

大規模・実時間知識ベースシステムの開発(1)

— 基本概念と機能 —

1996年4月

動力炉・核燃料開発事業団
大洗工学センター

複製又はこの資料の入手については、下記にお問い合わせ下さい。

〒311-13 茨城県東茨城郡大洗町成田町4002

動力炉・核燃料開発事業団

大洗工学センター システム開発推進部・技術管理室

Inquiries about copyright and reproduction should be addressed to: Technology Management Section O-arai Engineering Center, Power Reactor and Nuclear Fuel Development Corporation 4002 Narita-chō, O-arai-machi, Higashi-Ibaraki, Ibaraki-Ken, 311-13, Japan

動力炉・核燃料開発事業団 (Power Reactor and Nuclear Fuel Development Corporation) 1996

大規模・実時間知識ベースシステムの開発（1）

——基本概念と機能——

尾崎禎彦*、須田一則*、
吉川信治*、小澤健二*

要旨

原子力プラントの安全性、信頼性向上を目的とした運転制御の高度化、知能化の観点から、プラントで人間（運転員、保守員）が運転制御、保守において果たしている役割を人工知能で代替することを目指し、平成3年度から原子力クロスオーバー研究の一環として自律型プラントの開発を進めてきている。

自律型プラントにおいては、運転制御、保守保全に係わる人工知能や知的ロボットが必須であるが、それらが有効、かつ、適応的に稼働するためには、プラントに関する膨大な量の知識、情報の中から、必要な知識、情報が適切な形、タイミングで遅滞なく、これら人工知能や知的ロボットに与えられる必要がある。

自律型プラントにおける知識ベースの特徴として、原子力プラントの設計、運転、保守といったプラントの全ライフサイクルをカバーする多様で、大規模なものとなること、そして、プラント運転制御の使用に耐え得る実時間性が保証されたものであることが必要となる。この知識ベースの、正にこの大規模であることと実時間性との両立が可能となる知識ベースの構築、運用手法、方式の開発が愁眉の課題となっている。

大規模実時間知識ベースシステム構築に関する研究開発は、平成6年度からのクロスオーバー研究第2期の中で実施に着手された。平成7年度には、自律型プラントにおける人工知能の役割を整理し、また、過去の軽水炉での事故例における事象進展に対応した運転員操作を整理、分析し、自律型プラントという人工知能システムでの知識ベースに期待される機能と課題について検討した。

自律型プラントにおける大規模・実時間知識ベースの基本概念と機能に関して、特に、診断を含めたプラント運転制御における診断推論機構と知識、また、大規模と実時間の両立のための知識の共有化と動的合成、再配列、さらには、未知、未経験事象への対応という点からの学習による知識の更新（修正）の必要性を明らかにした。本報告では、軽水炉での事故例の整理、分析結果を含めてこの知識ベースの基本概念と機能についての検討結果を報告する。

* 大洗工学センター基盤技術開発部先進技術開発室

Study on Large Scale Knowledge Base with Real Time Operation for Autonomous Nuclear Power Plant (1)

— Basic Concept and Expecting Performance —

Yoshihiko OZAKI*, Kazunori SUDA*

Shinji YOSHIKAWA*, Kenji OZAWA*

Abstract

Since it is desired to enhance availability and safety of nuclear power plants operation and maintenance by removing human factor ,there are many researches and developments for intelligent operation or diagnosis using artificial intelligennce (AI) technique.

We have been developing an autonomous operation and maintenance system for nuclear power plants by substituting AI's and intelligent robots.

It is indispensable to use various and large scale knowledge relative to plant design ,operation ,and maintenance ,that is ,whole life cycle data of the plant for the autonomous nuclear power plant. These knowledge must be given to AI system or intelligent robots adequately and opportunely. Moreover ,it is necessary to insure real time operation using the large scale knowledge base for plant control and diagnosis performance. We have been studying on the large scale and real time knowledge base system for autonomous plant.

In the report ,we would like to present the basic concept and expecting performance of the knowledge base for autonomous plant ,especialy ,autonomous control and diagnosis system.

* Frontier Technology Section ,Advanced Technology Division ,
O-Arai Engineering Center

目 次

1. 緒言	1
2. 知的運転制御における知識ベースの役割と機能	3
2. 1 自律型プラントでの人工知能の役割	3
2. 2 知的運転制御における知識ベース	5
2. 2. 1 階層分散システムと知識	7
2. 2. 2 診断推論と知識	9
2. 2. 3 知識の共有化	10
2. 2. 4 知識の内容と構築／編集支援	12
2. 2. 5 知識の更新／追加と学習	14
2. 2. 6 知識の合成と再配列	15
3. 異常／事故事例に見る運転員操作と人工知能／知識の必要機能	18
3. 1 KMN # 2 の場合	19
3. 2 TMI # 2 の場合	27
4. 結言	37
5. 今後の課題	39
6. 謝辞	40
7. 参考文献	40

図 目次

図 1	自律型プラント機能構成概要	1
図 2	プラント運転・保守の位置付け	3
図 3	プラント運転サイクル	4
図 4	自律型プラントと知識ベース	4
図 5	通常運転時プラント運転制御フロー	5
図 6	異常時運転時プラント運転制御フロー	5
図 7	プラントと人間の関わり	6
図 8	知的運転制御プロトタイプシステム機能構成概要	7
図 9	プラント機能階層化モデル	8
図 10	知識構造概要	8
図 11	物理因果モデル例（蒸発器廻り）	9
図 12	エージェント内部構造	10
図 13	分散システムと知識構成	11
図 14	共有知識の多重化	11
図 15	知識ベース内容概要	12
図 16	自律型プラントにおける知識ベース	13
図 17	大規模知識ベース構築	13
図 18	未知事象対応のための推論手法と課題	14
図 19	知識の更新と学習	15
図 20	知識の合成と再構成	16
図 21	知識の再構成と学習	17
図 22	原子力発電所の事象と国際評価尺度	18
図 23	KMN # 2 事故事象進展と対応操作	19
		～25
図 24	KMN # 2 事故事例における運転員操作	26
図 25	KMN # 2 事故事例での人工知能への期待と課題	27
図 26	TM I # 2 事故事象進展と対応操作	28
		～32
図 27	TM I # 2 事故重大化の原因	33
図 28	TM I # 2 事故事例における人工知能代替の効果	34
図 29	TM I # 2 事故事例での人工知能への期待と課題	35

1. 緒言

原子力（発電）プラントの安全性、信頼性向上を目的として、従来、運転制御、点検保守において人間が果たしてきた役割を人工知能、知的ロボットに極力代替させ、原子力プラントにおける発生トラブルの大きな要因である人的因子の排除を目指した自律型プラントの研究開発が行われている。

自律型プラントとは、次の5つのアイテムからその概念が明示される。すなわち、与えられた規範によって自ら運転制御／点検保守を行うことができる、通常運転時／想定内事象の範囲では、人間に依存することなく運転制御できる、想定外事象に対しては、人間の大局的判断による指示を受け対応できる、通常運転時に、人間と協調しつつ点検保守ができる、定期検査時／故障・事故時に対しては、人間の大局的判断による指示を受け対応できる、というものである。そのため、人工知能による自律運転制御が、点検保守においては、知的ロボットによる自律点検保守が要請される。人工知能による自律運転制御は、想定内事象の範囲で自律し、その構成は分散協調機能が確保されるものとし、未経験事象に対しても対応できることが必要となる。一方、知的ロボットによる自律点検保守においては、環境としての既知空間内では自律し、分散協調機能が確保されたロボット群構成をとるとともに、人間との協調性に留意したものとする必要がある。

この概念に則した自律型プラント機能・構成の概要は、図1に示すようなものになる。図に示すように、自律型プラントにおいては、知的運転制御システムによる運転制御、並びに、知的ロボットによる点検保守も階層型分散協調システムの概念が採用されている。また、ここでの分散協調システムは、システム機能の動的な再配列、危険分散、自己診断、保守の局所化などにも配慮されたものとなっている。

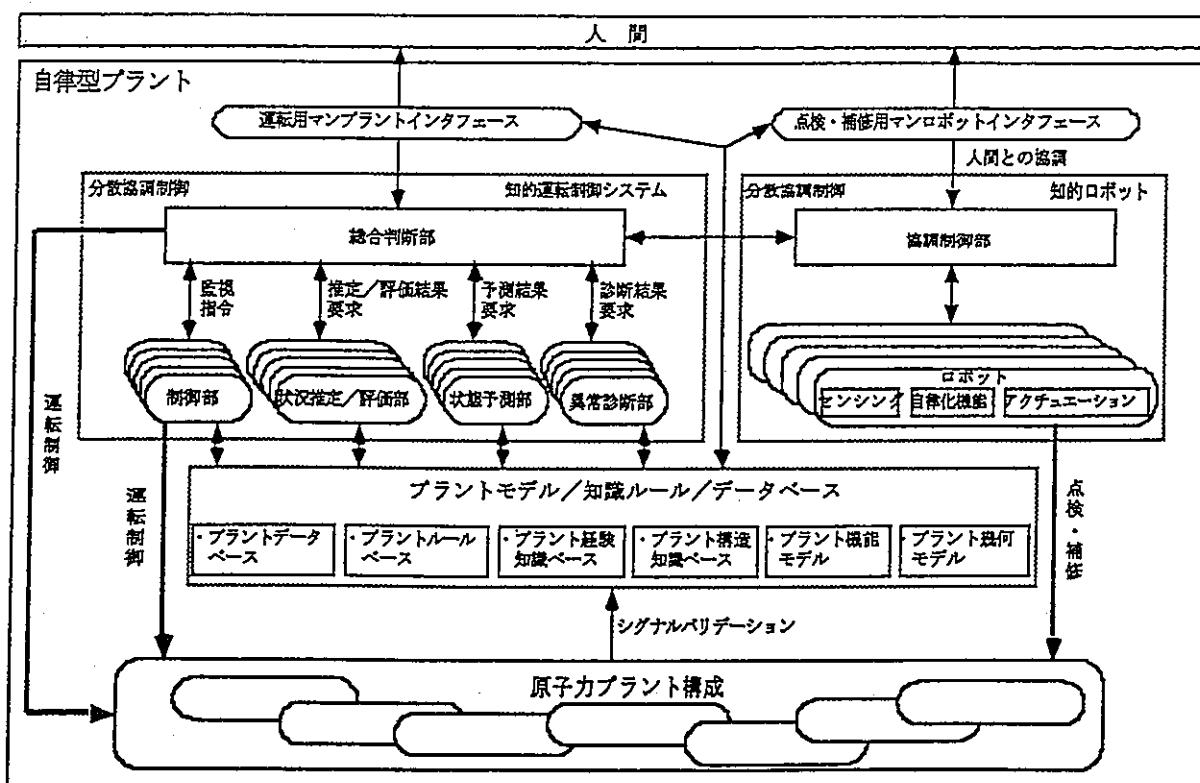


図1 自律型プラント機能構成概要

本報告で取り扱う大規模・実時間知識ベースとは、図1に示したプラントモデル／知識ルール／データベース部分であり、知的運転制御システム、知的ロボットが適切に、かつ、適正に動作するために必要な知識・情報が格納されたものであり、プラント設計、運転、保守等に係わる、いわばプラントの全ライフサイクルに関する膨大な知識・情報ということになる。これらの知識・情報が適切な形、タイミングで遅滞なく必要とするシステムに与えられて、初めて自律型プラントはその期待される機能を果たし得るものである。この大規模な知識ベースをいかに実時間性を損なうことなく構成、構築し、運用できるかが開発課題である。

大規模実時間知識ベースシステム構築に関する研究開発は、平成6年度からのクロスオーバー研究第2期の中で実施に着手された。平成7年度には、自律型プラントにおける人工知能の役割を整理し、また、過去の軽水炉での事故例における事象進展に対応した運転員操作を整理、分析し、自律型プラントという人工知能システムでの知識ベースに期待される機能と課題について検討した。

自律型プラントにおける大規模・実時間知識ベースの基本概念と機能に関して、特に、診断を含めたプラント運転制御における診断推論機構と知識、また、大規模と実時間の両立のための知識の共有化と動的合成、再配列、さらには、未知、未経験事象への対応という点からの学習による知識の更新（修正）の必要性を明らかにした。本報告では、軽水炉での事故例の整理、分析結果を含めてこの知識ベースの基本概念と機能についての検討結果を報告する。

2. 知的運転制御における知識ベースの役割と機能

ここでは、自律型プラントにおける人工知能の役割、さらに、知的運転制御システムでの人工知能、知識の現状と課題を整理し、るべき知識構造と期待される機能とを検討した。検討にあたっては、過去の原子力発電プラントでの代表的な事故事例における運転員操作の分析を通じた人工知能の役割と課題の抽出も併せ実施した。

2. 1 自律型プラントでの人工知能の役割

プラントの運転・保守とは、図2に示すようにプラントの通常時、異常時に応じた運転制御手段を通して、安全を確保しつつ電力を安定的に生産することを目的としている。

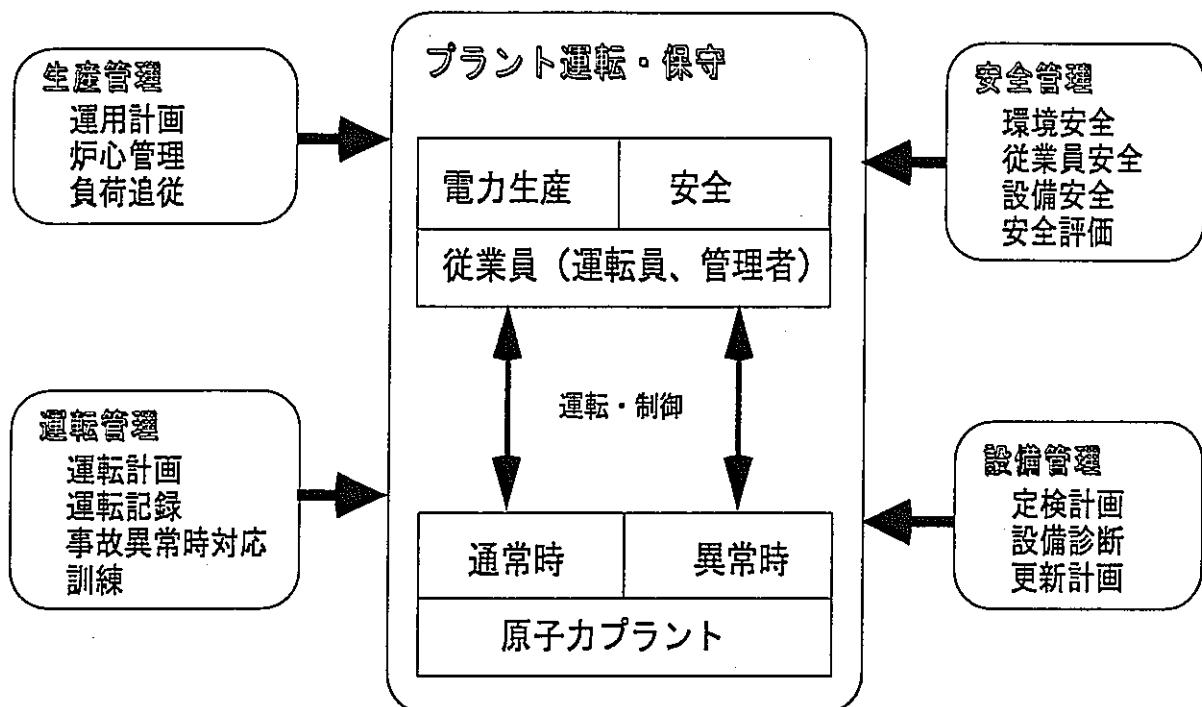


図2 プラント運転・保守の位置付け

このために、生産、運転、安全、そして、設備各々の管理・運用計画、操作手順、評価方法、などが必要な知識として準備されることになる。プラントに係わる運転員、保守員、管理者などの従業員は、この知識体系と自らの経験、知識を駆使して、その役割に応じた任を果たしているわけである。また、プラント運転サイクルでの運転制御と点検保守の位置付けは図3に示すとおりであるが、点検保守については運転中においても必要時に適宜実施される。

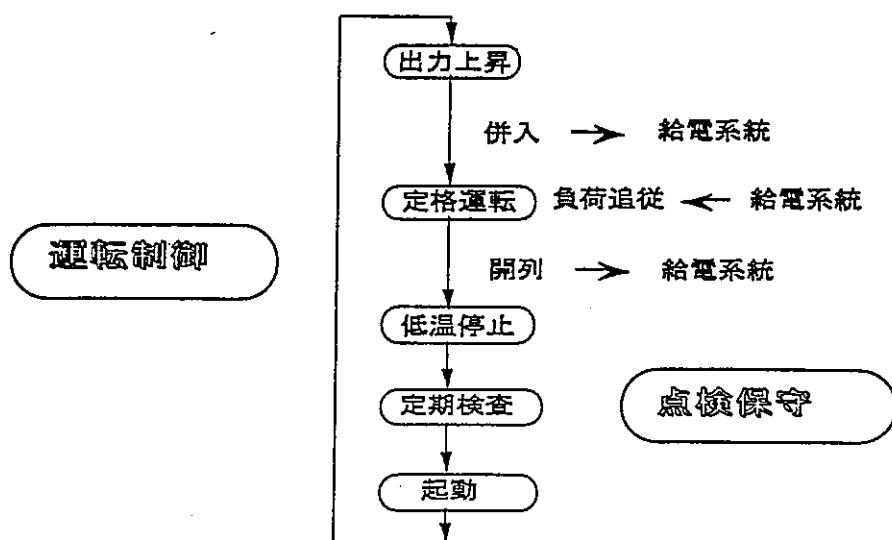


図3 プラント運転サイクル

自律型プラントは、先に記述したように大きく知的運転制御システム、知的保全管理システム、知的ロボットから構成されるが、この自律型プラントにおける知識ベースの位置付けを示したのが図4である。

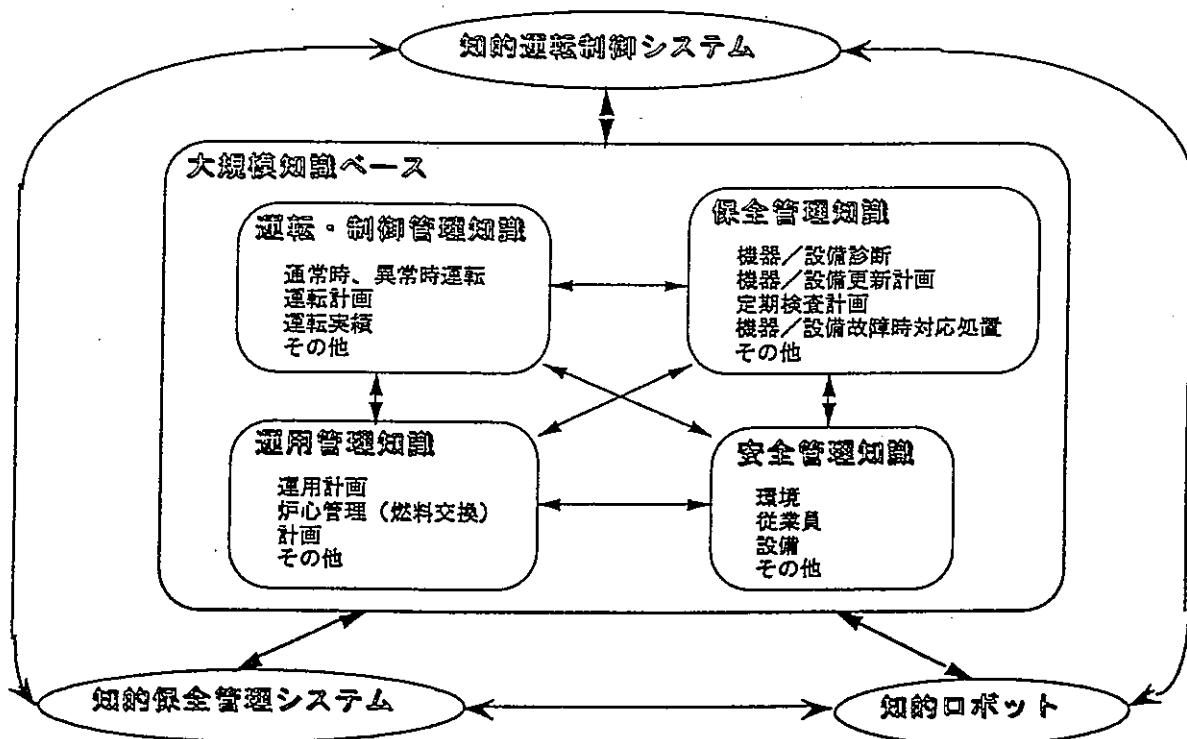


図4 自律型プラントと知識ベース

図4に示すように自律型プラントにおける知識ベースは、図2に示した生産管理、運転管理、安全管理、設備管理というドキュメント情報のみならず、運転員の運転制御に係

わる経験、知識、さらに、点検保守員の経験、知識までも網羅的、明示的に記述したものである必要がある。次に、自律型プラントにおける知的運転制御システムで要請される知識ベースについて明らかにしていく。

2. 2 知的運転制御における知識ベース

ここで、原子力プラントでの通常、異常時運転時それぞれにおける運転制御の流れを示したのが図5、図6である。

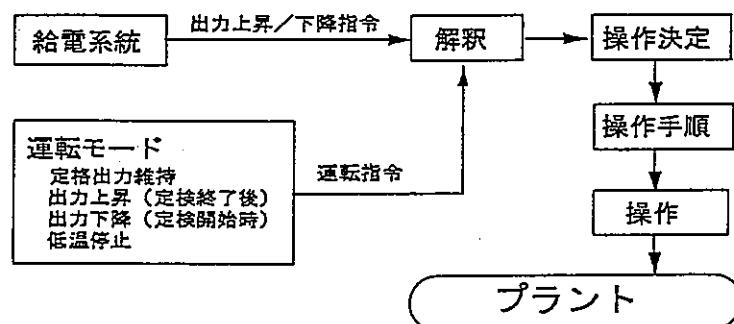


図5 通常運転時プラント運転制御フロー

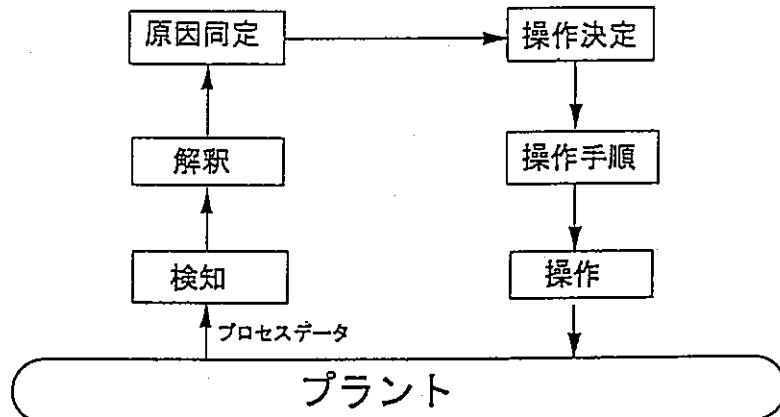


図6 異常時運転時プラント運転制御フロー

通常運転時においては、ルーチン的な給電指令、もしくは、運転モードの変更指令に基づいて、その指令内容を解釈し、対応操作を対応手順とともに決定、具体的にプラントに対して操作を実施する。一方、異常運転時においては、突発的、偶発的にプロセスデータから異常事象の発生が検知され、検知された内容から異常事象の発生と解釈すると同時に、その異常事象が一体何に起因するものかを複数のプロセスデータ、そのときのプラント状態、シミュレータ運転訓練経験、および、過去の異常事象事例等を参考にして同定する。同定された異常事象原因から異常時運転マニュアル、警報処理手順書等のドキュメントなどに従った対応操作、操作手順を決定し、プラントに対して操作を実施し

ていく。この実施の過程では実施操作によるプラント状態の変化を推測し、その状態推移が予想されたものと対応するか否かによって、異常事象同定、あるいは、対応操作の適正さを把握、必要があれば微修正、調整していく、といった判断、操作を短時間に繰り返し実施していく。このとき、既知の、言い換えると想定されていた範囲の異常事象だけとは限らず、あらかじめ想定されていなかった、いはば未知、未経験の事象、あるいはまた、いくつかの事象が複合された事象にも遭遇することが起こり得る。この場合は、運転員のプラントに対する知識、経験、直感力といった極めて高度な判断と対応操作の実施が要求されることになる。

このため、従来からこの運転員の負担を低減させることを目的とした研究開発が行われており、その代表例として運転員支援システムの開発が挙げられる。このシステムは、運転員に対しプラント状況に関する適切、かつ、過不足ない情報を対話形式で提供し、運転員の負担を低減し、以てプラントの安全性、信頼性の向上を図ろうとするものである。しかし、あくまでも運転員を支援するものであって、最終的な判断、操作は運転員に委ねられている。現在、我々が開発しようとしている自律型プラントにおける運転制御においては、この運転員の判断、操作をも人工知能への代替を図ろうとするものであり、しかも、未知、未経験事象に対しても極力対応可能なものにしていくとしている。したがって、自律型プラントに要求される必要な知識、ルールは膨大を極め、また、異常事象の同定などにおいては定性推論、仮説推論などの手法により確度の高い異常原因同定を実施していく必要がある。ここで、従来プラント、運転支援システムプラント、そして、自律型プラントにおけるプラントと人間との関わり方を示したのが図7である。

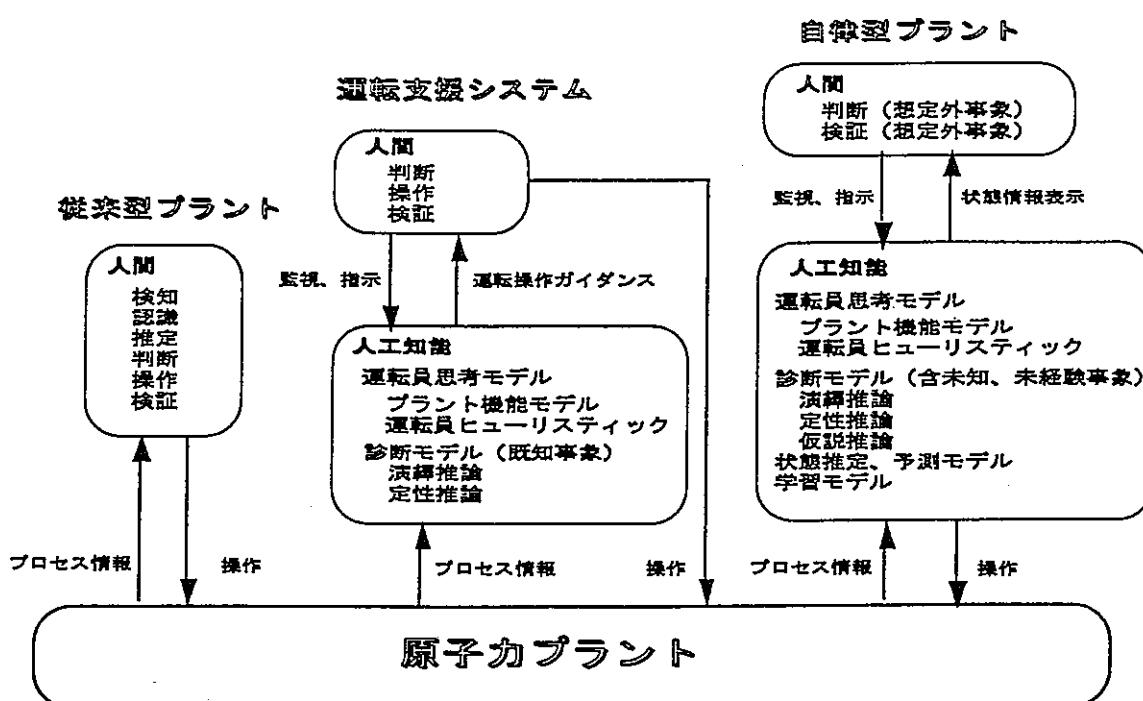


図7 プラントと人間の関わり

自律型プラントにおいて要求される人工知能の役割、知識ベースの在り様がいかに大きなものか予想できる。

2. 2. 1 階層分散システムと知識

ここで自律型プラントでの人工知能の役割を制御、診断に限って概要説明し、その中で知識がどのような形をとり利用されていくかを整理していくこととする。ここでは知的運転制御システムに対する人工知能の適応性を評価し、システム実現の見通しを得るために開発しているプロトタイプシステムを例にとって話を進める。知的運転制御プロトタイプシステム⁽¹⁾ の機能構成を図8に示す。

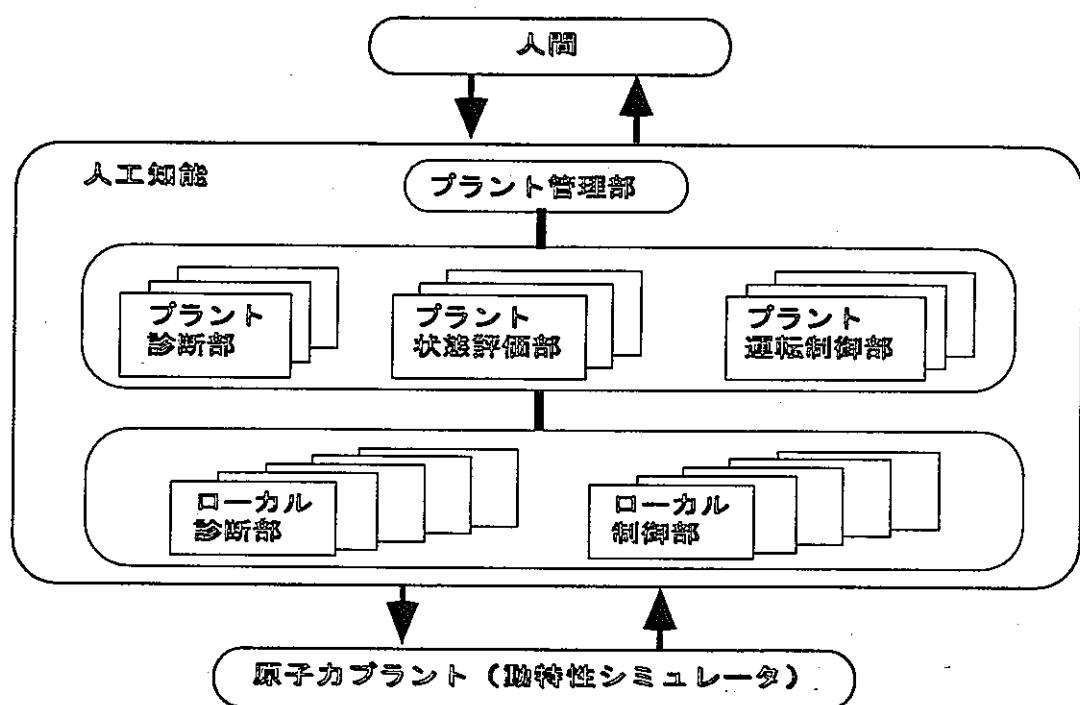


図8 知的運転制御プロトタイプシステム機能構成概要

図に示すように、知的運転制御プロトタイプシステムは、階層型の分散協調システム構成としており、マルチエージェントシステムを採用している。

また、ループ型FBRを模擬したビルディングブロックタイプのシミュレータをプラントとして用いている。ここでいうエージェントとは、それ自身が必要な知識、推論機構を備えた知的、かつ、自律的な知識処理機構の単位として位置付けられる。現状プロトタイプシステムでは、一つのエージェントには、1個、もしくは、複数のオブジェクトで構成され、オブジェクトは事実を表現している宣言型知識とその解釈、処理に関する手続き型知識とが、フレーム型知識表現構造により記述されている。

運転員のプラントに対するイメージは、ある目標に対してそれを実現するための上位機能、さらに、その上位機能を達成するための下位機能といった具合にプラント機能を階層的に捉えている。運転員は、この階層構造に展開された機能図をベースに運転制御操作を理解し、思考するというプロセスを踏んでいる。この運転員思考モデルに基づい

てプラント機能を階層構造で表現した知識、図9に示すプラント機能階層化モデルが基本となる。

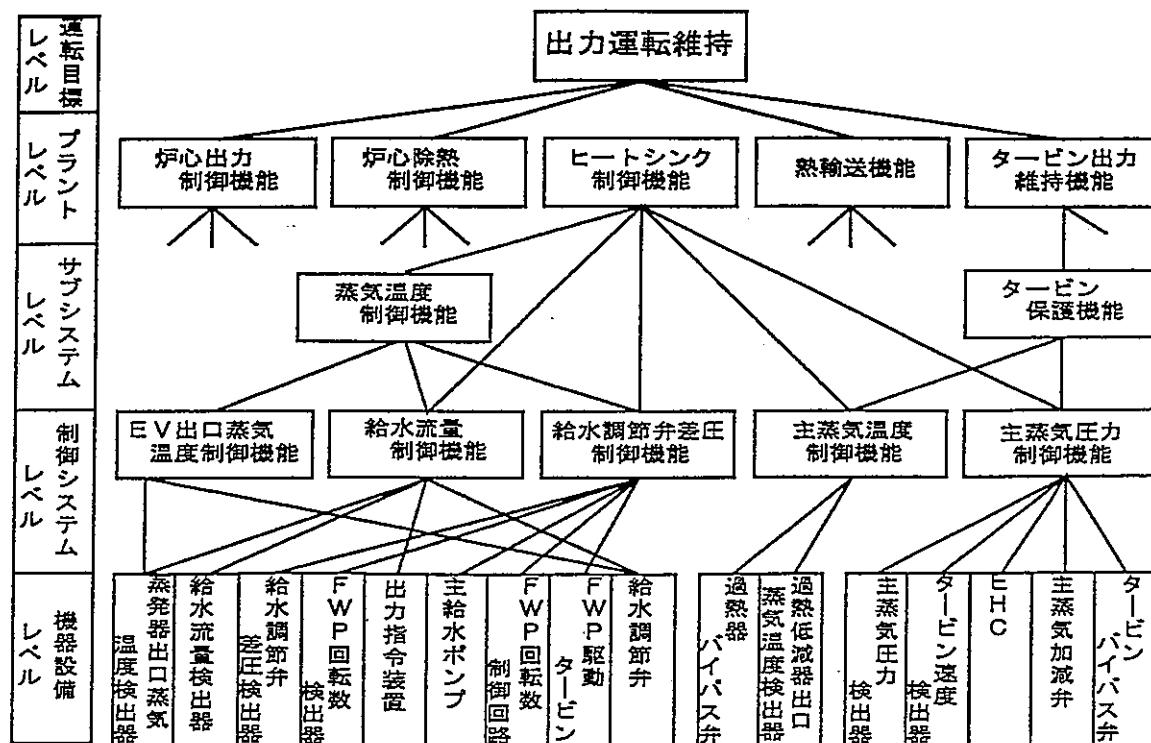


図9 プラント機能階層化モデル

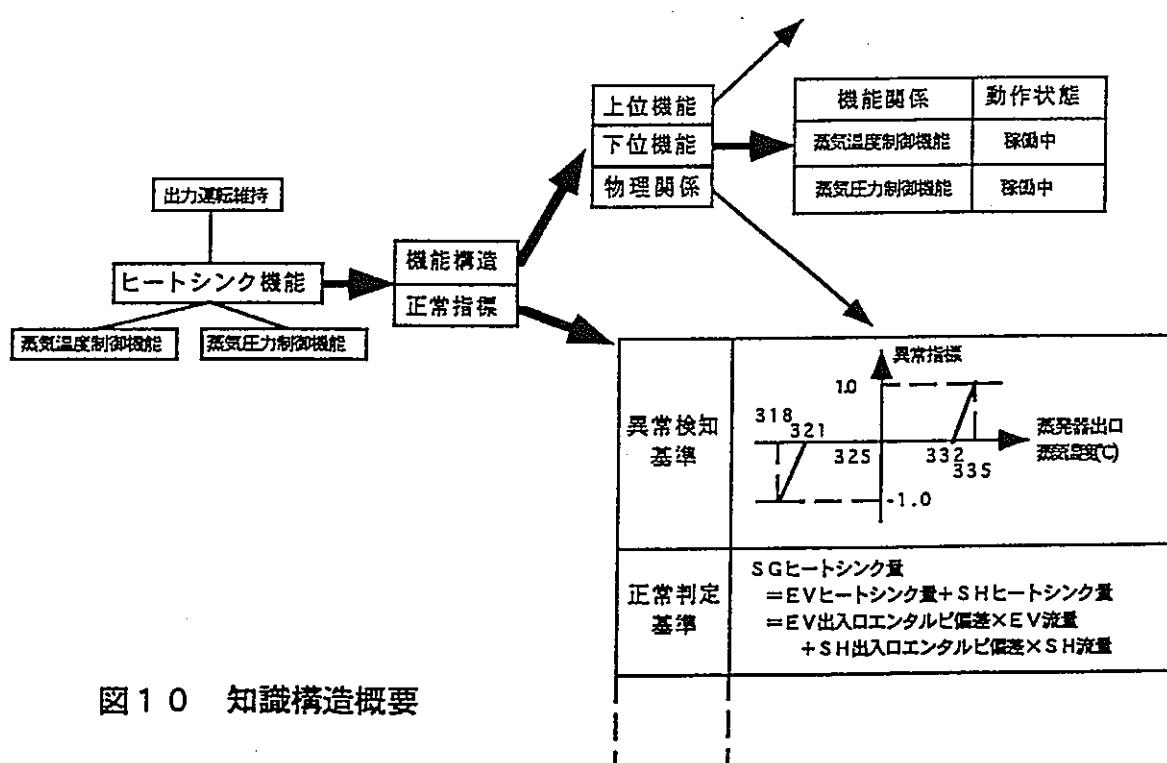


図10 知識構造概要

この機能階層モデルが、プラントの運転制御のための戦略を決定する基本モデルとなり、同時に、プラント診断の際の基本モデルともなる。機能階層化モデルにおける個々の機能に格納される知識構造は、図10に、一例としてヒートシンク機能の場合を示した。図に示すように機能の正常、異常の判定基準、上位、下位機能との関係などが明示的に記述されたものとなっている。

2. 2. 2 診断推論と知識

大枠としてのプラント運転制御、診断のための知識構成は、上記のプラントの機能階層モデルに基づく各階層機能の知識とその連関で説明できるが、ある意味では確定的知識によって可能な運転制御とは異なり診断の場合は、複数の観測プロセス量からのみ、もしくは、非観測プロセス量を含めた推論過程を通して原因同定が行われる。従って、この推論のための知識をどう構成するかが、診断性能を決定する。このため、対象機器の機能に関して上位、下位機能、機器間の物理関係を可観測、非観測量を介して定性的に記述した定性モデル、物理因果モデルによる原因同定のための推論方式を導入した。図11に、一例として蒸発器廻りの物理因果モデルを示した。

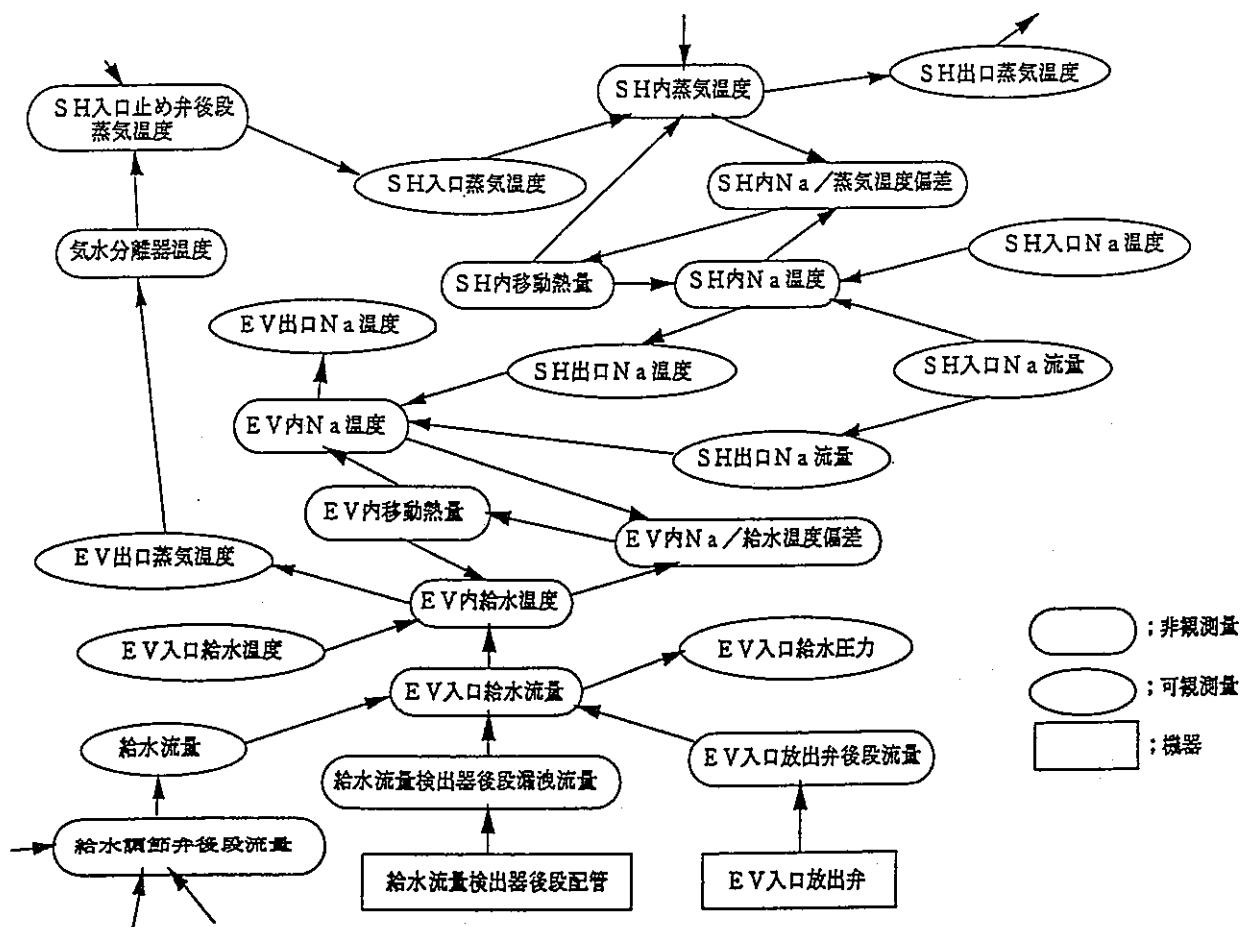


図11 物理因果モデル例（蒸発器廻り）

図において、例えば、蒸発器出口Na温度の上昇が観測された場合、因果関係から可観測量を参照しつつ異常事象の作用が伝播するアーケを逆にたどっていく方法で原因探索が行われる。従って、診断機能を担う診断部エージェントには、この推論に必要な知識、ルールが網羅的、明示的に記述されることになる。図8に示すようにプロトタイプシステムでは、階層化されてはいるが分散配置された複数のエージェントがそれぞれの機能を協調的に果たすことによって、全体システムとして所望の機能が実現される。ここで、運転制御に係わる一つのエージェントを例にとって、その内部構造を示したのが図12である。

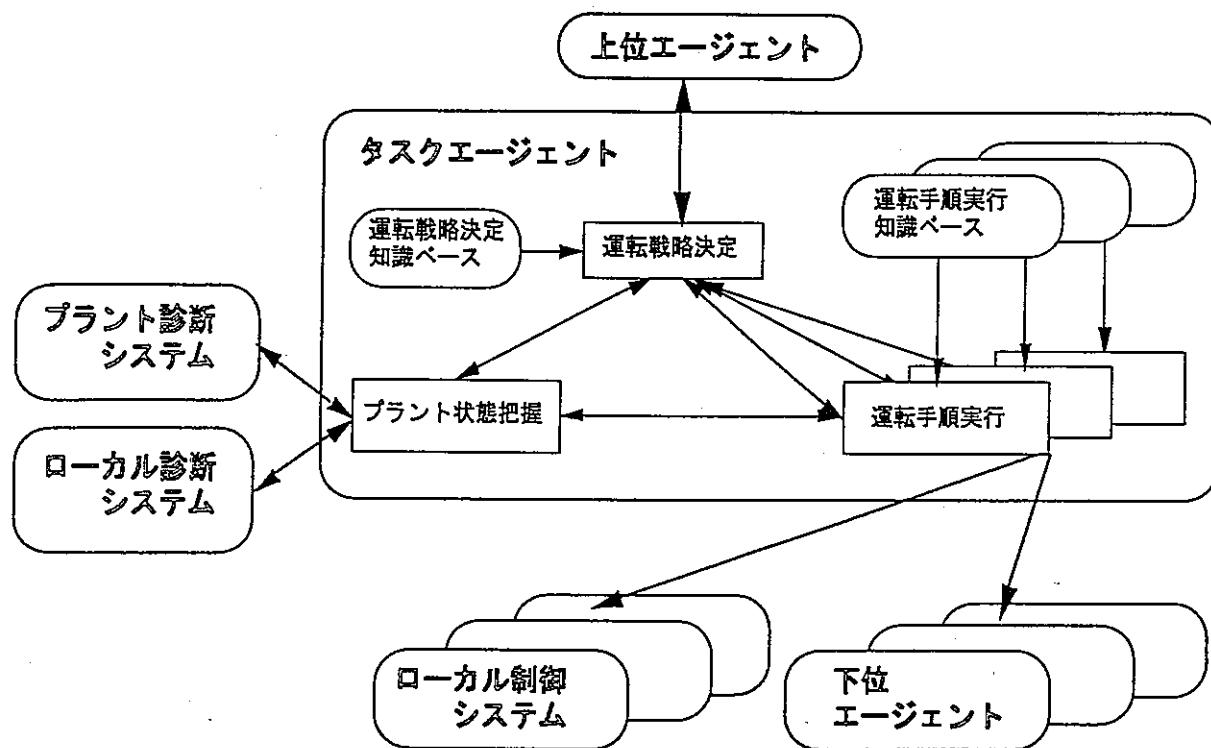


図12 エージェント内部構造

図に示すように、エージェントは制御、診断のための別のエージェントと上位、下位機能という関係のもとに連絡され、プラント状態を把握し、そのプラント状態に対応した運転戦略を決定、運転戦略に基づく運転手順を生成、実行していく。したがって、エージェント内部には、この上記の機能を果たすための必要にして充分な知識、ルールが格納されることになる。

2. 2. 3 知識の共有化

プロトタイプシステムでは、階層構造ではあるが基本的に分散システム構成としている。分散システムの大きな特徴は、危険分散という点にある。危険分散の考え方に対して、保有知識についても各エージェントが重複保有するのが必然となる。しかし、それ

でなくとも膨大な知識、プラントに関する共通知識をそれぞれのエージェントが重複保有するというのは、全体のシステムをコンパクトにし、かつ、実時間性を確保しようとする点からは重すぎる。この点に関して、分散システムと知識ベースという観点で対比的に示したのが図13、図14である。

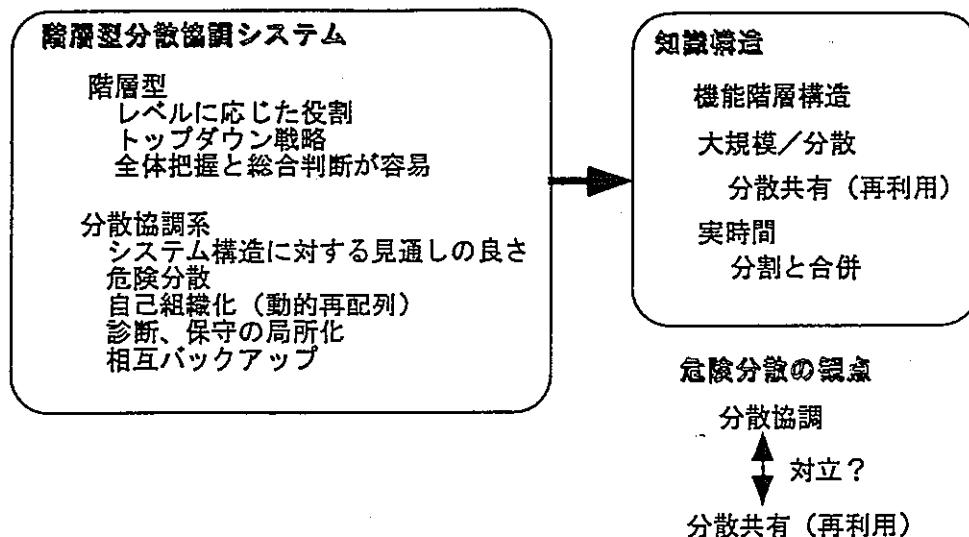


図13 分散システムと知識構成

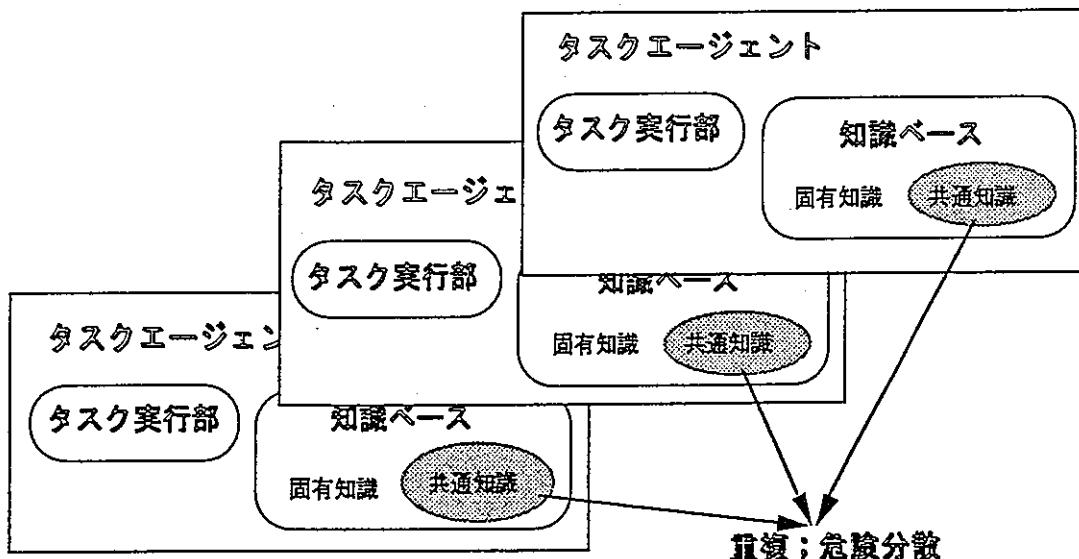


図14 共有知識の多重化

すなわち、分散システムでの危険分散と共通知識の各エージェントでの知識の共有化、再利用という点が両立し得ねばならない。これは、人工知能システム、知識ベースシステムの信頼性という大きな問題をはらんでいる。しかし、大規模で、かつ、実時間動作を保証する知識ベースシステムの構築のためには、知識の共有化と再利用は不可避と考える。各個別エージェントに重複格納されている共通知識を、共有化し、コンパクトな

ものとし、それぞれのエージェントがそれぞれのタスクを実行する時、その必要な知識を共有知識群の中から拾い出し、自らが使い易い形に再構成する、といった機能がどうしても必要とならざるを得ない。ここではこの機能を知識の共有化と再利用と呼ぶ。

2. 2. 4 知識の内容と構築／編集支援

自律型プラントにおける知識内容の概略を示したのが図15である。

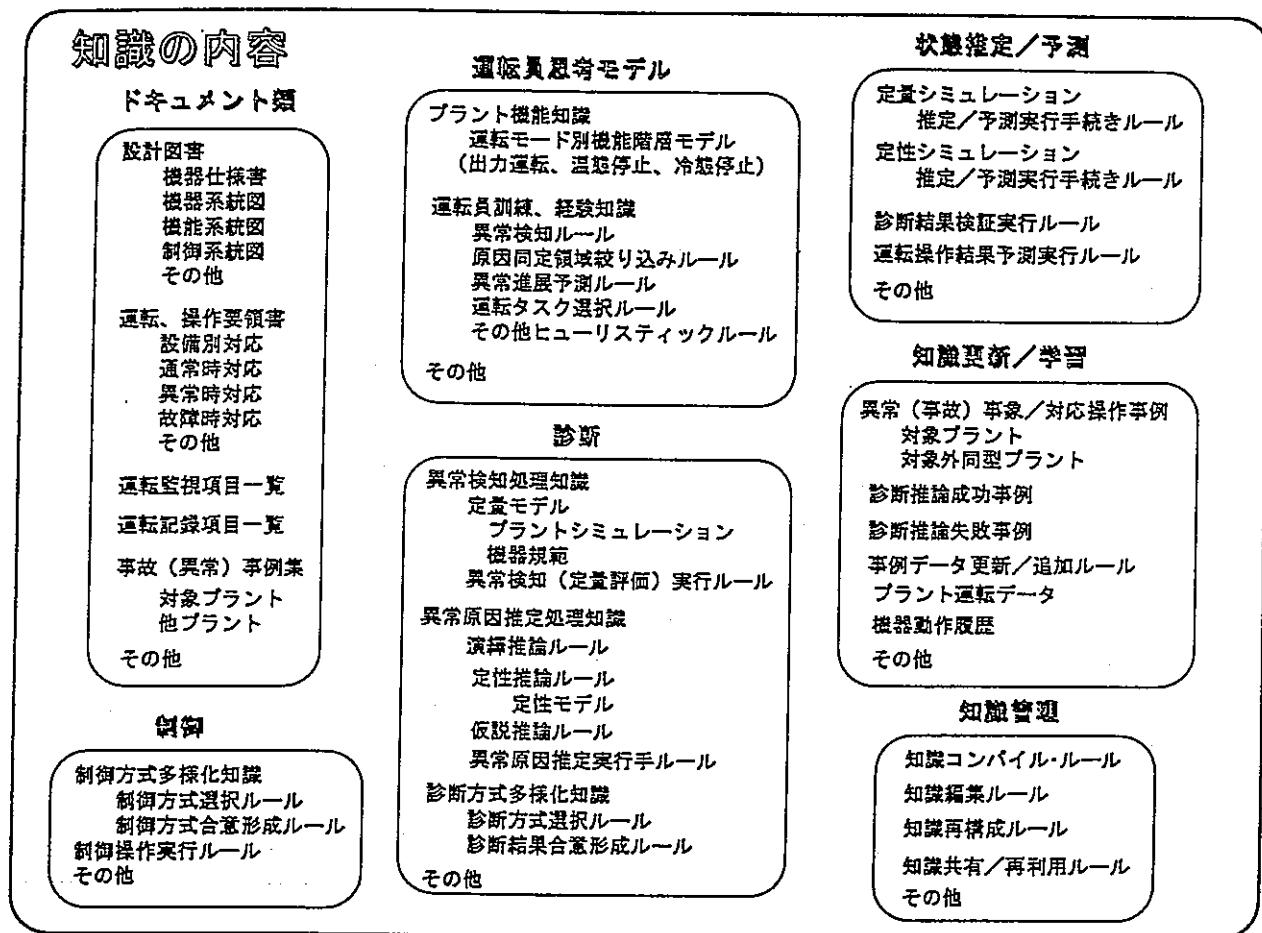


図15 知識ベース内容概要

図に示すように、プラント運転制御に関するものだけでも、膨大な知識群を必要とすることがわかる。次に、自律型プラント運転制御システムと知識ベースの関係を模式的に示したのが図16である。図において、個別共有知識群とは、例えば、機能階層モデル、機器接続図、機器別操作手順などのプラント運転制御に必要な共通知識群から構成されている。これらプラントの全ライフサイクルを通した共通知識は、設計ドキュメント、運転員思考モデル、診断推論ルール等々の種々の様式、形態からなる知識群から、知識ベース構築、編集支援手段によって効率よく、コンパクトに、利用性の高い知識ベースとして構成される。知識ベース部は、知識管理／エディタ部を介して知的運転制御システムへ再構成された知識を含めてタスク実行に必要な知識を供給し、逆に、運転制御シ

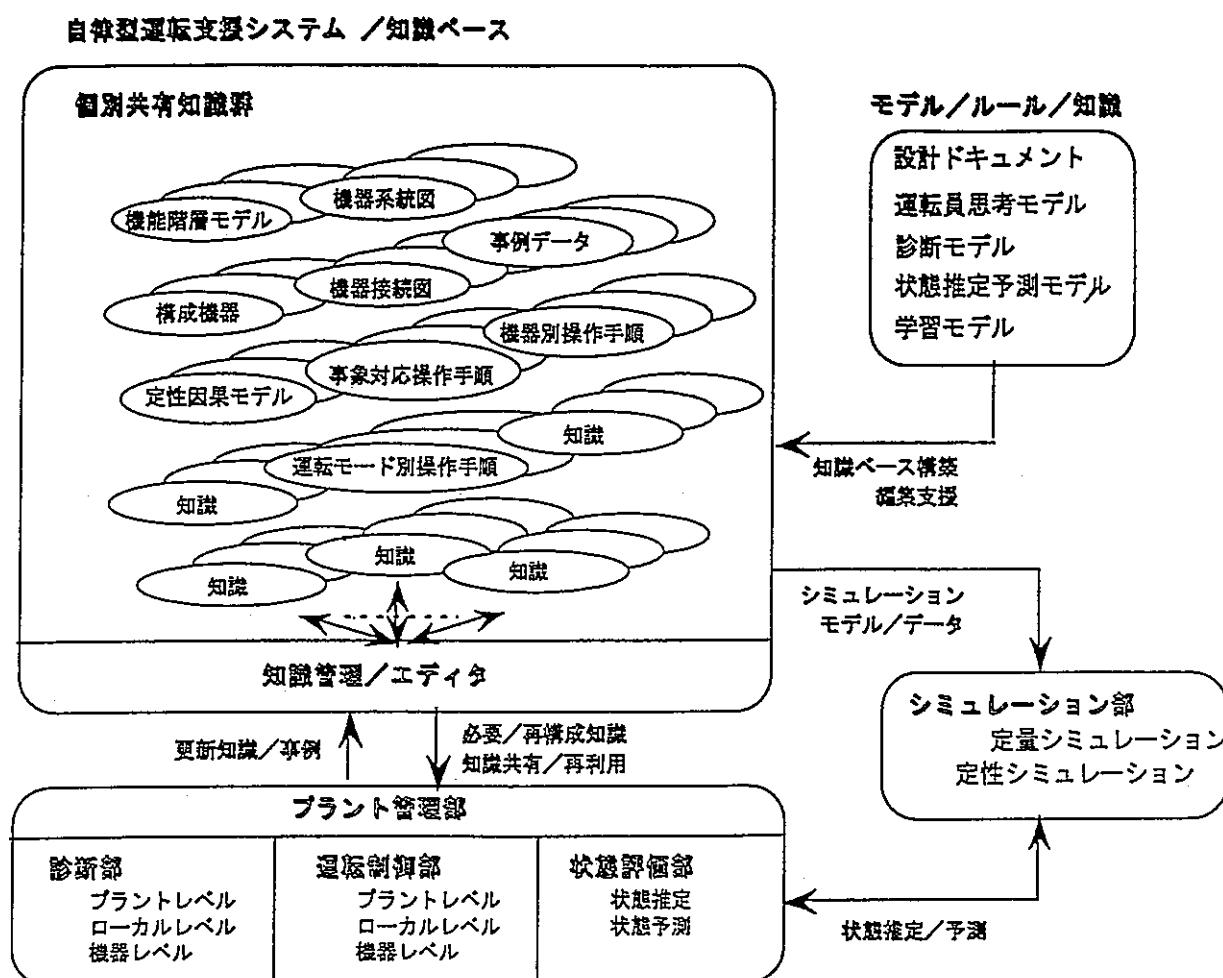


図 1 6 自律型プラントにおける知識ベース

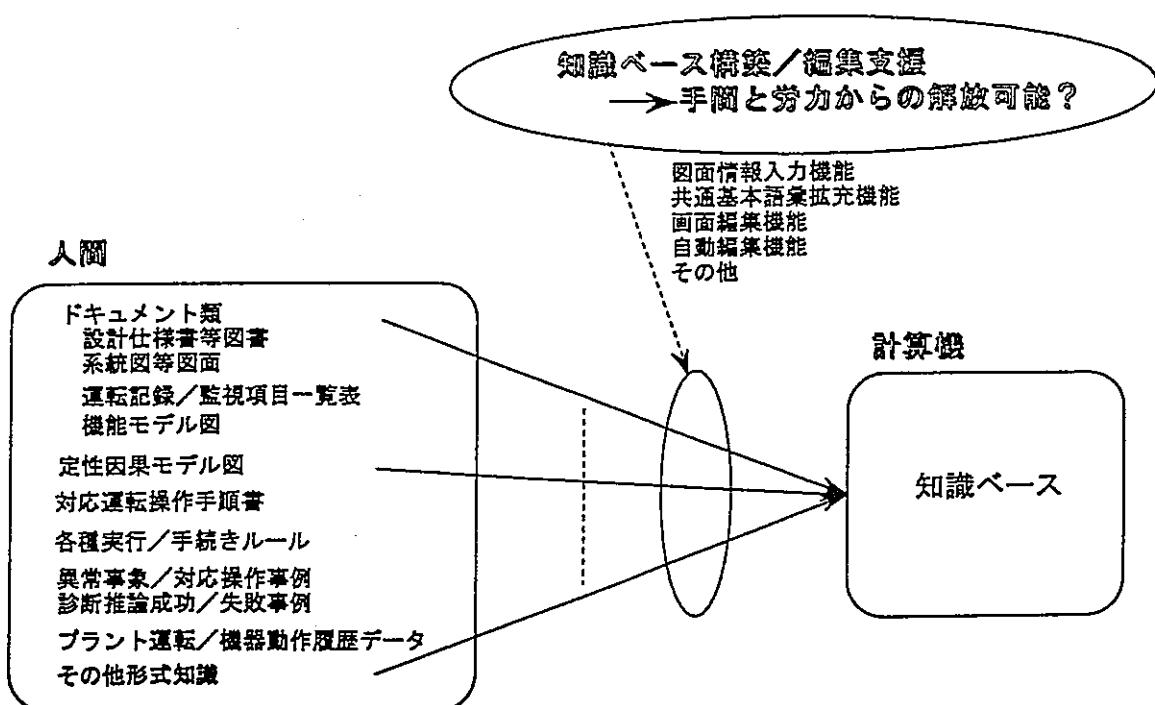
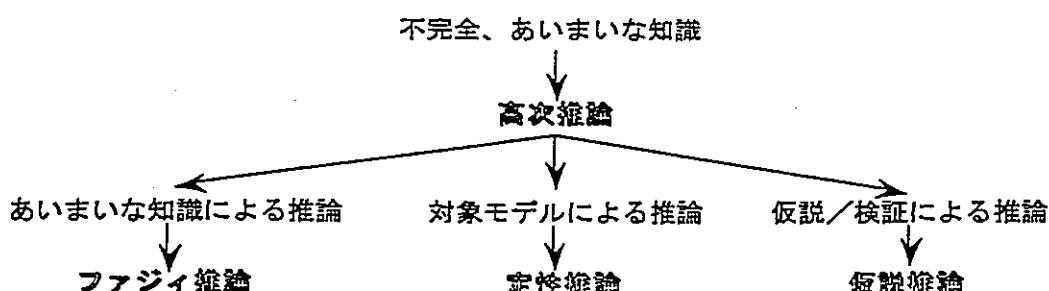


図 1 7 大規模知識ベース構築

システム側からは異常／事故事例や学習によって更新された知識、ルールが知識ベースに与えられ、知識ベース部は常にリファインされた状態が維持される。また、プラント診断、制御のための対応戦略決定に際して、知識ベース側からその目的に応じたプラント状態推定のための必要知識がシミュレーション部に与えられ、プラント挙動の定量的、定性的予測が行われる。この膨大な知識ベース構築にあたっては、上に述べたように効率的、かつ、利便性に優れた知識ベース構築、編集支援手段が必要となる。プラントに関する共通知識群は、機能系統図、機器接続図などの図面情報もあれば、設計ドキュメントのように図面、数値、文字が混在した情報もあり、多種多様な形式のものが存在する。そのため、図17に示すように知識ベース構築、編集支援手段としては、図面情報入力機能、画面編集機能、自動編集機能、さらに、共通基本語彙の拡充機能などのマンマシン性に優れ、インタラクティブなものであることが要請される。

2. 2. 5 知識の更新／追加と学習

知的運転制御システムにおける診断では、未知、未経験事象に対しても即応的に対応できることを目指している。そのため、明示的にルール化された診断プロセスによって原因同定、対応操作決定を行える場面だけではなく、不完全、あいまいな知識に基づいて診断、対応操作を決定していくかなければならない場合が予想される。すなわち、不完全、あいまいな知識のみから、ファジー推論手法により、あるいは、対象モデルに関するプロセスパラメータの定性的振る舞いの関係を用いる定性推論手法により、また、ある仮説を立てその仮説が正しいとしたときに予想される結論が導かれるかどうかによって推論を進めていく仮説推論手法、などによって診断を進めて行かねばならない。そのためには、今後、連想による知識の動的な合成、再構築を行い、推論が成功した場合、失敗した場合それぞれに関する事例を学習によって新たに知識化していくこと、また、明示的な問題解決規則無しで、いわば、適応型の問題解決手法を開発していく必要があると考える。この点に関して示したのが、図18である。



今後の検討課題？

連想による知識合成、再構築 → 成功、失敗例による知識の更新／学習

明示的な問題解決規則なしでの適応型問題解決 → ニューロコンピュータ

図18 未知事象対応のための推論手法と課題

図19は知識のリファイン化に関して図示したもので、未知、未経験事象との遭遇、自他プラントでの異常／事故事例、さらに、機器の動作履歴データなどの新たな知識の獲得による、知識の更新、追加に基づく既存知識の修正、追加を示している。この様な継続的な知識のリファイン化が、自律型プラントの信頼性確保の点で不可避である。

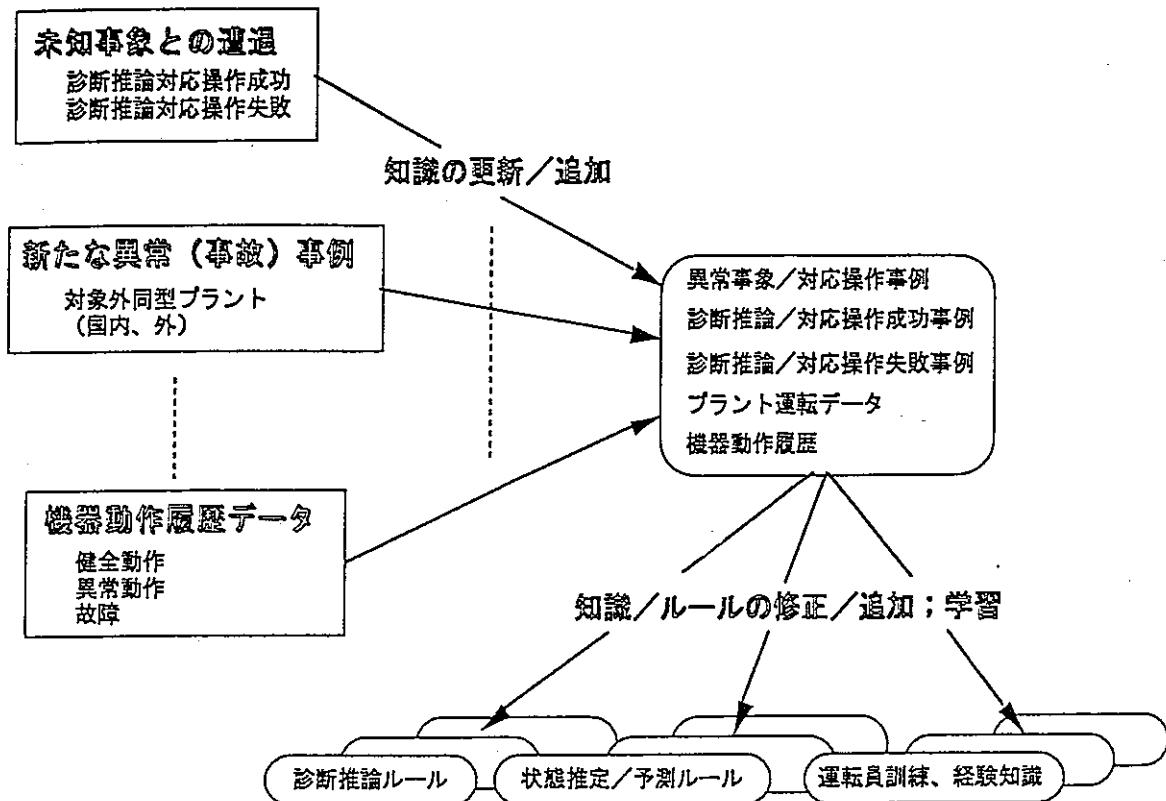


図19 知識の更新と学習

2. 2. 6 知識の合成と再配列

共有化された膨大なプラント共通知識群から、診断推論のために必要な知識、ルールを合成、再配列することの必然は、大規模と実時間の両立性確保の点から重要であることは既に述べた。図20を用いて、この流れを説明する。ここでは、異常検知した後の異常原因同定の場合を例として取り上げている。プラント機能のある機能について異常が検知されると、その機能に付随したエージェントが異常原因同定タスクを開始する。機能階層モデルにおける上位、下位機能の正常／異常判定から、ある程度まで異常原因同定の対象領域が限定される。限定された対象領域に関して、原因同定のために必要な知識の合成、再配列を図16に示した知識管理／エディタ部に要求する。この要求を受けて、共有共通知識群の中の機能階層モデル、機器系統図、機器接続図、定性因果モデル、等々から必要該当知識、ルールを抜き出し、診断推論、原因同定のため、図の例では合成、再配列された定性モデル知識をエージェントに供給する。エージェントでは、

供給された知識、ルールに基づいて具体的に診断推論を実行し、実行後、この供給された知識、ルールは基本的に棄却される。このエージェントでの診断推論において、例えば、未知、未経験事象などに対して診断推論、運転戦略決定などを実行した場合、その過程で獲得された問題解決知識、すなわち、成功、失敗事例、および、使用した仮説因果モデルなどは経験学習結果として必要であれば、共有共通知識群の中の個々の知識、ルールの修正、もしくは、追加される。すなわち、知識のリファイン化がなされることになる。

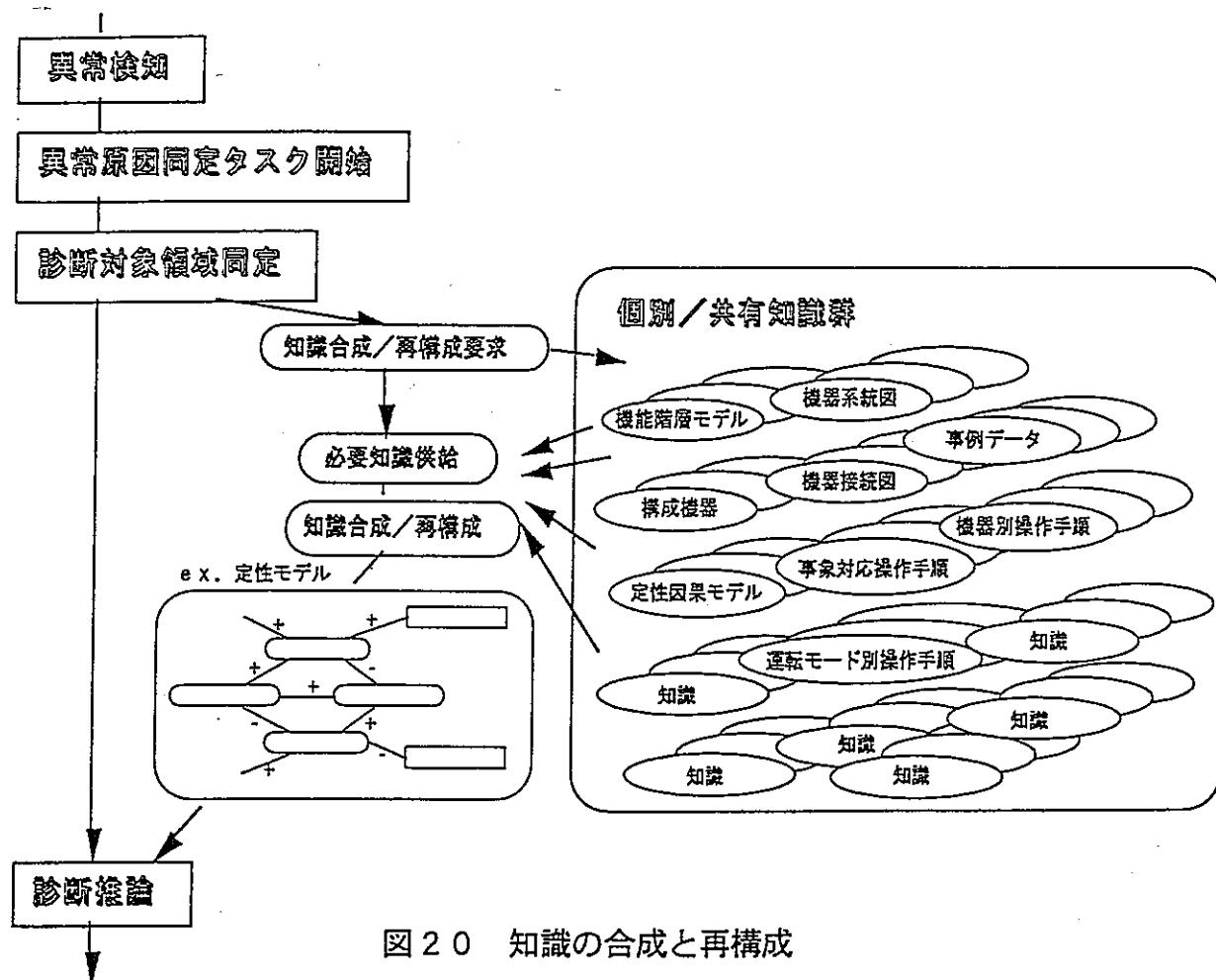


図 20 知識の合成と再構成

この一連の流れを表現したのが、次ページに示した図 21 である。

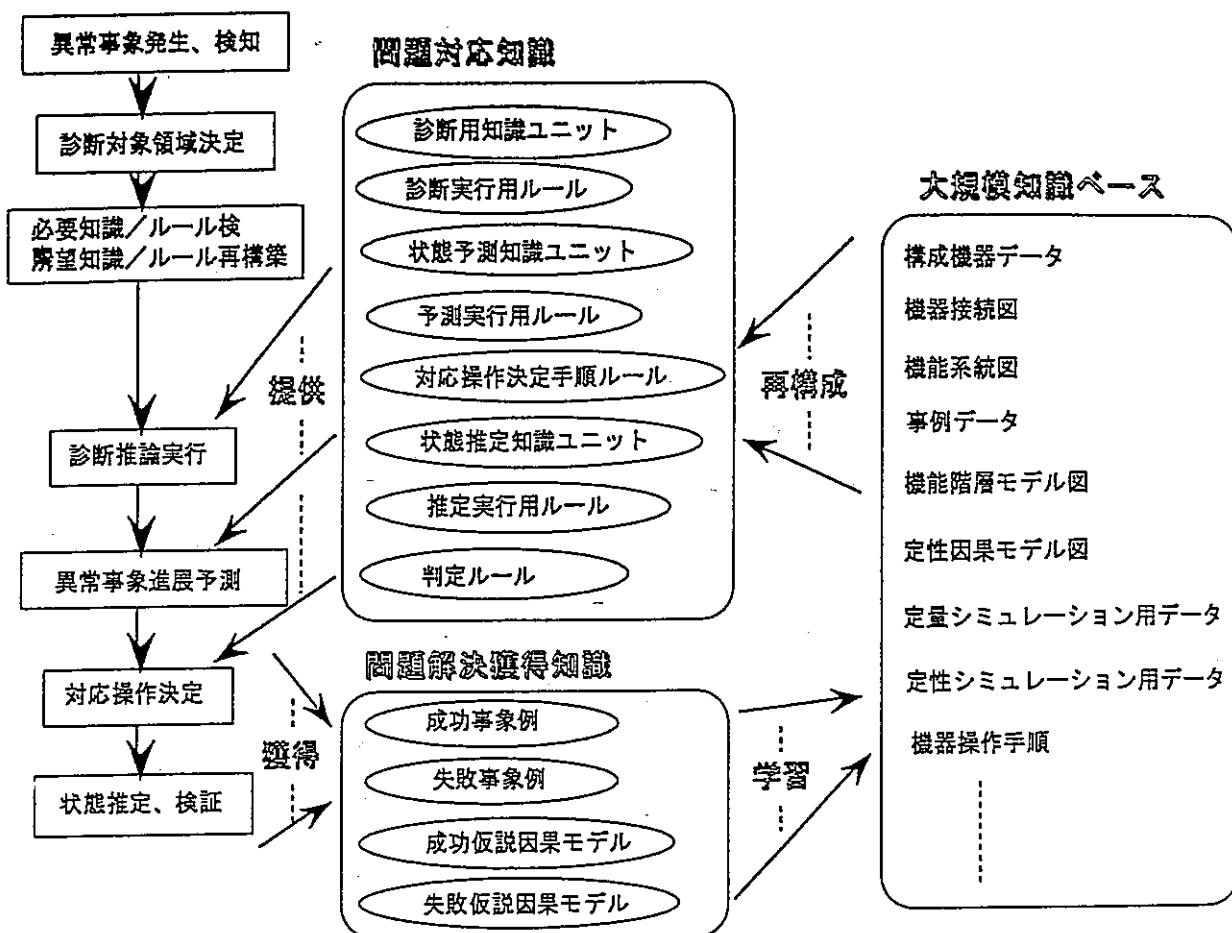


図 2.1 知識の再構成と学習

3 異常／事故事例に見る運転員操作と人工知能／知識の必要機能

次に、実際に発生した過去の軽水炉での具体的な異常／事故事例での運転員対応操作を分析し、こうした場合の知的運転制御システムにおける人工知能の問題点、課題というものを整理し、以て、知識に要求される機能について議論する。ここで取り上げた軽水炉事故事例は、関西電力（株）美浜発電所2号機（KMN # 2）と米国スリーマイルアイランド2号機（TMI # 2）の事例である。それぞれの異常／事故の程度を図22に示した国際評価尺度に照らすと、KMN # 2事故はレベル2の異常事象、TMI # 2事故はレベル5の事故と分類されるものである。

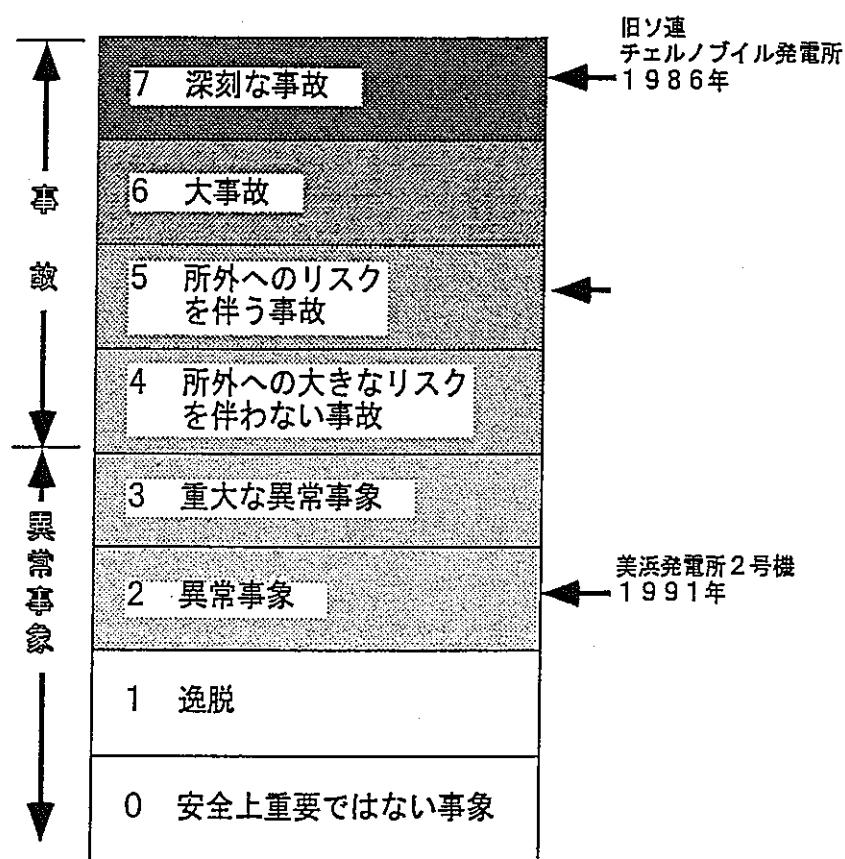


図22 原子力発電所の事象の国際評価尺度

KMN # 2の場合は、適切な運転員操作により事故拡大が防止されたとされ、TMI # 2の場合は、運転員操作が不適切であったため事故拡大を許したとされるものである。この2つの事故事例において、現実の事象展開に対する運転員の対応操作を検証していく中で、人工知能の場合にはどうであったか、また、こうしたケースに際して人工知能の役割と課題とは何か、さらに、この人工知能における知識の役割と課題についても検討した。

3. 1 KMN# 2 の場合

KMN# 2 の事故とは、1991年2月9日13:00頃に関西電力（株）美浜発電所2号機（2ループPWR、電気出力500MW）において、蒸気発生器伝熱管部施工上の問題により、冷却材流動により伝熱管が損傷した、というものであった。事故の概略経緯⁽²⁾は、2月9日13:40に復水器空気抽出機ガスモニタ警報発生に始まり、13:50に「加圧器圧力低」信号により原子炉自動停止、「加圧器圧力低&加圧器水位低一致」信号により緊急炉心冷却装置（ECCS）動作、14:02にAループ蒸気発生器隔離、翌日2月10日6:00に原子炉1次系冷態停止が無事完了した、というものである。では、具体的、かつ、詳細に事故経緯と運転員の対応操作を見てみることにする。それを示したのが、図23-1から図23-7である。

1991年2月9日

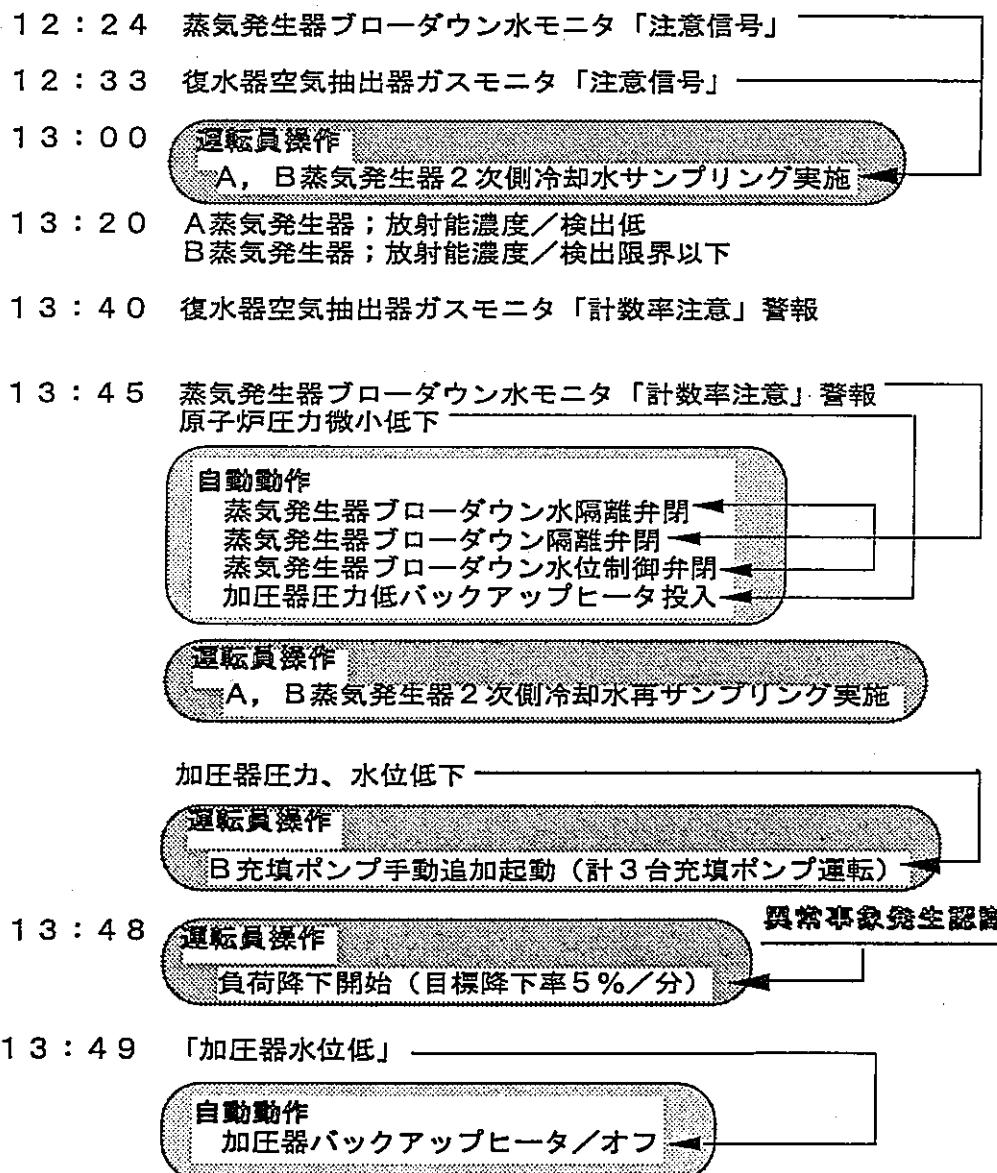
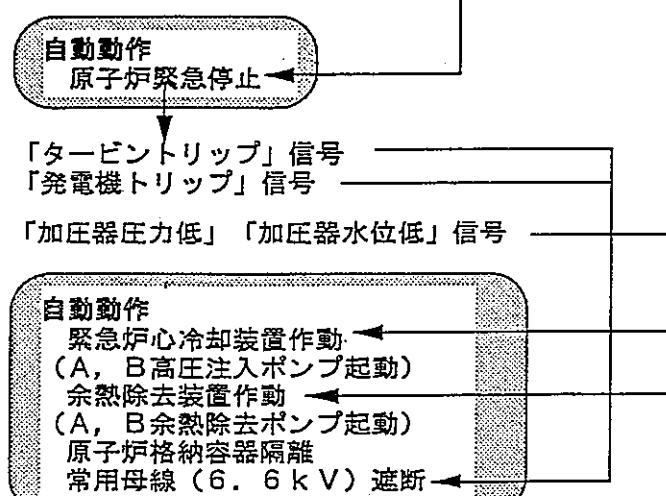


図23-1

図23 KMN# 2事故事象進展と対応操作

13:50 復水器空気抽出器ガスモニタ「計数率高」警報
 「加圧器圧力低」信号



13:55 蒸気発生器プローダウン水モニタ「計数率高」警報

A蒸気発生器に異常発生と判断

14:02

遠転員操作
A蒸気発生器隔離実施
(主蒸気隔離弁閉実施)

主蒸気隔離弁閉不完全(中制室より遠隔操作)

14:05

遠転員操作
原子炉1次系冷却開始

B蒸気発生器主蒸気逃し弁手動開

対応操作マニュアル

【設計】

原子炉緊急停止

1次系冷却材ポンプ自動停止

運転員操作
常用母線手動復旧
(1次冷却材ポンプ、
循環水ポンプ再起動
のため)

図23-2

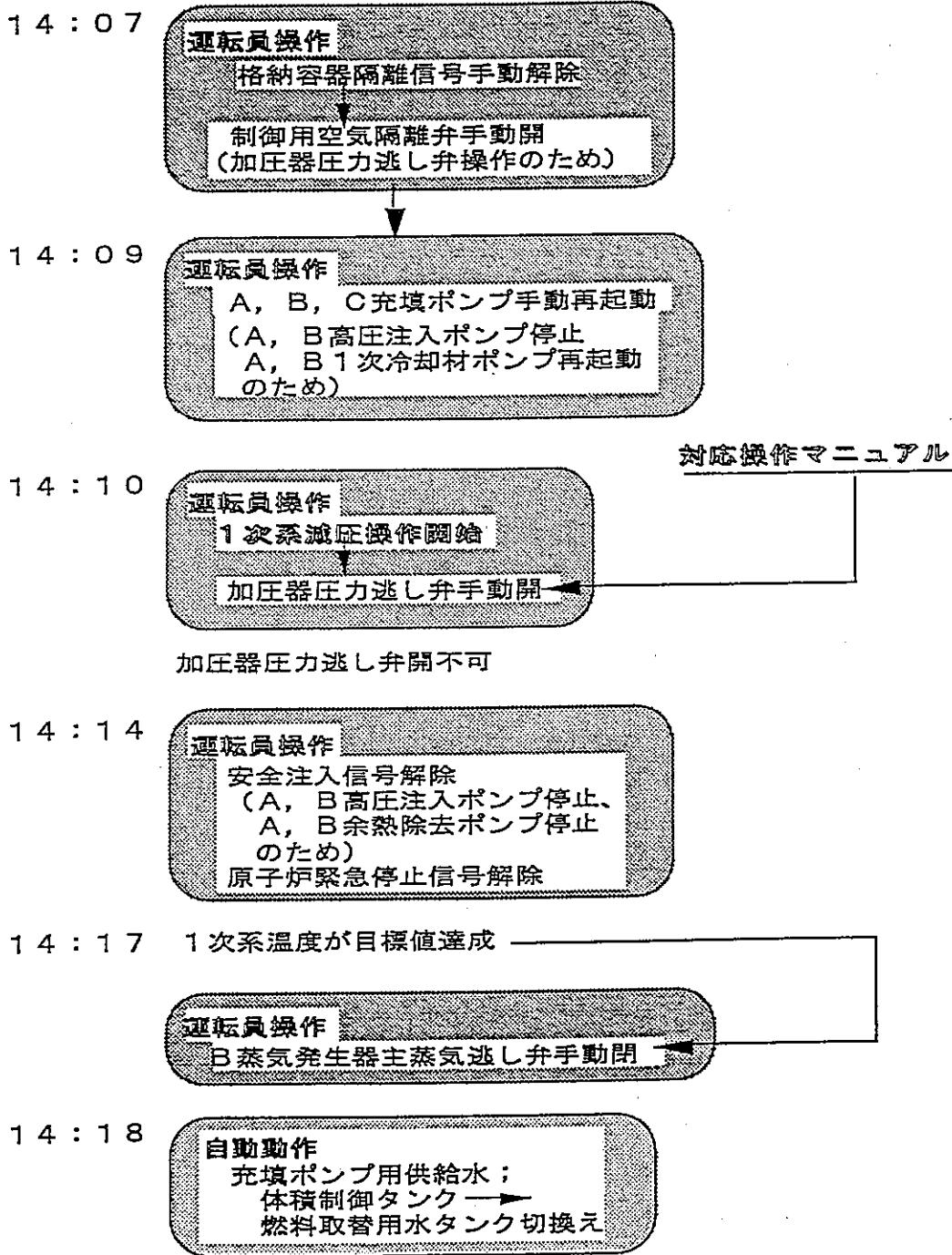


図23-3

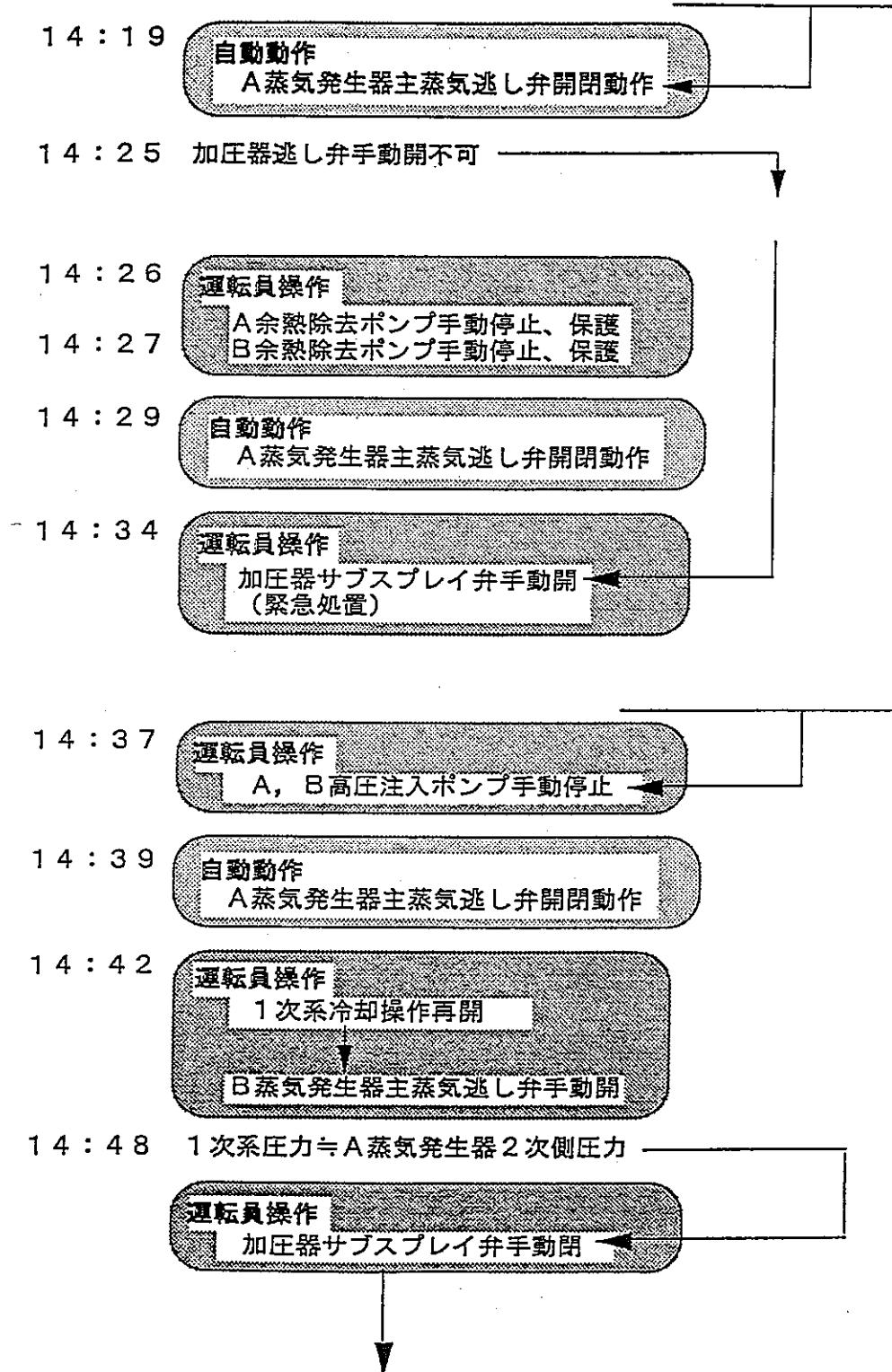


図23-4

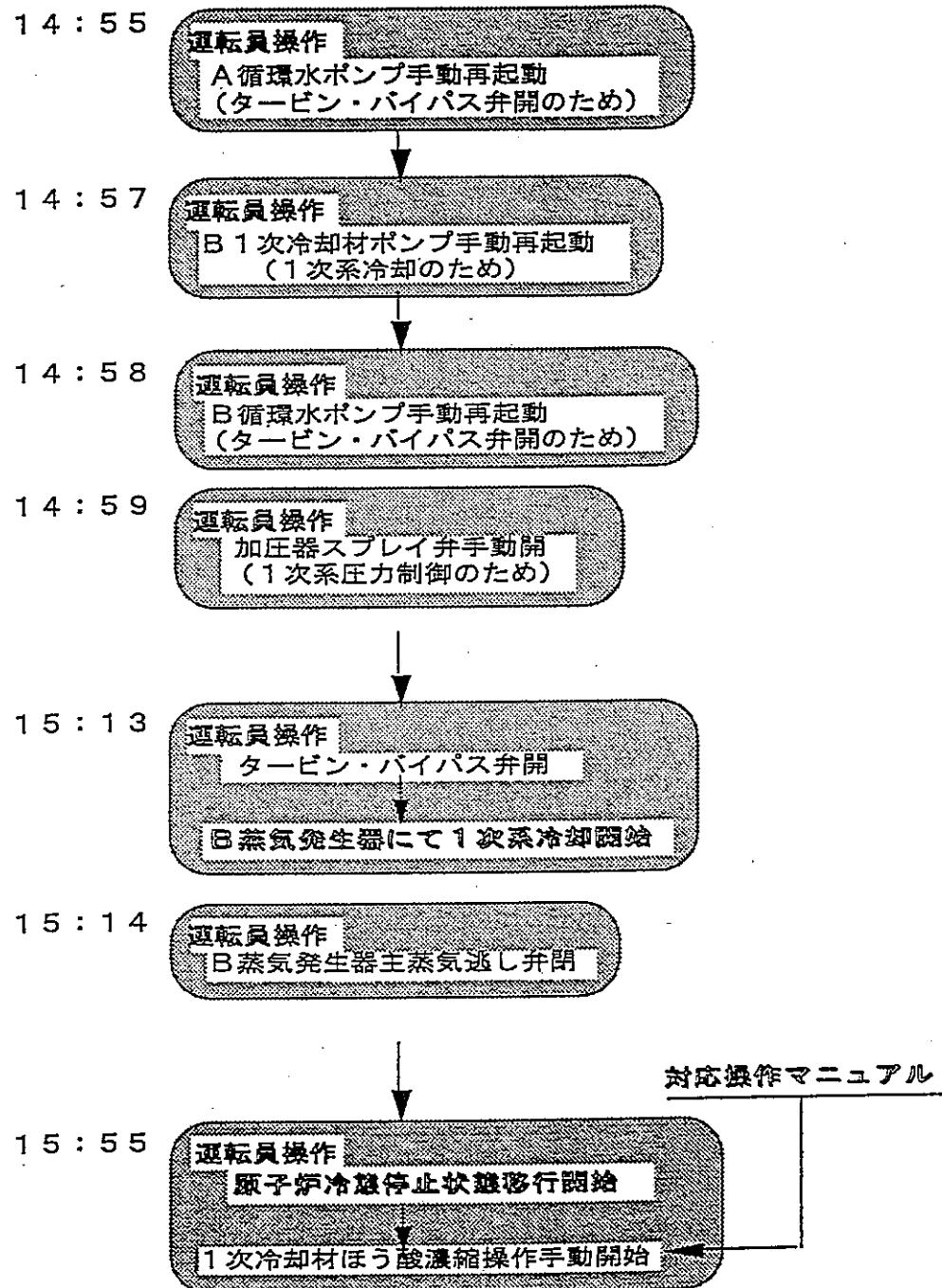
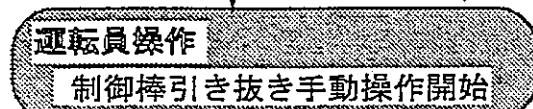


図 23-5

16:18 ほう酸濃度=所定濃度

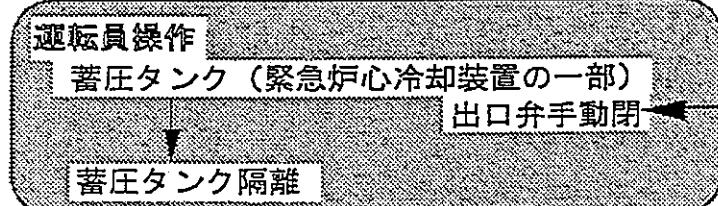


16:24

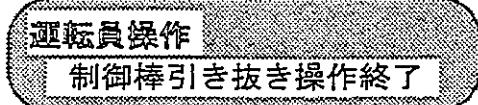


対応操作マニュアル

16:26



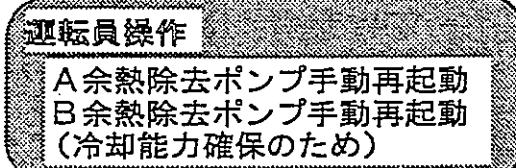
16:32



20:11 A蒸気発生器「水位異常低」信号

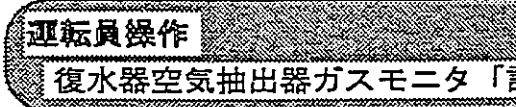


22:01



冷却停止移行順調と判断

23:17



23:28

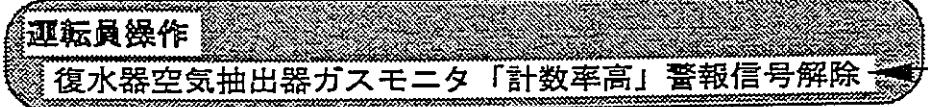


図23-6

1991年2月10日

02:30 1次系冷態停止到達

03:37

運転員操作

B 1次冷却材ポンプ手動停止

04:05

運転員操作

加圧器サブスプレイ弁手動開
(加圧器頂部冷却のため)

06:00 1次系冷却完了

温度=40°C、圧力=17kg/cm²

図23-7

これらの図からわかるように、運転員は事象の進展に対して分刻みの極めて短時間の間に次々と起こる事態の状況を認識し、判断を下し、対応操作を決定し、具体的な操作を実行している様子がわかる。このように事故時においては、運転員は非常に厳しい、過酷な状況下に置かれており、その果たすべき責務、責任を考慮すると、運転員の役割を人工知能で代替していくことの必然が見える。事故時における運転員の対応操作を、その判断と決定の根拠となった事象、運転員知識、計測モニター値などの観点から整理し直したものが図24である。

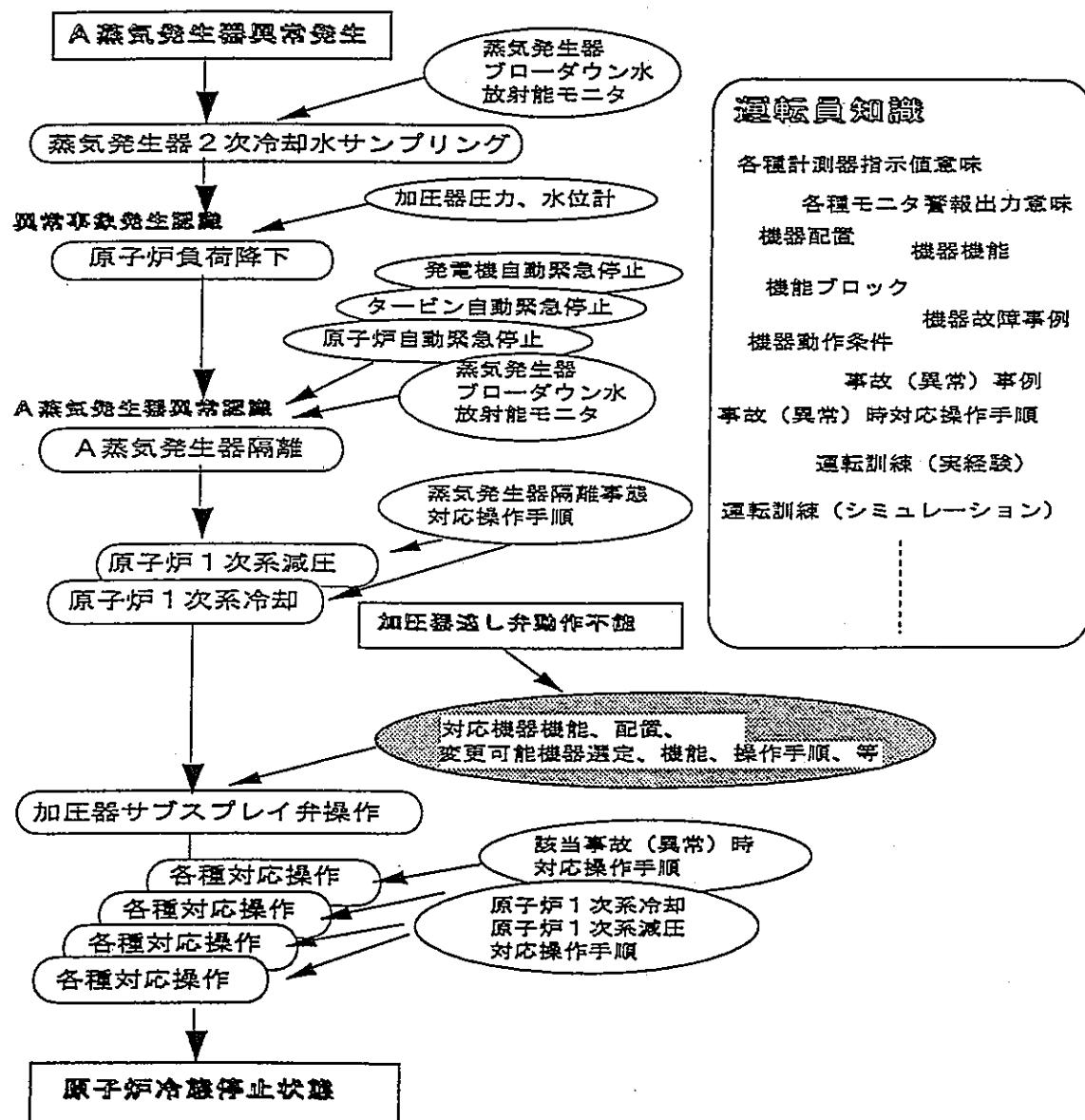


図24 KMN #2事故事例における運転員操作

ここで、注意すべきはほとんどの対応操作がマニュアルに従ったものといえるが、ただ、加圧器逃し弁動作不能という不測事態に対する対応処置は、運転員のプラント、機器機能に対する持てる知識を動員して、これに代わる代替機器として加圧器サブスプレイ弁を選択、操作し、加圧器逃し弁開と同等の機能を果たし得た。KMN # 2の場合、この

ことが無事に事故終息を可能なものとした大きな要因であろう。図25には、KMN #2事故事例の場合の運転員を人工知能に代替したときに期待される効果と問題点、課題を整理した。

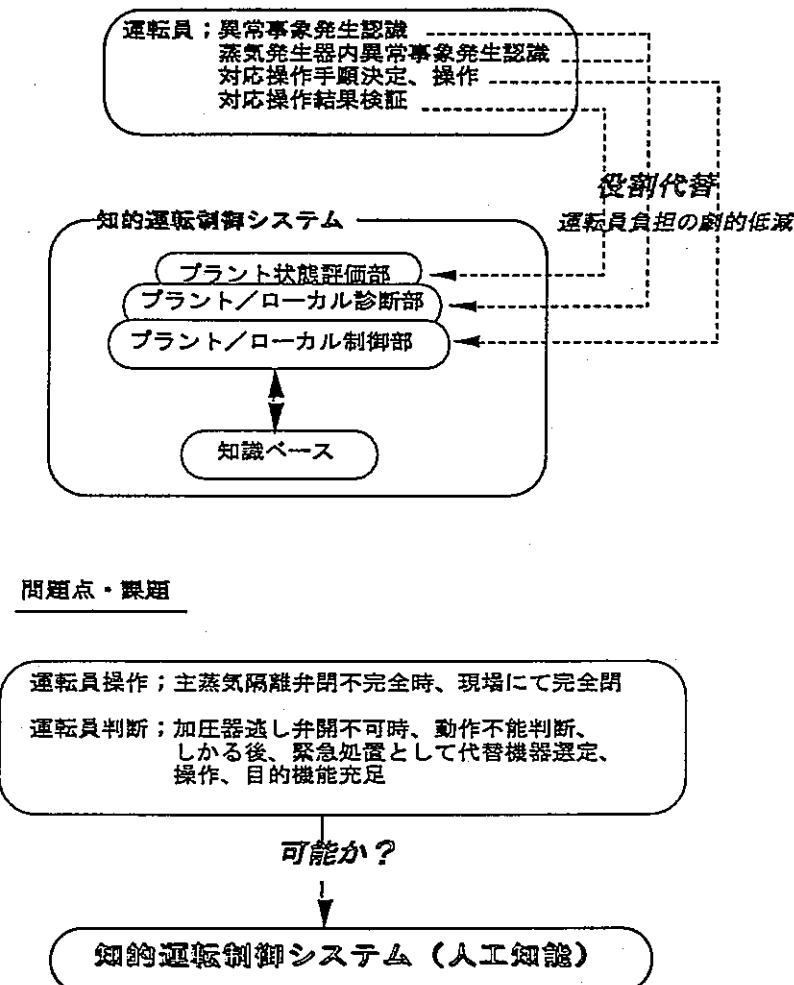


図25 KMN #2事故事例での人工知能への期待と課題

運転員を過酷な事故対応状況から解放し、運転員の負担を劇的に低減できる効果はあるものの、前述のある機器動作が不能となった場合の代替機器を選定し、操作することによって事故拡大を未然に防止するという機能が果たし得るか、という課題も同時に提示している。特に、機器接続、機器機能等に関する知識から代替機器を選択するための知識、ルールの構築が必要であることを示唆している。

3. 2 TMI #2の場合

TMI #2の事故とは、1979年3月28日4:00頃に米国ペンシルベニア州スリーマイル島発電所2号機（2ループPWR、電気出力959MW）において、加圧器逃し弁の故障によるいわゆる小破断冷却材喪失（LOCA）が発生し、いくつかの運転

操作上の誤判断、誤操作によって炉心損傷にまで至った、というものであった。事故の概略経緯^{(3) (4) (5)}は、3月28日4:00に復水器ポンプ、給水ポンプが緊急停止し、同時にタービン、原子炉緊急停止が起こり、4:03蒸気発生器2次側がドライアウト、ただちに緊急炉心冷却系（ECCS）が作動、その後、運転員のECCSの早すぎた停止、1次主冷却系ポンプの停止などにより、炉心温度が上昇、炉心損傷に至り、さらに、周辺環境への放射能漏れという重大事故に進展してしまった、というものである。では、このときの事象進展と運転員の対応操作について時間経過を追って示したのが、図26-1から図26-5である。

1979年3月28日

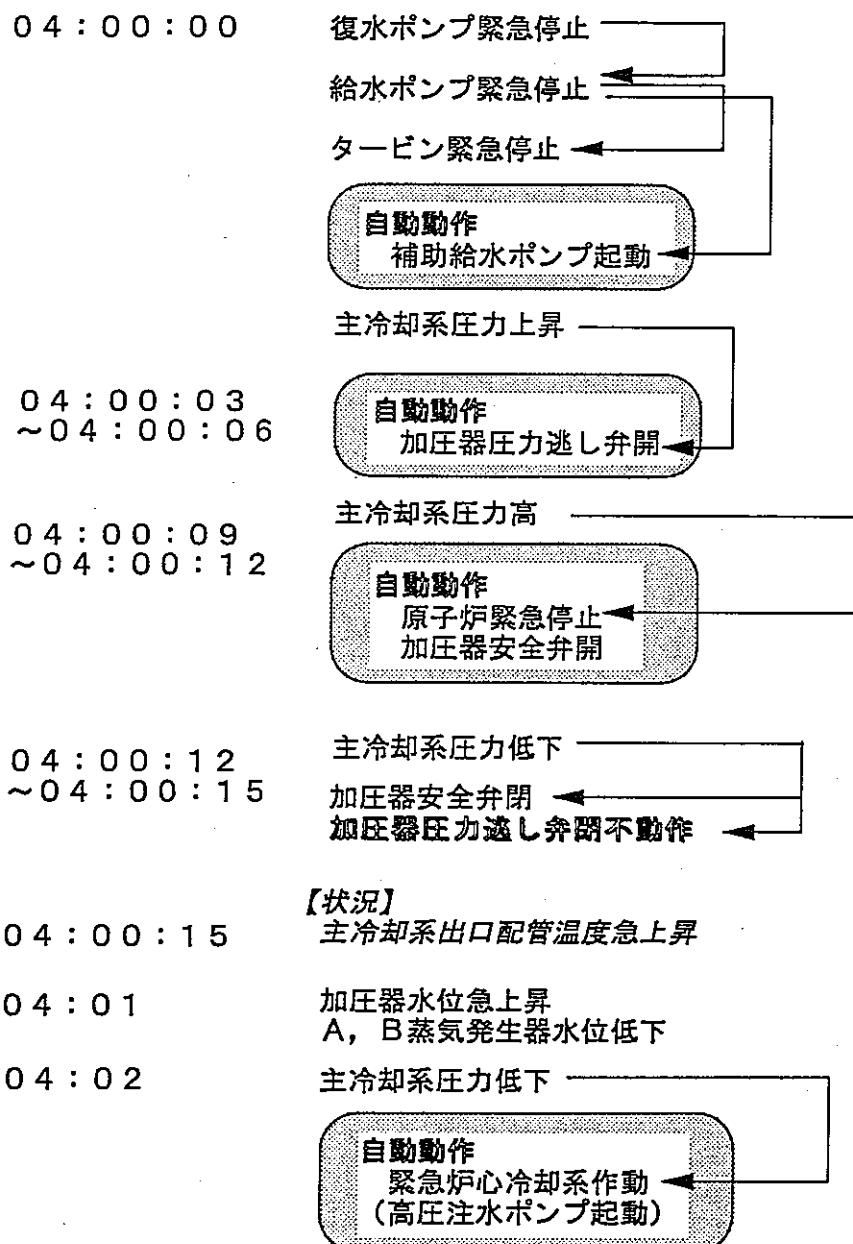


図26-1

図26 TMI #2事故事象進展と対応操作

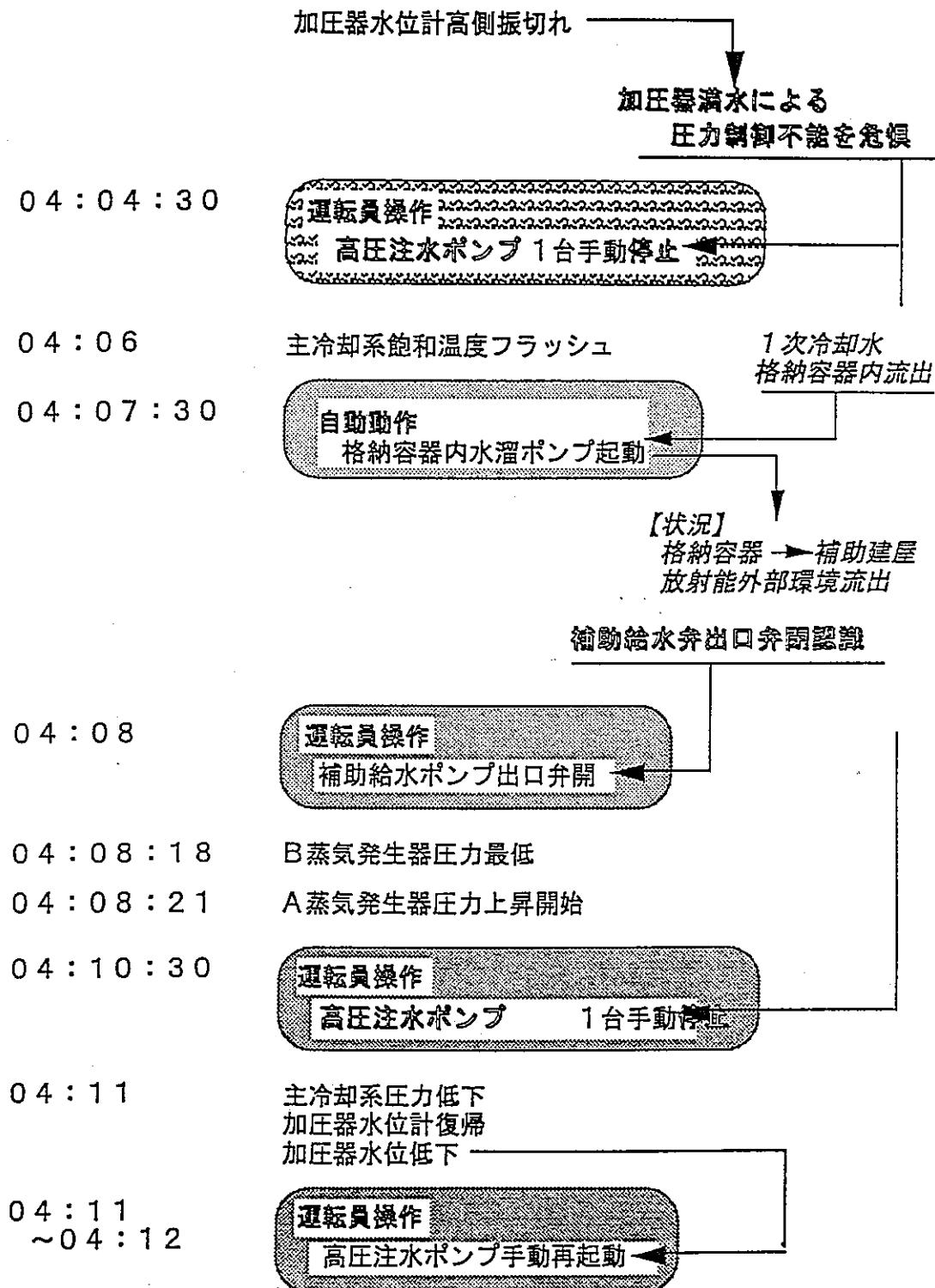


図26-2

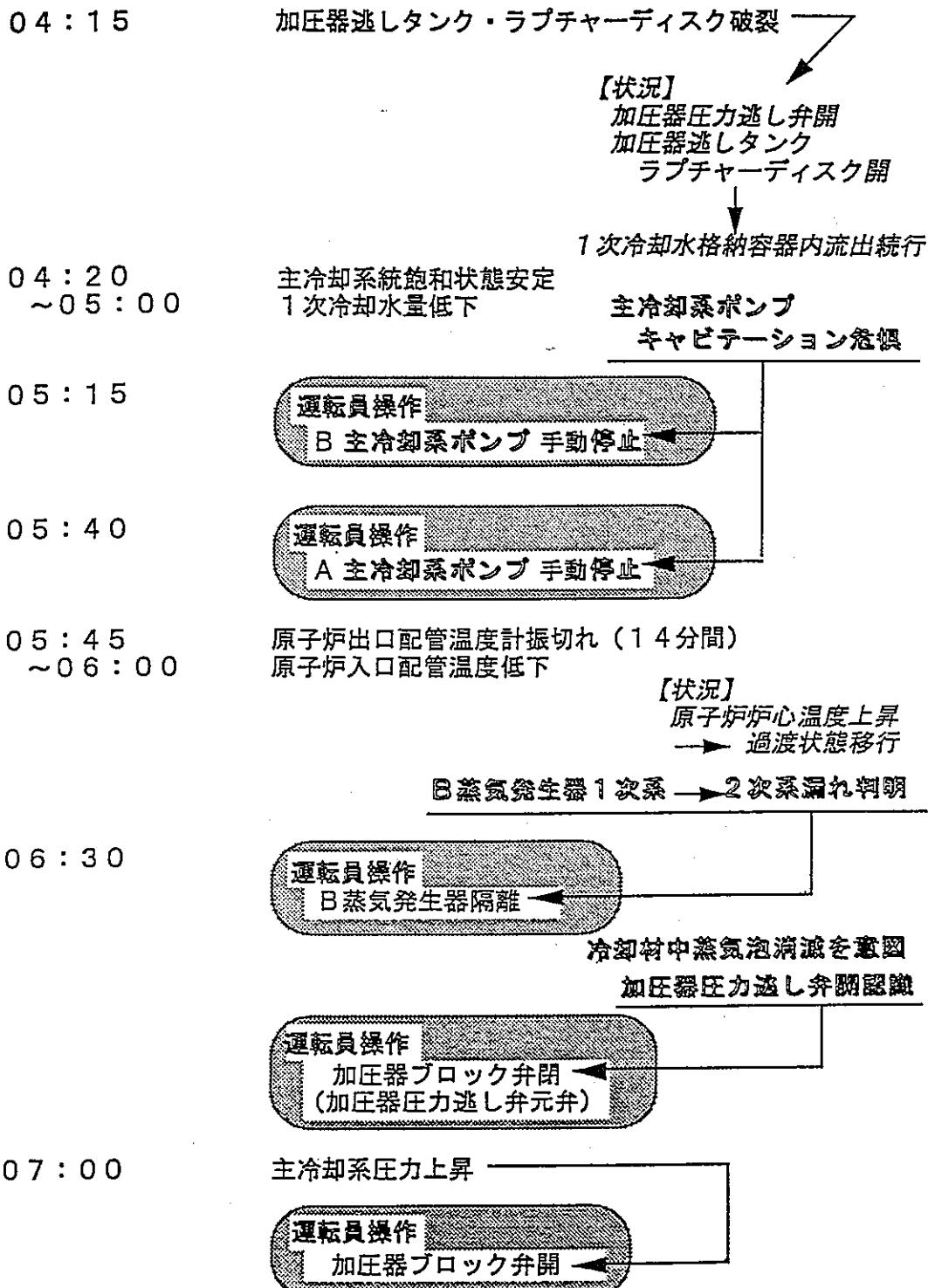


図26-3

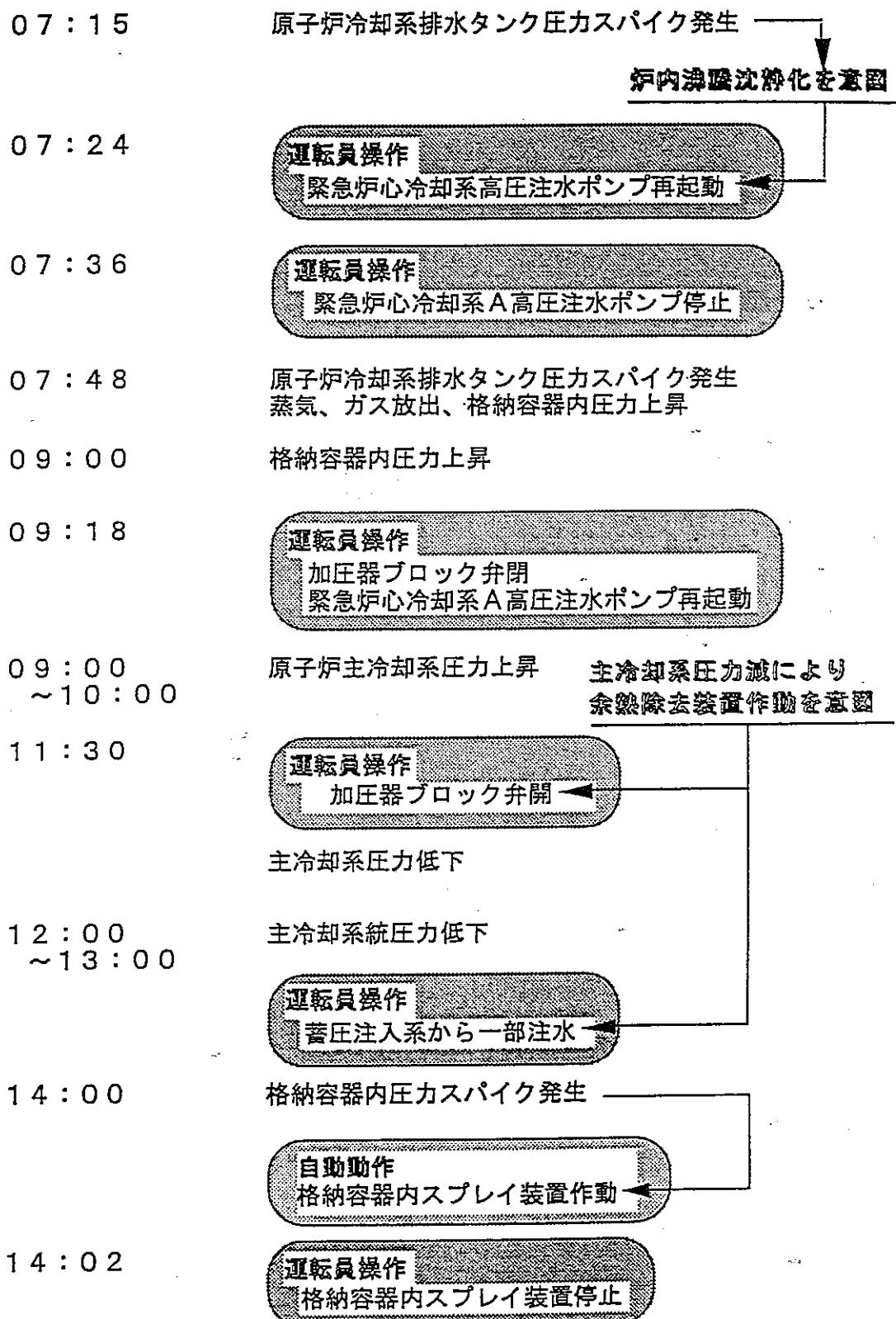


図 26-4

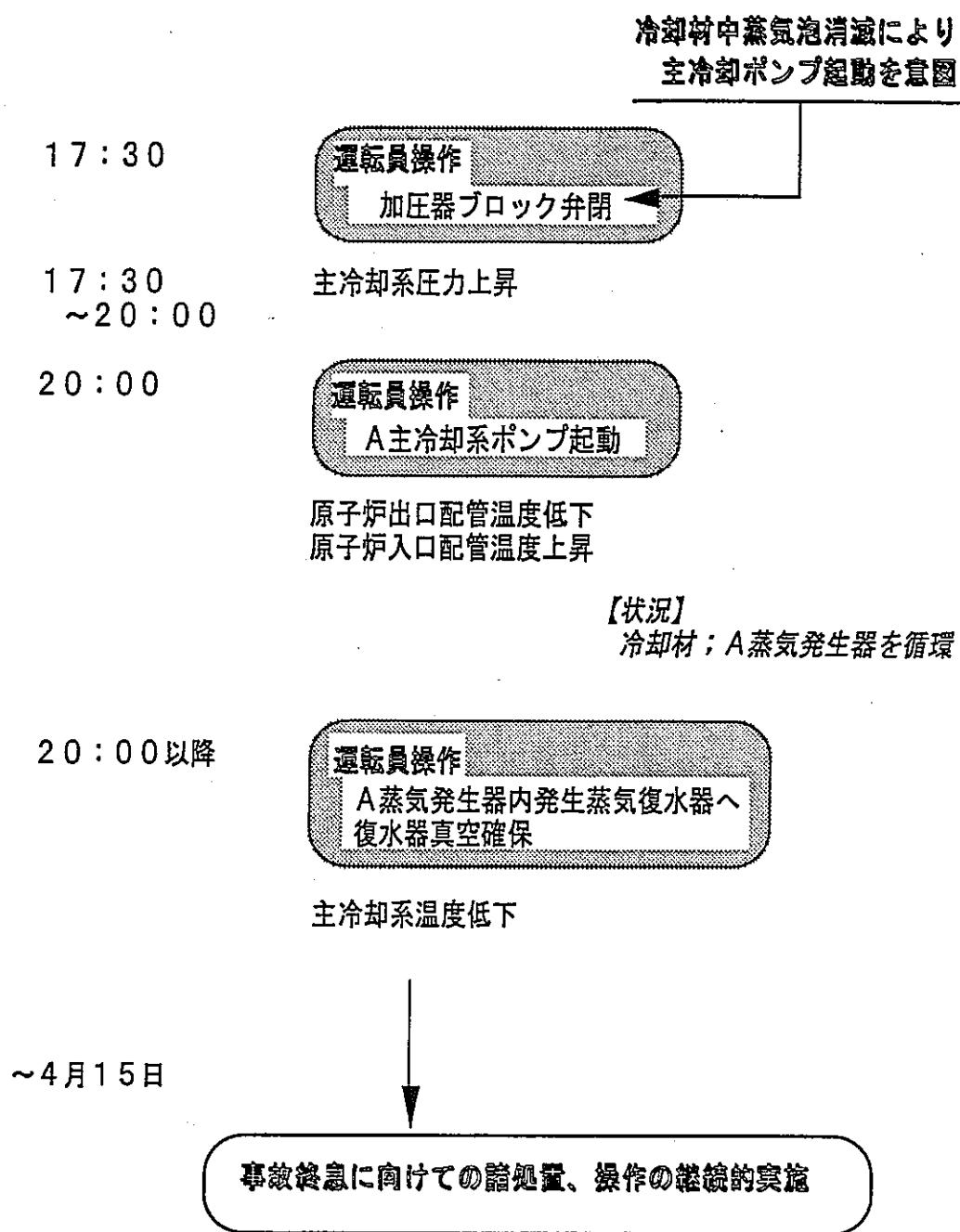


図 26-5

これらの図を見ると、事故発生の当初において、運転員が事態を的確に把握していない、運転保安規定違反があったなど不幸な推移をたどっている。しかし、その後の運転員の対応操作としては発生事象の状況から相当部分やむを得ない側面もあり、運転員の置かれた環境下において精一杯の努力を払っているといえる。事故拡大の原因全て運転員の誤判断、誤操作に帰因するのは、酷としかいいようがない。ここで、TMI # 2 事故が重大化した要因とされるものを整理し、事故後実施された事故対策を含めた諸施策をまとめたのが、図 27 である。

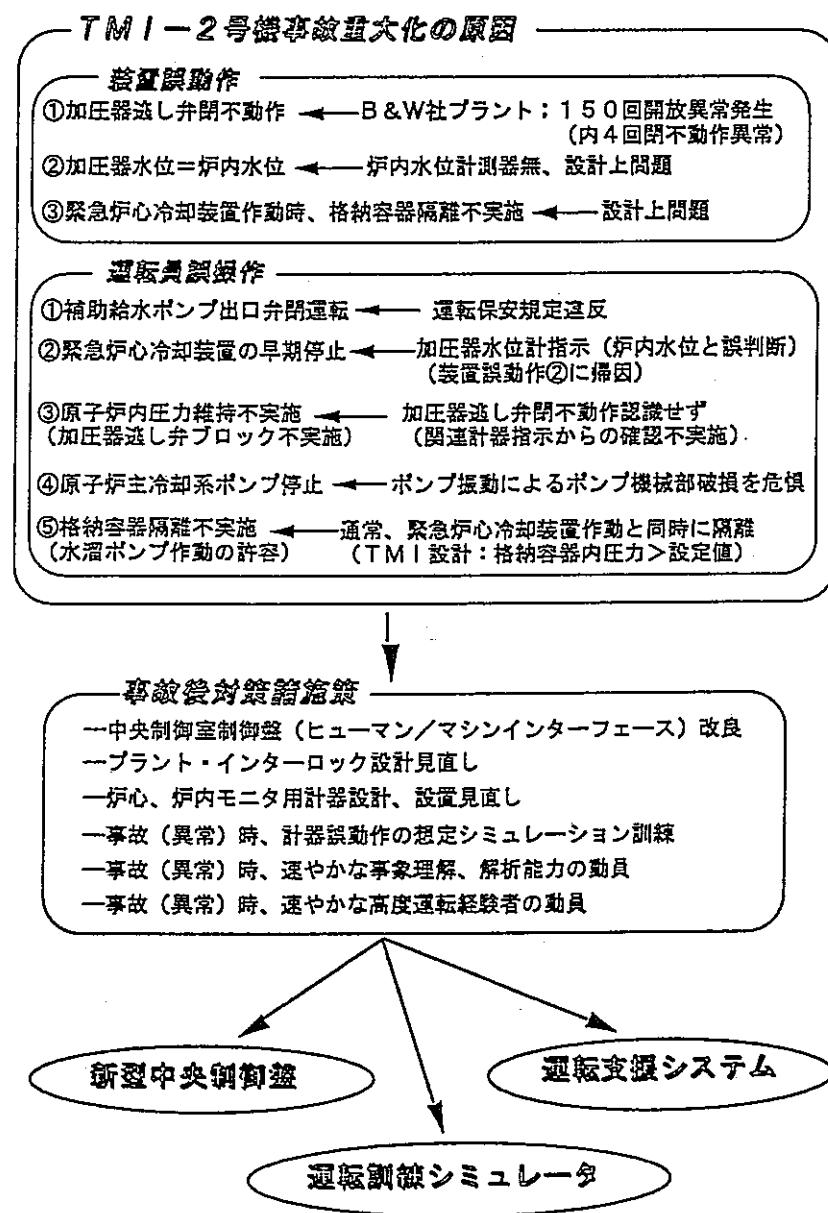


図 27 TMI # 2 事故重大化の原因

図に示したように、事故重大化の原因としては装置誤動作と運転員誤操作に分類される。このうち、加圧器逃し弁閉不動作については、B & W製プラントのこの種の弁で頻繁に

発生したとの事例があり、運転員はこのことから当該弁の不動作を疑つてみるということがあってもよかつた。また、加圧器水位を炉内水位と見なす、さらに、ECCS動作時に格納容器隔離が行われなかつたというのは、設計マニュアル上の問題として捉えられている。一方、運転員誤操作とされる一連のもののうち、明らかに運転員の誤判断、誤操作といえるのは、補助給水ポンプ出口弁閉のまま運転していたという運転保安規定違反と加圧器逃し弁不動作を確認せずに炉内圧力維持に努めなかつたという点である。炉心損傷にまで至つた1次主冷却系ポンプ停止については、ポンプ振動からポンプ機械部の破損を危惧したものとして、この状況下ではやむを得ない操作としかいいようがない。TMI #2の事故を契機として、図に記したように運転操作性の向上を目指した新型中央制御盤の開発、運転支援システムの開発が各国で精力的に取り組まれていった。TMI #2事故の場合について、もし、運転員を人工知能で代替していたとして、この事故の拡大は防止できたか、という観点で整理したのが図28である。

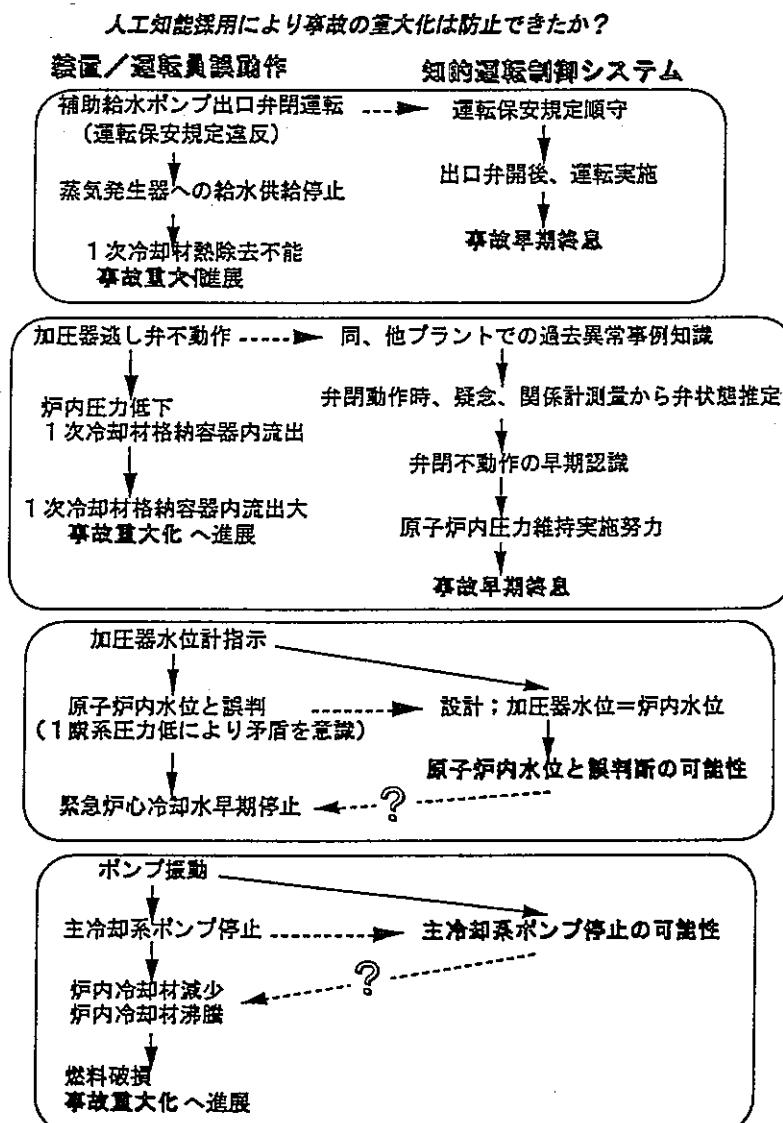


図28 TMI #2事故事例における人工知能代替の効果

各事故原因とされる点に対して、初期段階における事象、すなわち、運転保安規定違反運転、加圧器逃し弁不動作について有効に作用したと考えられる。しかし、加圧器水位から炉内水位を誤判断した点、ポンプ振動から1次主冷却ポンプを停止した点については、設計、運転マニュアルを基本として知識、ルール化されている人工知能でも同様、事故拡大の抑止にはつながらなかった可能性が大である。図29に、TMI #2事故事例での人工知能への期待と課題をまとめた。

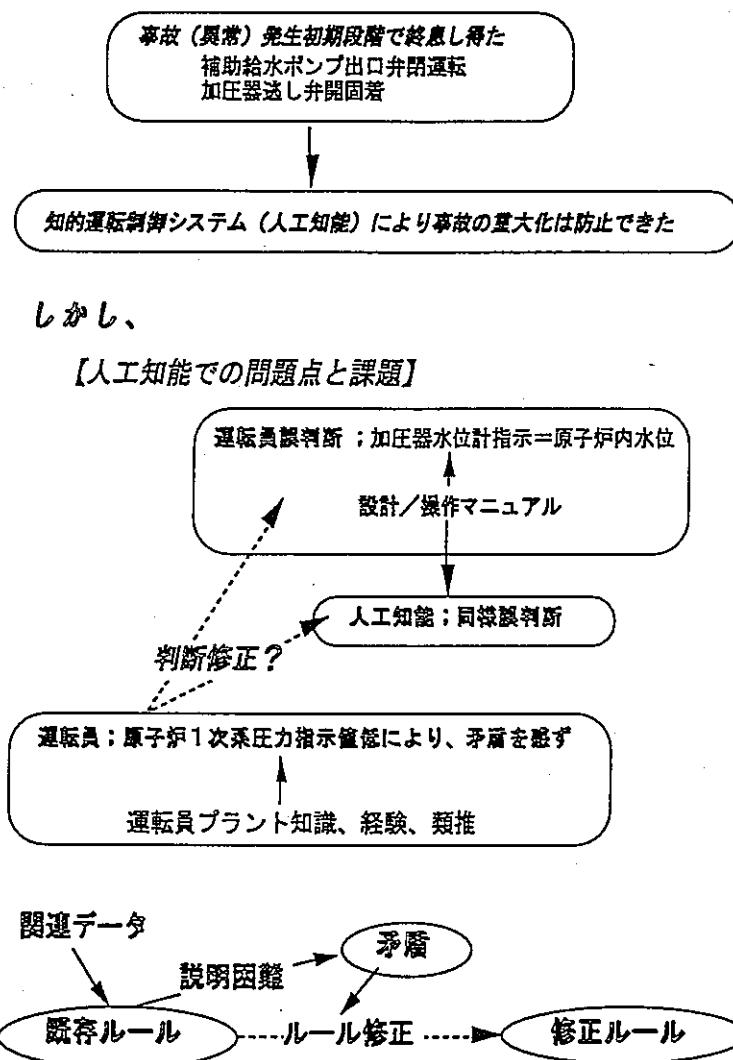


図29 TMI #2事故事例での人工知能への期待と課題

この事例では、実は、運転員は設計マニュアルにある加圧器水位と炉内水位とが等価であるということに疑問をもったことが知られている。すなわち、運転員は加圧器水位と炉内水位とが等しいとしたとき、原子炉1次系圧力の指示値が低すぎることに気がついている。このことから、加圧器水位と炉内水位とは異なるのではないかとの疑惑を抱きつつも、設計マニュアルに反してまでの判断、対応操作を実施するまでには至らなかつた。この運転員の疑惑は、プランに関する知識、経験、類推から導かれているもので、

極めて重要である。知的運転制御システムでは極力可能な範囲で運転員の役割を人工知能に代替させていく。このとき、その知識構成、機能の中に、現に現れている現象が関連プロセス量と既存知識からだけでは説明できない場合、その既存知識の矛盾として認識し、既存知識、ルールを自ら修正、再構成していく機能を有することが要請される。これは、自らの依って立つ基本知識に疑惑をもち、その基本知識を絶えず修正すべきか否かというチェック機構を持たそうとする試みで、相当技術的なハードルは高いと思われる。しかし、TMI # 2事故の場合、プラント設計専門家でもない極一般的な運転訓練と教育を受けたのみの運転員がその持てる知識、経験から、設計マニュアル上の、いかえれば既存知識の矛盾を認識し得ていることに、上記機能の実現に対して期待を持つものである。

4. 結言

本報告では、自律型プラント、特に、その中の自律型プラント運転制御のための知的運転制御システムにおける、大規模・実時間知識ベースシステムの基本概念と具備すべき基本機能に関する構想と解決すべき技術課題とを検討した。検討にあたっては、現在、試作を進めている知的運転制御プロトタイプシステムにおける人工知能の役割と課題の整理とともに、過去の軽水炉での異常／事故事例での事象の進展に伴う運転員の対応操作の分析とその運転員を人工知能に代替した場合の期待効果、解決すべき課題の整理を実施した。その結果、知的運転制御システムにおいて期待される大規模・実時間知識ベースの基本概念としては、概ね下記の通りであった。

- ①通常運転モードはもちろん異常／事故運転時モードに対しても、従来、運転員がその持てる知識と経験によって行ってきた事象に対する認知、判断、対応操作決定、実施を人工知能に代替させる。ただし、自律型プラントでは範疇としない想定外事象に対しては、人間（運転員）が対応するということから、機械と人間の協調、共同動作による問題解決が可能なものとする。
- ②異常／事故事象としては、既にその推移シナリオが確定、予想されるものののみではなく、未知、未経験事象に対しても対応する。ここでの、未知、未経験事象とは、上記の想定外事象が定義し得るも起こるべからざるものとして設計当初から除外、想定しないものであるのに対し、起こることが予想されなかつた、あるいは、その進展が予想外であったというもので、一旦、経験すれば想定内の既知事象として知識化され、経験、既知事象となるものである。
- ③診断、運転制御において、事象の難易度にもよるが、粗いけれど間違っていない解答を出しつつ、知識自身が徐々に洗練されていく、あるいは、推論過程での成功、失敗例を事例ベースとして知識の学習効果により洗練されていくという柔軟なシステム構成をとる。
- ④知識の大規模化と実時間性の両立のため、各エージェントがタスク実行に必要な推論ルール、モデル自身を共有知識群から必要なときに動的に合成、再構成する、いかえれば知識コンパイルにより次々と作り替えていく、さらに、学習による知識の更新、追加を繰り返しつつ、知識をリファイン化が可能なものとする。
- ⑤知識の共有化を推し進め、同時に上記の知識コンパイル機能により、実体的に汎用、共通知識部分のコンパクト化を実現する。
- ⑥異常／事故事象に対応して推論、対応操作決定に許される許容時間、あるいは、緊急度といったタスク特性によって、推論、対応操作決定のデッドラインを意識したこの許容時間内に、ともかくも間違ってはいない範囲で最善の解が出せるものとする。
- ⑦ある事象に対して、例えば、関連プロセス量の値などが保有する既存知識、ルールでは説明のできない様な場合、既存知識、ルールの矛盾として認識し、この矛盾解消の方向に既存知識、ルールを修正が可能なものとする。

また、この基本概念を実現するために知識ベースシステムが具備すべき必要機能として、下記の機能が挙げられた。

- ①マンマシンシステムによる円滑な機械と人間との協調動作による問題解決機能
- ②過去の事例ベース学習による知識の更新、追加機能
- ③共有知識からの知識コンパイルによる必要知識の動的合成と再配列機能
- ④診断推論、制御戦略決定でのタスク特性に対応した柔軟な即応的問題解決機能
- ⑤既存知識の矛盾検知機能と矛盾解消のための既存知識の修正機能

5. 今後の課題

自律型プラントシステムにおける大規模・実時間知識ベースシステム構築にあたって、解決すべき技術課題、さらには、研究開発実施にあたっての検討課題は多岐にわたる。とりわけ、人的、物的、予算的に限られたリソースの中での大規模・実時間知識ベース開発にあっては、何がブレークスルー技術かを見極め、戦略的にどの部分を攻撃ターゲットとするかを決める必要がある。現時点で考えられる上記観点からの技術的な戦略ターゲットとしては下記に示すものが挙げられる。

- ①大規模で、かつ、実時間性を追求する自律型プラント向け知識ベースにとっては基本的、重要な技術である知識の動的合成、再構成と学習による知識の更新によるリファイン化
- ②自律型プラントにおける人工知能と人間(運転員)との望ましい関わり合い方の決定と、それを実現するマルチメディア化されたマンマシンシステム構築
- ③知的計測、計装を通した高次知能の補助的実現による全体システムの負荷配分の適正化

①については、その技術的な課題を抽出し、方法論と手順について何らかの知見を具体的に提示できれば大きなブレークスルーの一つとなり得るのではないかと考える。ただしこの場合、現在の計算機能力の飛躍的発達を考えたとき、知識ベースシステムに詰め込むだけ知識を詰め込んで計算機による虱潰し探索とどちらが有利かを考えておく必要がある。

②については、人工知能がなし得ない、もしくは、現状では期待されていない高次の推論に対して、人工知能、知識ベースに頼りすぎないシステムとしていくために、高次、高度な推論に対してその推論過程の折々で人間が必要とする、あるいは、必要となるであろう知識、情報をビジュアルな形で提供するなど、過不足ない情報を的確に提供する機構は必要である。

③については、現状の自律型プラントにおいては、センサーに代表される計測、計装部分にあまり期待をかけない、センサーはただ単に物理状態量を正確に検出、出力すればよい、という割り切りになっている。しかし、今後、センシングの部分で单一、もしくは、いくつかの組み合わせによって、ある程度のローカル診断を実行し、その推論、診断結果を上位の人工知能システムに提供していくことが望ましいとも考えられる。大型のメインフレームに過度の負荷をかける、あるいは、期待するというやり方ではなく、システムのダウンサイジング、オープン化を図っていくことも、今後の自律型プラントのあり方を考えていく上で検討すべきと考える。

6. 謝辞

本報告をまとめるにあたっては、平成7年度に動燃主催で開催された「大規模・実時間知識ベースに関する研究会（第1回～第4回）」での議論を参考にした。主査の東北大・北村正晴教授、奈良先端大・西田豊明教授、京大・榎木哲夫助教授、NEC・渡辺正信氏、三菱総研・鷲尾隆氏の委員各位の議論、示唆に負うところ大である。また、原子力システム・瀬谷義一氏、山本裕史氏にはこの研究会の議論の詳細な資料の整理などを担っていただいた。これらの方々に深甚の謝意を表したい。

7. 参考文献

- (1) 小澤健二他：「知的運転制御システムの開発」，電気学会原子力研究会資料，資料No. NE-95-15 (1995)
- (2) 桜井淳：「美浜原発の技術論」，原子力工業，Vol.37, No.6 (1991)
- (3) 山田太三郎：「TMI 2号炉事故その発端から気泡との闘いまで」，原子力工業，Vol.25, No.6 (1979)
- (4) 高橋博：「TMI原発事故一技術面からの考察一」，原子力工業，Vol.25, No.8 (1979)
- (5) 村上隆：「TMI事故特別調査委（ケメニ一委）報告の詳細」，原子力工業，Vol.26, No.2 (1980)