

プラズマ・壁相互作用模擬実験のためのヘリコン波 プラズマの特性

坂本, 瑞樹
九州大学応用力学研究所

宮崎, 俊昌
九州大学総合理工学府

庄司, 多津男
名古屋大学工学部

芦川, 直子
核融合科学研究所

他

<https://doi.org/10.15017/14178>

出版情報 : 九州大学応用力学研究所所報. 134, pp.61-64, 2008-03. Research Institute for Applied Mechanics, Kyushu University

バージョン :

権利関係 :

プラズマ・壁相互作用模擬実験のための ヘリコン波プラズマの特性

坂本瑞樹*¹ 宮崎俊昌*² 庄司多津男*³ 芦川直子*⁴ 徳永和俊*¹

増崎 貴*⁴ 大宅 薫*⁵ 相良明男*⁴ 佐藤浩之助*¹

(2008年1月31日受理)

Characteristics of Helicon Wave Plasmas for Simulation of Plasma-Wall Interaction

Mizuki SAKAMOTO, Toshimasa MIYAZAKI, Tatsuo SHOJI, Naoko ASHIKAWA, Kazutoshi TOKUNAGA,

Suguru MASUZAKI, Kaoru OHYA, Akio SAGARA, Kohnosuke SATO

E-mail of corresponding author: sakamoto@triam.kyushu-u.ac.jp

Abstract

We have also been developing a PWI simulator of which plasma source is a steady-state RF helicon wave plasma supply to demonstrate in situ and real-time measurement and to study PWI phenomena. A helical antenna is surrounding a cylindrical quartz tube of which outer diameter is ~5 cm. The antenna is connected to an RF power supply of which power is up to 5 kW through a matching box. A set of two coils produces an axial magnetic field of 0.05 T at the plasma center. At present, the electron density at the plasma center is up to $\sim 3 \times 10^{18} \text{ m}^{-3}$ and electron temperature is up to $\sim 10 \text{ eV}$. Rather high plasma flux density of $\sim 4 \times 10^{22} \text{ m}^{-2} \text{ s}^{-1}$ to the substrate has been obtained.

Key words : Plasma-Wall Interaction, Helicon Wave Plasma

1. 緒言

プラズマ・壁相互作用 (PWI) の理解は、定常プラズマ維持のための必須の課題である。プラズマ対向壁表面はプラズマ放電中に損耗・再堆積や照射損傷を受け、時々刻々とその状態を変えていく。このような壁表面の改質を実時間で評価することは長時間定常放電時のプラズマ・壁相互作用の理解のために重要となる。壁表面改質の時定数は長く、またプラズマの状態にも依存し、短パルス放電ではその変化を明確に見ることは困難である。さらに実機では運転条件 (プラズマの状態) が実験テーマ毎に様々に変わるため、マテリアルプローブ等の試料の事後解析だけでは、その複合的な試料表面状態とプラズマとの因果関係を明確にすることは一般的

に困難である。

プラズマ放電中の複雑な PWI 現象を理解するためには、実時間その場観察が可能な壁表面計測が必要となる。さらに、試料の事後解析と実時間その場観察とを組み合わせることで PWI の理解が一層深まることが期待される。しかしながら、これまでコアプラズマや周辺プラズマの計測が精力的に開発されてきたのに対して、壁表面の実時間計測法の開発はあまり進んでいないのが現状である。壁の損耗・再堆積の実時間計測に関しては、これまでに水晶発振子マイクロバランス測定法や干渉法に基づくレーザー反射強度計測による実時間その場観察の損耗・再堆積計測法などが開発されてきている [1-4]。

長時間放電中のプラズマ対向壁表面改質の実時間計測法の開発と壁表面改質の基礎過程の研究を行うために、プラズマ・壁相互作用を模擬するための実験装置を整備している。本論文では、プラズマ・壁相互作用模擬実験に用いるヘリコン波プラズマ源の特性について報告する。

*1 九州大学応用力学研究所

*2 九州大学総合理工学府

*3 名古屋大学工学部

*4 核融合科学研究所

*5 徳島大ソシオテクノサイエンス

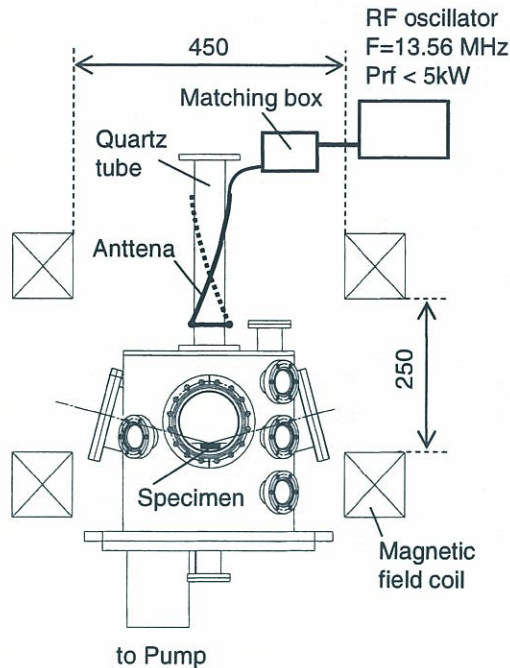
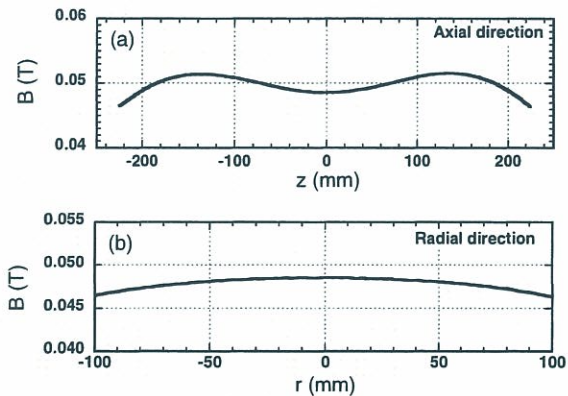


Fig.1 Schematic view of the experimental setup.

Fig.2 Magnetic field distributions in the axial direction at $r=0$ (a), and the radial direction at $z=0$ (b).

2. 実験装置

Fig.1に本研究で用いる実験装置の概略図を示す。真空容器の直径は約280mm、高さ約310mmである。真空容器上部に外径50mmの石英管とヘリカルアンテナが設置されている。真空容器中心部には水冷型の無酸素銅ステージ上に試料が固定されている。真空容器下部には排気ポートがあり、手動ゲートバルブとターボ分子ポンプ(300L/s)が設置されている。到達真空度は約 2×10^{-7} Torrである。プラズマ生成用のガスは、真空容器上部から流量調節器を経て真空容器内部に供給される。手動ゲートバルブの開

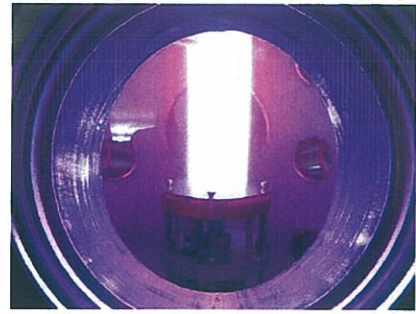


Fig.3 Picture of hydrogen plasma. The white arrow indicates the measurement position of a Langmuir probe.

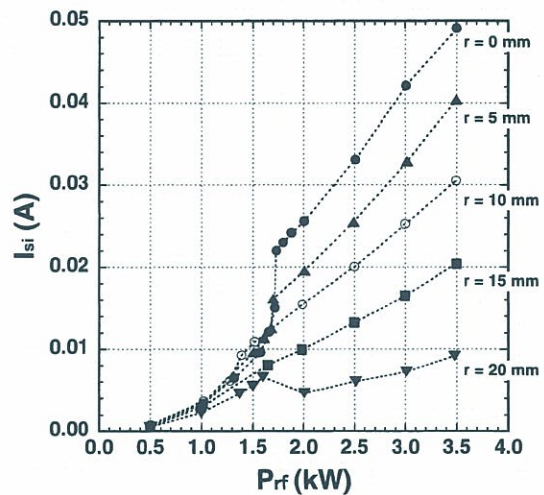


Fig.4 Ion saturated current as a function of RF power.

度も調整することにより、真空容器内圧を数 mTorr から数 10mTorr としている。

真空容器の回りにはプラズマ閉じ込め用の磁場コイル(内径 $\sim \phi 450$ mm)2個が設置されている。Fig.2に示すように、真空容器中心部で平均約0.05Tの磁場を生成することが可能であり、試料設置領域($< \phi 20$)ではほぼ一様な磁場強度となっている。

ヘリカルアンテナに13.56MHzの高周波(< 5 kW)を印加することによりヘリコン波($m=+1$ モード)を励起し、高密度プラズマを生成する。石英管部で生成されたプラズマは、真空容器中央部に設置された材料試料に照射される。また、真空容器内部には、タングステンやモリブデン等の金属フィラメントが設置され、そのフィラメントに通電加熱することで、フィラメントから原子を蒸発させ、材料試料表面上に水素との共堆積層を形成させることが可能となっている。この共堆積層の成長過程を分光エリプソメトリー法を用いて計測する予定であり、真空

容器の分光エリプソメトリー用ポートは、材料試料 (Mo, W 等) の可視光領域でのプリュスター角を考慮して中心軸から 75 度傾けた構造としている。

3. 実験結果

共堆積層を形成する前段階として、水素及びヘリウムのプラズマ生成実験を行い、安定してプラズマを生成可能であることを確認した。Fig.3 に水素プラズマ生成時の装置内部写真を示す。真空容器内下部に設置された試料取り付け用ステージにプラズマが照射されている。また、Fig.3 の白矢印で示した位置でラングミュアプローブ計測が行われている。

Fig.4 に水素プラズマにおけるイオン飽和電流の RF パワー依存性を示す。実験条件としては、真空容器内圧力が約 7mTorr、磁場が 0.025T である。RF パワー (Prf) が約 1.7kW において、急激にイオン飽和電流が増加 (密度ジャンプ) していることが分かる。r>10mm の領域では、密度ジャンプ現象は見られず、r<10mm のプラズマ中心部においてのみ急激な密度ジャンプが起きている。この密度ジャンプが起きた時には、プラズマ中心部に輝度の高い円筒状の領域が発生することが観測されている。低パワーすなわち低密度時には、アンテナの電流や電位により励起された高周波電場による電子加速や遅波による電子加熱によりプラズマが生成・維持され、RF パワーが増加し密度が上昇してくるとヘリコン波がプラズマ中に励起され、電子を加熱してプラズマ中心部の高密度プラズマを維持していると考えられる。

本研究での実験条件では、マイクロ波の周波数 ω は $\omega_{ci} \ll \omega \ll \omega_{ce}$ となり、この時の分散関係は

$$c^2 k_z (k_z^2 + k_\perp^2)^{1/2} = (\omega / \omega_{ce}) \omega_{pe}^2 \quad (1)$$

と書くことができる。ここで、c は光速、 ω_{ci} はイオンサイクロトロン周波数、 ω_{ce} は電子サイクロトロン周波数、 ω_{pe} はプラズマ振動数であり、 k_z 、 k_\perp はそれぞれ磁場と平行方向、直角方向の波数である。本研究での水素のヘリコン波プラズマでの実験パラメーターにおいては、磁力線方向のヘリコン波の波長は約 14cm となる。

Fig.5 にラングミュアプローブ (シングルプローブ) で測定した電子密度 n_e 、電子温度 T_e 、浮遊電位 V_f の半径方向空間分布を示す。ラングミュアプローブの測定は、材料試料より 100mm 上流 (Fig.3 の矢印で示した位置) で行った。密度分布は、Fig.5(a) に示すようにプラズマの端から中心にいくにつれて増加し、プラズマ中心での電子密度は $2.7 \times 10^{18} \text{ m}^{-3}$ である。一方、電子温度は、プラズマ中心部のみ $T_e \sim 7.6 \text{ eV}$ と高く、それ以外の領域

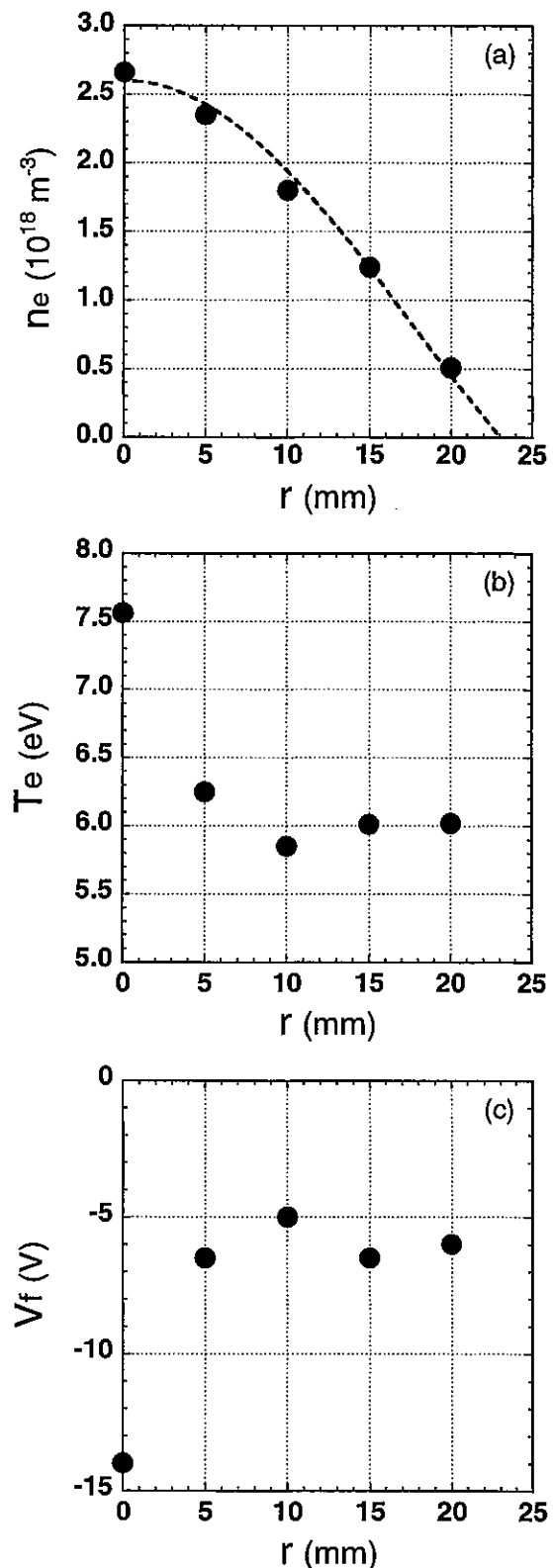


Fig.5 Radial profiles of (a) electron density, (b) electron temperature and (c) floating potential, which are measured by a Langmuir probe.

ではほぼ一定 ($T_e \sim 6\text{eV}$) であった。また、浮遊電位も電子温度と同様な傾向にあり、プラズマ中心部のみ $V_f \sim -14\text{V}$ と低く、それ以外の領域では $V_f \sim -6\text{V}$ であった。このプラズマ中心部での電子温度、浮遊電位の変化のメカニズムに関しては今後の課題である。

プラズマ中心部で得られた密度、温度から評価されるイオン粒子束は、約 $3.6 \times 10^{22} \text{m}^{-2} \text{s}^{-1}$ と比較的高い値が得られ、今後の共堆積層形成実験において効率的なプラズマ照射が可能であることが確認された。

4. まとめ

壁表面改質を実時間計測するために PWI 模擬実験装置を製作し、水素及びヘリウムのヘリコン波プラズマを安定に生成することに成功した。RF パワー3.5kW、磁場0.025T の実験条件において、プラズマ中心部にて、電子密度約 $2.7 \times 10^{18} \text{m}^{-3}$ 、電子温度約7.6eVを得た。材料試料へのイオン粒子束は約 $3.6 \times 10^{22} \text{m}^{-2} \text{s}^{-1}$ であり、今

後の共堆積層形成実験において効率的なプラズマ照射が可能であることが確認された。

参考文献

- 1) D. Bourgoïn, G. G. Ross, S. Savoie, Y. Drolet and E. Haddad, J. Nucl. Mater., Vol.241-243, (1997) 765-770.
- 2) H.G. Esser, V. Philipps, M. Freisinger, G.F. Matthews, J.P. Coad and G.F. Neill, J. Nucl. Mater., Vol.337-339, (2005) 84-88.
- 3) F. Weschenfelder, P. Wienhold and J. Winter, J. Nucl. Mater., Vol.196-198 (1992) 1101-1105.
- 4) M. Sakamoto, M. Ogawa, H. Zushi, A. Higashijima, H. Nakashima, S. Kawasaki, M. Hasegawa, H. Idei, K. Hanada, K. Nakamura and K.N. Sato, J. Nucl. Mater., Vol.363-365, (2007) 233-237.