SF₆ ガス中微小放電を伴った ギャップの絶縁破壊

正員 細川 辰三 (名古屋工大)

正員 河村 和彦 (中部電力)

正員 関谷 昌久 (大同工大)

正員 森田 公 (富士電機総研)

正員 杉山 修一 (富士電機総研)

Breakdown Mechanism of a Gap with Small Arc Current in SF₆ Gas

Tatuzo Hosokawa, Member (Nagoya Institute of Technology), Kazuhiko Kwamura, Member (Chubu Electric Power CO., Inc.), Yoshihisa Sekiya, Member (Daido Institute of Technology), Tadashi Morita, Member (Fuji Electric Corporated R&D Ltd.), Shuichi Sugiyama, Member (Fuji Electric Corporated R&D Ltd.)

The model experimental apparatus for poor contact portion of the gas-insulated switchgear is assumed to a rod-to-plane gap with small arc current in SF₆. The breakdown voltage in a gap at gas pressure of 0.1 MPa and small arc current of 1 A have been studied.

The effect of the small arc current on the breakdown in the gap was investigated experimentally, and the breakdown mechanism in the gap was studied. Also gas temperature and density were calculated by fluid analysis.

It was cleared that the small arc current played an important role on the breakdown in the rod-to-plane gap, and the hot gas produced by an arc was a principal factor of reduction of the breakdown voltage. The decomposition products produced by the arc were absorbed in an activated alumina effectively, and the breakdown voltage in the gap increased by setting the activated alumina in a chamber.

The time history of the breakdown voltage was characterized by six domains, and these breakdown mechanisms were explained by the development of the arc. The schematic diagram of the breakdown mechanism was proposed by the authors.

キーワード：ガス絶縁開閉装置，六フッ化イオウガス，絶縁低下，アーク

1. ま え が き

六フッ化イオウガス（以下、SF₆と記す）は、絶縁破壊強度が空気の2.5倍と高いうえ、絶縁油に比べて軽量で、化学的にも安定なことから、近年絶縁油に代わって高電圧の絶縁媒体として種々の電力機器に使用されている。特にガス絶縁開閉装置（GIS）は、大幅なスペース縮小化を目指した発電変電所用開閉装置とし

て、積極的に採用されている。

他方、近年エレクトロニクスの発展と相まって、ワードプロセッサやコンピュータなどエレクトロニクスの応用機器の普及が急速に進み、電力系統の瞬時の停電でもこれに与える影響が大きく、電力の安定供給の重要性が増している。

このような観点から、著者らは電力系統におけるガス絶縁開閉装置の開閉接点部の接触不良に起因した接

点部と容器壁間の絶縁破壊の解明とその予知技術の開発を目的に、模擬実験装置を用い 0.1~0.5 MPa (1~5 気圧) の SF_6 中接触不良を模擬した 1~3.6 A のアーク放電が模擬接触部と模擬器壁間の絶縁破壊に与える影響について研究を進めている^{(1)~(3)}。

ところで、0.1~0.2 MPa の SF_6 中で模擬接触部に 1~2 A の微小放電電流を流すと、微小放電 (以後、アークと呼ぶ) と模擬器壁間の破壊電圧は、アーク発生 (以後、アーク点弧と呼ぶ) 初期で異常低下を起こすが、アークを継続させると数分後上昇して、アークを伴わない場合より低い絶縁を回復する。しかし、更にアークを継続させると破壊電圧は再び低下しはじめ、特に模擬器壁をアーク点弧用電極の真上に配置した場合には、ギャップの長さが 30 mm 以下で破壊電圧は 80%~90% 低下した。またこの低下は、微小ギャップ長、アーク電流、気圧などによって異なるが、その主な要因はアークの微小ギャップ外への噴出による高温気体 (Hot gas)^{(4)~(11)} の上昇気流 (浮力) に起因していることは既に報告した⁽²⁾⁽³⁾。しかし、アーク点弧直後に現れる破壊電圧の異常低下については不明な点が多い。

本研究は、アーク点弧直後に現れる破壊電圧の異常低下ならびに経時変化の解明を目的に、0.1 MPa の SF_6 中で模擬接触部に 1 A の電流を流し、破壊電圧の低下に及ぼす接触部材料ならびに微小ギャップ長の影響を電気的および光学的手法を用いて調べ、その破壊機構の解明を行った。その結果、 SF_6 中アークを伴ったギャップで観測される破壊電圧の異常低下ならびに経時変化について検討し、その破壊機構を明らかにした。

本論文はそれらの結果をまとめたもので、 SF_6 中アークを伴ったギャップの破壊特性を述べ、更に破壊の経時変化に対する模式図を示し、その破壊機構を提案している。

2. 実験装置と実験方法

アークが模擬開閉装置接点部と器壁間の絶縁破壊に及ぼす影響を調べるための模擬実験装置の回路図を図 1 に示す。本研究では、接点部の接触不良の模擬として、図に示すような 2 本の棒電極を対向させ、電極間隔 0.3~1.1 mm の微小ギャップを形成させた。なお、実用の開閉装置の接点部は主に銅製であることから、本実験においても電極材料の影響を調べたとき以外は、その先端をほぼ平面状とした直径 10 mm 一對の銅製棒電極を用いた。また、開閉装置の容器壁はステンレス鋼製であることから、直径 40 mm のステンレ

図 1 実験回路

Fig. 1. Experimental Circuit.

ス鋼製ロゴウスキー形電極で器壁を模擬した。

銅製棒電極は、一度実験を行うと消耗が激しく、かつ表面に被膜が生ずるので、実験ごとに鉄ヤスリで被膜を除去した後先端を平面状に整形し、その後、更にサンドペーパーとピカールで表面を鏡面状に研磨した。また、容器壁を模擬したロゴウスキー形電極 (以後、前報⁽²⁾⁽³⁾ 同様ディスクと呼ぶ) も一度実験を行うと幾分汚れたので、実験ごとに表面をアルコールを含んだガーゼで拭いた。 SF_6 の充てんは、実験容器内を油回転ポンプで 7 Pa 以下になるまで排気した後、 SF_6 を所定の圧力まで充てんした。なお、圧力の影響を調べたとき以外は、圧力はすべて 0.1 MPa で実験を行っている。

微小放電は、AC 200 V, 60 Hz の商用周波電源をスライダック、200:6,000 の変圧器を経て 6,000 V に昇圧し、これを 0.3~1.1 mm の微小放電ギャップに印加して発生させた。放電電圧は抵抗分圧 (1 MΩ:1 kΩ) で、放電電流は低抵抗 (1 Ω あるいは 100 Ω) の電圧降下をオシロスコープ (岩崎通信機製 SS-5705) と電流計で測定した。また、回路中の L, C, R は、電力送電線の分布インダクタンスと分布容量を模擬したインダクタンスと容量、電流制限のためのインダクタンス、放電雑音吸収のための容量と抵抗などを等価的に含んでいる。

棒電極とディスク間に絶縁破壊を起こさせるため、ディスクは、AC 200 V, 60 Hz の商用周波電源をスライダックを経て 50 kV まで昇圧できる変圧器に接続されており、破壊電圧は 1 分間隔で測定した。またその電圧は、抵抗分圧 (1,000 MΩ:10 kΩ) で分圧し、その出力をデジタルマルチメータ (岩崎通信機製 SC-7401) に入力し実効値で表示している。なお、本実験では、棒電極とディスクとの間隔を主ギャップ長 l 、その全路破壊電圧を破壊電圧 V_b と呼び、 l はすべて 10 mm で行っている。また、微小ギャップ長 d はアーク熱による棒電極の熱膨張と蒸発消耗のため常に変わるが、ギャップの長さがほぼ一定の値に達すると

V_s の低下が始まるため⁽²⁾、初期設定値からその値に達するまでの時間が破壊予知には重要な時間である。このようなことから、本研究では実験設備を考慮し、微小ギャップ長 d の影響を調べた場合以外は、実験は初期設定値 $d=0.5\text{ mm}$ で行っている。

3. 実験結果

〈3・1〉 破壊電圧の経時変化 SF_6 中アークを伴った主ギャップの破壊電圧 V_s は、アークの継続時間によって変化する。気圧 $p \leq 0.2\text{ MPa}$ 、主ギャップ長 $l \leq 20\text{ mm}$ の実験範囲内では、 V_s はアーク点弧直後の初期（以後初期特性と呼ぶ）でアークを伴わない場合に比べ50%以上の大幅な低下を示すが、その後時間の経過に伴って上昇しはじめ、ギャップ条件によって幾分異なるが数分後に最大値（以後、前報⁽²⁾⁽³⁾同様I領域と呼ぶ）を示した後再び大幅な低下（以後、前報⁽²⁾⁽³⁾同様II領域と呼ぶ）を示す⁽²⁾⁽³⁾。

図2はその典型の一例で、アーク点弧用電極として銅を用い、その微小ギャップ長 $d=0.5\text{ mm}$ （初期設定値）、気圧 $p=0.1\text{ MPa}$ 、アーク電流 $I=1\text{ A}$ 、主ギャップ長 $l=10\text{ mm}$ （本論文では、以後、特に断らない限りこの条件で実験を行っている）における主ギャップの破壊電圧 V_s とアーク継続時間 t との関係をディスクがアーク電極の真上（以後、上側と記す）と真下（以後、下側と記す）に配置した場合について示している。図において、 V_s はアーク点弧直後の初期に

図2 破壊電圧とアーク継続時間の関係
Fig. 2. Breakdown voltage as a function of time.

おいて低いが、時間の経過に伴って上昇し、上側配置ではほぼ10分後に最大値を示し、更にほぼ10分間I領域を示した後時間と共に再び低下した。またこの特性はディスクの配置によって異なり、下側配置の V_s は上側配置に比べて高くかつI領域は幾分短かった。

このように、 V_s はディスクの配置によって幾分異なり、後でも述べるように、一般にディスクが下側配置の V_s は上側配置に比べて高い。しかし特性の傾向は類似しているため、以後は上側配置あるいは下側配置の場合のみについて述べる。

〈3・2〉 微小ギャップ長と破壊電圧の関係 アークを伴ったギャップの V_s は、伴わない場合に比べて大幅に低下するが、 V_s の低下はアーク長に関係する。

図3は、ディスクを上側に配置し、アーク点弧後15分間の V_s と t の関係を d （初期設定値）をパラメータとして表しており、 $d=0.2\sim 0.5\text{ mm}$ を(a)図に、 $d=0.5\sim 1.1\text{ mm}$ を(b)図にそれぞれ示す。これらの図から、 $d \geq 0.3\text{ mm}$ でアークが継続し、一般に d （初期設定値）が増すに伴って初期特性の継続時間が増し、 V_s 上昇特性からI領域への移行は遅れることがわかる。また $d \geq 0.5\text{ mm}$ では、 V_s の上昇特性で V_s がばらつき d の影響が認められなかったが、I領域では d の増加に伴って V_s は低下する傾向を示した。なお、 $d=0.2\text{ mm}$ では、アーク点弧1分後に最大値に達した後低下しはじめたが、2分後にアークが休止し V_s は急上昇した。これは、後でも述べるように、アークによる棒電極の熱膨張で銅の対向電極が接触し、アークが消滅したことによる。この $d=0.2\text{ mm}$ におけるアークの消滅は、ディスクを下側に配置した場合にも同様な特性が得られた。更に前にも述べたように、一般に平板電極が上側配置の V_s は、下側配置より低く、また初期特性に続く V_s の上昇は、下側配置では上側配置に比べ遅れる傾向を示した。

このように、 V_s の低下は d にも関係するので、次に V_s および d と t の関係を図4に示す。

図4は微小ギャップ電極として銅棒を用い $d=0.5\text{ mm}$ （初期設定）、ディスクを上側に配置した場合の結果の一例を示す。図から、 V_s はアーク点弧後初期特性とI領域を経て60分後にII領域へ移行している。他方、 d は初期特性では減少し、 V_s の最大値で最小値を示した後増加しはじめ、 $d=1.3\text{ mm}$ でII領域へ移行している。なお、 d はアーク点弧後6分で約 0.23 mm まで減少したが、これはアークに起因した棒電極の熱膨張でギャップがほぼ 0.27 mm 短縮したことを意味している。

これらの結果から、 V_s の上昇には d の減少も関係

図 3 破壊電圧とアーク継続時間の関係
(ディスク上側)

Fig. 3. Breakdown voltage as a function of time with arc gap length as a parameter (disk arranged above the arc).

しており、アーク点弧直後の初期特性からの V_s の上昇には d の減少も重要な役割を演じていることがわかる。

この特性を更に確かめるために、アーク電極材料として同一形状の W(70%)-Cu(30%)、炭素、Al につ

図 4 破壊電圧、アークギャップ長とアーク継続時間の関係 (ディスク上側)

Fig. 4. Both breakdown voltage and arc gap length as a function of time (disk arranged above the arc).

いて検討した。図 5 はディスクを上側に配置した場合の結果で、(a)図は W-Cu、(b)図は炭素、(c)図は Al の特性をそれぞれ示す。W-Cu 電極では、熱膨張、消耗が小さいため、初期特性から最大値へ達するまでの時間も長く、かつ II 領域への移行も長時間必要であることがわかる。他方炭素電極では、アークによって電極は消耗するのみで、従って V_s には初期特性と I 領域は観測されなかった。更に、Al 電極では、I 領域と II 領域の特性は観測されたが、初期特性は観測されなかった。なお、図より明らかなように、W-Cu 電極と Al 電極では、測定値がばらつき V_s に不整を伴った。

これらの結果から、初期特性からの V_s の上昇には、 d の減少も重要な役割を演じていることが確認される。更に重要なことは、Al 電極では初期特性が観測されなかったことから、初期特性は電極表面の清浄さに関係していることがわかる。つまり、これは Al は空気中で酸化皮膜が生じやすいことを考慮すれば、アークによって生成される分解化合物による電極表面の絶縁物化が V_s の上昇に最も重要な役割を演じていることを示唆している。

〈3・3〉 アークに起因した分解ガスの影響 前にも述べたように、微小放電を伴ったギャップの V_s は伴わない場合に比べて大幅な低下を示す。この原因の

(a) Cu-W電極

(c) Al電極

(b) 炭素電極

図5 破壊電圧に及ぼす電極材料の影響
(ディスク上側)

Fig. 5. Effect of electrode material on the Breakdown voltage (disk arranged above the arc)

図6 破壊電圧に及ぼす活性アルミナの影響
Fig. 6. Effect of Al_2O_3 on the Breakdown voltage (Disk arranged above the arc).

一つとしてアークによる分解ガス⁽¹²⁾の影響が考えられるので、その影響を検証するために実験容器内に分解ガスを吸収する活性アルミナ⁽¹³⁾(以後、 Al_2O_3 と記す)を入れ、 V_s に及ぼす Al_2O_3 の影響について検討した。

図6はディスクを上側に配置した場合の結果の一例で、 Al_2O_3 を入れた場合と入れない場合について比較している。図から明らかなように、 Al_2O_3 を入れても初期特性とII領域の特性では影響がほとんど認められ

ないが、I領域の特性には影響が現れ、特にディスクを上側に配置した場合の V_s は、 Al_2O_3 を入れることによってI領域で約20%上昇することがわかる。

図 7 破壊電圧とアーク継続時間の関係
(ディスク下側, p をパラメータ)

Fig.7. Breakdown voltage as a function of time with pressure as a parameter (disk arranged under the arc).

〈3・4〉 破壊電圧と圧力の関係 図 7 はディスクを下側に配置した場合の V_b と t の関係を p をパラメータとして示している。図から、 p を増すと初期特性および I 領域の V_b は上昇し、かつ初期特性から I 領域への移行は遅れることがわかる。

4. 考 察

〈4・1〉 アーク放電点弧による破壊電圧低下の要因

アークを伴ったギャップの絶縁破壊では、アーク点弧の初期と長時間経過後に V_b の異常低下が観測された。破壊電圧低下の要因として、(1)高温気体の影響、(2)電離気体の影響、(3)分解ガスの影響、(4)ガス圧力の影響、などが考えられる。ここでは、これらについて考察する。

(1) 高温気体の影響 破壊電圧低下には、高温気体による上昇気流と気体密度の低下が重要な役割を演じるものと考えられる⁽⁹⁾。ここでも同じ計算方法⁽³⁾で気流の計算を試みた。図 8 は、図 3 と同じ実験条件 ($p=0.1 \text{ MPa}$, $I=1 \text{ A}$, $l=10 \text{ mm}$) でアーク点弧 100 ms 後における気流の速度ベクトル図をディスクを上側に配置した場合 [(a) 図] と下側に配置した場合 [(b) 図] について示している。これらの図から、ディスクを下側へ配置した場合でも、ディスクとアーク間には、上向きの気流が存在することがわかる。なお後で

図 8 気流計算によるアーク点弧 100 ms 後の速度ベクトル図

Fig.8. Velocity vectors at 100 ms after the arc ignition by fluid analysis.

も述べるように、ディスクを下側に配置した場合の V_b が上側に配置した V_b に比べて高く現れるのは、この上向き気流の影響と考えられる。また、これらの結果を基に、アーク中心からディスク中心へ向かって 7 mm と 12 mm の位置における気体の温度 T および密度 ρ の時間変化を求めた結果を図 9 に示す。これらの図から明かなように、アーク発弧後 100 ms で温度は最大値に、密度は最小値にそれぞれ達することがわかる。更に、ディスクが上側配置のほうが下側配置に比べて温度は高く、密度は低くなることもわかる。

次に、これらの結果を考慮すれば、アークを長時間点弧させた場合にアーク弧が大きく上向きに膨らむが、この現象は、長時間点弧による電極の消耗でギャップ長が増加し、更に、上昇気流がアークを上方に押し上げるためと考えられる。従って、平板電極を上側に配置した場合、 V_b が著しく低下するのは、上昇気流で平板電極とアークの弧の先施部との距離が狭まるためと解釈される。

また、アークの点弧によって陰極の Cu が蒸発するが、このときの蒸気温度は少なくとも Cu の沸点 (2,853 K) であることは明らかである。従って、高温気体内部では、 E/N 分布 (E : 電界, N : 分子密度) の増大により、 α 作用が増大して電子なだれの成長を助け、破壊電圧を低下させていることも考えられる。

(2) 電離気体の影響 アークの陽光柱 (アーク

(a) ディスク上側

(b) ディスク下側

図 9 気流計算による気体の温度と密度の時間変化

Fig. 9. Time histories of both gas temperature and density calculated by fluid analysis.

柱)は電子と正イオンが同じ密度のいわゆるプラズマ状態となっている。破壊電圧の低下の原因として、主ギャップの破壊は棒電極が陰極の位相で生じることから、微小放電アークのプラズマ中の正イオンによる γ 作用(正イオンの陰極への衝突による二次電子放

出)や、プラズマの発光からの紫外線放射による γ 作用の影響なども考えられる(本論文ではこれらを総称して等価的 γ 作用と呼ぶ)。また、プラズマの棒-平板電極間への拡散による E/N 分布の増大は電子なだれの成長を助けることから、これも破壊電圧低下の原因と考えられる。

(3) アークにより生成する化合物および分解ガスによる影響 アーク放電により、 SF_6 がCuとの反応で分解されて化合物を生成し、これが棒電極表面に付着する。この場合、生成される化合物は次の反応式で示される^{(12)(14)~(16)}。

上記(1)~(4)式の反応により生成する化合物は、 CuF_2 と Cu_2S である。これらが付着すると棒電極の電子放出作用(等価的 γ 作用)が減少し、 V_s は上昇する。アーク点弧直後の初期特性から V_s が上昇するI領域への移行はこのためと解釈されるが、その速さは、後でも述べるように、分解化合物の棒電極先端を覆う速さに関係する。

また、実験容器内に水分が混入している場合には、 SF_6 は水分とも反応する。この場合は次の反応式で示される^{(12)~(19)}。

上記(5)~(9)式の反応により生成する分解ガスは HF 、 H_2S 、 SOF_2 、 SO_2 および SO_2F_2 である。また、(1)~(4)の反応により生成する分解ガスは SF_4 、 S_2F_2 、 SF_2 でこれらの分解ガスは破壊電圧低下の要因と考えられる。ところで、 Al_2O_3 は上記分解ガスのうち、 SO_2F_2 を除くすべての分解ガスを吸収する作用がある。従って、これらの分解ガスが V_s 低下の要因であるならば、実験容器内に Al_2O_3 を入れればその影響が現れるはずである。事実本研究においても、図6に示したように、 Al_2O_3 を実験容器内に入れたところI領域の V_s が20%程度上昇したことから、分解ガスは V_s 低下の一要因であると結論される。なお、初期特性とII領域で Al_2O_3 の影響が顕著に現れなかったのは、これらの特性域では、分解ガスの多量発生が V_s の異常低下をもたらすために、 Al_2O_3 の影響が観

測されなかったものと解釈される。

(4) 破壊電圧に及ぼす圧力変化の影響 アークを伴ったギャップの V_s は、図 7 に示したように、ガス圧力が高いほどアーク点弧から V_s 上昇までの時間が長いことがわかる。これは、分解ガスで生成される化合物 CuF_2 と CuS の生成の速さに関係し、一般に圧力が低下すると放電路が拡散して広まることから、分解ガスで生成される化合物が電極を覆う速さは、同一電極配置では圧力が低いほど速いためと解釈される。他方、同じ圧力ならば、図示していないが、放電路の広がりを変わらないことから、アーク電極の大きさ(半径)を減少させた場合にも同様な特性が得られる。

〈4・2〉 破壊電圧低下の機構 アークを伴ったギャップの絶縁低下の要因としては、前節で述べたように、(1)高温気体の影響、(2)電離気体の影響、(3)分解ガスの影響、(4)ガス圧力の影響、などが考えられ、ディスク電極が上側配置の場合にはこれらの要因の相乗効果によって V_s は異常に低下するが、下側配置の場合は気流が逆向きの分だけ上昇するものと解釈される。

ここでは、これらの要因を考慮しながら、 V_s の経時変化について考察する。

図 10 は SF_6 中アークを伴ったギャップの絶縁低下の経時変化を模式的に示したもので、その破壊機構として次のような機構を提案したい。

(1) 初期特性域 アーク点弧に伴う棒電極表面の温度上昇による等価的 γ 作用の急上昇⁽²⁰⁾ ならびに電極付近の気体密度の低下に伴い V_s が異常低下する

図 10 破壊電圧とアーク継続時間の関係における破壊機構の模式図

Fig. 10. Schematic diagram of breakdown mechanism as a function of time in the rod-to-plane gap with small arc current (disk arranged above the arc).

特性域。

(2) V_s 上昇域 アーク熱による棒電極の線膨張に伴い、微小放電ギャップ長 d が減少するとホットガスの熱量も低減し、上昇気流速度が低下してアークが伸張しがたくなること、ならびに分解ガス化合物が棒電極表面へ付着し、等価的 γ 作用の低減に伴う V_s 上昇域。

(3) I 領域 分解ガス化合物による等価的 γ 作用最小域。また、この特性域では、アルミナによる分解ガス吸収効果で V_s は上昇する。

(4) V_s 低下域 アークによる加熱で棒電極温度が沸点以上に上昇し、溶融金属分子がジェットとなって電極外へ噴出して、 V_s が低下する特性域。

(5) II 領域 溶融金属分子の噴出が活発化し、主ギャップの未電離空間が短縮して V_s が大幅に低下する特性域。

〈4・3〉 実用器への適用性について 本研究は、前にも述べたように、ガス絶縁開閉装置の開閉接点部の接触不良に起因した接点部と容器壁間の絶縁破壊の解明とその予知技術の開発を目的に、気圧 0.1 MPa (1 気圧)、アーク電流 1 A、主ギャップ長 10 mm と小規模な模擬実験装置で実験を行ったもので、得られた結果をそのまま実用器へ適用されるものではない。しかし、著者らがこれまで行った気圧 0.1~0.5 MPa、アーク電流 1~3.6 A、主ギャップ長 10~30 mm の実験結果⁽²⁾⁽³⁾ を考慮すれば、小形 GIS における破壊は、基本的には本研究で得られた破壊過程と類似した破壊過程をとるものと推察される。従って、本研究結果は、その破壊機構の解明に十分適用できるものと思われる。更に、大形実用器への適用性については、今後の研究に待ちたい。

5. まとめ

SF_6 ガス中アークを伴うギャップの破壊電圧は、アークによって大幅に低下することを述べ、その破壊機構を明らかにした。得られた結果を要約すると次のようである。

(1) SF_6 ガス中において、アークを伴ったギャップの破壊電圧は、アーク点弧直後に低下する初期特性、点弧数分後に現れる上昇域、ほぼ一定値を保つ I 領域、再び低下を始める低下域、および低下後の II 領域の特性域に分けられる。

(2) 活性アルミナ (Al_2O_3) を実験容器内へ入れると、I 領域の破壊電圧は上昇した。これは、アークによる分解ガスが Al_2O_3 に吸収されるためと結論された。

(3) コンピュータによる気流解析から、ディスクを下側へ配置した場合でも、アークに起因した上昇気流の存在が認められた。

(4) アークに起因して電極表面へ付着する化合物のX線解析から、アークを継続させるとイオウ化合物とフッ素化合物が生成付着することが明らかになった。また、この付着物によって破壊電圧が上昇することも明らかになった。

(5) 圧力の低下は、アーク径の増大をもたらし、初期特性の短縮、つまり破壊電圧の上昇を促進し、アーク点弧後の異常低下から上昇までの時間を速める作用がある。また同じ圧力ならば、アーク電極の大きさ(半径)を減少させた場合にも同様な特性が得られる。

(6) アークを伴ったギャップの破壊電圧低下の機構を明らかにし、破壊の模式図を提案した。

最後に、本研究の遂行にあたり、有益な御指導と御べんたつをいただいた名古屋大学工学部 鬼頭幸生教授、九州大学客員教授 宅間 董博士、ならびに中部電力(株)工務部次長 向山 翼氏、同工務技術課課長 小林重之氏、同工務技術課主任 高木 勲氏に深甚の謝意を表します。

なお、本研究は、中部電力(株)「GIS異常予知技術の開発研究」の一環として行われたものであることを付記し、関係各諸氏に謝意を表します。

(平成2年5月9日受付)

文 献

- (1) 細川・関谷, 他: 「SF₆中微小放電を伴ったギャップの絶縁破壊」, 電気学会開閉保護装置研資, SPD-89-14 (平元)
- (2) 関谷・細川, 他: 「SF₆ガス中における接触不良部発弧の絶縁低下に及ぼす影響」, 電学論 B, **110**, 818 (平2-10)
- (3) 杉山・森田, 他: 「SF₆ガス中におけるアークによる絶縁低下の気流解析による検討」, 同上 B, **110**, 827 (平2-10)
- (4) T. E. Broadbent & J. K. Wood: "A thermally triggered spark gap", *Brit. J. Appl. Phys.*, **6**, 368 (1955)
- (5) A. M. Sletten & T. J. Lewis: "Characteristics of the trigatron spark-gap", *Proc. Instn. Elect. Engrs*, **104C**, 54 (1957)
- (6) T. E. Broadbent: "The breakdown mechanism of certain triggered spark gaps", *Br. J. Appl. Phys.*, **8**, 37 (1957)
- (7) J. D. Cobine: *Gaseous Conductors*, p. 393 (1958) Dover Publications, Inc.
- (8) T. E. Broadbent & A. H. A. Shlash: "The development of the discharge in the trigatron spark gap at very high voltage", *Br. J. Appl. Phys.*, **14**, 687 (1963)
- (9) T. Ishikawa: "Effect of the Plasma-Jet in a Double Electrode Spark Gap", *J. Phys. Soc. Japan*, **19**, 367 (1964)
- (10) E. Kuffel & M. M. Bera: "Breakdown in Triggered Spark Gaps in Air", *IEEE Trans. Power Apparatus Syst.*, **PAS-87**, 1628 (1968)
- (11) 栗本・細川・三好: 「補助放電による気中ギャップの放電破壊」, 電学論 A, **93**, 199 (昭48-5)
- (12) 広岡・桑原他: 「SF₆ガスの大電流アークによる分解生成物とその反応機構」, 同上 A, **95**, 483 (昭50-11)
- (13) 潮・宮本・鎌谷「放電におけるSF₆ガスの化学的特性」, 三菱電機技報, **36**, 1360 (昭37)

- (14) S. Tominaga, H. Kuwahara & K. Hirooka: "Influence of arc-decomposed SF₆ gas on cast epoxy insulators for gas insulated switchgears", *IEEE Trans. Power Apparatus Syst.*, **PAS-98**, 2107 (1979)
- (15) 湯本・飯田・堺: 「SF₆ガス分解生成物の生成過程と絶縁破壊に及ぼす影響」, 電学論 A, **105**, 437 (昭60-8)
- (16) T. Suzuki, H. Yoshida, A. Koyama & S. Tomimuro: "Degradation process of grease due to SF₆ gas dissociation products", *IEEE Trans. Power Apparatus Syst.*, **PAS-101**, 2805 (1982)
- (17) R. J. Van Brunt: "Production Rates for Oxy-fluorides SOF₂, SO₂F₂, and SOF₄ in SF₆ Corona Discharges", *J. Res. Nat. Bur. Stand.*, **90**, 229 (1985)
- (18) T. Suzuki, S. Nakayama & T. Yoshimitsu: "Degradation of insulating materials, including SiO₂ due to SF₆ gas dissociation products", *IEEE Trans. Elect. Insulation*, **EI-15**, 53 (1980)
- (19) I. Sauers, H. W. Ellis & L. G. Christophorou: "Neutral decomposition products in spark breakdown of SF₆", *ibid.*, **EI-21**, 111 (1986)
- (20) 室岡・K. R. Hearne: 「絶縁破壊電圧に及ぼす電極温度の影響」, 電学論 A, **92**, 423 (昭47-9)

細川 辰三 (正員)

昭和2年9月19日生。29年3月東京電機大学電気工学科卒業。35年5月名古屋工業大学電気工学科勤務。同技官, 助手, 講師, 助教授を経て, 59年4月同教授。60年4月学科改組により電気情報工学科教授, 現在に至る。工学博士。主として, 気体中放電破壊の研究に従事。日本物理学会, 電気加工学会, プラズマ・核融合学会会員。

河村 和彦 (正員)

昭和41年2月9日生。平成2年3月名古屋工業大学大学院工学研究科博士前期課程修了。同年中部電力(株)入社。同社電気利用技術研究所にて産業加熱の研究に従事し, 現在に至る。

関谷 昌久 (正員)

昭和22年1月1日生。44年3月大同工業大学電気工学科卒業。44年4月同大学技手, 45年4月同助手, 59年4月同講師, 平成元年4月同助教授, 現在に至る。工学博士。主として, 気体放電現象, 特に, 負コロナ放電現象の研究に従事。静電気学会, プラズマ・核融合学会, 日本アイソトープ協会会員。

森 田 公 (正員)

昭和15年12月19日生。38年3月名古屋工業大学電気科卒業。同年4月富士電機(株)入社。55年4月(株)富士電機総合研究所出向。高電圧開閉保護装置の開発、遮断現象、高電圧絶縁現象の研究などに従事し、現在に至る。工学博士。IEEE会員。

杉 山 修 一 (正員)

昭和31年1月22日生。54年3月東京工業大学工学部電気電子工学科卒業。同年4月富士電機(株)入社。55年4月(株)富士電機総合研究所出向。高電圧開閉保護装置の開発、遮断現象の研究などに従事し、現在に至る。