

論文内容の要旨

論文題目

Wave Characteristics of Electron Cyclotron Range of Frequency in Dipole Confined Plasmas

(ダイポール閉じ込めプラズマ中の電子サイクロトロン周波数帯波動の特性)

氏名 谷塚 英一

1 核融合プラズマの高周波加熱における困難点

核融合プラズマにおいては、磁気圧に対してプラズマの圧力（温度、密度）の高い高ベータプラズマを生成することが望ましいことはよく知られている。そのための加熱法としてオーミック加熱だけでなく、高周波等による追加加熱が必要となる。しかし、従来から確立されている正常波及び異常波の電磁波モードによる加熱は、プラズマそれ自身による遮断という問題がある。近年、伝播に対する密度限界のない電子バーンスタイン波（E B W）[1]による加熱がその問題を克服する有望な手段として着目されている。この波は静電波（縦波）であるために、プラズマの外部において励起することができない。プラズマ中でのモード変換によって励起され、サイクロトロン高調波共鳴層において効率よく吸収される。これまでの多くのトラス系装置におけるE B Wに関する実験研究では、E B Wが電磁波への逆変換によってプラズマ外に放射されたものを計測する2次的な計測が行われていた。本研究では、アンテナ等を挿入することにより直接的にE B Wへのモード変換、プラズマ中での波動の伝播・吸収について調べた。

2 内部導体装置 Mini-RT でのプラズマ加熱

内部導体装置 Mini-RT はダイポール型の磁場をもったのプラズマ閉じ込め装置であり、Mahajan および Yoshida によって提唱された、二流体プラズマの自己組織化による高ベータプラズマ閉じ込め研究[2]（Ring Trap プロジェクト）の一環としての役割を担う。プラズマを閉じ込めるための磁場は高温超伝導線材（Bi-2223）を用いており、永久電流の励磁により、コイルを

磁気浮上させた状態で実験を行うことができる。そのときには、コイルを支持脚によって機械的に支えた状態と比較して1桁程度低い封入ガス圧下におけるプラズマ生成が可能となった。さらに、生成されたプラズマは、電子密度が正常波による加熱の遮断密度を2倍以上上回る、いわゆるオーバードンスプラズマであった[3]。

本研究では、始めに様々な実験条件下での加熱の特性を調べるために、静電プローブを用いた電子密度および電子温度の計測を行った。その結果、比較的高い密度分布を得るためには加熱パワーの閾値があること、その閾値はセパトリックスによってプラズマ閉じ込め領域を制限するほど小さくなることが明らかになった。しかし、電子密度のピーク値は正常波の遮断密度($7.4 \times 10^{16} \text{ m}^{-3}$)と同程度かそれをわずかに上回る程度であった(図1)。

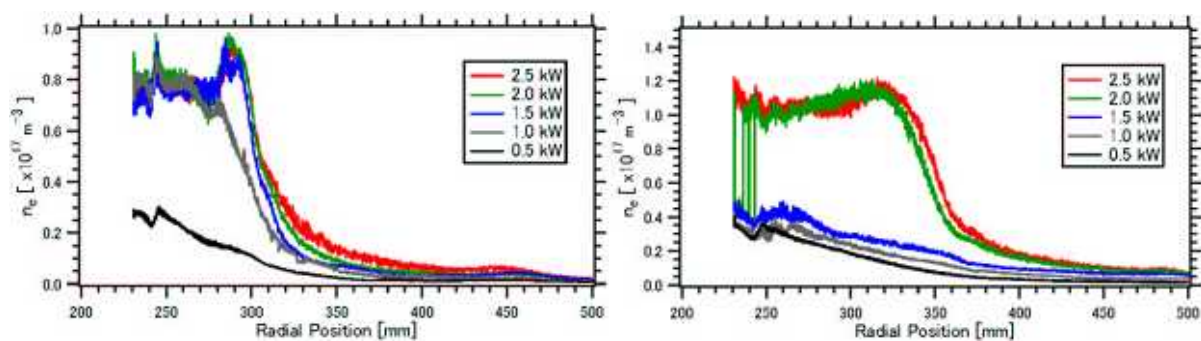


図1 電子密度分布の加熱パワー依存性：左(右)のグラフは最外殻磁気面位置が310 mm (360 mm)での実験結果である。プラズマ閉じ込め領域を小さくすることにより、高密度放電に必要な加熱パワーの閾値が下がる。

3 電子サイクロトロン周波数帯電場の計測

オーバードンスプラズマの維持、加熱のメカニズムを明らかにすることを目的として、電子サイクロトロン周波数帯(ECRF)電場の直接的計測システムを設計・開発した[4]。プラズマの生成と加熱は2.45 GHz、2.5 kWのマイクロ波によって行い、そこに計測用の1~2.1 GHz、10 Wのマイクロ波をプラズマの外部から入射して重畳する。プラズマ中にモノポールアンテナを挿入し、干渉法によりECRF電場の振幅と相対位相を含んだ信号を得られる(図2)。アンテナは電場の3成分を計測するために3本用いており、1本はエレメント長1 mmで静電的(縦波)の信号を得る。残りの2本は電磁的なモードと結合するように比較的長い(35 mm)のエレメントをセラミック被覆したものをを用いている。計測用のマイクロ波は、磁力線に垂直方向(異常波モード、X-Mode)の偏波で弱磁場側から入射した。この手法によりEBWを励起する場合、プラズマの密度勾配に最適値が存在する。Mini-RTでは最外殻磁気面付近での急峻な密度勾配(特性長~5 cm)によって高効率のモード変換が期待される。

電子バーンスタイン波には伝播に対する遮断密度がない、アッパーハイブリッド共鳴層(UHR)でプラズマ中での電磁波からのモード変換によって励起することができる、波長は電子のLarmor半径程度、静電的な波、任意のサイクロトロン高調波共鳴層において効率よくプラズマにエネルギーが吸収される、群速度と位相速度が逆向きであるという特徴がある[5]。

実験は内部導体コイルを支持した状態で行った。このとき、プラズマ加熱用の2.45 GHzに対してはオーバードンスになっていないが、計測用のマイクロ波に対してオーバードンスな状態で

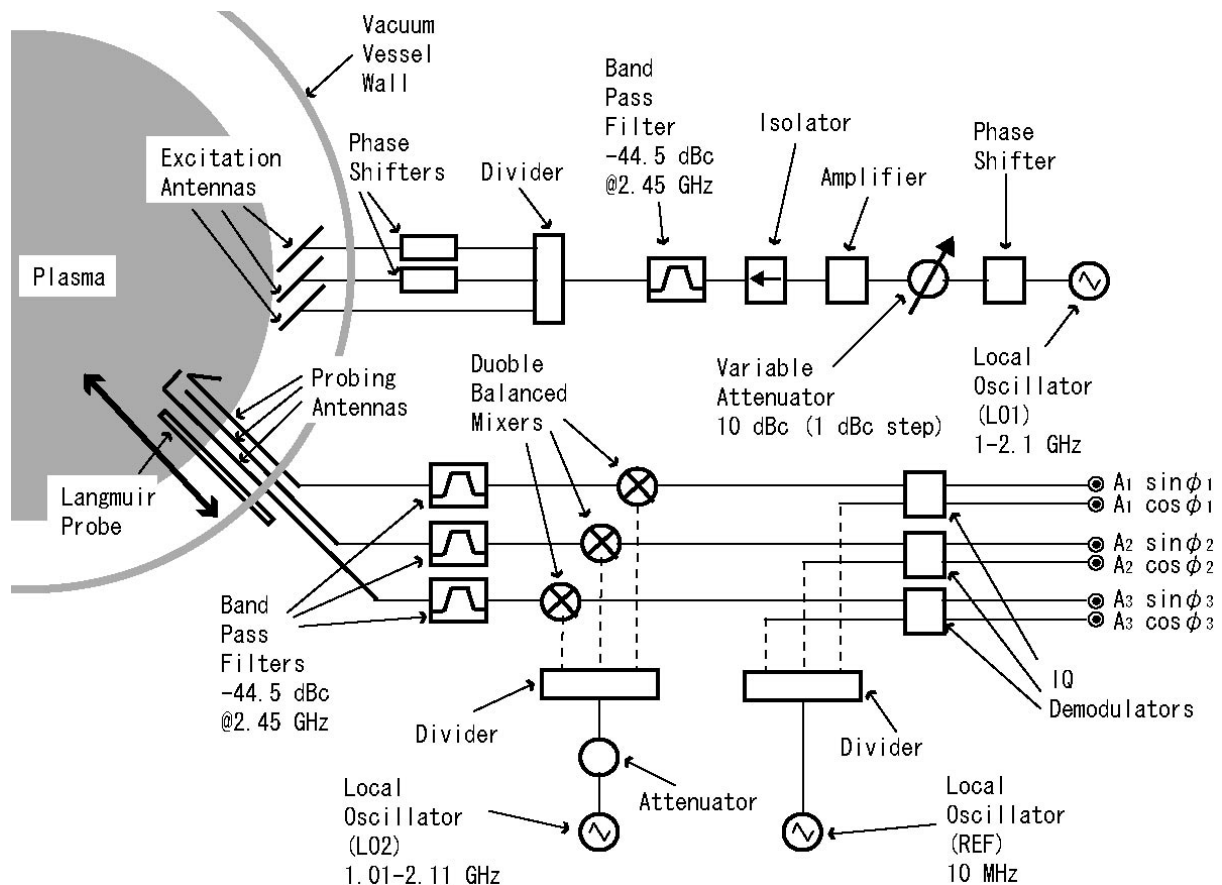


図2 電子サイクロトロン周波数帯電場計測システム

実験を行うために、1GHz の波の計測をした。その結果、比較的波長の短い（真空中でのそれと比較して 1/15 程度）静電的な信号が、プラズマ境界付近に局部的に励起されていることがわかった（図3）。そしてその波は冷たいプラズマにおけるエバネッセント領域で観測されることも明らかになっている。さらに、磁場配位および密度分布を変化させることにより、短波長信号の励起位置が配位とともに変化することを示し（図4）、UHRでのEBW励起の可能性を示した。また、この信号はサイクロトロン高調波共鳴層付近で減衰することも確認されている。加えて、位相計測により、短波長信号が観測されている位置において位相（アイコンール）の勾配が反転するという現象も観測された[6]（図5、6）。群速度すなわちエネルギー流束の伝播方向を装置内向きと考える（計測用マイクロ波は装置の外壁から内壁に向かって入射している）と、これはEBWの特徴の1つである後進波の直接的検出と考えられる。従って、EBWの性質を数多く同時に満たした波が磁場勾配を持つトラスプラズマ中で直接的に観測された。

しかしながら波長の値は理論によって導き出される値よりも1桁程度実験のほうが長い。高エネルギー電子による影響を考慮した、2成分（10 eV のバルク電子、数 keV の高エネルギー電子）電子に対する分散関係式を計算し、UHR付近での波長と同程度の値を得たが、吸収が起こる高調波ECR付近では高エネルギー電子の効果は支配的でなく、波長の定量的な議論は未解明な課題として残されている。密度勾配、磁場勾配波長等を考慮した波長の評価も必要と推測される。

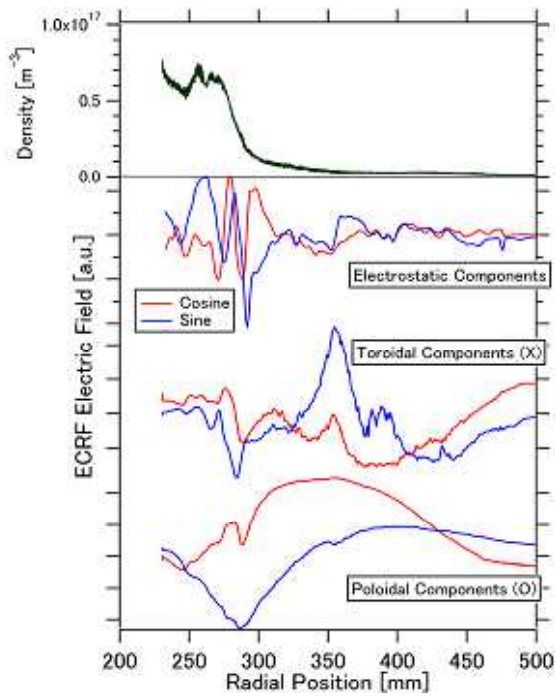


図3 ECRF電場3成分の計測結果

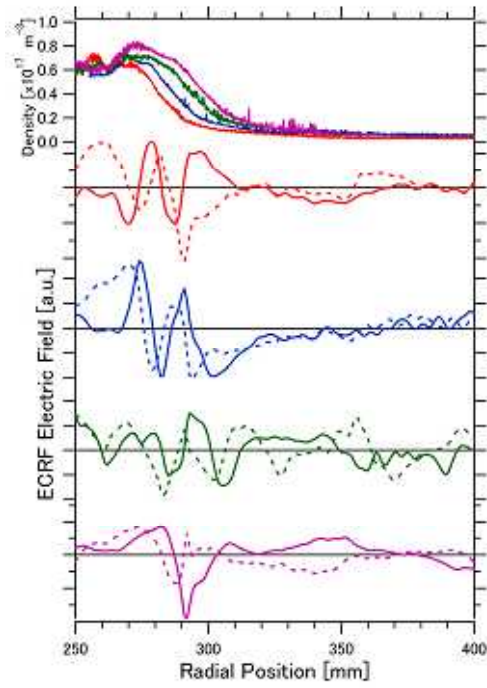


図4 密度分布とECRF電場の静電的成分との関係

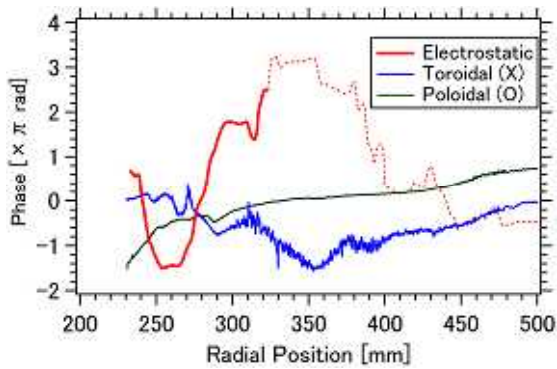


図5 ECRF電場位相分布

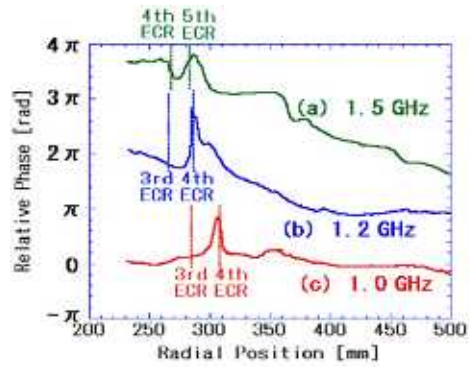


図6 静電的成分の位相分布と入射周波数の関係

参考文献

- [1] I. B. Bernstein, Phys. Rev. **109**, 10 (1958).
- [2] S. M. Mahajan and Z. Yoshida, Phys. Rev. Lett. **81**, 4863 (1998).
- [3] T. Goto *et al.*, Jpn. J. Apl. Phys. **45**, 5197 (2006).
- [4] E. Yatsuka *et al.*, Rev. Sci. Instr., **80**, 023505 (2009).
- [5] F. W. Crawford *et al.*, J. Geophys. Res. **72**, 57 (1967).
- [6] E. Yatsuka *et al.*, Plasma Fus. Res. **3**, 013 (2008).
- [7] E. Yatsuka *et al.*, *Proceedings of the Joint Conf. of 17th International Toki Conf. and 16th International Stellarator/Heliotron Workshop*, Toki, Japan, P2-092 (2007).