

LHDにおける電子サイクロトロン共鳴加熱の最適入射

Optimum injection of electron cyclotron resonance heating in the LHD

辻村 亨¹, 久保 伸¹, 下妻 隆¹, 吉村 泰夫¹, 伊神 弘恵¹, 高橋 裕己^{1,2}, 長壁 正樹^{1,2}
 Toru I. TSUJIMURA¹, Shin KUBO¹, Takashi SHIMOZUMA¹, Yasuo YOSHIMURA¹, Hiroe IGAMI¹,
 Hiromi TAKAHASHI^{1,2}, Masaki OSAKABE^{1,2}

¹ 自然科学研究機構 核融合科学研究所, ² 総合研究大学院大学

¹NIFS, NINS, ²SOKENDAI

大型ヘリカル装置 (LHD) プラズマの最外殻磁気面 (LCFS) より外側の低い電子密度を持つ周辺プラズマ領域における有限な電子密度勾配と磁気シアが, 電子サイクロトロン (EC) 共鳴加熱の入射最適化に影響を与えることを解明した [1, 2, 3]. 周辺プラズマ領域の有限な電子密度勾配と磁気シアが与える加熱モード純度や EC 波の屈折による加熱位置への影響は, ヘリカル・トカマクに関係なく磁場閉じ込めプラズマにおいて普遍的なものであることを示唆している. 特に ITER などの大型装置では周辺プラズマによる EC 波の微小な屈折効果による加熱位置のズレが懸念される. この影響を考慮した光線追跡コード *LHDGauss* を開発し, LCFS より外側の周辺プラズマ領域における光線の屈折の効果, および周辺領域を含む入射アンテナから共鳴層まで 1 次元波動方程式を解くことによる正常波 (O) モードと異常波 (X) モードの励起率の計算を新たに取り入れた. 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, 吸収パワー分布の絶対値の評価が可能となった.

そこで EC 波の吸収パワー分布の計算を LHD 実験に適用した. 実験中に得られる 3 次元平衡マッピングの高速後処理システムの適用による磁気軸シフトも考慮した上で, on-axis 加熱のために入射アンテナを調整したことにより, 中心電子加熱性能が向上し, 高電子温度化に寄与した. また周辺領域における電子密度と磁気シアの効果を考慮して最適な入射偏波を求めた. 図 1(a)-(d) にその一例を示す. 周辺プラズマを考慮しない場合の最適な入射偏波が 35° の偏波角となり, 低めの吸収パワーが実験で得られているのに対し, 考慮した場合には 45° となり, 実験的に得られた吸収パワーの最大値を与える偏波回転角と良い一致を示した. 図 1(e) は O モード純度の周辺領域の電子密度と磁気シアの勾配のスケール長に対する依存性を示す. この放電においては, 周辺領域を考慮しない場合には純度が 90% に位置することから, 純粋な加熱モード励起のためには周辺領域を考慮した入射偏波の調整が必要であることが示された.

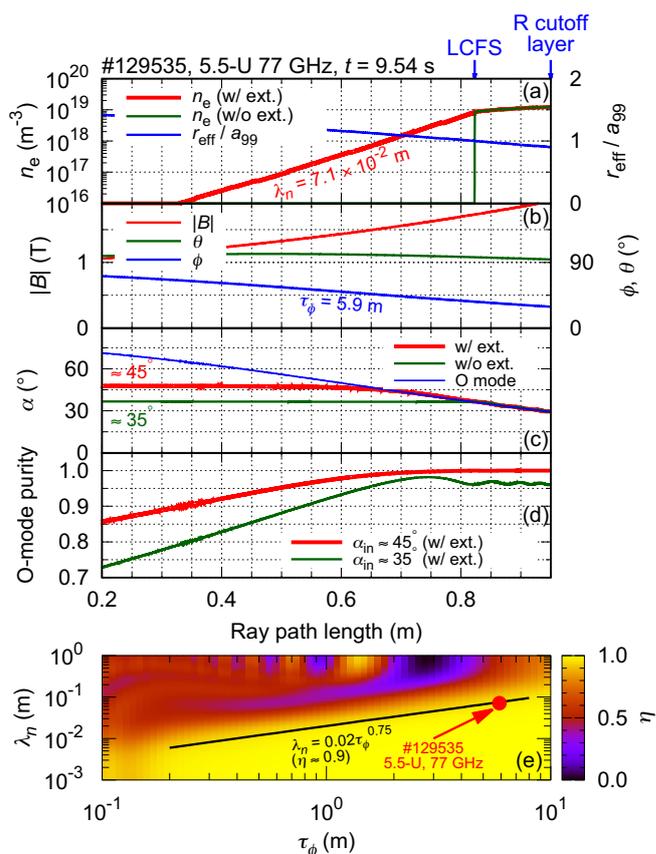


図 1: 伝搬軌道上における (a) LCFS 外側の密度を考慮した場合としない場合における電子密度 n_e と規格化小半径 r_{eff}/a_{99} , (b) 磁場強度 $|B|$, 伝搬角度 θ , 磁気シア角 ϕ (伝搬に垂直な断面における磁場の方向を表す角度), (c) LCFS 外側の密度を考慮した場合としない場合における偏波回転角 α と O モードの偏波回転角 α_0 , そして (d) 入射偏波回転角が 45° と 35° のときの O モード純度. (e) LCFS 外側の密度を考慮しない場合の入射偏波の設定における, 周辺プラズマの密度勾配と磁気シアの変化のスケール長 (λ_n, τ_ϕ) に対する O モード純度 η (参考文献 [1] 図 4 から転載).

さらに, この計算に基づき EC 波の入射偏波を最適化することで, 時間的に変化するプラズマの電子密度分布に対して EC 加熱効率を改善することに成功した [4]. これは EC 波の 1 回通過吸収パワーを最大化するために, 図 2 に示すような EC 波の入射偏波の実時間制御系を開発したことで可能となった. LHD

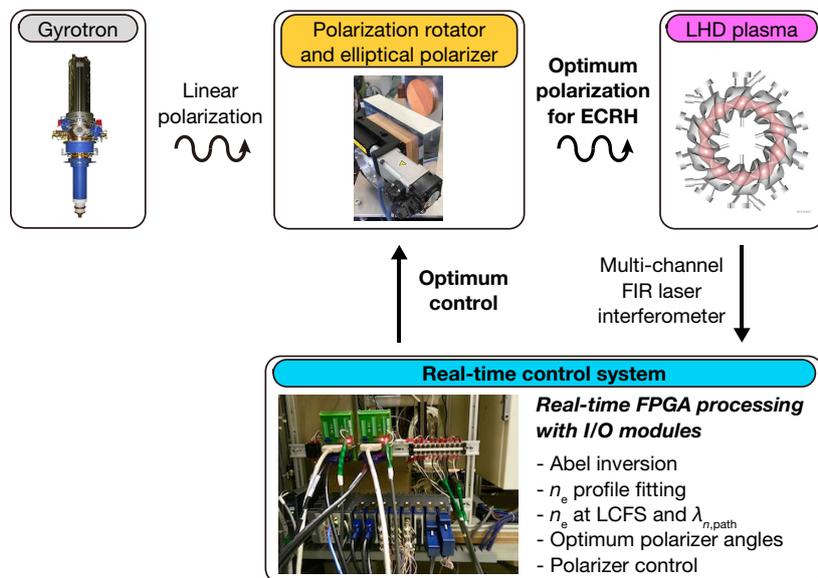


図 2: 入射 EC 波の偏波の実時間制御系 (参考文献 [4] 図 2 より転載).

の LCFS 外側の電子密度分布に対する入射偏波の依存性を制御モデルとして採用した. この偏波制御系には FPGA (Field Programmable Gate Array) が備え付けられている. これを用いて, 周辺領域の電子密度分布と, 伝送系に設置された偏波器の回転制御のための最適な EC 波偏波を実時間で計算・制御した. また FPGA を用いて, LHD の長時間パルス運転でも計測可能な多チャンネルの FIR レーザー干渉計を用いて得られた視線積分密度分布にアーベル変換やフィッティングを行うことで, 周辺密度分布を計算した. 最適偏波の周辺密度分布に対する依存性やデータセットは予め FPGA メモリに格納され, 実時間で参照した.

LHD において入射偏波の実時間制御の実証実験を行った. 図 3 に偏波器を実時間で回転制御した結果を示す. 制御信号に周辺プラズマ領域の密度分布を代表する LCFS での電子密度 $n_{e,LCFS}$ と伝搬軌道上での密度勾配長 $\lambda_{n,path}$ を用い, 最適な偏波状態を FPGA を用いて実時間で計算した. 実際の偏波器回転制御は $t = 5$ s から始めた結果, 偏波の指令値に追従し, 計算上最適な偏波が実現された. その結果, 比較的低密度のプラズマにおいて, EC 波による吸収パワーを高く維持する結果を得た. 1 回通過吸収に対して最適な偏波を入射することにより, 純粋な加熱モードを励起することができたためと考えられる. 一方で, 比較的高密度のプラズマに対して 1 回通過吸収効率を高めるためには, 偏波制御だけでなく吸収位置制御も同時に行う必要があることが今後の課題として示された. 現在, EC 入射系の偏波器回転角とアンテナ回転角の両方を同時に制御する実時間制御系を開発している.

本研究は NIFS 研究予算 ULRR027, ULRR701, ULRR804, ULHH007, および JSPS 科研費 16K18338 の助成を受けて行われた.

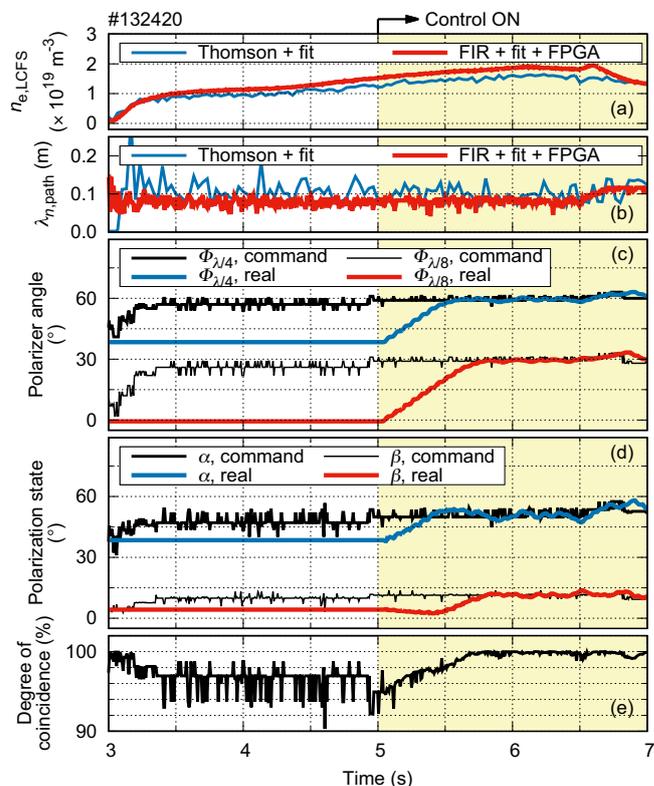


図 3: (a) $n_{e,LCFS}$, (b) $\lambda_{n,path}$, (c) 偏波器回転角の指令値と実際値, (d) 偏波の指令値と実際値, および (e) 偏波の指令値と実際値との一致度の時間発展. $t = 5$ s から偏波器回転制御を行った (参考文献 [4] 図 5 より転載).

参考文献

- [1] T. I. Tsujimura *et al.*, 2016 IAEA Fusion Energy Conf. (Kyoto, Japan) IAEA-CN-234-0083 (2016) Preprint.
- [2] T. I. Tsujimura *et al.*, Plasma Fusion Res. **11** (2016) 2402016.
- [3] T. Ii Tsujimura *et al.*, Nucl. Fusion **55** (2015) 123019.
- [4] T. Ii Tsujimura *et al.*, Fusion Eng. Des. **131** (2018) 130.