

## 科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 29 年 8 月 25 日現在

機関番号：32678

研究種目：基盤研究(C) (一般)

研究期間：2014～2016

課題番号：26420251

研究課題名(和文) 演色性とランプ効率の向上を目指した水渦冷却型高輝度アークランプの開発

研究課題名(英文) Development of Water-cooled Vortex Type of Wall-stabilized High Intensity Arc Lamp for Improvement of Lamp Efficiency and Color Rendering

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) 3,600,000円

研究成果の概要(和文)：緊急時に用いられる大規模照明では、明るさと演色性が非常に重要である。しかし、高輝度を得るために電流を増加させると、熱損失が増加する。したがって、低電力で放射パワーを増加させることが必要であり、この解決のためには、電流と器壁径を変化させ、温度分布を制御することが必要である。本研究では、小口径水渦流冷却型器壁安定化プラズマアーク発生装置を開発し、実験を行った。また、電磁熱流体シミュレーションによる解析を行った。結果として、器壁径が小さくなるか、入力電力が増加するにつれて、放射パワーが増加した。

研究成果の概要(英文)：For large-scale illumination that is necessary for emergencies, brightness and light color are extremely important. However, the heat loss increases with increasing the current in order to obtain a high intensity. Therefore, it is required that the radiation power increases at the low input power. It is necessary to control the temperature distribution with controlling the current and radius. In this study, the water-cooled vortex type of wall-stabilized high intensity arc lamp for improvement of lamp efficiency and color rendering was developed with experiment and using electromagnetic thermal fluid simulation. As a result, the radiation power increased when the wall diameter decreased or as the input power increased.

研究分野：工学

キーワード：高輝度アークランプ 水渦流冷却 器壁安定化アーク 演色性 ランプ効率

### 1. 研究開始当初の背景

HID (High-Intensity Discharge) ランプは、アークランプの1種であり、ガス中に封入されている金属の蒸気により高輝度な放射を得ることができる。加えて、混入する金属によって光色の選択ができる。このことから、大規模光源として、広場、道路、工場、スポーツ施設など幅広い用途に用いられてきた。特に、2000年以降、HID ランプの1つであるセラミックメタルハライドランプが開発されている。しかし、線スペクトルの組み合わせにより演色性と放射パワーを高められているため、人々の光色に対する不満が問題となっている。また、人々の明るさの感覚に沿うような放射パワーを得るために、ランプ効率の改善が求められている。

このような問題の解決を図るために、演色性やランプ効率の改善を目指した研究が行われてきた。例えば、複数の金属蒸気から生じる線スペクトルの組み合わせにより、演色性を向上させることや、器壁径を小さくすることでアーク径を小さくし、高温領域を増やして放射量の増大を図ること、並びに、電流を数千 A まで増加してアーク内の温度を上昇させることで、温度に依存する放射が増加することが報告されている<sup>[1][2][3]</sup>。

しかし、金属蒸気からの線スペクトルの組み合わせだけでは、ブロードなスペクトルを得ることが困難であるため、人間の光色に対する不満を解消することは難しい。また、電流が数千 A の高温アークは、粒子を構成する電子が高いエネルギー準位に遷移するため、これらから生じる線スペクトルは紫外光となり、ランプ効率が低下してしまう。このため、数十～数百 A 程度に電流を設定することで、アークからの紫外光の放射を抑える試みもなされている。しかし、この場合は、放射量の絶対値が低くなってしまふことや、赤外線放射が支配的になってしまう問題点がある。したがって、可視光の放射が主体的になるようなアークランプの開発が必要である。

### 2. 研究の目的

本研究は、研究代表者が研究してきた超高温アークからの放射の知見を活かし、演色性とランプ効率の向上を目指した高輝度アークランプを開発するものである。本研究により、緊急避難場所などの照明に求められている低コストで高効率、かつ、人体にとって安心を与えることができる光色を持つ照明の開発が期待できる。

具体的には、研究代表者が本学着任後 10 年間にわたり研究開発を続けてきた、高温アークの制御と電極の冷却システム、並びに、電磁熱流体シミュレーションによる放射パワーの算出結果の知見を活かし、演色性とランプ効率の向上を目指した水渦冷却型高輝度アークランプの開発の第1歩となる研究を行った。

### 3. 研究の方法

本研究では、電磁熱流体シミュレーションを用いた温度分布や放射分布の計算を行った。具体的な計算条件は、(1) 二次元円筒座標系の軸対称、(2) 定常状態 (時間に依存しない)、(3) 流れは全て層流で、非圧縮性、(4) 局所熱平衡が成立、(5) 陽極からの金属蒸気の発生は考慮しない、(6) すべての金属蒸気について、アルゴン中に最初に混入させて高温気体を発生させる、(7) 温度増加に伴う金属蒸気混入率の変化は考慮せず、混入率は一様とした。また、支配方程式は、(1) 質量保存則、(2) 運動量保存則、(3) エネルギー保存則、(4) 電流連続の式、(5) オームの法則、(6) アンペールの法則とした。

この計算を基に、図1に示す水渦冷却型の器壁安定化プラズマアーク発生装置を設計製作した。電極部分は、電極とパイレックスガラス製の器壁の間に冷却水を流すことで器壁の熔融を防いでいる。図2に、アーク姿態を示す。

図3に、実験回路を示す。アークは、水渦冷却型器壁安定化アーク発生装置を使用し、タッチスタート方式で発生させた。本装置は、パイレックスガラス内部に冷却水を渦状に回転させながら流し、冷却している。パイレックスガラスの内径は、15, 41 mm である。電極は、2%酸化ランタンタングステンをを用いた。電流は、10~60 A、電極間距離は、1~5 cm、雰囲気ガス、及び、流量は、アルゴンで3 L/minとした。また、電極間距離5 cmでは、電流10 Aの場合にアークが維持できなかったため、測定を行わなかった。放射パワーは、分光照度放射計 (CL-500, KONICAMINOLTA) を用いて測定した。アークを点光源として測定するために、アークと分光照度放射の距離は、1 mとした。

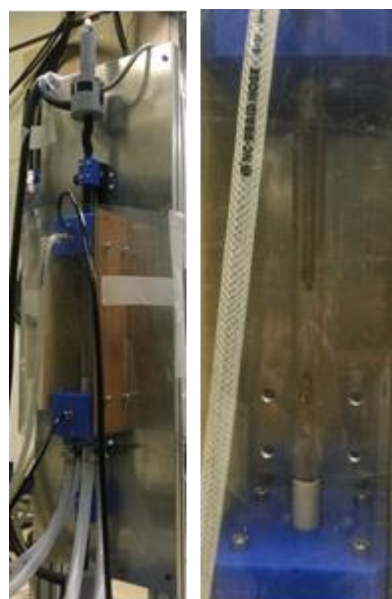


図1 水渦冷却型器壁安定化プラズマアーク発生装置



図2 アーク姿態

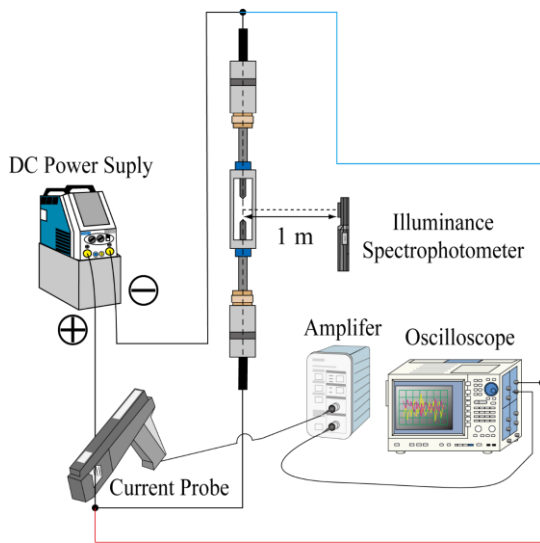


図3 実験回路

#### 4. 研究成果

(1) 電磁熱流体シミュレーションによる放射パワー、明度、ランプ効率の算出

電磁熱流体シミュレーションを用いて、放射パワー、明度、ランプ効率の算出をした。具体的には、電流、または、器壁半径を変化させた時の温度領域を算出し、放射パワーの変化を解析した。

図4に、電流/器壁半径変化時の放射パワーを示す。電流/器壁半径を増加させることにより、放射パワーが増加する結果が得られた。しかし、器壁半径と放射パワーの関係は定式化には至っておらず、また、演色性やランプ効率に関しても検討を行うことができていないため、器壁半径がランプ効率に及ぼす寄与が分かっていない。そこで、本結果を用いて、放射パワーとランプ効率の評価を行った。評価を行うパラメータとしては、ジュール発熱による温度効果を表す「電流の2乗/器壁半径の2乗」を用いた。図5に、 $I^2/R_w^2$  変化時の放射パワーを示す。結果として、電

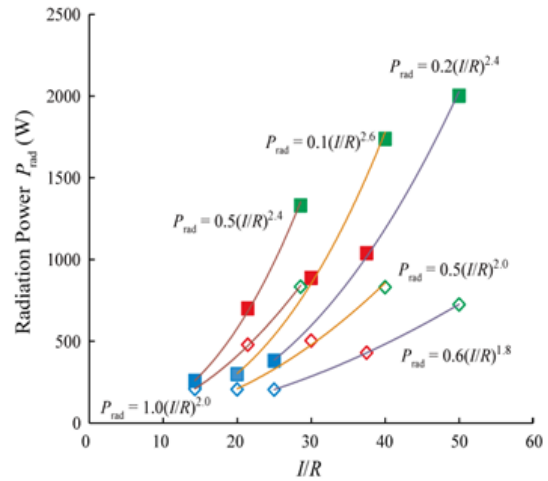


図4 電流/器壁径変化時の放射パワー

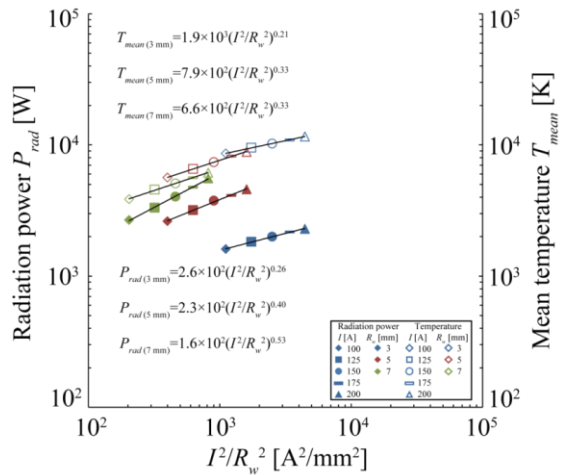


図5  $I^2/R_w^2$  変化時の放射パワー

流のジュール発熱による高温領域の増加により、放射パワーが増加することが明らかとなった。本結果より、電流が大きいほど、放射パワーが増加し、相関関係にある明度が大きくなることで、ランプ効率の向上が期待できることが示唆された。

また、本シミュレーションの結果を設計製作にフィードバックすることを考えた場合、器壁径 41 mm の水渦冷却型の器壁安定化プラズマアーク発生装置では、達成できない。これは、電流を 80 A 以上にできないこと、器壁径を 41 mm 以下にはできないことによる。このため、電流を 150 A にしても電極が損耗せず、器壁径も 15 mm 以内に抑えることができる装置を製作するための設計も行った。

更に、当初の実験計画にはなかったが、器壁径 41 mm において、平均演色評価数を測定したところ、各電流値で 85~90 となり、演色性が非常に良いアークランプであることが示された。このため、更に大電流化と器壁径を小さくすることで、より一層の高輝度で高演色性が期待できることが示唆された。なお、本結果は、次節に示す設計製作の際の知

見として活用した。

## (2) 実験装置の設計と製作

水渦冷却型の器壁安定化プラズマアーク発生装置の設計と製作、並びに、実験を行った。

シミュレーションの結果より、大電流化と器壁径を小さくすることが必要なため、器壁径 41 mm から器壁径 15 mm に変更した装置を開発した。結果として、小口径としたため、水渦の旋回とプラズマガスの排出、並びに、電極の冷却に問題が生じた。具体的には、器壁内の圧力上昇により水とガスの排出がうまくいかなかったことや、陽極の冷却不足による溶損があった。これらを解決するため、設計やアーク発生手順の見直しを図り、安定したアークを発生させることができた。

ランプの性能の観点では、演色性は良い結果が得られているが、ランプ効率は未だ低いままとなった。アークの電界-電流特性に鑑み、小電流で電圧の垂下特性を活かすことで、ランプ効率が向上することが予想されるため、実験やシミュレーションを行った。

シミュレーションでは、器壁安定化アークを模擬した詳細な計算に取り組み、電流と器壁径をパラメータとして用いることで、放射パワーと演色性に関する知見を得ることができた。

## (3) 電流と入力電力が及ぼす照度

水渦冷却型器壁安定化アークにおける電流と入力電力が及ぼす照度を解明することを目的とし、実験的検討を行った。

具体的には、器壁径 15 mm の装置を設計し、電流と電極間距離をパラメータとして、照度と演色性の測定を行い、ランプ効率を算出した。これらの結果から、電流と入力電力に対する照度の増加がともに 1 乗よりも大きいことから、電流を増加させると、更なる照度の増加が示唆された。

図 6 に、器壁径 15 mm と 41 mm における電流変化時の照度、図 7 に、電流変化時のランプ効率を示す。測定を行った 60 A までは照度、ランプ効率に大きな違いはなかった。これは、器壁径 41 mm では低電流において、熱損失によるランプ効率の低下が顕著ではないためである。しかし、電流と入力電力に対する照度の増加の傾きは、器壁径 41 mm よりも器壁径 15 mm の方が大きかった。したがって、器壁径 15 mm においては、更なる大電流を印加することにより熱損失を抑え、器壁径 41 mm のランプ効率を上回ることが示唆された。

図 8 に、器壁径 15 mm と 41 mm における電流変化時の平均演色評価数を示す。器壁径 15 mm の平均演色評価数は器壁径 41 mm の場合と同じく、おおよそ 80 と高い値をとった。これは、電流の増加に対するアーク温度の増加

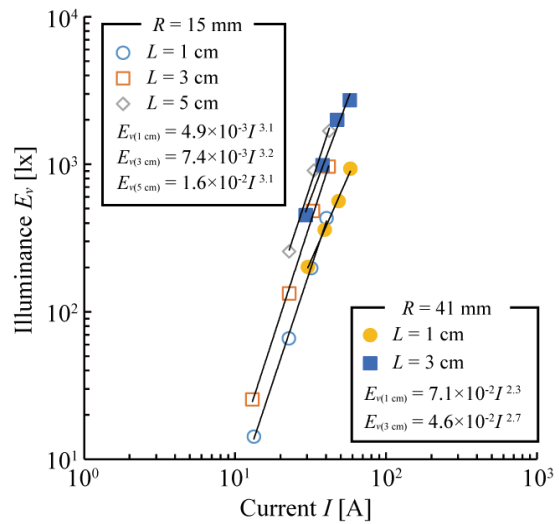


図 6 電流変化時の照度

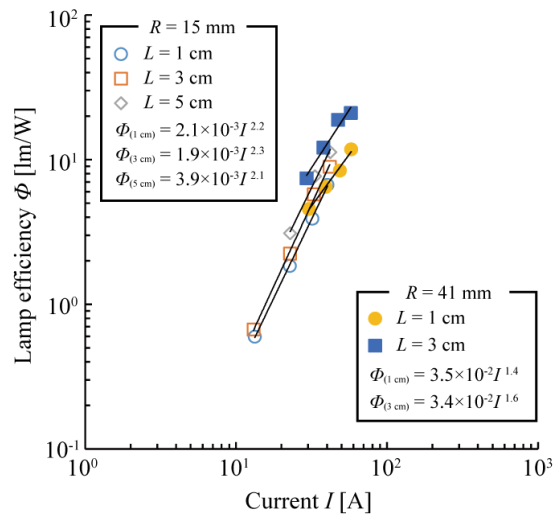


図 7 電流変化時のランプ効率

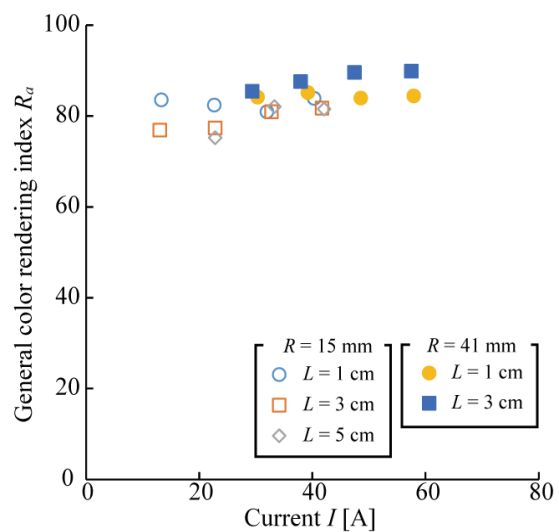


図 8 電流変化時の平均演色評価数

が小さいため、連続スペクトルの放射が増加しなかった。このため、線スペクトルが支配的となり、平均演色評価数が増加しなかった

ためである。

当初の実験計画にはなかったが、電流を 80 A まで上げると電極の損耗が激しくなり、アークの維持が難しいため、電極の配置を上下方向で反対にして実験を行った。結果として、損耗の激しい陽極を上配置することで、発生したタングステンの蒸気が放射に寄与し、照度が増加し、電極の損耗も軽減できた。

また、アークにヘルムホルツコイルを用いて縦磁界を印加し、アーク径を大きくすることで放射体積を増やす実験を行った。しかし、縦磁界によりアークがリボン状に円運動する結果となり、照度の増加にはつながらなかった。

以上の(1)～(3)の成果を ICOPS や電気学会にて発表し、他研究者との意見交換を行い、適宜、研究にフィードバックさせた。

#### まとめ

本研究は、研究代表者が研究してきた超高温アークからの放射の知見を活かし、演色性とランプ効率の向上を目指した高輝度アークランプを開発するものである。本研究により、緊急避難場所などの照明に求められている低コストで高効率、かつ、人体にとって安心を与えることができる光色を持つ照明の開発が期待できる。

結果として、3年間の研究を通し小口径水渦冷却型器壁安定化プラズマアーク発生装置の開発に成功した。また、実験とシミュレーションの結果より、アークの放射について多くの知見を得ることができた。

今後は、本研究で物理的に明らかにすることができた電流と半径の評価指標を基に、温度と放射の制御に取り組み、更なる低コストで高効率、かつ、人体に安心を与えることができる光色を持つ照明の実用化に向けた開発を進めていく予定である。

#### 参考文献

- [1] 東忠利：メタルハライドランプの発光原理と点灯動作の理論解析, J. Illum. Engng. Inst. Jpn, Vol. 73, No. 9, pp.18-24 (1989).
- [2] 榊原 建樹, 鬼頭 幸生, 宮地 巖, 池田 尚孝:放射のある安定化空気アーク陽光柱の電界の強さ, 電学論 A, Vol. 99, No. 12, pp. 592-598 (1979).
- [3] 池田弘一, 天川正士, 渋谷正豊: 高圧高温アルゴンアークの放射輝度の解析, 電学論 A, Vol. 120, No. 4, pp. 414-419 (2000).

#### 5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕(計1件)

- (1) 曾根和貴, 光安枝里子, 山本真司, 岩尾徹, 器壁安定化アークの演色性向上に及ぼす電流と器壁半径の寄与, 電気学会論文誌 B, Vol.136, No. 9, 2016.

〔学会発表〕(計22件)

- (1) 岩尾徹, 金属蒸気混入アークの発生と制御, 日本物理学会年次大会, 2017年03月18日, 大阪大学(大阪)
- (2) 内藤友人, 坐間義幸, 清水雄太, 山本真司, 岩尾徹, 縦磁界印加時におけるアルゴンプラズマアークの姿態と全光束, 電気学会全国大会, 2017年03月15-17日, 富山大学(富山)
- (3) 清水雄太, 内藤友人, 山本真司, 岩尾徹, 水渦流冷却型器壁安定化アークにおける電流が及ぼす照度, 2016年度放電学会年次大会, 2016年11月26日, 東京都市大学(東京)
- (4) Toru Iwao, Yuto Naito, Yuta Shimizu, Shinji Yamamoto, Radiation Power Affected by Input Power as Function of Wall-stabilized Arc of Water-cooled Vortex Type, 58th Annual Meeting of the APS Division of Plasma Physics, 2016/10/31, San Jose (USA)
- (5) Toru Iwao, Yuta Shimizu, Takaya Nakamura, Kentaro Yanagi, Shinji Yamamoto, Radiation Power of Wall-stabilized Arc of Water-cooled Vortex Type with Small Caliber, 21st International Conference on Gas Discharges and Their Applications, 2016/09/11-16, Nagoya University (AICHI)
- (6) 清水雄太, 内藤友人, 山本真司, 岩尾徹, 小口径水渦流冷却型器壁安定化アークにおける電流が及ぼす放射パワー, 電気学会基礎・材料・共通部門大会, 2016年09月07日, 九州工業大学(福岡)
- (7) 浅野雄飛, 清水雄太, 真栄田義史, 山本真司, 岩尾徹, 器壁安定化アークにおける電流が及ぼす温度分布の変化, 電気学会基礎・材料・共通部門大会, 2016年09月05日, 九州工業大学(福岡)
- (8) 藤野貴康, 岩尾徹, 茂田正哉, 田中康規, 窪田健一, 高エンタルピープラズマの数値シミュレーション, 電気学会プラズマ研究会, 2016年08月08日, 大阪市立大学(大阪)
- (9) Toru IWAQ, Yuta SHIMIZU, Kentaro YANAGI, Takaya NAKAMURA, Yoko ISHII and Shinji YAMAMOTO, Development of Wall-stabilized Arc of Water-Cooled Vortex Type with Small Caliber near 40 A, International Conference on Electrical Engineering 2016 (ICEE2016), 2016/07/03-07, Okinawa Jichikaikan (Okinawa)
- (10) Toru Iwao, Yuta Shimizu, Kazuki Sone, Yoshihumi Maeda, Shinji Yamamoto, DEVELOPMENT OF WALL-STABILIZED ARC OF WATER-COOLED VORTEX TYPE WITH SMALL



- CALIBER FOR HIGH INTENSE RADIATION, 43rd IEEE International Conference on Plasma Science, 2016/06/19-23, Banff (Canada)
- (11) Yuta Shimizu, Takaya Nakamura, Kentaro Yanagi, Shinji Yamamoto, Toru Iwao, Lamp Efficiency as Function of Input Power in Wall-stabilized Arc of Water-cooled Vortex Type with Small Caliber, 43rd IEEE International Conference on Plasma Science, 2016/06/19-23, Banff (Canada)
- (12) Yoshihumi Maeda, Yuta Shimizu, Yuhi Asano, Kazuki Sone, Shinji Yamamoto, Toru Iwao, Radiation power Affected by Electric Field with Changing Wall Radius and Current with Wall-Stabilized Argon Arc, 電気学会放電・静止器・開閉保護合同研究会, 2016年06月14日, 金沢大学(石川)
- (13) 柳健太郎, 中村駿哉, 鹿野竜大, 曾根和貴, 岩尾徹, 水渦流冷却型器壁安定化アークにおける入力電力変化時の温度と平均演色評価数, 放電学会年次大会, 2015年12月05日, 防衛大学校(神奈川)
- (14) Toru Iwao, Takaya Nakamura, Kentaro Yanagi, Shinji Yamamoto, Radiation Power Affected by Current and Wall Radius in Water Cooled Vortex Wall-stabilized Arc, 57<sup>th</sup> Annual Meeting of the APS Division of Plasma Physics, 2015/11/16, Savannah (USA)
- (15) Takaya Nakamura, Kentaro Yanagi, Shinji Yamamoto, Toru Iwao, General Color Rendering Index of Wall-stabilized Arc of Water-cooled Vortex type, 57<sup>th</sup> Annual Meeting of the APS Division of Plasma Physics, 2015/11/16, Savannah (USA)
- (16) 曾根和貴, 山本真司, 岩尾徹, 電流と器壁半径が及ぼす器壁安定化アルゴンアークの演色性への寄与, 電気学会放電・高電圧開閉保護合同研究会, 2015年11月04日, 姫路市商工会議所(兵庫)
- (17) 清水雄太, 中村駿哉, 柳健太郎, 山本真司, 岩尾徹, 水渦流冷却型器壁安定化アークにおける電流変化時の平均演色評価数, 電気学会基礎・材料・共通部門大会, 2015年09月17日, 金沢大学(石川)
- (18) Toru Iwao, Kazuki Sone, Shinji Yamamoto, Temperature Distribution Affected by Plasma Gas Velocity in Wall-stabilized Arc, International Symposium on Applied Plasma (ISAPS), 2015/08/31, Nara Hotel (Nara)
- (19) 曾根和貴, 光安枝里子, 岩尾徹, 湯本雅恵, 器壁径と電流が及ぼす器壁安定化アルゴンアークの温度分布, 電気学会B部門大会, 2014年09月10日, 同志社大学(京都)

- (20) 山本真司, 曾根和貴, 光安枝里子, 岩尾徹, 湯本雅恵, 水渦流冷却型器壁安定化アークランプに及ぼす器壁径と電流パラメータ, 電気学会B部門大会, 2014年09月10日, 同志社大学(京都)
- (21) 岩尾徹, 光安枝里子, 曾根和貴, 斎藤勇樹, 柳健太郎, 湯本雅恵, 演色性とランプ効率の向上を目指した高輝度アークランプの開発, 電気学会放電・静止器開閉保護合同研究会, 2014年06月10日, 金沢大学(石川)
- (22) Toru Iwao, Eriko Mituyasu, Shinji Yamamoto, Motoshige Yumoto, Control of Spectrum for Improvement of Color Rendering Affected by Metal Vapor Mixed with Wall-stabilized Argon Arc, IEEE 41st International Conference on Plasma Sciences (ICOPS), 2014/05/28, Washington DC (USA)

[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]

なし

## 6. 研究組織

### (1) 研究代表者

岩尾 徹 (IWA0, Toru)  
東京都市大学・工学部・教授  
研究者番号: 80386359

### (2) 研究分担者

なし

### (3) 連携研究者

なし

### (4) 研究協力者

なし