Study of State Diagnosis Method of Gas-insulated Switchgear

—High Sensitivity Detection Method of Partial Discharge by Decomposition Gas Accumulation—

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

Hisashi Goshima Member (CRIEPI, goshima@crepi.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

The maintenance rationalization to the equipment under operation and the lifetime protraction based on appropriate diagnosis result are necessary for the reduction in cost of gas insulated equipment. Therefore, the accurate state observation method for inside of equipment is requested.

In this research, the new state observation method which enabled the high sensitivity detection of decomposition gas by setting up the absorbent outside of the equipment was proposed (Fig. 1). The SF_6 gas in the gas-insulation equipment is made to circulate compulsorily with the recycling system of the external absorbent unit. When the state of the gas-insulation device is diagnosed, the presence of the decomposition gas can be detected from an absorptive unit. In this report, the new state observation method for paying attention to the decomposition gas, the effectiveness of proposed method based on the quantitative evaluation between the partial discharge and decomposition gas, and its composition unit were examined.

As the result, it was shown without ruining the reliability of the equipment by the absorbent unit setting up outside of the gas insulation equipment that the high sensitivity detection of decomposition gas is possible. Concretely, SO_4 , SOF_2 , SOF_4 , and SO_2F_2 were able to identify by FTIR excellently and it was clarified that the

decomposition gases accumulate with continuation of partial discharge (Fig. 2). Because the concentration of decomposition gas shows a remarkable correlation between total electric charge of partial discharge and the lifetime is different depending on the kind of the decomposition gas, the possibility that the detailed state of the equipment can be diagnosed was shown according to the detected gaseous species and its amount (Fig. 3). Moreover, we succeeded in the detection of the decomposition gas from absorbents and full-scale tank (Table 1).

Fig. 2. Typical FTIR absorbance waveform of decomposition gas

Fig. 1. Basic concept of outside absorbent unit

Fig. 3. Temporal stability characteristics of decomposition gas

Table 1. Parameters of partial discharge and decomposition gas for accumulation and detection which assumed prototype

Number of partial discharge	Electric charge			SF_6 gas moisture [ppm]	Gas detector tube		Concentration of SO_2F_2 [ppm]	FTIR
	Maximum $Q_{\max}$ [pC]	Average Q_{ave} [pC/cycle]	Total Q_{total} [pC/cycle]		SO_2 [ppm]	HF [ppm]		
3.8	58	4.6	26.8	< 58	0	trace	0.029	N.D.

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——

正員 新開 裕行* 正員 五島 久司*
正員 八島 政史*

Study of State Diagnosis Method of Gas-insulated Switchgear

—— High Sensitivity Detection Method of Partial Discharge by Decomposition Gas Accumulation ——

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

The maintenance rationalization to the equipment under operation and the lifetime protraction based on appropriate diagnosis result are necessary for the reduction in cost of gas insulated equipment. Therefore, the accurate state observation method for inside of equipment is requested. In this research, the new state observation method which enabled the high sensitivity detection of decomposition gas by setting up the absorbent outside of the equipment was proposed. As the result, it was shown without ruining the reliability of the equipment by the absorbent unit setting up outside of the gas insulation equipment that the high sensitivity detection of decomposition gas is possible. Because the concentration of decomposition gas shows a remarkable correlation between total electric charge of partial discharge and the lifetime is different depending on the kind of the decomposition gas, the possibility that the detailed state of the equipment can be diagnosed was shown according to the detected gaseous species and its amount. Moreover, we succeeded in the detection of the decomposition gas from the absorbent, therefore the availability of this method was shown.

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

SF₆ ガス絶縁開閉装置（GIS：ガス絶縁開閉装置，GCB：ガス遮断器）は，1960年代後半に導入が開始され，近年，経年30年を超えての運用も始まっている。これらの機器は，1980年代には加速的に導入が進んでおり，既設設備の極限までの有効活用が求められる情勢において，今後，高経年機器は着実に増加することが予想される。このような情勢の中，機器の信頼性を低下させることのない保守の合理化（点検インターバルの延伸，開放点検の省略など）が求められており，機器内部の的確な状態監視手法の確立が重要となっている⁽¹⁾⁽³⁾。GISなどのガス絶縁機器のコンパクト化された内部絶縁は，常時高い電界ストレスが印加されるため，金属異物の存在など，絶縁上の弱点因子が発生すると急激に絶縁性能が低下しやすい傾向を有する⁽⁴⁾。ガス絶縁

機器は密閉形機器の性格上，内部絶縁や導通の異常を外部から発見することが困難であるため，異常検出のための各種センサが多数提案されている⁽⁵⁾⁽⁶⁾。これらのセンサは絶縁上の弱点で生じる部分放電に伴う電氣的，機械的，化学的信号を検出するものが主である。GISにおいては，UHF帯の電磁波を捕らえる手法が最も多く検討されており，特に，初期欠陥などの異常の検出において有効とされている。

一方，長期運用での絶縁異常に関する状態監視の観点では，近年，オフラインによる簡易な外部からの（内蔵センサでない）診断手法が多く適用されている。しかし，GISは事故・障害率が非常に低い高信頼性機器であること，実フィールドにおける外部ノイズの問題（電氣的的手法），オフライン診断のタイミング時に必ずしも部分放電が発生しているとは限らないことなど，的確な異常判定を下せる診断手法は確立されていないのが実情である。

本研究では，長期運用での状態監視において有効な手法として，部分放電により発生する分解ガスに着目した新しい状態監視手法を考案した。ここでは，本手法の概要，部分放電電荷量と分解ガスの定量的評価に基づく本手法の有

*（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

効性等について報告する。

2. 外部吸着剤ユニット方式による異常検出手法の考え方

部分放電に伴う電氣的信号（電磁波等）を検出する手法の場合、対象となる信号は部分放電の規模に依存するため、個々の部分放電に対する検出感度の高感度化が必要となる。しかし、実フィールドにおいては常に外部ノイズが存在することから、センサ感度の向上だけでは必ずしも高感度な異常検出にはつながらない（S/N 比は向上しない）。これに対し、部分放電に伴う分解ガスを検出する手法の場合、化学的手法であるため電氣的なノイズの影響を受けず、分解ガスを蓄積させることにより、異常検出を高感度に行える可能性がある。しかし、一般的にガス絶縁機器の内部には水分や分解ガスを除去する目的で吸着剤が設置されている。この吸着剤は、ガス絶縁機器の信頼性確保の点から必要不可欠であるが、分解ガスを吸着するために SF_6 ガス中の分解ガスの濃度を著しく低下させ、その検出を困難にする。そこで吸着剤をユニット化（以下、外部吸着剤ユニット）してガス絶縁機器の外部に設置することで、機器の信頼性を損なうことなく分解ガスの検出が可能となる手法を考案した。図1に概念図を示す。図に示すとおり、吸着剤と SF_6 ガスを循環させる装置をユニット化してガス絶縁機器の外部に設置する。このときガス絶縁機器の内部に吸着剤は設置しない。通常は外部吸着剤ユニットの循環システムによって、ガス絶縁機器内部の SF_6 ガスを強制的に循環させる。ガス絶縁機器の状態診断を行う場合は、バルブによりガス絶縁機器と吸着剤ユニットを切り離し、吸着剤を分析することにより分解ガスの有無を検出する。また、ある期間だけ循環システムを停止させることでガス絶縁機器内部に分解ガスを蓄積させておき、ガスを直接分析することも可能である。上記の診断手法は、課電中に行うことができるために、機器の運転を停止させる必要はない。これらの手法の場合、単純に分解ガスの蓄積期間を長くするこ

とで、容易に異常状態の検出感度を向上させることが可能である。また、分解ガスの発生が認められない場合は、機器の健全性を直接証明することができる。

3. 実験方法

実験は、小型でハンドリングの容易な基礎実験タンクと大型で実機を模擬できる実規模タンクを用いて行った。基礎実験タンクは、比較的容易に高濃度の分解ガスを生成することができるため、分解ガスの性状（経時安定性）や部分放電電荷量との関係、吸着剤ユニットの評価などに使用した。実規模タンクは、実機と同程度の容積、圧力を達成できるために、実機を想定した検証実験に使用した。試験は全て室温（25℃）にて行った。

〈3・1〉 実験配置 図2に実規模タンクにおける電極配置図を示す。実規模タンクは内径 1000 mm、高さ 1000 mm であり、ガス容積は約 900 リットルである。 SF_6 ガス圧力は 0.5 MPa(abs.) とした。基礎実験タンクは、内径 240 mm、高さ 360 mm であり、内部に電極や部分放電検出回路などを設置した状態でのガス容積は 15.5 リットル（実測値）である。 SF_6 ガス圧力は 0.1 MPa(abs.) とした。実験はすべてシールドルーム内で行った。いずれの場合も高電圧側電極は平板電極とし（平坦部直径、基礎実験タンク：130 mm、実規模タンク：360 mm）、接地側は直径 0.5 mm の針電極（長さ、基礎実験タンク：35 mm、実規模タンク：25 mm）とした。ギャップ長は 15 mm とした。この針電極は、下部の接地側平板電極から絶縁スペーサで絶縁されており、高周波シャント抵抗（50 Ω ）へ接続されている。部分放電はシャント抵抗に発生する電位差としてオシロスコープ（Tektronix 社製 TDS7254B、アナログ帯域 2.5 GHz、20 GS/s）により計測した。オシロスコープの入力インピーダンスは 50 Ω 、サンプリングは 800 ps/pt、レコード長 25×10^6 ワード、計測時間は 20 ms（商用周波数 50 Hz の 1 サイクル）とした。このとき各部分放電パルスの電荷量 Q は、次式で表される。

図1 外部吸着剤ユニットの概念図

Fig. 1. Basic concept of external absorbent unit.

図2 電極配置図

Fig. 2. Experimental setup.

$$Q = \int \frac{2V}{R_s} dt \dots\dots\dots (1)$$

但し、Q：部分放電パルスの電荷量、V：オシロスコープの観測電圧、R_s：シャント抵抗（50Ω）

さらに商用周波数 50 Hz の 1 サイクル中の総電荷量 Q_{total} は次式で表される。

$$Q_{\text{total}} = \int_{t_0}^{t_1} Q dt \dots\dots\dots (2)$$

但し、t₁ - t₀ = 20 ms

部分放電は針先の状態により著しく変化する。本試験では安定した部分放電を発生させるために、ギャップの最低破壊電圧（V_{50-3σ}）の 80% の電圧を 8 時間程度印加してエージングを行った針電極を使用した。

試験電圧は交流（商用周波数 50 Hz）であり、Haefely 製（実規模実験タンク実験）および東京変圧器製のコロナフリー型の試験用変圧器（基礎実験タンク実験）より印加した。

〈3・2〉 分析装置配置およびガス分析 ガス流路および分析装置配置を図 3 に示す。ガス循環システムを有する閉ループとし、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、後述する 2 種類の分析装置、ガス検知管用の汎用ポートを設けた。FTIR（フーリエ変換赤外分光光度計：MATTSON 社製 Infinity Gold, ガスセル 2 m）は分解ガス種の同定および定量化が可能である。DILO 社

製ガス分析装置（3-036-R001-EZ）は、水分を計測する目的で設置した。今回、生成された分解ガスを図中の分析用ガス採取ポンプに採取し、（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た定量分析を実施した⁹⁾。分解能は 0.5 ppb Vol. で誤差 0.5% 以内である（ppb は ppm の 1/1000）。さらに、簡易なガス分析手法であるガス検知管による分析も行った。ガス検知管は、指示薬による呈色作用により対象ガスの濃度を示す。しかし、その他各種のガス（妨害ガス）にも反応するため、今回のように様々な分解ガスの発生が予想される場合、指示値は対象ガスの絶対量を示すものではない。ただし、清浄な SF₆ ガスに対しては反応することがないため、分解ガスの有無（部分放電の有無）を判断することが可能である。今回は、光明理化学工業製の北川式ガス検知器と専用の検知管（HF 用、SO₂ 用）を使用した。

4. 実験結果および考察

基礎実験タンクでは、分解ガスの蓄積効果の検証、分解ガス種の同定、分解ガスの経時変化特性の取得、部分放電と分解ガスの定量的評価および外部吸着剤ユニットの効果の検証を目的とした実験を行った。以下の各節にそれぞれの結果を詳述する。いずれの実験も SF₆ ガス圧力は 0.1 MPa(abs.) とし、電圧印加時間は連続 8 時間とした。実規模タンクでは実機を想定し、比較的小規模な部分放電を発生させ、長時間にわたる分解ガスの蓄積を行い、分解ガス検出の検証を行った。SF₆ ガス圧力は 0.5 MPa(abs.) とし、電圧印加時間は連続 72 時間とした。各実験における部分放電の詳細は後述するが、それぞれ概要を表 1 に示し、一例として観測された部分放電電流波形を図 4 に示す。今回の実験では、印加電圧に交流（商用周波数 50 Hz）を使用し、部分放電について 1 時間に 10 回のサンプリングを行った。同表中の値は、最大電荷量は実験（8 時間）中の最大値、平均電荷量は 1 パルスあたりの平均値、部分放電パルス数および総電荷量については商用周波数（50 Hz）1 サイクルあたりの平均値として示した。また、同表には実験後の SF₆ ガスの含有水分量を併記する。基礎実験タンクの実験において、比較的高い含有水分量が多いが、これは実験タンク（エポキシ製の器壁に吸着している水分がガス中に放出されたためと考えられる。これまで SF₆ 中のアーク放電により生成される

図 3 ガス配管図と各装置の配置

Fig. 3. Gas piping and analysis equipment.

表 1 各実験における部分放電量の概要と SF₆ ガスの含有水分量

Table 1. Parameters of partial discharge and SF₆ gas moisture.

Testing Tank	Test item	Number of partial discharge [pulse/cycle]	Electric charge			SF ₆ gas moisture [ppm]
			Maximum Q _{max} [pC/pulse]	Average Q _{ave} [pC/pulse]	Total Q _{total} [pC/cycle]	
Basic testing tank	Quantitative evaluation between partial discharge and decomposition gas	Level 1	129	64	14	1,894
		Level 2	659	51	12	7,752
		Level 3	2,691	131	18	50,996
	Temporal stability estimation of decomposition gas	2,299	131	14	32,137	3,300
	Verification of outside absorbent unit	2,677	127	13	36,828	< 58
Full-scale testing tank	Accumulation and detection which assumed prototype	3.8	58	4.6	26.8	< 58

図 4 観測された部分放電電流の一例

Fig. 4. Typical waveform of partial discharge current.

表 2 FTIR における波数と分解ガス

Table 2. Decomposition gas and wave number of FTIR.

Gas	SF ₄	SOF ₄	SOF ₂			SO ₂ F ₂			
Wave number [cm ⁻¹]	734	808	758	1,331	1,341	1,282	1,484	1,493	1,503

図 5 分解ガスの FTIR 吸光度スペクトルの一例

Fig. 5. Typical FTIR absorbance waveform of decomposition gas.

分解ガスと含有水分量の検討をした例があるが⁽¹⁰⁾、アーク放電のような高エネルギー放電と部分放電のような低エネルギー放電とは分解ガスの生成過程が異なる⁽⁷⁾。したがって、含有水分量と部分放電による分解ガスの関係は今後明らかにする予定であるが、今回の実験では〈4・5〉節で詳述するとおり、含有水分量 58 ppm 以下（実規模実験タンク）の場合でも分析に十分な分解ガスが生成されている。

〈4・1〉 FTIR による分解ガスの同定と蓄積効果の検証

FTIR を用いる場合、分析結果は波数 (wave number [cm⁻¹]) に対する吸光度 (Absorbance) のスペクトルとして表される。したがって、このスペクトルからガス種の同定を行う必要があるが、今回は発生する分解ガスがある程度判明していることから、これらのガスのライブラリデータおよび文献データ⁽¹¹⁾⁽¹²⁾より実測データとの照合を行った。表 2 に各分解ガスに対応する FTIR 波数を示す。同表では、各分解ガスのうち、本機において得に感度の良かった波数をハッチングで示す。一例として、図 5 に部分放電発生前、部分放電発生 4～8 時間後に測定した分解ガスの FTIR スペクトルを示す。いずれの波数においても、ライブラリおよ

図 6 分解ガスの経時変化特性

Fig. 6. Temporal stability characteristics of decomposition gas.

び文献データとほぼ一致するピークが認められ、良好にガス種を同定することができる。また、時間の経過とともに分解ガスの濃度が高くなっている（分解ガスが蓄積されている）ことがわかる。

〈4・2〉 分解ガスの経時変化特性 寿命の長い分解ガスは、効率的に蓄積されるために高感度な分析に適しているものと考えられる。しかし、寿命の短いガスが検出された場合には、至近に部分放電が発生していることを示唆している。このように、検出された分解ガス種と検出量（割合）などを総合的に考慮することにより、部分放電の規模、発生期間および発生箇所など、機器の内部状況を推定できる可能性がある。ここでは分解ガスの経時変化を評価するために、8 時間の連続課電により分解ガスを生成させ、電圧印加停止後 279 時間（11.6 日）までの各分解ガスの経時変化を FTIR により取得した。計測を容易にするために、比較的高濃度の分解ガスを生成させることとし、部分放電量は平均して交流 1 サイクルに 2,000 以上の部分放電パルスが発生する程度とした（今回の実験ではもっとも激しい部類の放電量となる。詳細は、表 1 参照）。

図 6 に各分解ガスの経時変化結果を示す。同図より各種の分解ガスは電圧の印加（部分放電の発生）とともに着実に蓄積されていることがわかる。電圧の印加を停止すると、SF₄、SOF₄ および SOF₂ は減少に転じており比較的生命が短いことがわかる。これに対し SO₂F₂ は増加を続け、約 30 時間経過時点から平衡し、計測を終了した 279 時間経過時点まで安定して存在している。以上より、ガス分析においては SO₂F₂ が有望であると考えられるが、前述の通り SF₄、SOF₄ および SOF₂ のように比較的生命の短いガスの有無も機器の状態診断の重要な要素となり得る。

〈4・3〉 部分放電と分解ガスの定量的評価 一般的な電気信号による部分放電の検出手法では、検出された信号から部分放電のパラメータを推定する。この場合、検出される電気信号は個々（単パルス）の部分放電の電荷量 (C/pulse) に対応している。これに対し、本手法においては分解ガスの時間的な蓄積が重要な要素となるために、対応する部分放電のパラメータは蓄積期間中の総電荷量と考えられる。こ

ここでは分解ガスと部分放電量相互の関係を明確にするために、表 1 に示す 3 レベルの部分放電量を設定して分解ガスの特性を取得した。図 7 に部分放電のパルス数、総電荷量、平均電荷量、および最大電荷量の時間的推移を示す。最大電荷量および平均電荷量は 1 パルスあたりの最大値および平均値、部分放電パルス数、総電荷量については商用周波数 (50 Hz) 1 サイクルあたりの平均値を示した。図 7 および表 1 より、「Level 1~3」までの部分放電量を比較すると、平均電荷量においてはほぼ等しく、最大電荷量においても、最も高い数値を示す「Level 3」の場合でも「Level 1」のたかだか 2 倍程度しかない。しかし、パルス数は「Level 1」

(a) Number of partial discharge

(b) Total electric charge

(c) Average electric charge

(d) Maximum electric charge

図 7 部分放電量の時間的推移

Fig. 7. Temporal development of partial discharge.

の 20 倍程度あり、結果的に総電荷量は 25 倍程度となる。

表 3 にはガスクロマトグラフにより定量化された SO_2F_2 濃度、およびガス検知管により得られた電圧印加直後の各種ガス濃度を示す。また、図 8 に総電荷量と各ガスの FTIR 吸光度の関係を示す。 SF_6 中のコロナによる分解ガスの発生量については、これまであまり定量的な値が報告されていない。例えば文献 (13) は、直流コロナについて検討しており、負極性針の場合における SO_2F_2 の発生量を $13.9\sim 16\mu\text{mol/C}$ ($8\sim 40\mu\text{A}$)、正極性針の場合において $109\sim 151\mu\text{mol/C}$ ($1.5\sim 16\mu\text{A}$) と報告している (0.2MPa(abs.))。この場合、商用周波数 50 Hz の 1 サイクルに相当する 20 msec での電荷量は $30\sim 800\text{pC}$ となる。これに対し、今回実験で得られた SO_2F_2 の発生割合は、 $1300\sim 4800\mu\text{mol/C}$ 程度であり、およそ 1~2 桁多い。ただし、前述のとおり実験条件が大きく異なる点に注意を要する。また、同文献では、 SOF_2 、 SOF_4 、 SO_2F_2 の総量が最大 $700\mu\text{mol/C}$ 程度 (正極性針、 0.2MPa(abs.)) とも報告されている。分解ガスの発生量はガス (圧力、不純物)、容器、コロナの状態などに依存するが、検出の基本にかかわる重要データであり、今後より定量的なデータを取得し各パラメータ依存性を明らかにする予定である。図 8 において縦軸の吸光度は、計測における最大値である。すなわち、 SF_4 、 SOF_4 、および SOF_2 は電圧印加停止直後の値、 SO_2F_2 については電圧印加停止後も徐々に濃度が上昇するために (図 6 参照)、濃度が安定している電圧印加停止 70 時間後の値とした。 SO_2F_2 のガスクロマトグラフによる定量分析についても、同様の理由から電圧印加停止 70 時間後に行った。図 8 より、いずれの分解ガスも、部分放電の総電荷量と吸光度 (分解ガス濃度) に顕著な相関が認められ、総電荷量が多いほど分解ガス濃度が高いことがわかる。ガス検知管による分析では、 HF 、 SO_2 検知管ともにすべての場合で電圧印加停止後、時間の経過とともに感度が低下し、 HF 検知管は停止後 40 時間程度で検出不能、 SO_2 検知管は停止後 70 時間程度で初期値の $1/3$ 以下となった。

図 9 に商用周波数 (50 Hz) 1 サイクルあたりの部分放電の総電荷量と定量化された SO_2F_2 濃度の関係を示す。両者の関係は以下の実験式で表すことができる。

$$C'_{\text{SO}_2\text{F}_2} = 3.03 \times 10^{-3} Q_{\text{total}} + 1.56 \times 10^{-7} Q_{\text{total}}^2 \quad \dots\dots\dots (3)$$

但し、 $C'_{\text{SO}_2\text{F}_2}$: SO_2F_2 濃度 [ppm], Q_{total} : AC1 サイクル中の総電荷量 [pC], 電圧印加時間 : 8 時間, ガス体積 : 15.5 リットル

表 3 ガスクロマトグラフとガス検知管による分析結果
Table 3. Results of gas chromatograph and gas detector tube.

Level of partial discharge	Concentration of SO_2F_2	Gas detector tube	
		SO_2 [ppm]	HF [ppm]
Level 1	5.7	10	5
Level 2	33	30	25
Level 3	560	> 300	> 75

SO₂F₂ の生成割合が一定であると仮定した場合、印加時間およびガス体積を考慮した一般式は次式で与えられる。

$$C_{\text{SO}_2\text{F}_2} = \frac{15.5}{8} (3.03 \times 10^{-3} Q_{\text{total}} + 1.56 \times 10^{-7} Q_{\text{total}}^2) \frac{t}{V_g} \dots\dots\dots (4)$$

但し、C_{SO₂F₂}: SO₂F₂ 濃度 [ppm], Q_{total}: AC1 サイクル中の総電荷量 [pC], t: 印加時間 [時間], V_g: 0.1 MPa 換算時のガス体積 [リットル]

上式は、分解ガスの濃度推定の基本式となるが、先に述べたとおり一つの仮定の上に成り立っているため、更なる実験によりその詳細を明らかにし、各パラメータの精度向上を行うことが今後の課題である。

〈4・4〉 外部吸着剤ユニットの検証 本節では、外部吸着剤ユニットによる分解ガスの清浄化を検証するために、分解ガス濃度が既知である高濃度分解ガス（前節における

Level 3 のガス、SO₂F₂ 濃度 560 ppm）に対して吸着剤ユニットを適用した場合と、部分放電の発生と吸着剤ユニットの運転を同時に行った場合の2つの実験を行った。先の試験においては、吸着後のガスについて SO₂F₂ の定量分析を行い、吸着剤ユニットの効果を定量的に評価した。吸着剤は、東ソー（株）製の合成ゼオライト系吸着剤「ゼオラム」、種類：F-9、球状品、サイズ 4～8 # を使用した。吸着剤は、いずれの場合も 50 g（約 100 cc）とし、吸着剤ユニットへのガスの送量は毎分 3 リットル程度とした。

図 10 に前節における Level 3 のガス（SO₂F₂ 濃度 560 ppm）に対して吸着剤ユニットを適用した場合（1 時間程度運転）、図 11 に部分放電と吸着剤ユニットの運転を同時に行った場合の FTIR による分析結果を示す。また、表 4 にそれぞれの結果をまとめる。図 10 に示すとおり、吸着剤ユニットを運転することにより、分解ガスがほとんど吸着されていることがわかる。SO₂ 検知管による検査の結

図 8 部分放電の総電荷量と FTIR 吸光度の関係
Fig.8. Relationship between total electric charge of partial discharge and FTIR absorbance.

図 9 総電荷量と SO₂F₂ 濃度の関係（電圧印加 8 時間時）
Fig.9. Relationship between total electric charge and SO₂F₂ concentration (Voltage application on 8 hours).

図 10 高濃度分解ガスに対する吸着剤ユニットの検証
Fig.10. Verification of absorbent unit for high-concentration decomposition gas.

図 11 部分放電の発生と吸着剤ユニットの同期運転
Fig.11. Generation of partial discharge and synchronized operation of absorbent unit.

表 4 吸着剤ユニットの検証試験結果

Table 4. Verification results of absorbent unit.

Absorbent unit operation	Test 1				Test 2			
	Gas detector tube		Concentration of SO ₂ F ₂ [ppm]	SF ₆ gas moisture [ppm]	Gas detector tube		SF ₆ gas moisture [ppm]	
	SO ₂ [ppm]	HF [ppm]			SO ₂ [ppm]	HF [ppm]		
Before	100	N.D.	560	3560	N.D.	N.D.	—	
After	N.D.	N.D.	0.011	< 56	N.D.	trace	< 56	

Test 1 : Verification of absorbent unit for high-concentration decomposition gas.

Test 2 : Generation of partial discharge and synchronized operation of absorbent unit.

N.D. : Not detectable.

表 5 実機を想定した実規模タンクにおける部分放電に関する概要とガス分析結果

Table 5. Parameters of partial discharge for experiment of accumulation and detection which assumed prototype and detected decomposition gas.

Number of partial discharge [pulse/cycle]	Electric charge			SF ₆ gas moisture [ppm]	Gas detector tube		Concentration of SO ₂ F ₂ [ppm]	FTIR
	Maximum Q _{max} [pC/pulse]	Average Q _{ave} [pC/pulse]	Total Q _{total} [pC/cycle]		SO ₂ [ppm]	HF [ppm]		
3.8	58	4.6	26.8	< 58	0	trace	0.029	N.D.

果、運転前の 100 ppm から運転後は検出不能であった。さらに SO₂F₂ の定量分析結果、560 ppm から 0.011 ppm と約 1/50,000 にまで減少していた。SF₆ 中の含有水分量も定量下限値未満 (< 56 ppm) となった (表 4)。また、部分放電の発生と吸着剤ユニットの運転を同時に行った場合 (図 11) の部分放電量は表 1 に示すとおりであり、部分放電に関する各パラメータから前節の Level 3 (SO₂F₂ 濃度 560 ppm) と同程度の分解ガスが発生しているものと推定される。しかし、図 11 より、FTIR においては感度がなほ清浄化されていることがわかる。実験終了時にガス検知管による検査を行った結果、SO₂ 検知管については感度がなく、HF 検知管については定量下限値未満 (< 0.17 ppm) であった (ガス吸気口付近の試薬が極わずかに変色する程度であり、色も指定色とは異なる)。以上より、吸着剤ユニットを外部に設け、強制的にガスを循環させることにより、十分に機器内のガスを清浄に保つことができることが判明した。

〈4・5〉 実規模実験系における分解ガスの検出 本実験では実機を想定し、大型の実規模タンク (ガス容量 900 リットル) に 0.5 MPa(abs.) の SF₆ ガスを封入して実験を行った。したがって、使用したガスの量は、基礎実験タンクの場合の約 290 倍である。発生させた部分放電は、総電荷量ベースで前述基礎実験タンクの場合の約 1/2,000 の 27 pC 程度とし、電圧の印加時間は連続 72 時間とした。表 5 に実験で発生させた部分放電についての概要とガス分析結果をまとめて示す。最大電荷量については実験 (72 時間) 中の最大値、平均電荷量は 1 パルスあたりの平均値、部分放電パルス数、総電荷量については商用周波数 (50 Hz) 1 サイクルあたりの平均値を示した。表 5 より、最大電荷量が比較的大きい印象をうけるが、これは 72 時間の実験中において極めて稀に発生するものであり、1 パルスあたりの平均電荷量は 4.6 pC と極小さい。図 12 に 1 パルスあたりの部分放電電荷量をヒストグラムで整理したものを示す。同図の縦軸はもっとも多かったもの (3.8 pC 以下) で規格化しており、約 20 pC を超える部分放電は殆ど無いことがわかる。

本試験においても、ガス検知管による分析と電圧印加停止後 70 時間程度のガスについて SO₂F₂ の定量分析を行った。FTIR では分解ガスを検出することができなかった。ガス検知管では電圧印加停止直後に HF において、定量下限値 (0.17 ppm) 未満ではあるが、指示薬がわずかに変色し分解ガスの存在を示した。ただし、24 時間後に再度ガス検知管による検査を行った際には、いずれの検知管にも変化

図 12 部分放電のヒストグラム

Fig. 12. Histogram of partial discharge.

はなかった。また、ガスクロマトグラフによる SO₂F₂ の定量分析の結果、0.029 [ppm] が確認された。以上より、今回の実験条件 (ガス体積、部分放電レベル) であれば、72 時間程度の蓄積により十分に部分放電を検出することができると判明した。また、この実験条件における SO₂F₂ の濃度は、(4) 式より求めると以下の通りである。

$$\begin{aligned}
 C_{\text{SO}_2\text{F}_2} &= \frac{15.5}{8} \left(3.03 \times 10^{-3} Q_{\text{total}} + 1.56 \times 10^{-7} Q_{\text{total}} \right) \frac{t}{V} \\
 &= \frac{15.5}{8} \left(3.03 \times 10^{-3} \times 26.8 + 1.56 \times 10^{-7} \times 26.8^2 \right) \frac{72}{900 \times 5} \\
 &= 0.0025 \text{ [ppm]}
 \end{aligned}$$

計算結果と実測値には若干の差があるが、(4) 式は現時点における限られた実験データから提案しており、ここで取り扱っているオーダーが ppb (ppm の 1/1000) である点を考慮すれば、今後実験を重ねることにより、精度の高い実験式を得ることは十分可能であると考えられる。

〈4・6〉 吸着剤ユニットからの分解ガスの検出 〈4・4〉 節において、吸着剤ユニットの効果を検証するために、高濃度分解ガスを吸着剤に吸着させたが (表 4 における Test 1)、この吸着剤からの分解ガスの検出を行った。吸着剤からのガスの検出は、加熱追い出し法を用いた。これは吸着剤を 300°C に加熱して分解ガスを追い出す手法であり、追い出したガス中の SO₂F₂ について定量分析を行った。追い出しに用いた吸着剤の量は 20 [g] であり、追い出しに用いた加熱容器の容量は 0.028 リットルである。この結果、気相部の成分濃度は 1.5 ppm であった。したがって、加熱容器中の SO₂F₂ の体積 (V_{SO2F2}) は、

$$V_{\text{SO}_2\text{F}_2} = 1.5 \times 10^{-6} \times 0.028 = 4.2 \times 10^{-8} \text{ [リットル]}$$

これを質量 (M_{SO2F2}) に変換すると、

$$\begin{aligned} M_{\text{SO}_2\text{F}_2} &= 4.2 \times 10^{-8} / 24.46 \times 102.07 \\ &= 0.18 \times 10^{-6} [\text{g}] \\ &= 0.18 [\mu\text{g}] \end{aligned}$$

但し、24.46：25°Cにおける理想気体 1 mol の体積 [リットル]，102.07：SO₂F₂ の分子量

追い出しに使用した吸着剤の量は 20 g であるので、単位質量あたりの吸着剤からの SO₂F₂ の分離量は約 0.01 [μg/g] となる。また、吸着剤の総量は 50 g であったので、吸着剤全体からは 0.5 μg の分離が可能となる。一方、吸着剤通過前の SO₂F₂ は 560 ppm，総ガス量は 15.5 リットルであることから、同様に 36.2 [mg] となる。したがって、吸着剤から分離された SO₂F₂ は全体のわずか 0.0014 [%] に過ぎず、ほとんどの SO₂F₂ が吸着剤に吸着されたままであるものと思われる。この原因としては、加熱追い出し法における加熱温度が不足しているなどが考えられる。但し、現時点においても吸着剤から追い出しされた SO₂F₂ は 1.5 ppm (1500 ppb) の濃度を有しており、ガスクロマトグラフの分解能 (0.5 ppb) を考慮した場合、十分な感度を有していると言える。吸着剤からの分解ガスの効率的な追い出し法については、引き続き検討を行う予定である。

5. ま と め

分解ガスに着目したガス絶縁機器の診断手法を提案した。主な成果を以下にまとめる。

(1) 吸着剤をユニット化してガス絶縁機器の外部に設置することで、機器の信頼性を損なうことなく高感度な分解ガスの検出が可能となる手法を考案した。試作した外部吸着剤ユニットは、良好に分解ガスおよび水分を除去することができ、本手法においても機器の信頼性が維持されることを示した。

(2) FTIR を用い、SO₄，SO₂F₂，SO₂F₄ および SO₂F₂ を対象に分析を行った。これらの分解ガスは部分放電の継続に伴い蓄積するため、分解ガスの蓄積期間を長くすることで、容易に異常検出の感度向上が図れる可能性が見出された。さらに、ガス種によって寿命が異なるため、検出された分解ガスの種類と量 (割合) によって、機器の異常状態を詳細に推定できる可能性がある。

(3) 実機を想定した実験系 (タンク容積約 900 リットル，SF₆ ガス圧力は 0.5 MPa) において、分解ガスの蓄積および検出を行った。設定した部分放電量は、総電荷量ベースで商用周波数 (50 Hz) 1 サイクルあたり 29 pC 程度とした (平均電荷量は 4.6 pC)。この結果、72 時間の蓄積により SO₂F₂ は 29 ppb を検出に至り、ガス検知管においても定量下限値以下ではあったが感度が認められた。

(4) 外部吸着剤ユニット中の吸着剤から分解ガス (SO₂F₂) を分離することに成功した。これにより吸着剤ユニットを用いた状態診断の可能性が見出された。

今後は、部分放電の性状 (部位や放電量) と分解ガス種

の関係についてさらに実験を行いデータの蓄積を図る。さらに、分解ガスの種類や濃度などから、総合的に機器の内部状況を推定する手法の確立し、本手法に基づいた点検要否等の判定基準を構築する。

本研究をとりまとめるにあたり種々の有益なご指導、ご鞭撻を頂いた、電力中央研究所宅間重研究顧問に厚くお礼申し上げます。また、実験において有益なご助言を頂いた、研究企画グループ後藤直彦主任、電力技術研究所機器絶縁領域高橋俊裕主任研究員に厚くお礼申し上げます。実験の遂行にあたり、ご助力頂いた (株) 電力テクノシステムズ天野貴明氏に厚くお礼申し上げます。また、ガスの分析にあたり種々のご助言を頂いた、(株) 東レリサーチセンター小川賢吾研究員に厚くお礼申し上げます。

(平成 18 年 2 月 2 日受付，平成 18 年 5 月 25 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) 電気学会：「SF₆ ガスの V-t 特性」，電気学会技術報告 (II 部)，No.206 (1986)
- (5) 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)
- (6) 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)
- (7) 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)
- (8) 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)
- (9) (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
- (10) “Investigation of S₂F₁₀ Production and Mitigation in Compressed SF₆—Insulated Power System”，CRADA Technical Note，No.1 (1992)
- (11) 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)
- (12) 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)
- (13) R.J. Van Brunt: “Production rates for Oxyfluorides SOF₂, SO₂F₂, and SOF₄ in SF₆ corona discharges”, *J. Res. NBS*, Vol.90, No.3, pp.229–253 (1985)

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 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 年～1993 年カナダ・マニトバ大学客員研究員。1989 年，1994 および 2005 年電気学会論文賞受賞。IEEE 会員。