

送変電設備診断エキスパートシステム

Application of Expert System for Diagnosis of Substation

高度情報化社会の発展に伴い、電力の安定供給、質的向上がなおいっそう要求されてきている。

このため、送変電設備にも機器固有の信頼度向上が図られてきているが、設備の密閉化などに伴い事故の未然防止、万一の事故時の早期復旧を支援する新しいオンライン保守支援システムへの期待が高まってきた。このシステムの核となるのは知識工学を応用した設備異常診断エキスパートシステムであり、中部電力株式会社と日立製作所は早くから実用化を目ざして共同で研究開発を進めてきた。エキスパートシステムは、専門家の知識、ノウハウをどのようにルール化、アルゴリズム化するかが課題であるが、プロトタイプシステムの開発、検証および改良の段階を完了し実用化への見通しを得た。

小松 巖* Iwao Komatsu
 山岸武久* Takehisa Yamagishi
 丸山 彰** Akira Maruyama
 山極時生*** Tokio Yamagiwa
 森 悦紀*** Etsunori Mori
 中山桂司**** Keiji Nakayama

1 緒 言

高度情報化社会の進展、生活環境の電力依存度の増大により電力の供給信頼度、質的改善に対する要請が強くなってきている。変圧器、遮断器などの送変電設備も信頼度向上が図られているが小形化、密閉化が進み保守点検も難しくなってきた。このため、運転中の設備をオンラインで自動的に監視、診断する新しいシステムへの期待が高まっている。

このような背景のもとに、最新のセンシング技術、エレクトロニクス技術を活用した送変電設備総合監視システムの開発を進めてきた。この概要については、本誌第70巻、第8号¹⁾(水力発電設備の最新技術・最近の送変電技術)に述べた。

本稿では送変電設備総合監視システムの中核となる知識工

学を応用した設備の異常診断エキスパートシステムの開発状況について詳細を報告する。

なお、今回は送変電設備の各種機器のうち代表的な変圧器とガス絶縁開閉装置を対象にしてプロトタイプシステムの開発を行った。

2 送変電設備総合監視システム

2.1 システムの概要^{2),3)}

変電所を対象とした送変電設備総合監視システムの構成例を図1に示す。この例は保守の拠点となる管理電力所から数十か所の変電所の設備を遠隔で監視、診断するもので、保守、

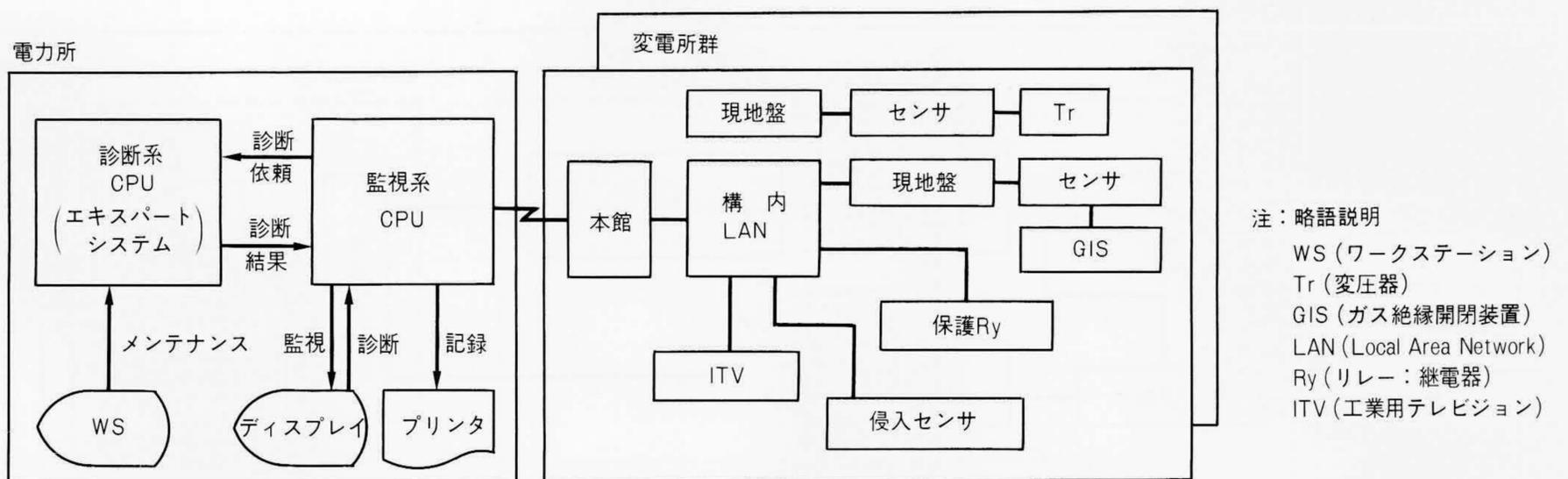


図1 送変電設備総合監視システム構成例 現地設備からのデータを基に、リアルタイムで監視や異常診断を行い、運転や保守を支援する。

* 中部電力株式会社電力技術研究所 ** 日立製作所大みか工場 *** 日立製作所国分工場 **** 日立エンジニアリング株式会社

診断に必要なデータはセンサ、構内LAN (Local Area Network), 変電所処理装置および通信回線を経由して管理電力所に伝送される。管理電力所では、本システムの中核となるオンライン処理装置によって、対象変電所群の設備を集中管理する。

オンライン処理装置は、監視系と診断系に処理を分担させている。監視系にはデータの収集と監視、保守、運転管理機能およびマンマシンを割り当て、診断系には知識処理による診断機能(エキスパートシステム)を割り当てている。このような構成にすることによって、監視系と診断系を独立して開発でき、稼働中のオンライン監視システムにエキスパートシステムが後からでも追加しやすいこと、エキスパートシステムの知識の追加変更、検証時でもオンライン監視が継続できることなど利点が多い。

2.2 エキスパートシステム(プロトタイプ)概要

開発した設備診断エキスパートシステム(プロトタイプ)のシステム構成を図2に示す。プロトタイプはワークステーション上に構築し、知識処理ツールは日立製作所がオンライン推論用に開発したEUREKA-II (Electronic Understanding and Reasoning by Knowledge Activation-II)を用いることによってオンライン実システムへの移行性を考慮している。

プロトタイプには、専門家、熟練者の知識、ノウハウおよび診断アルゴリズムがルール、フレームの形式で知識ベース化されており、これらを基にプロトタイピング手法によって検証、評価、改良を繰り返し診断精度を高めている。

プロトタイプであっても、診断結果をわかりやすい形で示すことも大事なことであり、CRTの画面も実運用を十分に考慮したものとしている。図3は変圧器とガス絶縁開閉装置を対象とした異常診断エキスパートシステム(プロトタイプ)の処理の流れを、CRT表示画面で示したものである。全体の流

れの概要は以下に述べるとおりである。

- (1) 管理対象となる変電所の設備になんらかの異常が発生したことを、全体系統図の当該変電所のシンボルを色替え、フリッカなどで表示する。
- (2) 当該変電所を選択することによって、単線結線図を表示し異常の発生した設備のシンボルを色替えなどで示す。
- (3) その設備を選択すれば、その診断内容が表示される。

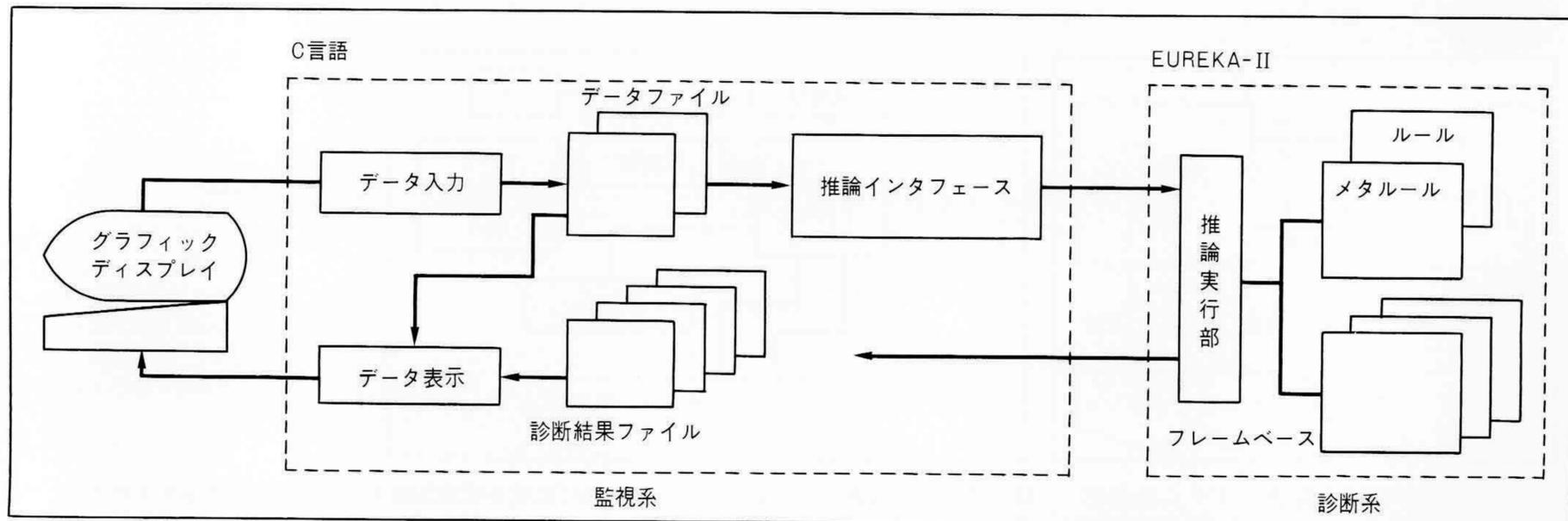
このように設備からのデータの入力を対話形式で模擬するほかは、マンマシン機能をオンラインシステムとまったく同じ操作の流れとすることによって、組み込んだ知識、ルールの検証ばかりでなくマンマシン機能についてもプロトタイピングを行っている。この結果、実システムの運用時には、これまで人手に頼っていた保守業務のかなりの部分が自動化可能であり、大きな支援効果があることも確かめられた。

3 診断ルール、アルゴリズム

3.1 変圧器の油中ガス分析診断

変圧器の油中ガス分析による内部異常診断の技術は、長年の経験とノウハウの蓄積によって体系化されており、エキスパートシステムに知識を移植する条件はよく整っている。変圧器の内部では、通常運転でも絶縁油、油浸材料が徐々に分解し H_2 , CO , CO_2 , CH_4 , C_2H_6 , C_2H_4 , C_2H_2 などの炭化水素系のガスが生成され、絶縁油中に溶存する。内部に異常が存在すると、その生成量は増大する。変圧器内部異常は局部過熱と放電に大別され、それぞれ特徴的なガスが増大することがわかっている⁴⁾。このように油中のガス成分と濃度を分析することによって、変圧器が正常に運転されているか、異常が発生しているかを診断することができる。プロトタイプに移植している診断ルール、アルゴリズムと診断の流れを図4に示す。油中のTCG(可燃性ガス総量)および各ガス量、前回

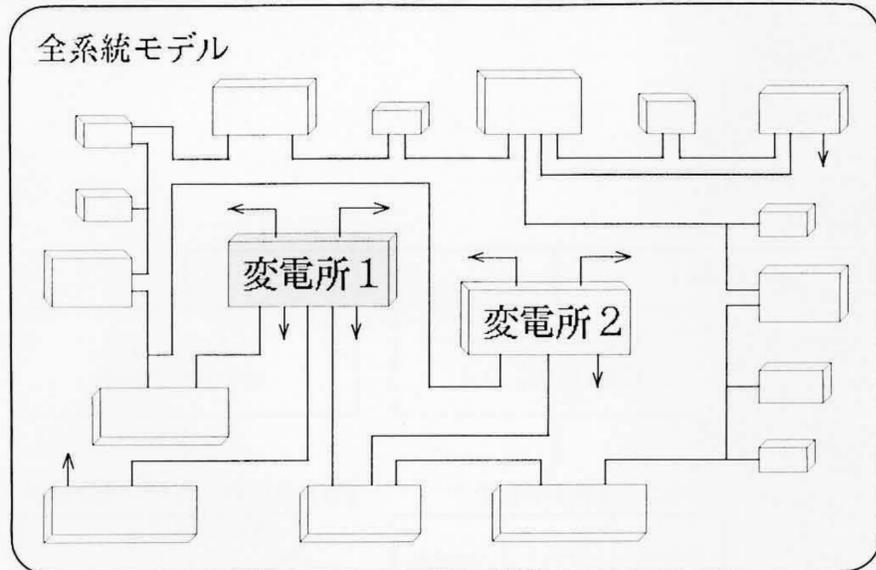
WS



注：略語説明 EUREKA-II (Electronics Understanding and Reasoning by Knowledge Activation-II：知識処理システム構築ツール)

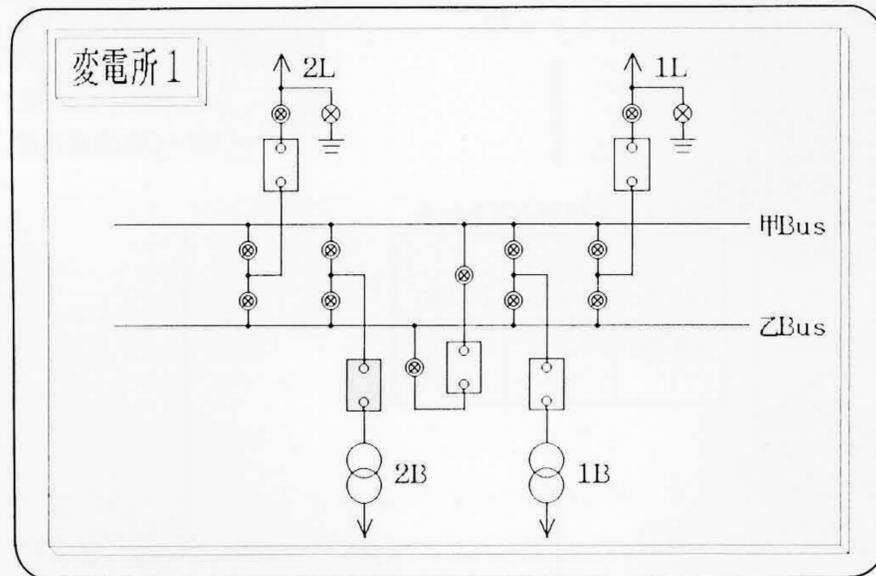
図2 設備診断エキスパートシステム(プロトタイプ)の構成 ワークステーション上にスタンドアロンシステムとして構築し、知識の検証、改良を容易にしている。

異常発生変電所を
色替えなどで表示

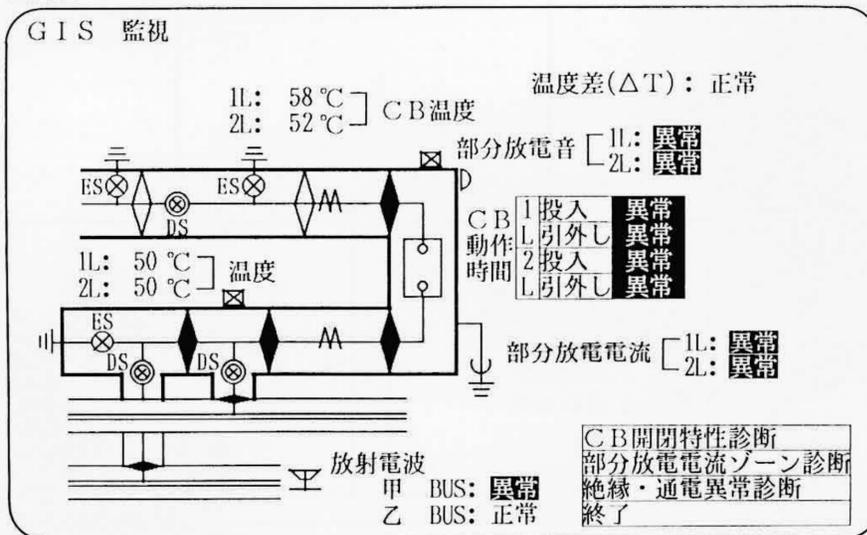


異常設備を色替え
などで表示

当該変電所を選択



画面例



注: 略語説明 BUS (母線), 1L/2L (送電線), 1B/2B (変圧器バンク), CB (遮断器), ES (アーススイッチ)

図3 プロトタイプの操作フロー 実用化システムと同等のマンマシン機能を持たせ、検証結果をわかりやすく表示している。

測定値からの増分と変圧器容量別に定めた異常判定基準値によって異常の有無を判定し、異常と判定すれば、各ガス成分による「ガスパターン分析」などよく知られた分析手法をベースに、次のような独自のアルゴリズム、ルールを加え、診断の精度の向上と保守支援の高度化を図っている^{5),6)}。

(1) 過熱温度、過熱面積の推定

ガス組成比(C₂H₄/C₂H₆)と過熱温度の間、ガス生成速度と過熱温度の間、およびガス増加量と過熱面積の間に関係があることが明らかにされている⁷⁾。この関係を、局部過熱の有無の診断アルゴリズム、ルールとして組み込み、異常部位の範囲を限定している。

(2) 特定ガス(C₂H₂)量による診断

C₂H₂は、絶縁油の高温熱分解時(例えば油中アーク)に多量に発生するが、接触不良による過熱現象時にも少量発生するなどの特徴があり、内部異常の診断には十分留意しなければならない成分ガスであると考えられる。C₂H₂の量と他のガス量との関係を分析整理して診断ルールとして組み込み、診断精度を向上させている。

(3) 経年劣化診断

変圧器内部でもっとも高温となる巻線部絶縁紙の機械的な強度低下によって、変圧器の寿命が左右されることがわかってきた⁸⁾。絶縁紙の引張り強さと、油中ガス中のCO+CO₂の量に相関関係があることが解析されており、この結果をルール、アルゴリズムとして組み込み、異常の診断と同時に変圧器の残存寿命を診断する。これによって、変圧器の更新計画に有効な情報を提供することができる。

診断結果の表示例を図5に示す。本例は実績では「無電圧タップ切換器・接触子の接触不良による過熱」異常であったが、プロトタイプでの診断も同様な結果が得られている。処置のガイダンスも専門家の判断と一致している。他の例でも実際の異常と診断結果は良い一致を示しており、変圧器の油中ガス分析による診断は、ほぼ実用化のレベルに達していると考えている。

経年劣化診断結果の画面表示例を図6に示す。この例は10年運転した変圧器の診断例で、このままの状態を続けられれば30年まで運転が可能であるが、今後CO+CO₂が多くなれば注意が必要であることを示している。

3.2 ガス絶縁開閉装置の絶縁、通電異常診断

ガス絶縁開閉装置は歴史が浅いため、変圧器のような体系だった診断技術はまだ確立していないのが実情であるが、これまでに稼動しているオンライン監視システムから得たデータ、知識および解析結果から、次のような診断を行うためのルール、アルゴリズムを開発してプロトタイプに組み込み検証を進めている。

(1) 部分放電パルスパターン診断

部分放電センサで検出した部分放電パルスが、電圧波形を4分割したゾーン内に、分布するパターン、平均電荷量および平均検出率から、例えばフロート性部分放電といった絶縁異常の要因を診断する。

(2) 部分放電音による診断

超音波センサによって検出したタンクに伝搬する部分放電

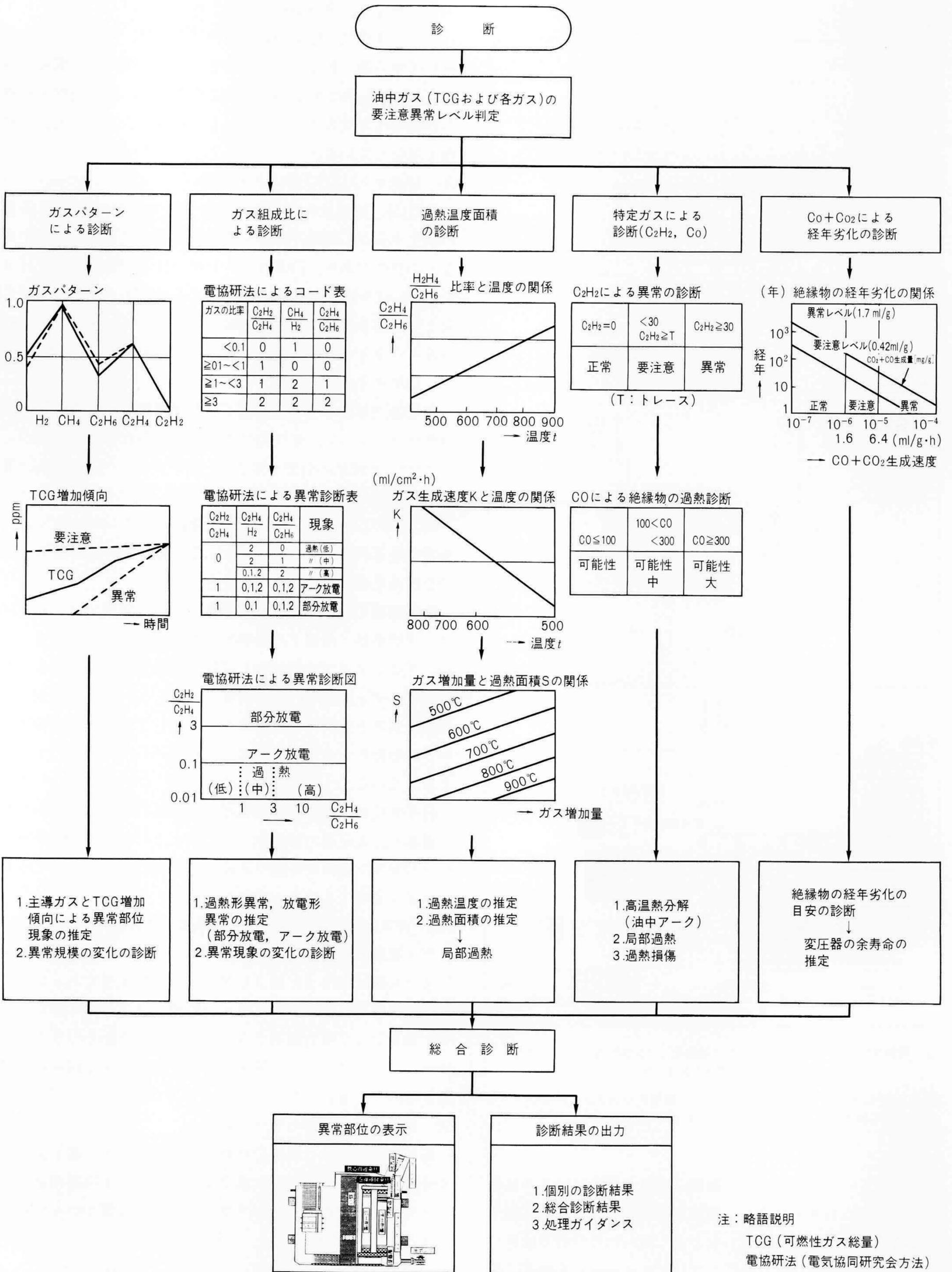


図4 変圧器油中ガス分析診断プロトタイプの推論の流れ よく知られたガスパターン分析手法に独自の知識を加え、推論精度を高めている。

油中ガス分析データ										《変電所TR1》	
容量	200	M	275	KV	油中ガス分析日					今回：88年 5月16日	
油	100.00	絶縁物総重量	2000.0	Kg	前回：86年11月16日						
封入型式	密封										
製造年月	68年 5月										
項目	TCG	H2	CH4	C2H6	C2H4	C2H2	CO	CO2			
測定値	793	258	236	10	267	2	22	257			
前回測定値 (PPM)	95	53	21	0	17	0	4	96			
判別レベル	要注意	正常	要注意	正常	要注意	要注意	正常	正常			
増加傾向	漸増	微増	漸増	微増	漸増	微増	微増	微増			
監視値	異常 (PPM)	1400	800	300	300	400	600	300			
増加傾向	要注意 (PPM/月)	700	400	150	150	200					
監視値	異常 (PPM/月)	70									
増加傾向	要注意 (PPM/月)	20									

油中ガスによる判定 : 要注意

《油中ガスによる診断結果》

《ガスパターンによる診断》

エチレン(C2H4)主導
可熱性ガス総量(TCG)漸増
増加傾向負荷依存大

《ガス組成比による診断》

アセチレン(C2H2)/エチレン(C2H4)比率 ≤ 0.1
エチレン(C2H4)/エタン(C2H6)比率 ≥ 3.0
高熱加熱

《異常部位・現象》

負荷電流による過熱

端子接続部の接触不良 裸部
LTCやNRA等の接触子の接触不良

《推定される異常部位に対する処置》

継続監視の後、TCG増加傾向であれば、電気的試験、精密点検が必要です。

《処置方法及び内容》

3ヵ月後、再測定を実施し、その結果により、判断して下さい。

図5 変圧器油中ガス分析診断結果の表示例 実際の異常は「無電圧タップ切換器・接触子の接触不良による過熱」であり、本診断結果と良い一致を示している。

経年劣化の診断

使用年数(年)

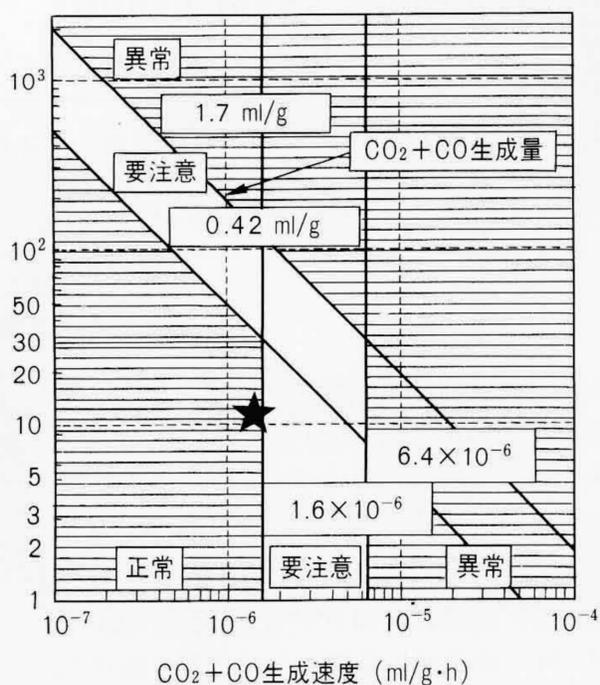


図6 変圧器経年劣化診断の表示例 ARY(A:生成量, R:生成速度, Y:運転年数)マップを表示し、診断結果を★で表示することによって、一目で判断できる。

表1 絶縁、通電異常総合診断ルール表 個々の知識による診断結果を本ルール群によって総合診断し、精度を高めている。

個別の診断					現象の説明	総合診断
放電パルス	分解ガス	放電音	電磁波	温度		
×	×	△	×	○	内部部分放電発生 条件によっては振動音発生	フロート電極
×	○	△	○	○	内部部分放電発生 衝突音の発生	内部異物
×	○	○	○	○	内部部分放電発生	絶縁物クラック
×	×	×	×	×	内部部分放電発生 分解ガス、音、電磁波の発生 局部過熱により タンク温度上昇	通電ギャップ
○	○	○	○	×	局部過熱によりタンク温度上昇	接触抵抗増加

注：記号説明 ×(異常), △(異常の可能性), ○(正常)

音のレベル、検出率から異常の有無を診断する。

(3) 放射電波による診断

部分放電によって発生し、外部に放射される電磁波のレベル、検出率によって異常の有無を診断する。

(4) 分解ガスによる診断

SF₆ガス中の分解ガス量によって異常の有無を診断する。

(5) 温度差による診断

タンクの各部の温度を測定し、温度差が基準値を超えたことによって通電特性の異常を診断する。

以上のような個々の診断結果をもとに、表1に示すような総合した診断を行うことによって精度を高めている。

診断結果の表示例を図7に示す。放電パルスのゾーン内の分布パターンからフロート性部分放電があると診断し、放電音、電磁波などから総合的にフロート電極と診断している。

3.3 ガス遮断器開閉特性診断

ガス遮断器の主接点の開閉時のストローク時間、制御電圧などから開閉部の異常を診断するもので、診断結果の表示例を図8に示す。この例ではガス遮断器の開路速度が上昇し、操作圧力が正常であることによって、SF₆ガス漏れ、操作機構部不良と診断している。

4 結 言

以上、変電設備総合監視システムの中核となる異常診断エキスパートシステムの開発状況について述べた。プロトタイプでの検証結果は、ほぼ実用の段階に入ってきたことを示していると考えているが、ガス絶縁開閉装置は実際の異常時のデータの蓄積、解析が不十分であり、現在稼働中のオンライン監視システムからのデータ収集に注力する必要がある。

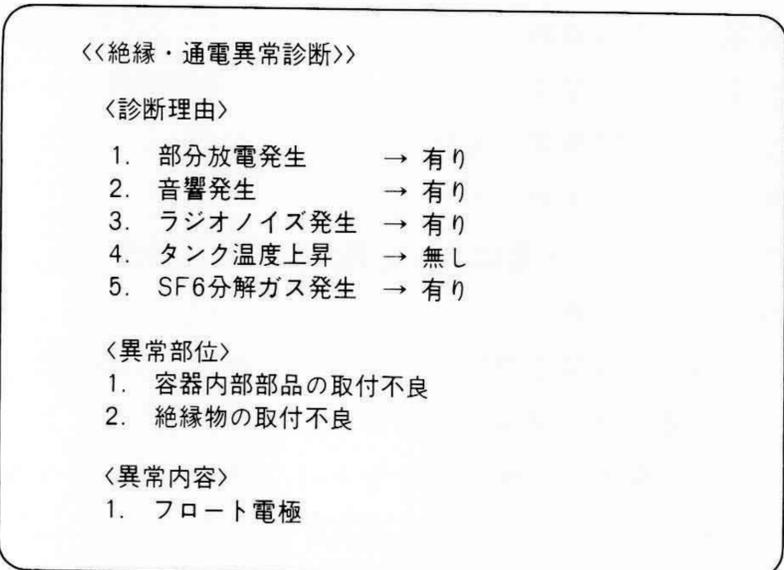
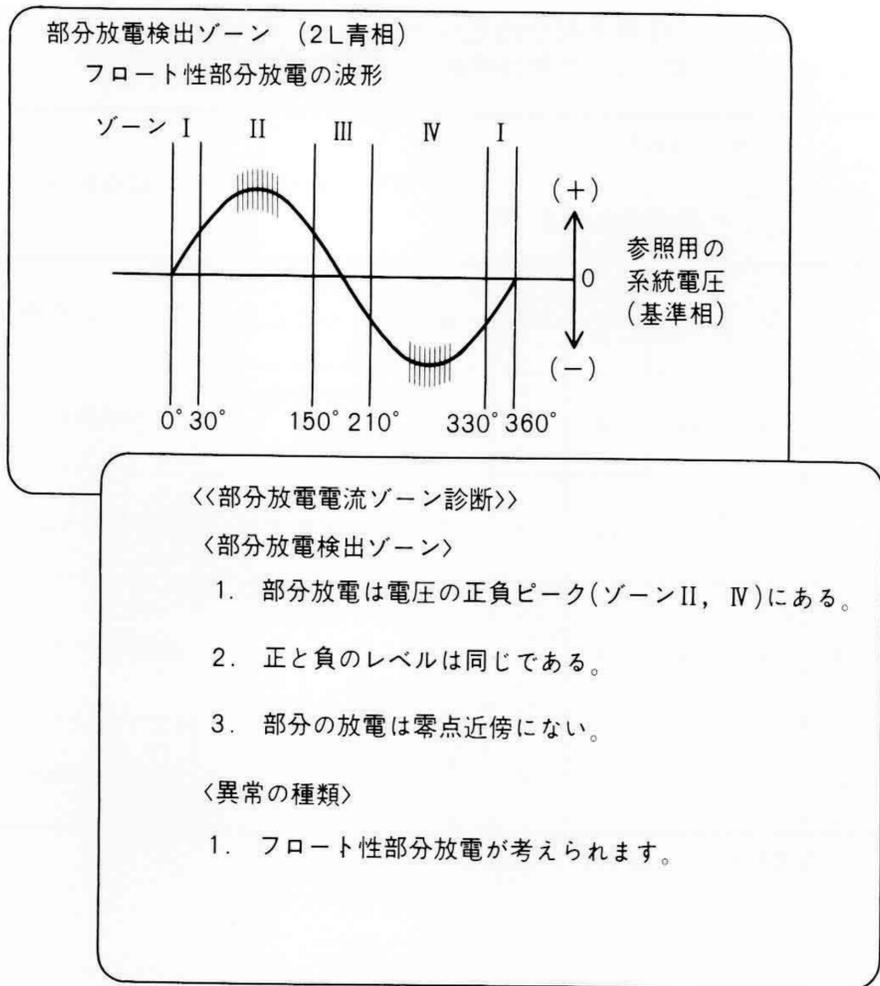


図7 ガス絶縁開閉装置絶縁通電異常診断結果の表示例 部分放電パルスのゾーン内分布パターンなどによって、総合的な診断を行っている。

この結果から知識ベースの改良, 追加を繰り返し成長していくことがエキスパートシステムの本質であり, 重要なことである。

現段階のプロトタイプシステムを稼動中のオンライン監視システムに付加して実証することも必要な時期にきており, 早急な実現を図っていきたいと考えている。

参考文献

- 1) 山田, 外: 最近の送変電技術, 日立評論, 70, 8(昭63-8)
- 2) 山田, 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(昭62-7)
- 3) 電気協同研究会: 変電所監視システム, 電気協同研究, 第42巻, 第3号(昭62-2)

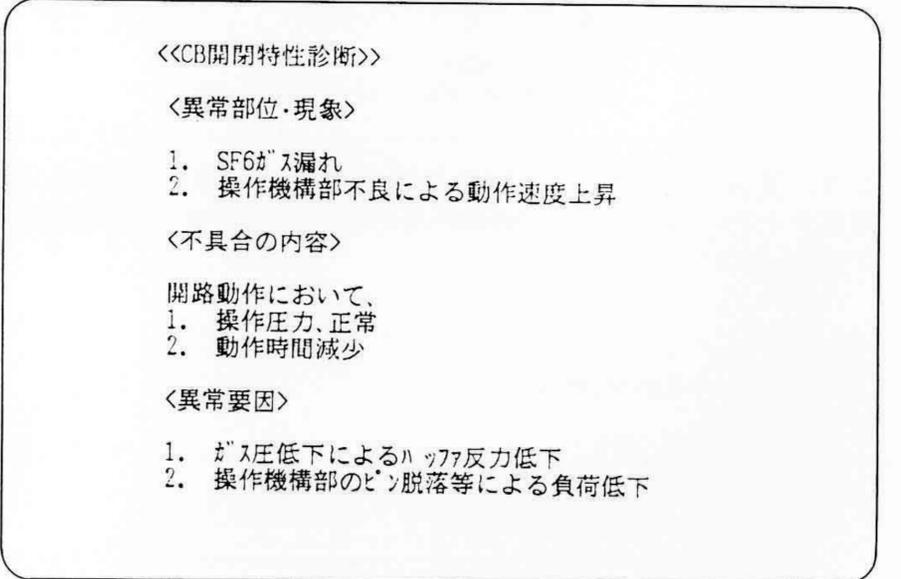
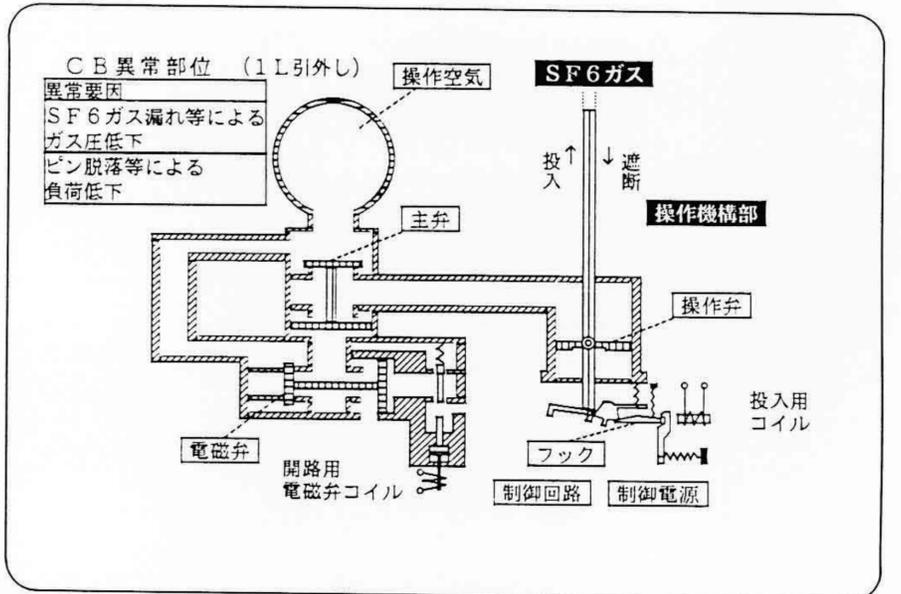
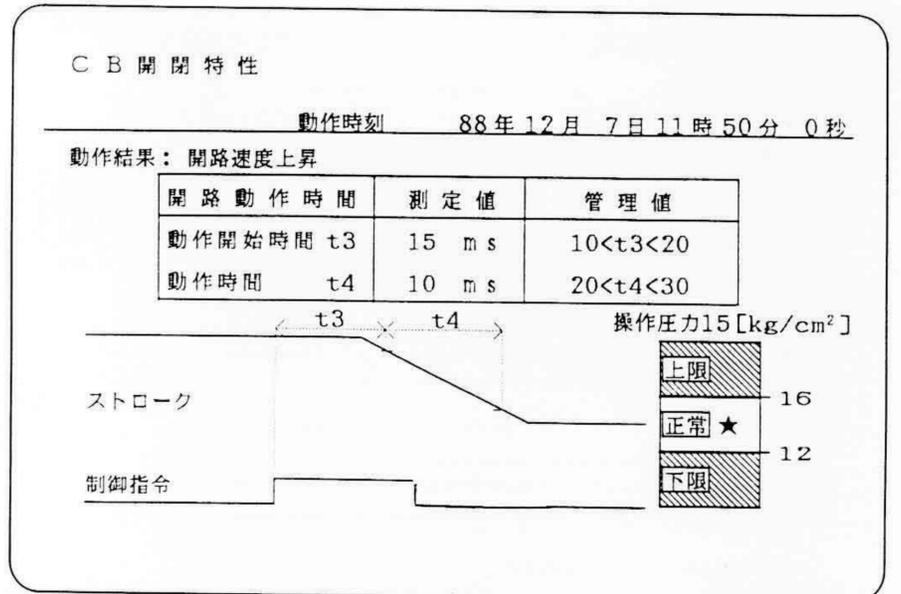


図8 ガス遮断器開閉特性診断結果の表示例 ストローク, 異常部位は図を用い可視性を高めている。

- 4) 電気協同研究会: 油中ガス分析による油入機器の保守管理, 電気協同研究, 第36巻, 第1号(昭55-7)
- 5) 小松, 外: 変圧器の油中ガス分析による異常診断エキスパートシステム, 電気関係学会, 東海支部連合大会(昭63-9)
- 6) 森, 外: 変圧器異常診断におけるエキスパートシステムの適用, 電気学会, 絶縁材料研究会資料(昭63-10)
- 7) 月岡, 外: 絶縁油の局部過熱による分解ガスによる挙動, 電気学会論文誌A, 48(37), 381(昭53-7)
- 8) 月岡, 外: CO₂とCOによる油入変圧器の経年劣化度診断の研究, 電気学会論文誌A, 106(7), 331(昭61-7)