



MONASH
University



COMET Phase-I CyDet トリガーシステムの 性能評価

大阪大学 山田千尋

2023/11/20 計測システム研究会 @RCNP

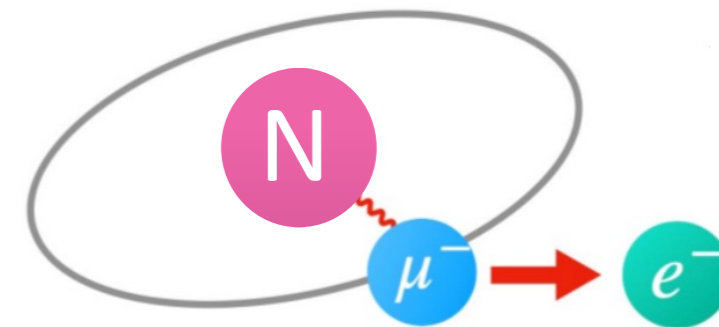
Outline

- COMET Phase-I
- CyDet トリガーシステム
- 通信安定性試験
- 中性子照射試験
- まとめ

COMET Phase-I

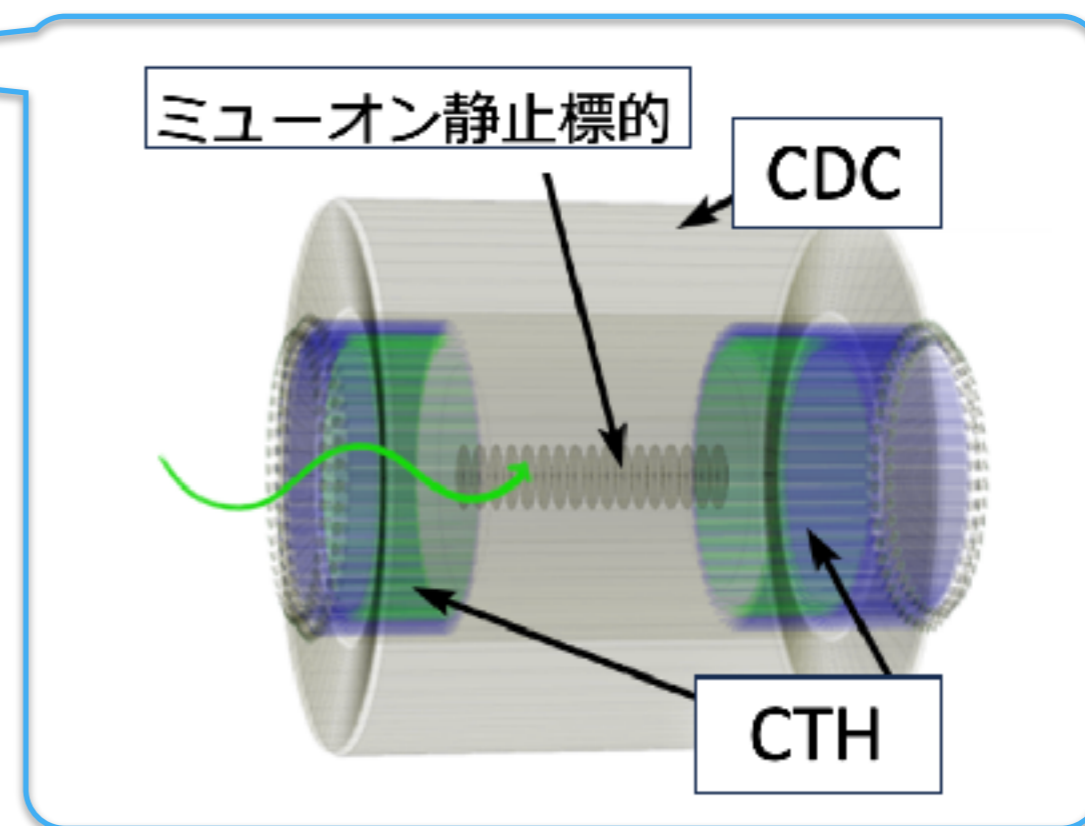
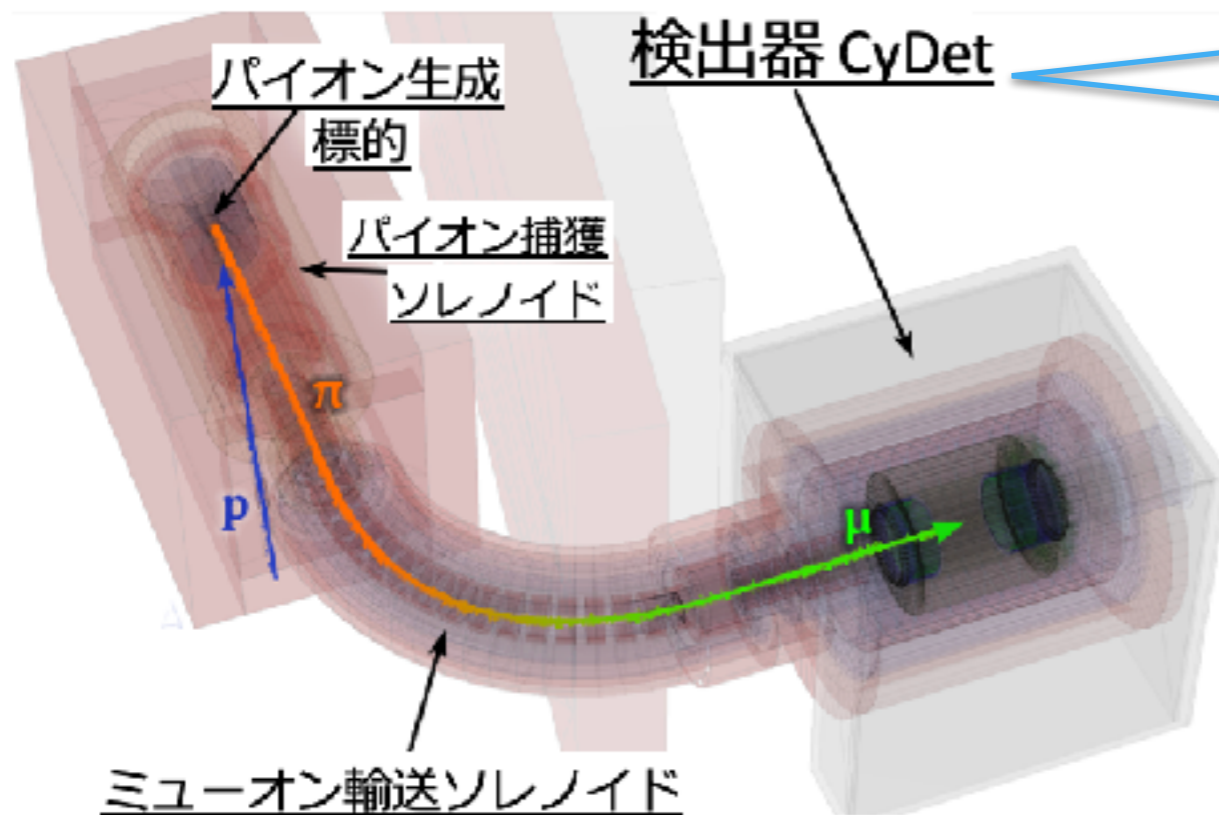
COherent Muon to Electron Transition @ J-PARC

Al原子核中でのミュオン・電子転換を探索

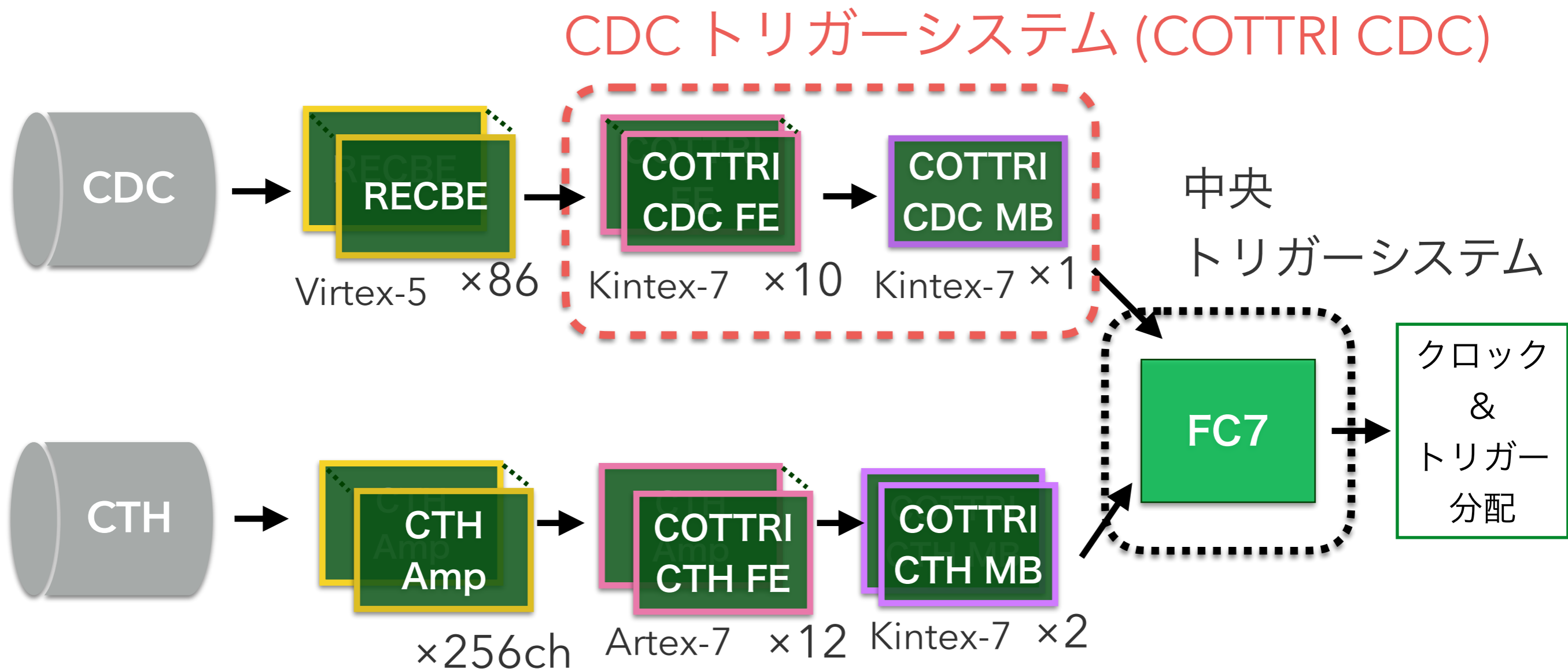


標準模型では分岐比 $\sim O(10^{-56}) \leftrightarrow$ 新物理では $\sim O(10^{-15})$

Phase-I では単一事象感度 3×10^{-15} での測定を目指す!



CyDet トリガーシステム

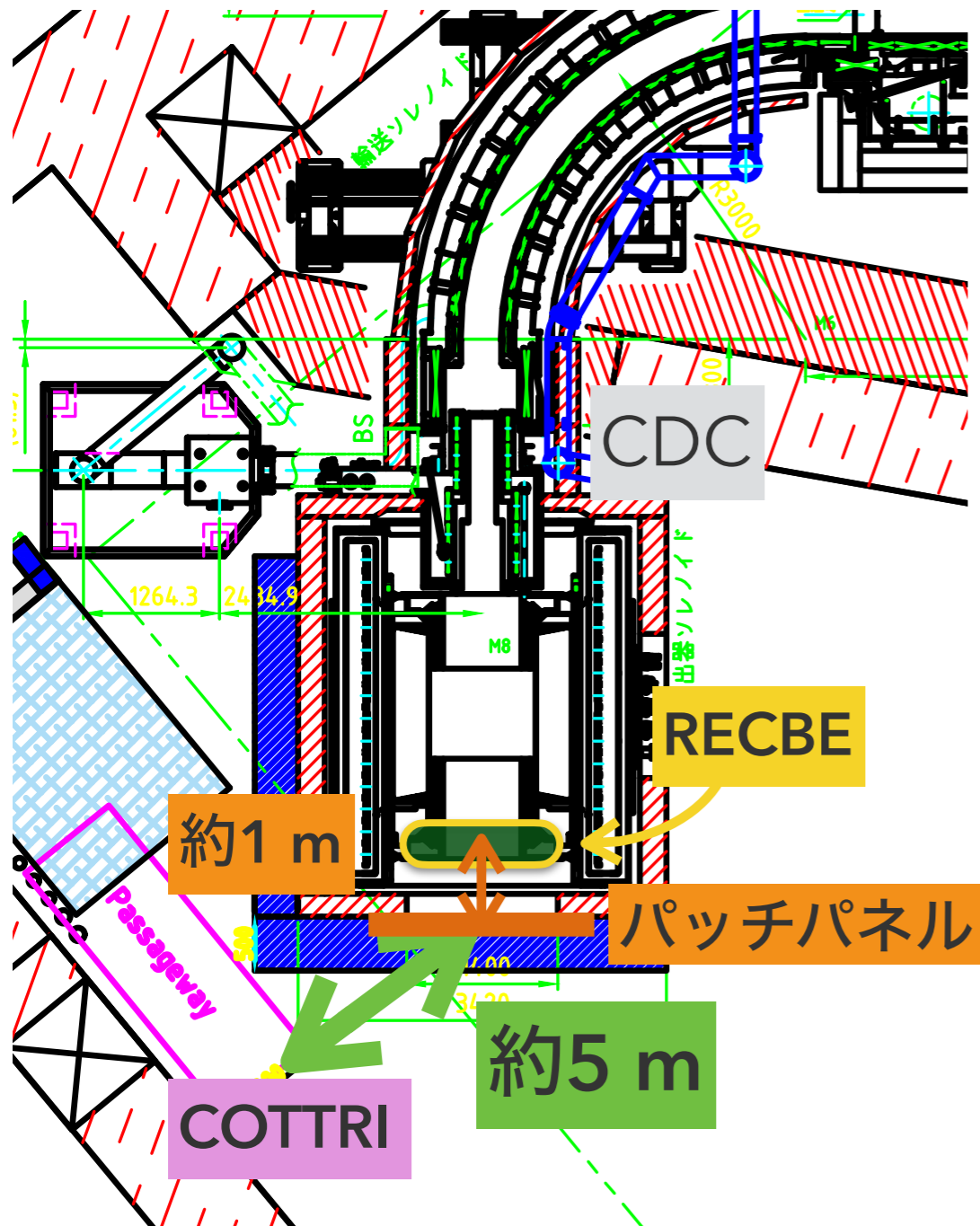


COTTRI system 全ボードの生産が完了

> 実装に向けた課題：ボード間の通信と放射線耐性

トリガーシステムの配置と通信安定性

・ 実験室レイアウト



RECBE ~ COTTRI

- ・ パッチパネルを取り付ける (RECBEから約1 m)
- ・ 5 m程度離す (放射線の影響を減らすため)

通信エラーが生じた場合、
ファームウェアを再プログラム
→ 復旧までに3分程度かかる見込み
・・・ **DAQのデッドタイム**

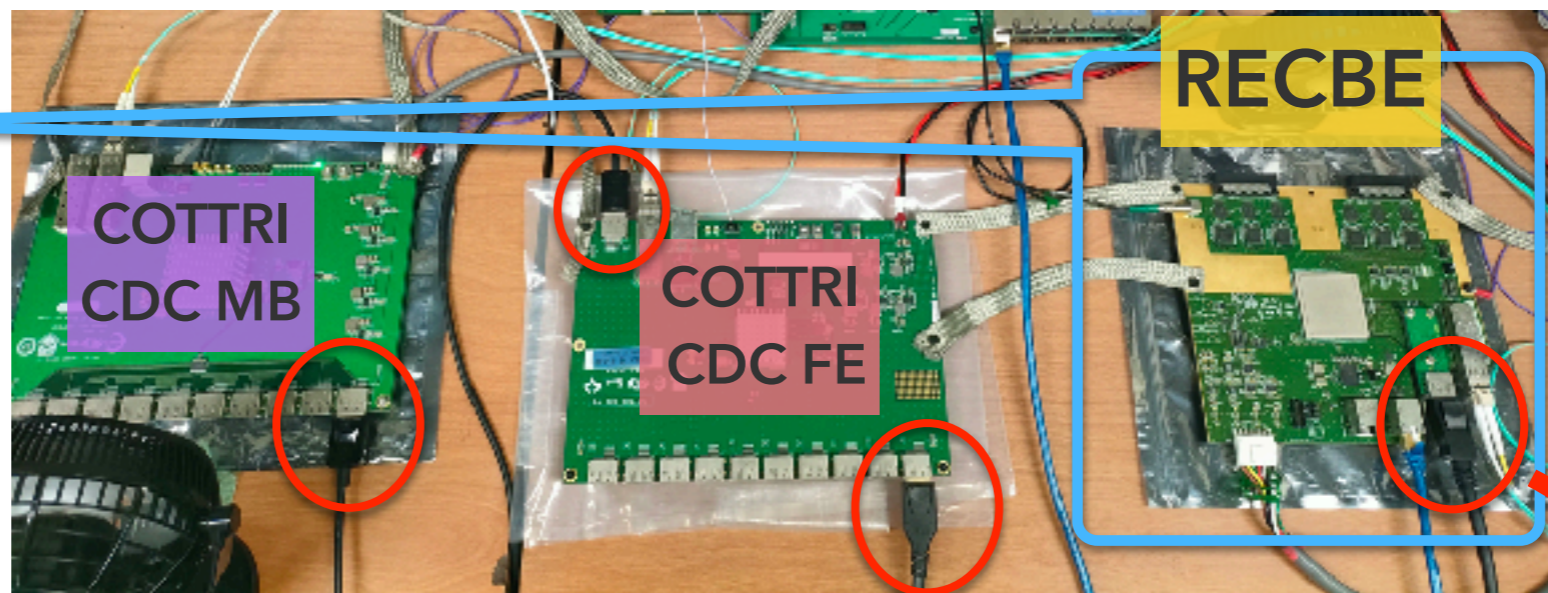
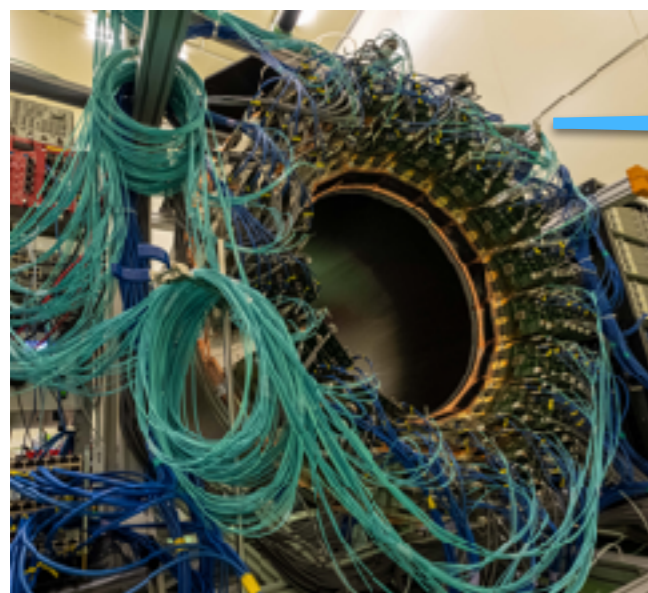
要求

約1 m 延長 + 約5 m ケーブル

デッドタイムを1%以下に収めようとする
エラーレート 6.5×10^{-7} error/sec/cable 以下

(通信レートは1.6 Gbps)

トリガーボードの通信



トリガーボードの通信： Aurora 8B/10Bプロトコル

高速シリアル通信 (RECBE -> FE : 1.6Gbps)

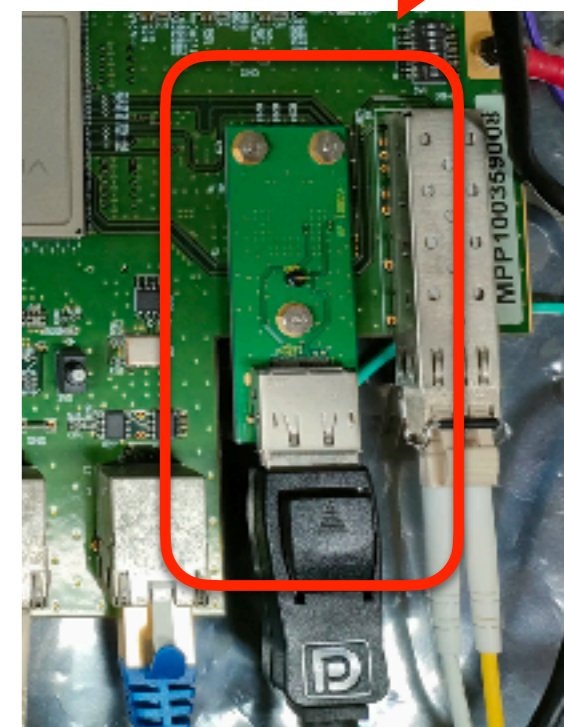
8ビットのデータに2ビット追加し符号化

接続： DisplayPortケーブル

4 lane 差動信号、1Gbps以上の高速信号に対応

Version 1.0(2006年) ~ 2.1 (2021年)

現在RECBE DisplayPort アダプタ基板を大量生産中 ->
電磁放射ノイズ削減のため、上下にシールド層を追加



DisplayPort ケーブルの選定

延長ケーブル : 0.9 m, Startech ver 1.2 →



延長と繋いで
通信確立



5 m :

- (a) Startech ver.1.2 -> ○
- (b) Startech ver.1.4 -> ▲
- (c) VENTION ver.1.2 -> ✗
- (d) Club3D ver.1.4 -> ✗
- (e) MacLab ver.1.4 -> ✗

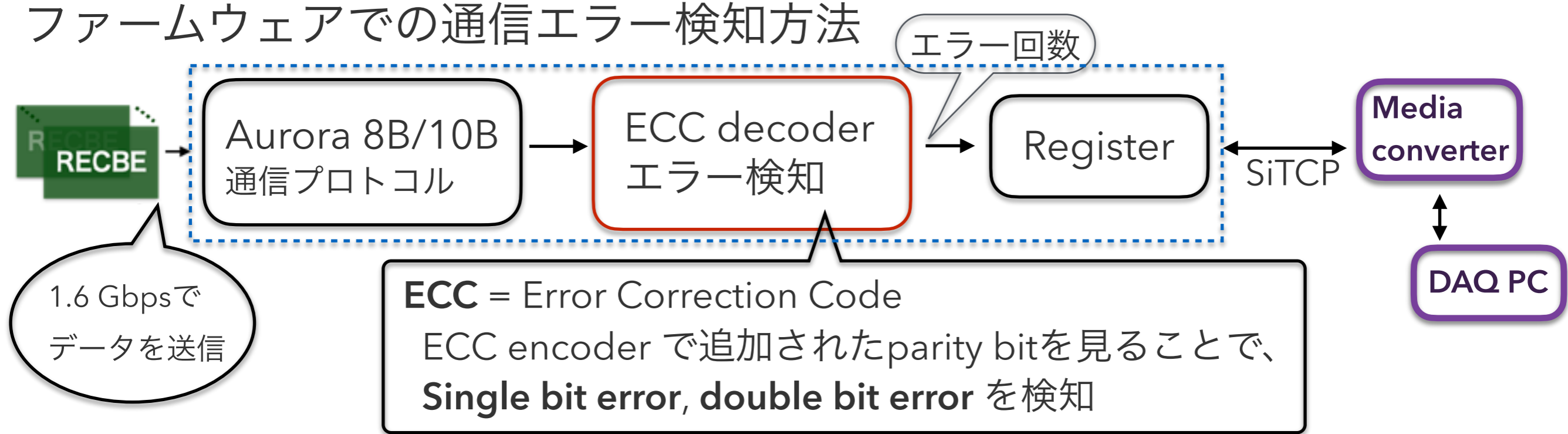
4 m : Startech ver.1.2 -> ○

同じメーカー同じ規格でのみ成功

-> 0.9 m + 5m or 4m (Startech製, ver.1.2)を用いて通信テスト

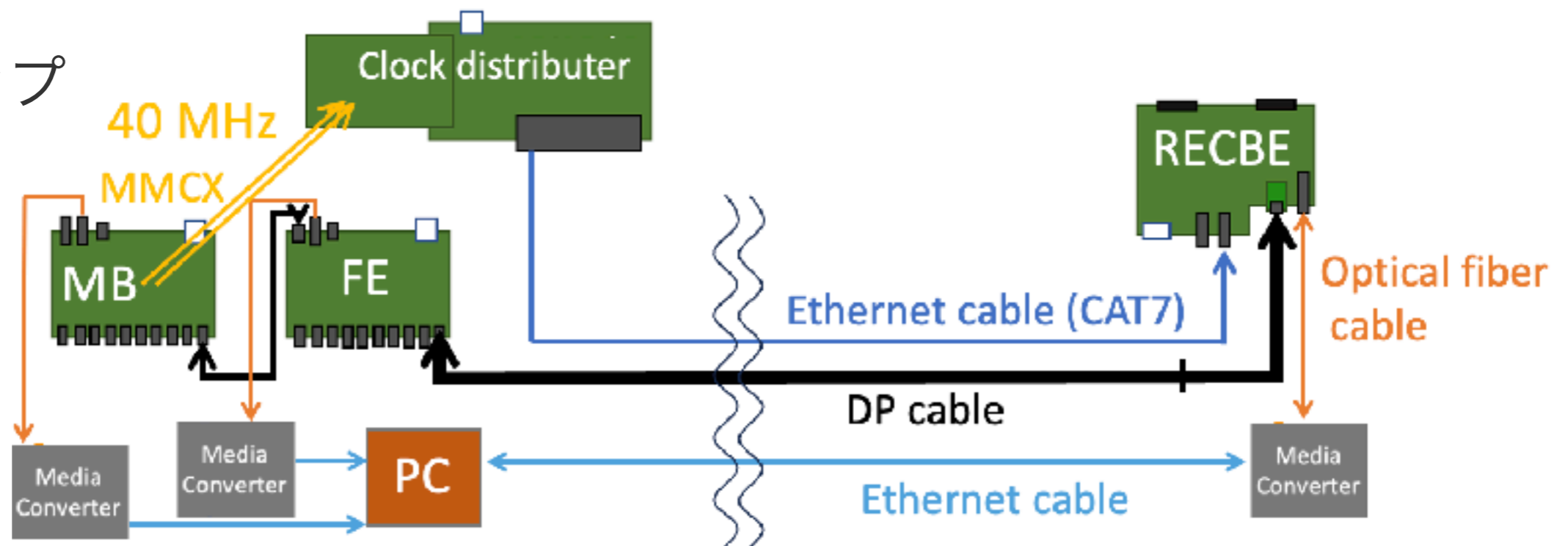
通信安定性試験 測定方法

ファームウェアでの通信エラー検知方法

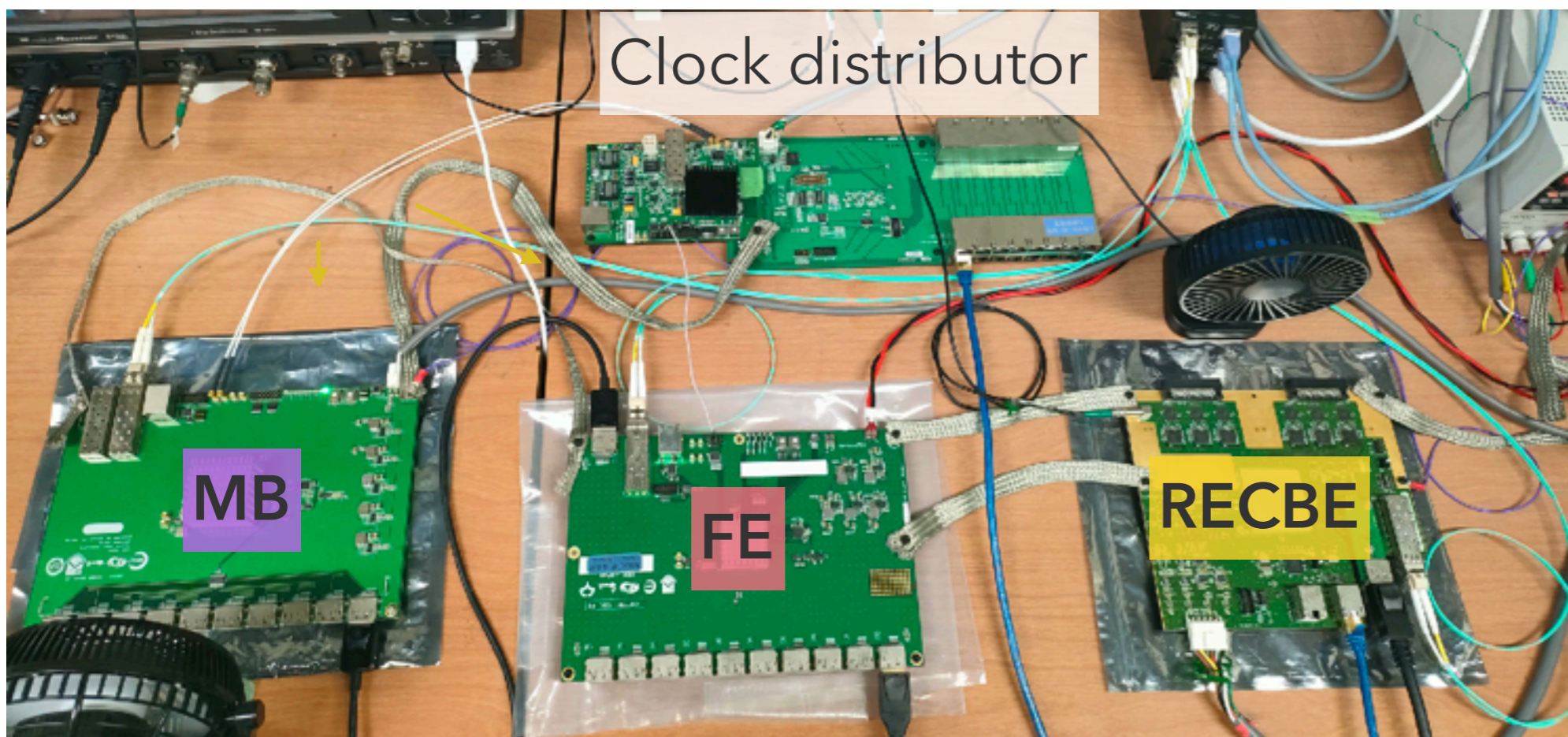


+ 通信が途切れた回数、データの破壊をAuroraモジュールで検知

セットアップ



通信安定性試験 セットアップ



DP ケーブルの様子
(延長+5 m)



DP cable

1 m

DP cable

0.9 m 延長(startech ver1.2) + 4 m (startech ver1.2)
5 m (startech ver1.2)

通信安定性試験 測定結果

$$\text{エラーレート} = \frac{\text{エラー数}}{\text{測定時間}} \text{ error/sec}$$

ケーブル	測定時間 [s]	全通信データ量 [bits]	エラー数	エラーレート上限 (95% C.L.)
4 m + 0.9 m	733,000 (約200 h)	1.17×10^{15}	0	$< 4.8 \times 10^{-6}$ error/sec
5 m + 0.9 m	1,763,100 (約5000 h)	2.80×10^{16}	0	$< 2.2 \times 10^{-6}$ error/sec

エラーなし！

6.5×10^{-7} error/sec
でデッドタイム1%

COMET Phase-Iでは、86本のDisplayPortケーブルを用いる

一日に起こりうるエラー回数は、4 m + 0.9 m : 41回未満 -> デッドタイム 8.5 %未満

現時点で

5 m + 0.9 m : 15 回未満 -> デッドタイム 3.1 %未満

→ 追加測定が必要 CDC実機に組み込んだ試験をする

放射線環境

読み出しボード RECBE 周辺は高放射線環境

150日間の測定で、中性子： $\sim 10^{12}$ neutrons/cm² (1MeV eq.) (含 安全係数)

永久損傷に対する耐性は確認済み

中性子によるFPGA(CRAM)への影響

SEU (Single Event Upset)

中性子の入射によって

FPGA内のロジックが

反転する

-> 1 bitの反転は

SEU コントローラで

修正可能

URE (UnRecoverable Error)

同時に2 bit以上の反転や

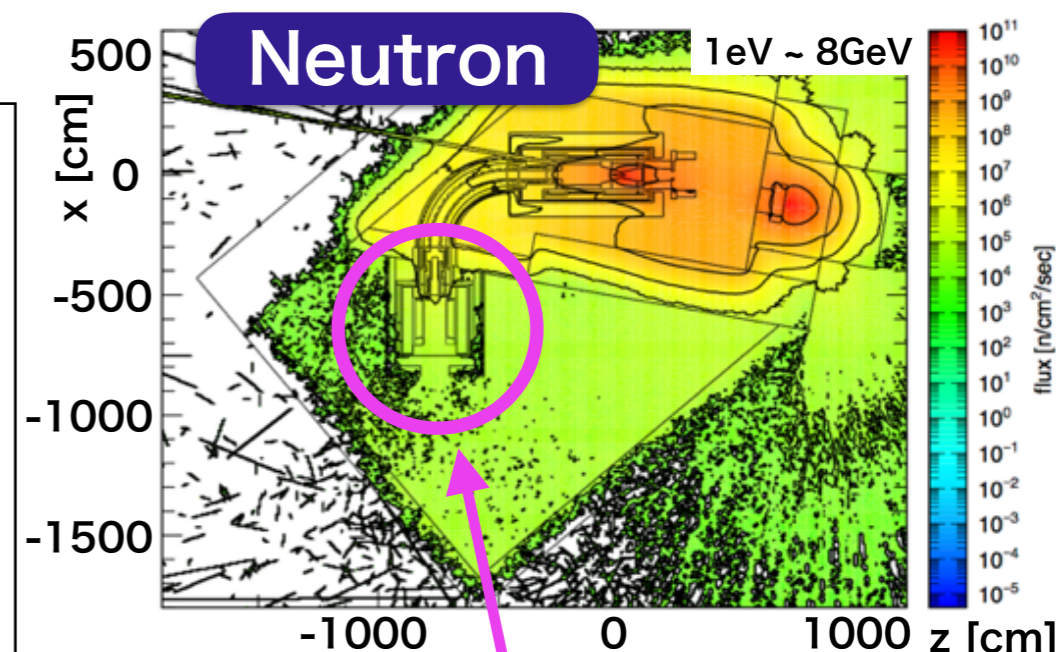
特定領域のSEUは

修正不可能

->ファームウェアを

プログラムし直す

PHITS Simulation
for COMET Phase-I



検出器領域

トリガー用モジュールを組み込んだRECBEに
新たにSEU コントローラ を実装

-> **最終版 RECBE ファームウェア!**

デッドタイム

UREが起こった際の、

DAQ復帰にかかる時間：約3分

中性子試験

2023/9/6 ~ 9/7 @神戸大学タンデム加速器

3 MeV 重陽子ビーム

標的：Be



中性子エネルギー：2 MeV

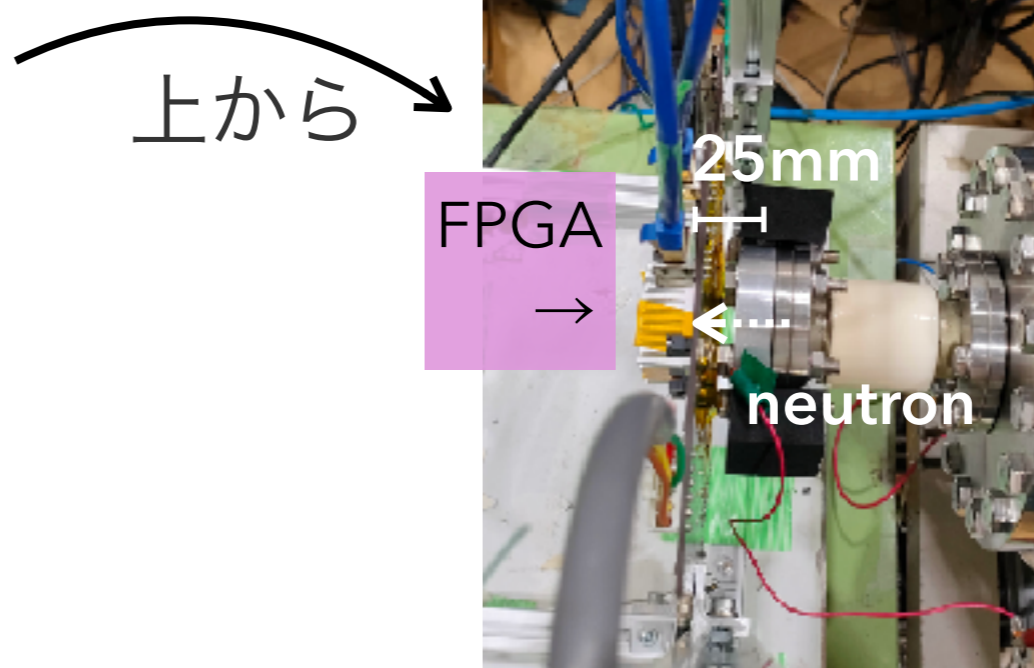
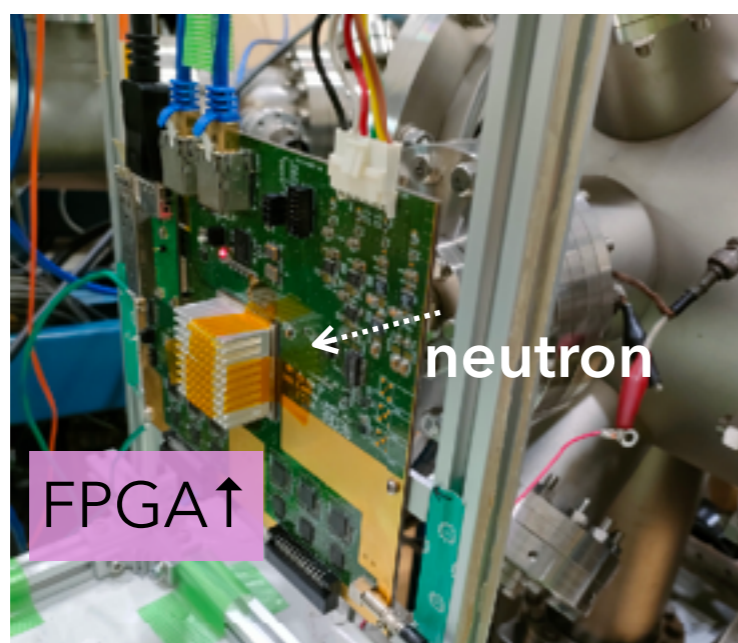
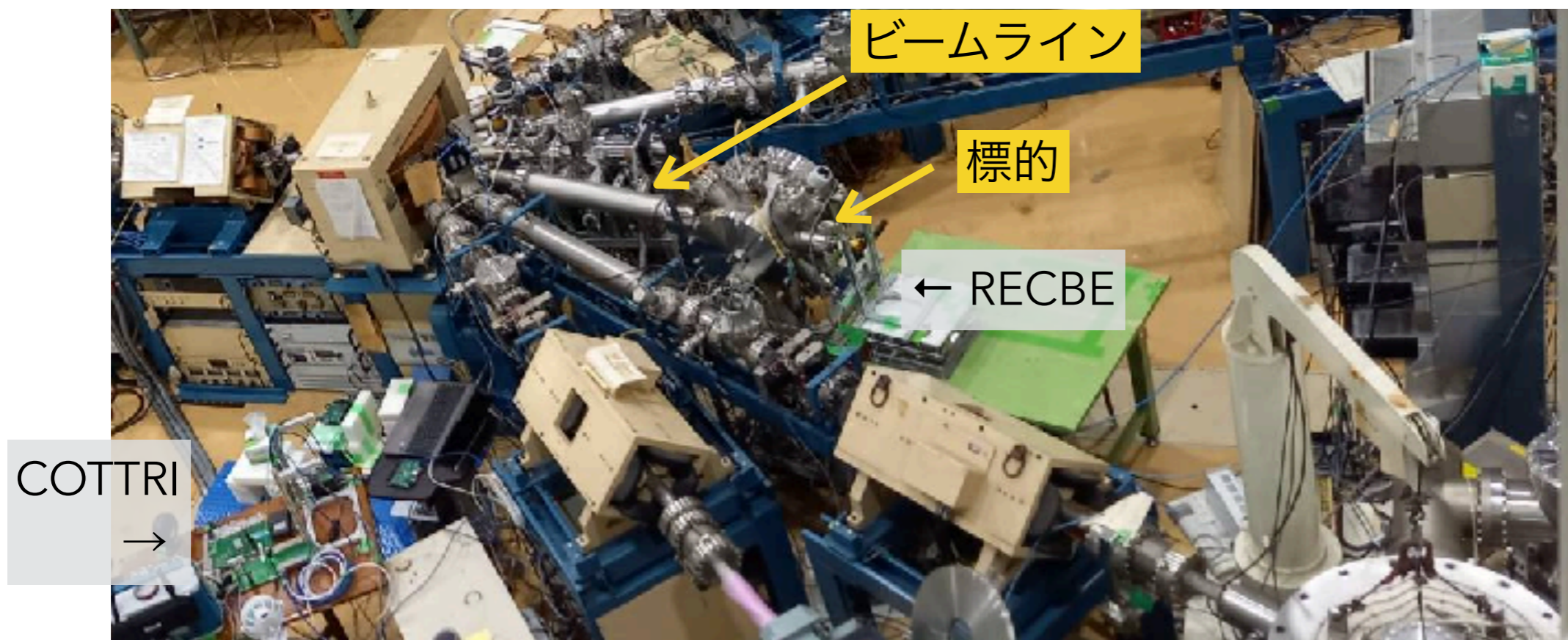
中性子流量平均：

$$1.4 \times 10^7 \text{ n}_{\text{eq}}/\text{cm}^2/\text{sec}$$



目的：トリガー用モジュールと、**SEUコントローラ**を追加した
最終版ファームウェアを実装したRECBEの
中性子環境下での動作試験

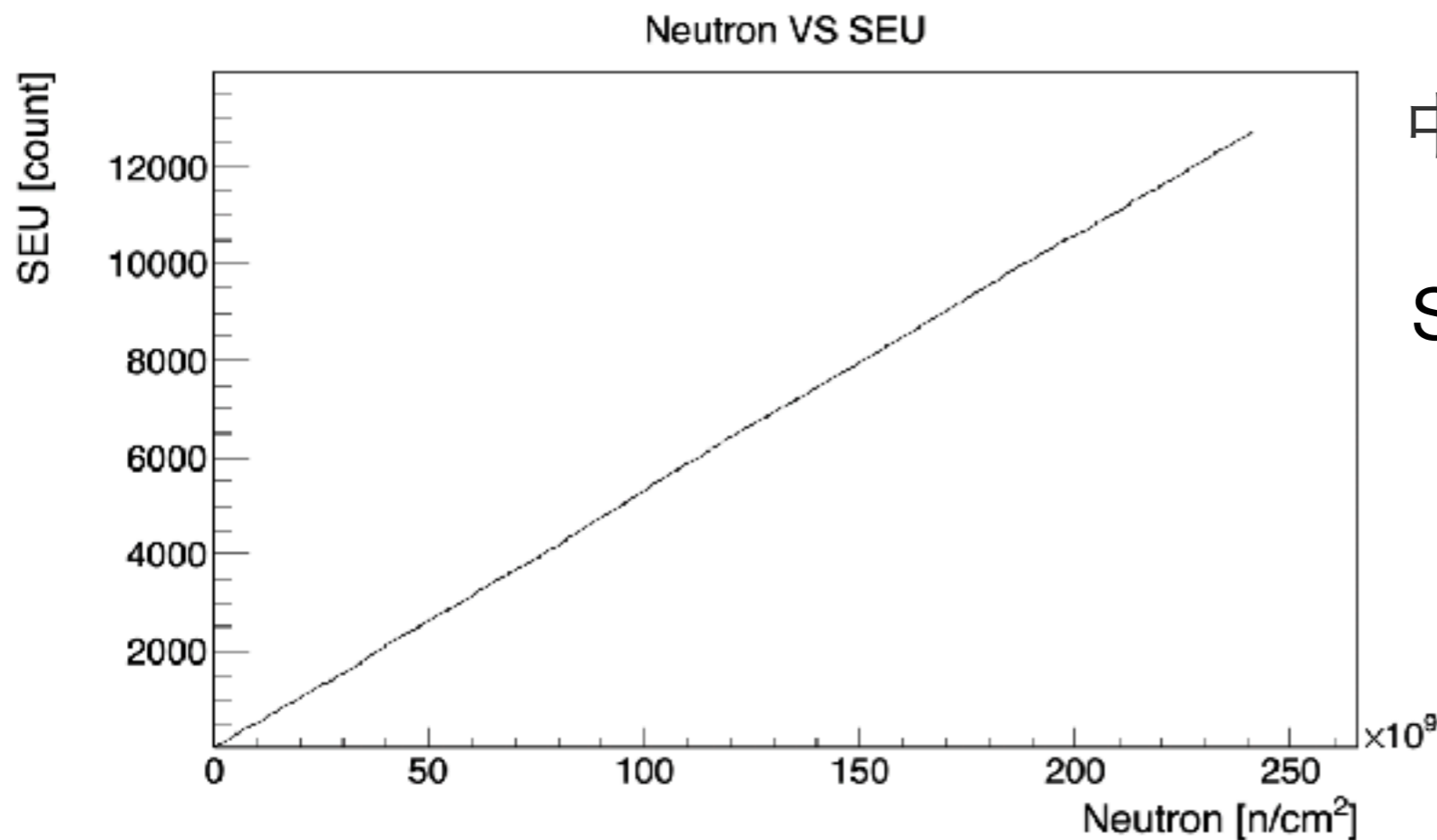
中性子試験セットアップ



結果：SEU

総中性子量： $(2.41 \pm 0.74) \times 10^{11} \text{ n}_{\text{eq}}/\text{cm}^2$

総SEU：12,713



中性子量に比例してSEUが増

SEU レート

$$(5.3 \pm 1.6) \times 10^{-8} \text{ SEU}/(\text{n}_{\text{eq}}/\text{cm}^2)$$

過去の試験

$$(4.6 \pm 1.4) \times 10^{-8} \text{ SEU}/(\text{n}_{\text{eq}}/\text{cm}^2)$$

<https://doi.org/10.1016/j.nima.2018.10.130>

->SEU コントローラが正常に動作

結果： URE

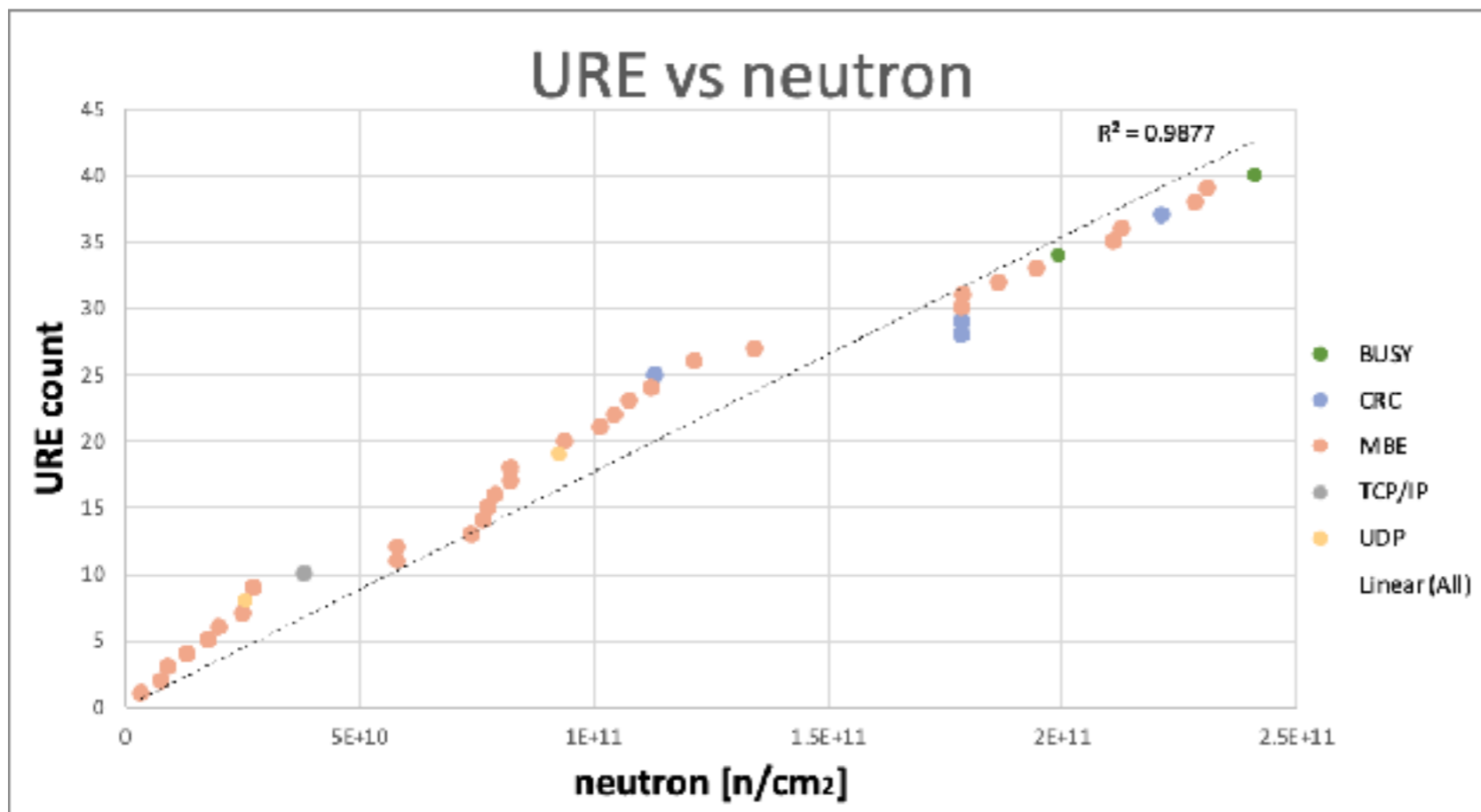
- Multi Bit Error (MBE) 31回
- SEUコントローラーのbusy信号が3秒以上オン 2回
- ビット反転が修正されずに残る 4回
- UDP通信タイムアウト 2回
- TCP/IP通信タイムアウト 1回
- (DisplayPort 通信エラー 20回)

-> 合計： 60回

$$(2.5 \pm 0.8) \times 10^{-10} \text{ URE}/(n_{\text{eq}}/\text{cm}^2)$$

-> w/o DisplayPort通信エラー
： 40回

$$(1.7 \pm 0.5) \times 10^{-10} \text{ URE}/(n_{\text{eq}}/\text{cm}^2)$$



過去の試験

DisplayPort通信は行なわず、

$$(1.4 \pm 0.4) \times 10^{-10} \text{ URE}/(n_{\text{eq}}/\text{cm}^2)$$

<https://doi.org/10.1016/j.nima.2018.10.130>

中性子耐性評価と課題

- 中性子耐性評価

中性子量：150日間の測定で、 $\sim 10^{12} n_{eq}/cm^2$ (含 安全係数)

SEU レート

$(5.3 \pm 1.6) \times 10^{-8} \text{ SEU}/(n_{eq}/cm^2)$

過去の参考値とコンシステント！

URE レート

DP 通信エラー 有り

$(2.5 \pm 0.8) \times 10^{-10} \text{ URE}/(n_{eq}/cm^2)$

DP 通信エラー なし

$(1.7 \pm 0.5) \times 10^{-10} \text{ URE}/(n_{eq}/cm^2)$

COMET phase-Iでは、読み出しに**104枚**のRECBEを使用

-> 実際のPhase-Iの測定では、1日あたり約118回 発生

DAQ損失 5.9 時間/日 ... 25%

◎対策：遮蔽を検討 再プログラムとDAQの並列化 エラー対策を強化

など。。。。

まとめ

❖ COMETはミュオン電子転換過程を探索する実験

COMET Phase-I実験におけるトリガーシステム実装に向けた
通信安定性試験と中性子照射試験を行った

結果：

- ・ 通信エラーレート：5 m + 0.9 mで、 $< 2.2 \times 10^{-6}$ error/sec (95% C.L.)
1日に発生しうるエラーは15回未満・・・デッドタイム 3.1%未満
- ・ 最終版ファームウェアを実装したRECBEで、
SEUコントローラが正常に動作していることを確認
中性子によるUREでのDAQ損失は約5.9時間/日

今後：RECBEの枚数を増やし、CDC実機でテスト
URE発生時のDAQ損失を改善する策を検討