電子サイクロトロン加熱による高エネルギー電子の径方向拡散の解析

山本 泰弘, 村上 定義, Chang Ching Chieh

京都大学 工学部 物理工学科 原子核工学コース 量子制御工学研究室(福山研究室)



はじめに

研究の背景と目的

核融合科学研究所の大型へリカル装置(LHD)において中 性粒子ビーム入射(NBI)加熱によって維持されたプラズマ 中に電子サイクロトロン加熱(ECH)を行うと、下図のように プラズマ中心部のトロイダル流が反転するという現象が報 告されている.(右下図.赤:NBI+ECHの実験結果,青: NBIのみの場合の概形を表す.)



トロイダル流およびその速度シアは乱流を制御抑制する働きがあることが実験的に観測されている.加熱により発生する高エネルギー電子の径方向拡散による電流を打ち消すように流れるイオン電流によって生じるj×Bドリフトを仮定することで、トロイダル流逆転現象に関する物理機構を解明することを本研究の目的とする.

ヘリカル型核融合炉

- ✓ 閉じ込め磁場は外部電流に依存 し,原理的に内部電流(トロイダル 電流)を必要としない.
- ✓ 3次元的な磁場配位により、粒子
 軌道が非常に複雑になる.
- ✓ ヘリカルリップルに補足されること で径方向の輸送を増加させる.



結果

シミュレーションパラメータ(ECH)

✓ 入射波:154GHz, 出力1.037MWのX-mode第2高調波を用いた. また, その他パラメータは以下のものを基準としている.

背景温度(イオン・電子)	T _e •T _i	5.0 keV
プラズマ密度(イオン・電子)	n _e ∙n _i	1.0×10 ¹⁹ ∼6.0×10 ¹⁹ m ⁻³
磁場強度	B ₀	2.75 T
磁気軸位置	Ray	3.60 m

実験においてはプラズマ密度n=1.0×10¹⁹m⁻³で行っているが, 今回の解析では時間の関係で主に高密度のものを設定している.

小半径r/aごとの速度分布(n=6×10¹⁹m⁻³)



プラズマ密度依存性

6×10¹⁹m⁻³以下の密度でも,定常状態になる前のjを計算して j×Bを概算した.(加熱位置(0.1,0°,18°),Δr=0.2)



- ✓ 衝突頻度はプラズマ密度nに比例するため、電子の径方向拡 散による電流の大きさはおおよそ1/nに比例していると予測で きる. (正確に1/n倍されているようではない)
- ✓ 中心部はノイズの影響が大きい.(以下では中心部2点のトル クを考慮しない.)

トロイダル流

NBIとECHを重畳させた場合のトロイダル流を,1次元の円筒内の拡散方程式

$$\frac{\partial V_t}{\partial t} = \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left(r D \frac{\partial V_t}{\partial r} \right) + \frac{1}{m_i n_i} \left(T_r + T_{j \times B} + T_{NBI} \right)$$

を解くプログラムを用いて計算した.

D:径方向拡散係数, v:トロイダル運動量の交換率, T_{jxB} :j×Bによるトルク, T_{NBI} :NBIによるトルク, T_r :レイノルズ応力によるトルク (簡単のため, 今回は0とした.)

拡散係数 n=1.0×10¹⁹m⁻³ NBI(3MW) ECH(1MW) ECH(1MW) ECH加熱位置 (0.1,0°,18°)

✓ Dが大きいと定常状態にすぐに落ち着き、トロイダル速度の大きさは1/Dに比例するが、概形は変わらない。

✓ 今回の解析ではD=1.0とした.

- ✓ 大型ヘリカル装置 (Large Helical Device:LHD)
- 核融合科学研究所(岐阜県土岐市)
- 大半径3.9m, 小半径0.6m
- 最大磁場強度4T



$GNET \neg - F[2]$

- ✓ Monte Carlo法により空間3次元・速度空間2次元の5次元位相空間におけるドリフト運動論方程式を解くことで、電子の速度空間分布を評価する。
- ✓ テスト粒子の軌道を6次のRunge Kutta法を用いて高精度で追 跡する.

 $\frac{\partial \delta f}{\partial t} + (\mathbf{v}_d + \mathbf{v}_{\parallel}) \cdot \frac{\partial \delta f}{\partial \mathbf{r}} + \dot{\mathbf{v}} \cdot \frac{\partial \delta f}{\partial \mathbf{v}} - C^{coll} = S^{ql}$

δf:電子の速度分布関数の摂動項 v_{II}:磁場に平行な速度, v_d:ドリフト速度, S^{ql}:ECH準線形拡散項 C^{coll}:衝突項,



今回用いたECH準線形拡散項の例

(電流駆動を考慮しないためにN₁₁=0とした. (N₁₁=k₁₁・c/ω))

速度空間上において青い領域の電子数が減少し,赤い領域の電子 数が増加していることを表す。



発生した電子電流を打ち消すようにイオン電流が発生し、プラズマにj×Bトルクが発生する.トロイダル流を計算する際に必要なトルクのトロイダル成分はポロイダル磁場B₀を用いてj×B₀と表されるため、B₀を求めなければならない.

ポロイダル磁場

ポロイダル方向の磁場は回転変換にと大半径Rを用いて





ECHにおいて加熱は局所的に行われているが、実際には加熱 される粒子の位置は広がりを持っている.ここで規格化小半径 における加熱される粒子の位置の広がりを以ってΔ,とした.

NBIトルク

NBIとは数百keV~数MeVのエネルギーをもった中性粒子がプラズマ中に入射され、電離したイオンビームとなってプラズマ中の粒子と衝突することによってプラズマを加熱する方法である.

Co方向入射NBI,入射ビームのエネルギー180keV,背景温度 3.5keV,となるものを考え,加熱パワーは1MWで規格化した.Co 方向入射において,粒子はトロイダル方向に加速される.このNBI によるトルクTをイオン発生率Rとその運動量pを用いてT=pRとして





高村秀一, プラズマ加熱基礎論, 名古屋大学出版会, 1986
 S.Murakami et al.,Nucl. Fusion **40**,693(2000)
 M.Yokoyama et al.,プラズマ・核融合学会誌,**79**,1138(2003)
 S.Murakami et al., Phys. Plasmas **23**, 012501 (2016)