

平成 22 年 5 月 8 日現在

研究種目：若手研究(B)

研究期間：2007 年度 ~2009 年度

課題番号：19740347

研究課題名（和文）電子バーンシュタイン波加熱用入射ミリ波の反射波計測の研究

研究課題名（英文）Investigation of measurement of reflected millimeter wave of injected for electron Bernstein wave heating

研究代表者

伊神 弘恵 (IGAMI HIROE)

核融合科学研究所・大型ヘリカル研究部・助教

研究者番号：10390634

研究成果の概要（和文）：高密度プラズマに入射されたミリ波の反射波偏波を計測できれば、最も高い効率で電子バーンシュタイン波を励起できる入射波の最適偏波を実験的に知ることができる。高密度プラズマ加熱のために反射波偏波計測を行って入射波の偏波やさらには伝播角度の最適化を行うための情報を得ることを着想し、実際のプラズマ実験条件で反射波計測を行うための検討に用いる数値計算コードを開発した。また、偏波検出回路の設計検討を行った。

研究成果の概要（英文）： Once a millimeter wave is injected to a high density plasma, polarization measurement of the reflected wave tells the optimum polarization of the incident wave to excite an electron Bernstein wave experimentally. To realize an idea to obtain information for optimization of polarization and propagation angle of the incident wave from the measurement of the reflected wave, a numerical code have been developed for investigation in real experimental configuration. Design study of detection system of polarization has also been done.

交付決定額

(金額単位：円)

| | 直接経費 | 間接経費 | 合計 |
|----------|-------------|-----------|-------------|
| 平成 19 年度 | 1,500,000 円 | 0 円 | 1,500,000 円 |
| 平成 20 年度 | 1,400,000 円 | 420,000 円 | 1,820,000 円 |
| 平成 21 年度 | 400,000 円 | 120,000 円 | 520,000 円 |
| 年度 | | | |
| 年度 | | | |
| 総計 | 3,300,000 円 | 540,000 円 | 3,840,000 円 |

研究分野：数物計科学

科研費の分科・細目：プラズマ科学・プラズマ科学

キーワード：プラズマ基礎 加熱計測

1. 研究開始当初の背景

核融合科学研究所の大型ヘリカル装置では、内部拡散障壁を伴った超高密度コアプラズマの研究が進み、中心部の電子密度は基本サイクロトロン共鳴加熱を行うミリ波周波数帯の 84GHz の正常波モードの遮断密度 ($8.98 \times 10^{19} \text{m}^{-3}$) の 5 倍以上を達成するように

なった。これは第二高調波共鳴加熱を行う 168GHz の異常波モードの遮断密度よりも高い。電磁波モードはその遮断密度を超えるような領域では伝播できず、サイクロトロン共鳴層がそのような領域にある場合には、電磁波モードによる直接的な電子サイクロトロン共鳴加熱は不可能である。従って、超高密

度コアプラズマの加熱は中性粒子ビーム入射により行われている。

電磁波モードの遮断密度を超えたプラズマのミリ波帯による加熱は、ミリ波の入射によって伝播に密度限界の無い、静電波である電子バーンシュタイン波を励起し、これを電子サイクロトロン共鳴吸収させることで可能である。この際、正常波(O-mode)として入射された波が一旦異常波(X-mode)に結合し、その後電子バーンシュタイン波(EBW, B波)にモード変換することから、この加熱手法はO-X-B法と呼ばれている。O-X-B法による電子サイクロトロン共鳴加熱が可能となれば、より電子温度の高い高密度プラズマの実現に貢献できる。

入射電磁波モードから電子バーンシュタイン波へのモード変換効率は、モード変換が起こる領域の密度勾配、磁場強度、波動の伝播角度、及び偏波により異なるため、効率よい加熱のためにはターゲットとなるプラズマの状態に合わせてミリ波入射方向の最適化を行う必要がある。スラブプラズマにおける理論解析では、プラズマ境界において入射波と反射波の密度勾配方向に垂直な伝播角度成分が等しい場合、それぞれを構成する電力直交成分間の関係を記述する散乱行列を反射波計測によって求めることで、偏波の最適化により得られる最大のB波へのモード変換効率と、その最適な偏波を実験的に求められることが示されている。また、この散乱行列成分がわかれば、O-modeとX-modeが混じった入射波の電子バーンシュタイン波へのモード変換効率も求めることができる。

この方法を用いれば、原理的にはプラズマ境界やプラズマ遮断層の位置がわからなくても、ある入射角の場合の最適偏波が実験的に求められる。また、ミリ波入射角度を変え、その度ごとに反射波計測を行えば最適なミリ波入射角度も知ることができると期待される。

2. 研究の目的

本研究では、大型ヘリカル装置における高密度プラズマ生成時に、加熱用ミリ波の反射波計測により散乱行列成分を実験的に取得し、電子バーンシュタイン波を励起して電子サイクロトロン共鳴加熱を行うために入射する電磁波の入射方向、偏波を最適化するための手法を確立することを旨とし、以下のことを行うことを目的とする。

- (1) 正常波モードの反射点と反射波到達位置に関して光線追跡を用いた検討を行う
- (2) 反射波偏波と強度について、数値的検討を行う
- (3) 反射波計測システムの検討を行う。

3. 研究の方法

- (1) 大型ヘリカル装置用に開発された光線追跡コードを拡張し、反射波の伝播軌道計算ができるようにする。また、反射点付近のプラズマと波動パラメータより、O-X-Bモード変換効率を計算し、モード変換効率の入射角依存性を調べる。
- (2) 反射点付近のプラズマパラメータを用いてスラブプラズマをモデリングし、1次元の波動方程式を解いて散乱行列成分を数値的にもとめる計算コードを開発する。
- (3) O-X-B法によるプラズマ加熱実験を行い、実験データを蓄積する。
- (4) 将来、各伝送系に反射波偏波計測システムを設置することを念頭に、コンパクトで安価な位相差検出システムができないか、検討を行う。

4. 研究成果

- (1) 光線追跡コードの拡張による O-X-B 法の検討

本研究遂行期間中に、ハイパワー(1MW)の77GHz ジャイロトロンが新たにミリ波源として導入され、入射角度の設定範囲の広い外側横長断面ポートアンテナに接続するミリ波伝送系に設置された。図1にそのアンテナ位置を示す。この位置より入射される77GHzの正常波モードに関して、様々な入射方向を選択した場合について、光線追跡コードを用いて入射波の反射点をもとめ、反射点でのプラ

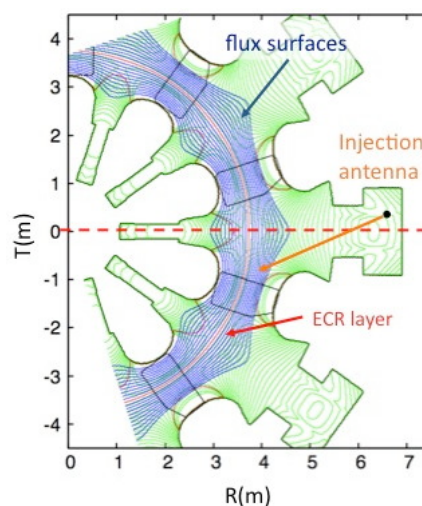


図1: 大型ヘリカル装置の水平方向断面図。横長断面にポートに設置されたミリ波アンテナ位置と、O-X-B方による加熱を狙った斜め入射方向の例を示す。

ズマ及び波動パラメータより O-X-B モード変換効率を計算した結果を図2に示す。ここで、座標(T_f , Z_f)は図1の座標 $R=3.9\text{m}$ における平面上のミリ波照準点である。 T_f はT方向

の、 Z_r は鉛直方向の座標成分である。仮定した実験条件は、磁気軸 $R_{ax}=3.75m$, 中心磁場強度 $B_{ax}=2.2T$, 規格化小半径 ρ の関数として表した密度分布が、 $n_e(\rho) = 1.0 \times 10^{20} (1 - \rho^2)$

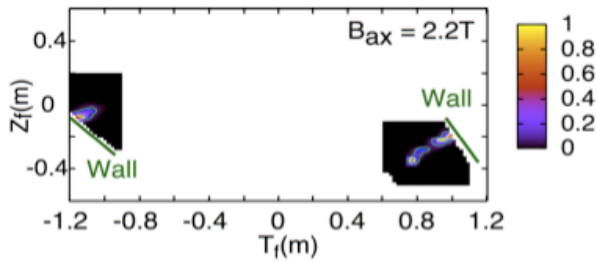


図 2: $R=3.9m$ における照準点の関数として等高線で示した 77GHz ミリ波の O-X-B モード変換効率。

$(1.1)^6)^2 (m^3)$ である。真空容器の壁によって、プラズマへの入射方向の範囲が制限されることがわかる。

電子バーンシュタイン波の伝播と吸収を取り扱う機能を光線追跡コードに加え、最も高い O-X-B 変換効率が得られる場合について、モード変換後の電子バーンシュタイン波の軌道と吸収を調べた。同じ磁気軸 $R_{ax}=3.75m$ で様々な中心磁場強度 B_{ax} の場合について調べた結果、

- B_{ax} が大きい場合、電子バーンシュタイン波はプラズマ周辺部においてモード変換した直後にサイクロトロン共鳴条件を満たしてパワー吸収される。
- B_{ax} が小さくなると、吸収領域はプラズマ中心部へシフトするが、ヘリカルコイルやポートの壁に阻まれて、高変換効率を得られるような入射角度設定ができない。

ということがわかった。

現況の入射アンテナを用いた 77GHz ミリ波入射では、プラズマ中心部の効率的加熱は困難であるとの数値検討結果を得たことから、今後は以下の方針の検討を行うこととし、

- 77GHz を用いる場合、O-X-B 加熱に最適なアンテナ位置を数値検討する。
 - 周波数を上げ、第二高調波周波数帯の 154GHz した場合、現況アンテナで中心部の有効な加熱ができるかを数値検討する
- その後 O-X-B 法による有効な中心部加熱ができると期待される場合に関して、反射波計測のための検討を行うこととした。

(2) 実際の実験配位から数値的に散乱行列成分を求めるための数値計算コードの開発

(1) で開発した光線追跡コードより、O-mode の反射点におけるプラズマパラメータよりスラブプラズマをモデリングし、1次元の波動方程式を解いて散乱行列を求める数値計算コードを開発した。図 3 にモデリン

グの概念図を示す。また、図 4 に九州大学 QUEST 装置生成される高密度の球状トカマクプラズマにおいて、5GHz の電磁波と電子バーンシュタイン波間のモード変換効率を、この計算コードを用いて求めた結果を示す。



図 3: 反射点を含むモード変換領域(MC layer)でのスラブプラズマモデリングと入射アンテナ、反射波(及び電子バーンシュタイン波由来放射電磁波)受信アンテナの位置関係の概念図

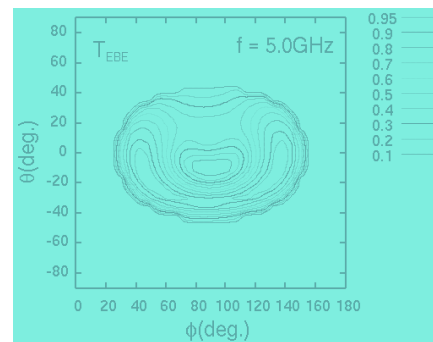


図 4: アンテナのトロイダル方向の設置角度 θ と煽り角 ϕ の関数として表したモード変換効率。

LHD の実験配位についても同様の計算が可能となっている。

(3) O-X-B 法によるプラズマ加熱実験

本研究開始後現在に至るまで、幾度か O-X-B 法によるプラズマ加熱を試みたミリ波入射事件を行ったが、明らかな加熱の兆候を得ることはできていない。しかし、2009 年度の実験では、高密度プラズマへのミリ波入射により、電子バーンシュタイン波の励起に伴って、非線形過程により励起される低域混成波周波数帯の波が計測された。今後は実験データとしての密度分布から数値計算により示される、高変換効率が得られる入射条件と実際モード変換が起きたと示唆される入射条件を比較し、数値計算手法の妥当性を検証することとする。

(4) コンパクトな反射波偏波検出システムの検討

近年のマイクロ波帯域の集積回路の進歩が著しく、5GHz 程度までは集積回路にて様々な機能が提供されるようになってきている。図 5 に示すように、I/Q 復調 IC、アンプ IC、検波器 IC を一つの基板上に配し、二つの直交偏波成分間の強度比と位相差に関する信

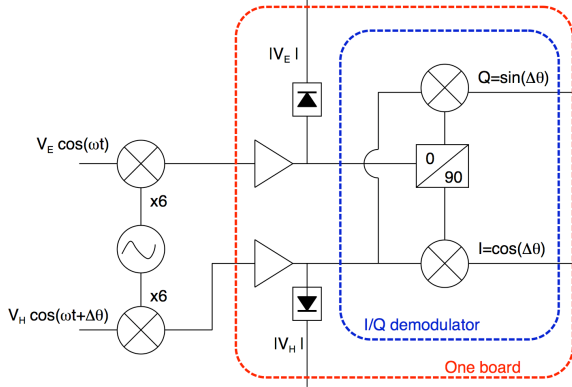


図 5: 相対強度・位相差検出回路

号を検出する、コンパクトな回路を構成することができると考えた。

本研究課題においては、2 台の 6 通倍ハーモニックミキサとミリ波帯の位相器、I/Q 復調器 IC を購入し、下記要領にて位相検出テストを行った。ガンダイオード発振器にて発生させたミリ波を分配して位相器にて位相差のある 2 信号を作り、これをハーモニックミキサに RF 信号として入力した。Lo 信号としては、シンセサイザで発生させた波を入力した。中周波数帯出力をそれぞれ I/Q 復調器に入力して、I/Q 信号の出力を調べた。結果としては、位相器によって位相を変化させても、有意 I/Q 信号出力が得られなかった。原因を調べたところ、ガンダイオード発振器が故障していることがわかった。ガンダイオード発振器の修理を待って、再びテストを行う予定である。テストの結果を参考に、IC 選定を行い、一つの基板上に検出回路を試作する予定である。

5. 主な発表論文等

(研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線)

[雑誌論文] (計 5 件)

- ① H. Igami et. al.,
“Electron Bernstein wave heating via the slow X-B mode conversion process with direct launching from the high field side in LHD” *Nuclear Fusion* vol.49 115005 p.1-11 (2009) 査読有り
- ② H. Igami et. al.,
“Development of an analysis method on the

mode conversion process between electromagnetic and electron Bernstein waves in real experimental configurations” *Proceedings of 34th International Conference on Infrared, Millimeter and Terahertz Waves 2009* T5E58.03381-2 (2009) 査読無し

- ③ H. Igami et. al.,
“Investigation of Experimental Configuration for Electron Bernstein Wave Heating on LHD” *Plasma Science and Technology* vol.11 p430-438 (2009) 査読有り
- ④ H. Igami et. al.,
“Electron Bernstein wave heating via the slow X-B mode conversion process with direct launching from the high field side in LHD” *Proceedings of 22nd IAEA Fusion Energy Conference EX/P6-13* (2008) 査読無し
- ⑤ H. Igami et. al.,
“ECH experiments aiming at further advanced operations in LHD” *AIP conference proceedings* 933 p.377-384 (2007) 査読無し

[学会発表] (計 7 件)

- ① 伊神 弘恵、他
「LHD における電子バーンシュタイン波加熱用アンテナの検討」(平成 21 年 12 月 4 日) プラズマ・核融合学会 第 26 回年会 京都府京都市(日本)
- ② H. Igami et. al.,
“Development of an analysis method on the mode conversion process between electromagnetic and electron Bernstein waves in real experimental configurations” (平成 21 年 9 月 22 日) *34th International Conference on Infrared, Millimeter and Terahertz Waves 2009* 釜山特別市(大韓民国)
- ③ 伊神 弘恵、他
「LHD における高密度プラズマの OXB モード変換過程とパワー吸収領域の検討」(平成 20 年 12 月 4 日) 第 25 回プラズマ・核融合学会年会 栃木県宇都宮市(日本)
- ④ H. Igami et. al.,
“Electron Bernstein wave heating via the slow X-B mode conversion process with direct launching from the high field side in LHD” *22nd IAEA Fusion Energy Conference* ジュネーブ(スイス)
- ⑤ 伊神 弘恵、他
「LHD における高密度プラズマの電子バーンシュタイン波加熱」(平成 20 年 3 月 25 日) 第 63 回日本物理学会年会 大阪府八尾市(日本)
- ⑥ 伊神 弘恵、他
「強磁場側からのミリ波斜め入射による

電子サイクロトロン加熱機構」(平成 19 年 11 月 30 日) 第 24 回プラズマ・核融合学会年会 兵庫県姫路市(日本)

⑦ H. Igami et. al.,

“ECH experiments aiming at further advanced operations in LHD”(平成 19 年 5 月 9 日) *17th Topical Conference on Radio Frequency Power in Plasmas*. Clearwater, Florida (アメリカ合衆国)

6. 研究組織

(1) 研究代表者

伊神 弘恵 (IGAMI HIROE) 核融合科学研究所・大型ヘリカル研究部・助教

研究者番号：10390634

(2) 研究分担者 なし

(3) 連携研究者 なし