U.D.C. 621.314/.316:621.317.3.087.9:681.322.022

送変電設備の予測保全システム

Predictive Maintenance Systems for Substations

山田　洋*　Hiroshi Yamada
山極時生*　Tokio Yamagiwa
森　悦紀*　Etsunori Mori
丸山　彰**　Akira Maruyama
広瀬義昭***　Yoshiaki Hirose

高度情報化時代を迎えた社会環境の変化は，電力の供給信頼度と質により高いレベルを要求するようになってきている。

これに伴って，送変電設備でも機器固有の信頼度向上が図られ，かつ事故の未然防止と万一の事故時の早期復旧に有用なシステムの導入が計画されるようになってきた。

日立製作所では，これにこたえるため異常検出技術の高精度化とオンライン診断システムへの適用に取り組んできた。また，診断結果をもとに運転・保守に関する支援情報を提供するエキスパートシステムの実用化にも注力している。エキスパートシステムはプロトタイプの検証段階であるが，実用化への見通しも得られた。

ここでは，送変電機器のオンライン監視・診断システムの分野でのセンシング技術と支援エキスパートシステムの概要について説明する。

1　緒　　言

最近の電力の利用環境は，高度情報化社会の進展，生活環境・社会機能の電力依存度の増大により，供給信頼度及び質的改善に対する要請をいっそう強めている。

一方，電気所の設備容量の増大，機器・装置の縮小化，密閉化といった設備形成の変化に伴い，稼動中の設備事故の未然防止や万一の事故時の処置などの保全技術に関し，新たな対応が求められるようになってきた。これにこたえるものとして，運転中の送変電設備を監視・診断し，細密点検の要否や寿命の予測などを自動的に行うオンラインシステムへの期待がいっそう高まってきている。

このような背景のもとで日立製作所では，稼動中の送変電設備の状態・異常兆候を的確かつ早期に把握するため，予測保全システムの開発を行ってきた。本システムは，最近のセンシング技術及びエレクトロニクス技術を活用した高精度診断を可能としている。

更に，このようなシステムによって得られた情報をもとに，運転・保守支援機能を高めることをねらいとして，近年，進展の著しいAI(Artificial Intelligence)を活用したエキスパートシステムの実用化に努めている。本エキスパートシステムは，変電所総合監視システムのマンマシン系での中核をなすものと考えられる。

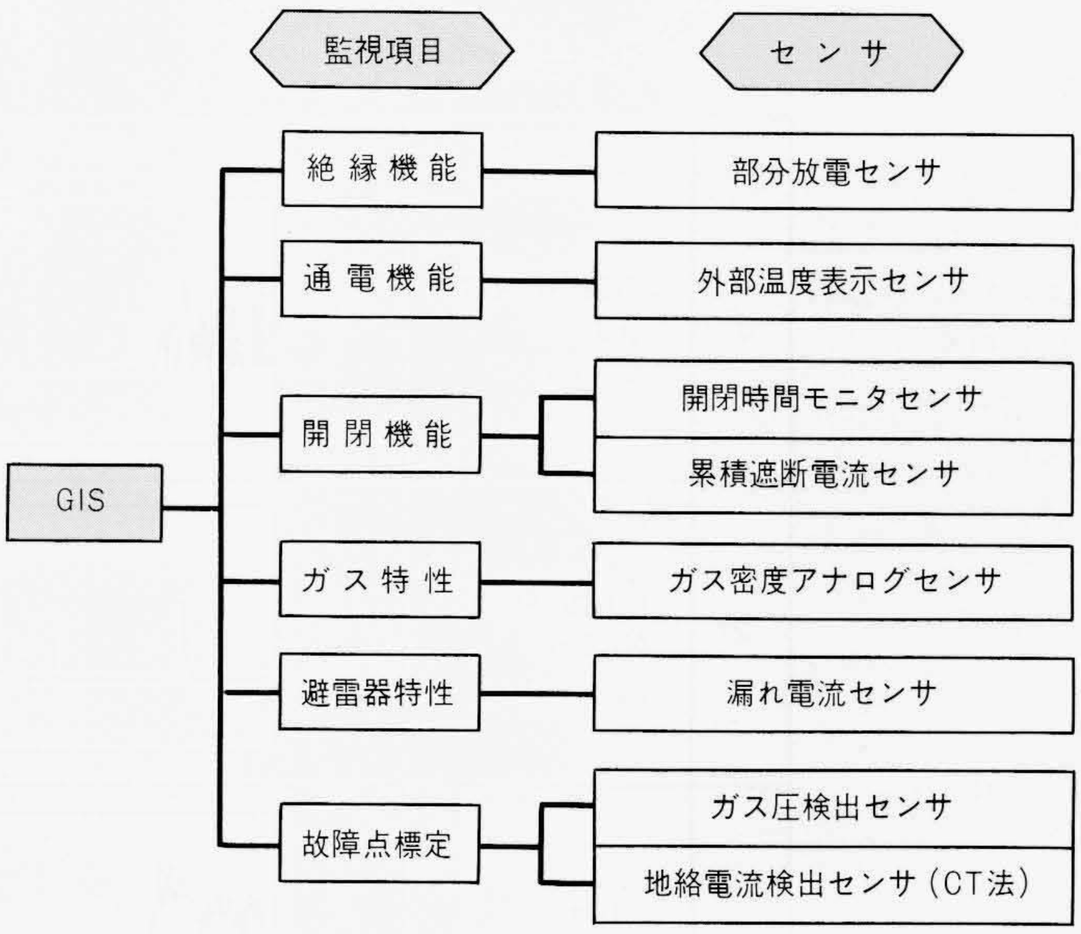
以下，日立製作所での送変電設備の予測保全システムとして，特にガス絶縁開閉装置と変圧器を対象とした技術の開発概要について述べる。

2　センサ技術の現状と高精度化の動向

2.1　ガス絶縁開閉装置

2.1.1　センサ技術の現状

図1は現状でのガス絶縁開閉装置の異常監視項目とセンサについて示したものである。これら各種センサをガス絶縁開



注：略語説明　GIS(ガス絶縁開閉装置)
CT(変流器)

図1　ガス絶縁開閉装置の異常監視項目とセンサ　オンライン監視用として，多種のセンサが実用化されている。

* 日立製作所国分工場　** 日立製作所大みか工場　*** 日立製作所電力事業本部

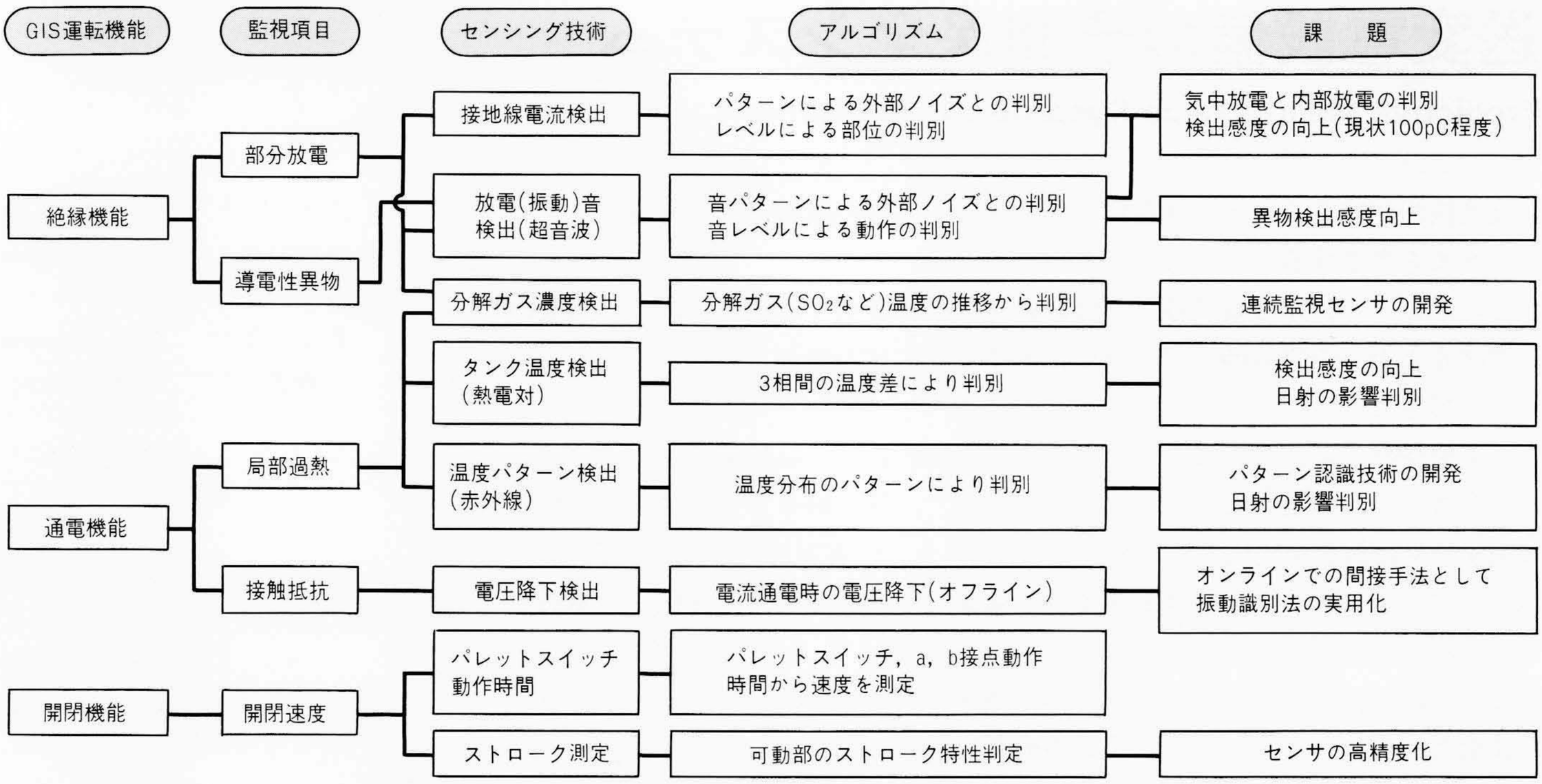
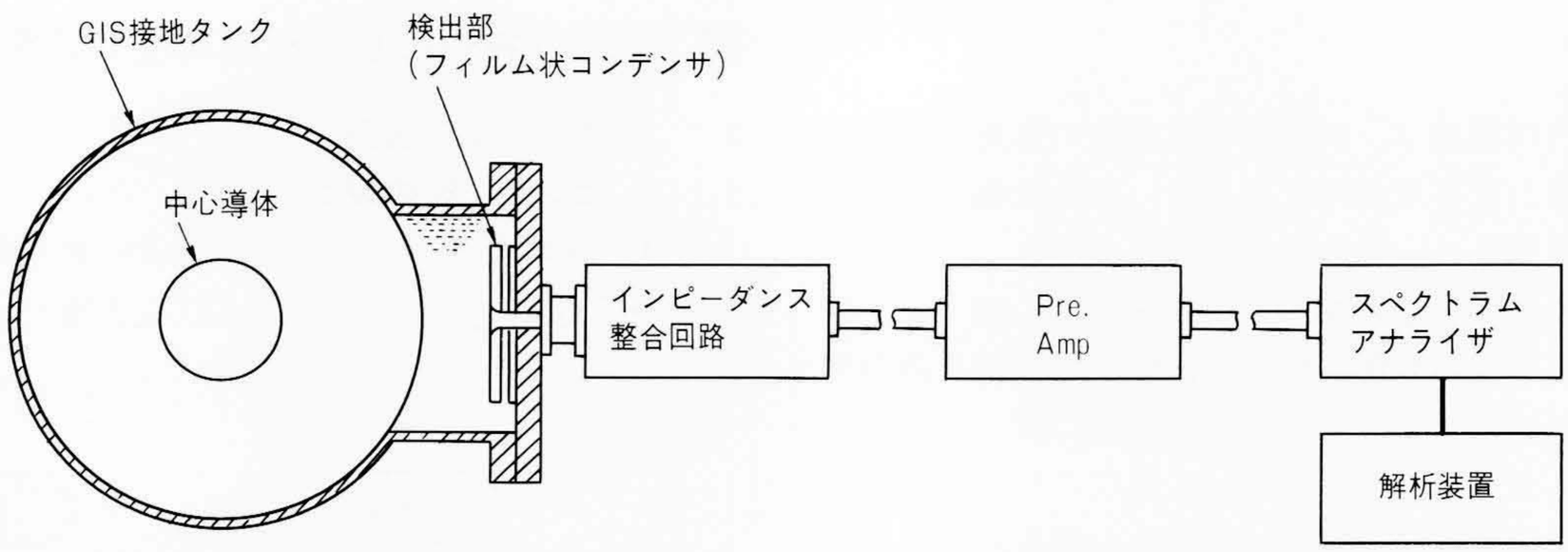


図2　異常センシング技術の現状と課題　　高精度診断のためには，センサの感度向上，新形センサの開発など課題も残されている。



	測定条件	周波数スペクトラム	特　徴
①	外部部分放電 (印加線) Q=400 pC	レベル	GIS外で発生する部分放電は，レベルが大きくても周波数が500 MHz以上の成分は少ない。
②	内部部分放電 Q=8 pC	レベル	GIS内で発生する部分放電は，750～1,500 MHz帯に現れる。
③	①＋② 外部と内部部分放電が重畳	レベル 0　300　600　900　1,200　1,500 周波数 (MHz)	GIS内外で同時に発生しても，GIS内部分放電を区別して検出することが可能である。

注：略語説明　Pre. Amp (前置増幅器)

図3　周波数解析による微小部分放電検出法　　センサ信号を周波数解析することによって，外部と内部の部分放電を高感度に識別することが可能になる。

閉装置の所定部位に取り付けて，オンラインでの異常監視が行われている[1),2)]。

しかし，現状の異常監視手法には，より高精度診断に向けての課題も残されている。**図2**はこれらセンシング技術と課題について示したものである。

絶縁機能に関する課題には，部分放電検出の感度向上とガス絶縁開閉装置に混入する異物の判別が挙げられる。また，通電機能に関しては現在外部からの温度監視が主体となっており，気象条件などの影響を軽減する技術開発が課題となっている。

2.1.2　センサ技術高精度化の動向

従来のセンシング技術は，ある検出量が設定基準値を超えた場合に異常と判定する方式が主流となっている。一方，最近では検出量を周波数解析し，そのパターンによって異常判定ばかりでなく各種識別を可能とする手法が実用化に近づいている。

(1)　周波数解析による微小部分放電検出法

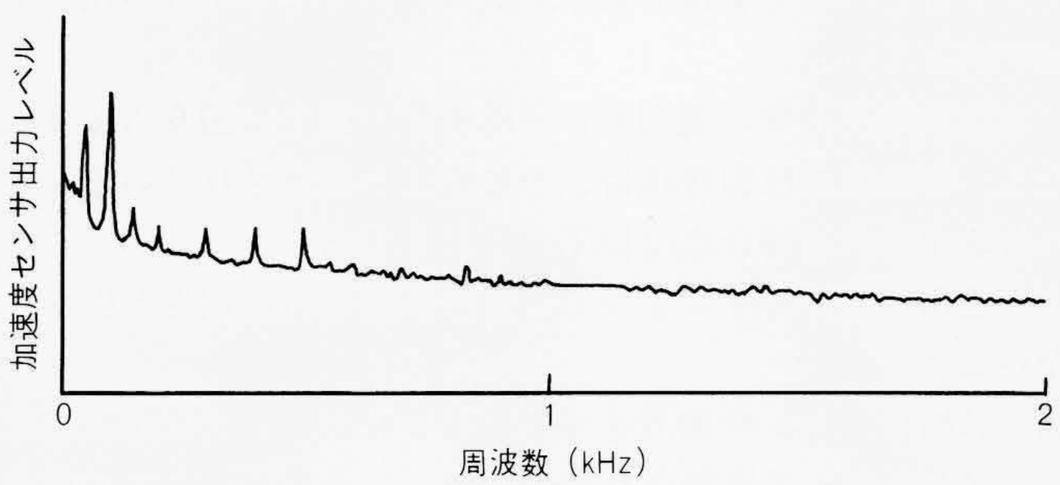
図3は周波数解析による微小部分放電検出法について示したものである。ガス絶縁開閉装置内のポケット部に設けられた検出部からの信号を，スペクトラムアナライザによって周波数解析し診断する。ガス絶縁開閉装置外の大気中で発生した部分放電は約500 MHz以下の帯域に現れ，ガス絶縁開閉装置内で発生する部分放電は750～1,500 MHz帯に現れている。したがって，ガス絶縁開閉装置内の部分放電電荷量が数ピコクーロン相当でも，同時に発生している数百ピコクーロンの大気中部分放電と識別することが可能である。今後このような検出法を適用することによって，検出精度の大幅な向上が期待できる。

(2)　振動測定による通電異常検出法

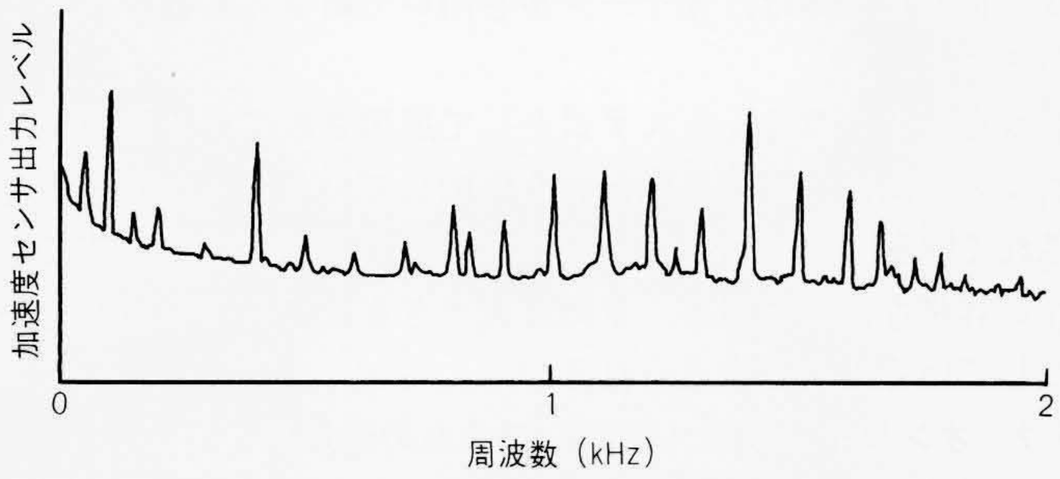
図4は振動測定による通電異常検出法について示したものである。タンク外壁に設置した加速度センサを用いてタンクの振動を測定し，振動波形の周波数解析によって異常診断する。(a)正常時の振動は，商用周波数の整数倍の比較的周波数の低い成分だけであるが，(b)通電異常時には商用周波数の整数倍の比較的高い周波数領域まで振動成分が検出されている。このように振動成分を常時監視することによって，通電異常を早期に精度よく検出できる可能性がある。本検出法によれば，従来のタンク表面温度検出とは異なり，周囲環境からの影響を大幅に軽減することができるため，今後の有力な検出法と考えられる。

(3)　微小異物検出法

図5は加速度センサ及び超音波センサを用いたガス絶縁開閉装置内の微小異物検出法を示したものである。(a)は検出状況を示したもので，前述の2種類のセンサの検出信号を処理する装置で構成されている。この方法は異物の種類により衝突音の周波数スペクトルが異なることに着目したもので，検出周波数帯域の異なる2種類のセンサの出力比で判別してい

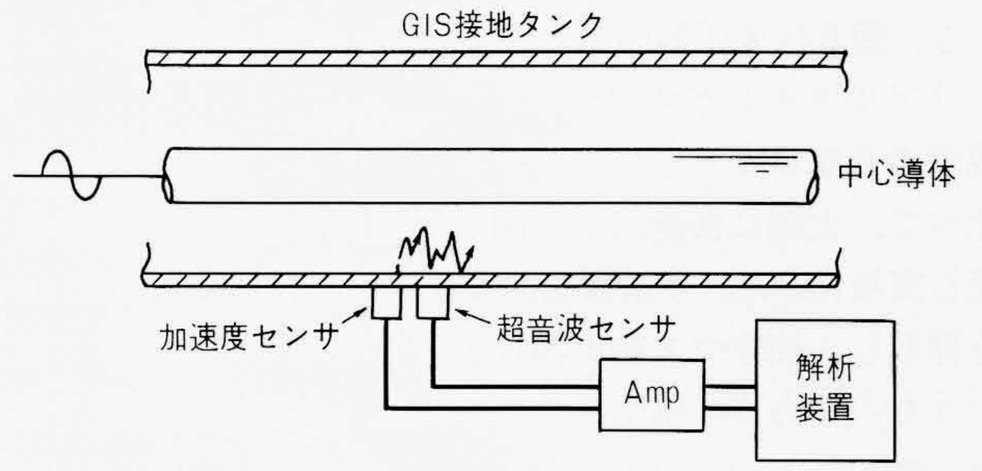


(a) 正常時のタンク振動

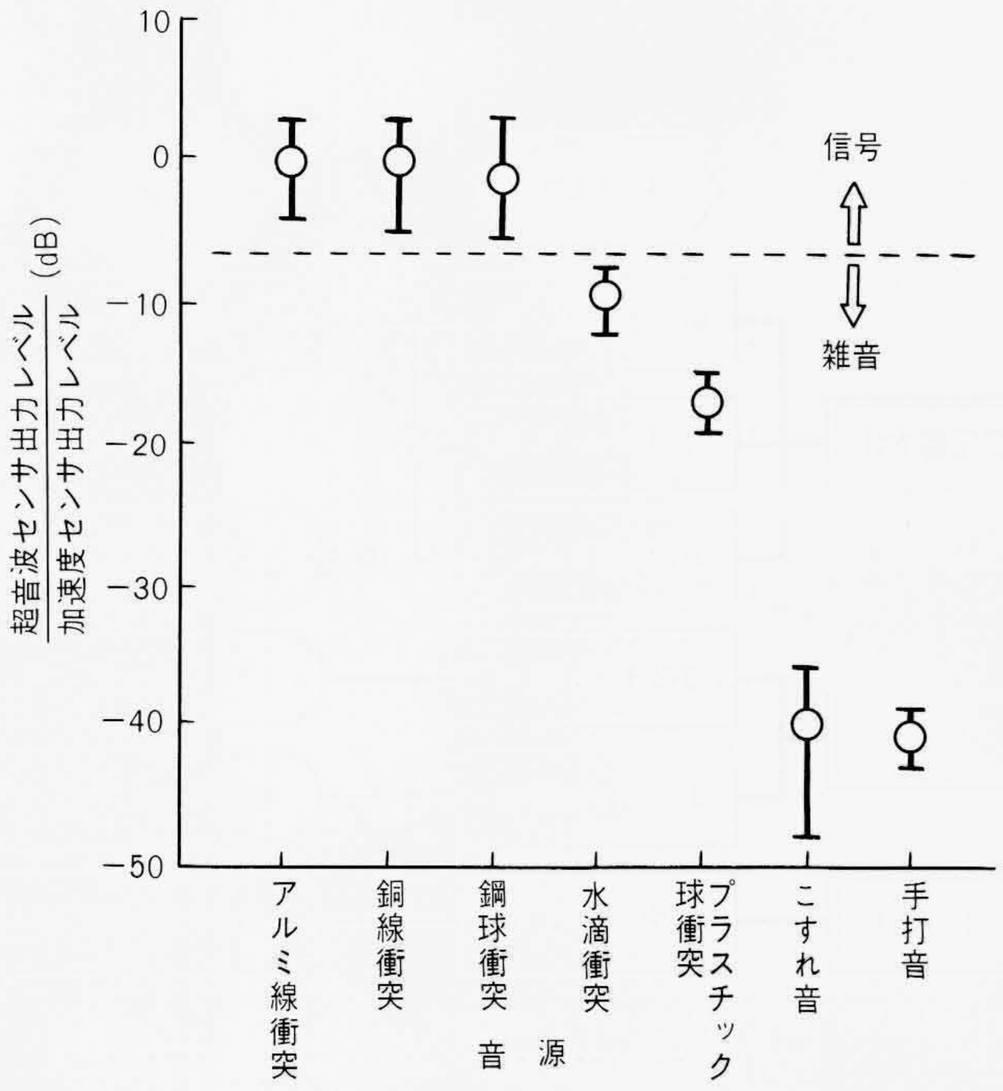


(b) 通電異常時のタンク振動

図4　振動測定による通電異常検出法　　通電異常時には，比較的高い周波数領域まで基本周波数の整数倍の振動が現れる。



(a) 異物検出状況



(b) 異物の種類の判別例

図5　微小異物検出法　　センサ信号のスペクトル分析情報をもとに，ガス絶縁開閉装置内部異物の識別が可能となってきた。

る。(b)はこの方法による判別結果の一例を示したものである。絶縁性能上問題となる導電性異物とその他の雑音を判別することが可能であることが分かる。なお，比較的広帯域のセンサを用いて周波数解析を行うことによって，1種類のセンサでも同様な結果を得ることができる。

上述したように各種の検出信号を周波数解析することによって，単なる高感度異常判定だけでなく，異常の識別も可能となりつつある。これらのセンシング技術を適用することによって，診断システムの高精度化が一段と進むものと期待される。

2.2 変圧器

変圧器の異常予知の質的向上及び保守作業の効率化を目的とした予測保全装置が開発され，既に実用化されている。ここでは，現状での予測保全用センサの概要と，最近日立製作所で開発した油中ガス分析装置(リアルタイムガスアナライザ)について紹介する。

(1) 変圧器の予測保全技術

変圧器のような油入機器の内部異常現象は，内部発熱を伴い，絶縁油を分解して可燃性ガスを発生させる。このガスを抽出分析して異常診断を行う油中ガス分析技術は，既に広く採用されている。更に，変圧器の絶縁異常を早期に発見することができる内部部分放電監視技術も，最近一部実用化されている。**図6**は変圧器の予測保全技術の代表的なものを示す。

(2) リアルタイムガスアナライザ

現状の6成分ガスを検出できるポータブル形異常診断装置に比べて，大幅に機能向上を図った新形油中ガス分析装置を開発し実用化した。本装置は，変圧器の排油弁から約50 mlの油を採取し，油中ガス抽出器によって現地で即座にガス抽出を行うものである。抽出されたガスは，高感度熱線形半導体式センサによって6成分ガス(H_2，CO，CH_4，C_2H_4，C_2H_6，C_2H_2)に分析される。これにより変圧器の異常診断を即座に行うことが可能となり，これをリアルタイムガスアナライザと呼んでいる。特徴としては下記が挙げられる。

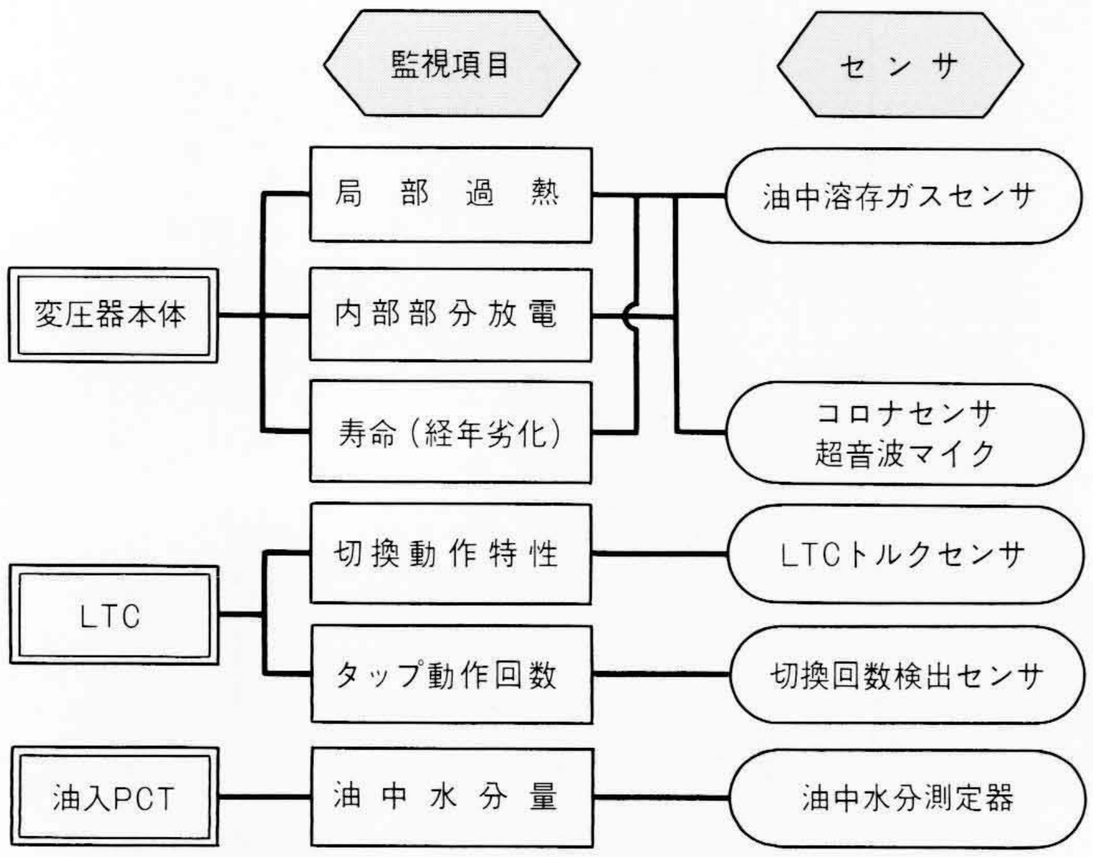
(1) 熱線形半導体式ガスセンサを使用することによって，高感度化を図った。

(2) 検知器と診断器を一体化し，かつ軽量化を図った。

(3) 高分子膜を用いたガス分離部による抽出だけでなく，現地で即座に抽出・分析し診断結果が得られるため，装置の適用範囲を拡大できる。

図7に排油弁へ直接ガス抽出器を組み合わせた場合の装置構成を示す。これにより緊急対応として，排油弁からの油を油中ガス抽出器に導き，溶存しているガスを抽出し，油中ガス分析装置によって各成分ガスの検知と異常診断が即座に実施可能となる。**図8**にリアルタイムガスアナライザの外観を示す。

変圧器の予測保全技術は，今後，余寿命予測手法の実用化に向けて，フィールドデータの蓄積と装置の改良が図られていくものと考えられる。



注：略語説明 LTC(負荷時タップ切換装置)
PCT(変成器及び変流器)

図6 変圧器の異常監視項目とセンサ 各種のセンサを用いたポータブル形診断装置がフィールドで適用されており，オンライン適用も可能となってきた。

3 オンライン設備監視・診断システム

センサを用いた送変電設備の診断技術は，可搬形，移動形高精度診断装置への適用ばかりでなく，オンラインシステムへの適用も本格的な実用化の段階に入った。送変電設備にオンライン監視・診断システムを適用する目的は，電力会社からのニーズ調査結果によれば，設備の高信頼度化(事故の未然防止)と保守の省力化が主となっており，これを満たすシステムの構築が重要となる。

3.1 オンラインシステムの現状

送変電設備，主として変圧器，ガス絶縁開閉装置，ガス遮断器を対象とした監視・診断システムは，構成・規模・適用センサなどの面で多様であり，長いものでは5年近い稼動実績を持っている。

主な診断項目別の適用センサは前出の**図1**，**図6**のようになり，診断技術は監視項目ごとに工夫が凝らされている。これらの中で共通的な点は以下のとおりである。

(1) 適用するセンサによって，被診断機器の信頼性が低下しないこと。

(2) 診断は，センサ信号をマイクロコンピュータによってディジタル処理して実施される。更に，システムとしての標準化，拡張性，発展性が十分に考慮されていること。

(3) 信号伝送路は，光ケーブルを用いて耐ノイズ性を高めていること。

現在，オンラインシステムとして運用されている監視・診断システムは，ほぼ目標どおり稼動していることが各種報告されている[3]。したがって，通常の巡視点検などでは対応できない詳細な診断情報を，常時監視できる点で有用な役割を果たしているものと考えられる。

3.2 オンライン監視・診断システムの適用例

既設の気中絶縁形変電所に導入されたシステムの例を**図9**に示す。変電所を構成する機器のうち主要なものが監視・診断の対象となっており，9種，158点のセンシング情報がある。

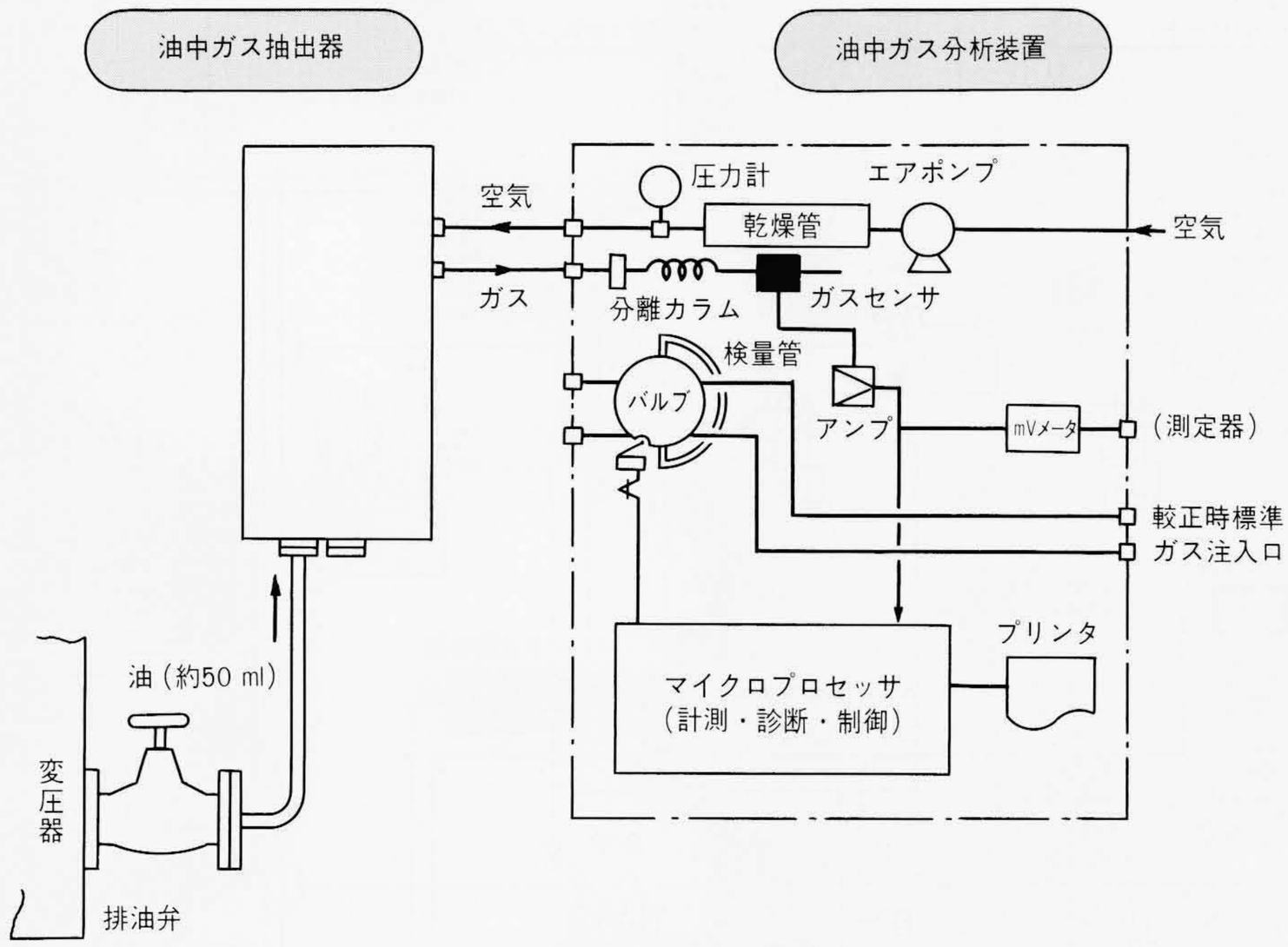
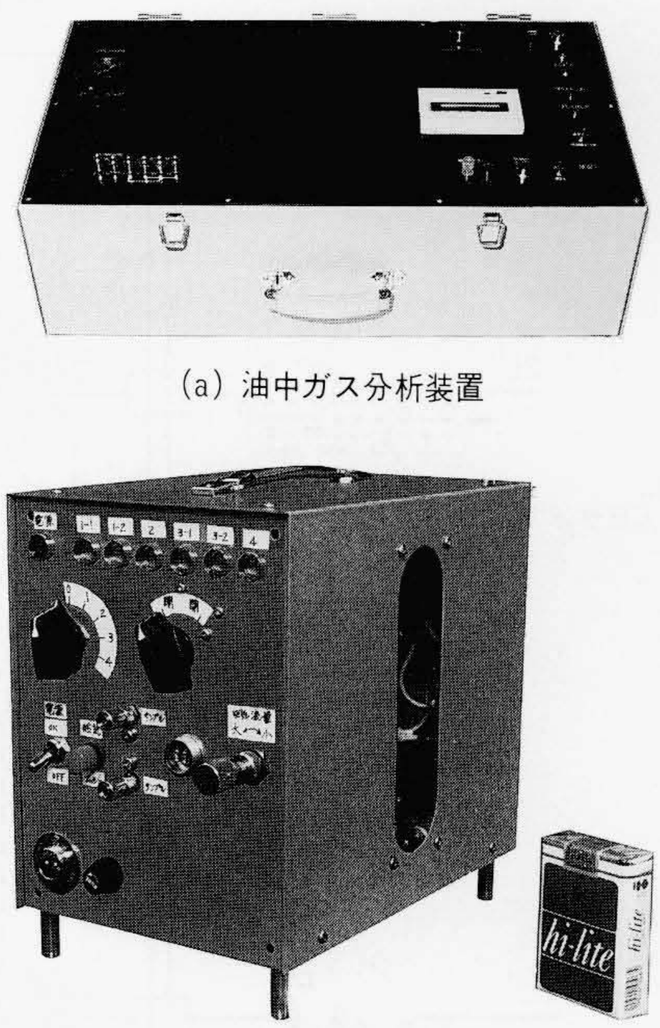


図7　リアルタイムガスアナライザの装置構成　排油弁から抽出された油は，抽出器でガスが抽出され，分析装置内のガスセンサによって6成分のガスが検知される。



(a) 油中ガス分析装置

(b) 油中ガス抽出器

図8　リアルタイムガスアナライザ　装置は小形・軽量で可搬性に富み，油を抽出後約30分で分析結果が得られ，リアルタイム診断が可能となった。

各種センサからの信号は，電圧階級別のヤードに設置された現地盤でディジタル信号化され，光ケーブルによって本館内の監視盤へ伝送されている。現地盤は**図10**のブロック図で構成され，マイクロコンピュータによってフレキシブルな機能を果たしている。現地盤内の電子回路は，開閉サージ，日射，外部ノイズなどの過酷な条件に耐えられるように配慮されており，万一のハードトラブルは装置の自己診断機能で検出される。**図11**に本システムでの診断アルゴリズムの概要を示す。機器の異常兆候を軽微な段階で検出するのがシステムの使命であるが，このために誤動作，誤警報が許容されるものではない。したがって，診断結果の判定には，ソフトウェア上のノイズ弁別に十分な配慮を払っている。

本システムは，昭和62年3月から運用が開始されている。

3.3　オンライン監視・診断システムの今後の動向

変電設備を取り巻く諸環境の変化に伴い，設備のオンライン監視・診断システムに対するニーズも，より高感度化，多機能化が望まれている。将来的には，変電所の侵入監視・防災監視といった別システムと組み合わされて変電所設備総合監視システムの構築が目標となっている[4]。このためにはセンサ技術，異常進展メカニズムの究明と，それに対応した診断アルゴリズムの開発などに関しいっそうの改良が望まれる。その一つとして，部分放電診断の高精度化の面から，内蔵コンデンサ電極をセンサとする内部診断手法が注目されてきた。これは，機器の信頼度を損ねることなく対応できる新設ガス絶縁開閉装置の絶縁診断手法として実用化に向け検討されている。

また，診断情報の活用の面からは，運転・保守支援の機能向上が望まれている。診断結果のビジュアル表示・トレンド表示だけでなく，複数のセンサ情報を総合的に判定し，次に何をなすべきかの支援情報を出力するシステムへの要望が強い。これは次に述べる運転・保守支援システム(エキスパートシステム)として実用化のレベルに近づいてきた。

4　予測保全と運転・保守支援システム

監視・診断システムから得られるデータは，専門家のノウハウにより評価された形で運転・保守員に提供されることが望ましい。すなわち，人間系に対し整理された情報を提供できるシステムとすることによって，事故時の対応はもとより平常時にも有用なシステムとなる。日立製作所では，エキスパートシステムを導入することによって，このシステムの実用化に取り組んでおり，以下にその概要を述べる。

4.1　診断エキスパートシステムの構築

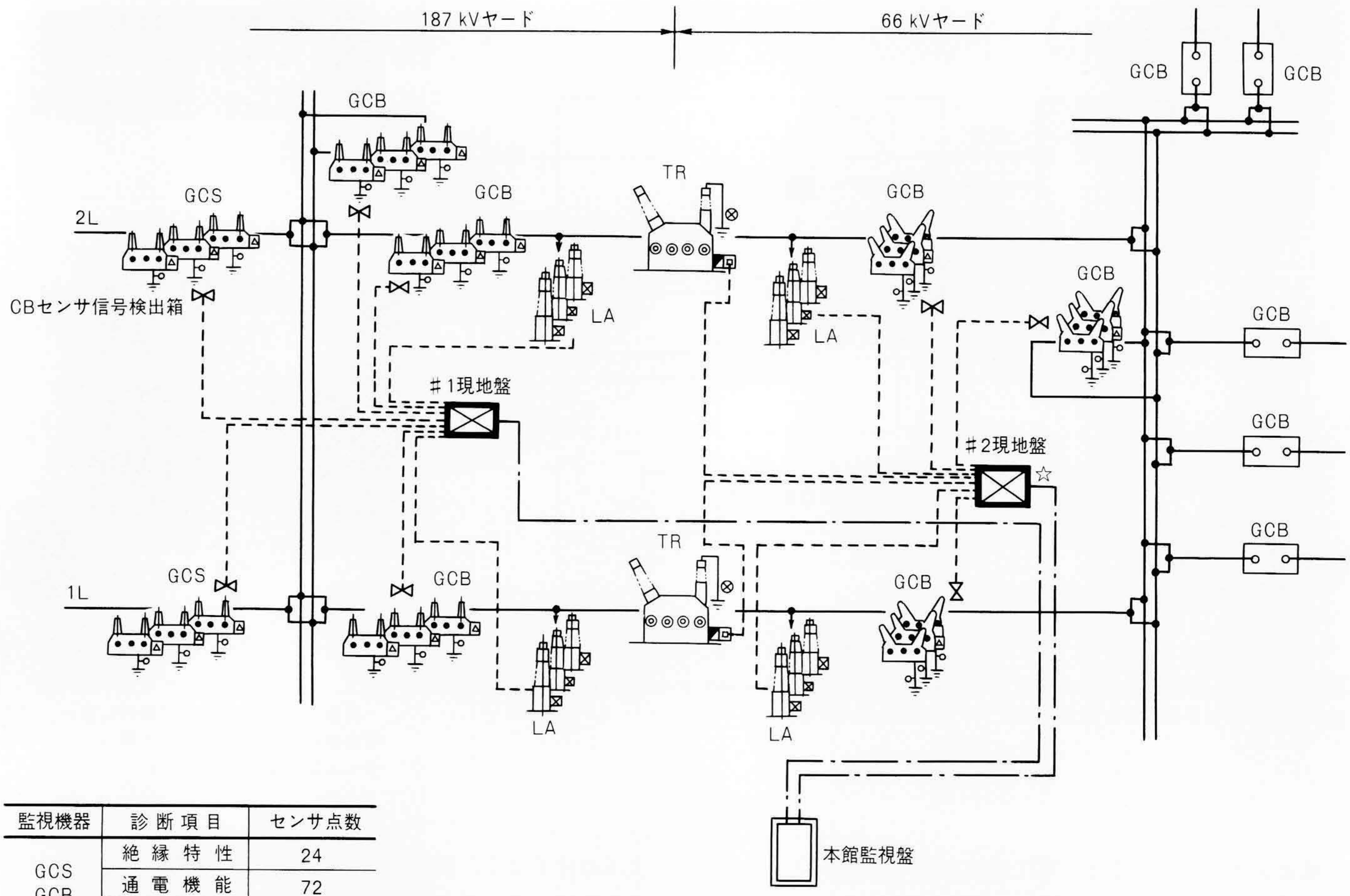
エキスパートシステムが目標とする運転・保守支援システムの全体機能ブロックは，**図12**のように表される。監視・管理系は運転中での人間系との接点となり，診断系にはエキスパートシステム特有の機能が付与される。

知識ベース，診断ルールは，設備に固有の異常進展メカニズムを分析・整理することによって作成した。診断ルールは，「もし～ならば～である」式のプロダクションルール形式を用いて構築されている。

4.2　変圧器の故障診断システム(プロトタイプ)

送変電設備の中で，変圧器は比較的診断アルゴリズムが確立しており，診断支援機能が実用化のレベルに近づいている。**図13**に変圧器の異常診断システム(プロトタイプ)によって実施した診断結果の表示例を示す。

変圧器内部異常の前駆現象は，絶縁油中の溶存ガスの量と

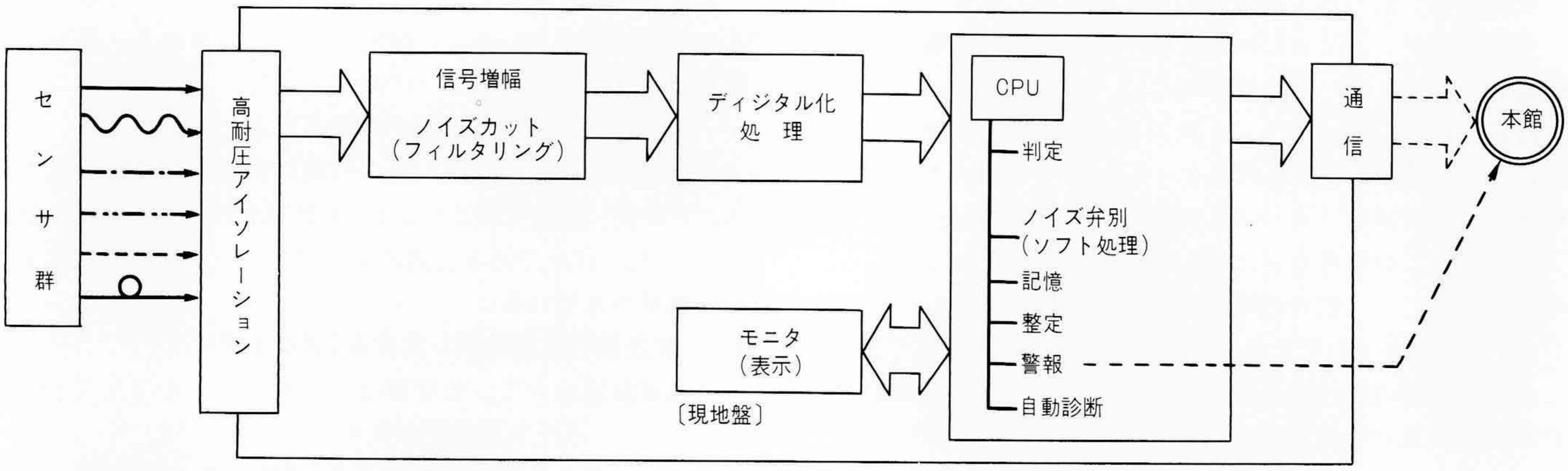


監視機器	診断項目	センサ点数
GCS GCB	絶縁特性	24
	通電機能	72
	開路特性	36
LA	漏れ電流	12
TR	絶縁特性	10
	油中水素ガス	2
	LTC動作特性	2
合計		158

注：略語説明
CB（遮断器） GCB（ガス遮断器）
TR（変圧器） GCS（ガス絶縁複合開閉装置）
LA（避雷器） PFA（フッ素系高分子透過膜）

センサ種類	適用センサ
• CB温度センサ	熱電対
∘ CBコロナセンサ	接地線CT
⊡ CB開閉特性センサ	トリップ電流CTとパレットスイッチ接点
⊠ LA漏れ電流センサ	接地線CT
⊡ TR H_2ガスセンサ	PFA膜とH_2ガス
◩ TR LTC動作センサ	補助リレー接点
⊗ TRロゴスキーコイル	中性線CT
◎ TR超音波マイク	圧電素子
☆ 湿度センサ	高分子感湿モノマー

図9 オンライン設備監視・診断の適用例　外部診断方式のセンサを適用することによって，既設の変電所へも容易にオンライン監視・診断システムを導入することが可能である。



注：略語説明 CPU（Central Processing Unit）

図10 現地盤の機能ブロック図　オンラインシステムでの現地盤はシステム構成のかなめであり，信号処理，診断の信頼性を高めるため種々の工夫がなされている。

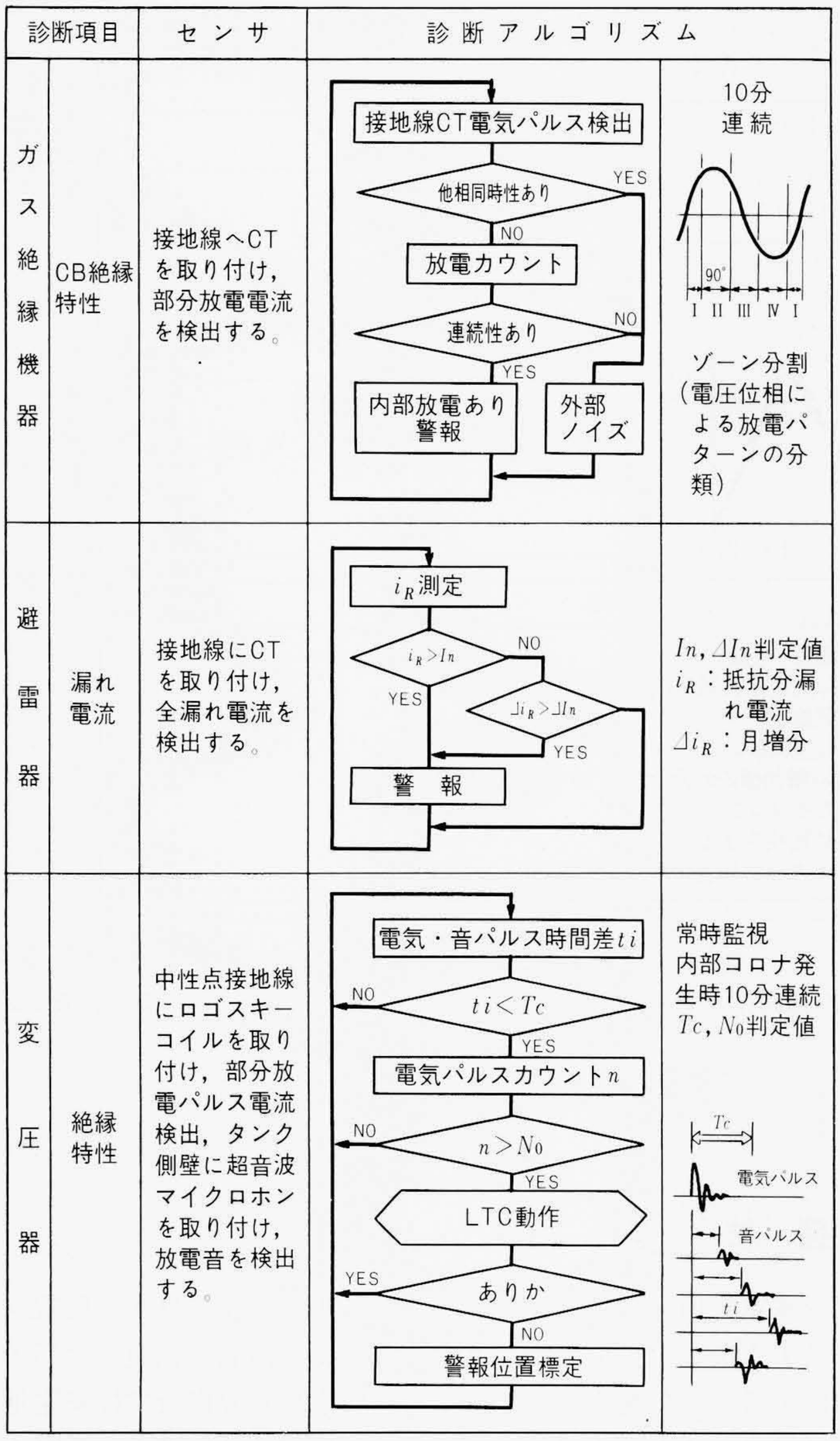


図11　診断アルゴリズムの概要　　ノイズなどによる誤診断を防止するため，ソフトウェアでの対応も重要となってくる。

増加傾向，及びガス成分比の変化に現れることが一般に知られている。本プロトタイプでは，油中ガス分析データとして，TCG（可燃性ガス総量）と各ガス成分（H_2, CH_4, C_2H_6, C_2H_4, C_2H_2, CO及びCO_2）の7成分を推論の基本入力としている。診断ルールは(1) TCGと各ガス量の異常レベル判定，(2) TCGの増加傾向の異常レベル判定，(3) ガス成分パターンと各ガス増加傾向による診断，(4) ガス成分比率による診断，(5) C_2H_2による診断，(6) 劣化，寿命の診断，(7) 各種診断に基づく異常部位推定，(8) 異常に対する処置ガイダンス決定，などによって構成されている。

本プロトタイプによる診断結果は，実例と比較して良好な一致をみているが，今後更に多くの実例を検証して，知識ベースの見直し，追加・改善を加えて実用に供する予定である。

4.3　ガス絶縁開閉装置特性診断システム（プロトタイプ）

図14に，ガス絶縁開閉装置の診断機能のうちガス遮断器の開閉特性診断システム（プロトタイプ）によって実施した診断結果の表示例を示す。本例は，ガス遮断器の開閉動作時の特性データをもとに異常の有無，及び異常部位とその現象を診断した例である。

診断ルールは，(1) 開閉動作時間に基づく異常の有無の判定，(2) 異常部位とその現象の推定，によって構成されている。

ガス絶縁開閉装置の絶縁特性に関しては，**2**章に述べた高精度診断手法によって異常進展メカニズムの究明が進んでいる。今後は，これらのデータの収集・分析による診断アルゴリズム，ルールの確立を図り，開閉特性，絶縁特性及び通電特性を含めた総合的なガス絶縁開閉装置診断システムを構築していく予定である。

4.4　予測保全システムの将来展望

現状の機器監視・診断システムにエキスパート機能が加わることによって，予測保全システムは変電所のトータルシステムの中に積極的に組み込まれていくものと考えられる。このとき，変電所全体のディジタル化，構内ネットワーク網の形成などの動向と歩調を合わせることが重要となろう。また，

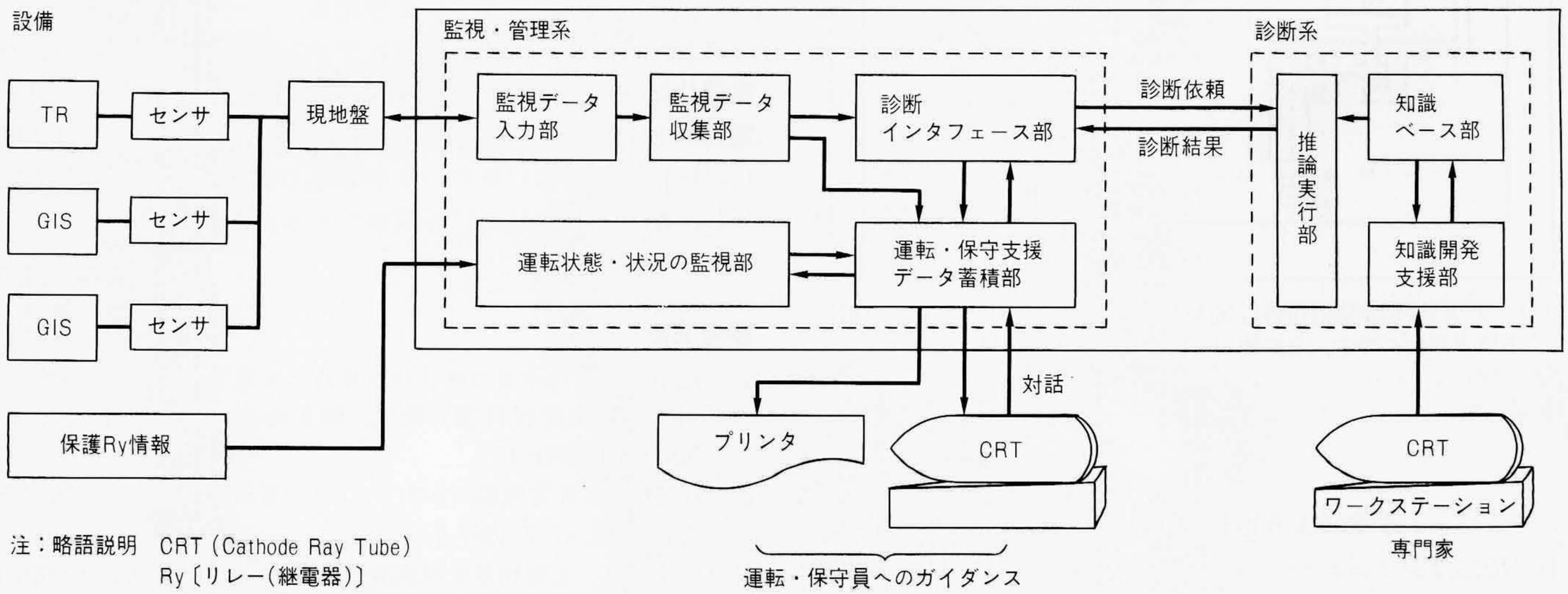
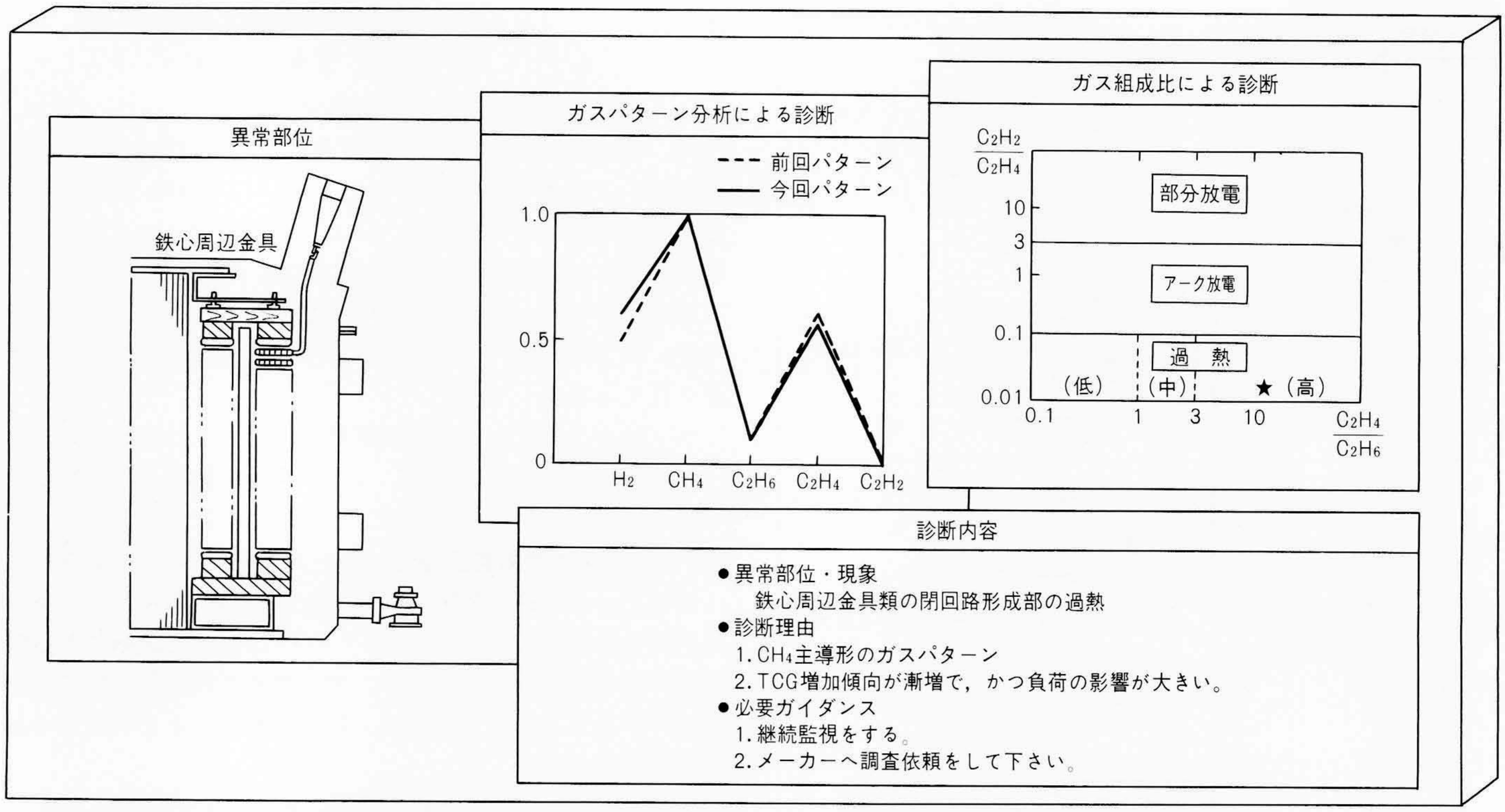


図12　監視・診断と運転・保守支援システム　　現地盤からの情報を基に，オンラインリアルタイムな異常の有無の検知と異常予知，及び運転・保守支援データの出力をする。



注：略語説明 TCG (可燃性ガス総量)

図13 変圧器異常診断結果の表示例 グラフィック機能による異常部位の表示，ガスパターン分析，ガス組成比による診断結果の表示，及び説明文による診断内容の表示を行う。

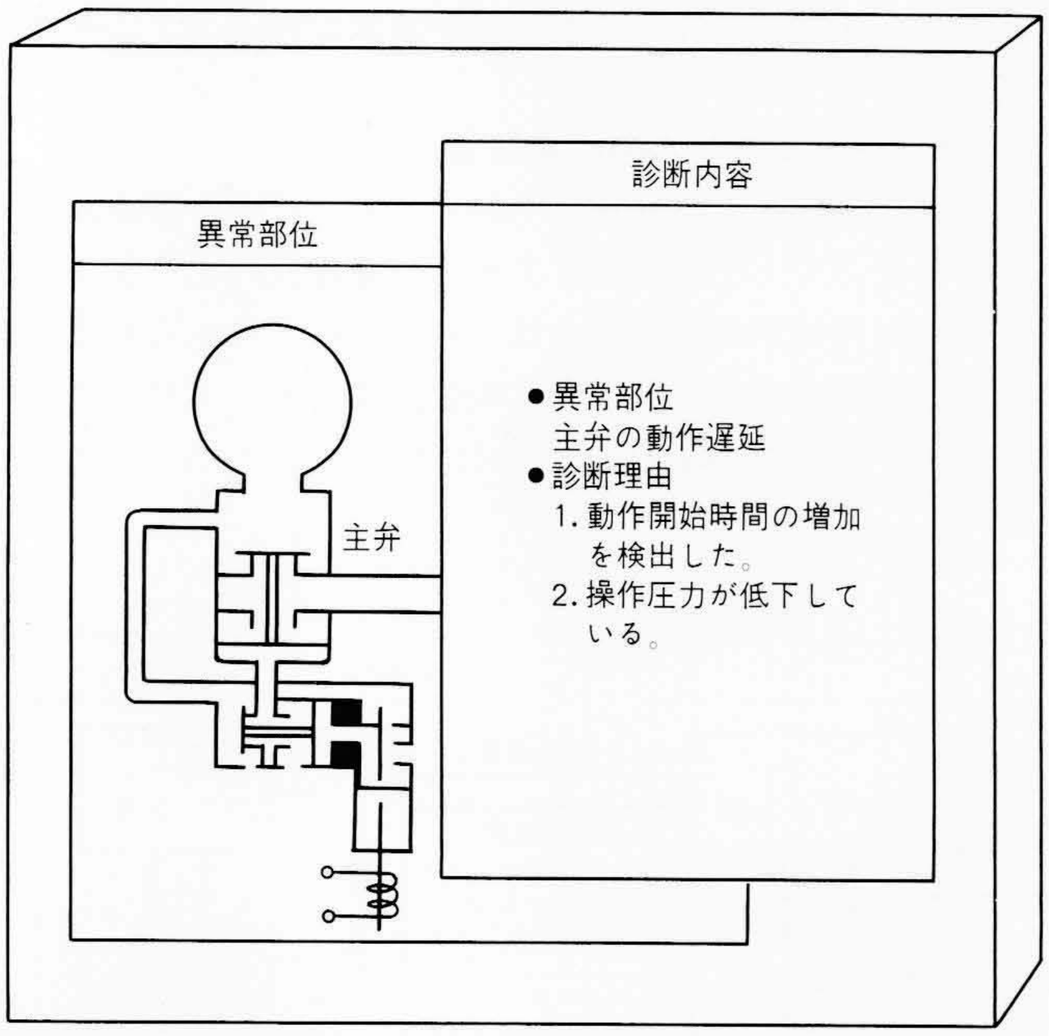


図14 ガス遮断器開閉特性診断結果の表示例 グラフィック機能による異常部位の表示，及び説明文による診断内容の表示を行う。

エキスパート手法による運転・保守支援情報の充実に伴い，平常時にはシミュレーションによる運転員・保守員の事故時対応訓練などへの活用も可能となる。今後この方面の機能向上も図られていくものと考える。

5 結 言

変電設備の予測保全システムは，単なるオンライン監視システムから一歩進んで，運転・保守支援機能の充実を目指す段階に入った。これにこたえるため，日立製作所では異常進展メカニズムの究明と高精度センシング技術の確立，及び支援エキスパートシステムの実用化に向けて注力している。

予測保全に関する支援エキスパートシステムを構築するに当たっては，機器の専門家としての予測ノウハウの蓄積のほか，ユーザーである電力会社のノウハウも必要であり，今後のいっそうの指導を得たいと考える。

終わりに，本稿で述べたオンライン監視・診断システムの実用化に当たり，御指導いただいた九州電力株式会社，四国電力株式会社の関係各位並びにエキスパートシステムの実用化に向けて御協力いただいた中部電力株式会社の関係各位に対し，厚く御礼申しあげる次第である。

参考文献

1) 塩田，外：九州電力株式会社新熊本変電所ガス絶縁開閉装置用デジタル監視装置の開発，昭和60年電気学会全国大会，No.1210(昭60-4)
2) 高芝，外：変電機器の診断システム，電気学会電力技術研究会資料，PE-87-7(1987-7)
3) 藤本，外：変電機器監視装置(その3)，昭和61年電気学会全国大会，No.1321(昭61-4)
4) 変電所監視システム，電気協同研究，第42巻，第3号，5，(1987)