

LHDプラズマにおけるICRF加熱により駆動する  
自発的トロイダル流の共鳴位置依存性  
Resonance position dependence of spontaneous toroidal flow  
driven by ICRF heating in LHD

梅月亮輔<sup>1</sup>, 村上定義<sup>1</sup>

Ryosuke BAIGETSU<sup>1</sup>, Sadayoshi MURAKAMI<sup>1</sup>

京都大学工学研究科 原子核工学専攻<sup>1</sup>

Department of Nuclear Engineering, Kyoto University<sup>1</sup>

垂直NBI加熱ではビーム粒子がトロイダル方向に運動量を持っていないため、トロイダル方向の外部駆動力を与えない。一方、LHDにおける垂直NBI加熱実験において自発的なトロイダル流の発生が報告された[1]。これはヘリカル型磁場配位の非軸対称性によるものと推測されたが、そのメカニズムについては未だ明らかにされていない。

先行研究ではLHDプラズマのECHによる $J \times B$ トルクの発生とそのトロイダル流への影響が定性的に示された[2]。ECHにより発生した高エネルギー電子が径方向に拡散すると、背景イオンによるリターン電流が流れる。このリターン電流とトロイダル方向の磁場により $J \times B$ トルクが発生する。一方、高エネルギーイオンは衝突によってそれらの運動量を背景プラズマに与え、衝突トルクを発生させる。軸対称プラズマでは $J \times B$ トルクと衝突トルクが打ち消し合うのに対し、非軸対称プラズマでは $J \times B$ トルクが支配的となり、正味としてECHによる自発的トロイダルトルクが生じることがわかった。

これまでに、同様のメカニズムでLHDプラズマを対象として垂直NBI加熱及び第二高調波ICRF加熱を重畳した場合の自発的トロイダル流を評価した。本研究では、ICRF共鳴位置を径方向に変化させた場合のトロイダルトルク及びトロイダル流を評価する。

トロイダル方向のトルクを評価するため、本研究ではHFREYAコードとGNETコード[3]を用いる。NBI加熱による高エネルギーイオンの発生分布をHFREYAコードにより計算し、これをソース項として、5次元位相空間ドリフト運動論方程式を解くGNETコードにより、NBI加熱およびICRF加熱による高エネルギーイオンについての解析を行う。

本研究では、ICRF加熱の吸収パワーを3MWと一定として共鳴位置を変化させ、各共鳴位置における加熱パワーや速度分布の変化、トロイダルトルク及びトロイダル流の評価を行った。LHDプラズマ( $B_{ax}=2.75T$ )に垂直NBI加熱及びICRF加熱を重畳させた際の速度分布図をFig.1に示す。ICRF加熱を重畳することで捕捉粒子が増加し、高エネルギー粒子輸送の増加に伴い径方向拡散が増加する。これに従い自発的トロイダルトルクも増加した。共鳴位置をプラズマ中心部に設定すると、磁場に対して平行な速度 $v_{\parallel}$ の方向に速度分布関数が拡散する。従って捕捉粒子割合が減少し、それに伴い粒子輸送が減少した。

吸収パワー3MWのICRF加熱を共鳴位置を変化させて重畳したときに生じたトロイダル流及び、その際の加熱パワーをFig.2に示す。ICRF加熱を重畳した場合、NBI加熱のみのケース(NBI加熱パワーは2.1MW)と比較してトロイダル流の増加は最大約1km/s程度であり、大幅には増加しなかった。共鳴位置をプラズマ周辺部に設定することで捕捉粒子割合が増加し、トロイダルトルクも同様に増加する。一方で、LHDの新古典粘性はプラズマ周辺部で大きいいため、周辺部におけるトロイダル流への影響が抑制されたと考えられる。全(NBI+ICRF)加熱パワーの観点では、NBI加熱により生じる高エネルギー粒子が多く分布する $r/a = 0.6 \sim 0.7$ に共鳴位置を設定した $B_{res} = 2.42T$ で加熱パワーが最大となった。径方向拡散が増加することによりトロイダルトルク及びトロイダル流が増加する一方で、高エネルギー粒子の損失も増加するため加熱効率が悪化する場合があります、適切な共鳴位置を設定することが重要である。

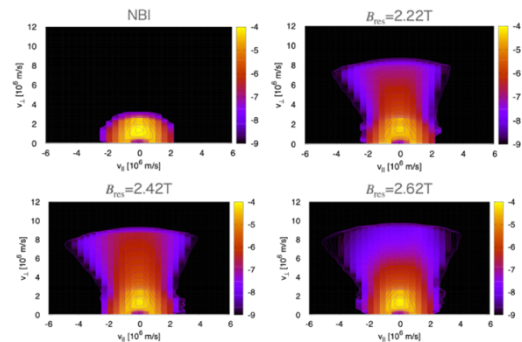


Fig. 1 共鳴位置を変化させた時の速度分布図

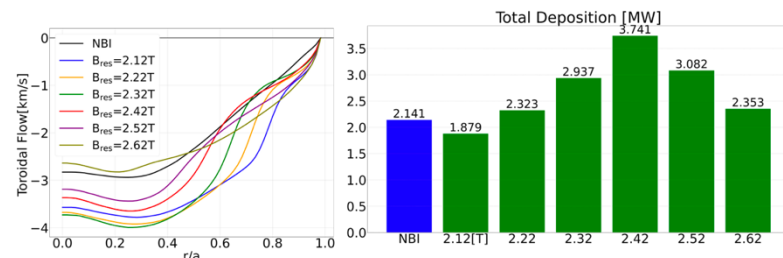


Fig. 2 トロイダル流 (左) 及び全加熱パワー (右) の共鳴位置依存性

- [1] K.Nagaoka et al., Nucl. Fusion 20, (2013) 056116.  
[2] Y. Yamamoto et al., Physics of Plasmas 28, (2021) 102501.  
[3] S. Murakami et al., Nucl. Fusion 40 (2000) 693.