

# いばらき中性子医療研究センターに おける加速器BNCT施設の建設

小林 仁<sup>#,A,B,F</sup>, 栗原 俊一<sup>A</sup>, 吉岡 正和<sup>A</sup>, 松本 浩<sup>A</sup>, 松本 教之<sup>A</sup>, 熊田 博明<sup>B</sup>, 櫻井 英幸<sup>B</sup>, 田中 進<sup>B</sup>, 松村 明<sup>B</sup>, 菅野 東明<sup>C</sup>, 柱野 竜臣<sup>C</sup>, 中島 宏<sup>D</sup>, 中村 剛実<sup>D</sup>, 平賀 富士夫<sup>E</sup>, 大場 俊幸<sup>F</sup>, 小林 創<sup>F</sup>, 名倉 信明<sup>F</sup>, 黒川真一<sup>A,G</sup>, 中本崇志<sup>G</sup>, Tilen Zagar<sup>G</sup>

A) KEK, Accelerator Research Organization

B) Tsukuba University

C) Mitsubishi Heavy Industries, LTD.

D) JAEA, Japan Atomic Energy Agency

E) Hokkaido University

F) Nippon Advanced Technology CO., LTD.

G) Cosylab

# *iBNCT*

## Industry-Government-Academia Research

### KEK

- Accelerator
- Target
- Moderator
- Collimator
- Rad. shielding

### Tsukuba University

- Project management
- JRR-4 (nuclear reactor)
- Medical system
- Monitoring

### Hokkaido University

- Neutron science, moderator

### JAEA

- JRR-4
- Moderator design
- Radiation safety

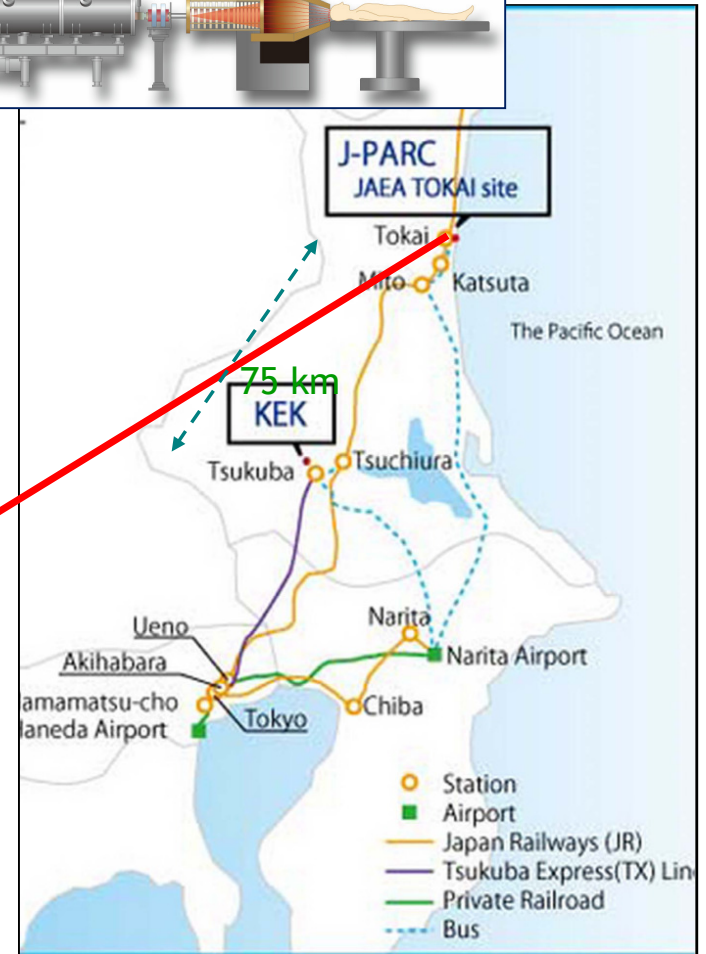
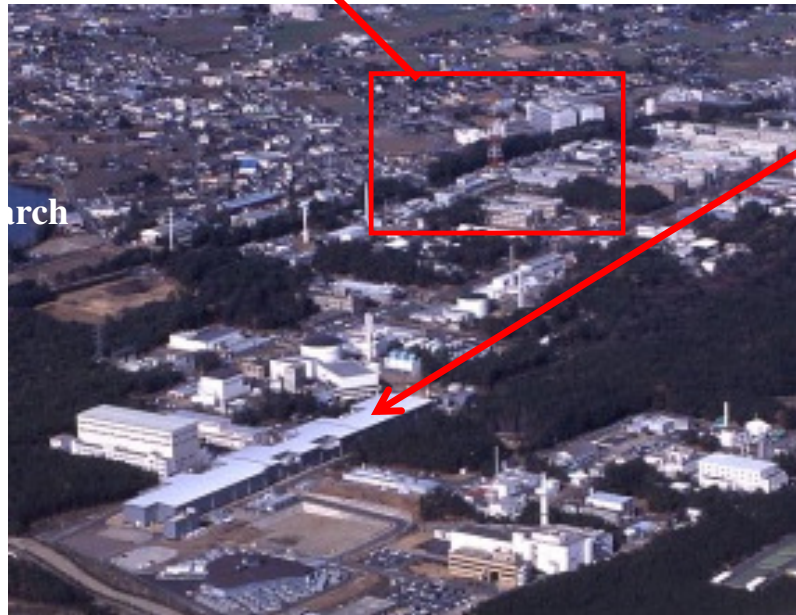
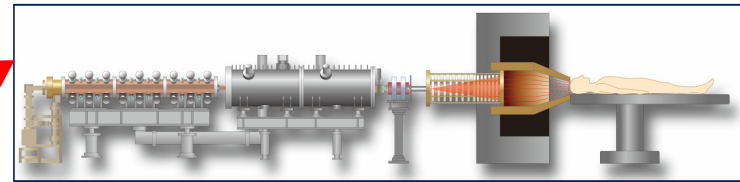
### Mitsubishi heavy industries LTD.

- Manufacturing

NAT, ATOX, Taiyo Valve, Toyama, Nihon Koshuha,  
NEC/Tokin,,,,many companies are involved

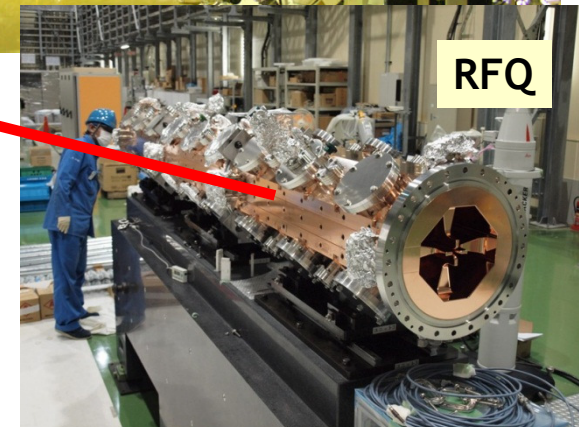
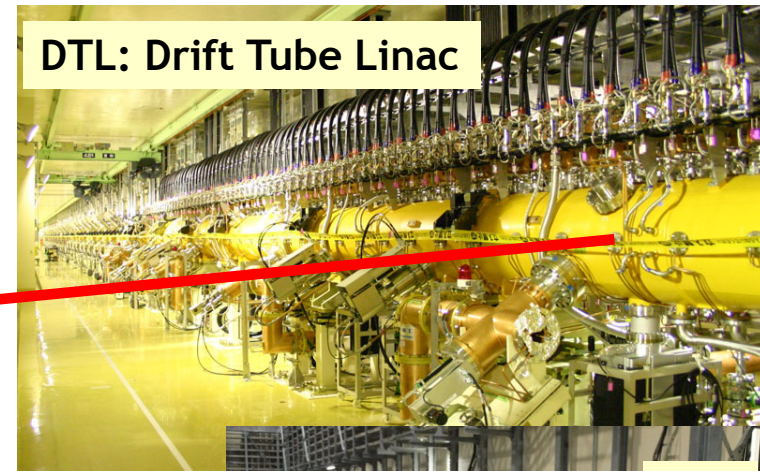
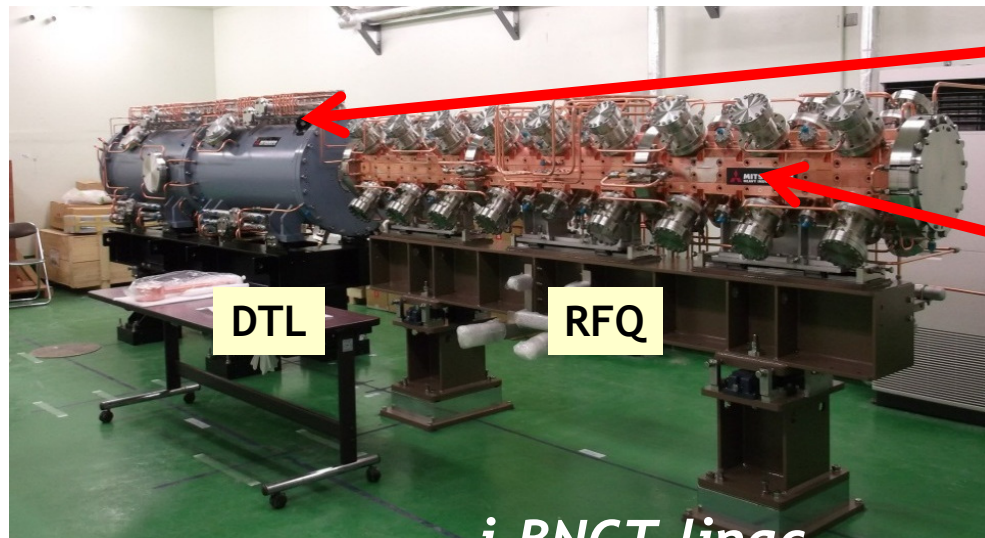
**Ibaraki prefecture**

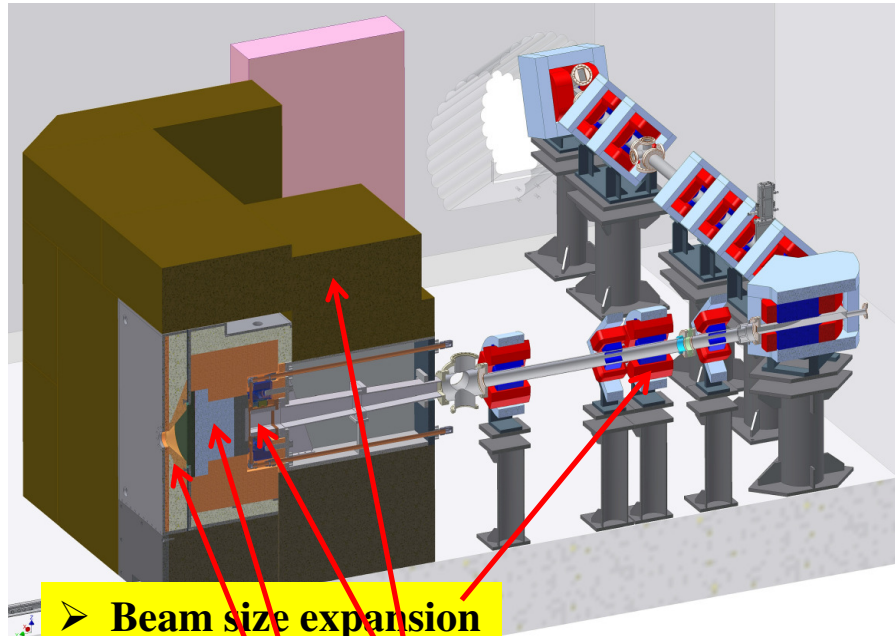
**iBNCT の建設サイト:  
いばらき中性子医療研究センター内 (J-PARC サイト近く)**



# iBNCT

## J-PARC の加速部をベース: ビームダイナミクス

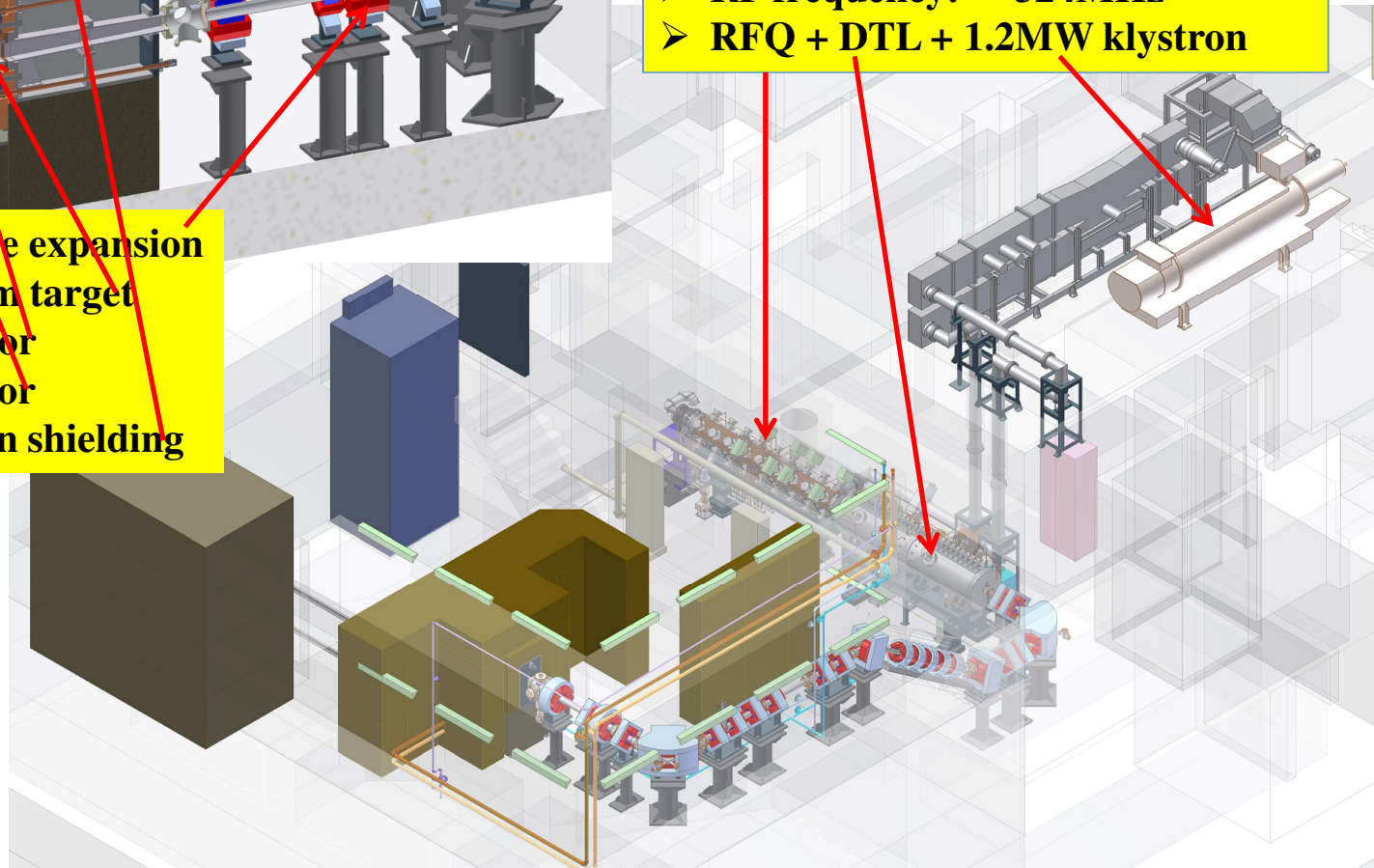




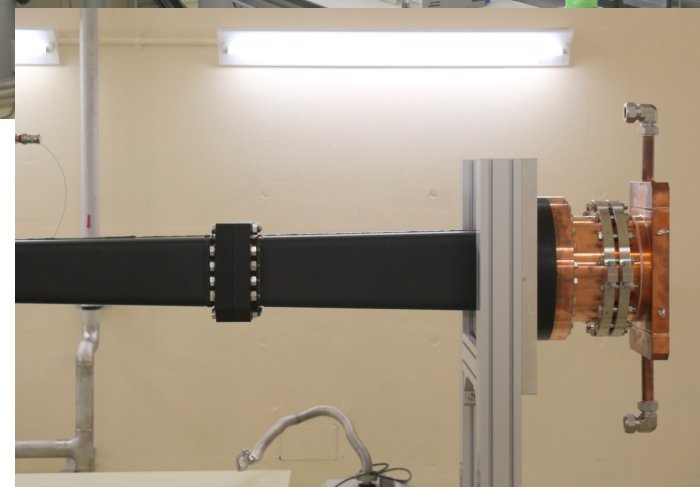
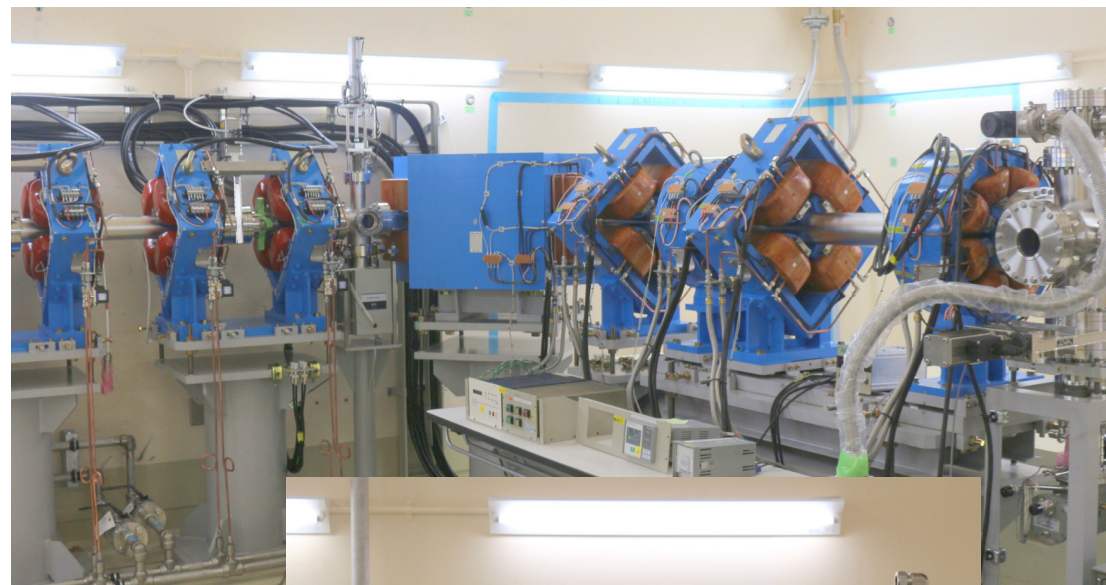
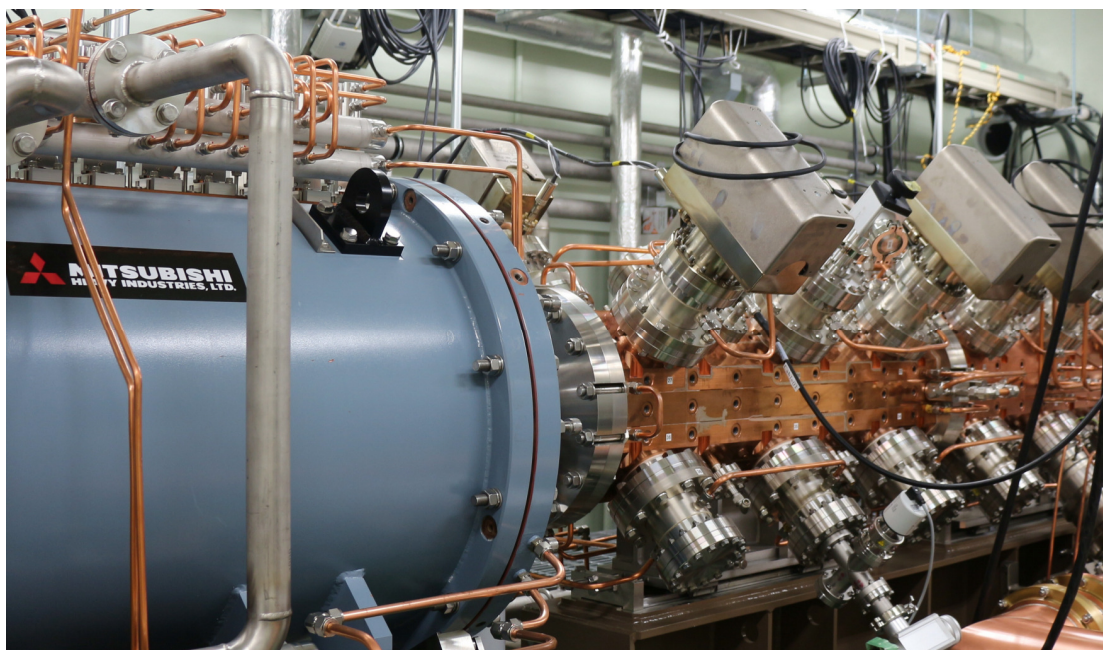
- Beam size expansion
- Beryllium target
- Moderator
- Collimator
- Radiation shielding

**Main parameters of *i*-BNCT linac;  
8MeV, 80kW High duty proton Linac**

- Peak current: 50mA
- Pulse width: 1ms
- Repetition rate: 200Hz
- Duty factor: 20%
- RF frequency: 324MHz
- RFQ + DTL + 1.2MW klystron



# 現在の加速器室と照射室-標的



# 主要パラメータの決定

## 基本方針:

**Hospital & Patient Friendly**

**Guiding Principle: Very low residual  
radio-activity.**

**エネルギーと標的材料が最重要パラメータ**

その他の材料の選択等でも注意深く低放射化の  
優先度を高く

# IAEA照射野での中性子強度指標 -原子炉ベース-

熱外中性子 (0.5eV-10keV):  $1 \times 10^9 \text{ n}/(\text{s} \cdot \text{cm}^2)$

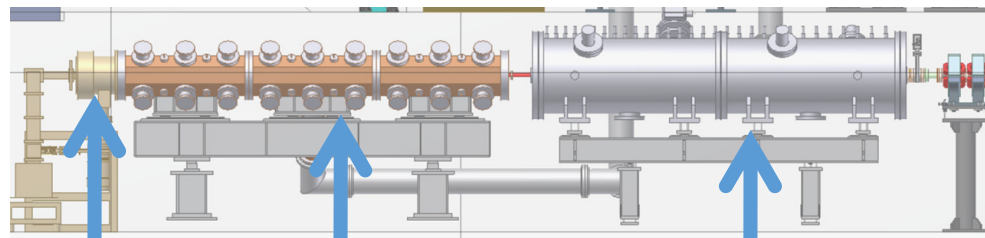
→ 治療時間の観点から(1回で終了。30分内外)  
加速器の観点からはかなりのハイパワー  
ビームが必要

当初基本的なモデレータ系を想定しての見積もりから、  
8MeV-80kW程度必要と判断



# 加速器パラメータ

- プロトンビームエネルギー: **8MeV**
- 電流: **50mA peak; 10mA average** ビームパワー: **80 kW**
- **0.5mm厚** ベリリウム



Ion source(50kV)

RFQ(3MeV)

DTL(8MeV)

## 加速器の構成

### J-PARC()比

ピーク電流:  
同

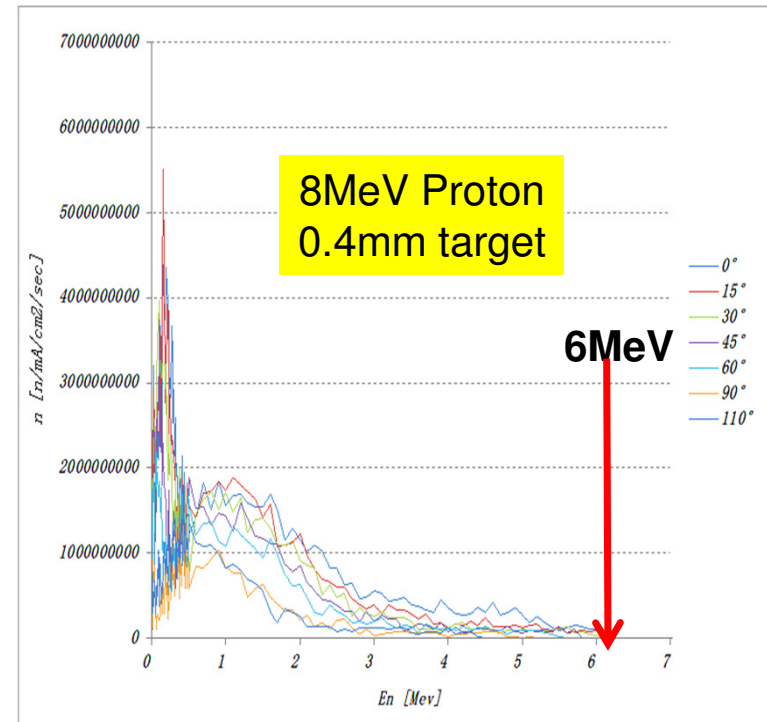
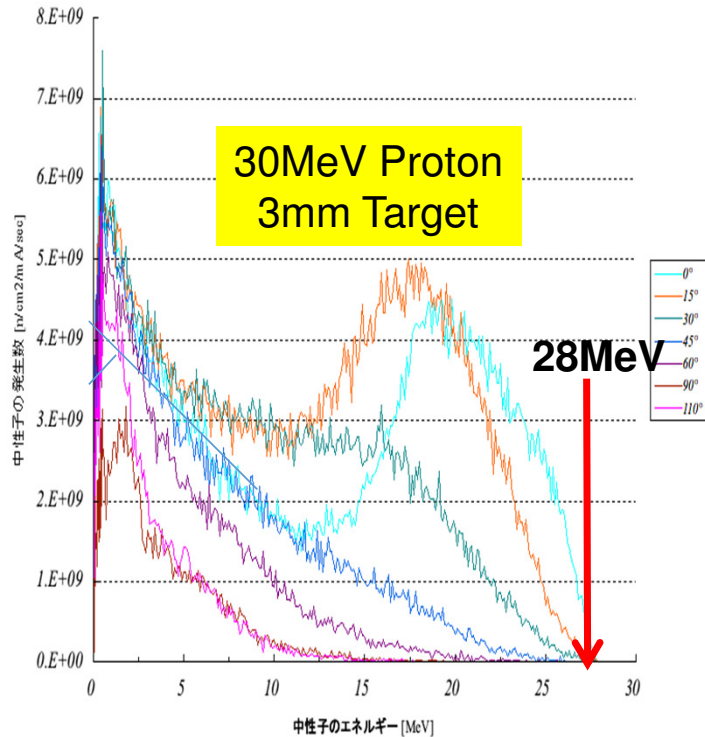
繰り返し:  
**200(50)Hz**

パルス幅  
**1(0.5)ms**

デューティ:  
**20(2.5)%**

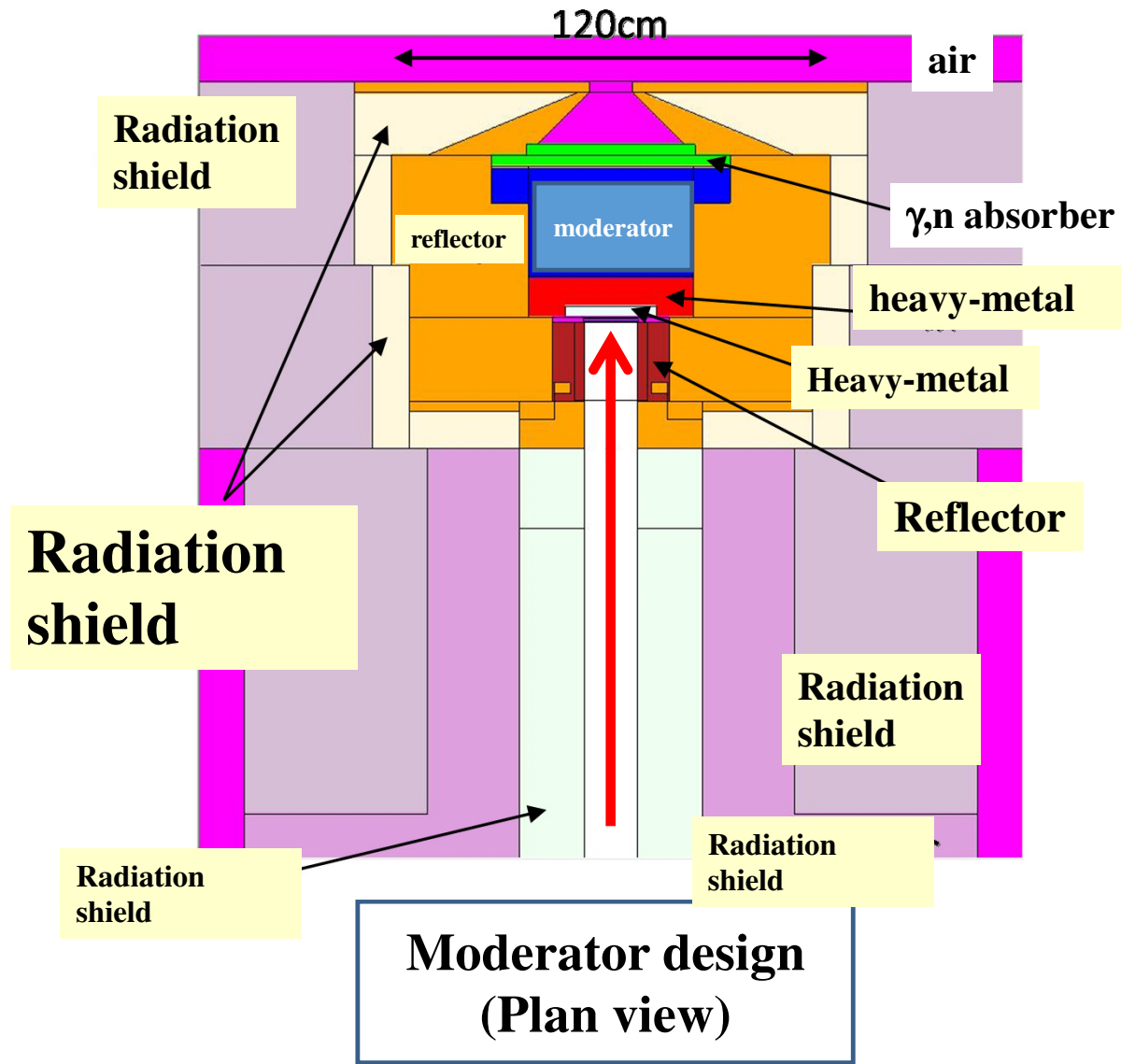
# プロトンエネルギーと中性子発生

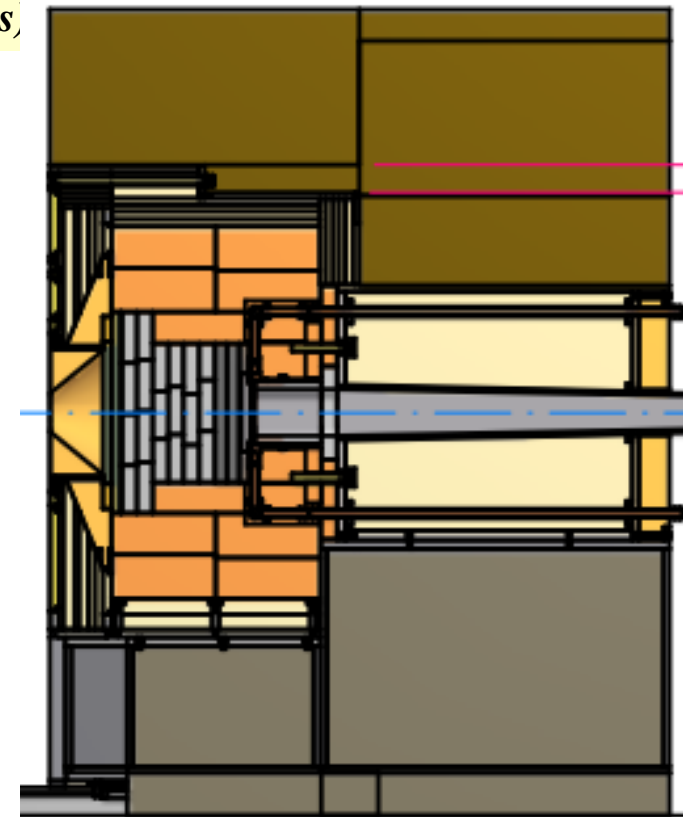
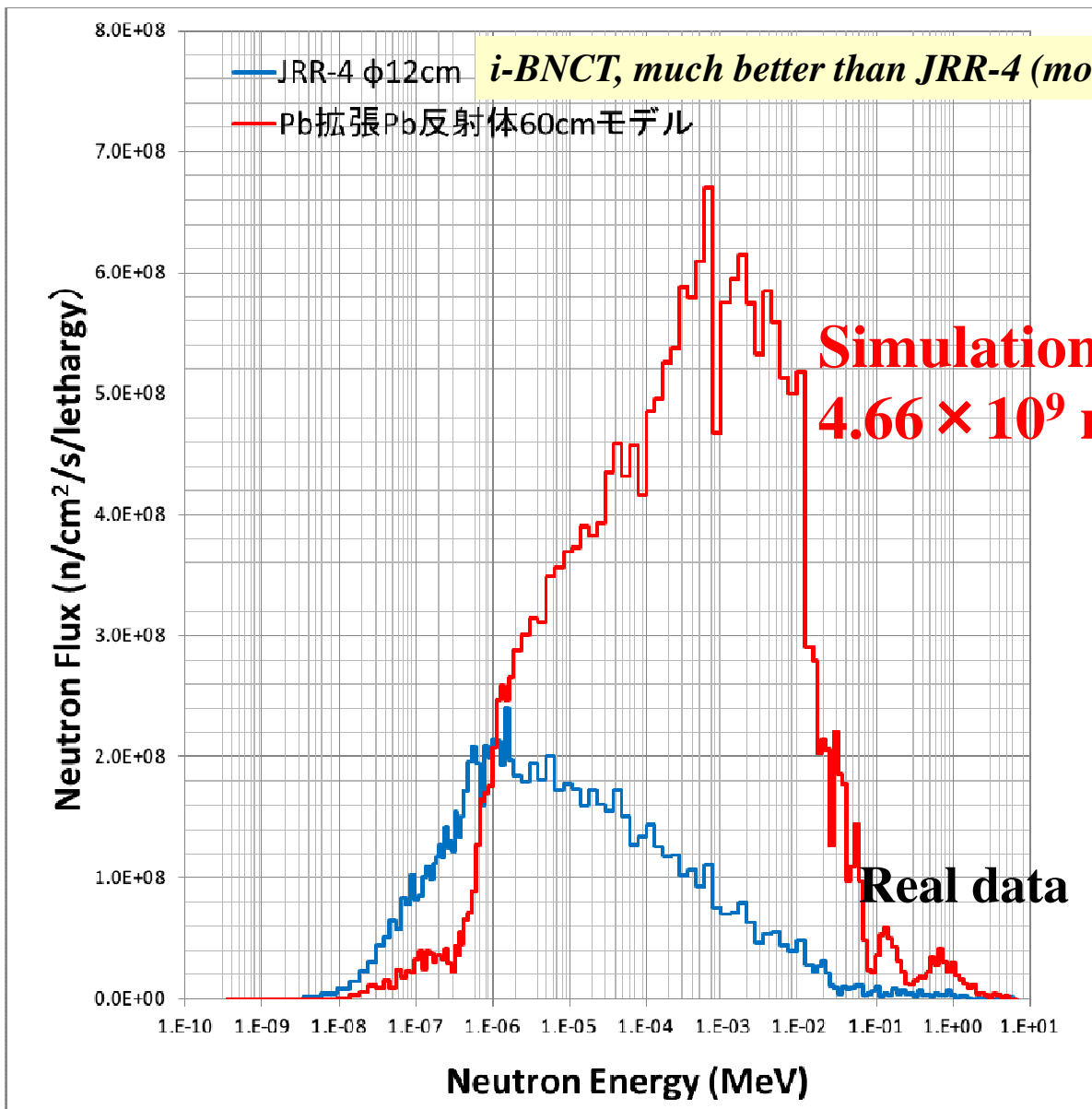
${}^9\text{Be}(p,n){}^9\text{B}$  Neutron energy spectrum for various production angle



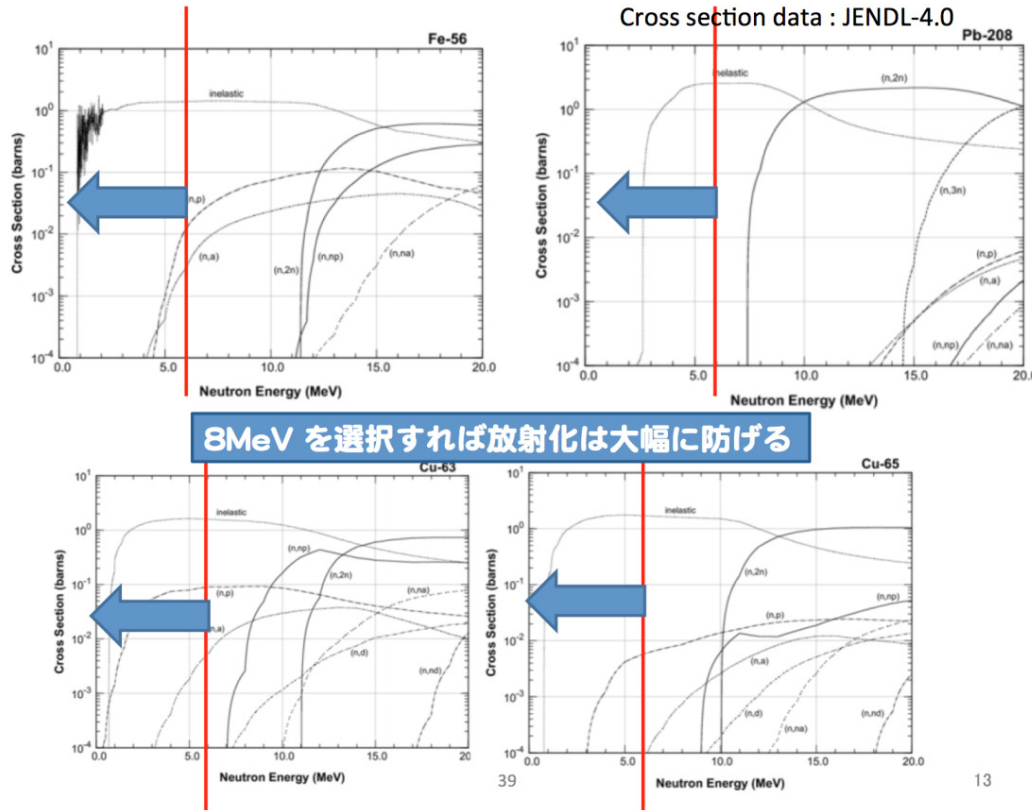
- 中性子発生効率: 高エネルギー有利
- モデレータ効率: 低エネルギー有利

ビームパワーはほぼ一定

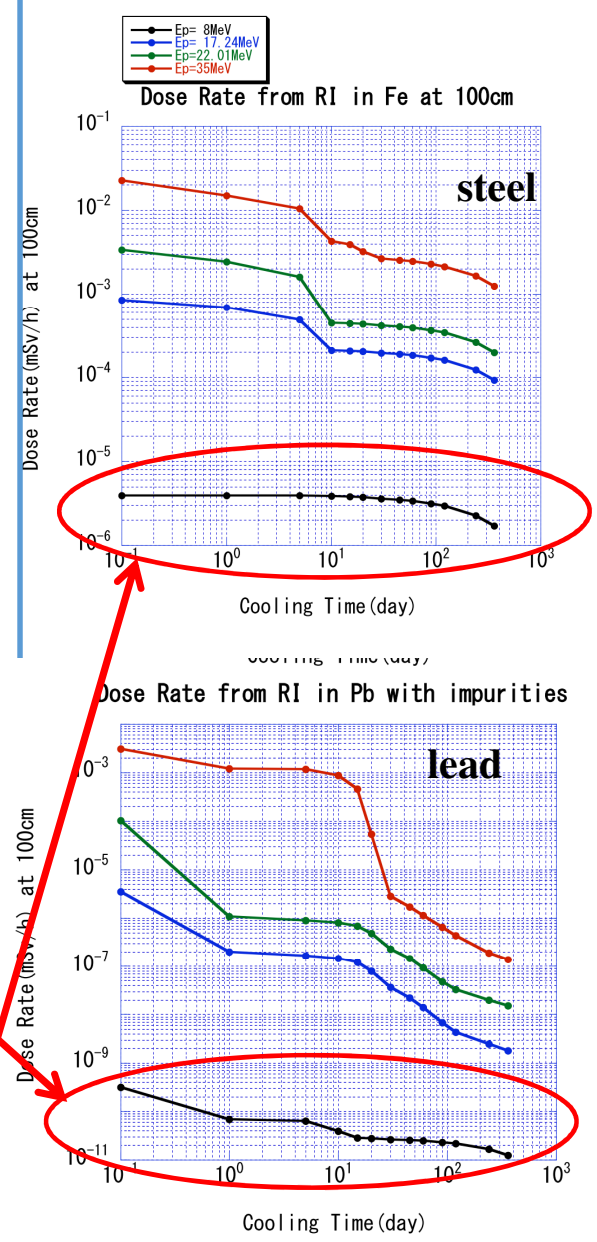




治療体系で線量強度は変わる



8MeV proton □ neutron energy < 6MeV  
 → We can avoid many nuclear reaction channels  
 → Low residual radiation

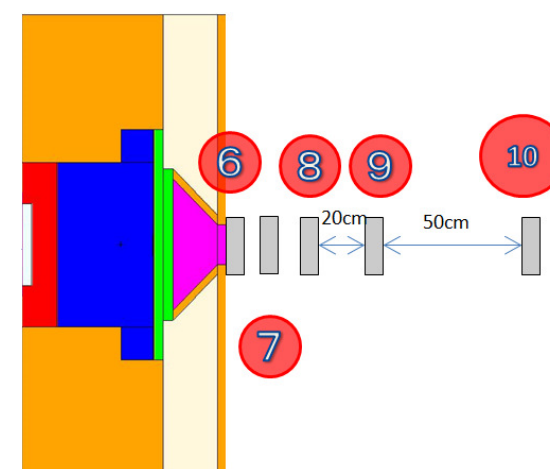
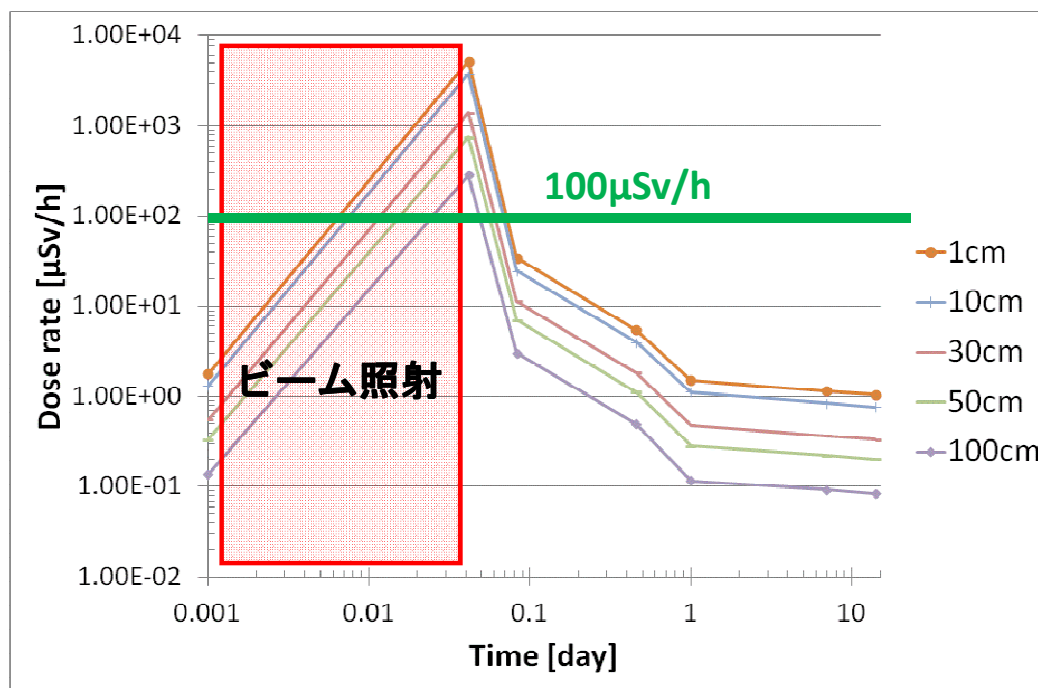


# 構造材の放射化検討



北海道大学  
HOKKAIDO UNIVERSITY

## コリメータ側の光子空間線量率分布



患者・医療従事者のエリアでは、1年間の使用後も急速に $10 \mu\text{Sv/h}$ 以下

# 個々の機器の状況

- モジュールータ
- イオン源
- 加速管
- 標的
- 制御
- ブリスタリング研究

# ロングパルス-高繰り返しモジュレータの開発

## 要求仕様

パルス幅: 1ms

電圧: -90kV

電流: 30A

繰り返し: 200Hz

パルス平坦度: 0.1%



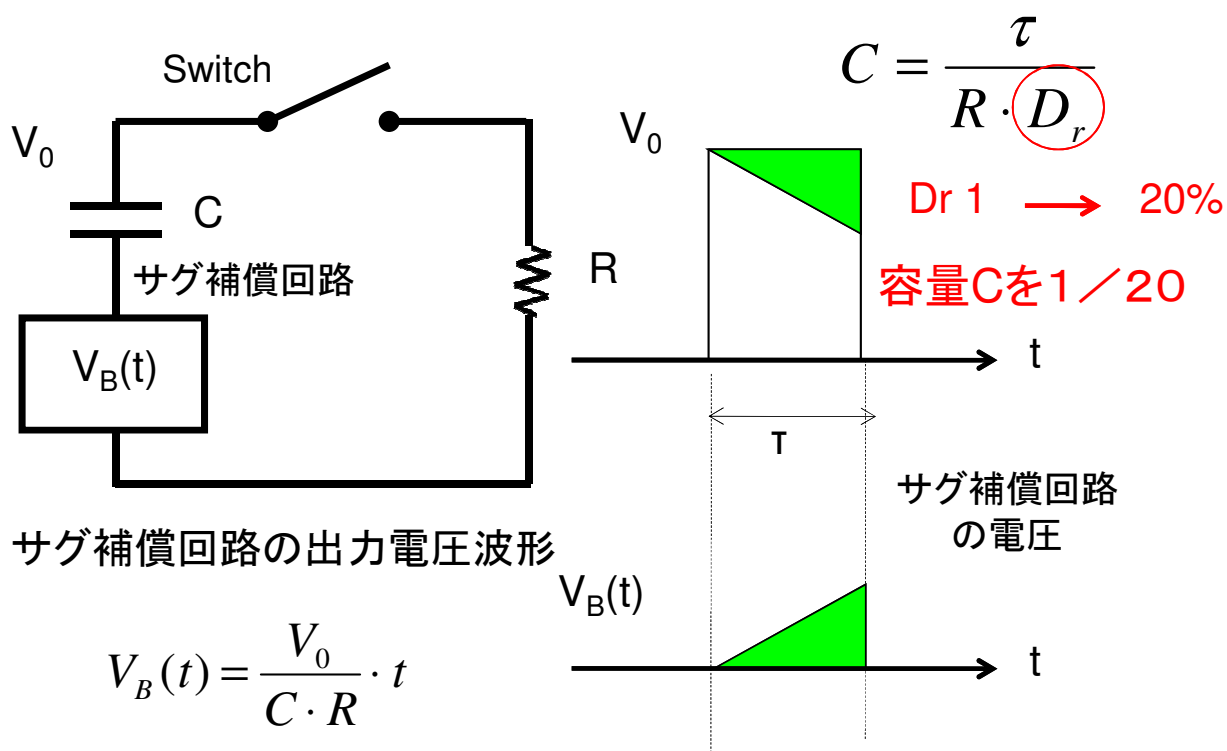




Accelerator Laboratory

# コンデンサバンク小型化技術

サグ補償回路でサイズを1/10程度に



C: コンデンサバンク容量、R: 負荷抵抗値

サグ補償回路

- バウンサー方式 (LC共振)  
長パルス (1.7ms) では  
大型化、コスト高

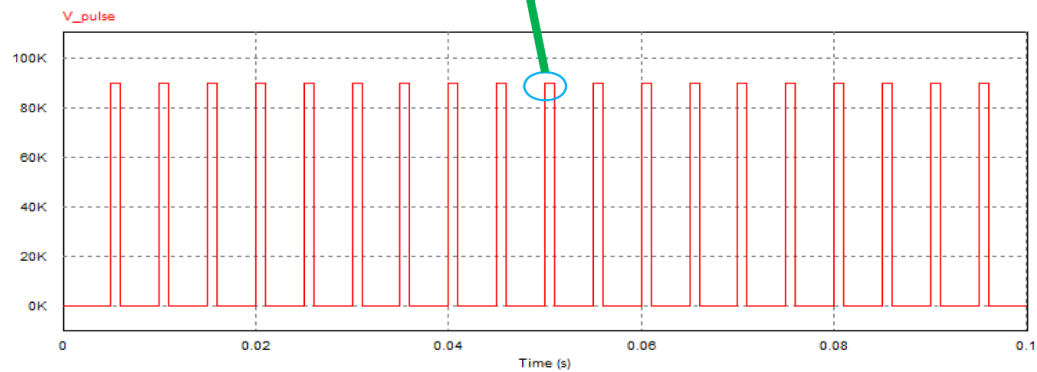
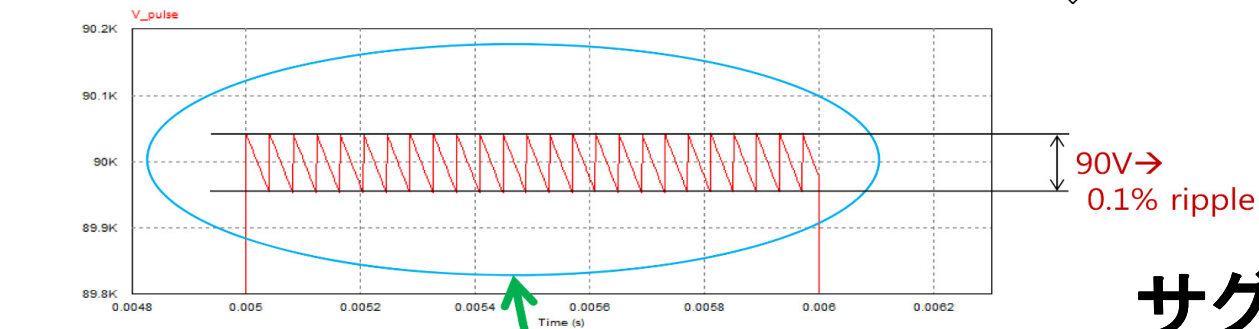
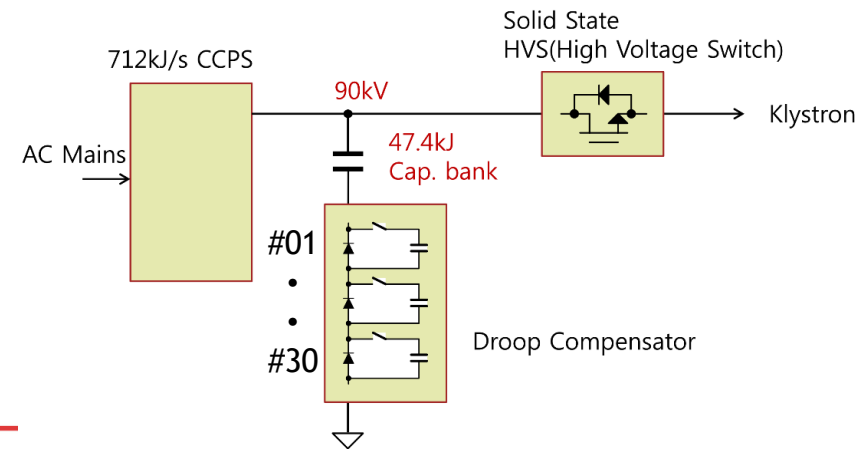


- チョッパ、インバータ方式  
PWM制御で三角波
- マルクス方式

# サグ補償回路(DRC)

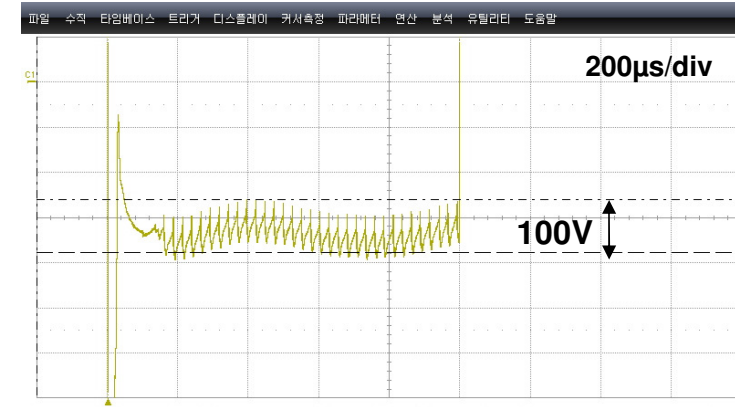
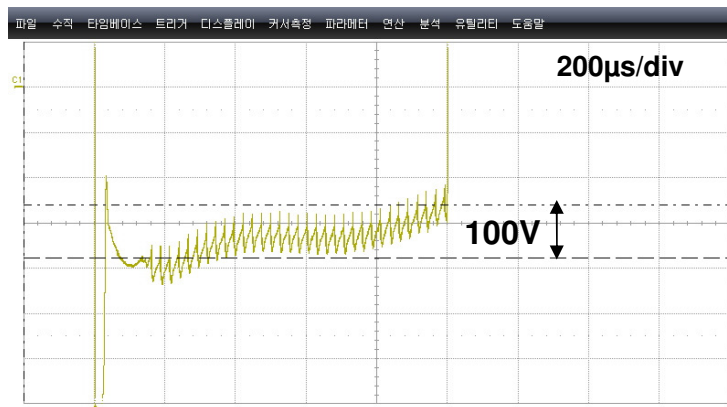
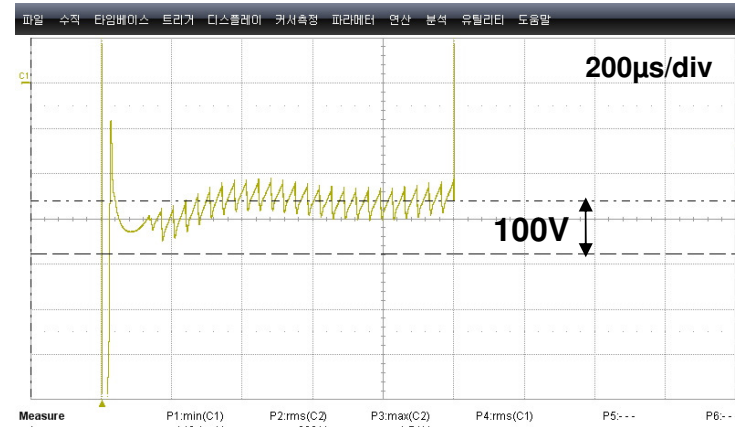
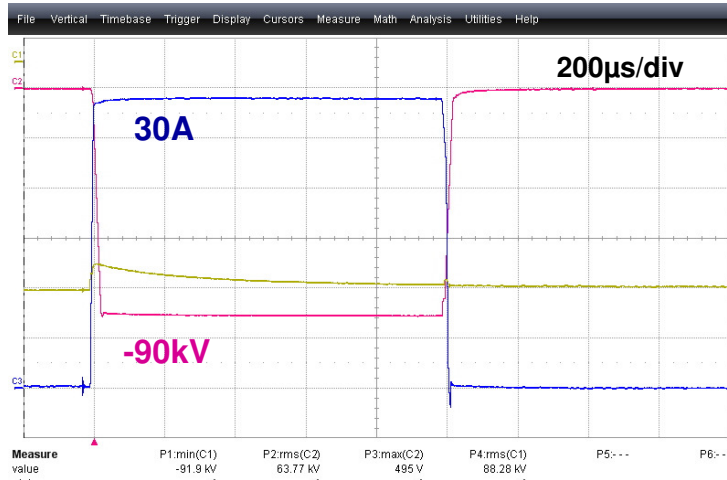
It will be used for 50 modules to provide an order of 10<sup>-4</sup> flat-top.

## Simulation Result



サグの補償回路:  
50分割のモジュール

# 出力の平坦度調整

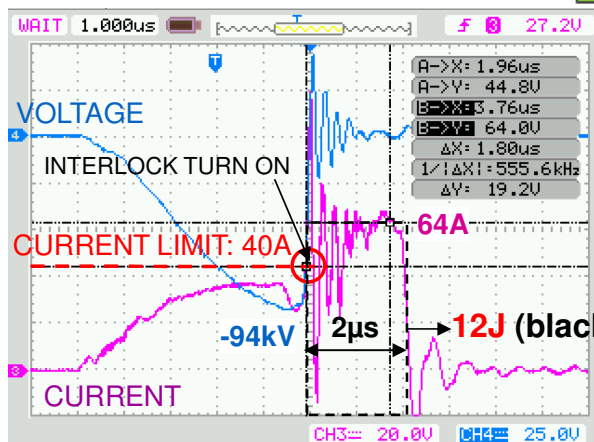
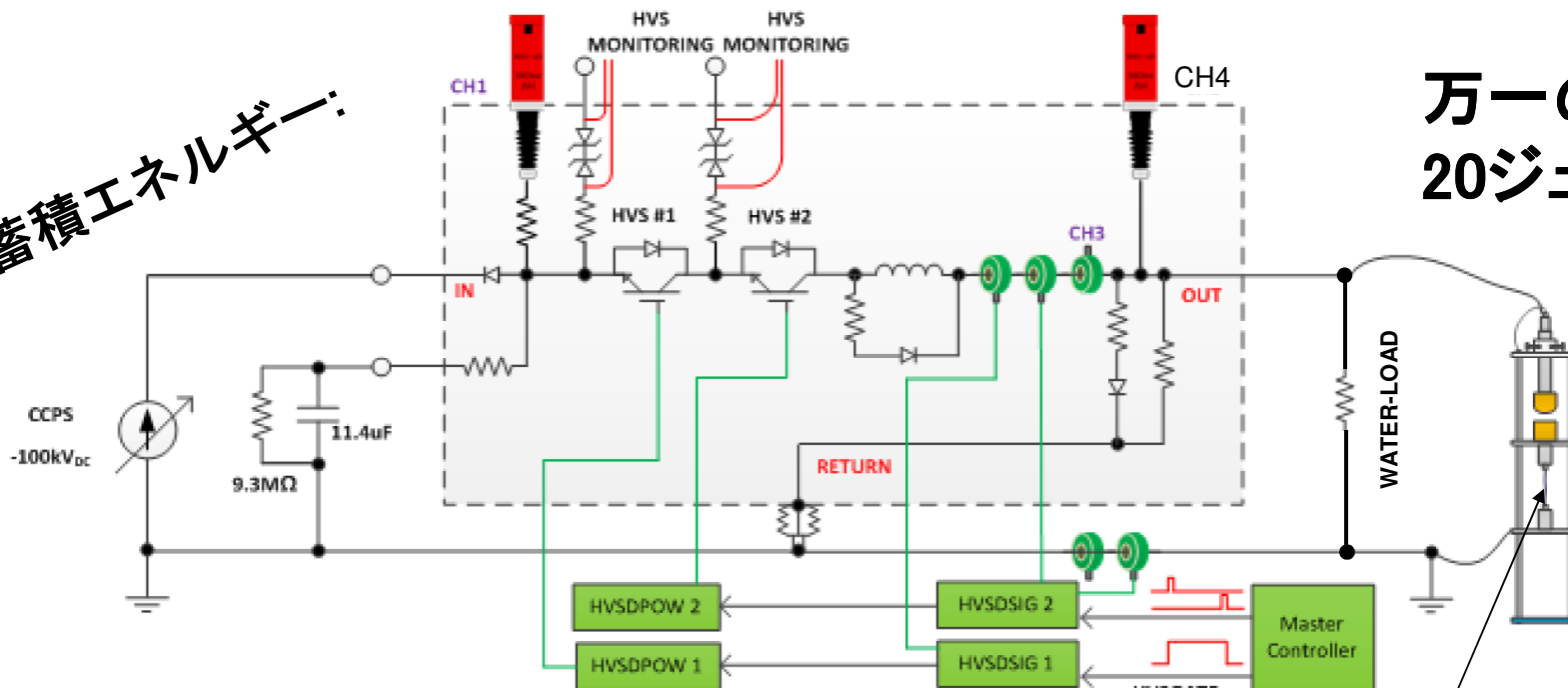


簡便なDROOP補償: タイミング調整のみ

# 過電流保護回路試験

コンデンサの蓄積エネルギー:  
47kJ

万一の放電時:  
20ジュール以下



**NO EVAPORATED  
COPPER WIRE**

Ø0.12

COPPER: ~7J

170mm

SPECIFIC GRAVITY: 8.9 [Ton/m<sup>3</sup>]

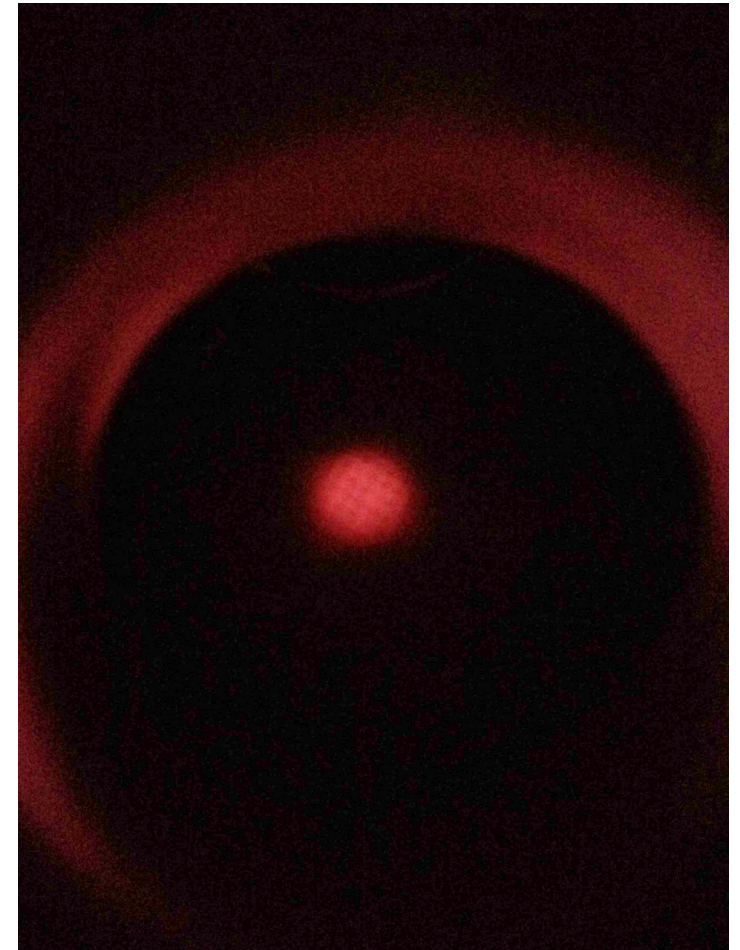
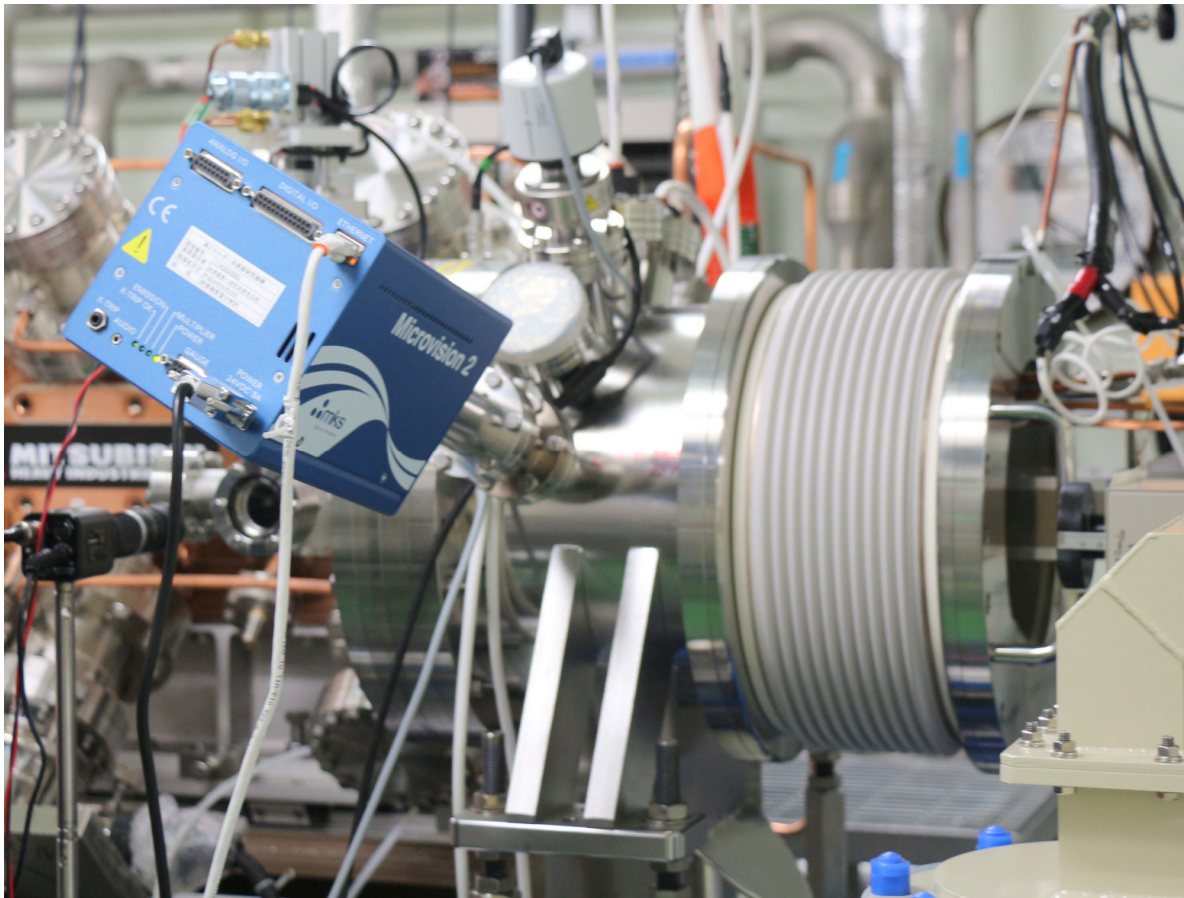
SPECIFIC HEAT: 0.09 [kcal/kg]

MELTING TEMP.: 1084 [° C]

WEIGHT: 0.017 [g]

12J (black color dotted line area)

# イオン源チューニング

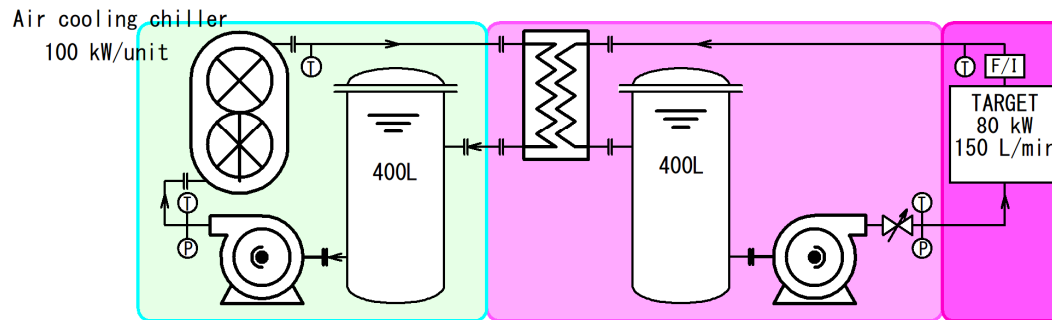
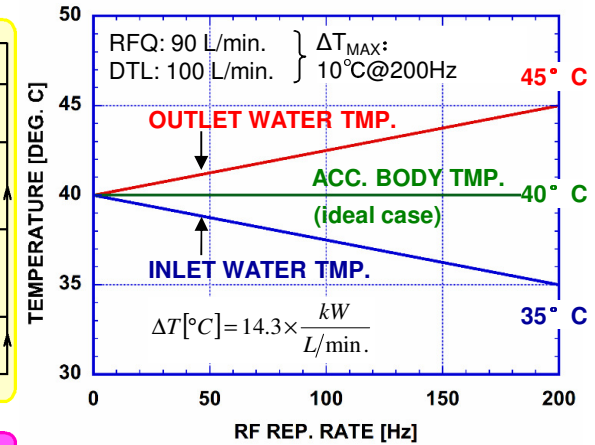
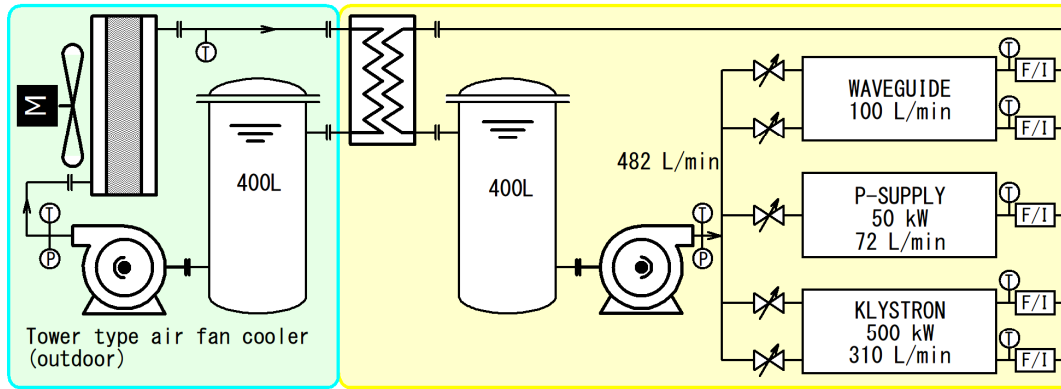
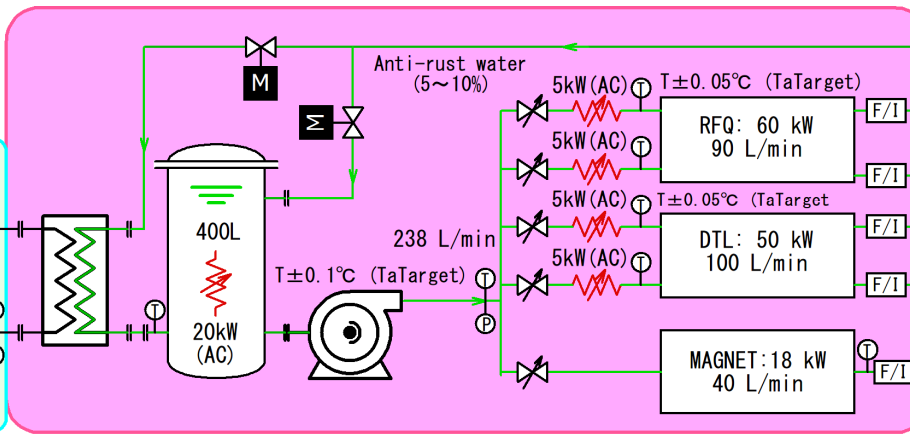
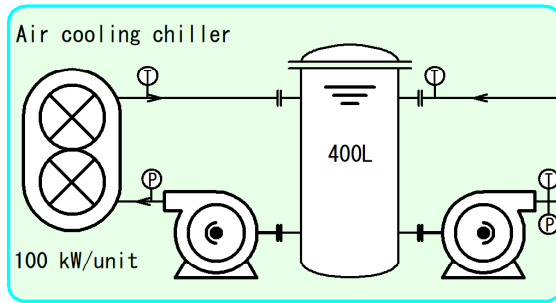


# 加速管の温度制御

ITEMS	UNIT	BNCT		J-PARC	
		RFQ	DTL	RFQ	DTL
LENGTH	m	3.1	3.004	3.1	9.921
BEAM CURRENT	mA	50	50	50	50
BEAM PULSE WIDTH	msec	1.0	1.0	0.6	0.6
INJECTION ENERGY	MeV	0.05	3	0.05	3
OUTPUT ENERGY	MeV	3	8	3	19.716
PEAK RF WALL LOSS POWER	MW	0.34	0.32	0.34	1.06
PEAK BEAM POWER	MW	0.15	0.25	0.15	0.84
TOTAL RF POWER (@50mA)	MW	0.49	0.57	0.49	1.90
Repetition Rate	Hz	200	200	50	50
AVERAGE BEAM POWER	kW	80		50	
AVERAGE RF WALL LOSS POWER/m (RFQ+DTL)	kW	21.6 (132)		3.2 (42)	
COOLING WATER FLOW RATE @ $\Delta T=0.1^{\circ}\text{C}$	L/min.	3,000 (19,000)		460 (6,000)	
COOLING WATER FLOW RATE @ $\Delta T=10^{\circ}\text{C}$	L/min	30 (190)			

$$\Delta T = 14.3 \times \frac{\text{kW}}{\text{L/min.}} \quad [^{\circ}\text{C}], \quad 1[\text{Joul}] = 0.239[\text{Cal}]$$

# IBNCT COOLING SYSTEM USING DYNAMIC TEMP. CONTROL

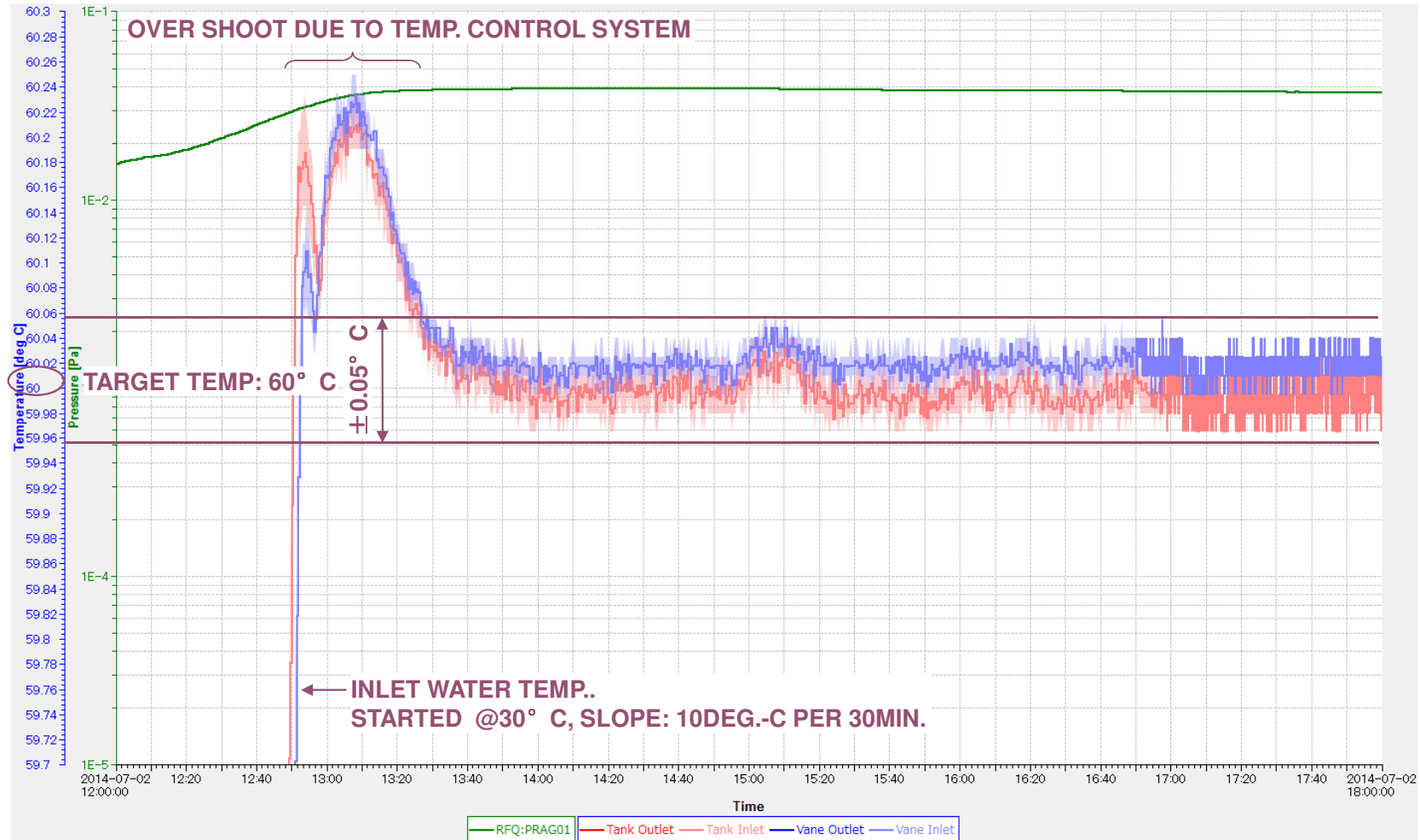


- : MOTOR DRIVE V-PORT VALVE
- : MANUAL VALVE
- : TEMP. SENSOR, ACCU. (1/100DEG. -C)
- : FLOW-METER/INTERLOCK
- : AC HEATER

WATER SPECIFICATION FOR KLYSTRON TUBE (@TOSHIBA)

1) pH: 7-8, 2) OXYGEN DENSITY: 1-6 ppm, 3) SPECIFIC RESISTANCE: >10kΩ·cm, 4) PARTICLE SIZE: <50μm

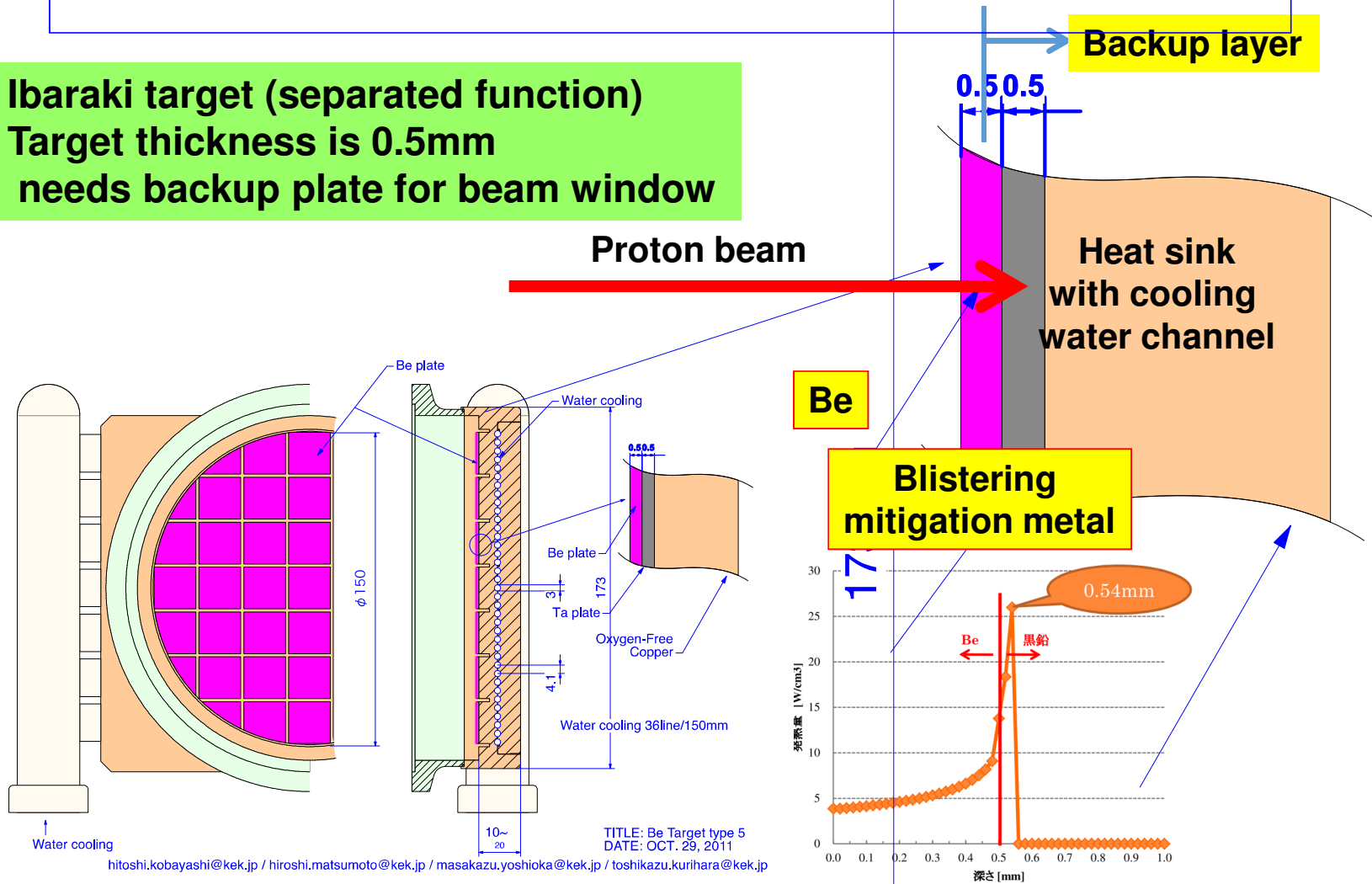
# 加速管の温度制御試験: FROM 30° C TO 60° C





# 標的開発: ブリスタリング対応

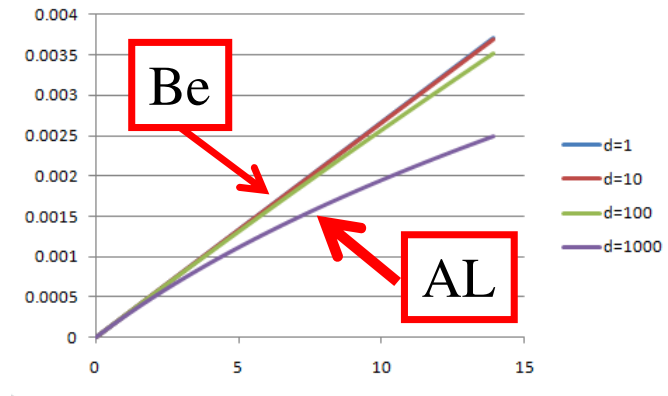
Ibaraki target (separated function)  
 Target thickness is 0.5mm  
 needs backup plate for beam window



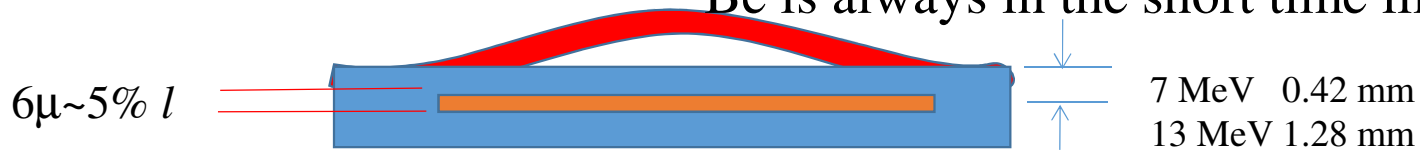
# Target Failure: ブリスタリング



Target Temperature (C)



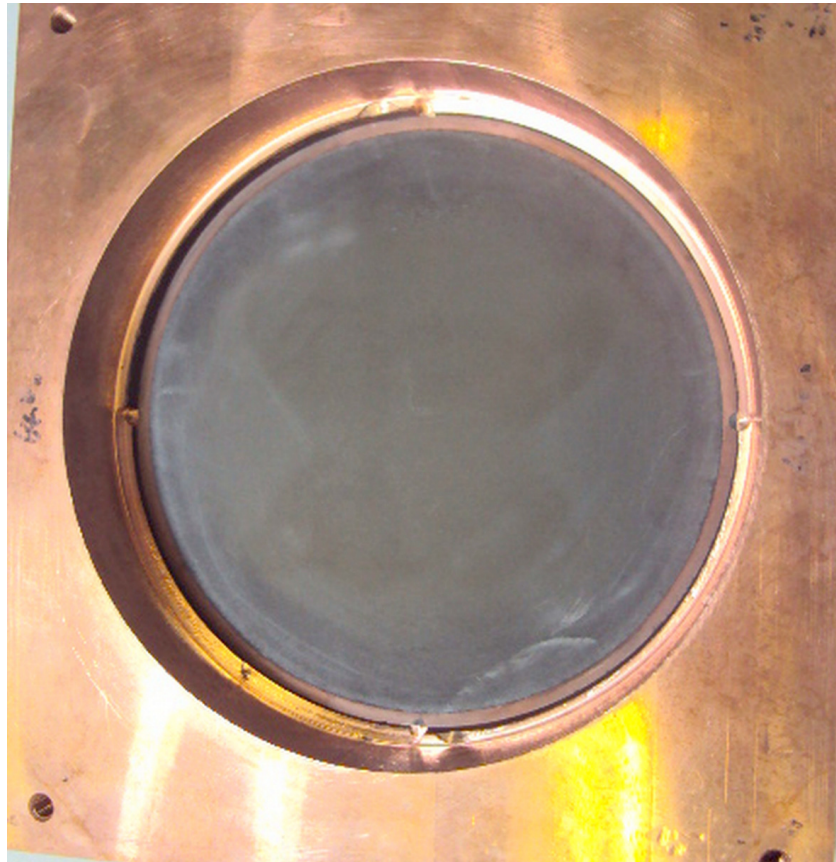
Be is always in the short time limit



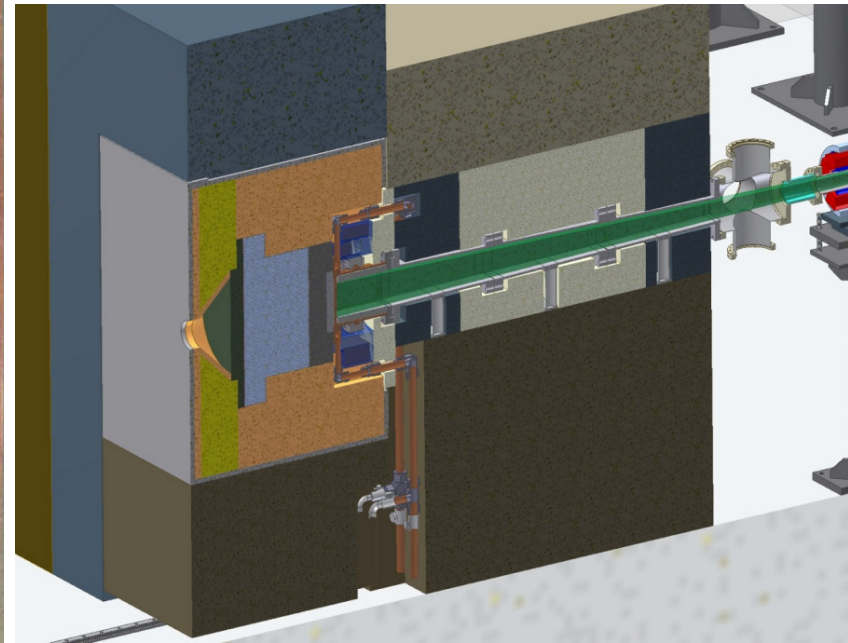
$$P = 2.3 \times 10^{-7} l - atm \frac{P(kw)t(sec)}{E(MeV)A(cm^2)\epsilon(cm)} \longleftrightarrow P \approx \frac{2Ey}{1-\nu} \frac{w}{A}$$

**Lifetime**    13 MeV ~ 6.5 days    Good agreement with  
                   7 MeV ~ 2 days            operating experience

# 実機大標的の製作



ベリリウム標的



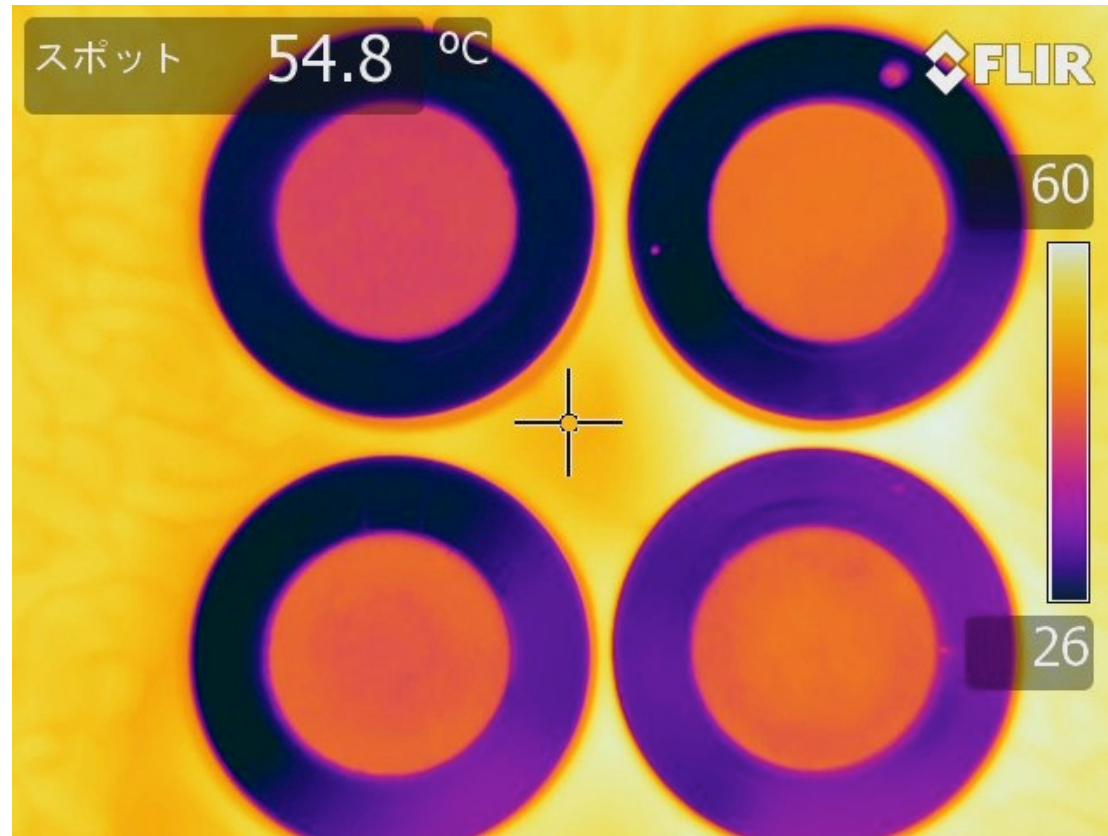
標的とモデレータ

# 試験用標的を付けた加速器



第1期  
10万分の1の  
パワー申請

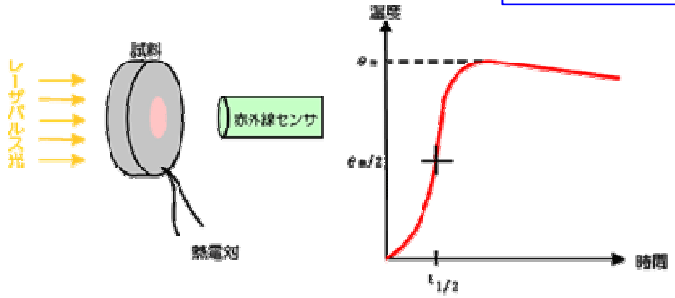
# 標的試料の製作と試験



熱伝導率、引っ張り試験他

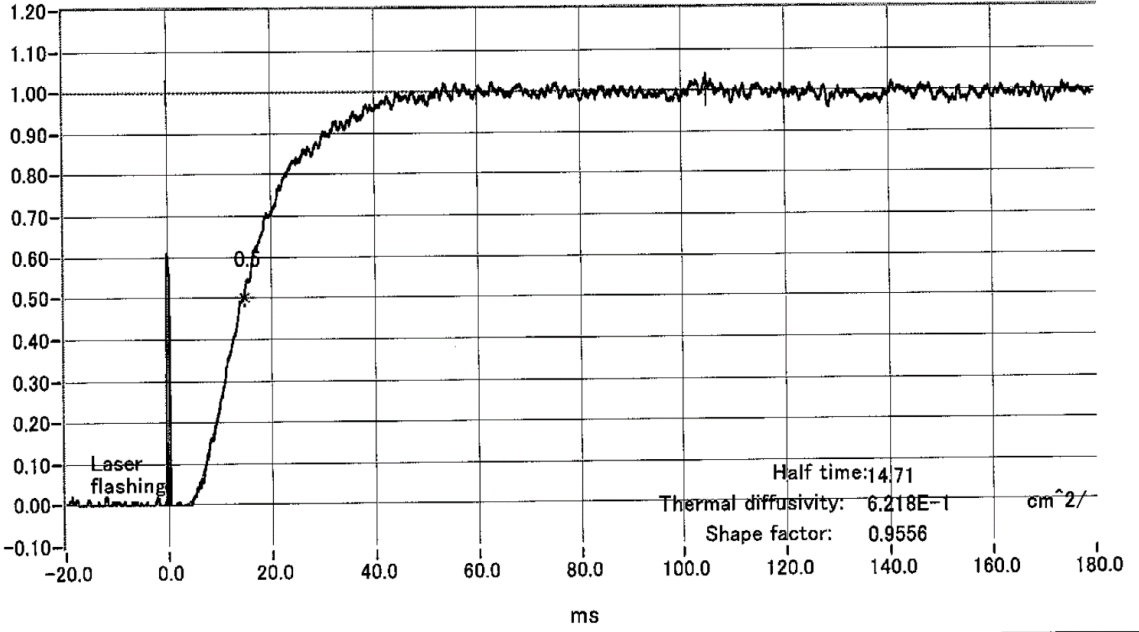
# Laser flashing

Direct measurement of heat conductivity with laser-flash method  
 → 200 W/(m/K)  
 → Good enough for the practical use

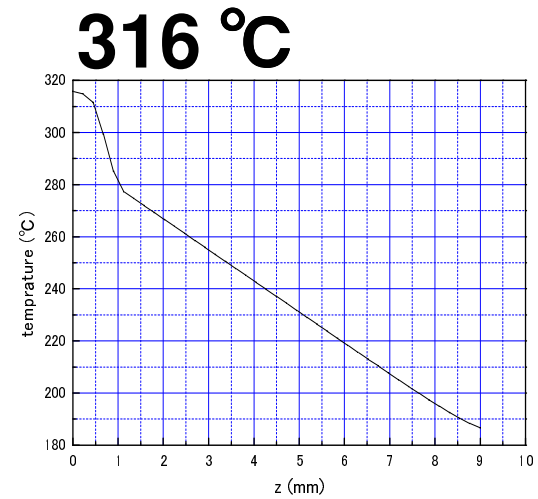
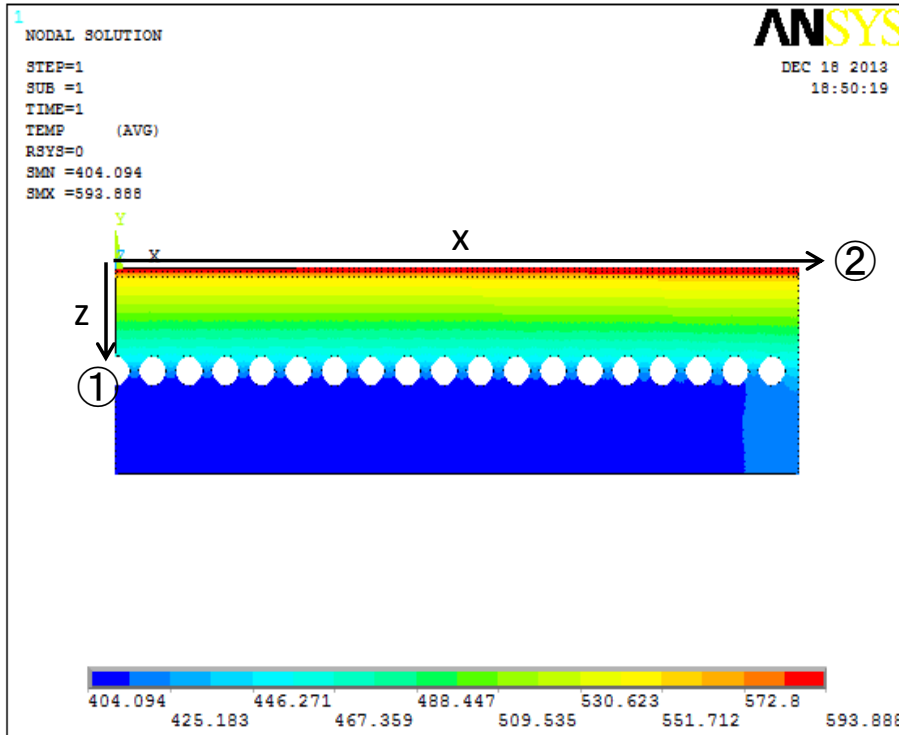


## Thermal diffusivity measurement

Sample name: Pd 10/10 Meas. temp.: 32.83C Sample thickness:2.6260E+0mm 2013/08/29 11:50 No.319

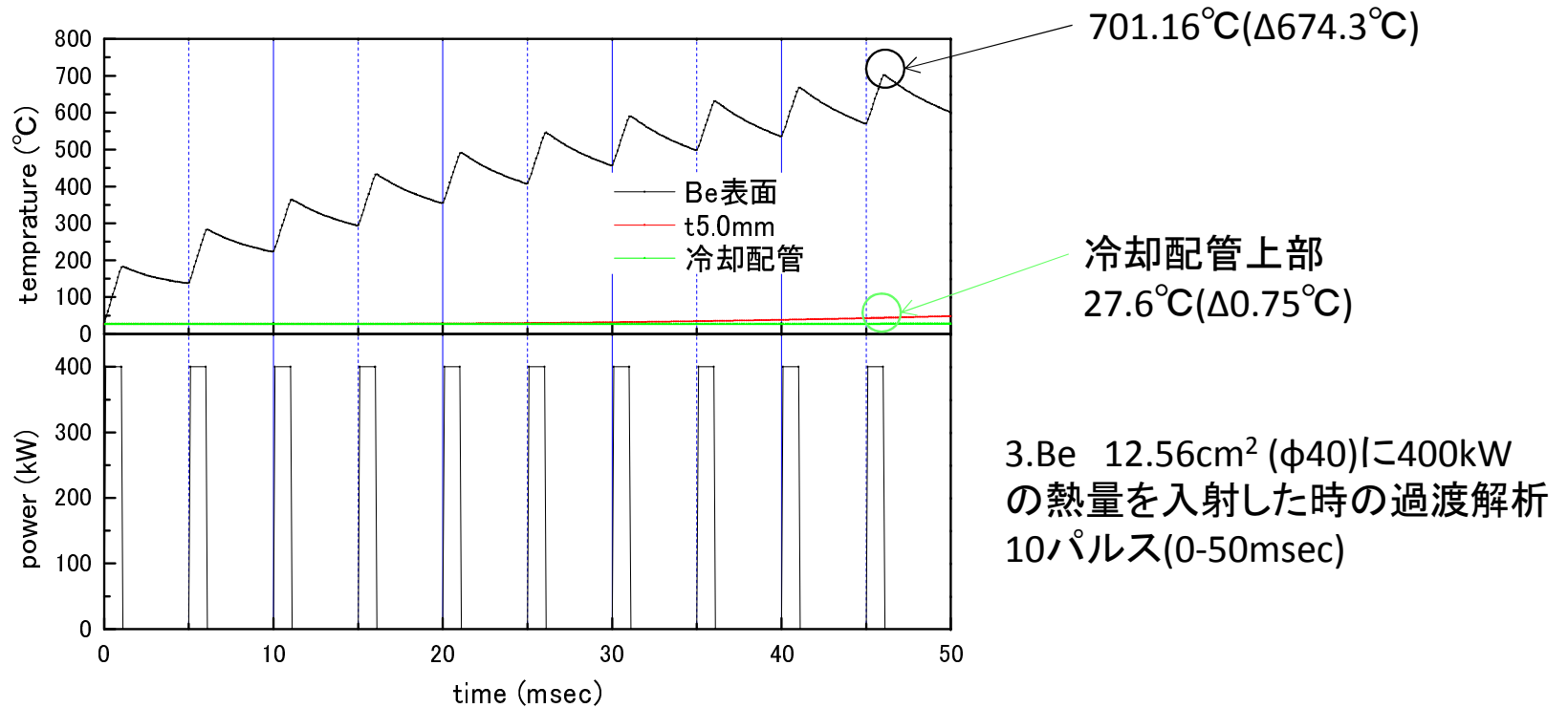


# 標的温度のシミュレーション



Temperature: surface to cooling pipe

# 過酷事故対応



10パルスにおけるBe表面とCu部分と  
冷却配管上部の温度の時間変化(上段)  
10パルスにおける入射熱量の時間変化(下段)

フルパワー時、万が一レーザービーム拡大系が止まると  
10パルス(50ms)で700度を超える: **時間的余裕あり**



# EXAMPLE OF CONTROL PANEL USING CSS (Control System Studio)



# ブリストリング研究: PLDMを用いた表面観察

- Incident angle dependency of reflectivity of s, p polarized light -

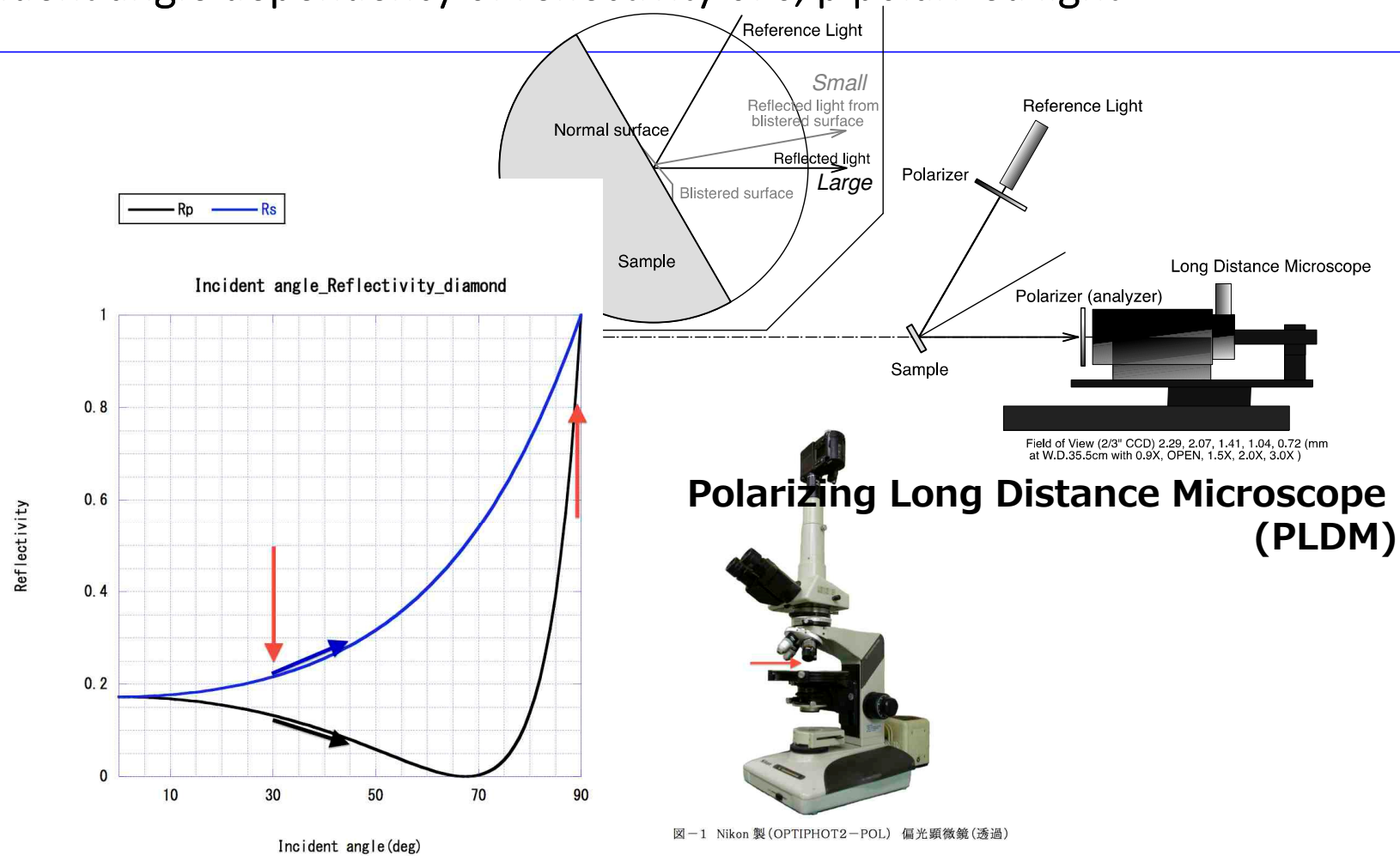
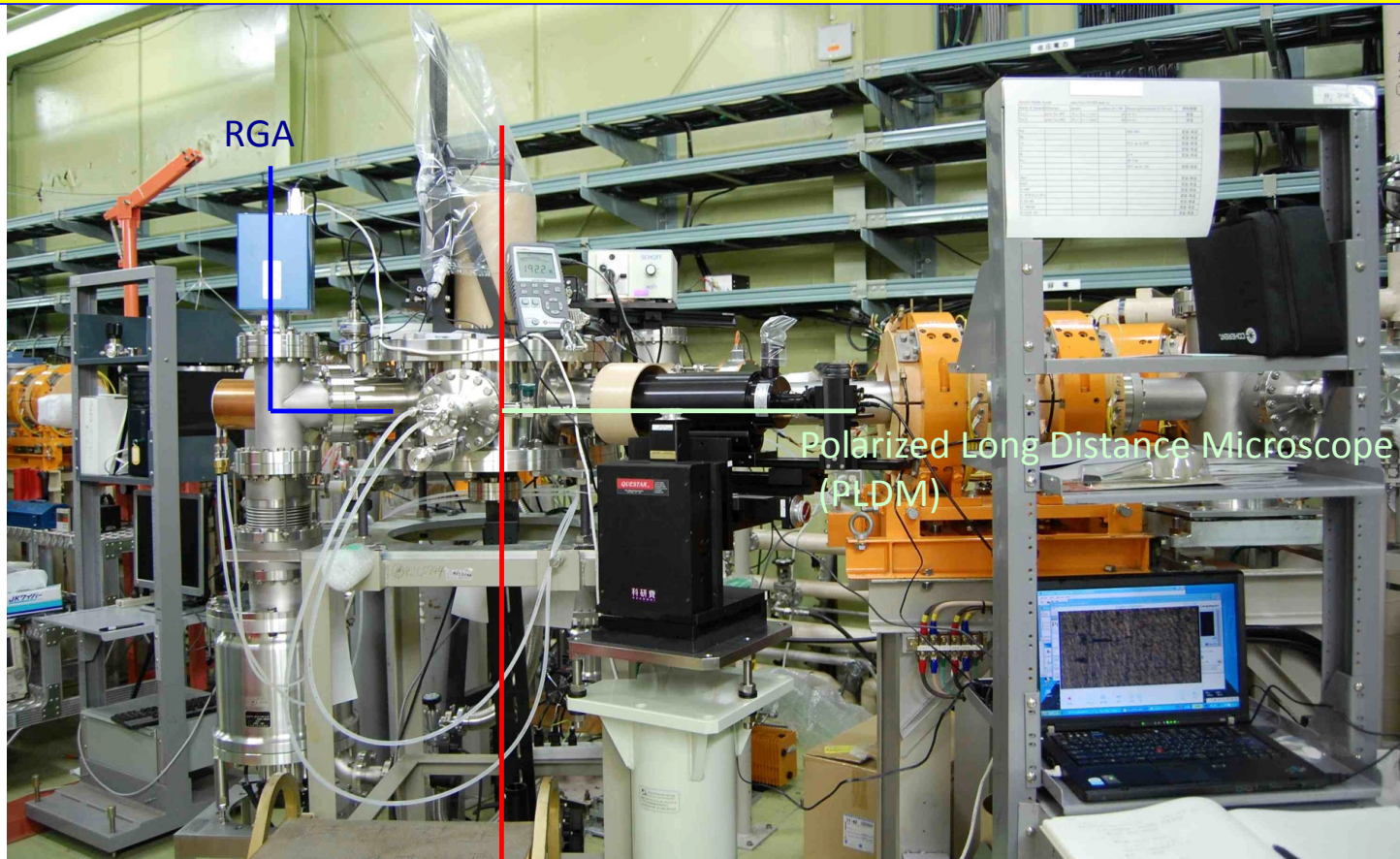


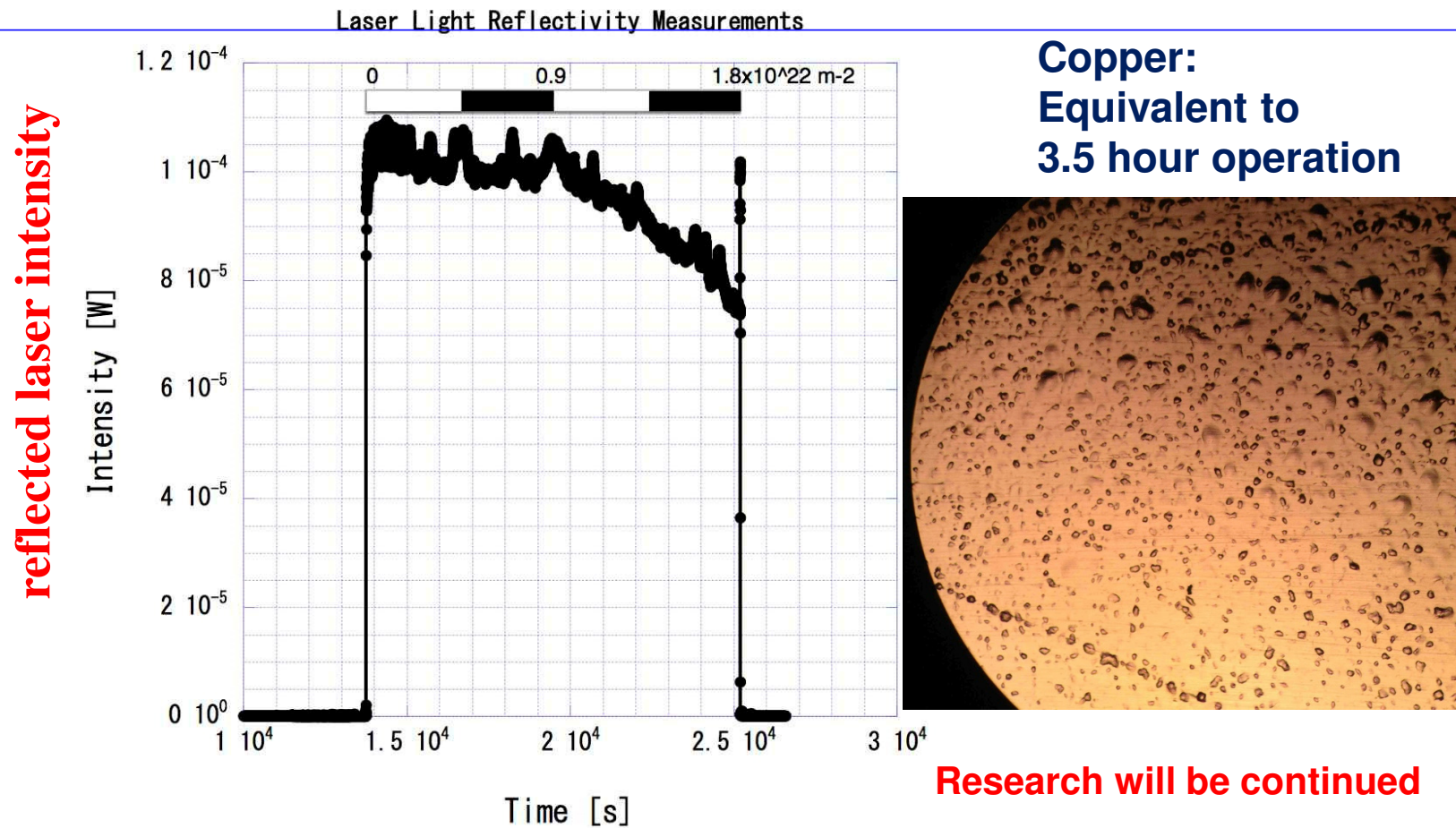
図-1 Nikon 製 (OPTIPHOT2-POL) 偏光顕微鏡 (透過)

# KEK700keVコッククロフトウォルトン In situ observation of blistering



Laser Light Reflectivity Measurement (LRM)

# Blistering observation using reflection laser light



# まとめ

- 2014年7月7日に放射線管理区域に設定
- 加速管のコンデショニング開始
- 概ね順調に動いているが立ち上げ特有の問題もあり