

LHDにおけるECHシステムのアップグレードと プラズマ加熱領域の拡大

ECH System Upgrade and Extension of Plasma Heating Parameter Regime in LHD

下妻 隆¹, 高橋 裕己¹, 久保 伸¹, 吉村 泰夫¹, 伊神 弘恵¹, 西浦 正樹¹,
小笠原 慎弥², 牧野 良平², 小林 策治¹, 伊藤 哲¹, 水野 嘉識¹, 岡田 宏太¹,
南 龍太郎³, 假家 強³, 今井 剛³, 武藤 敬¹

Takashi SHIMOZUMA¹, Hiromi TAKAHASHI¹, Shin KUBO¹, Yasuo YOSHIMURA¹,
Hiroe IGAMI¹, Masaki NISHIURA¹, Shinya OGASAWARA², Ryohei MAKINO², et al.

¹核融合研, ²名大エネルギー理工, ³筑波大

¹NIFS, ²Nagoya Univ., ³Univ. of Tsukuba PRC

大型ヘリカル装置(LHD)における電子サイクロトロン共鳴加熱(ECH)システムは、近年3台のメガワット級77 GHzジャイロトロンの導入により、全入射電力として3.7 MWを超える入射が可能になった。単管当たりの入力パワーが大きな77 GHzジャイロトロンの導入により、プラズマ実験におけるECH利用は、プラズマ生成だけでなく、高電子温度達成や高密度プラズマ加熱をはじめとしたプラズマ性能の向上、電子ルート達成による閉じ込め改善、局所加熱や局所電流駆動を利用したプラズマ分布制御や回転変換分布制御、変調ECHを活用した熱パルス伝搬による乱流、熱輸送研究、協同トムソン散乱(CTS)によるイオン温度や高エネルギーイオンのエネルギー分布関数計測など、プラズマの高度加熱、制御、計測の新たな手法として、様々な実験テーマに係わってきている。とりわけECHのみによる高電子温度プラズマの生成においては、低密度では、中心電子温度は20 keVを超え、また線平均密度 $1 \times 10^{19} \text{ m}^{-3}$ で $T_{e0} = 9 \text{ keV}$ 、高電子密度としては、カットオフ密度の7割以上の $5.4 \times 10^{19} \text{ m}^{-3}$ で1.3 keV程度の中心電子温度を達成している。2009年度から2011年度の実験によって達成されたECRプラズマのパラメータ領域を図1に示す[1]。

並行して、高密度や高ベータプラズマの電子の追加熱のために、閉じ込め磁場強度 $B_0 \sim 0.9 \text{ T}$ における77 GHz異常波モード入射による三倍高調波(X3)共鳴加熱（カットオフ密度は約 $5 \times 10^{19} \text{ m}^{-3}$ ）や、 $B_0 = 1.375 \text{ T}$ での正常波モード二倍高調波(O2)共鳴加熱（カットオフ密度は約 $7.4 \times 10^{19} \text{ m}^{-3}$ ）の最適化を、実験とレイトレース計算によって進めている。O2モード加熱では、X2モードカットオフ以上の密度でも20%程度の加熱効率が、X3モード加熱では、3 MWのECHパワー入射によって、40%以上の中心電子温度の増加が観測されている。

さらなる入射電力増強と、より高い密度領域での加熱を可能とするために、第2高調波異常波モード加熱で、カットオフ密度がおおよそ $1.5 \times 10^{20} \text{ m}^{-3}$ となる周波数154 GHzで出力1 MW以上のジャイロトロンの開発を、筑波大学とともに進めてきた[2]。表1に、開発された154 GHzジャイロトロンの設計パラメータを示す。出力は、1 MW以上、パルス幅は5秒を、定常運転としては0.3 MW以上の出力を目標としている。現在までに短パルスで、1 MWを超える出力、40%程度の効率が得られている。このジャイロトロンは、現在核融合研のECHシステムにインストールされ、LHDでのプラズマ実験使用が開始されており、さらなる加熱領域の拡大に寄与するものと期待されている。

[1] H. Takahashi, et al., IAEA FEC2012 conf., EX/2-5.

[2] R. Minami, et al., IAEA FEC2012 conf., FTP/P1-20.

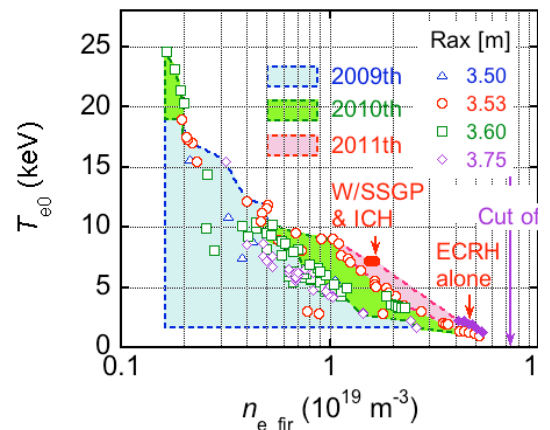


Fig. 1: Experimentally obtained data mapped in the T_{e0} - n_{e_fir} parameter space.

Table 1: Design parameters of a 154 GHz gyrotron

Parameters	Design
Frequency	154 GHz
Power	> 1 MW, 0.3MW
Pulse Width	5 s. CW
Efficiency	50% (with CPD)
Beam Voltage	80 kV
Beam Current	50 A
MIG	Triode
Oscillation Mode	TE28,8
Output Mode	Gaussian
Window	CVD Diamond
Collector	CPD (with sweeping coils)