

令和 2 年 6 月 15 日現在

機関番号：32657

研究種目：基盤研究(A) (一般)

研究期間：2016～2018

課題番号：16H02323

研究課題名(和文)CF3Iガス絶縁による世界初の管路送電線路構築に向けて

研究課題名(英文)Towards the construction of world's first CF3I gas-insulated pipeline transmission-line

研究代表者

日高 邦彦(Hidaka, Kunihiko)

東京電機大学・大学院工学研究科(工学部)・特別専任教授

研究者番号：90181099

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 34,700,000円

研究成果の概要(和文)：温暖化係数(GWP)が大きいSF6ガスの代替として注目されるCF3Iガスについて、電気絶縁特性を詳細に検討した結果、管路ガス絶縁送電線路(GIL)への適用が期待できるとの結論を得た。更に、可撓性を向上させたフレキシブルGIL(FGIL)の概念を追加し、世界初となるCF3I/CO2混合ガスを用いた22 kV級FGILのプロトタイプ器を製作した。直線状態および曲げ状態における特性を検討しCF3I混合ガスを用いたFGILの実現可能性の方向性を明らかにした。

研究成果の学術的意義や社会的意義

電気機器の絶縁媒体ガスとして広く利用されているSF6ガスは、地球温暖化係数(GWP)がCO2の23,500倍と非常に高く、代替ガスの研究が世界的に進められている。その候補としてわが国で自給できるCF3Iガスに着目して長年にわたり検討した電気絶縁特性や熱伝導特性に基づき、管路ガス絶縁送電線路(GIL)への適用可能性を示した上で、22 kV級GILのプロトタイプを世界に先駆けて製作、評価したことは、今後の地球温暖化対策に対する一つの方向性を示すことができたと考える。

研究成果の概要(英文)：CF3I gas is one of the alternatives for SF6. Its insulation performance is superior to SF6 in uniform field and its Global Warming Potential (GWP) is quite low as same as CO2. The electrical properties of CF3I and its gas mixtures were closely examined, and the results show that CF3I can be used as SF6-substitute gas in Gas Insulated transmission line (GIL). The world's first prototype of 22 kV-class flexible GIL (FGIL) system was produced, which had the same or more flexibility as a cable system had. The FGIL utilizes atmospheric pressure CF3I/CO2 (20:80) gas mixtures as insulating medium. Its feasibility was verified from the viewpoint of withstand voltage.

研究分野：電気工学

キーワード：SF6代替ガス CF3Iガス ガス絶縁 管路送電線路 電気絶縁 地球温暖化対策

## 様式 C - 19、F - 19 - 1、Z - 19 (共通)

### 1. 研究開始当初の背景

(1) ガス絶縁遮断装置やガス絶縁変圧器をはじめとする多くの高電圧機器の絶縁媒体ガスとして SF6 が広く使用されている。SF6 は絶縁性能が高くアーク遮断性能に優れている上、化学的に安定で無毒といった利点を有している。その一方で、SF6 の地球温暖化係数(GWP)が CO2 の 23,500 倍と非常に高いことが明らかになり近年問題となっており 1997 年の第 3 回気候変動枠組条約締結国会議(COP3)で SF6 は地球温暖化ガスに指定され、SF6 の排出抑制および使用削減が求められている。このような背景の下で、SF6 の代替ガスに関する研究が多く行なわれている。

(2) 筆者らは SF6 代替ガスの候補として CF3I (ヨウ化トリフルオロメタン) ガスについてその適用可能性の検討を行ってきた。平等電界下において CF3I は、SF6 の 1.2 倍の絶縁耐力を有することを報告した<sup>1)</sup>。CF3I の欠点としては液化温度が高いこと、不平等電界下において絶縁耐力が大きく減少することが確認されている。この点を克服するために、CF3I を N2、CO2 といった液化温度の低いガスと混合した場合の特性が詳細に検討されている。

(3) 以上の検討結果を踏まえて、ガス絶縁送電線路 (GIL) に適用することが有望であると結論付けられている。GIL は CV ケーブルなどに採用される固体絶縁とは異なりガス絶縁を採用した送電線路である。ガス絶縁は熱拡散に優れる上誘電率が低いいため従来のケーブルに比べ大電流を長距離で流すことができるという利点がある。近年では洋上風力発電所の送電線としての活用が期待されている。

### 2. 研究の目的

(1) 電気絶縁ガスとして広く用いられている SF6 (六フッ化イオウ) ガス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。SF6 代替ガスとして、高い絶縁性能を持ち地球温暖化係数が小さい CF3I ガスを有効活用すべく、10 年間の基礎研究および電力機器への適用可能性の検討を経て、実用化の第一歩となる管路ガス絶縁送電線路(GIL)のプロトタイプ製作を世界に先駆けて行うことを目指す。

(2) これまでの基礎データに加え、電気的および熱的特性において最適となるような CF3I ガス混合ガスの組成、混合比について詳細検討を進め、また実機では必ず課題となる、金属異物、金属・固体スペーサ・ガスが交わる 3 重点の電界などの影響を定量的に把握した上で、その対策を講じたプロトタイプにおいて有効性を検証する。

(3) 一般に GIL は可撓性に乏しく輸送が困難であるという欠点があり送電路が長距離になったときの高コスト化が懸念されている。そこで GIL にコルゲート状の加工を施し可撓性を向上させたフレキシブル GIL (FGIL) についても検討を行う。

### 3. 研究の方法

(1) フレキシブル GIL (FGIL) についての詳細な検討を進め、その仕様を決定したのち設計を行う。FGIL に CF3I/CO2 (20:80) 混合ガスを 1 気圧で封入したときに 22 kV 級の GIL としての性能を満たすことを想定して径を決定する。なお、径の決定の際には、研究初期に開発した GIL の概念設計手法を参考とする。

(2) 内部導体を支持するスペーサの素材および形状については、電界解析を元に決定する。また、スペーサを内部導体にとりつけるための固定具についても設計を行う。

(3) 製作した FGIL を直線状態にして絶縁特性を測定した (直線状態試験)。絶縁特性としては、FGIL に空気、CO2、CF3I/CO2 (20:80) 混合ガス、SF6/CO2 (20:80) 混合ガスをそれぞれ 1 気圧で封入し V-t 特性を取得する。FGIL には波頭長 1.2  $\mu$ s、波尾長 50  $\mu$ s の雷インパルス電圧を印加する。

(4) FGIL は実機での利用の際曲がった状態で用いられることが想定される。そのため FGIL の絶縁性能を評価するには通常の GIL 同様の直線状態に加えて、ケーブルなどのように曲がった状態での性能を評価する必要がある。電力ケーブルの許容曲げ半径は直径の 8 倍であることが多い。そのため今回製作した FGIL の許容曲げ半径も直径の 8 倍と設定し、曲げた状態での 50% 破壊電圧 V50 とを測定 (曲げ状態試験) し直線状態と比較する。

### 4. 研究成果

(1) 研究初期に開発した GIL の概念設計手法をベースとして、フレキシブル GIL (FGIL) についての詳細な検討を進め、その仕様を決定したのち設計を行った。FGIL に CF3I/CO2 (20:80) 混合ガスを 1 気圧で封入したときに 22 kV 級の GIL としての性能を満たすことを想定して径を決定した。なお、内部導体と外部シースにはコルゲート状の加工が施されており従来の GIL に比べ柔軟な構造になっている。製作した FGIL プロトタイプの概略図とその断面図を図 1 に示す。内

部導体の外径が 99 mm，外部シースの内径が 200 mm の同軸円筒構造でコルゲート（波状）構造部の長さは 870 mm となっている。内部導体は 3 個の亚克力製スペーサによって支持されている。

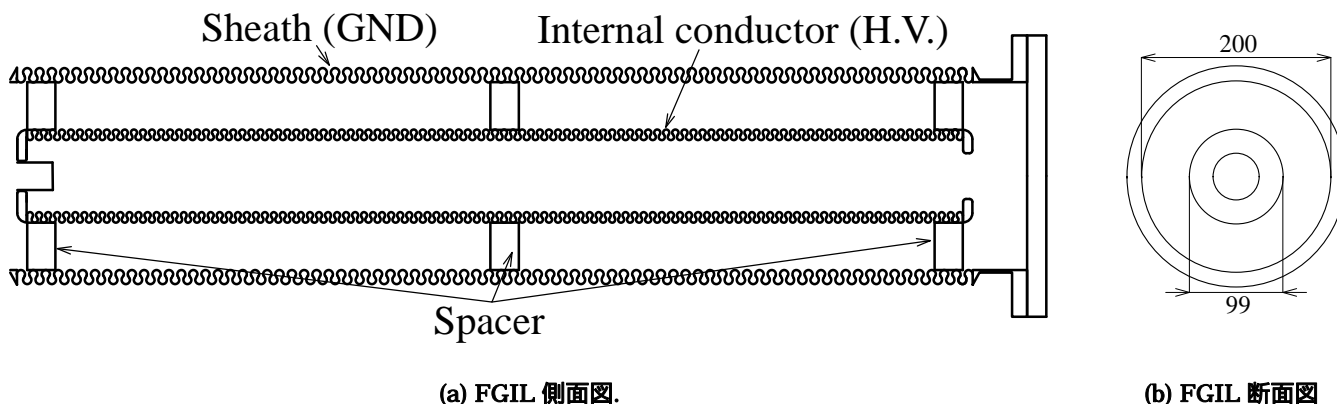


図 1 FGIL の構造

(2) 内部導体を支持するスペーサとしては，異なる 2 種類の亚克力製スペーサを用い実験結果の比較を行った。スペーサ内径は 100.5 mm，スペーサ外径は 196 mm，厚さは 20 mm である。各々のスペーサはエッジ部分の面取り度合いが異なり 2 mm で面取りしたもの (C2)，および 10 mm で面取りしたもの (R10) を用いた。スペーサを内部導体にとりつけるために固定具を用意し，固定の際には固定具を内部導体の波形構造の間に挟み亚克力製のネジでスペーサと固定具を接続した。(1)および(2)項の設計に基づき，世界初となる CF3I ガスを利用した FGIL を製作した。

(3) 直線状態試験での FGIL 絶縁特性として V-t 特性を取得した。封入ガスは，1 気圧の空気，CO<sub>2</sub>，CF<sub>3</sub>I/CO<sub>2</sub> (20:80) 混合ガス，SF<sub>6</sub>/CO<sub>2</sub> (20:80) 混合ガスで，また印加電圧は，波頭長 1.2 μs，波尾長 50 μs の雷インパルス電圧である。各スペーサ形状における V-t 特性を図 2，図 3 に示す。各プロットは火花放電の発生を示しており縦軸は印加した電圧波形の最高電圧，横軸は電圧印加開始から火花放電までの経過時間を表している。またグラフ中には 22 kV 級電力機器の絶縁耐圧基準 V125 (125 kV) を示している。どのスペーサ形状においても CF<sub>3</sub>I/CO<sub>2</sub> 混合ガス，SF<sub>6</sub>/CO<sub>2</sub> 混合ガスの 2 種類が空気，CO<sub>2</sub> に比べて高い絶縁性能を示している。22 kV 級電力機器の絶縁耐圧基準 V125 に着目するとどちらのスペーサ形状においても SF<sub>6</sub>/CO<sub>2</sub> 混合ガス，CF<sub>3</sub>I/CO<sub>2</sub> 混合ガスの V-t 特性が V125 を上回っていることが確認できる。

(4) 曲げ状態試験での FGIL の曲げ状態の様子を図 4 に示す。CF<sub>3</sub>I/CO<sub>2</sub> (20:80) 混合ガス，SF<sub>6</sub>/CO<sub>2</sub> (20:80) 混合ガスを 1 気圧で封入し曲げ状態における V50 とを測定した。

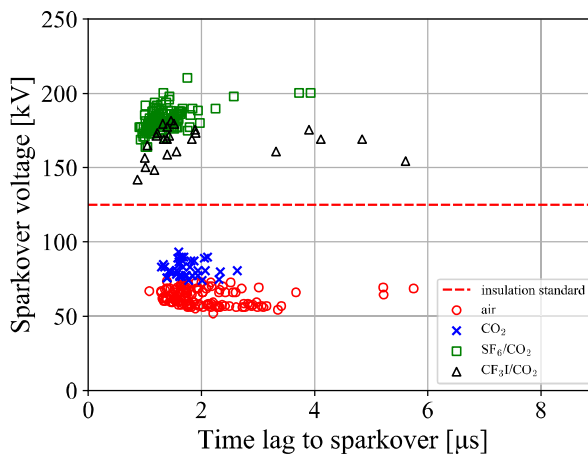


図 2 スペーサ C2 における各種ガスの V-t 特性

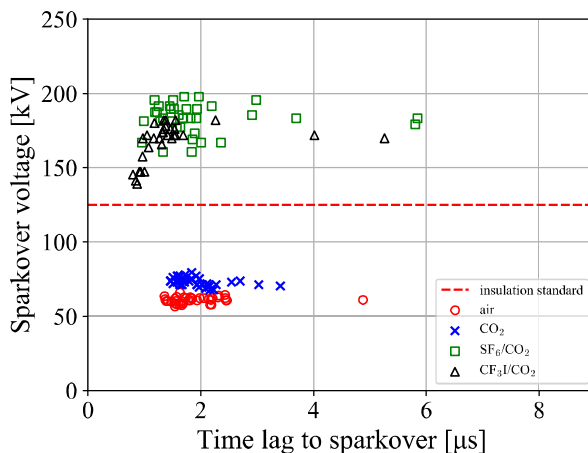


図 3 スペーサ R10 における各種ガスの V-t 特性

直線状態と曲げ状態それぞれにおける  $V_{50}$  と を比較したものを図 5 に示す。SF<sub>6</sub>/CO<sub>2</sub> 混合ガスの  $V_{50}$  は直線状態において 184.9 kV だったのに対し曲げ状態では 152.7kV と 18%低下している。CF<sub>3</sub>I/CO<sub>2</sub> 混合ガスの  $V_{50}$  は直線状態において 171.3 kV だったのに対し曲げ状態では 119.6 kV と 30%低下している。SF<sub>6</sub>/CO<sub>2</sub> 混合ガス, CF<sub>3</sub>I/CO<sub>2</sub> 混合ガスともに  $V_{50}$  が低下していることが確認できる。今回製作した FGIL は内部導体と外部シースは分離している。そのため FGIL を曲げた際、内部導体と外部シースの間で曲げ状態が異なる部分が形成されたと考えられる。曲げ状態が異なる部分では非常に不平等な電界が形成されるためその影響で絶縁性能が低下する。また、SF<sub>6</sub>/CO<sub>2</sub> 混合ガスに比べて CF<sub>3</sub>I/CO<sub>2</sub> 混合ガスで大きく  $V_{50}$  が低下していることがわかる。これは CF<sub>3</sub>I が SF<sub>6</sub> に比べて強い電界依存性を持つため不平等な電界の影響を強く受けたためと考えられる。

(5) 実現可能性の検討: 測定した  $V_{50}$  , をもとに CF<sub>3</sub>I/CO<sub>2</sub> 混合ガスの直線状態, 曲げ状態における火花放電確率曲線を計算した。直線状態では V125 における火花放電確率は 0.01%以下であり,  $V_{50}-3$  における火花放電確率 0.15%を下回っており十分低い確率と言える。従って, 本 FGIL は直線状態において 22 kV 級電力機器として十分実現可能であると考えられる。一方曲げ状態では V125 における火花放電確率は直線状態と比較して悪化しており, このままでは 22 kV 級電力機器としての絶縁耐圧基準を満たしているとは言えない。CF<sub>3</sub>I/CO<sub>2</sub> 混合ガスを用いた 22 kV 級 FGIL の実現のためには曲げ状態での絶縁性能, 特にスペーサと導体の接触部においてさらなる改善が必要である。



図 4 FGIL の曲げ状態

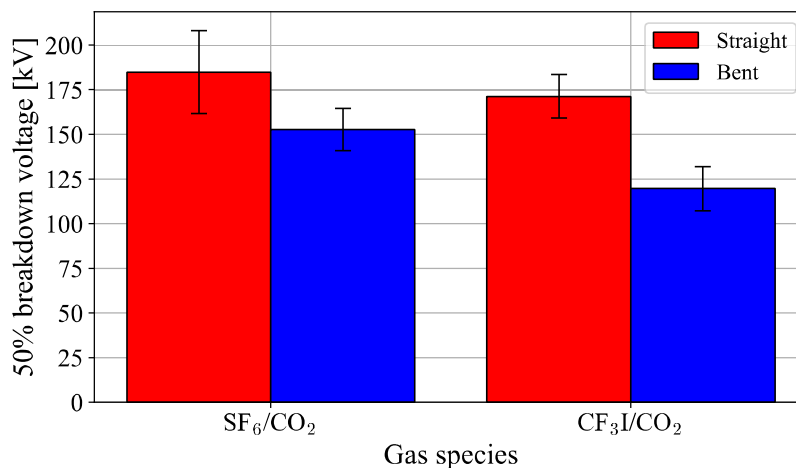


図 5 直線状態と曲げ状態での 50%破壊電圧  $V_{50}$  の比較

## 5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計4件（うち査読付論文 4件/うち国際共著 1件/うちオープンアクセス 0件）

1. 著者名 佐藤正寛, 熊田亜紀子, 日高邦彦	4. 巻 Vol.137, No.7
2. 論文標題 機械学習および量子化学計算を用いた気体材料の絶縁破壊電界・沸点予測の精度向上に関する一検討	5. 発行年 2017年
3. 雑誌名 電気学会論文誌A	6. 最初と最後の頁 422-427
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) DOI: 10.1541/ieejfms.137.422	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -
1. 著者名 Techaumnat Boonchai, Huynh Viet Q., Hidaka Kunihiro	4. 巻 54
2. 論文標題 Numerical Analysis and Experiments on the Electromechanical Behavior of Wired-Shape Conducting Particles	5. 発行年 2018年
3. 雑誌名 IEEE Transactions on Magnetics	6. 最初と最後の頁 1~5
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1109/TMAG.2017.2734742	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 該当する
1. 著者名 Nakamura Takahiro, Tokuhiko Makoto, Kumada Akiko, Hidaka Kunihiro, Kato Tatsuro, Yamagiwa Tokio	4. 巻 138
2. 論文標題 Observation of Electrical Treeing in Micro-filled Epoxy Resin by X-ray Phase Contrast Imaging	5. 発行年 2018年
3. 雑誌名 IEEE Transactions on Fundamentals and Materials	6. 最初と最後の頁 497~504
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) <a href="https://doi.org/10.1541/ieejfms.138.497">https://doi.org/10.1541/ieejfms.138.497</a>	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -
1. 著者名 Iwabuchi Hiroyuki, Oyama Tsutomu, Kumada Akiko, Hidaka Kunihiro	4. 巻 26
2. 論文標題 Breakdown phenomena across micrometer scale surface gap under negative voltage application	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation	6. 最初と最後の頁 1377~1384
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1109/TDEI.2019.007921	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

〔学会発表〕 計12件（うち招待講演 3件 / うち国際学会 6件）

1. 発表者名 C. Tateyama, S. Matsuoka, A. Kumada and K. Hidaka
2. 発表標題 Applicability of CF3I Gas Mixtures to Gas Insulated Transmission Line
3. 学会等名 GD 2016 (21st International Conference on Gas Discharges and their Applications) (国際学会)
4. 発表年 2016年

1. 発表者名 M. Sato, A. Kumada, and K. Hidaka
2. 発表標題 Prediction of electric breakdown field and boiling point of gases using kernel ridge regression
3. 学会等名 20th ISH 2017 (20th International Symposium on High Voltage Engineering) (国際学会)
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 A. Kumada and K. Hidaka
2. 発表標題 Dielectric Properties and Suitability of CF3I and its Mixture as Insulation Medium to Gas Insulated Transmission Line
3. 学会等名 20th ISH 2017 (20th International Symposium on High Voltage Engineering) (国際学会)
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 T. Nakamura, M. Tokuhiro, A. Kumada, and K. Hidaka
2. 発表標題 X-ray Phase Imaging of Electrical Treeing in Filled Epoxy
3. 学会等名 2017 IEEE Conference on Electrical Insulation and Dielectric Phenomenon (CEIDP) (国際学会)
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 徳弘誠, 中村隆央, 松岡成居, 熊田亜紀子, 日高邦彦, 加藤達朗, 山極時生
2. 発表標題 X線位相イメージングによる電気トリーの経時変化観察
3. 学会等名 平成29年度電気学会 基礎・材料・共通 部門大会
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 小池広和, 田中興大, 松岡成居, 熊田亜紀子, 日高邦彦
2. 発表標題 CF3I混合ガスを用いたフレキシブルGIL
3. 学会等名 平成29年度放電学会年次大会
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 田中興大, 小池広和, 松岡成居, 熊田亜紀子, 日高邦彦
2. 発表標題 CF3I混合ガスを用いたハイブリッドガス絶縁送電線路の概念設計
3. 学会等名 平成29年度放電 誘電・絶縁材料・高電圧合同研究会
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 熊田亜紀子
2. 発表標題 絶縁媒体、計測媒体としての気体のこれまでとこれから
3. 学会等名 平成29年度電気学会全国大会（招待講演）
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 T. Nakamura, T. Yokoi, A. Kumada, K. Hidaka, H. Hirai, T. Imai, and T. Yoshimitsu
2. 発表標題 Tree Propagation and Partial Discharge Phenomena of Nanocomposite Epoxy
3. 学会等名 CEIDP 2018 (2018 IEEE Conference on Electrical Insulation and Dielectric Phenomena) (国際学会)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 日高邦彦
2. 発表標題 特別講演「神秘的な放電現象に魅せられて」
3. 学会等名 2018年放電学会年次大会 (招待講演)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 Kunihiko Hidaka
2. 発表標題 Power engineering development for the future
3. 学会等名 14th The University of Tokyo - Seoul National University Joint Seminar on Electrical Engineering (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 小林拓人, 日高邦彦, 熊田亜紀子, 松岡成居, 塩入 哲
2. 発表標題 CF3I混合ガスを用いたフレキシブルガス絶縁送電線路の実現可能性の検討
3. 学会等名 令和元年度誘電・絶縁材料/放電・プラズマ・パルスパワー/高電圧合同研究会
4. 発表年 2020年



〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔その他〕

-

6. 研究組織

	氏名 (ローマ字氏名) (研究者番号)	所属研究機関・部局・職 (機関番号)	備考
研究 分担者	熊田 亜紀子  (Kumada Akiko)  (20313009)	東京大学・大学院工学系研究科(工学部)・教授   (12601)	
研究 分担者	松岡 成居  (Matsuoka Shigeyasu)  (10114646)	東京大学・大学院工学系研究科(工学部)・助教   (12601)	