

大矢恭久、孫飛
Yasuhisa OYA, Fei SUN静岡大学
Shizuoka Univ.

緒言

DT核融合炉において、燃料であるトリチウム(T)挙動の理解は放射線安全や燃料制御の観点から重要な課題である。DT核融合プラズマ中には、燃料となる水素同位体とともに、ヘリウム(He)が含まれるため、Heが水素同位体の滞留に及ぼす影響を評価することが必要である。

プラズマ対向壁を考えると、DT核融合反応で生成したHeが水素同位体と同時にタンゲステン表面に照射される。この時には表面に高密度のHeバブルが形成し、水素同位体滞留量が大きく変化することが報告されている。一方、DT核融合反応により生成した中性子はWバルク中で (n, α) 反応によりHeを生成するとともに、バルク内にTが滞留するとT自身の β 崩壊により ^3He となり、W中に存在することになる。核融合炉ではバルク中のHe濃度は10 appm He/dpa程度になると想定されている。^[1]

そのため、表面とバルクに存在するHeが水素同位体の挙動（滞留・拡散）に及ぼす影響を理解することが必要不可欠となる。これまでにHIDT (Hydrogen Isotope Trapping and Detrapping) シミュレーションコード^[2]を開発し、プラズマ対向壁W中での水素同位体挙動を明らかにしてきた。本コードにHe効果を付加し、実際の核融合炉環境で予測可能なシミュレーションの高度化を行った。

実験

Wバルクへの照射損傷とHeの影響を調べるために京都大学エネルギー理工学研究所のDuET装置を用いて $\text{Fe}^{3+}\text{-He}^+$ 同時照射を行った。He効果を十分に理解するために、100 appm He/dpaとし、照射損傷レベルは0.3~1.0 dpaまで行った。照射深さはともにピークが1~1.5 μm となるようにした。この試料に静岡大学で1 keVの D_2^+ を $1.0 \times 10^{22} \text{ D}^+ \text{ m}^{-2}$ まで照射し、TDSにより重

水素滞留量および放出温度を明らかにした。また、富山大学でTガス曝露及びイメージングプレートによるトリチウム分布評価とBIXSによる深さ分布評価も行った。実験結果に基づき、HIDTコードを用いて解析した。

結果と考察

図1に高エネルギー He^+ 照射Wおよび非照射Wにおける D_2 TDSスペクトルを示す。非照射Wでは主要な脱離ピークが400 K付近の低温側にあるのに対して、 $\text{Fe}^{3+}\text{-He}^+$ 同時照射Wでは高温側（550 Kおよび650 K）に見られ、重水素が照射欠陥に捕捉されていることがわかる。

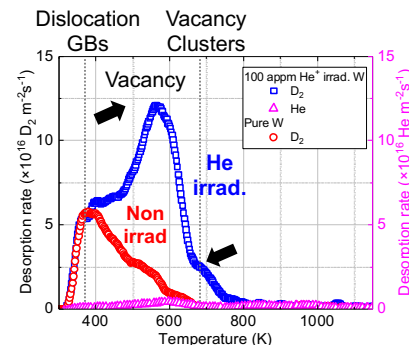


図1 高エネルギー He^+ 照射Wにおける D_2 とHeのTDSスペクトル

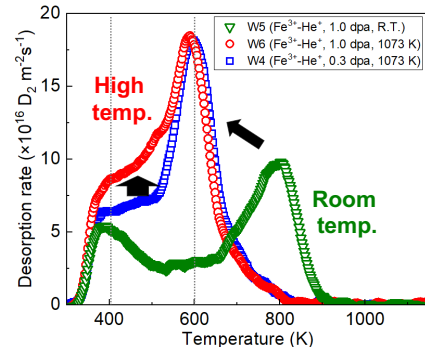


図2 $\text{Fe}^{3+}\text{-He}^+$ 同時照射Wにおける D_2 TDSスペクトル

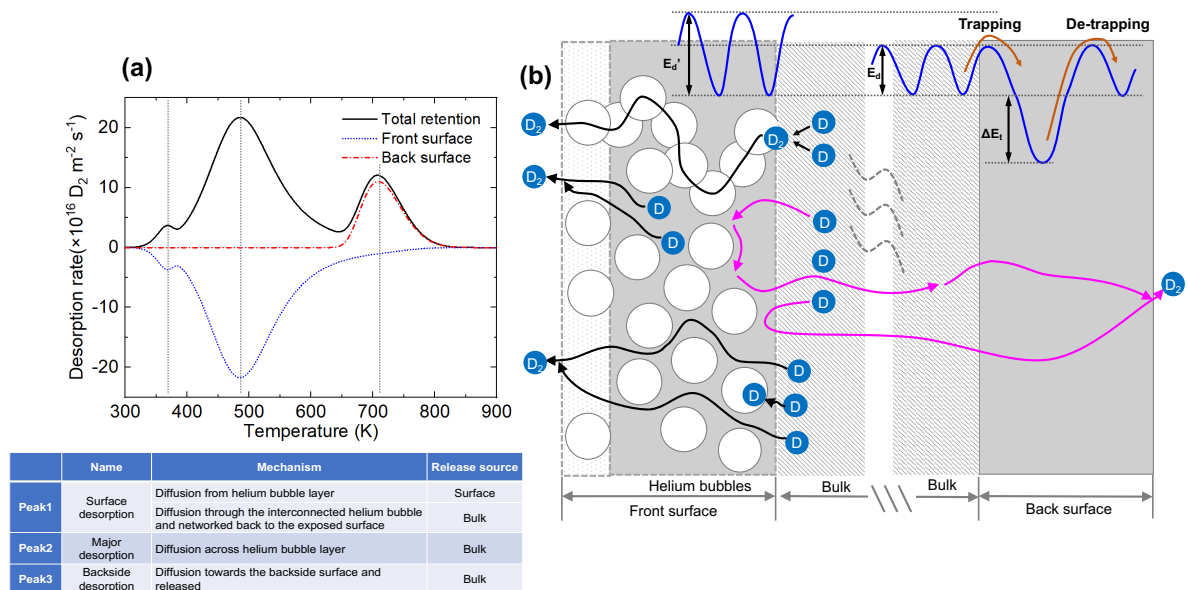


図3 Heが表面に滞留した際の重水素脱離挙動シミュレーション結果の例

図2に室温または1073 Kで $\text{Fe}^{3+}\text{-He}^+$ 同時照射した際の D_2 TDSスペクトルを示す。同時照射により照射欠陥が導入されることにより室温照射では800 Kに大きな脱離ピークが見られる。高温照射では照射欠陥が回復することにより D_2 の脱離温度は600 K付近にシフトしていることがわかる。^[3]

これらの結果をHIDTシミュレーション^[3]に反映させるために、拡散バリエー係数と捕捉エネルギー補正係数を導入し、He存在下での水素挙動を実験結果と検証したところ、よく一致することがわかった。

一方、表面He効果として、表面にHeバブル等を形成することにより有効拡散経路が減少し、水素溶解度が減少することになるため、この効果をHIDTシミュレーションに取り込んだ。図3にHeが表面に滞留した際のTDSスペクトルのHIDTシミュレーション結果の例^[4]を示す。トラップ密度を0.0001 site/W、トラップエネルギーを0.64 eVとし、拡散の活性化エネルギーを0.39 eVとした。Heバブル層は30 nmと仮定した。表面近傍に高密度のHeバブルが存在する（拡散バリエー係数が高い場合）ことによりHeバブル層より内部に滞留した D_2 は裏面まで拡散し放出することが示唆された。

そのため、表面He効果ではHeバブルが形成し、拡散が抑制され、溶解度、反射率や拡散係数に影響を及ぼすため、全水素同位体滞留量は減少することが示唆される。一方、高エネルギーHe照射によるバルク効果としては種々の捕捉サ

イトが形成されることにより水素同位体滞留量が増加することが示唆される。高温照射ではHe-V複合体が形成されることにより水素同位体のバルクへの拡散が抑制され、水素同位体滞留量が減少すると考えられる。また、高温では照射欠陥が回復するため、さらに水素同位体滞留量が減少することになる。そのため、照射温度によってHeと照射欠陥が水素同位体挙動に及ぼす影響が変化すると考えられる。

参考文献

- [1] M.E. Sawan, Structural Materials Damage in Fusion and Fission Systems, UWFD-1394, 2011.
- [2] Y. Oya, et al., J. Nucl. Mater. 461 (2015) 336.
- [3] F. Sun, et al., J. Nucl. Mater. 537 (2020) 152227.
- [4] F. Sun, et al., J. Nucl. Mater. 533 (2020) 152122.