U.D.C. 〔621.311.25:621.039.524〕:〔621.039.534.44:543.3.087.9:681.32〕

原子力発電設備水質診断システム

Water Chemistry Diagnosis System for Nuclear Power Plants

五十嵐裕夫* Hiroo Igarashi
小屋　博* Hiroshi Koya
大角克己** Katsumi Ôsumi

国内BWR(沸騰水型原子力発電所)の水質管理は近年急激に進歩し，放射能低減による線量低減などは世界をリードする立場となっている。このような水質管理の高度化と運転基数増加を背景に，多量な水質管理情報の整理の自動化とその高信頼性化が求められている。

日立グループでは，多量の水質データを計算機処理する水質データ管理システムと水質の微小な変化からプラントの運転状況を評価し，水質管理面の運転ガイドを行う水質診断システムから成る水質総合管理システムを開発した。

この水質診断システムは，あいまいなデータから迅速な診断を行うために，高速ファジィ推論を用いている。

1 緒　言

BWR(沸騰水型原子力発電所)での水化学管理は近年著しく進歩し，その結果として国内外プラントでの水質に関連した不具合も年々減少してきている[1),2)]。特に従事者の受ける放射線線量は，水質管理改良により大幅に低減し，国内プラントの第1回定期検査の総線量は10年前の数人・Sv(数百人・レム)から約0.2人・Sv(20人・レム)と一けた以上低減している。このような水質管理技術の高度化に加え，BWRの運転基数もこの20年間に20基と増加を続けており，水化学管理熟練技術者の十分な確保が大きな課題となっている。

一方，発電設備そのものも設計および管理の改善によって不具合や故障の発生率が減少しており，最近では発電所担当者が不具合対応の経験をすることも少なくなっている。このような背景から，**図1**に示すように水質管理全般に対する支援システムが必要とされている。

日立グループでは，BWR水質データバンクおよび水質診断機能の開発を行ってきた[3)]。特に水質データバンクは，建設プラントの運転開始後の全期間データを保存しており，水化学関係の顧客へのコンサルテーションおよび設計作業に利用し

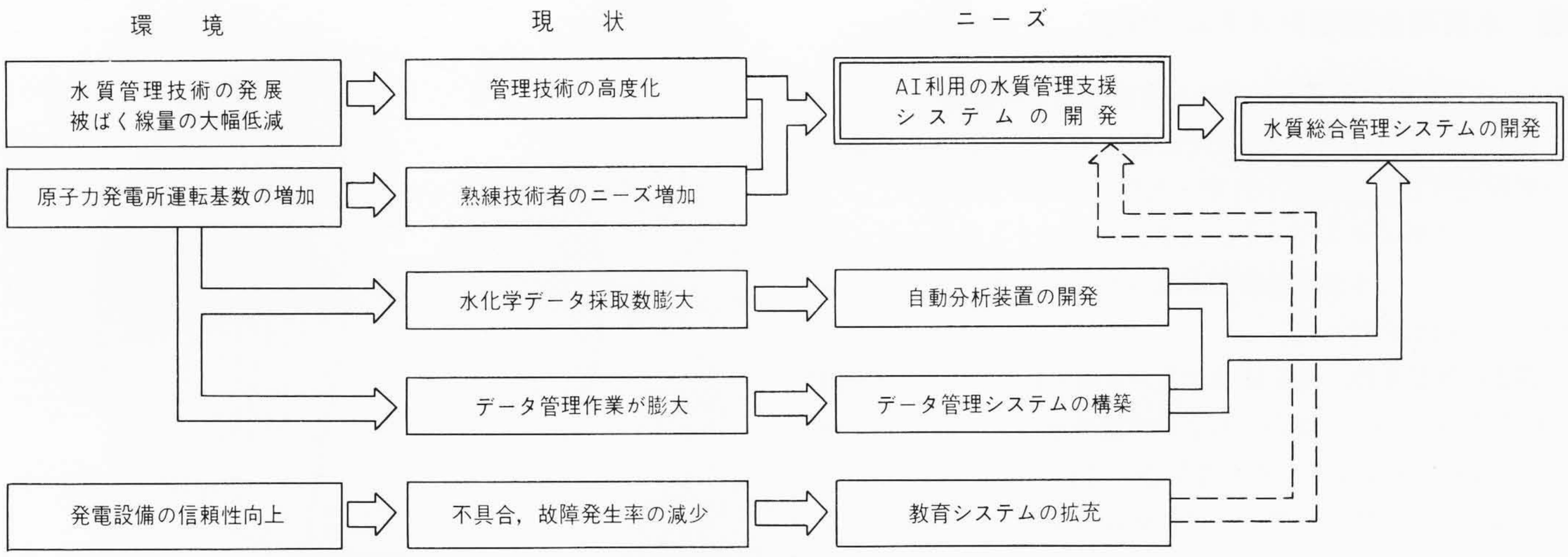


図1　水質総合管理システム開発の背景　　水質管理の高度化と原子力発電所運転基数増加を背景に，水質データを管理するシステムおよび得られた結果を判断するシステムが必要とされている。

* 日立エンジニアリング株式会社　** 日立製作所 日立工場 工学博士

ている。また水質診断手法としては，例えば燃料破損時の検知プログラム，配管線量率予測プログラムなど多くを開発し[4]，設計ツールとして大型計算機による解析に使用している。

最近の小型計算機のハードの発展は著しく，またそれに伴って種々の開発支援ツールが利用できるようになってきた。このような計算機の進歩のもとに，発電所プロセス計算機ともオンラインで接続し水質の微小変化の早期検知および原因究明，対策のガイダンスを行うことを目的とした水質診断システムを開発した。

2 水質管理システムの開発動向

水質データの日常管理およびその診断を行うシステムについては現在までに，BWR，PWR(加圧水型原子力発電所)および火力発電所を対象に開発が行われている[5)~10)]。

既発表のシステムとしては，データ収集および採取したデータの処理，例えば発電所の日報，月報の作成またはトレンド評価といったルーチン作業の省力化を目的としたデータ処理システム，ならびにAIを利用し水質診断を目指したものの2種類のシステムが考案されている。

原子力発電所で最も早く実機に適用されているのは，米国バージニア電力会社のPWRノースアナ(NORTH ANNA)-1，2号機である。このシステムの機能は，データの収集・整理用が主である。

以上，開発動向をまとめると，

(1) 水質管理の省力化のためデータ処理システムが多く，かつ実用化されているもののほとんどはこのシステムである。

(2) AIを利用した水質診断は各国で開発中であるが，実機適用には至っていない。

という状況である。

3 水質総合管理システムの構築

3.1 水質変動事例調査による水質診断項目の摘出

発電所で水質管理を行う上で必要な業務は，(1) 水質変動時の原因究明と対策立案，(2) 中・長期の変動予測である。

そこで診断エキスパートシステムを作成するにあたり，過去にどのような水質変動事例があったかを調査し，必要な診断項目の摘出を行った。

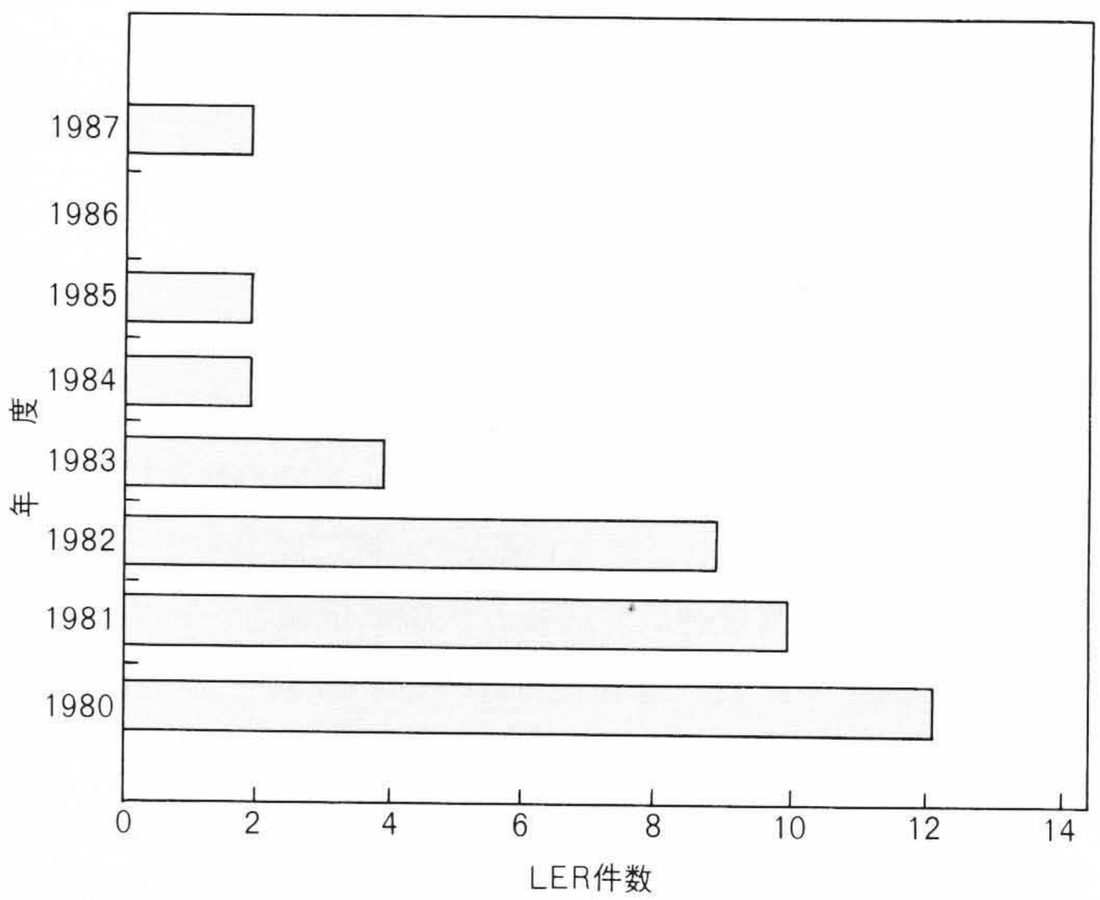
調査は運転基数，運転経験が多い米国の事例を中心にEPRI(米国電力研究所)の報告，および米国原子炉メーカーのレポート，NRC(米国原子力規制委員会)のLER(報告事例集)ならびに国内では「原子力発電所運転管理年報」(通商産業省)を対象とした。

米国BWRプラントの1980年以降での水質変動不具合事例調査[11)]では，**図2**に示すようにNRCに報告が必要な件数は年度ごとに減少しており，1984年～1987年に至っては2件以下ときわめて少なくなっている。また，これらの事例をその原因別に整理すると，**図3**に示すように多い原因は復水器冷却管の冷却水漏れ，樹脂漏れ，薬品混入などである。

したがって，これらの事例の発生頻度と影響度を勘案して診断項目を選定した。

3.2 水質総合管理システムの概要

水質総合管理システムは，**図4**に示すように水質データ管理システムと，水質診断システムで構成される。水質データ管理システムは，日常の水質データを取り込みそれを整理編集して，日報や月報の作成およびデータの経時変化図，相関図などの作図や作表をする機能を持たせている。水質診断シ



注：略語説明 LER(報告事例集)

図2 米国のBWR(沸騰水型原子力発電所)水質変動報告 NRC(米国原子力規制委員会)に報告された水質変動件数は，年度ごとに減少している。

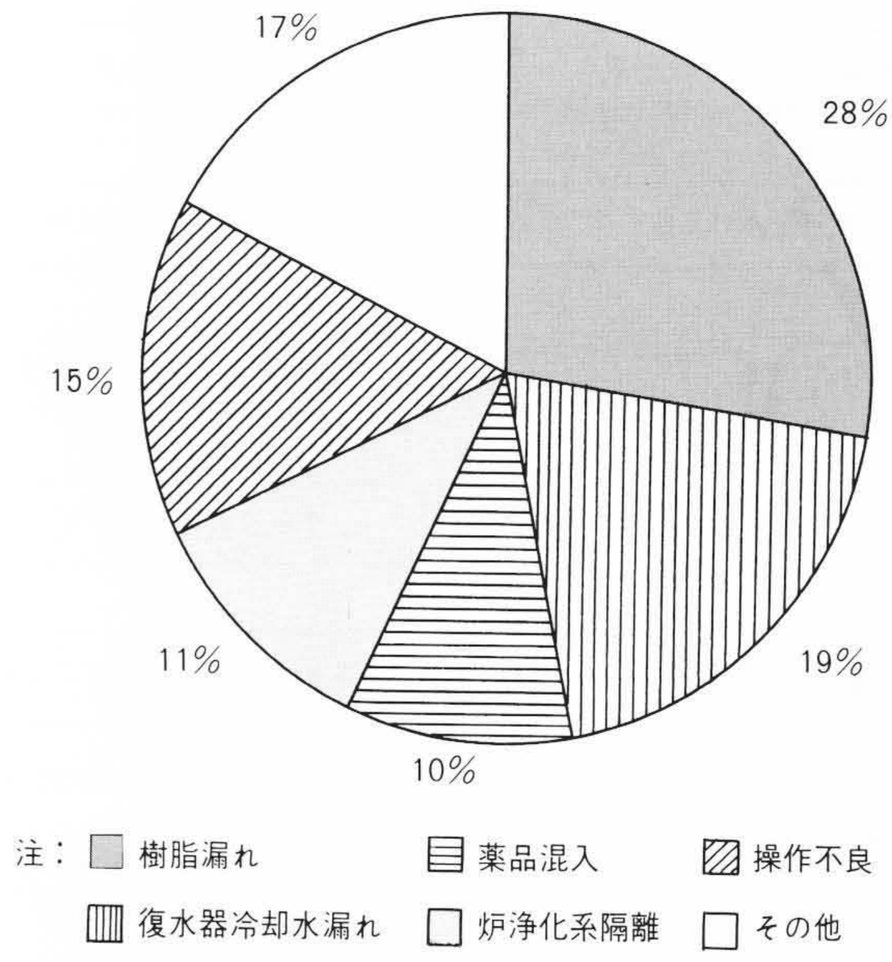


図3 米国の主な水質変動原因 原子炉水水質変動で多い原因は，樹脂漏れ，復水器冷却管冷却水漏れ，薬品混入などである。

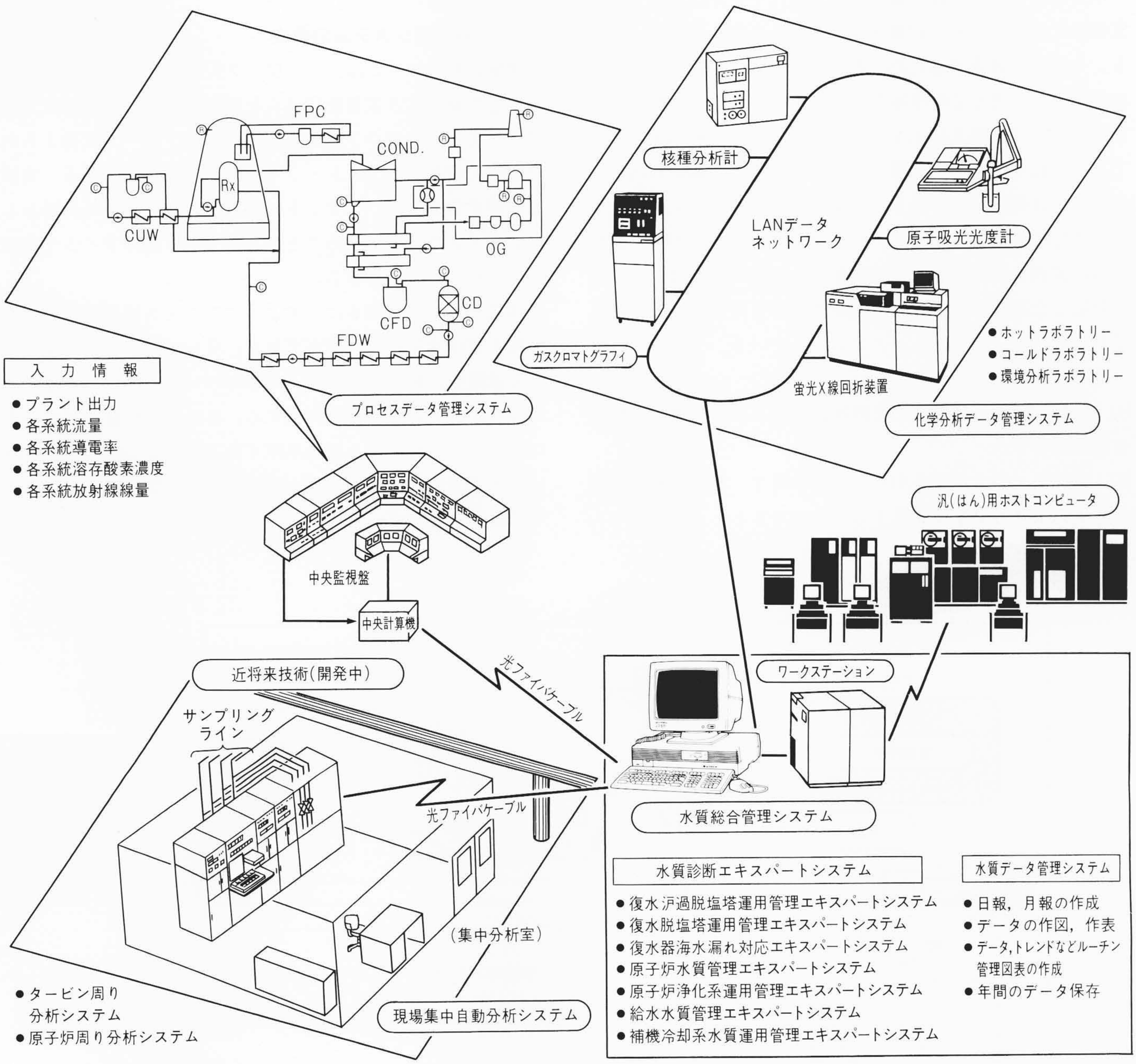
ステムは，水質データ管理システムに取り込まれたデータを診断するシステムである。

これらのシステムに自動的にデータを取り込むため，中央制御室のプロセス計算機から主要プロセスデータを引き出すラインと，化学分析室の分析器のデータをLANを通して引き出すラインを持っている。

現状の実プラントでの試料採取は，タービン周りおよび原子炉周りのサンプリングステーションから試料水またはサンプリングホルダを収集して，化学分析室で分析している。これらを省力化するため，サンプリングステーション内に現場集中自動分析装置を設け，現場から直接データを取り込むシステムも開発中である。

(1)　水質データ管理システム

水質データ管理システムは，ルーチンワークの作業量軽減を主目的としたものである。このシステムでは，水質データの整理編集だけでなく，分析作業に対して場所や採取頻度な



注：略語説明　CUW（原子炉浄化系）　FPC（燃料プール浄化系）　Rx（原子炉）　COND.（復水器）　Ⓡ（放射線モニタ）　Ⓒ（導電率計）　CFD（復水炉過脱塩装置）　FDW（給水）　OG（オフガス）　CD（復水脱塩装置）

図4　水質総合管理システム概念構成　　水質総合管理システムは，化学分析室およびプロセス計算機とオンライン化し，データを自動収集するデータ管理システムとデータを診断する水質診断システムから成る。

どのスケジューリングをも行う機能を持っている。

各分析器のデータは，その分析器の上流に位置するパーソナルコンピュータによってその分析したデータの正当性をあらかじめ設定してあるデータ範囲値との対比によって検証した上で，ワークステーションなどの化学専用機に送信される。化学専用機ではデータ処理を行って，水質診断システムでの診断用データとして使用する。また，化学管理担当課の承認を得たデータ，すなわち日報として報告されるデータは，サイトの汎(はん)用計算機に永久保存用として送信される。

(2) 水質診断システムの概要

水質診断システムは，微小な水質変化を早期に検知し，異常機器を同定し，その対策・ガイダンスを行うシステムである。それらを達成するため，本システムでは包括診断部と詳細診断部から成る2段推論方式としていることが特徴である。包括診断部は，**図5**に示すように医師の問診に相当するもので，得られた症状から判断して，可能性の高い順に原因を順位付けて詳細診断部へ送る。包括診断部の診断エンジンとしては新たに開発された高速ファジィ推論[12]を用いており，数秒以内に原因を推定することができる。詳細診断部は，各原因に対応した詳細なエキスパートシステムを持ち，必要に応じて対策ガイダンスを行うシステムとしている。

このシステムの特徴は，

(1) 包括診断と詳細診断の2段推論によって，迅速で高精度な診断を行う。

(2) 高速ファジィ推論を用いた包括診断で，異常事象を従来システムよりも早期に発見することができる。

(3) オンラインモニタ情報(導電率など)を包括診断することで，常時運転状況を診断することができる。

(4) 浄化設備の寿命予測とスケジューリングを行うことによって，運転支援を行うことができる。

(5) 異常事象が発生した場合には，その原因と故障を同定し対応を助言できる。

(6) ビジュアルな画面(機器構成図，トレンドグラフなど)により，水質情報が把握しやすい。

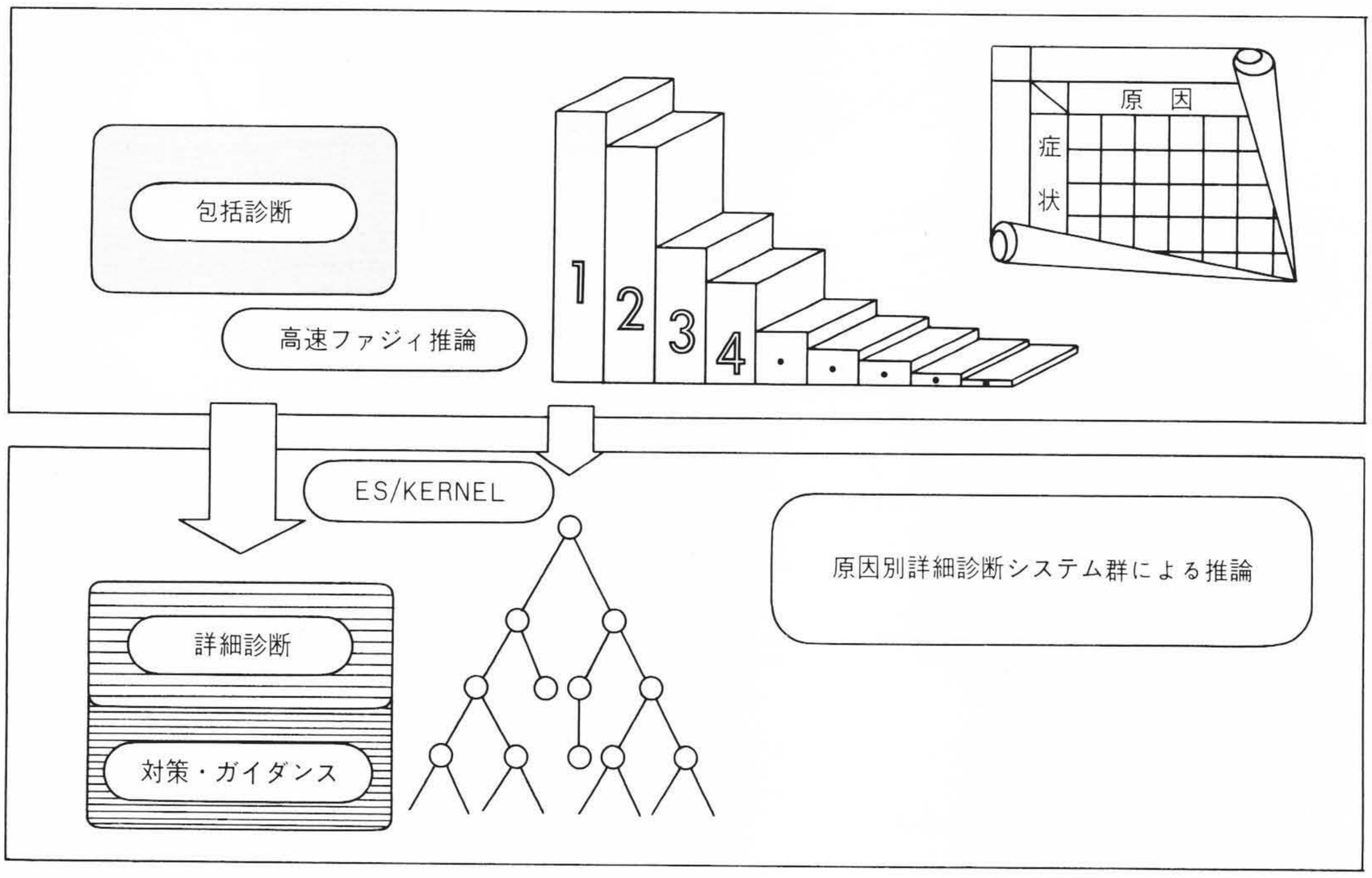
といった点である。

4 水質診断システムの構成およびアルゴリズムの開発

4.1 水質診断システムの構成

水質診断システムは，日立ワークステーション2050/32を中心とした構成で水質診断ES(エキスパートシスシム)のプロトタイプである。プラントの情報は，データベースに蓄えられた過去の情報やシミュレーション情報を利用している。実機に設置する場合は，プラントに設置されたプロセス計器からオンラインで入力とすることによって，リアルタイムで異常検出を行うことができる。

構成としては，**図6**に示すようにプロセス情報などの水質情報をデータ処理系に蓄えておく。そして，ファジィ推論による診断と，ES/KERNEL(エキスパートシェル)による診断の場合に，そのデータを利用する。また，運転員などの必要に応じて，水質情報を図表処理することによってビジュアルに表示できる。診断時には，同様に診断用図表表示することで診断を行いやすいものにしている。



注：略語説明
ES/KERNEL
(エキスパートシェル
KERNEL)

図5 水質診断システムのシステム概要 水質診断は，得られた症状から可能性の高い順に順位を付けて原因を推定する包括診断システムと，その結果を受けて原因を詳細に診断し，対策・ガイダンスを行う詳細診断システムから成る。

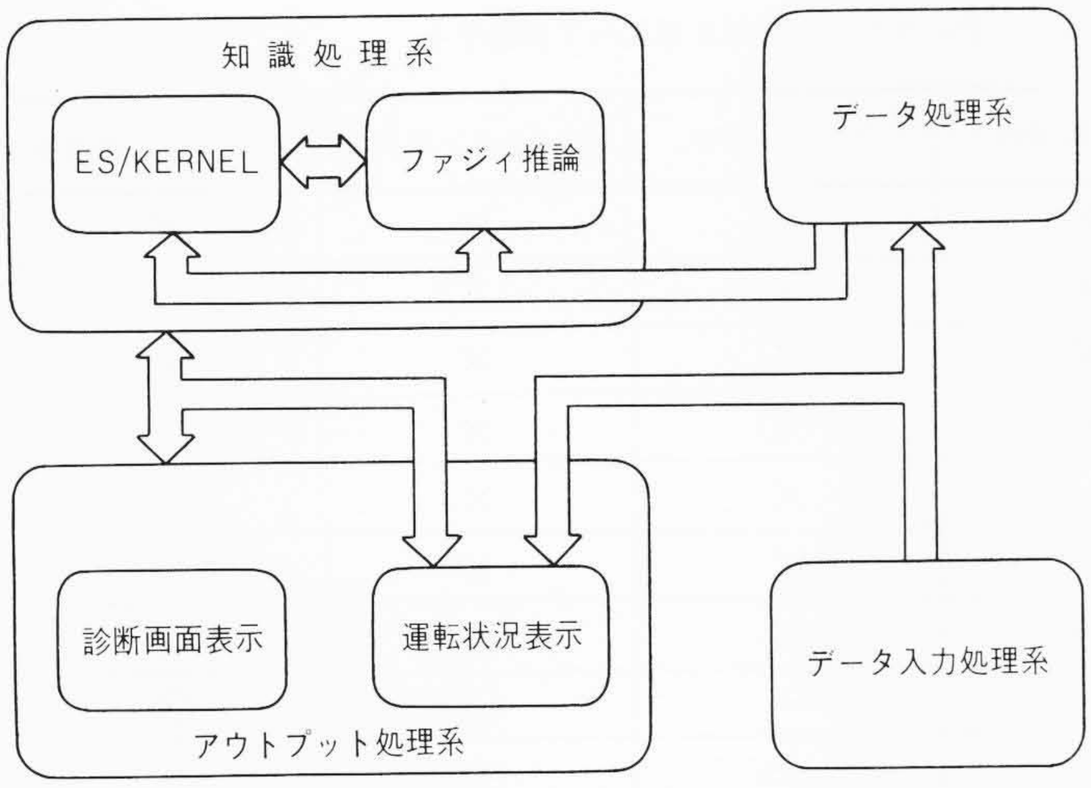


図6　水質診断システムの構成　プロセスデータなどの水質情報を処理するデータ処理系および診断する知識処理系，また運転員などの必要に応じて情報を表示するアウトプット処理系から成る。

診断システムは，一定周期もしくはオペレータの操作によって起動され，データベースから必要な情報を取り出し，ファジィ推論による診断を行う。この診断で変動兆候が認められた場合は，その変動兆候を報告する。その後，さらに必要な情報をデータベースから取り出し，明確な変動であるかどうかを診断する。もし変動があれば，変動をオペレータに知らせて，同時に可能性のある変動原因の表示も行う。

4.2　包括診断と詳細診断

(1)　包括診断

包括診断部にファジィ推論を用いた理由は，あいまいな変動兆候を的確にしかも高速に診断するためである。

従来のESでの異常診断は，**図7**に示すようにある設定された値(経験的な値，設計限界値など)でディジタルに反応し，その異常原因を推論，診断していた。異常が突発的に発生するシステムや異常の兆候が明確に判明しているシステムでは，ディジタルな診断で十分に実用的であった。しかし，大きなシステムでは，異常の傾向が時間とともに徐々に表面化することがあり，一般的な設定値に達するまでに長期間を要するものが多い。原子力発電所のような巨大なシステムでは，異常が明確になる前にその傾向を発見し予防保全を行うことが重要である。したがって，設定値に至る前段階で異常を発見するには，正常値から設定値までの区間を幾つかに分割して，そのレベルごとにルール化し評価する必要があった。

これに対してファジィ推論では，正常から異常までの区間をメンバーシップ関数を用いることで一つのルールとして記述可能であり，微妙な変化(あいまいな情報)の組み合わせから異常の早期発見を行う予防診断が可能である。

そして，これらの情報を用いて推論し，異常兆候の認められた個所を詳細診断部へ報告して，包括診断は終了する。

症状(原因個所，この場合はサンプリングポイントおよび項

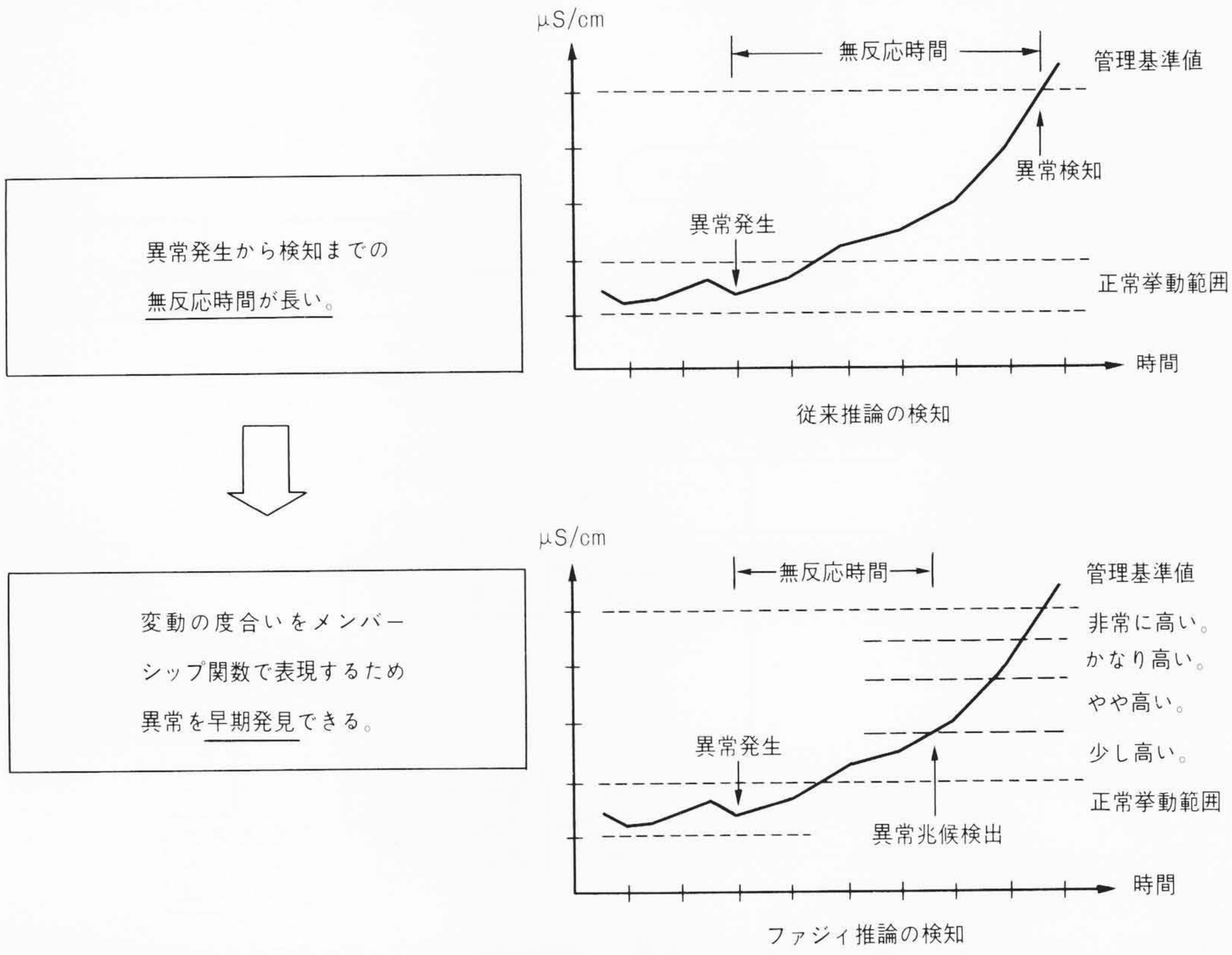


図7　ファジィ推論による包括診断　あいまいな情報でも早期に異常を検知できるファジィ推論を，包括診断部に使用している。

表1 包括診断の知識 原因と症状のファジィ関係を表した因果関係の例で，データとこの相関を見比べて推論する。

症状	原因	復水器海水漏れ	CF樹脂漏れ	CD樹脂漏れ	CDカチオン逆再生	CDアニオン逆再生
ホットウエル(H/W)出口	導電率	◎	×	×	×	×
復水沪過脱塩塔(CF)入口	導電率	○	×	×	×	×
	塩素	◎	×	×	×	×
	TOC	—	×	×	×	×
復水沪過脱塩塔(CF)出口	導電率	○	—	×	×	×
	塩素	◎	—	×	×	×
	TOC	—	◎	×	×	×
復水脱塩塔(CD)出口	導電率	○	—	—	○	○
	塩素	◎	—	—	—	—
	TOC	—	—	△	◎	—

注：略語説明など TOC(全有機炭素)，◎(強い関係あり)，○(関係あり)，△(弱い関係あり)，×(関係なし)

目)と原因のファジィ関係を表した因果関係(ルール)の一例を**表1**に示す。

(2) 詳細診断

包括推論で，異常が発生している可能性があると認められた項目(原因)を，さらに詳細に診断する。

詳細推論では，より具体的な異常個所の特定や異常の程度を調べる。そして，異常個所や異常の程度などを原子力発電所のオペレータに指示し，それに対する適切な対応ガイダンスを与える。

詳細診断項目としては，**3**章で摘出した異常事象を対象としており，

(1) 復水沪過脱塩塔運用管理
(2) 復水脱塩塔運用管理
(3) 復水器海水漏れ
(4) 原子炉水管理
(5) 原子炉浄化系運用管理
(6) 給水水質管理
(7) 補機冷却系水質管理
(8) 廃棄物処理系水質管理

などがあげられる。これらもさらに細かく分類すれば，膨大

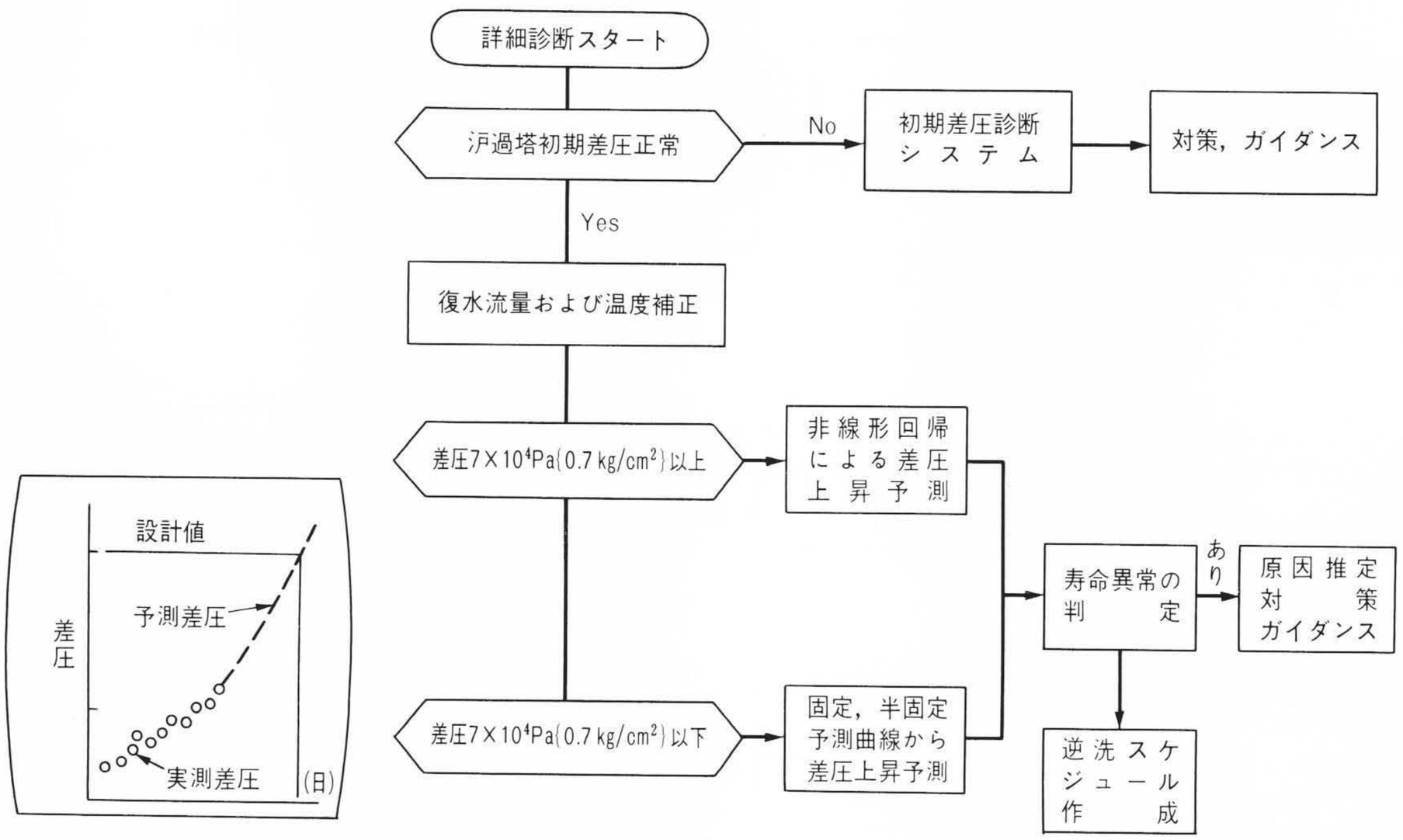


図8 詳細診断による推論…復水沪過脱塩塔差圧上昇予測 復水沪過脱塩塔は，復水中の腐食生成物を捕捉するに従い差圧が上昇する。電気出力1,100 MW級発電所で12塔運用しており，その運用管理用として日常使用するシステムである。

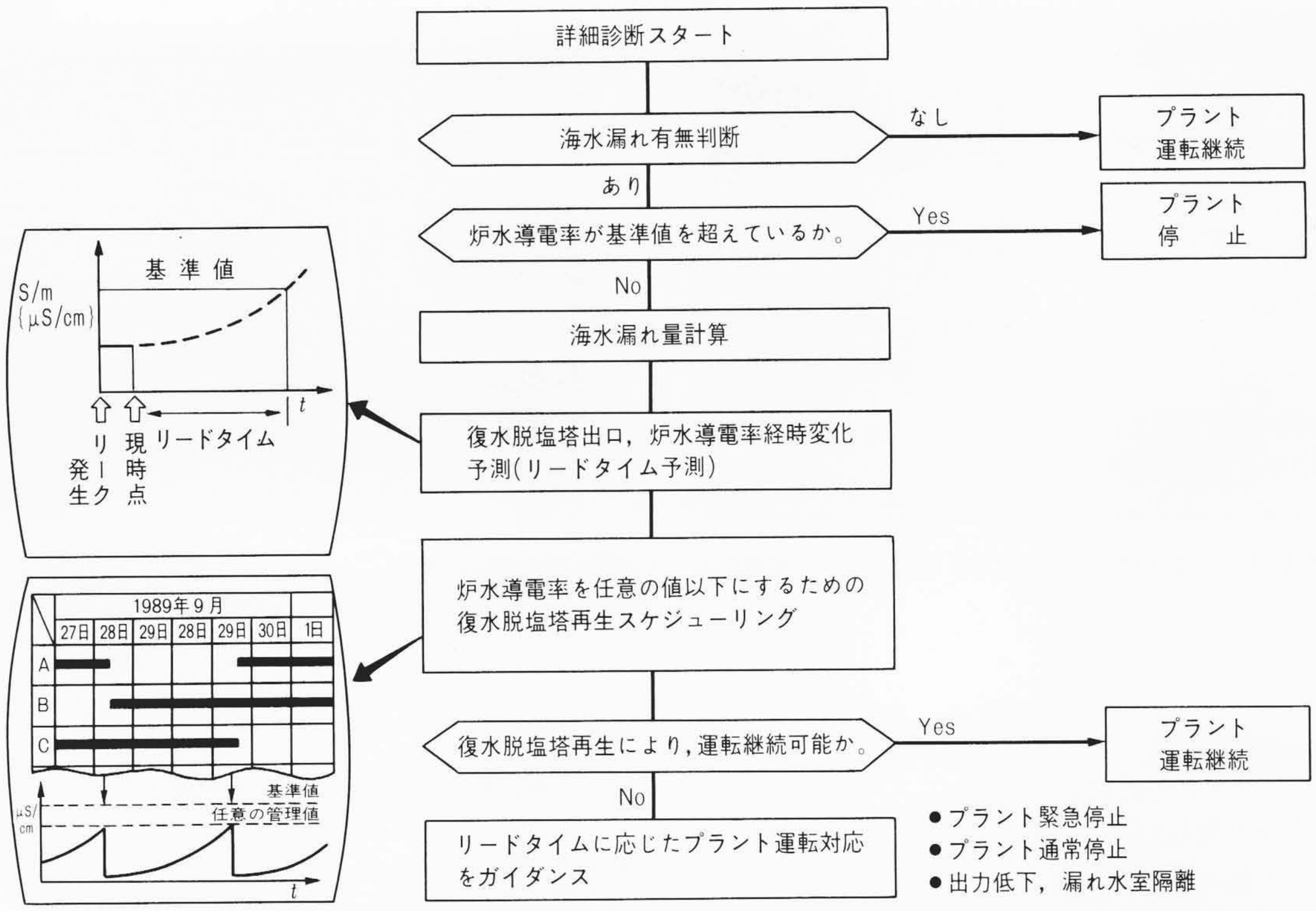


図9　詳細診断による推論…復水器海水漏れ　　復水器冷却管の海水漏れ対応のシステムで，原子炉水導電率を任意の値に制御する復水脱塩塔の薬品再生スケジューリングを行う。

な診断項目となる。ここでは，現在作成している詳細診断項目のうち二つを例にとり概要を述べる。

(a)　復水沪過脱塩塔運用管理エキスパートシステム
(復水沪過塔差圧上昇予測システム)

復水沪過脱塩塔の運用管理には，本来の設置目的である腐食生成物(以下，クラッドと称する。)除去に関する運用システムや，その結果として生ずる差圧上昇予測システム，沪過塔ストレーナ運用システムなど多くある。ここでは，一例として**図8**に差圧上昇予測システムの処理フローを示した。

このシステムでは差圧がまだあまり上昇していない期間，すなわち体積沪過時はその差圧に応じて固定または半固定の差圧上昇予測曲線によって設計差圧に到達するまでの時間を予測する。次に差圧上昇が表面沪過に移行して指数関数的に上昇し始めて，設計差圧の約半分 7×10^4 Pa {0.7 kg/cm^2} に到達した後は，非線形回帰曲線で予測するシステムとなっている。

(b)　復水器海水漏れ対応エキスパートシステム

復水器冷却管からの漏れなどによって海水が一次系内に流入しても，原子炉へ不純物，特に塩素が直接到達しないように復水脱塩塔が設置されている。

実際に海水漏れが発生した場合に，復水脱塩塔のイオン負荷状態に応じて薬品再生頻度を決めるには，従来は熟練者が時間をかけて計算を行っていた。

これに対し本システムでは，時々刻々得られる海水漏れに対して，直ちに対応可能なように**図9**に示すシステムを作製した。

基本は原子炉一次系へのナトリウム漏れ，塩素漏れおよび導電率バランスの連立微分方程式を用いたモデルである。診断結果は，炉水の導電率の管理を任意の値に指定でき復水脱塩塔器の再生スケジュールを表示できるシステムとなっている。

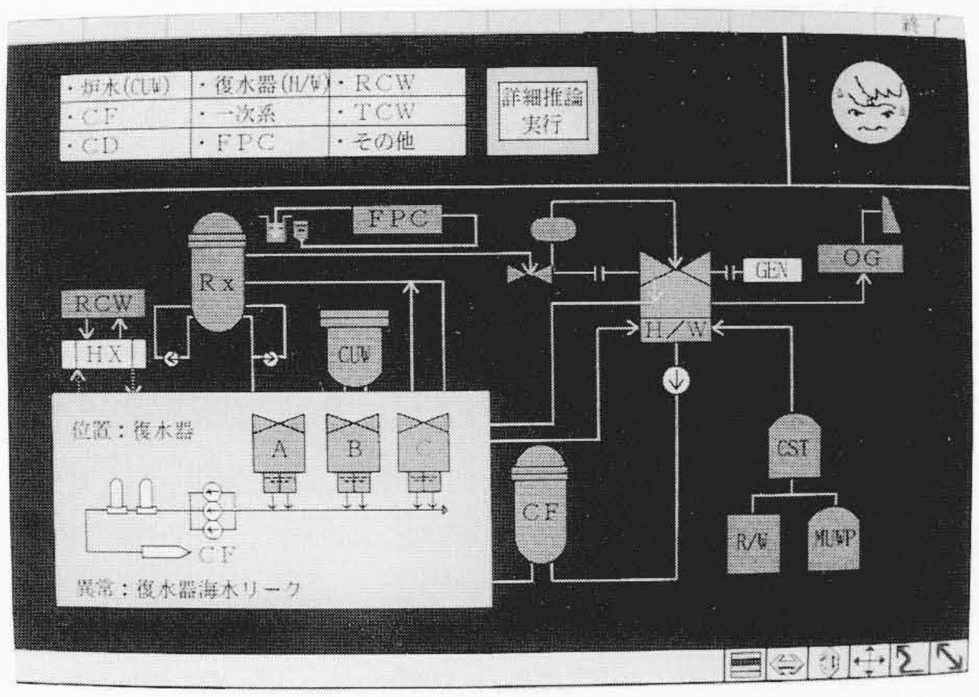


図10　包括診断結果　　復水器C塔冷却管から海水漏れの可能性があることを示す。

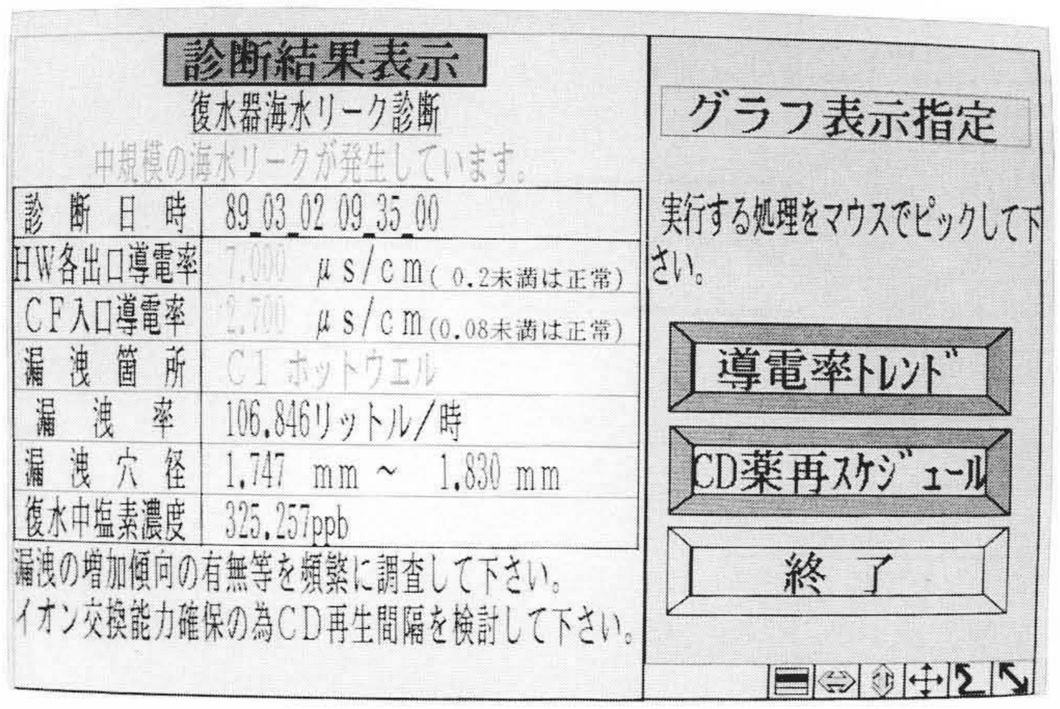


図11 詳細診断結果　復水器冷却管海水漏れの漏れ個所，規模などを示している。

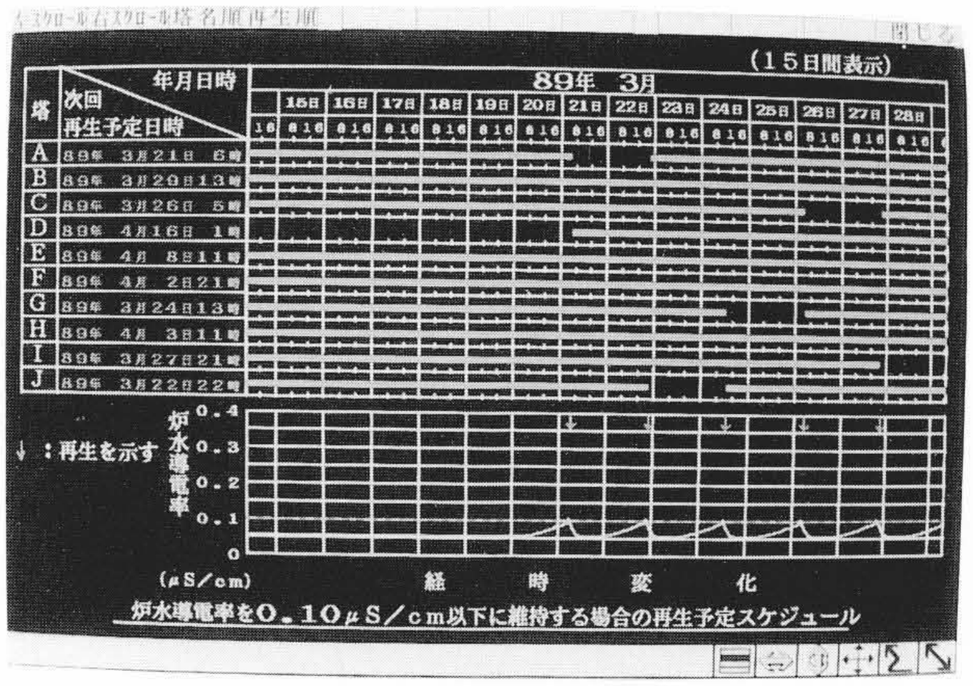


図12 詳細診断結果　復水器冷却管海水漏れ対策として，炉水導電率を0.1 μS/cm以下にするための復水脱塩塔薬品再生スケジュールを示す。

5 保守信頼性の向上

復水器冷却管海水漏れの場合に，この診断システムをオフラインで稼動した結果を以下に述べる。

図10は包括診断の結果を示すもので，復水器C塔冷却管から海水漏れが考えられることを示している。水質分析結果を入力し詳細診断を行った結果，**図11**に示すように海水漏れ率，穴径などが示される。さらに漏れが継続した場合，炉水導電率を設定値以下に保つ対策としての薬品再生スケジュールが**図12**に示すように表示される。以上の診断は数分で終了できる。

以上のようにこのシステムを用いることによって，従来人力で長時間を要していた作業を，必要に応じ何回でも短時間に表示できるという特徴がある。

今後詳細診断の充実と実機適用試験などによって，さらに信頼性を高めるとともに，使い勝手の良いものとしていく予定である。

6 結　言

国内BWRは初期の米国からの導入後20年が経過し，水化学分野での日本の役割は世界をリードする立場に変わった。水質診断システムは，プラント基数の増加に伴いデータ自動処理システムとともに省力化，高信頼性化を目指して今後いっそうニーズが高まるものと考えられる。

このようなニーズに対応するため，水質診断システムを含む水質総合管理システムを開発した。水質診断システムはあいまいなデータを的確に判断し，かつ高速に診断するために，高速ファジィ推論を用いている。

なお，このシステムの開発の一部は，茨城大学工学部の高岡忠雄教授，林　陽一助教授のご協力をいただいた。ここに深く感謝の意を表す次第である。

参考文献

1) 三木，外：低線量を目指した沸騰水型原子炉一次冷却系のシステム設計，日立評論，**64**，8，563～566(昭57-8)
2) K. Otoha, et al.：Measures for Suppressing Radioactivity Accumulation, JA1F ICWC(1988)
3) S. Uchida, et al.：Structural Material Anomaly Detection System Using Water Chemistry Data(I), Nucl. Sci. Tech. Vol.23, No.3(1986)
4) S. Uchida, et al.：A Calculation Model for Predicting Concentrations of Radioactive Corrosion Products in the Primary Coolant of Boiling Water Reactors, Nucl. Sci. Eng. 67(1978)
5) R. J. Barto, et al.：Intelligent Chemistry Management System (ICMS)-A New Approach to Steam Generator Chemistry Control, APC(1986)
6) D. P. Siegwarth：Application of Computer Assisted Data Trending and Problem Assessment Techniques to Power Plant Chemistry Control, APC(1986)
7) Energy Digest：Westinghouse Co.(1988)
8) K. Maeda, et al.：Development of an Expert System for Water Chemistry Control in BWRS, BNES, London (1989)
9) S. Miyazaki, et al.：PWR Secondary Water Chemistry Diagnostic System, BNES, London(1989)
10) 江成：水質管理システム，大倉技報，No.5(1989)
11) M. J. Fox：A Review of Boiling Water Reactor Water Chemistry, NUREG/CR-5115(1989)
12) 林，外：簡略化されたファジィ対応の逆問題の高速解法，第11回知識知能システムシンポジウム講演論文集，計測自動制御学会(1990)