

科学研究費助成事業（科学研究費補助金）研究成果報告書

平成 24 年 5 月 8 日現在

機関番号： 63902

研究種目： 基盤研究（C）

研究期間： 2009～2011

課題番号： 21560862

研究課題名（和文） LHD における電子バーンシュタイン波加熱

研究課題名（英文） Electron Bernstein wave heating in LHD

研究代表者

吉村 泰夫（YOSHIMURA YASUO）

核融合科学研究所・ヘリカル研究部・准教授

研究者番号： 90300730

研究成果の概要（和文）： 核融合科学研究所の大型ヘリカル装置 LHD の真空容器内に、高磁場側からプラズマ加熱用電磁波を入射することで電子バーンシュタイン波へのモード変換を可能とするための新たなミラーを設置した。用いる電磁波の遮断密度以上の高密度プラズマに対する加熱実験を行った結果、プラズマ中心部の電子温度上昇を実現した。電磁波入射時のプラズマ中心部の電子密度は用いた 77GHz の電磁波の左回り遮断密度の 1.6 倍の高密度プラズマであることから、中心部の電子温度上昇は入射された電磁波からモード変換された電子バーンシュタイン波によるものと結論できる。

研究成果の概要（英文）： A new mirror which enabled high-field side injection of electron cyclotron waves for mode conversion to electron Bernstein waves was installed in the vacuum vessel of large helical device LHD of national institute of fusion science. In the high-density plasma heating experiment where the electron density around the plasma center was higher than the cut-off density of applied waves, an increase in the electron temperature at the plasma center was realized. The electron density at the plasma center was 1.6 times higher than the left-hand cut-off density of the applied 77GHz wave, then the increase in the electron temperature at the plasma center should be attributed to the electron Bernstein wave which was mode-converted from the injected electron cyclotron wave.

交付決定額

（金額単位：円）

| | 直接経費 | 間接経費 | 合計 |
|---------|-----------|-----------|-----------|
| 2009 年度 | 2,900,000 | 870,000 | 3,770,000 |
| 2010 年度 | 500,000 | 150,000 | 650,000 |
| 2011 年度 | 400,000 | 120,000 | 520,000 |
| 年度 | | | |
| 年度 | | | |
| 総計 | 3,800,000 | 1,140,000 | 4,940,000 |

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

1. 研究開始当初の背景

(1) プラズマの生成・加熱のために、プラ

ズマ中の電子の磁場中での回転運動の周波数と同じ又はその数倍の周波数を持つ電磁

波（電子サイクロトロン波）が用いられている。電子サイクロトロン波の中でも従来から利用されている第二高調波の異常波または基本周波数の正常波には、遮断と呼ばれる、用いる電磁波の周波数に依存した伝搬の密度上限が存在する。このため、遮断密度以上の高密度プラズマの加熱に対しては、異常波や正常波を用いることが出来ない。また異常波や正常波は電子温度が高いほど効果的に加熱出来るという特性を持っている。一方、電子バーンシュタイン波と呼ばれる波動には遮断が存在せず、また温度の低い電子に対しても良好な加熱特性を持つ。しかしプラズマ外部から入射した電磁波により容易に励起出来る異常波や正常波と異なり、静電波である電子バーンシュタイン波はプラズマ中でのモード変換により励起しなければならず、電子バーンシュタイン波を用いた高密度プラズマ加熱は理論的にはその有効性が指摘されていたにもかかわらず実現が難しいとされていた。

(2) しかし、ドイツのステラレータ型プラズマ実験装置であるベンデルシュタイン7-ASにおいて1997年に正常波-異常波-電子バーンシュタイン波モード変換法(OXB法)によって遮断密度以上のプラズマ加熱が実証されたのを機に、電子バーンシュタイン波を用いた加熱手法が高密度プラズマの加熱法として大きな注目を集めた。トカマク型を含めた各国の他のプラズマ実験装置においても電子バーンシュタイン波加熱に関する研究が活発に行われるようになった。

2. 研究の目的

(1) 従来の正常波または異常波の電子サイクロトロン波を用いた加熱法では、波動が伝搬不能となる遮断密度以上の密度を持つプラズマに対してはプラズマ中心領域での加熱が不可能となる。それに対して、電子バーンシュタイン波は遮断が存在せず、高密度プラズマの加熱に有効な手法として各国で研究が進められている。特に近年LHDではこれまでの様々な核融合プラズマ実験装置におけるプラズマ密度上限を大きく上回る $1 \times 10^{21} \text{ m}^{-3}$ に達する高密度プラズマ維持を実現しており、ヘリカル型装置の新たな特性として大きな注目を集めている。LHDで生成されたこのような高密度プラズマに対応した加熱手法の確立が急務となっている。

(2) 本研究では、プラズマ中での電子サイクロトロン波からのモード変換が必要な電子バーンシュタイン波の励起のために、LHD真空容器内に新たなミラーを設置することによりプラズマ実験装置高磁場側からの電

子サイクロトロン波入射を可能とする。これにより達成される電子バーンシュタイン波へのモード変換を利用することでLHDにおいて電子バーンシュタイン波加熱を実現し、既設電子サイクロトロン波加熱システムの遮断密度以上の高密度プラズマ加熱を、既設のシステムを有効に活用して実現する。

3. 研究の方法

(1) OXB法とは異なる手法であるXB法による高密度プラズマ加熱を実現するために、電子バーンシュタイン波へのモード変換を目的とした電子サイクロトロン波の高磁場側からの入射を可能とする。そのために、LHD真空容器内に電子サイクロトロン波の反射ミラーを新たに設置する。

(2) LHDでは平成20年度の第12サイクル実験から、従来から使用していた周波数84GHzおよび168GHzに加えて新たに周波数77GHz、最大出力1MW、最大出力時のパルス持続時間5秒の定格を持つ大電力ミリ波発振管（ジャイロトロン）が利用可能となった。従来よりも低い77GHzの周波数を利用することにより、高磁場側入射のためのLHD真空容器内の空間的領域（最外殻磁気面内に入り込んだ基本波共鳴層の部分）を広く取れることから、本研究ではこの77GHzミリ波電力を用いて実験を行った。既設の77GHzミリ波電力入射システムはLHDプラズマの垂直断面が横長の楕円形状となる領域の外側にあり、真空容器内にミラーを設置することで、既設入射システムでは不可能であったこの断面での基本波共鳴層を通る強磁場側からの入射が可能となる。既設ミラーから入射されたビームは新設ミラーで反射された後に基本波共鳴層を通過してプラズマ中に入り、さらに高域混成共鳴層に到達することにより電子バーンシュタイン波にモード変換される（図1参照）。その後電子バーンシュタイン波はプラズマ中心側に進行し高密度プラズマの加熱に寄与すると期待される。

(3) LHD実験において電子サイクロトロン波ビームの高磁場側からの入射を実施し、電子温度や蓄積エネルギー等のプラズマパラメータを計測する。モード変換した電子バーンシュタイン波による加熱となっていることを、電磁波モードの電子サイクロトロン波遮断密度（正常波のプラズマ遮断密度 $7.4 \times 10^{19} \text{ m}^{-3}$ 、さらには高磁場側入射異常波の左回り遮断密度 $1.5 \times 10^{20} \text{ m}^{-3}$ ）以上の密度を持つプラズマを対象に、その温度変化と温度分布の変化を詳細に調べることで確認する。

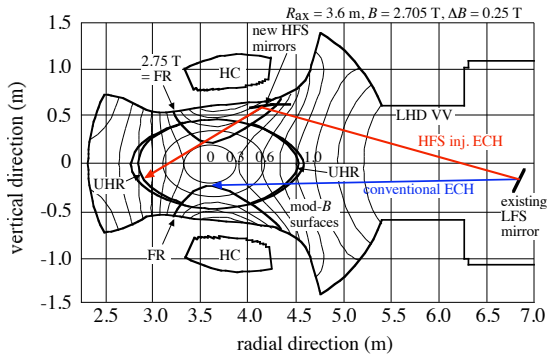


図 1 LHD 真空容器内に新たに設置されたミラー配置およびそれにより実現される電子サイクロトロン波の高磁場側入射。波動伝搬軌道の概略を赤線で示した

4. 研究成果

(1) 平成 22 年度の実験では、線平均電子密度 $7.5 \sim 8 \times 10^{19} \text{ m}^{-3}$ の高密度プラズマに対して、20Hz で 100%の電力変調をかけた 775kW の 77GHz 電子サイクロトロン波を新ミラー経由により強磁場側から入射し、プラズマ遮断密度である $7.4 \times 10^{19} \text{ m}^{-3}$ 以上のオーバーデンスプラズマにおいても電子サイクロトロン波電力変調に同期した顕著な蓄積エネルギーの上昇を確認した。一方、従来のような正常波の低磁場側からの入射ではプラズマに影響は見られなかった (図 2 参照)。

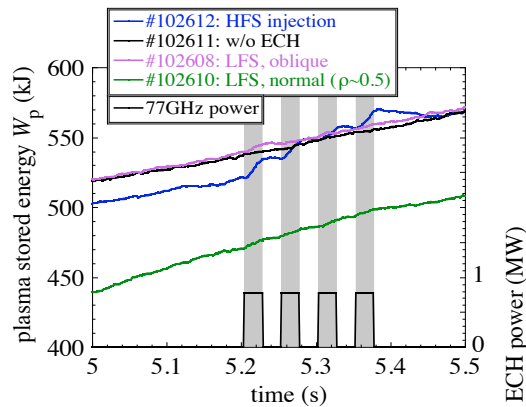


図 2 電子サイクロトロン波の高磁場側入射によるプラズマ蓄積エネルギーの上昇 (青線)。弱磁場側入射 (桃色および緑の線) ではプラズマに影響は見られない

(2) 平成 23 年度は、LHD で生成されるさらに高密度のプラズマ (スーパーデンスコア: SDC プラズマ) に対して電子サイクロトロン波の高磁場側入射を行った。12.5MW の中性粒子入射加熱装置 (NBI) で加熱したプラズマに水素ペレットを複数入射し SDC プラズマを

生成し、その後 4MW の NBI で維持したターゲットプラズマとした。ターゲットプラズマに 875kW、200ms の電子サイクロトロン波を高磁場側から入射することにより、プラズマ蓄積エネルギーの上昇とともにプラズマ中心部での電子温度上昇を実現した (図 3 参照)。電子サイクロトロン波入射時のプラズマ中心部の電子密度は $24 \times 10^{19} \text{ m}^{-3}$ であり、用いている 77GHz 電子サイクロトロン波の左回り遮断密度 $14.7 \times 10^{19} \text{ m}^{-3}$ の 1.6 倍、プラズマ遮断密度の 3.2 倍の高密度プラズマであることから、電磁波モードの電子サイクロトロン波はプラズマ中心部へは到達できない。したがってこの中心部の電子温度上昇は、入射された電磁波からモード変換された電子バーンシュタイン波によるものと結論できる。

(3) 以上から、本研究で目的とした高磁場側入射の電子サイクロトロン波からモード変換された電子バーンシュタイン波による遮断密度以上の高密度プラズマ加熱を実現したと言え、想定されている将来の高密度プラズマ核融合における電子サイクロトロン波加熱の有用性を大きく高めた。

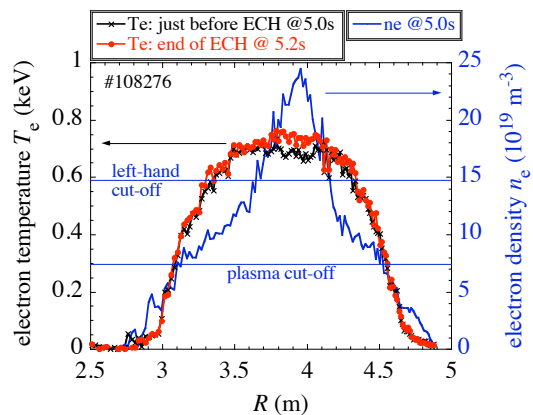


図 3 中心電子密度が 77GHz 電子サイクロトロン波の左回り遮断密度を大きく越える高密度プラズマにおいて、電子サイクロトロン波の高磁場側からの入射によりプラズマ中心部の電子温度が上昇

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 Y. Yoshimura 他、11 名中 1 番目、High Density Plasma Heating by EC-Waves Injected from High-Field Side for Mode Conversion to Electron Bernstein Waves in LHD, Plasma Science and Technology、査読有、掲載決定

② Y. Yoshimura 他、18名中1番目、ECCD Experiment Using an Upgraded ECH System on LHD、Plasma and Fusion Research、査読有、Vol.7 、 2402020 (2012) 、 DOI: 10.1585/pfr.7.2402020

〔学会発表〕(計 11 件)

① 吉村泰夫、LHD における電子バーンシュタイン波加熱のための EC 波高磁場側入射、Plasma Conference 2011、2011年11月23日、金沢市

② Y. Yoshimura、High Density Plasma Heating by EC-Waves Injected from High-Field Side for Mode Conversion to Electron Bernstein Waves in LHD、8th General Scientific Assembly of the Asia Plasma and Fusion Association、2011年11月1日、中国桂林市

③ Y. Yoshimura、Development of high-power, long-pulse gyrotrons and its application for high electron temperature, EBWH and ECCD experiments on LHD、Joint Meeting of 19th Topical Conference on Radio Frequency Power in Plasmas and US Japan RF Physics Workshop、2011年6月1日、米国ニューポート市

④ Y. Yoshimura、Recent activities on ECCD and EBWH by use of high-power upgraded 77GHz ECH system on LHD、USA-Japan Plasma Physics Workshop 2010、2011年2月8日、鳥羽市

6. 研究組織

(1) 研究代表者

吉村 泰夫 (YOSHIMURA YASUO)

核融合科学研究所・ヘリカル研究部・准教授

研究者番号：90300730

(2) 研究分担者

()

研究者番号：

(3) 連携研究者

()

研究者番号：