

補助事業番号 2023M-420
 補助事業名 2023年度 プラズマウィンドウを用いた革新的真空窓の開発と大気圧電子ビーム加工への応用 補助事業
 補助事業者名 難波 慎一

1 研究の概要

大気圧下での電子ビーム加工を可能にする仮想的な真空窓(プラズマウィンドウ)を開発しました。これを実現するために、超高密度(10^{16} /cc以上)、高温(1万度以上)の世界最高性能のアルゴンプラズマを定常的に発生させることに成功しました。さらに、プラズマ発生装置を小型・軽量化、安価、可搬型とすることで、TIG溶接並のコストで、超高精度でより強靱な電子ビームによる溶接・加工が可能であることを実証しました。

2 研究の目的と背景

電子ビームプロセスは、マイクロメートルオーダーのサイズでより強固に材料を溶接・加工を可能にするものです。ただし、電子ビームは大気中で直ぐに減衰してしまい、加工をするには加工物を真空容器内に入れる必要があります。この制約により大型構造物には適応できないという致命的な欠点がありました。

本研究では空気は通さないが電子は自由に通過できる特殊な仮想的な窓(プラズマウィンドウ)を開発することにより、電子ビームを大きな減衰なく大気中に引き出すことを試みました。これを実現するためには高温・超高密度アルゴンプラズマが不可欠となります。本研究の目的は、大気圧100 kPaと真空1 Paを大型の排気設備なしに形成するプラズマウィンドウを開発し、さらにアルゴン雰囲気下での電子ビーム透過特性を調べることで、大気圧下での電子ビームプロセスが実現可能であることを示すことにあります。

3 研究内容

(1) プラズマウィンドウの開発

<https://www.plasmasciencelab.com/research>

本研究では、申請者が長年研究を行ってきたカスケードアーク源を大幅に小型化、安価にすることとし、設計製作を行った。また、確実に安定に放電が開始、維持できるように本研究では傍熱型ホローカソード陰極を考案し、そこから効率的に熱電子放出が可能となるような工夫を施した。図

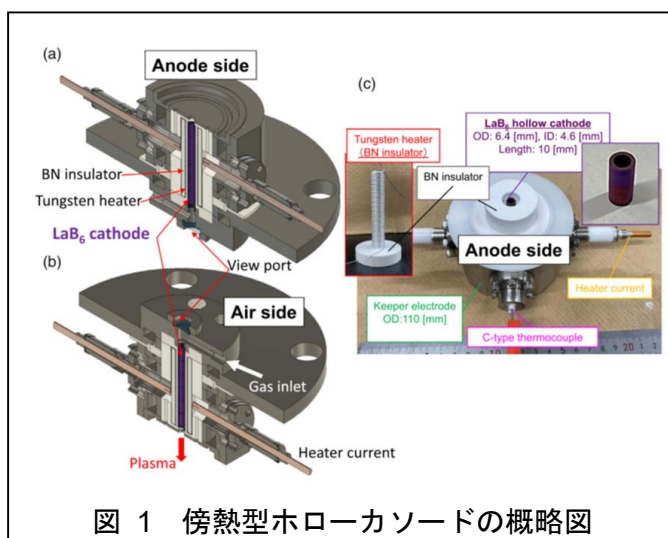


図 1 傍熱型ホローカソードの概略図

1に製作した傍熱ホローカソード陰極の概略図を示す。陰極材は六ホウ化ランタン(LaB6)であり、比較的低温でも熱電子放出が可能である。ヒーターは1mm径のタングステン製でLaB₆材をBN絶縁体を挟んで間接的に動作温度(約1680度)まで加熱する。アルゴンガスはこの陰極内部を流れることでガス温度が上昇、ガス粘性が上昇する。一方、図2にはカスケードアーク源の概略図を示す。この放電方式では中間電極を取り付けることで、高温高密度のプラズマを発生できる。本研究では従来のカスケードアーク源より1/5程度のサイズのものを作成した。プラズマ生成実験を

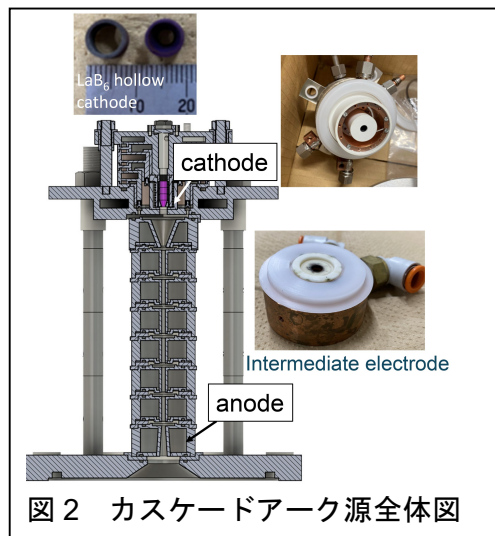


図2 カスケードアーク源全体図

を行い、可視発光分光、及び、トムソン散乱計測より電子温度2-5 eV, 密度 10^{16} cm^{-3} 以上のアルゴンプラズマを定常的に発生できることが分かった。

一方、プラズマウィンドウとしての性能はプラズマ両端のガス圧力差で決まる。開発したプラズマ

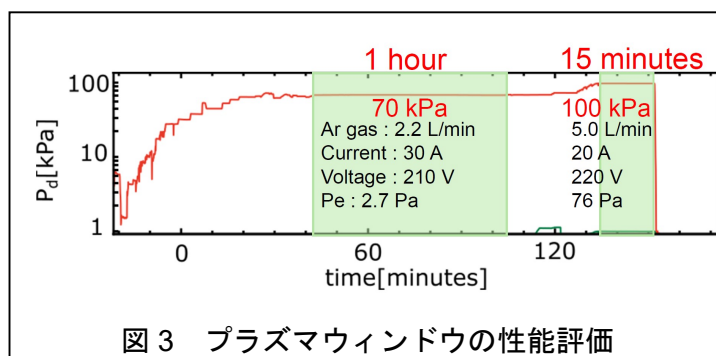


図3 プラズマウィンドウの性能評価

ウィンドウが大気圧と真空隔壁として優位なものであるかを調べる実験を行った。図3にその結果を示す。時刻約40分においては、放電電流30 A, 放電電圧 210 V, ガス流量 2.2L/minにおいて、70 kPaと2.7 Paの圧力隔壁を形成できた。更に、時刻約130分において、放電電流20 A, 放電電圧 220 V, ガス流量5 L/minにおいて、目標とする大気圧(100 kPa)と真空部圧力76 Paを達成することができた。ここで、真空部圧力が高く表示されているが、これは排気装置のターボ分子ポンプが停止したためであり、ポンプが正常に動作した場合は数Paを維持できることはすでに実験により明らかになっている。以上の結果より、目標する圧力隔壁をほぼ形成することができた。これは世界最高性能のプラズマウィンドウによる圧力隔壁である。

(2)アルゴンガス雰囲気下での電子ビーム透過実験

実際に電子ビーム(加速電圧: 20 kV, 集光ビーム径: 0.5 mmΦ)を放電部の高真空側から放電チャンネル内に入射し、アルゴン雰囲気下での電子ビーム透過の様子を調べた。実験配置図を図4に示す。なお、大気側は本来は空気であるが、ここではアルゴン大気圧として電子ビームがアルゴン中をどの程度透過することができるかを調べた。なお、電子ビームがガス雰囲気中を透過できたかどうかはRheed蛍光スクリーンに電子ビームを当て、そこからの発光を見て判断した。実験でのアルゴン圧力はそれぞれ10 Paと600 Paとした。図から分かるように、10 Paでは明瞭な電子ビームイメージが観測できたが、圧力600 Paでは電子ビームがアルゴンによる弾性・非弾性衝

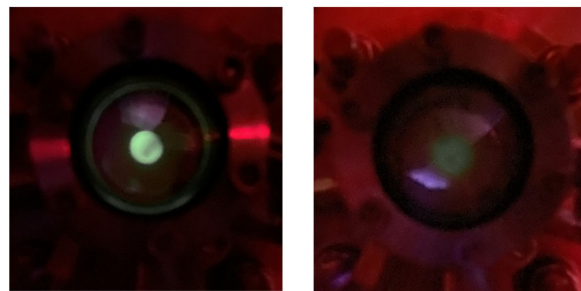
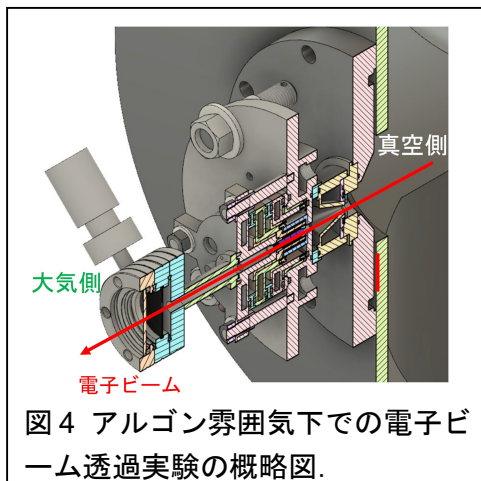


図5 蛍光スクリーンに映し出された電子ビームイメージ。

突、や散乱で大幅に減衰することが分かる。これはプラズマウィンドウ、つまり、放電を行っていない環境下での結果であり、放電点火時よりもガス密度は約40倍高く、且つ、電子ビーム加工に使われる電子加速電圧は80 kV以上であるため、本研究で用いたものよりも格段に速度が速いためガスと電子ビームの相互作用は大幅に抑制される。高速電子とアルゴンとの衝突断面積、及び、相対論的効果を考慮して、プラズマ点火時(プラズマウィンドウ形成時)の電子ビーム減衰率を評価すると50%以上の電子ビームが大気中に引き出せることが分かった。現在の中間電極長さは15 cm程度なので、これを20 cmとすればさらに高い圧力勾配を形成(つまりより低密度アルゴン下)できるので、80%近い電子ビームを取り出せるはずである。

4 本研究が実社会にどう活かされるか—展望

電子ビーム加工は超精密、強固な溶接や切断といった加工が可能です。しかしながら、加工物を真空内に置く必要があり、適用範囲は小型の加工物に限られてきました。もし大気圧下での電子ビーム加工が可能になれば加工物を真空用器内に入れる必要がなく、航空機や船舶、交通インフラ等の分野へ応用可能となり、安全安心の社会に大きく貢献できます。我が国独自の技術として当該分野で世界をリードすることができます。

5 教歴・研究歴の流れにおける今回研究の位置づけ

申請者はこれまでアーク放電による高密度プラズマ源の開発に20年近く従事してきました。特にカスケードアーク放電と呼ばれる方法に着目し、従来の温度・密度を遙かに凌ぐ定常的なプラズマの発生に関する研究を行ってきました。これは夢のエネルギー源として期待されている核融合プラズマに関する研究の一環です。

研究を進める中、放電部のガス導入部と排気部ではガスの高い粘性により非常に大きな圧力差があることに気がつき、本研究で試みる大気圧下での電子ビーム加工が可能ではないのかという発想に至り、真空仮想窓としてのプラズマウィンドウの研究を始めました。

6 本研究にかかわる知財・発表論文等

○発表論文

1. “Spectroscopic Diagnostics of Radiation Reabsorption in Dense He Arc Plasmas”, Md Anwarul Islam, Shinichi Namba, International Journal of Research and Innovation in Applied Science (IJRIAS), vol. **9** (7), pages 194-201 (2024).
2. “Development of a large-bore plasma window with an indirectly heated hollow cathode”, K. Yamasaki, S. Namba *et al.*, J. Appl. Phys. **134**, 093302 (2023).
3. “Generation of stationary high-density cascade arc plasma and application to plasma windows”, K. Yamasaki, S. Namba, *et al.* Jpn. J. Appl. Phys. **62**, SL1009 (2023).

○国際会議発表

1. “Generation of high-density Ar cascade arc plasma for plasma window and its application to electron beam engineering in air”, S. Namba *et al.* International Conference on Phenomena in Ionized Gases (ICPIG) Marseille, France, 21-25th Jul, 2025. 招待講演予定
2. “Radiation trapping effect on the helium line intensity ratio method”, K. Yamasaki, S. Namba, *et al.* 24th International Stellarator Heliotron Workshop, 9-13th Sep., 2024, Hiroshima, ポスター発表
3. “Impact of the radiative trapping on the helium line intensity ratio method”, K. Yamasaki, S. Namba, *et al.* 26th International Conference on Spectral Line Shapes, 2 – 7th Jun. Otsu, 2024, 招待講演
4. “Development of large channel diameter plasma window for quantum beam application”, K. Yamasaki, S. Namba, *et al.* JCREN 2023, 11-13 December 2023, Bangkok, Thailand. 口頭発表

7 補助事業に係る成果物

(1) 補助事業により作成したもの

現時点ではなし

(2) (1) 以外で当事業において作成したもの

現時点でなし

8 事業内容についての問い合わせ先

所属機関名: 広島大学大学院先進理工系科学研究科

(ヒロシマダイガク ダイガクイン センシンリコウガクケイケンキュウカ)

住 所: 〒739-8527 広島県東広島市鏡山1-4-1

担 当 者: 教授 難波慎一 (ナンバシンイチ)

担 当 部 署: 機械工学プログラム プラズマ基礎科学研究室

(キカイコウガクプログラム プラズマキソカガクケンキュウシツ)

E - m a i l: namba@hiroshima-u.ac.jp

U R L: <https://www.plasmasciencelab.com>