



COMET実験における 計測システム開発の現状 (と今後)

2020.11.27

上野一樹 (KEK IPNS)

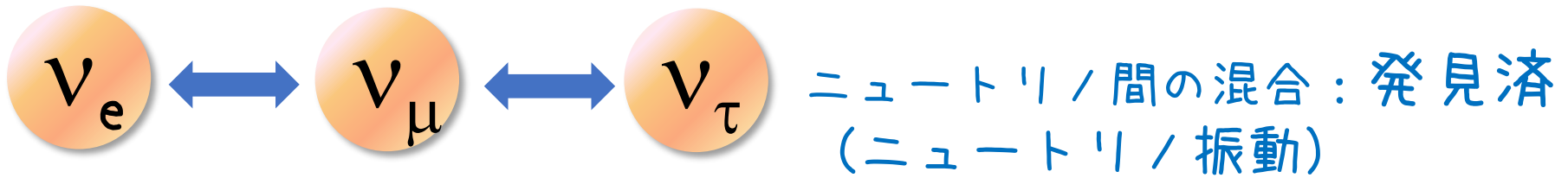
計測システム研究会2020@J-PARC

Outline

- イントロダクション
- COMET実験
- COMET計測システム
- 困難な点
- 今後
- まとめ

イントロダクション

Lepton Flavor Violation (LFV)



標準理論

荷電レプトン混合反応の分岐比 $\sim 0(-54)$ 観測不可能。。。

➡ 荷電LFVの発見 = 標準理論を超える物理

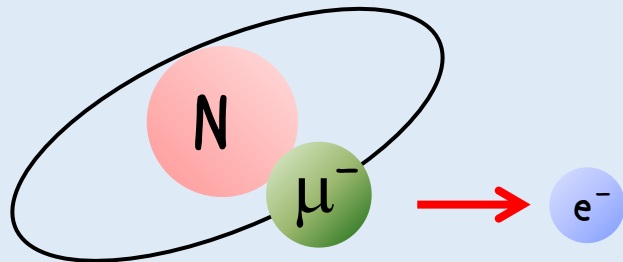
標準理論を超える模型 (ex. SUSY-GUT, SUSY-SEESAW)

分岐比 $\sim 0(-15)$ 観測可能！

イントロダクション

ミュオン電子転換事象 $\mu^- N \rightarrow e^- N$

シグナル

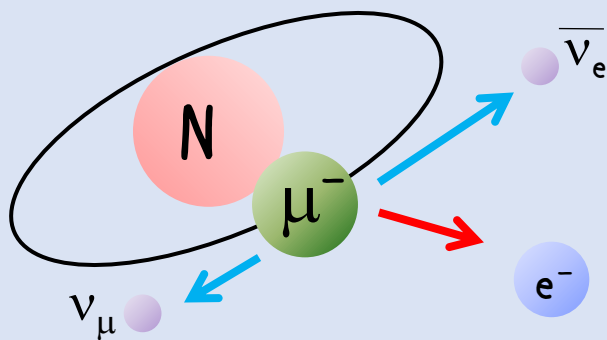


• 単一電子

$$E_e = m_\mu - B_\mu \sim 105 \text{ MeV (N=A1)}$$

• コヒーレント過程

BGs



• Decay in Orbit (DIO)

• Radiative π/μ -capture

• Decay in Flight (DIF)

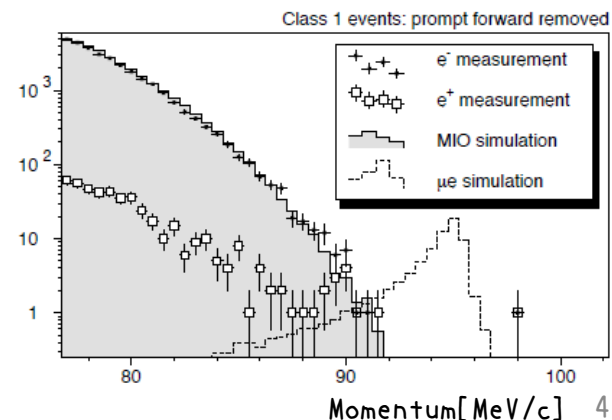
• Cosmic-rays など

分岐比上限値 $< 7 \times 10^{-13}$ (SINDRUM-II@PSI)

課題 ① ミュオンビーム大強度化

② 背景事象低減

③ 高分解能検出器開発

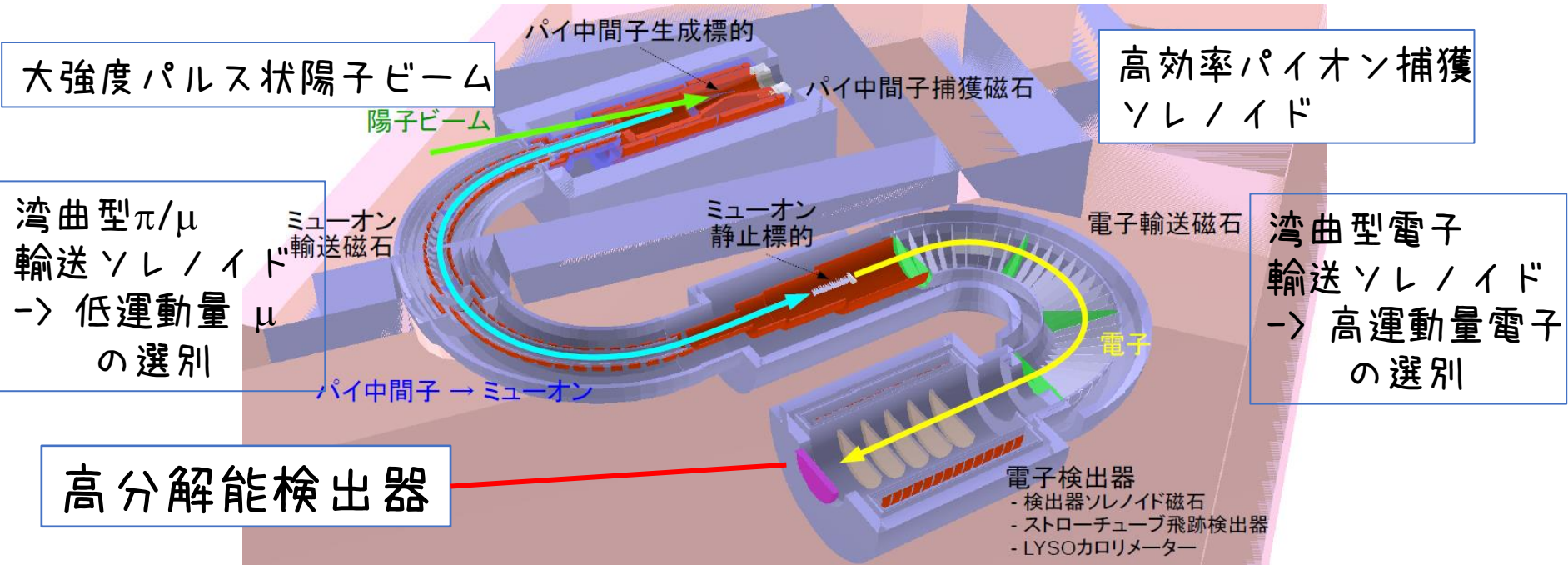
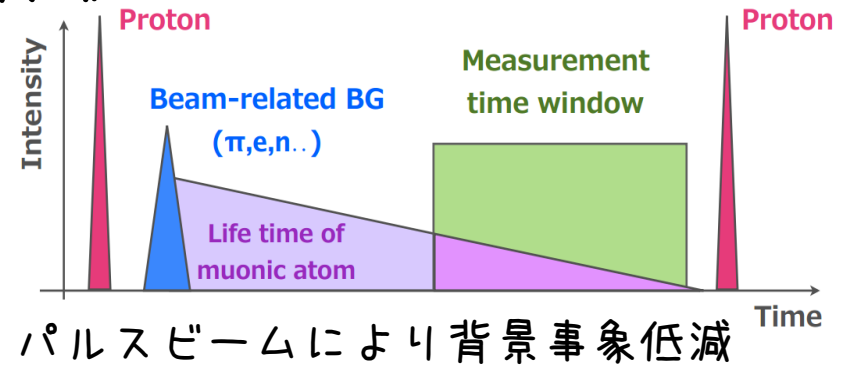


COMET実験

ミューオン電子転換過程探索実験@J-PARC

課題への対応

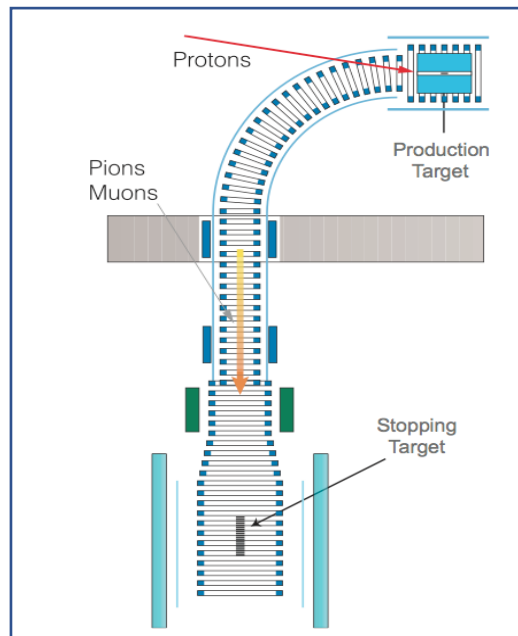
- ① J-PARCの大強度ビーム
- ② パルス化ビーム、輸送ソレノイド
- ③ 新たな高分解能検出器開発



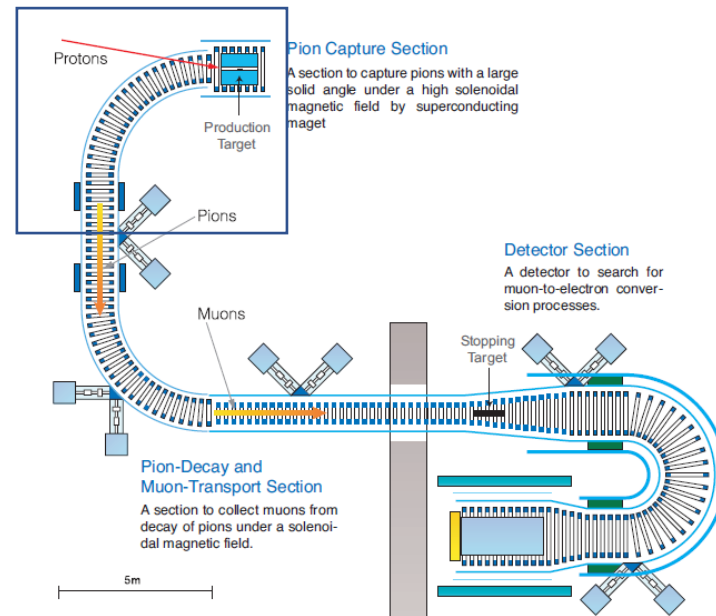
目標感度 : 3×10^{-17} (現状の10000倍)

COMET実験

ステージングアプローチ



Phase-I (2023)



Phase-II (202?-)

Phase-Iの目的

1. Phase-IIのためのR&D

ビーム診断 ⇒ Phase-II同様の検出器使用

2. ミューオン電子転換過程探索

実験感度 $O(-15)$ (現状の100倍) での探索 ⇒ 別の検出器使用

2種類の検出器システム

検出器1 : CyDet (Cylindrical Detector System)

CDC (Cylindrical Drift Chamber)

電子の飛跡検出により運動量測定

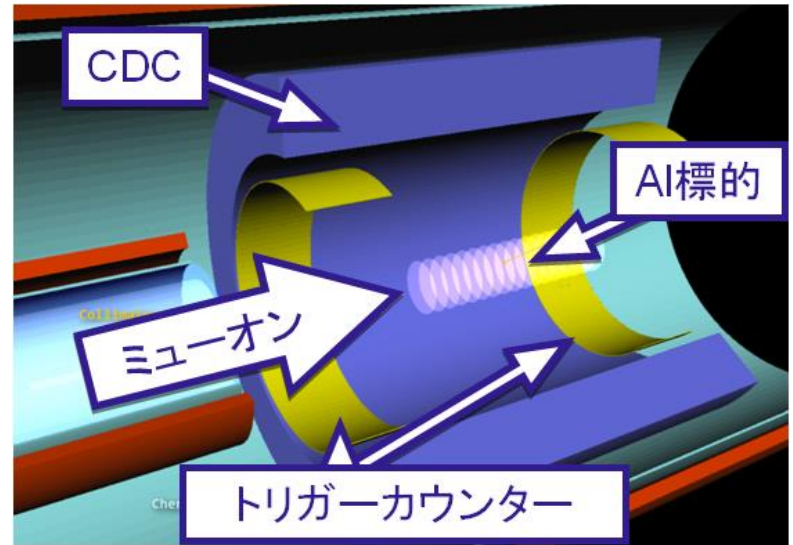
分解能 $< 200 \text{ keV}/c @ 105 \text{ MeV}/c$

CTH (Cylindrical Trigger Hodoscope)

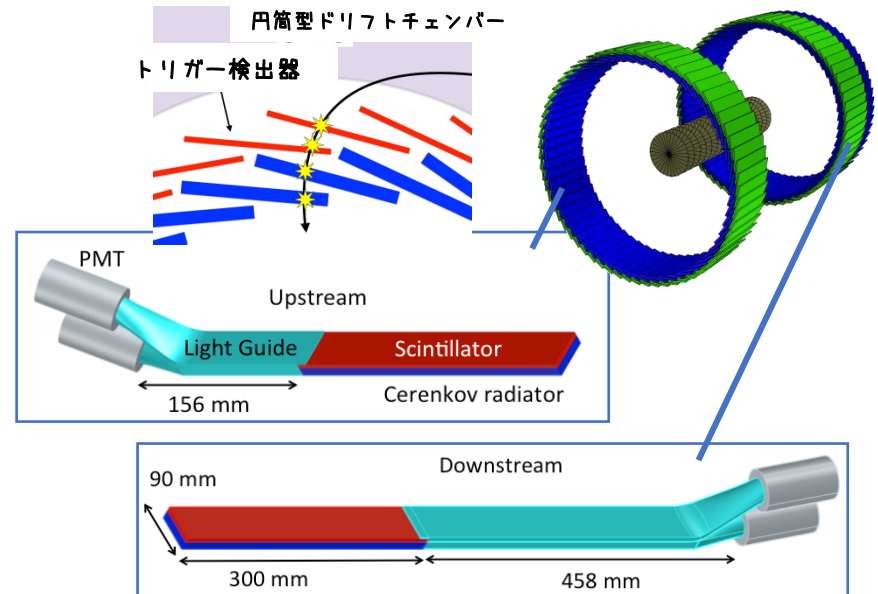
トリガー検出器

シンチレータ (+ チェレンコフ検出器)

光検出器 : Fine-mesh PMT or fiber+MPPC



CDC (実機)



CTH

検出器2 : StrECAL

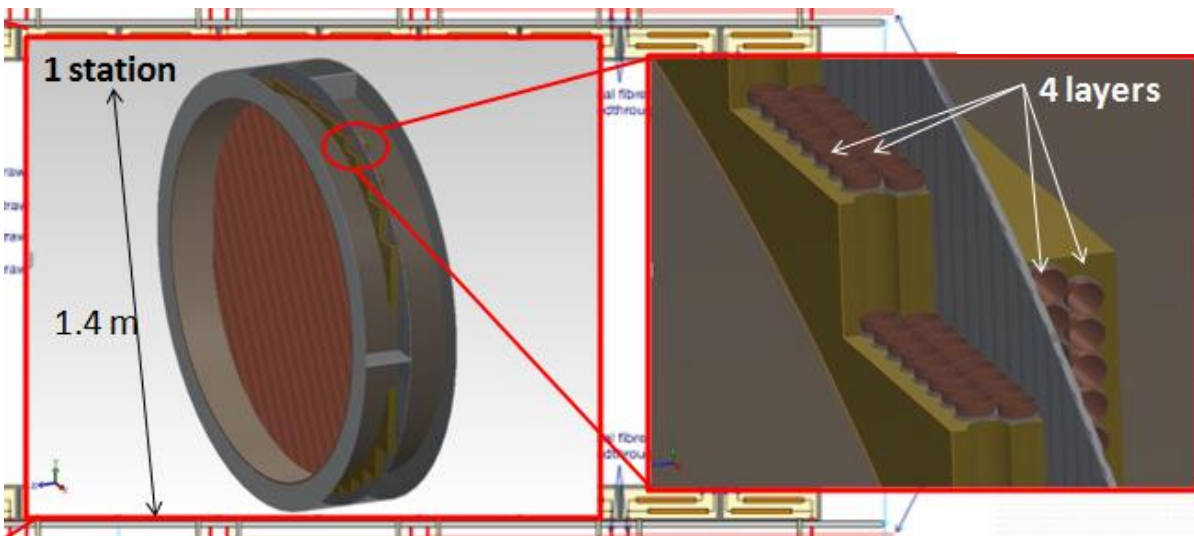
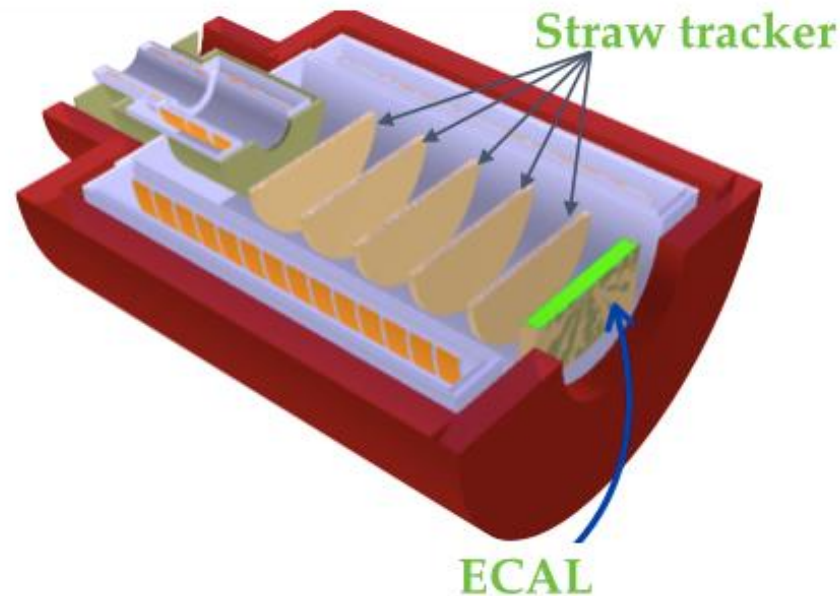
(Straw tube tracker + Electron calorimeter)

Straw tube tracker

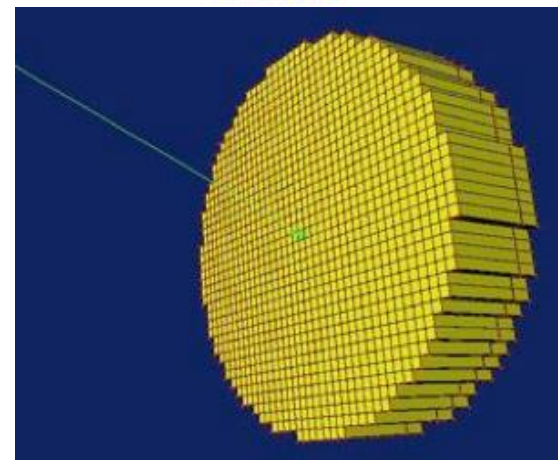
電子の飛跡検出により運動量測定
分解能 $< 200 \text{ keV/c} @ 105 \text{ MeV/c}$

Ecal (Electron Calorimeter)

LYSO + APD
エネルギー、タイミング、位置測定
トリガー生成、トラッキング補助、PID

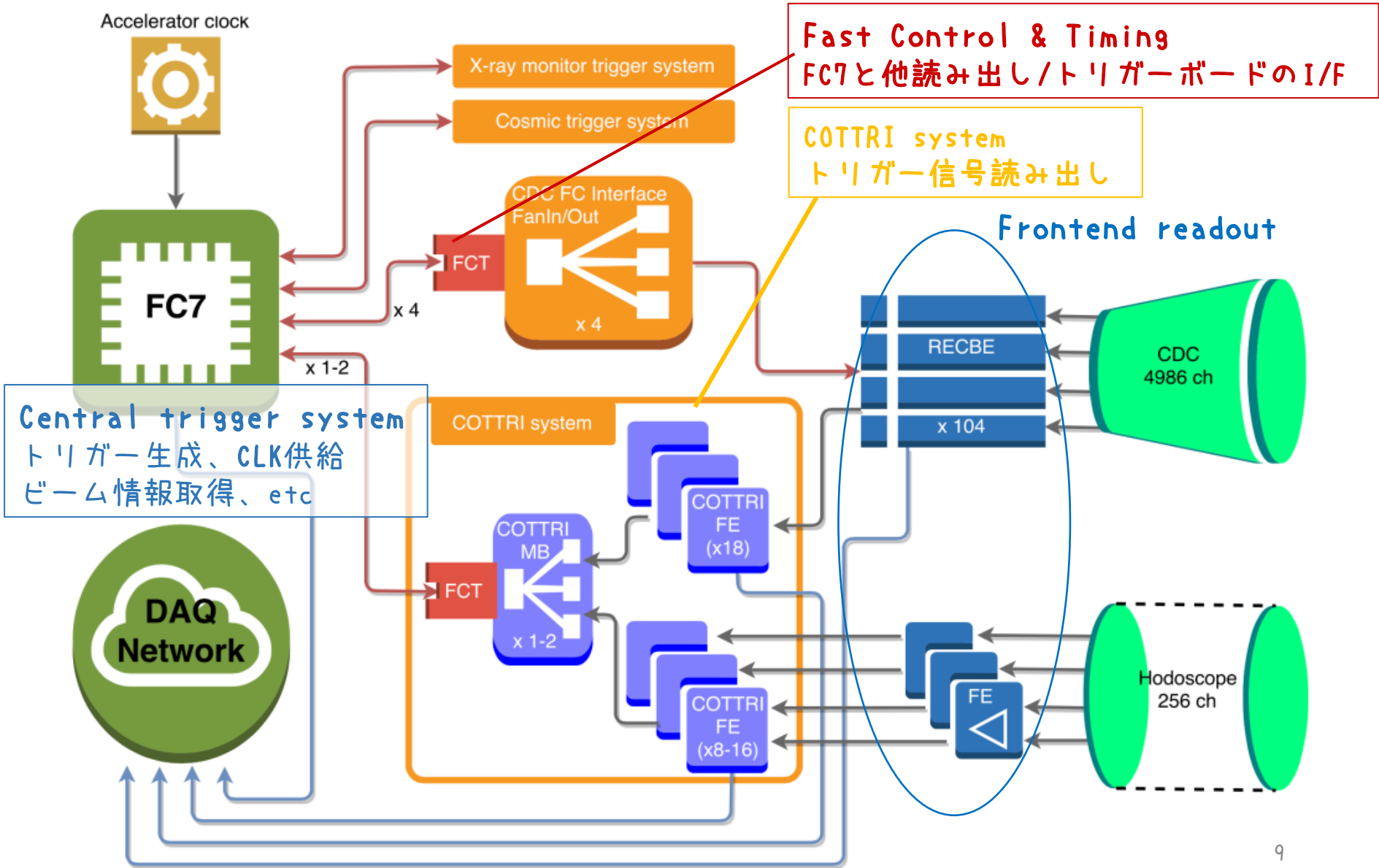


Straw tube tracker

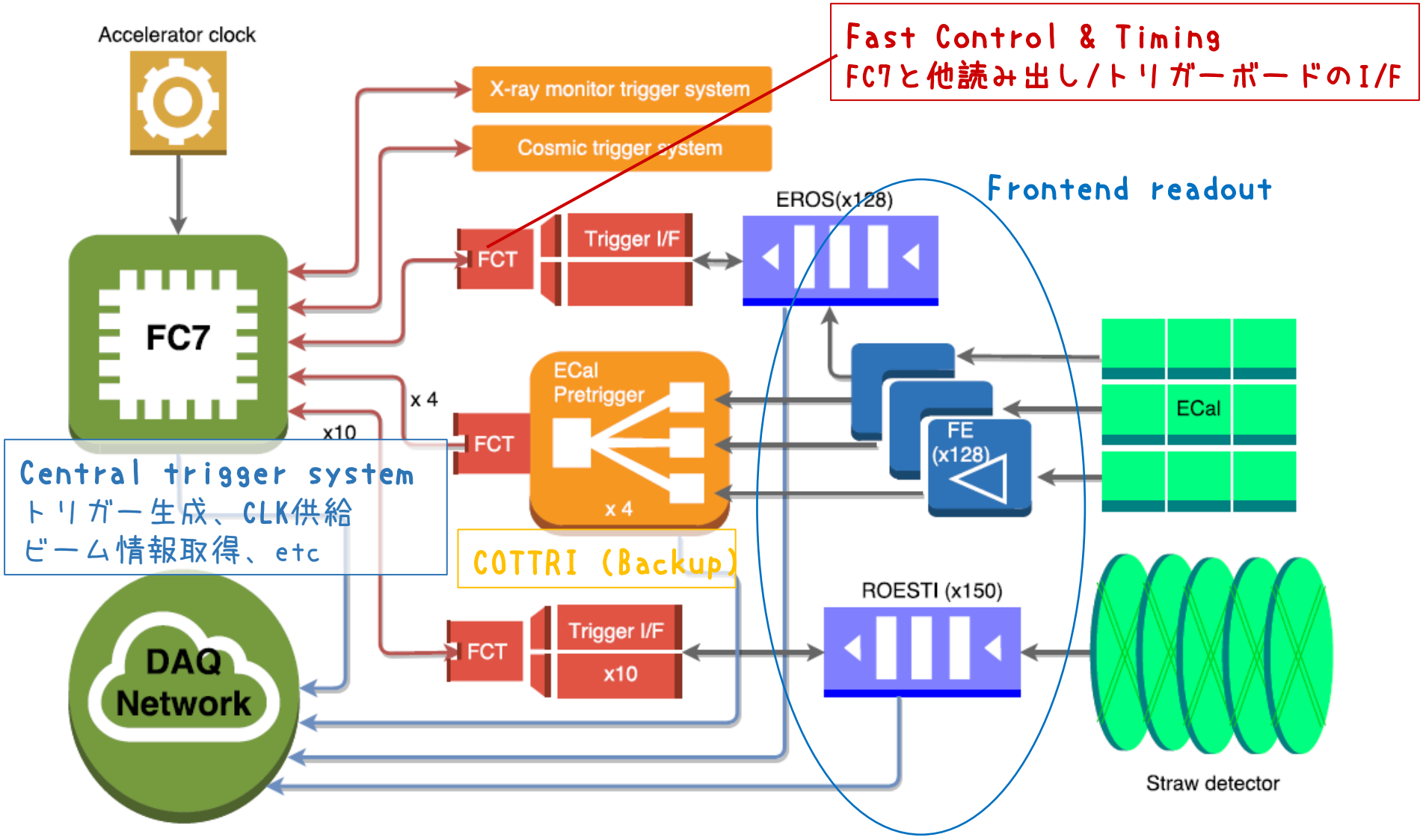


ECAL

計測システム (CyDet)



計測システム (StrECal)



エレクトロニクス開発

COMET実験で必要なエレクトロニクスたち (メインのもの)

- Central trigger system
 - Fast Control & Timing board (FCT)
 - CDC FE readout
 - CTH FE readout
 - Trigger readout
 - Straw readout
 - Ecal FE readout
 - Ecal readout 青字：日本グループが担当
- これら全てを1から開発するのは大変
 - これまでの技術資産利用+必要な部分を新たに開発
 - Open-Itの活用
 - 個々の詳細は過去の計測システム研究会スライド等参照

困難な点

大強度ビーム実験

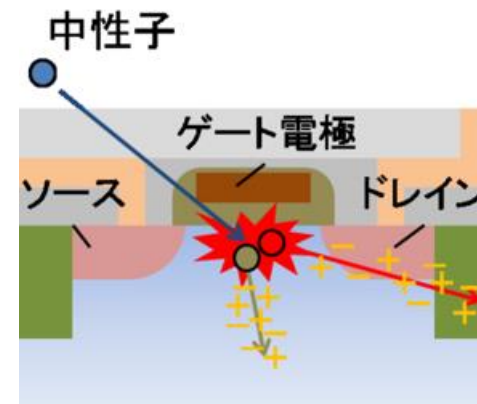
- 高レート
- 高放射線

→ 次の中沢講演

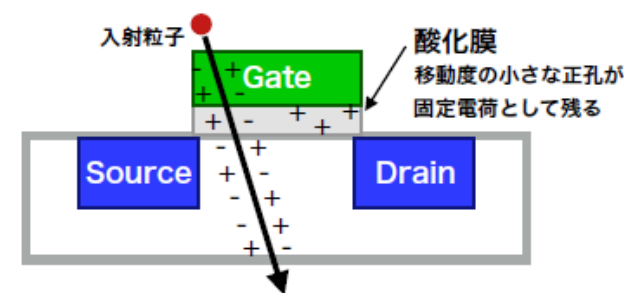
→ 本講演

放射線による影響

- Single Event Upset (SEU)
 - 中性子 (との核反応による荷電粒子) や高エネルギー重粒子による論理反転
 - FPGA、フラッシュメモリ
- Type Inversion
 - 中性子による半導体内のハード損傷
 - 半導体検出器、トランジスタ
- Total Ionizing Dose Effect (TID)
 - 多量の放射線 (主にガンマ線) による半導体内の電離作用で固定電荷や界面準位が形成され永久損傷
 - レギュレータ、SFP
- Displacement Damage Dose (DDD)
 - 放射線 (主に電子や陽子) 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永久損傷



安部晋一郎 (九州大学) 修士論文



放射線対策

- SEU

- FPGA

- エラー訂正機能の実装

- ファームウェア再ダウンロード手法の確立

- フラッシュメモリ等

- パーツ選定または使用の断念

- Type Inversion

- 耐性を持つパーツの選定

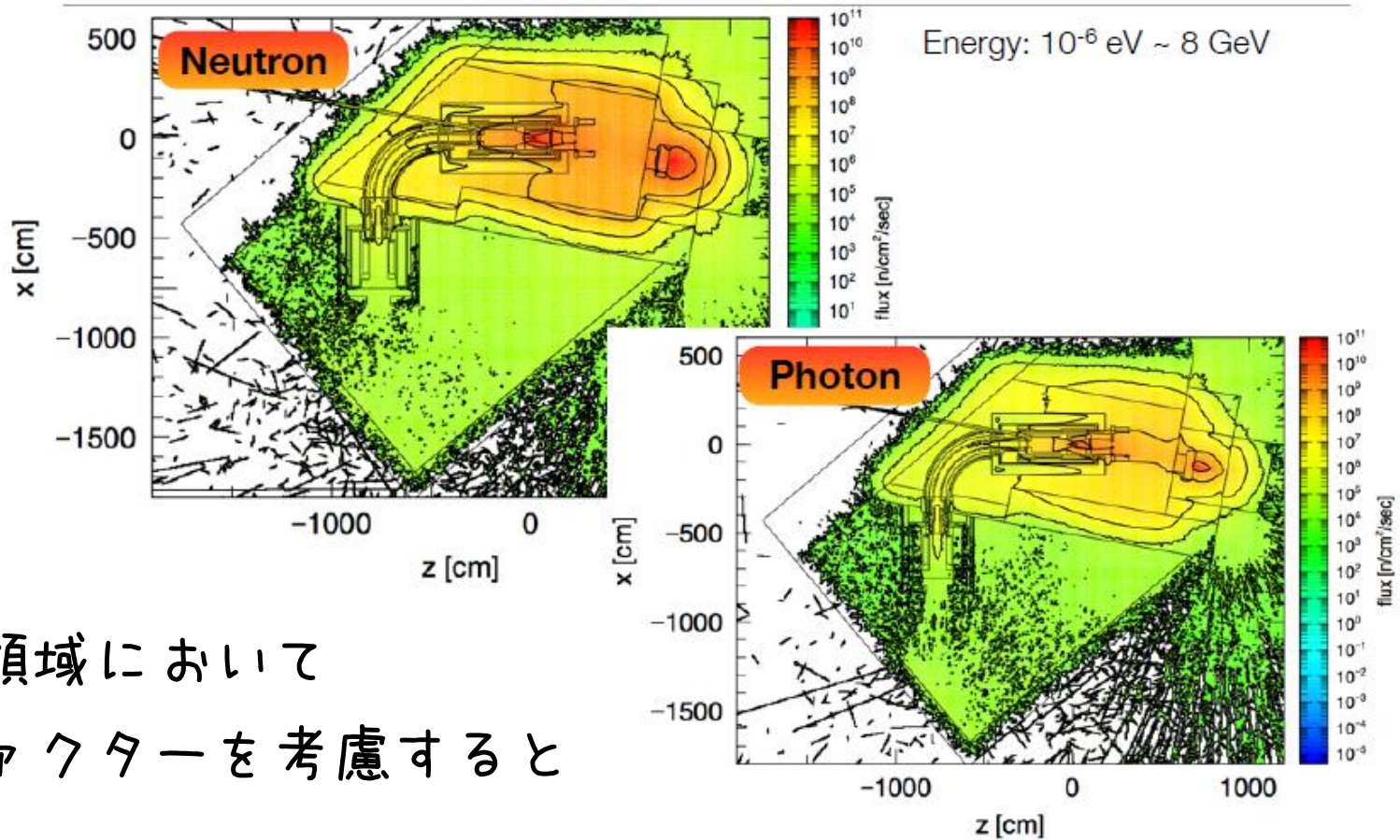
- TID, DDD

- 耐性を持つパーツの選定

こいつらはやっかい

COMET実験における放射線量

- PHITSによる計算for Phase-I実験



検出器領域において
安全ファクターを考慮すると

中性子： $10^{12}/cm^2$
ガンマ線： $1kGy$ (200days)

の放射線に耐えられる必要あり

COMET実験による取り組み

- シミュレーションスタディ
 - 前述PHITSに加え、Geant4、FLUKAによるクロスチェック
- SEU対策
 - 中性子照射試験によるSEU rate調査@神戸大学タンデム加速器
 - Configuration RAM
 - SEM(IP core from Xilinx)を実装
 - UnRecoverable Error (URE)発生の際はfirmware再ダウンロード
 - Block RAM
 - ハミングコードを利用したError Correction Code (ECC) (IP core from Xilinx) を実装
 - Cyclic Redundancy Check (CRC)によるチェック機能を実装
 - ハミング符号、CRC符号をデータに付加。Multi Bit Errors (MBE) の際はオフラインで確認
- TID等対策
 - ガンマ線照射試験による耐放射線パーツの選定
 - radhard品の調査

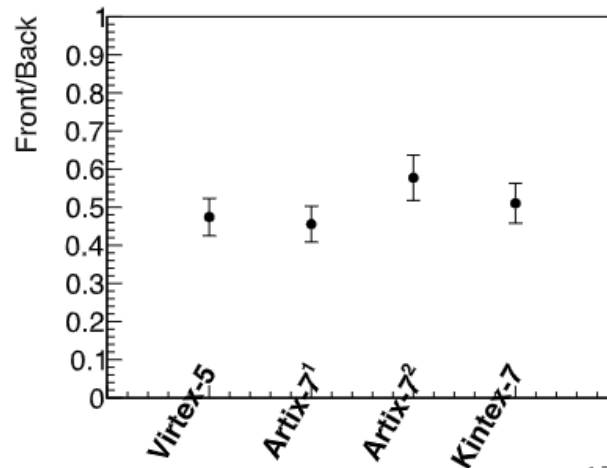
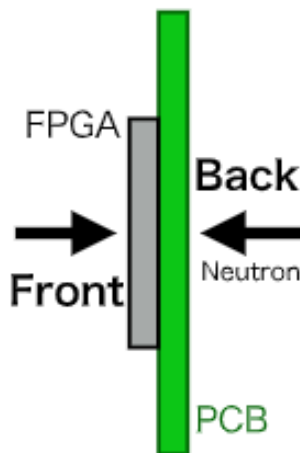
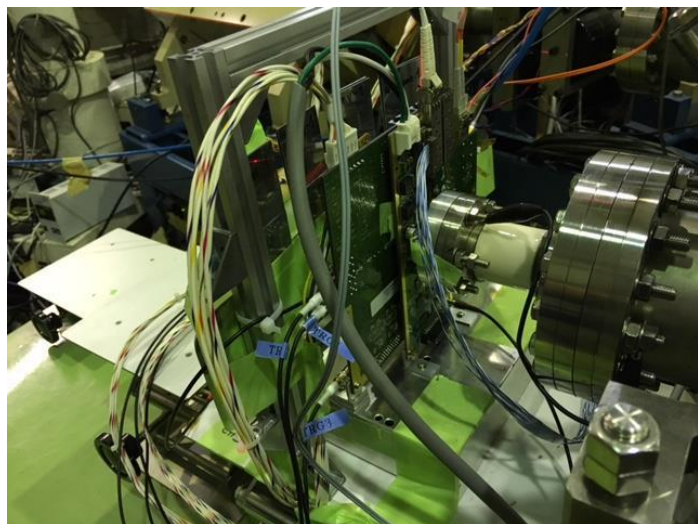
SEU

- 3種類のFPGAを用いてSEU、URE測定&諸々の機能確認
- Yu Nakazawa et al., NIMA 936 (2019) 351

Table 1

Summary of soft error rates and ratios of re-downloading time and total measurement time. The BRAM MBE rates of Artix-7¹ and Kintex-7 were not estimated due to low statistics. The CRAM URE rates in the COMET experiment were estimated by using the neutron fluence of 1×10^{12} neutron/cm².

	CRAM		BRAM		CRAM URE rate in COMET [h ⁻¹]	Dead time
	SEU [[n/cm ²] ⁻¹]	URE [[n/cm ²] ⁻¹]	SEU [n/cm ²] ⁻¹ kB ⁻¹	MBE [[n/cm ²] ⁻¹ kB ⁻¹]		
Virtex-5	$(4.6 \pm 1.4) \times 10^{-8}$	$(1.4 \pm 0.4) \times 10^{-10}$	$(7.0 \pm 2.2) \times 10^{-11}$	$(9.7 \pm 3.1) \times 10^{-13}$	1/27	0.024%
Artix-7 ¹	$(3.4 \pm 1.0) \times 10^{-8}$	$(1.2 \pm 0.4) \times 10^{-11}$	$(7.6 \pm 2.3) \times 10^{-12}$		1/30	0.034%
Artix-7 ²	$(2.9 \pm 0.9) \times 10^{-8}$	$(5.4 \pm 1.7) \times 10^{-11}$	$(7.0 \pm 2.3) \times 10^{-12}$	$(1.4 \pm 0.6) \times 10^{-12}$	1/67	0.031%
Kintex-7	$(2.6 \pm 0.8) \times 10^{-8}$	$(5.7 \pm 1.8) \times 10^{-11}$	$(8.7 \pm 2.7) \times 10^{-12}$		1/64	0.011%



TID等対策

- 今のところ確実な対処法がない（調べた限り）
- 実際に照射試験をするしかない
 - これまでに複数回実施@大阪大、東工大、九大、高崎QST
 - 他グループでも同様に実施
- 耐放射線パーツ（主に宇宙用）を取り扱ってる業者は存在する
 - 構造等は聞いても当然教えてもらえない
 - ざっくりコマーシャル品より2桁高い値段＋納期も半年以上。遅いものだと1年以上のものも。

ガンマ線照射試験

- COMETでこれまでにあてた（今あてている）ものたち

Manufacturer	Name	
Positive-linear regulator		
Linear Technology	LT1963	
	LT1963-3.3	
	LT1963-2.5	
	LT1963-1.8	
	LT3070	
	LT1764A	
	LTC3026	
Maxim Integrated	MAX8556	
Texas Instruments	TPS7A7200	
	TPS75801	
	TPS74401	
Analog Devices	ADP1755	
Positive-switching regulator		
Linear Technology	LT8612	
	LT8614	
	LTM4620	
	LTM4644	
	LTM8033	
Texas Instruments	LMZ10503	
Negative-linear regulator		
ST Microelectronics	L79	
ON Semiconductor	MC7905	
New JRC	NJM2828	
Linear Technology	ADP7182	
	LT1964	
	LT3015	
	LT3032	
	LT3090	
	LT3091	
	Texas Instruments	LM337
	Microchip Technology	MIC5271
		TC59

Manufacturer	Name
DAC	
Linear Technology	LTC2624
	LTC2634
	LTC2654
Texas Instruments	DAC7564
	DAC7565
Analog Devices	AD5624R
	AD5684R
	AD5324
	AD5624
	AD5684
ADC	
Linear Technology	LTC2264
Analog Devices	AD9287
	AD9637
High-Speed Differential Line Driver	
Texas Instruments	SN65LVDS391
	SN65LVDS116
	SN65LVDS386
High-Speed Differential Receiver	
Texas Instruments	SN65LVDT348
Splitter	
Maxim Integrated	MAX9175
Positive OR gate	
Texas Instruments	SN74AUP1G32
NOR/OR gate	
Texas Instruments	CD4078BM96
Multiplexer	
Analog Devices	ADG1606

SFP : 8種類

(Avago、ELECOM、サンワサプライ、DELL、Startech、FS.COM、10GTek)

SFP+ : 4種類

(FINISAR、Starline、Solitechなど)

その他

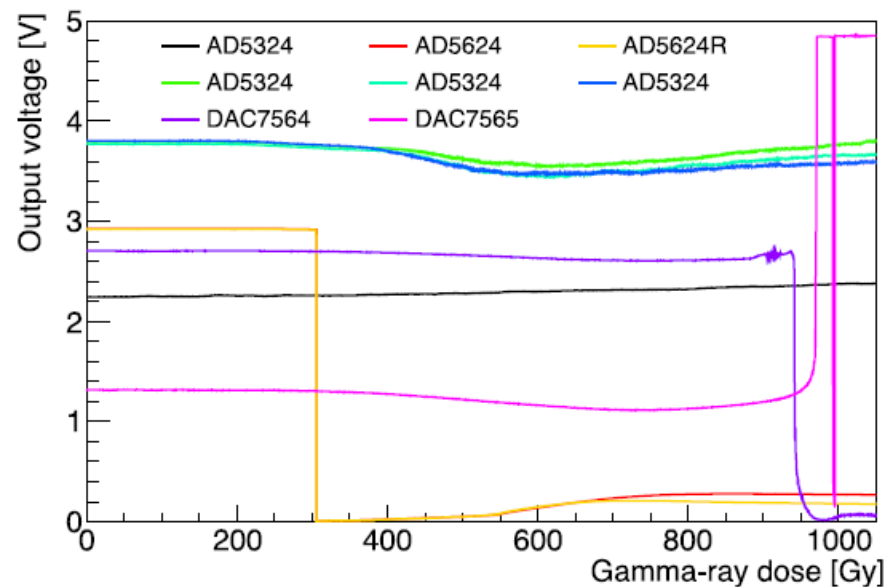
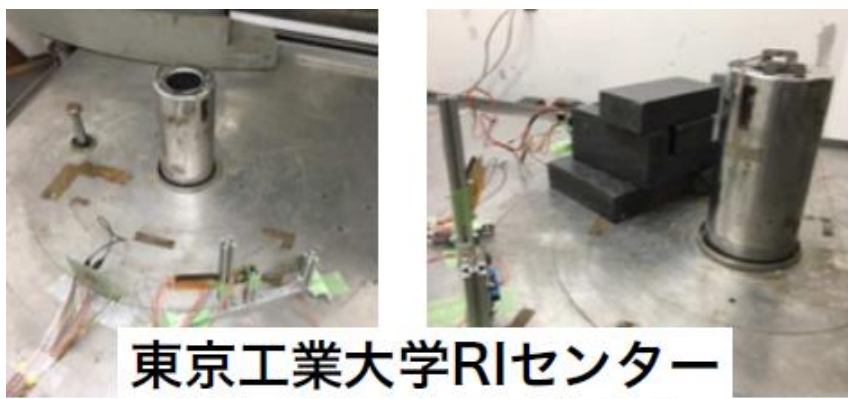
MPPC、APD、PMT

ファイバー、接着剤 などなど

などなど

ガンマ線照射試験

一例



- 概ねCOMET実験で使えるパーツ選定は完了
- Yu Nakazawa et al., NIMA 955 (2020) 163247

ついでに

2017 計測システム研究会 発表スライドより

技術・資産の共有化

- そんなわけで放射線対策は中々大変
- 各グループでそれぞれやるのは非効率
- 日本には情報共有の場がない
- 開発もそんなに進んでいない（宇宙は別）
- 今後（特に大強度加速器実験等では）更に必須になってくる技術



Open-Itを利用して共有の場を展開したい

17

技術・資産の共有化

- ひとまず「枠」は作ってみました
- <http://openit.kek.jp/project/RADHARD/RADHARD>
- （とりあえず公開はしています。）

取り組み

- 情報共有
 - 民生用パーツ、マテリアル等の放射線耐性試験結果
 - 耐放射線パーツ、マテリアル等の開発の動向
 - 耐放射線検出器の現状
 - 各機関、グループにおける取り組み
 - 参考になる論文、資料等のまとめ
- 開発
 - SEU対策FPGAファームウェア
 - 新たな耐放射線パーツ、マテリアル開発
- ワークショップ、セミナー
 - 各グループのスタディについての議論
 - 専門家によるセミナー

興味ある方は → <http://openit.kek.jp/project/RADHARD/RADHARD>

今後

- COMET Phase-Iはなんとかなりそう
- Phase-IIは更なる大強度化などで放射線問題はさらに大変に
- (他にも気にしている実験グループ等はあるはず)
- 色々考えておく必要あり

- 一例：原子スイッチの利用
ナノブリッジFPGA

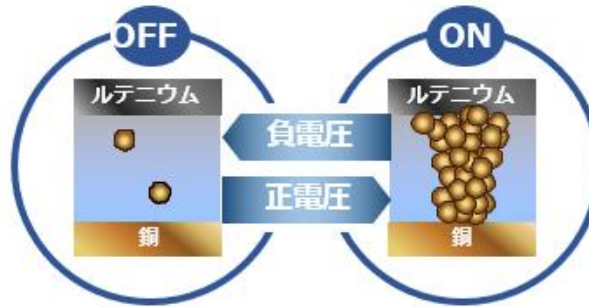
原子スイッチとは

技術
金属原子架橋
スイッチ素子

適用先
FPGAの配線スイッチ
不揮発メモリ

特徴
低電力、耐放射線
微細・高密度

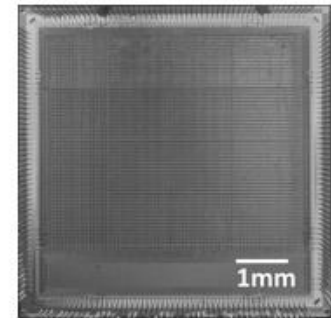
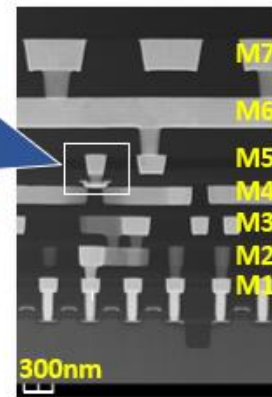
スイッチ動作概念図



チップ内で配線の
接続・切り離し可能



原子スイッチFPGA
集積回路断面



FPGAにおいて、「SRAM+パストランジスタ」を原子スイッチで実現

原子スイッチの耐放射線評価

- 重粒子線照射試験(/w JAXA様)
 - Cf or Xe(LET:68.2MeVcm²/mg)の照射前後で原子スイッチの状態が変化なし*1
- 中性子線照射(/w KEK様)
 - 現状問題なし
- TID評価(/w KEK様)
 - 現状問題なし
- JAXA 革新的衛星技術実証1号機「RAPIS-1」で軌道上実証*2
 - JAXA開発のカメラモジュールボードに原子スイッチFPGAを搭載し、画像圧縮に利用
 - 1年間に渡り軌道上で信頼性試験



©JAXA

*1 竹内ら、第1回QST高崎研シンポジウム「原子スイッチROM/FPGAへの重粒子照射によるシングルイベント効果の評価」、2017年

*2 <https://www.kenkai.jaxa.jp/kakushin/kakushin01.html#nbfpga>

まとめ

- COMET実験
- エレキ開発はOpen-It等を活用しつつ進行
- レート問題は次の中沢講演
- 放射線問題は大変
- 今後の大強度化対応も考え中