

知識工学の原子炉への応用

Application of Knowledge Engineering to Nuclear Reactors

大規模プラントの監視、制御へ知識工学を適用するためには、プラントの動的挙動を高速で取り扱える新しい知識工学の技術が必要である。そこで、動的挙動を評価、予測するための数値処理と推論のための記号処理を融合し、また知識情報の表現を構造化し推論を高速化した新しい手法を開発し、これを応用したプラント運転ガイダンス、自動制御システムの基本技術を開発した。

原子力発電プラントを対象に、シミュレーション試験によりこれらのシステムの基本性能を評価し、異常診断や運転操作のガイダンスなどに有効であることを確認した。ここで開発した技術は、原子力分野だけでなく、化学プラントなどの産業プラントに広く適用可能なものである。

木口高志* *Takashi Kiguchi*
木下光夫** *Mitsuo Kinoshita*
丹治順一** *Jun'ichi Tanji*
元田 浩*** *Hiroshi Motoda*
福西宏有*** *Kôyû Fukunishi*

1 緒 言

一般に、大規模プラントの異常診断や運転制御では、プラントで測定される種々の観測量やアラームの生起状態などからプラント状態の特徴を大局的に把握し、その状態に対応した適切な判断・操作を実施することが重要である。これらは従来、経験を積んだ技術者や運転員の知的活動の一部として実現されていたが、人工知能の研究成果として開発された知識工学の技術を応用すれば、計算機化できる部分もあると期待される。特に、このような技術が医療診断に有効であることが示されて以来、工学システムへの応用研究が急増している。

本論文では、知識工学を応用したプラント診断、制御の新しい技術を開発し、原子力発電プラントの運転ガイダンスや自動制御を対象にシミュレーション試験により評価した結果を報告する。

2 知識工学の適用に期待される効果

知識工学は、専門家が問題解決に当たって使用する知識を計算機に与え、その知識を使い推論によって問題を解決する技術である。従来の方法が処理手順のアルゴリズムをプログラム化(数値処理)するのに対し、問題を解くために知っていなければならないこと(知識)と、推論処理を行なう部分(記号処理)とを独立させたところに特徴がある。したがって、状況に応じて適切な知識が使用される、いわゆる事象駆動的な処理となる。

このような特徴をもつ知識工学を、プラントの診断や制御に適用することにより以下の効果が期待できる。

- (1) 熟練運転員の経験的知識を活用できる。特に、定性的、断片的かつ数値では表現しにくい知識を併用し、問題の解決を図ることができる。
- (2) 知識は一つのまとまった表現形式で記述され、それ自体が完結しているので、追加・修正により、システムとしての機能を向上できる。
- (3) 知識を入力することが、従来のプログラム開発に相当するので、ソフトウェアの開発工数を低減できる。
- (4) 推論プロセスを表現することにより、発生している現象に対する技術者、運転員の理解を助け、判断をより確実なものにすることができる。

のにすることができる。

3 運転ガイダンスシステム

3.1 システムの構成

運転ガイダンスの目的は、運転中に異常が発生した場合に、その原因は何か、どのような対応処置をとればよいかを判断するのに有効な情報を提供することである。原因の同定が診断であり、対応処置の提示がガイドである。

一般に、診断は異常兆候の検知によって開始され、図1に示す三つのステップで進められる(第3ステップ「テスト生成、評価」は、第2ステップ「原因候補の絞り込み」で原因が同定できなかった場合だけ必要)。運転員は、最初に、過去の経験や理論的考察から既に得られている、「もし～であれば、～に違いない」といった形の原因・結果の因果関係に関する知識(因果知識)を使った診断を試みる。これで結論が出せ

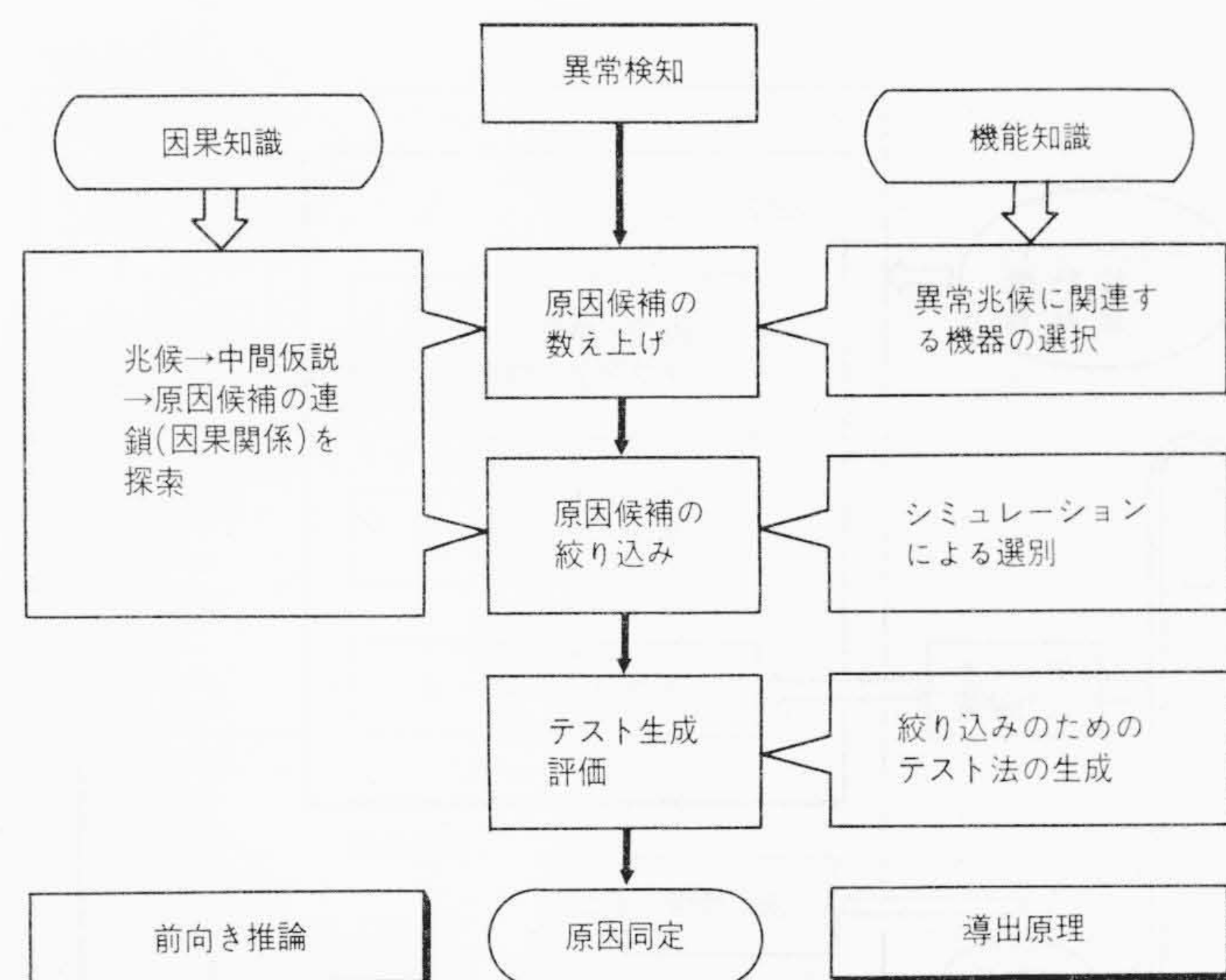


図1 異常診断プロセスの概要 異常が検知されると、原因と結果の因果関係の知識(因果知識)と、プラントの構造や機能に関する知識(機能知識)により、図のステップに従い原因を同定する。

* 日立製作所エネルギー研究所 工学博士 ** 日立製作所エネルギー研究所 *** 日立製作所基礎研究所 工学博士

ない場合は、プラントの構造や特性など機能に関する知識(機能知識)を使って、例えば、「このようなテストを実施すれば、二つのうちどちらが本当に異常かが理論的に分かるはずである」というような結論を引き出す。

このように、診断には一般に2種類の知識が用いられるが、前者の知識に関してはプロダクションシステムで用いられる前向き推論を、後者の知識に関しては述語論理に基づく導出原理による知識の演えき生成を利用できる。

原因が同定されれば、対応する操作は一義的に決まることが多いので、ガイド用の知識を因果知識と同じ形のルールで与え、プラント動特性シミュレータで将来の状態を予測しながら、前向き推論で次々にガイドを提示できる。

このような運転ガイダンスシステムでは、(1)プラントの状態が時間的に変化するため、時間依存性を適切に表現できなければならず、(2)オンライン処理可能な高速推論が要求され、(3)数値シミュレーション用の言語(例えばFORTRAN)と記号処理用の言語(例えばLISP)を併用して使う必要がある。

これらの要求を満たすように開発したプラント運転ガイダンスシステムの基本構成を図2に示す。このシステムの基本となる知識ベースには、プラント運転のエキスパートから抽出した2種類の知識(因果知識と機能知識)のほかに、プラントから周期的に取り込まれるプロセスデータも格納する¹⁾。推論機構は、これらの知識を用いて、診断やガイドに必要な前向き推論、導出などの処理をオンラインで実施し、結果は運転員に表示される。運転員は必要に応じて推論結果の根拠などを問い合わせることもできる。

一般に、推論処理の基本操作は、知識の探索、照合であり、オンラインシステム用の高速推論を実現するためには、これらを高速に実施する必要がある。そのため、ここで用いた知識ベースでは、知識をフレームで表現して格納する方式を採用している。フレームとは、対象とする事物に関する構造化された知識表現の手段である。例えば、あるシステムを表現する場合、そのシステムを構成するある一つの機器に対して、その種類、入出力ポートなどの属性を指定し、その属性の値

として他の機器(すなわち他のフレーム)の属性との関係を指定する。このように、直接、機器(あるいは構造)間の接続関係が表現されているため、検索が容易となり、高速推論が可能となる。

記号処理と数値処理の融合に関しては、共有メモリ管理機構とダイナミックリンク機構を導入した。この結果、図3に示すように、推論中にプロセスデータを取り込んだり、結果を表示したりするような非同期処理と、推論中にシミュレータを呼ぶような同期処理を可能とした。

3.2 シミュレーション結果の例

図4に、対象とした沸騰水型原子力発電プラントの主要系統、及び想定した異常事象である故障機器を示す。压力容器に内蔵される炉心で冷却水が加熱され蒸気となり、タービン・発電機で発電後、復水器で冷却されHPCP、LPCP(復水ポンプ)により加圧される。加圧された冷却水はRFP(給水ポンプ)で再び炉心に送り込まれる。同図中左側の諸系統は、異常・事故時の炉心冷却系統で、通常は待機状態にある。なお、本研究では、実際のプラントの代わりに動特性シミュレータを用いてプラントの異常事象を模擬し、前節で述べた運転ガイダンスシステムの動作を評価した。

用いた知識の例として、(もし～ならば～である)型のルール表現した因果知識を図5に示す。ここで、確信度は各ルールの確からしさを表わす指標であり、ルールの成立が全く不確かな0から、確実な1.0の間の数値をとる。

図5に示した二つのルールについて、計算機に入力する場合の表現例を、図6に示す。ここで、ルールは、

(if (条件部) (結論部)) (CF 確信度)

の構成で表現されており、更に、(条件部)、(結論部)は、andでつながれた複数の命題などから成り立っている。また、特にcontは時間の持続を、ANOMは異常信号を、outputは出力(状態)を、inportは入力(状態)を意味している。実際には、このようなルールは、入力されると直ちに、高速推論処理に適合したフレーム構造に変換されて、知識ベースに格納されることになる¹⁾。

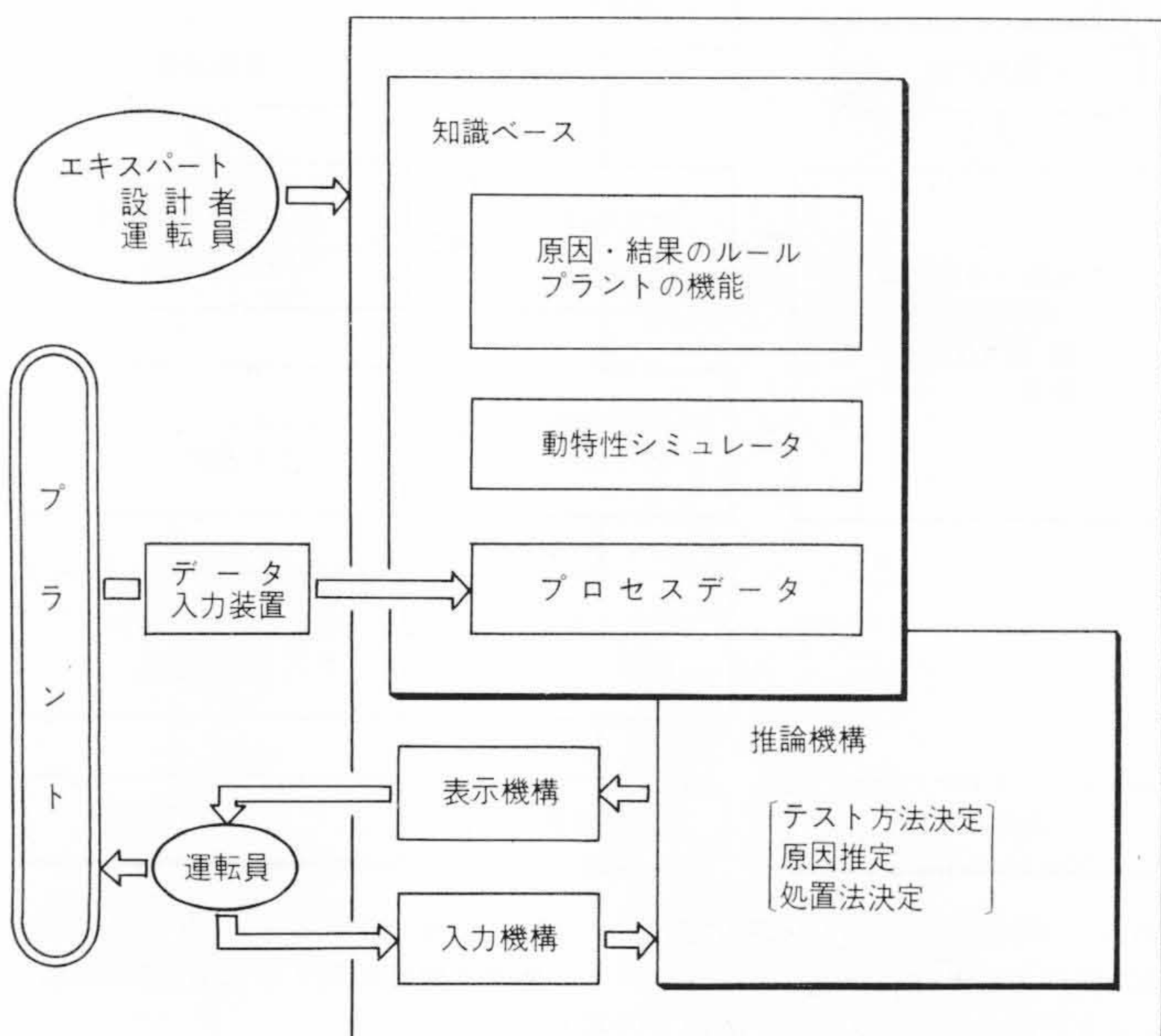


図2 プラント運転ガイダンスシステムの基本構成 知識ベースに格納された知識を用いて、推論機構は異常原因の推定、処置法の決定などを実施し、結果を運転員に表示する。

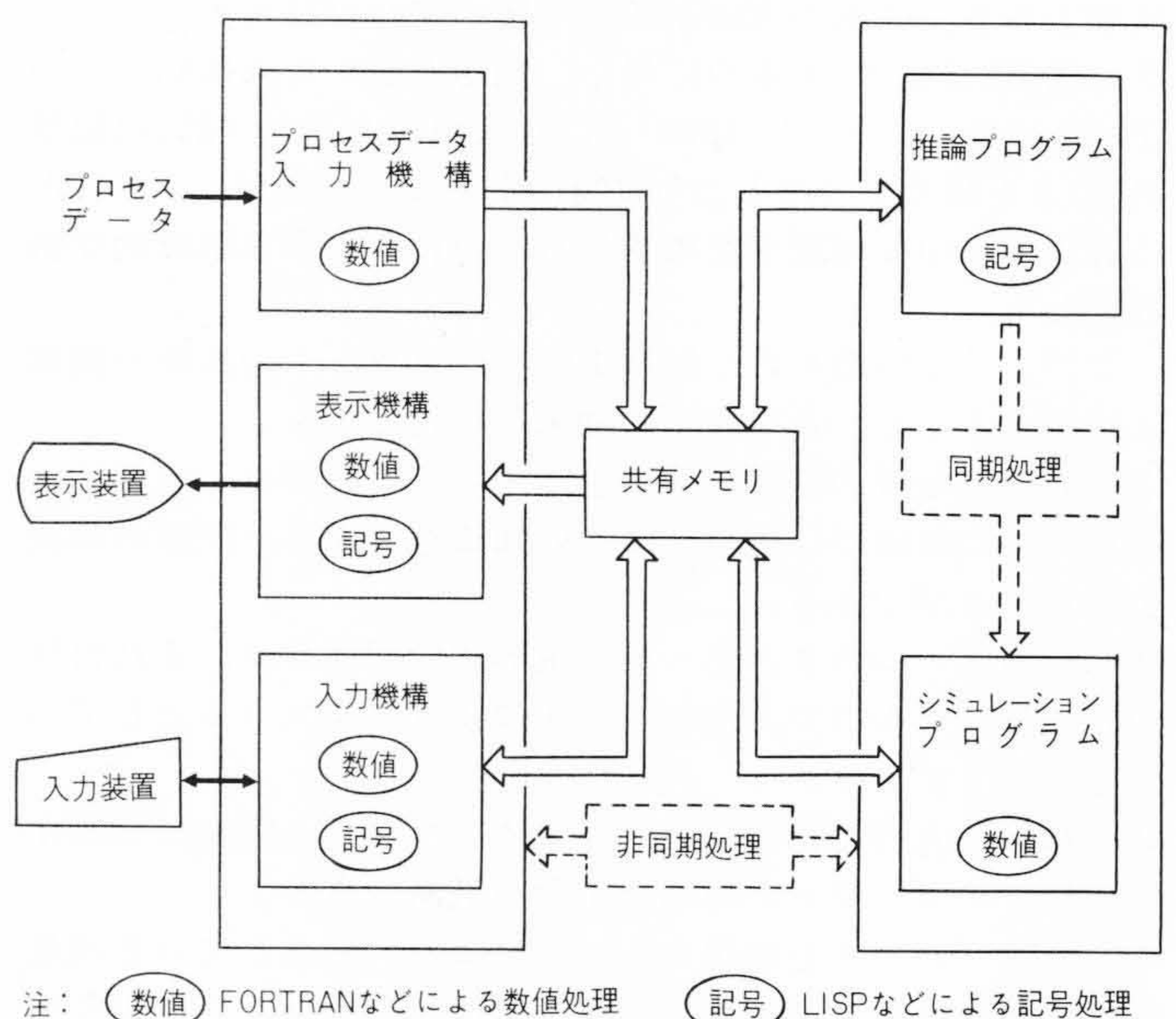
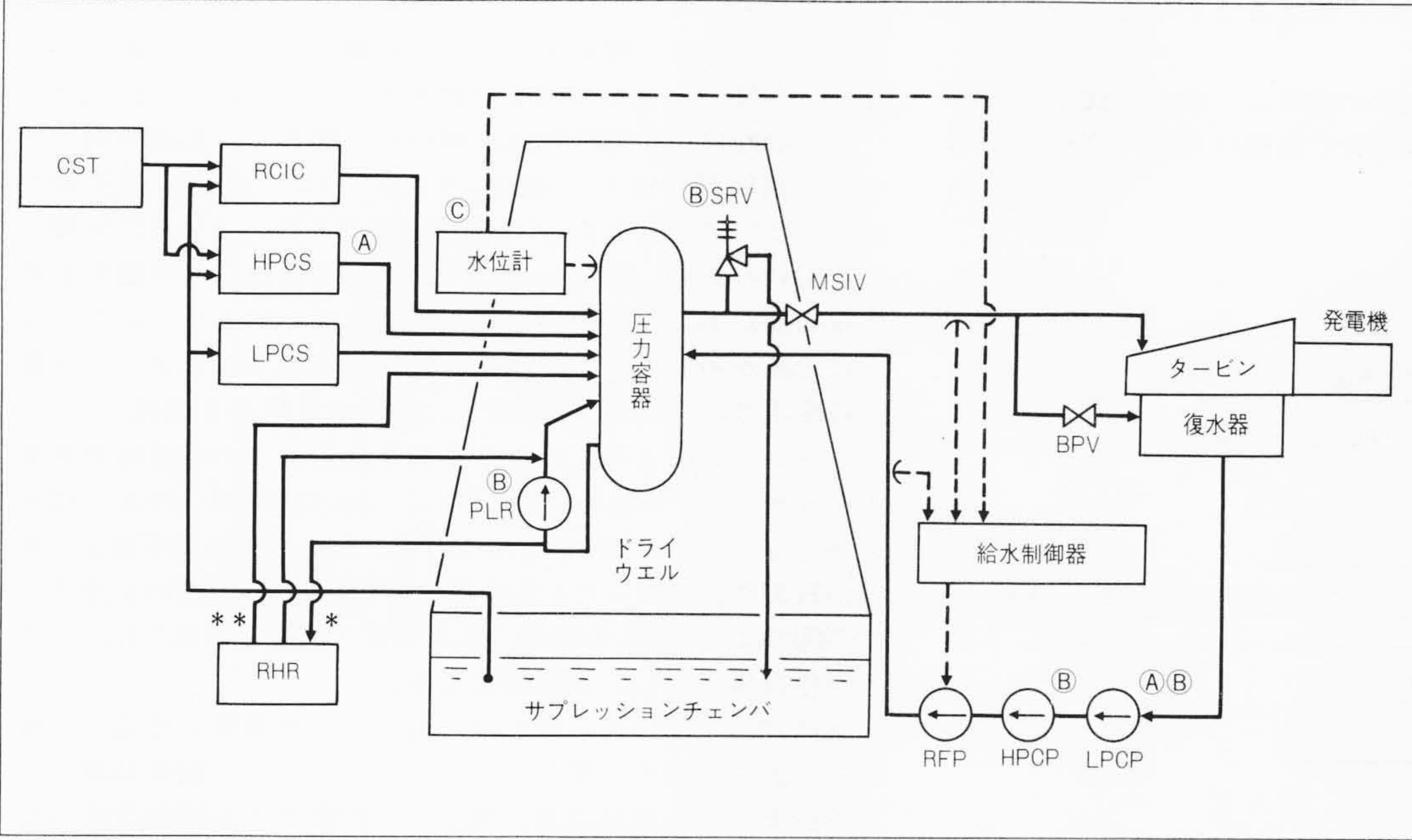


図3 記号処理と数値処理の融合 共有メモリの管理機構の導入などにより、LISPで実行する記号処理と、FORTRANで実行する数値処理を可能にした。

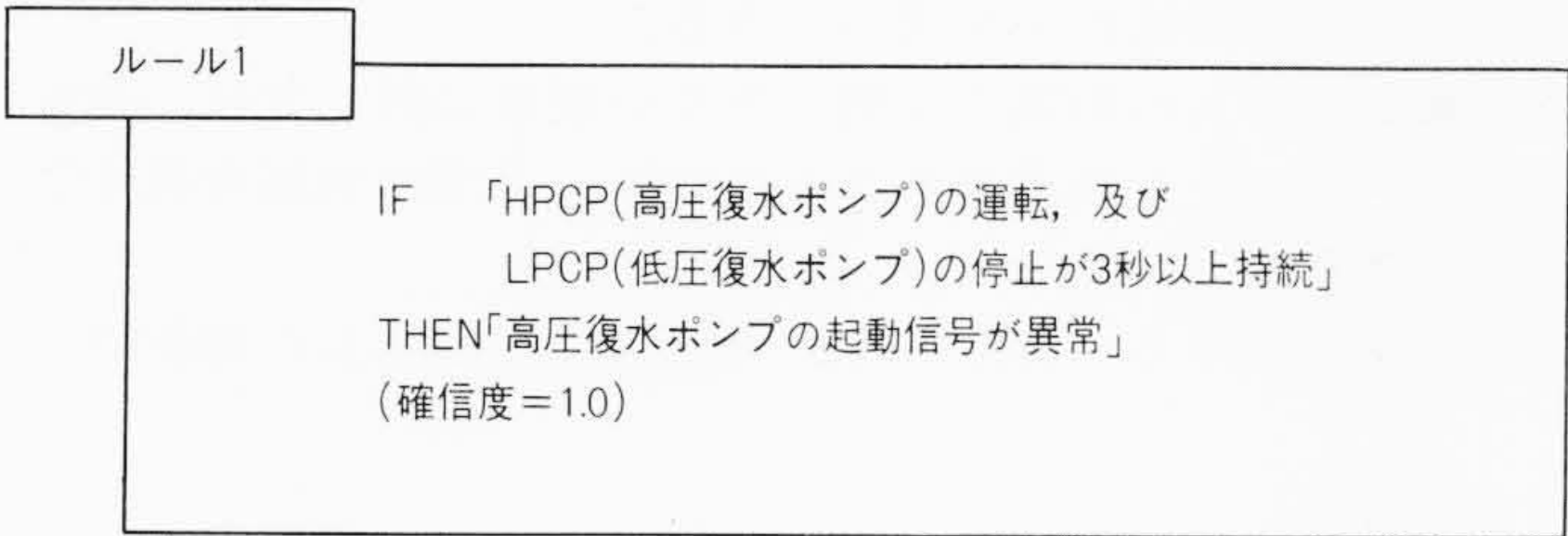


ケース	故障機器
①	LPCP, HPCS
②	電源喪失, SRV
③	水位計

記 号	名 称
CST	復水貯蔵タンク
RCIC	原子炉隔離時冷却系
HPCS	高圧炉心スプレー系
LPCS	低圧炉心スプレー系
RHR	残留熱除去系 * 停止時冷却モード ** 低圧注水モード
SRV	逃し安全弁
PLR	再循環ポンプ
BPV	タービン・バイパス弁
RFP	給水ポンプ
HPCP	高圧復水ポンプ
LPCP	低圧復水ポンプ
MSIV	主蒸気隔離弁

図4 シミュレーションの対象とした沸騰水型原子力発電プラントの主要系統 通常は蒸気はタービンを通ったあと、復水器で水になり、給・復水ポンプで圧力容器に戻される。左側の諸系統は異常・事故時用の待機系である。

HPCP(高圧復水ポンプ)の診断用ルール



RCIC(原子炉隔離時冷却系)の運転ガイド用ルール

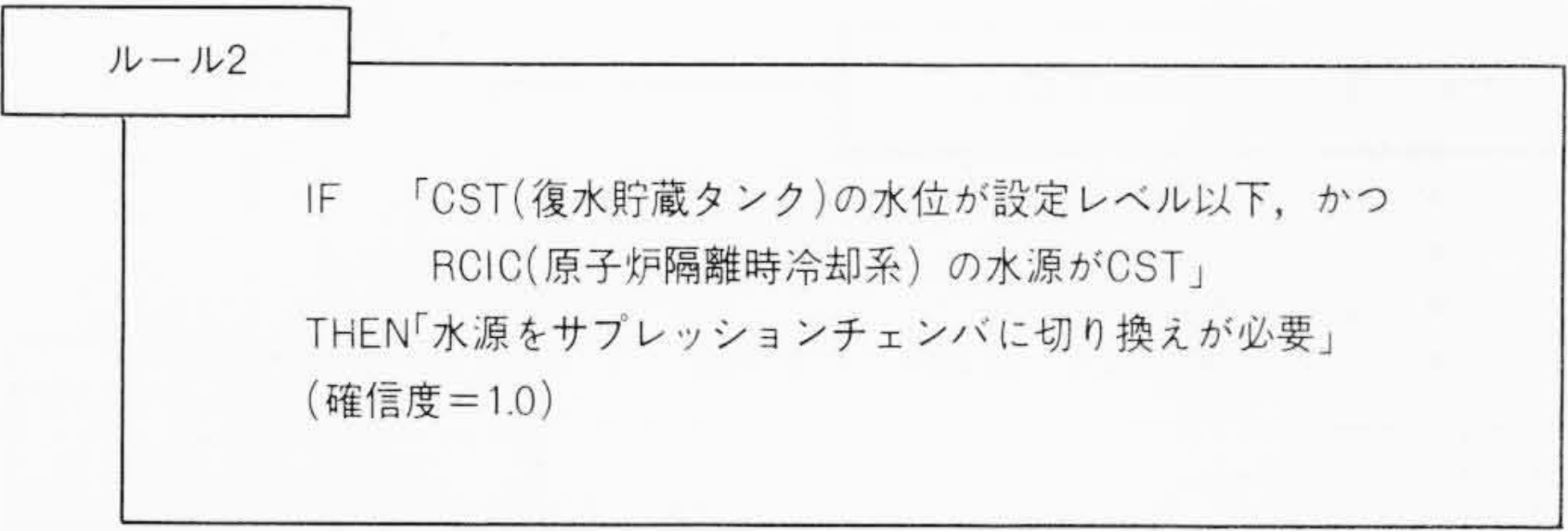


図5 ルールによる因果知識の表現例 (もし～ならば～である)型のルールで表現した因果知識である。

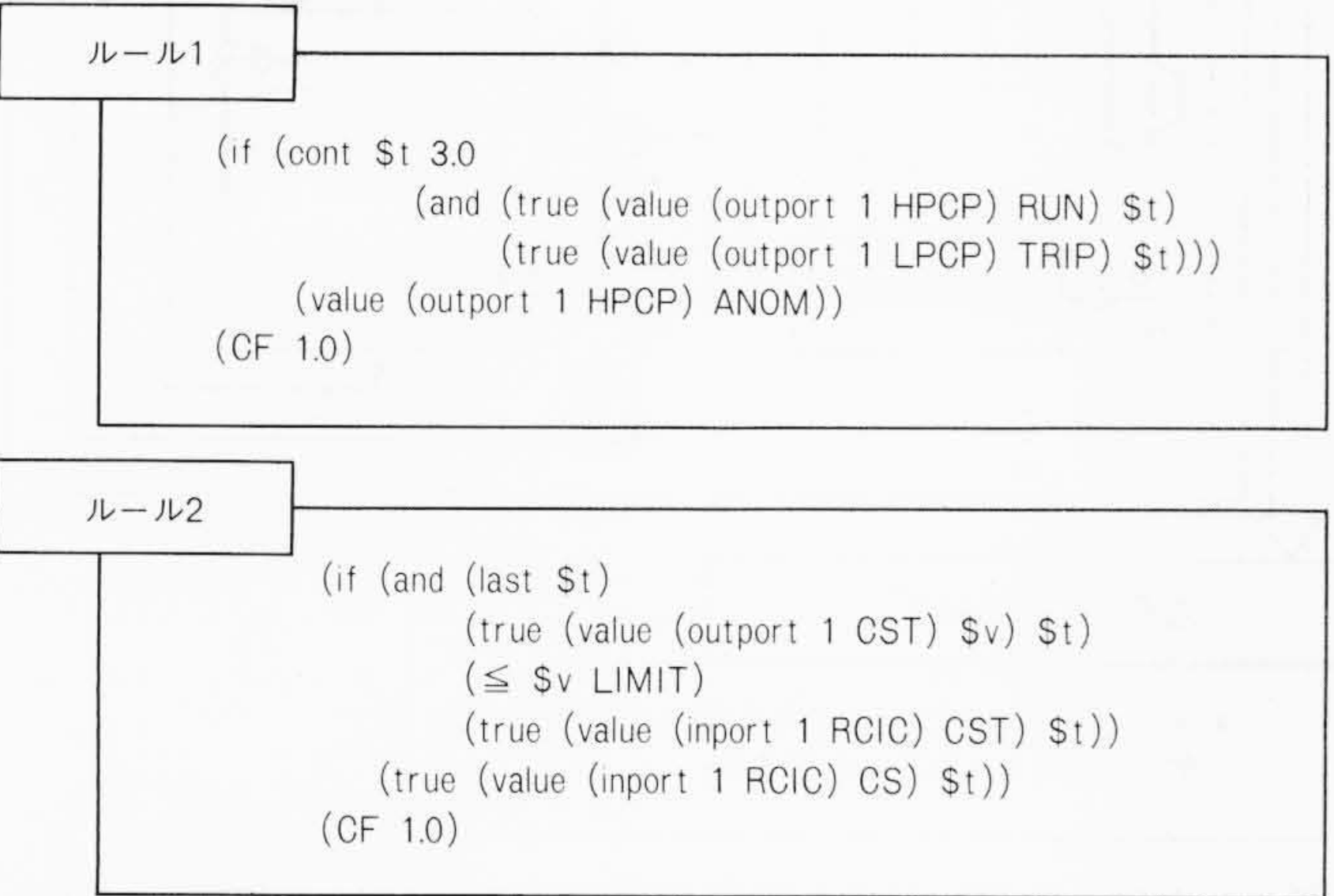


図6 ルールの計算機表現例 図5に例示した二つのルールに対応している。

機能知識の例は、後に説明する図9に示している。機能知識も、同じくフレーム構造で知識ベースに格納される。

異常事象のケース①は、「LPCP(低圧復水ポンプ)停止(故障)」のため炉心への給水が停止し、原子炉が緊急停止(スクラム)された場合であり、更にHPCS(高圧炉心スプレー系)も故障した状態を想定したものである²⁾。

この診断には、因果知識を用いた。図5に例示したルール1(高圧復水ポンプ関連の診断用ルール)などの知識を用いて異常原因を同定し、シミュレータで予測しながら必要なガイドを提示する。図7に、原子炉冷温停止を目的としたガイダンス結果を示す。起因事象が「LPCP停止」であり、引き続き自動起動すべきHPCSが故障のため起動していないことを診断し、約6時間先までの運転法を提示している。このような推論プロセスを、使用したルールも含めて運転員に示せば、運転員の最終判断をより確実なものにできる。

ケース②は、電源喪失により復水ポンプLPCP、HPCP、及びPLR(再循環ポンプ)が停止し、原子炉がスクラムされた場合である。シミュレーションの結果を、図8に示す。このケースでは、更に、SRV(逃し安全弁)の弁開閉信号に誤信号があった場合を想定した。すなわち、時刻②で、実際にはSRV 6弁開であるものを、4弁開としてプロセス信号を入力した。

本ケースでも、ケース①と同様に因果知識を用いた。診断結果は、まず時刻①で、この異常の起因事象が「電源喪失」であることを示している。引き続き時刻②では、入力されたSRV開閉データ(4弁開)、炉圧などのプロセス信号の変化を、知識ベースの「知識」、特に動特性シミュレータのシミュレーション結果からは説明できず、結論を断定していない。すなわち、SRV開閉データ(4弁開)からは、炉圧の変化(実際には6弁開に対応した炉圧の変化)を説明できず、「炉圧変化が異常」と出力している。更に、このような場合に対応した因果知識に基づき、その原因が誤信号あるいは更に他の原因である可能性も示唆している。

このように、知識工学的方式では、知識ベースの「知識」ではプラントの挙動を説明できない場合は、何が説明できな

いか、何をチェックすべきかを示唆することにより、人間の判断を促すことになる。

ケース③は、運転中に水位計が故障し、給水制御系を介して異常が伝搬して、全く別の場所で最初に異常が検知された

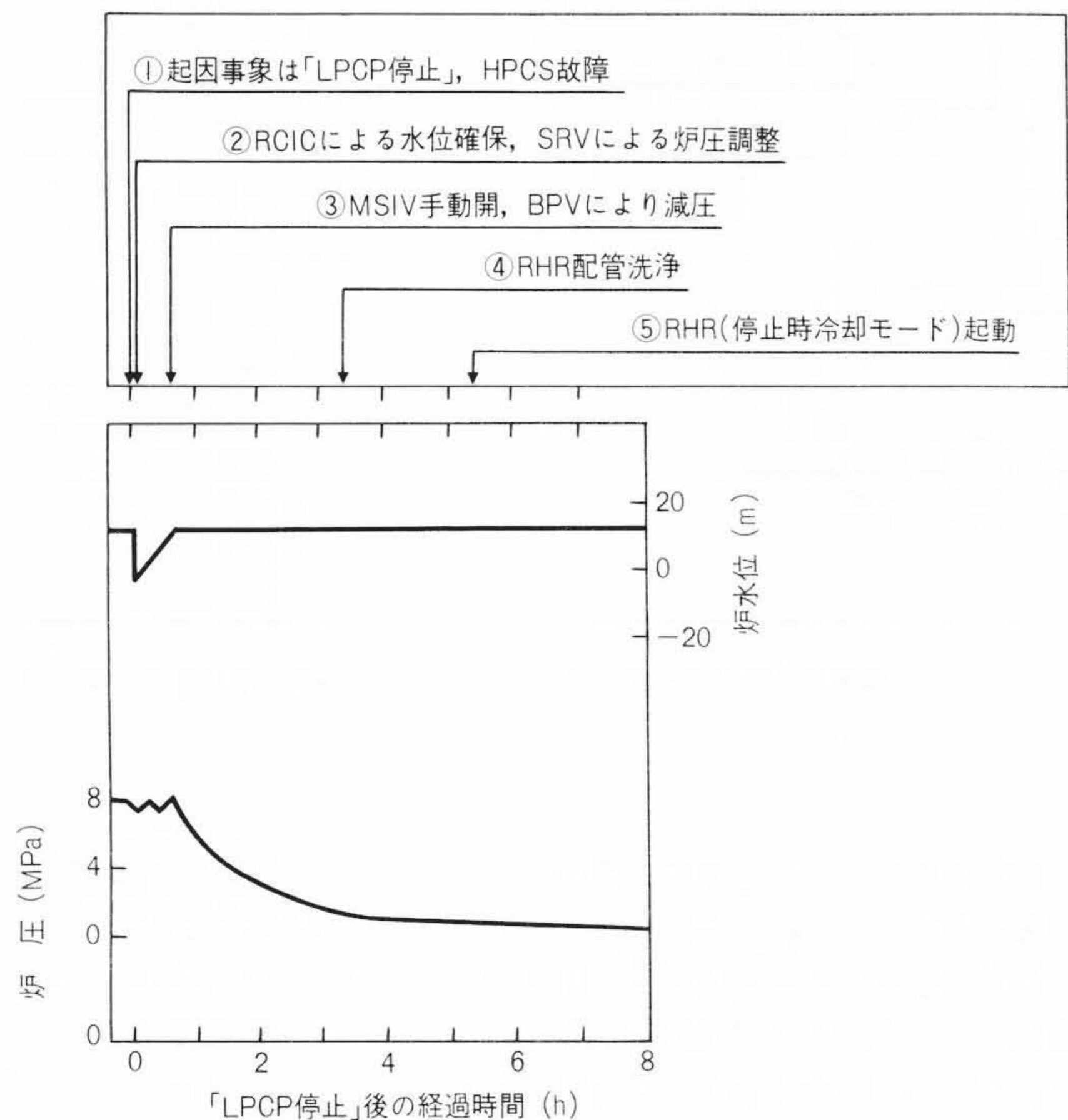


図7 「LPCP停止」及びHPCS故障に対する診断結果——ケース①
因果知識を利用した診断の結果である。記号説明については図4参照。①の異常原因を出力すると同時に、約6時間先までの運転法②～⑤を提示している。

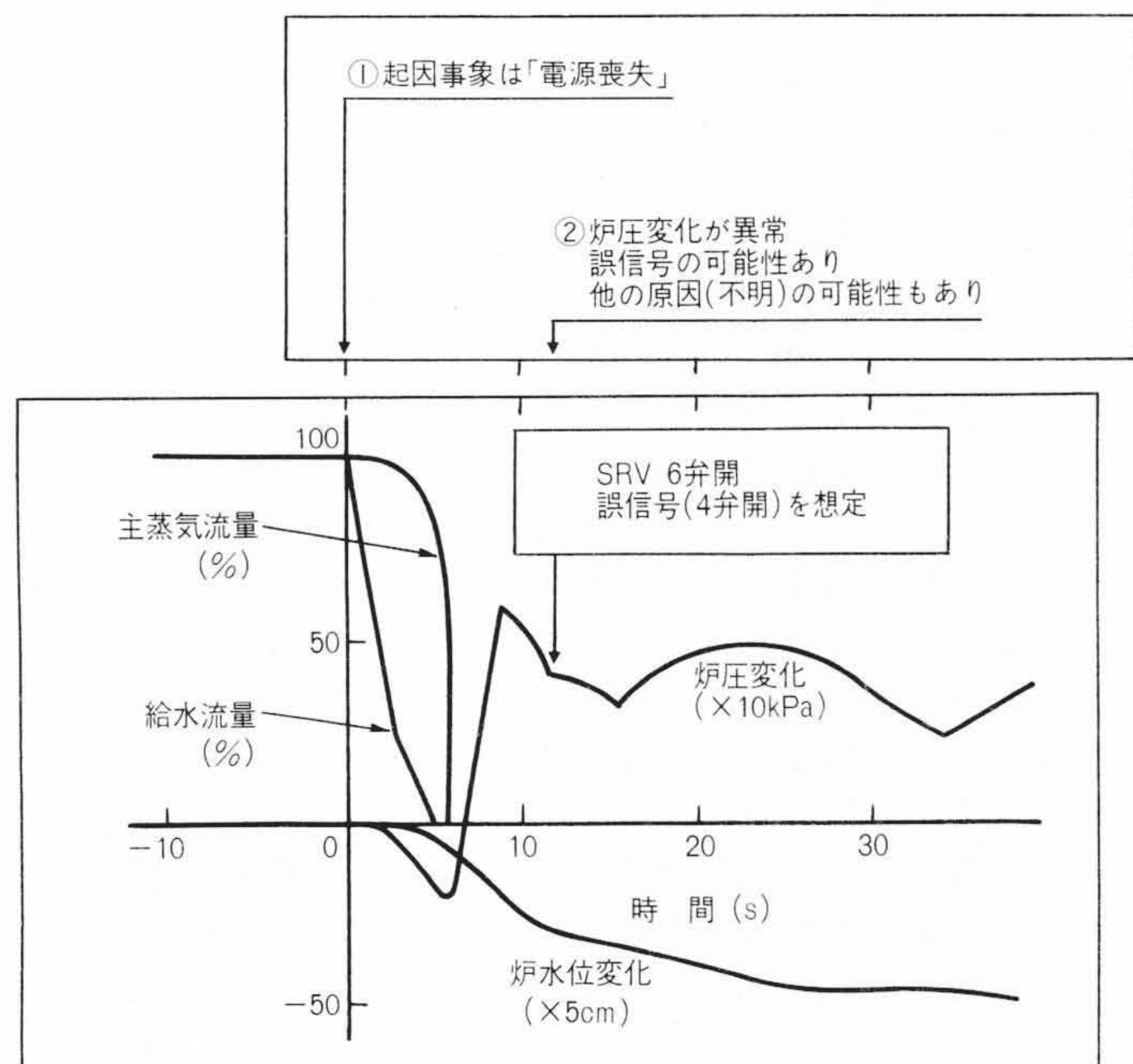


図8 「電源喪失」及びSRV開閉誤信号に対する診断結果——ケース②
因果知識を利用した診断の結果である。特に②では、「知識」では説明がつかず、結論を断定していない。

場合を想定したものである。この例では、最初に異常が検知された直後には、既に多くの信号が異常値を示しており、一見、プラントは非常に複雑な挙動を示しているように見える³⁾。

この診断には、機能知識を用いた。図9に、知識の例とともに診断結果を示す。同図に示すように、「蒸気は原子炉からタービンに流入する。」「S₁は水位計である。」といった知識だけを用いるため、推論によって診断に直接役立つ知識を生成する必要があるが、導出原理を用いることにより、以下のように診断が可能である。異常が最初に検知されたタービン駆動の給水ポンプの出口流量計S₃に関連する機器を選択し、シミュレーションによってそれらを絞り込む。この場合は異常原因を絞り込めないため、最終的に、「給水制御器への入力信号を与える計器の一つである水位計を、S₁からS₂に切り換えて異常が観測されなかったらS₁が異常である。」との指示を出す。この例では、テストの結果、S₁が異常であると結論され、切換え操作自体が正しい処置法になる。

機能知識を用いた診断では、あらかじめ異常を想定して準備する因果知識を必要としない。したがって、因果知識による診断よりも計算処理量は増すが、対応できる範囲は広いと言える。以上の結果、2章に述べた一般的な特徴のほかに、特に本システムの特徴を次のようにまとめることができる。

- (1) 知識を適切に記憶しておけば、その範囲内で、複数の異常事象(故障)をその発生時刻順に検出できる。
- (2) 更に、将来のプラント状態を予測し、その結果に基づき、あらかじめ運転操作法を提示できる。
- (3) 知識ベースの知識で説明できない現象に対しては、何が説明できないかを提示することにより、人間の判断を促すことができる。

上記結果のうち、特に(3)は、知識工学を応用した運転ガイ

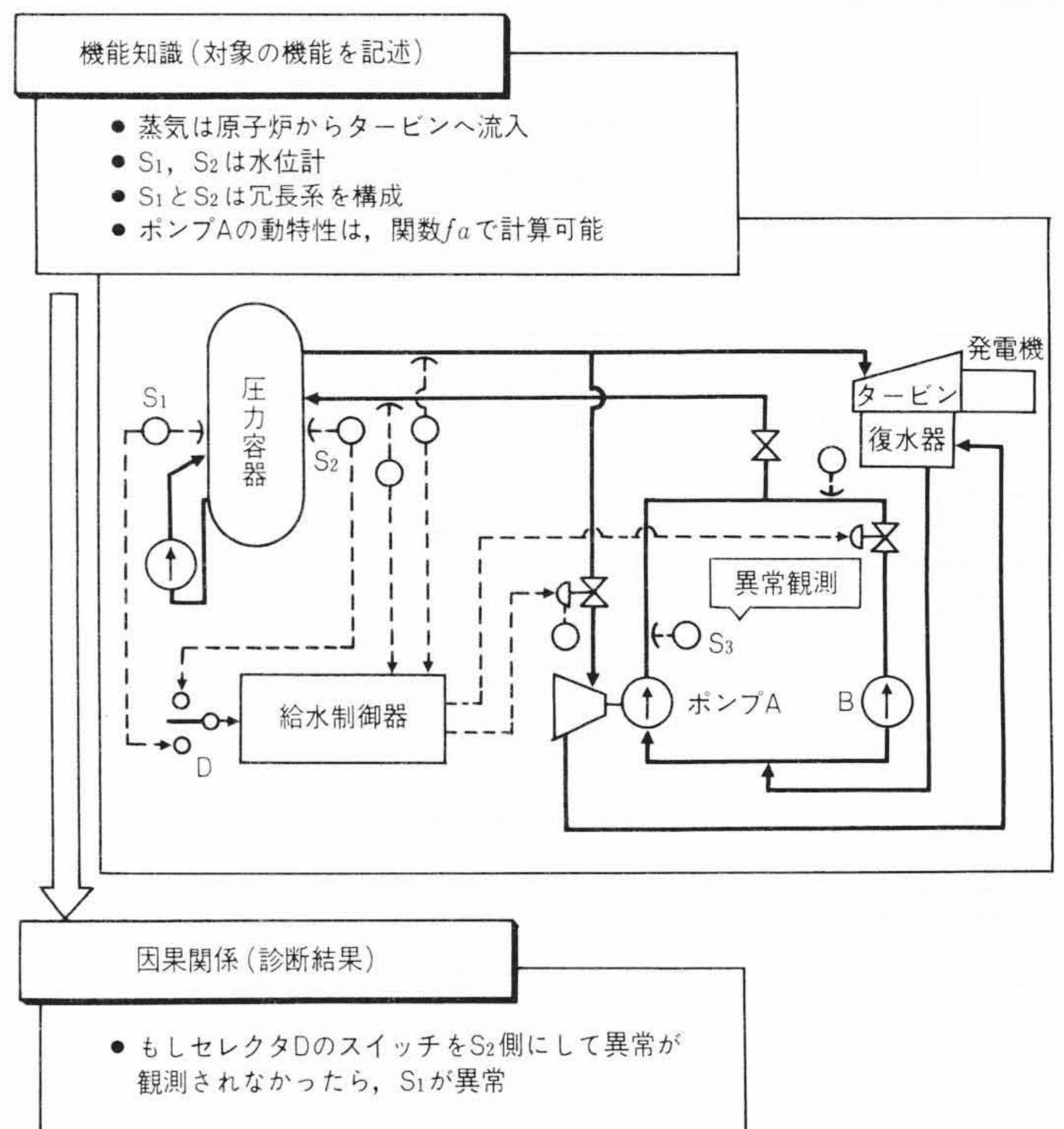


図9 水位計故障に対する診断結果——ケース③ 機能知識を利用した診断の結果である。対象の機能に関する知識から、診断に直接役立つ因果関係に関する知識を生成している。

ダンスシステムの特徴の一つとして重要である。本来、このようなシステムが対象とすべき事象は、必ずしもルーチンの対応手順が決まっているものだけではない。したがって、異常原因や運転操作法を一義的に特定できない場合もありうる。このような場合にも、知識工学の応用は、計算機と人間が共同で適切な解を見いだしてゆく上で有力な手段となりうるものとする。

4 事象駆動型制御システム

4.1 システムの構成

大規模プラントの制御システムでは、図10に示すように、各系統ごとの制御を担当するサブグループ制御システムと、それらを全体的に監視し、制御の指令を出す統括制御システムから構成するのが普通である⁴⁾。そして、統括制御システムの基本的制御方式は、事象駆動型、すなわちプラントに生起する現象に対応して操作を決定してゆく方式となる。本章では、知識工学を応用した事象駆動型制御システムについて論ずる。

プラント運転制御の特徴は、重要プロセスの頻繁な監視、生起事象に対応した操作、状況に応じた操作の優先度の変更などが要求されることである。これに対応して表1に示すように、事象駆動形制御システムには、柔軟性や高速性が求められる。このため、次のような特徴をもつ事象駆動型制御システムの基本プログラムを開発した。

- (1) 事象の周期的監視と動的プライオリティ管理による柔軟な制御
- (2) コントロールモジュール群の中から最優先のものを選択・実行することによるインタプリタの高速化

このプログラムの基本部は、図11に示すようなプロダクションシステムであり、生起した事象を格納する事象テーブル、運転員の知識を格納するCM(コントロールモジュール)群、及び事象に対応したコントロールモジュールを選択・実行するインタプリタから構成される。

事象テーブルには、プラント監視部とインタプリタから出力されたプロセス事象、操作事象などを格納する。図11の例では、「ペリオドタイマの指示値がT2、温度変化率は正常であること、運転モードスイッチは原子炉起動で現在臨界近接中であり、ある制御棒引抜き操作が終了した状態であること」を示している。

コントロールモジュール群には、運転に関する知識を、条件部(実行可能条件を示す知識)、状況部(状況に応じて処理の優先度を変更するための知識)、操作部(操作指示や事象を出力する知識)、及び優先度部(処理の優先度を示す知識)に分類して格納する。図11の例は、『ある制御棒の引抜きが終了し、ペリオドが0秒と200秒の間にあるなら、プロセス事象として、

表1 知識工学を応用した事象駆動型制御システムの特徴 本システムには、柔軟性、高速性が求められ、これらを実現するために、動的プライオリティ管理などの特徴を持っている。

要 求	実 現 方 法
柔軟性 (生起事象に対応した操作)	● 事象の周期的監視 ● 操作の優先度の動的管理 ● 事象駆動型プロセスに適合した知識表現
高速性 (実時間制御の実現)	● 高速インタプリタ (併別ネットの採用 アジェンダ方式の採用)

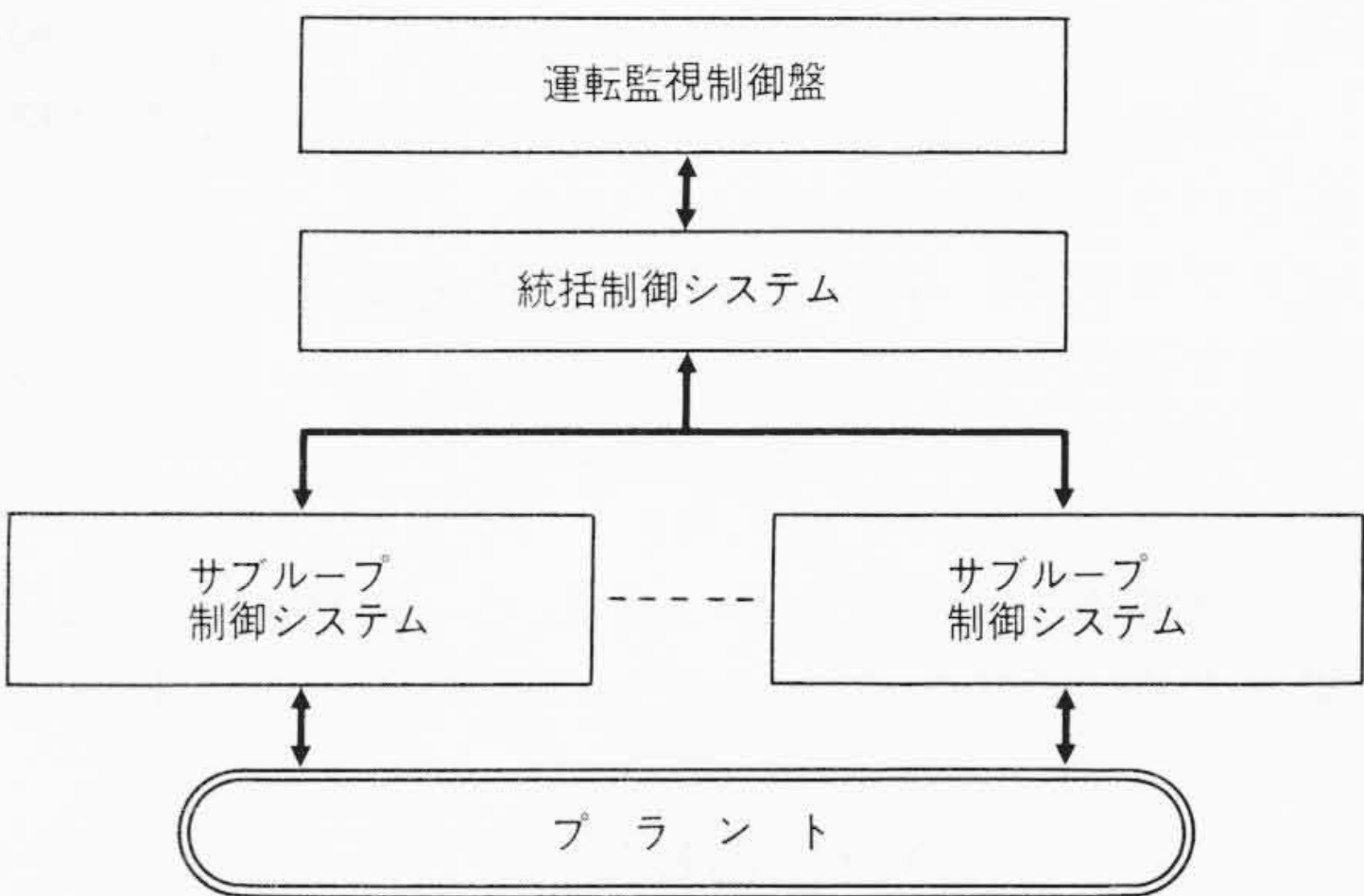


図10 統括制御システムを導入したプラント運転制御システムの基本構成 統括制御システムは、サブグループ制御システムに制御の目標を与える。

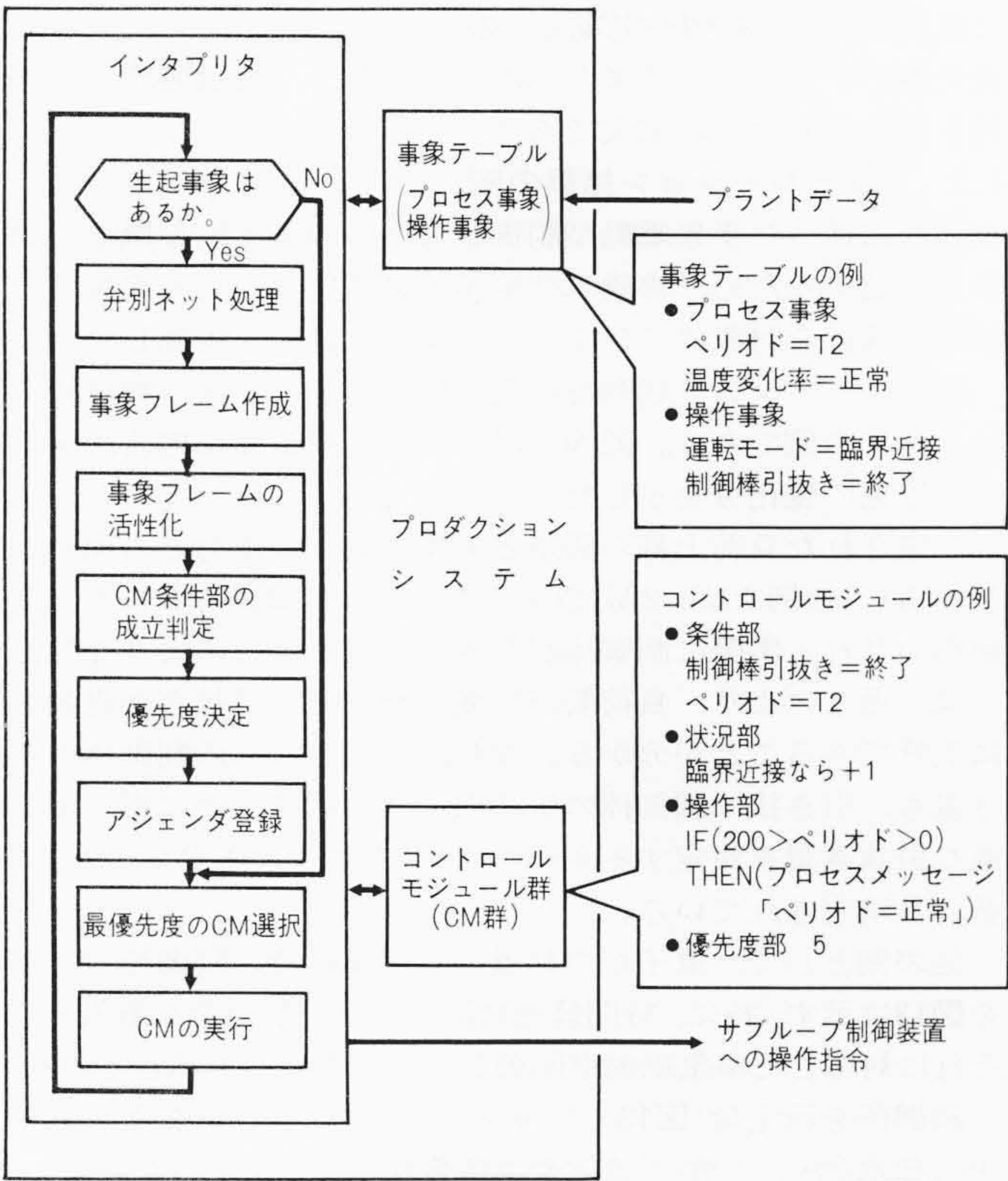


図11 知識工学を応用した事象駆動型制御システムの基本構成 基本部はプロダクションシステムである。高速推論を実現するため、併別ネットやアジェンダ登録が活用されている。

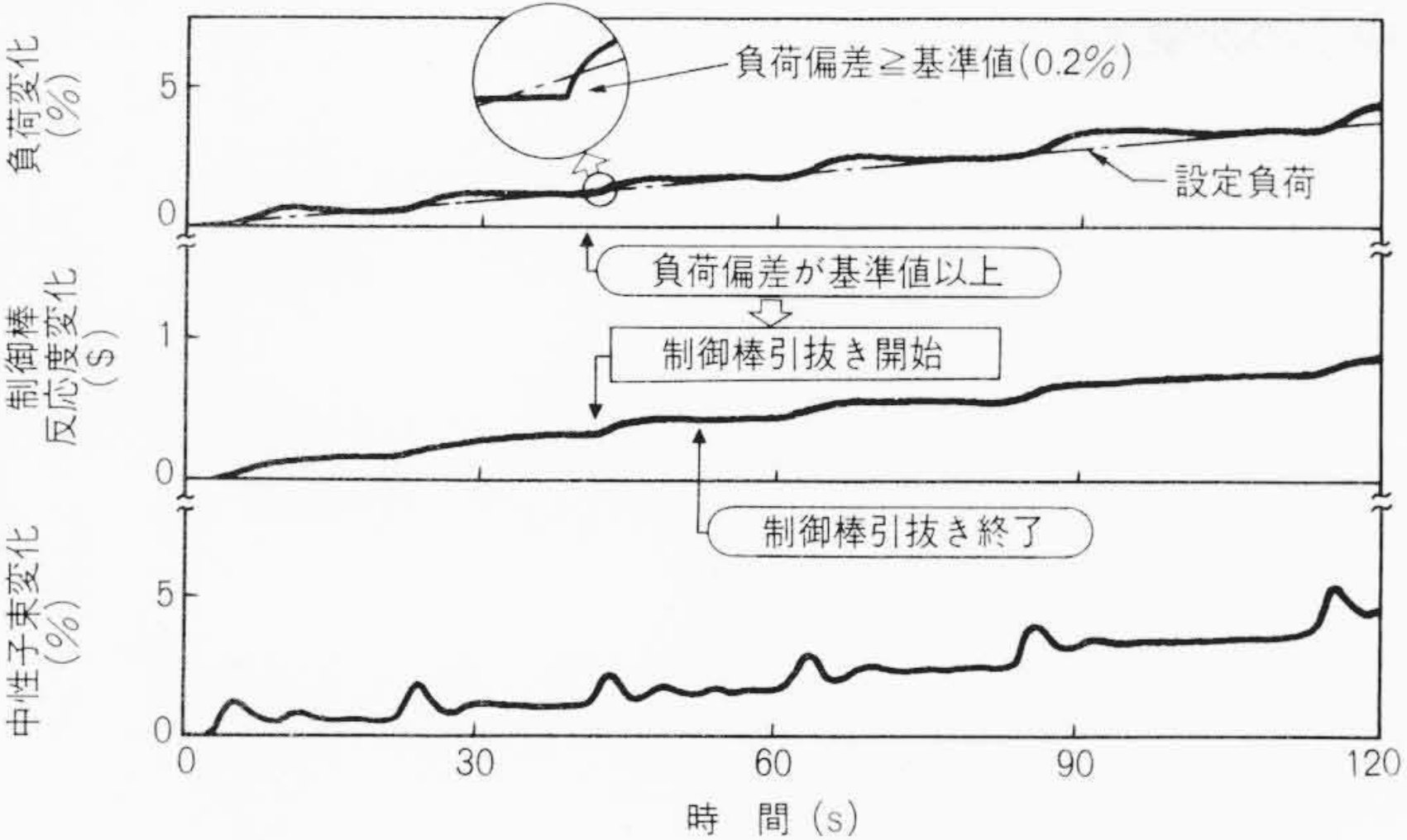


図12 プラント起動時の負荷上昇シミュレーション試験結果 負荷要求と実際の出力の偏差が基準値以上になると制御棒が引き抜かれている。

「ペリオドは正常」を出力せよ。このとき、臨界近接の操作中なら、このコントロールモジュールの優先度を1だけ格上げせよ』という知識を示している。

インタプリタは、以下の処理を実施する。

- (1) 事象テーブルから生起した事象をとらえ、関連するコントロールモジュールの条件部と状況部を弁別ネットを通じて見いだす。
- (2) その結果を、事象フレームとして一時格納する。
- (3) 関連するコントロールモジュールの条件部と状況部を活性化する。
- (4) すべての条件部が活性化したコントロールモジュールの優先度を決定して、アジェンダリストに登録する。
- (5) その中から、最優先のコントロールモジュールを一つ選択し実行する。

このような動作を繰り返すことにより、プラントの状態変化に適応した運転制御が実現できる。なお、弁別ネットの利用、優先度のアジェンダリストへの登録などは、推論処理の高速性を達成するための工夫である。

4.2 シミュレーション結果の例

前節に述べた事象駆動型制御システムの基本的な機能の動作を確認するため、沸騰水型原子力発電プラントの起動時の制御棒操作を対象に、シミュレーション試験を実施した。

図12は、プラント起動時の発電機負荷上昇に伴う制御棒引き抜き操作の例である。同図では、負荷、制御棒反応度、平均中性子束の変化分を示した。

設定された負荷上昇の要求と実際の発電機出力との偏差が基準値(この例では0.2%)以上になると、制御棒の引き抜き指令が出力され、実際に制御棒が引き抜かれる。このような操作の繰り返しにより、負荷要求に従った制御棒引き抜きが自動的に実施できることが分かる。なお、1回当たりの制御棒引き抜き量も、引き抜く制御棒の炉心内位置、深さなどに応じて最適な引き抜き量を決定するルール(コントロールモジュール)に基づき決定されている。

他の例として、原子炉の昇温・昇圧操作時の制御棒引き抜きを図13に示す。特に、時間経過に沿った原子炉の主な事象と、それに対応した事象駆動型制御システムの出力を示している。

制御棒を所定量(図13では6ノッチ)引き抜いたあと、原子炉冷却水(炉水)の酸素濃度や温度変化率などを正しく評価し、次の操作へ移行していることが確認できた。なお、このような制御ルール(コントロールモジュール)に基づき事象駆動的に制御する方式では、ルールの完備性が特に重要である。したがって、比較的狭い制御の単位ごとにルールのセットを完備し、この単位ごとにルールのセットを切り換えて使用してゆくのが望ましい。

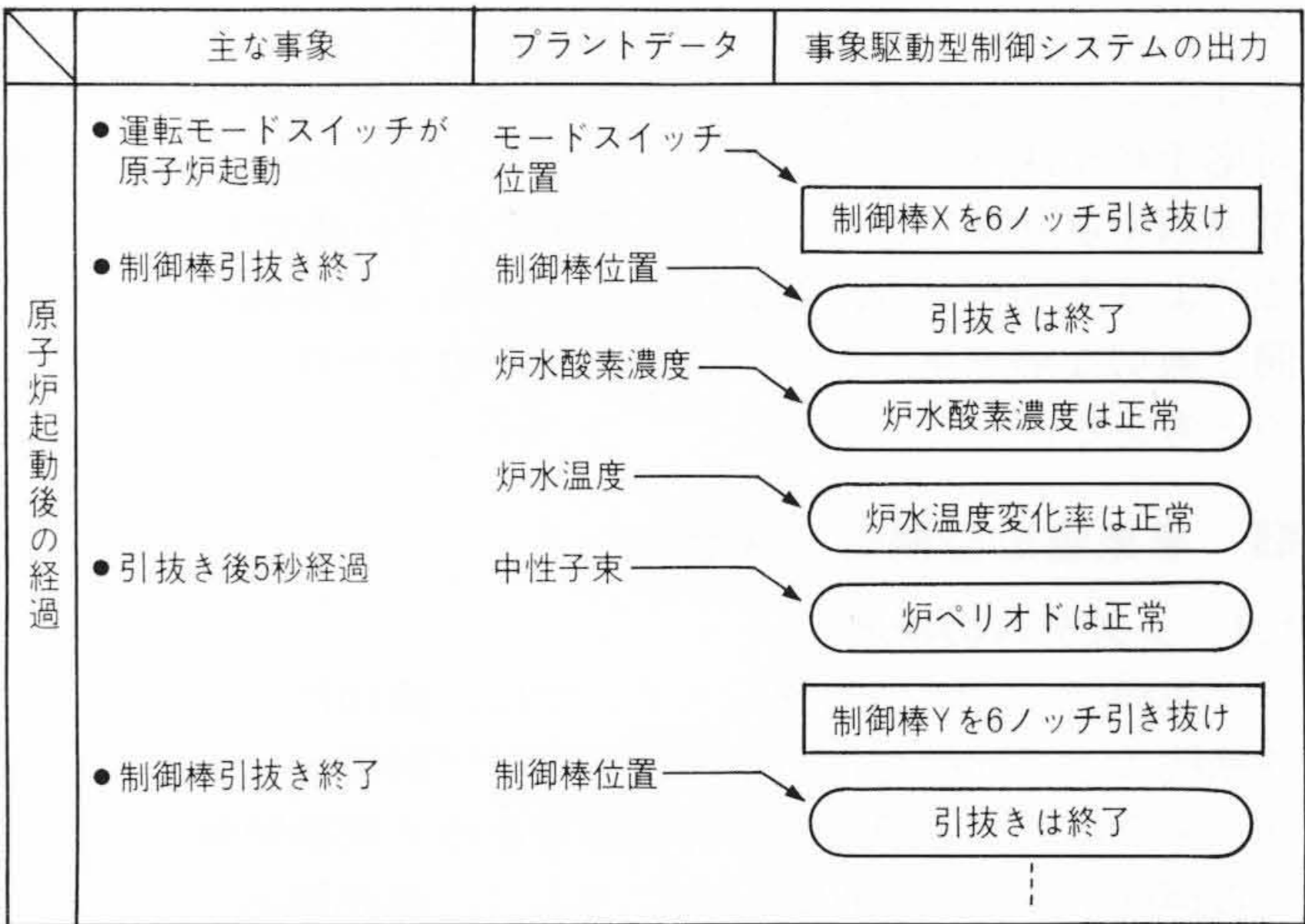


図13 プラント起動時の昇温・昇圧シミュレーション試験結果 プラント状態の変化を監視しながら、制御棒引き抜きの指示が出力されている。

5 結 言

知識工学を応用した新しいプラント診断、制御の技術を開発し、原子力発電プラントを対象にその有効性をシミュレーションによって評価した。

一般に、知識工学をダイナミックシステムに適用する場合、時間的に刻々と変化する対象をどのように知識表現し、推論に結び付けるかが課題である。この課題を、記号処理と数値処理の融合、アジェンダリストを活用した知識検索の高速化などのオンライン高速推論方式を開発することにより解決した。現在は、開発したシステムの基本性能をシミュレーション試験により評価した段階であるが、更に、本稿で述べたプラント運転ガイダンス、制御のほか、プラント運用管理⁵⁾、プラント保守⁶⁾などの分野で、知識工学の手法が応用できるものと考えている。なお、ここで開発した技術は、原子力分野だけにとどまらず火力発電所、化学プラントなど、産業システムで広く活用できるものである。

参考文献

- 1) 増位, 外: 知識処理のための推論ソフトウェア, 日立評論, **67**, 12, 939~944(昭60-12)
- 2) 木口, 外: 知識工学を適用したプラント運転ガイダンス方式の開発, 日本原子力学会誌, **25**, 298~305(昭58-4)
- 3) H. Motoda, et al.: A Knowledge Based System for Plant Diagnosis, Proc. of FGCS, 583~588(1984)
- 4) 木下, 外: 事象駆動型制御方式によるプラント運転自動化の検討, 第27回自動制御連合講演会論文集, 303~304(1984)
- 5) Y. Nishizawa, et al.: Approach to Knowledge Based Man-Machine Communication for BWR Start-Up Guidance, J. Nucl. Sci. Technol., **20**, 877~879(1983)
- 6) 駒田, 外: 原子力発電所機器寿命予測システム, 日本原子力学会, 昭58分科会予稿集C14(昭58-9)