

令和 2 年 6 月 8 日現在

機関番号：13801

研究種目：基盤研究(C) (一般)

研究期間：2017～2019

課題番号：17K06297

研究課題名(和文)放電経路の空間的分断による極小空間内でのアーク放電の強制消弧

研究課題名(英文)Forcible extinction of break arcs in extremely small space by spatial division of a discharge path

研究代表者

関川 純哉 (Sekikawa, Junya)

静岡大学・工学部・教授

研究者番号：80332691

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,600,000円

研究成果の概要(和文)：直流高電圧回路を電気接点对で遮断する際に発生するアーク放電の新たな消弧(アーク放電を消す)手法として、これまでに無い狭い空間内での消弧手段を提案し、その実現を目的とした。その手法として、接点間隙に分断板を挿入しアーク放電を空間的に分断した。直流600V-10Aの抵抗性負荷回路を分断操作により遮断した結果、アーク放電を長く引き伸ばすことなく、分断板とその板受けとの間に3mm程度だけ狭み込むことで、消弧させることができた。

研究成果の学術的意義や社会的意義

電磁リレーやコンタクタなどの既存のデバイスで広く用いられている、従来の消弧手法として、永久磁石によるアーク放電の引き伸ばしがある。この手法ではアーク放電を引き伸ばすための空間が必要であり、デバイスの小型化の制限のひとつとなっている。本研究で提案したアーク放電の空間的分断による強制消弧では、アーク放電を長く引き伸ばすことなく非常に狭い空間内での消弧を実現した。新たな原理による消弧方法の可能性を実証した点においてインパクトがあり、既存の関連する機器の性能向上に寄与する成果である。

研究成果の概要(英文)：A novel method for extinction of break arcs generated in a DC high voltage circuit between electrical contacts has been proposed. The method proposes an arc extinction measure in a very small space. The purpose of this research is to realize the method. In that method, a dividing plate is inserted to the contact gap to spatially divide the arc discharge. As a result of interruption of a 600VDC-10A resistive circuit by the dividing operation, it was possible to extinguish the break arcs without lengthening them.

研究分野：アーク放電、電気接点

キーワード：アーク放電

様式 C - 19、F - 19 - 1、Z - 19 (共通)

1. 研究開始当初の背景

(1) 情報通信機器用の直流給電システムや家庭用の直流発電システムの普及などに伴い、数百ボルトの直流回路が用いられる機器の利用が広がっている。一般の家庭用コンセントで使用されている交流の電気は周期的に電流が零となるのでその回路の遮断は比較的容易であるが、直流回路では電流が零になる瞬間が無いいためその遮断は交流に比べて困難である。回路を遮断するための代表的なデバイスとして電気接点と半導体素子が挙げられる。電気接点は同じ定格容量の半導体素子に対して、堅牢（短絡電流と過電圧に強い）、低コスト、及び低オン抵抗などの性能で優れており、現在でも多くの機器内で使用されている。

(2) 数百ボルトの直流回路を電気接点で遮断する際、接点間には激しいアーク放電が発生する。そのアーク放電を素早く消す方法として、アーク放電が発生する空間付近に永久磁石を配置し、ローレンツ力によってアーク放電を引き伸ばす、磁気吹き消しが電磁リレーなどで実用化されている。これによりアーク放電を短時間で消弧（アーク放電を消滅）させることができる。この方法では主に回路条件で決まる、ある長さまでアーク放電を引き伸ばす必要があるため、その長さに対して十分な消弧空間が必要である。即ち、アーク放電を引き伸ばす空間が狭すぎるとそれを十分に引き伸ばすことができず消弧条件を満たすことができない。電気接点を内蔵する遮断用デバイスでは、その空間はできる限り狭いほうが小型化に有利である。そこで研究代表者は、アーク放電が広い消弧空間に引き伸ばされる前に消弧させる方法が必要であると考えた。

2. 研究の目的

(1) 研究代表者らの過去の研究成果として、適切な方法で消弧空間を狭めれば、その狭い空間内でも開離時アークの消弧が実現できる可能性が示唆されていたが、空間の狭さには限界があった。そこで研究代表者は、放電空間を狭めるのではなく、放電経路を空間的に完全に分断してアーク放電を消弧させるとの発想に至った。放電経路を空間的に分断するための方法として、接点間隙に隔壁を挿入し、開離時アーク（通電中の回路の遮断時に発生するアーク放電）を空間的に切断することを提案した。その手法により、これまでに無い小空間内での消弧手段を実現することを目的とした。

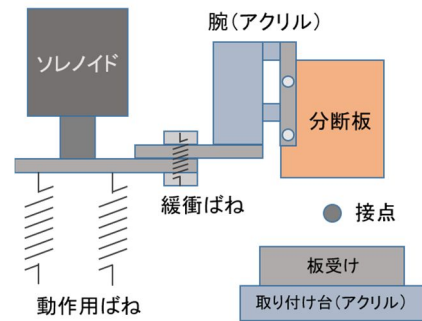


図1 分断機構の模式図

3. 研究の方法

(1) 接点間隙に隔壁としての分断板を挿入するために、ソレノイドコイルとばねを用いた分断板の駆動機構を製作した。その概要を図1に示す。接点对が閉じる前にソレノイドを励磁し分断板を上上げる。その後、接点对の開離タイミングに合わせてソレノイドの励磁を切り、動作用ばねによって分断板を下におろす。分断板のおろし始めから

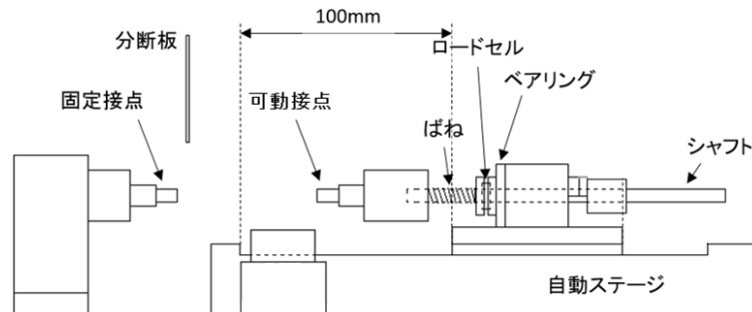


図2 電気接点对の等速開離装置の模式図

から板受けに当たるまでの時間は 15ms 程度である（分断板の初期の高さに依存）。分断板の大きさは、縦 80mm、横 50mm、板厚は 1mm とした。分断板と板受けの材料としては、絶縁物（PTFE：ポリテトラフルオロエチレン）を用いた。研究代表者らの過去の研究により、PTFE が耐アーク性に優れていたためこの材料を選んだ。

(2) 電気接点对の等速開離装置の模式図を図2に示す。1軸の自動ステージを用いて可動接点を固定接点側に移動させる。接点对の接触前に分断板を上を引き上げる。可動接点を固定接点側に移動させ、それらの接触後、ばねを縮めながら接触力を増大させる。接触力をロードセルで測定し、2N に達したら等速開離動作を始める。開離速度は 100mm/s とした。開離のタイミングに合わせて分断板を下におろす。円柱形の電気接点对の直径は 5mm 又は 3mm、材質は Ag(99.99%) とした。

(3) 分断板・電気接点对の模式図と高速度カメラによる撮影方向を図3に示す。高速度カメラ

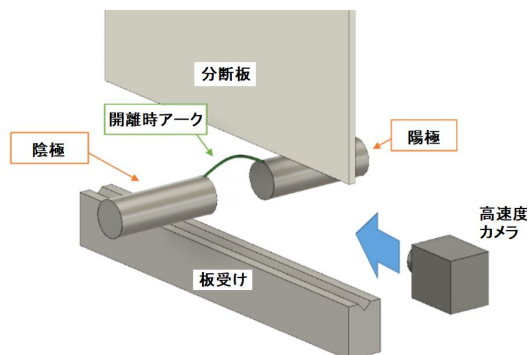


図3 分断板・電気接点对の配置の模式図と高速度カメラによる撮影方向

(FASTCAM Mini AX50)により水平方向から接点間隙を撮影した。分断操作をした場合を撮影した時の高速度カメラの設定は、撮影速度 10000fps、露光時間 97 μ s とした。

(4) 実験回路は抵抗性負荷回路である。回路は、直流電源、電流投入用コンタクタ、負荷抵抗、電気接点对、及び電流測定用抵抗の直列接続により構成されている。抵抗は無誘導巻きのメタルクラッド抵抗である。接点对接触後にコンタクタをオンにして通電し、接点を等速で開離させアーク放電を発生させた。電源電圧は 150V-600V、接点接触時の回路電流は 10A 一定とした。

4. 研究成果

(1) 以下で述べる結果を得るまでに、分断板と板受けの形状と材質の改良を重ねた。以下では、その一連の研究過程で最終的かつ最も効果的だった結果として、分断板と板受けの材料を PTFE、分断板の厚さを 1mm、電気接点对の直径を 3mm、及び板受けの形状を最適化した場合の結果について述べる。

(2) 電気接点对、分断板、及び板受けの初期配置の様子を図 4 に示す。開離時アークが上方へと伸びないように分断板の下端の初期位置を接点对の上辺に合わせた。板受けがこの形状に至るまでに、いくつかの形状で実験を実施し改良した。分断板と板受けが接触したときに跳ね返りが発生すると、その間隙を通して開離時アークが継続する場合があった。跳ね返りを防ぐために、板受けの V 字形の切込みの底に、幅 1.1mm で深さ 1.5mm の溝を付けた。これにより、分断板と板受けとの接触後における分断板の跳ね返りが抑制され、それらの間に間隙が生じないようになり、安定した分断操作が可能となった。分断板の挿入開始タイミングは接点間隙が 1mm に達した直後とした。

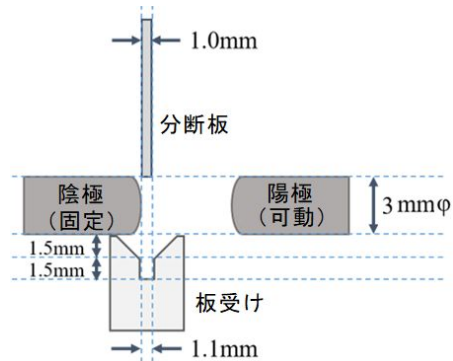
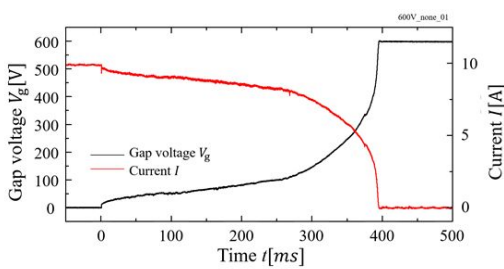
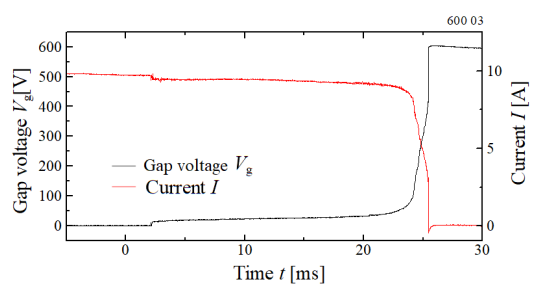


図 4 電気接点对、分断板、及び板受けの初期配置図（高速度カメラによる撮影方向から見た図）

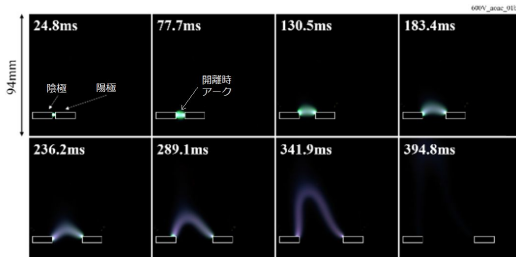
(3) 電源電圧 $E = 600V$ 時における、分断操作ありなしの違いを比較するために、それぞれの実験結果の例を図 5 と図 6 に示す。図 5 (a) に示すように、分断操作なしの場合には、アーク継続時間は約 390ms となった。図 5 (b) に示すように、接点对の開離とともに開離時アークは 130ms 程度までは水平に直線的に接点間隙で伸びている。その後は、上方にアーチ状に伸び始め消弧直前にはその高さは約 60mm に達する。次に、分断操作ありの場合の結果を図 6 に示す。図 6 (a) に示すように、分断操作ありの場合には、アーク継続時間は約 23ms となった。この時間は、分断板の挿入開始タイミングによって設定された時間である。図 6 (b) に示すように、開離時アーク発生後、それは分断板により下方に押し下げられ、分断板と板受けの間に挟まれて消弧に至っている。消弧直前（図 6 (b) の 25.4ms 字の画像）の様子から、開離時アークは接点の上辺を超えておらず、また下方には板受けの溝に押し込まれていることが分かる。図 5 と図 6 を比較すると、図 5 に示した分断操作なしの場合には開離時アークは上方に 60mm 程度まで伸びていたが、図 6 に示すように分断操作によりその上方への伸びを完全に抑えることに成功した。



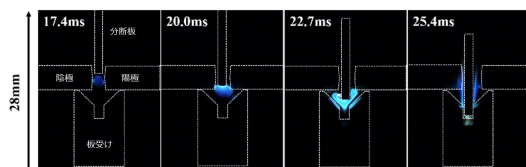
(a) 電圧電流波形



(a) 電圧電流波形



(b) 撮影画像



(b) 撮影画像

図 5 電源電圧 600V 時の開離時アーク（分断操作なし、接点の直径 5mm）

図 6 電源電圧 600V 時の開離時アーク（分断操作あり、PTFE 板、接点の直径 3mm）

(4) それぞれの場合の消弧メカニズムとしては、分断操作なしの場合には開離時アークが上方に伸びアーク長さが長くなることでアーク電圧が増大し消弧に至ったのに対し、分断操作ありの場合には、分断板と板受けとの間に開離時アークが挟まれることで、開離時アーク内の電流経路に沿った電界が増大し、短いアーク長さでもアーク電圧が電源電圧に到達し消弧に至ったと考えられる。

(5) 消弧直前のアーク高さについて解析した結果を、分断操作ありなしのそれぞれの場合について図7と図8に示す。各図にはそれぞれの電源電圧 E において、5回分の開離動作をさせた場合の解析結果を示している。図7では、分断操作なしの場合について、固定陰極の上辺を基準として、消弧直前の開離時アークが達した最大高さの解析結果を示している。図7に示すように、電源電圧 E の増大に伴い、消弧直前のアーク高さ H は直線的に長くなった。 $E = 600V$ の場合、 H は 60mm 程度となった。

(6) 図8に示した分断操作ありの場合のアーク高さの解析方法について説明する。図8(a)に示すように、 H_{high} 、 H_{low} はそれぞれ陰極の下辺を基準として、消弧直前の開離時アークが上側又は下側に達した最も遠い位置の解析結果を示している。図8(b)に示すように、分断操作ありの場合の、消弧直前の開離時アークの高さ H_{high} は 3mm 以内、 H_{low} は溝の深さとしている約 3mm の範囲に収まっており、分断操作による開離時アークの移動制限が成功したことを示している。すべての電源電圧 E (150V ~ 600V) において、開離時アークは分断操作により約 2.6mm ~ 5.6mm の空間に収まり、開離時アークの移動範囲は狙い通りに制限された。

(7) 上述のように、本研究で目的とした、開離時アークを空間的に分断することによる小空間内での消弧手段を実現できた。

(8) 開離時アークの新たな消弧方法として、本研究で提案した手法が有効であることが示された。このことは電磁リレーやコンタクタなどの電気接点を内蔵したデバイスの小型化に有効な、新たな消弧方法の可能性を実証した点においてインパクトがあり、既存の関連する機器の性能向上に寄与する成果である。

(9) 本研究の初期において、分断板の材料として絶縁物ではなく金属（銅）を用いた場合についても実験した。この場合には、電源電圧が 200V 程度までであれば金属板による分断効果が得られることが明らかとなった。この結果は、回路条件が限定的であれば、絶縁板よりも耐久性の高い金属板によって分断効果が得られることを示唆する結果であった。

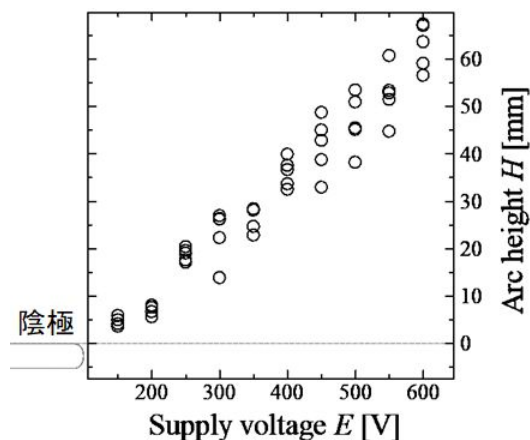
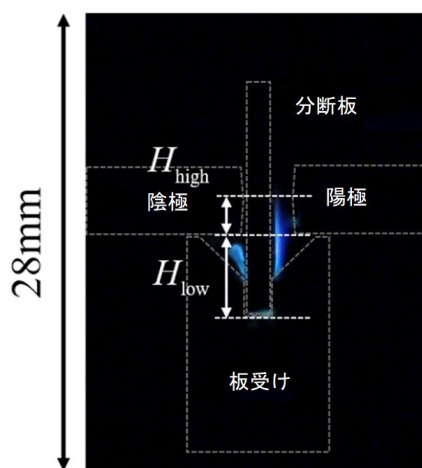
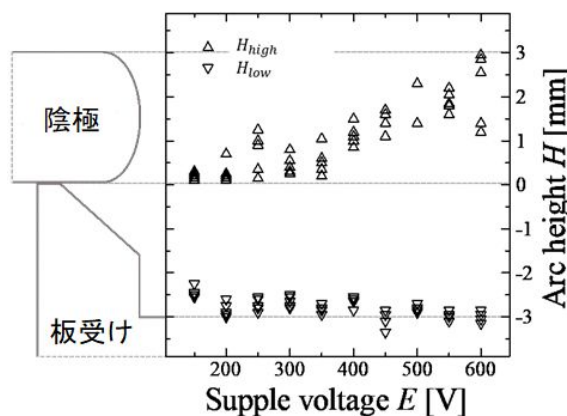


図7 消弧直前のアーク高さの解析結果
(分断操作なし)



(a) アーク高さの定義



(b) 解析結果

図8 消弧直前のアーク高さの解析結果
(分断操作あり)

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計2件（うち査読付論文 2件 / うち国際共著 0件 / うちオープンアクセス 0件）

1. 著者名 Akinori ISHIHARA, Junya SEKIKAWA	4. 巻 E101-C
2. 論文標題 Arc Duration and Dwell Time of Break Arcs Magnetically Blown-out in Nitrogen or Air in a 450VDC/10A Resistive Circuit	5. 発行年 2018年
3. 雑誌名 IEICE Trans. Electron.	6. 最初と最後の頁 699-702
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) https://doi.org/10.1587/transele.E101.C.699	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 Kenshi HAMAMOTO, Junya SEKIKAWA	4. 巻 E102-C
2. 論文標題 Investigation of Time Evolution of Length of Break Arcs Occurring in a 48VDC/50-300A Resistive Circuit	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 IEICE Trans. Electron.	6. 最初と最後の頁 424-427
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) https://doi.org/10.1587/transele.2018ECS6025	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19件（うち招待講演 0件 / うち国際学会 0件）

1. 発表者名 山下翔真、関川純哉
2. 発表標題 アークランナーを一体化した銀接点対間で発生させた開離時アークの輝点の移動特性
3. 学会等名 2018年 電子情報通信学会ソサイエティ大会
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 山村龍一郎、関川純哉
2. 発表標題 500VDC/10A抵抗性負荷回路内で発生させた開離時アークの二方向からの観察による消弧直前のアーク長さの解析
3. 学会等名 2018年 電子情報通信学会ソサイエティ大会
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 瀨本健史、関川純哉
2. 発表標題 48VDC/200A回路において発生する開離時アークの長さの時間変化
3. 学会等名 2018年 電子情報通信学会ソサイエティ大会
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 瀨本健史、関川純哉
2. 発表標題 48VDC/200A 抵抗性回路において磁気吹き消しされる開離時アークの消弧直前の形態観測方法の改善
3. 学会等名 2019年 電子情報通信学会総合大会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 金子裕汰、関川純哉
2. 発表標題 500VDC/10A抵抗性回路内で磁気吹き消しされる開離時アークの形状に対する磁石の横幅の影響
3. 学会等名 電子情報通信学会、機構デバイス研究会
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 Ryuichiro Yamamura, Junya Sekikawa
2. 発表標題 Analysis of Arc Length Just before Arc Extinction Generated in a 500VDC/10A Resistive Circuit by Means of Observation from Two Directions
3. 学会等名 IS-EMD2018, IEICE
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 Kenshi Hamamoto, Junya Sekikawa
2. 発表標題 Analysis of Length of Break Arcs Magnetically Blown-out just before Arc Extinction Occurring in a 48VDC/50-200A Resistive Circuit
3. 学会等名 IS-EMD2018, IEICE
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 金子裕汰、関川純哉
2. 発表標題 直流500V/10Aの高電圧回路遮断時に発生する開離時アークの消弧時の長さ
3. 学会等名 電子情報通信学会、機構デバイス研究会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Yu Ota, Junya Sekikawa
2. 発表標題 Splitting of Break Arcs Being Magnetically Blown-out in 450VDC/20A Resistive Circuit
3. 学会等名 IS-EMD2017, IEICE
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 高野隆一、関川純哉
2. 発表標題 48VDC/270A抵抗性負荷回路の遮断時に発生する開離時アークの高速度カメラによる2方向からの同時撮影
3. 学会等名 電子情報通信学会、機構デバイス研究会
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 木村雄一朗、関川 純哉
2. 発表標題 150V-250VDC/10A 抵抗性負荷回路内で発生する開離時アークの銅製の分断板による強制分断
3. 学会等名 電子情報通信学会、機構デバイス研究会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 増田 泰樹、関川 純哉
2. 発表標題 500VDC/10A 回路内で開離時アークを発生させた場合における絶縁した銀管によるアーク輝点の移動制限
3. 学会等名 電子情報通信学会、機構デバイス研究会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 木村雄一朗、関川 純哉
2. 発表標題 150V-400VDC/10A抵抗性負荷回路内で発生する開離時アークのPTFE製の分断板による強制分断
3. 学会等名 2019年 電子情報通信学会ソサイエティ大会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Yuta KANEKO, Junya SEKIKAWA
2. 発表標題 Characteristics of Break Arcs Magnetically Blown-Out with Simplified Shape in a 200V-500VDC/10A Resistive Circuit
3. 学会等名 電子情報通信学会、機構デバイス研究会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Yuichiro KIMURA, Junya SEKIKAWA
2. 発表標題 Forcible division of break arcs occurring in a 150V-600VDC/10A resistive circuit by a dividing plate made of PTFE
3. 学会等名 電子情報通信学会、機構デバイス研究会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 瀨本 健史、関川 純哉
2. 発表標題 48VDC/50-200A 抵抗性負荷回路において開離時アークが磁気吹き消しされる場合の消弧直前のアーク長さの磁束密度依存性
3. 学会等名 電子情報通信学会、機構デバイス研究会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 増田 泰樹、関川 純哉
2. 発表標題 絶縁銀管の形状の違いによりアーク輝点の移動範囲を変えた場合の500VDC/10A 回路において磁気吹き消しされる開離時アークの諸特性
3. 学会等名 電子情報通信学会、機構デバイス研究会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 木村雄一朗、関川 純哉
2. 発表標題 抵抗性負荷回路内で発生する開離時アークのPTFE製の分断板による狭小空間内での強制分断
3. 学会等名 電子情報通信学会、機構デバイス研究会
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 木村雄一朗、関川 純哉
2. 発表標題 分断板の跳ね上がりを抑制した場合の開離時アークのPTFE 製の分断板による強制分断
3. 学会等名 2020年 電子情報通信学会総合大会
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	木村 雄一朗 (Kimura Yuichiro)		