

論文の内容の要旨

論文題目 「ナノ秒領域における絶縁ガスの放電進展現象」

氏名 豊田 裕之

放電現象は工業的に広く応用され長い研究の歴史を持つが、その進展機構には未だ解明されない点が多く残されている。これは放電現象が高速に進展する確率的現象であり、印加電圧・媒体・電極などの各種要因を分離して検討することが難しいためである。特に印加電圧は、波頭峻度・波高値・継続時間などのパラメータを持つが、放電はナノ秒オーダの短時間のうちに進展するため、その範囲でパラメータを独立に変化させることが難しい。

この問題を解決するために理想的な印加電圧波形は、方形波である。なぜならば、方形波電圧では所望の電圧が瞬時に印加され、設定した継続時間だけ波高値が一定に保たれるため、上に挙げた印加電圧に関する問題が解決するからである。

しかし気体中で数 cm オーダのギャップを用いて試験を行うためには、数百 kV の波高値とナノ秒オーダの立ち上がり時間を実現する必要がある。従来そのような方形波高電圧を発生することは困難であり、研究報告例はほとんどない。そこで本研究室では新たに開発された急峻方形波高電圧発生装置を導入し、ナノ秒オーダの短時間領域に焦点を当てた放電現象の観測を開始した。本装置は 200 kV の電圧波高値、16 ns の規約波頭長、10 μ s の継続時間、2.5%の減衰率を実現した画期的な装置である。これを用いることで、放電進展現象の体系的な整理が容易になるのはもちろんのこと、近年ガス絶縁開閉装置 (GIS) で問題になっている Very Fast Transient Overvoltage (VFTO) と呼ばれる数 MHz の急峻サージを想定した絶縁試験を行うこともできる。

一方で、現在電力機器の気体絶縁媒体には SF₆ ガスが広く用いられているが、同ガスは地球温暖化係数が高く、2005 年にも発効する見通しの京都議定書の中では削減対象に指定されている。そのため以前より SF₆ 代替ガスの模索が多く研究者によって行われてきた。しかし工業的に扱いやすく絶縁性能の高いガスは提案されておらず、SF₆-N₂ 混合ガスが現実的な候補として期待されている。

こうした背景から、本研究では SF₆ とその代替となり得る絶縁ガスを主な対象とし、急峻方形波高電圧を用いてナノ秒オーダの短時間領域で放電進展現象の測定を行った。具体的に測定対象に設定したガスは、SF₆、SF₆-N₂ 混合、CF₃I、CF₃I-N₂ 混合、CF₃I-Air 混合、CF₃I-CO₂ 混合の各ガスである。CF₃I ガスはもともと消火剤であるハロンの代替として開発された新しいガスで、環境負荷が極めて小さいのが特徴である。地球温暖化係数は SF₆ ガスの 24900 に対し、5 以下と小さく、オゾン層破壊係数も 0.0001 と非常に小さくなっている。

測定項目は、50%絶縁破壊電圧、 $V-t$ 特性、ストリーマの発光、電流値などである。 $V-t$ 特性とは、誘電体に電圧を印加し始めてから絶縁破壊に至るまでの時間と電圧の関係を表したもので、電力機器の絶縁性能評価の指標として用いられるものである。

以下、主な成果を簡単に紹介する。

1.2 μs の波頭長を持つ標準雷インパルスを用いて $V-t$ 特性の測定を行うと、通常放電遅れ時間 1 μs 程度までしか測定することができない。平等電界中では、この範囲での SF_6 ガスの $V-t$ 特性は比較的平坦であることが知られている。これに対し、急峻方形波高電圧を用いて測定を行うと、放電遅れ時間 10 ns 程度までの測定が可能となる。長時間側から放電遅れ時間 20 ns 付近までは平坦な $V-t$ 特性を示すが、それ以内の短時間領域ではスパークオーバ電圧が大きく上昇し、 $V-t$ 特性が折れ曲ることがわかった。不平等電界中では、 $V-t$ 特性が 2 段階に折れ曲る特性が現れる。この特性はギャップ長 10 mm よりも 20 mm でより顕著に現れる。

既に述べたように、 $\text{SF}_6\text{-N}_2$ 混合ガスの絶縁特性にはシナジズムが現れることが知られている。急峻方形波高電圧を印加して $V-t$ 特性を測定したところ、放電遅れ時間 10 ns 程度の短時間領域においてもシナジズムが確認された。定量的には、60%まで N_2 を混合しても絶縁特性の劣化はほとんど見られず、それ以上に N_2 の混合率を増してゆくと急激に劣化する。

CF_3I ガスはもともと消火剤として開発された経緯を持つが、電子の付着係数が SF_6 と並ぶほどに大きいため、絶縁性能が高い。 $V-t$ 特性を測定して SF_6 ガスと比較したところ、同条件で SF_6 よりも 30%ほど高い絶縁性能を持つことがわかった。これは 10 ns 程度の短時間領域でも変わらず、VFTO などの急峻サージの進入に対しても十分な耐性を持つことを意味する。

CF_3I ガスの絶縁ガスとしての弱点は、液化温度が高いことである。大気圧で -22.5°C 、GIS で用いられる 0.5 MPa の高気圧では 20°C 以上の温度で液化してしまう。そこで他の気体と混合して分圧を下げ、液化温度を低下させることを試みた。

CF_3I ガスを N_2 ならびに Air と混合した場合は、 $V-t$ 特性は混合比に対して線形に変化する。また、 $\text{CF}_3\text{I-N}_2$ 混合ガスと $\text{CF}_3\text{I-Air}$ 混合ガスの $V-t$ 特性の間には、ほとんど差が見られない。これらの混合ガスでは、 CF_3I の混合率が 60%の時に SF_6 ガスと同等の $V-t$ 特性を示した。

これに対して $\text{CF}_3\text{I-CO}_2$ 混合ガスの $V-t$ 特性は混合比に対して線形に変化せず、 CF_3I の混合率が 40%と 60%の間にほとんど差は見られない。

以上のように実験によって放電特性を見極めることは基本的かつ重要なことであるが、工業的には計算による機器設計が行えることが望ましい。急峻方形波高電圧を用いて得られた測定値は理想に近いと、シミュレーション結果のフィードバックも容易である。そこで、等面積則を適用した $V-t$ 特性の定量的評価と、陰極向きストリーマシミュレーションに基づいたストリーマ進展速度の評価を行った。

等面積則とは、印加電圧波形に対してある電圧を超える部分の電圧-時間積分値が放電特性を

決定するというものである。つまり、いったん電圧-時間積分値を求めてしまえば、理想的にはあらゆる印加電圧波形に対して $V-t$ 特性が求まることを意味する。本研究の測定から得られた実測値に対しこれを適用したところ、10 ns 付近の短時間領域まで含めて良好な一致が見られた。

続いて陰極向きストリーマシミュレーションにより求めたストリーマ進展速度と、高速度カメラによる光学的測定により取得した実測値を比較したところ、これも良好な一致が見られた。これにより、荷電粒子分布の時間変化がある程度まで推測できるようになった。

本研究では、主に平等電界の放電特性を調査した。現実には不平等電界が絶縁上の弱点となり、またコロナ放電の発生を経てスパークオーバに至るために過程が複雑になる。そのため不平等電界の特性は、平等電界の特性以上に興味深い点が多い。今後は不平等電界に焦点を当てて研究を進めてゆく必要があると考えられる。