SF₆ ガス中複合絶縁における耐電圧向上の検討

正員 吉田 哲雄 (東芝)

正員 宮川 勝 (東芝)

正員 大島 巖 (東芝)

正員 正木 信男 (東芝)

正員 柳 父 悟 (東芝)

Increase of Breakdown Voltage Due to Composite Insulation in SF₆ Gas

Tetsuo Yoshida, Member, Masaru Miyagawa, Member, Iwao Ohshima, Member, Nobuo Masaki, Member, Satoru Yanabu, Member (Toshiba Corp.)

We have studied breakdown characteristics using hemi-spherical tip rod (10~60 mm) molded with epoxy resin to plate gap in SF₆ gas up to 0.20 MPa.

The result shows that breakdown characteristics are classified into three regions (A, B and C region) depending on gap length. In A-region breakdown voltage is lowered compared with bare hemi-spherical tip rod to plate gap. In B-region breakdown voltage is raised sharply with gap length. In C-region it saturates. The maximum increase ratio of breakdown voltage in B- and C-region are 1.95 times (AC) and 1.68 times (Impulse) compared with bare hemi-spherical tip rod to plate gap characteristic.

The ratios depend on the diameter of hemi-spherical tip rod and thickness of epoxy resin.

We have concluded that the increase of breakdown voltage is attributed to synergism effect of decrease of maximum electric field strength by epoxy resin and the suppression of field emission.

The use of composite insulation we have studied reduces gap length drastically in the gas insulated switchgear for instance C-GIS (Cubicle type Gas Insulated Switchgear).

キーワード：SF₆ ガス，エポキシ樹脂，複合絶縁，ステップ放電，C-GIS

1. ま え が き

SF₆ ガスは優れた絶縁耐力を有しており，縮小形開閉装置などに広く用いられている。最近では，単位回路構成機器を角形容器に一括収納し，低圧力 SF₆ ガスを封入したキュービクル形ガス絶縁開閉装置（以下，C-GIS と呼ぶ）が普及しており⁽¹⁾，集積密度の向上により大幅な縮小化が図られている。更に，縮小化を図るため，ペーパーミスト絶縁や混合ガス絶縁および被覆絶縁の研究が各方面で行われている^{(2)~(5)}。ここで，被覆絶縁は，電極の微小突起などを薄い絶縁被膜で覆い，電極表面状態を平滑にさせているが，フラッシュオーバー時には絶縁被膜が貫通破壊し，電圧向上に

限界が生じてくる。

そこで，フラッシュオーバー時に，貫通破壊せず沿面放電に移行するように厚肉のエポキシ樹脂を注形した電極を用い，その複合絶縁構成における絶縁特性を検討した。複合絶縁では，気中においてバリア絶縁によるフラッシュオーバー電圧の向上効果が明らかにされているが⁽⁶⁾，SF₆ ガス中では不明な点が多い。一部の報告例では，バリアの形状によりフラッシュオーバー電圧の向上が見られるが⁽⁷⁾，基本的には電極配置より求まる最大電界強度でフラッシュオーバー電圧が左右され，大きな効果は出ないと考えられる。このため，バリア絶縁の考え方を発展させ，バリアで電極を覆った状態，すなわち，被覆絶縁の電圧特性を求めた。

本論文は、SF₆ ガス中において、半球棒-平板ギャップを用い、半球棒側にはエポキシ樹脂を注形した絶縁層を設け、ギャップの長さや絶縁厚さなどが AC とインパルス電圧に及ぼす影響を求めた。また、C-GIS のような開閉装置では、遮断器や断路器などの機器を一括して収納するので、近接する機器の配置上の制約や、機器相互間の接続導体などで不平等電界になってしまう場合がある。従って、この箇所に適用するうえでの電極系の不平等性と被覆電極による電圧上昇倍数の関係を求めた。

次に、ガス圧力 0.20 MPa 以下での圧力特性を裸電極における特性と比較し、被覆電極の電圧向上効果の要因を検討した。

最後に、絶縁層の帯電状況を粉像法で観測すると共に、さい断波インパルス電圧印加時の静止写真からフラッシュオーバの進展状況を詳細に観測し、ガス中の放電の特徴、破壊メカニズムおよびフラッシュオーバ電圧と放電形態の対応を明らかにした。

2. 実験方法

(2・1) 実験装置 実験に用いたタンクを図 1 に示す。直径 1,000 mm で高さ 1,500 mm のタンク内に印加ブッシングを取付け、ブッシング側に半球棒電極を固定した。半球棒は、黄銅製であり、先端の曲率半

図 1 実験装置と試料形状

Fig.1. Schematic diagram of experimental apparatus and specimens.

径は棒の半径で滑らかに加工した。絶縁層は比誘電率 5.1、体積抵抗率約 $3 \times 10^{15} \Omega \cdot \text{cm}$ のエポキシ樹脂を注形して形成させた。また、絶縁層先端の曲率半径は、棒の半径と絶縁厚さを加算した大きさであり、曲率の終点から同一絶縁厚さで 30 mm の同軸状の直線部をもち、端部を C 3 mm で面取りをした。平板電極は、端部を丸く加工した直径 650 mm の円板であり、ギャップの長さに対し十分に広くした。円板を支える軸棒は、気密に保たれ上下にスライドできる構造であり、ギャップの長さをタンク外側のスケールにより設定した。

ここで、ギャップの長さ l の表示は、半球棒先端から平板までの金属間距離とし、最大 $l=200$ mm まで変化させた。

半球棒電極の直径 ϕ は、 $\phi=10, 20, 40, 60$ mm の四種類であり、絶縁厚さ t は、 $t=10, 20, 30$ mm の三種類である。ガス圧力は、0.10 MPa を基準にして、0.20 MPa まで変化させた。ただし、温度 20°C に換算した圧力である。

(2・2) 実験項目と方法 図 1 の実験装置により、まず交流フラッシュオーバ電圧を求めた。50 Hz の交流電圧を用い、JEC-170 に準じた電圧上昇法で 5 回の平均値を求めた。電圧上昇率は約 5 kV/s である。尚、一部の実験条件においては部分放電開始電圧を求めた。

次に、標準雷インパルス電圧 (1.2/50 μs) を用い、50 % フラッシュオーバ電圧を JEC-212 に準じた昇降法で求めた。印加回数は 40 回、繰返し時間間隔は約 1 分であり、特に絶縁層の残留電荷の除去は行わなかった。

ここで、絶縁層は、貫通破壊がないことを確認しながら実験を進めると共に、一条件の実験を行うと黒褐色の放電痕が付くので # 120 サンドペーパーで研磨して除去し、アセトン清浄後、繰返し使用した。

帯電状況は、インパルス電圧印加後、直ちにタンクの試料搬入口を開放し、ダストを振り掛け粉像を観察した。ダストは複写機用トナー (D 232 黒、富士ゼロックス社製) を使用した。更に、静電気測定器 (スタチロン M、宍戸電気社製) で絶縁層表面の帯電した極性と電圧値を測定した。

放電の進展は、試料と並列接続した気中棒ギャップでさい断波を作り、石英ガラス製のぞき窓にセットしたカメラ (F 4.7, フィルム ISO 3000, ポラロイド社製) で観測した。カメラおよびのぞき窓は外部より光が入らないように暗幕でおおった。

3. 実験結果

〈3・1〉 交流フラッシュオーバー電圧実験結果 裸電極を用いてギャップの長さを変化させたときの、交流フラッシュオーバー電圧 V_{AC} と部分放電開始電圧 V_i を図2に示す。ガス圧力は0.10 MPaである。注記がない限り以下の図も同様である。ここで、 V_i は $\phi=10$,

図2 半球棒-平板ギャップの交流フラッシュオーバー電圧特性

Fig. 2. AC flashover voltage characteristics in hemi-spherical tip rod to plate gap.

図3 絶縁層付半球棒-平板ギャップの交流フラッシュオーバー電圧特性

Fig. 3. AC flashover voltage characteristics in epoxy molded rod to plate gap.

20 mmのみプロットしている。

V_{AC} は、ギャップの長さの増加と共に上昇しており、半球棒先端の曲率半径、すなわち直径が大きいほど、上昇率は大きい。しかし、 $\phi=10$ mm は最も細径であるのにもかかわらず、 $\phi=60$ mm と同程度の上昇率である。これは、同図の V_i と比較して、 $V_i \ll V_{AC}$ の関係にあり部分放電による電界緩和作用で V_{AC} が上昇したためである。 $\phi=20$ mm 以上では、電界が改善され、 $V_i \approx V_{AC}$ となるので、部分放電はフラッシュオーバー電圧近くにならないと発生せず、電界緩和作用による電圧上昇が少なくなる。

これに対し、 $t=10$ mm の絶縁層を被覆したときの結果を図3に示す。図より、 V_{AC} は裸電極の特性と同様にギャップの長さの増加と共に上昇しており、半球棒の直径が大きいほど上昇率は大きい。また、被覆電極の V_{AC} は、裸電極の特性と比べると、いずれも上昇しており絶縁層の効果が出ている。ただし、 $\phi=10$ mm は逆に低下している。これは、同図に V_i をプロットしていないが、被覆電極はいずれの電極径も $V_i \approx V_{AC}$ の関係にあり、特に、 $\phi=10$ mm においては裸電極の

図4 半球棒-平板ギャップのインパルスフラッシュオーバー電圧特性

Fig. 4. Impulse flashover voltage characteristics in hemi-spherical tip rod to plate gap.

ような電界緩和作用による電圧上昇が少なかったためである。なお、被覆電極は、 $V_i \approx V_{Ac}$ であることより、部分放電の発生を抑制する作用がある。

〈3・2〉 インパルスフラッシュオーバー電圧実験結果

(1) ガス圧力 0.10 MPa の特性 まず、基本特性となる裸電極を用いてギャップの長さを変化させたときの、インパルスフラッシュオーバー電圧 V_{50} を図 4 に示す。各半球棒別の記号で、白印は正極性、黒印は負極性である。以下の図においても同様である。

図より、 V_{50} は、〈3・1〉節の V_{Ac} と同様にギャップの長さの増加と共に上昇しており、半球棒の直径 ϕ が大きいほど、上昇率は大きい。ここで、正・負極性を見ると、 $\phi=10, 20$ mm では負極性より正極性のほうが低く、また $\phi=40$ mm 以上では逆に負極性のほうが低い特性である。これは、ギャップの電界が非常に不平等の場合には、部分放電の発生により電界緩和作用が働き、特に負極性の V_{50} を上昇させたためであり、〈3・1〉節の結果を裏づけている。

次に、絶縁厚さ 10 mm の絶縁層を被覆したときの結果を図 5、図 6 に示す。図 5 は裸電極の特性で正極性が低い $\phi=10$ mm、図 6 は逆に負極性が低い $\phi=40$ mm であり、それぞれ裸電極の特性を併記した。

被覆電極の特性は、両図ともギャップの長さの増加

と共に直線的に上昇し、その後、飽和する特性曲線となる。また、正・負極性を見ると、正極性のほうが早く飽和し、負極性より低い特性である。この飽和の要因としては、絶縁層を面取りした端部の電界強度が、ギャップの長さを広げるにより上昇し、フラッシュオーバーの始まりが絶縁層先端から端部に移行することが挙げられる。

ここで、被覆電極の特性は、三つの領域に区分することができる。

A 領域：短ギャップ長で裸電極の特性より低くなる領域。これは、絶縁層の絶縁厚さだけがガスギャップが短くなり、ガスギャップの電界強度が上昇するためである。しかし、図 5 のように極端な不平等の配置では、電界強度を上昇させる割合より、電圧を上昇させる効果が大きく、裸電極の特性より高くなる。

B 領域：電圧特性が直線的に上昇し、電圧向上効果が最大限に出る。

C 領域：長ギャップ長で飽和する特性であるが、電圧向上効果はある。この飽和は、絶縁層の直線部を長くするなど、端部の電界強度を抑制する構造にすれ

図 5 絶縁層付半球棒-平板ギャップのインパルスフラッシュオーバー電圧特性 ($\phi=10$ mm)

Fig. 5. Impulse flashover voltage characteristics in epoxy molded rod to plate gap. ($\phi=10$ mm)

図 6 絶縁層付半球棒-平板ギャップのインパルスフラッシュオーバー電圧特性 ($\phi=40$ mm)

Fig. 6. Impulse flashover voltage characteristics in epoxy molded rod to plate gap. ($\phi=40$ mm)

ば防ぐことができる。しかし、電極を完全に被覆することは困難であり、限界を生じ、飽和の現象が現れる。

なお、図6では電圧上昇が少ないが、絶縁厚さを厚くすれば上記の領域が顕著に現れ⁽⁸⁾、電圧上昇が大きくなる。

そこで、この影響を調べた結果を図7に示す。横軸に半球棒の直径 ϕ をとり、 $t=10\text{ mm}$ と 30 mm と比較した。また、同図に裸電極の特性を併記した。ギャップの長さは 100 mm と一定である。

$t=10\text{ mm}$ では、 $\phi=10\text{ mm}$ が裸電極の特性と比べて最も電圧向上効果があり、 $1.3\sim 1.5$ 倍に上昇するが、直径が大きくなると電圧向上効果はあるものの、上昇倍率は小さくなる。また、 $t=30\text{ mm}$ では、細径の半球棒で正極性が低下し効果が少ない。しかし、 $\phi=40\text{ mm}$ になると、電圧向上効果が大きく、約 1.6 倍に上昇する。

これらのことより、不平等電界の電極では、比較的に薄い絶縁層を、また平等電界に近い電極では、厚い絶縁層を被覆すれば電圧向上効果は大きくでる。なお、完全な平等電界では、絶縁層の効果はなくなることが推定できる。

図7 絶縁層付半球棒の直径とインパルス電圧の関係

Fig. 7. The impulse voltage due to diameter of epoxy molded rod electrode.

(2) ガス圧力特性 ガス圧力 0.20 MPa までの結果を図8に示す。半球棒は、 $\phi=10\text{ mm}$ と 60 mm であり、 $t=10\text{ mm}$ の絶縁層で被覆した。また、同図に裸電極の特性を併記した。ギャップの長さは 50 mm と一定である。

不平等電界となる $\phi=10\text{ mm}$ の電圧特性は、裸電極ではガス圧力に対しほとんど変化せずフラットである⁽⁹⁾。これに対し、被覆電極の負極性は、 $0.10\sim 0.14\text{ MPa}$ まで裸電極の特性と同様にほとんど変化しないが、 0.14 MPa 以上からガス圧力に依存して上昇する屈折点をもった電圧特性となる。なお、正極性はすべてのガス圧力領域で直線的に上昇するガス圧力依存性の電圧特性である。

また、比較的平等電界となる $\phi=60\text{ mm}$ の電圧特性は、裸電極と被覆電極の両電極ともガス圧力に対し直線的に上昇し、 $\phi=10\text{ mm}$ より大きな上昇率である。

なお、 $\phi=20, 40\text{ mm}$ においては、同図に併記していないが、裸電極と被覆電極の両電極ともガス圧力に対し直線的に上昇する特性であった。

これらのことより、極端に電界集中を生じる電極においては、絶縁層の被覆により電界が緩和され、ガス

図8 絶縁層付半球棒-平板ギャップのガス圧力特性

Fig. 8. Gas pressure characteristics in epoxy molded rod to plate gap.

圧力に依存する電圧特性にさせることができると考えられる。

4. 考 察

〈4・1〉 電圧上昇倍数 被覆電極は、裸電極に比べてフラッシュオーバー電圧を上昇させることができる。この上昇倍数を $\phi=40$ mm 半球棒について求め、図9に示す。横軸はギャップの長さであり、縦軸は裸電極の特性を基準 (1.0) とした上昇倍数で、交流電圧 K_{AC} 、インパルス電圧 K_{IMP} 、および最大電界強度比 K_E である。裸電極の最大電界強度 E_{max} は半球棒先端、また被覆電極の E'_{max} は絶縁層先端に位置し、 $l=50$ mm、の電界ベクトル図を同図に併記した。

図より、 K_{AC} 、 K_{IMP} は、〈3・2〉節で述べた A 領域では裸電極のフラッシュオーバー電圧より低下するため、1 以下となるが、B、C 領域では1.2~1.4 倍の電圧上昇があることがわかる。これに対し、 K_E はギャップの長さの増加と共に低下し、 K_{AC} 、 K_{IMP} の上昇を裏づけているが、 K_E が低下した割合より電圧上昇倍数のほうが少ない。一例を示すと、 $l=100$ mm で K_E は0.65 まで低下するが、 K_{AC} は1.32 倍しか上昇しない。従って、被覆電極の電圧向上要因は、電界強度だけによ

って決定されず、他の要因が加わっていると考えられる。

なお、 $\oplus K_{IMP}$ は $l=30$ mm で約1.2 倍の最大値をもち、ギャップの長さの増加により低下していく放物曲線特性である。これは、電界ベクトル図に示すように、絶縁層端部の電界強度 E_1 がギャップの長さの増加と共に上昇し、この部分からフラッシュオーバーが起るためである。 $l=50$ mm では、 E_1 が $0.71E'_{max}$ であるが、 $l=200$ mm になると、 $0.95E'_{max}$ まで上昇する。ここで、フラッシュオーバー電圧の絶対値は、電圧が上昇する B 領域で正極性>負極性の関係にあり、絶縁設計上からは負極性が重要となってくるので、絶縁層端部の影響をとりわけ考える必要はない。

他の半球棒においては、 $\phi=40$ mm の結果と同様に、最大電界強度が低下した割合だけフラッシュオーバー電圧は上昇しなかった。電圧上昇倍数の最大値は、 K_{AC} で $\phi=20$ mm の1.95 倍、 K_{IMP} で $\phi=10$ mm の1.68 倍であった。絶縁厚さは10 mm の条件である。

ここで、インパルス比 (各電極でのインパルス電圧/交流電圧波高値) を見ると、被覆電極は、インパルス電圧より交流電圧のほうの電圧上昇が大きいので、裸電極より小さくなった。

〈4・2〉 ガス圧力特性 絶縁物を介したガス中の破壊電界 E_b はガス圧力に依存し、平等電界において、

$$E_b = 89P^\alpha \quad (\text{kV/cm}) \quad \dots\dots\dots (1)$$

ここで、 P : ガス圧力 (atm)、 α : ガス圧力

に加わる係数 $= 0.85^{(10)}$

で示される。この α を裸電極と被覆電極について求め図10に示す。横軸は平均電界を最大電界で除した

図9 絶縁層付半球棒の電圧上昇倍数と最大電界強度

Fig.9. Voltage increase ratio and maximum electric field strength with epoxy molded rod electrode.

図10 ガス圧力0.20 MPa以下におけるインパルス電圧のガス圧力依存特性

Fig.10. SF₆ gas pressure characteristics of impulse voltage at gas pressure up to 0.20 MPa.

電界利用率 u であり、裸電極を $\circ$, $\bullet$ 印, $l=10\text{ mm}$ の被覆電極を Δ , $\blacktriangle$ 印で示す。

裸電極の特性は, $u=0.5$ 以上では $\alpha=0.9$ で平等電界の特性と同等になり, また $u=0.08$ 以下では $\alpha \approx 0$ となり, ガス圧力依存性を示さない。そして, α は u が $0.5 \sim 0.08$ の間でほぼ直線で結ばれる。

これに対し, 被覆電極の特性は, 裸電極の特性より右寄りとなり, 立上りが急激である。従って, α が 0 から 0.9 まで変化する u の間隔が狭い特性である。

一般に, ガス中のフラッシュオーバー電圧は最大電界強度に依存し, 破壊前には初期電子が生成される。初期電子の生成機構は, 電界電子放出, 負イオンからの電子離脱, および正イオンによる二次電子放出などが考えられる。そして, これらは, 電界強度 (E_b/p または E_b) に左右される。

従って, 被覆電極は絶縁層により電極からの電子放出が抑制されるので, 初期電子の生成が遅れ, 電界緩和作用が強く働かない。このため, 低いガス圧力からフラッシュオーバー電圧の上昇が始まり, α の立上りが急激になったと考えられる。また, 電界強度の抑制により, u が大きくなり右寄りの特性になったと考えられる。

〈4・3〉 帯電現象 被覆電極の電圧向上要因に, 絶縁層の帯電現象が考えられる。そこで, V_{50} 相当の電圧を印加したときの帯電状況を調べ, 図 11 に示す。

帯電状況を見ると, 正極性では大きな斑点模様, 負極性では小さな斑点模様であることが特徴である。また, バックディスチャージの影響で部分的には極性が乱れるが, 全体の計測では印加された極性と同極性に帯電され, 電荷量は約 4 nc/cm^2 であった。

このように, 絶縁層の帯電により絶縁層が見掛け上

図 11 絶縁層表面の帯電状況

Fig.11. Charging state of epoxy mold surface.

電極化したと想定し, フラッシュオーバー電圧を裸電極の特性と比較した。図 12 に絶縁層先端から平板までのギャップの長さで整理した特性を示す。同図に絶縁層と同一直径の裸電極の特性を併記した。

図より, 被覆電極の特性は V_{AC} , V_{50} とも裸電極の特性より高いことがわかる。ただし, $\oplus V_{50}$ は, $l=50\text{ mm}$ 以上で絶縁層端部の影響で, 裸電極の特性より低下する。このため, 絶縁層が電極化して電極先端の形状が大きくなったことだけでは, 電圧向上の説明はできない。

従って, 電圧向上の要因は, 最大電界強度の抑制や電子放出などの抑制が相乗されていると考えられる。

〈4・4〉 放電過程 裸電極と被覆電極の放電過程を V_{50} に対し $110 \sim 120\%$ の過電圧さい断波を印加して調べた。

まず, 裸電極の放電路を図 13 に示す。上段が正極性, 下段が負極性であり, $\phi=20\text{ mm}$ の半球棒を用い, $l=100\text{ mm}$ である。

正極性は, $0.8 \sim 0.9\text{ }\mu\text{s}$ のさい断時間で半球棒先端から正ストリーマ PS が伸びている。この PS は, いったん停止して輝度を増し, その先端から新たな PS

図 12 等価棒電極におけるフラッシュオーバー電圧特性

Fig.12. Flashover voltage characteristics of rod electrode with equivalent diameter.

図 13 裸電極の放電路

Fig. 13. Flashover process of rod to plate gap.

が伸びておりステップ状の進展をしている⁽³⁾⁽¹¹⁾。更に、印加電圧を高くすると、正リーダ PL に成長し、PL から枝分かれして PS が伸びている。負極性は、正極性よりステップ状の進展が明確に現れ、負ストリーマ NS および負リーダ NL が進展し、NL からは新たな NS が枝分かれして伸びている。そして、フラッシュオーバーは、棒先端から起こる。ここで、図中に PS と NS の進展距離を併記したが、正極性で 20~30 mm、負極性で 5~20 mm と負極性のほうが短い。これは、進展速度が正極性で 15 cm/μs、負極性で 3 cm/μs⁽³⁾と、負極性のほうが遅いためと考えられる。

次に、被覆電極の放電路を図 14 に示す。φ=20 mm の半球棒に t=10 mm の絶縁層を被覆し、l=100 mm である。

正極性は、0.8~1.0 μs のさい断波で、絶縁層端部から PS が伸び、絶縁層表面、またはガス空間をステップ状に進展している。印加電圧を高くすると、PL となり、PL から枝分かれして新たな PS が伸びている。そして、絶縁層表面から離れたガス空間でフラッシュオーバーに至る。負極性は、0.8~0.9 μs のほぼ同じ断時間で、絶縁層端部から NS がステップ状の進展をするものや、先端から進展するもの、あるいは絶縁層表面からグローチャネル GC を形成するものがある。しかし、印加電圧を高くすると、NL が絶縁層表面に沿って先端まで伸び、NL からは NS がガス空

図 14 被覆電極の放電路

Fig. 14. Flashover process of epoxy mold-coated rod to plate gap.

間に伸びている。そして、絶縁層表面に沿ってフラッシュオーバーに至る。ここで、進展距離を図中に併記したが、絶縁層表面においても裸電極と同様に、正極性で 30~50 mm、負極性で 5~35 mm と負極性のほうが短い。このことは、図 11 の斑点模様の帯電状況が、負極性のほうが小さいことと一致する。

以上のことより、被覆電極は、絶縁層により電極先端の電界緩和が行われ、絶縁層端部よりフラッシュオーバーに至り、耐電圧を向上させていると言える。

5. ま と め

SF₆ ガスと厚肉の絶縁物より構成する複合絶縁の諸特性を検討した結果を要約すると次のようになる。

(1) 被覆電極のインパルス電圧特性は、ギャップの長さにより、三つの領域に分けられる。すなわち、裸電極の特性より低下する A 領域、急激に上昇する B 領域、および飽和する C 領域である。

(2) B, C 領域での電圧上昇倍数は、同一ギャップの長さの裸電極の特性に比べて、交流電圧で最大 1.95 倍、インパルス電圧で最大 1.68 倍である。

(3) 電圧上昇の要因として、最大電界強度の抑制や電極からの電子放出の抑制などが挙げられるが、単独では説明ができず、これらが相乗されると考えら

れる。

(4) 被覆電極の放電路は、裸電極と同様にステップ状で進展し、絶縁層端部よりフラッシュオーバーに至る。なお、ステップの間隔は、正極性より負極性のほうが短い。

(5) 以上述べた複合絶縁を電気機器、例えば、C-GISに適用することにより、構成機器などの縮小化が大幅に可能となった。

最後に、本研究を進めるにあたり、御指導をいただいた当社スイッチギヤ部松沢主幹に感謝の意を表する。

(平成元年7月26日受付、同元年12月9日再受付)

文 献

- (1) 正木・吉田：「キュービクル形ガス絶縁開閉装置 (C-GIS) の動向」, 電学誌, **107**, 121 (昭62-2)
- (2) 例えば、宮本・金子・下妻・佐藤・田頭：「ペーパーミスト絶縁の研究—放電中(大気中)ギャップ」, 昭61電気学会全大, No.178
- (3) 「気体絶縁への混合ガスの応用」, 電気学会技報(II)部, No. 248 (昭62)
- (4) 乾・大久保・本多・小林：「SF₆ガス中被覆電極絶縁特性」, 昭59電気学会全大, No.64
- (5) J.D. Morgan & M. Abdellah: "Impulse breakdown of covered cylinders in SF₆ and SF₆-gas", *IEEE Trans. Elect. Insulation*, **23**, 467 (1988)
- (6) 「放電バリア効果」, 電気学会技報(II)部, No.270 (昭63)
- (7) 宮川・吉田・正木・大島・柳父：「低圧力SF₆ガス中不平等電界下のバリア効果」, 電気学会放電研資, ED-89-32 (平元)
- (8) 吉田・大島・宮川・正木：「SF₆ガス中の複合絶縁特性」, 平元電気学会全大, No.138
- (9) N. Masaki, T. Yoshida & I. Ohshima: "72/84 kV cubicle type SF₆ gas-insulated switchgear with vacuum circuit breaker", *IEEE conf. No. 261*, 87 (1986)
- (10) 藤波・宅間・八島・河本：「ガス絶縁スベーサの帯電機構と絶縁特性」, 電学論B, **108**, 297 (昭63-7)
- (11) N. Wiegart, et al.: "Inhomogeneous field breakdown in GIS the prediction of breakdown probabilities and voltages", *IEEE Trans. Power Delivery*, **3**, 923 (1988)

吉 田 哲 雄 (正員)

昭和24年9月4日生。43年3月広島県立尾道工業高校電気科卒業。同年4月(株)東芝入社。重電技術研究所に勤務。主として、スイッチギヤの気中絶縁、複合絶縁、固体絶縁および低圧力SF₆ガス絶縁に関する研究に従事。

宮 川 勝 (正員)

昭和35年12月16日生。58年3月明治大学工学部電気工学科卒業。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、中圧スイッチギヤの研究開発に従事している。

大 島 巖 (正員)

昭和21年4月28日生。44年3月九州工業大学電気工学科卒業。同年4月(株)東芝入社。重電技術研究所に配属され、現在に至る。この間、変圧器・開閉装置・変換装置・避雷器などの高電圧技術開発に従事し、最近では真空遮断器、中圧スイッチギヤ、電力変換装置の開閉技術・高電圧技術およびパルスパワーの研究に従事。工学博士。IEEE 会員。

正 木 信 男 (正員)

昭和23年5月9日生。46年3月神奈川大学電気工学科卒業。同年4月(株)東芝入社。府中工場スイッチギヤ部に勤務。スイッチギヤの開発に従事。

柳 父 悟 (正員)

昭和16年7月15日生。39年3月東京大学工学部電気工学科卒業。47年イギリス・リバプール大学電気電子工学部博士課程修了。39年4月(株)東芝入社。以来、高電圧絶縁現象、遮断現象、高電圧大電流試験法などの研究、高電圧開閉保護装置の開発などに従事。47年 Ph. D (Liverpool)。56年、62年電気学会進歩賞、58年同論文賞受賞。IEEE, Current Zero Club 会員。