

# ELMを想定した非定常熱負荷による ダイバータの熱構造的挙動評価

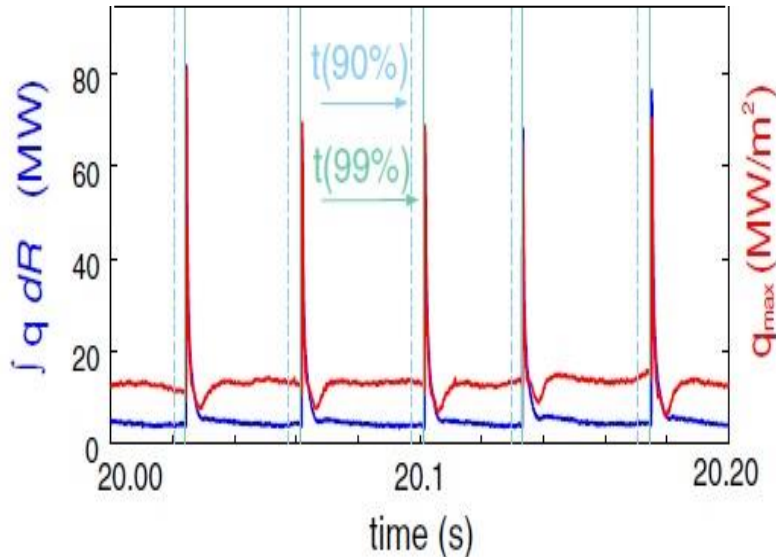
グオン ヒヨソン

権 暁星<sup>1</sup> 笠田 竜太<sup>1</sup> 小西 哲之<sup>1</sup> 松田 慎三郎<sup>1,2</sup>

江里 幸一郎<sup>3</sup> 関 洋治<sup>3</sup> 鈴木 哲<sup>3</sup>

<sup>1</sup>京都大学、<sup>2</sup>東京工業大学、<sup>3</sup>日本原子力機構

# 研究背景及び目的



<Divertor target for a typical JET discharge during type-I ELM phase>

## 目的

- 有限要素法を用いELMによる非定常熱応答特性を評価する
- その非定常熱応答特性の評価の上、ダイバータに対してプラズマ運転が目指すべき指標を工学的時点からの限界を示し明確にする。(その限界としてタングステンの再結晶、溶融、熱応力の3つを上げる)

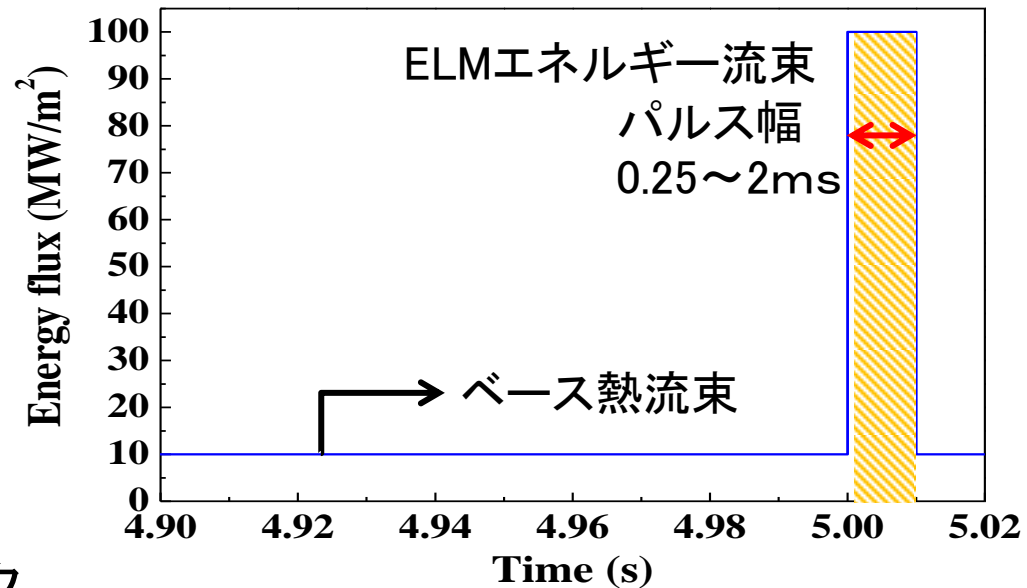
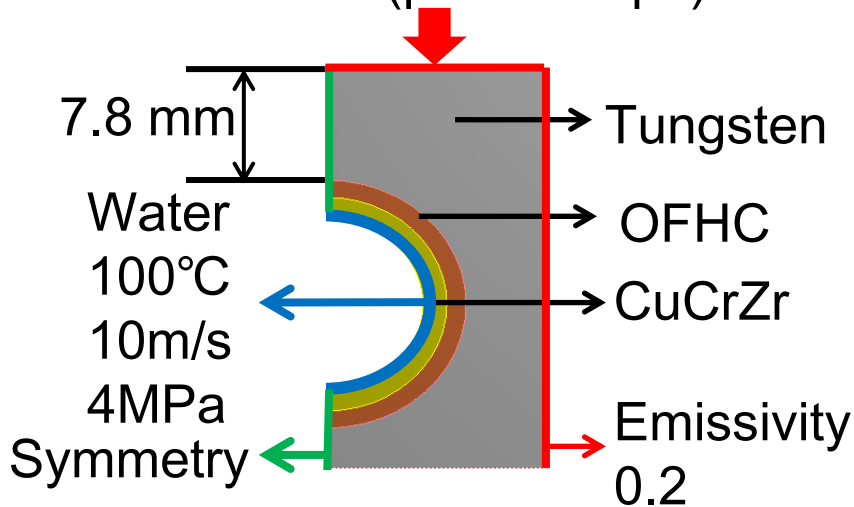
## 背景

ITERのダイバータのターゲット

- 平均 $10\text{MW/m}^2$
- Slow transient  $20\text{MW/m}^2$
- ELMにより数百 $\text{MW/m}^2$ オーダー (数ms)
- ELMについて計測データが限られておりITERについても、幅広い推定 (既存の実験装置からITERに外挿) しかない状態

# 解析条件

Heat flux (pulse shape)



1. 構造: フルタンングステンモノブロック

2. 解析モデルのサイズ: 28\*12\*28mm

3. 熱流束

- トータルの平均熱流束( $q_{\text{avg}}$ )=(ベース熱流速+ELM熱流束)の時間平均: 10MW/m<sup>2</sup>

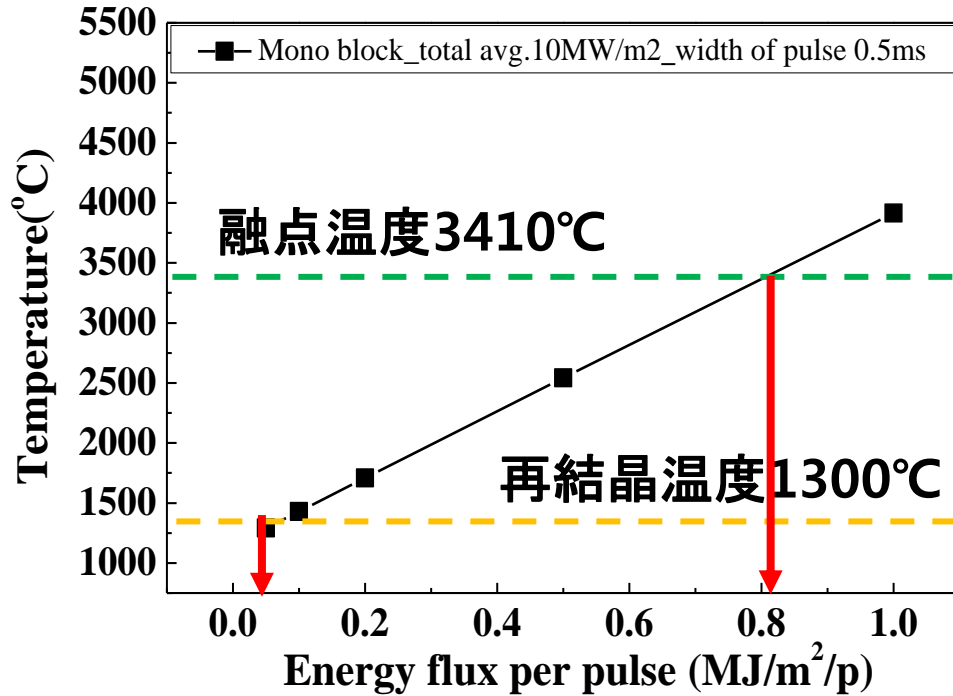
- ELM 1発のエネルギー流束( $q_{\text{peak}}$ ): 0.05~2MJ/m<sup>2</sup>

- パルス幅: 0.25~2ms

4. 冷却管: 熱伝達係数 水 100°C 4MPa 10m/s

5. 表面と冷却管以外は断熱

# パルスエネルギーとピーク温度



- Pulse width :0.5ms
- $q_{avg}$  :10MW/m<sup>2</sup>
- $q_{peak}$  : 0.05-1MJ/m<sup>2</sup>

トータルの平均エネルギー流束 (MW/m <sup>2</sup> )	再結晶に対する限界 (MJ/m <sup>2</sup> )	溶融に対する限界 (MJ/m <sup>2</sup> )
10	0.05	0.83

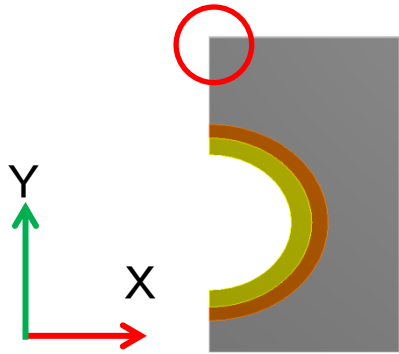
\*タングステンの引張強度：  
220MPa(@1300°C)

<パルスエネルギーとピーク温度の関係>

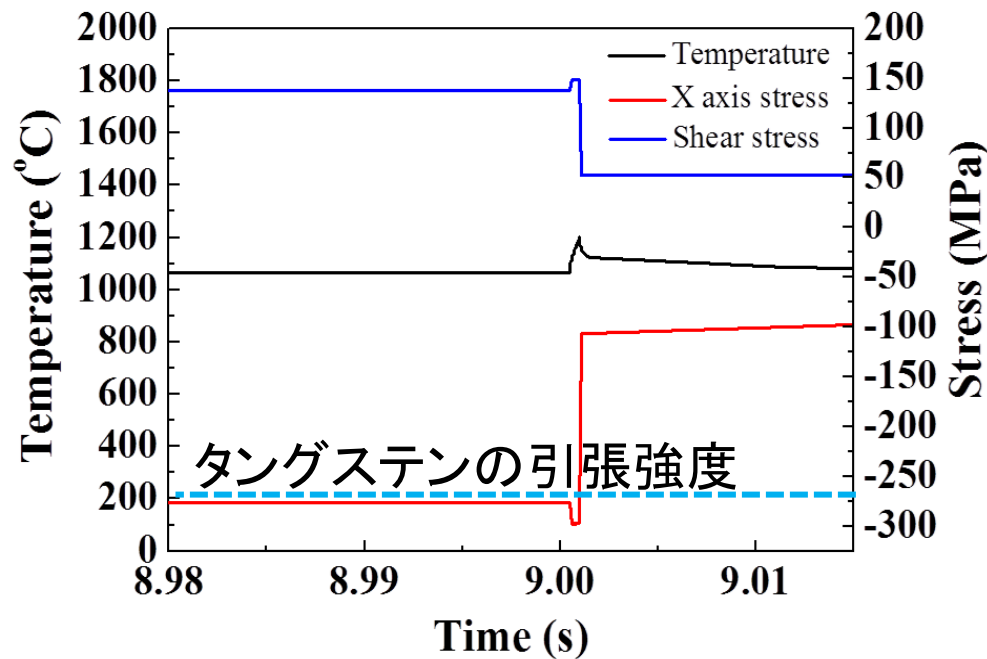
-トータルの平均熱流束が10MW/m<sup>2</sup>を超えなくてもモノブロックの表面温度は再結晶温度、融点に達する。ピークの表面温度はほぼELM1発のエネルギー流束で決まる。

-再結晶に対する限界(0.05MJ/m<sup>2</sup>) << ITERでのELMによるダイバータの熱負荷(0.5MJ/m<sup>2</sup>以上)

# パルス負荷による熱応力



\*タングステンの引張強度: 274MPa(@1200°C)



- Pulse width : 0.5ms
- $q_{avg}$  : 10MW/m<sup>2</sup>
- $q_{peak}$  : 再結晶限界~0.05MJ/m<sup>2</sup>
- タングステン表面温度 : 1300°C以下

- タングステン強度より大きい応力発生  
→せん断応力: 表面剥離発生  
→圧縮、引張応力: 表面き裂発生

<タングステン表面付近での温度及び応力分布>

- タングステン強度より大きい応力発生 → **熱応力の限界 < 再結晶の限界**
- タングステンの表面付近ではせん断応力より圧縮応力が支配的である。

# レーザーを用いたELM模擬実験

Pyrometer  
で温度測定

レーザー(熱流束)

材料: タングステン(3\*3\*1.65mm)



1. レーザー負荷条件

-レーザー直径: 1.2mm

-パルス幅: 1ms、矩形波

2. 温度測定

-Pyrometer, Thermocouple

-Emissivity 0.37

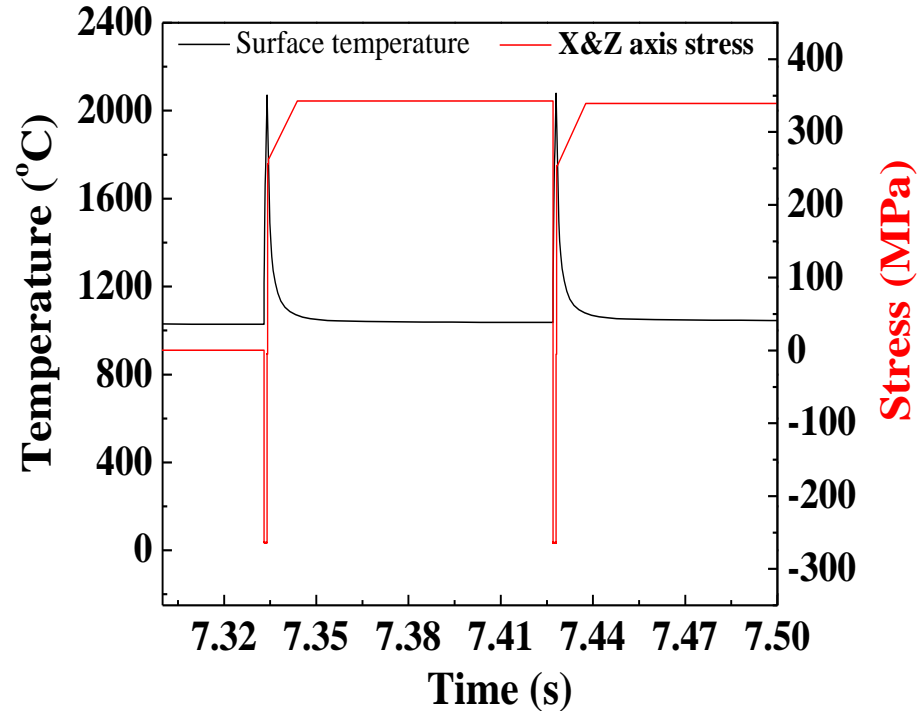
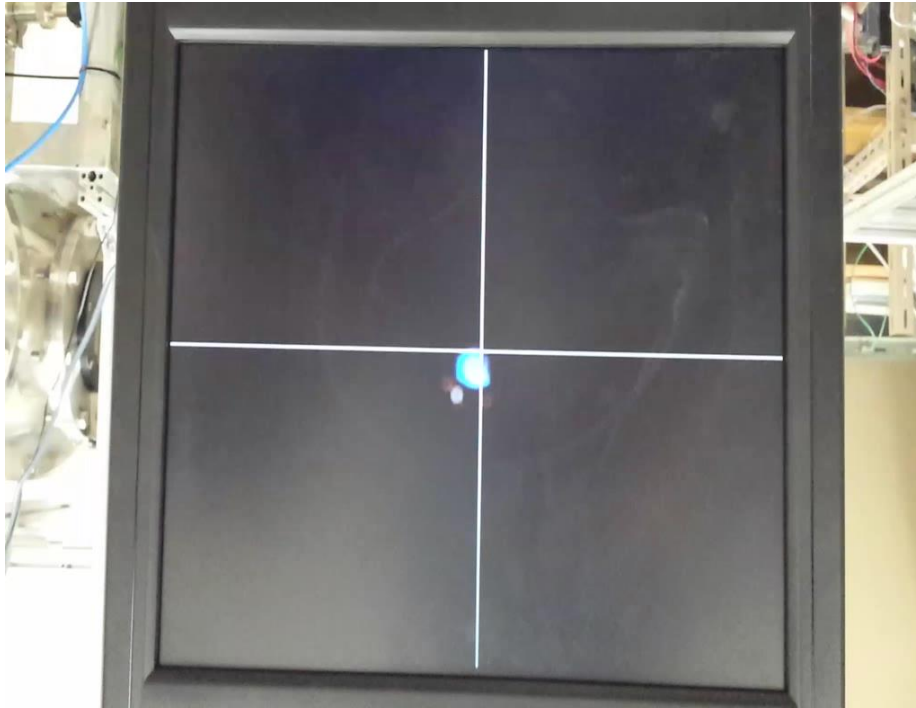
3. 真空中で照射(2Pa)

熱電対

\*ITERでELMによるダイバータ許容熱負荷: **0.5MJ/m<sup>2</sup>**

width	Laser output	$q_{peak}$	$q_{avg}$	counts	Interval
m s	J /pulse	MJ/m <sup>2</sup>	MW/m <sup>2</sup>	回	ms
1ms	0.61	0.54	5.8	540(80)	94

# 表面温度及び熱応力分布



<1ms-5.8MW/m<sup>2</sup>-0.54MJ/m<sup>2</sup>>

<表面応力の解析値>

解析\_最大表面温度:2080°C

最大圧縮応力:264MPa

pyrometer\_最大表面温度:3250°C

最大引張応力:339MPa

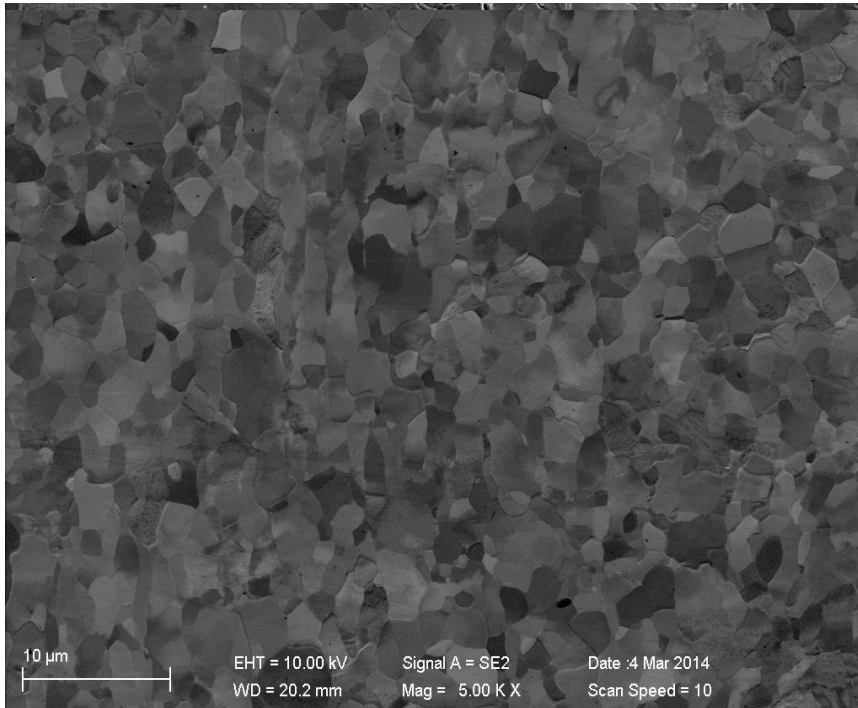
→反射光の影響

→**タングステンの損傷**

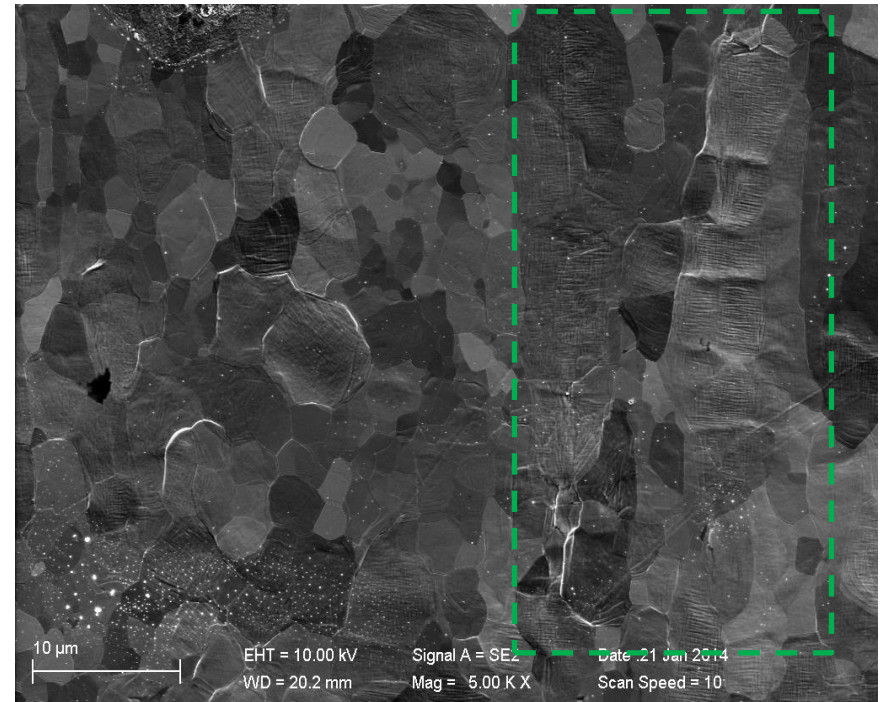
\*タングステンの引張強度:220MPa(@1300°C)

# 表面写真(1ms-5.8MW/m<sup>2</sup>-0.54MJ/m<sup>2</sup>)

塑性変形



レーザー負荷前x5000



レーザー負荷後x5000 ①真ん中-1

→部分的再結晶(レーザー負荷前1μm)

→塑性変形起こる

→き裂発生(結晶が成長していないところでもき裂発生)

赤矢印: き裂

緑矢印、緑箱: 塑性変形



# 結論

タングステンモノブロックのELMによる熱応答を有限要素法で解析  
平均熱流束 $10\text{MW}/\text{m}^2$ に $0.05\sim 2\text{MJ}/\text{m}^2$ のパルス( $0.25\sim 2\text{ms}$ )負荷

1. 平均熱流束が $10\text{MW}/\text{m}^2$ でもタングステンの再結晶、溶融が起こりうる。
2. ピーク温度はELM1発のエネルギー(J)で決まる。  
→  $0.05\text{MJ}/\text{m}^2$  で再結晶温度、 $0.83\text{MJ}/\text{m}^2$  で融点に達する(<ITER想定)  
→ELM1発当たりのエネルギーを下げる必要がある(grassy化は有効)。
3. 再結晶温度より低いピーク温度でも温度勾配で大きな熱応力が発生  
→熱応力による損傷  
→せん断応力より圧縮と引張応力が支配的。表面の剥離よりき裂が優先  
→さらに疲労も注意が必要(grassy化でも疑問)
4. レーザーパルスにより再結晶、塑性変形、き裂の発生を確認。

・平均熱流束 $10\text{MW}/\text{m}^2$ でも非定常熱負荷によりダイバータ表面は損傷しうる。

・ダイバータの成立性は現実的なプラズマ条件を考慮する必要がある