

高分散分光計測によるダイバータ-プラズマ間の不純物入射・排出過程の研究 Impurity distribution and transport at divertor region via high resolution spectroscopy

川手 朋子^{1,2}, 芦川 直子^{1,2}, 後藤 基志^{1,2}, 大石 鉄太郎^{1,2}, 川本 靖子¹, 豊田 浩孝^{3,1}, 庄司 主^{1,2}, 河村 学思^{1,2}, 増崎 貴^{1,2}, F. Nespoli⁴, E.P. Gilson⁴, R. Lunsford⁴, 鈴木 千尋^{1,2}, A. Nagy⁴, D. Gates⁴

T. Kawate^{1,2}, N. Ashikawa^{1,2}, M. Goto^{1,2}, T. Oishi^{1,2}, Y. Kawamoto¹, et al.

核融合研¹, 総研大², 名古屋大³, プリンストンプラズマ物理研究所⁴
NIFS¹, SOKENDAI², Nagoya University³, PPPL⁴

1 はじめに

水素リサイクリングや主プラズマへの不純物流入の抑制のため、壁コンディショニングは一般的な手法である。壁コンディショニングの1つの方法であるボロニゼーションでは、ボラン・ヘリウム混合ガスをグロー放電により蒸発させ、容器内にホウ素堆積層を形成する。これによりプラズマ対向壁に水素や不純物元素を吸着させ、気相の水素・不純物量を抑制することが可能である。一方有毒なボランガスの使用の回避やリアルタイムボロニゼーションのため、ホウ素粉末をプラズマに重力落下させることによりホウ素導入を行う不純物ダストドロップ (Impurity Powder Dropper; IPD)[1] がプリンストンプラズマ物理研究所により開発され、世界中のトカマク・ヘリカル型配位の磁場閉じ込め装置で導入・実験されている。これまで IPD によるホウ素の輸送に関する研究では、主にコアプラズマからスクレイプオフ層に着目しているものが多く、プラズマ放電中のホウ素堆積過程について実験的な調査が進んでいなかった。そこで本研究では、分子分光計測を用いてプラズマ放電中の対向壁周辺のホウ素量の定量評価を行うことにより、IPD 実験による水素リサイクリング・不純物制御など壁コンディショニングの効果について議論する。

2 実験方法

本研究は核融合科学研究所大型ヘリカル装置 (Large Helical Device; LHD) で実験を行った。LHD はヘリカル型磁場閉じ込めプラズマ装置であり、ダイバータ配位を形成している。運転磁気軸と磁場強度はそれぞれ 3.6 m, 2.75 T であり、放電は約 5 秒間行われた。ホウ素元素の分布・時間発展を調査するため、本研究では特に IPD 有無の放電間の比較を行った。IPD によりホウ素粉末は約 30 mg s^{-1} の速度で約 4 秒間落下

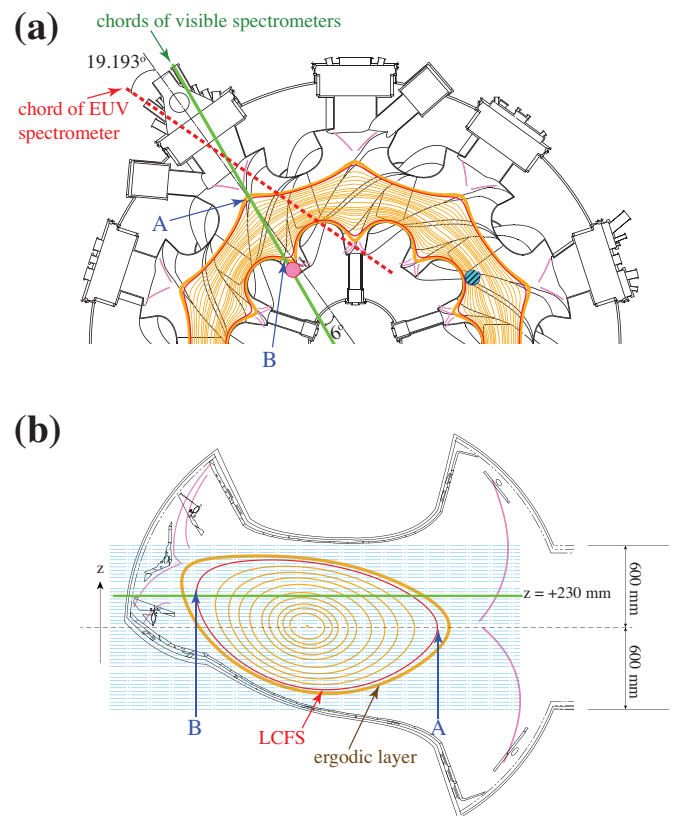


Fig. 1: 分光器視線と LHD 真空容器およびプラズマの位置関係。いずれの図も橙色実線は磁気面、赤実線は最外殻磁気面を示す。(a) LHD 赤道面図。緑線は可視分光器の視線、赤点線は極端紫外線分光器の視線である。(b) 可視分光器視線断面。水色点破線はそれぞれが可視分光器の視線を表す。[2]

していた。

分光計測はリアルタイムな原子・分子の反応・輸送を知る強力な手法である。水素化ホウ素分子 (Boron hydride: BH) は解離エネルギーが 3.42 eV[3] と主プラズマよりはるかに低温であるため、対向壁周辺で生

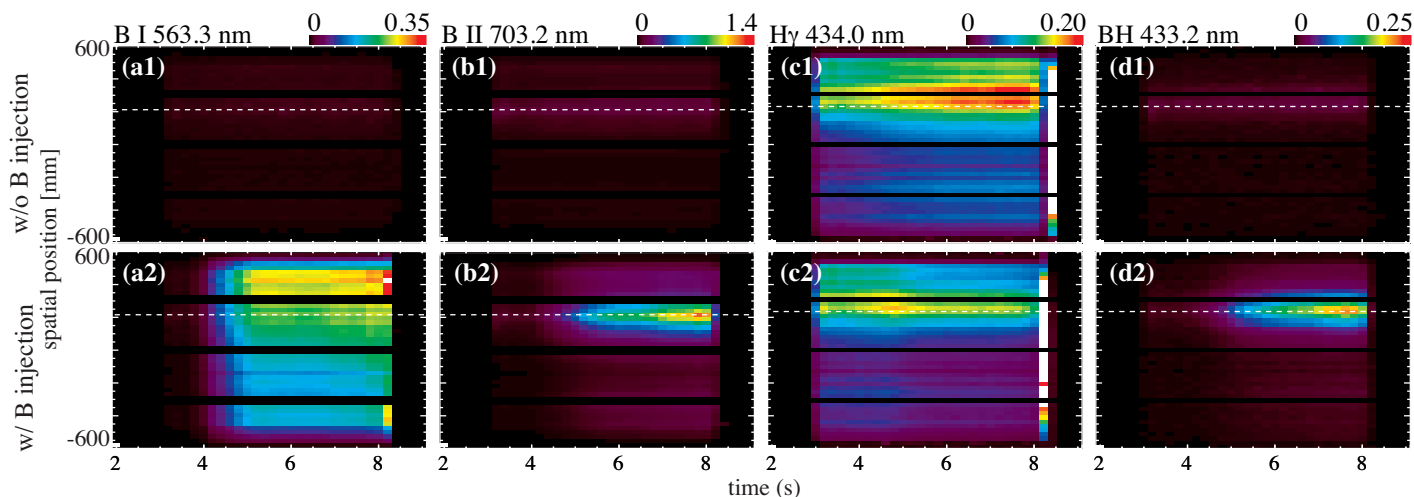


Fig. 2: ホウ素粉末入射時および非入射時における発光線強度 ($\text{W m}^{-2} \text{sr}^{-1}$) の時空間発展。白点線はダイバータ板を見込む視線位置を示す。発光線の粒子種は (a) B I, (b) B II, (c) $\text{H}\gamma$, (d) BH である [2]。

成されると考えられる。また B, H それぞれの原子が BH 分子を形成する反応は吸熱反応であり、気相で BH が形成するとは考えづらく、化学・物理スパッタリングが主たる形成過程であると考えられる。そこで我々は、対向壁におけるホウ素の堆積・放出過程の指標として BH 分子を用いた。

本研究では可視分光器および極端紫外線分光器でプラズマ計測を行い、得られたスペクトルを解析した。分光器と真空容器・プラズマの位置関係を Fig. 1 に示す。可視分光器の空間分解能は 26 mm、時間分解能は 200 ms であった。

3 実験結果

原子・分子の分布を得るため、可視分光器で計測した発光線強度の空間分布・時間発展を Fig. 2 に示す。図から、 B^0 や H^0 は比較的広い空間に存在しているのに対し、 B^+ および BH 分子は空間的に局在しており、それがダイバータを見込む視線に相当する。また B II と BH の発光線強度の時空間的な変動は、相互相関値が約 99% と非常に高い。この結果から、BH および B^+ は共にダイバータ板周辺で形成されていると推察される。

BH、B II の強度が時間が経つにつれ上昇していることは、ダイバータ板周辺の対向壁におけるホウ素濃度が増加していることを示している。BH、 B^+ が対向壁周辺で形成されると仮定し、気中における各粒子のフラックスを発光線強度から見積もると、それぞれ最大で 7×10^{18} 、 $3 \times 10^{19} \text{ m}^{-2} \text{ s}^{-1}$ であった。静電プローブによる粒子フラックス計測と合わせて、水素が BH として排出される量は、ダイバータ板への入射粒

子フラックスの 0.01% 程度であることがわかる。一方、B I の発光線強度はホウ素粉末入射開始後 2 秒程度まで上昇するが、その後放電終了までほぼ一定値であった。これは気相でのホウ素元素量は、粉末および対向壁からの入射量と、排気による排出が釣り合った状態を示していると考えられる。

4 議論

ホウ素粉末入射により BH 分子の発光線がダイバータ周辺で増加したことは、IPD により入射したホウ素粉末がプラズマ内で電離しダイバータまで輸送され、ダイバータ板周辺に堆積したことを示す。LHD の磁場配位に対する不純物輸送計算研究では、IPD で入射したホウ素元素は内側の閉ダイバータにおいて高いフラックスとなる結果 [4] が得られており、本実験研究の結果とも整合する。粉末として入射したホウ素量は $1.6 \times 10^{21} \text{ s}^{-1}$ であり、BH や B^+ の気相へのフラックスは $10^{18-20} \text{ s}^{-1}$ であることから、入射したホウ素のうち 10% 程度はダイバータ周辺の対向壁に堆積したと考えられる。また H^0 による発光線強度、極端紫外線で得られた多価炭素の発光線強度が、ボロン入射中に大きく減少していたことから、ダイバータ周辺に堆積したホウ素により壁コンディショニングの効果が得られていると考えられる。

References

- [1] Nagy, A et al., 2018 Review of Scientific Instruments 89 10K121
- [2] Kawate, T. et al., accepted by Nuclear Fusion
- [3] Huber, K. P. and Herzberg G. 1979 Molecular spectra and molecular structure. Vol.4: Constants of Diatomic Molecules (Springer, Boston, MA)
- [4] Shoji, M. et al. 2020 Contributions to Plasma Physics 60 e201900101