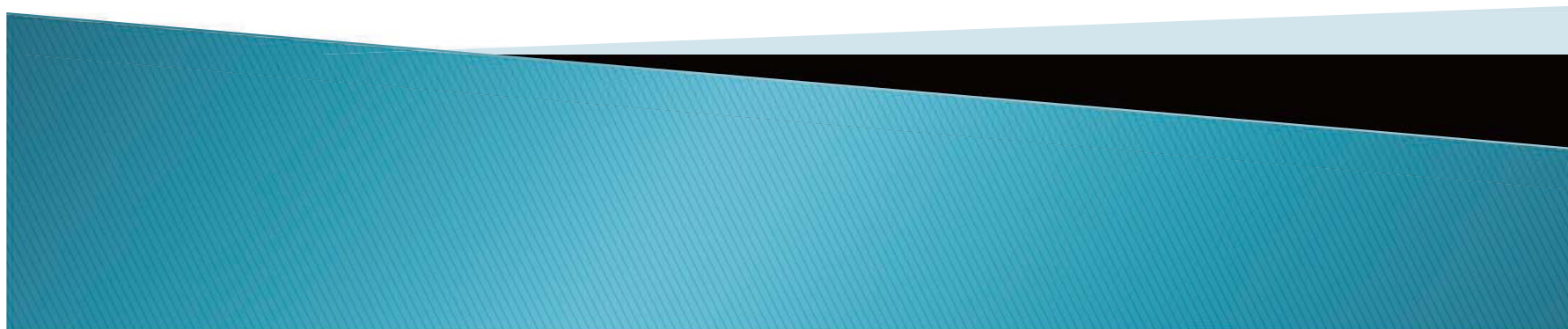


タングステンにおいて重水素, 炭素, ヘリウムイオン 同時照射が及ぼす重水素滞留挙動への影響

静岡大・理・放射研・奥野大矢研究室
修士1年 押尾純也



背景

核融合炉開発: 将来の実機を見据えた研究開発

プラズマ対向壁: ダイバータ部において**タングステン**の利用

● 炭素, ヘリウム

● プラズマ粒子(水素同位体など)



タングステン上における同時照射モデル

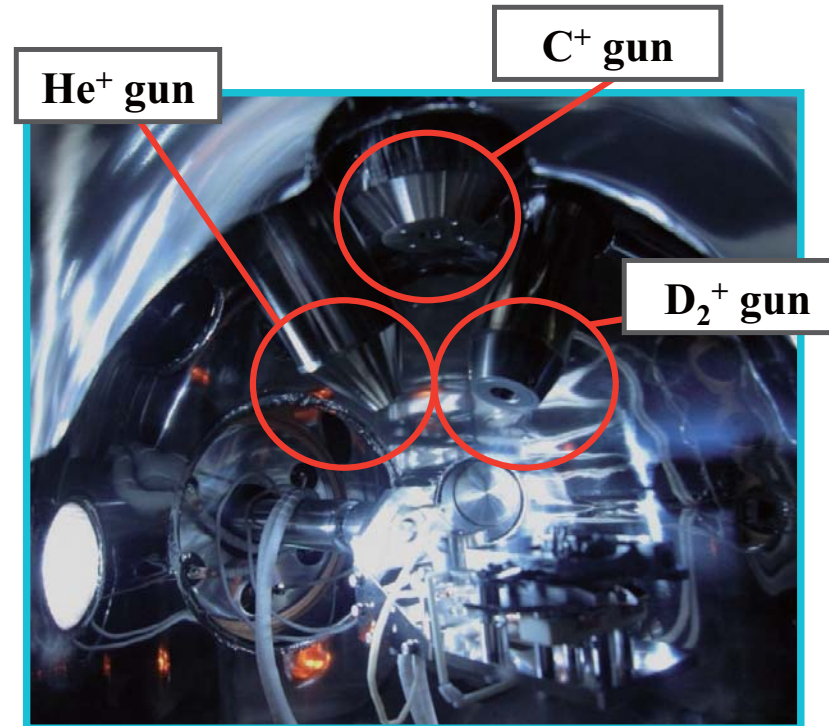
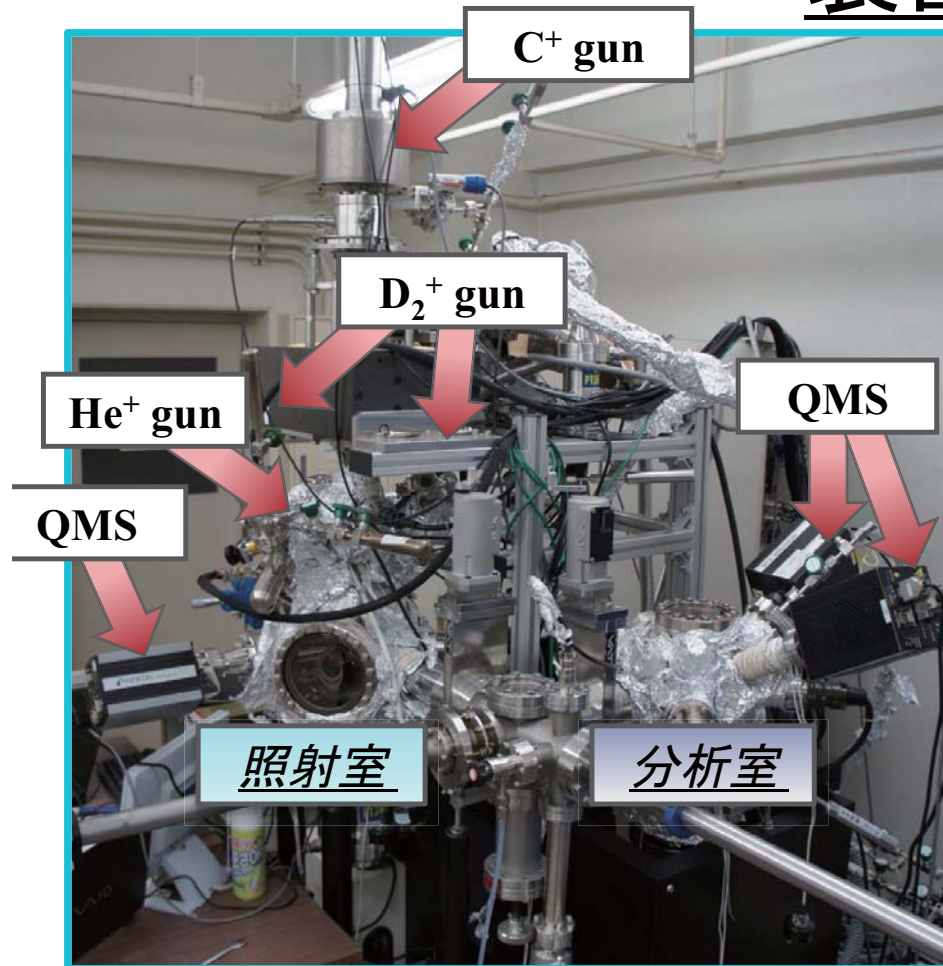
プラズマから漏洩した高エネルギー
水素同位体・炭素・ヘリウム等が
同時に照射[1]

不純物滞留と共に水素同位体が相互作用

水素同位体・炭素・ヘリウム
同時照射時における
水素同位体滞留挙動の解明

[1] T. Shimada et al., *J. Nucl. Mater.*, 329 (2004) 747.

装置



照射室内部

3種イオン同時照射システム

真空中での試料移動が可能

TDSおよびイオン照射時のスパッタ種の測定

実験手順

試料 多結晶タングステン 10 mm \varnothing × 0.5 mm
(アライドマテリアル社製 900 °Cにて歪み取り加工)

加熱温度: 1173 K
加熱時間: 10 min

加熱処理

・重水素イオン(D_2^+)
エネルギー: 3.0 keV D_2^+
フラックス: $1.0 \times 10^{18} D^+ m^{-2} s^{-1}$
フルエンス: $1.0 \times 10^{22} D^+ m^{-2}$
照射温度: R.T.

- ① D_2^+ 単独照射
- ② D_2^+ - He^+ 同時照射
- ③ D_2^+ - C^+ 同時照射
- ④ D_2^+ - C^+ - He^+ 同時照射

イオン照射

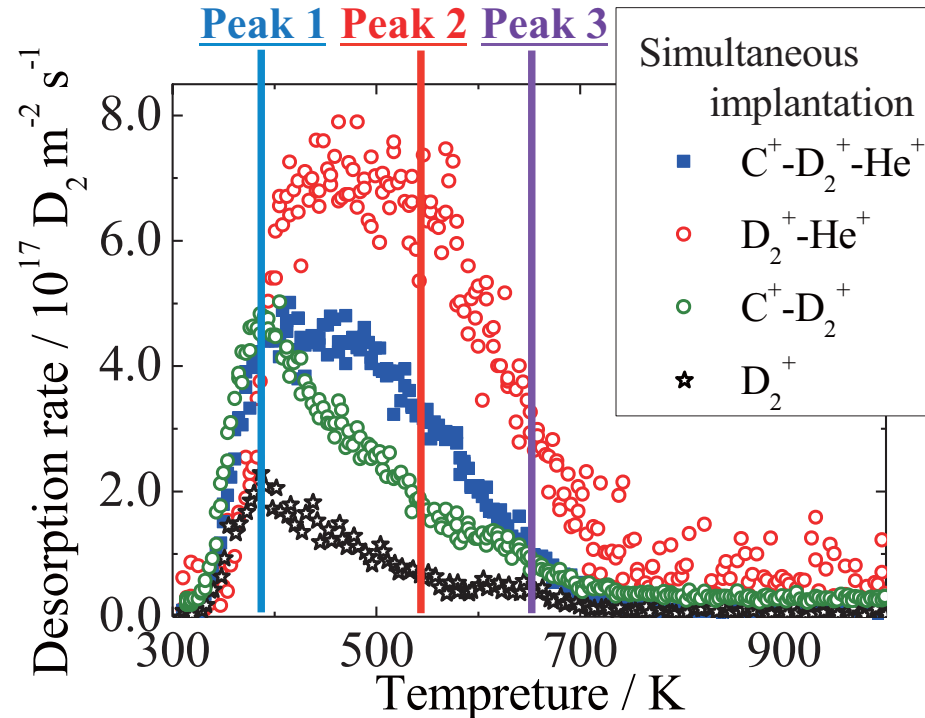
・ヘリウムイオン(He^+)
エネルギー: 3.0 keV He^+
フラックス: $0.2 \times 10^{18} He^+ m^{-2} s^{-1}$
フルエンス: $0.2 \times 10^{22} He^+ m^{-2}$
照射温度: R.T.

昇温速度: $0.5 K s^{-1}$
昇温領域: R.T.- 1173 K

TDS測定

・炭素イオン(C^+)
エネルギー: 10 keV C^+
フラックス: $0.2 \times 10^{18} C^+ m^{-2} s^{-1}$
フルエンス: $0.2 \times 10^{22} C^+ m^{-2}$
照射温度: R.T.

結果・・・イオン種比較



各イオン同時照射におけるD₂ TDSスペクトル

Peak1 (400 K) : Surface adsorptions, dislocation^[2]

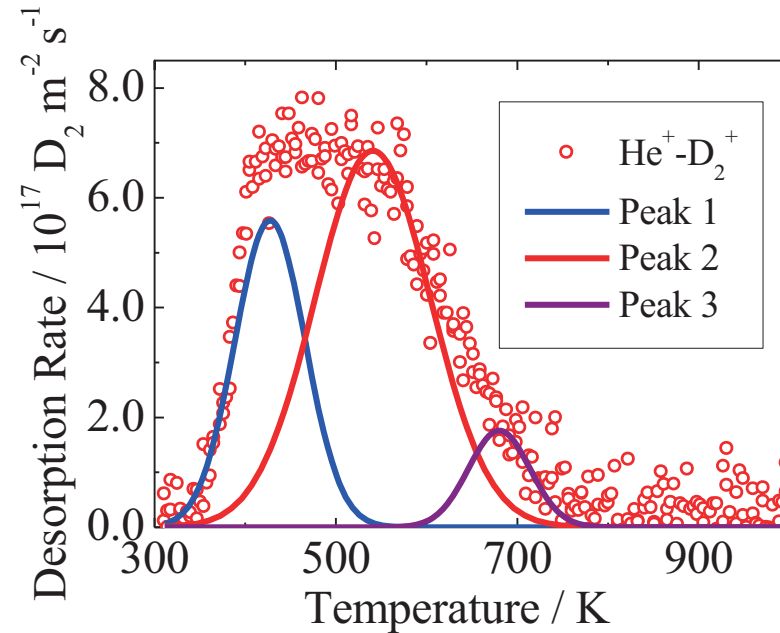
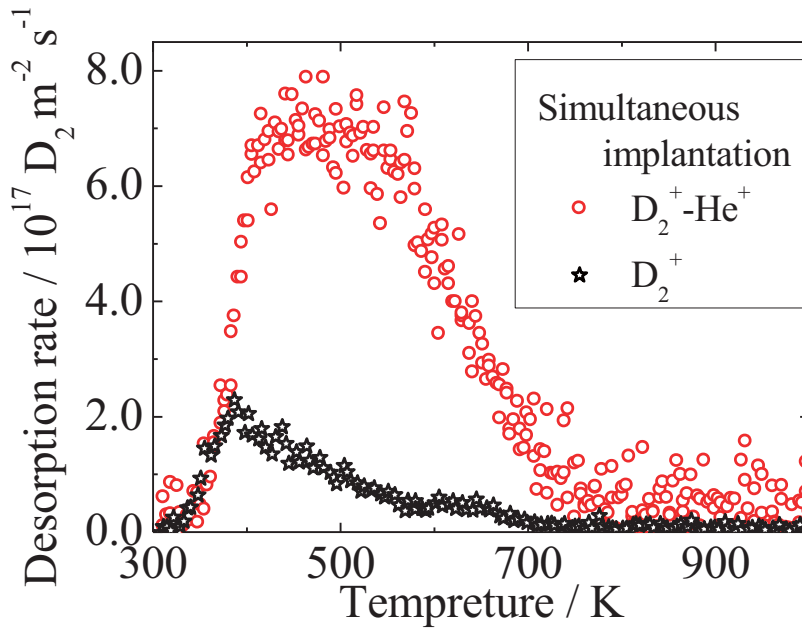
Peak2 (550 K) : Ion induced defects(dislocation loop)^[3]

Peak3 (650 K) : Ion induced defects(vacancy type)^[3]

[2] O. V. Ogorodnikova, et al., *J. Nucl. Mater.*, 313 (2003) 469-477.

[3] S. O'hira, et al., *J. Nucl. Mater.*, 258-263 (1998) 990-997.

重水素滞留挙動・・・ $He^+ - D_2^+$ 同時照射



各イオン同時照射における D_2 TDSスペクトル He-D同時イオン照射におけるピーク分離

Peak1 (400 K) : Surface adsorptions, dislocation^[2]

Peak2 (550 K) : He vacancy complexes(dislocation loop)^[4]

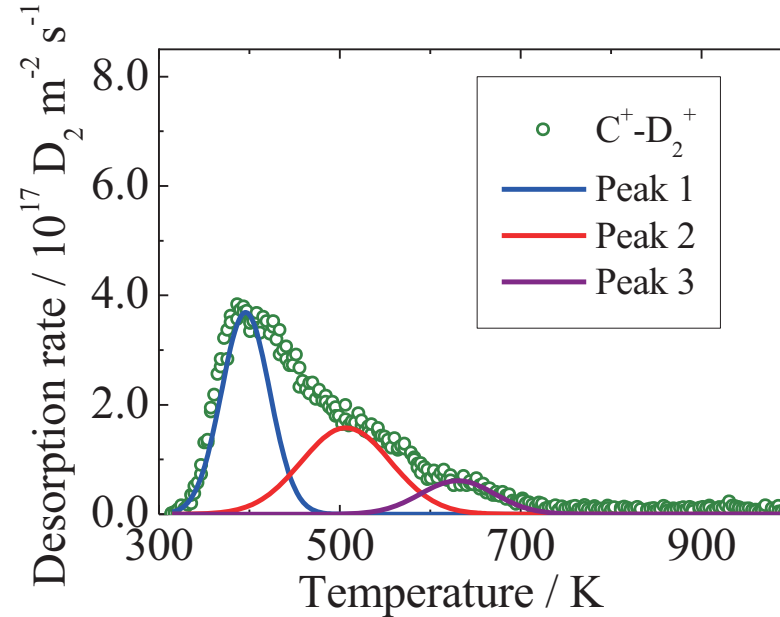
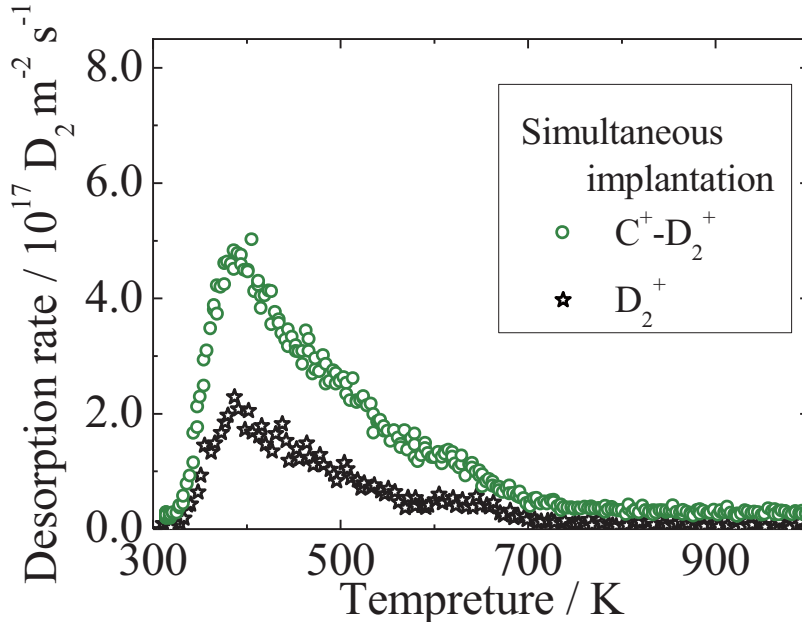
Peak3 (650 K) : Ion induced defects(vacancy type)^[3]

He⁺照射により重水素滞留量の増加

[4] H.T.Lee et al., *J. Nucl. Mater.*, 363 (2007) 898 .

He⁺照射によって照射欠陥(He bubble)の形成

重水素滞留挙動・・・ $C^+-D_2^+$ 同時照射



各イオン同時照射における D_2 TDSスペクトル C-D同時イオン照射におけるピーク分離

Peak1 (400 K) : Surface adsorptions, dislocation^[2]

Peak2 (550 K) : Ion induced defects(dislocation loop)^[3]

Peak3 (650 K) : Ion induced defects(vacancy type)^[3]

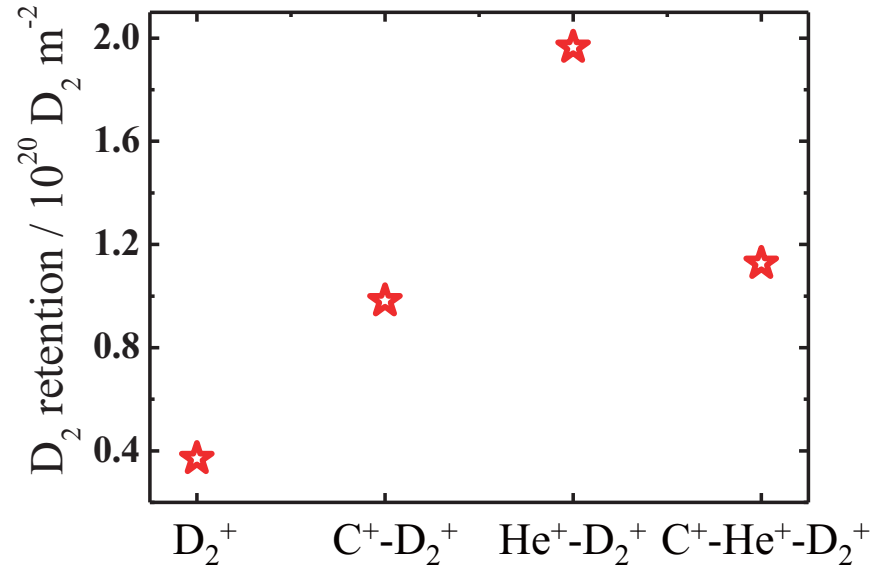
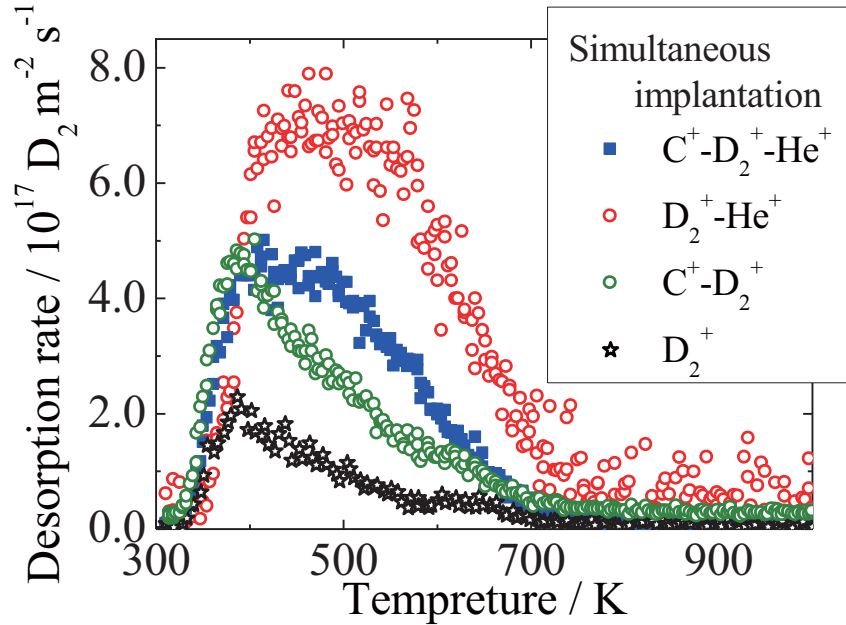
各脱離ステージにおける重水素捕捉量の増加

C^+ 照射により照射欠陥(Dislocation loop)の形成

[2] O. V. Ogorodnikova, et al., J. Nucl. Mater., 313 (2003) 469-477.

[3] S. O'hira, et al., J. Nucl. Mater., 258-263 (1998) 990-997.

重水素滞留挙動・・・ $C^+ - He^+ - D_2^+$ 同時照射



各イオン同時照射における D_2 TDSスペクトル

各イオン同時照射における重水素滞留量

- $C^+ - D_2^+$ と重水素滞留量は増加
- $He^+ - D_2^+$ と比較して重水素滞留量の減少

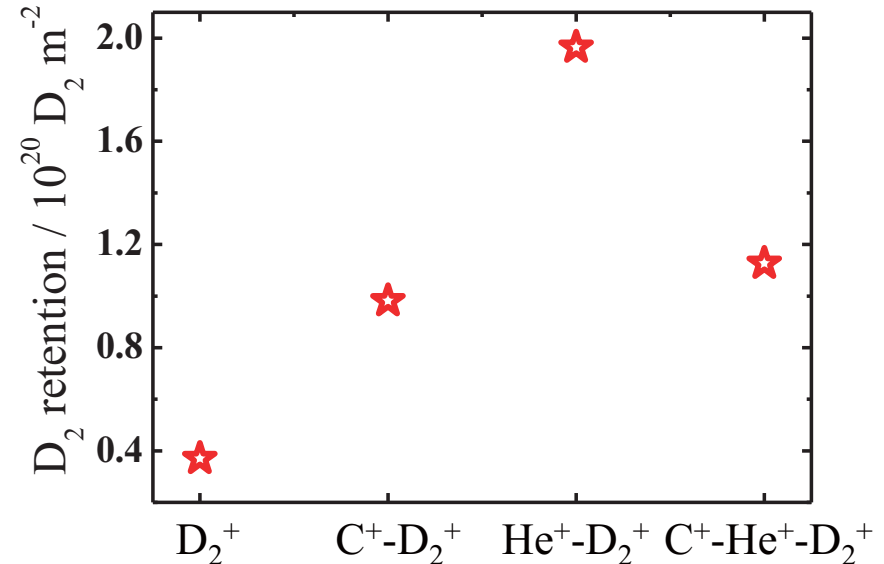
重水素滞留挙動・・・ $C^+ - He^+ - D_2^+$ 同時照射

各イオン照射におけるdpa比較

$D_2^+ : 7.8 \times 10^{-4} \text{ dpa s}^{-1}$
 $He^+ : 9.5 \times 10^{-4} \text{ dpa s}^{-1}$
 $C^+ : 9.0 \times 10^{-3} \text{ dpa s}^{-1}$

照射欠陥形成量と重水素滞留量に差異

- $C^+ - D_2^+$ と重水素滞留量は増加
- $He^+ - D_2^+$ と比較して重水素滞留量の減少



各イオン同時照射における重水素滞留量

C^+ 照射によるWのスパッタ [5]

W表面のスパッタによる
重水素のスパッタ

[5] W. Eckstein et al., Nucl. Instr. Meth. Phys. Res. B, 360 (2007) 196

まとめ

He⁺照射による照射欠陥の形成

C⁺照射による照射欠陥の形成

重水素捕捉サイト形成による重水素滞留量の増加

- C⁺-D₂⁺よりも重水素滞留量が増加
- He⁺-D₂⁺よりも重水素滞留量の減少

**C⁺照射によるタングステンのスパッタによって
重水素滞留量の減少**

イオン照射における重水素捕捉サイト
(Dislocation loop, He bubble)形成過程の解明

実験手順

試料 多結晶タングステン 3 mm^φ×0.1 mm^t
(アライドマテリアル社製 900 °Cにて歪み取り加工)

・炭素イオン(C⁺)
エネルギー: 10 keV C⁺
フラックス: $0.2 \times 10^{18} \text{ C}^+ \text{ m}^{-2} \text{ s}^{-1}$
フルエンス: $(0.02-1.0) \times 10^{21} \text{ C}^+ \text{ m}^{-2}$
照射温度: R.T

・ヘリウムイオン(He⁺)
エネルギー: 3.0 keV He⁺
フラックス: $0.2 \times 10^{18} \text{ He}^+ \text{ m}^{-2} \text{ s}^{-1}$
フルエンス: $(0.02-1.0) \times 10^{21} \text{ He}^+ \text{ m}^{-2}$
照射温度: R.T.

・重水素イオン(D₂⁺)
エネルギー: 3.0 keV D₂⁺
フラックス: $1.0 \times 10^{18} \text{ D}^+ \text{ m}^{-2} \text{ s}^{-1}$
フルエンス: $(0.1-1.0) \times 10^{22} \text{ D}^+ \text{ m}^{-2}$
照射温度: R.T.

加熱処理

加熱温度: 1173 K
加熱時間: 10 min

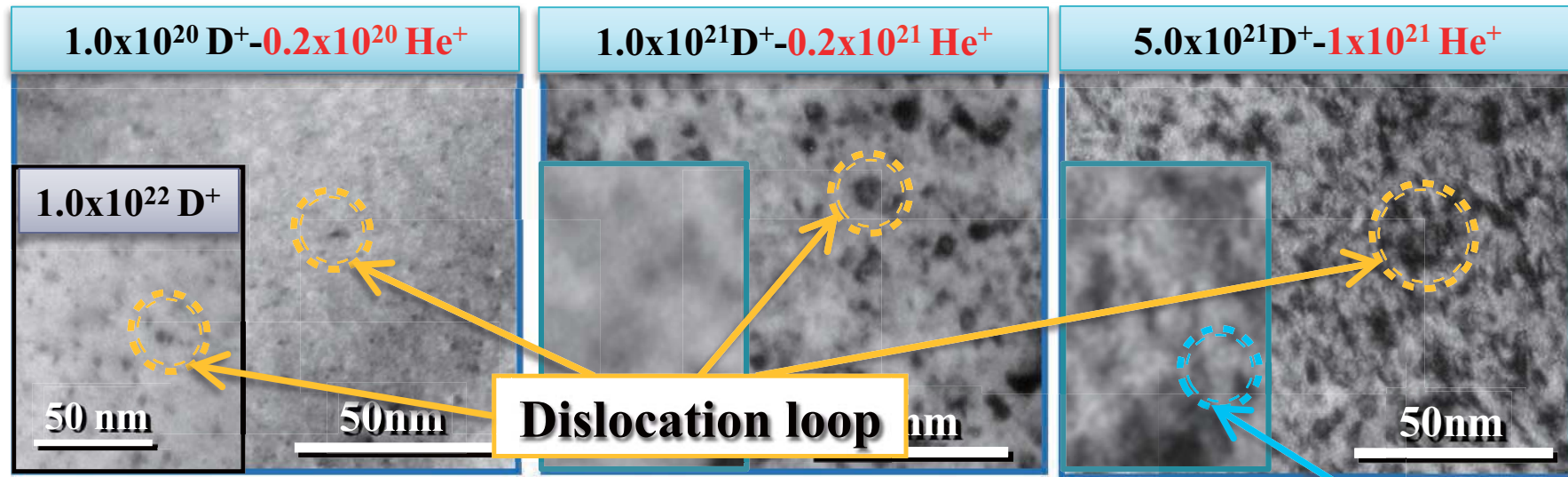
イオン照射

- ① D₂⁺ 単独照射
- ② D₂⁺- He⁺ 同時照射
- ③ D₂⁺- C⁺ 同時照射
- ④ D₂⁺- C⁺- He⁺ 同時照射

TEM

重水素捕捉サイト形成過程評価

欠陥形成挙動・・・ $He^+ - D_2^+$ 同時照射



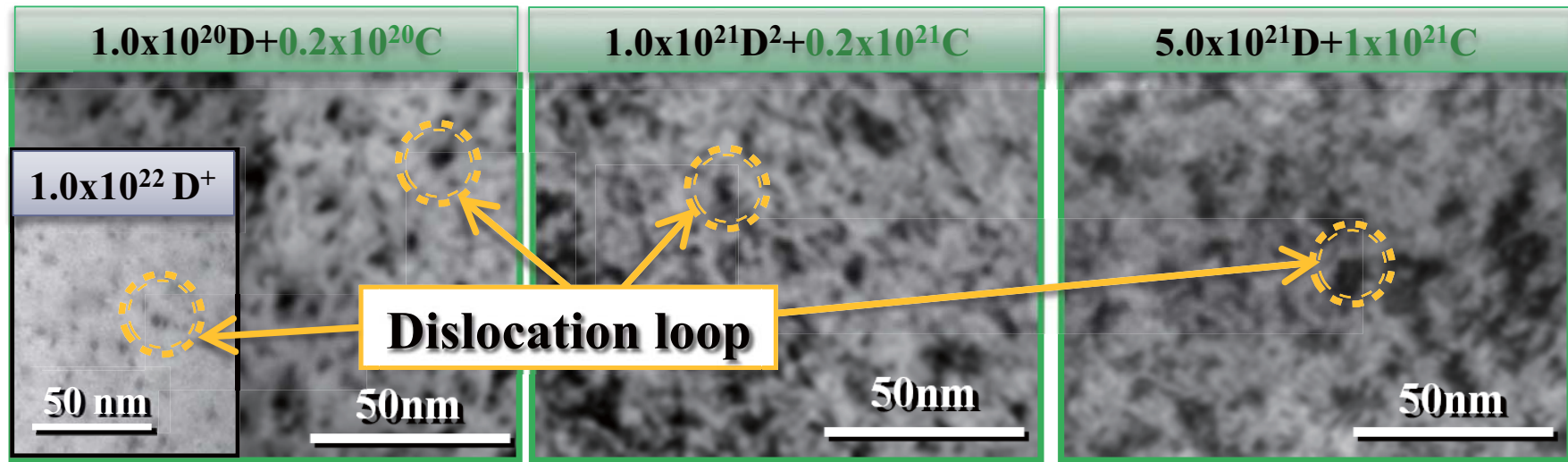
各フルエンスにおける $He^+ - D_2^+$ 同時照射のTEM像

He bubble

- $1.0 \times 10^{20} D m^{-2}$: Dislocation loopの形成
- $1.0 \times 10^{21} D m^{-2}$: Dislocation loopが増加・成長
- $5.0 \times 10^{21} D m^{-2}$: Dislocation loopの増加・成長
He bubbleの形成

フルエンス上昇に伴いDislocation loopの成長およびHe bubbleの形成

欠陥形成挙動・・・ $C^+ - D_2^+$ 同時照射

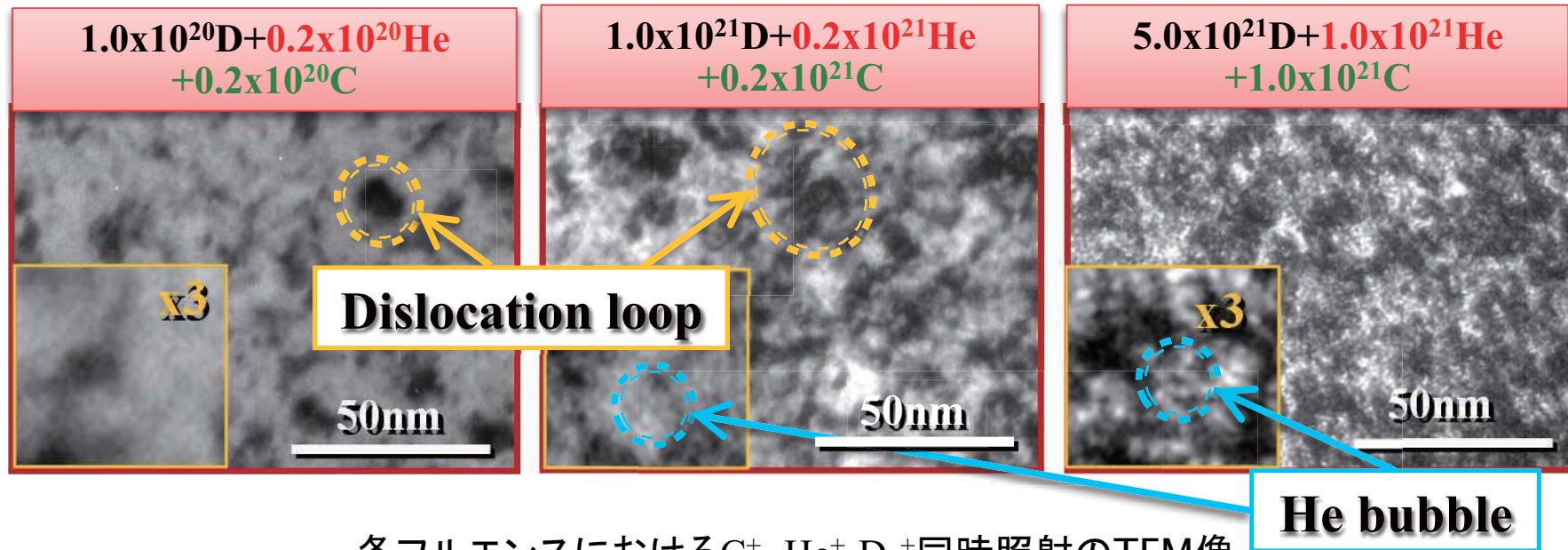


各フルエンスにおける $C^+ - D_2^+$ 同時照射のTEM像

- $1.0 \times 10^{20} D m^{-2}$: Dislocation loopが形成
- $1.0 \times 10^{21} D m^{-2}$: 欠陥の蓄積は飽和状態に到達

低フルエンス時においても多くのDislocation loopが形成
照射初期段階においてDislocation loopの形成が飽和

欠陥形成挙動・・・ $C^+ - He^+ - D_2^+$ 同時照射

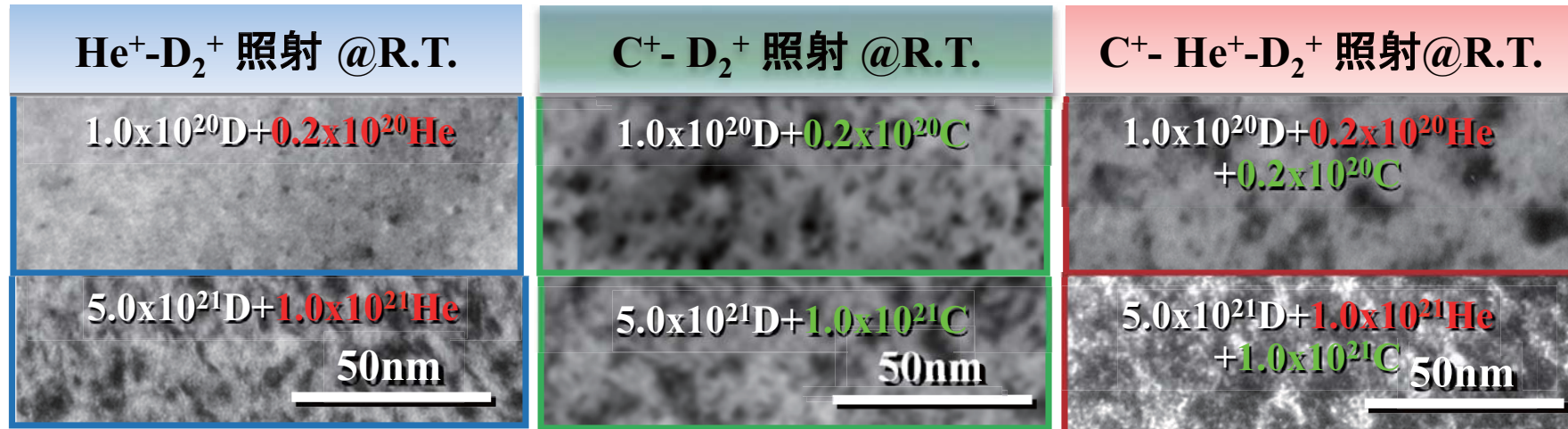


各フルエンスにおける $C^+ - He^+ - D_2^+$ 同時照射のTEM像

- $1.0 \times 10^{20} D m^{-2}$: Dislocation loopの形成
- $1.0 \times 10^{21} D m^{-2}$: Dislocation loopの成長、He bubbleの形成
- $5.0 \times 10^{21} D m^{-2}$: 高密度のDislocation loop, He bubbleが存在

Dislocation loop, He bubbleの成長

各イオン照射・・・欠陥形成挙動比較



フルエンス増加に伴う各イオン同時照射でのTEM像

照射初期段階においてC⁺を含む同時照射において多くのDislocation loopが形成

すべての試料においてDislocation loopの形成
He⁺を含む同時照射においてHe bubbleの形成

3種イオン同時照射試料に関してHe⁺, C⁺照射双方の重水素捕捉サイトの形成が示唆

まとめ

水素同位体・炭素・ヘリウム同時照射時における
水素同位体滞留挙動の解明

$C^+ - D_2^+$ よりも重水素滞留量が増加
 $He^+ - D_2^+$ よりも重水素滞留量の減少

C^+ 照射によるタングステンのスパッタによって
重水素滞留量の減少

3種イオン同時照射試料に関して He^+ , C^+ 照射双方の
重水素捕捉サイトの形成が示唆

3種イオン同時照射時において、 C^+ , He^+ 照射による
重水素捕捉サイトの形成と同時に、
 C^+ 照射による W のスパッタによって重水素滞留量が減少する。