

第11回 若手科学者によるプラズマ研究会

2008. 3.18 (火)

ヘリウムバブル形成における タングステン製造法依存性に関する研究

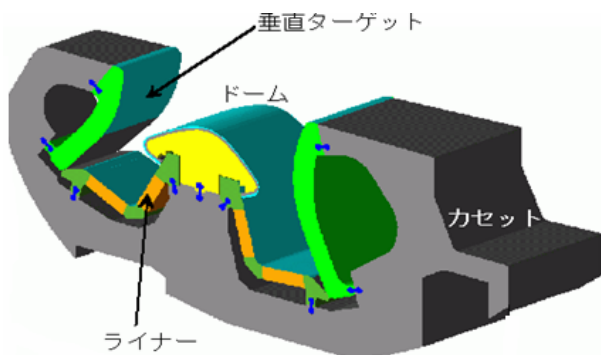
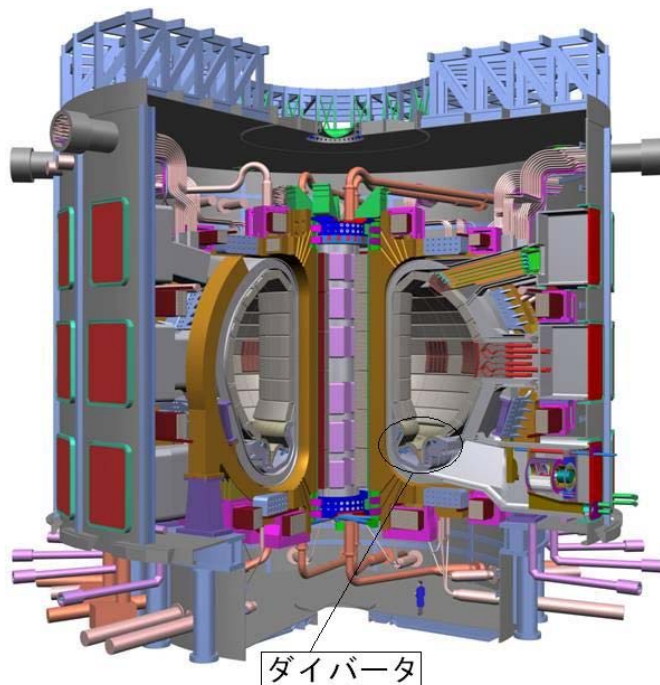
山際 正人

名古屋大学 工学部 B4

大野研究室

核融合炉におけるプラズマ対向材料

国際熱核融合実験炉 (ITER)



ダイバータ

- ヘリウム灰や不純物プラズマを炉外へ排気
- 非常に高い熱負荷・粒子負荷にさらされるため、ダイバータ材は高融点、低損耗であることが要求される。

材料候補: タングステン(W)

- ・高融点(3600K)
- ・低スパッタ率
- ・低水素吸蔵
- ・高Z材

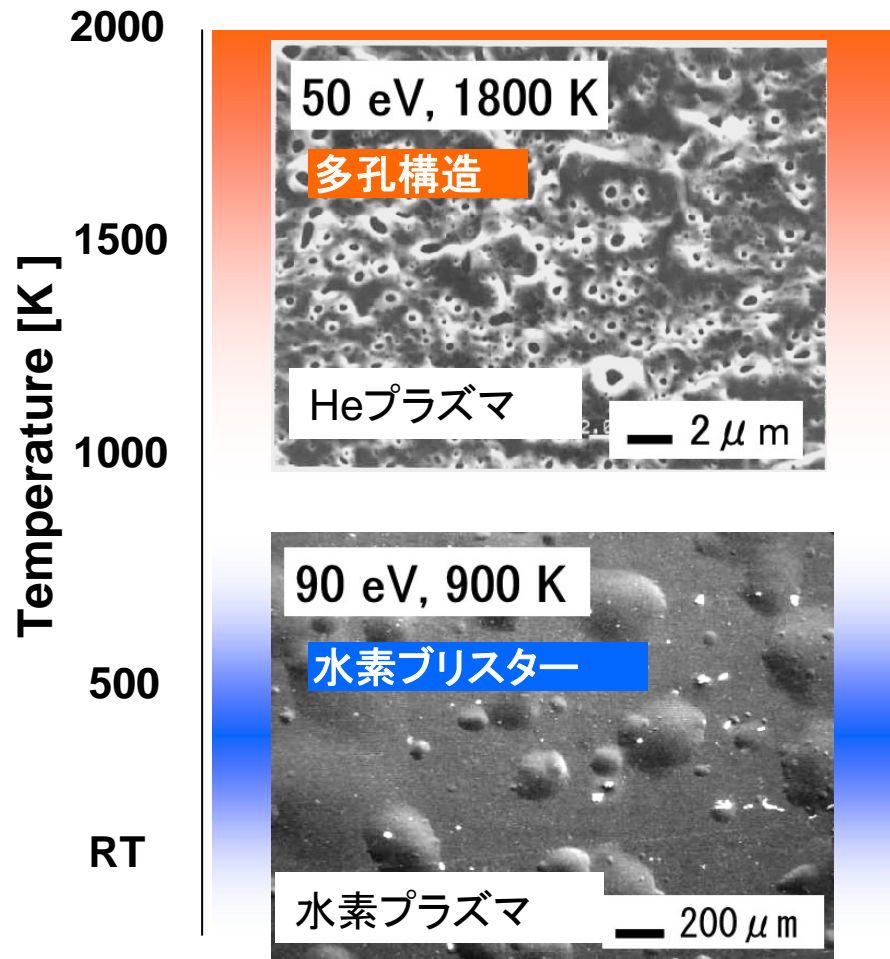
問題点

低エネルギーの水素及びヘリウムプラズマ
照射により激しい損傷



プラズマ内部にW(高Z材)が混入
⇒放射損失により **プラズマ消滅**

低エネルギープラズマ照射によるWの損傷



照射欠陥を作らない低エネルギープラズマ照射でもW表面に損傷が見られる。

損傷はイオン種・照射温度に依存。

Heプラズマ 1500 K以上では

多孔構造

水素プラズマ 1000 K以下では

ブリスター

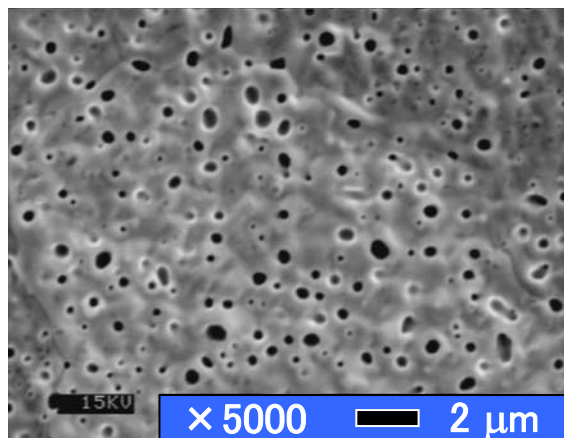
M. Y. Ye, et al., J. Nucl. Mater. **313-316** (2003) 74-78.

D. Nishijima, et al., J. Nucl. Mater. **329-333** (2004) 1029-1033.

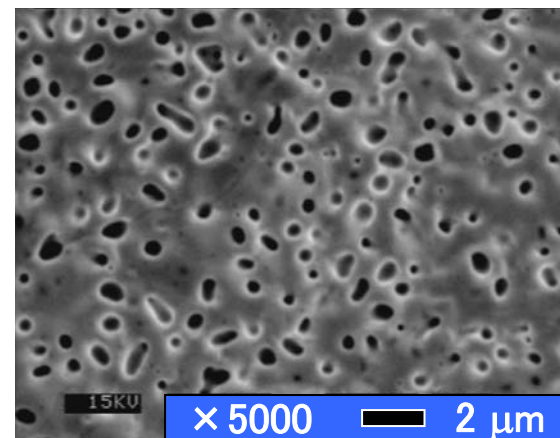
不純物発生・トリチウム吸蔵

タングステン製造法の違いによる損傷への影響

粉末焼結タングステン



単結晶タングステン



・Heプラズマ照射条件
照射温度 : 2200 K
粒子束 : $8.3 \times 10^{22} \text{ m}^{-2}\text{s}^{-1}$
照射時間 : 10000 s

・Heプラズマ照射条件
照射温度 : 2200 K
粒子束 : $9.0 \times 10^{22} \text{ m}^{-2}\text{s}^{-1}$
照射時間 : 7200 s

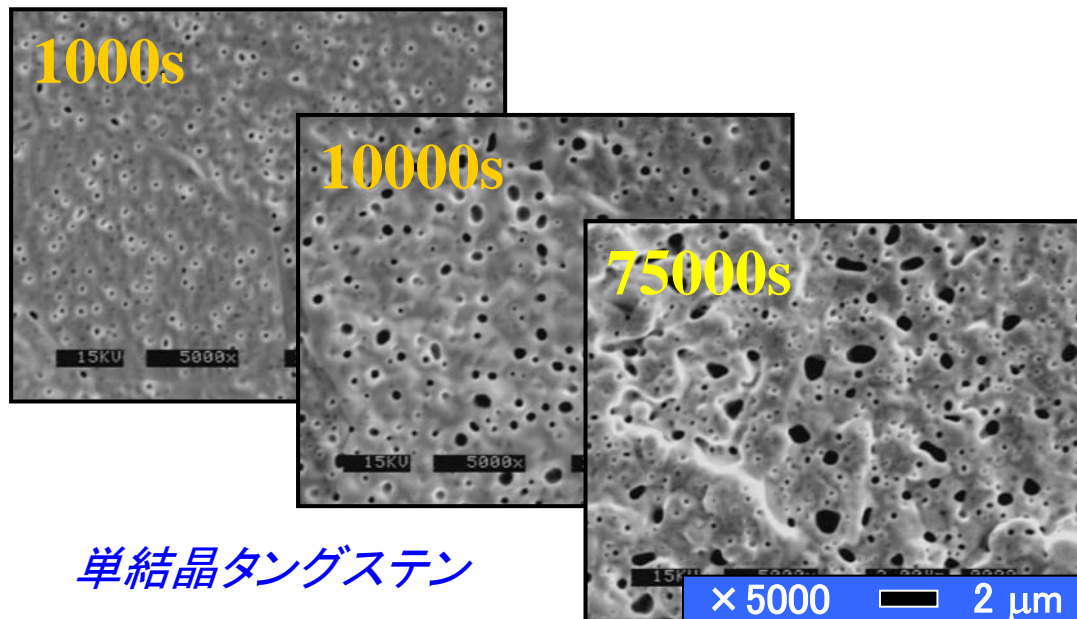
製造法の異なるどのタングステン試料においても多孔構造の形成が確認されている

本研究の目的

- タングステンの組成変形に関する物理機構の解明
⇒ 内部構造の異なる数種類のタングステン試料を用いて、
損傷の起こる温度領域で高密度ヘリウムプラズマを照射する

タングステン試料は照射前に
手作業による表面研磨を行う

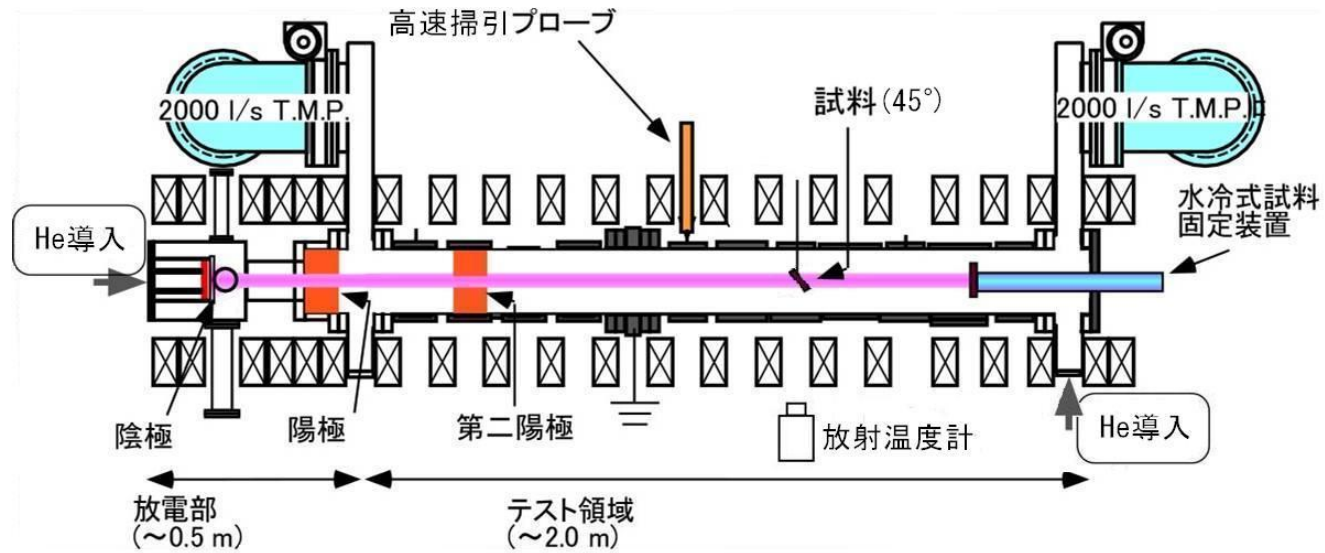
- タングステン表面損傷過程のプラズマ照射量依存性の調査
⇒ ヘリウムプラズマの照射時間を変化させて実験を行なった後、
タングステンの表面形状を走査型電子顕微鏡(SEM)を用いて観察する



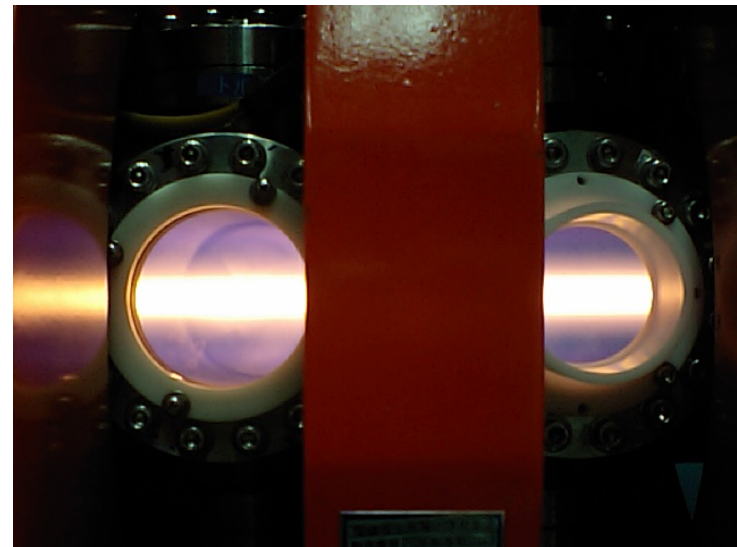
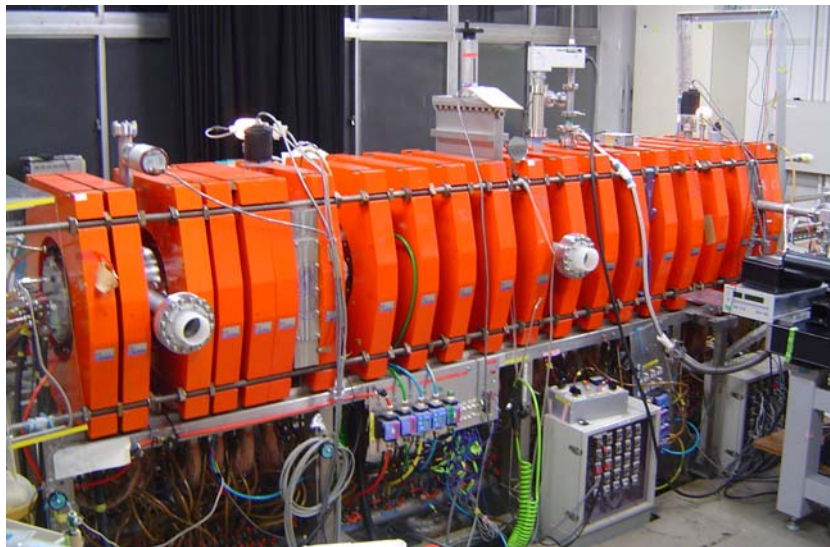
単結晶タングステン

・Heプラズマ照射条件
照射温度 : 2200 K
粒子束 : $8.3 \times 10^{22} \text{ m}^{-2}\text{s}^{-1}$
入射エネルギー: 15 eV

直線型ダイバータ模擬実験装置 NAGDIS-II



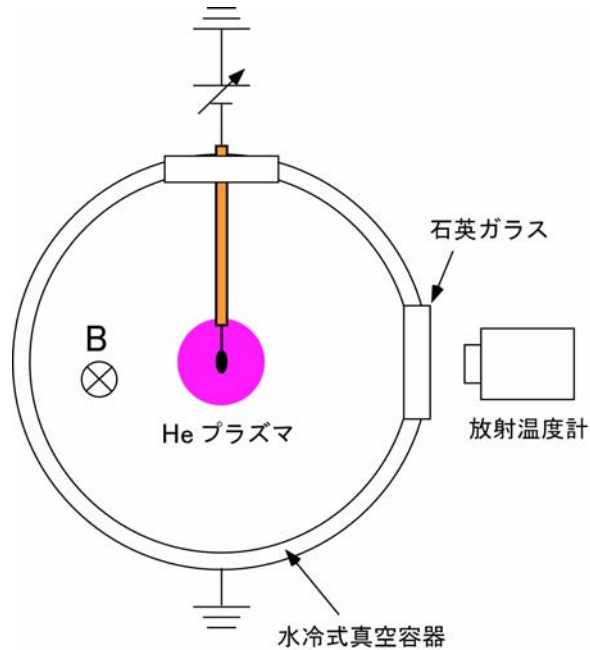
全長 : 2.5m
内径 : 0.18m
電子密度 : $< 10^{20} \text{m}^{-3}$
電子温度 : $< 10 \text{eV}$



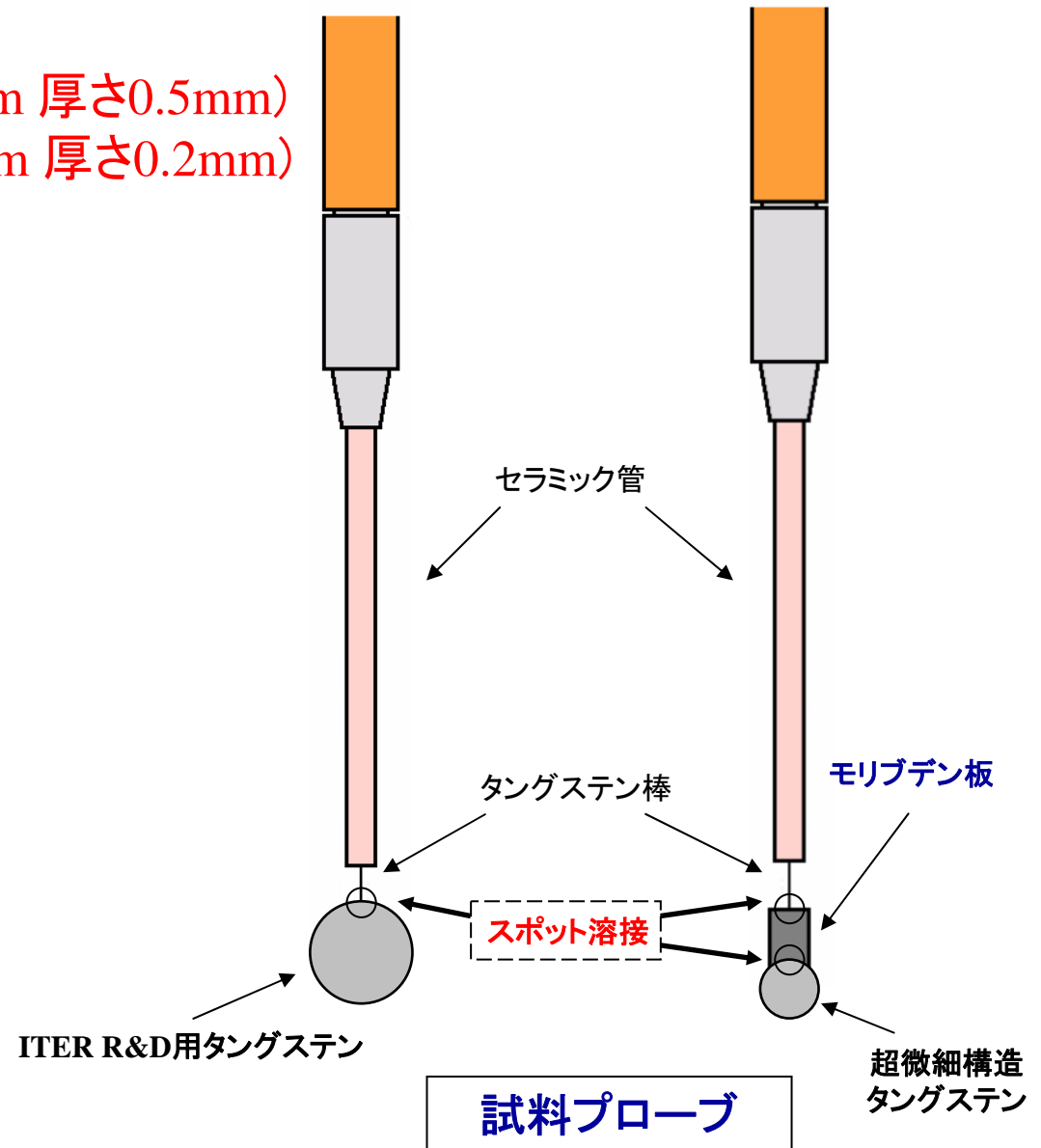
実験配置図

● 試料

- ・ITER R&D用タングステン(φ 1cm 厚さ0.5mm)
- ・超微細構造タングステン(φ 0.7cm 厚さ0.2mm)
 - ・W-0.8TiC-H₂
 - ・W-0.5TiC-H₂
 - ・W-0.25TiC-H₂
 - ・W-0.5TiC-Ar



真空容器断面図



試料プローブ

タングステン表面処理

タングステン表面を均一に研磨

・研磨方法

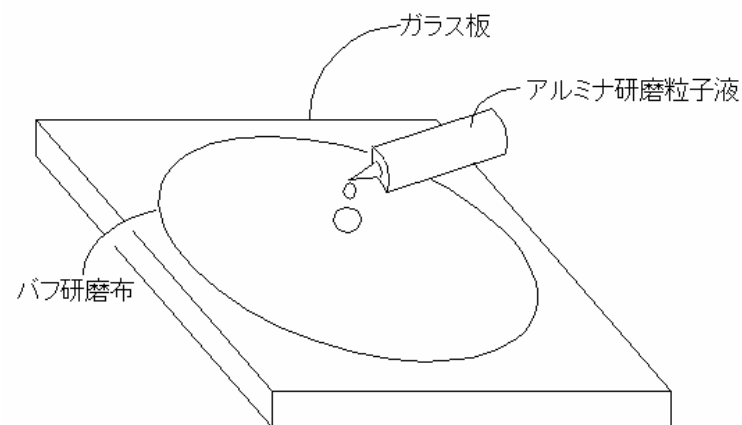
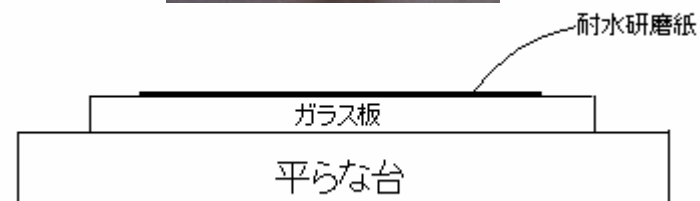
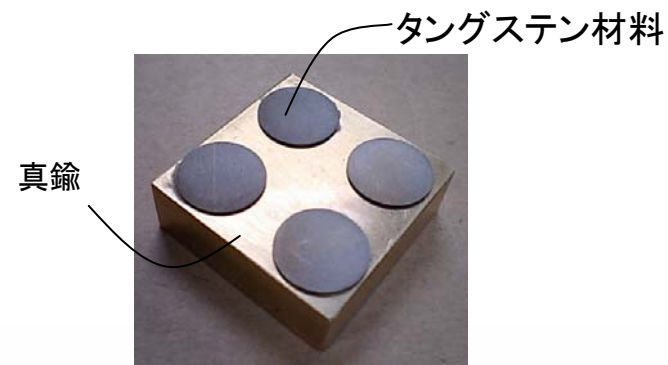
- ① 真鍮板の四隅にタングステン試料を接着
- ② 研磨紙を置き、台に対して水平に擦り付ける
→ 目の粗いもの(#400)から順に、5種類の研磨紙を使用して研磨
- ③ バフ研磨布を置き、アルミナ粒子液を垂らして台に対して水平に擦り付ける
→ 粒径の大きいものから順に、2種類のアルミナ研磨粒子液を使用して研磨
- ④ 真鍮から材料を取り外し、エタノールを用いて超音波洗浄

□耐水研磨紙

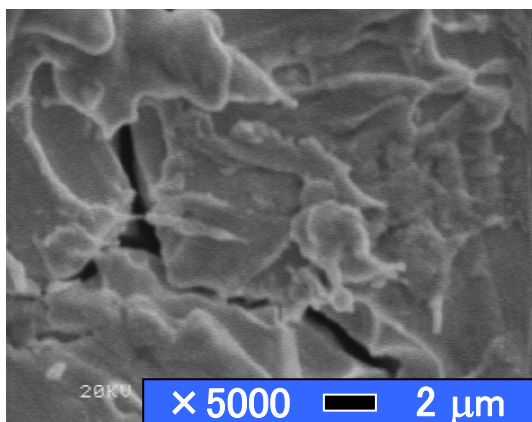
| 粒度 | 粒径(μm) |
|-------|---------------------|
| #400 | 88~74 |
| #600 | 44~37 |
| #800 | 31~26 |
| #1000 | 22~18 |
| #2000 | 18~14.6 |

□アルミナ研磨粒子液

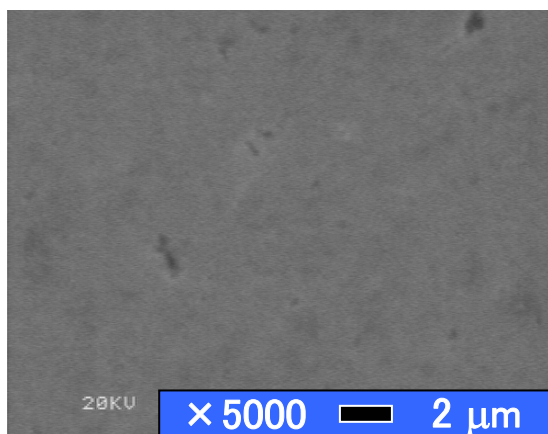
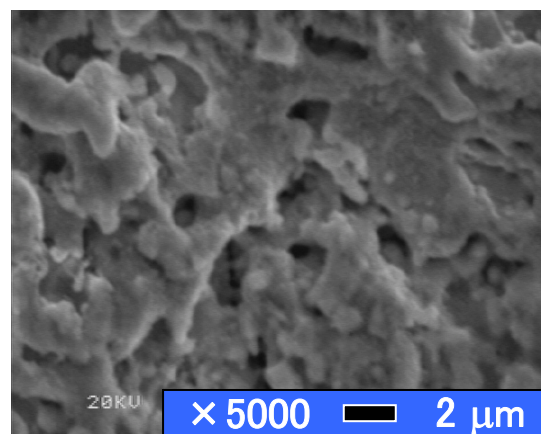
- 粒径
- $3.0\ \mu\text{m}$
 - $0.3\ \mu\text{m}$



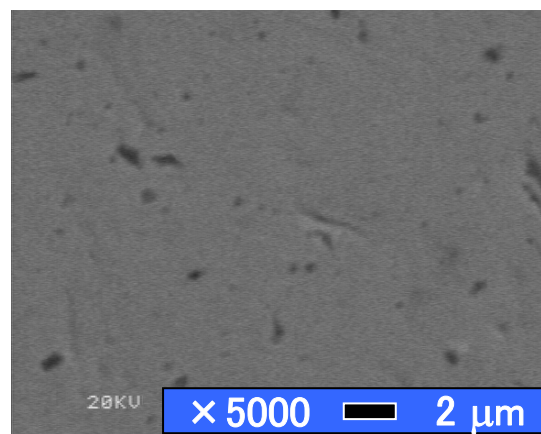
タングステン試料の表面研磨



研磨前



研磨後



ITER R&D用タングステン

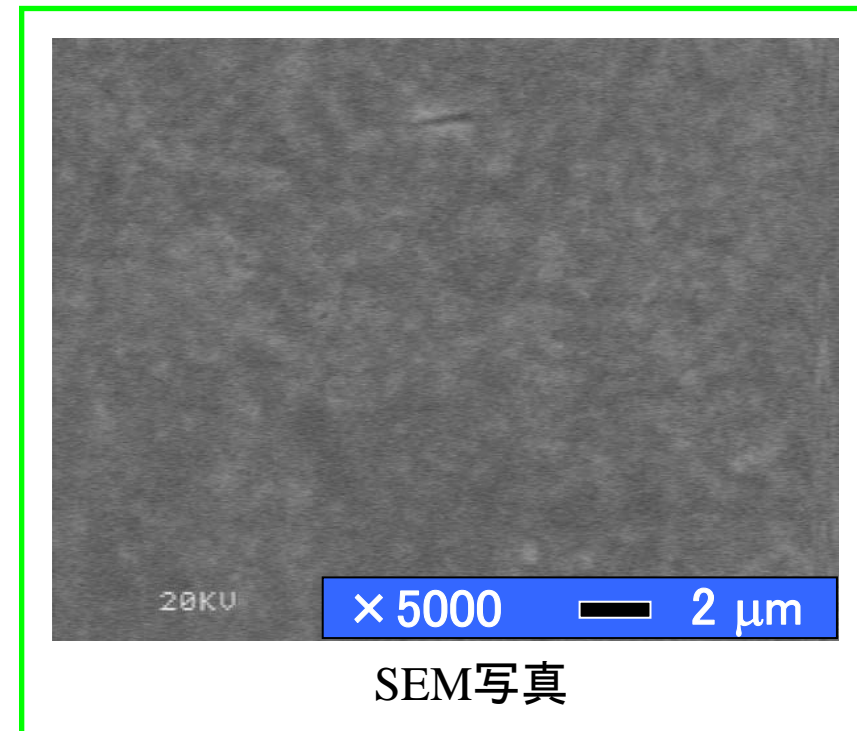
研磨前のタングステン試料表面は起伏が激しいが、表面研磨により平坦化され研磨傷もほぼ見られない

超微細構造タングステン

ITER R&D用タングステンと比べると研磨後の表面に多数の穴が見られる

短時間Heプラズマ照射 (ITER R&D用W)

試料温度: 1800K、電子温度: 10eV、粒子束: $1.4 \times 10^{23} \text{m}^{-2}\text{s}^{-1}$ 、照射時間: 300s (5分)



照射後の試料表面は薄っすらと白くなっており、SEM写真上でもわずかな損傷が確認された。

長時間Heプラズマ照射 (ITER R&D用W)

試料温度: 1800K、電子温度: 10eV、粒子束: $1.4 \times 10^{23} \text{m}^{-2}\text{s}^{-1}$



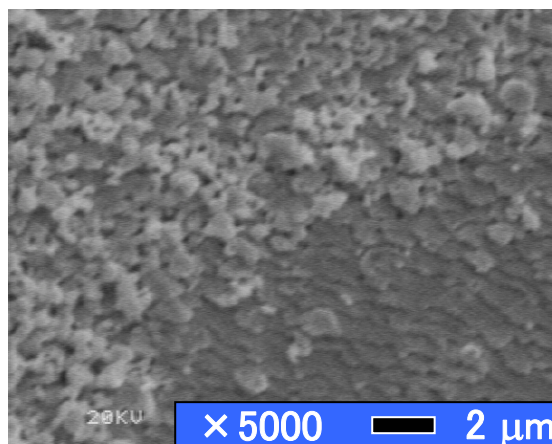
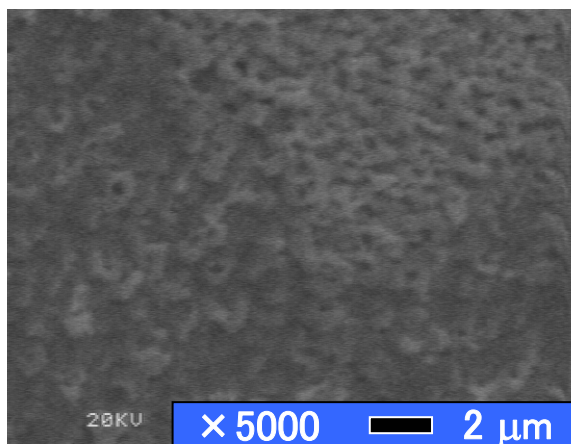
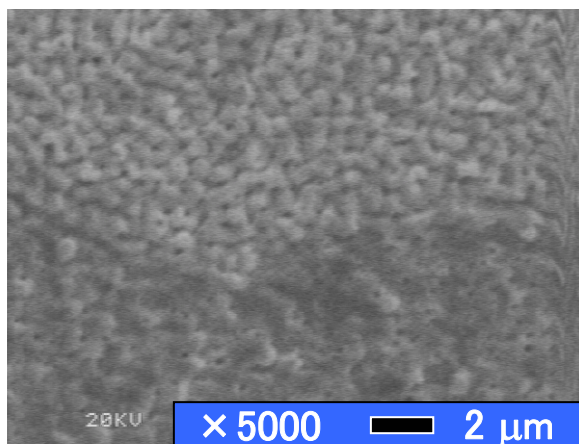
1800s(30分)



7200s(2時間)

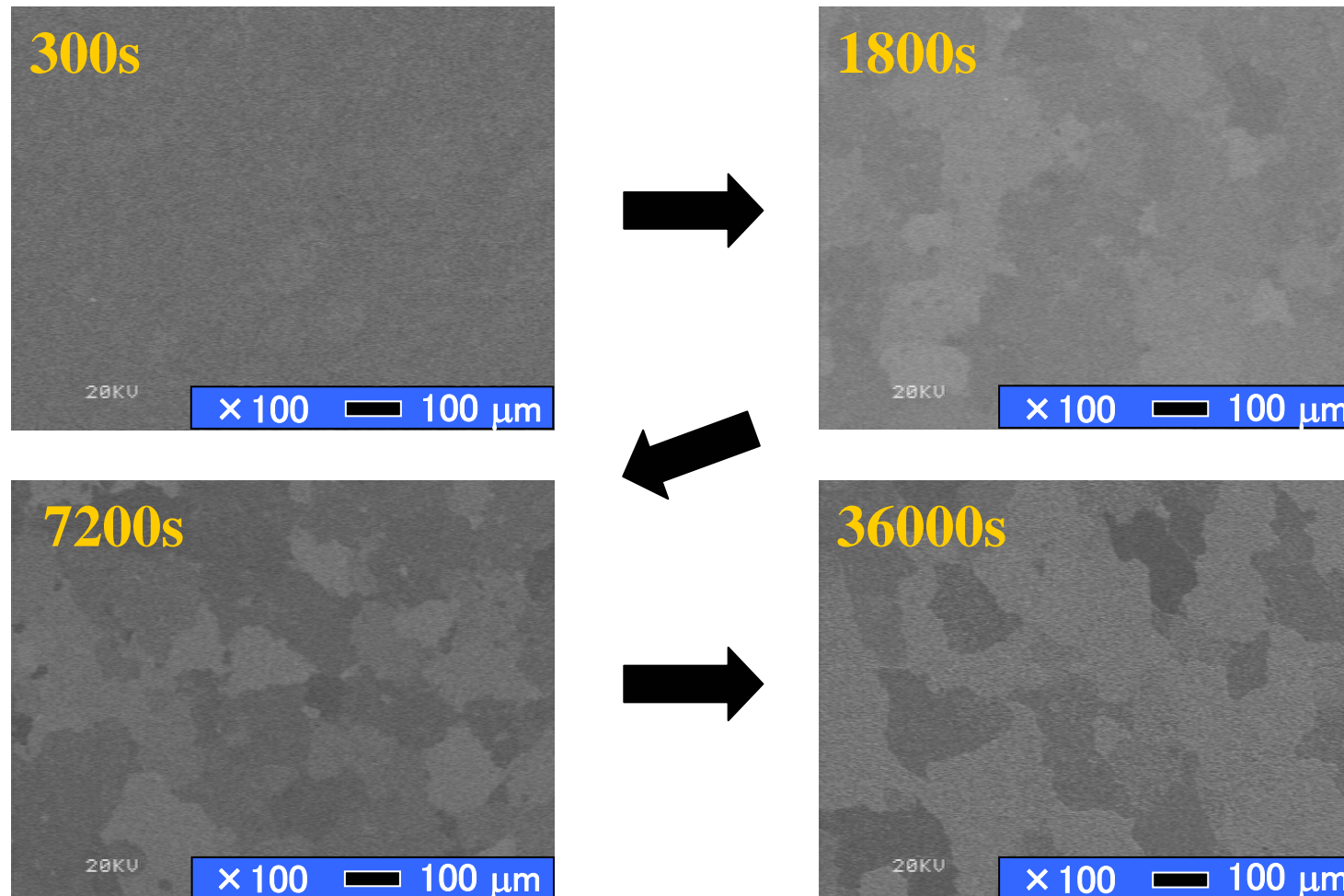


36000s(10時間)



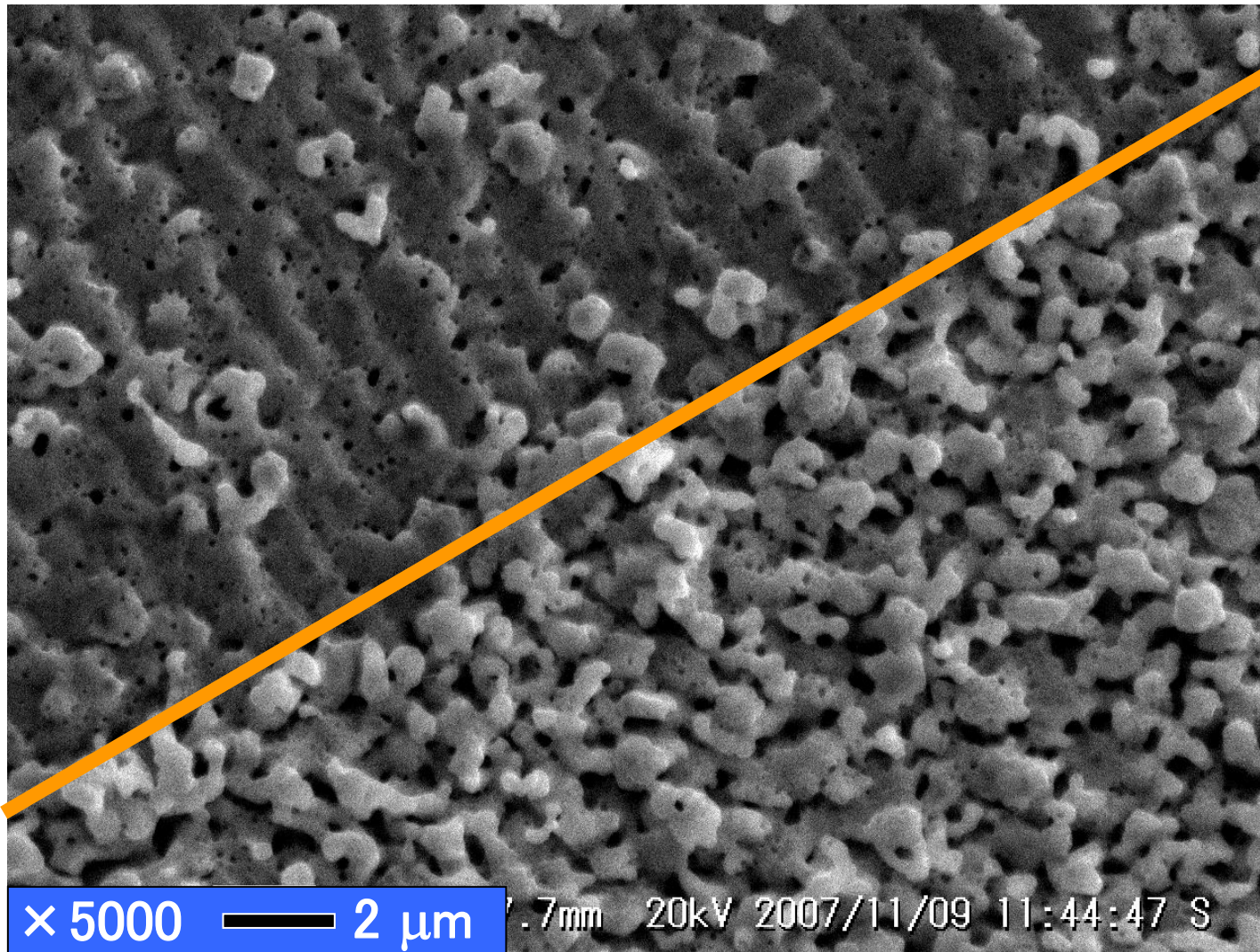
ヘリウムバブルの形成及びまだら模様の損傷が確認された。
場所によって損傷状態に差異がみられた。

多孔構造形成における照射量依存性 (ITER R&D用W)



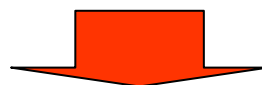
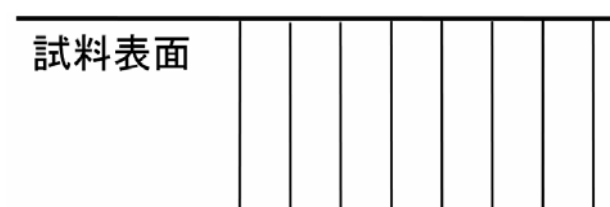
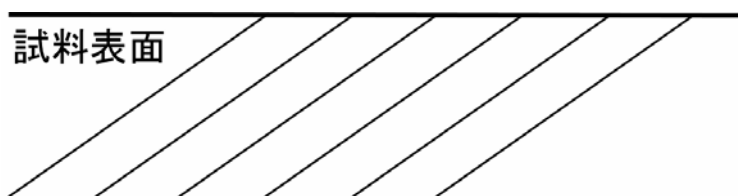
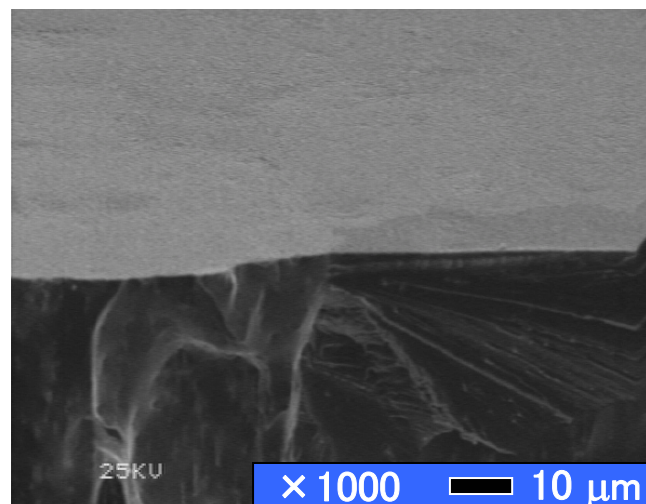
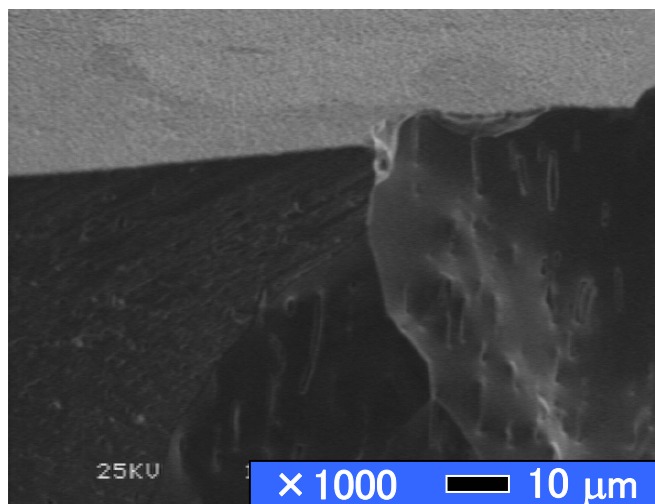
照射量が増加するにつれ、損傷が明確になっている。大きさの変化はみられない。

2時間照射後のITER R&D用タンゲステン表面(高解像度)

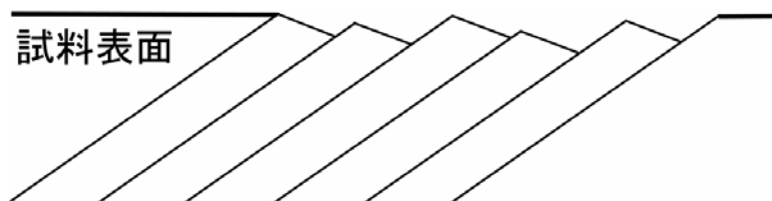


結晶構造の差異によって、損傷の違いが発生するのではないか

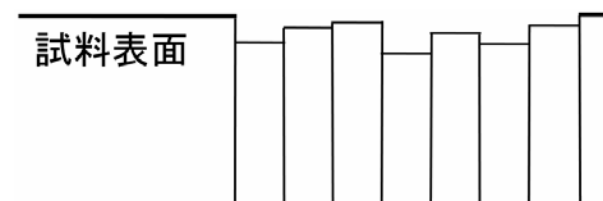
損傷を受けた試料の断面写真 (ITER R&D用W)



Heプラズマ照射



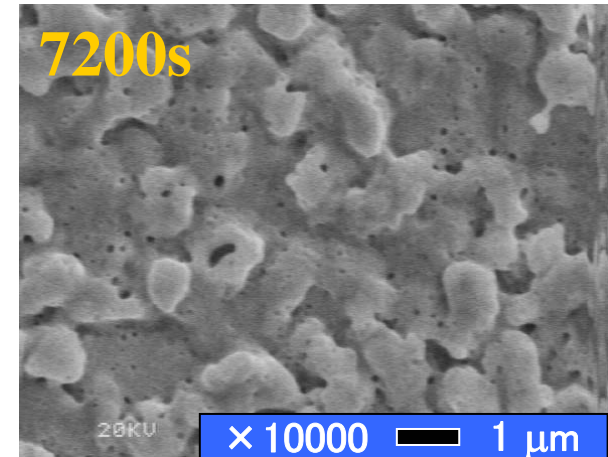
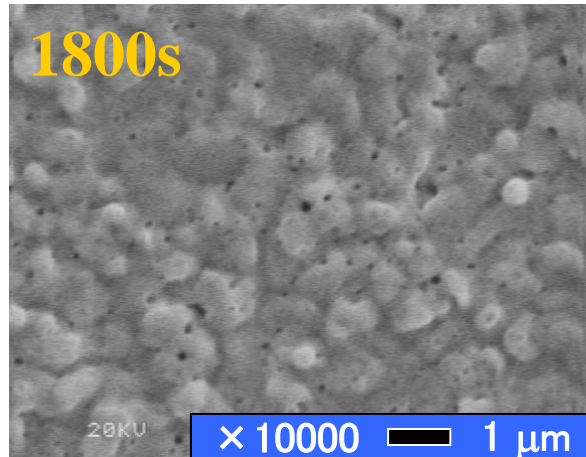
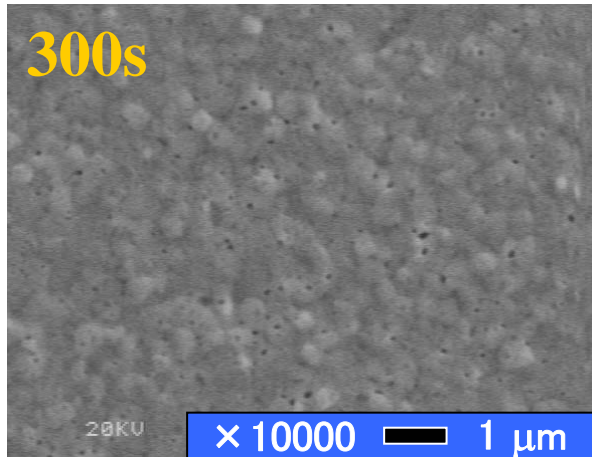
暗く表示される部分の断面概略図



明るく表示される部分の断面概略図

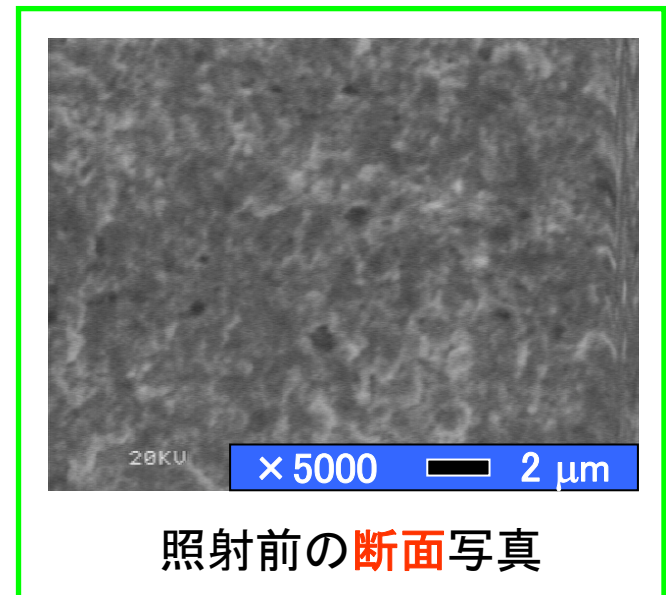
Heプラズマ照射 (超微細構造W)

試料温度: **1800K**、電子温度: 10eV、粒子束: $1.3 \times 10^{23} \text{m}^{-2}\text{s}^{-1}$



- ・プラズマ照射後の試料表面にはヘリウムバブル等の多孔構造の形成が確認された。
- ・また、多数の粒状の物体が形成されていた。
- ・照射量が増加するにつれ、凹凸の径が大きくなっている。

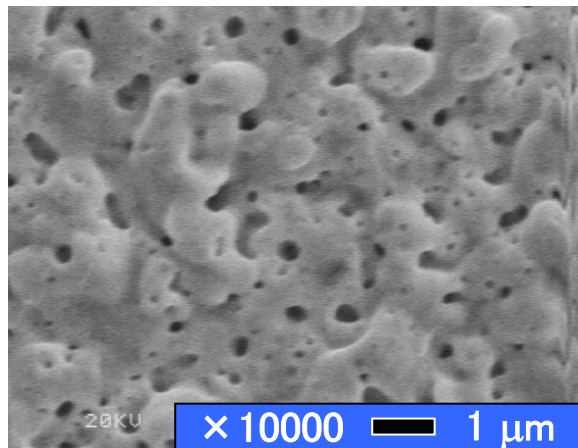
➡ 再結晶による結晶成長が発生している可能性



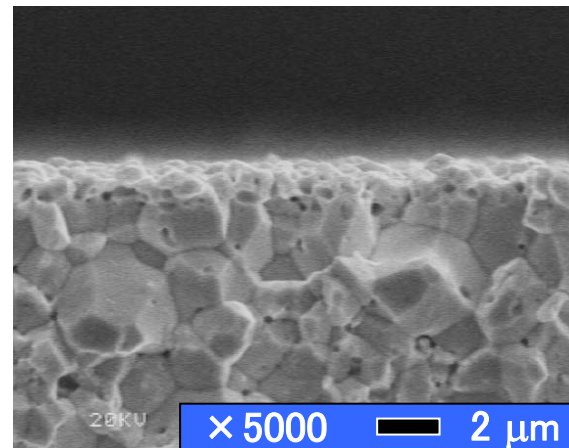
照射前の断面写真

より高温域でのHeプラズマ照射 (超微細構造W)

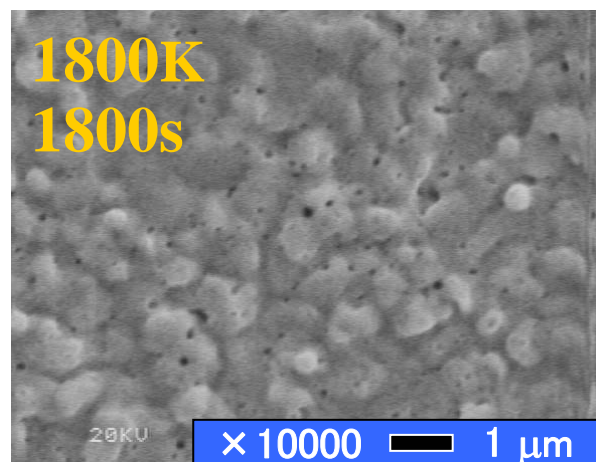
試料温度: **2050K**、電子温度: 11eV、粒子束: $1.9 \times 10^{23} \text{m}^{-2}\text{s}^{-1}$ 、照射時間: 1800s



表面写真



断面写真



1800Kでの照射後の**表面**写真

試料温度1800Kでの照射結果に比べ、より大きなヘリウムバブルが形成されており、損傷も激しくなっていることが確認された。

まとめと今後の課題

まとめ

- ITER R&D用タングステン、超微細構造タングステンともに、高温域(1800K)でのプラズマ照射によって、ヘリウムバブル等の多孔構造の形成が確認された。
- とともに照射量が増えるにつれ、損傷が激しくなった。
- ITER R&D用タングステンにおいて、場所によって損傷に差異がみられた。
⇒結晶構造の違いによって変わるものと考えられる。
- 超微細構造タングステンにおいて、照射量の増加に伴い表面に形成された粒状の物体が大きく成長した。
⇒再結晶による結晶成長が発生している可能性が考えられる。

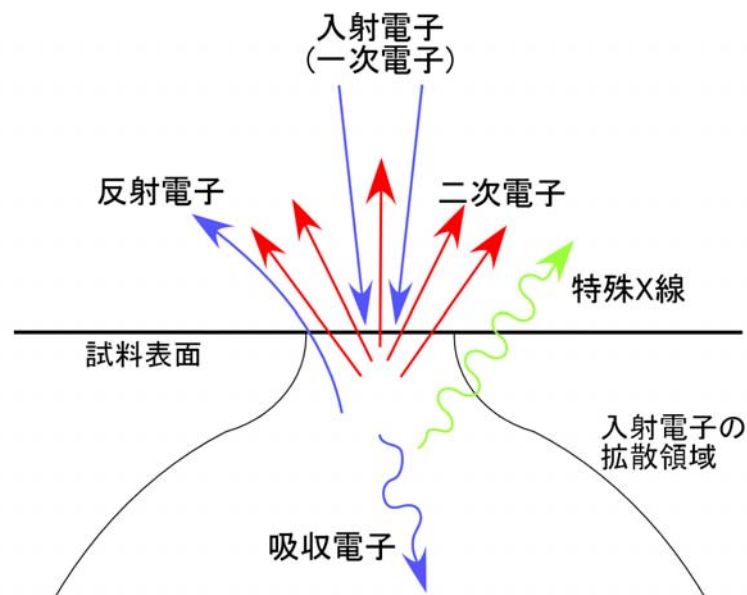
今後の課題

- ITER R&D用タングステンにおいて組成変形と結晶構造に関するさらなる調査
- 多孔構造形成における照射温度依存性の調査
⇒中温域においてHeプラズマ照射実験を行う
- 超微細タングステンの各製造法における組成変形への影響の調査
⇒製造法の異なる超微細タングステンにおいても同様の実験を行う

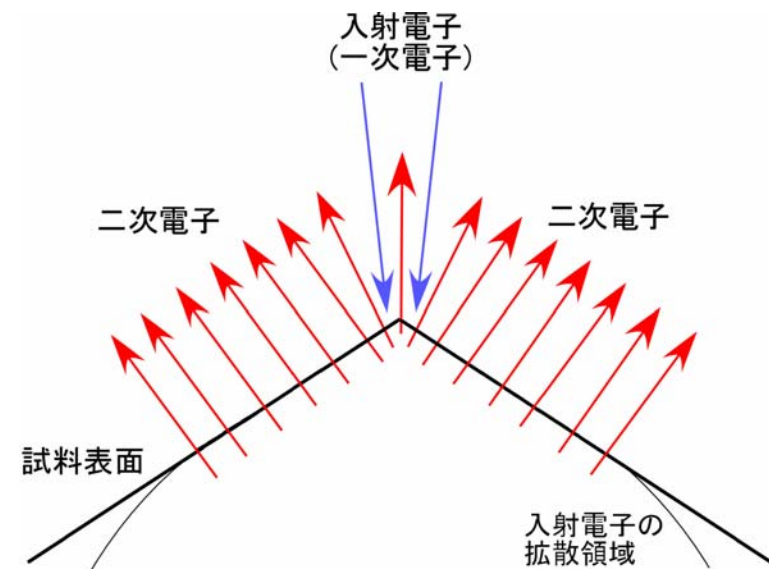
走査型電子顕微鏡(SEM)

<特徴>

- 試料に対して電子線を照射し、それによって放出された二次電子を検出することで、試料の形状を観察する
- 二次電子のエネルギーは非常に小さいため、試料表面付近で発生したものしか外部に飛び出さない
- 検出される二次電子の数が多いほど、その箇所はSEM写真上で明るく表示される



電子線照射による効果



二次電子放出の傾斜角効果

表面処理後のタングステンにおけるHeプラズマ照射例

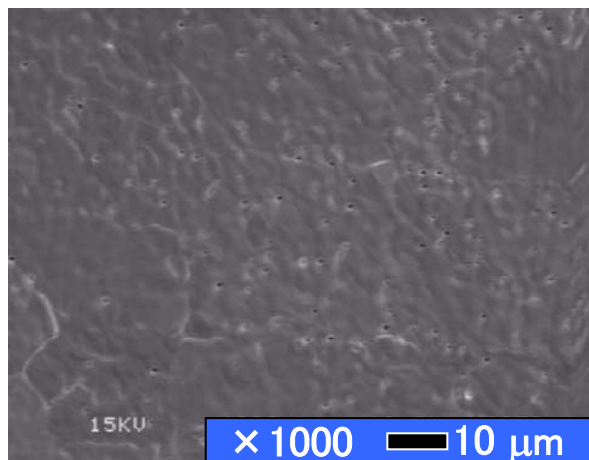
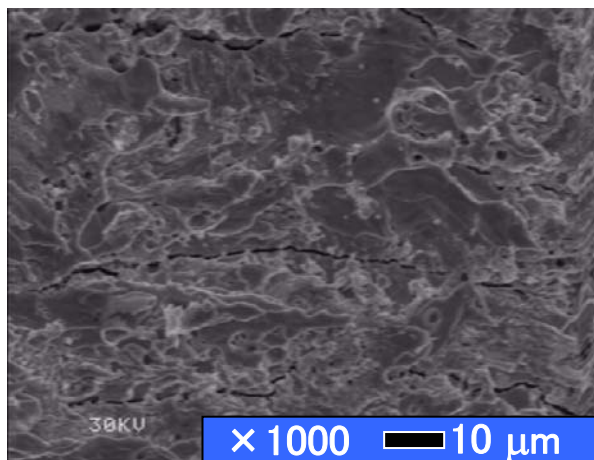
使用材料・・・粉末焼結タングステン

・研磨方法

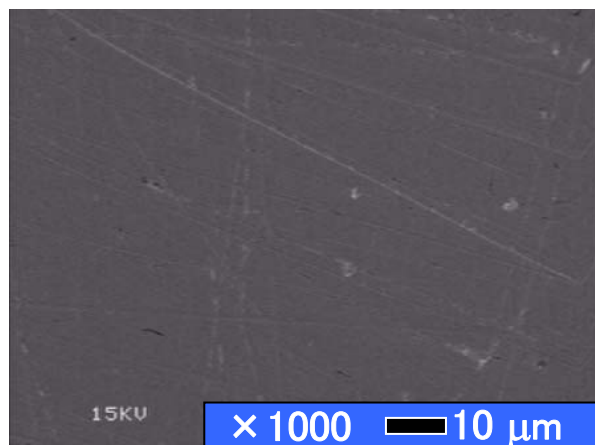
- ①目の粗い研磨紙(1600番)で手研磨
- ②目の細かい研磨紙(2000番)で手研磨

・照射条件

| | |
|------|---|
| 試料温度 | 1600K |
| 電子温度 | 17.6eV |
| 粒子束 | $3.8 \times 10^{21} \text{m}^{-2}\text{s}^{-1}$ |
| 照射時間 | 7200s |
| 照射量 | $2.8 \times 10^{25} \text{m}^{-2}$ |



表面研磨



Heプラズマ照射

研磨による影響はほぼ見られなかったが、研磨後の表面には多数の傷が見られる

・精度の高い研磨方法を用い、照射前後の表面変化を調べる