

Target R&D

for the J-PARC neutrino experiment

Yoshinari Hayato (KEK/IPNS)
for the J-PARC target & monitor R&D group

温度上昇量、熱衝撃評価 (input parameters)

グラフィット標的

Target size

30mm ϕ x 900mm L

Beam size

$\sigma_r = 6\text{mm}$

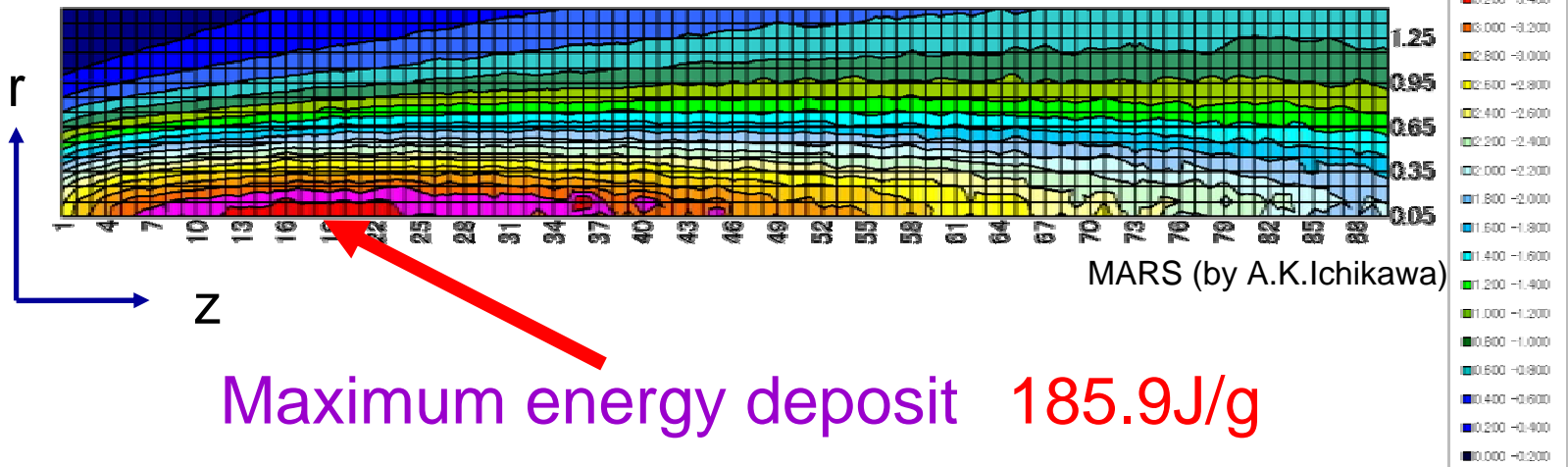
Density

1.85 g/cm³

Energy deposit

58kJ/spill

Distribution of the energy deposit in the target



温度上昇量評価

Heat transfer rate @ surface

Temperature @ surface (environment)

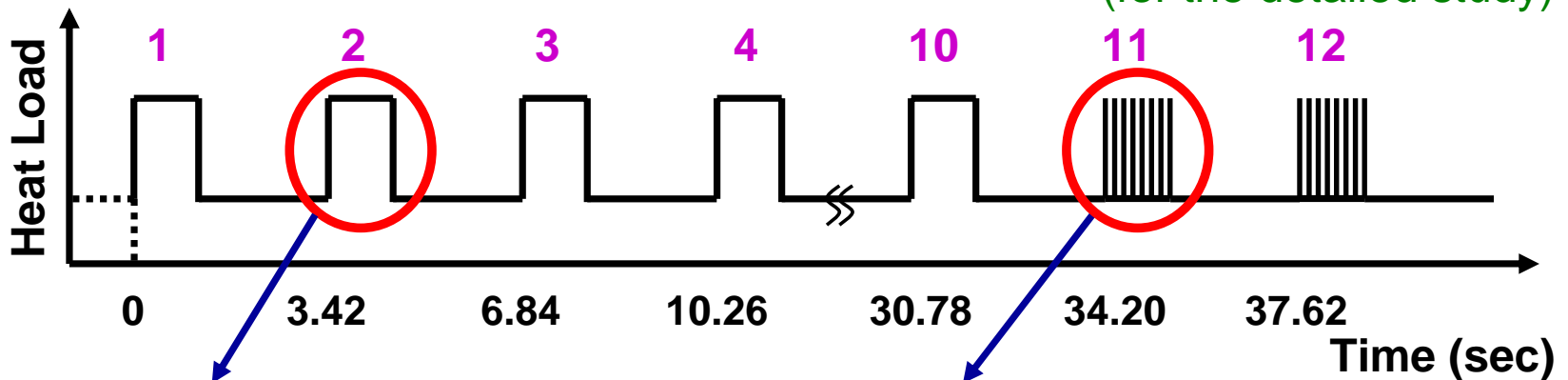
(FEM simulation)

6.5kW/m²/K

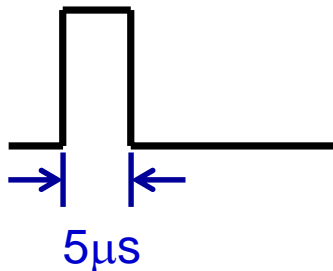
25°C

Two patterns of the time structures were simulated.

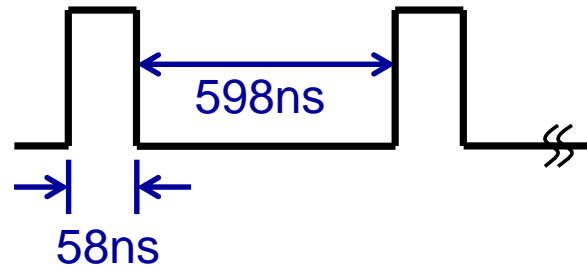
(for the detailed study)



averaged



8 bunches/spill



温度上昇量、熱衝撃評価

result 1 : 解析計算

温度上昇

198°C (IG-43)



200°C (G-347)

Equivalent stress σ_{eq} (Quasi-static stress + Dynamic stress)

$$\sigma_{eq} = \sqrt{\{(\sigma_x - \sigma_y)^2 + (\sigma_y - \sigma_z)^2 + (\sigma_z - \sigma_x)^2\} / 2} \leq \frac{2-\nu}{3(1-\nu)} E\alpha T_0$$

E : Young's modulus

T_0 : Temperature rise

α : Linear expansion coeff.

ν : Poisson ratio

	tensile strength	T_0 (K)	σ_{eq} [MPa]	Safety factor
IG-43	37.2	198	7.48	4.0
G347	31.4	200	5.55	4.5

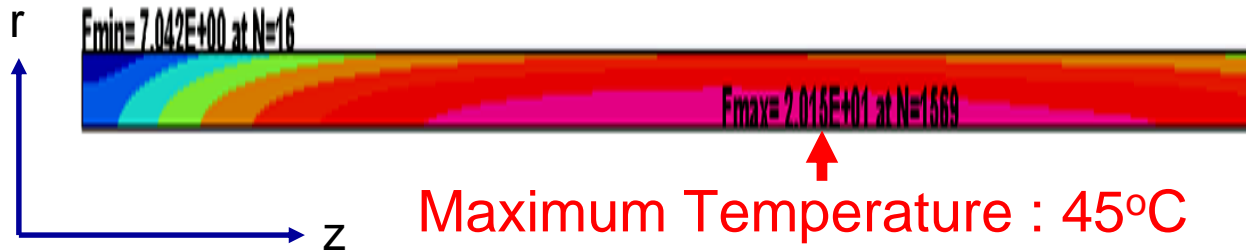
Safety factor = [tensile strength] x [material fatigue factor] / σ_{eq}
 (material fatigue factor = 0.8)

→ These materials seem to have sufficient safety factor.

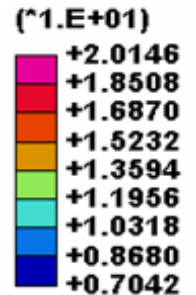
温度上昇量評価

FEM simulation result

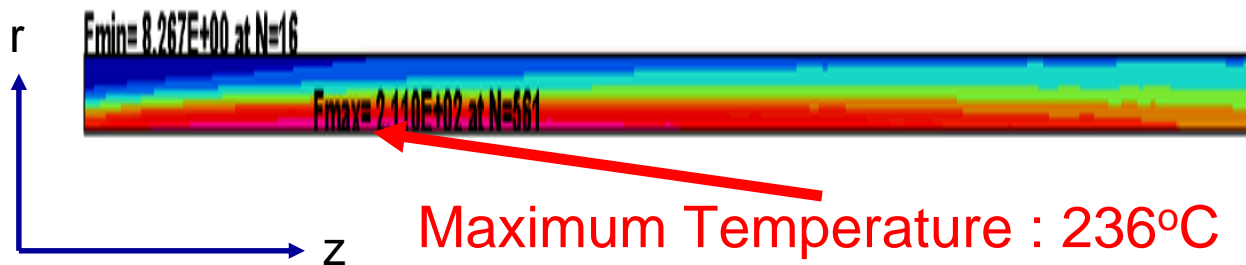
just before the 11th spill



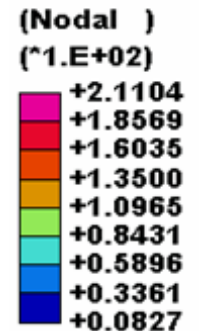
relative temp.
from 25°C



just after the 11th spill



temprrt



(Material : IG-43)

温度上昇量評価

FEM simulation

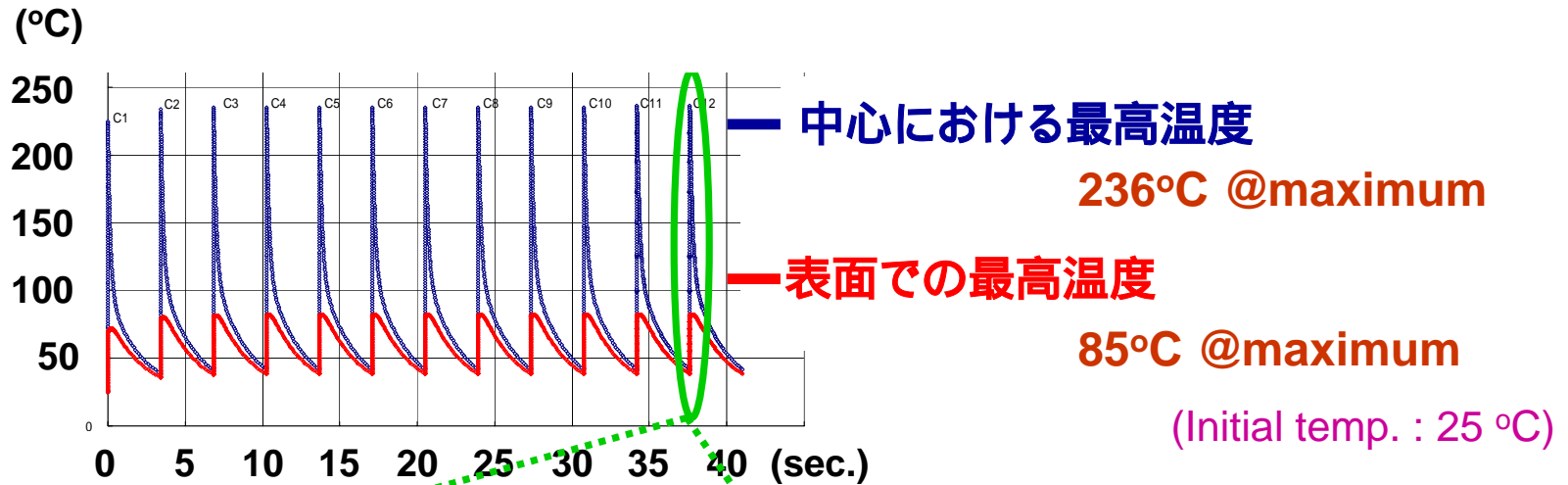
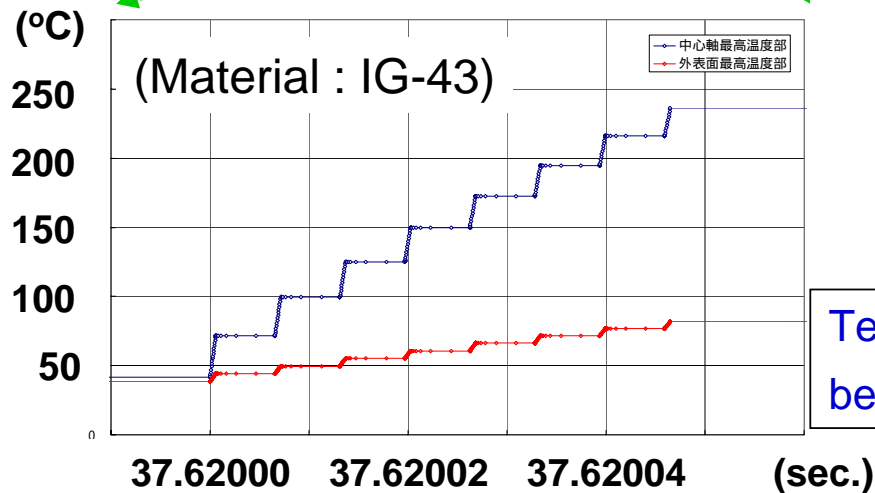


図 クラフタイトターゲットの温度変化



Temperature is saturated
in a few spills.

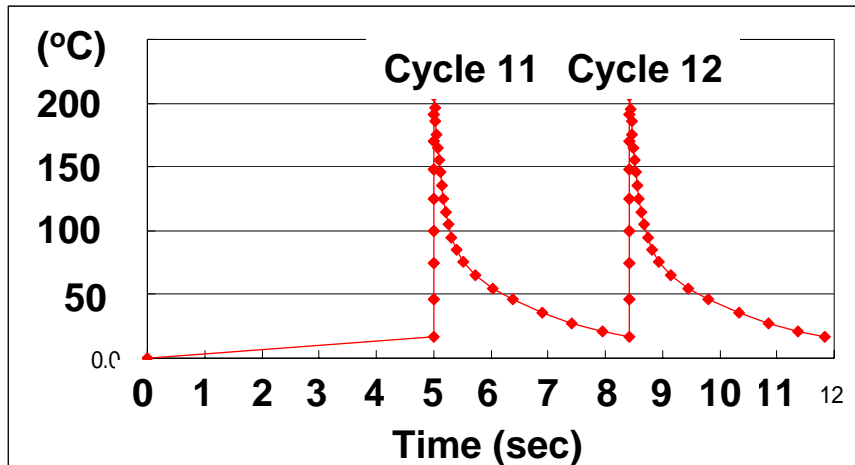
Temperature rise gradually decreased
because of the temp. dependence of C_p .

温度上昇量、熱衝撃評価

温度時間変化

(simulation input parameters)

Cycle 11 と 12 を用いる



Material properties

Temperature (°C)	Young's modulus (MPa)	Linear Expansion Coeff. (x10 ⁻⁶)
0.0	10760	3.6814
20.0	10790	3.762063
100.0	10920	4.065344
200.0	11080	4.48612
400.0	11410	4.926584

Two types of the stress analysis (LS-DYNA)

R方向の変位解析 (fast components)

time step : 1 μ s (from 0 to 205 μ s)

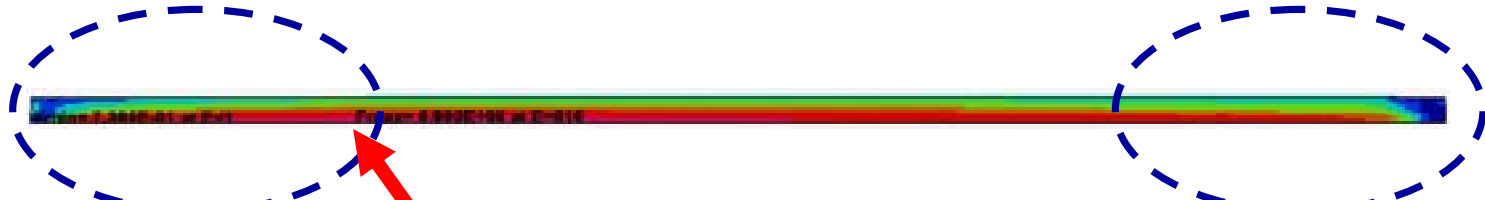
Z方向の変位解析 (slower components)

time step : 10 μ s (from 0 to 2050 μ s)

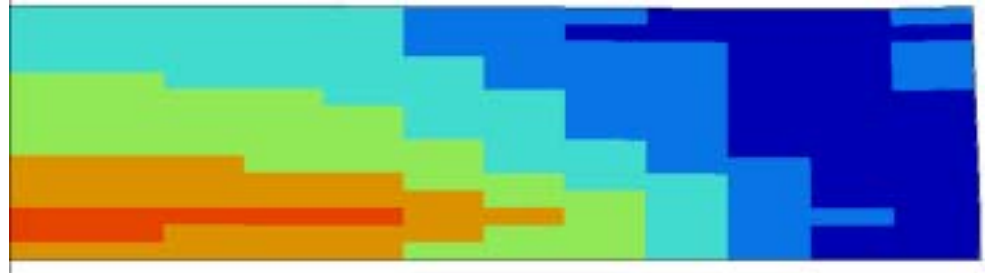
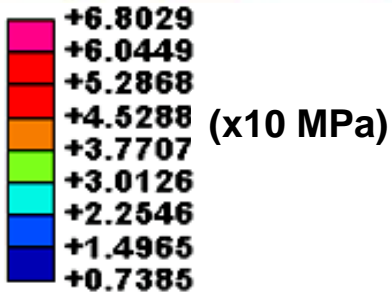
熱衝擊評價

FEM simulation result

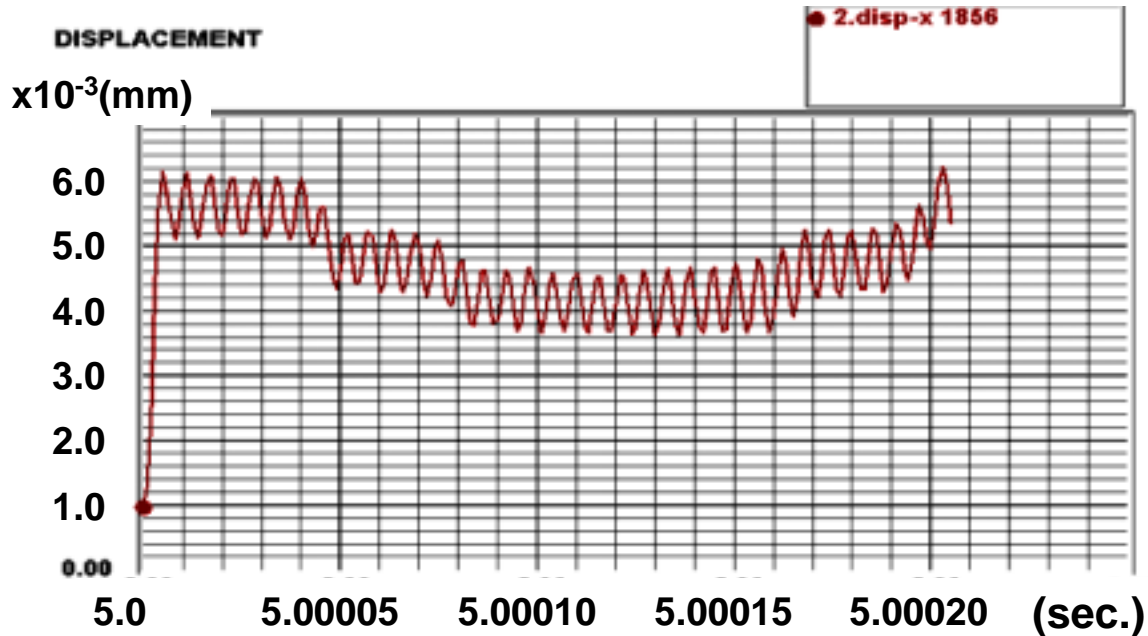
Just after the 11th spill



Maximum equivalent stress
6.8MPa



変位量評価 (R方向) FEM simulation



Displacement in the radial direction

最大変位

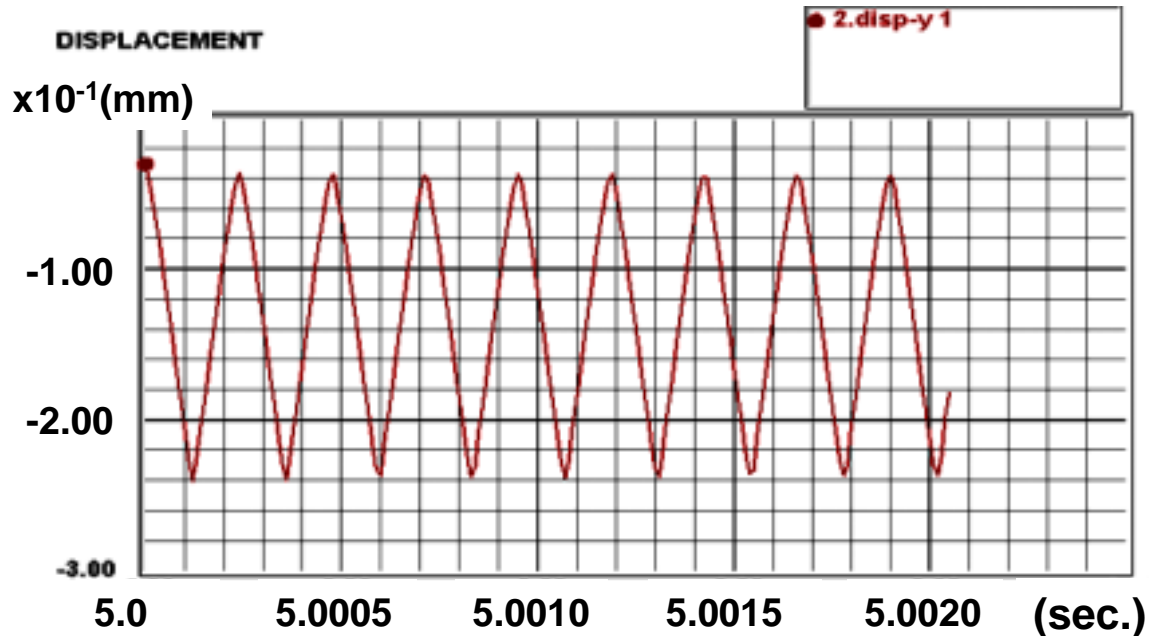
$\sim 6 \times 10^{-3} \text{mm}$

周期

$\sim 6 \mu\text{s}$

変位量評価 (Z方向)

FEM simulation



Displacement in the longitudinal direction

最大変位

~ $2.5 \times 10^{-1} \text{mm}$

周期

~ $250 \mu\text{s}$

温度上昇量、熱衝撃評価

FEM simulation

最高温度 @ 中心

~ 236°C

(analytical : @ center ~ 250°C)

@ 表面

~ 85 °C

応力

~ 6.8MPa

(analytical ~ 7.5MPa)



F E M simulationと解析計算はコンシステント.

最大変位

radial ~ 6×10^{-3} mm

longitudinal ~ 2.5×10^{-1} mm

振動周期

radial ~ 6 μ s

longitudinal ~ 250 μ s

→ 今後

中心を外れたビームが照射された場合の評価を行う

ターゲット冷却

Energy deposit in the target ~ 60kJ/spill

~3秒以内に除熱する

Cooling method : Water cooling

高効率 (high heat transfer rate can be achieved)

比較的シンプルなシステム

温度の上限が低い。 (boiling point = 100°C)

熱伝達係数の概算

Surface area ~ 30mm x π x 900mm = 0.085 m²

Required heat transfer ratio (α)

~ 20 kW / 0.085m² / ΔT

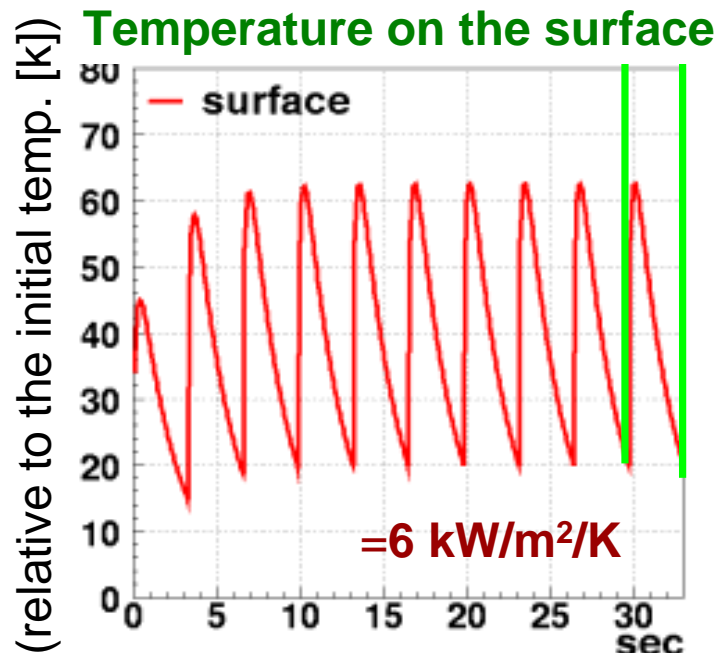
(ΔT : Temperature difference between the water and the surface)

$\Delta T = 40^\circ\text{C}$ とすると、 $\alpha \sim 6 \text{ kW/m}^2/\text{K}$

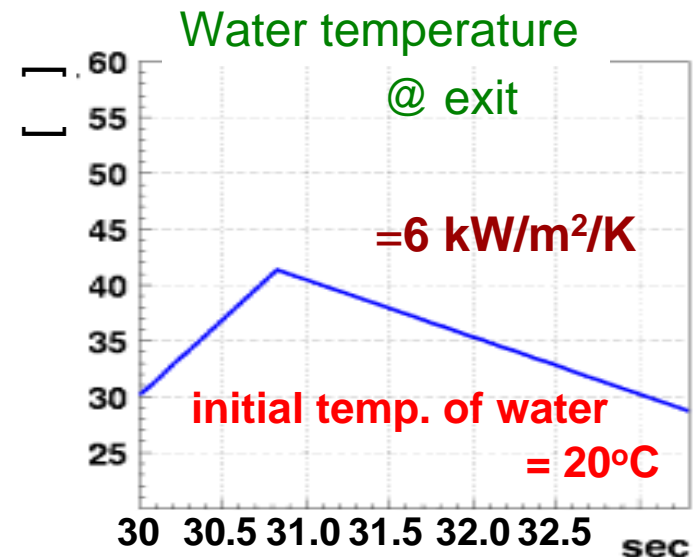
ターゲット冷却

熱伝達係数を仮定した場合の、温度変化を解析的に計算

(Use fitted energy deposit distribution in r-direction and averaged in z-direction.)



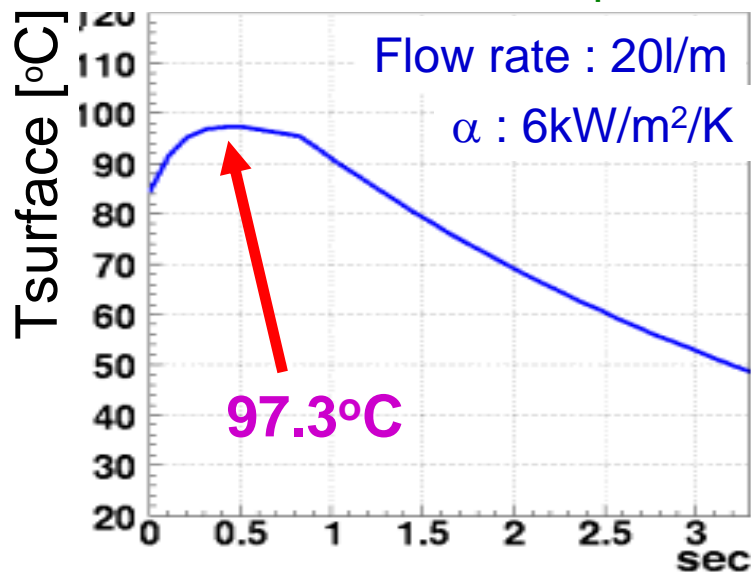
水流量を仮定し、水の温度を評価



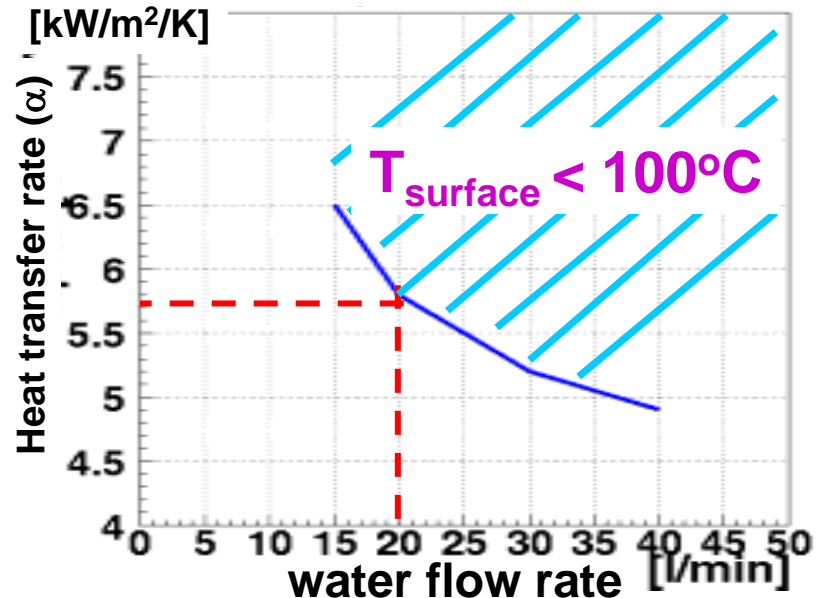
ターゲット冷却

水温を100度以下という条件を与え、
必要とされる流量及び熱伝達係数を評価

Example of the time dependence
of maximum surface temperature



relation between water flow rate vs. α



To satisfy $T_{\text{surface}} < 100^\circ\text{C}$,

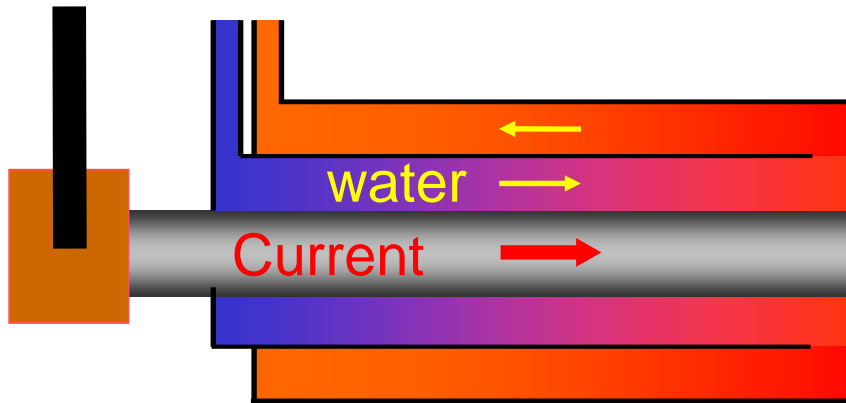
$\alpha > 6.5\text{kW/m}^2/\text{K}$ @ flow rate = 15l/m

$\alpha > 5.8\text{kW/m}^2/\text{K}$ @ flow rate = 20l/m

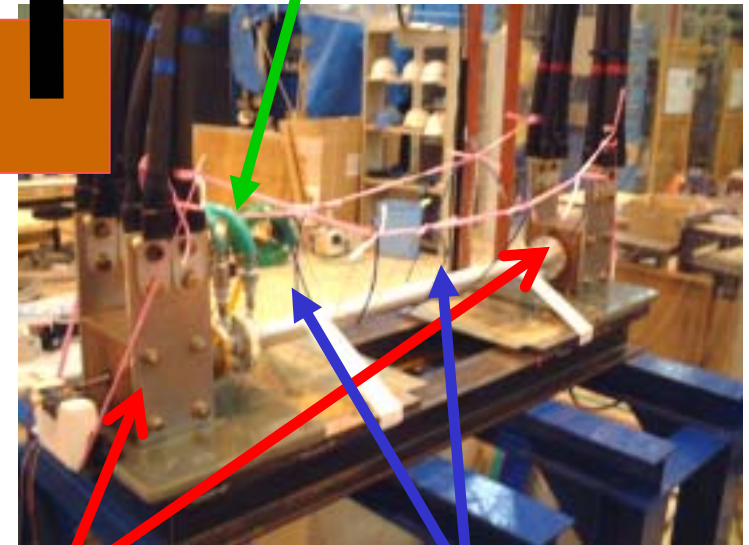
冷却テスト(heat transfer rate measurements)

ジュール熱によりターゲットを加熱
水による直接冷却の試験を行う。

水温、表面温度を測定。



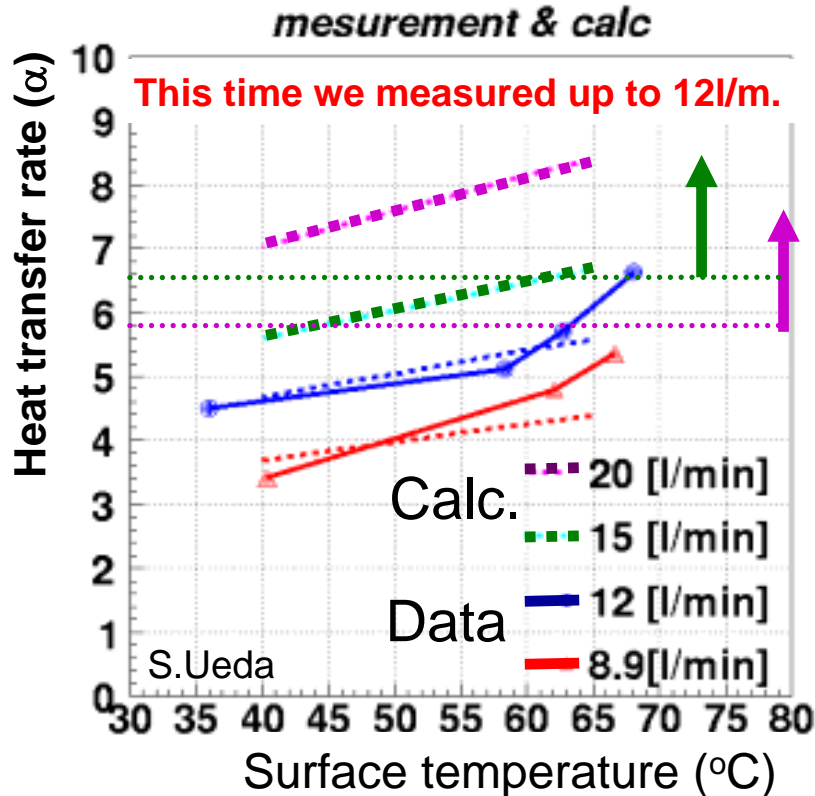
Thickness of the water path: 2mm
Diameter of the target: 30mm
Water temp. (in): ~25°C
DC Current: up to 1.3kA
(~20kW)



Current feeds Thermocouples

熱伝達係数計測

Measurements & theoretical expectations



理論式

$$\alpha = 0.023 \times \text{Re}^{0.8} \times \text{Pr}^{0.4} \times \lambda \times d^{-1}$$

Re Reynolds number

Pr Prandtl number

λ Thermal conductivity

d equivalent diameter

(Re and Pr also depend

on the surface temp.)

計測値と期待値はよく一致している

$$\alpha > 6 \text{ kW/m}^2/\text{k}$$

→ 水流量を18l/m以上確保すればよい

まとめと今後(I)

温度上昇量及び熱衝撃評価

解析計算とFEM simulationはコンシステント

最高温度 @ 中心

~ 236°C

(analytical : @ center ~ 250°C)

最大等価応力

~ 6.8MPa

(analytical ~ 7.5MPa)

	tensile strength	σ_{eq} [MPa]	Safety factor
IG-43	37.2	7.48	4.0
G347	31.4	5.55	4.5

これらの材料は要求を満たしている。

→ ビームが中心を外れて照射された場合について検討

まとめと今後(II)

標的冷却

水冷

$$T_{\text{surface}} < 100^{\circ}\text{C},$$

[Heat transfer rate] > 6.5kW/m²/K @ flow rate = 15l/m

[Heat transfer rate] > 5.8kW/m²/K @ flow rate = 20l/m

水の直接冷却試験を行い、熱伝達係数(graphite-水)を測定

→ 実測値は計算値とよく一致していた

Heat transfer rate > 6kW/m²/k

→ 18l/m 以上流せば要求を満たすことができる

Next : アルミ-水の熱伝達係数を測定

まとめと今後(III)

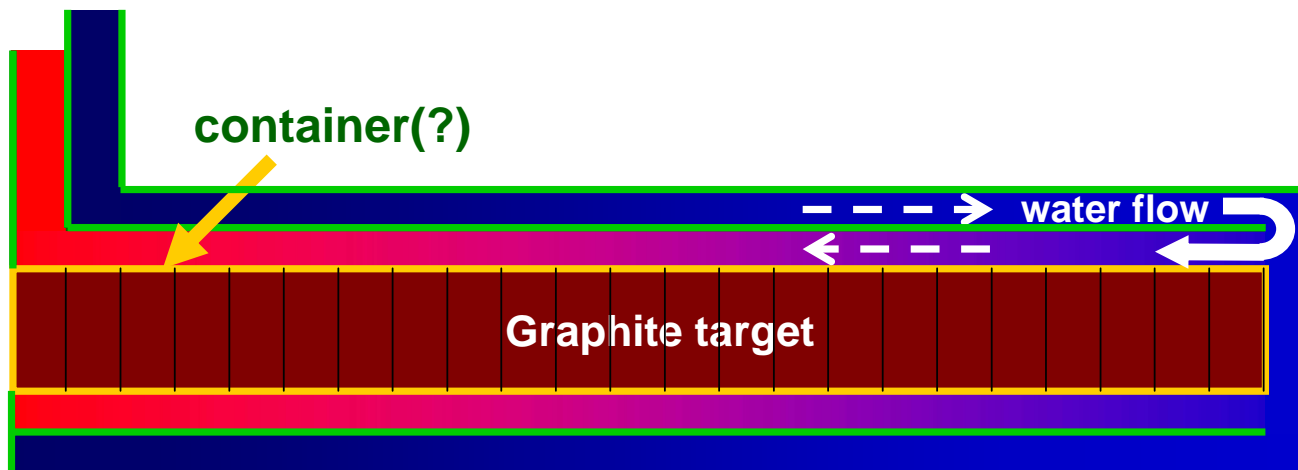
今後

- 標的を分割するか(Z軸方向)?

中心を外れたビームが照射された場合に、大きなストレスが発生する可能性。

- 標的をケースに入れる(水と接しないようにする)か?

標的を分割した場合には、水がビーム中心付近にいかないようにケースに入れることは必須となる。



Schematic view of the possible target (cooling) system

まとめと今後(IV)

- **ビーム照射による影響**

- **熱伝導係数**

約1/10になっても問題なさそう

- **標的が 1~数%収縮する**

長いターゲットの場合、cmオーダーで収縮する可能性 で照射した場合の寸法変化

小さいピースに分割することは必須(?)

標的をケースに入れた場合、R方向も収縮するので

固定方法を検討する必要がある。

冷却効率が大幅に悪化することも考慮する必要がある。

→ **照射の影響の情報収集及び試験を行う**

- **Swelling effect**

- **水素生成、蓄積・He蓄積**

