

## 論文の内容の要旨

論文題目 Experimental Verification and Numerical Analysis on the Excitation and Propagation of Electron Bernstein Waves in the Internal Coil Torus Plasmas

(内部導体トーラスプラズマにおける電子バーンスタイン波の励起・伝搬に関する実験的検証と数値解析)

氏 名 内島 健一朗

電子バーンスタイン波 (EBW) はプラズマ中の波の一つであり、伝搬密度限界がないという特徴を持つ。そのため、近年核融合を目指したプラズマ実験装置において EBW による加熱、電流駆動に関する実験が精力的に進められている。現在の EBW に関する計測はサイクロトロン放射計測等の間接的な計測が主であり、EBW そのものを直接計測する例は少ない。EBW はプラズマ中にのみ存在するモードであり、外部からの励起のためにはモード変換を経なければならない。そのための方法として現在 3 つの手法が知られている。1) 弱磁場からの X 波入射、2) 弱磁場からの O 波斜め入射、3) 強磁場からの X 波入射の 3 つであり、これらの手法は対象とするプラズマによって効率のよい手法が異なる。

本研究で対象とするプラズマは、ダイポール磁場閉じ込めプラズマであり、実験には内部導体装置 Mini-RT を用いる。ダイポール磁場は惑星型の磁場構造を持つプラズマ閉じ込め配位であり、Mini-RT 装置はそうした宇宙プラズマの自己緩和による高効率閉じ込め実証のために作られた装置である。Mini-RT はその磁場構造のほかに、装置が有するコイルの電流を調節することで様々な閉じ込め領域の制限が可能であるという特徴を持つ。先に述べたように EBW の励起には有効なプラズマ配位と対応した入射方法が存在し、Mini-RT でのプラズマに応じた励起方法をとることで 1)、2)、3) の 3 つ全ての手法で EBW の励起実験を行った。

本論文では、基本的なプラズマ中の波の物理について簡単に紹介したのち、Mini-RT における波動伝搬の理論解析を行った。解析に用いられた手法は 2 つある。一つは幾何

光学近似を用いた光線追跡法であり、もうひとつはマクスウェル方程式を差分化によって直接的に解く有限差分時間領域法(FDTD法)である。Mini-RTは装置スケールが半径50cmであり、GHzのマイクロ波では波長とプラズマスケールが同程度となるため幾何光学的な近似は破綻してしまうが、EBWの波長は電子ラーマ半径程度でありMini-RTのプラズマパラメータでは数mmと見積もられている。そのため、EBWの伝搬解析には光線追跡法も有効である。本研究では真空中から入射されたO波がプラズマ中でX波にモード変換した後、さらに高域混成共鳴層(UHR層)にてEBWに変換され共鳴層に吸収されるまでの光線経路を示した。有限差分時間領域法による解析では、簡易的な冷たいプラズマモデルを利用した解析で、Mini-RT内での2次元的な波の伝搬パターンと共鳴層付近での波長の変化を時間発展的に示した。また、プラズマの熱的效果を取り入れるために、誘電率テンソルを用いた表記からRC法を用いて実時間における計算を行い1次元モデルでの弱磁場X波入射によるモード変換の様子を時間発展とともに示した。

Mini-RTにおけるEBW励起の実証実験では、外部から入射された電磁波の特性をプラズマ内部に設置したアンテナから計測し、理論値と比較、考察した。プラズマの生成には2.45GHzのマイクロ波を用い、EBW励起のための試験用のマイクロ波をプラズマ外部から入射した。試験用のマイクロ波は1.0GHzであり、プラズマ生成用のマイクロ波よりも周波数が低い。そのため、2.45GHzで生成されたプラズマは入射された試験用のマイクロ波に対してオーバードンスプラズマとして振る舞う。オーバードンスプラズマ中の波の振る舞いを調べるために複数本の異なる向き、形状のアンテナをプラズマ内部に設置、走査して受信信号を調べた。受信された信号はIQデモジレータを通してある時刻での電磁場のスナップショットとして記録される。これにより波の分布、振幅、位相の情報を同時に得ることができる。EBWの特徴として1) 伝搬密度限界がない、2) 静電波である、3) プラズマ中でのみ電磁波からモード変換によって励起される、4) 波長はラーマ半径程度である、5) 縦波の偏波を持つ、6) 電子の熱速度程度の負の群速度を持つ(後進波である)、といった項目が挙げられる。こうした特徴と、実験により得られた波動特性が一致しているかを確認し、EBWを同定すると同時にEBWの励起条件の詳細について調査した。

実験結果として、先に列挙した特徴を全て満たすようなモードの波が観測された。定性的にEBWの特徴と一致し、プラズマや周波数などの条件に応じてその特徴が変化したため、EBWの励起を示唆するモードであることが実験によって波形の変化とともに示

された。弱磁場 X、弱磁場斜め O、強磁場 X の 3 つ全てにおいて、こうした特徴を持つ短波長モードの波が観測され、定性的には EBW の直接観測に近い結果が得られた。

しかしながら、定量的な議論において、実験と理論とはやや大きな差があった。特に波長については実験で得られた波の屈折率が 15~20 であったのに対して、分散関係を解いて得た値では 100~200 となっており 1 桁程度も値が異なっていた。EBW ではなく別のモードの波である可能性も考えられたが、空間的な励起位置の特徴が EBW の特徴と一致しており他のモードでは説明が難しかった。

EBW は電子のサイクロトロン運動に伴う電場の形成によって波が伝搬するモードであり、電子温度は EBW の波長を議論するうえで極めて重要なパラメータ

である。Mini-RT のように ECH で生成されたプラズマは ECH の非等方性によって電子の分布関数がマクスウェル分布からずれることが予測される。そのため、電子のエネルギー分布関数を Langmuir プローブによって計測し、Druyvesteyn 法を用いてエネルギー分布関数を求めた。計測結果には負スパイクがノイズとして多分に含まれており、正確性には確証がまだないが、その計測結果を信用したとしても EBW の波長として実験結果を説明することは困難であった。また、高エネルギー電子の存在は、プローブによる電子密度の計測にも誤差を与えるため、計測位置の信頼性が失われる結果ともなりうる。仮に、プローブによる密度分布そのものが正しいと仮定しても、プローブ自身がそのヘッド部を 5mm の大きさで持っているため、少なく見積もっても 5mm の空間的誤差を考慮しなければならない。また、励起位置と位相勾配の逆転が起こる位置から、短波長モードが存在している領域を特定すると、実験によって、UHR 近傍で急激に位相勾配が変化している場合と、共鳴層付近で位相勾配が大きく変化している場合とがあ

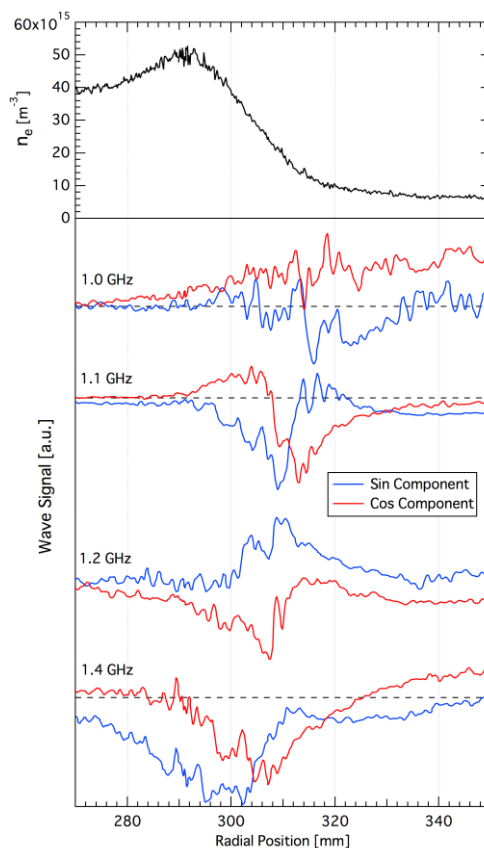


図 1 短波長モードの励起と周波数による励起領域の変化

った。こうした位置情報に位置情報について、先ほどの高エネルギー電子の影響に加えプローブ自身を持つ大きさによる誤差と実験によるばらつきを合わせると、短波長モードが励起されているのは UHR よりも少し高密度側の領域で、その波長は SX モードと EBW の中間的な大きさになることが分かった。そのため、実験によって得られたこの短波長モードは、EBW へモード変換が起こるまさにその時の中間的な領域のモードであると考えられる。励起位置や、電子のエネルギー分布計測等の定量的課題はあるものの 3 つ全ての方法において EBW そのものではないが、モード変換の過程を実験的に示したと言える。

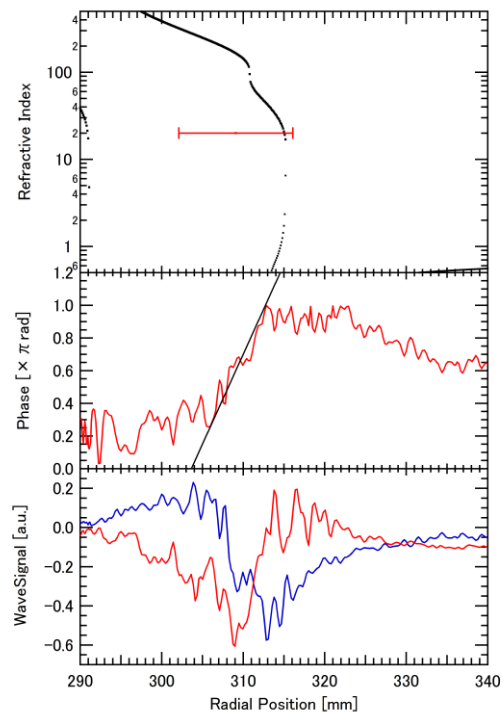


図 2 励起領域と分散関係の対応