

磁化同軸プラズマガンにおける放電による予備電離の開発と評価

Development and Evaluation of Spark-Based Pre-Ionization in a Magnetized Coaxial Plasma Gun

○半田 博也¹, 関 太一², 宮本 靖孝², 小林 大地³, 高橋 努³, 浅井 朋彦³
 *Hiroya Handa¹, Taichi Seki², Yasutaka Miyamoto², Daichi Kobayashi³, Tsutomu Takahashi³, Tomohiko Asai³

Abstract : The magnetized coaxial plasma gun (MCPG) is a promising method to inject magnetized plasmoids for fueling fusion core plasmoids. However, plasmoids can be slowed down or trapped by the background magnetic fields before reaching the core. In this study, to increase injection velocity without raising the charging voltage, the initial inlet gas pressure was reduced. Since low gas pressure can decrease electron density and hinder breakdown according to Paschen's law, spark-based pre-ionization was employed to generate seed plasma between the electrodes. Plasmoid generation and injection experiments were conducted, and the discharge waveform, velocity, and electron density were measured. The effectiveness of pre-ionization in stabilizing breakdown and enhancing injection velocity was evaluated.

1. 研究背景・目的

磁化同軸プラズマガン (Magnetized Coaxial Plasma Gun: MCPG) は, 磁化プラズモイドを射出して核融合炉心プラズマへ燃料や磁気ヘリシティを供給する有力な手法として開発がすすめられている. 一般に強い磁場で閉じ込められた高温な炉心プラズマにプラズモイドを入射するためには閉じ込め磁場の磁気圧およびプラズマの熱圧力勾配に由来する効果を上回る運動エネルギーが必要である.

一方, MCPG の主放電回路では高電圧を用いることから, 放電電流の増強は容易ではない. そこで, 本研究では, 主放電回路を同じ条件下で運転した場合においても射出速度を向上させるための手法として初期導入ガスを低減させる方法に着目した. ガス圧の低下はプラズモイドの電子密度低減や放電を不安定化する懸念がある. これを克服する手段として予備電離を導入する. 新たな運転条件領域の拡大が期待できる. また低いバイアス磁場でも絶縁破壊が起き, バイアス磁場によるドラッグを低減することや絶縁破壊時のエネルギーのロスを低減することでガン放電電流が増加し運動エネルギーが上昇することも期待できる.

本研究では, 放電波形, プラズモイドの射出速度, 電子密度を計測することで, 放電による予備電離がMCPGの放電に影響を及ぼすことを確認する. その後, 低ガス圧・予備電離条件下におけるプラズモイド射出特性を明らかにする[1].

2. 磁化同軸プラズマガンの基本原理

MCPG は, 同軸状に配置された内部電極と外部電極, さらに内部電極の内部または外部電極の外側に設置さ

れるバイアス磁場コイルから構成される. 電極間に生成されたプラズマには大電流が流れ, この電流と自己磁場との相互作用により, プラズマは自己ローレンツ力を受けて軸方向へ加速される. その後, バイアス磁場による電磁誘導によってトロイダル電流が励起され, プラズマは磁化プラズモイドとして形成されながら射出される. [1]

3. 予備電離機構

本研究では, MCPG のプラズマの射出口から 674 mm の位置に予備電離装置を設置した. 装置内の直流電源側電極と高圧電源側電極はセラミック管の中を通して Figure 1 のように固定されており電極間距離は約 3 mm である. 直流電源側の電極にはあらかじめ電流を流しておき, 熱電子を放出する. ガス導入と同時に高圧電源から電流を印加することで, パッシェンの法則に基づいて両電極間に絶縁破壊を誘発する. その際に発生する放電により電子が加速され, 気体分子との衝突電離を経て種プラズマが生成される.



Figure 1. Inside the pre-ionization mechanism

4. 実験概要

本実験の MCPG の主放電回路の充電電源は最大 10 kV の充電電源、コンデンサーは1つ 30 μ F のコンデンサーを3つ並列に接続している。Figure 2 の装置系を用いて放電による予備電離が MCPG に影響を与えることを調査する。充電電圧を 8 kV, 9 kV, 10 kV と変更した場合と予備電離を適用の有無についての計 6 条件について各 1 ショットずつ行った。また、導入ガス圧を 0.061 MPa, ガス導入から放電までの遅延を 10 ms に固定して実験を行った。

測定については、トリプルプローブを用いて電流法により電子温度および電子密度を測定した。

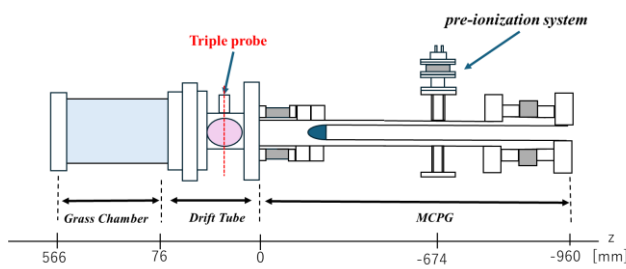


Figure 2. schematic diagram of the experimental system

5. 実験結果

Figure 3, 4 に、予備電離を適用した場合と適用しなかった場合の充電電圧 10 kV における電子温度・電子密度および電流波形の結果を示す。Figure 3, 4 の結果から、トリプルプローブを通過するプラズマの検出時間を予備電離の適用の有無について比較すると約 100 μ s 増加している事が確認できる。したがって予備電離を適用した場合には電子温度の信号の持続時間が有意に伸長している。この傾向は充電電圧 8 kV および 9 kV においても同様に観測された。以上の結果から、MCPG の放電に対して放電による予備電離が効果を与えていることが示された。

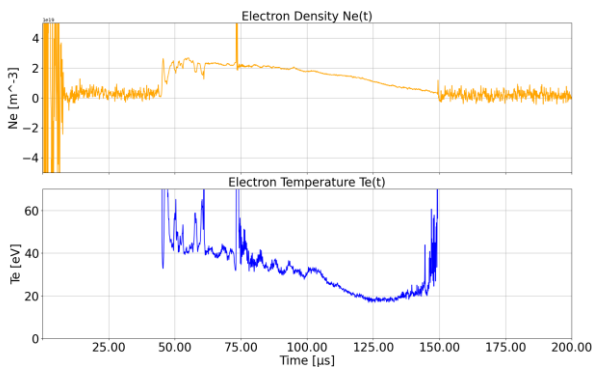


Figure 3. Electron temperature and density with pre-ionization at 10 kV

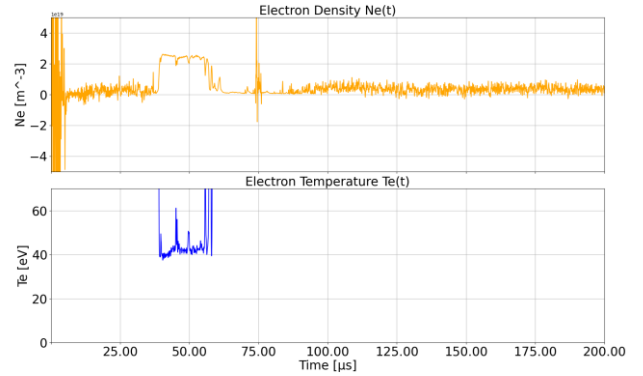


Figure 4. Electron temperature and density without pre-ionization at 10 kV

6. 今後の展望

予備電離を適用した場合と適用していない場合のそれぞれの結果から放電による予備電離が MCPG の放電に影響を与えることが確認できたため、今後の実験では予備電離が射出速度および電子密度に及ぼす影響を総合的に評価することを目的とする。具体的には、プラズモイド射出速度のガス圧依存性を調べるために、導入ガス圧を 0.101 MPa から 0.041 MPa まで 0.02 MPa 刻みで変化させた場合と予備電離の適用の有無について、計 8 条件で各 3 ショットずつ放電実験を行う。

測定装置については、トリプルプローブを用いた電子温度および電子密度の計測、Photomultiplier Tube によって検出されるプラズマが発する光の立ち上がりの時間差を用いた Time of flight 法による射出速度の計測、さらにログスキーコイルによるガン電流の計測も継続して行う。これらの結果を総合することで、放電による予備電離の有効性を評価する。

7. 参考文献

[1] T. Matsumoto et al., “Development of a magnetized coaxial plasma gun for compact toroid injection into the C-2 field-reversed configuration device”, Rev. Sci. Instrum. 87, 053512 (2016).
 [2] T. Edo et al., “Performance Improvement of a Magnetized Coaxial Plasma Gun by Adopting Iron-Core Bias Coil and Pre-Ionization Systems,” Plasma and Fusion Research, 13, 3406094 (2018).
 [3] 鄭 信力, 「Triple probes によるプラズマの瞬間測定」, 核融合研究, 12 巻 1 号, pp. 35-50, 1964 年 1 月.
 [4] T. Asai et al., “Compact toroid injection fueling in a large field-reversed configuration,” Nuclear Fusion, 57 (7), 076019 (2017).