



QUEST2018A/Wまでの 水素同位体滞留の変遷

小池彩華¹、仲田萌子¹、孫飛²、趙明忠¹、和田拓郎¹、山崎翔太¹、
吉田直亮³、花田和明³、大矢恭久²

¹静岡大学総合科学研究科

²静岡大学大学院理学領域

³九州大学応用力学研究所

背景

タングステン (W)

✓ 高融点

✓ 低スパッタ率



プラズマ対向材料の候補

高エネルギーイオンや中性子照射

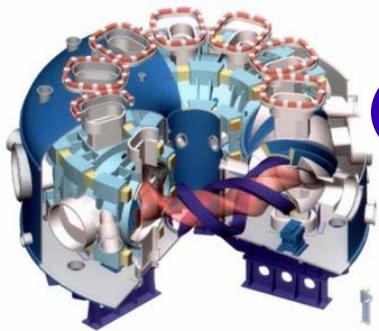
照射欠陥や不純物の堆積

水素同位体滞留の増加

燃料効率や安全性の低下

プラズマ曝露したタングステンの水素同位体滞留挙動を解明する。

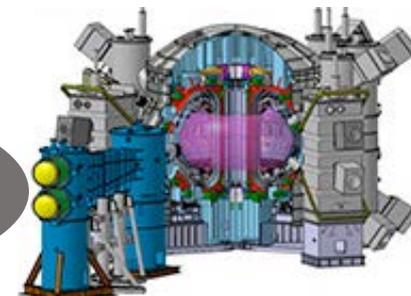




核融合科学研究所
LHD

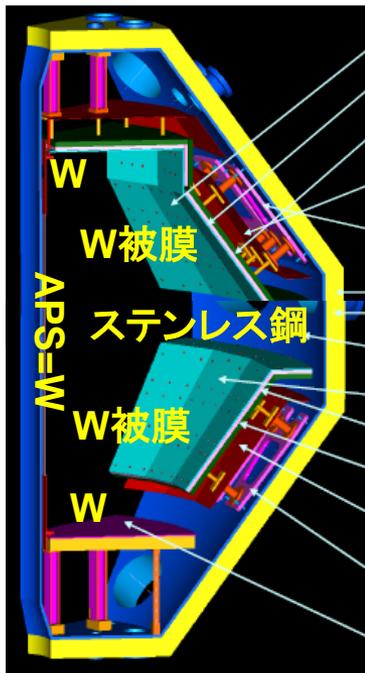
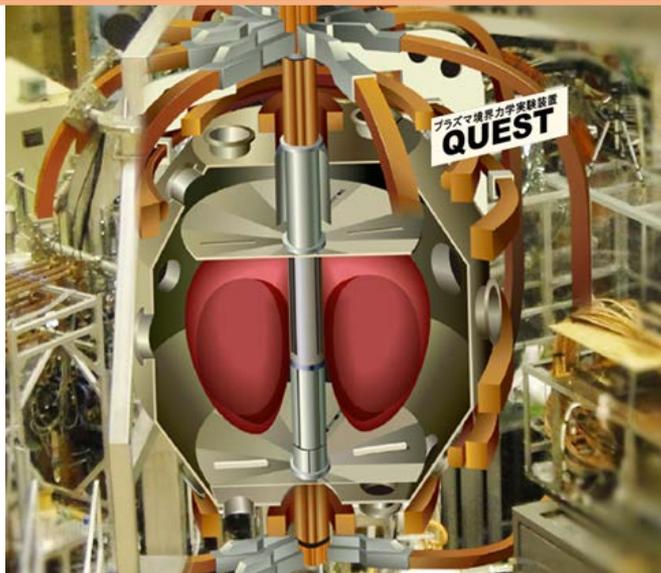
<http://www.lhd.nifs.ac.jp/>

量子科学技術研究開発機構
JT-60SA



<http://www-jt60.naka.qst.go.jp>

国内の大型プラズマ装置



QUEST構造図 3

未来の核融合炉の環境に
近いプラズマ実験炉

- ✓ 長時間放電が可能
- ✓ 金属壁
- ✓ 高温壁(473 K)
- ✓ 水素プラズマのみ

キャンペーン間の特徴比較

| 特徴 | 2016A/W | 2017A/W | 2018A/W |
|------------|---------|----------|----------|
| 最長放電時間 | 6時間 | 10分 | 96分 |
| CHI放電 | なし | 20~40 kA | 20~40 kA |
| 28GHz高出力実験 | なし | ~10 kA | ~90 kA |
| 高温壁長時間放電 | R.T. | R.T. | 200°C |
| 合計ショット数 | 1154 | 626 | 1398 |

磁場を途中で反転
上部壁側にプラズ
マが偏る磁場配位

Shot number

最初から磁場反転
プラズマ立ち上げ
実験を複数回施行

Time /s

shot number

最初から磁場反転
下部壁側にプラズ
マが偏る磁場配位

Time /s

shot number

実験方法

A.L.M.T製多結晶W(10mm ϕ , 0.5mm t)

加熱処理

温度 : 1173 K
時間 : 30 min

プラズマ曝露

QUEST
上部壁、赤道面、下部壁

X線光電子分光分析
XPS測定

X線源 : Mg-K α 1253 eV
スパッタリング : 3 keV Ar $^+$
測定元素 : C, O, Cr, Fe, W

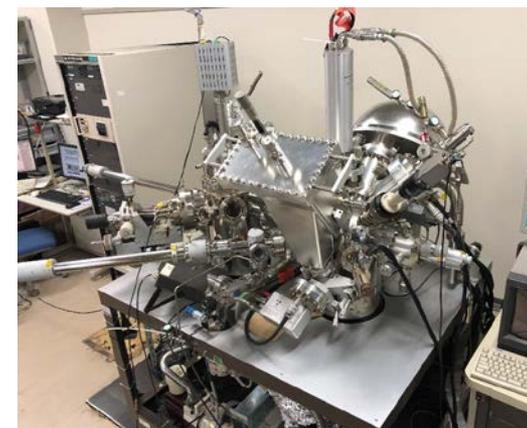
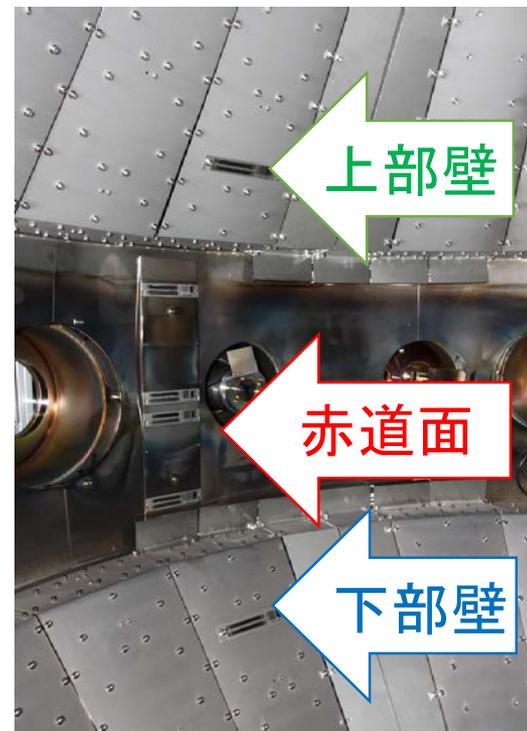
重水素照射

エネルギー : 1 keV
フラックス : 1.0×10^{18} D $^+$ m $^{-2}$ s $^{-1}$
フルエンス : 1.0×10^{22} D $^+$ m $^{-2}$

昇温脱離法
TDS測定

TEM
観察

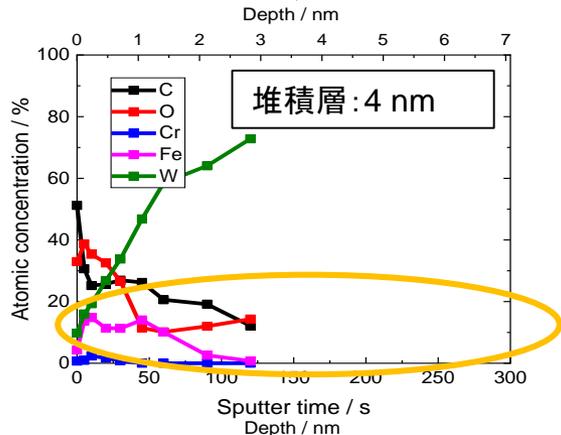
昇温速度 : 30 K / min
温度 : R.T. \rightarrow 1173 K



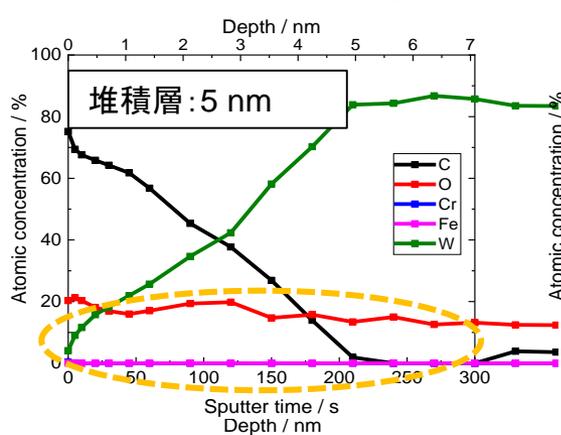
XPS装置

XPS結果 -深さ方向の元素分布-

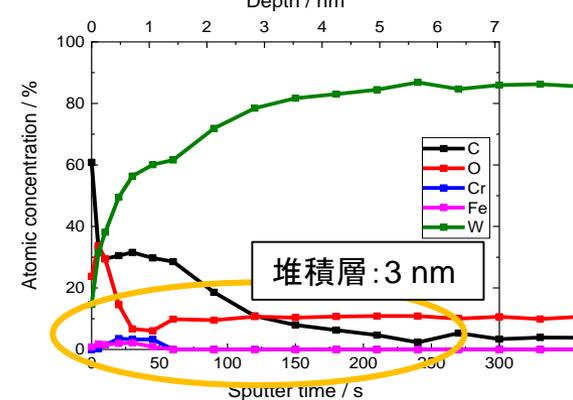
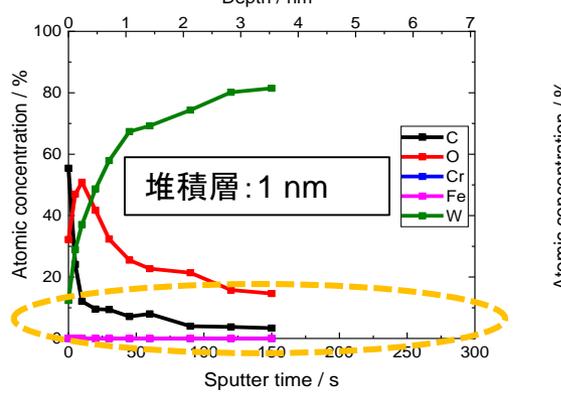
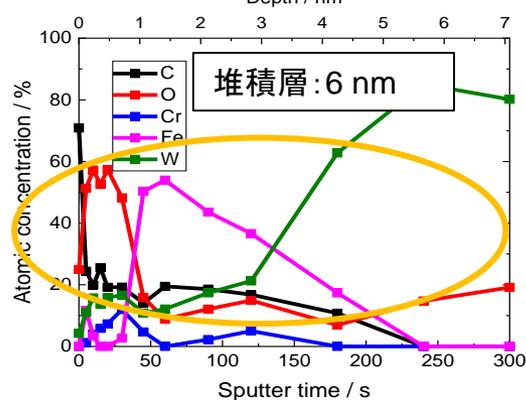
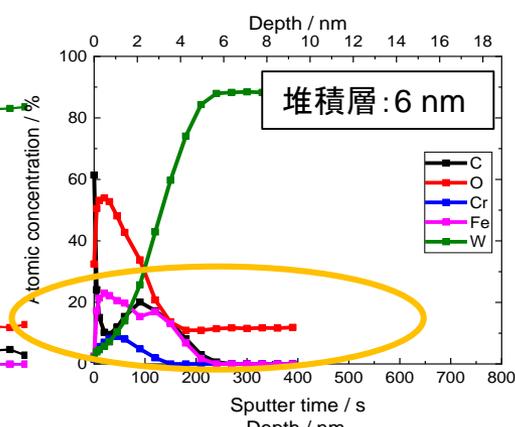
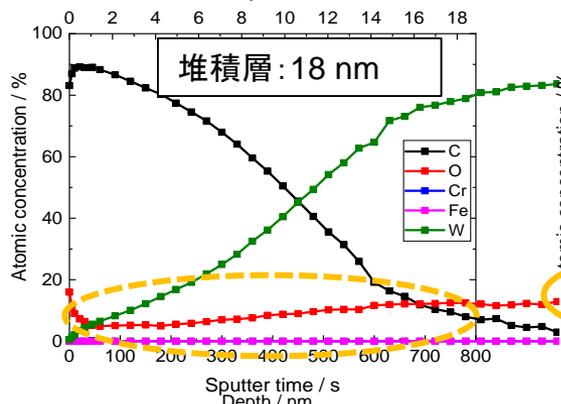
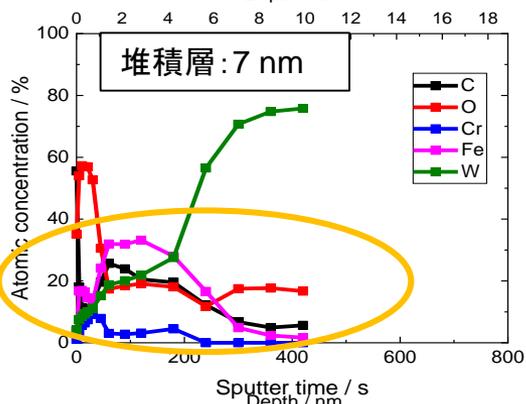
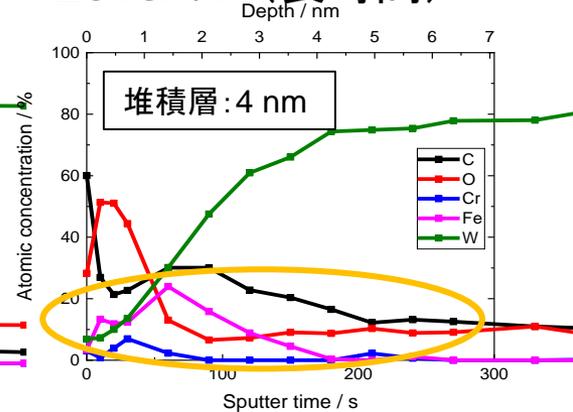
2016A/W(長時間)



2017A/W(短時間)



2018A/W(長時間)



上部壁

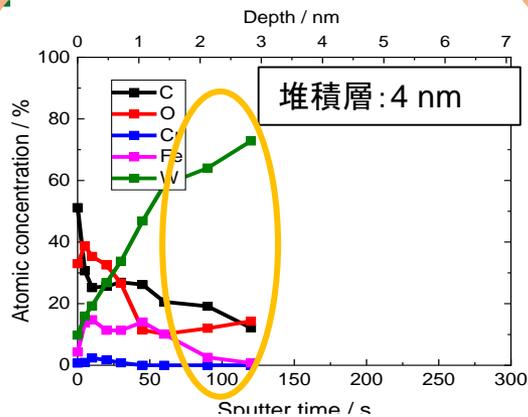
赤道面

下部壁

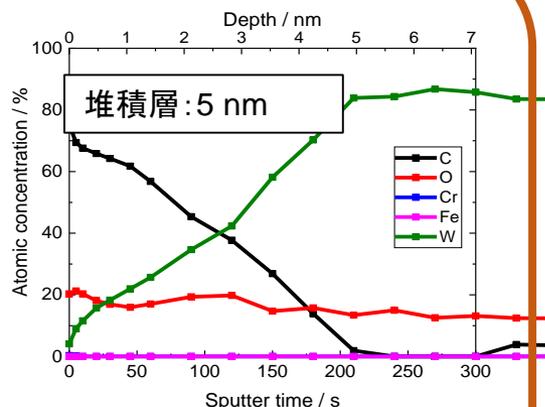
XPS結果 -深さ方向の元素分布-

上部壁

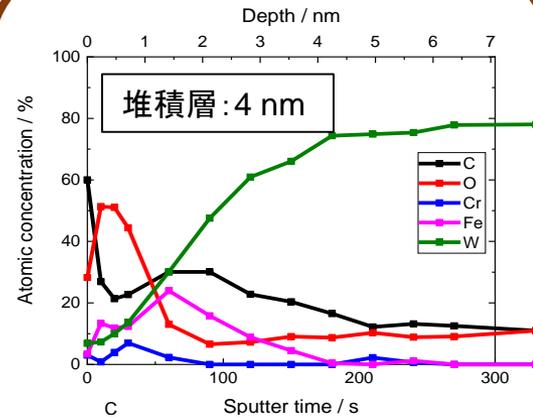
2016A/W(長時間)



2017A/W(短時間)



2018A/W(長時間)



C1s

- 最表面はC堆積
- 10s程度で純C層からC-W層と金属混合層へと変化
- 60s程度でWの半値幅が増大

→ 内部構造の変化

- ステンレス由来の金属不純物が存在

- 深さ方向におけるCの割合減少がおだやか
 - C堆積が厚く、堆積優位な配位
 - ステンレス由来の金属不純物が全く存在しない
- 炭素の打ち込み + 堆積

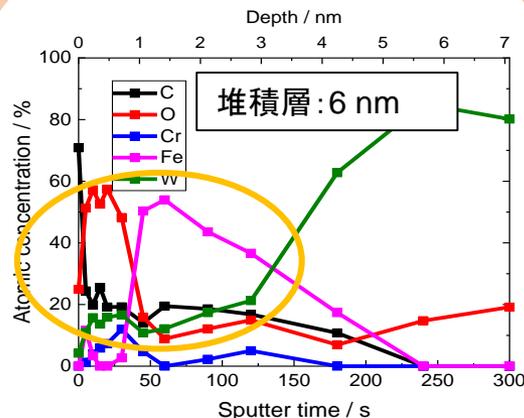
- 最表面はC堆積
- 10s程度で純C層からC-W層と金属混合層へと変化
- 堆積は厚く、堆積優位な配位であると考えられる
- ステンレス由来の金属不純物が存在

W4f

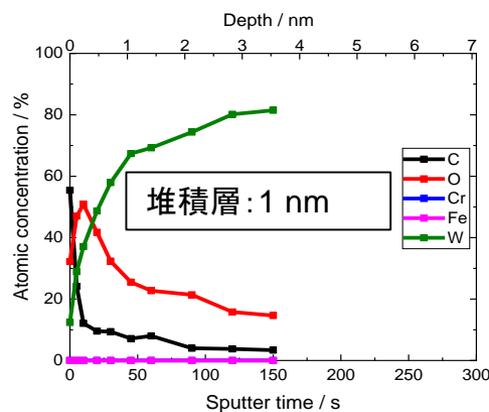
XPS結果 -深さ方向の元素分布-

下部壁

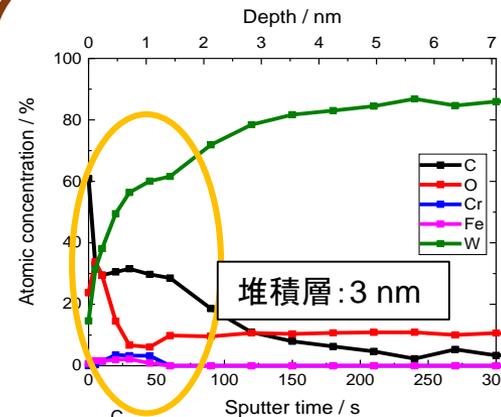
2016A/W(長時間)



2017A/W(短時間)



2018A/W(長時間)



C1s

- 最表面はC堆積
- 10s程度で純C層からC-W層と金属混合層へと変化
- 堆積は厚く、堆積優位な配位であると考えられる

- 深さ方向におけるCの割合が急減
- 堆積は非常に薄く、損傷優位な配位
- ステンレス由来の金属不純物が全く存在しない

- Wの急激な持ち上がり(0~1 nm)
- ステンレス由来の金属不純物が少ない

W4f

- ステンレス由来の金属不純物が多く存在

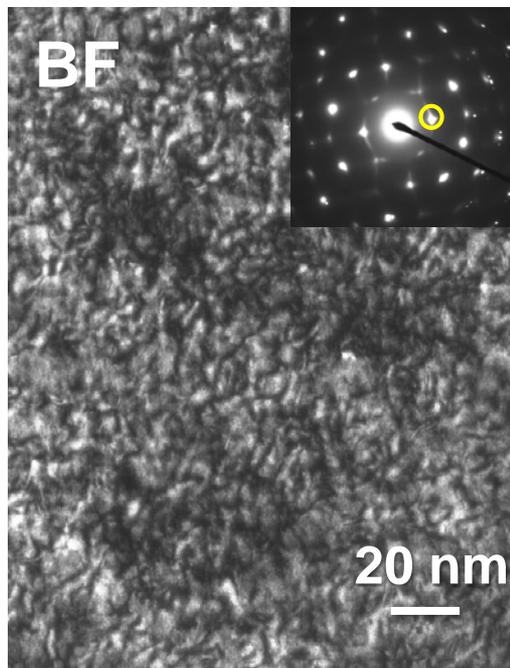
→炭素の打ち込み
+堆積

→上部壁と異なり
堆積が非常に薄い

TEM観察 — 照射損傷 —

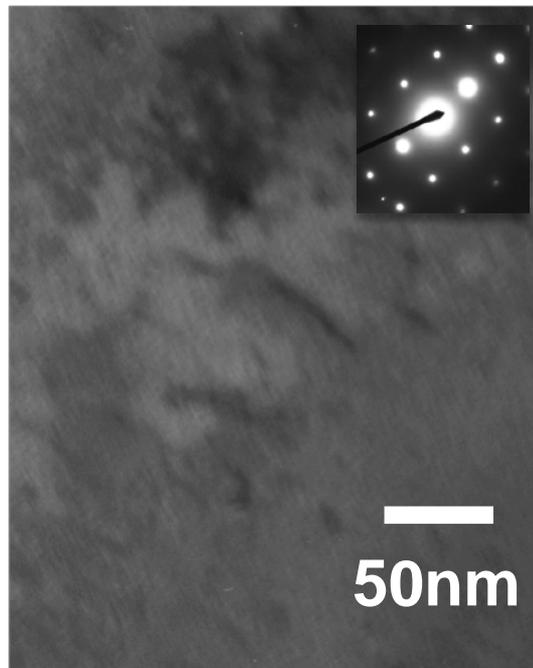
上部壁

2016A/W



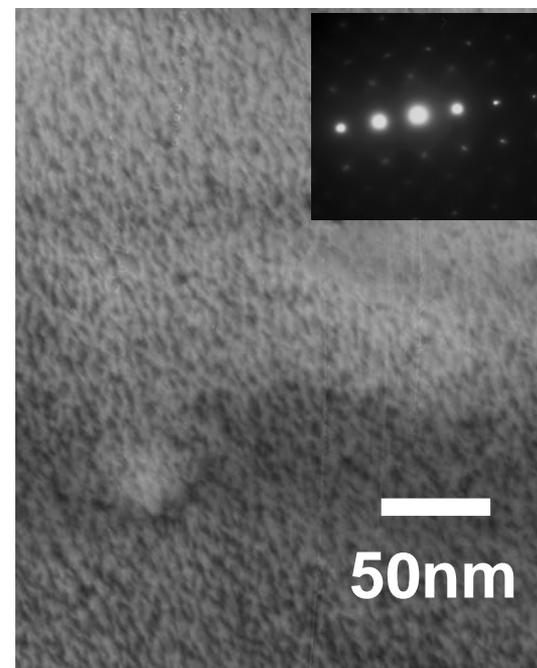
- 表面の転移ループが多く存在
- 原子はじき出し損傷

2017A/W



- 転移ループなし
- 炭素を主成分とする薄い堆積

2018A/W

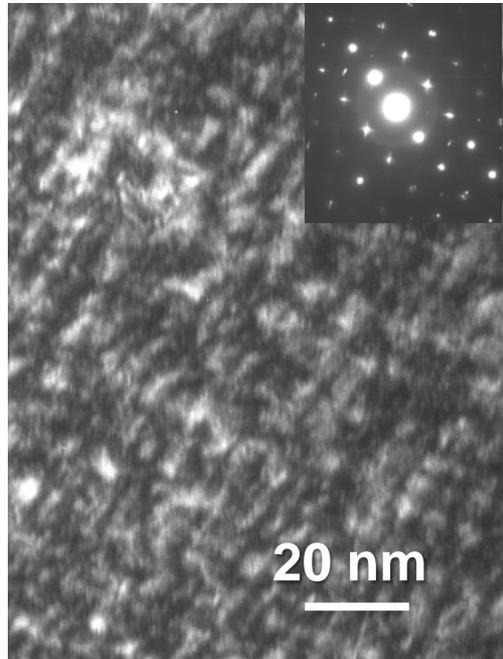


- 転移ループなし
- 炭素を主成分とする堆積

TEM観察 — 照射損傷 —

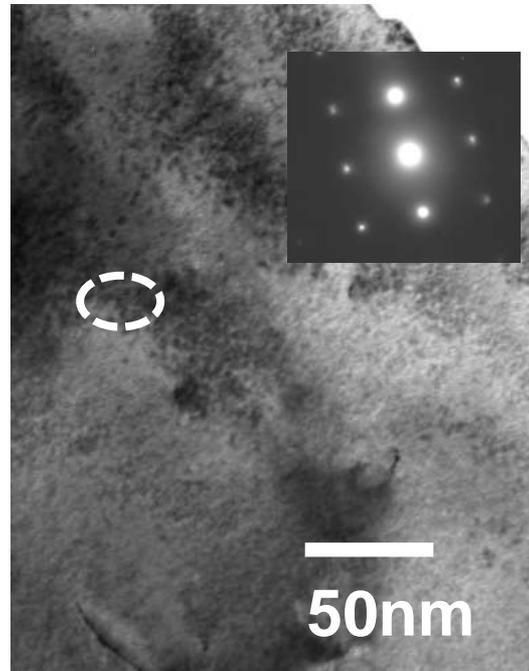
下部壁

2016A/W



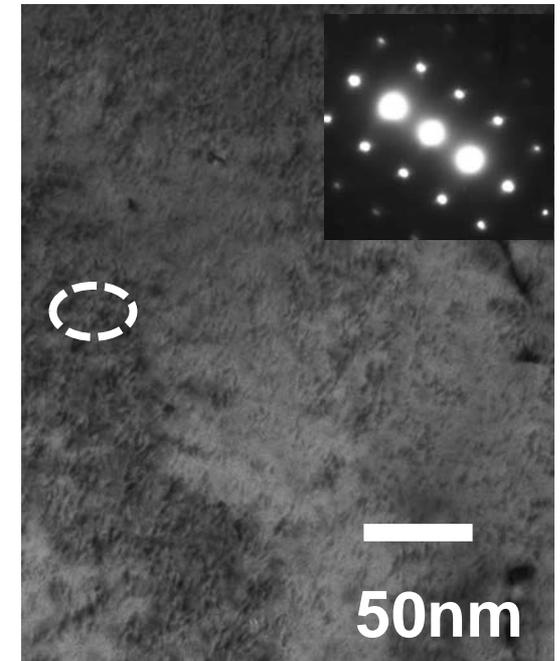
- 転移ループと堆積を確認
→ 原子はじき出し
損傷

2017A/W



- 転移ループあり
- 炭素を主成分とする薄い堆積

2018A/W



- 転移ループあり
- 炭素を主成分とする薄い堆積

TDS結果 - 軽水素同位体滞留 -



H₂

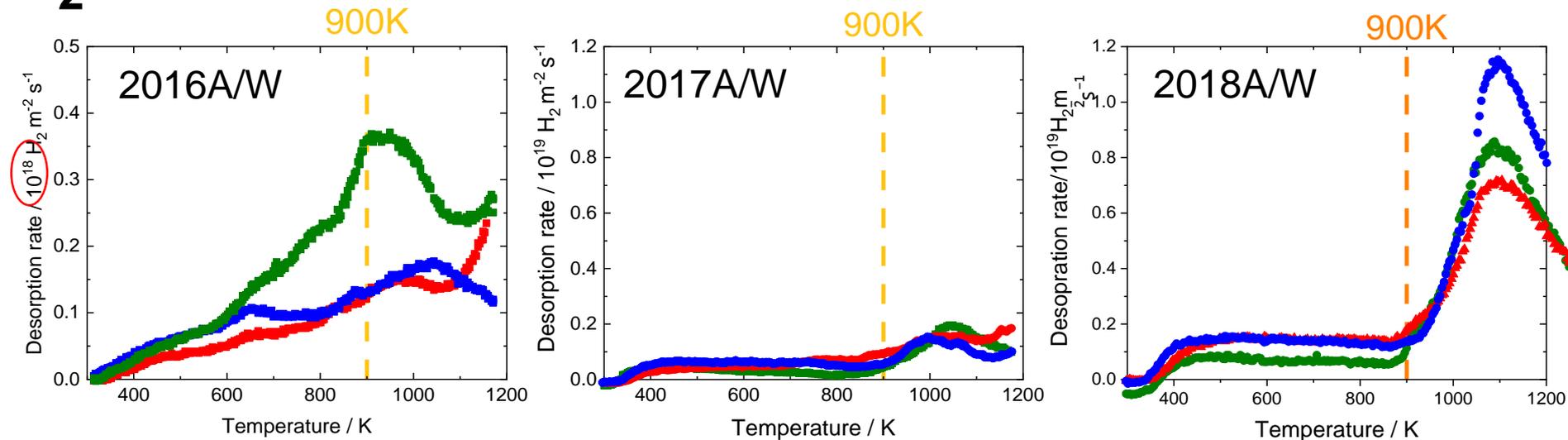


表 各試料における軽水素滞留量

| H ₂ | 2016A/W | 2017A/W | 2018A/W |
|----------------|----------------------|----------------------|----------------------|
| 上部壁 | 1.5×10^{20} | 1.5×10^{21} | 2.1×10^{21} |
| 赤道面 | 7.1×10^{19} | 1.9×10^{21} | 7.8×10^{20} |
| 下部壁 | 8.6×10^{19} | 1.8×10^{21} | 1.9×10^{21} |

- 年々、軽水素の滞留は増加傾向。
- 2017年から900K以上の脱離ピークが顕著に表れはじめた。

磁場配位の変化により軽水素の滞留する場所が変化した。
これらが損傷由来の滞留か、堆積由来の滞留か今後検討予定

TDS結果 - 重水素同位体滞留 -

400 K : 表面吸着、転位ループ
 650 K : 原子空孔
 900 K : ボイド
 900 K以上 : C-H 結合

■ 上部壁
 ■ 赤道面
 ■ 下部壁

D₂

[1] M. Kobayashi, M. Shimada, Y. Hatano, T. Oda, B. Merrill, Y. Oya, K. Okuno: *Fusion Eng. Des.* **88** (2013) 1749.
 [2] G. N. Luo, W.M. Shu, M. Nishi: *Fusion Eng. Des.* **81** 8-14 (2006) 957.

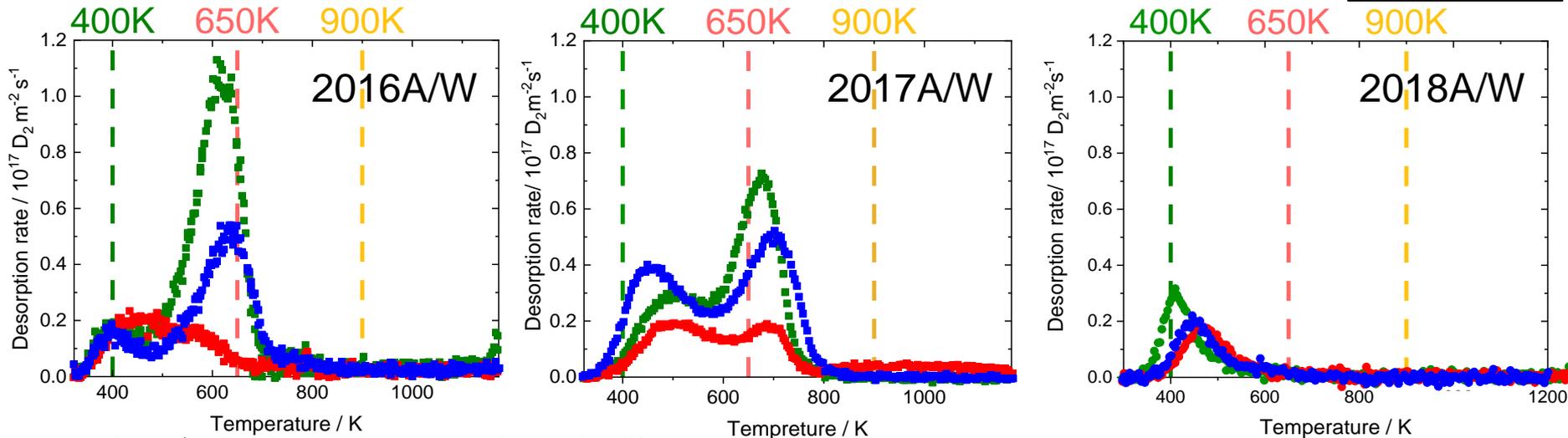


表 各試料における重水素滞留量

| D ₂ | 2016A/W | 2017A/W | 2018A/W |
|----------------|----------------------|----------------------|----------------------|
| 上部壁 | 1.5×10^{19} | 1.2×10^{19} | 1.8×10^{18} |
| 赤道面 | 9.8×10^{18} | 6.6×10^{18} | 2.7×10^{18} |
| 下部壁 | 5.9×10^{18} | 1.3×10^{19} | 2.3×10^{18} |

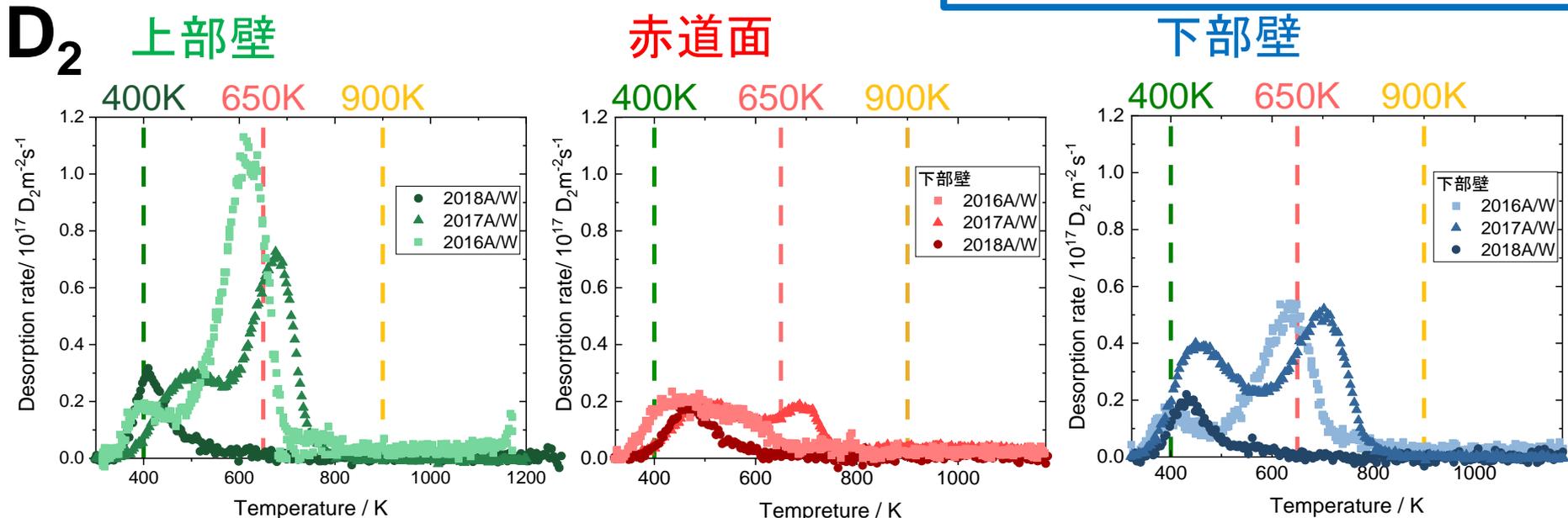
- 損傷による滞留及び、不純物による滞留は減少傾向
- 堆積の厚さは滞留量と関係ない

2017A/WまではTEM観察結果とも一致
 2018A/Wの重水素滞留の挙動は軽水素の滞留とも関係あり ¹²

TDS結果 - 重水素同位体滞留 -

400 K : 表面吸着、転位ループ
650 K : 原子空孔
900 K : ボイド
900 K以上 : C-H 結合

[1] M. Kobayashi, M. Shimada, Y. Hatano, T. Oda, B. Merrill, Y. Oya, K. Okuno: *Fusion Eng. Des.* **88** (2013) 1749.
[2] G. N. Luo, W.M. Shu, M. Nishi: *Fusion Eng. Des.* **81** 8-14 (2006) 957.



壁ごとの比較

- ✓ 上部壁下部壁では650Kのピークが減少 400Kのピーク増加
- 短時間放電の2017A/Wでは炭素が多く照射され、転位ループを生成させながら堆積した。
- ✓ 2017A/Wはピーク位置が高温側にシフト
→より安定な捕捉サイトに捕獲されている

まとめ

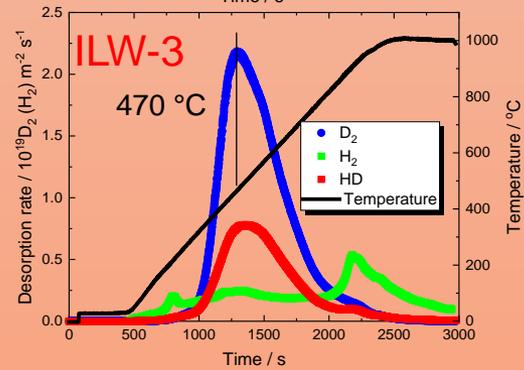
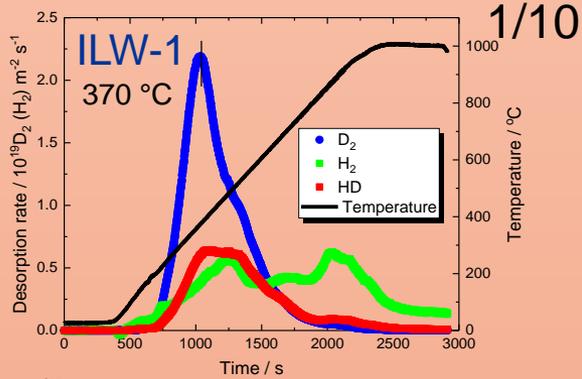
QUEST内で曝露されたタングステンにおける不純物堆積と水素同位体滞留挙動の変遷

- 不純物の堆積
 - ✓ 赤道面に多く堆積し、上部壁下部壁の厚さは磁場配位に依存する。また、その厚さは減少傾向。
- 水素同位体滞留
 - ✓ 軽水素は2017A/Wから増加傾向。
放電方法や堆積物の表面状態に関係あり。
 - ✓ 重水素は2018A/Wから急激に減少。

今後の実験予定

2018A/W鉄照射試料のプラズマ曝露における影響評価
→水素が照射欠陥にどのように滞留するか判明する

TDSによるH,D滞留・放出挙動評価結果



- ✓ ILW-3試料ではDの脱離温度が高温側にシフト
- 高出力運転による熱負荷
- ✓ 外側ではHの脱離が多い
- 損耗領域

