

科学研究費助成事業（科学研究費補助金）研究成果報告書

平成24年6月8日現在

機関番号：32678

研究種目：基盤研究(C)

研究期間：2009～2011

課題番号：21560313

研究課題名（和文）SF₆代替ガスの破壊抑制条件の最適化に関する研究研究課題名（英文）Study of suitable gas mixture improving the breakdown properties for substitution of SF₆

研究代表者

湯本 雅恵 (YUMOTO MOTOSHIGE)

東京都市大学・工学部・教授

研究者番号：10120867

研究成果の概要（和文）：窒素を主体とした雰囲気中で放電を繰り返すと、窒素原子および分子はエネルギーを蓄積しやすいため、放電を停止した後も電子が空間に供給される。供給電子数を減らすために蓄積されたエネルギーを開放する必要がある、一酸化窒素や炭酸ガスを微量に混合することが効果的であった。しかし、放電直後の短時間領域ではその効果は認められなかった。一方、電子付着により電子数を減らす SF₆ の効果は顕著であった。CF₃I は最も顕著な抑制効果があるが、解離の影響を軽減する必要性の高いことが明らかとなった。

研究成果の概要（英文）：Electrons are supplied even after the breakdown in nitrogen gas. The phenomenon is assumed to be introduced by energy accumulation by nitrogen atom or molecule. To reduce the number of electrons supplied after breakdown, it is necessary to de-excite the energy with nitrogen atom or molecule. The results showed that mixture of small amount of nitrogen mono-oxide or carbon dioxide was effective to reduce the energy. However, in the region of short time after the breakdown, its effect was not observed. Mixture of SF₆ was also effective to reduce the number of supplied electrons by electron attachment effect. CF₃I showed the most effective to reduce the number of supplied electrons. However it was shown that the reduction of its dissociation was important.

交付決定額

(金額単位：円)

	直接経費	間接経費	合計
2009年度	1,600,000	480,000	2,080,000
2010年度	800,000	240,000	1,040,000
2011年度	1,000,000	300,000	1,300,000
年度			
年度			
総計	3,400,000	1,020,000	4,420,000

研究分野：放電工学

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：六フッ化硫黄、代替ガス、窒素、初期電子、放電遅れ時間、地球温暖化

1. 研究開始当初の背景

(1) 六フッ化硫黄 (SF₆) は絶縁ガスとして極めて優れた絶縁特性と放電路の消弧特性を持ち、電力機器に不可欠なガスとして用いられている。しかし、地球温暖化が社会問題となり、地球温暖化係数が炭酸ガスの 23,700

倍もある SF₆ は、1997 年に京都で開催された COP3 において、大気中への排出削減の対象物質として指定され、その代替ガスの研究が必要となった。

(2) 単独で SF₆ ガスを凌ぐ絶縁特性を有し、

環境負荷の小さなガスは見つかっていない。

(3) 環境問題を考えれば自然ガスを利用することが最善である。しかし、絶縁特性はSF₆ガスと比較して半分以下しかなく、消弧特性も乏しい。したがって、窒素や空気に別種のガスを混合させる方法が、代替ガスとしての有力な候補の一つとして検討されていた。

(4) 窒素は環境の観点からは優れているが、原子あるいは分子自体がエネルギーを蓄積する性質があり、絶縁ガスとして用いるうえでは十分な検討を要することが指摘されていた。

2. 研究の目的

SF₆ガスの代替ガスとして、ガスの混合が有力な方策として考えられている。そこで、本研究では窒素を主体として、混合させるガスの種類とその量を実験的に明らかにすることを主目的とする。具体的には、以下の3つの項目に対して検証を重ね、それぞれの条件を明らかにする。

(1) 窒素を主体としてガスを混合させる場合、蓄積されたエネルギーの開放が重要な要因になることが予測される。そこで、実験的にその予測を検証する必要がある。次に、エネルギーの開放に有効なガスを選択する。

(2) 放電が繰り返された場合に、後続の放電特性を悪化させないためのガスの混合率を決定する。

(3) 国内ではCF₃Iが着目されており、窒素に混合させた場合の有効性を検証する。

3. 研究の方法

上記2に示した3つの項目を明らかにするために以下の方法をそれぞれ用いる。

(1) 実用的な電極配置を想定し、半球棒-平板電極を用いた準平等電界中で、半球電極に負のステップ電圧を印加する。放電を一定時間経過後に繰り返し発生させ、その都度、放

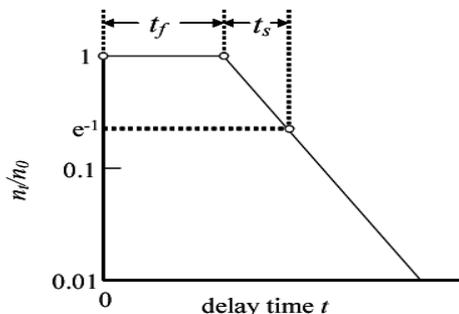


図1 破壊確率と遅れ時間の関係 (ラウエ・プロット)

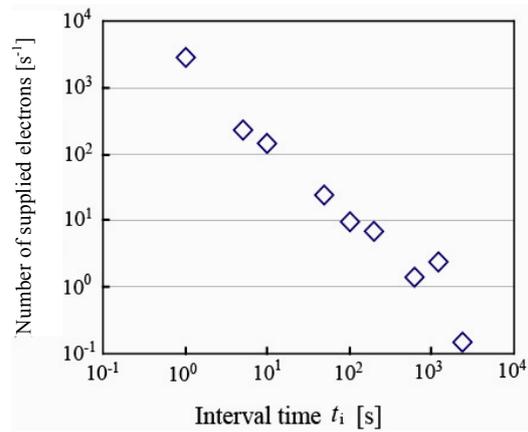


図2 窒素雰囲気中での供給電子数の変化

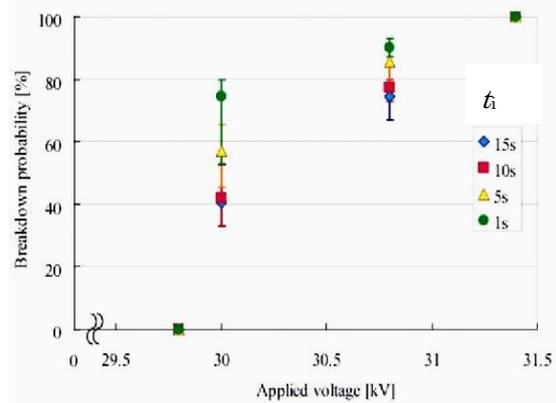


図3 絶縁破壊確率の繰返し時間依存性

電遅れ時間を測定し、図1に示すようなラウエ・プロットに描く。ここで、電極間で放電が発生するために必要な電圧を、静的破壊電圧と定義する。その1.1倍以上の電圧を印加して破壊の遅れ時間を測定すれば、その負の傾きを有する直線部分の勾配から、単位時間あたりに供給される電子数が算出できる。この手法を用いて、窒素中における電子供給数を求める。

(2) 混合ガスの混入量を制御し、繰返し時間に対する供給電子数を算出し、放電抑制効果を検証する。

(3) CF₃Iを混合ガスとして用い同様の測定を行い、その有効性を検討する。

4. 研究成果

(1)① 目的の1項目を検証するために、窒素単独の場合の問題点を定量的に把握した。次いで、混合すべきガスの種類の選択をおこなった。

静的破壊電圧の1.2倍の電圧を印加し、破壊の遅れ時間を測定し、ラウエ・プロットから単位時間あたりに供給される電子数を窒素雰囲気中で算出した結果を図2に示す。電圧を印加する時間間隔が短いと1秒あたりに

1000 個以上もの電子が供給されることがわかる。この値は電圧が印加されると放電を誘発するに十分な数である。

図 3 は電圧を印加した時に各印加電圧に対する破壊の確率と繰返し時間との関係を示したグラフである。同一電圧を印加しても繰返し時間が短くなると破壊する確率が高くなっている。特に、繰返し時間が 10 秒以下では破壊確率の増加が顕著になる。これらの結果から、供給される電子数は 100 個以下に減少させる必要のあることが分かる。

図 2 から電圧を印加する時間間隔が長くなると、電子数は時間とともにほぼ反比例の関係で減少することが分かる。したがって、図 2 は 1 秒以上の時間領域のデータであるが、1 秒以下の領域のデータが重要であることも判断できる。

② 低気圧中での実験では、同様の現象が報告されている。この原因は、放電によって発生したエネルギーを原子あるいは分子内に蓄積した窒素の活性種が空間に蓄積する事によってもたらされると考えられ、数多くの解析が行われてきた。しかし、高気圧中では、粒子間の衝突が高い頻度で繰り返される。したがって、衝突によって蓄積したエネルギーが解放される確率が高いため、活性種が空間に長時間残留する可能性は疑問視されてきた。そこでまず、高気圧中でも活性種の影響がある事を確認するための実験を行った。

具体的には、電子の供給源が空間に残留するイオンであれば、空間の体積に依存して供給電子数は変化すると考えられる。それに対し、活性種が原因しているならば、電極や壁に衝突したときに保持しているエネルギーによって物質表面から二次電子を発生させるはずである。したがって、物質の面積に依存した電子数になることが予想できる。その際、放電の発生には電界の値がある閾値以上になる必要がある。そこで、電極間距離と球電極の直径を変化させ、電極間の空間の電界分布を解析した結果を表 1 に示す。表 1 には電界の値が閾値を越す電極の面積がほぼ同一で空間の体積が違う電極の組み合わせである 1 と 2、また体積はほぼ同一で面積の違う組み合わせである 1 と 3 を用い供給される電子数を比較することとした。

表 1 電界の閾値を越える電極面積と体積

No	ϕ [mm]	d [mm]	V [kV]	Area $\times 10^{-6}$ [m ²]	Volume $\times 10^{-9}$ [m ³]
1	5	1	22	4.3	7.4
2	5	2	34	4.2	3.7
3	15	2	34	8.8	7.6

ϕ : 半球電極の直径、d: 電極間距離
V: 印加電圧 (圧力 0.5 MPa)

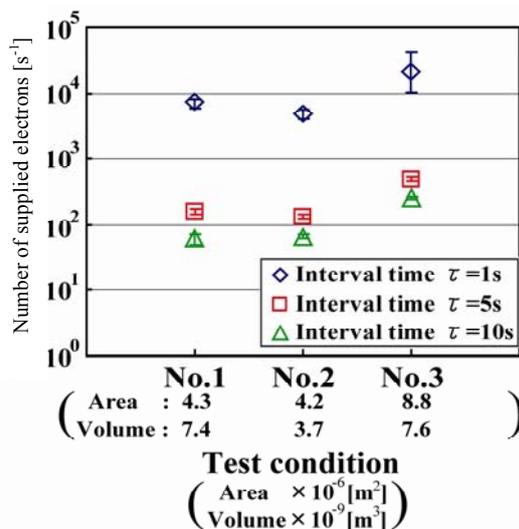


図 4 供給電子数に対する電極の表面積と体積の依存性 (圧力 0.5MPa)

図 4 に各条件で電圧の印加する時間間隔を変化させた場合に得られた供給電子数の違いを示す。1 と 2 とを比較すると、いずれの時間間隔においても電子数の違いはわずかである。それに対して 1 と 3 を比べると、3 の方がいずれの時間においても供給電子数は明らかに増加している。つまり、電界の閾値を越える領域の電極の表面積が広がると電子数が多く供給されることが確かめられた。したがって、前段の放電で発生し空間に残留するイオンよりも、高気圧中といえども、放電によって発生したエネルギーを内蔵している粒子の空間での蓄積が電子の供給源になっている可能性が高いことが確かめられた。

(2)① 上記の結果から、窒素原子や分子が内蔵しているエネルギーを効率的に開放する性質を有するガスを混入することが有効と判断できた。そこで、混入するガスの種類と量を検証した。

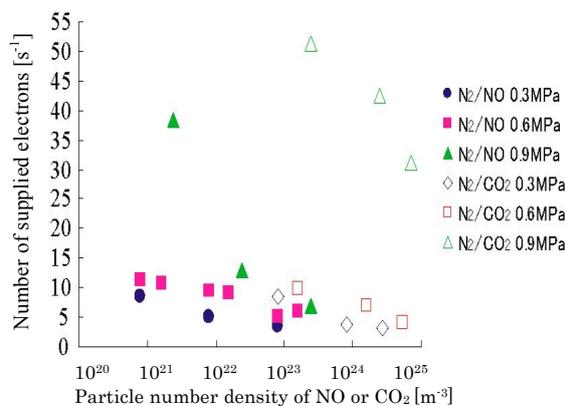


図 5 混入するガス分子の数密度に対する供給電子数の変化

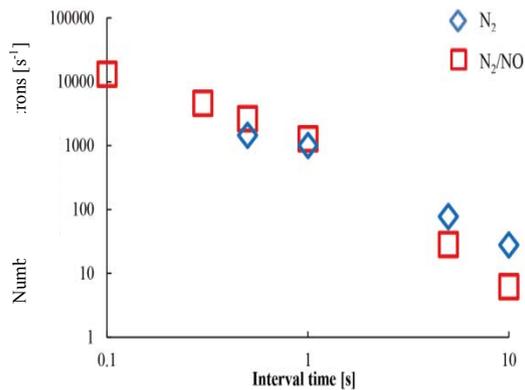


図6 10秒以下の繰返し時間における供給電子数の変化

窒素原子あるいは分子が内蔵するエネルギーは5~10eV程度なので、各ガス分子の衝突断面積のデータを参考にして、この程度のエネルギーを効率よく吸収できる分子を選択すると、NOとCO₂が候補として挙げられる。そこで、それぞれ混入するガス分子の数密度を変えて窒素中に混入した場合に得られた供給電子数の変化を図5に示す。

同一圧力で比較すると、NOはCO₂に比べていずれも1桁から2桁程度少ない混入量で同程度の供給電子数に減少させられることが分かる。いずれにしても、1%以下の混入量で先に述べた供給電子数を100個以下にする目標は実現できている。

② 図5は繰返し時間を15秒にした場合の結果であり、NOの混入は極めて有効であることがわかる。しかし、先の結果より1秒以下のデータを取得する必要性の高いことが確認された。そこで、NOを混合させて0.1秒まで取得したデータを窒素単独の場合と比較した結果を図6に示す。

エネルギーを解放する性質を有する分子の混入は、10秒以上の繰返し時間においては極めて有効であるが、短時間ではむしろ特性は悪化することが確かめられた。これは、エネルギーを短時間で開放すれば、ある程度の時間が経過した後は有効であるが、短時間の領域では、むしろ多くの電子を発生させてしまうことを意味している。つまり、NOやCO₂はエネルギーを吸収した場合、その状態は不安定なため、短時間でそのエネルギーを電磁波として放出してしまう反応過程が生じている事を示唆している。したがって、エネルギーの解放だけでは短時間領域における供給電子数の減少にはむしろ悪影響を及ぼす事があり、これを解決する必要がある。

そこで、発生した電子を捕獲するために、SF₆を1%混合した結果を図7に示す。図2に示す窒素単独の場合に比べ、明らかに電子数は減少していることが分かる。電極の直径

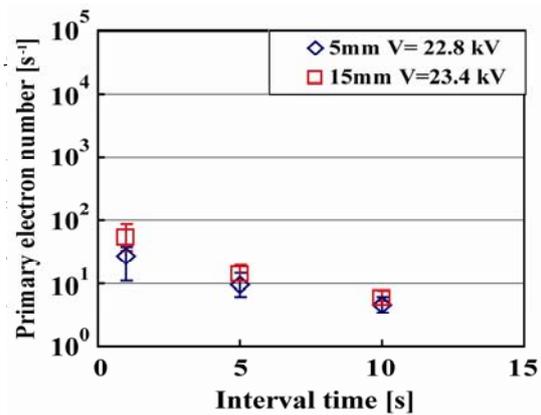


図7 SF₆を混合した場合の供給電子数

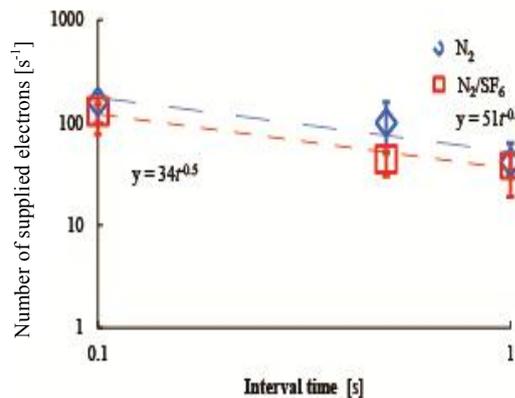


図8 SF₆を混合した場合の短時間領域における供給電子数

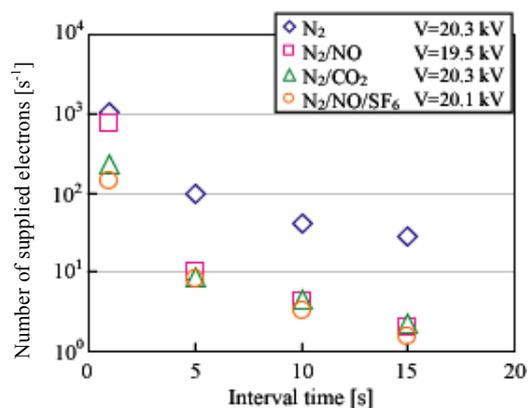


図9 各種ガスを混合した場合の供給電子数の変化

の影響、つまり電極の表面積の違いによる変化は極めて小さいことが分かる。図8は短い時間領域の結果であり、比較するために、窒素の測定条件を変えた結果を示しているが、NOの場合と違い、SF₆の供給電子数の変化は窒素の時間間隔に対する依存性を平行移動するような変化を示している。したがって図7、8の結果から、SF₆の場合には、電子を空間で補足する反応が主であることを示唆している。そこで、窒素に蓄積したエネルギー

一を解放する性質のあるガス (NO あるいは CO_2) と、発生した電子を補足する性質のある SF_6 ガスを混合させた場合、さらに NO と SF_6 とを混合させた場合の測定を行った。その結果を図 9 に示す。

全体の傾向としては、想定した変化を示している。つまり、NO の混入によるエネルギーの解放効果のため、時間の長い領域に供給される電子数は減少させられる。しかし、短時間領域になると、エネルギーの解放がむしろ供給電子数を多くしてしまう影響を、 SF_6 の混入による電子の捕獲効果により、供給電子数の増加を緩和させられることが認められる。しかし、図 2、3 で判断した、単位時間当たり供給される電子数を 100 個以下に減らす目標には十分応えられていない。

(3) 以上の結果から、エネルギーの解放作用と電子の捕獲作用との重畳が供給電子数を減少させる上で有効であることが判明した。そこで、両者の性質を同時に兼ね備えている CF_3I に着目し、その有効性を検証した。

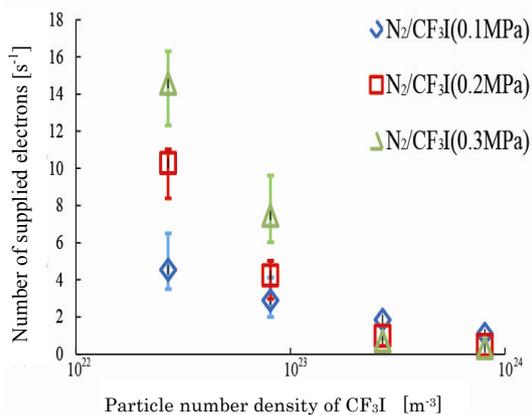


図 1 0 CF_3I を混合した場合の供給電子数

① 図 1 0 は圧力を変化させ、 CF_3I の混入量に対する供給電子数の変化をまとめた結果であり、図 1 1 は短時間領域における 1% CF_3I を混合させた場合の結果である。

図 1 1 では図 8 と同様、窒素の場合と比較するための結果を記入してあるが、直線の傾きはエネルギー解放作用のある NO の場合と同様である。したがって、 CF_3I はエネルギーを解放させる反応が供給電子数を減少させる主たる反応過程であることが予想できる。したがって、2 種類のガスを混合させる場合よりは明らかに効果的であり、短時間でも 100 個程度まで減少させられることが分かる。② CF_3I が供給電子数を抑制するのは、電子を捕獲する効果よりも、分子が解離して窒素原子や分子が内蔵するエネルギーを吸収するためであることが分かった。したがって、分子が解離すれば、分解した原子が空間に供

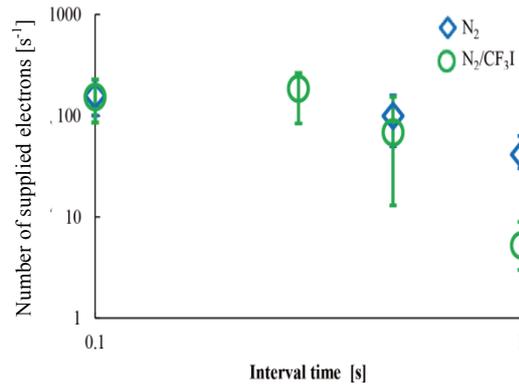


図 1 1 CF_3I を混合した場合の短時間領域における供給電子数

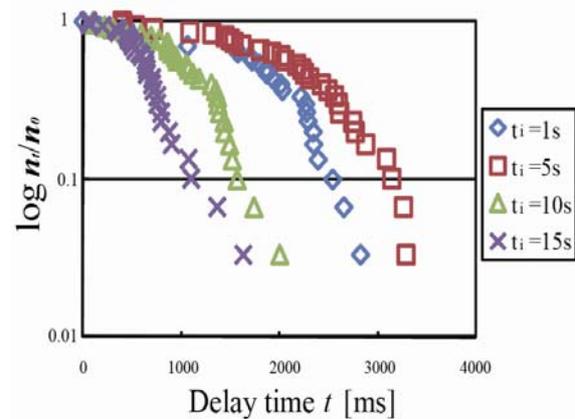
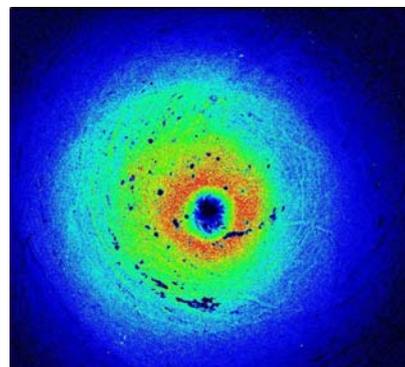


図 1 2 多数回測定した場合の CF_3I のラウエ・プロット

給されることになる。そのために、測定を繰り返すと空間の条件が時間とともに変化することが予想できる。図 1 2 は、測定されたラウエ・プロットの一例である。通常は、負の傾きを有する測定点は図 1 に示すように、直線状に分布する。ところが、 CF_3I の場合、測定回数を多くすると図 1 2 に示すように直線とはならず曲線が得られる事をしばしば経験している。その際、回数が増えると傾きが急激に増加する傾向が強くなる。



←→ 200 μm

図 1 3 電極表面におけるヨウ素の析出

図13は電極表面の組成分析をした結果であり、暖色系の色が濃い部分に多くのヨウ素が析出していることを示している。したがって、放電を繰り返すと電極、さらに容器の表面にヨウ素が析出し特性を変化させていることが明らかである。この対策としてヨウ素を吸着する物質を容器内に配置する等の対策をする必要がある。

以上3項目に対する検討を重ねた結果を要約すると、

- ・窒素原子と分子が内蔵するエネルギーを解放することが供給電子数を抑制する上で有効であることが確認できた。特にNOを1%前後混入することが効果的であった。
- ・電圧を印加する時間間隔を短くするとエネルギーの解放作用が逆効果になる場合があることが確かめられた。
- ・電子の捕獲作用は、時間間隔によらず効果的であり、SF₆の混合量を1%あるいはそれ以下にした場合でも、有効である。
- ・CF₃Iは極めて有効であり、その原因は解離によるエネルギーの解放が寄与していることが確かめられた。その結果として、解離によるヨウ素が析出する。したがって、この対策を十分に行えば、極めて有望な混合するガスとなりうる。

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 濱野修一、小林史典、岩尾徹、湯本雅恵：
「高気圧窒素中における繰り返し放電時の初期電子供給—電子付着作用に用絶縁破壊特性—」電気学会論文誌A, Vol.130, No.7, pp.704-709 (2010) (査読有)
- ② F.Kobayashi, S.Hamano, T.Iwao and M.Yumoto: “Decrease of Primary Electron Number by NO, CO₂ and SF₆ Mixing at Breakdown in High-Pressure Nitrogen”, Electrical Engineering in Japan, Vol.172, No.3, pp1-7 (2010) (査読有)

[学会発表] (計8件)

- ① I.Nagashima, T.Iwao and M.Yumoto: “Number of supplied electrons under repetitive discharge in high pressure nitrogen based gas mixture”, Proc. 17th Intern. Symp. on High Voltage Engineering, Hannover Germany, August 22-26 (2011)
- ② M.Yumoto, S.Hamano, T.Suzuki and T.Iwao: “Influence of CF₃I on the number of supplied electrons under high pressure nitrogen”, Proc. 18th Intern. Conf. on Gas Discharges and their Applications, Greifswald Germany, September 5-10 (2010)
- ③ S.Hamano, T.Iwao and M.Yumoto: “Suppression of Primary Electron Number by De-excitation and/or Electron Attachment Reaction in High Pressure Nitrogen”, Proc. 17th Intern. Symp. on High Voltage Engineering, Cape Town South Africa, August 24-28 (2009)

6. 研究組織

(1) 研究代表者

湯本 雅恵 (YUMOTO MOTOSHIGE)

東京都市大学・工学部・教授

研究者番号：10120867

(2) 研究分担者

岩尾 徹 (IWAO TOORU)

東京都市大学・工学部・准教授

研究者番号：80386359