

生駒 直弥 \*A) B)、奥野 広樹 B)、難波 慎一 C)、菊池 崇志 A)  
Naoya Ikoma \*A) B), Hiroki Okuno B), Shinichi Namba C), Takashi Kikuchi A)

A) Nagaoka University of Technology

B) RIKEN Nishina Center

C) Hiroshima University

## Abstract

Plasma window (PW) which separates vacuum and atmosphere by high-temperature arc plasma has many applications such as gas charge stripper and target system for heavy ion accelerator system. However, previous PW has only 2.3mm diameter while general heavy ion beam has diameter of 10mm approximately. Therefore, we developed new PW with diameter of 10 and 20mm for actual beam passing, and measured confinement pressure and electron density varying arc current. As results, pressure and electron density increased with arc current and they are reached to 10 [kPa] and  $3.4 \times 10^{14}$  [ $1/\text{cm}^3$ ] in diameter of 10mm and arc current of 100A.

## 1.

粒子加速器において、ビームライン中にガスを蓄積するためのビーム窓は重要な技術である。ビーム大強度化の要求に伴い、熱負荷や放射線損傷に耐えうる新たなビーム窓が必要とされている。プラズマウィンドウ (PW) は、アークプラズマによって大気と真空を封止する技術であり、重イオン加速器におけるガス荷電変換装置やターゲットシステムなど、様々な応用が期待できる。しかし、重イオンビームの直径は一般に 10mm 程度なのに対し、Hershcovitch によって開発された最初の PW [1] の直径は 2.36mm であり、ビームを通すには直径が小さすぎた。PW の大口径化を行うとともに、その径でどれだけの圧力を閉じ込めることができるかを調べる必要があった。

そこで我々は、広島大学、難波研究室で開発された TPD (Test Plasma by Direct current discharge) 型カスケードアーク放電装置 [2] を元に、直径 10, 20mm の PW を開発した。さらに、放電電流を変化させてプラズマ上流下流の圧力を測定した。また、生成されたプラズマの状態を知るために、可視分光によって電子密度を測定した。

## 2. 414

従来の PW の構造を Figure 1 に示す。カソードは、ホルダー先端に  $\text{ThO}_2 - \text{W}$  が取り付けられる構造になっており、これがカソードハウジングに対して放射状に 3 本付いている。カソードホルダー、カソードハウジング、中間電極、アノードはいずれも純度 99.9999% の無酸素銅でできており、水冷されている。この構造では、冷却水路と干渉するため 6mm 程度までしか直径を拡大

できず、また拡大には中間電極の切削が必要で一度加工してしまえば元に戻せない問題があった。

今回新たに作製した大口径 PW の構造を Figure 2 に示す。カソードには、先端を約  $30^\circ$  に削った CeW 溶接棒を使用した。中間電極は、アークプラズマに接する中心部分には高融点かつ高熱伝導率の CuW (Cu: 30%, W: 70%)、外側の部分にはステンレスが用いられており、この間に冷却水が流れる構造になっている。アノ

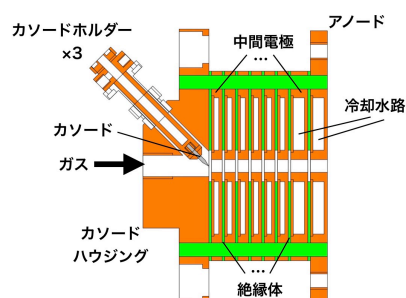


Figure 1: Previous PW.

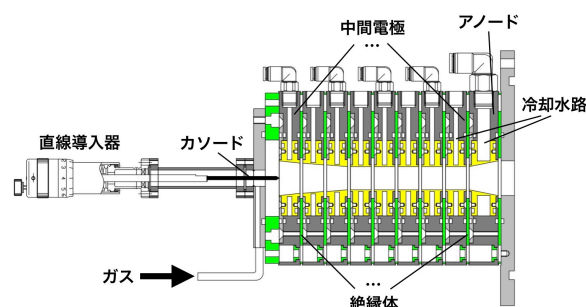


Figure 2: Newly fabricated PW with large aperture.

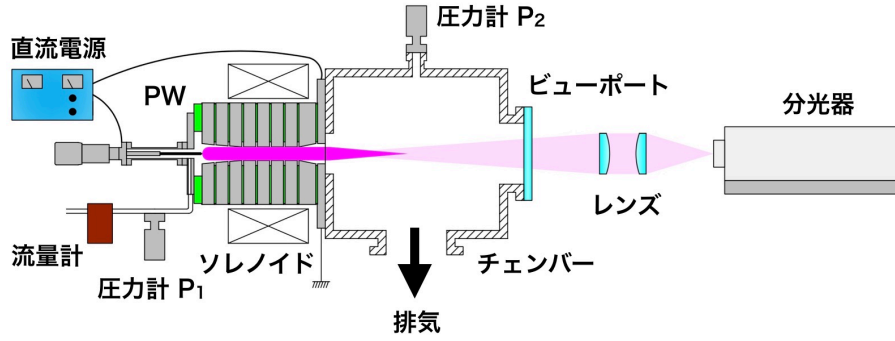


Figure 3: Experimental setup.

ードは、中間電極と同じ構造であるが、電流が流れ込むことによる熱負荷が最も集中する箇所であるため、プラズマとの接触面積をできるだけ大きくするため厚くなっている（中間電極は厚さ 18mm に対しアノードは 25mm）。CuW 部は、穴の直径が 10mm, 20mm のものを作製し、これらを交換することで直径を変えることができる。また、各電極間の絶縁体として、従来は G10 ガラスエポキシが使用されていたが、本 PW では将来的な放射線環境下での使用を考慮しアルミナを採用した。

### 3. 実験方法

実験セットアップを Figure 3 に示す。He ガスは、フローコントローラ（ATO VAC Type AFC500）を通して PW 上流部に供給される。直流電源によってアノード-カソード間に電圧が印加され、アークプラズマが生成される。プラズマはチェンバーに向かって膨張し、メカニカルブースターポンプ（MBP, Edwards EH500）及びロータリーポンプ（RP, Edwards E2M80）によって排気される。PW の外周にはソレノイドコイルが設けられており、最大電流 60A のとき約 60mT の磁場を発生させることができる。

PW の上流圧力  $P_1$ 、下流圧力  $P_2$  を、ピエゾゲージ（Pfeiffer Vacuum APR 267）、ピラニ & コールドカソードコンビネーションゲージ（Balzers PKR 250）でそれぞれ測定した。

チェンバーのさらに下流には分光器（Jobin Yvon HR-1000、焦点距離 1m、回折格子 2400grooves/mm）がセットされており、プラズマの発光は BK7 のビューポートを通して分光器の入口スリットにフォーカスされる。これらを用いて、発光スペクトル中の  $H_\beta$  線の Stark 拡がりから、電子密度を測定した。測定されるプラズマの発光スペクトルは、Gauss 分布で近似される装置固有の拡がりとは、Lorentz 分布で近似されるスペクトルの拡がりが増み込まれた、Voigt 分布で表される [3]。そこで、まず水素ランプ（Electro-Technic Products SP200）の  $H_\beta$  線を測定し、Gauss 分布でフィッティングすることにより装置関数の半値全幅  $\Delta\lambda_G$  を求める。そして、プラズマの  $H_\beta$  線を Voigt 分布でフィッティングし、先ほど求めた  $\Delta\lambda_G$  を用いてデコンボリューションすることにより、Lorentz 分布の半値全幅  $\Delta\lambda_L$  を得る。この

$\Delta\lambda_L$  を用いて、以下の式から電子密度  $n_e$  を求める [4].

$$\Delta\lambda_L = 4.8[\text{nm}] \times \left( \frac{n_e}{10^{23}[\text{m}^3]} \right) \quad (1)$$

PW の運転は、次のように行われる。まず、MBP 及び RP によりチェンバーを真空引きする。次にソレノイドコイルを励磁し、He ガスを流す。カソードに -1kV を印加すると、はじめはグロー放電が起こり、しばらくするとカソードがジュール加熱され、熱電子が始めアーク放電に移行する。このとき、電圧は 100V 前後まで低下する。

### 4. 実験結果

PW 上流圧力  $P_1$ 、下流圧力  $P_2$ 、及び電子密度の放電電流依存性を、Table 1 に示す条件で測定した。 $\phi 10\text{mm}$  では、流量 3.5[L/min] で固定、ソレノイド磁場なし、 $\phi 20\text{mm}$  では、流量 3.0[L/min] で固定、プラズマを安定させるためソレノイド磁場ありで実験した。 $P_1$ 、 $P_2$  の放電電流依存性を Figure 4, 5 にそれぞれ示す。点線は、プラズマを点火していないときの圧力を表している。 $\phi 10\text{mm}$  の場合、放電電流とともに  $P_1$  は上昇し、100A の時に 10kPa に達した。 $P_2$  は、プラズマを点火することで減少した。一方直径 20mm の場合は、放電電流を上げて  $P_1$  はプラズマ無しの圧力と変わらず、 $P_2$  は放電電流とともに上昇した。これは、プラズマによる真空封止効果が現れていないことを示している。

次に、電子密度の放電電流依存性を Figure 6 に示す。電子密度は、 $\phi 10$ 、20mm のいずれの場合も、放電電流に対してリニアに増加していくことが確認された。放電電流 100A のとき、 $\phi 10$ 、20mm でそれぞれ  $3.4 \times 10^{14}$ 、 $1.3 \times 10^{14}[\text{l}/\text{cm}^3]$  となり、比較的高密度のプラズマが得られていることが分かった。

Table 1: Experimental Conditions

	使用ガス	ガス流量 [L/min]	ソレノイド磁場
$\phi 10\text{mm}$	He	3.5	なし
$\phi 20\text{mm}$	He	3.0	あり (約 60mT)

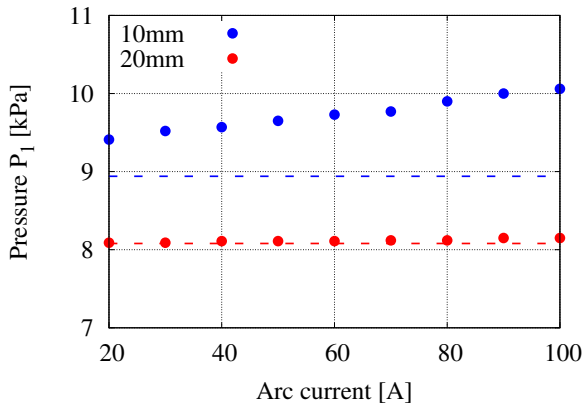


Figure 4: Dependence of  $P_1$  on arc current.

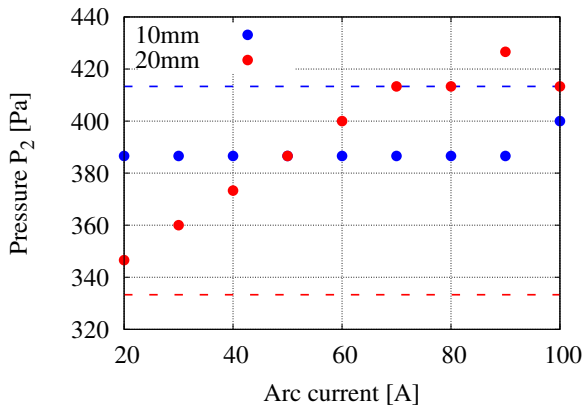


Figure 5: Dependence of  $P_2$  on arc current.

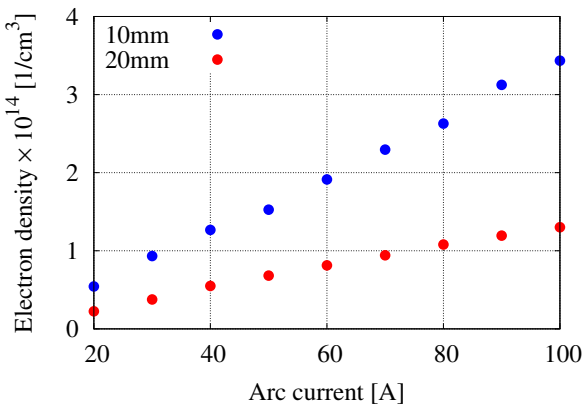


Figure 6: Dependence of electron density on arc current.

## 5. まとめ

大強度重イオン加速器におけるビーム窓への応用を目指して、直径 10mm, 20mm の PW を作製し、いずれも点火に成功した。10mm では、プラズマ点火により上流圧力  $P_1$  は増加し、放電電流 100A のとき 10kPa に

達したが、20mm ではプラズマによる真空封止の効果は見られなかった。電子密度は、放電電流 100A のとき  $\phi 10$ , 20mm でそれぞれ  $3.4 \times 10^{14}$ ,  $1.3 \times 10^{14}$  [1/cm<sup>3</sup>] であり、比較的高密度のプラズマが得られていることが分かった。今後、直径 6mm, 15mm の CuW 電極を作製し、各直径で PW が保持できる圧力の限界やその条件を詳しく調べる予定である。

本研究は、総合科学技術・イノベーション会議が主導する革新的研究開発推進プログラム (ImPACT) の一環として実施したものです。また、本研究は理研の大学院生リサーチ・アソシエイト制度の下での成果です。

## 参考文献

- [1] A. Hershcovitch, J. Appl. Phys. 78 5283 (1995).
- [2] S. Namba, T. Endo, S. Fujino, C. Suzuki, N. Tamura, Rev. Sci. Inst., 87 083503 (2016).
- [3] 山本学, 村山精一, 「プラズマの分光計測」, 学会出版センター (1995).
- [4] M. A. Gigosos, M. A. Gonzalez, V. Cardenoso, Spectrochimica Acta Part B, 58 (2003).