

# 上下水道自家発電設備予防診断エキスパートシステム

## Priventive Diagnostic Expert System for Private Power Plants for Water and Wastewater Facilities

自家発電設備は電力供給信頼性の向上がもっとも重要である。このため、故障兆候を事前に検知し、事故を未然に防止する予防保全システムの導入気運が高まってきた。この要請にこたえるために、故障の予知、排除とリアルタイムの診断を目指したディーゼルエンジン発電設備の予防診断エキスパートシステムを開発した。エキスパートシステム構築ツールには、EUREKA-II (Electronic Understanding and Reasoning by Knowledge Activation-II)を用い、制御用計算機HIDIC-V90/25でリアルタイムに診断する。

本システムは、東京都下水道局小松川ポンプ所に納入し、実用に供している。運用開始後に得られた知見も容易に組み込むことができ、今後のシステム成長が期待されている。

笠井武郎\* Takeo Kasai  
早稲田邦夫\*\* Kunio Waseda

### 1 緒言

上下水道施設は、人間の生活および都市機能の維持と安全を保つ公共性の高い施設である。このため、電力供給設備は買電停電に備え、非常用自家発電設備の装備が一般化している。また、市街地での雨水排除の使命を担う雨水排水ポンプ所では、自家発電設備を常用化しているところもある。いずれの場合も、運転が必要となったときには確実に稼動することが要求され、予防保全の重要性が高まっている。

今回、東京都下水道局小松川ポンプ所にディーゼルエンジン発電設備を対象として、予防診断システムを納入した。本システムは、ユーザーやエンジンメーカーの協力を得てエキスパートシステムとして開発したものである。システムの開発目標には、故障の予知、排除による稼動信頼度向上と、実用化のうえで不可欠であるリアルタイム診断<sup>\*)</sup>の二つを設定した。診断方式は標準値との偏差値を監視する状態診断、起動および停止時の過渡特性診断、負荷変動に伴って変わるプロセス量の相関関係を診断する相関値診断の三つに分類した。

本稿では、システムの構成と機能および診断の実行例につ

いて述べる。

### 2 自家発電設備の予防診断

異常とは正常に対応することばで、きわめて広い概念である。異常と判断される状態でも、対象物の機能喪失に至らなければ故障ではなく、フォルトトレラント (Fault Tolerant) の状態である。このような異常は、それを観測しモニタすることによって故障兆候パラメータとして故障や事故などの予知、診断に利用することができる。また、故障を機能喪失状態と考えると、エンジン待機中の補機システムの故障は、起動前に検知、除去すれば発電機能に対しては故障ではない。以上の考え方のもとに、故障の前兆である異常状態を予知して、除去することを予防診断の基本方針とした。

診断対象の自家発電設備の構成を図1に示す。ディーゼルエンジン2台、3,600 kVA同期発電機2台および各種エンジン補機で構成している。診断システムはこの要素別に、ディーゼルエンジン主運動部、始動空気系、燃料系、冷却水系、潤滑油系および発電機系に分けて診断する。診断内容は表1に示すように待機中、運転中に区分し、エンジンの動作状態によって異なる。待機中はエンジンの始動条件を重点に診断する。運転中は、動特性を診断するため、表2に示すように始動中から停止動作に至るまでの広い範囲を対象としている。

\*) リアルタイム診断：医療診断に代表されるように、症状を会話形で入力するバッチ形診断に対して、診断対象のデータの変化をとらえて診断を実行するデータ駆動形の診断方式で、オンライン診断とも呼ばれる。

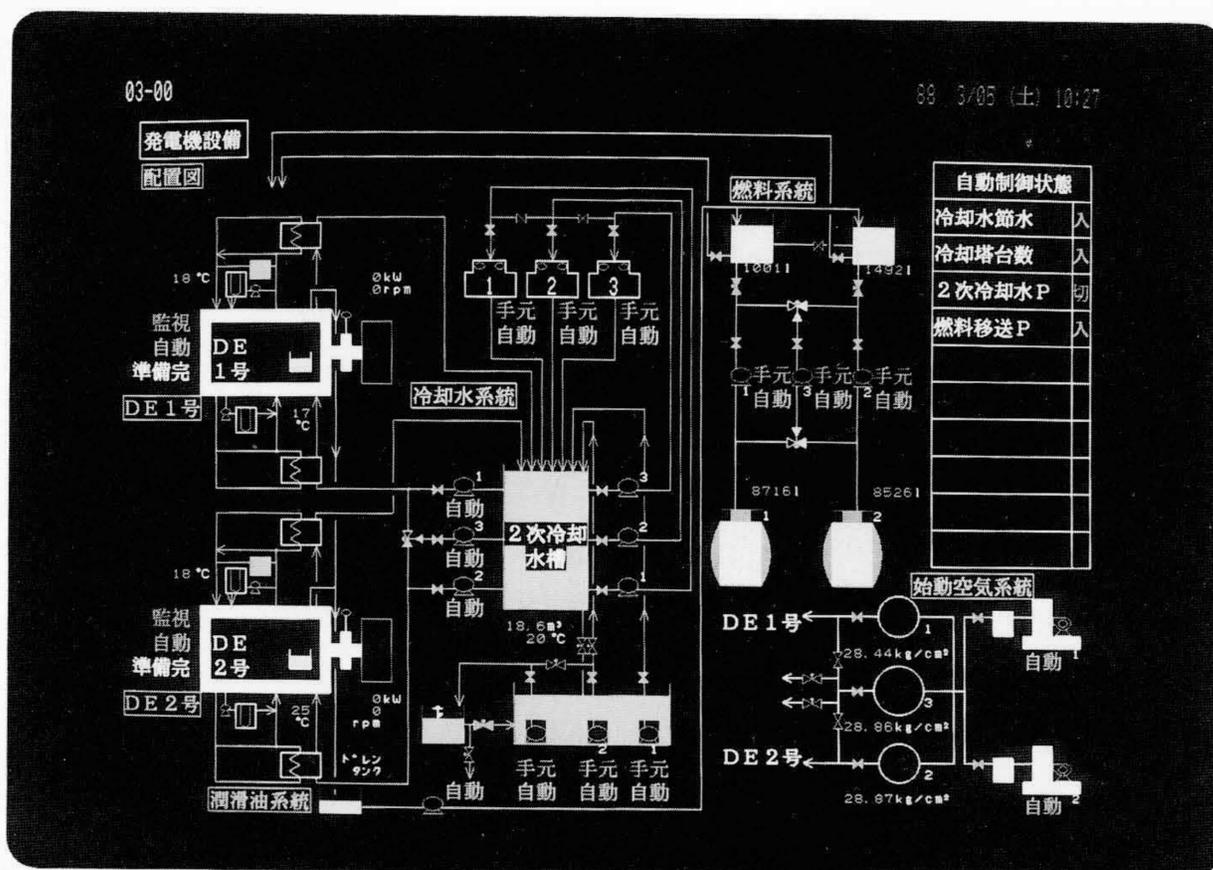


図1 自家発電設備 ディーゼルエンジン発電機2台と、燃料系統や冷却水系統などのエンジン補機で構成している。

表1 予防診断の内容 系統別に待機中、運転中の状態が綿密に診断される。

No.	系 統	内 容	待機中	運転中
1	ディーゼルエンジン	ディーゼルエンジンの運転特性データを判定して、エンジン運転状態を診断する。	—	○
2	始動空気系統	空気槽圧力や空気圧縮機の運転状態を判定して、始動空気系統がディーゼルエンジンの始動条件を満たしていることを診断する。	○	—
3	燃 料 系 統	燃料槽などの液位や燃料移送ポンプの運転状態を判定して、燃料系統が待機状態であることを診断する。	○	—
		燃料消費量、圧力、フィルタ差圧などを判定して、燃料系統の運転状態を診断する。	—	○
4	冷 却 水 系 統	一次、二次冷却水各水槽の液位や各循環ポンプなどの運転状態を判定して、冷却水系統が待機状態であることを判断する。	○	—
		一次、二次冷却水の温度、圧力、差圧などを判定して、冷却水系統の運転状態を診断する。	—	○
5	潤 滑 油 系 統	潤滑油槽などの液位や温度を判定して、潤滑油系統が待機状態であることを診断する。	○	—
		潤滑油の温度、圧力、フィルタ差圧などを判定して、潤滑油系統の運転状態を診断する。	—	○
6	発 電 機 系 統	発電機の界磁電流、電圧、電流、電力、力率、周波数、回転数、巻線温度などを判定して、発電機系統の運転状態を診断する。	—	○

表2 動作別診断内容 運転中は、始動中から停止中に至る幅広い範囲で診断される。

No.	動 作	内 容
1	待 機 中	エンジン始動条件(空気槽圧力、潤滑油温度など)を重点に診断する。
2	始 動 中	始動に携わる制御機器(ガバナ、各種弁)の動作および回転上昇率を診断する。
3	負 荷 変 更 中	負荷投入、遮断時の電圧、周波数特性を発電機電圧、周波数、回転数の変動データによって解析する。
4	運 転 中	エンジン運転特性を中心に、プロセス量を負荷との相関をとり監視する。
5	同 期 中	発電機並列前の同期追従状態および並列後の電圧、周波数、有効電力分担量を監視する。
6	停 止 中	停止に携わる制御機器の特性を、発電機回転数の降下データによって解析する。

### 3 自家発電設備予防診断エキスパートシステム

#### 3.1 診断方式

故障に至る以前に、異常状態にあることを早期に検知し、故障による機能喪失を未然に防止することが予防診断の目的である。人間の体温、血圧などの物理量の測定による病氣予防と同様に、本システムでは設備のプロセス諸量を計測し、標準値との比較で診断する方式とした。本システムの診断方式を図2に示す。

区分	状態診断	過渡状態診断	相関診断
内容			
診断	<p><math>M_i \geq M_H</math> または <math>M_i \leq M_L</math> の場合、異常と診断する。</p>	<p>整定および許容範囲内であること。 整定および25%、90%応答時間が許容値内であること。</p>	<p><math>\Delta M &gt; \Delta M_0</math> の場合、異常と診断する。 <math>\Delta M =  M_i - M_0 </math> <math>M_i</math>: 計測値 <math>M_0</math>: 標準値</p>

図2 診断方式 診断は三つの方式に分類され、診断項目により最適な方式を選択する。

(1) 状態診断

ディーゼルエンジン待機中の始動空気槽圧力、冷却水槽水位などの時間に関係なく、維持すべき値と計測したプロセス量を比較して判定する。

(2) 過渡状態診断

ディーゼルエンジン、発電機の始動特性を判定する。ディーゼルエンジンでは過給機回転数、給気圧などを計測して速度調節装置を診断する。発電機では回転数、電圧、周波数などを計測し、始動特性を診断する。計測値は許容範囲の判定

のほか、到達時間も標準値と判定する。

(3) 相関診断

ディーゼルエンジンの負荷特性を判定する。エンジン運転中は発電機の負荷変動で過給機回転数、給気圧、シリンダ排気温度が変化する。このように計測値に相関がある場合、相関関係が規定の範囲内に存在することを判定する。

3.2 システム構成と機能

予防診断エキスパートシステムは、図3に示すように、ポンプ所の監視制御システムの中のサブシステムとして構成し

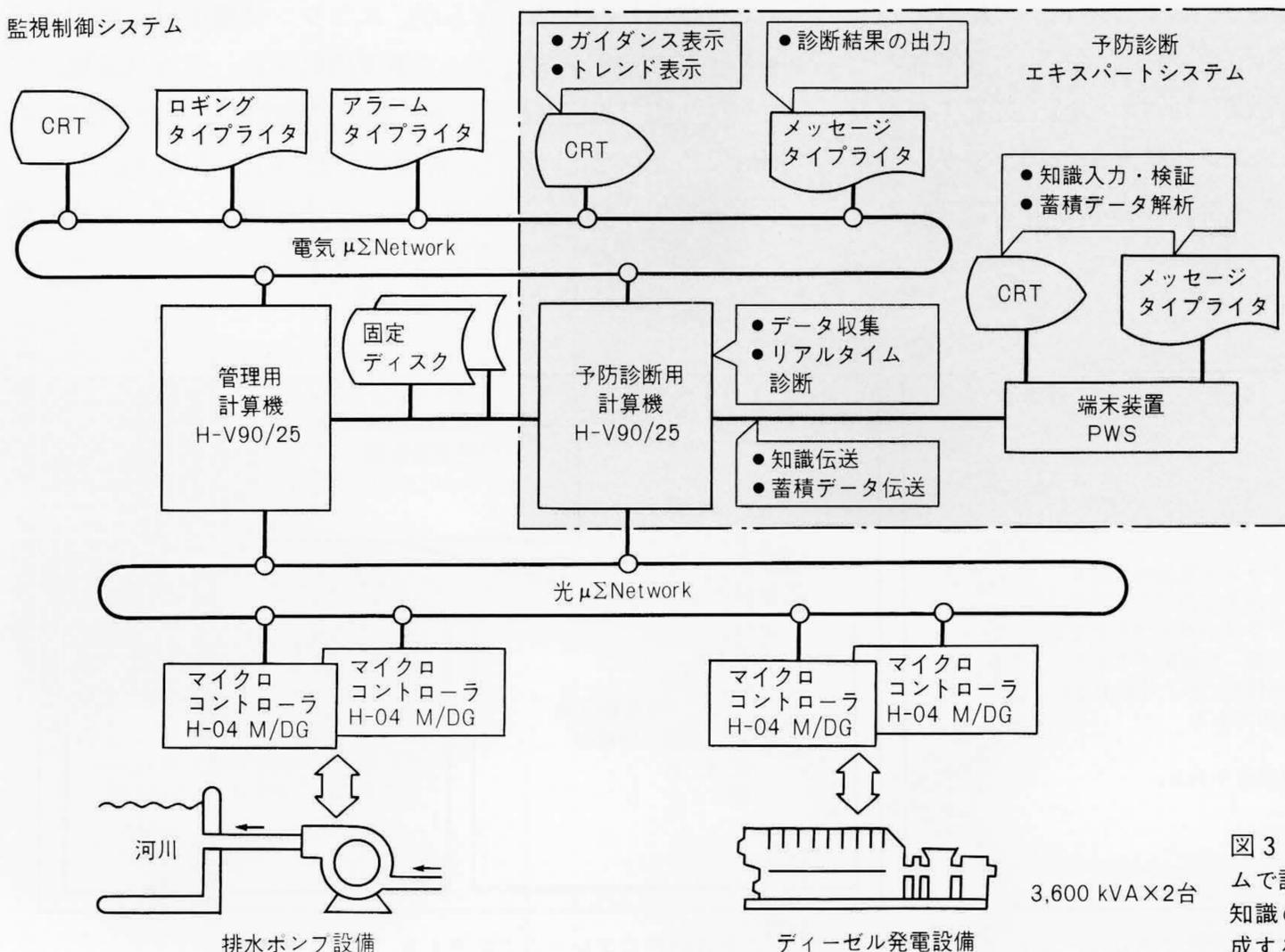


図3 システム構成 リアルタイムで診断する予防診断用計算機と、知識の入力・検証用の端末装置で構成する。

ている。制御用計算機HIDIC-V90/25(以下、V90/25と略す。)二重系システムのうち1台と、PWS(Programming Work Station)から成っている。

V90/25は下位マイクロコントローラHISEC-04M/DGを経由して、ディーゼル発電設備のデータを収集する。診断に用いるオンラインデータは、温度、圧力、液位などアナログ計測値約100点、運転・停止、弁の開閉などデジタル値約100点である。運転中は時々刻々変化するこれらのデータを用いてリアルタイムで診断し、診断結果はCRTおよびメッセージタイプライタに出力する。

PWSは、知識入力端末として使用し、診断知識の入力とその検証ができるようにした。検証済みの診断知識はV90/25に伝送され、リアルタイム診断に利用される。また、V90/25から伝送された蓄積データを保存し、必要時CRTにトレンド表示し解析に利用する。このように知識入力・検証と、オンラインリアルタイム診断とを分離することによって、診断結果の解析から得られた新しい知見を、リアルタイム診断に影響を与えることなく入力できる。

### 3.3 知識処理システム構築

知識処理システムの構築方法は、システムが効率よく作れることから、現在もっとも一般的な手法である知識処理システム構築用ツールを利用する方法とした。採用した構築ツールEUREKA-II (Electronic Understanding and Reasoning by Knowledge Activation-II)には次のような特長がある<sup>1)</sup>。実用的システムの実現を意図して、リアルタイム環境下でも適用できる高速推論処理性能を備えている<sup>2)</sup>。知識表現方法はルール、フレームなど4種類のコンポーネントの組み合わせによって、簡単なものから複雑なものまで幅広く表現できる<sup>3)</sup>。

知識処理システムの開発では、知識の整理、可視化が重要である。本システムではエンジン、発電機の専門家から得られた予防診断に関する診断知識を、機器状態およびプロセス

計測値と対応させて整理した。整理した知識をEUREKA-IIの知識表現方法で記述した例を図4に示す。ルールは事実間の因果関係を記述した診断手順の表現に用いる。フレームは機器の状態や計測データなどの事実の表現に用いる。本システムの知識の規模は、ルール数150、フレーム数50である。

知識の入力および利用方法を図5に示す。知識入力はバッチ処理系である知識入力端末装置で行う。マンマシンインタフェースを介して入力した知識は、知識データ編集処理でルール、フレームとして格納する。知識の検証は、模擬データ入力処理部を介して機器の動作状態、計測値を与え、ルールの成立を確認して行う。検証済みのルール、フレームは、オンラインリアルタイム処理系の予防診断用計算機V90/25に伝送する。V90/25は、データ収集処理によって発電設備の機器状態、計測値をオンライン入力し、フレームに格納する。診断実行部は、マンマシンインタフェースを介して指令する診断の起動指令によって、フレームを参照しながらルールを実行する。データ収集処理部は計測値の履歴を蓄積データとして保存し、要求時に呼び出してトレンド表示する。蓄積データは端末装置にも伝送し、異常時の解析に利用する。オンラインリアルタイム処理系の処理速度は約5秒で、1分周期の診断に対し十分余裕のある処理性能を実現した。

### 3.4 診断の実行例

本システムで採用した診断方式の状態診断、過渡状態診断および相関診断の実行例を以下に述べる。

状態診断の例を図6に示す。本実行例は、先の図4の知識表現方法に示す内容の診断実行例である。一次冷却水はエンジン運転中は冷却水となるが、エンジン待機中は予熱用の温水として温水ポンプによって循環供給する。温水は温度、圧力が標準値で規定されている。本診断例では、圧力下限値245 kPa(2.5 kg/cm<sup>2</sup>)に対し、計測値が227 kPa(2.32 kg/cm<sup>2</sup>)と下限値を切ったことを診断して、温水循環ポンプの吐出し能

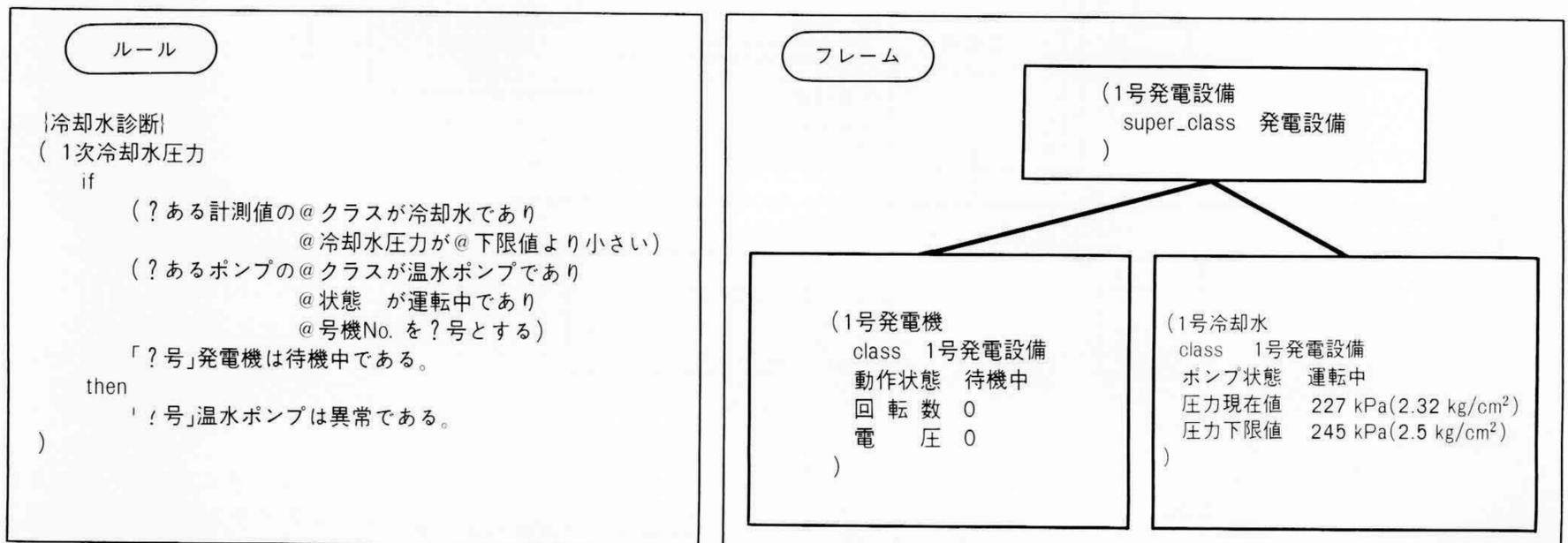
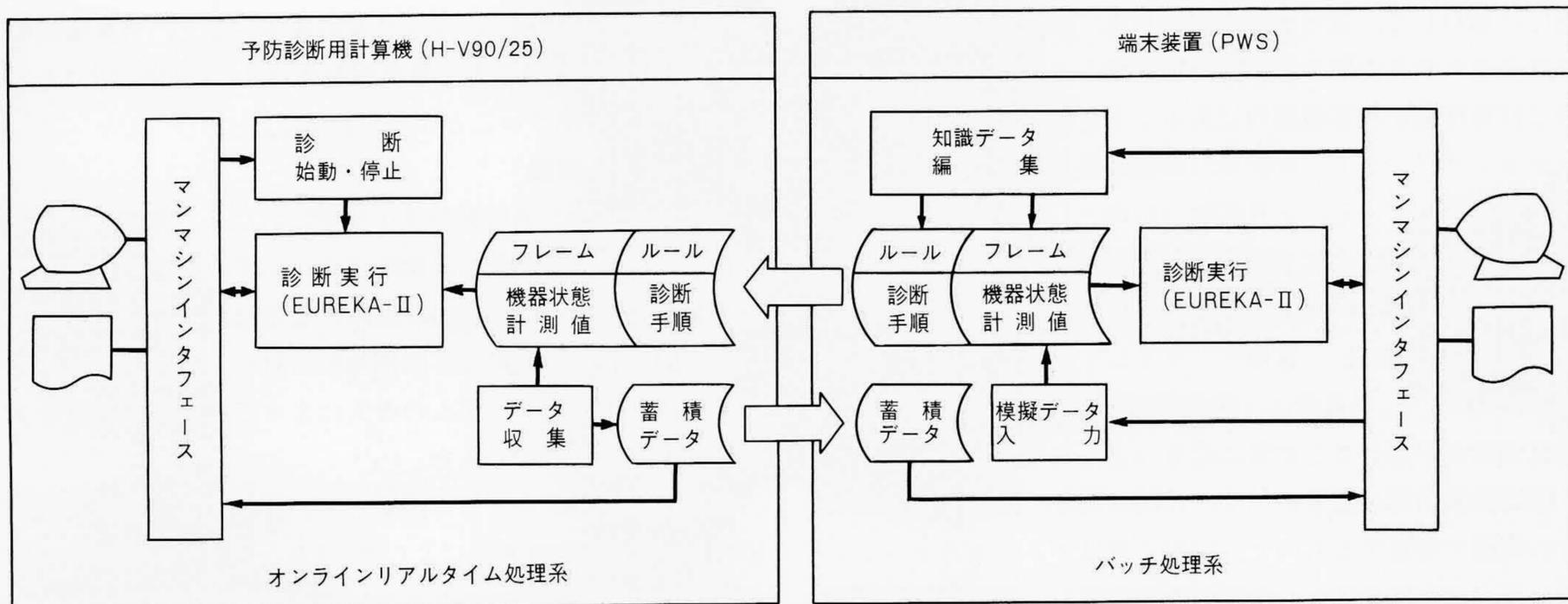


図4 診断知識の記述形式 診断手順はルールで、ルールが参照するプロセス状態はフレームで記述する。



注：略語説明 EUREKA-II (Electronic Understanding and Reasoning by Knowledge Activation-II), PWS (Programming Work Station)

図5 知識処理の構成 バッチ処理系の端末装置で入力した知識は、オンラインリアルタイム系に伝送し、診断に利用する。

力低下を推定原因として提示している。マンマシンインタフェースは診断結果、推定原因、処置ガイダンスを系統図と合わせて1画面に収納し表示する。診断実行部は同一の診断結果が繰り返し出力されることがないように、オペレータ確認以後、対策・処置完了まで本診断の出力を停止する。

過渡状態診断の例を図7に示す。同図は発電設備の起動特性を診断したものである。計測値の入力は発電機回転数、発電機電圧、ディーゼルエンジンの過給機回転数および始動に携わる機器の計測値の相互の関係がわかるように、0.1秒の高速周期で同期をとって計測する。診断は、中心となる発電機

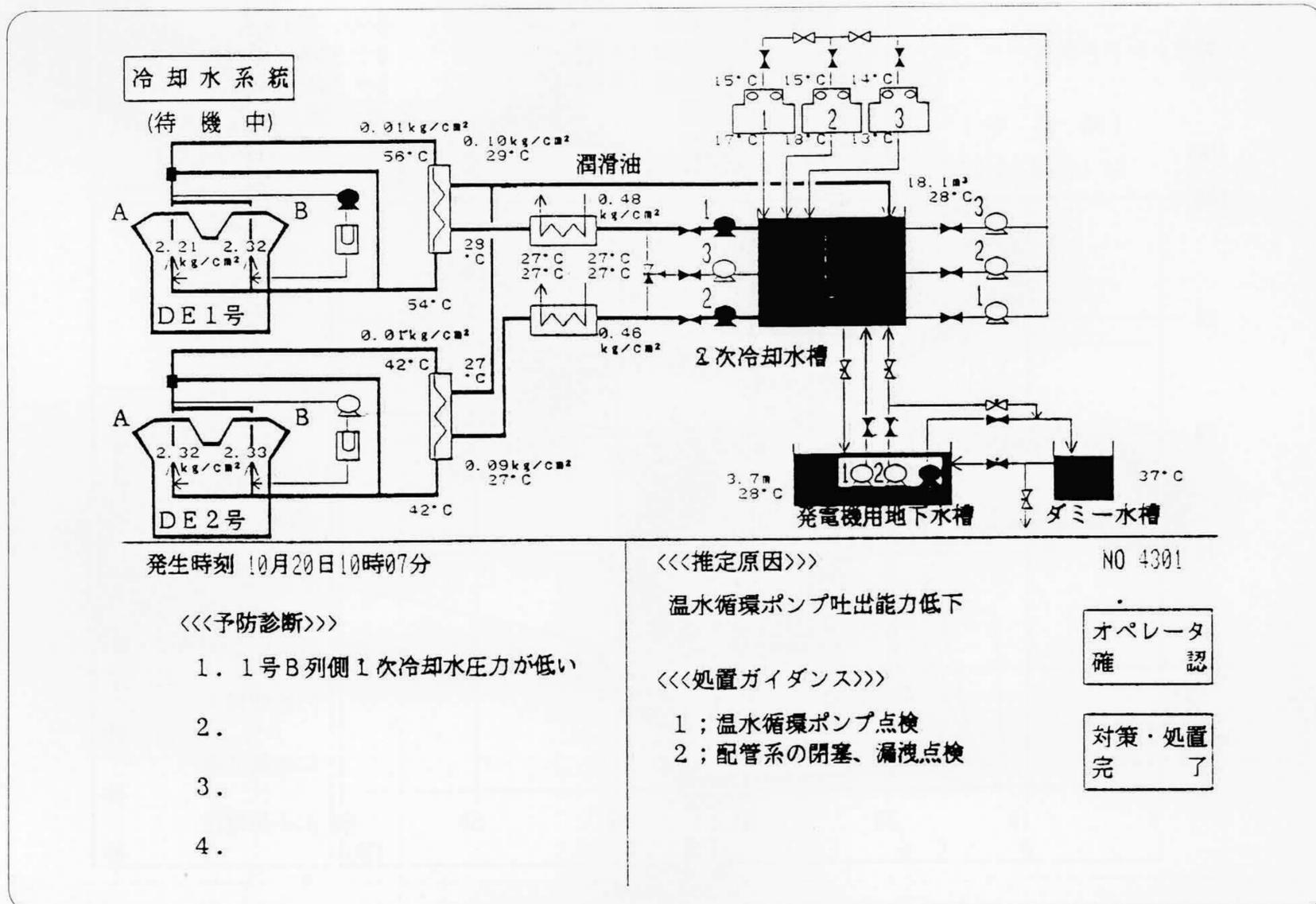


図6 状態診断の実行例 診断結果、推定原因および処置ガイダンスが、関連設備系統図と合わせて出力される。

電圧に着目して、定格出力の25%時点、90%時点およびピーク値までの到達時間を標準値と比較すると同時に、ピーク値および定格値が許容範囲内にあることを判定する。同図はオンラインリアルタイム診断系の診断結果を示したもので、正常と診断されている。正常診断の根拠として、始動から負荷投入用遮断器の投入までの時間を表示する。異常時は時間表示を赤色表示して、到達時間が許容値外であることを示す。過渡状態の計測値は、蓄積データとして保存しており、端末装置に伝送する。異常時には計測値相互の関係が解析可能で、異常個所の早期発見と対策に役立つようにした。

関連診断の例を図8に示す。関連診断は、関係する計測値との関連で判定するもので、同図の例はディーゼルエンジンのシリンダ排気温度を、発電機の発電電力と関係づけて診断する。発電機の負荷増大に伴って、シリンダ排気温度も上昇するため、判定許容値は発電電力の関数として設定し、診断している。異常と判定された場合は、蓄積データのトレンド表示により、異常発生前後の状況を知ることができる。ディーゼルエンジン2号機A列の6気筒分の排気温度を、トレンド表示したものを図9に示す。グラフ下部のタイムチャートは始動・停止を表している。75分から100分の間は負荷を上昇させ、負荷変動特性もとっている。本グラフから、始動・停止

動作中は変化が大きく、ばらつきも大きいこと、負荷変動時にも大きく変動すること、負荷が大きいほど(定格に近づくほど)ばらつきが小さいことなどがわかる。

### 3.5 システム評価

本システムは、運用開始後1年間にわたって実績データを収集し、標準値の見直し、診断タイミングの修正など運用後に得られた知見を即座に組み込み、実用に供している。従来の定期的な試験運転による設備診断に対し、常時、定量的に設備を診断する本システムの導入によって、稼動信頼度を大幅に向上することができた。

知識処理システムとして構築したメリットは、診断手順がif~then形式の知識表現によくマッチし、システム構築、変更が容易となり、運用経験とともにシステムが成長していく点にある。センサの充実によって保全作業が機械化でき、日常点検の項目を削減し中央監視室で監視可能としたこと(図10)、蓄積データ解析による異常発見の容易さなど、副次的なメリットも大きい。

予防診断システムの理想は、故障の100%予知にあるが、すべてが可能というわけではない。結局、事前予知の技術的可能性と経済性のバランス(trade off)に帰結する。

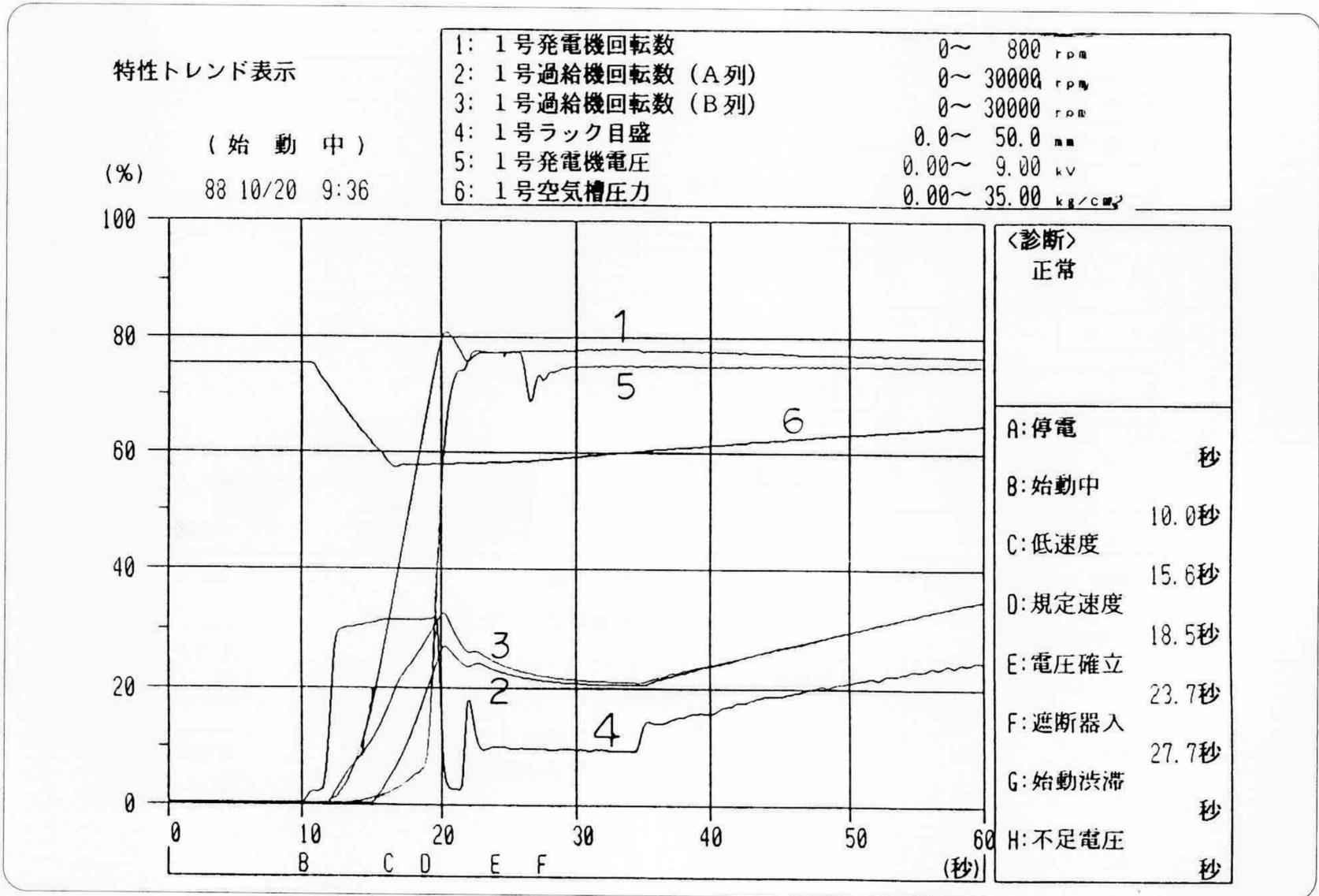


図7 過渡状態診断の実行例 発電設備の始動特性を診断したもので、診断結果の正常と、始動シーケンスのポイント部分の時間を表示する。

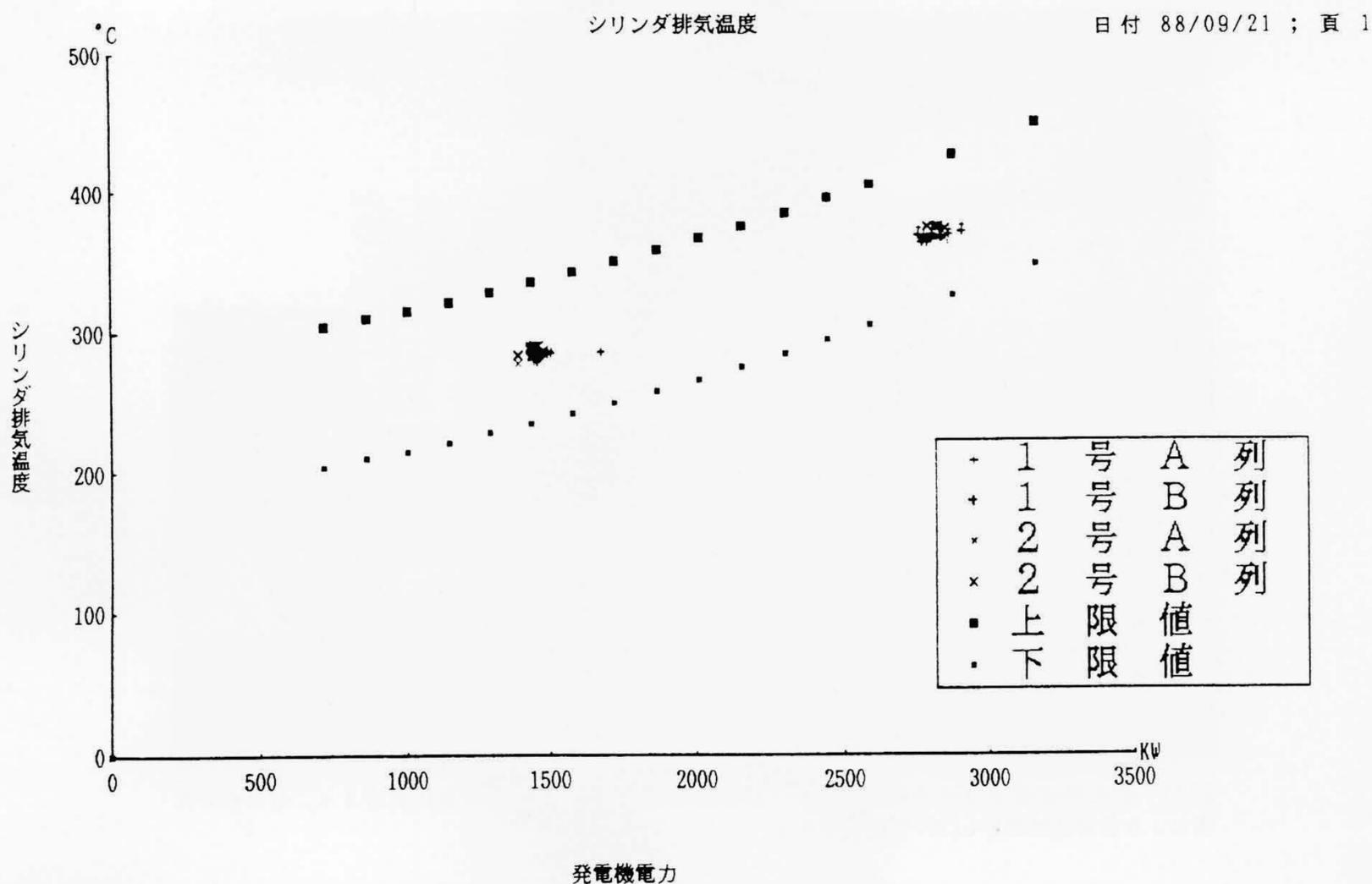


図8 変化診断の実行例 発電機の出力によって変化するシリンダの排気温度が、規定値に入っていることを示す。

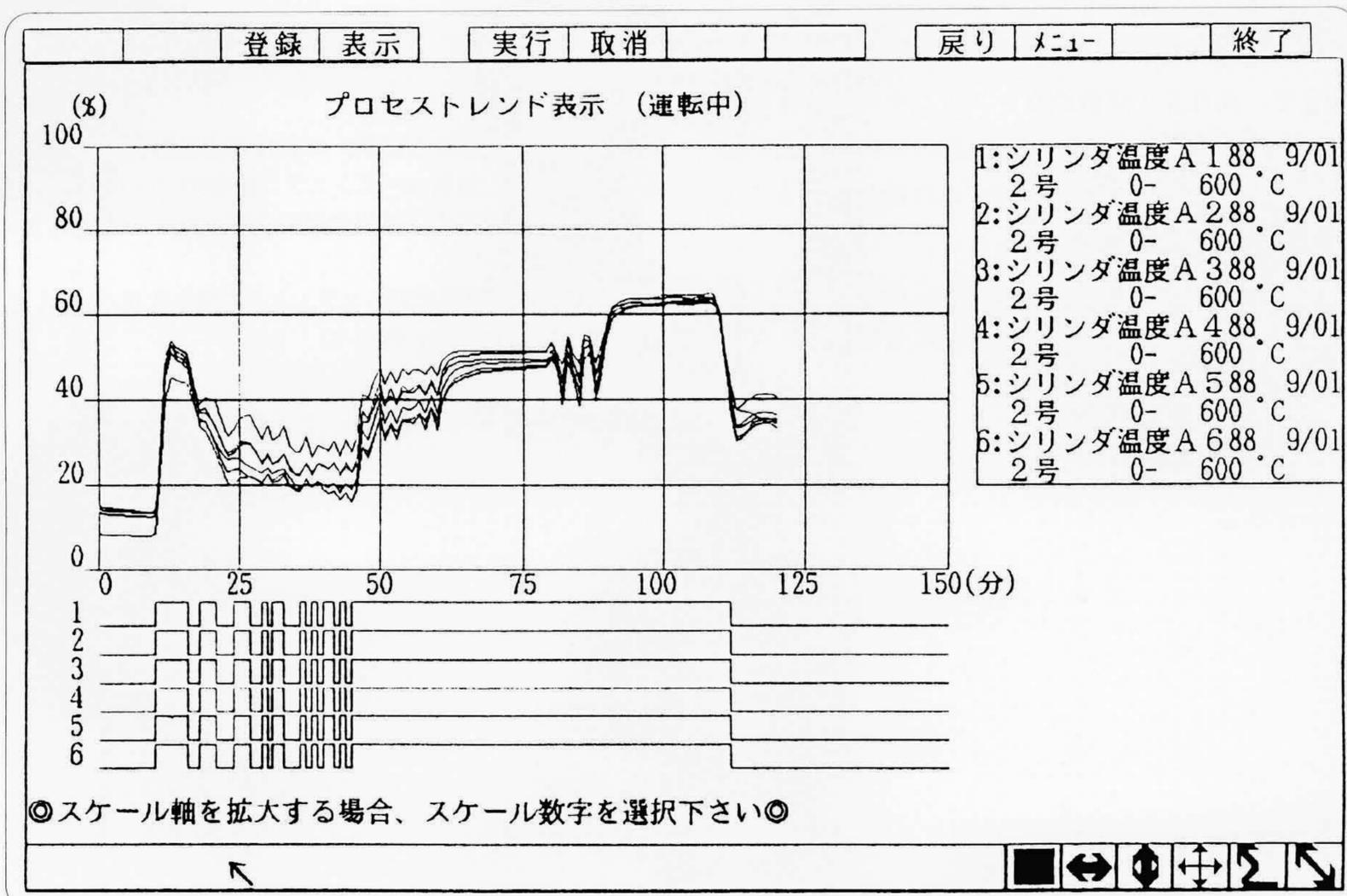


図9 蓄積データ表示例 蓄積データは端末装置にも保存されている。異常発生時、関連計測値と合わせて解析に利用する。

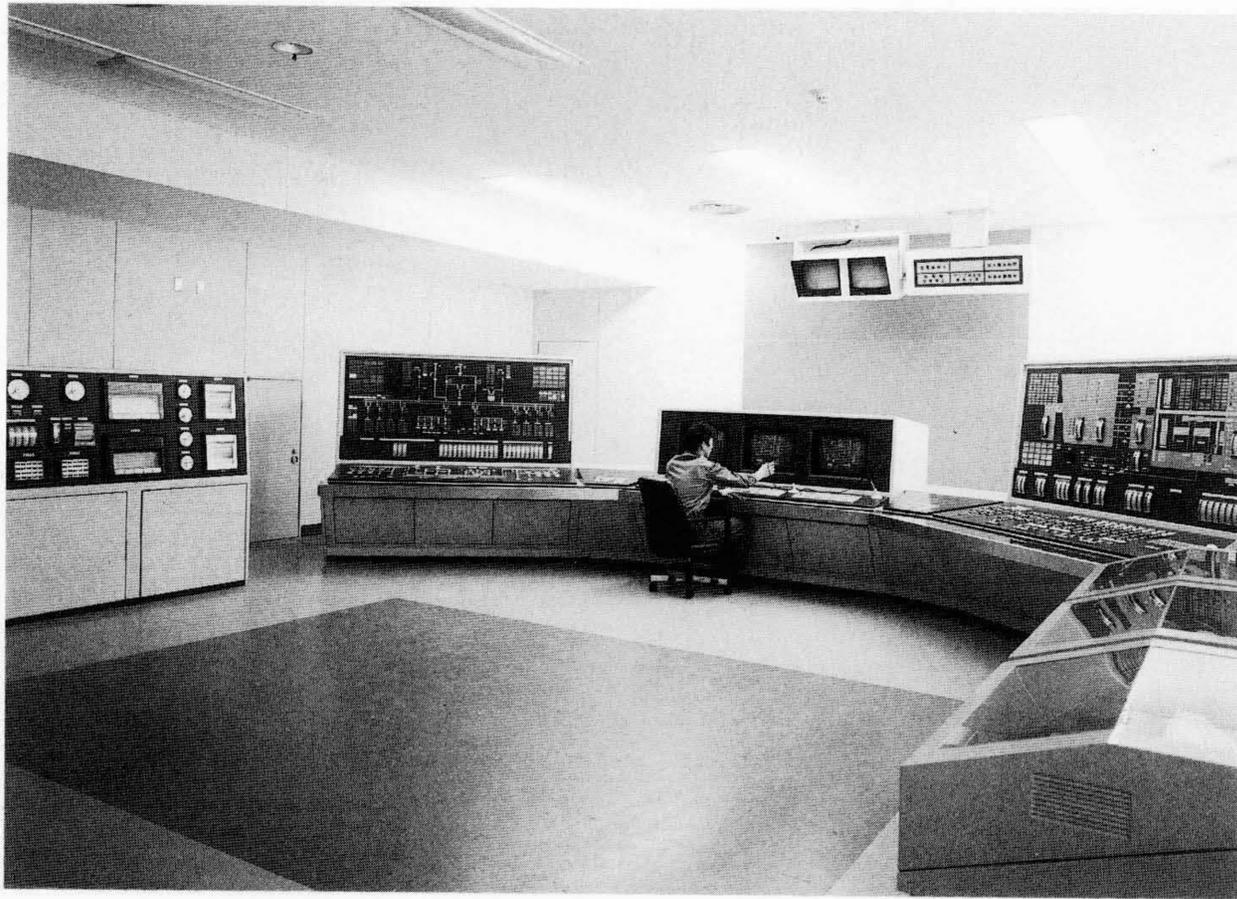


図10 雨水排水ポンプ所中央監視室 診断結果はCRT, タイプライタに出力する。センサの充実により日常点検項目もCRTで監視できる。

#### 4 結 言

保全の理想である予防保全を目指して、ディーゼルエンジン発電設備の予防診断システムを開発し、実用化した。システムは構築ツールEUREKA-IIを用いた知識処理システムとした。リアルタイム高速診断、蓄積データ解析による異常発見の容易性など、高性能・高機能なシステムを実現することができた。また、運用後に得られた新知識の入力、変更の容易性は、知識処理システムが診断システムに適していることを実証した。

知識処理システムは、専門知識を運用者にわかりやすく提供することも大切であるが、運用者の経験に合わせて、より

深い知識へと知識の成長を図ることが重要と考える。

終わりに本プラント実現に当たり、多大なご指導、ご協力をいただいた東京都下水道局および関係各位に対し深く感謝の意を表す次第である。

#### 参考文献

- 1) 塩見：故障解析と診断，日科技連出版社(昭52)
- 2) 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(昭62-12)
- 3) 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)