

**科学研究費助成事業 研究成果報告書**

平成 29 年 6 月 15 日現在

機関番号：15401

研究種目：挑戦的萌芽研究

研究期間：2015～2016

課題番号：15K13610

研究課題名(和文)真空インターフェースを目指したプラズマウィンドウの基盤技術開発

研究課題名(英文)Development of plasma window for innovative vacuum interface

研究代表者

難波 慎一(Namba, Shinichi)

広島大学・工学研究院・教授

研究者番号：00343294

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 2,900,000円

研究成果の概要(和文)：アーク放電を利用したプラズマウィンドウは大きな排気系なしに大気と真空を隔離する革新的インターフェースである。本研究ではカスケード型プラズマをベースとした放電源を製作し、実用的プラズマウィンドウを開発することを目的とした。装置サイズは直径120 mm、長さ100 mm、重量は15 kg以下である。開発した放電源を用いることで50 A放電にて大気側・真空側圧力比約3桁の圧力勾配を発生させることに成功した。この値は世界最高値であるが、現実的なプラズマウィンドウとして圧力比5桁を指標としているため、さらに一桁高い値が要求される。これには電流を100Aまで増大させることで対応できる。

研究成果の概要(英文)：To realize a novel vacuum-atmosphere interface that does not require a large differential pumping system, a robust cascade arc discharge source called a plasma window is constructed and tested for long-term operation. By modifying a test plasma with a direct current discharge, a vacuum interface with a high gas pressure ratio of  $\sim 1/1000$  between the discharge and expansion sections is demonstrated for currents as high as 50 A. No significant damage to the electrodes is observed during the operation. Analysis of the visible emission spectra reveals that a stationary, stable argon plasma having a temperature of 1 eV and a density of  $5 \times 10^{16}/\text{cc}$  is generated in the plasma channel.

研究分野：プラズマ工学

キーワード：プラズマウィンドウ 高密度プラズマ 大気圧アーク放電 プラズマ分光

### 1. 研究開始当初の背景

(1) 17 世紀の中頃、パスカルは真空と大気圧の概念を確立した論文を発表した。この業績に刺激されて 1650 年ドイツのゲーリケは世界で初めて真空ポンプを開発した。そして現在、真空技術は研究開発、工学分野で不可欠な要素技術の一つとなっている。

精密加工の一つである電子ビーム溶接は高アスペクト比（深さ方向と幅の比）、高エネルギー効率等の利点がある。しかし、加工は真空中で行われるため生産性が低く、溶接物は真空容器の大きさで制限される。TIG 溶接などの汎用性から理解できるように、電子ビーム加工を大気中でできたらその優位性・利便性は計り知れない。

このような観点から注目されたのがプラズマウィンドウ(PW)であり、荷電粒子は通過できるが中性粒子の流れは抑制されるパーティクルな窓が形成される。この斬新な技術開発は Hershovitch らによりはじめられた。彼らは様々な研究開発・製造分野で PW を応用できることを実証したが、大気圧から真空までの圧力差を大型差動排気系なしで実現する PW 開発には至っておらず、広く普及していない。

(2) 我々は独自に開発を進めてきた TPD 型放電が PW にも応用できることに気が付いた。この装置では特異な電極構造により高密度プラズマを発生できる。ただし、TPD 装置はガス圧 $\sim$ 10 Torr、強磁場下でアークを発生させるため、磁場なし大気圧 PW に適用することはできない。そこで昨年は TPD 電極の改良に取り組み、磁場なし大気圧で真空側圧力 0.1 Torr の PW 開発に成功した。

(3) 実用的な PW 技術開発が成功すれば、工学・産業界をはじめとする材料物性・精密加工や医学・生命科学などの分野で画期的ツールを提供できる。例えば以下の応用が考えられる。

電子ビーム発生装置と溶接物を PW で仕切ることで大気中での加工が可能になる。溶接物を真空容器に入れる必要がないため生産性が向上し、アクセスが困難であった所に適用可能。

イオンビーム源と大気中に置かれた基板を PW で遮蔽することにより、基板へのイオン注入やドライエッチングが大気中で可能。

大気中の生細胞と X 線源を PW で隔離することで、生きたままの状態で細胞を超高空間分

解で観測できる X 線顕微鏡が可能。

### 2. 研究の目的

金属のように大気と真空を隔てる圧力隔壁となる一方、荷電粒子や光は自由に通過できる魔法のような物質は存在しないのであろうか？これを解決するのが高圧力アーク放電を用いたプラズマウィンドウである。このパーティクルな窓は高気圧アーク放電により実現される。本研究ではプラズマウィンドウとしてこれまで採用されてきた電極構造を大幅に見直すことにより、大気と真空( $10^{-3}$  Torr)の圧力勾配を僅か 120 mm の距離で実現する小型・長時間運転可能な装置を開発する。実用化すれば、電子ビーム溶接やイオン注入、エッチングが大気中で可能になり、さらには軟 X 線顕微鏡に適用すれば生きたまま細胞観測ができる強力な研究手法を提供できる。

### 3. 研究の方法

(1) 図 1 に TPD 型放電源の内径を従来の 8 mm $\phi$ から 3  $\mu$ m $\phi$ に変更したものを示す。カスケードアークプラズマを発生させるために陰極に 3.2 mm 径 CeW ロッドを、陽極には W を用い、陰極・陽極間には SUS あるいは Mo 製の浮遊中間電極を 10 枚設置した。陽極・中間電極の穴径はいずれも 3 mm $\phi$ で水冷されている。電極間での放電を防ぐため、厚さ 1

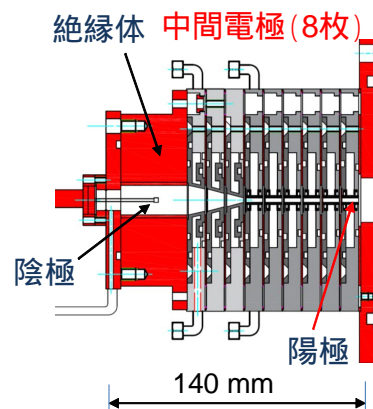


図 1. カスケードアーク放電源。

mm、3.2 mm $\phi$ のアルミナスパーサーを挟んでいる。一方、プラズマウィンドウの実用化を視野に入れ、小型・軽量の放電源を設計・製作した。図 2 に装置の概略図を示す。漏斗上の中間電極以外はプラズマに曝されるパーツは Mo で製作した。電極構造を大きく見直

すことで、製作費は約 1/8 に抑えることができた。

(2) 放電ガスはアルゴンである。通常の TPD プラズマ発生では 0.2 T 程度の磁場を印加するが、本研究では大気圧熱プラズマを対象としているため無磁場の環境で実験を行った。放電開始方法として先ず陽極・陰極間に 1 kV を印加しグロー放電をさせた後、自己加熱で熱電子放出アーク放電へ移行させるという簡便な手法を採用した（放電電圧は 1 kV から ~150 V 以下に低下）。電極間で発生した熱プラズマは図の右側に設置されている大型真空容器に音速で膨張する。排気はロータリーポンプ、及び、メカニカルブースタポンプで行った。アルゴンガス流量は一定になるようマスフローコントローラで制御された。放電電流は最大で 100 A であるが、電極冷却のための水冷機能が十分ではないため今回は最大 60 A の低電流のみで実験を行った。

(3) 発生したプラズマの特性を調べるために、本研究では 2 台の可視分光器を用いてスペクトル計測を行った。観測位置はアノード付近である。まず、連続スペクトルの計測には Acton Spectra Pro 2500i、焦点距離  $f=50$  cm、回折格子数 150 grooves/mm、検出器は Princeton Instrument 社製の CCD カメラである。可視分光器の入口スリット幅は 50  $\mu\text{m}$  とし、感度較正には W ランプを使用した。線スペクトル精密計測には Jobin Yvon HR1000、 $f=1$  m、回折格子数 2400 grooves/mm、CCD カメラは ANDOR 製 DU934P-BU2-SE を用いた。可視分光器の入口スリット幅は 20  $\mu\text{m}$  である。各分光器の装置幅の見積もりには HeNe レーザー、あるいは、低圧水銀ランプを用いたところ約 9 pm であった。

#### 4. 研究成果

(1) 放電部ガス圧力の電流値依存性をまず調べた、プラズマ発生後に放電部ガス圧力が上昇し、放電電流 20 A において圧力は 4.1 倍に達した。この圧力上昇は主にプラズマの温度が上昇したことによるものである。理想気体の状態方程式を考えると、アーク放電によるジュール加熱でカソード付近のガス温度が約 1200 K 程度まで上昇していることになる。また、放電チャンネル内ではジュール加熱が

起こるので、ガス流は出口で音速となる等エントロピー流れではなく、いわゆる加熱を伴うレイリ - 流れで記述される。したがって、アノード手前までは等温流れと見なすことができ、その後流れは音速まで加速される。その結果としてガス圧力がアノード付近で急激に低下する（1/2~1/3 程度）。

(2) 放電電流 60 A において、大気圧(100 kPa)と真空側圧力 0.1 kPa (圧力比 1000) を達成するプラズマウィンドウを得ることができた。これは世界最高性能の装置開発に成功したことを意味するものである。

(3) スペクトル解析による電子温度・密度の決定した。本研究では、フォーク関数により各励起準位の発光スペクトルをフィッティングし、そのスペクトルの面積をスペクトル強度とした。その値から各準位の占有密度の相対値を決定し、その比から電子温度を評価した（ボルツマンプロット法）。その結果、電子温度は約 1 eV と決定することができた。

(4) 電子密度計測にはシュタルク拡がりを用いた。一般に高密度プラズマ中ではシュタルク効果によりスペクトル形状が拡がり（ローレンツ型）、その広がり幅から電子密度を評価できるためである。今回計測スペクトルは Ar I 430 nm である。放電電流 50 A でアノード出口での密度は約  $5 \times 10^{16} \text{ cm}^{-3}$  と決定することができた。さらに 2 倍程度の電子密度を発生することができれば、実用的なプラズマウィンドウとして機能すると考えられる。

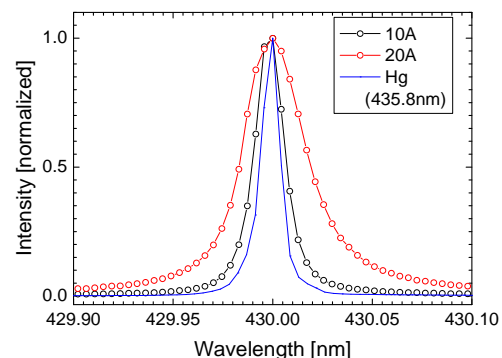


図 2. 放電電流 10 A、20 A でのスペクトル拡がり。水銀ランプスペクトル(435.8 nm) も参考として示す。

#### 5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕(計 3 件)

1. “Measurement of ion Mach number of arcjet plasmas by a directional Langmuir probe under high-gas pressure” W. Sasano, T. Shikama, K. Kozue, L. Matsuoka, N. Tamura and S. Namba, IEEE Transactions on Plasma Science 3, pp. 285-288 (2017). (査読有)
2. “Development of a cascade arc discharge source for an atmosphere-vacuum interface device” S. Namba, T. Endo, S. Fujino, C. Suzuki, and N. Tamura, Rev. Sci. Instrum. **87**, 083503 (2016). (査読有)
3. “Numerical Study of Spectral Line Shapes in High-Density He Plasmas”, H. Kawazome and S. Namba, Plasma Fusion. Res. **11**, 2401124 (2016). (査読有)

〔学会発表〕(計5件)

1. カスケードアーク放電を用いた定常高密度アルゴンプラズマの発生とその分光計測, 難波慎一, 上田恵, 岩本勇樹, 松岡雷士, 田村直樹 2017年度日本物理学会年会 2017年3月17-20日大阪大学
2. アークジェットプラズマにおける発光分布のトムグラフィ計測, 佐野史弥, 佐々野航, 園山裕太郎, 松岡雷士, 難波慎一, プラズマ核融合学会年会2016年11月29-12月2日東北大学
3. カスケードアーク放電を用いた大気圧アルゴン熱プラズマの発生, 上田恵, 岩本勇樹, 松岡雷士, 難波慎一, プラズマ核融合学会年会2016年11月29-12月2日東北大学
4. 真空インターフェースのための小型カスケードアークプラズマ源の開発, 難波慎一, 上田恵, 岩本勇樹, 松岡雷士, 遠藤琢磨, 田村直樹, 電気学会プラズマ研究会2016年8月9-10日, 大阪市立大学
5. Measurement of electron temperature and density of an arcjet plasma by an electric probe in high-gas pressures, W Sasano, K. Kozue, L. Matsuoka, T. Endo, N. Tamura, N. Ezumi, S. Namba, 9<sup>th</sup> APSPT, 12-15 Dec, 2016, Nagasaki,

〔その他〕

<http://www.hiroshima-u.ac.jp/plasma>

6. 研究組織

(1)研究代表者

難波 慎一 (NAMBA SHINICHI)  
 広島大学大学院工学研究科・教授  
 研究者番号：00343294

(2)研究分担者

遠藤 琢磨 (ENDO TAKUMA)  
 広島大学大学院工学研究科・教授  
 研究者番号：00211780