

# COMET実験で用いる 回路素子の放射線耐性評価

阪大理<sup>A</sup>、Open-it<sup>B</sup>、高工研<sup>C</sup>、九大理<sup>D</sup>、KAIST<sup>E</sup>、IHEP<sup>F</sup>

中沢 遊<sup>AB</sup>

五十嵐洋一<sup>BC</sup>、上野一樹<sup>BC</sup>、大石航<sup>BD</sup>、久野良孝<sup>AB</sup>、佐藤朗<sup>AB</sup>、中居勇樹<sup>BD</sup>、  
名取寛顕<sup>E</sup>、吉田学立<sup>AB</sup>、MeyongJae Lee<sup>D</sup>、Jie Zhang<sup>D</sup>、他COMETコラボレーション

2018.03.22

22pK205-13

# 目次

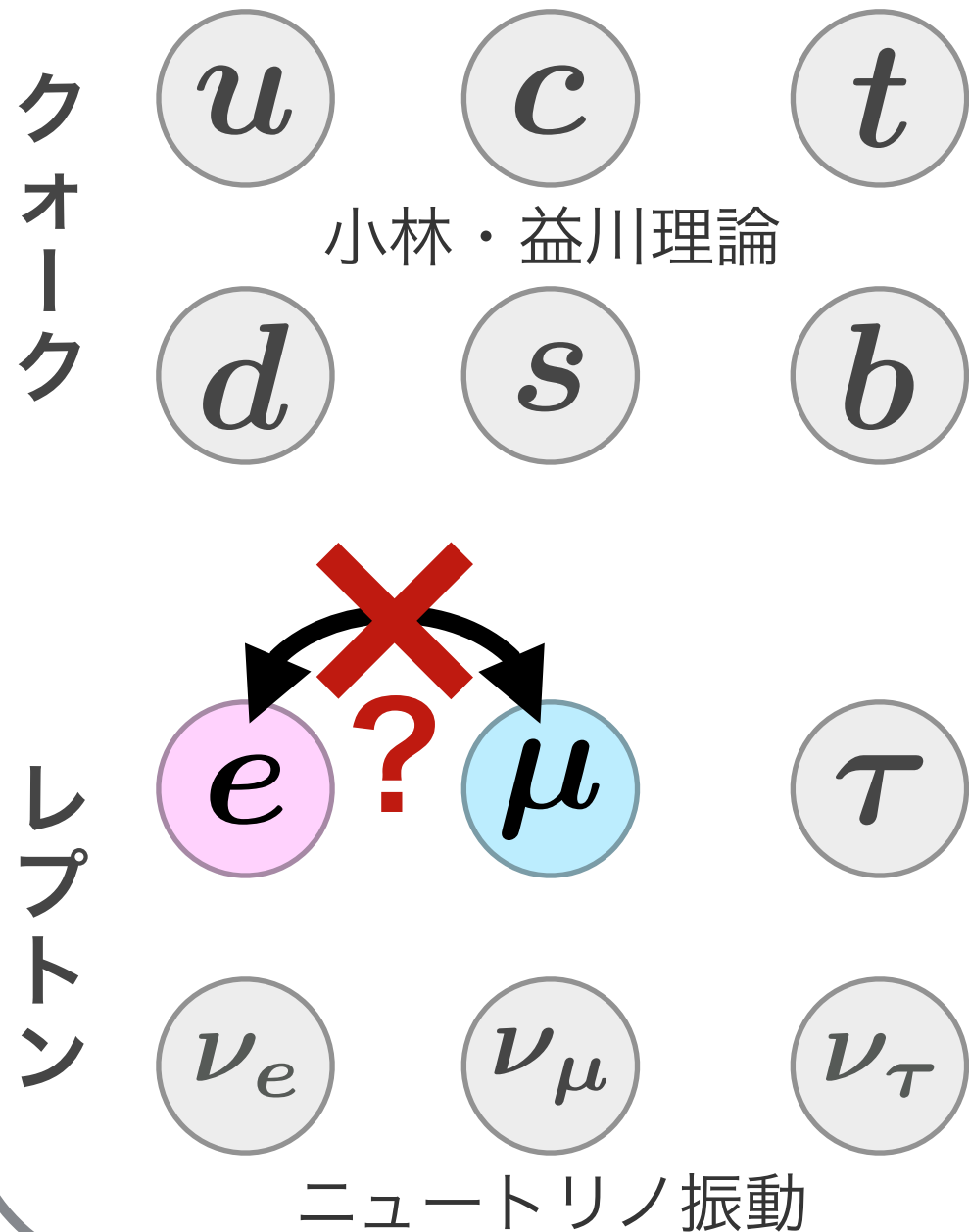
---

- **イントロダクション**
  - ・ COMET Phase-I 概要
  - ・ 放射線量
  - ・ 放射線による影響とパーツ選定
- **耐性評価試験**
  - ・ ガンマ線
  - ・ 中性子
  - ・ 磁場
- **まとめ**

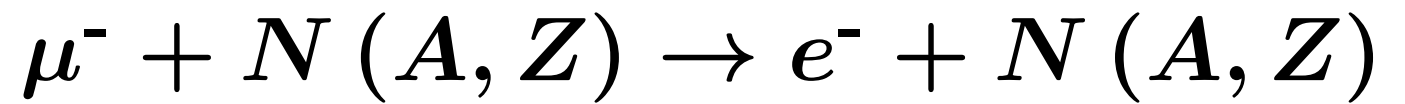
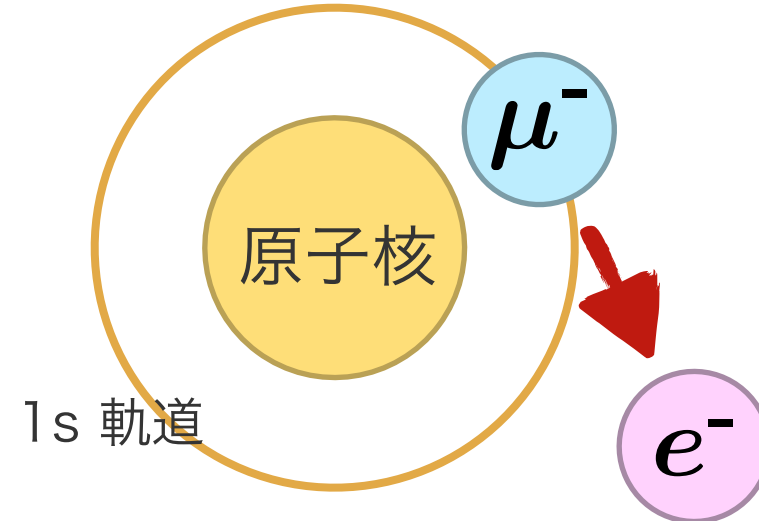
# イントロダクション

# ミューオン電子転換過程

## 標準模型 フェルミ粒子



## ミューオニック原子



## ミューオン電子転換過程 (荷電レプトンフレーバー非保存)

分岐比 ( $\mu \rightarrow e\gamma$ )

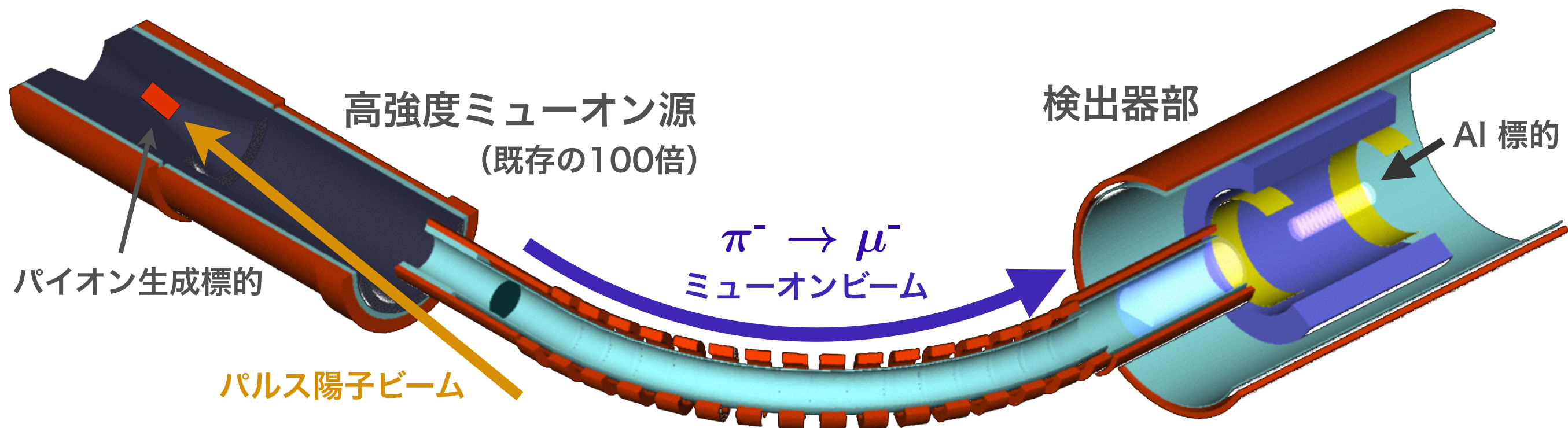
標準模型:  $O(10^{-54})$

新物理:  $O(10^{-15} \sim -17)$

**観測すれば新物理を示唆**



# COMET Phase-I



**目的：Al原子中でのミュオン電子転換過程探索 @J-PARC (2019年ごろ)**

- ・ 200日間の測定で実験感度 (S.E.S)  $\sim 3 \times 10^{-15}$  (先行実験の100倍)

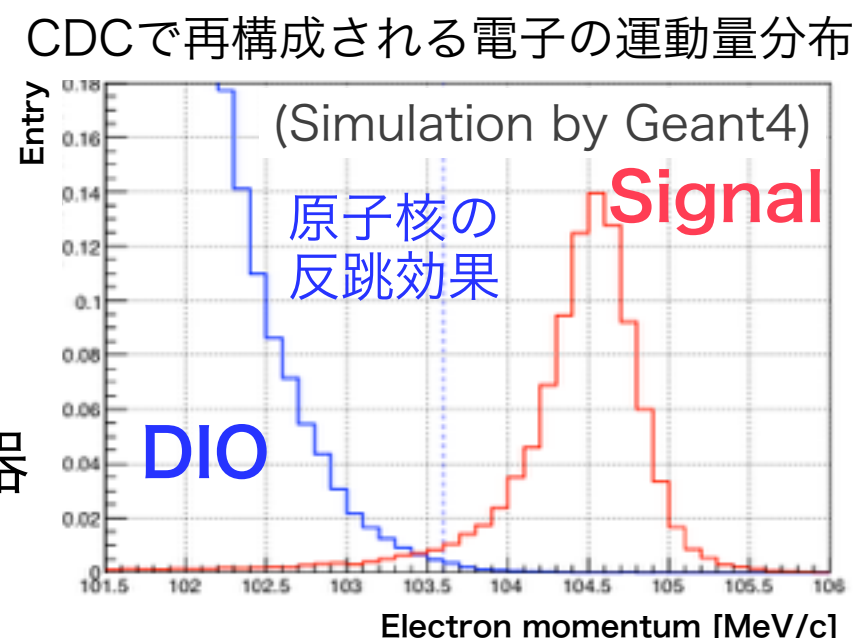
**信号：**  $\sim 105 \text{ MeV}/c$  の単一エネルギーを持った電子

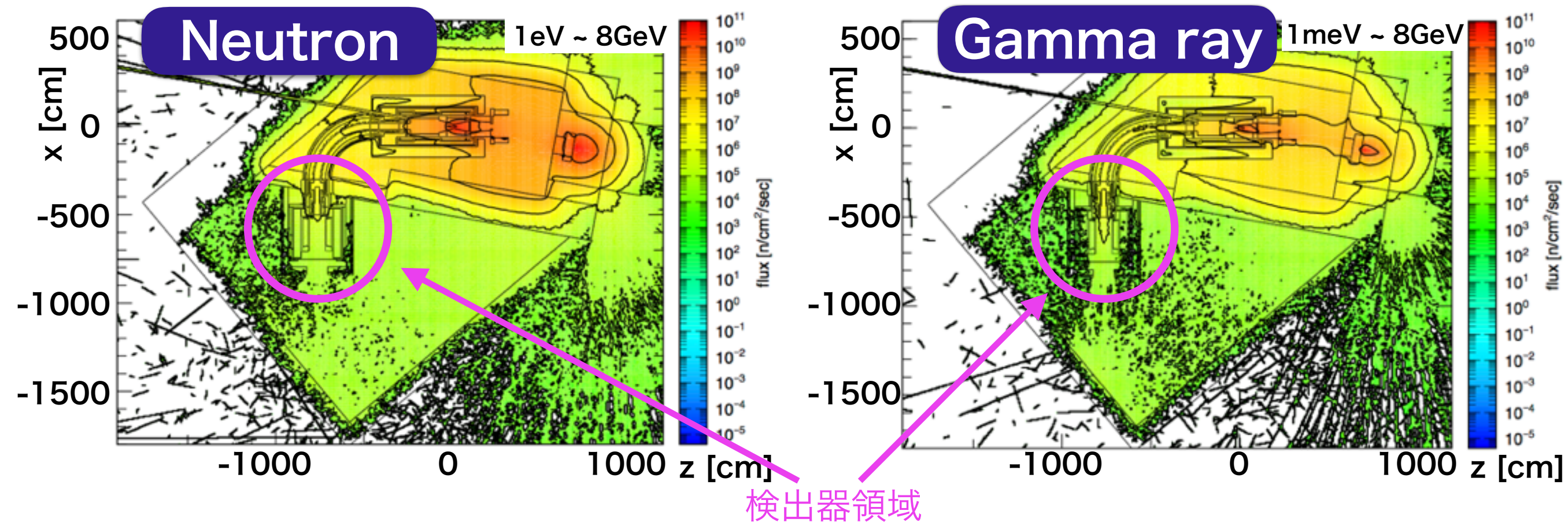
**背景事象：** Decay-In-Orbit 電子 & ビーム由来の事象

- ・ DIO :  $\mu^- + N_{\text{Al}}(A, Z) \rightarrow e^- + \nu_\mu + \bar{\nu}_e + N_{\text{Al}}(A, Z)$

**検出器：** Cylindrical Drift Chamber & ストロー飛跡検出器

- ・  $105 \text{ MeV}/c$ の電子に対する高運動量分解能 :  $< 200 \text{ keV}/c$





高強度ビームによる高放射線環境が危惧されている。

## 検出器領域において (200日間)

ガンマ線 : ~200 Gy

中性子 : ~10<sup>12</sup> neutrons/cm<sup>2</sup> (1 MeVeq.)

(ソレノイド磁場 : 1 T)

**検出器、読み出し回路は、高放射線耐性が求められる！**

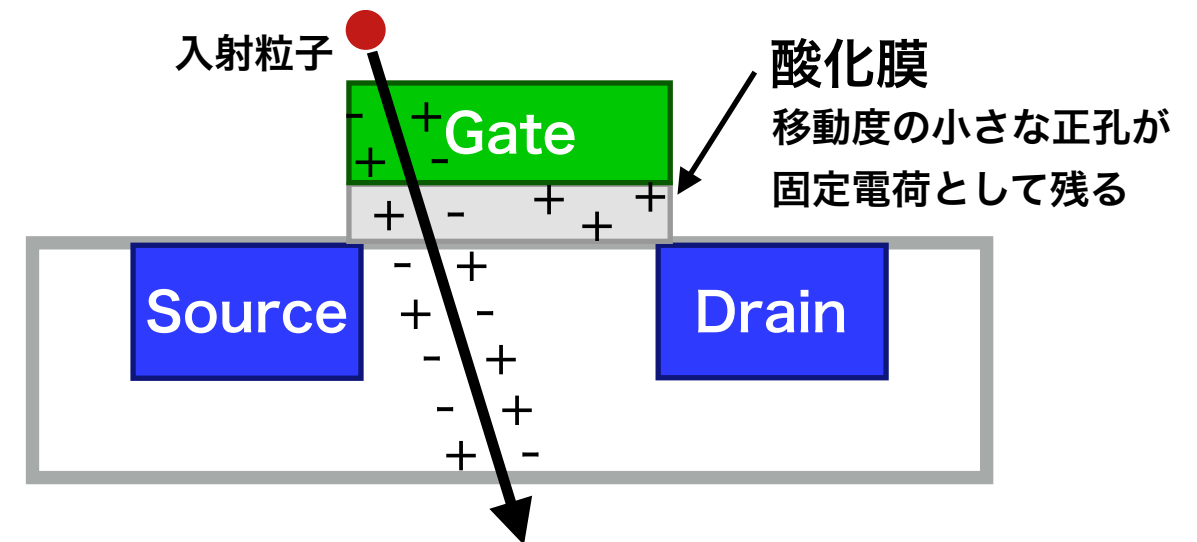


# 放射線による影響 と パーツ選定

- 半導体素子の放射線損傷

- ・ Total Ionizing Dose (TID) 効果
  - ・ 多量の放射線による電離作用で、固定電荷が形成されることによる。
  - ・ 素子の特性を劣化させ、永久損傷を引き起こす。
- ・ Displacement Damage Dose 効果
  - ・ 放射線により、半導体結晶内の原子がはじき出されることによる。
  - ・ 素子の特性を劣化させ、永久損傷を引き起こす。
- ・ Single Event 効果
  - ・ 1個の入射粒子が引き起こす電離作用で、高密度の電荷が形成されることによる。
  - ・ 一時的または、永久損傷を引き起こす。

## TID効果模式図



- パーツ選定

- ・ パーツ選定を早期に完遂することが重要
  - ・ 物理測定に向けて、回路設計を少しでも早く完成させる必要がある。
- ・ 耐放射線の回路素子は破格の値段
  - ・ レギュレータ：~10万円      FPGA：~100万円
  - ・ 大量に回路を使用する実験では予算的に非現実的

**本講演：レギュレータ・SFPのパーツ選定について発表**

# 耐性評価試験

# ガンマ線試験：セットアップ

施設：量子ビーム科学研究施設 @阪大  
放射線総合センター @東工大

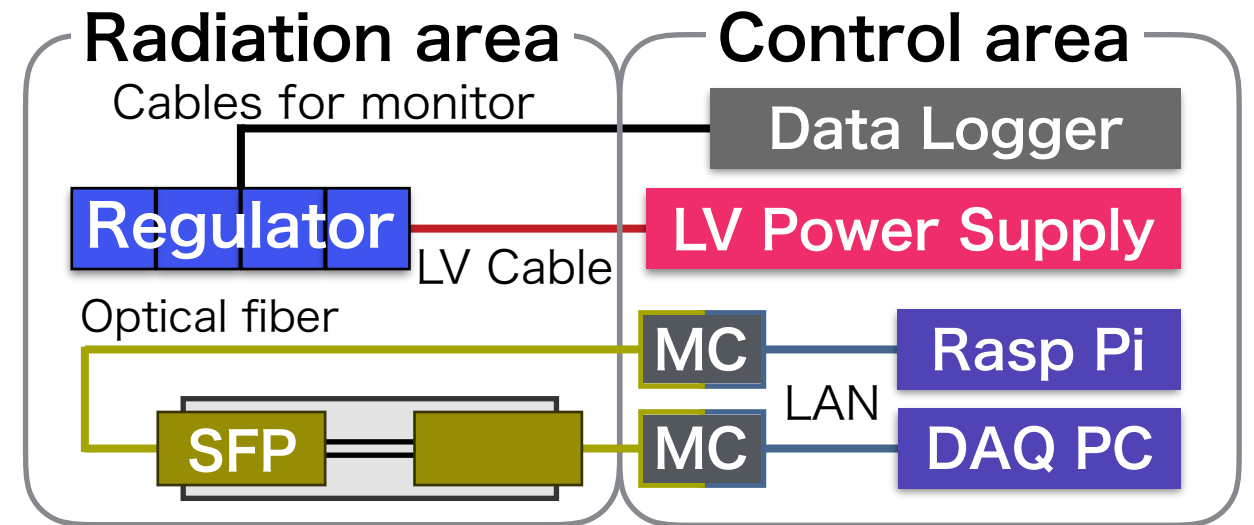
線源： $^{60}\text{Co}$  (1.17 MeV, 1.33 MeV)

線量率：400 Gy/h, 200 Gy/h,  
22 Gy/h, 4.5 Gy/h

COMET Phase-I : ~0.04 Gy/h

目標照射量：2 kGy (安全係数：10)

電源OFF/ON：200 Gy毎



レギュレータ：負荷抵抗を実装  
SFP：“ping”で動作確認

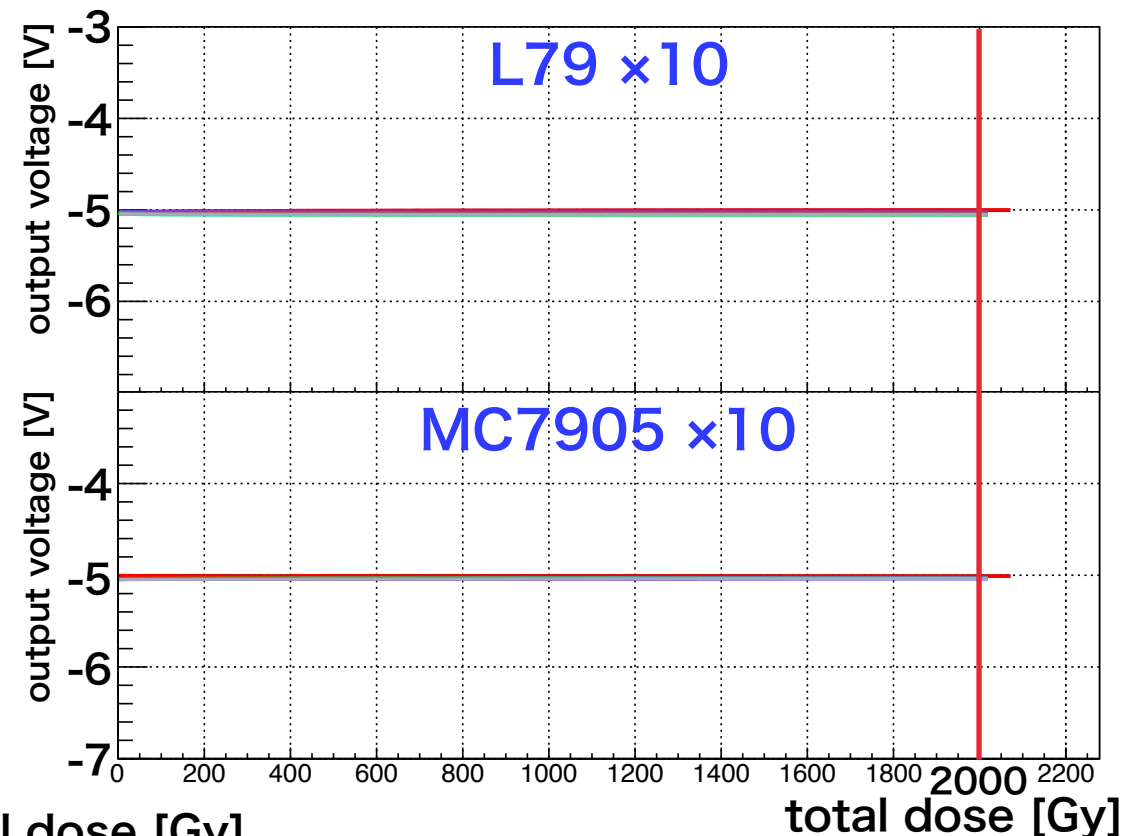
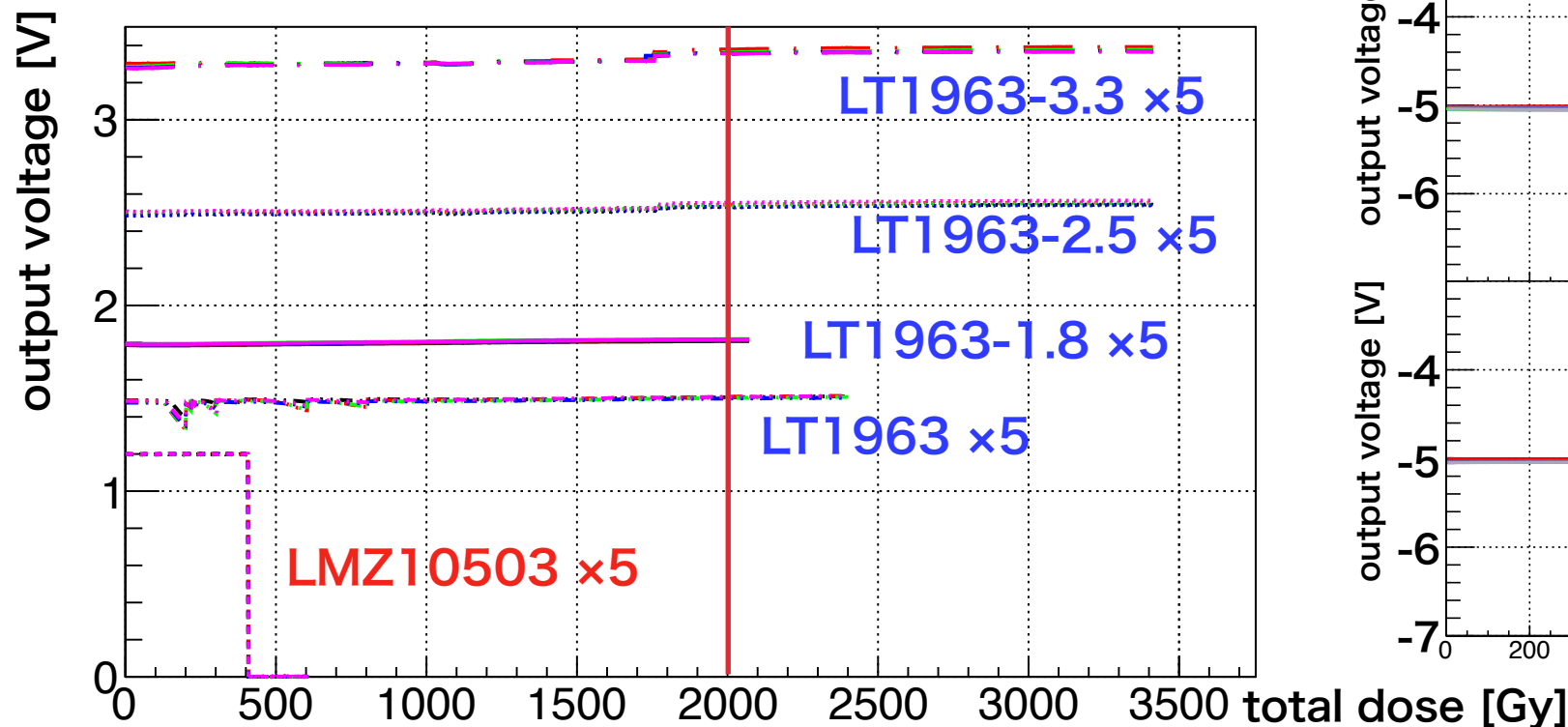
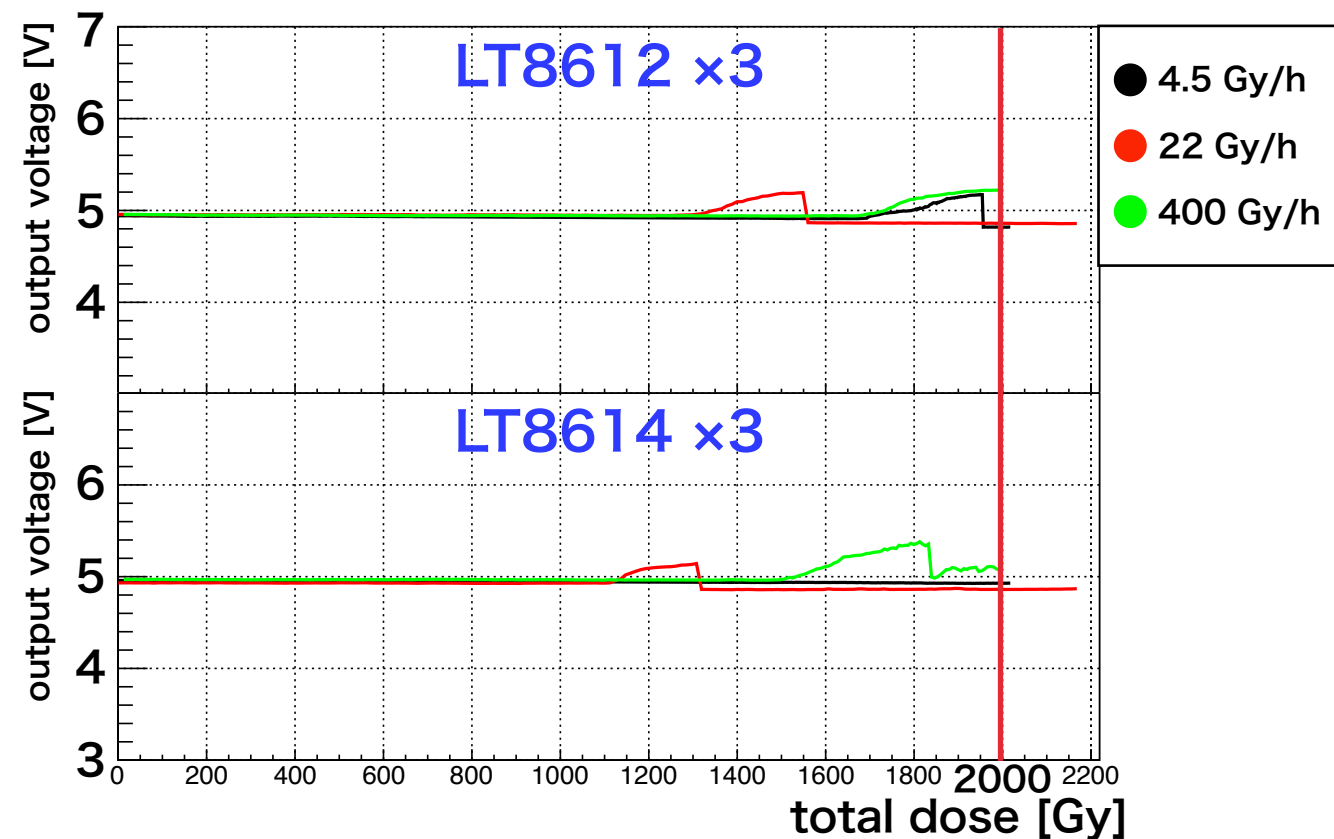
Positive		Negative
Linear	Switching	Linear
LT1963	LT8612	L79
LT1963-3.3	LT8614	MC7905
LT1963-2.5	LMZ10503	NJM2828
LT1963-1.8	+3 レギュレータ	ADP7182
+8 レギュレータ		+8 レギュレータ

全 29種類

SFP
AFBR-57D9AMZ (Avergo)
SFP made in China (very cheap)
EHB-EX-SFPGSX (ELECOM)
LAN-SFPGSX (サンワサプライ)
63GGJ (DELL)
SFPGESST (STARTECH.com)
SFP+
FINISAR
KCC-REI-NXT-NEXT-SFP 10G-SR
10G-SR (Starline)
EHB-EX-SFPGSX (ELECOM)

# ガンマ線試験：結果

- SFP (4.5 Gy/h)
  - ・ AFBR-57D9AMZ : 1.1 kGy
  - ・ EHB-EX-SFPGSX : 1.5 kGy
    - ・ 22, 400 Gy/h では1 kGy以下で動作不安定
- SFP+ : 全素子0.5 kGy以下
  - ・ 実装回路を検出器領域外に設置する案もある
- 要求を満たすレギュレータ
  - ・ LT1963シリーズ (200 Gy/h)
  - ・ LT8612・LT8614
    - ・ 電圧の上昇は供給する回路素子の定格で許容
  - ・ L79・MC7905



# 中性子試験

## TANDEM 加速器 @神戸大学

ビーム：~3 MeV 重陽子

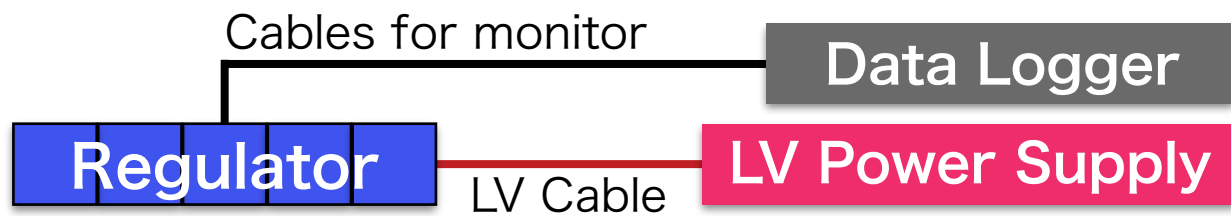
標的：Be ( $\phi$  20 mm)

中性子エネルギー：2 MeV (< 7 MeV)

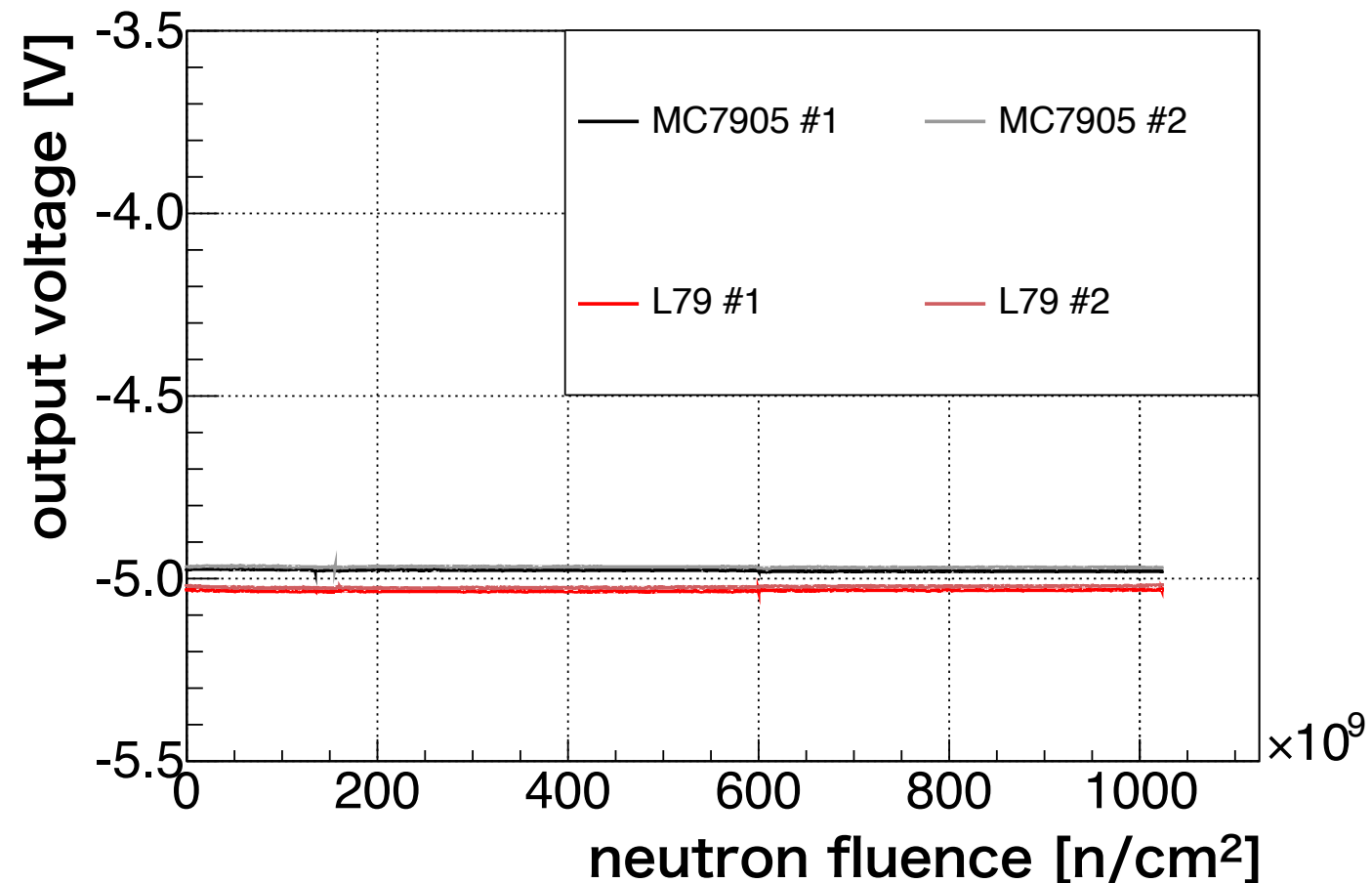
中性子流量： $1.6 \times 10^6$  neutrons/cm<sup>2</sup>/sec

(標的からの距離：10 cm)

(ビーム電流：1  $\mu$ A)



- **MC7905・L79の出力は安定**
- LT1963シリーズは読み出し回路の中性子照射時に評価済み
  - ・ SFP (AFBR5D9AMZ) も同様
- LT8612・LT8614は4月に評価予定





# 磁場試験：セットアップ

- 協力：超電導低温工学センター (KEK)
- 評価対象：スイッチングレギュレータ  
(リニアレギュレータ)
  - ・ インダクタが磁場の影響を受ける。
  - ・ リニアレギュレータはインダクタを使用しない。
- 評価方法：電力効率

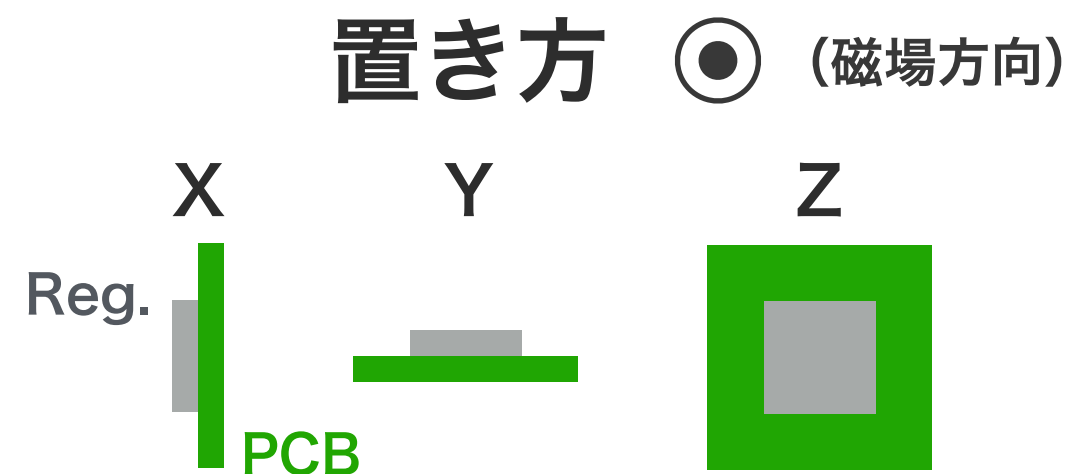


最大磁場：1.7 T



$$\text{Eff.} = \frac{I_{\text{out}} V_{\text{out}}}{I_{\text{in}} V_{\text{in}}}$$

Positive		Negative
Linear	Switching	Linear
LTC3026	LTM4644	MC7905
MAX8556	LT8612	L79
TPS7A7200	LT8614	
TPS74401		

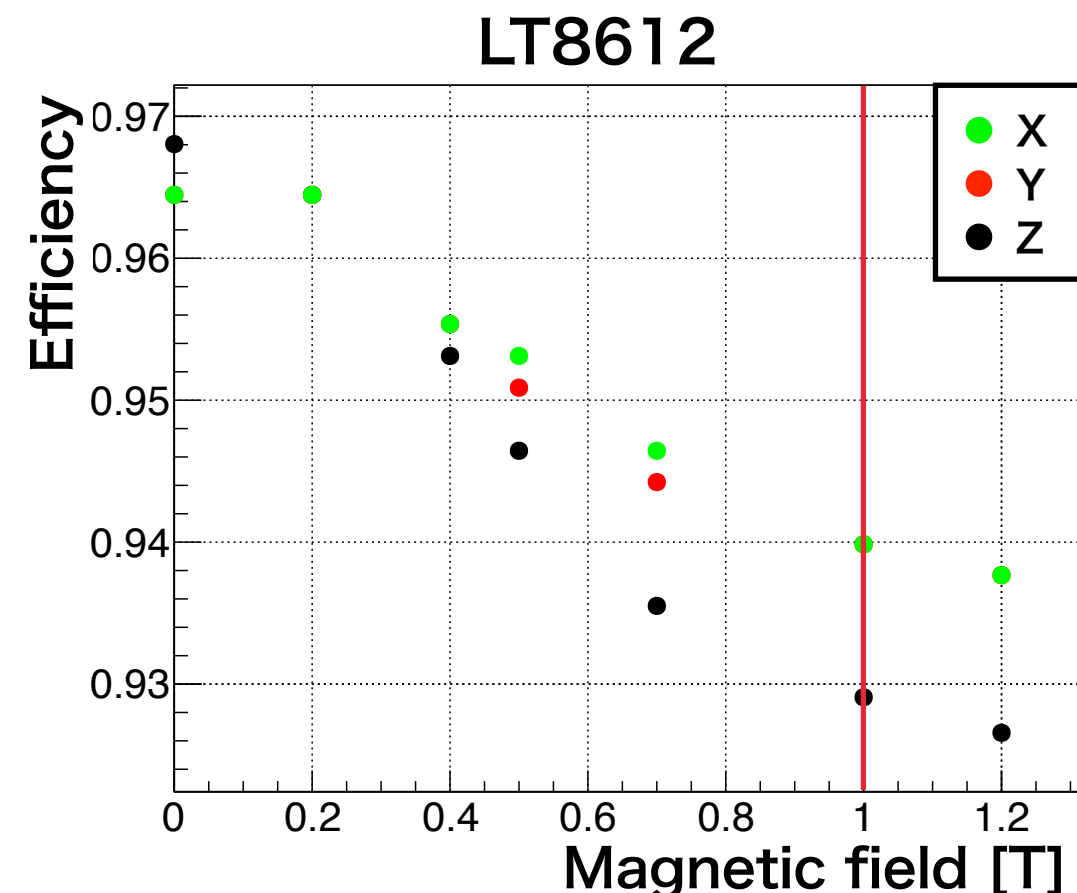




# 磁場試験：結果

- リニアレギュレータ
  - ・ LTC3026以外の全レギュレータで電力効率の減少は一切観測されなかった。
  - ・ LTC3026の評価回路にインダクタが実装されていた。（排除可能）
- スイッチングレギュレータ
  - ・ **電力効率の減少を観測したが、使用可能な範囲であると判断した。**

Positive Switching	Axis	Efficiency %	
		0 T	1.2 T
LTM4644	Z	49.7	22.9
LT8612	X	96.4	93.8
	Y	96.4	93.8
	Z	96.8	92.7
LT8614	X	96.3	89.2
	Y	96.3	89.4
	Z	96.3	84.4



# まとめと今後

## COMET Phase-I

- AI原子中でのミュオン電子転換過程をS.E.S  $3 \times 10^{-15}$  で探索 (2019年ごろ)
- COMET Phase-I における検出器領域の環境 (シミュレーション: PHITS)
  - ・ ガンマ線: 200 Gy
  - ・ 中性子:  $1.0 \times 10^{12}$  n/cm<sup>2</sup>
  - ・ ソレノイド磁場: 1 T
- 早期にパーツ選定を完了することが重要

## 耐性評価試験

- SFP: ガンマ線耐性が1 kGy以上のものを発見
  - ・ CERN開発の耐放射線SFPの利用を相談&検討
- SFP+: 未発見
  - ・ 実装回路を検出器領域外への設置案
- レギュレータ: パーツ選定をほぼ完了

## 今後

- 4月にLT8612・LT8614の中性子耐性を評価し、レギュレータ選定を完了
- 複数のシミュレーションコードによる放射線量評価
  - ・ 最新のシミュレーションの結果では放射線量の見積もりが減少
  - ・ PHITS、MARS、FLUKA、ICEDUST (Geant4 base)
- 光ファイバーの放射線耐性評価
  - ・ ガンマ線照射後に光ファイバーの先端が黒ずんでいた

## 耐性評価試験結果

SFP	ガンマ線	中性子	1T磁場
AFBR-57D9AMZ	△ (> 1.1kGy)	○	
EHB-EX-SFPGSX	△ (> 1.5kGy)		
Positive Linear			
LT1963シリーズ	○	○	○*
Positive Switching			
LT8612	○	4月試験	○
LT8614	○	4月試験	○
Negative Linear			
MC7905	○	○	○
L79	○	○	○

(\*) 試験はしていないが、リニアでインダクタの使用もないため



照射後 未照射

光ファイバーの先端

# Backup



# Cylindrical Detector System

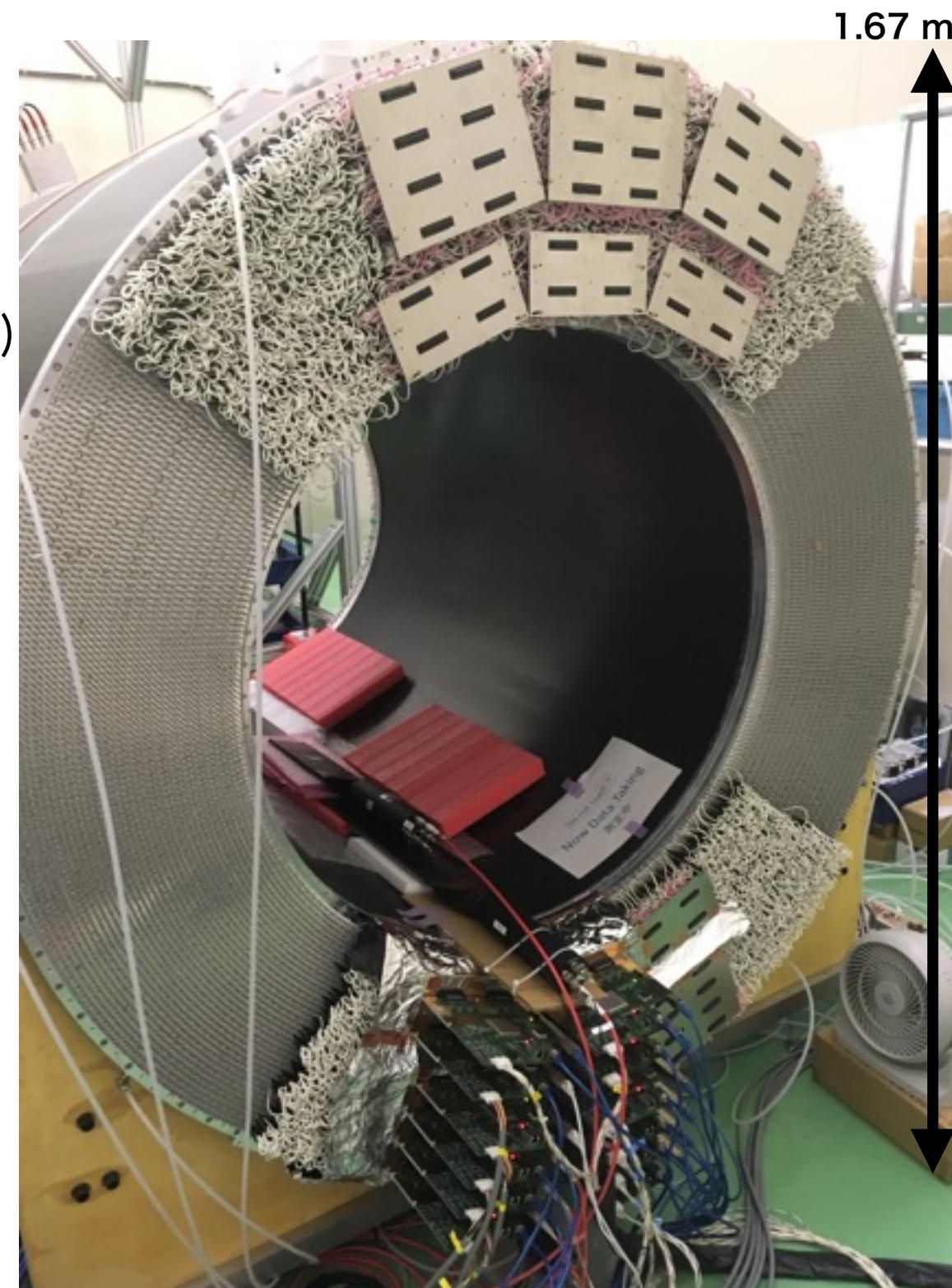
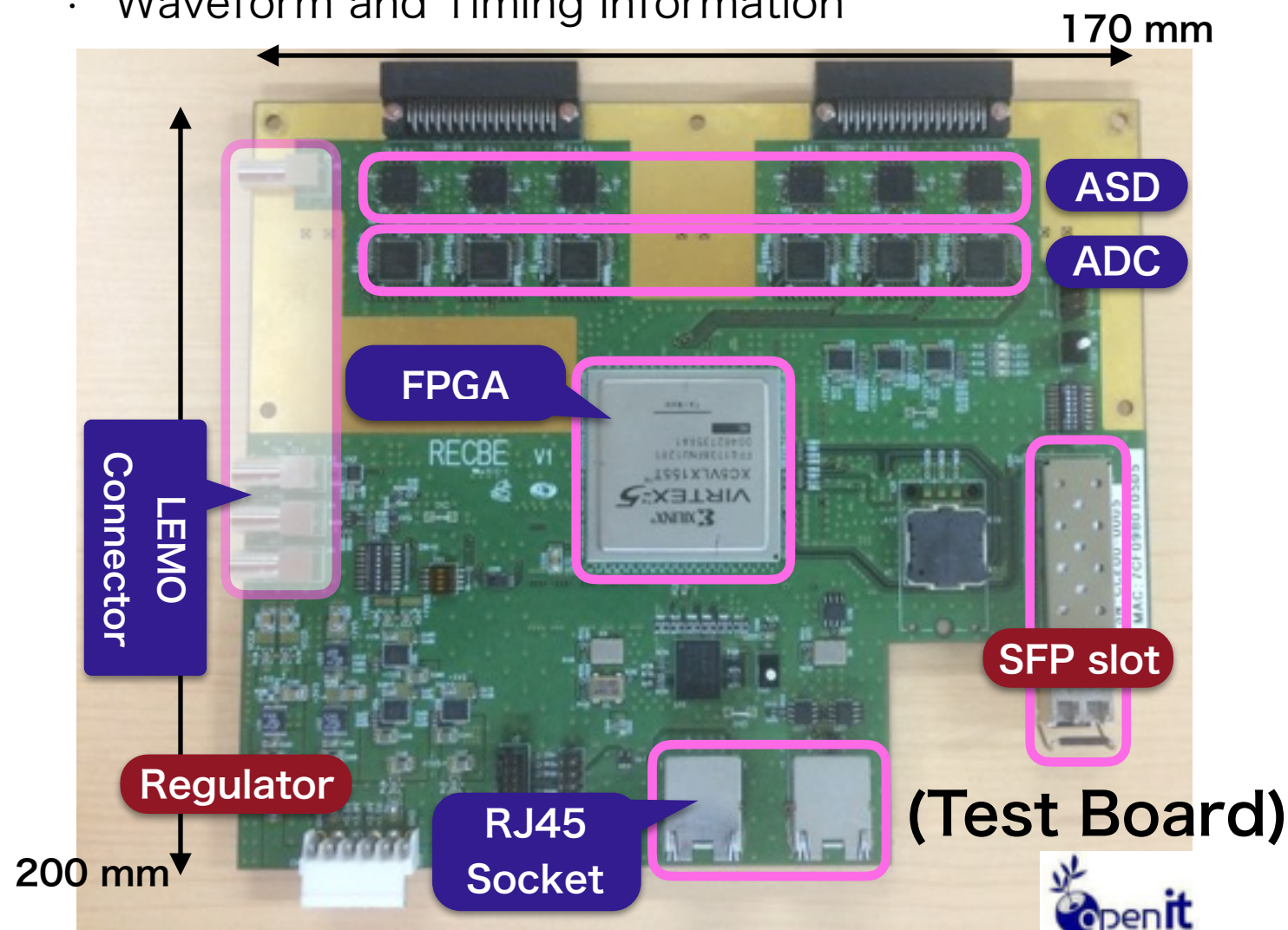
## Cylindrical Drift Chamber

### Momentum measurement

- Resolution :  $< 200 \text{ keV}/c$  for 105 MeV electrons

### Readout : Readout Electronics for the Central drift chamber of the Belle II detector (RECBE)

- Developed by the Belle-II CDC group
- Waveform and Timing information





# Cylindrical Detector System

## Cylindrical Trigger Hodoscope Counter

Scintillator : High momentum particle

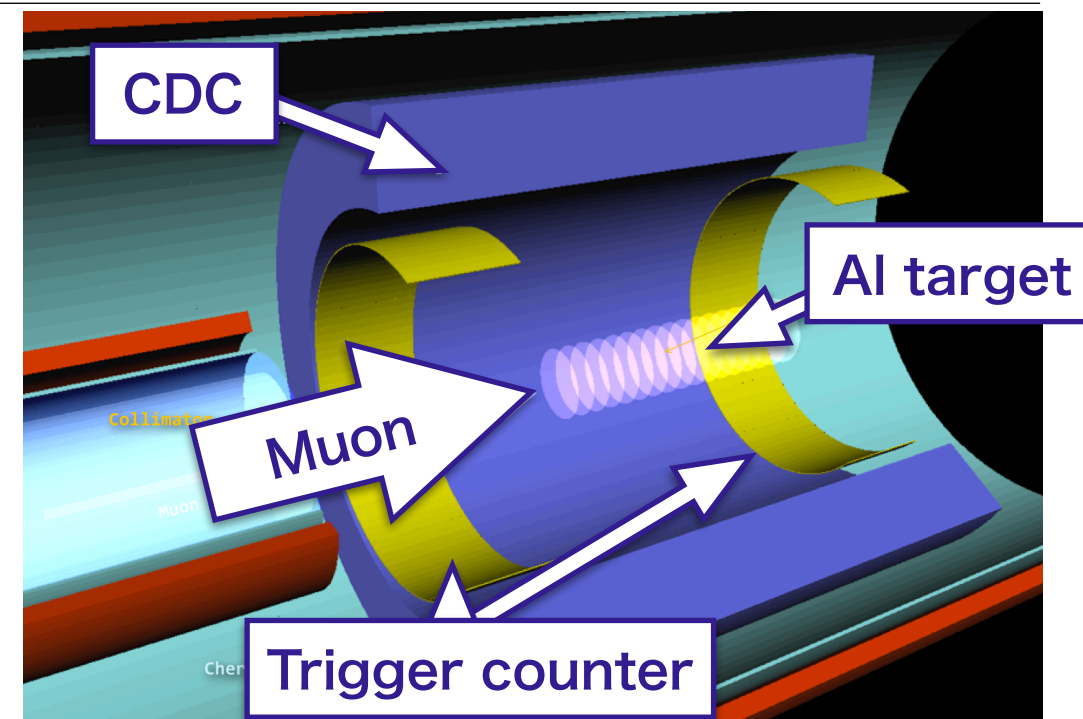
Cherenkov : Electron

Photo sensor : Fine-mesh PMT

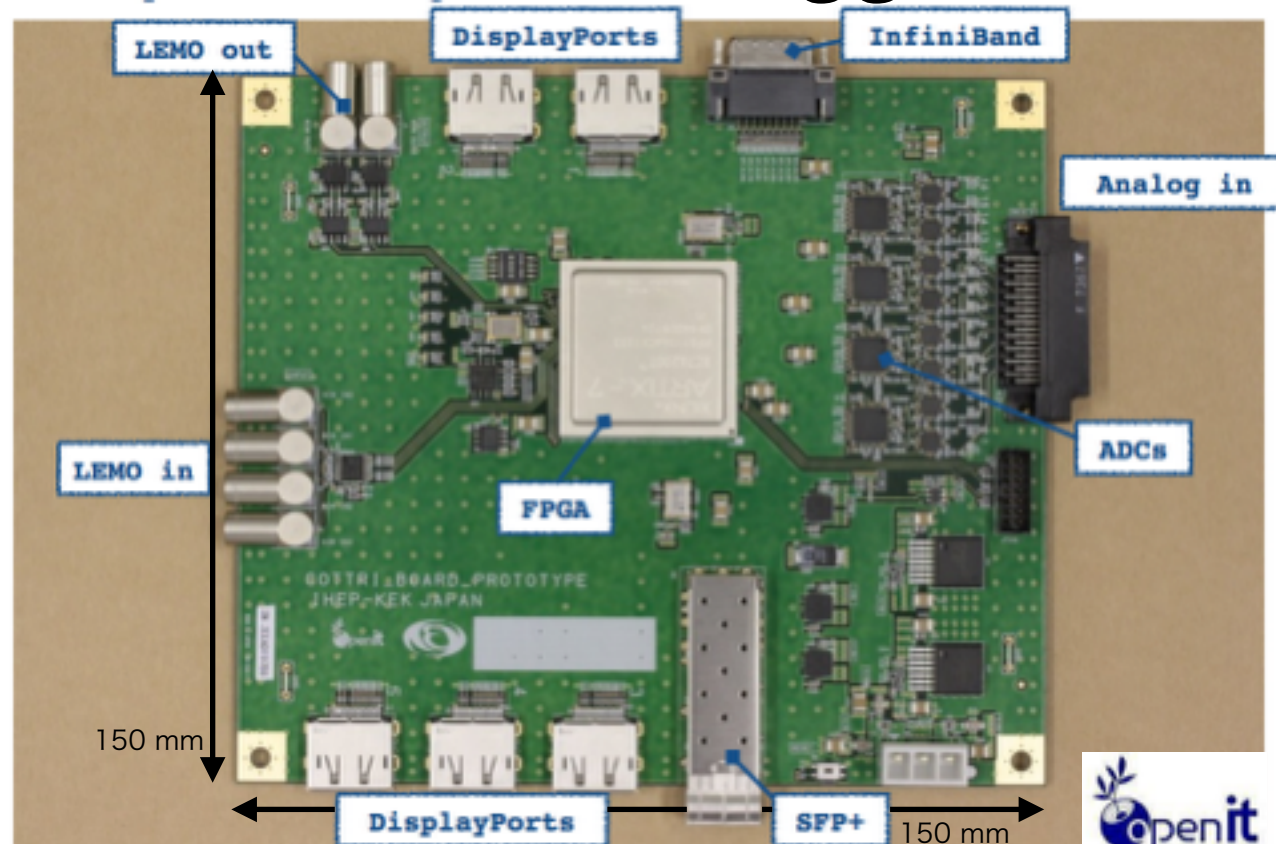
### Readout

Front-end Board : Single-end to Differential

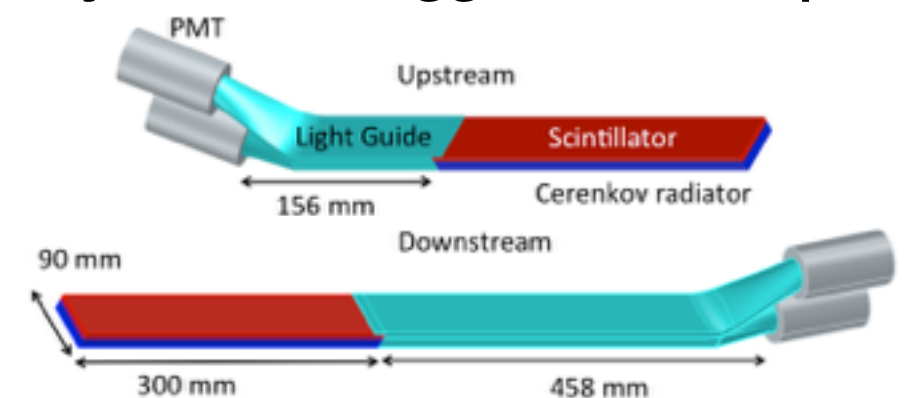
COTTRI : CTH signal processing, Trigger decision



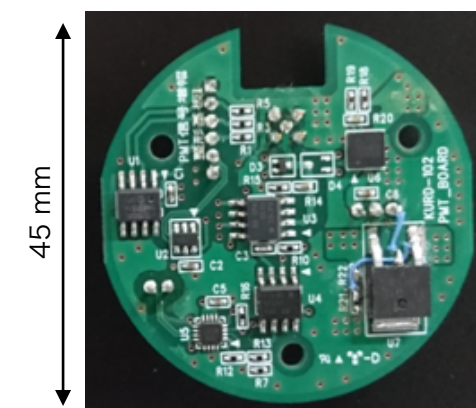
## COmeT TRigger



## Cylindrical Trigger Hodoscope



## Front-end Board



# StrECAL

## Straw Tube Tracker

### Momentum measurement

- Resolution :  $< 200 \text{ keV/c}$  for 105 MeV electrons

### Readout : Read Out Electronics for Straw Tube Instrument (ROESTI)

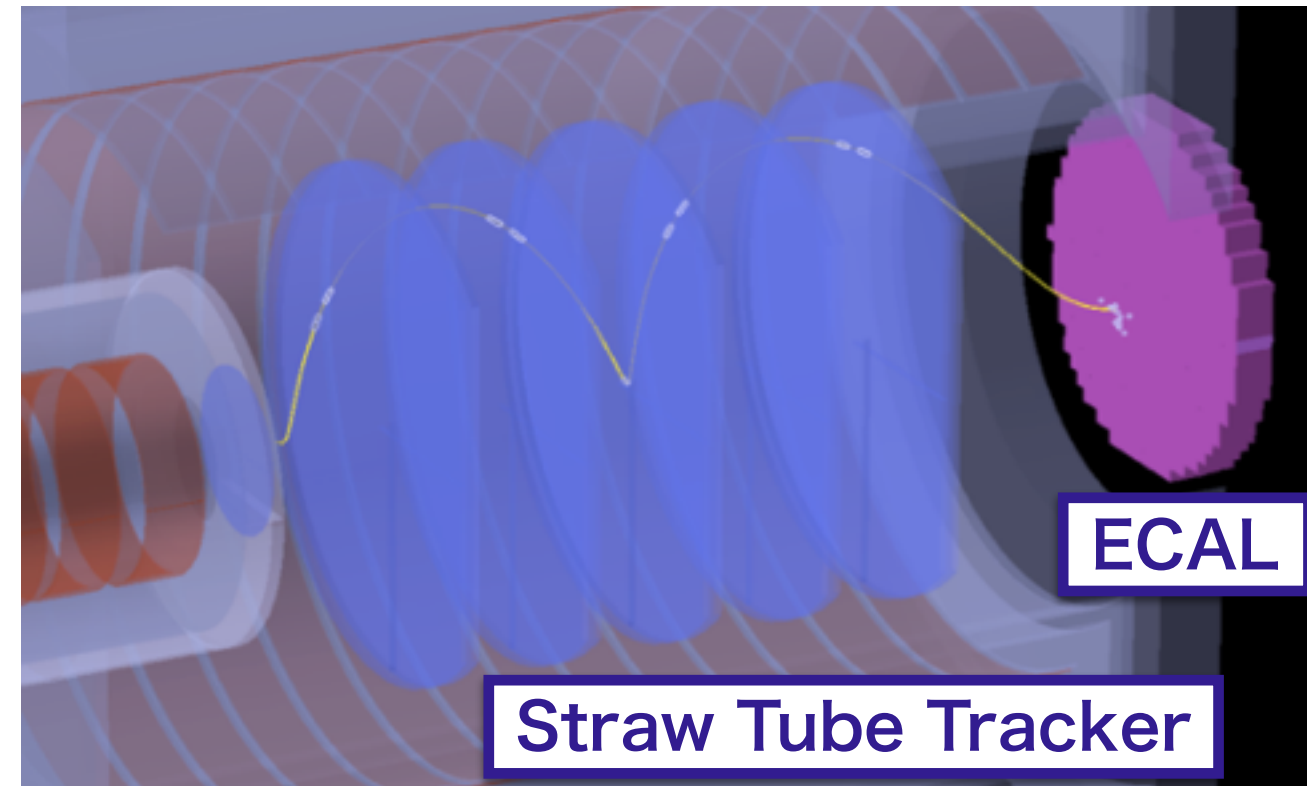
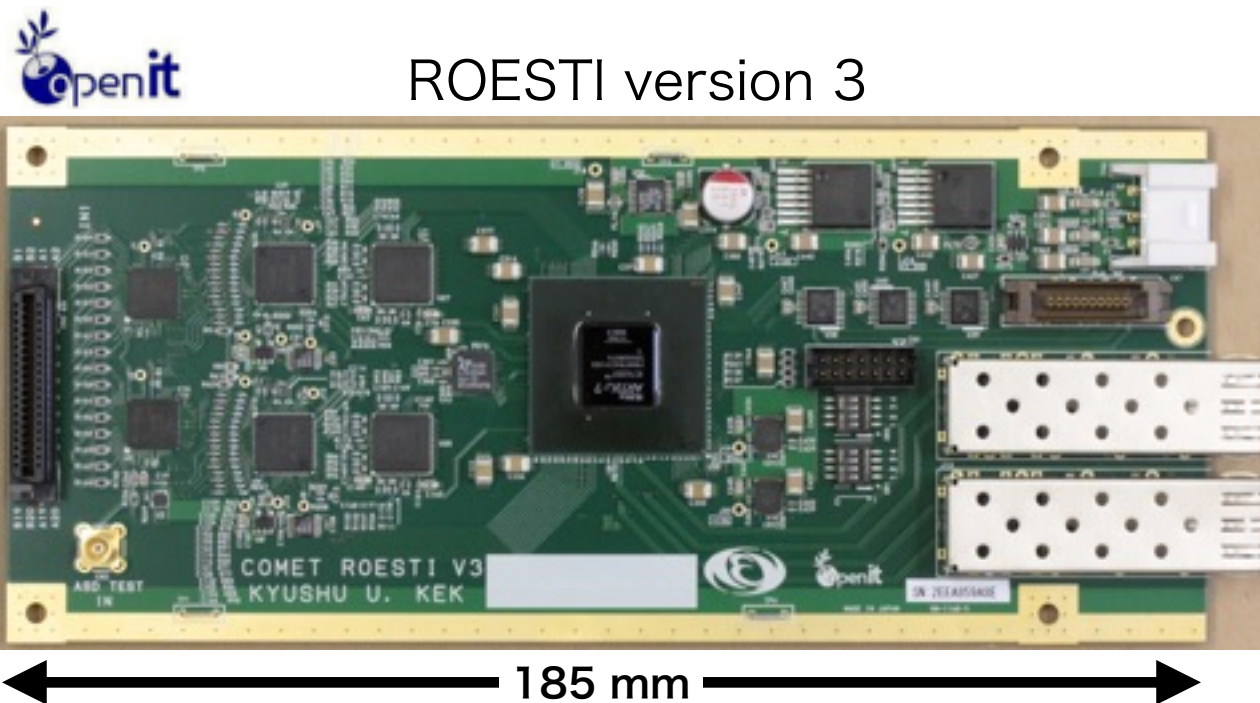
- Developed by the COMET StrECAL group

## Electron Calorimeter

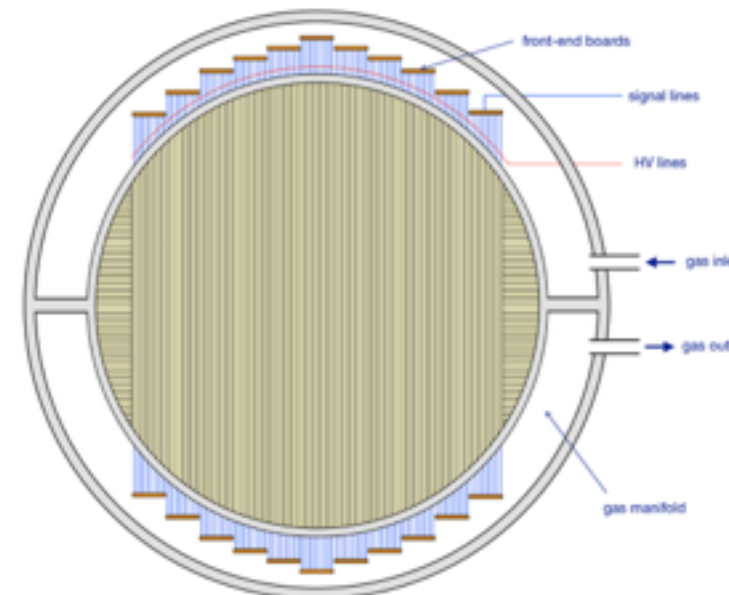
### Crystal : LYSO

- Particle identification ( $e/\mu/\pi$ )

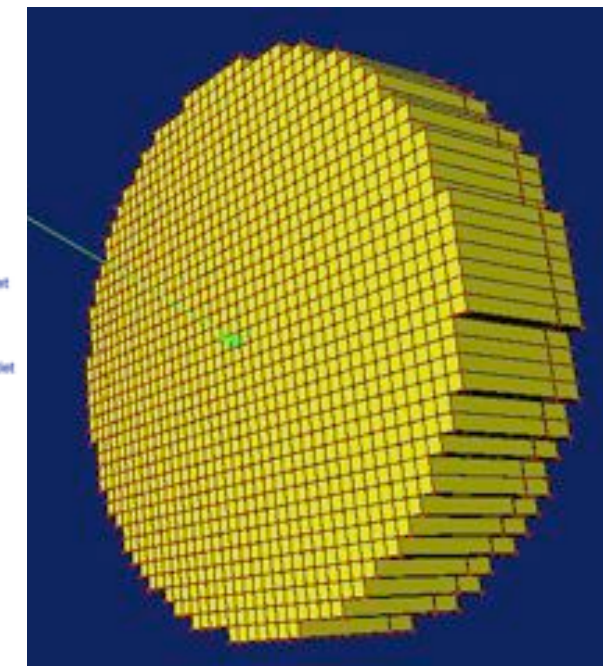
### Readout : ROESTI



Straw Tube Tracker

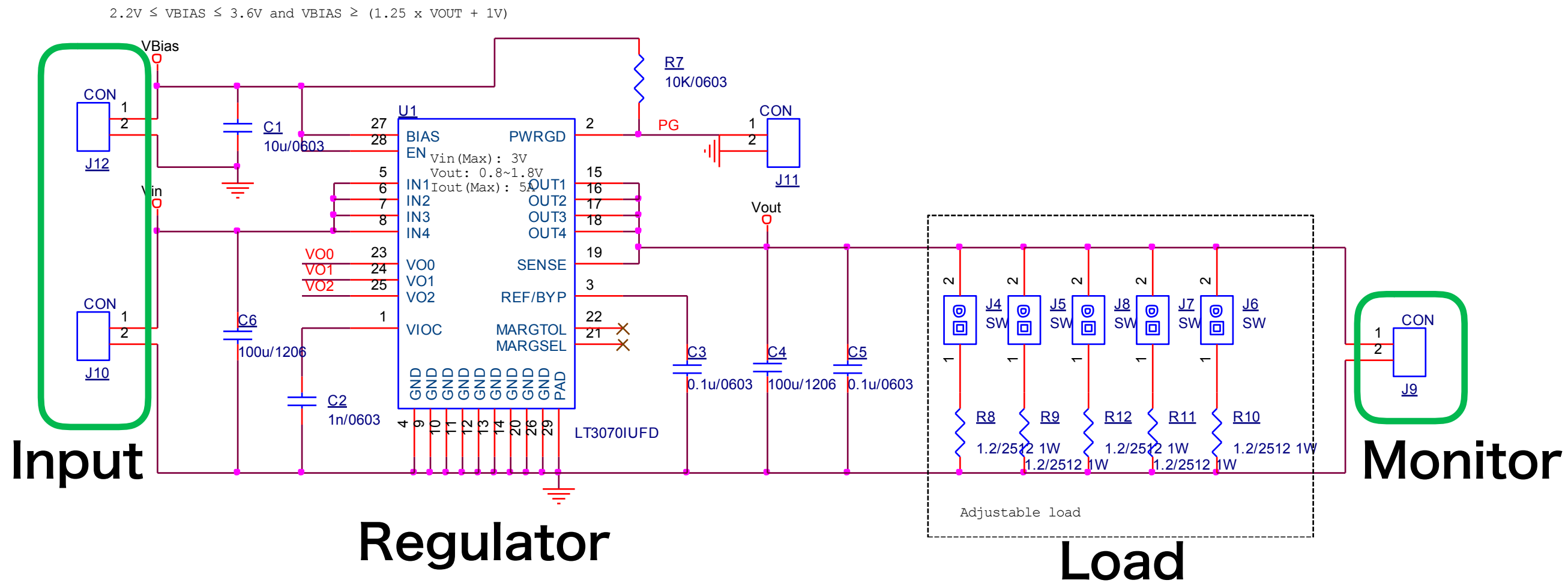


Electron Calorimeter





# Schematic diagram



# ガンマ線@阪大：セットアップ

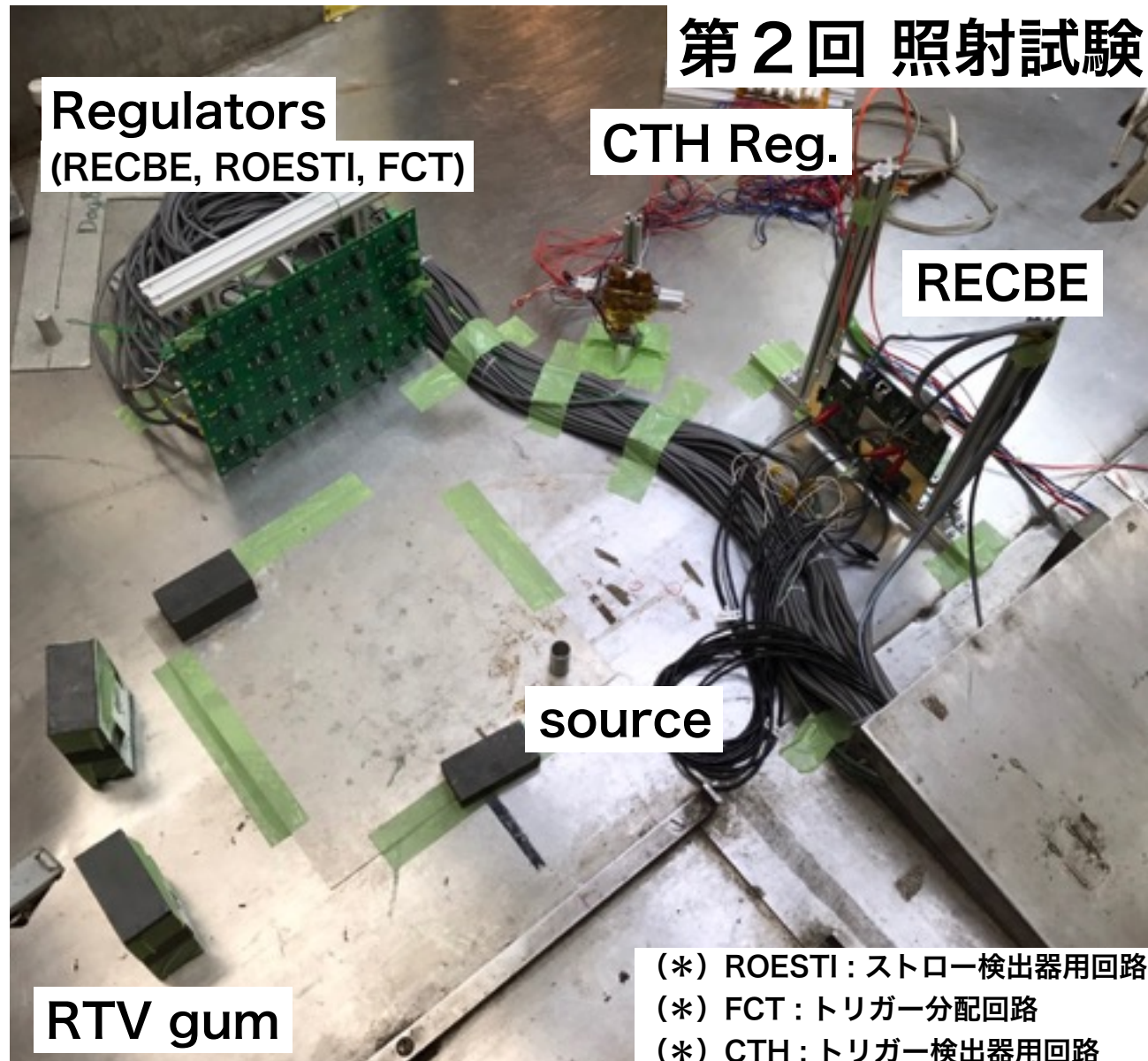
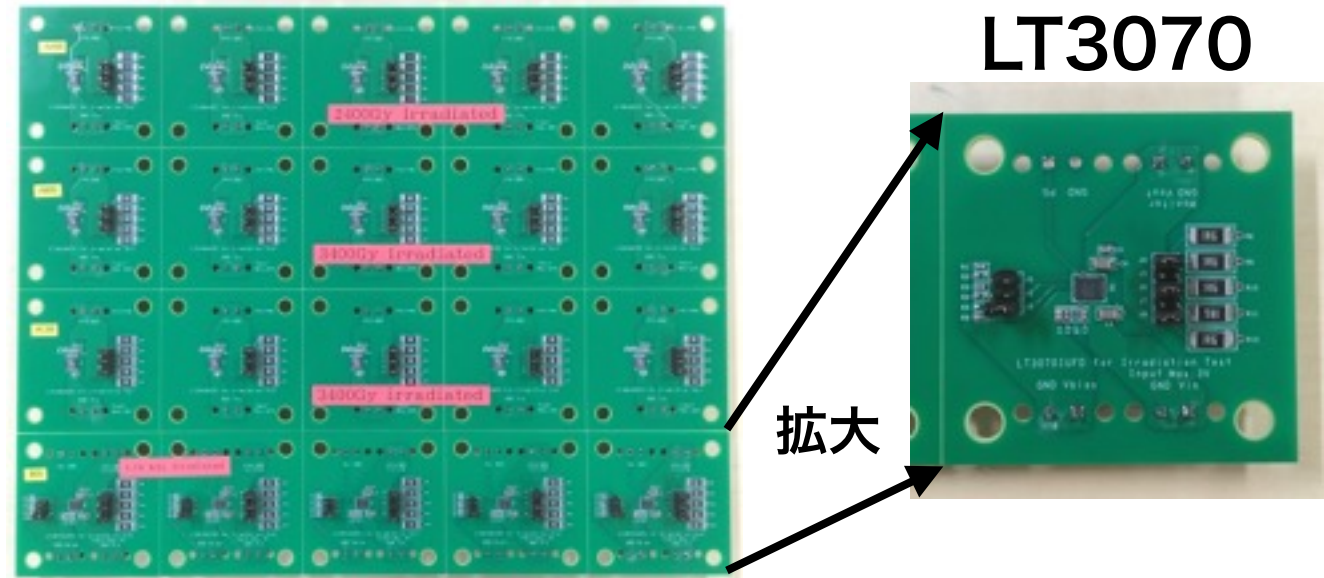
量子ビーム科学研究施設 @大阪大学

線源： $^{60}\text{Co}$

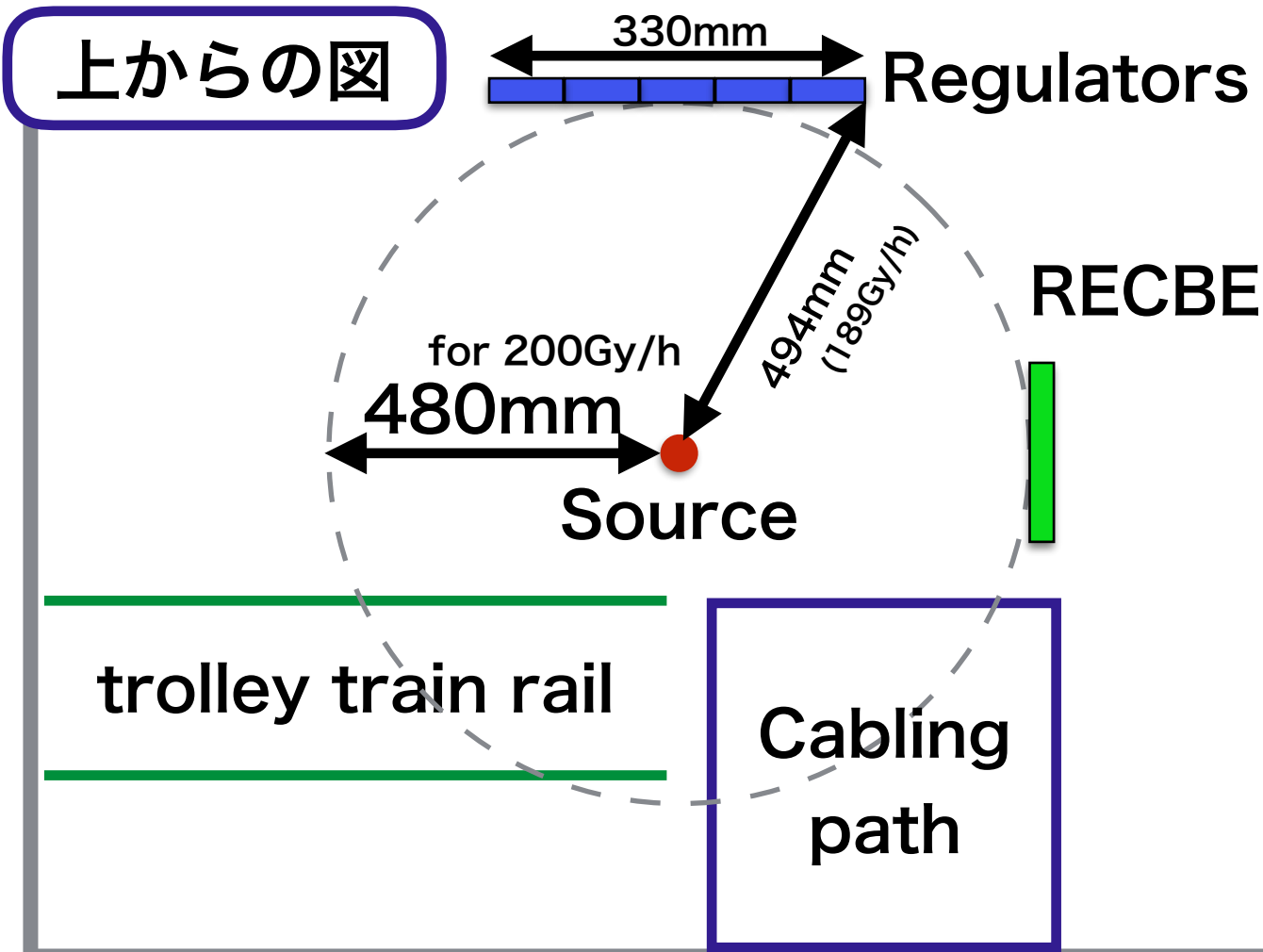
エネルギー：1.17 MeV, 1.33 MeV

吸収線量 (2017年10月1日、距離 1 m)  
1. 44.8 Gy/h, 2. 11.3 Gy/h

Regulator試験用PCB



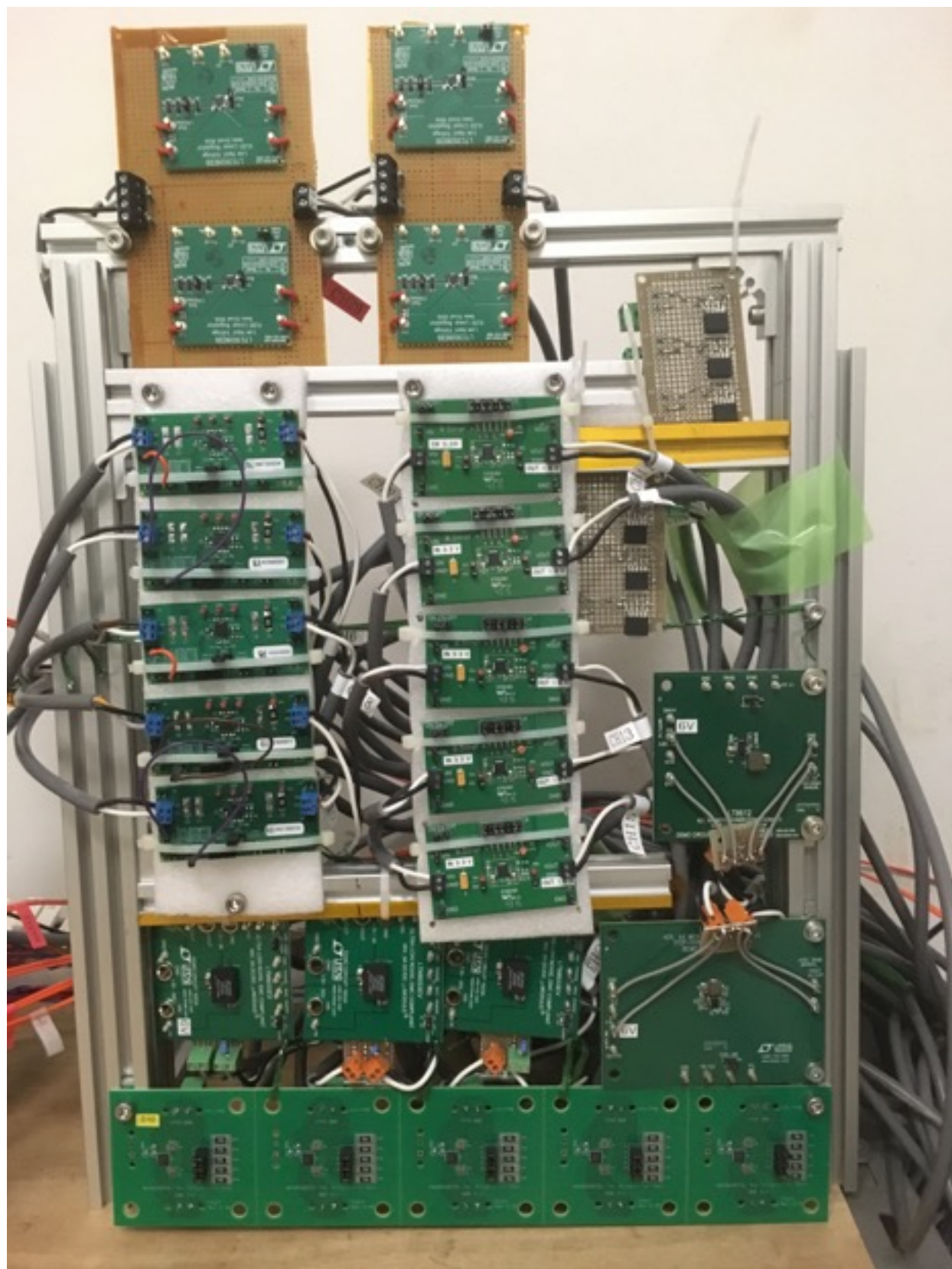
第2回 照射試験



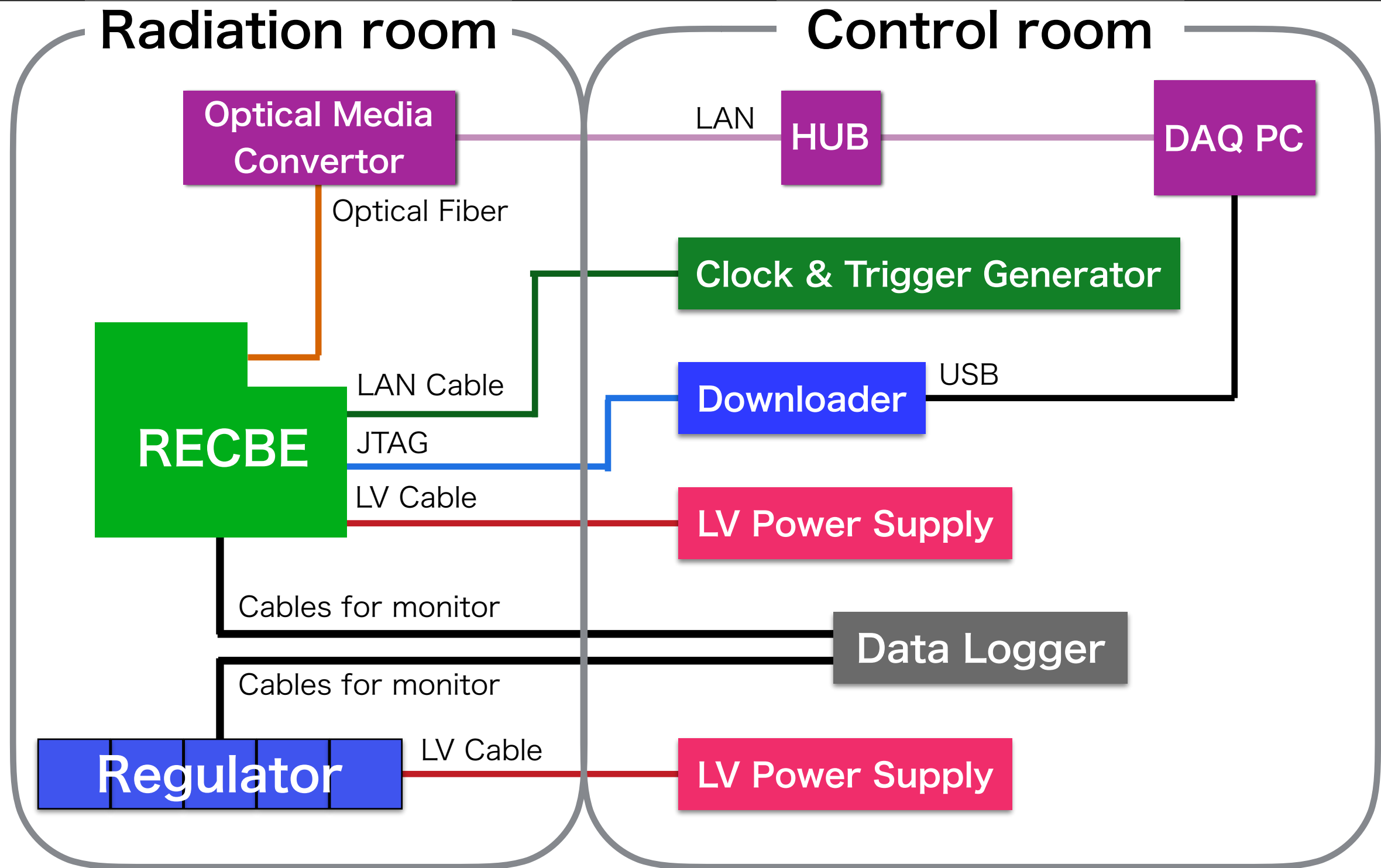
- (\*) ROESTI：ストロー検出器用回路
- (\*) FCT：トリガー分配回路
- (\*) CTH：トリガー検出器用回路



# ガンマ線@東工大：セットアップ



# セットアップ : DAQ



(\*) 各Regulatorの出力電圧をロガーで記録

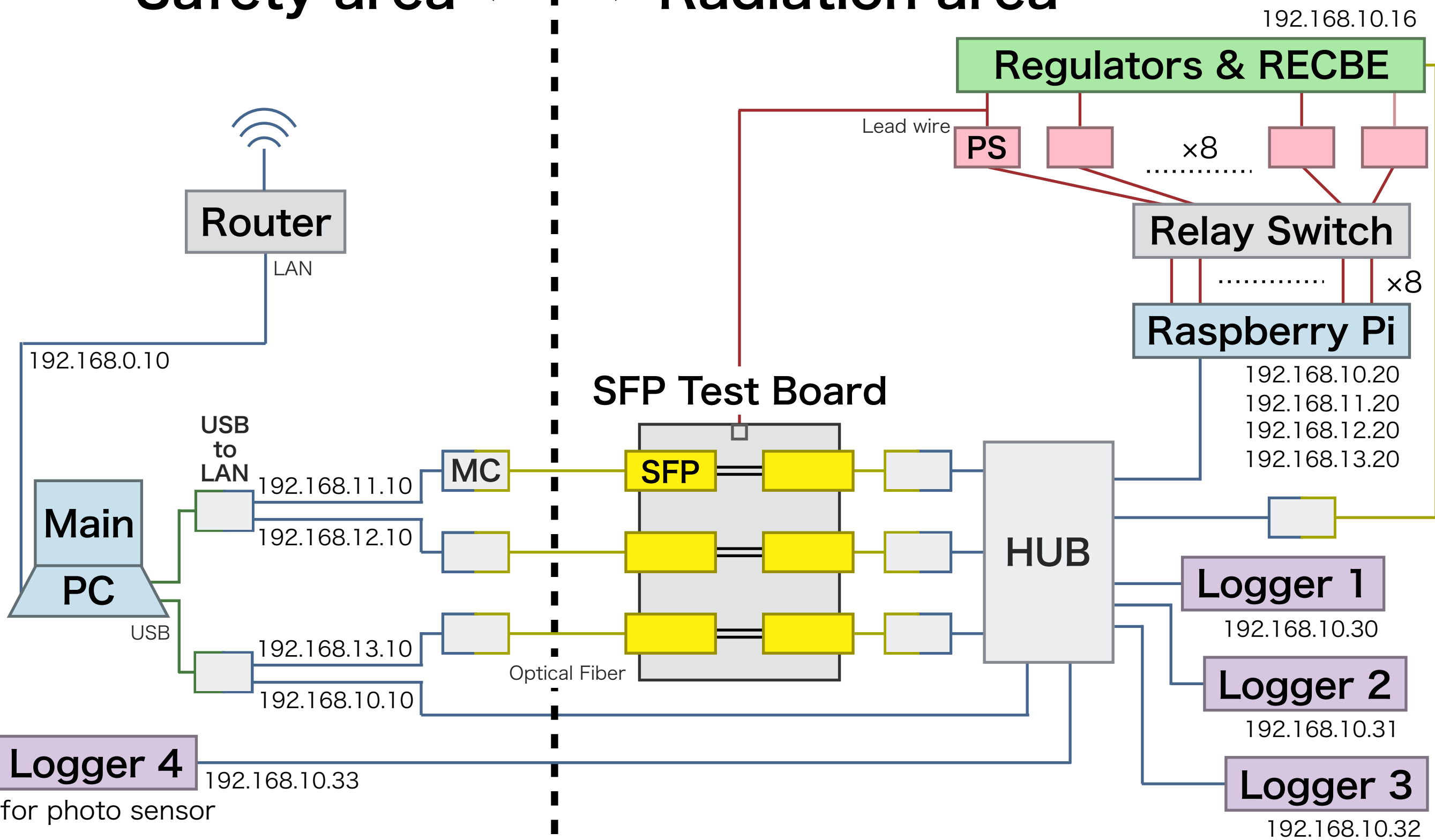
(\*) RECBEとの通信をペデスタルデータを取得しながらDAQ PCで確認



# Setup : Network @TIT

Power Supply : PS  
Media Converter : MC

Safety area ← → Radiation area



(\* ) All systems are operated by remote control with TeamViewer via the main PC.