この炉は1969年6月に商業運転を開始された。

(1) 事象の概要

本事象は、非常用復水器のサーベランステスト中に熱水力的な外乱が発生し原子炉トリップに至った後、運転員の誤操作・誤判断により炉心が露出する寸前にまで至った事故である。

事故は、非常用復水器の圧力高起動スイッチのサーベランステスト中に熱水力的な外乱が発生し、これにともなって原子炉圧力高の誤信号が発生、原子炉トリップすることから始まった。これと同時に、

- ・ 4台の再循環ポンプが停止（Oyster Creekには5台の再循環ポンプがあるが1台は供用外であった）、
- ・ 発電機の出力低下（25%以下）に伴いタービンが停止、これと同時に主蒸気止め弁が閉り、タービンバイパス弁が開く、
- ・ 1B常用母線の電源が喪失（2台の起動変圧器のうち1台が供用外であったため？）、これにともないB,Cの復水ポンプ/給水ポンプが停止、
- ・ B,Cの復水ポンプが停止したため吸込み側圧力低によりA給水ポンプも停止、これにより、全ての給水ポンプが停止した。

全給水の停止に直面して、運転員は、圧力容器内の保有水量の確保を意図して電源に問題のないA給水ポンプを起動した。しかしながら、給水ポンプの補助オイルポンプが起動しなかった（原因の記述はない）ためA給水ポンプの起動に失敗した。このためプラントは給水が全て停止しているにも係わらず、蒸気の流出はタービンバイパス弁を通して確保されるという状態となるため、圧力容器内の水位が低下してLow-Levelの水位低警報が発信された。運転員は、この警報の発信を受けてタービンバイパス弁からの流出を止めるために主蒸気隔離弁を閉止した。

次に、運転員はタービンバイパス弁による炉心の冷却ができない（給水系が停止しているため）ため、崩壊熱を除去する目的で非常用復水器を用いるという判断を行ない、非常用復水器Bの戻り弁を開いた。これと同時に、手順に沿って再循環ポンプの吐出弁（4台中2台）を閉めようとして間違えて4台全ての吐出弁を閉めてしまった。これにより、圧力容器内の自然循環はほとんど停止してしまうこととなった（バイパス弁が開い

ているため若干の流量はあった)。

非常用復水器を使用した炉心の冷却では、炉心で発生した蒸気を非常用復水器に導きそこで復水された冷却材を再循環ループに注入するというパスとなるため、自然循環の停止にともない炉心シュラウド部の水位は漸次低下することとなる。一方、炉心シュラウド外壁と原子炉圧力容器内壁の間のアニュラス部の水位は非常用復水器からの流入により若干の増加傾向を持つ。このように、アニュラス部とシュラウド部の水位に相違が現れることとなる。しかしながら、運転員は吐出弁が全て閉り自然循環が停止していることには気付いていないため、中央制御盤上にあるアニュラス部の水位計(Yarway水位計)の指示が圧力容器内の水位を代表していると思っている。

この様な状況の中で、炉心の水位が非常に低下しているという警報であるTriple-Low警報が発信された。ここで、運転員はYarway水位計の指示が炉心の水位も示していると思っているため、この警報を誤警報と判断した。

一方、自然循環が停止した状態で非常用復水器による冷却を行っているため冷却率が大きくなっており、運転員はこれに対応するため非常用復水器の使用を中断し冷却率を所定の範囲に納めるという判断を行った。非常用復水器の停止により、アニュラス部の水位は流入がなくなることで、及び吐出弁のバイパス弁によりシュラウド部への若干の流出があるため低下する。これを見て、運転員は、シュラウド部の水位も同様に低下したと判断し、水位を回復するために非常用復水器を再使用した。この判断も、自然循環が確立しているため、アニュラス部とシュラウド部の水位は等しいという思い込みに基づいている。

この時点で、当直長はさきに発信されたTriple-Low警報の確認のために、運転員を原子炉建屋に派遣して、シュラウド水位の警報のために設置されているもう一つの水位計であるBarton計を確認させる。この水位計が、シュラウド部の水位は炉心上端から4フィート10インチ(4'10")以下であることを指示していることが判明し、先の警報が正しかったのかも知れない、アニュラス部とシュラウド部の見かけ上の水位差は本当かも知れないと思うようになる。しかしながら、この様な状況においても、運転員はYarway計の指示を「正」とする判断を下す。

この後は、冷却率・水位・圧力のバランスを取るため非常用復水器の開閉を繰り返すこととなる。非常用復水器の開閉では上記のパラメータのバランスが取れないため、運転員は、炉心内で冷却材が一様に混合していないのではないかと判断をする。この判断に基づいて、冷却材を強制循環させるためC再循環ポンプを起動する。このポンプ起動に伴うシステムの応答が運転員の予想に反するものであったため、Engineering Supervisorの示唆によりC再循環ポンプのシールの確認を行う中で全ての吐出弁が閉止していることを発見する。この発見により、システム状態の理解ができ高温停止状態への移行操作に移ることが出来た。

(2) 事象のクロノロジー

表2. 1. 1に「プラントの状況」、「運転員の意図と行動」を中心にまとめたものを示す。表2. 1からわかるように、この事故事象は人的因子の観点からみると次の6つのフェーズに分けることが出来る。

①原子炉トリップ時の初期対応

- ②再循環ポンプの吐出弁の閉止
- ③Triple-Low警報への対応
- ④Barton水位計の指示の評価
- ⑤非常用復水器のサイクリング操作
- ⑥再循環ポンプCの再起動とその評価

以下にこれらの各フェーズの運転員の振舞いをまとめる。

①原子炉トリップ時の初期対応

ここでの運転員の行動は次の3つのものである。

- i) A給水ポンプの起動
- ii) 主蒸気隔離弁の閉止
- iii) 非常用復水器を使用する判断

i) は、原子炉トリップと同時に発生した電源系のトラブルによる給水の喪失を回復するための行動であり、圧力容器内の保有水量の減少を防ぐためには適切な判断であった。しかし、現実には機器の故障（補助オイルポンプが起動しない）の重畳により起動できなかった。ii) はi)の結果給水系を復旧することが出来なかったためタービンバイパス弁からの蒸気の流出ひいては保有水の減少を防ぐために行われたものであり、「炉心の水量を減少させない」という観点から適切な判断であった。iii) は「タービンバイパス弁を通して流出されてきた蒸気を復水器で復水し、その冷却材を給水ポンプにより圧力容器に送る」という通常の崩壊熱除去系が使用できないためにその代替案として取られたものであり、適切な判断であった。

②再循環ポンプの吐出弁の閉止

この操作自体は原子炉トリップ時の手順に従って行われたものである。しかしながら、正しい手順では2/4の吐出弁を閉める操作であるにも係わらず、現実には4台全ての吐出弁を閉止してしまった。

③Triple-Low警報への対応

ここでは、原子炉の安全性にとって重要な警報である「Triple-Low」警報を運転員がどのように受け止めたかが問題となる。運転員は「吐出弁が全て閉められており、自然循環が停止している」ことを知らないため「中央制御盤上に表示されるアニュラス部の水位とシュラウド部の水位は一致しており、アニュラス部の水位で代表される」と思い込んでいる。また、訓練においても「アニュラス部とシュラウド部の水位が異なる」という状況があり得るということを教育されていない。このため突然発生した「Triple-Low警報」に対して簡単に「誤警報」という判断を下したのではないかと思われる。

④Barton水位計の指示の評価

ここでも、運転員はアニュラス部の水位（Yarway水位計の指示）とシュラウド部の水位（Barton水位計の指示）の比較を行ない、その差が現実のものかも知れないという気持ちを持ちながら、最終的には「Barton水位計の指示を採用しない」と判断している。この背景としては③で示したように「訓練されていない」ということが1つのファクタ

一となっていたものと思われるが、この他のファクターとの重畳効果が大きかったのではないかと推察される。しかしながら、判断に至った過程が記述されていないためこの他にどの様なファクターがあったのか特定できない。

⑤ 非常用復水器のサイクリング操作

この操作は、自然循環が確立している状況で非常用復水器を使用する場合は通常の手順である。しかしながら、本事象では自然循環が確立していないため蒸気の抽出をとおしてシュラウド水位の低下をもたらした。

⑥ 再循環ポンプCの再起動とその評価

非常用復水器のサイクリングにより期待するプラント状態が得られなかった運転員は、その原因がシュラウド内での冷却材の混合状態にあると判断した。この判断に基づいて冷却材を強制的に混合させるためにC再循環ポンプを起動した。運転員の持っている「アニュラス水位=シュラウド水位」という前提では、このポンプ起動により水位の変化は現れないと予想されていた。しかしながら、実際はポンプの起動によりアニュラス水位の急激な減少が発生したため、Engineering Supervisorによりポンプシールの破損が示唆された。これを確認する途中で「吐出弁が全て閉まっている」ことを発見した。

以上6つのフェーズの判断/操作のなかで②、③及び④がヒューマンエラーと考えられる。

(3) 人的因子に関する分析

Oyster Creek事象の中で行われた運転員の行動の中でエラーと考えられるものは、

- 1) 再循環ポンプ吐出弁全台閉止のエラー
- 2) Triple Low警報の評価に関するエラー
- 3) Barton水位計の評価に関するエラー

である。以下に各エラーについての分析及びその結果を記す。なお、各エラーのRasmussenの手法による分析チャートをそれぞれ図2. 1. 2から図2. 1. 4に示す。

1) 再循環ポンプ吐出弁全台閉止のエラーについての分析

原子炉トリップ時のSOP(標準運転手順)に従って再循環ポンプ2台の吐出弁を閉止するべきところを全台の吐出弁を閉止してしまった。文献(1)においてはこのエラーについての人的因子に係る問題点として以下のことがあげられている。①ポンプ吐出弁操作スイッチの配置の欠陥、②スイッチのラベル表示に欠陥があってパネルの他のスイッチと混同しやすかった、③多くのアラームと付加的なタスクを遂行する必要が生じた結果として、注意の分散が起きた、④運転員訓練における欠陥の可能性がある。

スイッチの配置とラベル表示については、通常運転中はプラント運転を妨害するほど不十分というわけではないが、運転員が急いでいて彼のタスクに集中していないときには不正確な反応をもたらすほど悪い。訓練の欠陥についてはそれほど大きい問題と考えられていない、何故ならば少なくとも行動を思い出させて検討させてみた結果では正確な手順の目的と遂行を完全に理解していたから。しかしながら、作業負荷が

高い条件下で訓練がされていたならば、その運転員が失敗せずにやれたかどうかは依然疑問のまま残る。表2. 1. 1の詳細なクロノロジーをもとに以上の情報を参考にRasmussenの手法に基づいて分析すると次のようになる(図2. 1. 2参照)。

外的モードとしては、対象となる2ヶの吐出弁(A,E)の他に、さらに2ヶの吐出弁を閉じたのであるから、無関係な(余計な)行為の実行である。それが生じたのは操作実行段階でのエラーによる。その生じた原因はスクラム直後の多くの警報、信号などが発生して運転員に対応をせまっていた状況なので外部事象の中の干渉タスクによって気を散らされた(原因)。メカニズムとしては他の高い熟練度(または最近遂行された)動作または活動に干渉されたというステレオタイプののっとりによるものと思われる。この視点に立つと4つの吐出弁を全部閉止するというタスクの頻度と最近類似のタスクをやっていないかが気になるところである。さらに別の視点としてポンプが既にシャットダウンしたのを認識してないまたは忘れて4台のポンプをトリップしようとし、それに引きずられて吐出弁を4つとも閉じてしまった可能性が大である。クロノロジーの中で、「A,Eの吐出弁を閉じてRCP-A,Eをトリップし、次にB,Cの吐出弁を閉じて、RCP-B,Cをトリップした」とある。ポンプは4台全部トリップするのに対して、対応する吐出弁を2ヶだけ閉じるのは無意識的なスキルベースで行うのは至難の技と考えられる。

2) Triple Low警報の評価に関するエラーについての分析

炉心シュラウド水位Triple Low警報が発生したが、制御室内に表示されている水位計(Yarway計、アニュラス部)がTriple Lowよりも高い水位を示しているのをこれを誤信号と判断した。このエラーについての人的因子に係わる問題点としては文献(1)に以下のことが列挙されている。

- ①中央制御室にはアニュラス部の水位を計測するYarway水位計、G/MAC水位計のアナログ表示と、低い、低-低のアラーム信号を発する警報があるが、シュラウド水位を計測するBarton水位計のアナログ表示はなく、単にシュラウド水位のTriple-lowのアラーム信号だけしかない。バートン水位計によるシュラウド内水位は原子炉建屋行かなければ見られない。この“直接性(immediacy)”の欠如が運転員の2つの種類の水位計のどちらを信頼するかということに影響を与える可能性が大である。
- ②訓練及び標準運転手順において、水位の計測器として、2つのYarway水位計と2つのG/MAC水位計の使用を強調している。
- ③運転クルーは如何なる条件下でアニュラス部水位とシュラウド水位が異なり得るかということについて訓練・教育を受けていない(運転員はYarway水位計とG/MAC水位計はアニュラス水位を計測し、Barton水位計はシュラウド水位を計測しているという事は知っている)。

表2. 1. 1のクロノロジーをもとに上記の情報を参考にRasmussenの手法にもとづいて分析すると次のようになる(図2. 1. 3参照)。

Triple-low 警報を無視した結果として、シュラウド水位低の状況に対応した行動をとらないということで行為の省略に至っている。その原因は、アニュラスとシュラウド両水位が異なる状況を理解することが過大なタスク要求であったことである。そのメカニズムは、通常はYarway水位計がアニュラスとシュラウド両水位を代表している

という、慣れ親しんだ近道により情報を解釈したというものである。したがって、近道することによって機能不全を起こした内的機能は状態同定の段階である。これらの状況に対応する情報が不適切であったというものである。

3) Barton水位計の評価に関するエラーについての分析

2)のエラーの約6分後と10分後の2回にわたって別建屋にあるShroud水位計 (Barton水位計) を運転員に確認にいかせている。そして、このBarton計が、Triple-Low水位を示していることを見出した。Barton計の確認によって、Triple Low警報は本当なのかもしれないと思うようにはなるが、シュラウドとアニュラスの水位が異なるという状況は、これまでに考えられもしなかったので、本当の状況が良くわからない。しかし、現在の状況にとにかく対応しなければならないのでこの場になっても、慣れ親しんだアニュラス水位を示すYarway計を信じることに決定してしまった。このエラーのRasmussenの分析ガイドに従った分析チャートを図2. 1. 4に示す。分析結果をまとめると、次のようになる。Yarway計を信じた結果として、シュラウド水位低の状況に対応した行動をとらないということで行為の省略に至っている。その原因は、アニュラスとシュラウド両水位が異なる状況を理解することが過大なタスク要求であったことである。そのメカニズムは、ポンプ吐出弁の状態表示を見れば、自然循環が確立していないことが気づいたと考えられるが、逆に自然循環が確立していると思いつている（仮定している）から弁表示を見ない。したがって、仮定することによって機能不全を起こした内的機能は状態同定の段階である。これらの状況に対応する情報を正しく収集しなかったというものである。

表 2.1.1 Oyster Creek 事象における運転員のふるまい (1/4)

時刻	プラントの状態	運転員の意図 (何をしようと思ったか)	運転員の行動/判断 (何をしたか)	運転員に影響したと思われる因子
13:50 以前	試験中に水力的な外乱が発生し「原子炉圧力高」の原子炉スクラムの誤信号が発生 ↓ ・原子炉自動停止 ・全ての首領森ポンプがシャットダウン ↓ ・原子炉出力が停止にもなない25%まで低下したため発電機が停止 ・発電機停止にもなないタービン停止 ・電源系の問題により給水ポンプが全台停止		非常用復水器の「圧力高」起動スイッチのサーベランステストを行っていた	
13:50 :13		R/V内の保有水量を確保しなければならぬ	原子炉停止時の手順書の実行	
13:50 :13.6	給水ポンプの補助オイルポンプが起動しなかったため給水ポンプは起動しない ↓ 全ての給水が喪失 ↓ R/V内の保有水量が減少 ↓ Low-Level水位警報発信		電源に問題のないA給水ポンプを起動	
13:50 :43	アニモラス部の水位が上昇する	R/V内の保有水量の減少を止めなければならぬ	主蒸気隔離弁を閉める	
13:51 :16		炉心で発生する崩壊熱を除去しなければならぬ	非常用復水器を使用して冷却する	

表 2.1.1 Oyster Creek 事象における運転員のふるまい (2/4)

時刻	プラントの状態	運転員の意図 (何をしようと思ったか)	運転員の行動/判断 (何をしたか)	運転員に影響したと思われる因子
13:51:30	<p>アニュラスからシュラウドへの自然循環がとまる</p> <p>↓</p> <p>アニュラス部に冷却材が流入したためLow-Level警報が発信される</p> <p>↓</p> <p>シュラウド内の水位が低下を始める</p> <p>↓</p> <p>Triple-Low警報が発信される</p>		<p>非常用復水器Bの戻り弁を開ける</p> <p>手順に沿ってA,Eの吐出弁を開め、間違っ てB,Cの吐出弁も閉めてしまう</p>	
13:52:52	<p>炉心の冷却率が100F/hを超える</p> <p>↓</p> <p>シュラウドの水位が上昇する (操作の意図とは関係ない現象)</p> <p>↓</p> <p>冷却率が手順書の値になる</p> <p>↓</p> <p>アニュラス部の水位が低下する</p> <p>↓</p> <p>冷却率が大きくなってくる</p>		<p>Varway計の指示と矛盾している</p>	<p>アニュラスとシュラウドの水位が異なる状況があるということには訓練されていない。従って、水位の指示はVarway計の方が正しいと思っ ているはずはないと思っ ている</p>
13:53:06		<p>冷却率を抑えなければならぬ</p>	<p>非常用復水器Bの戻り弁を閉める準備をする</p> <p>↓</p> <p>非常用復水器Bの戻り弁を閉める</p>	
13:54:10		<p>シュラウド内の水位を上げさせなければならぬ</p>	<p>A,Bの非常用復水器の戻り弁を開ける</p>	
13:57:30		<p>冷却率を抑えなければならぬ</p>	<p>B非常用復水器の戻り弁を閉める</p>	
13:58:48		<p>13:52:52にTriple-Low警報が出たため、シュラウド内の水位を確認しよう</p>	<p>運転員を派遣して水位を確認させる</p>	<p>シュラウド水位=アニュラス水位と思っ ているためこのような判断となる</p>
13:59				

表 2.1.1 Oyster Creek 事象における運転員のふるまい (3/4)

時刻	プラントの状態	運転員の意図 (何をしようと思ったか)	運転員の行動/判断 (何をしたか)	運転員に影響したと思われる因子
14:03 :30	炉心水位は燃料棒上端から(4'10")以下			
14:10 :12	炉心水位は輸出器下端(4'8")以下	炉心から冷却材がなくなかないようにする	Triple-Low警報は正しかったかとも知れない また、アニュラスとシユラウドの水位差は 現実のように思える A非常用復水器の戻り弁を閉める ↓ Yarway計の水位を信じることにする	
14:14 :48		水位、圧力、冷却率のバランスを取りたい	B非常用復水器の戻り弁を周期的に閉開す る	
14:21 :54	水位、圧力、冷却率がバランスしない	再循環ポンプを起動して、強制的に混合さ せる	炉心内の冷却材が一樣に混合していないの ではないか C再循環ポンプを起動	
14:23				
14:24	アニュラス部の水位が急減少		C再循環ポンプのシールから漏洩があるの かも知れない ↓ C再循環ポンプを停止 ↓ シールディスプレイを確認する途中でB.C の吐出弁が閉まっていることを発見	
14:26 :48		2台目の再循環ポンプを起動する前にアニ ュラスの水位を確保しなければならぬ		

表 2.1.1 Oyster Creek 事象における運転員のふるまい (4/4)

時刻	プラントの状態	運転員の意図 (何をしようと思ったか)	運転員の行動/判断 (何をしたか)	運転員に影響したと思われる因子
14:29	アニュラスの水位が上昇		A給水ポンプを起動 A再循環ポンプを起動	

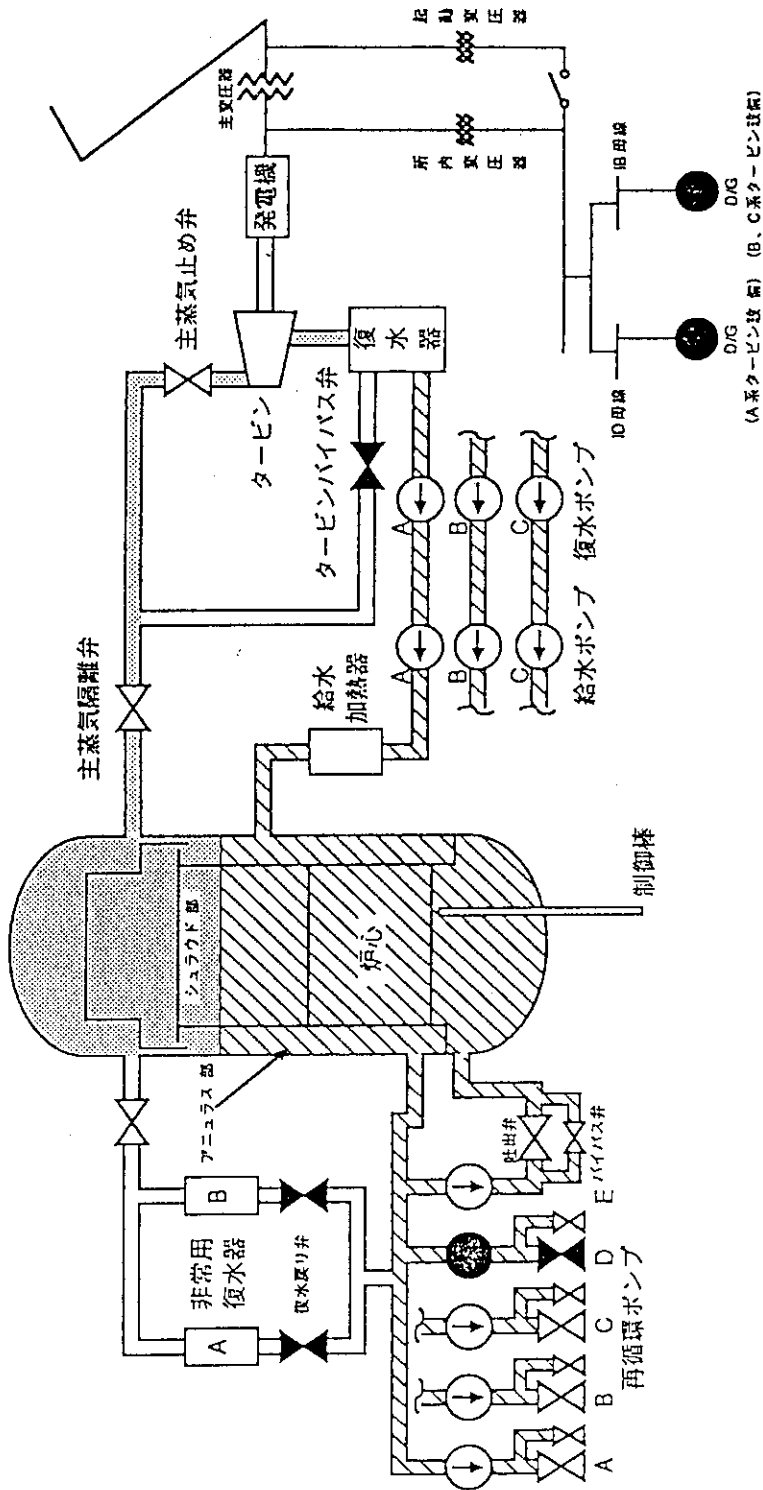
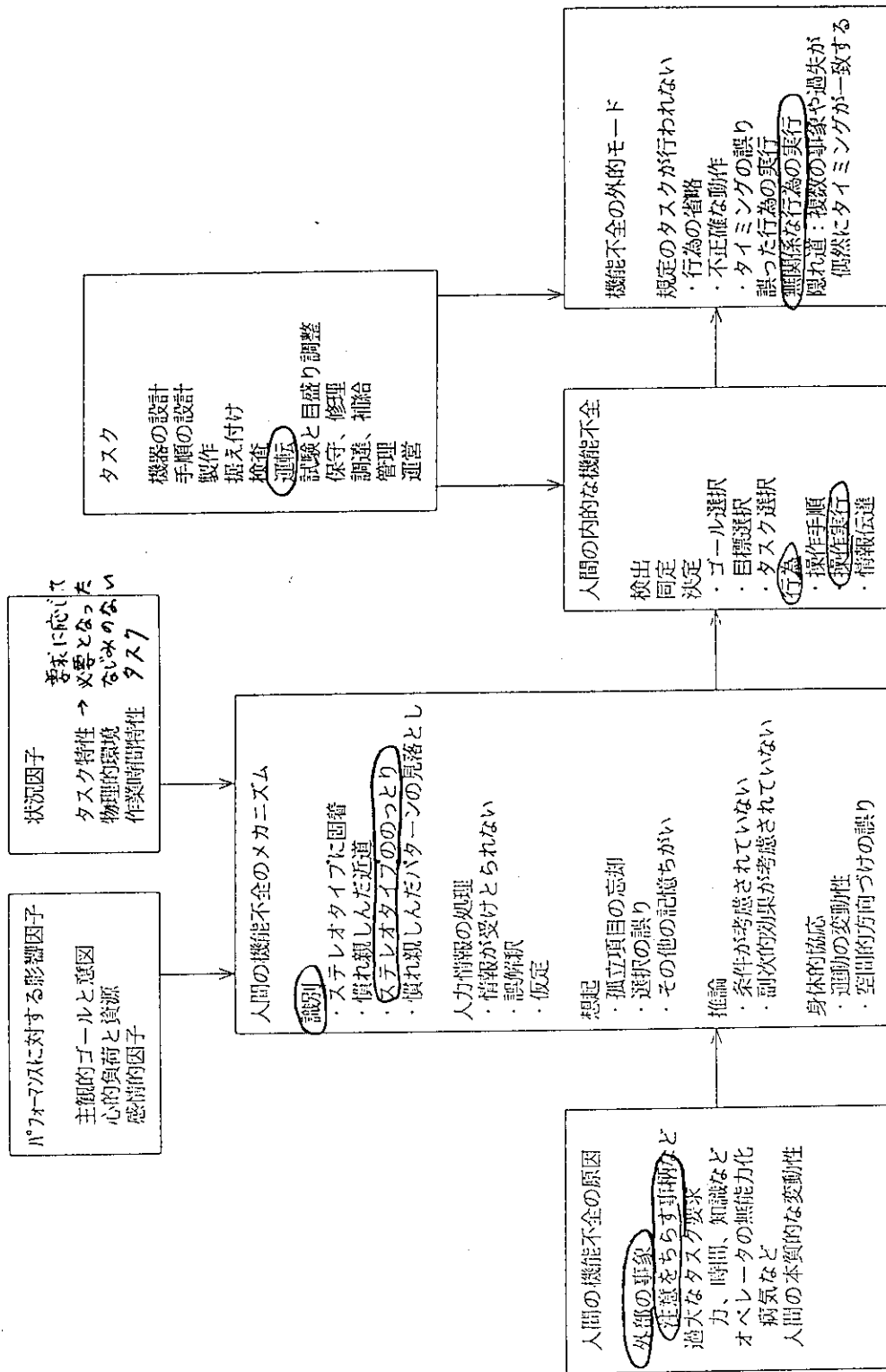
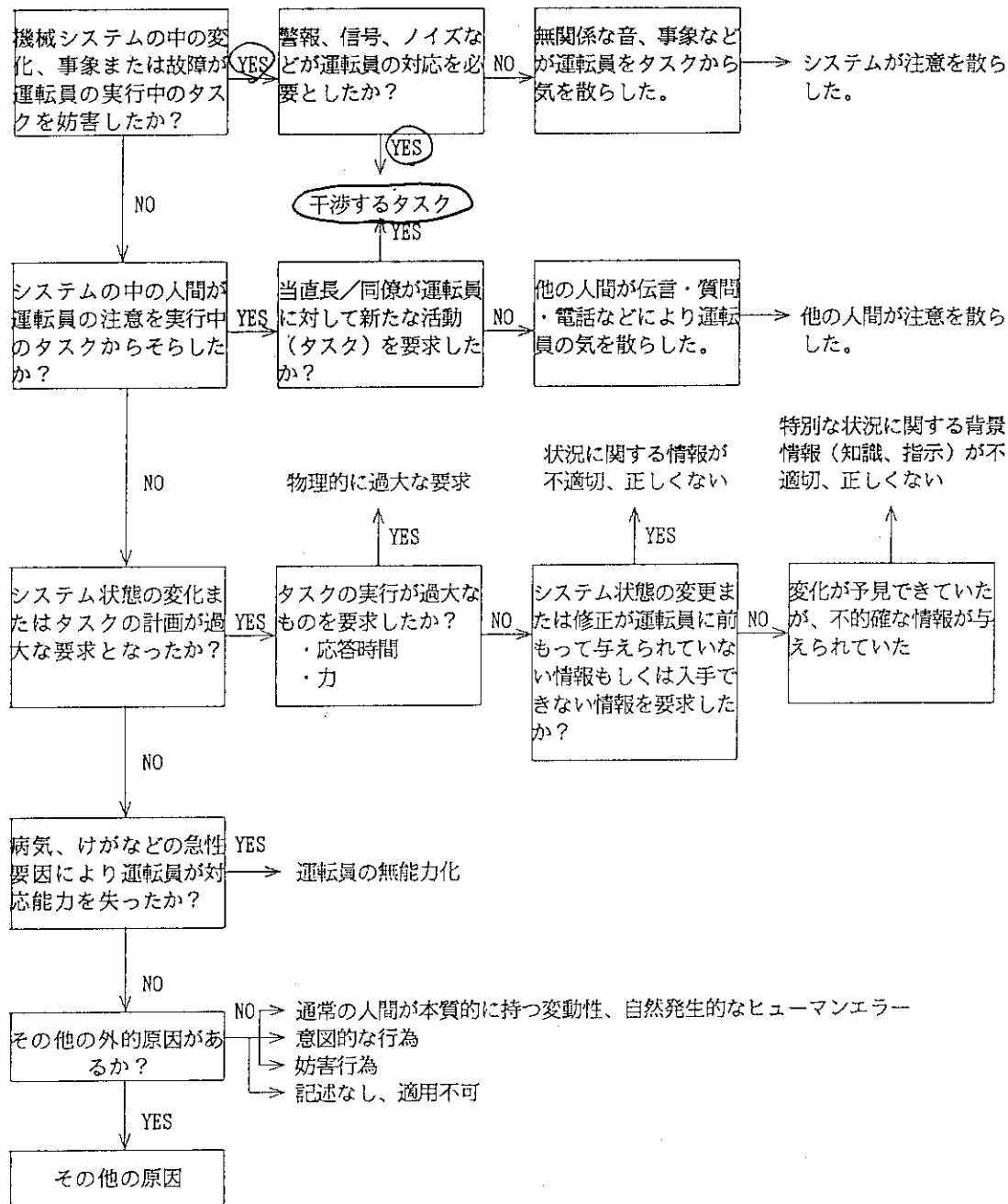


図 2.1.1 Oyster Creek プラント 概念図



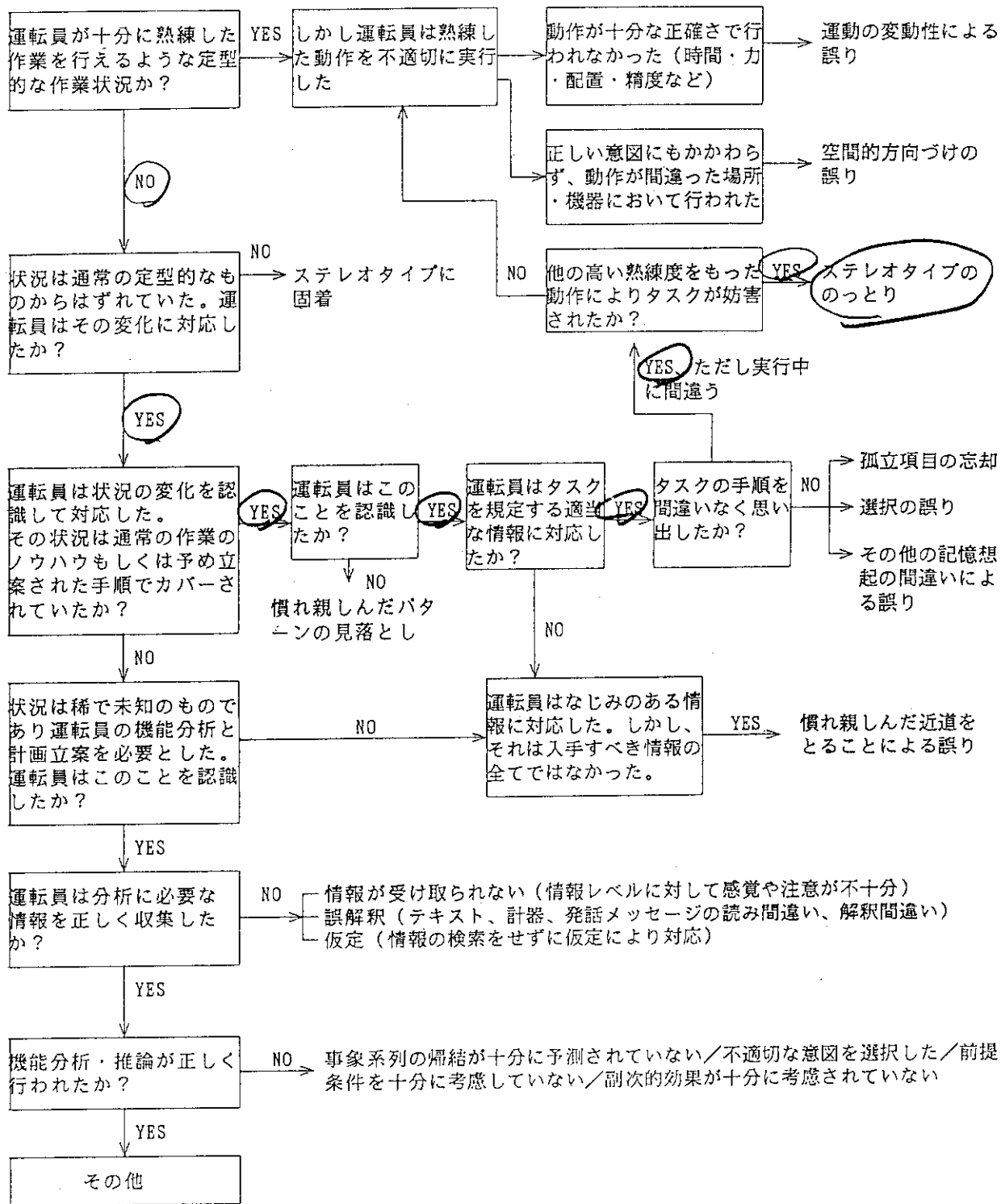
Rasmussenの提唱する人間の機能不全を含む事象の既述と分析のための多面的分類法

図 2.1.2 Rasmussenの手法による Oyster Creek 事象の分析チャート (1/6)
(再循環ポンプ吐出弁閉)



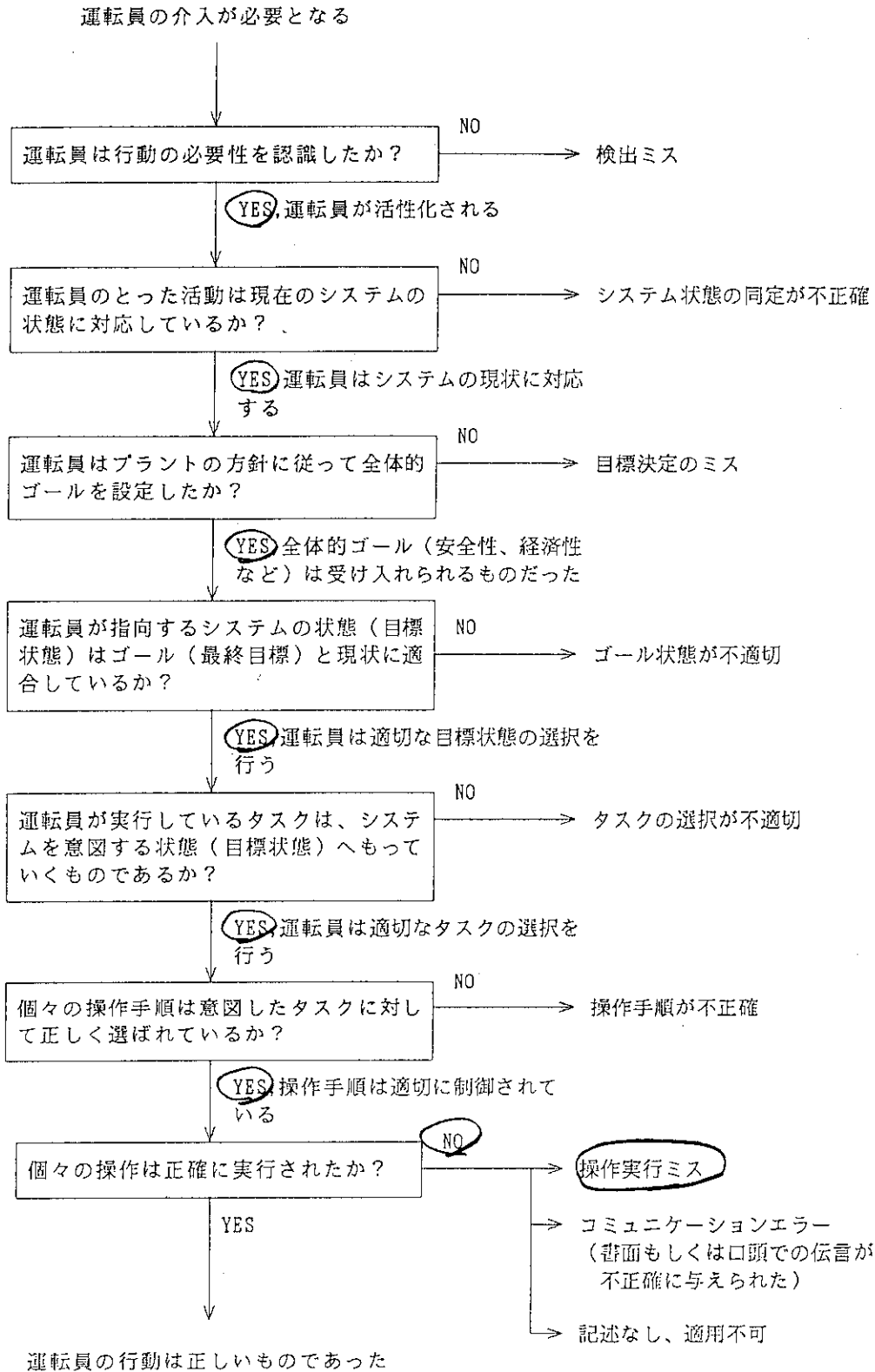
人間の機能不全の原因に対する分析ガイド

図 2.1.2 Rasmussenの手法による Oyster Creek 事象の分析チャート (2/6)
(再循環ポンプ吐出弁閉)



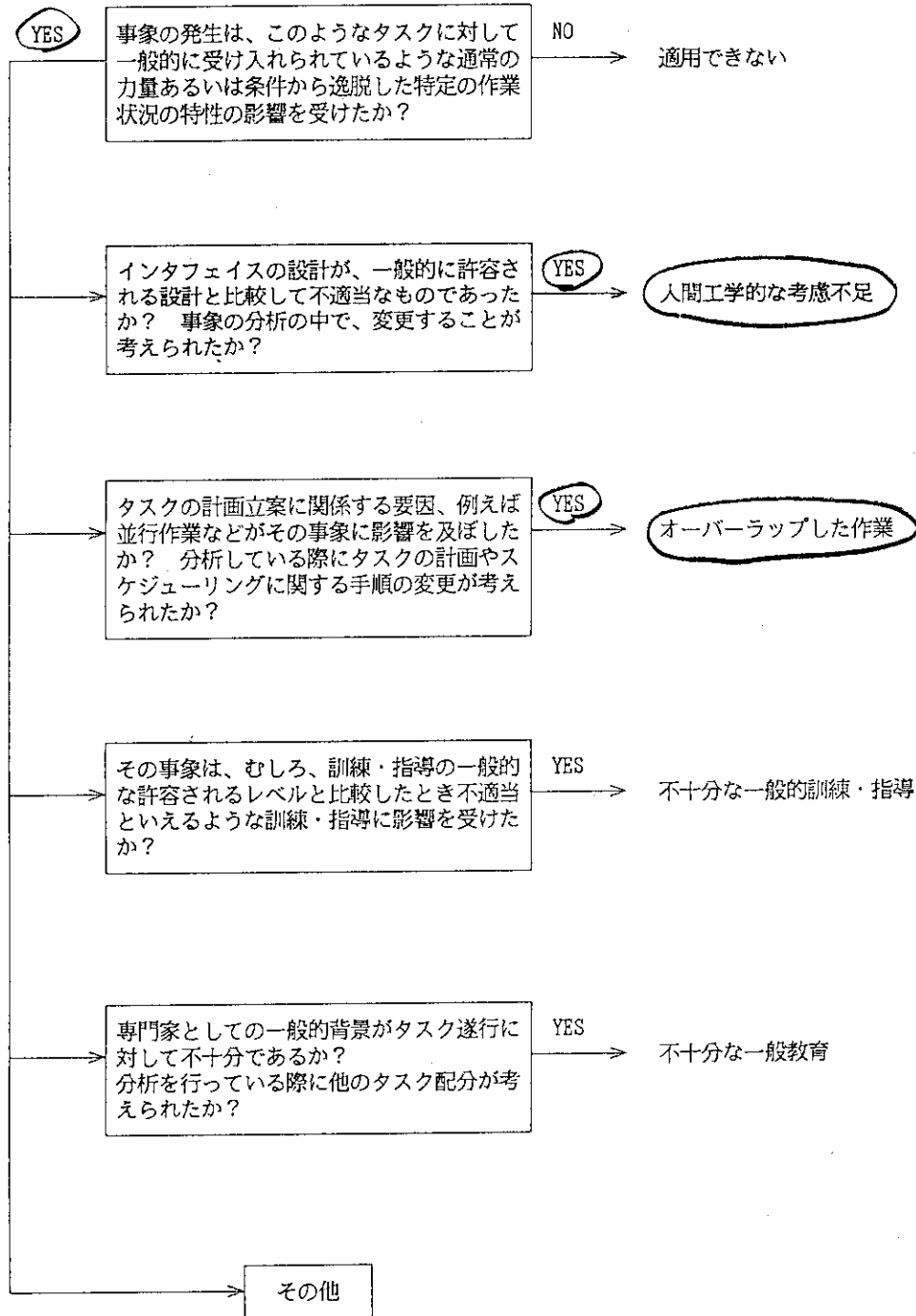
人間の機能不全のメカニズムの分析ガイド

図 2.1.2 Rasmussenの手法による Oyster Creek 事象の分析チャート (3/6)
(再循環ポンプ吐出弁閉)



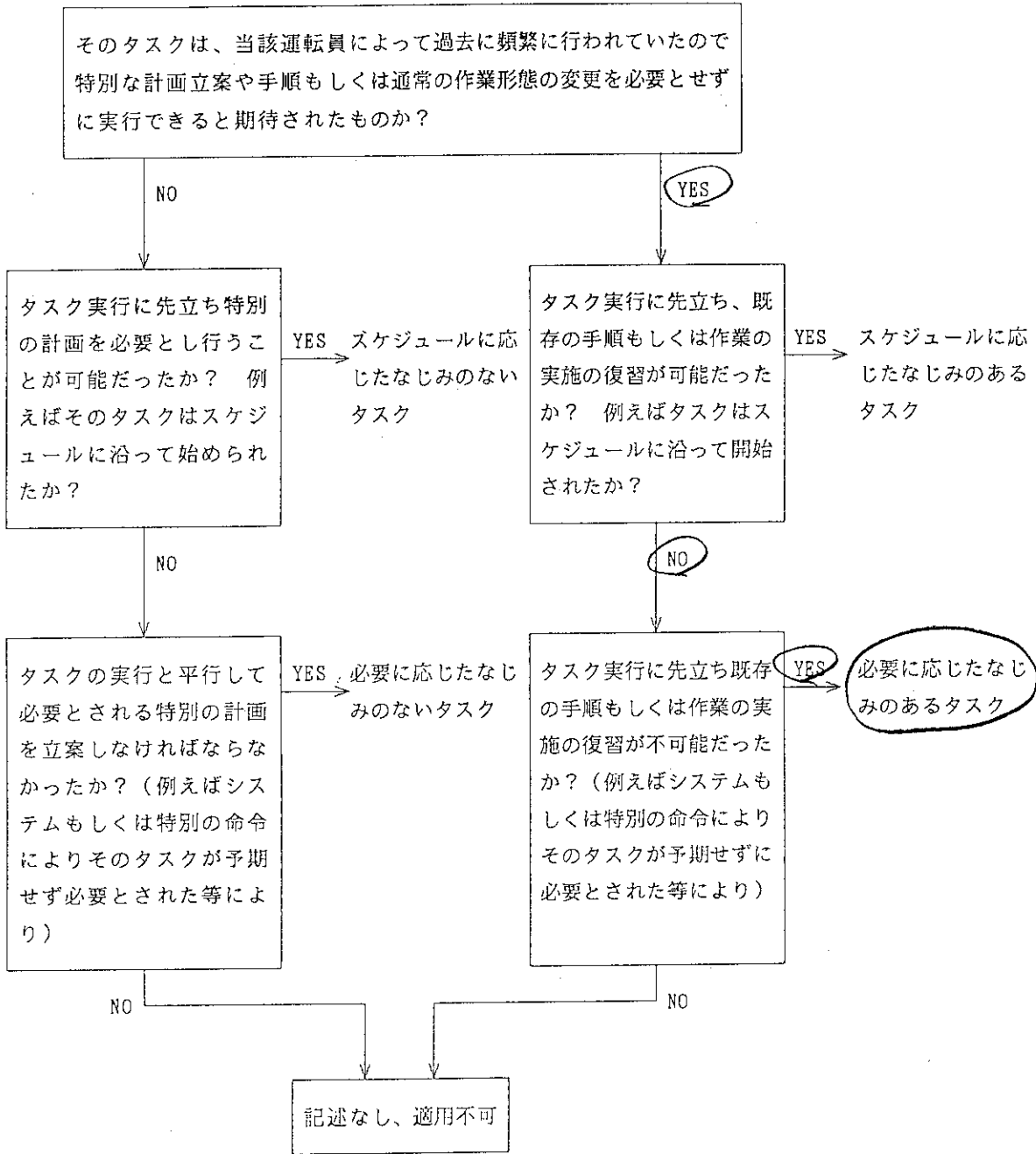
人間の内的な機能不全の分析ガイド

図 2.1.2 Rasmussenの手法による Oyster Creek 事象の分析チャート (4/6)
(再循環ポンプ吐出弁閉)



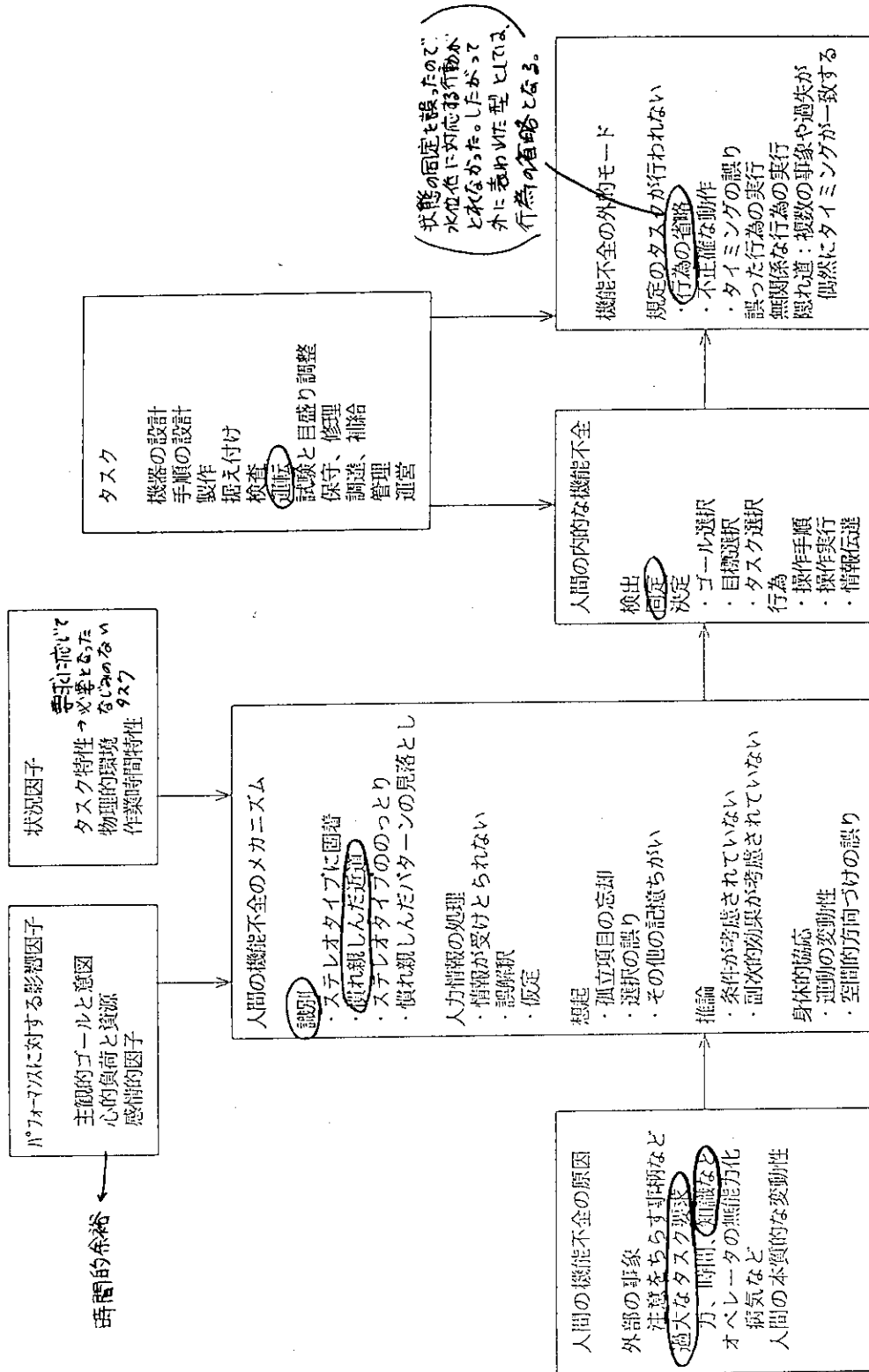
パフォーマンスに対する影響因子のうち心的負荷と資源に対する分析ガイド

図 2.1.2 Rasmussen の手法による Oyster Creek 事象の分析チャート (5/6)
(再循環ポンプ吐出弁閉)



状況因子のうちタスク特性 (Preparedness) に関する分析ガイド

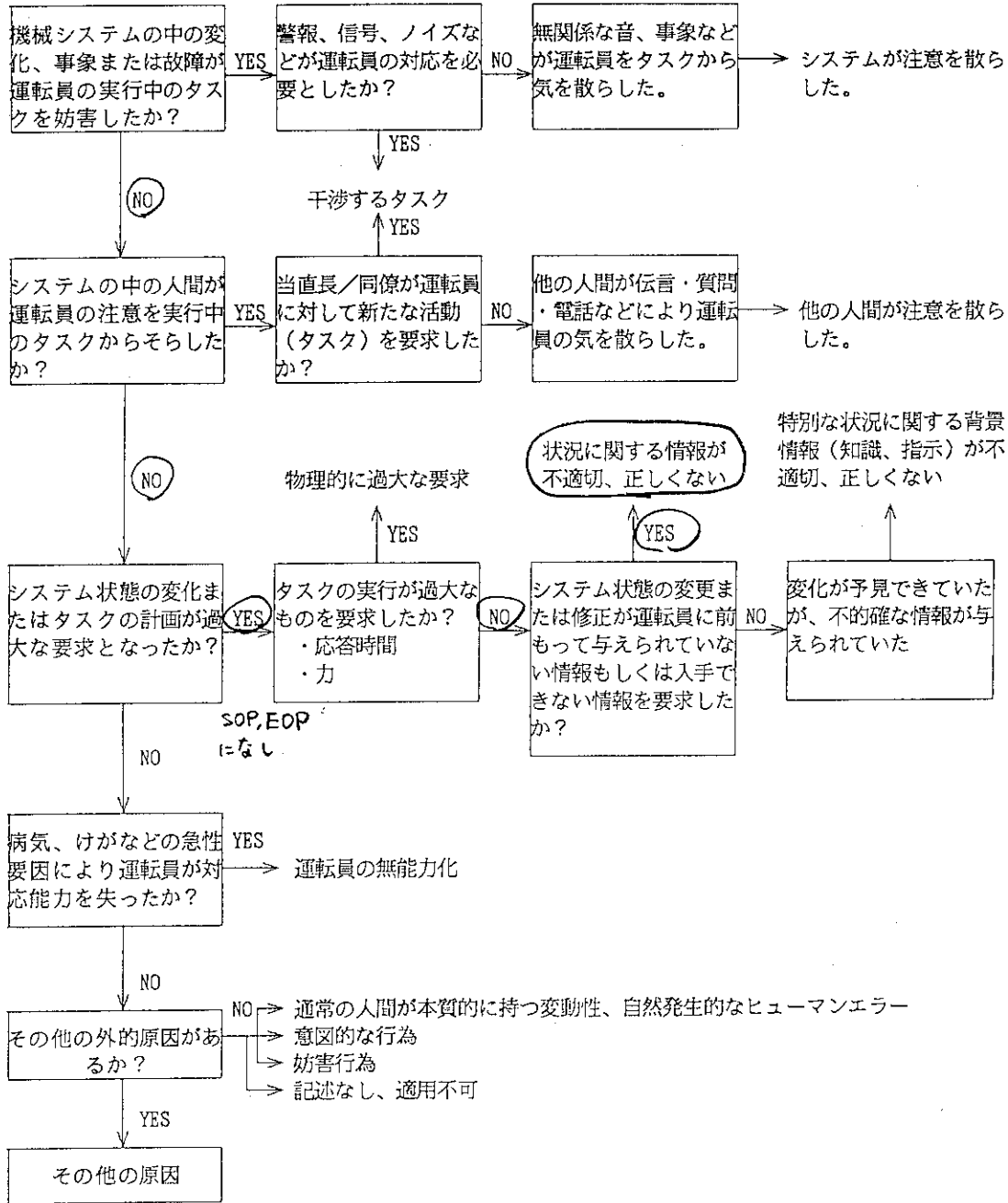
図 2.1.2 Rasmussen の手法による Oyster Creek 事象の分析チャート (6/6)
(再循環ポンプ吐出弁閉)



状態の固定と誤ったことで、
状態に対応する行動が
とれなかった。したがって
外に表れた型としては、
行為の省略となる。

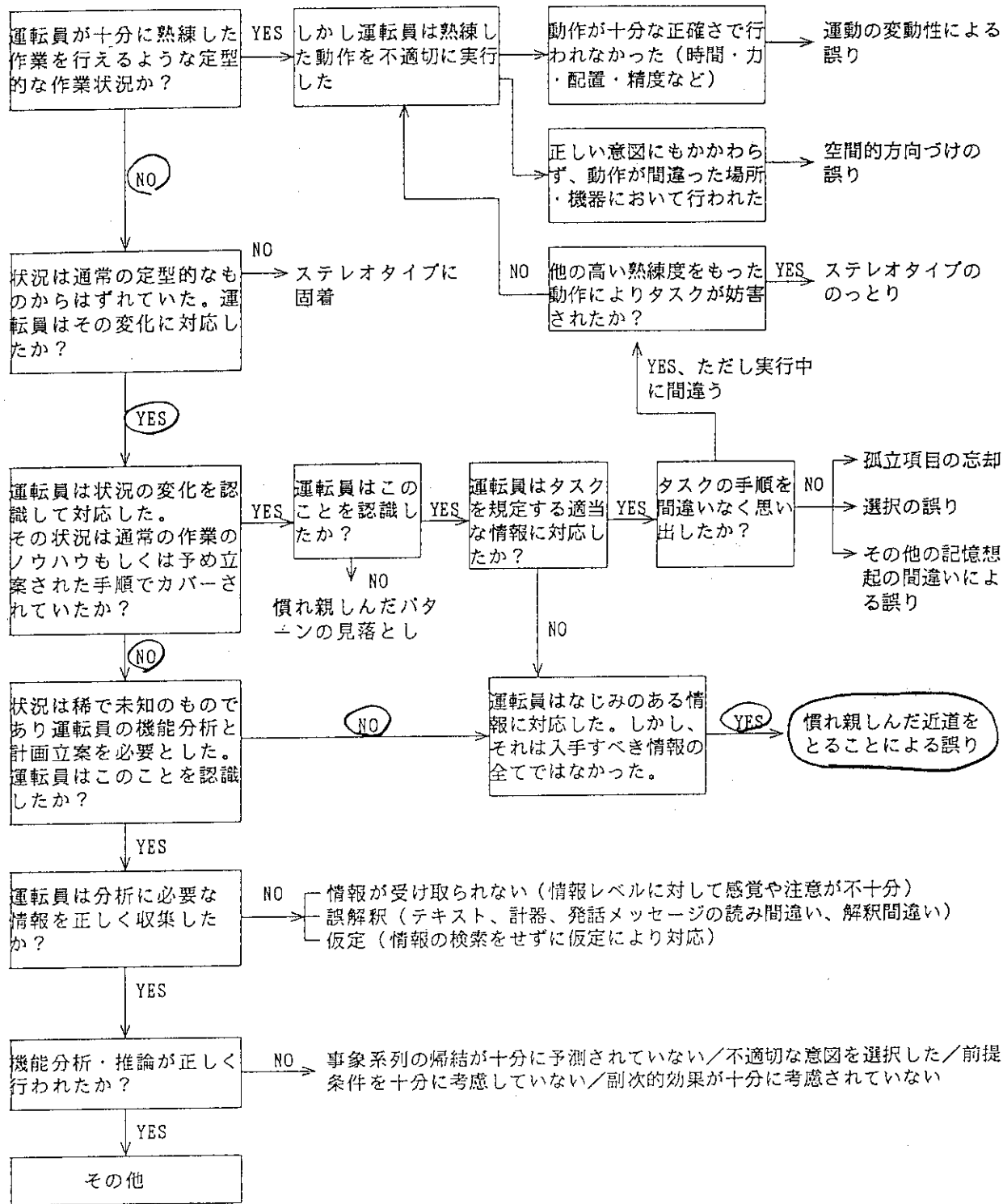
Rasmussenの提唱する人間の機能不全を含む事象の既述と分析のための多面的分類法

図 2.1.3 Rasmussenの手法による Oyster Creek 事象の分析チャート (1/6)
(シュラウド水位 Triple-low 警報の評価)



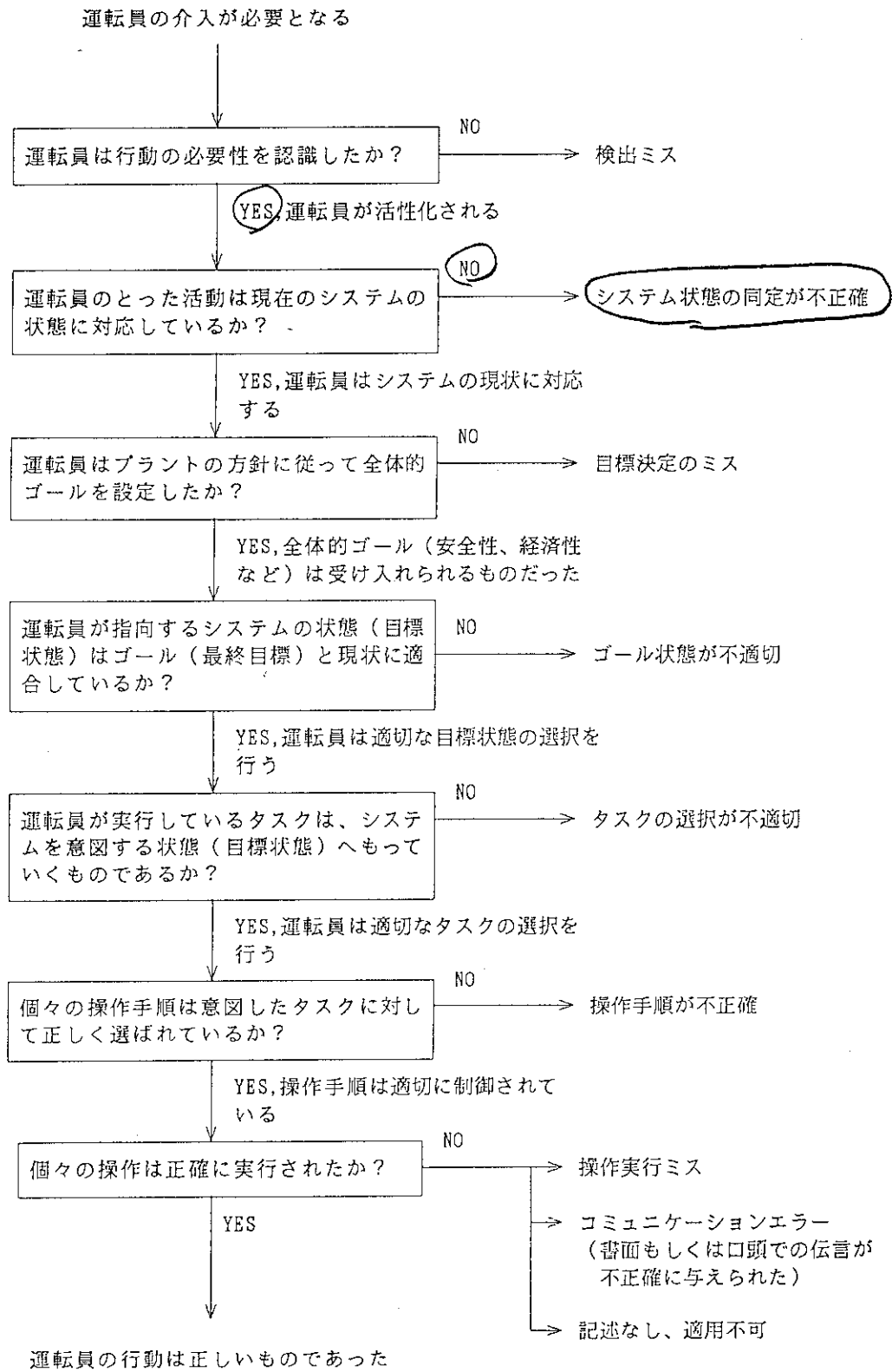
人間の機能不全の原因に対する分析ガイド

図 2.1.3 Rasmussen の手法による Oyster Creek 事象の分析チャート (2/6)
(シュラウド水位 Triple-low 警報の評価)



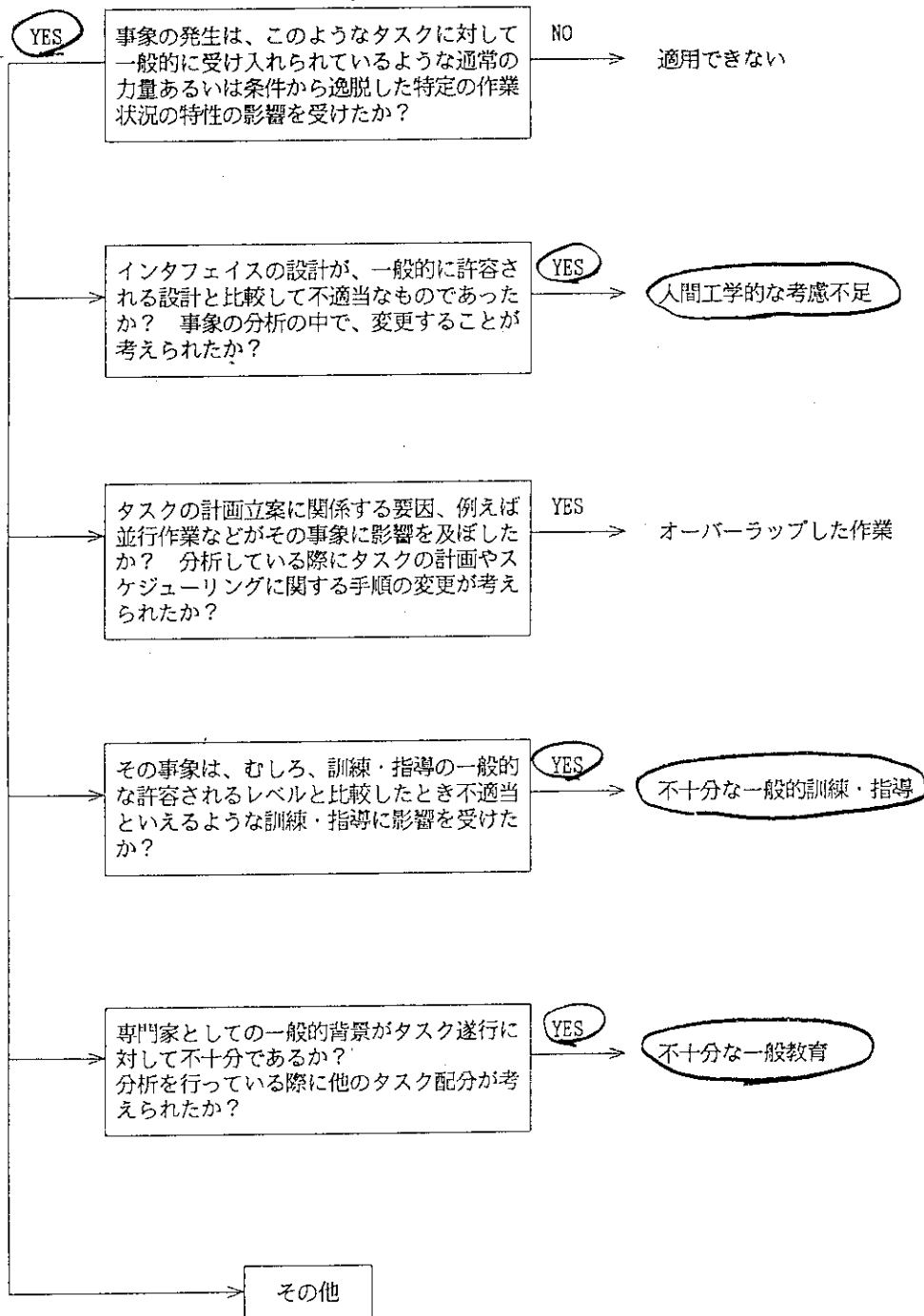
人間の機能不全のメカニズムの分析ガイド

図 2.1.3 Rasmussen の手法による Oyster Creek 事象の分析チャート (3/6)
(シュラウド水位 Triple-low 警報の評価)



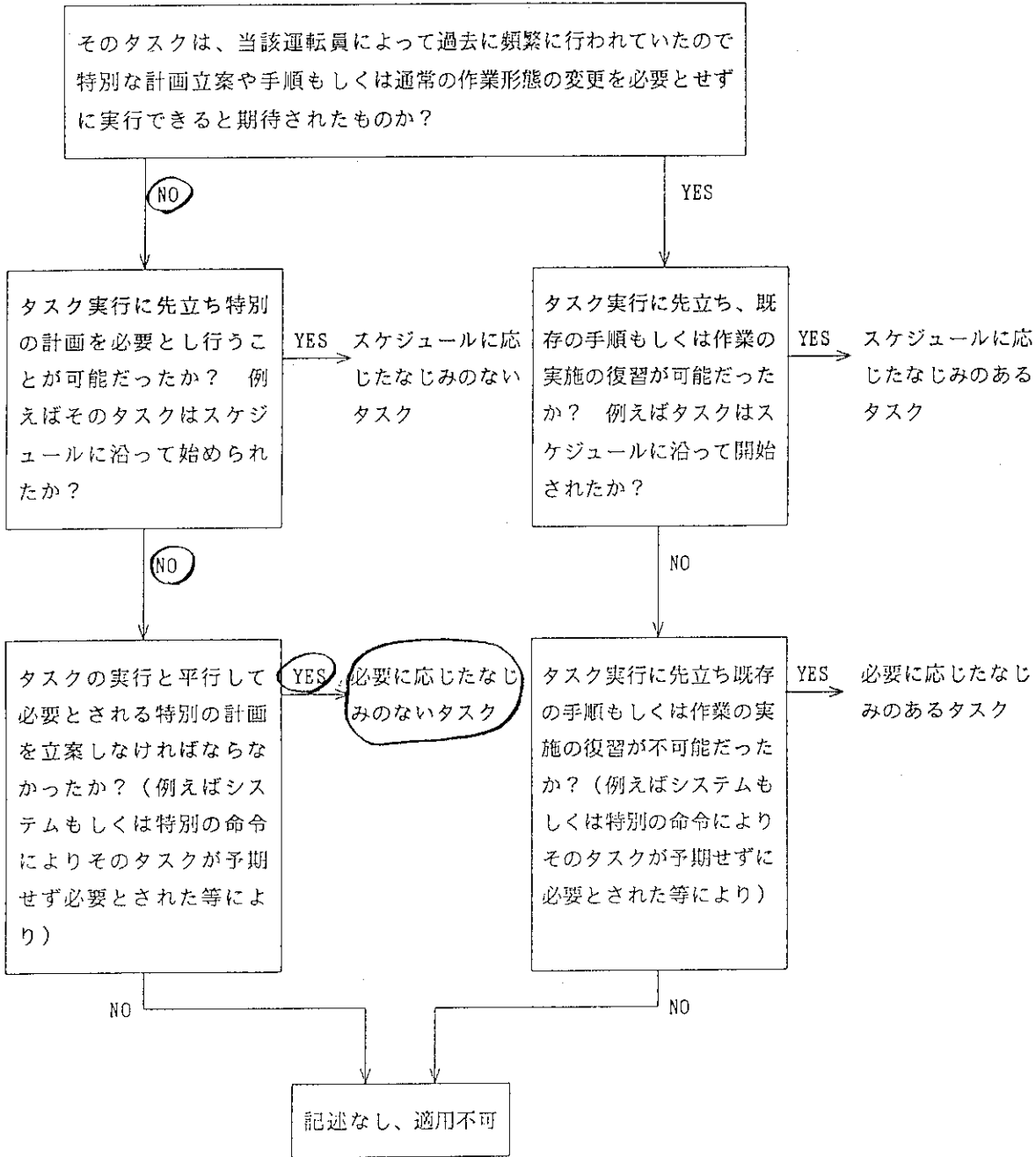
人間の内的な機能不全の分析ガイド

図 2.1.3 Rasmussenの手法による Oyster Creek 事象の分析チャート (4/6)
(シュラウド水位 Triple-low 警報の評価)



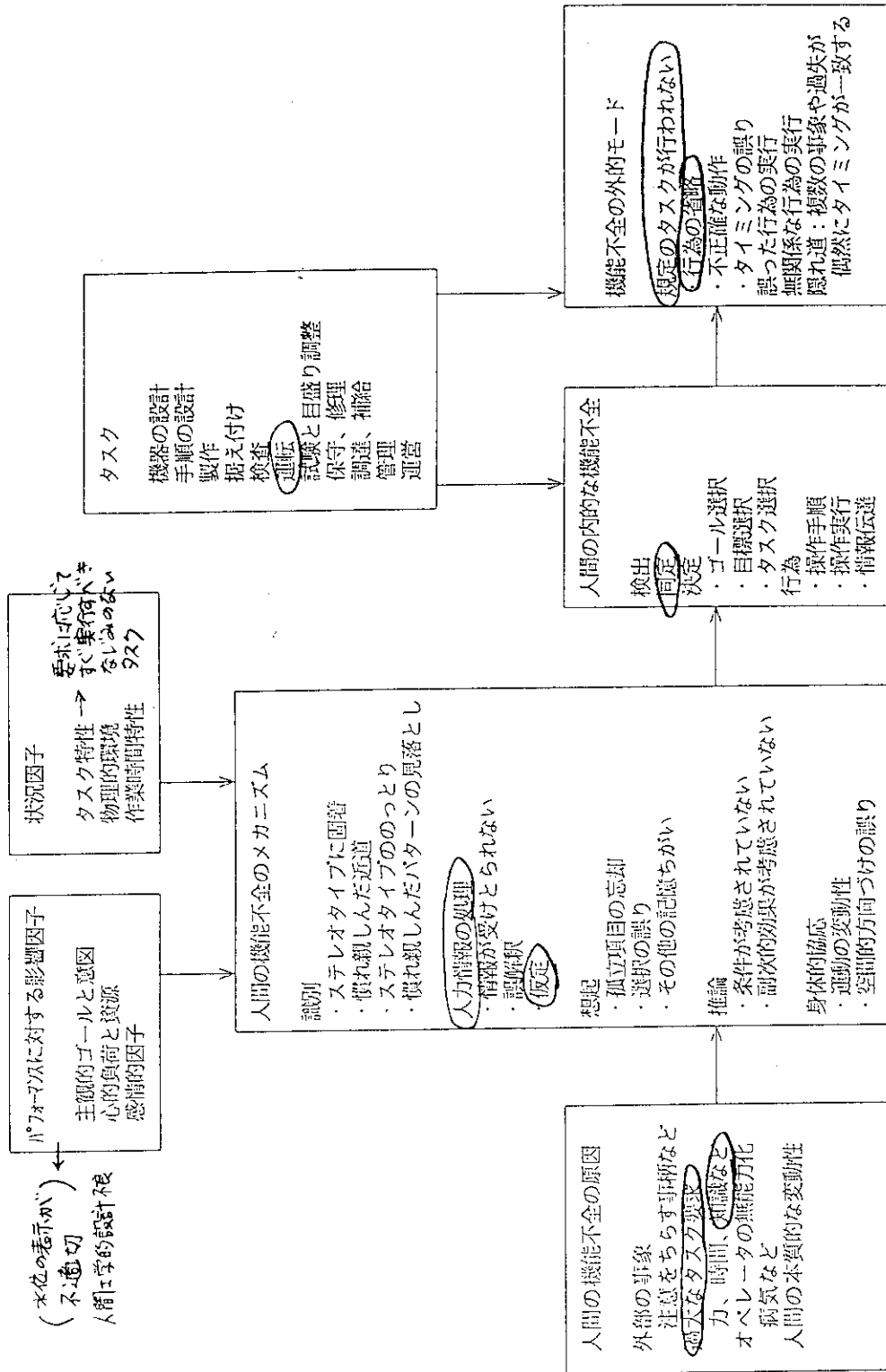
パフォーマンスに対する影響因子のうち心的負荷と資源に対する分析ガイド

図 2.1.3 Rasmussenの手法による Oyster Creek 事象の分析チャート (5/6)
(シュラウド水位 Triple-low 警報の評価)



状況因子のうちタスク特性 (Preparedness) に関する分析ガイド

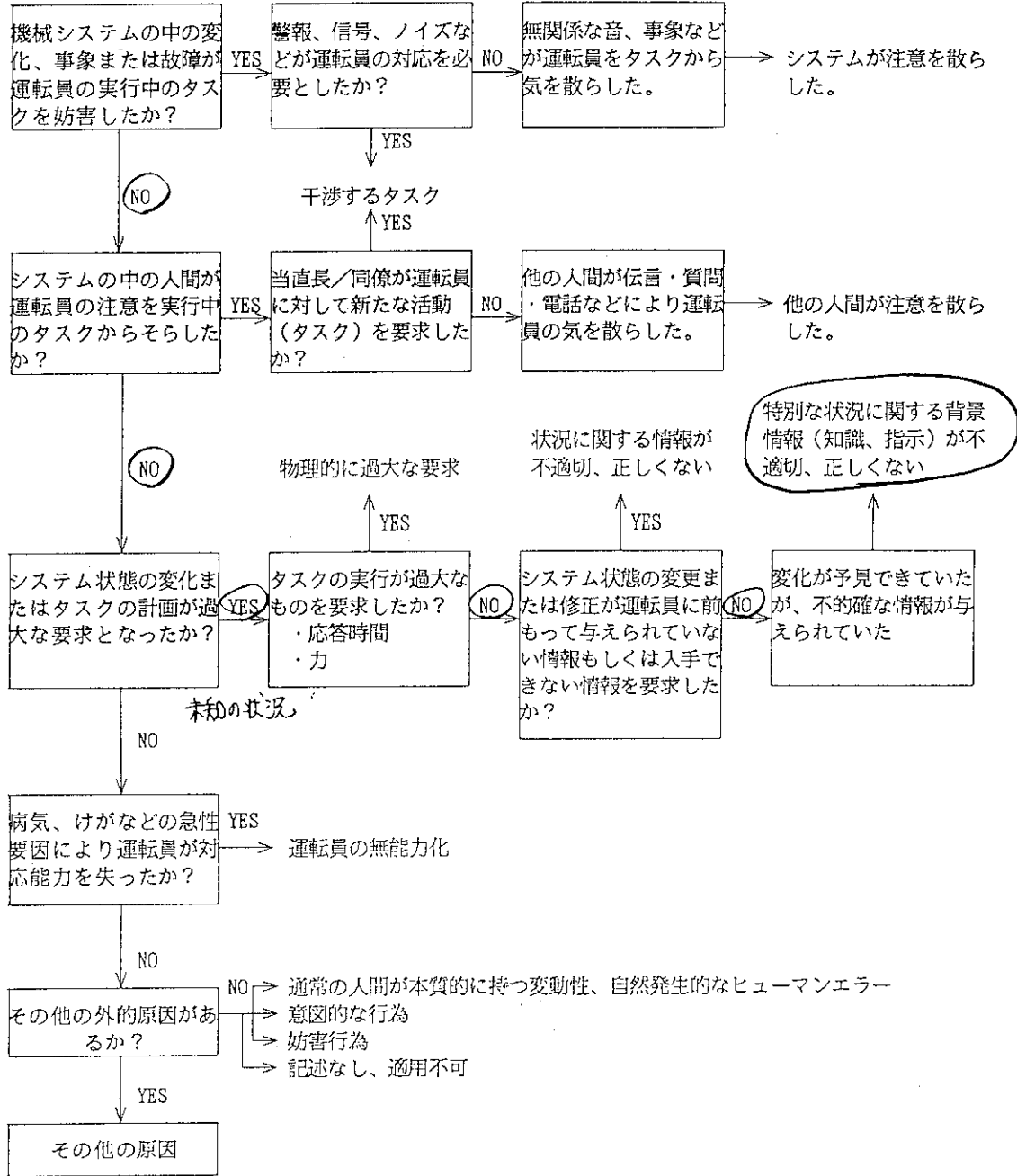
図 2.1.3 Rasmussenの手法による Oyster Creek 事象の分析チャート (6/6)
(シュラウド水位 Triple-low 警報の評価)



Rasmussenの提唱する人間の機能不全を含む事象の既述と分析のための多面的分類法

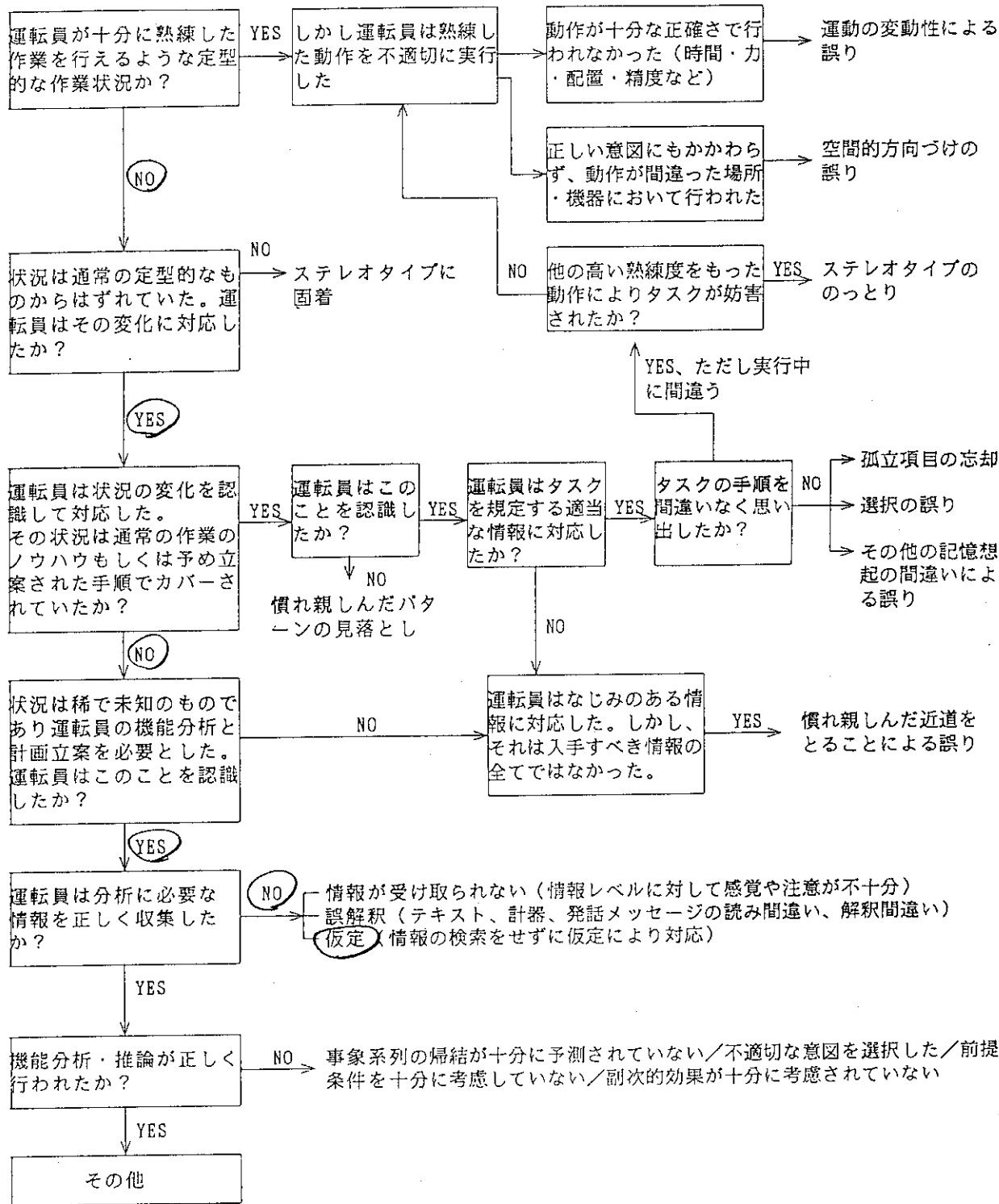
図 2.1.4 Rasmussenの手法によるOyster Creek事象の分析チャート (1/6)

(Barton水位計の評価)



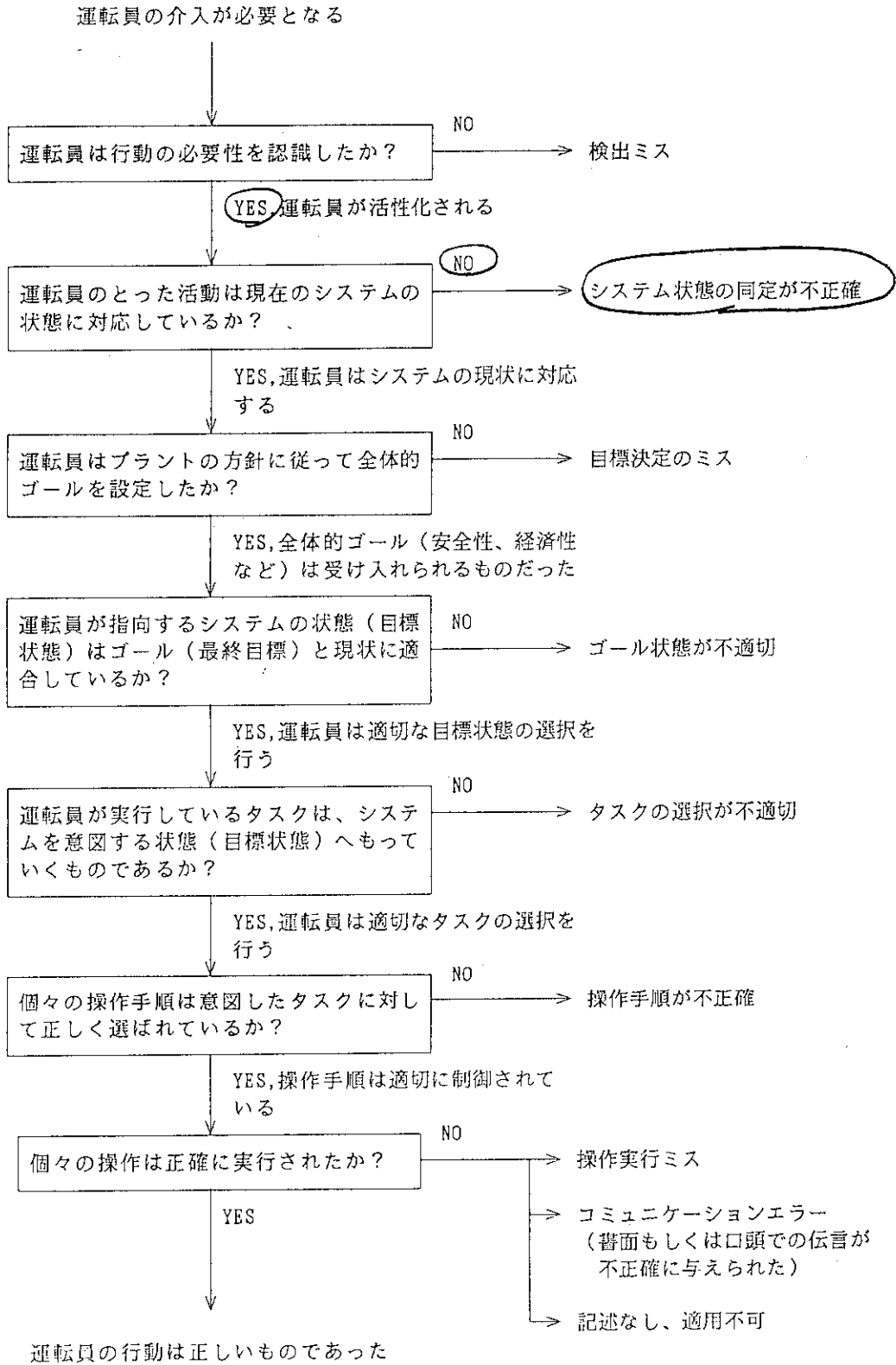
人間の機能不全の原因に対する分析ガイド

図 2.1.4 Rasmussenの手法による Oyster Creek 事象の分析チャート (2/6)
(Barton水位計の評価)



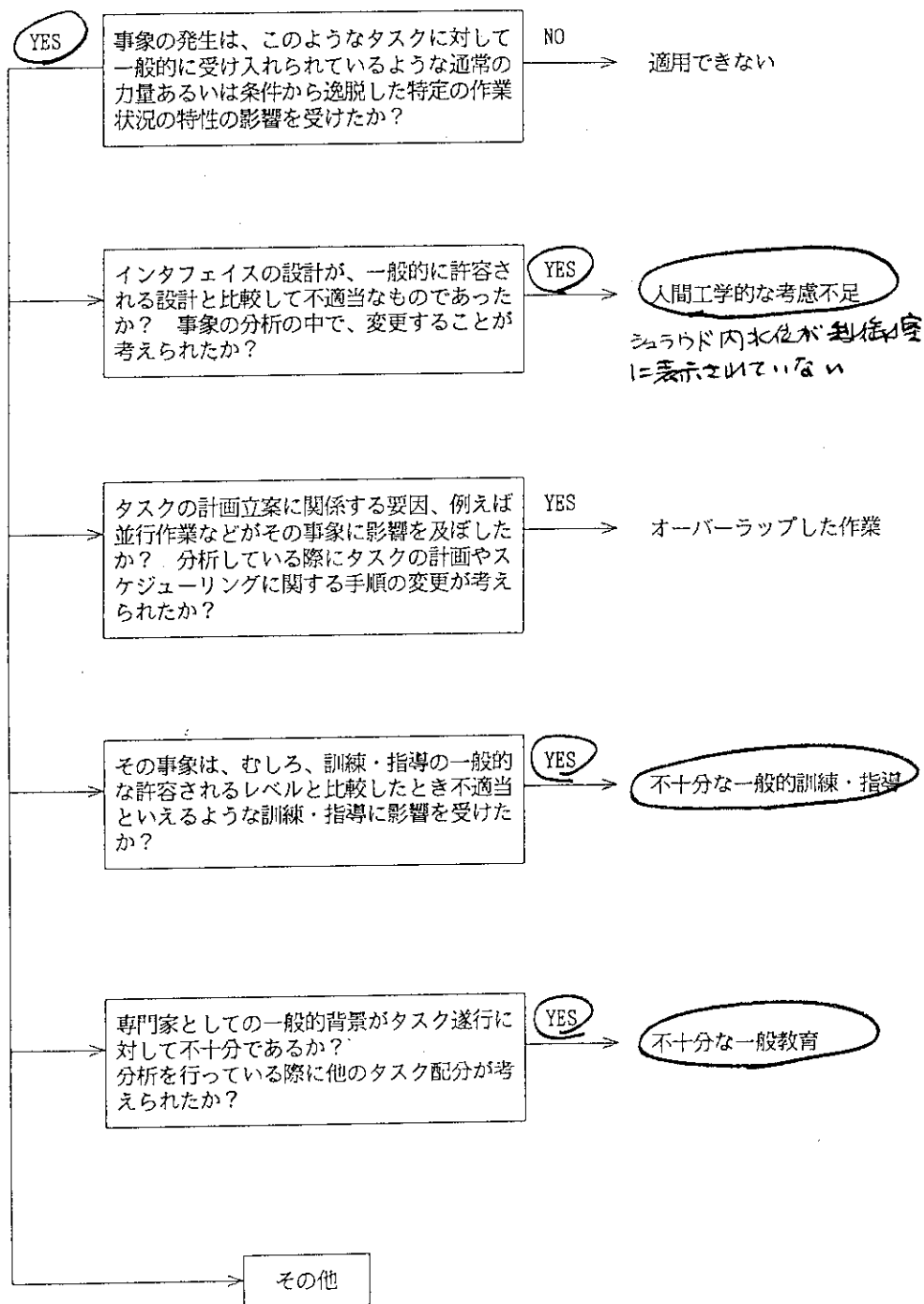
人間の機能不全のメカニズムの分析ガイド

図 2.1.4 Rasmussen の手法による Oyster Creek 事象の分析チャート (3/6)
(Barton 水位計の評価)



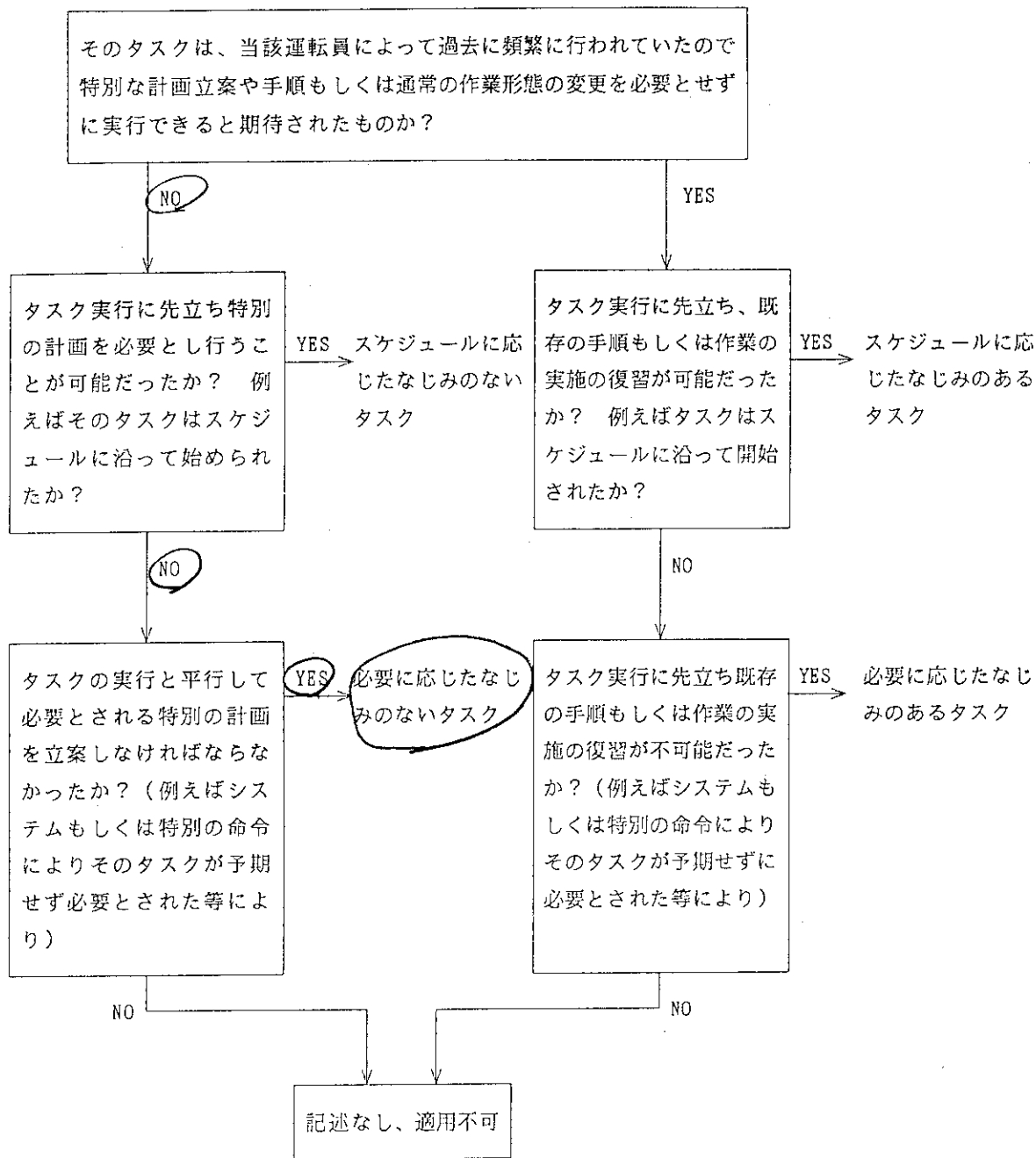
人間の内的な機能不全の分析ガイド

図 2.1.4 Rasmussenの手法による Oyster Creek 事象の分析チャート (4/6)
(Barton水位計の評価)



パフォーマンスに対する影響因子のうち心的負荷と資源に対する分析ガイド

図 2.1.4 Rasmussen の手法による Oyster Creek 事象の分析チャート (5/6)
(Barton 水位計の評価)



状況因子のうちタスク特性 (Preparedness) に関する分析ガイド

図 2.1.4 Rasmussen の手法による Oyster Creek 事象の分析チャート (6/6)
(Barton 水位計の評価)

2. 2 North Anna 事象

North Anna 1号炉における1979年9月25日の事象について、参考文献(1)をもとに、以下に概要とクロノロジーをまとめる。

North Anna は、ウェスチングハウス社製のPWRである。システムの概念を図2. 2. 1に示す。この炉の商業運転は1978年6月より開始された。

(1) 事象の概要

本事象は、タービン系の機器からの漏洩によるタービン停止及び原子炉トリップが起因で発生した後、運転員の誤操作・誤判断により1次系の過冷却と体積制御タンクから格納容器内への冷却材の漏洩が発生したものである。

事故は、低圧ヒータドレインのダンプ弁からの漏洩によりタービンがトリップしこれに伴って原子炉がトリップする事から始まった。プラントは原子炉トリップに対応して蒸気ダンプ弁(8基)が作動し蒸気発生器内の蒸気を復水器にダンプすることにより1次系の除熱を行った。このため、蒸気発生器内の保有水量が減少し「蒸気発生器水位異常低」信号が発信し3台の補助給水ポンプが起動した。プラント応答が正常に行われていればこの状態で安定するはずであるが、実際は1次系の圧力が減少を続けていることを示す「加圧器圧力低」信号が発信された。このため、運転員は制御盤上の弁の開閉状態の確認を行い蒸気ダンプ弁8基のうち1基が全開位置で固着している事を発見した。

Shift Supervisor は、蒸気ダンプ弁を手動では閉めることが出来ないため、その上流側にある「逆止弁(NRV)」を閉めることを指示し、続いて「主蒸気隔離弁(MSIV)」を閉めるように運転員に指示した。NRVは閉まるのに3分かかるのに対しMSIVは即座に閉まるので、MSIVを先に閉めた方が効果的である。Operating Supervisor からはMSIVを先に閉めるように(電話で)勧告されたが、Shift Supervisor はこのとき既にMSIVは運転員によって閉じられたと思い込んでいるため、特に確認は行わなかった。運転員は、NRVを先に閉め、続いてShift Supervisor の指示に従ってMSIV閉めに向かったが、途中でSI信号が発生したため信号に気を取られ弁を閉めることを忘れてしまった。このため、蒸気発生器からの蒸気の流出は、NRVが全閉状態になる3分間は継続されることとなった。

Operating Supervisor は、MSIVが閉められたにもかかわらず1次系圧力が低下し「加圧器圧力異常低」信号によりSIが発信されたため、MSIVが閉められているかどうかShift Supervisor に尋ねた。Shift Supervisor は、この時になってMSIVが開いていること、即ち蒸気発生器からの蒸気の流出が止まっていないことに気付いた。運転員はこれに対する回復操作(MSIVの閉止、1次冷却材ポンプの停止、SI信号のリセット)を行ったが、「MSIVを閉止するまでの時間が長かったこと」及び「SIが起動されたこと」により1次系の冷却率はすぐには小さくならなかった。

TMI以降NRCは、「SIが起動された場合20分間は停止しないこと」という要求をだしていた。SIは燃料取替用水タンク(RWST)を水源としているため低温の水を注入する。このため、20分のSI運転は1次系の温度を下げ、かつ加圧器水位を満水にする可能性がある。このジレンマに直面して運転員は2台中1台の充填ポンプを停止するという判断を下した。更に、「加圧器スプレイを作動可能にする」、「1次冷却材の混合を促進する」、「プラントを安定させる」ために1次冷却材ポンプの再起動を行った。

これと同時期に蒸気発生器内の水温を上昇させるために補助給水ポンプを停止し、主給水ポンプを起動した。また、1次系内の保有水量を減少させるため抽出系の確立操作を行った。ここで、運転員は「抽出系の出口である体積制御タンク(VCT)に充填系も接続されているためタンクが溢れることはない」と思い上記の操作を行ったが、実際はSIの起動により充填系はVCTから燃料取替え用水タンク(RWST)に切り替わっていた。また、運転員は1次系の安定に注意を注いでいたため、VCTの水位が上昇していることに気付かず、VCTの「水位高」・「圧力高」警報にも適切に対処することが出来なかった。このため、VCTから冷却材が溢れ出すことになった。最終的には抽出弁を閉めることにより対処した。

(2) 事故のクロノロジー

表2. 2. 1に「プラントの状況」、「運転員の意図と行動」を中心にまとめたものを示す。表2. 2. 1からわかるように、この事故事象は人的因子の観点からみると次の5つのフェーズに分けることが出来る。

- ①原子炉トリップ時の初期対応
- ②SIの自動起動/手動停止の判断
- ③1次冷却材ポンプの再起動
- ④主給水ポンプの再起動
- ⑤抽出系の確立操作

以下これらの各フェーズの運転員の振舞いをまとめる。

①原子炉トリップ時の初期対応

ここでの運転員の判断/行動は次のものである。

- i) 1次系の過冷却の原因を特定する
- ii) MSIV/NRVの閉止
- iii) MSIVの状態の確認

i)は、プラントが通常の原子炉トリップ時の応答から予想される範囲で安定せず過冷却が進んでいる状態でその原因を特定する行動である。当直長(Shift Supervisor)は、弁の表示灯の確認をすると蒸気ダンプ弁(1/8)が開状態で固着していることが判明し、この事態をOperating Supervisorに電話で知らせた。更に、弁の状態を確認するために運転員が現場に派遣されている。これら一連の診断過程は適切なものであったといえる。

ii)は、これらの診断結果に基づいて、Shift Supervisorが蒸気発生器からの蒸気の流出を止めるため蒸気ダンプ弁の上流側に位置するNRVを、続いてMSIVを閉めるように指示した判断、及びShift Supervisorから指示を受けた運転員が弁を閉めに向かった行動である。Shift Supervisorが蒸気ダンプ弁の上流側の弁を閉じる必要があると判断したことは適切なものだったが、必ずしも必要でないNRV閉を先に指示し、その後MSIV閉を指示するという操作手順の策定(とくに操作順序)が不適切なものだった。NRVは完全閉までに3分かかり、MSIVはほぼ操作と同時に閉まるので、応答時間の短いMSIVを先に閉めた方が減圧を止めるには有効であり、そのようにすればSI起動はなかったであろう。運転員はNRV閉止の操作完了後、MSIVを閉めに向かう途中でSI信号が発信し、それに気を

取られてMSIVの閉止操作を忘れてしまった。

iii)は「MSIVが閉められているにもかかわらず1次系が冷却される」という状況をどのように解釈したかということである。Operating Supervisorはii)の直後MSIVを閉めるように指示しているが、Shift SupervisorはMSIVは既に閉められていると思い込んでいるため、これには対応しなかった。SIの起動と同時にOperating Supervisorは、MSIVが閉じられているかと問いかけている。これは「主蒸気隔離弁が閉められているはずなのに、なぜ1次系の冷却が止まらないのか」という疑問から出た行動であろう。この問いかけに対応したShift Supervisorは、MSIVをチェックしてやっと自分の思い込みが誤りであったことに気づき、MSIVは閉められた。

②SIの自動起動／手動停止の判断

TMI以降NRC要求により「SIが起動した場合20分間は止めない」事となった。この事故の場合このルールを守ると1次系の温度低下が大きくなりかつ加圧器水位が満水になる恐れがある。このジレンマに直面して運転員は2台の充填ポンプのうち1台のポンプを停止することで対応した。1台の充填ポンプの停止がどの程度水位の上昇を抑えることが出来るのかの正確には判ってはいなかったが、この状況の中では正しい判断の1つであろう。

③1次冷却材ポンプの再起動

ここでは、NRCの規則に従って原子炉トリップと同時に停止された1次冷却材ポンプが、

- ・加圧器スプレイを利用可能にすること、
- ・1次系の混合を促進すること、及び
- ・プラントを安定化すること

を目的として手順に沿って再起動されている。この判断は、1次系の圧力制御・温度制御にとって適切なものであった。

④主給水ポンプの再起動

冷却率を制御するための1つの手段として補助給水系からの給水に代わってよりサブクール度の小さい主給水系からの給水を行うという判断が下されている。この給水は、始めの6分は流量を小さくし、その後SG水位を回復するために増やし、そしてまた減少させ、最終的にゼロにした。この操作は、結果として、1次系、2次系の温度のわずかな上昇と、冷却率を減少させることとなった。

⑤抽出系の確立操作

SIの起動により加圧器水位が上昇したことに伴って、1次系の保有水量を減少させる目的で抽出系が確立された。通常運転時は抽出系／充填系とも体積制御タンクに接続されているため体積制御タンクの水位は抽出系と充填系の流量バランスで決まり一方的に上下することはない。しかしながら、SIが起動された場合は充填ポンプの水源は自動的に燃料取替用水タンクに切り換えられる。この事故の場合、運転員は充填ポンプの水源が切り換えられていることに気付かず抽出系を確立し、なおかつ1次系の安定に集中し

ていたため体積制御タンクの水位挙動を監視しなかった。このため、体積制御タンクの「水位高」「圧力高」警報が発生してもすぐには事態を正確に理解できず、対処が遅れた。

以上から、この事故では①及び⑤の中にヒューマンエラーによるものがあると考えられる。

(3) 人的因子に関する分析

North Anna事象の中で行われた運転員の行動の中でエラーと考えられるものは、

- 1) MSIV及びNRVの手動閉止に係わる行動、及び
- 2) 抽出系の確立操作

である。以下にRasmussenの分析手法を基に行った分析の結果を示す。

1) MSIV及びNRVの手動閉止に係わる行動

ここで実際に行われた行動は

- ① Shift Supervisor(S. S.)は、蒸気ダンプ弁が1つ閉まらないままになっており、これを手動で閉めることはできないので、系の減圧を防ぐためにNRVとMSIVを手動で閉止するように運転員に指示した。しかし、このときNRVの閉止を先に指示し、NRV閉止操作終了後MSIV閉を指示した。
- ② NRV閉止操作を行った運転員はS. S.の指示に従ってMSIVを閉止すべくMSIVコントロールパネルに向かった(NRV用パネルとMSIV用パネルは離れている)。このときSI起動信号が発せられ、運転員はそちらに注意がそらされた。この結果、MSIVの閉止操作を行わないまま運転員はMSIV用パネルから立ち去った。
- ③ ①の直後Operating Supervisor(O. S.)はMSIVを閉じるようにS. S.に指示するが、S. S.は自分からの運転員へのNRV、MSIV閉指示により既にMSIVは閉じているものと信じ、MSIVの状態を示すindicatorの確認を行わなかった。

この後減圧が止まらないことから、O. S.はMSIVが閉じているか問い合わせを行い、これに従ったS. S.はMSIVが開状態であることを初めて知り、MSIV閉止操作を行った。

①について、Rasmussenの分析ガイドによる分析のチャートを図2. 2. 2に示す。この中で、ガイドに従ったチャートの中で、分岐に迷う部分が出てくる。それは、「S. S.がNRVとMSIV各々の閉に要する時間に関する知識を教育もしくは訓練で与えられていたかどうか」ということである。この知識が既に与えられているものとするれば(Ⓐ)、この閉止操作の順序をNRV、MSIVとしたのはS. S.のエラーとすることができるが、もし与えられていないとすれば(Ⓑ)、どちらの弁の閉止操作を先に行うべきかを指示せよというのは、過大な要求である。ただし、報告書の中の事象の推移の表の中にNRV閉止については、プラントに関する知識に基づくもの、MSIV閉止については、SOP(Standard Operating Procedure)に基づくものという記述があるので、このS. S.の指示としてはSOPに基づいたMSIV閉止のみで良かったのかもしれない。Ⓐ、Ⓑの場合、Rasmussenのガイドに従って分析した結果に基づいてまとめると、

- Ⓐ: NRV、MSIVが閉止に要する時間についての知識は習得していたが減圧を止めるべく両バルブの手動閉止を状況に応じて即座に指示するに際し、各バルブに関する知

識の想起を間違ったために、閉止の順序を誤った。

- ⑤：NRV, MSIV各々の閉止時間に関する知識は持ちあわせておらず、プラントに関する知識と手順書とから減圧を止めるためには、NRVとMSIVの手動閉止を行うことを決めたが、それぞれの機能の分析は行えず、このために閉止するバルブの順序には考えが及ばなかった。教育・訓練もしくは手順書でバルブの特性に関する情報が与えられていれば、ここで順序を指示できなかつた原因は解決される。

②について、Rasmussenの分析ガイドによる分析チャートを図2. 2. 3に示す。既にNRVの閉止操作は実行し、S. S.の指示に従いMSIV閉止操作を行うだけで良かった。NRVは閉止したので減圧は抑えられSIの起動は避けられたと思いながらMSIVのコントロールパネルに向かったMSIVの手動閉止は特別の操作ではない。ところが、ここで、回避されたいはずのSI起動の信号が発せられ、運転員の関心はSI起動に釘付けになってしまい、混乱した。その結果、MSIV閉止操作は省略されてしまった。

③についてRasmussenの分析ガイドによる分析チャートを図2. 2. 4に示す。S. S.は原子炉トリップ直後にO. S.に状況を電話で知らせている。このすぐ後、かつ、運転員にNRV, MSIV手動閉止の指示を出した直後O. S.からMSIVを先に閉止操作を行うよう指示されたが、自分の指示により既にMSIVは閉められているものと思い込みMSIVの状態の確認を行わなかった。O. S.からの指示に対しての確認作業は、指示に従ってMSIVのindicatorを確認するという熟練したタスクであり、特別のものではない。しかし、MSIVは既に閉められていると思い込んでいる（仮定している）ことにより、このタスクを必要なしと判断し、意図的に省略してしまった。この行為は、教育・訓練・指導が徹底していれば、避けられるものとするれば、これらの欠陥ということもできる。

2) 抽出系の確立操作

ここで行われた行動は、プラントを安定させるための操作の1つとして1次系内の保有水量を減少させる目的で抽出系の確立を行うための操作である。この操作の中で実際に運転員が行ったのは、抽出系の開始のみである。しかし、ここでは、抽出系の開始の前に充填系の水源とのオリフィスを燃料取替用水タンク（RWST）から体積制御タンク（VCT）に切り替えなければならなかった。充填系の水源は通常はVCTであるが、SIが起動されると自動的にRWSTに切り替えられているのである。このためVCTには抽出系からの冷却水が流入されるのみとなり、VCTの水が溢れる結果となってしまった。この操作は標準手順書（SOP）に記載されており、この時も、他の運転員がその手順書を読み上げており、操作の確認も行っていた。したがって、ここでのエラーは、充填系の水源を確認し、必要な場合はVCTに戻すという手順を省略してしまつたエラーである。これについてRasmussenの分析ガイドによる分析チャートを図2. 2. 5に示す。ここでのエラーは、抽出系の確立という手順書に従って実行すれば良いタスクの中の手順省略のエラーである。充填系の水源は通常、抽出系の吐出先のVCTとなつており、この状態に慣れていたので、このときも充填系の水源はVCTと思い込んでいた。そのために充填系の水源確認手順を省略してしまつた。ただし、このRasmussenの分析チャートには現れないが、報告書によると、この行動には、もう1人の運転員が補佐及びモニターとして、①手順書を読み上げ、②行動のモニターを行っていた。にもかかわらず、エラーが生じてしまつたという点は重要である。①に従ってタスクを実行すれば手順の省略は防げるし、また、たとえ

充填系の水源の確認を省略したとしても、②によってそこでリカバーできたはずである。ここで問題となるのは、この補佐員が経験の浅い運転員であったということである。このときの運転クルーは、この補佐員が経験豊かな運転員であったなら、手順をはっきりと読み上げ、タスクの各手順の確認もしっかりと行い、このようなエラーは生じなかったと信じている、ということが報告書に記載されている。補佐員が経験不足により補佐の役割を果たさなかったことになる。Rasmussenの分類法の中で考えるとこれはエラーを犯した操作への影響因子となるのであろうか。操作員・補佐員の共同作業と考えると、影響因子とはならない。

表 2.2.1 North Anna 事象における運転員のふるまい (1/3)

時刻	プラントの状態	運転員の意図 (何をしようと思ったか)	運転員の行動/判断 (何をしたか)	運転員に影響したと思われる因子
06:09:46	タービントリップ警報 ↓	原子炉トリップ時の immediate action が正 常に作動していることを確かめる	<ul style="list-style-type: none"> 制御棒の挿入を確認 加圧器圧力、Taveを監視 	何故原子炉がトリップしたのかは解っていない
06:09:46.1	原子炉トリップ警報			
06:09:46.2	蒸気ダンブ弁の警報。蒸気ダンブ弁が開く ↓	2次側圧力の低下を止めたい	1次系の圧力が急速に低下している ↓ 機器が正常に作動していれば圧力/温度は安定するはず ↓ 弁の表示灯を確認 S.S.は Ope. Supervisor に Tel で事態を知らせる 蒸気ダンブ弁は手動では閉められない	MSIVを閉めようと移動していたときSI信号が発信したため弁を開めることをされる
06:09:46.3	「中性子束高」原子炉トリップ ↓			
06:09:54	「蒸気発生器水位異常低」原子炉トリップ ↓			
06:09:58	補助給水警報。3台の補助給水ポンプが起動			
06:10	「加圧器圧力低」警報 ↓			
06:10:32	蒸気ダンブ弁のうち7基は閉じているが、1基は全開位置にある			

表 2.2.1 North Anna 事象における運転員のふるまい (2/3)

時刻	プラントの状態	運転員の意図 (何をしようと思ったか)	運転員の行動/判断 (何をしたか)	運転員に影響したと思われる因子
06:11	Taveが低下	冷却率を抑える	1台の主給水ポンプを停止する	
06:11:18	「原子炉圧力低」原子炉トリップ			
06:11:30	加圧器水位低により抽出系が隔離される			
06:12	体積制御御タンクの水位低警報	水位を回復しよう	水位を回復させようとするが困難なため Shift Super. に連絡する	
06:14:45	SI自動起動		加圧器の水位/圧力は回復するが冷却率はより大きくなる。NRCの規則により起動したSIポンプは20分間止められない ↓ Ope. Super. がMSIVが閉じているかを確認	
06:15	SI起動にともない主給水ポンプ(RCP)が停止			
06:16			MSIVが開いていることが判明 ↓ MSIV閉止、RCP停止、SIリセット	
06:17	加圧器圧力/水位は上昇、Taveは今までのトレンドにある	加圧器が満水になる恐れがあるため注入量を減らそう		
06:19			1台の充填ポンプを停止	
06:20:30		<ul style="list-style-type: none"> ・加圧器スプレイを回復させる ・1次冷却材を混合させる ・システムを安定させる ためにRCPを起動しよう	RCPのシールを確認する	
06:25	蒸気発生器の水位が築域水位まで回復	2次側での冷却を抑えるために補助給水ポンプの代わりに主給水ポンプで給水しよう	補助給水ポンプを停止	

表 2.2.1 North Anna 事象における運転員のふるまい (3/3)

時刻	プラントの状態	運転員の意図 (何をしようと思ったか)	運転員の行動/判断 (何をしたか)	運転員に影響したと思われる因子
06:27		1次系の保有水量を減少させよう	抽出弁を開き、抽出ポンプを起動する	運転員は充填ポンプの水源が体積制御タンク(VCT)になっていると思っている
06:29		1次系ないの冷却材の一樣な混合を得たい	RCP-Bを再起動	
06:31	Taveが上昇	蒸気発生器の水位を回復し、除熱能力をたかめる	主給水弁を調整して給水流量を増加	
06:34 :30		充填ポンプはBITに接続されていないければならない。	充填ポンプの水線をRWSTからBITに変更	
06:37	蒸気発生器の水位は上昇し、除熱が確保されている	給水流量を減らそう	主給水弁を部分的に閉める	
06:46	VCT水位/圧力高警報	警報の理由が解らない	VCT水位計、系統構成の確認	系統構成が間違っていることには気づかない
06:46 :30		VCTの水位を下げよう	<ul style="list-style-type: none"> ・充填ポンプをVCTに接続 ・VCTのドレイン弁を開けるために運転員を派遣 ・抽出流量を減らす 	
06:59	VCT水位は高い状態で推移		抽出系を隔離して流入を止める	
07:01	PORVが閉閉を始める			
07:04		加圧器圧力の制御を容易にしよう	蒸気バイパス弁を開ける	
07:05			<ul style="list-style-type: none"> ・加圧器ヒータを作動 ・抽出系を回復 	

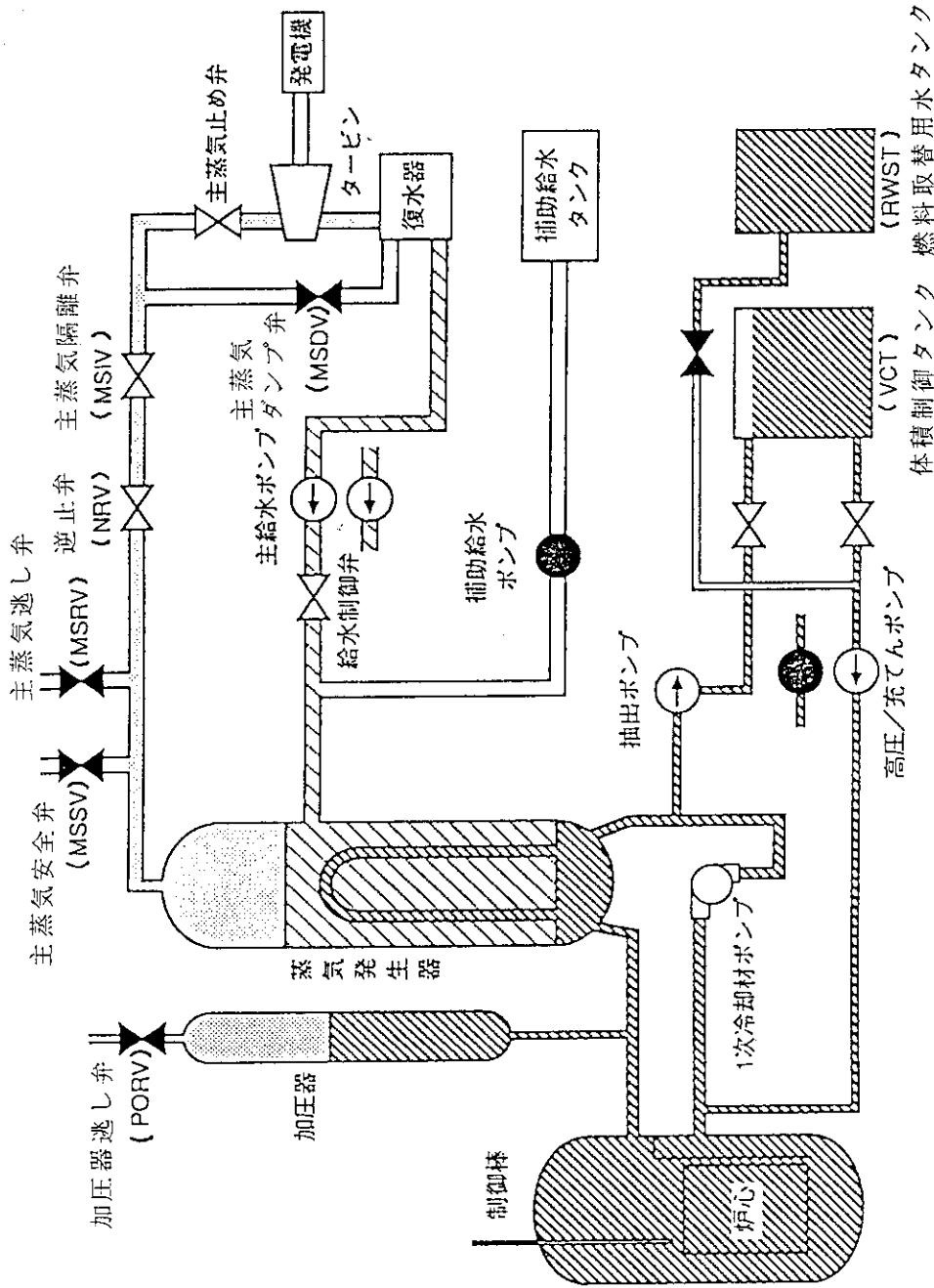
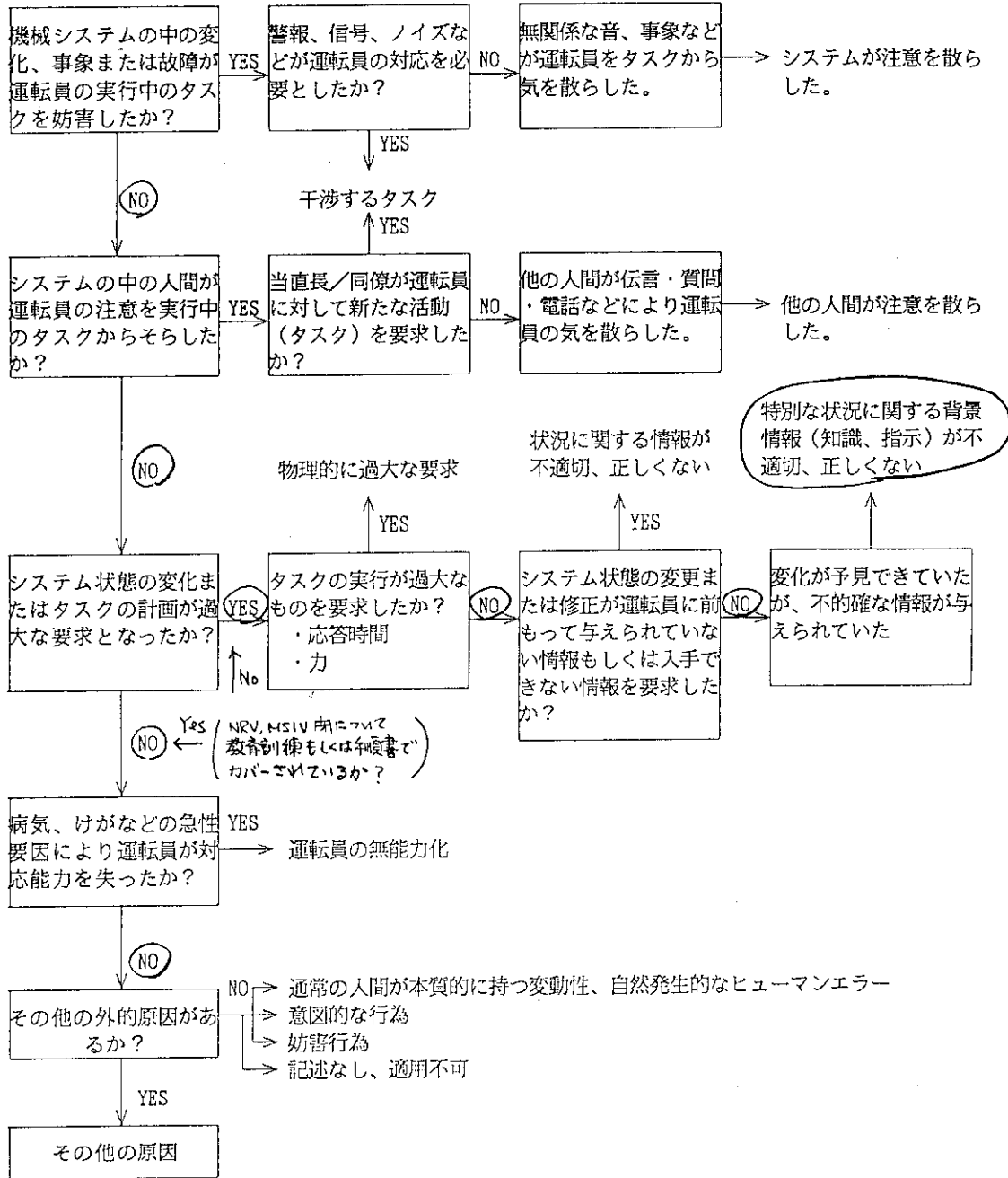
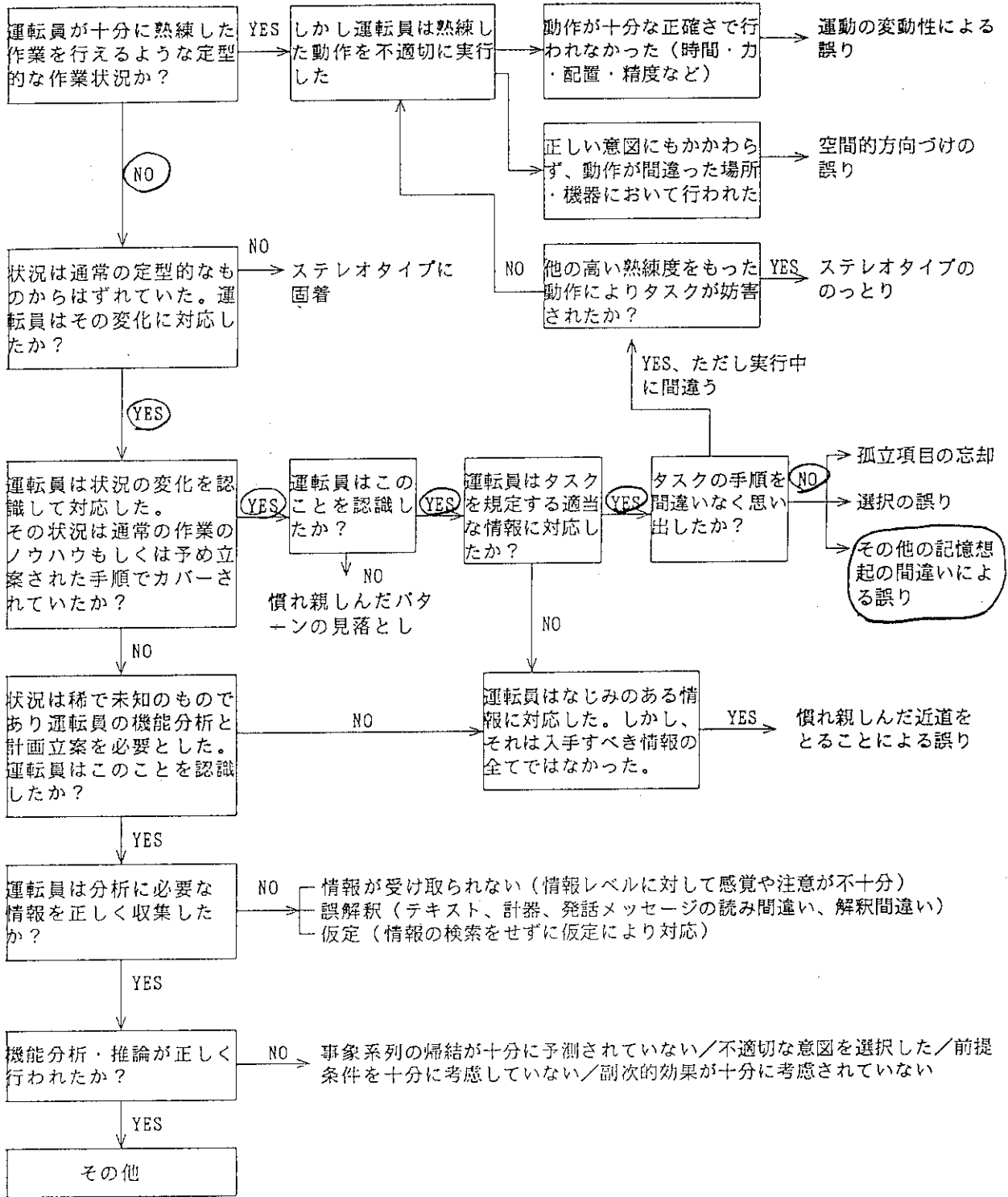


図 2.2.1 North Anna プラント 概念図



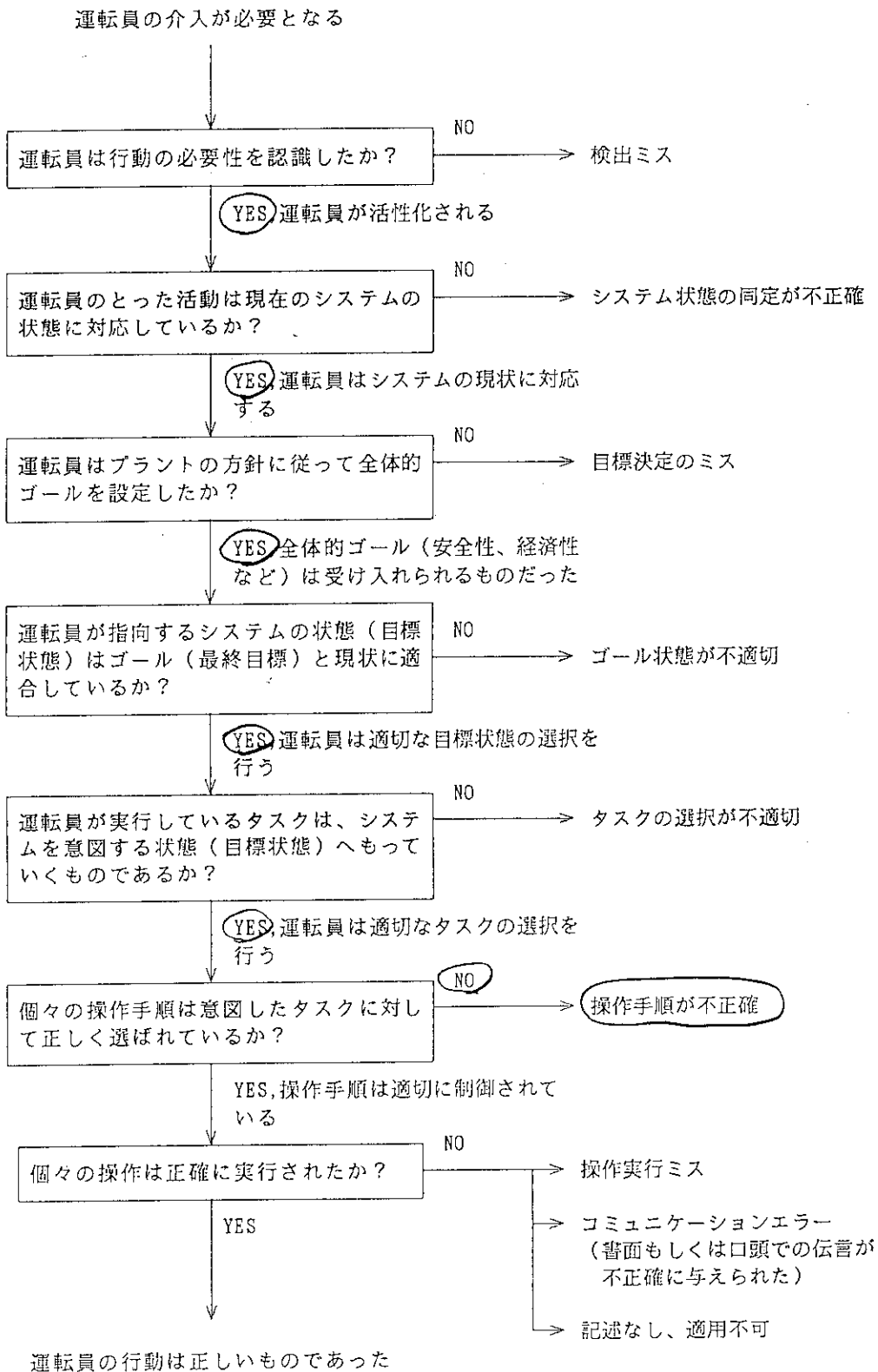
人間の機能不全の原因に対する分析ガイド

図 2.2.2 Rasmussen の手法による North Anna 事象の分析チャート (2/6)
(S.S. の NRV 閉, 続いて MSIV 閉の指示)



人間の機能不全のメカニズムの分析ガイド

図 2.2.2 Rasmussenの手法によるNorth Anna 事象の分析チャート (3/6)
(S.S.のNRV閉、続いてMSIV閉の指示)

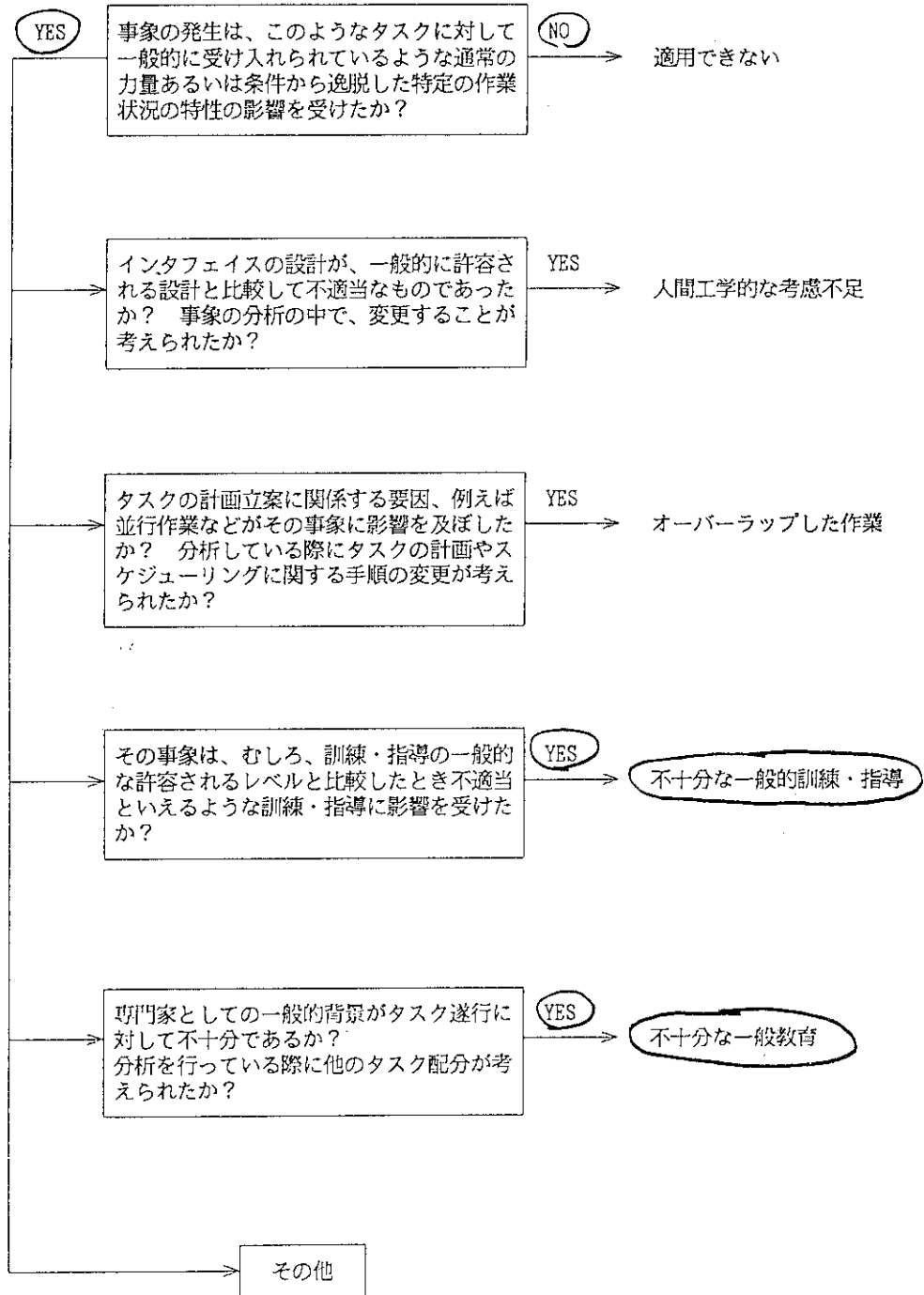


人間の内的な機能不全の分析ガイド

図 2.2.2 Rasmussen の手法による North Anna 事象の分析チャート (4/6)
(S.S.のNRV閉, 続いてMSIV閉の指示)

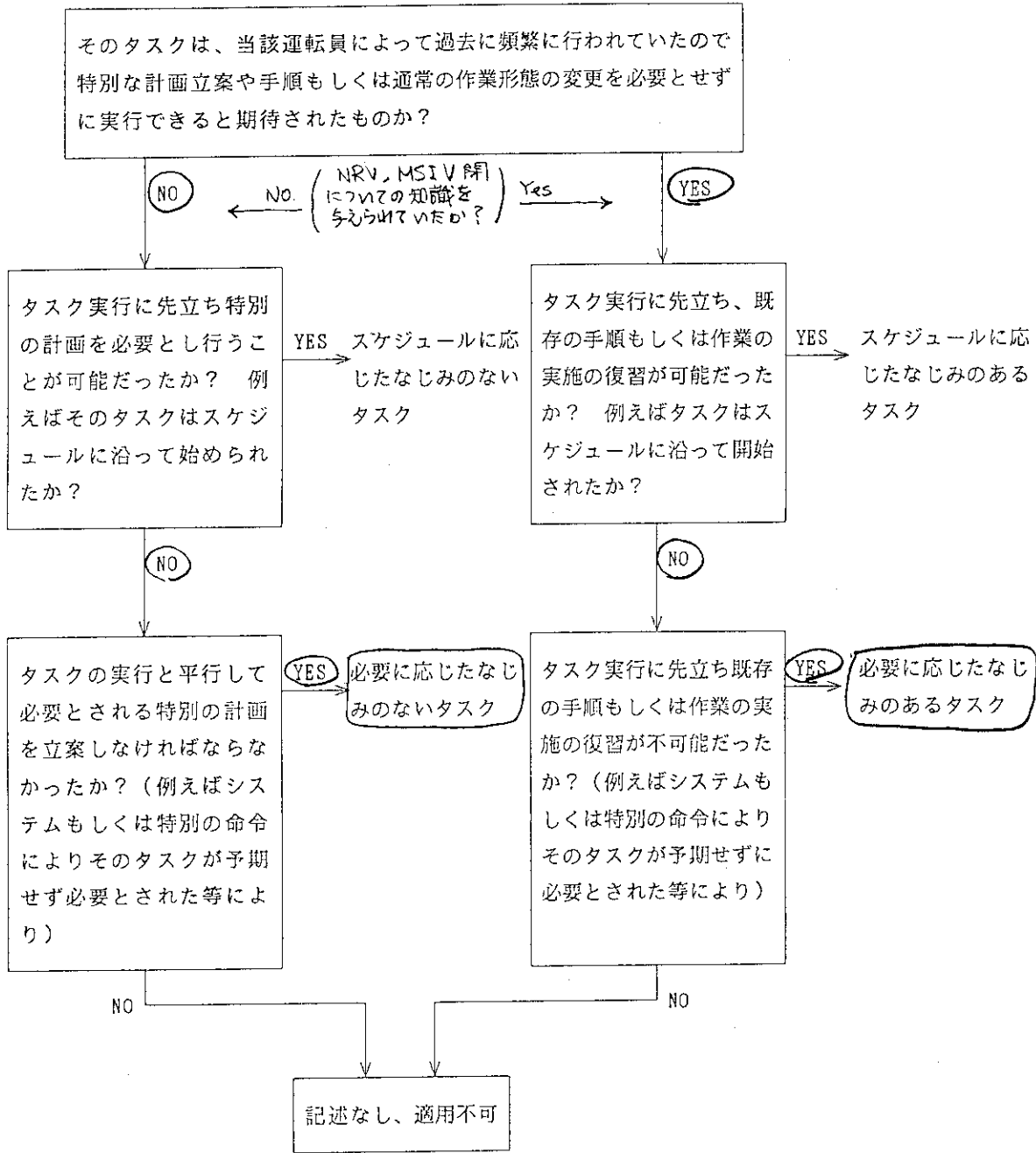
If. NRV, MSIV 閉の応答
についての知識をもっていない場合は、

If. NRV, MSIV 閉の応答
についての知識を持っているなら、



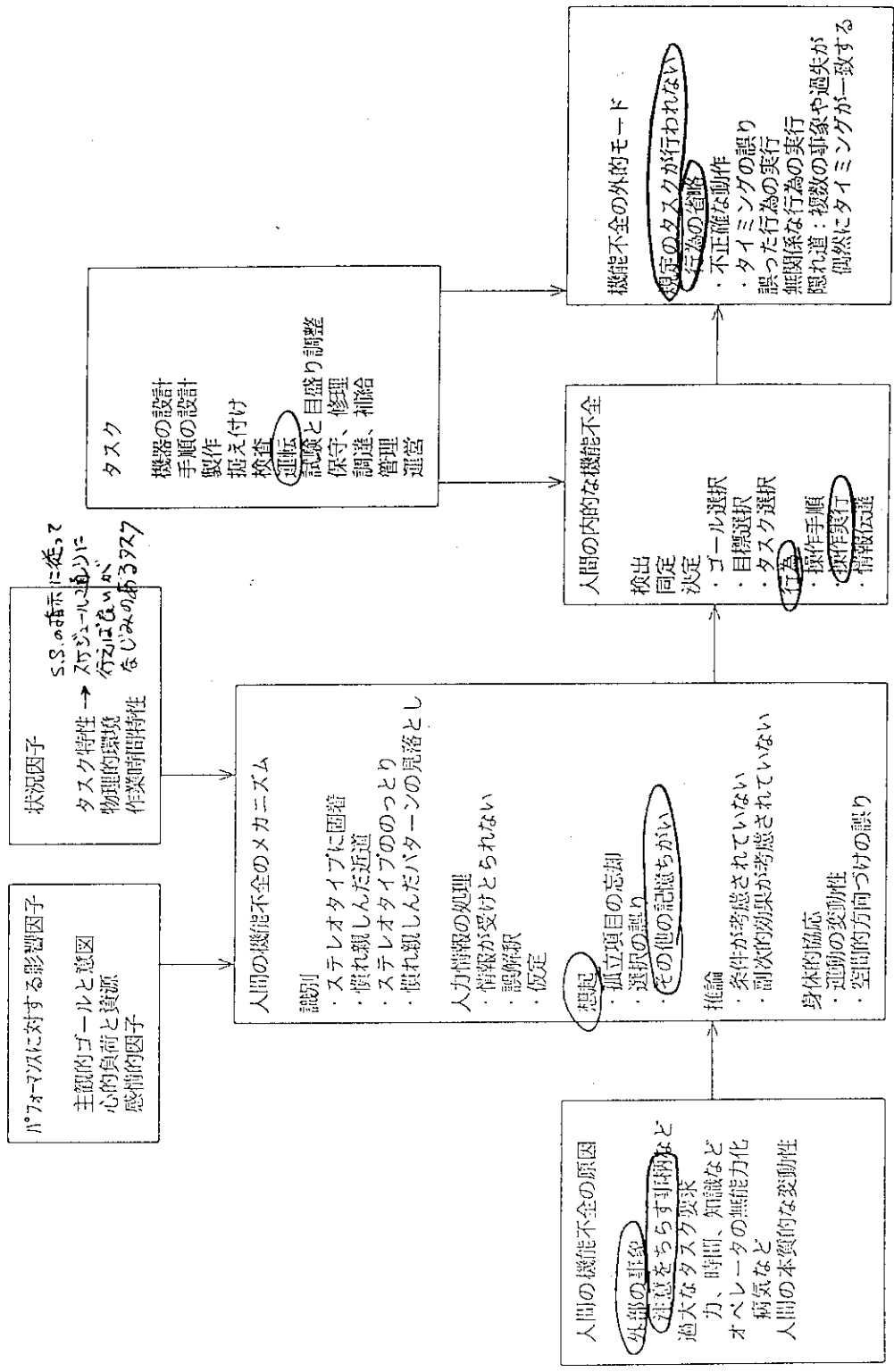
パフォーマンスに対する影響因子のうち心的負荷と資源に対する分析ガイド

図 2.2.2 Rasmussen の手法による North Anna 事象の分析チャート (5/6)
(S.S.のNRV閉, 続いてMSIV閉の指示)



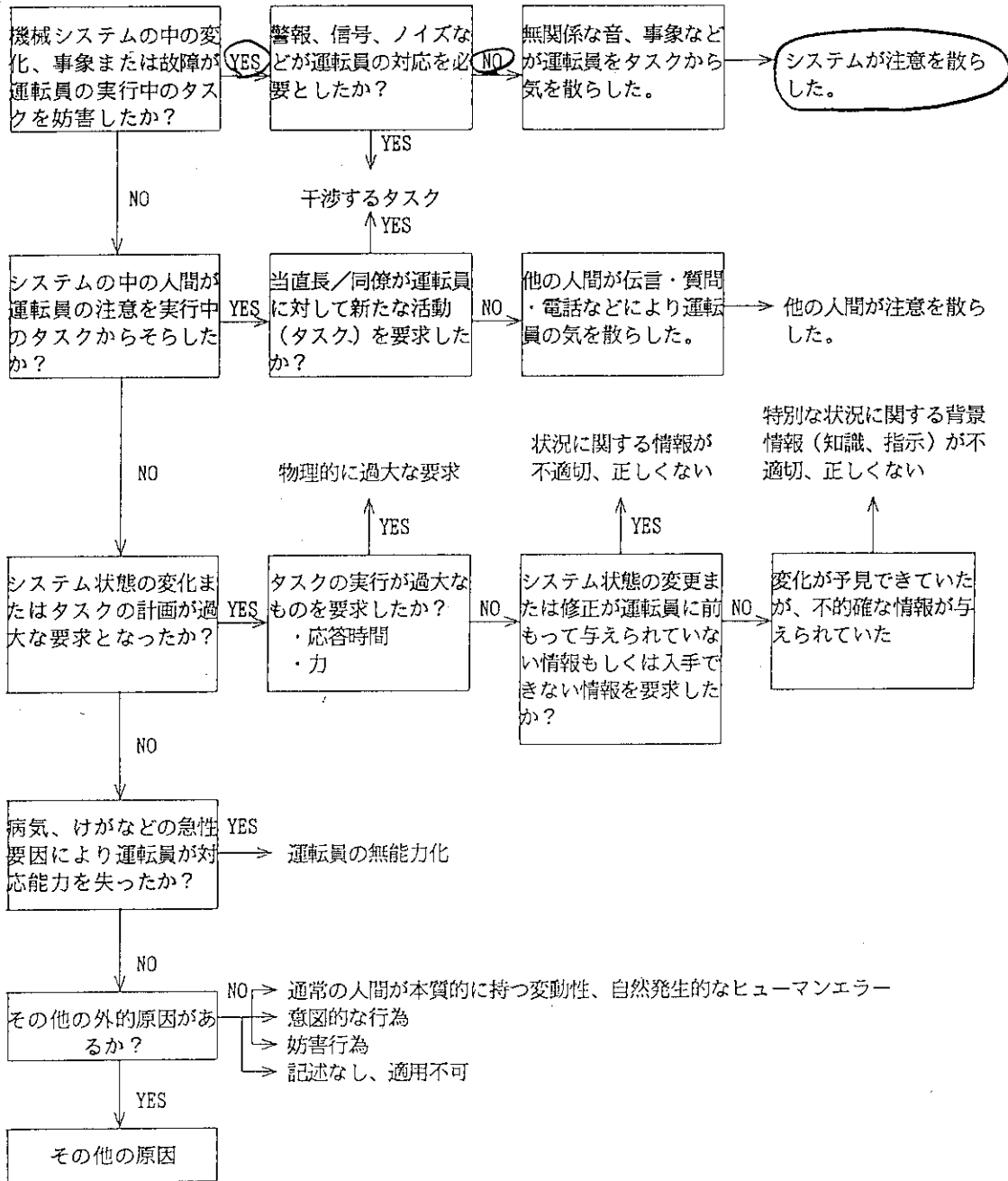
状況因子のうちタスク特性 (Preparedness) に関する分析ガイド

図 2.2.2 Rasmussen の手法による North Anna 事象の分析チャート (6/6)
(S.S. の NRV 閉, 続いて MSIV 閉の指示)



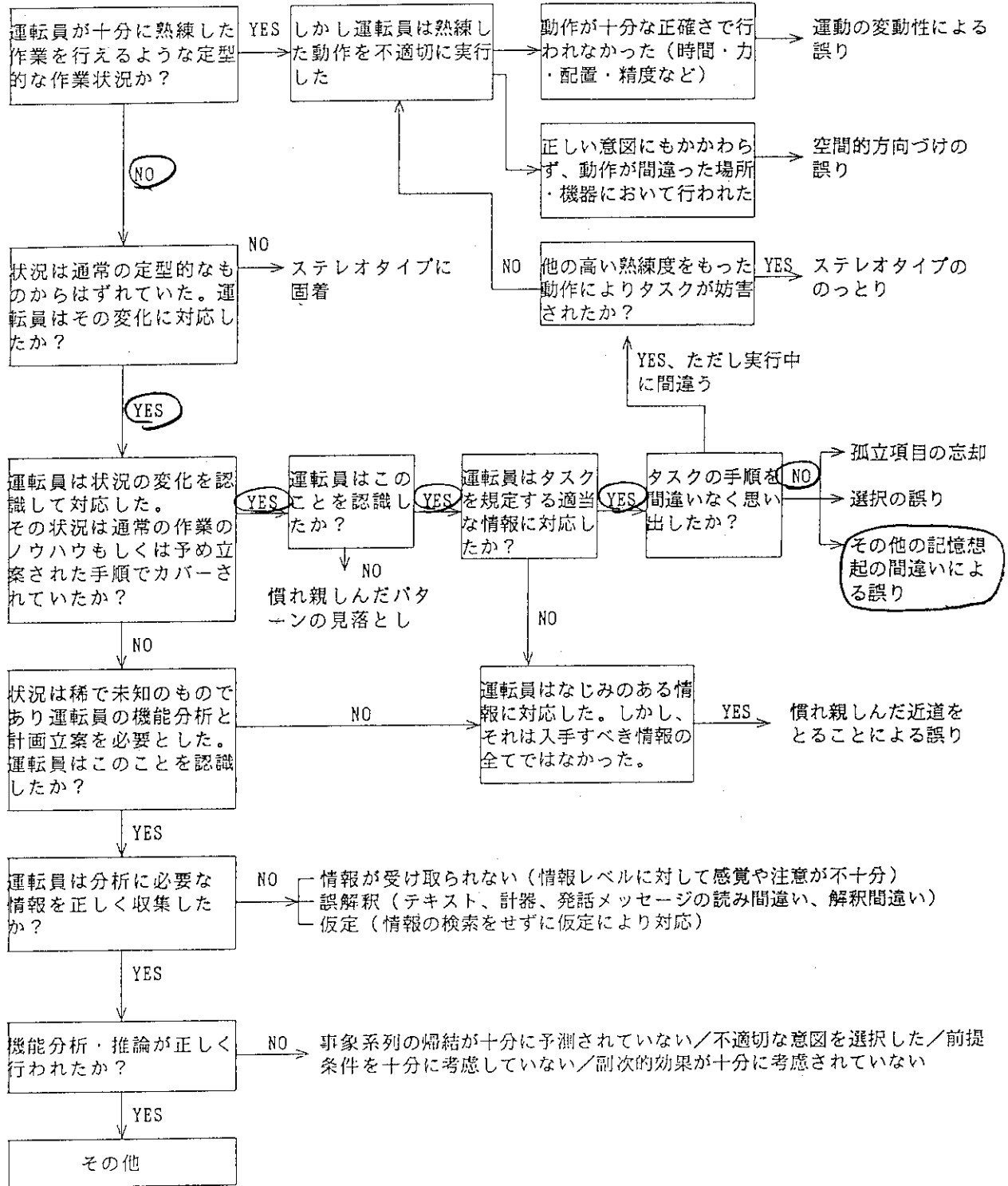
Rasmussenの提唱する人間の機能不全を含む事象の既述と分析のための多面的分類法

図 2.2.3 Rasmussenの手法によるNorth Anna 事象の分析チャート(1/6)
(MSIV閉を忘れた)



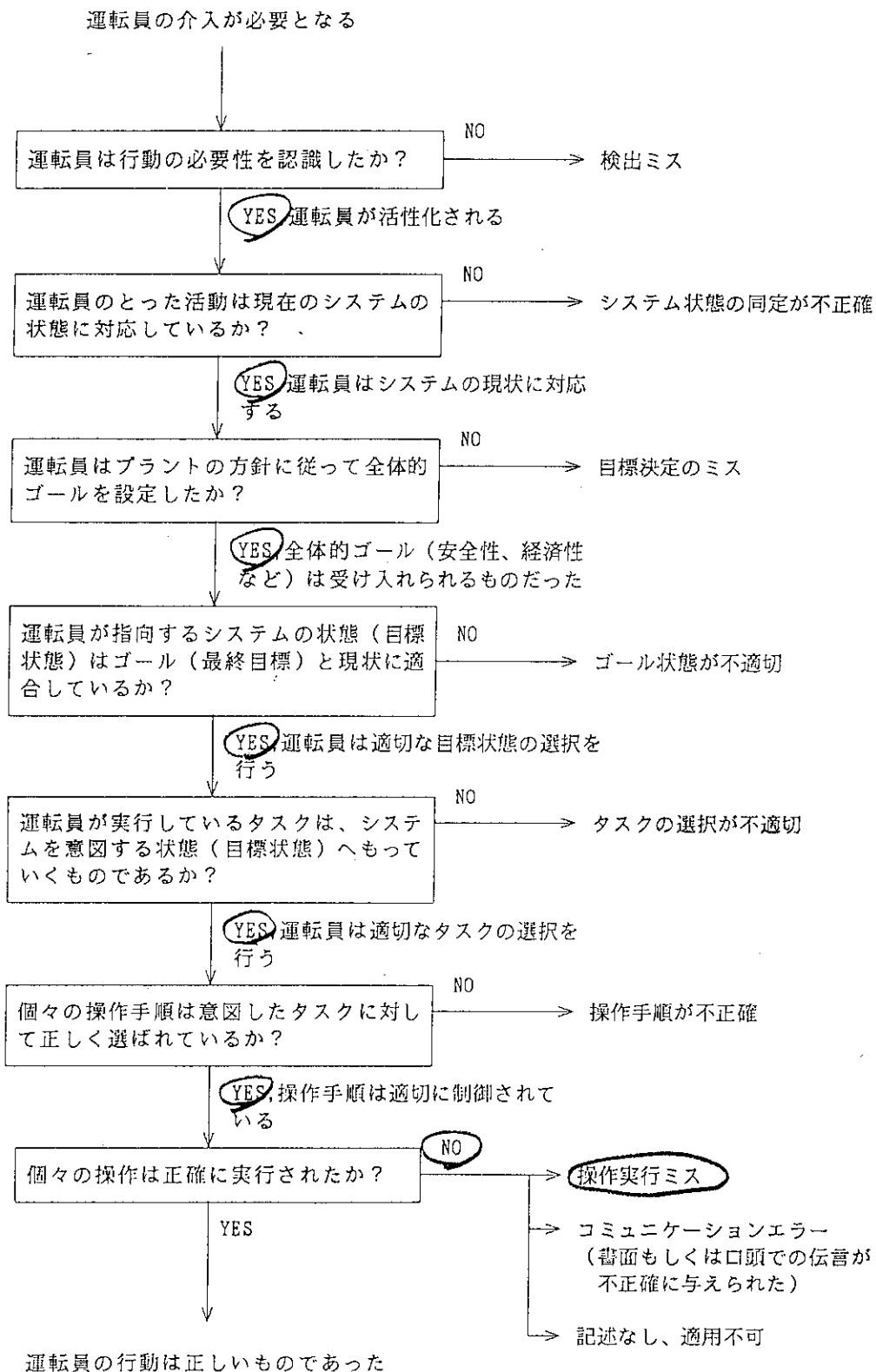
人間の機能不全の原因に対する分析ガイド

図 2.2.3 Rasmussen の手法による North Anna 事象の分析チャート (2/6)
(MSIV 閉を忘れた)



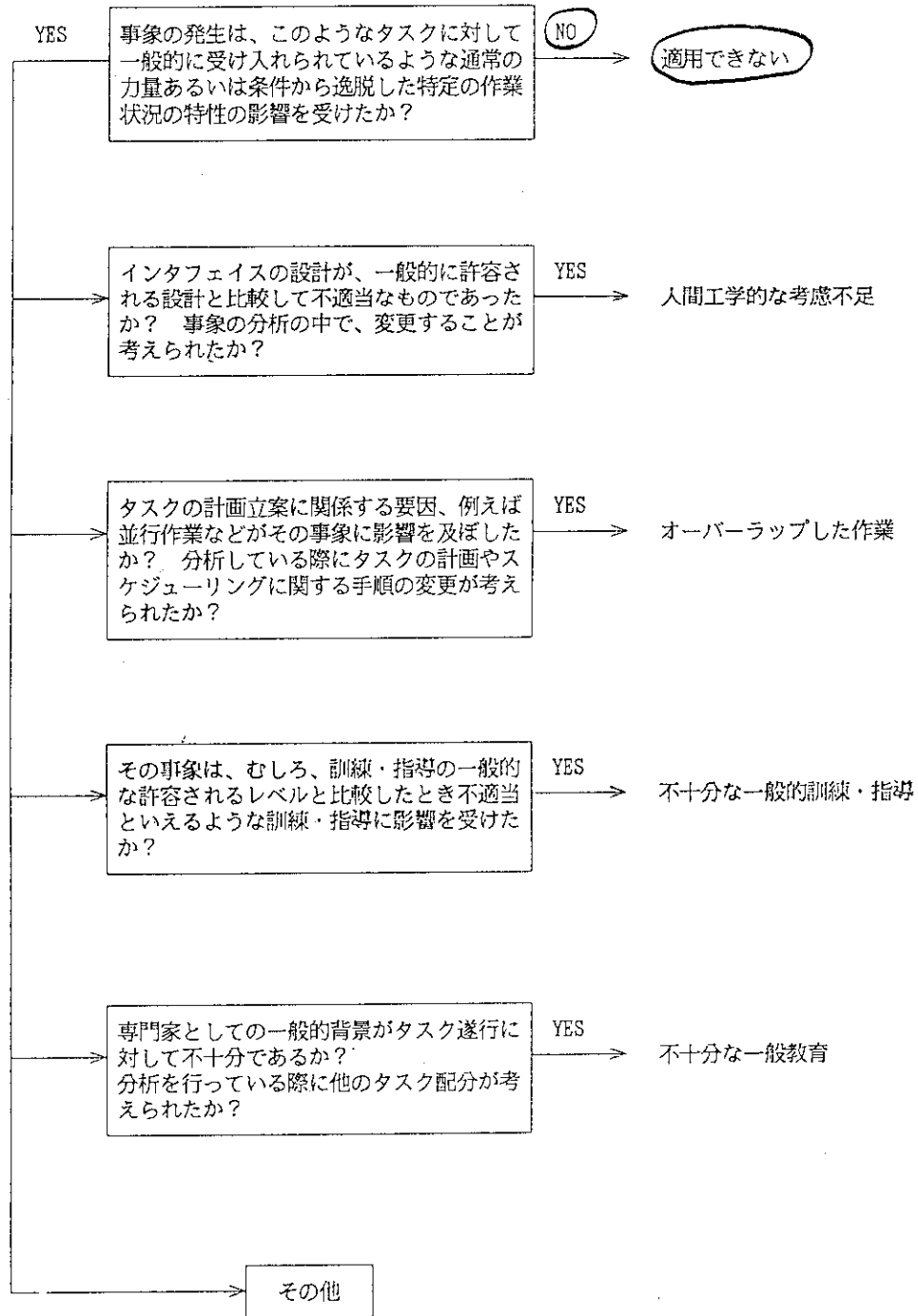
人間の機能不全のメカニズムの分析ガイド

図 2.2.3 Rasmussen の手法による North Anna 事象の分析チャート (3/6) (MSIV 閉を忘れた)



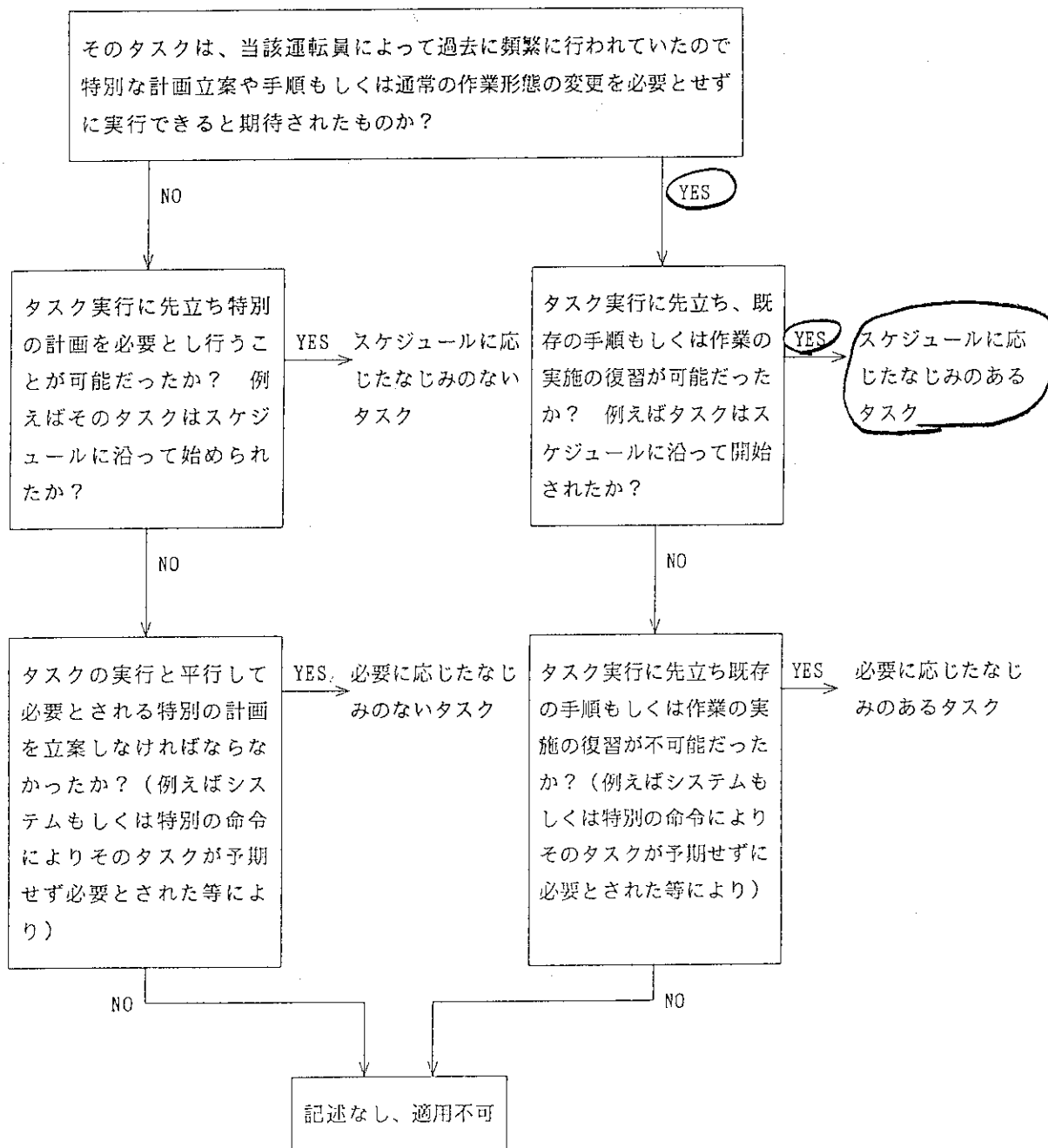
人間の内的な機能不全の分析ガイド

図 2.2.3 Rasmussen の手法による North Anna 事象の分析チャート (4/6)
(MSIV 閉を忘れた)



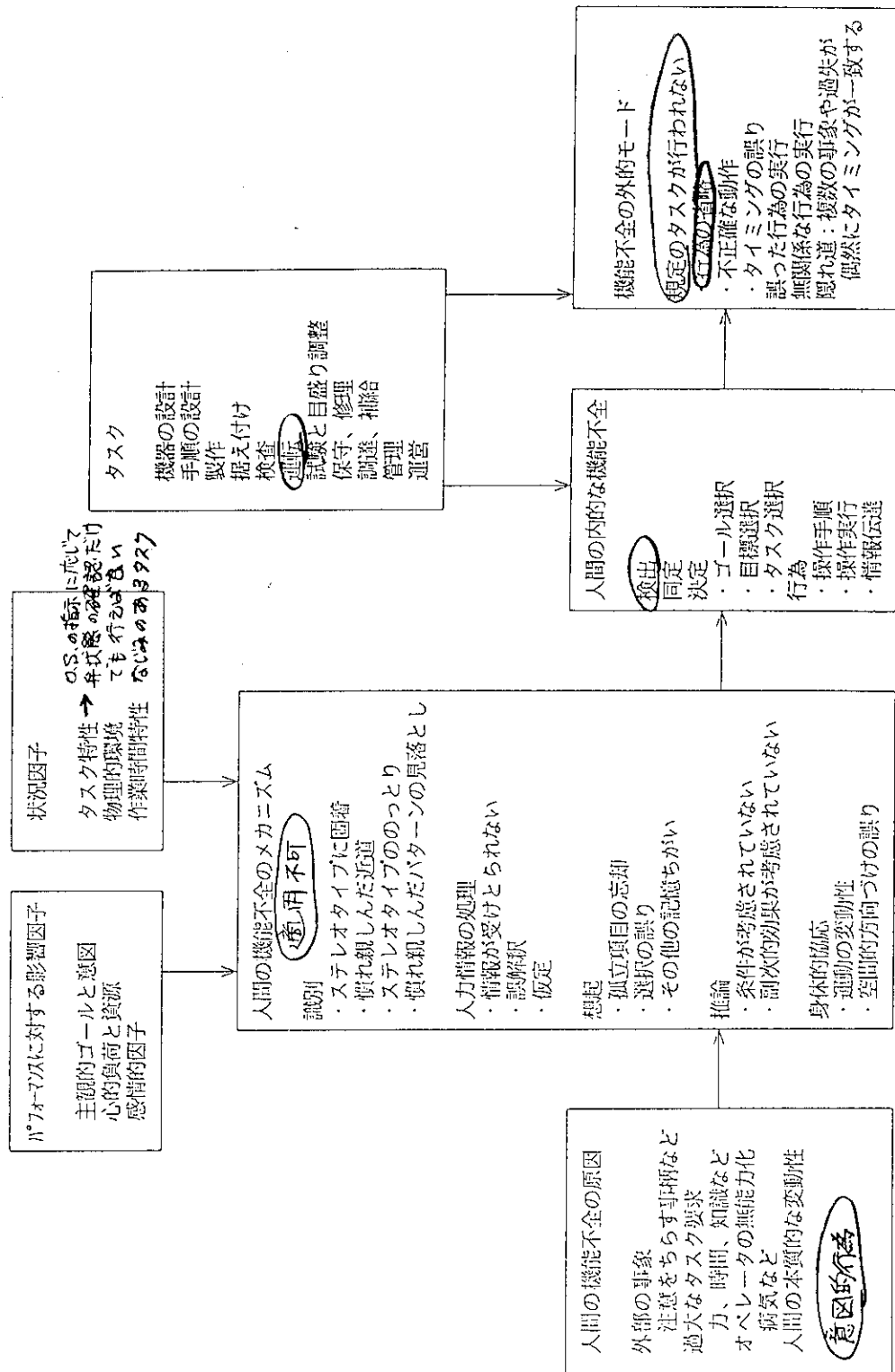
パフォーマンスに対する影響因子のうち心的負荷と資源に対する分析ガイド

図 2.2.3 Rasmussen の手法による North Anna 事象の分析チャート (5/6)
(MSIV 閉を忘れた)



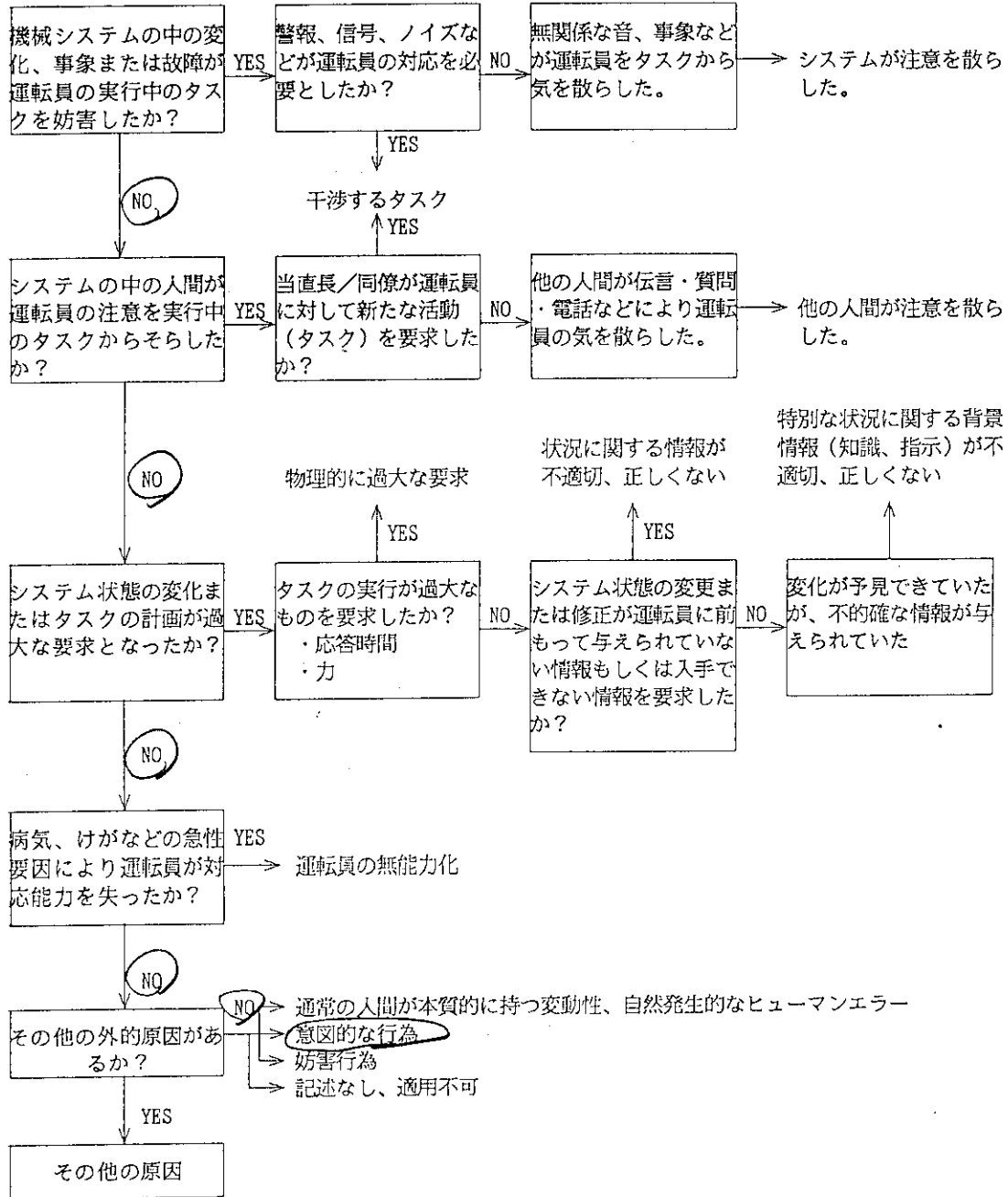
状況因子のうちタスク特性 (Preparedness) に関する分析ガイド

図 2.2.3 Rasmussen の手法による North Anna 事象の分析チャート (6/6)
(MSIV 閉を忘れた)



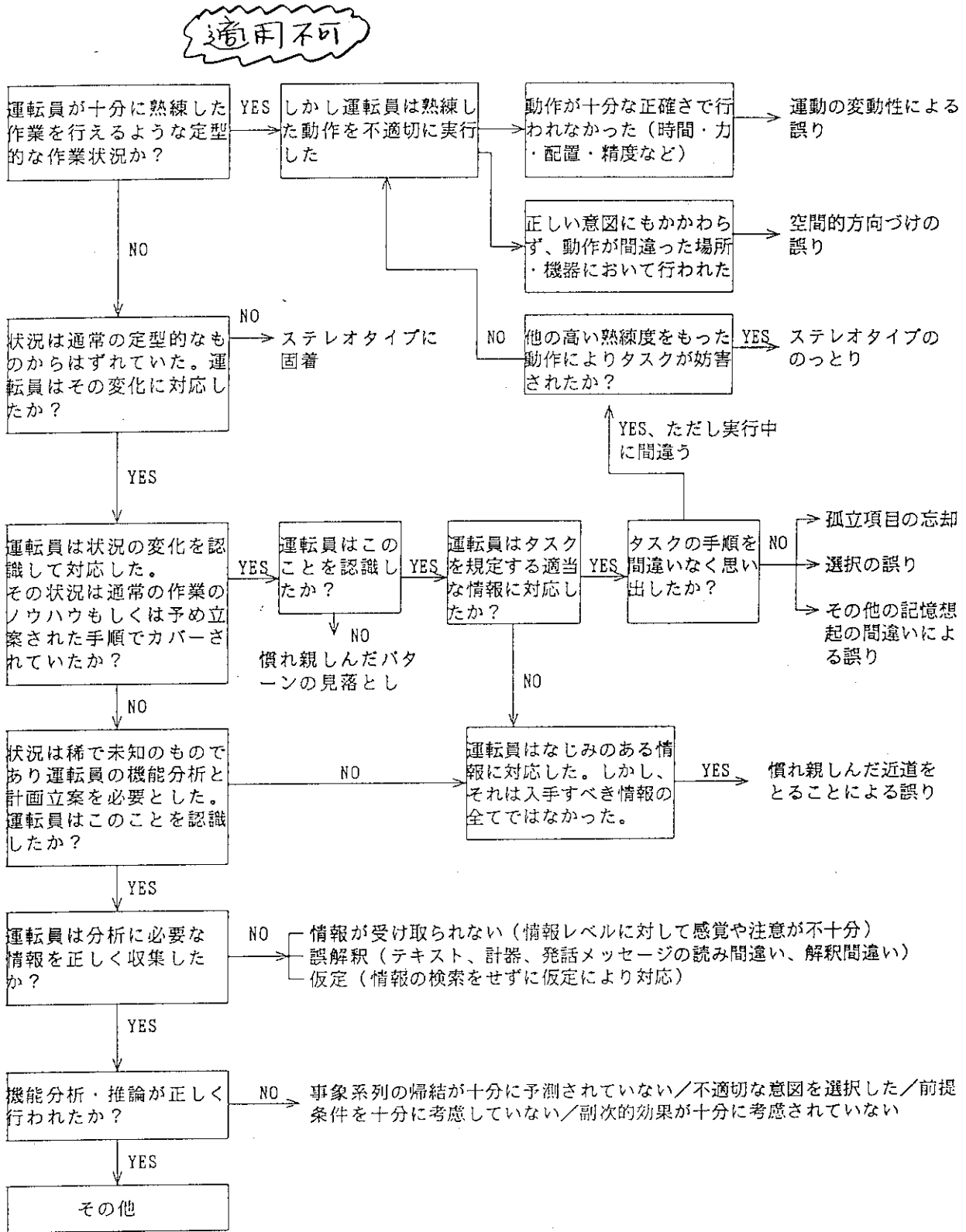
Rasmussenの提唱する人間の機能不全を含む事象の既述と分析のための多面的分類法

図 2.2.4 Rasmussenの手法によるNorth Anna 事象の分析チャート (1/6)
(O.S.のMSIV閉の指示に対するS.S.の対応)



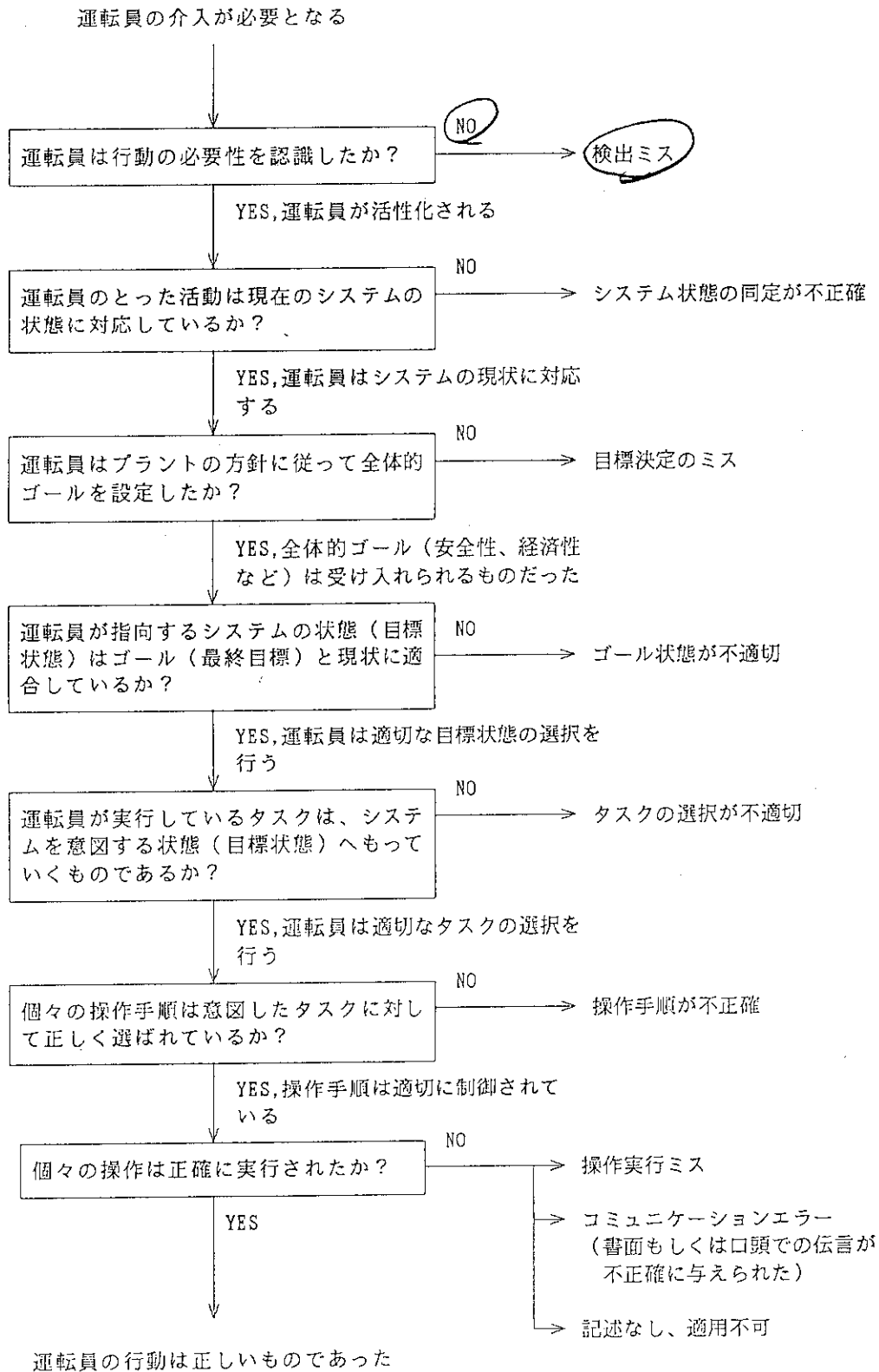
人間の機能不全の原因に対する分析ガイド

図 2.2.4 Rasmussen の手法による North Anna 事象の分析チャート (2/6)
(O.S.のMSIV 閉の指示に対する S.S.の対応)



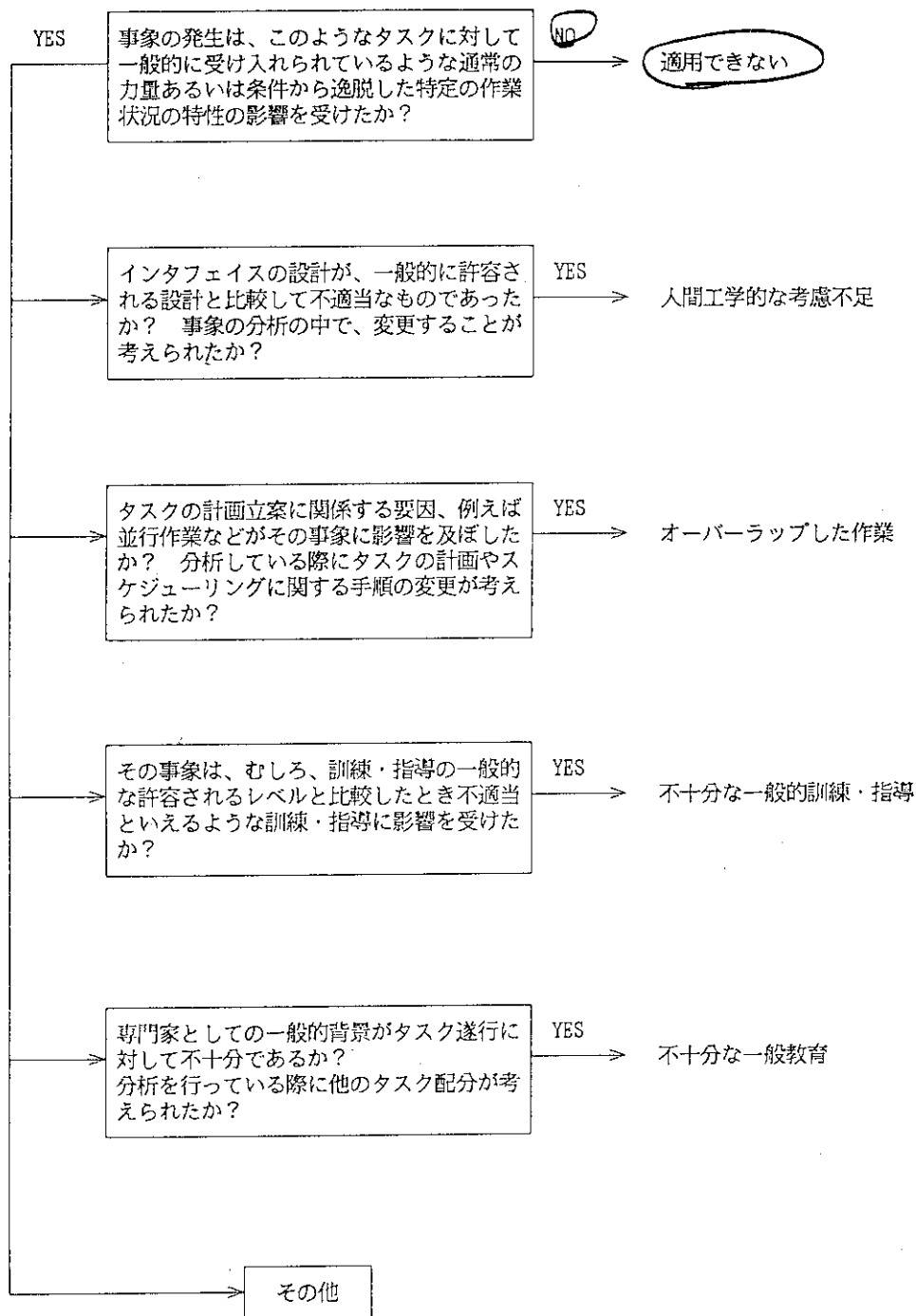
人間の機能不全のメカニズムの分析ガイド

図 2.2.4 Rasmussen の手法による North Anna 事象の分析チャート (3/6)
(O.S.のMSIV閉の指示に対するS.S.の対応)



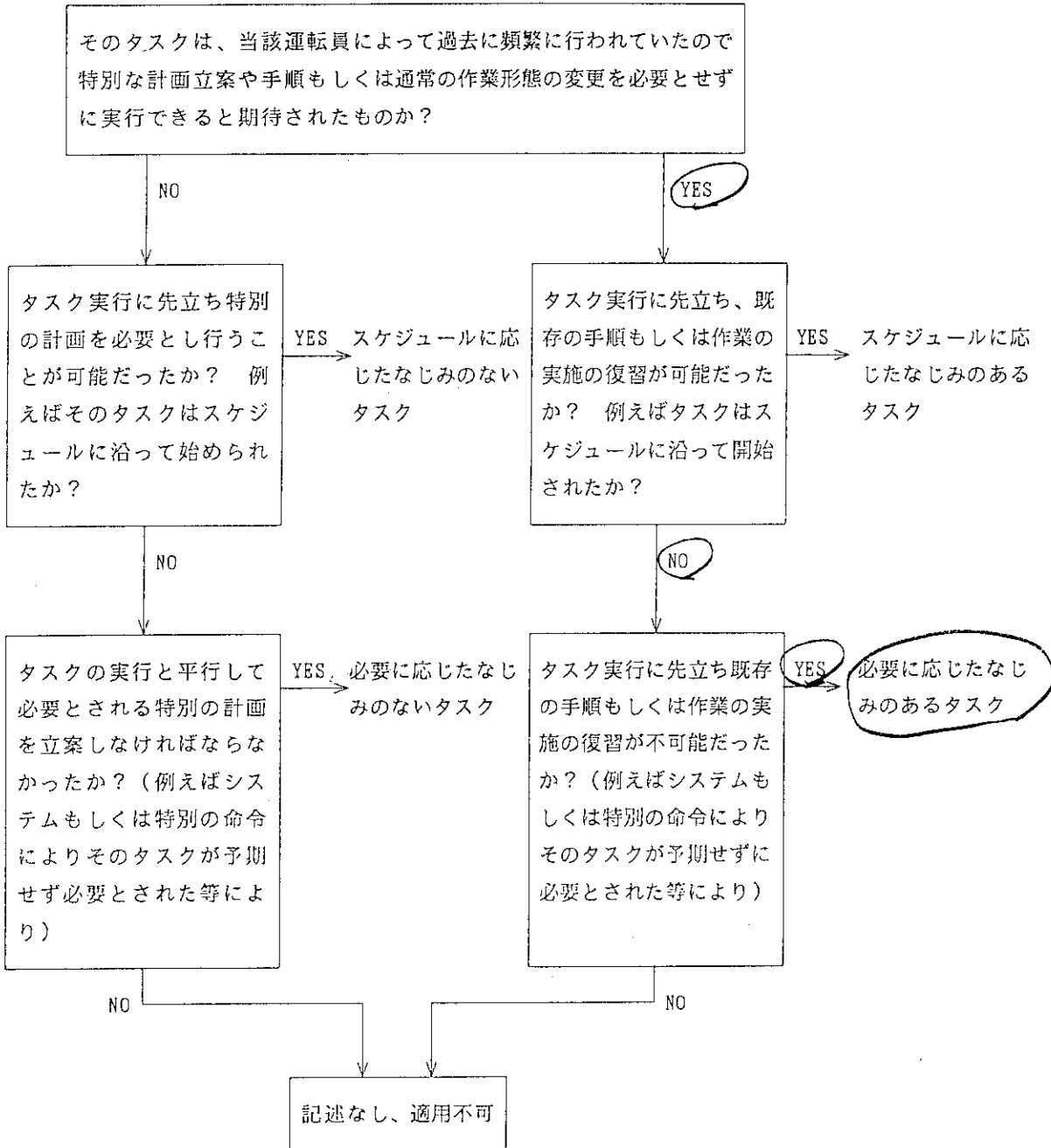
人間の内的な機能不全の分析ガイド

図 2.2.4 Rasmussenの手法によるNorth Anna事象の分析チャート(4/6)
(O.S.のMSIⅴ閉の指示に対するS.S.の対応)



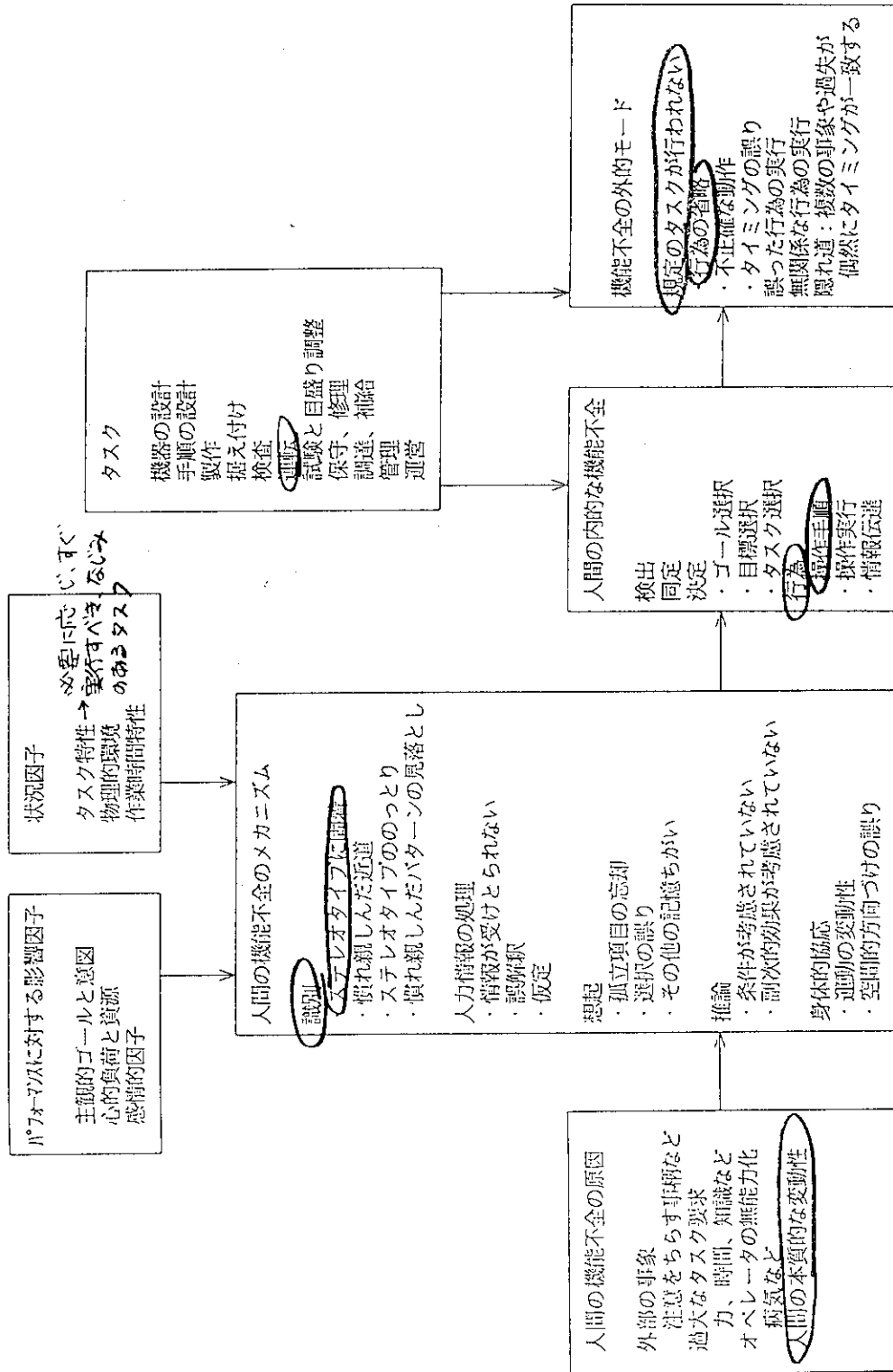
パフォーマンスに対する影響因子のうち心的負荷と資源に対する分析ガイド

図 2.2.4 Rasmussen の手法による North Anna 事象の分析チャート (5/6)
(O.S.のMSIV 閉の指示に対する S.S.の対応)



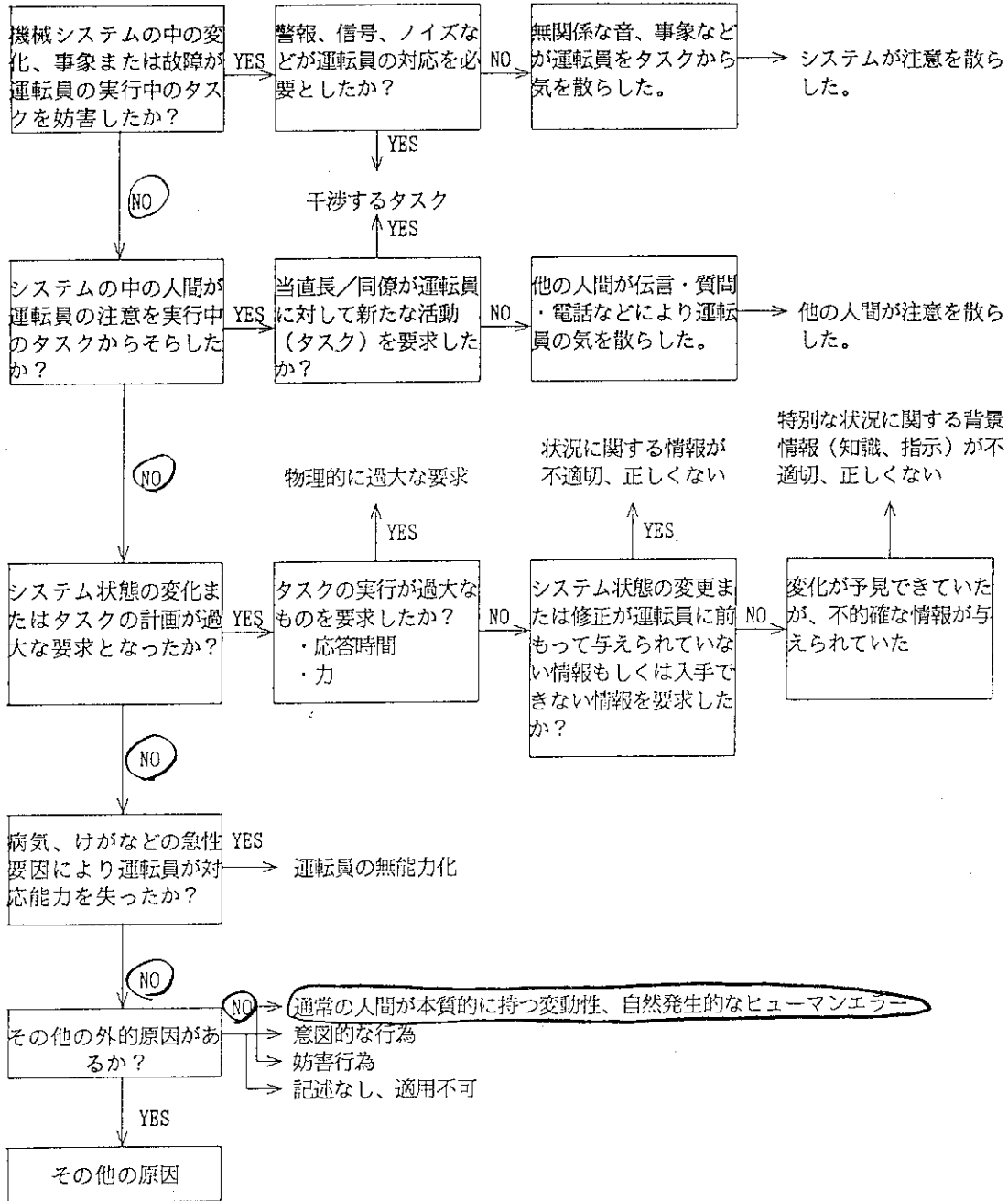
状況因子のうちタスク特性 (Preparedness) に関する分析ガイド

図 2.2.4 Rasmussen の手法による North Anna 事象の分析チャート (6/6)
(O.S.のMSIV 閉の指示に対するS.S.の対応)



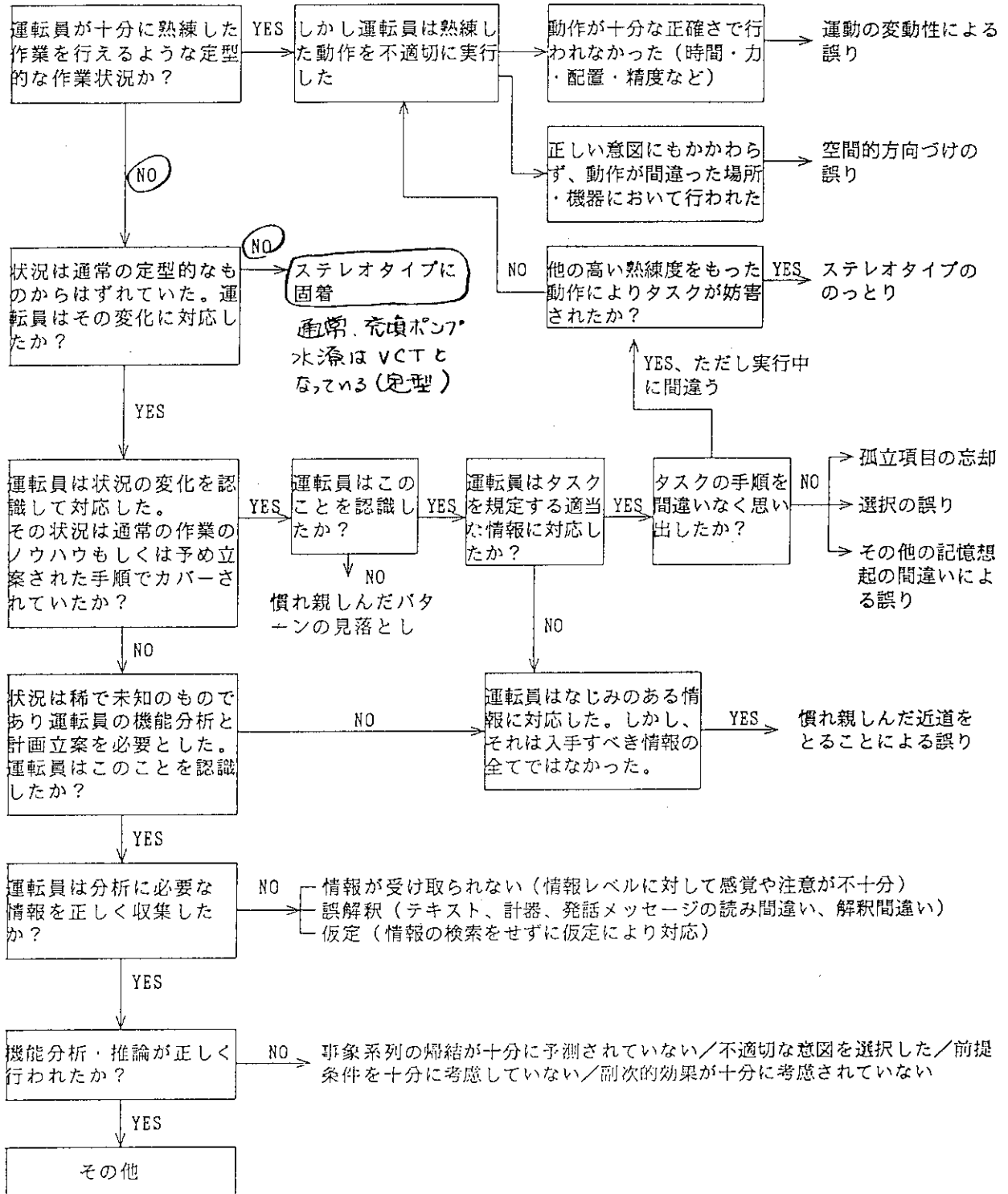
Rasmussenの提唱する人間の機能不全を含む事象の既述と分析のための多面的分類法

図 2.2.5 Rasmussenの手法による North Anna 事象の分析チャート (1/6)
(抽出系の確立)



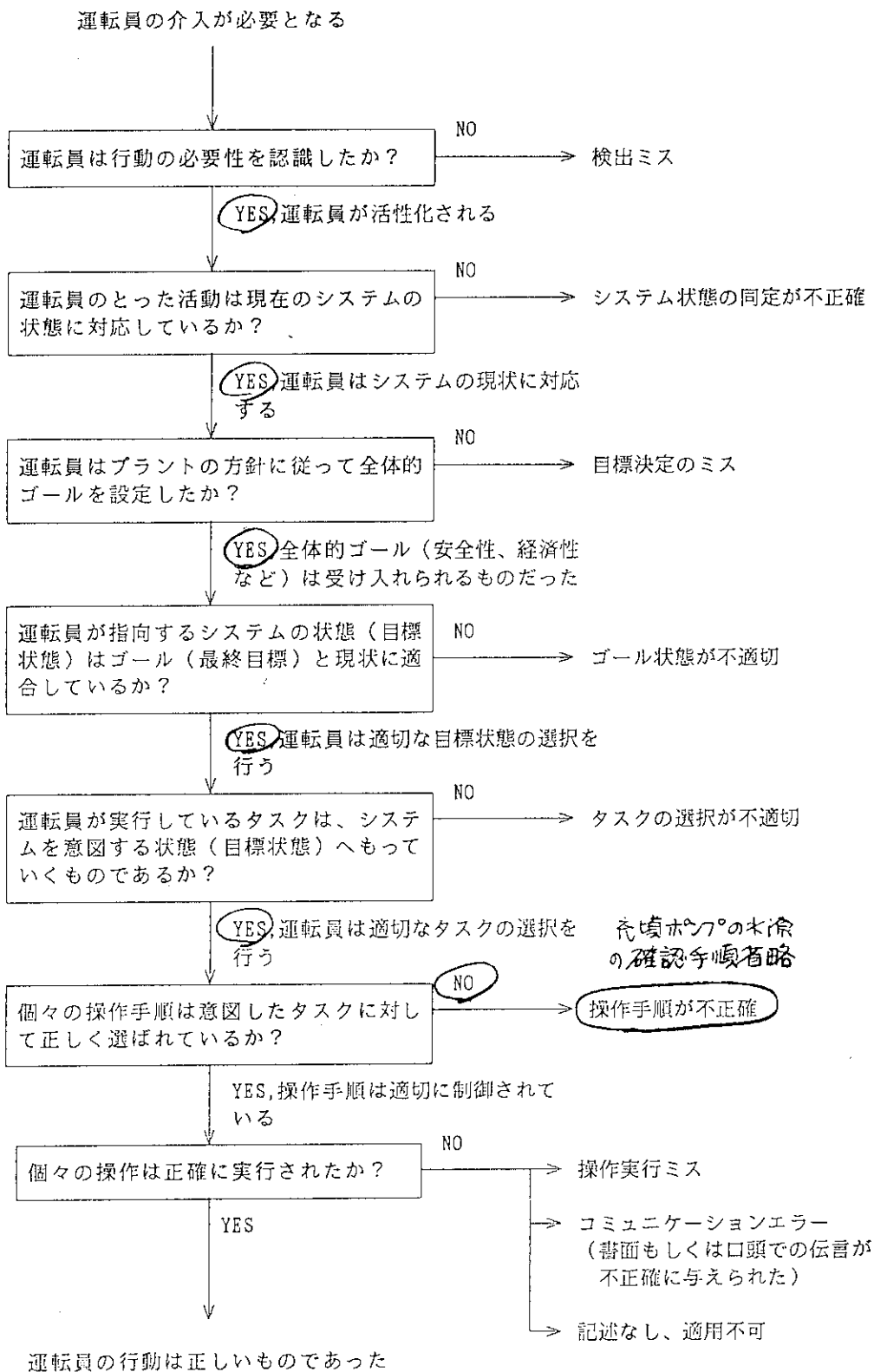
人間の機能不全の原因に対する分析ガイド

図 2.2.5 Rasmussen の手法による North Anna 事象の分析チャート (2/6)
(抽出系の確立)



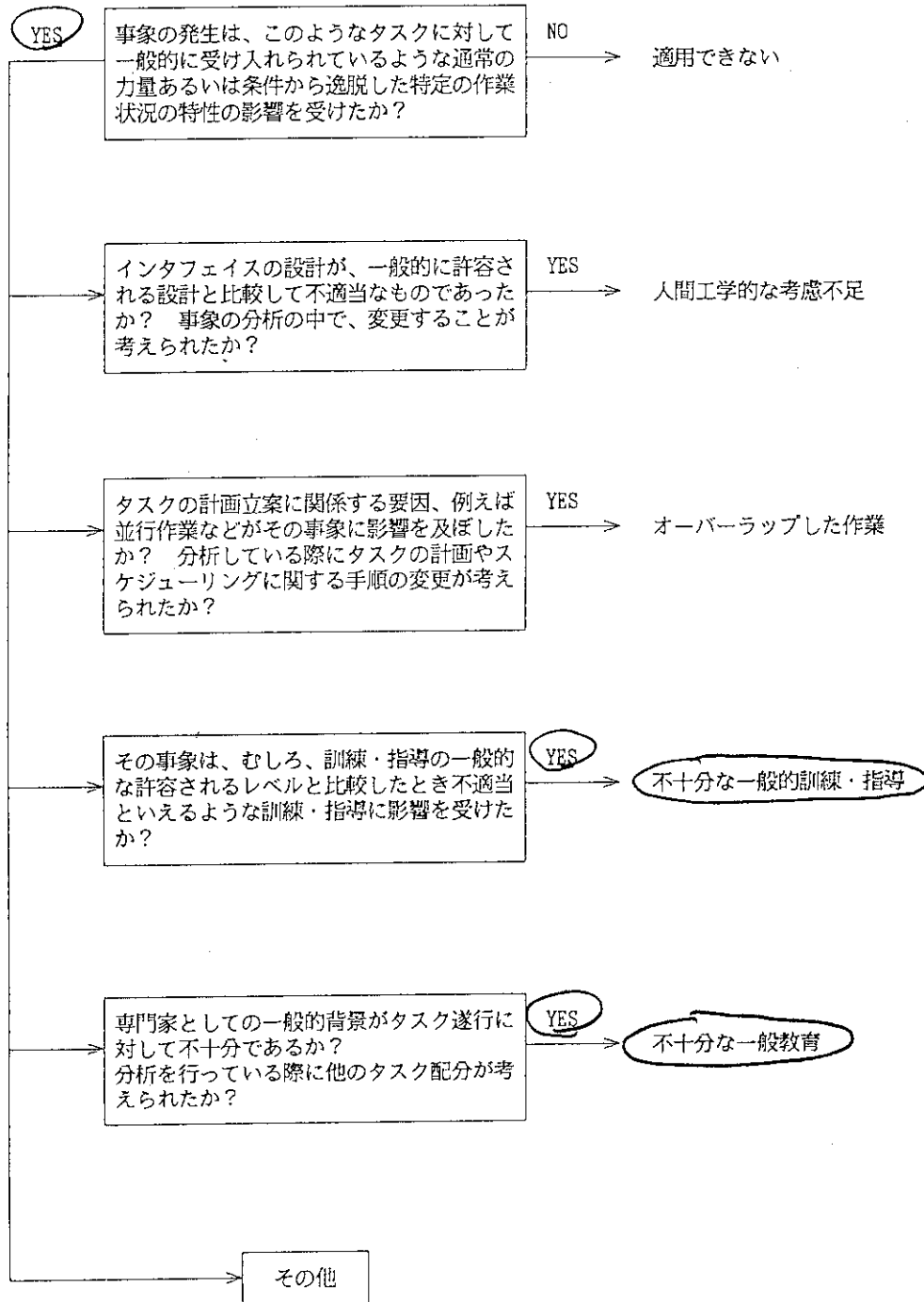
人間の機能不全のメカニズムの分析ガイド

図 2. 2. 5 Rasmussenの手法によるNorth Anna 事象の分析チャート (3/6)
(抽出系の確立)



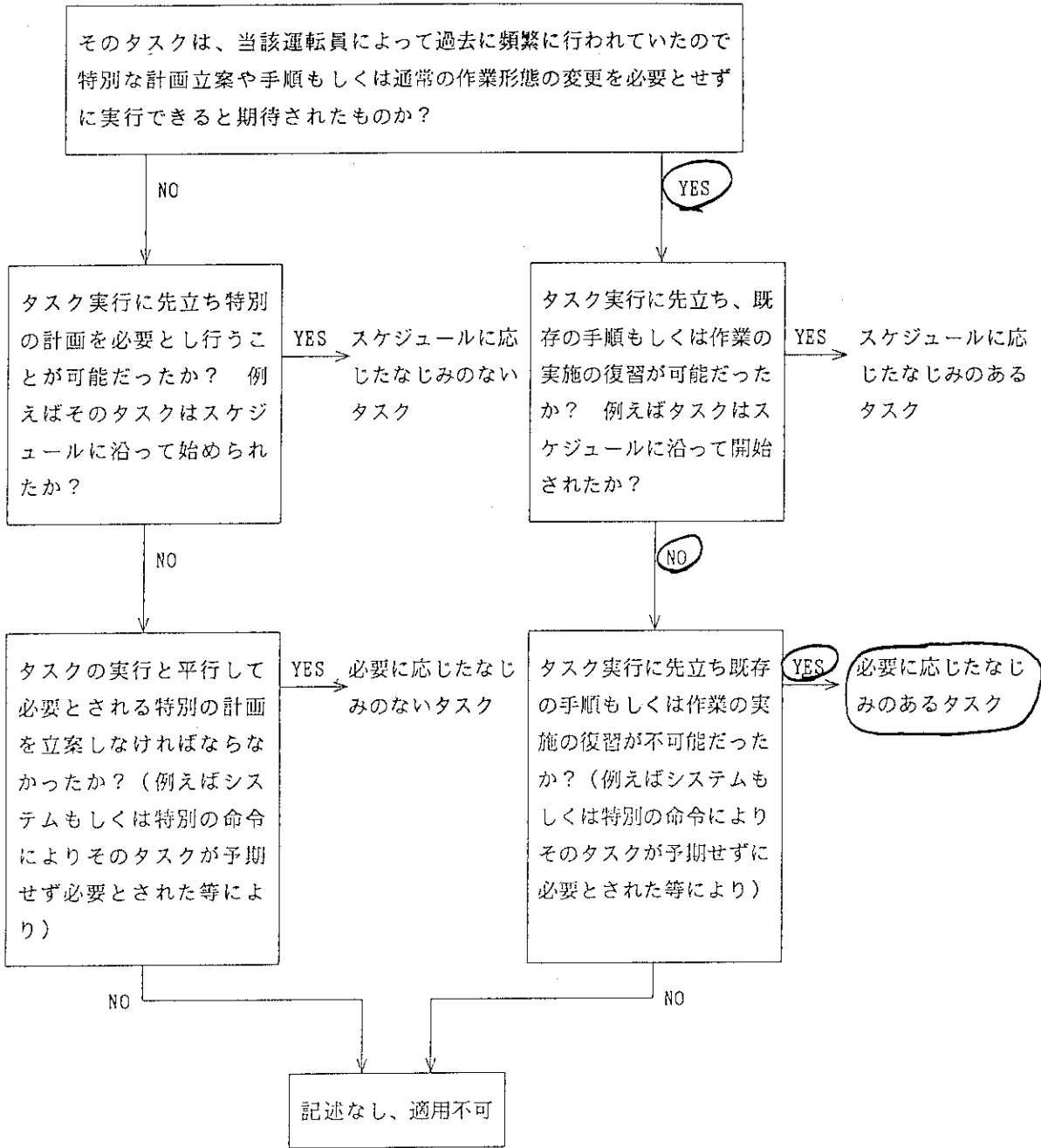
人間の内的な機能不全の分析ガイド

図 2.2.5 Rasmussen の手法による North Anna 事象の分析チャート (4/6) (抽出系の確立)



パフォーマンスに対する影響因子のうち心的負荷と資源に対する分析ガイド

図 2.2.5 Rasmussen の手法による North Anna 事象の分析チャート (5/6)
(抽出系の確立)



状況因子のうちタスク特性 (Preparedness) に関する分析ガイド

図 2.2.5 Rasmussen の手法による North Anna 事象の分析チャート (6/6)
(抽出系の確立)

2. 3 Oconee 事象

Oconee 3号炉における1979年11月30日の事象について、参考文献に記載の情報をもとに、以下に概要とクロノロジーをまとめる。

Oconee 3号炉は、B&W社製のPWRである。システムの概念を図2. 3. 1に示す。Oconee 3号炉の商業運転は、1974年12月に開始された。

(1) 事象の概要

本事象は、復水系の故障により原子炉がトリップしたと同時にB&Wプラント特有の制御系であるICS(Integrated Control System)の電源が喪失し、その診断及び電源回復後のプラント操作が問題となった事象である。

事故は、復水器の「ホットウェル水位低」の誤信号が発信した事から始まる。これが原因となり、ホットウェルポンプさらに復水ブースタポンプが停止し、これに伴って給水流量が低下し、これに対応してICSが原子炉出力を低下させた。しかしながら、ICSのランバックが給水流量の低下に十分対応できなかったため「原子炉圧力高」により原子炉がトリップした。

この原子炉トリップとほぼ同時にICSに電源を供給するKIインバータがトリップしかつ交流母線への自動切替にも失敗した。これらの情報を示す警報が示されていたが、原子炉トリップにより発生する他の警報(約200個)に埋もれて目立たなかったため運転員は気付かなかった。また、ICSの電源喪失と同時に崩壊熱の除去に関する表示、1次系/2次系への注入に関する表示が喪失した。

運転員はこの様な状況の中でプラントに何が起きているのかを正確に理解することはできなかったが、1979年3月に起きたTMI事故以降の訓練に従い炉心の露出を防ぐために既に起動している2台の高圧注入ポンプに加えて3台目の高圧注入ポンプを起動させた。これは原子炉トリップにともなう1次系の収縮量を相殺することを目的としたものであった。

この様な操作を行って行く中で、運転員はICSインバータ警報が出ていることを知るが、プラントの状態については正確に理解できなかった。この様な状況の中で、運転員は1次系/2次系の計装・警報を監視していたが、その中でShift Supervisorは、ICS上の計器類が原子炉トリップ直前の状況とは関係のない、特異な表示の組合せになっていること、及び、炉心冠水タンク(ほう酸水貯蔵タンク: BWS Tともいう)の水位が低下していることに気付いた。Shift Supervisorは、この表示は正しくないはずであり、ICSインバータ警報はICS電源喪失を知らせるものであること、さらに過去の経験からもプラントは「ICSの電源が喪失している」状況にあると判断した。この判断に基づきICSの電源が手動で回復された。

ICSの電源回復にともない計装系が使用可能になると、Tave(冷却材平均温度)が低下し冷却率が大きくなっていること(過冷却)が判明した。運転員は原因を検討する過程で「タービンバイパス弁」が開いていることに気付きそれを部分的に閉めた。しかしながら、過冷却の原因が「タービンバイパス弁が開いていたこと」の他にICSの電源回復に伴い「給水流量が増大していた」ことのためであったため、冷却率は依然として大きいままであった。このため、運転員は主給水系及び補助給水系の流量を絞ることによりプ

ラントを安定化させる操作を行った。

上記の操作によりプラントがほぼ安定な状態になったとき、Shift supervisorはプラントを高温停止状態に移行させるため、復水ブースタポンプを起動して主給水を回復した。この際補助給水系の流量調節弁を完全に閉めてはいなかった。このため蒸気発生器には大量の給水が流入し、蒸気発生器水位の急激な上昇及びTaveの急激な低下を招いた。

運転員はこの状態に対応し復水ブースタポンプを停止することにより主給水を停止し、再度高温停止状態への移行操作に入った。

(2) 事象のクロノロジー

表2. 3. 1に「プラントの状況」、「運転員の意図と行動」を中心にまとめたものを示す。

表2. 3. 1からわかるように、この事故事象は人的因子の観点からみると次の3つのフェーズに分けることが出来る。

- ①原子炉トリップ時の初期対応
- ②Taveの低下への対応
- ③主給水ポンプの再起動

以下これらのフェーズについて運転員の振舞いをまとめる。

①原子炉トリップ時の初期対応

これを構成する運転員の判断/行動は以下のものである。

- i) 原子炉トリップの初期診断
- ii) 3台目の高圧注入ポンプの起動
- iii) Shift Supervisorによる事態の診断

i)は、原子炉トリップの前後における運転員の判断を問題とする。事故の最初の徴候はホットウェルポンプが停止した事である。運転員はこのポンプを再起動すれば、給水が回復し通常の運転状態に復旧することを期待してホットウェルポンプを起動した。しかしながら、インターロックのため再起動できなかった。このインターロックを満足させるための操作を行っている内に復水ブースタポンプも「吸込み圧力低」で停止し、給水流量の低下による「原子炉圧力高」信号で原子炉がトリップした。この様に、原子炉トリップまでの運転員の判断/行動は適切であった。原子炉トリップとほぼ同時にICSの電源であるKIインバータがトリップし、なおかつ電源の自動切替にも失敗するが、これらの警報は原子炉トリップにともなう1次系・2次系の警報に埋もれて運転員の注意を引かなかった。KIインバータに対する警報が「インバータに何等かの故障が発生した」事を示すのみで「ICSの電源が喪失する」故障であるかどうかの特定が出来ないものだったのである。また、ICSの電源喪失にともなって中央制御盤上の表示器は予めプログラムされた故障位置を示した。この表示位置が、あるものはフルスケール、あるものは中央位置、あるものはゼロ位置というようになっていたため、混乱した情報を運転員に与えるのみで「計装系の電源が喪失している」ことを直接的に運転員に知らせることが出来なかった。ii)はプラントに発生している事態の理解が十分でない時点で「炉心が冠水している」ことのクレジットを得るために既に起動している2台の高圧注入ポンプに加えて3台目の高圧注入ポンプを起動した判断に対するものである。この判断を行った時点

では運転員は事故の状況を正確には把握しておらず、「原子炉トリップによる1次系の収縮を相殺するためには3台の高圧注入ポンプを起動しておけば十分であろう」という意図の基にこの行動が取られたわけである。TMI事故以降の「炉心の冠水を保つ」訓練と、事故の状況が正確に把握できていなかったことの両者を考え合わせると適切な判断/行動であったと思われる。iii)はShift Supervisorのみが事態の判断を正確に出来たことである。Shift supervisorは事態の把握をするために制御盤上の情報を確認していたがその中で炉心冠水タンクの水位が低下していることに気付いた。更に、Shift Supervisorはこの表示が「蒸気発生器の広域圧力計の表示」及び「原子炉トリップの状況」と矛盾していること及び「過去に同様の表示を経験したことがある」という2つの理由により「ICSの電源が喪失している」という正しい判断を行うことが出来た。

②Taveの低下への対応

ICSの電源回復に伴って制御盤上の計装が機能を回復したが、その中に「蒸気発生器の圧力が低い」という情報と「Taveが低い」という情報があった。運転員がタービンバイパス弁の表示を確認したところ50%開位置に設定されていた。このため、運転員は「タービンバイパス弁からの蒸気流出」により先の事態が引き起こされていると判断しタービンバイパス弁を部分的に閉めた(どの程度まで閉めたのか不明)。ところが実際は「タービンバイパス弁による除熱」のみでなく「給水制御弁がICSの電源回復によりリセットされたため給水流量が大きくなっていった」事によって蒸気発生器での除熱が大きくなっていった事が原因であったためTaveの低下は止まらなかった。このため、運転員はAの主給水ポンプを停止し、なおかつ非常用給水用の弁を閉じた。この状態でTaveの低下がほぼ終了したため、運転員はB蒸気発生器への非常用給水及びタービンバイパス弁を完全には閉めなかった。このため、ゆっくりではあるがTaveは低下傾向を持つことになった。

③主給水ポンプの再起動

②のフェーズが終了した時点で、Shift Supervisorはプラントが安定したと思い込み高温停止状態への移行操作に移った。このため、B蒸気発生器への主給水を確立する目的で復水ブースタポンプを起動した。しかしながら、②で示したようにB蒸気発生器の非常用給水の制御弁が閉められていなかったためB蒸気発生器に多量の給水が流入し、蒸気発生器水位の急上昇とTaveの急低下を招いた。

以上から、この事象では、①及び③の中にヒューマンエラーによるものがあると考えられる。

(3) 人的因子に関する分析

Ocone事象の中で行われた運転員の行動の中でエラーと考えられるものは、

- 1) ICS電源喪失の同定ができなかったエラー(最終的にはできたがかなり遅かった)
- 2) ホットシャットダウンへ移行する中でシステム状態の確認を省略してOTSG-Bへの主給水ポンプを起動したエラー

である。

1) ICS電源喪失の同定ができなかったエラーについての分析

原子炉トリップとほぼ同時にICS電源を給水するKIインバータがトリップし、かつ交流母線への自動切替にも失敗した。これらの情報を示す警報は示されてはいたが原子炉トリップに伴うその他の警報（約200個）が次々と発生し、それらの中に隠れてしまったため、運転員は、ICS電源喪失を同定できなかった。これについて、Rasmussenの分析ガイドによる分析チャートを図2. 3. 2に示す。分析ガイドに従った分析結果をまとめると、次のようになる。このエラーは、異常状態という状況は検知しているものの、ICS電源喪失というシステム状態の同定エラーである。このようなエラーの原因は、主として状況に関する情報が不適切である故に過大な要求となる。ICS電源喪失を示す情報すなわち計器類の指示の組み合わせはこの中に存在していたが、その表示が、あるものは最小、あるものは最大、あるものは中央というような一貫しない混乱した情報を与え人間工学的に不適当な設計だったので、教育・訓練の中で既に与えられ、手順書に載っている情報であったにもかかわらず見落としてしまったというメカニズムである。

このエラーはこの後シフトスーパーバイザ (S.S.) によって解決されるのであるが、以下に示すように、この状況下でICS電源喪失を同定することは非常に難しいことがわかる。すなわち、S.S.は結果的に次の3つの情報からICS電源喪失を同定したものである。

- ① 計器類の特異な組合せの表示が出ており、これは直前のプラントの状態とは関係のない表示であり、この表示に突然なった。
- ② Core Flood Tank の水位が下がっているのを観測した。
- ③ ①、②の発生とほとんど同時にKI inverter アラームが発生したことがアナウンスされた。

そこで、S.S.は考えた。直前の状況から判断すると、②は正しくないはずであり、③は電源喪失を知らせるものである。・・・とすれば、①の指示計の特異な組合せも改めて考えてみるとICS電源喪失を示すものであった。そして、このS.S.は過去に同様の経験をしていることも成功に大きく影響していよう。

2) ホットシャットダウンへ移行する中でシステム状態の確認を省略してOTSG-Bへの主給水ポンプを起動したエラーについての分析

プラントがほぼ安定な状態になったとき、S.S.はホットシャットダウン状態にプラントを移行させる操作を行った。すなわち、復水ブースターポンプを起動して、OTSG-Bへの主給水ポンプを起動した。しかし、これ以前に冷却率を抑えるために補助給水を絞る操作を行ったとき、流量調節弁を完全閉にはしていなかったにもかかわらず、これを確認せずに主給水ポンプを起動したため、OTSG-Bに大量の給水が入り、水位の上昇及び水温の低下を招いてしまった。このエラーについてのRasmussenの分析ガイドによる分析チャートを図2. 3. 3に示す。エラーの形態としては、Hot shutdownへ移行するためのタスクの中の手順のミスである。この原因としては、タスクの手順が手順書に従ったものなので、過大な要求とも言えず通常の人間の変動性であろう。そのメカニズムは、早くHot shutdownに移行したいという時間的あせり、及び、補助給水ポンプ等の表示パネルが復水ブースターポンプ、主給水ポンプ制御パネルから十分

に離れていたという設計上の問題（欠陥とまでは言えないのでは？）、さらにこのタスクに関する教育・訓練が不十分ということが影響し、要求に応じて実行すれば良いなじみのタスクを実行するときの手順の選択の誤りということになる。

表 2.3.1 Oconee 事象における運転員のふるまい (1/2)

時刻	プラントの状態	運転員の意図 (何をしようと思ったか)	運転員の行動/判断 (何をしたか)	運転員に影響したと思われる因子
15:16	・主給水ポンプのサーキュレータ圧力警報 ・復水器ホットウェルポンプ警報 ・ホットウェルポンプ警報	通常の状態に戻すためにホットウェルポンプを復旧しよう	ホットウェルポンプのスイッチを入れる	
15:16:10	ホットウェルポンプは起動しない	インターロックがかかっているのでそれを外せばポンプは起動する	放出弁を閉じる	
15:16:15	ICSがタービン/原子炉出力をランバックさせる	原子炉トリップに伴う操作を行う	1次系/2次系の監視を行う	
15:16:57	・原子炉トリップ警報 ・タービントリップ警報	事故の本質となる手がかりを探す	警報を確認し、計装系の監視を行う	
15:17:15	約200の警報が発生	原子炉トリップによる1次冷却材の収縮を相殺し、炉心の冠水を確保する	高圧注入ポンプHPI-Cを起動する	HPI-A,Bは既に起動している
15:17:25	ICSインバータ警報			インバータに問題があることは解ったが、どこに問題があるのかは解らない
15:18	炉心冠水タンクの水位が低下する表示がある		原子炉トリップの状況/蒸気発生器の広域圧力計の指示に矛盾している	
15:19	計装計の表示が設計上の「故障位置」にある		計装系の電源が喪失している	当直長(SS)は以前に似た状況を経験したことがある

表 2.3.1 Ocone 事象における運転員のふるまい (2/2)

時刻	プラントの状態	運転員の意図 (何をしようと思ったか)	運転員の行動/判断 (何をしたか)	運転員に影響したと思われる因子
15:21 :42	計装系が作動を始める		インバータの電源を回復するために運転員を派遣	
15:22	Taveが低下している	プラント状況の決定	計装系の監視	
15:23	Taveの低下が続く	圧力低下/冷却率を抑えなければならぬ	タービンバイパス弁を部分的に閉める	
15:24	Taveの低下が続く	冷却率を抑えなければならぬ	A給水ポンプを停止	
15:25	Taveの低下が続く	蒸気発生器への給水を減少させなければならぬ	非常用給水を絞る	
15:25 :45		除熱源を探す	非常用給水弁を閉める	
15:26	蒸気発生器の水位が急激に上昇すると共に Taveが急激に低下する	高温停止状態へ移行しよう	急速な冷却は止まった 主給水を回復	
15:27		蒸気発生器Bへの給水をとめ プラントを高温停止状態へ移行させよう	復水ブーストポンプを停止 ・主給水の回復 ・加圧器水位/圧力の回復	

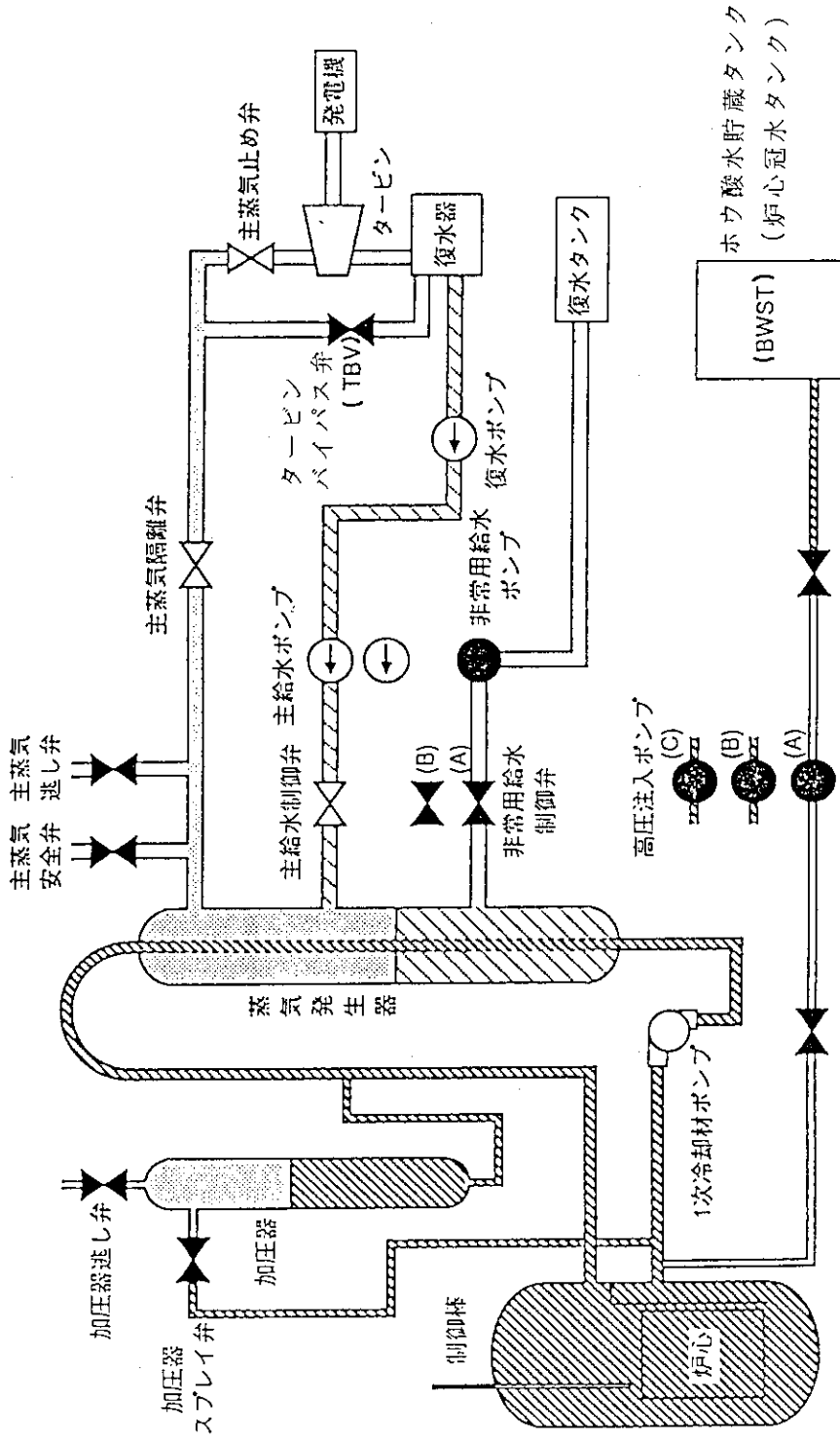
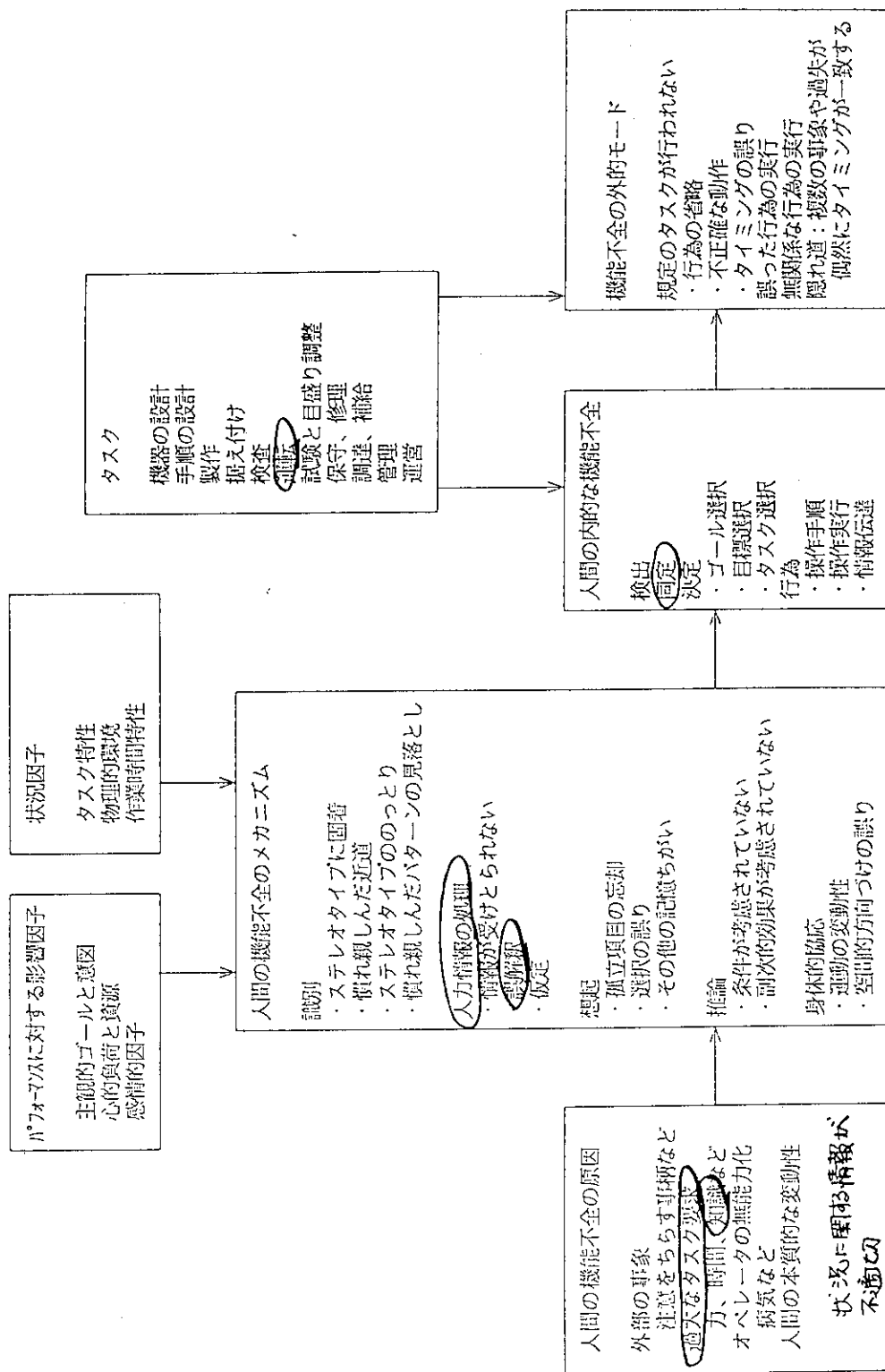
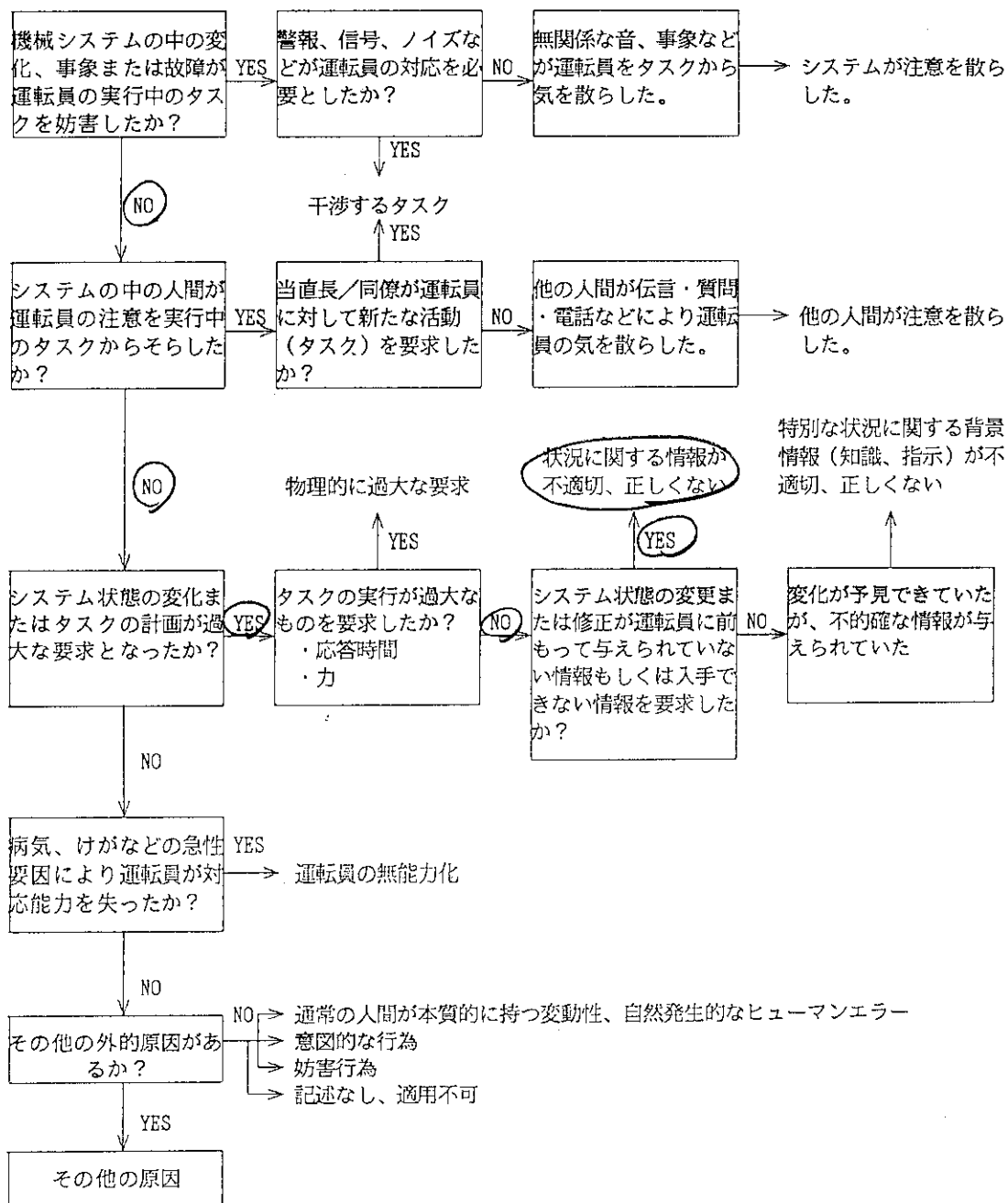


図 2.3.1 Ocone プラント 概念図



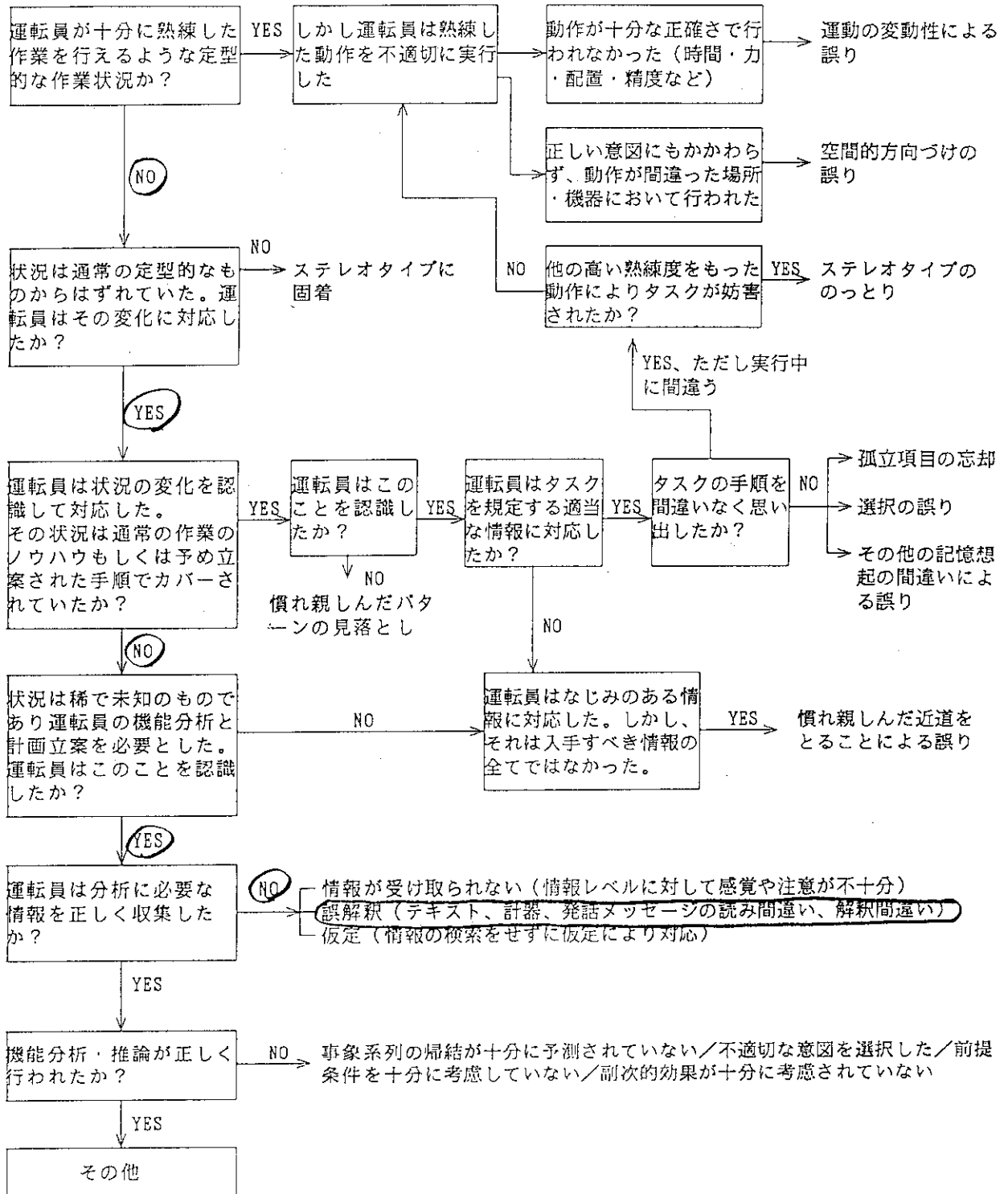
Rasmussenの提唱する人間の機能不全を含む事象の既述と分析のための多面的分類法

図 2.3.2 Rasmussenの手法によるOcoone事象の分析チャート(1/6)
(ICS電源喪失の同定)



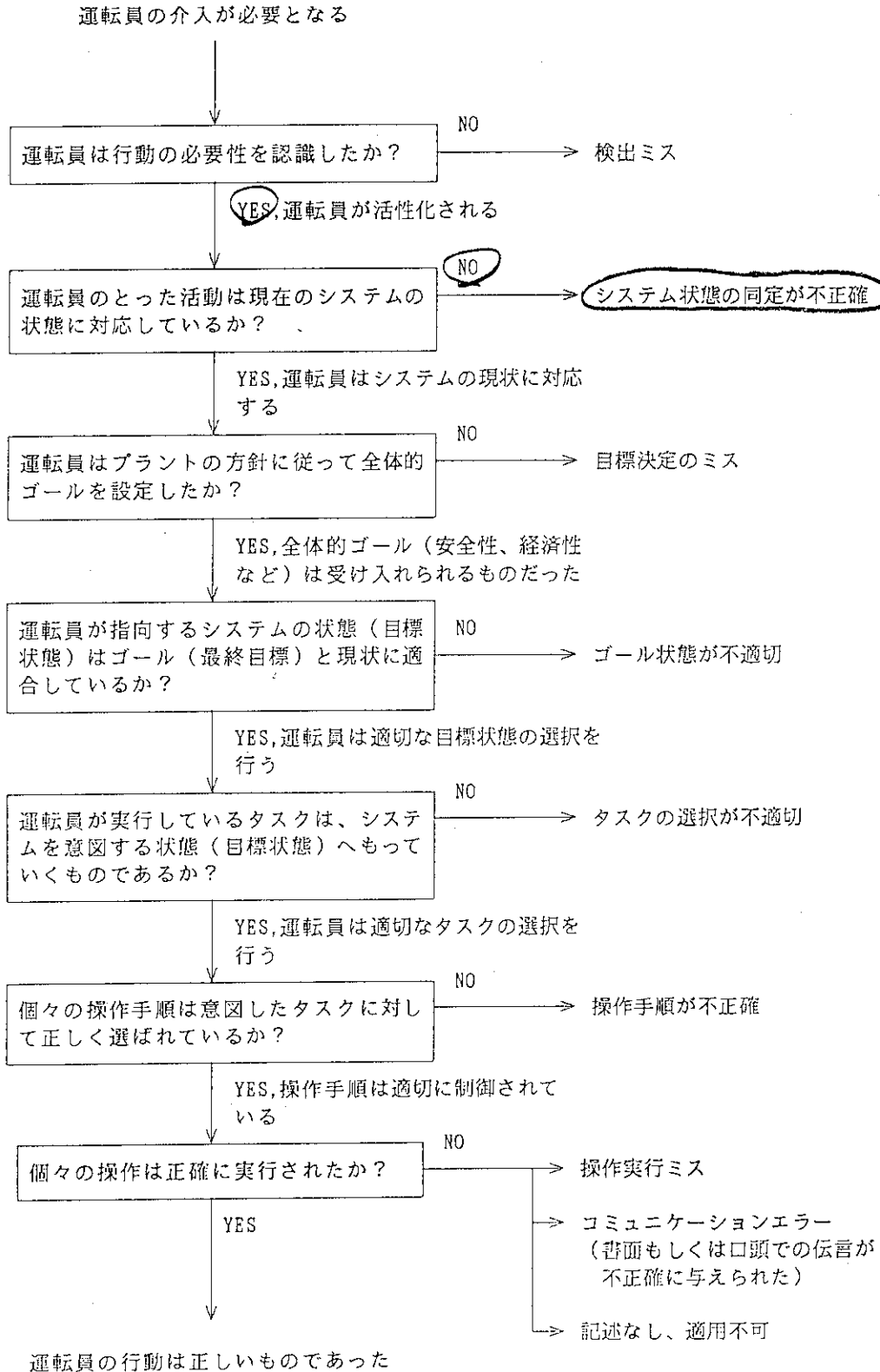
人間の機能不全の原因に対する分析ガイド

図 2.3.2 Rasmussen の手法による Ocone 事象の分析チャート (2/6) (ICS 電源喪失の同定)



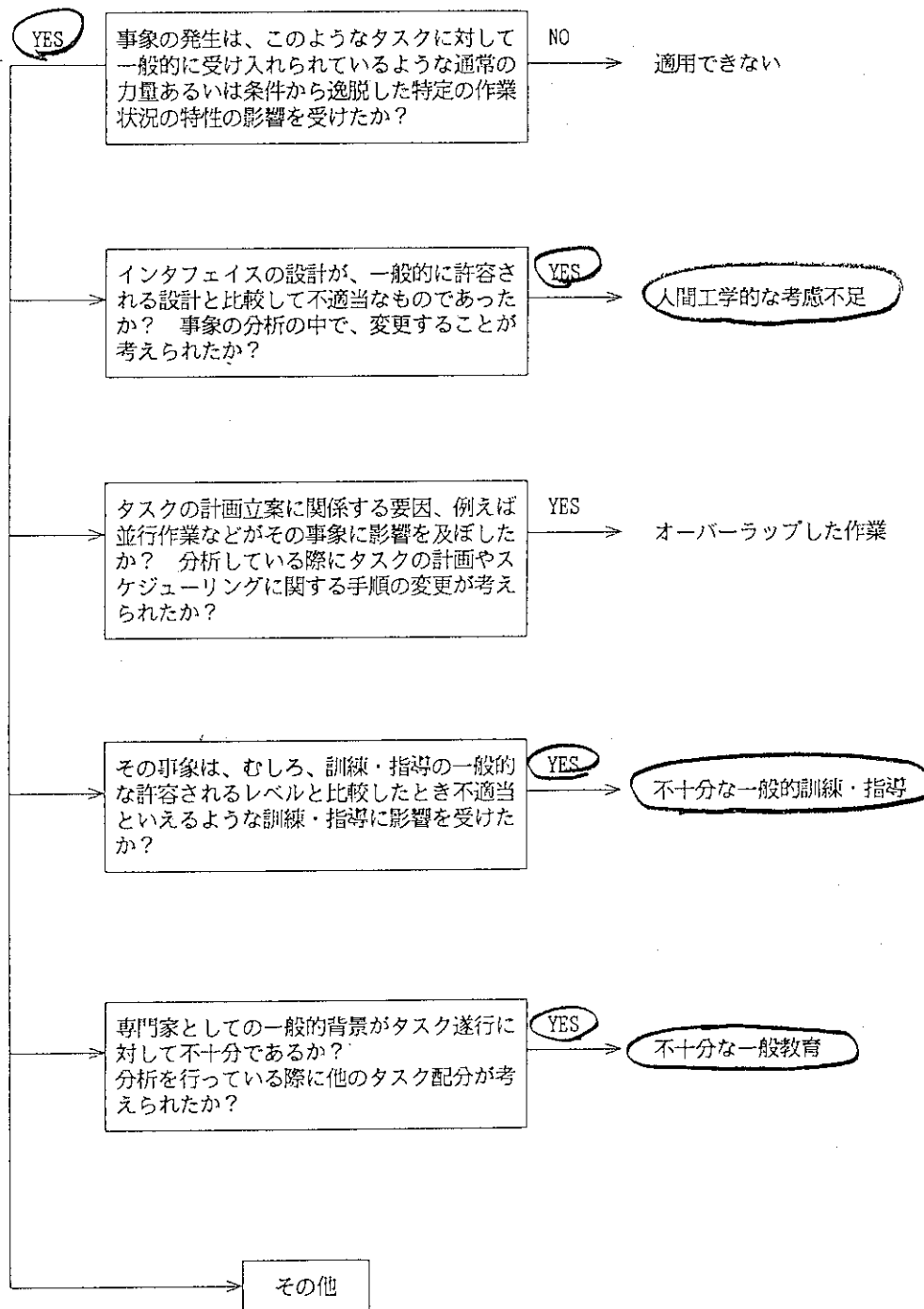
人間の機能不全のメカニズムの分析ガイド

図 2.3.2 Rasmussen の手法による Ocone 事象の分析チャート (3/6)
(ICS 電源喪失の同定)



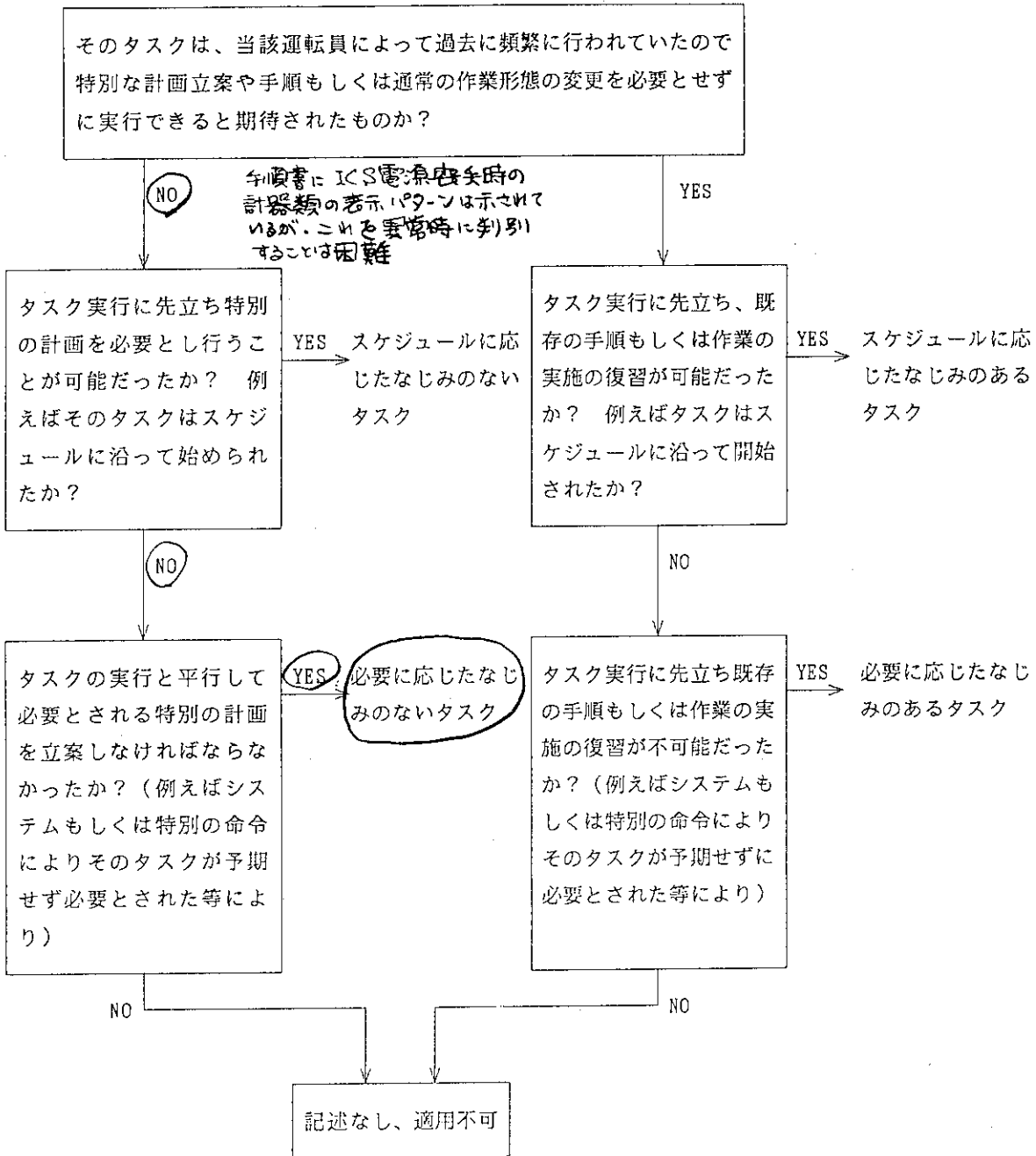
人間の内的な機能不全の分析ガイド

図 2.3.2 Rasmussen の手法による Ocone 事象の分析チャート (4/6)
(ICS 電源喪失の同定)



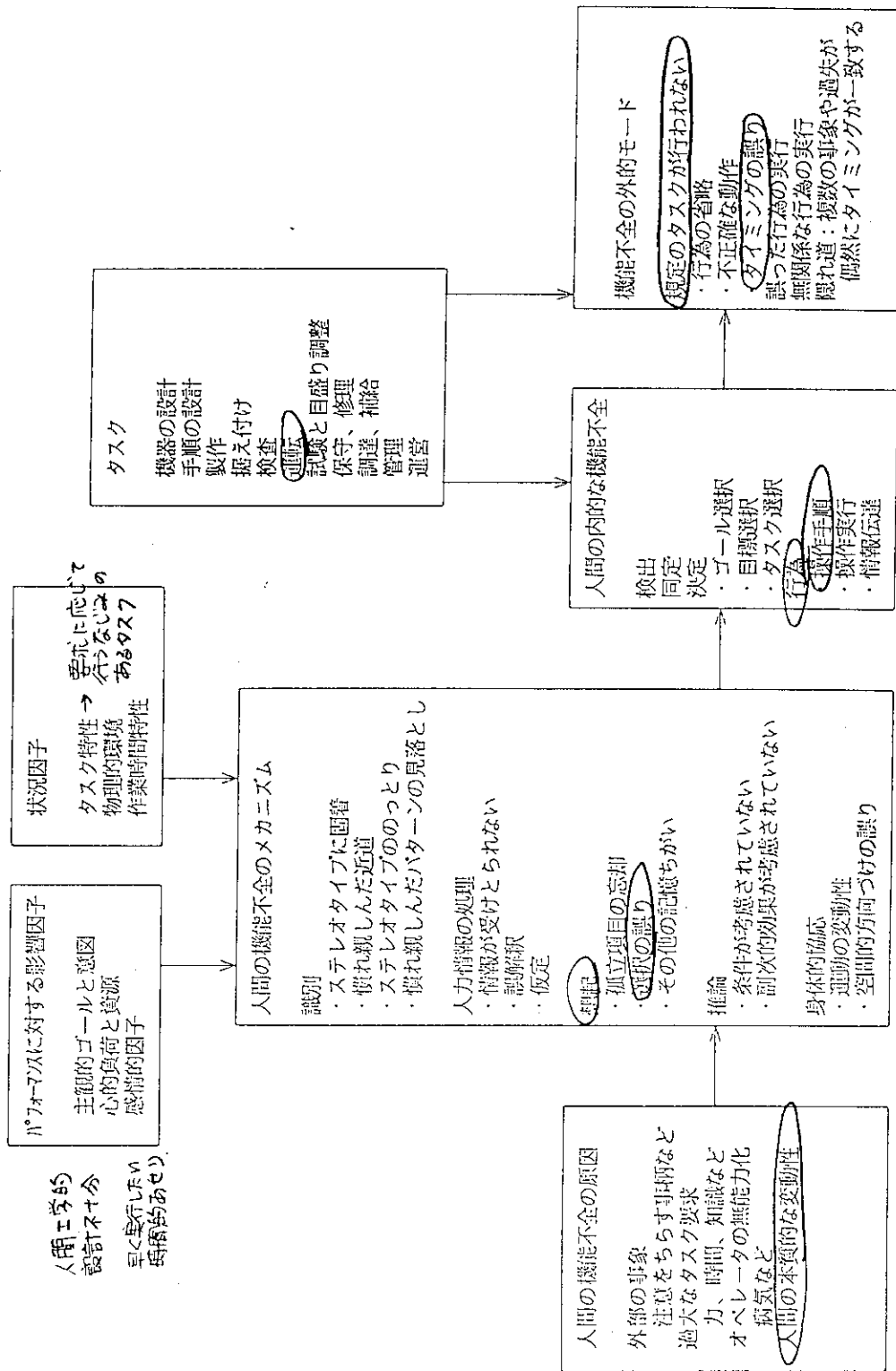
パフォーマンスに対する影響因子のうち心的負荷と資源に対する分析ガイド

図 2.3.2 Rasmussen の手法による Ocone 事象の分析チャート (5/6)
(ICS 電源喪失の同定)



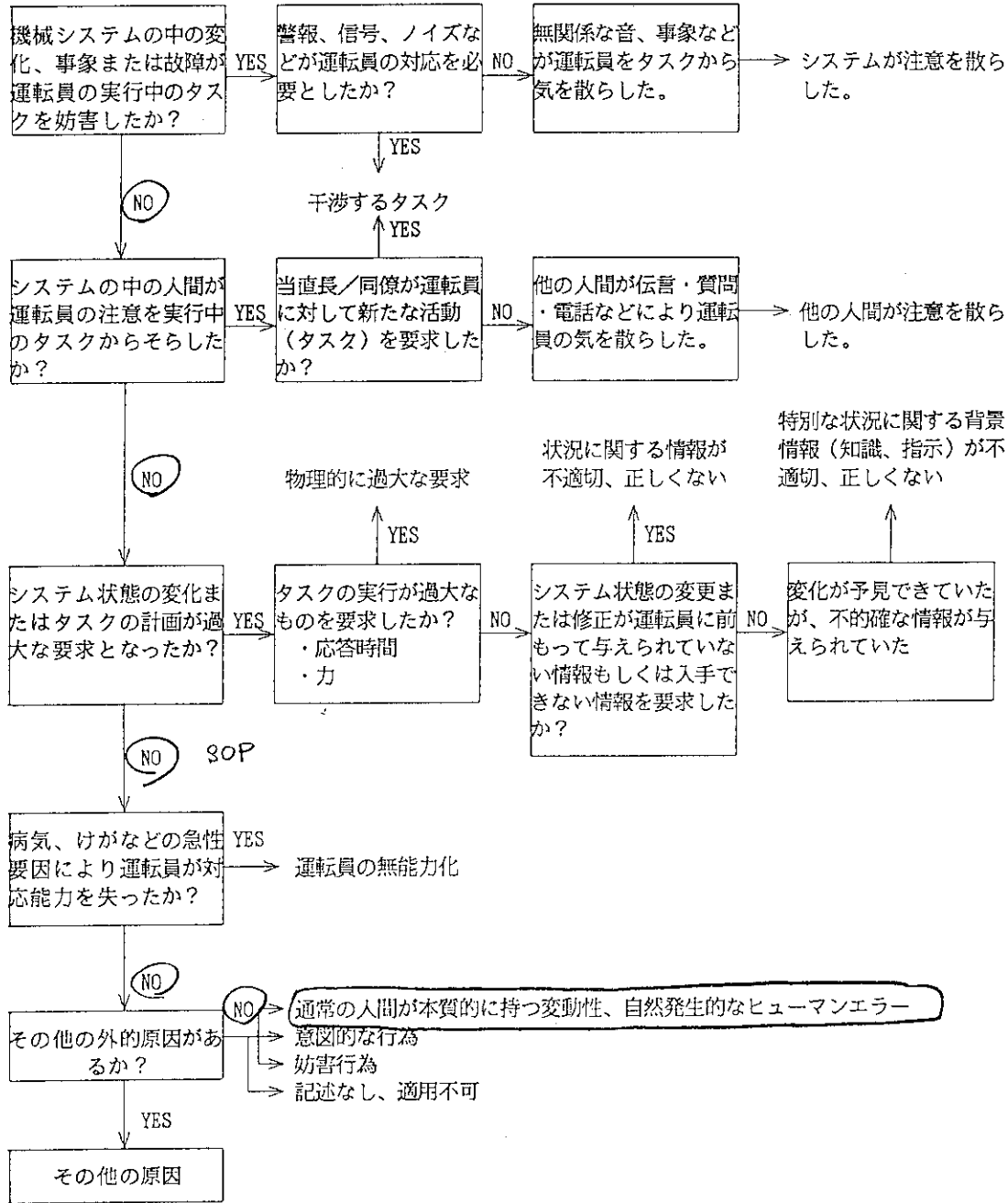
状況因子のうちタスク特性 (Preparedness) に関する分析ガイド

図 2.3.2 Rasmussen の手法による Oconee 事象の分析チャート (6/6)
(ICS 電源喪失の同定)



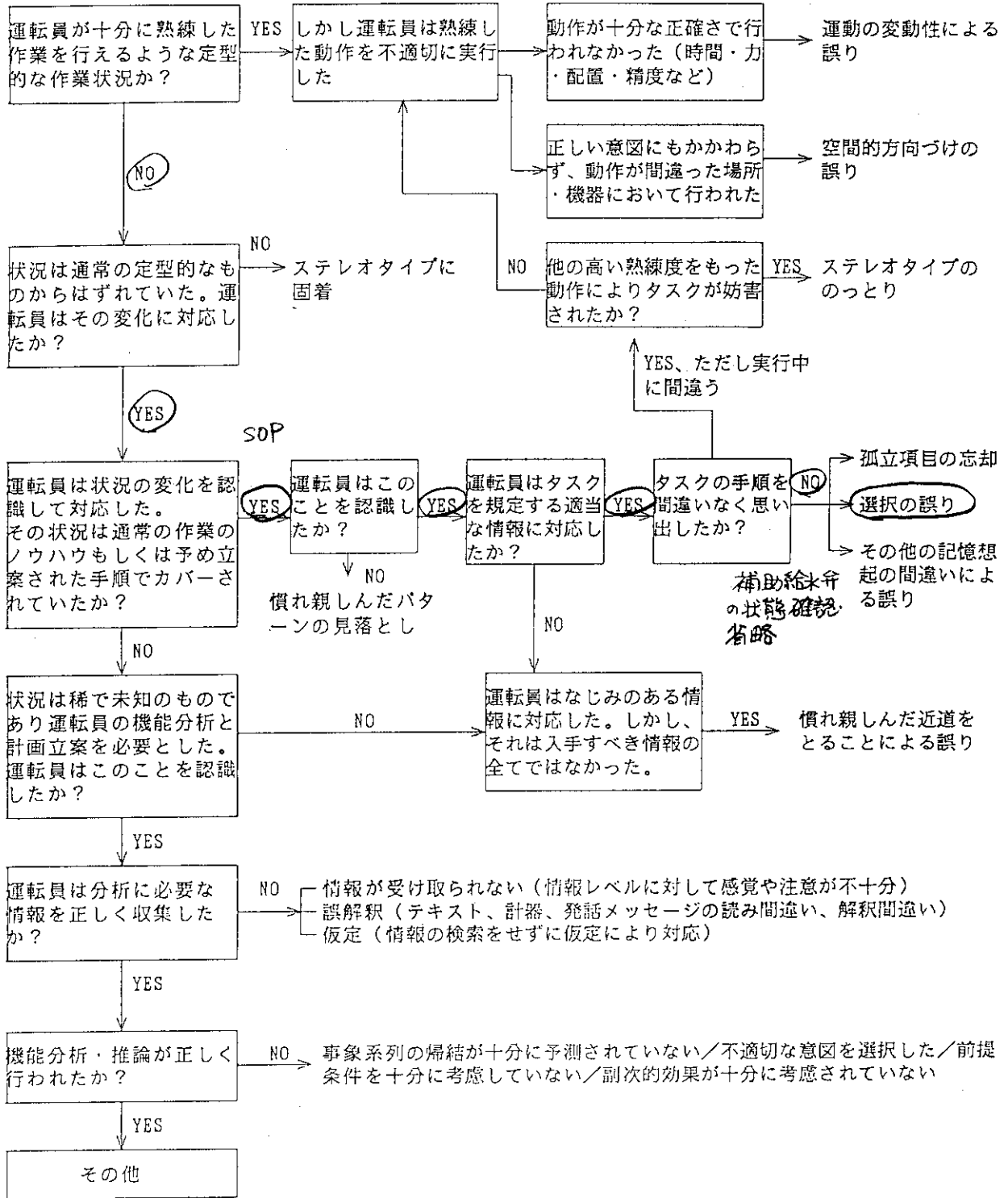
Rasmussenの提唱する人間の機能不全を含む事象の既述と分析のための多面的分類法

図 2.3.3 Rasmussenの手法によるOcone事象の分析チャート(1/6)
(主給水ポンプのリスタート)



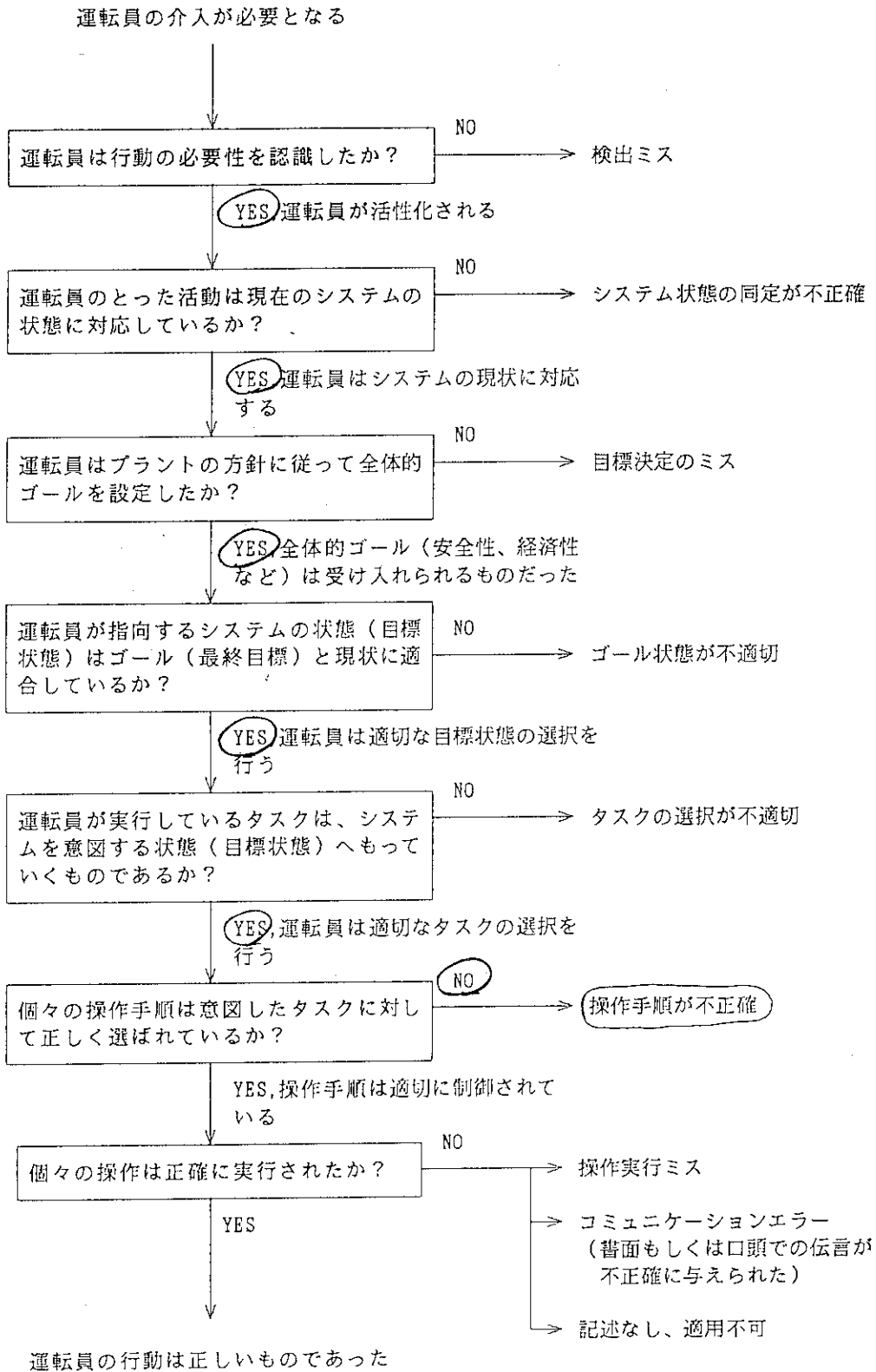
人間の機能不全の原因に対する分析ガイド

図 2.3.3 Rasmussen の手法による Ocone 事象の分析チャート (2/6)
(主給水ポンプのリスタート)



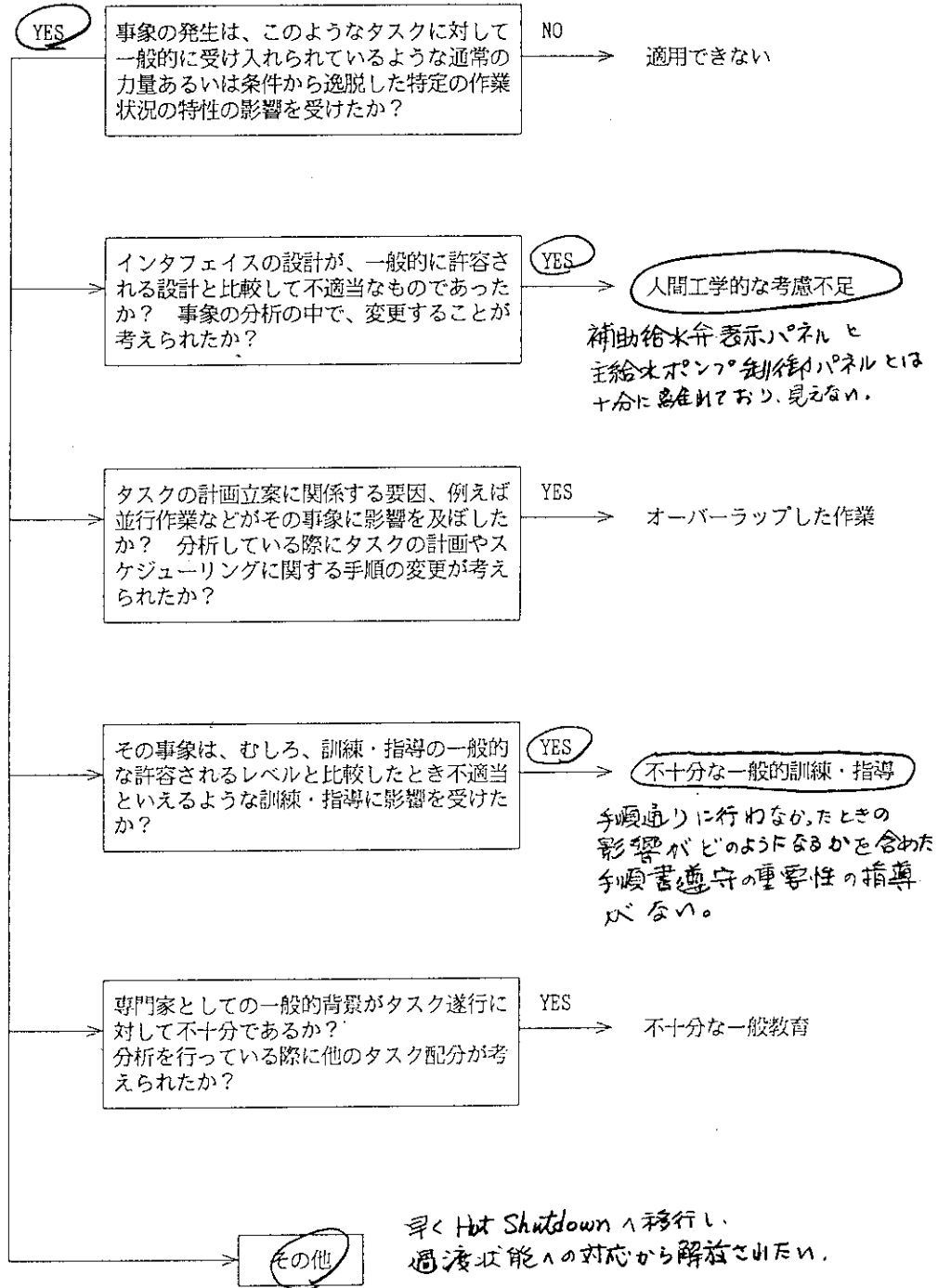
人間の機能不全のメカニズムの分析ガイド

図 2.3.3 Rasmussen の手法による Ocone 事象の分析チャート (3/6)
(主給水ポンプのリスタート)



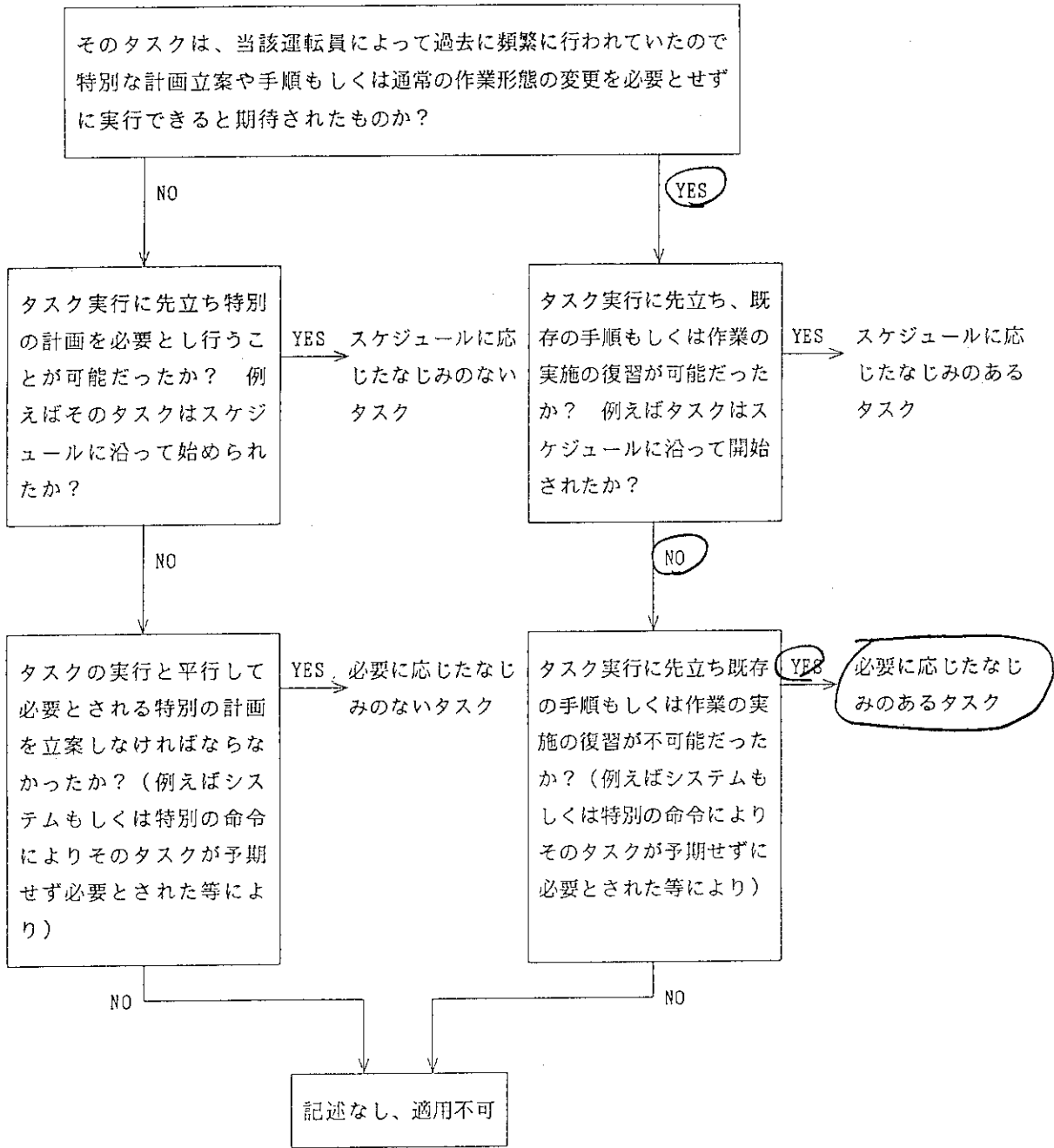
人間の内的な機能不全の分析ガイド

図 2.3.3 Rasmussen の手法による Ocone 事象の分析チャート (4/6)
(主給水ポンプのリスタート)



パフォーマンスに対する影響因子のうち心的負荷と資源に対する分析ガイド

図 2.3.3 Rasmussen の手法による Oconee 事象の分析チャート (5/6)
(主給水ポンプのリスタート)



状況因子のうちタスク特性 (Preparedness) に関する分析ガイド

図 2.3.3 Rasmussen の手法による Ocone 事象の分析チャート (6/6)
(主給水ポンプのリスタート)

2. 4 Davis Besse 事象

Davis Besse 炉における1985年6月9日の事象について、参考文献(2)に記載の情報をもとに、以下に概要とクロノロジーをまとめる。

Davis Besse は、B & W社製のPWRである。システムの概念を図2. 4. 1に示す。Davis Besse 炉の商業運転の開始は1978年7月である。

(1) 事象の概要

本事象は、2台中1台の主給水ポンプの停止が起因となり原子炉がトリップし、これに機器の故障及び運転員の誤操作/誤判断が重畳して蒸気発生器がドライアウトした事象である。

事故は、1/2のタービン駆動主給水ポンプが“overspeed”により停止したことが起因となった。通常はこの時点でB&W特有の制御系であるICS(Integrated Control Systems)が作動し2台目のタービン駆動主給水ポンプの流量を増加させるはずであったが、2台目のポンプが「手動モード」に設定されていたためICSが働かず、したがって給水流量の低下により「原子炉圧力高」で原子炉がトリップした。

原子炉トリップに伴ってタービンがトリップし主蒸気止め弁が閉止されたが、この止め弁の閉止により発生した圧力波をプラントの制御系が受信し「蒸気発生器水位低」の誤信号を発信した。そして、この信号に応答して主蒸気隔離弁が自動的に閉止された。Davis Besseでは主給水ポンプにタービン駆動のものを使用しており、このポンプを駆動するための蒸気を主蒸気隔離弁の下流から取っていたため、主蒸気隔離弁の閉止にともなって「手動モード」で運転中の主給水ポンプまでも停止してしまった。これにより、蒸気発生器への全ての主給水が喪失してしまった。

ここで、運転員は「蒸気発生器の水位が低下し補助給水系の自動起動が目前に迫っている」という判断の基、自動起動に先だてて補助給水系の起動ボタン(パネル上、上から4段目の2個の「SG水位低」というラベル付き)を押しに行った。しかしながら、間違ったボタン(パネル上、上から2段目の2個の「SG圧力低」というラベル付き)を押したため意図とは全く逆に補助給水系を隔離してしまった。運転員は、この誤操作に気付き回復操作を行ったが補助給水系の機器の故障が重なったため回復できなかった。この時点で、蒸気発生器への全ての給水が喪失した。

全給水喪失によりプラントは崩壊熱の除去機能が低下し1次系の温度・圧力の上昇が大きくなった。この時点で、運転員は中央制御室内では事態の回復が出来ないため、給水を確保するために、

- ・補助給水ポンプの復旧のためにEquipment Operatorを派遣
- ・給水系の中で唯一電動で作動する起動用補助給水ポンプを供用に戻す

という決定を行い、各機器が設置されている現場で復旧作業を行った。

この復旧期間中に蒸気発生器がドライアウト状態となった。しかしながら、中央制御室内の表示(蒸気発生器の広域水位計及び圧力計)がわずかの水位(8インチ/200インチ)を読み取れるものではなかったため運転員は状況の認識が正しく出来ず、したがって手順書に記載された一次系に高圧注入ポンプで注入し、加圧器逃し弁の開閉を繰り返して蒸気を放出することにより一次系の除熱を行う、いわゆる“Feed-and-Bleed”操作を行

わなかった。一方、補助給水系の復旧にあたっていたEquipment Operatorは未経験の機器の操作であったため復旧に手間取った。更に、1次系の圧力上昇に伴って「加圧器逃し弁」が3度作動し、3度目に部分的に開固着したが運転員はそのことに気付かなかった。

この間に、起動用補助給水ポンプが復旧し蒸気発生器への給水が始まった。また、これに引き続いて補助給水系が復旧したため、1次系の温度・圧力上昇はとまり加圧器逃し弁からの1次冷却材の流出という事態は避けることが出来た。

(2) 事象のクロノロジー

表2. 4. 1に事故の詳細なプラント応答とそれに対応する運転員の振舞いをまとめたものを示す。表2. 4. 1からわかるように、この事故事象は人的因子の観点からみると次の6つのフェーズに分けることが出来る。

- ①初期診断
- ②補助給水系の起動
- ③全給水喪失時の対応
- ④蒸気発生器がドライアウトした時の対応
- ⑤補助給水系の復旧
- ⑥加圧器逃し弁の開固着

以下、この5つのフェーズに従って運転員の振舞いをまとめる。

①初期診断

ここでは、原子炉トリップに引き続いて発生した主蒸気隔離弁の閉止に対する対応が重要である。

主蒸気隔離弁が閉まっていることは、Shift Supervisor及びSecondary-Side Reactor Operatorによりほぼ同時に、かつ独立に見つけられている。Shift Supervisorは主蒸気安全弁が原子炉トリップ後何度も開閉する音を基に経験から異常があるのではと推定し制御盤を見渡しているときに、またSecondary-Side Reactor Operatorは主給水ポンプの回転数が低下していることから推定してこの事象を発見している。この様に、運転クルー内での役割分担に沿った形で事象が複眼的に捉えられることにより原因が特定された。

しかしながら、「主蒸気隔離弁が何故閉まったか」については運転員は何も分からなかった。これに関しては、「運転員は制御系(SFRCS)の作動によるものではないか」という正しい推定の下、警報を見たにもかかわらず、その時点では警報が自動的に解除されていたためである。

②補助給水系の起動

ここでは、次の3つの段階を考えなければならない。

- i) 補助給水系を手動で起動するという判断
- ii) 起動ボタンの操作
- iii) 回復操作

i)は、「何故自動で起動する制御系を手動で起動しようとしたか」ということである。このプラント（一般的に米国の電力会社）では「自動で起動することが明白な制御系は

プラントへの影響を小さくするために手動で起動するように」という訓練が行われていた。運転員は、この訓練を基にして「蒸気発生器の水位があまり下がらないうちに補助給水系を起動させプラントの回復を早くしよう」という意図のもと、この判断をくださったわけである。ii)はi)の判断をうけてボタンを操作する段階である。iii)の回復操作ではSecondary-Side Reactor Operatorの誤操作をどの様な形で発見できたかということである。本事象では、Shift Supervisorが制御盤上の情報から、またAssistant Shift Supervisorが手順書のチェックからというように独立にエラーの発見を行っている。このように①と同じく役割分担に沿った形で正しい判断が下されている。

③全給水喪失時の対応

ここでは、「制御室では何もできない」という状況で下した

i)補助給水ポンプの復旧のためにEquipment Operatorを派遣

ii)給水系の中で唯一電動で作動する起動用補助給水ポンプを供用に戻すという判断のうちii)の判断が重要となる。この判断により「停止した補助給水系を復旧する」というノーマルな復旧操作と平行して「起動用補助給水ポンプを供用に戻す」という操作が行われたため、Equipment Operatorの復旧操作の遅れをカバーすることが出来た。プラントの系統構成に関する正しい知識による正しい判断が下されたものと思われる。

④蒸気発生器がドライアウトした時の対応

ここでは、運転員に対するクリティカルなパラメータの表示が問題となる。蒸気発生器がドライアウトしているという基準は、手順書では

- ・圧力が960psig以下に下がり、かつ下がり続けている
- ・水位が8インチ以下になる

ことである。しかしながら、制御室内には圧力のトレンドレコーダがないため圧力が960psig以下になっても、それが「スパイク状に下がった」のか「継続的に低下している」結果なのか判断が出来ない。また、水位計も0-250インチというスケールであったため8インチを読むことは実質的に出来ない状況にあった。更に、このような情報を提供する支援システムとしてTMI以降導入されたSPDS(安全パラメータ表示システム)も以前から故障で使用できない状態だった。以上のような原因により運転員は蒸気発生器がドライアウトしている状況を認識できず、したがって“Feed-and-Bleed”操作も行わなかった。

⑤補助給水系の復旧

ここでは、つぎの2つのエラーにより復旧操作が遅れたことが重要となる。

i)補助給水ポンプの復旧手順を間違えたこと

ii)トリップスロットル弁を開けられなかったこと

正しい手順に従えば、補助給水ポンプの復旧操作は

a)overspeed Tripを解除する

b)トリップスロットル弁を開ける

という手順で行われるものである。しかしながら、2人のうち1人のEquipment Operatorはこの手順を逆に行った。また、トリップスロットル弁を開ける際にも弁両端の差圧

のために大きな力が必要である場面に直面して無理に力を入れようとしなかった。

⑥ 加圧器逃し弁の開固着

Primary-Side Reactor Operatorは加圧器逃し弁の開止に関して、制御盤上の情報及び加圧器水位が安定していることからシミュレータによる訓練を基に「弁は閉止した」と判断した。しかしながら、制御盤上の情報は弁の位置を直接示したものではなかったため、部分的な開固着には気付かなかった。弁の開閉状態を見るためにはTMI以降設置されたAcoustic-Monitorがあったが、この表示器が制御盤から7ft離れており、かつ表示器そのものが小さかったため制御盤からは見えなかった。

以上から、この事象では、②、④、⑤、⑥の中にヒューマンエラーによるものがあると考えられる。

(3) 人的因子に関する分析

Davis Besse事象の中での運転員の行動でエラーと考えられるものは、

- 1) 補助給水系起動のエラー
- 2) SGドライアウト時にFeed&Bleedを行わなかったエラー
- 3) 補助給水系復旧操作におけるエラー
- 4) 加圧器逃し弁開固着に気付かなかったエラー

である。

1) 補助給水系起動のエラーについての分析

SGの水位が低下し、補助給水系の自動起動が目前に迫っているのに、自動起動に先立って手動で補助給水系を起動する操作を行った。しかし、間違っただボタンを押したため、補助給水系を起動とは全く反対に隔離してしまった。運転員はこの誤りに気付いて回復操作を行ったが、機器の故障が重なり、回復できず、SGへの給水は喪失してしまった。このエラーについてRasmussenの分析ガイドに従った分析チャートを図2.4.2に示す。この分析結果をまとめると次のようになる。誤った行為の実行（間違っただ機器に対する動作の実行）エラーの表れ方であり、これは、操作の実行ミスである。原因としては、通常の間人が持つ変動性によるものである。そのメカニズムを分析すると、安全注入系の自動起動が直後に生じる場合は先立って手動で起動するというノウハウがあり、これに従って操作を実行したが、操作すべきボタンの位置を誤ってしまった（空間的方向付けの誤り）。これに与えた影響因子としては、この操作がなじみのある操作ではあったが、特別の要求により予期せず必要となったので復習する暇がなかったという状況因子と、補助給水系の手動操作パネルがバックパネルのしかも膝の高さのところであり、そこには安全系を操作するボタンが集中しており、ボタンの表示としては、Low level, Low pressure, Low flow等システムの状態を示すものになっておりボタン操作の機能を明確に記述しておらず、操作者の意図と対応しない。また、Lowという単語が多かったという操作するインタフェースとして人間工学的

に見るとエラーを起こしやすい不備なものであった影響因子がある。

2) SGドライアウト時に Feed & Bleed を行わなかったエラーについての分析

補助給水ポンプの回復操作中にSGがドライアウトしたが中央制御室の運転員は状況の認識が正しく行えなかったため、手順書に載っている“Feed and Bleed”操作を行わなかった。このエラーについてRasmussenの分析ガイドに従った分析チャートを図2.4.3に示す。分析結果をまとめると次のようになる。SGのドライアウトに対して必要なFeed and Bleed操作を行わなかったタスクのオMISSIONという形で表れたエラーであるが、その内的機能としては、SGの水位の状態同定が不正確であったことになる。原因としては、SGの水位の表示がドライアウトを判断するには不適切であった（フルスケール250インチの中から8インチを読み取らなければならない、SPDSが働いていない）ことが挙げられる。そのメカニズムは、運転員がSG水位の情報を正しく収集しようとしたが、同様の不適切な表示レベルのため不可能であったということになる。これに与えた影響因子としては、SPDSが働いていない状況では、SGのドライアウトレベルを計器から読み取れという予期されず要求が生じたなじみのないタスクであったという状況因子と、SGの水位計の人間工学的に見ると設計不備という行動影響因子が指摘できる。

3) 補助給水系復旧操作におけるエラーについての分析

ここで行うべき補助給水系復旧操作は

- i) Overspeed Tripを解除する。
- ii) トリップスロットル弁を開ける

という手順のものである。この操作を行う場所は2カ所あり、その各々に機器運転員が派遣された。そして、1人はこの手順を間違え、もう1人はトリップスロットル弁を開けられなかった。したがってここには2つのエラーがあるので、手順を間違えたエラーを①、後者を②とする。

まず①について分析する。これは、機器操作員Aが上記手順を間違えNo.1の補助給水ポンプのオーバースピードによるトリップを解除せずにトリップスロットル弁を開けたエラーである。このエラーのRasmussenの分析ガイドに従った分析チャートを図2.4.4に示す。分析結果をまとめると、このエラーは不正確な動作として表れ、その内的機能不全としては、操作手順のミスである。このエラーの原因としては、手順は訓練を受けていたので、本質的な変動性によるものとされるが、そのメカニズムは訓練不十分（経験不足）及び異常状態がこの操作を要求したという心理的なストレスが影響した作業手順の選択の誤りである。

次に②について分析する。機器操作員Bは操作手順は誤らず、トリップのリセットを行ったが、トリップスロットル弁を開けるときの、力を入れても開けることができず、それ以上力を入れると損傷することを恐れて開けなかったというエラーである。このエラーのRasmussenの分析ガイドに従った分析チャートを図2.4.5に示す。分析結果をまとめると次のようになる。このエラーは操作員Aとは手順と力加減という違いはあるものの不正確な動作という表れ方になり、その内的機能不全としては、操作の実行を止めてしまった実行ミスである。このエラーの原因としては、訓練のときの力

よりも大きい力を要求しているので、過大なタスク要求によるものとなる。そのメカニズムは、訓練の不十分（状況、力について）、また、これによる不慣れな操作状況という影響因子に影響された手作業の変動性によるものである。ここで強調しておきたいのは、アシスタントS.S.及び経験豊富な機器操作員が上記2つのエラーについては、リカバーしたので行うべき操作の遅れによる影響は出たものの最悪の状況に至ることが避けられたということである。

4) 加圧器逃し弁開固着に気付かなかったエラーについての分析

運転員が事態の回復を図っている中で、加圧器逃し弁が3回作動し、3回目に開固着してしまった。一次系の運転員は、制御盤上の情報及び加圧器水位の安定から、訓練での経験を基に加圧器逃し弁は閉じたと判断し、開固着に気付かなかった。制御盤上の情報は「弁の開機能が作動した」というものであり、部分的開固着については表示できない。これを検知するには、Acoustic-Monitorが有効であるが、運転員のいるところから7ft離れており、表示も小さかった。このエラーについてRasmussenの分析ガイドに従った分析チャートを図2.4.6に示す。分析結果をまとめると次のようになる。加圧器逃し弁開固着の検知ミスという内的機能不全は外的モードには表れない。この検知ミスの原因は、状況を検知できる情報が見えにくいところにあるので、過大なタスク要求ということになる。そのメカニズムは、情報が入手できず、誤った仮定で推論してしまったということになり、これには、加圧器逃し弁の開閉度の表示が運転員から7ft離れて、しかも小さいという人間工学的に見て不備な設計によるインタフェースという行動影響因子、突然の要求に応じて即座に実行しなければならないなじみのないタスクという状況因子が影響している。

表 2.4.1 Davis Besse 事象における運転員のふるまい (1/5)

時刻	システムの状態	Shift Supervisor	Assistant Shift Supervisor	Primary-Side Reactor Operator	Secondary-Side Reactor Operator	Equipment Operator
1:35	<p>1. 主給水ポンプ停止。2. 2号は手動にセットされてきたためICSからの流量増加要求に反応しない。</p> <p>ICSが給水流量の低下に伴って原子炉の出力を下げる。</p>	<p>1. 主給水ポンプが停止する音をオフィスで聞く。</p> <p>2. 制御室へ向かう</p>	<p>1. 食事から戻り、制御室の確認中に1号主給水ポンプが停止し、給水流量が低下していることに気づく。</p>	<p>この時点では加圧器スプレイを開けていた（給水流量の低下に伴うヒートアップによる圧力上昇を抑えるため）</p> <p>200psigの「圧力高」原子炉トリップ23定時点まで圧力が上昇しないようにスプレイ弁を開状態に維持する。</p>	<p>1. 主給水ポンプが停止する音をキッチンで聞く。</p> <p>2. キッチンから走って戻る</p> <p>3. 主給水ポンプの停止に伴う流量の低下を調うために2号ポンプの回転数を上げる。</p>	<p>（Administrative Assistantも自分のオフィスで停止音を聞く）</p> <p>↓</p> <p>（制御室へ向かう）</p>
1:35:01						
1:35:21						
1:35:30	<p>「圧力高」により原子炉トリップ。この時の出力は80%。</p> <p>1. 主蒸気止め弁閉止。タービントリップ</p> <p>2. 主蒸気安全弁が開く</p>	<p>Secondary-Side Operator と共に蒸気発生器の水位を監視</p> <p>↓</p> <p>全て確認のように見えた</p>	<p>緊急運転手順書（厚さ2インチ、タブ付）を開く</p> <p>↓</p> <p>すぐに実施しなければならない行動を認める</p> <p>↑</p> <p>Reactor Operatorがうなずく</p>	<p>運転員は、原子炉トリップを随うだけのことをした。</p> <p>↓</p> <p>1. 主蒸気止め弁の閉止音で原子炉トリップを知る</p> <p>2. 主蒸気安全弁の開く音も聞く</p> <p>3. 全ては設計通りであるため、蒸気発生器の水位を監視する</p>	<p>主蒸気止め弁の閉止音を聞き、原子炉トリップを知る</p> <p>↓</p> <p>2人が制御室に向かう</p>	<p>（Administrative AssistantはSTAに連絡した後、Operatorの発言を聞き取る。但し、遠すぎて聞き取れない部分があった）</p> <p>↓</p> <p>（STAは連絡があった時は寝ていた。1985年1月にSTAにSTAになって初めて原子炉トリップであったために割置きみ）</p>
1:35:31	<p>1. SFRCSが「low-level」の警報を発生</p> <p>2. 主蒸気隔離弁が開く</p>					
1:35:31	<p>SFRCS信号が自動的に解除される</p>					
1:35:36	<p>1. 2号主蒸気隔離弁閉止</p> <p>2. 1号主蒸気隔離弁閉止</p> <p>↓</p> <p>主蒸気隔離弁が閉止したため、2号主給水ポンプの駆動力が失われる。但し、主蒸気管および気水分離器の再熱ヒータからの蒸気により4分半は作動していた</p>	<p>主蒸気安全弁が再度開いた音を聞き、23線から異常があるのではと思う。</p> <p>↓</p> <p>手掛かりを見つけたために制御室を見直す</p> <p>↓</p> <p>主蒸気隔離弁が2号とも閉まっている事を見える</p>	<p>緊急手順書のsupplementary actionを大声で読み上げた</p>	<p>2号主給水ポンプの回転数が下がっているのを「おかしいと思う。」</p> <p>↓</p> <p>タービンの状態は正常であるので、圧力が低下しているとは結論する。</p> <p>↓</p> <p>先と同時にShift Supervisorが「主蒸気隔離弁が開まっている」と叫ぶのが聞こえる</p>		
1:35:37						
			全員が、Back Panel上段のannunciatorを見る。			
			SFRCSのannunciatorが点灯していることを期待した。先行経験からSFRCSの部分の/全体の起動により主蒸気隔離弁が開くと信じていた。しかし、annunciatorは点灯しておらず、原子炉トリップ後に点灯する種別・数とも正常なものであった。			

表 2.4.1 Davis Besse 事象における運転員のふるまい (2/5)

時刻	システムの状態	Shift Supervisor	Assistant Shift Supervisor	Primary-Side Reactor Operator	Secondary-Side Reactor Operator	Equipment Operator
1:35:45	加圧器スプリング閉止					
1:35:50	蒸気発生器は原子炉トリップ時の正常な水位 (35インチ) を示す。					
1:40:00	蒸気発生器の水位が低下しはじめる。				<ul style="list-style-type: none"> 蒸気発生器の水位を監視 主蒸気安全弁が閉鎖開く音を聞く 	
1:41:04	#1蒸気発生器のSFRCSが"low-level"でトリップ。これにより#1補助給水ポンプが起動			(要求)	<ul style="list-style-type: none"> 給水が停止したため、SFRCSが蒸気発生器の"low-level"で直ぐに起動するだろう 自動トリップが目前に迫っている場合は手動でその点をトリップするように訓練されていた 蒸気発生器の保水を確認するために、SFRCSを"low-level"で起動させたい (蒸気発生器が"low-level"でトリップする前に補助給水系を起動させたい) 	
1:41:08	SFRCSは"low-pressure"で起動されたことにより、蒸気室の圧断が漏洩と判断し、設計通り蒸気発生器を保護し、補助給水ポンプを停止する。 <ul style="list-style-type: none"> 補助給水ポンプの保護弁の閉止 #1補助給水ポンプへの蒸気の供給弁の閉止 				<ul style="list-style-type: none"> Back-Panel上の手動起動スイッチに行き、"low-level"と間違いない"low-pressure"ボタンを押す。 補助給水系が蒸気発生器に必要な給水を供給していることを期待してAux. Feedwater Section に行く 	
1:41:13	#2蒸気発生器のSFRCSが"low-level"でトリップ					
1:41:31:44	#1補助給水ポンプトリップ #2補助給水ポンプトリップ				<ul style="list-style-type: none"> #1、#2 補助給水ポンプがoverspeedでトリップしていることを発見 SFRCSのパネルに行き、間違ったボタンを押したことを見つける 	
1:42:00		補助給水系の弁が開いて設定されていることに気づく	<ul style="list-style-type: none"> (緊急手順書を読み上げている) 給水が確保されているかどうかを確認する部分まで進む。 	<ul style="list-style-type: none"> 1次系の圧力上昇にもならない加圧器スプリングを開 		

表 2.4.1 Davis Besse 事象における運転員のふるまい (3/5)

時刻	システムの状態	Shift Supervisor	Assistant Shift Supervisor	Primary-Side Reactor Operator	Secondary-Side Reactor Operator	Equipment Operator
1:43:55	<p>補助給水系の隔離弁が自動的に開くはずであったが開かなかった。</p> <p>(SFRCS と HRS が正常に作動していれば何れの問題はなかった)</p> <p>補助給水の隔離弁は閉まったまま</p>	<p>"low-pressure" で起動していた SFRCS をリセットし、運転員のエラーを正す。</p>	<p>主給水はもとより、補助給水まで作動してない</p> <p>手順書の該当する部分 "Lack of Heat Transfer" を開ける</p> <p>補助給水系が作動していない理由を診断する</p> <p>隔離弁が開いていることを発見</p> <p>Back-Panelにある隔離弁のボタンを押して弁を開けようとしたが失敗</p> <p>Back-Panelの裏側にある SFRCS のキヤビネットに行き全てをリセットし、隔離弁を開けるために番号をプロロックする</p> <p>隔離弁を開める番号はない</p> <p>トルク・スイッチがトリップしていることと悟る</p>			
1:44			<p>制御室内は "hectic" になる。 (給水はない、温度・圧力は上昇する、予想しない機器の故障が多発する)</p>			
1:44:50	<p>加圧器水位が高設定点に達したため充満弁が自動的に閉まる</p>	<p>3人目の Equip Op. に補助給水系の隔離弁をあげるように指示</p> <p>4人目の Equip Op. をプラント・コミュニケーションシステムで呼び出し補助給水系の隔離弁を開けるように指示</p>	<p>蒸気発生器へ給水するため制御室で出来ることは全て実行する</p> <ul style="list-style-type: none"> 主蒸気隔離弁を開けても、蒸気発生器がドライアウトしているため主給水ポンプへ十分な蒸気を供給出来ない 補助給水系のタービンは overspeed でトリップしており、トリップ・スロット弁は制御室からは開けられない 補助給水ポンプが作動可能であっても隔離弁が制御室からは開けられない 補助給水ポンプのトリップをリセットし流路を確保しても、補助給水ポンプを起動できる蒸気が残っているかは疑問 <p>2人に Aux. Feedwater Pump Room に行きポンプの取回を指示。</p>			<p>3人が原子炉トリップ直後から指示を受けるために制御室中に滞留していた</p> <p>↓</p> <p>走って Aux. Feedwater Pump Room に向かいトリップ・スロット弁を開く作業を行う</p> <p>補助給水系の隔離弁を開く作業を行う</p>
1:45:50						
1:46:20	<p>#1 蒸気発生器の大気放出弁が開く</p>					<p>#2 補助給水ポンプのトリップ番号をリセット</p>

表 2.4.1 Davis Besse 事象における運転員のふるまい (4/5)

時刻	システムの状態	Shift Supervisor	Assistant Shift Supervisor	Primary-Side Reactor Operator	Secondary-Side Reactor Operator	Equipment Operator
1:46:30						
1:47:30	1:蒸気発生器の圧力が900psig 以下がる			↓ タスクを実行するためにSPRCS キャビネットに向かう	↑ 起動用補助給水ポンプの隔離番号をリセットするように指示	1:補助給水ポンプのトリップ・スロットル弁が閉鎖された後部分的に開く。但し、トリップ番号はリセットされていない
1:47:48						
1:48:08	1:蒸気発生器の蒸気放出弁が開く			↓ タスクが終了しcontrol areaに戻る	↑ 大気放出弁のリセットを指示 (どのような事を意図したのか不明)	2:補助給水ポンプの隔離弁が開く
1:48:49	加圧器遮し弁が開く					
1:48:51	2:大気放出弁の圧力が900psig 以下がる。この時点で手操室ではFeed-and-Bleedが行われなければならない。		緊急手帳面によると「圧力が900psig 以下がり、かつ下がりが遅れている」、「水位が8インチ以下になる」で蒸気発生器はドライと判断することになっている。しかし、制御室内の表示が去分でないため運転員は状態を理解できない。 ・圧力のトレンド・レコーダがないため圧力が900psig になり、下がりが遅れているのか料らない ・水位のスケールが0~250と大きいため8インチは読めない ・このようなクリティカルな情報を表示するSPDSは使えない			
1:48:52	加圧器遮し弁が開く					
1:49:28						
1:50:09:12	加圧器遮し弁が開く	蒸気発生器がドライになる前からFeed-and-Bleed操作の必要性は認識してた ↓ Feed-and-Bleedを行わず補助給水系の頂上を待つ ↓ ・条件に達していないと思っている ・Feed-and-Bleedの経済性を考慮する ・固着すると制御室が壊れる 成功しても数日のクリーンアップが必要		↓ Secondary-Side Reactor Operator の要求によりcontrol section を離れていため2回の加圧器遮し弁の閉鎖は知らない	↑ ホットレク温度が50°FになったときにFeed-and-Bleed操作を提案 (2回)	1:補助給水ポンプの隔離弁が開く (この後Aux. Feedwater Pump Room に行きトリップ・スロットル弁の復旧作業を手伝う)
1:50:13	1:蒸気発生器の大気放出弁が開く 2:蒸気発生器の圧力が急速に低下し750psig となる		Operations Superintendent も1分以内に補助給水系が復旧しない場合はFeed-and-Bleedを準備するように言う。 （電話で議論したため結果的にはShift Supervisorをdisturbした）			
1:51:17	1:蒸気発生器の水位が8インチまで低下					
1:51:18	加圧器遮し弁が開き、固着する					
1:51:23						
1:51:30	1:蒸気発生器へ給水開始		起動用補助給水ポンプが使用可能になった		↑ 起動用補助給水ポンプを起動 (遅延)	

表 2.4.1 Davis Besse 事象における運転員のふるまい (5/5)

時刻	システムの状態	Shift Supervisor	Assistant Shift Supervisor	Primary-Side Reactor Operator	Secondary-Side Reactor Operator	Equipment Operator
1:51:12	#1ループの圧力が最低となる (PONIが閉まっているため)		補助給水ポンプの復旧作業を手伝いに行く	1次系の低圧の原因を次のものと思う ・加圧器スプレイ弁 ・起動用補助給水ポンプの送動		
1:51:43				↓ スプレイ弁を閉めると同時に、空のために加圧器送し弁の弁を閉める		
1:53:00	#1ループのホットレグ温度が最高となる					
1:53:22	#2補助給水系から#2蒸気発生器へ給水開始	SFPCS をリセットし、「low-level」で起動				#2補助給水系のトリップ・スロップル弁が開かれる
1:53:35	#2蒸気発生器の圧力が900psig に上昇					
1:54:15	#1蒸気発生器の圧力が990psig に上昇 (起動用補助給水ポンプからの給水)					
1:54:46	#1補助給水系から#1蒸気発生器へ給水開始 補助給水系の過熱給水により1次系が過熱冷却となる					#1補助給水系のトリップ・スロップル弁が開く
1:58				ECCSの1系統をpiggyback configuration とする。 ↓ ECCSを起動する ↓ 1次系は1830psigまで上昇 ・加圧器ヒーテ ・ECCS ・補助給水の流量低下		
1:58:10	#1補助給水ポンプの水源が預水タンクからサービスイ水へ切替わり				水源が預水タンクに戻す (おそらく、このoperatorが行ったものと思われる)	
1:58:57						#1補助給水ポンプのoverspeedトリップがリセットされる
2:04	プラントは安定な状態に移行					

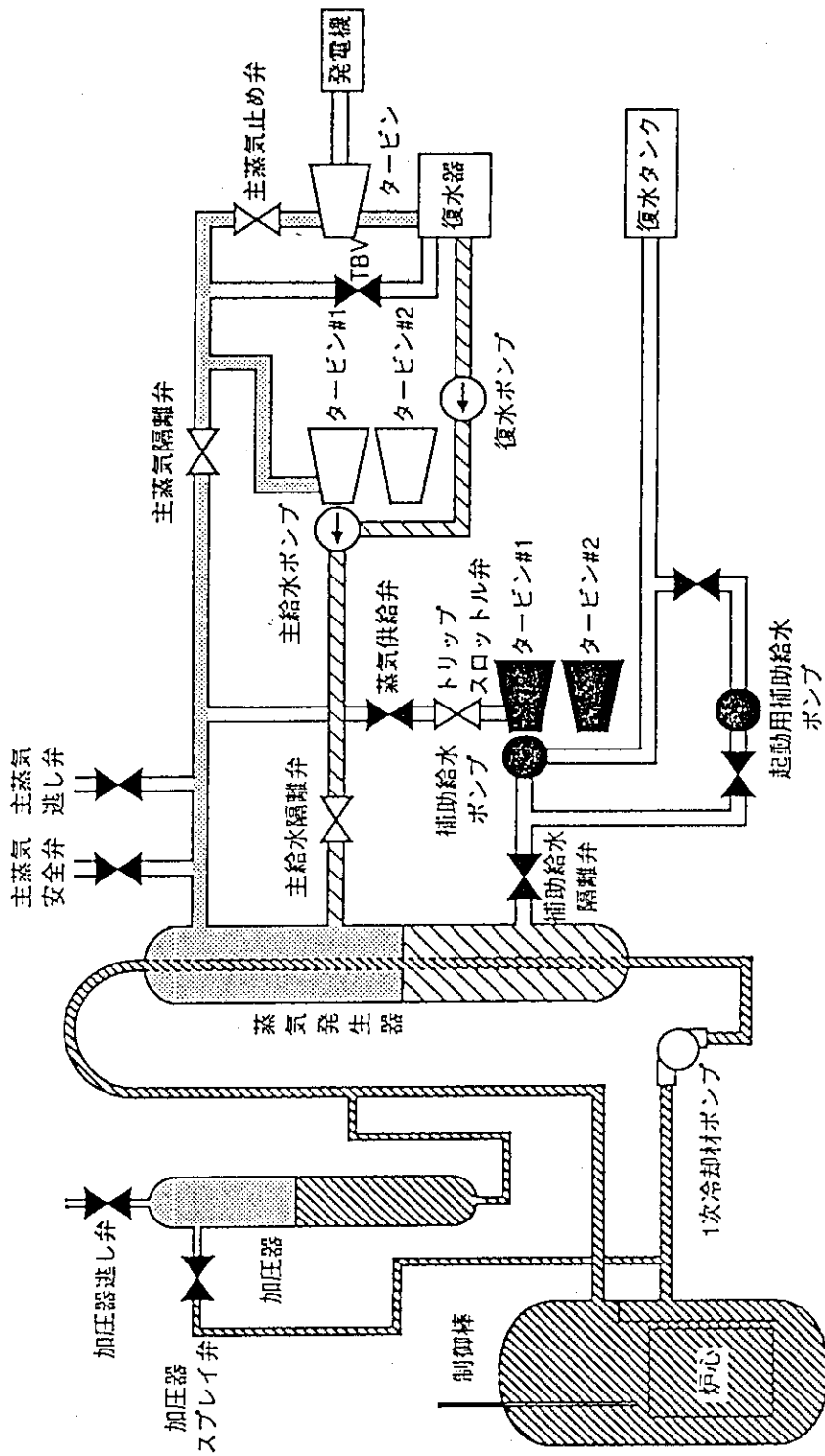
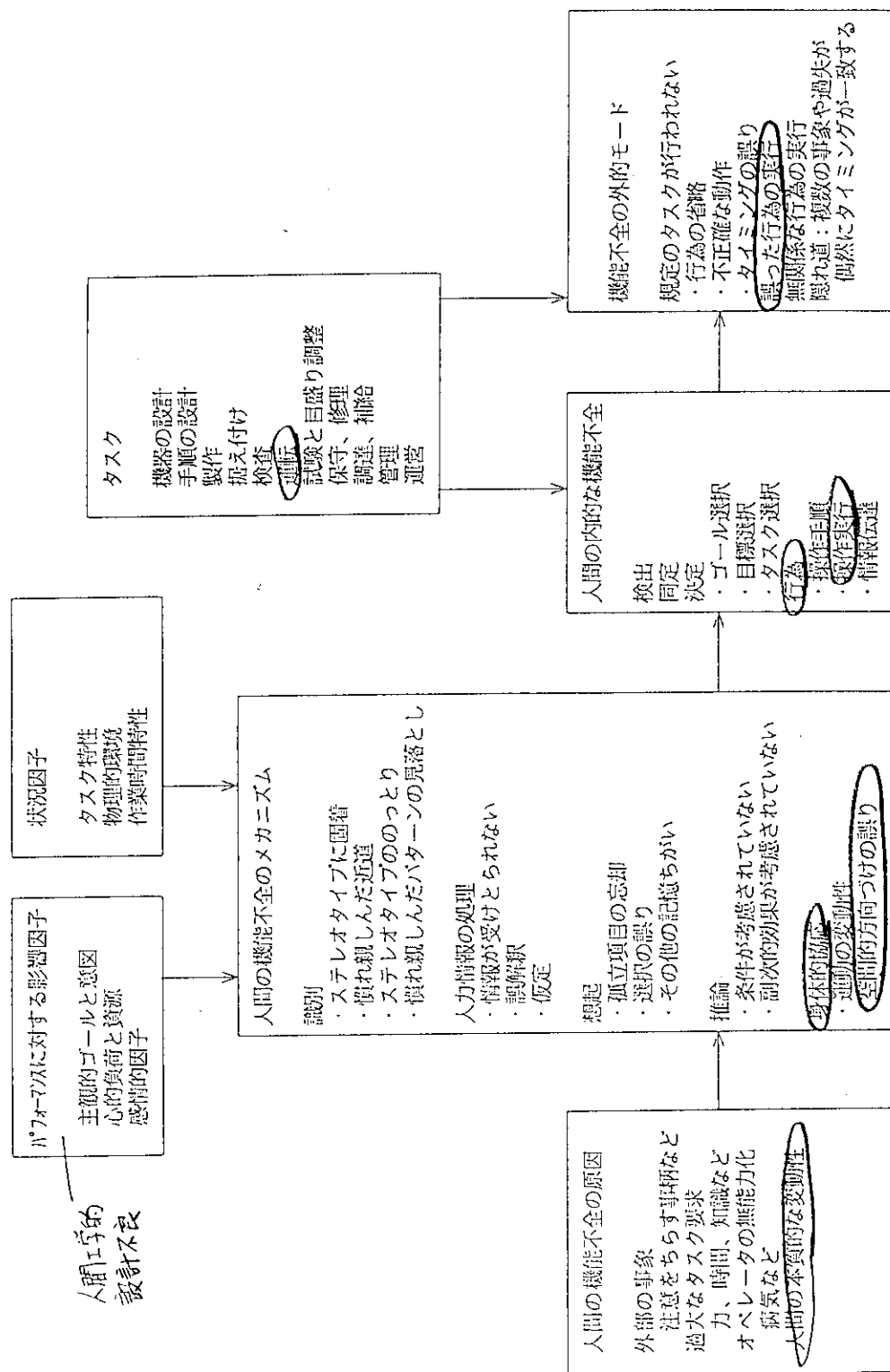
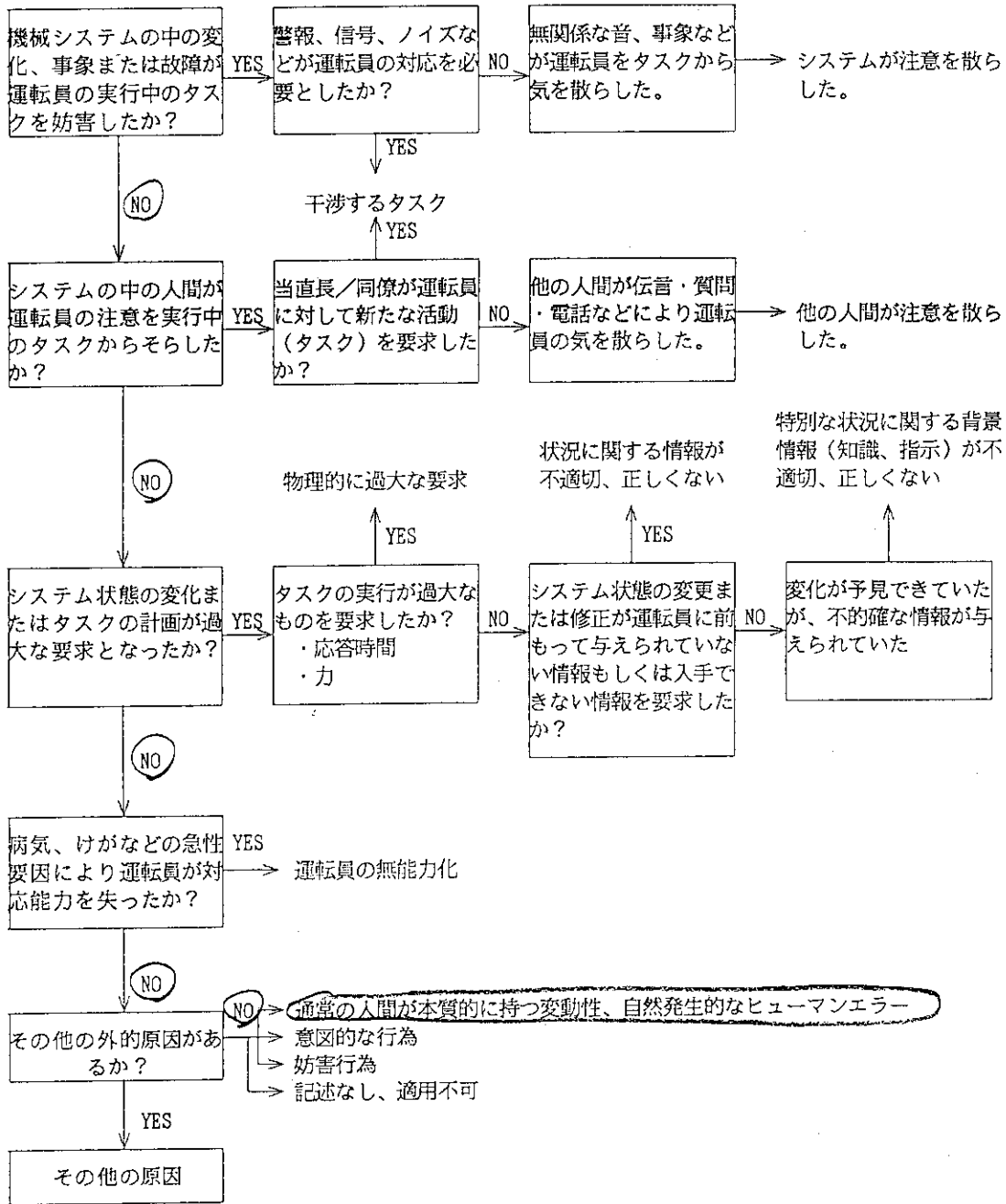


図 2.4.1 Davis Besse プラント 概念図



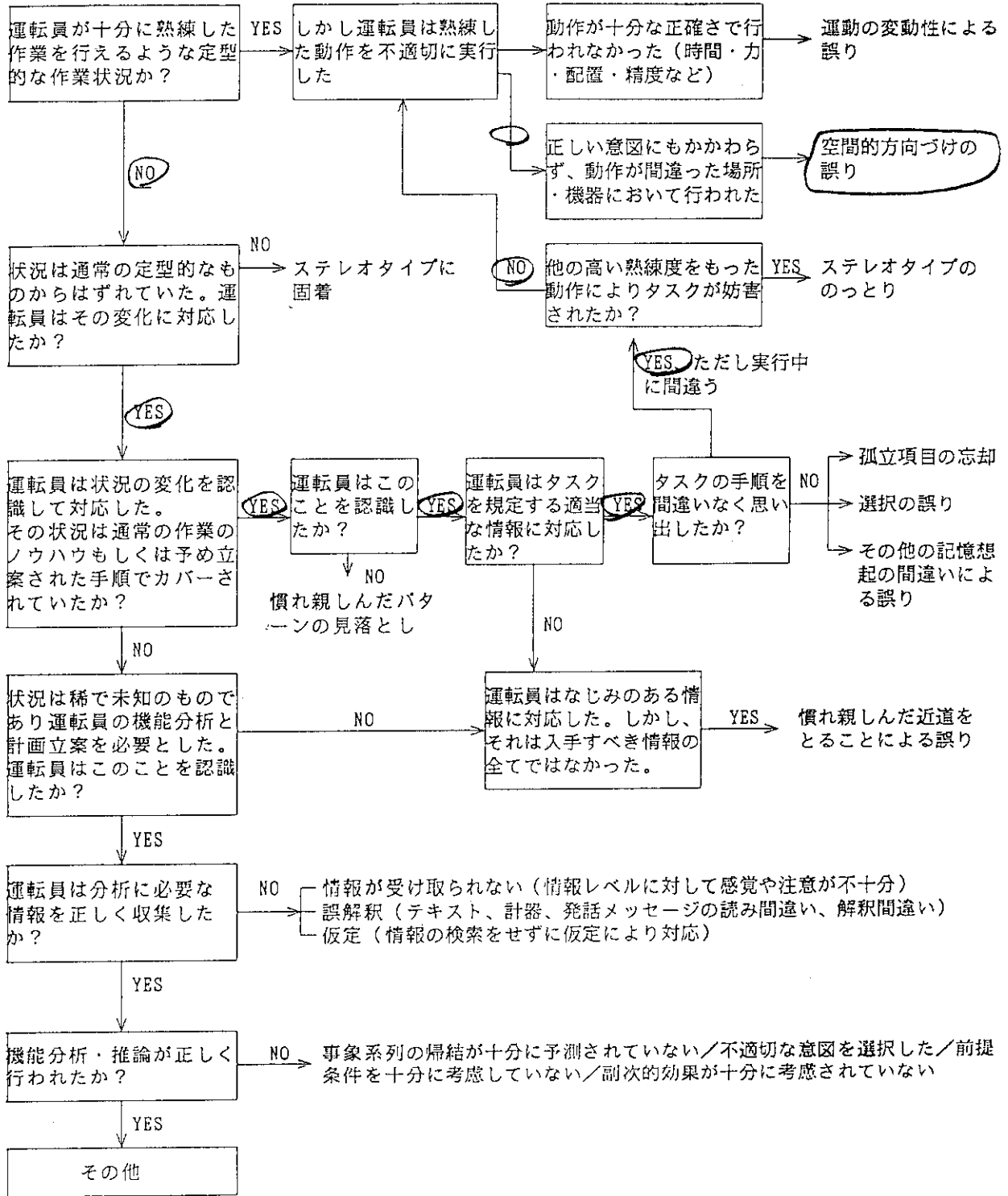
Rasmussenの提唱する人間の機能不全を含む事象の既述と分析のための多面的分類法

図 2.4.2 Rasmussenの手法によるDavis Bessee事象の分析チャート(1/6)
(補助給水ポンプの手动起動)



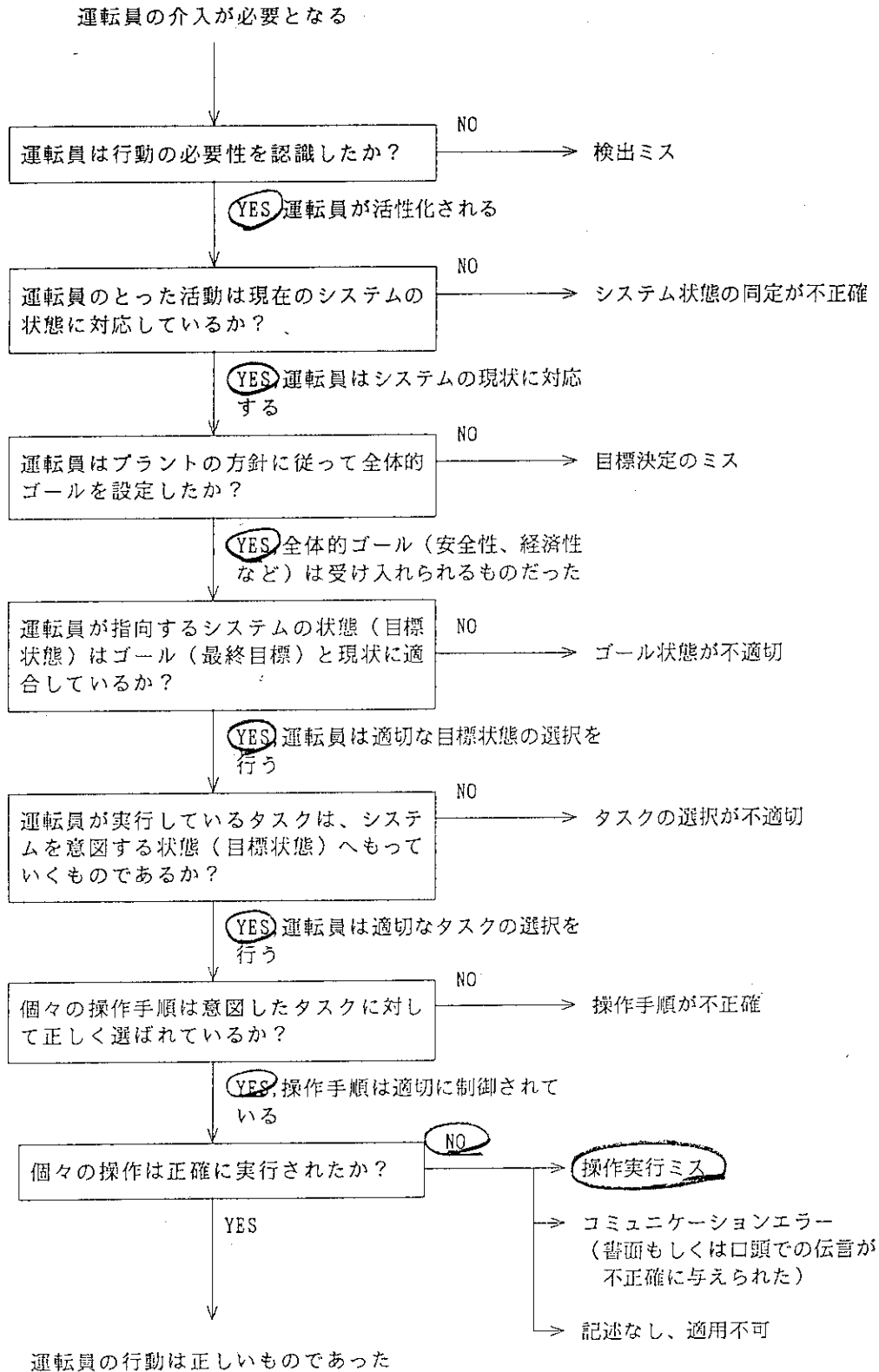
人間の機能不全の原因に対する分析ガイド

図 2.4.2 Rasmussen の手法による Davis Bessee 事象の分析チャート (2/6)
(補助給水ポンプの手動起動)



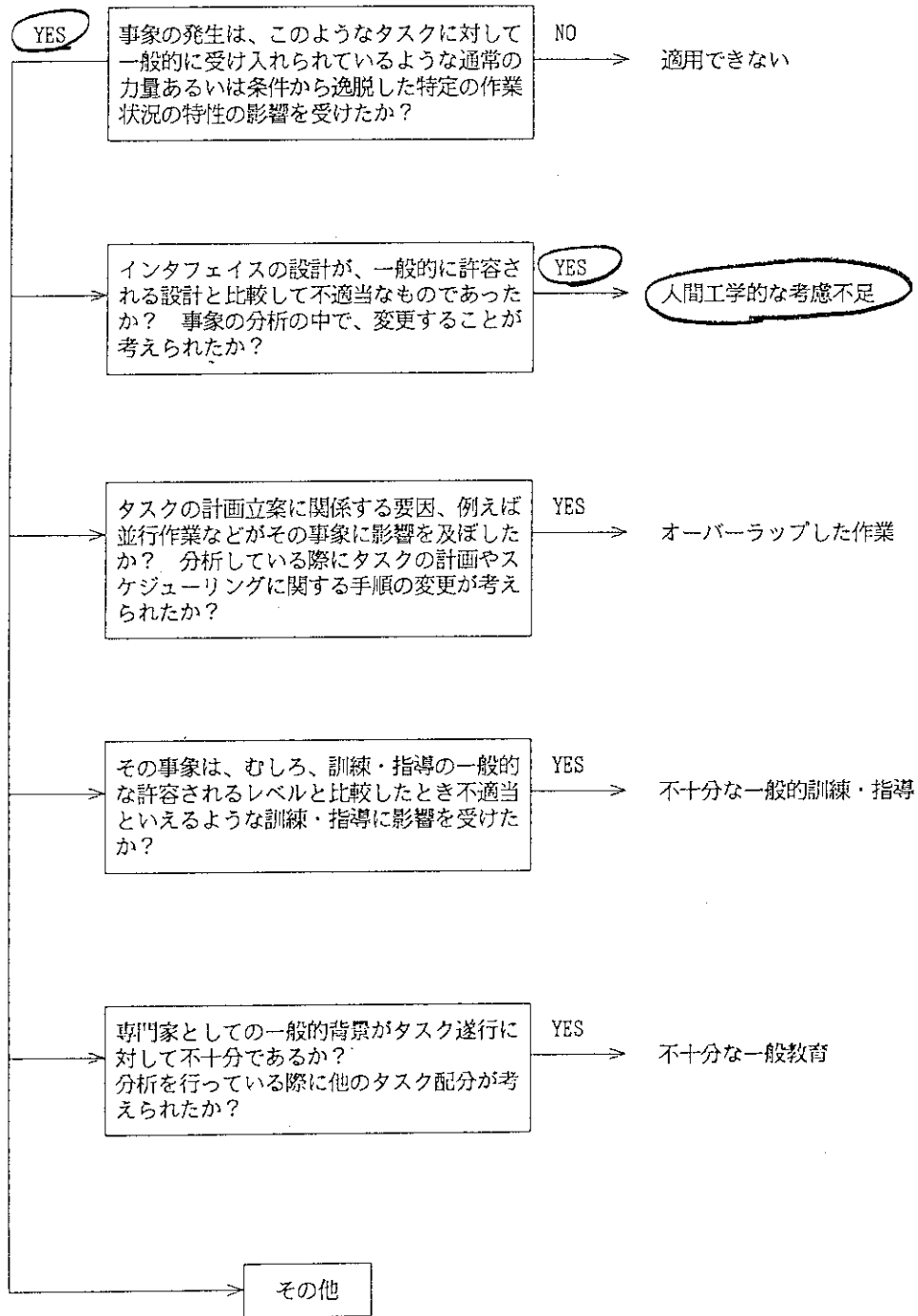
人間の機能不全のメカニズムの分析ガイド

図 2.4.2 Rasmussen の手法による Davis Bessee 事象の分析チャート (3/6) (補助給水ポンプの手動起動)



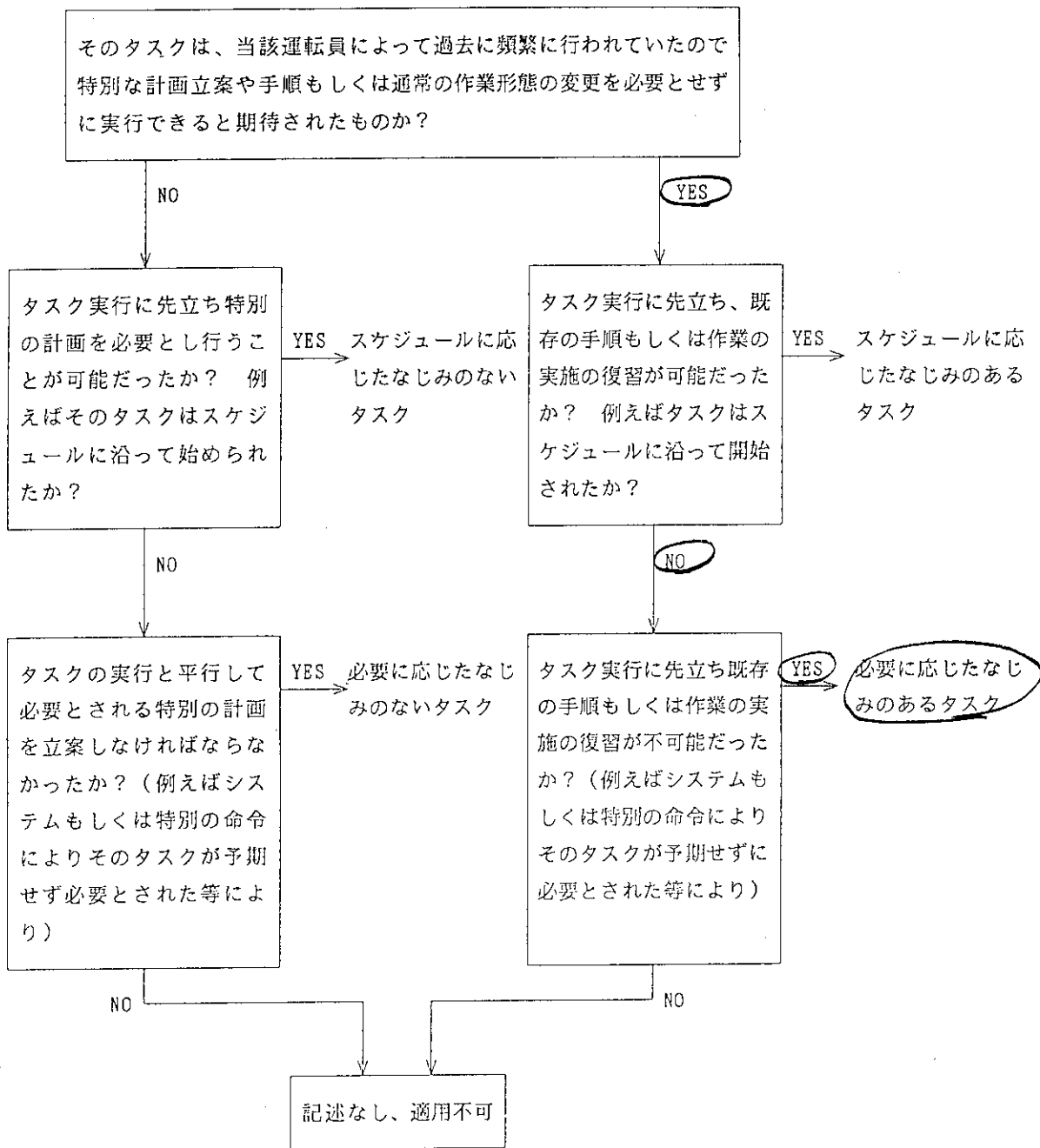
人間の内的な機能不全の分析ガイド

図 2.4.2 Rasmussen の手法による Davis Bessee 事象の分析チャート (4/6)
(補助給水ポンプの手動起動)



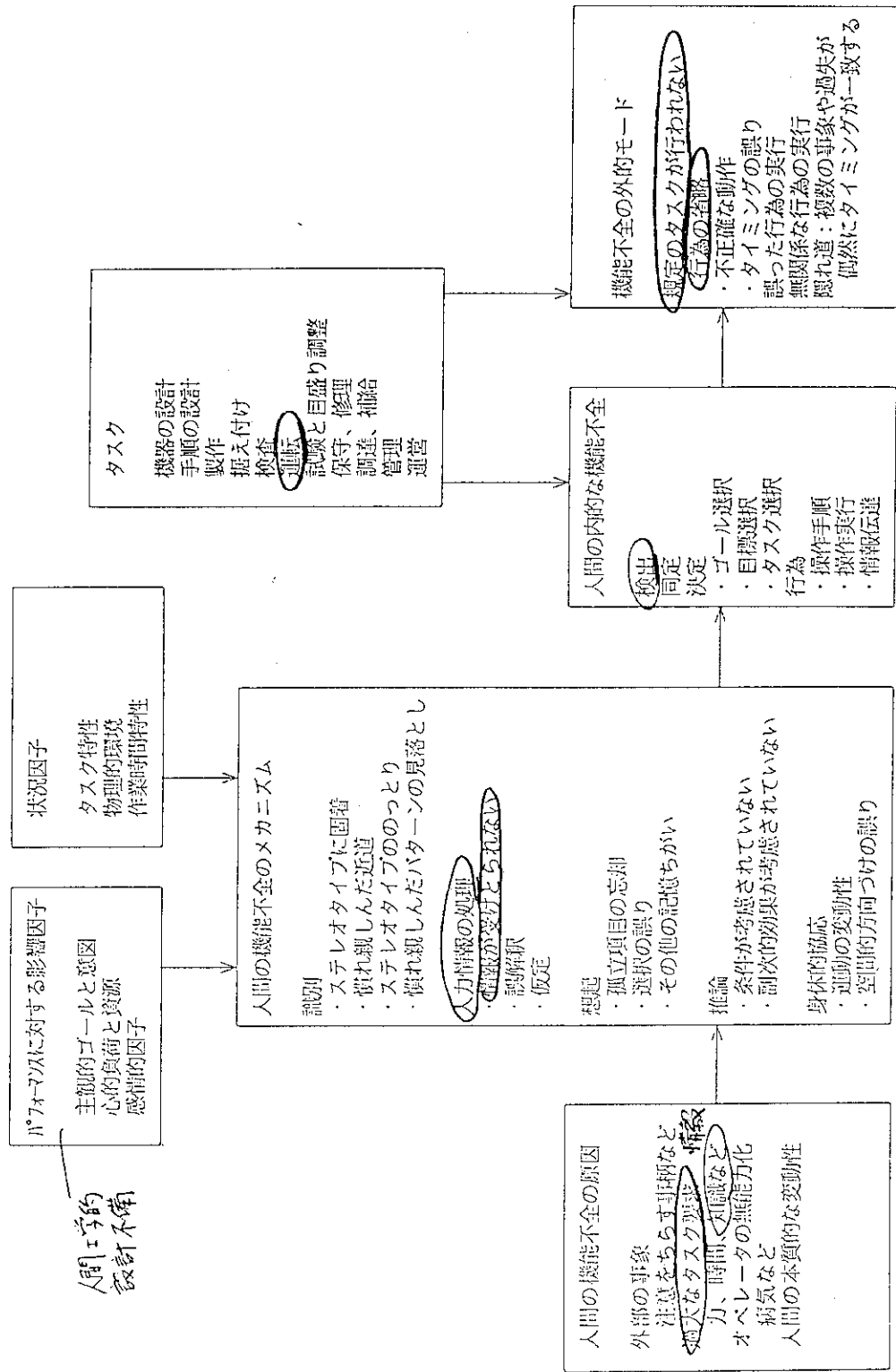
パフォーマンスに対する影響因子のうち心的負荷と資源に対する分析ガイド

図 2.4.2 Rasmussenの手法によるDavis Bessee 事象の分析チャート (5/6)
(補助給水ポンプの手動起動)



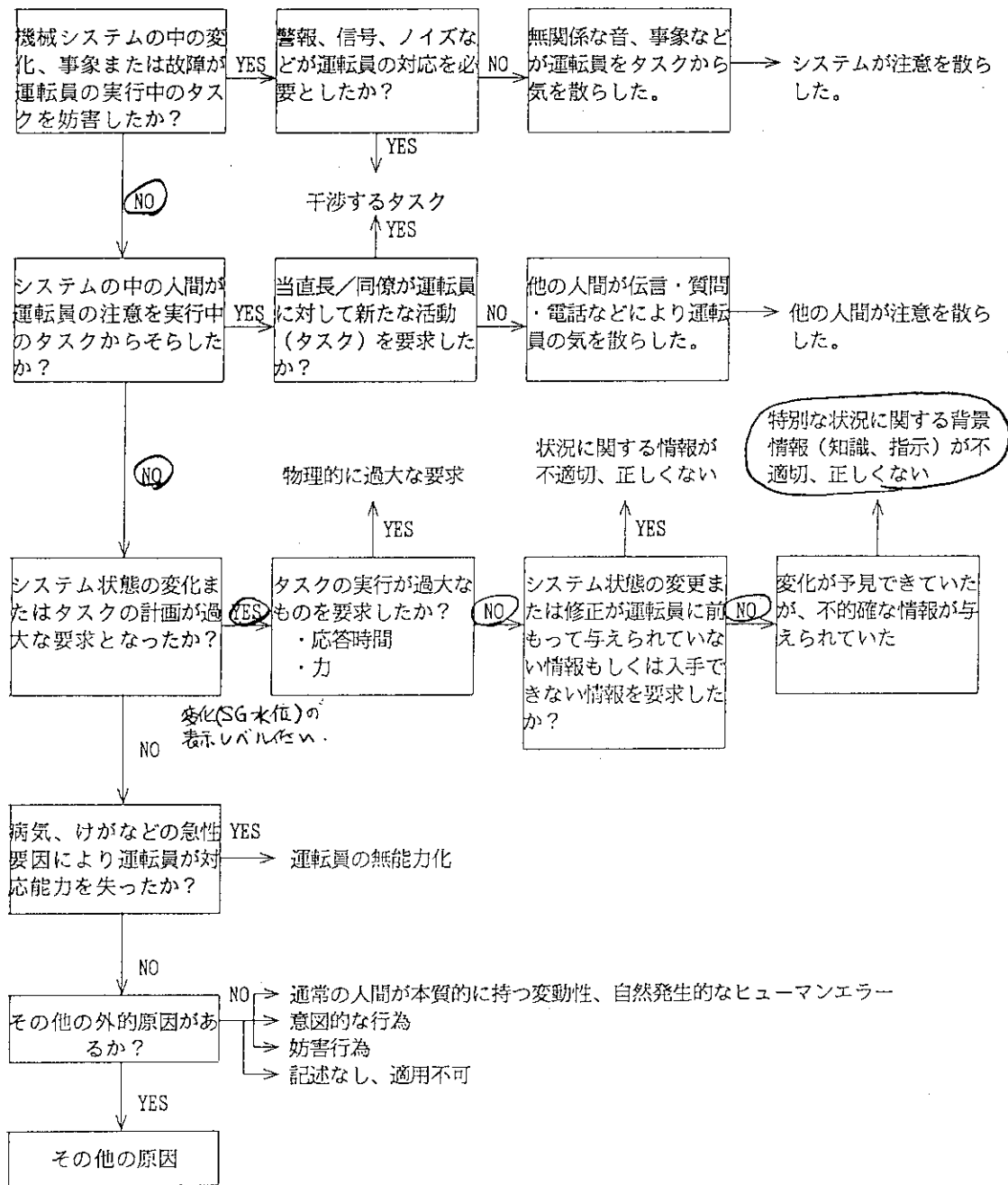
状況因子のうちタスク特性 (Preparedness) に関する分析ガイド

図 2.4.2 Rasmussen の手法による Davis Bessee 事象の分析チャート (6/6)
(補助給水ポンプの手動起動)



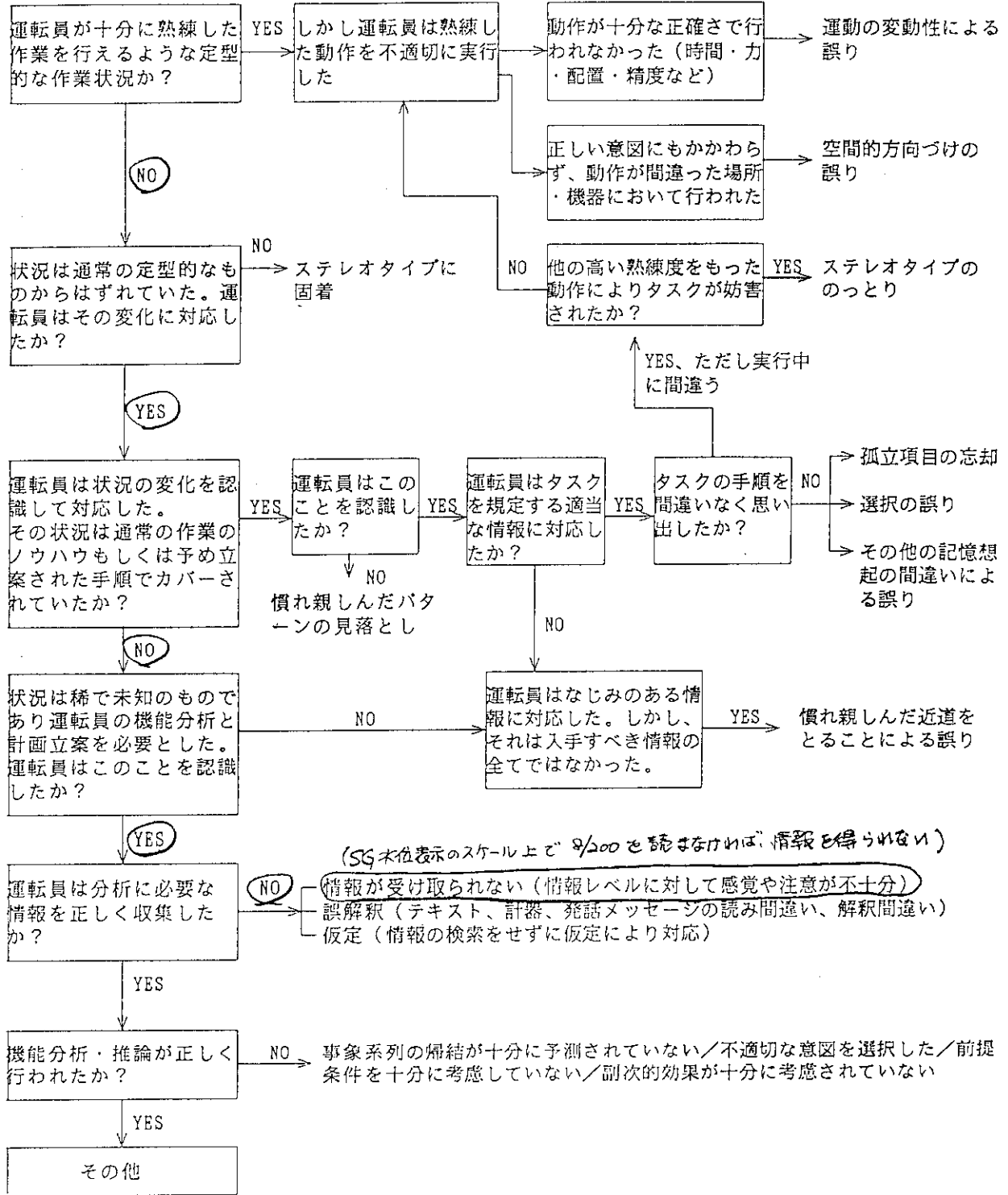
Rasmussenの提唱する人間の機能不全を含む事象の既述と分析のための多面的分類法

図 2.4.3 Rasmussenの手法によるDavis Bessee 事象の分析チャート (1/6)
(外部電源からのFeed and Bleed)



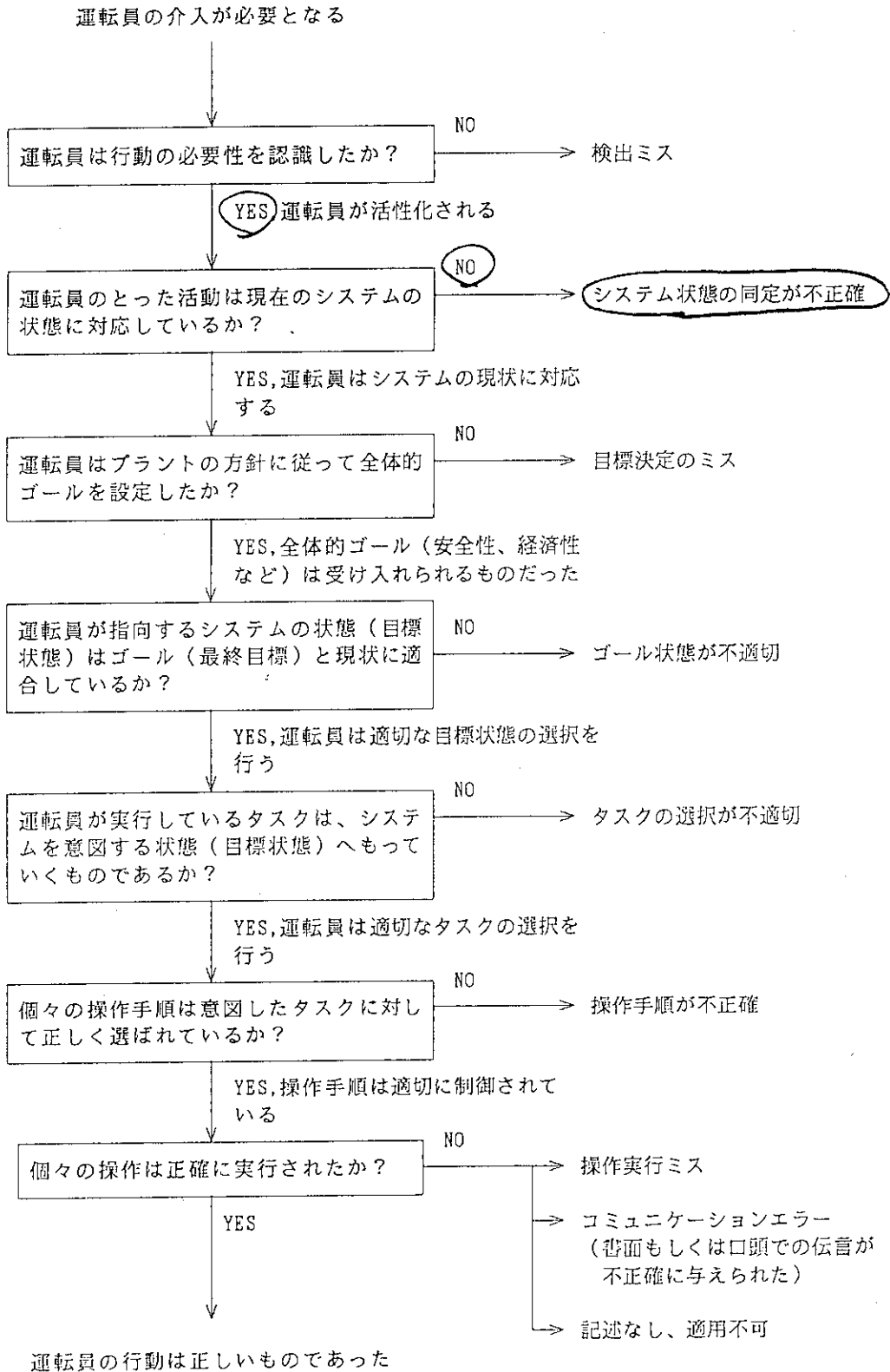
人間の機能不全の原因に対する分析ガイド

図 2.4.3 Rasmussen の手法による Davis Bessee 事象の分析チャート (2/6)
(外部電源からの Feed and Bleed)



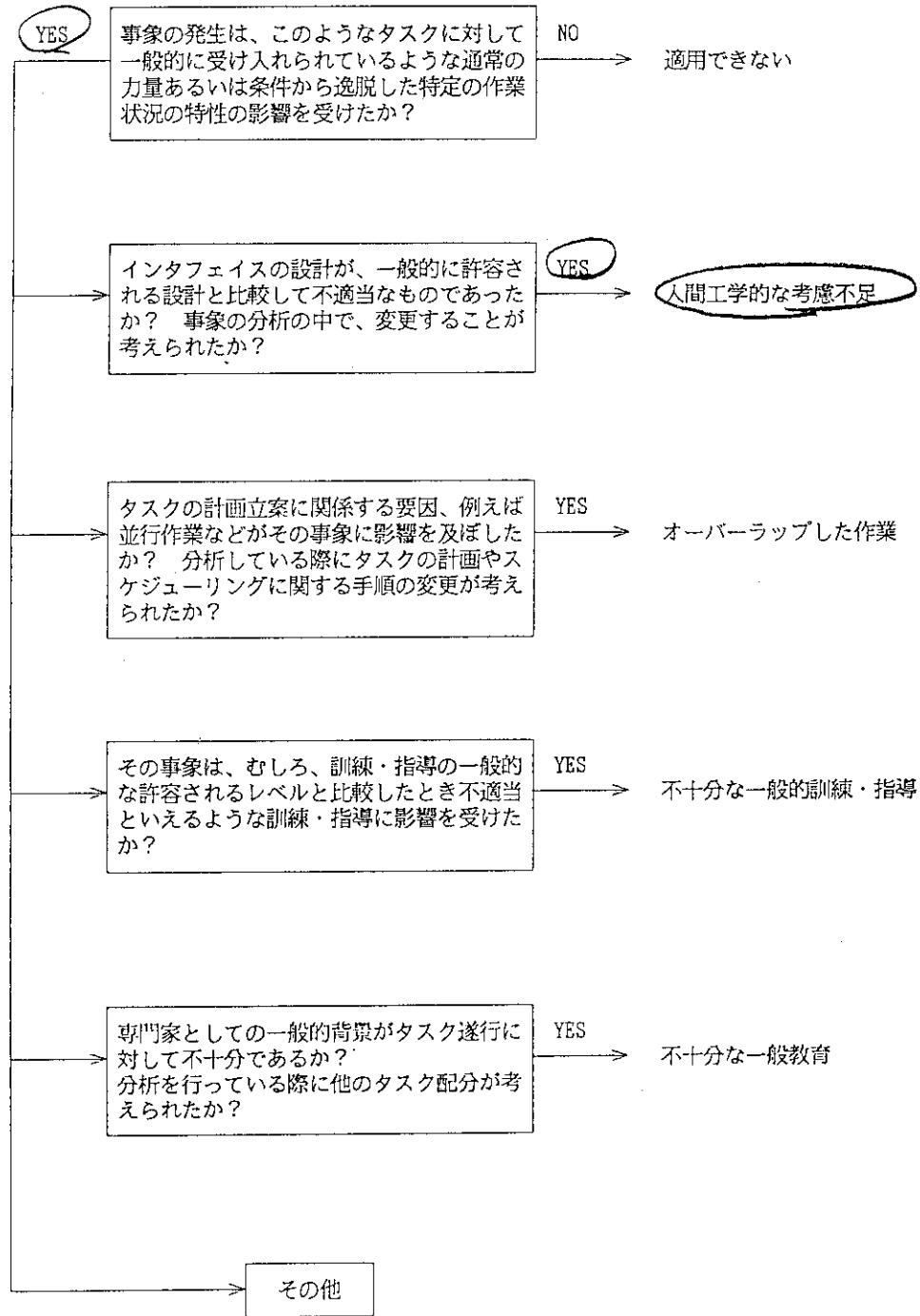
人間の機能不全のメカニズムの分析ガイド

図 2.4.3 Rasmussen の手法による Davis Bessee 事象の分析チャート (3/6)
(外部電源からの Feed and Bleed)



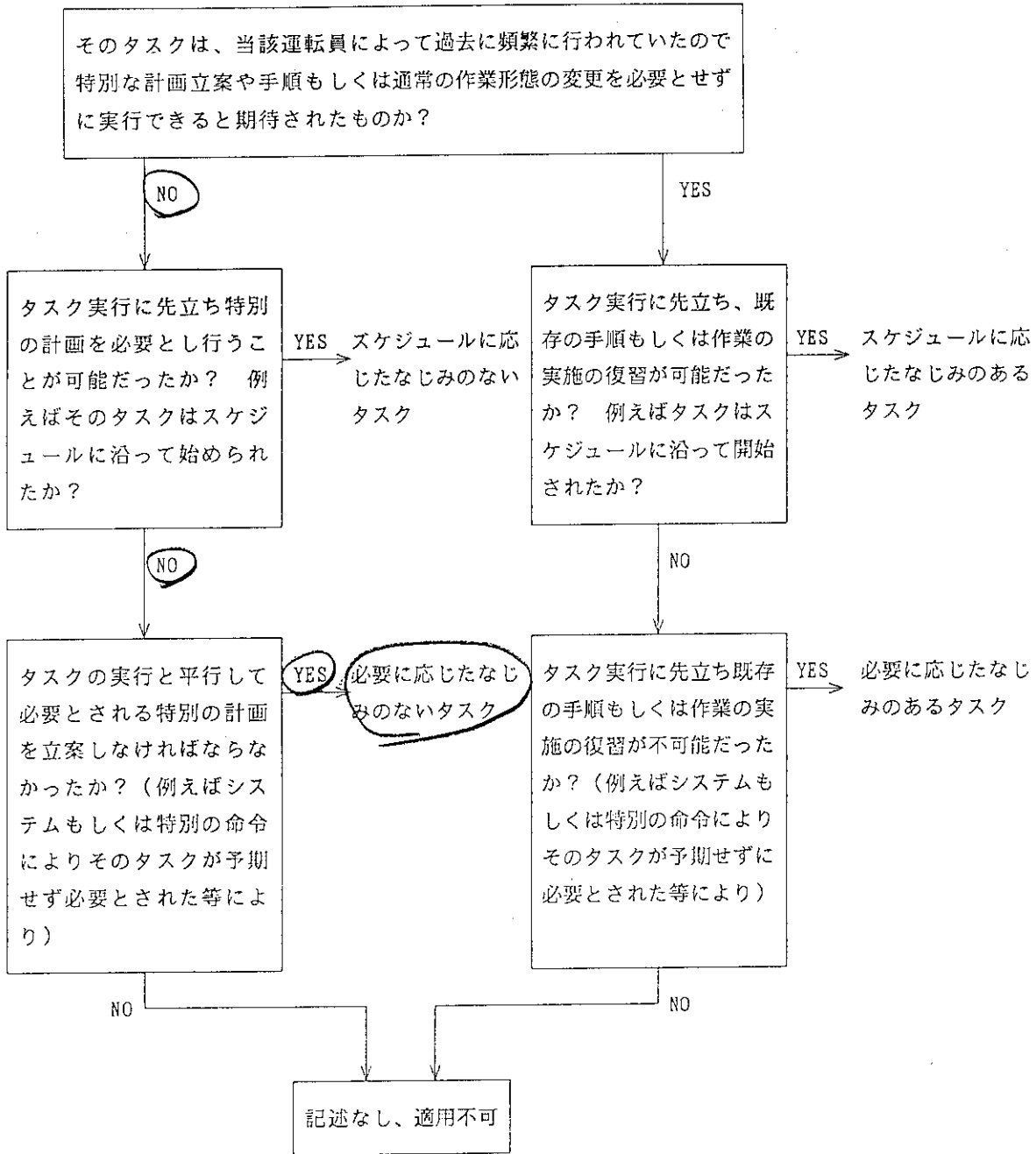
人間の内的な機能不全の分析ガイド

図 2.4.3 Rasmussen の手法による Davis Bessee 事象の分析チャート (4/6)
(外部電源からの Feed and Bleed)



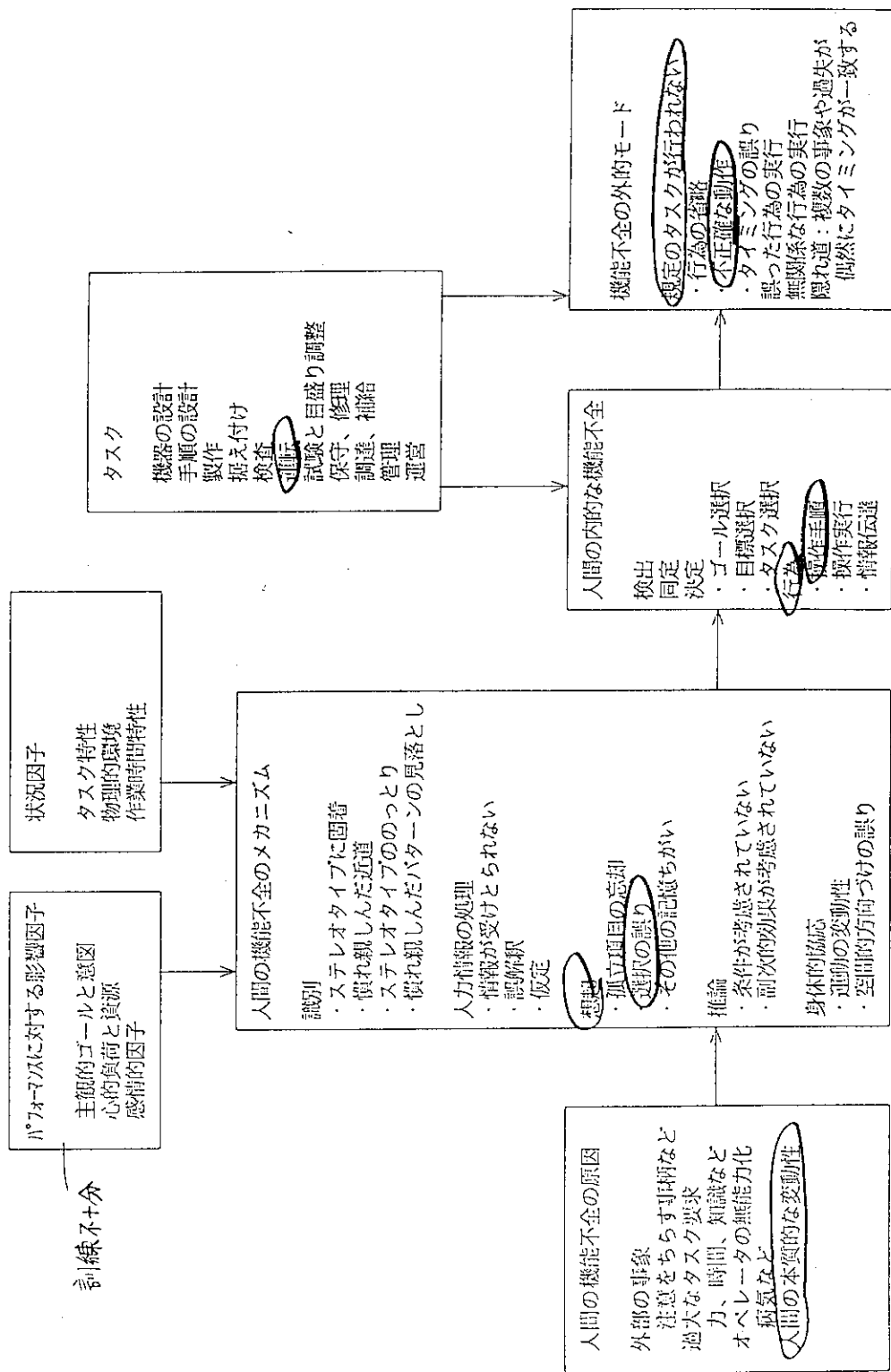
パフォーマンスに対する影響因子のうち心的負荷と資源に対する分析ガイド

図 2.4.3 Rasmussen の手法による Davis Bessee 事象の分析チャート (5/6)
(外部電源からの Feed and Bleed)



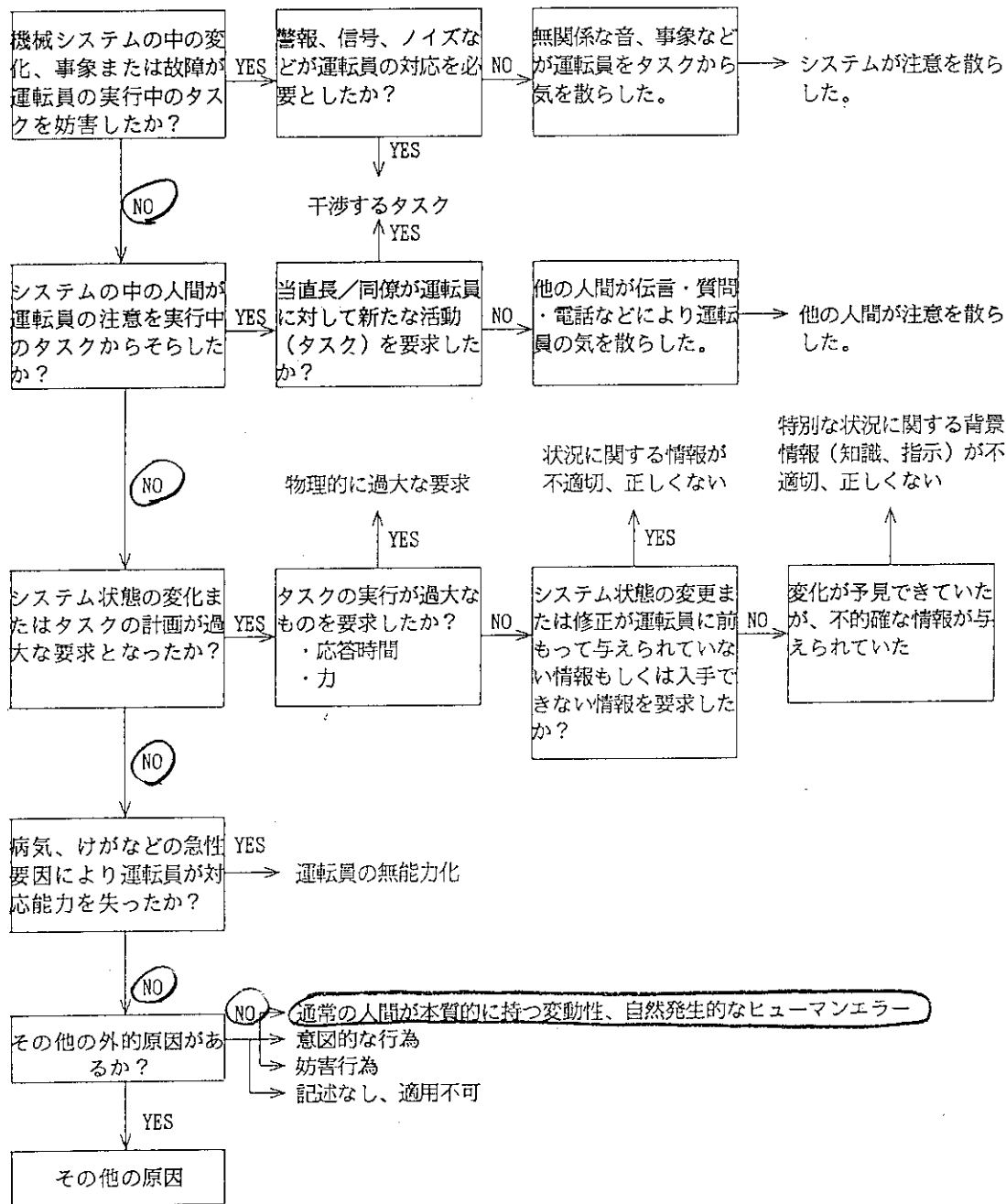
状況因子のうちタスク特性 (Preparedness) に関する分析ガイド

図 2.4.3 Rasmussen の手法による Davis Bessee 事象の分析チャート (6/6)
(外部電源からの Feed and Bleed)



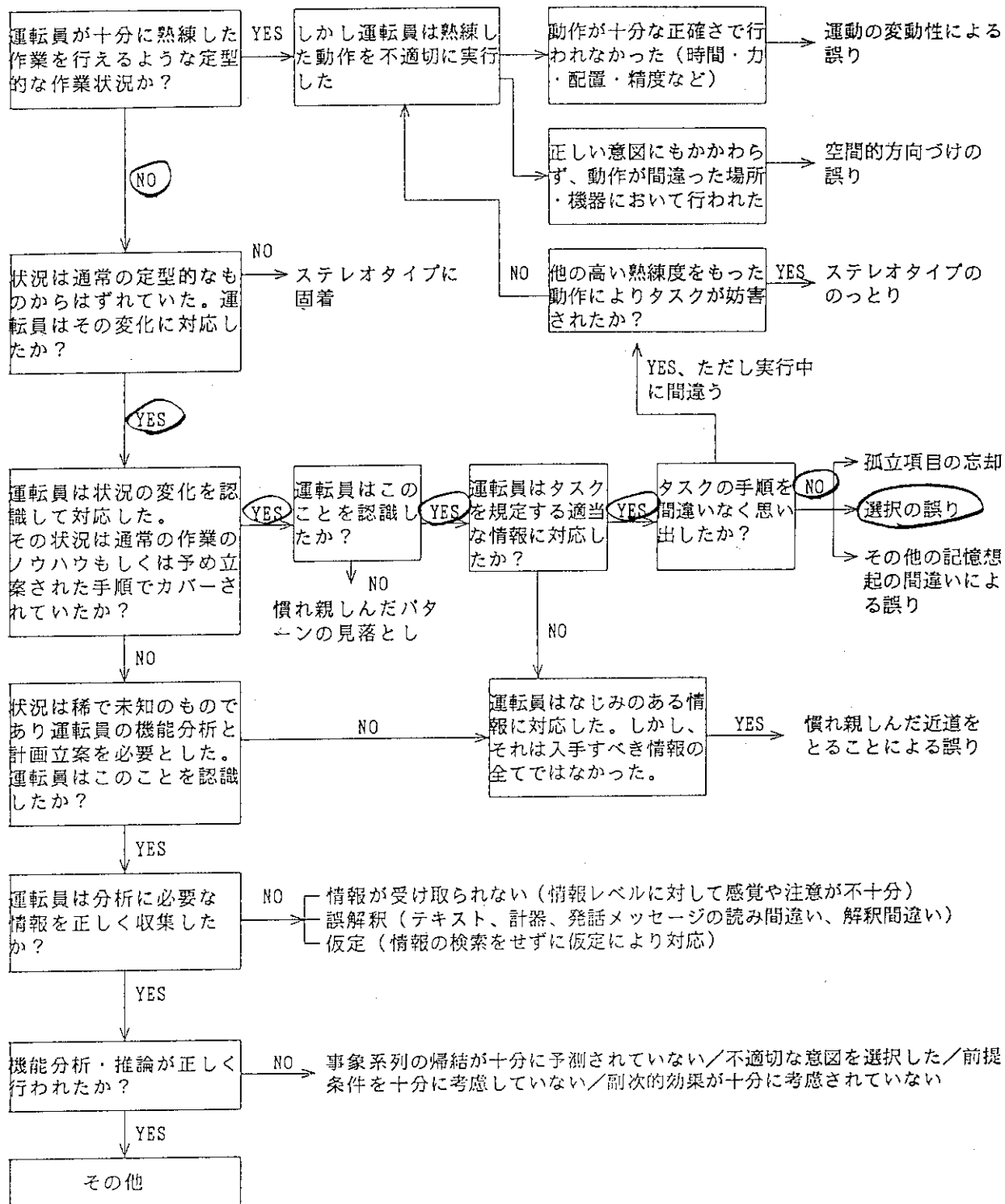
Rasmussenの提唱する人間の機能不全を含む事象の既述と分析のための多面的分類法

図 2.4.4 Rasmussenの手法によるDavis Bessee事象の分析チャート(1/6)
(補助給水系回復操作1)



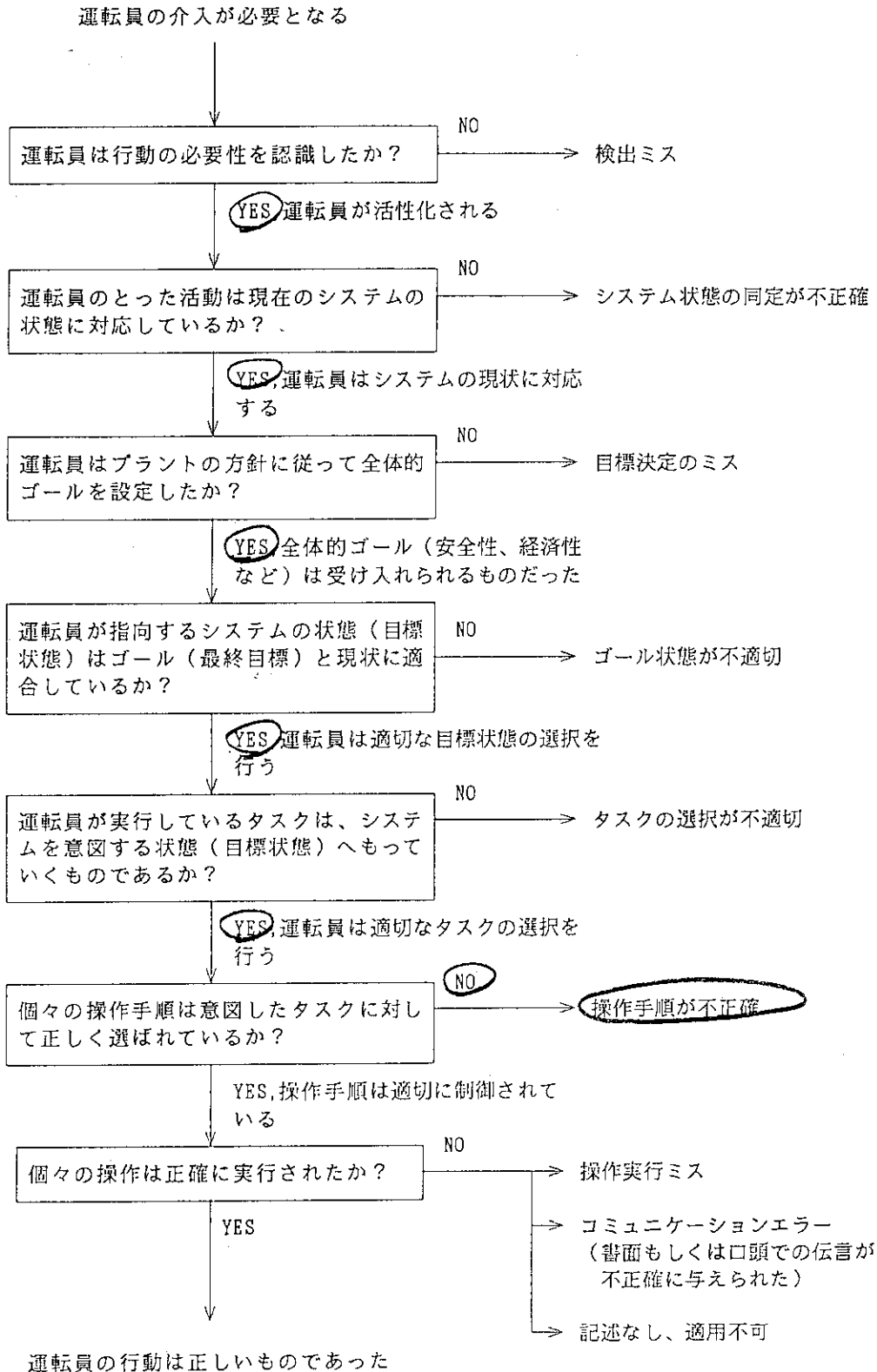
人間の機能不全の原因に対する分析ガイド

図 2.4.4 Rasmussen の手法による Davis Bessee 事象の分析チャート (2/6)
(補助給水系回復操作 I)



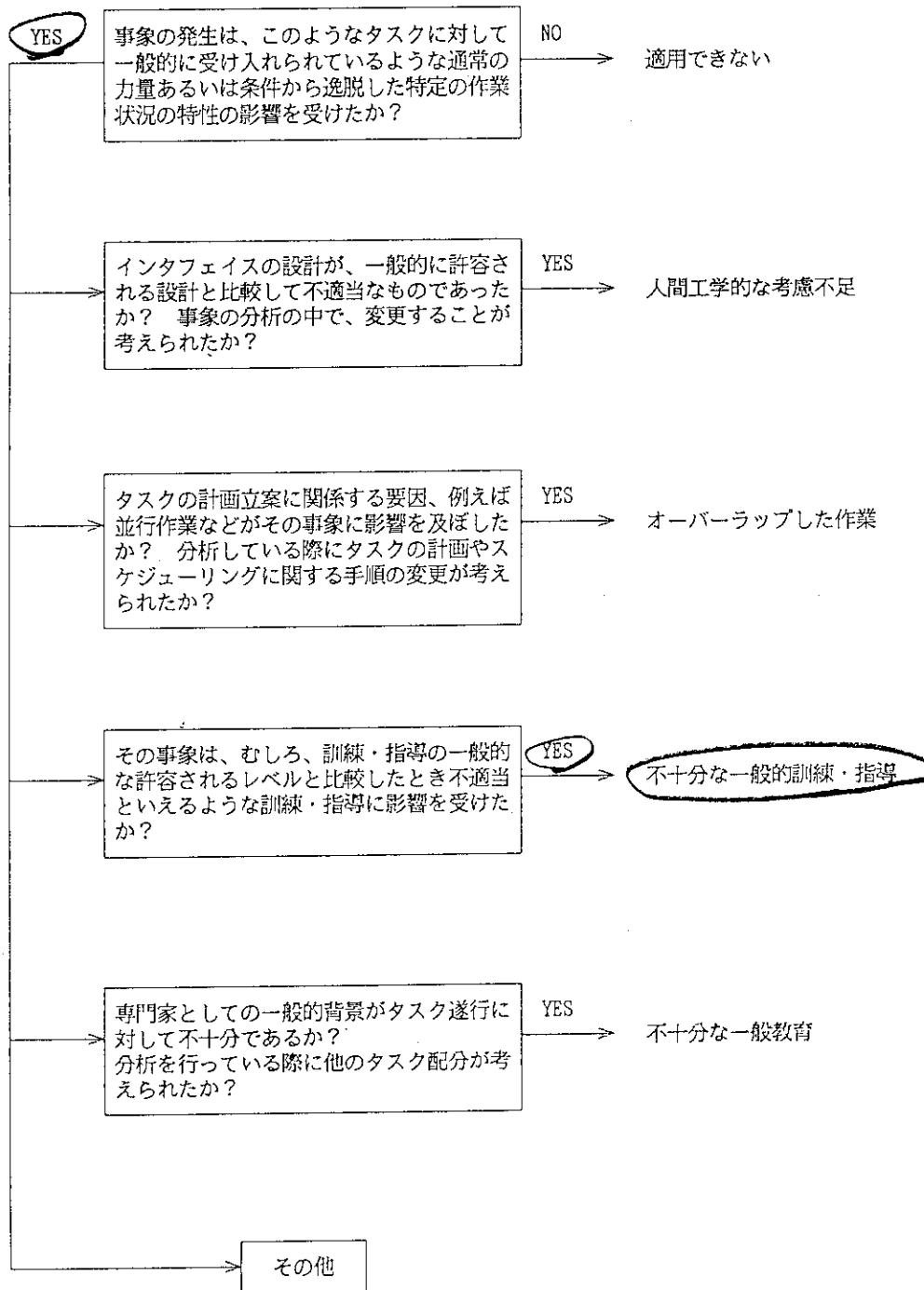
人間の機能不全のメカニズムの分析ガイド

図 2.4.4 Rasmussen の手法による Davis Bessee 事象の分析チャート (3/6)
(補助給水系回復操作 1)



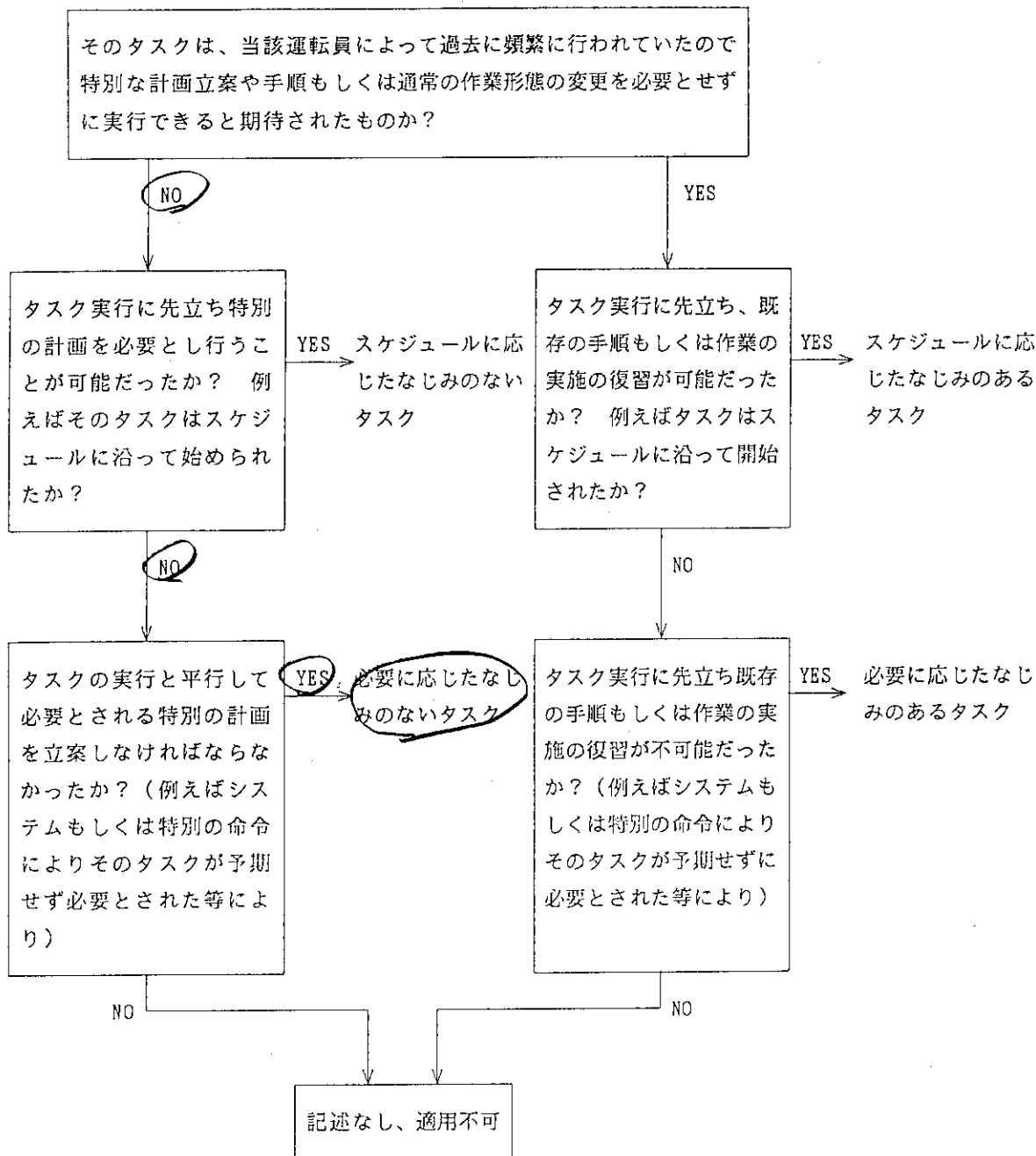
人間の内的な機能不全の分析ガイド

図 2.4.4 Rasmussen の手法による Davis Bessee 事象の分析チャート (4/6)
(補助給水系回復操作 1)



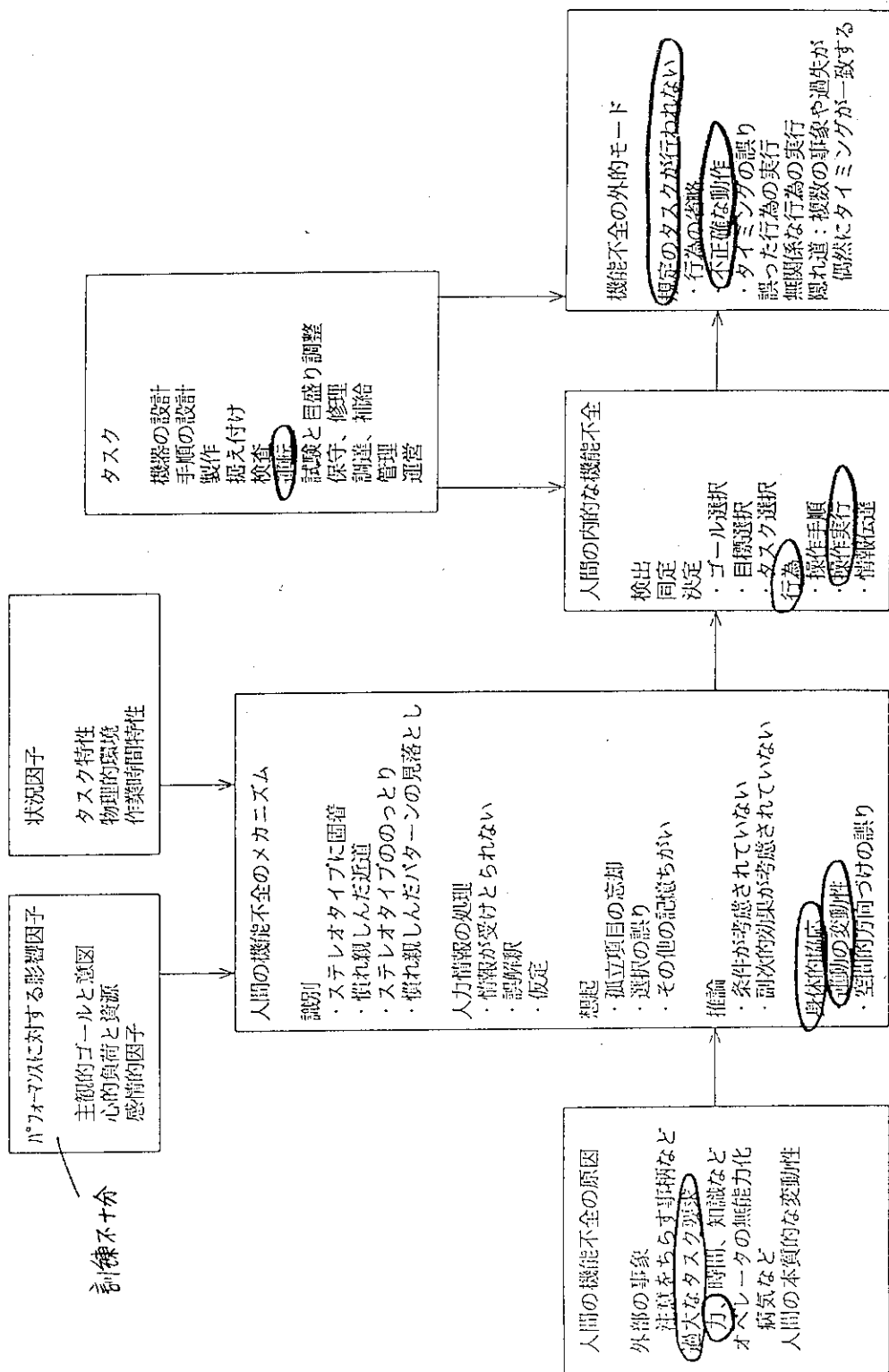
パフォーマンスに対する影響因子のうち心的負荷と資源に対する分析ガイド

図 2.4.4 Rasmussen の手法による Davis Bessee 事象の分析チャート (5/6)
(補助給水系回復操作 1)



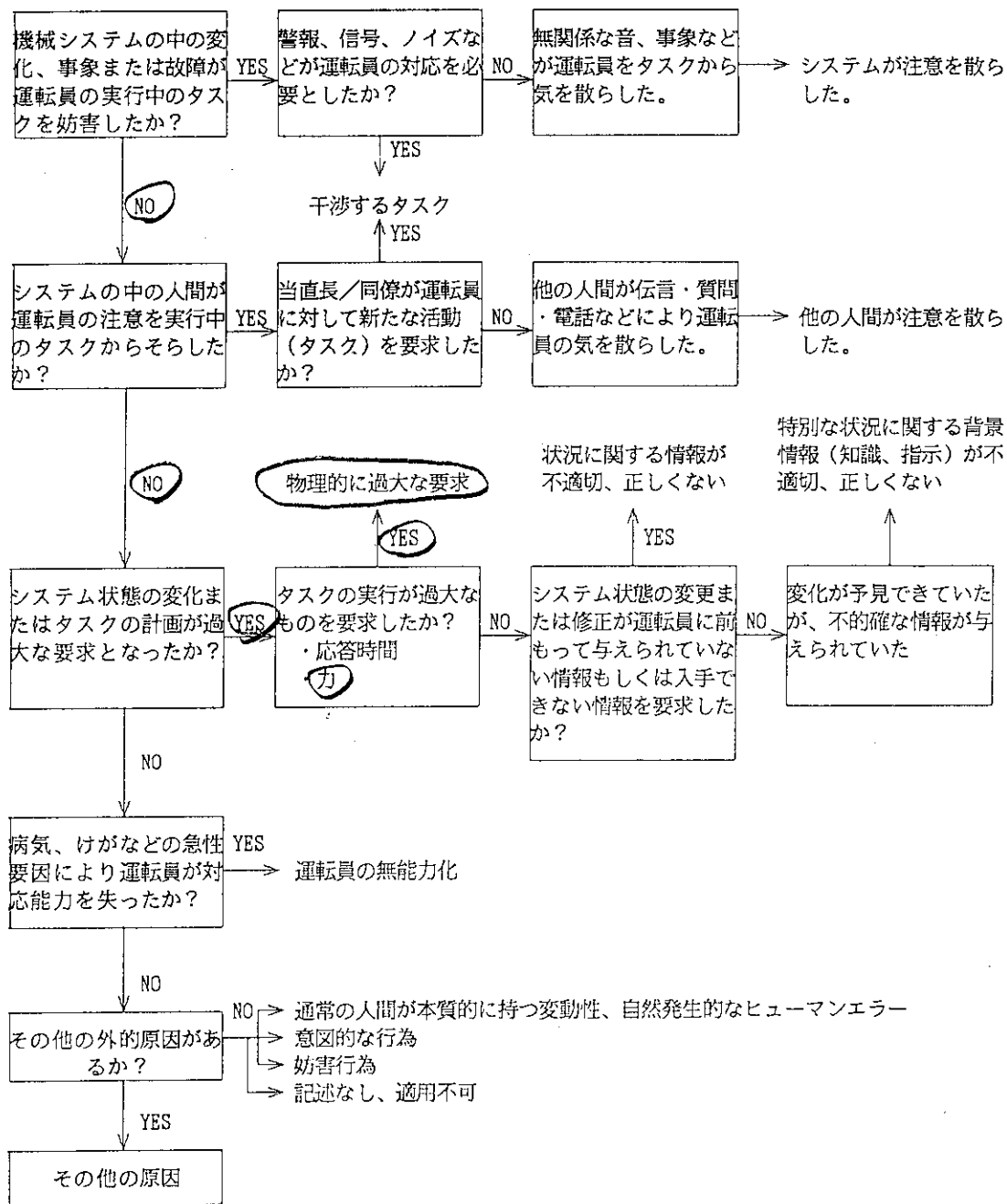
状況因子のうちタスク特性 (Preparedness) に関する分析ガイド

図 2.4.4 Rasmussen の手法による Davis Bessee 事象の分析チャート (6/6)
(補助給水系回復操作 1)



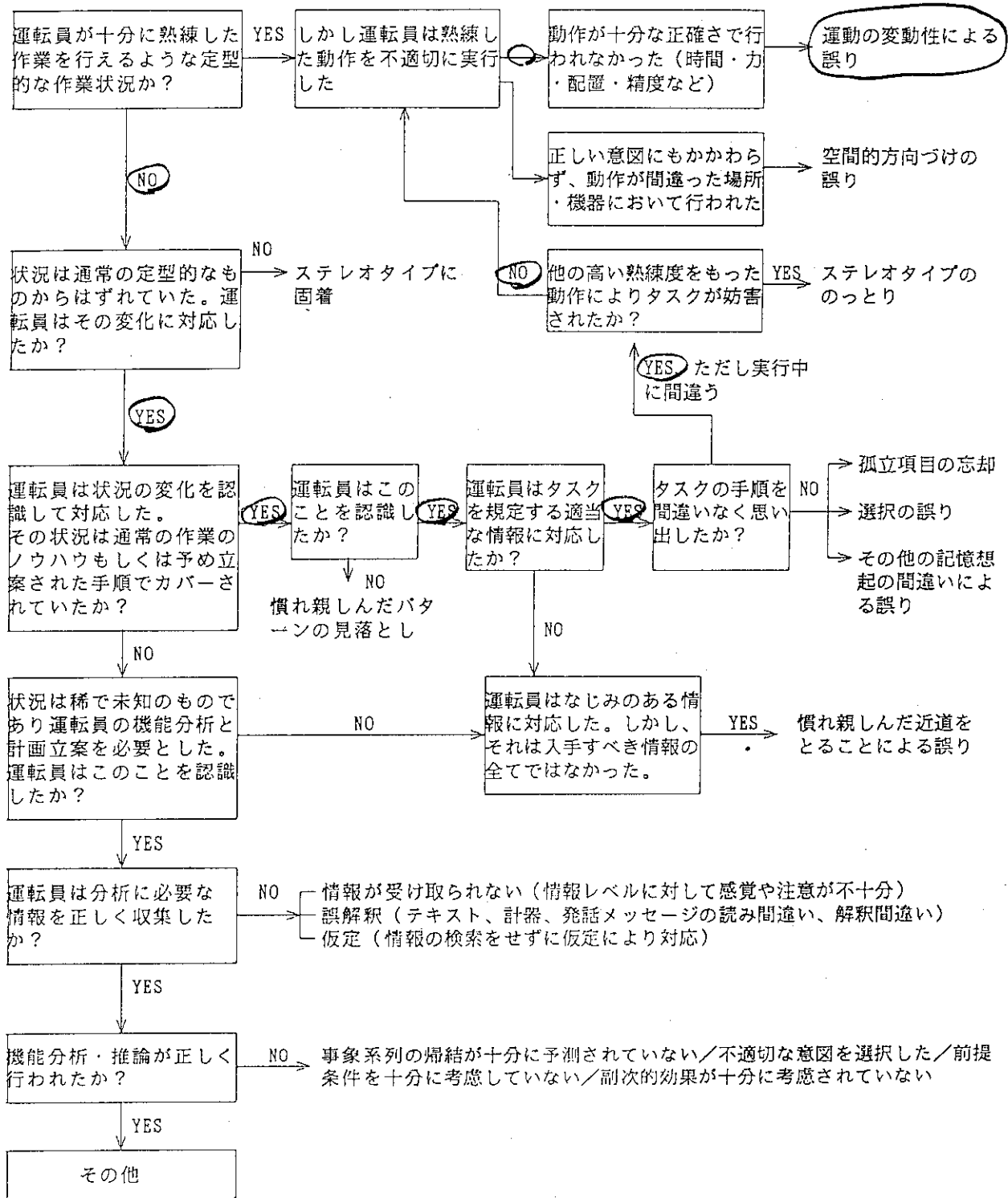
Rasmussen の提唱する人間の機能不全を含む事象の既述と分析のための多面的分類法

図 2.4.5 Rasmussen の手法による Davis Bessee 事象の分析チャート (1/6)
(補助給水系回復操作 2)



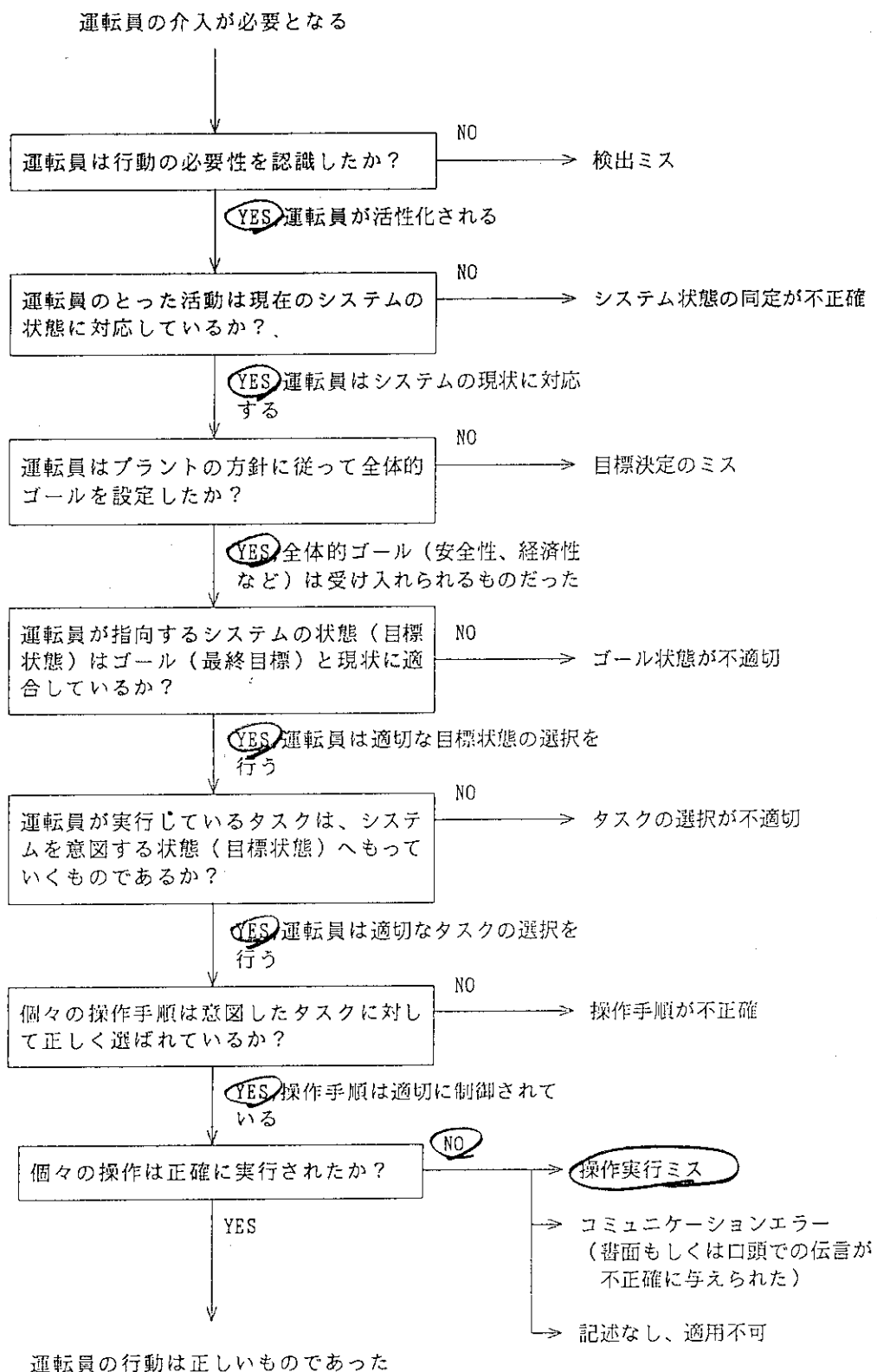
人間の機能不全の原因に対する分析ガイド

図 2.4.5 Rasmussen の手法による Davis Bessee 事象の分析チャート (2/6)
(補助給水系回復操作 2)



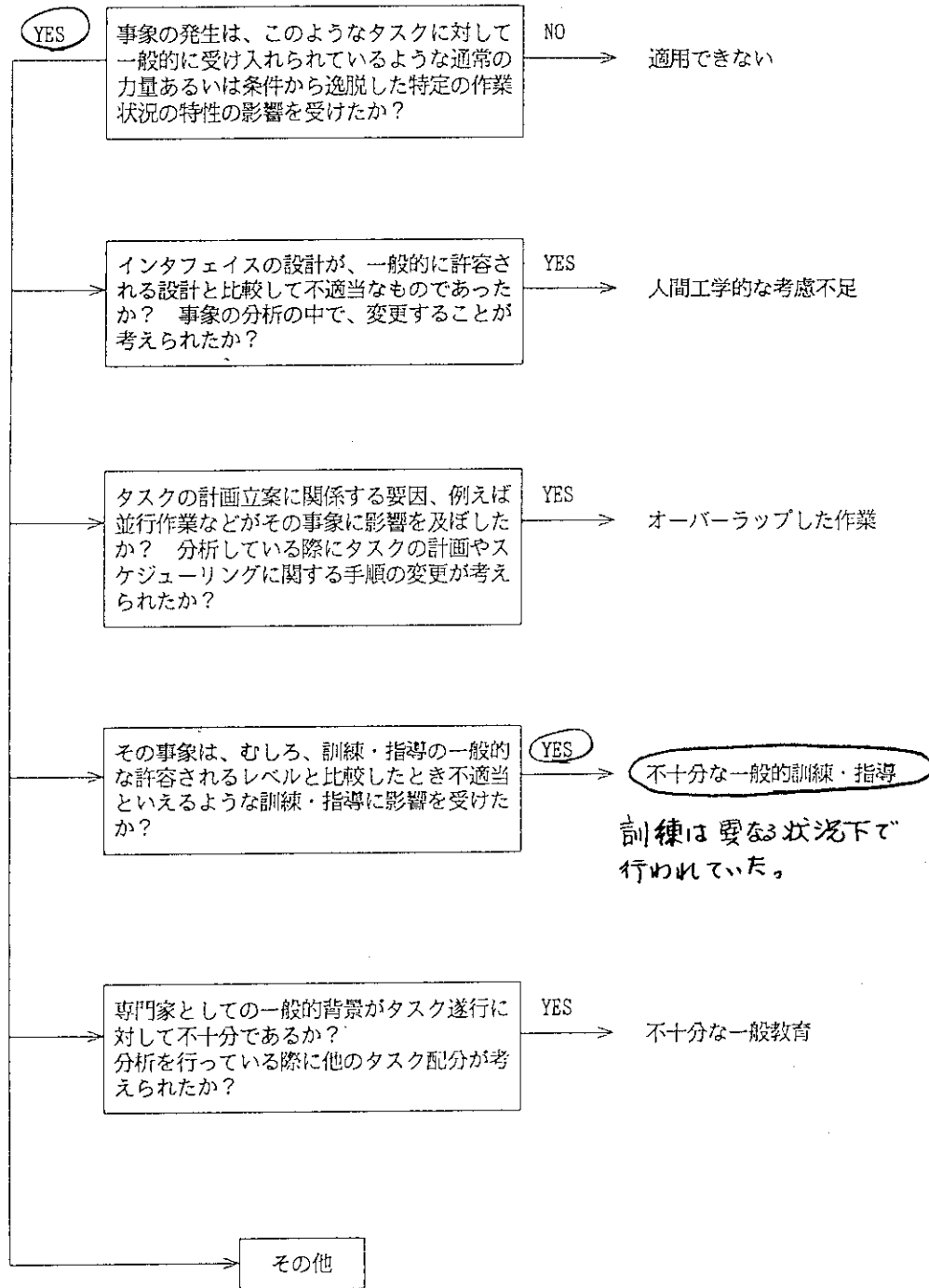
人間の機能不全のメカニズムの分析ガイド

図 2.4.5 Rasmussen の手法による Davis Bessee 事象の分析チャート (3/6)
(補助給水系回復操作 2)



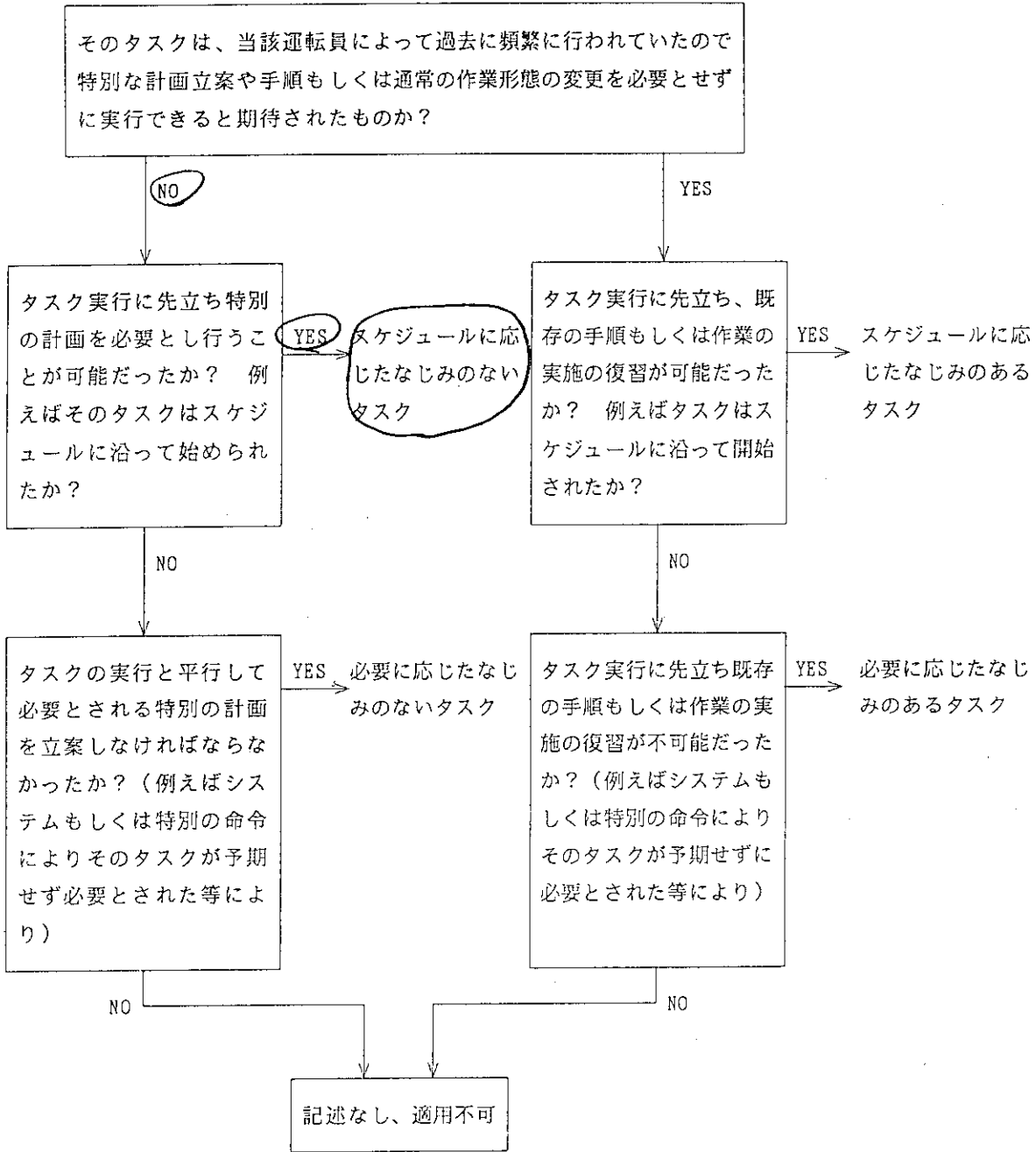
人間の内的な機能不全の分析ガイド

図 2.4.5 Rasmussen の手法による Davis Bessee 事象の分析チャート (4/6)
(補助給水系回復操作 2)



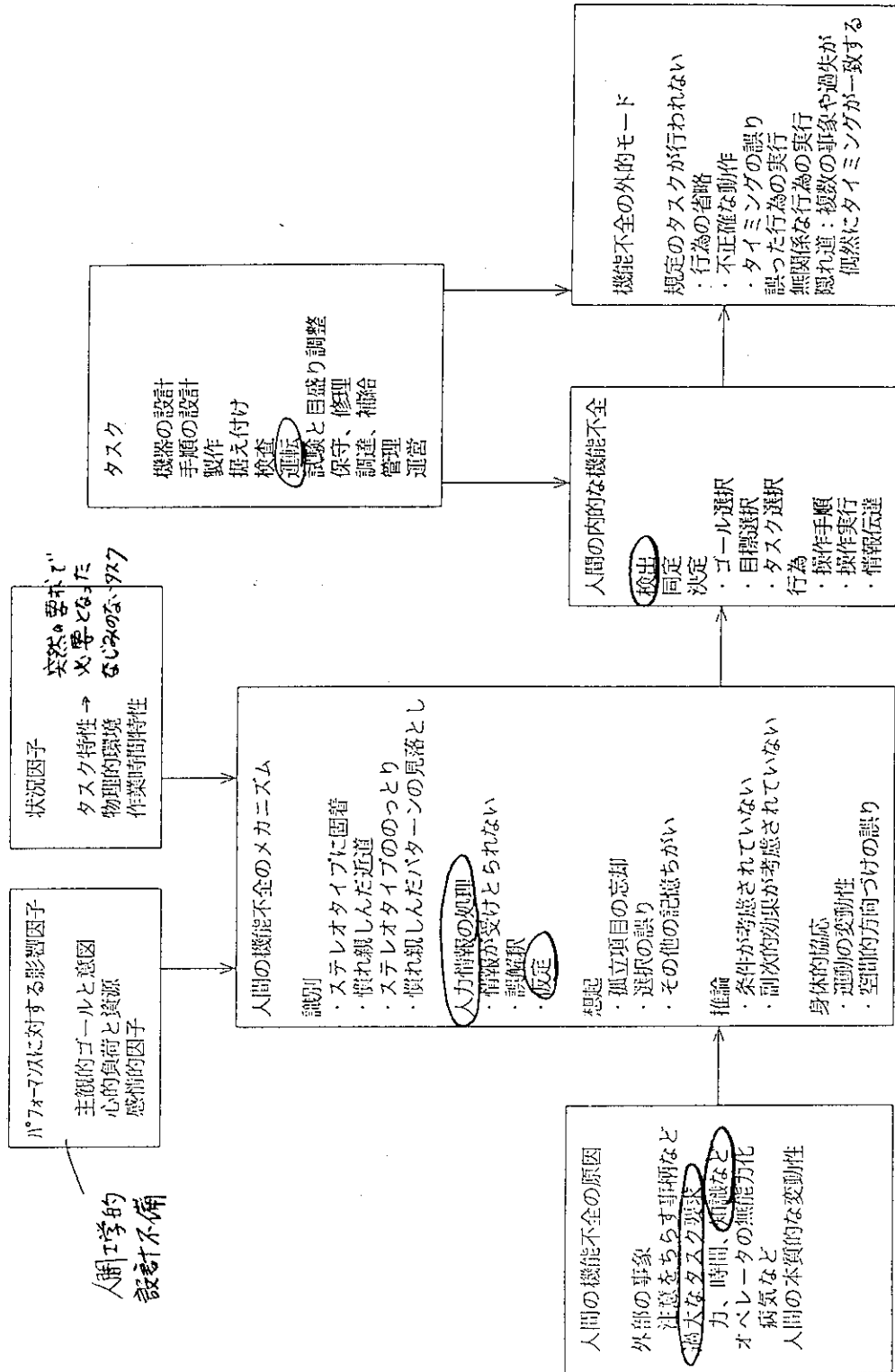
パフォーマンスに対する影響因子のうち心的負荷と資源に対する分析ガイド

図 2.4.5 Rasmussen の手法による Davis Bessee 事象の分析チャート (5/6)
(補助給水系回復操作 2)



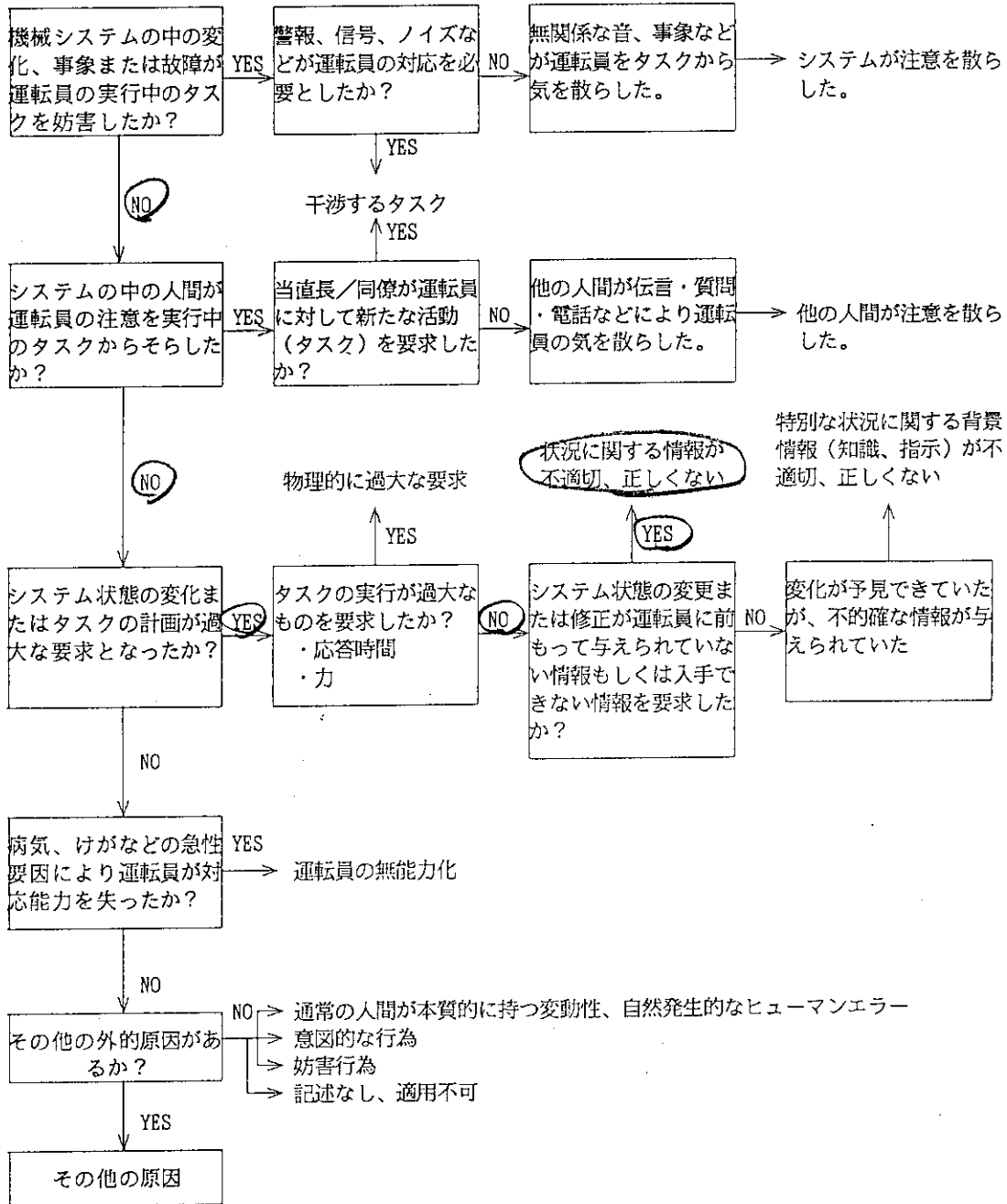
状況因子のうちタスク特性 (Preparedness) に関する分析ガイド

図 2.4.5 Rasmussen の手法による Davis Bessee 事象の分析チャート (6/6)
(補助給水系回復操作 2)



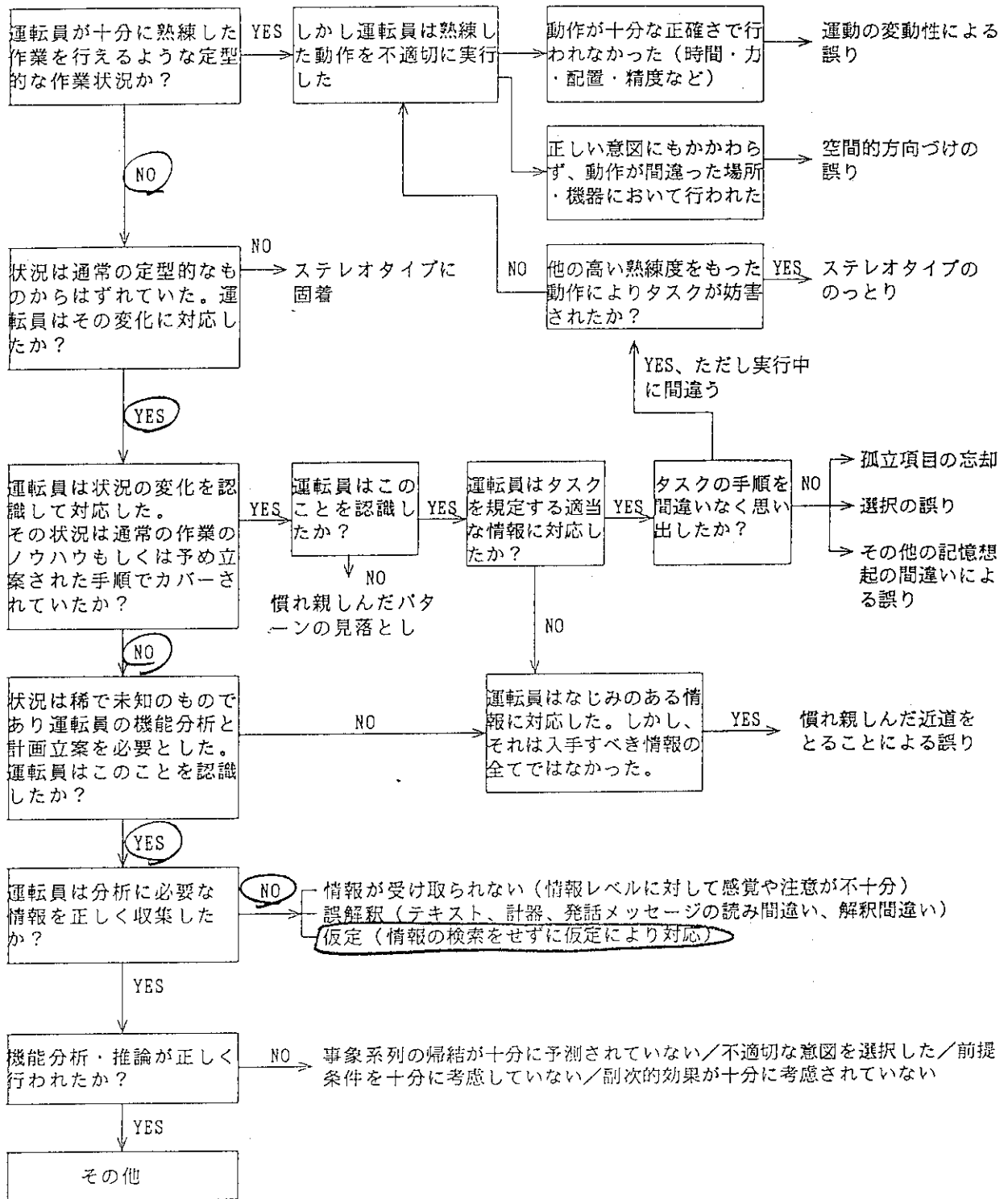
Rasmussenの提唱する人間の機能不全を含む事象の既述と分析のための多面的分類法

図 2.4.6 Rasmussenの手法によるDavis Bessee事象の分析チャート(1/6)
(PORV閉固着の検出)



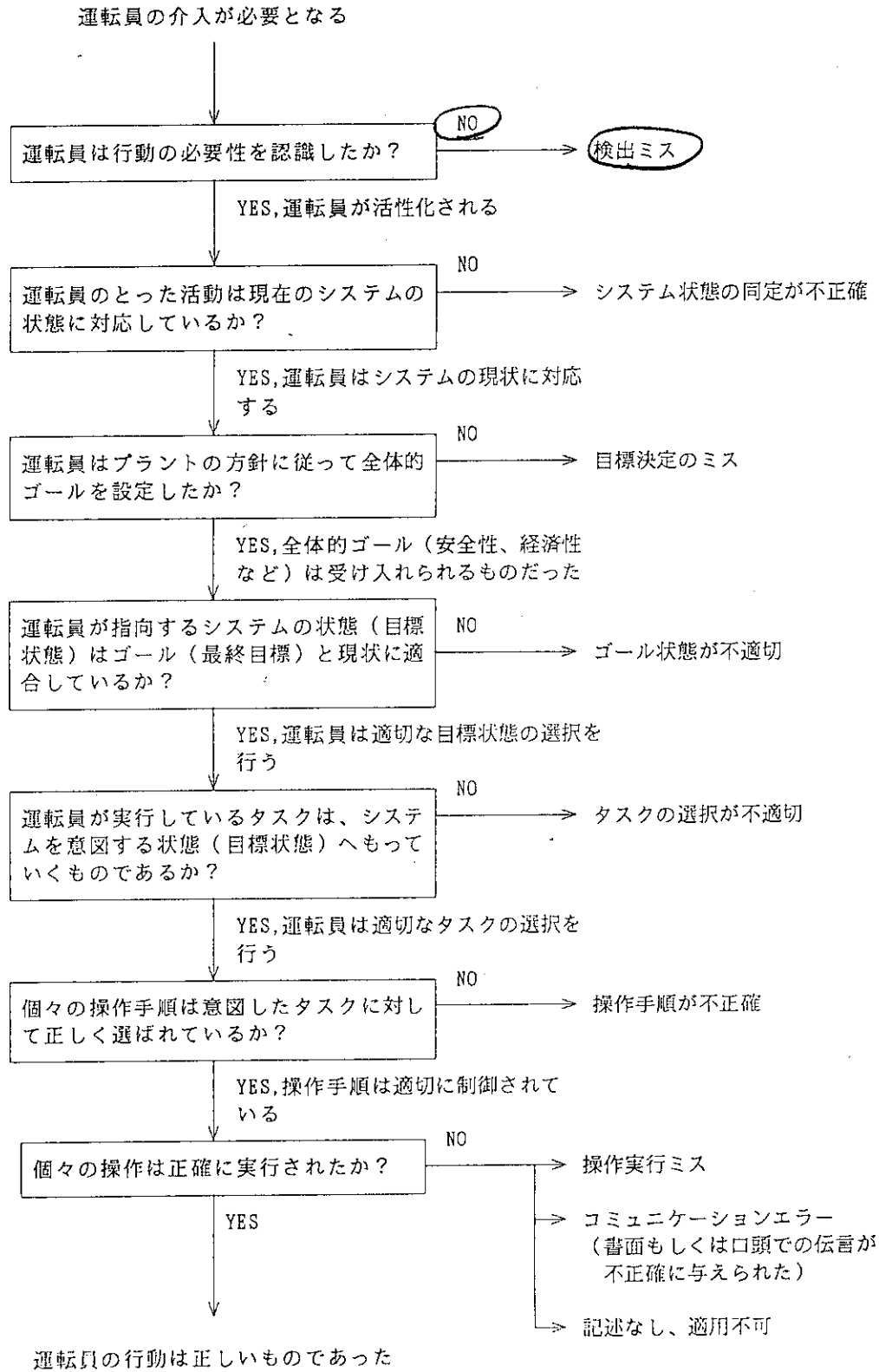
人間の機能不全の原因に対する分析ガイド

図 2.4.6 Rasmussen の手法による Davis Bessee 事象の分析チャート (2/6)
(PORV 開固着の検出)



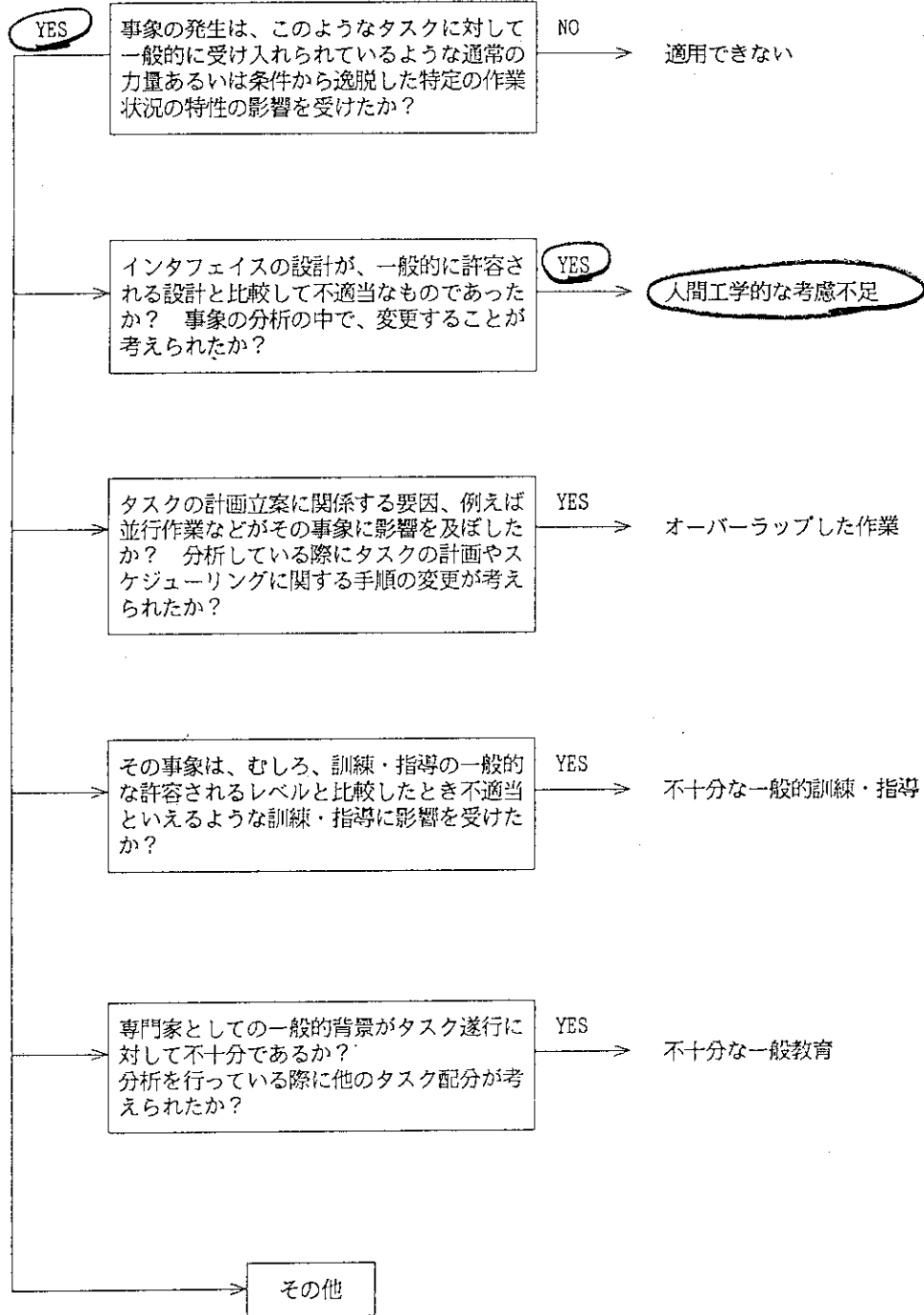
人間の機能不全のメカニズムの分析ガイド

図 2.4.6 Rasmussen の手法による Davis Bessee 事象の分析チャート (3/6)
(PORV 開固着の検出)



人間の内的な機能不全の分析ガイド

図 2.4.6 Rasmussen の手法による Davis Bessee 事象の分析チャート (4/6)
(PORV 開固着の検出)



パフォーマンスに対する影響因子のうち心的負荷と資源に対する分析ガイド

図 2.4.6 Rasmussen の手法による Davis Bessee 事象の分析チャート (5/6)
(PORV 開固着の検出)

2. 5 San Onofre 事象

San Onofre-1号炉における1985年11月21日の事象について参考文献(3)に記載の情報をもとに、以下の概要とクロノロジーをまとめる。

San Onofre-1 は、ウェスチングハウス社製のPWRである。システムの概念を図2.5.1に示す。この炉の商業運転は1968年1月より開始された。

(1) 事象の概要

本事象は、安全系等に給電している母線1Cの地絡を調査している時に、補助変圧器の保護リレーが働いたことによる母線2Cの電源喪失をきっかけに、手動原子炉トリップ及び所内交流電源喪失、蒸気発生器給水喪失、さらにその回復の過程でWater-Hammerの発生による給水管の破損が発生した事象である。

1985年11月20日深夜、日中に生じた主復水器内への海水漏洩の修復中のため、プラントは60%出力(250MWe)で運転されていた。冷却水循環ポンプの1台が止められ、蒸気発生器の海水による塩分濃度を低くするために各蒸気発生器の2次側ブローダウン流量が40gal/minから100gal/minに増加されていた。

午後11時50分頃、4160V母線1Cの地絡検出器によって100%地絡が検出された。図5.2に示すように、母線1Cは安全系に係わる機器に通常運転時に給電する母線であり、この母線への給電は、図5.3に示すように、母線2Cと共にサイト外から補助変圧器Cを介して行われる。地絡検出器による警報は、母線1Cのどこで地絡が発生したかを示すものではなかった。これを同定する作業の結果、地絡は母線1Cと補助変圧器Cの間であることが判明した。この作業の中で、原子炉を停止せずに、即ち母線1Cへの通電を停止せずに作業を行うために、母線1Cへは補助変圧器Cではなく母線1Aから電力を供給するように接続していた。補助変圧器Cは通電状態のまま母線2Cに電力を供給していた。しかし、この給電方法は、運転手順書に載っていないものであった。これが21日午前4時30分頃であった。

電気関係の技術者2人が補助変圧器Cを目視調査をしていた午前4時51分、補助変圧器Cに過電流が流れサーキットブレーカが働き補助変圧器Cが隔離された。これにより所外交流電源が喪失、即ち母線2Cの電源が喪失し種々の機器が停止した。通常の電源構成になっていれば母線2Cの電源喪失と同時に母線1Cも電源が喪失するはずであったが、上述のように母線1Cは母線1Aを通して一次的に所内電源から給電するように接続していたため電源が確保されていた。

母線2Cの電源喪失により東-主給水ポンプが停止した際にこのポンプの吐出側の逆止弁が開固着したため、電源のある母線1Cに接続されていた西-主給水ポンプにより東-給水加熱系が加圧され、この加圧により復水器の細管及びエバポレータシエルが破損した。

母線2Cの電源喪失が起きたことは当直責任者(Shift Superintendent)により見出され、この当直責任者の判断により、電気系統取扱緊急手順書に従い原子炉手動トリップ、続いてユニット・トリップ(主変圧器出力回路ブレーカ4012,6012開、補助変圧器A,B出力回路ブレーカ11A04,11B04開、及びタービン・トリップ)が行われた。この操作により所内交流電源が喪失し、結果として全交流電源喪失となった。

所内交流電源の喪失と同時に西一主給水ポンプもトリップした（蒸気発生器給水喪失）が、このとき西一主給水ポンプの吐出側逆止弁及びC-蒸気発生器の給水制御弁下流の逆止弁が故障した。さきに復水器の細管が破損していたため、3台の蒸気発生器のインベントリが喪失し、さらにこの逆止弁の故障により給水配管中の冷却材が逆流し、水平給水配管に空の部分が発生した。

全交流電源喪失に伴って、非常用ディーゼル発電機2台が起動し、さらに外部から電源を確保するための自動スキーム（the loss of voltage auto transfer scheme）が作動した。運転員は手順書に従い、外部電源の状態（利用可能か否か）確認、SIが起動しているか否かの確認を行った。外部電源の状態はすぐに確認され、SI起動に関しては起動を示す誤信号が出ていたが、最終的に起動していないことが確認された。続いて、電源の回復については、外部からの電源確保、いわゆる外部電源からのバックフィードを優先するという手順書に従い、自動スキームの完了を待った。完了ランプが点灯したら、手動でブレーカー4012及び6012を閉じて外部電源からのバックフィードが終了する。しかし、この事故では自動スキームは起動したものの2分間待っても完了ランプは点灯しなかった。運転員は、手動操作によるバックフィードの確立を行ったが、この作業の中で操作ミス等が重なり約2分間を要したため、結果としてプラントは約4分間の全交流電源喪失を経験することとなった。

この期間中に、原子炉トリップによる主蒸気止め弁の閉止により起動された補助給水ポンプのうち、タービン駆動補助給水ポンプ（電動補助給水ポンプは電源がないため起動信号は受けたが作動しない）が暖機運転を終了し給水を開始した。しかし、この補助給水給水は、給水管中を逆流している冷却水と一緒に復水器に運ばれてしまい、蒸気発生器には給水されなかった。

運転員の手動による電源回復操作が終了すると、電動補助給水ポンプも作動を始めたため、このポンプからの給水も逆流を始めた。しかし、これらの逆流は手順書に従った「主給水系の隔離操作」により終了し、この時点から補助給水は蒸気発生器に供給されることとなった。一方、電源喪失により起動し警報を発していた放射線モニターを解除したため、隔離されていた蒸気発生器のブローダウン系が再開し、補助給水流量より大きなブローダウン流量が抽出され始めた。これにより、運転員は「1次系の温度・圧力が低下している（1次系が過冷却されている）にもかかわらず蒸気発生器の水位が低下する」という矛盾した状況に直面することとなる。

このような状況の中で、先に逆流した補助給水のために主給水管内で“Water Hammer”が発生し、給水チェック弁が破損、主給水管に大きなクラックが発生した。これにより大量の水蒸気及び水の漏洩が始まり、本事象の中での2番目の漏洩となった。この音は制御室内でも聞くことが出来たが、発生現場で作業を行っていたEquipment Operatorが「主蒸気管が破損した」と報告した。この時Water Hammerの発生と給水チェック弁の破損を運転員に知らせる情報は、制御室内には何もなかった。運転クルーは、Equipment Operatorの報告に基づき主蒸気管が破損したものと思っていた。蒸気発生器の水位の低下もこれに原因するものと判断していた。しかし、制御室内のいかなる計器類も主蒸気管破損による効果を示していないので、運転員達は、原子炉トリップ時の非常用手順に従った操作を継続していた。

2番目の漏洩は、さきに思いがけず再開した蒸気発生器からの通常の2.5倍の流量のブ

ローダウンと相まって、3台全ての蒸気発生器の水位は制御室に表示している水位の最低レベルよりも低くなってしまった。個々の蒸気発生器には主蒸気隔離弁がないため、全ての蒸気発生器から水蒸気が流出した。

事態の成行き全体を見守り、的確な指示を出していたShift Technical Advisorが、蒸気発生器の水位低下に対応する非常用運転指示書（EOI:Emergency Operation Instructions）を見ると「蒸気発生器のブローダウンを隔離すること」という項目があり、これを確認することにより初めて蒸気発生器の水位低下の原因として、再開していたブローダウンであると特定した。

この後は、2台の蒸気発生器への補助給水量を増やして、給水配管からの漏洩とは直接結び付けることなく水位を回復し、RHR（余熱除去系）を作動することにより、プラントは低温停止状態へ移行された。ただし、この低温停止状態は、給水配管からの漏洩が炉心での崩壊熱の除去の一端を担っているものであった。

運転クルーのシフト交替は、通常なら午前7時であるが、この事象のために低温停止状態になるまで延期され、午前10時となった。給水配管からの漏洩が弁閉止によって隔離されたのはその後(10:45)であり、Water Hammer 発生が判明したのは交替を終わった運転クルーが事象について詳細に議論している中であった。さらに、給水配管の損傷が確認されたのは翌11月22日のことであった。

(2) 事象のクロノロジー

表2.5.1に事故の詳細なプラント応答とそれに対応する運転員の振舞いをまとめたものを示す。表2.5.1から解るように、この事故事象は人的因子の観点からみると次の7つのフェーズに分けることが出来る。

- ①地絡修復時の母線1Cの接続
- ②電源喪失時の初期診断
- ③外部電源からのバックフィード操作
- ④放射線モニターのリセット
- ⑤1次系の過冷却と同時に蒸気発生器の水位が低下するという事態への対応
- ⑥Water Hammer現象の評価
- ⑦蒸気発生器のブローダウンの発見

以下これらのフェーズについて運転員の振舞いをまとめる。

①地絡修復時の母線1Cの接続

母線1Cの地絡警報の後、運転クルーは、地絡を隔離するためにその場所を同定する作業を、手順書に従って行っていた。午前3時頃、当直責任者の要請によって、手伝うために Supervisor of Coordination（1号炉の管理部門の一人で、Senior Reactor Operator の資格を持っている。）が制御室に到着した。そして、これまでにとられた行動と地絡を隔離するために可能な残されたオプションについて議論した。運転クルーは地絡対応の手順書にしたがって、西側給水ポンプを除く母線1Cに接続された全ての機器のテストを行った。原子炉をトリップすることなく西側給水ポンプをテストするためには、電氣的負荷を250MWeから150MWeに落とし、給水ポンプを共用からはずすことが必要であった。運転クルーはこの準備を行った。この時までには、電気関係の手伝いのために、2人

の電気技術者がサイトに到着し、手順書に従って調査した結果、地絡は西側給水ポンプを除いて母線1Cに接続されたどの機器の中でもないことがわかった。そして、手順書によると、次に行くことは母線1Cへの給電の停止というところまで行ってしまった。この時点で運転員達は手順書から逸脱した。当直責任者は、電気技術者の提案を受け、管理者の賛同も得て、地絡の修復方法として、手順書には載っていない一時的な方法を採用したのである。その方法は、母線1Cの通電を止めなくてもよいという利点を持っていた。すなわち、母線1Cを1Aと並列に接続し補助変圧器Aから給電し、補助変圧器Cを母線1Cから外すというものであった。この並列接続は、合計3回行われた。補助変圧器Cから母線1Cへの接続が外されたとき、地絡警報は解除された。このことは、地絡は母線1Cへ給電していた補助変圧器Cの二次側であることを示していた。これにより、地絡は母線の変圧器側であることがはっきりしたので、西側給水ポンプを外す必要がなくなった。これは、午前3時30分頃のことであった。その後4時30分には、変圧器Cでなく、母線1Aから給電されるように接続された母線1Cによって、ユニットの負荷は、150MWeから250MWeに上昇した。補助変圧器Cへの給電は止めていなかったため、母線2Cには電力が供給されていた。この通常とは異なるスイッチの接続状態は、プラントの運転手順書ではカバーされていないものである。

母線1Cへの給電を停止しなかったのは、母線への給電を停止しプラントをシャットダウンしなければならないような状況は常に避けるべきである、という Plant Specification Action Statement を守るためであった。Plant Technical Specifications によれば、「母線1Cと2Cは、常に通電しておくこと。もし、母線1Cへの給電を停止したら、8時間以内に運転可能な状態に戻すこと。もしくは、プラントのシャットダウンを行うこと。」ということが要求されている。

この後、2人の電気技術者は、補助変圧器Cとスイッチギアを目視で調べ、地絡の場所を同定するために、現場に派遣された。

②電源喪失時の初期診断

ここでは、次の2つの段階が重要となる。

- i) 母線の喪失と原子炉トリップ
- ii) SIの起動確認

i) 午前4時51分、多くの警報音が鳴り、アナンスエータが点滅する制御室で、運転クルーは「ブー」という異常音を聞いた。ただちに、5人の運転クルー全員がこの状況を診断するために、警報盤と制御盤を調べた。当直責任者は、補助変圧器Cが保護リレーによって隔離されたことを見つけた。これにより、母線2Cへの電源喪失となった。彼は、この母線喪失に対する手順に記載されている、直ちに行うべき行動に基づいて、運転員達に原子炉トリップを命じた。2人の運転員が原子炉トリップボタンを押し（どちらか一方のボタンを押せばよいのだが、確実に行うため）、もう1人の運転員は、ユニットトリップボタンを押した。このように、保護リレーによる補助変圧器Cの隔離から20秒以内に運転クルーはこの事象の起因事象を同定し対応した。

ii) 原子炉トリップと共に、所内交流電源が喪失し全交流電源喪失に至った。「全交流電源喪失」の手順書にあるSIの起動確認において、First-Outパネル上のSI起動警報が点灯していたが、過去の「ある母線の電源が喪失した場合、この警報は誤警報を出す」た

め信頼性に欠けるという経験による判断から、誤警報であると思った。しかしながら、SLSS(Safeguard Load Sequencing System)のサーベランステストパネル上のSI表示も点灯していたため、運転員はSIが起動しているかどうかの確認を行った。すなわち、加圧器及び格納容器の圧力の状態をチェックし、その結果、SIが作動する条件には至っていないこと、従って、SIは起動していないという結論に達した。

③外部電源からのバックフィード操作

補助変圧器Cが使用不可となり、ユニットトリップが行われ、全交流電源喪失となったわけであるが、電源を回復する手段は、2通りあった。各々母線1C、2Cに接続され、電源喪失によって起動していた2台の非常用ディーゼル発電機から給電する方法と、外部電源から主変圧器とA及びB補助変圧器を通じて給電するバックフィードである。非常時の手順書では、外部電源からのバックフィードを優先するとあった。

この外部電源からのバックフィードのためのネットワークの接続切り替えは、電源喪失によって作動した、外部から電源を確保するための自動スキーム (the loss of voltage auto transfer scheme) が行うが、全ての切り替えを行うわけではない。この自動スキームは、主発電機からの18KV線のMOD(Motor Operated Disconnect)を開き、母線1Aと1Bへの電源ブレーカー11A04及び11B04を閉じ、スキーム完了を表示する。運転員は、これを受けて、主変圧器出力回路ブレーカー4012と6012を手動で閉じ、さらに母線1Aと1C、母線1Bと2Cを接続するブレーカー11C01と12C01を閉じて、バックフィードの完了となる。

自動スキームは作動したが、2分間待ってもスキーム完了が表示されなかったので、運転クルーは、スキームの各ステップを確認した。その結果、ブレーカー11A04,11B04及び12C01が閉じられていないことがわかった(11C01は地絡対応の作業の中で既に閉じられていた)。このような状況は手順書でカバーされていなかった。そこで運転クルーは、手動によって外部電源のバックフィードを行うこととした。

まず、主変圧器出力回路ブレーカー4012と6012を手動で閉じる操作を行った。この操作は、以下の4つの手順から成り立っている。

- i) ユニットトリップ解除ボタンを押す (これによって、全てのブレーカーのトリップを解除する)。
- ii) 該当する同調選択スイッチを適切な制御位置に挿入し、ONにする。
- iii) 同調チェックバイパスボタンを押す。
- iv) 該当するブレーカーの制御スイッチをCLOSEの方へまわす。

1つめのブレーカーを閉じるにはこれら4つの手順全てを行う必要があるが、2つめのブレーカーに対しては、ii) と iv) の2手順を行うだけでよい。

運転員は、はじめにブレーカー4012を閉じる操作を行ったが、失敗した。手順iii)を省略してしまったのである。続いて2回目、3回目も失敗した。ユニットトリップのリセットが、主発電機のロックアップを解除していなかったためであった。Jコンソールにいた別の運転員がユニットトリップ解除ボタンを押しなおした。そして、垂直パネルにいた運転員が、ブレーカー6012を閉じる操作を行った。1回目はやはり手順iii)を省略したために失敗したが、2回目の試みで、6012閉に成功した。4012は開いたままであったが、主変圧器、A及びB変圧器への給電が行われ、続いてブレーカー11A04を閉じ母

線1A及び1Cへ給電し（11C01は前述にあるように閉じられていた）、さらにブレーカー11B04及び12C01を閉じて母線1B及び2Cへ給電して、外部電源からのバックフィードを完了した。

しかし、これらの操作に約2分を要したため、自動スキームの完了表示を待っていた2分と合わせて、4分間の全交流電源喪失となった。また、ブレーカー4012が閉じられたのは後のことである。

④放射線モニターのリセット

制御室に来ていたSupervisor of Coordinationは、電源回復後、警報を発していた放射線モニターを当直責任者（Shift Superintendent）の許可を得てリセットした。

この放射線モニターは、通常は各蒸気発生器からのブローダウン水を採取して放射能濃度を継続的にモニターし、高放射能レベル、またはモニターの制御電源の喪失を検知すると、制御室に警報を発するとともに、自動的にブローダウンを隔離する、という機能を持っている。本事象の場合、電源喪失により、警報発信と蒸気発生器のブローダウン隔離が行われていた。

電源回復後もこの状態は継続しており、警報を手動でリセットすることによって、ブローダウンが再開され放射線モニターの監視機能が回復する。

したがって、Supervisor of Coordinationが行ったリセット操作によって、隔離された蒸気発生器のブローダウンが自動的に再開したのである。しかも、前日、復水器での海水漏洩への対応として増加された、通常の2.5倍の100gal/minという流量のブローダウンが再開されたのであった。

⑤1次系の過冷却と同時に蒸気発生器の水位が低下するという事態への対応

電源回復にともない加圧器水位と蒸気発生器水位が予想よりも低いことが分かった。これに対して、運転員はまず加圧器水位を回復するために充填ポンプの起動を行った。この操作によっても加圧器水位が回復しないため、運転員は1次系が冷却されているものと思いSIの起動を避けるために補助給水系の停止を行った。しかしながら、この操作により蒸気発生器の水位が急速に低下したため、蒸気発生器のドライアウトを避ける目的で当直責任者により再起動された。この時、蒸気発生器から通常の2.5倍の流量のブローダウンが行われていることはもちろん、前記④の放射線モニターのリセット操作によって蒸気発生器のブローダウンが再開したことすら誰も理解していなかった。したがって、水位が低下しながらも1次系を冷却するという状況が理解できなかった。

⑥Water Hammer現象の評価

主給水管のチェック弁がWater Hammerによって破損したとき、運転員は制御室内で大きな音を聞いた。Equipment Operatorは、このとき蒸気発生器のクールダウンを最小限にする目的で、主蒸気管のブロック弁を閉じるためにタービン建屋に派遣され、ちょうどその現場にいわせられた。作業に取り掛かろうとしたとき、彼はドカンという音と共に衝撃波を感じ、同時に水蒸気に覆われてしまった。彼は、ずぶ濡れになりながらそこから逃げだし、制御室に戻ると、「主蒸気管が破損した」と報告した。

この時Water Hammerの発生と給水チェック弁の破損を運転員に知らせる情報は、制御

室内には何もなかった。運転クルーは、Equipment Operatorの報告に基づき主蒸気管が破損したのと思っていた。蒸気発生器の水位の低下もこれに原因するものと判断していた。しかし、制御室内のいかなる計器類も主蒸気管破損による効果を示していないので、運転員達は、原子炉トリップ時の非常用手順に従った操作を継続していた。

⑦ 蒸気発生器のブローダウンの発見

この発見は補助変圧器Cが隔離されてから11分経過して制御室に到着したShift Technical Advisorによって行われた。STAは運転クルーとある程度独立に制御室内で作業を行っており、蒸気発生器のブローダウンの発見も「蒸気発生器の水位を確保する方法が他にないか」という観点で手順書のチェックを行っているときに行われた。

以上より、この事象では、①、③、⑤、⑥の中にヒューマンエラーによるものがあると考えられる。

(3) 人的因子に関する分析

本事象で運転員のとった行動の中でエラーと考えられるものは、

- 1) 地絡修復時の母線1Cの接続に関するエラー
- 2) 外部電源からのバックフィード操作に手間取ったエラー
- 3) 1次系の過冷却と同時に蒸気発生器の水位が低下するという事態への対応できなかったエラー
- 4) Water Hammer現象の評価に関するエラー

である。

1) 地絡修復時の母線1Cの接続に関するエラー

このヒューマンエラーに関してRasmussenの分析ガイドによる分析のチャートを図2.5.4に示す。このエラーは手順書からの逸脱、すなわち外的モードとしては「誤った行為の実行」である。手順書に従って作業を進めていけば、母線1Cへの給電を停止し、プラントのシャットダウンへと移行して、その後生じた異常事象には至らずにすんだであろう。手順書から逸脱した原因は、運転クルーではない地絡の調査に来ていた電気技術者からの「誤った行為の提案」である。すなわち、母線1Cを1Aと並列につないで補助変圧器Aから給電すれば母線1Cの通電を止める必要はない、ということが提案されたのである。母線1Cへの給電を停止すると、既に60%に減少させているプラントの出力をさらに減少させなければならないし、“8時間以内に地絡を修理しなければプラントをシャットダウンしなければならない”というルールもあった。運転クルーは、プラントのシャットダウンは避けられないであろうと考え、その準備に入っていた。その時の電気技術者からの提案は、このまま地絡が修理できれば、出力も下げず、もちろんプラントも止めず、うまい方法に見えたのであろう。このような「主観的な意図」が影響因子として働き、手順書から逸脱した方法を、検討はしたものの採用してしまった。そのエラーのメカニズムは、「副次的効果が考慮されていなかった」というものであろう。すなわち、補助変圧器Aは内部で元々地絡させているので、この接続切り替えの時に短時間ではあるが地絡が起きている可能性のある補助変圧器C

と並列接続されることによってさらに悪い状態に至るかも知れない、また、このような接続状態に対応する手順書はない、といった効果である。また、復水器内への海水漏洩の修理中のため出力を下げて運転している時の地絡への対応という「必要に応じて発生したなじみのないタスク」であり、「夜間シフト」であったという状況因子も多少なりとも影響していよう。このようにして、手順書から逸脱してしまったエラーの内的機能不全は、手順書でカバーされていない母線の接続状態という「不適切な目標状態」を選択したというものである。

2) 外部電源からのバックフィード操作に手間取ったエラー

これは、手動でブレーカー4012と6012を閉じて外部電源からのバックフィードを完了させるために、電源喪失時からバックフィードのための接続を自動的に行うスキームの終了ランプの点灯を2分待ったが、点灯しなかったので、手動でバックフィードをする際に失敗を繰り返し手間取ってしまったエラーである。

このヒューマンエラーに関してRasmussenの分析ガイドによる分析のチャートを図2.5.5に示す。このエラーの原因は、各手順の必要性を十分に理解していなかった、すなわち手動による外部電源からのバックフィードを必要とする「特別な状況に関する知識が不適切」であった。そのメカニズムとしては、「不十分な教育・訓練」（行動影響因子）及び、「必要に応じて発生したなじみのないタスク」（状況因子）であったために、各手順を行う「前提条件が考慮されていなかった」ということになる。そしてこれが「操作手順が不正確」という内的な機能不全となり、「手順の省略」を繰り返し「規定のタスクが行われぬ」外的モードとなった。

この分析では、2分間待って自動スキーム完了の表示が出なかったために故障したと判断したことについては、含まれていない。文献(3)には、自動スキームの終了には、4分近くかかったのではないかと記されているが、調査の結果を待たないとはっきりしないとも記されている。しかし、実際には、外部電源からのバックフィードが終了したのが電源喪失後4分なので、自動スキームに異常なく4分で終了したとすれば、その後ブレーカー4012と6012を閉めていたのでは、手間取ったとされるこの場合よりも電源回復は遅れてしまうことになる。もちろん、この自動スキームに要する時間を予め把握していなかったことは、訓練、手順書の欠陥と言うことができよう。

ここで、文献(3)の中に情報がなかったために、報告者が疑問に感じる部分を記しておく。運転員が、終了しない自動スキームを調査した結果、4160V母線のブレーカ11A04,11B04がまだ開いていることがわかった。ここから手動操作を行ったのであるが、自動スキームを手動で行うよりも先に、手動で行うブレーカー4012,6012の閉止を行ったのが不明である。また、自動スキームが2分以上かかってもまだ進行中であったのなら文献(3)に記してある内容で問題はないが、そこで滞っていたのであれば、その原因と思われる状態がある。すなわち、自動スキームが11A04,11B04を閉じる時には、通常であれば、11C01,12C01は共に開いているはずであるが、先の地絡対応時に手順書から逸脱した接続の結果11C01は閉じられていた。このことが、自動スキームが11A04を閉じる前提条件を満たしていなかったのではないかという疑問である。

3) 1次系の過冷却と同時に蒸気発生器の水位が低下するという状況を同定できなかったエラー

このヒューマンエラーに関してRasmussenの分析ガイドによる分析のチャートを図2.5.6に示す。このヒューマンエラーの原因は、電源回復後行われた放射線モニターのリセットによって再開していた蒸気発生器のブローダウンという「状況に関する知識」が不適切であったということが挙げられる。これに蒸気発生器のブローダウン流量の表示が制御室にないという「人間工学的考慮の欠けた設計」、「不十分な訓練・指導」が行動影響因子となり、さらに「必要に応じて発生したなじみのない」タスク特性が状況因子となって、「情報が受け取れない」という人間の機能不全のメカニズムとなった。そして、内的な機能不全、蒸気発生器の水位低の原因の「同定失敗」となり、外的モードとして「誤った行為の実行」すなわち補助給水系の停止となった。

ここで報告者が気になるのは、蒸気発生器のブローダウン再開をもたらした放射線モニターのリセットを始めから制御室にはいなかったSupervisor of Coordinationが行ったという点である。当直責任者の許可を得てリセットしたので、この操作及び副次効果は制御室内で把握されていると考えるべきであろう。しかし、蒸気発生器のブローダウンに誰も気が付かなかったという報告から考えると、この放射線モニターのリセット操作の運転クルーの中での役割分担、情報伝達といったものに疑問がわいてくる。文献(3)の中ではこの点について特に取り上げていないので、分析するための情報が得られない。

4) Water Hammer現象の評価に関するエラー

このヒューマンエラーに関してRasmussenの分析ガイドによる分析のチャートを図2.5.7に示す。このEquipment Operatorのエラーの原因は、システム状態の変化が彼がこれを同定するには「物理的に過大な要求であった」ということである。給水管で発生したWater Hammerによる弁、配管の損傷で、ドカンという音、激しい振動と共に吹き出した水蒸気に自分自身が巻き込まれ、ほぼ同時にその場から避難しなければならなかったという突然の状況変化の中でシステム状態を同定することは、応答時間が「物理的に過大な要求」といえる。そのメカニズムは、身近で「予期せず突然発生したなじみのない事象」という状況から逃れると同時に、タービン建屋の配管の近傍で水蒸気を浴びたので、水蒸気ということから「慣れ親しんだ近道」を通して主蒸気管の破損という識別した。そしてこの突然の事象の原因の「同定ミス」という内的機能不全を起こし、制御室に戻ると主蒸気管破損を報告という「誤った行為の実行」となってしまった。

このEquipment Operatorの報告に対しての制御室の運転員の行動は、エラーには当たらないと考える。このとき制御室内では、先のドカンという音は聞こえたものの、既に蒸気発生器水位の低下という状況にあったので、Water Hammerによる給水管の破損と結び付ける情報は得られなかった。このため報告通り主蒸気管が破損したと思いついてはいたが、これに関する表示も同様に表れていないので直接対応することはなく、蒸気発生器ブローダウン隔離と補助給水量増大によって事態は收拾されていたので、エラーにあたる行動はないと考えられる。

表 2.5.1 San Onofre 事象における運転員のふるまい (1/4)

時刻	システムの状態	Shift Superintendent	Control Room Supervisor	Operator (x 2)	その他	
04:51:11	<ul style="list-style-type: none"> 補助変圧器Cのリレーが過電流を感じしサーキットブレイクがトリップする 4032, 6032サーキットブレイクが閉鎖した220kV 電源から補助変圧器Cを隔離した 12C02 サーキットブレイクが4kV 母線2Cから補助変圧器Cに隔離するために閉鎖 2C母線の電圧が低下したため次の機器の電圧がなくなる 東一主給水ポンプ 南東一復水ポンプ 北東一復水ポンプ 東一ヒータタレイオンポンプ 120V非常用母線4 	<p>多数の警報音、アナウンスエコータの点灯の中で、機器の回転数が低下する音に選ばれて「ドカーン」と鳴る音を聞く</p> <p>状況の診断のために、警報パネルと制御盤を見渡す</p> <p>補助変圧器Cが保護リレーの作動により隔離されていることに気付く(タービン・ファーストアクト・パネルから見つける)</p> <p>非常用母線の電圧が喪失していると判断</p> <p>原子炉を停止するように指示</p>	<p>原子炉を停止 ユニットをトリップ →</p> <p>{ 主変圧器出力回路ブレイク 4012, 6012 閉 補助変圧器A, B 回路ブレイク 11A04, 11B04 閉 タービントリップ</p>	<p>緊急時運転手頭章 (Emergency Operation Instructions (EOI)) のうち「原子炉トリップ及びSIの注入」のステップを次手で読み上げる。</p> <p>(1C, 2Cの母線の電圧を確認するステップまで進む) → IC, 2Cの母線の電圧が喪失していることを発見</p> <p>「全交流電源喪失」用のEOIに変更</p> <p>2ステップ目でSIが起動しているかどうかの確認をする</p> <p>次のステップでは自動シーケンサが作動していることを確認する</p>	<p>実際は誤信号であった。SIが起動していることを確認するステップが適切であったため誤信号であることがすぐに分かる</p> <p>「シーケンサが作動終了し、最後のブレイクが閉まっている。閉鎖されていない」ことを示すライトがついていない。</p> <p>2分間後、シーケンサが故障していると判断する</p> <p>220kV 用サーキットブレイクを閉鎖する。しかし、Synchronizing Check-Bypassボタンが押されていないためために失敗</p>	
04:51:31 32	<ul style="list-style-type: none"> 非常用の照明を除き全ての照明が消える 電源喪失により、抽出系、蒸気発生器のプロロー夫により、抽出系、蒸気発生器の閉鎖弁が閉 IC母線の電圧喪失により0V/G が自動起動 しかしながら、設計により自動的に母線に給電しない 外部電源からのバックフィード・スキームが起動 代替電源への自動切換に続いて、この保護制御装置が誤作動 原子炉トリップと同時に主蒸気止め弁が閉止したため蒸気発生器の水位が低下し補助給水ポンプの起動信号が送信される しかしながら、電動補助給水ポンプは電圧が喪失しているため作動信号を受けない。また、タービン駆動は遅延に3分半を要する 原子炉トリップと同時に給水制御弁が5%まで閉じる 西一主給水ポンプがトリップした際、その吐出側の逆止弁と蒸気発生器の給水制御弁の逆流の逆止弁が故障して閉じなかった。同時にA-B一蒸気発生器の給水制御弁が閉じる。東一復水ポンプの逆止弁が破損しているため全ての給水が空になる 東一復水/給水系の遮り弁が吹く。 	<p>NRC 上の直通電話に対応 (IC母線の電圧喪失に伴ってEmergency Notification Systemが作動し、制御室とNRC のオフィスで同時に電話が鳴った。しかし、両者とも相手が電話したものだと思っただけのため意味のある会話にならなかった)</p>	<p>緊急時運転手頭章 (Emergency Operation Instructions (EOI)) のうち「原子炉トリップ及びSIの注入」のステップを次手で読み上げる。</p> <p>(1C, 2Cの母線の電圧を確認するステップまで進む) → IC, 2Cの母線の電圧が喪失していることを発見</p> <p>「全交流電源喪失」用のEOIに変更</p> <p>2ステップ目でSIが起動しているかどうかの確認をする</p> <p>次のステップでは自動シーケンサが作動していることを確認する</p>	<p>実際は誤信号であった。SIが起動していることを確認するステップが適切であったため誤信号であることがすぐに分かる</p> <p>「シーケンサが作動終了し、最後のブレイクが閉まっている。閉鎖されていない」ことを示すライトがついていない。</p> <p>2分間後、シーケンサが故障していると判断する</p> <p>220kV 用サーキットブレイクを閉鎖する。しかし、Synchronizing Check-Bypassボタンが押されていないためために失敗</p>		
04:55	<ul style="list-style-type: none"> タービン動補助給水ポンプが暖機運転を終了し給水を開始する。この給水が復水系へ逆流している冷卻材といっしょに逆流してしまう。 					

表 2.5.1 San Onofre 事象における運転員のふるまい (2/4)

時刻	システムの状態	Shift Superintendent	Control Room Supervisor	Operator (x 2)	その他
04:55:13				220kV 用サーキットブレイカ4012を閉じる。しかし、unit trip lock up bus がリセットされていないため失敗	
04:55:15				220kV 用サーキットブレイカを閉じる。前と同じ結果 unit trip lock up bus をリセット	
04:55:24	電源回復に伴い、電動補助給水ポンプが起動 抽出系が自動起動、充てん系は停止したまま 加圧器水位低になり抽出系は隔離		電源回復に伴い、EOI が「全空温電源喪失」から「原 子炉トリップ及びB1注入」に変更	EO12ブレイカを閉じる。バックフィードに成功 補助変圧器Aと4kV 母線1Aのサーキットブレイカを閉 じる。これにより1A、1C母線の電源が回復 補助変圧器Bと4kV 母線1Bのサーキットブレイカを閉 じる。1B、2C母線のサーキットブレイカも閉じる。 →大気放出弁を閉める	
	SGからの蒸気の放出が止まる。		EOI が大気放出弁を閉めるように指示		
	補助給水の復水器への逆流が止まり、SGへ 給水される。		EOI が主給水のバスを隔離するように要求	→給水補助弁と電動の給水隔離弁を閉じる (要求)	
					Supervisor of Coordinationが電源喪失により 起動された放熱器モニターの解除を意図 解除
	SGのプロローダクンが自動的に閉鎖される。 (100gpa)				(許可)
04:58	加圧器水位が低下している			1台の充てんポンプを起動	
04:59	充てん系のヘッジ圧力低により2台目の充 てんポンプが自動的に起動される。				
05:00	充てんポンプの水源は水位低によりVCT か らWSIに自動的に切替られる(数回切替っ った) 加圧器水位はオフ・スケールまで低下。圧 力はWSIの設定点にまで低下しようとしてい る。		この時点で「1次系の温度・圧力が低下しているにも かかわらず蒸気発生器の水位が低下している」という 矛盾する状況に直面していた Supervisor of Coordinationも含めて議論する 1次系は冷却していると判断する WSIの起動を防ぐために補助給水系を停止する。		
05:02					

表 2.5.1 San Onofre 事象における運転員のふるまい (3/4)

時刻	システムの状態	Shift Superintendent	Control Room Supervisor	Operator (x 2)	その他
05:07	<p>SGの水位の低下が早くなる</p> <p>Water Hammerによる給水系の逆止弁の故障であった。</p> <p>10インチ径の給水管が破損 (80インチのクランクが発生)</p> <p>SGの蒸気がこの破損箇所からリーク</p> <p>8-SGへの補助給水もリーク</p> <p>RCP-Bのスタート・ベアリングの温度が高いという警報がでる。</p>	<p>補助給水の回復をoperatorに指示</p>	<p>25gpm/基に回復する。</p> <p>中盤内でも大きな音を聞く</p> <p>(Equipment Operatorの報告)</p> <p>主蒸気管が破損したと思う</p>	<p>その他</p> <p>(Equipment Operatorが生蒸気管の元弁を閉める) ために派遣される。</p> <p>元弁を閉めようとしたとき、大きな音(聞き、concussion waveを感じる。さらに蒸気につつまれそうになったためその場から離れる。</p> <p>中盤に戻って、主蒸気管が破損したと報告</p>	
05:00			<p>E01がスプレィを復旧するため、RCP-Bの起動を要求</p> <p>→起動</p>		
05:10	<p>抽出系が加圧器の水位上昇に伴い起動する</p>			<p>異常相だと思ったがSupervisor of Coordinationと話し合い、20分後にA、C-RCPを起動し、Bを停止することにする</p>	
05:17				<p>充てんポンプの水源をRSTに切り替える。</p> <p>A-RCP起動</p> <p>C-RCP起動</p> <p>B-RCP停止</p>	
05:21 27 28	<p>SGの水位がオフ・スケールになる。</p> <p>SGはドライとなる。</p>	<p>水位の急速な低下及びEquipment Operatorの報告に基づき、蒸気のリークがあると判断</p>	<p>E01の「SGドライ」の条件には合っていないかった。</p> <p>SGの広域水位 ≥ 0</p> <p>$\Delta T \geq 0$</p> <p>補助給水 $\geq 25\text{gpm}$</p> <p>が同時に満たされてなければ、SGはドライと考えられる。</p> <p>どれも満足されていなかったということに気が付かなかった。(上のパラメータもストリップチャート上ではない)</p>		

表 2.5.1 San Onofre 事象における運転員のふるまい (4/4)

時刻	システムの状態	Shift Superintendent	Control Room Supervisor	Operator (x 2)	その他
05:45		<p>リークを隔離し、補修するためにプラントを低圧停止に移行する。</p> <p>(この時点でも、運転員たちはWaterhammerが発生し、給水管に大きな損傷があったことは知らない。)</p>	<p>蒸気発生器のプロセダクションを隔離する</p>	<p>(出げる)</p>	<p>ST1が、液面水位が10%以下であるのを見て150水位下のBIBに行く、3ステップ目に「50のプロセダクションを隔離されている」というのがあった。</p>

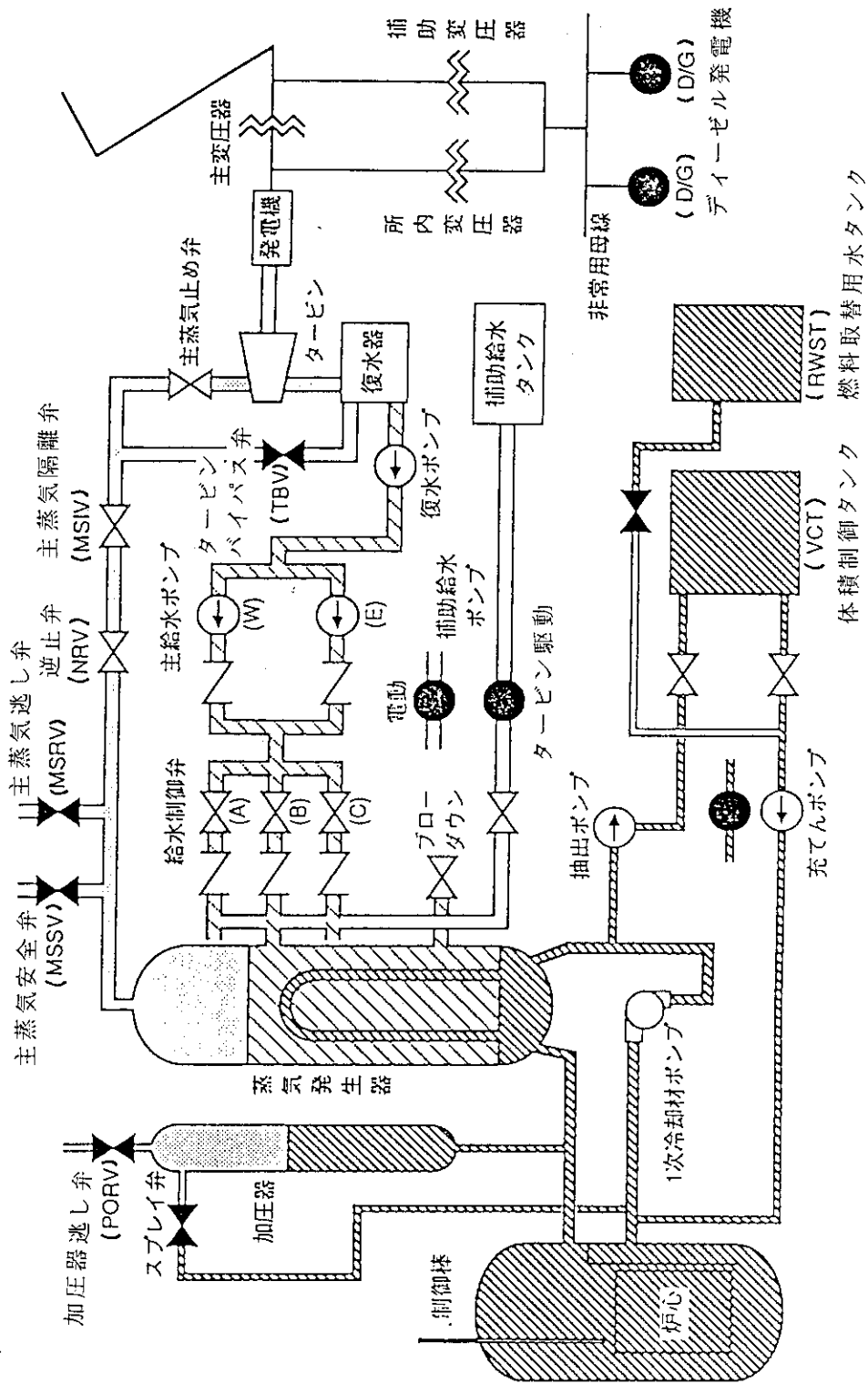


図 2.5.1 San Onofre プラント概念図

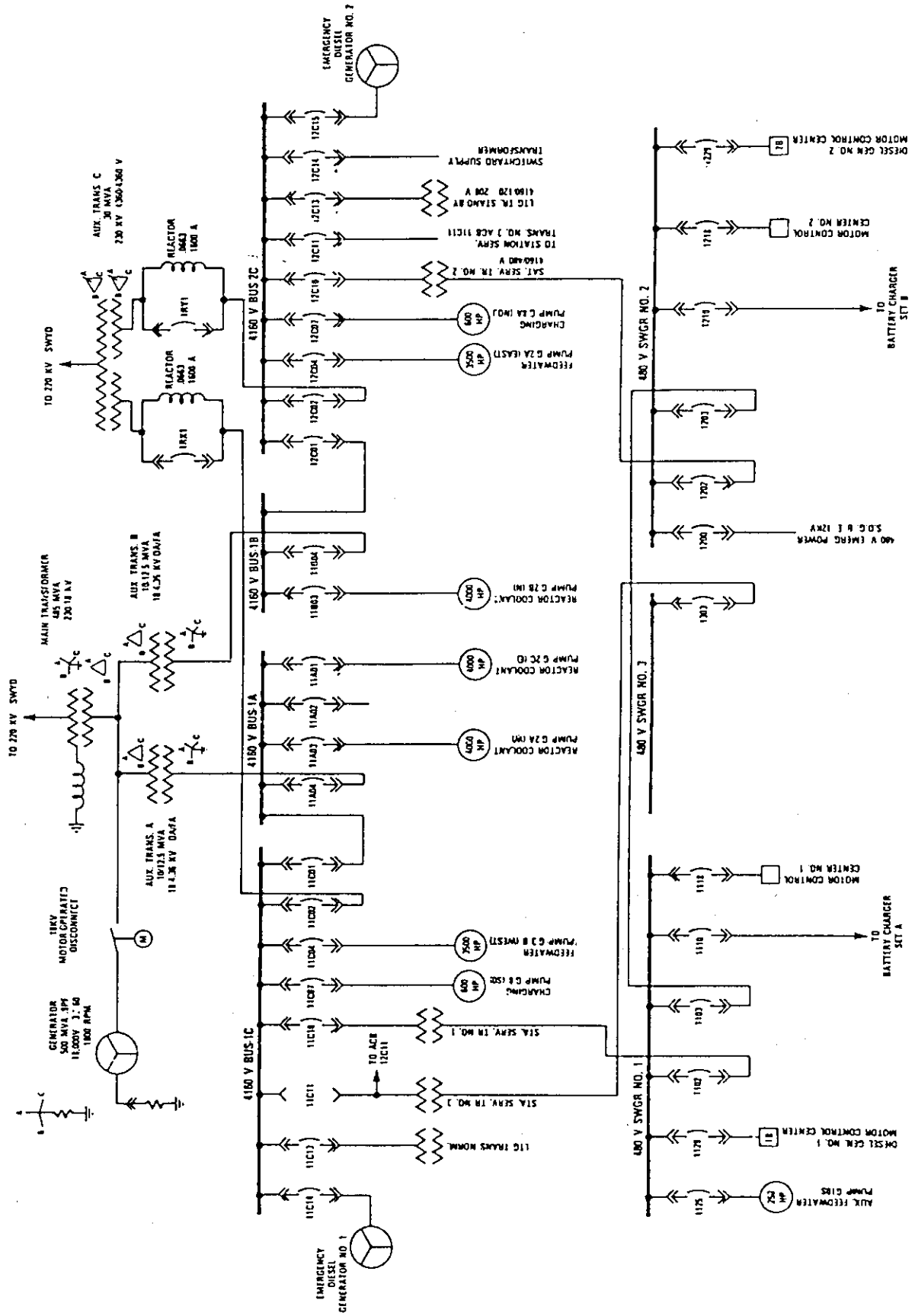


図 2.5.2 San Onofre 18kV, 4160V 及び 480V 系統図 (文献(3)より)

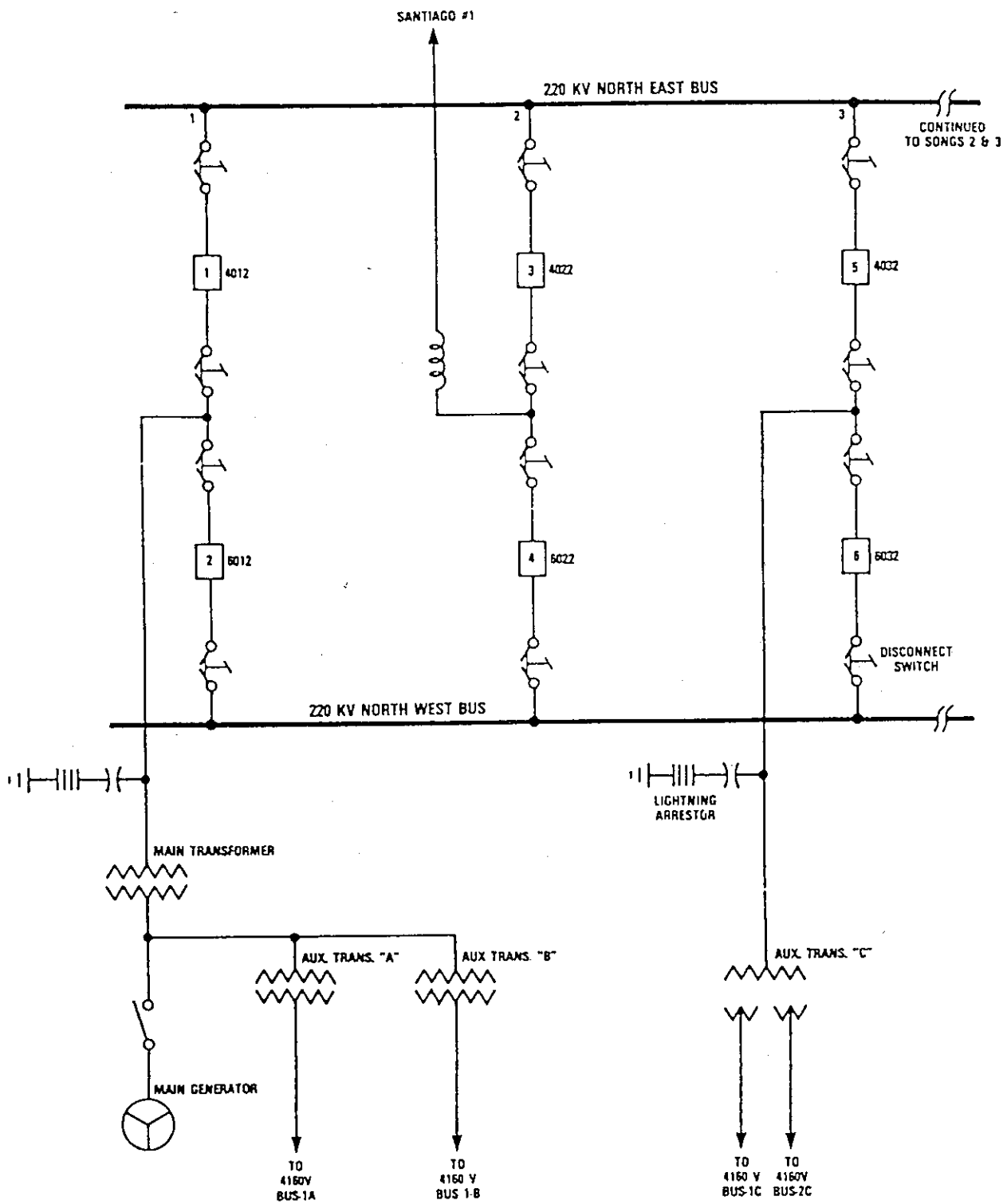
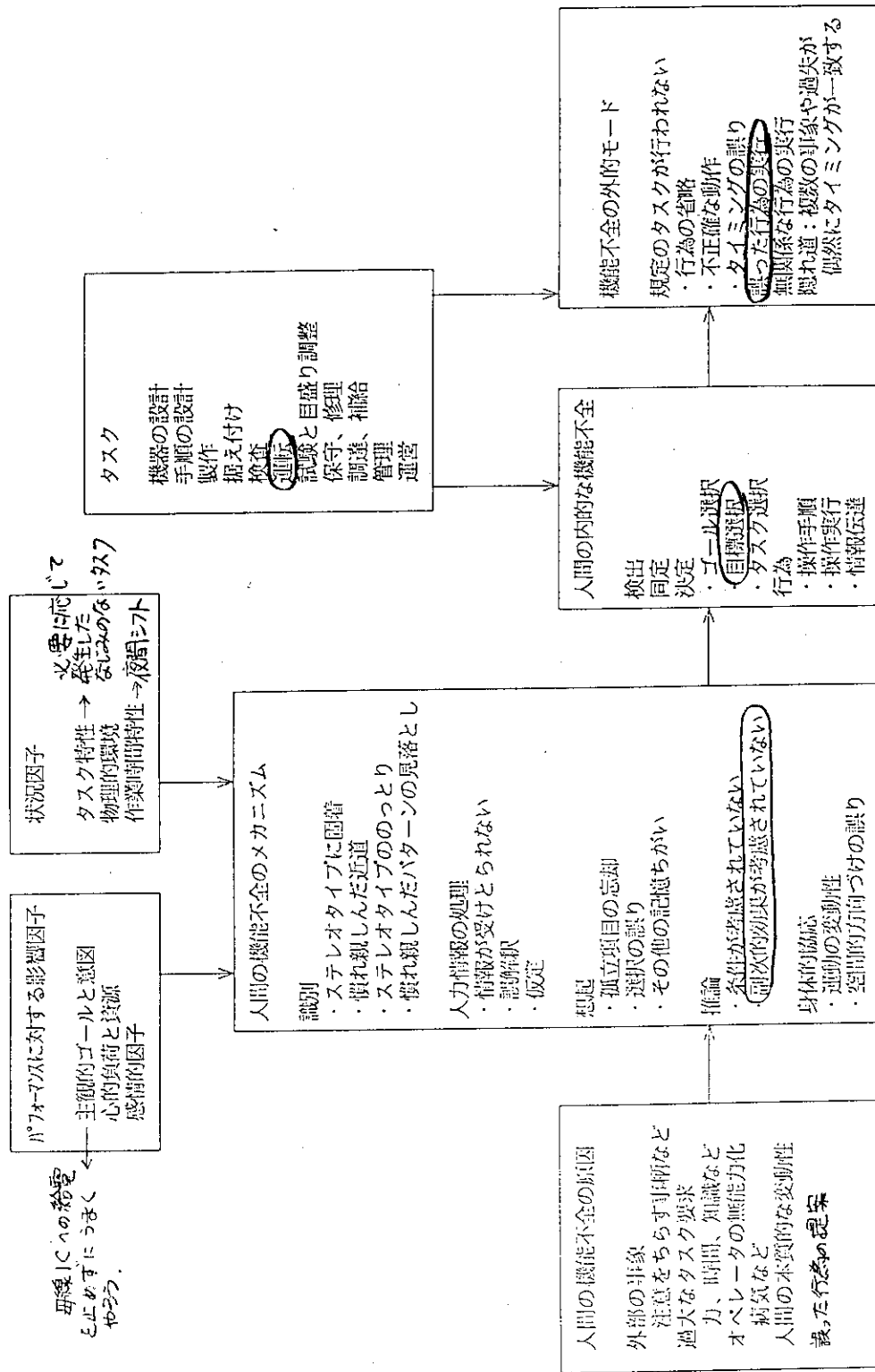


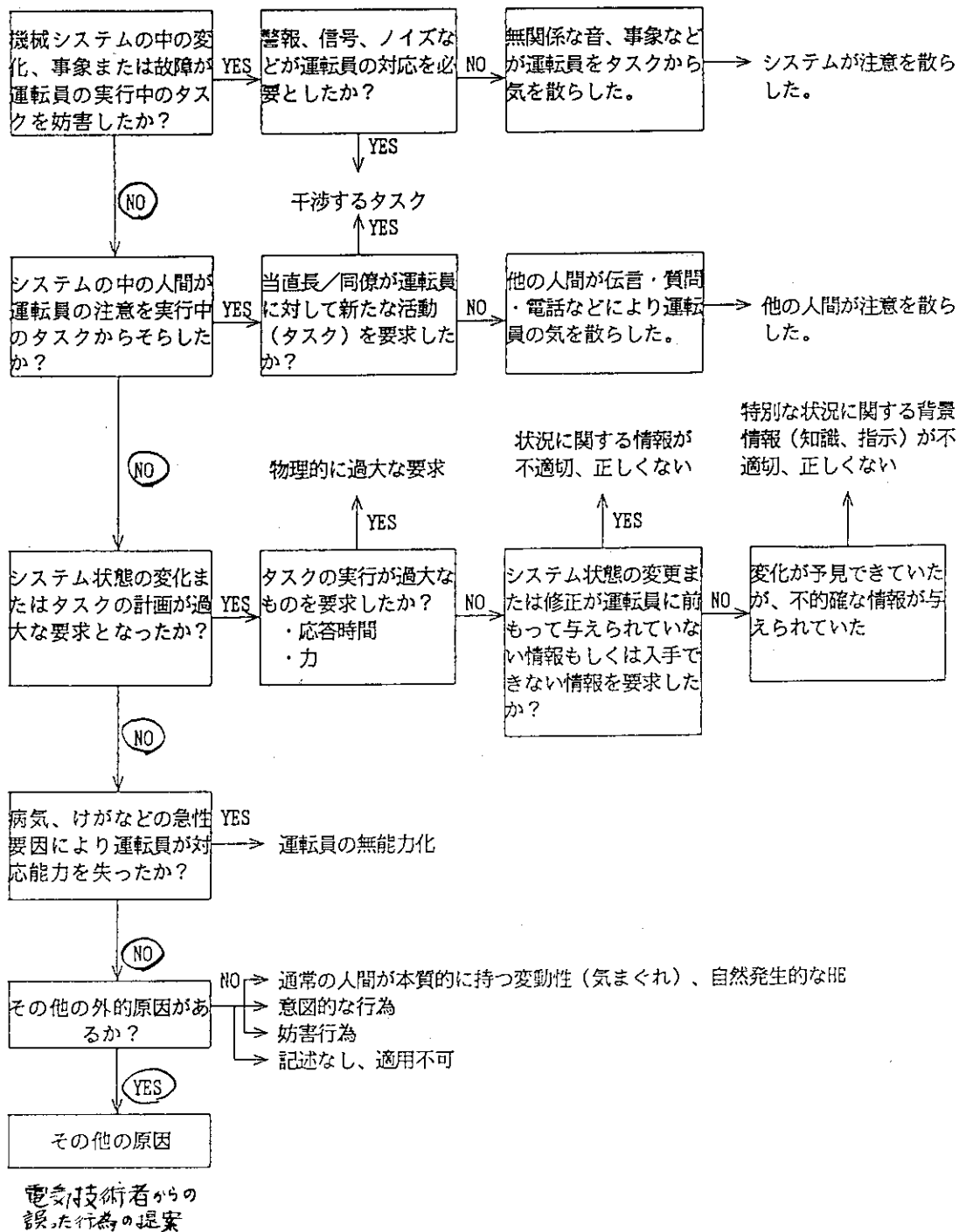
図 2.5.3 San Onofre 220 kV 系統図 (文献(3)より)



Rasmussenの提唱するヒューマンエラーの分類法

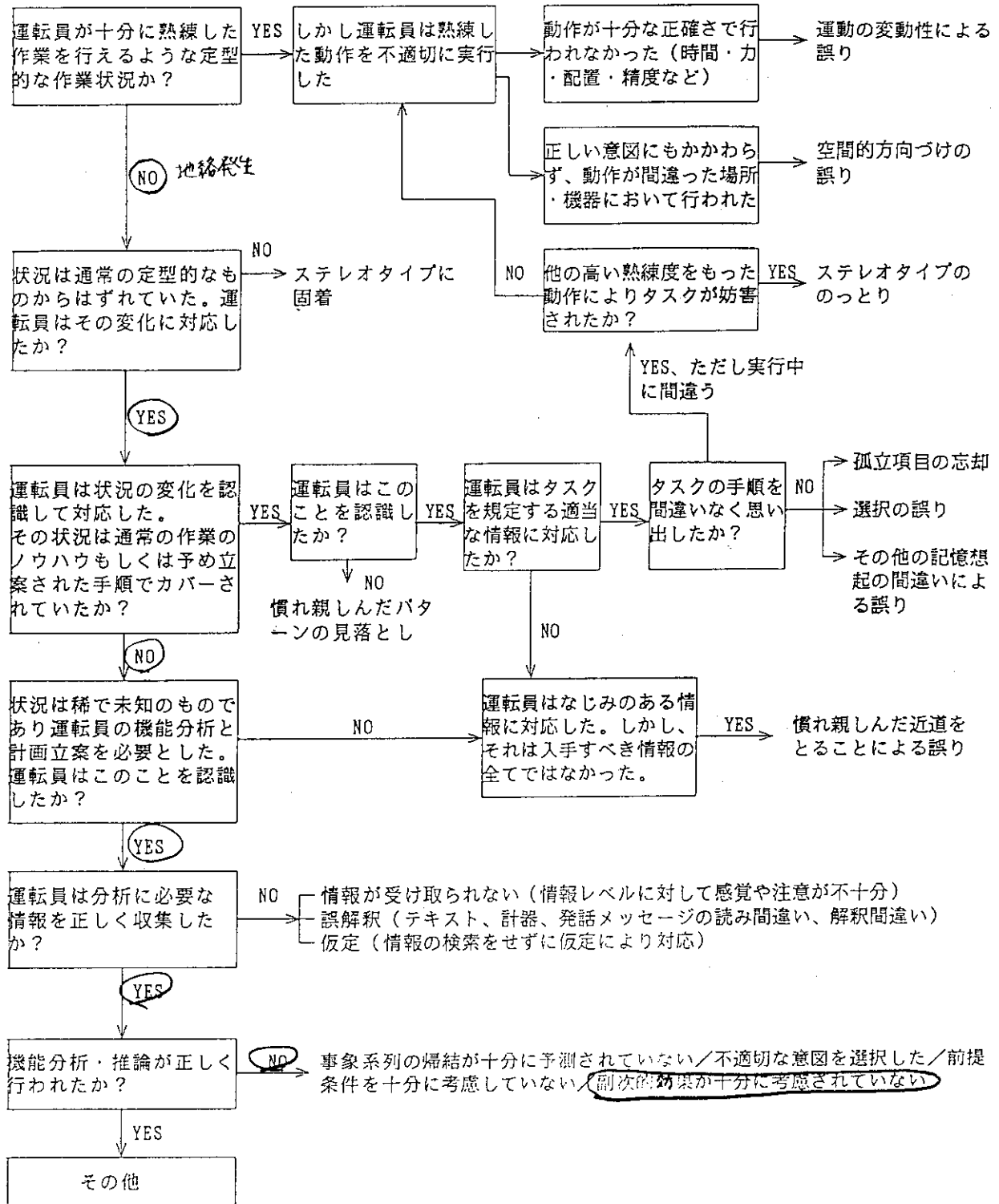
図 2.5.4 Rasmussen の手法による San Onofre 事象の分析チャート (1/6)

(地絡修復時の母線 1 C の接続)



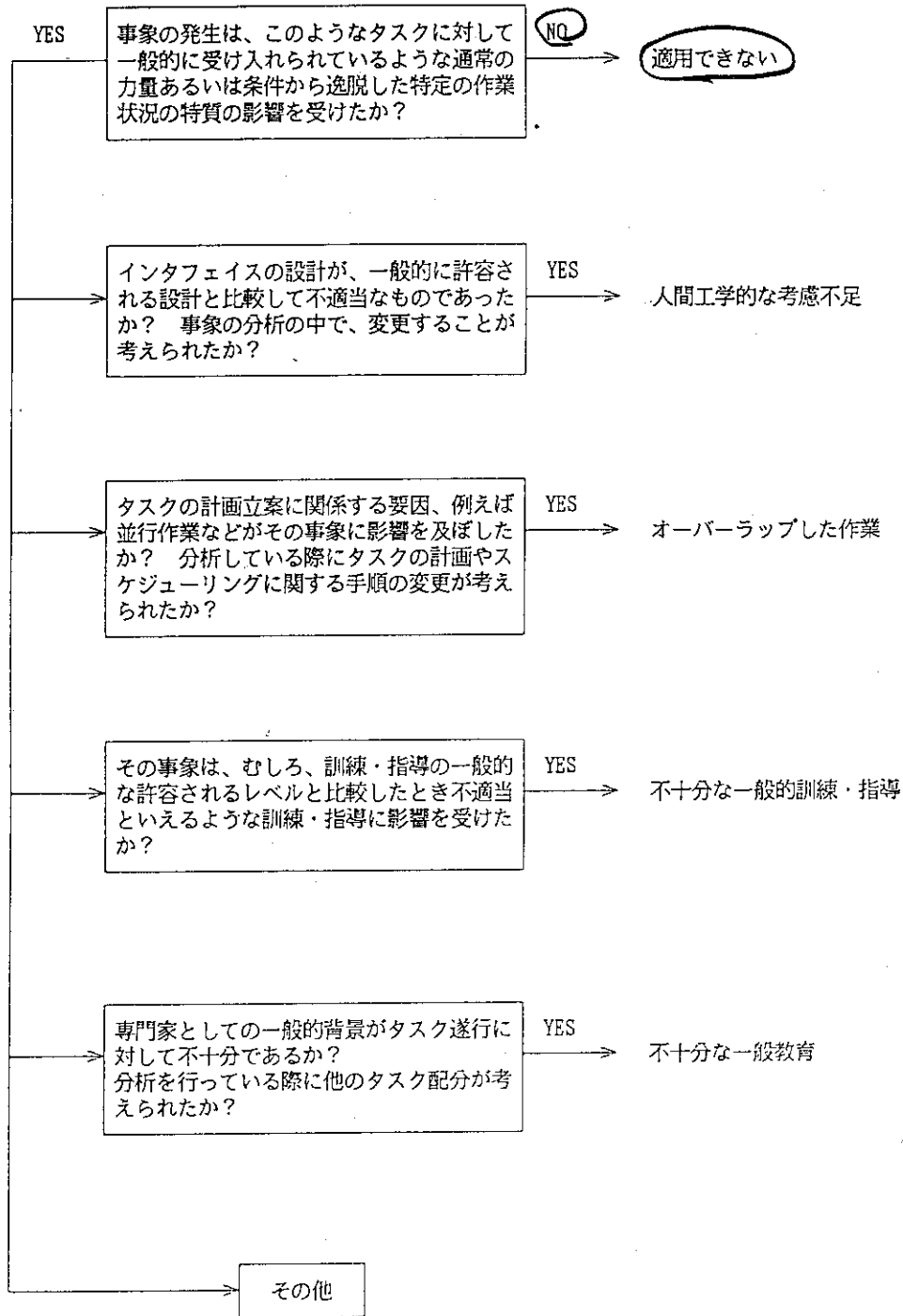
人間の機能不全の原因に対する分析ガイド

図 2.5.4 Rasmussen の手法による San Onofre 事象の分析チャート (2/6)
(地絡修復時の母線 1C の接続)



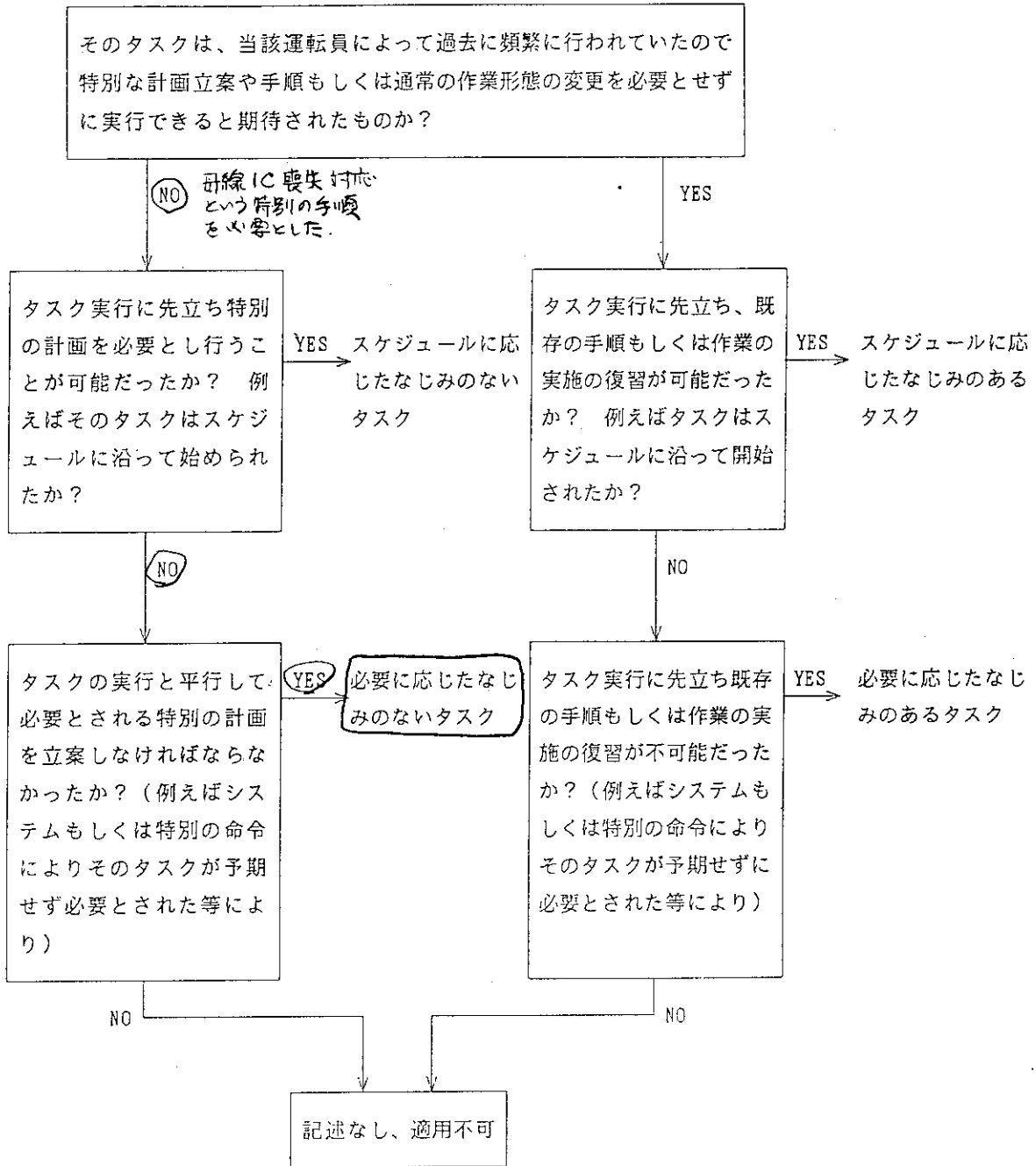
人間の機能不全のメカニズムの分析ガイド

図 2.5.4 Rasmussen の手法による San Onofre 事象の分析チャート (3/6)
(地絡修復時の母線 1C の接続)



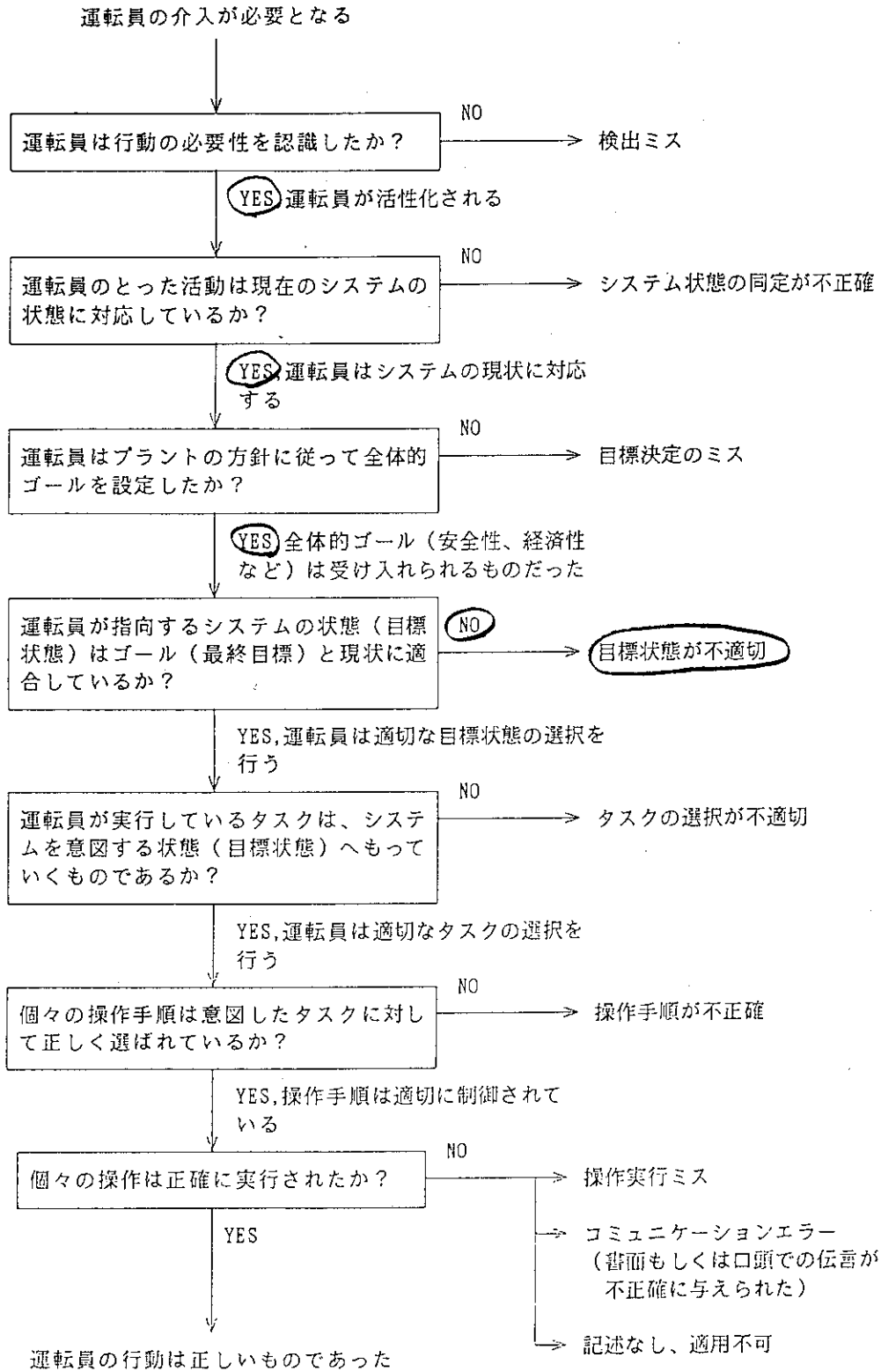
パフォーマンスに対する影響因子のうち心的負荷と資源に対する分析ガイド

図 2.5.4 Rasmussen の手法による San Onofre 事象の分析チャート (4/6)
(地絡修復時の母線 1 C の接続)



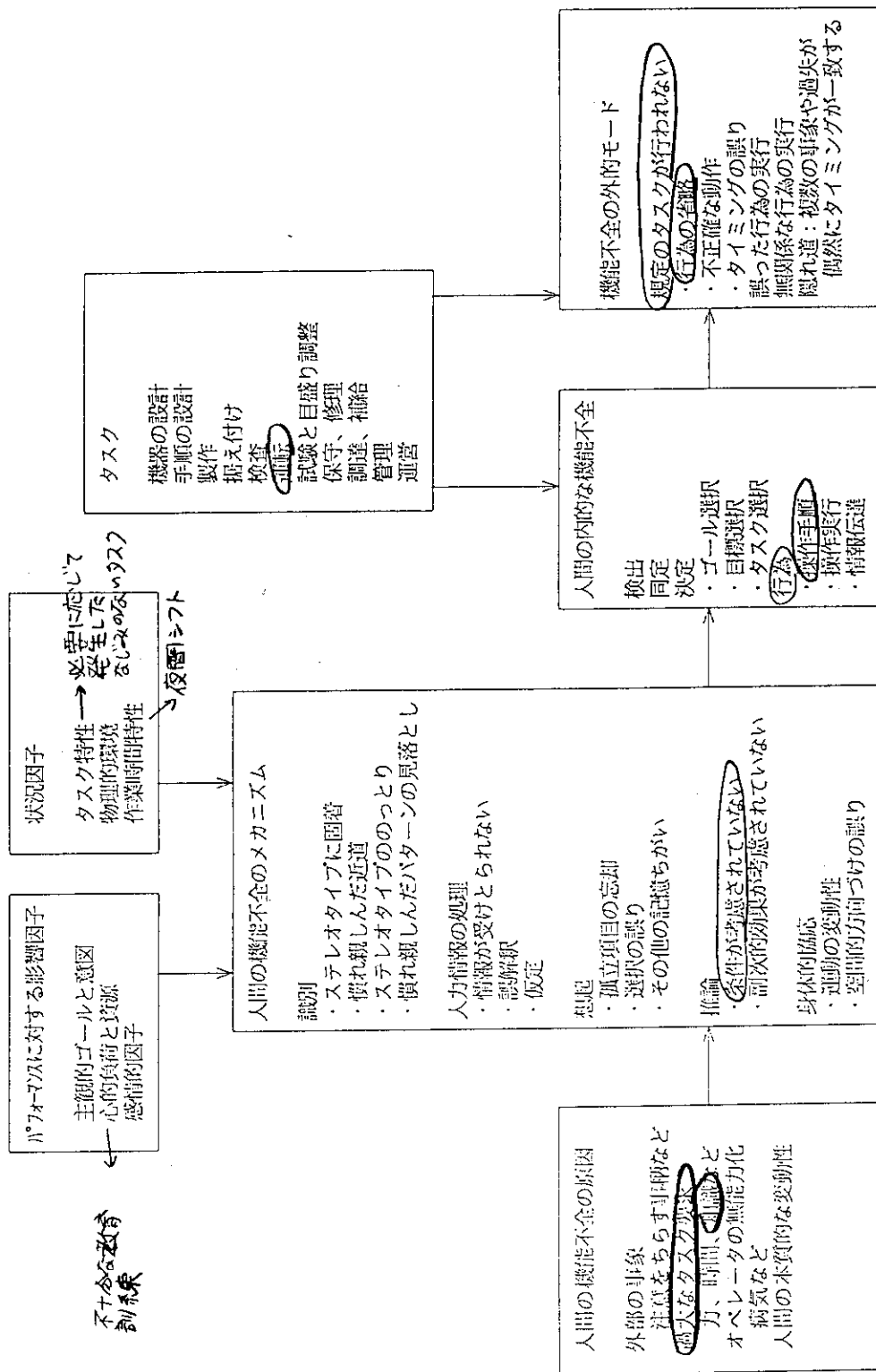
状況因子のうちタスク特性 (Preparedness) に関する分析ガイド

図 2.5.4 Rasmussen の手法による San Onofre 事象の分析チャート (5/6)
(地絡修復時の母線 1C の接続)



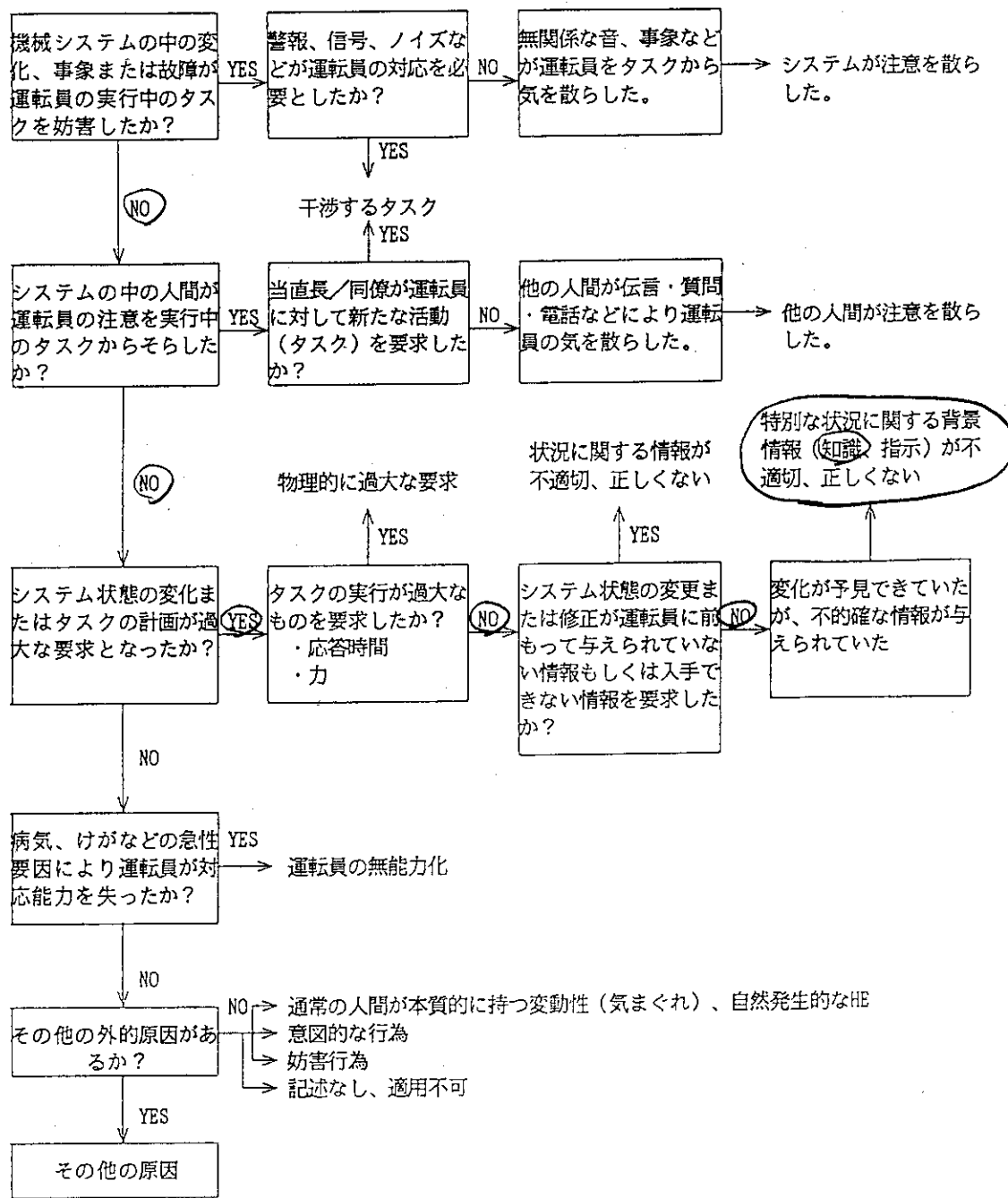
人間の内的な機能不全の分析ガイド

図 2.5.4 Rasmussen の手法による San Onofre 事象の分析チャート (6/6)
(地絡修復時の母線 1 C の接続)



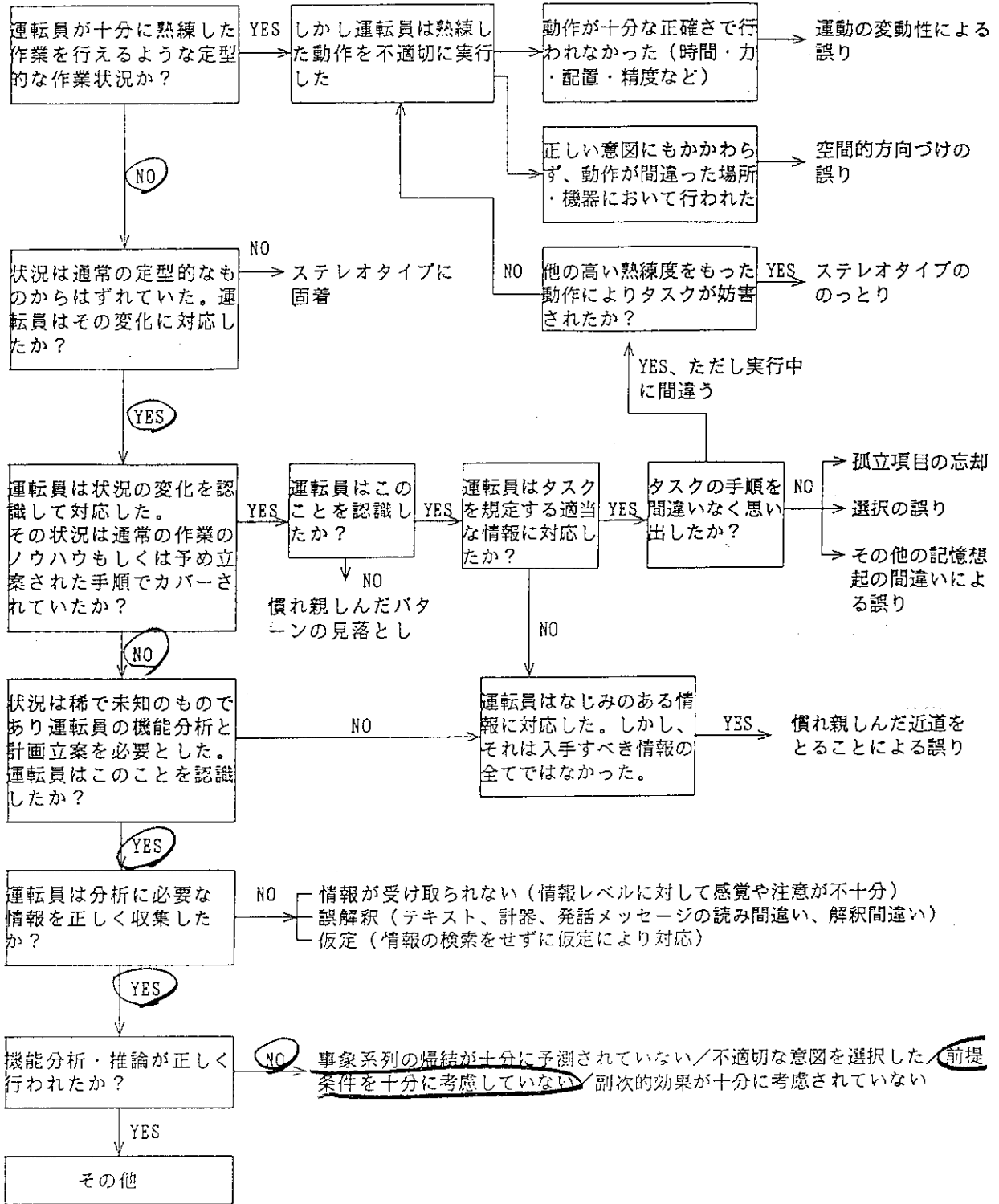
Rasmussenの提唱するヒューマンエラーの分類法

図 2.5.5 Rasmussen の手法による San Onofre 事象の分析チャート (1/6)
(外部電源からのバックフィード)



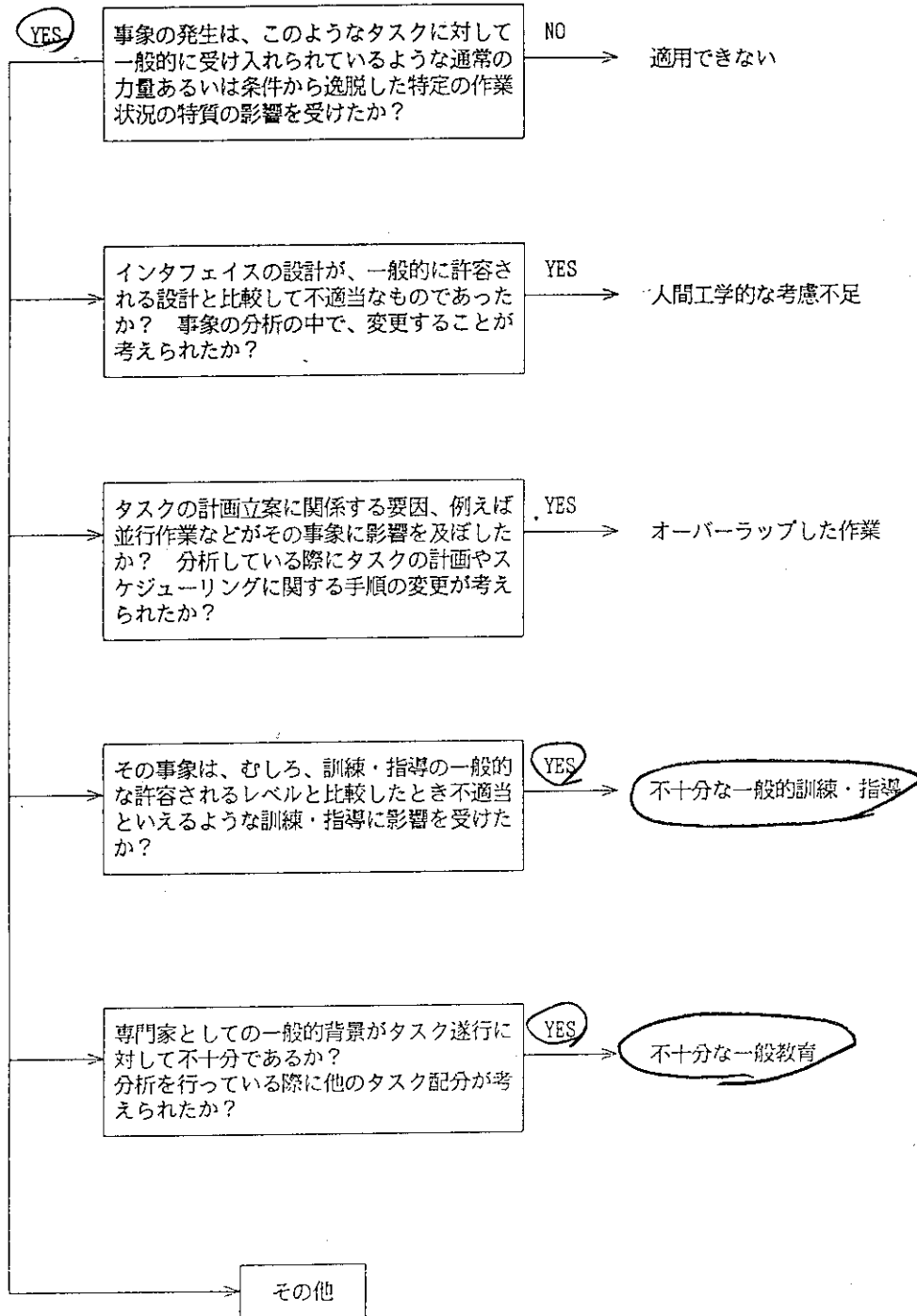
人間の機能不全の原因に対する分析ガイド

図 2.5.5 Rasmussen の手法による San Onofre 事象の分析チャート (2/6)
(外部電源からのバックフィード)



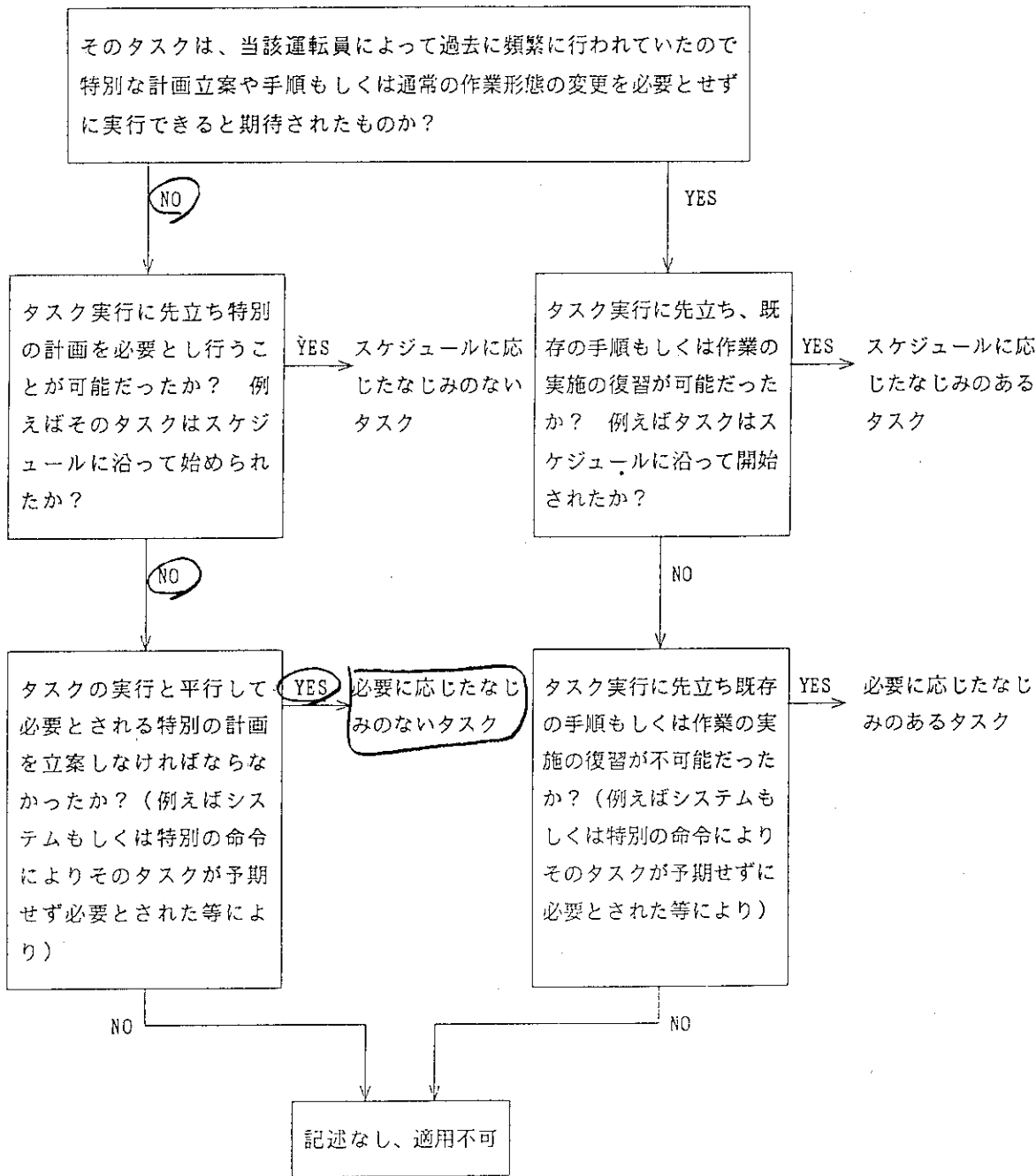
人間の機能不全のメカニズムの分析ガイド

図 2.5.5 Rasmussen の手法による San Onofre 事象の分析チャート (3/6)
(外部電源からのバックフィード)



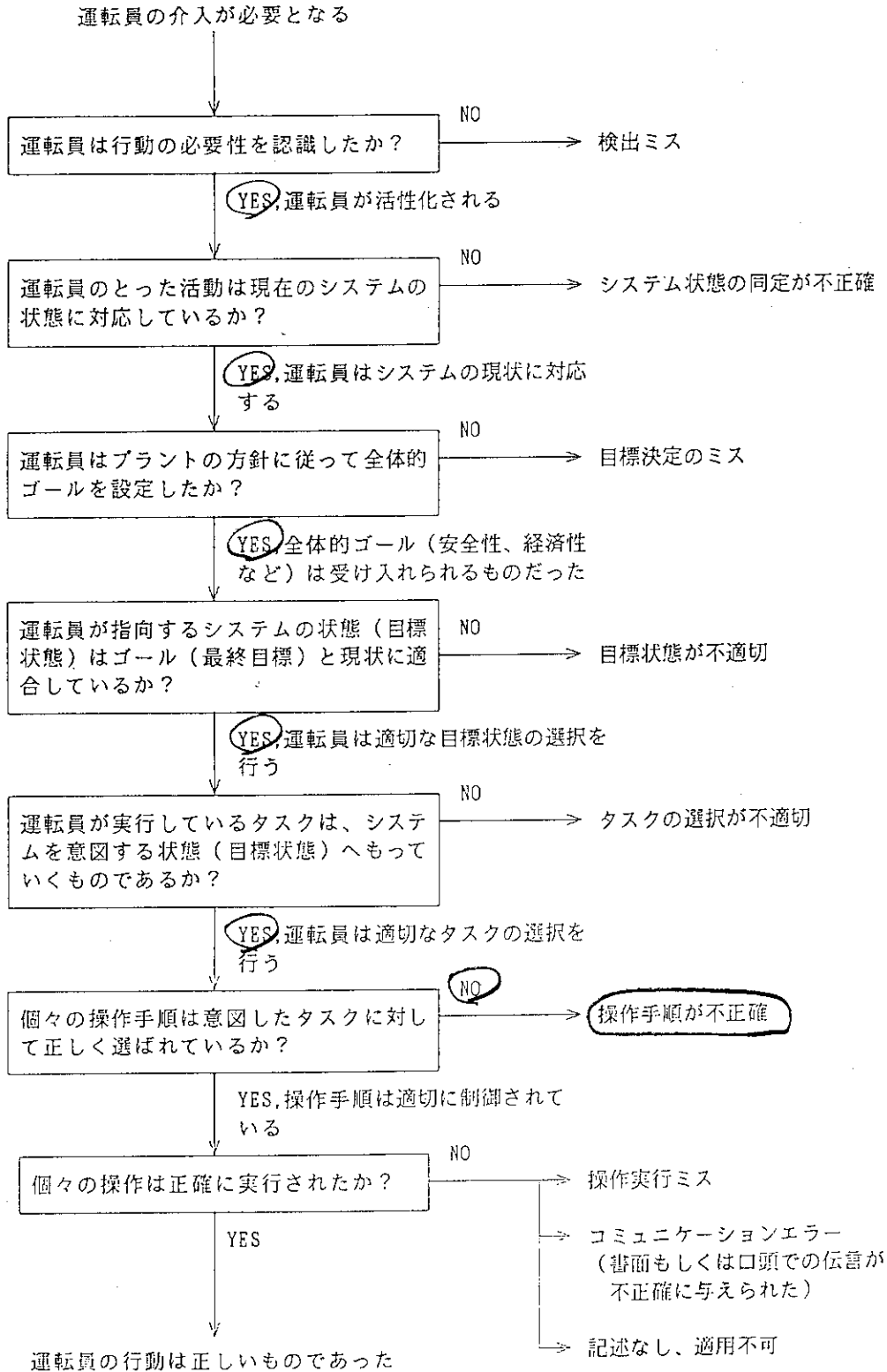
パフォーマンスに対する影響因子のうち心的負荷と資源に対する分析ガイド

図 2.5.5 Rasmussen の手法による San Onofre 事象の分析チャート (4/6)
(外部電源からのバックフィード)



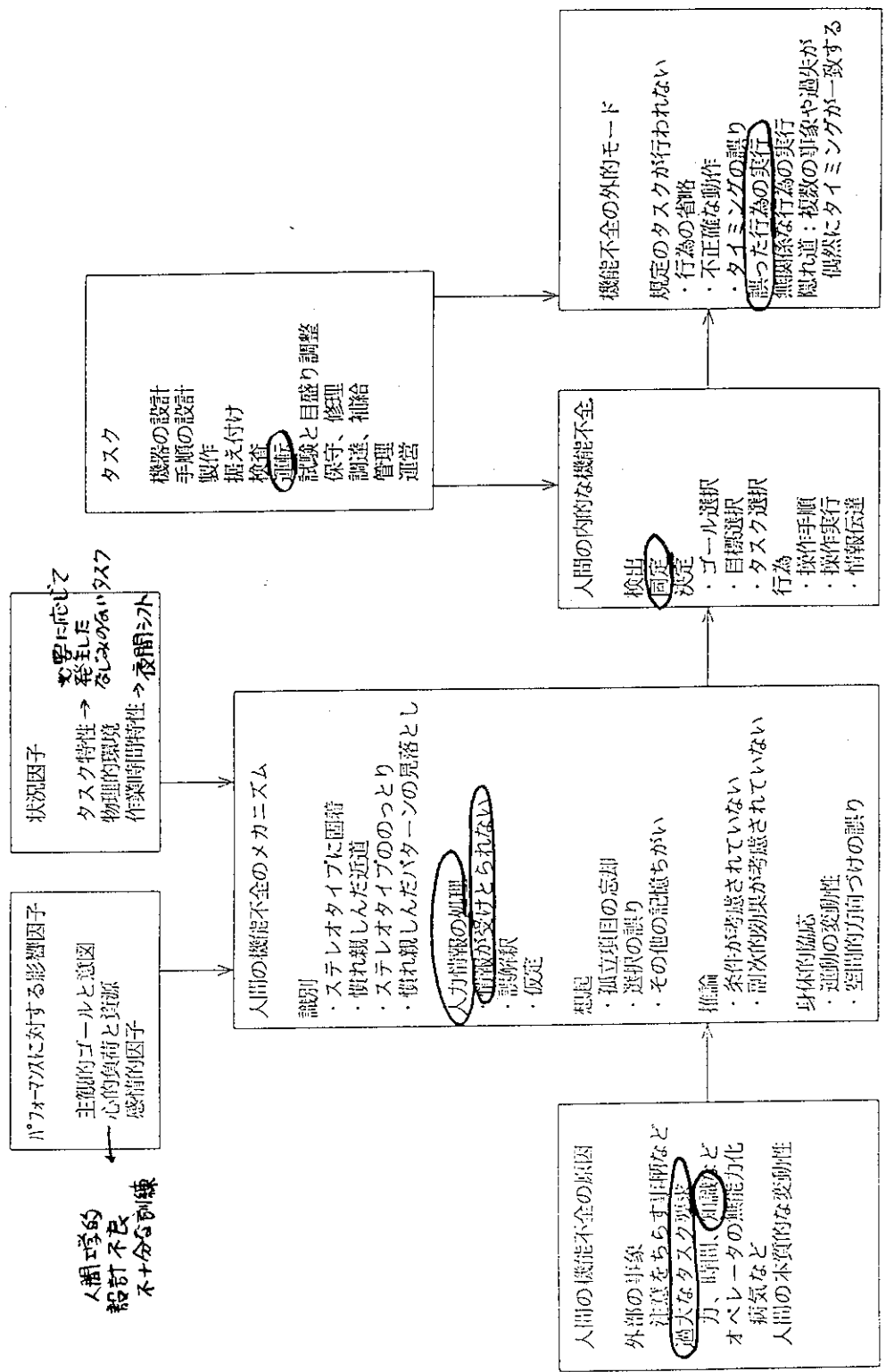
状況因子のうちタスク特性 (Preparedness) に関する分析ガイド

図 2.5.5 Rasmussen の手法による San Onofre 事象の分析チャート (5/6)
(外部電源からのバックフィード)



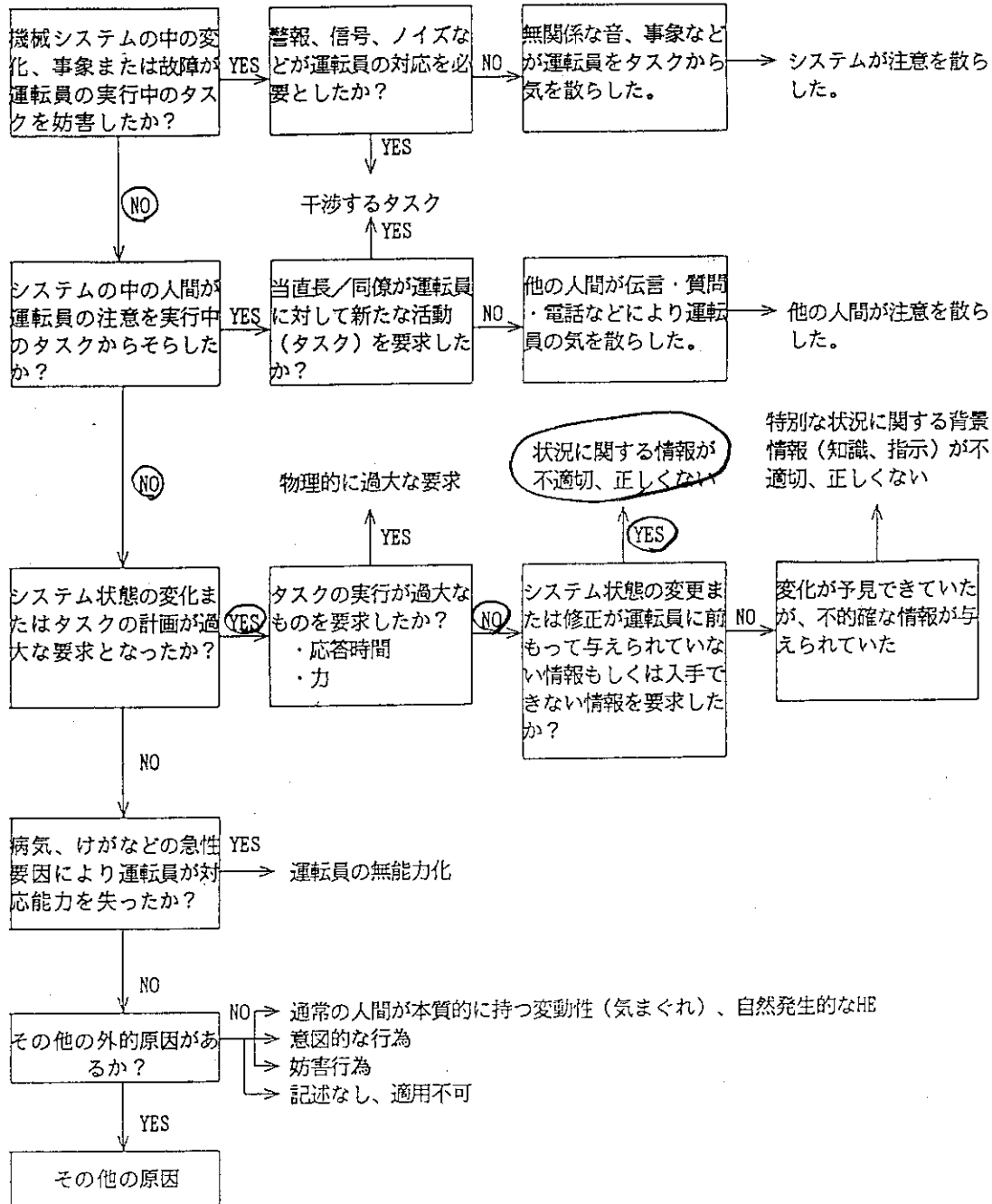
人間の内的な機能不全の分析ガイド

図 2.5.5 Rasmussenの手法による San Onofre 事象の分析チャート (6/6)
(外部電源からのバックフィード)



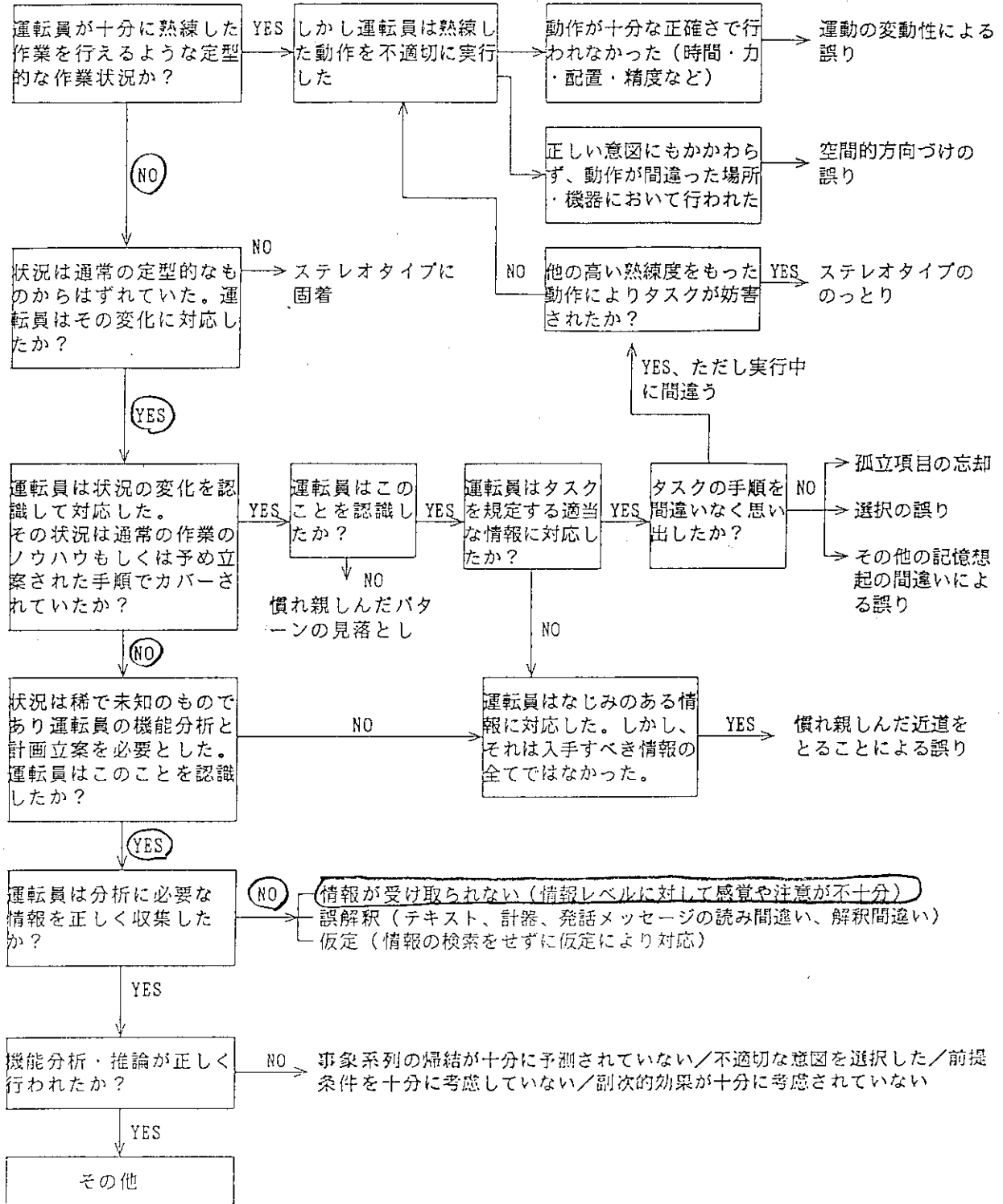
Rasmussenの提唱するヒューマンエラーの分類法

図 2.5.6 Rasmussen の手法による San Onofre 事象の分析チャート (1/6)
(一次系過冷却と SG 水位底の同定)



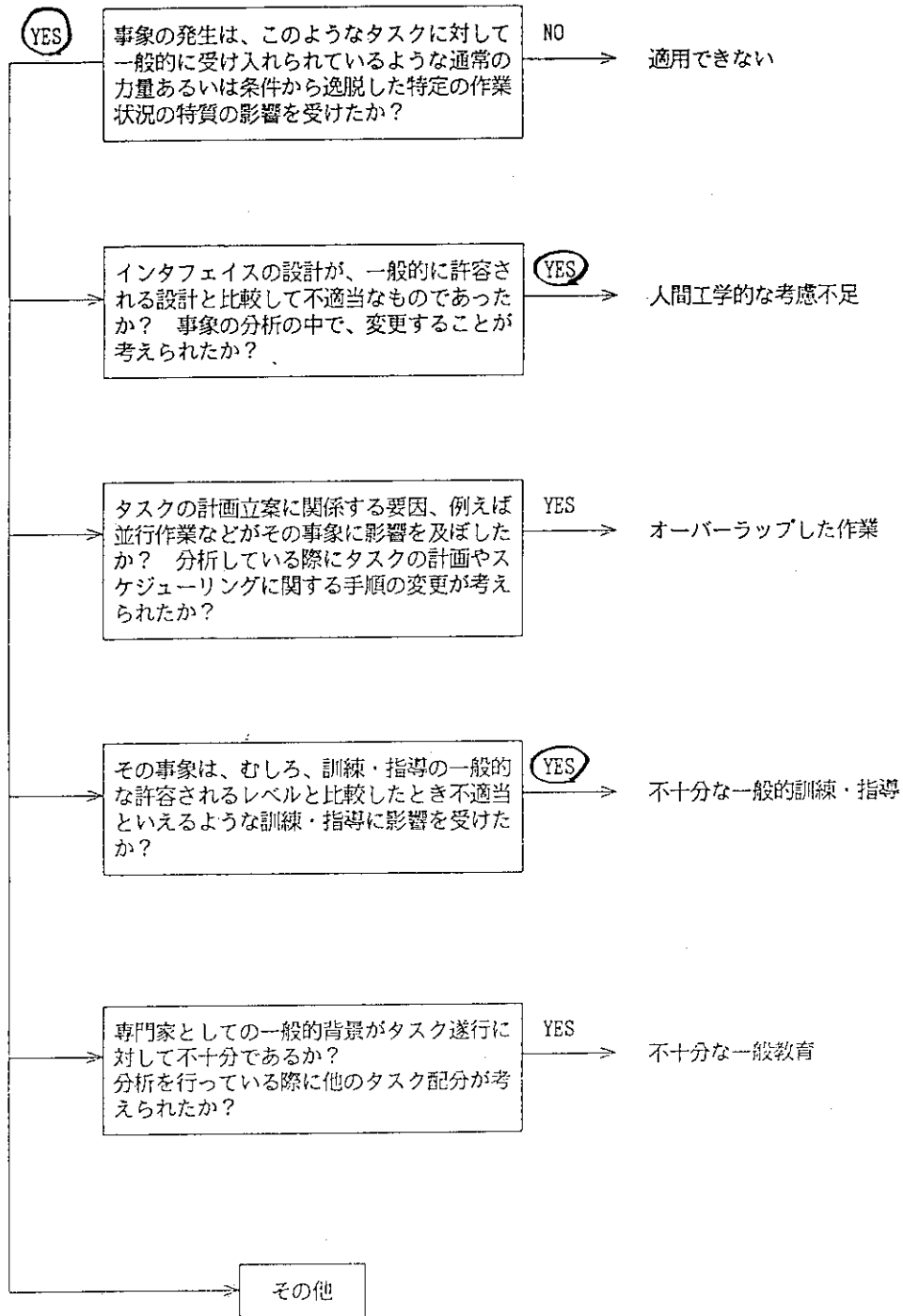
人間の機能不全の原因に対する分析ガイド

図 2.5.6 Rasmussen の手法による San Onofre 事象の分析チャート (2/6)
(一次系過冷却と SG 水位低の同定)



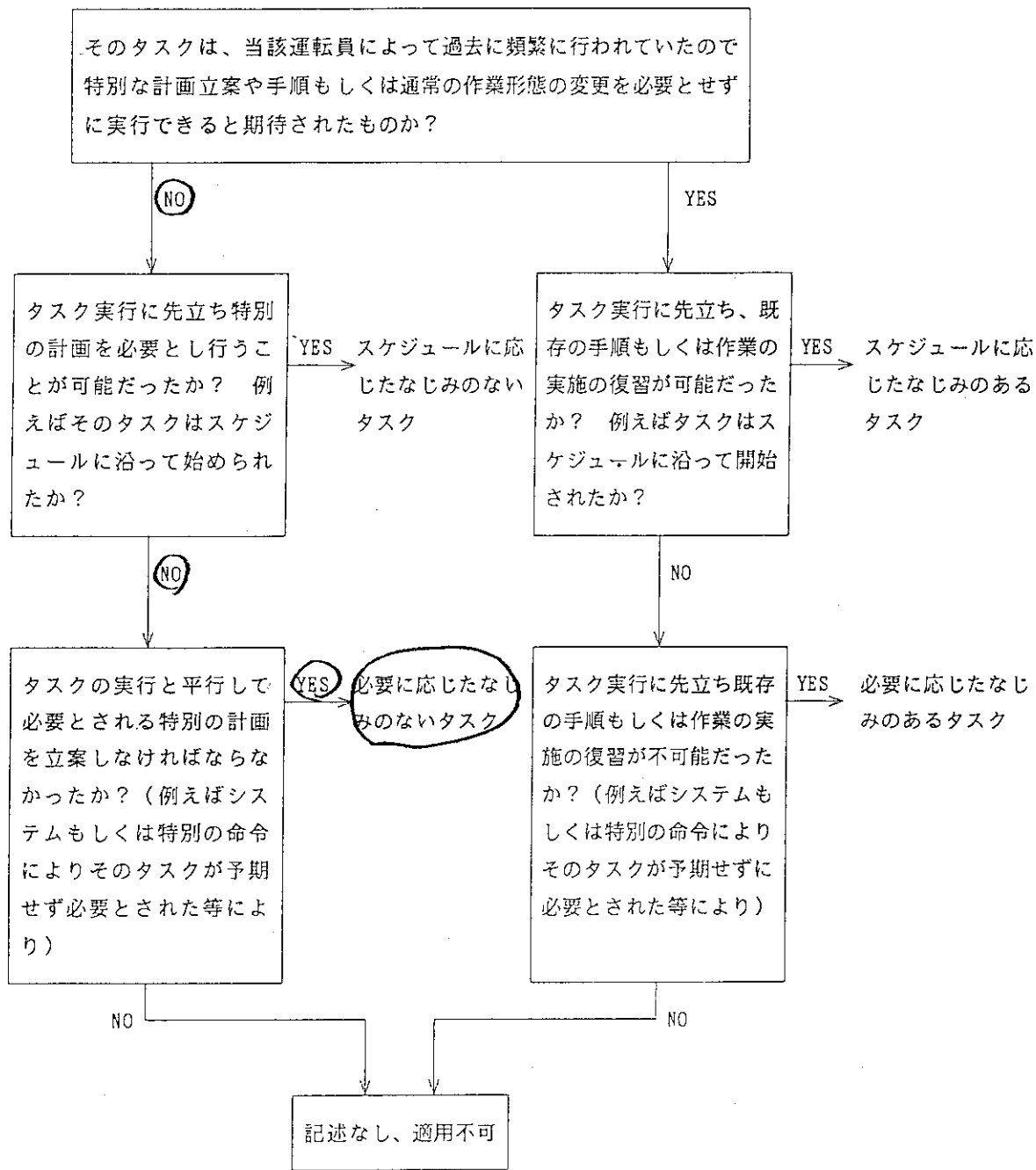
人間の機能不全のメカニズムの分析ガイド

図 2.5.6 Rasmussen の手法による San Onofre 事象の分析チャート (3/6)
(一次系過冷却と SG 水位低の同定)



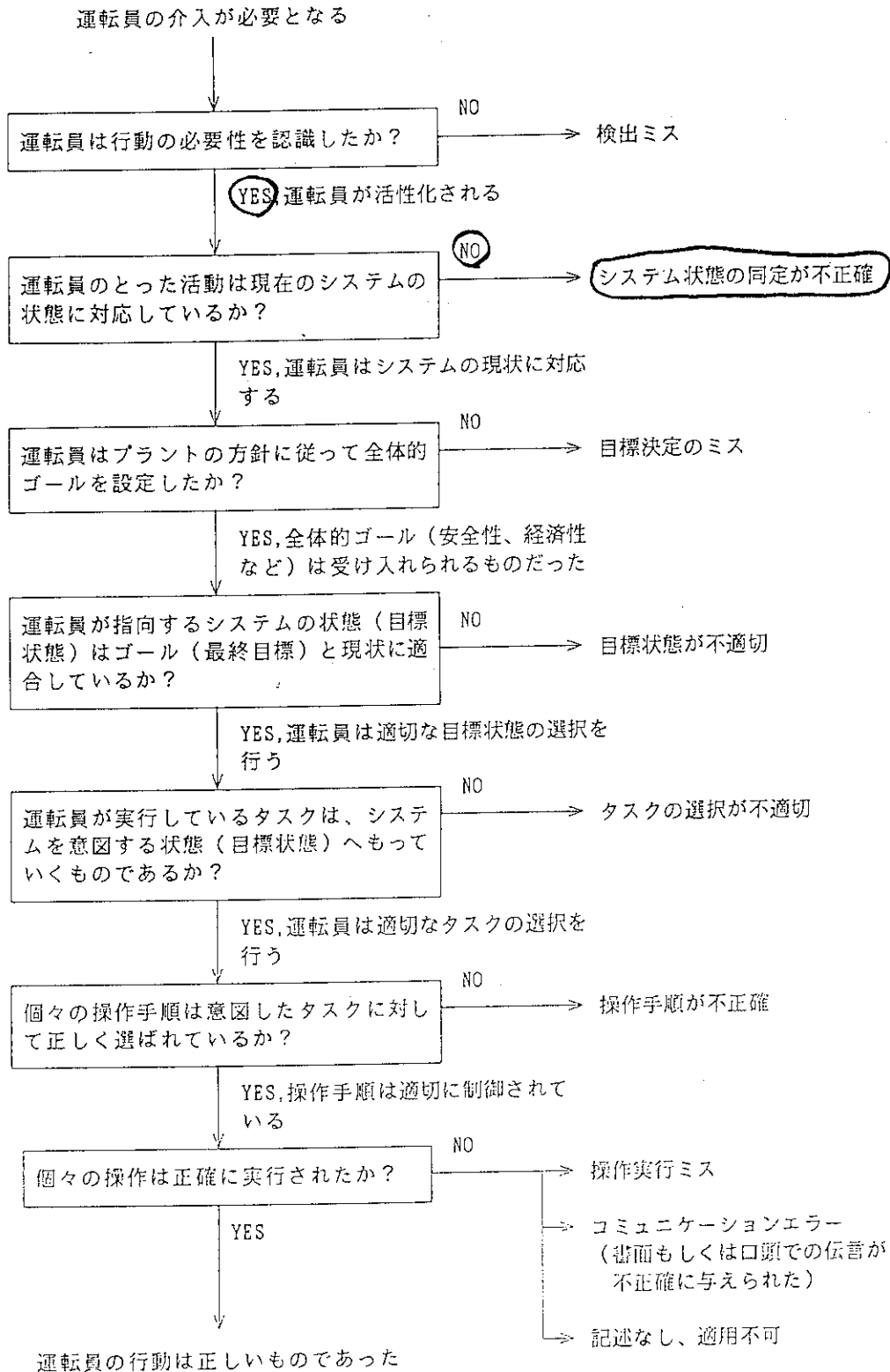
パフォーマンスに対する影響因子のうち心的負荷と資源に対する分析ガイド

図 2.5.6 Rasmussen の手法による San Onofre 事象の分析チャート (4/6)
(一次系過冷却と SG 水位低の同定)



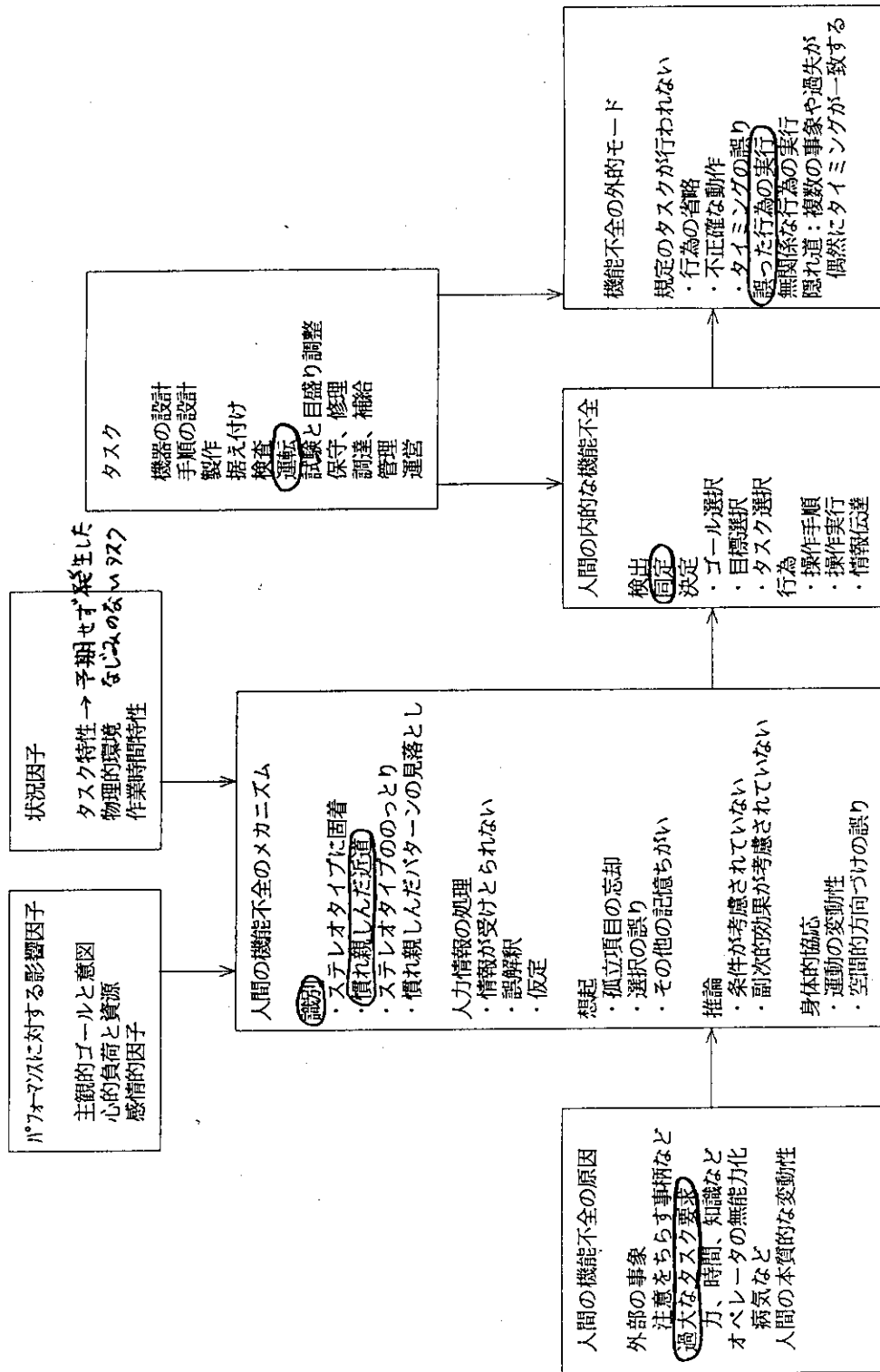
状況因子のうちタスク特性 (Preparedness) に関する分析ガイド

図 2.5.6 Rasmussen の手法による San Onofre 事象の分析チャート (5/6)
(一次系過冷却と SG 水位低の同定)



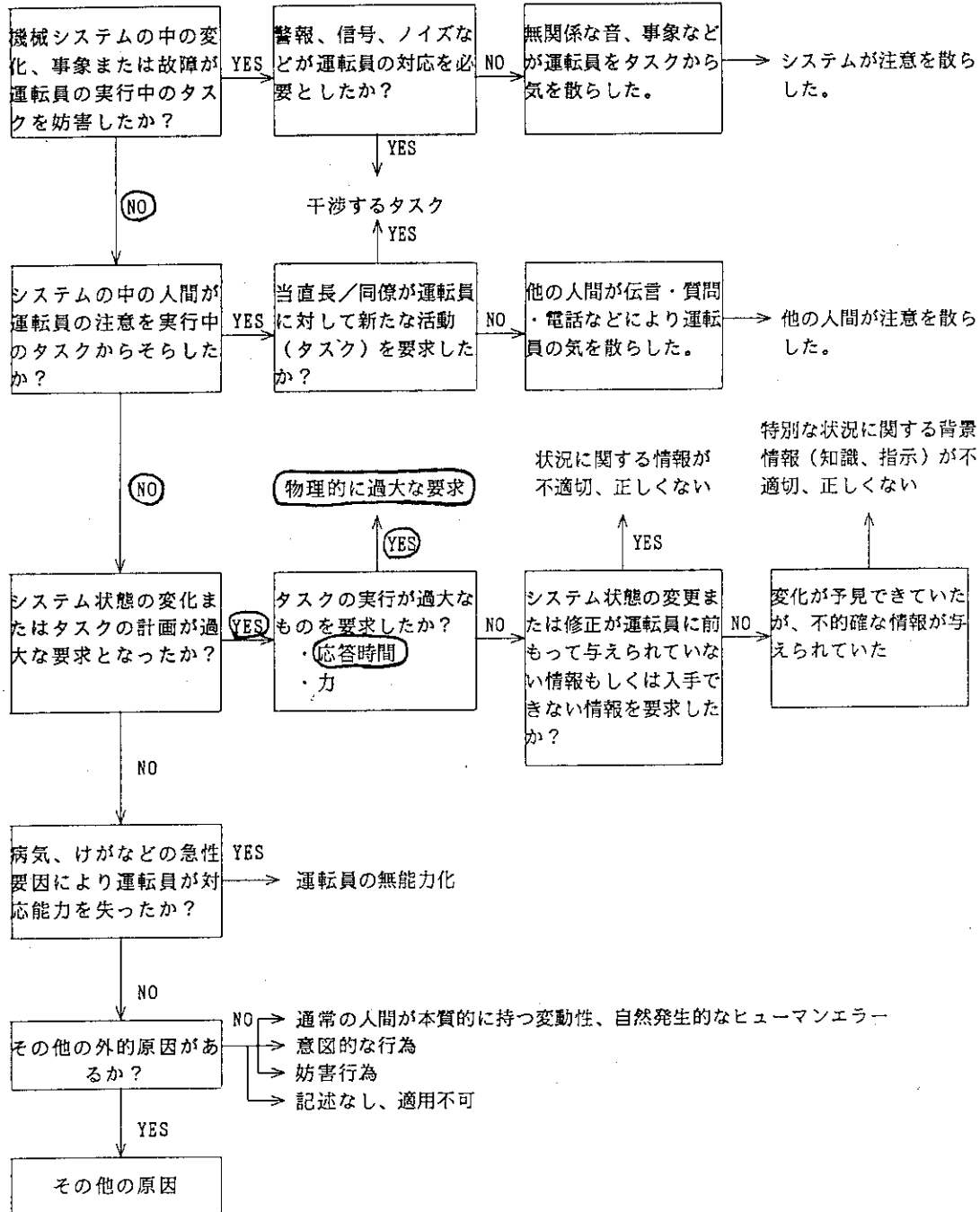
人間の内的な機能不全の分析ガイド

図 2.5.6 Rasmussen の手法による San Onofre 事象の分析チャート (6/6)
(一次系過冷却と SG 水位低の同定)



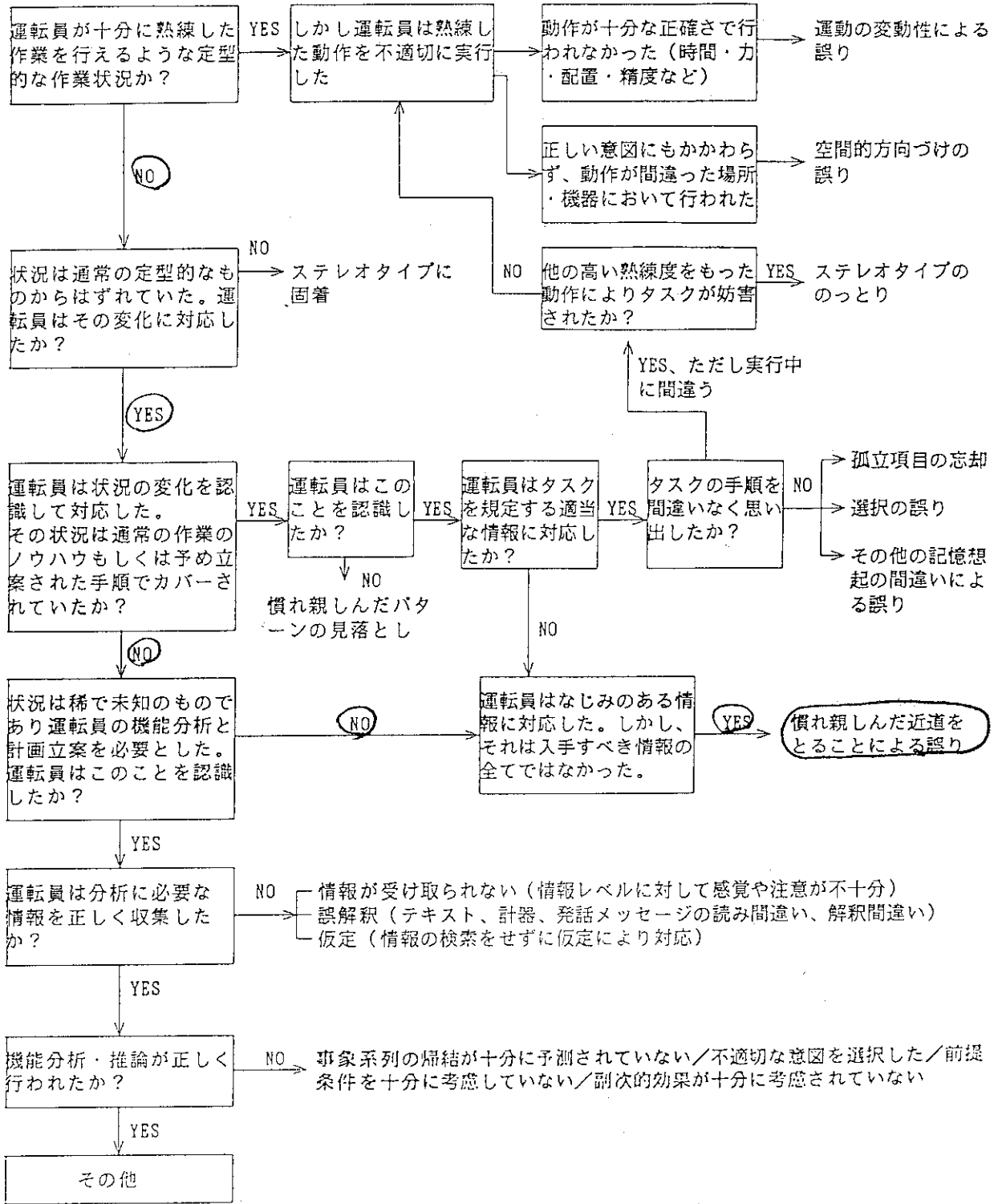
Rasmussenの提唱するヒューマンエラーの分類法

図 2.5.7 Rasmussenの手法による San Onofre 事象の分析チャート (1/6)
(Water Hammer 現象の評価)



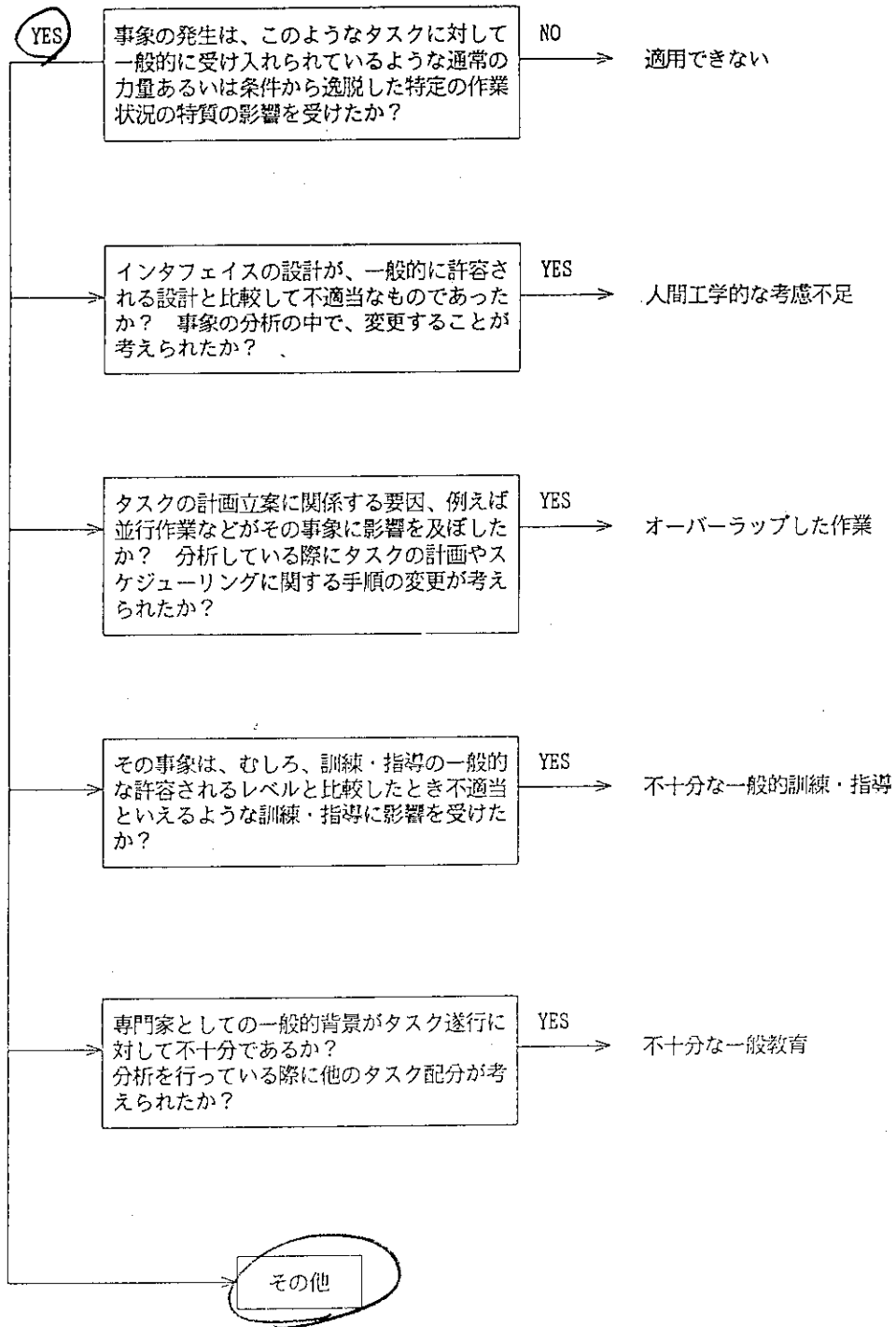
人間の機能不全の原因に対する分析ガイド

図 2.5.7 Rasmussenの手法による San Onofre 事象の分析チャート (2/6)
(Water Hammer 現象の評価)



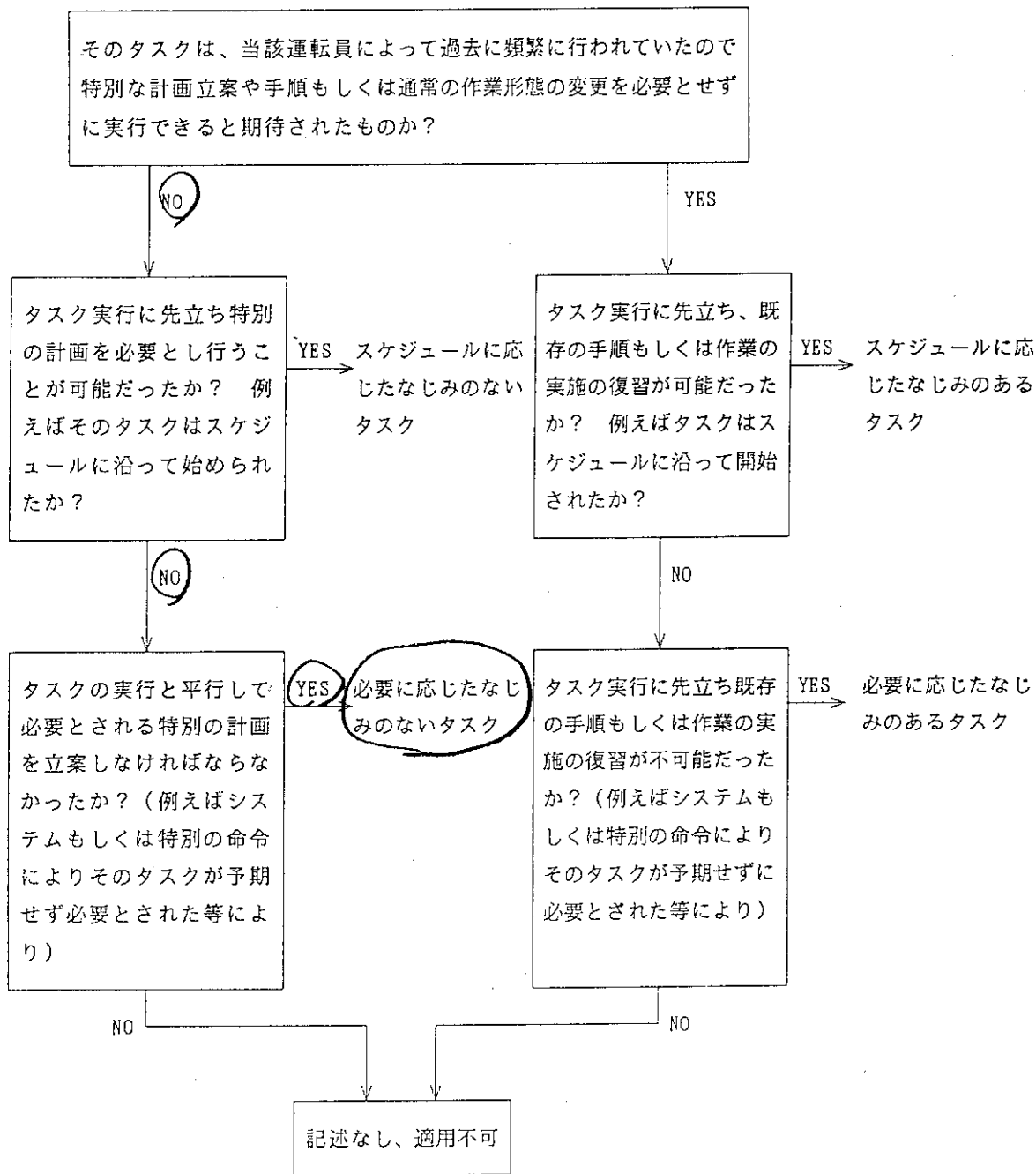
人間の機能不全のメカニズムの分析ガイド

図 2.5.7 Rasmussenの手法によるSan Onofre 事象の分析チャート (3/6)
(Water Hammer 現象の評価)



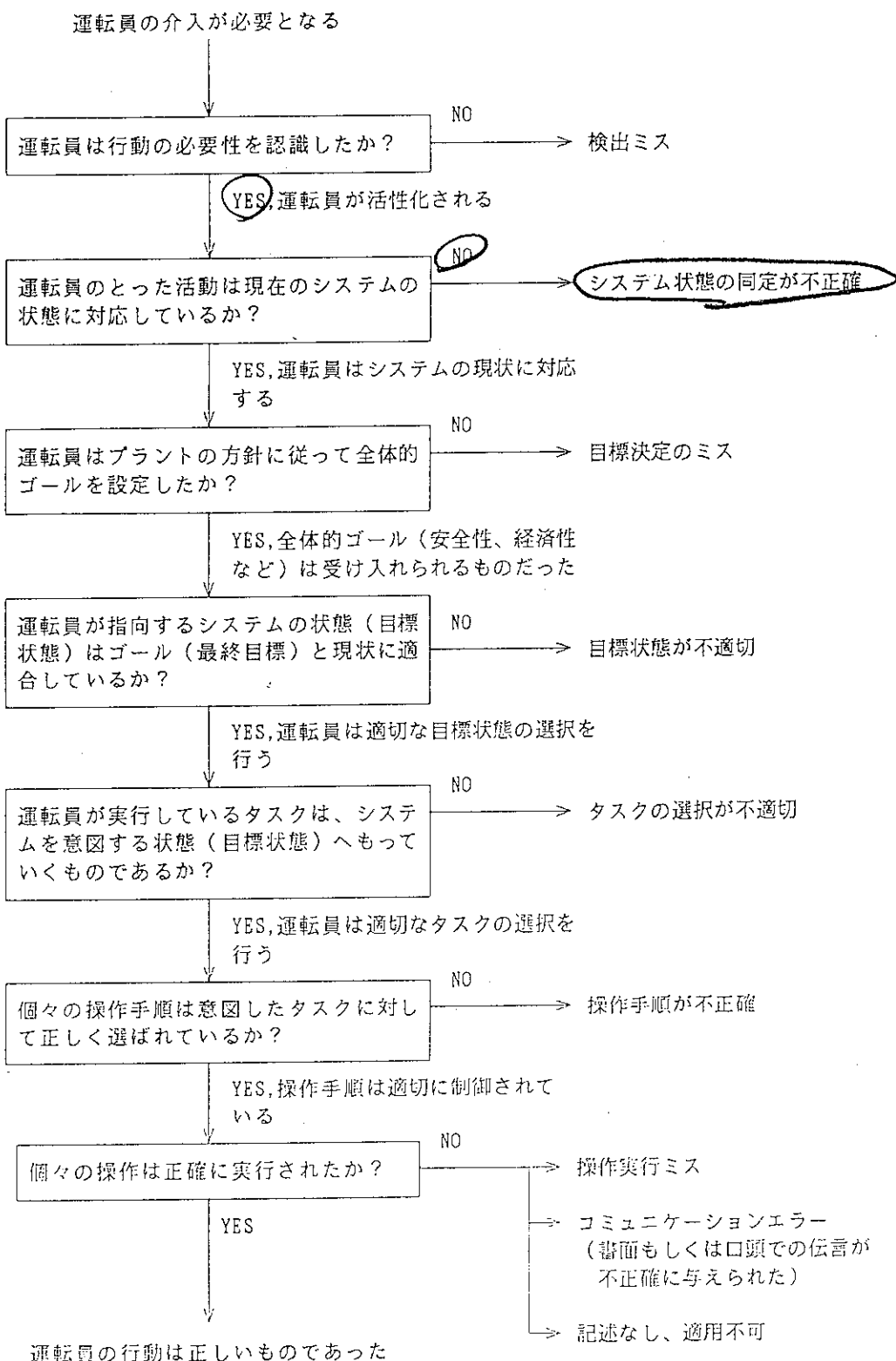
パフォーマンスに対する影響因子のうち心的負荷と資源に対する分析ガイド

図 2.5.7 Rasmussen の手法による San Onofre 事象の分析チャート (4/6)
(Water Hammer 現象の評価)



状況因子のうちタスク特性 (Preparedness) に関する分析ガイド

図 2.5.7 Rasmussenの手法によるSan Onofre 事象の分析チャート (5/6)
(Water Hammer 現象の評価)



人間の内的な機能不全の分析ガイド

図 2.5.7 Rasmussenの手法によるSan Onofre 事象の分析チャート (6/6)
(Water Hammer 現象の評価)

2. 6 Rancho Seco 事象

Rancho Seco 炉における1985年12月26日の事象について、参考文献(4)に記載された情報をもとに、以下に概要とクロノロジーをまとめる。

Rancho Seco は、B&W社製のPWRである。システムの概念を図2. 6. 1に示す。この炉の商業運転は1975年4月に開始された。

(1) 事象の概要

本事象は、B&W特有の制御系であるICS(Integrated Control System)への電源供給モニターの故障によるICS電源喪失が起因事象となり、PTS(加圧熱衝撃)領域にまで入る過冷却の発生及びメイクアップポンプの損傷にともなう1次冷却材の漏洩が発生したものである。

事故は、制御室内で“ICS or Fan Power Failure”の警報を含んだ多数の警報が点灯したことからはじまる。この警報では、「ICSに何らかの問題が発生した」という程度の情報しか運転員に提供できなかったため、運転員はICSの電源が喪失したことは理解できなかった。しかしながら、1次系の圧力上昇及び主給水流量の急激な低下により事故が発生したこと及び1次系が冷却不足になっていることは理解できた。

ICSは電源が喪失すると、制御系で制御している各種の弁及び制御盤上の表示をあらかじめ設定された位置にリセットする(例えば、タービンバイパス弁は50%開状態に設定される)。運転員は事故の起因が理解できていないため、制御盤上の1次系主給水流量の表示(3Mlb/hr)を見て主給水流量は確保されていると理解した。しかしながら、実際には、ICSの電源喪失により主給水ポンプは最低速度にリセットされたため、主給水流量はほとんどなくなっていた。

このように1次系が冷却不足となったため、「原子炉圧力高」で原子炉はトリップした。これにより原子炉の出力が崩壊熱レベルにまで低下したため冷却不足は解消された。この時点で、ICSの電源喪失により50%開状態にリセットされたタービンバイパス弁及び大気放出弁が運転員によってすぐには閉められなかったこと及び、先の主給水ポンプの停止によって補助給水ポンプが起動したことにより、2次系での冷却が勝り、1次系は一転して過冷却の状態となった。

運転員は、加圧器水位の低下などから1次系が過冷却の状態になったことに気づきタービンバイパス弁(TBV)、大気放出弁(ADV)及び補助給水制御弁を閉めるために補機操作員(Equipment Operators)を各現場に派遣した。運転員はこの場合これらの弁は現場でしか操作できないと思っていた。しかしながら、実際には制御室外側のシャットダウンパネルから操作することができた。運転員はこの方法を見逃してしまった。また、主給水ポンプの停止操作も行った(先に示したように実際は止まっていた)。

2次系での冷却により1次系の圧力が低下したため安全系であるSFAS(Safety Features Actuation System)が起動し、1次系に対しては高圧及びメイクアップポンプからの注入が、また2次系に対しては補助給水ポンプが起動されSFAS系の補助給水流量制御弁から給水が始まった。さらに、蒸気発生器の圧力低下にともない運転中の復水ポンプからの給水が始まったため、1次系の過冷却は一層深刻なものとなった。

SFASの起動にともなって高圧注入ポンプ(x2)及びメイクアップポンプ(x1)が作動状態

となったため、これらのポンプからの注水により1次系の圧力低下は止まり、若干の上昇に転じた（この時点では、加圧器は空になっており、圧力容器の上部ヘッドにボイドが生成されていた。）。このため、B&Wが設計で定めるPTSの限界を越えてしまった。ほぼ同時期に主蒸気管圧力低による主給水制御弁の閉止、さらに、先に派遣した補機操作員(Equipment Operators)によってTBV及びADVが隔離された。AFW制御弁の手作業による閉止には、失敗があり、A,B 2つの制御弁のうち閉じられたのはBだけであったが、制御室の運転員がこれを補う操作(RCP、HPIポンプの停止等)によってPTS領域からは逃れ、深刻な事態にはいたらなかった。

この後、プラントの安定状態への移行期間に、1次系補助給水ポンプ吸込口の弁の切り替え中に、補助給水ポンプ直前の弁が不慮にも閉じられてしまった。これにより、補助給水ポンプは過熱、損傷した。さらに、損傷に気づいた運転員がメイクアップポンプの吸い込み弁を開いてしまったため損傷したポンプに1次冷却材が流入しフロアに溢れた。しかし、メイクアップタンクの水位が急減したので冷却水の流失に気づき、タンク出口の弁をすぐに閉め、さらにHPIが作動していたので、1次系は大事に至らずに済んだ。また、溢れた水によるサイト内外への放射能の放出には至らず、人員の被曝もなかった。この後、損傷したポンプは隔離され、プラントは安定状態に移行された。

(2) 事象のクロノロジー

表2. 6. 1に事故の詳細なプラント応答とそれに対応する運転員の振舞いをまとめたものを示す。表2. 6. 1からわかるように、この事故事象は人的因子の観点からみると次の5つのフェーズに分けることが出来る。

- ① 初期診断
- ② ICSの電源喪失にともなってリセットされた弁の操作
- ③ Equipment Operatorによる給水制御弁の復旧作業
- ④ 高圧/メイクアップポンプの水源の切り替え操作
- ⑤ メイクアップポンプの損傷への対応

以下これらのフェーズについて運転員の振舞いをまとめる。

① 初期診断

ここでは、事故の起因となった「ICSの電源喪失」が事象発生後早い時期に発見されなかったことが重要である。

ICS電源喪失に対して、制御室内の表示盤上にいくつかの表示警報が働いた。「ICSまたはファン電源の故障」及びその他の数コの警報は、ICS内に変動が生じ、次いで、プラント全体に影響を及ぼしつつあるということを示している。これらの警報の中で運転員が最も注目すべきは、「ICSランバックまたは制限」であった。この警報は、通常「ICSは自動的にプラント出力を下げています」ということを示している。（しかしながら、ICS電源喪失のために実際にはICSはプラント出力を下げはしなかった。）この警報が鳴ったとき、制御室の運転員の1人は、直ちにICS制御ステーションへ行き、S.S.はRCS圧力制御ステーションへ行った。このように運転員はすばやく問題が生じたことを認識した。しかし、その問題点の一番重要な部分について理解しているかということについては明らかでない。S.S.は、RCS圧力を制御しようとした。圧力は急速に上昇していた。S

S. は原子炉トリップを避けるために、RCS圧力を下げようと加圧器スプレイを起動した。しかし、スプレイ弁を全開にする前に、原子炉は正にトリップしようとしていることを認識した（これは、ICS DC電源喪失から約16秒のことである）。原子炉トリップ後S. S. はスプレイ弁を閉じた。圧力高による原子炉トリップに伴って、OTSGコード安全弁開放及びADVとTBV開による騒音が発生した。原子炉トリップ直後1人の制御室運転員は、制御室からは、ICSにより制御している弁類を制御できないことを知った。それらについて入手可能な機器類を評価している中でその運転員は、主給水がSGに給水されていると誤った解釈を信じていた。水蒸気の放出とOTSGへの過給水を制御できないという事実に基づき、その運転員は、過冷却過渡事象になっていることを認識した。しかし、この時点でも、運転員等は、ICS電源喪失を認識していないようである。SCRO (Senior Control Room Operator), 彼は本事象が起こったときには、プラントの見回りに出ていたのだが、主給水ポンプがトリップする前に制御に急いで戻ってきた。主給水ポンプがトリップすると直ちにCROの1人はICS制御ステーションに電源がきていないことを知った。そして制御室内の運転員にICS電源が喪失していることを知らせた。この時点で、事象発生後約2分、運転員はICS電源喪失を実感した。S. S. は、鍵をとって制御室に付随しているICSキャビネットの鍵を空けた。3人の運転員は、電源喪失の原因を調査に行った。結局、ICS電源喪失はこれを生じてから2分を経過して、やっと認識されたのである。ICS電源故障についての警報は運転員に対して発せられはしたが、「ICSまたはファン電源故障」という警報は、ファンの故障、またはICSの予備の直流電源の1つの喪失についてのトラブル警報としても働くので、この警報の重要性が不明瞭になっていたようだ。これらファンの故障、ICS用予備電源の喪失、どちらも過渡事象のinitiatorとして運転員の対応を即座に要求するものではないのである。結果として、運転員達は、ICS DC電源喪失が過渡事象のinitiatorとすぐには認識せず、その結果表面に現れた症状に対応していったのであった。

ここで、ICS電源喪失に対するの対応手順について記しておく。ICS電源が全喪失したときのプラントの応答については、訓練時の講義もシミュレータ訓練も行われていなかった。喪失したICS電源の回復についても同様に行われていなかった。しかも、ICS電源喪失に対する手順書も用意されていなかったのである。B & W原子炉のオーナーズグループでICS電源喪失を含む手順書を用意していたが、Rancho Secoプラントの会社(SMUD)側では、ICS電源の喪失は起こり得ない事象として捉え、その手順書の必要性を認めていなかったのである。

② ICSの電源喪失にともなってリセットされた弁の操作

①でも示したようにICSの電源が喪失すると種々の弁があらかじめプログラムされた位置にリセットされる。本事故でも、タービンバイパス弁(TBV)、大気放出弁(ADV)、給水流量制御弁などが50%開状態にリセットされたため運転員はこれらの弁を閉めるためにEquipment Operatorを弁が設置されている現場に派遣した。しかしながら、これらの弁は制御室外側にあるリモートシャットダウンパネルから操作できたものであった。運転員はこれに気づかなかった。結果として、余分な時間を要したことにより過冷却が一層進み、さらに手動操作による機器への損傷などが発生した。

しかし、リモートシャットダウンパネルは、制御室が火災になったときに制御室外に

避難してプラントをシャットダウンするために、最近新たに設置されたものであった。そのなかにTBV,ADVを操作する機能がついていたのである。このプラントの変更は、運転員の訓練の際にも知らされていたが、このパネルに関する実際の操作手順の訓練は、制御室に火災が起きて室外に避難した場合に対してだけであった。

③補機操作員(Equipment Operator)による給水制御弁の復旧作業

TBV及びADVの隔離に派遣された各々の操作員は、派遣されてから9分後に指定された作業を終了した。一方、補助給水(AFW)制御弁を閉めに派遣された補機操作員は、作業に困難を生じていた。彼は、この作業の経験が訓練を通して非常に少なかった。先ず、A-制御弁をハンドルを回して全閉したつもりであったが、実際には半開きの状態だったので、蒸気発生機Bへの給水は40%程減少しただけであった。続いて、彼はB-制御弁のところへ行き同様に全閉した。こちらは実際に全閉された。これにより、B-制御弁を通る流量が増加した。ここで彼は、A-制御弁のポジション指示計を見なかった。というよりも、操作を行いながら、この指示計は見えなかった。彼は、同軸にはなっていない弁の軸を指示計代わりを見た。そして1/2インチ程出ていたので、まだ80%しか閉まっていないと思い、バルブレンチを使ってさらに力を加えた。その結果、ハンドルによる開閉機構を壊し、以後使いものにならなくなってしまった。A-制御弁は再び開いたままになってしまった。

その時まで、もう一人の補機操作員がB-制御弁のところに来て、B-制御弁を完全に閉めた。一方A-制御弁の操作を失敗した操作員は制御室と連絡をとると、A-補助給水手動隔離弁を閉じるように指示された。しかし、この弁は長い間保守点検を行っていなかったため開固着しており、レンチを使っても閉じることができなかった。A-補助給水制御弁の方は、結局、ICS電源が回復した後、制御室からの操作で閉じられるまで開いたままであった。

④高圧/メイクアップポンプの水源の切り替え操作

SFASの起動にともなって、高圧注入ポンプとメイクアップポンプの水源が切り替わったことに気づかず弁の開閉操作を行ったために、メイクアップポンプの損傷を招いた。

通常運転時には、メイクアップポンプの水源はメイクアップタンクとなっているが、SFASが起動されるとこの水源がBWST(ほう酸水貯蔵タンク)に切り替えられる。したがって、メイクアップタンクから見ると流出側の弁はすべて閉じられることとなる。このような状況の中で、高圧注入ポンプの再循環弁(メイクアップタンクからみると流入弁)を開いたために、メイクアップタンクの水位が上昇してフラッシュタンクに溢れ出てしまった。

また、この上昇した水位を下げるために、高圧注入/メイクアップポンプの水源をBWSTからメイクアップタンクに切り替えた(吸い込み弁は開いていない)ことにより、高圧注入/メイクアップポンプは水源から隔離された状態で運転されることになってしまった。

高圧注入ポンプは「1次系への注入流量を減らす」ために手動で停止されたが、メイクアップポンプは運転を続けられたため損傷に至った。

この運転員の作業に関しては、運転員が受けたシミュレータ訓練と実際のプラントの

系統構成が異なっていたということを記しておかなければならない。シミュレータ訓練では、SFASが起動しても、メイクアップポンプのメイクアップタンクからの吸い込み弁は開いたままになっており、BWSTと併せて水源が2つとなっていたのである。したがって、BWSTからの吸い込み弁を閉じて、メイクアップタンクから冷却水が供給されるので、メイクアップポンプが損傷することはなかったのである。

ただし、事故後この運転員は、この実プラントとシミュレータとの違いについては承知していたと述べている。

⑤メイクアップポンプの損傷への対応

ここでは、メイクアップポンプの損傷が判明したときポンプを停止すると同時にポンプの吸い込み弁を開けたため損傷したポンプから冷却材が溢れ出たことを取り上げる。

メイクアップポンプの損傷は、大きな音及び、制御盤の表示がメイクアップポンプに通常の1/3の電流しか流れていないことを示していたことから判明した。運転員は、メイクアップタンクからの吸い込み弁が閉じていることに気づき、これ以上の損傷を抑えるために、直ちにポンプを止め、吸い込み弁を開けた。ところが、メイクアップタンクからの冷却水は、損傷したメイクアップポンプからフロアへ流出した。運転員は、メイクアップタンクの水位が急激に下がったので、何処かでメイクアップタンクからの冷却水が漏洩していると考え、メイクアップタンクの出口弁を閉じた。このため、メイクアップポンプからの流出はすぐに止められた。

以上より、この事象では、①、③、④の中にヒューマンエラーによるものがあると考えられる。

(3) 人的因子に関する分析

Rancho Seco 事象の中で行われた運転員の行動の中でエラーと考えられるものは、

- 1) 初期診断においてICS電源喪失同定が遅れたエラー
- 2) Equipment Operatorによる補助給水制御弁の復旧作業におけるエラー
- 3) 高圧/メイクアップポンプの水源の切替操作におけるエラー

である。

1) 初期診断においてICS電源喪失同定が遅れたエラーについての分析

このエラーの Rasmussen の分析ガイドによる分析のチャートを図2. 6. 2に示す。

本エラーは、運転員が異常事態には気付いたが、ICS電源喪失という「システム状態の同定」ができなかった機能不全であり、その原因は、ICSの警報が弁の開度を50%にリセットする等、電源喪失を示すに理解されにくいものであった、という「特別な状況に関する背景情報が不適切」であったことである。そしてそのメカニズムは、ICSが電源喪失に対応してリセットした弁の開度等をそのままパネル上に表示してしまうという「人間工学的設計不備」、ICS電源喪失に直接対応した手順書が用意されていなかった、訓練でも考えられていなかったという「不十分な教育/訓練」等の行動影響因子、突如発生したなじみのないタスクという状況因子により、ICS電源喪失を示す「情報が受け取られない」というものである。これによって、システム状態の同定が

できず、運転員の「意図したタスクが行われない」という外的モードとなった。

- 2) Equipment Operatorによる給水制御弁の復旧作業におけるエラーについての分析
このエラーに関して、作業状況等に関する情報を基に行った Rasmussen の分析ガイドによる分析のチャートを図 2. 6. 3 に示す。

このエラーの原因は、弁の手作業による閉止操作をどの程度の力加減で行うかということが訓練中に与えられていなかったという「状況に関する情報が不適切」だったことによる。さらに、弁の位置指示計が操作中には見えないところにあったという「人間工学的な設計不備」及び「不十分な訓練・指導」が行動影響因子、希な「必要に応じて発生したなじみのない操作（タスク）」が状況因子として働き、力の加減を間違えという「運動の変動性」といったメカニズムによって、弁の閉止「操作の実行ミス」という内的な機能不全を生じた。結果として、弁の閉止が不正確に実施され「規定のタスクが行われなかった」という外的モードとなった。

- 3) 高圧/メイクアップポンプの水源の切替操作におけるエラーについての分析

このエラーの原因に関して行った Rasmussen の分析ガイドによる分析のチャートを図 2. 6. 4 に示す。

このヒューマンエラーの原因は、高圧/メイクアップポンプの系統構成について実プラントのものとシミュレータのものと2種類のもの知識として与えられていた、すなわち、「特別な状況に関する背景情報としての知識が不適切」であったことである。このことは運転員は承知はしており、水源切り替え操作が必要と対応したのであるが、実プラントの系統構成が異なるシミュレータで行った「不十分な訓練・指導」が行動影響因子、さらに「必要に応じて生じた馴染みのないタスク」というタスク特性が状況因子として働き、「選択の誤り」という機能不全のメカニズムによって、意図したタスクに対して「操作手順が不正確」という内的機能不全を生じてしまった。その結果、高圧注入/メイクアップポンプは水源から隔離された状態で運転されることになってしまう「誤った行為の実行」という外的モードとなった。

表 2.6.1 Rancho Seco 事象における運転員のふるまい (1/4)

時刻	システムの状態	Shift Supervisor	Reactor Operator (x2)	その他
04:13:17	多数の警報が制御室で点灯。この中に「IC S or Fan Power Failure」警報があった。この警報がICCSに問題のあることを示していた。 ↓ プラントはICCSの電源喪失に伴い設計通り応答する。 ・タービンバイパス弁、大気放出弁、主及び補助給水制御弁が50%位置になる。 ・主給水ポンプが最低速度に到着するに主給水止め弁が閉止 ↓ 主給水ポンプが最低速度になったとき、主給水は完全に喪失する ↓ ICCSが制御棒を自動的に挿入するはずであったが制流電源喪失により機能を果たさない ↓ ICCSはundercoolingになる。 ↓ 主給水のポンプアスビードのRunbackにより吸込み側圧力が電動補助給水ポンプが自動起動する圧力以下に低下する。 ↓ 「原子炉圧力高」により原子炉トリップ。これに伴いタービントリップ。 ↓ 主蒸気安全弁が吹く。 ↓ 「主給水ポンプ吸込み側圧力低」により補助給水ポンプが自動起動 ↓ 50%位置にある補助給水制御弁を通して給水を始め。 (1000gpm)	1次系の圧力上昇を止めるために加圧器スプレイを開く	<ul style="list-style-type: none"> 主給水流量の急激な低下に気付く。 1次系の圧力上昇及び「ICCS Runback or Limit」警報により事故の開始に気付く。 <p>運転員は気付いていない。(ICCSの電源喪失により表示が制御位置にリセットされ、このため運転員は充分な給水流量(0.1t/h)があるものと思っている)</p> <ul style="list-style-type: none"> 引き続き発生するプラントの冷却に備えてタービンバイパス弁、大気放出弁の隔離することを見過す。 <p>加圧器スプレイ弁を減圧に備えて閉める。</p>	
04:14:01				
04:14:03				
04:14:04				
04:14:08				
04:14:11				
04:14:25				
04:14:30				
04:14:48	メイクアップタンクの水位が急激に低下。		<ul style="list-style-type: none"> 加圧器水位が低下していることに気づき、1次系の充てんのためにA-BP1の注入弁を全開にする。 タービンバイパス弁及び大気放出弁が50%位置にあること及び補助給水が供給されていることから過冷却が始まったことに気付く。 <p>Equipment Operatorsを弁の設置場所に派遣する。 (実際は、ADYとTBYはRemote shutdown panelからまたADYはmanual control stationでも閉めることはできた。しかし、この方法は火災時の知覚で使用するために付加された機能であり、その他の目的に用いることができず知らざらされてなかった。充てん流量を確保するために、ほうろくタンクに採取された吸込み弁を開く。</p>	
04:15:04				
04:16				

表 2.6.1 Rancho Seco 事象における運転員のふるまい (2/4)

時刻	システムの状態	Shift Supervisor	Reactor Operator (×2)	その他
04:16:02				
04:16:57	<p>I次系の圧力がSFASの設定点に達したため、SFASが起動。加圧器水位も220から15インチに低下。</p> <ul style="list-style-type: none"> ・IPの注入弁(×4)が開く ・電動補助給水ポンプが非常用母線から給電される ・補助給水制御弁(SFAS系)が全開になる ・IPに接続するBISTの吸込み弁が開く ・メイクラップタンクのIP吸込み弁及び再循環弁が隔離 ・A、Bの低圧注入ポンプが再循環モードで起動 ・D/Cが起動するが非常用母線の電断があるため接続されない ・B-IPが起動信号を受ける。(しかし、すでに手動により起動されていた) <p>I次系の圧力が低下を続ける</p>	<p>蒸気の放出弁を開く。</p> <p>過去に2度、補助蒸気制御弁の故障により給水加熱器の遮断弁が開き、過剰別に至ったことを思い出し、この弁を止めることを指示</p>	<p>(給水流量があるものと思われるため) 過剰弁を防ぐために2台の主給水ポンプを停止、実際は主給水は止まっている。</p>	
04:17:10				
04:17:15	<p>SFASにより制御室の空調ユニット(BHAC)が起動する</p>		<p>補助蒸気制御弁を閉じる。(TBV×4、ADV×2、補助給水制御弁×2は開いたまま)</p>	
04:17:27	<p>制御室内の騒音レベルが上がる</p> <p>電動補助給水ポンプが非常用母線に再接続されたため再起動する。Dual-Drive補助給水ポンプは連続的に運転中。</p>		<p>補助給水流量が過剰であるためSFAS系の流量制御弁を閉じる。 (ICS系の制御弁は開いたまま)</p>	
04:19	<p>加圧器が空になり上部ヘッドにポイドが発生。</p>			
04:19:15				
04:20	<p>加圧器水位がスケールオフ。サブグループマージンが85°Fとなり更に増加</p>	<p>ICSの電源をチェックするためにComputer Technicianを派遣する。 ICSの4つ全ての24V直流電源が喪失していることが報告される。 以後20分間、Senior Control Room Operator、STAとともにICSの修復を行なう。しかし、ICSの24V直流電源に給電するスイッチが開いていることには気が付かない。</p>	<p>運転員間のコミュニケーションの妨害となっている制御室内の騒音を下げるためにB-BHACを切る。</p>	<p>Shift Technical Advisorが制御室に到着(プラント状態を確認し、Shift Supervisorと話し合う)</p>
04:20:20	<p>SGの圧力が500psig以下。このため、運転中の復水ポンプからSGに給水が始まる。</p>			
04:21:25	<p>I次系が5磅低圧力(106-10psig)、を記録する。</p>			
04:21	<p>I次系の冷却は続いているが、注入流量により(上部ヘッドにポイドがあることも手伝い)加圧器は再電水を始め。これによ</p>			

表 2.6.1 Rancho Seco 事象における運転員のふるまい (3/4)

時刻	システムの状態	Shift Supervisor	Reactor Operator (x2)	その他
04:22	1次系圧力は上昇を始める。 BWRのDTS設計限界を越える。しかし、NUTの限界値は越えなかった。		RCSの圧力上昇とサブクールマージンの上昇を抑えるためRPの流量をゆっくり減少させる。	
04:22:50	SG圧力が435psigまで経過したため「主蒸気圧断のロジックが起動し、給水制御弁が閉じられる。 ↓ 復水ポンプからの給水が止まる。			Equipment OperatorがTBV、APVと隔離したことを報告
04:23				Equipment OperatorがTCS系の補助給水制御弁を閉じる。 (Bの弁を完全に閉めたつもりで部分的にしか閉めていなかった。この状態でAの弁を完全に閉めたためBの流量が増加した。さらに、Aの弁は完全に閉まっていなかったと思い、レンチを使って閉めたため手動閉鎖機構が破損し、再び閉じてしまった)
04:23:10				
04:25:30			RPのSFAS系の再循環弁(メイクアップタンクへの注入弁)を全て閉ポンプの加熱を防ぐため閉じられた。しかし、この時点ではメイクアップタンクからの吸込み弁はすでに閉じられていた。	
04:28:15			制御室内の騒音を下げるとためA系のRWCも切る。	
04:28:47	加圧器水位がスケール内に回復、サブクールマージンは170F		急激なA系の圧力上昇を抑えるために、RP1流量を減少させる。 RWCからの吸込み弁を閉じる。	
04:28:00	メイクアップタンクの水位が上昇し、スケールアウトする。このため逃し弁が開き、フラッシュタンクに放出される。		メイクアップポンプ、A-RP1、A-低圧注入ポンプの水源がなくなる (A系温度が418Fのとき、C-RCPを停止する。	
04:28:43			抽出系を回復する。	
04:28:59			A-RP1を停止する。	
04:29:40	1次系圧力が1616psigのピークを示す。		再加圧を少なくするため、Dの注入弁が開められる。	
04:29:45			PTS領域から出るための減圧を、加圧器スプレイで行う。	
04:30:30				
04:33:20	B-蒸気発生器への給水は止まる。しかし、A-蒸気発生器への給水は続く。 A-蒸気発生器が過熱になり溢れ出た水が主蒸気器に流入する。(ストリップアップチャータ上に示される)			飯から到着したEquipment OperatorがB-補助給水流量制御弁を閉じる
04:33:40				

表 2.6.1 Rancho Seco 事象における運転員のふるまい (4/4)

時刻	システムの状態	Shift Supervisor	Reactor Operator (×2)	その他
01:35	マイクアップポンプ、A-BIP1 (すでに止まっていた)、A-低圧注入ポンプの電源が隔離された。		マイクアップポンプの水位を低下させるためA-BIP1の吸込み口をBIP1からマイクアップポンプに切り換える。しかし、マイクアップポンプからの吸込み弁は閉じられていた。	Equipment Operatorが制御室に連絡し、その指示のもとA-補助給水系の流量制御弁を閉じようとするが動かない。
04:36				
01:39:00	サブクォールマージンが201Fの最高値に達する。			
01:40	ICS 電源が回復(弁の操作が可能になる)		閉じている全ての弁を閉める	Backup Shift Supervisor がICS 電源への給電スイッチが開いていることに気づき、閉じる。
04:41:00	蒸気発生器への補助給水が完全に停止する			Equipment OperatorがA-補助給水系の隔離弁が閉鎖したことを報告
04:41:10	A-蒸気発生器の水位が低下する		B-補助給水系の流量制御弁及び大気放出弁の戻田に向かう	
04:42:42			B-BIP1を停止。マイクアップポンプは運転を続ける。	
04:42:50			A-BIP1の注入弁を閉じる	
04:43:30			1次冷却材ポンプのシール水の喪失に気づく	
04:43:54			シール水を回復させるためB-BIP1を再起動する	
04:49	損傷した蒸気ポンプから補助建屋の排気系を通して蒸気の漏れがある。 補助建屋の放射線モニターが警報を発生 損傷した充鎮ポンプから煙が発生し、火災警報を発生 補助建屋の排気系が隔離される		B-BIP1を停止 ↓ 1次系冷却材ポンプのシール水の喪失に気づく ↓ B-BIP1を起動	
04:50:19				
04:50:30				
05:00			制御室内で大きな音を聞く。さらにマイクアップポンプの電流が1/3しか流れていないことにより、損傷したことが解る。	
05:00:10	この後プラントは安全状態へ移行		マイクアップポンプを停止し、吸込み弁を開けたため、そこから冷却材がフロアにあふれる。マイクアップポンプの水位が急にながったため、タンク出口弁を閉じる。	

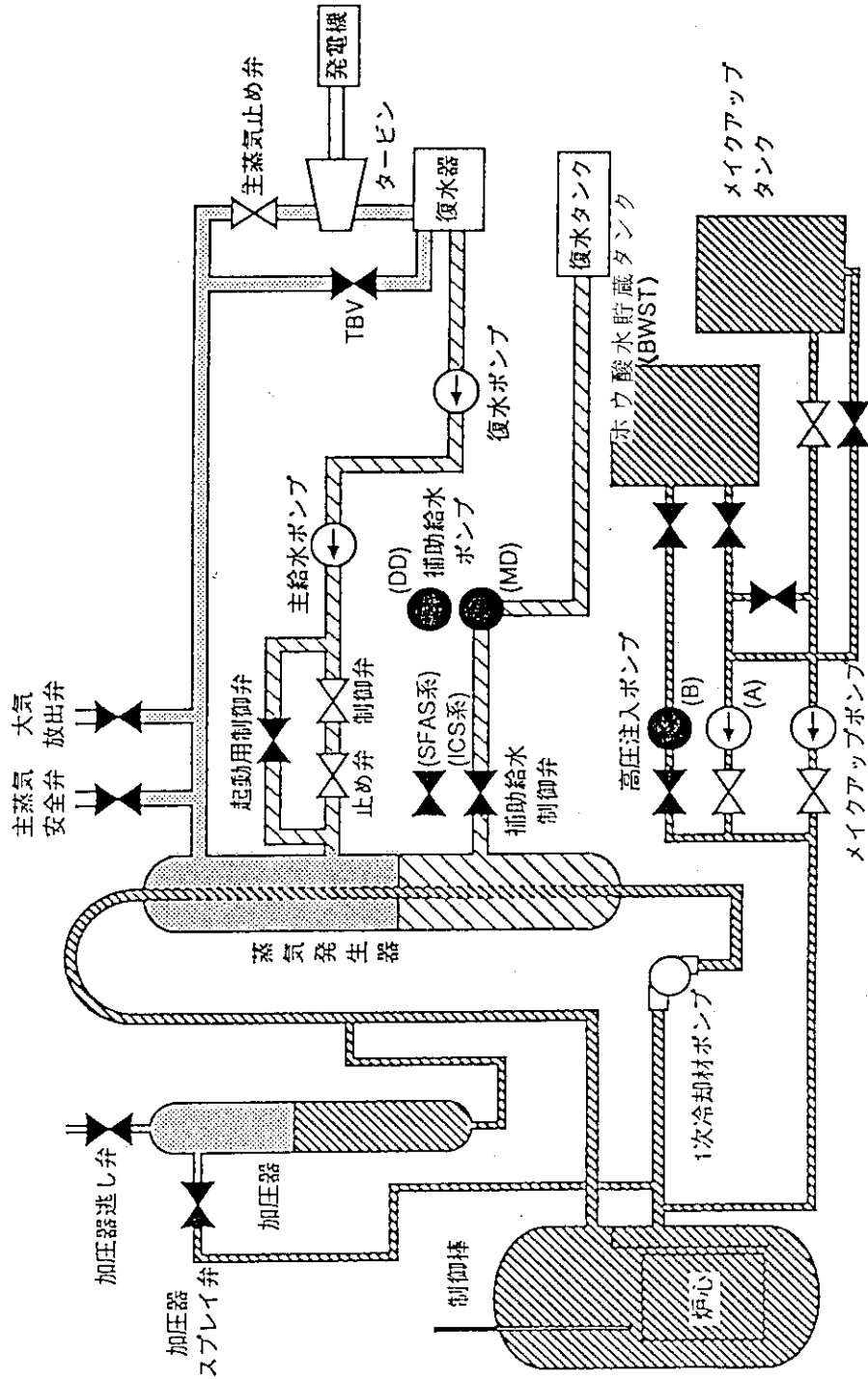
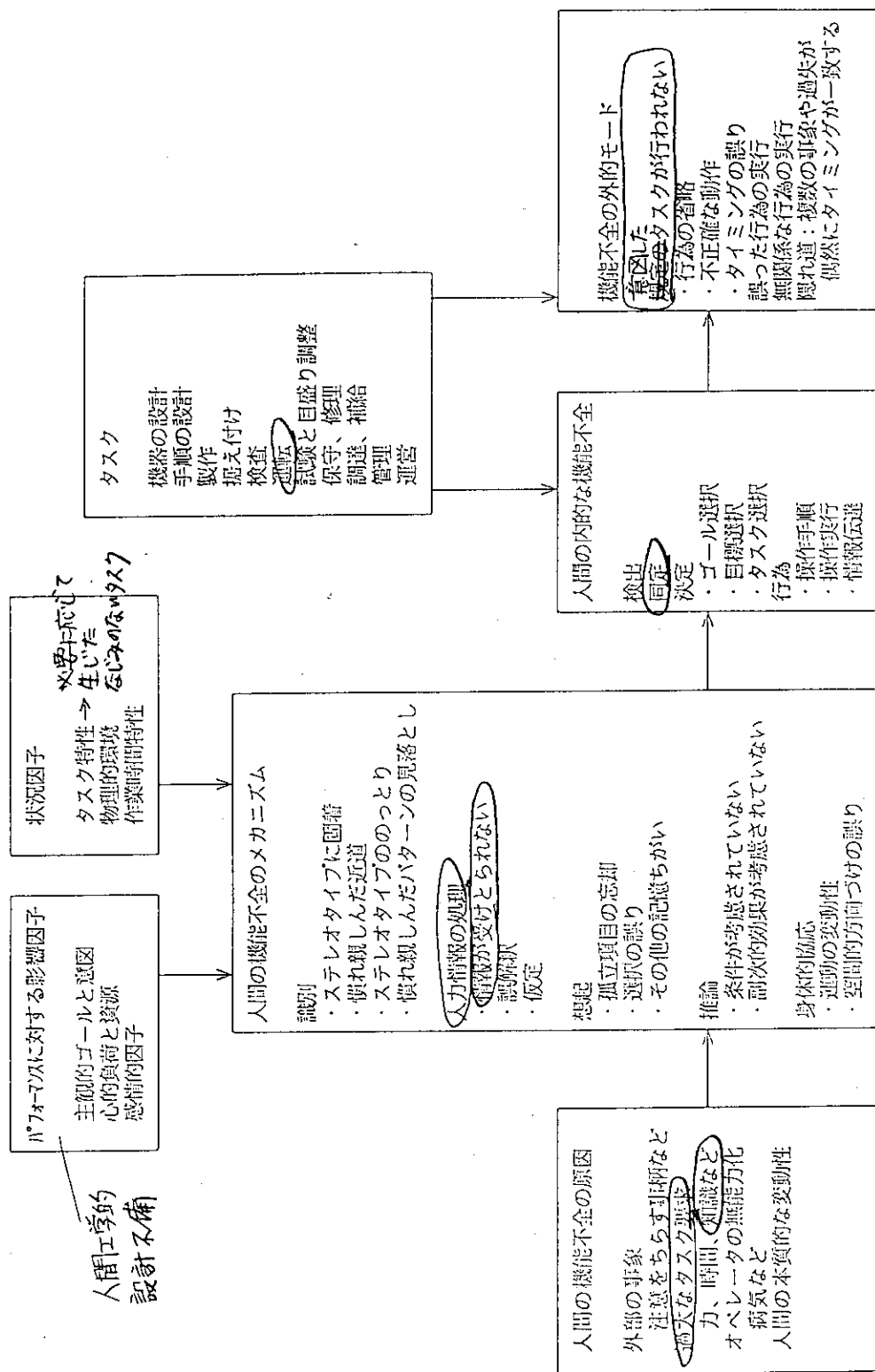
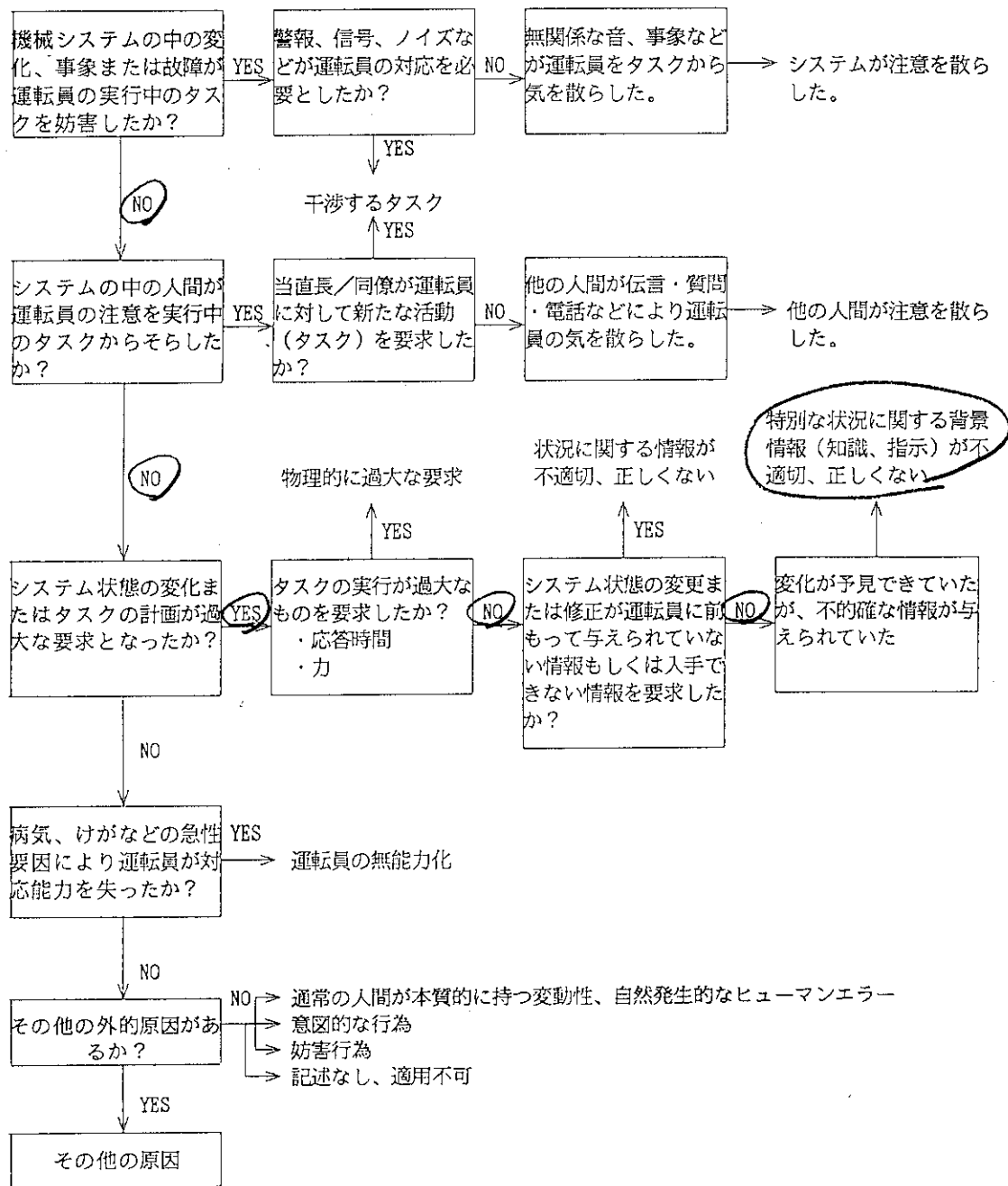


図 2.6.1 Rancho Seco プラント概念図



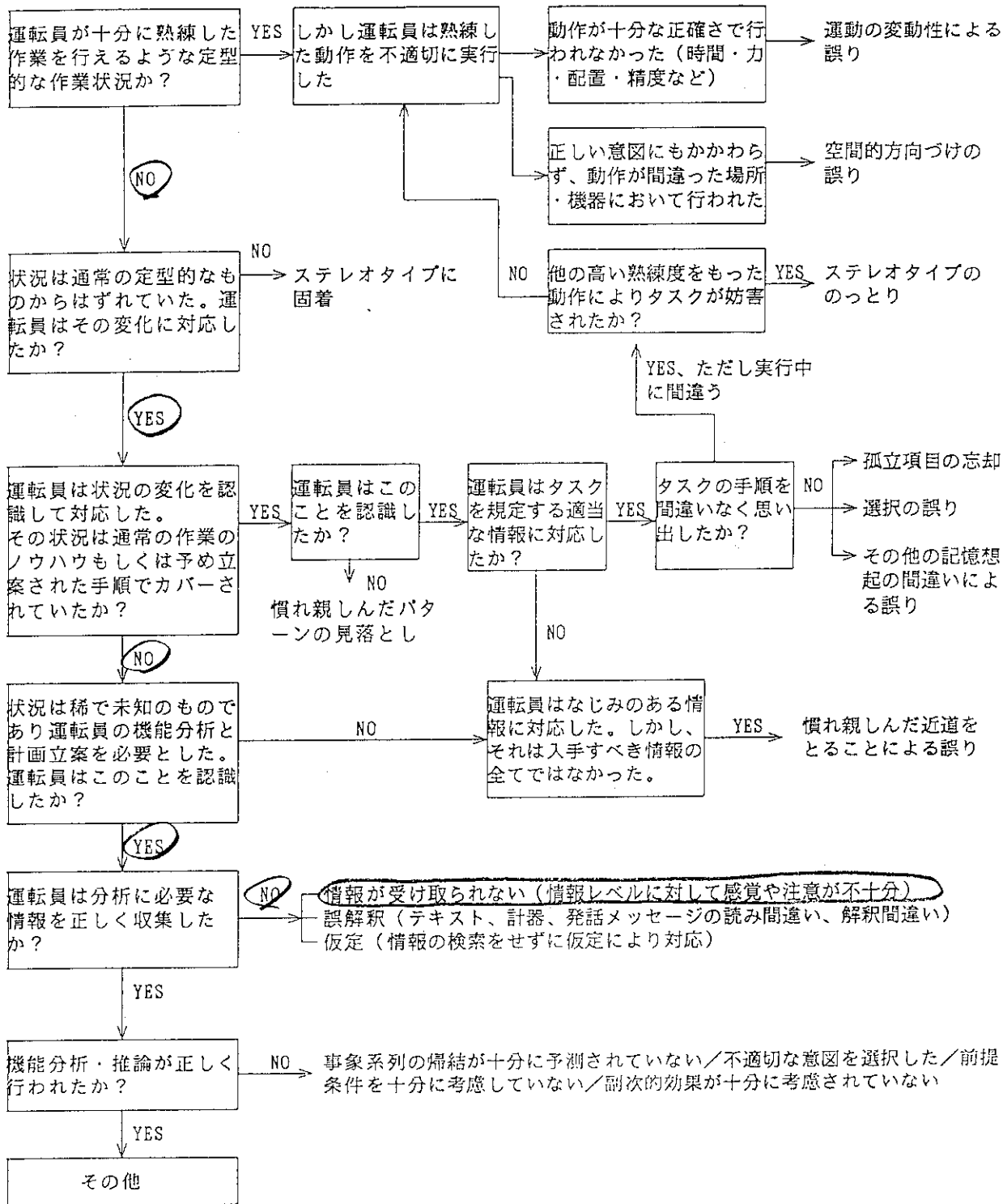
Rasmussenの提唱する人間の機能不全を含む事象の既述と分析のための多面的分類法

図 2.6.2 Rasmussenの手法によるRancho Seco事象の分析チャート(1/6)
(ICS電源喪失の同定)



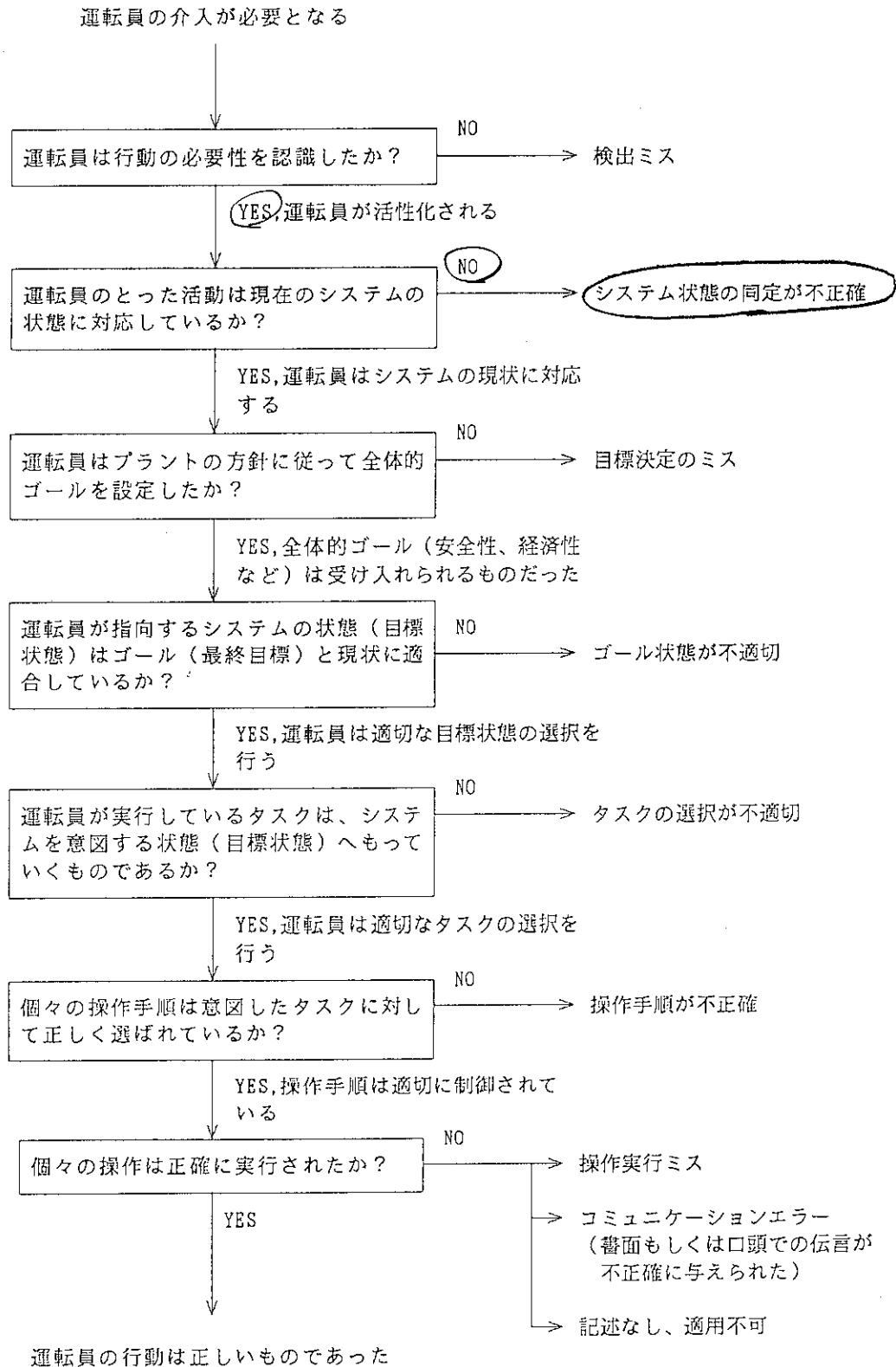
人間の機能不全の原因に対する分析ガイド

図 2.6.2 Rasmussen の手法による Rancho Seco 事象の分析チャート (2/6)
(ICS 電源喪失の同定)



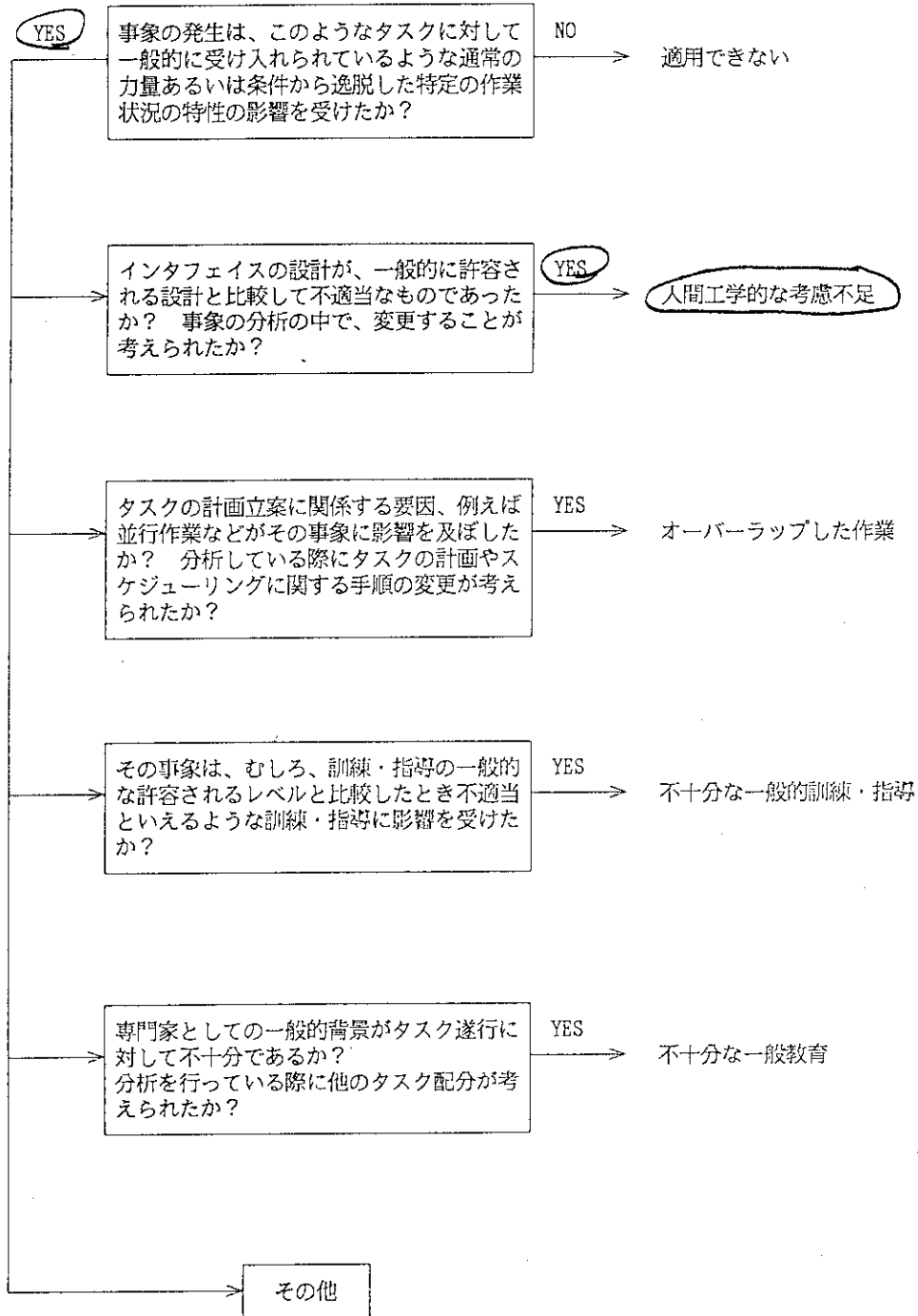
人間の機能不全のメカニズムの分析ガイド

図 2. 6. 2 Rasmussen の手法による Rancho Seco 事象の分析チャート (3/6)
(ICS 電源喪失の同定)



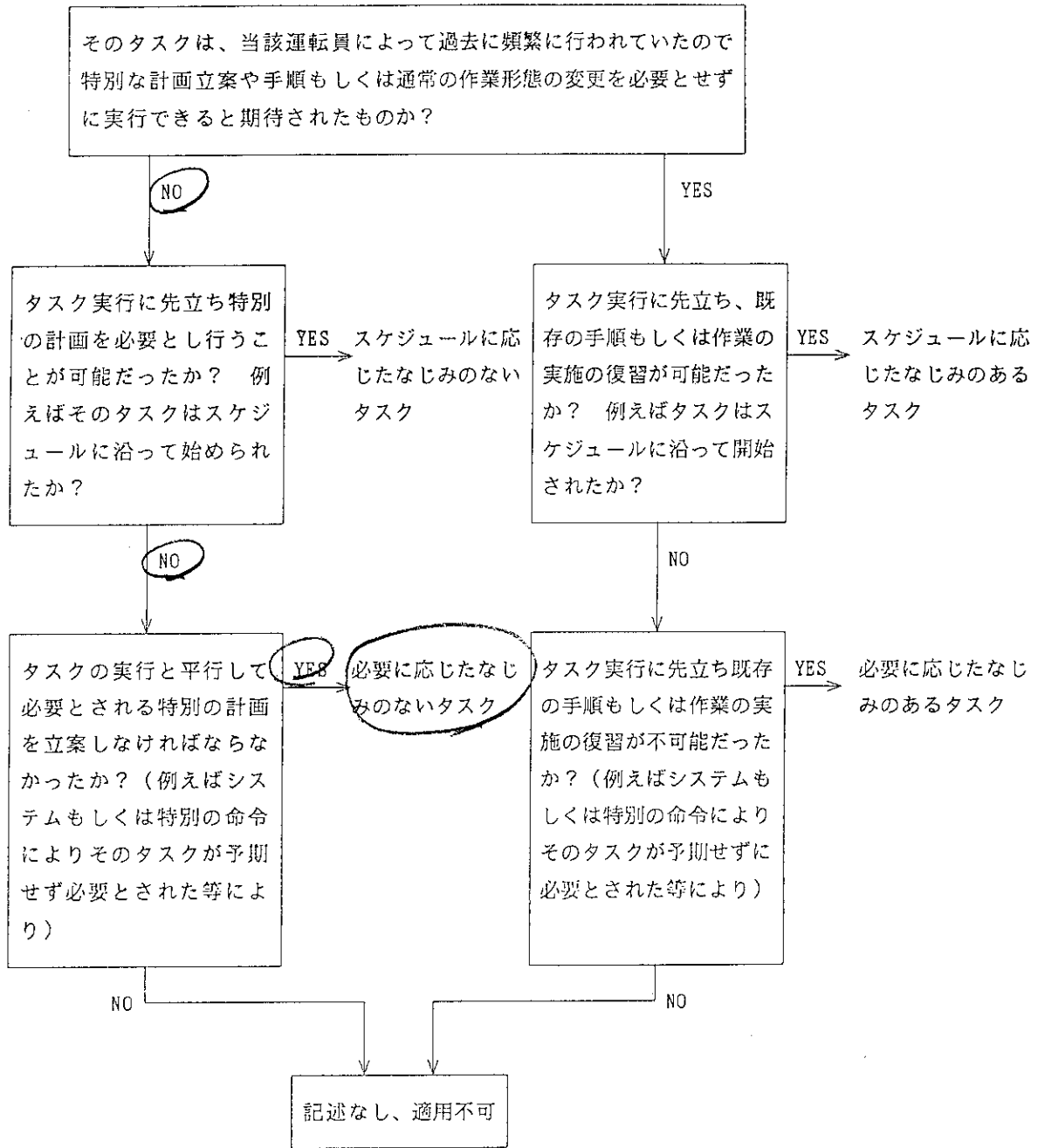
人間の内的な機能不全の分析ガイド

図 2.6.2 Rasmussen の手法による Rancho Seco 事象の分析チャート (4/6)
(ICS 電源喪失の同定)



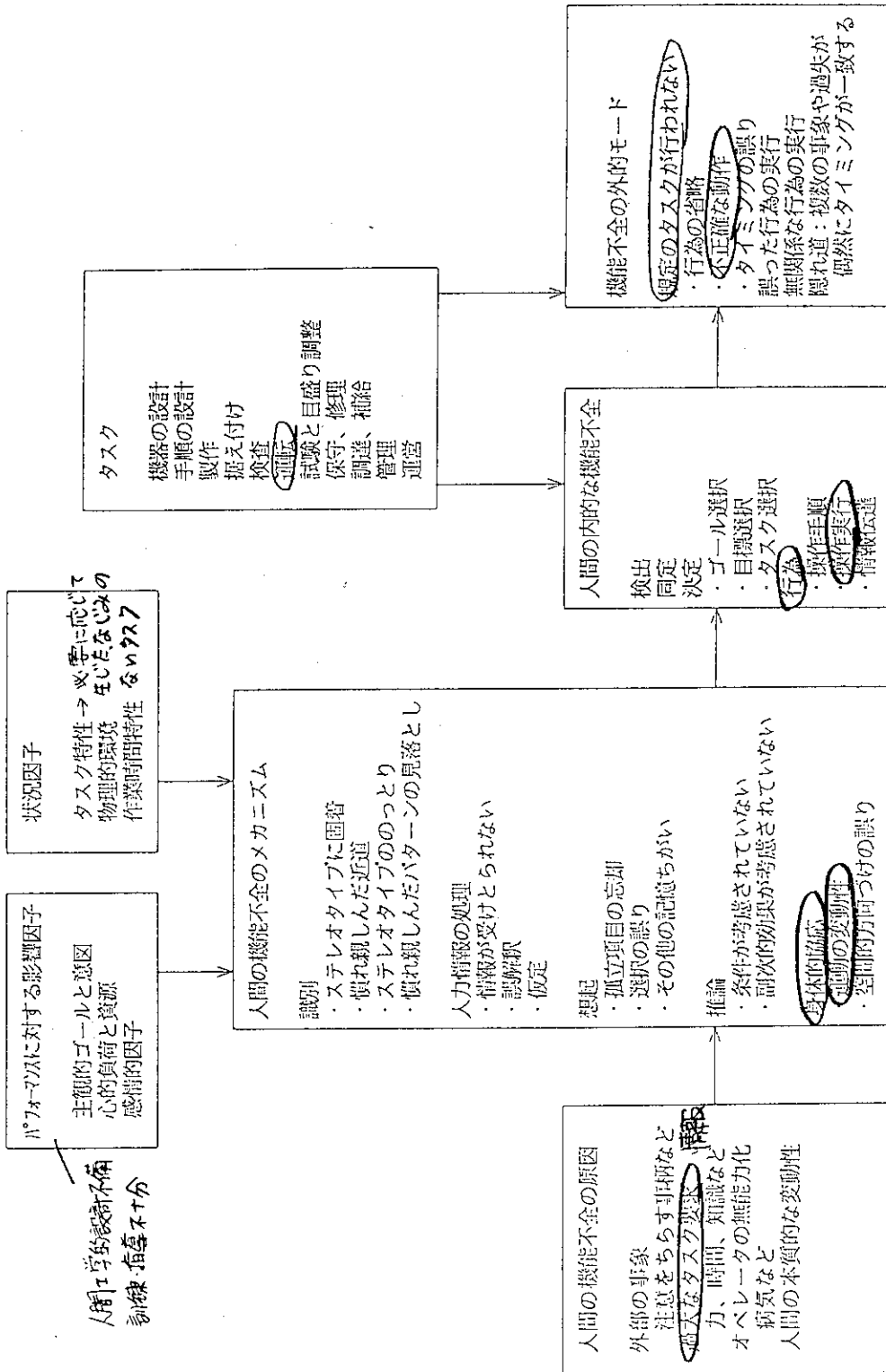
パフォーマンスに対する影響因子のうち心的負荷と資源に対する分析ガイド

図 2.6.2 Rasmussen の手法による Rancho Seco 事象の分析チャート (5/6)
(ICS 電源喪失の同定)



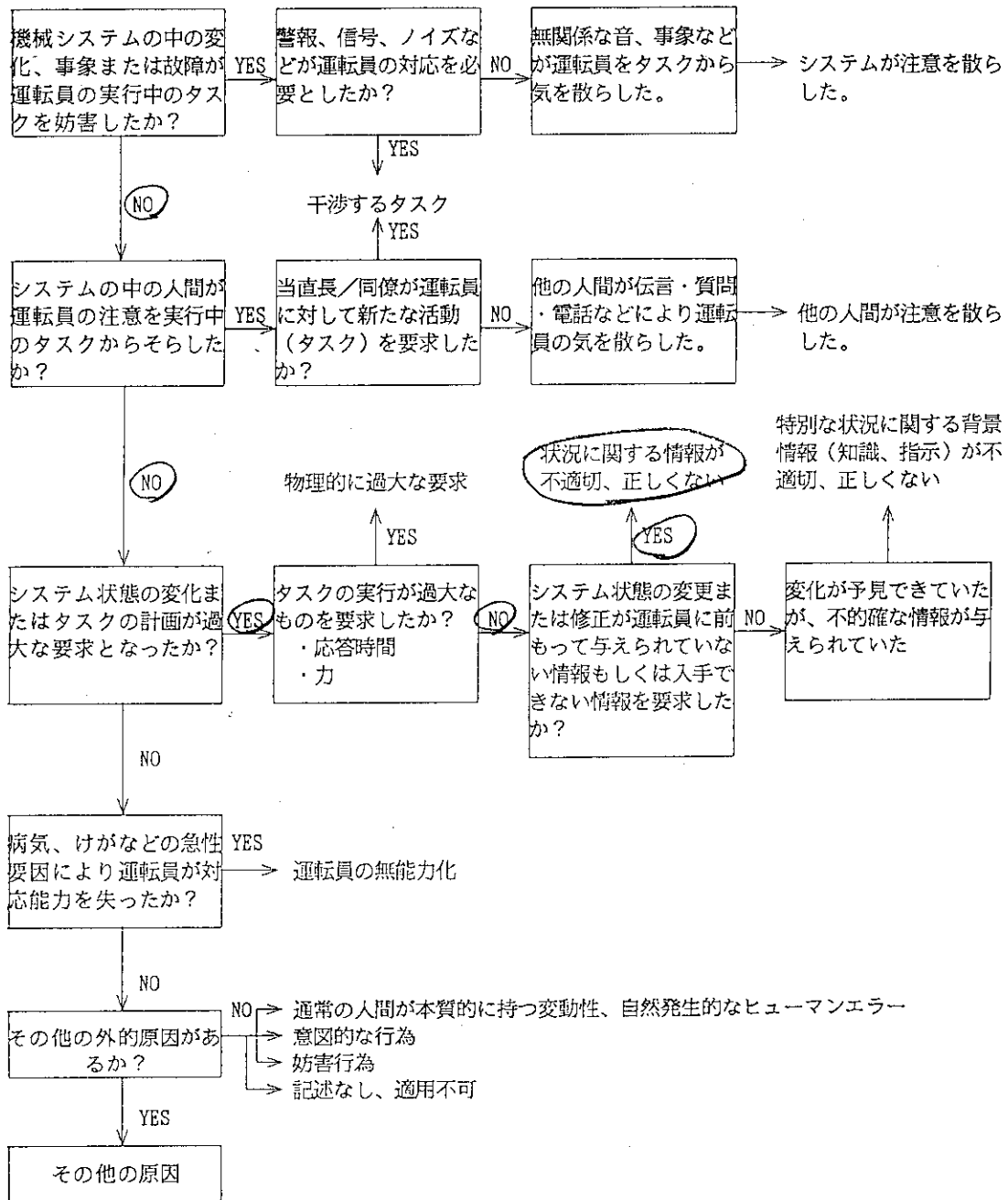
状況因子のうちタスク特性 (Preparedness) に関する分析ガイド

図 2.6.2 Rasmussen の手法による Rancho Seco 事象の分析チャート (6/6)
(ICS 電源喪失の同定)



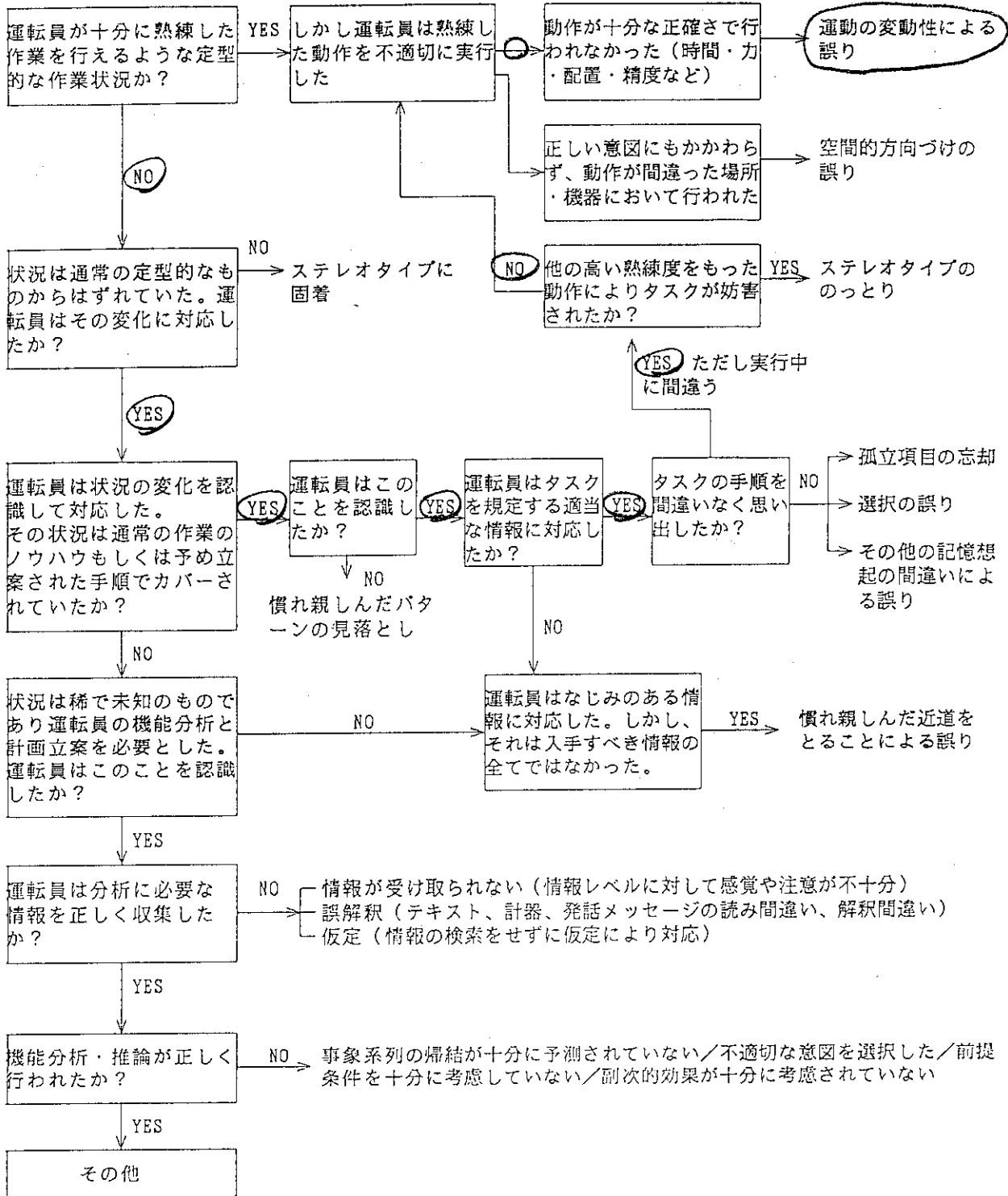
Rasmussenの提唱する人間の機能不全を含む事象の既述と分析のための多面的分類法

図 2.6.3 Rasmussenの手法によるRancho Seco事象の分析チャート(1/6)
 (給水制御弁の復旧)



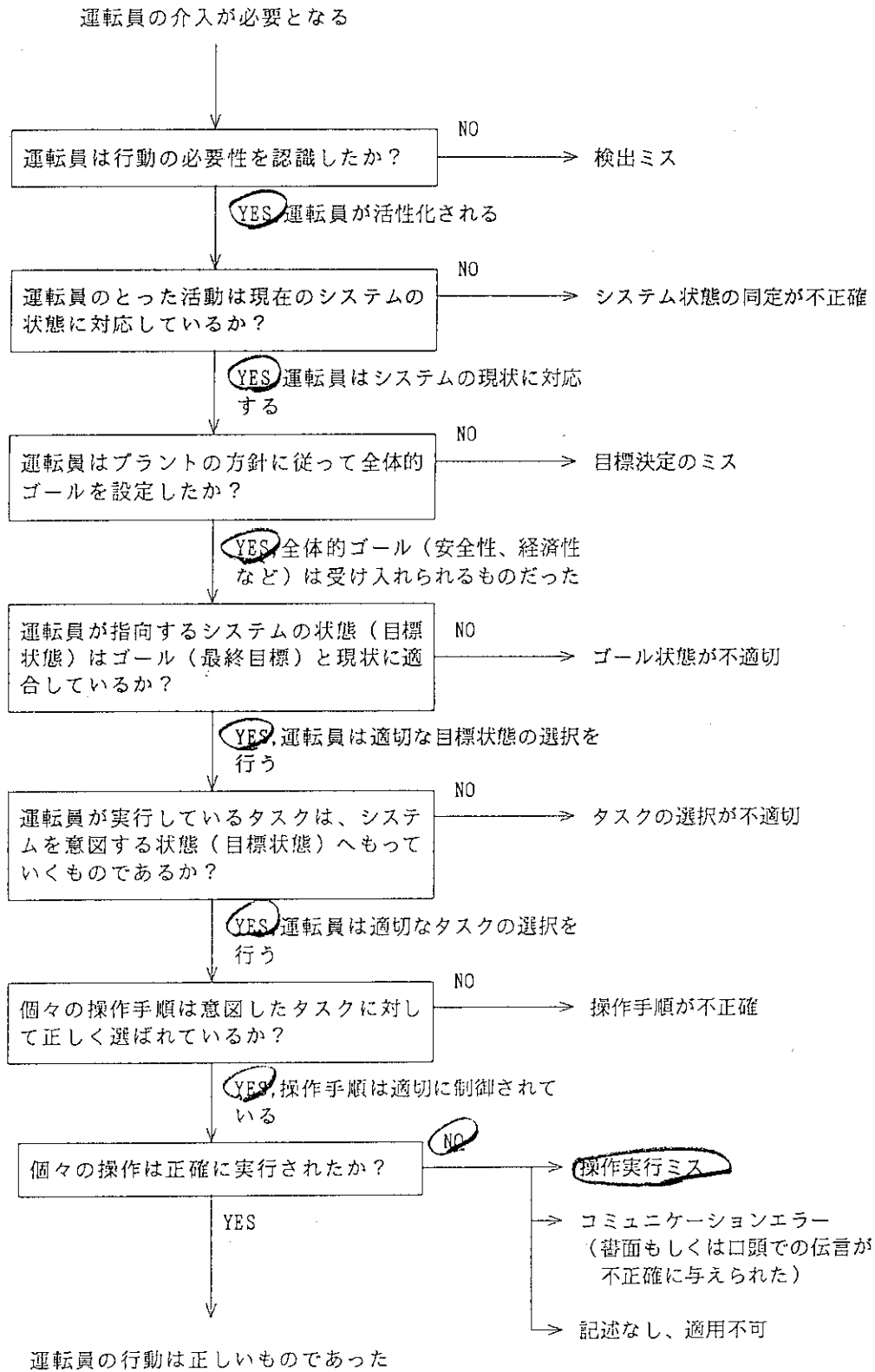
人間の機能不全の原因に対する分析ガイド

図 2.6.3 Rasmussen の手法による Rancho Seco 事象の分析チャート (2/6)
(給水制御弁の復旧)



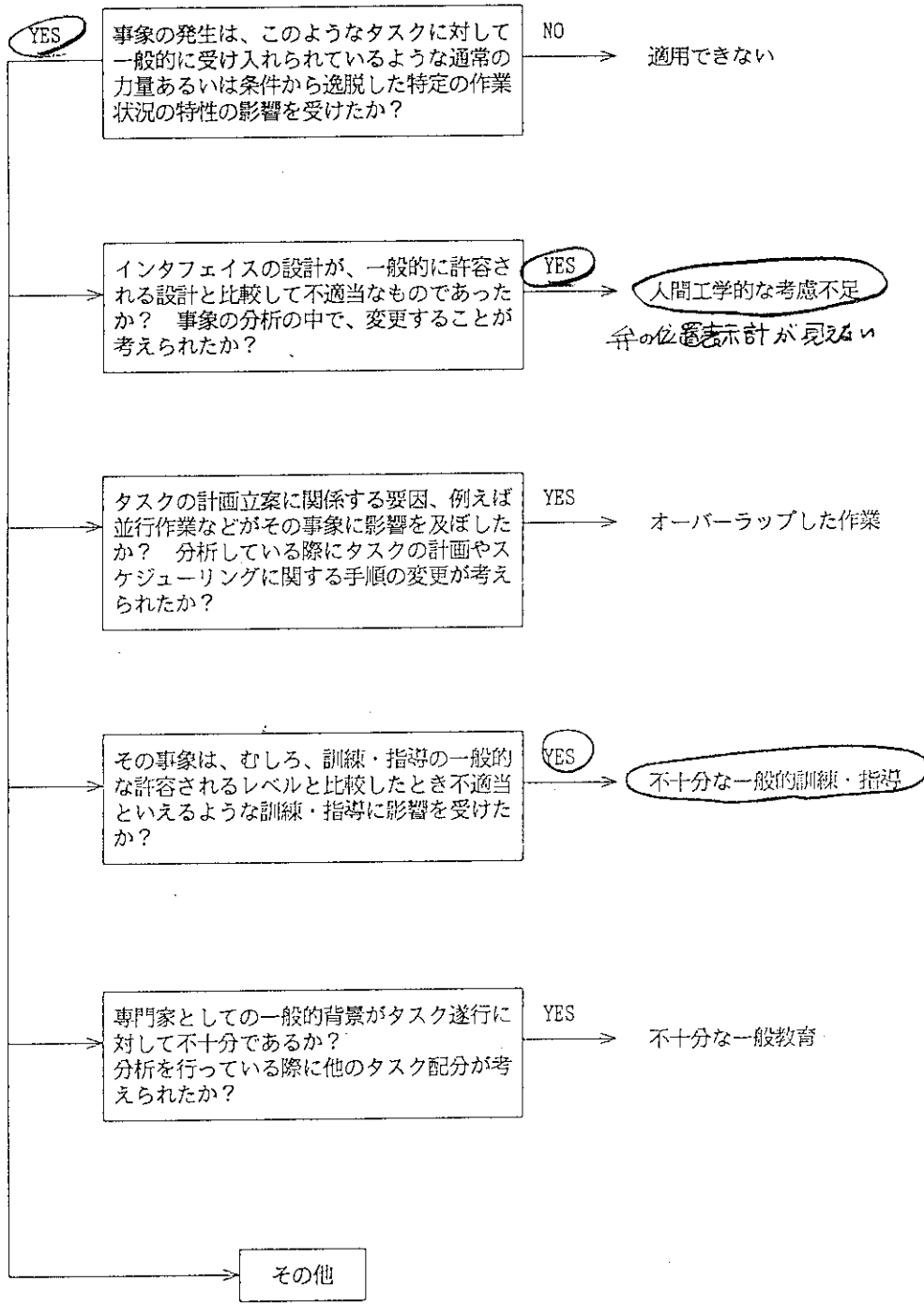
人間の機能不全のメカニズムの分析ガイド

図 2.6.3 Rasmussen の手法による Rancho Seco 事象の分析チャート (3/6)
(給水制御弁の復旧)



人間の内的な機能不全の分析ガイド

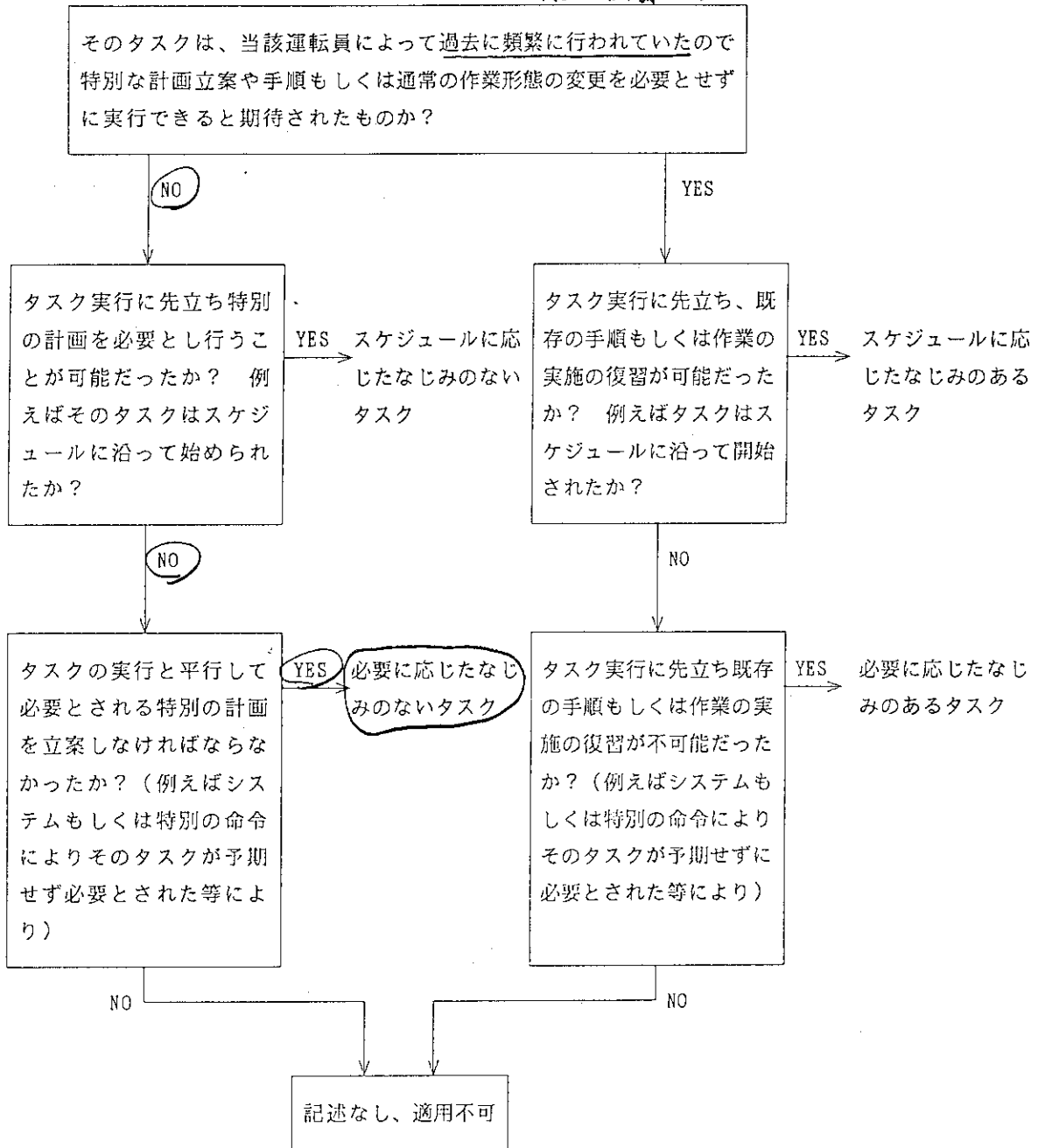
図 2.6.3 Rasmussenの手法による Rancho Seco 事象の分析チャート(4/6)
(給水制御弁の復旧)



パフォーマンスに対する影響因子のうち心的負荷と資源に対する分析ガイド

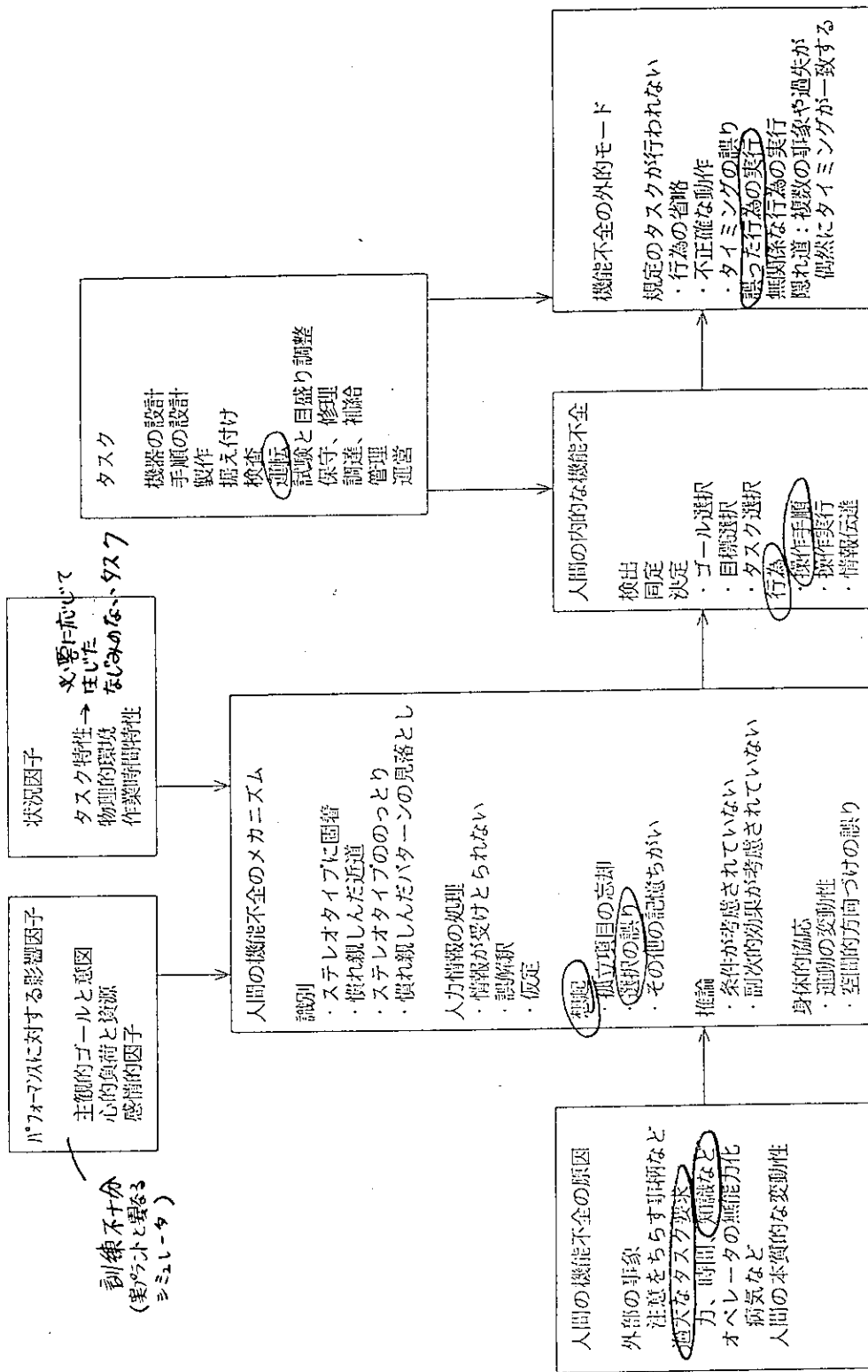
図 2.6.3 Rasmussen の手法による Rancho Seco 事象の分析チャート (5/6)
(給水制御弁の復旧)

No. 訓練不足



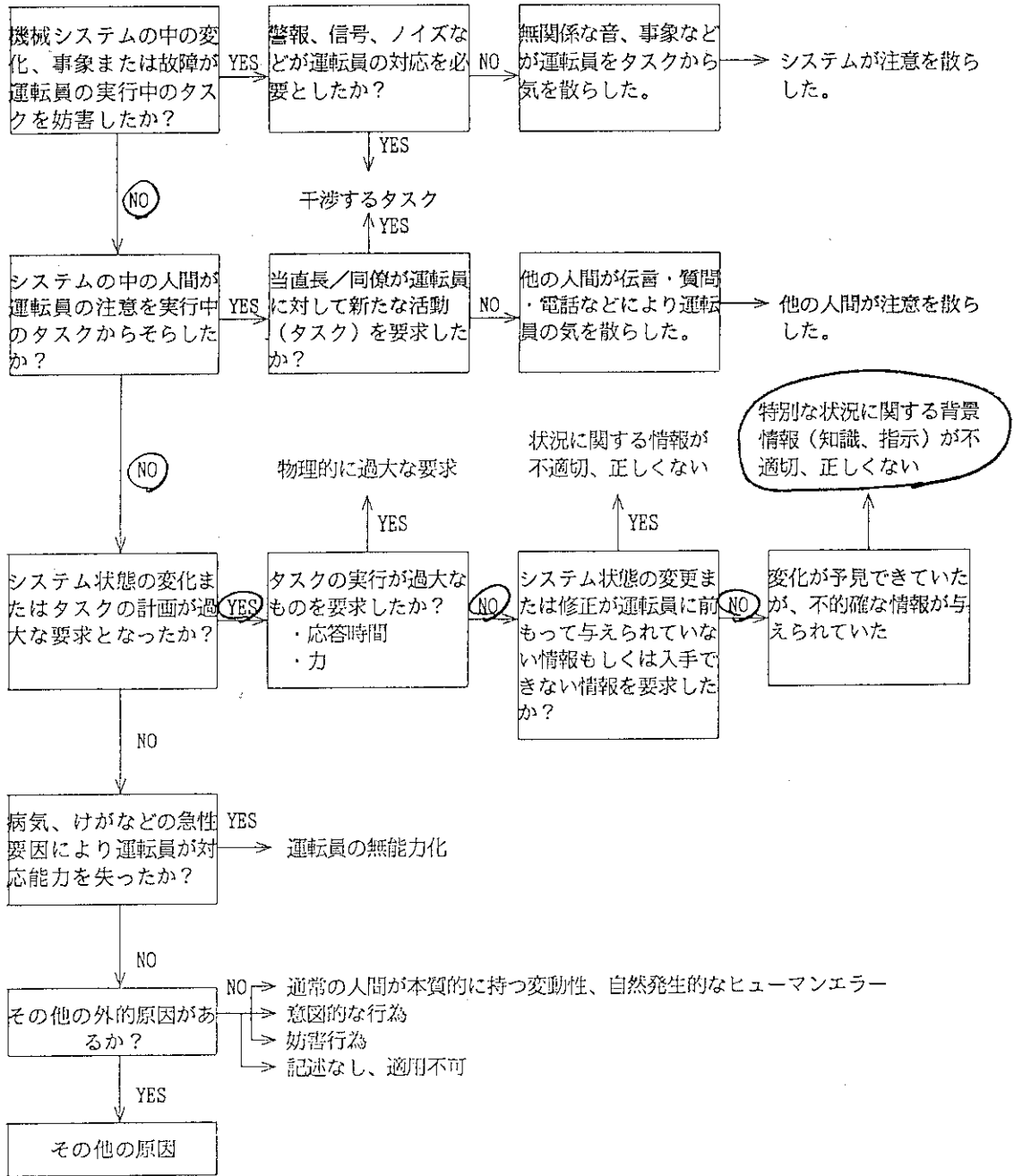
状況因子のうちタスク特性 (Preparedness) に関する分析ガイド

図 2.6.3 Rasmussen の手法による Rancho Seco 事象の分析チャート (6/6)
(給水制御弁の復旧)



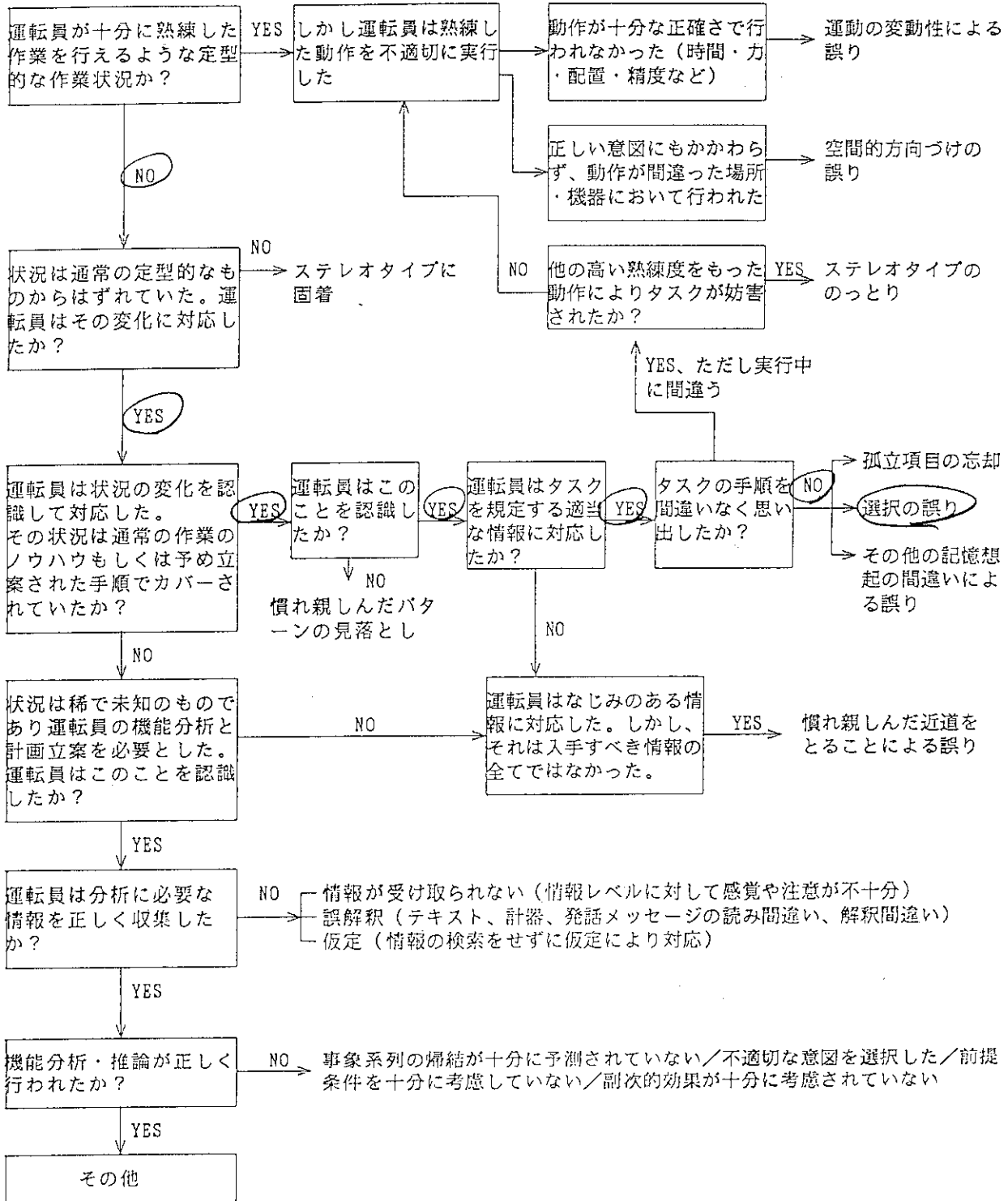
Rasmussenの提唱する人間の機能不全を含む事象の既述と分析のための多面的分類法

図 2.6.4 Rasmussen の手法による Rancho Seco 事象の分析チャート (1/6)
(高圧/メイクアップポンプの水源地切り替え)



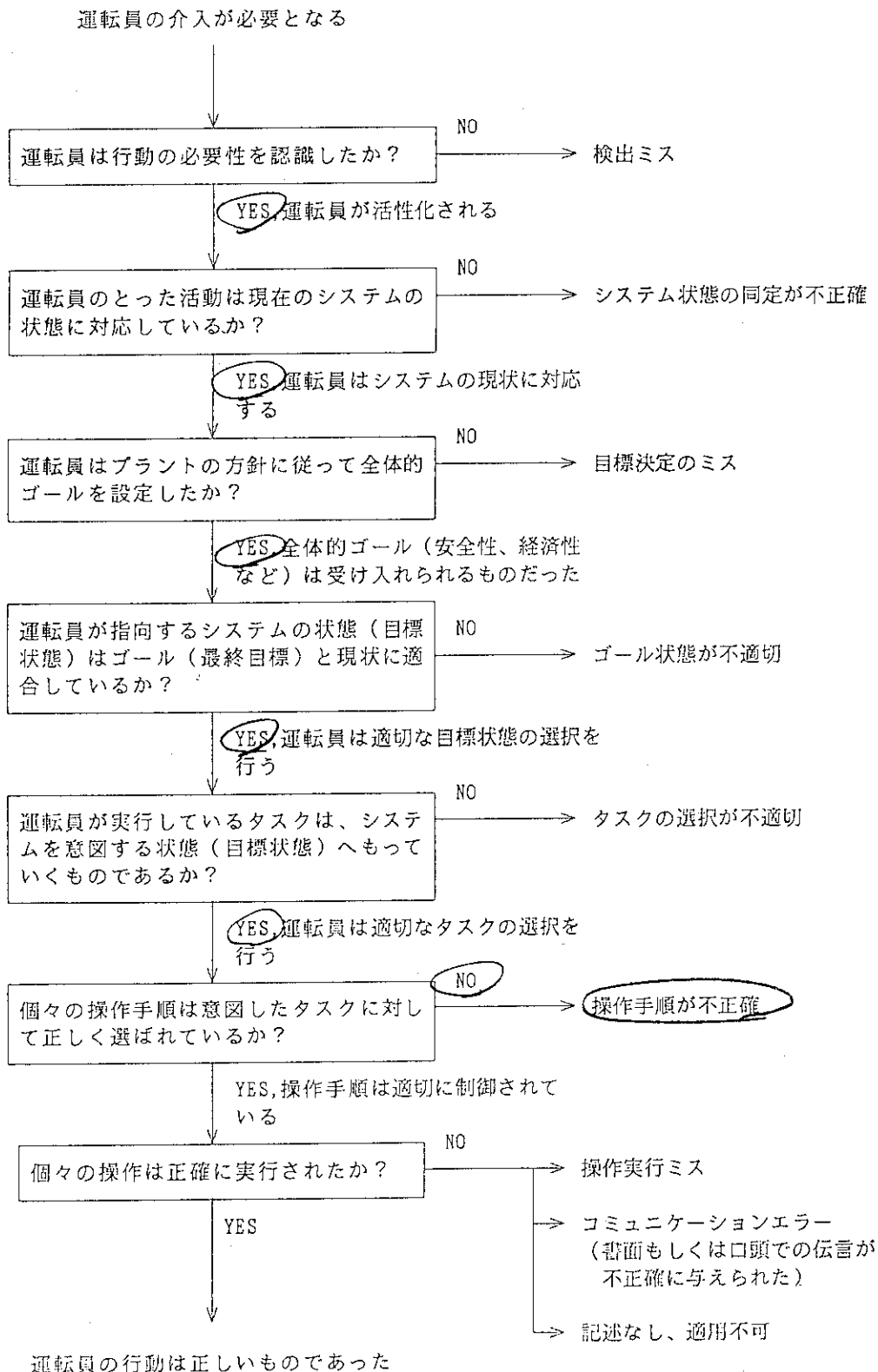
人間の機能不全の原因に対する分析ガイド

図 2.6.4 Rasmussen の手法による Rancho Seco 事象の分析チャート (2/6)
(高圧/メイクアップポンプの水源切り替え)



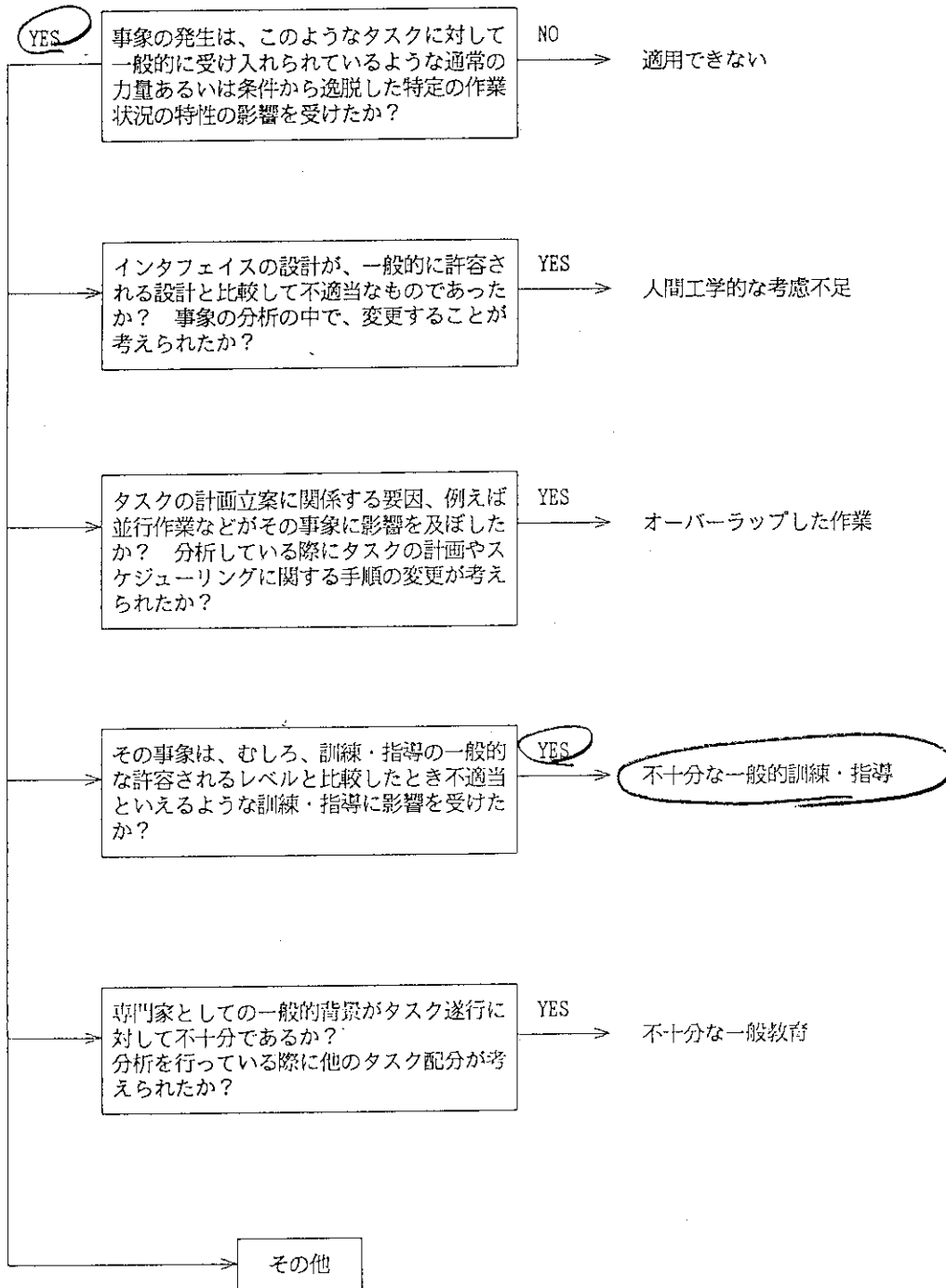
人間の機能不全のメカニズムの分析ガイド

図 2.6.4 Rasmussen の手法による Rancho Seco 事象の分析チャート (3/6)
(高圧/メイクアップポンプの水源切り替え)



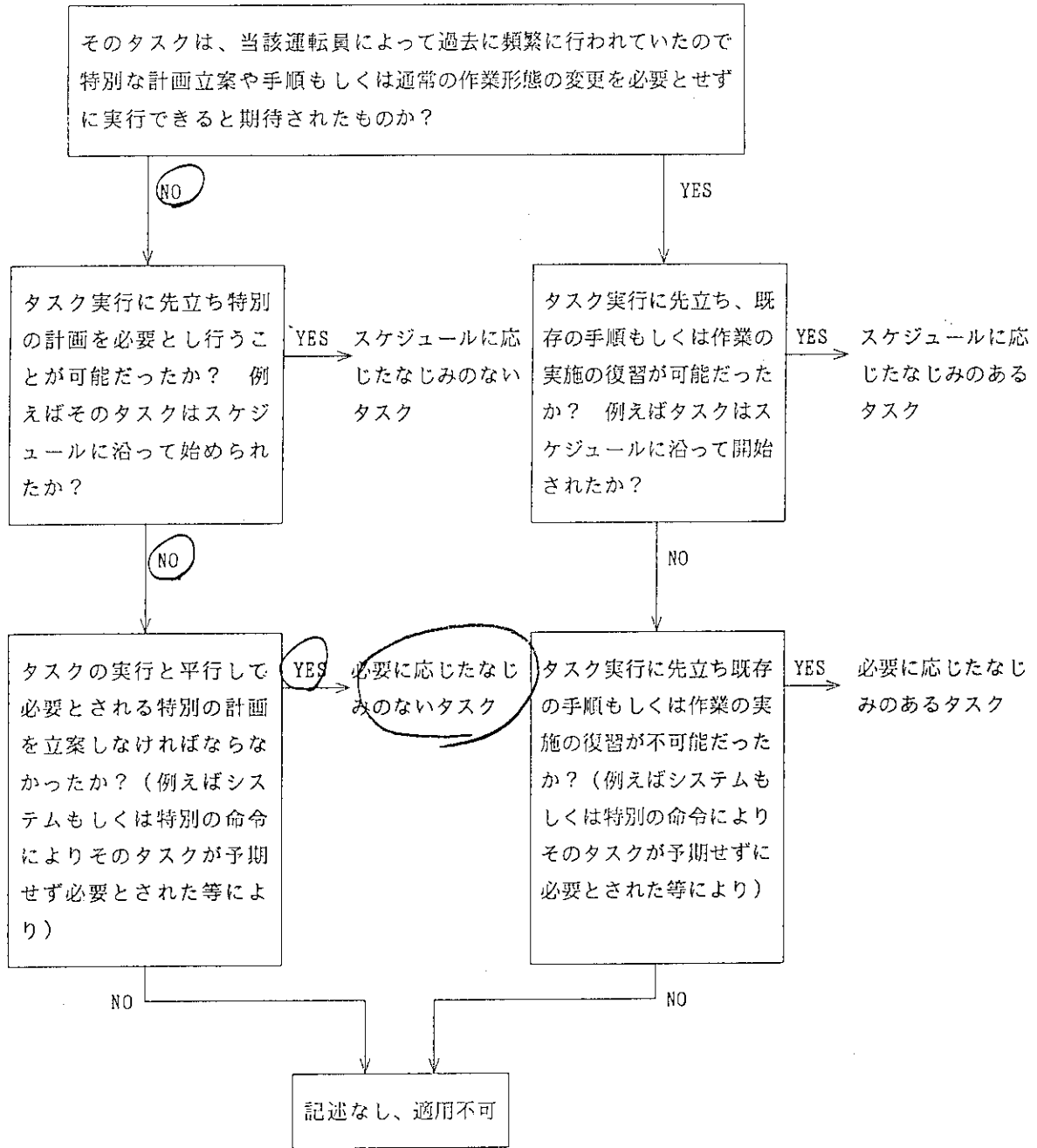
人間の内的な機能不全の分析ガイド

図 2.6.4 Rasmussen の手法による Rancho Seco 事象の分析チャート (4/6)
(高圧/メイクアップポンプの水源切り替え)



パフォーマンスに対する影響因子のうち心的負荷と資源に対する分析ガイド

図 2.6.4 Rasmussen の手法による Rancho Seco 事象の分析チャート (5/6)
(高圧/メイクアップポンプの水源切り替え)



状況因子のうちタスク特性 (Preparedness) に関する分析ガイド

図 2.6.4 Rasmussen の手法による Rancho Seco 事象の分析チャート (6/6)
(高圧/メイクアップポンプの水源切り替え)

2. 7 Prairie Island 事象

Prairie Island 1号炉における1979年10月2日の事象について、参考文献(1)に記載の情報をもとに以下に概要とクロノロジーをまとめる。

Prairie Island プラントは、ウェスチングハウス社製のPWRである。冷却系統の概念を図2. 7. 1に示す。この炉の商業運転は、1976年12月に開始された。

(1) 事象の概要

本事象は、復水器の空気排出器における放射線高警報から始まった典型的な蒸気発生器伝熱管破損事故である。事故は、復水器の空気排出器で放射線高警報が発生することから始まるが、この検出器が過去に時折スパイク状の誤信号を発生していたため運転員は誤信号の可能性を探ろうと2度の警報をリセットする。このリセットにより表示器が0表示に戻ったため運転員は誤信号の可能性が捨てきれない。しかし、3度目の警報発生時には警報と同時に、

- ・タービンランバック警報
- ・給水流量と蒸気流量のミスマッチ
- ・加圧器圧力/水位の低下

が観測されたため、運転員は蒸気発生器伝熱管破損事故との診断をいち早く下した。この診断には、プラントが示した徴候が典型的な蒸気発生器伝熱管破損事故に対応するものであったこと、及び運転クルーのうち何人かが最近蒸気発生器伝熱管破損事故のシミュレータ訓練を受けていたことが影響している。

この後、蒸気発生器伝熱管からの漏洩により加圧器の圧力/水位が低下する。運転員は、漏洩量の評価及び1次系からの漏洩を補う目的で2台目、3台目の充填ポンプを起動する。しかし、漏洩量が大きく充填ポンプの容量では補いきれず原子炉圧力低原子炉トリップ信号により原子炉は自動停止する。1次系圧力/水位の低下は原子炉トリップ以降も続き原子炉圧力異常低信号により安全注水系(SI)が自動作動し、高圧注水系(HPIS)により注入が始まった。ここで、非常用SIの作動に関しては、自動作動/手動作動の両方のオプションがあったが、運転クルーは自動作動を選択するという決定をした。

TMI以降、NRCは、原子炉トリップが発生した場合すぐに1次冷却材ポンプを停止するように要求している。蒸気発生器伝熱管破損事故の場合、手動操作により1次系圧力を2次系圧力まで低下させる必要があるが、NRCの規則に従うと、有力な減圧手段である加圧器スプレイが使用できなくなり、PORV(加圧器逃し弁)が唯一の圧力制御手段となるが、PORVの開固着、加圧器逃しタンクのラプチャ・ディスクの破損というリスクの可能性を負うこととなる。運転クルーはNRCの規則に従うか否かの検討を行なった結果、規則に従い1次冷却材ポンプを停止し、PORVで減圧するという決定をした。この後は、減圧操作を行い1次系からの漏洩を止め、クールダウン手順への移行を行う。

(2) 事象のクロノロジー

表2. 7. 1に本事象をプラントの状況及び運転員の意図と行動を中心にまとめたも

のを示す。表2. 7. 1から解るように、この事故事象は人的因子の観点からみると次の6つのフェーズに分けることが出来る。

- ①初期診断
- ②S I (安全注水系)の起動に対する判断
- ③N R Cの規則に従って1次冷却材ポンプを停止するかどうかの判断
- ④M S I V (主蒸気隔離弁)の操作
- ⑤P O R Vによる減圧操作
- ⑥H P I (高圧注入)ポンプの停止操作

以下にこれらの各フェーズでの運転員の振舞いをまとめる。

①初期診断

初期診断を構成する運転員の判断は次の3つのものである。

- i) 「放射線高」警報が誤信号であるかどうかの判断
- ii) 「蒸気発生器伝熱管破損事故」であるかどうかの判断
- iii) 破損した蒸気発生器の同定に関する判断

i)では時折スパイク的な信号により誤って「放射線高」警報が発信されているという経験を踏まえて2度の信号はリセットし3回目の信号で漏洩の可能性を考えている。更に、「警報のセンサ部分に水滴が付着し信号を発生」している可能性も考慮し、その有無を手順書に従って確認している。ii)ではi)で得られた問題意識の上に「過大温度 ΔT によるタービンランバック警報」が得られたため容易に事故事象の同定が出来ている。この背景としては、

- ・プラントの示す徴候が典型的なものであった
- ・運転クルーのうち何人かがシミュレータ訓練により「蒸気発生器伝熱管破損事故」を最近経験していた

ことの2点が文献(1)の中で指摘されている。更に、iii)では事故事象の判定の直後に「A蒸気発生器の蒸気/給水不一致信号」が検出されたため容易に判断が出来る状況にあった。

②安全注入系(S I)の起動に対する判断

S Iの起動に関しては次の2つのオプションがあった。

- ・自動的に起動するのを待つ
- ・自動起動に先立って、状況が認識できた段階で手動起動する

このうちPrairie Islandの運転クルーは「自動起動を待つ」方を選択した。この選択には「自動起動が目前に迫っているため手動で起動しても時間差はない」こと及び「自動起動によってシステムが設計通りに作動するかを確認したい」という2つの因子が影響を与えている。

③N R Cの規則に従って1次冷却材ポンプを停止するかどうかの判断

「原子炉がトリップした場合は速やかに1次冷却材ポンプを停止すること」というN R Cの規則は手動での1次系の減圧操作に大きな影響を持つ。これは、1次冷却材ポンプの停止により減圧操作のための有効な手段である「加圧器スプレイ」が使用できなくなり、P O R Vに頼らなければならない状況になるためである。P O R Vの使用に関し

ては、

- ・弁の固着の可能性を考慮しておかなければならない
 - ・加圧器逃しタンクから格納容器に冷却材があふれ、クリーン・アップが必要となり、
- 運転再開に時間がかかる。

というリスクを負うことになる。Prairie Islandの運転クルーはNRCの規則に従わない場合のリスクと効用を検討した結果、最終的には規則に従うという判断を下している。

④MSIV(主蒸気隔離弁)の操作

1次冷却材ポンプを停止し、PORVによる減圧操作を行うまでの間に、A、B各ループの主蒸気隔離弁に対してそれぞれ閉、開の操作を行っている。この操作は、Aループ側については破損蒸気からタービン側に放射能汚染が拡散することを防ぐために閉じ、Bループ側については1次系の除熱源を確保するために「開」操作が行われている。これらの操作は、「破損蒸気発生器がA蒸気発生器である」という正確な診断を基礎として行われている。

⑤PORVによる減圧操作

PORVによる減圧操作は③の判断から導かれる操作である。③の段階で運転員が懸念していた「弁の開固着」は発生しなかったが、加圧器逃しタンクから格納容器内への冷却材の流出は発生している。

⑥高圧注入(HPI)ポンプの停止操作

SIのうちのHPIからの注入により一旦低下した加圧器水位が回復した場合は、過剰な水位の上昇を防ぐためにHPIの注入量を絞る必要がある。この事例では、加圧器水位がスケール内に回復した時点で1台を停止し、さらに定格値に近づいた時点で2台目のHPIポンプも停止している。

以上6つの判断/操作のどれをとってもこの事例ではヒューマンエラーと考えられるものはない。

(3) 人的因子に関する分析

本事故事例に関しては、(2)で見たように

- ①初期診断
- ②安全注入系起動に対する判断
- ③NRCの規制に従って1次冷却材ポンプを停止するかどうかの判断
- ④主蒸気隔離弁の操作
- ⑤PORVによる減圧操作
- ⑥高圧注入ポンプの停止操作

の6つのフェーズに分け各々のフェーズの運転員の振舞いを検討した結果、ヒューマンエラーに該当するものはないという結論を得た。

このように全て良い方向に判断し、対応できた背景には、本事象が典型的な「蒸気発生器伝熱管破損(SGTR)」事象というあらかじめ対応策が立たてられていた事象である

こと、さらに運転員の何人かがこのSGTRのシミュレータによる訓練を受けていたことが挙げられる。このことは、「ECCSの自動起動を待つ」という判断理由の中に、異常事象の最中であるにもかかわらず「自動起動によってシステムが設計通り働くことを確認したい」ということが考えられる精神的余裕があるところにも表れている。

表 2.7.1 Prairie Island 事象における運転員のふるまい(1/3)

時刻	プラントの状態	運転員の意図(何をしようと思ったか)	運転員の行動/判断(何をしたか)	運転員に影響したと思われる因子
14:14	復水器の空気排出器で「放射線高」警報が発生 放射線モニタが通常表示に戻る	スパイク状の信号により時折誤信号が発生している ↓ 表示器の表示もフルスケールではない ↓ 誤信号でなければもう一度警報が出るだろう	警報をリセット	
14:18	復水器の空気排出器で「放射線高」警報が発生 放射線モニタが通常表示に戻る	スパイク状の信号ではなさそうだが誤信号の可能性はある ↓ 誤信号でなければもう一度警報が出るだろう	警報をリセット	
14:19	前回よりはゆっくりに放射線モニタは通常表示にもどる 復水器の空気排出器で「放射線高」警報が発生。モニタはフルスケールに振り切れる	現実には漏洩が発生しているかも知れない ↓ モニタに水滴が付着しているのかも知れない	確認のために運転員を派遣。また、信号系統も確認	
14:20	過大温度ΔT信号によるタービンランパック警報発生	漏洩を起こしている蒸気発生器を同定しなければならぬ	蒸気発生器の伝熱管が破損していると判断	運転クルーのうち何人かが最近シミュレータ訓練を受けていた
14:21	蒸気発生器Aで蒸気/給水のミスマッチ警報発生		蒸気発生器Aで伝熱管破損が発生していると判断	

表 2.7.1 Prairie Island 事象における運転員のふるまい (2/3)

時刻	プラントの状態	運転員の意図 (何をしようと思ったか)	運転員の行動/判断 (何をしたか)	運転員に影響したと思われる因子
14:23	抽出系が自動で隔離される	・漏洩量の推定 ・1次冷却材の補充		
14:24	加圧器圧力と水位の低下が続く		2 台目の充填ポンプを起動 破断サイズが予想より大きい 3 台目の充填ポンプを起動	
14:24:09	3 台の充填ポンプ及び抽出系の隔離でも 1 次冷却材の減少が止められない ↓ 「原子炉圧力低」により原子炉トリップ	1 次冷却材を補充しなければならない	S I がすぐに起動するだろうから手動で起動させずに自動起動を待つ	・運転員は S I の自動起動が避けられないと思っ込んでいた ・自動起動により S I が設計通り作動するか確認するという意図もあった
14:24:14	S I が自動起動 ↓ 加圧器水位は安定し、圧力は上昇に転ずる			
14:26:27	加圧器水位/圧力は上昇中	原子炉がトリップしたため NRC の規則に従えば 1 次冷却材ポンプを停止しなければならない	1 次冷却材ポンプ(#11)を停止(#12)を停止	1 次冷却材ポンプを停止すると加圧器スプレイが使用できなくなるため PORV で減圧しなければならぬ。PORV を使用することは「弁の閉塞」「差しタンクから格納容器内への冷却材の流出」というリスクを負うことになる。このため運転クルー内で議論となる。
14:38			S I をリセット	
14:39	S I の自動起動時に誤って B ループの主蒸気隔離弁が閉まってしまっている	1 次系の除熱源を確保しなければならない	B ループの主蒸気隔離弁を開ける	

表 2.7.1 Prairie Island 事象における運転員のふるまい (3/3)

時刻	プラントの状態	運転員の意図 (何をしようと思ったか)	運転員の行動/判断 (何をしたか)	運転員に影響したと思われる因子
14:41		破損しているA蒸気発生器からの放射能汚染の拡大を防がなければならない		
14:56	加圧器のスケール内に水位が回復する	1次系への注入量を減少させ、水位の過大な上昇を防ぐ	Aループの主蒸気隔離弁を閉じる 高圧注入ポンプ(#12)を停止	
15:06	加圧器水位が(55%)まで回復	1次系からの漏洩を止めるために1次系を減圧しなければならぬ	PORVを使って1次系を減圧	1次冷却材ポンプを停止しているため減圧の手段はこれしかない
15:07	加圧器過しタンクのラプチャ・ディスクが破損		高圧注入ポンプ(#11)を停止	
15:15	1次系と2次系の圧力が等しくなり漏洩が停止する。			

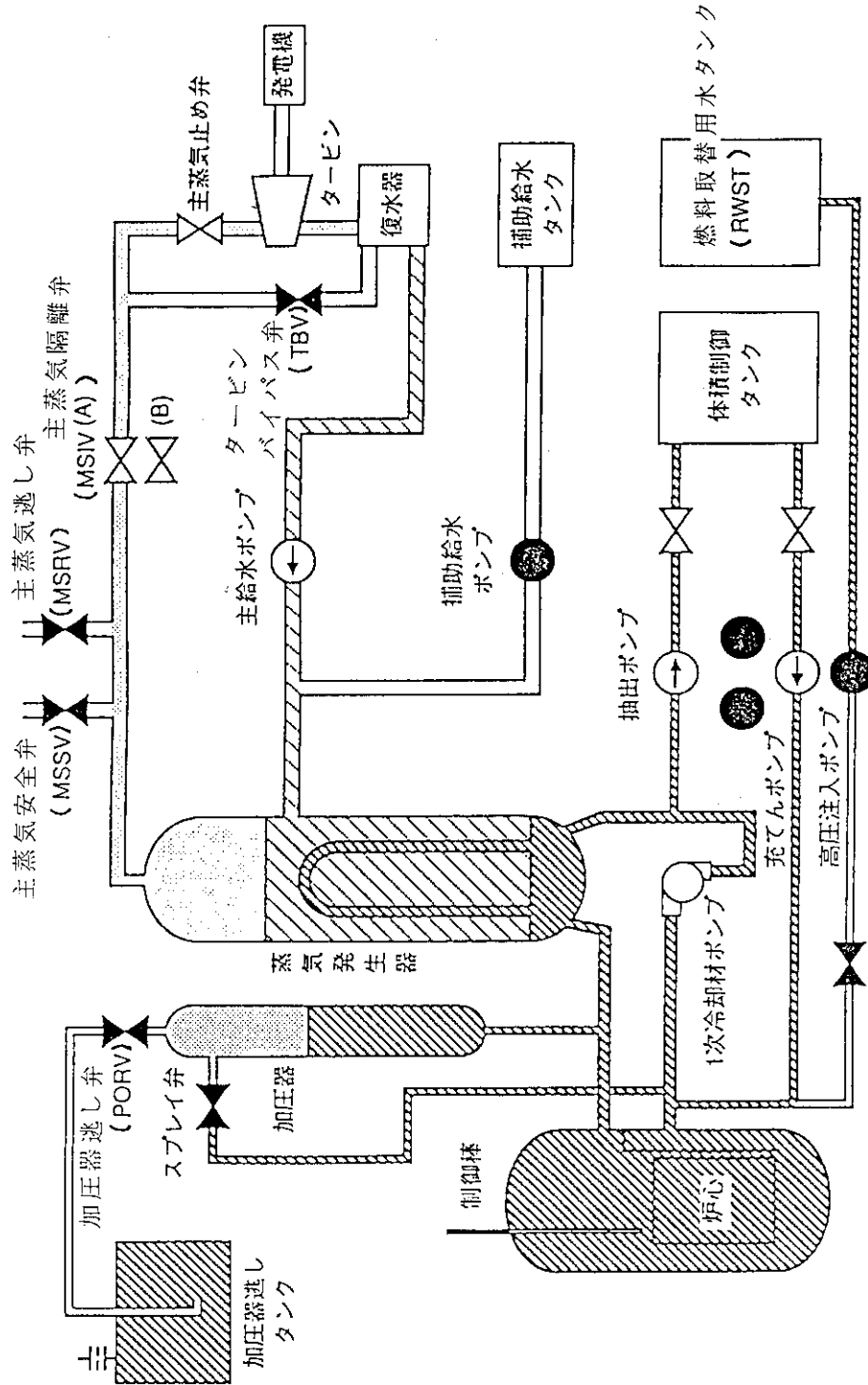


図 2.7.1 Prairie Island プラント概念図

3. ま と め

TMI、チェルノブイル両事故をはじめとする原子力施設の事故・故障の発生・進展において、人的過誤が重要な役割を果たしていることを踏まえ、原子力施設の安全性の一層の向上を目的とした人的過誤の低減ないしはその影響緩和の方策を探るため、その一步として人的過誤発生の原因、機構の解明に資することを目的として、米国で出版された7件の事象報告書を人的因子の観点から分析した。以下に分析の結果得られた結論、教訓等の成果を列挙する。

- (1) 分析の結果、原子力発電プラントにおける異常事象の中で運転員がエラーを起こす原因、メカニズム、影響因子等を抽出することができた。
- (2) 今回分析した事象7件は、既に発生した異常事象の中での運転員のふるまいが分析の対象であり、高ストレス下で対応しなければならず、不適切な行動をとりやすくなっていた。
- (3) 異常事象であっても、予め対策がたてられ、十分に訓練、教育等でカバーされている場合は、運転員たちは十分な精神的余裕をもって事象に対応することができ、訓練、教育の重要性が改めて明確になった。
- (4) 機械システムの操作パネル等人間とのインタフェースの部分に、人間工学的に見ると不適切な設計であることがエラーを生じる影響因子となっていることが多かった。
- (5) 各事象が最悪の事態に至らずに済んでいる理由の一つに、チーム外の第三者もしくはチーム内において第三者的な冷静な目で事態を観察していた者が解決の糸口を発見していることが多い。
- (6) (5)より、分析はエラーばかりでなく成功についても行うことが有効であることがわかる。
- (7) Rasmussenの分析手法はかなりの程度有用であるが、
 - ・実時間軸が欠落しているため文脈性が希薄である、
 - ・複数人間による共同作業の分析に難がある、
 等の問題点が確認された。これらの問題点を解決した、より幅広く分析できる手法の確立が望まれる。
- (8) 今回の調査では、報告書以外からは、プラントに関する情報を調査・取得したが、事象の内容については1つの報告書のみが情報源であった。これは詳細分析の程度及び質を制限するものである。

これらの成果を基に、今後は、さらに事例分析の経験を重ねつつ、分析手法の確立を図り、得られた教訓をヒューマンエラーの低減ないしはその影響緩和対策へ反映し、さらに、人的因子に関する研究の中で、人間の認知的ふるまい及びそのモデル化の研究、人間のふるまいの信頼性評価手法の開発に役立てていく予定である。

参 考 文 献

1. R.W.Pew, et al, "Evaluation of Proposed Control Room Improvements Through Analysis of Critical Operator Decisions," EPRI NP-1982, Aug. 1981
2. U.S.NRC, "Loss of Main and Auxiliary Feedwater Event at Davis-Besse Plant on June 9, 1985," NUREG-1154, Jul. 1985
3. U.S.NRC, "Loss of Power and Water Hammer Event at San Onofre, Unit 1 on November 21, 1985," NUREG-1190, Jan. 1986
4. U.S.NRC, "Loss of Integrated Control System Power and Overcooling Transient at Rabcho Seco on December 26, 1985," NUREG-1195, Feb. 1986
5. O.M.Pedersen, "Human Risk Contributions in Process Industry : Guides for Their Pre-Identification in Well-Structured Activities and Post-Incident Analysis," Riso-M-2513, May 1985
6. J.Rasmussen, et al., "Classification System for Reporting Events Involving Human Malfunctions," RIS0-M-2240, March 1981
7. J.Rasmussen, "Human Errors. Taxonomy for Describing Human Malfunction in Installations", Journal of Occupational Accidents, 4(1982) 311-333
8. J.ラスムッセン著、海保博之、田辺文也、他訳、「インタフェースの認知工学」、啓学出版、1990

付 録 Rasmussen の分析手法の概要

巨大システムにおける人間の役割の改善を目的として、

- ・巨大システムの中で発生する希な事象における人間の役割の検討
- ・急速に進歩しつつある情報処理技術に基礎をおいたインターフェイスの導入

を行うには、「人間がどのようにタスクを処理するのか」というモデルに従った人間行動の分析が必要となる。即ち、運転員または保守員の心理学的な側面に注目した人間行動の分類を行うことが必要となる。

Rasmussen の分析手法は以上のような考えに従って、事故・故障報告に含まれる人間の機能不全を分析する際に用いる分類方法として、Riso研究所（デンマーク）、CEC-JRC/Ispra（伊）、CEA、EdF（以上仏）共同で考案されたものである⁽⁶⁾。ここでRasmussenがヒューマンエラーと呼ばずに、機能不全(malfunction)と呼んでいるのは、エラーという言葉には罪の匂いがつきまわっているからそれを避けたと述べている⁽⁷⁾。

事故・故障報告を分析する際に用いる分類方法として、ここに示したRasmussen の分類では従来の分類方法にみられる階層的・排他的なものの代わりに、多面的な記述方法を用いている。分類の基本的な枠組みを以下に示す。

この分類方法は大きく次の2つの部分から構成されている。

- a. 人間の意志決定及び意志決定のプロセスに関連する部分
- b. 人間の処理能力の限界を決定したり、心理状態に影響を与える外的因子に関連する部分

さらに、a. は次のような項目から構成されている。

- ・ Cause of Human Malfunction : 人間の機能不全の原因
- ・ Mechanisms of Human Malfunction : 人間の機能不全のメカニズム
- ・ Internal Human Malfunction : 人間の内的な機能不全
- ・ External Mode of Malfunction : 機能不全の外的モード
- ・ Personal Task : タスク

また、b. には次の2つの項目が含まれている。

- ・ Performance Shaping Factor : パフォーマンスに対する影響因子
- ・ Situation Factor : 状況因子

これらの項目の関係を図A. 1に示す。また、これらの項目のうち、人間の機能不全の原因、人間の機能不全のメカニズム、人間の内的な機能不全、パフォーマンスに対する影響

因子のうちの心的負荷と資源、及び、状況因子のうちのタスク特性 (Preparedness) についての分析ガイドをそれぞれ図 A. 2 ~ A. 6 に示す⁽⁵⁾。これらの中には、馴染みの薄い、または表現が短すぎる用語、言い回しがあるので、以下に各項目、分析ガイドの中で用いられている用語の解説を記す。なお、以下の解説は、文献 6 からの引用であり、日本語訳は、文献 8 を参考にしている。

(1) タスク

1. 機器の設計及び設計変更
2. 手順の設計及び変更
3. 組立て
4. 設置・取付け
5. 点検・検査
6. 運転
 - 6.1 監視
 - 6.2 手動動作、操縦、その他の手動運転
 - 6.3 インベントリ制御
 - 6.4 監督制御
7. 試験と調整
 - 7.1 作業現場への接近 (許可受けを含む)
 - 7.2 機器及び道具の準備
 - 7.3 試験及び調整活動の実施
 - 7.4 復旧、道具の除去
8. 保守と修理 (変更、他)
 - 8.1 (7.1と同じ)
 - 8.2 (7.2と同じ)
 - 8.3 保守活動の実施
 - 8.4 (7.4と同じ)
9. 調達・補給
10. 管理：記録、報告書執筆、他
11. 運営：資源の配分と管理
12. その他
13. 適用不可

(2) 機能不全の外的モード

1. 以下の結果として規定の、または意図したタスクが実行されない
 - 1.1 タスクの省略
 - 1.2 動作の省略
 - 1.3 不適切な、不正確なパフォーマンス
 - 1.4 不適切なタイミング

- 1.5 動作の順序の誤り
2. 対象とするシステムに対して規定の、または誤った動作が実行される
 - 2.1 正しい機器・装置に対して間違っただ動作
 - 2.2 間違っただ機器・装置に対して動作が実行された
 - 2.3 間違っただタイミング
3. 余計な動作、すなわち、対象以外のシステムに対する動作
4. 他の誤った、もしくは通常の人間の行為、または技術的な条件との同時発生、もしくは協同効果による
5. 適用不可

(3) 状況因子

1. 「準備 (Preparedness)」から観たタスク特性
 - 1.1 スケジュール通りのなじみのあるタスク
 - 1.2 必要に応じたなじみのあるタスク
 - 1.3 スケジュール通りのなじみのないタスク
 - 1.4 必要に応じたなじみのないタスク
 - 1.5 その他
 - 1.6 適用不可

- ・なじみのあるタスク (Familiar Task) : 頻繁に行われて、担当者がノウハウで実施することが可能なタスク。すなわち手順の立案や変更を特に必要としないタスク。
- ・なじみのないタスク (Unfamiliar Task) : 手順や通常行っている作業の変更を特別に計画したり考慮する必要のあるタスク。または、頻繁には行われていないので、予め立案された作業指示書を使う必要のあるタスク。
- ・スケジュール通り (On schedule) : 特定の手順が前もって立案されている状況、もしくは、既存の手順を調べて復習できるような状況。または、タイムスケジュールに従って運転員によって開始されるタスク。
- ・必要に応じて (On demand) : タスクの実行と並行して計画を立てなければならず、その計画は、運転員の診断と即座の意志決定に基づくものであるような状況。すなわち、そのタスクは既に行われているタスクを邪魔してしまうような、予期せずシステムによって要求されるものである。

2. 物理的環境

- 2.1 雑音
- 2.2 不快な温度、湿度、気圧、臭い、他
- 2.3 照明
- 2.4 放射線
- 2.5 その他
- 2.6 適用不可

3. 作業時間特性
 - 3.1 昼間のシフト
 - 3.2 夜間のシフト
 - 3.3 シフトの初期
 - 3.4 シフトの中間期
 - 3.5 シフトの終期
 - 3.6 適用不可

(4) 人間の内的な機能不全

(注) 人間の内的な機能不全は、必ずしも人間に責任のある失敗や誤りを意味していない。

1. 検出：運転員が要求に応答しない
2. システム状態の同定：運転員は応答はするが、システムの状態を誤って解釈する。
3. 意志決定
 - 3.1 目標（ゴール）の選択：運転員は適切に同定されたシステム状態に対応するが間違ったゴール（例えば、安全性よりも運転の継続を選ぶ）を目標としている。
 - 3.2 システム目標状態の選択：運転員は適切なゴールを遂行するために不適切なシステム目標状態を選択してしまう（例えば、シャットダウンの代わりに出力を80%へ低下させる）。
 - 3.3 タスクの選択：運転員は、プラントを目標状態へ持っていくものではないタスク（行為）を選んでしまう。
4. 行 為
 - 4.1 操作手順：実行された行動のシーケンスが不適切、または選んだタスクに対して正確に一致していない。
 - 4.2 操作実行：手順の中のそのステップに係わる身体活動が正しくない。
 - 4.3 情報伝達：書面もしくは口頭による伝言が不正確に伝わる。
5. 適用不可

プラントの運転上の要求に関するという意味での「個人のタスク」というカテゴリーで特定される運転員のタスクは、人間の内的な心的データ処理または意志決定の機能を要求する。

「人間の内的な機能不全」というカテゴリーは、人間の意志決定要素を因果関係の順に並べたシーケンスであり、習慣的なバイパスによって実行されなかったか不適切に実行され、意志決定シーケンスの中のステップ／要素を特徴付けるのに用いられる。この分類法には基本的にある曖昧さが存在する。第一に、同定、意志決定、実行という点からの記述（表現）は、タスクの記述の中でいくつかの詳細さのレベルにおいて行うことができる。事象の分類での使用では全体的なタスクの記述に関するような高

レベルを保つべきである。修理というタスクを例として挙げるができる：このタスクの診断部分（故障の発見）は、もし、不正確に実施されたなら「システム状態の同定」として分類される。もう1つの場合は、以下の仮定を考える。診断は正しく実施された。そして、コンポーネントの交換という修理担当者の適切な意図は明言された。彼は故障を直すために必要な行動を実行中である。この行動のフェーズの最中に、彼は修理中のシステムの実際の状態を同定していなかったため、間違っただ順序で作業を行ってしまう。この場合は、「手順」と分類される。これは便宜上の問題である。しかし、ここでとられた立場（「手順」と分類した）は保たれるべきである。それは、ある面では一般的に大変詳しいレベルで分類するために必要な情報が事象報告書には載っていないという事実からきており、またある面では、作業支援の改善のために分類結果を利用することが有効であるということからきている。第二に、曖昧さは意志決定の第1フェーズでの機能不全は、しばしば、その後のシーケンスの中で不適切な意志決定へと導くという事実が原因となっている。このようなシーケンスを記述するためには、詳細に時間を追った分析と全ての重要な意志決定を同定する必要がある。しかし、この分析は関係者へのインタビューを含む非常に注意深く収集したデータに基づいて行わなければならない。（これは、事象直後に行われた場合のみ実現可能である。例えば、訓練用シミュレータ上での研究による分析等。）一般的に、そのような情報はあまり得られない。そして、現在の分類法の中では、不適切に実行されたりステレオタイプのバイパスによって短絡されるような人間の意志決定のシーケンスの第1の要素に対してのみ分類を行うということを勧告する。ほとんどの事象報告書はもっともらしく説明のできる原因に至る事象の道筋をバックトラッキングしているため、運転員を適切な道筋から外してしまう最初の機能不全が記録の中に表されていることが最も多い。これは、もっと複雑な状況では「人間の内的な機能不全」と「関係するエラーのメカニズム」からその機能不全の外的効果に至る因果関係が、記録データの中に保有されないということの意味する。しかしながら、統計的な定量化または改善という意味での一般化という観点から見るとこれは現在の文脈の中ではあまり重要ではない。何故なら、間違っただ意志決定 — 仮に同定とする — の後の人間の応答の自由さの多様性と度合は、とても高いので、詳細な研究の後にのみ特徴付けすることができるのである。

「人間の内的な機能不全」というカテゴリーは、機能不全のいかなる原因も考慮しないし、また「機能不全(malfunction)」という用語は、それ自身「人的過誤(Human Error)」を意味するものではないということを強調しておかなければならない。機能不全は人々による妨害、間違っただ命令、命令された不在といった外的条件または事象が原因となって生じる。これらは全て個別に「原因」の下に考慮される。現在の分類（カテゴリー）のメンバーは1974年に Rasmussenの報告書の中で詳細に記述された人間の意志決定過程のモデルから導かれたものである。そのモデルを図A. 7に示す。

(5) 人間の機能不全の原因

一環として事象の因果的チェーンに積極的な役割を果たす事象もしくは短期の条件である。

1. 外的事象
 - 1.1 システムや環境による気のちらし
 - 1.2 他人からの質問、伝言、雑音による気のちらし
2. 特定の状況の中での過大なタスク要求
 - 2.1 時間・力の強さ等の物理的要求
 - 2.2 状態の情報が不適當、間違っている
 - 2.3 特定の状況に関係する背景情報（知識、指示）が不適當か間違っている
3. 運転員の無能力化（病気、傷害、他）
4. 外的原因なし
 - 4.1 通常の間人が本質的に持つ変動性；自然発生的な誤り
 - 4.2 意図的な行為
 - 4.3 妨害行為
5. その他
6. 適用不可

可能性のある外的な原因を特定することは多くの理由で重要である。まず第1に、システムの運転不全に含まれる事象のチェーンを分析するとき、もし、因果関係のバックトラッキングによって不適切な人間の行為が見つければ、人的過誤(ヒューマンエラー)として説明することが受け入れられる自然発生的傾向がある。この傾向はごく自然である。何故なら、人間のパフォーマンスを通しての因果関係のバックトラッキングを続けていくのは難しいし、人間は過誤を犯すものであるということが一般的に受け入れられているからである。それ故に、事象分析の一環として、考えられる外的原因を特定することに対しては特別の注意を払うことが重要である。

常識による原因の規定は非常に曖昧である。それ故、現在の文脈の中で明らかにしなければならない。人的過誤の定量化という観点からすると、もし、原因の規定が分析した事象の頻度に明らかに関係しているなら有益である。したがって我々は、不適切な行為の因果関係をもった先行事象として働く通常の作業条件や事象を原因として定義する。その人が過誤を起こしやすくなるように影響を与えるような一般的条件、例えば、通常状態ではあるが高い騒音レベル、不適當な人間工学的設計、夜勤直中の疲れ等の条件、は全て「状況因子」(situation factor)もしくは「人間のパフォーマンスに対する影響因子」(Performance Shaping Factors)として考える。これらは、過誤確率に影響を与えるが、-Rasmussen等の定義によれば- 過誤の原因とはならない。「原因」のカテゴリーの上記のメンバーは例として考えるべきである。これらは、少数の分析に基づいたものである。原因について一般的に信頼できる情報は上述の理由で事象の報告書の中には見つからないのが常である。

(6) パフォーマンスに対する影響因子

1. 主観的ゴールと意図
 - 1.1 タスクパフォーマンスの局面が誇大に促進するように与えられている。 ;
例えば、遅れないように、速く、完璧に、正確に、努力してというように。

- 1.2 タスクの中味が不適切なまでに拡大している。
- 1.3 そのタスクが二次的なものと考えられている。
- 1.4 矛盾するゴール
- 1.5 その他
- 1.6 適用不可
2. 心的負荷、資源
 - 2.1 作業現場の人間工学的に不適切な設計
 - 2.2 オーバーラップしたタスク
 - 2.3 不十分な一般的教育
 - 2.4 不十分な一般的訓練・指導
 - 2.5 その他
 - 2.6 適用不可
3. 感情的因子
 - 3.1 社会的因子
 - 3.2 過少負荷、退屈
 - 3.3 時間圧力
 - 3.4 失敗への恐怖
 - 3.5 その他
 - 3.6 適用不可

(7) 人間の機能不全のメカニズム

1. 識別

このカテゴリーは、人間行動を制御する適切なモードを識別・選択する能力に関するものである。この機能不全のメカニズムは、人間のステレオタイプで習慣化した（そしてしばしば無意識の）反応と「稀れ」で「ユニーク」なタスク要求の下での作業環境との間の干渉により特徴付けられる。

1.1 ステレオタイプに固着

定義： スキルベースの領域で行動している。注意と慎重さが喚起されている状況を認識しない場合。認識（再認）のための手がかり(Cue)が存在しないかもしれないし、見過ごされたかもしれない。これは「人間の機能不全の原因」または「内的機能不全」のカテゴリーによって特徴づけられる。

1.2 慣れ親しんだ近道をとることによる誤り（慣れ親しんだ連合による近道）

定義： 状況を意識的に同定することが必要だということは認識されていたが、慣れ親しんだ手がかりにより、誤った意図・作業が活性化された場合。知識ベースの評価及び立案が必要とされるとは認識されない。

1.3 ステレオタイプののっとり

定義： 正しい意図に従ってタスクまたは行為が実行されようとするが、実行時の「うっかり(absent-mindedness)により、異なった行為またはタスクに係わるステレオタイプ化された動作系列に陥った場合。

1.4 慣れ親しんだパターンの見落とし

定義： ある特定の状況に対する慣れ親しんだパターンが認識されず、より高度な知識ベースの評価または立案が不必要かつ不適當に適用された場合。

2. 入力情報の処理

このサブ・カテゴリーは人間の情報入手活動に関連するものである。情報の出力側に問題があった場合は、内的な機能不全のカテゴリーの行為における誤りのサブ・カテゴリーでコミュニケーションが不正確に与えられるというエラーに分類する。

2.1 情報が受け取られない／検索されない

定義： 現在の情報レベルに対して感覚や注意が不十分であったため、手がかりが人間を活性化しなかった場合。

2.2 情報の誤解釈

定義： 文章や計器の読み違い、口頭によるメッセージの誤解等、情報の間違った理解に基づいて行動した場合。

2.3 情報の検索の仮定による代替

定義： 外部からの入手可能な情報に対応していない（想起／推定等の）運転員により提供される情報に基づいて不適切な対応をした場合。

3. 想起

3.1 孤立項目の忘却

定義： 運転員が孤立した行為や機能（孤立項目）の実行を忘れた場合。即ち、機能的な文脈の中で手がかり（Cue）が与えられないか、または心的・運動的なシーケンスに直接影響を及ぼさない行為や機能の実行を忘れた場合。

3.2 選択の誤り

定義： 間違った選択肢の選択、カテゴリーは正しく使われるがメンバーを取り違える。幾つかある候補のうち間違っただけのものを選択した場合。例えば、上／下、+/-、右／左、A/B、開／閉、旋錠／開錠等の間違い

3.3 その他の記憶想起の間違いによる誤り

定義： 参照とするデータの値、名称、項目及び行為の必要性などを誤って想起した場合。

4. 推論

このカテゴリーはある因果関係網の中の直線的思考の問題を扱う。

・副次的効果や前提条件が十分に考慮されていない。

定義： 人間は知識ベースの行動、ゴール制御型の行動によって特徴付けられるあまり慣れ親しんでいない状況下にあつて、機能的な推論を間違つて行った場合。即ち、状況が適切に同定されていない、事象の連鎖の影響・帰結が十分に予測されていない、または不適當な意図が選択された、または前提条件が十分に考慮されていない。そのためにタスクや意図した目標が完遂されなかったり、意に反した副次効果が発生したり、またはこれらの影響・帰結が同時に発生した場合。（これらは見落としや知識不足その他による場合

は、機能不全の原因に分類する。)

5. 身体的協応

5.1 運動の変動性

定義： 手動操作の正確さ不足、不適切な力加減、不適切なタイミングなど。期待された技能“good craftsmanship”からのずれもここに含む。

5.2 空間的方向付けの誤り

定義： 正しい意図及びマーク／タグの正確な想起にもかかわらず、現下の局所性に対する感覚（この感覚は、更新されていない、古い習慣の印象が残っていること等であり、適用できない）に従ったため、間違った場所または対象に対して、タスク／行為を実行した場合。

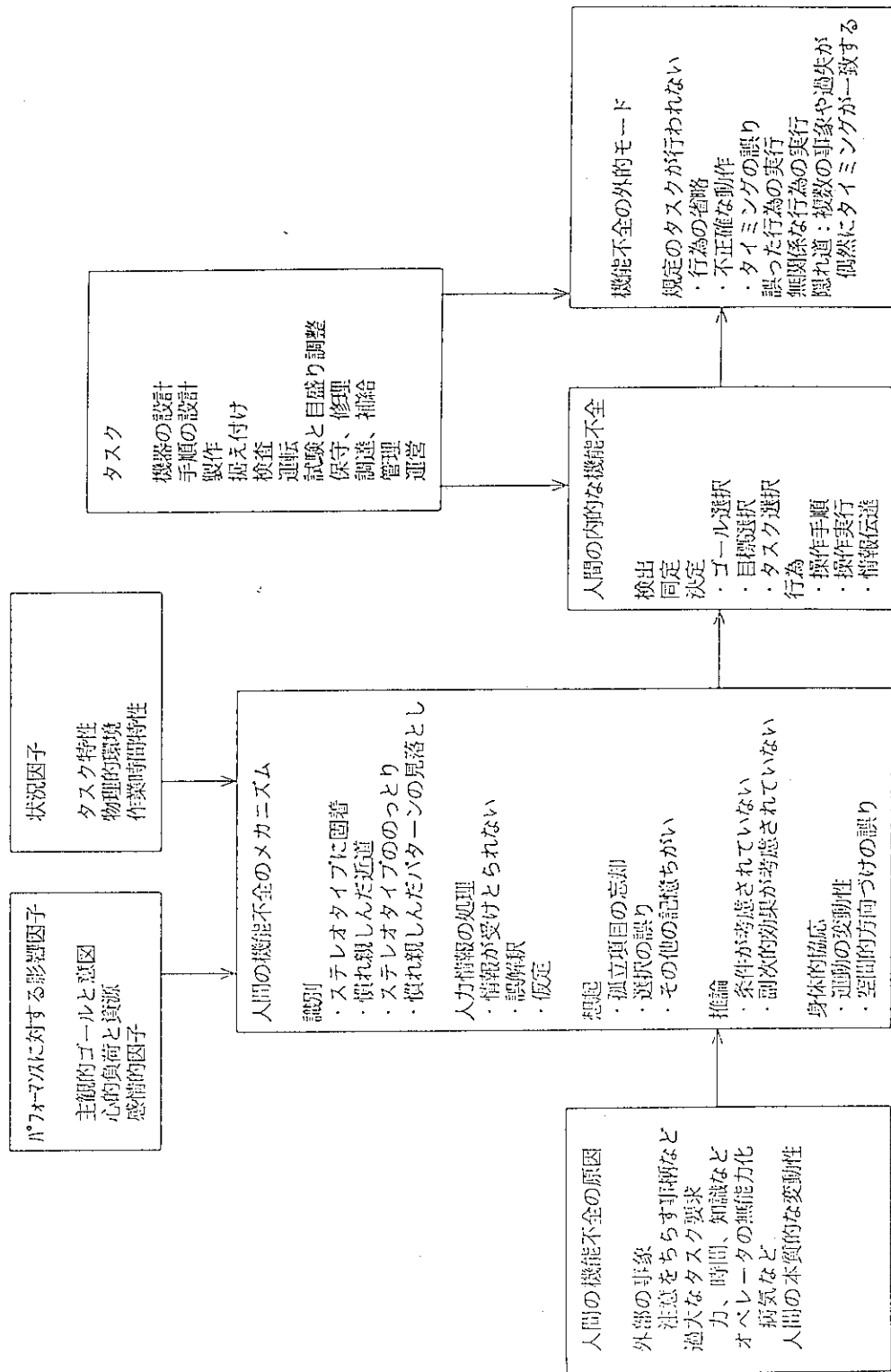
6. その他

7. 特定不可能

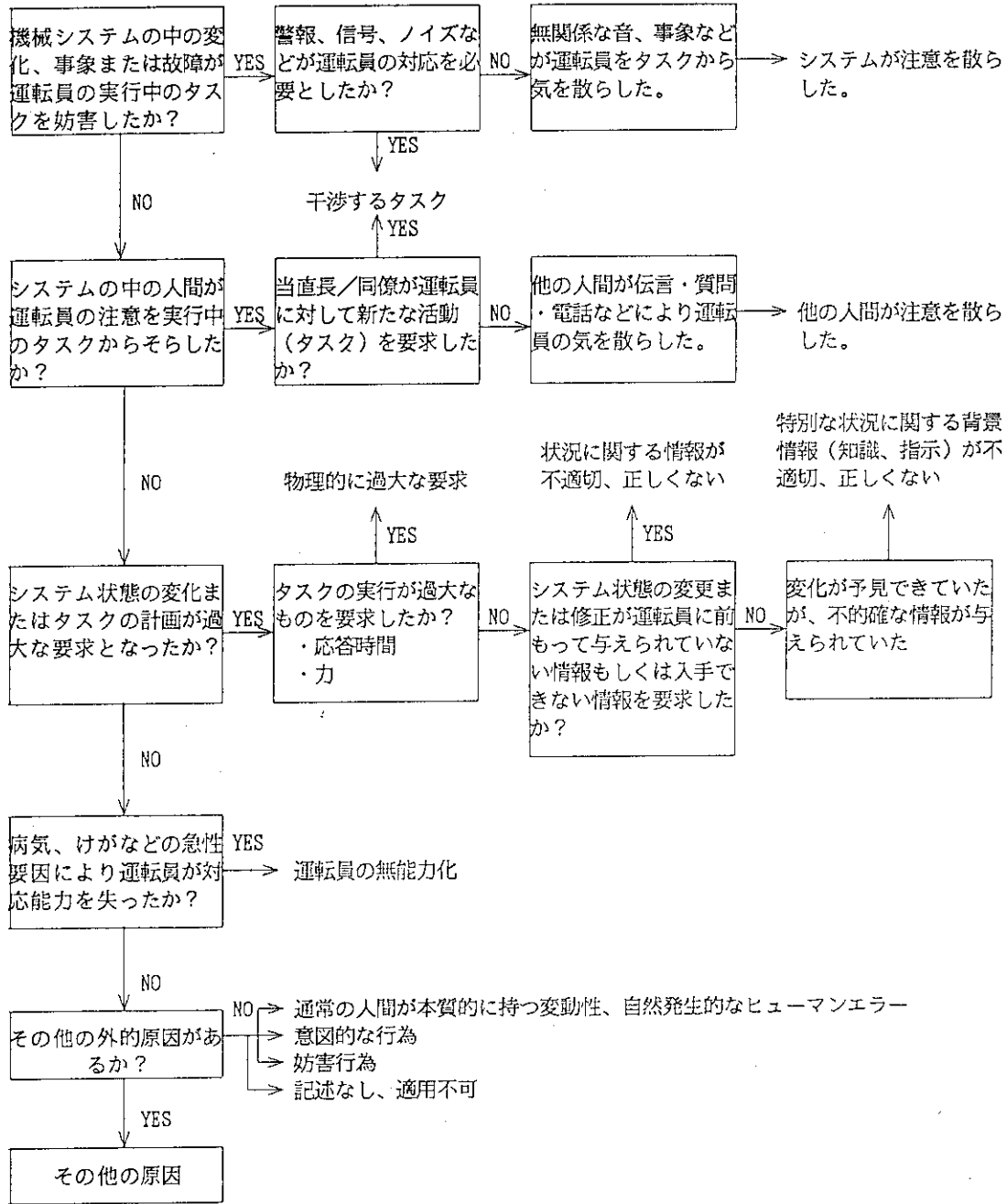
このカテゴリーは、包括的かつタスクに依存しない型で人間の機能不全のメカニズムを系統的に記述しようとしたものである。関連するカテゴリーである「機能不全の外的モード」及び「内的な機能不全」は、タスクと密接に関連しており、基本的に人間の不適当な行動のタスクへの影響を反映している。新しいタスクの設計及びマンマシンインタフェースを含めた改良された作業条件の中での人間行動を評価するためには、人間の機能不全のメカニズムを、不適切なタスクの実行と、その行動の基礎である心理学的なメカニズム及びそのメカニズムの制限的な性質とを関係づける一般的な用語で特定することが重要である。

人間は、訓練の状況、目標の主観的な設定及び行動に対する規準に依存して、同じタスクを様々な異なった方法で実行することが出来る。このため、心理学的なメカニズムの役割は非常に個人的かつ状況依存的なものになる。不適当なタスクの実行はタスクからの要求とそれに当てられる人的資源との間の不適合を反映しており、原因に関わりなくその不適合の特質が特定されれば、適用された心理学的メカニズムとタスクに係るその限界特性に関する重要な情報が得られる。

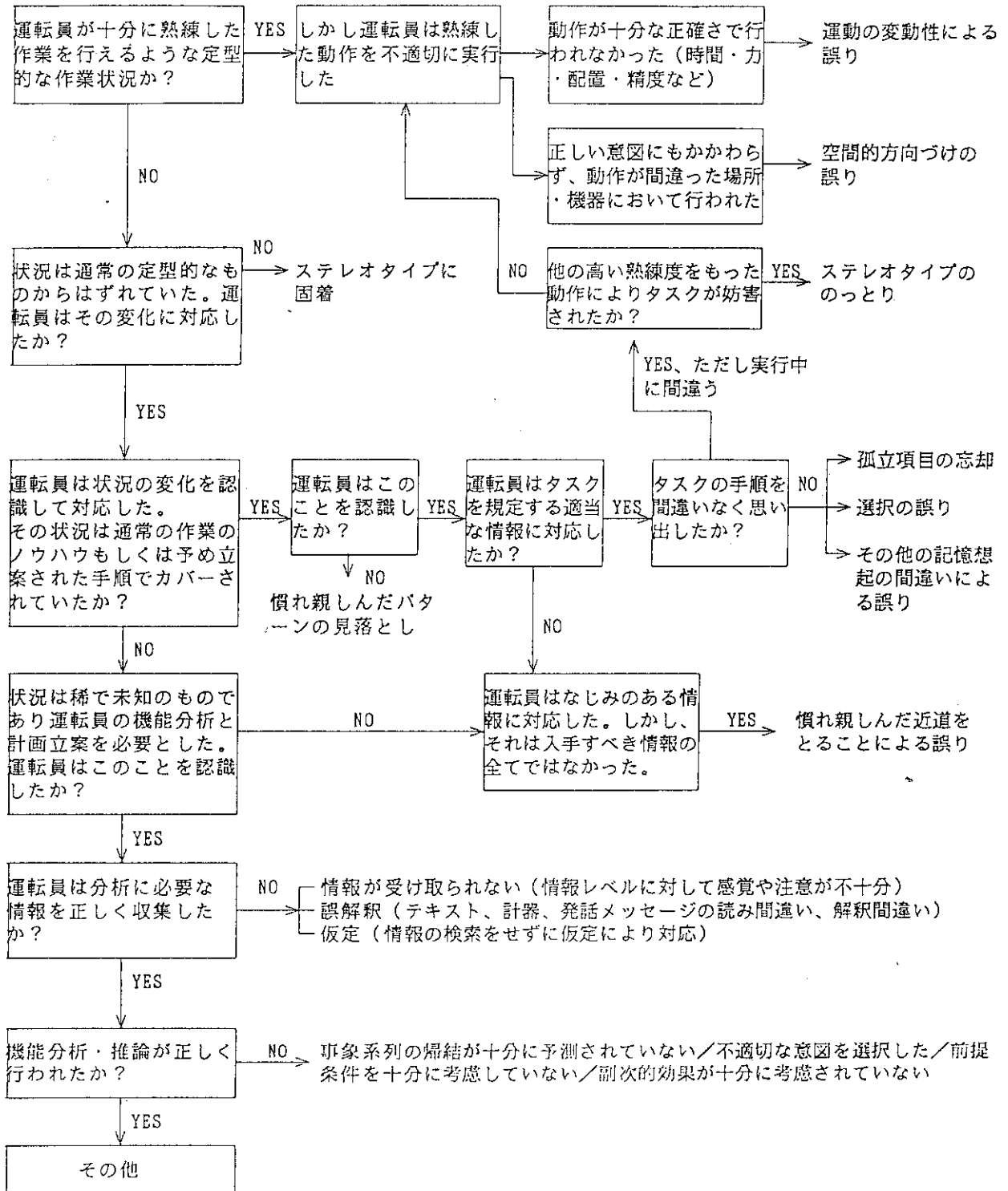
上述のカテゴリーはこの様な資源／要求の不適合を特徴付けることを意図したものであり、200件の事故報告書を用いた予備的分析(Rasmussen 1980)から得られた運転員の行動モデルを基本としている。モデルの構造を図A. 8に示す。「人間の機能不全のメカニズム」の使用の指針はPedersen, et al(1981) (文献5)に示されている。



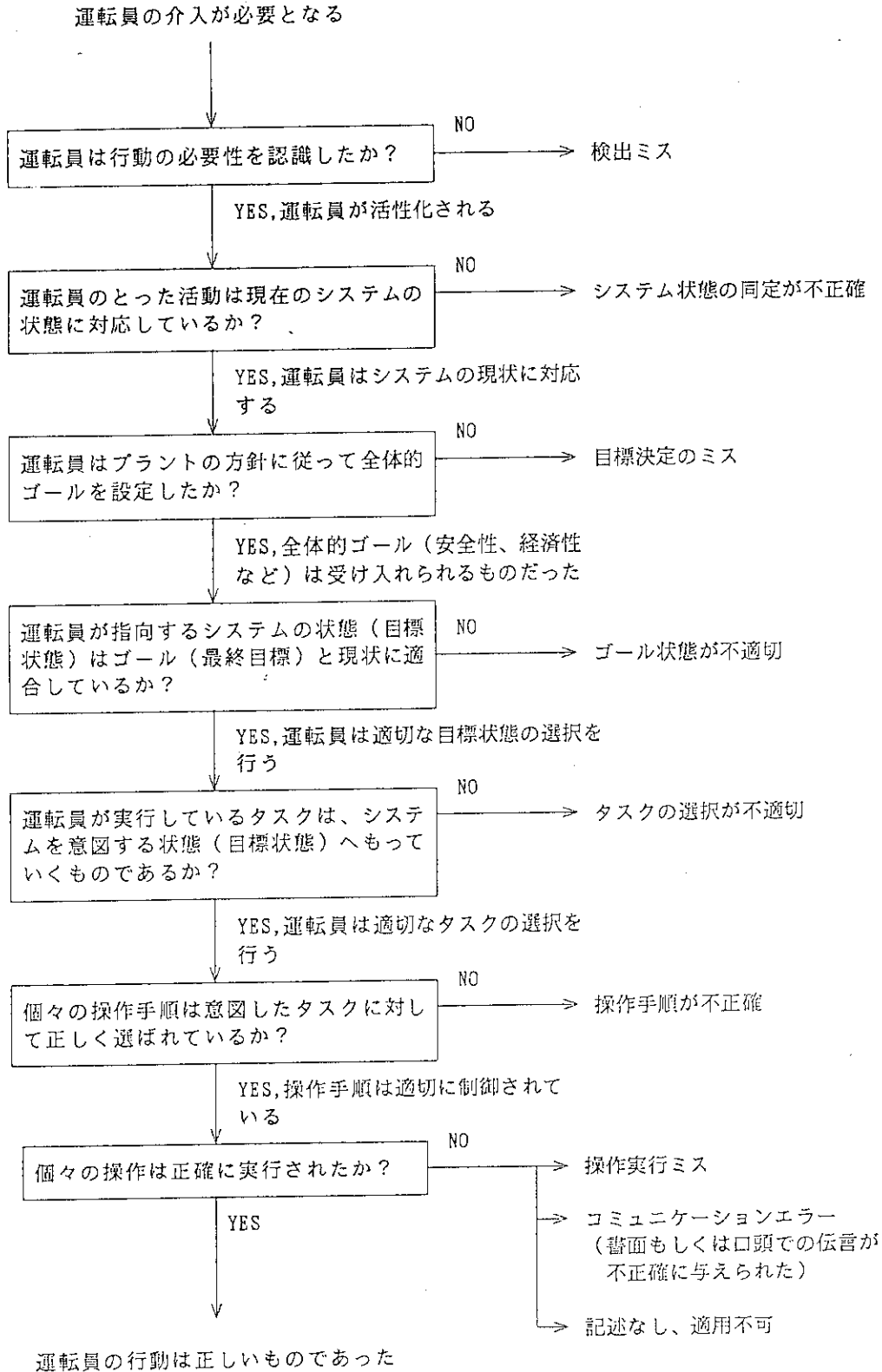
図A.1 Rasmussen の提唱する人間の機能不全を含む事象の記述と分析のための多面的分類法



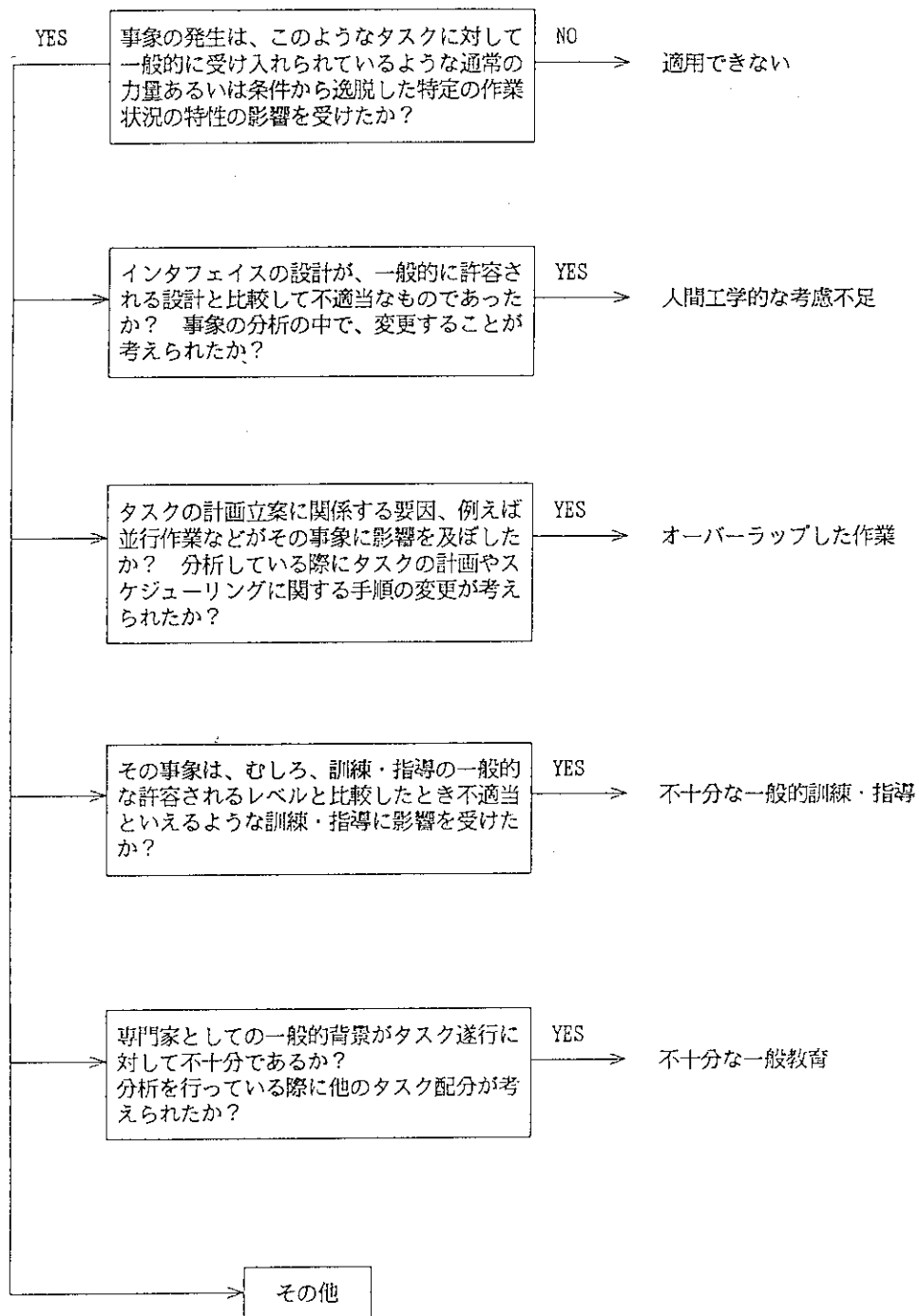
図A.2 人間の機能不全の原因に対する分析ガイド



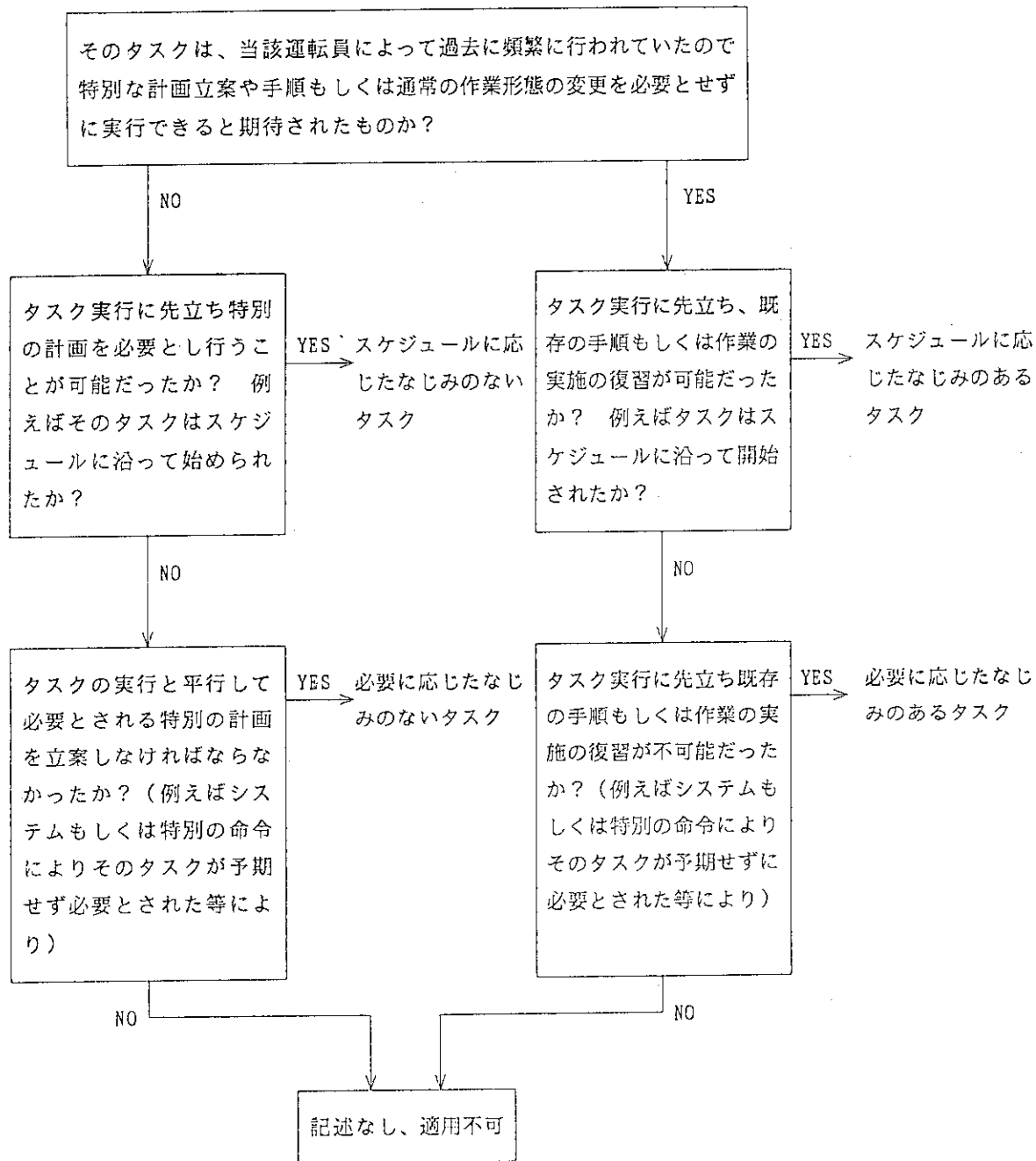
図A.3 人間の機能不全のメカニズムの分析ガイド



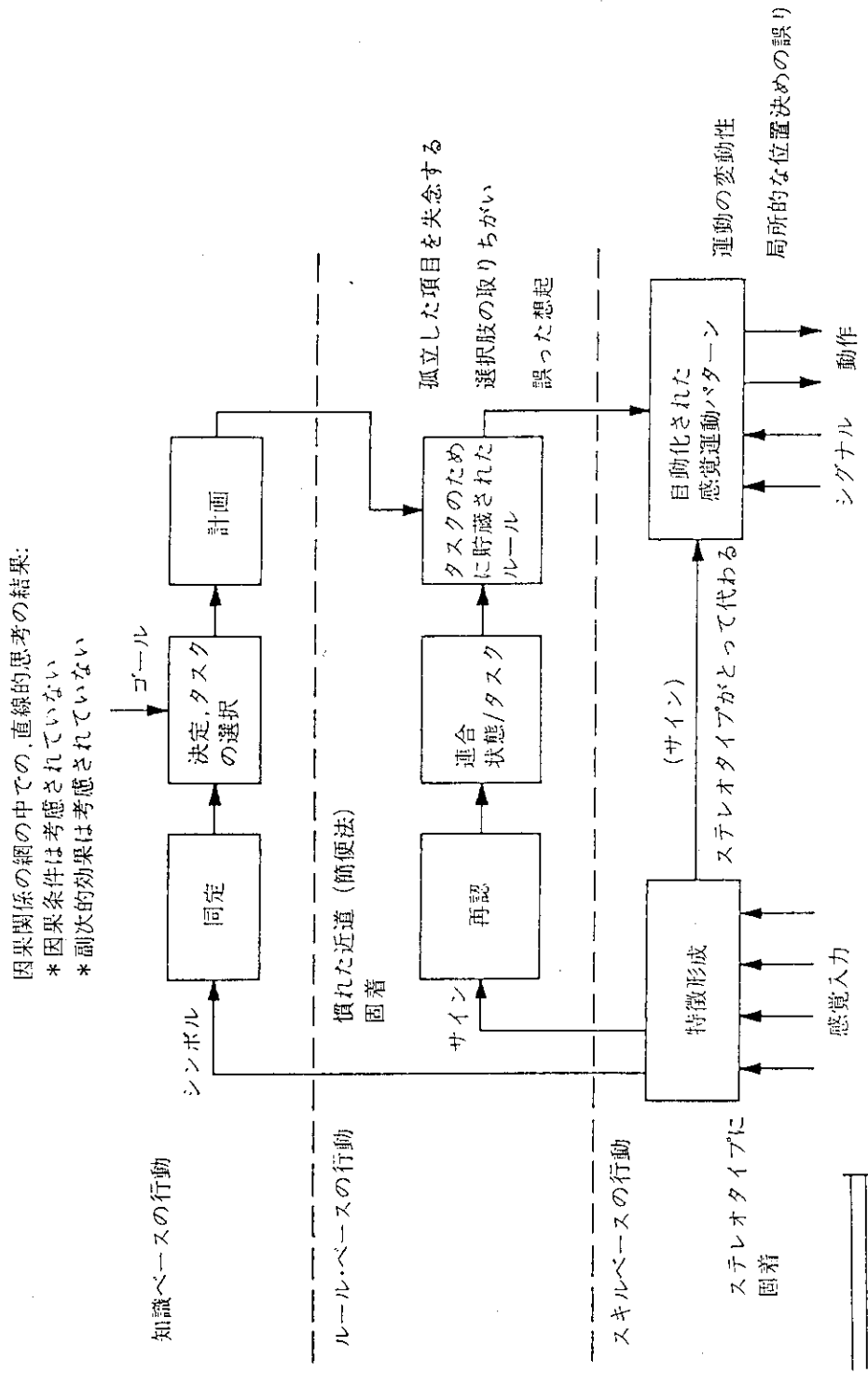
図A.4 人間の内的な機能不全の分析ガイド



図A.5 パフォーマンスに対する影響因子のうち心的負荷と資源に対する分析ガイド



図A.6 状況因子のうちのタスク特性 (Preparedness)に関する分析ガイド



図A.8 典型的なヒューマンエラーのメカニズムと、人間行動の制御との関係 (文献8より)