

# JPARC - ニュートリノ生成標的の 冷却と熱応力



## Introduction

J-PARCニュートリノ実験  
ニュートリノ生成標的  
ターゲットの要請

## 耐久性、熱応力

## 冷却能力

必要な熱伝達係数  
冷却試験

## まとめと今後

京大理 上田 俊輔

JHF target monitor group

# J-PARC ニュートリノ 実験

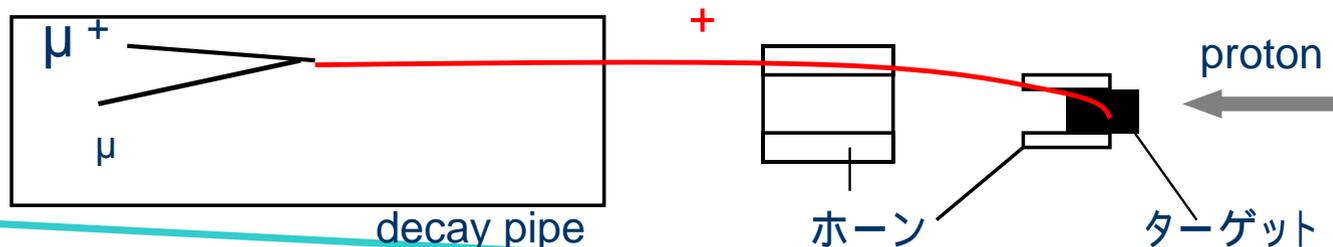
## 目的

- $\mu \rightarrow e$
- $\mu$  disappearance
- CPV in lepton sector

**十分な統計が必要**



	J-PARC	K2K
Energy (GeV)	50	12
Int. ( $10^{12}$ ppp)	330	6
beam間隔(sec)	3.3	2.2
Power (kW)	750	5.2

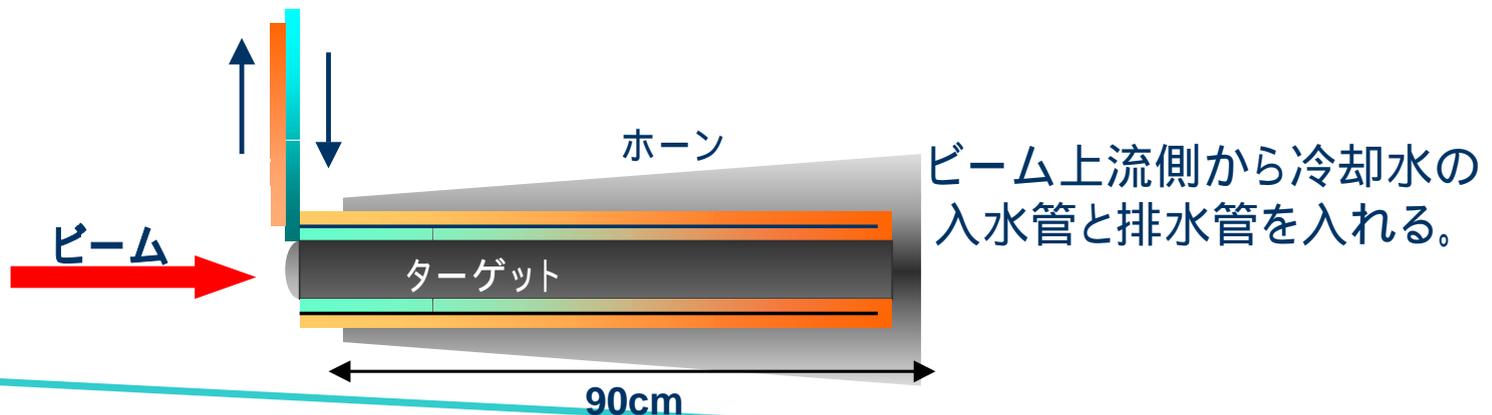


# ニュートリノ生成標的

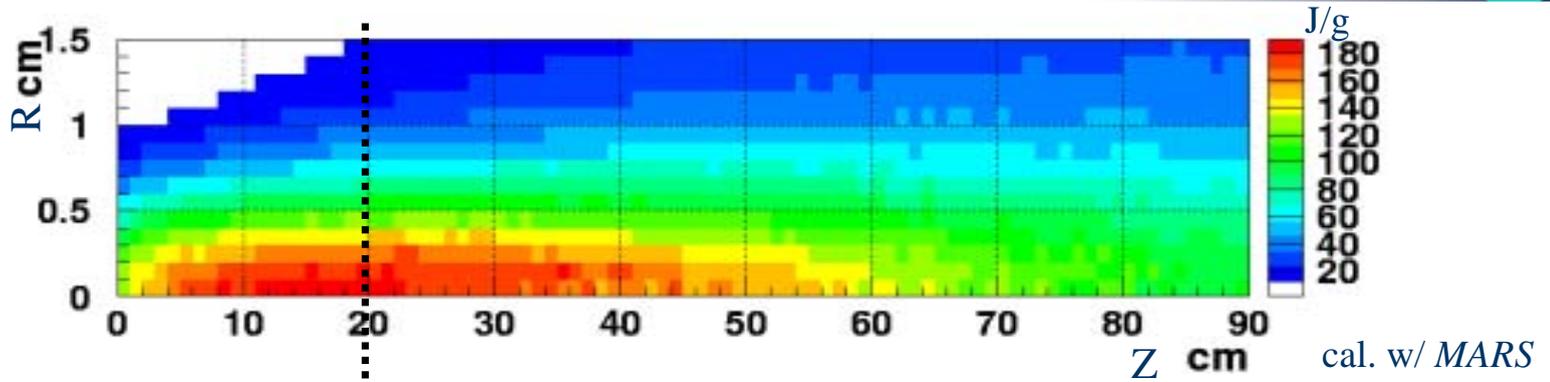


## ■ 主な特徴

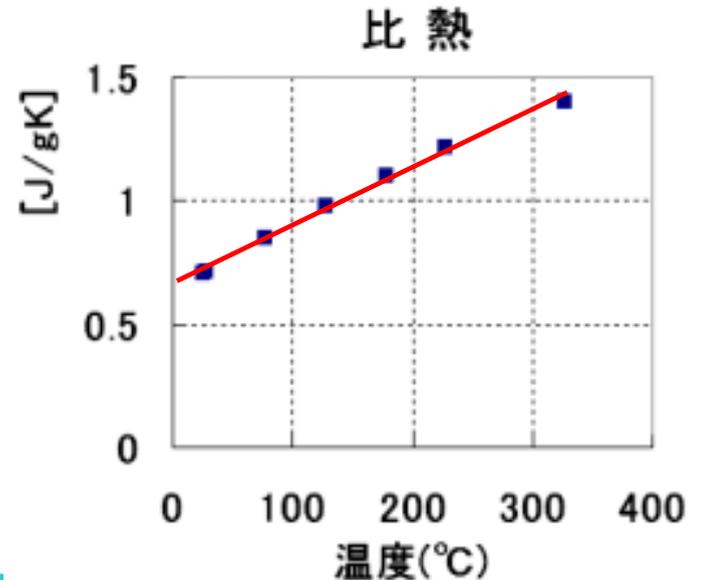
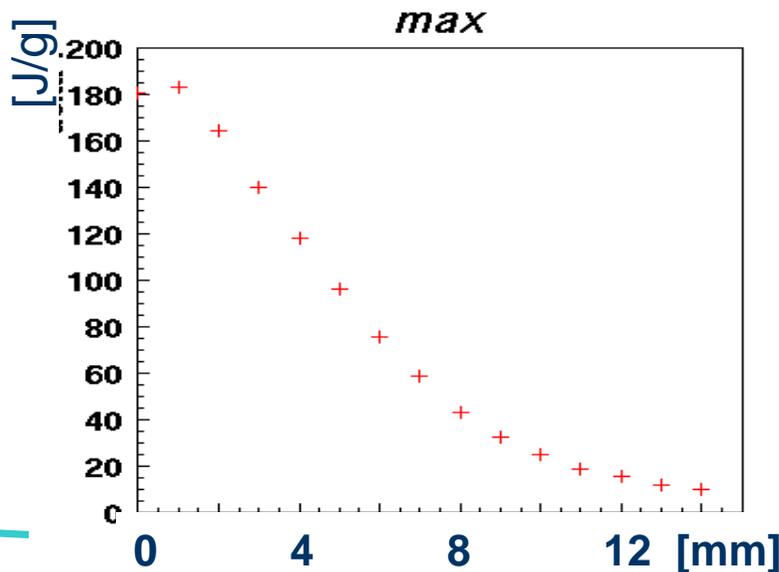
目標	できるだけ多くの 中間子を生成	瞬間的に 大量の熱 (60 kJ)
ビーム	大強度陽子ビーム。5 $\mu$ 秒で $3 \times 10^{14}$ proton。 →	
種類	グラファイト、またはc/c composite 理由: 高い融点(3700 ), 原子番号が小さい、強度がある(数十MPa)。	
冷却	60kJの熱を3.3秒間に冷却できないといけない。 空冷より熱伝達がよい <b>水冷</b>	
形状	長さ90cm(2 int) 半径12mmから15mm程度の円柱形。	



# 発生する熱分布



半径15mmの場合、1pulseで発生する熱量



# ターゲットの要請



瞬間的かつ大量の熱(60kJ/5 μ sec)

➔ 熱応力に耐えられるか？  
冷却できるか？

■ ニュートリノ収量

半径が大 減

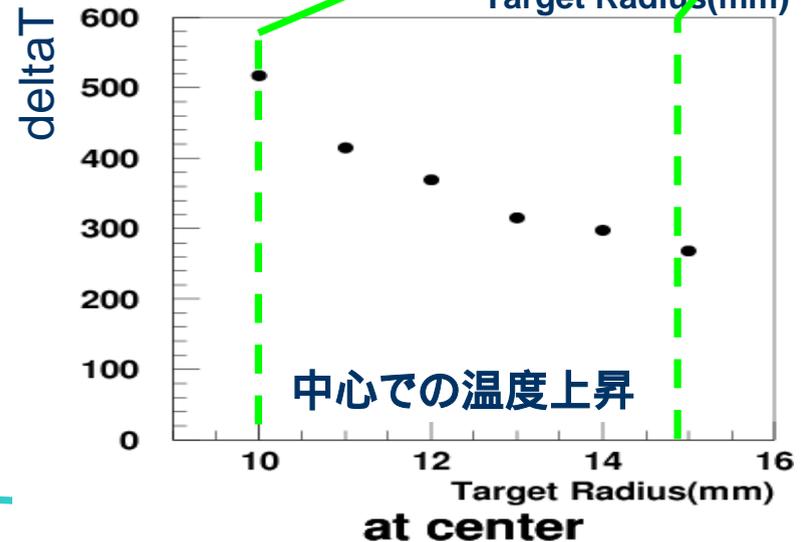
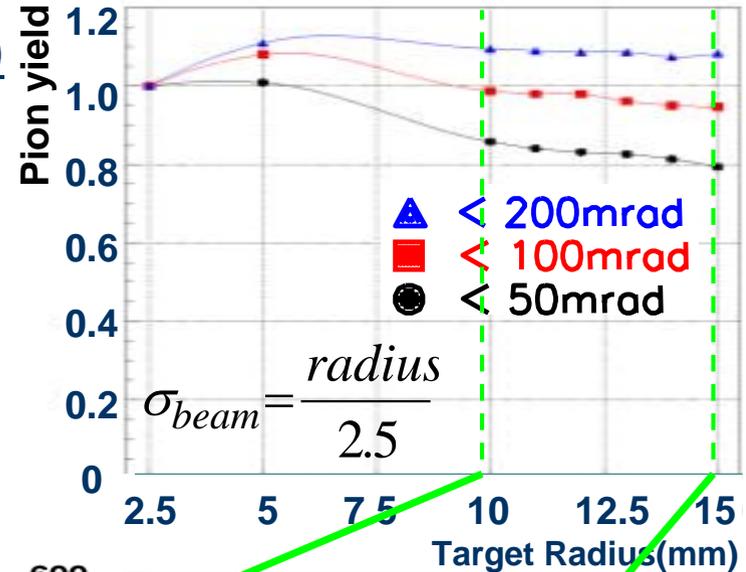
■ 耐久性、熱応力

半径が小 中心温度大

■ 冷却能力

半径が小 表面積小

ターゲット半径が  
15mmの場合での  
熱応力と冷却能力  
に関して調べた。



# 耐久性、熱応力



## ■ 熱応力 (中心r=0)

不均一な温度分布

→  
準静的応力

$$\begin{aligned}\sigma_z^{stat} &\approx -\frac{2}{3} \frac{E \alpha T_0}{1-\nu} \\ \sigma_r^{stat} &\approx -\frac{E \alpha T_0}{3(1-\nu)} \\ \sigma_\phi^{stat} &\approx -\frac{E \alpha T_0}{3(1-\nu)}\end{aligned}$$

E : ヤング率  
: ポアソン比  
: 線膨張係数  
T<sub>0</sub>: 中心温度

急激な温度上昇

→  
動的応力

$$\sigma_z^{dyn} \approx \pm \frac{1}{3} E \alpha T_0$$

音速で伝わる。(±は反射による)

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

## ■ 安全率

$$\text{安全率} = \frac{\text{物質の引張り強度}}{\text{等価応力}}$$

繰り返し応力の場合通常6以上見積もる



# 耐久性、熱応力



## ■ 種類による熱応力の比較

ヤング率、密度、線膨張係数引張り強度を使って計算

製造会社	型式	$e_q$ (MPa)	引張り強度	安全率	備考
東洋炭素	IG-11	5.51	24.5	4.4	
	IG-43	6.74	37.2	5.5	
	ISEM-1	4.40	19.6	4.5	
	ISO-88	11.3	68.6	6.1	
	SIC-6	7.81	29.4	3.8	
Poco Grap	ZXF-5Q	95.0	15.2	6.3	minosで使用



安全率6以上は可能



# 冷却



## ■ 冷却能力

発生する熱量 ~ 60 [kJ/pulse]

$T_{surf}$  < 100

## □ 熱の移動量Q 熱伝達係数

$$Q = \alpha S (T_{surf} - T_{water}) \equiv \alpha S \Delta T_{表面}$$

:[kW/Km<sup>2</sup>]

Q : 熱の移動量

S : 表面積

Tsurf : 表面温度

Twater : 水温

## □ $T_{表面}$

ターゲットの温度分布(t=0)

熱伝達係数:

熱の移動量: Q

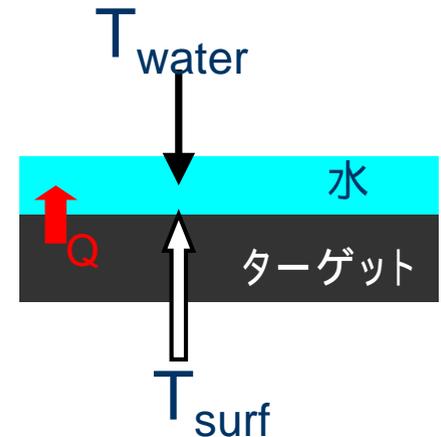


$T_{表面}$ の時間変化

以下

必要な熱伝達係数

冷却試験



# 必要な熱伝達係数

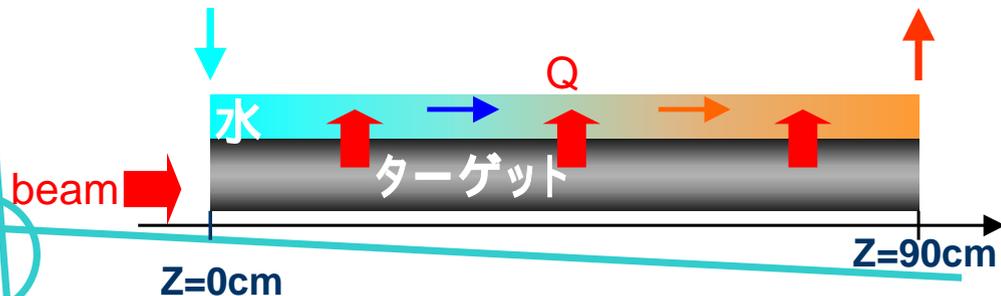
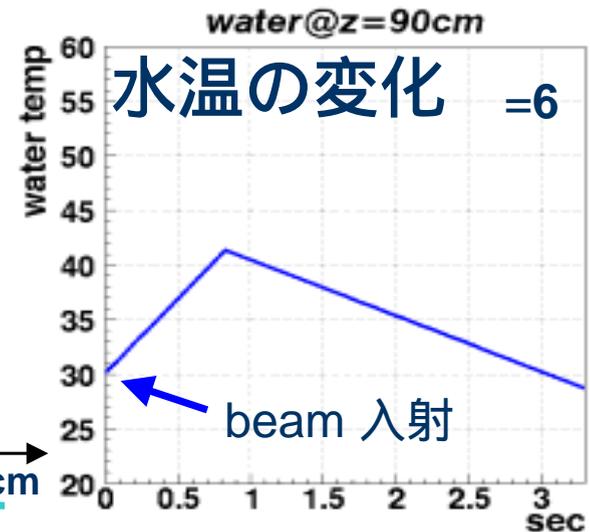
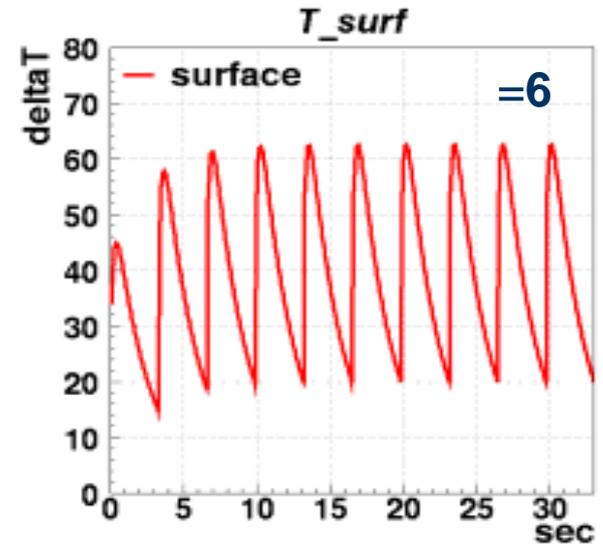


## 温度変化

- $T_{\text{表面}}$ の時間変化  
3.3秒ごとに60kJを入熱。  
入熱はr方向に直線分布を仮定。  
10spillで安定している。

## 水温の時間変化

- 水の温度上昇  $T_{\text{表面}}$   
安定な10spill目の温度分布を使い  
 $z=90\text{cm}$ での水温の変化を調べた。



# 必要な熱伝達係数

## 結果

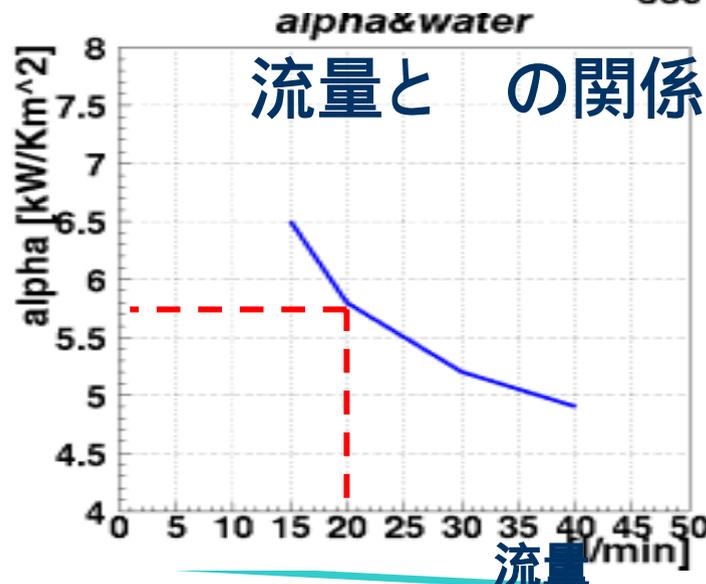
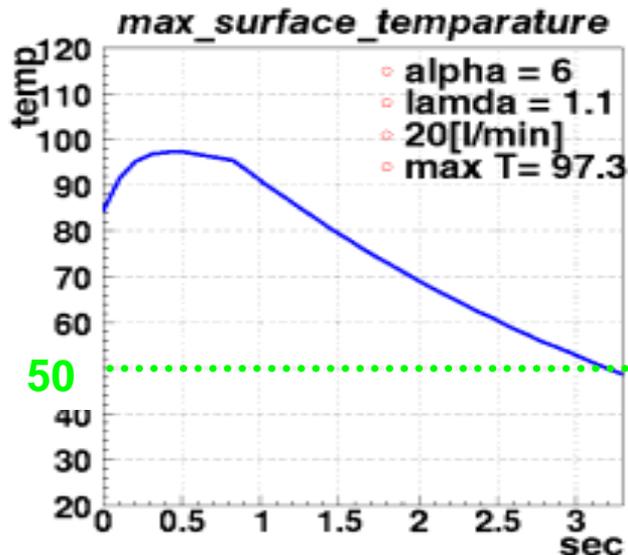
表面温度 =  $T_{\text{表面}} + \text{水温}(z=90)$   
z=90cmで $T_{\text{表面}}$ が100を超えない  
ような流量と熱伝達係数を調べた。  
(表面温度は常に**50度以上**)

流量が多い 水温上昇が小  
は小さくていい

15[l/min]で**6.5**[kW/Km<sup>2</sup>]以上

20[l/min]で**5.8**[kW/Km<sup>2</sup>]以上

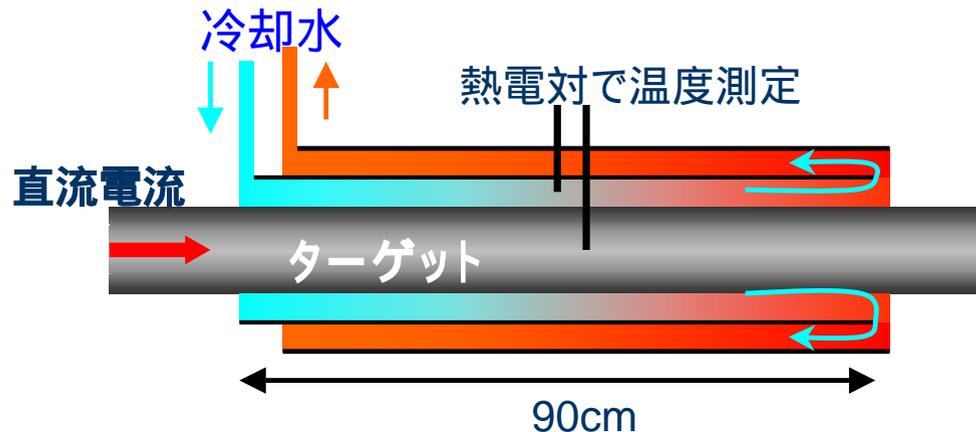
必要



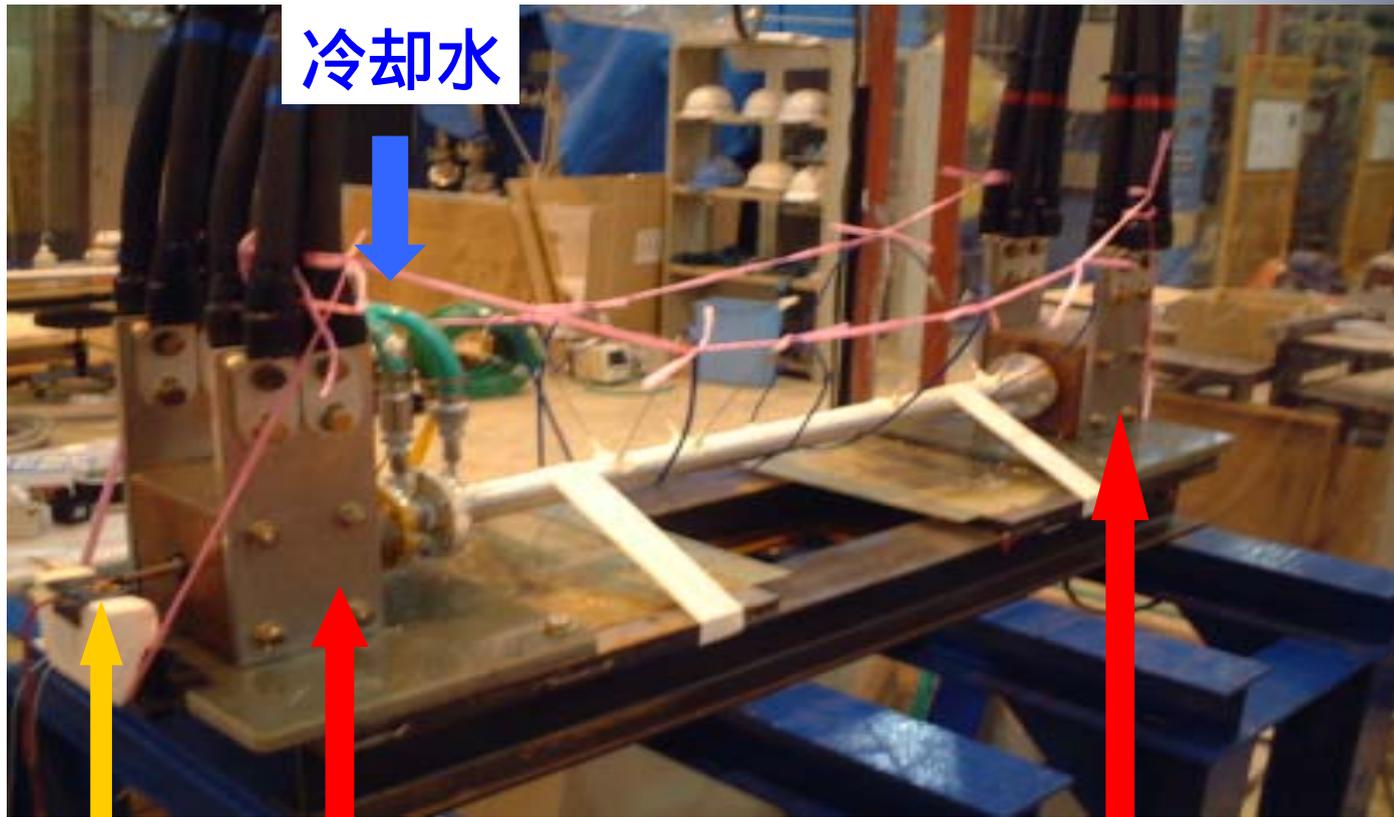
# 冷却試験



- 目的 冷却水を片側から出し入れする実機に近い形状で冷却試験をし熱伝達係数の測定
- 内容 炭素棒の両端に直流電流を流し、ターゲットの周りに冷却水を流す。流量、入熱量を変えて熱伝達係数を測定する。
- 測定したもの 水温、中心温度、ターゲットを流れた電流と電圧  
(入熱量と中心温度から表面温度を測定)
- セットアップ



# 冷却試験



冷却水

テスター

電極

電極



# 冷却試験



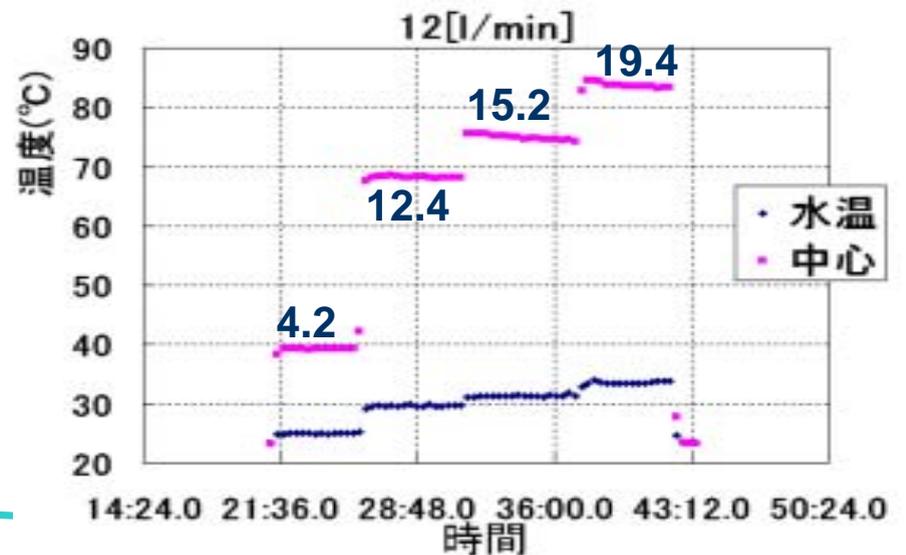
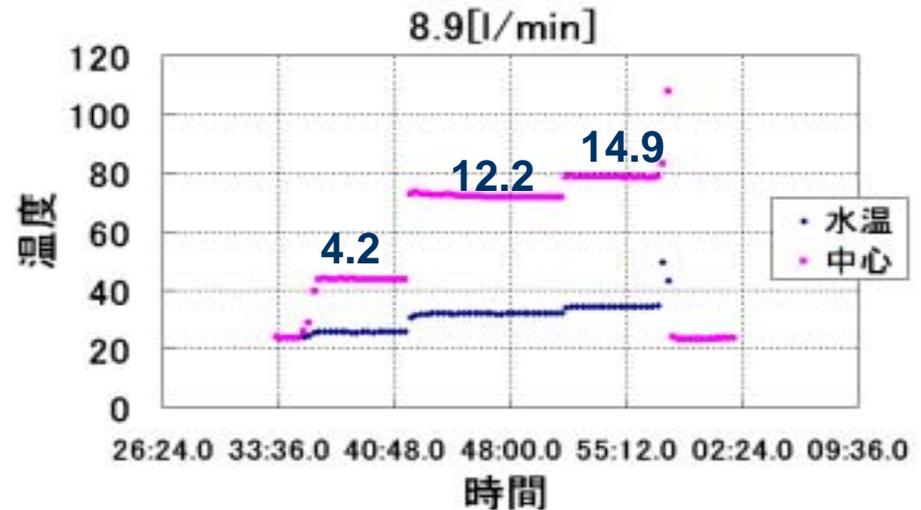
## ■ 測定data

$$\alpha = \frac{Q}{S (T_{surf} - T_{water})}$$

4.2kWから19.4kW

流量は8.9と12[l/min]

温度は平衡状態のときを使用



# 冷却試験



## ■ 測定と計算の比較

流量、表面温度に比例し  
熱伝達係数も大きくなる。

### 計算

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

Re(T) : レイノルズ数

Pr(T) : プラントル数

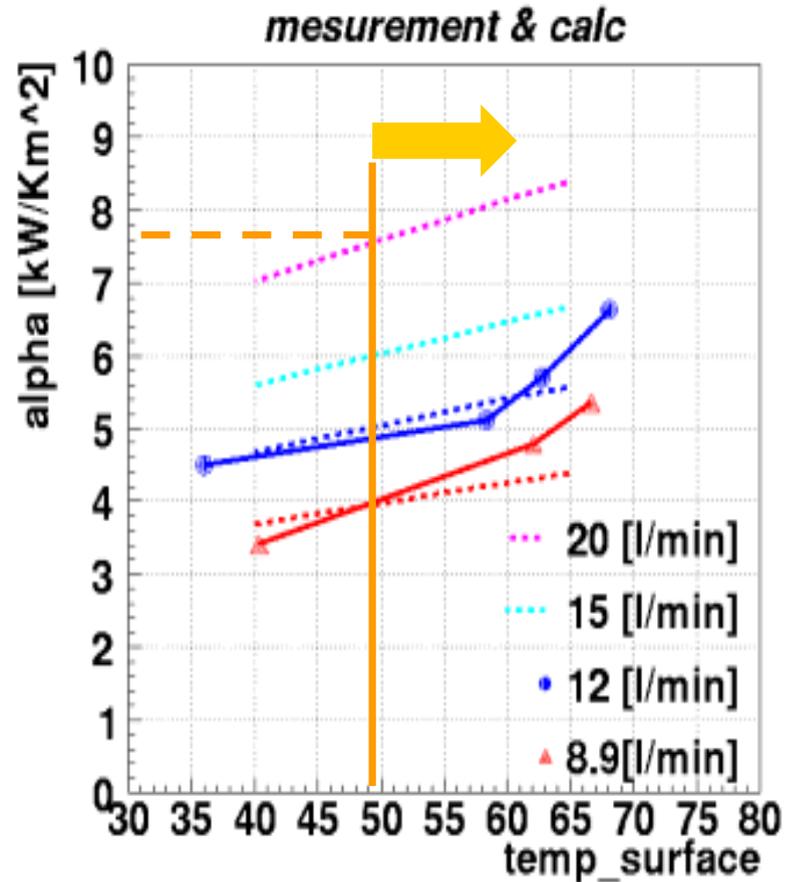
(T) : 熱伝導度

d : 管の等価直径

### 比較

8.9と12[l/min]で比較

15、20[l/min]へ外挿



20[l/min]以上あれば冷却できる。

# まとめと今後



## ■ まとめ

半径15mmのターゲットで

- ・ 応力計算      安全率6以上は可能。
- ・ 冷却能力      必要な熱伝達係数と水量の関係を調べた。  
冷却試験より、20[l/min]以上流せば冷却可能。

## ■ 今後

- 流量、圧力損失などを踏まえた冷却systemの設計
- ニュートリノ生成量が最大となるようにビームとターゲットサイズを決定する。(十分な安全率をもって)
- 繰り返し応力に対するグラファイトの評価

