

## LHDプラズマにおける新古典輸送の水素同位体効果 Hydrogen isotope effect on neoclassical transport in LHD plasma

佐竹 真介  
SATAKE, Shinsuke

核融合科学研究所  
NIFS

新古典輸送による粒子・熱輸送は、LHDのようなヘリカル装置においては乱流輸送と同程度の寄与をする場合もあり、新古典輸送の水素同位体効果を理解することは、将来のDT核融合炉の閉じ込め性能を予測する上でも重要な課題の一つと言える。

LHDにおける軽水素、重水素実験観測の比較から、熱輸送について明らかな同位体効果が見られており、乱流輸送の理論・シミュレーションモデルによる解析が進められている[1]。一方、新古典輸送については、従来の予測では水素同位体効果は弱いと考えられており、詳細な解析がなされてこなかった。本研究では、近年発達した新古典輸送シミュレーションモデルを用いて、LHDプラズマにおける新古典輸送の水素同位体効果について改めて考察した。

LHDにおける新古典粒子拡散係数 $D$ は、プラズマの衝突周波数 $\nu$ と $E \times B$ 回転周波数 $\omega_E$ を用いて、定性的に次の依存性をすることが知られている[2]。

- $D \sim 1/\nu$ ,  $D_H/D_D \sim \sqrt{m_H/m_D}$  ( $1/\nu$ -regime),
- $D \sim \sqrt{\nu}/\omega_E^{3/2}$ ,  $D_H/D_D \sim (m_D/m_H)^{1/4}$  ( $\sqrt{\nu}$ -regime),
- $D \sim qT^2\sqrt{m}$ ,  $D_H/D_D \sim \sqrt{m_H/m_D}$  (plateau regime)。

ここで、HとDの衝突周波数の比 $\nu_H/\nu_D$ について、 $\nu_H/\nu_D = \sqrt{m_D/m_H}$ と見積もった。通常、LHD放電では水素イオンは $\sqrt{\nu}$ -regimeにあり、同位体効果は弱いことが上の見積もりから予想される。ただし、実際のプラズマでは両極性径電場が両極性条件 $\Gamma_H + \Gamma_D = \Gamma_e$ を満たすように形成され、 $\sqrt{\nu}$ -regimeにおける新古典フラックスが $\omega_E$ に強く依存すること、一方で $\omega_E$ は粒子種に依らず共通であることに留意する必要がある。

両極性径電場は高密度放電でイオンルート、低密度放電で電子ルートになる傾向がある。図1は低密度放電における $r=0.82a$ 磁気面の新古典粒子束の径電場依存性を示しているが、確かに $\sqrt{\nu}$ -regimeの依存性を示している。一方、図2の

磁気軸近傍( $r=0.23a$ )では電子ルートのみ存在するが、従来計算法では強い同位体効果が現れている。これは、従来計算法が $E \times B$  flowに対し非圧縮近似を使っているため、ポロイダルマッハ数 $M_p = E_r/(v_{th}B_p) > 0.1$ を超える状況ではこの近似が妥当でないことと、 $M_p$ がイオン質量に依存することが原因である。 $E \times B$ 圧縮性を扱える新しい新古典計算法では、フラックスの $E_r$ に対する非線形依存性は弱まり、両極性径電場、両極性フラックスの同位体効果は従来計算法と異なって現れる。このように、磁気軸近くの電子ルートでは、 $M_p$ が大きくなりやすいので、 $E \times B$ 圧縮性を考慮した新古典輸送計算が同位体効果の評価に必要不可欠である。

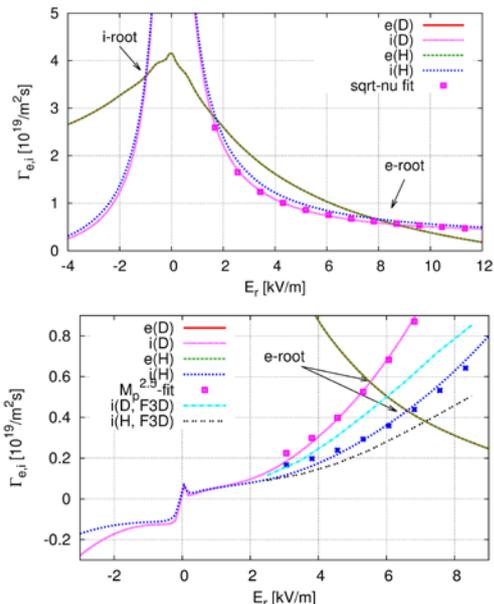


図1 (上)、2 (下) :  $r=0.82a$ 及び $r=0.23a$ の磁気面における、新古典フラックスの径電場依存性。図2のF3Dは $E \times B$ 圧縮性を考慮した計算法の結果。

[1] K. Tanaka et al., Plasma Phys. Controll. Fusion **63** 094001 (2021)

[2] K.C. Shaing, S.A. Sabbagh and M.S. Chu, Nucl. Fusion **50** (2010) 025022.