UDC [621.315.616.96 : 678.742.2+621.315.618.9 : 546.226, 226.166-1], 015.51

論文

57-A11

SF₆ ガス-ポリエチレン複合誘電体の 方形波パルス電圧による絶縁破壊

正員 中山 博 史 (姫路工大)

正員 小野田 光 宣 (姫路工大)

正員 天 川 清 士 (姫路工大)

正員 犬 石 嘉 雄 (大阪大)

1. ま え が き

SF₆ ガスは現在最もよく利用されている電氣的負性気体である。すなわち、その優れた絶縁耐力および消弧能力のために、しゃ断器、乾式変圧器、管路気中送電およびガス絶縁変電所において使用されている。電力需要の増大によって電力用機器および電力ケーブルは高電圧化し、また経済性の追求の面から小形化される傾向にある。そして、電力の安定供給のためには電力用機器などの電気絶縁の信頼性の向上を図ることが肝要である。

そのためには、まず第一に SF₆ ガスの絶縁特性を十分に知ることが大切であり、各方面で活発な研究が行われてきた⁽¹⁾⁻⁽⁴⁾。著者らも針-平板電極における SF₆ ガスとガラス板からなる複合誘電体における方形波パルス電圧による部分放電の過電圧特性について調べ⁽⁵⁾、更に SF₆ ガスを充てんした針状ボイドからのトリッキング破壊についても報告した⁽⁶⁾。実用面で重要となる SF₆ ガスを用いた絶縁構成における交流電圧による部分放電劣化についても研究がなされてきた⁽⁷⁾。しかし、急しゅんなパルス電圧については空気とポリエチレンの複合絶縁系におけるコロナを介した絶縁破壊に関する報告⁽⁸⁾⁽⁹⁾があるのみで、高気圧 SF₆ ガスを含む複合誘電体の絶縁破壊についてはまだ不明なところが多い現状である。

そこで、著者らは立上りの鋭い方形波パルス電圧を用いて SF₆ ガスの破壊の V-t 特性、および SF₆ ガスとポリエチレンフィルムからなる複合誘電体の破壊の V-t 特性について調べた。既にその一部は報告した⁽¹⁰⁾⁽¹¹⁾が、ここでは V-t 特性に及ぼす電極の形状、ギャップの長さ、SF₆ ガスの圧力およびポリエチレンフィルムの影響について検討を加えた。本論文で述べる結果が、急しゅん波に対する電力用機器の複合絶縁の合理的な設計に役立てば幸いである。

2. 試料および実験方法

試料としては、SF₆ ガスと高密度ポリエチレンフィルム(密度 0.94~0.95 g/cm³、結晶化度 90%、厚さ約 20 μm)を用いた。電極構成は図 1 に示すように、針-平板電極あるいは球-平板電極とし、針(球)電極には負極性の方形波パルス電圧を印加し、SF₆ ガス中

針電極 (r=50 μm)
又は球電極 (r=2.5 mm)

SF₆ ガス

図 1 電極構成

Fig. 1. Electrode configuration.

Breakdown of SF₆ Gas-Polyethylene Composite Dielectrics under Rectangular Pulse Voltage. By Hiroshi Nakayama, Member, Mitsuyoshi Onoda, Member, Kiyoshi Amakawa, Member (Himeji Institute of Technology) & Yoshio Inuishi, Member (Faculty of Engineering, Osaka University).

中山博史: 正員, 姫路工業大学電気工学科

小野田光宣: 正員, 姫路工業大学電気工学科

天川清士: 正員, 姫路工業大学電気工学科

犬石嘉雄: 正員, 大阪大学工学部電気工学科

図 2 実験回路

Fig. 2. Experimental circuit.

の放電の時間遅れおよび平板電極上にポリエチレンフィルムを置いて SF_6 ガスとで複合誘電体とした場合の破壊の時間遅れをオシロスコープで測定した。測定回数は同一の印加電圧によって 10~20 回とした。

ポリエチレンフィルムは電圧印加の度に移動させ、ポリエチレン表面への電荷のたまりによる前電圧印加の影響がないようにした。針電極先端の曲率半径は約 $50\mu\text{m}$ であり、球電極の半径は 2.5mm である。電極間のギャップの長さは $0.3, 0.6, 1.2\text{mm}$ の三とおりである。電極系を黄銅製の容器 (約 $3,000\text{cm}^3$) に入れて、 10^{-3}Torr 以下の真空にしてから SF_6 ガスを所定の圧力 ($1\sim 5\text{atm}$) まで注入した。容器にはガラス窓はあるが、特別に照射は行なっていない。印加する方形波パルス電圧の発生回路を図 2 に示す。パルス電圧の立ち上がり時間は $0.8\mu\text{s}$ 、パルス幅は可変で、最大幅を $600\mu\text{s}$ とした。図 3 にパルス電圧の波形の一例を示す。パルス電圧の印加間隔を 30s 以上とし、ステップアップ方式を用いて実験を行なった。

3. 実験結果と検討

〈3.1〉 針 - 平板電極における SF_6 ガスの破壊の $V-t$ 特性 針 - 平板電極間のギャップの長さを 1.2mm とした場合の SF_6 ガスの破壊の $V-t$ 特性に及ぼす SF_6 ガスの圧力の影響について調べた結果を図 4 に示す。ギャップにかかる過電圧が小さいときには破壊の時間遅れに数百 μs にも及ぶものがあり、数十~数百 μs とばらつきも大きい。過電圧が大きくなるにつれてばらつきも小さくなり、破壊の時間遅れも短くなる。測定点の下限を結んで $V-t$ 曲線を作ると、傾斜部と平坦部に分

(a) 電圧波形 (b) 破壊時の波形
垂直軸 5kV/div , 水平軸 $5\mu\text{s/div}$

図 3 パルス波形の一例

Fig. 3. Example of pulse waveform.

けられる。この折れ曲り点は SF_6 ガスの圧力が上昇するほど、長い時間遅れのところに移動する。すなわち、 1atm では約 $30\mu\text{s}$ であるが、 4atm になると約 $100\mu\text{s}$ になっている。

図 5 にギャップの長さを短くして 0.3mm にした場合の結果を示す。この図には SF_6 ガスの圧力が 1atm および 5atm について示してある。この場合も、最小破壊電圧の近傍の電圧に対しては約 $100\mu\text{s}$ にも及ぶ長い時間遅れが存在する。またギャップの長さが短くなると、 $V-t$ 特性が傾き始める時間が短くなることがわかる。

$V-t$ 特性の平坦部、すなわち最小破壊電圧から次式⁽¹²⁾によって針電極先端の最大電界 E_{max} を計算で求め、 SF_6 ガスの圧力を p として E_{max}/p と p の関係を図 6 に示す。

$$E_x = 2VS/\ln Q \quad \dots\dots\dots (1)$$

ただし、

図 4 針 - 平板電極における SF_6 ガスの $V-t$ 特性 (I)Fig. 4. $V-t$ characteristics of SF_6 gas in the needle-plane electrode (I).

図 5 針-平板電極における SF_6 ガスの $V-t$ 特性 (II)

Fig. 5. $V-t$ characteristics of SF_6 gas in the needle-plane electrode (II).

$$S = L^{1/2}(L+r)^{1/2}/(2Lx-x^2+Lr)$$

$$Q = \{2L+r+2L^{1/2}(L+r)^{1/2}\}/r$$

ここで、 E_x : 電極軸上で針電極から x だけ離れた点の電界、従って $E_{\max} = E_{x=0}$, V : 印加電圧, L : ギャップの長さ, r : 針電極先端の曲率半径, x : x 軸上で針電極先端からの距離

ところで、 $E_{\max}/p$ はガス中の電子が自由行程内に電界 $E_{\max}$ から受けるエネルギーを代表する量である。図 6 によると、圧力 p が增大するほど最小破壊電圧から求めた $E_{\max}/p$ は減少している。このような不平等電界においては、高気圧になるほど破壊時における針電極近傍の電子が電界から受けるエネルギーの値が小さくても全路破壊が起こることがわかる。また圧力が一定の場合には、ギャップの長さが短くなるほど $E_{\max}/p$ の値は小さくなっている。これはギャップの長さが短くなるほどギャップの平等性が増してくるために、針電極近傍の電子の受けるエネルギーは小さくても破壊の条件が満たされるものと考えられる。

SF_6 ガスは電気的負性気体であるので、ギャップ中で発生した電子を付着して負イオンになりやすい。そして、負イオンは一般に電離能力がない。電子の衝突電離係数を α 、圧力を p とすると、 α/p は E/p の増加と共に大きくなる。一方、電子の付着係数を η とすると、 η/p は E/p の増加と共に小さくなる⁽¹³⁾。従って、ギャップ中で電子の衝突電離が効果的となるのは E/p の値が大きくなって、 $(\alpha-\eta)/p$ が正になるときである。すなわち、電子などが成長するための臨界条件は $\alpha=\eta$ である。この条件を満足する E/p の値は、 SF_6 ガスにおいて $89 \text{ kV} \cdot \text{cm}^{-1} \cdot \text{atm}^{-1}$ とされている⁽¹⁴⁾。

図 6 針-平板電極における SF_6 ガスの最小破壊電圧から求めた $E_{\max}/p$ と p の関係

Fig. 6. Relation between $E_{\max}/p$ calculated from the minimum breakdown voltage of SF_6 gas in the needle-plane electrode and p the pressure of SF_6 gas.

図 7 針電極先端から $\alpha=\eta$ になる点までの距離と SF_6 ガスの圧力の関係

Fig. 7. Relation between the distance from the needle to the point in the state of $\alpha=\eta$ and the pressure of SF_6 gas.

著者が用いた電極系における針電極先端から平板電極に至る電界分布を(1)式を用いて求め、 $\alpha=\eta$ の条件を満足する針電極先端からの距離と SF_6 ガスの圧力の関係を図 7 に示す。ギャップの長さが短くなると $\alpha=\eta$ になるまでの針電極先端からの距離は短くなるが、ギャップの長さに対する割合は大きくなっている。またギャップの長さが一定の場合には圧力が上昇するにつれて、この距離は短くなっている。そして、この圧力効果はギャップの長さが短いときに著しい。

例えば、ギャップの長さ 0.3 mm, 1 気圧では $\alpha=\eta$ になる針電極先端からの距離は 105 μm であるが, 5 気圧になると 20 μm である。このように SF_6 ガスにおいては, 高気圧になるほど針電極近傍の局部において破壊の条件が満たされると全路破壊に至ることがわかる。

次に印加する方形波パルス電圧を高くし, 過電圧を大きくすると破壊の時間遅れは短くなり, $V-t$ 特性が傾き始める領域について述べる。一定の大きさの方形波パルス電圧を試料に N_0 回印加したとき, 電圧を印加してから時間 t までに試料が破壊しない回数を N とすると, 次の関係式が成立する⁽¹⁵⁾。

$$N/N_0 = \exp \{ -(t - T_F)/T_S \}$$

$$\dots\dots\dots (2)$$

ここで, T_F : 形成時間遅れ,

T_S : 統計時間遅れ

放電の時間遅れのラウエプロットを行なうと, $N/N_0=1$ より T_F が求まり, $N/N_0=e^{-1}=0.368$ より $(T_F + T_S)$ が求まる。

図 4 に示すギャップの長さが 1.2 mm の場合の SF_6 ガスの破壊の時間遅れの測定点をもとにしてラウエプロットをとり, これより求めた時間遅れ $(T_F + T_S)$ および形成時間遅れ T_F を図 8 に示す。いずれの圧力においても, 統計時間遅れが形成時間遅れに比べて長い。また T_F の直線の傾きに比べて $(T_F + T_S)$ の傾きが小さいことから, 形成時間遅れおよび統計時間遅れのいずれもが印加電圧の関数であるが, 形成時間遅れがより電圧に依存していることがわかる。

〈3・2〉 針電極-SF₆ガス-ポリエチレン-平板電極における破壊の $V-t$ 特性 針-平板電極構成の平板電極の上に厚さ約 20 μm の高密度ポリエチレンフィルムを置いて, 破壊の $V-t$ 特性に及ぼす影響について調べた結果を図 9 に示す。ギャップの長さを 1.2 mm 一定とし, SF_6 ガスの圧力を 1~4 気圧と変化さ

図 8 針-平板電極における SF_6 ガスの破壊の時間遅れと破壊電圧の関係

Fig. 8. Relation between the time lag and the breakdown voltage of SF_6 gas in the needle-plane electrode.

図 9 針-平板電極における SF_6 ガスとポリエチレンフィルムからなる複合誘電体の $V-t$ 特性 (I)

Fig. 9. $V-t$ characteristics of composite dielectrics composed with SF_6 gas and the polyethylene film in the needle-plane electrode (I).

せた。まず, 最初に $V-t$ 特性に現われる最小破壊電圧について考えると, 図 4 に示す SF_6 ガスのみの場合に比べて, いずれの圧力においても約 2 kV の破壊電圧の上昇が見られる。

更に印加電圧が大きくなると, 同じ大きさの印加電圧に対してポリエチレンの効果のために破壊までの時

図 10 針-平板電極における SF_6 ガスの時間遅れと破壊電圧に及ぼすポリエチレンフィルムの影響

Fig. 10. Effect of the polyethylene film on the time lag and the breakdown voltage of SF_6 gas in the needle-plane electrode.

図 11 針-平板電極における SF_6 ガスとポリエチレンフィルムからなる複合誘電体の $V-t$ 特性 (II)

Fig. 11. $V-t$ characteristics of the composite dielectrics composed with SF_6 gas and polyethylene film in the needle-plane electrode (II).

間が長くなっている。この間の様子を更にはっきりさせるために、ラウエプロットから求めた形成時間遅れ T_F を示したのが図 8 の点線であり、時間遅れ ($T_F + T_s$) について比較したものが図 10 である。ポリエチレンフィルムがあると、形成時間遅れおよび統計時間

遅れのいずれもが長くなる。ギャップの長さを 0.6mm にすると、ポリエチレンの効果は約 3~4kV の破壊電圧の上昇となって現われる。更に、ギャップの長さを短くして 0.3mm にすると、図 11 に示すようにポリエチレンフィルムの効果は 1 気圧の SF_6 ガス中で約 6kV の破壊電圧の上昇となり、5 気圧で約 5kV の上昇となる。

高密度ポリエチレンの常温での破壊電界 4.2MV/cm⁽¹⁶⁾ からすると、平等電界においてこの試料の破壊電圧は約 8.4kV である。しかし、ここでは SF_6 ガス中に発生したストリーマによる不平等電界の破壊であるので、ポリエチレンの効果として現われた電圧がこの値より小さいものと考えている。また、短ギャップではギャップ中で発生する電子などによってできる空間電荷が、ポリエチレンフィルムの表面にたい積電荷として残留し、ギャップ中の電界を緩和し、後続のストリーマの発生および進展を抑える作用が大きい。ところが、ギャップの長さが長くなると、ポリエチレンフィルムの上にたまった積電荷

の影響する領域外のギャップ中で容易にストリーマが発生し、その先端電界も強くなる。従って、ギャップの長さが長くなるほど、ポリエチレンフィルムの効果が少なくなるものと考えている。

〈3.3〉 球-平板電極における SF_6 ガスの破壊の $V-t$ 特性 針電極先端の曲率半径を大きくした場合の破壊の特性を知る目的で、針電極の代わりに半径 2.5mm の鋼鉄の球を用いた場合に、ギャップの長さ 1.2mm の SF_6 ガスの破壊の $V-t$ 特性について求めた結果を図 12 に示す。針電極の場合と異なり、 $V-t$ 特性が傾き始める時間が短くなっており、1 気圧で約 2μs、3 気圧で約 4μs である。圧力の上昇と共に時間遅れが大きくなるが、針電極の場合に比べて約 1 けた小さくなっている。

このように $V-t$ 特性の形が異なるので、長い時間遅れの領域では球電極のほうが針電極に比べて破壊電圧が高いが、短い時間遅れの領域ではこの関係が逆転し、針電極の破壊電圧が高くなる。これは球電極の場合に電極の有効面積が大きく、統計時間遅れ T_s が針電極の場合に比べて小さいので、放電の時間遅れ ($T_s + T_F$) が小さくなるためである。また、 $V-t$ 特性が傾き始める時間は同一の圧力に対して、ギャップの長さと共に長くなり、同じギャップの長さに対しては圧力が上昇するほど長くなっている。

図 12 球-平板電極における SF₆ ガスの V-t 特性
Fig. 12. V-t characteristics of SF₆ gas in the sphere-plane electrode.

球-平板電極の球電極表面に生じる最大電界 $E_{\max}$ は、印加電圧を V 、ギャップの長さを L とすると次式で表わされる⁽¹⁷⁾。

$$E_{\max} = f \frac{V}{L} \dots\dots\dots (3)$$

ここで、 f : L/a の関数、 a : 球電極の半径
ギャップの長さ 0.3mm に対して $f=1.1$ 、0.6mm に対して $f=1.2$ 、1.2mm に対して $f=1.4$ である。

ここで、仮に電界を平等と仮定して、電子なだれのギャップ間の走行時間を計算してみる。電子なだれの速度は気体の破壊する E/p の領域で約 10^7 cm/s であるので、この実験に用いたギャップの長さに対する電子なだれの走行時間は ns のオーダーである。この値はラウエプロットから求めた形成時間遅れに比べて非常に小さい。そこで、次に電子なだれによって発生した電子が SF₆ ガスに捕えられ、生じた負イオンのギャップ間の走行時間を計算する。SF₆ ガス中で発生した負イオン SF₆⁻ の移動度は 5.7×10^{-1} cm²/V・s⁽¹⁸⁾ であるので、平等電界であると仮定して求めたこの負イオンのギャップ間の走行時間とラウエプロットから求めた形成時間遅れ T_F を図 13 に示す。これによると、SF₆ ガスにおいては電子なだれが生じたときに発生する負イオンの動きによって、後続の電子なだれの成長およびストリーマへの転移が起これと考えられる。すなわち、電子付着が小さければ単一電子なだれからストリーマへの転移は容易であるが、SF₆ ガスのように電子を付着して負イオンを作る場合には、この負イオ

図 13 球-平板電極における SF₆ ガスの破壊電圧と形成時間遅れおよび負イオンのギャップ間走行時間の関係
Fig. 13. Relations between the breakdown voltage of SF₆ gas and the formative time lag, and the transit time of the negative ion in the sphere-plane gap.

図 14 球-平板電極における SF₆ ガスの最小破壊電圧から求めた $E_{\max}/p$ と p の関係
Fig. 14. Relation between $E_{\max}/p$ calculated from the minimum breakdown voltage in the sphere-plane electrode and p the pressure of SF₆ gas.

ンが陽極に向かって移動することによってギャップ中に局部高電界が生じ、電子なだれが成長し、ストリーマになると考えられる。このように SF₆ ガスの絶縁破壊は、負イオンの影響を受けるために長い時間遅れになるものと思われる。

SF₆ ガス圧力を p 、(3)式を用いて計算した球-平板電極の球電極の表面に現われる最大電界を $E_{\max}$ とし、 $E_{\max}/p$ と p の関係を図 14 に示す。電離係数

図 15 球-平板電極における SF_6 ガスとポリエチレンフィルムからなる複合誘電体の $V-t$ 特性

Fig. 15. $V-t$ characteristics of composite dielectrics composed with SF_6 gas and the polyethylene film in the sphere-plane electrode.

$\alpha >$ 電子付着係数 η なる条件 $E_{\max}/p > 89 \text{ kV} \cdot \text{cm}^{-1} \cdot \text{atm}^{-1}$ は 1 気圧の SF_6 ガスについてはいずれのギャップの長さに対しても満たされているが、2 気圧以上では 1.2 mm のギャップの長さを除き満たされていない。すなわち、この臨界値より小さい値で SF_6 ガスが破壊している。特に短ギャップでこの傾向が顕著である。これは電極の表面に微小な突起が存在するためと考えられる。すなわち、 SF_6 ガスの気圧の上昇と共に破壊時の電界は上昇していることから、高気圧になると陰極表面の粗さの程度が重要となり、1 気圧では問題にならなかった微小突起が破壊のトリガになることが考えられる。更に、ギャップ中の電離係数 $\alpha <$ 電子付着係数 η なる領域においては、電子なだれは形成されなくても陰極から出た電子を SF_6 ガスが付着し、負イオンは作られる。そのため、ギャップ中に局所的な電界ひずみが生じ、 $\alpha > \eta$ を満足する電界が形成され、ストリーマまで進展するものとする。このような現象は高気圧、短ギャップにおいて顕著となる。

〈3.4〉 球電極- SF_6 ガス-ポリエチレン-平板電極の破壊の $V-t$ 特性 球-平板電極の平板電極の上にポリエチレンフィルムを置いた場合の破壊の $V-t$ 特性について調べた。ギャップの長さが 1.2 mm の場合の結果を図 15 に示す。図 16 および図 17 にギャップの長さが 1.2 mm および 0.3 mm の場合のポリエチレンフィルムの影響についてまとめた。

図 16 球-平板電極における $V-t$ 特性に及ぼすポリエチレンフィルムの影響(I)

Fig. 16. Effect of the polyethylene film on $V-t$ characteristics in the sphere-plane electrode (I).

図 17 球-平板電極における $V-t$ 特性に及ぼすポリエチレンフィルムの影響(II)

Fig. 17. Effect of the polyethylene film on $V-t$ characteristics in the sphere-plane electrode (II).

まず、ギャップの長さが 1.2 mm の図 16 について、最小破壊電圧に対しては SF_6 ガスの圧力が低いときにポリエチレンの効果が大きく、圧力の上昇と共にその効果が小さくなり、3 気圧ではほとんど差がない。また $V-t$ 特性が傾いている短時間領域については、ポリエチレンの効果は明らかでない。ギャップの長さの短い 0.3 mm については、同図に示すように特

にポリエチレンフィルムの効果が大きく、 $V-t$ 特性は重なることなく、ポリエチレンのあるほうが破壊の時間遅れが大きく、最小破壊電圧も上昇している。0.3mm のギャップの長さについては、 SF_6 ガスの圧力を上昇させても破壊電圧がそれほど上昇しない。しかし、ポリエチレンフィルムのそう入が破壊電圧の向上に有効である。

一方、ギャップの長さ 1.2mm の場合には、1 枚のポリエチレンフィルムをそう入する効果は短ギャップに比べて小さく、 SF_6 ガスの圧力の上昇によるほうが破壊電圧の向上には有効である。

このようにギャップの長さの大小によって、破壊電圧に対する SF_6 ガスの圧力とポリエチレンフィルムの効果の現われ方が異なることがわかった。これは高気圧 SF_6 ガスの破壊電界が高いので、陰極表面の微小突起から放出された電子および SF_6 ガスが付着した負イオンがポリエチレンフィルム上にたまり、ギャップ中の電界を緩和するためと思われる。このような効果は短ギャップ長で著しいので、破壊電圧の上昇となって現われるものと考えられる。

4. ま と め

SF_6 ガス単独およびポリエチレンフィルムとで構成した複合誘電体の方形波パルス電圧による絶縁破壊について調べた結果、次のことがわかった。

(1) 針-平板電極のような不平等電界における SF_6 ガスの破壊には、数百 μs にも及ぶ長い時間遅れが存在する。

(2) ポリエチレンフィルムを針-平板電極の平板の上に置き、 SF_6 ガスとの複合誘電体とすると破壊しにくくなり、時間遅れは大きくなるが $V-t$ 特性の傾向は変わらない。

(3) 球-平板電極における SF_6 ガスの時間遅れは短く、長くても数十 μs である。従って、球-平板電極の場合の SF_6 ガスの最小破壊電圧は針-平板電極の場合に比べて高いが、短い時間遅れの領域においては球-平板電極のほうが低い。

(4) 球-平板電極における SF_6 ガスの最小破壊電圧から求めた最大電界/圧力 E_{max}/p は短ギャップ、高気圧の領域においては $89 \text{ kV} \cdot \text{cm}^{-1} \cdot \text{atm}^{-1}$ よりはるかに小さい値となる。

(5) ポリエチレンフィルムを球-平板電極の平板の上に置き、 SF_6 ガスとの複合誘電体とすると、針電極の場合と同様に短ギャップでは SF_6 ガスのみの圧力の上昇によるよりも容易に破壊電圧が高くなる。しかし、ギャップが長くなると、 SF_6 ガスの圧力の上昇が破壊電圧を高めるのに有効である。

最後に、本研究を進めるにあたり、いろいろと御援助、御激励をいただきました大阪大学工学部大石研究室 吉野勝美助教授をはじめ、諸氏にお礼を申し上げます。

(昭和 56 年 4 月 13 日受付, 同 56 年 9 月 2 日再受付)

文 献

- (1) M.S. Bhalla & J.D. Craggs: "Measurement of ionization and attachment coefficients in sulphur hexafluoride in uniform fields", *Proc. Phys. Soc.*, **80**, 151 (1962)
- (2) T. Nitta & Y. Shibuya: "Electrical Breakdown of Long Gaps in Sulfur Hexafluoride", *IEEE Trans. Power Apparatus Syst.*, **PAS-90**, 1065 (1971)
- (3) 山田・藤原・新田: 「高気圧 SF_6 中の暗電流と絶縁破壊」, 電学誌 A, **93**, 37 (昭 48-1)
- (4) 遠藤・吉川: 「 SF_6 ガスの初回直流破壊電界と面積効果」, 同上 A, **99**, 265 (昭 54-6)
- (5) 永田・中山・大石: 「電気負性気体および不平等電界中の複合誘電体における部分放電」, 同上 A, **95**, 137 (昭 50-3)
- (6) 中山・天川・吉田・大石: 「方形波パルス電圧によるエポキシ樹脂中の針状ボイドからのトリッキング破壊」, 同上 A, **100**, 241 (昭 55-4)
- (7) 中北・小柳: 「 SF_6 ガス中におけるエポキシ樹脂板の部分放電劣化」, 同上 A, **94**, 233 (昭 49-6)
- (8) 家田・沢・宮入・篠原: 「空気-ポリエチレン複合絶縁系における気中コロナ放電を介した固体の絶縁破壊現象」, 電学誌, **89**, 580 (昭 44-3)
- (9) 家田・沢・宮入・篠原: 「単一気中・油中コロナ放電によるポリエチレンの絶縁破壊」, 同上, **90**, 956 (昭 45-5)
- (10) 中山・小野田・天川・吉田・大石: 「高分子の SF_6 ガス中における方形波パルス破壊」, 昭 54 電気関係学会関西支部連大, G5-1
- (11) 中山・小野田・天川・吉田・大石: 「複合誘電体 (SF_6 -ポリエチレン) の方形波パルス電圧による絶縁破壊」, 昭 55 電気学会全大, 297
- (12) J.H. Mason: "Breakdown of Solid Dielectrics in Divergent Fields", *Proc. Instn. Elect. Engrs*, **102**, 254 (1955)
- (13) 電気学会: 放電ハンドブック, p. 26 (昭 49)
- (14) 大重・原: 高電圧現象, p. 204 (昭 48) 森北出版
- (15) M. Von Laue: "Bemerkung zu K. Zuber's Messung der Verzögerungszeiten bei der Funkenentladung", *Ann. Phys. Lpz.*, **76**, 261 (1925)
- (16) 天川・森内・吉田・大石: 「ポリエチレンの電気伝導と絶縁破壊」, 電学誌, **84**, 129 (昭 39-1)
- (17) 電気学会技術報告, 「最近の電界計算法」, II, No. 98, 51 (昭 55)
- (18) 電気学会: 放電ハンドブック, p. 54 (昭 49)