

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 27 年 6 月 12 日現在

機関番号：63902

研究種目：基盤研究(C)

研究期間：2012～2014

課題番号：24561029

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の高度化

研究課題名(英文)Improvement of 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

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 4,000,000円

研究成果の概要(和文)：従来の電子サイクロトロン(EC)波を用いた加熱法では不可能であった波動の遮断密度以上のプラズマ加熱を、プラズマ実験装置高磁場側からのEC波入射を可能とすること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して実現した。また、大電力のEC波ビームがプラズマに吸収されなかった場合のLHD真空容器の損傷を防ぐためのインターロックシステムを構築した。このインターロックシステムはLHDにおけるEC波を用いた定常実験の進展に大きく寄与し、2014年には350kWのEC波電力で $1.1 \times 10^{19} \text{ m}^{-3}$ の線平均電子密度、中心電子温度2.5keV以上のプラズマを39分間維持出来た。

研究成果の概要(英文)：Heating plasmas with the electron density higher than the cut-off density of electron cyclotron (EC) heating waves was realized, by enabling the injection of EC-waves from high magnetic field side so that the EC waves are mode-converted to the electron Bernstein waves. An interlock system which prevent the possible damage of LHD vacuum vessel caused by non-absorbed high power EC-waves was constructed. The interlock system greatly contributed to the progress of steady state plasma sustainment by EC-waves. In 2014, a high performance plasma with the line average electron density of $1.1 \times 10^{19} \text{ m}^{-3}$ and the central electron temperature of over 2.5keV was stably sustained by 350kW EC-wave for 39 min.

研究分野：プラズマ理工学

キーワード：電子サイクロトロン波 トオフ 電子バーンシュタイン波 定常プラズマ モード変換 高密度プラズマ プラズマ加熱 カット

1. 研究開始当初の背景

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）が用いられており、特に第二高調波の異常波および基本周波数の正常波は加熱効率がよく従来から利用されている。しかし異常波または正常波には、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、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これまで実現が難しいとされてきたが、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における1997年の加熱実証を機に、電子バーンシュタイン波加熱は高密度プラズマの加熱法として大きな注目を集めて来ている。他のトカマク型装置や核融合科学研究所の中型のヘリカル型装置 CHS においても電子バーンシュタイン波加熱の研究が進められ、O-X-B 法および遅波 X-B 法によるプラズマ加熱が実現している。ここで O-X-B 法とは正常波 (Ordinary wave) - 異常波 (extraordinary wave) - electron Bernstein wave の二段階のモード変換手法で、電子サイクロトロン波入射の容易な装置外側の弱磁場側から正常波を入射し、プラズマ遮断層での反射の際モード変換され生じた異常波が、さらに高域混成共鳴層で電子バーンシュタイン波にモード変換されるものである。遅波 X-B 法では異常波を基本共鳴磁場よりも磁場強度の強い強磁場側から入射し、それが高域混成共鳴層で電子バーンシュタイン波にモード変換される。

核融合科学研究所の大型ヘリカル装置 LHD においても、平成 21-23 年度の科学研究費補助金 基盤研究 (C) 課題番号 21560862 「LHD における電子バーンシュタイン波加熱」(研究代表者 吉村泰夫) により設置した真空容器内ミラーを用いて遅波 X-B 法の実証実験を開始した。異常波の強磁場側からの入射により、加熱に用いている 77GHz の電子サイクロトロン正常波のプラズマ遮断密度 $7.4 \times 10^{19} \text{m}^{-3}$ および異常波の左回り遮断密度 $14.7 \times 10^{19} \text{m}^{-3}$ を上回る高密度のプラズマ中心領域 ($\sim 17 \times 10^{19} \text{m}^{-3}$) においても電子温度の上昇が観測され、また同時にプラズマの蓄積エネルギーも上昇していることから、モード変換による電子バー

ンシュタイン波加熱の原理実証に成功した。

一方この原理実証実験後に、ステンレスで製作した高磁場側入射用ミラー表面に溶融による損傷が認められた。これは電子サイクロトロン波入射による発熱と LHD プラズマからの通常の入熱に加え、ミラーを貫通する電子サイクロトロン波共鳴層でのプラズマ生成によると考えられる入熱が原因と考えられた。さらに、除熱機構のないステンレスミラーではビーム入射時間幅が数百ミリ秒に制限されることから、本研究の更なる進展のためにはミラーの改良が必要であった。

また、LHD では近年電子サイクロトロン波加熱システムの増強が進み、電子サイクロトロン波入射電力の増加およびパルス幅の伸長が大きく進展している。それに伴い、密度が薄く入射電力の吸収が十分でない場合や入射中にプラズマが崩壊した場合などに電力入射を続けることにより対向壁の損傷が生じる場合があった。

2. 研究の目的

既に設置した真空容器内ミラーはステンレス製 (融点 1400 度程度) であり、冷却機構が無くまた真空容器内上部に設置してあることから、溶融による損傷とそれによるプラズマへの悪影響を避けるために、このミラーを使用した電子サイクロトロン波入射のパルス幅を 200 ミリ秒に制限している。しかし 200 ミリ秒のパルス幅では原理実証は出来ても放電時間が数秒にわたる LHD プラズマのパラメータ向上につなげるのは難しい。そこで本研究では新たに高融点金属であるタングステン (融点 3380 度) 製の真空容器内ミラーを製作・設置することで 1 秒以上のパルス幅の遅波 X-B 加熱を実現し、LHD プラズマの最高蓄積エネルギーや最高中心電子密度の達成など、マクロなプラズマパラメータの向上に寄与することを目的とする。

また電子サイクロトロン波入射の適切な制御のため、FPGA (Field Programmable Gate Array: プログラム可能な集積回路) システムを導入する。FPGA システムのプログラミングとセットアップを行う。電子サイクロトロン波のパルス長設定値よりも早くプラズマ放電が異常終了した場合の電子サイクロトロン波の入射停止、プラズマ生成のために電子サイクロトロン波を入射したにもかかわらず所定の時間内にプラズマが生成できなかった場合の入射停止、プラズマの密度が所定の値を下回った場合の入射停止・密度が回復した場合の入射再開などの機能を持つ入射制御システムを構築し、LHD の電子サイクロトロン波加熱システム全体の高度化を図る。

3. 研究の方法

既設アンテナシステムからの電子サイクロトロン波を反射させることで装置の高磁場強度側から異常波をプラズマに入射し、か

つ秒オーダーの入射時間を確保するために、高融点素材であるタングステンを用いた真空容器内ミラーを設計・製作し、既設ステンレス製ミラーとの交換を行った。設計に当たっては、設置済みのステンレス製真空容器内ミラーを用いた遅波 X-B 加熱手法の原理実証実験から得た知見を基にした。既設のステンレス製ミラーの寸法が角度の異なる3枚のミラーを組み合わせるとおおよそ 15cm×40cm であったのに対し、ミラーが基本波共鳴層を横切らないように、新たなタングステン製ミラーは 15cm×20cm のもの1枚とした。新ミラーについても既設ミラーと同様に温度を監視するために、ミラー背面の3カ所に熱電対を取り付け、実験中のミラー温度を監視可能とした。この熱電対信号の情報はミラー温度の監視のみならず、ミラーに対する電子サイクロトロン波入射位置の確認にも利用可能とした。

設置するタングステン製真空容器内ミラーを用いて、LHD においても原理実証された高磁場側入射の電子サイクロトロン波による遅波 X-B 加熱手法をさらに進展させ、プラズマパラメータの向上への寄与を目指す。プラズマへの電子サイクロトロン波入射方向はミラー設置角度によりほぼ一方に決まり固定されていることから、電子バーンシュタイン波の吸収位置を変化させるためにはプラズマの電子密度や磁気軸位置をスキャンして調整する。高密度プラズマを生成・維持するスーパーデンスコアプラズマ実験において、プラズマの維持に重要と考えられているプラズマ周辺部の温度上昇を遅波 X-B 法を適用することで実現し、さらにはこの電子温度上昇によって、維持可能なプラズマ密度の更なる増加を実現する。高蓄積エネルギーの達成を目的とした LHD 実験に対しては中心加熱の遅波 X-B 法を適用し、LHD プラズマの最高蓄積エネルギーの達成を目指す。

また、電子サイクロトロン波の入射制御システムを構築した。このために、AandD 社のシングルボード Linux コンピュータ FPGA システム AD7011-EVA を用いた。FPGA システムへの入力信号として、LHD プラズマの線平均電子密度信号と酸素分光信号、および大電力電子サイクロトロン波の発振源であるジャイロトロンへのアノード印加電圧信号を用いた。それぞれ、プラズマの電子密度の高低、プラズマ崩壊のタイミング、電子サイクロトロン波入射の有無の判断に用いている。FPGA のプログラミングにより、電子サイクロトロン波入射開始後所定の時間内にプラズマ生成が出来なかった場合、プラズマ維持中にプラズマが崩壊した場合および線平均電子密度が所定の値を下回った場合の入射停止、およびその後密度が回復した場合の入射再開の機能を持つ入射制御システムを作成した。各判断のための閾値はタッチパネルへの入力またはパソコンを用いた

通信により、実験状況に応じて容易に変更可能とした。本システム構築により、大電力入射短パルス実験・長パルス定常実験共に安全な電子サイクロトロン波入射が可能となった。

これら真空容器内新ミラーおよび電子サイクロトロン波入射制御システムを用いて、LHD において遅波 X-B 加熱実験および長時間放電実験を行う。

4. 研究成果

遅波 X 波から電子バーンシュタイン波へのモード変換を利用した高磁場側入射 X 波加熱手法による LHD プラズマの高性能化を実現するため、まず線平均電子密度と加熱入力を抑制してターゲットプラズマを維持し、重畳入射する遅波 X 波の効果を際立たせるための実験を行った。LHD の上部ポートから入射する別の 77GHz 電子サイクロトロン波によりプラズマを生成し 1.6MW のイオンサイクロトロン波加熱で維持した線平均電子密度 $1.2 \times 10^{19} \text{m}^{-3}$ のプラズマに対し、プラズマ維持加熱入力の 50%弱となる 0.76MW の電子サイクロトロン波電力を、LHD の外側ポート (2-O ポート) から真空容器内ミラー経由の高磁場側入射 X 波 (遅波 X 波) として入射した。遅波 X 波の入射

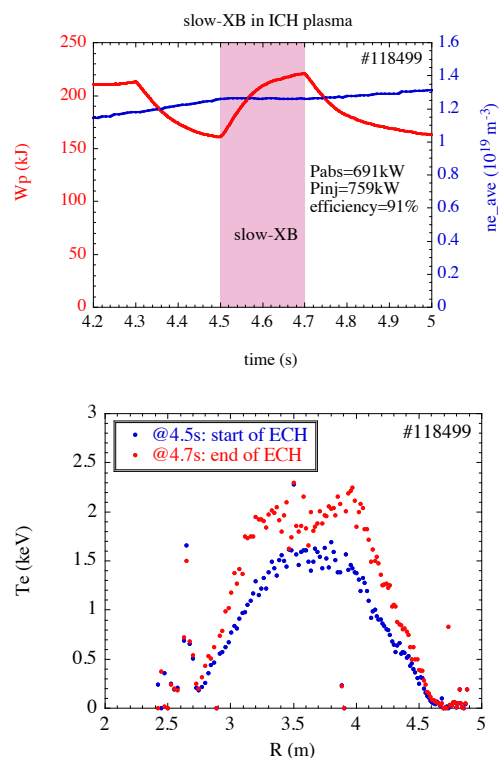


図 1. イオンサイクロトロン波加熱で維持した線平均電子密度 $1.2 \times 10^{19} \text{m}^{-3}$ のプラズマに対する~90%の高加熱効率の遅波 X-B 加熱の実現。遅波 X-B 加熱適用前後の、上：プラズマ蓄積エネルギー (赤) と線平均電子密度 (青) の時間変化、下：電子温度分布の変化 (青が適用前、赤が適用後)。

直前には時間的に減少傾向にあり 162kJ であったプラズマ蓄積エネルギーは入射開始とともに増加に転じ、入射終了時には約 1.4 倍の 220kJ に達した。また電子温度も全域にわたって顕著に上昇している。その加熱効率は 91% と評価され、高効率の遅波 X-B 加熱が実現された。(図 1)。

ターゲットプラズマの線平均電子密度を 1.5 から $9 \times 10^{19} \text{m}^{-3}$ まで変化させ、加熱位置の密度依存性を調べる実験を行った。ターゲットプラズマは 5.4MW の中性粒子入射加熱で維持し、追加熱として 0.76MW の遅波 X 波を 5Hz の 100% 電力変調をかけて入射した。加熱位置の同定は多チャンネル電子サイクロトロン波放射 (ECE) 計測データの解析結果から行った。図 2 に ECE 信号の変調振幅分布および変調伝搬の位相分布を示す。変調振幅分布が最大となり、かつ位相分

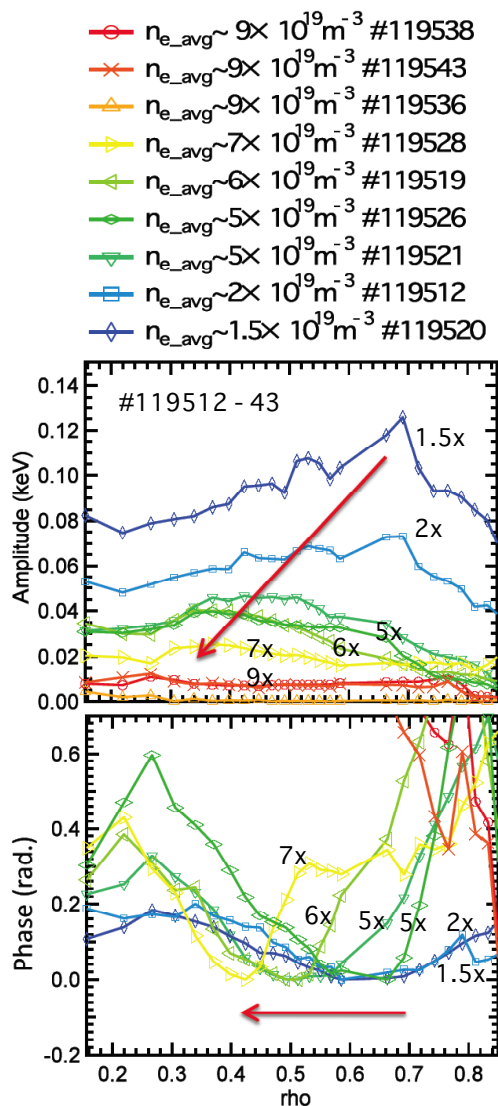


図 2. 遅波 X-B 加熱電力吸収位置の密度依存性。上図は ECE 信号の変調振幅分布、下図は変調伝搬の位相分布を示し、ターゲットプラズマの線平均電子密度の上昇と共に加熱位置がプラズマ中心側に移動していることが分かる。

布で最低となる位置が加熱電力吸収位置を示している。密度の増加にともない、 $1.5 \times 10^{19} \text{m}^{-3}$ で規格化小半径 $\rho \sim 0.7$ であった加熱位置は徐々にプラズマ中心側へ変化し、 $7 \times 10^{19} \text{m}^{-3}$ では $\rho \sim 0.4$ となった。遅波 X 波から電子バーンシュタイン波へのモード変換位置・モード変換後の電子バーンシュタイン波の伝播経路の変化によるものと考えられる。

また、大電力の電子サイクロトロン波ビームがプラズマに吸収されなかった場合の LHD 真空容器の損傷を防ぐためのインターロックシステムを構築したことは特に長時間入射設定を行う定常実験において重要であり、LHD における電子サイクロトロン波を用いた定常実験の進展に大きく寄与した。2014 年には 350kW の電子サイクロトロン波電力で $1.1 \times 10^{19} \text{m}^{-3}$ の線平均電子密度、中心電子温度 2.5keV 以上、中心イオン温度 1keV のプラズマを 39 分間維持し (図 3)、それまでの電子サイクロトロン波電力 240kW、線平均電子密度 $0.7 \times 10^{19} \text{m}^{-3}$ 、中心電子温度 1.5keV、維持時間 30 分間の記録を大きく更新することが出来た。図には上から、電子サイクロトロン波入射電力、39 分放電ではトムソン散乱計測による中心電子温度の取得が出来なかったことからパ

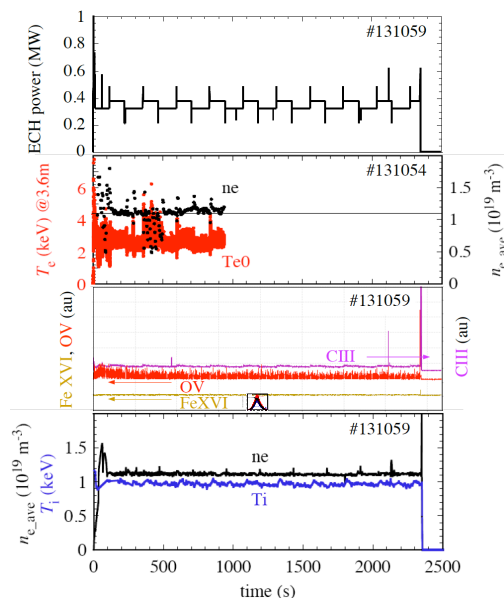


図 3. 時間平均入射電力 350kW の電子サイクロトロン波加熱単独で 39 分間安定に維持された線平均電子密度 $1.1 \times 10^{19} \text{m}^{-3}$ 、中心電子温度 2.5keV 以上、中心イオン温度 1keV のプラズマ。上から、電子サイクロトロン波入射電力、39 分放電ではトムソン散乱計測による中心電子温度の取得が出来なかったことからパラメータとして同等な放電における中心電子温度及び線平均電子密度、炭素・酸素・鉄からの不純物放射強度、線平均電子密度及び中心イオン温度の時間発展。

ラメータとして同等な放電における中心電子温度及び線平均電子密度、炭素・酸素・鉄からの不純物放射強度、線平均電子密度及び中心イオン温度の時間発展を示した。

以上に述べた成果について、以下に示すように、論文として公表し、また国内学会および国際会議において発表を行った。

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 3 件)

① Y. Yoshimura 他、22 名中 1 番目、Long-Pulse Plasma Discharges by Upgraded ECRH System in LHD、EPJ Web of Conferences、査読なし、Vol. 87、2015、02020、DOI:10.1051/epjconf/20158702020

② Y. Yoshimura 他、17 名中 1 番目、Electron Bernstein Wave Heating by Electron Cyclotron Wave Injection from High-Field Side in LHD、Nuclear Fusion、査読あり、Vol. 53、2013、063004、DOI:10.1088/0029-5515/53/6/063004

③ 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、Vol. 15、2013、pp. 93-96、DOI:10.1088/1009-0630/15/2/02

[学会発表] (計 5 件)

① Y. Yoshimura、Progress of Long Pulse Discharges by Electron Cyclotron Heating in Large Helical Device、8th IAEA Technical Meeting on Steady State Operation of Magnetic Fusion Devices、2015 年 5 月 26-29 日、奈良春日野国際フォーラム 麓 (奈良県・奈良市)

② Y. Yoshimura、Progress in High Performance Steady State Plasma Operation in LHD、Plasma Conference 2014、2014 年 11 月 18-21 日、新潟コンベンションセンター 朱鷺メッセ (新潟県・新潟市)

③ Y. Yoshimura、Long-Pulse Plasma Discharges by Upgraded ECRH System in LHD、18th Joint Workshop on Electron Cyclotron Emission and Electron Cyclotron Resonance Heating、2014 年 4 月 22-25 日、奈良県新公会堂 (奈良県・

奈良市)

④ Y. Yoshimura、Long-pulse plasma sustainment and high-density plasma heating by use of electron cyclotron waves in LHD、The 4th International Symposium of Advanced Energy Science、2013 年 9 月 30 日-10 月 2 日、京都大学宇治キャンパス おうぼくプラザ (京都府・宇治市)

⑤ Y. Yoshimura、Progress in long-pulse plasma sustainment and high-density plasma heating by upgraded ECRH system in LHD、Joint 19th ISHW and 16th IEA-RFP workshop、2013 年 9 月 16-20 日、イタリア パドヴァ市

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