ガス絶縁変圧器の異常診断のための分解ガスの研究

正員 岡部成光 (東京電力)

正員 小林恒夫 (東芝)

正員 石岡康昭 (東芝)

正員 才田敏之 (東芝)

正員 大野高宏 (東京電力)

正員 川口賢二 (東芝)

正員 井上保 (東芝)

正員 池田正己 (東芝)

STUDY ON DECOMPOSITION GAS FOR DIAGNOSTICS OF GAS-INSULATED TRANSFORMERS

Shigemitsu Okabe, Member, Takahiro Ohno, Member (Tokyo Electric Power Co., Inc)

Tsuneo Kobayashi, Member, Kenji Kawaguchi, Member, Yasuaki Ishioka, Member,

Tamotsu Inoue, Member, Toshiyuki Saida, Member, Masami Ikeda, Member (Toshiba Corporation)

Concentration in population and business activities results in high energy demand in urban areas. This requires the construction of underground substations. Oil-less, non-flammable and non-explosive equipment is recommended for underground substations. Therefore, gas-insulated transformers have been developed. Development of the method for diagnosis of gas-insulated transformers is required.

In this paper, experimental survey over the main components of decomposes generated by various faults in gas-insulated transformers is described that is carried out through simplified model tests. The phenomena of overheat and partial discharge are modeled, taking the actual materials related to each fault into account. For example, CO, CO₂, and aldehydes are produced by an overheat from pressboards and PET-films. The amount of gas production increases with temperature rise. While various types of gases are produced from the partial discharge, principal components are SO₂ and SOF₂. These results will be used to develop the diagnostics method for gas-insulated transformers.

キーワード：ガス絶縁変圧器、異常診断、ガス分析、過熱、部分放電、SF₆ガス、プレスボード、PETフィルム

1. はじめに

近年、大都市の電力需要の集中が進んでいる。しかし用地難や防災上の理由から、都市部に変電所を建設することは年々困難になってきている。そのため、大容量の地下変電所の需要が急激に高まってきている。ガス絶縁変圧器は配電用を主体に伸び、人口が密集するビルや地下へ数多く配置されてきた。最近は大容量のガス絶縁変圧器の開発も進み⁽¹⁾、配電のみでなく大容量変電所でも適用され始めている。

ガス絶縁変圧器では、主たる絶縁材料として油入変圧器に伝統的に使われてきた絶縁紙に替わって、巻線絶縁にはポリエチレンテレフタレートフィルム (PETフィルム) が使用される。そのため、変圧器内部で異常が発生した場合には、使用している材料が油入変圧器と異なるため、発生する分解ガスも異なることが考えられるが、これについて調査した報告例はまだ少ない⁽²⁾⁽³⁾⁽⁴⁾。特に、ガス絶縁変圧器の異常診断を考える上で、変圧器が正常に運転されている領域で発生する分解ガスの調査は、変圧器の運転が正常か異常かを判断するためには不可欠であるが、これまではこの領域まで踏み込んだ報告はなされておらず、多様な現象を検知、判断するためにはさらなるデータの集積が必要とされている⁽⁵⁾。

本論文では、正常運転領域から異常運転領域まで、幅広いエネルギー範囲において変圧器内部に発生する分解ガスを調査した。また、その結果をもとに、得られたデータがどのように異常診断に利用できるかを考察した。

2. 調査項目

変圧器内部の異常としては、大きく過熱異常と放電異常に分類される。変圧器の構造・材料などを模擬したモデルにより、変圧器内部で過熱異常、及び放電異常が起きた場合に発生する分解ガスについて調査した。

<2.1> 加熱試験

加熱試験では、2つの運転状態を模擬して発生する分解ガスの調査を行った。すなわち、変圧器内部に異常が発生し、絶縁材料や金属面に塗布される塗料が高温にさらされた場合に発生する分解ガスについては、短時間加熱試験により調査した。

また、正常運転状態において、軽微な異常や過負荷など、絶縁物が運転温度に近い比較的低温領域で長時間加熱された場合に発生する分解ガスについては、長時間加熱試験により調査した。

＜2・2＞ 部分放電試験

変圧器内部に絶縁不良や異常電圧の侵入等により絶縁異常が発生した場合、絶縁物の沿面やSF₆ガス中に部分放電を生じる。部分放電試験では、変圧器内部の部分放電発生を模擬したモデルによって、絶縁物を介在した場合と、絶縁物を介在しないSF₆ガス単体の場合について、部分放電が生じた際に発生する分解ガスをそれぞれ調査した。

絶縁物を介さないSF₆ガス単体での部分放電試験については、変圧器内部には被覆されていない高電圧導体は基本的にはないが、放電エネルギーによってSF₆ガスからどのような分解ガスが発生するかの調査を行う必要があると考え、実施した。

3. 加熱試験

過熱異常によって、絶縁材料から発生する特徴的な分解ガスを把握するための高温短時間加熱試験と、正常運転状態における軽微な異常時に発生する分解ガスを把握するための低温長時間加熱試験の2通りの加熱試験を行った。

＜3・1＞ 高温短時間加熱試験

高温短時間加熱試験では、過熱により絶縁材料から発生する分解ガスと、金属材料共存におけるSF₆ガスの分解ガスを調査するため、試料として絶縁材料と金属材料を加熱した。

＜3.1.1＞ 試験装置・方法

(1) 絶縁材料

図1に高温短時間加熱試験の試験装置を示す。試料はガス絶縁変圧器の巻線の主要絶縁材料である耐熱ポリエチレンテレフタレート（PET）フィルム、プレスボード、および変圧器内部の金属面に塗布されるエポキシ塗料を3mm角（1～20g）にしたものを準備した。なお、耐熱PETフィルムは、PETフィルムに対して低分子不純物含有量を減少させ耐熱性を改良した耐熱クラスBの絶縁材料である。

試料は105℃3時間乾燥後、ガラス管内に試料を設置し、バルブA、Cを開放してA部から徐々にN₂ガスをA→B→C→Dに流した後、管の両端のバルブA、Cを閉鎖する。

次に、恒温槽の温度を上げて加熱し、試料温度が所定の温度に達してから30分～4時間保持した後にA、Cを開放してA部からN₂ガスを導入して、発生する分解ガスを捕集した。なおN₂ガス中で加熱試験を実施したのは、300℃

図1 熱分解装置

Fig.1. Thermal Decomposition Test Setup

までの加熱条件下で、SF₆ガスが熱分解し、ガラス管を損傷してしまうのを避けるためである。

分解ガスのうち高沸点成分についてはB部（冷却部）に液体として、また低沸点成分についてはD部（採気瓶）にそれぞれ捕集した。これらの捕集した分解ガスをガスクロマトグラフ（GC）、及びガスクロマトグラフ／質量分析計（GC／MS）により分析した。なお、加熱温度は耐熱PETフィルムの融点（260℃）近くの温度として、180℃～300℃の範囲でそれぞれ加熱した。表1に加熱条件を示す。

表1 各種絶縁材料の加熱条件
Table.1 Heat Condition of Insulation Materials

絶縁材料	加熱温度	180℃	200℃	220℃	250℃	300℃
	加熱時間	4h	4h	4h	4h	30min
耐熱PETフィルム*		○	○	—	○	○
プレスボード*		○	○	—	○	○
エポキシ塗料*		—	○	○	○	—
金属材料#		○	○	○	○	—

○：測定実施 —：測定省略
*：N₂中で加熱 #：SF₆中で加熱

(2) 金属材料

珪素鋼板（246g）と銅板（173g）の表面を溶媒で洗浄し、図2に示すステンレス製試験容器に各々個別に入れて封じた後、10Pa以下の減圧下で3時間真空引きを行う。その後、SF₆ガスを0.2MPa（絶対圧力）充填し、180℃～300℃でそれぞれ30分～4時間加熱した。表1に加熱条件を示す。

図2 試験容器
Fig.2. Test Vessel Container

＜3.1.2＞ 結果

(1) 絶縁材料

表2に各絶縁材料から発生する分解ガスの分析結果を示す。耐熱PETフィルムからの分解ガスは200℃以下は、CO₂、アセトアルデヒド、メチルアルコール、250℃以上ではさらにメタンなども検出された。

一方、プレスボードからの分解ガスは、耐熱性が耐熱PETフィルムよりも低いために、発生量や種類も多く、耐熱PETフィルムから発生する成分以外に、他のアルデヒド類、ケトン類、フラン類およびフルフラールとその誘導体など20種類以上の分解ガスが検出された。

エポキシ塗料からの分解ガスは、220℃以下でCO₂を主成分として、少量の水素、CO、C₁~炭化水素類、アセトアルデヒド、メチルアルコール、250℃でさらにメチルピラジンなどが検出された。

各絶縁材料から発生した共通の主要分解ガスは、CO₂、アセトアルデヒド、およびメチルアルコールなどであり、その生成量は、プレスボードが耐熱PETフィルムの数倍～数十倍多かった。

プレスボードから発生する、メチルエチルケトン、メチルイソブチルケトン、酢酸メチルおよびフルフラール類は、耐熱PETフィルムから発生しないため、プレスボードの特徴成分といえる。特にフルフラールは油入変圧器の劣化

診断の指標として内外で検討されている成分である⁽⁶⁾。

フルフラールは高沸点(164℃)のため液体として絶縁油中に含まれており、抽出して液体クロマトグラフにより分析されるが、本実験では、SF₆ガス中においても検出できており、注目すべき成分のひとつとして考えられる。

また、エポキシ塗料特有の発生分解ガスはメチルピラジンである。

(2) 金属材料

表3に、金属材料によるSF₆の分解ガスの測定結果を示す。金属材料によるSF₆の分解ガスは、180℃以上で微量のSO₂が検出されたが、これまでの研究例⁽⁷⁾で報告されている、金属材料との共存におけるSO₂F₂、HFの生成は検出されなかった。珪素鋼板と銅におけるSO₂発生量は、珪素鋼板が銅よりも多かったが、珪素鋼板と銅を共存させた系においては単独よりも特に多くなるような結果は得られなかった。

表2 絶縁材料の分解ガス
Table.2 Decomposition Gas of Insulating Materials

分析対象分解ガス	試料	耐熱PETフィルム				プレスボード				エポキシ塗料		
	加熱温度	180℃	200℃	250℃	300℃	180℃	200℃	250℃	300℃	200℃	220℃	250℃
	加熱時間	4h	4h	4h	30min	4h	4h	4h	30min	4h	4h	4h
水素(H ₂)		×	×	×	×	×	×	×	○	○	○	◎
一酸化炭素(CO)		×	×	×	×	○	◎	◎	◎	○	○	○
二酸化炭素(CO ₂)		○	○	○	○	◎	◎	◎	◎	◎	◎	◎
メタン(CH ₄)		×	×	△	△	△	△	○	○	△	△	○
エチレン(C ₂ H ₄)		×	×	×	×	×	×	△	△	×	×	△
エタン(C ₂ H ₆)		×	×	×	×	×	×	△	△	×	△	△
アセトアルデヒド(C ₂ H ₄ O)*		×	△	○	○	△	△	○	◎	○	○	○
メチルアルコール(CH ₃ OH)		△	△	○	×	○	○	○	×	△	△	○
アセトン(C ₃ H ₆ O)		×	×	×	×	×	×	○	×	×	×	△
メチルエチルケトン(C ₄ H ₈ O)		×	×	×	×	×	×	○	△	×	×	×
メチルイソブチルケトン		×	×	×	×	×	×	×	△	×	×	×
フルフラール(C ₆ H ₈ O ₂)		×	—	—	×	×	○	○	◎	×	×	×
メチルフラン(C ₆ H ₈ O)		×	—	—	×	×	—	—	○	×	×	×
メチルフルフラール(C ₆ H ₈ O ₂)		×	—	—	×	×	—	—	◎	×	×	×
ヒドロキシメチル(C ₆ H ₈ O ₃) フルフラール		×	—	—	×	×	—	—	○	×	×	×
酢酸メチル(C ₃ H ₆ O ₂)		×	—	—	×	×	—	—	◎	×	×	×
メチルピラジン(C ₅ H ₈ O ₂)		×	—	—	×	×	—	—	×	×	×	△

・ N₂ガス中で測定

* : 検知管で測定したもの

・ 分解ガスの表示基準=◎は0.1ml/g以上、○は0.01~0.1ml/g未満、

△は0.001~0.01ml/g未満、×は0.001ml/g未満

表3 金属材料の分解ガス（珪素鋼板+銅）

Table.3 Decomposition Gas of Metal Materials

分析対象分解ガス	加熱温度	180℃	200℃	220℃	250℃
	加熱時間	4h	4h	4h	4h
弗化スリフリル(SO ₂ F ₂)		×	×	×	×
弗化チオニル(SOF ₂)		×	×	×	☆
二酸化硫黄(SO ₂)*		☆	☆	☆	☆
弗化水素(HF)*		×	×	×	×
四弗化炭素(CF ₄)		×	×	×	×

*：検知管で測定したもの

SF₆ガス中（0.2MPa：絶対圧力）にて測定
分解ガスの表示基準＝×：0.001ml/g未満

☆：痕跡

<3・2> 低温長時間加熱試験

<3・2・1> 試験装置・方法

厚さ50μmの耐熱PETフィルム、および厚さ2mmのプレスボード約1～20gを乾燥器中で100℃、4時間で乾燥した。その後、それぞれ図2に示すステンレス製容器に各々個別に入れ、0.1torr以下の真空引き後、SF₆ガスを0.2MPa（絶対圧力）で充填して密閉し、乾燥器中で長時間の加熱を行った。加熱温度は130℃、150℃、180℃で、一定時間経過後絶縁材料から発生した分解ガスを分析した。各種絶縁材料の加熱条件を表4に示す。なお、加熱温度は耐熱PETフィルムの耐熱クラスBの許容最高温度130℃から設定した。また、高温短時間加熱試験との連続性から180℃まで設定した。

SF₆ガスの分解ガスと絶縁材料から発生する分解ガスについては、高温短時間加熱試験の結果から得られた成分の中から選定したガスについて、ガスクロマトグラフと検知管により分析した。表5に分析対象分解ガスを示す。

表4 各種絶縁材料の加熱条件

Table.4 Heat Condition of Insulation Materials

絶縁物	130℃			150℃			180℃		
	2週間	2ヶ月	6ヶ月	2週間	2ヶ月	6ヶ月	2日	1週間	1ヶ月
耐熱PETフィルム	○	○	○	○	○	○	—	○	○
プレスボード	○	○	○	○	○	○	○	○	—

すべてSF₆中（0.2MPa：絶対圧力）で加熱

○：測定実施

—：測定省略

表5 分析対象分解ガス

Table.5 Chemical Analyzed Gases

分析機器	分析対象分解ガス
ガスクロマトグラフ	CO、CO ₂ 、C1-4の炭化水素、アセトアルデヒド、メチルアルコール、メチルエチルケトン、メチルイソブチルケトン、アセトン、フルフラール
検知管	SO ₂ 、（アセトアルデヒド）

<3・2・2> 結果

表6に、低温長時間加熱試験でのガスクロマトグラフおよび検知管による分解ガスの分析結果を示す。また、図3a～cに各絶縁材料からの分解ガスのうち、代表的成分である、CO₂とアセトアルデヒドの発生ガス量の経時変化を加熱温度別に示す。

耐熱PETフィルムの分解ガスは、150℃以下で少量のCO₂、アセトアルデヒド、180℃では、さらに微量のメチルアルコールとメタン、COが検出された。プレスボードの分解ガスは、耐熱PETフィルムで発生する成分以外に、フルフラールとメチルエチルケトン、アセトン、アセチレンが検出された。分解ガスのうち共通に発生する分解ガス量を比較すると、CO₂発生量は各温度でプレスボードの方が耐熱PETフィルムより数十～百倍程度多い。

なお、本試験で130℃の条件でもSO₂が微量ながら検出された。絶縁物を容器中に入れず、SF₆のみで加熱したブランク試験でも検出されたため、SF₆ガスがステンレス容器と反応して分解したものと考えられる。

表6 絶縁材料の分解ガス

Table.6 Thermal Decomposition Substance of Insulating Materials

分析対象ガス	試料	耐熱PETフィルム			プレスボード		
	加熱温度	130℃	150℃	180℃	130℃	150℃	180℃
	加熱時間	6ヶ月	6ヶ月	3ヶ月	6ヶ月	6ヶ月	1ヶ月
一酸化炭素		×	×	◎	◎	◎	◎
二酸化炭素		○	○	◎	◎	◎	◎
メタン		×	×	△	×	×	△
アセチレン		×	×	△	×	×	×
エチレン		×	×	×	×	×	×
エタン		×	×	×	×	×	×
アセトアルデヒド*		△	△	△	×	○	◎
メチルアルコール		—	—	△	—	—	◎
アセトン		—	—	×	—	—	◎
メチルエチルケトン		—	—	×	—	—	◎
フルフラール		—	—	—	—	—	◎

*：検知管で測定したもの

分解ガスの表示基準＝◎は0.1ml/g以上

○は0.01～0.1ml/g未満

△は0.001～0.01ml/g未満

×は0.001ml/g未満

図 3 a 130℃における分解ガス発生量の比較

Fig.3a.Difference of amount of Decomposition Gas between insulating materials(130℃)

図 3 b 150℃における分解ガス発生量の比較

Fig.3b.Difference of amount of Decomposition Gas between insulating materials(150℃)

図 3 c 180℃における分解ガス発生量の比較

Fig.3c.Difference of amount of Decomposition Gas between insulating materials(180℃)

4. 部分放電試験

部分放電により発生する分解ガスの調査を、部分放電試験モデルにより実施した。試験は絶縁物を介して部分放電を発生させるモデルと、絶縁物を介さない、ガス単体で部分放電を発生させるモデルで行った。

<4・1> 試験モデル

(1) 絶縁物を介した部分放電試験モデル

図 4 に針-平板モデルを示す。モデルは針-平板電極構成で、電極間に絶縁物を挿入している。針電極（銅製：直径0.9mm）は高圧側に配置し、先端曲率を約0.15mmにしている。平板電極は接地電極でステンレス製である。試料となる絶縁物は、針電極と0.5mmのガスギャップを保ち平板上に密着させて取り付けた。試料に用いた絶縁物は、ガス絶縁変圧器の巻線主要絶縁材料であるプレスボード（厚さ4mm）、PETフィルム（厚さ0.05mm×10枚）である。

また、図 5 に示したPETフィルムで平角銅線（2.2mm×10mm）を絶縁被覆（被覆厚0.5mm）して変圧器の巻線構成を模擬した、ターン間モデルでも試験を実施した。

図 4 針-平板モデル

Fig.4. Needle-Plane Model

図 5 ターン間モデル

Fig.5.Turn-to-Turn Model

(2) 絶縁物を介さない部分放電試験モデル

絶縁物を介さずにSF₆ガス単体で部分放電を発生させるガスギャップモデルを図 5 に示す。モデルは針-平板電極（ステンレス製）構成とし、高圧側を針電極とし、接地側を平板電極とした。部分放電の発生頻度を高めるため、針電極を4本並列とし、4ヶ所のガスギャップで部分放電を発生させる。ギャップ長は10~15mmとした。

図6 ガスギャップモデル
Fig. 6 Gas-Gap Model

<4・2> 試験方法

モデルは、90℃×72時間熱風乾燥を実施後、図7に示す試験装置の試験用タンクにセットした。その後、10Pa以下の圧力で4時間真空引きし、SF₆ガスを封入後、1時間静置し、交流電圧（50Hz）を一定時間（1時間から約40時間）印加して針電極と平板電極間で部分放電（1000～10000 pC）を発生させた。その後、ガスクロマトグラフ及び検知管によって、発生する分解ガスを分析した。

部分放電は、結合コンデンサに接続した部分放電測定器による測定と、試料の接地線にスイッチングダイオードを接続し、部分放電電流を整流して直流電流として測定する方法の2種類の方法を用いて測定した。

放電エネルギーは、部分放電電流を積分して部分放電電荷量を求め、部分放電電荷量と印加電圧により算出した。試験は印加電圧、印加時間を変えて放電エネルギーを変化させて実施した。絶縁物を介したモデルについては、ガス絶縁変圧器の大容量器と中・小容量器とのSF₆封入ガス圧の相違の影響を調査するため、SF₆ガス圧力を0.15MPaと0.5MPa（いずれも絶対圧力）の2通りで試験を実施した。また、タンク容量の影響を調査するため、内容量19リットルと75リットルの2種類のタンクで試験を実施した。絶縁物を介さないガスギャップモデルにおいては、SF₆ガス中の水分による発生分解ガスの影響を調査するため、SF₆ガス中にマイクロシリンジにより水分を封入し、水分量を13～760vol ppmまで変化させた試験を実施した。なお、水分量の設定は、ガス絶縁開閉装置の管理指針を目安に設定した。

図7 試験装置
Fig. 7. Test Setup

<4・3> 結果

(1) 絶縁物を介した放電放電試験モデル

プレスボードを介した針-平板モデルによるSF₆ガス分解ガスは、比較的放電エネルギーの低い領域でSO₂のみが検出されたが、エネルギーがある程度（1000J）大きくなると、SO₂に加えてSOF₂が検出された。さらにトレースながらCF₄、CH₄等が検出された。これらSO₂、SOF₂、CF₄の発生は、ガス圧に関係せずに検出された。

PETフィルムを介した針-平板モデルでも、SO₂、SOF₂の発生はプレスボードと同様な特性を示していたが、CF₄の発生はみられなかった。また、PETフィルムで被覆したターン間モデルについても、他のモデルと同様、SO₂、SOF₂が検出された。

図8～9にガス圧を変化させた場合の、各モデルからのSO₂、SOF₂の発生量を示す。発生量は、多少バラツキのあるものの、放電エネルギーに対してほぼ同一曲線上で表せられ、SF₆ガス圧や、絶縁物の種類にあまり依存せず、放電エネルギーに比例する結果が得られた。

また、試験用タンクの容量を変化させSF₆ガス量の変化が及ぼす影響を検証した。各モデルでの結果をすべてプロットして図10に示す。これより、SF₆ガス量の変化に対する依存性は見られなかった。

(2) 絶縁物を介さない部分放電試験モデル

ガスギャップモデルによるSF₆ガス単体での放電でも絶縁物を介した放電と同様、放電エネルギーの低い領域でSO₂が検出され、放電エネルギーの大きい領域でSO₂に加えSOF₂が検出された。また、ガス圧を変化させても分解ガスの種類の差は見られなかった。図11にガス中水分を変化させたときのガスギャップモデルでのSO₂発生量を示す。図より、SO₂発生量は今回試験した領域でのガス中水分にはあまり影響されず、ほぼ同じ特性で表されることがわかる。

図8 SO₂発生量とエネルギーの関係（絶縁物放電）
Fig. 8. Relation Between amounts of decomposition SO₂ and Partial-discharge energy

図9 SOF₂発生量とエネルギーの関係（絶縁物放電）

Fig.9. Relation Between amounts of decomposition SOF₂ and Partial-discharge energy

図11 SO₂発生量とエネルギーの関係（ガス単体放電）

Fig.11. Relation Between amounts of decomposition SO₂ and Partial-discharge energy

図10 SO₂発生量とエネルギーの関係（絶縁物放電）

Fig.10. Relation Between amounts of decomposition SO₂ and Partial-discharge energy

5. 異常診断への考え方

<5.1> 異常により発生する分解ガス

3章、4章の結果を、異常診断の観点で見直し以下に示す。

今回の実験で各温度で絶縁材料の加熱により検出された分解ガスを表7にまとめた。このほかに特徴として、量的な面では温度上昇で発生量が多くなること、プレスボードからの発生量が多いことがある。

放電により発生する分解ガスの特徴としては、絶縁物を介した放電の場合、SF₆ガス単体のガスに加えCF₄が検出されることが挙げられる。放電により検出された分解ガスを表8にまとめる。SF₆ガス単体の放電ではSO₂、SOF₂が発生する。絶縁物が介在した場合には、まず絶縁物と電極間のSF₆ガスが放電して、その後絶縁物部分の放電が考えられる。

表7 絶縁材料からの主要発生分解ガス
Table7. Main Decomposition Gases from Insulating Materials

加熱温度	耐熱PETフィルム	プレスボード	エポキシ塗料
130℃-150℃	CO ₂	CO ₂ 、CO	—
150℃-180℃	CO ₂ 、アセトアルデヒド	CO ₂ 、CO	—
180℃-200℃	CO ₂ 、アセトアルデヒド メチルアルコール	CO ₂ 、CO、アセトアルデヒド メチルアルコール、フルフラール	—
200℃-250℃	CO ₂ 、アセトアルデヒド メチルアルコール	CO ₂ 、CO、アセトアルデヒド メチルアルコール、フルフラール	CO ₂ 、CO、アセトアルデヒド メチルアルコール
250℃-	CO ₂ 、アセトアルデヒド メチルアルコール	CO ₂ 、CO、アセトアルデヒド メチルアルコール、フルフラール 炭化水素、ケトン類、 フラン化合物、酢酸メチル	CO ₂ 、CO、アセトアルデヒド メチルアルコール、 メチルピラジン

表 8 部分放電による主要発生分解ガス

Table 8. Decomposition Gases at PD test

部分放電エネルギー		小	大
ガスギャップモデル		SO ₂	SO ₂ SOF ₂
針-平板電極 + 絶縁物	プレスボード	SO ₂	SO ₂ SOF ₂ CF ₄ CH ₄
	PETフィルム	SO ₂ SOF ₂	SO ₂ SOF ₂
ターン間モデル		SO ₂ SOF ₂	SO ₂ SOF ₂ CF ₄

従って、エネルギーの低い領域では、主として SF₆ ガス単体で、SO₂、SOF₂ が発生し、エネルギーが大きい領域で絶縁物表面が破壊を始めると、炭素が発生し、SF₆ ガス単体で発生する分解ガスに加え CF₄ が発生するものと考えられる。

これらのことから、異常診断への考え方を、次のように示す。

<5・2> 異常診断法構築の考え方

<5・2・1> 正常運転

正常運転においても、過負荷運転などによる過熱によりガス発生があるので、変圧器内の温度分布から正常運転時の分解ガス発生量を予測しておくか、実運転での分解ガス発生量をデータベースとして作成しておく。今回の検討で実運転温度に近い領域までのデータが得られたので、平常運転時に発生する分解ガス量を推定することができる。

<5・2・2> 異常運転

<5・2・1>での発生量より多量の分解ガスが発生すれば異常と判断される。さらに、前述の通り絶縁材料および温度による分解ガス発生の特徴と変圧器内部の設計情報から、異常部位、温度などを推定できる。

部分放電の異常があったとき、有機物が関与しない場合には SF₆ の分解ガスである SO₂、SOF₂ が異常の指標ガスとなり、さらに部分放電に有機物が関われば CF₄ が加わる。

6. むすび

ガス絶縁変圧器の絶縁に主に使用される絶縁材料、金属材料を SF₆ ガス中などで加熱し、また部分放電試験により、発生分解ガスを調べた。得られた結果の概要は次の通りである。

(1) 絶縁材料の過熱異常により CO₂、CO、アセトアルデヒド、メチルアルコールなどの分解ガスが発生し、主成分は CO₂ と CO である。

(2) プレスボードからの分解ガス発生量は耐熱 PET フィルムからの発生量よりも多く、250℃、300℃という高温では、プレスボードから特徴的な多くの分解ガスが発生する。

(3) 加熱温度、材料の違いなどで分解ガス発生の様子に特徴があり、異常診断の資料として役立てられる。

(4) 部分放電により発生する SF₆ ガスの分解ガスは放電エネルギーの小さい領域では SO₂ が主に検出され、エネルギーが大きくなると、さらに SOF₂ が検出される。

(5) 絶縁物を介した放電では、SF₆ ガス単体放電で発生する分解ガスに加えて CF₄ が痕跡程度検出され、その発生量は、SO₂ ≧ SOF₂ > CF₄ である。

(6) エネルギーに対する分解ガスの発生量は、ガス圧力、絶縁物の種類にあまり依存せず、エネルギーにのみ依存する。

今回の試験で、ガス絶縁変圧器内部に用いられる各部材から、過熱異常や部分放電異常により発生する分解ガスの種類や発生量について把握することができた。今後は得られたデータをもとに異常診断法を検討していきたい。

(平成9年8月20日受付)

文 献

- (1) 高橋、田中、他：「大容量ガス絶縁変圧器の開発」、電学論 B、115 巻 4 号、平成 7 年
- (2) 電気学会技術報告：「不燃性・難燃性変圧器の現状とその動向」、第 459 号、平成 5 年 4 月
- (3) 戸田、池田、石岡、毛受：「ガス絶縁変圧器の絶縁材料の熱劣化特性」、電学論 B、115 巻 4 号、平成 7 年
- (4) 向山、工藤、他：「ガス絶縁変圧器の各種内部異常による主要な分解生成物」、電学誌 B、111 巻、第 12 号、平成 3 年
- (5) 岡部、大野、他：「ガス絶縁変圧器要素モデルによる分解生成物の検討」、平 8 電気学会全大、No. 591
- (6) 張替、後藤、太田、月岡：「フルフルールによる油入変圧器の経年劣化診断の研究」、電学論 A、112、pp589、平成 2 年 6 月
- (7) 井関、小原：「フッ素系絶縁ガスの安定性」電気学会誌 7 P1134(1968)
- (8) F.Y.Chu: "SF₆ Decomposition in Gas Insulated Equipment", IEEE Trans. on EI., Vol. EI-21, No. 5, pp693(1986)

岡部 成光 (正員) 1958年9月18日生。1981年3月東京大学工学部電気工業科卒業。1986年3月同大学大学院博士課程修了。同年4月東京電力(株)入社。主として、変電機器の診断技術および絶縁協調の研究に従事。現在、電力技術研究所絶縁・機器研究室。工学博士。1993年電気学会論文賞受賞。

大野 高宏 (正員) 1964年10月9日生。1988年3月北海道大学工学部電気工学科卒業。1990年3月同大学院修士課程修了。同年4月東京電力(株)入社。主として、変電機器診断技術の研究に従事。現在、電力技術研究所絶縁・機器研究室。

石岡 康昭 (正員) 1945年3月9日生。1963年3月秋田県立能代工業高校化学科卒業。同年4月(株)東芝入社。現在、重電技術研究所に勤務。主として、変電機器用絶縁材料の研究開発に従事。

井上 保 (正員) 1949年7月3日生。1968年宮崎工業高校電気科卒業。同年4月(株)東芝入社。以来重電技術研究所において主として油入変圧器及びガス絶縁変圧器絶縁の研究に従事。

小林 恒夫 (正員) 1959年8月6日生。1985年3月生。慶應義塾大学大学院電気工学専攻修士課程修了。同年4月(株)東芝入社。主としてガス絶縁変圧器・ガス絶縁分路リアクトルの開発に従事。

川口 賢二 (正員) 1970年3月28日生。1992年神奈川大学電気工学科卒業。同年4月(株)東芝入社。主として電力用変圧器、ガス絶縁変圧器の開発に従事。

才田 敏之 (正員) 1967年1月12日生。1991年3月名古屋大学大学院電気工学専攻修士課程修了。同年4月(株)東芝入社。同社電力変電技術部において、主として変電プラントのシステムエンジニアリングに従事。

池田 正己 (正員) 1943年9月14日生。1962年3月神奈川県立神奈川工業高校電気科卒業。同年(株)東芝入社。同社重電技術研究所において油入絶縁及び高電圧技術開発を担当。82年浜川崎工場変圧器部に転籍、電力用変圧器の開発設計などの業務に従事。電気学会論文賞、進歩賞、工学博士(慶応大学)。