

短パルス繰り返しレーザー及び Heプラズマの同時照射が タンゲステンに与える影響

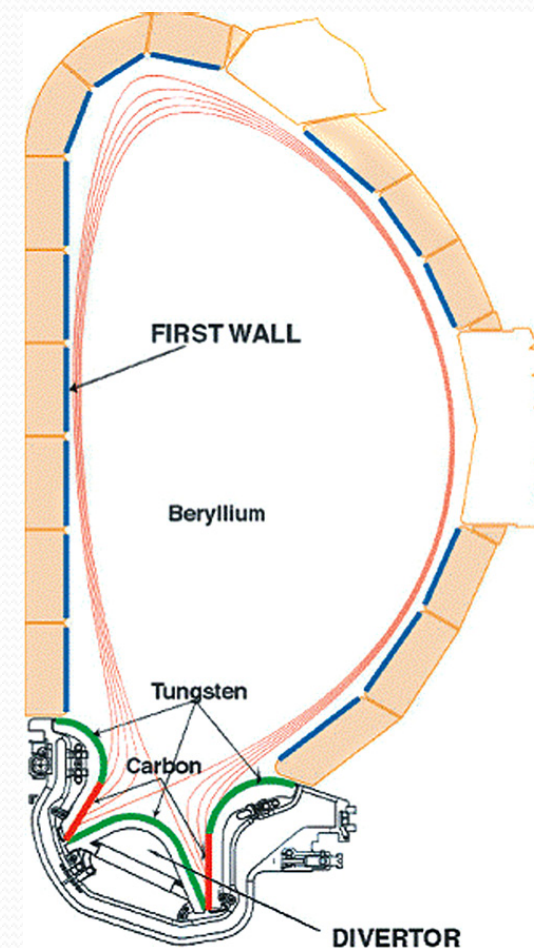
平成23年3月7日
大阪大学 河合俊昇

【発表内容】

- 研究背景・目的
- 実験装置
- タングステン試料
- 照射実験
 - 真空中でのレーザー照射
 - レーザー+Heプラズマ同時照射
- 不純物の影響について
 - 酸素不純物の影響
 - 炭素不純物の影響
- 結論

【研究背景・目的】

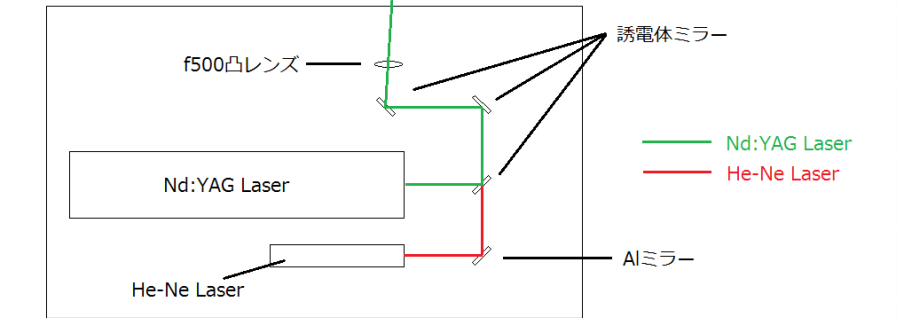
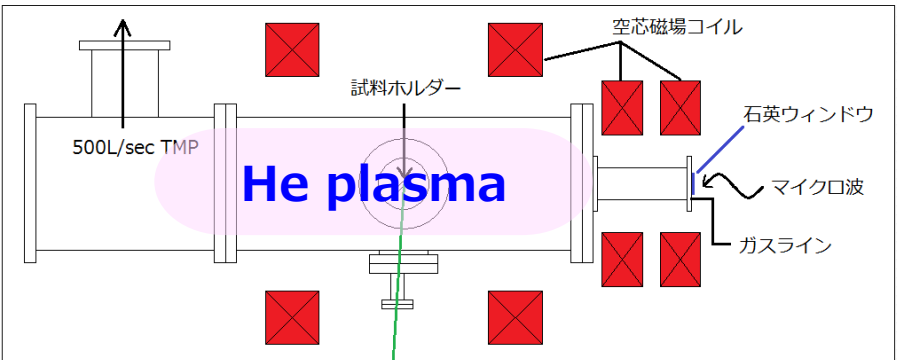
- ITERをはじめとするトカマク装置ではELMと呼ばれる熱・粒子負荷が間欠的・周期的に発生。
 - 繰り返し周波数：10～100Hz
 - パルス幅：200 μ s
 - エネルギーフルエンス：<40 J/cm²
- ITERのダイバータ部では**タングステン**の導入が計画されている。(右図)
- タングステンはELMにより損耗を受ける。
 - > 40 J/cm²：融解
 - < 40 J/cm²：亀裂が発生
 - 2種類の亀裂が発生(macro / micro - cracks)
- ELMの壁材料との相互作用の解明はITER計画において課題となっている。
- 先の研究では**ELMの熱負荷に焦点を絞り**、タングステン表面に短パルス繰り返しレーザー熱負荷を与える研究が行われた。
- 本研究ではELMの粒子負荷にも注目し、**レーザーとHeプラズマを同時照射**することで、プラズマ照射の有無がタングステン表面の亀裂発生に及ぼす影響を評価することを目的とする。また、**炭素や酸素の不純物**が表面に存在した場合の影響も調べた。



ITER

【実験装置】

- プラズマの生成
 - 電子サイクロトロン共鳴(ECR)放電を採用
- プラズマパラメータ
 - 電子温度：10eV前後
 - 電子密度： 10^{21}m^{-3} 程度
- Heの入射フラックス
 - $3.8 \times 10^{20}\text{m}^{-2}\text{s}^{-1}$



レーザーの仕様

エネルギー	0.45J
パルス幅	130 μs
繰り返し周波数	10Hz
ビーム径	<10mm
波長	1064nm

レーザー照射の条件

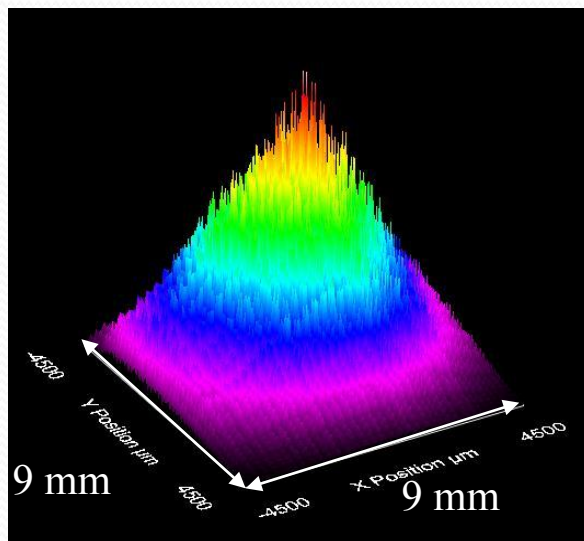
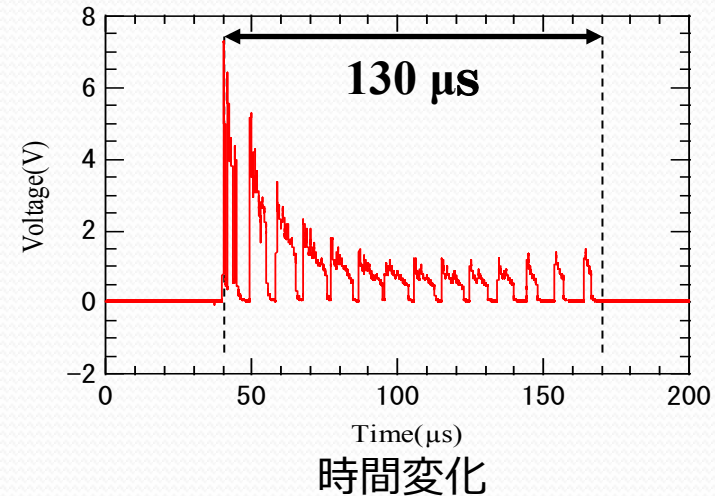
エネルギーフルエンス	10J/cm ²
繰り返しショット数	500~10000
レーザー入射角	45°

プラズマ照射の条件

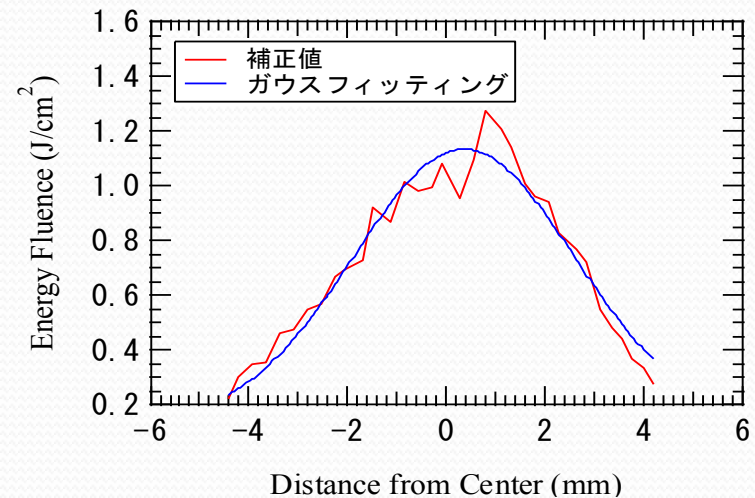
使用ガス種	He
イオン入射エネルギー	30eV
予照射のフルエンス	$1.0 \times 10^{24}\text{m}^{-2}$

【Nd:YAGレーザーについて】

- 1パルス内に複数のパルス
- ピーク値は徐々に減少
- エネルギー分布はガウス分布に従う
- レーザー径はビームプロファイラを用いて計算

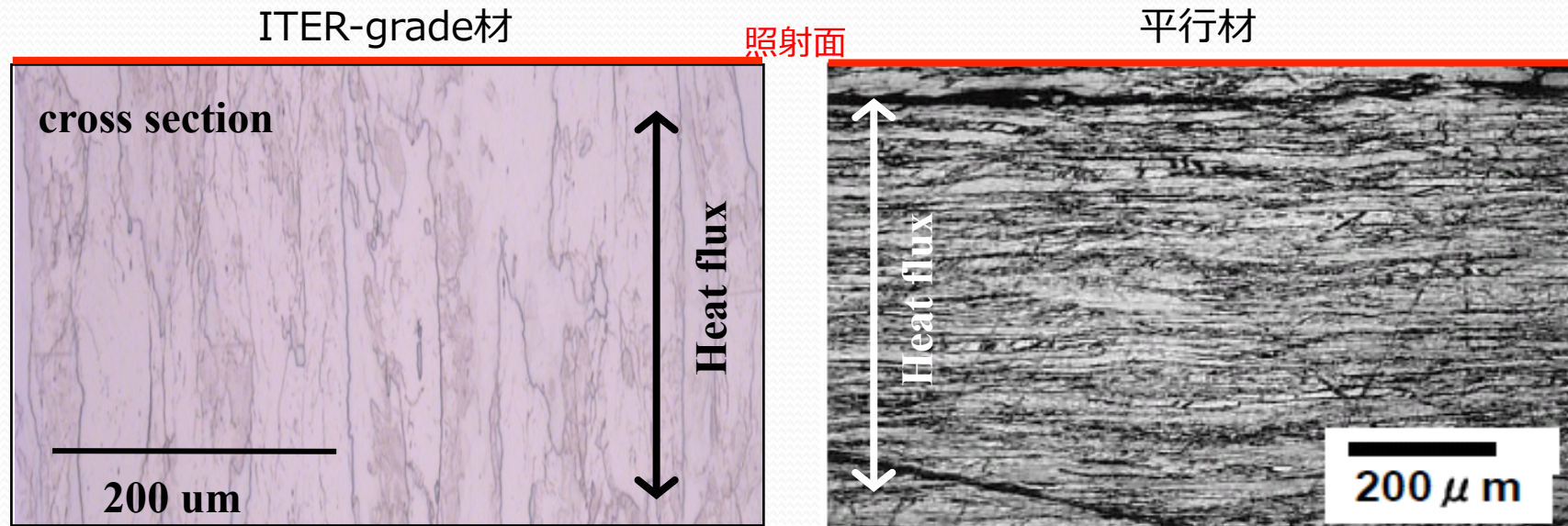


エネルギー分布(3D)



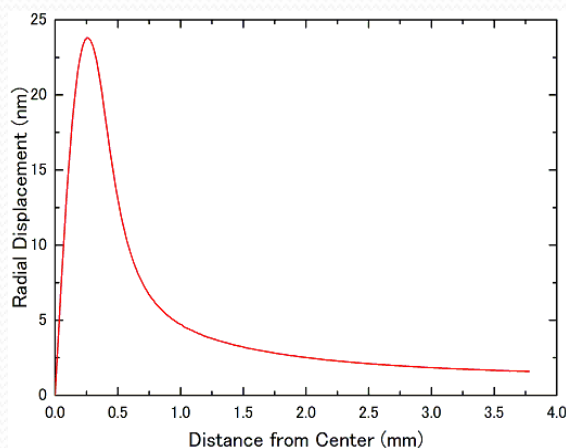
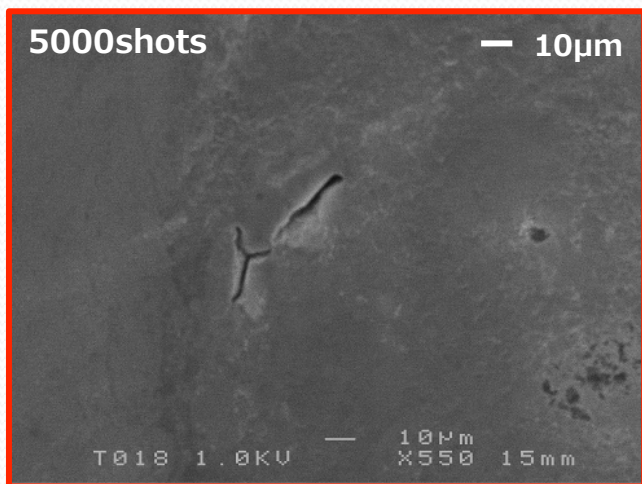
エネルギーフルエンスの径方向分布

【タングステン試料】



- タングステン試料はITER-grade材と平行材の2種類
- 応力除去された粉末焼結材で純度は99.99 %
 - ITER-grade材：結晶粒が表面に対して垂直方向に引き伸ばされた構造
 - 平行材：薄層状の結晶粒が積み重なった層構造
- 照射表面は鏡面加工されており、レーザー吸収率は30 %

【実験1：真空中でのレーザー照射】



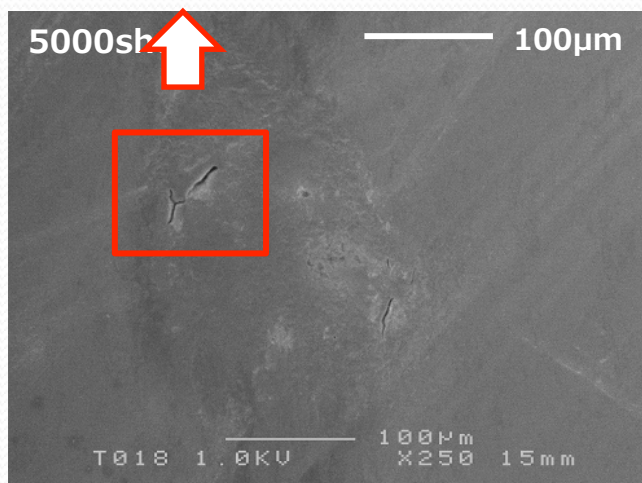
照射直後の表面変位分布

■ 500 / 1000shots
→表面変質は見られなかった

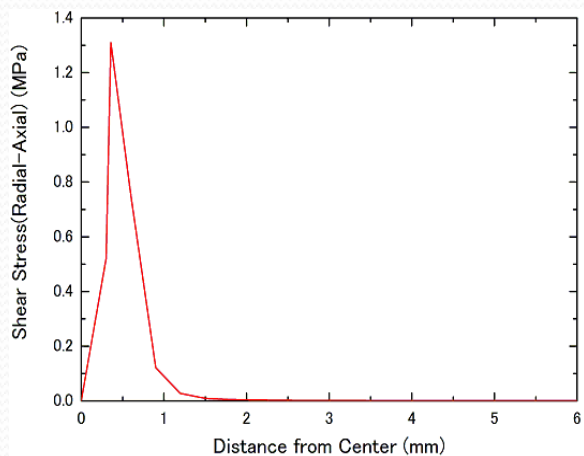
■ 5000 / 10000shots
→長さ20~30μm・幅1~2μm
程度のクラックが発生

■ クラックは照射スポットの
円周部に発生

→円周部に応力発生、繰り返し
照射による金属疲労



照射後のSEM

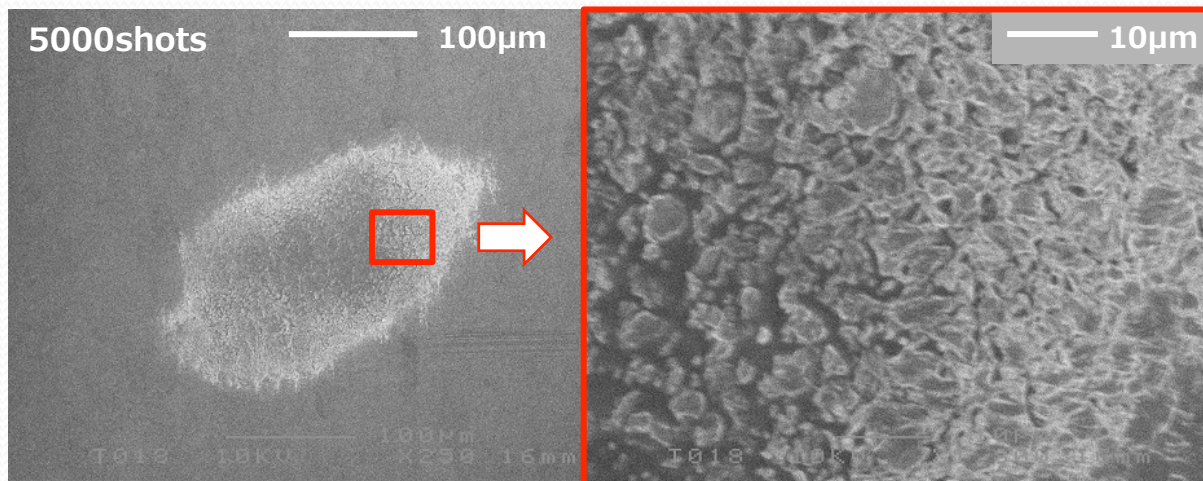
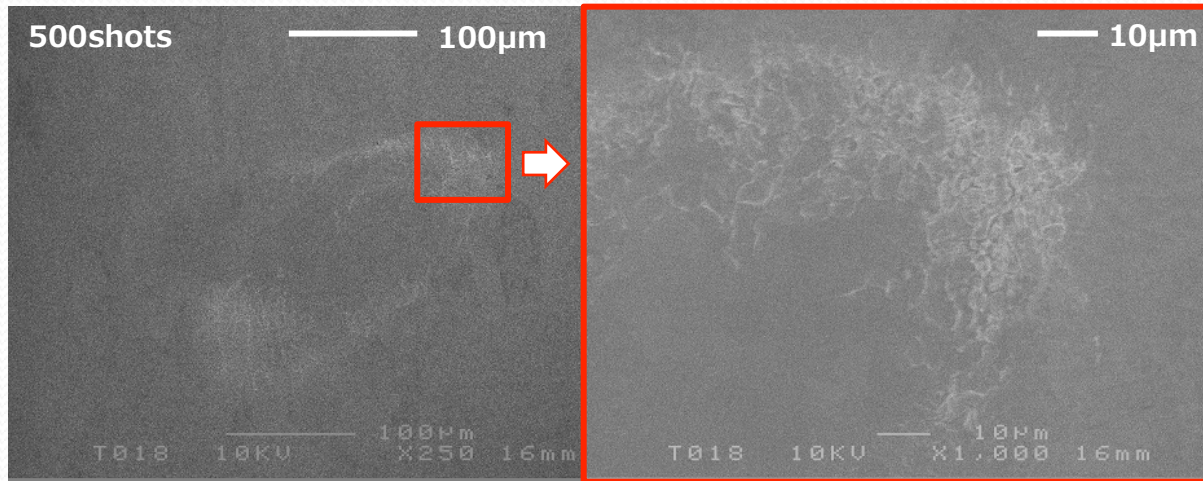


照射直後のせん断応力分布
(Radial-Axial)

照射条件

エネルギーフルエンス	10J/cm ²
残留ガス圧	10 ⁻⁷ Torr
初期温度	750K
タングステン試料	ITER-grade材

【実験2:レーザー+Heプラズマ同時照射】



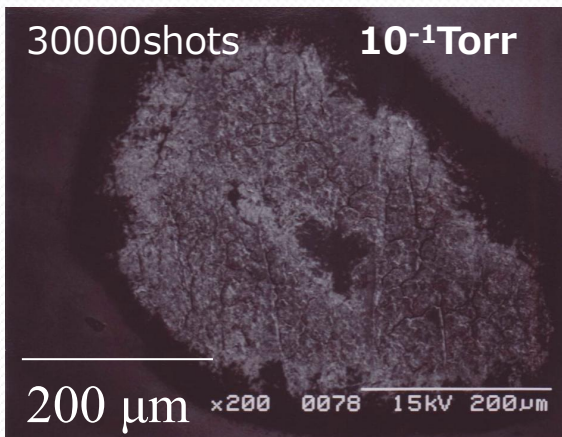
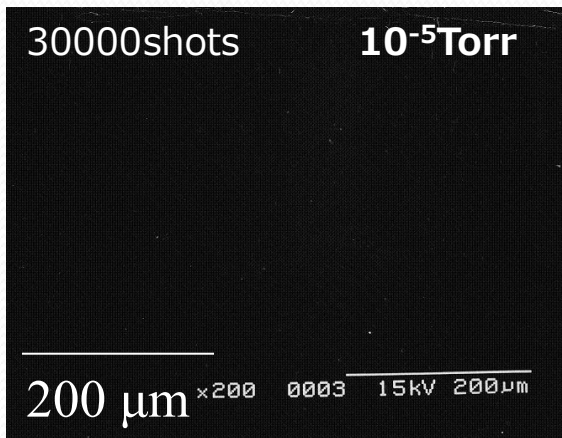
照射後のSEM

- すべての照射回数で網状の細かなクラックが発生
- 5000 / 10000shots
→ 損傷はスポット全体に及ぶ
- レーザーのみの場合と比べ、表面損傷が激しい
- 一方、長さ20~30µm程度のクラックは見られない
- 平行材でもほぼ同様の結果

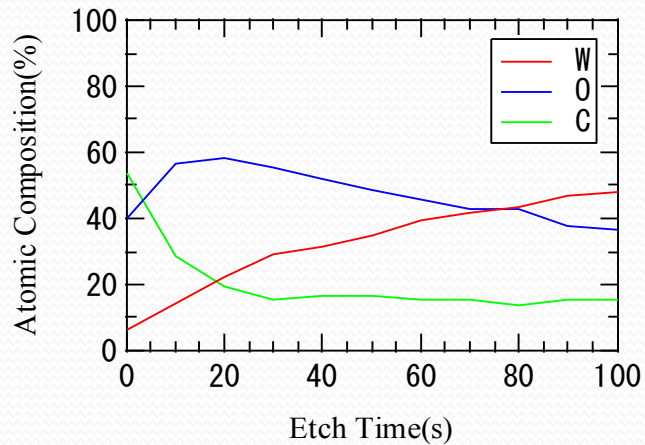
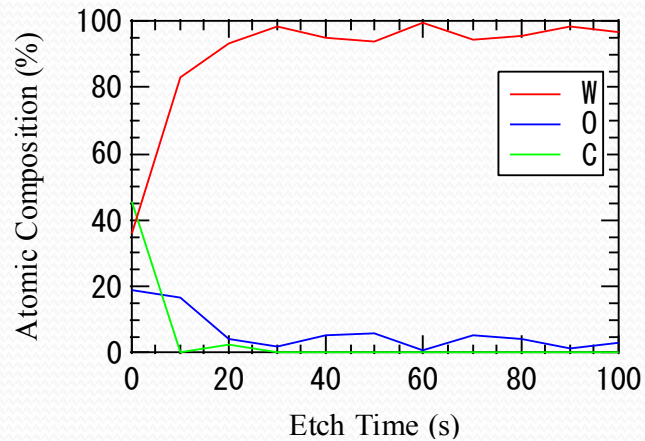
照射条件

エネルギーフルエンス	10J/cm ²
He入射エネルギー	30eV
He予照射	1.0×10 ²⁴ m ⁻²
初期温度	880K
タングステン試料	ITER-grade材

【酸素不純物の影響】



照射後のSEM



XPS

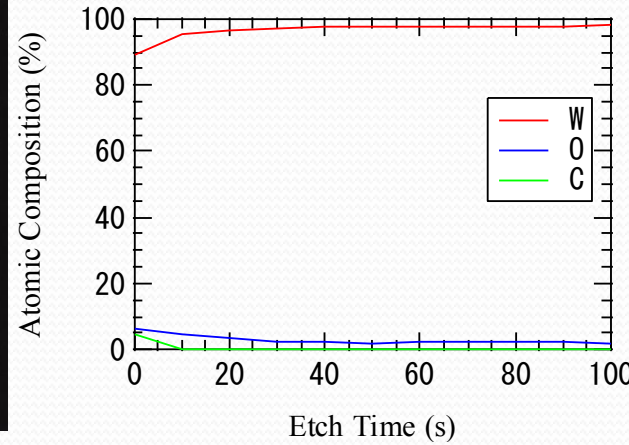
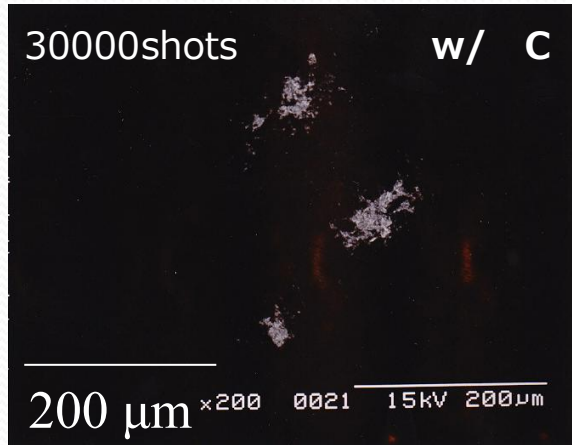
- 表面に酸素不純物が含まれると損傷が激しくなる
- 酸化すると脆性が高くなる
- 融点・熱伝導率が低下する

照射条件

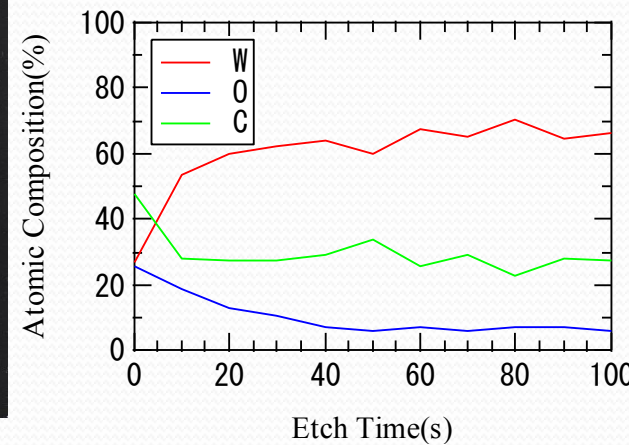
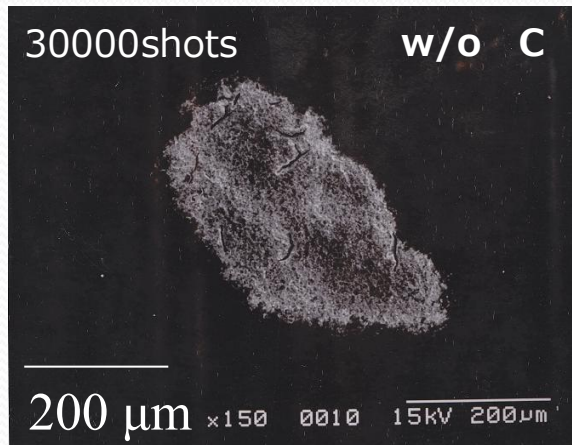
エネルギーフルエンス	14J/cm ²
照射回数	30000shots
残留ガス圧	10 ⁻⁵ / 10 ⁻¹ Torr
初期温度	773K
タングステン試料	板材[1]

[1] 結晶粒は表面に対して平行の向きに長い。本研究における「平行材」と同様。

【炭素不純物の影響】



- 表面に炭素不純物が含まれると損傷が激しくなる
- 炭化すると脆性が高くなる
- 熱伝導率が低下する



照射条件

エネルギーフルエンス	14J/cm ²
照射回数	30000shots
残留ガス圧	10 ⁻⁵ Torr
初期温度	773K
タングステン試料	板材

照射後のSEM

XPS

【結論】

タングステン表面への短パルス繰り返しレーザー照射及びレーザー+Heプラズマ同時照射を行い表面状態を観察した結果、以下の点が明らかになった。

- 10J/cm²のエネルギーフルエンスでレーザーのみの照射を行った場合、照射回数が5000回を超えると、表面に長さ20~30μm・幅1~2μm程度のクラックが照射スポットの円周部に発生する。
- Heプラズマとの同時照射により、表面に網状の細かなクラックが発生し、表面損傷も激しくなるが、上記のような大きなクラックはみられない。
 - Heプラズマとの同時照射により材料は脆化するが、大きなクラックの発生が緩和された可能性がある。
- 炭素や酸素の不純物が表面に存在した場合、材料が脆化し損傷が激しくなる。