



COMET実験

ストロー飛跡検出器用 読み出し回路の放射線耐性

24 Sep 2016

上野一樹 (KEK、Open-It)

藤井祐樹^{a,b}、濱田英太郎^{a,b}、池野正弘^{a,b}、三原智^{a,b}
中沢遊^{b,c}、西口創^a、内田智久^{a,b}、山口博史^{b,d}、吉田学立^c
他COMETコラボレーション

a: KEK素核研、b: Open-It、c: 大阪大、d: 九州大

日本物理学会 2016年秋季大会@宮崎大学

もくじ

- イン트로ダクション
 - COMET実験
 - スロー飛跡検出器
 - スロー読み出し回路 (ROESTI)
- 放射線耐性
 - 中性子照射試験
 - ガンマ線照射試験
- まとめと今後

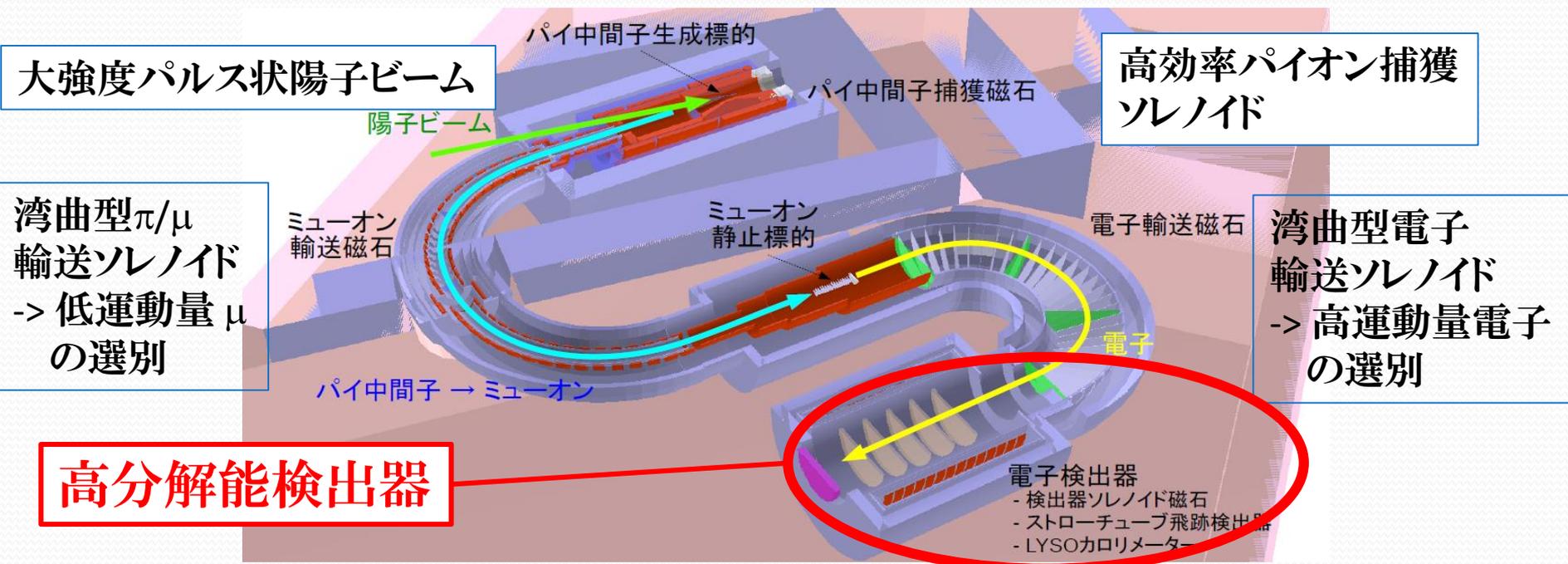
イントロダクション

COMET実験 = ミューオン電子転換過程探索実験@J-PARC

標準理論: 荷電レプトン混合反応の分岐比 $\sim O(-54)$ 観測不可能。。

➡ **荷電LFVの発見 = 標準理論を越える物理**

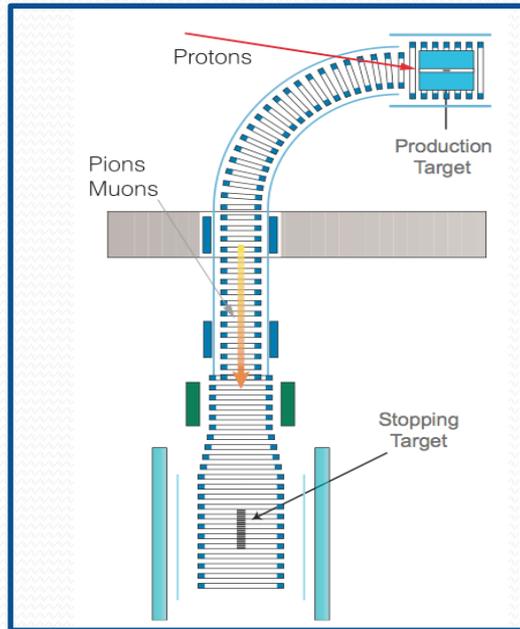
標準理論を越える模型 (ex. SUSY-GUT, SUSY-SEASAW: 分岐比 $\sim O(-15)$)
観測可能!



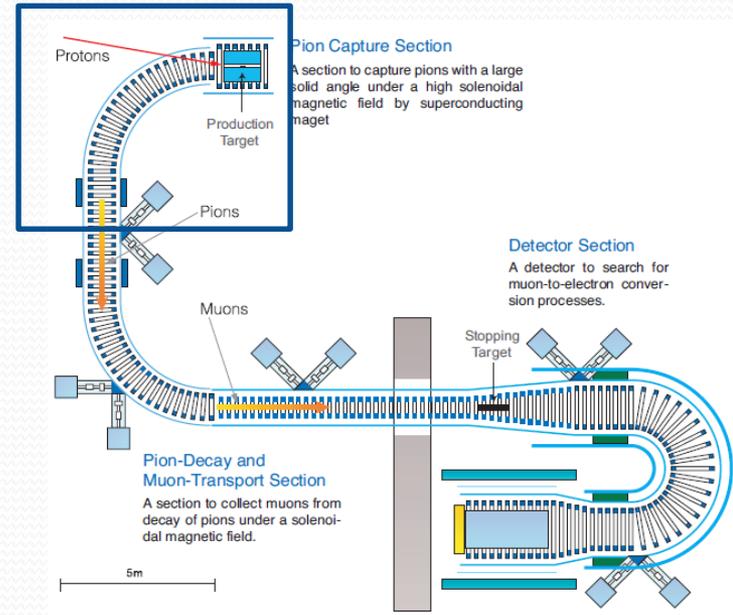
目標感度: 3×10^{-17} (現状の10000倍)

COMET実験

ステージングアプローチ



Phase-I (2018)



Phase-II (2020~)

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

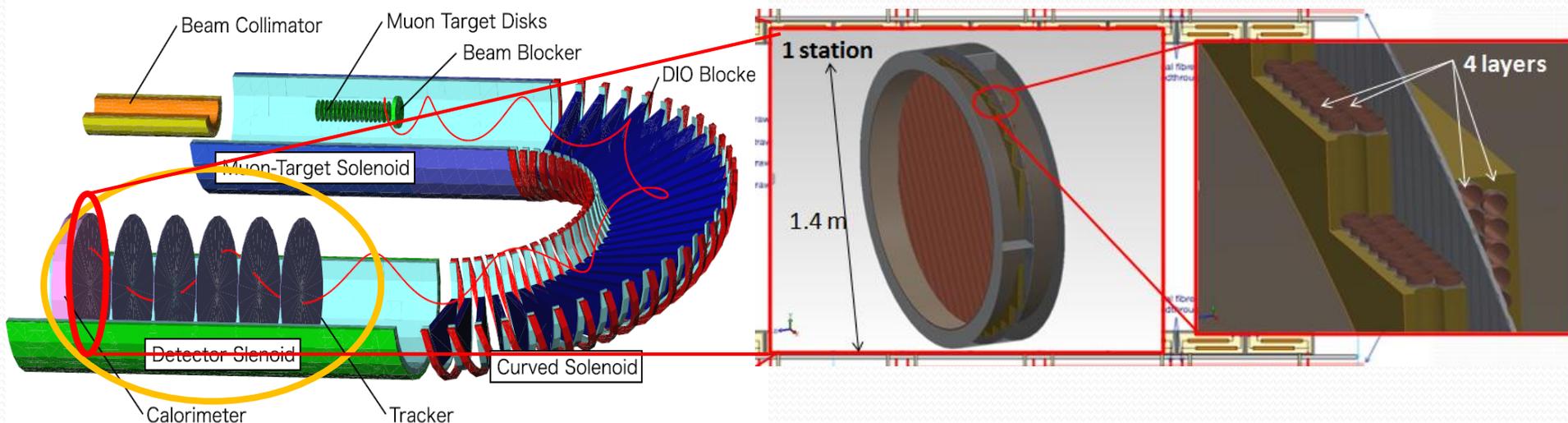
2. ミューオン電子転換過程探索

実験感度 $O(-15)$ (現状の100倍)での探索 ⇒ CDC使用

森津23aSG-1
山根23aSG-2
サム23pSG-2
中沢24pSF-3

ストローチューブ飛跡検出器

- 要求
- 高い運動量分解能 ($<200\text{keV}/c @ 105\text{MeV}/c$)
 - 真空中、高放射線環境、磁場中 (1T) でオペレーション可能



StrECal検出器

ストローチューブトラッカー

運動量測定

+ カロリーメータ

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

野口22aSF-6
大石23pSG-1

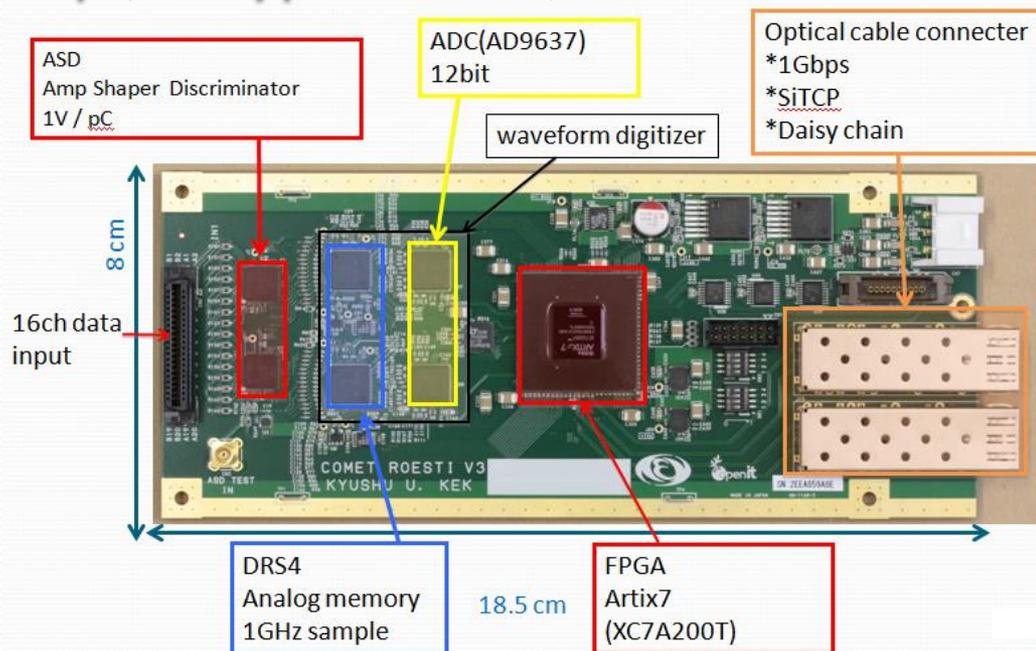
ストロー飛跡検出器読み出し回路

要求

時間分解能	: <math>< 1\text{ns}</math>	トラッカー位置分解能	~100 μm
ゲイン	: ~1V/pC	最小電荷 (16fC) に対して	S/N > 10
チャンネル数 (1ボード)	: > 16ch	ストロー数	> 2000ch
大強度対応、真空対応、放射線耐性、磁場耐性、コンパクト化			



ROESTI (ReadOut Electronics for Straw Tube Instrument)



- 段階的に開発
- 現在ver.3
- 回路の機能的には問題なし
- 概ね要求は満たす
(詳細定量評価は進行中)
- **放射線耐性は要調査**

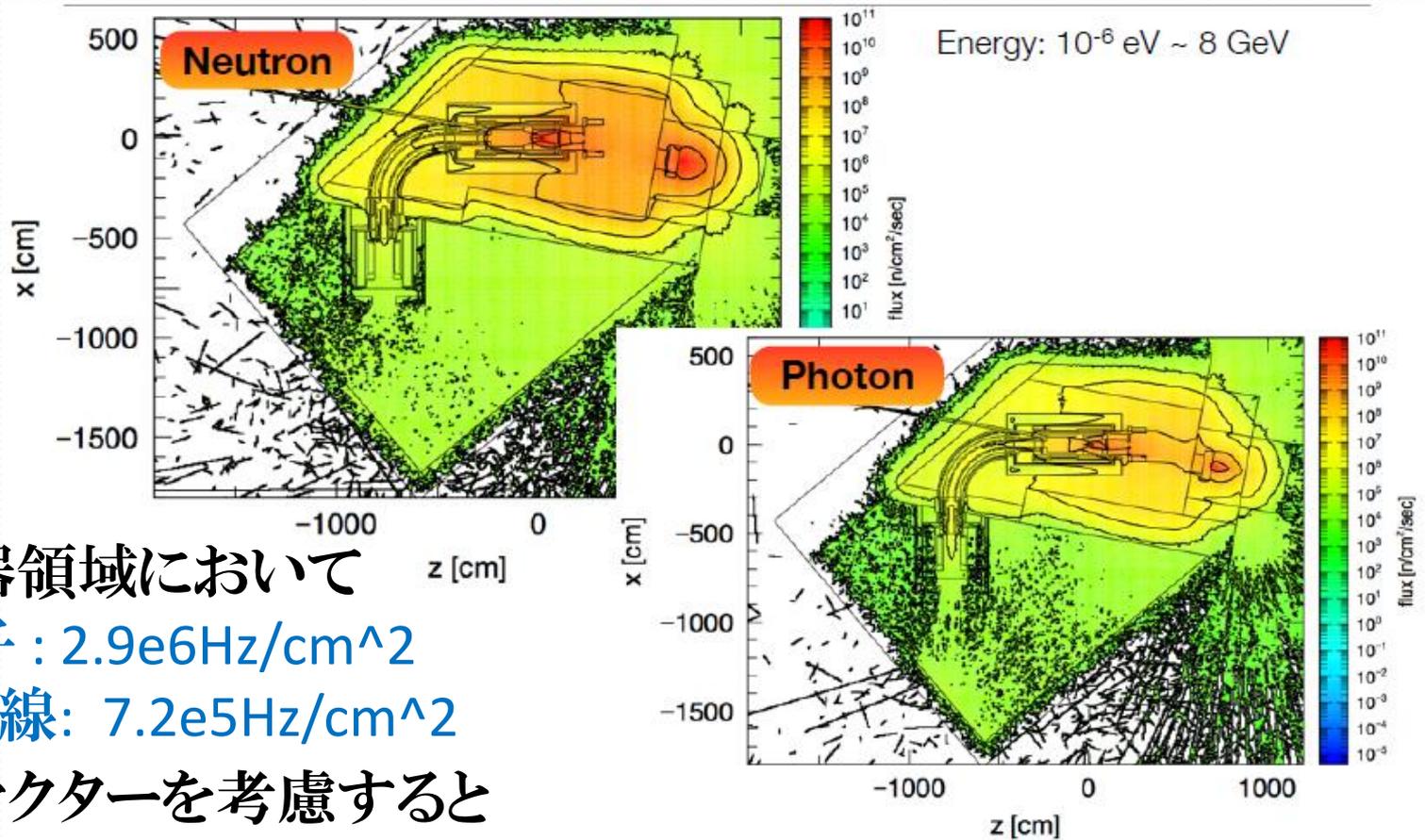
➡ 本講演

放射線による影響と対策

- 中性子
 - ソフトエラー: Single Event Upset (SEU) など
 - ⇒ SEU rate 調査
 - FPGA firmware の改良 (SEU 検出/修復)
 - ハードエラー: Type inversion など
 - ⇒ 耐性を持つパーツ選定
- ガンマ線
 - ハードエラー: Total Ionizing dose (TID) 効果 など
 - ⇒ 耐性を持つパーツ選定

Simulation study

- PHITSによる計算for Phase-I実験



検出器領域において

中性子: $2.9e6 Hz/cm^2$

ガンマ線: $7.2e5 Hz/cm^2$

安全ファクターを考慮すると

中性子: $1e12/cm^2$

ガンマ線: $\sim 1kGy$ (100days)

の放射線に耐えられる必要あり

放射線耐性試験

これまで行ってきた試験

- 中性子照射試験

- 九州大学タンデム加速器(2014)
- 神戸大学タンデム加速器(2015～)

第70回年次大会山口22pDL-4

- ガンマ線

- 高崎量子応用研究所(2015)
- 東京工業大学RIセンター(2016～)

第70回年次大会山口22pDL-4

中性子照射試験

目的

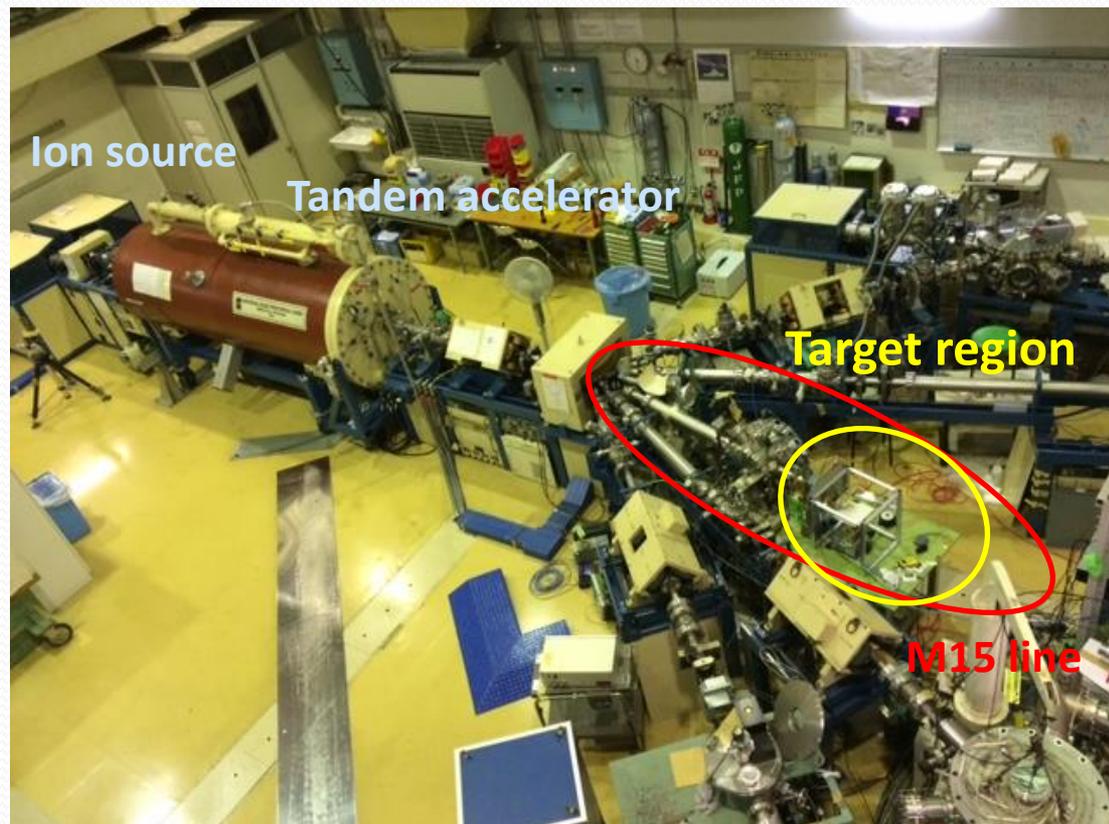
- FPGA (Artix7)におけるSEU rate調査
- FPGA firmwareのSEU検出/修復機能試験
 - Configuration RAM (CRAM)
 - SEM (IP core from Xilinx)を実装
 - Unrecoverable Error (URE)発生の際はfirmware再ダウンロード
 - Block RAM (BRAM)
 - ハミングコードを利用したError Correction Code (ECC) (IP core from Xilinx)を実装
 - Cyclic Redundancy Check (CRC)によるチェック機能を実装
 - 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
- デイジーチェーン使用時の動作確認
- パーツの中性子耐性試験

中性子照射試験

神戸大学タンデム加速器

- 2016年3月15 – 20日
(ROESTI 1台使用)
- 2016年7月25 – 31日
(ROESTI複数台使用)
- M15 line
- ビーム: ~3MeV deuteron
- 標的: Be
- 強度: $1.6e6 \text{ Hz/cm}^2$ (※)
@10cm from target (1uA)

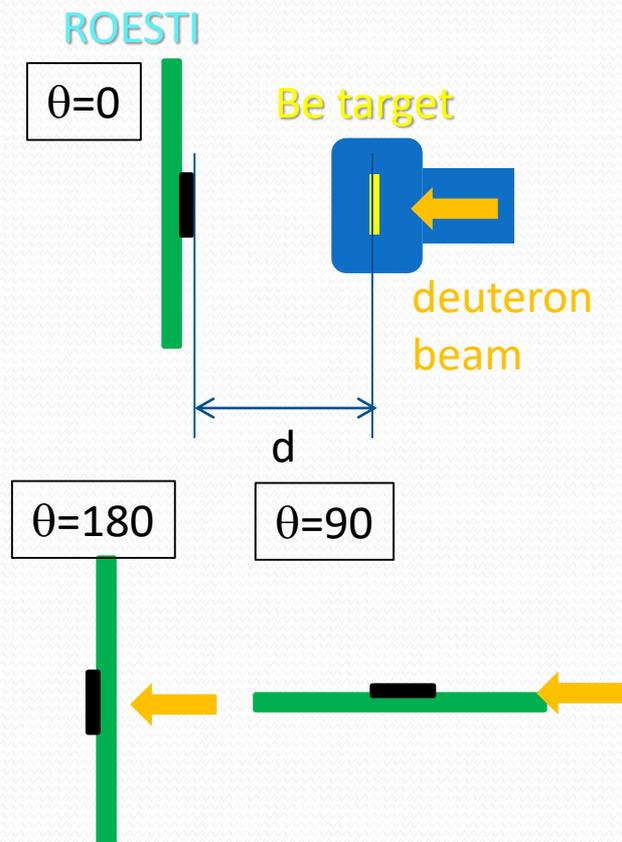
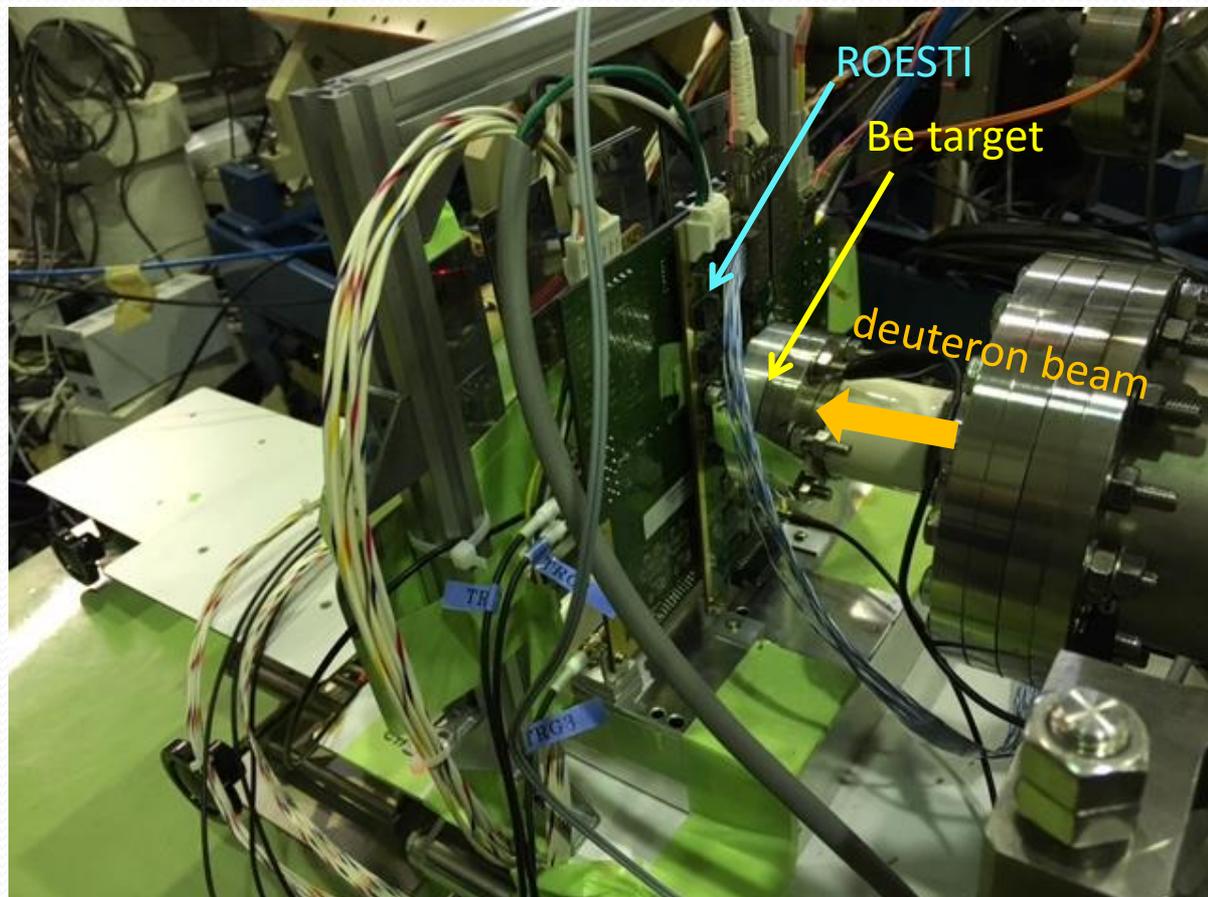
※factor2程度の不定性あり
中性子量測定も別途行った。
現在詳細解析中



COMETで使用予定の他の回路等も同時に試験を行った。

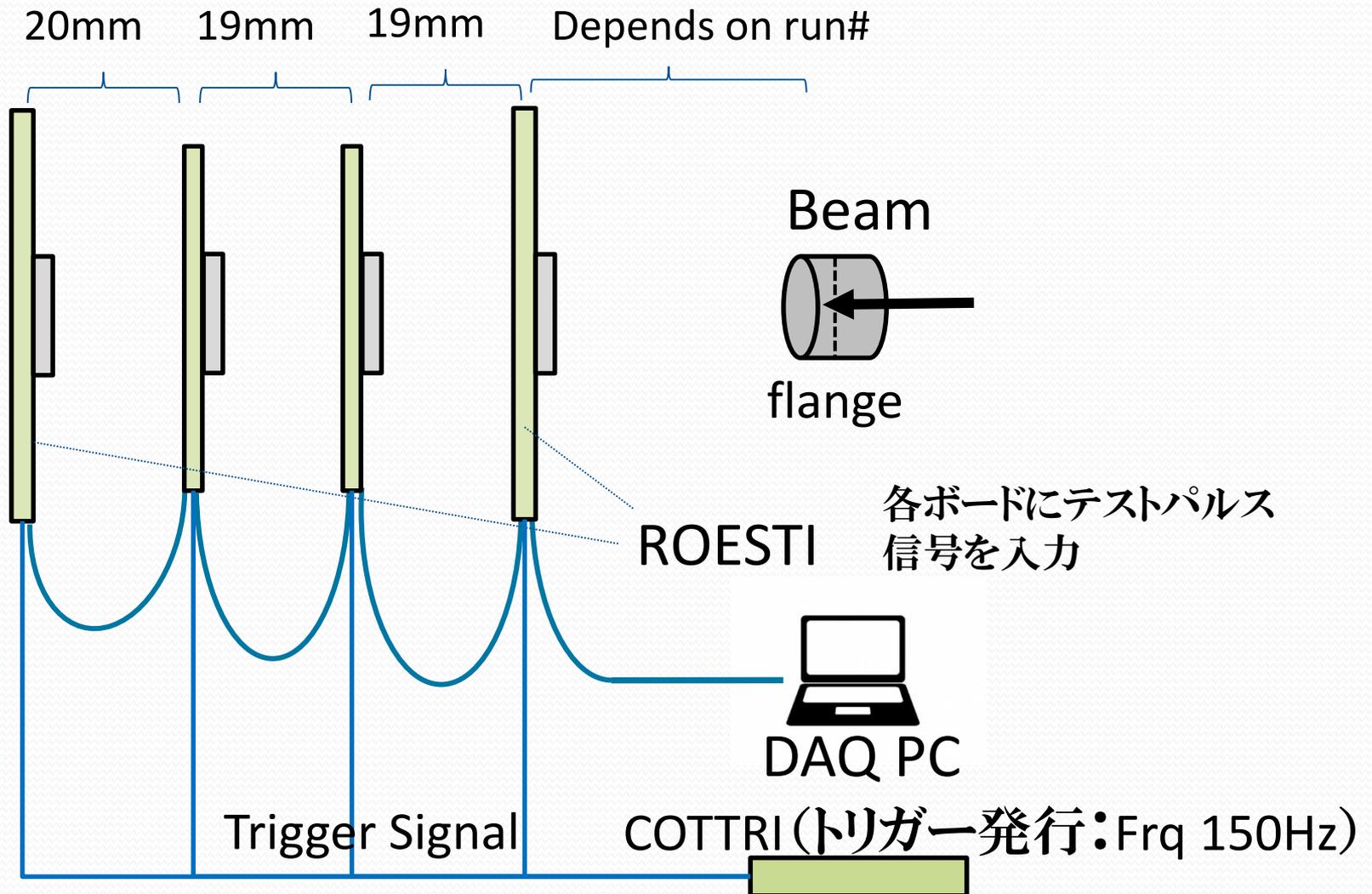
藤井21pSG-9
中沢24pSF-3

実験セットアップ(2016年3月)



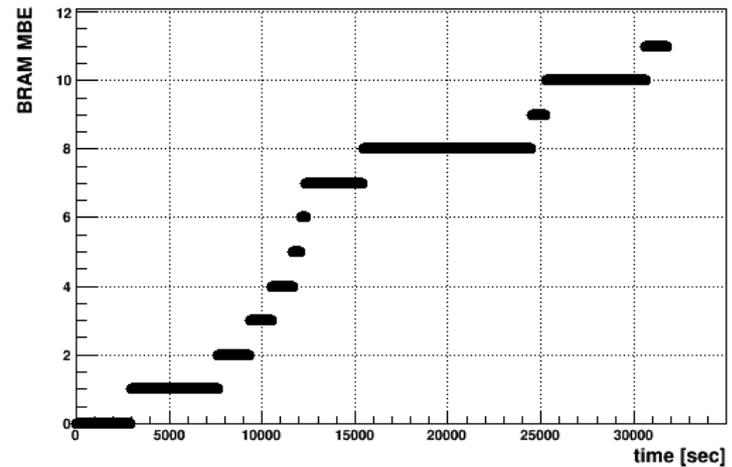
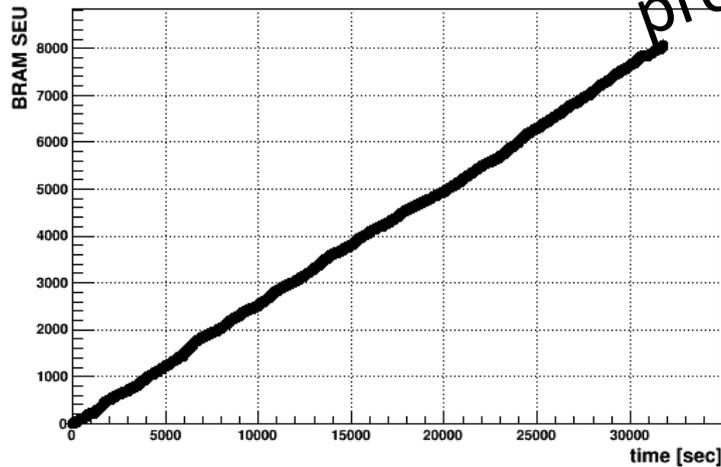
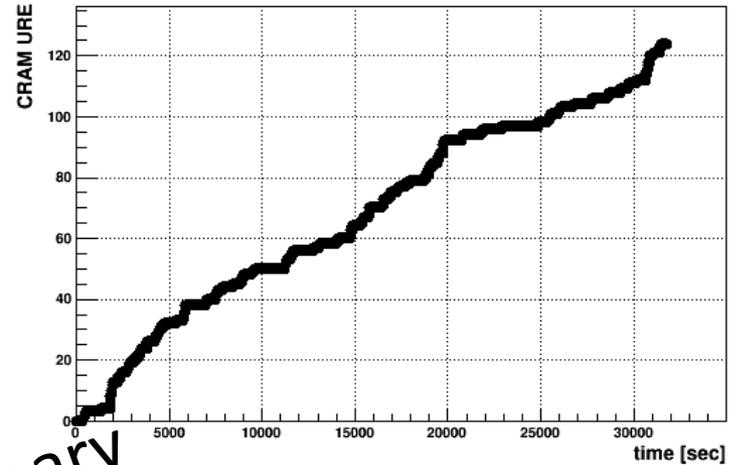
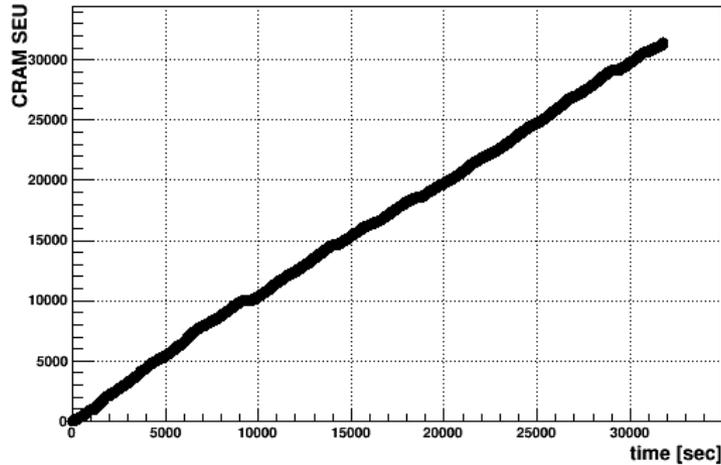
- SEU、URE、MBEの回数をカウント
- 中性子の入射方向依存性も調査
- URE発生時はJTAGを使用してFirmware自動再ダウンロード

実験セットアップ(2016年7月)



3月同様SEU、URE、MBEをカウント。URE発生時はFirmware自動再ダウンロード

結果の1例 (2016年3月: $\theta=0$ 、 $d=26\text{mm}$)



preliminary

SEM、ECCの機能は問題なく動作

結果(2016年3月)

preliminary

θ	Distance [mm]	# of SEU in CRAM	# of URE in CRAM	# of SEU in BRAM	# of MBE in BRAM	SEU rate (CRAM)	URE rate (CRAM)	SEU rate (BRAM)	MBE rate (BRAM)
0	26	31361	124	8059	11	3.14e7	7.95e9	1.22e8	8.96e10
180	28	50499	254	12031	25	2.50e7	4.96e9	1.05e8	5.04e10
180	53	17483	55	4392	3	1.89e7	6.00e9	7.51e7	1.10e11
90	58	17211	114	3448	6	1.95e7	2.94e9	9.72e7	5.58e10

* Rate : # of neutron / # of SEU (URE, MBE)

入射角度による依存性はあまり見られない。要詳細調査。

それぞれのrateはPhase-Iの中性子量(worst case)を仮定すると

SEU(CRAM) $\sim 1/30s$, URE (CRAM) $\sim 1/1hour$

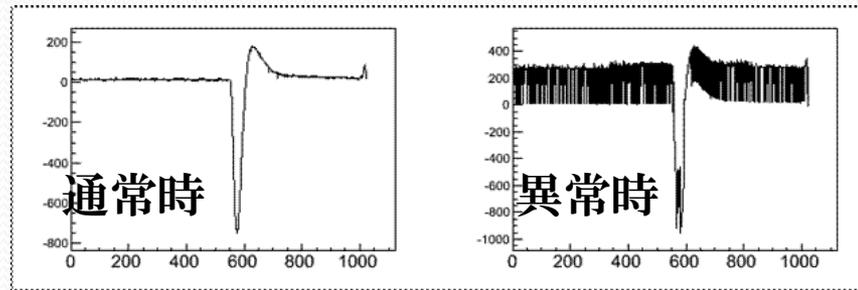
SEU(BRAM) $\sim 1/100s$, MBE(BRAM) $\sim 1/10hours$

今後、中性子量も踏まえた詳細解析

結果

preliminary

- 総照射量は $5.5e12$ n/cm² (3月) $6.0e11$ n/cm² (7月)。
 - 特に問題の起こるパーツは見つからなかった。
- ⇒ 現在使用中のパーツは中性子によるハードエラーに対し、十分耐性があると考えられる
- デイジーチェーン使用時も基本的には問題なく動作した。
 - 稀にボード間のイベントナンバー情報の違いが見られた。
(本来はイベントナンバーは全ボードで揃うべき)
 - 現在詳細調査中
 - 稀に異常データが現れた
 - SEM, ECCで検出されない
 - CRCでは稀に検出されない
 - Firmware再ダウンロードで復帰
 - 現在詳細調査中



ガンマ線照射試験

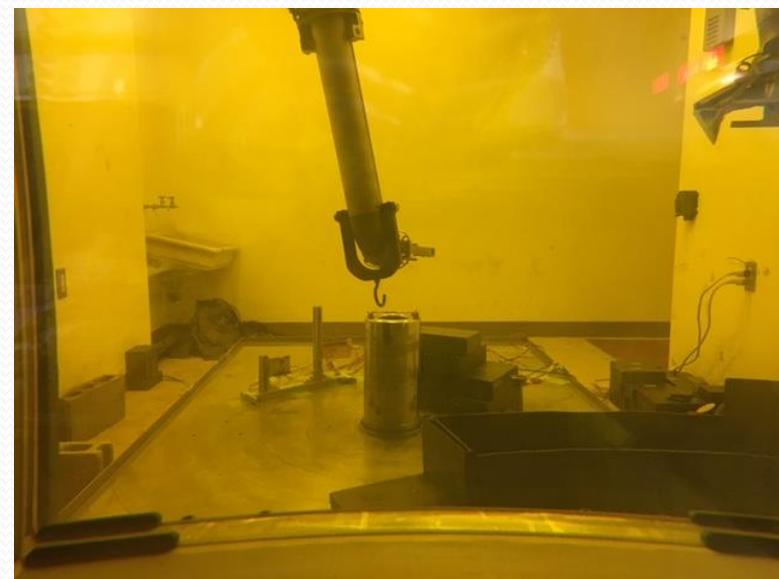
目的

- パーツのガンマ線耐性試験
 - これまでの試験で問題のあったパーツ
 - メモリ ⇒ ver.3から廃止
 - DAC ⇒ 要パーツ選定
 - レギュレータ ⇒ 要パーツ選定
 - SFP ⇒ 要パーツ選定
 - これまでの試験で未照射のパーツ
 - ADC ⇐ ver.3で実装
- なるべくコンパクトなものを選定したい

ガンマ線照射試験

東京工業大学RIセンター

- 2016年6月29, 30日
- 線源: Co-60
- 強度: 191Gy/h@40cm



COMETで使用予定の他の回路等も同時に試験を行った。 藤井21pSG-9

照射パーツ

- DAC

- AD5324

- AD5624

- AD5624R

- レギュレータ

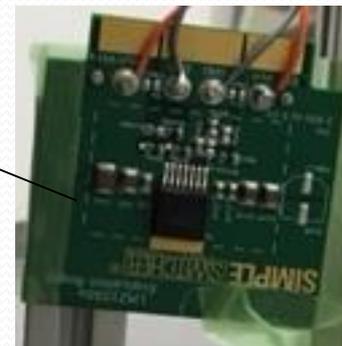
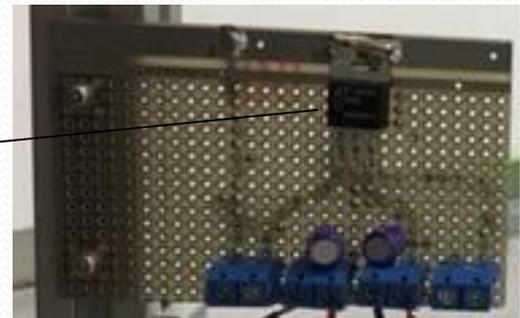
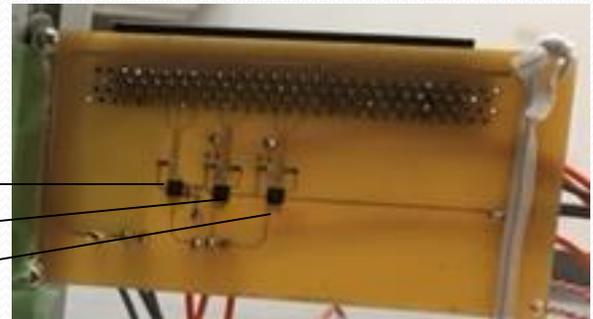
- LT3086

- LMZ10503

- ADC

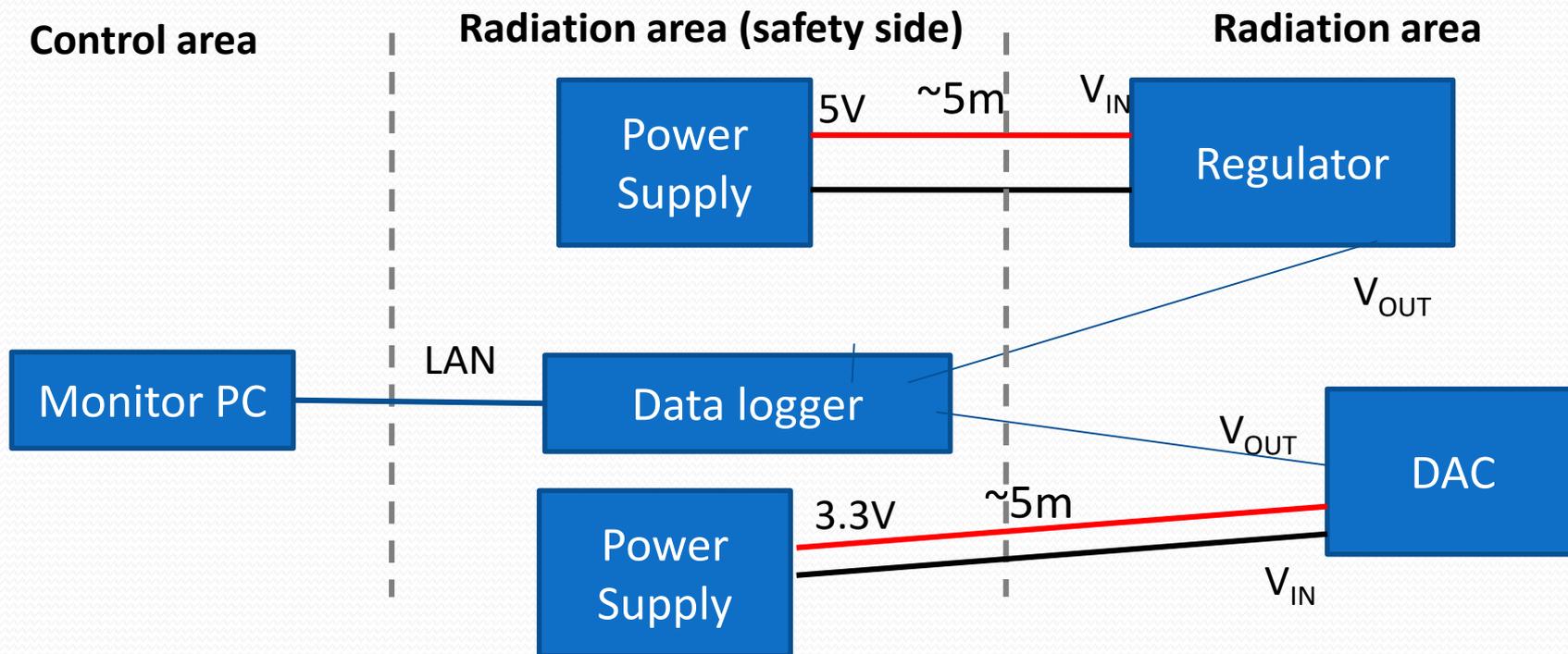
- LTC2264 (評価ボード使用)

- AD9287 (for COTTRI) 藤井21pSG-9



実験セットアップ

- DAC & レギュレータ



出力電圧をデータロガーにて記録

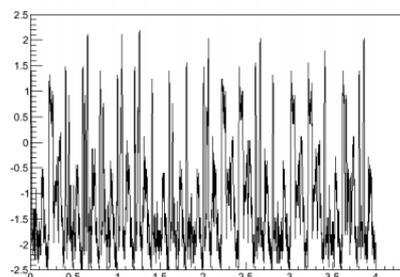
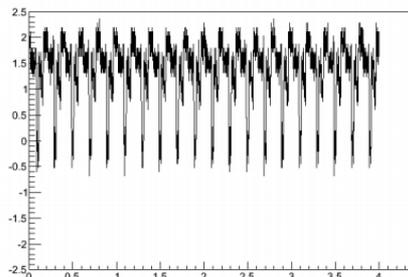
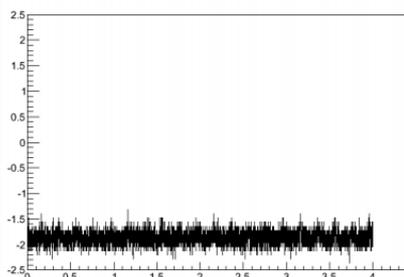
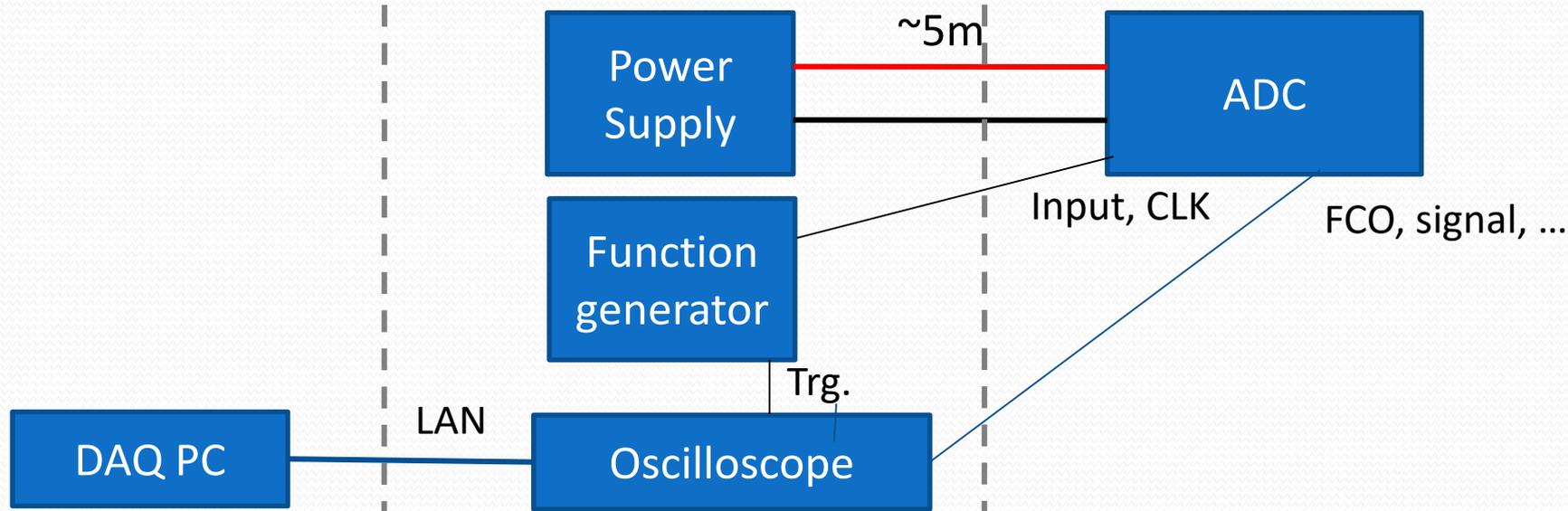
実験セットアップ

- ADC

Control area

Radiation area (safety side)

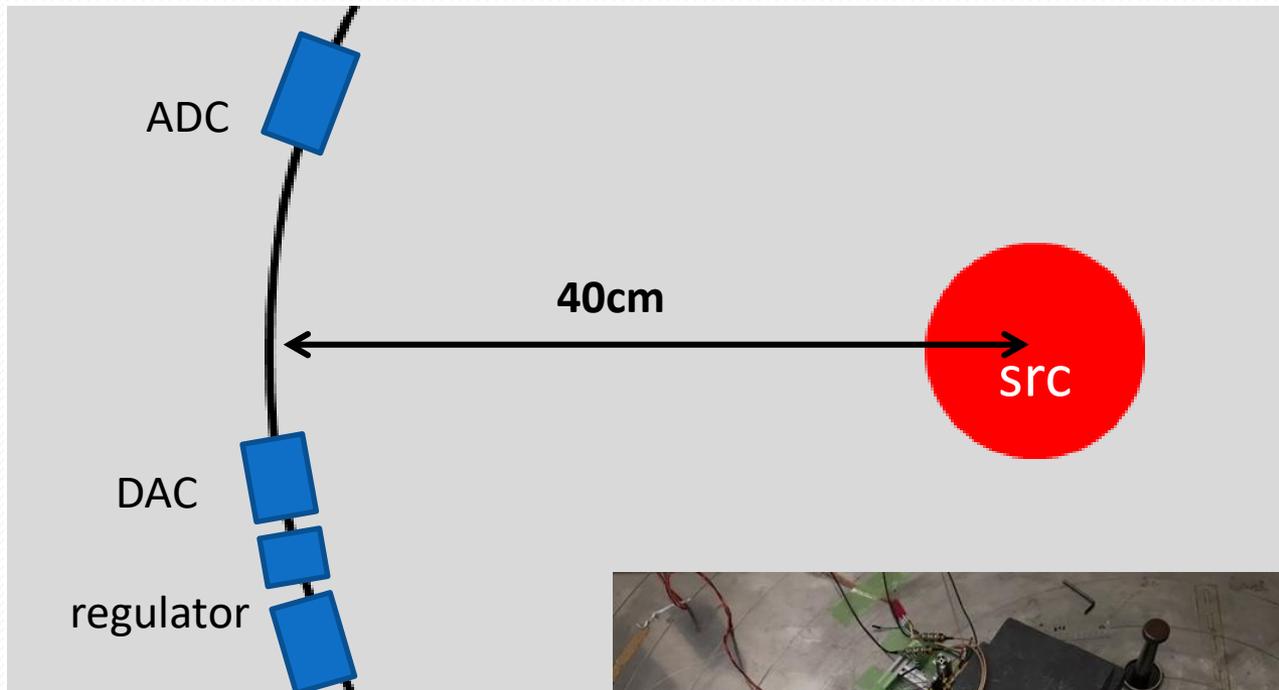
Radiation area



CLKとTrg.のタイミングにより出力信号は左図の三状態をとる

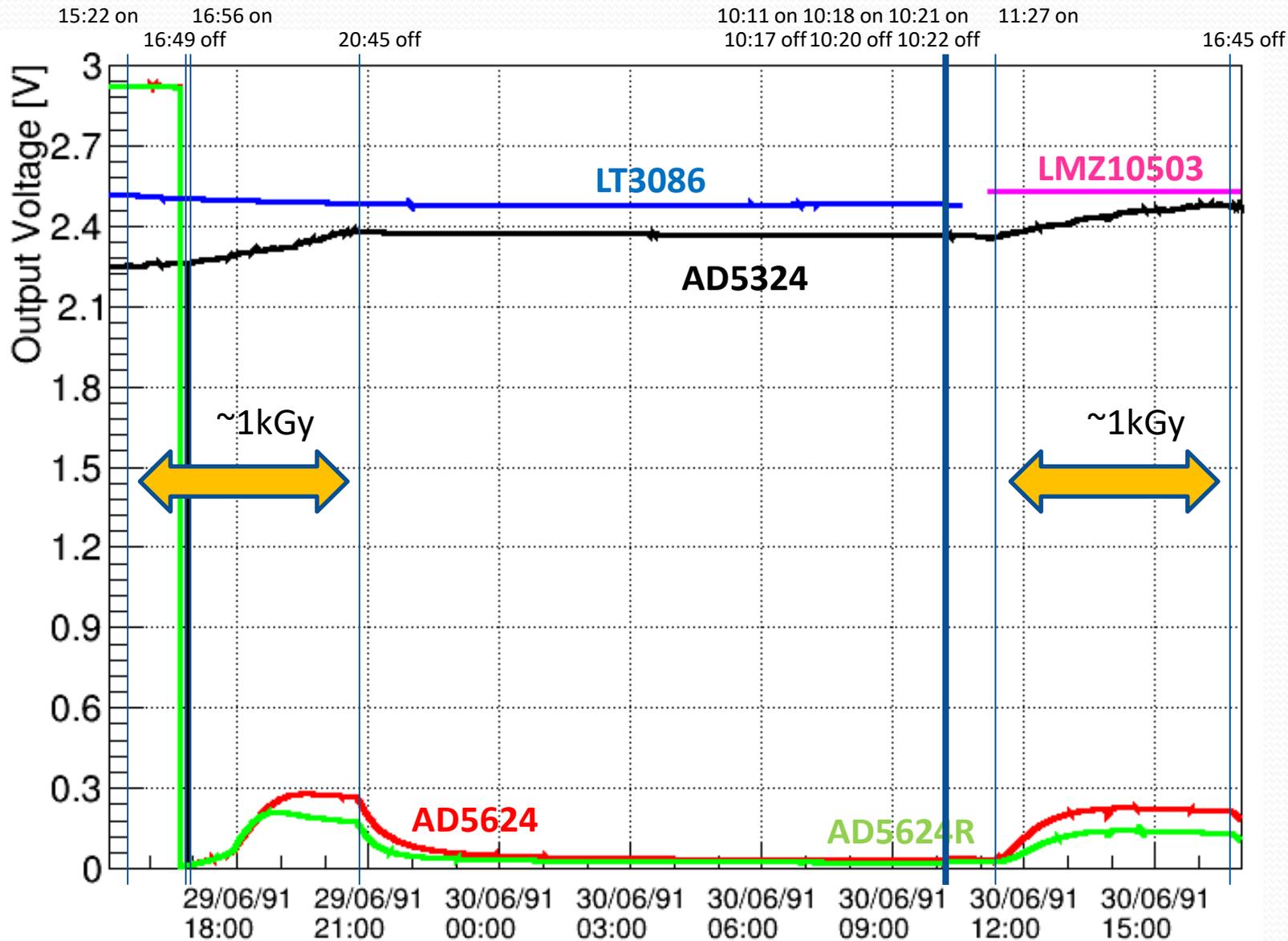
出力信号をオシロスコープDAQにて取得

実験セットアップ

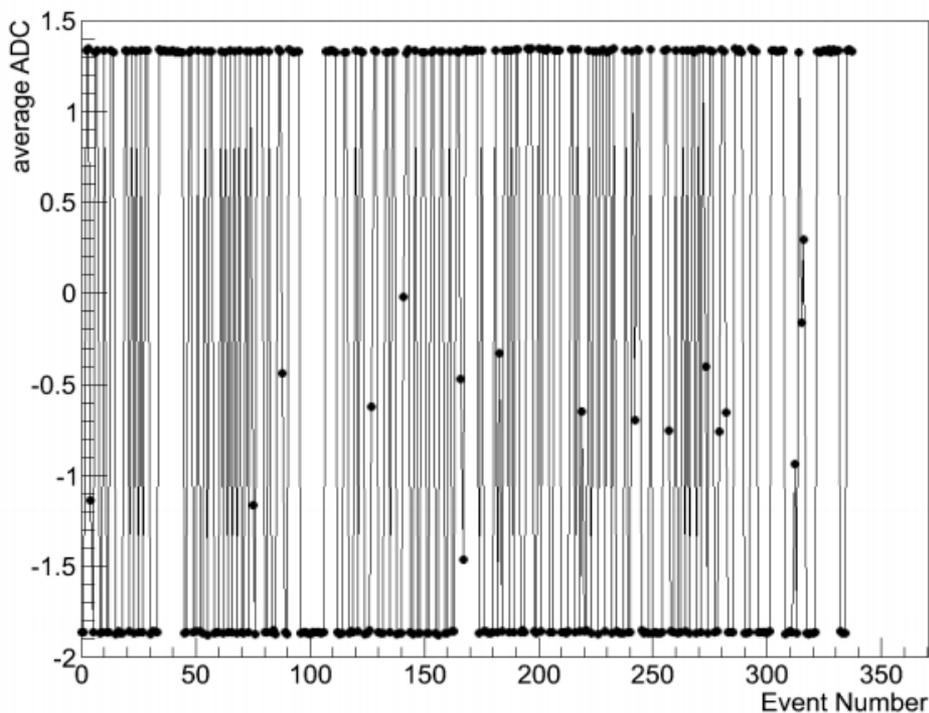


※ADC
評価ボードの目的外のIC等に
影響のないよう前方に鉛設置

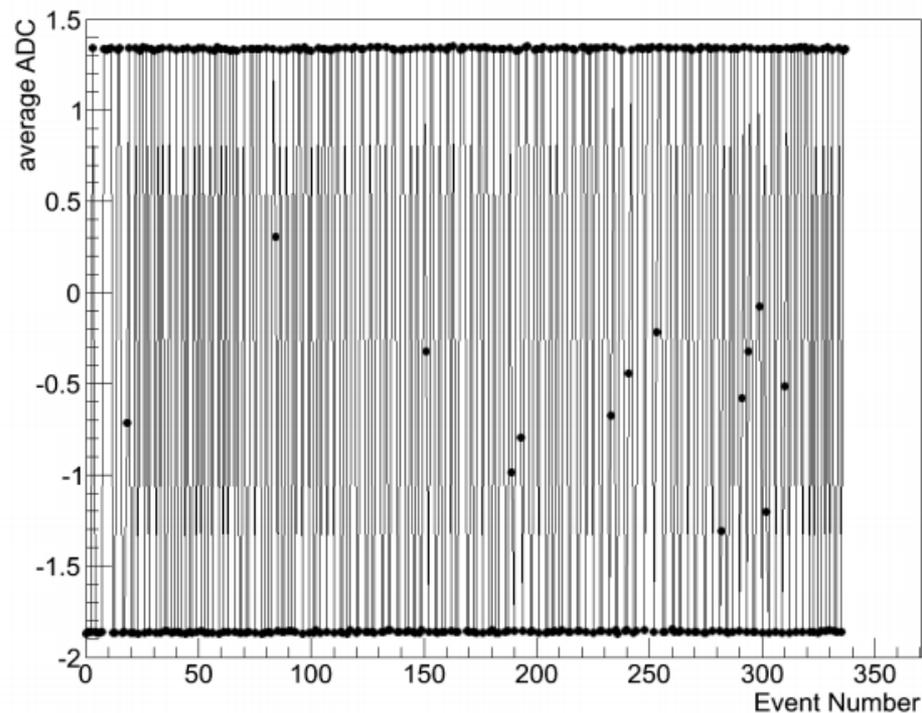
結果 (DAC, レギュレータ)



結果 (ADC)



照射中



照射後

- 出力信号の平均値の時間変化をプロット
- 照射による影響は見られなかった

結果

- DAC
 - AD5324 : 出力電圧変化は見られたが許容範囲
 - AD5624 : dead
 - AD5624R : dead

⇒AD5324の変化分による影響について定量評価
他の候補についても調査
- レギュレータ
 - LT3086 : 出力電圧変化は見られたが許容範囲
 - LMZ10503 : good

⇒個体差がないか今後複数個で更なるチェック
- ADC
 - LTC2264: good

⇒個体差がないか今後複数個で更なるチェック

まとめ

- COMET実験@J-PARC
- StrECal検出器開発中
- スロー飛跡検出器用読み出し回路 (ROESTI) 開発中
- 放射線照射試験によるパーツ選定、耐性調査
 - SEU対策 (SEM、ECC、CRC、Firmware再ダウンロード) 機能は問題なく動作
 - UREの頻度はworst caseで1/1hour
 - 細かい問題 (異常データ等) あり
 - パーツの中性子による劣化はなし
 - ガンマ線耐性を持つパーツの選定進行中

今後

- 引き続きパーツ選定、耐性調査
- SEU対策機能をさらに改良 (TMR、DPR等実装)
- 完了次第実機構築、マスプロダクション