

大型ヘリカル装置における粒子閉じ込めに対する同位体効果

学生証番号 47196076 氏名 今川 直人
(指導教員 山田 弘司 教授)

Key Words: nuclear fusion, particle transport, isotope effect, deuterium plasma

1. 序論

核融合エネルギー源として最も有望視されているのは重水素Dと三重水素Tの核融合反応(DT反応)の利用である。このためには水素同位体燃料を超高温度のプラズマとして、閉じ込める必要がある。1回のDT反応によって発生するエネルギーを E_{DT} 、DT反応の反応断面積を $\langle\sigma_{DT}\rangle$ とすると、重水素イオン密度 n_{D^+} と三重水素イオン密度 n_{T^+} からなるプラズマ中でDT反応によって生成されるエネルギー E は、以下のように表すことができる。

$$E = n_{D^+}n_{T^+}\langle\sigma_{DT}\rangle E_{DT} \quad (1)$$

イオン密度 $n_{D^+} + n_{T^+}$ が与えられた場合、 $n_{D^+} : n_{T^+} = 1:1$ のとき $n_{D^+}n_{T^+}$ が最大となる。そのため、 E を最大化するには n_{D^+} と n_{T^+} が等しくなるよう制御する必要がある。このためには水素同位体質量による粒子輸送特性の異同を同定することが課題となる。

輸送に対する同位体効果は核融合プラズマ研究の長年の未解決課題である。特に、粒子輸送についての研究は限られている。この原因として粒子供給源の同定と水素同位体イオン密度の分離計測が困難、粒子輸送は密度勾配に比例する粒子束だけで説明がつかないことなどが挙げられる。

本研究では大型ヘリカル装置LHDにおいて軽水素Hと重水素Dを用いたプラズマ実験を行い、同位体効果について調べた。LHDでは、ガスパフやペレットによる粒子供給やHイオンとDイオンの分離計測を利用でき、前述の問題点に留意した研究が可能である。

2. 実験条件

本研究では定常プラズマと非定常プラズマ(ペレット入射)の2種類の実験を行った。中性粒子ビーム入射(NBI)や電子サイクロトロン加熱(ECH)でプラズマを加熱し、定常プラズマではガスパフによってプラズマ密度を保つ。非定常プラズマで

は水素ガスを冷却して固化したペレットを入射し、コア領域に直接、粒子を供給する。

電子密度・温度はトムソン散乱計測によって、イオン密度・温度は荷電交換分光計測によって計測した。特に、HイオンとDイオンの密度分布はバルク荷電交換分光法を使用して得た [1]。

3. 定常プラズマにおける粒子閉じ込め

定常プラズマの粒子閉じ込め評価指標として、電子のグローバル粒子閉じ込め時間 τ_p を使用する。これは粒子バランスから、電子の総数 $N_e = \int_{V_p} n_e dV_p$ を用いて以下のように定義される。

$$\frac{dN_e}{dt} = \Gamma_{\text{inflow}} - \frac{N_e}{\tau_p} \quad (2)$$

時間変化がない定常プラズマでは、 τ_p は N_e をプラズマに流入する粒子束 Γ_{inflow} で割った値となる [2]。ここで、電気的中性条件から電子とイオンのふるまいは一致すると考えられる。

Γ_{inflow} は、H・D・He原子の発光から評価する。NBIおよびECH加熱プラズマの運転パラメータを変化させたデータセットについて、 τ_p の統計回帰分析を行った。使用したパラメータはプラズマ平均質量数 M 、NBIとECHの加熱吸収パワー P_{abs} [MW]、平均磁場 B_{av} [T]、線平均電子密度 \bar{n}_e [10^{20}m^{-3}]である。

$$\text{NBIプラズマ } \tau_{p,\text{scl}}^{\text{NBI}} \propto M^{-0.75} B_{\text{av}}^{1.33} \bar{n}_e^{0.22} P_{\text{abs}}^{-1.05} \quad (3)$$

$$\text{ECHプラズマ } \tau_{p,\text{scl}}^{\text{ECH}} \propto M^{-0.71} \bar{n}_e^{-0.00} P_{\text{abs}}^{-0.73} \quad (4)$$

M に対して負の依存性、すなわち重水素の方が粒子閉じ込め時間が短いことが示された。

NBI加熱プラズマの τ_p について、スケーリング則による予測値と実験値の比較を図1に示す。

また、局所的な粒子輸送特性を評価するため $\alpha = V_e/D_e$ を求めた。ここで、粒子拡散係数 D_e は密度勾配に比例する拡散流束を、ピンチ速度 V_e は密度勾配によらない対流を表す。

$$\Gamma_e = -D_e \nabla n_e + n_e V_e \quad (5)$$

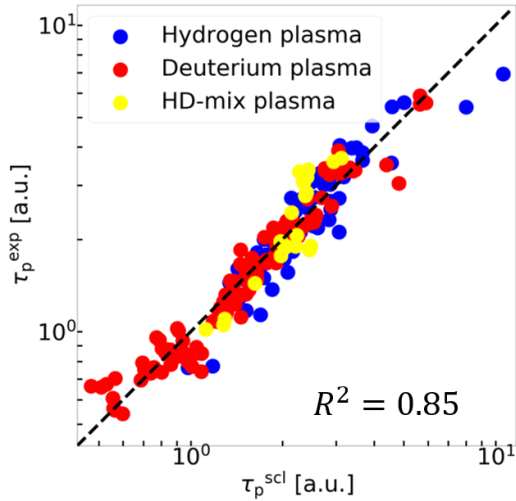


図 1 NBI加熱プラズマの τ_p 実験値 τ_p^{exp} (縦軸) とスケールリング則による予測値 τ_p^{scl} (横軸) の関係. 青はHプラズマ, 赤はDプラズマ, 黄色はHD混合プラズマのデータを示す. 縦軸横軸は対数スケールで示した.

α はプラズマ周辺部で符号が逆転し, V_e が外向きから内向きに変化することを表す. 統計的な比較の結果, Dプラズマの方がこの反転位置がより外側にあり, D_e が等しいとすれば V_e は外向きでは大きく, 内向きで小さくなる. これによってDプラズマの密度分布がより強い凹状となっていることを説明できる.

4. ペレット入射過渡応答

ペレット入射の実験放電波形を図2に示す. 図2(b)のように, ペレット入射によって密度は瞬時に増加し, 輸送を反映した時定数で減衰する. この過渡応答では背景としての粒子源よりもペレットの粒子源が十分大きい場合, 粒子源の位置や分布を問わず, 粒子の輸送過程を議論できる.

過渡応答からの粒子閉じ込め評価指標として, ペレット入射で増加した同位体イオン密度の指数減衰時定数, 減衰時間 τ_{decay} を解析した.

ペレットで入射した同位体の質量数 M_{pellet} , H原子発光 H_α とD原子発光 D_α の合計に対する H_α の割合 $H_\alpha/(H_\alpha + D_\alpha)$, 中心電子温度 T_{e0} [keV] を用いて τ_{decay} の統計回帰分析を行った結果を示す.

$$\tau_{\text{decay,scl}} \propto M_{\text{pellet}}^{-0.52} T_{e0}^{-0.73} H_\alpha / (H_\alpha + D_\alpha)^{0.21} \quad (6)$$

Dイオンの方が減衰時間は短く, 閉じ込めが悪いことを示している. また, $H_\alpha/(H_\alpha + D_\alpha)$ の効果を見ると, 軽いHの割合が高いほど減衰時間が長く, 質量の効果と同じ傾向である.

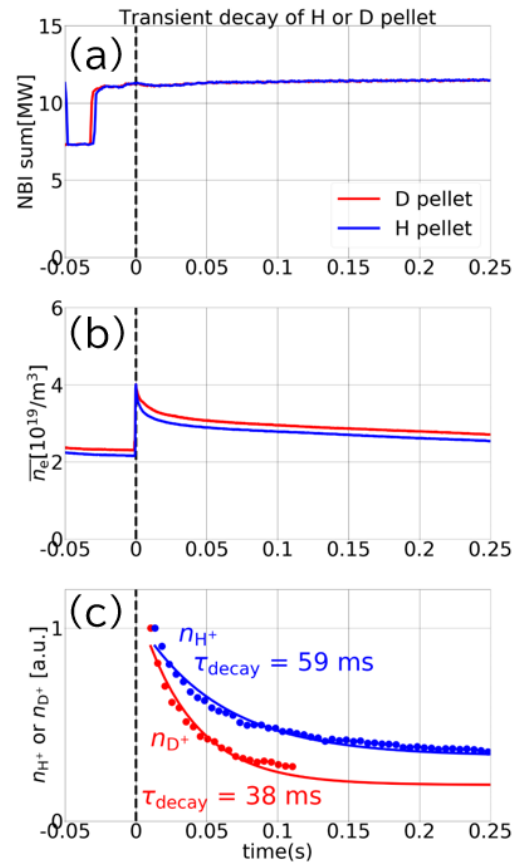


図 2 ペレット入射の実験放電波形例. 青: Hペレット入射時, 赤: Dペレット入射時. 上から, (a) 加熱パワー, (b) 線平均電子密度, (c) ペレット入射同位体イオン密度 (青: Hペレット入射時の n_{H^+} , 赤: Dペレット入射時の n_{D^+}) の時間変化を表す.

5. 結論

本研究で求めた3種類の粒子閉じ込めのスケールリング則について, 水素同位体イオンの質量数 M に対して共通して負の効果があることが分かった. これは先行研究におけるエネルギー閉じ込め時間や熱輸送 [3]についての観測結果とは異なる. 今後の体系的な同位体効果の理解に向けた研究に資する結果である.

本研究で得た質量が大きいほど粒子閉じ込めが悪いという特性を将来のDT燃焼に外挿した場合, プラズマ中で重水素Dと三重水素Tが1:1の分布とする燃料制御が必要となることになる.

参考文献

- [1] K. Ida et al., Rev. Sci. Instru. 90 093503 (2019).
- [2] P. C. Stangeby and G. M. McCracken, Nuclear Fusion 30, 1225 (1990).
- [3] H. Yamada et al., Phys. Rev. Lett. 123, 185001 (2019).