

JT-60U の周辺領域における水素・重水素プラズマの比較 Comparison of Hydrogen and Deuterium Plasmas in the Peripheral Region of JT-60U

仲野 友英
Tomohide Nakano

量研機構
QST

【はじめに】

本講演では、LHDの重水素実験の開始に先立ち実験計画立案の参考となるよう先例として、JT-60U における軽水素・重水素プラズマの違いを不純物量に着目して報告する。LHD ではJT-60U と同じく炭素材ダイバータ板をもつ。水素が炭素材ダイバータ板に入射すると、物理および化学スパッタリングによって炭素が不純物として発生する。重水素による物理スパッタリング率は質量数依存のため軽水素によるそれよりも高く、また重水素による化学スパッタリング率は軽水素によるそれと比較して同じかやや高いとされている。ダイバータ板から発生した炭素は輸送されつつイオン化され、主に線放射により周辺プラズマを冷却する。炭素イオンの一部は主プラズマに侵入し、主プラズマを希釈および冷却する。よって、炭素不純物の発生量が多い重水素プラズマでは軽水素プラズマよりもプラズマ実効電荷数が高くなり、放射損失パワーが大きくなると予想される。ここではJT-60U において同一放電条件の放電（1放電中に中性粒子ビーム加熱なし、4 MW、および 13 MWの3フェーズを持つ。以降、標準放電と呼ぶ。）を繰り返し行い、これらの放電から構築したデータベースを基に、軽水素と重水素プラズマの比較を行う。

【ダイバータからの不純物発生量】

図1（上）には、ダイバータにおける $D\alpha$ 発光強度に対する $C II$ 発光強度を示す。それぞれ、ダイバータへの水素フラックスおよびダイバータからの炭素発生フラックス（物理および化学スパッタリングの和）の良い指標であることから、それらの比（図中の破線）は炭素発生率の指標となる。重水素放電での炭素発生率は軽水素放電でのそれと比較して約 3 倍である。一方、化学スパッタリングによる炭化水素発生量は、CH（またはCD）および C_2 スペクトル

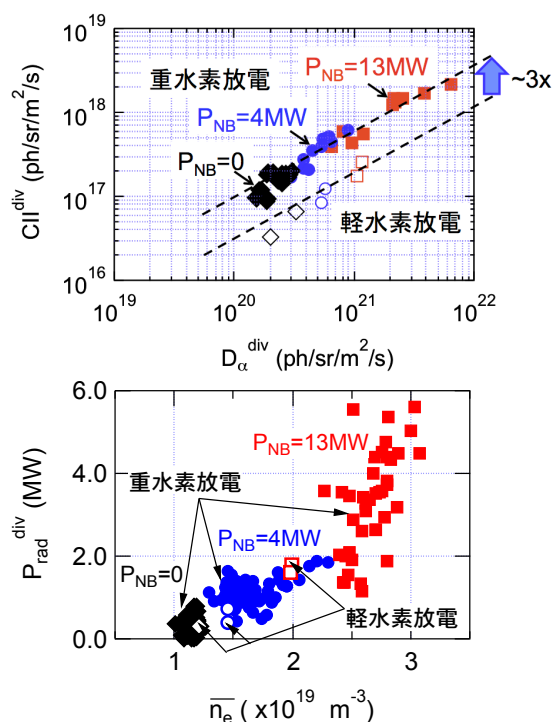


図1.（上）ダイバータでの $D\alpha$ 発光強度に対する $C II$ 発光強度の軽水素と重水素放電の比較、および（下）主プラズマの線平均電子密度に対するダイバータプラズマの放射損失パワー。記号の意味は上下の図で同じ。

バンドの強度から測定される[1]が、それらの発光率の実測値（CDの発光率がCHの発光率より高い）[2]を考慮すると、炭化水素の発生量には軽水素と重水素で違いは見られなかった。よって、図1に示す炭素発生率の違いは主に物理スパッタリング率の違いに起因する可能性が高い。また、図1（下）に示すように重水素放電のダイバータプラズマにおける放射損失パワーは軽水素放電のそれより高い。これはダイバータ板からの炭素発生量の違いに起因すると推測される。

【主プラズマ中の不純物量】

図2（上）には標準放電におけるプラズマ実

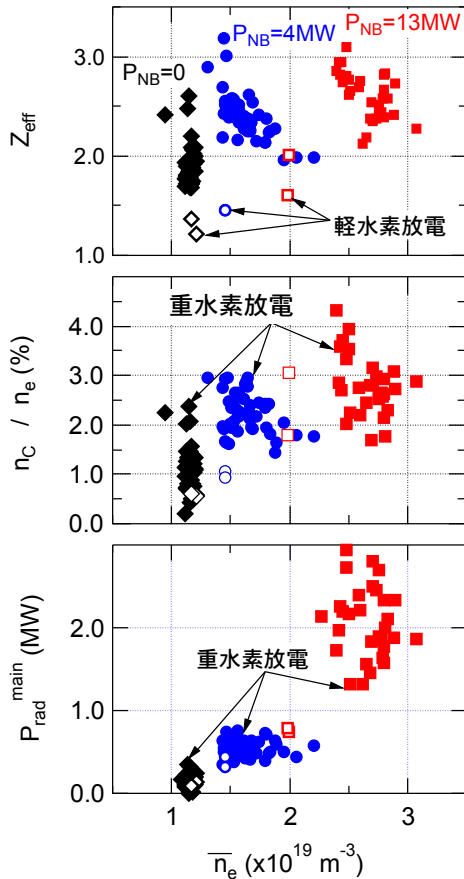


図2. 主プラズマの線平均電子密度に対する (上) プラズマ実効電荷数, (中) 炭素不純物濃度, および (下) 主プラズマの放射損失パワー. 記号の意味は図1と同じ.

効電荷数を示す[3]. 中性粒子ビーム加熱なし, 4 MW および 13 MW 入射フェーズのそれぞれにおいて重水素放電のプラズマ実効電荷数は軽水素放電のそれよりも明らかに高い. 不純物の主な成分は炭素であり, 図2 (中) に示すように炭素不純物濃度はプラズマ実効電荷数とほぼ同様の傾向を示し, 重水素放電ではより高い濃度を示す. 関連して, 図2 (下) に示すように, 主プラズマからの放射損失パワーも重水素放電の場合により高い値を示す.

一方で, 図3 (上) に示すように, プラズマ中心部の電子温度は重水素放電でより高い値を示し, プラズマの蓄積エネルギーも重水素放電でより高い値を示す. また, 中性粒子ビーム加熱 13 MW フェーズでは重水素放電では H モードに遷移したが, 軽水素放電では L モードのままであった. よって, 重水素放電では軽水素放電と比較してダイバータでの炭素不純物発生量が多いことに加えて, 高い閉じ込め[4]のために主プラズマ中の炭素不純物濃度が高く, 放射損失パワーが高いと解釈される.

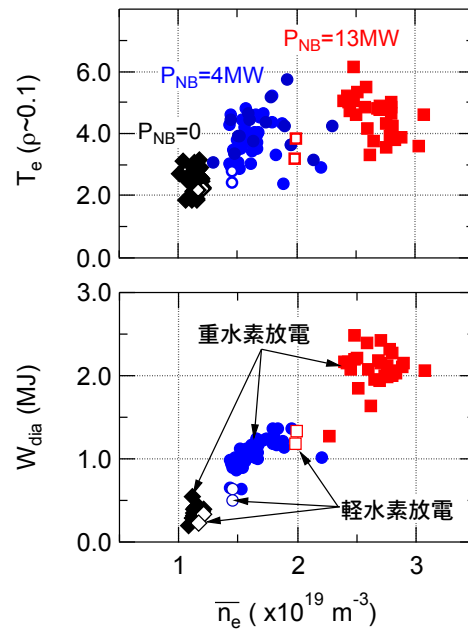


図3. 主プラズマの線平均電子密度に対する (上) プラズマ中心部 ($\rho \sim 0.1$) の電子温度, および (下) 主プラズマの蓄積エネルギー. 記号の意味は図1. 図2と同じ.

講演では, 軽水素と重水素放電でのデタッチメントの発生条件の違いについても言及する予定である.

【LHDの重水素実験への研究提案】

まずは, 軽水素放電と比較して重水素放電ではダイバータでの炭素発生量が多く, ダイバータプラズマのパラメータに影響を与えるため, 炭素発生量の違いを明確にするべきである. これには, 図1 (上) で示した方法が簡便でありながら良い指標となる. 炭素イオンの放射冷却はダイバータデタッチメントの発生に影響を与えるため, 炭素イオンの線放射強度と軽水素・重水素放電におけるアタッチ・デタッチメントのダイバータ運転領域の関連を明確にすることは重要な研究対象である. また, ヘリウム排気に対する弾性衝突の効果には, 軽水素・重水素で明確な違いが生じる可能性がある. そのほか, ペレット (TESPELなど) で入射した不純物の輸送のバルクイオン種に対する依存性, 密度限界の物理究明など, 未解明の物理課題の解決に主導的な役割を果たすことが期待される.

参考文献

- [1] T. Nakano et al. Nucl. Fusion 42 (2002) 689.
- [2] T. Nakano et al. Nucl. Fusion 54 (2014) 043004.
- [3] T. Nakano et al. J. Nucl. Mater. 313-316 (2003) 149.
- [4] H. Urano et al. Nucl. Fusion 53 (2013) 083003.