

油入変圧器の自動油中ガス分析装置

Automatic Gas Analyzer for Oil-immersed Transformer

佐藤 英夫^{*1}
Hideo Satoh
吉田 覚^{*2}
Satoru Yoshida
神谷 俊郎^{*2}
Toshiro Kamiya
星野 芳彦^{*1}
Yoshihiko Hoshino
小山 純二^{*3}
Junji Koyama

The recently developed Automatic Gas Analyzer is used for early detection of abnormalities within oil-immersed transformers. By automatically and periodically measuring the amount of hydrogen and methane gas generated during transformer operation, this analyzer detects faults before critical conditions can occur, playing an important role in transformer lifetime prediction and diagnostic technology.

This device has the following prominent advantages over existing analyzers :

- 1) Efficiently detects dissolved gas in the oil in a short amount time, employing a piston-operated system at the extractor part.
- 2) Incorporating a methane gas sensor with hydrogen gas sensor, the overheated phenomenon can now be more easily detected. This phenomenon was previously difficult to detect using only a hydrogen gas sensor.

1 まえがき

近年、発電所の無人化及び発電設備のメンテナンスフリー化が進む中で、これら設備に対する高信頼性への要求は一段と高まってきている。

特に、油中ガス分析による診断は、以前から油入変圧器に適用され、その診断の的確なことから、今日では油入変圧器保守管理手法の主流となっている。

変圧器内部に何らかの原因で放電現象や過熱現象等の異常が発生すると、その異常箇所に近接している絶縁物(絶縁油及び有機絶縁物)が急激に熱分解し、ガスが発生する。これらガスの一部は気泡となって変圧器上部に設置された保護継電器(ガス検出器、ブッフホルツ継電器等)に溜ることがあるが、大部分は絶縁油に対する溶解度が高いため、絶縁油中に溶解する。

したがって、油中ガス分析による診断は、これら絶縁油中に溶解したガスを分析することにより変圧器の内部異常を早期に発見しようとするものである。

通常は、変圧器の排油弁から絶縁油を採取し、ガス抽出装置により絶縁油中に溶解しているガスを抽出してガスクロマトグラフで分析するため、稼働中の変圧器を停止することなく変圧器の異常を診断することができる。

しかし、定期的実施される絶縁油の採取と油中ガス分析には人手と費用がかかること、及び変圧器が設置されている場所と油中ガス分析装置が設置されている場所は、通常遠く離れているため、分析結果が出るまでに長時間かかること等の問題点がある。

今回これらの問題点を解決すべく、半導体ガスセンサを採用した低コストで分析のスピード化を図った変圧器直付形自動油中ガス分析装置を開発したので、ここに紹介する。

2 検出要素及び検出センサ

油入変圧器では内部の異常現象により、水素(H₂)、メタン(CH₄)、一酸化炭素(CO)、二酸化炭素(CO₂)、エ

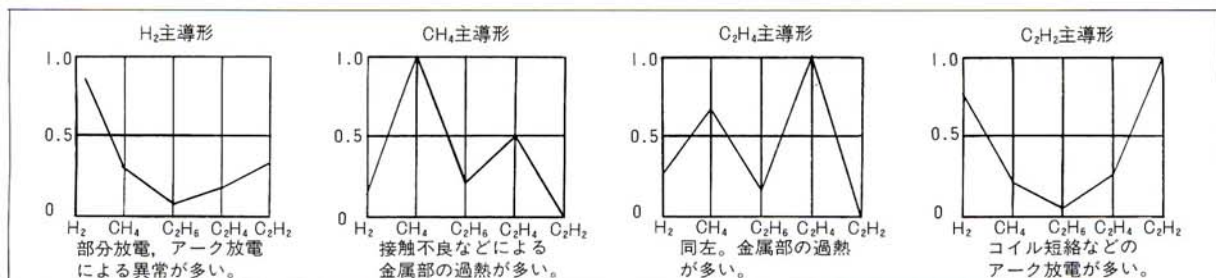


図1/変圧器内部異常のガスパターン

(縦軸は各ガス成分の中で最大濃度を1とした場合の組成比をプロット)

Fig. 1/Typical gas patterns caused by internal fault of oil-immersed transformer

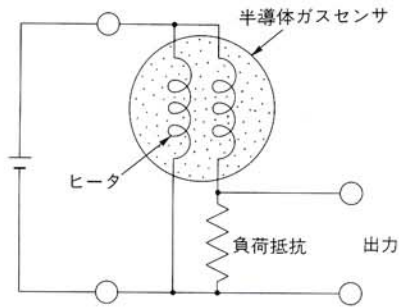


図2/半導体ガスセンサの基本回路図

Fig. 2/Fundamental circuit of semiconductor gas sensor

チレン (C₂H₄), エタン (C₂H₆), アセチレン (C₂H₂) 等のガスが発生する。この異常現象は、放電異常現象と過熱異常現象に大別され、図1の4パターンに分類される⁽¹⁾。

これらのパターン及び長年の実績データから、水素、メタン、エチレン、アセチレンを検出することにより、変圧器の内部異常現象を把握することが可能であることが明らかになっている。

これらのガスを検出するには、ガスクロマトグラフ、赤外線検出器、検知管、ガス透過膜等の種々のセンサがあるが、今回開発した自動油中ガス分析装置では、小形化及び低コスト化を図るために半導体ガスセンサを採用した。

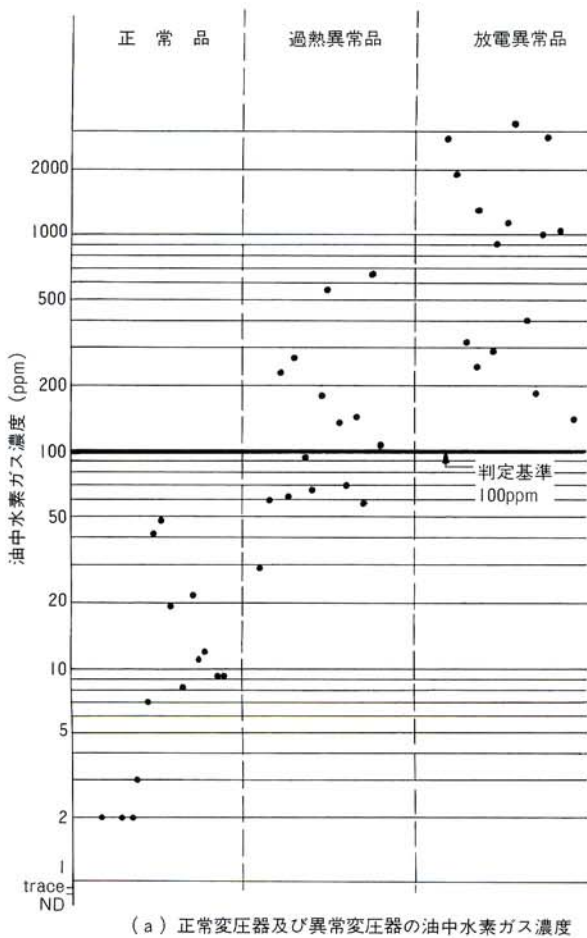
半導体ガスセンサは、酸化スズ (SnO₂) を主成分とするn形半導体セラミックスよりできており、半導体表面にガスが化学吸着することによる半導体の電気伝導度変化を利用してガスを検知するセンサである。

図2に半導体ガスセンサの基本回路図を示す。

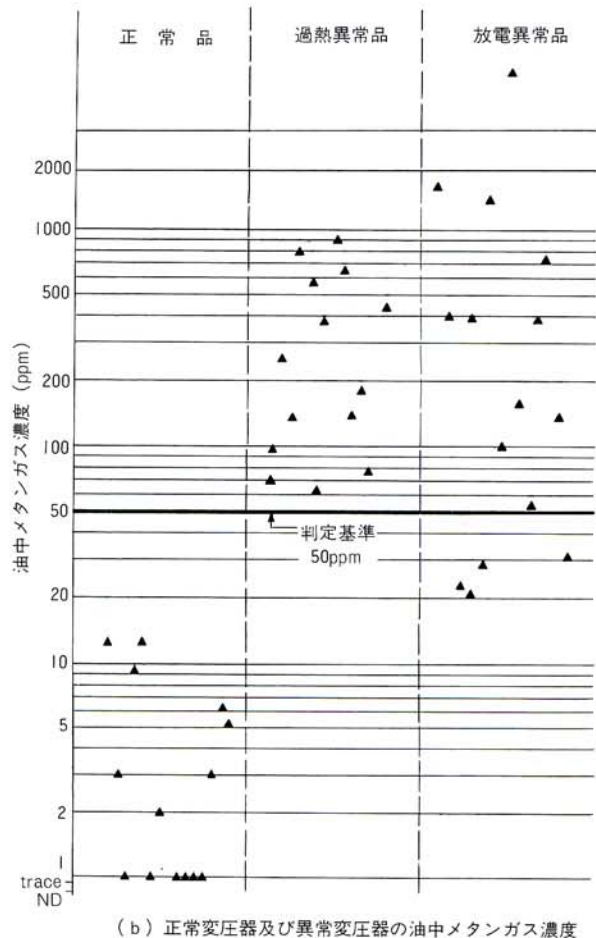
現在のガスセンサ技術では、エチレン、アセチレンの単独ガス検出が不可能であることから水素、メタンに着目し、これら2種類の単独ガス濃度から変圧器の内部異常を把握できるかを検討した。

過去の正常稼働変圧器、放電異常変圧器、及び過熱異常変圧器の油中ガス分析値から水素、メタンをプロットした結果を図3に示す。

この図より、正常稼働変圧器と放電異常変圧器とでは水素濃度に差があり、また過熱異常変圧器とではメタン濃度に差があることから、水素、メタンの2ガスのみを



(a) 正常変圧器及び異常変圧器の油中水素ガス濃度



(b) 正常変圧器及び異常変圧器の油中メタンガス濃度

図3/実稼働変圧器の油中ガス濃度測定例

Fig. 3/Examples of measurement result of gas concentration

測定することにより、変圧器の内部異常を把握できることが判明した。

すなわち、水素は約100ppm、メタンは約50ppmの濃度を境にして正常変圧器と異常変圧器との差があるので、これらの濃度を異常の判定基準とすることができる。

水素ガス単体の濃度測定でも異常の検出は可能であるが、図3(a)にみられるように初期の過熱異常の場合には正常品と異常品の判別が困難であり、かなり過熱異常が進展してから判定せざるを得ない。しかし、メタンガスの濃度測定を行うと図3(b)にみられるように正常、異常の差が明確になるので、今回特にメタンガスセンサを装着した。

各ガスセンサはこれらの濃度を測定できる検出能力、及び検出対象以外のガスに妨害されないガス選択能力を有することを必要とする。

水素センサについては、以前より半導体ガスセンサが開発されており、多方面に應用されていることから、今回の自動油中ガス分析装置に適用できるかを検討したところ、良好な結果が得られたのでこのセンサを採用することにした。

この水素センサの特性を図4に示す。

しかし、メタンセンサについては現状のセンサでは水素の影響を受けやすく、今回の目的にはそぐわないこと

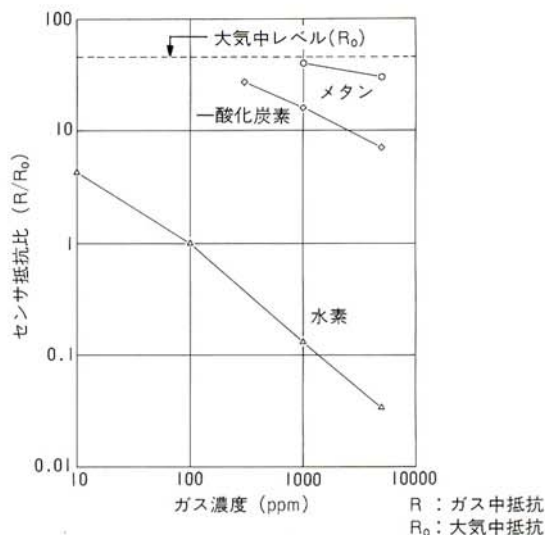


図4/水素ガスセンサのガス濃度特性

Fig. 4/Gas concentration characteristics of hydrogen gas sensor

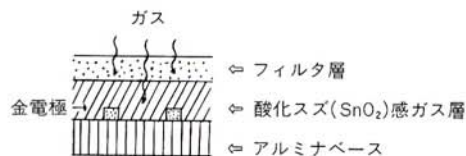


図5/メタンガスセンサの断面図

Fig. 5/Cross section of methane gas sensor

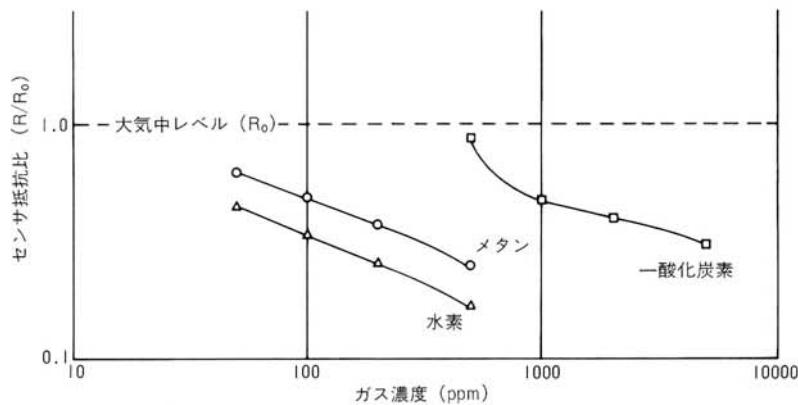


図6/従来形メタンガスセンサのガス濃度特性

Fig. 6/Gas concentration characteristics of conventional methane gas sensor

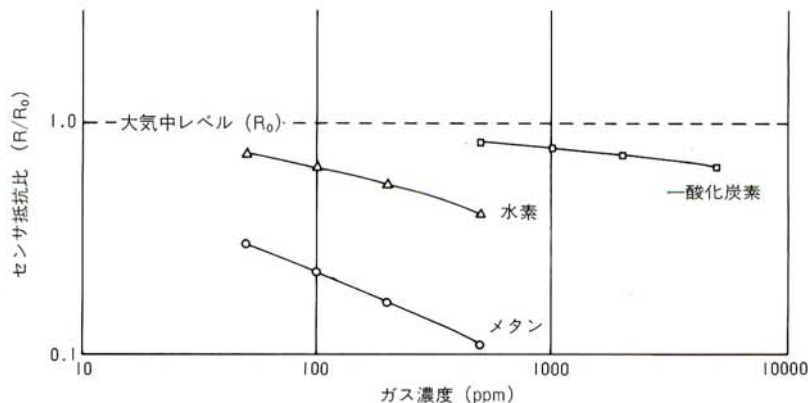


図7/新開発メタンガスセンサのガス濃度特性

Fig. 7/Gas concentration characteristics of improved methane gas sensor

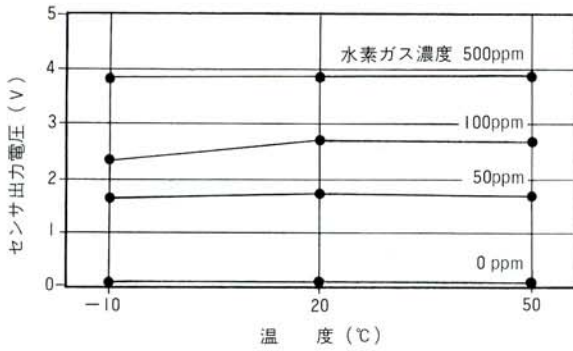


図8/水素ガスセンサの温度特性
Fig. 8/Temperature characteristics of hydrogen gas sensor

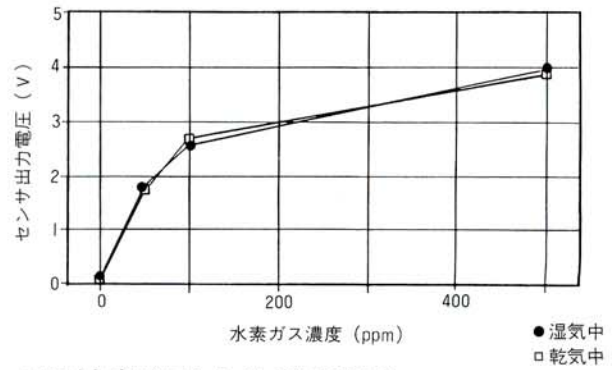


図9/水素ガスセンサの湿度特性
Fig. 9/Humidity characteristics of hydrogen gas sensor

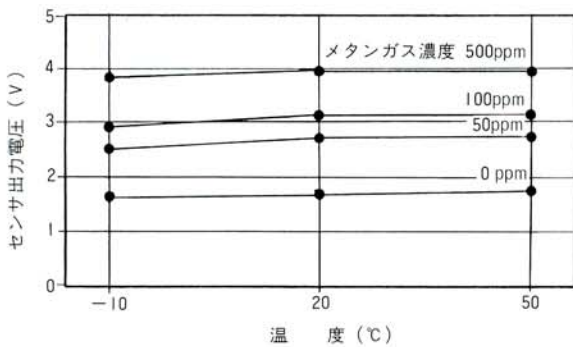


図10/メタンガスセンサの温度特性
Fig. 10/Temperature characteristics of methane gas sensor

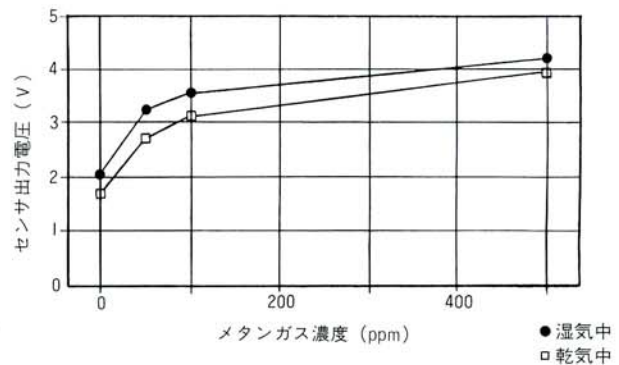


図11/メタンガスセンサの湿度特性
Fig. 11/Humidity characteristics of methane gas sensor

が判明したため、センサメーカーの協力を得てメタン選択性のあるガスセンサを開発した。

このセンサの主な改良点は次の2点である。

- (1) 感ガス層の上にフィルタ層を設けることにより (図5)、メタン以外のガスを感じ層に到達しにくくし、メタンに対する選択性を向上させた。
- (2) 酸化スズ (SnO₂) に微量の添加剤を加えることにより、温湿度特性の向上を図った。

以上の改良により、今回開発したメタンセンサは図6及び図7に示すように従来形に比べメタンガスと水素ガスのセンサ抵抗比 R/R_0 (ガス中の抵抗/大気中の抵抗) が離れており、水素の影響を $\frac{1}{10}$ 以下に低減させることができた。今回採用した水素及びメタン半導体ガスセンサの温度特性及び湿度特性を図8から図11に示す。これによれば水素、メタンセンサ共に -10°C から $+50^{\circ}\text{C}$ 迄の温度において平坦な特性を示している。また、湿度特性においても湿気中(相対湿度70%)と乾気中(相対湿度30%)の差はほとんどみられない。

3 ガス抽出装置

油中に溶解している単独ガスを直接測定するセンサは現在開発されていないため、絶縁油からガスを抽出する

装置が必要となる。そのため、各種のガス抽出方式が考案され、ガスクロマトグラフを用いた油中ガス分析装置において実用化されている。

代表的なガス抽出方式を図12に示す⁽¹⁾。

しかし、これらの方式はガスクロマトグラフを使用することが前提であるため小形化及び自動化は困難であり、変圧器直付形自動油中ガス分析装置には適さない。

それゆえ、半導体ガスセンサによる自動油中ガス分析装置に対応したガス抽出装置として次の2方式を研究試作した。

- (1) 真空噴霧方式

図13に示すように、脱気槽を真空ポンプにて真空にし、その中に定量槽中の絶縁油を噴霧させてガスを抽出する方式。

本装置の内部構造写真を図14に示す。

- (2) 直接ピストン方式

図15に示すように、ガス抽出容器中の絶縁油を、ピストンを上昇させることにより真空空間を作りガスを抽出する方式。

両方式のガス抽出装置を試作し、検討した結果、直接ピストン方式の方が構造部品の簡略化・小形化・メンテナンスフリー化において優れていることが判明したのでこの方式を採用することにした。

抽出方式名称	装置の概要	
トリチェリ方式		<p>水銀の入った水準びんを下げ、トリチェリの真空を作り、その真空空間へ試料油を導入することによりガスを抽出する方式。</p> <p>古くから用いられている方式で構造が単純であるが抽出率がやや低い。</p>
テプラポンプ方式		<p>真空ポンプで排気した脱気容器に試料油を導入し、水銀拡散ポンプとテプラポンプによりガスビュレットにガスを抽出する方式。</p> <p>比較的広く用いられている方式で抽出率が高いが構造は複雑である。</p>
ピストン方式		<p>真空ポンプでシリンダ内を真空にし、その中にガスを抽出しピストンを移動してガス試験管へ送る方式。</p> <p>現在、当社の油中ガス分析システムで採用している方式で、抽出率は比較的高い。</p>

図12/代表的なガス抽出装置

Fig. 12/ Typical gas extract device

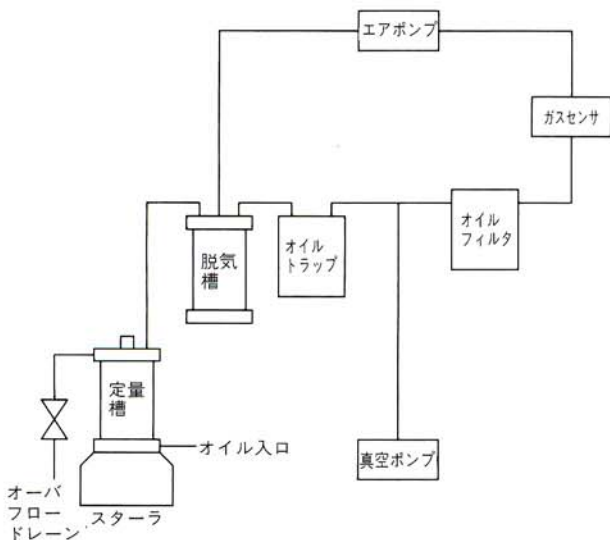


図13/真空噴霧方式

Fig. 13/Vacuum-spray type

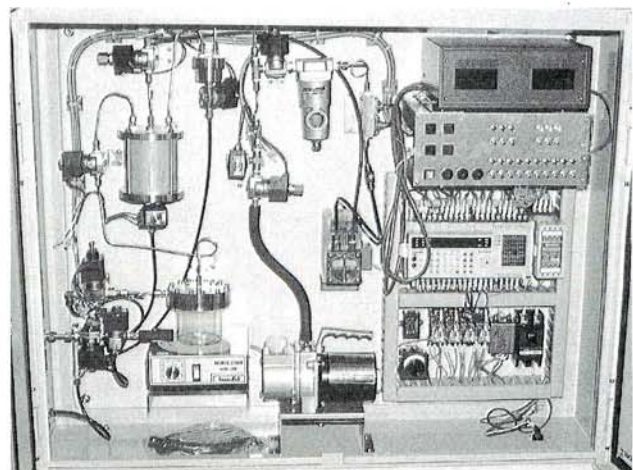


図14/内部構造

Fig. 14/Internal view

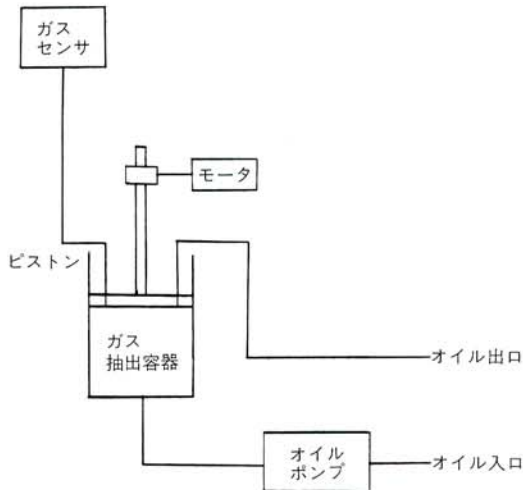


図15/直接ピストン方式
Fig. 15/Direct piston-operated type

4 試作器の開発

ガス検出センサ及びガス抽出装置の研究結果を踏まえ、水素及びメタン半導体ガスセンサを用いた直接ピストン方式による自動油中ガス分析装置の試作器を開発した。本装置の内部構造を図16に示す。

試作器は、絶縁油を変圧器下部に備えられている排油弁から導入し、ガス抽出を行った後、変圧器上部の濾過弁へ戻す方式とすることにより、変圧器中の絶縁油を消費することなく分析できる構造とした。

また、分析開始直前のバックグラウンドを補正する演算回路をセンサ出力に接続し、センサの温湿度変化による分析値のバラツキを減少させた。

4.1 装置概要(仕様)

- ガスセンサ
水素選択性及びメタン選択性半導体ガスセンサ
- 抽出方式
直接ピストン方式(シリンダピストンによる減圧抽出方式)
- 操作方式
タイマによる自動運転及びスイッチによる手動運転方式
- サンプル油量
100ml
- 所要時間
採油から分析まで20分以内
- 検知出力方式
測定ガス濃度のピークホールド方式
- 出力端子

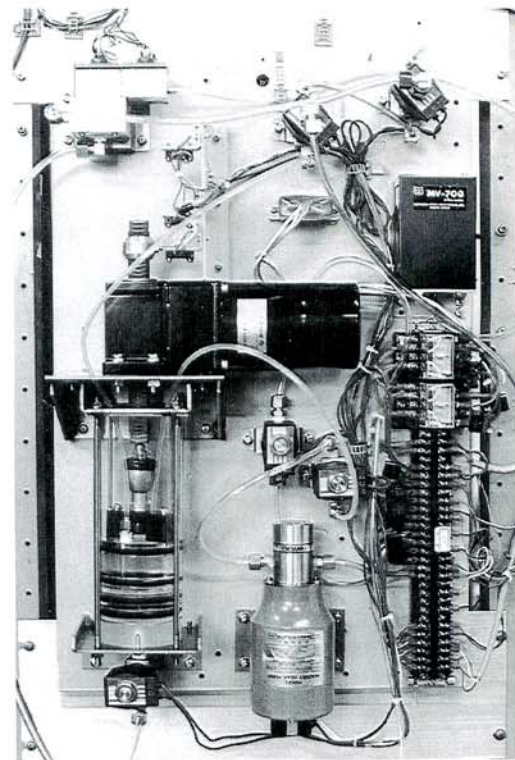


図16/内部構造
Fig. 16/Internal view

水素及びメタン濃度外部出力
濃度異常時外部出力
自己診断異常外部出力

- 表示ランプ
濃度異常表示ランプ
自己診断異常表示ランプ
- 自動運転インターバル
1時間～半年(タイマにより設定値可変)
- 使用周囲温度
-10°C ~ +50°C
- 使用電源
AC 200V 60Hz
- 寸法
幅580mm, 奥行600mm, 高さ540mm

4.2 動作シーケンス

本装置は図17に示す機構で、これら各構成部品(バルブ、ポンプ、モータ)は表1の工程順に動作する。

4.3 抽出効率

水素及びメタンについて、絶縁油からのガス抽出率を測定した結果を表2に示す。

4.4 油中ガス濃度—センサ出力特性

絶縁油中に水素及びメタンを溶解させた時のセンサ出

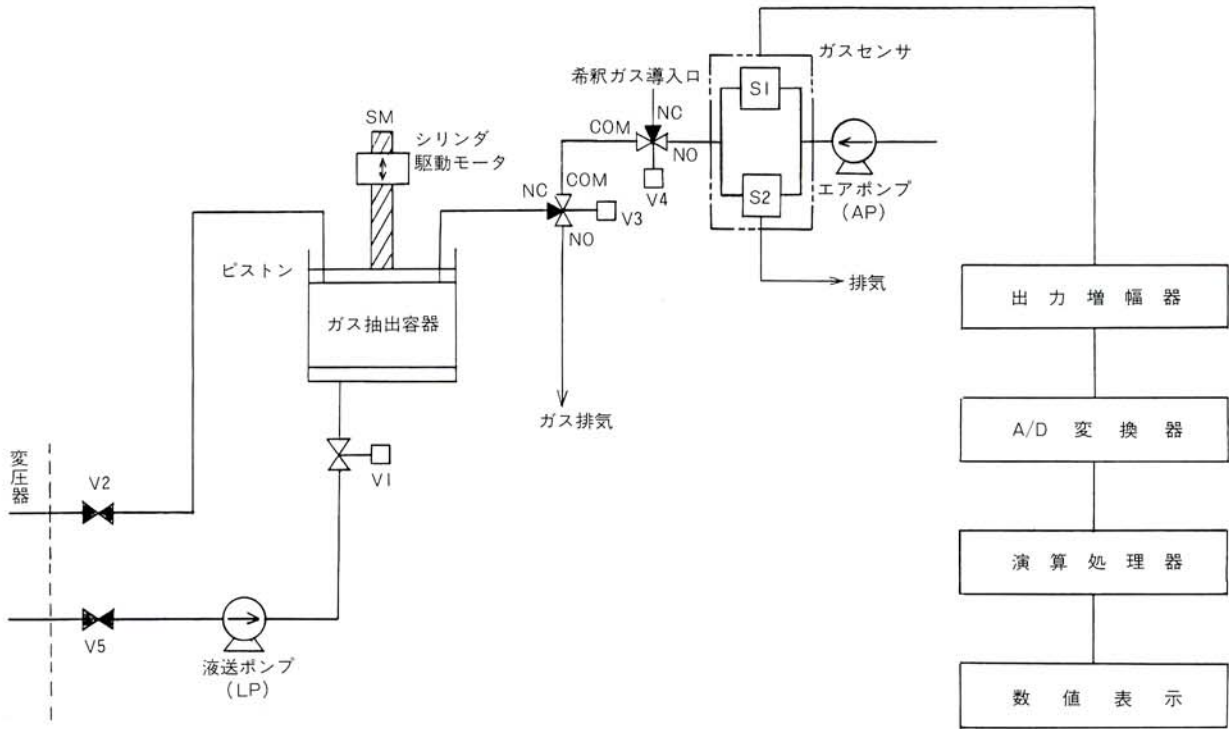


図17/直接ピストン方式
Fig. 17/Direct piston-operated type

表 1/動作シーケンス

Tab. 1/Operating sequence (表内の○印は、動作状態を表す)

順序	工程	V1	V2	V3	V4	V5	LP	AP	SM
①	初期状態								
②	油循環	○	○			○	○		
③	真空空間形成								○
④	油導入	○				○			
⑤	減圧空間形成								○
⑥	ガス抽出								
⑦	希釈			○	○				
⑧	ガス濃度測定			○					○
⑨	油排出		○						○
⑩	センサクリア							○	
⑪	動作完了								

V1~V5: 電磁弁 LP: 液送ポンプ
AP: エアポンプ SM: シリンダ駆動モータ

表 2/絶縁油からのガス抽出率

Tab. 2/Extraction rate from insulating oil

分析対象ガス	ガス抽出率(%)
水素 (H ₂)	70
メタン (CH ₄)	30

力を測定すると共に、ガスクロマトグラフを用いた油中ガス分析装置にて油中ガス濃度を測定した。図18に本装置における油中溶解水素ガス濃度と水素ガスセンサ出力の関係を示す。また、図19に油中溶解メタンガス濃度とメタンガスセンサ出力の関係を示す。これらの図は、油中ガス濃度と各センサ出力の良好な相関性を示すものであり、これらのガスセンサを用いれば水素の判定基準である100 ppm, 及びメタンの判定基準である50ppmの測定も可能である。

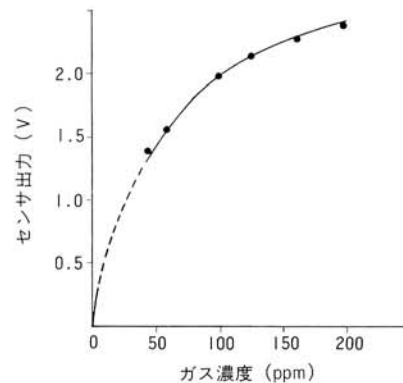


図18/油中溶解水素ガス濃度と出力特性 (水素ガスセンサ)

Fig. 18/Characteristics between dissolved hydrogen gas concentration and output (hydrogen gas sensor)

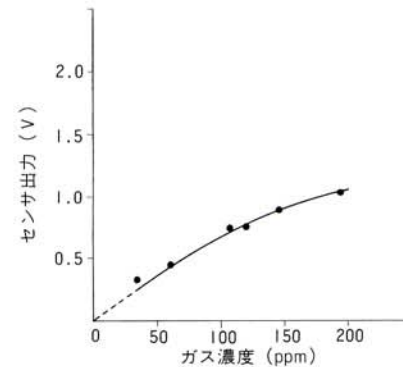


図19/油中溶解メタンガス濃度と出力特性 (メタンガスセンサ)

Fig. 19/Characteristics between dissolved methane gas concentration and output (methane gas sensor)

5 あとがき

現在開発されている自動油中ガス分析装置は、大形で高価なことから、超高压大容量変圧器に取り付けられることが多く、一般の配変級変圧器では絶縁油の採取から分析まで人手に頼っているのが現状である。

今回、半導体ガスセンサを採用した小形で低コストの自動油中ガス分析装置を開発したことにより、70kV級の変圧器にまで油中ガスの自動監視が可能になる。

また、稼働中の変圧器の保護装置が作動した場合、それが変圧器内部の異常によるものか、あるいは保護装置自体の誤動作によるものかを油中ガス分析で判断することが多く、現状ではガスクロマトグラフにて分析を行っているため、絶縁油の採取から分析結果が出るまでに数時間以上かかることもあったが、本装置を変圧器に取り付

けることにより、短時間で結論を出すことが可能となる。

また本装置は、通常自動運転されているため、分析インターバルを縮めることにより、従来より早期に異常を検出することが期待できる。

したがって、本装置が変圧器の信頼性向上、更にメンテナンスフリー化に貢献できるものと確信する。

最後に、本装置の開発にあたり多大な協力をいただいたオザワ科学(株)殿、フィガロ技研(株)殿に感謝の意を表する。

参考文献

(1) 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

最近公告された愛知出願(I)

特許

公告番号	名称	発明者	共同出願人
63-56	暖房便座における便座用ヒーターの取付方法	横山 武弘	東陶機器(株) 高木工業(株)
63-16887	巻鉄心の成形装置	磯部 治男	
63-16890	変圧器におけるブッシングポケット部への絶縁油注入方法	佐藤 亘 坂入美津郎	中部電力(株)
63-27843	巻鉄心変圧器の製作方法	広江 成致 河村 良二	
63-30774	負荷時タップ切換装置	森 鉄夫	
63-32020	発電機の自動解列装置	浮田 義也 小田 新一 田中 雅治	沖縄電力(株)

公告番号	名称	発明者	共同出願人
63-46659	強制接地装置	永瀬 公平 戸松 均治	中部電力(株)
63-48411	移動用変圧器におけるブッシングの取付方法および取付装置	坂入美津郎	中部電力(株)
63-52762	変圧器鉄心の製造方法	矢後 克二	中部電力(株)
63-66047	変圧器鉄心の製造方法	矢後 克二	中部電力(株)
63-66406	巻鉄心の製造方法	矢後 克二 関 晃	中部電力(株)