

令和 2 年 6 月 10 日現在

機関番号：13901

研究種目：研究活動スタート支援

研究期間：2018～2019

課題番号：18H05848・19K21037

研究課題名（和文）自動車用ヒューズ内のアークに対する粒子数密度/ガス特性の二次元分布計測法の開発

研究課題名（英文）Development of two-dimensional measurement method of gas density and gas property for DC arc established in high voltage fuse

研究代表者

児玉 直人（Kodama, Naoto）

名古屋大学・工学研究科・助教

研究者番号：80828971

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 1,900,000円

研究成果の概要（和文）：本研究の目的は、珪砂が封入された限流ヒューズ内部で発生した直流アーク放電に対して、様々な粒子の数密度やガス特性に対する二次元観測方法を開発することである。本研究では、局所分光観測システムや申請者らが構築した二次元分光観測システムを用いた直流アークに対する発光分光測定、およびガス組成および特性計算コードを用いた高温アークの特性計算を実施した。その結果、珪砂封入空間内部で点弧する直流アークに対する温度計測および銅蒸気濃度評価に成功した。また、限流ヒューズを用いた大電流遮断時ににおけるアーク抵抗低下の原因が、アーク中の高い銅蒸気濃度による可能性が高い知見を得た。

研究成果の学術的意義や社会的意義

本研究では、直流遮断用の限流ヒューズにおいて高いアーク抵抗の維持が難しい原因を検討し、それがアーク中の高い銅蒸気濃度による可能性が高い知見を得た。また、高い銅蒸気濃度化の原因として、遮断過程でアーク周囲に形成されるフルグライト中に含まれる銅が再蒸発することによる可能性が高い知見が得られている。これは、限流ヒューズの高遮断容量化の指針を与える重要な成果であると考えられる。

また、本研究で開発された二次元分光観測システムは汎用性が高く、ヒューズ内部アーク以外の様々な放電・プラズマに対する二次元的な観測が可能である。この点でも、学術的意義が高いと言える。

研究成果の概要（英文）：This study focused on development of a two-dimensional measurement system for gas number density and properties of DC arc established in a limiting fuse. In this study, we developed two-dimensional optical emission spectroscopy (OES) system to obtain two-dimensional distribution of specific spectral line of DC arc. In addition, we also carried out traditional zero-dimensional OES measurement to obtain an arc temperature and to evaluate copper vapor concentration in the DC arc with calculation of high temperature arc properties.

Results showed that high concentration of copper vapor can be maintained during DC interruption in the silica-sand filled space. This high copper vapor concentration may occur due to re-evaporation of fulgurite consist of SiO₂ and Cu.

研究分野：電気機器

キーワード：アーク ヒューズ 分光観測 空間分布

様式 C-19、F-19-1、Z-19 (共通)

1. 研究開始当初の背景

電気自動車などの電気系回路内には、回路保護のために限流ヒューズが取り付けられている。回路内で故障大電流(数千 A)が発生した際には、ヒューズのエレメントが溶断する。このとき、溶断したエレメント間に高温のアーク放電が点弧する。限流ヒューズ内には珪砂が封入されており、アークによる珪砂の蒸発によりアークを冷却し、アークの抵抗を高めることで電流を限流し、消弧へと導く。

近年では自動車用バッテリーの高圧化(約 1000 V)が進んでおり、これに伴い故障電流もさらに大電流化する恐れがある。しかしながら、この故障電流の大電流化に対してヒューズの遮断容量不足が深刻な問題であることが、ヒューズメーカーとの情報交換から明らかになっている。

遮断容量の向上のためには、電流遮断過程におけるアークの抵抗を更に高める必要がある。アーク抵抗の更なる向上のためには、(1) 現在のヒューズで高いアーク抵抗が維持できない原因の解明、(2) アーク抵抗を上昇可能な新手法の考案が必要である。近年では、(2)に対して珪砂と共に高分子材を利用することでアーク抵抗上昇が可能なことが報告されている。しかしながら、高分子材併用時には電流遮断後の絶縁抵抗が低下しやすい課題も報告されている。そのため、(1)および(2)の更なる解決のためには、珪砂中もしくは珪砂/高分子材併用時におけるアークの組成や物性の空間的な分布およびその時間的な変化を測定し、明らかにする必要がある。しかしながら、アーク組成や物性を二次元で測定可能な手法は確立されていない。

2. 研究の目的

本研究では、以下の二点を解明することを主目的とする。(1) 消弧媒体として珪砂もしくは珪砂/高分子を用いたヒューズ内で発生するアーク放電のガス組成およびガス特性の空間分布の計測・推定方法の開発、(2) 消弧媒体蒸気のアークへの混入がアーク電圧や絶縁抵抗およびガス特性に与える影響の解明。

3. 研究の方法

研究の目的を達成するために、以下の3つの方法を主として用いて研究を実施した。

(1) 局所熱平衡を仮定したヒューズ内部アークの化学組成およびガス特性の計算

アーク抵抗はアークの化学組成と温度に強く依存する。珪砂や高分子蒸気が混入したアークは非常に多種の化学粒子を含むため、アーク内部で生成し得る全ての粒子種の実験的な同定は不可能である。本研究では、ヒューズ内部で生成され得る高温蒸気の組成を、ガス中の元素比率を仮定したうえで数値計算により求めた。計算には、系の Gibbs の自由エネルギーを最小化させる方法を用いた。本研究においてヒューズ内部で生成し得る化学粒子 113 種を NIST-JANAF Table から同定し、その全てに対して励起準位や縮退状態などを考慮したうえで内部状態和を計算した。この計算結果や標準生成エンタルピーを用いることで、その粒子の化学ポテンシャルを計算した。計算された粒子ごとの化学ポテンシャルを用いて、任意の高温ガスに対する化学組成を求めた。また、計算された化学組成を用いて、高温ガスの放射特性や、消弧媒体性能の指標の一つとなる定圧比熱などの熱力学特性を計算した。

(2) 様々な高分子材と珪砂を併用した直流アーク遮断実験とアークと消弧媒体の相互作用に関する検討

これまで、PA66 (C₁₂H₂₂O₂)製の高分子円筒と珪砂を併用した実験において、アーク抵抗の上昇が報告されている。高分子材の種類は多岐にわたり、その成分も多様である。本研究では、PA66 以外のいくつかの高分子材も併用した実験を行い、高分子材種ごとのアーク抵抗上昇および遮断後の絶縁抵抗低下について検討した。PA66 以外の円筒として、主として PA66 と構成成分が似ておりかつ透明度が高い PMMA (C₅H₈O₂)を用いた。また、高分子材を併用したアーク遮断後に電極間の絶縁抵抗が低下する原因として、高分子中の C が原因となる可能性がある。このことから、C 含有割合が少ない Si 樹脂 (C₂H₆OSi)を用いた実験も同様に行った。実験の結果から、高分子材ごとのアーク抵抗上昇の差異や絶縁抵抗に対する影響を調査した。

PMMA 使用時には高速度ビデオカメラを用いたアークの観測を実施した。珪砂未併用時において円筒内で形成されるアークの様相から、アークと高分子円筒の相互作用について検討した。

(3) 二次元分光観測系の構築と二次元分光観測系を用いたアークの空間・時間分解計測によるアーク組成の実験的な検討

アーク抵抗はアークの化学組成と温度に強く依存する。一般的に、アークの温度が高いほどアーク抵抗は低く、アーク中の金属蒸気濃度が高いほどアーク抵抗は低くなる。そのため、アーク温度やアーク中の金属蒸気濃度は、アークの導電性を検討するための非常に基礎的なパラメータである。

本研究では、珪砂中におけるアークに対して局所的な発光分光観測を実施した。測定された Si II の発光スペクトルに対して局所熱平衡を仮定した解析を行うことで、アーク温度の時間推移を求めた。また、Si II と Cu I の放射強度比を実験的に求めた。測定されたアーク温度において実験的に求められた放射強度比と(1)で求められた放射特性を比較することで、珪砂のみ使用時、および珪砂/円筒併用時におけるアークの銅蒸気濃度について、検討した。

ヒューズ内部においてアークは二次元的な分布を示す。そのため、前述した局所分光観測によ

るアーク組成の検討だけではなく、二次元的な分光観測によるアーク組成分布・時間変化の検討も重要である。干渉フィルタとカメラを併用した二次元分光観測は従来から様々なアークの観測に対して行われてきた。しかし、干渉フィルタを用いた方法は基本的に波長分解能が数 nm-数 10 nm と低い。ヒューズ内部アークでは短い波長間隔に様々な種類の発光スペクトルが現れるため、干渉フィルタを用いた二次元分光観測では、隣り合ったスペクトルを分解できない可能性がある。そこで本研究では、imaging 分光器やカメラレンズを組み合わせることで、任意の波長を高い波長分解能(コンマ数 nm-数 nm)で観測可能な二次元分光器を設計し、構築した。

構築された二次元分光観測器を用いて珪砂中アークの観測を行うことで、金属蒸気の空間的な分布について検討を深めた。

4. 研究成果

(1) 局所熱平衡を仮定したヒューズ内部アークの化学組成およびガス特性の計算

図 1 に様々な上記に対する電子密度の計算結果を示す。同図から、Cu 蒸気は電子密度が最も高く、次いで珪砂の電子密度が高い。これは、SiO₂の解離により生成される Si 原子の電離電圧が Cu 原子と同程度であるためである。そのため、アークによる珪砂の蒸発はアークの冷却源となる一方で、アークに混入した珪砂蒸気はアークに多量の電子を供給し、アーク抵抗を低下させる可能性があることが示唆される。一方で、Cu 蒸気や珪砂蒸気と比較して PA66 や PMMA 蒸気は電子密度が非常に低く、これら的高分子蒸気のアークへの混入がアーク抵抗を上昇させ得ることが示唆される。

また、定圧比熱の計算結果から、Cu < 珪砂 < 各高分子材混合蒸気の順で比熱が高くなる傾向が得られた。よって、高分子蒸気混入により比熱が上昇し、アークの限流過程におけるアーク温度の上昇が抑制されることで、アーク抵抗が上昇することが示唆された。

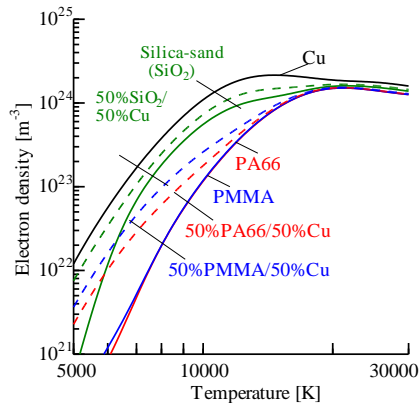


図 1 様々な蒸気の電子密度

(2) 高分子併用時におけるアーク抵抗上昇の更なる検討

① 様々な高分子材と珪砂の併用時における

直流アーク抵抗上昇

珪砂のみ、PA66、PMMA および Si 樹脂円筒を珪砂と併用した直流アーク遮断実験の結果を図 2 に示す。試験電流はピーク値が 1000 A の直流減衰電流である。同図から、円筒配置によりアーク電圧が上昇していることがわかる。また、アーク電圧上昇の程度は樹脂の種類ごとに異なることがわかる。この結果から、円筒内の珪砂と共に円筒内壁がアークにより蒸発し、アーク中に混入することでアーク抵抗が上昇していることがわかる。

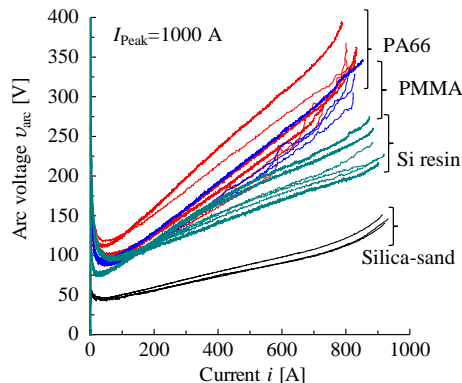


図 2 様々な高分子円筒使用時のアーク電圧上昇

② 高分子円筒と円筒内珪砂によるアーク抵抗上昇要因の検討

図 3 に、円筒未併用時に PMMA 円筒内で形成されたアーク様相の観測結果を示す。アーク点弧後、電流の増加と共にアーク径が増大し、電流ピーク付近ではアークと円筒内壁が接触している様相が観測されている。一方で、電流遮断直前の低い電流域ではアークと円筒内壁が接触していないことがわかる。これらの結果から、円筒配置時におけるアーク抵抗上昇の要因として、以下の点が示唆された。(1) 大電流時：アークと円筒内壁の接触によりアーク径が強制的に収縮する。この時に珪砂と共に高分子材が蒸発することでアークのエネルギーを損失させる。(2) 低い電流時：高分子材蒸気が混入したアークの温度が低下することで電子密度が著しく低下し、抵抗率が上昇する。これにより高いアーク抵抗が維持される。

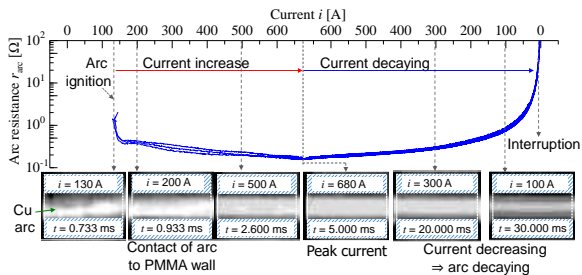


図 3 円筒内アークの光学観測結果

(3) 珪砂中アークに対する局所分光観測とアーク温度および銅蒸気濃度の測定

① 珪砂使用時および珪砂/石英円筒併用時におけるアーク温度の減衰とアーク電圧上昇

図 4(a)は、珪砂使用時および珪砂/石英円筒併用時におけるアーク抵抗である。同図から、高分子円筒ではなく石英円筒を併用した条件でも、高いアーク電圧が得られることがわかる。よって、高分子蒸気の影響がない条件下でもアーク電圧が上昇し得ることが判明した。

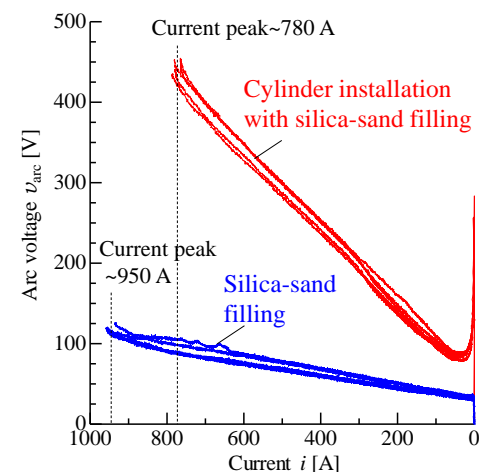
図 4(b)は、これらの条件において測定された Si II の発光スペクトルに対して Boltzmann plot 法を用いることで測定されたアーク温度である。Boltzmann plot 法は局所熱平衡が成立する場合に適用可能な温度測定法である。Boltzmann plot 法においてプロットされた測定点が線形になるか否かで局所熱平衡状態の簡易的な判定ができる。本研究でも、Boltzmann plot 法でグラフ中にプロットされた点が直線状にプロットされることを確認しており、局所熱平衡状態が成立することがわかっている。

同図から、石英円筒設置条件のアーク温度よりも石英未設置条件のアーク温度が低く測定される傾向があることがわかる。本実験では、主成分が SiO₂ の石英管を使用しているため、円筒内で生成し得る高温ガスは珪砂と銅の混合蒸気であり、円筒未設置時とほぼ同じ成分の高温ガスが生成され得る。そのため、図 1 に示した様に温度が高いと電子密度は高くなり、アーク電圧は低下する傾向を示すはずである。しかしながら、図 4(a)に示した様に円筒設置時のアーク電圧がより高く測定されている。この原因を検討するために、アーク中の銅蒸気濃度に着目した。

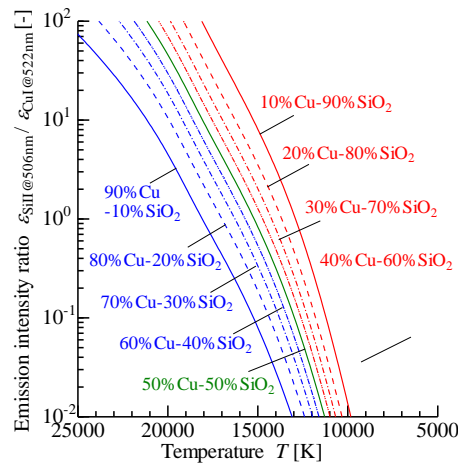
② 珪砂使用時および珪砂/石英円筒併用時における銅蒸気濃度の測定

様々な珪砂/銅蒸気混合条件に対して理論計算から得られる Si II と Cu I 発光スペクトルの放射係数比と、実験結果から得られる Si II と Cu I の放射強度比を比較することで、珪砂のみ条件と石英円筒/珪砂併用条件におけるアーク中の銅蒸気濃度の差異を検討した。

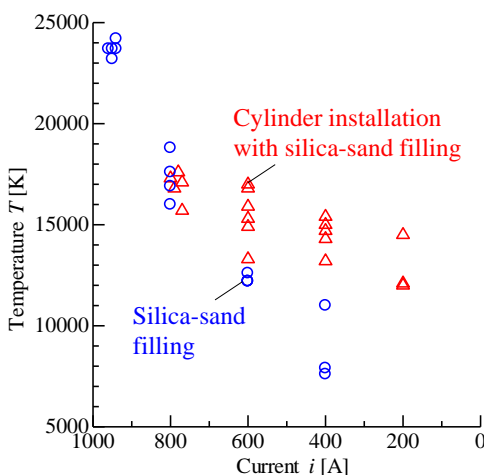
図 5(a)は、珪砂/銅混合蒸気に対する Si II と Cu I の発光スペクトル強度比を温度に対してプロットした図である。混合蒸気中の銅蒸気濃度を様々に変えて計算をしている。また、過去の文献



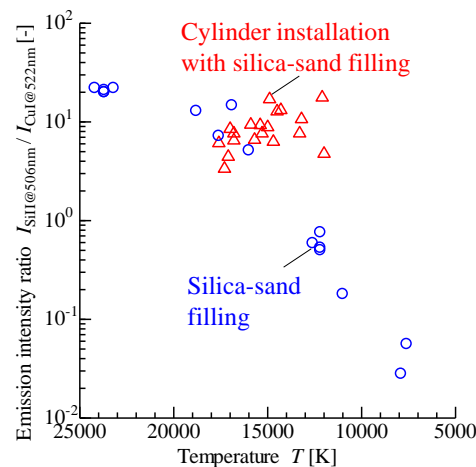
(a) Arc voltage during current decaying period



(a) Emission coefficient ratio between Si II and Cu I



(b) Arc temperature during current decaying period



(b) Radiation intensity ratio between Si II and Cu I plotted against arc temperature

図 4 円筒設置時および未設置時におけるアーク電圧とアーク温度

図 5 Si II と Cu I の放射係数比の計算値と放射強度比の測定値

から、計算圧力を 10 atm に設定している。同図から、高温蒸気中の銅蒸気濃度が保たれたままアーク温度が低下すると、放射強度比が急峻に減少することがわかる。これは、温度低下に伴い $\text{Si}^+ + e \rightarrow \text{Si}$ の再結合反応より Si イオンの数密度が低下し Si II の放射係数が低下する一方で、 $\text{Cu}^+ + e \rightarrow \text{Cu}$ の再結合反応より Cu 原子の数密度が増加し Cu I の放射係数が増加するためである。

図 5(b) は実験結果から得られた Si II と Cu I の放射強度比を、アーク温度の測定値に対してプロットした図である。同図から、珪砂のみ条件ではアーク温度の低下と共に放射強度比が急峻に低下することがわかる。これは、アーク中の銅蒸気濃度がほぼ低下せずにアーク温度が低下し、Cu 原子数が増加するためである。一方で、石英円筒設置条件ではアーク温度の低下に対して放射強度比がほぼ一定であることがわかる。図 5(a) から、温度の低下に対して放射係数比が一定であるためには、温度の低下と共に銅蒸気濃度が減少する必要がある。よって、珪砂のみ条件とは、異なり円筒設置条件ではアーク中の銅蒸気濃度が減少することでもアーク抵抗を高めていることが判明した。

珪砂のみ条件においてアーク中の銅蒸気濃度が高い状態で維持された原因を、次節において珪砂中アークに対する二次元分光観測の結果から考察した。

(4) 珪砂中アークに対する二次元分光観測と銅蒸気濃度上昇要因の分析

① 二次元分光観測系の構築

本研究では、任意の波長に対する発光スペクトル放射強度の空間分布を時間分解計測可能な光学観測系を構築した。図 6 が構築した二次元分光観測系の概要図である。一般的な二次元分光観測では、特定波長の発光スペクトルを観測するために干渉フィルタを用いる。本研究では、アークからの放射光の波長分解に imaging 分光器を用いている。これにより、任意の波長の発光スペクトルの二次元放射強度分布を、高い波長分解能で測定可能である。

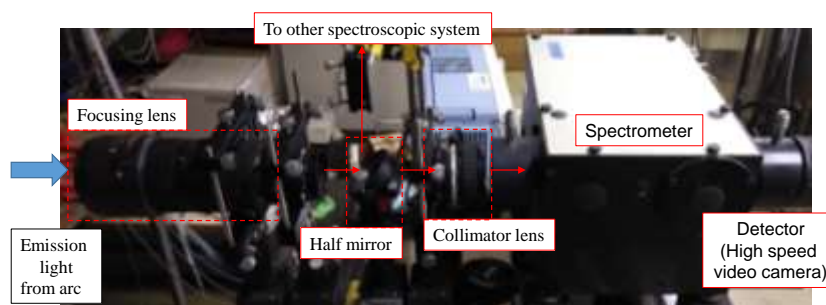


図 6 構築した二次元分光観測系

② ヒューズ内部アークに対する二次元分光観測による銅蒸気濃度上昇要因の分析

図 7 に、珪砂中で点弧したアークの Cu I 発光スペクトルに対する二次元分光観測の結果を示す。同図(a)-(c)が電流増進過程、(d)-(i)が電流減衰過程におけるアークである。

同図から、アーク中の Cu I 発光スペクトルの二次元分布計測に成功していることがわかる。観測領域中央付近にある暗い領域は、観測窓に溶融珪砂が付着したことでアークからの発光を観測できなかった部分である。

同図から、電流減衰過程の 500 A や 400 A でも円筒内での Cu I 放射強度が強く観測されており、特にアーク端での放射強度が強くなる傾向が見られる。この原因として、以下が考察される。(i) 珪砂中で点弧した銅アークは非常に高圧(数 MPa)であることが報告されている。そのため、アークの主成分である銅蒸気は、圧力勾配によりアークの径方向に拡散する。(ii) アークと非溶融珪砂の界面には、液相珪砂の層が存在する。径方向に拡散した銅蒸気は液相珪砂と混合される。(iii) アークの熱により、珪砂と銅の混合液相が再蒸発する。これにより、アーク中に再度銅蒸気が供給され、アークの銅蒸気濃度は高い状態に保たれる。よって、アーク周囲に存在する珪砂が銅蒸気の拡散を阻害することで高い銅蒸気濃度が保たれ、アーク抵抗が低下すると考えられる。

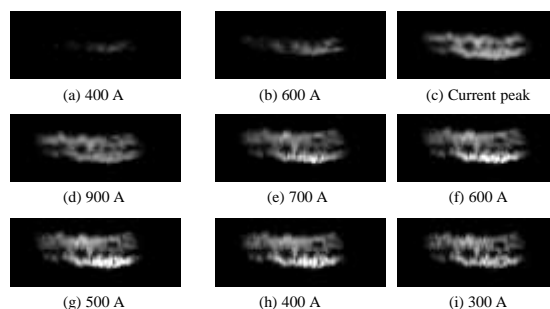


図 7 珪砂中で点弧したアークに対する Cu I スペクトルの二次元放射強度分布

(5) まとめ

本研究では、アークに対する局所的な分光観測と、新たに構築した二次元分光観測システムを用いた二次元分光観測を用いることで、アーク温度やアーク中の特定の粒子の空間分布および蒸気濃度を検討した。本研究期間ではアーク圧力の測定ができなかったことから、当初予定していた粒子数の絶対値の計測には至らなかった。しかしながら、銅蒸気濃度の計測結果や二次元的な分光観測結果を踏まえて、従来から用いられてきた珪砂封入型限流ヒューズにおけるアーク抵抗低下の原因の一つを明らかにできたと考えられる。

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計0件

〔学会発表〕 計8件（うち招待講演 0件 / うち国際学会 4件）

1. 発表者名 兒玉直人, 高橋明里, 中村晃也, 横水康伸, 近藤祐介
2. 発表標題 珪砂中へのPA66, PMMAおよびSi樹脂設置による直流アーク遮断時間の短縮-原子化エンタルピーからの解釈-
3. 学会等名 電気・電子・情報関係学会東海支部連合大会
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 Naoto Kodama, Asato Takahashi, Koya Nakamura, Yasunobu Yokomizu and Yusuke Kondo
2. 発表標題 Installation of PA66, PMMA or Si-resin cylinders in silica-sand for rising arc voltage during DC interruption
3. 学会等名 International Workshop on High Voltage Engineering (国際学会)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 兒玉直人, 横水康伸, 高橋明里, 中村晃也, 近藤祐介
2. 発表標題 珪砂中へのPMMA円筒設置時における直流アーク抵抗上昇機構の検討
3. 学会等名 平成31年電気学会全国大会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Naoto Kodama, Yokomizu Yokomizu, Asato Takahashi, Koya Nakamura, Yusuke Kondo
2. 発表標題 Fundamental study on role of silica-sand and polymer cylinder in terms of gas properties during DC interruption
3. 学会等名 XXXIV International Conference on Phenomena in Ionized Gases/10th International Conference on Reactive Plasmas (ICRP-10) (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Naoto Kodama, Yokomizu Yokomizu, Asato Takahashi, Koya Nakamura, Yusuke Kondo
2. 発表標題 Approach to Mechanism Interpretation of Arc Voltage Rise by Polymer Cylinder Installation in Silica- Sand
3. 学会等名 5th International Conference on Electric Power Equipment - Switching Technology (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 兒玉直人, 横水 康伸, 中村晃也, 高橋明里, 近藤祐介
2. 発表標題 珪砂中への円筒設置時における 直流アーク温度の測定とアーク電圧上昇機構の検討
3. 学会等名 放電・プラズマ・パルスパワー/開閉保護/高電圧 合同研究 会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Naoto Kodama, Yokomizu Yokomizu, Asato Takahashi, Koya Nakamura, Yusuke Kondo
2. 発表標題 Arc voltage rise by cylinder arrangement in silica-sand filling space during DC arc interruption
3. 学会等名 The 11th Asia-Pacific International Symposium on the Basics and Applications of Plasma Technology (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 兒玉直人, 横水 康伸, 中村晃也, 高橋明里, 近藤祐介
2. 発表標題 珪砂中でのDC遮断 時におけるアーク内の銅蒸気濃度に関する検討
3. 学会等名 令和2年電気学会全国大会
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
研究協力者	中村 晃也 (Nakamura Koya)		
研究協力者	高橋 明里 (Takahashi Asato)		