

原子力プラント系統・機器異常診断システム

Diagnosis System for the Systems and Equipment of Nuclear Power Plants

原子力発電所の基数増加に伴い、発電所保守作業の合理化および信頼性の確保がますます要求されてきている。このため、過去に蓄積された経験、知識を有効に活用し、プラント異常発生時の原因究明、その対策などの保守を支援する異常診断システムへの期待が高まってきた。

このたび日本原子力発電株式会社、東北電力株式会社、東京電力株式会社、中部電力株式会社、北陸電力株式会社および中国電力株式会社と日立製作所は、給・復水系および電動弁を対象とし、異常診断エキスパートシステムのプロトタイプを共同開発した。給・復水系および電動弁について、合わせてルール数約800、フレーム数約800のシステムを構築し、システムの検証および原子力発電所保守部門への模擬データによるデモンストレーションを行い、実用化への見通しを得た。

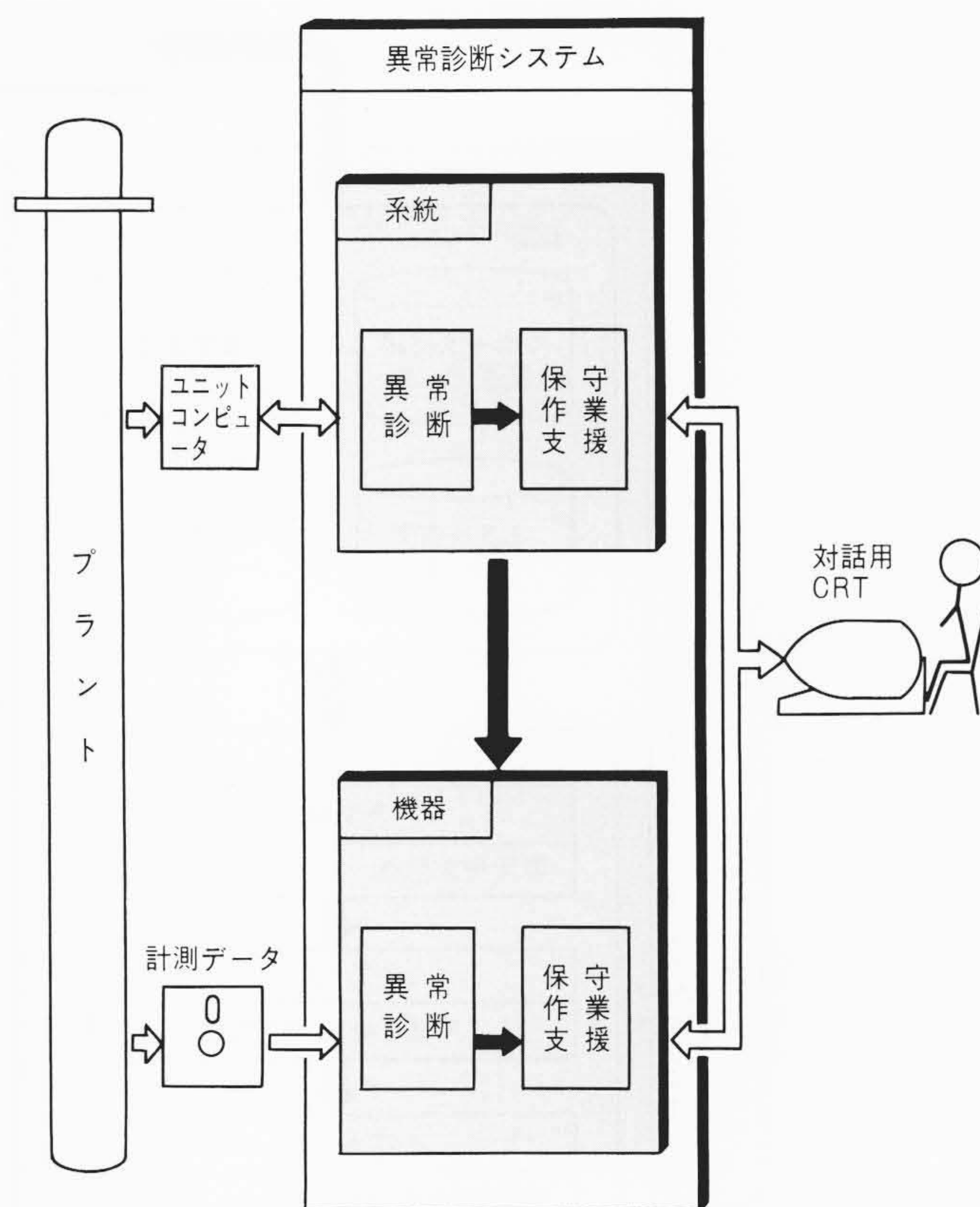
竹内 力* Chikara Takeuchi
佐藤隆雄* Takao Satō
朝倉由雄** Yoshio Asakura
佐藤孝一*** Kōichi Satō
高橋 務**** Tsutomu Takahashi

1 緒 言

原子力発電のような大規模なプラントの保守には、多くのマンパワーが必要である。しかし近年、稼動プラントの数が増加し、トラブル発生時に要因を正確に把握し、迅速かつ確実に保守することがいっそう必要となってきた。このため、専門知識や経験的知識を有効に活用し、保守面での支援を目的としたエキスパートシステム開発の期待が高まってきた¹⁾。そこで日立製作所では、BWR(沸騰水型原子力発電所)所有の全電力会社との共同研究で、BWRプラントの代表的な系統の給・復水系と、プラントに多数使用されている電動弁について、保守作業を支援するエキスパートシステムのプロトタイプを開発した。今回開発したシステムでは、給・復水系および電動弁を対象として、異常発生時の原因究明、復旧対策を保守面で支援する機能を持たせた。

2 システム概要

系統・機器異常診断システムの基本構成を図1に示す。システムは、系統異常診断部と機器異常診断部で構成する。系統異常診断部は、プラントからのプロセス信号をユニットコンピュータを介してオンライン入力する。一方、機器異常診断部については診断対象の数が多いため、ポータブル測定器でデータを収集し、オフラインでシステムへのデータ入力を行う。これらの信号やデータを基に、各診断部で異常原因お



注：記号説明 □ システム外部信号、■ システム内部信号

図1 システム・機器異常診断システムの基本構成 このシステムは系統異常診断部と機器異常診断部で構成し、異常原因および保守ガイダンスをCRTに出力する。

* 日立製作所 日立工場 ** 日立製作所 大みか工場 *** 日立エンジニアリング株式会社 **** 株式会社日立エンジニアリングサービス

よび異常個所を同定し、保守作業を支援するガイダンスをCRTに出力する。

診断の深さは、系統は機器レベル、機器は部品レベルを原因として同定できる。このシステムの知識ベースは、知識構築支援ツールを用いてシステムエンジニアが簡単に知識の修正、追加をすることが可能である。

3 システムの全体構成

3.1 異常診断システム

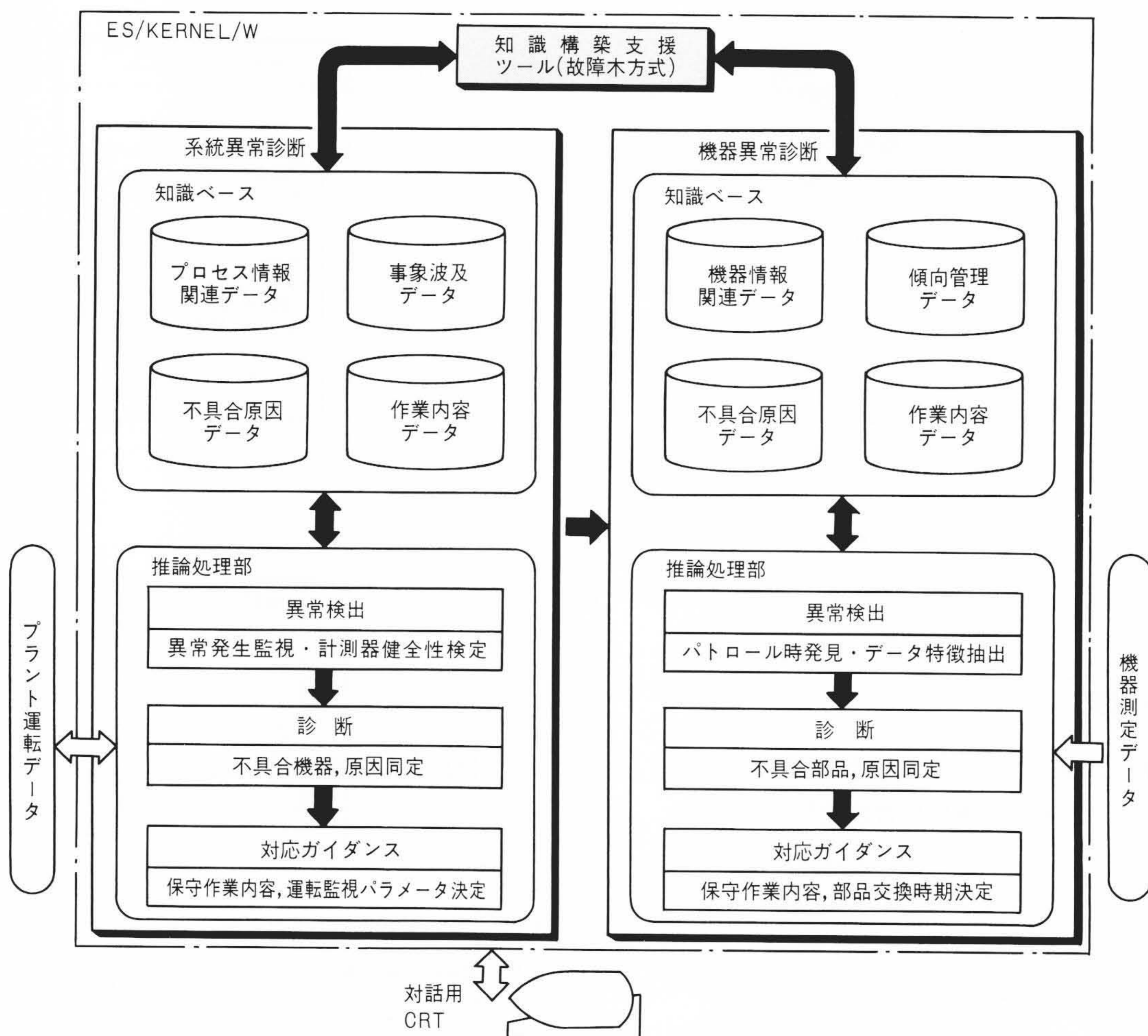
システムの全体構成を図2に示す。エキスパートシステム構築ツールとしては、大規模なエキスパートシステム構築用に日立製作所が開発したES/KERNEL/W (Expert System/KERNEL/Workstation)²⁾を、ワークステーション2050/32³⁾上で使用している。

一般に、プラントは複数の系統、複数の機器および複数の部品で構成している。したがって、プラントに発生した異常に対しては、最終的にどの系統の、どの機器の、どの部品の

不具合によるものであるかを明確にする必要がある。このため、その機能を大きくプラント異常診断、系統異常診断および機器異常診断に階層化し、今回は特に、後の二者について開発、その機能を検証した。系統異常診断機能は、プラントの運転データを使用して系統内の機器レベルの異常を診断する。機器異常診断機能は、機器の測定データを使用して機器内の部品レベルの異常を診断する。各異常診断は、不具合原因と事象波及の関係などのデータを格納する知識ベースと、診断を実行する推論処理部から成る。

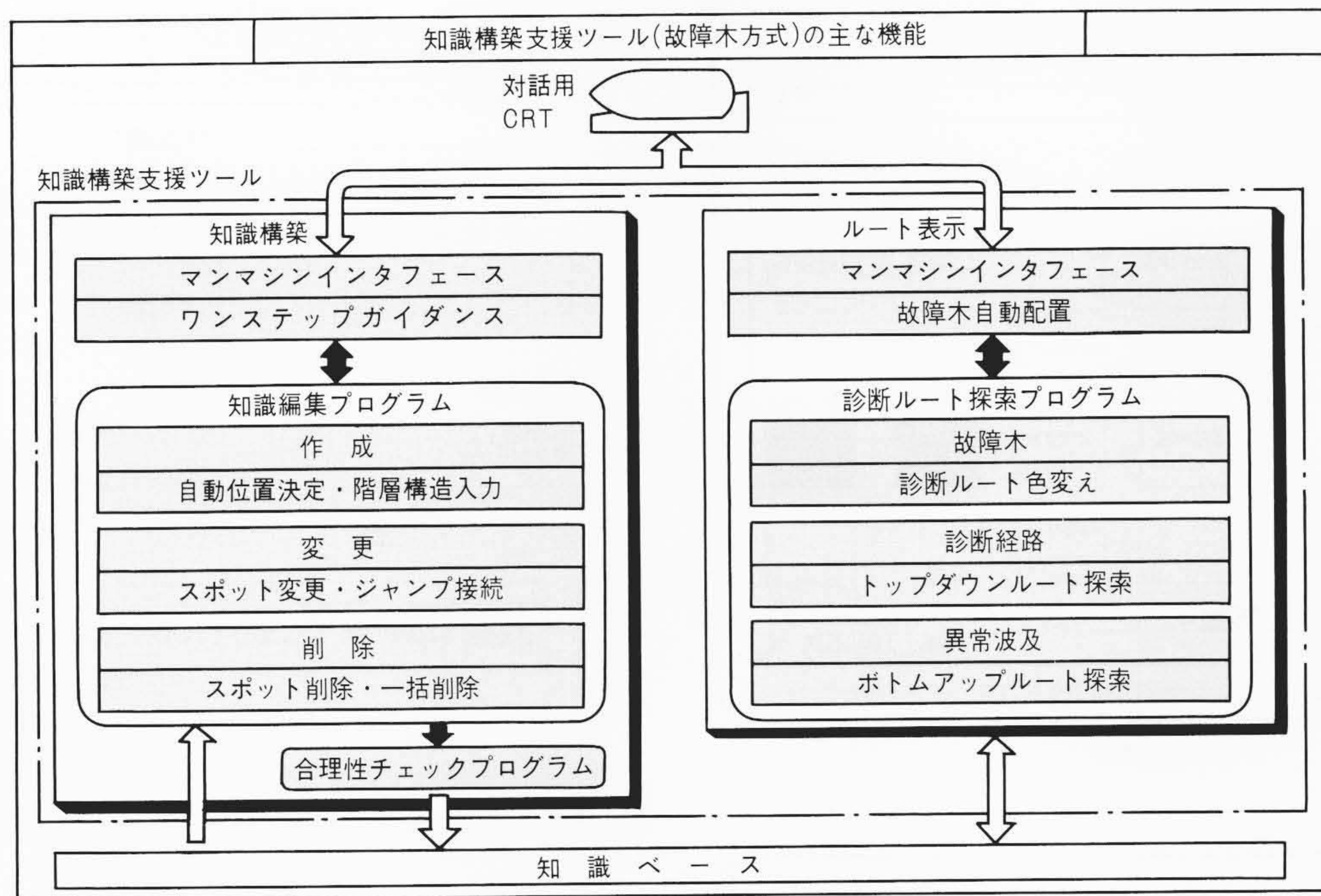
3.2 知識構築支援ツール

従来のエキスパートシステム^{1),4)}構築には、ナレッジエンジニアと呼ばれるエンジニアが必要とされていた。そこで、今回の開発にあたっては、エキスパートシステムを実際に使用して業務を行うプラントエンジニア、機器エンジニアおよび保守エンジニア(以下、システムエンジニアと称する。)が容易に扱えるシステムとすることを第一目標とした。従来、システムエンジニアは設計あるいは故障解析段階で、故障の木解



注：略語説明など ES/KERNEL/W (Expert System/KERNEL/Workstation：エキスパートシステム構築ツール)
 □ システム外部信号、■ システム内部信号

図2 異常診断システムの構成 系統異常診断で機器レベルの、機器異常診断で部品レベルの診断後、対応処置のガイダンスを行う。



注：記号説明 □ 知識構築支援ツール外部信号、■ 知識構築支援ツール内部信号

図3 知識構築支援ツール(故障木方式)の主な機能 故障の木を利用することにより、システムエンジニアでも簡単に知識を構築でき、かつ構築した知識の合理性を容易に検証することができる。

析(FTA: Fault Tree Analysis)と呼ばれる手法を頻繁に利用している。故障の木解析とは、システム故障や不安全を引き起こす可能性のある事象を摘出し、その原因とシステム故障を論理的に結び付けた故障の木を作成して、これをもとに故障原因などを解析する手法であり、抜けのない解析ができる。そこで、CRT画面上に故障の木を描くだけで知識を構築できる知識構築支援ツールを開発し、適用した。知識構築支援ツールの主な機能を図3に示す。

これにより、システムエンジニア自身で知識が構築できるので、ノウハウや経験則が抜け落ちなく、かつ整理されてシステムに入力できる。また、異常診断結果を故障の木を利用して出力することにより、その経緯がきわめて理解しやすくなる。

この知識構築支援ツールは、次のような特徴を持っている。

(1) ワンステップガイダンスのインタフェース機能、故障の木の作成位置自動決定機能により、知識の入力が容易である。

マニュアルを見ずに短時間で知識の入力ができるように、入力項目を一つずつガイダンスで先導する。また、故障の木の枝葉をどの位置に作成するのか悩まぬように、作成位置を自動的に決定する。

(2) 入力した知識の合理性検証機能により、知識の正しさの検証が容易である。

入力した知識の正しさが自動的に検証できるように、故障の木に基づく上位事象と下位事象の論理的つながりを利用して、合理性チェックをする。

(3) 故障の木による診断ルート表示機能により、診断結果の正しさの検証が容易である。

診断結果の正しさが検証できるように、入力した知識と同じ故障の木上に診断ルートを色変えて表示する。

(4) 異常波及予想事象の表示機能により、運転監視と保守作業を支援する。

異常が発生したとき、関連して異常状態になる可能性がある事象の情報を提供して、運転監視や保守作業が支援できるように、故障の木に基づき下位事象から上位事象へボトムアップ的にルートを探索し、異常波及事象を一直線上に並べて表示する。

以上のように、ES/KERNEL/W自体が持っている優れたマンマシンインタフェースに加え、故障の木方式による知識構築支援機能により、使い勝手のきわめて良いエキスパートシステムが実現できた。CRT画面例を図4に示す。

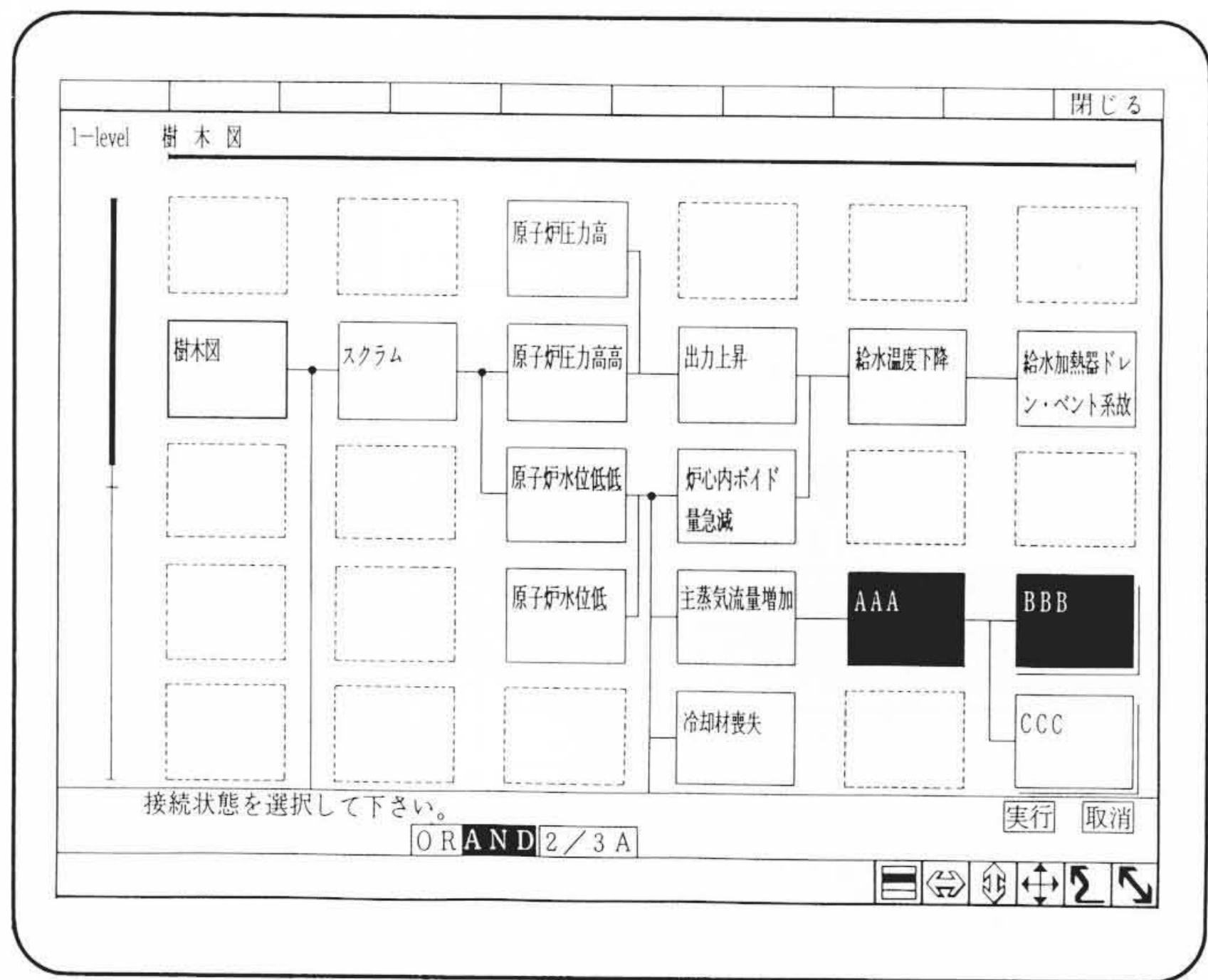
4 異常診断システム

4.1 系統異常診断機能

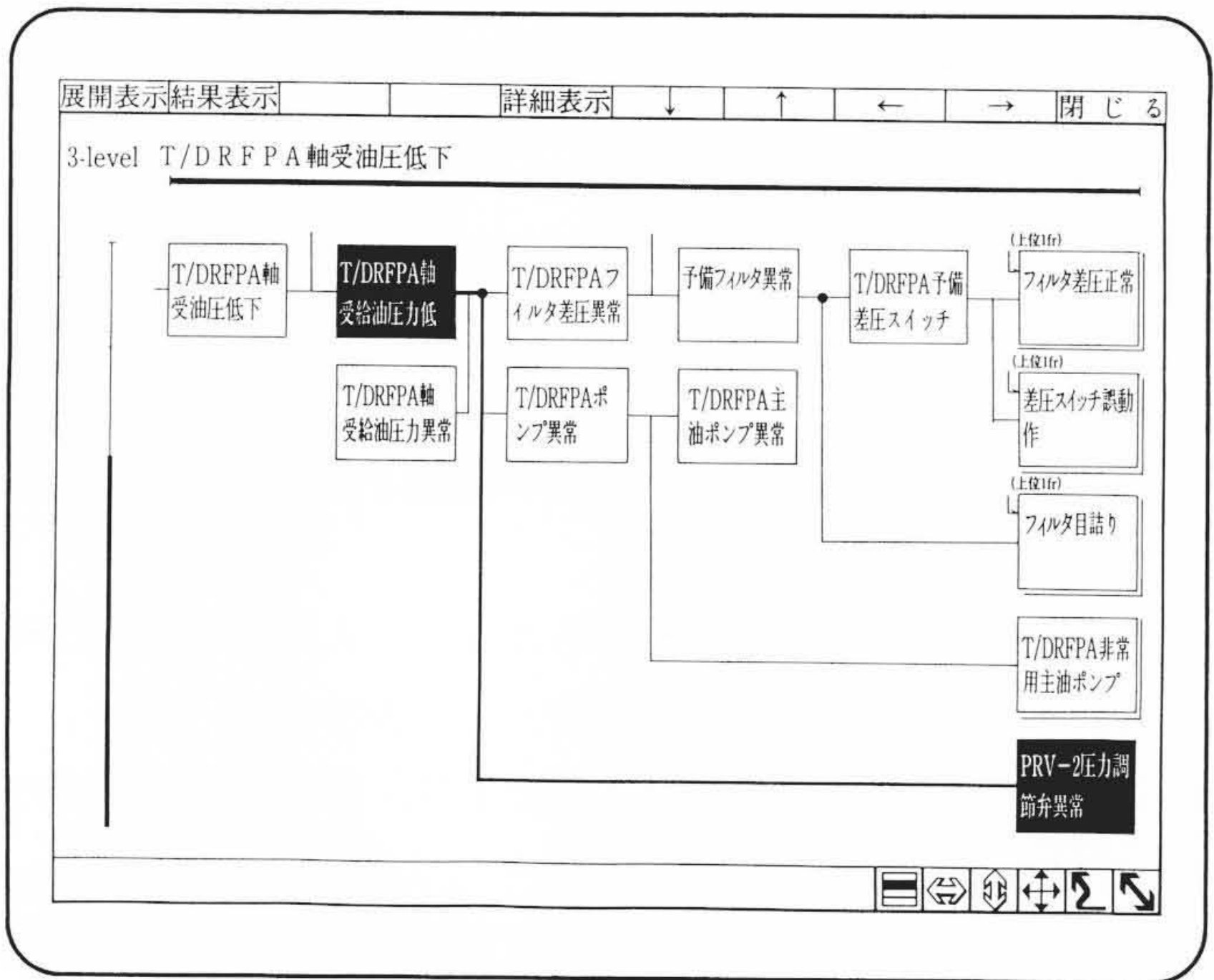
系統異常診断は、プラントが正常であるか否かをチェックする異常検出、異常発生時に何が原因かを同定する診断、および保守方法をガイドする保守対応ガイダンスの三つの機能から成る。

4.1.1 異常検出

異常検出は、プラントパラメータを常に監視し、設定したそれぞれのしきい値と比較することによって異常発生の有無



(a) 知識構築



(b) 診断ルート

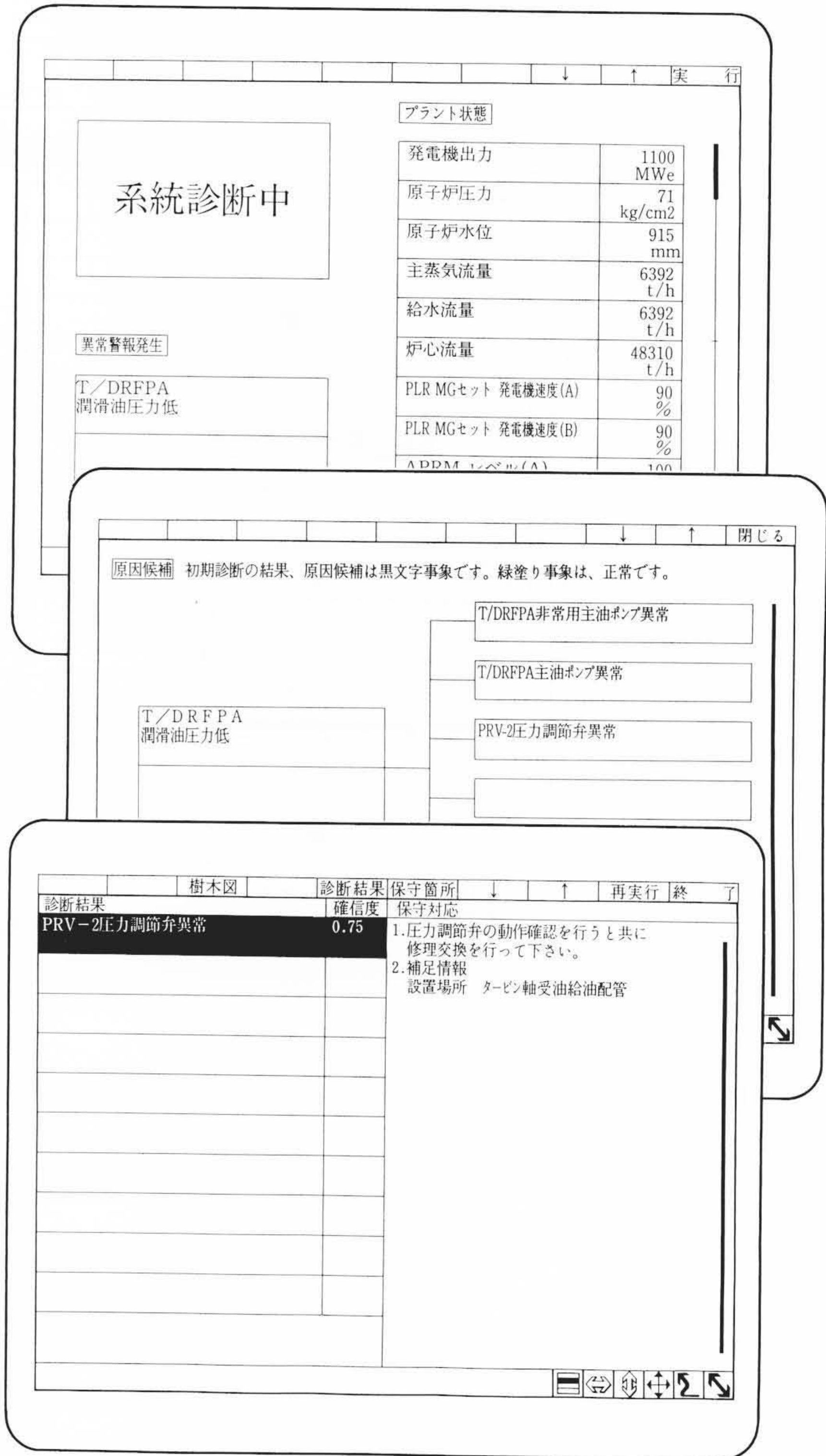
注：略語説明 T/DRFPA (タービン駆動給水ポンプA)

図4 知識構築支援ツールのCRT画面例 CRT画面上にフォールトツリーを描くことにより、容易に知識の構築が可能である。

を判定する。しきい値は、異常事象検知用と、異常事象の前段階である兆候事象検知用の2段階に設定している。兆候事象検知用のしきい値は、各検出器の精度および信号ノイズを考慮し設定している。このシステムは、診断のために計測点を増加させるのではなく、発電所既存の約200点のプロセス信号を利用し、システム設備の効率化を図っている。

4.1.2 診断

異常検出機能によって異常発生を検知すると、システムは直ちに診断を開始し、診断アルゴリズムをまとめた知識ベースを使用して仮説検定により推論を行う。まず、システムに入力されている情報だけを用いる初期診断を実行し、大まかな原因を同定する。その後、不足情報があればCRTにそれを表示し、操作員に入力を促す。そして、最終的に絞り込んだ



注：PRV-2 (圧力調整弁の識別記号)

図5 給・復水系での診断結果表示例 診断画面は見やすいようにシンプルな構成とし、サポート画面は必要に応じ選択することによって表示することができる。

原因候補を、確信度(確からしさ)とともにCRTに表示する。給・復水系では主として故障の木解析および故障モード影響解析(FMEA: Failure Mode and Effects Analysis)によって要因分析をし、診断アルゴリズムを作成した。給・復水系での診断例を図5に示す。タービン駆動給水ポンプAの潤滑油圧力低下を模擬事象として診断実行した場合、潤滑油圧力低の警報を検知し、初期診断で主油ポンプ異常、非常用油ポンプ異常および圧力調整弁異常の三つの原因候補があげられる。次に、ポンプの運転状況が正常であるかどうかを観測要請し、正常と回答入力することにより、圧力調整弁異常を原因として同定する。ここで、故障の木表示画面を選択すれば、システムがたどった一連の診断過程を確認することができる。系統異常診断システムのもう一つの機能であ



図6 兆候診断による異常波及予測 タービン駆動給水ポンプ軸受給油圧力の低下が給水ポンプ機能喪失を招き、最終的には原子炉スクラムに至ることを示している。

る兆候診断もほぼ同様な推論を行い、兆候事象原因同定および異常波及の予測をする。図6に、タービン駆動給水ポンプ軸受給油圧力が低下し、兆候事象として検知されたときの異常波及予測を示す。本例では、軸受給油圧力の低下が給水ポンプ機能喪失を招き、最終的には原子炉スクラムに至ることを示している。

4.1.3 保守対応ガイダンス

この機能は前述した診断結果に基づき、異常発生機器の保守方法をガイダンスとしてCRTに表示する。このための知識ベースは、機器取扱説明書に基づいており、また保守個所の系統図表示等を行い、マンマシン性に配慮している。

4.2 機器異常診断機能

機器異常診断機能は系統と同様に、異常検出、異常原因同定を行う診断および保守対応ガイダンスがある。さらに、機器の余寿命予測を行う傾向管理機能を設けている。以下、電動弁を例にとり説明する。

4.2.1 異常検出

電動弁の異常検出は2種類ある。一つは、弁動作テスト時に弁駆動部から測定可能な出力軸トルク、電動機電流、トルクスプリングの移動量などのデータをポータブル測定器によって測定し、オフラインでシステムに入力し、正常動作時のデータと比較することによって異常検出を行う。他の一つは、運転中に中央制御室で得られたランプ不点灯、弁開閉時間不良や、建屋内通常パトロール時での弁グランド部からの流体の漏れといった異常情報をシステムへ入力する場合である。

4.2.2 診断

電動弁に関する診断知識では、まず機能不良に至ると考えられる異常事象と要因を、FTAを用いて弁部品単位に分析した。さらに、ポータブル測定器で測定した各種パラメータの

変化と異常原因との相関関係をマトリックスに表現し、この二つを知識ベース化した。そして、パラメータの変化と異常事象との関連をより明確にするため、異常事象を模擬した実験を行い、知識の修正および追加を行った。

開側トルク・リミット両者切りおよび閉側トルク切りの制御方式を持った電動弁に関する異常原因と測定パラメータの相関関係の一例を表1に示す。各異常原因に対する測定パラメータの変化パターンはおおのろろ異なっており、原因同定に有効な知識を提供している。

弁動作テスト時での診断例を図7に示す。診断対象の弁番号を入力すると、システムはその弁を内部のデータベースから検索し、仕様を表示する。次に、測定したデータを入力すると、システムは異常診断を開始する。診断例では、出力軸

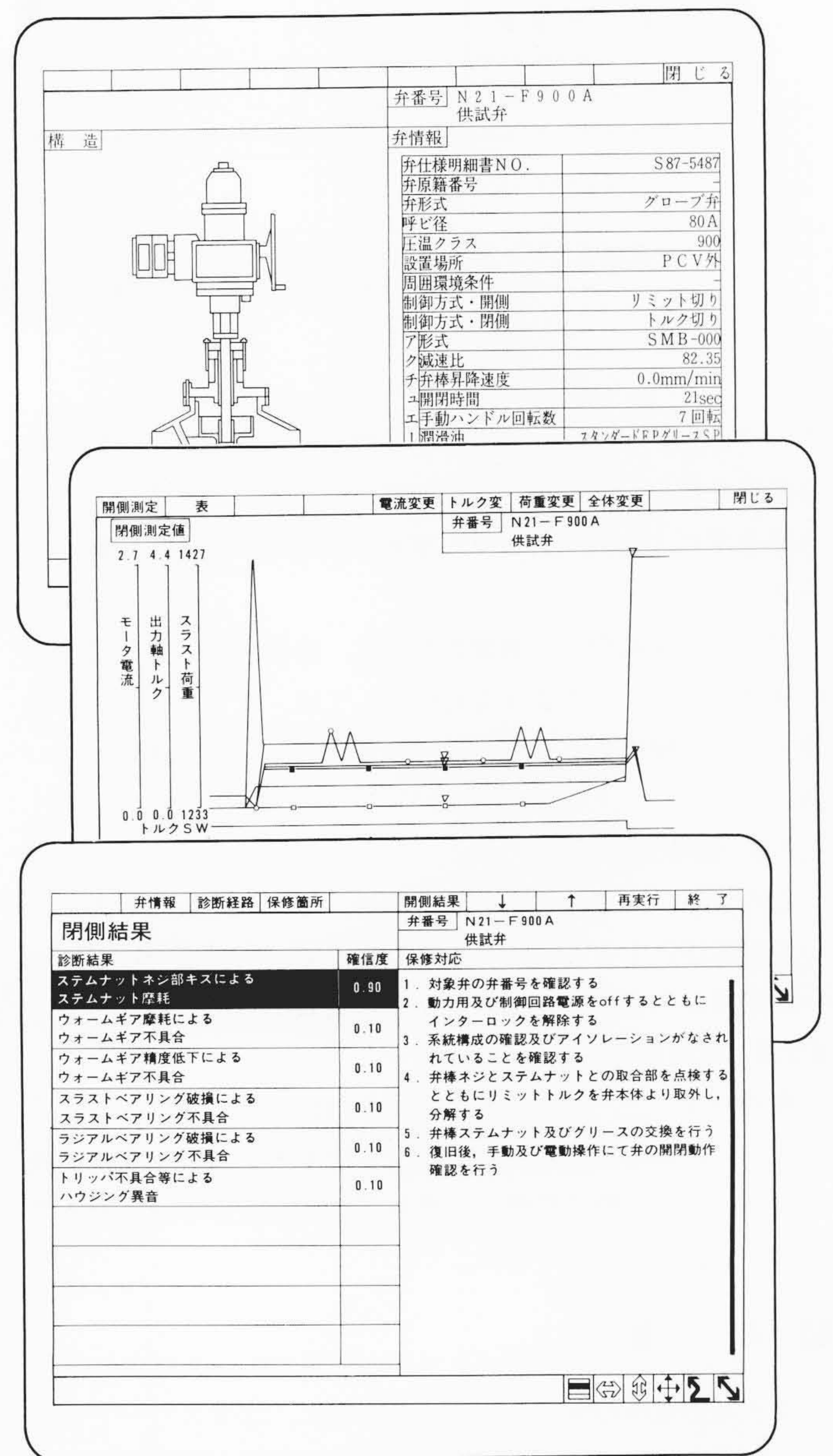


図7 電動弁動作テスト時での診断結果表示例 弁動作テスト時測定したデータをトレンド表示し、異常発生の有無をシステム使用者が確認することができる。

表1 異常原因と測定パラメータの相関マトリックス表の例 この表ではT.SWのねじ緩みとT.SW設定ミスは、パラメータ変化パターンは同じ表記であるが、実際は変化量が異なり知識ベースに反映されている。

測定パラメータ 異常原因	出力軸 トルク	電動機電流	T.SPの 移動量	T.SWの 設定値	L.SWの 作動位置	閉側スラ スト荷重	弁開閉時間
グランドパッキン 締付力変化	○	×	○	×	×	○	×
L.SWの調整ミス	◎	◎	◎	×	◎	◎	◎
T.SWのねじ緩み	◎	◎	◎	◎	×	◎	○
T.SWの設定ミス	◎	◎	◎	◎	×	◎	○
L.SWの接点不良	×	×	×	×	◎	×	×
T.SWの接点不良	×	×	×	×	◎	×	○
ステムの曲がり	○	×	●	×	×	○	×
ステムブッシュ および ステムのきず	◎	×	●	×	×	×	×
グリース劣化	◎	×	○	×	×	×	×

注：略語説明など T.SW（トルクスイッチ）、L.SW（リミットスイッチ）、T.SP（トルクスプリング）
◎（顕著な出力変化）、●（出力変動）、○（微小な出力変化）、×（変化なし）

トルクおよびトルクスプリング移動量の間開度での断続的な異常を検出した結果、診断知識に基づき、ステムナットねじ部きずによるステムナット摩耗の可能性が高いと診断している。

プラント運転中での異常診断では、弁動作テストができない場合がある。このような弁に対しては、プラント停止時に優先して点検できるように、点検優先弁リストを準備している。

4.2.3 保守対応ガイダンス

この機能は、系統異常診断と同様、原因同定後の対応について情報提供するものである。点検手順、点検箇所などについて図面表示を交じえてわかりやすく表示している。

4.2.4 傾向管理

機器の保守上、傾向管理も重要な項目である。このシステムは、弁の開閉機能に直接影響を及ぼすステムナットの摩耗量を弁の開閉回数で管理し、摩耗量に応じた保守対応ガイダンスを提供することにした。

5 結 言

原子力発電所の保守の高度化のために、エキスパートシステムを利用した系統・機器異常診断システムの開発状況につ

いて述べた。ここで開発したシステムは、原子力発電所で模擬データによるデモンストレーションを実施し、実用性を確認している。特に電動弁の異常診断システムは、プラントの定期検査での弁の点検作業の省力化に効果的である。系統に関しては、ここに述べた手法を用いて、診断対象範囲を拡張することによって、より効果的な診断が可能となる。今後は、実機適用に向けて対象範囲を拡大し、システムをいっそう充実させていく考えである。

終わりに、このシステムの開発は日本原子力発電株式会社殿をはじめ東北電力株式会社殿、東京電力株式会社殿、中部電力株式会社殿、北陸電力株式会社殿および中国電力株式会社殿のご指導・ご支援のたまものであり、深く感謝する次第である。

参考文献

1) 伊藤，外：原子力発電プラント保守支援エキスパートシステム，日立評論，71，8，747～752(昭64-8)
2) 増位，外：エキスパートシステム構築ツールの新しいトレンド，日立評論，70，11，1088～1093(昭63-11)
3) 中村，外：ワークステーションの進展，2050，2020のエンハンス，日立評論，70，9，929～934(昭63-9)
4) 氏田，外：原子力プラント保守支援システムの開発，日本原子力学会誌，29，6，538～547(1987-6)