

磁気圏型プラズマ閉じ込め装置 RT-1 における電子サイクロトロン加熱と ICRF 加熱に関する研究

47-146066 虫明 敏生
(指導教員 西浦 正樹 准教授)

Key Words : Ion cyclotron heating, Pockels effect, Radio frequency waves, Dipole magnetic field confinement, Electric field

1. Introduction

現在、核融合によるエネルギー供給を実現させるために高温プラズマの閉じ込めに関する研究が世界中で行われている。

磁気圏型プラズマ閉じ込め装置 RT-1(Ring Trap1)では、木星に代表される惑星磁気圏を模擬したダイポール磁場を発生させることができる。RT-1は先進核融合装置としてこの磁場配位を利用し、ダイポール磁場中にプラズマを閉じ込めている。RT-1の断面図を Fig.1 に示す。

現在までの研究では、電子サイクロトロン加熱により局所電子 β 値が100%を超え、数十 keV の高エネルギーを持った電子が報告されている[1]。しかし、イオン温度は数 eV までしか加熱できておらず、イオンサイクロトロン周波数帯(ICRF)加熱による実験が進められている。高イオン β 値を実現させるには、ICH による波の伝搬特性を明らかにしなければならない。

以上を踏まえて、本研究では非線形光学素子を用いた電場計測システムを開発し、RT-1 内部の RF 電場の直接計測と波動伝搬解析コード(TASK)によるシミュレーションを行った。

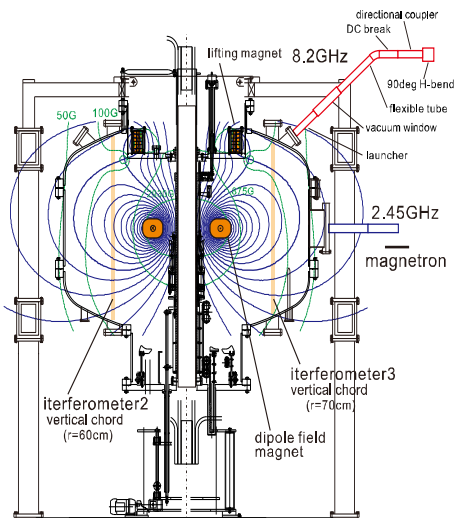


Fig.1 RT-1 の断面図

2. 光電界センサシステムを用いた電場計測

本研究では、ポッケルス素子を用いて電場を計測する光電界センサシステムを設計・製作した。ポッケルス素子とは、「ポッケルス効果」を持つ誘電体のことであり、ある方向に電界が加えられるとその強度に比例して屈折率が変化する結晶である。この性質を利用することで、局所的な電場を計測することができる。ポッケルス素子とミラーを組み合わせた光電界センサ(Electro-Optical sensor)やレーザー、サーキュレータなどを組み込むことで信号を検出している[2]。その計測システムを Fig.2 に示す。

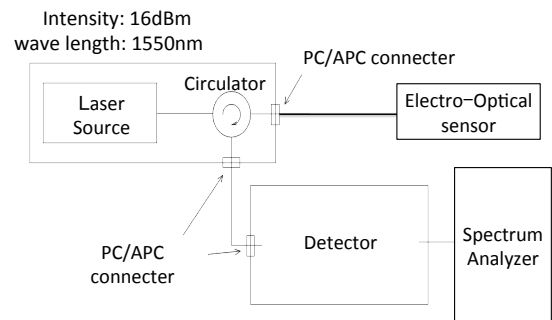


Fig.2 光電界センサシステム

3. 大気中における電場計測結果とシミュレーション結果

Fig.3にRT-1内部の電場計測のセットアップを示す。Fig.3の橙点で示されている Double-loop アンテナ前面の Z 軸に沿って計測を行った。径方向 $R=0.26[m]$ の位置で真空容器の真上から電界センサを挿入している。計測範囲は $Z=0.19\sim 0.4[m]$ となっている。電場の方向は紙面奥行き方向、 θ 方向である。Fig.3における計測結果とシミュレーション結果との比較を Fig.4 に示す。

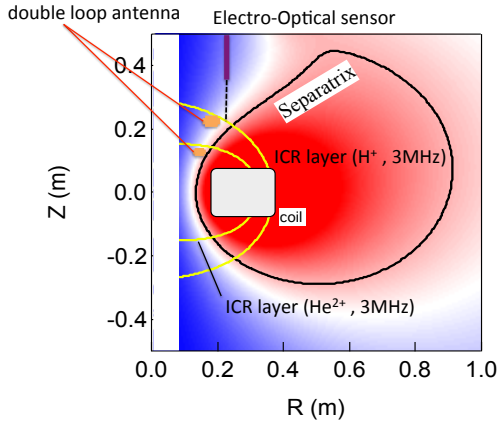


Fig.3 ICRF アンテナと電場計測の測定位置

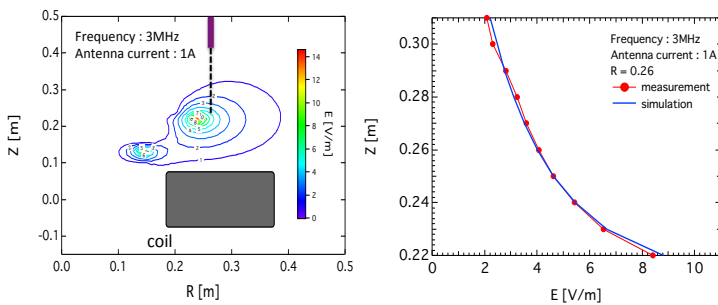


Fig.4 TASK/WF コードにより計算された電界(θ 方向)の等高線図(左図), θ 方向の電場計測結果とシミュレーション結果の比較(右図)

Fig.4 より, 計測結果とシミュレーション結果が良い一致をしており, シミュレーションと電場計測システムの信頼性を示した.

4. プラズマ中における電場計測結果とシミュレーション結果

プラズマ中を伝搬する RF 電場を光電界センサシステムにより計測した. 計測位置は, Fig.3 において $R=0.72$ の位置で行った. θ 方向の電場を計測し, その計測範囲は $Z=0.19\sim 0.4$ [m] となっている. 超電導コイルを着地した状態で計測した結果を Fig.5 に示す.

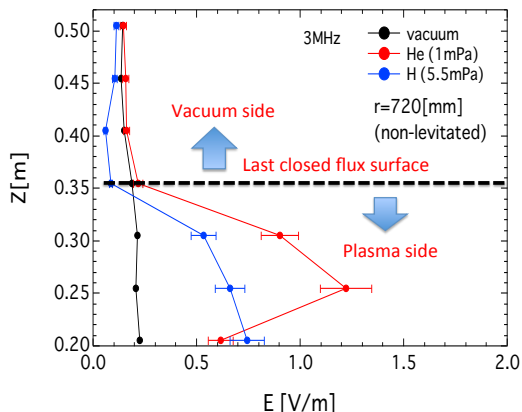


Fig.5 プラズマ中における電場計測結果

Fig.5 より, プラズマ中では電場の強度が大きくなるという結果が得られた. この結果より, プラズマ中の電場は電子密度に大きく依存していると考えられる. 電子密度を変化させたシミュレーションでの電場分布から, 電子密度が高い方が電場の染み込みが強いことが確認できている. 続いて, 超電導コイルを浮上させた状態においてプラズマ中の電場計測を行った結果を Fig.6 に示す.

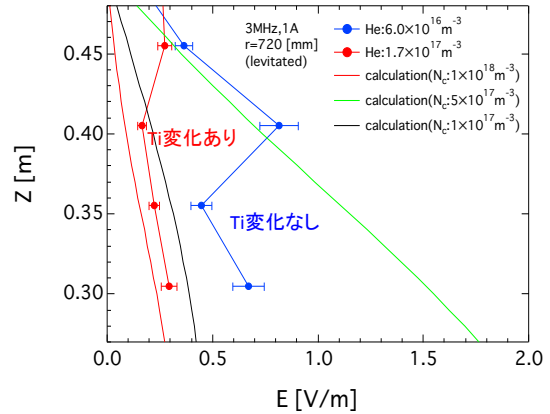


Fig.6 各イオン種によるパワー吸収の密度依存性

Fig.6 においても, プラズマ中の電場は電子密度に大きく依存している結果が得られた. この結果からは, 電子密度が高いとプラズマ中の電場が小さくなるという結果が得られた. シミュレーションにおいても同様の結果が得られ, これはプラズマが ICRF アンテナから放射されたパワーを吸収しているためであると考えられる. 分光のドップラー広がりによるイオン温度の計測から, 密度が高いプラズマにおいてはイオン温度 (C^{2+}, He^+) の上昇が確認できており, 電界の計測結果とシミュレーション結果との整合性が確認できている.

5. まとめ

プラズマ中の波動伝搬を計測するためのシステムを開発し, RT-1 内部の RF 電場分布の計測を可能にした.

TASK コードによる計算との比較を行い, 計測結果を再現していることを示した.

シミュレーション結果から, ICRF アンテナによるイオンの加熱特性を明らかにし, その結果に基づいて設計した ICRF アンテナによって磁気圏型プラズマにおいて初めてイオンの加熱に成功した.

プラズマを伝搬する RF 電場を計測することで, プラズマ中の RF 電場は電子密度に大きく依存するという結果が得られた.

5. 参考文献

- [1] M.Nishikura et al Nuc. Fusion 55,053019 (2015) 1-5.
- [2] K.Hidaka J. Appl. Proc... 53,5999 (1982).