



## 研究最前線

# LHD における電子サイクロトロン波の入射偏波の最適化

## Optimization of Incident Electron Cyclotron Wave Polarization in the LHD

辻村 亨

TSUJIMURA Toru

自然科学研究機構 核融合科学研究所

(原稿受付：2019年1月17日)

大型ヘリカル装置 (LHD) プラズマの最外殻磁気面より外側の低い電子密度を持つ周辺プラズマ領域において、有限な電子密度勾配と磁気シアの存在が、電子サイクロトロン (EC) 共鳴加熱パワーの入射最適化に影響を与えることを見出した。本稿では、LHD 実験において入射 EC 波の偏波を最適制御した結果を中心に紹介する。

### Keywords:

EC wave, polarization, mode content analysis, real-time control, FPGA

### 1. はじめに

電子サイクロトロン (EC) 共鳴加熱において、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 EC 入射条件の調整が必要である。大型ヘリカル装置 (LHD) [1, 2] の EC 加熱実験において、加熱位置や入射 EC 波の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。

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 [3] 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 (O) 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 O-X モード間結合は従来無視されがちであったが、このような効果はトカマクプラズマでも重要であると考えられる。

そこで、そのような効果を考慮した光線追跡コード LHDGauss を近年開発した [4]。このコードは LHD 放電の高速後処理システム AutoAna [5] 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ている。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  $r_{\text{eff}}$  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、O 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。コードについての詳しい説明は文献 [4] を参照されたい。

本稿では第 2 章で偏波スキャン実験による吸収パワーの

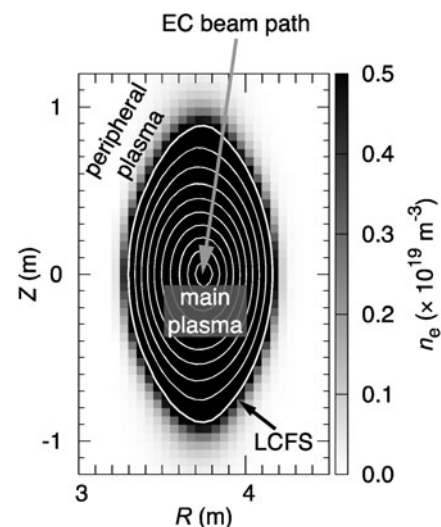


図 1 LHD 縦長断面上における電子密度分布。加熱用 EC 波は真空容器内に設置されたアンテナから周辺プラズマを通してプラズマ中の共鳴層へ向けて伝搬する。

モード純度依存性を調べた結果について紹介する。第3章ではその実験から見出された周辺プラズマがモード間結合に与える影響を利用して開発した入射偏波のリアルタイム制御系の原理実証実験について紹介する。第4章にまとめを示す。

## 2. 周辺プラズマがモード間結合に与える影響

仮にプラズマ領域と真空領域の境界がはっきり存在すれば(例えばLCFSを近似的にそのような境界に設定する), 真空領域から入射されたミリ波はその境界でEC波に結合する。加熱に最適な入射偏波はその境界上での磁場の向きから決定できる。しかしながらLHDプラズマのようにLCFS外側にも有限な電子密度が存在し, そこに比較的強い磁気シアが存在すれば, プラズマと真空を接続する有限な幅を持つ境界領域を考慮し, 最適な入射偏波を実験的あるいは数値的に探索する必要が生じる。

この効果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[6,7]。LHDの5.5-U (upper) ポートに設置したアンテナ[8]から周波数77 GHzのEC波を入射した。図2に伝送路中のマイターバンドに設置された $\lambda/8$ 型偏波器と $\lambda/4$ 型偏波器を放電中に高速回転させたとき

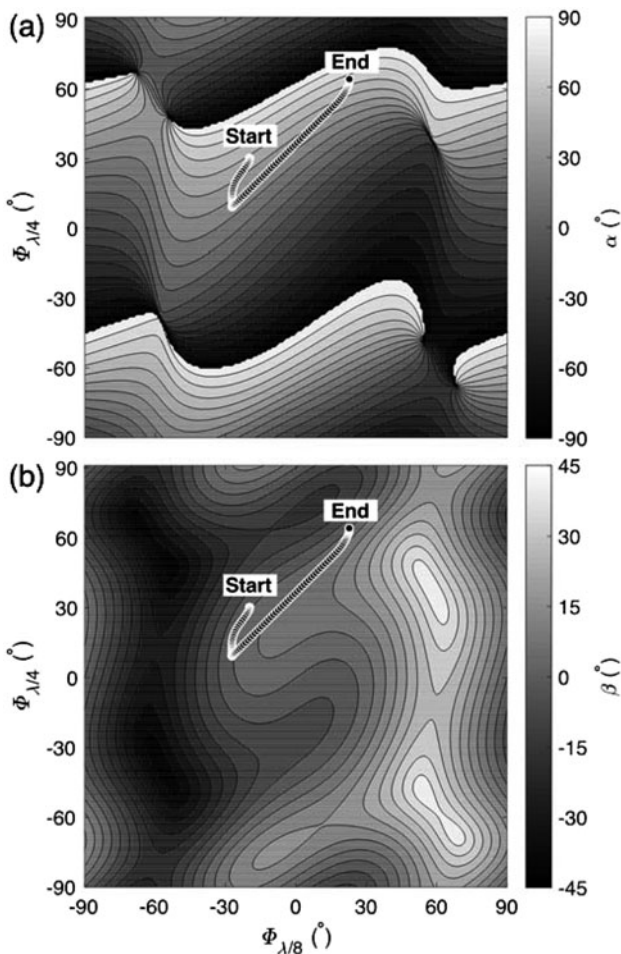


図2 伝送路中のマイターバンドに設置された回転角( $\phi_{\lambda/8}, \phi_{\lambda/4}$ )で表される $\lambda/8$ 型偏波器と $\lambda/4$ 型偏波器を放電中に高速回転させたときの5.5-Uポートから入射したEC波の偏波の(a)回転角 $\alpha$ と(b)楕円度 $\beta$ の軌跡。

の入射アンテナの最終ミラーの位置における入射偏波の(a)回転角 $\alpha$ と(b)楕円度 $\beta$ の軌跡を偏波マップ上に示す。ほぼ直線偏波にするために $\beta$ はほぼ $0^\circ$ に固定し, $\alpha$ を変化させた。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。ICRF (ion cyclotron range of frequency) 加熱により線平均電子密度がおおよそ $1 \times 10^{19} \text{ m}^{-3}$  (77 GHzの基本波O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[9]。LHDの標準磁場配位で磁場強度が2.75 Tということから, 通常の加熱モードは基本波Oモードになり, プラズマ中心付近を通るEC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(R)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。したがって図3に示す吸収パワーの時間変化の主要な要因はO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。O/Xモード励起率の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になった。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。

図3に示すように実験的に吸収パワーが極大となる時間9.54 sについて, 周辺プラズマがモード間結合に与える影響について調べた結果を図4に示す。図4に伝搬軌道上における(a)LCFS外側の密度を考慮した場合と考慮しない場合における電子密度 $n_e$ と規格化小半径 $r_{\text{eff}}/a_{99}$ (ただし $a_{99}$

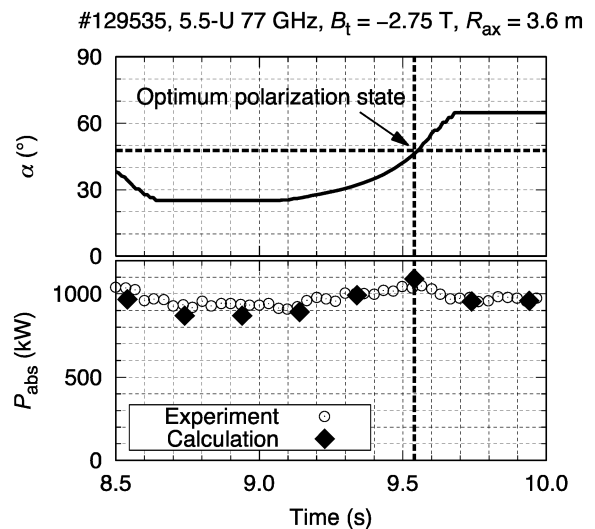


図3 図2の偏波の回転角 $\alpha$ のスキャン時のプラズマへの吸収パワー $P_{\text{abs}}$ の時間発展。吸収パワーは実験的には変調ECパワーのオンまたはオフのタイミングで評価された。

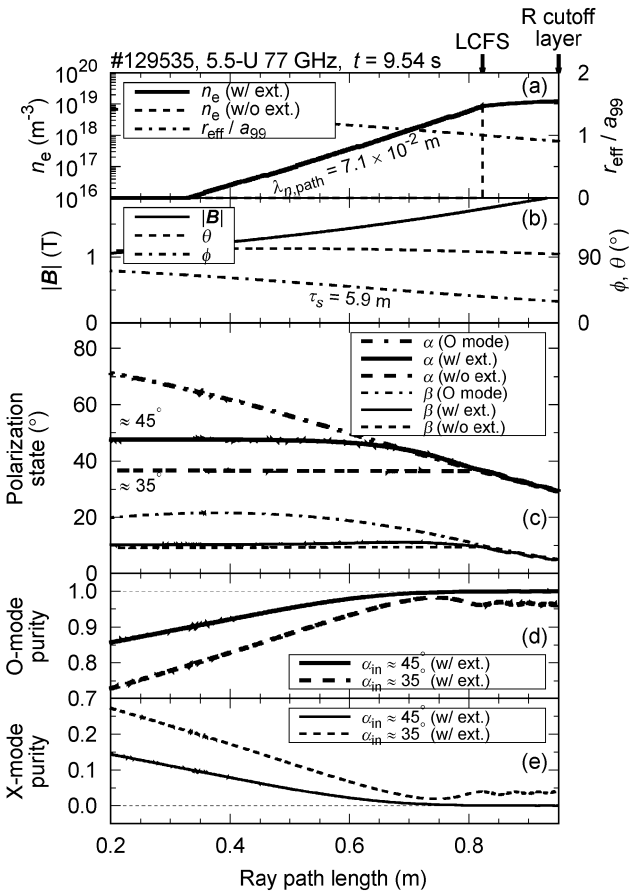


図4 伝搬軌道上における(a)LCFS外側の密度を考慮した場合(w/ext.)と考慮しない場合(w/o ext.)における電子密度 $n_e$ と規格化小半径 $r_{\text{eff}}/a_{99}$ 、(b)磁場強度 $|B|$ 、伝搬角度 $\theta$ 、磁気シアを表す角度 $\phi$ 、(c)LCFS外側の密度を考慮した場合としない場合における偏波回転角 $\alpha$ 、Oモードの偏波回転角 $\alpha_0$ 、楕円度 $\beta$ 、およびOモードの楕円度 $\beta_0$ 、そして入射偏波回転角が約 $45^\circ$ と $35^\circ$ のときの(d)Oモード純度と(e)Xモード純度。

はプラズマ蓄積エネルギーの99%が閉じ込められている領域の実効小半径)、(b)磁場強度 $|B|$ 、伝搬角度 $\theta$ 、磁気シアを表す角度 $\phi$  (伝搬に垂直な断面における磁場の方向を表す角度)、(c)LCFS外側の密度を考慮した場合としない場合における偏波状態( $\alpha, \beta$ )とOモードの偏波状態( $\alpha_0, \beta_0$ )、そして入射偏波回転角が約 $45^\circ$ と $35^\circ$ のときの(d)Oモード純度と(e)Xモード純度を示す。ここで図4(c)に示す結果は1次元の全波解析をR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、Oモード偏波を初期値として解いたものである。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 $\alpha \approx 45^\circ$ がO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 $\alpha \approx 35^\circ$ は実験では低い吸収パワーを示している。図5にLCFS外側の密度を考慮しない場合の入射偏波の設定における、 $n_{e,\text{LCFS}} = 1.0 \times 10^{19} \text{ m}^{-3}$ の場合の周辺プラズマの密度勾配と磁気シアの変化の伝搬軌道上でのスケール長( $\lambda_{n,\text{path}}, \tau_s$ )

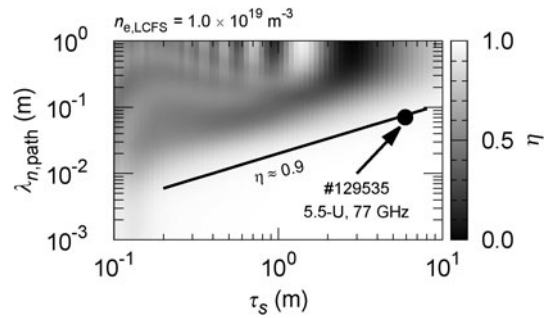


図5 LCFS外側の密度を考慮しない入射偏波の設定における、 $n_{e,\text{LCFS}} = 1.0 \times 10^{19} \text{ m}^{-3}$ の場合の周辺プラズマの密度勾配と磁気シアの変化の伝搬軌道上でのスケール長( $\lambda_{n,\text{path}}, \tau_s$ )に対するOモード純度 $\eta$ 。

( $\lambda_{n,\text{path}}, \tau_s$ )に対するOモード純度 $\eta$ を示す。図4(a)と(b)からこの放電は( $\lambda_{n,\text{path}}, \tau_s$ ) = ( $7.1 \times 10^{-2} \text{ m}, 5.9 \text{ m}$ )と評価され、Oモード純度 $\eta \approx 90\%$  ( $< 100\%$ )の線上に位置する。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O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・ヘリカル問わず磁場閉じ込めプラズマに共通する特徴であり、特に同程度の大きさの $\lambda_{n,\text{path}}$ と $\tau_s$ の場合に有効である。LHDプラズマのストキャスティック領域を通したEC加熱やトカマクのベダスタル領域やスクレイブオフ層を通したEC電流駆動においてこの効果が期待される。

### 3. 入射偏波のリアルタイム制御

放電中の電子密度の時間的な変化に伴い、EC波のパワーをプラズマへ効率的に吸収させるための最適な入射偏波も時間的に変化し得るが、ほとんどの実験ではある放電に対して偏波の設定は固定である。少ない例として、ASDEX-U装置でのEC加熱放電に対して、入射偏波のフィードフォワード制御や加熱位置のリアルタイム制御が試みられた[10, 11]。その加熱位置制御の特徴として、ビーム追跡の高速計算がリアルタイムで行われている。LHDにおいては、入射偏波のフィードフォワード制御[7]、入射アンテナの高速フィードバック制御[12]、そして入射偏波のフィードバック制御[13]の実験が行われた。そこで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、入射偏波だけがECE温度を変化させるとは限らない。入射偏波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、第2章で明らかにした周辺プラズマがモード間結合に与える影響を考慮して、モード励起率計算を含めたLHDGaussコードを用いて、様々な電子密度分布に対する最適な入射偏波を計算したデータセットを参照データとして、入射偏波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 EC 加熱システムの安全な運用に貢献する。

図 6 に最適な入射偏波の LCFS 外の周辺電子密度分布に対する依存性を示す。密度分布は LCFS 上での密度  $n_{e,LCFS}$  と、5.5-U ポート入射の EC ビームパス上での密度勾配長  $\lambda_{n,path}$  で減衰する指数関数でモデル化した。周辺電子密度分布に関する 2 つのパラメータに対する依存性に従って、一回通過吸収効率の最大化のために、入射 EC 波の偏波を放電中にリアルタイムで調整する。この種の依存性は一般的に他の磁場閉じ込め配位、他の EC 入射システム、あるいは他のジャイロトロン周波数に適用可能である。

図 7 に開発した入射 EC 波のリアルタイム制御の概略を示す[14]。多チャンネルの遠赤外 (FIR) レーザー干渉計[15]が LHD では長パルス放電でのリアルタイム計測とし

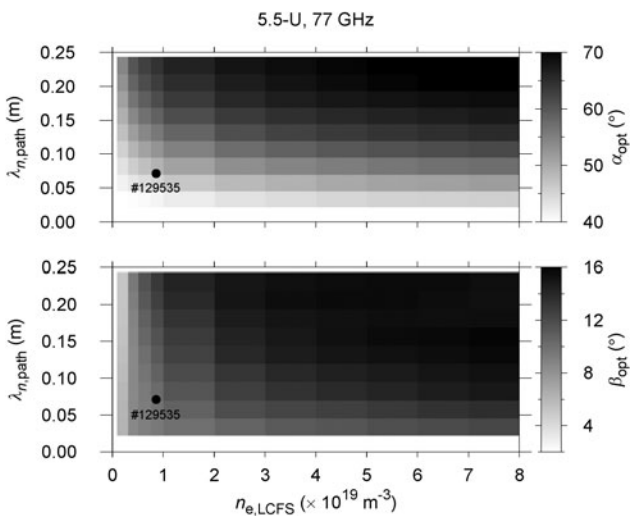


図 6 最適な入射偏波 ( $\alpha_{opt}, \beta_{opt}$ ) の周辺電子密度分布に対する依存性。密度分布は LCFS 上での密度  $n_{e,LCFS}$  と密度勾配長  $\lambda_{n,path}$  で減衰する指数関数でモデル化。

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。電子密度分布のリアルタイムの取得下での偏波制御は 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。図 6 に示す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と、最適な偏波と EC 伝送系の 2 種類の偏波器の回転角との関係に関するデータセットが予め FPGA メモリに保存してあり、それらをリアルタイムで参照した。ある偏波状態を実現する 2 種類の偏波器の回転角の組み合わせは 1 通りとは限らないので[16]、リアルタイム制御中に偏波器がシームレスに回転するように最適な組み合わせを選択した。制御系についての詳しい説明は文献[14]を参照されたい。高速回転制御試験の結果、この制御系はガスパフによる緩やかな密度変化には対応可能であるが、ペレット入射による急な密度変化には対応が困難であることが確認された。

計測された線積分電子密度分布へのアーベル変換は観測半径とプラズマ平衡との間の幾何学的な関係から決まる単純な行列演算[17]として FPGA に実装した。またアーベル変換後の離散的な電子密度分布は、トムソン散乱計測の電子密度分布に対して過去に行われていたのと同様に、多項式関数によるフィッティングを疑似逆行列演算として FPGA に実装した。その後、制御に必要な周辺電子密度分布に関する 2 つのパラメータである  $n_{e,LCFS}$  と  $\lambda_{n,path}$  を計算し、最適な入射偏波を算出した。

EC 波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 EC 加熱により維持された。図 8 に典型的な偏波の最適化制御の動作結果を示す。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

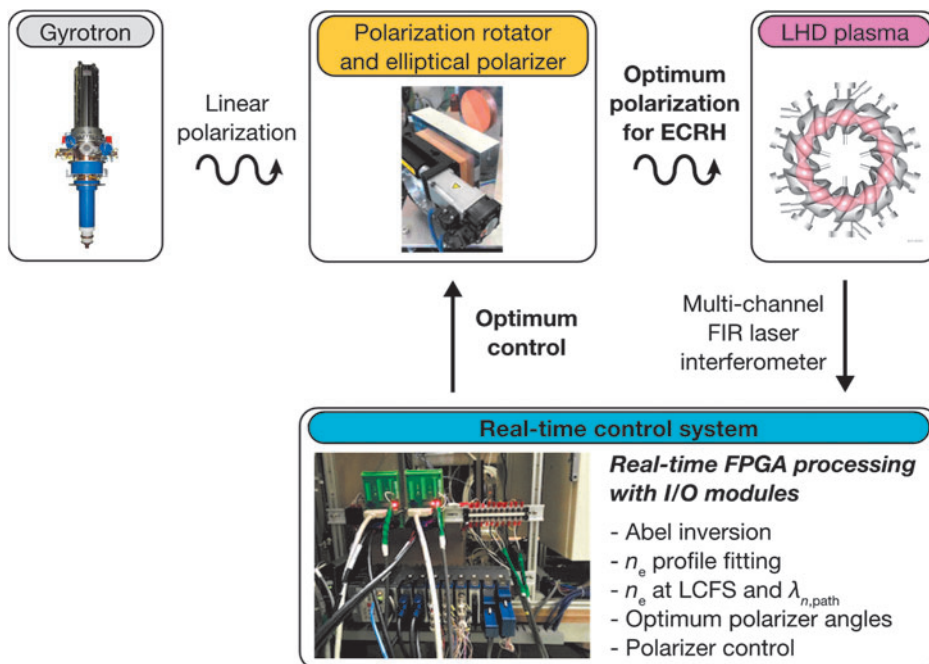


図 7 入射 EC 波の偏波のリアルタイム制御系 (文献[14]の図 2 から転載)。

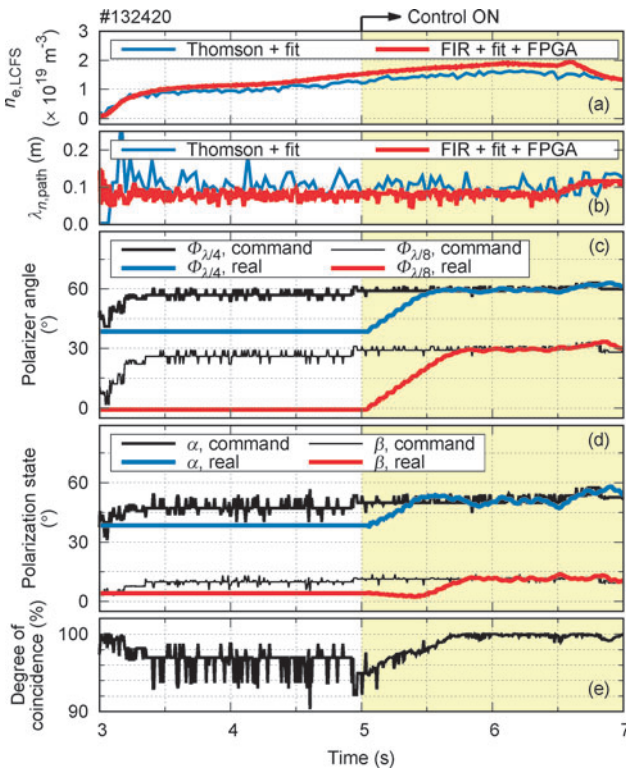


図8 各種時間発展：(a)  $n_{e,LCFS}$ , (b)  $\lambda_{n,path}$ , (c) 偏波器回転角の命令値と実際値, (d) 偏波状態の命令値と実際値, (e) (d)の2つの偏波状態の一致度。(a)(b)には放電後に得られるトムソン散乱計測データから計算した値も示す。偏波器回転制御は5sから実行した(文献[14]の図5から転載)。

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がわかる。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Oモードが励起されていることが示された。図9に線平均電子密度が $\sim 1 \times 10^{19} \text{ m}^{-3}$ の比較的 low 密度プラズマに対して、偏波器回転制御の有無における5.5-Uポート入射の77 GHz EC波のプラズマへの吸収パワーの時間発展を示す。77 GHzの基本波Oモードのカットオフ密度は $7.4 \times 10^{19} \text{ m}^{-3}$ であるから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EC波パワーを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O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、 $3 \times 10^{19} \text{ m}^{-3}$ 程度までの密度ランプアップ実験においては、制御の有無による吸収パワーの差異を観測できたが、その差は比較的小さいという結果が得られた。放電後に得られる3次元平衡マッピングを用いたLHDGaussコードの計算により励起モード解析を行った結果、純粋なOモードを励起・維持できていることが示された。制御の有無による吸収パワーの

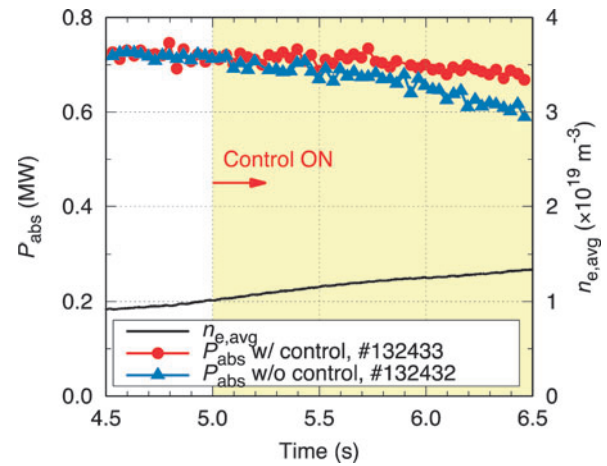


図9 偏波器回転制御の有無における5.5-Uポートから入射された77 GHz EC波のプラズマへの吸収パワーの時間発展。偏波器回転制御は5sから実行(文献[14]の図6から転載)。

差異の小さい原因として、高密度プラズマによる屈折による、一回通過吸収パワーの減少が考えられる。複数回通過は無視できないレベルであることを示唆するが、2回目以降のEC波の通過に対してそれぞれの入射偏波を最適化するの現状難しい。

#### 4. まとめ

LHDプラズマの周辺領域が有限な電子密度勾配と磁気シアを持つことから、入射EC波のO-Xモード間結合に与える影響が調べられた。そこから周辺電子密度分布に応じたEC波の偏波の最適化の必要性が生じ、周辺領域での屈折やモード間結合を考慮した光線追跡コードLHDGaussを開発した。その計算に基づき、加熱モードの励起率向上による高効率加熱の実現を達成することができた。また最適な入射偏波の周辺電子密度分布に対する依存性をLHDGaussコードを基に調べ、それを制御モデルとした入射偏波のリアルタイム制御系をFPGAを用いて開発した。時間変化する電子密度に対する最適な入射偏波の実現と高効率加熱の維持を原理的に示した。高密度プラズマによる屈折を考慮するために、偏波と加熱位置の同時制御による一回通過吸収効率の最大化を行う複合制御が今後の課題と考える。

#### 謝辞

本稿の執筆にあたり、LHD実験グループの協力を得た。本研究は核融合科学研究所予算ULRR027, ULRR701, ULRR804, ULHH007, 一般共同研究KLPR045, およびJSPS科研費16K18338の支援を受けて行われた。ここに謝意を表す。

#### 参考文献

- [1] Y. Takeiri *et al.*, Nucl. Fusion **57**, 102023 (2017).
- [2] H. Takahashi *et al.*, Nucl. Fusion **57**, 086029 (2017).
- [3] C. Suzuki *et al.*, Plasma Phys. Control. Fusion **55**, 014016 (2013).
- [4] T. Ii Tsujimura *et al.*, Nucl. Fusion **55**, 123019 (2015).

- [ 5 ] M. Emoto *et al.*, Fusion Eng. Des. **89**, 758 (2014).
- [ 6 ] T.I. Tsujimura *et al.*, 2016 IAEA Fusion Energy Conf. (Kyoto, Japan) IAEA-CN-234-0083, Preprint (2016).
- [ 7 ] T.I. Tsujimura *et al.*, Plasma Fusion Res. **11**, 2402016 (2016).
- [ 8 ] Y. Yoshimura *et al.*, Nucl. Fusion **56**, 046005 (2016).
- [ 9 ] R. Makino *et al.*, JPS Conf. Proc. **1**, 015034 (2014), Proceedings of the 12th Asia Pacific Physics Conference.
- [10] D. Wagner *et al.*, Fusion Sci. Technol. **58**, 658 (2010).
- [11] M. Reich *et al.*, Fusion Eng. Des. **100**, 73 (2015).
- [12] K. Okada *et al.*, Rev. Sci. Instrum. **85**, 11E811 (2014).
- [13] F. Felici *et al.*, Nucl. Fusion **50**, 105003 (2010).
- [14] T. Ii Tsujimura *et al.*, Fusion Eng. Des. **131**, 130 (2018).
- [15] T. Akiyama *et al.*, Fusion Sci. Technol. **58**, 352 (2010).
- [16] T. Ii *et al.*, Rev. Sci. Instrum. **86**, 023502 (2015).
- [17] Y.T. Cho and S.-J. Na, Meas. Sci. Technol. **16**, 878 (2005).