

COMET実験における 計測システムの放射線対策

中沢 遊^{AB}

上野一樹^{BC}、大石航^{BD}、沖中香里^A、久野良孝^{AB}、佐藤朗^{AB}、中居勇樹^{BD}、
中村有希^A、濱田英太郎^{BC}、藤井裕樹^{BC}、森津学^A、吉田学立^{AB}、
山口博史^{BD}、山根峡人^A、Jie Zhang^E、他COMETコラボレーション
阪大理^A、Open-it^B、高工研^C、九大理^D、IHEP^E

2016.10.13

目次

- ・ **イントロダクション**

- ・ ミューオン電子転換過程
- ・ COMET実験
- ・ 放射線環境と影響
- ・ 放射線耐性の調査対象

- ・ **放射線耐性試験**

- ・ 放射線照射施設
- ・ 各照射対象について

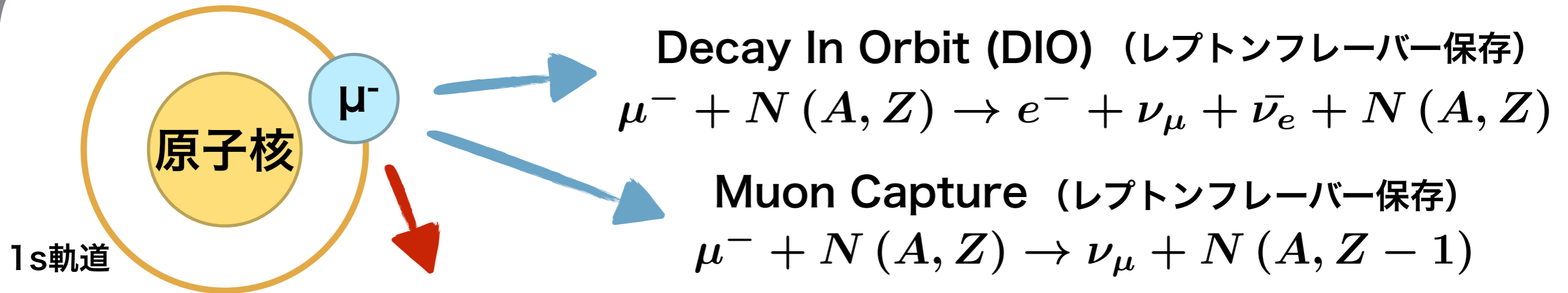
- FPGA、Regulator、DAC、ADC、Fine-mesh PMT、
Preamplifier、APD

- ・ **まとめ**

イントロダクション

ミュオン電子転換過程

ミュオニック原子



ミュオン電子転換過程 (荷電レプトンフレーバー非保存)



$$E_e = m_\mu - B_{\text{atom}} - R_{\text{atom}} \quad (\text{Monoenergetic})$$

電子エネルギー ミュオン質量 束縛エネルギー 反跳エネルギー

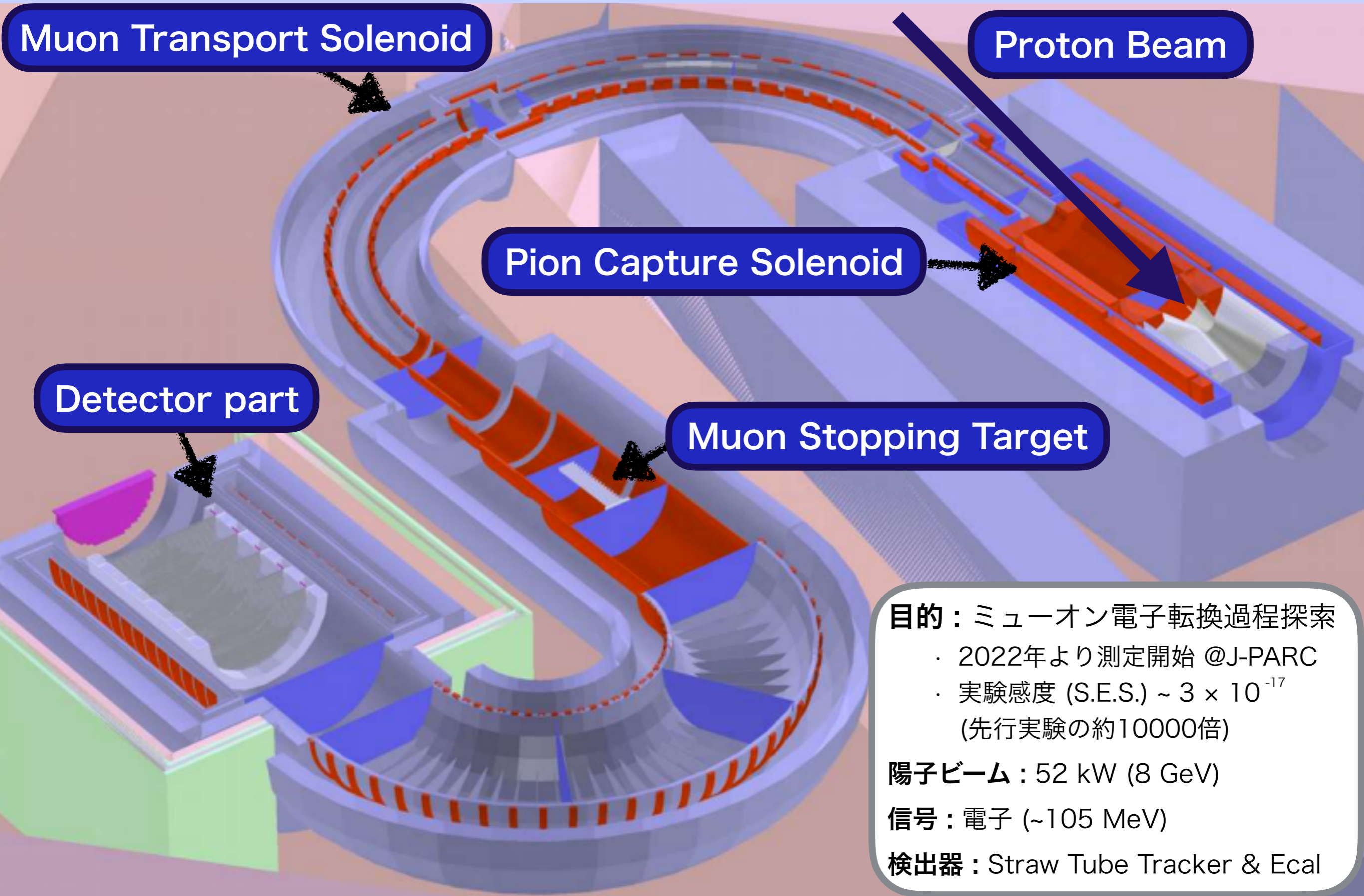
荷電レプトンフレーバー非保存 ($\mu \rightarrow e \gamma$) の分岐比

標準模型 : $O(10^{-54})$ → 厳しく制限されている

標準模型を超える理論 : $O(10^{-15})$

ミュオン電子転換過程の発見は新物理を示唆する

COMET実験



目的： ミューオン電子転換過程探索

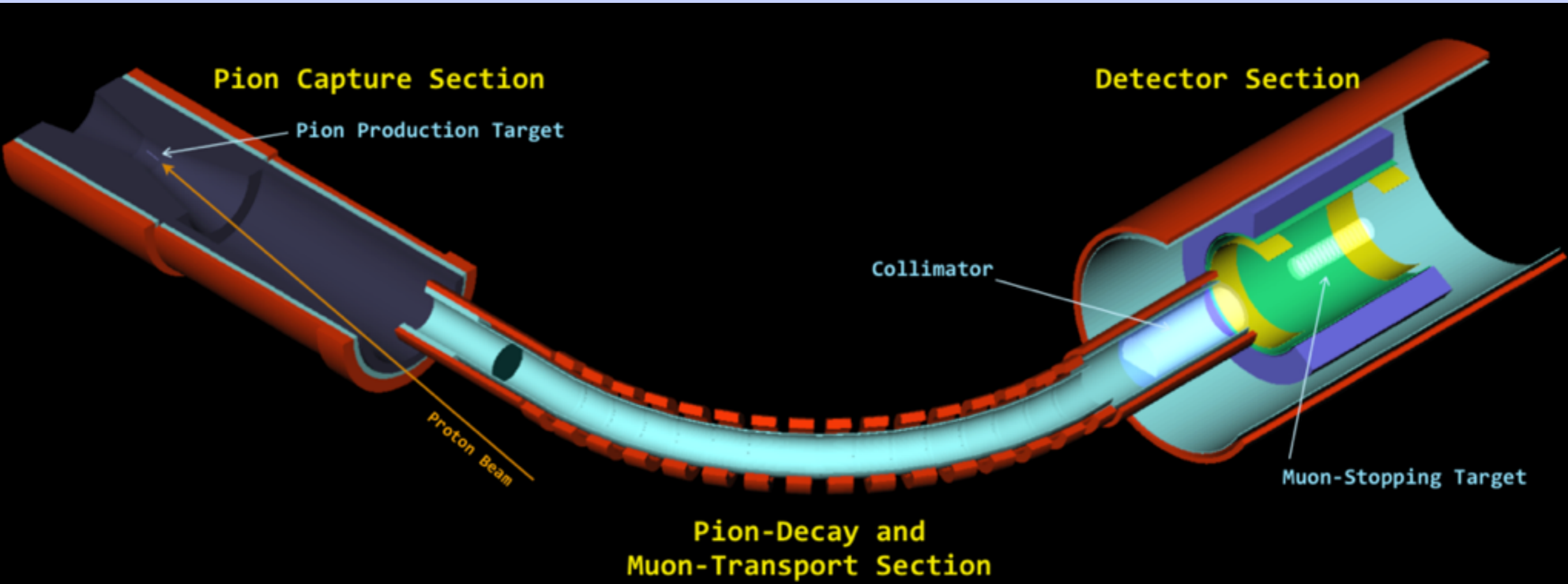
- ・ 2022年より測定開始 @J-PARC
- ・ 実験感度 (S.E.S.) $\sim 3 \times 10^{-17}$
(先行実験の約10000倍)

陽子ビーム： 52 kW (8 GeV)

信号： 電子 (~ 105 MeV)

検出器： Straw Tube Tracker & Ecal

COMET Phase-I



目的：Al原子中でのミュオン電子転換過程の探索

- ・ 2019年より測定開始 @J-PARC
- ・ 150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)

陽子ビーム：3.2 kW (8 GeV)

信号：電子 (~105 MeV)

検出器：Cylindrical Detector System (CyDet) or StrECAL

CyDet → Cylindrical Drift Chamber (CDC) & Cylindrical Trigger Hodoscope (CTH)

StrECAL → Straw Tube Tracker & Electron Calorimeter (ECAL)

背景事象：DIO電子 & ビーム由来の事象など

Cylindrical Detector System

Cylindrical Trigger Hodoscope

構成：シンチレータとチェレンコフ検出器

シンチレータ：高運動量の粒子を識別

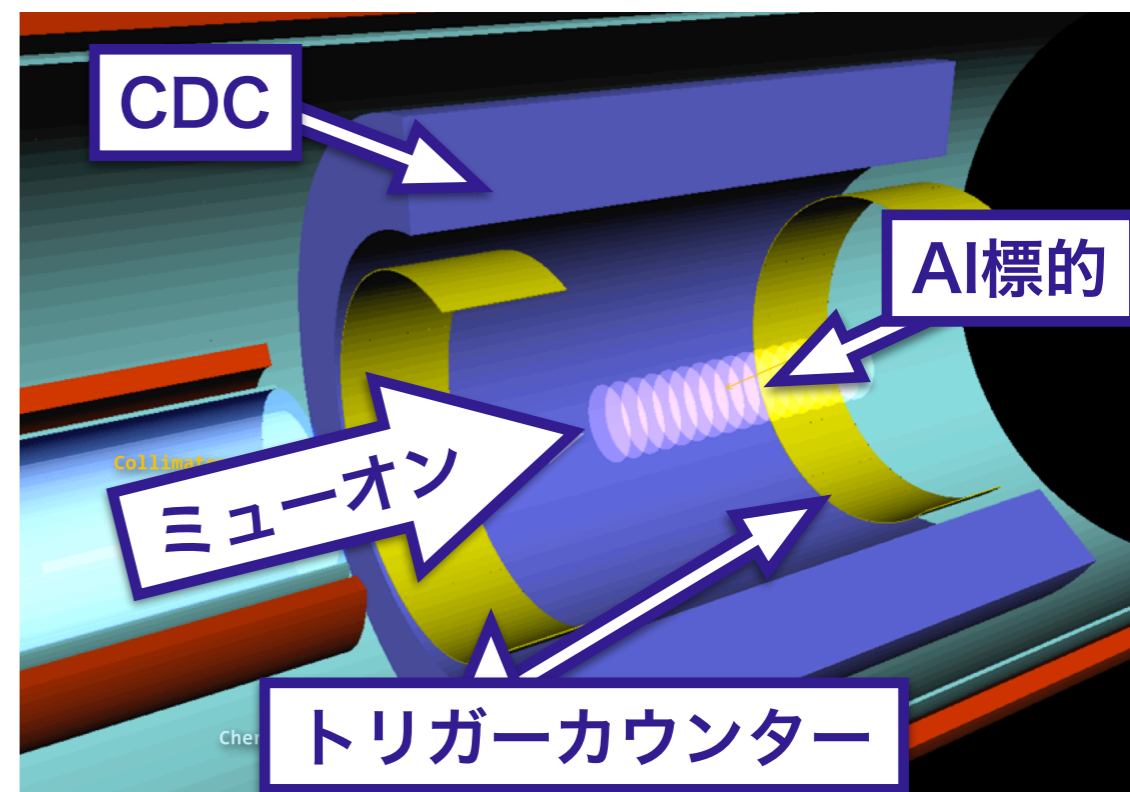
チェレンコフ：電子を識別

光検出器：Fine-mesh PMT

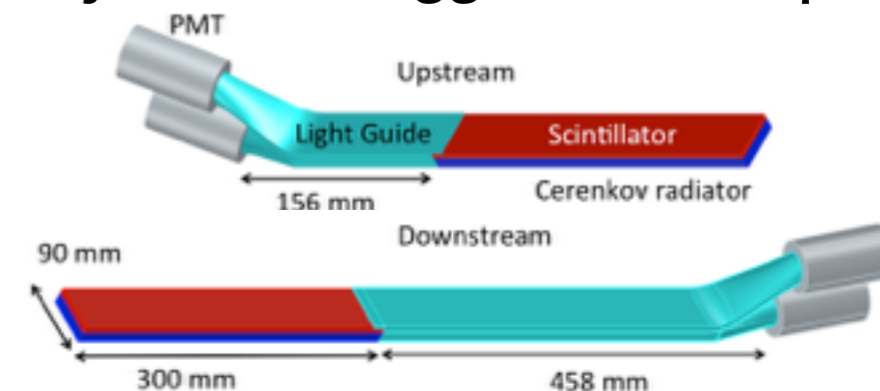
読み出し回路：Front-end Board & C0meT TRigger (COTTRI)

Front-end Board：APDによる光信号読み出し

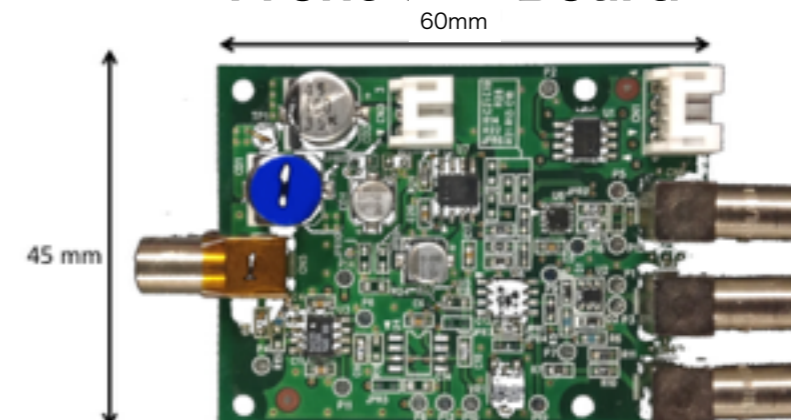
COTTRI：CTHの信号処理及び、トリガーロジック用回路 (COMET独自)



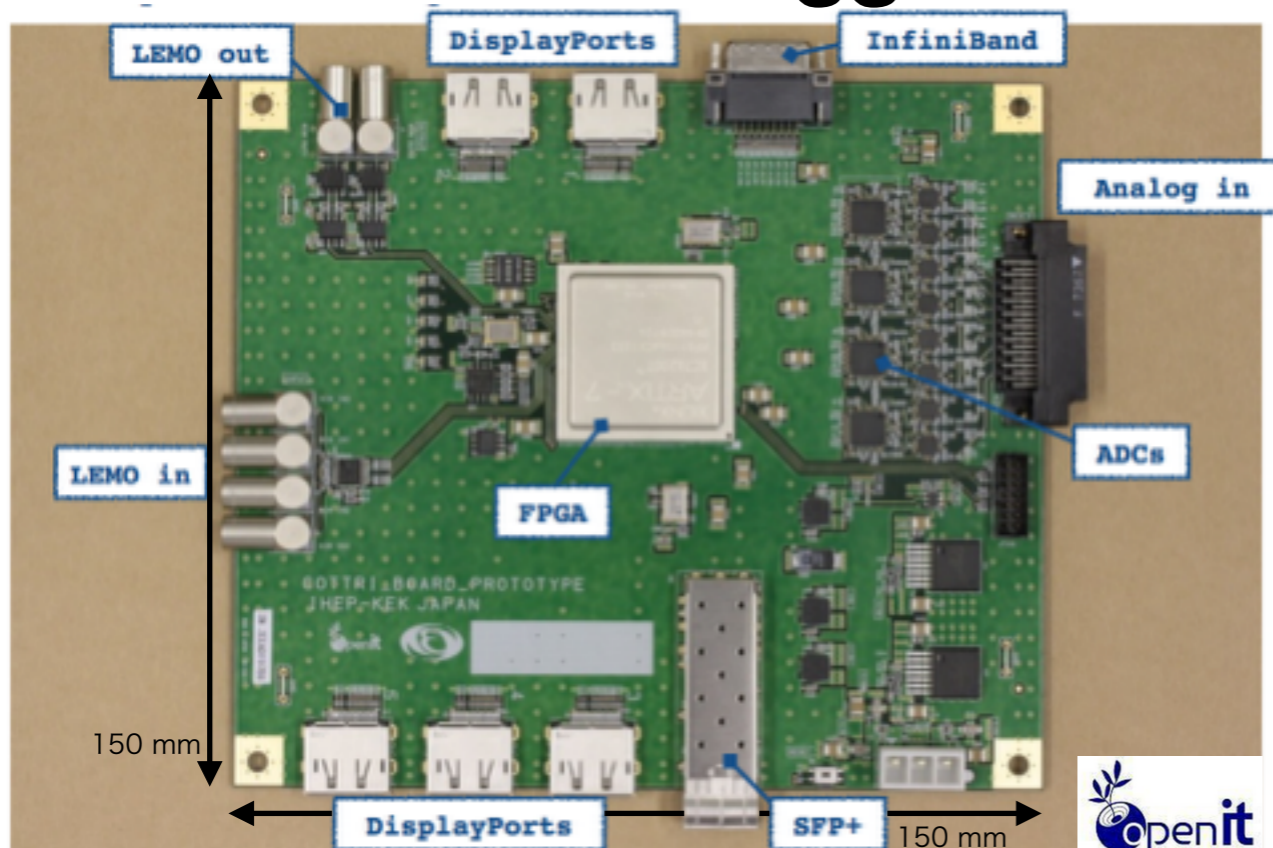
Cylindrical Trigger Hodoscope



Front-end Board



C0meT TRigger



Cylindrical Detector System

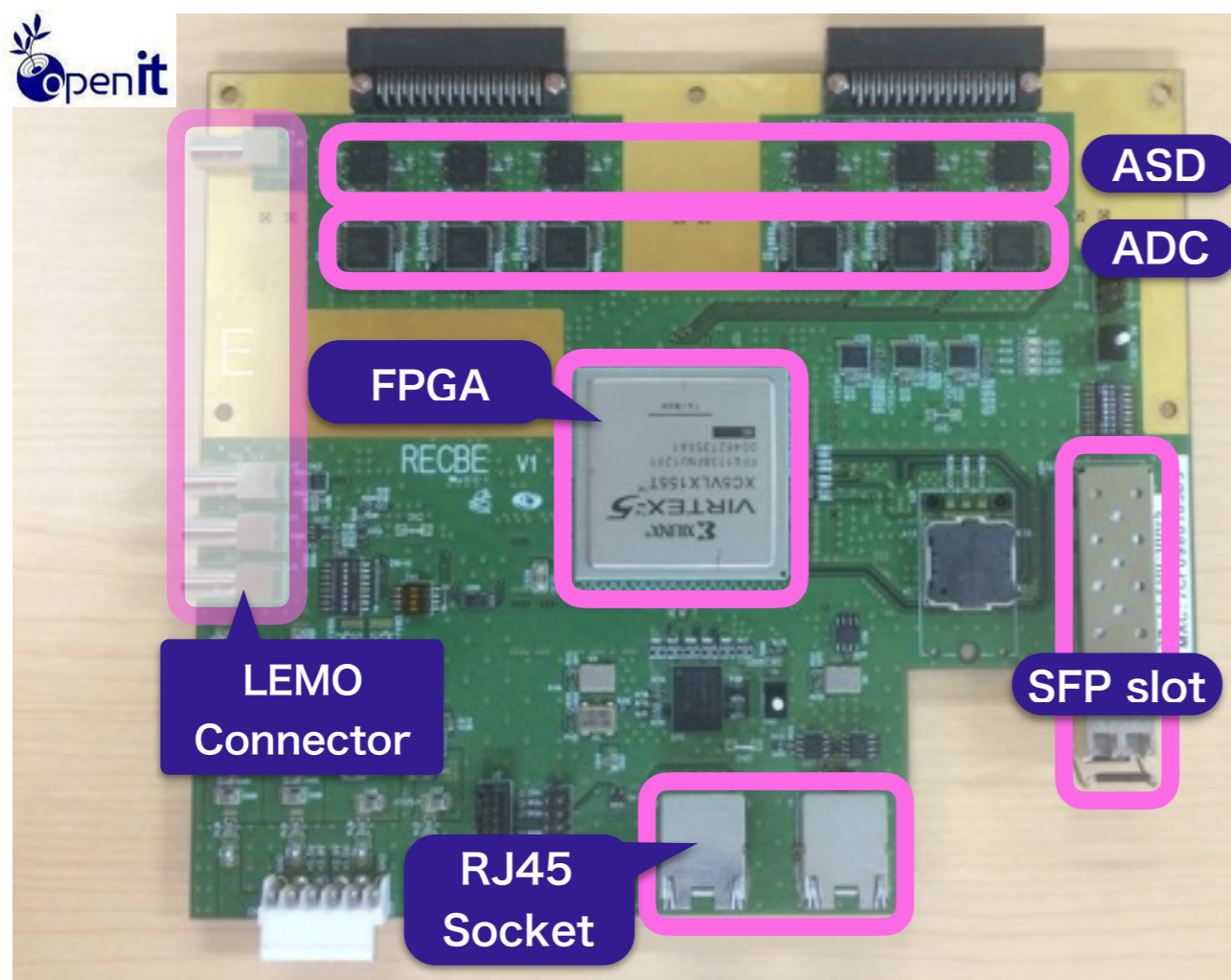
Cylindrical Drift Chamber

用途：飛跡再構成による電子の運動量検出

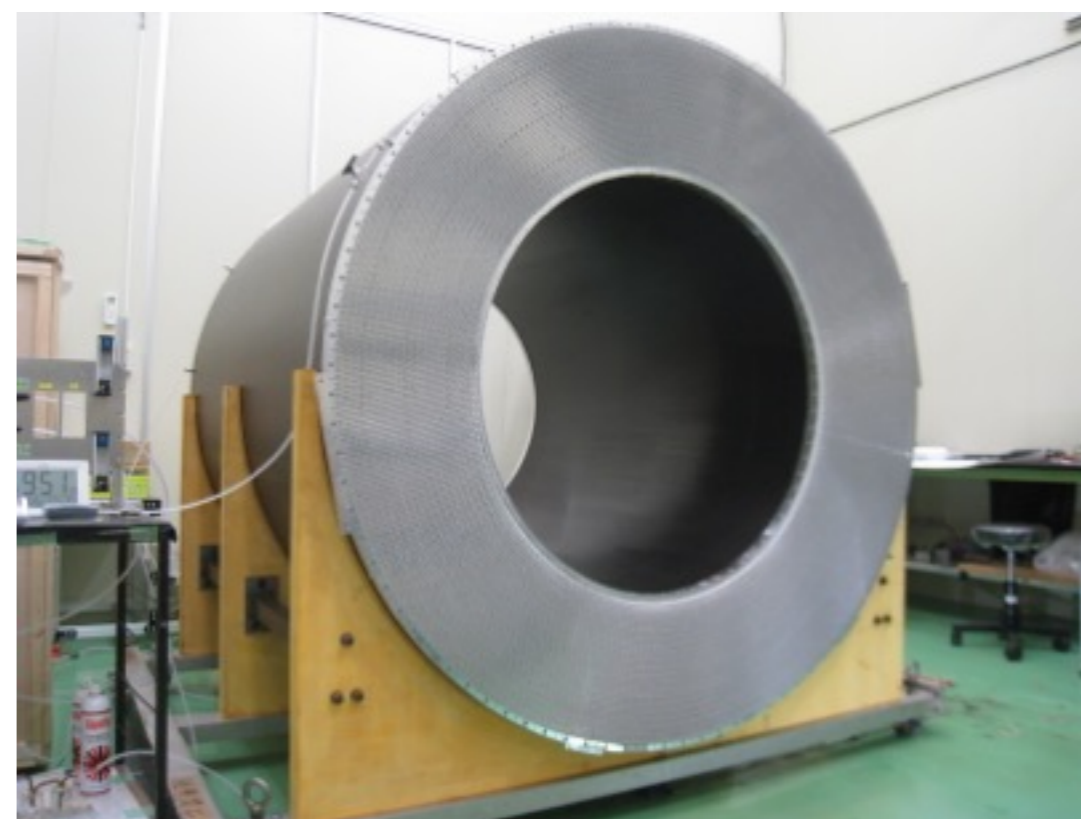
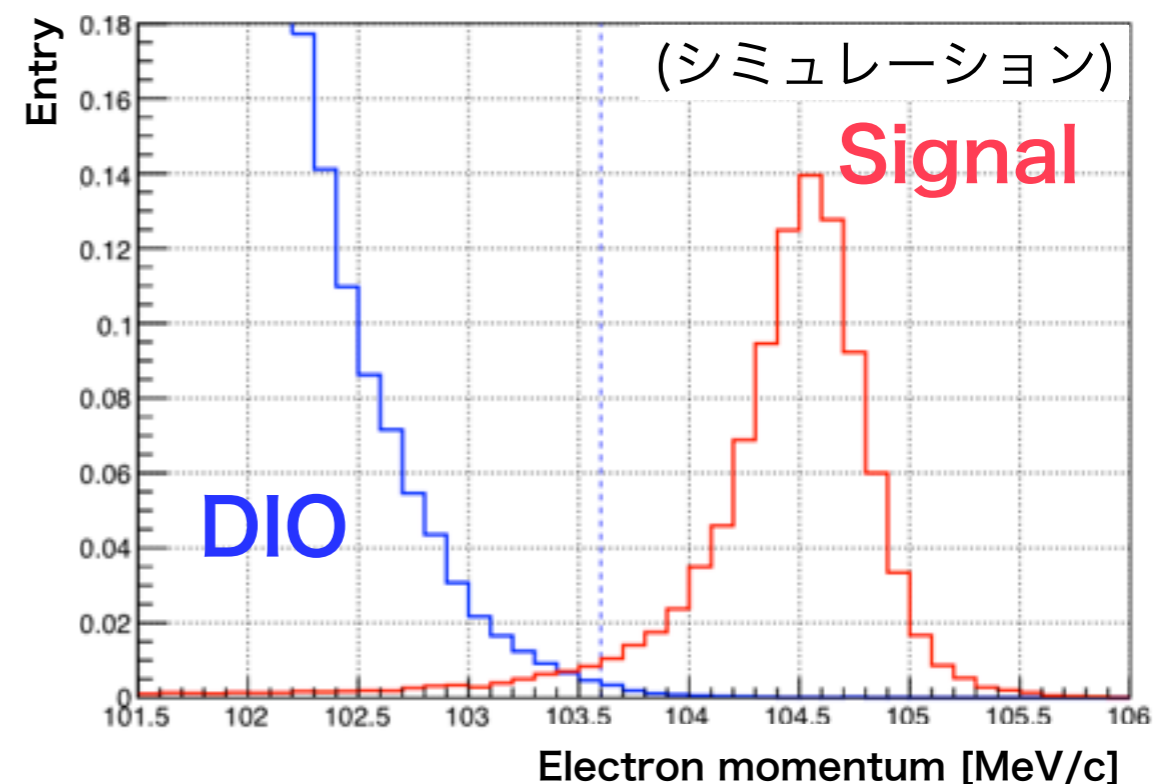
- ・ DIO電子は反跳効果により100MeV/c程度の運動量を持ちえる
- ・ 運動量分解能： $< 200 \text{ keV/c}$ for 105 MeV electrons

読み出し回路：Readout Electronics for the Central drift chamber of the Belle II detector (RECBE)

- ・ RECBEはBelle-II グループが開発
- ・ 波形情報とタイミング情報の読み出し



CDCで再構成される電子の運動量分布



StrECAL

Straw Tube Tracker

用途：飛跡再構成による電子の運動量検出

- ・ 運動量分解能： $< 200 \text{ keV}/c$ for 105 MeV electrons

読み出し回路：Read Out Electronics for Straw Tube Instrument (ROESTI)

- ・ COMET独自で開発
- ・ 試作機バージョン3まで完成しており次が最終バージョン

Electron Calorimeter

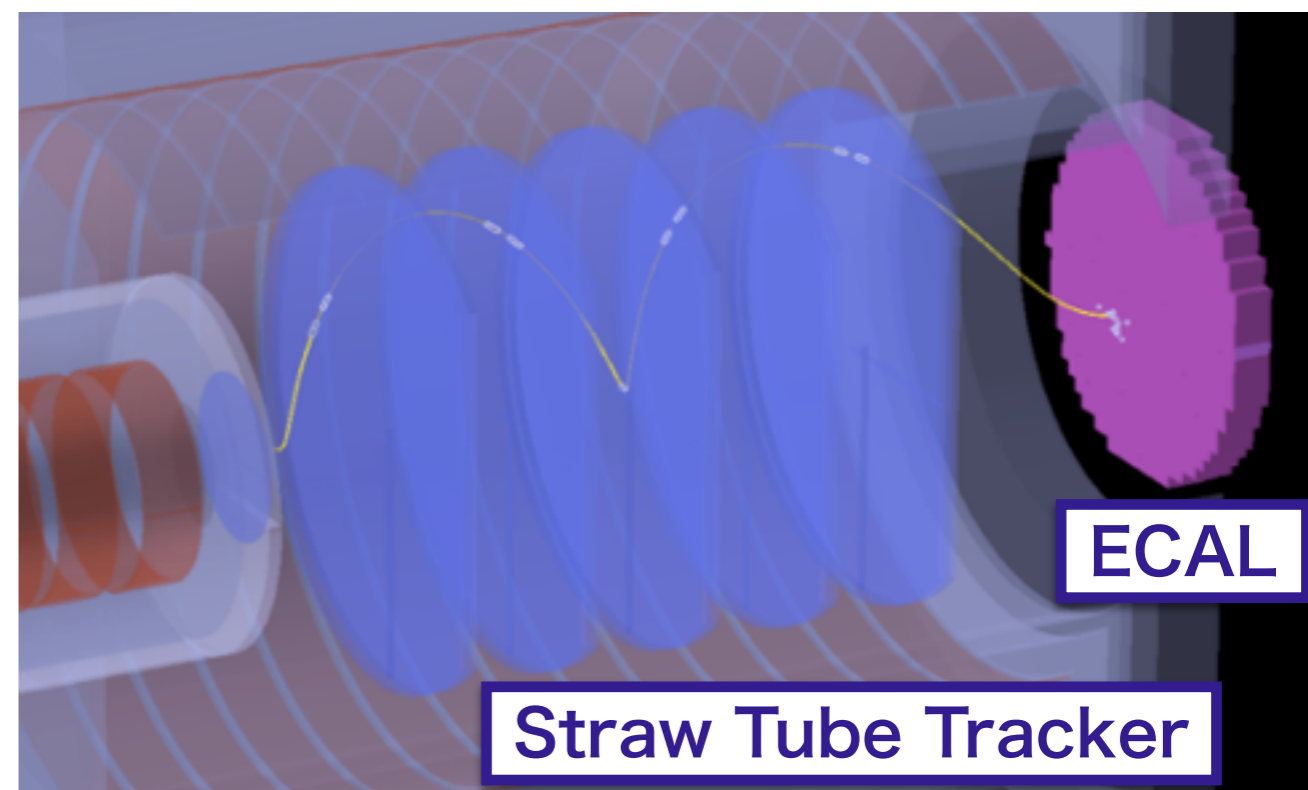
構成：LYSO結晶

- ・ エネルギー損失量から粒子識別 ($e/\mu/\pi$)

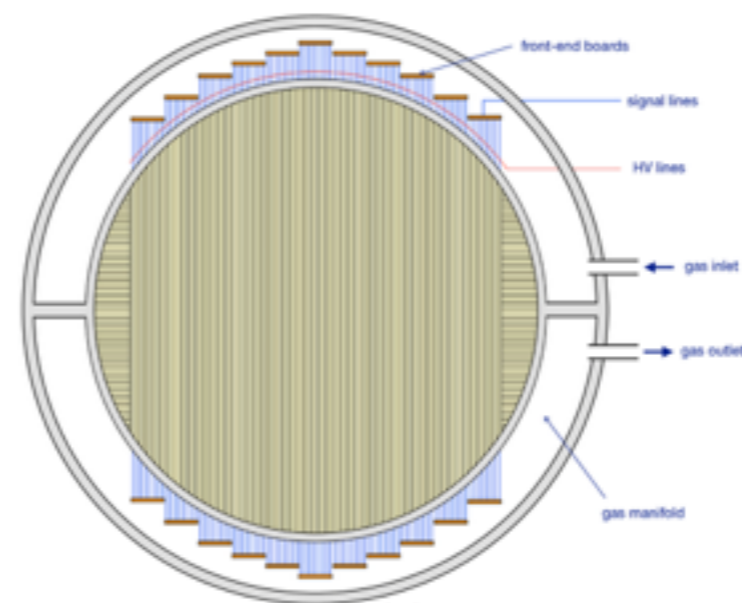
読み出し回路：ROESTI



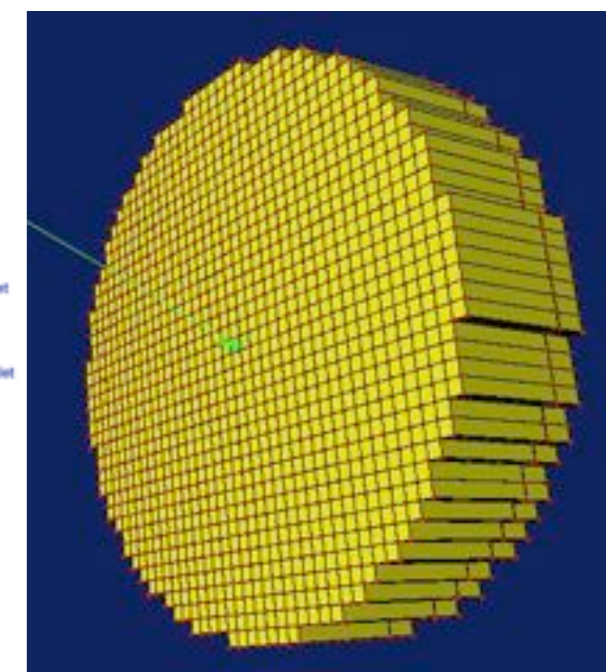
ROESTI version 3



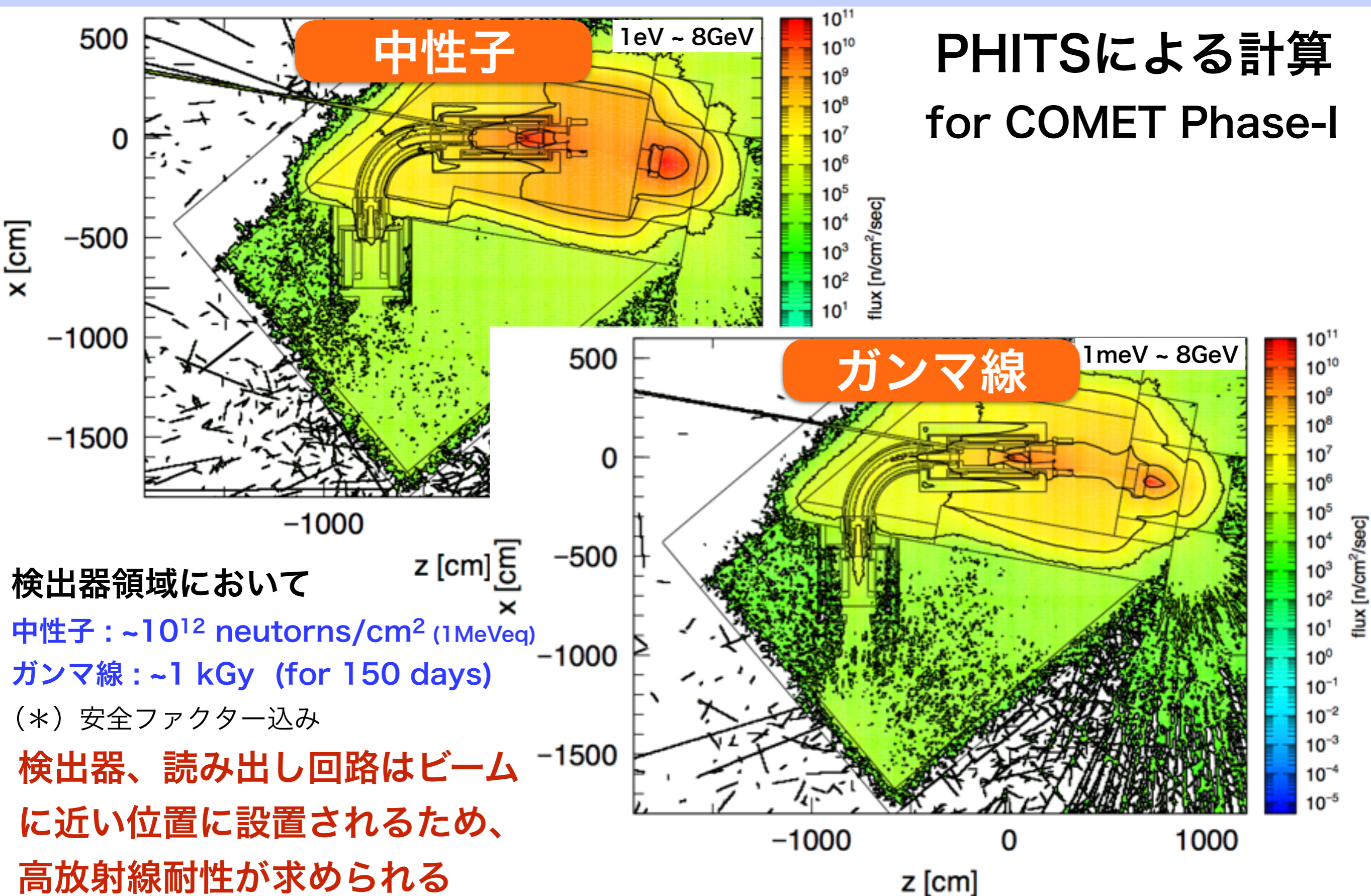
Straw Tube Tracker



Electron Calorimeter

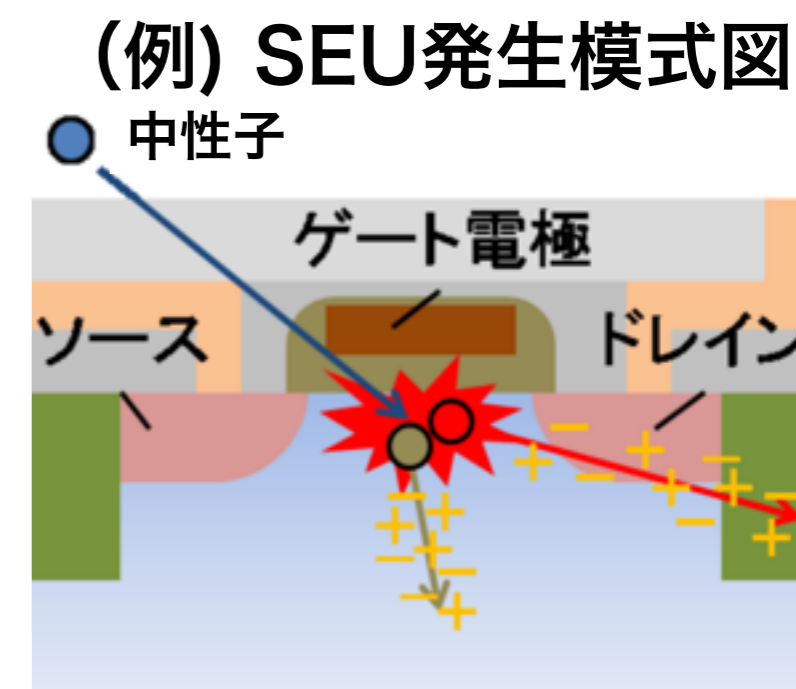


COMET Phase-Iにおける放射線量



放射線による影響と対策

- FPGAファームウェアやデータの破損：**Single Event Upset (SEU)**
 - ・ **中性子**と半導体原子の核反応により荷電粒子が生成される。
 - ・ これらが半導体内でドリフトすることにより電子正孔対が論理反転を引き起こす。
 - ・ 主な発生箇所
 - Configuration RAM：回路構成を決定するRAM
 - Block RAM：一時的にデータを保管するRAM
 - ・ 誤り訂正符号を使って修復
 - 修復不可能なエラー：**Unrecoverable Error (URE)**
 - UREはファームウェアの再ダウンロードで修正
 - **Error rate調査、FPGAファームウェアの改良**
- Si半導体のハード損傷：**Type Inversion**
 - ・ **中性子**との衝突で荷電粒子が発生する。
 - ・ これによってできる不純物によりN型、P型が反転する。
 - **耐性を持つパーツの選定**
- 半導体素子の劣化：**Total Ionizing Dose Effect (TID)など**
 - ・ 多量の**ガンマ線**が半導体内において電離作用を引き起こす。
 - ・ 生成された電荷が固定電荷などを形成することで半導体素子を劣化させる。
 - **耐性を持つパーツの選定**



安部晋一郎（九州大学）修士論文

放射線耐性の調査対象

放射線による影響渡合を確認するため、以下の部品において中性子、ガンマ線による放射線耐性試験を実施した。

		中性子	ガンマ線	調査目的
CTH Front-end	Regulators	done	done	選定
	DAC	done	done	選定
	Fine-mesh PMT	done	done	評価
COTTRI	FPGA	done	not yet	ファームウェア改良
	ADC	not yet	done	選定
RECBE	FPGA	done	not yet	ファームウェア改良
ROESTI	FPGA	done	done	ファームウェア改良
	ADC	done	done	選定
	DAC	not yet	done	選定
	Regulators	not yet	done	選定
ECAL	Preamplifier	done	not yet	評価
	APD	done	not yet	選定

放射線耐性試験

照射施設

TANDEM加速器 @神戸大学

ビーム：~3 MeV 重陽子

標的：Be (径20 mm)

中性子強度： 1.6×10^8 neutrons/sr

(*) 2016年7月：産総研やKEK RIグループの人と測定、現在解析中

試験実績

- ・ 2014年12月
- ・ 2015年7月
- ・ 2016年1月
- ・ 2016年3月
- ・ 2016年7月



高崎量子応用研究所

線源：Co-60

ガンマ線強度：15Gy/h @60cm

利用月：2015年1月

東京工業大学RIセンター

線源：Co-60

ガンマ線強度：191Gy/h @40cm

利用月：2016年6月

九州大学 加速器・ビーム応用科学センター

線源：Co-60

ガンマ線強度：1.4 kGy/h @10cm

利用月：2016年

(2013年8月)

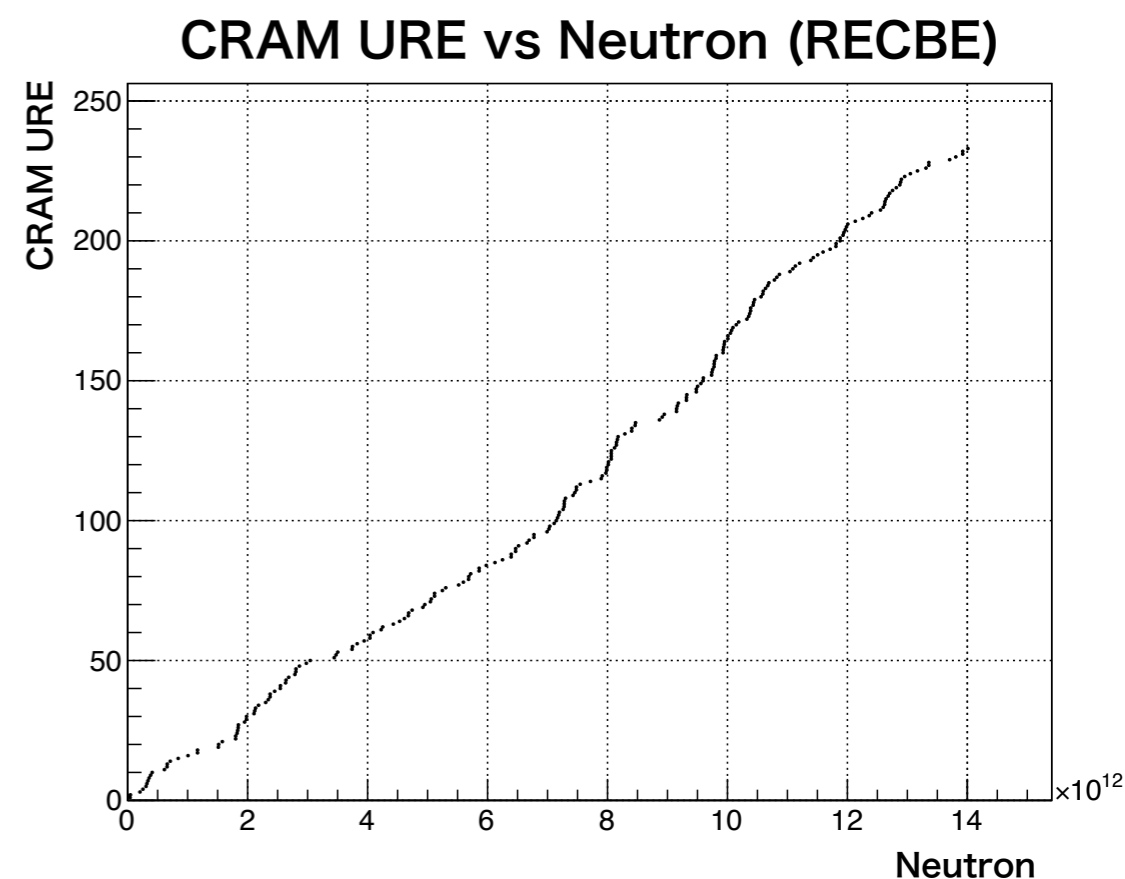
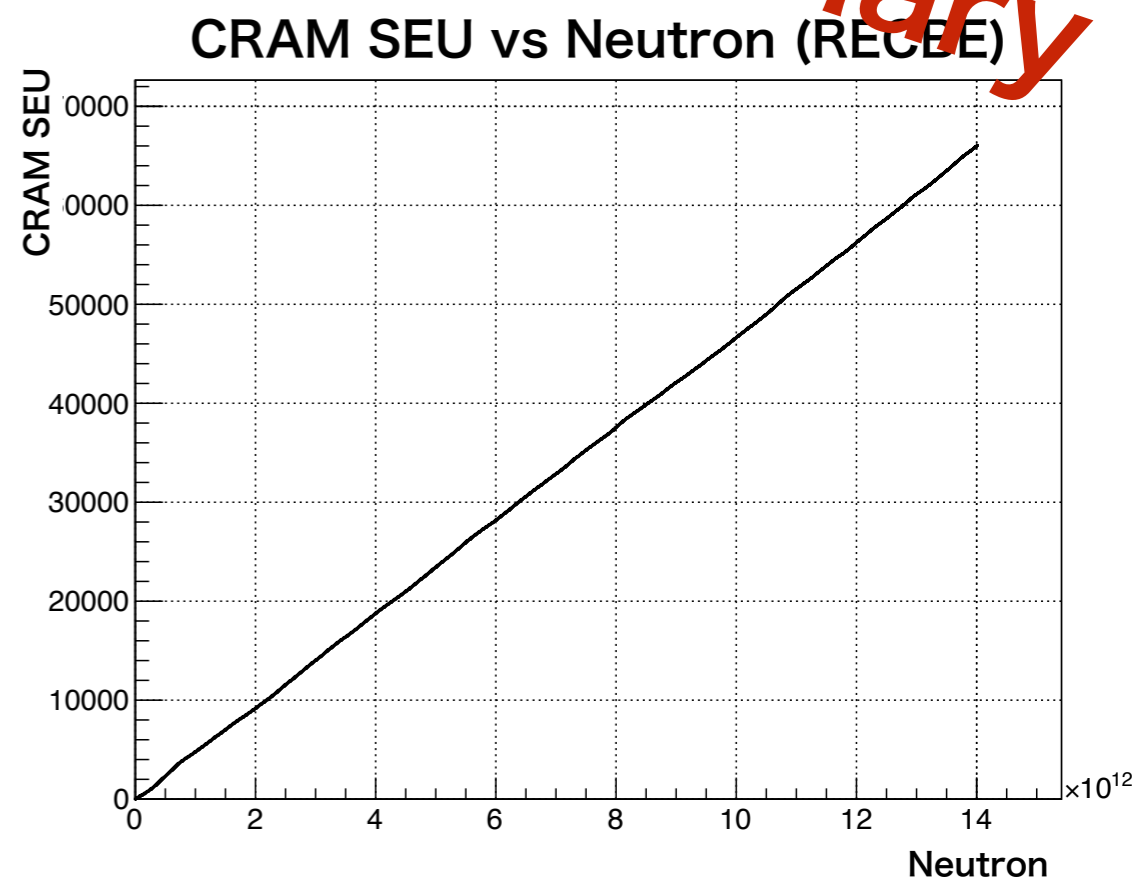


東京工業大学RIセンター

FPGA

Preliminary

- 中性子照射量 : $>10^{12}$ n/cm²
- 照射対象
 - COTTRI : Artix-7 (XC7A200T-2FFG1156C)
 - RECBE : Virtex-5 (XC5VLX155T)
 - ROESTI : Artix-7 (XC7A200T-FBG676-2)
- 試験結果 : 永久的な損傷は確認されなかった
 - COTTRI、ROESTIと比べRECBEは割合が一桁異なる
→ Artix-7とVirtex-5のテクノロジーの違いやチップの使用領域の違いが考えられる
- 課題 : ファームウェアのさらなる改良 や 遮蔽



	SEU Rate*	URE Rate*	URE Rate for Phase-I*
COTTRI	4.8×10^{-8}	1.3×10^{-10}	~1/20
RECBE	4.0×10^{-9}	1.1×10^{-11}	~1/13
ROESTI	4.0×10^{-8}	1.6×10^{-10}	~1/16

* Error Rate : Error/neutrons

** URE Rate for Phase-I : URE/hours

Regulators

- 中性子照射量 : $>10^{12}$ n/cm² (CTH用のみ) ガンマ線照射量 : > 1 KGy

- 照射対象

CTH : (pos) LM317、LM2941、LT3086

(neg) LM2991、LM337

ROESTI : (pos) LTM8023、LT3086、LMZ10503

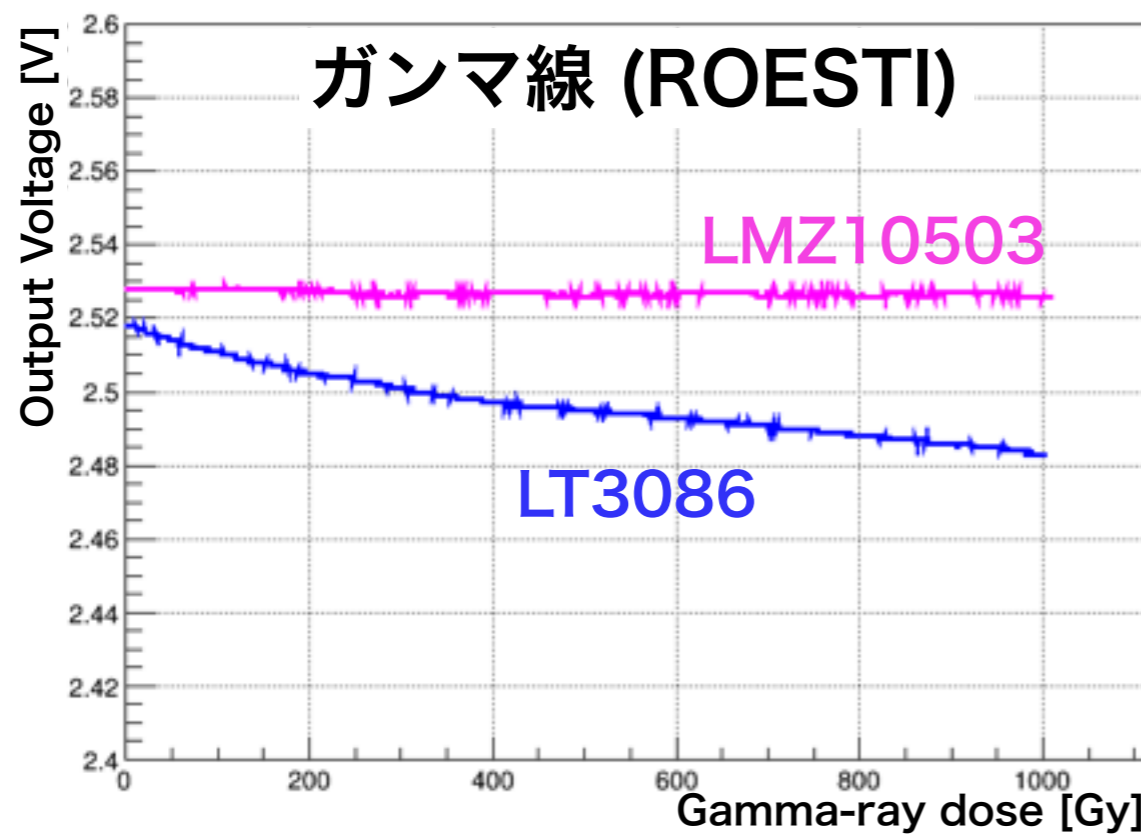
- 試験結果 (優位な破損が確認されなかったもの)

CTH : (pos) LM2941、(neg) LM337

ROESTI : (pos) LT3086 (許容範囲の出力電圧変化)

(pos) LMZ10503

この結果を踏まえてCOTTRI用Regulatorを選定予定



中性子 (CTH)

	Before [V]	After [V]	Ratio
LM317	+4.970	+4.850	97.6% △
* LM294	+5.047	+5.005	99.2% ○
* LT3086	+4.968	+4.935	99.4% ○
LM299	-5.005	-4.862	97.1% △
* LM337	-5.089	-5.087	100% ○

ガンマ線 (CTH)

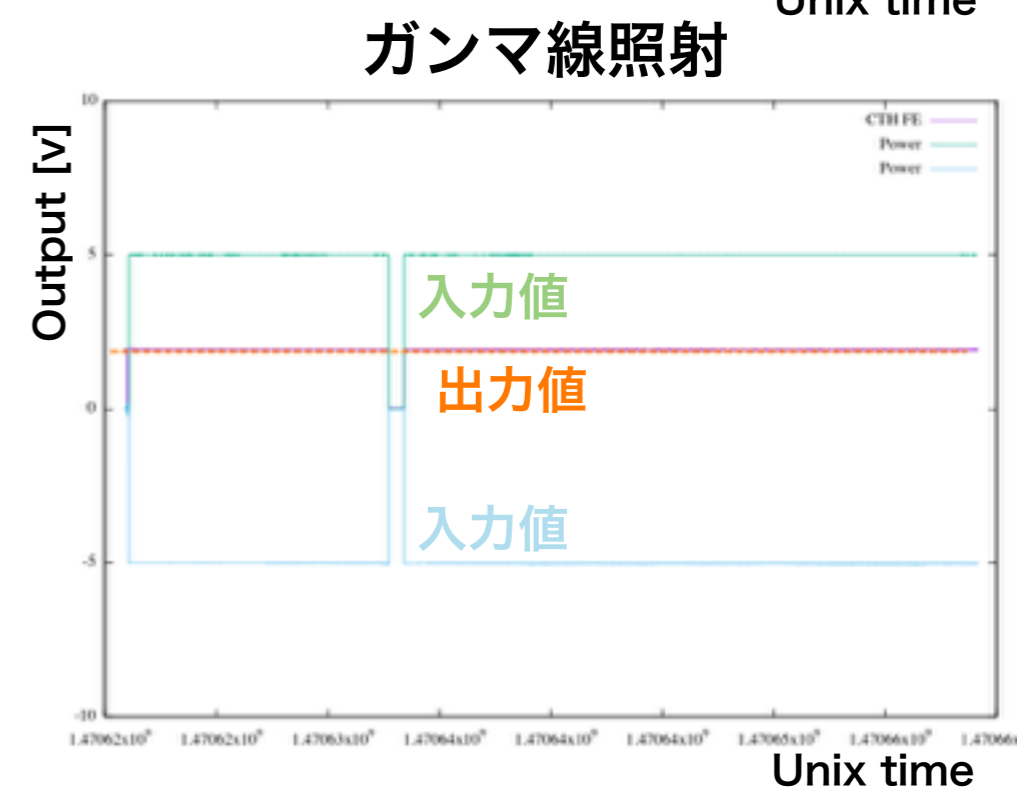
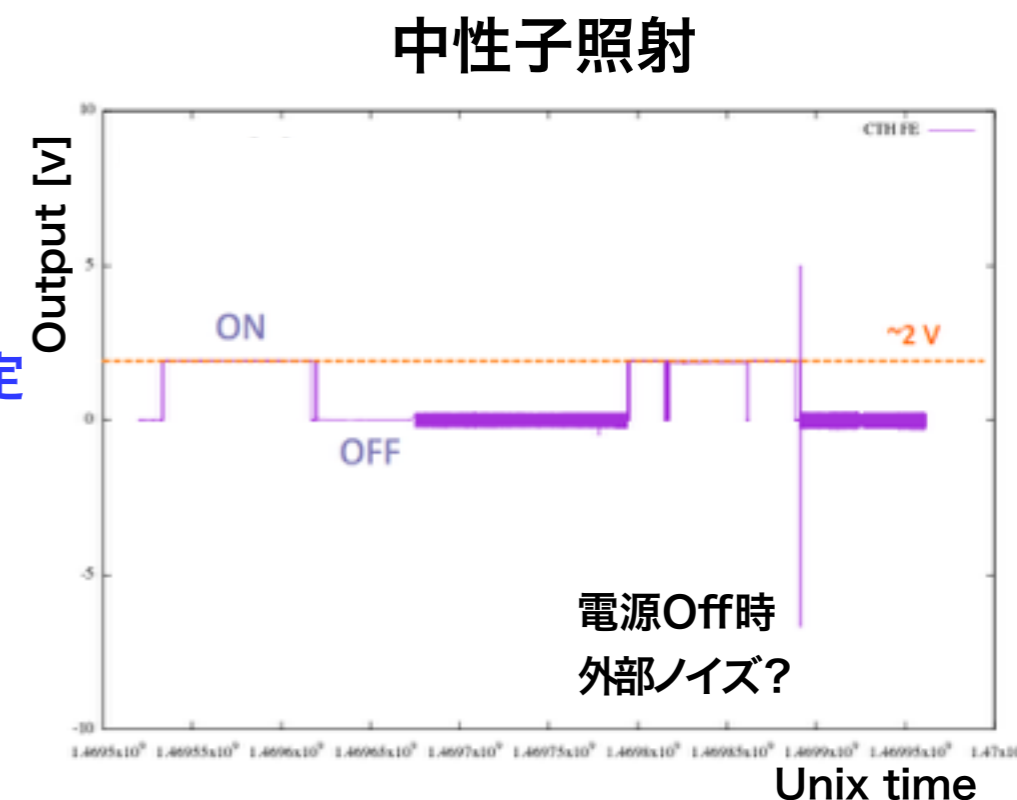
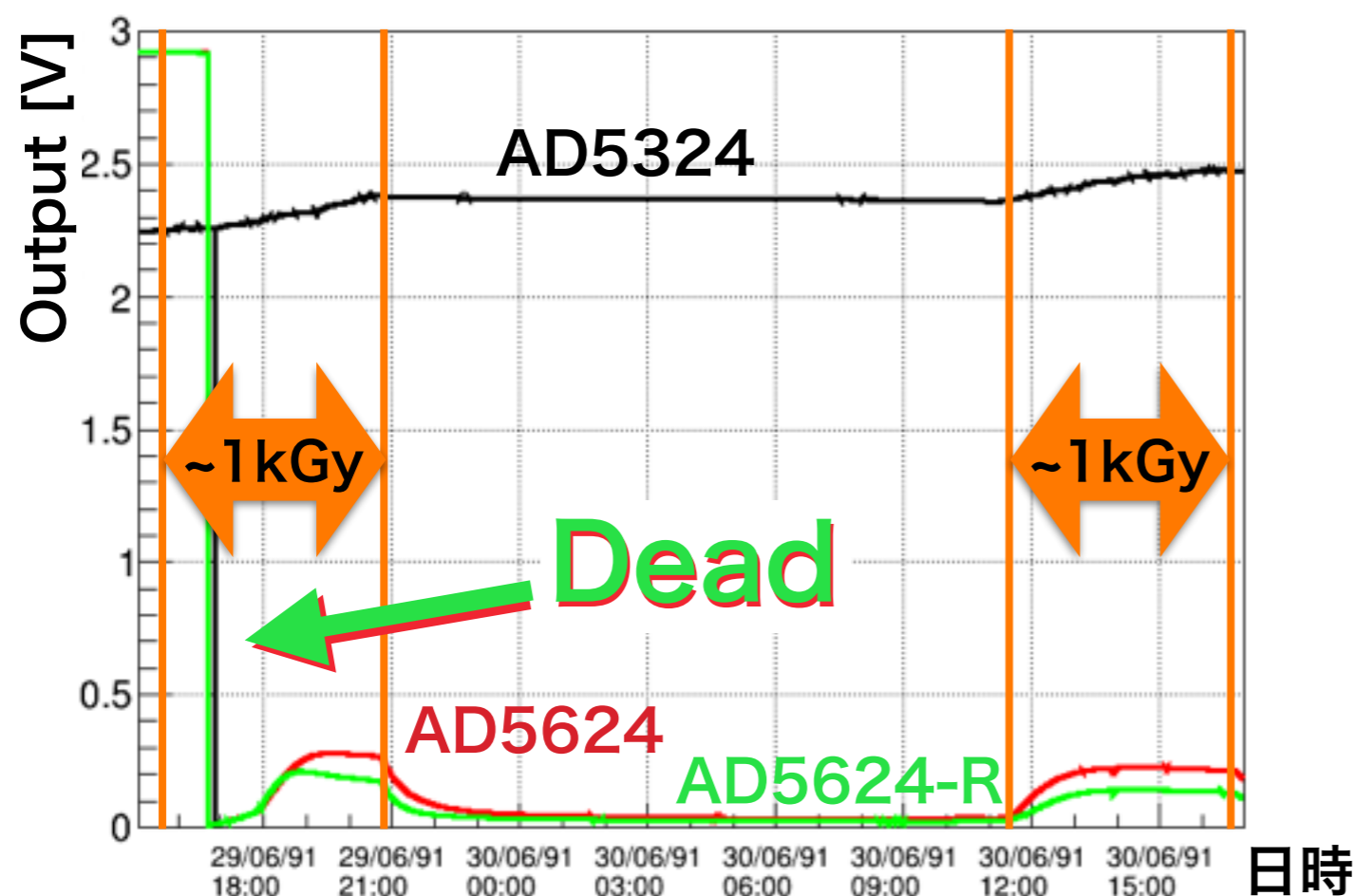
	Before [V]	After [V]	Ratio
* LM317	+4.994	+4.981	99.7% ○
* LM294	+5.083	+5.061	99.6% ○
LT3086	+4.954	+0.227	4.6% ×
LM299	-5.020	-0.657	13.1% ×
* LM337	-5.156	-5.153	99.9% ○

(Regulators) 過去のガンマ線試験

- 照射対象 : LMZ10503、LTM8023
- 試験場 : 高崎量子応用研究所 (2015年1月)
- 測定方法 : (左図同様) 出力値を確認
- 試験結果 : LMZ10503 survive
LTM8023 dead

DAC

- 中性子照射量 : $>10^{12}$ n/cm² (CTH用のみ) ガンマ線照射量 : > 2 KGy
- 照射対象
 CTH : MCP41050, microchip
 ROESTI : AD5324、AD5624、AD5624R
- 試験結果 (優位な破損が確認されなかったもの)
 CTH : 出力値が安定していることから、MCP41050を使用予定
 ROESTI : AD5324は出力電圧の変化があったものの許容範囲
- 課題 : AD5324の電圧変化を定量的に評価

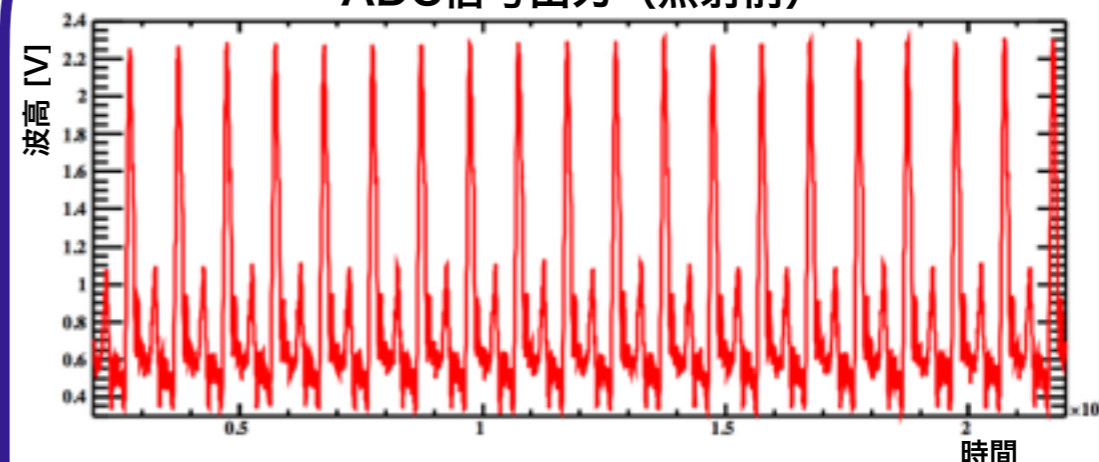


ADC

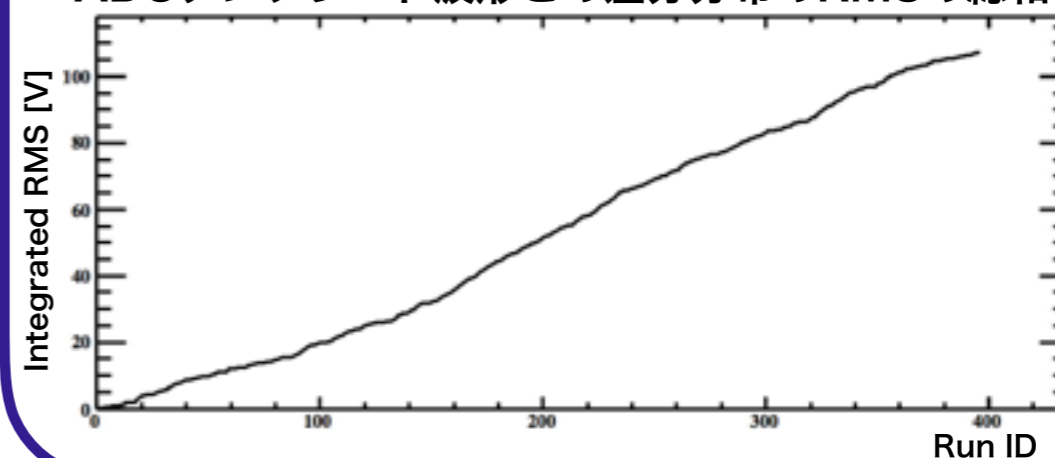
- **ガンマ線照射量** : 1 kGy
- **照射対象**
COTTRI : ADC (AD9287)
ROESTI : ADC (LTC2264)
- **ADCの評価方法**
照射前と照射中の出力値を比較し、差分分布をイベント毎に評価
AD9287 : 差分分布のRMSを積算
LTC2264 : 差分分布の平均値をプロット
(誤差はガウスフィットの σ)
- **試験結果**
両サンプル共に明らかな劣化は確認されず

COTTRI (AD9287)

ADC信号出力 (照射前)

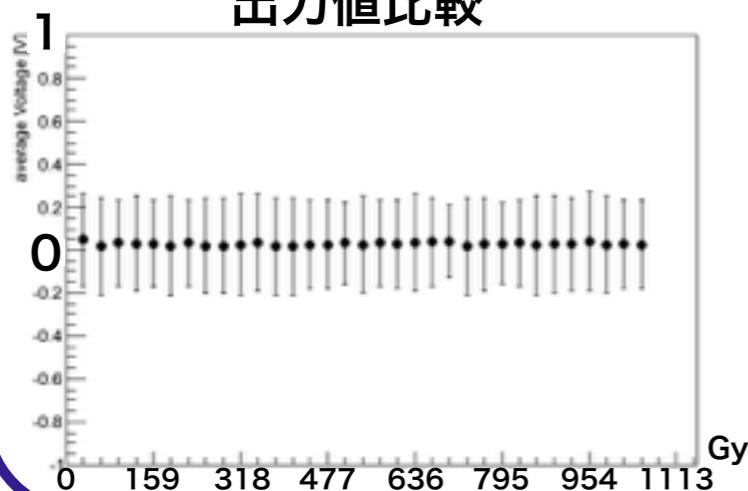


ADCテンプレート波形との差分分布のRMSの総和

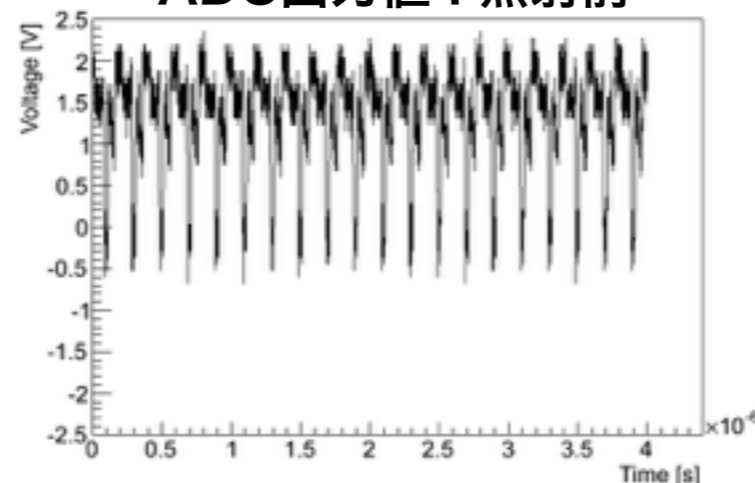


ROESTI (LTC2264)

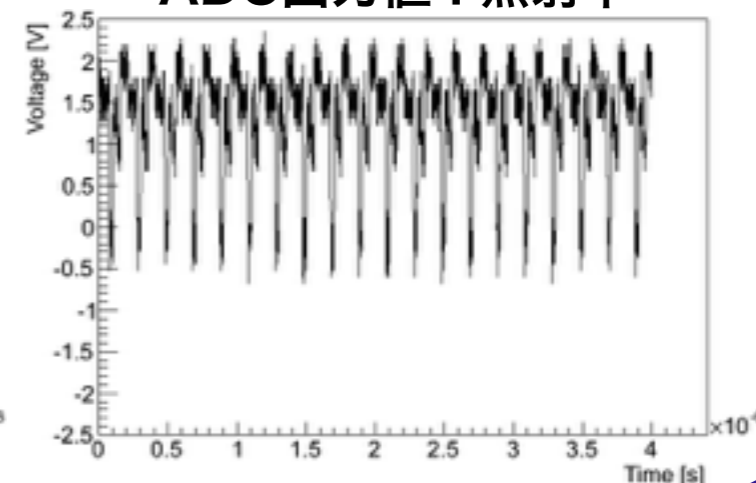
出力値比較



ADC出力値 : 照射前

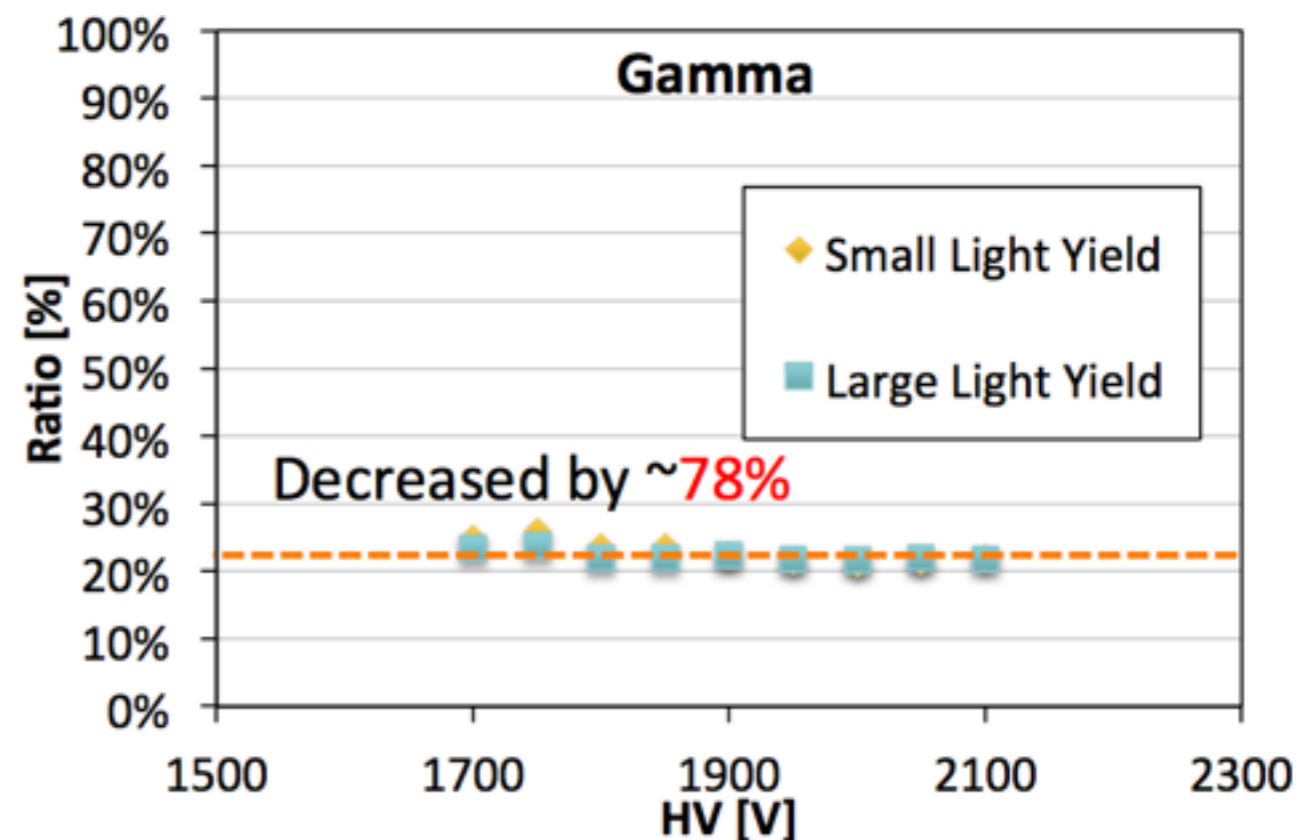
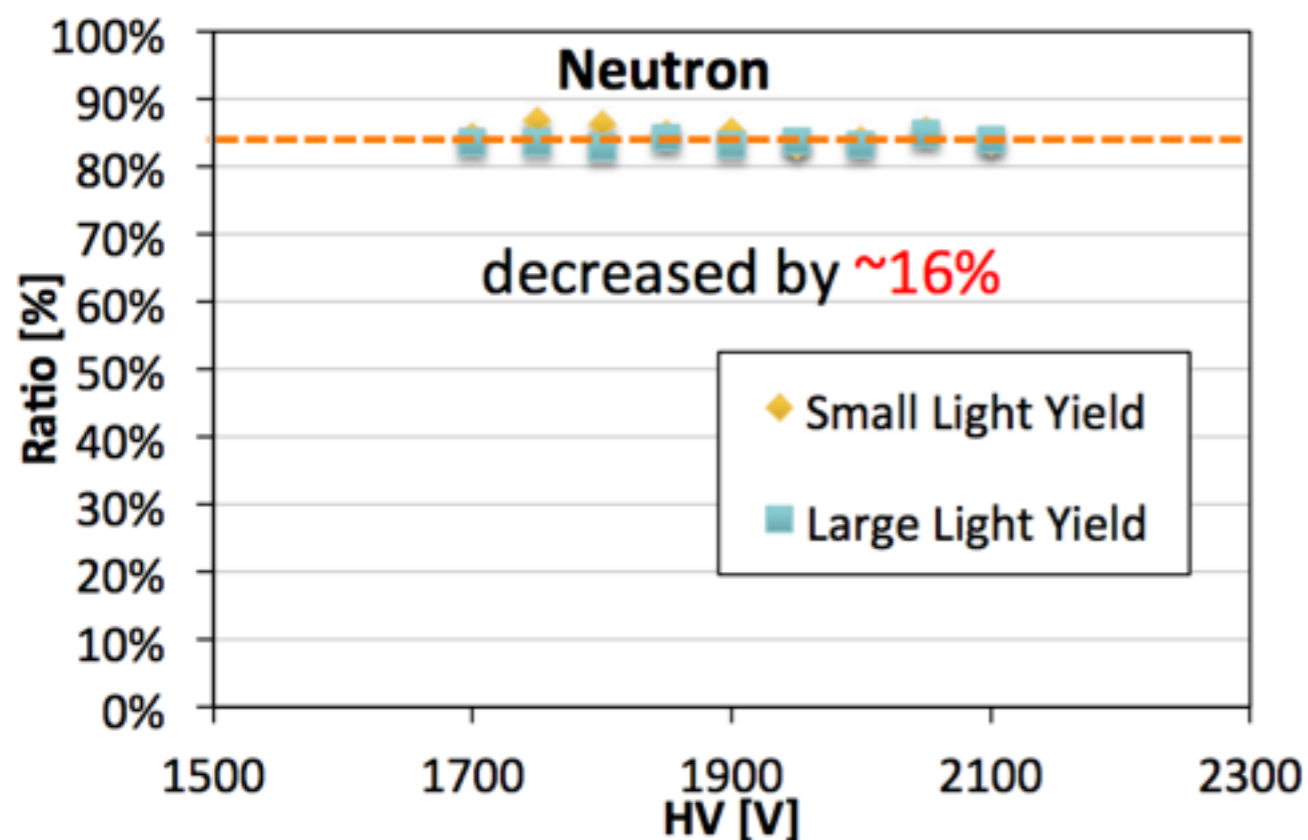


ADC出力値 : 照射中



Fine-mesh PMT

- 中性子照射量 : $> 10^{12}$ n/cm² ガンマ線照射量 : > 2 kGy
- 照射対象 : Hamamatsu、H8409-70
- 比較方法 : 照射前後でLEDの光を当て、出力値を比較
(LEDからの光量はMPPPCで調整)
- 試験結果 : **ガンマ線により大きく損傷**
- 課題 : 遮蔽が必要



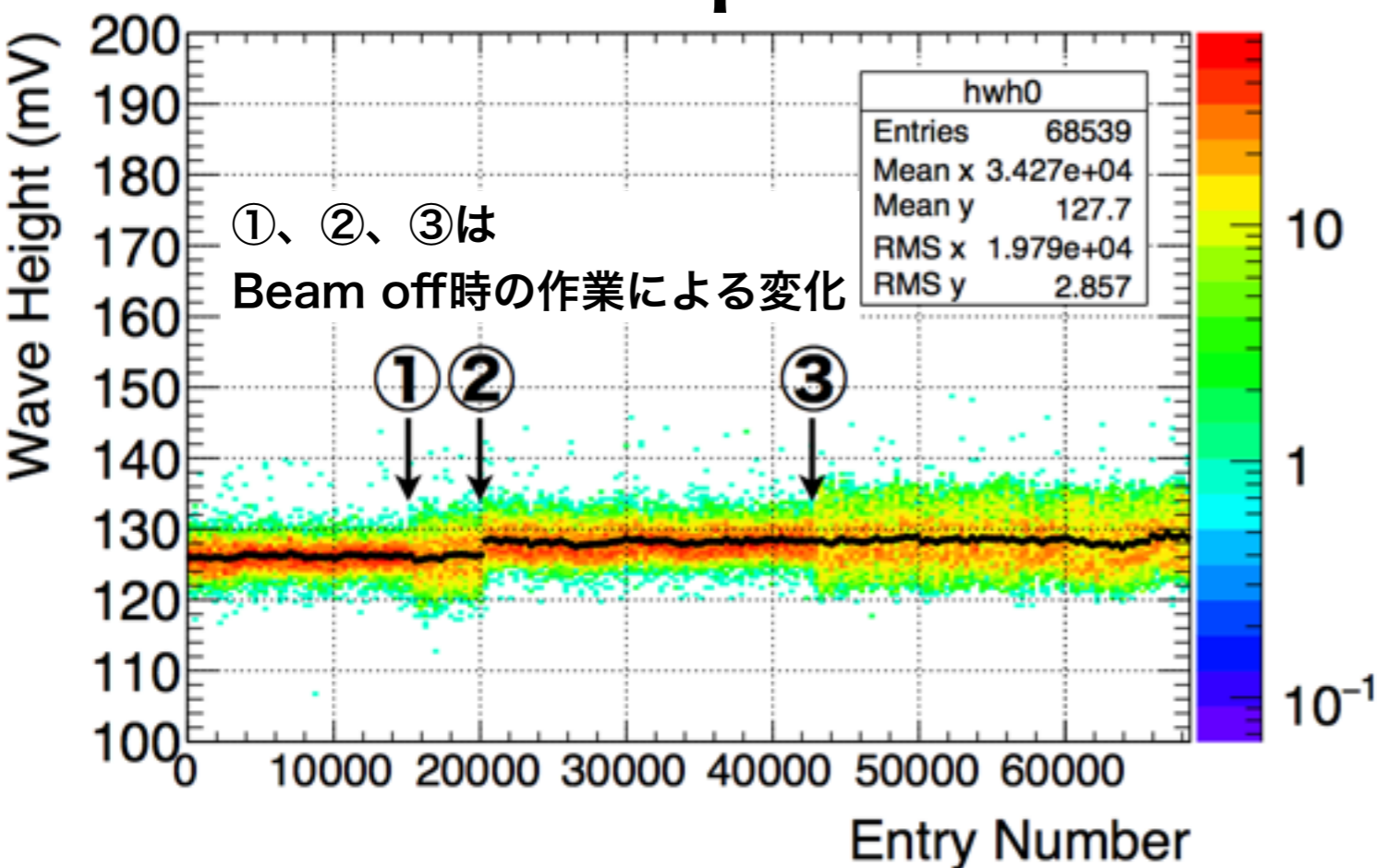
Preamplifier、APD

- 中性子照射量 : $> 10^{12}$ n/cm² ガンマ線照射量 : not yet
- 照射対象 : (ECAL用) Preamplifier、5mm APD
- 試験結果

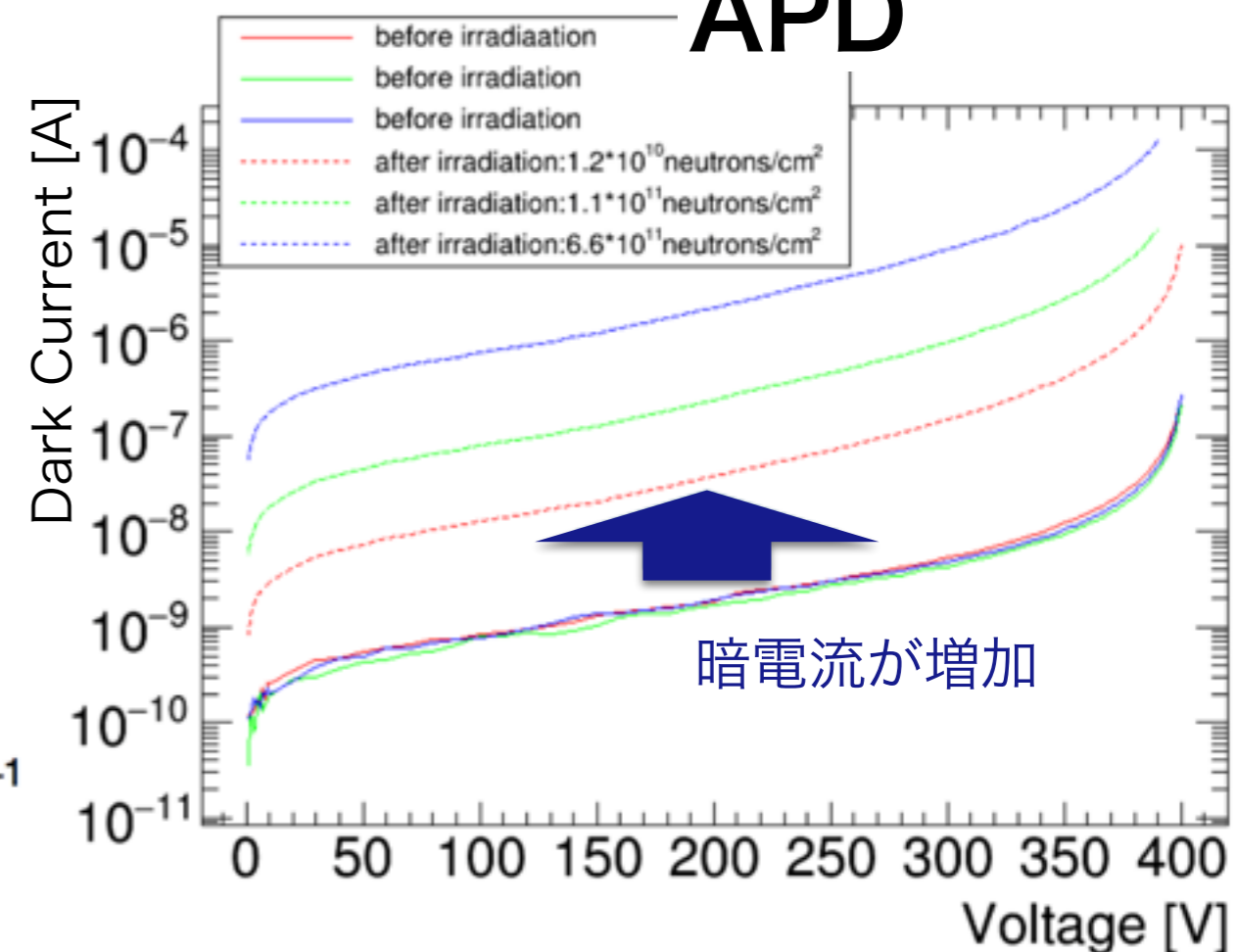
Preamplifier : 優位な損傷は確認されなかった

APD : 中性子照射により暗電流が増加したが、波形解析で補償可能

Preamplifier



APD



まとめ (パーツ毎測定結果)

● FPGA

Artix-7 (XC7A200T-2FFG1156C) for COTTRI : 永久的な損傷は確認されず (URE rate for Phase-I : ~1/20 hours)
(中性子)

Virtex5 (XC5VLX155T) for RECBE : 永久的な損傷は確認されず (URE rate for Phase-I : ~1/13 hours) (中性子)

Artix-7 (XC7A200T) for ROESTI : 永久的な損傷は確認されず (URE rate for Phase-I : ~1/1 hours) (中性子)

● Regulator

LM2941 (pos)、LM337 (neg) for CTH Front-end : 異常なし (中性子、ガンマ)

LT3086 for ROESTI : 許容範囲の出力電圧変化 (ガンマ)

LMZ10503 for ROESTI : 異常なし (ガンマ)

● DAC

MC41050 for CTH Fron-end : 出力値安定、異常なし (中性子、ガンマ)

AD5324 for ROESTI : 許容範囲の出力電圧変化 (ガンマ)

● ADC

AD9287 for COTTRI : 明らかな劣化は確認されず (ガンマ)

LTC2264 for ROESTI : ガンマ線による異常なし (ガンマ)

● Fine-mesh PMT

Hamamatsu H8409-70 for CTH Front-end : 大きく損傷 → 遮蔽が必要 (ガンマ)

● Preamplifier

Preamplifier for ECAL : 優位な損傷なし (中性子)

● APD

APD for ECAL : 中性子照射により暗電流が増加したが、波形解析で補償可能 (中性子)

まとめ

COMET実験

- AI原子中でのミュオン電子転換過程をS.E.S. 3×10^{-17} で探索 (2022年)
検出器 : Straw Tube Tracker、Electric Calorimeter
- 150日間の測定でS.E.S. 3×10^{-15} の感度を目指したCOMET Phase-I が2019年より開始
検出器 : Cylindrical Drift Chamber
- COMET Phase-I において検出器に要求する放射線耐性 (for 150 days)
中性子 : $\sim 10^{12}$ neutrons/cm²
ガンマ線 : ~ 1 kGy
- 読み出し回路に使用する各パーツが中性子やガンマ線により損傷
中性子 : SEU、Type Inversion ガンマ線 : Total Ionizing Dose Effect

放射線耐性試験

- 照射施設
中性子 : 神戸大学TANDEM加速器
ガンマ線 : 高崎量子応用研究所、東京工業大学RIセンター、九州大学
- 各回路パーツの選定、評価、改良を進めている
照射対象 : Regulators、DAC、Fine-mesh PMT、FPGA、ADC、Preamplifier、APD