

令和 5 年 6 月 6 日現在

機関番号：13301

研究種目：挑戦的研究（萌芽）

研究期間：2021～2022

課題番号：21K18717

研究課題名（和文）吸水ポリマ溶発を利用するエアロゾル粒子混合による直流アークの高速遮断技術の開発

研究課題名（英文）Development of high-speed interruption technology for DC arc by polymer ablation and aerosol particle mixing using water-absorbing polymer ablation

研究代表者

田中 康規（Tanaka, Yasunori）

金沢大学・電子情報通信学系・教授

研究者番号：90303263

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 5,000,000円

研究成果の概要（和文）：本研究では、革新的な直流大電流遮断方式を開発すべく、「ポリマおよび吸水ポリマ溶発を利用するエアロゾル粒子混合による直流アークの高速遮断技術の開発」を新提案する。直流給電導入に喫緊の課題は、故障事故時の直流大電流を確実に遮断する技術の開発である。本研究では、アークがポリマ接触する際に溶発するポリマアブレーションをアーク減衰に応用するとともに、ナノ・マイクロサイズのポリマ粒子が混合したエアロゾル混合系を大電流アーク遮断に応用しようとするものである。そのための誘導熱プラズマをポリマー照射実験基礎実験装置とともにその数値解析モデルを構築した。

研究成果の学術的意義や社会的意義

ポリマーアブレーションおよびナノ・マイクロポリマのエアロゾル混合系とアークとの相互作用の検討例はほとんどなく未知である。溶発による吸熱作用とポリマ材料混入によるアークの熱力学輸送特性の変化や圧力上昇、乱流ガス流発生による急速混合効果も期待できる。既存のDusty plasmaとエアロゾルの合成領域であり、学術的に非常に興味深い未踏域である。さらにここにアーク遮断に有効なH₂Oを大量に吸水する新しいポリマPAAゲル利用を提案し、そこからのマイクロ粒子の放出を利用し、アークプラズマの減衰効果を一気に高める革新的な構想である。

研究成果の概要（英文）：In this study, in order to develop an innovative high-current interrupting method, we propose a new high-speed interrupting technology for DC arcs by aerosol particle mixing that utilizes polymer and water-absorbing polymer ablation. A pressing issue in the introduction of DC power supply is the development of technology for reliably interrupting large DC currents in the event of an accident. In this study, we are trying to apply polymer ablation, which is ablated when an arc contacts a polymer, to arc attenuation, and to apply an aerosol mixture system in which nano- and micro-sized polymer particles are mixed to high-current arc interruption. A numerical analysis model for the induced thermal plasma was constructed together with a basic experimental device for polymer irradiation experiments.

研究分野：熱プラズマ工学

キーワード：熱プラズマ アーク 遮断器 ポリマーアブレーション 消弧

様式 C-19、F-19-1、Z-19 (共通)

1. 研究開始当初の背景

現在の高度社会を支えるのは高品質・高信頼性の電気エネルギー供給である。事故時など緊急時に発生する大電流を遮断する技術は、高信頼性を有する電力伝送の中核基盤技術であり、しかも電力機器の中で最も技術革新の難しい分野である。経済発展著しい中国では交流 1000 kV 送電(UHV 送電)、直流±800kV の導入され短絡電流が増し、さらなる大電流遮断技術が必要課題である。一方我が国では、先の震災以降、電力供給源の点では太陽光、風力などの再生可能エネルギーの導入と大容量蓄電に関心が集まるほか、供給の高効率化・省エネの観点からスマートグリッド、直流給電導入への関心が急速に高まっている。現代のほとんどの電気・電子機器は直流で動作し、機器内で「交流-直流」変換し電力を使用している。そのため直流給電システム実現は、交直変換回数を少なくし電力損失低減の有効な省エネ法として挙げられ、米国では年間 20 億ドル市場と試算されている。しかし直流システムの最大の問題点は、事故時に発生する直流短絡電流の高速遮断技術の難しさにある。直流短絡電流は交流と異なり自発的に電流零点を持たない。そのため高電圧直流系では零点を生じさせる振動回路を設けたり、低電圧直流系では限流遮断器など特別なものが必要となる。現在、ビル・データセンタ用には 400V 系の直流給電が検討されているが、将来的には電力増強に伴い kV 級直流給電も考えられ、直流遮断技術の開発が、安全安心な次世代電力給電システム構築での鍵となる。

大電流遮断技術開発は我が国を含め、特にフランス・スイス・ドイツ・中国・韓国の各メーカーがしのぎを削っている。これまでに交流高電圧の大電流遮断技術では自力消弧型・直列パuffa 式などが開発され、我が国メーカーは世界トップ技術を確保している。しかし、直流高電圧大電流遮断や直流配電遮断技術においては、我が国メーカーとも革新的な遮断技術の向上には至らず危機感を募らせている。この「電力供給の中核基盤技術」である遮断技術分野で我が国が主導権を取り続けることは、我が国の現在・未来の継続的経済発展のために必要である(当該課題の重要性)。以上の背景の下、革新的な大電流遮断方式を開発すべく、「ポリマおよび吸水ポリマアブレーションを利用するエアロゾル粒子混合による直流アーク遮断技術の開発」を提案する。

2. 研究の目的

本研究の目的は、革新的な直流大電流遮断方式を開発すべく、「ポリマおよび吸水ポリマ溶発を利用するエアロゾル粒子混合による直流アークの高速遮断技術の開発」を新提案することである。直流給電導入に喫緊の課題は、故障事故時の直流大電流を確実に遮断する技術の開発である。故障電流を切る際には遮断器内にアークが発生し、それを通じ電流が流れ続けてしまう。遮断器はこのアークを消すことで故障大電流を遮断する。直流電流は交流電流と異なり自発的電流零点がないため、LC 回路を導入して零点を人工的に作り出したり、アークを減衰させ限流させるなどの技術が用いられるが、アーク時間が長いと大きな負荷となる。本研究では、アークがポリマ接触する際に溶発するポリマアブレーションをアーク減衰に応用するとともに、ナノ・マイクロサイズのポリマ粒子が混合したエアロゾル混合系を大電流アーク遮断に応用しようとするものである。

3. 研究の方法

本研究では一般に使用されるアークプラズマの代わりに、誘導結合熱プラズマ (ICTP) を用いる。アークおよび ICTP はいずれも熱プラズマに属し高温高気圧のプラズマである。この ICTP をポリマーのバルク試験片に照射することでポリマーアブレーション現象を基礎的に検討した。ポリマーアブレーション現象は、配線用遮断器、EV のリレーなどの設計にとって非常に重要な要素である。アークの代わりに ICTP を用いることで再現性・制御性に優れ、電極等からの汚染がないクリーンな熱プラズマをポリマーに照射できるという利点がある。この実験では、Ar 誘導熱プラズマを 5 種類のポリマー固体バルクに直接照射し、ポリマーバルクを熱アブレーションさせた。さらにアブレーション蒸気に対し分光観測を実施した。測定できた C2 の振動温度と回転温度を理論計算した放射係数と比較することで決定した。この熱プラズマを照射する数値解析モデルも構築し、ポリマーに熱プラズマを照射し、アブレーションが生じる過程をモデル化した。

4. 研究成果

<実験的アプローチ>

図 1 は、実験に使用したプラズマトーチ、チャンバーおよび試料ホルダーを示している。プラズマ トーチは 2 本の同軸石英管で構成されている。これらのチューブの間にはトーチ壁温度を 300 K に維持するために冷却水が流れている。トーチの周囲には、トーチ内に電磁場を生成するために 8 ターンの誘導コイルを取り付けてある。コイル電流周波数は 450 kHz である。Ar ガスは、内部の石英管に沿ってシースガスとして供給している。このプラズマトーチの下流には、ポリマー試料をステンレス鋼製マウント上に設置している。ポリマー試験片の直径と厚さは、それぞれ 15 mm と 5 mm である。誘導コイル端とポリマー試験片表面の間の距離は 200 mm である。

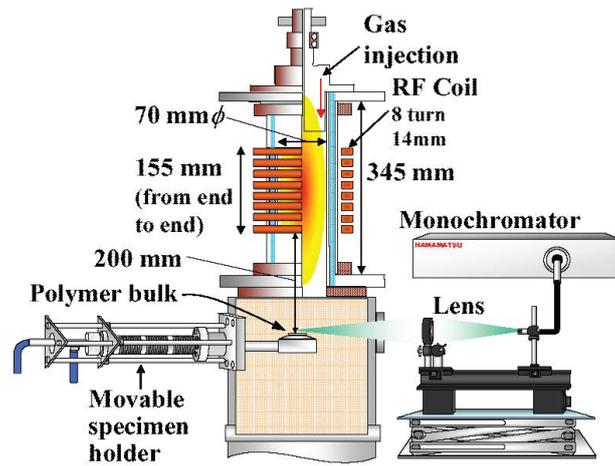


図 1. 誘導熱プラズマ照射によるポリマーアブレーション基礎実験装置とスペクトル観測系

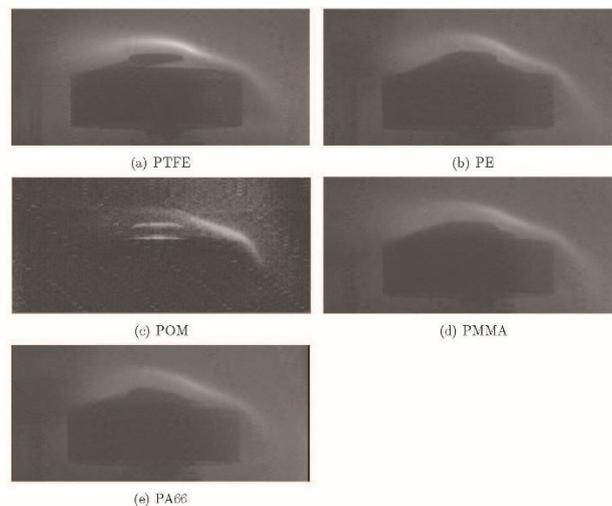


図 2. Ar 誘導熱プラズマを照射したポリマーから噴出するアブレーションガスの様子

図 2 に、熱プラズマ照射中における照射台付近の高速度カメラ画像を示す。(a) が PTFE, (b) が PE, (c) が POM, (d) が PMMA, (e) が PA66, (f) が PA6 の場合である。まず POM の場合に、画像全体が白みを帯びている。これは POM の場合放射強度が小さく、S/N 比が小さいためである。これらの図からわかるように、POM 以外の場合において、バルク材表面から 3 mm 程度までの範囲で特に明るくなっている。このような明るい領域は、高分子材料の溶発ガス中に含まれる C2 分子による放射光である。また、バルク材表面付近から照射用マウント表面、ホルダー周辺にかけて明るくなっている。このことから、高分子材料の溶発ガス中の C2 分子がバルク材表面から下流および周辺に流れていく様子がわかる。また、熱平衡状態を仮定した高分子蒸気の粒子組成から、POM の場合は C2 分子の数密度が他の材料と比較して少ない。このため、POM の場合は放射光が観測されなかったと考えられる。

図 3 に、それぞれバルク材表面上 1.25 mm における分光観測結果を示す。(a) がバルク材が Ti の場合、(b) が PTFE, (c) が PE, (d) が POM, (e) が PMMA, (f) が PA66, (g) が PA6 の場合である。いずれの場合においても、波長 700.850 nm 付近において多数の Ar 原子スペクトルが確認できる。POM 以外の場合では、波長 400.600 nm において C2 Swan 系のバンドスペクトルが確認できる。これらのスペクトルは高分子材料の溶発によって生じたガスに含まれる C2 分子によるものである。PA66, PA6 の場合には 386.1 nm 付近に CN 分子スペクトルが確認できる。また、いずれの観測位置においても、(a) バルク材を Ti とした場合と比較して、高分子材料とした場合は Ar スペクトル放射強度が低下していることがわかる。ここで、前節で示したように、Fig. 3.11 の高速度カメラ画像より、C2 分子はバルク材表面から 3 mm 程度の範囲で特に多く存在する。分光観測により、表面上 6.25, 8.75mm において観測された C2 分子スペクトルは、溶発ガスが反応容器壁で反射し上流に対流したものに含まれる C2 分子によるものと考えられる。

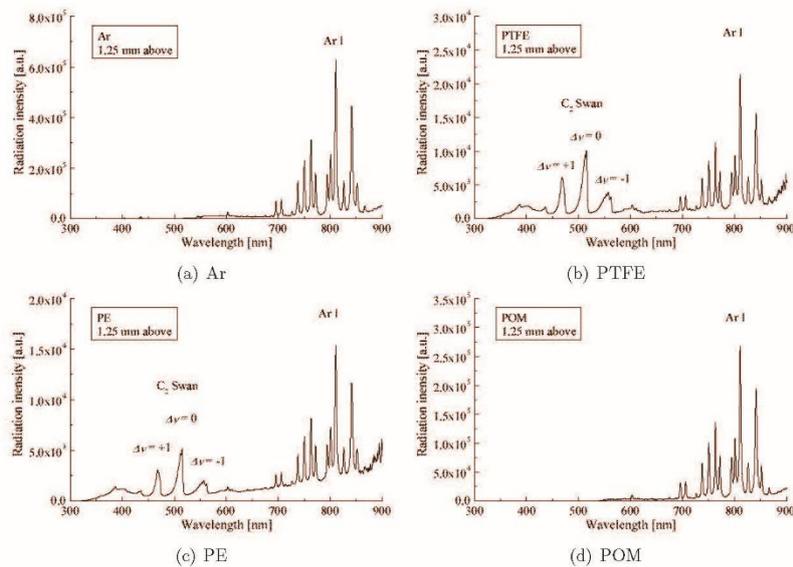


図 3. アブレーション蒸気に対するスペクトル観測結果

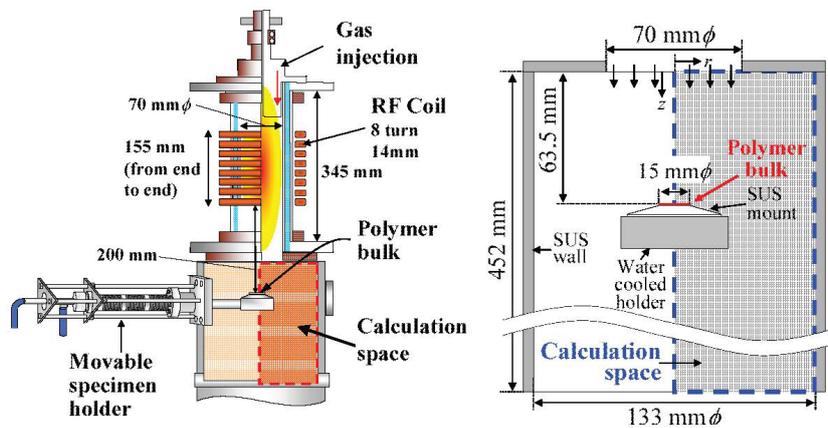


図 4. Ar 誘導熱プラズマを照射したポリマーバルクとアブレーションを考慮した数値解析モデル

<数値解析的アプローチ>

Ar 誘導熱プラズマを照射したポリマーとポリマーアブレーションを考慮した数値解析モデルを構築した。図 4 左に、熱プラズマトーチと反応容器の概略図を示す。本熱流体解析では、実験で用いた熱プラズマトーチと反応容器を計算対象としている。図 4 右に本熱流体解析の計算空間の概要を示す。バルク材表面は軸方向位置 63.5 mm に位置している。計算空間は反応容器のみで、右側半面（網掛け部分）である。この計算空間を Fig. 5.3 に示すように軸方向を 154、径方向を 66 のグリッドに分割した。境界条件としては、まず $z=0$ mm の反応容器の流入口に軸方向・径方向流速、温度を与えた。例として、中心軸付近では軸方向流速 7.46 m/s、径方向流速 0.01 m/s、温度 7650K である。これらの流速および温度は、事前に熱プラズマトーチ部分の電磁熱流体解析を実験と同様のシースガス流量および入力電力のもとで行ないた結果を用いている。反応容器壁および水冷ホルダーは 300 K 一定としている。SUS マウントおよびバルク材内部については、熱プラズマ部と同時に解いている。中心軸においては円柱対称条件を適用し、 $z=452$ mm の反応容器流出面では自由流出としている。

図 5 に、バルク材を PTFE とした場合の温度分布の計算結果を示す。同図(a) はアブレーションを考慮しない場合、(b)にアブレーションを考慮した場合を示している。白抜きの部分はバルク材、SUS マウントおよび水冷ホルダーを示している。照射されるプラズマはバルク材表面上 5 mm の位置では温度が約 6500 K である。プラズマはバルク材にあると方向を変え、高温領域が反応容器の壁面方向へと広がっていく。アブレーションを考慮しない場合、バルク材部分が高温になっていることがわかる。中心軸上、表面下から 3 mm では 1200 K 程度である。一方でアブレーションを考慮した場合は、バルク材内部の温度が低下していることが分かる。

このようにポリマーアブレーションによりアブレーション蒸気が噴出し、ポリマー周囲の熱プラズマ温度が急激に低下することがわかる。このアブレーション効果を利用することでアー

ク熱プラズマの冷却がなされうる。

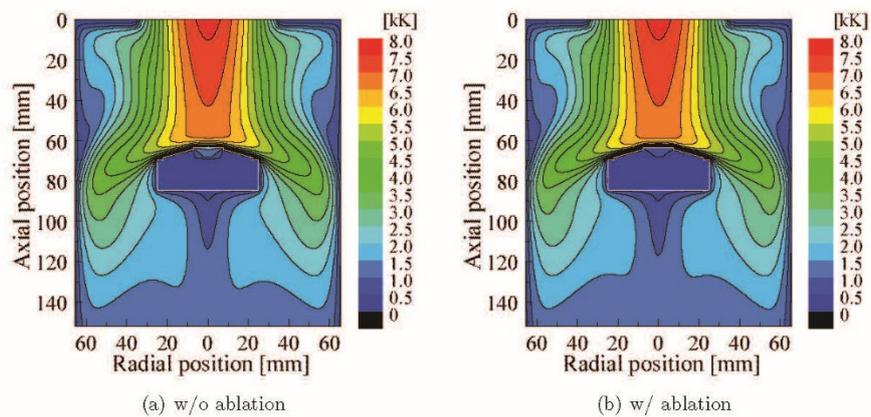


図 5. Ar 誘導熱プラズマを照射したポリマーバルクとアブレーションを考慮した数値解析の温度分布計算結果

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計1件（うち査読付論文 1件 / うち国際共著 0件 / うちオープンアクセス 1件）

1. 著者名 Masao Shibayama, Yasunori Tanaka*, Yusuke Nakano, Tatsuo Ishijima	4. 巻 54
2. 論文標題 Numerical study of polymer-ablation arc with polyacrylic acid + H2O mixture	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Journal of Physics D: Applied Physics	6. 最初と最後の頁 145203
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1088/1361-6463/abd506	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている（また、その予定である）	国際共著 -

〔学会発表〕 計1件（うち招待講演 0件 / うち国際学会 1件）

1. 発表者名 Toshiaki Sakuyama, Yasunori Tanaka*
2. 発表標題 A study on temperature decay of thermal plasma due to polymer ablation using induction thermal plasma technique
3. 学会等名 The 5th Asia Pacific Conference on Plasma Physics(AAPPS-DPP2021)（国際学会）
4. 発表年 2021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	石島 達夫 (Ishijima Tatsuo) (00324450)	金沢大学・電子情報通信学系・教授 (13301)	
研究分担者	中野 裕介 (Nakano Yusuke) (60840668)	金沢大学・電子情報通信学系・助教 (13301)	

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
---------	---------