

令和 3 年 6 月 17 日現在

機関番号：12608

研究種目：基盤研究(B) (一般)

研究期間：2018～2020

課題番号：18H01420

研究課題名(和文) 微細構造化高硬度接点による革新的アークレスハイブリッドしゃ断技術

研究課題名(英文) Innovative arcless hybrid interrupting technology with finely structured hardness contacts

研究代表者

安岡 康一 (Yasuoka, Koichi)

東京工業大学・工学院・教授

研究者番号：00272675

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 13,300,000円

研究成果の概要(和文)：数100A以上の直流電流を、アークレス開閉可能なしゃ断技術の確立を目指し、初年度は高沸点材料であるタングステン接点を用いて、200Aのアークレス直流しゃ断を世界で初めて実現した。翌年度は接点抵抗と表面粗さの関係に着目して、接点抵抗を銅接点の約2倍の0.3 $\mu$ mまで低下させた。さらに電極表面に局所集中する熱の放散を促進し、接点材料の沸騰を防止する銅クラッドタングステン接点を開発し、アークレス電流を400Aまで増加させた。最終年度は限界電流をより高める方式として2種以上の材料からなる複合接点を提案し、シミュレーションによる検討を経て、アークレス転流限界値を700Aまで増加させることに成功した。

研究成果の学術的意義や社会的意義

太陽光等の直流エネルギー源を蓄電池と組み合わせる直流マイクログリッドシステムは、CO<sub>2</sub>削減技術として注目されている。ただし直流は電流ゼロ点がないため、機械接点でしゃ断するとアークが発生して接点寿命が低下し、同時に電磁ノイズが発生する課題がある。全半導体しゃ断器はアークレス開閉が可能である一方、定常時の電力損失が大きい。

ハイブリッド直流しゃ断器はこれらの短所を持たない次世代直流器であるが、しゃ断時には短時間アークが発生することから完全な課題解決には至っていない。本研究はアーク発生を完全に防止する直流しゃ断技術を実現したもので、社会ニーズに応えらるとともに新たな技術分野の構築に寄与した。

研究成果の概要(英文)：Aiming to establish a breaking technology that can open and close an DC current over several hundred amperes without generating arc. In the first year, the arcless current interruption of 200 A was demonstrated using contacts of tungsten material, which has the highest melting point.

In the following year, the relationship between contact resistance and surface roughness was studied experimentally. Based on the result, the contact resistance was reduced to 0.3  $\mu$ m, which was about twice that of copper contacts. Furthermore, new-type of copper-clad tungsten contacts were developed to promote heat dissipation locally concentrated on the electrode surface and prevent boiling of the contact material. The arcless current was increased to 400A. Another type of contacts that consisted of two or three contact materials was proposed. We succeeded to increase the arcless commutation current up to 700 A in experiments using the variable resistance contacts.

研究分野：高電圧プラズマ工学

キーワード：電気接点 溶融ブリッジ アーク 高融点材料 可変抵抗

### 1. 研究開始当初の背景

CO2 排出削減に向けて、太陽光・風力・蓄電池などの分散エネルギー源により直流マイクログリッドを構成し活用することが期待されている。ただし直流は電流ゼロ点が無いため交流と比較してしゃ断が困難であることから、新たな直流しゃ断技術が求められていた。これまでも電鉄用には真空遮断器と転流用のコンデンサバンクとを一体化した大型の直流遮断器が実用化されてきた。また kV 以下の小電流用途では半導体パワーデバイスのみで構成した直流遮断器が商品化されてきた。ただし直流マイクログリッドに使用する kV・kA 級の中容量用途に対しては、半導体式は定常時損失が大きいため、大型の放熱機構を必要としていた。

これに対して機械接点とパワーデバイスを並列接続したハイブリッド直流しゃ断方式は定常時損失が小さく、機械接点の開極時に発生するアークの継続時間は ms 未満と短い特徴があった。ただし、数  $\mu$ s の短時間アークが間欠的に継続することから電磁ノイズの影響や機械接点の損耗という課題は残されていた。なお 15 V 程度以下までの電圧範囲では、アークレス技術は開発されていたが kV・kA 級の技術は開発されていなかった。

### 2. 研究の目的

本研究の目的は、機械接点の開極時にアークを発生させない革新的なハイブリッドしゃ断技術を確立することである。筆者らはこれまでに、Ag-W 電極のコンタクトと SiC-MOSFET モジュールを組み合わせることで 200V-100A 程度までのアークレスしゃ断を実現した実績がある。[1] ただし、メガソーラーをはじめとした高電圧大容量化に対応するためには、kV・kA 級のハイブリッド直流しゃ断技術の確立が必須である。なおハイブリッド直流遮断器は 100 kV 超の超高压直流送電システム用にも開発されているが、本研究の対象外である。

### 3. 研究の方法

図 1 に示すハイブリッド直流遮断器は、機械接点と半導体パワーデバイス (SiC-MOSFET)、さらにサージ電圧制限用バリスタを並列接続した構成である。

図 2 は動作ダイアグラムで、期間(1)-(2)は定常時を示し、直流電流は機械接点を流れる。時刻(2)で接点を開極すると接点電圧が増加するとともに接点電流は減少し、同時にパワーデバイスに直流電流は転流する。接点間にはアークが発生し、その電圧は 10 V 以上で、パワーデバイスのターンオン電圧よりも十分大きい。このため転流は加速されてアークは消滅し、機械接点電流はゼロになる。時刻(3)でパワーデバイスをターンオフすると、図示していない回路インダクタンスによってパワーデバイス両端にサージ電圧が発生する。サージ電圧はバリスタのクランプ電圧により制限され、回路電流はその後バリスタを流れる。バリスタの抵抗で回路エネルギーが消費されると回路電流はゼロになり、この時点で遮断は完了する。なおパワーデバイスのターンオフ時刻は、接点間の絶縁破壊電圧がサージ電圧以上になった以降であり、開極から数 ms 以内である。

機械接点は閉極時に接点間に通常数 10N の圧力をかけて接点抵抗を低減させており、銅接点の場合では m 以下である。開極動作が始まると接点圧力が低下して通電点の数が減少して電流が集中しだす。このため接点金属の温度は上昇して接点抵抗は増加し、同時に接点電圧も増加する。通電中の接点電圧  $V_c$  と接点表面の最高点温度  $T_{max}$  は比例関係にあり、Holm[2]の式で与えられる。通電点の直径は 100  $\mu$ m 以下と小さいため、電流集中によって容易に接点材料の沸騰温度を超え、沸騰して発生した金属蒸気によって接点間にアークが発生する。沸騰温度に対応して求めた沸騰電圧は、銅が 0.8 V、タングステンが 2.1 V である。表 1 に接点材料特性を示す。

表 1. 銅とタングステンの材料特性

	溶融電圧 [V]	沸騰電圧 [V]	抵抗率 [ $10^{-8}$ M]	熱伝導率 [ $WM^{-1}K^{-1}$ ]	ヤング率 [ $10^9$ NM <sup>-2</sup> ]
CU	0.4	0.8	1.7	398	110
W	1.1	2.1	5.3	178	345

開極中の接点電圧を常に沸騰電圧以下に保つと、アークが発生しないアークレス転流が可能

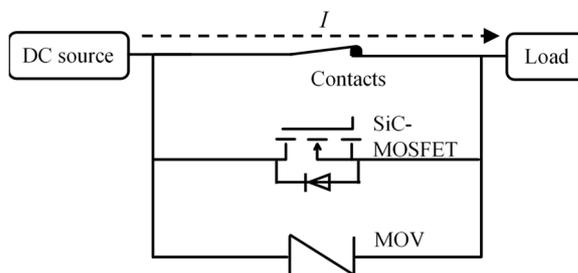


図 1 ハイブリッド直流遮断器の構成

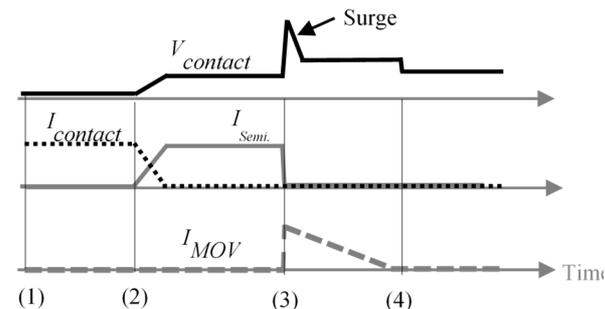


図 2 ハイブリッド直流遮断器の動作ダイアグラム

になる。[1] この条件は、接点電圧と転流回路の電圧により判断できるが、転流回路電圧はパワーデバイスのオン電圧に加えて、図示していない残留抵抗や残留インダクタンスでの電圧降下を含んでいる。

#### 4. 研究成果

初年度は接点条件、回路条件を最適化することで 200 A までのアークレスしゃ断を実現した。図 3 はハイブリッド遮断器のモックアップを示す。直径 10 mm の円筒状の銅接点を上下に配置し、上部接点は piezo アクチュエータ (メカのトランス, MTKK16S400F170R) で高速移動可能とした。接点直径 10, 15, および 20 mm の接点を製作し比較した。図 4 に実験回路図を示す。パワーデバイスはハーフブリッジの SiC-MOSFET モジュール (Wolfspeed, CAS325M12HM2, 1200 V, 444 A, 3.6 mΩ) で、片側のみを使用した。またバリスタは、電圧 390 V, クランプ電圧 650 V の素子 (Panasonic, ERZV20D391) を並列接続して使用した。接点間電圧は差動プローブ (Tektronix, TPP1000) で、接点位置はレーザーセンサ (KEYENCE, LK-H055) で計測した。

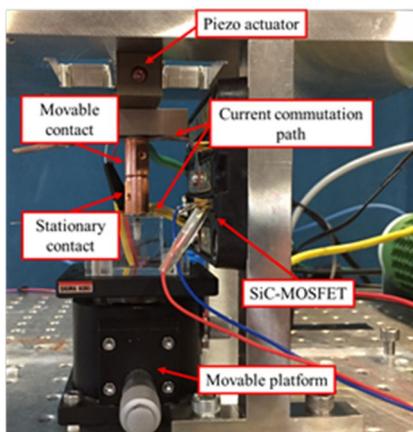


図 3 ハイブリッド遮断器の構成 [3]

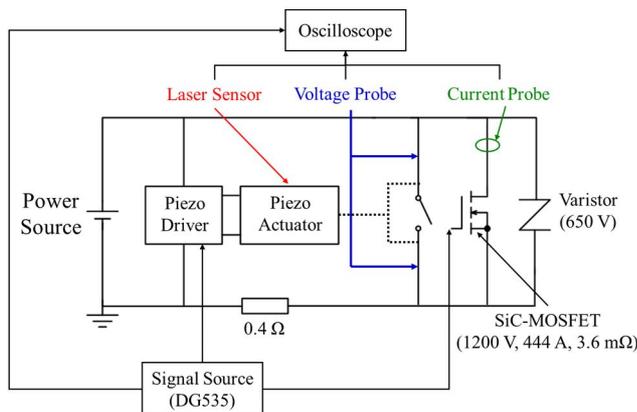


図 4 ハイブリッド遮断器の実験回路 [3]

接点开極速度 0.052 m/s, 接点直径 20 mm の場合の 130 A 転流時の、接点電圧と接点間距離の時間変化を図 5 に示す。転流ループ長を変化させ、ループインダクタンス 0.25 μH と 0.1 μH の結果である。長ループの場合 (青) は短ループ (赤) よりも転流開始が遅れ、接点電圧が高いことがわかる。図 6 は短ループで回路電流が 190 A の場合の結果を示す。転流後に接点電圧は 0.9 V まで増加したがアークは発生せず、190 A のアークレス転流が実現できたことがわかる。

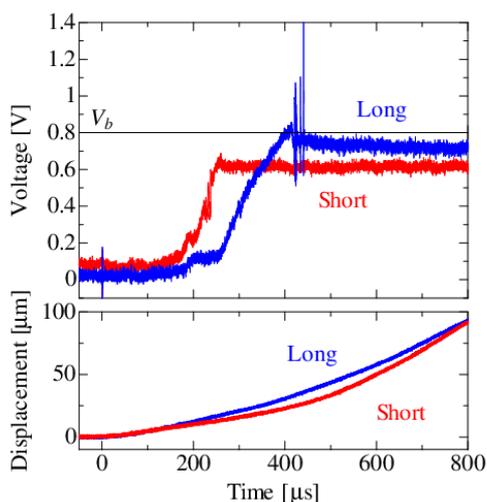


図 5 転流ループ長変化時の接点電圧と接点間距離 [3]

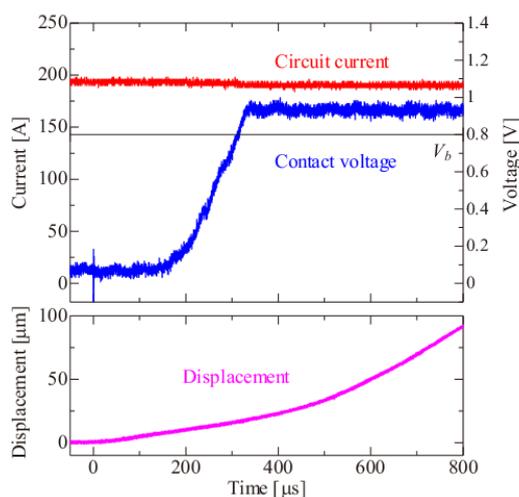


図 6 190 A のアークレス転流波形 [3]

翌年度はアークレス転流可能な電流限界を高めるため、銅接点に替えて銅基材上に 1 mm 厚のタングステンを開発した。比較のため同形状の銅接点とタングステン接点を用意した。図 7 に接点写真、図 8 に接点抵抗と通電電流の関係を示す。[4] タングステンは銅に比較して接点抵抗が大きい課題があるため、接点抵抗と表面粗さの関係を詳細に検討した。表面粗さを制御することで Cu-W 接点の接点抵抗を銅接点の約 2 倍の 0.3 mΩ まで低下させることができた。

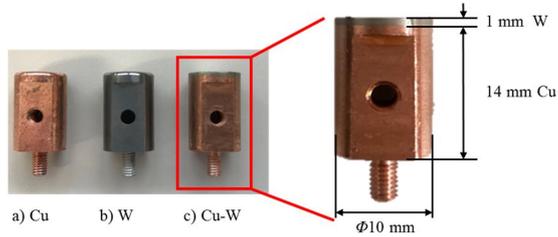


図7 銅，タングステン，クラッド接点[4]

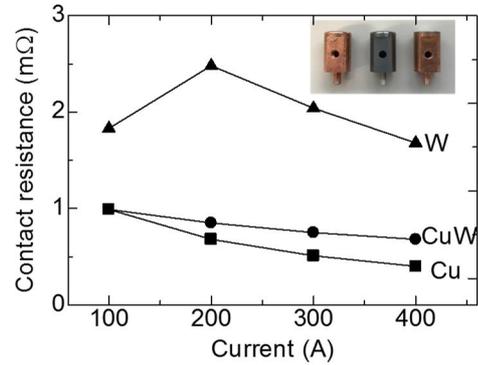


図8 接点抵抗と通電電流の関係[4]

図9にCu-W接点を使用したアークレス転流の結果を示す。接点に3秒間通電した後、ピエゾアクチュエータに開極指令を送った。なお各条件で10回の転流実験を行うとともに、電流値の変更時には接点表面を磨いた。接点开極指令の10 $\mu$ s前にSiC-MOSFETをターンオンしたため、図9で分かるようにこの時点で回路電流はSiC-MOSFETに分流し、接点電流は400Aから減少した。接点電圧(青)は200 $\mu$ s以降増加し2Vに漸近していくがアークは発生せず、接点からSiC-MOSFETへの転流が進んだことがわかる。500 $\mu$ sで接点電流はゼロとなって転流は完了し、400Aのアークレス転流が10回の実験すべてで実現できたことがわかる。さらに600Aまで接点電流を増加させると10V程度のスパイク電圧が観測され発光が目視された。ただしスパイク電圧は10Vを超えることはなく、通常のアーク電圧は観測されなかった。このため走査型電子顕微鏡を用いて転流後の接点表面を観測したところ、溶融ブリッジ痕は観測されたがアーク痕は観測されなかったことから、発光はアークによるものではなく溶融ブリッジ間で生じた短時間の放電破壊であると推測した。

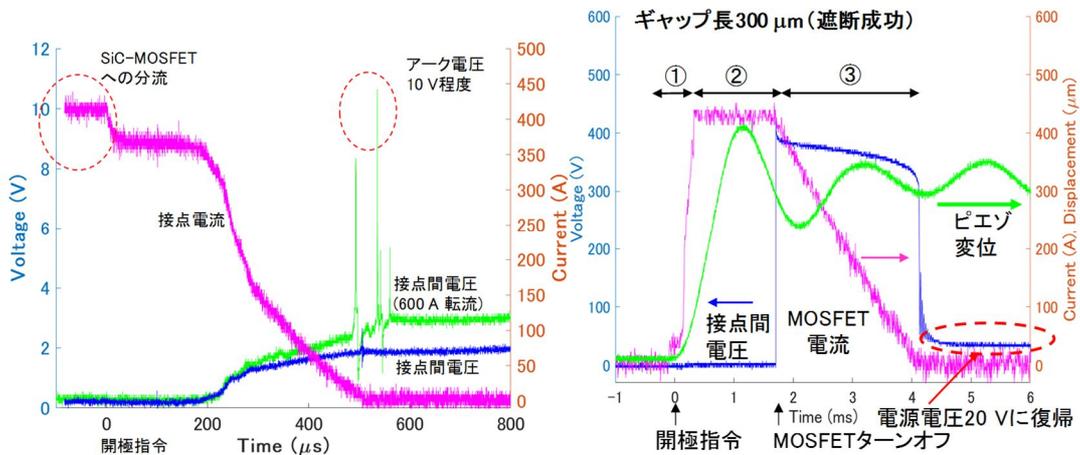


図9 銅，タングステン，クラッド接点[4]

図10 直流400Aのアークレスシャ断波形[4]

ハイブリッド遮断器は開極動作に加えて閉極動作も必要である。SiC-MOSFETを接続しない場合は、接点が接触する直前にアークが発生するが、接点开極前にSiC-MOSFETをターンオンすることで閉極アークは防止できた。このとき通電電流は400Aとして、また閉極時の接点バウンスを抑えるために閉極速度は転流実験よりも遅い0.03 m/sに設定した。ターンオンしたSiC-MOSFETの効果でアークは観測されず、接点表面の損耗も見られなかった。一方SiC-MOSFETをターンオンさせないと15V以上のアーク電圧が観測されて、接点表面は激しく損耗した。

ここまではアークレス転流動作について述べたが、遮断器としては回路電流の遮断完了までの期間でアークレス動作を検証する必要がある。先に述べたように、SiC-MOSFETのターンオフ時刻は接点間の絶縁破壊電圧がターンオフ時のサージ電圧を上回っていることが必要である。ピエゾアクチュエータの開極長を250 $\mu$ mと300 $\mu$ mに設定し、開極距離をかえた400Aの遮断実験をした。SiC-MOSFETを約1.8msでターンオフすると接点間にはバリスタの制限電圧380Vが接点間に加わった。開極長250 $\mu$ mで4回遮断実験を行ったところ、3回目でバリスタでのエネルギー吸収期間中の約2.2msで絶縁破壊が生じて、遮断が失敗した。これはピエゾアクチュエータが振動するため接点間距離が極小になった時刻で絶縁破壊したことが分かった。次に開極長を300 $\mu$ mにして余裕を持たせた結果、転流後のSiC-MOSFETターンオフした場合の0回すべてで絶縁破壊は生じなかった。以上から、制限電圧380Vのバリスタを用いたハイブリッド直流シャ断器により、接点間電界を約16 kV/cm以下の時点でSiC-MOSFETをターンオフすれば、遮断時間約4.4msで直流400Aをアークレス遮断できることがわかった。

Cu-W 接点によるアークレス転流限界は 400 A であることがわかった。転流回路のインダクタンス低減によって限界電流を若干増加することは期待できるが、主な制限要因はタンゲステンの物性値である。より高いアークレス電流を実現するには、新たな転流機構が必要と考えられた。これまでのアーク発生要因を分析した結果、接点電圧と沸騰電圧の大小関係の他に、接点電流が SiC-MOSFET に転流完了する際には、階段状に電流がゼロになることが分かった。接点電流には最小維持電流が存在するとみられ、この変化と回路の残留インダクタンスとが作用することで接点間にスパイク電圧が発生すると考えられた。このため転流完了時点での接点抵抗を増加させると、電流値が減少するためスパイク電圧を低減させることができ、アーク発生の防止が可能になると考えた。

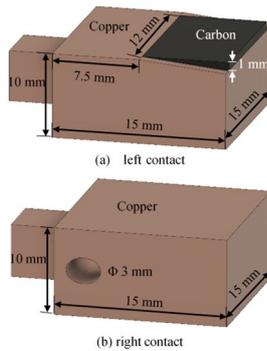


図 11 2分割可変抵抗接点[5]

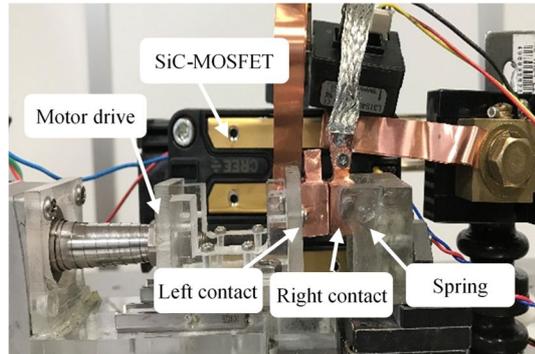


図 12 ハイブリッド遮断器の転流実験回路[5]

図 11 に新たに製作した接点構造を示す。[5]接点(a)は銅に炭素板を接合した接点で、(b)は銅接点である。両者を図 12 の中央部のように左右に配置し、圧力を加えて接触させる。定常時は接点(a)(b)の銅材料部分が通電し、開極指令が加わる左端に配置したモータによって接点(a)は左方向に移動する。同時に接点(b)は時計回りに回転するため、接点(a)の炭素部分と接点(b)の銅部分が接触する。この結果接点抵抗が増加して、転流完了時の誘導電圧を低減する構成である。

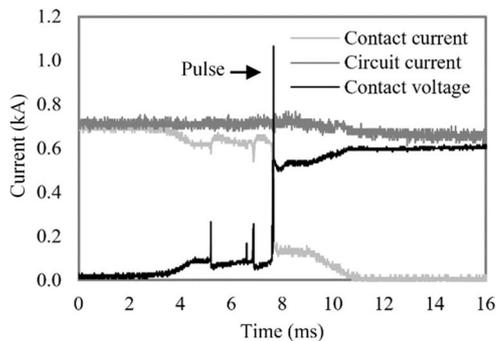


図 13 700 A アークレス転流時の電圧電流波形[5]

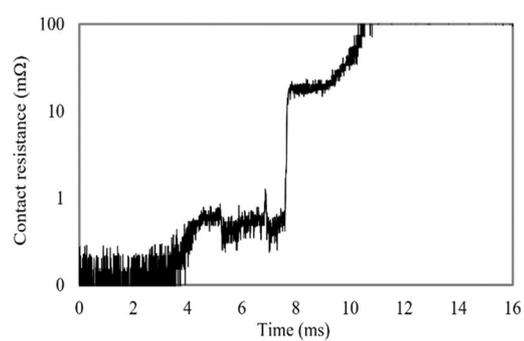


図 14 接点抵抗の時間変化(図 13 より)[5]

図 13 は 700 A での回路電流、接点電流、および接点電圧を示す。モータ駆動のため接点开極速度はピエゾアクチュエータに比較して遅い。時刻 2 ms で接点圧力の低下により接点電圧は増加して SiC-MOSFET に転流が進む。7.6 ms でパルス電圧が観測されるがこの時に、炭素部分での通電が開始している。この様子は図 13 から求めた図 14 の接点抵抗の時間変化より確認できる。その後、接点電流は低下して転流が完了したが、転流期間中に発生したスパイク電圧は 10V 以下であり、目視でもアークの発生は認められなかった。以上のように可変抵抗接点により 700A のアークレス転流が実現でき、kV・kA 級のアークレス遮断器につながる成果を得たといえる。

[1] K. Yasuoka, Y. Tsuboi, T. Hayakawa, N. Takeuchi, "Arcless Commutation of a Hybrid DC Breaker by Contact Voltage of Molten Metal Bridge," IEEE Trans. CPMT, Vol. 3, pp. 350–355, 2018.

[2] R. Holm, "Electric Contacts: Theory and Application," 4th edit., Berlin, Germany: Springer-Verlag, 1967.

[3] M. Chen, K. Nakayama, S. Zen, K. Yasuoka, "Threshold Current of Arc-Less Current Commutation in a Hybrid DC Switch," IEEE Trans. CPMT, Vol. 9, pp. 1029–1037, 2019.

[4] 山田雄太, 陳黙, 安岡康一, "400A 級ハイブリッド直流スイッチのアークレス開閉を実現する Cu-W 接点の開発," 電気学会論文誌 B, Vol. 139, pp. 592–597, 2019.

[5] C. Ou, H. Yinming, and K. Yasuoka, "New Configuration of Contacts for Increasing the Threshold Current of Arc-Free Commutation in a DC Hybrid Switch," IEEE Trans. CPMT, Vol. 10, pp. 1320–1327, 2020.

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計7件（うち査読付論文 4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 O. Chomrong, R. Nakayama, S. Zen, K. Yasuoka	4. 巻 9
2. 論文標題 Influence of a Short-Duration Arc on the Erosion and Dielectric Strength of Narrow Air-Gap Contacts in a Hybrid DC Switch	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 IEEE Transactions on Components, Packaging and Manufacturing Technology	6. 最初と最後の頁 1068-1074
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1109/TCPMT.2019.2904616	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 M. Chen, K. Nakayama, S. Zen, K. Yasuoka	4. 巻 9
2. 論文標題 Threshold Current of Arc-less Current Commutation in a Hybrid DC Switch	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 IEEE Transactions on Components, Packaging and Manufacturing Technology	6. 最初と最後の頁 1029-1037
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1109/TCPMT.2019.2915764	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 山田雄太, 陳黙, 安岡康一	4. 巻 139
2. 論文標題 400A級ハイブリッド直流スイッチのアークレス開閉を実現するCu-W接点の開発	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 電気学会論文誌B	6. 最初と最後の頁 592-597
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1541/ieejpes.139.592	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 Nakayama Ryo, Ou Chomrong, Zen Shungo, Yasuoka Koichi	4. 巻 15
2. 論文標題 Dielectric strength of electric contacts after short duration arc in a hybrid DC circuit breaker	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 IEEJ Transactions on Electrical and Electronic Engineering	6. 最初と最後の頁 671 ~ 675
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1002/tee.23102	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 Yamada Yuta, Chen Mo, Yasuoka Koichi	4. 巻 210
2. 論文標題 Development of copper tungsten clad contacts for 400 A arc less switching of hybrid dc switch	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Electrical Engineering in Japan	6. 最初と最後の頁 3~10
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1002/eej.23249	査読の有無 無
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 Chen Mo, Yamada Yuta, Zen Shungo, Takeuchi Nozomi, Yasuoka Koichi	4. 巻 10
2. 論文標題 ON-State Contact Resistance and Arc-Less Commutation Characteristics of Cu-W Clad Contact Materials in a Hybrid DC Switch	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 IEEE Transactions on Components, Packaging and Manufacturing Technology	6. 最初と最後の頁 1138~1147
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1109/TCPMT.2020.3001280	査読の有無 無
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 Ou Chomrong, Yinming Huang, Yasuoka Koichi	4. 巻 10
2. 論文標題 New Configuration of Contacts for Increasing the Threshold Current of Arc-Free Commutation in a DC Hybrid Switch	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 IEEE Transactions on Components, Packaging and Manufacturing Technology	6. 最初と最後の頁 1320~1327
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1109/TCPMT.2020.2998817	査読の有無 無
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11件 (うち招待講演 0件 / うち国際学会 6件)

1. 発表者名 久保翔也, 佐藤俊介, 全俊豪, 安岡康一
2. 発表標題 SiC-MOSFETを用いたkV, kA級ハイブリッド直流遮断器
3. 学会等名 電子通信情報学会 機構デバイス研究会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 C. Ou, Y. Huang, K. Yasuoka
2. 発表標題 Simulation of heat distribution in electric contacts of a hybrid DC switch
3. 学会等名 令和元年電気学会電力・エネルギー部門大会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 X. Tian, M. Chen, K. Yasuoka
2. 発表標題 Development of Low Resistance Tungsten-clad Copper Contacts in an Arc-free Hybrid DC Circuit Breaker
3. 学会等名 令和元年電気学会電力・エネルギー部門大会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Y. Huang, C. Ou, K. Yasuoka
2. 発表標題 328 A kV-kA hybrid DC circuit breaker with SiC-MOSFET module
3. 学会等名 令和元年電気学会電力・エネルギー部門大会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Xinhao Tian, 陳默, 安岡康一
2. 発表標題 アークフリーハイブリッド直流スイッチのためのタングステンクラッド接点の接点抵抗
3. 学会等名 電子通信情報学会 機構デバイス研究会
4. 発表年 2019年

1 . 発表者名 Shoya Kubo, Shunsuke Sato, Yinming Huang, Koichi Yasuoka
2 . 発表標題 Arc-Free Bidirectional Hybrid DC Switch using Tungsten or Tungsten-clad Copper Contacts
3 . 学会等名 IEEE International conference on DC Microgrids ( 国際学会 )
4 . 発表年 2019年

1 . 発表者名 Koichi Yasuoka, Yuta Yamada, Mo Chen, Ryo Nakayama, Shoya Kubo, Shungo Zen
2 . 発表標題 Microsecond Break Arcs During or After Commutation of Current in a Hybrid DC Switch
3 . 学会等名 IEEE International Conference on Dielectric Liquids ( 国際学会 )
4 . 発表年 2019年

1 . 発表者名 Koichi Yasuoka, Yuta Yamada, Mo Chen
2 . 発表標題 Contact Resistance and Arc-free Commutation Current of Tungsten-clad Copper Contacts for a Hybrid DC Switch
3 . 学会等名 IEEE Holm Conference on Electrical Contacts ( 国際学会 )
4 . 発表年 2019年

1 . 発表者名 K. Yasuoka, Y. Yamada, and M. Chen
2 . 発表標題 Hybrid Switch with Tungsten-clad Copper Contacts for Arc-free On/Off Switching up to DC 400 A
3 . 学会等名 18th Int. Conf. Renewable Energies and Power Quality (ICREPPQ'20), September 2-4, 2020, Spain ( 国際学会 )
4 . 発表年 2020年

1. 発表者名 K. Yasuoka, C. Ou, Y. Huang
2. 発表標題 Emission spectrum from a ruptured molten-metal-bridge during opening period of a hybrid DC switch
3. 学会等名 LASER, OPTIC SCIENCE & PHOTONICS (国際学会)
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 C. Ou, H. Yinming, and K. Yasuoka
2. 発表標題 Threshold Current of Arc-Free Commutation For Copper-Carbon Contact in a DC Hybrid Switch
3. 学会等名 30th International Conference on Electrical Contacts (国際学会)
4. 発表年 2020年

〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔その他〕

東京工業大学工学院竹内研究室ホームページ  
[http://www.plasma.ee.titech.ac.jp/research/detail\\_189.html](http://www.plasma.ee.titech.ac.jp/research/detail_189.html)

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	竹内 希  (Takeuchi Nozomi)  (80467018)	国立研究開発法人産業技術総合研究所・エネルギー・環境領域・主任研究員    (82626)	

7. 科研費を使用して開催した国際研究集会

〔国際研究集会〕 計0件

8 . 本研究に関連して実施した国際共同研究の実施状況

共同研究相手国	相手方研究機関
---------	---------