

## 科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 26 年 6 月 12 日現在

機関番号：12601

研究種目：基盤研究(A)

研究期間：2010～2013

課題番号：22246035

研究課題名(和文)高性能低環境負荷CF3I絶縁方式の実用可能性に関する基礎研究

研究課題名(英文)Fundamental study on practical application of high-performing and environmentally-friendly CF3I gas insulation system

研究代表者

日高 邦彦(Hidaka, Kunihiko)

東京大学・工学(系)研究科(研究院)・教授

研究者番号：90181099

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 38,300,000円、(間接経費) 11,490,000円

研究成果の概要(和文)：地球温暖化ガスとして削減が求められているSF6ガスの代替としてCF3Iガスに着目し、その可能性を検証した。準平等電界下ではCF3IはSF6より絶縁性能が高いが、極端な不平等電界下ではCF3IはSF6より絶縁性能が低いことや沿面絶縁について詳細な特性を明らかにした。又、CF3Iは高気圧では液化の懸念があるので、混合ガスの利用が有効であり、CF3I/N<sub>2</sub>、CF3I/CO<sub>2</sub>、CF3I/SF<sub>6</sub>混合ガスの放電特性を体系的に測定し検討した。検討結果から不平等電界が形成され難いGIL(管路気中送電路)への応用が最も適し、ガス組成としてはCF3I/N<sub>2</sub>(混合比30%:70%程度)が有力であることを示した。

研究成果の概要(英文)：CF3I gas is one of alternatives to SF6 gas, which are utilized for electric power equipment, and has some advantages as follows: the insulation performance of CF3I is equivalent or superior to SF6 in uniform field and its global warming potential, GWP, is quite low as same as CO<sub>2</sub>. It has, however, a low sparkover voltage in non-uniform field. The surface flashover voltage on a new and clean insulator in CF3I gas is 1-1.2 times higher than that in SF6 gas. As the saturated vapor pressure of CF3I gas is low, the reduction of partial pressure of CF3I gas is effectively reduced by mixing other gases in order to prevent CF3I from devolatilization. The insulation characteristics of CF3I/N<sub>2</sub>, CF3I/CO<sub>2</sub> and CF3I/SF<sub>6</sub> mixtures are systematically investigated. Through these discussions, it is proposed that the most optimum gas is CF3I/N<sub>2</sub> mixture and that it can be practically applied to gas insulated transmission lines, GIL.

研究分野：工学

科研費の分科・細目：電気電子工学、電力工学・電力変換・電気機器

キーワード：電気機器 ガス絶縁 CF3Iガス 絶縁性能 絶縁破壊現象 SF6ガス V-t特性 沿面放電

### 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、上で挙げられたガスと共に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。

筆者らを中心に、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)に着目していた。CF<sub>3</sub>I ガスは地球温暖化係数が 1 と非常に低く、ある一定条件下であるが CF<sub>3</sub>I ガスの絶縁性能は SF<sub>6</sub> ガスより優れていることが見出されており、CF<sub>3</sub>I ガスを電気絶縁媒体に適用することが期待できる状況となっていた。ただ、CF<sub>3</sub>I ガスを実用機器に応用するに当たり解明しなければならない特性が多数存在しており、地球環境が問われる新世紀において、本研究の実施が求められていた。

### 2. 研究の目的

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)は地球温暖化に与える影響が大きく、使用量の削減が求められている。本研究においては、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 CF<sub>3</sub>I ガス(ヨウ化トリフルオロメタン)を SF<sub>6</sub> 代替ガスとして用いることにより、電力機器絶縁として用いられている SF<sub>6</sub> ガス使用量を削減し、なおかつ高い絶縁信頼性を実現できる低環境負荷高性能ガス絶縁方式の提案を行う。特に実用化を見据えて、絶縁設計において必要不可欠となる項目の解明や、機器適用時の課題抽出と解決法の提案を行う。

### 3. 研究の方法

気体が電気絶縁媒体として使用される実用機器(ガス絶縁開閉装置、ガス絶縁変圧器、管路気中送電線路)に CF<sub>3</sub>I ガスを適用することを考え、(1)基本的な絶縁性能(絶縁破壊電圧、部分放電開始電圧、沿面フラッシュオーバー電圧、V-t 特性など)の体系的な把握、(2)絶縁性能の予測する手法の開発、実用化にむけての課題検討という観点から、(3)CF<sub>3</sub>I ガスを含む混合ガス中の絶縁性能評価、(4)放電分解生成物(ヨウ素)の絶縁性能への影響評価と除去方法の検討、(5)SF<sub>6</sub> ガス代替となる候補の比較評価、について検討を行った。絶縁性能の測定には、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 10μs 経過後で約 2.5% という急峻方形波電圧発生器を用いた。

### 4. 研究成果

(1) 準平等電界においては CF<sub>3</sub>I ガス中の正

極性急峻方形波印加時の最低スパークオーバー電圧はギャップ長 10mm で 112kV と高い値を示した。負極性 V-t 特性は正極性 V-t 特性より高いスパークオーバー電圧を示し、50Hz 交流電圧印加時のスパークオーバー電圧は方形波印加時の最低スパークオーバー電圧より 5% 低い値を示した。針 平板電極のように電界不平等性が強い場合、絶縁性能が低下するが、特に CF<sub>3</sub>I ガスについては低下が著しい。最低スパークオーバー電圧は、負極性の方が正極性の約 2 倍の値となった。CF<sub>3</sub>I ガスと SF<sub>6</sub> ガスの絶縁性能を比較すると、準平等電界において CF<sub>3</sub>I ガスは SF<sub>6</sub> ガスより高い絶縁性能をもち、一方、不平等電界ではその関係は逆転した(図 1 参照)。

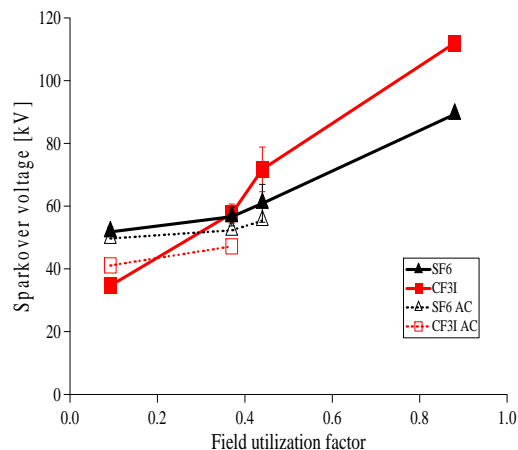


図1 最低スパークオーバー電圧と電界利用率の関係

(2) 沿面放電に対しては CF<sub>3</sub>I ガスは SF<sub>6</sub> ガスと同等以上の高い絶縁性能を持っている。しかし、背後電極がない場合、放電によって発生する固体ヨウ素が誘電体スペーサ表面に付着し絶縁性能低下の原因となる。高速度カメラを用いて沿面放電の様子の撮影を行い、背後電極の有無や、固体ヨウ素付着による影響で放電の形状が異なることが観測された。

(3) CF<sub>3</sub>I ガスの実効電離係数と電界計算に基づいて考察を行い、CF<sub>3</sub>I ガスや SF<sub>6</sub> ガスの絶縁性能の電界分布依存性を明らかにした。また、沿面放電においては背後電極の有無が最大電界に大きく作用し、電界に敏感な CF<sub>3</sub>I ガスの沿面フラッシュオーバー電圧に大きな影響を与えること、などを明らかにした。

(4) CF<sub>3</sub>I ガスは液化温度が必ずしも低くないために、超高電圧級以上の送変電機器で使用される 5 気圧 SF<sub>6</sub> ガスの直接的な代替ガスにはなりにくく、液化温度の低いガスとの混合ガスにして利用する必要がある。そこで、混合の対象となりうる N<sub>2</sub> と CO<sub>2</sub> を取り上げ、CF<sub>3</sub>I ガスとこれらガスとの混合ガス中での絶縁破壊特性を検討した。絶縁設計上重要となる破壊電圧 - 破壊遅れ時間特性 (V-t 特性) を中心に測定を行い、混合比については冬季で

も液化の心配がなく、また不平等電界下での絶縁性能が SF<sub>6</sub> 並であると判明した CF<sub>3</sub>I を 20 % 混合する場合に固定して実験を行った。準平等電界下では、0.05 MPa ~ 0.15 MPa の圧力領域において、V-t 特性の全ての時間領域に渡り、CF<sub>3</sub>I の混合相手である N<sub>2</sub> と CO<sub>2</sub> の間に差は見られなかった。電子の衝突断面積データセットに基づきボルツマン方程式の数値解析を行い実効電離係数を求め、シューマンの火花条件式で判定することにより最低火花電圧を理論的に予測することに成功した。不平等電界下では、圧力を増加させていくと、いずれの混合ガスにおいても V-t 特性は上昇していくが、その増加量は徐々に飽和し、0.3 MPa と 0.5 MPa に対する特性間の差はほとんど見られなくなっている。また、いずれの混合ガスにおいても明確なコロナ安定化作用は観測されなかった。電界平行型の沿面放電においては、急峻な電圧波形の場合に放電生成物であるヨウ素の影響を受け破壊電圧が低下し、一方、交流電圧印加時には受けないことがわかった。電界垂直型の沿面放電では、ほぼ純粋 CF<sub>3</sub>I と同等の絶縁性能を示し、また、放電生成物であるヨウ素の影響をほとんど受けないことがわかった。準平等電界下であっても、回数を重ねるうちに電極の汚染とガスの劣化により絶縁性能が低下する。活性炭を用いることにより、ガスの劣化については防ぐことができることを見出した。

(5) SF<sub>6</sub> ガスの代替ガスとして注目される CF<sub>3</sub>I 混合ガスの研究の延長線上として、SF<sub>6</sub> を混合させた実験を行い、これまでの研究結果と比較することで、CF<sub>3</sub>I を電力機器に適用する際の最適なガス種および混合率を検討した。CF<sub>3</sub>I / SF<sub>6</sub> 混合ガスは、準平等電界印加時の絶縁破壊特性において「負のシナジズム」を示し、一方、不平等電界において「正のシナジズム」を示した。特に、CF<sub>3</sub>I / SF<sub>6</sub> (20%:80%、40%:60%) の混合率で、SF<sub>6</sub> を凌ぐ絶縁破壊電圧値となった。また沿面放電においては、CF<sub>3</sub>I が混合されると副生成物の影響から、絶縁破壊電圧が低下することがわかった。なお、先行研究の N<sub>2</sub> や CO<sub>2</sub> でも同様の結果が得られている。

(6) 全体的に見て、CF<sub>3</sub>I/SF<sub>6</sub> 混合ガスは非常に良い絶縁性能を示しているのが、大きな GWP を補償できるような巨大なメリットがあるわけではないということから、SF<sub>6</sub> 代替ガスとしての候補からは外すべきであると判断した。混合の対象となりうるものとして N<sub>2</sub> と CO<sub>2</sub> を取り上げ、また、評価項目としてガス圧、飽和蒸気圧、不平等電界特性、沿面放電特性、GWP を採用し定量的な評価を行った。SF<sub>6</sub> の絶縁性能と同等以上となる場合を最良として順位付けを行った結果 (表 1 参照) 混合ガスにおいては、CF<sub>3</sub>I/N<sub>2</sub> と CF<sub>3</sub>I/CO<sub>2</sub> において、混合比が 2 : 8 ないし 4 : 6 であるとき

に最適となった。CF<sub>3</sub>I を利用する電力機器としては遮断、開閉機構を含まない GIL (管路気中送電路) が開発対象の第 1 に挙げられる。

表 1 CF<sub>3</sub>I 混合ガスのランキング

1	CF <sub>3</sub> I/N <sub>2</sub> (20%:80%)
2	CF <sub>3</sub> I/CO <sub>2</sub> (20%:80%)
3	CF <sub>3</sub> I/N <sub>2</sub> (40%:60%)
4	CF <sub>3</sub> I/CO <sub>2</sub> (40%:60%)
5	CF <sub>3</sub> I/N <sub>2</sub> (60%:40%)
6	CF <sub>3</sub> I
7	CF <sub>3</sub> I/N <sub>2</sub> (80%:20%)
8	CF <sub>3</sub> I/CO <sub>2</sub> (60%:40%)
9	CF <sub>3</sub> I/CO <sub>2</sub> (80%:20%)

(7) GIL を模した同軸円筒電極における交流絶縁破壊電圧について混合ガス中で実験を行い、いずれもシミュレーション値と実測値がほぼ一致していることを明らかにした (図 2 参照)。このことにより、GIL はシミュレーションベースで絶縁設計ができることを示した。

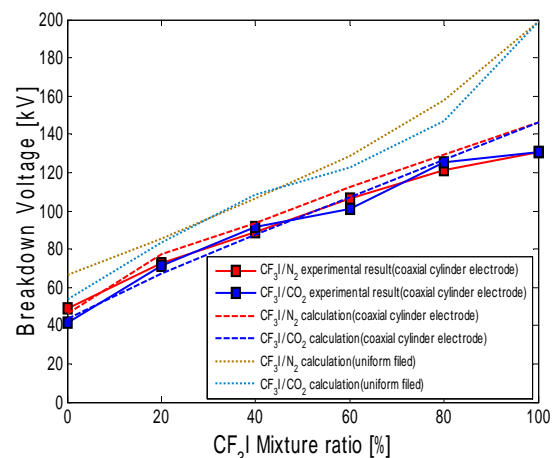


図 2 同軸円筒電極における CF<sub>3</sub>I 混合比毎のスパークオーバー電圧値

## 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 15 件)

八木貴大, 丸尾徳, 松岡成居, 熊田亜紀子, 日高邦彦: CF<sub>3</sub>I ガスにおける不平等電界下の火花電圧圧力依存性, 電気学会論文誌 A, 査読有, Vol. 132, No. 8, 2012, pp. 700-701

DOI: 10.1541/ieefms.132.700

武田敏信, 松岡成居, 熊田亜紀子, 日高邦彦: CF<sub>3</sub>I ガスの放電による副生成物の発生と絶縁特性への影響, 電気学会論文誌 B, 査読有, Vol. 131, No. 10,

2011, pp. 859-864  
DOI: 10.1541/ieejpes.131.859  
武田敏信, 松岡成居, 熊田亜紀子, 日高邦彦: CF3I ガス及び CF3I/N2 混合ガスの不平等電界下における放電特性, 電気学会論文誌 B, 査読有, Vol. 130, No. 9, 2010, pp. 813-818  
DOI: 10.1541/ieejpes.130.813

〔学会発表〕(計 115 件)

今井克樹, 松岡成居, 熊田亜紀子, 日高邦彦: CF3I/SF6 混合ガスの絶縁特性, 平成 25 年電気学会全国大会, 2013 年 3 月 20~22 日, 名古屋大学, 愛知県  
H. Iwabuchi, S. Matsuoka, A. Kumada, K. Hidaka, Y. Hoshina, T. Yasuoka and M. Takei: Charge distribution measurement on GIS insulator in high pressure SF6 gas, The International Conference on Electrical Engineering 2012 (ICEE 2012), 2012 年 7 月 8 日~12 日, ANA Crown Plaza Kanazawa, 石川県  
H. Moriyama, S. Matsuoka, A. Kumada, K. Hidaka: Streamer-to-leader transition across surface/gaseous gap in SF6/N2 gas mixture, 16th Asian Conference on Electrical Discharge (ACED2012), Dec. 10-12, 2012, Johor Bahru, Malaysia  
岩淵大行, 松岡成居, 熊田亜紀子, 日高邦彦: 高気圧 SF6 環境下における GIS 絶縁スペーサの直流帯電現象, 平成 24 年放電学会若手セミナー, 2012 年 11 月 30 日~12 月 1 日, マホロバマインズ, 神奈川県  
守山浩史, 松岡成居, 熊田亜紀子, 日高邦彦: SF6/N2 混合ガス中における沿面ストリーマからリーダへの転換過程の高時間分解測定, 平成 24 年電気学会基礎・材料共通部門大会, 2012 年 9 月 20~21 日, 秋田大学, 秋田県  
D. Tanaka, A. Kumada, K. Hidaka: Numerical simulation of streamer development in CF3I-N2 gas mixture, 17th International Symposium on High Voltage Engineering, Aug. 22-26, 2011, Hannover, Germany  
T. Takeda, S. Matsuoka, A. Kumada and K. Hidaka: Breakdown characteristics of CF3I/CO2 gas mixture on dielectric surface, 10th University of Tokyo - Seoul National University Joint Seminar on Electrical Engineering, March 12-13, 2010, Seoul, Korea  
八木貴大, 武田敏信, 松岡成居, 熊田亜紀子, 日高邦彦: CF3I ガスの沿面放電特性, 2010 年放電学会年次大会, 2010 年 11 月 6 日, 日本大学駿河台キャンパス, 東京都

〔図書〕(計 0 件)

〔産業財産権〕  
出願状況(計 1 件)

名称: 電位差測定のための電位差計および電位差測定方法  
発明者: 日高邦彦、熊田亜紀子  
権利者: 東京大学  
種類: 特許  
番号: 特願 2012-260490  
出願年月日: 平成 24 年 11 月 29 日  
国内外の別: 国内

取得状況(計 2 件)

名称: 高電圧測定装置  
発明者: 日高邦彦  
権利者: 同上  
種類: 特許  
番号: 特許第 4474536 号  
取得年月日: 平成 22 年 3 月 19 日  
国内外の別: 国内

名称: 気体透過光を用いた電圧測定方法及び表面汚損の測定方法  
発明者: 日高邦彦  
権利者: 同上  
種類: 特許  
番号: 特許第 4662322 号  
取得年月日: 平成 23 年 1 月 14 日  
国内外の別: 国内

〔その他〕  
ホームページ等  
該当なし

6. 研究組織

- (1) 研究代表者  
日高 邦彦 (HIDAKA, Kunihiko)  
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: 20313009
- (3) 研究分担者  
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
- (4) 連携研究者  
該当なし