

ヘリカル型核融合炉の α 粒子閉じ込め性能に対する径電場効果の研究

エネルギー電磁流体グループ 渡邊研究室 森 涼雅

目的と意義

本研究では、ヘリカル型核融合炉中の高速 α 粒子の閉じ込め性能の評価を行う。DT核融合反応で生成される高速 α 粒子は核融合反応の燃料となる重水素や三重水素を加熱し、DT反応が継続的に行われるための重要な加熱源である。本研究では、荷電粒子軌道追跡コード(MORH-CODE)を利用し、核融合炉容器内での α 粒子の軌道解析を行う。一方、従来のコードにはない新たな物理量、径電場の効果を取り入れることで、より実際の状況に近い解析が可能となった。また、ヘリカル型核融合発電炉として最も有力であるFFHR-d1での軌道解析から今後の炉の検討材料として役立つ(より優れた磁場条件の模索や外部から径電場を印加する有効性の評価)ことを目的とした。

解析条件と解析手法

追跡コードを利用し、核融合炉中での高速 α 粒子のドリフト(軌道の案内中心)の数値解析を行った。ヘリカル型核融合炉は、FFHR-d1相当の計算条件(真空磁場、磁気軸 $R_{ax} = 14.2$ mでの磁場強度5.0 T)を設定した。また粒子の初期条件として①横長ポロイダル断面とトーラス赤道面の交線上の出発点($Z = 0$)、②粒子速度の初期ピッチ角(磁場と速度のなす角)の2つのパラメータを設定した。また径電場は空間一定の①60 kV/m、②150 kV/mでの数値計算を行った。計算データの解析は、(i)平均軌道位置、(ii)燃料加熱効率、(iii)軌道特性の3つの評価指標を使って実施した。

結果

評価指標(i)、(ii)から、径電場による α 粒子の閉じ込め性能の変化を確認した。径電場は一般に低エネルギー粒子であるほど、その軌道への影響が大きいとされているが、低エネルギー粒子は出発磁気面と軌道のずれが小さく、径電場による閉じ込め改善効果がほとんどみられなかった。これに対し、高エネルギー粒子は、出発磁気面と軌道のずれが大きく、径電場の印加に伴う改善効果が顕著だった(右図)。次に評価指標(iii)から、粒子の軌道の特徴(軌道特性)の変化を確認した。プラズマ内部で損失が起こる代表的な粒子は、カオス軌道粒子(遷移粒子)であり、このカオス軌道粒子の閉じ込めを改善することが、炉の発電効率向上に繋がるということが分かった。右図の点線で囲んだ領域は、カオス軌道粒子の分布がみられた場所である。カオス軌道粒子の閉じ込めが改善するのは、径電場150 kV/mを印加した際に、より損失の起こりにくい通過粒子やバナナ粒子の軌道特性に変化するからだとわかった。以上より、径電場は α 粒子の閉じ込め性能に対して、鍵となるカオス軌道粒子の閉じ込めを改善する効果をもつ。またこの効果は、径電場が大きいほど、粒子のエネルギーが小さいほど大きくなる。径電場が粒子軌道に及ぼす直接的な影響は、ドリフト方程式において $E \times B$ の項であり、ポロイダル方向に作用する。しかし、カオス軌道粒子のように、複数の磁気面間を移動する粒子に対してはその効果を一意に評価することが難しい。そのため、本研究のような粒子追跡コードを利用することが重要であり、核融合炉中の複雑な条件下で解析ができるよう今後さらなる開発を期待する。

参考文献: [1] K Hamamatsu et al., Plasma Phys. Control. Fusion 49, 1955 (2007)

学会発表

プラズマ・核融合学会・第38回・年会 (2021)

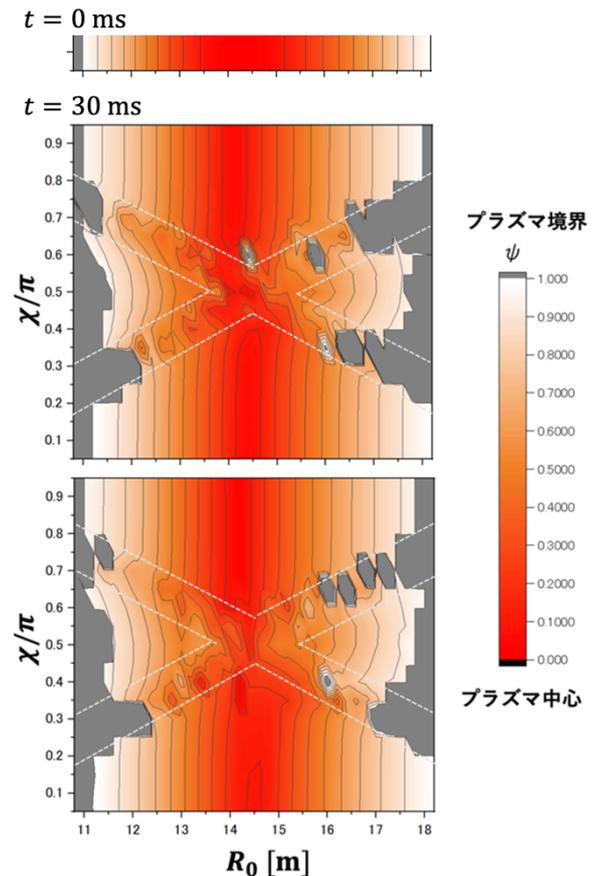


図: $E_{\alpha} = 3.5$ MeVの平均軌道位置
(上) $E_r = 0$ kV/m, (下) $E_r = 150$ kV/m