

SF₆ガス絶縁変圧器における錫蒸着膜による分解ガス検出センサの開発

Development of Sensor Detecting Decomposition Product Gases in SF₆ gas Insulated Transformer with Sn Evaporating Film

梶田省吾^{※1}
Shogo Kajita
後田澄夫^{※1}
Sumio Ushiroda
近藤芳孝^{※2}
Yoshitaka Kondo
中村 博^{※3}
Hiroshi Nakamura
佐藤一彦^{※3}
Kazuhiko Sato

Detection of decomposition product gases generated by partial discharge in the SF₆ gas, one of internal faults of SF₆ gas insulated transformers, is an important subject for diagnostic techniques.

With the viewpoint of the service of SF₆ gas insulated transformers in safety, development of the diagnostic technique to detect certainly decomposition product gases in their initial stage is expected.

The authors have made various groundworks on the detection of decomposition product gases.

The Sn evaporating films formed on a slide glass base in a vacuum are employed to be exposed to the decomposition product gases generated by AC partial discharges in the SF₆ gas.

In our experimental results, the transmission factor of the film become 10 to 30% larger than its original due to the reaction between the film and the decomposition product gases.

1 はじめに

近年、都市部への電力需要の集中によりビルの地下や高層階に変電所が設置されるようになり、変電機器の不燃化が重要課題となっている。SF₆ガスは絶縁油に比べて不燃性に優れ、空気に比べて絶縁性能が優れている。また、SF₆ガスはきわめて安定性の高い化合物であり不燃性、非爆発性という特長を備えている。以上の背景のもと、不燃性変圧器としてSF₆ガス絶縁変圧器（以下、ガス絶縁変圧器という）の需要は急激に伸びつつある。

しかし、SF₆ガスは変圧器の内部障害によって分解し、SF₆ガスの分解ガス及び分解生成物による固体絶縁材料の劣化及び絶縁耐力の低下が問題となる場合がある。現在、ガス絶縁変圧器は実用化の歴史が浅く、現地用簡易異常診断技術としてガス検知管⁽¹⁾は実用化されているが部分放電等に対する常時監視技術としての予測保全技術は開発途上にあり、油入変圧器と同等レベルの予測保全技術の開発がガス絶縁変圧器にも期待されている。

ガス絶縁変圧器の内部障害としては、部分放電、アーク放電、局部過熱などが想定される。

本研究では、ガス絶縁変圧器の内部障害の一つである部分放電に的を絞って、その兆候を早期に発見可能な簡易検出用予測保全センサの開発を目的とした。

筆者らはこれまでに、スライドガラス基板に真空蒸着した金属薄膜を用いて部分放電によるSF₆分解ガス（以下、放電分解ガスという）を簡易に検出する研究を行ってきた⁽²⁾⁽³⁾。部分放電は実器の内部障害を想定した微小放電エネルギーに設定し、実験容器中で強制的に放電分解ガスを発生させ、その雰囲気中に金属蒸着膜を暴露した。金属蒸着膜は暴露前・後で透過率に顕著な差を有し、目視観測においても金属蒸着膜の呈色反応を認めた。蒸着金属としては、アルミニウム、マグネシウム、銅、銀、鉄、クロム、錫の7種類の検討を行ったが、このなかで特に錫が放電分解ガスに顕著な反応を示した⁽⁴⁾。

今回の研究ではこの錫を用いてさらに検討を行ったところ、放電分解ガスの検出用センサとしての活用が可能であることが明らかとなったので、その開発概要を報告する。

2 部分放電によるSF₆ガスの放電分解ガス

SF₆ガスは熱的には500℃以下では分解しない安定したガスである。しかし、放電などで分解するとHF、SF₄などの低フッ化物、さらに残留酸素と結合してSOF₂、SO₂F₂など放電分解ガスを生じる。この放電分解ガスの成分分析については、すでに多くの研究結果がある⁽⁵⁾。ここで、ガス絶縁変圧器の内部障害における分解ガスの発

※1 豊田工業高等専門学校 ※3 電力事業本部 変圧器事業部 技術部
※2 大同工業大学
愛知電機技報No.18

生について、異常の種類における主要分解生成物を表1¹⁾に示す。本研究では部分放電により発生する放電分解ガスをF⁻、SO₄²⁻のイオン総量⁶⁾として取扱った。

3 金属蒸着膜の製作

3.1 真空蒸着方法

基板は20×35×1.5mmのスライドガラス(ソーダ石灰ガラス)を使用し、蒸着容器内の真空度が10⁻⁵Torr以下で錫を所定の融点とすることによりガラス基板上へ真空蒸着を行った。

図1に蒸着装置の全体図を示す。排気系としてロータリーポンプと油拡散ポンプを使用した。図2に加熱用ヒータとシャッター部を示す。なお、シャッター部は蒸着初期における不純物除去機構である。

以下に、真空蒸着法の手順についてその概要を述べる。

まず、①スライドガラス基板を溶剤で洗浄する。次に②加熱用ヒータ(タングステンフィラメント)に蒸着する錫(φ0.25mm)を幅広く巻き付け、③ガラス基板を固定台にのせて加熱用ヒータの真上に置く。④固定台及びシャッターを取り付け後、蒸着装置の蓋とバルブを閉じロータリーポンプにより真空引きを開始する。⑤蒸着容器内が10⁻²Torr以下に達した時点から油拡散ポンプを使用し、蒸着容器内が10⁻⁵Torrに達するまで高真空引きを行う。⑥加熱用ヒータに通電し蒸着を開始する。⑦蒸着中の蒸着容器内の圧力は10⁻⁵Torrの高真空に保つ。⑧加熱用ヒータに巻き付けた錫がある一定量蒸発後、⑨シャッターを開く。⑩ガラス基板上に蒸着金属が凝結して薄膜を形成し始めると同時に膜厚測定を行い、

⑩所定の膜厚に達した段階で蒸着を終了する。
なお、錫は純度99.99%のものを使用した。

3.2 蒸着膜厚の測定

本研究では、電気的方法の一種である水晶振動子法に

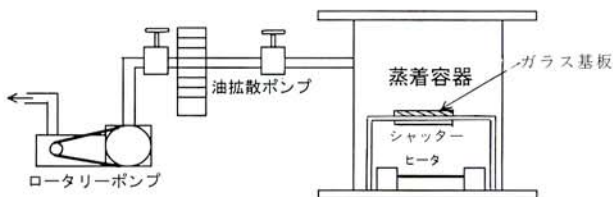


図1 / 真空蒸着装置全体図

Fig.1/Schematic diagram of the vacuum evaporator

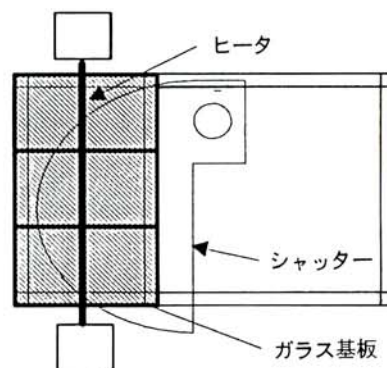


図2 / ヒータとシャッター部

Fig.2/Part of the heater and the shutter

表1 / ガス絶縁変圧器の主要分解生成物¹⁾

Tab.1/Principal decomposition products at various faults in SF₆ gas insulated transformers

異常の種類	主要分解生成物	備考
金属の過熱	SO ₂ >SF ₄ F ⁻ , (SO ₄ ²⁻ + SO ₃ ²⁻)	けい素鋼板, 鉄, 銅の過熱 (200~500℃) × (1~4 h)
絶縁物の過熱	CO ₂ >CO>CH ₄ 高温の方がCO/CO ₂ の比率大 (油入変圧器と類似) 微量のF ⁻ アルデヒドの生成もある	PETフィルム(融点260℃)の過熱 (230~290℃) × (3~10 h)
裸金属間の部分放電	SO ₂ F ₂ >SF ₄ 銅電極でのSF ₄ は極微量 F ⁻ , (SO ₄ ²⁻ + SO ₃ ²⁻)	針-平板電極(平板はステンレス) 電極材料: けい素鋼板, 銅 総電荷量: 0.04~1.5 C 総放電エネルギー: 65~3,900 J
巻線間部分放電	SO ₂ F ₂ >CO ₂ , SF ₄ F ⁻ , (SO ₄ ²⁻ + SO ₃ ²⁻) 微量のCF ₄ , アルデヒドの生成もある	PET巻平角銅線のコイル間モデル 総電荷量: 0.004~0.045 C 総放電エネルギー: 77~220 J
巻線間アーク放電	SF ₄ >CF ₄ , CO ₂ , CO F ⁻ , (SO ₄ ²⁻ + SO ₃ ²⁻)	PET巻平角銅線のコイル間モデル ギャップ長: 3 mm 印加エネルギー: 1~100 J 通電電流: 1 kA, 5 kA

(注) 1. イオンで括弧内に記述した成分は分離できない成分を示す。
2. PET: ポリエチレンテレフタレート

より膜厚を測定した。この方法は、蒸着装置内に水晶振動子をセットし、その発振周波数の変化を観測して蒸着膜の厚さを測定するものである。測定器はこの原理を用いた日電アネルバ(株)製ITM蒸着モニタを使用した。

3.3 透過率の測定

蒸着したガラス基板(以下、蒸着板という)を24時間デシケータ内で常温保管し、膜面の安定化処理を行った。蒸着板は実験装置取付前と放電分解ガス暴露後について透過光を測定した。

3.4 蒸着状態の観測

ガラス基板上に蒸着された成分の分析はX線回折装置(株理学電機製:CN4037A1)を用いて行った。その結果から、蒸着金属以外の成分は観測されず異種金属を含まない良好な状態での蒸着が確認できた。さらに、前項での透過率測定は複数個製作した蒸着板についても、ほぼ同等の値を示しており、再現性のある真空蒸着法を確立できた。

4 実験

4.1 実験装置

図3に実験装置の概要を示す。図4に実験装置外観を、図5に電極写真を示す。放電容器は円筒型(φ30×H55cm)で内容量が約38.8Lのステンレス製、電極配置は銅製の針-平板電極(針電極の先端部の曲率半径は0.6mm、平板電極の直径250mm、ギャップ長4mm)、放電容器内のSF₆ガス圧力は実変圧器を模擬しゲージ圧力で0.12MPa(於20°C)とした。透過率を測定する光センサは、(株)オムロン製透過型リニア光電センサZ4LA型(波長780nm、最大出力3

mV)を使用し、センサ出力の測定はデジタルマルチメータを使用した。放電電荷量の測定は、日本計測器(株)製同調式部分放電測定器CD-5を用いた。

放電容器側面には円筒形容器(φ120×H240mm)をフランジ接続し、この中に蒸着膜試料を固定した。透過型リニア光電センサ(以下、光電センサという)にはレーザー投光部と受光部があり、受光部からの出力値はデジタルマルチメータを介してオンラインでパソコンに取り込んだ。なお、光電センサは、外光の影響をなくすためにセンサ部を暗幕で覆った。

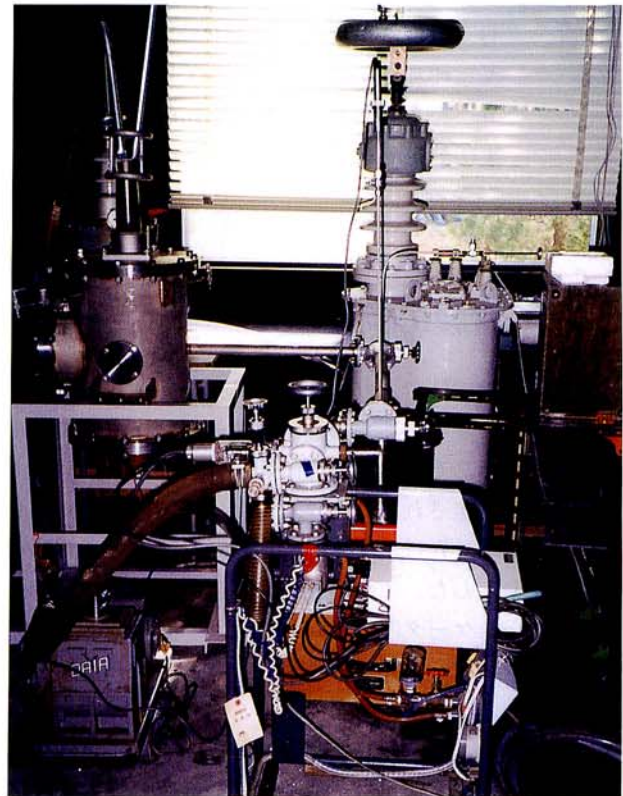


図4/実験装置外観

Fig.4/Appearance of the experimental apparatus

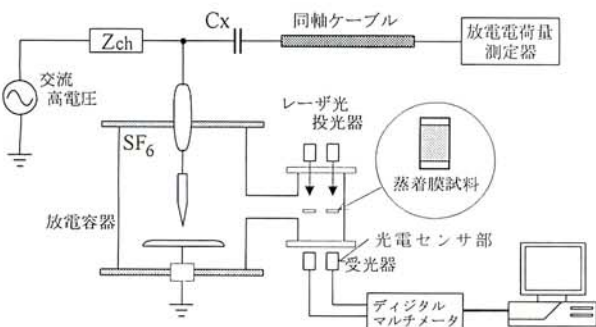


図3/実験装置

Fig.3/Schematic diagram of the experimental apparatus

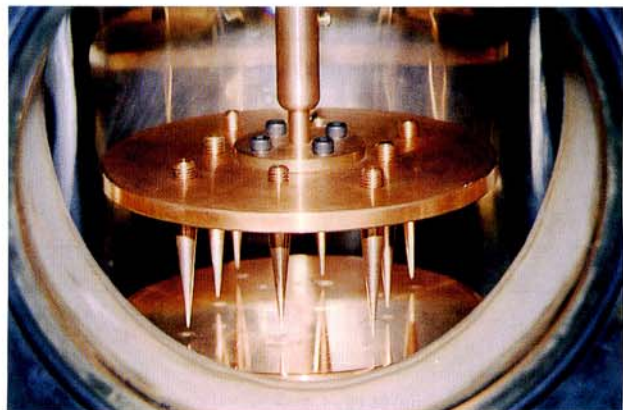


図5/電極写真

Fig.5/Photo of electrodes

4.2 実験条件

実験条件は、電圧15～16.5kVrms、放電電荷量80～150 pC、放電パルス個数300～2000ppsで印加を行い、放電継続時間は8時間一定とした。例えば、印加電圧15kV、放電電荷量80pC、放電パルス個数2000ppsの場合、放電エネルギーは35 Jとなる。

放電エネルギーは次式から求めることができる。

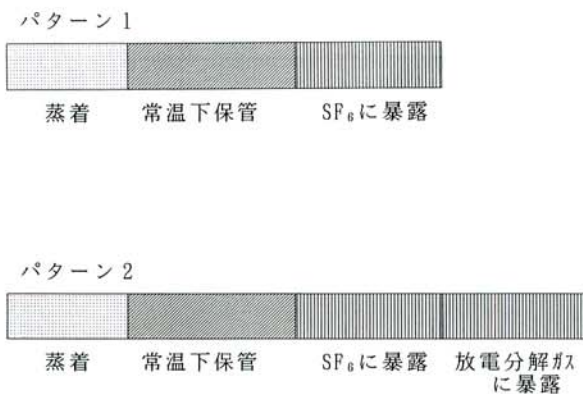
$$\omega = \frac{1}{2} \cdot Q \cdot V \cdot n \cdot t$$

ここで、 ω ：放電エネルギー (J)
 Q：放電電荷量 (C)
 V：印加電圧 (V)
 n：パルス個数 (pps)
 t：放電継続時間 (sec)

5 実験結果

5.1 蒸着膜の安定性

錫蒸着膜は安価であり製作も容易であるが、蒸着膜の安定性を検討する必要がある。ガス絶縁変圧器への適用を考慮すると、蒸着後一定の時間を経て変圧器へ装着されることが想定されるため、常温気中での安定化処理を行い、図6 (a) に示す2つのパターンにおいて透過率の変化を測定した。ガラス基板に錫を真空蒸着後、24時間常温でデシケータ内で保管し、SF₆ガスに暴露したものをパターン1とし、その後放電分解ガスに暴露したものをパターン2とした。パターン1、2における光電センサ出力比を図6 (b) に示す。この結果から、常温下で



(a)処理パターン

図6 / 蒸着膜の処理パターン比較

Fig.6/Pattern comparison of the evaporating film treatment

24時間保管した蒸着膜はSF₆ガス単独雰囲気中では出力比に変化がなく、放電分解ガスに暴露すると反応を起こすことが確認できた。なお、光電センサ出力比は初期値に対する常時監視状態のセンサ出力値の比率を示す。

5.2 透過率の暴露前後の変化

図7は錫蒸着板を放電エネルギー50 Jの放電分解ガス中に暴露した場合の暴露前後の透過率変化を、図8は錫蒸着膜面の変化状況を示す。蒸着膜の厚さにより暴露後の透過率は暴露前の透過率より5～20%上昇した。特に膜厚80 Å以上において透過率が顕著に変化することが明らかとなった。

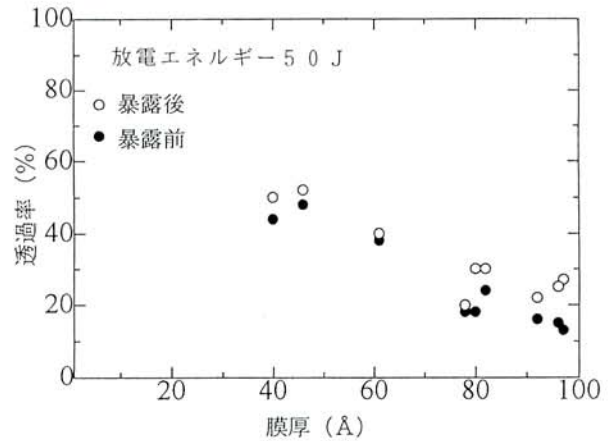
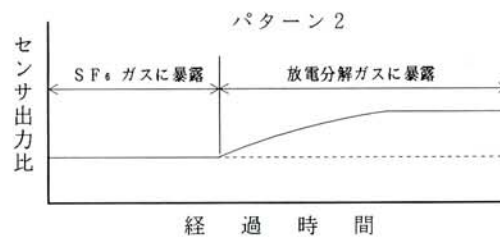


図7 / 可視光による暴露前と暴露後の透過率変化

Fig.7/Change of transmission factor before and after the exposure in decomposition of SF₆ gas



(b)センサ出力比の時間変化

5.3 蒸着膜厚の影響

図9は同一放電エネルギー下の各種膜厚における放電継続時間とセンサ出力比の関係を示している。膜厚38Åでは放電開始後1時間半でセンサ出力比が変化するが、出力比は微小で1.05以下で飽和する。また、膜厚78Å以上では、出力比変化が現れるのが放電開始後約1時間半と38Åの場合と同様であるが、センサ出力比1.05以上の顕著な変化があった。さらに、蒸着膜厚78Å以上であればセンサとしての利用条件を満足することが確認できた。

5.4 放電エネルギーの影響

図10は同一膜厚における放電エネルギーの影響を示している。放電エネルギーが50Jの場合に比し1/10の5J程度の微小放電に対しても膜厚が78Åあれば充分検出が可能であることが確認できた。放電エネルギーによりセンサ出力比が変化するの、放電分解ガスの発生量が異なるためであると考えられる。

5.5 分解ガスの定量化

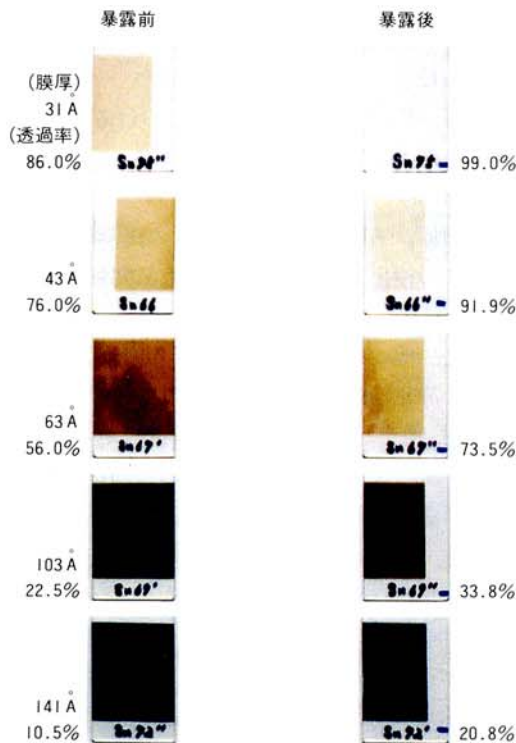
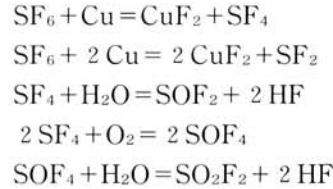


図8/錫蒸着膜面の変化状況
Fig.8/Change of the surface of Sn evaporating film

実験により発生した放電分解ガスの分析はイオンクロマトグラフ法(サプレッサ式イオンクロマトアナライザ: 横河電機(株)製IC7000)により行った。放電分解ガスとしては電極材質(銅)から、次に示す反応ガスを予想した。すなわち、



である。これらを吸収液にバブリングしてF⁻イオン及びSO₄²⁻イオンの総量として放電分解ガスの検出を行った。図11(a)(b)にイオンクロマトアナライザによる分析例を示す。図12にはF⁻, SO₄²⁻イオン量と放電エネルギー

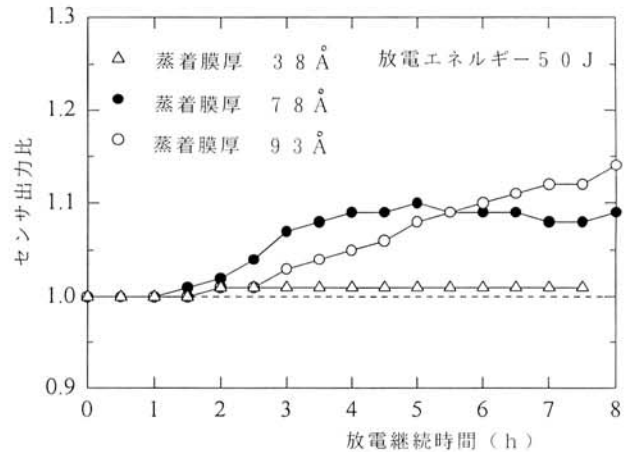


図9/同一放電エネルギーにおける膜厚差によるセンサ出力結果

Fig.9/Results of the sensor output with the difference of film thickness under the same discharge energy

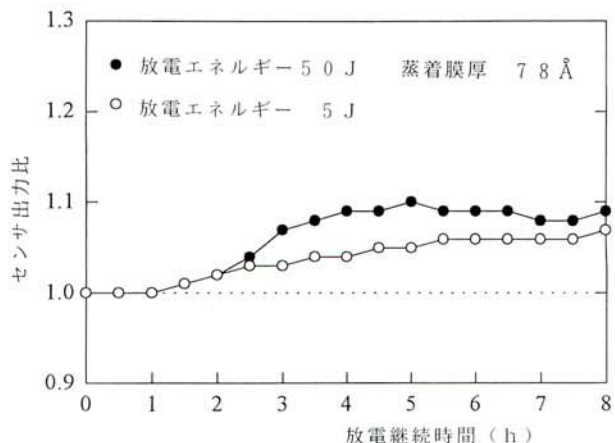
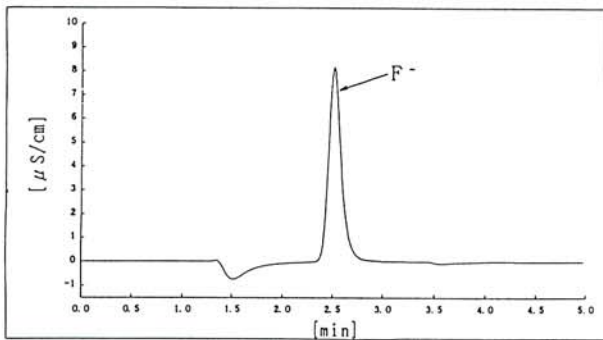
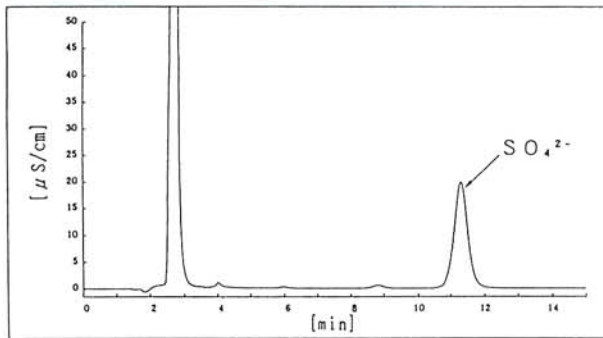


図10/同一膜厚における放電エネルギーの影響
Fig.10/Influence of discharge energy for the same film thickness



(a) F⁻イオン量



(b) SO₄²⁻イオン量

図11/イオンクロマトアナライザによる分析例
Fig.11/Analysis examples with ion chromatograph analyzer

の関係を示す。この結果より、各イオン量とも放電エネルギーが10 J 付近より増加する傾向がみられた。さらに、F⁻、SO₄²⁻の関係は、F⁻>SO₄²⁻であることが明らかとなった。

6 まとめ

微小部分放電下を模擬した放電分解ガス中に、真空蒸着法により製作した錫蒸着膜を暴露し透過率の変化を測定した。この錫蒸着膜と光電リニアセンサを組み合わせた実験結果から次のことが明らかになった。

- (1) 錫蒸着膜が放電分解ガスに対して反応し、錫蒸着膜の可視光波長 (780nm) の透過率は分解ガス中への暴露前後では5~20%の差を生じる。
- (2) 錫蒸着膜の膜厚は放電分解ガスに対するセンサ出力比1.05以上を実用化レベルとすれば、およそ80 Å必要である。
- (3) 微小放電下では放電開始後約1時間半で透過率の変化が検出可能である。
- (4) 放電分解ガスの成分はイオンクロマトグラフ法ではF⁻>SO₄²⁻の関係にあることが判明した。

従って、錫蒸着膜を透過型リニア光電センサと組み合わせることにより放電分解ガスセンサとして活用の目処を得ることができた。

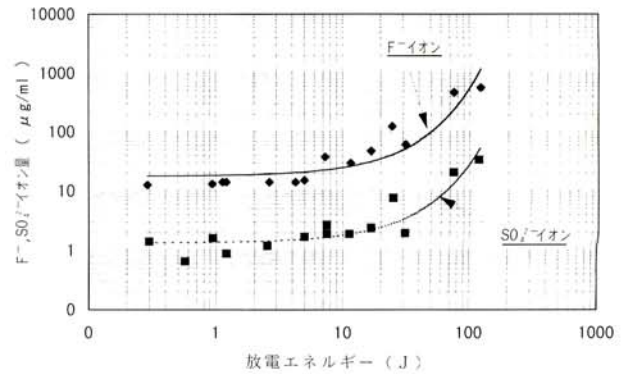


図12/放電エネルギーと放電分解ガスのイオン量
Fig.12/Relationship between the amount of ions in decomposition of SF₆ gas and the discharge energy

7 あとがき

今後は本研究データをもとに、

- (1) 錫蒸着膜における透過率変化のメカニズム
- (2) 統計手法を用いた再現性の確認
- (3) 放電分解ガスの他成分の分析

の検討を進め、実用センサの開発を図る予定である。

参考文献

- (1) 電気学会技術報告：第459号「不燃性・難燃性変圧器の現状とその動向」、1993
- (2) 佐藤一彦, 他：「SF₆ガス絶縁変圧器の蒸着膜による分解ガスの検出」1991年度電気関係学会東海支部連合大会No.126
- (3) 梶田省吾, 他：「A.C.コロナ放電におけるSF₆分解ガスの簡易検出」電学論B研究開発レター、114巻 12号、1994
- (4) 中村博, 他：「SF₆ガス絶縁変圧器の錫蒸着膜による分解ガスの検出 (II)」1995年度電気関係学会東海支部連合大会 No.1195
- (5) 小林重之, 他：「ガス絶縁変圧器の内部異常診断」電気学会静止器研究会 SA-91-71、1991
- (6) 後藤直樹, 他：「SF₆ガス絶縁変圧器のイオンクロマトグラフ法による分解ガスの検出」1991年度電気関係学会東海支部連合大会 No.125