

補助事業番号 28-116

補助事業名 平成28年度電子ビーム溶接のためのプラズマウィンドウ技術開発補助事業

補助事業者名 広島大学工学部基礎科学研究室 難波慎一

## 1 研究の概要

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透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カーク放電を用いたプラズマウィンドウである。このバーチャルな窓は高気圧アーク放電により実現される。本事業では大気と真空（1Pa）の圧力勾配を僅か10cmの距離で実現するプラズマウィンドウを開発する。実用化すれば、電子ビーム溶接やイオン注入、ドライエッチングが大気中で可能になる我が国独自の技術的真空インターフェースを提供できる。

## 2 研究の目的と背景

アーク溶接・TIG溶接技術は安価簡便、且つ、経済的で、各種金属接合に広く用いられている、当に現代の工学・産業には不可欠な要素技術の一つである。一方、電子ビーム溶接は超精密、難加工材にも適応可能という優れた加工プロセスである一方、加工物を真空中に設置する必要があるという最大の欠点を抱えている。したがって、工事現場や大型の溶接物には適応することができない。

本事業の目的は、電子ビーム溶接を大気中で行うための小型・低コスト・高耐久性を有する実用的なプラズマウィンドウを開発することにある。併せて、大気・真空インターフェースとしての性能が世界最高であることを実証する。以下に具体的に本事業で目指す数値目標を示す。

### ① カスケードアークプラズマ源の開発

高温高密度プラズマを定常的に発生させる。具体的な数値目標は電子温度3万度、電子密度 $10^{17}\text{cm}^{-3}$ 以上のアルゴンプラズマとする

### ② 真空インターフェースとしての性能

大気圧（100KPa）と真空側圧力（1Pa）の圧力勾配を僅か100mmのプラズマウィンドウ装置で実現する。目標とする連続運転は実機への視野をいれて200時間以上とする。

## 3 研究内容

### （1）電子ビーム溶接のためのプラズマウィンドウ技術開発

(URL <http://home.hiroshima-u.ac.jp/plasma/>)

大気圧アーク放電を利用したプラズマウィンドウは大きな差動排気系なしに大気と真空を隔離する一方、荷電粒子や軟 X 線に対しては透過率が高い革新的インターフェースとして期待されている。我々はこのプラズマウィンドウを大気中の電子ビーム溶接や軟 X 線透過窓として将来活用することを考えている。本研究では、定常高密度アークプラズマを発生させるため、核融合研（旧名大プラズマ研）で開発されたカスケードアーク放電のひとつである TPD (Test Plasma by Direct current) 型プラズマをベースとした放電源を設計・製作し、実用的プラズマウィンドウ装置を開発することを目的として実験を行った。

TPD 型放電源を小型化し且つ電子温度 1 eV 以上、密度  $10^{16} \text{ cm}^{-3}$  以上の定常高密度プラズマを発生させるため、新たに装置の設計・製作を行った（図 1）。放電部サイズは従来の半分以下(直径: 120 mm, 長さ: 100 mm), 重量は 15 kg 以下である。放電ガスは Ar, He で、放電部の圧力は 5~100 kPa とした。このプラズマは圧力勾配で膨張室へ超音速で噴射され、ポンプで排気される。プラズマウィンドウの性能は放電特性、及び、電子温度密度計測により調べた。なお、温度・密度計測には低分散・高分散可視分光器をそれぞれ用いた。

開発したアーク放電源を用いることで放電電流 50 A にて大気側・真空側圧力比  $10^3$  以上(100 KPa- 70 Pa)の圧力勾配を定常的発生させることに成功した。現実的なプラズマウィンドウとして我々は圧力比  $10^5$  の実現をひとつの指標としているため、さらに一桁高い値が要求される。これには放電電流を 100 A まで増大させることで今後対応するが（放電電流と圧力勾配の関係式を外挿すると放電電流 100A で～数 Pa 以下）、現時点では冷却能力不足で放電電流 100A での実験が行えない（冷却水が循環型でないため、流量・水圧低下のため施設側からストップがかかった）。したがって、今後は循環型大型チラークーリングシステムの導入（6 月納品予

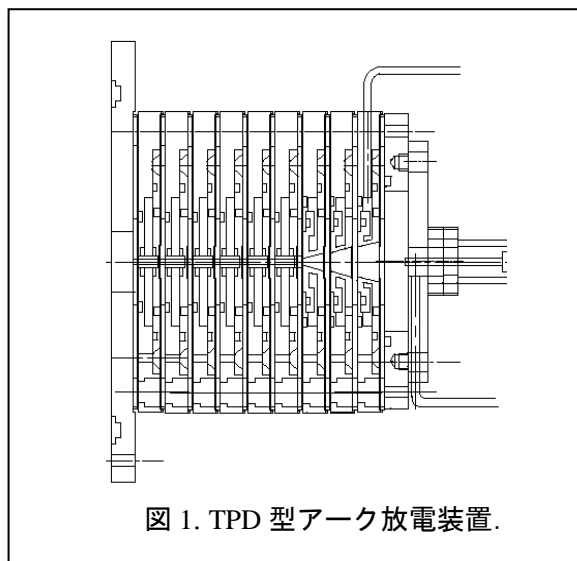


図 1. TPD 型アーク放電装置.



図 2 プラズマウィンドウ装置全体図

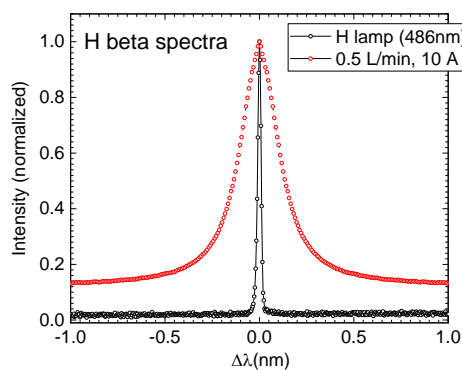


図 3. Hβスペクトル.

定), 及び, 高熱伝導剤の電極材 CuW へ変更 (製作済み) することで目標値の圧力勾配を容易に達成できると考えている.

一方, プラズマパラメータは可視分光スペクトル解析(H $\beta$ スペクトル, Ar I ボルツマンプロット)により, 陽極で温度 1.2 eV, 電子密度  $3 \times 10^{16} \text{ cm}^{-3}$ , 電離度は約 4% と評価された. 圧縮性流体力学によると陽極出口では流れが音速( $M=1$ )で密度が約半分に低下することを考えると, 放電チャンネル内の密度は  $6 \times 10^{16} \text{ cm}^{-3}$  以上, 電子温度 1.5eV 以上と考えられる. 典型的なカスケードアークプラズマ源では放電電流増大に伴い線形的に温度密度が増大することが判明している. したがって, 放電電流 100A では密度  $10^{17} \text{ cm}^{-3}$  以上, 温度 3eV 以上の高温密度プラズマが発生することは確実である. また, 現在は冷却水タンクの流量で制限されている運転時間に関しても内部循環式チラーを採用することで連続 200 時間以上の運転の実証実験が行える(現在は放電電流 60A における 7 時間運転で電極材の損傷なし).

#### 4 本研究が実社会にどう活かされるかー展望

本補助事業では, 大気圧アークプラズマを用いた真空インターフェースの基盤技術開発を行った. この技術は大気圧下での電子ビーム溶接を可能とする革命的プラズマ応用技術であるが, 実用化には未だ至っていなかった.

本事業では世界最高性能のプラズマウィンドウ装置プロトタイプ機の製作であったが, 今後さらなる実用化に向けた低コスト化・小型化研究が世界各国で進められ, 極めて高コストであった電子ビーム溶接が安価にできるようになる. これにより我が国の安心・安全社会の構築に大きく貢献できるものと考えている. 例えば, 電子ビーム溶接は高精度な溶接を可能とするが, 溶接物を真空中にいれなくてはいけないという大きな制約があった. 本事業で開発を行ったプラズマウィンドウを用いることで, 大気中での電子ビーム溶接が可能画期的技術である. このことは, 航空機や大型船舶, 大型ビル等の構造物にも適応できることを意味し, 高い信頼が求められる製造業に多大な貢献をもたらす.

#### 5 教歴・研究歴の流れにおける今回研究の位置づけ

本事業を通じて, アークプラズマがさまざまな工業・産業分野に強力なツールを提供できることを改めて実験することができた. 今回知り合った研究者と新規に共同研究を始めることにもつながり, スキルアップ・知識の習得に大いに役に立った事業である.

一方, 教育面では大学院生は座学で得た知識を実践で活かせるよう, 伝熱学, 圧縮性力学, プラズマ工学に対する深い知識を習得できたはずである. 社会人になってからも貴重な経験を提供できたと自負している.

#### 6 本研究にかかわる知財・発表論文等

##### 【発表資料等】

- ① 原著論文発表 (国内) 電気学会研究会資料 PST-16-062 43-46項 (2016)

発表者 難波慎一, 上田恵, 岩本勇樹, 松岡雷士, 田村直樹, 遠藤琢磨

「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」

【学会発表】

① 電気学会プラズマ研究会

発表者 難波慎一，上田恵，岩本勇樹，松岡雷士，田村直樹，遠藤琢磨  
「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」  
2016. 8. 9 大阪市立大学

② プラズマ核融合学会

発表者 上田恵，岩本勇樹，松岡雷士，難波慎一  
「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」  
2016. 11. 30 東北大学

③ 核融合科学研究所素過程研究会

発表者 難波慎一，上田恵，岩本勇樹，松岡雷士，鈴木千尋，田村直樹  
「カスケードアークプラズマにおけるH $\beta$ 線シュタルク拡がりによる電子密度計測」  
2016. 12. 20 核融合科学研究所

②日本物理学会年会

発表者 難波慎一，田村直樹  
TPD型カスケードアーク放電を用いたプラズマウィンドウの開発  
2017. 3. 21 大阪大学

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

なし

(2) (1) 以外で当事業において作成したもの

電子ビーム溶接のためのプラズマウィンドウ技術開発報告書

(URL) <http://home.hiroshima-u.ac.jp/plasma/>

8 事業内容についての問い合わせ先

所属機関名： 広島大学大学院工学研究科プラズマ基礎科学研究室（ヒロシマダイガクダイガクインコウガクケンキュウカ プラズマキソカガクケンキュウシツ）

住 所： 〒739-8527

広島県東広島市鏡山1-4-1

申 請 者： 教授 難波慎一（ナンバシンイチ）

担 当 部 署： 研究室（ケンキュウシツ）

E-mail： namba@hiroshima-u.ac.jp

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