

LHD 準定常プラズマの不純物輸送研究の進展と運転領域マッピング

Progress in impurity transport study of LHD quasi-steady-state plasmas and mapping of impurity behavior on n-T space

中村幸男, 田村直樹, 小林政弘, 鈴木千尋, 吉沼幹朗, 吉村信次, 田中謙治,

居田克己, B. J. Peterson

NAKAMURA Yukio, TAMURA Naoki, KOBAYASHI Masahiro, SUZUKI Chihiro, YOSHINUMA Mikiro, YOSHIMURA Shinji, TANAKA Kenji, IDA Katsumi, Byron Jay PETERSON

核融合研

NIFS

これまで LHD の準定常プラズマを用いて行ってきた不純物輸送研究の進展を紹介するとともに、不純物蓄積のない運転領域を明示するために、不純物挙動に対する運転領域マッピングを作成し、不純物輸送を支配する物理機構を含めた包括的な理解を目指すものである。

LHD の準定常プラズマ(数秒の長時間放電)での不純物挙動に関する研究は、LHD 運転開始時は 1MW の NBI 加熱パワーを用いて、水素プラズマの長時間放電によって行われた。プラズマの密度をスキャンして不純物挙動を調べたところ、ある特定の密度領域で不純物の蓄積が観測された[1]。図 1 に示されるように、加熱パワー、プラズマ密度及び温度がほぼ一定に保持された時に、コア部での放射損失、金属不純物ライン及び炭素密度の時間的増加が観測された。放電の後半では密度の上昇とコア部での不純物蓄積による温度の低下が観測されて

いる。この不純物蓄積のプラズマ密度依存性を調べてみると、ある密度領域だけでコア部の放射損失が増加(不純物蓄積が起こる)するのが観測された。この不純物蓄積が起こる密度領域を“不純物蓄積窓”と呼んでいる。この不純物蓄積窓は加熱パワーとともに密度領域が上昇し、プラズマの衝突周波数によって決まる事も分かった。最近の高パワー加熱実験(10MW 以上)では、これまでの不純物挙動とは全く異なる振舞いを示し、プラズマ密度のスキャンで観測された不純物蓄積窓は見られず、不純物蓄積領域は完全に消滅することが分かった。これまで観測された不純物挙動に関する実験データをまとめたものを図 2 に示す。

不純物蓄積窓の両側の境界条件が何によって決まるのかを調査することは、不純物輸送機構を明らかにする上で非常に重要である。そこで、まず第 1 に、ヘリカル系の新古典不純物輸送は径電場に大きく依存することから、不純物挙動の径電場依存性を調べた。径電場が磁場配

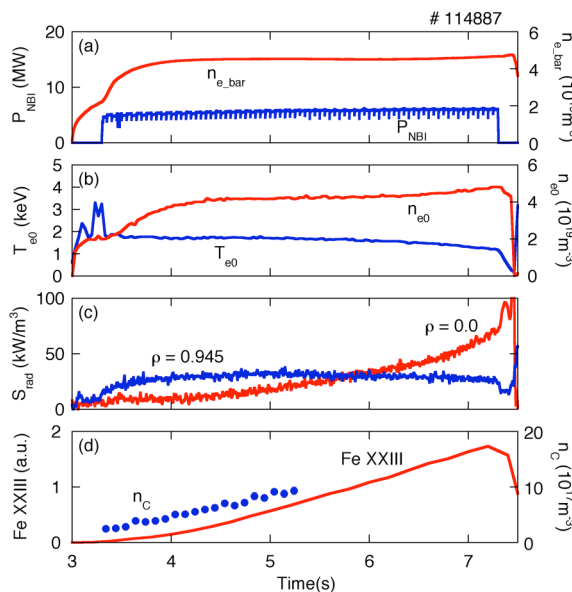


図 1 不純物蓄積を伴う典型的な長時間放電

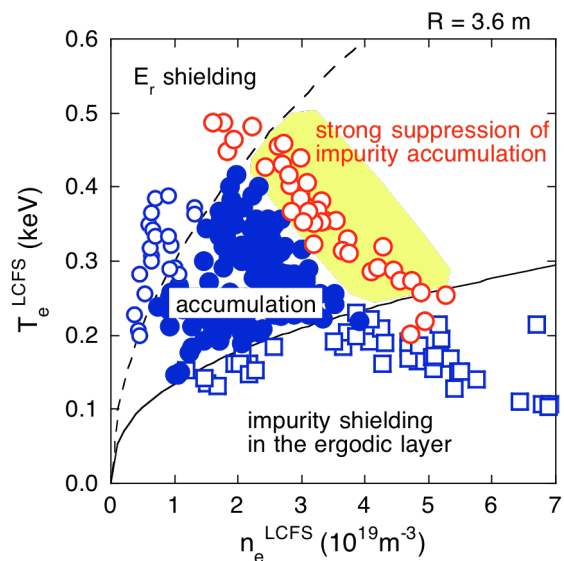


図 2 不純物挙動に関する n-T ダイアグラム

位に依存することを利用して、径電場と不純物蓄積との相関が実験的にも確認された[2]。また、ヘリカル系に特有の磁場構造（エルゴディック層）では、周辺プラズマが高衝突領域に入ると不純物入射束が顕著に抑えられること（不純物シールド効果）が実験的及び理論的にも明らかにされた[3]。さらに、それぞれの境界条件は各領域の理論モデルに基づいたプラズマパラメータによって決まり、最外核磁気面での密度及び温度の2次元空間（ n - T スペース）で実験的な経験則として表せることも分かった（図2における点線と実線）[2]。

高パワー加熱実験（10MW 以上）での不純物挙動の違いは、コアプラズマのイオン温度勾配とトロイダル流速が重要であることが示唆された。そこで、加熱パワーを固定して接線 NBI による外部トルク入力を変化させる実験を行ったところ、炭素密度分布がトロイダル流速に顕著に依存することが分かった。トロイダル流速（マッハ数）が磁場方向に強くなると炭素密度はホロー分布になる（図3）。さらに、トータルの外部トルクをゼロにして、垂直 NBI に

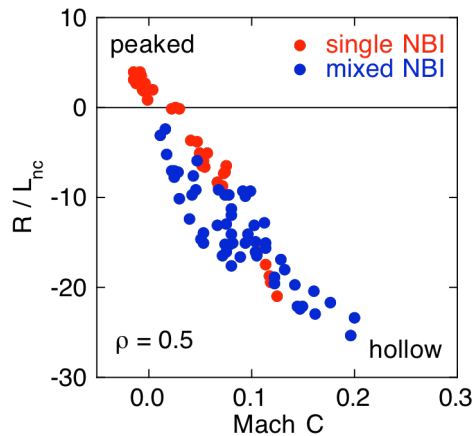


図3 炭素密度分布のマッハ数依存性

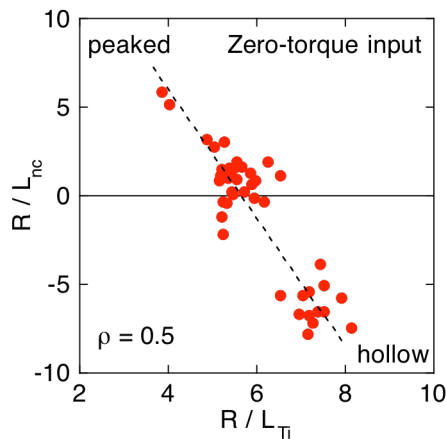


図4 炭素密度分布のイオン温度勾配依存性

よる加熱を増加すると、不純物蓄積は抑制され、炭素密度分布はホローになることが分かった（図4）[4]。これはトロイダル流速（あるいはその径方向の勾配）とイオン温度勾配が不純物輸送において重要なキーパラメータであることを示すものである。現時点で、最も可能性のある物理機構は、イオン温度勾配及びトロイダル回転効果が顕著に見られる乱流不純物輸送であると考えられる。

これまで得られた結果を踏まえて、LHD における準定常の標準水素放電（平坦な密度分布と尖塔化した温度分布）では、周辺プラズマの密度及び温度の2次元領域で不純物挙動の運転領域マッピングを図5のように作成することができる。ここでは新古典輸送と乱流輸送は共存するものと考えられる。加熱パワーが小さい時は、新古典輸送における径電場の効果が大きく、不純物挙動は新古典輸送が支配的になり、密度上昇による負電場の形成により、不純物蓄積が起こる。また、高衝突周波数領域ではエルゴディック層での不純物シールド効果が作用する。しかしながら、高パワー加熱では乱流輸送が新古典輸送よりも大きくなり、不純物挙動は乱流輸送によって左右されることになると思われる。

- [1] Y. Nakamura et al., Plasma Phys. Control. Fusion **44** (2002) 2121
- [2] Y. Nakamura et al., Plasma Phys. Control. Fusion **56** (2014) 075014
- [3] M. Kobayashi et al., Nucl. Fusion **55** (2015) 104021
- [4] Y. Nakamura et al., 26th IAEA Fusion Energy Conference (Kyoto, Japan) (2016) EX/P8-4

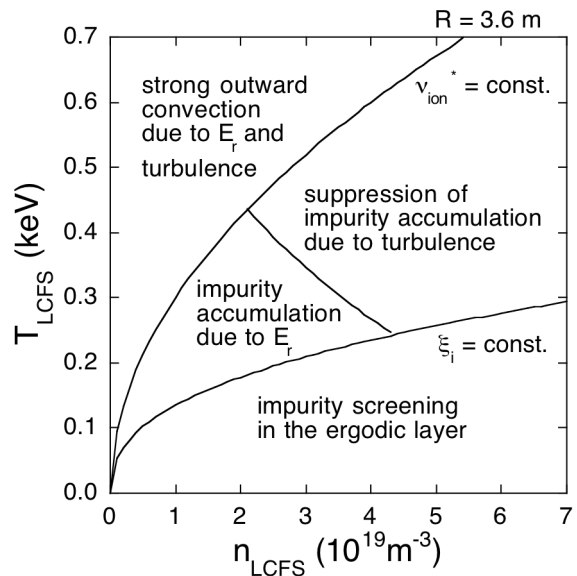


図5 不純物挙動に対する運転領域マッピング