

平成 31 年 4 月 25 日現在

機関番号：63902

研究種目：若手研究(B)

研究期間：2016～2018

課題番号：16K18338

研究課題名(和文)電子サイクロトロン加熱の入射条件の最適化

研究課題名(英文)Optimum injection of electron cyclotron heating

研究代表者

辻村 亨(Tsujimura, Toru)

核融合科学研究所・ヘリカル研究部・助教

研究者番号：00732744

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 2,800,000円

研究成果の概要(和文)：本研究では、核融合プラズマにおいて電子サイクロトロン加熱(ECH)の入射条件の最適化を行った。ECHでは、プラズマでの加熱吸収パワーの局在性と制御性の向上のために、一回通過吸収効率を最大化することが重要な鍵となる。大型ヘリカル装置(LHD)プラズマの最外殻磁気面外側の薄い密度領域がECHの最適化を阻害することを解明し、それを考慮した光線追跡コードを開発して実験に適用することで加熱効率を改善した。またFPGA(Field Programmable Gate Array)を用いてECH入射のリアルタイム制御系を構築し、入射偏波や加熱位置の制御による一回通過吸収効率の改善を実証した。

研究成果の学術的意義や社会的意義

学術的意義は、電磁波と電子との相互作用を評価する数値計算モデルを基にしたECH入射系のリアルタイム制御により、ECHの一回通過吸収効率を向上することが可能となったことである。これにより核融合プラズマの高性能化だけでなく、高パワー加熱による炉内機器の損傷防止にもつながる結果となった。社会的意義は、核融合炉の早期実現に向けて、プラズマの加熱性能に優れたECHの炉への適用の妥当性・実現性の向上につながることである。

研究成果の概要(英文)：Optimum injection of electron cyclotron heating (ECH) was conducted in LHD (Large Helical Device) plasmas. Maximizing the single-pass absorption power is a key for localized heating and improving its controllability. We found that peripheral plasmas outside the last closed flux surface of the LHD affect optimization of ECH, then developed the ray-tracing code which includes those effects, and finally improved the heating efficiency. The real-time control system of the ECH injection settings was developed with FPGA (Field Programmable Gate Array), based on the dependence of the optimum ECH settings on peripheral plasmas. We demonstrated to improve the single-pass absorption efficiency by controlling the incident polarization and the deposition locations of the EC waves in real time.

研究分野：核融合プラズマ

キーワード：核融合プラズマ 電子サイクロトロン加熱 プラズマ加熱 大型ヘリカル装置 リアルタイム制御 偏波 デポジション位置 ミリ波

様式 C-19、F-19-1、Z-19、CK-19（共通）

1. 研究開始当初の背景

(1) 磁場中の電子のサイクロトロン運動周波数に合わせた周波数の電磁波をプラズマに入射して、電磁波と電子の間の共鳴現象を利用する電子サイクロトロン加熱(ECH: Electron Cyclotron Heating) という手法が、核融合プラズマの加熱に広く用いられている。ECHにおいて、高性能プラズマの生成、容器内漏洩波レベルの低減、および所望の加熱・電流駆動分布の実現のためには、ECH入射条件の調整が必要である。大型ヘリカル装置(LHD)のECH実験において、加熱位置や入射偏波を調整する様々な試みが行われ、LHDプラズマの高電子温度化や物理研究からの要請を満たすことに貢献してきた。ECHでは、プラズマでの加熱吸収パワーの局在性と制御性の向上のために、一回通過入射時の吸収効率を最大化させることが重要な鍵となる。

(2) 一方で、トムソン散乱計測を用いた3次元平衡マッピングの計算等によると、最外殻磁気面(LCFS)外側の周辺領域において有限な電子密度が存在することが知られている。その領域の有限な電子密度勾配による、EC波の屈折の効果を無視することはできない。さらに、その低い密度を持つ周辺領域における有限な磁気シアの存在により、純粋な正常波(0)モードあるいは異常波(X)モードを共鳴層において励起するためには、入射偏波の調整が必要である。周辺領域におけるEC波の屈折と0-Xモード間結合は従来無視されがちであったが、このような効果は磁場閉じ込め核融合プラズマにおいて共通に重要であると考えられる。

2. 研究の目的

(1) ECHの入射条件の最適化を行い、一回通過吸収効率を向上させることを研究の目的とした。

1. (2)で述べた周辺プラズマがECHの入射最適化に影響することを実験的に検証し、その効果を考慮した光線追跡コードを開発して実験結果と比較する。

(2) (1)の結果を基に、入射偏波や入射ターゲット位置をプラズマの状態に合わせてリアルタイムで制御するシステムを構築し、時間的に変化するプラズマに対してECHの入射制御を行い、一回通過吸収効率の向上を実現する。

3. 研究の方法

(1) ECHの入射条件の最適化についての実験と数値計算の結果を比較するために、1. (2)で述べた周辺プラズマがEC波の屈折や偏波に影響を与えるという効果を、核融合科学研究所で開発している光線追跡コードLHDGaussに取り入れた。このコードはLHD放電の高速後処理システムAutoAnaに導入され、同じくAutoAna上で自動計算される3次元平衡マッピングを用いて、原理的にはEC加熱された全放電において後処理として自動で光線追跡が全タイムスライスに対して並列計算できるようになり、パワーデポジション分布の予測に基づく入射設定の調整が実験に役立てられる。このコードは3次元平衡マッピングの磁気面をLCFS外側へ仮想的に外挿し、電子密度の実効小半径に対する分布を求めることで周辺領域を考慮している。図1に例としてLHD縦長断面上における電子密度分布を示す。このコードには加熱位置の計算だけでなく、0モードとXモードの励起率の計算が新たに組み込まれている。このモード励起率は、入射アンテナからLHDのEC共鳴層までを周辺プラズマを通して伝搬する軌道上(磁場と電子密度が伝搬軌道上で変化する)で1次元の全波解析から求められる。光線追跡コードそれ自体は世界中で広く利用されている汎用的なコードであるが、周辺領域も計算に取り入れ、モード励起率を計算することで、パワーデポジション分布の絶対値の評価が可能となった。

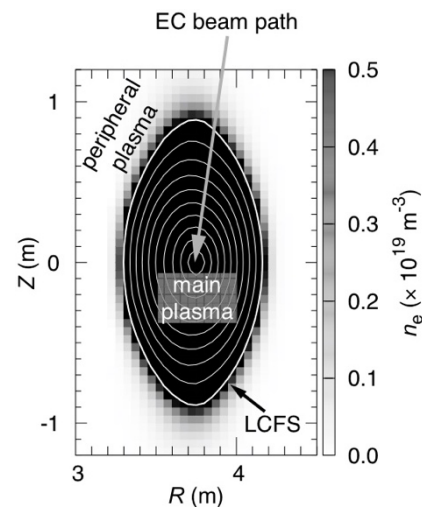


図1 LHD縦長断面上における電子密度分布[1]

(2) 入射偏波や入射ターゲット位置をプラズマの電子密度に合わせて最適化し、リアルタイム制御して、一回通過吸収効率を向上させるために、ECHの入射制御系を構築した。過去には、電子サイクロトロン放射(ECE)計測による電子温度が参照信号としてフィードバック制御に用いられた。しかしながら、燃料供給やMHD不安定性などによりECE温度は変わり得るため、ECHの入射設定だけがECE温度を変化させるとは限らない。入射設定が仮に最適値に到達していたとしても、別要因によりECE温度は変わり得る。そこでEC波パワーをプラズマへ効率的に吸収させるための新提案は、周辺プラズマがモード間結合や屈折に与える影響を考慮した光線追跡コードLHDGaussを用いて、様々な電子密度分布に対する最適な入射偏波や入射ターゲット位置を計算したデータセットを参照データとして、入射系をリアルタイム制御するというものである。この方法はEC波の伝搬・吸収モデルをベースにしているため、将来の数値モデルの改良による制御の更なる高度化やECHシステムの安全な運用に貢献する。図2に開発したECH入射系のリアルタイム制御の概略を示す。多チャンネルの遠赤外(FIR)レーザー干渉計がLHDでは長

パルス放電でのリアルタイム計測として適用できるため、リアルタイムで周辺電子密度分布を取得するのに利用した。電子密度のリアルタイムの取得化での入射制御は FPGA (Field Programmable Gate Array) を用いたリアルタイム演算を用いて行われた。最適な偏波の周辺電子密度分布に対する依存性に関するデータセットや、様々な電子密度分布に対して中心加熱を行うための入射ターゲット位置に関するデータセット等が予め FPGA メモリに保存しており、それらをリアルタイムで参照し、ECH 伝送系における偏波器の回転制御や入射アンテナの回転制御を行った。

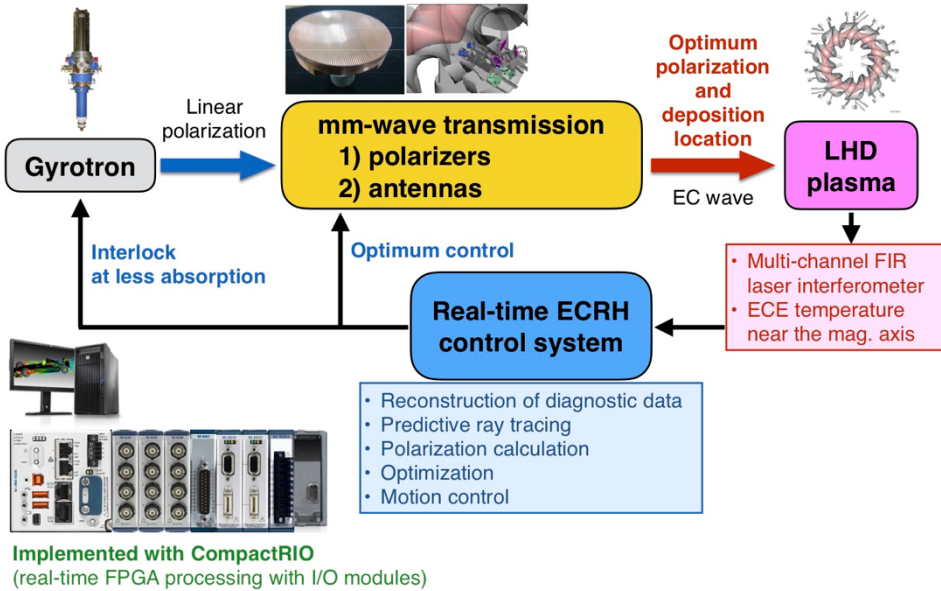


図 2 ECH 入射系のリアルタイム制御系

4. 研究成果

(1) 周辺プラズマがモード間結合に与える影響を調べるために、リアルタイムで入射偏波をスキャンする実験を行った。LHD の 5.5-U ポートに設置したアンテナから周波数 77 GHz の EC 波を入射した。伝送路中のマイターバンドに設置された 2 種類の偏波器を放電中に高速回転させ、ほぼ直線偏波にするために偏波の楕円度がほぼ 0° になるように、回転角 α をスキャンした。図 3 に偏波スキャン時のプラズマへの吸収パワーの時間発展を示す。イオンサイクロロン周波数帯の加熱により線平均電子密度がおよそ $1 \times 10^{19} \text{ m}^{-3}$ (77 GHz の基本波 0 モードカットオフ密度は $7.4 \times 10^{19} \text{ m}^{-3}$) に維持されている準定常プラズマに 15 Hz でパワー変調した EC 波を入射した。パワー入射のオンとオフのタイミングにおけるプラズマ蓄積エネルギーの時間変化から吸収パワーを実験的に評価した。LHD の標準磁場配位で磁場強度が 2.75 T であるから、通常の加熱モードは基本波 0 モードになり、プラズマ中心付近を通る共鳴層において一回通過での吸収が期待されるのに対し、X モードの EC 波はプラズマ中の伝搬経路上において共鳴層の手前に右手カットオフが存在するため、一回通過吸収は期待できない。従って、図 3 の吸収パワーの時間変化の主要な原因は 0 モード純度が入射偏波によって変化していることを示している。また励起モード解析を含んだ LHDGauss コードの計算で得られた吸収パワーの時間発展は実験で評価された吸収パワーの時間発展と良い一致を示している。0/X モード励起率計算を含んだ光線追跡計算により、吸収パワーの絶対値の評価が可能であることを示すものである。ただしここで一点注意すべきことは、LHDGauss コードでは一回通過吸収によるパワーデポジション分布のみ計算しているため、複数回通過吸収成分が比較的大きくなるような場合には、吸収パワーの計算値と実験値とのずれが大きくなることが予想される。実験的に吸収パワーが極大となる時間 9.54 s について、1 次元の全波解析を行い、右手カットオフ位置から入射アンテナ位置まで逆方向伝搬で、0 モード偏波を初期値として解いた。その結果、磁気面外挿による LCFS 外側の電子密度を考慮した場合、入射偏波角 45°

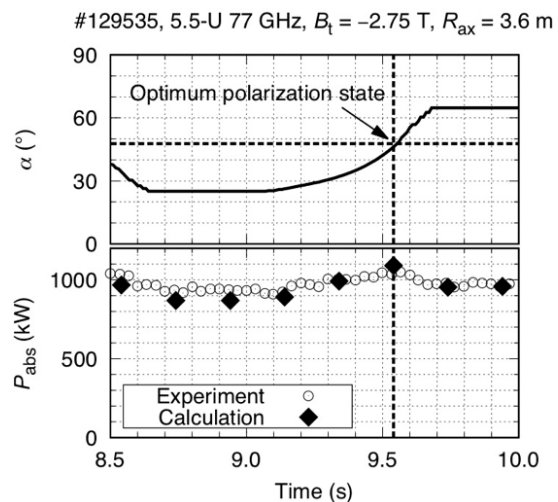


図 3 偏波の回転角 α のスキャン時のプラズマへの吸収パワー P_{abs} の時間発展 [1]

通常の加熱モードは基本波 0 モードになり、プラズマ中心付近を通る共鳴層において一回通過での吸収が期待されるのに対し、X モードの EC 波はプラズマ中の伝搬経路上において共鳴層の手前に右手カットオフが存在するため、一回通過吸収は期待できない。従って、図 3 の吸収パワーの時間変化の主要な原因は 0 モード純度が入射偏波によって変化していることを示している。また励起モード解析を含んだ LHDGauss コードの計算で得られた吸収パワーの時間発展は実験で評価された吸収パワーの時間発展と良い一致を示している。0/X モード励起率計算を含んだ光線追跡計算により、吸収パワーの絶対値の評価が可能であることを示すものである。ただしここで一点注意すべきことは、LHDGauss コードでは一回通過吸収によるパワーデポジション分布のみ計算しているため、複数回通過吸収成分が比較的大きくなるような場合には、吸収パワーの計算値と実験値とのずれが大きくなることが予想される。実験的に吸収パワーが極大となる時間 9.54 s について、1 次元の全波解析を行い、右手カットオフ位置から入射アンテナ位置まで逆方向伝搬で、0 モード偏波を初期値として解いた。その結果、磁気面外挿による LCFS 外側の電子密度を考慮した場合、入射偏波角 45°

が0モードを励起する最適な偏波となり、実験における最大加熱効率時の偏波と一致することが示された。この計算での最適な偏波は少量の楕円度も有しており、実験的にもこの楕円度がほぼ垂直入射の場合においても加熱効率の向上に寄与している。一方でLCFS外側の電子密度を考慮しない場合の最適偏波35°は実験では低い吸収パワーを示している。すなわち周辺プラズマを考慮した入射偏波の最適化の必要性を示している。周辺プラズマ領域が純度の高い0モードあるいはXモードの励起、あるいはEC波の屈折に対して与える影響はトカマク・ヘリカル間わず磁場閉じ込めプラズマに共通する特徴である。LHDプラズマのストキャスティック領域を通したEC加熱やトカマクのペデスタル領域やスクレイプオフ層を通したEC電流駆動において、この効果が期待される。

(2) ECHパワーの吸収を高効率化し、それを維持するために、5.5-Uポート入射の77 GHz EC波に対して入射偏波のリアルタイム制御の実験を行った。プラズマは他のECHにより維持した。最適な偏波状態を生成する偏波器の回転角を、周辺電子密度分布の高速計算結果に従って、放電開始からリアルタイムで決定した。偏波器の回転制御を5sから実施し、放電開始から固定の偏波状態にして、回転制御を行わない場合と比較した。回転制御開始後、偏波状態の命令値に実際値が追従していることを確認した。また偏波の命令値と実際値の一致度がほぼ100%まで増加していることから、計算上は純粋な0モードが励起されていることが示された。図4に線平均電子密度が約 $1 \times 10^{19} \text{ m}^{-3}$ の比較的低密度プラズマに対して、偏波器回転制御の有無におけるプラズマへの吸収パワーの時間発展を示す。カットオフ密度より非常に低いので、屈折の効果は抑制されている。プラズマ蓄積エネルギーのオンとオフのタイミングでの変化から吸収パワーを評価するために、77 GHzのECHパワーを15 Hzで変調した。その結果、吸収パワーは偏波の最適化制御により高い状態が維持されている。その一方で制御を行わない場合には、電子密度の緩やかな時間的増加に伴い、吸収パワーは減少した。以上より、一回通過吸収効率を高くする0モード励起率の増加が偏波の最適化制御による実験で示された。一方で、カットオフ密度の半分程度の高密度プラズマにおいては、屈折の効果により、一回通過吸収パワーの減少が観測された。入射偏波に加えて、デポジション位置の制御による一回通過吸収効率の改善が必要であることが示された。

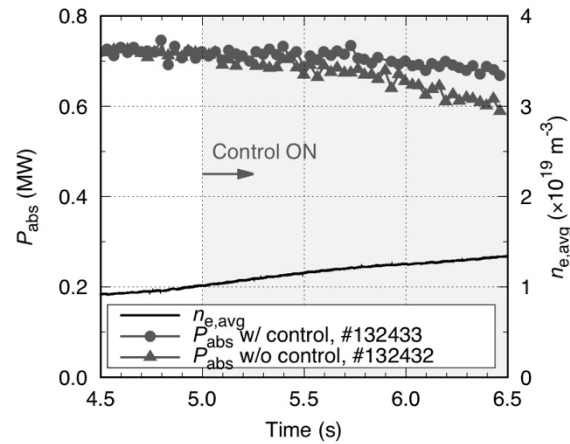


図4 偏波器回転制御の有無におけるプラズマへの吸収パワーの時間発展[2]

(3) そこで次に入射ターゲット位置も制御する実証実験を行った。図5にデポジション位置のリアルタイム制御の実験結果を示す。制御の有り・無しの放電に関わらず、数秒の放電パルス間にガスパフにより平均密度は 1×10^{19} から $4 \times 10^{19} \text{ m}^{-3}$ 程度まで増加した。入射アンテナのミラーの向きは2軸のモーターにより変えられるようになっており、主に垂直方向のターゲット位置を変えるアンテナYの回転角度をリアルタイムで制御した。モーター回転速度の制限内でアンテナは指令値に追従していることが分かる。制御により、 $3 \times 10^{19} \text{ m}^{-3}$ 以下の密度領域で、高効率加熱をより長く維持できていることが分かる。また変調ECE信号の解析により、デポジションのピーク位置をプラズマ中心側により長く維持できていることも分かる。一方で、 $4 \times 10^{19} \text{ m}^{-3}$ 以上では、複数回通過吸収成分が支配的となり、吸収効率が

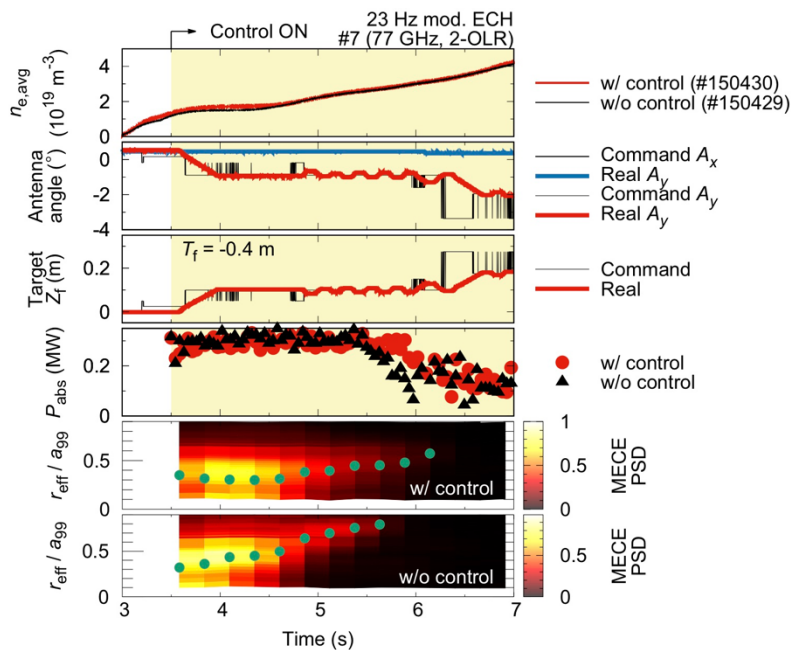


図5 デポジション位置のリアルタイム制御結果

が $3 \times 10^{19} \text{ m}^{-3}$ 以下の密度領域で、高効率加熱をより長く維持できていることが分かる。また変調ECE信号の解析により、デポジションのピーク位置をプラズマ中心側により長く維持できていることも分かる。一方で、 $4 \times 10^{19} \text{ m}^{-3}$ 以上では、複数回通過吸収成分が支配的となり、吸収効率が

減少し、変調 ECE 信号が減少している。更に一回通過吸収効率を高めるためには屈折した軌道に対して主加熱モードの純励起とデポジション位置の同時制御が必要であると考えられる。

<引用文献>

- [1] 辻村亨、プラズマ・核融合学会誌、95 巻、2019、139-144
- [2] T. Ii Tsujimura *et al.*, Fusion Engineering and Design, Vol. 131, 2018, 130-134

5. 主な発表論文等

[雑誌論文] (計 3 件)

- ① 辻村亨、LHD における電子サイクロトロン波の入射偏波の最適化、プラズマ・核融合学会誌、査読無、95 巻、2019、139-144
http://www.jspf.or.jp/Journal/PDF_JSPF/jspf2019_03/jspf2019_03-139.pdf
- ② T. Ii Tsujimura, Y. Mizuno, T. Tokuzawa, 他 7 名, Real-time control of electron cyclotron wave polarization in the LHD, Fusion Engineering and Design, 査読有, Vol. 131, 2018, 130-134
DOI:10.1016/j.fusengdes.2018.04.062
- ③ T. Ii Tsujimura, H. Idei, S. Kubo, S. Kobayashi, Optimized design of polarizers with low ohmic loss and any polarization state for the 28 GHz QUEST ECH/ECCH system, Fusion Engineering and Design, 査読有, Vol. 114, 2017, 97-101
DOI:10.1016/j.fusengdes.2016.11.019

[学会発表] (計 12 件)

- ① T. Tsujimura, Real-time injection control of electron cyclotron resonance heating power in LHD, 23rd Topical Conference on Radiofrequency Power in Plasmas, 2019 年 (招待講演)
- ② 辻村亨、大型ヘリカル装置における電子サイクロトロン加熱の入射最適化に関する研究、日本物理学会第 74 回年次大会、2019 年 (招待講演)
- ③ 辻村亨、LHD における電子サイクロトロン共鳴加熱の最適入射、第 35 回プラズマ・核融合学会年会、2018 年 (招待講演)
- ④ T. Tsujimura, Study of optimum injection of ECH for high electron temperature plasmas in the Large Helical Device, 22nd Topical Conference on Radiofrequency Power in Plasmas, 2017 年
- ⑤ T. I. Tsujimura, Impact of the LHD Peripheral Region and the Magnetic Axis Shift on Optimal On-Axis ECRH Injection for High-Electron-Temperature Plasmas, 26th IAEA Fusion Energy Conference, 2016 年
- ⑥ T. Tsujimura, Recent Progress of ECRH plasma in LHD, 19th Joint Workshop on ECE and ECRH, 2016 年 (招待講演)

※科研費による研究は、研究者の自覚と責任において実施するものです。そのため、研究の実施や研究成果の公表等については、国の要請等に基づくものではなく、その研究成果に関する見解や責任は、研究者個人に帰属されます。