

# 製鉄所における設備運転支援形エキスパート システムの実用化

## Application of Expert System Assisting Plant Operation in a Steel Mill

鉄鋼業の管理システムの分野での最近の課題は、ますます激しくかつ短サイクルになりつつある環境変化へ迅速・的確にシステムを追随させることと、情報を中心とした新技術の発掘・活用によって新たな世界を確立することである。この課題を解決する有効な手段の一つとして期待されているのが「知識工学」である。

新日本製鉄株式会社は、この技術を早期に実用化すべく、各分野への適用研究・開発を進めている。

当「高炉炉頂圧発電設備運転支援エキスパートシステム」は、そのテーマの一つで日立クリエイティブワークステーション2050/32とES/KERNEL/Wを活用し、操作性・原因追跡などに十分工夫を行い開発されたもので、既に実運用に入っており、知識の伝承・異常の迅速診断などに威力を発揮している。

本稿では、同システムの概要、知識ベース構築の考え方、適用効果・知見について紹介する。

浅田 誠\* *Makoto Asada*  
中西光博\* *Mitsuhiro Nakanishi*  
松本守量\* *Morikazu Matsumoto*  
小田 豊\*\* *Yutaka Oda*  
藤田昌平\*\*\* *Shōhei Fujita*  
足立誠治\*\*\*\* *Seiji Adachi*

### 1 緒 言

鉄鋼業は大規模な装置産業であり、多品種、多形状の鉄鋼製品の製造には複雑・多岐な工程を要している。このため、プロセス技術の革新、設備の効率化、省力化、省エネルギー化が経営の主要課題であり、早くからコンピュータを生産工程管理、プロセス制御などに活用し大きな効果を生み出してきた。

しかし、近年、我が国鉄鋼業を取り巻く環境は急激な円高、産業構造の転換、顧客ニーズの多様化などによって非常に厳しい状況となり、業界を挙げて歩留まり・原単位向上や要員合理化といったコスト切下げ、品質向上、納期の短縮などの努力を極限まで追求している。これに伴って、システム部門に対する役割・期待はますます大きく、その重要性を増しつつある。

したがって、「いかに効果的なシステム化を行い、よりいっそうの成果を得るか」が今後の課題と言える。しかし、これまで支えてきた従来技術の延長・拡大のアプローチでは限界があり、この壁を打破する核となる技術の一つとして期待されているのが「知識工学」である。

このような背景から新日本製鉄株式会社では、この技術を早期に実用化し、効果に結び付けていくべく全社的な推進組織を発足させ、種々の分野への適用研究・開発を進めている。

本稿では、そのテーマの一つで設備異常の迅速診断及び次世代への技術伝承、少人数運転体制実現への支援を目的に開

発された新日本製鉄株式会社名古屋製鉄所における「高炉炉頂圧発電設備運転支援エキスパートシステム」の概要と知識ベースの構築方法、適用効果などについて述べる。

### 2 高炉炉頂圧発電設備運転支援エキスパートシステムの概要

本システムは、高炉炉頂圧発電設備の運転時異常が発生した際の原因究明作業を支援するシステムであり、タービン起動装置の異常状況及び各設備ユニットの動作状況を計算機に対話形式で入力することによって、調査箇所のガイダンスと、不良箇所の推論結果をディスプレイに表示するものである。対象とする設備ユニットは32箇所機械・油圧・電気回路の故障診断を主体としている。

#### 2.1 高炉炉頂圧発電設備の概要

高炉炉頂圧発電設備は、高炉から排出されるガスの圧力を利用してタービンを回し発電する設備で、新日本製鉄株式会社名古屋製鉄所では、2基の高炉にそれぞれ1基ずつ設置されており、各14 MWの電力を生み出している。設備の概要を図1に示す。

#### 2.2 開発の背景とねらい

図2に示すように、この発電設備のタービン起動装置は複雑な制御回路から成っており、異常時の原因調査は、熟練運

\* 新日本製鉄株式会社名古屋製鉄所生産技術部 \*\* 新日本製鉄株式会社名古屋製鉄所製鉄部 \*\*\* 日立製作所大森ソフトウェア工場  
\*\*\*\* 日立中部ソフトウェア株式会社

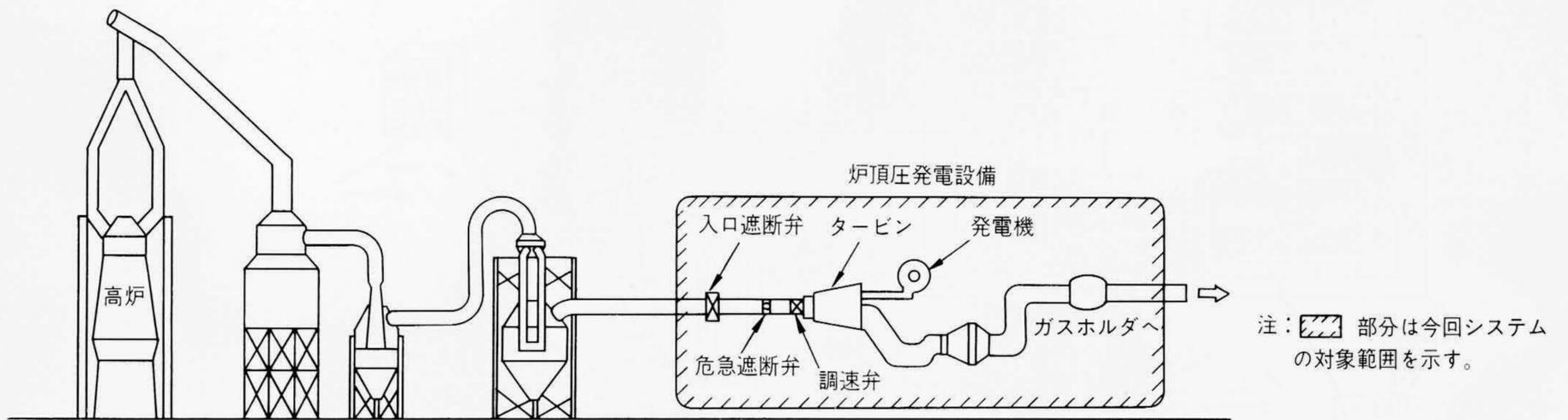
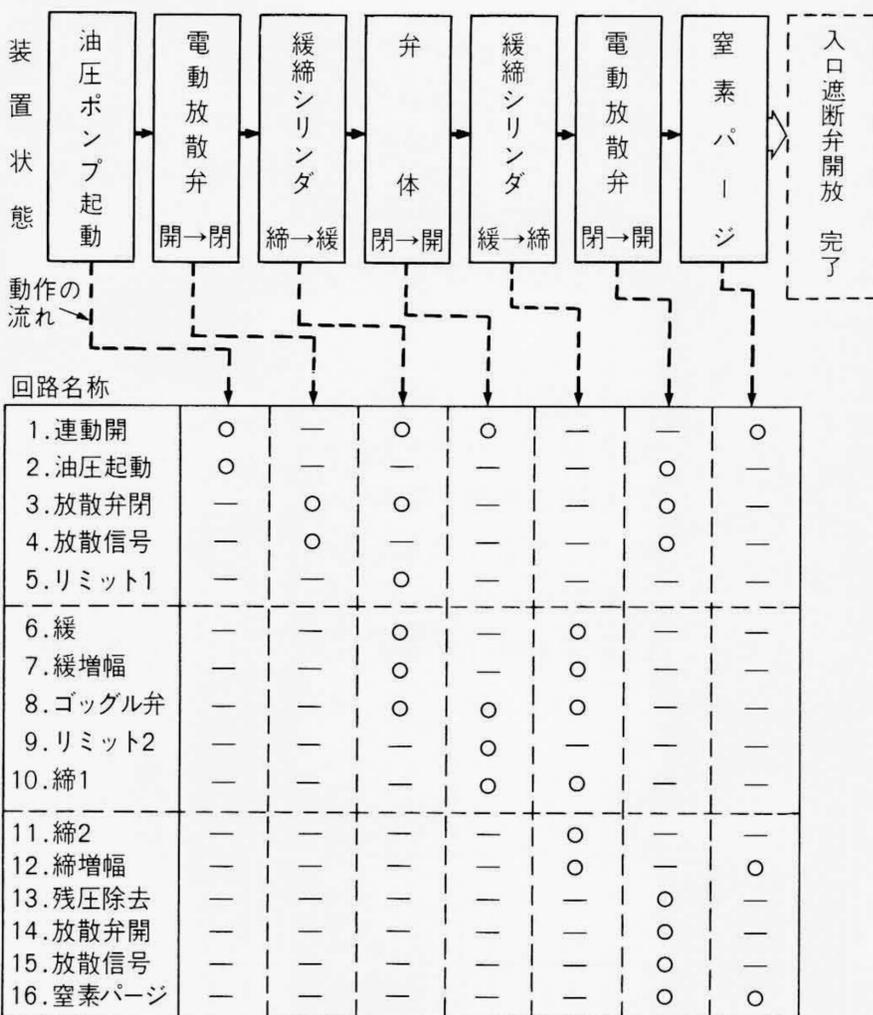


図1 設備概要 高炉から排出されるガスの圧力を利用して、タービンを回し発電する。



注：○(回路状態変更)

図2 装置と回路の関連図 装置状態が変わるごとに回路状態が変更される(シーケンス回路)。

転者の知識や経験に頼るところが大きく、しかも多くの時間(復旧平均時間：8時間/回、うち5時間は原因調査・連絡)を費やしているのが実情である。

こうした問題を解決するために、AI(Artificial Intelligence)エキスパートシステムによる運転支援システムの導入を図った。本システムのねらいは以下のとおりである。

- (1) 迅速な設備異常診断によって、発電の機会損失を防止する。
- (2) 生きた標準として、次世代への技術伝承を行う(熟練運転者の枯渇化対策)。
- (3) 少人数運転体制実現のための運転者プール運用に伴う、各人の管理スパン拡大を支援する(熟練運転者の合理化)。

### 2.3 システムの特徴

本システムの主な特徴を挙げると下記のようになる。

(1) マンマシンインタフェースはグラフィック機能やマウスを利用した操作性の高いものとしている。

(a) ディスプレイに電気回路図、油圧系統図などを表示したうえ、点検の箇所を点滅させることによって視覚に訴えた親しみやすいマンマシンインタフェースとした。

(b) 図面及び操作選択のメニューを常にディスプレイ表示することによって、マウスによる選択を可能とした。

(2) ファジ理論を応用したあいまい性表現を適用し、知識の推論結果の信頼性を高めている。

熟練運転者のあいまい性を含んだ知識を活用するためファジ理論を適用した。

(3) 推論結果に至るまでの過程の説明表示を行い運転者の判断作業を支援している。

推論過程を運転者に提示して個別の知識の持つ意味、更には発生した現象の理解を助けている。

### 2.4 システムの構成

本システムの構成を図3に示す。システムを実現するに当たり、以下の要点を整理し、機器の選定を行った。

(1) 操作性の高いマンマシンインタフェースを実現するため、以下の条件を満たすものとする。

(a) 日本語による知識表現が可能なインタフェースを持つこと。

(b) カラーディスプレイ、マウス、マルチウインドウ機能を備えていること。

(c) グラフィック機能を活用して図で提示できること。

(2) 将来的には運転者自身で知識の追加・修正が可能なこと。

これらの機能を満足するものとして、ハードウェアは日立クリエイティブワークステーション2050/32、AIエキスパートツールはES/KERNEL/Wで構成した。

エキスパートシステムの基本構成と今回の開発規模を図4に示す。知識ベースの構築方法は次章で詳述する。

### 2.5 診断手順

本システムでの診断手順を図5に示す。

## 3 知識ベースの構築

システムの開発は、プロトタイプングアプローチで行った。プロトタイプングアプローチのねらいは知識構造の明確化と、その問題領域でのエキスパートシステムの適用可否検討をまず行ってから先に進むことにある。そこで、要求の明らかに

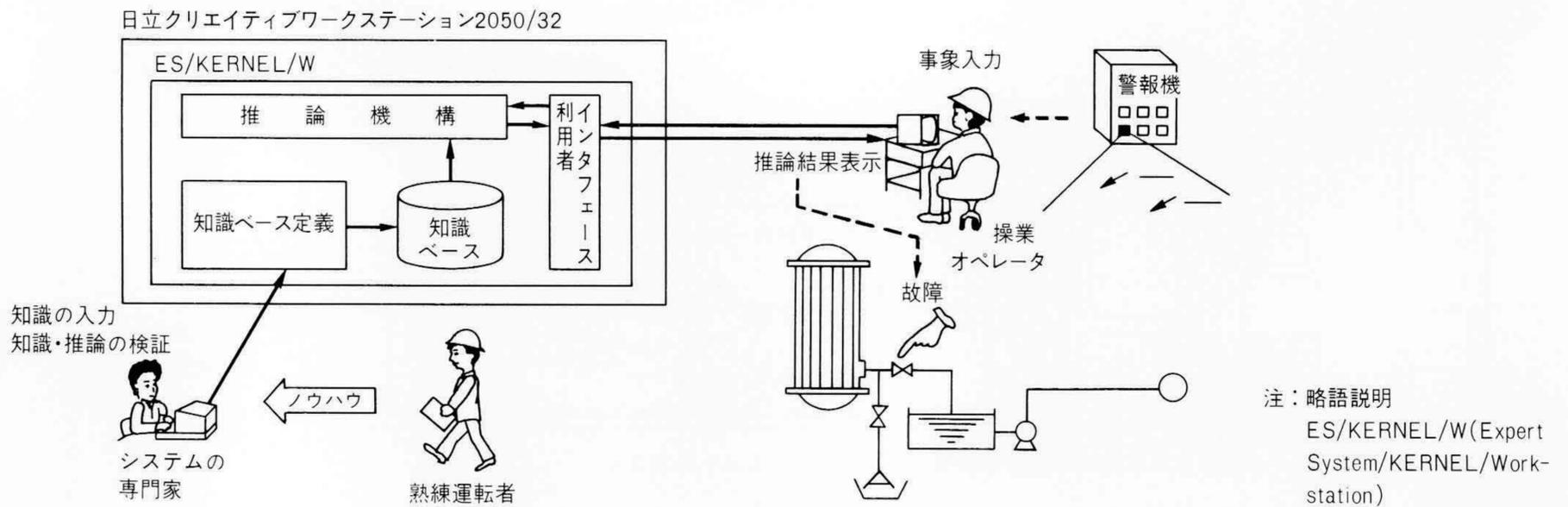


図3 システム構成 このシステムは日立クリエイティブワークステーション2050/32上で稼動し、AIエキスパートツールはES/KERNEL/Wで構成している。

なった範囲でプロトタイプを構築し、実際に運転者に使ってもらい大まかな動作の確認及び実現の可能性を判断したうえで実機化(知識の追加)に進んだ。

知識ベース構築については、登録した知識の良しあしが直接システムの有用性を左右するので非常に重要な作業である。実際の作業は、知識獲得、知識整理、知識ベース設計、知識ベース登録の4フェーズに分けて行った。

以下にその内容を述べる。

### 3.1 知識獲得

知識獲得方法については、現在まだ手法として確立されたものもなく、熟練運転者の漠然とした断片的な知識とノウハウをいかに迅速に、漏れなく正確に抽出するかに苦労した。

知識獲得は熟練運転者へのインタビューによるアプローチで行った。インタビューに際しては難航が予想され、システムの専門家と熟練運転者のシステムイメージを少しでも一致させる必要があった。このため、実施に先立ち以下の事前準備を行った。

#### (1) 事前準備

(a) システムの専門家は、システム化領域の設備フロー・仕様・運転方法及びシーケンス回路の動作原理、油圧回路などの業務専門知識を理解・習得し、極力熟練運転者と対等の立場で会話のできるレベルを目指した。

(b) 逆に、熟練運転者にはAIエキスパートの現状を認識してもらうための教育を受けてもらい、AIに対する過大な期

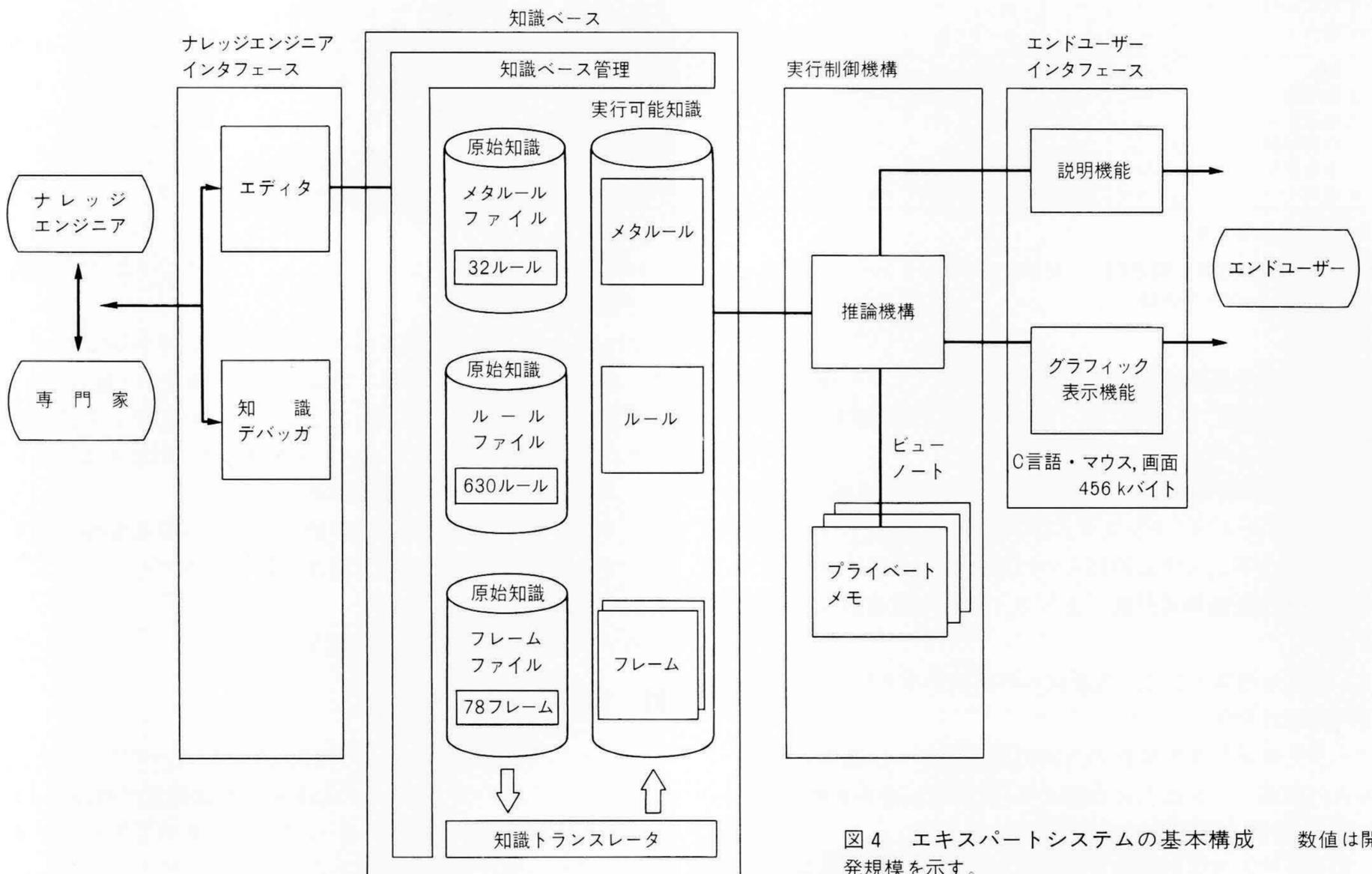


図4 エキスパートシステムの基本構成 数値は開発規模を示す。

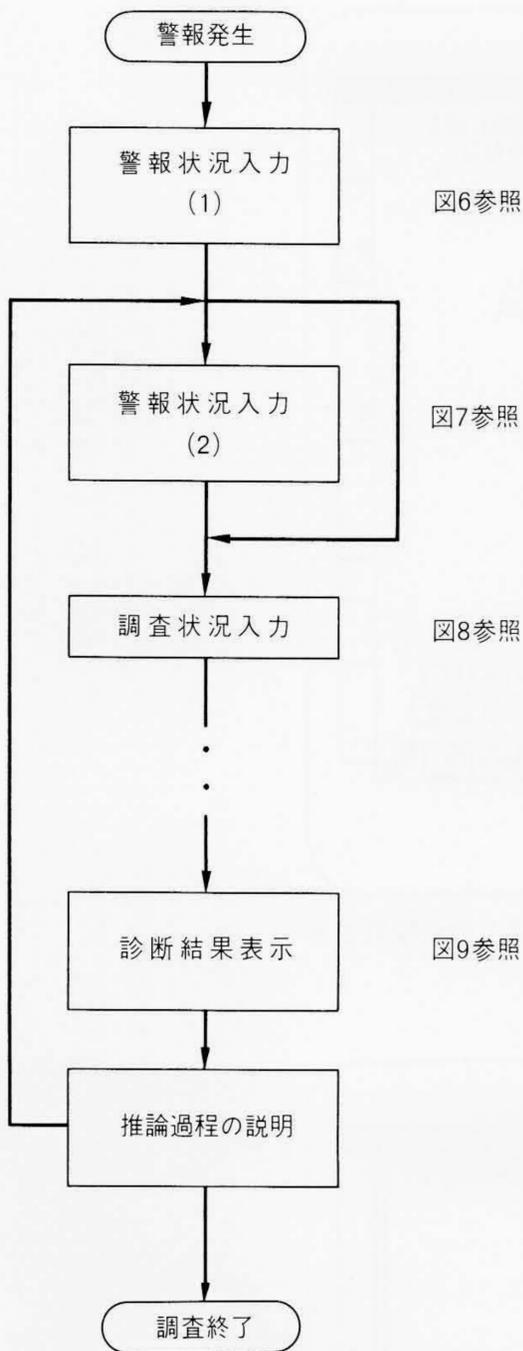


図5 診断手順 診断作業の流れを示す。設備の異常・動作状況を対話形式で入力しながら推論機構で異常原因を推定し、診断結果を運転者に表示する。また推論過程の表示も可能である。

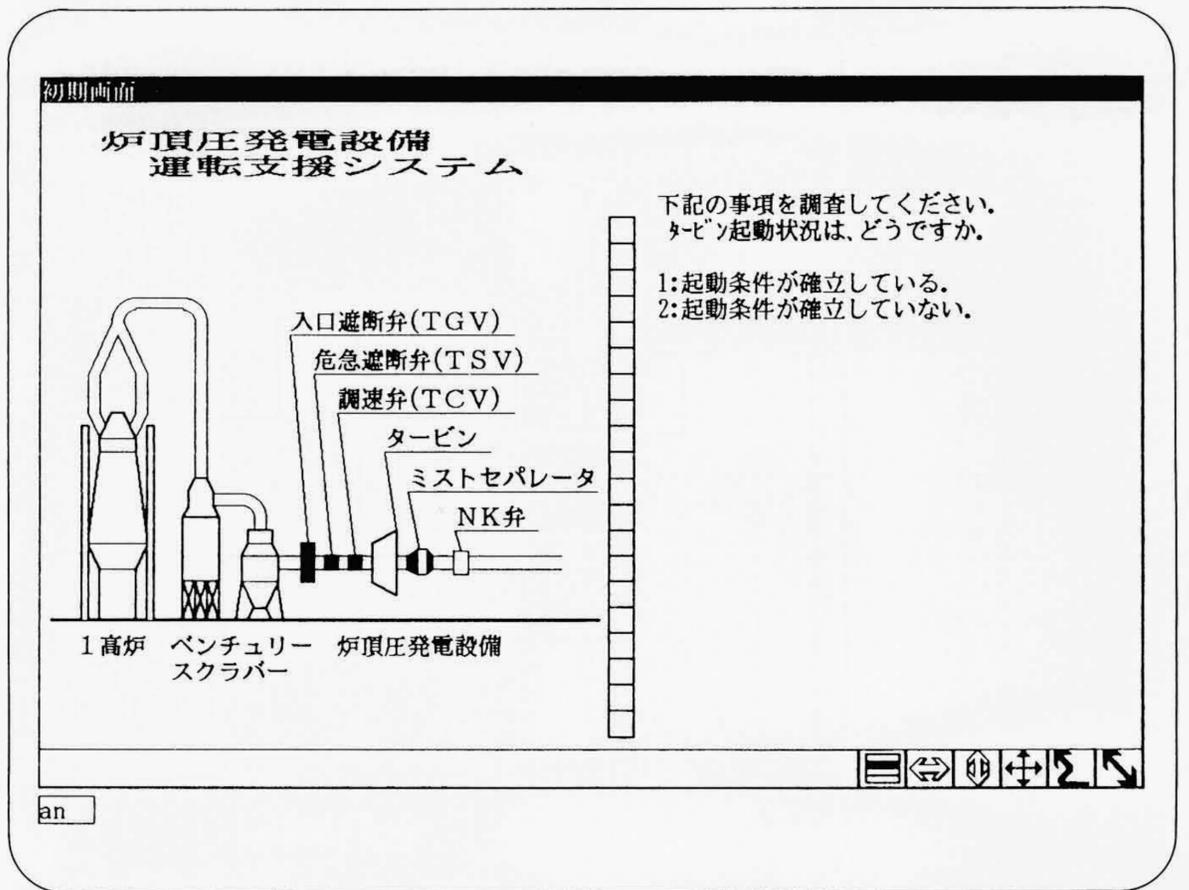


図6 炉頂圧発電設備運転支援エキスパートシステムの初期画面 設備の概要図、タービン起動条件の問い合わせで構成されている。

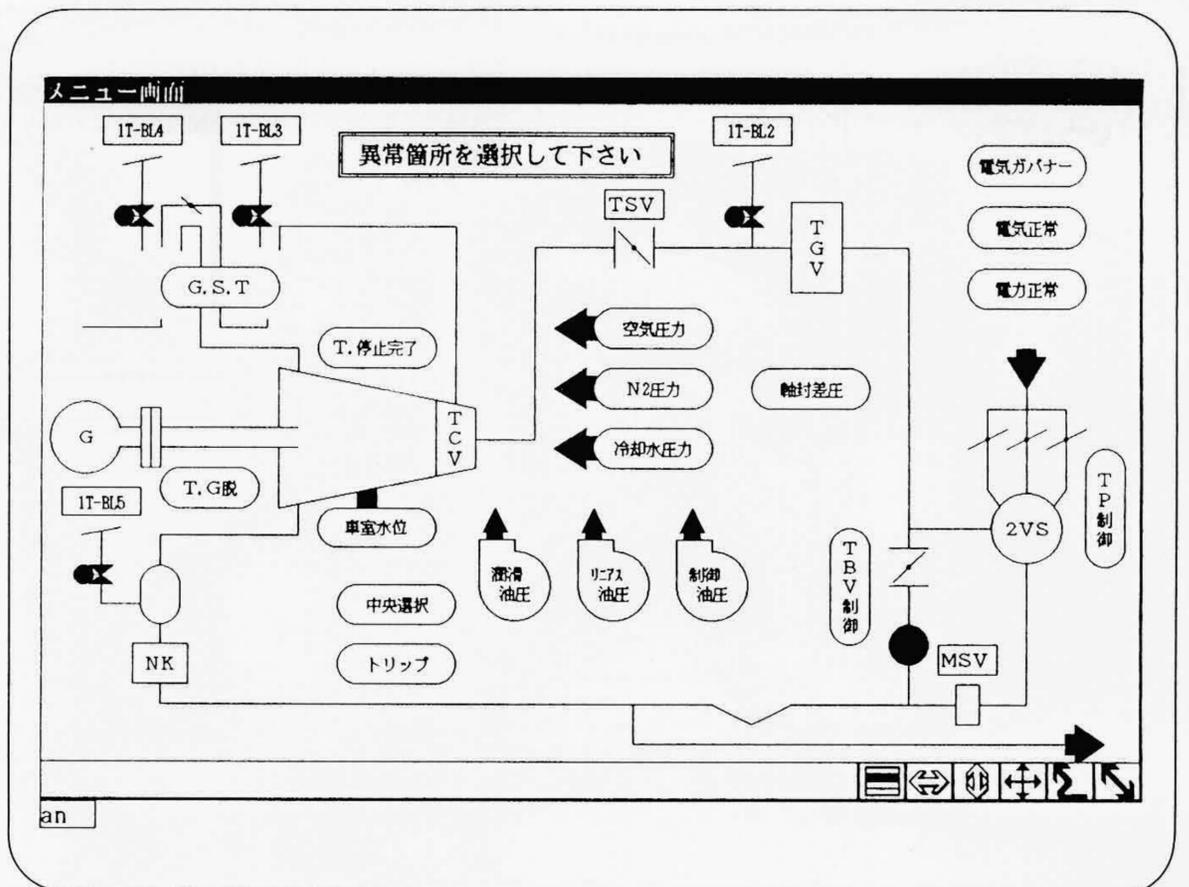


図7 異常箇所の選択メニュー画面 設備の流れの中に32箇所の設備ユニットを表現し、視覚で訴えた親しみやすいマンマシンインターフェースである。

待を取り除いてもらった。

これらの事前準備を行ったあと、インタビューを実施した。

(2) インタビューの実施

インタビューの実施に当たって、熟練運転者が答えやすい環境にするため、以下のことを心がけた。

- (a) 質問は具体的な内容で行う。
- (b) 実際の故障調査手順に従って質問を行う。
- (c) 質疑応答は紙に絵や図を書きながら行う。

診断形エキスパートシステムは、原因と事象との因果関係、

又は事象から原因への探索方法に熟練運転者のノウハウがあると考えるとよい。したがって、熟練運転者が実際の故障を追う手順に沿って質問を繰り返す、質問も熟練運転者が故障を思い浮かべられるような具体的なものとした。更に、紙に図や絵を書くことによって、相互の誤解が生じないようにした。

以上の方法によって、熟練運転者からのインタビューは円滑に行うことが可能になり、スムーズに知識を得ることができた。

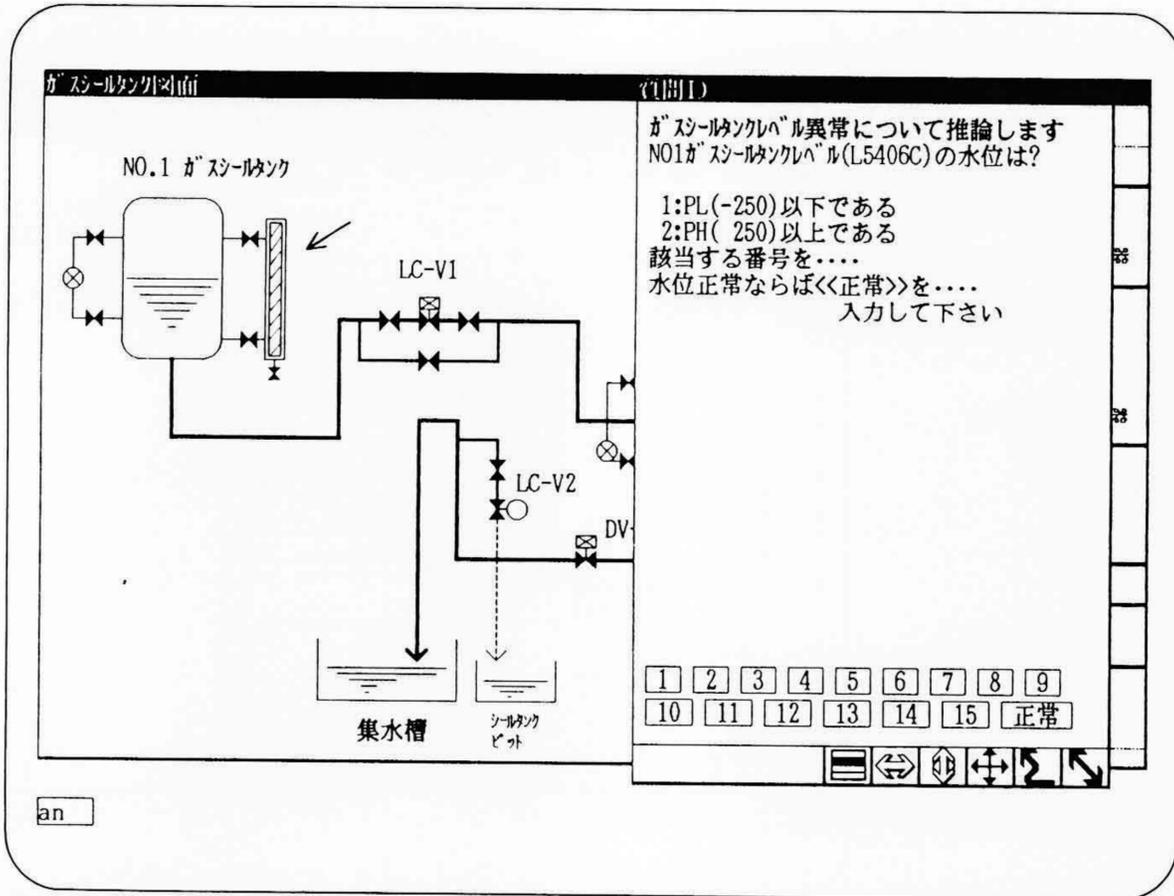


図8 事象入力画面 質問内容が表示され画面上に調査箇所が点滅する。また調査結果をマウスで選択できる。

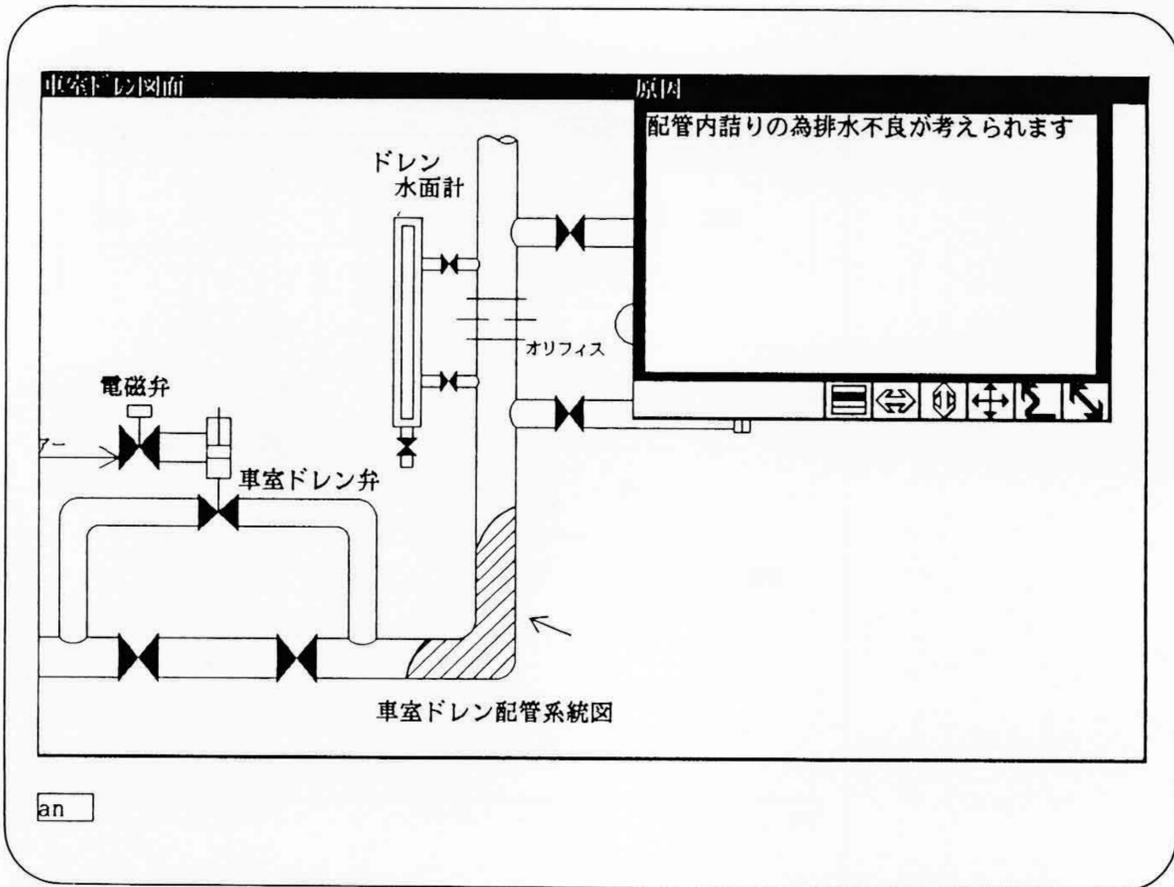


図9 診断結果を表示した画面 診断結果が表示され、画面上に異常箇所が点滅する。

### 3.2 知識整理(体系化)

エキスパートシステムを開発するうえで知識体系化・設計(次のフェーズで詳述)は、システムの性能(診断結果の妥当性、メンテナンス性、診断の効率性など)にかかわる重要なフェーズである。

開発当初は、獲得した熟練運転者の知識(原始知識)を診断形でよく使われる因果樹木図(ツリー)にまとめることを試みたが、末端のノード(原因)に至るまでのノードの深さが非常に深いツリーとなってしまった。特にシーケンス回路の故障

を追求するツリーについては、ノードに同じ回路名称が存在するというむだ・類似が多く存在した。この原因としては、実際に熟練運転者の頭の中に膨大なツリーがイメージされているわけではなく、動作規則・原理をインタビュー時に想定した状況に合わせて、そのまま一つ一つ単純に当てはめながらツリーを作り上げていったためである。したがって、知識整理の段階では、熟練運転者から獲得した知識(原始知識)に含まれる矛盾・類似・むだを取り除き、動作規則・原理(本質的な知識)を取り出す作業を行う必要がある。そこで、図10の

知識整理手順に従って整理を行った。まず、原始知識を形式によって以下の三つに分類した。

- (1) 規則的な知識：動的な知識で行動や調査に関する知識
- (2) 宣言的な知識：静的な知識で設備能力・状態などに関する知識
- (3) あいまい的な知識：あいまい性を含んだ知識

これら分類した知識のうち、規則的な知識を中心に図10の

手順に従って知識の集約を行った。こうして整理された知識を使って診断精度の検証を行ったところ、特に精度の低下はみられなかった。これによって、この方法に基づき分類していくと「本質的な知識」の導出に有効であることが分かった。

### 3.3 知識ベース設計

知識ベース設計は、「本質的な知識をいかに効率よく、分かりやすくコンピュータに登録するか」という問題を解決するフェーズである。コンピュータ上の知識表現形式には、プロダクションルール、メタルール、述語論理、フレーム、メソッドなどがあり、複数の知識表現形式を利用することが一般的になっている。しかし、これらの各表現形式の持つ機能(ユニフィケーション、継承機能など)をどう使いこなすかがポイントとなる。熟練運転者の頭の中にあるいろいろな知識を、宣言的知識はフレームで、規則的知識はプロダクションルールや述語論理で、いかに表現するか頭を悩ますところである。逆にいうと自由度が大き過ぎてどの表現形式にも当てはめられる。しかし、自由に知識ベースの構築を行うと、知識ベースの規模が小さければ推論の流れは理解しやすく新しい知識の追加もやさしいが、知識の量が増すにつれシステム全体の動きが把握できなくなり、知識を追加しにくくなる。現実以下のような現象も発生した。

#### (1) 現象

新たなプロダクションルール追加によって、他の既存のプロダクションルールに影響を与え診断結果を狂わせてしまった。

#### (2) 原因

新規ルールの追加によって、一度に動けるルール数が増加し競合解消の様子が変わり、従来動いていたルールと異なるルールが動くようになってしまったためである。

知識ベースの設計では、「規模が大きくなっても推論の流れの見える設計」が一つの指標になる。推論の流れを明確にするには、熟練運転者がいかに問題を解決しているかの問題解決プロセスを解明し、各プロセスごとの知識に分割する必要がある。そこで規則的な知識を中心に機能分類を行った。その結果、図11のような問題解決プロセスを実行していることが分かった。これによって、規則的な知識は状態を調査する知識と状態から仮説を導く知識とに分けられ、宣言的な知識は状態を認識する知識として定義できた。また、メタルールを使って、これら知識群に対し、順次焦点を移動しながら診断を行う構成にすることができた。この構成によってマクロ的な推論の流れが明確になり、典型的な診断プロセスが得られるようになった。また、各設備ユニットごとに知識を分けることによって、知識の守備範囲がはっきりし、実行可能ルールも絞られ、処理速度向上にもつなげることができた。また、ミクロ的な各知識群の表現に当たっては実際の業務を素直に表すように心がけた。以下にその表現方法について述べる。

#### (a)の1 状態を調査する知識の表現方法

状態を調査する知識は、仮説を絞り込むための調査箇所を指定する知識である。この知識は必ずしも三段論法だけで表現できるものではなく、試行錯誤を繰り返すこともあり、これらについては、バックトラック機能とユニフィケ

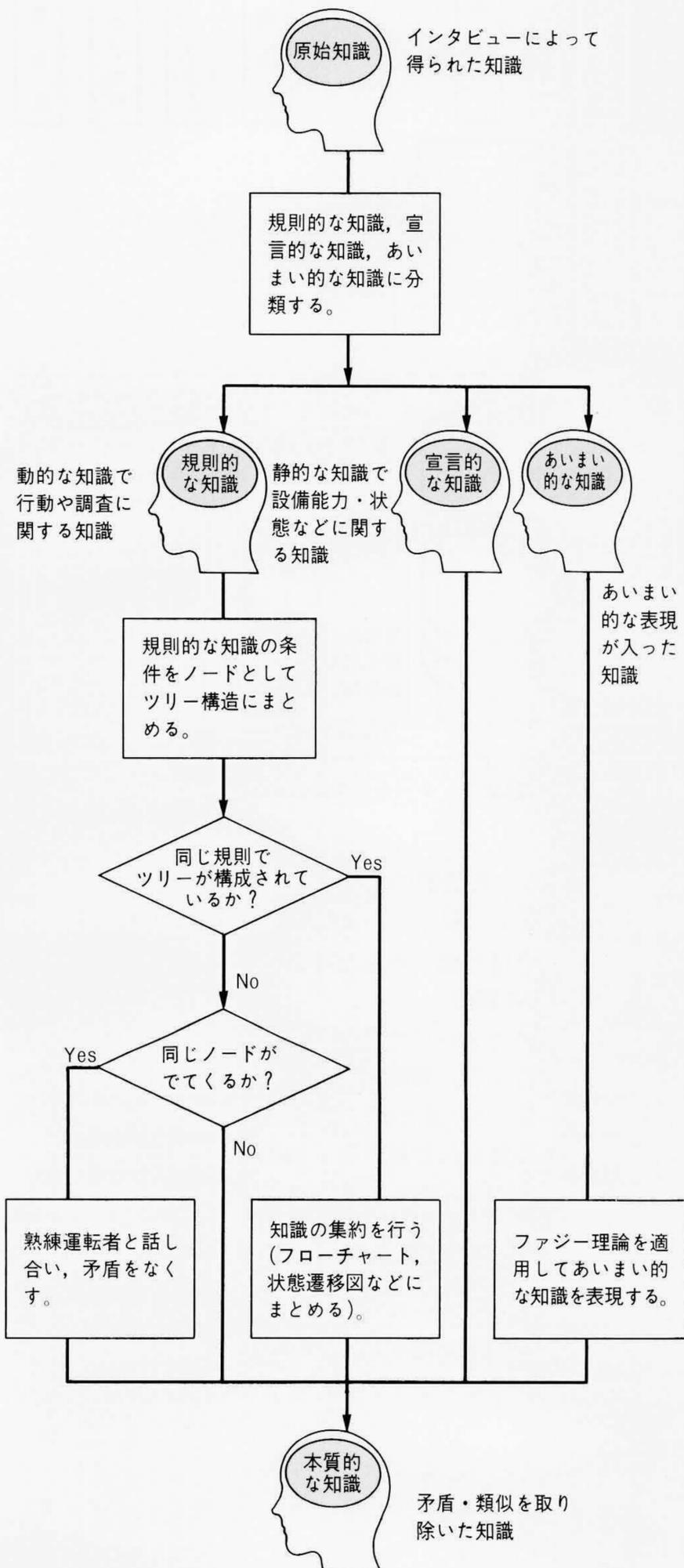
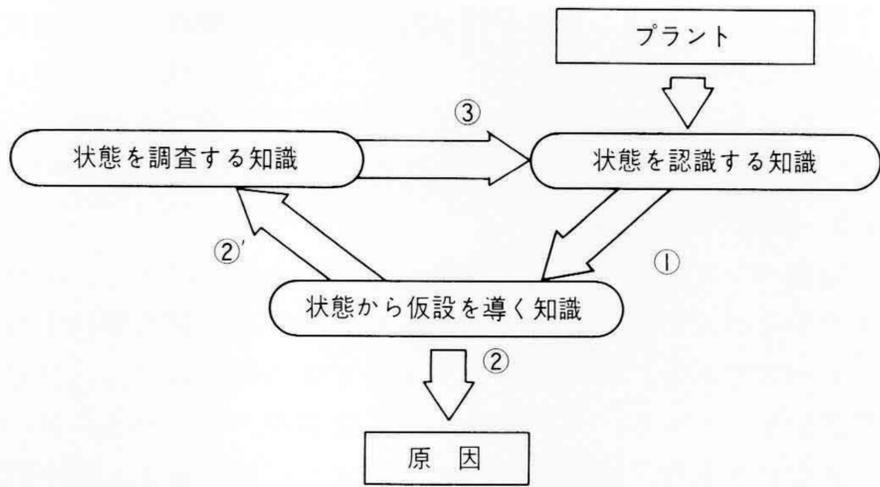


図10 知識整理手順 獲得した知識から本質的な知識を導く手順を示す。



注：①～③は推論手順を示す。

図11 原因追及の推論過程 原因を求めるための推論の流れを示す。

ーション機能を使ったほうが書きやすいため、プロダクションルールとビューノートを利用して表現を行った。

(a)の2 状態から仮説を導く知識の表現方法

状態から仮説を導く知識は、状態から推論して原因を予想する知識である。これらは、プロダクションルールを利用して表現をした。

(b) 状態を認識する知識の表現方法

状態を認識する知識は、トラブルが発生した時点のプラントの状況判断を行う知識である。これらの知識は静的な知識が多いため、フレーム表現を利用した。知識の中に現れるプラントの状態を表す項目を洗い出し、同じ項目をまとめたうえで設備的に依存関係にあるものは階層構造にした。これによって、個々のフレームに記述する項目数も少なくて済んだ。また、類似した回路が順に接続されているようなシーケンス回路は、リスト構造、デーモン機能を利用した。デーモンとはソフトウェア割込みの一種で、スロット値の読出し、書込みを実行しようとしたとき、その直前に必要な手続きを起動する機能である。これによって、情報入力につど、入力に関係する設備データが更新されるようなシミュレータが構築でき、入力された情報源を最大限に活用することが可能となった。今回開発したシステムのフレーム構成を図12に示す。

以上、各知識の内容と表現方法について述べたが、基本的なポイントは以下の2点にある。

- (1) 熟練運転者がプラントを調査する着眼点と、その状態から仮説を立てる知識を、忠実にプロダクションルールとビューノートによって表現する。
- (2) プラントの動作機構を再現するためフレーム、デーモン機能を活用する。

これら知識の分類法、分類された知識群の表現法によって、知識の追加による修正箇所の検索が早くなり、修正作業も容易になった。また、以上述べた以外に、各知識群どうしのインタフェースを統一することは、知識の追加をより楽にした。本節では、整理された知識をマクロ的にとらえ問題解決プロセスの解明を行い、プロセスごとに知識を分類することの重要性について述べたが、あらゆる問題領域の知識がプロセスごとに分類できる保証はない。しかし、今回獲得したいかな

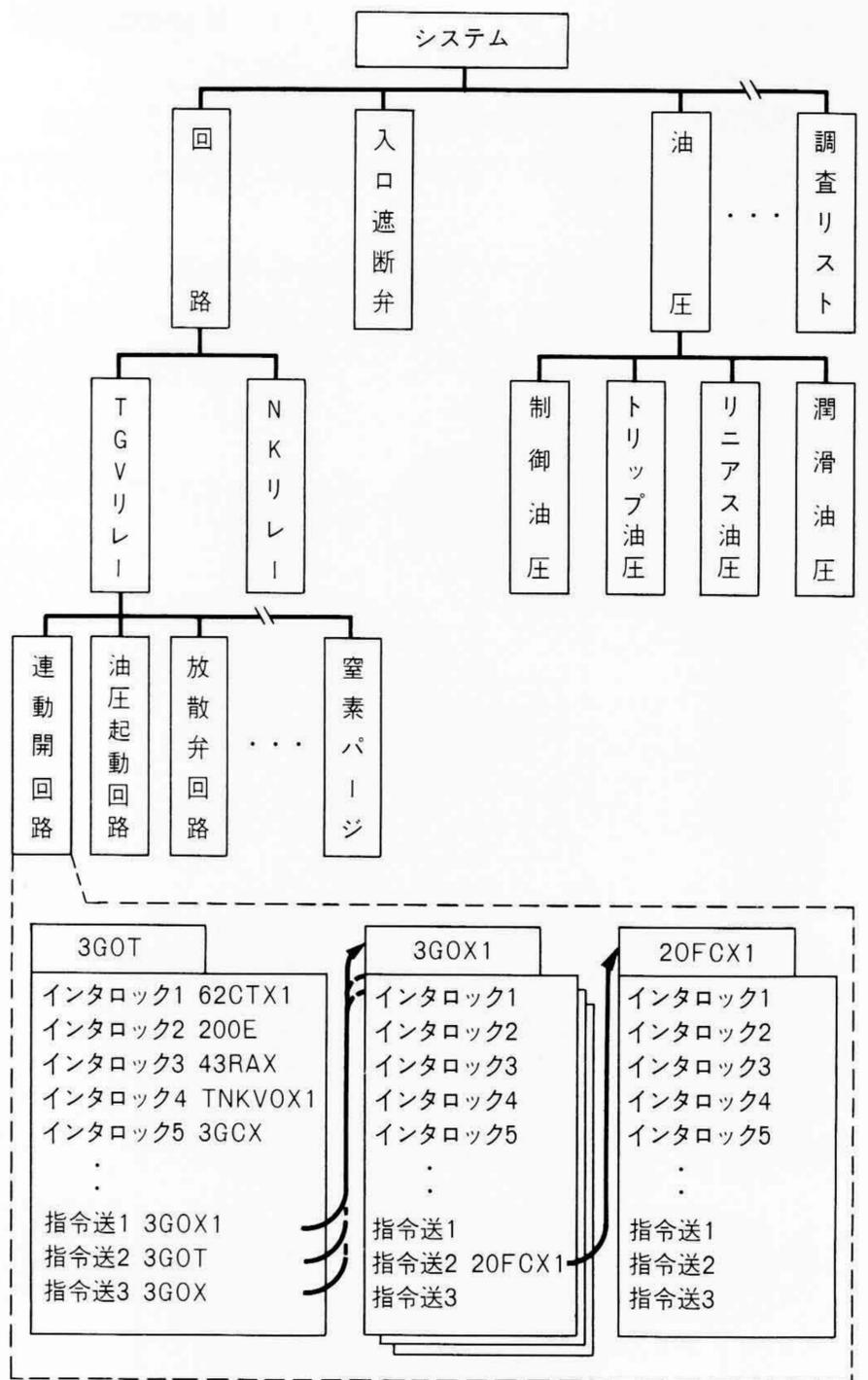


図12 フレーム構成 シーケンス回路のフレーム表現を示す。

る知識も、三つの知識群のいずれかに属することが分かった。診断形のシステムに限っていえば、知識を常に三つの知識群に分類することは可能であると考えられる。

3.4 知識ベース登録

知識の登録のフェーズでは、知識ベースの設計を基に知識の登録作業を行った。知識の追加・修正を容易に行えるように設備ユニットごとにまとめ、各知識(状態認識の知識・状態調査の知識・状態から仮説を導く知識)を個別に登録した。

また、知識の検証を容易に行うために、ルール登録票(ルールの条件部, 実行部, 出典箇所, 目的など), フレーム登録票(スロット定義, メソッド定義など)などのワークシートを作成した。これにより、システムを動かしながらルールが参照できスムーズに検証を行うことができた。今後の知識修正・追加のためのドキュメントとしても有効に活用できると考える。

4 適用効果と適用知見

4.1 適用効果

熟練運転者の知識・経験を知識ベースに蓄えることによって、非熟練運転者が利用できるようになった。

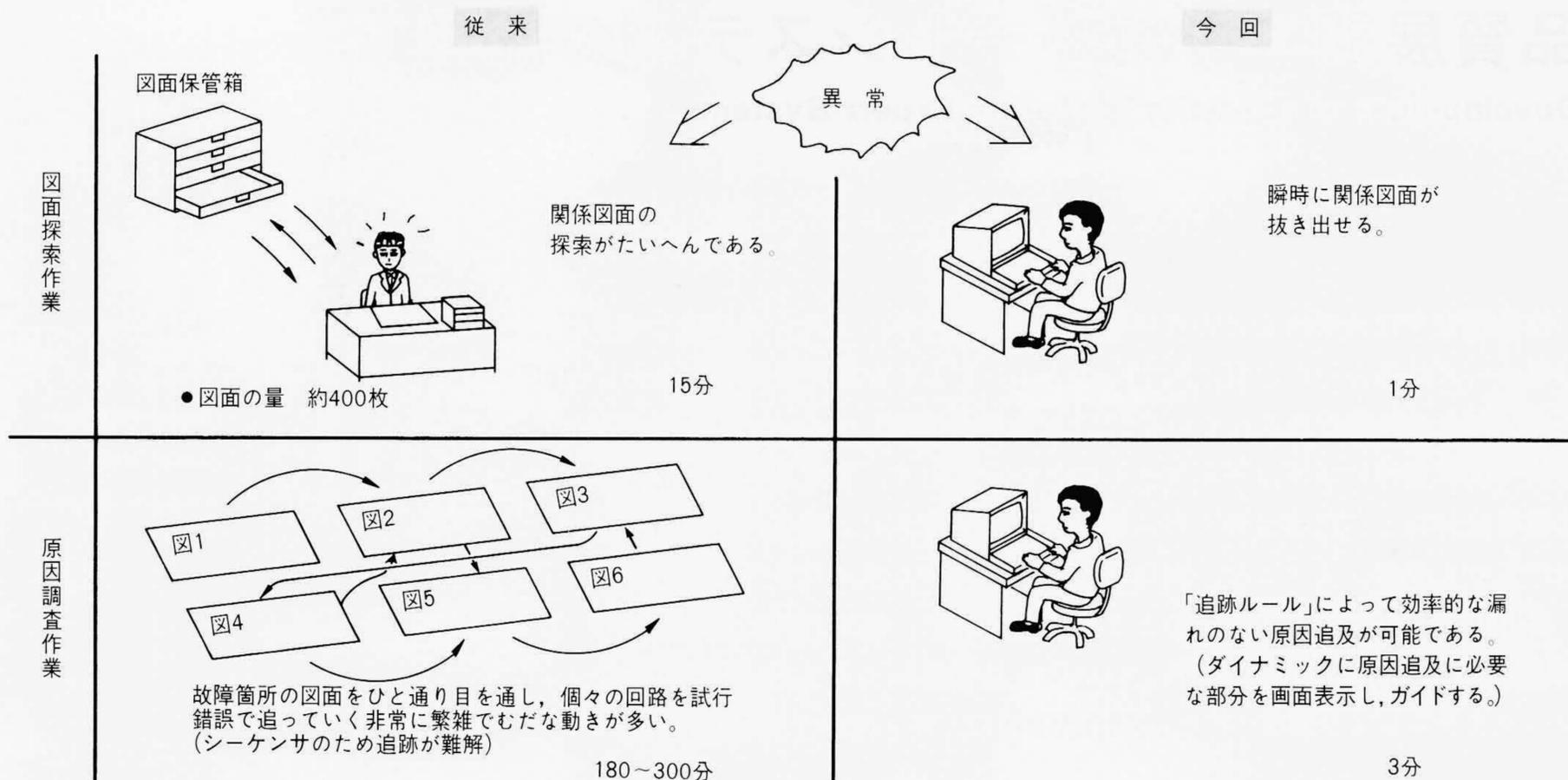


図13 新旧作業比較 原因調査作業が大幅に短縮された。

これによって、故障診断が新旧作業比較(図13)に示すように迅速に進められ、大幅に復旧時間が短縮された。また、技術の伝承及び運転者のプール運用に伴う管理スパン拡大の支援としても有効性を発揮し、今後の少人数運転体制への基盤が確立された。

#### 4.2 適用知見

今回の開発を通して診断形のAIエキスパートシステムに限っていえば、主なものとして以下の三つの知見が得られた。

##### (1) 親和性の高いマンマシンインタフェースの実現が必要

自然言語で運用者に情報提供することはもとより、視覚に訴えた親しみやすいマンマシンインタフェースでなければならない。単に日本語による対話形式で推論結果を表現しても、関係図面の探索・調査や原因箇所の場所調査などが別作業として発生すると、そのシステムは運転者になじんでもらえない。そのシステムが普及するかどうかは、操作性の良いマンマシンインタフェースを実現できるかどうかにかかっている。

##### (2) 知識の体系化にはシステムの専門知識が必要

今回開発では、プロトタイプをシステム部門の専門家で構築し、その後の知識追加は若い運転者(若干のシステム経験とシステムに興味を持っている人を人選)と共同作業で行った。運転者へひととおりの教育(AIエキスパートシステム、C言語など)を実施し、知識ベースの構築を行ってもらったが、知識ベース設計及び熟練運転者から獲得した知識を実質知識への展開作業には、システムの専門知識が必要となり、この部分はシステムの専門家で対応した。このことから、運転者自らの知識追加は部分的には可能であるが、全面依存は難しいことが分かった。

##### (3) 熟練運転者のAIについての正しい認識が必要

AIエキスパートシステムは、人間に代わって考えてくれるものというイメージを持つ人が多い。まだ今のところ人間と同等の知能は持っていない。確かに幾つかの限られた領域で

は、意味の認識、対象の理解、論理的な思考をする。これがあたかも、すべてを実現しているかのように見える。しかし、それを知能と呼ぶにはまだギャップがある。

知識獲得に当たっては、熟練運転者にAI(特にAIエキスパートシステム)について、将来の可能性と現状実現されているレベルの違いをはっきり認識してもらう必要がある。

## 5 結 言

高炉炉頂圧発電設備運転支援エキスパートシステムの開発経験をもとに診断形エキスパートシステムでの知識獲得方法、知識の表現方法などについて述べた。

本システムは、昭和62年に完成させ実用に供しており、知識の伝承・異常の迅速診断に威力を発揮している。今回の開発を通して、(1) 親和性の高いマンマシンインタフェースの実現が必要、(2) 知識の体系化にはシステムの専門知識が必要、(3) 熟練運転者のAIについての正しい認識が必要などの知見が得られ、AIエキスパートシステムの現状認識ができ、今後の取組みへの方向づけが見えてきた。また、近い将来、知識工学の技術を駆使することによって情報処理システムの新しい世界が確実に開かれ、「これまで人間でしかできなかった仕事をコンピュータに置き換えられるようになる。」と確信している。

## 参考文献

- 1) 石崎, 外: AI入門, オーム社(1987-2)
- 2) 川上, 外: 知識工学の電力・鉄鋼システムへの応用, 日立評論, 67, 12, 945~950(昭60-12)
- 3) 湯井, 外: 鉄鋼業におけるエキスパートシステムの応用, 電気学会論文誌C, 147, 2, 115~120(昭62-2)
- 4) 川北, 外: 知識工学の産業システムへの応用, システムと制御, Vol.30, No.5, 289~295(昭61-5)