

Study on Propagation and Heating of Microwaves of Electron Cyclotron Range of Frequency on the Internal Coil Device Mini-RT

内部導体装置Mini-RTでの電子サイクロトロン領域高周波の伝播・加熱特性

46213 谷塚 英一

(指導教員 小川 雄一 教授)

Key Words : Internal Coil Device, Electron Bernstein Wave, Mode Conversion, Cyclotron Resonance, Local Heating

1. 背景

Mahajan-Yoshidaによって、流れを駆動することによる高ベータプラズマの閉じ込めが理論的に示され[1]、内部導体装置RT-1が2006年1月に建設された。本研究で用いたMini-RTでは、RT-1での実験で必要とされる技術のR&D行われてきた。一例として、コイルの支持脚によるプラズマのエネルギー損失を低減するために、高温超伝導線材で作られたコイルを磁気浮上させる技術があり、その状態でプラズマを生成したとき(~3kW,2.45GHzの電子サイクロトロン加熱)、遮断密度よりも高密度なプラズマ(オーバデンスプラズマ)が生成された。電磁波が遮断密度のない電子バーンスタイン波にモード変換され、サイクロトロン高調波共鳴によってエネルギーがプラズマに吸収されるという加熱のメカニズムが考えられた。

オーバデンスプラズマの生成・加熱は、弱磁場またはオーミック加熱なしの方式の装置では重要な課題である。高周波でのプラズマ加熱では、磁場強度により遮断密度が決まる。プラズマの高ベータ化を目的として、電子バーンスタイン波(EBW)による加熱・電流駆動の実験が、様々な装置で行われている。例えば球状トカマクCDX-Uでは、ローカルリミター(プラズマの閉じ込め領域を制限する壁)を用いて、プラズマの密度勾配をコントロールすることにより、ほぼ100%のモード変換効率が得られた[2]。

内部導体装置は磁場勾配が急峻($B \propto r^3$)であるから、高次のサイクロトロン共鳴層が現れる。EBWは種々の次数のサイクロトロン共鳴により吸収されるので、将来的には局所加熱などへの応用が期待される。

2. 本研究の目的、手段

内部導体装置での、EBWによる加熱を、実験及び解析によって考察すること、さらに、それに伴うプラズマの高密度化を目的とする。

プラズマの閉じ込め領域を、磁場配位を変化させることによって制限し、静電プローブにより、電子

密度・電子温度の局所計測を行う。この方法によって、密度勾配および密度の絶対値の変化が、プラズマの加熱にどのような影響を与えるかを調べた。

3. 内部導体装置Mini-RT

内部導体はヘリウムガスにより冷却(~20K)、永久電流スイッチを用いた直接通電方式による励磁(~50kAturns)を行った後に、支持脚で真空容器中央までリフトアップし、引き上げコイルに通電することによって磁気浮上させることができる。引き上げコイルの電流値を磁気浮上に必要な値より低くし、内部導体を支持した状態で磁場配位を変え、プラズマの閉じ込め領域を制御することもできる。

4. 電子バーンスタイン波

EBWは熱いプラズマにおける、磁力線に垂直に伝播する静電波である[3]。ここで、「熱い」は波長と比較してラーマー半径が無視できないことを意味する。この波は静電波であるので、プラズマの外で励起できない。電磁波からのモード変換により、プラズマ中でEBWを励起する必要がある。異常波モードの電磁波(X波)が、アップーハイブリッド共鳴(UHR)層でEBWへとモード変換される。電磁波からEBWにモード変換するために、次の3つの有効な方法があることが知られている。

- ① 強磁場側からのX波(磁力線に)垂直入射
- ② 弱磁場側からのX波垂直入射
- ③ 弱磁場側からのO波(正常波モード)斜め入射

②の方法は急峻な密度勾配、弱磁場のときにモード変換の効率が低いことが分かっており、Mini-RTへの適用には最も実用的である。本研究では弱磁場側からX波を入射した。

EBWはさらに以下のような特徴を持つ。

- ① サイクロトロン高調波共鳴が起こる
- ② バンド構造の分散関係を持ち、局所的に伝播するEBWの分散関係式は次のように書ける。

$$1 + \frac{\omega_{pe}^2}{\Omega_e^2} \frac{1}{\lambda_e} \left\{ 1 - \sum_{n=-\infty}^{\infty} \frac{\omega}{\omega - n\Omega_e} e^{-\lambda_e} I_n \right\} = 0, \lambda_e \equiv \left(\frac{k_{\perp} v_{th}}{\Omega_e} \right)^2 \equiv (k_{\perp} \rho_{th})^2$$

5. 電子密度、温度プロファイル計測

5-1 計測器配置、校正

計測器の配置を図1に示す。1ショットごとに静電プローブの位置を変えてプロファイル測定している。計測は赤道面上で行った。電子密度・電子温度が磁気面上で一定であると仮定し、プローブで得られた電子密度を、マイクロ波干渉計の光路に沿って線積分した結果、±20%以内の精度でプローブと干渉計の測定値は一致した。

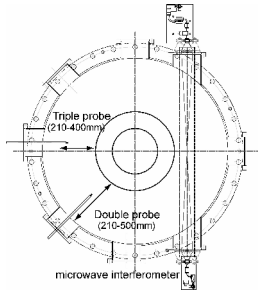


図1 計測器の配置 (トロイダル断面)

5-2 測定結果

閉じ込め領域、マイクロ波入射パワーなどを変化させて、電子密度・電子温度を測定した。磁場配位を図2に、代表的なプロファイル測定結果を図3に示す。密度勾配を急峻にし、かつ密度が十分高いとき(プローブ計測の範囲内にUHRが存在するとき)に、電子温度が局所的にピークを持つ。UHRで励起されたEBWがプラズマ中の限られた領域だけで伝播し、サイクロトロン高調波共鳴によってEBWのエネルギーがプラズマに吸収された可能性を示唆している。

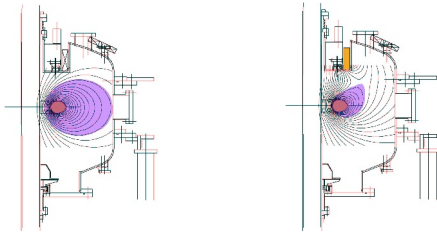


図2 磁場配位による閉じ込め領域の変化 (浮上コイル電流は共に32kA、引き上げコイル電流は左が0A、右が13.6kA)

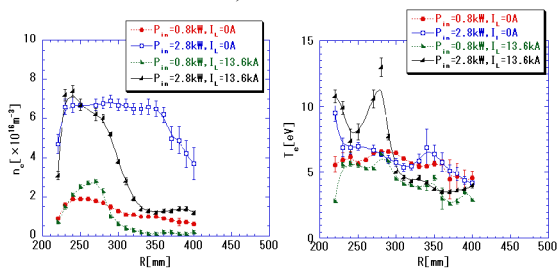


図3 電子密度(左)、電子温度(右)プロファイル

6. 分散関係の数値計算

入射したX波の経路に沿って、X波とEBWの分散関係式を計算した。図4にX波の経路を示す。ここでも電子密度・電子温度は磁気面上で一定と仮定した。磁場強度は経路上での値を用いた。

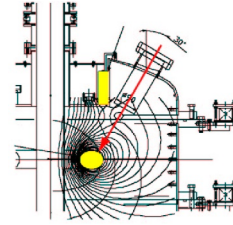


図4 X波入射経路

計算に用いた電子密度・電子温度プロファイルと、得られたUHRおよびサイクロトロン高調波共鳴の位置を図5に、X波とEBWの屈折率のプロファイルを図6に示す。赤道面上での電子温度のピークはX波入射経路上では3倍高調波のサイクロトロン共鳴層とほぼ一致する。しかし、UHRの位置から考えるとEBWは2倍高調波の位置で吸収されるはずであり、計算と実験は一致しない。この理由として、電子密度計測の精度が十分でないことが考えられる。密度測定誤差10%に対して、UHRの位置が赤道面上で10mm程度ずれる。

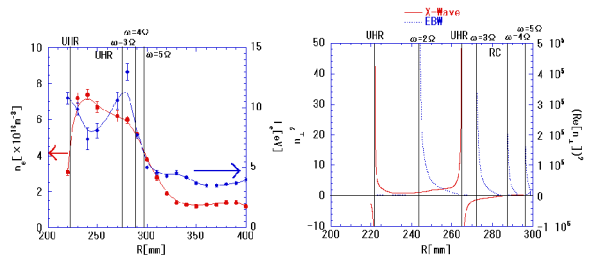


図5 電子密度・温度 図6 X波・EBWの屈折率プロファイル

7. 結論

磁場配位により閉じ込め領域を制御して、電子密度・電子温度プロファイルを測定し、EBWによる加熱の可能性が定性的に示唆された。分散関係の計算と実験の結果は、EBWが吸収される位置が一致しない場合がある。これは、電子密度測定誤差などによって、計算で得られるUHRの位置がずれること、および内部導体装置では磁場勾配が急峻なので、各次数のサイクロトロン共鳴層が近接し合うことに起因する。高精度な密度・磁場の局所計測が、EBWによる加熱の理解と制御に必要であり、今後の課題である。

8. 参考文献

- [1] S.M. Mahajan, *et al.*, Phys. Rev. Lett. **81** 4863 (1998)
- [2] B. Jones, *et al.*, Phys. Rev. Lett. **90**, 165001 (2003)
- [3] I.B. Bernstein, Phys. Rev. **109**, 10 (1958)