

被覆タンゲステンへの 重水素蓄積特性

原子力研究開発機構

福本 正勝

仲野 友英

伊丹 潔

大阪大学

和田 隆明

上田 良夫

九州大学

田辺 哲朗

- 核融合炉内へのトリチウム蓄積が問題
 - 安全性
 - トリチウム経済
 - ⇒ 核融合炉内トリチウム蓄積量の低減
- タングステンが核融合炉壁の候補材料
 - 低トリチウム蓄積
 - 低損耗
 - 高融点

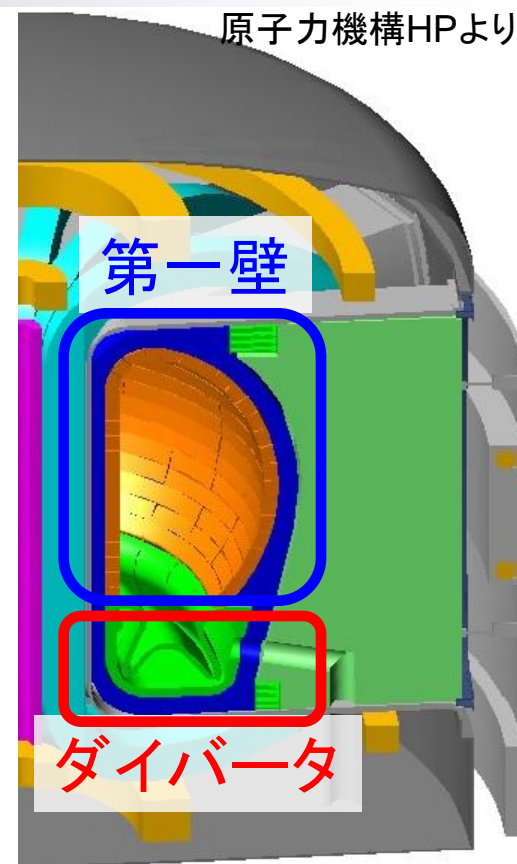
研究背景と目的

研究背景 (続き)

- DEMO炉におけるタングステンの使用
 - ダイバータ: バルク材
 - ⇒ 水素蓄積機構は理解されつつある
 - 第一壁ブランケット: 被覆材
 - ⇒ 水素蓄積機構は未解明

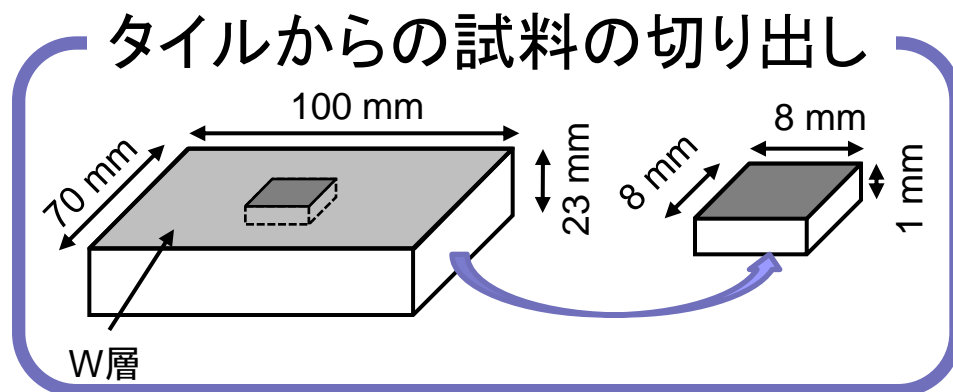
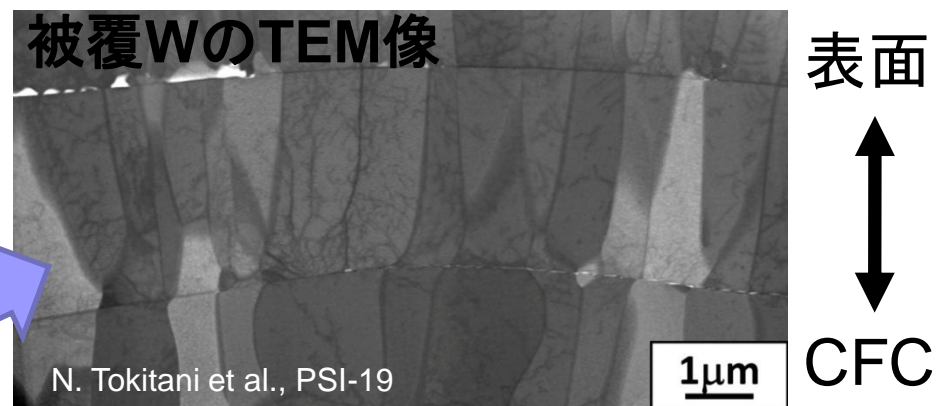
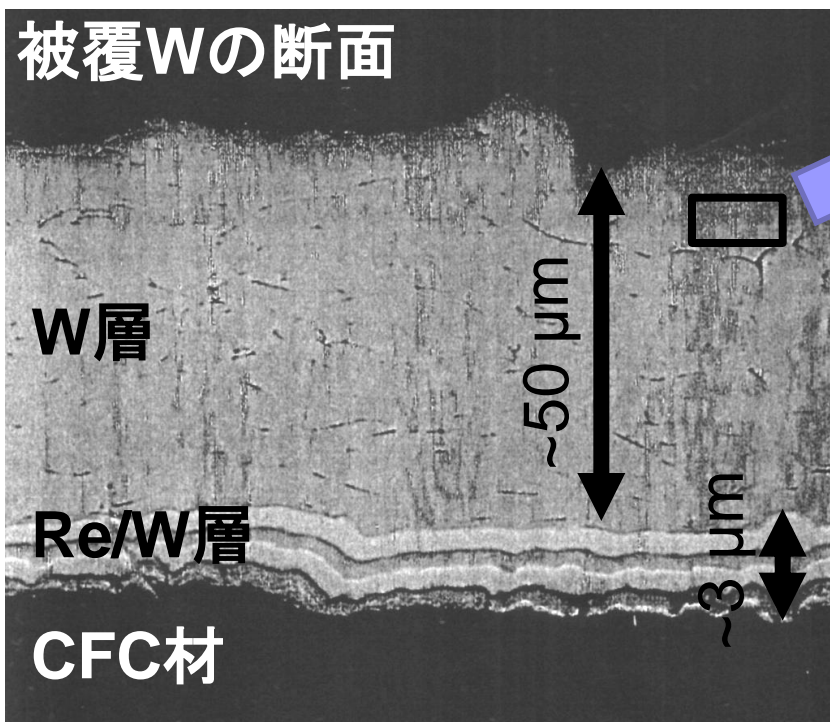
研究目的

- 被覆タングステンへの水素蓄積機構の解明
 - ⇒ 炉内トリチウム蓄積量の予測に貢献



原型炉(SlimCS)のポロイダル断面

- 炭素繊維複合材料 (CFC) 表面にタングステンを被覆
 - 手法: 真空プラズマスプレー法 (Plansee)
 - 熱処理: 1573 K, 5 h



→ 切り出し後、1273 Kで脱ガス

実験方法

1. 重水素の照射実験@阪大

イオンエネルギー: 1 keV (D^+ , D_2^+ , D_3^+)

照射量: $1.3 \times 10^{23} \sim 3.7 \times 10^{24}$ D/m²

試料温度: 500, 700 K

2. 重水素の深さ分布の測定@原子力機構

手法: 二次イオン質量分析法 (SIMS)

スパッタイオン: 5 keV Cs^+

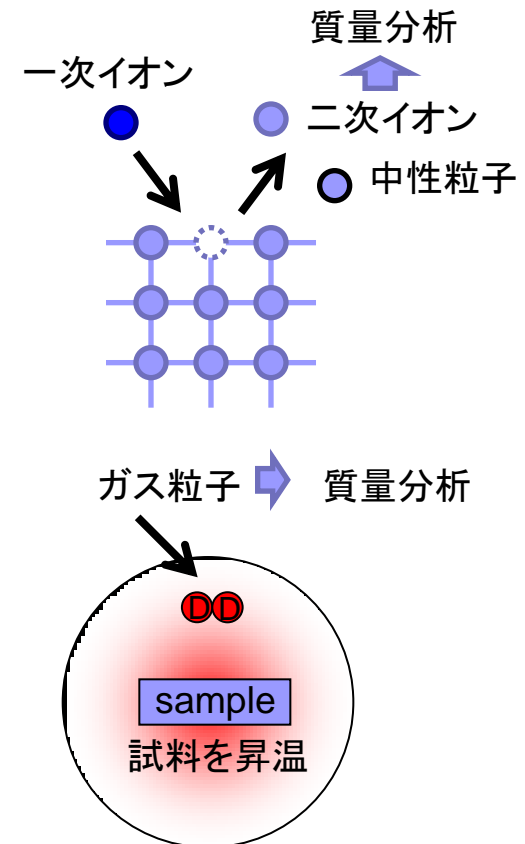
測定イオン: $^2H^-$, $^{184}W^-$

3. 重水素の蓄積量の測定@原子力機構

手法: 昇温脱離測定法 (TDS)

昇温範囲: 300 K ~ 1373 K

昇温速度: ~ 0.42 K/s



重水素拡散・捕獲および放出のモデル

- 材料中に溶解した重水素原子の密度変化

$$\frac{\partial C_D}{\partial t} = \underbrace{-\nabla \cdot J_D}_{\text{重水素の拡散}} - \underbrace{\sum_k \frac{\partial C_D^{t_k}}{\partial t}}_{\text{捕獲サイトでの重水素の密度変化}}$$

C_D : 材料中の重水素原子の密度

J_D : 重水素原子の拡散フラックス

$C_D^{t_k}$: 捕獲サイトでの重水素原子の密度

- 捕獲サイトでの重水素原子の密度変化

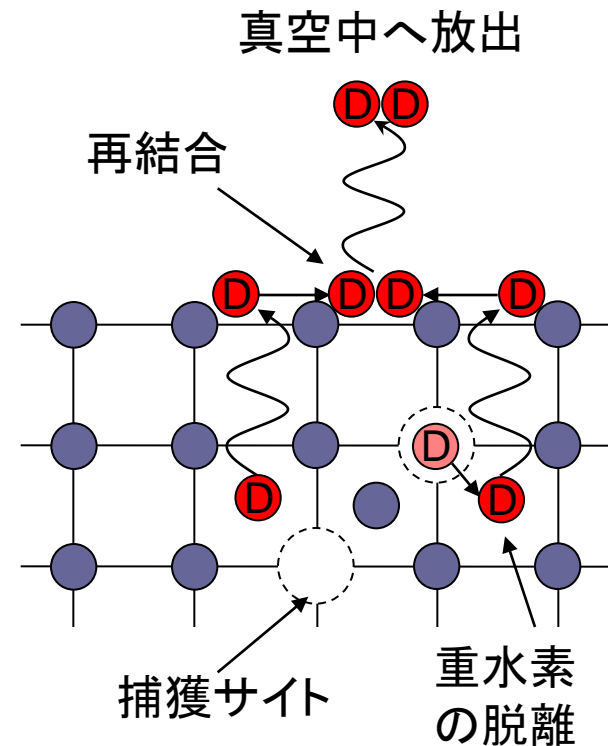
$$\frac{\partial C_D^{t_k}}{\partial t} = \underbrace{\frac{\alpha_{t_D} C_{t_k}^e}{N} C_D}_{\text{捕獲された重水素}} - \underbrace{\alpha_{r_k} C_D^{t_k}}_{\text{脱離した重水素}}$$

α_{t_D} : 重水素原子の捕獲割合

$C_{t_k}^e$: 空いている捕獲サイトの密度

N : 材料原子密度

α_{r_k} : 重水素原子の脱離割合



- 真空中への重水素の放出フラックス

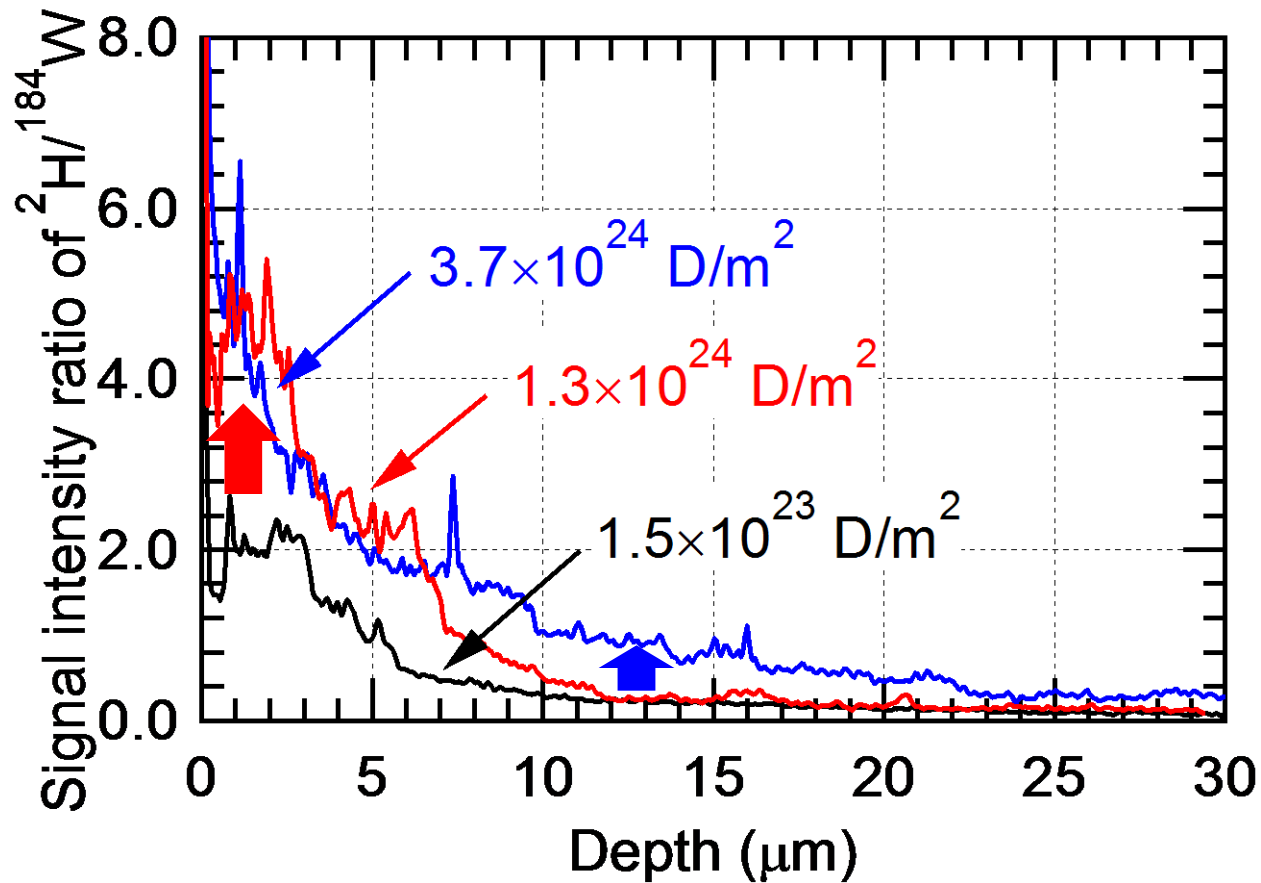
$$J_r = 2\sigma K_r C_D^2$$

σ : 表面粗さ

K_r : 表面での重水素原子の再結合定数

C_D^2 : 表面での重水素原子の密度

重水素の深さ分布 (500 Kの場合)



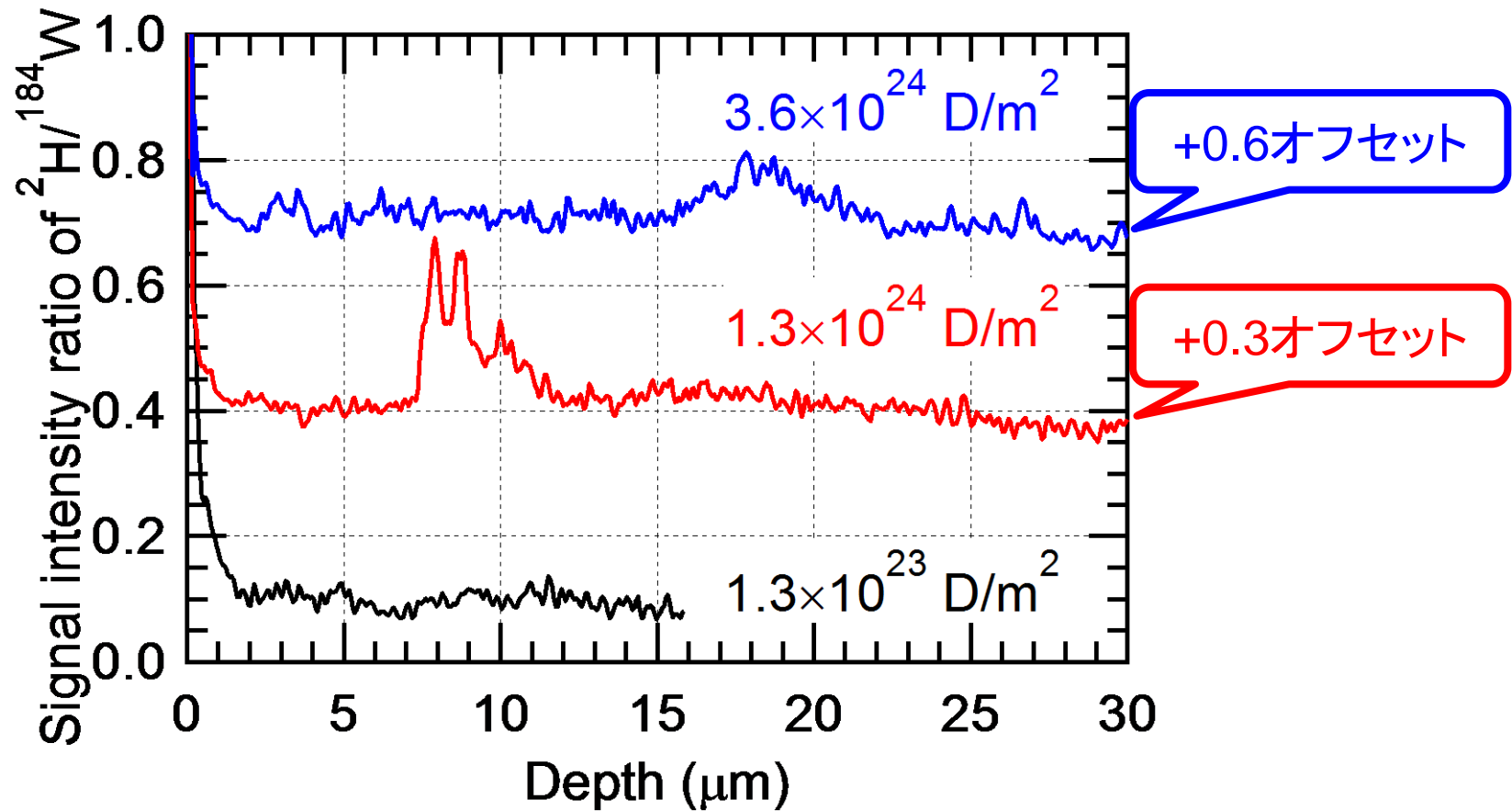
■ $1.3 \times 10^{24} \text{ D/m}^2$ に増加

⇒ 表面付近の蓄積量が増加

■ $3.7 \times 10^{24} \text{ D/m}^2$ に増加

⇒ 深い領域での蓄積量が増加

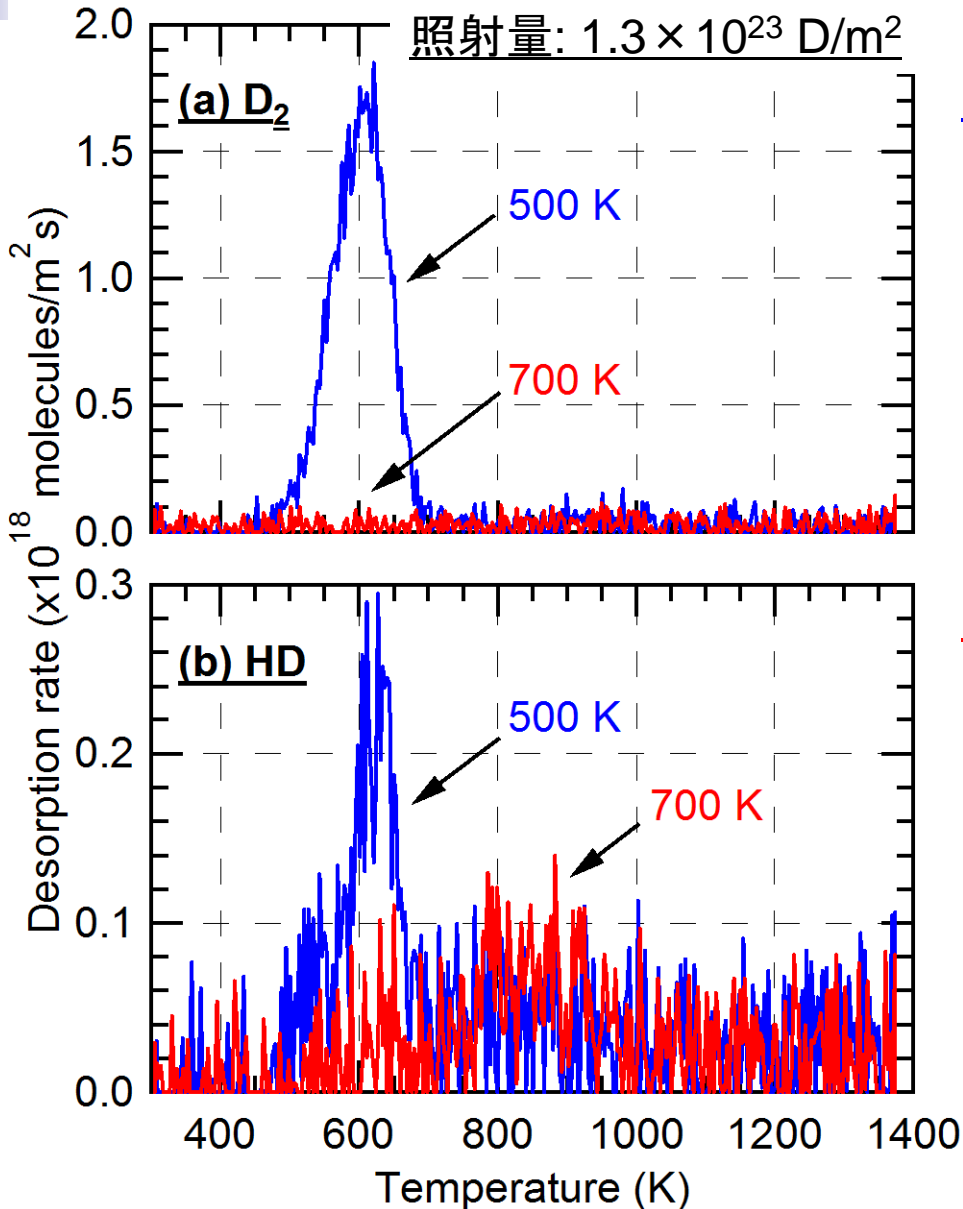
重水素の深さ分布 (700 Kの場合)



- 照射量を増加させても深さ分布は一定

⇒ $\sim 1.3 \times 10^{23} \text{ D/m}^2$ で重水素の蓄積量は飽和

重水素の放出スペクトル



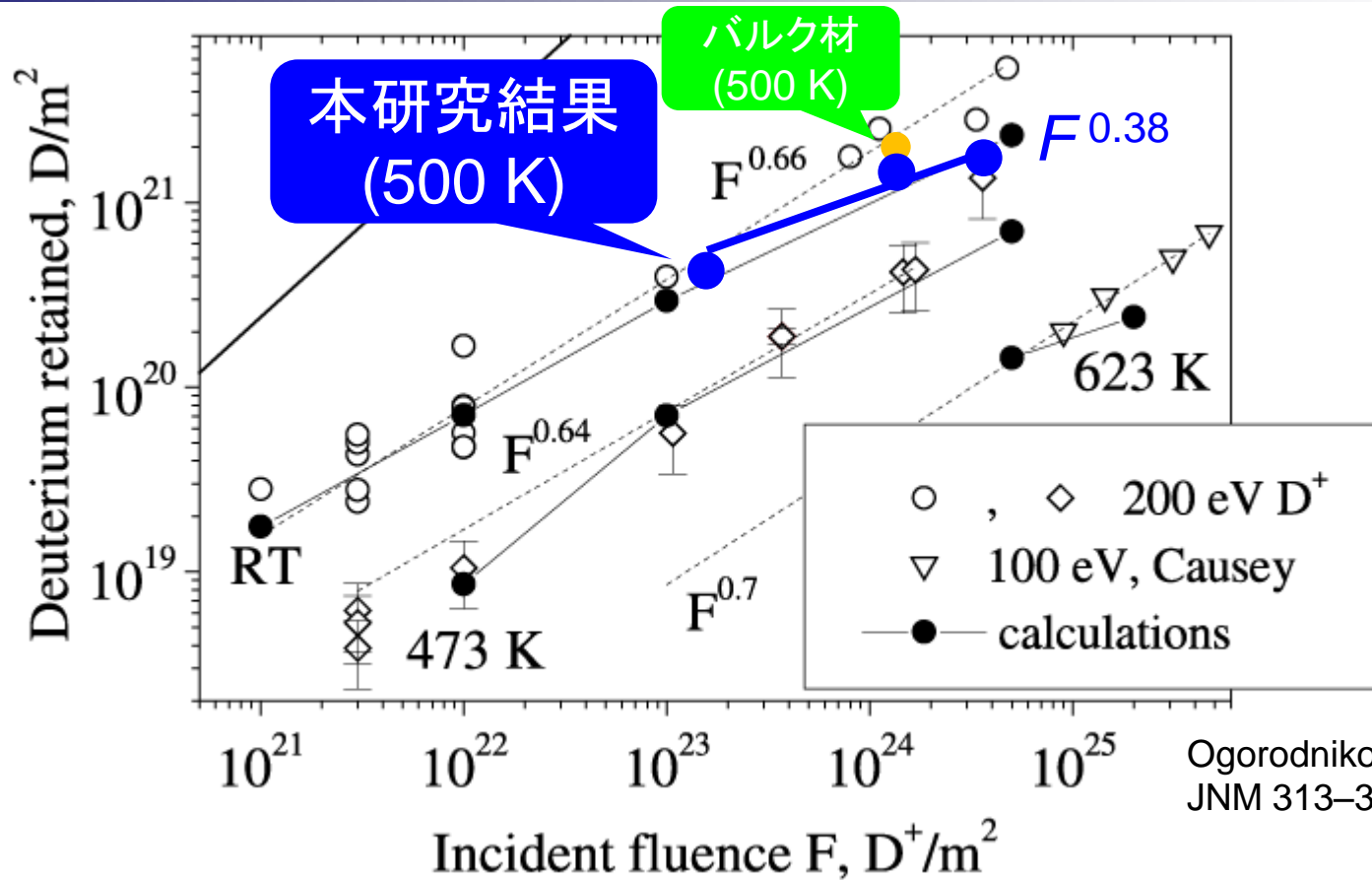
500 K

- ~610 Kに単一のピーク
- ⇒ 一種類の捕獲エネルギーを示唆

700 K

- 明確なピークなし
- ⇒ 被覆タングステン中には重水素は蓄積しない

重水素蓄積量の照射量依存性

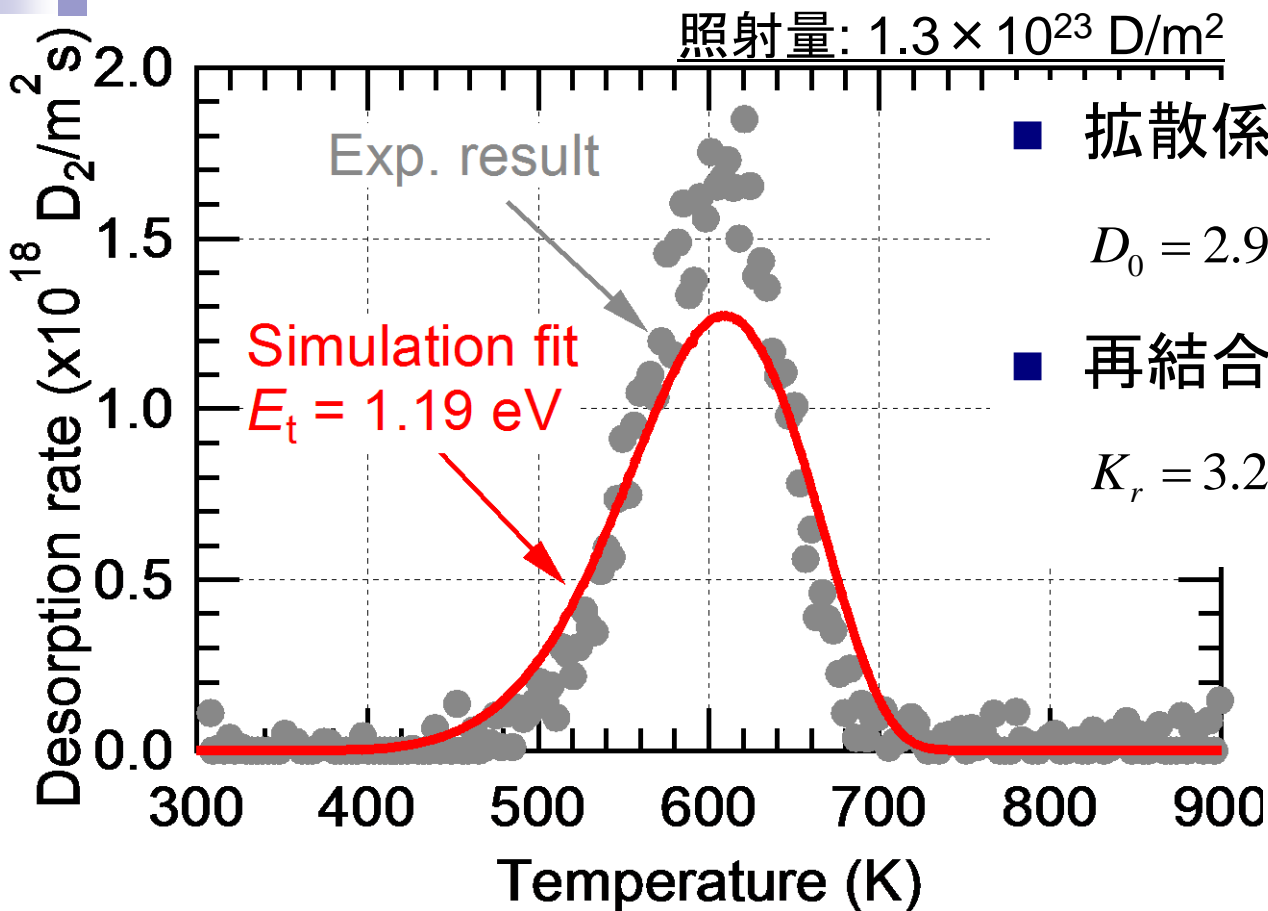


■ バルク材に比べて蓄積速度が遅い

⇒ トリチウム蓄積の観点からは有利な点

■ 同条件でバルク材との比較が必要

TMAP7による重水素の放出シミュレーション 11



■ 拡散係数

$$D_0 = 2.9 \times 10^{-7} \exp\left(-\frac{0.39 \text{ eV}}{kT}\right) \text{ m}^2/\text{s}$$

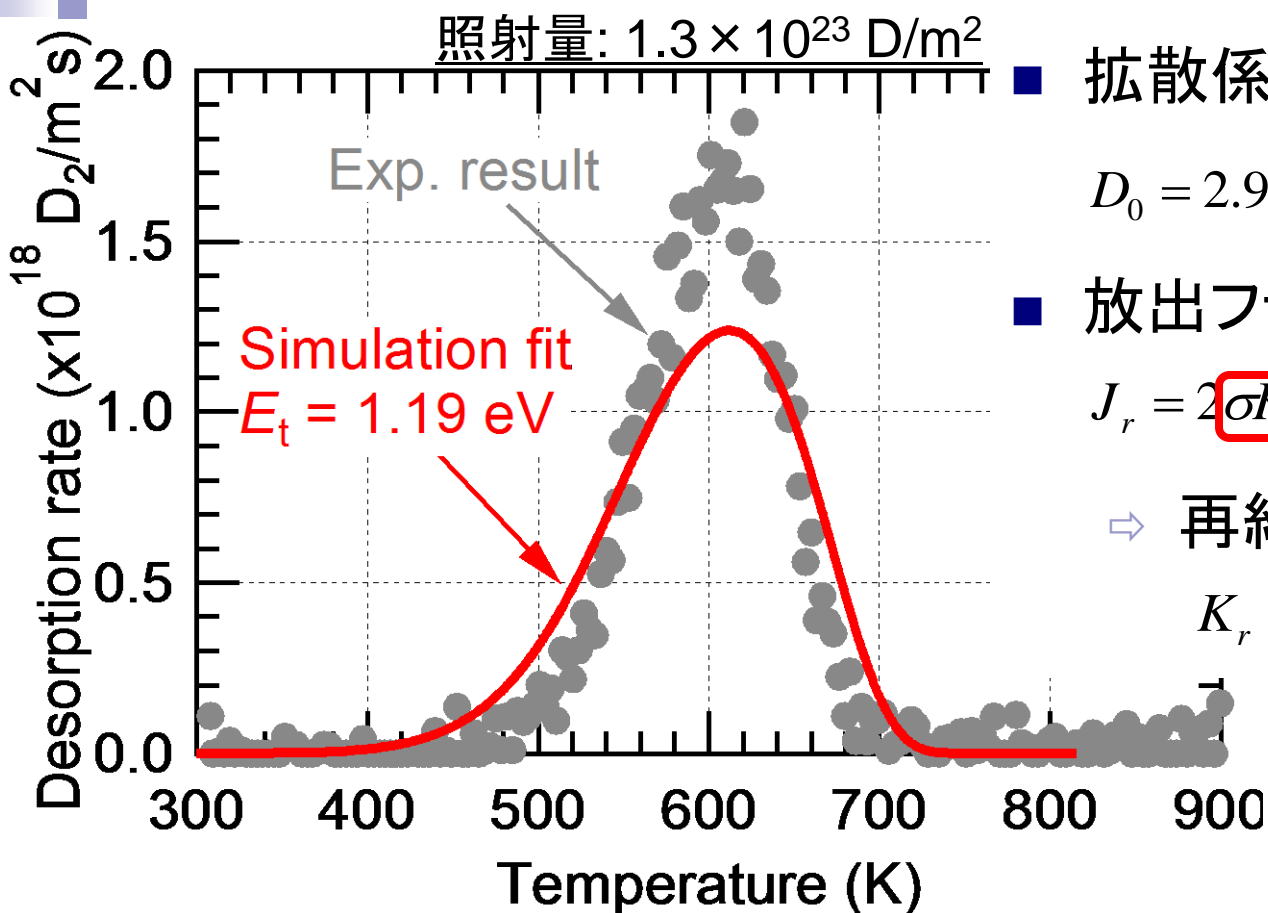
■ 再結合定数

$$K_r = 3.2 \times 10^{-15} \exp\left(-\frac{1.16 \text{ eV}}{kT}\right) \text{ m}^4/\text{s}$$

■ 1.19 eVでピーク温度が一致

□ 実験結果に比べてピークがブロード

⇒ 拡散係数又は再結合定数が異なる可能性



■ 拡散係数

$$D_0 = 2.9 \times 10^{-7} \exp\left(-\frac{0.39 \text{ eV}}{kT}\right) \text{ m}^2/\text{s}$$

■ 放出フラックス

$$J_r = 2\sigma K_r C^2 \text{ m}^2/\text{s}$$

⇒ 再結合定数

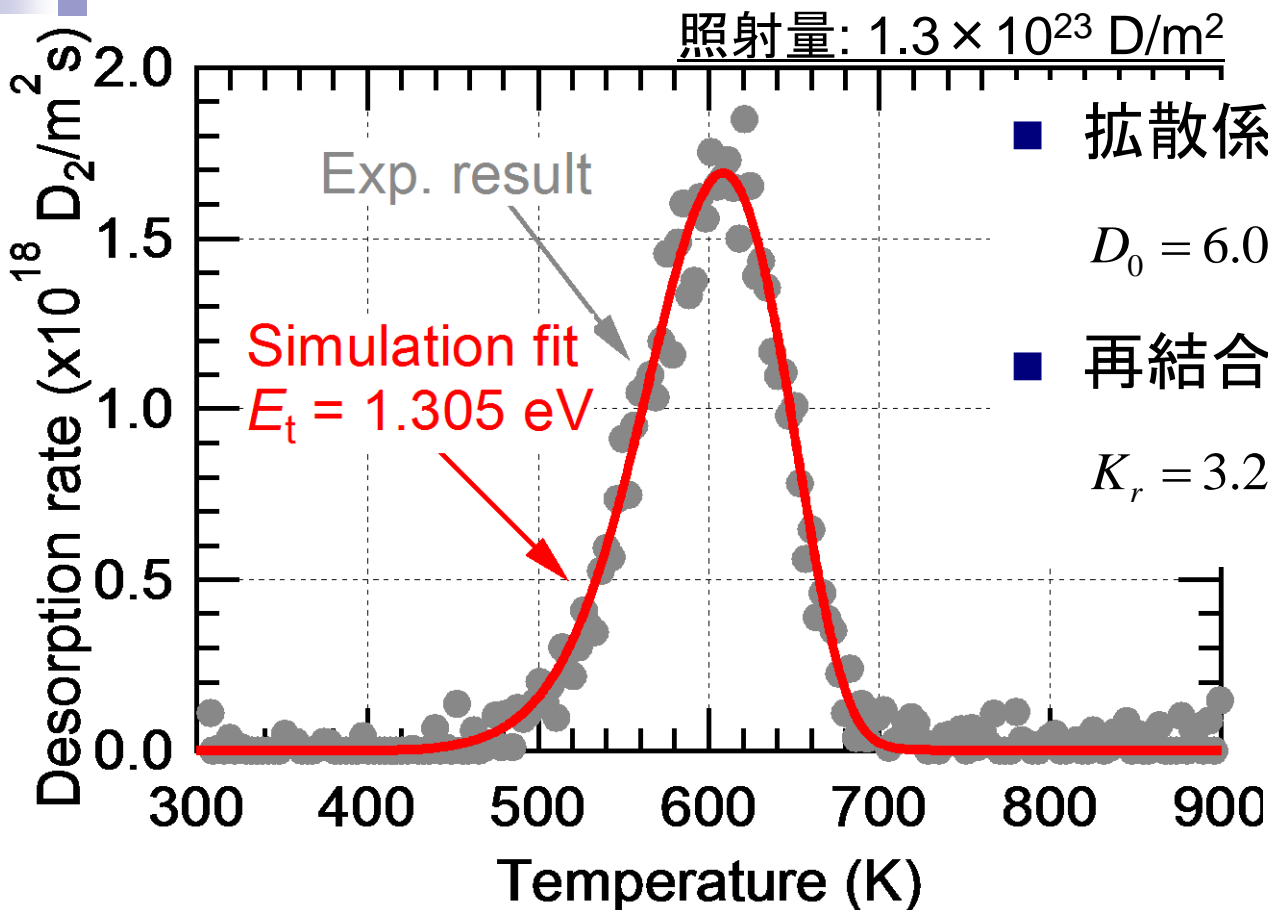
$$K_r = 1.0 \text{ m}^4/\text{s}$$

■ 1.19 eVの捕獲エネルギーでピーク温度が一致

□ よりブロードな放出ピーク

⇒ 拡散係数が異なる可能性

拡散係数を変化させたシミュレーション



■ 拡散係数

$$D_0 = 6.0 \times 10^{-7} \exp\left(-\frac{0.39 \text{ eV}}{kT}\right) \text{ m}^2/\text{s}$$

■ 再結合定数

$$K_r = 3.2 \times 10^{-15} \exp\left(-\frac{1.16 \text{ eV}}{kT}\right) \text{ m}^4/\text{s}$$

■ $\sim 1.31 \text{ eV}$ の捕獲エネルギーで実験結果と一致

□ 被覆タングステン中の重水素の捕獲エネルギーは $\sim 1.31 \text{ eV}$

⇒ 原子空孔の捕獲エネルギー $1.34 \pm 0.03 \text{ eV}$ と一致

まとめ

- 被覆タングステンに重水素イオンを照射
 - SIMS, TDSにより重水素の深さ分布と蓄積量を評価
 - 重水素の放出シミュレーションから捕獲エネルギーを評価

500 K

- 単一の捕獲エネルギーをもつ捕獲座が存在
 - 捕獲エネルギー: ~ 1.31 eV \rightarrow 原子空孔の可能性
- 蓄積速度は (Fluence)^{0.38}
 - バルク材 (Fluence)^{0.5~0.7} に比べて遅い

700 K

- 重水素は蓄積せず

DT核融合炉では700 K以上で使用する必要