

平成 22 年 6 月 8 日現在

研究種目：基盤研究 (A)
 研究期間：2007～2009
 課題番号：19206029
 研究課題名（和文）CF₃I ガスを利用した環境に優しい高性能ガス絶縁方式に関する基礎研究
 研究課題名（英文）Environmentally friendly high-performance gas insulation system using CF₃I gas
 研究代表者
 日高 邦彦 (HIDAKA KUNIHICO)
 東京大学・大学院工学系研究科・教授
 研究者番号：90181099

研究成果の概要（和文）：

絶縁ガスとして使用されている SF₆ ガスは地球温暖化に与える影響が大きい。そこで SF₆ ガスに代わる絶縁方式が必要とされている。本研究では SF₆ 代替ガスとして、温暖化係数が CO₂ 並みに小さいが絶縁性能が SF₆ ガスに匹敵する CF₃I について、機器への適用可能性について検討を行った。不平等電界ギャップ放電特性、沿面放電特性、放電によるガスの劣化と分解生成物の影響などの測定によって、実際に機器で 사용되는場合の問題点やその対策などを検討した。

研究成果の概要（英文）：

SF₆ gas has high global-warming-potential (GWP), and is one of the gases for the restriction. Therefore, the research and the development of alternative insulating gases to SF₆ are actively done in recent years. GIS, in which air or N₂ gas is used as insulating gas, is developed recently. However, most of GIS for more than 72kV class still use SF₆ gas. Therefore, the improvement of insulation performance of SF₆ substitutions is one of important issues.

In this research, CF₃I gas which is one of promising SF₆ substitutions is examined. The GWP of CF₃I gas is low, and its insulation performance is equal or superior to SF₆ gas. The substitutability of CF₃I is examined through measuring sparkover voltages in various non-uniform electric fields, flashover voltages on the surface of insulating material and by-products generated by the sparkover and the flashover.

交付決定額

(金額単位：円)

	直接経費	間接経費	合計
2007 年度	11,900,000	3,570,000	15,470,000
2008 年度	14,400,000	4,320,000	18,720,000
2009 年度	10,800,000	3,240,000	14,040,000
年度			
年度			
総計	37,100,000	11,130,000	48,230,000

研究分野：工学

科研費の分科・細目：電力工学・電気機器工学

キーワード：電気機器工学、電子・電気材料、電力工学、環境対応、電気絶縁

1. 研究開始当初の背景

現在絶縁ガスとして広く用いられている SF₆ ガス（六フッ化イオウ）は地球温暖化係数（100 年換算）が CO₂ の 23900 倍と非常に高く、削減対象に指定されている。今後の地球温暖化問題に対する関心の高まりによって削減対象から使用禁止というように規制強化される可能性も考えられ、SF₆ 代替ガスの実用化が求められている。

過去 30 年に亘り、新しいガスの探索が行われてきたが、絶縁性能、消弧性能、環境安全性、毒性の有無、不可燃性、科学的安定性、液化特性、生産コストなどの面で総合的に SF₆ ガスに勝るガスは発見されていなかった。しかし、近年ハロン消火剤（オゾン層破壊物質として法的規制）の代替物質の一つである CF₃I ガス（ヨウ化トリフルオロメタン）が高い絶縁性能を持ち地球温暖化に与える影響が極めて小さいということで、SF₆ 代替ガスとして注目されている。

2. 研究の目的

地球温暖化係数が SF₆ に比べて小さい CF₃I を活用することにより、電力機器絶縁における SF₆ ガス使用料を削減し、なおかつ高い絶縁信頼性を実現できる高性能ガス絶縁方式の提案を目指す。

3. 研究の方法

ガス絶縁開閉器内部で形成され得る条件に着目し、(1)不平等電界ギャップのスパークオーバー電圧特性の測定、(2)大気圧ガス中での沿面放電特性の測定、(3)沿面放電特性のガス圧依存性の測定、(4)放電による分解生成物の影響の測定評価を行った。放電特性の測定には、印加電圧の波頭峻度の影響を除去し、ガス絶縁開閉器の絶縁設計合理化には欠かせないナノ秒オーダの短時間領域の放電進展現象の観測が行える、立ち上がり時間 16ns、減衰率 10 μ s 経過後で約 2.5% という急峻方形波電圧を用いた。

4. 研究成果

(1)不平等電界ギャップのスパークオーバー電圧特性

ガス自体の基本的な絶縁耐力の指標が現れる準平等電界から、機器に金属異物混入時に形成される極端な不平等電界まで、電界分布の不平等性(電界利用率 η)が異なる 4 種類の電極($\eta=0.89, 0.45, 0.38, 0.095$)を用いて、スパークオーバー特性の測定を行なった。図 1、2 に CF₃I と SF₆ の各電界利用率での $V-t$ 特性を示す。これらを比較すると CF₃I の方が SF₆ より電界利用率の変化による変化が大きいことが分かる。このことにより準平等条件下では CF₃I の方が SF₆ よりスパークオーバー電圧が高いのに対して、極端な不平等条件下で

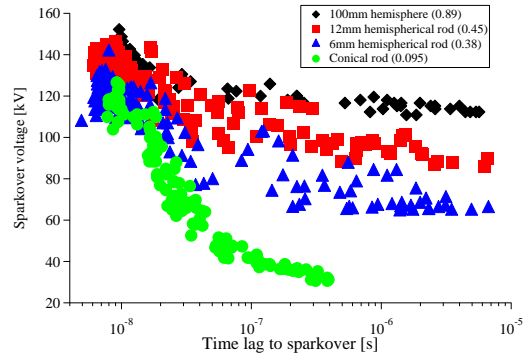


図 1 $V-t$ 特性(CF₃I, 0.1 MPa, ギャップ長 10 mm, 正極性急峻方形波)

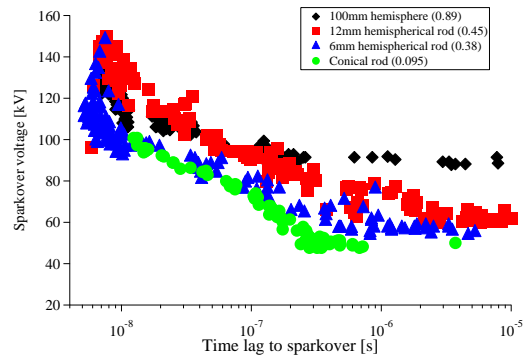


図 2 $V-t$ 特性(SF₆, 0.1 MPa, ギャップ長 10 mm, 正極性急峻方形波)

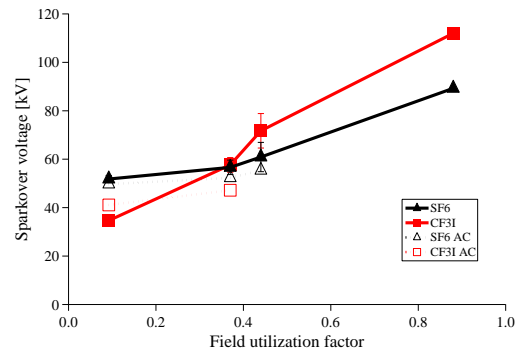


図 3 最低スパークオーバー電圧と電界利用率の関係

は CF₃I のほうが SF₆ よりスパークオーバー電圧が低くなっている。

図 3 に CF₃I と SF₆ の最低スパークオーバー電圧と電界利用率の関係を示す。準平等電界である $\eta=0.89$ において CF₃I ガスは SF₆ ガスの 1.2 倍程度のスパークオーバー電圧を示すこと、最も電界の不平等性が強い $\eta=0.095$ において CF₃I ガスは SF₆ ガスの 0.7 倍程度のスパークオーバー電圧を示す。また、 $\eta=0.38$ で CF₃I と SF₆ の最低スパークオーバー電圧はほぼ等しい値を取る。

このことから電界利用率 $\eta=0.5$ 以上となる

ように設計される通常の機器では CF_3I ガスは SF_6 代替ガスとして十分な絶縁性能を持っているが、金属異物混入などによって不平等性が高くなった場合 CF_3I ガスの絶縁性能は大きく低下してしまうことが判明した。すなわち、 CF_3I ガスを絶縁ガスとして用いる場合はこれまで以上に金属異物混入対策などのメンテナンス面での対応が重要であると言える。

(2) 大気圧ガス中での沿面放電特性

実際の電力機器では、高圧母線を電力用エポキシ性で保持するなど、複合絶縁システムを採用している。絶縁上の弱点はこの固体と気体の界面部分に現れる。そこで、沿面距離 (10mm, 20mm, 30mm)、背後電極の有無、誘電体素材 (PTFE, PMMA) を変化させて、 CF_3I , SF_6 の沿面フラッシュオーバー電圧特性の測定を行った。

図 4 に大気空気、 CF_3I 、 SF_6 の沿面距離 10mm、0.1MPa、正極性急峻方形波印加時の $V-t$ 特性を示す。

CF_3I と SF_6 の 1 回目の沿面フラッシュオーバー電圧を比較すると CF_3I は SF_6 の 1~1.2 倍の絶縁性能であったが、数十回沿面フラッシュオーバーが起きた後の沿面フラッシュオーバー電圧は SF_6 の約 0.6 倍まで低下することがわかった。 CF_3I 中での沿面放電後の誘電体表面には茶色の物質が付着していることが観察された。これは放電によって分解生成されたヨウ素であると考えられ、これによって絶縁性能が低下したと考えられる。

GIS などの絶縁機器は事故などによって内部で絶縁破壊が起こった場合はオーバーホールを行ってから運転を再開するので、絶縁破壊事故の場合のヨウ素付着の影響は問題ない。気をつけなければならないのは内部で不平等電界が形成され、部分放電によってヨウ素が生成、付着してしまうことである。これに対しては気体ギャップ放電の不平等電界の場合と同様に金属異物混入防止を徹底し、部分放電の検出に力を入れることで対応できると考えられる。また、 CF_3I は飽和蒸気圧が低く、実機への適用には、ガス混合によって CF_3I の分圧を下げ液化を防ぐという方法をとることが考えられる。そこで、急峻方形波印加時と 50Hz 交流電圧印加時の CF_3I 混合ガスの放電特性の測定を行った。混合するガスとしては自然界に存在するガスを選び、 N_2 , CO_2 を対象とした。測定結果の一例を図 5 に示す。急峻方形波印加時の $\text{CF}_3\text{I}/\text{CO}_2$ 混合ガスのフラッシュオーバー電圧は CF_3I 混合率に比例的に増加せず、 CF_3I 混合率を 0% から 5% に変化させた場合でフラッシュオーバー電圧の変化が最も大きいという、強いシナジズムを示すことが分かった。これは適切ガス種を混合相手として選択すること

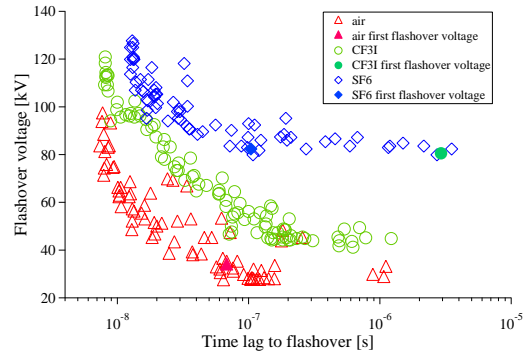


図 4 $V-t$ 特性 (0.1 MPa, 沿面距離 10 mm, PTFE 沿面, 正極性急峻方形波)

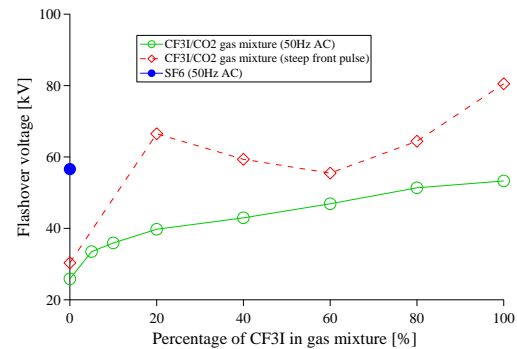


図 5 CF_3I 混合率とフラッシュオーバー電圧の関係

により、絶縁性能を保ったまま液化温度を下げることを示唆するものである。

(3) 沿面放電特性のガス圧依存性

実際に絶縁ガスが機器内部で使用される場合は 0.1MPa ではなく、高圧で使用される場合が多い。図 6 に CF_3I の 0.1MPa と 0.2MPa の $V-t$ 特性を示す。

図 6 では気圧が高い場合の方が絶縁性能が高いことが分かる。また、ヨウ素が付着する前の最低火花電圧、ヨウ素が付着した後の最低火花電圧の上昇比率は 1.55 倍と 1.37 倍であり、高圧であるほどヨウ素の付着の影響が大きい。

表 1 は 0.1MPa でのそれぞれの最低火花電圧を 1 とした場合の、0.2MPa にした場合の最低火花電圧が何倍に変化したかを示している。放電に関わる要因が気体だけの CF_3I の 12mm 半球棒と 6mm 半球棒の気体ギャップ放電での最低火花電圧が気圧を 2 倍にした影響が最も大きく 1.6 倍以上に変化している。放電に関わる要因が、気体だけでなく誘電体もある SF_6 とヨウ素が付着後の CF_3I の沿面フラッシュオーバー電圧は気体ギャップ放電より低い 1.5 倍前後である。

ヨウ素が付着する前の CF_3I の最低沿面火

花電圧は最も低い 1.37 倍であった。しかし、この値は 1 回目の放電時にしか測定することができないものであり、ばらつきが大きい。よって、この条件については更なる検証が必要である。

(4)放電による分解生成物

準平等電界下気体ギャップ放電、不平等電界下気体ギャップ放電、沿面放電による分解生成物について、GC-MS で解析を行った。平等電界下気体ギャップ放電は、波高値 135kV の急峻方形波を 100 回連続で印加し、測定範囲は放電 25 回から 1300 回まで、不平等電界下気体ギャップ放電は、波高値 43kV の急峻方形波を 200 回連続で印加し、測定範囲は放電 0 回から 1400 回まで、沿面放電は、波高値 83kV の急峻方形波を 200 回連続で印加し、測定範囲は放電 0 回から 800 回までの条件で測定を行った。

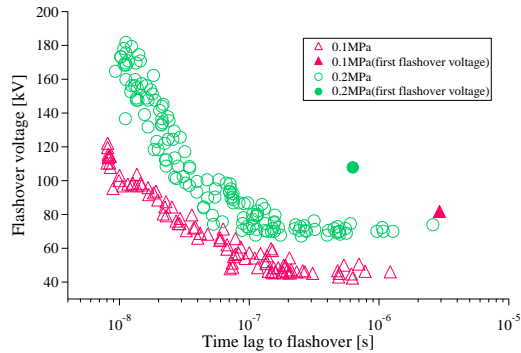


図 6 V-t 特性(CF₃I, 沿面距離 10 mm, PTFE 沿面, 正極性急峻方形波)

表 1 0.1MPa と 0.2MPa の比較

	0.1MPa と 0.2MPa での最低火花電圧の比
CF ₃ I(沿面)	1.52
CF ₃ I(沿面、first flashover voltage)	1.37
SF ₆ (沿面)	1.47
SF ₆ (沿面、first flashover voltage)	1.55
CF ₃ I(12mm φ 半球棒、気体ギャップ)	1.66
CF ₃ I(6mm φ 半球棒、気体ギャップ)	1.63

図 7 に準平等電界での放電回数 25 回、300 回、500 回、700 回、1000 回、1300 回の時のガスクロマトグラフィを示す。

図中に CF₃I ガスと放電回数によって変化が見られる成分の名前を記しており、放電回数によって変化があると考えられるのは C₂F₆、C₂F₄、CHF₃、C₃F₈、C₃F₆、C₂F₅I の 6 種類

である。不平等電界と沿面放電での測定においても、この 6 種類以外の分解生成ガスは観測されなかった。また、これらの分解生成ガスの生成量は放電回数に比例していることが分かった。

表 2 に準平等電界、不平等電界、PTFE 沿面での C₂F₆、C₂F₄、CHF₃、C₃F₈、C₃F₆、C₂F₅I の 6 種類の分解生成物の 1 回の放電での生成量を示す。

表 3 は表 2 の準平等電界の各値を 1 としたときの比を表している。不平等電界に関しては C₂F₄ 以外は印加電圧比に近い値を取っており、PTFE に関しては C₂F₆ 以外は印加電圧比に近い値を取っている。

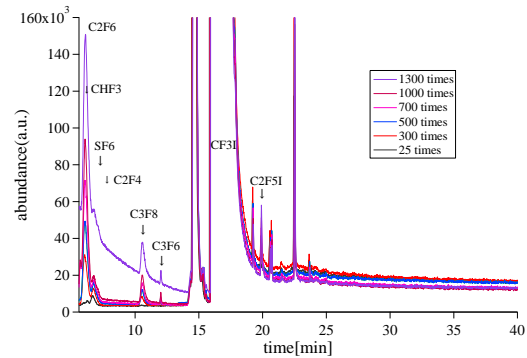


図 7 ガスクロマトグラフィ

表 2 1 回の放電による分解生成物の生成量

	準平等電界 [ppm]	不平等電界 [ppm]	PTFE 沿面 [ppm]
印加電圧 [kV]	135	43	83
C ₂ F ₆	0.119	0.0423	0.0317
C ₂ F ₄	0.0057	0.00348	0.00294
CHF ₃	0.0147	-	-
C ₃ F ₈	0.0112	0.00452	0.00718
C ₃ F ₆	0.00122	0.000501	0.000683
C ₂ F ₅ I	0.00739	0.00335	0.00522

表 3 準平等電界を 1 とした場合の比較

	準平等電界	不平等電界	PTFE 沿面
印加電圧	1	0.0319	0.615
C ₂ F ₆	1	0.355	0.266
C ₂ F ₄	1	0.615	0.515
C ₃ F ₈	1	0.403	0.641
C ₃ F ₆	1	0.411	0.560
C ₂ F ₅ I	1	0.453	0.706

また、沿面放電での放電回数による絶縁性能の変化を測定するために

- ① 沿面放電 800 回の後、V-t 特性を測定
 - ② 沿面放電 10 回の後、V-t 特性を測定
- の 2 通りの V-t 特性を測定した。

その結果が図 8 である。この図から放電回数 800 回の後でも $V-t$ 特性に大きな変化は見られないことが分かる。

図 9 に放電回数と放電遅れ時間の関係を示す。放電遅れ時間は初めの 1 回の放電だけ 1000ns 以上であり、それ以降は 15~30ns で安定していることがわかる。気体ギャップ放電では絶縁性能の低下が見られたが、沿面放電では放電回数 800 回ではほとんど変化が見られないことの原因は PTFE に付着したヨウ素が沿面放電において支配的な影響力を持っているからであることが考えられる。

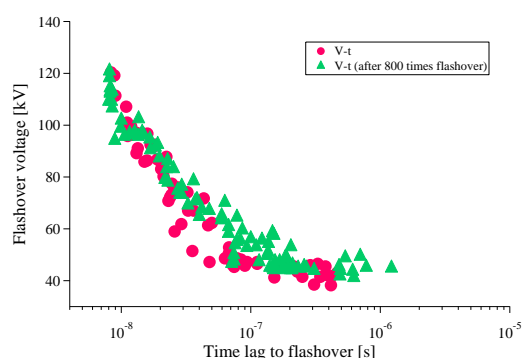


図8 放電回数による絶縁性能の変化

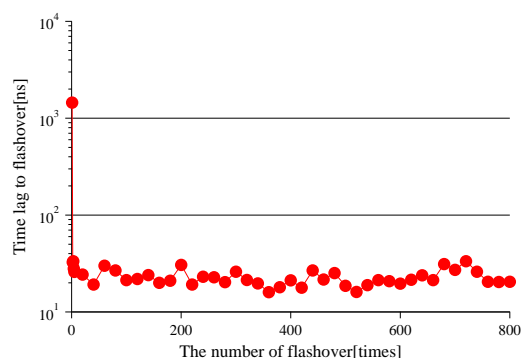


図 9 放電回数と放電遅れ時間の関係

(5)まとめ

本研究によって CF_3I は SF_6 に匹敵する高い絶縁性能をもっていることが明らかとなった。このことから SF_6 が低ガス圧で用いられる、低電圧絶縁機器において CF_3I は SF_6 代替ガスとなりうると言える。高ガス圧で用いられる高電圧絶縁機器に関してもガス混合によって今後対応できると考えている。

5. 主な発表論文等

(研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線)

[雑誌論文] (計 2 件)

- ① 武田敏信, 松岡成居, 熊田亜紀子, 日高邦彦: CF_3I ガス及び CF_3I/N_2 混合ガスの不平等電界下における放電特性, 査読有, Vol. 130, No. 9(2010)掲載予定
- ② 武田敏信, 宇尾寛志, 松岡成居, 熊田亜紀子, 日高邦彦: 急峻方形波印加時の CF_3I の放電特性, 放電研究, 査読なし, Vol. 51, No. 4, pp. 20-21, 2008

[学会発表] (計 16 件)

- ① Toshinobu Takeda, Shigeyasu Matsuoka, Akiko Kumada and Kunihiko Hidaka: Breakdown Characteristics of CF_3I/CO_2 Gas Mixture on Dielectric Surface, Proceedings of the 10th University of Tokyo-Seoul National University Joint Seminar on Electrical Engineering, pp. 47-50, Seoul, March 12, 2010
- ② Toshinobu Takeda, Shigeyasu Matsuoka, Akiko Kumada, and Kunihiko Hidaka: Breakdown characteristics of CF_3I on the dielectric surface, Proceedings of 2009 Korea-Japan Joint Symposium on Electrical Discharge and High Voltage Engineering, OB-3, pp. 104-107, Pusan, Nov. 5, 2009
- ③ Toshinobu Takeda, Shigeyasu Matsuoka, Akiko Kumada, and Kunihiko Hidaka: Sparkover and Surface Flashover Characteristics of CF_3I Gas under Application of Nanosecond Square Pulse Voltage, 16th International Symposium on High Voltage Engineering, C-55, CD Rom, pp. 1-6, Cape Town, Aug. 24, 2009
- ④ Kunihiko Hidaka: On the Better Understanding of Electrical Discharge Phenomena Through Advanced Measurement Technologies, Proceedings of the 17th International Conference on Gas Discharges and their Applications, invited lecture, pp. 57-69, Cardiff, Sept. 11, 2008
- ⑤ Toshinobu Takeda, Shigeyasu Matsuoka, Akiko Kumada, and Kunihiko Hidaka: By-product of CF_3I produced by spark discharge, Proceedings of 2007 Japan-Korea Joint Symposium on Electrical Discharge and High Voltage Engineering, 17A-p7, pp. 157-160, Tokyo, Nov. 17, 2007
- ⑥ Toshinobu Takeda, Akiko Kumada, Kunihiko Hidaka and Shigeyasu Matsuoka: Breakdown Characteristics of CF_3I Gas in Uniform and Non-Uniform Field Gap under Various Voltage Applications of Nanosecond Pulse to AC,

Proceedings of 15th International
Symposium on High Voltage Engineering,
T9-647, p. 364, Ljubljana, Slovenia,
Aug. 27, 2007

〔図書〕(計 2 件)

- ① 日高邦彦:数理工学社, 高電圧工学, 277,
2009

〔その他〕

受賞

- ① 日高邦彦:電気学会業績賞、2008 年 5 月
23 日 (CF3I ガス絶縁を含む絶縁材料工
学に対する貢献に対して)
- ② Toshinobu Takeda: Best Paper
Presentation Award, 2009 Korea-Japan
Joint Symposium on Electrical
Discharge and High Voltage
Engineering, Nov. 9, 2009 (論文
"Breakdown characteristics of CF3I on
the dielectric surface"に対して)

6. 研究組織

(1) 研究代表者

日高 邦彦(HIDAKA KUNIHICO)
東京大学・大学院工学系研究科・教授
研究者番号: 90181099

(2) 研究分担者

熊田 亜紀子 (KUMADA AKIKO)
東京大学・大学院工学系研究科・准教授
研究者番号: 20313099

松岡 成居 (MATSUOKA SHIGEYASU)
東京大学・大学院工学系研究科・助教
研究者番号: 10114646

(3) 連携研究者

該当なし