

## 【助成 39-23】

### 傍熱型ホローカソードを用いたプラズマウィンドウの実用化

代表研究者 広島大学工学部 助教 山崎 広太郎

#### 〔研究の概要〕

プラズマウィンドウ(PW)はプラズマの熱を用いて高めた粘性を用いて大気と真空の圧力差を支えるプラズマ応用技術である. 本研究では PW の実用化を阻む問題であるカソードの寿命を解決し, さらに圧力隔壁性能向上するために傍熱型ホローカソードを用いた PW の開発を行った. 本研究で開発した傍熱型ホローカソードを用いた PW は 1 時間以上の長時間にわたって圧力隔壁として動作することが確認された. またトムソン散乱計測を行うことで傍熱型ホローカソード出口付近において電子温度 1.6 eV 程度, 密度  $10^{19}$ - $10^{20}$   $m^{-3}$  程度の高温高密度なプラズマが生成できていることが確認できた.

#### 〔研究経過および成果〕

プラズマウィンドウ(PW)はプラズマの熱を用いて高めたガス粘性を用いて大気と真空の圧力差を支えるプラズマ応用技術である. PW はガラス窓等の固体を用いることなく大気と真空を隔てることができるため, 実用化できれば通常の真空窓を通過することができない軟X線や電子・イオンビームを大気側に導くことができ, 量子ビーム技術の適用範囲を大幅に拡張することが可能になる. これまで行われてきた PW の研究から, 実用化を図る上で従来以上に高密度なプラズマを長時間生成することが必要であることが明らかになった. 本研究では PW が抱える上記の課題を解決することを目的としてカソードを外部から加熱する機構を持つホローカソード(傍熱型ホローカソード)を用いた PW の開発を行った. ホローカソードは円筒形をした陰極のことであり, 放電の際に円筒内部に高密度プラズマを生成するホローカソード効果と呼ばれる性質を示すことが知られている. 陰極部から高密度プラズマを生成することができれば, チャンネルを通してガス粘性をさらに向上させることが可能となる. ま

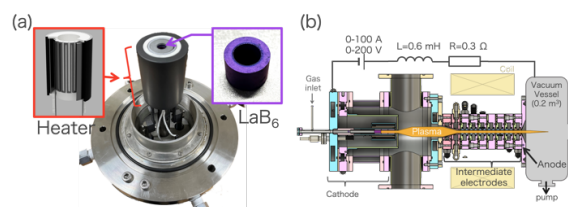


図 1 (a)傍熱型ホローカソードの概略図 (b)本研究で開発した PW の概略図

た, 従来の PW では陰極に表面積の小さい針状電極を用いており, 熱負荷による損傷が長時間放電実現を妨げていた. ホローカソードを用いることでプラズマとの接触面積が増えるため, 陰極に生じる熱負荷を大幅に低減させることが期待できる.

傍熱型ホローカソードの概略図を図 1 に示す. 円筒形 LaB6 の周囲に C/C コンポジット製のヒーターを設置し, LaB6 から生じる熱電子放出を促すことで放電に必要な電圧を低下させ, さらにカソード内部に高密度プラズマ柱を形成しやすい条件をつくり出す. ヒーターを用いて LaB6 を 1200 °C 以上に加熱した状態で放電を開始する.

傍熱型ホローカソードを用いた PW で得られた圧力隔壁性能を図 2 に示す. カソード側からヘリウムガ

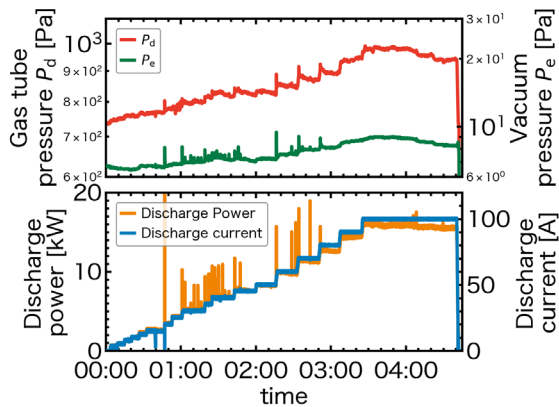


図 2 (上)大気圧側と真空容器側の圧力, (下)放電電力および放電電力の時間発展

を 0.07 L/min で流入させた状態で放電を行った。アーク放電電力を増加させて上流部圧力が 1 kPa 程度に達した条件で 1 時間以上にわたって圧力隔壁として動作させることに成功した。

PW の圧力隔壁特性を定量的に評価する上で重要である電子温度および密度を計測するためにレーザーを用いたトムソン散乱計測を行った。本研究では特に傍熱型ホローカソードで生成されるプラズマの電子温度密度と圧力隔壁性能の関係を明らかにするためにカソード出口から軸方向に 2 cm 離れた位置における電子温度密度計測を行った。計測により得られた電子温度および密度の放電電力依存性を図 3 に示す。電子密度は放電電力が増加するとともに  $10^{19}$ – $10^{20}$   $m^{-3}$  の範囲で増加しており、ガス流量にはほとんど依存していないことが明らかになった。放電電力増加とともに密度が増える傾向は H $\beta$  線のシュタルク広がりを用いた計測の結果と一致している。また、達成できた密度は以前の PW で達成できた  $6.6 \times 10^{19}$   $m^{-3}$  よりも高くなっており傍熱型ホローカソードを用いることでチャンネル内のプラズマの高密度化に成功したことが明らかになった。電子温度は放電電力にほとんど依存せず 1.6 eV 程度であることが明らかになっ

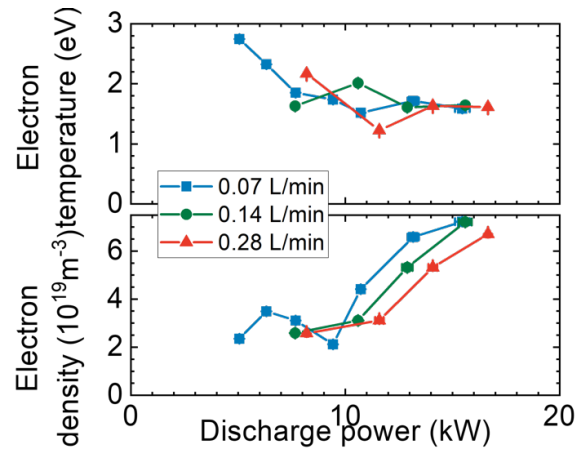


図 3 傍熱型ホローカソード出口付近における電子温度(上)密度(下)の放電電力依存性

た。これまで PW 内部の電子温度を推定する手法として、放電抵抗の変化を用いてきた[発表論文 1]。放電抵抗から推定した電子温度は放電電力に対して単調に増加していたため、トムソン散乱計測で得られた結果はこれまでの結果と矛盾する傾向を示している。トムソン散乱計測で得られたプラズマパラメータはカソード出口付近の局所的なデータであるのに対し、放電抵抗から推定した電子温度は PW のチャンネル全体で粗視化したデータである。そのためこれらの物理量に現れる傾向の不一致はカソード出口付近とチャンネル内部でプラズマパラメータが不均一であることを示唆している。そのため PW の圧力隔壁特性を定量的に評価するためにはカソード付近だけでなくチャンネル内部のパラメータを取得する必要があることが明らかになった。

[発表論文]

1. K. Yamasaki, O. Yanagi, Y. Sunada, *et al.*, “Discharge characteristics of steady-state high-density plasma source based on cascade arc discharge with hollow cathode” *Review of Scientific Instruments* **93**, 053502 (2022)