

SF₆を含む混合ガスの絶縁耐力に関する相乗効果

正員 伊藤 秀 範 (室蘭工大)

准員 松村 俊 明 (室蘭工大)

正員 佐藤 孝 紀 (室蘭工大)

正員 中尾 好 隆 (室蘭工大)

正員 田頭 博 昭 (北海道大)

Synergistic Behaviour in Dielectric Gas Mixtures Containing SF₆

Hiddenori Itoh, Member, Toshiaki Matsumura, Associate, Kohki Satoh, Member, Yoshitaka Nakao, Member (Muroran Institute of Technology), Hiroaki Tagashira, Member (Hokkaido University)

The synergistic behaviour in dielectric gas mixtures containing SF₆ has been shown from $(E/N)_{lim}$, that is the E/N at which the net ionization coefficient is equal to zero, and investigated by a Boltzmann equation method. In this paper, the difference between SF₆ and nitrogen, and SF₆ and c -C₄F₈ mixtures, in dielectric strength has been explained by the calculated electron energy distributions and the respective sets of electron collision cross-sections. The dielectric characteristics in SF₆, N₂ and c -C₄F₈ mixtures has been also calculated and discussed in detail.

キーワード：SF₆、混合ガス、絶縁耐力、相乗効果、ボルツマン方程式法

1. ま え が き

SF₆ガスは優れた電氣的絶縁媒体として各種高電圧機器などに広く利用されている。同時に、早くからSF₆ガスの不平等電界下における絶縁性能の低下が指摘され、この欠点克服のためにSF₆を含む混合ガスの絶縁特性が精力的に研究されてきた⁽¹⁾。著者らも、これまでに混合ガスによる synergism (相乗効果) を利用したSF₆ガス絶縁方式の効率化に関連する研究を基礎過程の面から、主にボルツマン方程式法によって行ってきた。SF₆ガスの解析⁽²⁾、SF₆とN₂の混合ガスの解析⁽³⁾に引き続いて行った。SF₆と c -C₄F₈の混合ガスの解析では、絶縁耐力について強い相乗効果があることを示した⁽⁴⁾。すなわち、20%のSF₆と80%の c -C₄F₈混合ガスの絶縁耐力が混合率に対して最大値をもつ可能性を初めて論文として発表した。

一方、最近岡部らは、主にボルツマン方程式解析によってSF₆、N₂、 c -C₄F₈の3種混合ガスの絶縁耐力の相乗効果について論じている⁽⁵⁾。絶縁破壊によって

炭素を解離する c -C₄F₈の絶縁材料としての欠点を補うために、SF₆と c -C₄F₈の混合ガスにN₂を混合して、 c -C₄F₈の総量を抑制するというアイデアは、実用的には非常に有効であると思われる。前述のように、著者らはこれまでの研究で、妥当と思われるSF₆、N₂、 c -C₄F₈それぞれの電子衝突断面積のセットを見いだしている。ここでは、これらのセットを用いて、3種混合ガス中の電子スウォームの解析を、3項近似のボルツマン方程式法⁽⁶⁾によって行なった。本論文の目的は、この混合ガス中の電子エネルギー分布の解析結果とそれぞれの衝突断面積から、SF₆を含む混合ガスの絶縁耐力を評価し、絶縁性能に関する相乗効果について考察することである。

2. 電子衝突断面積

計算機の高速化に伴い、ボルツマン方程式法やモンテカルロシミュレーション法などによる気体中の電子群(スウォーム)の輸送現象の理論解析は、ますますその重要性が高まり、その適用範囲も広がっている。

各種混合ガス中の電子スウォームの解析も多く見られるようになった。混合ガス中の解析では、構成ガスの断面積のセットのほかに用いられるパラメータは混合率のみであり、構成ガスそれぞれの衝突断面積のセットの慎重な吟味が特に大切である。すなわち、計算されるそれぞれの単ガス中の各種電子スウォームパラメータがそれぞれの単ガス中の測定値と矛盾なく一致するセットが用意されなければならない。

本論文では、それぞれの単ガスについて、既に発表されていて、可能な限り新しく、モンテカルロシミュレーション法あるいは多項近似解析などのボルツマン方程式法で評価されていて、電子スウォームの観測原理の違いが十分に考慮されているセットを採用している。すなわち、 SF_6 と $c\text{-C}_4\text{F}_8$ は著者らがまとめたものを⁽⁷⁾⁽⁴⁾、 N_2 はOhmoriらがまとめたもの⁽⁸⁾をそれぞれ選択した。

3. 解析方法

解析は、文献(6)で示した方法で行った。本論文では SF_6 を含む混合ガスの絶縁耐力の評価を目的としているため、定常タウンゼント (SST) 法による解析結果のみを示して、論ずることにする。

電氣的負性気体の絶縁耐力は、 $\alpha=\eta$ となる換算電界 $(E/N)_{\text{lim}}$ で見積ることができる。ここで、 α , η , E , N は、電離係数、電子付着係数、電界強度、ガス分子数密度をそれぞれ示す。このことは、後述の図2に示されるように、 SF_6 と $c\text{-C}_4\text{F}_8$ 混合ガスの絶縁破壊電圧の測定値⁽⁹⁾ V_s をギャップの長さ d と N の積で割った値 $E_s/N = V_s/d \cdot N$ とボルツマン方程式法によって計算される $(E/N)_{\text{lim}}$ が、非常によく一致していることからわかる。従って、本論文でも $(E/N)_{\text{lim}}$ で絶縁耐力を評価することにする。

E/N については、基本的に283~566 Tdの範囲で計算を行い、 $(E/N)_{\text{lim}}$ がこの範囲外にあるときは、範囲を広げて計算を行った。なお、すべての計算で N は $3.5355 \times 10^{16} \text{ cm}^{-3}$ (1 Torr, 0°C)としている。図2の E_s/N は、 $N=1.6471 \times 10^{18} \text{ cm}^{-3}$ (46.6 Torr, 0°C)のときの測定値であり、 $(E/N)_{\text{lim}}$ の計算値と一致していることから、 N の選択には問題がないと考えられる。

4. 混合ガスによる SF_6 の絶縁特性の改善

文献(7)の図1からわかるように、 SF_6 の電子衝突断面積は、 SF_6^- および SF_5^- を形成する大きな電子付着断面積を有し、これにより、 SF_6 は優れた絶縁性能を示す。しかし電離断面積もまた大きく、 SF_6 は高

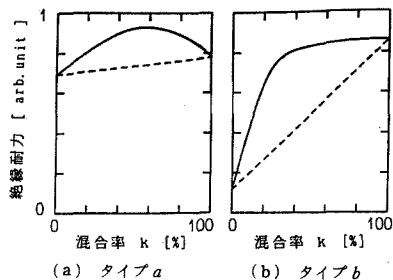


図1 絶縁耐力に関する相乗効果
Fig. 1. Schematic illustration of two types of synergistic behaviour for the breakdown strength in dielectric gas mixtures.

E/N で強電離性ガスとして振舞う。これらの性質をよく理解したうえで、混合ガスによる synergism を利用して SF_6 の絶縁性能を改善する可能性が生ずる。すなわち、 SF_6 の電離衝突成分を抑制する、あるいは SF_6^- , SF_5^- を形成する電子付着作用を積極的に利用する、という二つの見地から SF_6 に混合するガスを選択する必要がある。

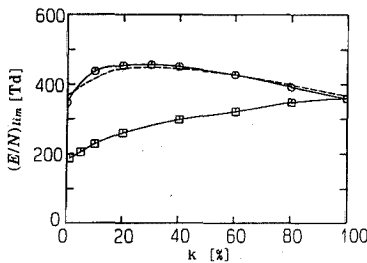
一般に synergism とは、ガスを混合したときに混合ガスのもつ特性が混合率 k に対して直線的な関係よりも高くなることをいう。Christophorou らは、絶縁耐力の synergism を、図1に示される図を用いて説明した⁽¹⁰⁾。すなわち、(a)図のように混合ガスの絶縁耐力が構成ガスの絶縁耐力よりも高くなるものと、それ以外のもの(b)図に分類した。本論文では、前者をタイプ a の synergism、後者をタイプ b の synergism と呼ぶことにする。

SF_6 を含む混合ガスの研究のなかでは、特に N_2 との混合ガスに関するものが多い。最近の研究例だけでも、Aschwanden⁽¹¹⁾, Fréchette⁽¹²⁾, Yousfi ら⁽¹³⁾, Phelps ら⁽¹⁾による論文があり、著者らもこの混合ガスの解析を行っている⁽³⁾。 N_2 以外では、Hasegawa ら⁽¹⁴⁾による空気との混合ガス、Christophorou ら⁽¹⁵⁾による CO_2 との混合ガス、文献(1)の O_2 や Ne との混合ガスなどの報告例がある。著者らは、Novak ら⁽¹⁶⁾により発表された $c\text{-C}_4\text{F}_8$ ガスの振動励起断面積が非常に大きいことに着目し、 SF_6 と $c\text{-C}_4\text{F}_8$ の混合ガスについても解析を行い報告した⁽⁴⁾。以下に SF_6 と N_2 の混合ガスならびに SF_6 と $c\text{-C}_4\text{F}_8$ の混合ガスの絶縁特性について、これまでの研究結果より考察してみる。

図2は SF_6 と N_2 , SF_6 と $c\text{-C}_4\text{F}_8$ のそれぞれの混合ガスの $(E/N)_{\text{lim}}$ (Td)を SF_6 の混合率 k (%)の関数として示した図である。前述のように、○印の SF_6

と $c\text{-C}_4\text{F}_8$ の混合ガスの $(E/N)_{\text{lim}}$ は、絶縁破壊電圧値から導出した E_s/N とよく一致している。また $(E/N)_{\text{lim}}$ は $k=20\%$ のときに最大値を示している。一方、 \square 印の SF_6 と N_2 の混合ガスの $(E/N)_{\text{lim}}$ は、 k の増加に伴って急速に立ち上がり、その後こう配はゆるやかになりつつ増加するが、 SF_6 の $(E/N)_{\text{lim}}$ を超えることはない。このように、図2は SF_6 に $c\text{-C}_4\text{F}_8$ を混合することにより、タイプ a の synergism を利用できること、ならびに SF_6 に N_2 を混合することによりタイプ b の synergism を利用できることをそれぞれ示している。

SF_6 を含む混合ガスの絶縁耐力に、タイプ a とタイプ b の synergism が現れることは、電子エネルギー分布と、構成ガスの電子衝突断面積から説明される。図3に SF_6 と N_2 の混合ガスの電子エネルギー分布を速度空間でルジャンドル展開した第1項目 F_0 について、 SF_6 の混合率 k をパラメータとして示す。(a)図は E/N が 141 Td のときの F_0 を、(b)図は E/N が



○, limiting E/N in SF_6 and $c\text{-C}_4\text{F}_8$ mixtures⁽⁴⁾; □, limiting E/N in SF_6 and N_2 mixtures⁽⁵⁾; (---) E_s/N in SF_6 and $c\text{-C}_4\text{F}_8$ mixtures at $N=1.6471 \times 10^{18} \text{ cm}^{-3}$ (6).

図2 臨界換算電界 $(E/N)_{\text{lim}}$ と E_s/N ⁽⁴⁾
Fig. 2. The limiting E/N and the E_s/N values as a function of k

707 Td のときの F_0 をそれぞれ示している。(a)図では N_2 の増加に伴って、 F_0 が 2 eV 付近に鋭いピークをもつようになるが、(b)図では N_2 の混合に伴う F_0 の顕著な変化は見られない。なお、5 eV 以下で見られる F_0 の振動は、 N_2 のように全衝突断面積が電子エネルギーに対して不規則で激しい変化をするガス中の解析を、3項近似によるボルツマン方程式法で行う場合にのみ見られるが、これに関する考察は文献(3)で行っているため、詳細はここでは省略する。

一方、図4は、図3と同様に、 SF_6 と $c\text{-C}_4\text{F}_8$ の混合ガスの F_0 を、 k をパラメータとして示した図である。(a)図 $E/N=283 \text{ Td}$ 、(b)図 $E/N=707 \text{ Td}$ いずれのときも $c\text{-C}_4\text{F}_8$ の混合に伴って分布関数は低エネルギー側にシフトしている。これは電子と $c\text{-C}_4\text{F}_8$ 分子との振動励起衝突から説明される。

図5に、それぞれのガスの振動励起断面積を示す。 $c\text{-C}_4\text{F}_8$ は大きな振動励起断面積をもち、 SF_6 に $c\text{-C}_4\text{F}_8$ を混合するに従い、電子は $c\text{-C}_4\text{F}_8$ 分子と振動励起衝突を起こしてエネルギーを失う確率が高くなる。その結果、電子エネルギー分布は低エネルギー側へシフトすることになり、 SF_6^- 、 SF_5^- を形成する電子付着作用がより活発になる。同時に、高いエネルギーをもつ電子が減少して、電離も抑制される。しかし、 $c\text{-C}_4\text{F}_8$ を入れすぎると、大きな電子付着係数をもつ SF_6 の割合が減るため、電子エネルギー分布が低エネルギーにシフトしても電子付着は減ることになる。これらのことから、タイプ a の synergism が現れる。一方、 N_2 を混合したときは、 N_2 の振動励起断面積が、広範囲の E/N で電子エネルギー分布を低エネルギー側にシフトさせるだけ十分な大きさをもたないので、 SF_6^- あるいは SF_5^- を形成する電子付着は、 $c\text{-C}_4\text{F}_8$ との混合ガスほどには活発にはならず、タイプ a の

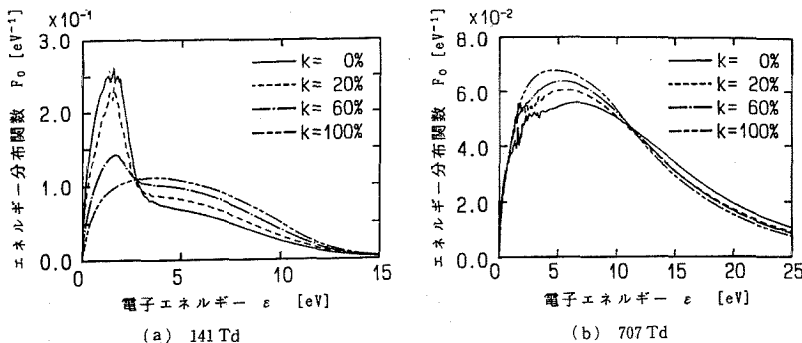


図3 SF_6 と N_2 混合ガスの電子エネルギー分布⁽³⁾
Fig. 3. The electron energy distributions for SF_6 and N_2 mixtures.

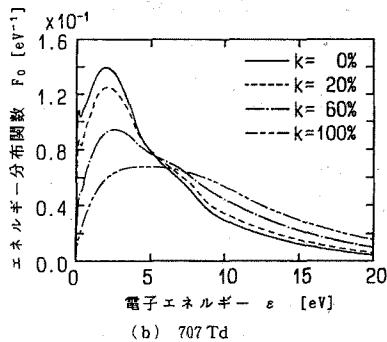
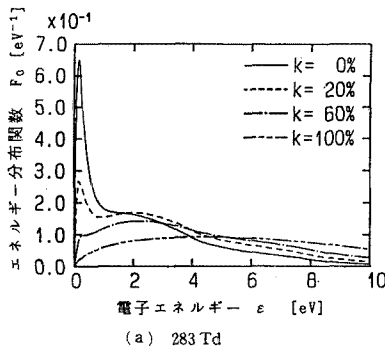


図 4 SF_6 と $c\text{-C}_4\text{F}_8$ 混合ガスの電子エネルギー分布
Fig. 4. The electron energy distributions for SF_6 and $c\text{-C}_4\text{F}_8$ mixtures.

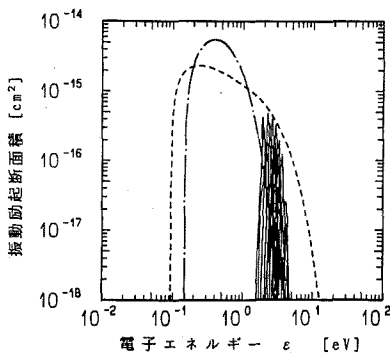


図 5 振動励起断面積
Fig. 5. The vibrational excitation cross sections for $\text{SF}_6^{(7)}$ (.....), $\text{N}_2^{(8)}$ (—) and $c\text{-C}_4\text{F}_8^{(4)}$ (— · —).

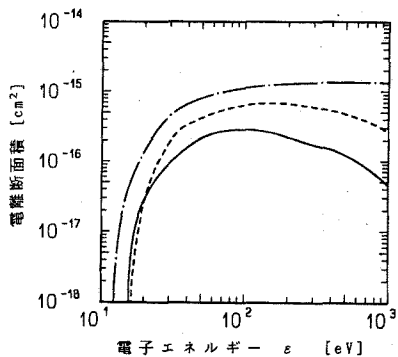


図 6 電離断面積
Fig. 6. The ionization cross sections for $\text{SF}_6^{(7)}$ (.....), $\text{N}_2^{(8)}$ (—) and $c\text{-C}_4\text{F}_8^{(4)}$ (— · —).

synergism を示すほど η が上がらない。また、図 6 に示すように、 N_2 の電離断面積は、 SF_6 のそれよりもかなり小さいので、 N_2 を混合することによって、 SF_6 成分の電離が抑制されて、タイプ b の synergism が現れる。

以上 SF_6 と N_2 、および SF_6 と $c\text{-C}_4\text{F}_8$ の混合ガスに関する絶縁特性について述べた。最近、岡部らは SF_6 、 N_2 、 $c\text{-C}_4\text{F}_8$ の 3 種混合ガスのボルツマン方程式解析を行い、その結果から絶縁特性を考察し報告している⁽⁵⁾。上述の結果から、これら 3 種混合ガスの絶縁特性は、タイプ a 、 b の synergism が組合されたものになることが予測される。そのことを確認する前に、岡部らの解析を評価してみる。岡部らの計算は、(i) N_2 のそれぞれ複数ある電子状態の励起および振動励起断面積を、それぞれ一本ずつにまとめて取扱っている。(ii) $c\text{-C}_4\text{F}_8$ の電子衝突断面積セットは Novak ら⁽¹⁶⁾ のものをそのまま使用し、妥当と思われる

N_2 の衝突断面積セットに修正を加えている。(iii) N_2 の混合率を 70% に固定しているなどの点で本解析と異なる。(i) は、文献(8)で決定しているそれぞれのしきい値が異なる電子励起 20 本、振動励起 10 本をそれぞれ一本にまとめていることを意味している。このことは、どの励起衝突をしても、電子は最小のしきい値のエネルギーのみを失うことになり、結果としてそれぞれの励起衝突を過小評価していることになる。文献(8)のセットの電子励起と振動励起をそれぞれ 1 本の断面積にまとめて計算すると、 $E/N=566 \text{ Td}$ で、電離係数は本解析値と約 40% の相違を生じた。(ii) は、得られる α 、 η ははじめ拡散係数、ドリフト速度などの電子スウォームパラメータが測定値と一致しないことから⁽⁴⁾、少なくとも矛盾に満ちた $c\text{-C}_4\text{F}_8$ のセットを使用していること、また(iii)は 3 種といたながら、 N_2 の混合率を固定して絶縁性能を評価していることをそれぞれ示している。実際に、本解析で得た結果は、後述するように岡部らが得た結論とは異なるも

のとなっている。

岡部らは更に、最近衝突断面積のセットを変更して3種混合ガスの解析を行っている⁽¹⁷⁾。しかし、N₂のセットの選択の基準はあいまいであり、各種スウォームパラメータの測定値との一致性によるセットの吟味がなされていないなどの問題が残っている。

5. 解析結果および考察

〈5・1〉 臨界換算電界 $(E/N)_{lim}$ 図7(a)は、SF₆、*c*-C₄F₈、N₂の3種混合ガスの $(E/N)_{lim}$ を、混合率の関数として立体的に示した図であり、同図を、N₂が100%の軸を中心にして、N₂が0%の面に投影した図が(b)図である。これらの図は、この3種混合ガスの絶縁特性を表現しており、混合ガスの絶縁耐力が予測したように、タイプ*a*, *b*の synergism の組合せによって表現されることを示している。破線で示した断面は、岡部らによる文献(5)の条件と一致させて計算した結果であり、図中の△印は、やはり文献(5)で相乗効果が見られるとした点を表している。○印はこの混合ガスにおける最大値を示しており、文献(4)のSF₆と*c*-C₄F₈の混合ガス中の $(E/N)_{lim}$ の最大値と一致する。

同図から、SF₆とN₂の混合ガスの絶縁耐力を効果的に上げるには、タイプ*a*の相乗効果が利用できる

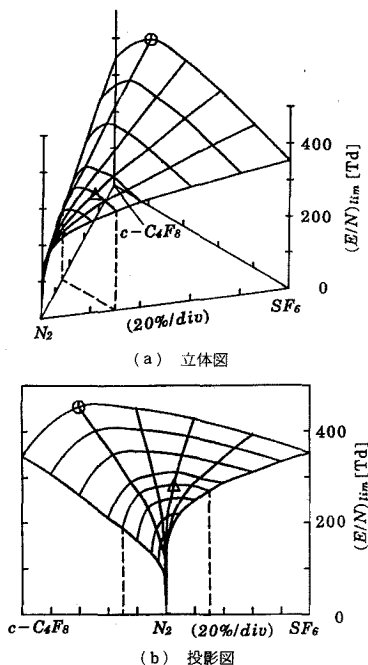


図7 臨界換算電界 $(E/N)_{lim}$
Fig. 7. The limiting E/N values.

ように、*c*-C₄F₈をSF₆に対して80%程度混合する必要があること、またN₂の混合率を全体の50%程度より少なくしなければならないことを示している。しかし同時に、この図は3種混合ガスによる絶縁耐力の予測を可能にしており、使用目的に合わせて最適の混合割合を同図から選択することができる。

次に $(E/N)_{lim}$ が上のような振舞いを示すことを電離係数、電子付着係数およびそれらを構成する各種の付着成分の観点から調べてみる。

〈5・2〉 電離係数 図8は、 $E/N=283, 424, 566$ Tdにおける電離係数を混合率の関数として表したものであり、(a), (b)図はそれぞれ図7と同様に表現している。電離係数は、どの E/N においてもSF₆の混合率が100%において最大であり、*c*-C₄F₈あるいはN₂の混合に伴って減少し、*c*-C₄F₈の混合率が100%において最小となる。この図からも、SF₆はN₂や*c*-C₄F₈と比べて強電離性ガスであり、 E/N の上昇に従って、それが顕著になることがわかる。

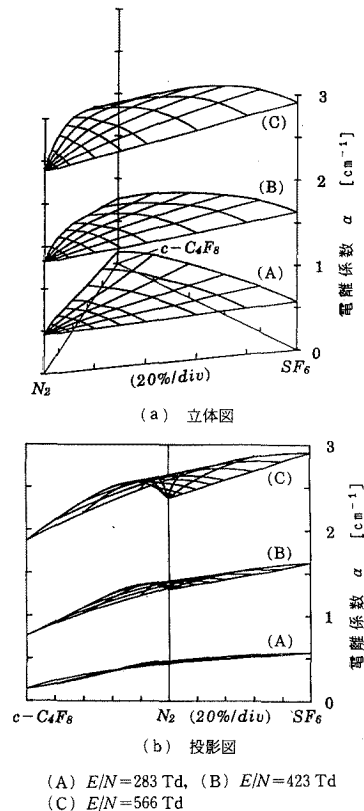


図8 電離係数
Fig. 8. The ionization coefficient.

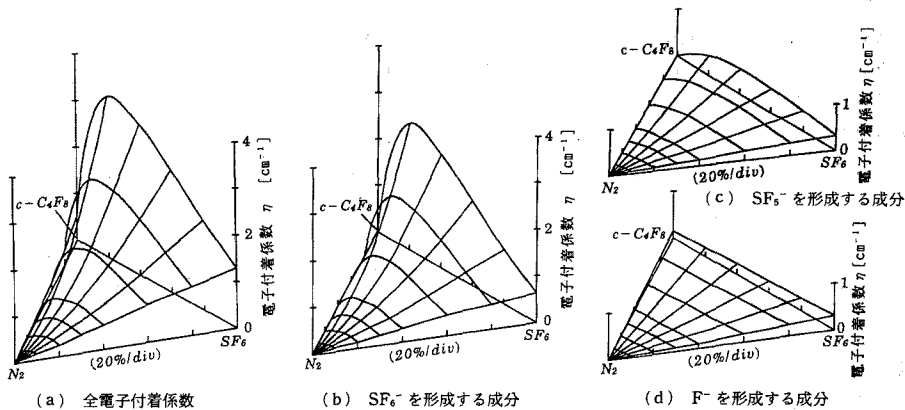


図 9 電子付着係数
Fig. 9. The electron attachment coefficients(at $E/N=283$ Td.).

〈5・3〉 電子付着係数 図 9 は $E/N=283$ Td における電子付着係数を、混合率の関数として立体的に示した図である。(a)図は全電子付着係数を、(b)図は SF_6^- を形成する成分を、(c)図は SF_5^- を形成する成分を、(d)図は F^- を形成する成分をそれぞれ示している。これらの図から次のことがいえる。

(1) 電子付着係数は、その大部分が SF_6^- を形成する成分からなり、その残りのほとんどは、 SF_5^- および F^- を形成する成分からなる。

(2) SF_6^- 、 SF_5^- を形成する成分は、 $c-C_4F_8$ の混合率によって変化し、 $(E/N)_{lm}$ が最大となる混合率においてピークをもち、特に SF_6^- は鋭いピークとなる。

(3) F^- を形成する成分は、 N_2 の混合率を一定とすれば、ほとんど変化しない。

これらの結果は、混合ガスの電子付着係数が、 SF_6 の電子付着断面積に強く依存し、 $c-C_4F_8$ の電子付着断面積にほとんど依存しないことを示している。(2) は $c-C_4F_8$ を混合することによって、 SF_6^- あるいは SF_5^- を形成する電子付着が盛んになることを意味している。また(3)は、 SF_6 と $c-C_4F_8$ の F^- を形成する電子付着断面積にほとんど差がないことによる⁽⁴⁾⁽⁷⁾。

6. おわりに

以上、 SF_6 を含む混合ガスの $(E/N)_{lm}$ が、混合するガスの種類、混合率によってどのように変化するかについて、ボルツマン方程式法による理論解析から考察した。これは数値計算による予測であるが、 SF_6 と N_2 、 SF_6 と $c-C_4F_8$ のそれぞれの混合ガスの実験値がよく

予測と一致するので、3種混合ガスに関する予測が、実験値と一致する可能性は極めて高いと考えられる。

混合ガスによる synergism を利用して SF_6 ガス絶縁方式の効率化を図るためには、低エネルギー部分にある SF_6 の大きな電子付着断面積を利用しなければならないことを、 N_2 と $c-C_4F_8$ を取上げて、それぞれの混合ガスの電子エネルギー分布と電子衝突断面積から説明した。すなわち、低エネルギー部分に大きな振動励起断面積をもつ $c-C_4F_8$ ガスを混合することによって、電子エネルギー分布が低エネルギー側にシフトして、 SF_6 成分の電子付着衝突が盛んになり、 SF_6 より大きな絶縁耐力をもつことを示した。また $c-C_4F_8$ ほど大きくはないが、同じく低エネルギーに振動励起断面積をもち、電離断面積が SF_6 よりも小さい N_2 を混合すると、絶縁耐力が混合率に対して直線的な関係よりも大きくなることを示した。

SF_6 、 N_2 、 $c-C_4F_8$ の3種混合ガスの絶縁耐力は、 SF_6 と N_2 、 SF_6 と $c-C_4F_8$ のそれぞれの混合ガスの相乗効果を組合されて表現されることを示した。すなわち、どの程度の $c-C_4F_8$ を混合すると N_2 と SF_6 の混合ガスの絶縁耐力を上げることができるかを、それぞれの混合率に対して示した。また、3種混合ガスの電子付着係数は、そのほとんどが SF_6^- および SF_5^- を形成する成分からなり、これが、混合ガスにおける絶縁耐力に関する相乗効果が現れる原因であることを示した。

最後に、本研究に対して貴重な御討論をいただいた徳島大学生田信浩教授および北海道大学医療技術短期大学部下妻光夫助教授に心から感謝します。

(平成4年3月4日受付、同4年10月19日再受付)

文 献

- (1) 例えば, A. V. Phelps & R. J. Van Brunt: "Electron-transport, ionization, attachment, and dissociation coefficients in SF₆ and its mixtures", *J. Appl. Phys.*, **64**, 4269 (1988)
- (2) H. Itoh, M. Kawaguchi, K. Satoh, Y. Miura, Y. Nakao & H. Tagashira: "Development of electron swarms in SF₆", *J. Phys. D: Appl. Phys.*, **23**, 299 (1990)
- (3) H. Itoh, Y. Ohmori, M. Kawaguchi, Y. Miura, Y. Nakao & H. Tagashira: "Electron energy distribution and transport coefficients of electron swarms in SF₆ and nitrogen mixtures", *ibid.*, **23**, 415 (1990)
- (4) H. Itoh, T. Miyachi, M. Kawaguchi, Y. Nakao & H. Tagashira: "Electron transport coefficients in SF₆ and c-C₄F₈ mixtures", *ibid.*, **24**, 277 (1991)
- (5) 岡部・佐々木: 「三成分混合ガス(N₂/SF₆/c-C₄F₈)の電子スウォームパラメータ解析と絶縁特性」, 電学論A, **111**, 205 (平3-3)
- (6) H. Itoh, M. Kawaguchi, M. Takada, Y. Nakao & H. Tagashira: "A three-term Boltzmann equation analysis of electron swarms in gases for the time-of-flight condition", *J. Phys. D: Appl. Phys.*, **22**, 1095 (1989)
- (7) H. Itoh, Y. Miura, N. Ikuta, Y. Nakao & H. Tagashira: "Electron swarms development in SF₆: I. Boltzmann equation analysis", *ibid.*, **21**, 922 (1988)
- (8) Y. Ohmori, M. Shimozuma & H. Tagashira: "Boltzmann equation analysis of electron swarm behaviour in nitrogen", *ibid.*, **21**, 724 (1988)
- (9) 種田: 「混合ガスの電離係数測定と絶縁破壊特性の測定」, 北海道大学大学院修士論文 (昭59)
- (10) L. G. Christophorou, D. R. James & R. A. Mathis: "Dielectric gas mixtures with polar components", *J. Phys. D: Appl. Phys.*, **14**, 675 (1981)
- (11) T. Aschwanden: "Swarm parameters in SF₆ and SF₆/N₂ mixtures determined from a time resolved discharge study. Gaseous Dielectrics IV (ed. L. G. Christophorou & M. O. Pase), p. 24 (1984) Pergamon
- (12) M. F. Fréchette: "Experimental study of SF₆/N₂ and SF₆/CCl₂F₂ mixtures by the steady-state Townsend method", *J. Appl. Phys.*, **59**, 3684 (1986)
- (13) M. Yousfi & A. Chatwiti: "Determination of collision cross sections in SF₆ coherent with swarm parameter measurements", *Proc. Int. Conf. on Phenomena in Ionized Gases X VIII*, (ed. W. T. Williams), p. 8 (1987) Hilger
- (14) H. Hasegawa, A. Taneda, K. Murai, M. Shimozuma & H. Tagashira: "Measurement of the effective ionization coefficient in SF₆ and air mixtures at high E/p₀ values", *J. Phys. D: Appl. Phys.*, **21**, 1745 (1988)
- (15) L. G. Christophorou, I. Sauers, D. R. James, H. Rodrigo, M. O. Pace, J. G. Carter & S. R. Hunter: "Recent Advances in Gaseous Dielectrics at Oak Ridge National Laboratory", *IEEE Trans. Elect. Insulation*, **EI-19**, 550 (1984)
- (16) J. P. Novak & M. F. Fréchette: "Collisional cross sections of c-C₄F₈ and transport coefficients of c-C₄F₈ and N₂-c-C₄F₈ mixtures", *J. Appl. Phys.*, **63**, 2570 (1988)
- (17) 森田・家永・原田・岡部: 「N₂/SF₆/c-C₄F₈混合ガスの電子スウォームパラメータ解析の比較検討」, 電気学会放電研資, BD-92-34 (平4)



伊 藤 秀 範 (正員)

昭和26年10月26日生。55年北海道大学大学院工学研究科博士後期課程修了。同年徳島大学工業短期大学部勤務。59年室蘭工業大学勤務, 現在に至る。

工学博士。日本物理学会, 応用物理学会, 放電研究グループ会員。



松 村 俊 明 (准員)

昭和43年5月2日生。平成3年室蘭工業大学電気工学科卒業。同年同大学大学院工学研究科博士前期課程電気電子工学専攻入学, 現在に至る。



佐 藤 孝 紀 (正員)

昭和38年12月17日生。63年室蘭工業大学大学院工学研究科修士課程電気工学専攻修了。平成3年北海道大学大学院工学研究科博士後期課程電気工学専攻修了。同年室蘭工業大学勤務, 現在に至る。工学博士。



中 尾 好 隆 (正員)

昭和12年7月25日生。37年北海道大学工学部電気工学科卒業。38年同大学工業教員養成所勤務。43年室蘭工業大学勤務, 現在に至る。工学博士。照明学会, 放電研究グループ会員。



田 頭 博 昭 (正員)

昭和8年1月13日生。33年北海道大学工学部電気工学科卒業。36年同大学大学院博士課程中退。同年北海道大学工学部勤務, 現在に至る。イギリス・リバプール大学 Ph. D. 工学博士。電離気体現象国際会議国際科学委員会委員。照明学会, 日本物理学会, 応用物理学会, プラズマ核融合学会, 放電研究グループ会員。