

3. プラズマ・壁相互作用に関する研究課題 Issues for Plasma Wall Interaction

大野哲靖
Noriyasu OHNO

名古屋大学工学研究科
Graduate Sch. of Eng., Nagoya University

1. LHDにおけるプラズマ・壁相互作用の特徴

LHDの第一壁とダイバータタイルはそれぞれステンレス鋼、等方性黒鉛で構成されており、真空容器内の炭素材料表面積は全対向材料の約10%程度である。これまでのプラズマ実験は主に軽水素(H)とヘリウム(He)放電によるものであった。また、He放電では、高周波加熱により、 $n_e \sim 1.2 \times 10^{19} \text{ m}^{-3}$ 、 $T_{i,e} \sim 2 \text{ keV}$ のプラズマを最長で48分間にわたって維持する実験も行われた。このような対向材料と放電種の組み合わせによるプラズマ・壁相互作用(PWI)の結果として形成される壁表面の特徴は、一つ目に、第一壁、ダイバータタイル双方の表面大部分に炭素が主で鉄を僅かに含む図1-(a)、-(b)に示すようなMixed-material堆積層が形成されること。二つ目に、ステンレス鋼製第一壁表面にはHe照射に伴うバブルや転位ループなどの高密度照射欠陥組織が形成されること、が挙げられる。これらの特徴的な壁面のPWIによって引き起こされるプラズマ制御への問題は、「①壁排気率の動的変化」と「②不純物混入によるプラズマ放電の停止」に大別できる。①では、図1に示すMixed-material堆積層がプラズマ粒子を捕捉し、壁表面が粒子排気と放出の元となること

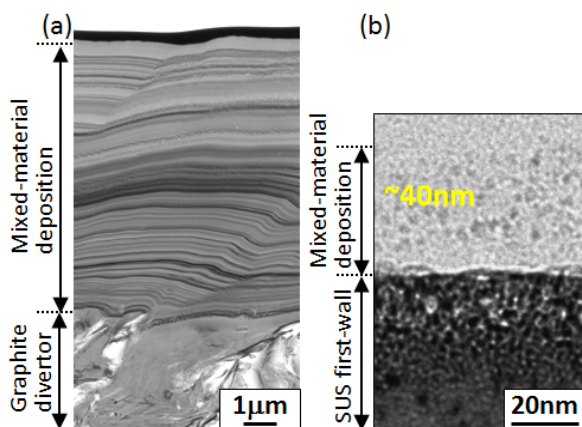


図 1. (a)ダイバータタイルおよび(b)第一壁上に形成された Mixed-material 堆積層の断面 TEM 像。第一壁基盤内部には He バブルが同時に形成されている。

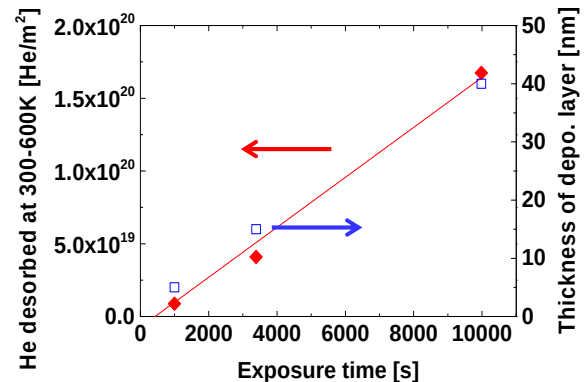


図 2. 照射時間増加に伴う 300-600K における He 放出量と Mixed-material 堆積層厚さ

で発生する。図2は、Mixed-material堆積層が増加するにつれて壁表面がHeをより多く捕捉していることを示す昇温脱離ガス分析実験(TDS)のデータである。堆積層はFeが主の層と炭素が主の層が地層のように折り重なり合う構造であるため、ヘリウムによる高密度照射欠陥組織は基板だけでなく堆積層中のFeが主の層にも形成されている。このような複雑な構造がHeの捕捉サイトとして機能していると考えられる。②においても同様に Mixed-material堆積層の構造が複雑であるが故に層構造の一部が微小破断することで、堆積層がフレーク状に剥離を引き起こし、不純物としてプラズマ中に混入することで発生する。

2. PWI研究で利用可能な機器

LHDプラズマへの材料照射実験では、プラズマ実験期間中継続して壁位置に設置される長期設置試料と、目的のプラズマだけに試料を照射するための可動式のマテリアルプローブシステム2機が準備される。後者の機器は特に特徴的なものであり、この機器を用いることで、例えば重水素プラズマだけに照射させた試料を取り出すことも可能となる。照射後の試料分析はLHD本体室の周辺および地下に設置された分析エリアにおいて実施される。主要な分析

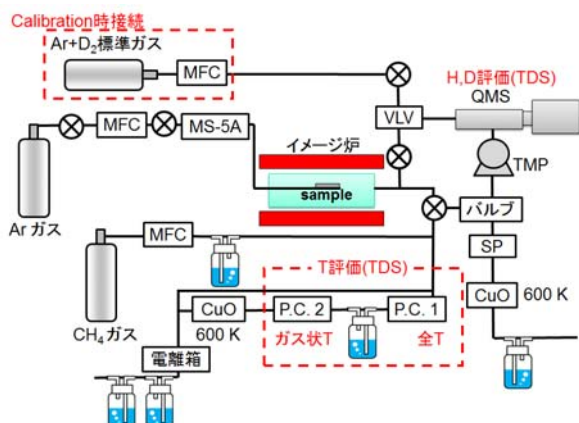


図 3. 静岡大学・大矢研究室との共同研究で NIFS に設置された HI-TDS 装置の模式図

装置は、集束イオンビーム/電子ビーム加工観察装置(FIB-SEM)、透過型電子顕微鏡(TEM)、グロー放電発光分析装置(GD-OES)、昇温脱離ガス分析装置(TDS)である。さらに、静岡大学との共同研究でNIFSに設置された図3に示す水素同位体TDSシステム(HI-TDS)の準備も整っている。HI-TDS装置は材料中に捕捉された3種類の水素同位体(H, D, T)を全て同時定量化できる世界で初めての装置である。NIFS-PWI研究最大の特徴は、微細構造解析と捕捉粒子の定量評価を分析エリアにおいて同時に評価することができ、プラズマ粒子の壁表面への捕捉機構を原子レベルの構造変質と併せて根本的に理解できる点にある。

3. 重水素実験で注目すべきPWI課題

重水素実験では、第1節で紹介した特徴的な壁表面が、重水素放電下のPWIにどのような影響を及ぼすのかについて、3つのPWI課題に注目する。一つ目に、「3種類の水素同位体(H, D, T)の壁表面への捕捉形態および捕捉の面分布の導出」が挙げられる。これには、HI-TDSを用いて照射後の試料中のH, D, Tを同時定量化し、H, D, Tの面分布を定量的に導出する。

二つ目は、「壁表面の水素同位体置換についての知見を得る」ことである。本課題は一つ目の課題と密接に関連するが、核融合炉におけるトリチウムインベントリ問題に関して、TをDに置き換えて考えると、HによりDがどの程度除去されるのか、除去されたDはどこに再び蓄積され得るのか、についての指針を得ることができる。例えば図4は、DあるいはHプラズマを

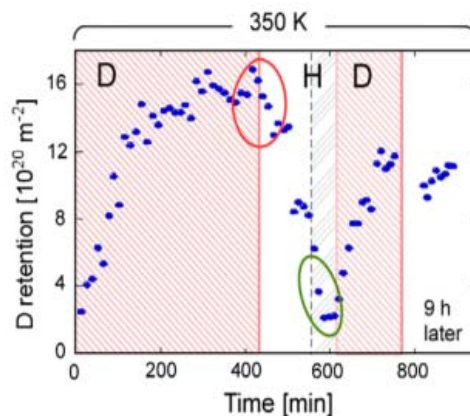


図 4. D プラズマをタングステンに照射中(赤色ハッチ)、照射休止中(白色)、H プラズマを照射中(黒色ハッチ)において、材料表面に滞留している D 粒子面密度の時間変化[1].

350K でタングステンに $\sim 2.0 \times 10^{21} \text{D/m}^2 \text{s}$, $\sim 3.4 \times 10^{21} \text{H/m}^2 \text{s}$ 照射中、あるいは休止中において、材料表面に滞留しているD粒子面密度の核反応分析によるその場計測結果である[1]。Dプラズマ照射を休止すると、動的リテンション分のDが放出され、滞留量が減少する。その後H照射を行うと同位体置換反応によりその滞留量の減少は指数関数的に転じている。例えばLHDのステンレス鋼製第一壁は、長時間放電時には70℃程度まで温度上昇しているため、金属壁部分は図4と類似した置換反応を示す可能性があるが、Mixed-material堆積層で覆われた対向壁表面においてはどのような置換反応が進むのか、その分布は対向壁全体でどのようなになるのかの知見を得る。

三つ目の課題は、Dプラズマによる長時間放電において、第1節で述べた「①壁排気率の動的変化」と「②不純物混入によるプラズマ放電の停止」がHeプラズマの長時間放電と比較してどのように異なってくるのかについての知見を得ることである。例えば、閉ダイバータには水素同位体を排気できる十分な能力があるため、①の影響を抑制できる可能性がある。一方で、水素の化学スパッタリング率は0.4程度となるため、He放電よりも多量の炭素材料の損耗が予測され、②の影響が助長される可能性がある、などの予見が立つ。

これら3つのPWI課題について、大学との共同研究を含めて意見集約を行い、実験を遂行していく予定である。

[1] T. Watanabe et al., J. Nucl. Mater. **463** (2015) 1049.