A Study of Condition Assessment Method of Gas-insulated Switchgear (Part II)

—Influence of Moisture in the SF₆, Detection of a Partial Discharge on a Spacer,
Repetition Discharge and Overheating by Incomplete Contact—

Hiroyuki Shinkai Member (CRIEPI, shinkai@criepi.denken.or.jp)

Hisashi Goshima Member (CRIEPI, goshima@criepi.denken.or.jp)

Masafumi Yashima Member (CRIEPI, yashima@criepi.denken.or.jp)

Keywords: gas insulated switchgear, condition based maintenance, gas analysis, diagnosis method, life extension

Rationalization of the maintenance of gas-insulated equipment under operation and lifetime extension based on the results of appropriate diagnosis are necessary to reduce in the cost of gas-insulated equipment. Therefore, condition-based maintenance (CBM) is required and accurate methods for observing the inside of equipment is important. In this report, we describe a diagnosis method that can be used for actual gas-insulated equipment, such as to assess the deterioration of the spacer made by epoxy resin and to detect a loose connection in the central conductor. The principal results are summarized as follows:

(1) The quantity of decomposition gases depend on the moisture and magnitude of the partial discharge. However, decomposition gases were detected even if SF₆ has low moisture content (less than 100 ppm) similar to that used in actual equipment. This means that our method can be applied to actual equipment (Fig.1).

(2) It became clear that CF₄ is a typical gas generated by partial discharge on the spacer surface. Therefore, it is possible to diagnose the deterioration of the spacer by monitoring the CF₄ (Fig.2).

(3) The decomposition gases (SF₄, SO₂, SO₄, SO₂F₂) were generated by an impulse breakdown, which was assumed to be due to the spark discharge caused by insulation failure and loose connection.

(4) SF₆ gas which is assumed the loose connection and was heated up from room temperature to 800 degrees C, and the generated decomposition gases were analyzed by FTIR in real time. As a result, the decomposition gases were generated at temperatures above approximately 500 degrees C in the heating time of 1.5 minutes. Therefore, a loose connection can be detected by analyzing the decomposition gas (Fig.3).

Fig. 1. Relationship of PD electric charge, moisture of SF₆ and decomposition gases (SO₂F)

(a) Model spacer (after experiment)

(b) gas chromatograph

Fig. 2. Gas chromatograph of partial discharge decomposition gas of spacer surface

Fig. 3. Relationship between decomposition gas and heating temperature

ガス絶縁開閉装置の状態診断手法の検討（その2）

——SF₆ 中水分量の影響，スパーサ上の部分放電および接触不良に伴う
繰返し放電と異常加熱の検出に関する検討——

正 員 新開 裕行* 正 員 五島 久司*
正 員 八島 政史*

A Study of Condition Assessment Method of Gas-insulated Switchgear (Part II)

——Influence of Moisture in the SF₆, Detection of a Partial Discharge on a Spacer,
Repetition Discharge and Overheating by Incomplete Contact——

Hiroyuki Shinkai*, Member, Hisashi Goshima*, Member, Masafumi Yashima*, Member

Rationalization of the maintenance of gas-insulated equipment under operation and lifetime extension based on the results of appropriate diagnosis are necessary to reduce in the cost of gas-insulated equipment. Therefore, condition-based maintenance (CBM) is required and accurate methods for observing the inside of equipment is important. In this report, we describe a diagnosis method that can be used for actual gas-insulated equipment, such as to assess the deterioration of the spacer made by epoxy resin and to detect a loose connection in the central conductor. The principal results are summarized as follows:

(1) The quantity of decomposition gases depend on the moisture and magnitude of the partial discharge. However, decomposition gases were detected even if SF₆ has low moisture content (less than 100 ppm) similar to that used in actual equipment. This means that our method can be applied to actual equipment.

(2) It became clear that CF₄ is a typical gas generated by partial discharge on the spacer surface. Therefore, it is possible to diagnose the deterioration of the spacer by monitoring the CF₄.

(3) The decomposition gases (SF₄, SO₂, SO₄, SO₂F₂) were generated by an impulse breakdown, which was assumed to be due to the repetition discharge caused by insulation failure and loose connection.

(4) SF₆ gas which is assumed the loose connection and was heated up from room temperature to 800 degrees C, and the generated decomposition gases were analyzed by FTIR in real time. As a result, the decomposition gases were generated at temperatures above approximately 500 degrees C in the heating time of 1.5 minutes. Therefore, a loose connection can be detected by analyzing the decomposition gas.

キーワード：ガス絶縁開閉装置，状態依存型メンテナンス，ガス分析，診断法，寿命延伸

Keywords: gas insulated switchgear, condition based maintenance, gas analysis, diagnosis method, life extension

1. はじめに

ガス絶縁電力機器（GIS, GIL）は1980年代に急速に導入が進み、近年、30年を越えて運用されているものもある。電力輸送設備の維持・管理に対するコスト削減の要請から、高経年機器は今後増加していくと考えられる。このような情勢においてコスト削減と機器の信頼性維持を両立させるた

めに状態管理保全（CBM：Condition Based Maintenance）が求められている。CBMの確立のためには機器の状態を的確に診断できる手法が必要となる^{(1)~(3)}。密閉形機器であるガス絶縁電力機器は、外部より機器内部の状態診断が困難なため、異常検出のための各種センサが提案されており⁽⁴⁾⁽⁵⁾、特に、初期欠陥などの検出において有効とされている。一方で、GISの長期運用時の状態診断は、特有の困難さを含んでいる。すなわち、事故・障害率が極めて低い高信頼性機器であり、診断実施時に必ずしも異常が発生しているとは限らない（診断タイミングの問題）など、長期運用時の健全性評価が困難である。そこで我々は、ガス絶縁機器の長期

*（財）電力中央研究所
〒240-0196 横須賀市長坂 2-6-1
Central Research Institute of Electric Power Industry
2-6-1, Nagasaka, Yokosuka 240-0196

Fig. 1. Basic concept of external absorbent unit method.

運用時の状態診断を対象とした診断法を提案している⁽⁶⁾⁽⁷⁾。本手法は、部分放電に伴う分解ガスに着目したものである。本来、機器内部に設置されている吸着剤（水分・分解ガス除去用）をユニット化して外部に設置することで、 SF_6 ガスの清浄性を維持しつつ、吸着剤に蓄積された分解ガスの有無から機器の状態診断を行う（Fig. 1）。分解ガスの有無を判定基準とするために、診断時に部分放電が発生している必要が無く、診断のタイミングに依存しない。すなわち、機器の運転開始（または前回の診断実施時）から今回の診断までのすべての期間が診断できる。また、部分放電に伴って発生する分解ガスは徐々に蓄積し高濃度化するために、その有無を判定することは容易になる。言い換えれば、時間的な蓄積を利用することで、部分放電検出感度の高感度化を可能にする。これまでに本手法について、分解ガスの時間蓄積効果や診断に適するガス種の選定、外部吸着剤ユニットによる SF_6 ガスの清浄性の検証、吸着剤からの分解ガスの分離法などを報告している⁽⁶⁾⁽⁷⁾。

本報告では、上記提案手法の有用性を高めるために、実際の機器を想定した異常状態の検出について検討を行った。各検証項目とその目的は以下の通りである。

（１） SF_6 の含有水分量と分解ガスの関係の解明 前報⁽⁶⁾⁽⁷⁾では、部分放電に伴って SF_4 , SO_2F_2 , SO_2F_2 , HF などが発生し、特に SO_2F_2 は安定なガスであり、提案手法におけるモニターガスとして期待できることを報告した。これらの分解ガスは、純粋な SF_6 には含まれない酸素（O）や水素（H）が結合したものであり、これらは実験系中の水分（器壁に吸着しているものや、最初から SF_6 ガスに含まれるものなど）から供給されると考えられる。本手法においては外部ユニットに吸着剤を設置しており、 SF_6 ガスの含有水分量は極めて低い状態に管理されている。例えば、実際の GIS の場合（タンク内部に吸着剤が設置されている場合）、 SF_6 ガスの水分量は 100 ppm 程度との報告がある⁽⁸⁾。従って、本手法においては、 SF_6 中水分量と分解ガスの関係を明らかにしておく必要がある。

（２）スパーサ上の部分放電の診断 SF_6 ガスは自復性があるために、部分放電が発生してもガスそのものの絶

Fig. 2. Generation flow of decomposition gases⁽⁸⁾.

縁性能の低下はほとんど無い。しかし、固体絶縁物であるスパーサは自復性がなく、スパーサ沿面で部分放電が継続的に発生すると、劣化が蓄積すると考えられる。したがって、機器の長期使用により絶縁性能が低下する可能性があり、スパーサ上の部分放電の診断は GIS の状態診断において重要である。

（３）接触不良・絶縁不良による繰り返し放電の診断

（４）接触不良による異常過熱の診断 GIS における障害において、「動作不良」、「ガス漏れ」に次いで多いのが「絶縁不良」と並んで「接触不良」である⁽⁹⁾。これらは、母線の連結部や開閉器などにおいて、繰り返し放電や異常過熱を引き起こし、最終的に事故に至る。従って、繰り返し放電や異常過熱の有無を診断できれば、これらに起因する事故を未然に防ぐことができる。

2. SF_6 分解ガスの生成メカニズム⁽⁸⁾⁽¹⁰⁾

加熱や再結合により、 SF_6 ガスはイオウ原子とフッ素原子に解離し、多くの基やイオン、中性分子を形成する。

エネルギー（ ΔE ）の入力がなくなれば、イオウ原子やフッ素原子は再結合によりほとんど SF_6 に戻るが、一部は酸素や水分などと結合して分解ガスとなる。（１）式において主に発生するガスは SF_4 である。これらの分解ガスの発生メカニズムを Fig. 2 に示す⁽⁸⁾。破線は SF_6 ガスが分解されている期間中でのみ生じる反応である。特に再結合時、機器内に酸素原子などが存在すると、酸素を含んだフッ化物である SOF_4 , SOF_2 , SO_2F_2 などが発生する。

3. 実験方法

〈3・1〉 SF_6 の含有水分量と分解ガスの関係の解明

Fig. 3 にガス配管図を示す。ガス管路は、ガス循環システムを有する閉ループ構成とし、ループ内に外部吸着剤ユニット、ガス循環用ドライポンプ、分析用ガス採取ポンプ、および FTIR（フーリエ変換赤外分光光度計）と水分計測装置を設けた⁽⁶⁾⁽⁷⁾。実験タンクはステンレス製で内径 150 mm、高さ 220 mm で、内部に電極などを設置した状態でのガス容積は 3.5 リットルである。ただし、Fig. 3 に示すとおり実

Fig. 3. Piping diagram.

Fig. 4. Electrode arrangement of PD generation test in dry SF_6 .

験タンクは各種計測装置や循環ポンプと連携しており、これら全てを含めた全ガス容積は6リットルである。 SF_6 ガス圧力は0.1MPa(abs.)とした。電極配置をFig. 4に示す。高電圧側電極は平板電極とし(平坦部直径:130mm)、接地側は直径0.5mm、長さ25mmの針電極とした。ギャップ長は10mmである。この針電極は高周波シャント抵抗へ接続されており、部分放電電流はシャント抵抗を介して電圧としてオシロスコープ(Tektronix社製DPO7254, アナログ帯域2.5GHz, 40GS/s, サンプリグ400ps/pt, レコード長 50×10^6 ワード)により計測される。印加電圧は商用周波数(50Hz)の交流電圧とし、印加時間は4時間とした。あらかじめ実験タンクは十分な真空引きを実施し、実験タンクや配管内の水分を除去している。しかし、配管や容器の内壁などは水分が付着しており、時間の経過とともに SF_6 ガス中へ放出されるため、この実験において SF_6 中の水分量を厳密に一定に保つことは困難である。したがって、今回述べる「水分量」とは4時間の電圧印加終了直後の値とした。水分量パラメータは、100ppm以下、150~300ppm, 3900ppmの3つの範囲に分類した。

生成した分解ガスは、ガス循環管路中に設置されている

Fig. 5. Electrode arrangement of PD generation on spacer and repetition discharge test.

FTIRにより分析した。

〈3・2〉 スペース上の部分放電の診断 実験タンクおよびガス配管系は前節のFig. 4と同じものを使用した。スペースを含む電極配置をFig. 5(a)に示す。電極間距離40mmの平板電極間にエポキシ樹脂製のスペース($\phi 40$ mm)を設置した。スペースの表面で部分放電を発生させるため、金属異物を模擬したステンレス製の針($\phi 0.5$ mm)を接地側電極に10本設置した。このとき、針先端から対向する高電圧側電極までのギャップ長は10mmである。下部の接地側電極は絶縁スペースでタンクから絶縁されており、前節と同様の手法によりオシロスコープで計測する。印加電圧は商用周波数(50Hz)の交流電圧とし、連続100時間印加した。生成した分解ガスはガス採取ボンベに採取し、(株)東レリサーチセンターにおいてガスクロマトグラフを用いて分析した⁽¹¹⁾。同様にスペースを用いない SF_6 気中の部分放電に伴う分解ガスを分析し、両者を比較することで、スペース部の部分放電に伴う特有の分解ガスの同定を行った。

〈3・3〉 絶縁不良・接触不良に伴う繰り返し放電に関する診断 本実験においても、実験タンクは前節のスペースの部分放電の場合と同じ実験タンクを使用した。Fig. 5(b)に電極配置を示す。電極系は、針($\phi 2$ mm)-平板電極とし、いずれもステンレス製である。ギャップ長は10mmおよび20mmとした。印加電圧は標準雷インパルス($1.2/48\mu\text{s}$)とし、通電電流はCT(PEARSON MODEL110A)を用いて計測した。通電電流は、パラメータを波高値および波尾長とし、それぞれ3種類設定した(Table 1参照)。放電回数は900回とし、30回印加するたびにFTIRによる分解ガスの分析を行った。

〈3・4〉 接触不良に伴う異常過熱に関する診断 この実験では、 SF_6 の熱分解特性を調べるために、FTIRと連結している加熱炉に SF_6 を連続的に注入し、過熱された排気ガスをFTIRでリアルタイム分析した。本実験は(株)東レリサーチセンターにおいて実施した。加熱炉への SF_6 ガスの流量は約50ml/minとし、加熱炉の温度上昇率は $2^\circ\text{C}/\text{min}$ とした。加熱炉の容積は約75 cm^3 であることから、加熱時間は1.5min程度となる。加熱炉から排出されたガスは、室温下にあるFTIRによって1minおきに計測される。FTIR

Table 1. Impulse parameters for repetition discharge.

Gap separation [mm]	Max value of current [kA]	Wave tail length [μ s]	Amount of implantation electric charge (at 900 shots) [C]
10	0.5	12	8.0
	1.0	12	15.0
	1.1	20	25.7
	1.1	28	36.9
20	0.5	12	7.9
	0.8	12	11.2
	1.0	12	15.2
	0.5	20	12.5
	1.1	20	25.2
	1.0	28	36.9

のガスセルの容量は約 360 cm^3 であり、ガスセル内の気体が置換されるには $7\sim 8\text{ min}$ を要するため、分解ガスの温度特性は最大で $14\sim 16^\circ\text{C}$ 程度遅れることとなる。

4. 実験結果

〈4・1〉 SF_6 の含有水分量と分解ガスの関係の解明

Fig. 6 に典型的な部分放電波形を示す。同図には、印加電圧波形 (AC50 Hz) もあわせて示す。今回の実験では、接地側が針電極 (金属異物) となっており、主に負極性において部分放電が連続的に発生していることがわかる。今回の実験では、部分放電の発生レベルを 3 レベル設定した。Table 2 に商用周波数 1 サイクル (20 ms) あたりのパルス数、1 パルスあたりの最大電荷量 (Qmax)、平均電荷量 (Qave)、商用周波数 1 サイクルあたりの総電荷量 (Qtotal-1)、および電圧印加期間 (4 時間) の総電荷量 (Qtotal-2) をまとめる。同表には 4 時間後の SO_2F_2 濃度もあわせて示す。

Fig. 7 に実験結果を示す。(a)~(d) 図は、それぞれ SF_4 、 SOF_4 、 SOF_2 、 SO_2F_2 に対する結果である。(a)~(c) 図の縦軸は FTIR の吸光度であり、対象ガスの濃度に依存する値である。(d) 図の SO_2F_2 は装置の濃度校正ができていたため縦軸は濃度 [ppm] とした。いずれの図においても、横軸は発生させた部分放電量であり、商用周波数 1 サイクル (20 ms) において発生した総電荷量 [pC/cycle] で整理している。また、図中のシンボルの違いはガス中の含有水分量の違いを表す。いずれの分解ガスも、その生成量は基本的には部分放電量に依存しており、部分放電量の多いものほどその濃度は高いことが分かる。 SF_6 中の含有水分量に着目した場合、(a) 図の SF_4 については顕著な特性の変化は見られない。 SF_4 は、部分放電のエネルギーによる解離と再結合によって生成されるガスであり水素や酸素を必要としないため、基本的に水分とは無関係である。(b)、(c) 図の SOF_4 、 SOF_2 は、 SF_4 が酸素と結合することで生成されるが、(b) 図の SOF_4 は水分量による依存性が見られない。これに対し、(c) 図の SOF_2 は水分量 100 ppm から 300 ppm 程度では顕著な違いは認められないが、水分量の最も多い 3900 ppm では明らかに高い濃度を示している。この原因については不明であるが、 SOF_4 は SF_6 が分解されている期間中でのみ生成される高速反応であるのに対し、 SOF_2 は比較的低速反応 (数分程度) であるなど、その生成過程が異

Fig. 6. Waveform of applied voltage and partial discharge current (needle-plane electrode).

Table 2. Parameters of partial discharge (needle-plane electrode).

Moisture content of SF_6 [ppm]	Magnitude of partial discharge	Number of partial discharge [/cycle]	Electric charge				SO_2F_2 [ppm Vol]
			Maximum Qmax [pC/pulse]	Average Qave [pC/pulse]	Total-1 Qtotal-1 [pC/cycle]	Total-2 Qtotal-2 [C] (at 4hr)	
Low (<100ppm)	Level 1	1,442	66	5.5	7,873	5.7E-03	1.2
	Level 2	2,514	80	5.7	14,297	1.0E-02	2.0
	Level 3	2,814	169	9.5	26,819	1.9E-02	5.5
Mid (150~300ppm)	Level 2	2,030	70	7.5	15,206	1.1E-02	5.1
	Level 3	2,275	85	10.7	24,459	1.8E-02	10.7
Wet (3900ppm)	Level 2	4,711	42	3.1	14,613	1.1E-02	18.9

なる (Fig. 2 参照)⁽⁸⁾。(d) 図より SO_2F_2 については、明らかに水分量に依存していることが分かる。 SO_2F_2 は、 SOF_4 や SOF_2 から生成されるが、その生成は部分放電停止後も持続することが確認されている⁽⁶⁾⁽⁷⁾。これは部分放電のエネルギーを直接必要としない反応過程を示唆しており、雰囲気的水分量の影響が大きい可能性がある。いずれの分解ガスも、実機程度の水分量 (100 ppm 程度) でも発生しており、分解ガスの蓄積を利用することで部分放電診断が可能であると考えられる。

〈4・2〉 スペーサ上の部分放電の診断 Fig. 8 に典型的な部分放電電流波形を示し、Table 3 に商用周波数 1 サイクル (20 ms) あたりのパルス数、1 パルスあたりの最大電荷量 (Qmax)、平均電荷量 (Qave)、商用周波数 1 サイクルあたりの総電荷量 (Qtotal-1)、および電圧印加期間 (4 時間) の総電荷量 (Qtotal-2) をまとめる。同図には、印加電圧波形 (AC50 Hz) もあわせて示す。スペーサ部における部分放電は、前節で示した SF_6 ガス中の針-平板電極における部分放電波形 (Fig. 6) とは大きく異なり、電圧の立上りにおいて正極性、電圧の立下りにおいて負極性の部分放電が発生していることが分かる。また、いずれも間欠的で 1 パルスあたりの平均電荷量が多い点も特徴的である (SF_6 中針-平板電極の場合の 2~4 倍程度大きい)。これは針電極がスペーサの表面に設置してあるために、針先においてスペーサの充電と放電が繰り返されているためと考えられる。

実験後の模擬スペーサの写真を図 9、ガスクロマトグラ

(a) SF₄

(b) SOF₄

(c) SOF₂

(d) SO₂F₂

Fig. 7. Relationship of PD electric charge, moisture of SF₆ and decomposition gases.

の結果を Fig. 10 に示す。本実験における SF₆ 中水分量は約 1000 ppm であった（実験終了時の値）。Fig. 9 よりスペーサの金属異物を模擬した針先付近が黒色に変色していることがわかる。針先で発生した部分放電によりエポキシが劣化しているものと考えられる。Fig. 10 のガスクロマトグラフより、炭化物である CF₄ の発生が確認できた。CF₄ ガスはスペーサを用いない気中の部分放電による分解ガスからは検出されておらず、また今回の実験において有機物はエポキシのみであることから、スペーサ部における部分放電特有の分解ガスであると思われる。一般に CF₄ は非常に安定（常温の大気中寿命は 50,000 年）であり、これに

Fig. 8. Waveform of applied voltage and partial discharge current (needle-plane electrode).

Table 3. Parameters of partial discharge (needle-plane electrode).

Number of partial discharge [/cycle]	Electric charge				SO ₂ F ₂ [ppm Vol.]
	Maximum Qmax [pC/pulse]	Average Qave [pC/pulse]	Total-1 Qtotal-1 [pC/cycle]	Total-2 Qtotal-2 [C] (at 100hr)	
58	152	27.1	1,529	2.8E-02	1,789

Fig. 9. Model spacer (after experiment).

Fig. 10. Gas chromatograph of partial discharge decomposition gas of spacer surface.

着目することでスペーサ表面における部分放電の検出ができる可能性がある。また、部分放電のモニターガスとして有用である SO₂F₂ も同時に発生することが確認されており（Table 3 参照）、分解ガスの蓄積を利用した診断は可能であるといえる。

Fig. 11. Relationship between number of repetition discharge and concentration of decomposition gas.

〈4・3〉 絶縁不良・接触不良に伴う繰り返し放電に関する診断 実験結果の一例として、電圧印加回数（スパークオーバ回数）と分解ガスの関係を Fig. 11 に示す（ギャップ長 20 mm、波高値 0.5 kA、波尾長 20 μ s）。SF₆ 中の繰り返し放電に伴って各分解ガスが生成されていることがわかる。すなわち、浮き電極の形成により発生する繰り返し放電の場合、高濃度に分解ガスが蓄積することが期待できる。Fig. 12 に 900 回の放電後の分解ガス分析結果を示す。〈4・1〉節で述べたとおり SF₆ 中水分量により分解ガスの生成量が異なるが、本実験における SF₆ 中水分量はいずれも 150～250 ppm（実験終了時）であったことから、水分条件はほぼ等しく、各条件において生成された分解ガス量については直接比較することができると考えられる。Fig. 12(a) はギャップ長、波尾長を一定とし、電流の波高値を変えた場合である。横軸は 900 ショットにおける通電電荷量の総和である（波高値が変化することで、通電電荷量の総和も変化する）。いずれの分解ガスも、電流波高値が高くなるほど濃度が高くなるが、波高値が高くなるほどには上昇しないことが分かる。Fig. 12(b) はギャップ長、電流の波高値を一定とし、波尾長を変えた場合である。横軸は 900 ショットにおける通電電荷量の総和である（波尾長が変化することで、通電電荷量の総和も変化する）。いずれの分解ガスも、波尾長が長くなるほど濃度が高くなるが、波尾長が長くなるほどには上昇しないことが分かる。Fig. 12(c) は電流の波尾長、波高値を一定とし、ギャップ長を変えた場合である。通電電流の波高値・波尾長が同じでも、ギャップ長が広くなるほど分解ガスの濃度が高くなることが分かる。これは、ギャップ長が長くなることで放電とガスとの反応領域が増えることが一因と考えられる。

〈4・4〉 接触不良に伴う異常過熱に関する診断 Fig. 13 に SF₆ ガスの熱分解特性を示す。SF₆ ガスはボンベから直接加熱炉に注入されているため、SF₆ の水分量は 10 ppm 以下であると考えられる。いずれも横軸は加熱温度、縦軸が FTIR の吸光度である。同図より SF₄、SOF₂、SOF₄、SO₂F₂ は、520～550℃ 付近から発生していることがわかる。〈3・4〉節で述べたとおり、本実験系では FTIR のガスセル容量と SF₆ 流量の関係から、分解ガスの温度特性に遅れが生じる（最大 14～16℃ 程度）。したがって、この温度特性の遅れを考慮すると、分解ガスの発生温度は 500℃ 付近と考えられ、特

(a) Parameter is crest value of current (Gap separation and wave tail length is constant)

(b) Parameter is wave tail length (Gap separation and crest value of current is constant)

(c) Parameter is gap separation (Wave tail length and crest value of current is constant)

Fig. 12. Concentration of decomposition gas after repetition discharge.

Fig. 13. Relationship between decomposition gas and heating temperature.

に HF や SOF₄ については比較的低温度から高強度に検出されている。SOF₄ は時間の経過とともに SO₂F₂ に変化する（すなわち SOF₄ は比較的生命が短い）ため、間欠的に発生する部分放電を想定する場合には、時間的な蓄積による SOF₄ の高濃度化は期待できない可能性がある。しかし、異常過熱が持続的な現象である場合、SOF₄ の継続的な発生が期待できるため、SOF₄ と安定な SO₂F₂ の比率などに着目することで異常過熱の判定ができる可能性がある。また、

SO₂F₂ の発生温度は 700°C を越える付近であり、前述のガスに比べると非常に高いことが分かる。3 章 (Fig. 2) で述べたとおり、SO₂F₂ は、SF₄ や SOF₂, SOF₄ に酸素 (O) や水分 (H₂O) が結合して生成されるガスであり、部分放電停止後も長時間にわたって生成される⁽⁶⁾⁽⁷⁾。すなわち、SF₄ や SOF₂, SOF₄ から SO₂F₂ が生成されるのに放電等の外部エネルギーを必要とせず、また、生成されるまでに比較的時間を要するガスである。今回の実験では、〈3・4〉節で述べたとおり、FTIR ガスセル中におけるガスの滞在時間がせいぜい 7, 8 分程度であることから、SF₄, SO₂, SO₄ から SO₂F₂ が生成されるには十分な反応時間が足りないものと考えられる。したがって、SF₄, SO₂, SO₄ が発生している 500°C 付近でも反応時間が十分であれば、SO₂F₂ は生成されるものと考えられる。

このほか比較的水分量の多い SF₆ を長時間加熱した検討としては、広岡⁽¹⁴⁾ による 400~10,000 ppm の水分を含む SF₆ を 96 時間過熱したのものがある。これによると、250°C において SO₂ が生成されており、生成量は水分、接触金属の影響を受けることが報告されている。

以上より、実際の診断を考えるとき、少なくとも 500°C 程度の異常過熱が発生した場合には分解ガスが発生し、モニターガスに適する SO₂F₂ の発生も期待できるため、異常状態の検出は可能であると考えられる。さらに SOF₄ に着目することで異常過熱の判定ができる可能性がある。

5. ま と め

当所で提案している分解ガスを用いたガス絶縁電力機器の診断法について、実機において想定される各種の異常状態に対する適用可能性を検討した。

(1) 含有水分量が 100 ppm 以下から 3900 ppm までの SF₆ ガス中において部分放電を発生させ、分解ガスの生成特性を調べた。この結果、低水分量 (100 ppm 以下) の SF₆ ガスにおいても、部分放電に伴う分解ガスが発生することが判明した。特に、部分放電の検出に有効である SO₂F₂ については、ガス中水分量に依存し、水分量が多いほど増加することが判明した。

(2) エポキシ製のスパーサ表面に金属異物を模擬した針電極を設置し、部分放電を発生させた。この結果、スパーサ表面における部分放電によって、CF₄ が発生することが判明した。CF₄ はスパーサの無い SF₆ 中の部分放電では生成されていないことから、スパーサに関係する特有の分解ガスであると言える。したがって、CF₄ の有無によりスパーサの診断が可能であると考えられる。

(3) 絶縁不良・接触不良による繰り返し放電を模擬したインパルス放電試験を実施し、分解ガスの特性を取得した。この結果、SF₄, SO₂, SO₄, SO₂F₂ などの分解ガスの発生を確認した。これらの分解ガスは、インパルス放電回数に依存しており、浮き電極形成時のような繰り返し放電の場合、分解ガスが高濃度に蓄積することが期待できる。

(4) 接触不良による異常過熱を模擬し、SF₆ を室温か

ら 800°C まで加熱しながら FTIR によるリアルタイム分析を実施した。この結果、少なくとも 500°C 付近から分解ガスが発生することが確認された。このことから、接触不良に伴う異常過熱を検出できると考えられる。さらに、SOF₄ など経時変化しやすいガスに着目することで異常過熱の判定ができる可能性が見出された。

(平成 20 年 2 月 22 日受付, 平成 20 年 6 月 9 日再受付)

文 献

- (1) 電気協同研究会 変電設備点検合理化専門委員会:「変電設備の点検合理化」, 電気協同研究, Vol.56, No.2 (2000)
- (2) 電気協同研究会 21 世紀変電技術専門委員会:「21 世紀の変電技術—サブステーションからマルチステーションへ」, 電気協同研究, Vol.58, No.2 (2002)
- (3) 電気協同研究会 (社) 電気共同研究会主催研究討論会:「電力設備の保守・運用における IT の活用と将来動向」, 電気協同研究, Vol.58, No.5 (2003)
- (4) 電気協同研究会 ガス絶縁開閉装置仕様・保守基準専門委員会:「ガス絶縁開閉装置仕様・保守基準」, 電気協同研究, Vol.52, No.1 (1996)
- (5) 電気学会:「ガス絶縁機器における部分放電現象と検知技術の最新動向」, 電気学会技術報告, No.982 (2004)
- (6) H. Shinkai, H. Goshima, and M. Yashima: “Development of condition assessment method of gas-insulated switchgear—High sensitivity detection method of partial discharge by decomposition gas accumulation—”, CRIEPI Report, H05009 (2006) (in Japanese)
新開裕行・五島久司・八島政史:「ガス絶縁開閉装置の状態診断手法の開発—分解ガスの蓄積による部分放電の高感度な検出法—」, 電中研究報告, H05009 (2006)
- (7) H. Shinkai, H. Goshima, and M. Yashima: “Study of state diagnosis method of gas-insulated switchgear—High sensitivity detection method of partial discharge by decomposition gas accumulation—”, *IEEE Trans. PE*, Vol.127, No.1, pp.231–239 (2007-1) (in Japanese)
新開裕行・五島久司・八島政史:「ガス絶縁開閉装置の状態診断手法の検討—分解ガスの蓄積による部分放電の高感度な検出法—」, 電学論 B, **127**, 1, pp.231–240 (2007-1)
- (8) 電気協同研究会 電力用 SF₆ ガス取扱基準委員会:「電力用 SF₆ ガス取扱基準」, 電気協同研究, Vol.54, No.3 (1998)
- (9) 電気協同研究会 密閉形変電設備劣化保全技術高度化専門委員会:「密閉形変電設備の劣化保全技術高度化」, 電気協同研究, Vol.61, No.3 (2006)
- (10) 電気学会:「ガス絶縁開閉装置の環境適応性と安全性」, 電気学会技術報告, No.852 (2001)
- (11) (株) 東レリサーチセンター・東京電力・電力中央研究所:「SF₆ ガス中の分解生成物分析方法」, 特許第 3318473 号, 公開平成 9 年
- (12) H.M. Heise, R. Kurte, P. Fischer, D. Klockow, and P.R. Janissek: “Gas analysis by infrared spectroscopy as a tool for electrical fault diagnostics in SF₆ insulated equipment”, *Fresenius J. Anal. Chem.*, Vol.358, pp.793–799 (1997)
- (13) R. Kurte, C. Beyer, H.M. Heise, and D. Klockow: “Application of infrared spectroscopy to monitoring gas insulated high-voltage equipment: electrode material-dependent SF₆ decomposition”, *Anal. Bioanal. Chem.*, Vol.373, pp.639–646 (2002)
- (14) K. Hirooka and M. Shirai: “Thermal Characteristics of Sulfur Hexafluoride”, *Chem. Soc. Jpn*, No.2, pp.165–169 (1980) (in Japanese)
広岡紘一・白井 満:「六フッ化硫黄の熱的特性」, 化学誌, No.2, pp.165–169 (1980)

新開 裕 行 (正員) 1975 年 3 月 5 日生。1999 年 3 月長岡技術科学大学大学院工学研究科電子機器工学専攻修士課程修了。同年 4 月 (財) 電力中央研究所入所、現在に至る。主としてガス絶縁機器の絶縁技術、パルスパワー応用技術に関する研究に従事。博士 (工学)。2005 年電気学会論文賞受賞。

五 島 久 司（正員） 1969 年 9 月 12 日生。1996 年 3 月名古屋

屋大学大学院工学研究科電気工学専攻博士課程後期課程修了。同年 4 月（財）電力中央研究所入所，現在に至る。主としてガス絶縁機器の絶縁技術，雷放電に伴う電磁界現象，極低温液体の絶縁技術に関する研究に従事。博士（工学）。2005～2006 年ドイツ・ハノーファー大学客員研究員。1996 年および 2005 年電気学会論文賞受賞。

八 島 政 史（正員） 1959 年 1 月 24 日生。1983 年 3 月九州

大学大学院総合理工学研究科エネルギー変換工学専攻修士課程修了。同年 4 月（財）電力中央研究所入所，現在に至る。主としてガス絶縁機器の絶縁技術に関する研究に従事。博士（工学）。1992～1993 年カナダ・マニトバ大学客員研究員。1989 年，1994 年および 2005 年電気学会論文賞受賞。IEEE 会員。