

25pA01 JT-60U での電子サイクロトロン波電流駆動における トロイダル電場効果と非線形効果

Toroidal Electric Field Effect and Non-linear Effect on Electron Cyclotron Current Drive in JT-60U

鈴木 隆博, 井手 俊介, 濱松 清隆, Craig Petty¹⁾, Lang Lao¹⁾, 諫山 明彦, 藤田 隆明, 池田 佳隆, 関 正美, 森山 伸一, 福山淳²⁾
原研那珂, General Atomics¹⁾, 京大工²⁾

SUZUKI Takahiro, IDE Syunsuke, HAMAMATSU Kiyotaka, PETTY, Craig¹⁾ LAO, Lang¹⁾, ISAYAMA Akihiko,
FUJITA Takaaki, IKEDA Yoshitaka, SEKI Masami, MORIYAMA Shinichi, FUKUYAMA Atsushi²⁾
JAERI Naka, General Atomics¹⁾, Graduate School of Engineering, Kyoto University²⁾

電子サイクロトロン(EC)波はサイクロトロン共鳴層と波の入射角の設定で吸収位置が概ね決まるので、EC 波による電流駆動(ECCD)はプラズマ電流分布制御に有用であると考えられている。例えば高温トカマクプラズマでは、磁気島内圧力の平坦化により減少した bootstrap 電流を ECCD により局所的に補うことで新古典テアリングモードの抑制に成功している[1]。このように ECCD は電流分布制御の強力な道具として利用されているが、ECCD 理論の詳細な検証はトロイダル電場や EC 波加熱といった電子の速度分布関数を歪ませる効果が衝突による緩和に比べて小さな領域に未だ限られている[2,3]。JT-60U では最近の EC システムの進展により、この領域を拡大した実験が可能になった。ECCD 理論の検証を精力的に行っている装置に DIII-D が挙げられるが、後に述べる規格化した指標を用いるとトロイダル電場及びパワー密度のダイナミックレンジはそれぞれ DIII-D[3]の 8 倍、5 倍程度である。EC 加熱パワーの増加により吸収パワー密度が増加し、20keV を超える電子温度と大きな誘導トロイダル電場(E_{ϕ})により E_{ϕ}/E_{cr} のダイナミックレンジが広がった(E_{cr} は逃走電子生成の臨界電場で、ここでは文献[4]の定式化を採用する)。また、高パワーでの長時間 EC 入射により EC 駆動電流分布の測定が可能になった。この拡大した領域では、電子の衝突緩和より大きなトロイダル電場または EC 波加熱の効果により電子の速度分布は大きく歪むことが予想される。速度分布関数の歪みは ECCD の効率に影響すると考えられる。本研究では、実験で測定した EC 駆動電流及びその分布を、線形または非線形の Fokker-Planck 計算と比較し、速度分布関数の歪みの効果を議論する。

実験における EC 駆動電流分布は周回電圧分布解析により評価する[2]。MSE 計測による内部磁場計測を用いた平衡から求まるトロイダル磁束の時間微分が内部周回電圧になる。OH 駆動電流密度はこの周回電場と新古典電気電導率の積と考えられる。平衡計算による全電流密度から、OH、bootstrap、ビーム駆動電流密度を差し引くと EC 駆動電流密度 j_{EC} が求まる。EC 駆動電流 I_{EC} は j_{EC} の面積分値である。様々な放電条件を比べるために規格化電流駆動効率 $\zeta = CI_{EC}Rn_e/(T_e P_{abs})$ を導入する。 $C = e^3/\epsilon_0^2$ は定数、 R はプラズマ大半径、 n_e は電子密度、 T_e は電子温度、 P_{abs} は吸収パワーであり線形コード(RADAR)により評価した。線形コードは準線形拡散項を含む Fokker-Planck 方程式を線形化して高速に解く。相対論効果とトロイダル性による捕捉粒子効果を含むが、トロイダル電場効果と非線形効果は含まない。文献[5]の評価によるとトロイダル電場効果は $|E_{\phi}/E_{cr}|$ に依存し、 $|E_{\phi}/E_{cr}| \ll O(10^{-2})$ では小さいと考えられる。非線形コードを用いた計算によると、非線形効果は p/n_{e19}^2 に強く依存し、 $p/n_{e19}^2 < 0.5$ では無視できると考えられる (p は MW/m^3 単位の吸収パワー密度、 n_{e19} は $10^{19}/\text{m}^3$ 単位の電子密度)[6]。

実験と RADAR による ζ の比 ζ_{exp}/ζ_{cal} の E_{ϕ}/E_{cr} 及び p/n_{e19}^2 に対する依存性を調べた。実験では p/n_{e19}^2 の増加とともに E_{ϕ}/E_{cr} は負の方向に絶対値が増加してほぼ線形に結合しているため、両者の依存性を独立に調べることは難しい。 E_{ϕ}/E_{cr} が負の方向に絶対値が大きくなるにつれ、また p/n_{e19}^2 が大きくなるにつれ ζ_{exp}/ζ_{cal} は減少する傾向を示す。ここで EC 駆動電流の方向をトロイダル電場の正方向とする。 $p/n_{e19}^2 < 0.5$ 、 $|E_{\phi}/E_{cr}| < 0.25\%$ では ζ_{exp}/ζ_{cal} は 0.8-1.2 にばらつくが、実験結果と線形計算は誤差の範囲で一致する。 $p/n_{e19}^2 \sim 4.9$ 、 $E_{\phi}/E_{cr} \sim 1.7\%$ では ζ_{exp}/ζ_{cal} は 0.68 になり線形コードは過大評価していると考えられる。トロイダル電場が負の方向に大きくなると、トロイダル電場を考慮した計算は考慮しない計算より電流駆動効率が減少すると評価されている[5]。また非線形効果が大きくなると、非線形計算は線形計算より電流駆動効率が增大すると評価されている[6]。実験結果はトロイダル電場の減少効果が加熱パワーの増加効果より強い状態で重なっていると仮定すると説明できる。

以上の実験と線形計算の比較を報告すると共に、トロイダル電場を考慮した非線形計算と実験を空間分布を含めて定量的に比較・議論し、両者の効果を報告する。

References

- [1] A. Isayama et al., Plasma Phys. Control. Fusion **42** (2000) L37.
- [2] T. Suzuki et al., Plasma Phys. Control. Fusion **44** (2002) 1.
- [3] C. C. Petty et al., Nuclear Fusion **42** (2002) 1365, C. C. Petty et al., Nuclear Fusion **43** (2003) 700.
- [4] H. Knoepfel and D. A. Spong, Nuclear Fusion **19** (1979) 785.
- [5] Y. N. Dnestrovskij et al., Nucl. Fusion **28** (1988) 267.
- [6] R. W. Harvey et al., Phys. Rev. Lett. **62** (1989) 426.