

パルス・定常熱照射PWI研究

上田良夫、河合俊昇、阪本雄祐、大塚裕介(阪大)
菊池祐介、永田正義(兵庫県立大学)、
栗下裕明(東北大)、吉田直亮(九大)、
鈴木 哲、関 洋治(JAEA)

平成25年度

第1回プラズマ物理クラスター・スクレイプオフ層とダイバータサブクラスター会合

第3回炉工学クラスター・ブランケットサブクラスター会合

第1回炉工学クラスター・ダイバータサブクラスター会合

筑波大学プラズマ研究センターシンポジウム

双方向型共同研究「磁化プラズマ中の壁不純物粒子挙動とプラズマ特性への影響」会合

平成25年8月29日(木)8:50~17:50 30日(金) 9:00~17:10

つくばサイエンスインフォメーションセンター-大会議室

アウトライン

- パルスレーザー繰り返し照射によるWの表面損傷
 - 純W
 - W合金 (W-Ta、W-Re)
 - 微結晶粒W (TFGR-W、TiC or TaC)
 - 表面損傷を持つWモノブロックの定常熱負荷影響
 - 表面損傷: パルスプラズマガン(兵庫県立大)、E-beam (JEBIS、JAEA)
 - 定常熱負荷実験: E-beam (JEBIS、JAEA) 10 MW/m²、20 MW/m²
-

ITERの熱負荷の想定事象

- 定常熱負荷: $\sim 10 \text{ MW/m}^2$
 - 単独では、Wダイバータ機器は問題なし
- Slow transient: $\sim 20 \text{ MW/m}^2 (\sim 10 \text{ s})$
 - 定常熱負荷の2倍と見積る(非接触状態→接触状態、等を想定)
 - Wダイバータ機器(特に冷却管とWの接合部)は、使用限界に近い
- ディスラプション: 非放射化フェーズ
 $25.5 \sim 483 \text{ MJ/m}^2/\text{s}^{0.5}$ (15MA、L mode)
 - ($\sim 48 \text{ MJ/m}^2/\text{s}^{0.5}$: W溶融限界)
- ELM: Type I (緩和なし) (非放射化フェーズ)
 $\sim 10 \text{ MJ/m}^2/\text{s}^{-0.5}$ (7.5 MA)、 $\sim 200 \text{ MJ/m}^2/\text{s}^{-0.5}$ (15 MA)
 - 15 MA運転時には、ELM緩和が必須
 - 7.5 MA運転時の影響は？

繰り返しパルス熱負荷実験セットアップ

- Plasma Production
 - ECR discharge
- Plasma Parameters
 - Electron temperature : ~ 10 eV
 - Electron density : 10^{21} m^{-3}
- He flux : $\sim 1 \times 10^{21} \text{ m}^{-2} \text{ s}^{-1}$
- Energy (w/ bias) : 30 eV
- Fluence : $\sim 1 \times 10^{24} \text{ m}^{-2}$

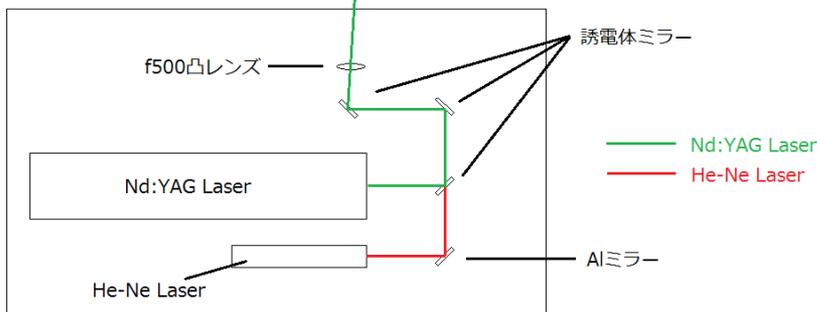
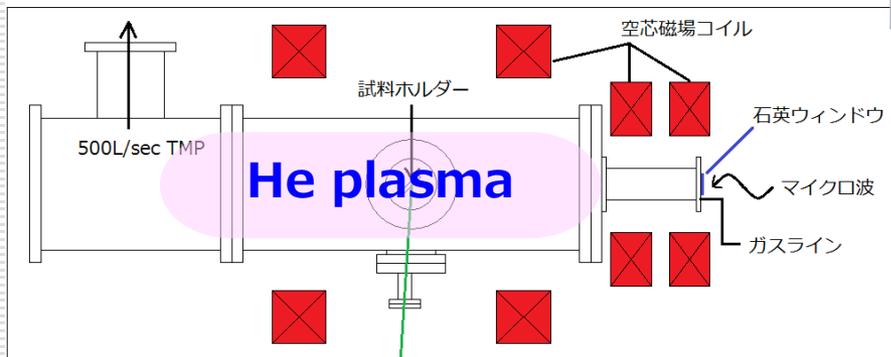
Laser specifications

Nd/YAG fundamental wave

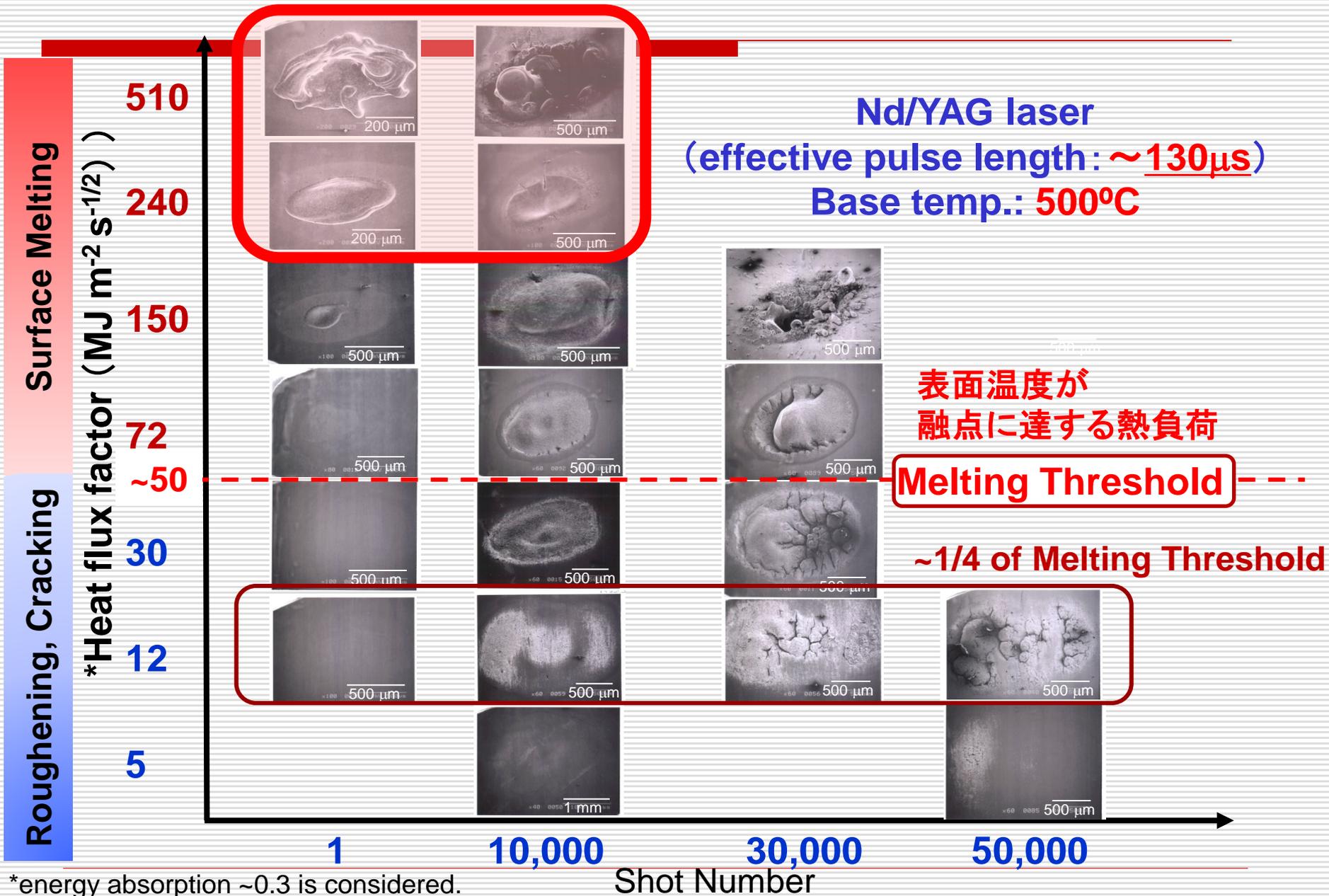
Energy	0.45J
(Effective) Pulse Width	130μs
Repetition	10Hz
Beam width	<10mm
Wavelength	1064 nm

Conditions

Energy Fluence	Max~ 1 MJ/m ²
Shot number	500~100,000
Angle of incidence	45°



繰り返し熱負荷による表面状態変化(純W板材)



高熱負荷による溶融（ディスラプション想定）

- 溶融限界の約10倍（510）で、溶融表面不安定性が発現

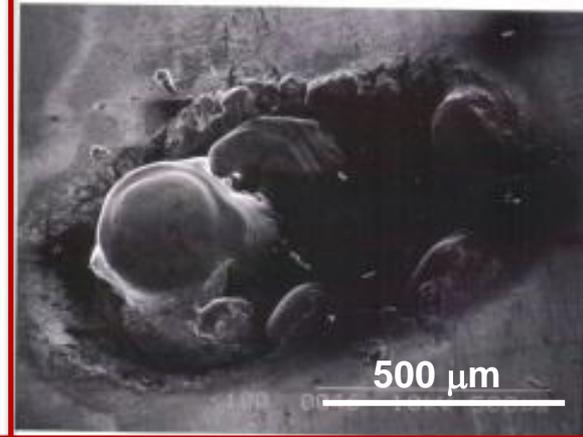
- 表面に凹凸が生じる
→ 定常熱負荷でも局所溶融の可能性

- ITERWモノブロックではリーディングエッジ上限0.3 mm

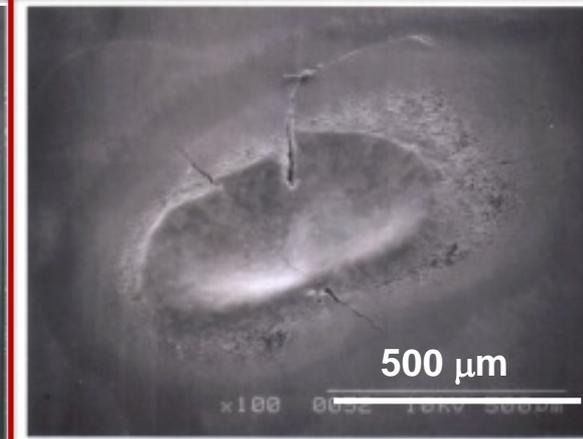
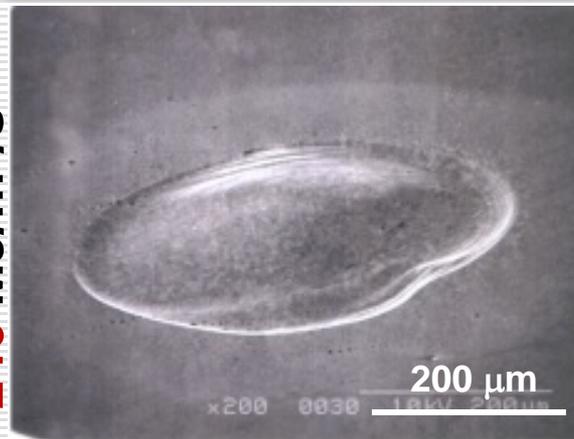
- 凝固後の表面が滑らかであれば、ある程度のディスラプションには耐えられる

- ショット数が増えた場合の表面状態変化を調べる必要あり

510 MJ/m²/s^{0.5}



240 MJ/m²/s^{0.5}



1 shots

10⁴ shots

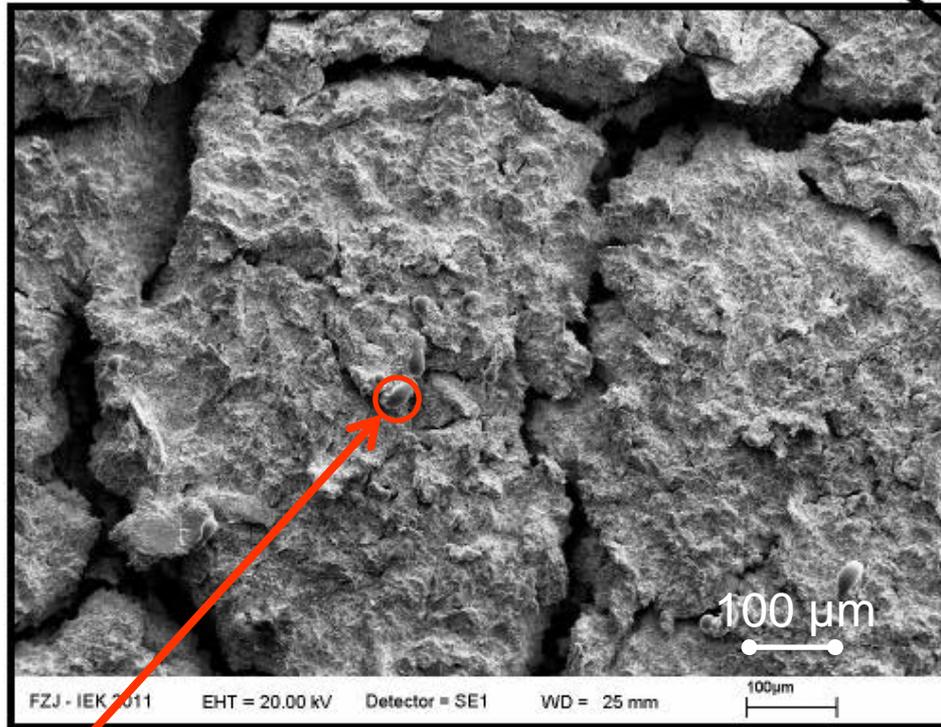
ELM simulation using e-beams with high repetition rates in JUDITH 2

Pulse energy : 1/5 of E_{MT} 溶融限界の1/5
 10^5 cycles

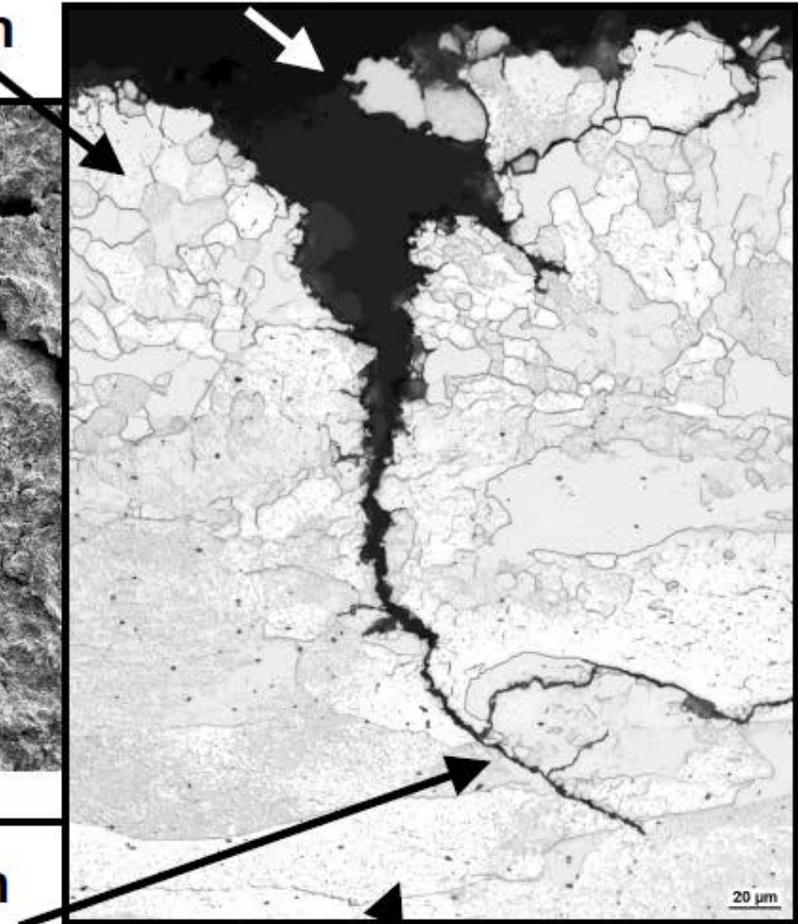
Unacceptable?

recrystallization

melting



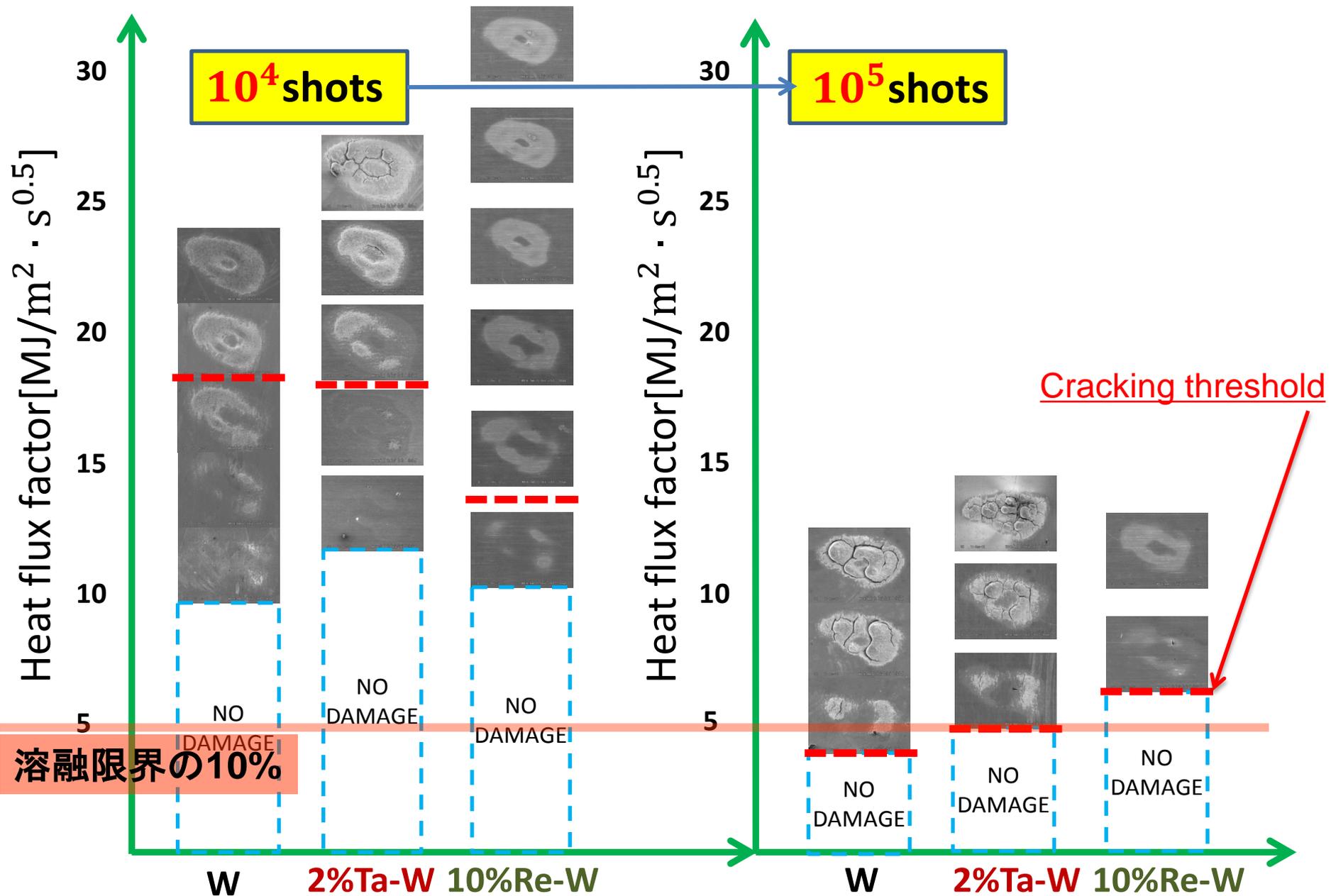
polygonization/recrystallization
around crack edges



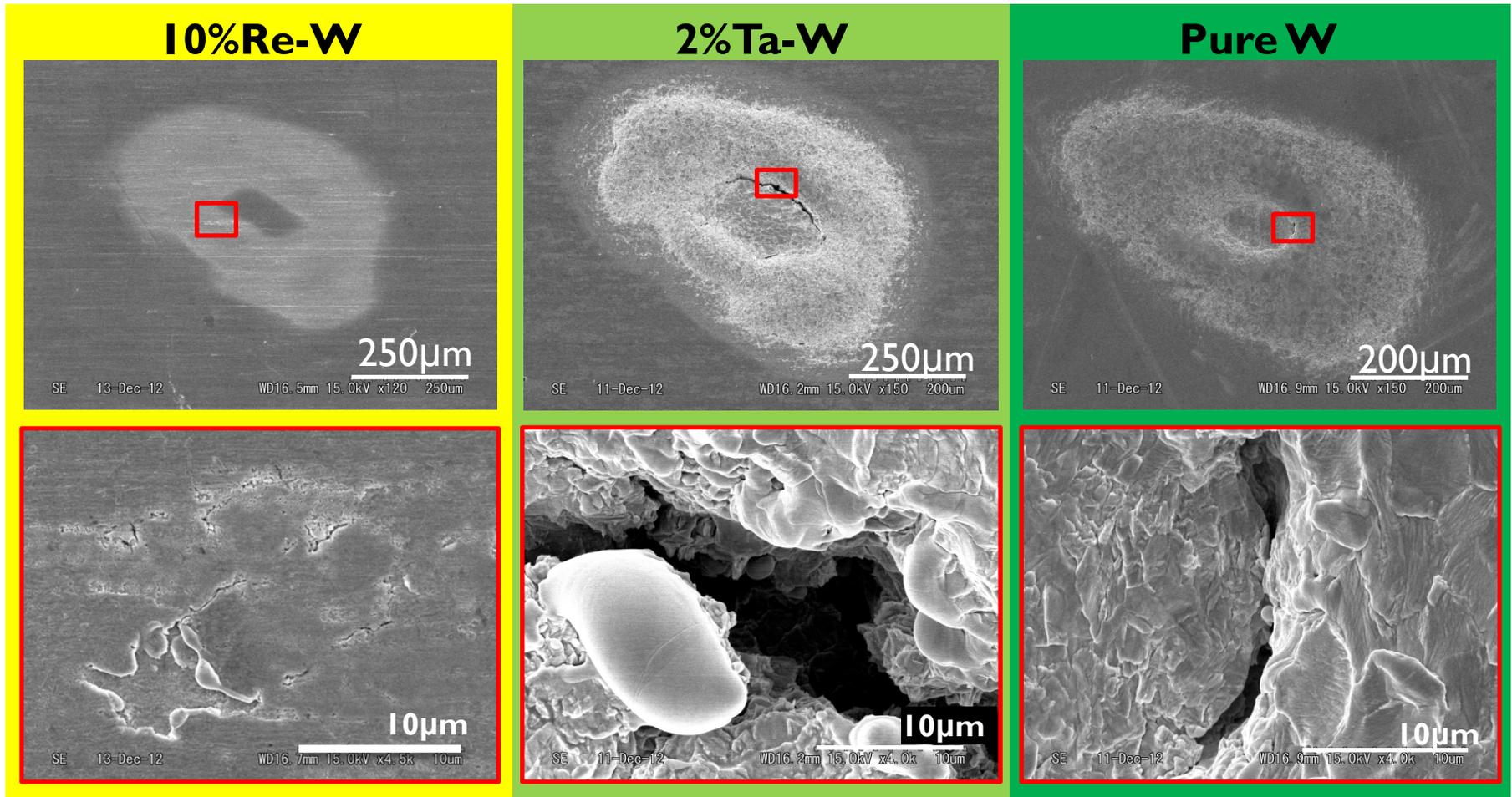
original grain structure

J. Linke, this meeting

W 合金のパルス熱負荷影響



各材料の比較 (10^4 shots, $15 \text{ MJ/m}^2 \text{ s}^{0.5}$)



- pure W, 2%Ta-Wでは、表面全体が粗面化＋亀裂
- 10%Re-Wでは、表面の一部が粗面化＋わずかな亀裂

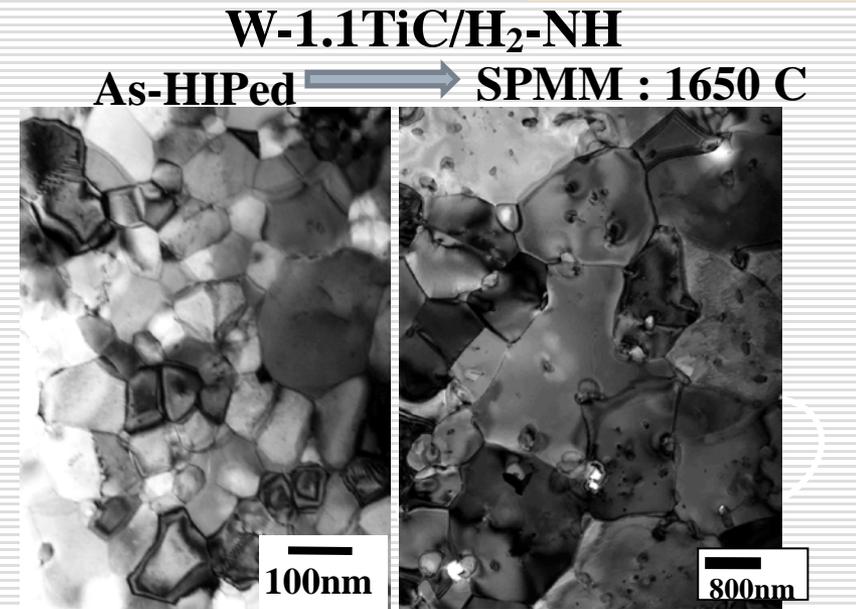
TFGR-Wのパルス熱負荷影響



Osaka University

□ TFGR-W試料

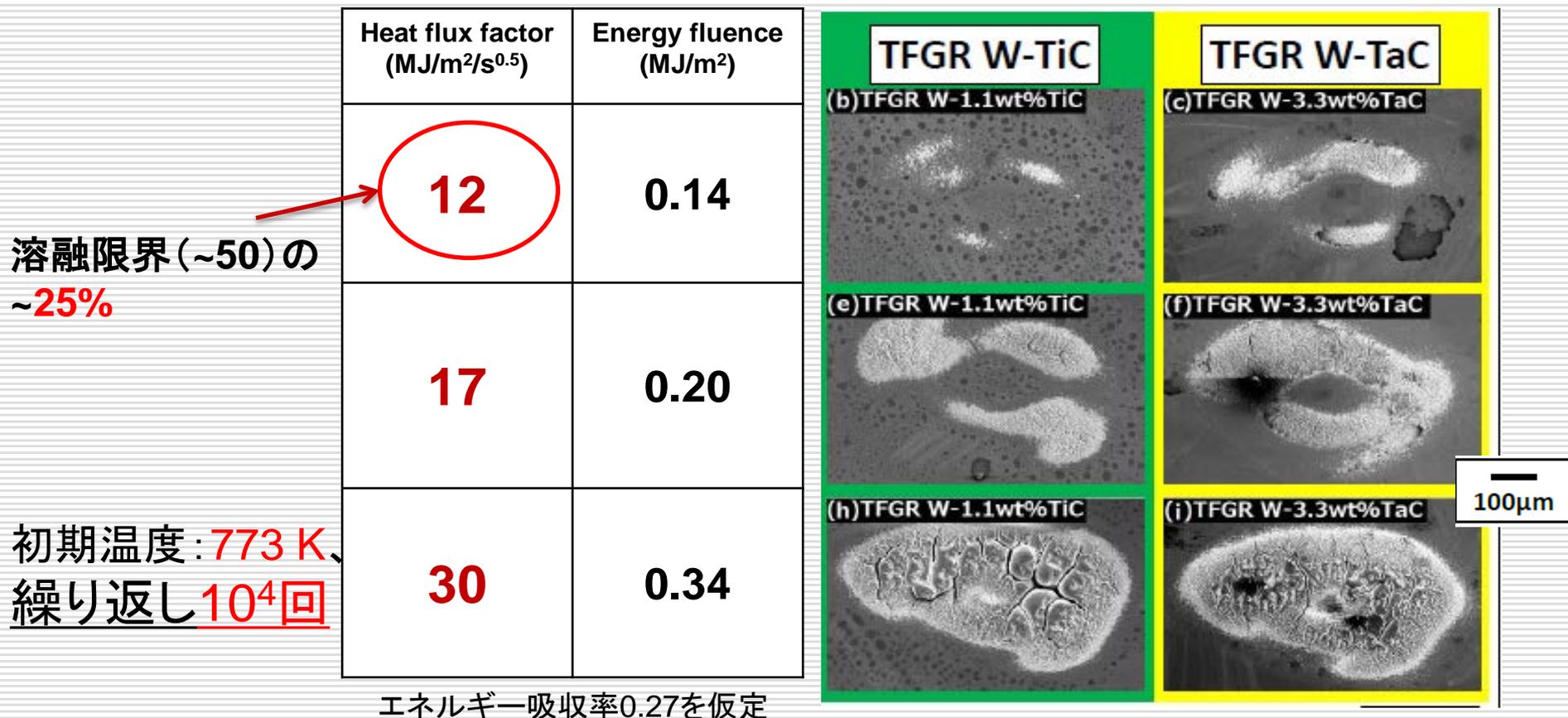
- 栗下先生(東北大)開発
- 従来の微結晶粒Wに超塑性加工を行う(SPMM)
- 低温脆性と中性子照射脆性を改善
- TFGR-W 1.1wt% **TiC**
 - 水素雰囲気化で作成
 - 粒径: ~1.5 μm
 - 再結晶化によるランダム方向
 - TiCによる結晶粒界強化
- TFGR-W 3.3wt% **TaC**
 - Tiと同じ割合のTa含む



Grain size : 90 nm Grain size : 1480 nm

SPMM (SuperPlasticity-based
Microstructural Modification)

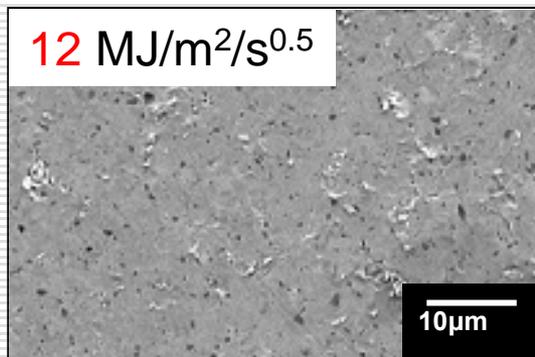
TFGR-Wのパルス熱負荷影響



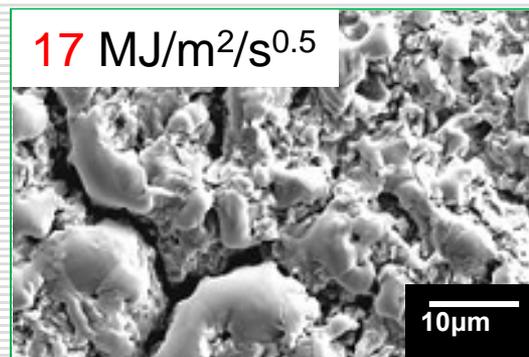
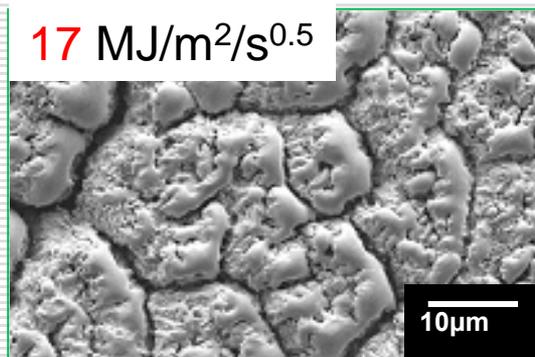
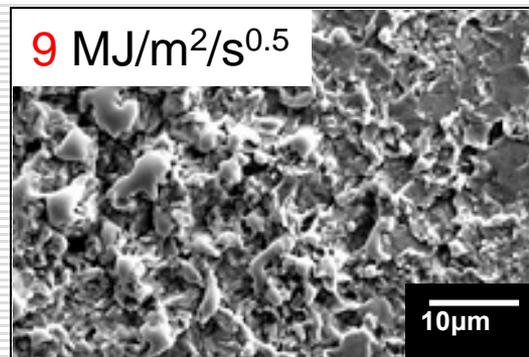
- TFGR-Wは、純Wよりやや耐性が高いものの、低パルスエネルギー（溶融限界の1/4）で表面粗面化が発生
- TaC添加材の亀裂がやや細かいが、大きな違いはない。

パルス熱負荷印加後の表面状態(拡大)

□ TFGR W-1.1wt%TiC



□ TFGR W-3.3wt%TaC

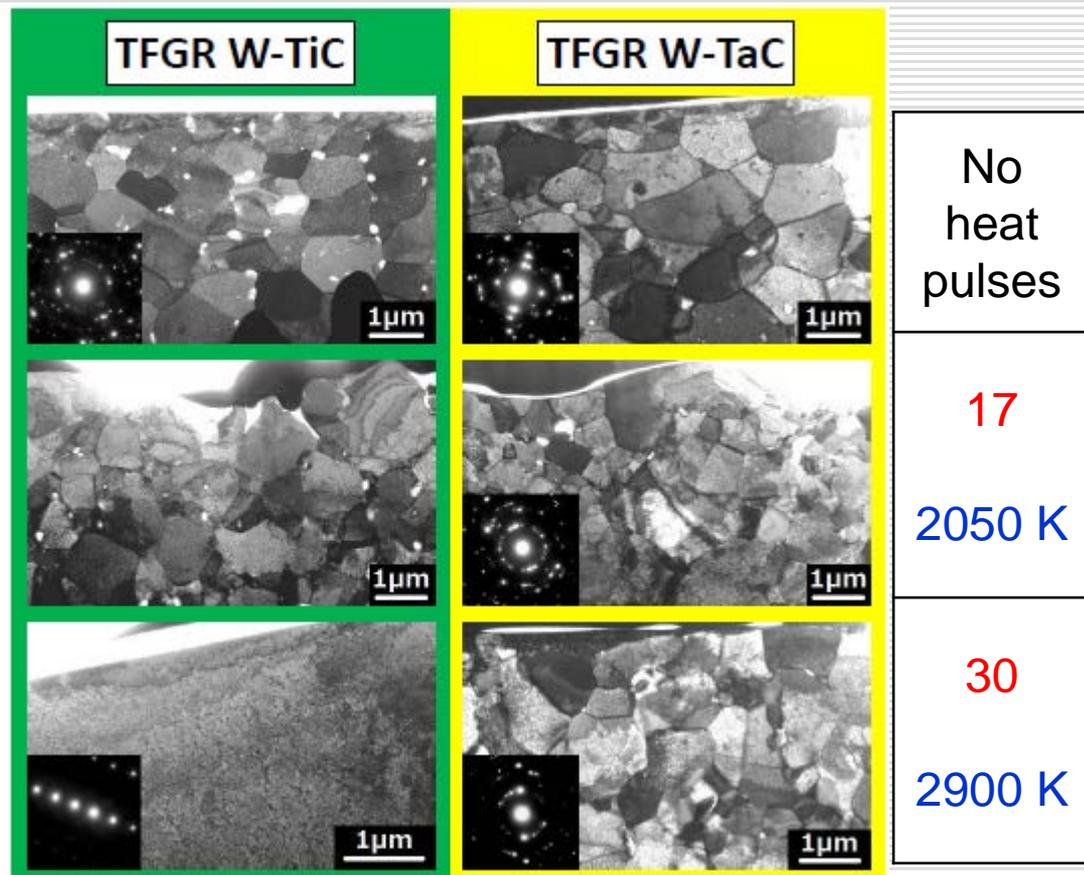


shot number = 10⁴, base temperature = 773K

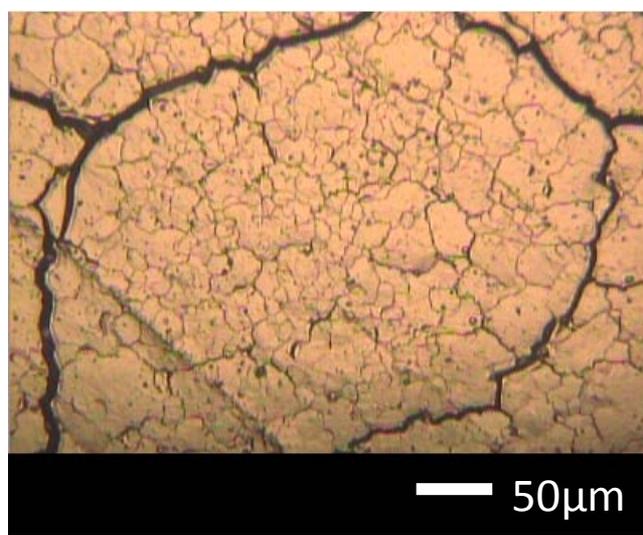
粗面化は、細かい亀裂と表面の滑らかな隆起による

レーザー照射後の結晶組織(断面)

- 分析方法: FIBで切断後、TEMで断面観察
 - 表面の滑らかな部分
- TFGR W-1.1TiC
 - 2050 Kで表面近傍のTiCが消滅
 - 2900 Kで、結晶粒成長が観測される
- TFGR W-3.3TaC
 - 2900 Kでも結晶粒成長は観測されない
→ TaCが残り、粒成長を阻害

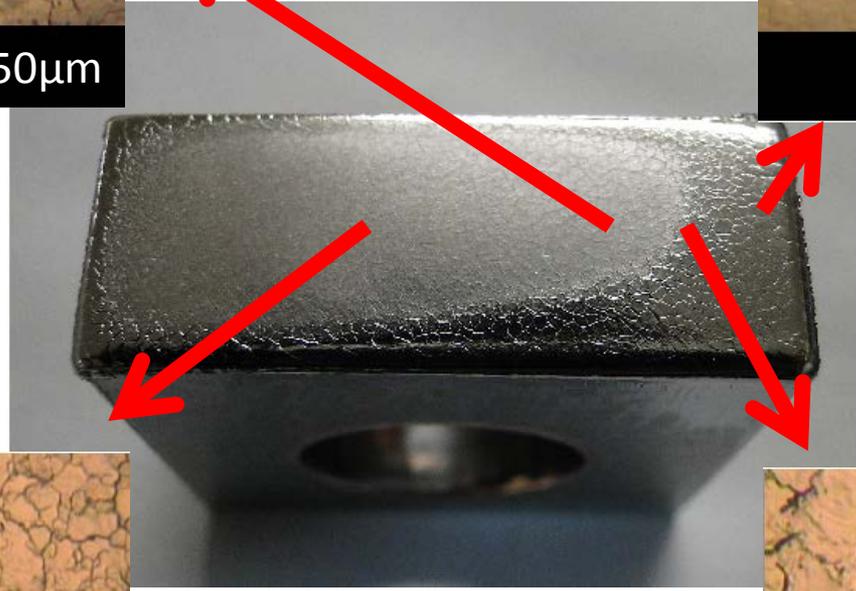
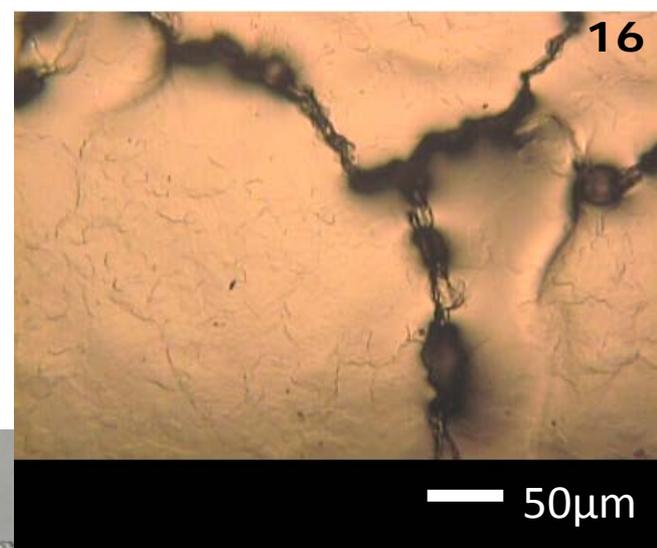


Heat flux factor ($\text{MJ}/\text{m}^2/\text{t}^{0.5}$)
Maximum temperature (K)



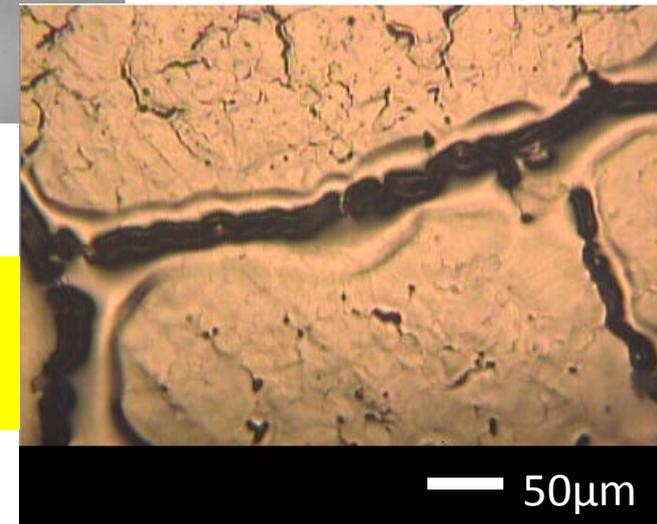
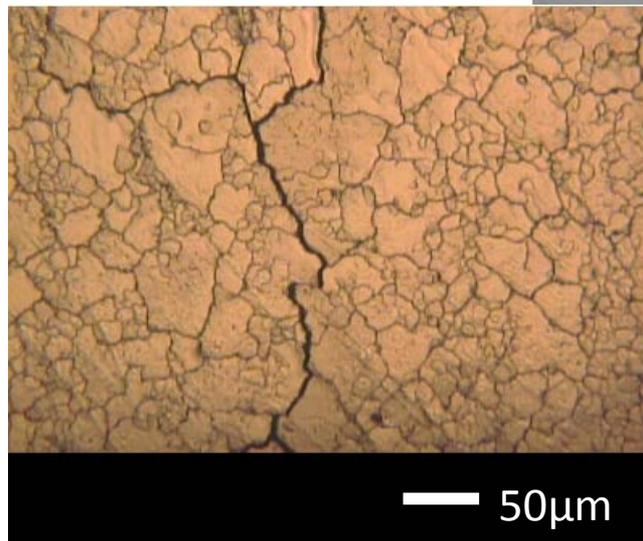
Surface damage
by pulsed plasma gun

Univ. Hyogo



2MJ/m², 25shots

**ITER Wモノブロック
への複合熱負荷照射**



まとめ

- ディスラプションやELMによるパルス熱負荷による表面損傷とWの寿命評価は、ITERおよびDEMOで重要な課題
 - すべてのW材料(純W、W合金、TFGR-W)において、溶融限界の10~25%のパルスエネルギーでも、 $10^4 \sim 10^5$ 程度の繰り返し照射により、粗面化(Roughening)、亀裂の発生、局所溶融がみられた。ただ、この条件での損傷の程度は、TFGR-WとW-Reが純WやW-Taに比べ小さい。
 - ITERで想定されるパルス数($\sim 10^7$ 回、あるいはそれ以上)での表面状態変化、およびその炉心プラズマへの影響評価は今後の課題。
 - 表面損傷(パルス熱・粒子負荷)を持つWモノブロックは、20 MW/m²の熱疲労試験で、少ないサイクル数(32ショット)で冷却管付近まで達する大きな亀裂が発生した。ただ、この亀裂は熱除去性能には影響しない。
-