

科学研究費助成事業（学術研究助成基金助成金）研究成果報告書

平成25年 4月29日現在

機関番号：13301

研究種目：挑戦的萌芽研究

研究期間：2010～2012

課題番号：23656194

研究課題名（和文）ナノ・マイクロ/スプレーシオンポリマ粒子分散系による大電流アーク遮断の新技術創出

研究課題名（英文）New technology for high-current interruption using polymer nano- and micro-particles dispersed medium

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

研究成果の概要（和文）：

遮断器内アーク放電減衰の基礎研究を目的として、ナノ・マイクロサイズのポリマー粒子をアークに混入させ、アークを減衰させる新技術の検討を行った。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プレーシオン現象が生じる。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。スプレーシオン現象発生条件を検討し、ポリアミドへの吸水量と関係することがわかった。

研究成果の概要（英文）：

A new technique for high-current interruption has been fundamentally studied using polymer nano- and micro-particles dispersed medium. The arc plasma in a circuit breaker contacts the polymer materials which is installed for insulation, which results in polymer ablation. In addition to this, polyamide materials eject spallation micro-sized particles, which can penetrate the arc deeply. The present work investigated conditions of spallation occurrence.

交付決定額

（金額単位：円）

	直接経費	間接経費	合 計
交付決定額	3,100,000	930,000	4,030,000

研究分野：電力・電気機器

科研費の分科・細目：電気電子工学・電力工学・電力変換・電気機器

キーワード：アーク、電力用遮断器、ポリマー、アブレーション、ナノ粒子

1. 研究開始当初の背景

現在の高度情報化社会を支えるのは、紛れもなく高品質・高信頼性の大規模電気エネルギー供給である。この超高圧送電においては事故時に流れる短絡電流は 80 kA 近くにも達する。電力用遮断器はこの大電流を高速に確実に遮断するという責務を課されている。事故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。一方特に経済発展著しい中国では交流 1000 kV 送電(UHV 送電)、直流±80kV の導入が予定

され、さらなる大電流遮断技術が必要課題である。我が国では 1990 年代に UHV 送電に向けて技術開発が行われたが基本的には 500kV での技術延長で行っている。また一方で地球温暖化の観点から大電流遮断技術においても環境低負荷化が課題となっている。現在、電力用遮断器は SF₆ 吹付け形が主流であるが、SF₆ は温室効果が CO₂ の 23900 倍(100 年換算)と極めて高く、気候変動枠組み条約締結国 COP 会議において排出削減ガスに指定された。このため、政治レベルで SF₆ 使用制限が発せられる可能性もある。したがって、SF₆ に替わる消弧媒

体や新概念を導入した遮断方式の実現が、現場で切望されている。しかし新たな代替ガス技術は見出されていない。

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。これまでにダブルフロー型、自力消弧型などが開発され、我が国メーカーはコンパクトで 500 kV-63kA を一点で遮断する世界トップ技術を確認している。しかし、我が国の各メーカーともその後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も必要である。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・マイクロポリマ/スポレーション粒子混合によるプラズマクエンチング研究を提案する。

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。

研究代表者はこれまでに「ナノポリマによるプラズマクエンチング（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[H21 挑戦的萌芽研究]。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

本研究においてはまず、おもに 15kW 級誘導プラズマ装置を用い、ポリマーに熱プラズマ・アークプラズマを接触させた場合の現象を基礎実験的に検討することである。具体的にはポリマー試料をプラズマトーチの下流に固定し、そこに熱プラズマを照射する。このとき、特定のポリマー（ここではポリアミド樹脂）の場合には、ポリマー表面から粒子が飛び出すスポレーション粒子が飛翔することを見出している。この粒子が破碎し飛び出す現象をスポレーション現象という。このようなスポレーション現象がどのようなメカニズムで発生するのか、どのような物理量

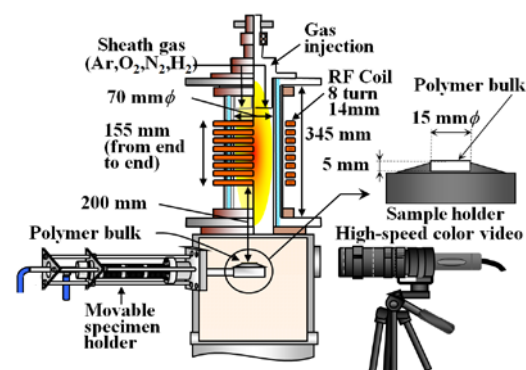


Fig.1 プラズマトーチおよび観測システム

と関係するのかを検討する。スポレーション粒子の飛翔の様子をカラー高速度ビデオカメラで撮影し、その飛翔頻度の各条件依存性を検討した。さらにポリマー蒸発をスペクトル観測することにより、その組成状態・温度などの物理量を把握した。

Fig.1 に、本実験に使用した熱プラズマトーチと反応容器、観測システムを示す。トーチは、内径 70 mm、外径 95 mm、長さ 330 mm の円筒型石英管の二重管構造となっている。内管と外管の間に水を流すことにより石英管を冷却している。シースガスとして Ar をプラズマトーチの上端から内管内壁に沿って流している。このプラズマトーチには 8 ターンの誘導コイルが巻いてあり、コイル電流により軸方向交番磁界を発生させ、周回方向に電場をトーチ内に誘導する。これによってトーチ内の電子を加速させて、ガスを励起・電離させ、熱プラズマを発生・維持させている。一方、トーチ下流部には反応容器を取り付けている。ポリマー材照射実験はコイル下 200 mm の位置にサンプルホルダーを取り付けて行う。このホルダーは水冷されており、プラズマによる熱に耐える仕様になっている。このホルダーは伸縮性があり、径方向位置を調整できる。したがって、プラズマへの入力電力、ガス流量、圧力等の実験条件を実現した後にバルク材への照射を開始することができる。このホルダーの対面には観測窓が取り付けられており、ここから分光観測や高速度カラービデオカメラによる観測を行った。

実験条件はプラズマへの入力電力 8.54 kW、チャンバー内圧力 760 Torr, Ar シースガス 30 slpm とした。ポリマーバルク材の形状は、直径 15 mm、厚さ 5 mm の円柱形である。高速度ビデオカメラの撮影条件は、フレームレート 1000 fps としている。分光観測における焦点位置は、バルク材径方向中心、ポリマー表面から 1.25 mm である。

4. 研究成果

(1)高速度カラービデオカメラによるスポレ

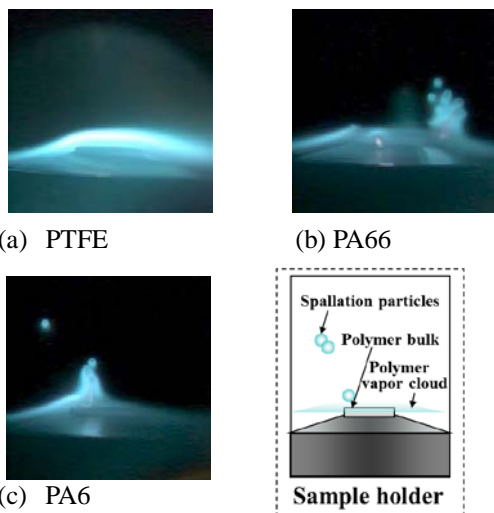


Fig.2 Ar 誘導熱プラズマ照射時におけるポリマー溶発の様子

ーシオン粒子の観測

各ポリマー材料へ Ar 誘導熱プラズマを照射した時の溶発の様相を、高速度カラービデオカメラを用いて撮影した。Fig.2 に、その撮影結果を示す。同図より、各ポリマーバルク材の表面上約 0.5 mm において、ポリマー溶発蒸気の雲がバルク材を覆うように生成していることがわかる。また、溶発蒸気から青色の発光が強く観測されている。一方、ナイロン系ポリマー材料 PA66 においては、ポリマーバルク材表面上の溶発蒸気雲の形成に加え、バルク材表面の端から微粒子の放出する様子が観測できる。この微粒子は溶発蒸気と同様に、青色の光を発生しながら飛翔している。この微粒子は、ポリマー表面の機械的損耗によって放出したスポレーション粒子と考えられる。ポリマー表面の端から間歇的に放出され、その初速度は、撮影結果から見積もり平均して約 2.5 m/s であった。このようにポリマー粒子が飛翔するスポレーション現象を確認でき、その飛翔速さ、飛翔高さなどを見積もることができた。

(2) 分光観測結果

Ar 誘導熱プラズマ照射時に、ポリマーバルク材の表面上約 0.5 mm では、ポリマー溶発蒸気による雲が観測された。そこで、溶発蒸気雲の構成分子を調べるため、バルク材表面上 1.25 mm に焦点を合わせ分光観測を行った。Fig.3 および 4 に、ポリマーバルク材を PTFE および PA66 とした場合の分光観測結果を示す。同図から、両材料において、波長 700.850 nm では Ar 原子スペクトル、波長 470.570 nm では C_2 分子の Swan 系バンドスペクトル ($d^3\Pi_g \rightarrow a^3\Pi_u$) が観測されていることがわかる。この C_2 分子は溶発したポリマーの組成に含まれるものである。Ar 誘導熱

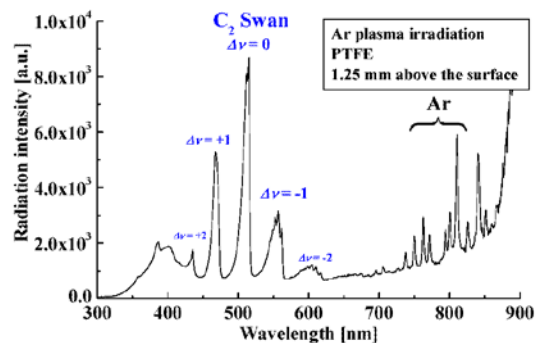


Fig.3 熱プラズマを照射した PTFE 材上方 1.25 mm における分光スペクトル

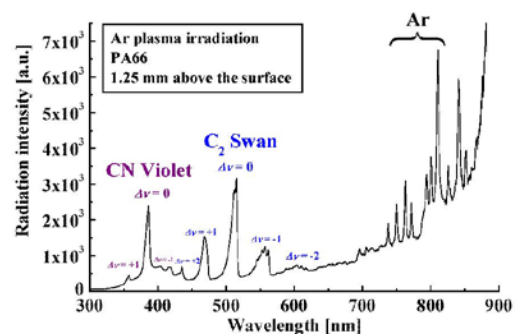


Fig.4 熱プラズマを照射した PA66 材上方 1.25 mm における分光スペクトル

プラズマ照射時に観測された青色の発光はおもにこの C_2 分子スペクトルからのものである。組成に N を含む PA66 においては、波長 360.460 nm において CN 分子の Violet 系バンドスペクトル ($B^2\Sigma^+ \rightarrow X^2\Sigma^+$) も観測されている。本スペクトル観測により、明らかに溶発蒸気が放出されていること、その主な成分がポリマー構成粒子から分子で構成されていることが明らかになった。またスポレーション粒子が飛翔する際にはその周囲にポリマー溶発蒸気が観測でき、粒子が飛翔しながら溶発できることを確認した。このことは、アーク遮断に応用する際に、アーク内部にまで入り込みそこで溶発することが可能であることを示しており、アーク温度減衰に効果的である可能性がある。

(3) ナイロン系材料の吸水性がスポレーションに及ぼす影響

① ナイロン系材料の吸水性

前章では、各種ポリマー材料と熱プラズマとの相互作用について検討した。ナイロン材料 PA66 および PA6 においては、スポレーション現象が観測された。ナイロン材 PA66 および PA6 は、分子鎖にアミド基を持つために親水性であり、

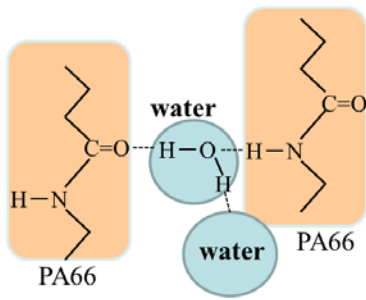


Fig.5 アミド基と水素結合による水分子の捕捉

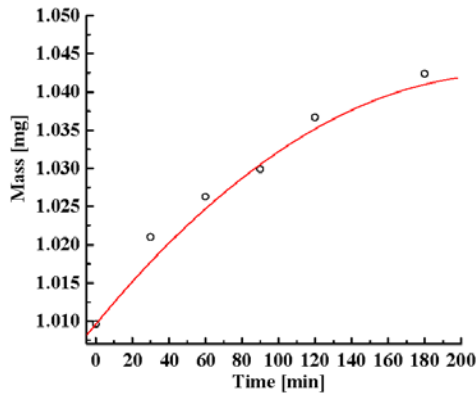
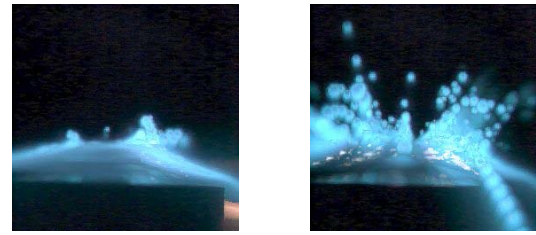


Fig.6 煮沸処理による PA66 材の質量の時間変化

他のポリマー材料と比較して高い吸水性を持つことが一般的に知られている。これは、水分子が直接アミド基と水素結合を形成するためである。Fig.5に、アミド基と水分子と水素結合することが可能な状態を模式的に示した。このナイロン材料内部に含まれる水は、熱プラズマ照射によって熱され蒸発する。ポリマー材料内部の水の急な蒸発によって、その内部圧力が高まる。これによって材料表面の一部がその圧力によって内部から破壊される。この機構によってスポレーション粒子は生成されたと推論した。したがって、スポレーション現象はナイロン系材料の高い吸水性が関係すると思われる。

②吸水ナイロン材の加工

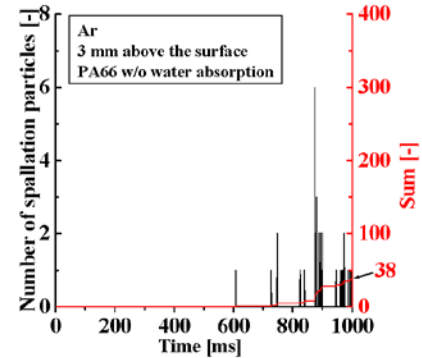
ナイロン材の吸水性がスポレーション現象に及ぼす影響を検討するために、2種類のナイロン材料 PA66 を用意した。一つは無吸水ナイロン材 PA66, もう一つは吸水加工を施したものである。まず二つの材料は、シリカゲルを使ったデシケータ内にて2週間十分に乾燥させる。その後、一つは沸騰した純水中で3時間吸水させた。Fig.6に、煮沸吸水によるナイロン材 PA66 の質量の時間変化を示す。同図から、3時間の煮沸によって約 3%の吸水率増加が得られた。



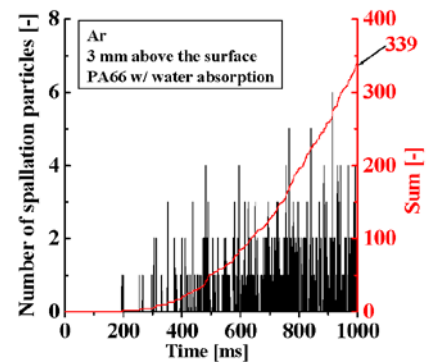
(a) 無吸水 PA66

(b) 吸水 PA66

Fig.7 吸水および無吸水 PA66 への熱プラズマ照射時の様相



(a) 無吸水 PA66



(b) 吸水 PA66

Fig.8 吸水および無吸水 PA66 への熱プラズマ照射時のスポレーション粒子飛翔頻度

(4)ナイロン材で観測されたスポレーション現象の画像解析

前節で説明した吸水および無吸水 PA66 材料に、Ar 誘導熱プラズマを直接照射した。熱プラズマ照射時の溶発ガスの分布やスポレーション粒子の挙動は、高速度ビデオカメラを用いて撮影した。撮影フレームレートは 1000 fps である。Fig.7(a) および (b)に、吸水 PA66 および無吸水 PA66 へ熱プラズマを照射した時の溶発の様相を示す。同図は、熱プラズマ照射開始後 900 ms から 1000 ms の間の 100 枚の撮影画像において、各ピクセルでの輝度の最大値をとったものである。無吸水 PA66 では溶発ガスの分布が観測できるが、材料から飛翔するスポレーション粒子はほとんど観測されなかった。一方吸水 PA66 においては、溶発ガスの分布だけでなく、多くの

スポレーション粒子が間歇的に飛翔する様相が観測された。この吸水 PA66 で観測されたスポレーション粒子は、プラズマトーチからバルク材料方向への Ar ガスの流れに逆らって、バルク材料表面から 25 mm 以上上部へと飛翔していた。この結果より、スポレーション粒子は分布している溶発蒸気の雲より熱プラズマ内部に深く侵入することができ、侵入した粒子は熱プラズマ中心に溶発ガスを供給できると考えられる。

次に、熱プラズマ照射時に吸水 PA66 および無吸水 PA66 から飛翔したスポレーション粒子数を見積もった。Fig.8(a)および(b)に、1 秒間の Ar 熱プラズマ照射によって材料表面から飛翔したスポレーション粒子数を示す。またこれらの図には、各時刻までに飛翔した粒子の数を積算した値も示しており、右縦軸が対応する。Fig.8(a)の無吸水 PA66 では、熱プラズマを照射後 600 ms からスポレーション粒子が逐次観測された。1 秒間において粒子が飛翔した総数は、約 40 個と少ない。一方 Fig.8(b)の吸水 PA66 では、熱プラズマ照射後 200 ms から頻繁に粒子の飛翔を観測できた。この場合の 1 秒間における粒子が飛翔した総数は、約 340 個と多い。これらの結果の比較から、ナイロン材 PA66 の吸水はスポレーション現象を促進させていることが明白である。

(5) 結果まとめ

本研究では、遮断器アークの減衰を行う新技術として、ポリマーの粒子をアークに投入し、そこでポリマーを溶発（アブレーション）させることで、より効率よくアークを減衰させる手法について考案し検討した。

遮断器内においては、大電流遮断時においてアーク放電が生じそれを通じて大電流が流れ続ける。このアークを減衰させることで初めて、大電流が遮断できる。アークはしばしば電気絶縁ポリマーと接触し溶発を引き起こす。この溶発ガスをアーク減衰に積極的に利用することが検討されている。一方、筆者らはポリアミドの場合には溶発ガスだけでなく粒子が飛翔するスポレーション現象が生じることを見出した。このスポレーション粒子は質量が大きく、溶発ガスより深くアークに侵入しそこで溶発を生じればアークを減衰できる。

本研究においてはアークの代わりに誘導熱プラズマを用い、ポリマー材料間の熱的相互作用について検討した。ナイロン材 PA66 および PA6 においては溶発現象だけでなくスポレーション現象が観測できることがわかった。ナイロン材の場合にスポレーションが生じる原因として調査したところ、ナイロンは吸水性が高い樹脂であることがわかった。そこでナイロン材の吸水性とスポレーシ

ョン現象との関係性を検討した。その結果、ナイロン材に吸水させることで、スポレーション粒子発現を促進されることがわかった。このことはスポレーション発現に吸水した水分子が関わっていることを示している。

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 Y.Tanaka, N.Shinsei, Y.Uesugi, J.Wada, S.Okabe, Generation of spallation particles from polyamide materials with water irradiated by thermal plasmas, Proc. 19th Int.Conf. Gas Discharges & their Appl., GD2012, pp.210-213, 2012.9, Beijing, China, (published in High voltage Engineering, vol.38, Supplement, 2012)
- ② Y.Tanaka, N.Shinsei, K. Amitani, Y. Uesugi, J. Wada, S. Okabe, Spallation particle ejection from polymer surface irradiated by thermal plasmas, IEEE Trans. Plasma Sci., Vol.39, No.11, pp.2776-2777, 2011.11

〔学会発表〕（計 8 件）

- ① 中野智之, 新清直樹, 石田昌弘, 田中康規, 上杉喜彦, 石島達夫, N2 および O2 を混合した熱プラズマを照射した吸水ナイロン材からのスポレーション粒子飛翔数, 平成 25 年電気学会全国大会 No.6-185, 2013.3
- ② N.Shinsei, M.Ishida, Y.Tanaka, Y.Uesugi, T.Ishijima, Ejection frequency of spallation particles from polyamide materials with water absorption irradiated by Ar thermal plasma with molecular gases, Joint Conference of IWHV2012 & JK 2012 on ED&HVE, ED-12-122, SP-12-050, HV-12-053, 2012.11
- ③ 新清直樹, 石田昌弘, 中野智之, 田中康規, 上杉喜彦, 吸水ナイロン材からのスポレーション粒子飛翔頻度の熱プラズマ照射熱流束依存性, 電気関係学会北陸支部連合大会, 2012 年 9 月, 富山.
- ④ Y.Tanaka, N.Shinsei, M.Ishida, Y.Uesugi, J. Wada and S. Okabe, Dynamic behaviors of spallation particles from polymers during irradiation of Ar thermal plasmas, 12th Workshop on Fine Particle Plasmas, 2011.11, Toki, Japan,
- ⑤ N.Shinsei, M.Ishida, Y.Tanaka, Y.Uesugi, J.Wada, S.Okabe, Ejection frequency of

spallation particles from polymers during irradiation of Ar thermal plasmas with different molecular gases., Plasma conference 2011 (PLASMA2011), 22P084-R, 2011.11

- ⑥ N.Shinsei, Y.Tanaka, Y.Uesugi, J.Wada, S.Okabe, Numerical simulation on dynamics of spallation particles ejected from polyamide materials during irradiation of Ar thermal plasma, Proc. the First Int. Conf. Electric Power Equip. Switching Technol., ICEPE2011, pp.555-558, 2011.10, Xi'an, China
- ⑦ 新清直樹, 田中康規, 上杉喜彦, 和田純一, 岡部成光, N₂あるいはO₂混合 Ar 熱プラズマ照射時におけるナイロン系ポリマー材料溶発とスポレーション粒子飛翔の観測, 電気学会電力エネルギー部門大会, No.291, 2011.9

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