

Experimental study on isotope effects in internal transport barriers and their underlying physics

小林達哉^{1,2}, 高橋裕己^{1,2}, 永岡賢一¹, 佐々木真³, 仲田資季^{1,2}, 關良輔^{1,2}, 田中謙治^{1,3}, 徳澤季彦^{1,2}, 吉沼幹朗¹, 居田克巳¹

T. Kobayashi^{1,2}, H. Takahashi^{1,2}, K. Nagaoka¹, M. Sasaki³, M. Nakata^{1,2} et al.

¹核融合研, ²総研大, ³九州大学

¹NIFS, ²SOKENDAI, ³Kyushu Univ.

磁場閉じ込めプラズマの「水素同位体効果」は、燃料ガス質量が大きいほどプラズマ閉じ込めが良くなるという現象であり、スケーリング予測に反する長年の未解決課題である。トカマク装置では閉じ込め時間スケーリング則に加え、閉じ込め状態遷移の閾値パワーに顕著な同位体効果が見られる。本研究では、大型ヘリカル装置 LHD において、イオン温度分布および電子温度分布にそれぞれ見られる内部輸送障壁 (Internal Transport Barrier; ITB) について、同位体効果を定量化し、その背景物理を議論した。

イオン温度の ITB は、発生場所や強度が実験条件によって様々であり、遷移の時間スケールも長い。その定義に統一見解を与えることが困難であった。本研究では、拡散係数のイオン温度依存性に着目し、ITB 強度を新たに定義した[1]。軽水素プラズマと重水素プラズマを比較した結果、(1)重水素プラズマでより強いイオン ITB が形成された(図 1)。また、(2)水素プラズマでは、ITB 形成時に周辺閉じ込め悪化が起こり、中心イオン温度の上昇が制限された[2]。主成分分析により、ITB 強度は密度ピーキングと強い相関を持つことが示された。

電子温度の ITB は、温度勾配に明らかな不連続点が現れるため、その存在は一見して明らかである。一方で温度輸送に顕著な非局所性が現れるため、その定式化が困難であった[3,4]。本研究では、加熱モジュレーション実験を行い、電子温度勾配の応答量から ITB への遷移閾値を定義した。重水素においてより低いパワー・密度比閾値で ITB が形成された。この閾値の違いは局所輸送係数の分岐によることがわかった。

これらの成果は、イオン温度および電子温度どちらの輸送チャンネルにおいても、よりイオン質量が大きい場合に閉じ込め遷移が起こりやすいことを示している。ITB に関して実験的にこれらのことが示されたのは世界で初めてである。また、

トカマク装置の H モード遷移閾値パワーにおいて見られる同位体効果とも共通する、磁場閉じ込め環状プラズマに見られる普遍的な性質である。これらの背景物理の解明のため、同位体効果実験に特化した狭帯域フィルタビーム放射分光計測器が開発され、運用されている[5]。

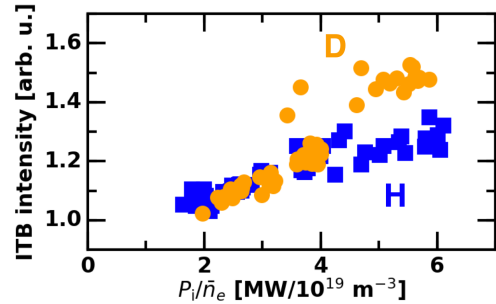


図 1. イオン ITB 強度のパワー・密度比依存性

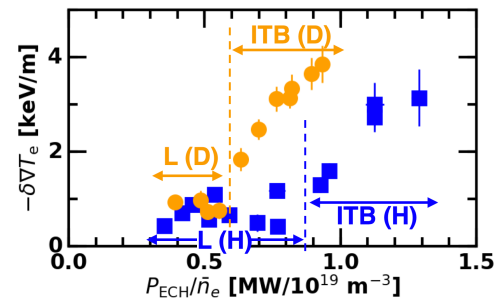


図 2. 電子 ITB のパワー・密度比閾値

[1] T. Kobayashi et al., Plasma Phys. Control. Fusion **61** 085005 (2019)

[2] T. Kobayashi et al., Sci. Rep. **9** (2019)

[3] T. Kobayashi et al., Nucl. Fusion **60** 076015 (2020)

[4] T. Kobayashi et al., Plasma Fusion Res. **15** 1402072 (2020)

[5] T. Kobayashi et al., Plasma Phys. Control. Fusion **62** 125011 (2020)