

平成 27 年 6 月 8 日現在

機関番号：13301

研究種目：挑戦的萌芽研究

研究期間：2013～2014

課題番号：25630108

研究課題名（和文）マイクロスポレーションポリマ粒子の直接噴出・溶発による直流アーク遮断の新技术創出

研究課題名（英文）Development of a new technology for dc-current interruption assisted by ablation of polymer micro-particles

研究代表者

田中 康規（TANAKA, YASUNORI）

金沢大学・電子情報学系・教授

研究者番号：90303263

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 3,100,000 円

研究成果の概要（和文）：次世代高電圧直流給電システムの中核基盤技術である大電流遮断技術への貢献のため，ナノ・マイクロスポレーション粒子分散ガスによる直流アーク遮断を提案した。アークを減衰させる新技术の検討を行った。アークにポリマーが接触するとポリマーは溶発し，アーク遮断性能が向上する。ポリアミド材の場合，さらにマイクロサイズの粒子が飛翔するスポレーション現象が生じる。この粒子は溶発ガスより質量密度が大きくアークにより深く侵入し熱を奪う。このポリマから自発的に粒子発生するスポレーション現象の発生機構と吸水量との関係を，誘導プラズマ装置を用い基礎解明し，本特長を活かしたポリマノズルによる直流アーク遮断性能を検討した。

研究成果の概要（英文）：We fundamentally investigated a new technique for dc-current interruption assisted by ablation of polymer micro-particles ejected from the polymer bulk wall. The polymer materials are widely used in a circuit breaker for insulation. They often contact the arc plasma during high-current interruption, resulting in polymer ablation. We found that polyamide materials eject spallation micro-sized particles, which can penetrate the arc deeply. The present work investigated spallation occurrence due to water absorption.

研究分野：電力・電気機器

キーワード：アーク 遮断器 ポリマー アブレーション

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 ± 80 kV の導入が予定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、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・直列パッファ式などが開発され、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。以上の背景の下、革新的な大電流遮断方式を開発すべく、「ナノ・マイクロスポレーション粒子混合によるアーク遮断を提案する。

2. 研究の目的

本研究の目的は、ナノ・マイクロポリマー粒子をアークプラズマに混入させることでアークを急激に減衰させる手法を考案し、その効果を検討することにある。

申請者はこれまでに「ナノポリマによるアークプラズマのクエンチング（減衰）」着想に至り、粒子のプラズマ減衰への影響を検討している。さらに別途の共同研究においてポリマーに熱プラズマを照射すると特定のポリマー材の場合には蒸発だけでなくマイク

ロサイズの粒子が噴出する（スポレーション（破碎））現象を見出した。マイクロサイズ粒子はガスよりも熱プラズマのさらに内部まで侵入し、そこで溶発し熱を奪いプラズマ輸送特性を変化させる。

本研究申請では、このような固体からの噴出マイクロ粒子とナノ粒子混合ガス（粒子分散系エアロゾル）をアーク遮断に応用することを着想した。この効果を明らかにすることが本研究目的の一つである。

3. 研究の方法

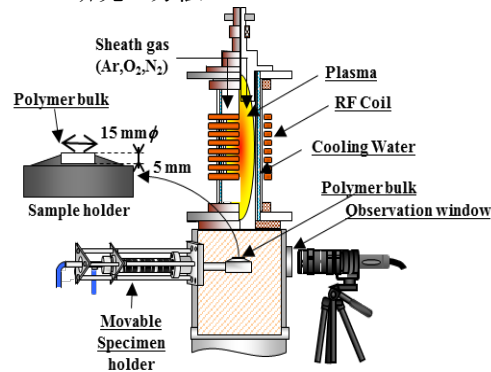


図1 ICTP 装置図

本実験においては、熱プラズマ源として誘導熱プラズマ ICTP を用いた。ICTP は無電極放電による照射が可能であるため、不純物の混入がなく、また定常状態を維持できるため再現性の高い実験が可能である。さらに、任意のガス種と流量の設定が可能である。図1に、ICTP 装置の概略図を示す。プラズマトーチは二重構造の石英管と、8 ターンコイルからなる。熱プラズマからの高熱流に耐えるため、石英管の二重構造の内部には冷水を循環させている。コイルに高周波大電流を流すことで石英管内部に熱プラズマを点弧・維持する。熱プラズマはガス流によって下方に伸び、反応容器に流入する。反応容器にはサンプルホルダーが設置されており、ここに試料が固定されている。熱プラズマは試料に対して垂直に照射される。反応容器側面には観測窓が設けられており、そこから放射温度測定および高速ビデオカメラによる撮影を行った。

被照射試料は直径 15 mm、厚さ 5.0 mm の円柱形状のポリアミド 66 (PA66) である。PA66 はエンジニアリングプラスチックの 1 つであり、強度特性や耐薬品性に優れる。ポリアミド系材料は水分を保持する性質をもち、この性質は、ポリアミド内のアミド基によるものであると考えられる。アミド基および水分子の H と O がそれぞれ水素結合することで、アミド基と水分子が結びつき、ポリアミド材は水を保持する。照射実験を行う前に、PA66 試料を温度 100℃ の純水中に 3 時間浸漬することで吸水させた。吸水後の試料の吸水率は約 3.0 wt% となった。

熱プラズマへの導入ガスには Ar, N₂ およ

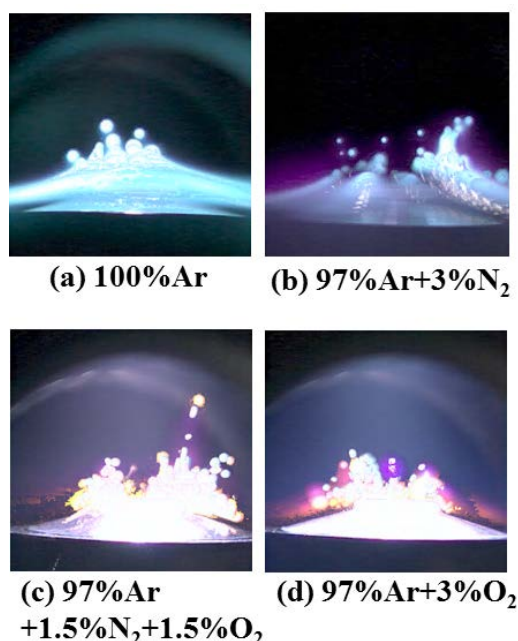


図2 PA66 への熱プラズマ照射によるスポレーション粒子飛翔の様相

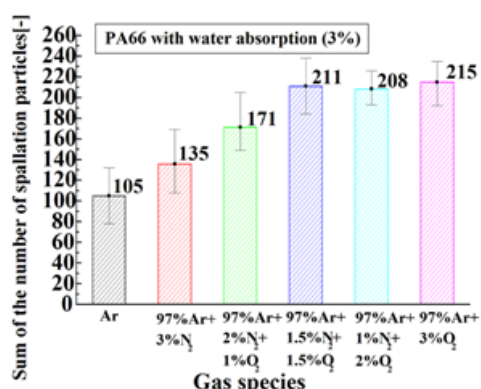


図3 各条件における1秒間熱プラズマ照射時におけるスポレーション発現数

びO₂を用いた。N₂およびO₂を混入させたのは、空気中の主成分のN₂およびO₂がスポレーション発現に与える影響を検討するためである。異なる混入割合の混合ガスを6種類設定した。いずれの条件も、反応容器内圧力は760 Torrである。いずれの条件においても、同一熱流束が照射されるように、熱プラズマへの入力電力を調整した。PA66 試料への熱プラズマ照射時の様子は高速カラービデオカメラにより撮影した。その際フレームレートは1000 fps に設定し、試料への照射時間は20 s とした。

4. 研究成果

(1) Ar+N₂+O₂ 熱プラズマ照射によるスポレーション粒子発現促進 同一熱流束照射条件に従い入力電力を設定し、吸水 PA66 試料に対して N₂ および O₂ 混合 Ar 熱プラズマを照射した。図 2(a)-(d)に高速ビデオカメラによ

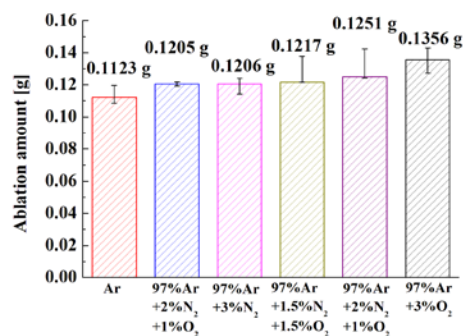


図4 熱プラズマ照射時のポリマーバルク材損耗量

って観測された画像を示す。これらは熱プラズマ照射を開始してから0.9 s-1.0 sの間に撮影された100枚のスナップを合成したものである。いずれのガス条件においても、試料からスポレーション粒子が飛翔することが確認できる。また、溶発ガスからの発光に着目すると、100%Arの場合は水色の発光が強く、N₂が混入すると紫色の発光が強くなる。O₂が混入するとオレンジ色の発光が強くなった。100%Arの場合にみられる青い発光は、波長域450-570 nmにおけるC₂分子のSwan系スペクトルに由来するものであると考えている。N₂が混入した際にみられる紫色の発光は、波長域350-400 nmのCN分子のViolet系スペクトル由来のものと推察している。また、O₂を混入した際にみられるオレンジ色の発光は黒体放射とみており、炭素粒子の燃焼時の光と似た波長成分を有することがわかってい。以上のように、O₂およびN₂の混入により熱プラズマ照射中のPA66アブレーションの様子に大きな変化がみられた。

100%Arの場合と比較すると、N₂およびO₂を混入した場合に粒子飛翔数が増加している。特にO₂混合時にその傾向が強いと考えられる。N₂混入時にみられたCN分子による発光が、O₂のみ混入した場合にもみられる。これはPA66蒸気内に存在したCとNから生成したCN分子からのものと考えられる。100%Arの場合にはCN分子由来の強い発光は見られないため、O₂が溶発に寄与した可能性がある。さらにO₂が混入した場合にはC₂分子由来の発光はほとんど見られず、連続スペクトル発光が強いことがわかった。これは、試料から解離したグラファイト粒子がO₂と燃焼反応を起こしたことが原因であると考えられる。

N₂およびO₂の混合によるスポレーション粒子飛翔頻度の変化を定量的に確認するため、熱プラズマ照射を開始してから0.9 s-1.0 sの間に飛翔した粒子の数を計測した。その結果を図3に示す。Arに3%N₂を混合することで粒子飛翔数は1.3倍程度となり、3%O₂を混合することで最大2倍以上となった。以上の

ことから、スポレーションの発現は O_2 によって促進され、空気中においてもスポレーションの発現は促進されるものと推測できる。 O_2 がスポレーション発現を促進する理由は、 O 原子による化学スパッタ作用によるものであると考えている。

(2) 質量損耗量測定結果

図 4 に、試料の損耗量を示す。同図において、3% O_2 混合時に最も損耗量が多く、100%Ar 照射時に最も少ない。スポレーション粒子の飛翔数は 3% O_2 混合時に多く、100%Ar のときに少なかったことから、スポレーション粒子飛翔数の増加は、より多くのポリマー材を熱プラズマに導入できることにつながると考えられる。しかしながら、損耗量が 2 倍以上にもなることはなかったため、スポレーション発現が質量損耗量に及ぼす影響は大きくない。

(3) アーク内でのスポレーション粒子挙動の数値解析

さらに片側吹き付け型 PA66 アブレーションアークプラズマ中における PA66 スポレーション粒子の飛翔モデルの構築を試みた。計算では、片側吹き付け型アブレーションアークを対象とした。直径 6 mm の円柱電極を囲むように内径 6 mm の円筒型ポリマーバルク材料を設置している。片側吹き付け型アブレーションアークプラズマでは、ガス流速は極めて速いためガス流は圧縮性流体としている。アーク電流値は 50 A、電極間距離は 50 mm とした。ポリマー材料空間内はポリマー材料溶発蒸気で満たされているとする。開口部からは、ガスは自由に流出でき、アークプラズマに作用する Lorentz 力を考慮する。電極は溶融、溶発せず、電極とポリマー材料内の熱伝導を考慮している。さらに、求めたアークプラズマ温度場および流速場の下で、粒子が飛翔する軌跡および温度変化を計算した。スポレーション粒子は円筒ポリマーの内側から、ある大きさと速度を持って飛翔する仮定した。粒子最外殻は表面でプラズマとエネルギー交換(熱伝達、放射)、溶発が生じるとした。

本計算の結果、アークは軸上で温度 10000 K に達し、ポリマー壁付近では温度が低下していることがわかった。溶発により出口付近においてガス流が 140 m/s に達していた。この背景場の下で、PA66 スポレーション粒子の飛翔軌跡を計算した結果が図 5 である。スポレーション粒子の初期温度を 500 K、初期速度を 1.0 m/s、初期粒径を 0.2 mm、飛翔角度を 9 度とした例である。上記の条件において PA66 スポレーション粒子はガス流に流されながらアーク内部に侵入している。図 6 はそのときのスポレーション粒子の内部殻の温度変化と内径変化を表している。粒子が飛翔しながら溶発していくことがわかる。このような数値解析により、スポレーション粒子はアーク内部に侵入できることを確認できた。PA66 スポレーション粒子はアーク内部で溶発していくため、アーク冷却効果が期待でき

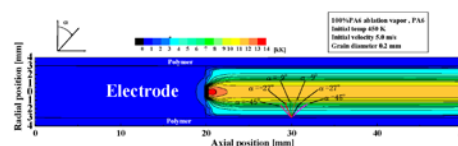


図 5 アーク内のスポレーション粒子飛翔解析結果

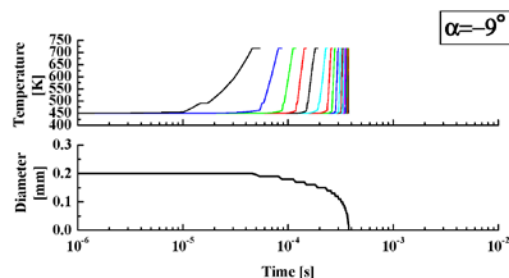


図 6 アーク内を飛翔するスポレーション粒子内の温度変化と内径変化

ることがわかった。

5. 主な発表論文等

(研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線)

〔雑誌論文〕(計 2 件)

- ① T.Nakano, Y.Tanaka, Y.Goto, H.Horibe, T.Ishijima, Y.Uesugi, Spallation Occurrence Control by Mixing Phthalate Esters in Polyamide Material for Polymer Ablation Assisted Circuit Breakers, Int. Conf. Gas Discharges and Their Appl. GD2014, A43, pp.215-218, 2014.6 (査読有)
- ② T. Nakano, N.Shinsei, M. Ishida, Y.Tanaka, Y.Uesugi, T.Ishijima, Effect of N_2/O_2 Inclusion on Polymer Ablation and Spallation Phenomena from Polyamide During Thermal Plasma Irradiation, 2nd Int. Conf. Electric Power Equip. ICEPE2013, 2-p2-P-1, 2013.10, Matsue, Japan (査読有)

〔学会発表〕(計 10 件)

- ① 中野智之, 中川拓也, 田中康規, 上杉喜彦, 石島達夫, 西山 聖, 堀邊英夫, 浅沼岳, 恩地俊行, $Ar+O_2$ 熱プラズマ照射による DBP 混練 PA6 からのスポレーション発現促進, 平成 27 年電気学会全国大会 6-052, 2015.3 (東京)
- ② 中川拓也, 中野智之, 田中康規, 上杉喜彦, 石島達夫, 西山 聖, 堀邊英夫, 浅沼岳, 恩地俊行, PA6 溶発アークプラズマ中におけるスポレーション粒子飛翔高度の初速度依存性, 平成 27 年電気学会全国大会 6-053, 2015.3 (東京)
- ③ T.Nakano, Y.Tanaka, T.Ishijima, Y.Uesugi,

Voltage application test to residual arcs under free recovery condition using an IGBT-controlled impulse generator, The 9th Int. Workshop on High Voltage Engineering (IWHV2014), ED-14-085/ SP-14-041/ HV-14-097, 2014.11 (6pp), Naha, Okinawa, Japan

- ④ T.Nakagawa, T. Nakano, Y.Tanaka, Y.Uesugi, T.Ishijima, Numerical simulation on dynamics and evaporation of spallation polymer particle flying in the polymer ablated arcs, The 9th Int. Workshop on High Voltage Engineering (IWHV2014), ED-14-116/ SP-14-072/ HV-14-128, 2014.11 (6pp), Naha, Okinawa, Japan
- ⑤ 神原淳, 茂田正哉, 石島達夫, 村松壽晴, 田中康規, 重相構造プラズマの基礎と応用技術展開, 電気学会プラズマ研究会 PST-14-040, 2014.9(6pp), 大阪府大阪市
- ⑥ 中川拓也, 中野智之, 村井康佑, 田中康規, 上杉喜彦, 石島達夫, ポリマー溶発アーク内におけるポリアミドスポレーション粒子の飛翔解析モデルの構築, 平成 26 年電気関係学会北陸支部連合大会 A6, 2014.9, 富山県富山市
- ⑦ 中野智之, 田中康規, 上杉喜彦, 石島達夫, 後藤洋介, 堀邊英夫, 添加剤混練ポリアミドに照射する Ar 熱プラズマへの O₂ 混入によるスポレーション発生促進, 電気学会放電・開閉保護・静止器合同研究会 ED-14-071, SA-14-058, SP-14-027, 2014.6(6pp), 石川県金沢市
- ⑧ 中野智之, 石田昌弘, 田中康規, 上杉喜彦, 石島達夫, 後藤洋介, 堀邊英夫, フタル酸エステル混練によるポリアミドからのスポレーション発生, 平成 26 年電気学会全国大会 6-291, 2014.3, 愛媛県松山市
- ⑨ 中野智之, 石田昌弘, 田中康規, 上杉喜彦, 石島達夫, 後藤洋介, 堀邊英夫, 可塑剤添加によるポリアミド材からのスポレーション粒子発生促進効果, 平成 25 年電気関係学会北陸連合大会 A1-24, 2013.9, 石川県金沢市
- ⑩ 中野智之, 新清直樹, 石田昌弘, 田中康規, 上杉喜彦, 石島達夫, 吸水ポリアミドからのスポレーション粒子混入による気中アーク冷却効果の基礎的検討, 電気学会放電・静止器・開閉保護合同研究会 ED-13-067, SA-13-040, SP-13-012, pp.17-22, 2013.6, 沖縄県那覇市

6. 研究組織

(1)研究代表者

田中康規 (TANAKA YASUNORI)
金沢大学・電子情報学系・教授
研究者番号 : 90303263

(2)研究分担者

上杉喜彦 (UESUGI YOSHIHIKO)

金沢大学・電子情報学系・教授

研究者番号 : 90213339

石島達夫(ISHIJIMA TATSUO)

金沢大学・サステナブルエネルギー研究
センター・准教授

研究者番号 : 00324450

堀邊英夫(HORIBE HIDEO)

大阪市立大学・工学研究科・教授

研究者番号 : 00372243