

ITERや原型炉R&Dの視点から2-3のコメント

平成25年8月30日

筑波合同研究会

京大エネルギー理工 松田慎三郎

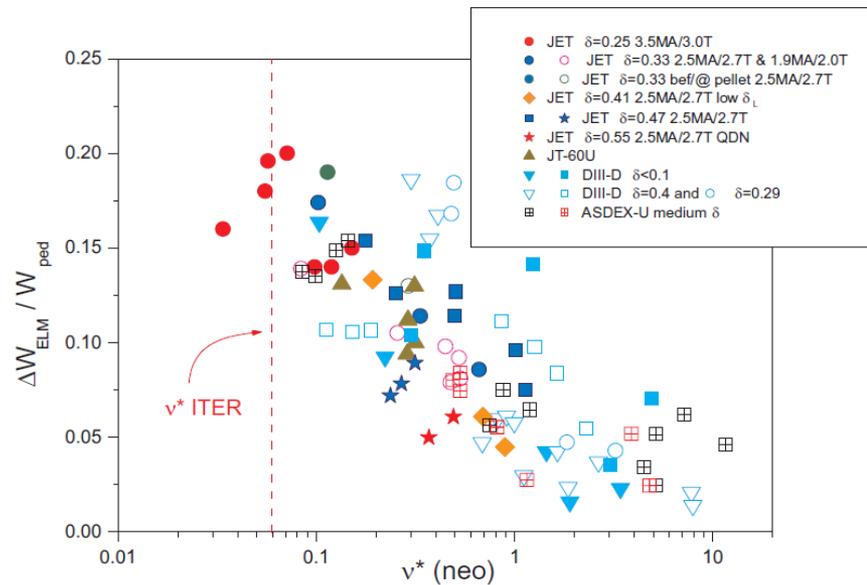
1. ダイバータへの熱負荷の広がり
2. パルス熱負荷の実験上の注意
3. 熱源スキャン方式の適用範囲

1 ダイバータ問題、実験はどうなっているか

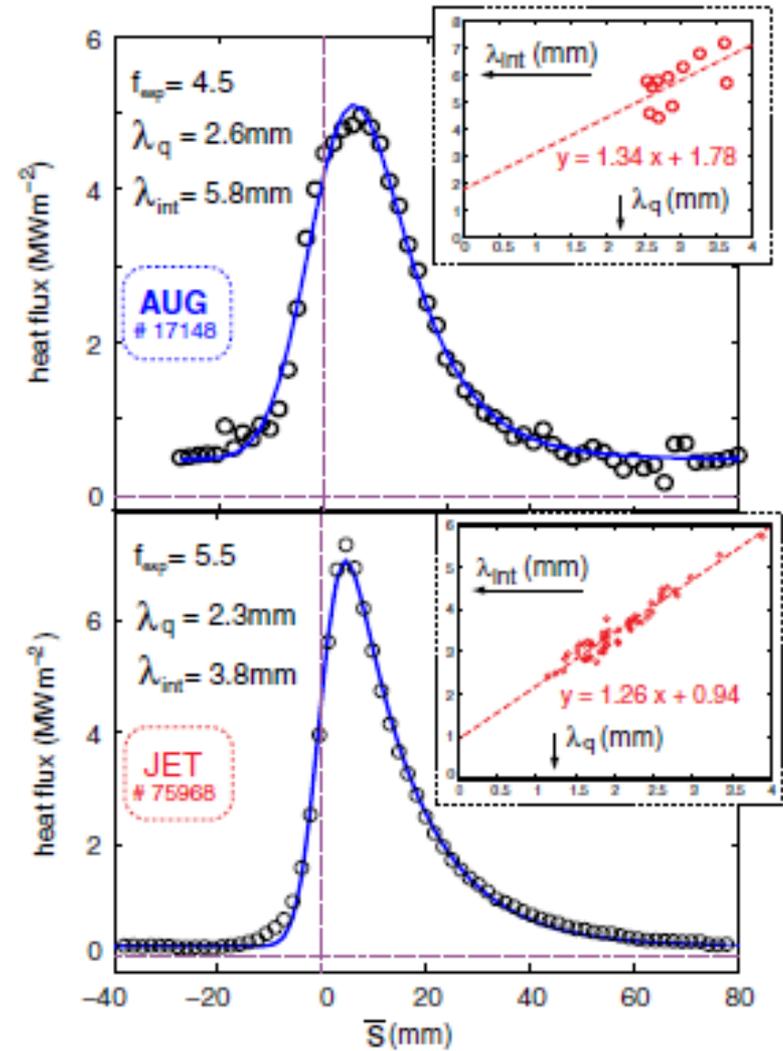
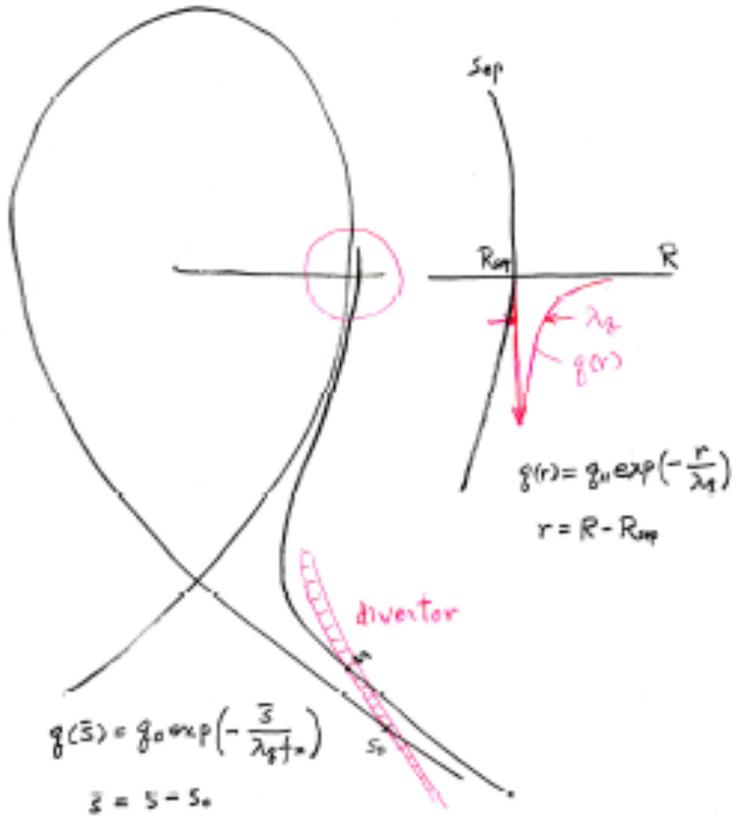
如何にELMピーク負荷を緩和するか？

A. Loarte et al: Plasma Phys. Cont. Fusion 45(2003) 1549,

N.Oyama et al; NuclearFusion 45 (2005) 871



Attach Plasma で幅が調べられた。
ITERにスケールすると、 $\lambda \downarrow q \sim 1\text{mm}$!



$$\lambda_{int} = \int \frac{[q(s) - q_{BG}]}{q_{max}} ds / \int \frac{1}{x} dx - 1$$

ダイバータへのELMパワー

- T.Eich et al: Inter ELM Power Decay Length for JET and ASDEX Upgrade and Comparison with Heuristic Drift-Based Model PRL107,215001(2011)
- M.A.Makowski, et al., Analysis of a multi-machine database on divertor heat flux, Phys. of Plasmas, 19,056122(2012)

空間分布のピーキングを問題にして、
ITERなどに適用できるスケーリング
を追求。

広がり比例則 $\lambda \downarrow \text{int} \cong \lambda \downarrow$

ダイバータ面への入熱はこれに
磁束の広がり係数 $f \sim 3$ (SlimCS), 6 (ITER)
倍する。

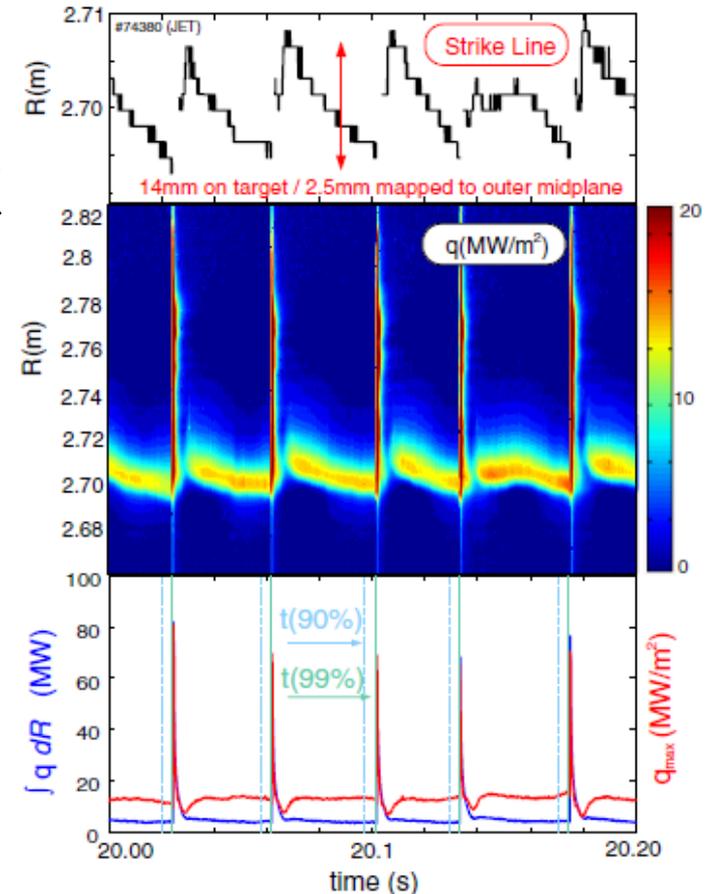
tokamak data $w \downarrow pvt \sim 1.5$

→ $\lambda \downarrow \text{int} \sim 3.5$

ITER ダイバータの位置では

$3.5 \times 6 \sim 20 \text{ mm}$

Semi-detach や detach でどれくらい
広がるか → シミュレーションに期待



2. パルス熱負荷取り扱いの実験上の注意

1次元無限長固体中の熱伝導(ステップ入熱)

$$\frac{\partial T}{\partial t} = \alpha \frac{\partial^2 T}{\partial x^2} \quad \alpha = \lambda /$$

$c\rho$: 熱拡散速度 (m^2/s)

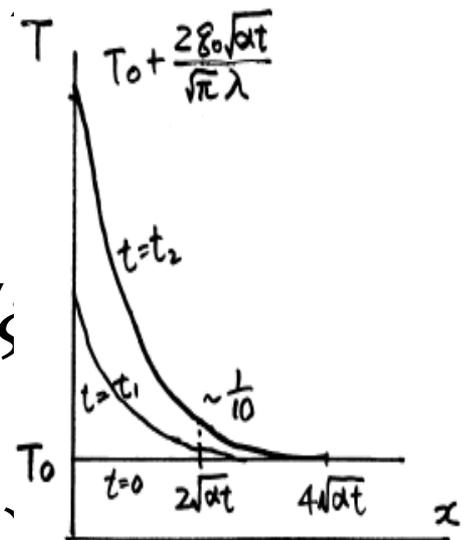
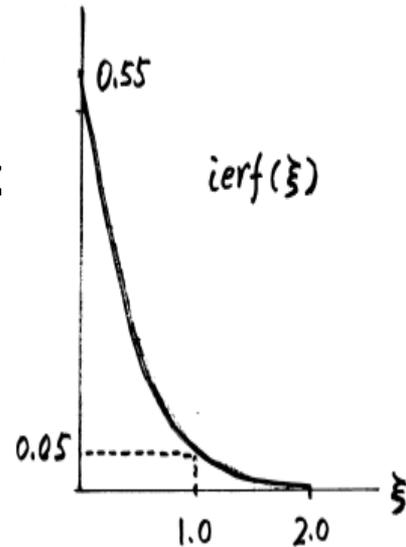
ρ (kg/m^3), c (J/kgK), λ (W/mK)

$\xi = x / 2\sqrt{\alpha t}$ は無次元量

$$\frac{d^2 T(\xi)}{d\xi^2} + 2\xi \frac{dT(\xi)}{d\xi} = 0 \quad \rightarrow$$

$$T = \text{erf}(\xi) = \int_0^\xi \exp(-u^2) du$$

表面熱流速が $q_0 \exp(-\xi^2)$



異常発生を目安

例えば、Wの場合、

ベース温度 $T \downarrow 0$ (K) 300K, 密度 ρ (kg/m^3) 19300, 比熱 C (J/kgK), 200 (at 3680K), 熱伝導率 λ (W/mK) = 89 (at 3680K), 融点 $T \downarrow c$ (K) 3680 より

$$\Delta T = (3680 - 300) \sim 3400 \text{ K}$$

$$\begin{aligned} \Delta T \sqrt{\pi c \rho \lambda} / 2 &= \sqrt{\pi} / 2 \\ &\times 3400 \times \sqrt{200 \times 89 \times 1.93 \times 10^4} \\ &= 5.6 \times 10^7 = 56 \text{ MJ}/\text{m}^2 \text{ s}^{-1/2} \dots\dots(3) \end{aligned}$$

これ以上の入熱があるとW表面は溶ける。薄板に比べて単位に

Q: ELMの繰り返しによって熱は蓄積するか?

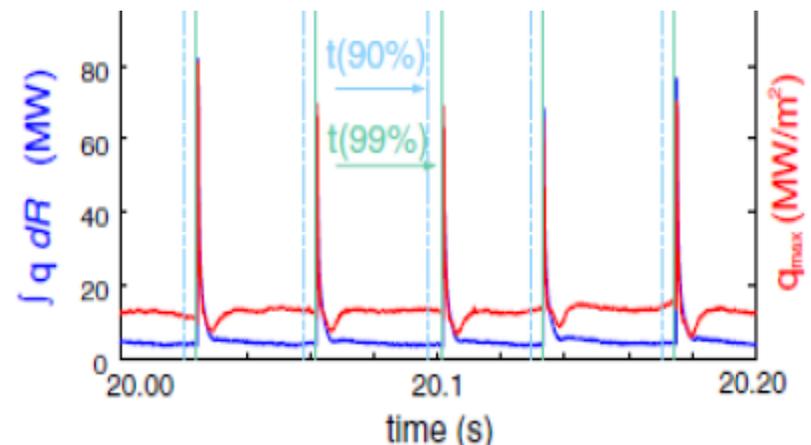
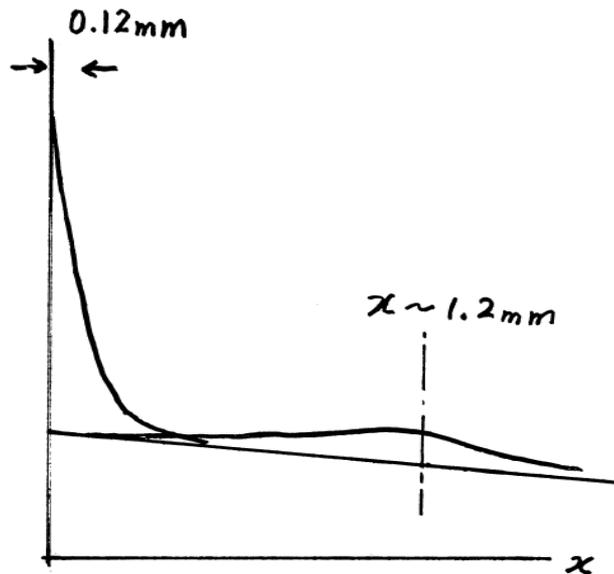
Ans: 蓄積しない場合

浸透深さは(4)式 $\delta \sim \sqrt{at} = \sqrt{\lambda/cp\Delta t}$ より、 $\delta \sim 0.12-0.38\text{mm}$

一方、1サイクル40msec に対する熱拡散深さは

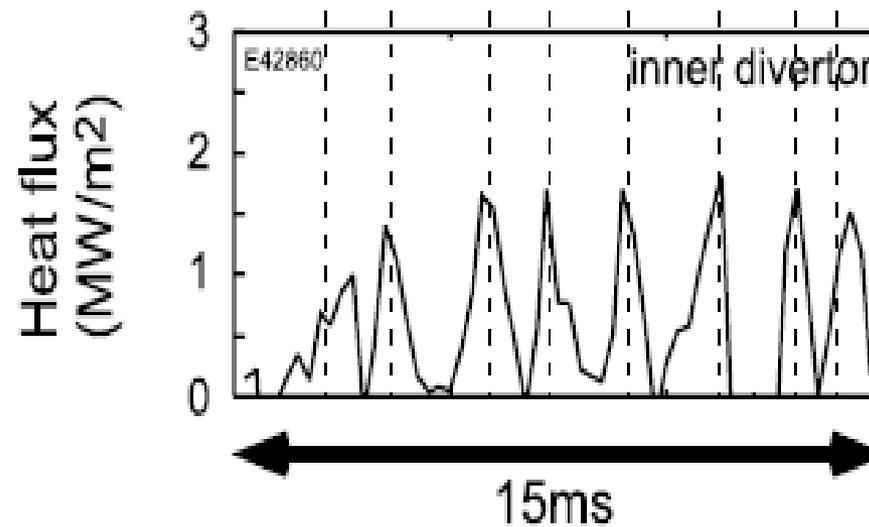
$$x \sim \sqrt{a\Delta t} = \sqrt{\lambda\Delta t/cp} \sim 1.2\text{mm}$$

1つのELMによる温度上昇 ($\Delta T \sim 110-340^\circ\text{C}$) は次のELMまでに深さ方向に伝播し、蓄積しない。 → 溶融しない、再結晶温度にもならない。



Ans: 蓄積する場合

- *Fig.2 (a) type 1 ELM from Ref. [2] and Grassy ELM from Ref. [4]*



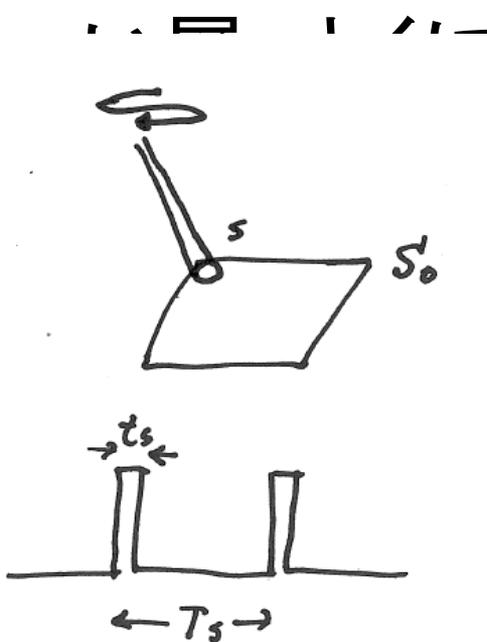
3. 熱源掃引方式の適用範囲

資料面積より熱源面積が小さく、sweepにより平均的に熱を与えようとする場合(電子ビーム、レーザー)

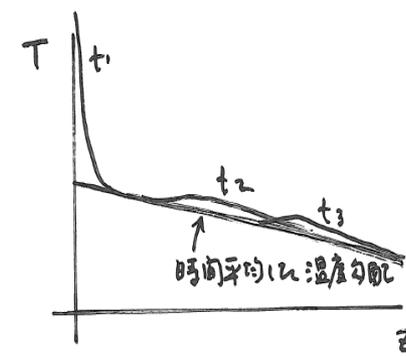
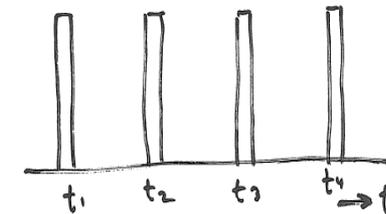
1サイクルの時間を $T \downarrow s$ とすると $S/S \downarrow 0 = t \downarrow s / T \downarrow s$, 平均熱負荷 $\langle q \rangle = q \downarrow peak t \downarrow s / T \downarrow s$

ある深さ以上 $x \geq \delta$ の状態を模擬するのであれば問題はない。

しかし
く別物



$$x < \sqrt{\lambda t \downarrow s} /$$



全

変動に**影響**しない深さを求める。

周期 $T \downarrow S$ ($= q \downarrow peak t \downarrow s / \langle q \rangle$) の間に入ってくる総熱量は変わらず、また、 $t \downarrow s \sim T \downarrow s$ なる極限においては定常熱負荷になるので、 $t \sim T \downarrow s$ 間に熱が伝わる特徴的距離 d 以上においては熱源 sweep の影響は無いと考えられる。

$$d \sim \sqrt{\lambda T \downarrow s / c \rho} = \sqrt{q \downarrow peak / \langle q \rangle} \sqrt{\lambda t \downarrow s / c \rho} \\ \sim \sqrt{q \downarrow peak / \langle q \rangle} \delta \downarrow t \downarrow s$$

例えば duty が 1/10 程度で sweep する場合 ($q \downarrow peak \sim 10 \langle q \rangle$),

$$d \sim \sqrt{10} \delta \downarrow t \downarrow s \sim 3.2 \delta \downarrow t \downarrow s \quad \text{となり、}$$

また、1/100 程度であれば、 $d \sim 10 \delta \downarrow t \downarrow s$ となる。

ロシア エフレモフ研究所の IDTF 電子ビーム装置は周波数 1~10kHz で掃引して平坦分布を得ている (鈴木哲氏情報)

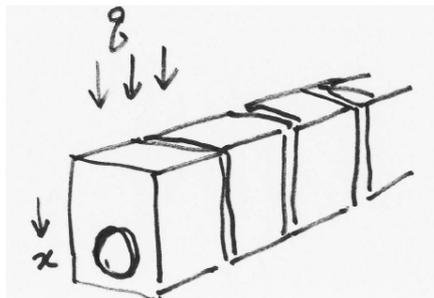
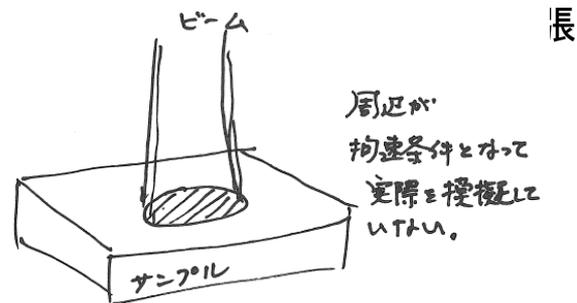
電子ビームの直径 2mm、ターゲットの大きさを 1.5cm x 2.0cm とすると、

急峻な熱負荷時の温度分布と応力

$q \downarrow 0$ が大きくて深さ方向への熱伝導が追いつかない時間スケールで何がおきるか？
表面近傍に急峻な温度勾配ができる。 → バルクの材料は熱

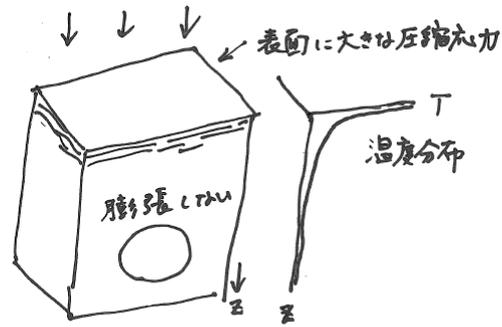
拘束条件に注意

レーザーや電子ビームなどの熱源を用いる場合、照射領域がサンプル前面にわたっているか、そうでないときは周辺の非照射領域が拘束条件になっているので、クラックが生じたとしても普遍性が無い。



定常熱負荷

膨張による応力緩和



急速加熱の場合

表面付近に応力シア

表面には長手方向の圧縮応力が働く。 → 膨張しない内側層との間に応力シアが生じ、層間割れとともに表面層に座屈が生じ、クラック、固体片の飛び出しが生じる。