

平成23年度合同研究会、筑波大学プラズマ研究センターシンポジウム
プラズマ物理クラスター スクレープオフ層とダイバー タ物理サブクラスター(第1回会合)
炉工学クラスター ブランケット サブクラスター(第2回会合)
双方向型共同研究会合「ガンマ10装置における炉壁材料の損耗・再堆積の研究とそのダイバータ
開発戦略における位置づけ」
2011年7月20～22日、つくばサイエンスインフォメーションセンター(つくば市)

タングステンのパルス熱・粒子負荷影響

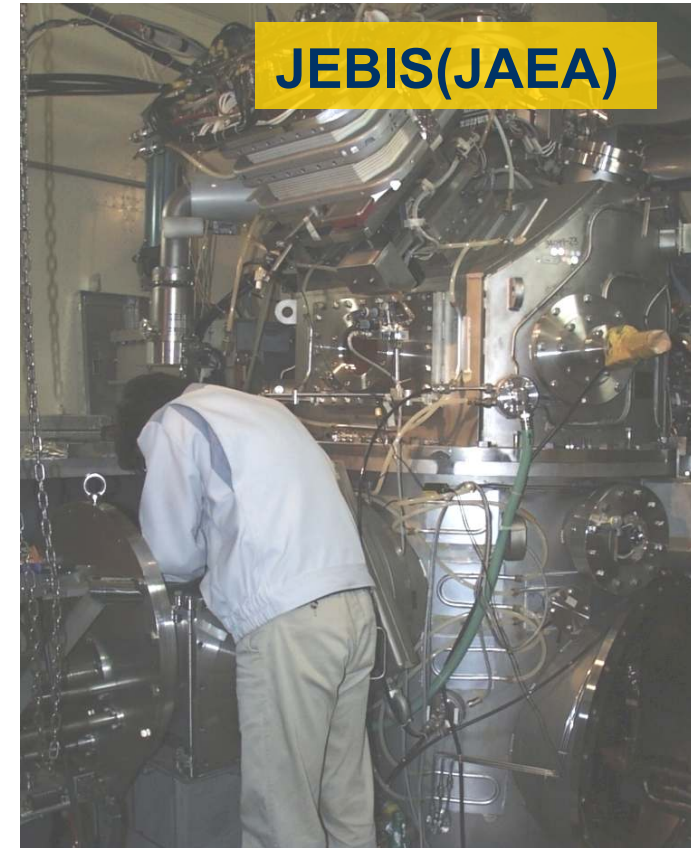
九大応力研 徳永和俊、荒木邦明、藤原正、宮本好雄、中村一男
九大総理工 堀田智宏
原子力機構 江里幸一郎、鈴木哲、榎枝幹男、秋場真人
東北大金研 栗下裕明

研究の背景と目的

- **タングステン(W)**:スパッタリング特性、熱特性に優れている。
ダイバータ及び第一壁・ブランケットのアーマ材
低温脆性、再結晶脆化、照射脆化の問題
延性脆性遷移温度(DBTT): 400°C程度
再結晶温度:1300°C程度
 - **核融合炉ダイバータ板の熱負荷**:
定常熱負荷: $5\text{MW/m}^2 \sim 20\text{MW/m}^2$ ➡ 除熱
非定常熱負荷:
 ディスラプション: 数ms、数MJ/m² ➡ 損耗、損傷、寿命
 ELM: 0.1~1ms, 0.5~2Hz ➡ プラズマへの影響
 - **熱負荷模擬実験によるタングステン材の熱負荷特性評価**:
ダイバータ負荷熱源: 水素、ヘリウム、電子、電磁波他
模擬実験: 電子ビーム、イオンビーム照射(H, He)、
 He照射材のパルス電子ビーム加熱
- (1) ディスラプション模擬実験
 - (2) イオンビーム加熱(水素/ヘリウム注入効果)/パルス熱負荷実験
 - (3) 繰返し熱負荷実験

ディスラプション模擬実験

- 電子ビーム装置:
高熱負荷試験装置(JEBIS)(原子力機構)
照射条件:
エネルギー : 65 keV
熱流束: 1 GW/m²
ビームの半値幅 : 8 mmΦ
ビームアパチャー : 4 mmΦ
照射時間: 0.6 ms
- 試料:
タングステン(W)系材料
10x10x1mmt、室温
- 観察分析:
表形状変化: 走査型電子顕微鏡(SEM)
損耗量: 電子天秤



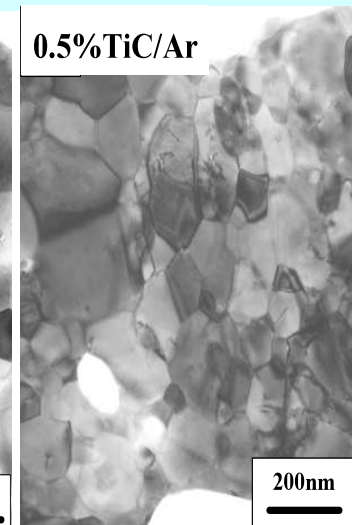
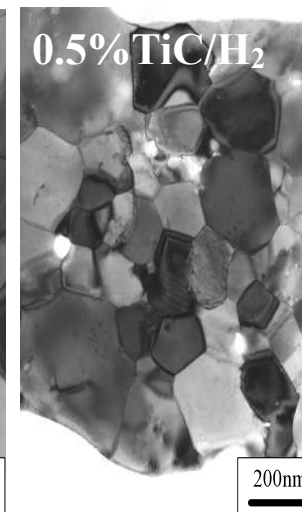
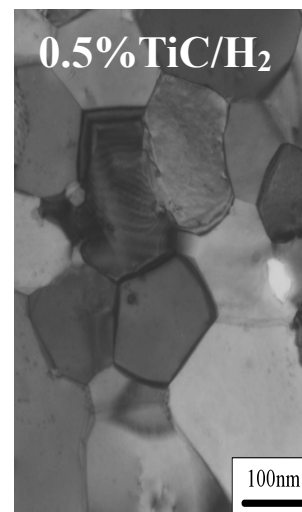
$$T = T_0 + F_0 \sqrt{t} \frac{2}{\sqrt{\pi \rho c k}}$$

試料

■ 試料：

- ・ 粉末焼結タングステン：
圧延方向が表面に平行(PM-W)及び垂直(PM-W_{pa})
(応力除去及び再結晶処理材)
- ・ La₂O₃ (0.96wt%) ドープW (W-La₂O₃)
- ・ K(0.003wt%) ドープW (W-K)
- ・ 超微細結晶粒W-TiC合金(UFG W-TiC alloys)
W-0.5wt%TiC/H₂
W-0.5wt%TiC/Ar: 結晶粒 小、Arバブル
製造の際のMA時にH₂及びAr雰囲気中で作製

W-0.5wt%TiC合金のTEM像
(栗下(東北大)より)



電子ビーム(EB)照射パルス熱負荷実験

- 電子ビーム装置: 高熱負荷試験装置(JEBIS)(原子力機構)

- 試料ホルダー

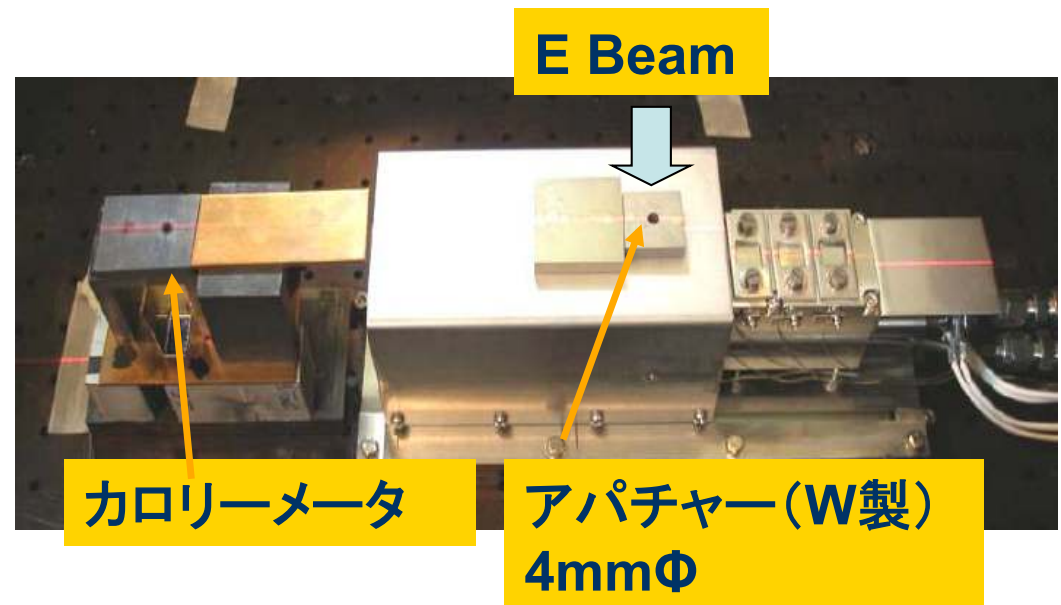
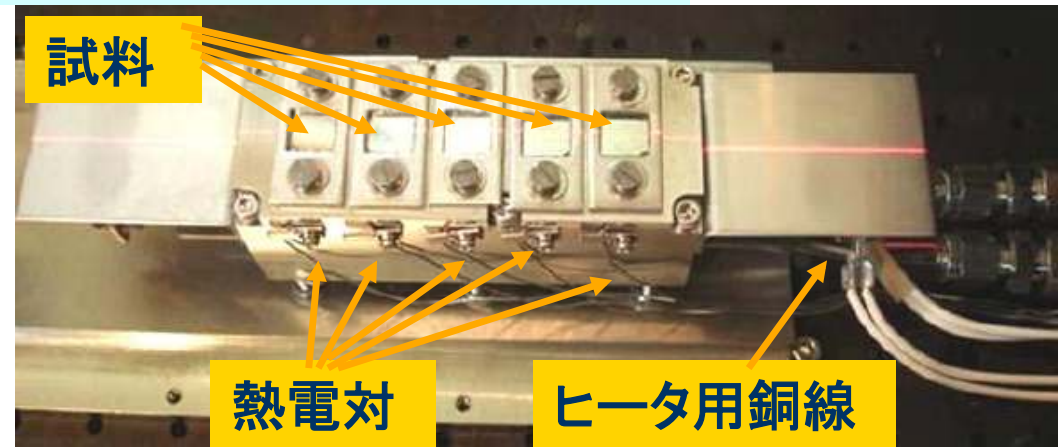
- ・試料: 銅製のブロックの表面
- ・試料の裏面を熱電対で温度測定
- ・ヒータにより加熱可能(550°C程度)

- 電子ビーム照射

ビームアパチャー: 4mmΦ

- 熱流束測定:

カロリメータ(W製)

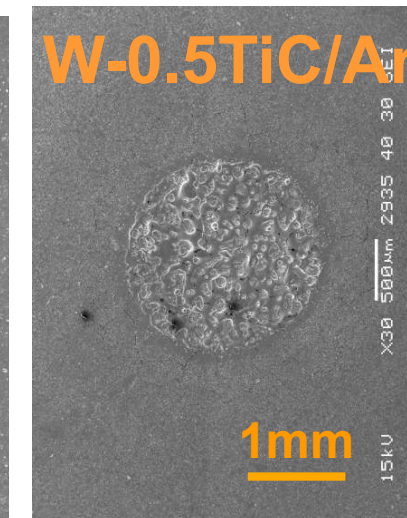
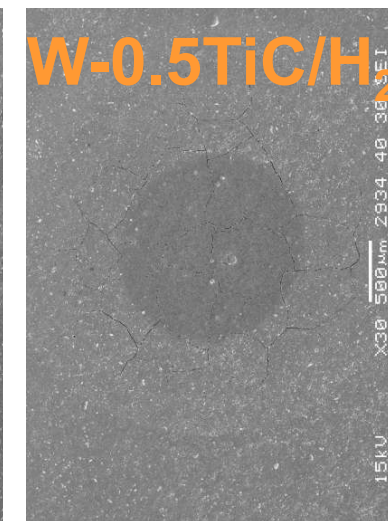
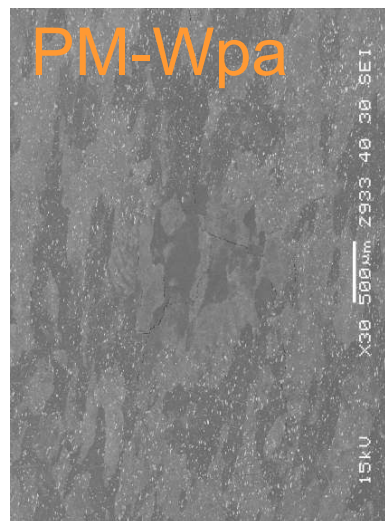
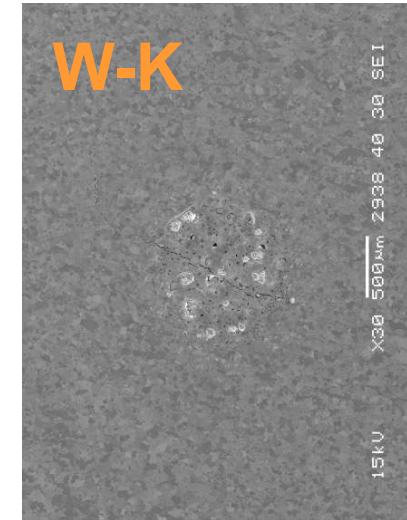
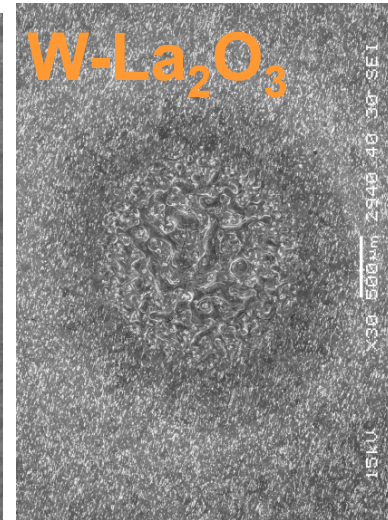
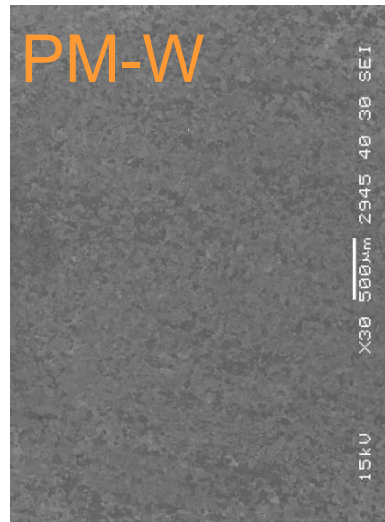


EB照射後の表面形状

・1GW/m², 0.6ms, 4mmφ, 1回(JEBIS)

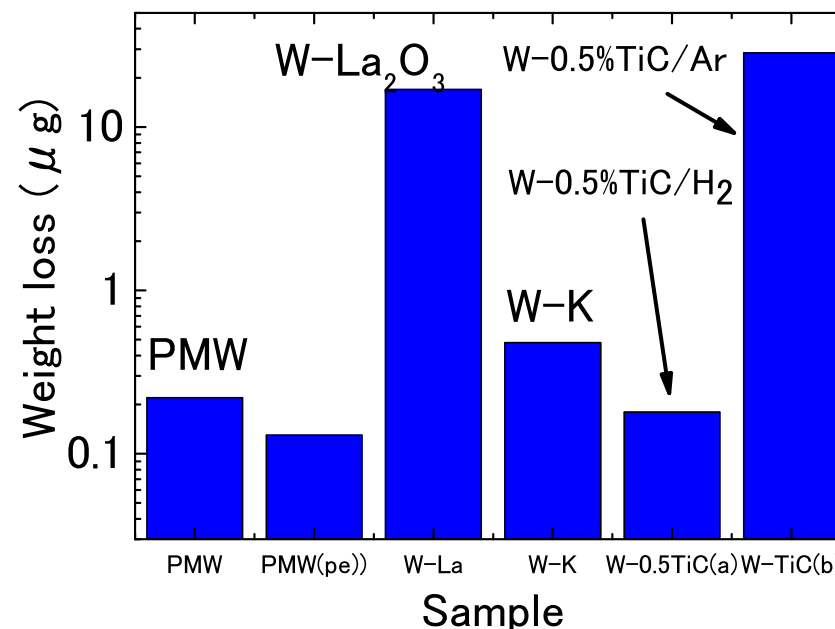
SEM像

- PM-W:照射部分の中心部分の表面 薄く溶融凝固?、クレータや液滴等は観察されない。
- W-La₂O₃:中心部分が溶融凝固 溶融部分は波状の凹凸が形成、La₂O₃の沸騰
- W-K:凹凸は少ない。突沸した跡等
- W-0.5TiC/Ar: 波状の溶融凝固部分が観察、Arバブルによる?
- W-0.5TiC/H₂: 中心部分が比較的薄く平坦に溶融凝固



損 耗 量

- K(0.003wt%)ドープW及びW-0.5wt%TiC-H₂は、パルス熱負荷による損耗特性が良好



- 内部組織の詳細な検討を行うことにより、損傷、損耗のメカニズムを解明する。
- 初期温度が450℃程度のDBTT以上の場合の熱負荷実験を行う。
- 繰り返し熱負荷時の挙動を調べる。

水素・ヘリウム照射による高熱流照射

■水素・ヘリウム照射

・ダイバータ受入試験装置(DATS)
(原子力機構)

■照射条件(ヘリウムの場合)

エネルギー: 18.7 keV

フラックス: $\sim 2 \times 10^{21}$ He/m²s (中心部)

熱流束: ~ 6 MW/m² (中心部)

照射時間: 3.0 $\sim$ 3.9 s

繰り返し回数: 7 $\sim$ 170回

照射量: $10^{22} \sim 10^{24}$ He/m²

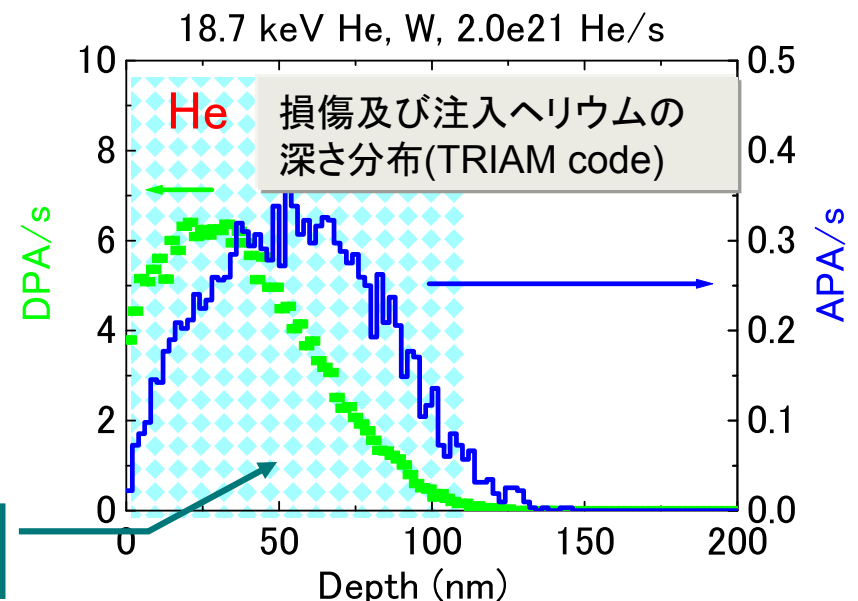
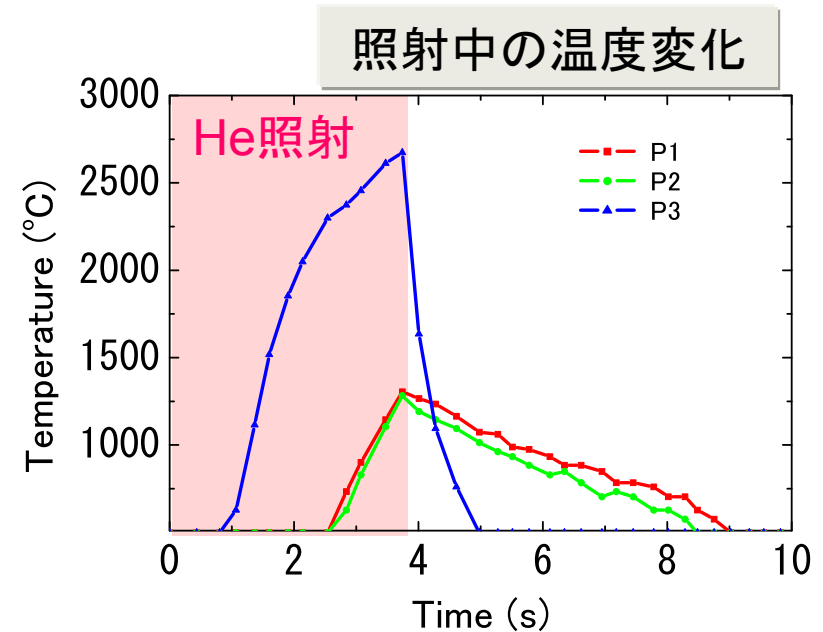
■試料: 粉末焼結タングステン (PM-W)

20 x 20 x 5mm、10 mm x 10 mm x 1 mm

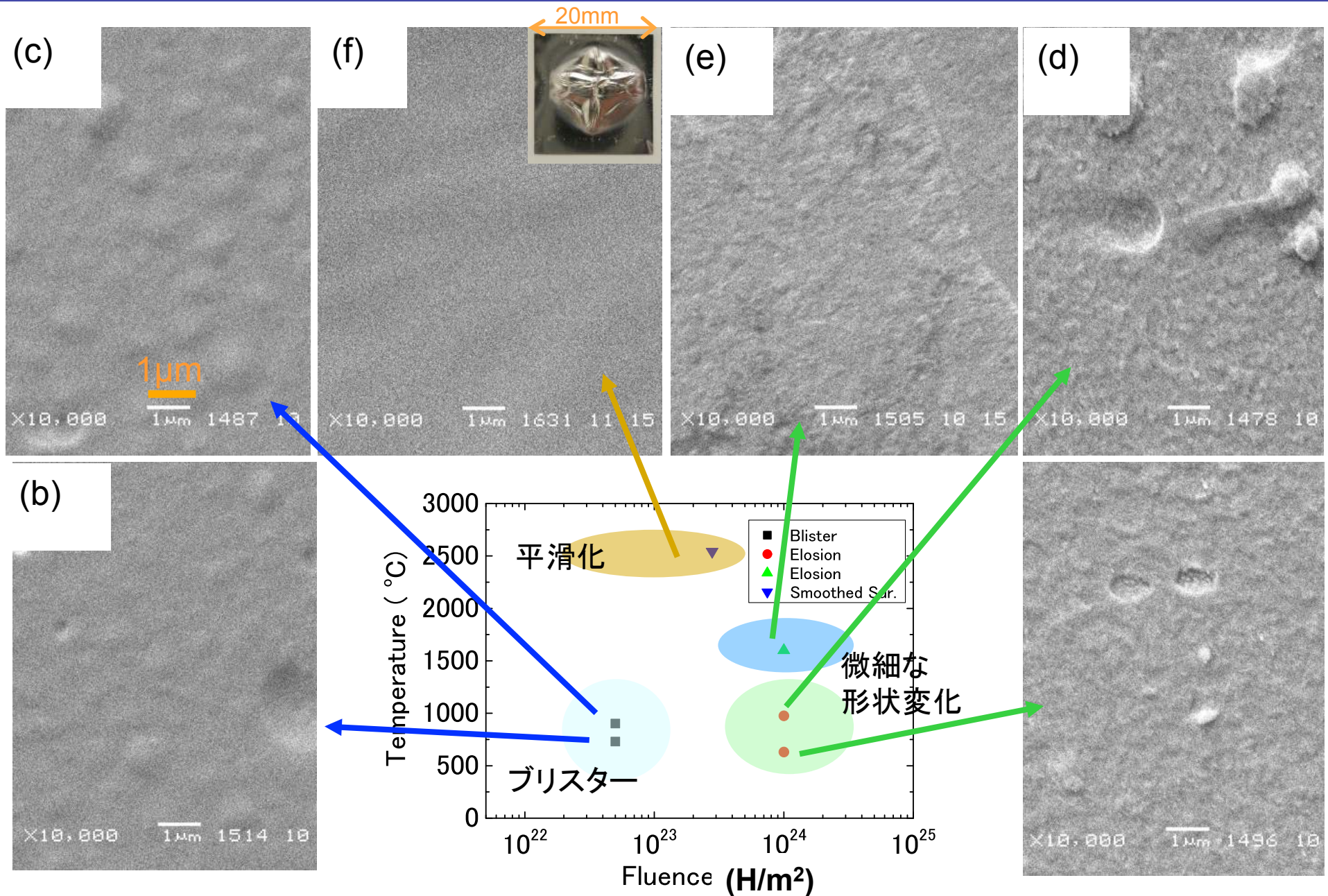
20 x 20 x 0.1 mm、10 x 10 x 0.1 mm

無酸素銅の冷却管の表面に機械的に固定

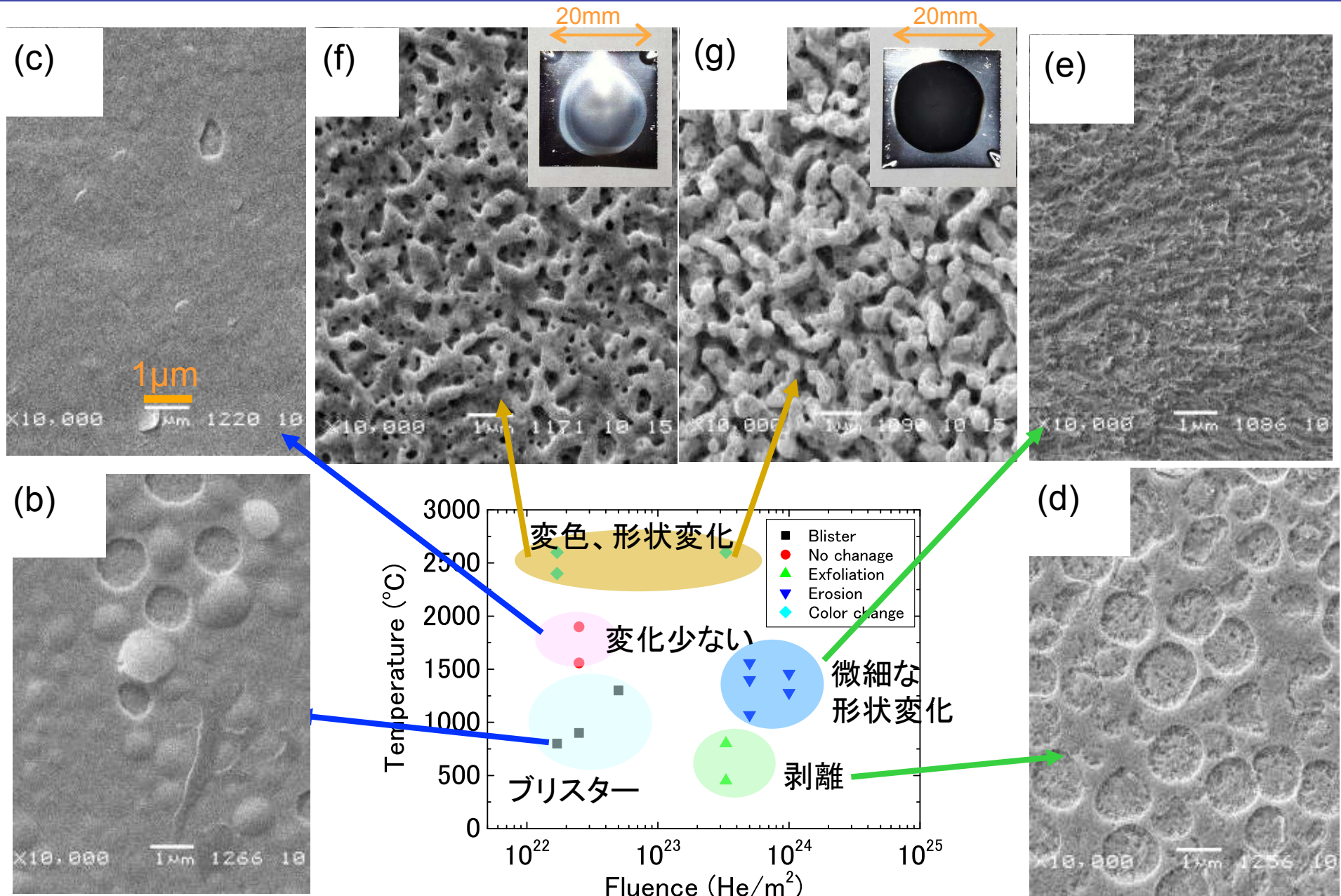
損傷影響領域 $\sim$ 100nm



水素照射後の表面形状変化



ヘリウム照射後の表面形状変化

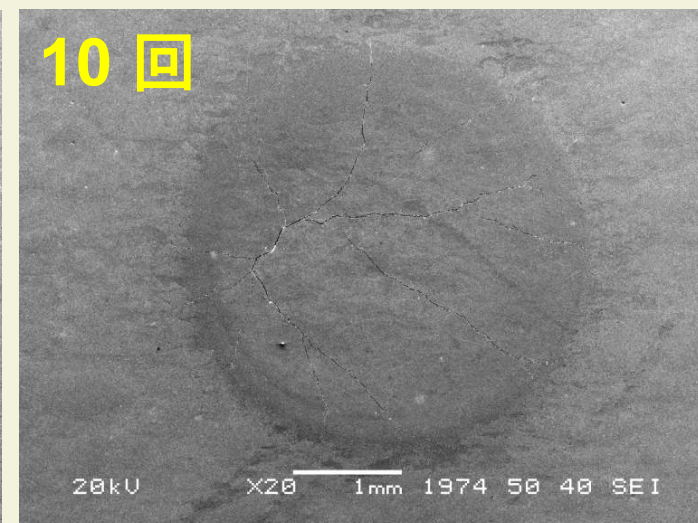


パルス高熱負荷後の表面形状(マクロ)

再結晶処理(RX)材、1 GW/m²、1.0 ms、1 回及び10 回

He未照射材

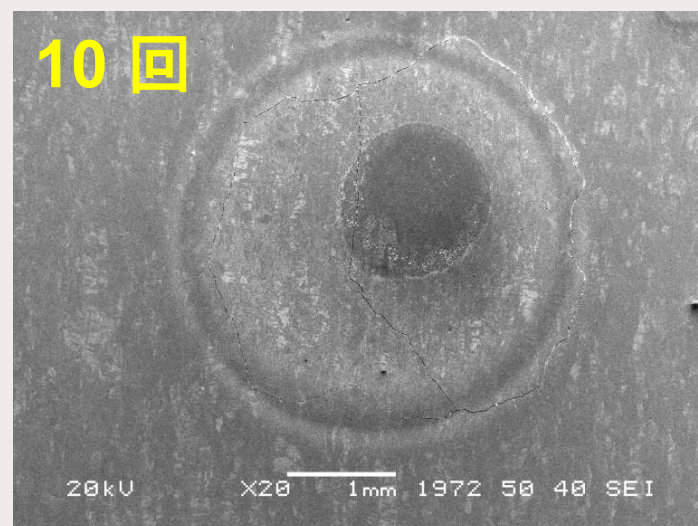
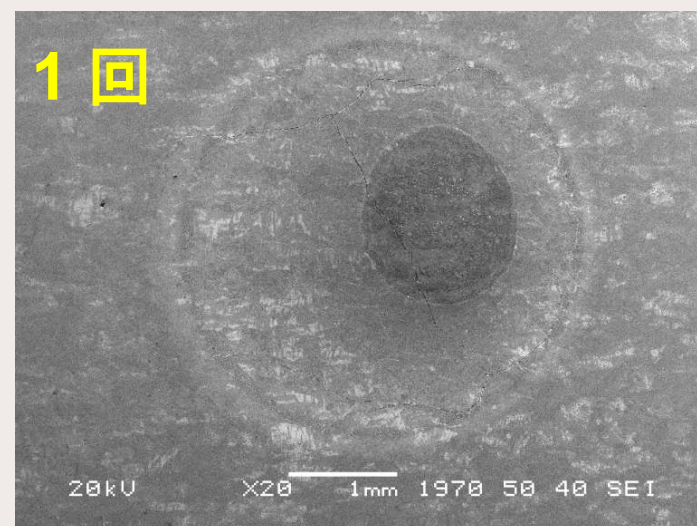
- 溶融無し
- クラック、多少発生
- 優れた耐熱衝撃性



He予照射材

(3×10^{23} He/m²、<973K)

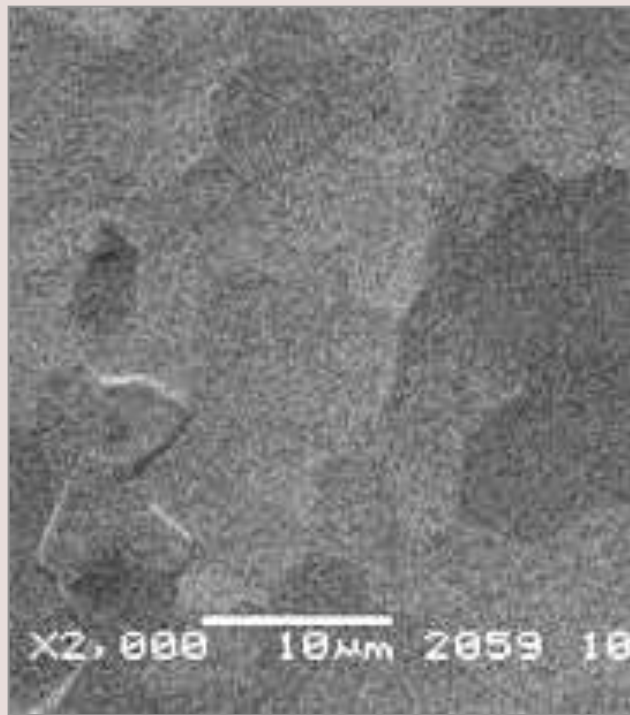
- 熱負荷の高い中心部で溶融
- ⇒ He照射による熱伝導率の低下
- 周辺では白い像



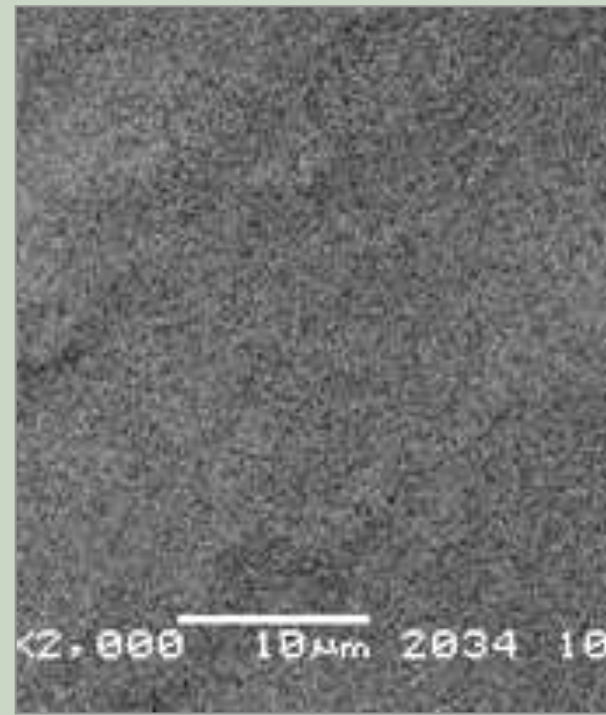
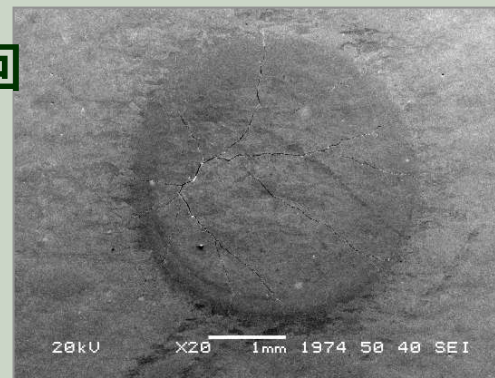
パルス高熱負荷⇒He未照射材 (ミクロ)

再結晶処理(RX)材(He未照射)、1 GW/m²、1.0 ms、1 回及び10 回

1回



10回



- 亀裂が発生するが、あまり増加しない。
- 表面の平滑化
- 再結晶、表面拡散(高温時に原子移動)

表面、内部での原子の自由な移動

⇒容易な回復



耐熱衝撃特性は良好

パルス高熱負荷⇒He予照射材(ミクロ)

再結晶処理(RX)材

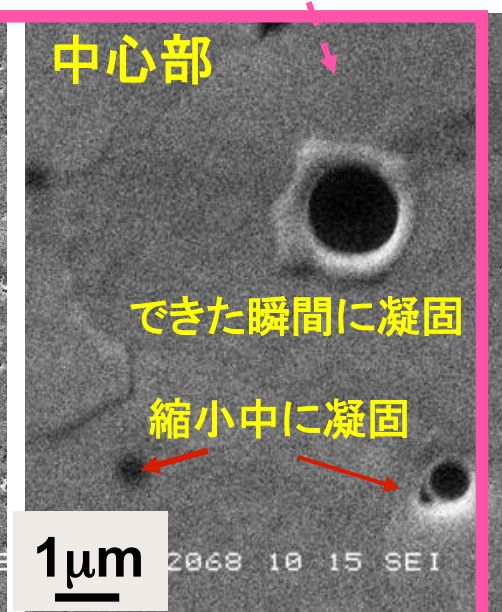
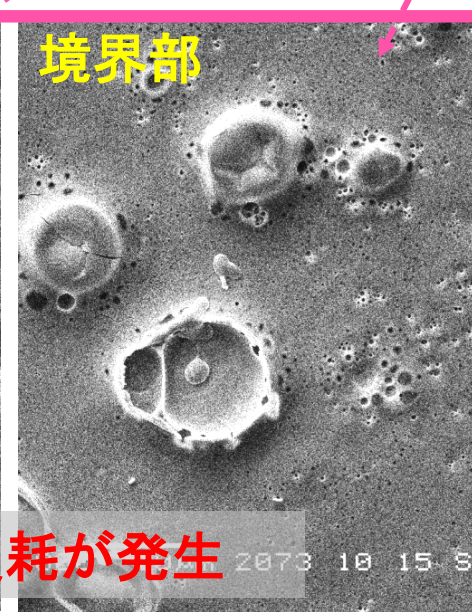
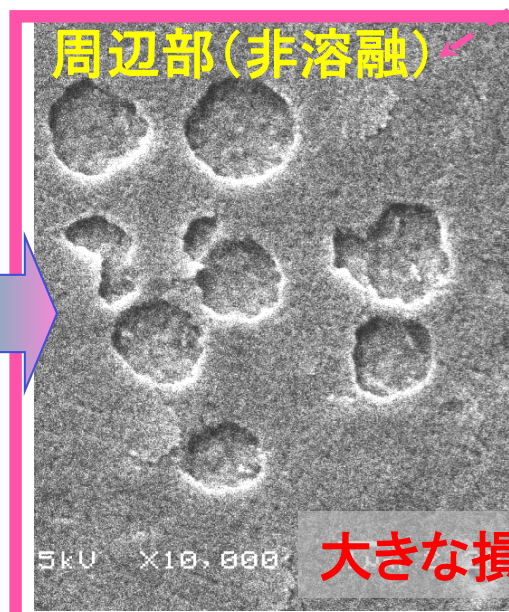
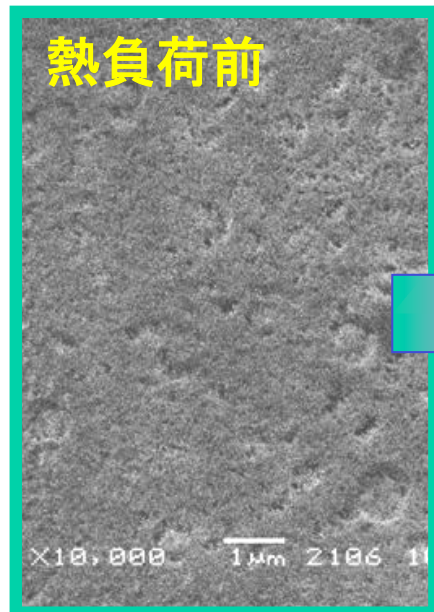
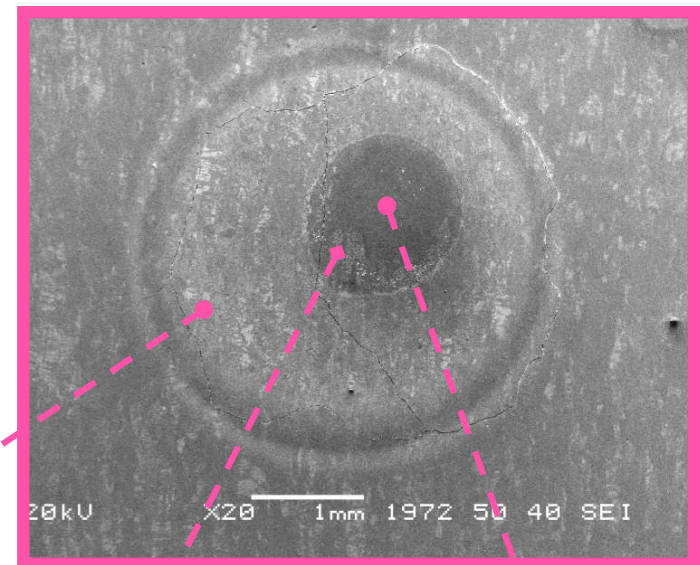
ヘリウム予照射: $3 \times 10^{23} \text{He/m}^2$ 、 $< 973 \text{K}$

熱負荷: 1 GW/m^2 、 1.0 ms 、10 回

中心部: 溶融、Heバブルの破裂によるホール⇒液滴

境界部: 直径 $10 \mu\text{m}$ 程度のブリスターの破裂、
100nm程度のピンホール孔⇒損耗、ダスト

非溶融部: 表面スポンジ層の剥離(瞬間的)⇒損耗、
ダスト、表面の平滑化無し⇒拡散困難



大きな損耗が発生

タングステン材の高熱負荷特性

■ 試料 10mm x 10mm x 1mm

- ・ **粉末焼結W材**: アライドマテリアル(株)製、ITER用納入
圧延方向に平行、垂直の2種類
- ・ **高靱性W-1.1TiC(TFGR W-1.1TiC)**: 東北大学・栗下先生作製
HIP焼結体について粒界すべりを活用した高靱性化処理を約1923Kで行い、再結晶状態で靱性に優れる。酸素濃度が異なる2種類
(#134:850ppm、
#138:170ppm)

■ 実験条件

- ・ **定常熱負荷**:
1700°C、3min
- ・ **繰返し熱負荷**: ELM時の熱負荷によるアーマ材影響を評価
<450°C-1250°C、2s/9.5s、380回

電子ビーム熱負荷装置(九大応力研)

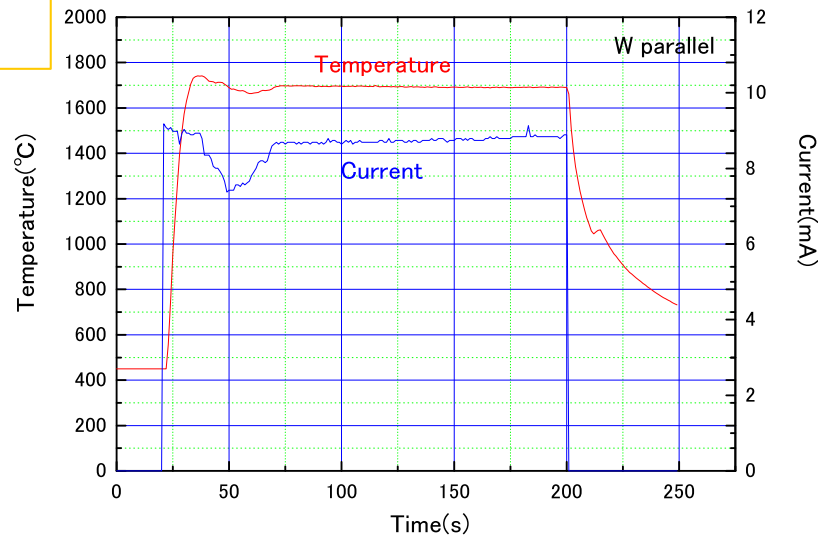
■ 仕様、付属装置

- ・3kW:20kV, 150mA
- ・パルス～定常ビーム
- ・要素材
- ・試料ホルダー(水冷)
- ・2色放射温度計(低・高温)
- ・熱電対
- ・QMS、可視分光器
- ・膜厚計
- ・熱流束:電流(バイアス電圧印加)、 ΔT



定常熱負荷及び繰り返し熱負荷

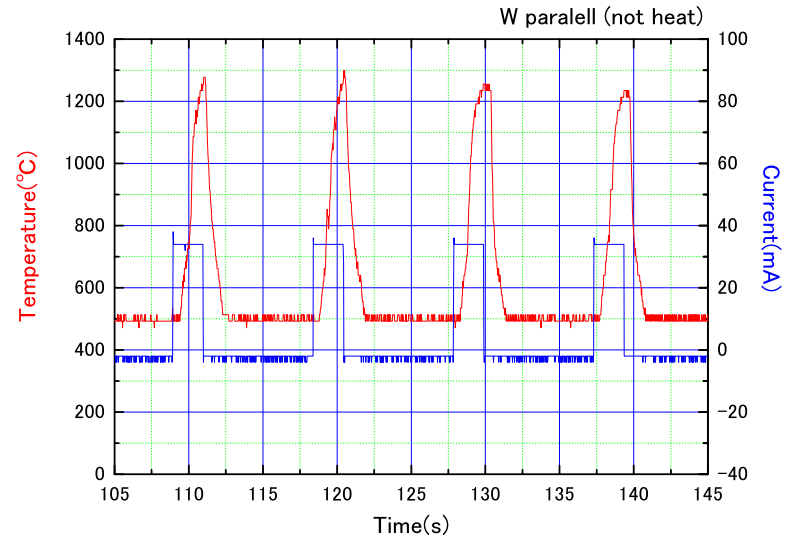
$W_{//}$



定常熱負荷: 1700°C、3min



試料ホルダー(Cu, W)及び試料



繰返し熱負荷

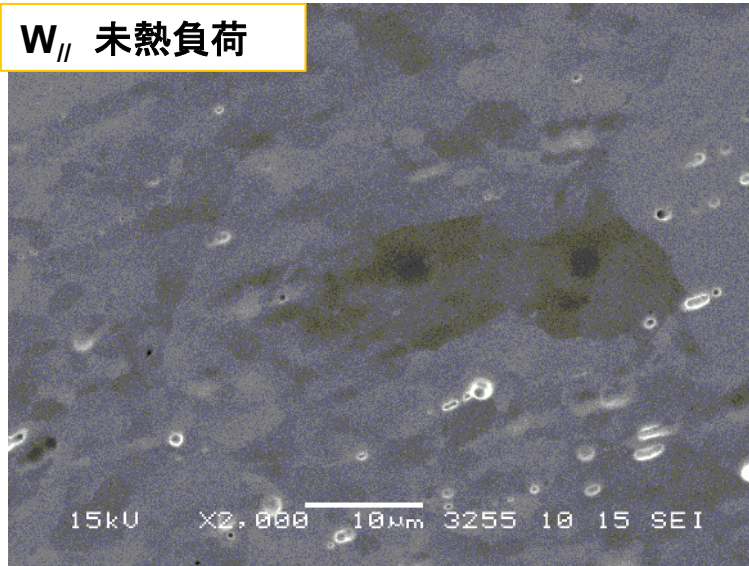
2s/9.5s、<450°C–1250°C、380回



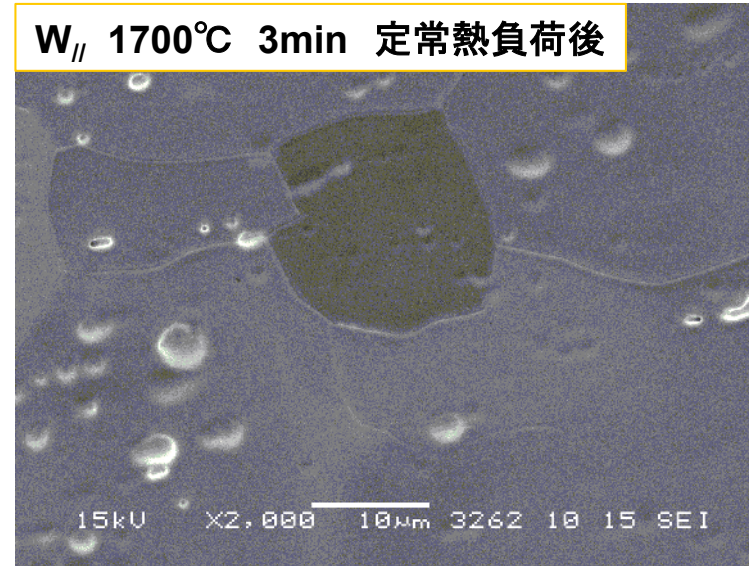
試料ホルダー(CU, W押さえ板)
及び試料

繰返し熱負荷前後の $W_{//}$ 及び $W_{\perp}$ のSEM像

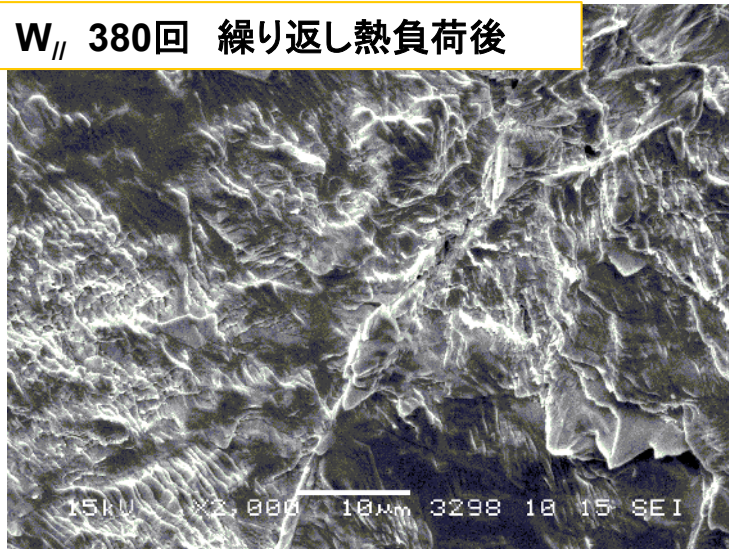
$W_{//}$ 未熱負荷



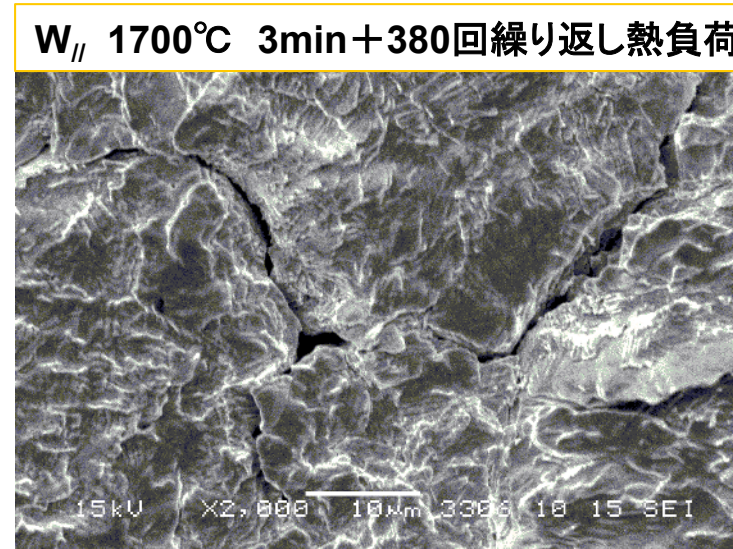
$W_{//}$ 1700°C 3min 定常熱負荷後



$W_{//}$ 380回 繰返し熱負荷後

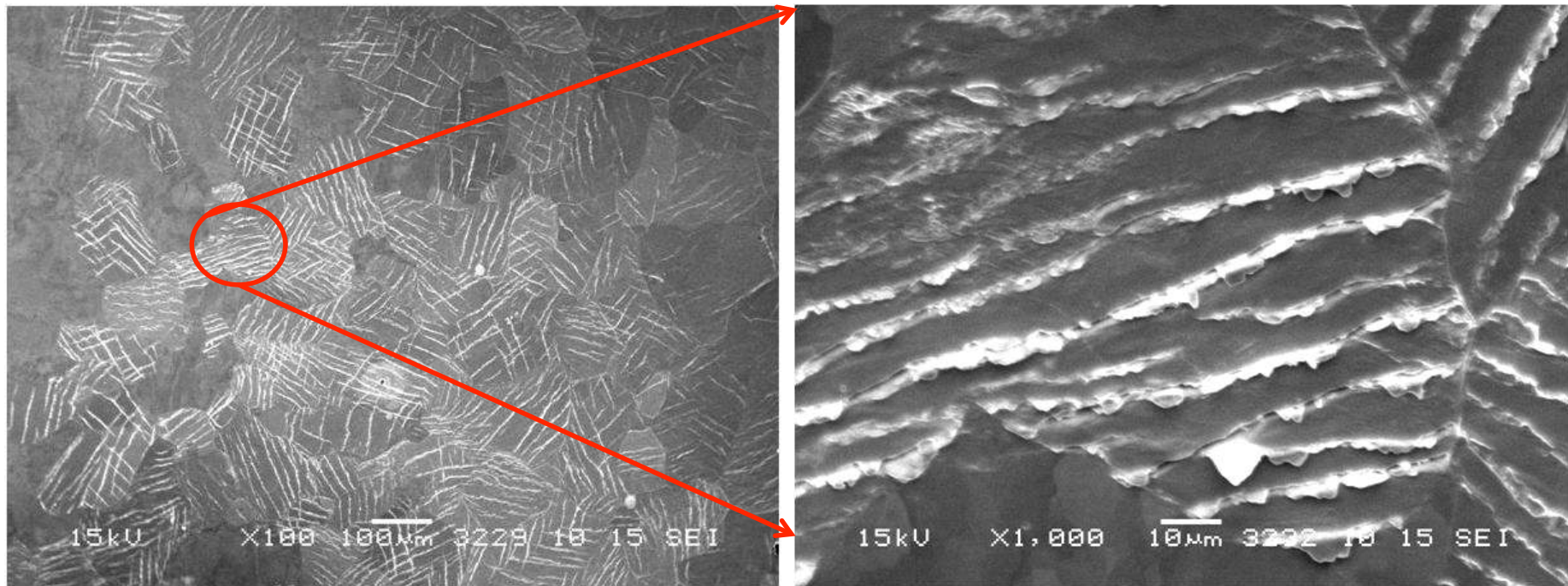


$W_{//}$ 1700°C 3min+380回繰返し熱負荷後



繰返し熱負荷により顕著な凹凸、亀裂、剥離等が発生し、表面が粗面化。
1700°C、3min加熱により再結晶化した試料では、粒界に沿う亀裂が発生。

繰返し熱負荷による表面形状変化の 初期過程 (SEM像)

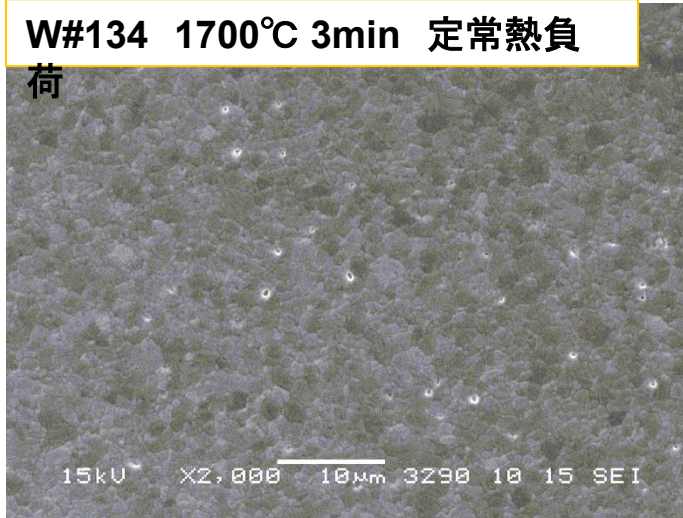


- ・粒界により拘束された各結晶粒の方位の違いにより発生する種々の熱応力により、各結晶粒で不均一な塑性変形が生じる。
- ・一回の照射では、変化はないが、繰返し熱負荷による熱疲労により、表面に、結晶方位に依存した線上の凹凸が形成するものと考えられる。
- ・これらが、さらに繰り返すことにより、顕著な凹凸等が形成されたものと考えられる。

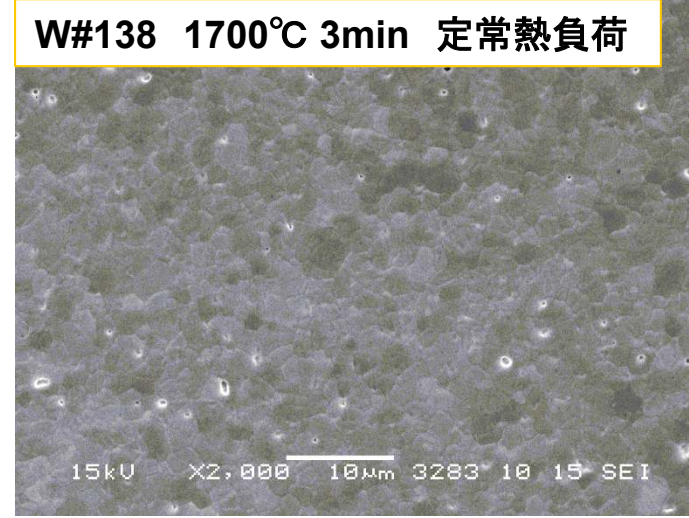
繰返し熱負荷前後のW-1.1TiCのSEM像

繰返し前

W#134 1700°C 3min 定常熱負荷

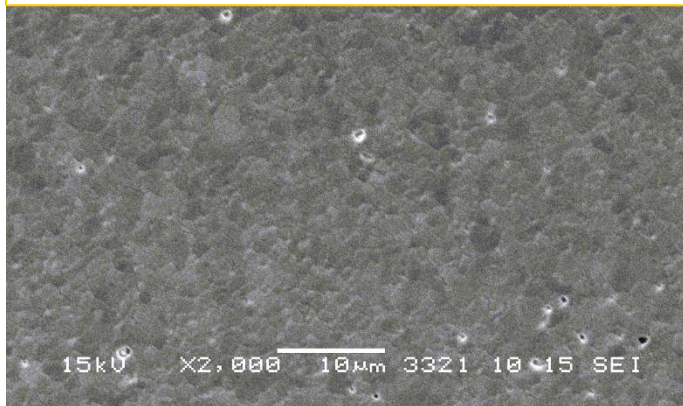


W#138 1700°C 3min 定常熱負荷

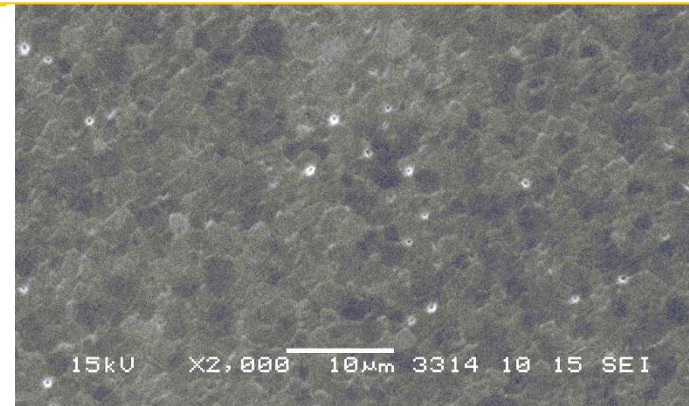


繰返し後

W#134
1700°C 3min+380回繰返し熱負荷後



W#138
1700°C 3min+380回繰返し熱負荷後



- ・繰返し熱負荷後も表面形状の変化は見られない。結晶粒の大きさも同じ。
- ・W-1.1TiCの結晶粒が微細でかつランダムな方位を有するため、隣接結晶粒の間に働く熱応力が小さく、またそのような熱応力は、微細結晶粒に特徴的な粒界すべりにより緩和されたためであると考えられる。

まとめ

- プラズマディスラプション時のパルス高熱負荷による損傷、損耗を評価するために、タングステン(W)材に対して電子ビーム照射実験を行い、**パルス高熱負荷特性**を評価した。
- He照射を受けた焼結Wでは、ディスラプションレベルのパルス高熱負荷(1GW、1ms)によって表面層の剥離や、ブリスターの形成、熔融などが促進され、大きな**損耗**や**ダスト**の発生をもたらす。
- これは、表面直下にHeバブルが形成(**スポンジ層**)されたことによる**熱伝導率の低下**、**原子の熱拡散の低下**(⇒回復の遅れ)、**材料脆化**などが起こったためと考えられる。
- 粉末焼結W材に対する繰返し熱負荷実験では、亀裂、剥離、顕著な凹凸が形成され、**ELM時に受ける繰返し熱負荷**により、表面損傷が発生することが予想される。さらに、これらの損耗、剥離、寿命、熱特性、水素特性等に及ぼす影響を評価する必要がある。
- 一方、**高靱性W-1.1TiC**では、同条件の負荷を与えても、表面形状の変化はなく、核融合炉のELMのような繰返し高熱負荷下における熱・機械的特性に極めて優れていることを示している。