

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 26 年 6 月 23 日現在

機関番号：63902

研究種目：基盤研究(C)

研究期間：2011～2013

課題番号：23561006

研究課題名(和文) 超高密度プラズマの中心部加熱条件探査のための電子バーンシュタイン波放射計測

研究課題名(英文) Measurement of electron Bernstein wave emission to search the optimum injection condition to heat the central region of the extremely high dense plasma

研究代表者

伊神 弘恵 (Igami, Hiroe)

核融合科学研究所・ヘリカル研究部・准教授

研究者番号：10390634

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,900,000円、(間接経費) 1,170,000円

研究成果の概要(和文)：超高密度プラズマにおける弱磁場側からの電磁波入射による電子サイクロトロン加熱(ECH)では、正常波(O)モードを弱磁場側から磁場に対して斜め方向に「モード変換窓」と呼ばれる領域に向けて入射することで、一旦異常波(X)モードに変換させた後高域混成共鳴層に到達させ、EBWを励起しサイクロトロン共鳴吸収させる手法(OXB法)が選択される。本研究では「モード変換窓」を実験的に探査するために、ECH用伝送系の途中に設置した導波管切替器の先にヘテロダイン式ラジオメータを構築し、加熱の逆過程としてEBWとして電子サイクロトロン放射され、BXOモード変換過程を経てプラズマ外部に放射される電磁波の観測を行った。

研究成果の概要(英文)：For the electron cyclotron heating (ECH) in over-dense plasmas by launching the electron cyclotron (EC) wave from the low magnetic field side, the electron Bernstein wave (EBW) excited via the ordinary - extraordinary - EBW (OXB) mode conversion process is used. To excite the EBW, the ordinary mode should be launched toward the restricted range of the injection angle, so called "OXB mode conversion window". The EBW emitted thermally in the electron cyclotron resonance (ECR) layer in the over-dense region, can be radiated as an electromagnetic wave via the B-X-O mode conversion process, which is the reverse process of the heating. To survey the "OXB mode conversion window" experimentally, a waveguide switch was installed in the middle of the ECH transmission line to send the emission from the plasma to a heterodyne radiometer system. As the first results, we have observed emission with the radiometer when an over-dense plasma is generated.

研究分野：工学

科研費の分科・細目：総合工学・核融合学

キーワード：炉心プラズマ 電子バーンシュタイン波加熱

1. 研究開始当初の背景

ミリ波帯の電磁波を用いたプラズマの電子サイクロトロン共鳴加熱(ECRH)は、入射アンテナをプラズマ境界面から離れた位置に設置できるため、磁場閉じ込め型核融合プラズマの加熱方式として有力である。大型ヘリカル装置(LHD)で生成される超高密度コア(SDC)プラズマでは $1.0 \times 10^{21} \text{m}^{-3}$ を越えた中心密度が達成されているが、この SDC プラズマでは電子サイクロトロン共鳴層周辺の密度は基本・第二高調波共鳴周波数帯のいずれに関しても、電磁波モードの遮断密度を越えるため遮断層が現れ、電磁波モードとしてのミリ波は遮断層で反射されるので、サイクロトロン共鳴層まで到達できない。このような「オーバードレンスプラズマ」の有力な電子サイクロトロン共鳴加熱手法として、磁場のあるプラズマ中を伝播する静電波である、電子バーンシュタイン波(electron Bernstein wave: EBW)による加熱がある。現在 SDC プラズマ実験においては、高密度状態を保持しつつ中心部の温度をさらに上昇させるには中心部への局所的な加熱入力が必要となる局面を迎えており、EBWによる加熱の必要性が増している。

2. 研究の目的

SDC プラズマのように電子サイクロトロン共鳴層付近の電子密度が加熱適用周波数の遮断密度を越える場合には、弱磁場側からのミリ波入射では、正常波(0)モードを弱磁場側から磁場に対して斜め方向に、「モード変換窓」と呼ばれる領域に向けて入射することで、一旦異常波(X)モードに変換させた後に高域混成共鳴層に到達させ、EBW を励起しサイクロトロン共鳴吸収させる手法(OXB 法)が選択される。本研究では、電子サイクロトロン共鳴加熱用のアンテナと伝送系を用い、加熱の逆過程として電子バーンシュタイン波として熱輻射され、電磁波へのモード変換過程を経てプラズマ外部に放射されるミリ波を観測し、加熱のための最適入射条件を探索する。

3. 研究の方法

本研究では、光線追跡計算によりプラズマカットオフ近傍までの正常波の軌道を計算し、最もプラズマカットオフに近づいた点となる参照点を求め、その点でのプラズマパラメータを用いて、解析的な表式から OXB モード変換効率を計算する。実験的に得られた温度密度分布をふまえてデータベースより参照される平衡データを用いて、3 次元的な温度密度分布を与え、軌道/吸収計算に用いる。また、入射される波は有限のビーム幅を持つため、マルチレイ計算を導入し、個々のレイに関して OXB モード変換効率が計算できるように数値計算コードを改良し、有限ビーム幅を考慮したモード変換窓幅を求めることができるようにし、数値計算の予測精度を向上させ、実験結果と比較する。

第二高調波周波数帯の EBW に由来する放射

波に関しては、LHD 水平ポートアンテナに接続される ECRH 用伝送系の途中に導波管切り替え器を設置し、準光学ミラー系により集光したミリ波をヘテロダイン式ラジオメータで受信するシステムを構築し、計測を行う。

基本共鳴周波数帯の EBW に由来する放射波に関しては、下部ポートアンテナに接続する伝送系に設置された協同トムソン散乱計測用ラジオメータを用いて、計測する。

4. 研究成果

図 1 に、実験で得られた温度密度分布をふまえてデータベースより参照された平衡データを用いて計算された、水平ポートアンテナ射出角に対する基本共鳴周波数帯である 77GHz の OX モード変換効率分布を、ビーム中心のレイのみの場合と有限ビーム幅を考慮した

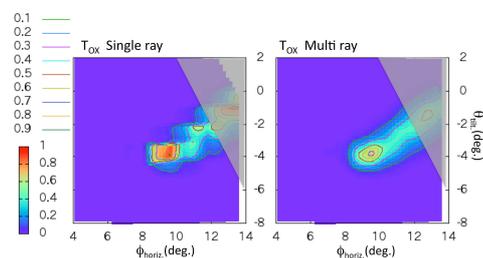


図 1: ヘリウムガスパフで生成された LHD 高密度プラズマにおける、ECH 水平ポートアンテナ射出角に対する 77GHz OX モード変換効率分布。(左) ビーム幅を考慮しない場合(右) ウェスト幅 30mm のガウスビーム幅を考慮した場合

マルチレイ計算を行った場合について示す。変換効率 50%以上の領域幅はビーム幅を考慮すると狭くなるが、20%以下の領域の広さは同程度であることがわかる。実験前の予測としては、実験前にはビーム中心のみのシングルレイ計算でおおまかな傾向を予測すれば良いことがわかる。

第二高調波周波数帯の放射計測に関しては、水平ポートアンテナに接続する伝送系の途中

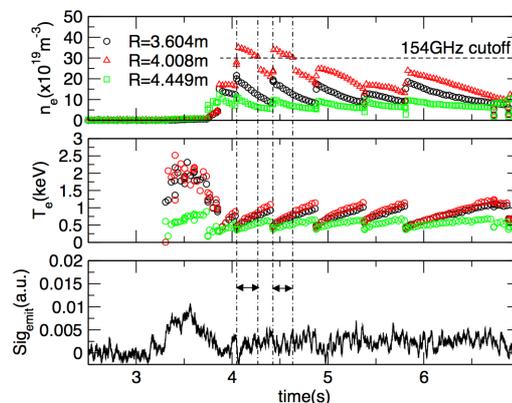


図 2: (上から)トムソン散乱計測で得られた密度(ミリ波干渉計で校正)、温度、ECH 伝送系で受信した 153GHz の放射、の時間変化

に導波管切り替え器を設置し、ヘテロダイン方式のラジオメータシステムを構築した。図

2に示すように、中心部で154GHzのカットオフ密度を越えるような密度分布のSDCプラズマが生成されている時間帯でも、ラジオメータで153GHz帯の信号が観測されたという初期結果を得ている。この実験の磁場配位では、154GHzの第二高調波共鳴層は磁気軸よりもトーラス内側にあるので、プラズマ中心部でカットオフ密度を越えていれば第二高調波共鳴からの電磁波モード放射は直接観測できなくなるはずであり、EBW由来の放射電磁波を計測した可能性がある。

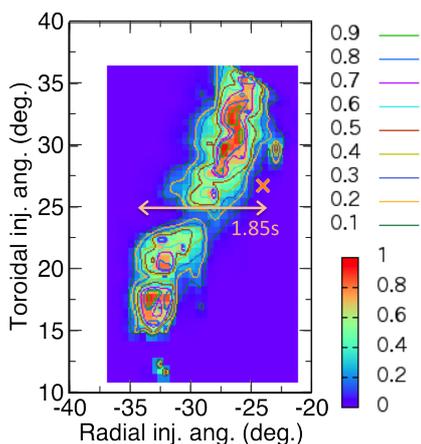


図3: LHD下部ポートアンテナ射出角に対するOXモード変換効率、実験で設定した射出角(X), 1.85秒間に掃引可能な範囲(矢印)

基本共鳴周波数帯に関しては、下部ポートアンテナを用いると、OXモード変換窓が水平ポートアンテナを用いる場合と比べて広く分布することを明らかにした。図3に77GHzのカットオフ密度を越えるプラズマが生成された場合の下部ポートアンテナからのビーム射出角に対するOXモード変換効率分布を示す。図3中のX印の射出角設定において、図4に

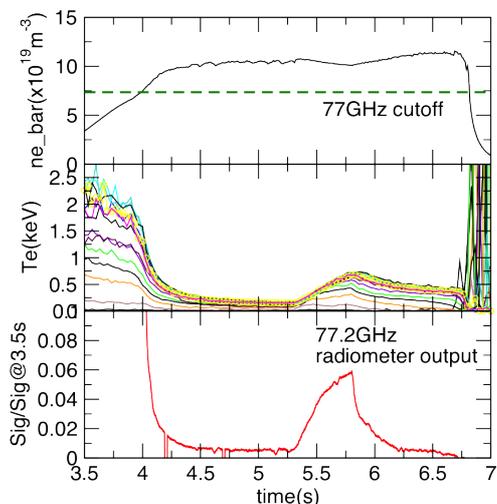


図5: ヘリウムガスパフ高密度放電での(上から)線平均電子密度、トムソン散乱計測各ch温度、3.5sの信号強度で規格化した77.2GHzラジオメータ信号強度

示す様にカットオフ密度を越えた時間帯に放射が計測された。電磁波モードの放射となっている時間帯(3.5s)に対する信号強度比は5sでは0.005と非常に弱い、5.3sから大きく上昇し、5.8sでは0.06まで上昇した。5.8sでのトムソン電子温度の3.5sに対する比はプラズマ中心部で0.33、周辺部で($r_{eff}/a_{99}=0.8$)0.4であったため、熱放射の1-2割程度の強度の信号を受信していると推測される。この射出角は5.0sにおけるモード変換窓をはずれた設定となっているにも拘らず信号を計測した理由として、①密度分布が変化し変換窓位置がX印のところまでシフトした ②EBW由来の電磁波がプラズマ外部に放射された後多重反射を経てアンテナに到達した成分を計測した、可能性が考えられる。このアンテナは放電中掃引が可能であるので、次の実験サイクルでは掃引による実験的なモード変換窓幅を調べる予定である。

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 4 件)

- ① “Electron Bernstein wave heating and emission measurement through the very narrow O-X-B mode conversion window in the LHD”, H. Igami, S. Kubo, T. Shimozuma, Y. Yoshimura, H. Takahashi, M. Nishiura, S. Ogasawara, R. Makino, H. Idei, K. Nagasaki, T. Seki, T. Mutoh, *AIP Conf. Proc.* **1580**, 490 (2014) (査読無し)
- ② Progress of ECRH by EBW in over-dense plasmas and controlling the confinement regime by ECCD with high power launching in LHD” H. Igami, Y. Yoshimura, H. Takahashi, T. Shimozuma, S. Kubo, H. Idei, M. Nishiura, S. Ogasawara, R. Makino S. Ohdachi, K. Ida, M. Yoshinuma, T. Ido, A. Shimizu, N. Tamura, S. Inagaki and T. Mutoh *EPJ Web of Conference* **32**, 02006(2012) (査読無し)
- ③ “Experimental Results for Electron Bernstein Wave Heating in the Large Helical Device”
- ④ H. Igami, S. Kubo, T. Shimozuma, Y. Yoshimura, H. Takahashi, H. Idei, M. Nishiura, S. Ogasawara, R. Makino, R. Kumazawa, T. Mutoh, A. Sagara and T. Goto, *Plasma and Fusion Research* **7**, 2402110 (2012) (査読あり)
- ⑤ “Measurement of the Electron Bernstein Wave Emission with One of the Power Transmission Lines for ECH in LHD” IGAMI Hiroe, IDEI Hiroshi, KUBO Shin, YOSHIMURA Yasuo, SHIMOZUMA Takashi,

and TAKAHASHI Hiromi, Plasma Science and Technology, **13** 405 (2011) (査読あり)

[学会発表] (計 6 件)

- ① “LHD におけるアンテナ放電中掃引を用いた OXB モード変換窓探査” 伊神弘恵 他、プラズマ・核融合学会 第 30 回年会 平成 25 年 12 月 3 日-6 日 於 東京工業大学大岡山キャンパス (東京都) 口頭発表
- ② “Electron Bernstein wave heating and emission measurement through the very narrow O-X-B mode conversion window in the LHD”, H. Igami 他 *20th Topical Conference on Radio Frequency Power in Plasmas* 25 -28 June, Sorrento, Italy (2013), ポスター発表
- ③ “磁場配位最適化による基本共鳴周波数帯の電子バーシュタイン波加熱による高密度プラズマの中心部加熱” 伊神弘恵 他 プラズマ・核融合学会 第 29 回年会 平成 24 年 11 月 27 日-30 日 於 クローバープラザ(福岡県春日市) 招待講演
- ④ “Progress of ECRH by EBW in over-dense plasmas and controlling the confinement regime by ECCD with high power launching in LHD”, H. Igami, 他 *17th joint workshop on Electron cyclotron Emission and Electron Cyclotron Resonance Heating*, 17 - 10 May, Deurne, Netherlands (2012) 口頭発表
- ⑤ “Experimental results of electron Bernstein wave heating on the LHD and consideration for a helical type fusion device”, H. Igami, S. Kubo, T. Shimozuma, Y. Yoshimura, H. Takahashi, H. Idei, M. Nishiura, S. Ogasawara, R. Makino, R. Kumazawa, T. Mutoh, A. Sagara, T. Goto *International Toki Conference 21*, Nov. 29-Dec. 1 (2011), Toki, Japan ポスター発表
- ⑥ “LHD における OXB モード変換過程を介した電子バーシュタイン波加熱実験” 伊神弘恵, 久保伸, 下妻隆, 吉村泰夫, 高橋裕己, 出射浩, 他 5 名 Plasma Conference 2011, 2011 年 11 月 22 日 - 11 月 25 日 石川県立音楽堂 口頭発表

[図書] (計 0 件)

[産業財産権]

○出願状況 (計 0 件)

名称：
発明者：

権利者：
種類：
番号：
出願年月日：
国内外の別：

○取得状況 (計 0 件)

名称：
発明者：
権利者：
種類：
番号：
取得年月日：
国内外の別：

[その他]
ホームページ等

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・准教授
研究者番号：10390634

(2) 研究分担者

()

研究者番号：

(3) 連携研究者

久保伸 (KUBO Shin)
核融合科学研究所・教授
研究者番号：80170025

下妻隆 (SHIMOZUMA Takashi)

核融合科学研究所・教授
研究者番号：80270487

吉村泰夫 (YOSHIMURA Yasuo)

核融合科学研究所・准教授
研究者番号：90300730

高橋裕己 (TAKAHASHI Hiromi)

核融合科学研究所・助教
研究者番号：00462193

出射浩 (IDEI Hiroshi)

九州大学 応用力学研究所・准教授
研究者番号：70260049