

ヘリオトロンJプラズマにおけるECHによるトロイダル流駆動トルクの検証 Study of ECH generated Toroidal Torque in HeliotronJ Plasma

坂本光輝¹, 山本泰弘¹, 小林進二², 村上定義¹

Koki SAKAMOTO¹, Yasuhiro YAMAMOTO¹, Shinji KOBAYASHI², Sadayoshi MURAKAMI¹

京大工原子核¹, 京大エネ研²

Department of Nuclear Engineering¹, Institute of Advanced Energy², Kyoto University

1 背景・目的

トラス型磁場閉じ込め装置において、トロイダル流とそのシアがMHDモード安定化と乱流の抑制に寄与し、エネルギー閉じ込め等に大きな役割を持つことが知られている。特に、電子サイクロトロン加熱(ECH)による自発的トロイダル流の発生が、JT-60UやLHD、ヘリオトロンJのような様々なトカマク・ヘリカル装置で観測されている[1,2]。このECHに関連するトロイダル流の駆動について、多くの実験的・理論的研究が行われてきたが、その機構は未だ十分に明らかになっていない。

ECH高速電子に由来するトロイダル流駆動トルクには、ECHによって径方向に発達する高速電子の輸送への応答として発生するイオン電流による $\mathbf{j} \times \mathbf{B}$ トルクとドリフト運動によりトロイダル方向に速度を持つ高速電子と背景プラズマとのクーロン衝突による衝突トルクが考えられる。その発生機構を図1に示す。HSXや理想トカマクなどの軸対称な磁場配位においては、前述の2つのトルクが打ち消し合うことが知られている[3]。しかし、3次元磁場配位では、粒子軌道が複雑になり、ECHによる高速電子がトルクに与える影響を十分に評価できていない。

本研究では、非対称な磁場配位を持つヘリオトロンJに焦点を当て、ECHによるトロイダル流駆動トルクをシミュレーションによって評価する。

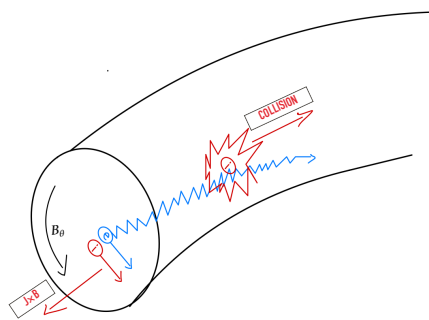


図1：高エネルギー電子によるトルク概念図

2 シミュレーションモデル

本研究では、ヘリオトロンJプラズマでのECH高速電子の解析にGNETコード[4]を用いる。GNETコードは、空間3次元、速度2次元の5次元位相空間上のドリフト運動論方程式

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

をMonte-Carlo法によって解き、定常状態における電子の速度分布やトロイダル流駆動トルクなどを評価できる。ここで、 δf は電子速度分布のMaxwell分布に対する変位、 C^{coll} は背景プラズマとのクーロン線形衝突項、 S^{ql} は準線形拡散理論により導出されたECH加熱項である。

3 結果・今後の展望

理想トカマクにおける完全軸対称な磁場配位においては、前述の2つのトルクが打ち消し合うことが確認できた。対して、ヘリオトロンJのような非対称な磁場配位ではリップルに捕捉された電子の径方向流束が支配的であり、ECHによる $\mathbf{j} \times \mathbf{B}$ トルクと衝突トルクの釣り合いが崩れて正味の自発トロイダル流を駆動するトルクが生じた。図2はこれらのシミュレーション結果である

また、本研究ではヘリオトロンJの径電場とトロイダル流駆動トルクとの依存性についても調査した。結果、ECHによる $\mathbf{j} \times \mathbf{B}$ トルクの最大値は半径方向の電場の増加とともに減少することが確認できた。特に径電場が0kV/mから5kV/m程度の比較的小さな値にトルクがより顕著に変化した。これは、径電場が生じることで電子の $\mathbf{E} \times \mathbf{B}$ ドリフトが輸送を支配し、リップルに捕捉される電子の割合が減少したため、電子の径方向輸送が制限されイオン電流を抑制したと予測できる。

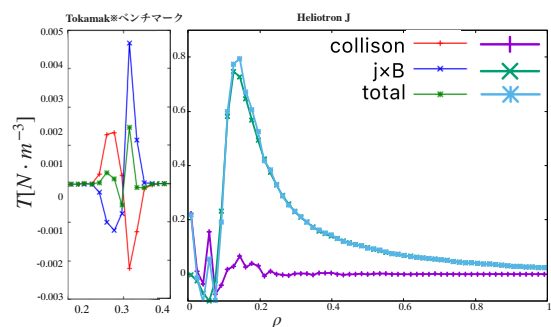


図3：トカマクおよびヘリオトロンJにおけるトロイダル流駆動トルク

参考文献

- [1] M.Yoshida, et al., Phys.Rev.Lett.103,065003(2009)
- [2] J.deGrassie, et al.Phys.Plasmas11,4323(2004)
- [3] Y.Yamamoto, et al.N.F62,064004(2022)
- [4] S.Murakami, et al.N.F40,693 (2000)