

令和 4 年 5 月 30 日現在

機関番号：12601

研究種目：基盤研究(B)（一般）

研究期間：2018～2020

課題番号：18H01419

研究課題名（和文）超高電圧直流真空遮断器の実現に向けた真空アーク現象の基礎研究

研究課題名（英文）Elucidation of Vacuum Arc Phenomena for Realization of Ultra-High Voltage DC Vacuum Circuit Breakers

研究代表者

熊田 亜紀子（Kumada, Akiko）

東京大学・大学院工学系研究科（工学部）・教授

研究者番号：20313009

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 13,500,000円

研究成果の概要（和文）：世界に先駆けて真空アーク消弧時のアークプラズマの温度分布、粒子（電子・金属蒸気・イオン）密度分布を高い時間・空間分解能で測定するシステムを開発し、電極に使用する合金の成分比・結晶微細構造や遮断時に外部回路より注入する重畳電流波形を変化させた条件下で、これらアーク現象の測定を行った。電極温度の測定は、精度の向上が課題として残ったが、電流ゼロ点時における金属蒸気の供給状態、温度を可視化することに成功し、消弧課程における蒸気の様相を説明するモデルの開発を行った。

研究成果の学術的意義や社会的意義

真空遮断器の遮断の成否は、電流零点のアーク消弧時において、接点間に印加される再起電圧に対してアークが再発弧するかどうかで決まる。遮断動作時には、接点金属がアーク電流により加熱され金属蒸気や溶融金属液滴が噴出し、その金属蒸気内でアークプラズマが形成されるという、種々の物理現象が絡み合った複雑な事象が生じており、消弧・再発弧機構には不明確な点が多い。本研究においては、電極金属の蒸発とアークプラズマの相互作用を含めて真空アーク現象解明に資するデータを得、今後の遮断器の設計の高耐電圧化・合理化に理論的な指針を与えられると期待される。

研究成果の概要（英文）：We developed the system to measure the temperature distribution and particle (electron, metal vapor, and ion) density distribution of vacuum arc plasma with high temporal and spatial resolution, and measured these arc phenomena under the conditions of varying the composition ratio and microstructure of the alloy used for the electrode and the superimposed current waveform injected from an external circuit at the time of arc interruption. Arc phenomena were measured under different conditions. Although the accuracy of the electrode temperature measurement remained to be improved, we succeeded in visualizing the state of metal vapor supply at the current zero point and developed a model that qualitatively explains the vapor supply and diffusion in the arc interruption process.

研究分野：高電圧工学、放電プラズマ工学、電気器楽

キーワード：遮断器 大電流 直流遮断 アークプラズマ プラズマ温度

様式 C - 19、F - 19 - 1、Z - 19 (共通)

1. 研究開始当初の背景

真空遮断器は、真空中で接点を開極し、真空の優れた拡散作用を利用し、接点間のアークを消弧することで電流を遮断する機器である(図1参照)。遮断の成否は、電流零点(直流の場合は外部回路から高周波電流を重畳して作成した電流零点)のアーク消弧時において、接点間に印加される再起電圧に対してアークが再発弧するかどうかで決まる。遮断動作時には、接点金属がアーク電流により加熱され金属蒸気や溶融金属液滴が噴出し、その金属蒸気内でアークプラズマが形成されるといふ、種々の物理現象が絡み合った複雑な事象が生じており、消弧・再発弧機構には不明確な点が多い。外部回路電流波形とのかかわり、電極金属の蒸発とアークプラズマの相互作用を含めて真空アーク現象が解明できれば、手探りであった遮断器の設計の高耐電圧化・合理化に理論的な指針を与えられると期待される。

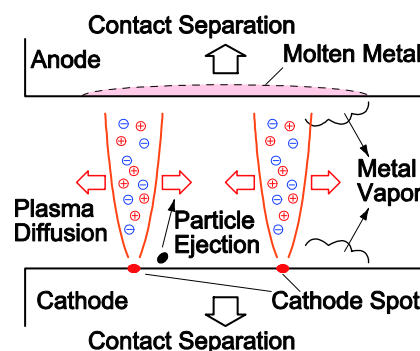


図1 真空アークプラズマ

2. 研究の目的

世界に先駆けて真空アークプラズマと電極の温度分布、プラズマ中の粒子(金属蒸気、イオン、電子)密度分布、電流分布(導電率分布)を高い時間・空間分解能で測定するシステムを開発し、真空アークの消弧・再発弧にいたる過程におけるこれら諸量の過渡変化を計測する。測定結果をもとに、遮断成否を決定する要因を抽出し、成否の臨界条件を議論できるモデルの提案を行い、遮断器の革新的高度化に資する。

3. 研究の方法

真空遮断器の遮断性能と信頼性を向上するとともに小型化を図り、さらに直流遮断器への応用を実現するためには、電流遮断中に電極間で発生する真空アークのプラズマパラメータを把握することが不可欠である。

種々の手法があるが、本研究においては、従来のレーザ波面測定装置を利用した電子密度測定装置、短パルスレーザと高速度カメラを利用した微小粒子の挙動観察系、発光分光(観測視野は、ライン上に限定される)に加え、真空アーク中の金属蒸気の中性粒子の励起温度の

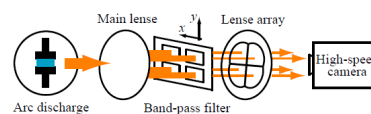


図2 多結像光学系

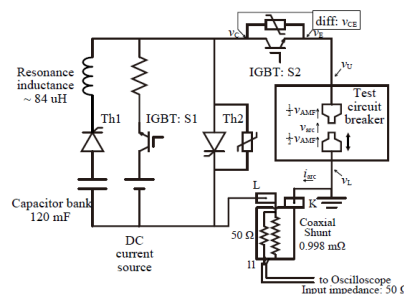


図3 電源回路

動的挙動を高空間分解能、高時間分解能で測定する装置の開発を行った。この装置は、二つのスペクトル線とそれぞれの近傍の連続光を一度に撮像する多結像光学系と、高速度ビデオカメラよりなり比較的簡便な装置ながら、中性粒子の挙動のダイナミクスをとらえることができる。アーク用電源には、直流遮断波形を模擬するため、LC共振回路と半導体スイッチング素子を組み合わせて生成した電流波形を使用した。さらに、衝突輻射モデルを用いた各励起準位のポピュレーション遷移計算により測定精度と緩和時定数の概算を行った。

4. 研究成果

四分岐の多結像光学系を用いて、直流遮断波形を模擬した電流波形下での真空アークの励起準位温度分布を測定した。その結果、ピーク値 2 kA の大電流を電極直径 10 mm、ギャップ長 5 mm の電極に投入したところ、電流ピーク付近における励起準位温度は Cu100 電極では 6500-7500 K、Cu80Cr20 電極では 6000-7000 K、Cu50Cr50 電極では 5500-6500 K であった。転流サイリスタと遮断 IGBT を組み合わせて使用し、電極に流れる電流を 30 A/ μ s の割合で減少させたところ、Cu100 電極では励起温度は電流ゼロ点に向けて急激に低下した。一方、Cu80Cr20 電極、Cu50Cr50 電極では電流減少過程で励起温度が上昇した。

このような二線強度比法においては適用対象である中性粒子の各準位間のポピュレーション分布が十分にボルツマン分布とみなせるか、また 510.6 nm と 515.3 nm のスペクトルを用いた励起温度がボルツマンプロットから導出できる励起温度を精度良く計測できているかについては議論が必要である。衝突輻射モデルを用いて励起温度の算出妥当性を検討した。その結果、拡散モードを測定対象とした場合、510.6 nm と 515.3 nm のスペクトルを用いた励起温度測定は、定常値に至るまでの時定数が最大でも数 μ s 程度と短く、それより長い時間変化においては十分適用可能であることがわかった。

真空アークは、拡散モード、フットポイントモード、インテンスモードと多様なフェーズをとる。各モードにおけるプラズマの様相測定結果をデータベース化し、より統一的な理解を得ていく予定である。

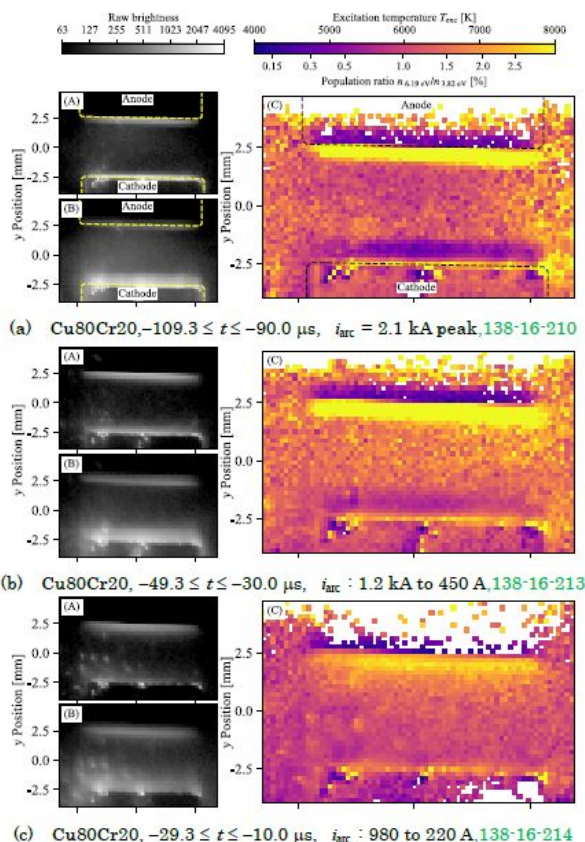


図5 u80Cr20 電極における発光強度と励起温度の例

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計11件（うち査読付論文 11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 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 -
1. 著者名 Ejiri Haruki, Kumada Akiko, Hidaka Kunihiko, Donen Taiki, Kokura Kentaro	4. 巻 47
2. 論文標題 Motion and Breakdown Related to Microparticles in Vacuum Gap	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 IEEE Transactions on Plasma Science	6. 最初と最後の頁 3384 ~ 3391
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1109/TPS.2019.2925655	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 Kumada Akiko, Nagata Taiga, Hidaka Kunihiko, Watanabe Shinya, Kokura Kentaro	4. 巻 28
2. 論文標題 Two-dimensional temperature distribution of air arc commutating to arc runner	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 Plasma Sources Science and Technology	6. 最初と最後の頁 095013 ~ 095013
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1088/1361-6595/ab3c7d	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 Iwabuchi Hiroyuki, Oyama Tsutomu, Kumada Akiko, Hidaka Kunihiko	4. 巻 26
2. 論文標題 Breakdown phenomena across micrometer scale surface gap under negative voltage application	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation	6. 最初と最後の頁 1377 ~ 1384
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1109/TDEI.2019.007921	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 三谷卓矢、諏訪晃弘、松井芳彦、榊正幸、熊田亜紀子、日高邦彦	4. 巻 139
2. 論文標題 EMTPを用いた真空遮断器の直流遮断性能評価	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 776 ~ 782
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1541/ieejpes.139.776	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 Inada Yuki, Komuro Atsushi, Ono Ryo, Kumada Akiko, Hidaka Kunihiko, Maeyama Mitsuaki	4. 巻 52
2. 論文標題 Two-dimensional electron density measurement of pulsed positive secondary streamer discharge in atmospheric-pressure air	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 Journal of Physics D: Applied Physics	6. 最初と最後の頁 185204 ~ 185204
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1088/1361-6463/ab0725	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 Iwabuchi Hiroyuki, Oyama Tsutomu, Kumada Akiko, Hidaka Kunihiko	4. 巻 140
2. 論文標題 Polarity Effect of Breakdown Characteristics across Micrometer-scale Surface Gap	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 IEEJ Transactions on Fundamentals and Materials	6. 最初と最後の頁 342 ~ 348
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1541/ieejfms.140.342	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, Fujii Takashi, Kumada Akiko, Hidaka Kunihiro	4. 巻 140
2. 論文標題 Particle-In-Cell Simulation for Breakdown Phenomena in Vacuum	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 IEEJ Transactions on Fundamentals and Materials	6. 最初と最後の頁 318 ~ 324
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1541/ieejfms.140.318	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 Kunihiro, Maeyama Mitsuaki	4. 巻 53
2. 論文標題 Influence of CuCr electrode composition on 2D 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 ~ 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 江尻開, 熊田亜紀子, 日高邦彦, 道念大樹, 小倉健太郎	4. 巻 Vol. 138, No. 7
2. 論文標題 真空中微小粒子挙動のモンテカルロシミュレーション	5. 発行年 2018年
3. 雑誌名 電気学会論文誌B	6. 最初と最後の頁 pp.628-635
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1541/ieejpes.138.628	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12件 (うち招待講演 0件 / うち国際学会 12件)

1. 発表者名 Ryo Kikuchi, Yuki Inada, Hiroyuki Nagai, Shigeyasu Matsuoka, Akiko Kumada, Kunihiro Hidaka
2. 発表標題 Measurement of Metal Vapor Composition in Vacuum Plasma Generated between CuCr Electrodes
3. 学会等名 XXXIV International Conference on Phenomena in Ionized Gases (XXXIV ICPIG) (国際学会)
4. 発表年 2019年

1 . 発表者名 Takuya Mitani, Akiko Kumada, Kunihiko Hidaka, Akihiro Suwa, Yoshihiko Matsui, Masayuki Sakai
2 . 発表標題 Measurement of 2-D Temperature Distribution in Vacuum Arc
3 . 学会等名 XXXIV International Conference on Phenomena in Ionized Gases (XXXIV ICPIG) (国際学会)
4 . 発表年 2019年

1 . 発表者名 Haruki Ejiri, Akiko Kumada, and Kunihiko Hidaka
2 . 発表標題 Particle-In-Cell Simulation for Breakdown Initiating Process in Vacuum
3 . 学会等名 The International Symposium on High Voltage Engineering (ISH 2019) (国際学会)
4 . 発表年 2019年

1 . 発表者名 H. Ejiri, T. Fujii, A. Kumada, and K. Hidaka
2 . 発表標題 Particle-In-Cell Monte Carlo Collision Simulation of the Breakdown Initiating Process in Vacuum
3 . 学会等名 5th International Conference on Electric Power Equipment -Switching Technology- (ICEPE-ST 2019) (国際学会)
4 . 発表年 2019年

1 . 発表者名 Y. Inada, H. Nagai, A. Kumada, K. Hidaka, Y. Demura, Y. Tabata, Y. Tanaka, T. Nakano and M. Maeyama
2 . 発表標題 Comparative study on turbulent flow structure under AIR, CO2 and SF6 gas blasting visualized by band-pass filtering schlieren system
3 . 学会等名 25th International Conference & Exhibition on Electricity Distribution (CIRED 2019) (国際学会)
4 . 発表年 2019年

1. 発表者名 Y. Inada, A. Komuro, R. Ono, A. Kumada, K. Hidaka, and M. Maeyama
2. 発表標題 Comparison of two-dimensional electron density distribution between positive primary and secondary streamer discharge in atmospheric-pressure air
3. 学会等名 24th International Symposium on Plasma Chemistry (ISPC 24) (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Fumitoshi Demura, Yusuke Nakano, Yasunori Tanaka, Tatsuo Ishijima, Ryo Kikuchi, Akiko Kumada, and Yuki Inada
2. 発表標題 Experimental Study on Re-ignition Process in CO ₂ /C ₂ F ₆ Gas Mixture Flow After Application of Quasi-Transient Recovery Voltage
3. 学会等名 International Workshop on High Voltage Engineering 2020 (IWHV2020) (国際学会)
4. 発表年 2020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 ISDEIV 2018 (28th International Symposium on Discharges and Electrical Insulation in Vacuum) (国際学会)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 Hiroyuki Nagai, Yuki Inada, Akiko Kumada, Hisatoshi Ikeda, Kunihiro Hidaka, Chihiro Tateyama, Yoshimitsu Niwa, Tetsu Shioiri, Takayoshi Ichikawa
2. 発表標題 High-speed spectroscopy of vacuum breakdown process between CuCr electrode
3. 学会等名 ISDEIV 2018 (28th International Symposium on Discharges and Electrical Insulation in Vacuum) (国際学会)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 Yuki Inada, Yuki Taniguchi, Yasushi Yamano, Mitsuaki Maeyama, Yusuke Kitabayashi, Hiroyuki Iwabuchi, Hiroyuki Nagai, Haruki Ejiri, Akiko Kumada, Kunihiko Hidaka, Fujiya Oshiro, Yuma Nagayo, Yuto Hachiman, Eiji 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 ISDEIV 2018 (28th International Symposium on Discharges and Electrical Insulation in Vacuum) (国際学会)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 Haruki Ejiri, Akiko Kumada, Kunihiko Hidaka, Taiki Donen, Kentaro Kokura
2. 発表標題 Breakdown Phenomena Triggered by Microparticle in Vacuum Gap
3. 学会等名 ISDEIV 2018 (28th International Symposium on Discharges and Electrical Insulation in Vacuum) (国際学会)
4. 発表年 2018年

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, Kunihiko Hidaka
2. 発表標題 Late Dielectric Breakdown Phenomenon Caused by Microparticles Released after Current Interruption
3. 学会等名 ISDEIV 2018 (28th International Symposium on Discharges and Electrical Insulation in Vacuum) (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	稲田 優貴 (Inada Yuki) (00735532)	埼玉大学・理工学研究科・助教 (12401)	

6. 研究組織（つづき）

	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	日高 邦彦 (Hidaka Kunihiko) (90181099)	東京電機大学・工学部・教授 (32657)	
研究分担者	松岡 成居 (Matsuoka Shigeyasu) (10114646)	東京大学・大学院工学系研究科（工学部）・助教 (12601)	

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