

磁気圏型プラズマ閉じ込め装置RT-1における 自己組織化プラズマの密度限界の解明

学生証番号 47186098 氏名 森 敬洋
(指導教員 西浦 正樹 准教授)

Key Words : magnetospheric plasma, electron cyclotron wave,
ECH, over dense plasma

1. 研究背景

ダイポール磁場配位は、プラズマ閉じ込めのための本質的な基本構造であり、普遍的な物理的原理を引き出すための適当な研究課題である。Ring Trap 1 (RT-1)装置は木星の磁気圏によって動機付けられた装置であり、磁気圏プラズマ物理学と先進核融合の両方を研究することを可能にしている。RT-1におけるプラズマは、2.45 GHzおよび8.2 GHzの電子サイクロトロン(EC)波の一方または両方を使用する電子サイクロトロン加熱(ECH)によって生成される。このようにして生成されたプラズマはピークのある密度プロファイルを持ち、それは自然に形成された惑星磁気圏でも観察される自己組織化構造を持つ。8.2 GHzのEC波では、線平均電子密度はカットオフ密度以下の範囲に制限される。しかし、同じ干渉計を使用して電子密度を測定した場合でも、2.45 GHzのEC波が2.45 GHzのカットオフ密度を超えるoverdense状態であることが実験から明らかになっている。EC波の伝播と吸収を理解することは、8.2と2.45 GHzのECHによる電子密度限界から基礎となる物理学を抽出するために不可欠である。これらの現象が、ダイポール閉じ込めシステムによって生成された固有の磁気構造および不均一性によって引き起こされているかどうかは不明であるため、プラズマの高性能、高密度化のためには詳細な研究が望まれる。

2. 目的および手法

本研究の目的は、ダイポールプラズマ閉じ込めにおけるoverdense状態および電子密度限界の解明である。

目的に対する研究手法として、

1. ダイポール閉じ込めプラズマ中のEC波の伝搬とプラズマの電力吸収を波動光学を用いて解析する
2. プラズマの電磁波吸収効率の実験による検証を行う

の2つの内容を研究した。

3. RT-1実験における電子密度限界

ダイポール磁場配位は、図1にRT-1装置の断面およびECHシステムを示す。真空容器の内部は 10^{-6} Paまで排気され、プラズマの粒子源である水素またはヘリウムガスが真空容器に導入された後、ECHを利用してプラズマを生成し、維持する。

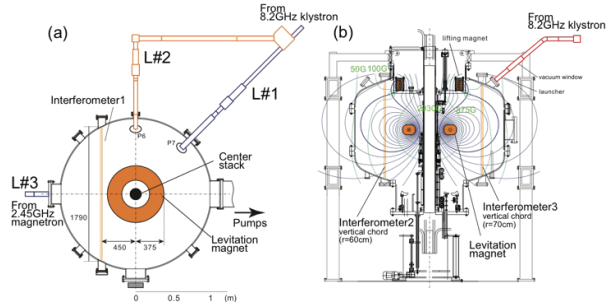


図1 RT-1装置の(a)水平断面(b)垂直断面。L#1およびL#2は8.2 GHzのECHで、L#3は2.45 GHzのECHで使用される。

実験では、干渉計1(IF1)を使用して線平均電子密度を測定した。

2.45 GHzのECHの実験的な密度限界を図2に示す。電子密度限界は $1.6 \times 10^{17} \text{ m}^{-3}$ であり、これは2.45 GHzのカットオフ密度である $0.8 \times 10^{17} \text{ m}^{-3}$ を超えたoverdenseのプラズマの形成を示している。

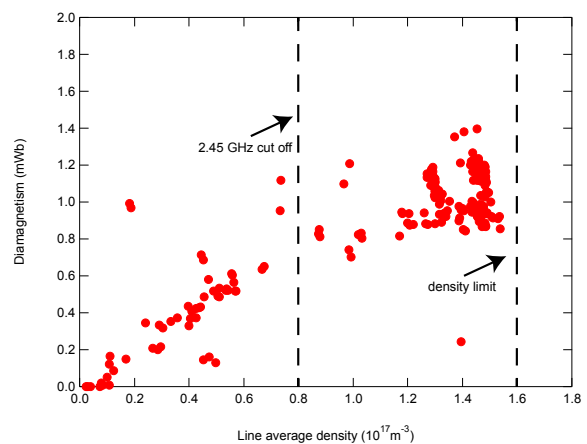


図2 2.45 GHz ECHにおけるRT-1の電子密度限界

4. EC波波動光学計算およびECH効率計算

Maxwell方程式を有限要素法を用いて解く波動光学電磁波伝搬計算を2次元空間で行なった。この際、cold plasma近似によるプラズマの誘電率テンソルを利用した。計算においてRT-1の真空磁場分布および干渉計から再構成された代表的な電子密度分布を用いた。境界条件としてRT-1真空容器形状を取り入れ、完全反射境界として取り扱った。

磁場に対して入射した電磁波の電場が平行な場合をO-mode励起、垂直な場合をX-mode励起としてRT-1プラズマ中の2次元EC波伝搬を計算した。O-mode励起では $P=0$ 、X-mode励起では $R=0$ で電磁波が反射されて直接EC共鳴層に到達できない。しかし電磁波が真空容器で反射されることを考慮するとEC共鳴層に到達し、プラズマを加熱可能であることが示された。

EC波伝搬計算結果から、数値計算におけるプラズマのEC波電力吸収 P_{abs} を計算した。その際、熱いプラズマ近似から導かれる以下の近似式を用いた。

$$P_{abs} = \frac{\omega_{pe}^2}{2k_z v_{Te}} \sqrt{\frac{\pi}{2}} \exp\left(-\frac{(\omega - \omega_{ce})^2}{2k_z^2 v_{Te}^2}\right) \frac{\epsilon_0}{2} |E_x - iE_y|^2$$

EC共鳴層付近でおよそ1MW/m³の電力吸収が計算され、その体積積分によってプラズマ全体のEC波電力吸収効率を求めた。図3に吸収効率の電子密度依存性計算結果を示す。吸収効率は $2.0 \times 10^{16} \text{ m}^{-3}$ で0%となる。この結果は実験的な電子密度限界の値および2.45 GHzのカットオフ密度に対して非常に小さいため、現状の計算は実験結果を十分に説明できるものではない。原因としては、2次元cold plasma近似による波動伝搬計算であるため、3次元方向のEC波動の広がりおよび反射、またはカットオフ密度が存在しないプラズマ中の波動モードである電子バーンシュタイン波(EBW)への変換が考慮できていないことが原因として考えられる。

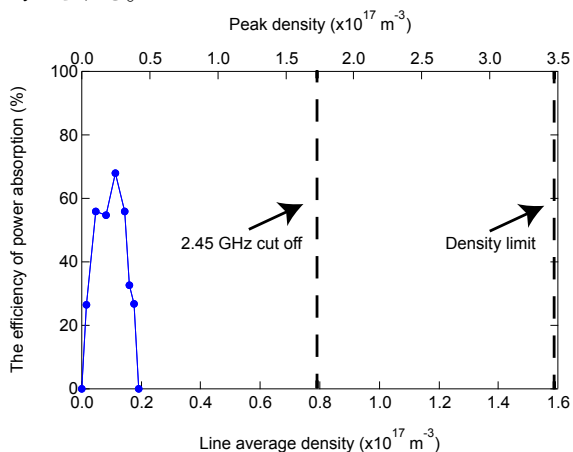


図3 各線平均電子密度における2.45 GHz EC波電力吸収効率計算

5. ECH効率実験計測

ECHの出力を一定の周波数で変調すると、プラズマの反磁性信号、すなわちプラズマ蓄積エネルギーも

応答を示すため、ECHの1周期の変調に反応する反磁性信号の微分値から、ECHの吸収電力を解析することが可能である。図4にECH出力変調を用いたプラズマのEC波電力吸収効率の電子密度依存性の計測結果を示す。

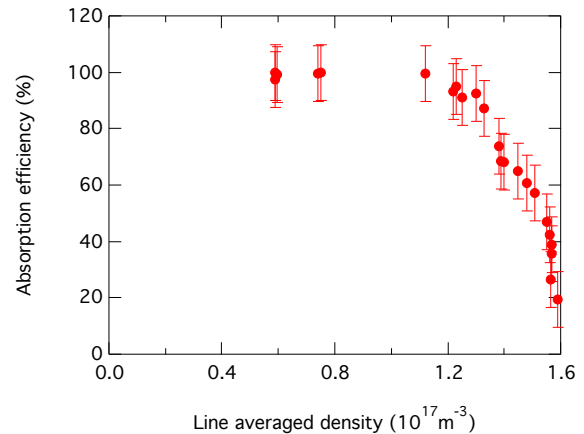


図4 ECH出力変調を用いた2.45 GHz EC波電力吸収効率の電子密度依存性

遮断周波数である $0.8 \times 10^{17} \text{ m}^{-3}$ 前後において電力吸収効率は約100%で変化せず、その後密度増加に伴い球種効率が悪化し、 $1.6 \times 10^{17} \text{ m}^{-3}$ で吸収効率が20%に減少している。吸収効率の低下がプラズマの密度限界に影響を与えている。

また、エネルギー閉じ込め時間についても反磁性信号の微分値から解析を行った。その結果エネルギー閉じ込め時間は電子密度の上昇とともに悪化し、 $1.6 \times 10^{17} \text{ m}^{-3}$ では5 msになることが示された。

6. まとめ

RT-1装置における加熱メカニズムおよび電子密度限界を、波動光学計算による電力吸収効率計算およびECH出力変調による電力吸収効率測定で解析した。

数値計算ではカットオフ密度の25%の密度で吸収が0となり、実験で観測されている電子密度限界を説明できない。その主要因として現象の計算で模擬していない3次元の反射や回り込み効果、およびモード変換によるカットオフ密度を超えた加熱可能性が挙げられる。

電力吸収効率測定ではカットオフ密度付近では吸収効率は100%を維持しているが密度限界付近において吸収効率は0に近づいた。吸収効率の低下が密度限界を引き起こしていることが明らかになった。これはプラズマの電子密度の増加に伴いEC共鳴層の一部において電子密度がカットオフ密度を上回るため、EC波のEC層への到達が不可能となることが主な原因であると考えられる。