

令和 2 年 5 月 30 日現在

機関番号：12401

研究種目：挑戦的研究（萌芽）

研究期間：2018～2019

課題番号：18K18845

研究課題名（和文）次世代型直流送配電網の実現に向けた突発的真空絶縁破壊抑制法の提案

研究課題名（英文）Suppression Method of Disruptive Vacuum Breakdown for Next-Generation DC Transmission and Distribution Power Network

研究代表者

稲田 優貴（Inada, Yuki）

埼玉大学・理工学研究科・助教

研究者番号：00735532

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 4,800,000円

研究成果の概要（和文）：本研究では、～100nsの時間分解能と～1μsのフレームレートを有する高性能なシャドウグラフ型イメージングシステムを構築することで、微小金属粒子に起因した真空内での絶縁破壊現象をとらえることに世界で初めて成功した。これにより、(i)絶縁破壊を生じさせる粒子の粒径には～100μmと～10μmの2種類が存在すること、(ii)粒子に起因した絶縁破壊は必ず粒子が負電極に衝突した際に発生すること、(iii)電極間を飛行している間や負電極衝突時に、粒子の粒径は小さくならない、ことなどを明らかにした。

研究成果の学術的意義や社会的意義

微小金属粒子に起因した真空内での絶縁破壊現象は、理学・工学・医学を含む諸分野において喫緊の克服課題となっている。本絶縁破壊現象を解明し、その抑制策を明らかにすることが出来れば、電力システムに実装されている真空遮断器とされる電力機器や、素粒子物理学の進展を牽引する粒子加速器、無尽蔵なエネルギー供給を実現する核融合炉、様々な治療や医療診断に使用されている重粒子線源をさらに小型化・高エネルギー化することが可能である。これにより例えば電力機器の分野では、現在多用されている、環境負荷の高いSF6ガス遮断器を真空遮断器で代替することが可能となり、環境と調和したクリーンな電力システムが実現可能となる。

研究成果の概要（英文）：We developed a shadowgraph imaging system with a ~100-ns time resolution and ~1-μs framing rate, which enabled the world first capturing of a vacuum breakdown phenomenon induced by a microparticle. In our series of observations, the vacuum breakdown was found to be caused by two types of microparticles: those with diameters of ~100μm and ~10μm. Further, all the particle-induced vacuum breakdowns occurred at the time of particle collision with the negative electrode. In addition, the decrease in the particle size was not observed during the particle flight between the electrodes or at the particle collision with the negative electrode.

研究分野：高電圧工学

キーワード：真空遮断器 絶縁破壊

様式 C - 19、F - 19 - 1、Z - 19 (共通)

1. 研究開始当初の背景

現在の送電システムでは、CO₂ に比して 22800 倍の地球温暖化係数を有する SF₆ ガスを使用した SF₆ ガス遮断器が適用されている。一方、この SF₆ ガスを一切使用しない真空遮断器も配電システムを中心に多数使用されている。しかし、SF₆ ガス遮断器と比べ、高電圧下における絶縁性能は著しく低い。この一因は、真空遮断器内部で突発的に発生する“微小金属粒子”が絶縁破壊を生じさせることにある。しかし、このタイプの絶縁破壊現象を実証した例はこれまでになく、現象理解は長らく滞っている。そのため微小金属粒子に起因した絶縁破壊現象を解明し、その防止策を明らかにすることが出来れば、真空遮断器の絶縁性能を飛躍的に改善し、環境負荷の高い SF₆ ガス遮断器を環境適合性の高い真空遮断器で代替することが可能となる。

2. 研究の目的

そこで本研究の目的は、時空間再現性なく突発的に生起する微小金属粒子起因の絶縁破壊現象が捉えられるイメージング技術を開発することで、実測結果とこれまで想定されてきたモデルとの差異を明確化し、絶縁破壊現象の防止策を提示することである。

3. 研究の方法

この目的を達成すべく本研究計画では下記を実施する。

- (1) 従来型の可視化センサに高繰返しパルスレーザとハイスピードカメラを新規実装することで、 $\sim 100\text{ns}$ の時間分解能と $\sim 1\mu\text{s}$ のフレームレートを有する超高性能なシャドウグラフ型イメージングセンサを開発する。(担当：稲田)
- (2) (1)で開発したセンサを駆使し、微小金属粒子に起因した絶縁破壊現象の電極材料依存性を測定する。(担当：稲田)
- (3) 走査電子顕微鏡法(SEM)とエネルギー分散型 X 線分光法(EDX)により(2)で使用した電極の表面を詳細観測する。(担当：熊田)
- (4) (2)と(3)の結果をもとに、今回撮影した微小金属粒子に起因した絶縁破壊現象とこれまで想定されてきたモデルとの差異を明確化し、絶縁破壊現象の防止策を提示する。(担当：稲田、熊田)

4. 研究成果

(1) イメージングシステムの開発

時空間再現性なく突発的に生起し、高速移動する微小粒子を観測すべく、高速度ビデオカメラ及びカメラと同期して発光するパルスレーザ等からなる光学観測系を構成した。図1に観測系の外観図を示す。

粒子の観測にはシャドウグラフ法を採用した。真空チャンバ備え付けの計3か所の観測窓のうち、1つの窓からパルスレーザを打ち込み、それと対面する観測窓から高速度カメラで撮影した。図2に示すよう、移動速度が速い粒子が電極間に存在する場合には、粒子のストロボ画像が得られる。

レーザのパルス幅や繰返し周波数、さらにはカメラのシャッタースピードを調整することで、図3に示すよう、画像1フレームあたりに3発のパルスレーザを打ち込み、粒子挙動を高フレームレートで撮影した。レーザのパルス幅は150ns、繰返し周波数は7-8 μs であり、カメラのフレームレートは23 μs とした。

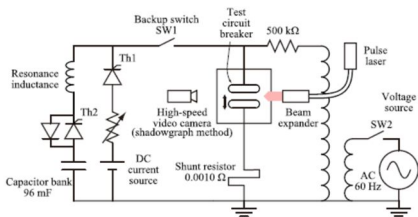


図1 シャドウグラフ型イメージングシステム

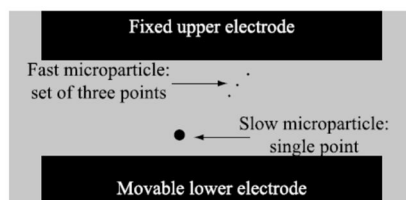


図2 粒子のシャドウグラフ像

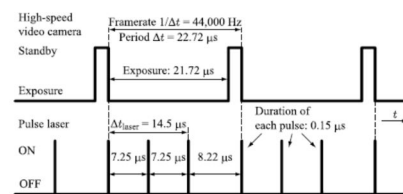


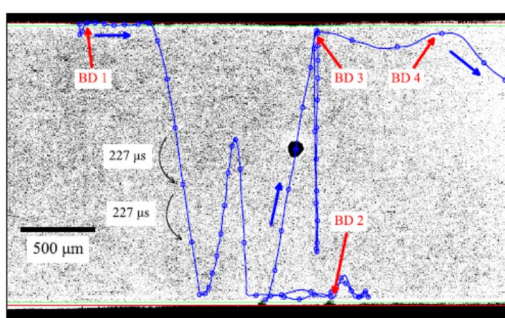
図3 イメージングシステムの動作シーケンス

(2) 絶縁破壊現象の電極材料依存性

(1)で構築したイメージングシステムにより、微小金属粒子に起因した絶縁破壊現象をとらえることに世界で初めて成功した。まず、銀タングステンカーバイド(AgWC)電極に対する撮影結果について述べる。AgWC電極間に集中モードの真空アークを点弧・遮断した直後に、周波数60Hz・波高値35kVの高電圧を印加し粒子起因の絶縁破壊現象を撮影した。その結果、AgWC電極の場合、絶縁破壊を引き起こす粒子は、直径が $\sim 100\mu\text{m}$ 程度の“大きな”粒子と直径が $\sim 10\mu\text{m}$ 程度の“小さな”粒子に大別されることが分かった。大きな粒子の撮影結果を図4に示

す。上側電極から粒子が現れ、その後電極間を浮遊し上下の電極に衝突、絶縁破壊を引き起こしながら、フレームから外れた。発光を伴う絶縁破壊は計4回確認できた。発光は図4(b)に示す電圧波形がゼロに落ちる瞬間と一致していた。粒子の飛行経路と電圧波形から、粒子に起因した絶縁破壊は必ず、粒子が負電極に衝突した際に発生していた。さらに、電極間を飛行している間、粒子の粒径は小さくならず、ほぼ一定であった。画像から粒子の直径と速度を見積もると、直径は約100 μm で移動速度は約3m/sであった。次に、小さい粒子の撮影結果を図5に示す。下側電極で発生した粒子は直線的に飛行し、上部電極にぶつかり発光を伴って絶縁破壊が発生した。その際、上部電極は負電極であった。画像から粒子の大きさや速度を見積もると、直径は約20~40 μm で電極間を約15m/sで移動していた。小さな粒子は電極間を直線的に飛行するとともに、絶縁破壊が発生した衝撃で、新たな粒子が電極表面からギャップ間に放出される様子も数多く撮影された。

本研究では、銀タングステンカーバイド(AgWC)電極に加え、銅(Cu)電極や銅クロム(CuCr)電極に対しても同様の撮影を行ったが、粒子に起因した絶縁破壊現象をとらえることはできなかった。本イメージングシステムの空間分解能は10 μm であることを考慮すると、もし粒子起因の絶縁破壊が生じていたとしてもその粒径は10 μm 以下であることが明らかとなった。



(a) 飛行経路

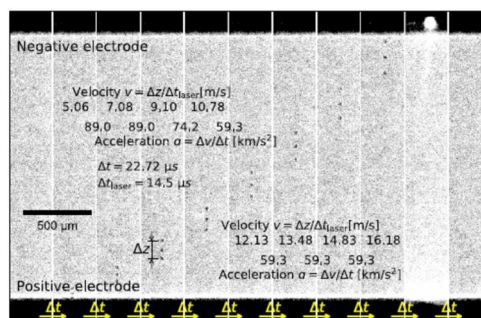
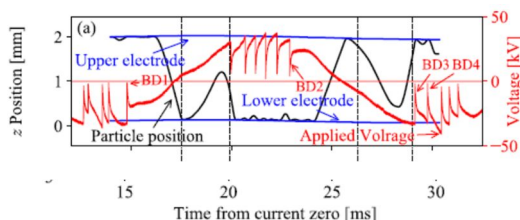


図5 小さな粒子に起因した絶縁破壊現象

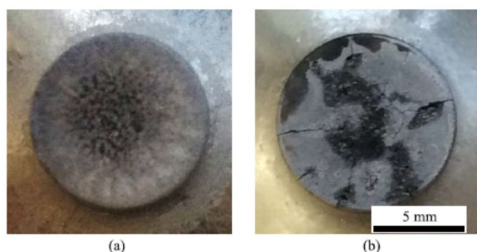


(b) 粒子の縦方向位置と印加電圧波形

図4 大きな粒子に起因した絶縁破壊現象

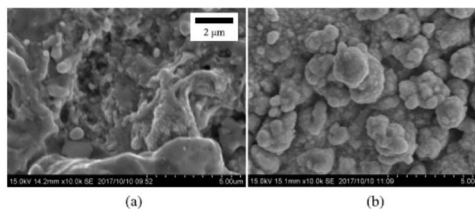
(3) 走査電子顕微鏡法(SEM)とエネルギー分散型X線分光法(EDX)による電極表面の観察

AgWC電極の表面写真を図6に、AgWCカソード表面のSEM画像を図7にそれぞれ示す。図7に示されているよう、電極表面上の位置によって、粒径や形状の異なる粒子が多数付着していた。さらに付着粒子の粒径や形状は、電極の極性にも大きく依存していた。しかしEDXにより電極表面の組成分布を調べたところ、タングステンの含有量が銀よりも少ない電極を用いて実験を行ったにもかかわらず、実験終了後には、タングステンの含有量が銀よりも多くなっていた。これは、電極の極性や表面上の位置に依らず、共通して測定された特徴である。



カソード アノード

図6 AgWC電極の表面写真



白い領域 黒い領域

図7 AgWCカソード表面のSEM画像

(4) 本撮影結果と従来モデルの相違点、および絶縁破壊の防止策

粒子起因の絶縁破壊現象を対象に作られたモデルとしてもっとも有名なものはクランプ理論である。クランプ理論では、粒子が電極に衝突して絶縁破壊現象が発生する際には、粒子は全て蒸発することが仮定されている。さらにこの理論に着想を得て、その後いくつかのモデルが構築された。代表的なものとしては、粒子が完全蒸発した際の金属蒸気内で電子雪崩が発生することによって絶縁破壊が生じるとするモデルである。ここでもやはり、粒子の完全蒸発が前提とされている。しかし大きな粒子に起因した絶縁破壊において示されているよう、本撮影結果では、絶縁破壊が生じたとしても粒子は完全に蒸発していない。そればかりか、絶縁破壊の前後で粒径すら変化していない。これは、従来の絶縁破壊モデルに修正を迫る観測結果であり、粒子が負極に近づいた際の電界増強効果など、非常に過渡的な現象のモデル化に取り組む必要があることを示している。

粒子起因の絶縁破壊を防止するためには、とりもおさず粒子の発生を抑制することが必須である。AgWC 電極は、融点の大きく異なる Ag(融点 1235K)と W(融点 3695K)の混合体である。そのためアーク通電時の電極温度上昇により、Ag のみが選択的に蒸発し、電極表面には W で構成された骨格構造のみが残る。Ag の欠如は電極表面の強靱性を著しく低下させるため、電極表面の一部が高電圧起因の静電気力によって剥がれ、絶縁破壊を誘起する。一方、CuCr 電極の表面は、Cu と Cr がナノオーダーの微細分散層を形成している。Cr の融点は Cu よりも 900K 程度高いため電極表面では Cu の含有量がもとの電極組成よりも多くなっているが、AgWC 電極のような激しい元素欠如は起きていない。そのため、電極表面の著しい強靱性低下は生じない。そのため、CuCr 電極では、AgWC 電極のような微小金属粒子を観測することは出来なかった。これより、著しい元素欠如による電極表面の強靱性低下を防ぐことが、粒子起因の絶縁破壊を防止するためには有効である。

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計4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 Inada Yuki, Kikuchi Ryo, Nagai Hiroyuki, Yamano Yasushi, Maeyama Mitsuaki, Iwabuchi Hiroyuki, Kumada Akiko, Hidaka Kunihiko, Kaneko Eiji	4. 巻 48
2. 論文標題 A Systematic Comparison of Intense-Mode Vacuum Arc Between CuCr and AgWC Electrode by Using Various Optical Diagnostics	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 IEEE Transactions on Plasma Science	6. 最初と最後の頁 1~13
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1109/TPS.2020.2992675	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 Inada Yuki, Kikuchi Ryo, Nagai Hiroyuki, Kumada Akiko, Hidaka Kunihiko, Maeyama Mitsuaki	4. 巻 53
2. 論文標題 Influence of CuCr Electrode Composition on Two-Dimensional Electron and Metal Vapor Density Distribution over Vacuum Arc	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Journal of Physics D: Applied Physics	6. 最初と最後の頁 305201
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1088/1361-6463/ab83bd	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 Nagai Hiroyuki, Kikuchi Ryo, Inada Yuki, Matsuoka Shigeyasu, Shioiri Tetsu, Kumada Akiko, Hidaka Kunihiko	4. 巻 47
2. 論文標題 Initiation Process of Vacuum Breakdown Between Cu and CuCr Electrodes	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 IEEE Transactions on Plasma Science	6. 最初と最後の頁 5191~5197
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1109/TPS.2019.2947444	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 Ejiri Haruki, Kumada Akiko, Hidaka Kunihiko, Taguchi Yuki, Inada Yuki, Yamano Yasushi, Iwabuchi Hiroyuki, Kaneko Eiji	4. 巻 47
2. 論文標題 Late Breakdowns Caused by Microparticles After Vacuum Arc Interruption	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 IEEE Transactions on Plasma Science	6. 最初と最後の頁 3392~3399
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1109/TPS.2019.2917379	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4件（うち招待講演 1件 / うち国際学会 4件）

1. 発表者名 Yuto Hachiman, Fumiya Oshiro, Yuma Nagayo, Eiji Kaneko, Yuki Inada, Yuki Taguchi, Yasushi Yamano, Mitsuaki Maeyama, Yusuke Kitabayashi, Hiroyuki Iwabuchi, Haruki Ejiri, Akiko Kumada and Kunihiko Hidaka
2. 発表標題 Late Dielectric Breakdown Phenomenon Caused by Microparticles Released after Current Interruption
3. 学会等名 28th International Symposium on Discharges and Electrical Insulation in Vacuum (ISDEIV 2018) (国際学会)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 Akiko Kumada
2. 発表標題 Laser Diagnostics for Elucidation of Vacuum Arc Behavior
3. 学会等名 28th International Symposium on Discharges and Electrical Insulation in Vacuum (ISDEIV 2018) (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 Y. Inada, Y. Taguchi, Y. Yamano, M. Maeyama, Y. Kitabayashi, H. Iwabuchi, H. Nagai, H. Ejiri, A. Kumada, K. Hidaka, F. Oshiro, Y. Nagayo, Y. Hachiman and E. Kaneko
2. 発表標題 Systematic Comparison of Vacuum Arc between CuCr and AgWC Electrode by Using Various Optical Technique
3. 学会等名 28th International Symposium on Discharges and Electrical Insulation in Vacuum (ISDEIV 2018) (国際学会)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 H. Nagai, Y. Inada, A. Kumada, H. Ikeda, K. Hidaka, C. Tateyama, Y. Niwa, T. Shioiri and T. Ichikawa
2. 発表標題 High-Speed Spectroscopy of Vacuum Breakdown Process between CuCr Electrode
3. 学会等名 28th International Symposium on Discharges and Electrical Insulation in Vacuum (ISDEIV 2018) (国際学会)
4. 発表年 2018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 分担 者	熊田 亜紀子 (Kumada Akiko) (20313009)	東京大学・大学院工学系研究科(工学部)・教授 (12601)	