

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 29 年 6 月 19 日現在

機関番号：12601

研究種目：基盤研究(A) (一般)

研究期間：2013～2015

課題番号：25249028

研究課題名(和文)高性能低環境負荷CF3Iガス絶縁方式の実用化に向けた発展研究

研究課題名(英文) Evolutionary study toward practical use of high-performance environmentally-friendly gas insulation system using CF3I gas

研究代表者

日高 邦彦 (Hidaka, Kunihiko)

東京大学・大学院工学系研究科(工学部)・教授

研究者番号：90181099

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 36,000,000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。絶縁特性、液化温度、GWPを総合的に評価して適応可能性のランキング付け手法を提案し、CF3I(20%)/CO2(80%)やCF3I(20%)/N2(80%)の混合ガス組成が最適であることを示した。また、実運用されている275kV-GILにCF3I混合ガスが適用可能であるか、電気絶縁および熱特性の観点から検討を行った。

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 CF3I/N2, CF3I/CO2 and CF3I/SF6 mixtures are closely examined and the results show that CF3I can be used as SF6-substitute gas in Gas Insulated transmission-Line (GIL). A simple ranking method is proposed where the dielectric properties, saturated gas pressure, and GWP are taken into account in selecting the mixture ratio as pragmatic gas mixture to GIL. With this method, it turns out that CF3I(20%)/CO2(80%) or CF3I(20%)/N2(80%) gas mixtures are the reasonable choices. In addition, the applicability of these CF3I gas mixtures to the existing 275kV-GIL is evaluated through computation of cross sectional size of conductors based not only on insulation designing but also on thermal designing.

研究分野：電気工学

キーワード：ガス絶縁 CF3Iガス 混合ガス 管路気中送電 電気絶縁設計 地球温暖化対策

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 ガスは地球温暖化係数 (100 年換算) が CO2 の 23900 倍と非常に高く、上述のガスと共に削減対象に指定されている。密閉された絶縁機器内部で用いられるガスであり、本来の用途では大気中に放出されることはないが、ガス漏れや使用後の SF6 ガスの処理の問題などの課題も残されている。また、地球温暖化問題に対する更なる関心の高まりによって、削減対象から課税による使用抑制、その先の使用禁止というように規制強化される可能性が、欧州を中心に徐々に増大しつつあるという状況も顕在化している。

このような背景から SF6 代替ガスを見つけ出す必要があり、本研究へと繋がっている。過去 30 年に亘り、筆者らを含めて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い。一方、近年、申請者らが中心となり、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) に着目して、その絶縁性能、アーク遮断性能などの基礎研究を進めている。

CF3I 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、CF3I ガスの絶縁性能は SF6 ガスより優れていることが示され、CF3I 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た。

2. 研究の目的

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。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 CF3I (ヨウ化トリフルオロメタン) ガスを SF6 代替ガスとして用いることにより、電力機器に用いられ SF6 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を実用化レベルまで引き上げることを目指す。実用化の観点から、これまでの基礎研究に加え、実機では必ず課題となる金属異物、トリプルジャンクション (金属、固体スペーサ、ガスが交わる 3 重点) の影響を定量的に把握し、その対策を提案すると共に、管路ガス絶縁送電線モデルへの適用を世界に先駆けて試みる。

3. 研究の方法

3.1 電源、実験容器 実験に使用した電源としては密閉型のタンク (約 200l) 直結の急峻方形波発生装置 SPURT (日新電機株式会社製、NSRG-200) 及び交流高電圧発生装置を用いた。SPURT の出力電圧波形は、規約波頭長 16ns、波高値 40 ~ 200kV、パルス継続時間 10µs である。

3.2 電極形状 準平等電界を形成する 100mm 半球 平板電極、極端な不平等電界を形成する針 - 平板電極、沿面放電を生じさせるリング電極付き誘電体スペーサを用いた。100mm 半球電極、平板電極はステンレス製、針電極は真鍮製、そして沿面放電で用いるリング電極はアルミニウム製であり、表面は鏡面加工が施されている。沿面放電の誘電体部分はテフロン (PTFE) となっており、外径 30mm の棒形状のものと背後電極付きのパイプ形状 (外径 30mm、肉厚 7mm、背後電極外径 16mm) の 2 種類を用いた。また初期電子の供給を促すために放射線源として ⁶⁰Co (3.7MBq) を設置した。

3.3 実験条件 供試ガスとして CF3I ガス単体、SF6g ガス単体、およびそれらと N2 ガスや CO2 ガスとの混合ガスを使用し、混合率を 10% 刻みとして、全圧を 0.1、0.2、0.3、0.4MPa (abs) で変化させ、V-t 特性、50% 絶縁破壊電圧、放電電流波形、放電発光を計測した。

4. 研究成果

<4.1> 実用的絶縁媒体としての適性評価

これまでの全データの体系化を実施した。
(1) 準平等電界 各ガスの急峻方形インパルス電圧印加時の 50% 絶縁破壊電圧値 V_{50} と、0.1MPa の SF6 と同等の絶縁破壊電圧を有するのに必要と推測されるガス圧を Table 1 に示す。いずれのガスにおいても絶縁破壊電圧はガス圧に比例すると仮定している。

Table 1. Pressure of CF₃I mixture (reference value for SF6)

CF ₃ I mixture ratio	0%	20%	40%	60%	80%	100%
CF ₃ I/CO ₂	0.393	0.222	0.161	0.135	0.110	0.077
CF ₃ I/N ₂	0.273	0.196	0.153	0.128	0.100	0.077
CF ₃ I/SF ₆	0.1	0.225	0.109	0.094	0.089	0.077

unit [MPa]

電力機器に適用するに当たり、液化温度が低いことが求められる。そこで、Table 1 に示した混合比、圧力における液化温度を求めた結果を Table 2 に示す。CF3I の飽和蒸気圧曲線のデータは文献 (15)、(16) の値を用いた。CF3I の状態方程式は Virial 方程式を、混合対象である N2、CO2、SF6 については理想気体の状態方程式を用いて各構成気体の分圧値を求めている。この表から、準平等電界に関しては CF3I の混合比が低いほど液化温度が低くなるのがわかる。

Table 2. Boiling point of CF₃I mixture listed in Table.1

CF ₃ I mixture ratio	0%	20%	40%	60%	80%	100%
CF ₃ I/CO ₂	-58.3	-45.5	-39.2	-32.6	-30.6	-33.9
CF ₃ I/N ₂	-186.3	-49.1	-39.4	-33.9	-32.9	-33.9
CF ₃ I/SF ₆	-69.3	-59.6	-46.9	-41.2	-35.8	-33.9

unit []

(2)不平等電界 各ガスの不平等電界及び準平等電界における急峻方形波印加時の 50%絶縁破壊電圧値 V50 を比較することで、電界の不平等性に対する低下の程度を調べた。低下係数 k を以下のように定義する。

$$k = \frac{\text{不平等電界での 50\%火花電圧}}{\text{準平等電界での 50\%火花電圧}} \dots\dots(1)$$

純粋な CF3I が最も k が小さく、混合ガスに関しても CF3I を含む割合が大きいほど、電界の不平等性に対して敏感になる。

(3)沿面ギャップ(電界平行型・垂直型)

各ガスの沿面放電(電界平行型・電界垂直型)と準平等電界におけるの 50%絶縁破壊電圧値を比較し低下係数を求めたところ、不平等電界と同様な結果が得られ、CF3I を含む割合が高いほど値が大きくなり下がっている。

(4)適性評価 CF3I を含んだガスは、沿面絶縁において副生成物の影響から絶縁破壊電圧が大きく下がる性質がある。よって CF3I を電力機器に実用化する際には、管路気中送電線のような単純な形状のものがふさわしいと考えられる。そのような電力機器の絶縁媒体として適用するには、どのガス種とどのような比率で混合した CF3I がふさわしいか検討する。CF3I 混合比率を高めると、全圧を低く抑えることができるが、液化温度は高くなり、また不平等電界・沿面ギャップ下において絶縁性能が低下する傾向を示す。これらのバランスをとれたものを探ることになる。バランスのとれた混合比を探すにあたり、各特性を数値化する簡易ランキング手法をとることとした。これは、評価基準として上記に示したガス圧、飽和蒸気圧、不平等電界、沿面ギャップ(電界垂直型、電界平行型)を用い、それぞれ 100 点を満点とし、その総合得点で優劣を定めようというものである。

評価項目の選定、重みづけはユーザにゆだねられるが、数値化を通じて、ユーザのニーズに合わせて適切なガスを簡易的に選定できる利点が期待される。

具体的な得点の与え方について、以下にそれぞれ説明する。ガス圧に関しては、電力機器に適用するうえで低い方が好ましい。そこで、Table 1 に示したガス圧の逆数を利用した。Table 1 の数値が一番小さい CF3I ガスが 100 となるよう規格化した。

不平等電界の絶縁性能に関しては、低下係数 k が最も大きい CF3I/CO2(20%:80%)が 100 となるよう規格化した。沿面ギャップの絶縁性能に関しても同様に求めた。

飽和蒸気圧に関しては、電力機器に適用する際に、沸点は低い方が良い。ガス絶縁開閉装置の耐環境試験において規定されている下限値は -20 であるが、0.1MPa の SF6 の液化温度は -69.3 であり、この下限値までは 49.3 の温度マージンがある。各ガスの -20 までの温度マージンの、0.1MPa の SF6 のそれ (49.3)に対する比率を評価基準とすることとした。なお、100% N2 に関しては、液

化温度が突出して低く、液化は議論の対象とならない。N2 の得点は 388 点となるが、満点である 100 点とした。

以上のような手法で先に挙げた評価基準を全て得点化した結果を Table 3 に示す。参考のため、各ガス使用時の温暖化への寄与度を数値化し、Table 3 中に示している。これらは、各混合ガスの GWP に、Table 1 に示した 0.1MPa の SF6 と同等の絶縁破壊電圧を有するのに必要と推測されるガス圧を乗じて算出した。

Table 3. Scores of CF3I mixture

gas	gas pressure	boiling point	non-uniform field	surface gap	impact on global warming
CF3I	100.0	28.2	34.2	35.5	0.8
CO2	19.6	77.7	52.6	100.0	3.9
CF3I/CO2 (20%:80%)	34.7	51.7	100.0	87.3	2.2
CF3I/CO2 (40%:60%)	47.8	38.9	76.4	61.3	1.6
CF3I/CO2 (60%:40%)	57.0	25.6	62.5	56.1	1.4
CF3I/CO2 (80%:20%)	70.0	21.4	52.5	49.7	1.1
N2	28.2	100.0*	34.0	91.4	0.0
CF3I/N2 (20%:80%)	39.3	59.1	78.2	74.7	0.4
CF3I/N2 (40%:60%)	50.3	39.2	73.0	56.4	0.6
CF3I/N2 (60%:40%)	60.2	28.3	66.9	54.2	0.8
CF3I/N2 (80%:20%)	77.0	26.2	50.7	42.0	0.8
SF6	77.0	100.0	57.7	76.5	23900
CF3I/SF6 (20%:80%)	34.2	80.3	90.9	68.9	43020
CF3I/SF6 (40%:60%)	70.6	54.5	77.4	56.2	15631
CF3I/SF6 (60%:40%)	81.9	43.0	55.4	46.9	8987
CF3I/SF6 (80%:20%)	86.5	32.0	45.3	36.3	4255

* Original scores were over full marks.

また総得点から順位づけを行った結果を Table 4 に示す。同表には、SF6 とその混合ガスを除いた順位も示してある。

総合順位においては SF6 が 1 位であった。2 位は CF3I/SF6 (20%:80%)であるが、温暖化への寄与は 1 位の SF6 よりも高くなっており、100%SF6 の代替媒体としてはふさわしくない。CF3I/CO2(20%:80%)、N2、CF3I/N2(20%:80%)、CO2 がいずれも 60 ポイント以上のスコアで SF6 及びその混合ガスを除いた順位において 1 位から 4 位を占めている。すなわち、これらが総合的に電力機器への適用性が高いバランスをとれたガスとしてあげられよう。CO2 や N2 に 20% CF3I を混合することにより、液化温度や沿面ギャップの耐圧悪化を補う以上の平等電界における絶縁耐力、電界の不平等性による低下が改善されたと言える。

Table 4. Ranking of CF₃I mixture

gas	Score	rank	rank (excluding SF ₆ mixture)
CF ₃ I	49.5	14	9
CO ₂	62.5	7	4
CF ₃ I/CO ₂ (20%:80%)	68.4	3	1
CF ₃ I/CO ₂ (40%:60%)	56.1	9	5
CF ₃ I/CO ₂ (60%:40%)	50.3	12	8
CF ₃ I/CO ₂ (80%:20%)	48.4	16	11
N ₂	63.4	5	2
CF ₃ I/N ₂ (20%:80%)	62.8	6	3
CF ₃ I/N ₂ (40%:60%)	54.8	10	6
CF ₃ I/N ₂ (60%:40%)	52.4	11	7
CF ₃ I/N ₂ (80%:20%)	49.0	15	10
SF ₆	77.8	1	-
CF ₃ I/SF ₆ (20%:80%)	68.6	2	-
CF ₃ I/SF ₆ (40%:60%)	64.7	4	-
CF ₃ I/SF ₆ (60%:40%)	56.8	8	-
CF ₃ I/SF ₆ (80%:20%)	50.0	13	-

<4.2> CF₃I ガス利用 GIL の設計

中部電力新名火東海線の 275kV 管路気中送電線(GIL、SF₆ 利用)をベースに、CF₃I/CO₂ 混合ガス利用を想定したGILの構造設計を行った。詳細は学会発表(3)、(4)に示されているので、ここでは結果のみ記述する。(1)電気絶縁設計 実験で得られた絶縁破壊特性およびその標準偏差を用いて、GILの基本構造である同軸円筒構造の絶縁設計を行った。その結果を図1、図2に示す。図1は0.3MPa(abs)、図2は0.4MPa(abs)の結果で、図中には新名火東海線のGIL寸法もプロットされている。どの条件でも新名火東海線のGILに対して絶縁設計上、裕度を持って適用できることがわかった。

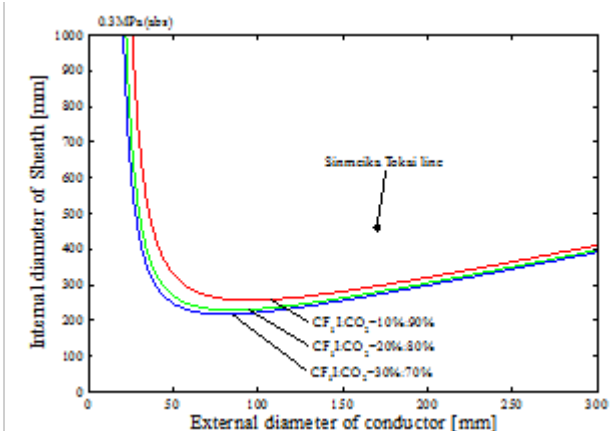


図1 0.3MPa(abs) CF₃I/CO₂ 混合ガスの絶縁設計

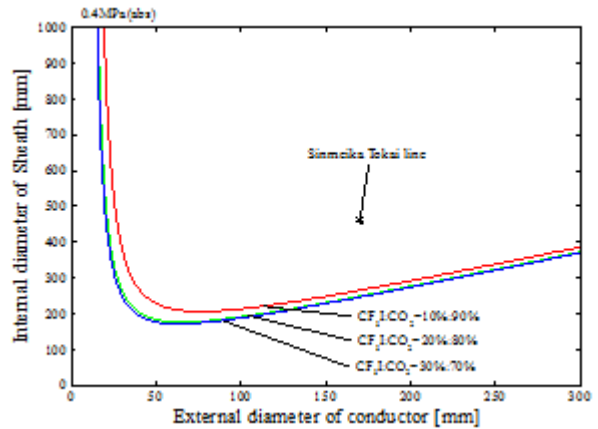


図2 0.4MPa(abs) CF₃I/CO₂ 混合ガスの絶縁設計

(2)熱的設計 大気温度を上限の 40 とし、中心導体を許容上限温度の 105 と固定してシース温度を変化させた場合と、シースを許容上限温度の 70 と固定して中心導体温度を変化させた場合の伝熱量を計算し、中心導体～シース間の伝熱量とシース～大気間の伝熱量が等しくなるときの導体およびシースに流れる電流が新名火東海線の定格電流である 6300A となるような GIL 寸法をそれぞれ計算した。中心導体温度を 105 と固定した場合の伝熱設計を図3、シース温度を 70 と固定した場合の伝熱設計を図4に示す。図3、4中には新名火東海線の GIL 寸法をプロットしている。中心導体温度固定時は混合比による差がほとんど見られず、シース温度固定時に至っては差が見られなかった。これはシース温度が一定の場合シース～大気間の伝熱量が管内の状況に依らず一定であることが理由であると考えられる。伝熱設計においては、0.2～0.4MPa(abs)のどの圧力条件でも性能を満足していることがわかる。また、圧力が高いほど伝熱性能に裕度がある。

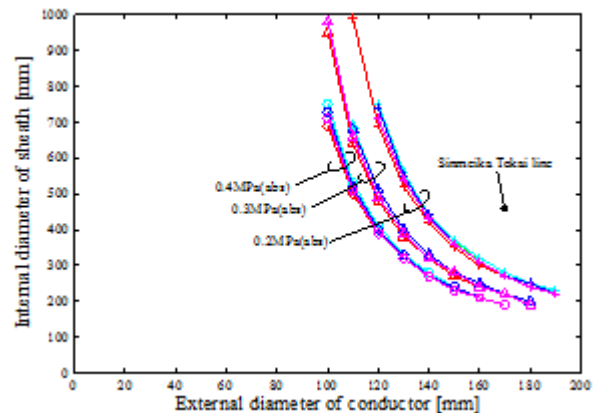


図3 同軸円筒断面における CF₃I/CO₂ 混合ガスの伝熱設計 (中心導体温度: 105)

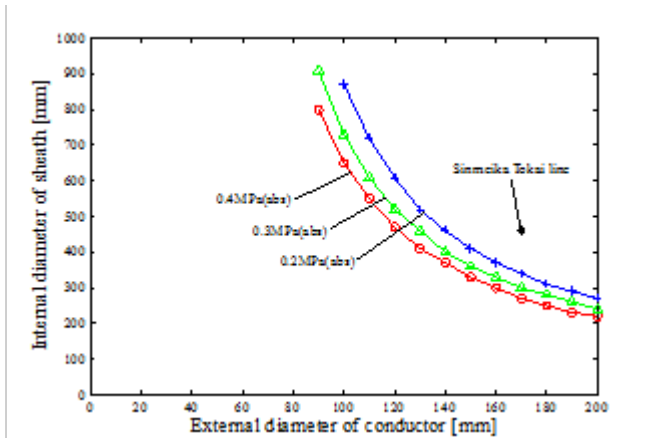


図4 同軸円筒断面におけるCF₃I/CO₂混合ガスの伝熱設計 (シース温度: 70)

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 4 件)

(1)M. Sato, A. Kumada, and K. Hidaka: Computational study on Kerr constants of neutral and ionized gases, Applied Physics Letters, 査読有, Vol.107, Issue 8, 084102, 2015, pp.1733-1738

DOI: 10.1063/1.4929455

(2)熊田亜紀子, 今井克樹, 松岡成居, 日高邦彦: CF₃I ガス及びその混合ガスの放電特性とその絶縁媒体としての適性, 電気学会論文誌 A, 査読有, Vol.134 No.12, 2014, pp.635-641

DOI: 10.1541/ieefirms.134.635

(3)田中大樹, 熊田亜紀子, 日高邦彦: 大気圧空気中における沿面ストリーマ進展シミュレーション, 電気学会論文誌 A, 査読有 Vol. 134, No. 3, 2014, pp. 118-125

DOI: 10.1541/ieejfms.134.118

(4)H. Iwabuchi, S. Matsuoka, A. Kumada, K. Hidaka, Y. Hoshina, T. Yasuoka, and M. Takei: Influence of tiny metal particles on charge accumulation phenomena of GIS model spacer in high-pressure SF₆ gas, IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation, 査読有, Vol. 20, No.5, 2013, pp.1895-1901

DOI: 10.1109/TDEI.2013.6633722

[学会発表](計 14 件)

(1)豎山智博, 松岡成居, 熊田亜紀子, 日高邦彦: 同軸円筒電極にスペーサを挿入した際のCF₃I ガスの絶縁破壊電圧への影響, 平成28年度電気学会全国大会, 東北大学(宮城県仙台市) 2016.3.18

(2)L. Chen, P. Widger, C. Tateyama, A. Kumada, H. Griffiths, K. Hidaka, and A. Haddad: Breakdown Characteristics of

CF₃I/CO₂ Gas Mixtures Under Fast Impulse in Rod-Plane and GIS Geometries, 19th International Symposium on High Voltage Engineering (ISH 2015), Pilsen (Czech) 2015.8.23-28

(3)豎山智博, 松岡成居, 熊田亜紀子, 日高邦彦: CF₃I/CO₂ 混合ガスの50%絶縁破壊電圧ガス圧依存性および管路気中送電線への適用可能性の検討, 平成27年度放電開閉保護高電圧合同研究会, 姫路商工会議所(兵庫県姫路市) 2015.11.5

(4)C. Tateyama, S. Matsuoka, A. Kumada, and K. Hidaka: Pressure dependency of 50% breakdown voltage in CF₃I/CO₂ gas mixture and its applicability to gas insulated transmission line, 2015 Korea-Japan Joint Symposium on Electrical Discharge and High Voltage Engineering, Mokpo (Korea) 2015.11.19

(5)豎山智博, 松岡成居, 熊田亜紀子, 日高邦彦: CF₃I/CO₂ 混合ガスを用いた66kV級GILの概念設計, 平成27年度放電学会年次大会, 防衛大学校(神奈川県横須賀市) 2015.12.5

(6)平井宏光, 熊田亜紀子, 日高邦彦, 加藤達郎, 山極時生: エポキシ樹脂内部トリー進展のX線による観測, 平成26年度放電誘電・絶縁材料高電圧合同研究会, 九州大学(福岡県福岡市) 2015.1.29

(7)豎山智博, 松岡成居, 熊田亜紀子, 日高邦彦: 不平等電界下におけるCF₃I/CO₂ 混合ガスの50%絶縁破壊電圧圧力依存性, 平成27年電気学会全国大会, 東京都世田谷キャンパス(東京都世田谷区) 2015.3.26

(8)今井克樹, 日高邦彦, 熊田亜紀子, 松岡成居: CF₃I 及びCF₃I 混合ガスの放電特性とその適性, 電気学会放電・誘電・絶縁材料・高電圧合同研究会, 九州工業大学(福岡県北九州市) 2014.1.23

(9)野間健太郎, 松岡成居, 熊田亜紀子, 日高邦彦: CF₃I ガス中における沿面放電進展特性, 平成26年電気学会全国大会, 愛媛大学(愛媛県松山市) 2014.3.18

(10)平井宏光, 熊田亜紀子, 日高邦彦, 加藤達郎, 額賀淳, 山極時生, 百生敦: エポキシ樹脂における電気トリーの作成と観察, 平成26年電気学会全国大会, 愛媛大学(愛媛県松山市) 2014.3.20

(11)豎山智博, 松岡成居, 熊田亜紀子, 日高邦彦: 不平等電界下におけるCF₃I/CO₂ 混合ガス絶縁破壊電圧の極性効果, 平成26年度放電学会年次大会, 東京電機大学(東京都足立区) 2014.12.6

(12)H. Hirai, A. Kumada, K. Hidaka, T. Kato, T. Yamagiwa, and A. Momose: Non-Destructive inspection of Solid Insulators Based On X-ray, The 17th Asian Conference on Electrical Discharge (ACED 2014), Bangkok (Thailand) 2014.12.9

(13)K. Hidaka: The role of IEEJ in development of future power

infrastructure-coexistence between power development and ecological civilization, invited lecture, CSEE Annual Meeting 2013 (招待講演), Chengdu (China) 2013.11.23
(14)野間健太郎, 松岡成居, 熊田亜紀子, 日高邦彦: CF3I 中の沿面放電特性, 平成 25 年度放電学会年次大会, 首都大学東京(東京都八王子市)2013.11.30

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
(工学部)・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
(工学部)・准教授
研究者番号: 20313009

研究分担者

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

研究分担者

稲田 優貴 (INADA, Yuki)
埼玉大学・理工学研究科・助教
研究者番号: 00735532