

知識処理システム構築支援ツール“EUREKA-II”

Tool EUREKA-II for Building Knowledge-Based Real Time Control Systems

産業分野での知識処理システムに対するニーズが、以前にもまして高まってきた。EUREKA-II (Electronic Understanding and Reasoning by Knowledge Activation-II) は、この知識処理システムを効率よく構築するためのツールである。本ツールは、知識の表現・利用形態の多様性、高速推論処理、ファジィ推論のサポート、既存ソフトウェアとの高い結合性などの特徴を備えており、オンラインリアルタイム用知識処理システムの構築に適している。

本EUREKA-IIは、制御用計算機HIDIC V90/5シリーズおよびエンジニアリングワークステーションES(Extended System)シリーズ上の多数の実用的な知識処理システムの開発に適用され、その有用性が確認されている。

森 清三*	Kiyomi Mori
中野利彦*	Toshihiko Nakano
増位庄一**	Shōichi Masui
田野俊一**	Shun'ichi Tano
本多 健***	Takeshi Honda

1 緒 言

産業分野では、プラントの多様化、設備の複雑化・大規模化に伴って、プラント運用に必要な技量は以前にもまして高度化している。このため、プラント運用の自動化範囲の拡大、効率的かつ安定した操業、高度な品質制御を実現する計算機制御システムの構築が強く要求されている。

これらの要求を実現するために、従来の制御理論によるシステム制御に加え、近年、熟練運転員などの専門家の操業ノウハウを活用する知識処理システムによるシステム制御化が進められている。

知識処理システムのねらいは、「対象とする問題領域の専門知識やノウハウを計算機に移植することによって、専門家でなければ解けない問題を専門家と同等レベルの能力で判断し、制御・判断・計画などを支援・代行する」ことにある。これら知識処理システムの構築を容易にするためのソフトウェアが、知識処理システム構築支援ツールである。

日立製作所は、長年にわたる幅広い計算機制御システム取りまとめの経験に基づき、オンラインリアルタイム制御用の知識処理システム構築支援ツールEUREKA-II (Electronic Understanding and Reasoning by Knowledge Activation-II)を開発し改善を図ってきた。本ツールは、その実用的特性によって、プロセス運転計画、監視制御、診断など、計算機制御の主要応用業務全般にわたって、多数の知識処理システムの開発に用いられている^{1),2)}。

また、本EUREKA-IIをベースにした分野別特化ツール(いわゆるドメインシェル)^{3),4)}も各種開発され、知識処理システム

の構築がより容易になっている。

2 知識処理システムとEUREKA-II 開発の背景

2.1 知識処理システム

知識処理システムは、専門家の知的業務を計算機システムで支援・代行するものである。

図1は、従来处理と知識処理の特徴的な相違をマクロに示したものである。従来のプログラミング言語による手続き処理では、専門家の知識は手順やパラメータの形でプログラム中に散在しており、これらが順序よくまとまってはじめて機能するものであった。これに対して、知識処理では、個々に独立した知識が知識ベースに格納され、要求に応じて推論機構がこれら知識を結合させて問題を解く。

したがって、知識処理では、

- (1) 個々の知識の独立性が保たれ、知識の入力、追加、修正、削除がきわめて容易になる。
 - (2) 個々の知識の記述の順序が処理に影響せず、人間の持つ並行处理的な試行パターンにマッチした処理ができる。
- という特徴がある。

人間の思考パターンはきわめて複雑であるため、従来处理のアプローチでは、思考判断過程にマッチしたソフトウェアを作成することは困難であったが、知識処理という新しい方式によって、専門家を代行するシステムが容易に構築可能となった。

* 日立製作所大みか工場 ** 日立製作所システム開発研究所 *** 日立プロセスコンピュータエンジニアリング株式会社

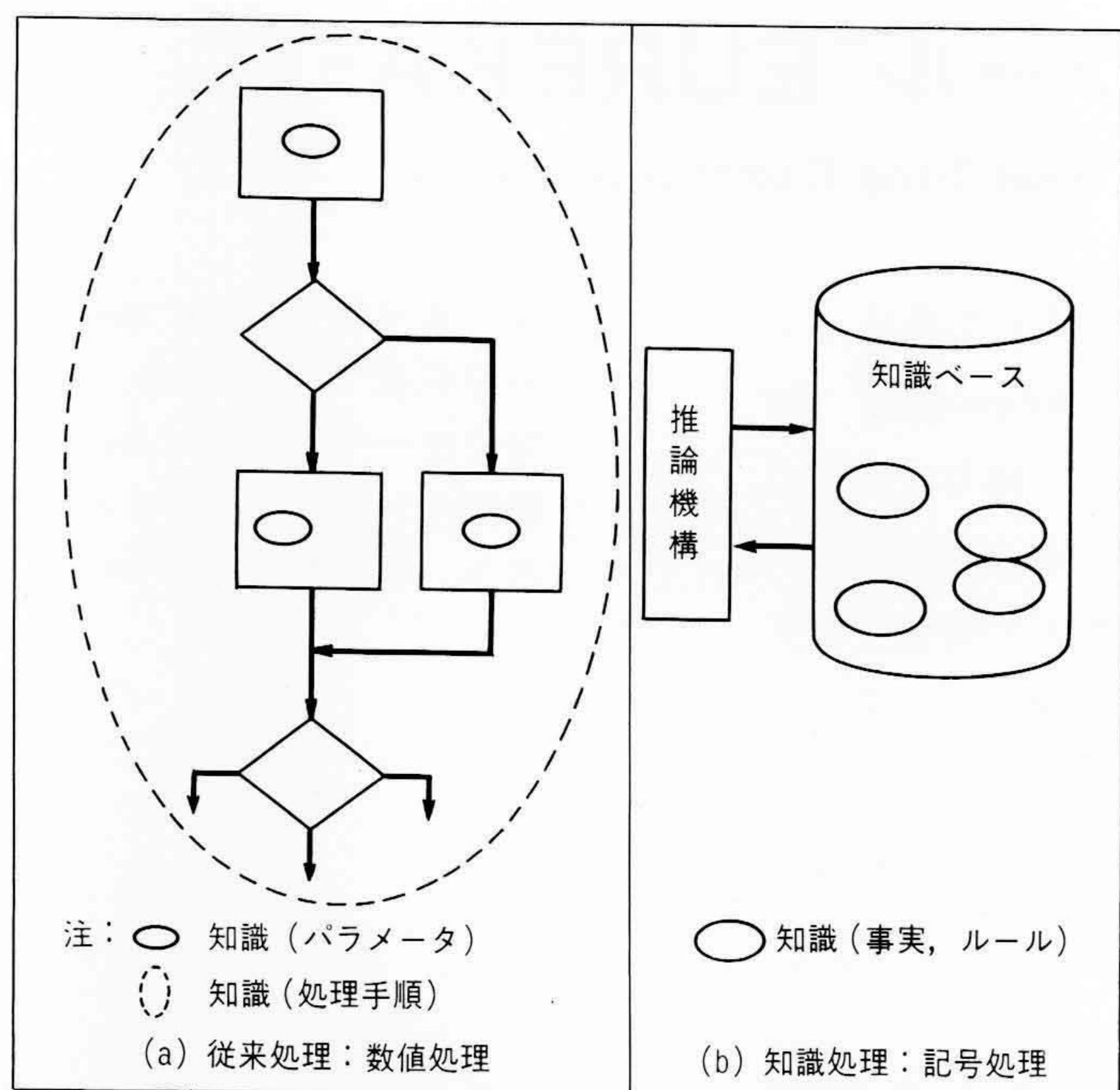


図1 従来处理と知識処理の比較 従来处理では、知識を処理手順やパラメータの形で手続きプログラムに埋め込む。これに対し知識処理では、手順を明示的に記述する必要がないため、個々の知識の独立化が図られ、システムの構築・改良が容易になる。

2.2 EUREKA-II 開発の背景

制御用計算機的主要業務には、監視・制御といったプロセスに密着した業務と、計画・分析診断といった情報処理的性格の強い業務がある。知識処理の応用業務は、本特集にその多くの事例が見られるように、これらのほとんどの領域をカバーしている。こうした知識処理システムの構築を支援するツールに対するニーズは、以下の3点に整理される。

(1) 知識の表現・利用形態の多様性

プラント制御システムでは、熟練運転員の判断知識はもとより、プラント設備の機器構成や状態に関する知識も容易に表現できる能力が必須(す)である。

また、知識利用形態の重要なポイントは、専門家の思考過程に近い推論方式を備えていることにある。

この方式の代表的なものとしては、三段論法である演繹(えき)的推論を行うプロダクションシステムや、人間の持つあいまい性をメンバーシップ関数で表現するファジィ推論¹⁾がある。高度な知識処理システム実現のためには、おのおのが得意とする領域を分担するマルチパラダイム方式の提供が要求される。

さらに、産業分野では、プラントのトータル制御実現のため、複数の知識処理システムが互いに有機的結合を図りながら、協調して推論を進める方式も必要不可欠である。

(2) リアルタイム性・信頼性

知識処理では、パターンマッチングによって処理が進行する。このため、計算機の処理負荷は従来ソフトウェアに比べ

て必然的に増大する。オンライン リアルタイム システムに適用するためには、推論の高速性が要求される。

また、信頼性の確保も必要不可欠である。すなわち、異常発生時のフェイルセーフ機能、推論過程・結果の検証機能などが要求される。

(3) 従来ソフトウェアとの結合性

実用的な計算機制御システムを構築する場合、知識処理システム単体で実現できることは少ない。

知識処理は、人間の思考過程の計算機化あるいは条件分岐の多い業務の計算機化に適している。システム構築で必要となる業務を、すべて知識処理システムで実現するのは効率が悪い。したがって、従来ソフトウェアと知識処理が互いに役割分担して、一つのシステムを実現するのが妥当である。さらに、既存ソフトウェアの機能拡張として、知識処理システムを導入する場合についても考慮する必要がある。

このため、手続きプログラミング言語で作成された従来ソフトウェアとの高い結合性が要求される。

EUREKA-IIは、以上のニーズを満足させるものとして開発した知識処理システム構築支援ツールであり、その構成を図2に、また特徴的機能を表1に示す。

本ツールは、プロダクションシステムとファジィシステムの機能を兼ね備えているが、前者を3章で、また後者を4章で述べる。

3 プロダクションシステムとしての機能と特徴

3.1 知識表現

知識表現の基本は、熟練運転員の操業判断ノウハウを表現する「ルール形知識」と、運転対象プロセスの機器構成・状態などを表現する「事実形知識」のハイブリッドタイプである。これらの組み合わせによって、簡単な知識から複雑な知識まで幅広く記述することができる。また、知識は日本語ベースで記述できるので、理解が容易で保守性も高い。記述例を図3に示す。

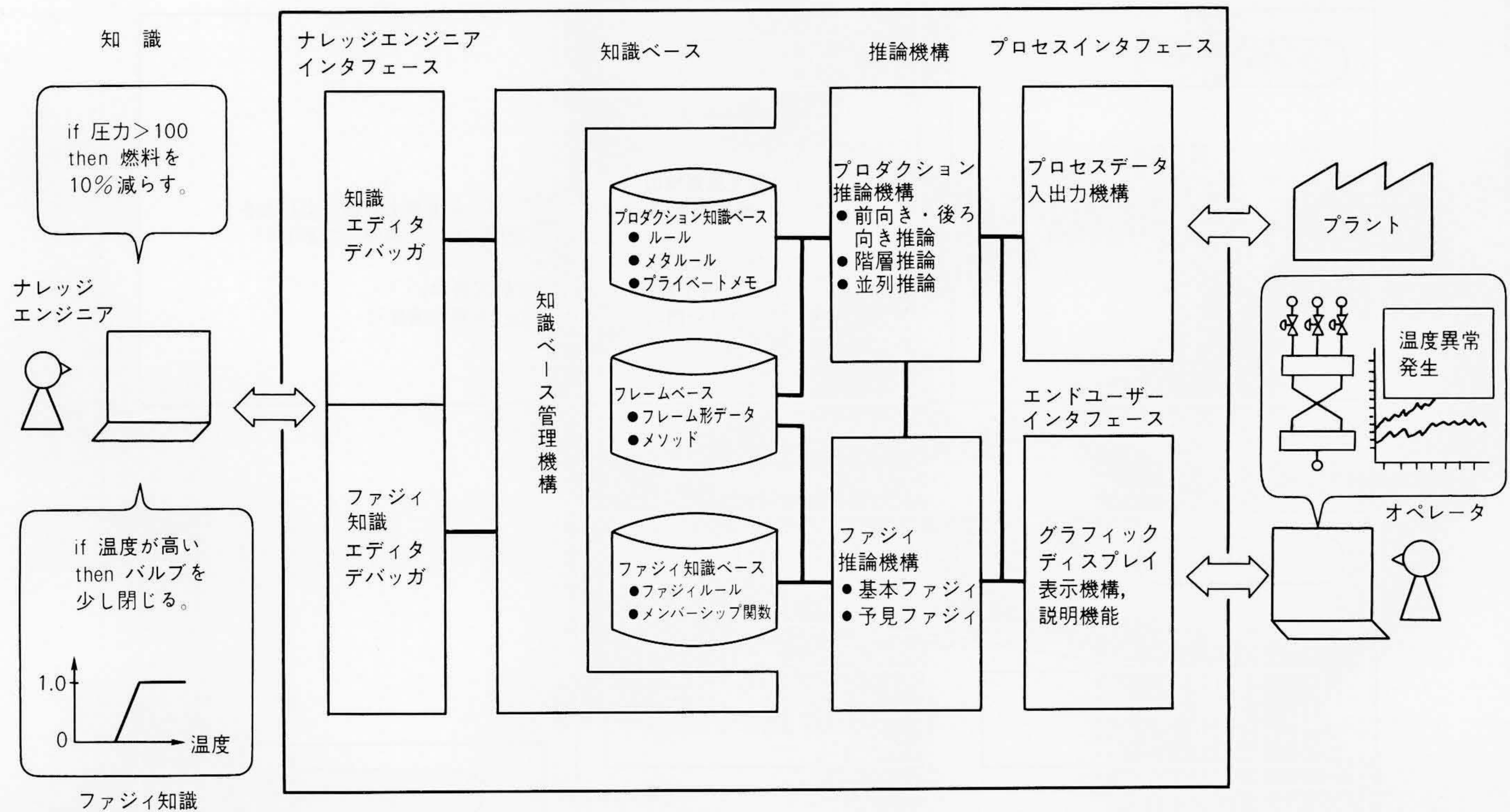
(1) ルール形知識

ルール形知識表現として、ルールおよびメタルールの2種類がある。

ルールは、専門家の操業判断ノウハウなどを「if条件部A, then結論部B」(「もしAならばBである」あるいは「もしAならばBをせよ」というプロダクションルール形式で表現する。EUREKA-IIでは、条件部で変数・式・関数の記述や、値の比較(等しい, 小さい, 大きいなど)が可能で、専門家の知識の自然な表現を可能としている。

一方、メタルールは、知識の使い方に関する知識であり、ルール群をどの順序に動かすかなどを制御する。これによって、知識処理システム全体の動作の可視性が高まる。

(2) 事実形知識

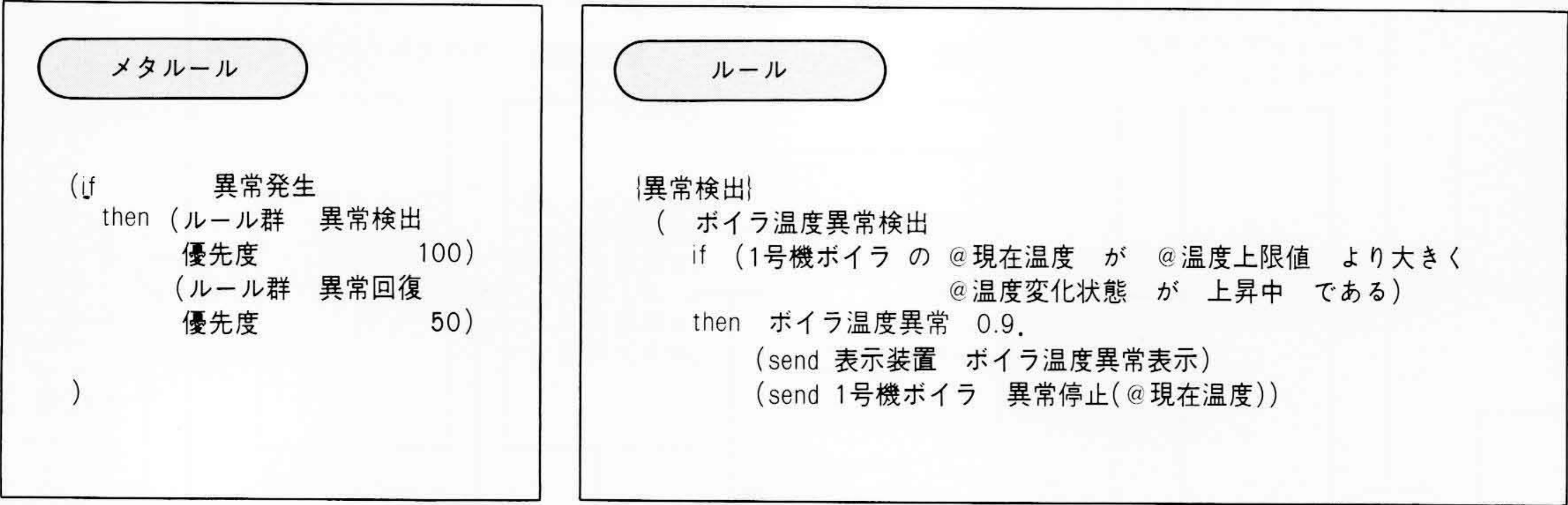


注：略語説明
EUREKA-II (Electronic Understanding and Reasoning by Knowledge Activation-II)

図2 EUREKA-IIのシステム構成 プロダクション推論機構とファジィ推論機構を備え、高レベルの知識処理システムが実現できる。また、使い勝手の良い開発環境によって、効率的にシステムを構築できる。

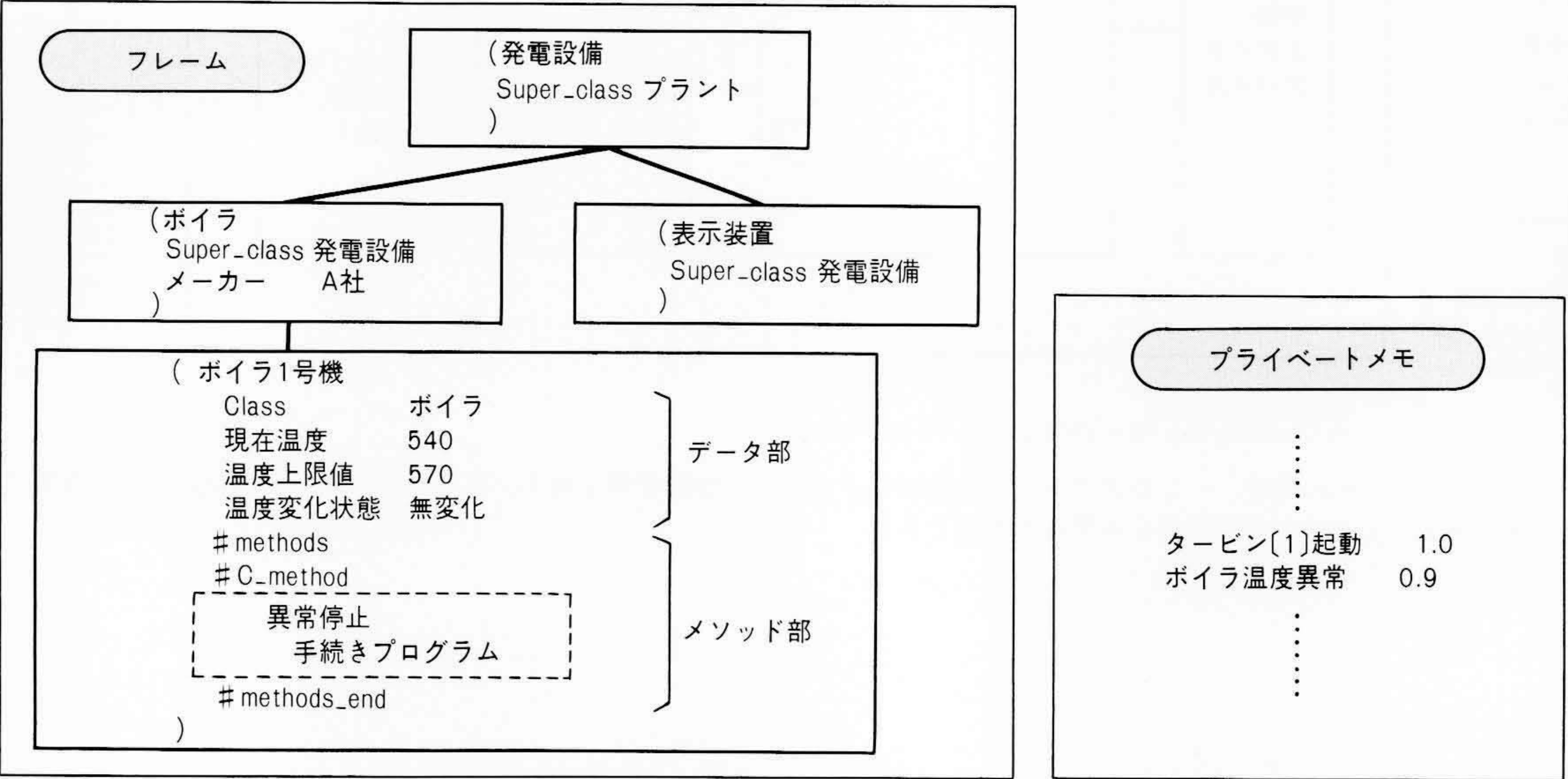
表1 EUREKA-IIの特徴的機能 多様な知識表現でさまざまなノウハウが容易に入力でき、リアルタイム向けの推論処理速度を備えている。

ニ　　ー　　ズ	項　　　　　　目		EUREKA-II の特徴的機能
知識の表現・利用形態の 多様性	プロダクションシステム	知識表現	● ルール，フレーム ● プライベートメモ(推論過程での中間仮説) ● メタルール(ルール群の実行制御)
		推　　論　　法	● 前向き，後ろ向き一体形推論 ● トップダウン形の階層推論 ● 複数知識ベースの並列推論
	ファジィシステム	知識表現	● ファジィルール ● メンバーシップ関数
		推　　論　　法	● 基本ファジィ推論 ● 予見ファジィ推論
	共　　　　　　通		● 日本語ベースの知識記述 ● プロダクションとファジィの協調推論
リアルタイム性・信頼性	推　　論　　速　　度		● 高速推論 ● ルールの総数によらない応答性能
	信　　頼　　性　　確　　保		● 推論の上限条件指定 ● 推論異常時のフェイルセーフ
従来ソフトウェアとの結合性			● プロセスデータ入出力インタフェース ● グラフィックディスプレイ表示インタフェース ● 従来ソフトウェアをEUREKA-II のサブルーチンとして利用 ● EUREKA-II を従来ソフトウェアのサブルーチンとして利用
使い勝手の良い開発環境			● マルチウインドウ，マウスによる操作 ● 日本語ベースの知識エディタ ● 知識ブラウザ(静的解析) ● 知識デバッガ



注：@は、フレーム中のデータ名(スロット名)を示す記号である。

(a) ルール形知識表現



注：#は、メソッド部の始まりと終わりを示す記号である。

(b) 事実形知識表現

図3 EUREKA-IIの知識表現 知識表現はルール形知識と事実形知識のハイブリッドタイプであり、専門家の持つ知識が自然に表現できる。日本語的な知識記述によって、可視性や保守性が高い。

事実形知識には、フレームとプライベートメモの2種類を用意している。

フレームは、プロセス機器などの確定的な事実に関する知識を階層的に表現する。機器の構成や状態を表すデータ部と、機器の機能を表すメソッド部(手続きプログラム)を一体化したオブジェクト指向表現を取っている。

一方、プライベートメモは、推論過程で生まれる一時的な事実や仮説を表現するものである。プライベートメモの導入によって、プロセス機器に関する確定的な知識と推論過程で生じる一時的な知識とが分離でき、知識表現の簡潔化が図れる。

3.2 推論機能

推論機能として、ルールの条件部(if部)から結論部(then部)を逐次導く前向き推論、結論部から条件部の成否を調べる後ろ向き推論を備えており、問題に応じてこれら推論を動的に

選択することができる。また、確信度を用いたあいまい推論も可能としている。

EUREKA-IIの推論機能の特徴は、上記に加えて、複雑な問題をトップダウンに解決していく階層推論、複数知識ベースの並列推論、およびリアルタイム性を確保するための高速推論の実現にある。

(1) 階層推論

専門家が複雑な問題を解決する場合、すべての知識を一度に使うのではなく、最初に概略についての検討を行い、さらに大きな問題をいくつかの詳細問題に分割し、この詳細問題について解決を行うのが普通である。

EUREKA-IIでは図4に示すように、概略の問題解決を上位推論とし、詳細な問題解決を下位に位置づけて推論を進める階層形の推論をサポートしている。これによって、複雑な知識処理システムの構築が容易に行えとともに、知識がグ

ループ化され保守性も向上できるという利点がある。

(2) 並列推論

異なる業務を受け持つ複数の知識処理システムが互いに有機的に結合して、推論処理を進めることが必要となる場合がある。

EUREKA-IIでは、これにこたえるため、1台の計算機内で、複数の知識ベースが互いに交信しながら同時実行する並列推論機能を備えた。

これによって、知識処理によるトータルなプラント制御を可能としている。

(3) 高速推論

EUREKA-IIの大きな特徴は、以上のような多様な推論機能を備えているにもかかわらず、リアルタイム向けの高速推論を実現している点にある。

一般に知識処理システムの推論でもっとも時間がかかるのは、ルールの条件部の成立判定である。このため、条件部の重複判定がないようにするとともに、判定方法の効率化を図ることによって、ルール総数に依存しない高速な応答性が得られるようにした。

この方式は、ルール条件部を弁別ネットに類したネットワークに変換し、変化したデータに関する条件判定だけを行い、条件判定の回数そのものを少なくした変化データ駆動形マッチング方式である⁵⁾。

高速推論の従来技法として、Reteアルゴリズム⁶⁾が著名であるが、新たな推論アルゴリズムの開発によって、図5に示すような高速性を実現している。

以上のほかに、EUREKA-IIでは、推論ルール数や推論時間の上限指定が可能であり、予測しない事態が発生した場合のフェイルセーフも確保している。

さらに、異常発生時には、無条件に処理を打ち切ることなく推論状態を確保し、従来ソフトウェアからの次の対応指示を待つということもできる。

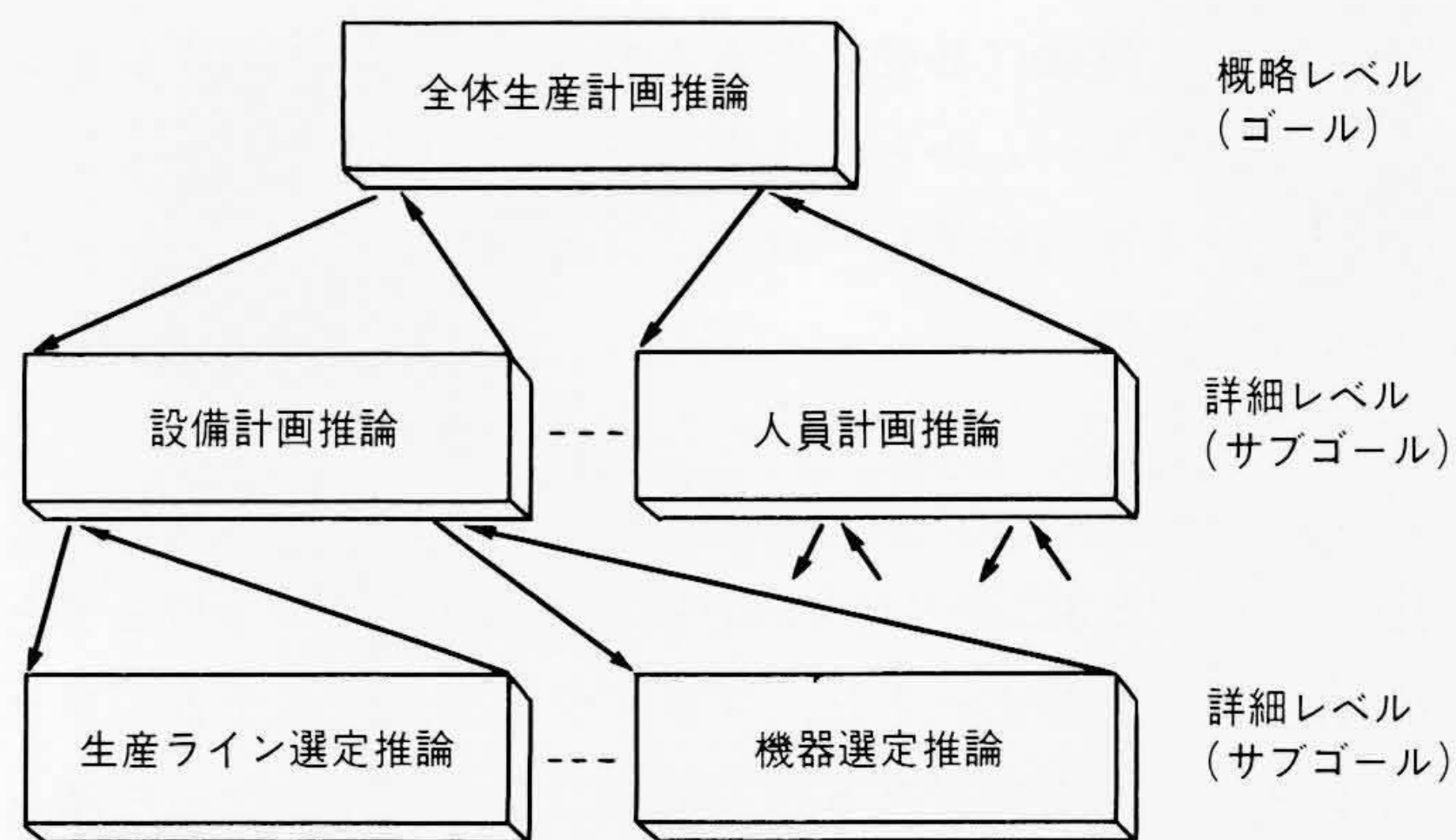


図4 階層推論の例 複雑な問題を詳細な問題に分割し、概略レベルから詳細レベルへと階層的に推論を進めることができる。

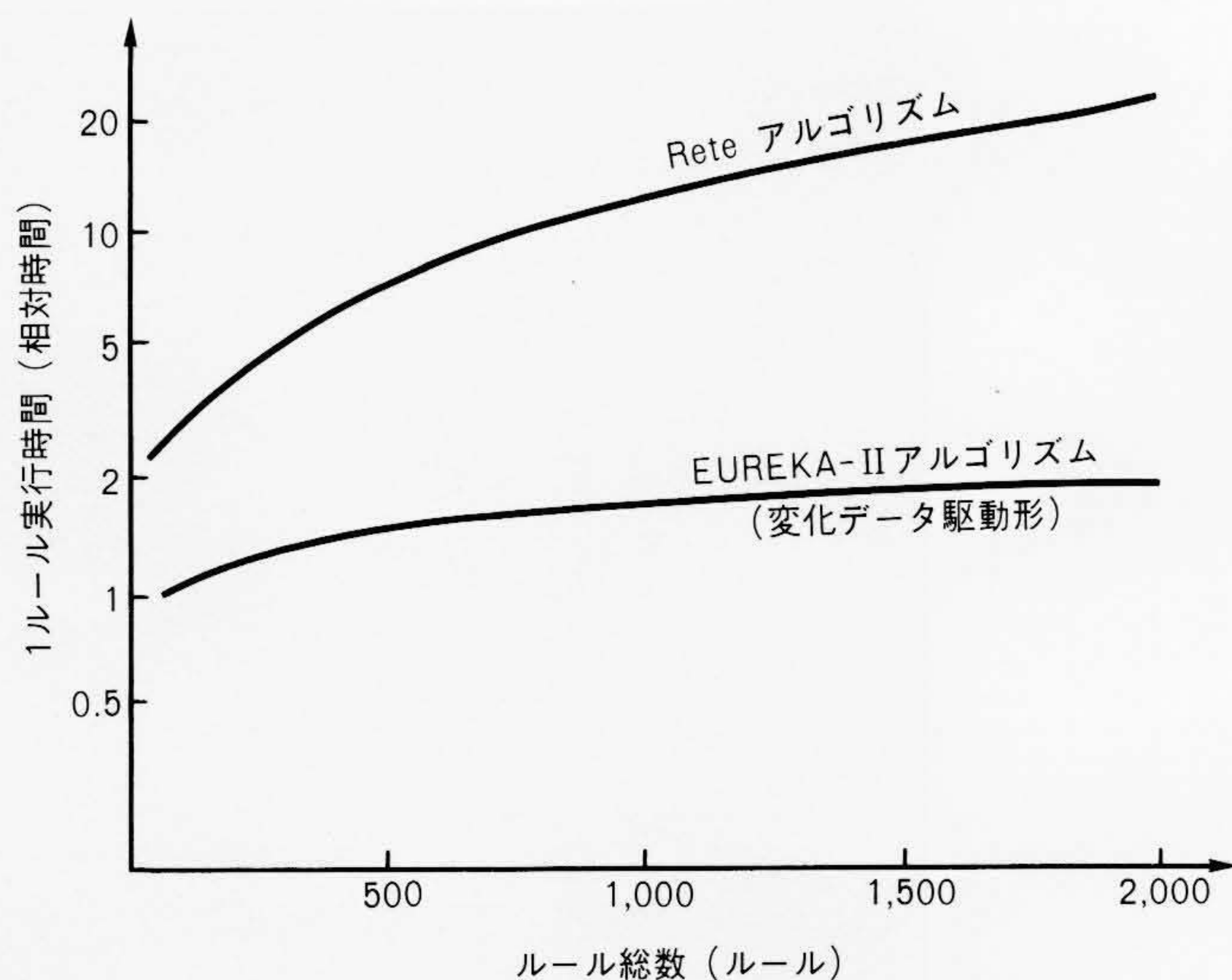


図5 EUREKA-IIの推論処理性能 入力された知識を効率よく処理するアルゴリズムの開発によって、実用的な知識処理システム構築に適した推論機構を実現している。

3.3 従来ソフトウェアとの結合

知識処理を利用した実用的な計算機制御システムを構築するためには、従来ソフトウェアとの結合が要求される。

EUREKA-IIでは、プロセスデータ入出力パッケージとのインタフェースを装備しており、変化するプロセスデータに基づく推論が行える。

また、グラフィックディスプレイ表示パッケージとのインタフェースによって、推論結果や推論経過の説明を容易にディスプレイへ表示できる。推論経過の説明機能としては、前向き推論結果の導出過程を説明するHOW機能と、後ろ向き推論での質問意図を説明するWHY機能を備えている。これによって、ユーザーは必要に応じて、どういう経緯で推論結果が得られたかを容易に理解できる。推論結果を表示したグラフィックディスプレイ画面の例を図6に示す。

さらに、EUREKA-IIから従来ソフトウェアをサブルーチンとして呼ぶことができるだけでなく、EUREKA-IIの推論機構を従来ソフトウェアのサブルーチンとしても利用できるように、大規模なシステム構築に対する対応力を備えている。

4 ファジィシステムとしての機能と特徴

プラント操業判断知識の中には、例えば、「もし蒸気温度が非常に高ければ、バルブを大きく開ける」といった定量的でない知識がある。プロダクションシステムでは、これらの直感的な言葉や幅を持った表現の扱いが不得意である。

EUREKA-IIでは、このような知識が扱えるファジィ推論の機能もサポートし、計算機制御のいっそうの高度化を可能にしている。

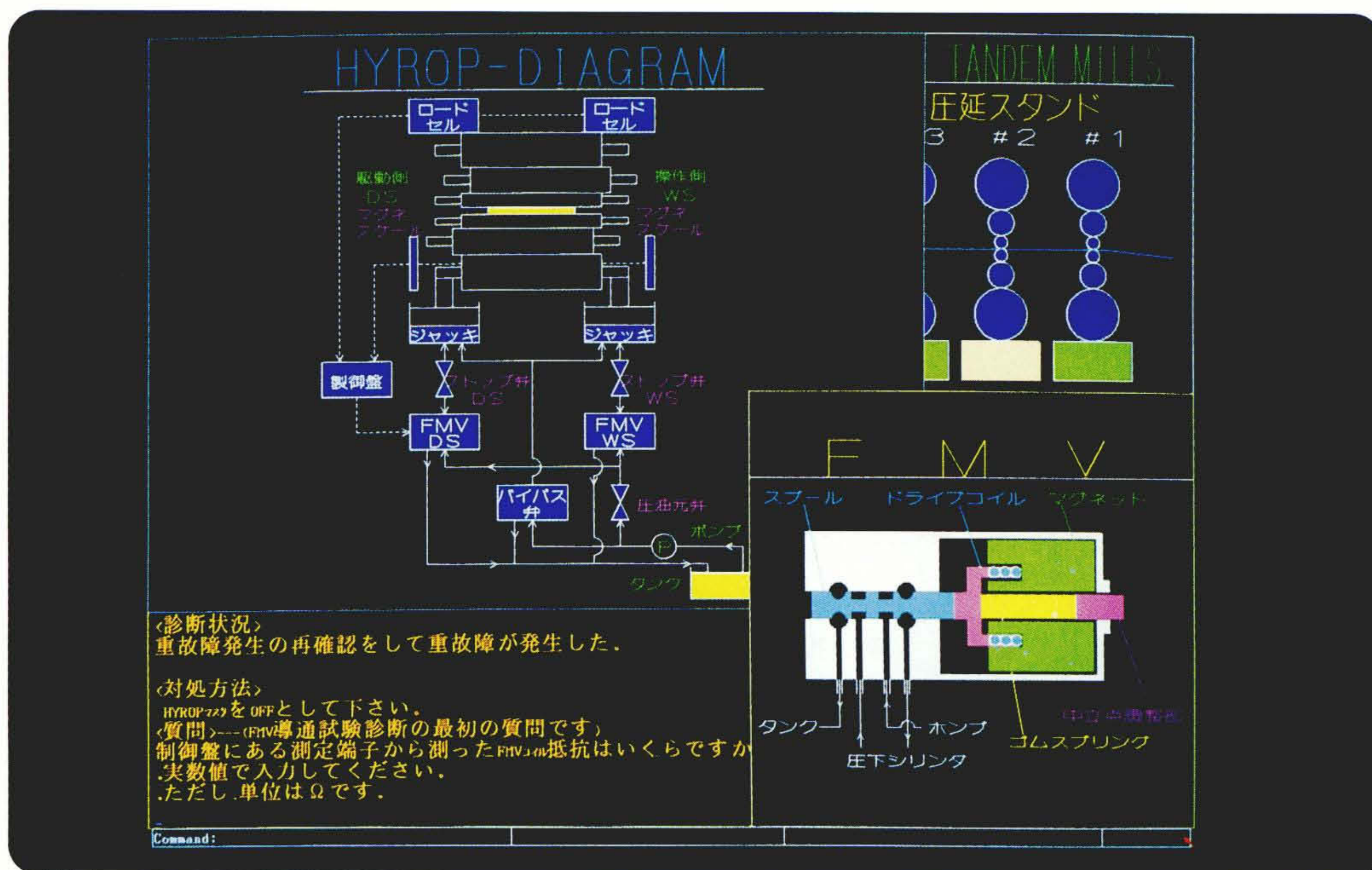


図6 推論結果の画面表示例 グラフィックディスプレイ表示パッケージを介して、推論結果や推論経過の説明をわかりやすく表示できる。

4.1 ファジィ推論

ファジィ推論では、専門家の直感的な知識は、「if条件部A then結論部B」(もしAならばBである)というファジィルールで表現する。条件部Aおよび結論部Bの成否は、0から1までの連続的な値によって、中間的な状態も認めた形で扱う。この成否の度合い(一般的に適合度と呼ばれる。)は、メンバーシップ関数という関数で定義される。

ファジィ推論の基本的処理は、図7に示すように、次の二つのステップによって実行される。

(ステップ1)個々のファジィルールの推論

ファジィルールの条件部の適合度を調べ、結論部の適合度を決定する。これをすべてのファジィルールに対して行う。

(ステップ2)推論結果の統合

(ステップ1)で求められた個々のルールの結論部の適合度に対して、合成演算を施し、全体としての適合度を決定する。この最終的な結果を物理的な一つの値として出力する必要がある場合は、適合度を表す面積の重心計算などを施し、その値を求める。

EUREKA-IIのファジィ推論の特徴は、上記基本機能に加えて、予見ファジィ機能⁹⁾をサポートしていることにある。これは、予測シミュレータを付加することによって、具体的なプラント操作を実行した場合に、どのような結果が生じるかをリアルタイムで予見し、最適な結果をもたらす操作を選び実行に移すという機能である。

この機能によって、例えば、「もしバルブを大きく開けたとき、蒸気温度が安全に低下できるならば、バルブを大きく開ける」といった予見を含んだ経験則を有効に利用可能となり、

制御レベルの飛躍的向上を図ることができる。

4.2 協調推論

プロダクションシステムとファジィシステムは、どちらか一方が他より優れているというわけではなく、おのこの得意とする問題領域を持っている。例えば、前者は図3のボイラ温度異常検出ルール「if1号機ボイラの現在温度が温度上限値より大きい…」という定量的知識の処理に適している。これに対して後者は、図7のバルブ操作ルール「if蒸気圧力が非常に高い…」といった定性的知識の処理が得意である。したがって、両者が役割を分担して、互いに相補いながら業務を遂行させるのが有効である。

EUREKA-IIでは、このために両者間の結合インタフェースを設け、両者が協調して推論を進めることを可能にしている。具体的には、

- (1) プロダクションシステムからファジィ推論機構をサブルーチンとして呼び出す機能
 - (2) ファジィ推論に必要な入力データをプロダクションシステムのフレームから取り出し設定する機能
 - (3) ファジィ推論結果をプロダクションシステムのフレームに設定する機能
- などである。

さらに、ファジィシステムでもプロダクションシステムと同様に、前記3.3に述べたものと同様の「従来ソフトウェアとの結合」機能もサポートし、プロダクションシステム、ファジィシステム、従来ソフトウェアの三者が一体となった高レベルの計算機制御システムの実現を容易にしている。

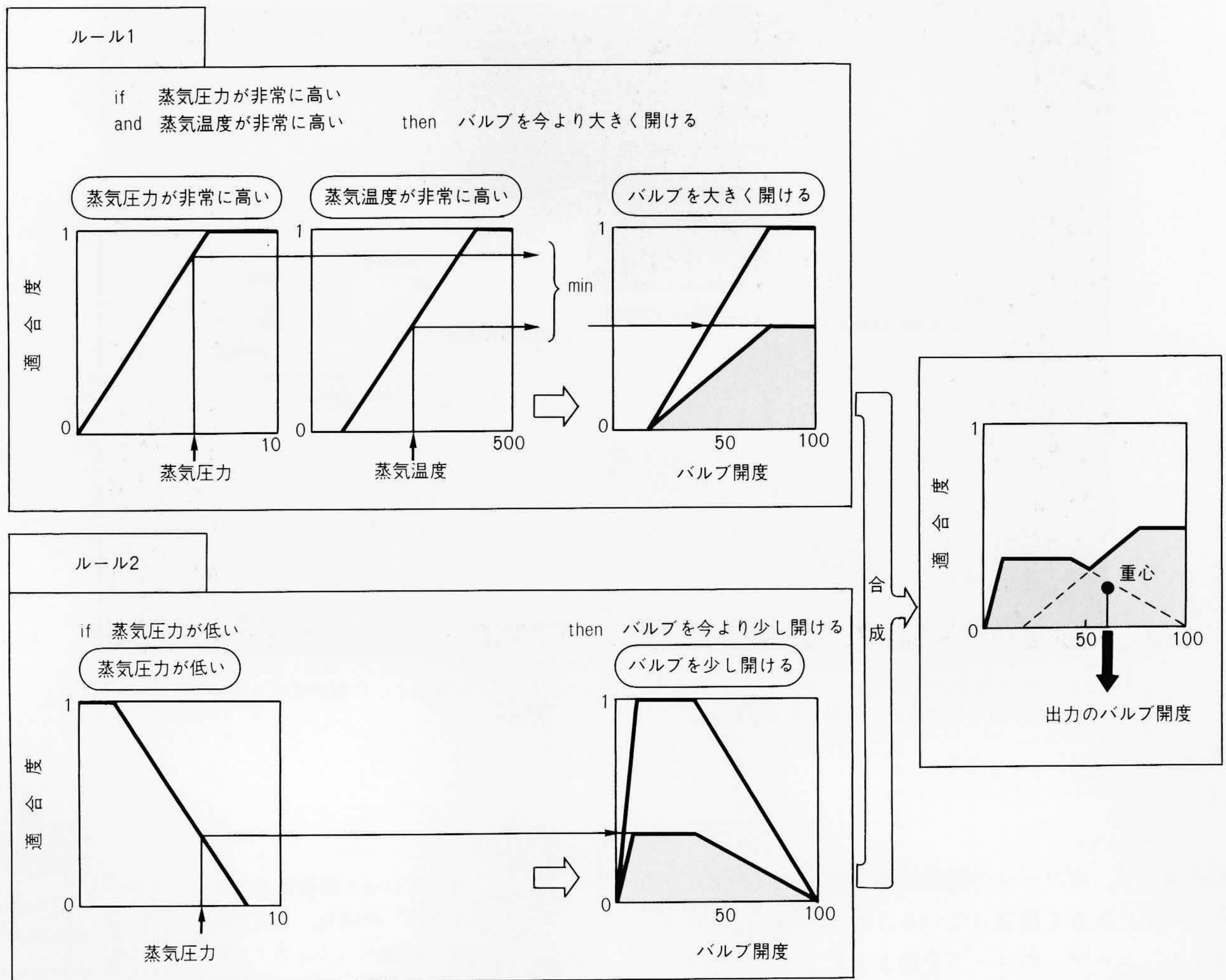


図7 ファジィ推論の例 ファジィ推論は、個々のルールの推論および推論結果の合成によって行われる。専門家の直観的知識が扱え、より人間に近い知識処理システムを構築できる。

5 開発環境

知識処理システムを効率よく構築するためには、ナレッジエンジニア(専門家から知識を引き出し、知識処理システムを構築するエンジニア)にとって使い勝手のよい開発環境を用意することが必要不可欠である。

EUREKA-IIでは、図8に示すようなマルチウインドウ、マウスによる操作を基本とした知識エディタ、ブラウザ、デバッガを備え、これにこたえている。

(1) 知識エディタ

知識ベースへの知識の入力・編集を行うものであり、知識を日本語ベースで容易に入力できるようになっている。

また、ファジィのメンバーシップ関数定義は、グラフィカルに行えるばかりでなく、システムが用意している標準パターンを取り出し、カスタマイズすることもできる。

(2) 知識ブラウザ

知識ベースの静的解析を支援するツールであり、ルール、フレーム、ビューノートなどの構造枠組みや、定義・参照の

クロスリファレンスをグラフィカルに表示する。

(3) 知識デバッガ

ブレイクポイントによる推論中断・再開、1ルールごとのステップ実行、推論途中でのフレームやビューノートの内容表示などを行うことができる。ルールの実行順序、実行結果を調べ知識の正しさを確認することが可能になる。

さらに、知識修正時の再テストを容易に行えるよう、テストデータやテスト結果をライブラリ化することが可能であり、知識修正時の品質確保、作業効率向上を図っている。

6 結 言

HIDIC V90/5シリーズおよびエンジニアリングワークステーションESシリーズ上の知識処理システムの構築を支援するツールEUREKA-IIについて、その開発背景と機能を述べた。

本ツールは、知識の表現・利用形態の多様性や高速推論処理などの実用的特性によって、種々の分野の多数の知識処理システム構築に適用され、プラント運用の自動化範囲の拡大、効率的かつ品質の高い操業実現に寄与してきた。また、これ



図8 開発環境の画面例 マルチウインドウ，マウスによる操作を基本とした開発環境を備えており，知識の入力や正しさの確認が容易に行える。

ら適用を通じて，本ツールの開発環境は知識処理システム構築の効率向上に大きく役立っていることが確認されている。

今後とも，ユーザーのニーズを踏まえてより使いやすいツールにするとともに，ニューロコンピューティング技術などの幅広い知識工学技術を取り入れ，より高機能なツールとするために不断の努力を積み重ねていく考えである。

参考文献

- 1) 船橋，外：知識処理システムの現状と動向，日立評論，71，8，701～707(平1-8)
- 2) 船橋，外：知識処理システムとその構築支援ツール，日立評論，70，5，547～554(昭63-5)
- 3) 鍛冶，外：火力発電プラント設備診断・運転支援エキスパートシステム，日立評論，71，8，753～758(平1-8)
- 4) 小山，外：プロセス制御用エキスパートシステム構築支援システム“APOS”の開発，日立評論，71，8，717～724(平1-8)
- 5) 田野，外：知識ベースシステム構築用ツールEUREKAにおける高速処理方式，情報処理学会論文集，Vol.28，No.12，1255～1268(昭62-12)
- 6) 安信：列車運転のファジィ制御，システム制御，Vol.32，No.11，629～636(昭63-11)
- 7) Forgy, C. L., Rete: A Fast Algorithm for the Many Pattern/Many Object Pattern Match Problem, Artificial Intelligence, Vol.19(1982)
- 8) S. Tano, et al.: EUREKA-II: A Programming Tool for Knowledge-Based Real Time Control Systems, Proceedings of IEEE Int. Workshop on Artificial Intelligence for Industrial Applications, pp.370～375(1988)
- 9) M. Funabashi, et al.: Knowledge Based Control Systems and Software for Building Expert Systems EUREKA-II, Hitachi Review 37, No.4, pp.267～274(1988)