

LHDにおける垂直NBIおよびICRF重畳加熱時の
 $J \times B$ トルクの発生とそのトロイダル流への影響
**Generation of $J \times B$ Torque and its Effect on Toroidal Flow
 Driven by Vertical NBI and ICRF Superposition Heating in LHD**

梅月亮輔¹, 村上定義¹, 山本泰弘²

Ryosuke BAIGETSU¹, Sadayoshi MURAKMI¹, Yasuhiro YAMAMOTO²

京都大学工学研究科 原子核工学専攻¹, 量子科学技術研究開発機構²

Department of Nuclear Engineering, Kyoto University¹

National Institutes for Quantum and Radiological Science and Technology²

垂直NBI加熱やICRF加熱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による自発的なトロイダルトルクが生じることがわかった。

本研究ではLHDプラズマに対して垂直NBI加熱及び、そこに第二高調波を用いたICRF加熱を重畳した時に生じるトルクとして同様のメカニズムで $J \times B$ トルクの発生を考慮し、トロイダル方向のトルクを評価した。正味のトロイダルトルクから運動量輸送方程式を解くことでトロイダル流を評価し、実験結果との比較を行った。

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コードを用いて、NBI加熱及びICRF加熱により生じる高エネルギーイオンについての解析を行う。

LHDの磁場配位における垂直NBI加熱により生じた $J \times B$ 及び衝突トルクをFig.1に示す。非軸対称な磁場配位であるLHDプラズマでは、衝突トルクより $J \times B$ トルクが支配的であることが示された。トロイダル流を評価した結果をFig.2に示す。 $J \times B$ トルクに起因するトロイダル流が約3km/s生じることがわかり、これを考慮することで実験とよく一致することが示された。垂直NBI加熱にICRF加熱を重畳した場合、捕捉粒子の新古典輸送増加に伴い径方向拡散が

増加する。従ってトロイダルトルクの増加も予想される。重畳加熱時に生じるトロイダルトルクをFig.3に示す。3MWのICRFを重畳させることにより、NBI加熱のみの場合と比較して最大2倍程度に増加した。これらの結果から、LHDにおいて垂直NBI加熱及びICRF加熱プラズマにおいてトロイダル流の駆動機構として $J \times B$ トルクが重要であることが示された。

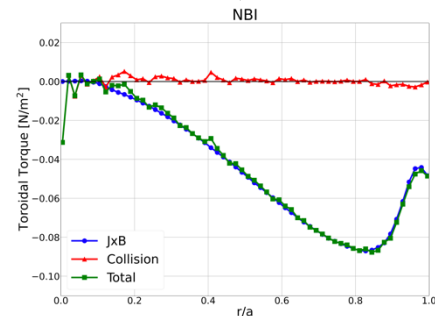


Fig. 1 垂直 NBI 加熱によるトロイダルトルク

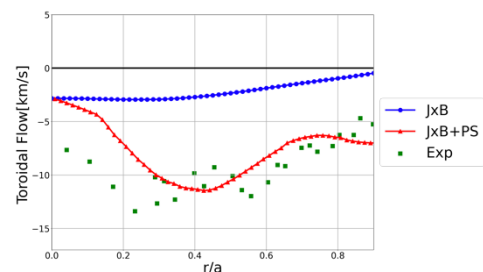


Fig. 2 LHD において垂直 NBI 加熱によって駆動されるトロイダル流

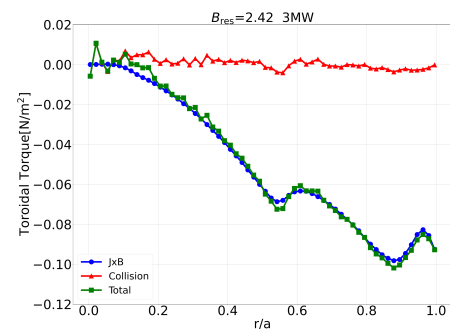


Fig. 3 垂直 NBI 加熱に ICRF 加熱(3MW)を重畳した場合に生じるトロイダルトルク

[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.