

## 科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 26 年 6 月 18 日現在

機関番号：32678

研究種目：基盤研究(C)

研究期間：2011～2013

課題番号：23560341

研究課題名(和文)超高速分光計測を用いた酸化膜除去過程の解明

研究課題名(英文)Elucidation of Removal Process of Oxide Layer using High Speed Spectroscopic Measurement

研究代表者

岩尾 徹(IWAO, TORU)

東京都市大学・工学部・准教授

研究者番号：80386359

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,000,000円、(間接経費) 900,000円

研究成果の概要(和文)：本研究代表者が独自に開発したビームスプリッターとバンドパスフィルタを用いた2次元の計測が可能な超高速分光計測システム、並びに、PIPアルゴリズムを用いて、真空アーク陰極点の酸化膜除去過程の解明を行った。真空アーク陰極点の除去過程を解明することによって、本研究から真空アーク陰極点による超高速酸化膜除去手法の開発の知見を得ることができる。結果として、酸化膜蒸発除去には、酸化膜を蒸発除去させるための時間が必要であり、この時間は、酸化膜やバルクの比熱や熱伝導率に依存すること、つまり、アークの維持や移動には、滞在時間(体積除去速度や移動速度)の最適値による蒸発量の制御が必要となることがわかった。

研究成果の概要(英文)：The removal process of oxide layer in the vacuum arc using high speed spectroscopic measurement was elucidated by using the 2D high speed spectroscopic measurement system with beam splitter and band path filter and plasma image processing developed by this research representative. It is expected that the method of high speed oxide layer removal is obtained from this elucidation. Concretely, the removal process such as stagnation time, track, and species of vapor at oxide layer removal is elucidated with the above method, and then, the condition for fast oxide layer removal is elucidated. As a result, it takes a time for removing the oxide layer, and this time depends on the specific heat and thermal conductivity. Thus, the appropriate vapor amount value of stagnation time is important to maintain and move the vacuum arc. This technology with the knowledge for development of method of high speed removal process of oxide layer will be applied for the social needs of 3R.

研究分野：工学

科研費の分科・細目：電気電子工学・電力工学・電力変換・電力機器

キーワード：真空アーク 陰極点 超高速分光計測 蒸発除去 表面クリーニング 伝熱シミュレーション 滞在時間 移動軌跡

### 1. 研究開始当初の背景

国内外において、東京電機大学の柳父教授や琉球大学の金子教授、Humboldt UniversityのBurkhard Juttner氏[1]らによって真空遮断器に関わる真空アークの物理的特性に関する研究がされている。また100 Pa程度の真空アーク陰極点による酸化膜除去に関しては中央大学の稲葉教授や秋田県立大学の武田教授、電力中央研究所の足立氏らによってその応用の観点から研究[2][3][4]がされている。これら研究においては、酸化膜を除去する理由として、酸化膜がバルクより仕事関数が低いという点から酸化膜上に陰極点が発生するモデルが提案され、このことから、現在まで、陰極点は、酸化膜を除去中にジャンプして離れた酸化膜上につくと考えられてきた。過去の研究においては、1,000 frame/sの高速ビデオカメラや従来のPIPアルゴリズム(Plasma Image Processing: プラズマに特化した画像処理アルゴリズム)では、陰極点の移動を的確に把握することができず、陰極点が「飛ぶ」という結果が得られ、国内外の論文ではこの現象について「Jump」という表現が多用されてきた。しかし、酸化膜は絶縁物であり、本研究で対象とする雰囲気気圧100 Pa、電流数十A、電圧数十Vでは、陰極点から離れた絶縁物上から新しく放電を開始するのに必要な電子の供給、増殖が起きるとは考えられないため、陰極点はジャンプしないのではないかという疑問が生じた。

このような研究動向を踏まえ、本格的な真空アークの応用を図るためには、酸化膜除去時の陰極点の滞在時間、挙動軌跡、除去時の蒸発粒子の特定による除去過程の解明が不可欠と考えた。この理由は、本研究代表者が2006, 07年に報告[5]しているように、陰極点の滞在時間、挙動軌跡、分裂、移動速度は、除去する表面の表面粗さを変化させるためである。具体的には、2006~2007年は真空アーク発生電極とPIPアルゴリズムを開発し、通常のビデオカメラや1,000 frame/sの高速ビデオカメラを用いて、陰極点を用いた酸化膜処理において陰極点の移動速度の算出、処理時間と粗さの特性解明、母体材料への熱伝導の計算を行ってきた。さらに、2008~2010年に、科研費の若手研究(B)により、30,000 frame/sでの撮影と挙動軌跡の解析を行った。具体的には、PIPアルゴリズム[6]によって、陰極点は時間と共に連続的に移動することが分かった。また、このことがアーク電圧にも現れ、アーク内に酸化膜蒸気が混入するために、圧力や導電率が変化することが示唆された。これは、酸化膜蒸気が陰極点に混入することにより、アーク内部の粒子密度や電子・イオン密度が増加し、アークが維持されるため、陰極点が酸化膜を優先的に除去するためと考えたことによる。したがって、陰極点による酸化膜除去過程は、陰極点が酸化膜に接触することによる蒸発が主要因と考えた。

以上のことから、陰極点は陰極表面をジャンプすることなく連続して移動し、酸化膜とバルクとの境界につきながら除去を行うことが明らかとなった。しかし、酸化膜除去過程の解明には、酸化膜の蒸発過程を明らかにすることが不可欠であり、このためには分光学的解明が必要である。しかし、超高速で移動する陰極点を分光器で測定することは困難であるため、陰極点の移動の制御と超高速現象を計測できる分光計測システムを用いることが必要となる。そこで、本研究では、本研究代表者が独自に開発している超高速ビデオカメラと分光器を組み合わせた超高速分光計測システムと、PIPアルゴリズムによる画像処理手法、及び、伝熱シミュレーションを用いて、滞在時間、挙動軌跡、酸化膜除去時の蒸発粒子の特定などの処理過程を解明し、その結果を基に酸化膜除去の高速化のための条件を解明する。

### 2. 研究の目的

本研究は、本研究代表者が独自に開発したビームスプリッターとバンドパスフィルタを用いた2次元の計測が可能な超高速分光計測システム、PIPアルゴリズムによる画像処理、並びに、伝熱シミュレーションを用いて、真空アーク陰極点の酸化膜除去過程の解明を行う。真空アーク陰極点の除去過程を解明することによって、本研究から真空アーク陰極点による超高速酸化膜除去手法の開発の知見を得ることができる。具体的には、上述した手法を用いて、滞在時間、挙動軌跡、酸化膜除去時の蒸発粒子の特定などの除去過程を解明し、その結果を基に酸化膜除去の高速化のための条件を解明する。以上より、超高速酸化膜除去手法の開発への大きな知見が得られることから、今後の社会ニーズである3R(Reduce, Reuse, Recycle)への応用が可能である。

### 3. 研究の方法

本研究は、本研究代表者が独自に開発したビームスプリッターとバンドパスフィルタを用いた2次元の計測が可能な超高速分光計測システム、PIPアルゴリズムによる画像処理、並びに、伝熱シミュレーションを用いて、陰極点により酸化膜が除去される時の、滞在時間、挙動軌跡、酸化膜除去時の蒸発粒子の特定などの計測を行った。陰極点は、酸化膜付きSS400試験片を陰極として、圧力100 Pa、電流12 Aにおいて発生させた。

なお、本研究では、「超高速分光計測システムの改良」、「酸化膜厚さ変化時の酸化膜蒸発除去と電圧の解明」、「酸化膜蒸発除去時のエネルギーと除去過程の解明」と3つのサブテーマを設けて、検討を行った。

#### (1) 超高速分光計測システムの改良

超高速ビデオカメラと分光器を組み合わせて独自に開発した1次元の計測が可能な

超高速分光計測システムや、超高速ビデオカメラ単体を用いた予備実験を行い、焦点、位置分解能、アークのゆらぎに関し実験を行った。また、この成果を基に多点分光システムの検討を行った。また、スペクトルの電子データ化には画像処理を用いるため、このアルゴリズムの精度の向上のための検討も行った。

#### (2) 酸化膜厚さ変化時の酸化膜蒸発除去と電圧の解明

酸化膜厚さ変化時の酸化膜蒸発除去と電圧の解明として、酸化膜の厚さを変化させた際の陰極点の挙動軌跡の解析を行った。陰極点が移動する際、酸化膜の厚さによって変化する単位時間当たりの酸化膜の蒸発した面積によって、陰極点の挙動が変化すると共に電圧が変化し、陰極点の維持やエネルギーバランスが左右されると考えられるため、この解明を行った。この際、蒸発粒子の特定に関しては、本研究代表者が独自に開発したビームスプリッターとバンドパスフィルタを用いた2次元の計測が可能な超高速分光計測システムにより計測した。さらに、陰極点の酸化膜への伝熱により、酸化膜やバルクの蒸発が生じると考え、この現象のシミュレーションを行った。

#### (3) 酸化膜蒸発除去時のエネルギーと除去過程の解明

陰極点が酸化膜蒸発除去をする際、陰極点が酸化膜とバルクの境界につきながら酸化膜を蒸発[2][3]させたり、陰極点が酸化膜から離れ、バルク上に存在したりすることがあるため、この時の酸化膜への伝熱や蒸発のエネルギーの推定と除去過程の解明を図った。具体的には、本研究代表者が独自に開発したビームスプリッターとバンドパスフィルタを用いた2次元の計測が可能な超高速分光計測システム、並びに、新たに導入した電圧と電流の高速計測システムを用いることにより、位置の特定や酸化膜蒸発除去時のスペクトル、並びに、高速な電圧と電流のデータ取得を行った。この際、特定の波長を2次元で計測したデータと、その時の電圧と電流を同期し、比較検討を行った。また、これらの実験結果を基に、酸化膜とバルクの伝熱シミュレーションを行い、酸化膜蒸発除去過程のモデル化を行うと共に、この過程の物理的機構に関し検討と考察を行った。特に、陰極点のエネルギー密度と蒸発除去過程との相関を実験と理論の両面で検討し、物理的かつ定量的な除去過程の解明を図った。

### 4. 研究成果

#### (1) 超高速分光計測システムの改良

超高速ビデオカメラと分光器を組み合わせ独自に開発した1次元の計測が可能な超高速分光計測システムや、超高速ビデオカメラ単体を用いた予備実験を行い、焦点、位

置分解能、アークのゆらぎに関する知見を得た。結果として、焦点、位置分解能、アークの揺らぎは、滞在時間、挙動軌跡、酸化膜除去時の蒸発粒子の特定に対し、問題がないことがわかった。具体的には、電源のリップルにより、真空アークの輝度が変化したり、分裂をしたりすることに寄与している可能性が示唆されるデータを得た。また、広がりを持つ真空アークの放射を分光器で取り込むための実験方法について検討し、実験の方向性を見出すことができた。さらに、高速分光を行う際の同期計測システムの構築や、精度良いスペクトルの計測と画像処理手法の開発を行い、高速に輝度が変化するスペクトルに関し、スペクトルの同定や温度の算出などを行うことを可能とした。ただし、1次元のみの計測では、酸化膜蒸発時の蒸発粒子を計測することが困難であるため、新しい計測手法の検討を行った。

#### (2) 酸化膜厚さ変化時の酸化膜蒸発除去と電圧の解明

真空アーク陰極点は高速に動き回る性質があるため、酸化膜蒸発時の蒸発粒子を計測することは極めて難しい。このため、超高速ビデオカメラ、ビームスプリッター、バンドパスフィルタを組み合わせ独自に開発した2次元の計測が可能な超高速分光計測システムを開発した。

結果として、酸化膜の厚さを変化させた際の陰極点の挙動軌跡の解析が可能となった。特に、酸化膜の蒸発除去には、酸化膜とバルクの境界における酸化膜蒸発、酸化膜とバルクの境界における停滞、分裂と消滅、バルク蒸発の、4つの移動形態(モード)があることが判明した(図2~4)。また、酸化膜を蒸発除去している時における、陰極点の移動速度(図5, 6)、体積除去速度(図7)、除去時の酸化膜の蒸発粒子の特定(図3, 5, 6)を容易に行うことが可能となった。

特に、ビームスプリッターにより、2波長の光を2次元で同時計測することが可能となった。このことから、従来、検討が難しかった、蒸発除去時のスペクトルを特定することができるようになったため、除去過程の解明に向け、大変大きな一歩となった。

なお、電源による電圧のリップルに関しては、新規の電源の導入により改善され、精度良い電圧計測が可能となった。

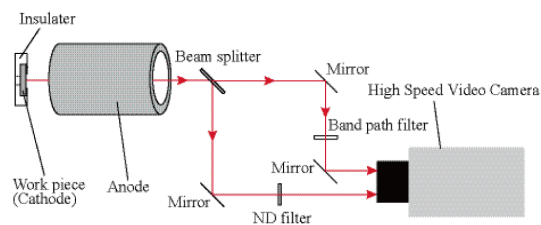


図1 ビームスプリッターによる分光計測[7]

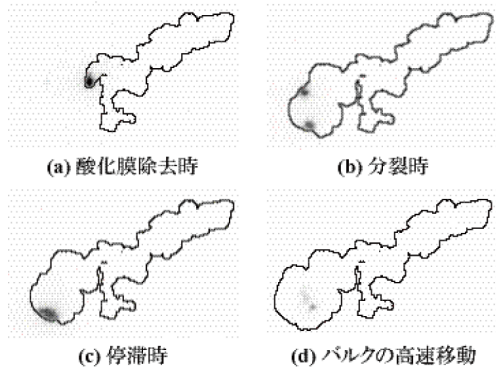


図2 陰極点の4つの移動形態（モード）[7]

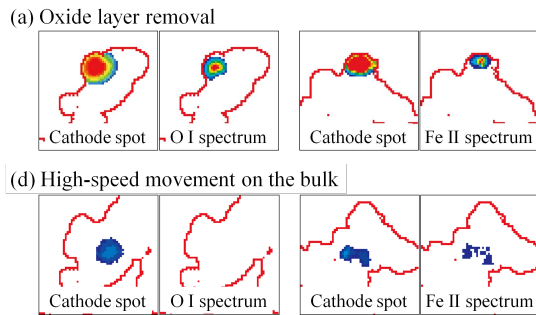


図3 酸化膜蒸発時のスペクトル

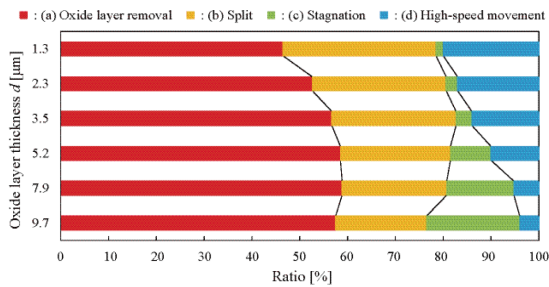


図4 酸化膜厚さが及ぼす陰極点の分類[7]

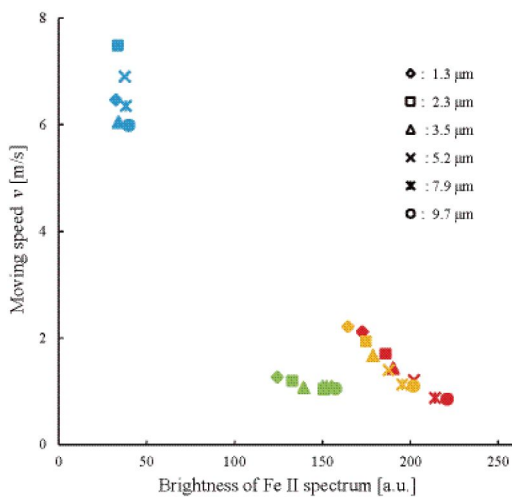


図5 酸化膜厚さ変化時の陰極点の移動速度とFe II スペクトル[7]

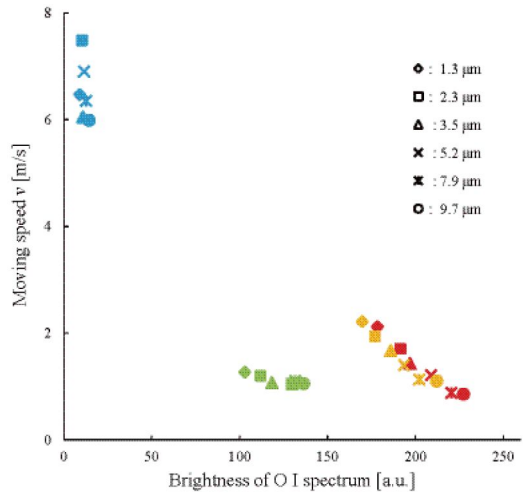


図6 酸化膜厚さ変化時の陰極点の移動速度とO I スペクトル[7]

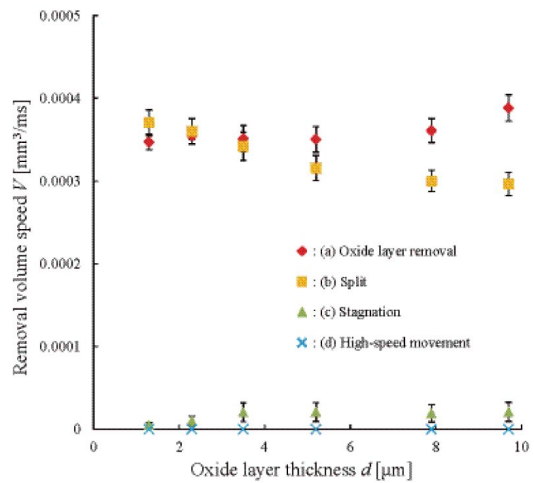


図7 酸化膜厚さが及ぼす体積除去速度

### (3) 酸化膜蒸発除去時のエネルギーと除去過程の解明

本研究代表者が独自に開発したビームスプリッターとバンドパスフィルタを用いた2次元の計測が可能な超高速分光計測システム、並びに、新たに導入した電圧と電流の高速計測システムを用いることにより、酸化膜除去時のエネルギーを推定することができた(図8)。これらの実験結果を基に、酸化膜とバルクの伝熱シミュレーションを行った結果、酸化膜やバルクの蒸発は材料の比熱に大きく依存し、酸化膜やバルクの温度分布は熱伝導率に依存することが分かった(図9)。図8、9の検討を基に、体積除去速度と移動速度の実験結果(図10)を検討すると、酸化膜は、陰極点の高速な移動速度(滞在時間)で除去可能であることがわかり、陰極点の維持には適切な蒸気量の供給が必要であることを確認した。このことから、陰極点のエネルギー密度と蒸発除去過程との相関を実験と理論の両面で検討し、物理的かつ定量的な除去過程の解明を図ることができた。

また、上述した結果を基に、酸化膜蒸発除去過程のモデル化を行うことができた。具体



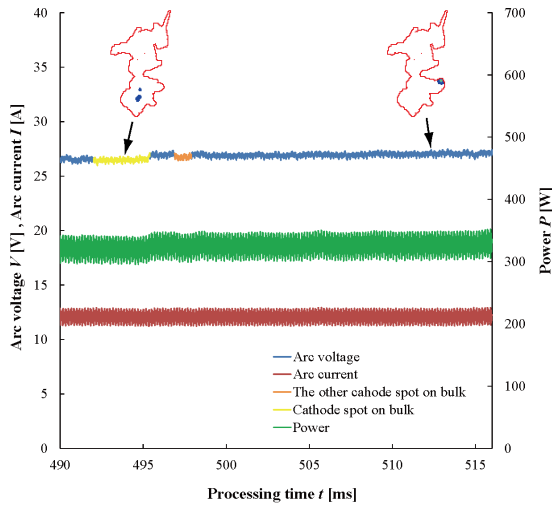


図 8 真空アーク陰極点の電圧，電流，電力

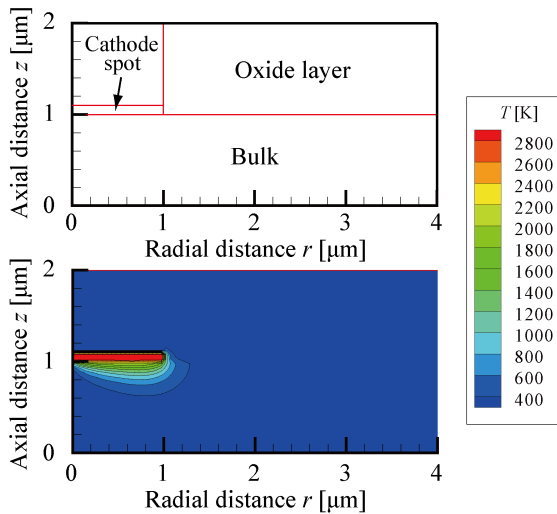


図 9 酸化膜除去時の伝熱シミュレーション

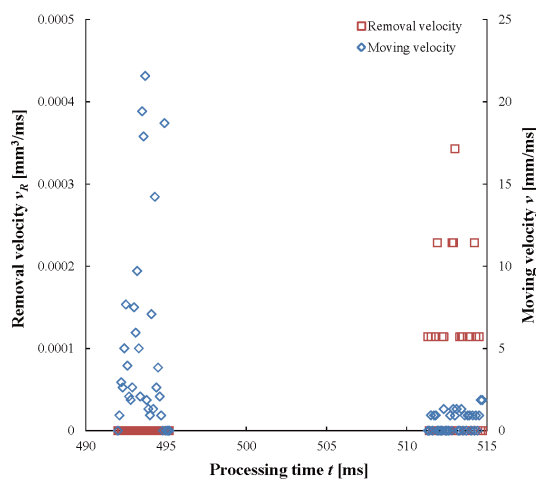


図 10 体積除去速度と移動速度

的なモデルは，以下の通りである。陰極点はまず，導電性のあるバルク上に発弧する。そして，陰極上の酸化膜との境界面に接すると，付近の酸化膜とバルクを蒸発する。この時，

酸化膜は局所的に温度が上昇するが，バルクは高温になりにくい。これは，バルクが酸化膜よりも比熱と熱伝導率が高いため，温度上昇のためにより多くのエネルギーを必要とし，かつ，内部で熱が拡散し冷却されやすいためである。

このモデルより酸化膜蒸発除去の高速化のための条件を考えると，酸化膜蒸発除去には，酸化膜を蒸発除去させるための時間が必要であり，この時間は，酸化膜やバルクの比熱や熱伝導率に依存することとなる。つまり，アークの維持や移動には，滞在時間（体積除去速度や移動速度）の最適値による蒸発量の制御が必要となる。

以上より，陰極点が酸化膜を蒸発除去するときの4つのモードに関し，この現象を物理的に説明することができた。また，このことにより，本研究代表者が独自に開発したビームスプリッターとバンドパスフィルタを用いた2次元の計測が可能な超高速分光計測システム，PIP アルゴリズムによる画像処理，並びに，伝熱シミュレーションを用いて，滞在時間，挙動軌跡，酸化膜除去時の蒸発粒子の特定によりモデルを構築することで，酸化膜除去の高速化のための条件を解明し，超高速酸化膜除去手法の開発への大きな知見を得ることができた。

なお，本研究で得られた知見は，IEEE や電気学会の研究会や国際会議にて発表し，広く世界に情報発信を行った。

#### <参考文献>

- [1] Burkhard Juttner, J. Phys. D: Appl. Phys., Vol.28, No.3, pp.516-522 (1995).
- [2] 久保祐也, 岩尾徹, 武田紘一, 稲葉次紀, 電気学会論文誌 A, Vol. 122, No. 1, pp.65-71 (2002).
- [3] K.Takeda, and S.Takeuti, MATERIALS TRANSACTIONS, JIM, Vol.138, No.1, pp.636-642 (1997).
- [4] 足立和郎, 天川正士, 古川静枝, 藤原和俊, 神戸弘巳: 電中研報告, W00030 (2001).
- [5] A. Sato, T. Iwao, M. Yumoto, IEEE Transactions on Plasma Science, Vol. 35, pp.1004-1009 (2007).
- [6] S. Kamishima, T. Iwao, M. Yumoto, IEEJ Trans on Electrical and Electronic Engineering, Vol.5, No.6, pp.670-676 (2010).
- [7] 山本真司, 光安枝里子, 岩尾徹, 湯本雅恵, 電気学会 電力・エネルギー部門大会, 査読無, CD-ROM, 2013, pp.27-32

#### 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 0 件)

〔学会発表〕(計 13 件)

Removal Process of Oxide Layer for Cathode Spot Existence in Vacuum Arc, Naoko OGURA, Yosuke NISHI, Yuki SAITO, Toru Iwao, Motoshige YUMOTO, The Fifth International Workshop on Plasma Application and Hybrid Functionally Materials, 査読無, Vol.21, 2012, p.69

Time Variation of Spectrum Emitted from Constant Arc, Yoshihiro SUZUKI, Yuki SAITO, Toru Iwao, Motoshige YUMOTO, The Fifth International Workshop on Plasma Application and Hybrid Functionally Materials, 査読無, Vol.21, 2012, p.60

パルス電流の増加率が及ぼすアーク温度の時間変化, 鈴木祥浩, 岩尾徹, 湯本雅恵, 電気学会 全国大会, 査読無, CD-ROM, 2012, 107

Toru Iwao, Naoko Ogura, Yosuke Minato, Motoshige Yumoto, Cathode Spot Existence and Removal Process for movement of Vacuum Arc Affected by Oxide Layer Thickness, The International Conference on Electrical Engineering 2012, 査読無, CD-ROM, 2012, pp.1490-1493

Shinji Yamamoto, Toru Iwao, Motoshige Yumoto, Removal Process of Cathode Spot of Vacuum Arc with Vapor from Oxide Layer, IWHV & JK2012 The 8th International Workshop on High Voltage Engineering and Japan-Korea Joint Symposium on Electrical Discharge, 査読無, ED-12-154, SP-12-080, HV-12-083, 2012, pp.135-138

岩尾徹, 山本真司, 湯本雅恵, 真空アーク陰極点の酸化膜除去時における O I スペクトルと面積除去速度, 電気学会全国大会, 査読無, CD-ROM, 2013, 78

Toru Iwao, Shinji Yamamoto, Motoshige Yumoto, Removal and Split Movement with Oxygen Spectrum of Cathode Spot of Vacuum Arc with Vapor from Oxide Layer, IEEE Pulsed Power and Plasma Science Conference, 査読無, 2013, 1401

山本真司, 光安枝里子, 岩尾徹, 湯本雅恵, 酸化膜厚さ変化時における真空アーク陰極点への酸化膜蒸気混入が及ぼす酸化膜除去過程の変化, 電気学会 電力・エネルギー部門大会, 査読無, CD-ROM, 2013, pp.27-32

Shinji Yamamoto, Toru Iwao, Motoshige Yumoto, Split Frequency of Vacuum Arc Cathode Spot with Changing Current, 電気学会 放電・静置器・開閉保護合同研究会,

査読無, ED-13-84, SA-13-57, SP-13-29, 2013, pp.97-100

Shinji Yamamoto, Toru Iwao, Motoshige Yumoto, Moving Speed of Vacuum Arc Cathode Spot Mixed with Vapor from Oxide Layer and Metal Surface Affected by Oxide Layer Thickness, International Symposium on Plasma Chemistry 21, 査読無, 2013, 476

Shinji Yamamoto, Toru Iwao, Motoshige Yumoto, Split and Removal Process of Vacuum Arc Cathode Spot with Vapor from Oxide Layer with Changing Current, the 9th International Symposium on Applied Plasma Science, 査読無, 2013, P-I-7

Toru Iwao, Shinji Yamamoto, Motoshige Yumoto, Mean Number of Vacuum Arc Cathode Spot Mixed with Vapor on Oxide Layer and Metal Surface Affected by Oxide Layer Thickness, Annual Meeting of Institute of Applied Plasma Science, 査読無, Vol.23, 2014, pp.111-112

Keita Ogura, Toru Iwao, Motoshige Yumoto, Voltage and Spectrum at Oxide Layer Removal Process in Vacuum Arc Cathode Spot, Annual Meeting of Institute of Applied Plasma Science, 査読無, Vol.23, 2014, p.76

〔図書〕(計 0件)

〔産業財産権〕  
○出願状況(計 0件)

○取得状況(計 0件)

〔その他〕

3/18 発売のフジサンケイビジネスアイの「大学発 次ぎのニッポン～日本を支える研究活動と技術開発～」に、「真空アーク陰極点を用いた酸化膜付金属表面の超高速処理手法の開発」と題した研究紹介が掲載された。

## 6. 研究組織

### (1)研究代表者

岩尾 徹 (Iwao Toru)  
東京都市大学・工学部・准教授  
研究者番号: 23560341

### (2)研究分担者

( )  
研究者番号:

### (3)連携研究者

( )  
研究者番号: