

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）CF<sub>3</sub>I 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 CF<sub>3</sub>I 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 SF<sub>6</sub> ガスは地球温暖化に与える影響が大きい。そこで SF<sub>6</sub> ガスに代わる絶縁方式が必要とされている。本研究では SF<sub>6</sub> 代替ガスとして、温暖化係数が CO<sub>2</sub> 並みに小さいが絶縁性能が SF<sub>6</sub> ガスに匹敵する CF<sub>3</sub>I 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、実際に機器で使用される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）：

SF<sub>6</sub> 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 SF<sub>6</sub> are actively done in recent years. GIS, in which air or N<sub>2</sub> gas is used as insulating gas, is developed recently. However, most of GIS for more than 72kV class still use SF<sub>6</sub> gas. Therefore, the improvement of insulation performance of SF<sub>6</sub> substitutions is one of important issues.

In this research, CF<sub>3</sub>I gas which is one of promising SF<sub>6</sub> substitutions is examined. The GWP of CF<sub>3</sub>I gas is low, and its insulation performance is equal or superior to SF<sub>6</sub> gas. The substitutability of CF<sub>3</sub>I 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SF<sub>6</sub>ガス（六フッ化イオウ）は地球温暖化係数（100年換算）がCO<sub>2</sub>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、SF<sub>6</sub>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SF<sub>6</sub>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CF<sub>3</sub>I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、SF<sub>6</sub>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SF<sub>6</sub>に比べて小さいCF<sub>3</sub>Iを活用することにより、電力機器絶縁におけるSF<sub>6</sub>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 $\mu$ 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 $\eta$ )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CF<sub>3</sub>IとSF<sub>6</sub>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CF<sub>3</sub>Iの方がSF<sub>6</sub>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CF<sub>3</sub>Iの方がSF<sub>6</sub>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

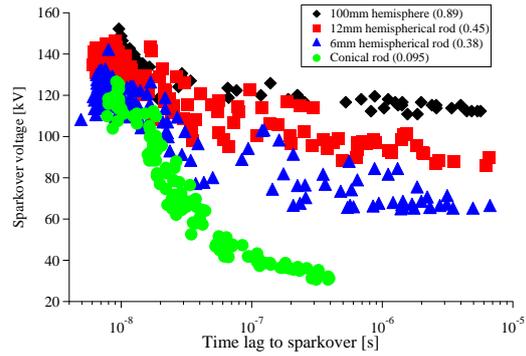


図1 V-t特性(CF<sub>3</sub>I, 0.1 MPa, ギャップ長10 mm, 正極性急峻方形波)

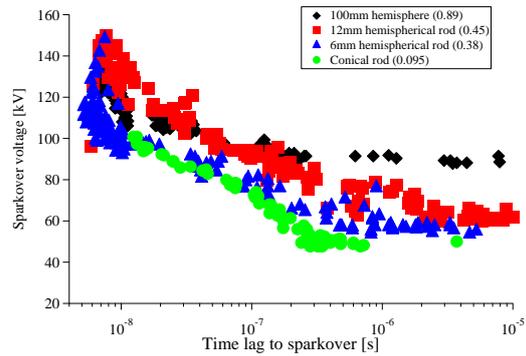


図2 V-t特性(SF<sub>6</sub>, 0.1 MPa, ギャップ長10 mm, 正極性急峻方形波)

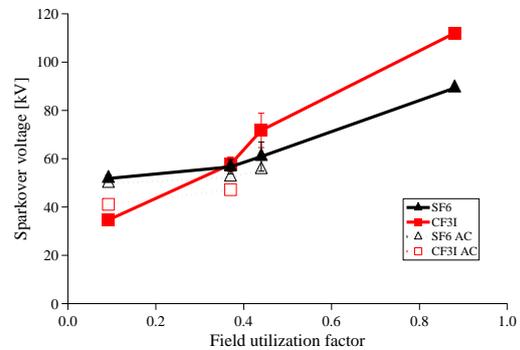


図3 最低スパークオーバー電圧と電界利用率の関係

はCF<sub>3</sub>IのほうがSF<sub>6</sub>よりスパークオーバー電圧が低くなっている。

図3にCF<sub>3</sub>IとSF<sub>6</sub>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CF<sub>3</sub>IガスはSF<sub>6</sub>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CF<sub>3</sub>IガスはSF<sub>6</sub>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CF<sub>3</sub>IとSF<sub>6</sub>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  $\text{CF}_3\text{I}$  ガスは  $\text{SF}_6$  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  $\text{CF}_3\text{I}$  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、 $\text{CF}_3\text{I}$  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、 $\text{CF}_3\text{I}$ ,  $\text{SF}_6$  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、 $\text{CF}_3\text{I}$ 、 $\text{SF}_6$  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。

$\text{CF}_3\text{I}$  と  $\text{SF}_6$  の 1 回目の沿面フラッシュオーバー電圧を比較すると  $\text{CF}_3\text{I}$  は  $\text{SF}_6$  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  $\text{SF}_6$  の約 0.6 倍まで低下することがわかった。 $\text{CF}_3\text{I}$  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、 $\text{CF}_3\text{I}$  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  $\text{CF}_3\text{I}$  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  $\text{CF}_3\text{I}$  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、 $\text{N}_2$ ,  $\text{CO}_2$  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  $\text{CF}_3\text{I}$  混合率に比例的に増加せず、 $\text{CF}_3\text{I}$  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

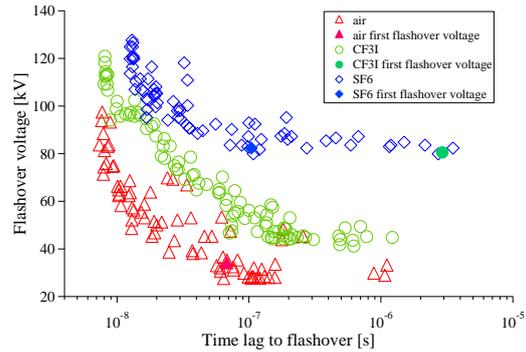


図 4  $V-t$  特性 (0.1 MPa, 沿面距離 10 mm, PTFE 沿面, 正極性急峻方形波)

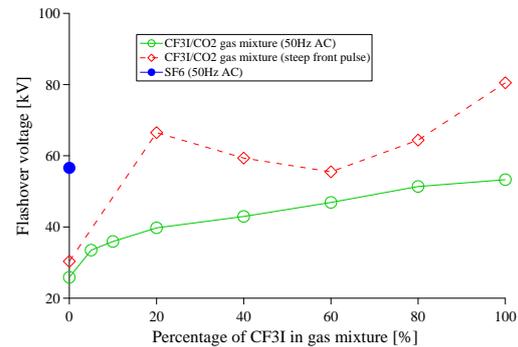


図 5  $\text{CF}_3\text{I}$  混合率とフラッシュオーバー電圧の関係

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  $\text{CF}_3\text{I}$  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  $\text{CF}_3\text{I}$  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  $\text{SF}_6$  とヨウ素が付着後の  $\text{CF}_3\text{I}$  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  $\text{CF}_3\text{I}$  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。

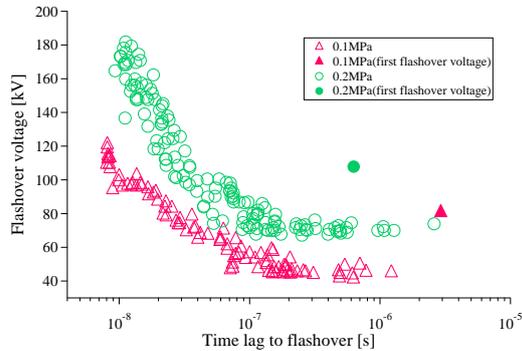


図 6 V-t 特性(CF<sub>3</sub>I, 沿面距離 10 mm, PTFE 沿面, 正極性急峻方形波)

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 <sub>3</sub> I(沿面)	1.52
CF <sub>3</sub> I(沿面、first flashover voltage)	1.37
SF <sub>6</sub> (沿面)	1.47
SF <sub>6</sub> (沿面、first flashover voltage)	1.55
CF <sub>3</sub> I(12mm φ 半球棒、気体ギャップ)	1.66
CF <sub>3</sub> 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 CF<sub>3</sub>I 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 C<sub>2</sub>F<sub>6</sub>、C<sub>2</sub>F<sub>4</sub>、CHF<sub>3</sub>、C<sub>3</sub>F<sub>8</sub>、C<sub>3</sub>F<sub>6</sub>、C<sub>2</sub>F<sub>5</sub>I 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 C<sub>2</sub>F<sub>6</sub>、C<sub>2</sub>F<sub>4</sub>、CHF<sub>3</sub>、C<sub>3</sub>F<sub>8</sub>、C<sub>3</sub>F<sub>6</sub>、C<sub>2</sub>F<sub>5</sub>I 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 C<sub>2</sub>F<sub>4</sub> 以外は印加電圧比に近い値を取っており、PTFE に関しては C<sub>2</sub>F<sub>6</sub> 以外は印加電圧比に近い値を取っている。

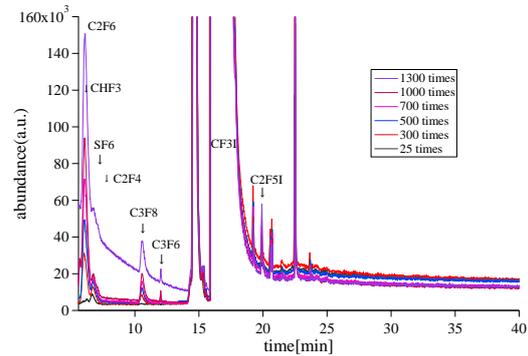


図 7 ガスクロマトグラフィ

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 <sub>2</sub> F <sub>6</sub>	0.119	0.0423	0.0317
C <sub>2</sub> F <sub>4</sub>	0.0057	0.00348	0.00294
CHF <sub>3</sub>	0.0147	-	-
C <sub>3</sub> F <sub>8</sub>	0.0112	0.00452	0.00718
C <sub>3</sub> F <sub>6</sub>	0.00122	0.000501	0.000683
C <sub>2</sub> F <sub>5</sub> 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 <sub>2</sub> F <sub>6</sub>	1	0.355	0.266
C <sub>2</sub> F <sub>4</sub>	1	0.615	0.515
C <sub>3</sub> F <sub>8</sub>	1	0.403	0.641
C <sub>3</sub> F <sub>6</sub>	1	0.411	0.560
C <sub>2</sub> F <sub>5</sub> 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 回後も  $V-t$  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。

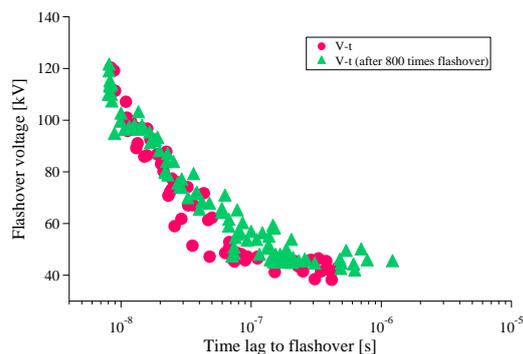


図8 放電回数による絶縁性能の変化

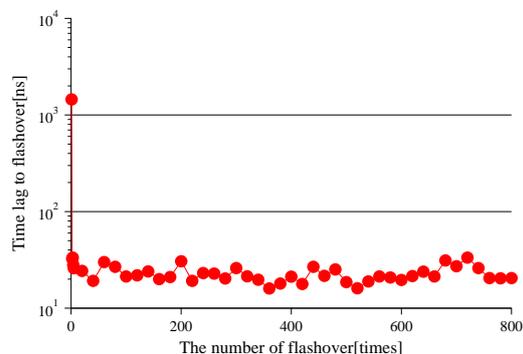


図9 放電回数と放電遅れ時間の関係

### (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