

COMET Phase-I実験開始に 向けたトリガー開発の現状



藤井 祐樹

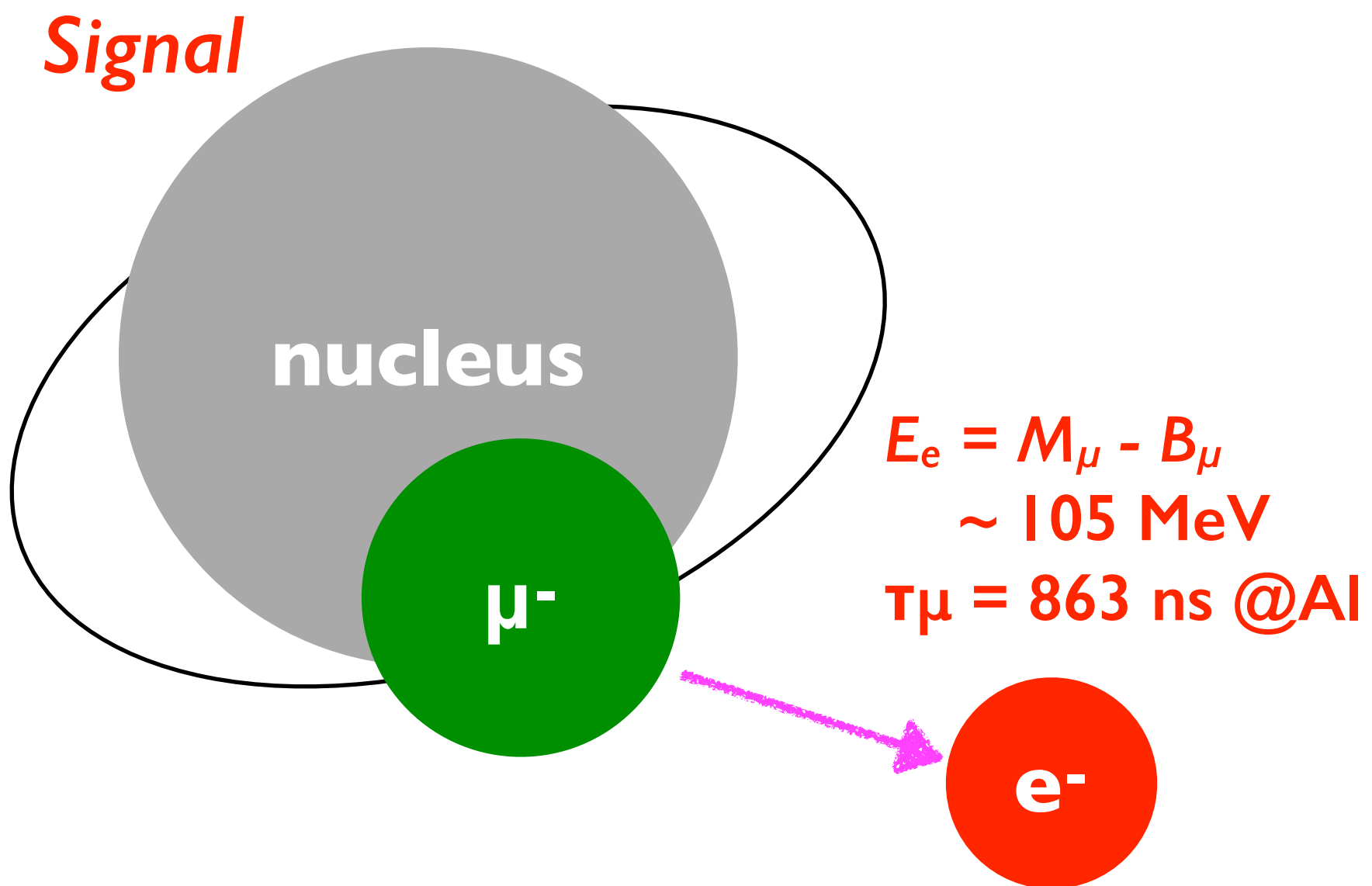
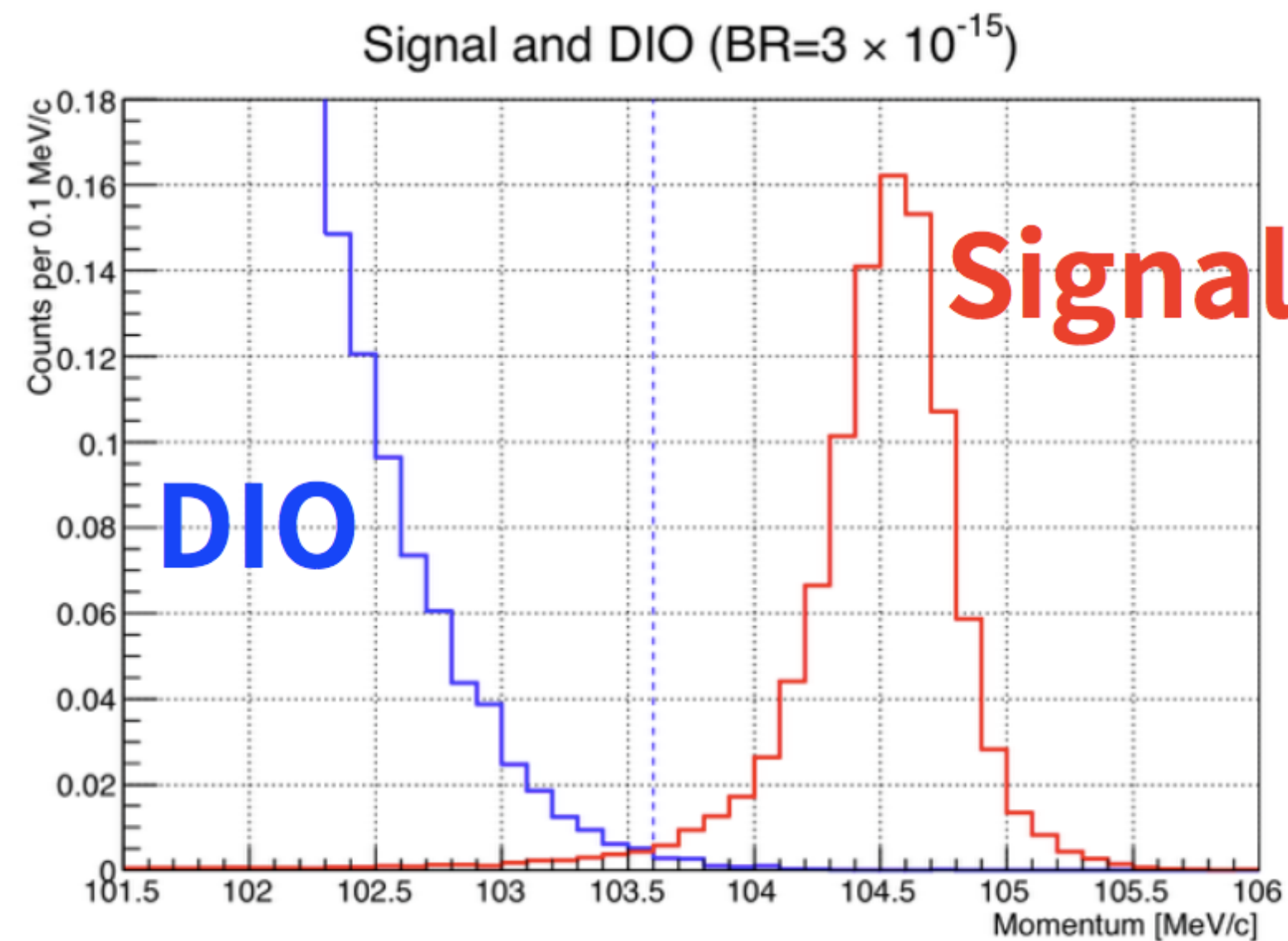
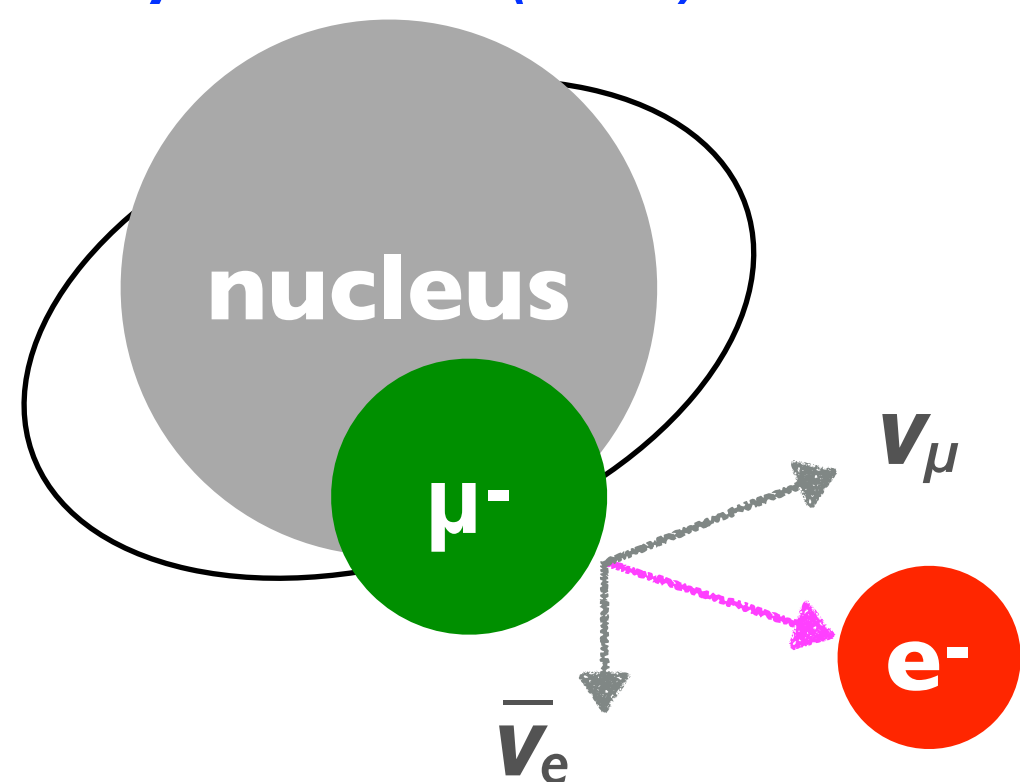
2024年11月19日

計測システム研究会

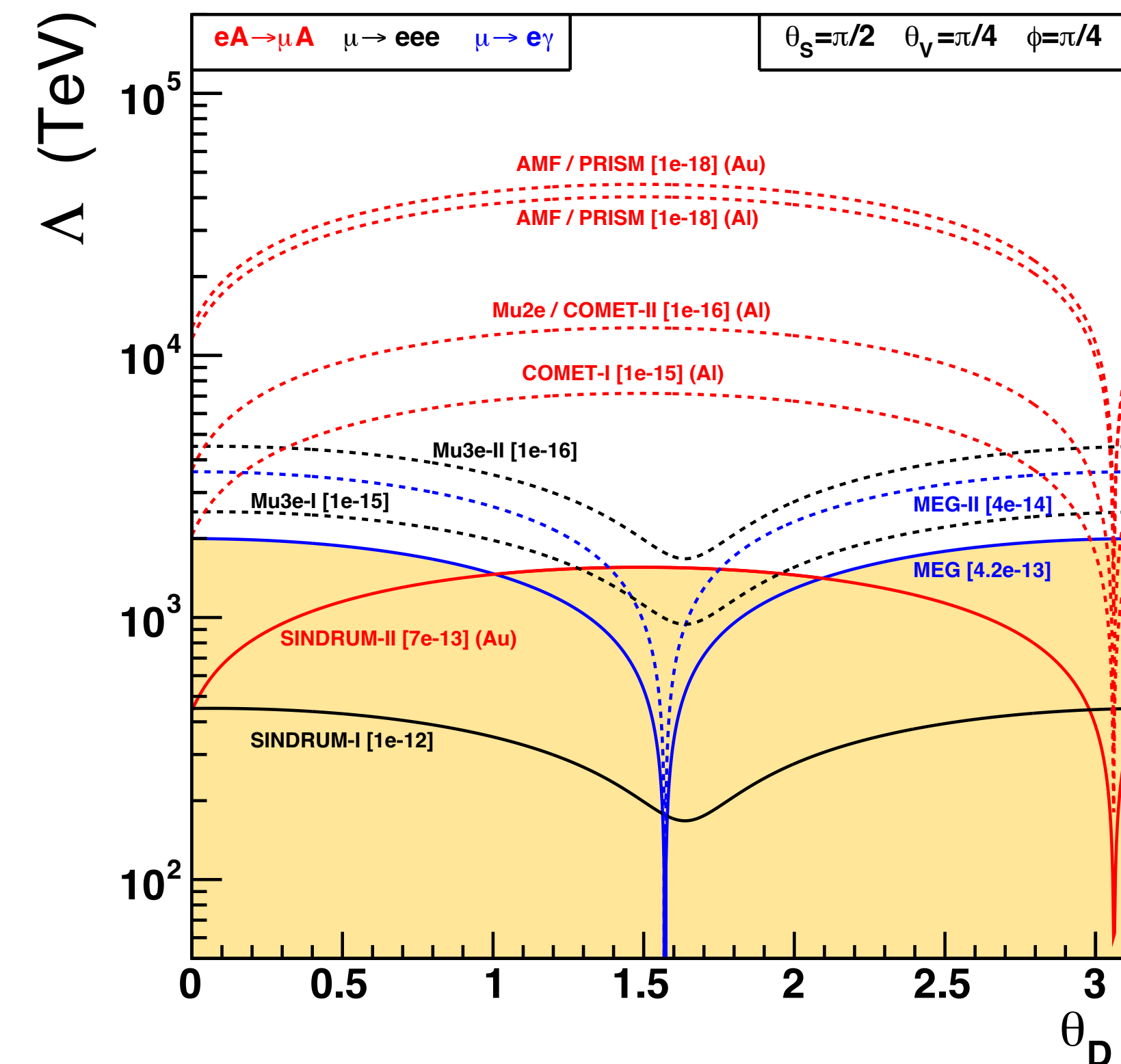
Imperial College
London

μ-e転換

Decay In Orbit (DIO)



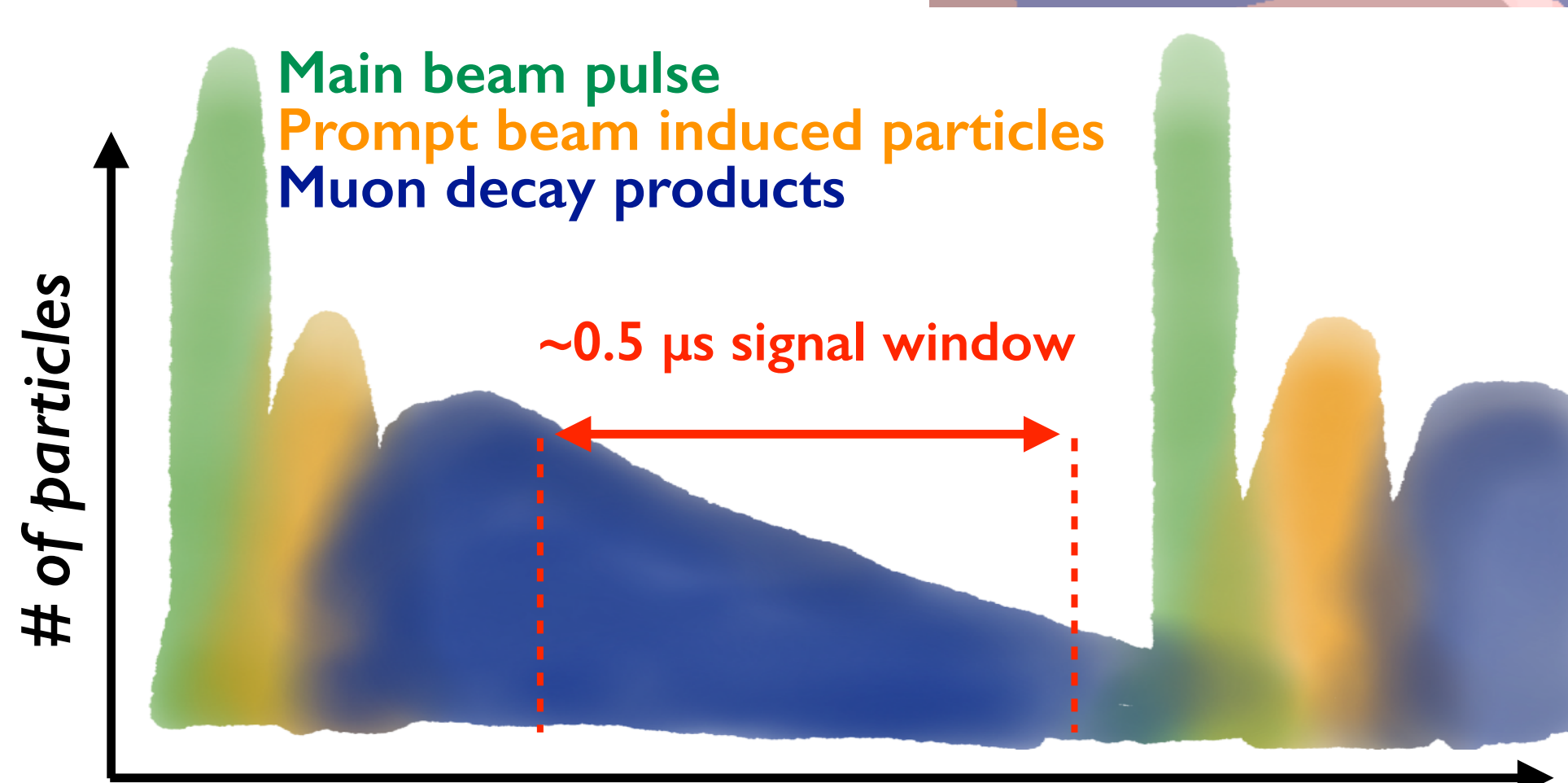
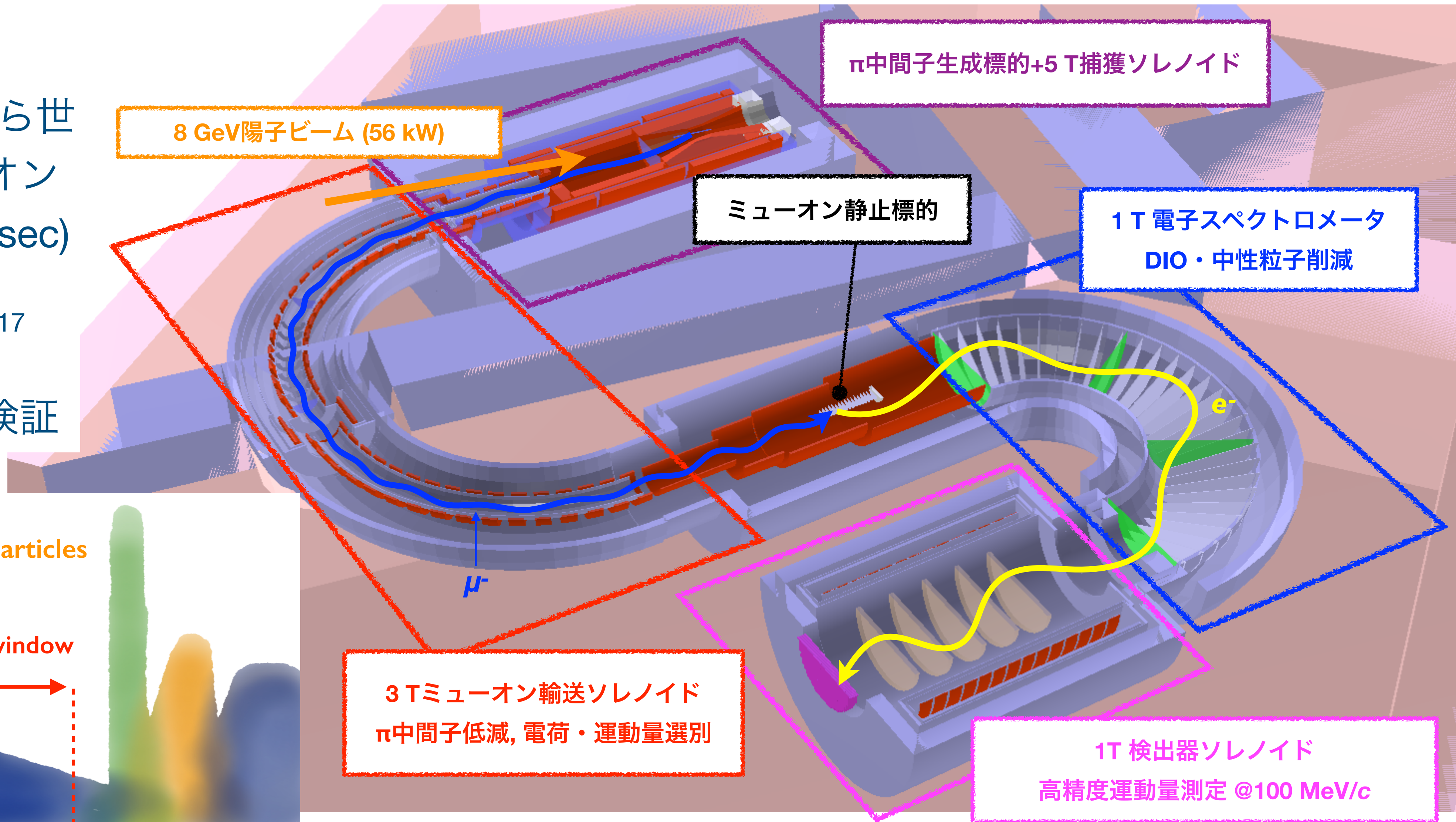
- 標準模型では禁止されており, ニュートリノ振動を考慮してもほぼゼロ
- 見つければ新物理の確かな証拠
- 多くの新物理モデルで遷移確率増大
- 現在の上限値は 7×10^{-13} 90% CL by SINDRUM II



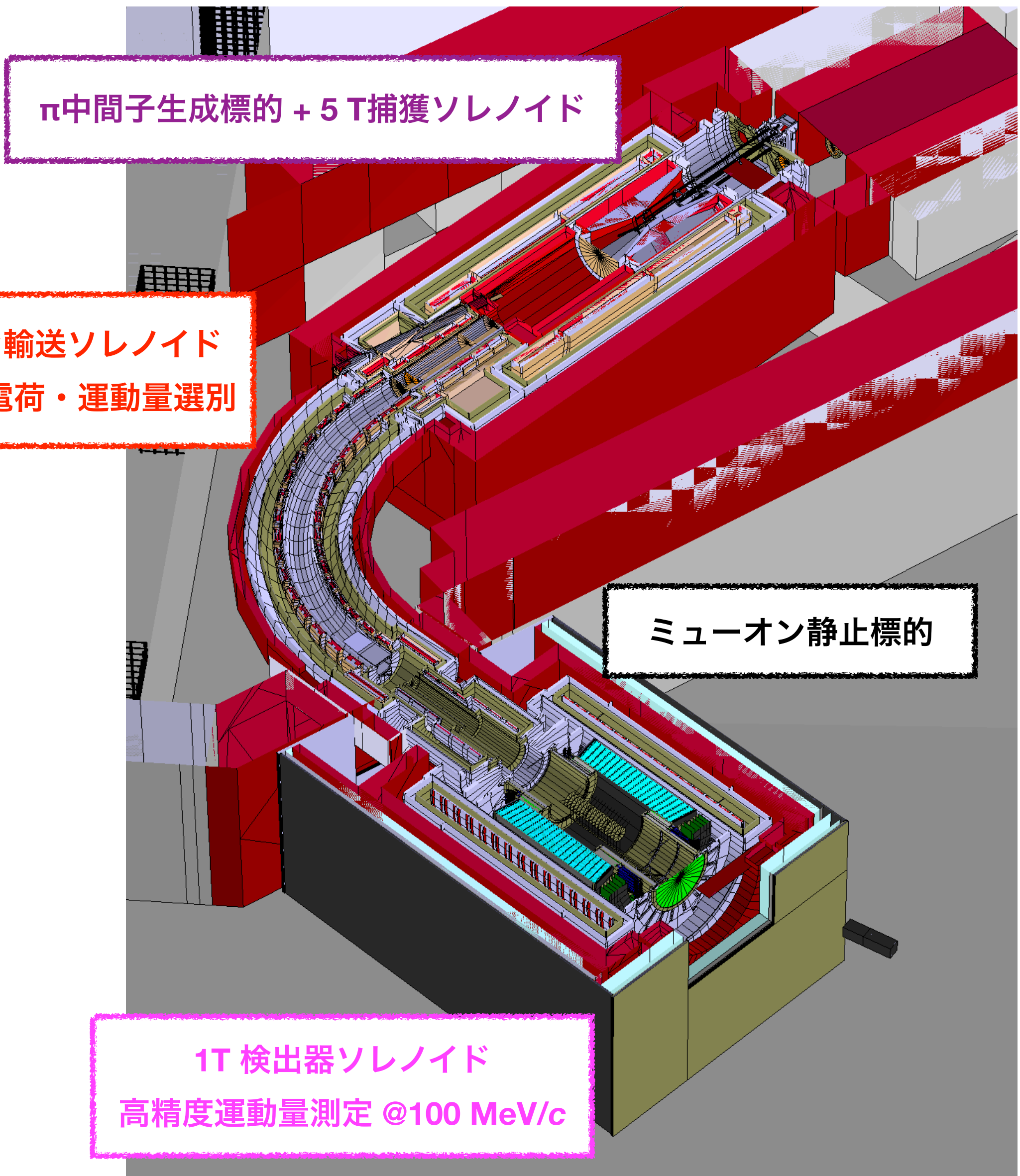
S. Davidson and B Echenard, arXiv:2204.00564

COMET実験

- J-PARC陽子ビームから世界最高強度のミュオンビームを作る ($10^{10} \mu/\text{sec}$)
- 目標単一事象感度 10^{-17}
- 多くの新物理模型を検証



COMET Phase-I (2026年開始予定)



$$\mathcal{B}(\mu^- N \rightarrow e^- N) |_{Al} = \frac{1}{N_\mu \cdot f_{cap} \cdot f_{gnd} \cdot A_{\mu-e}} = 3.0 \times 10^{-15}$$

N_μ : 合成静止ミュオン数, 1.5×10^{16} @ 150 日,

f_{cap} : 静止 μ -原子核捕獲確率, 0.61 (理論値),

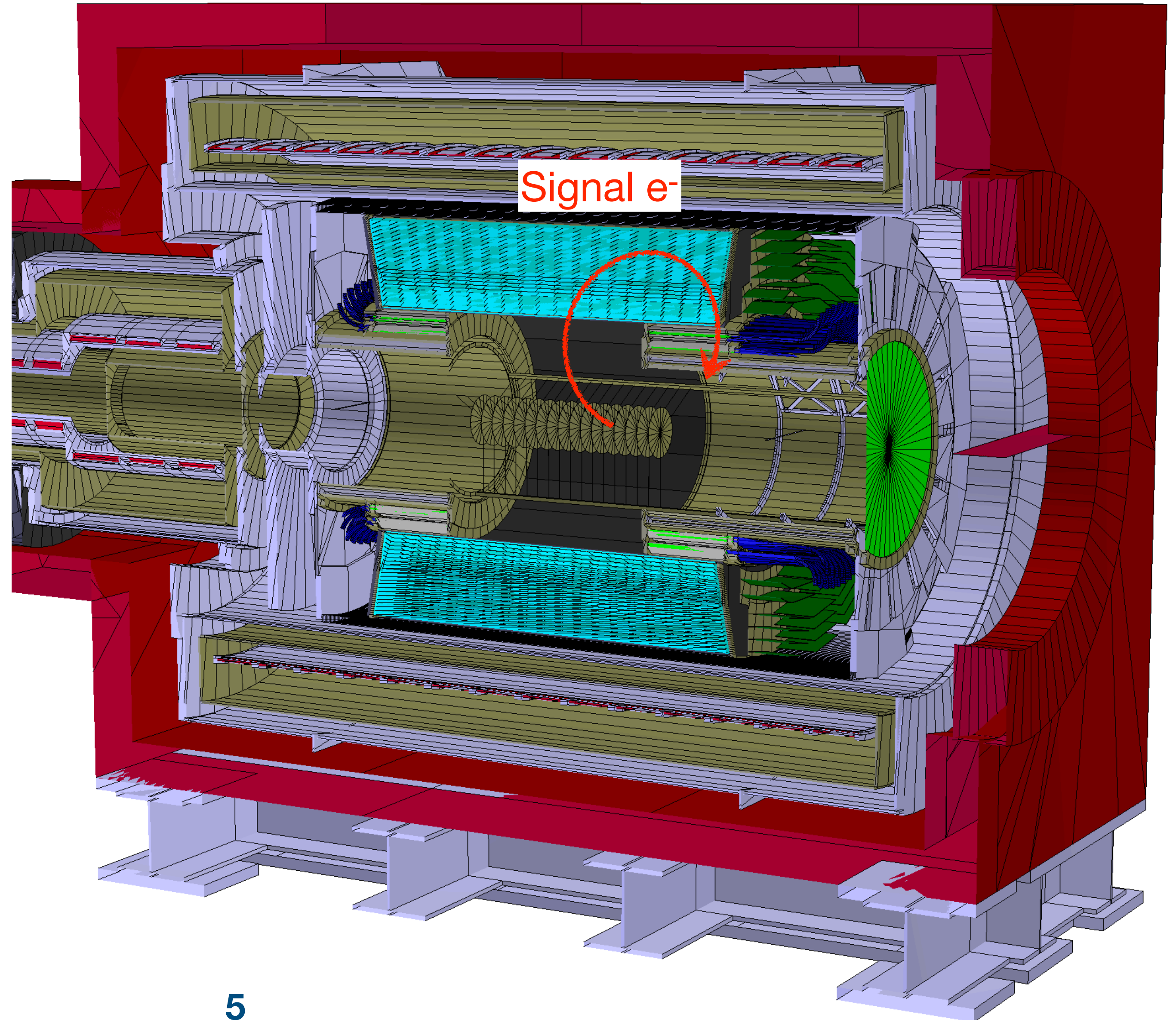
f_{gnd} : 捕獲 μ -の基底状態遷移率, 0.9 (理論値),

A_μ : μ -e信号のアクセプタンス, 0.041 (実験予想値)

Item	Value	Comment
Acceptance	0.2	Fixed
Trigger/DAQ efficiency	0.8	Subject to change
Track finding efficiency	0.99	SC
Track selection	0.9	SC
Momentum window	0.93	$103.6 \text{ MeV}/c < p < 106.0 \text{ MeV}/c$
Timing window	0.3	$700 < t < 1170 \text{ ns}$, SC
Total A_μ	0.04	At least 25% error

物理測定用検出器

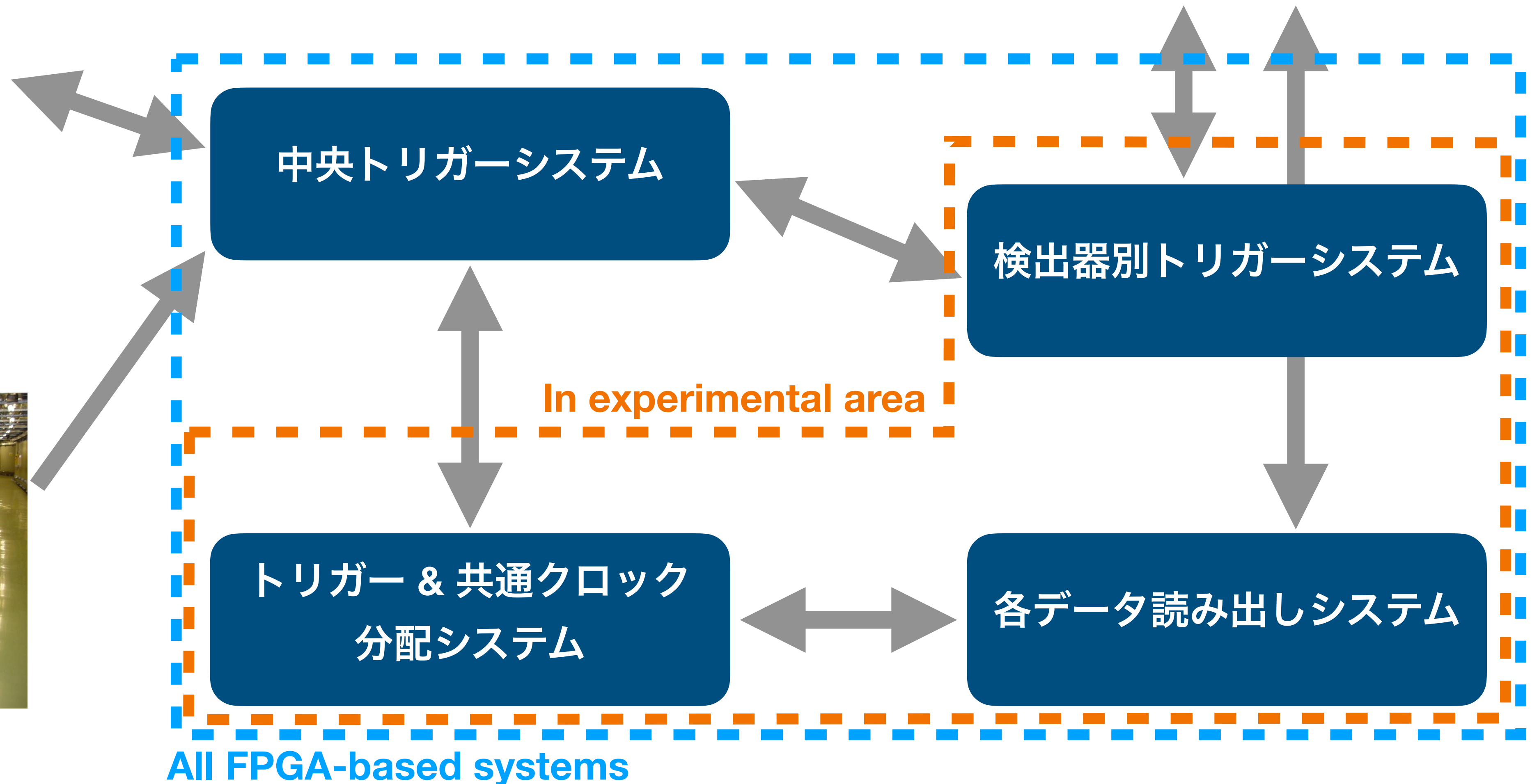
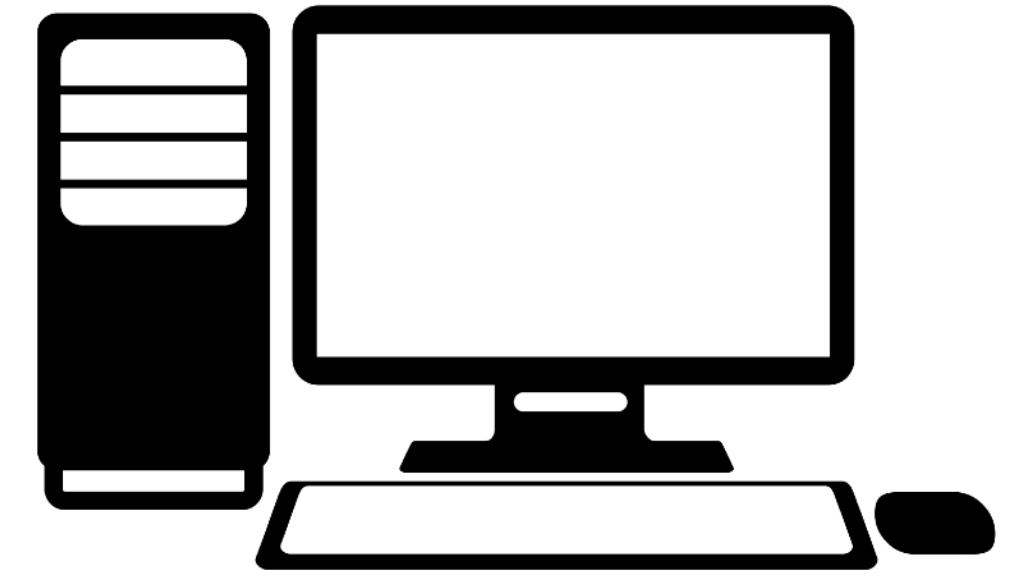
- 円筒型ドリフトチェンバー(CDC)
 - He:iC₄H₁₀=90:10
 - ~5000アノードワイヤー
 - フルステレオ角
 - 運動量分解能 200 keV/c
- 円筒型トリガーホドスコープ(CTH)
 - 256チャンネルのプラスチックシンチレータ
 - 光ファイバー+MPPC読出
 - 時間分解能 1 ns



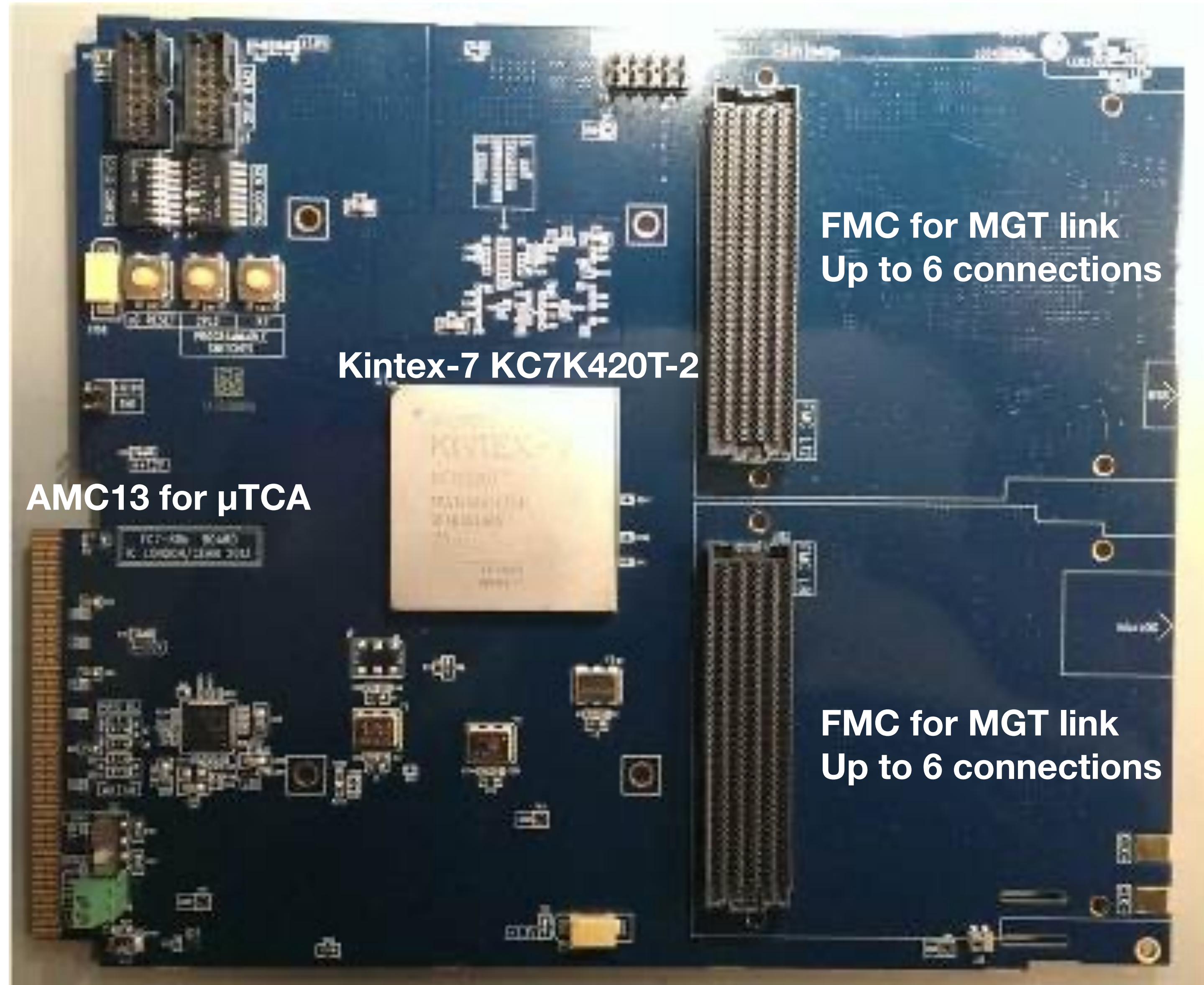
システム要求

- トリガー計数率削減 < 20 kHz
- 信号保持率 > 90%
- 固定トリガー遅延 < 6.5 μ s
- 複数システムからの情報を集約してトリガー判断
- 高放射線耐性 (10^{11} n/cm², 1 kGy @ 150日)

トリガーシステム全体像



中央トリガーシステム



Trigger control PC
Other FC7 board(s)



Front-end readout
system (SFP+)

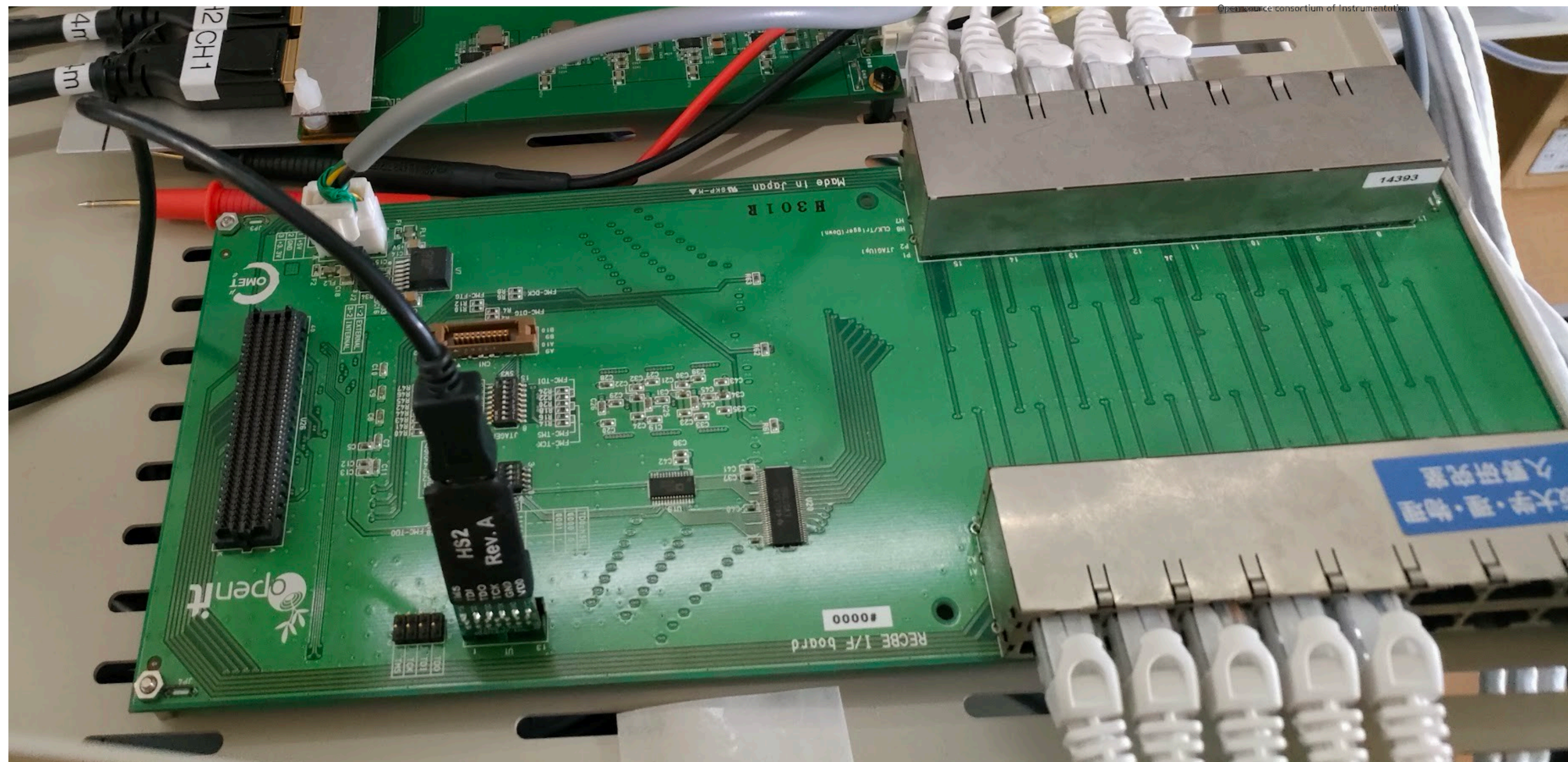
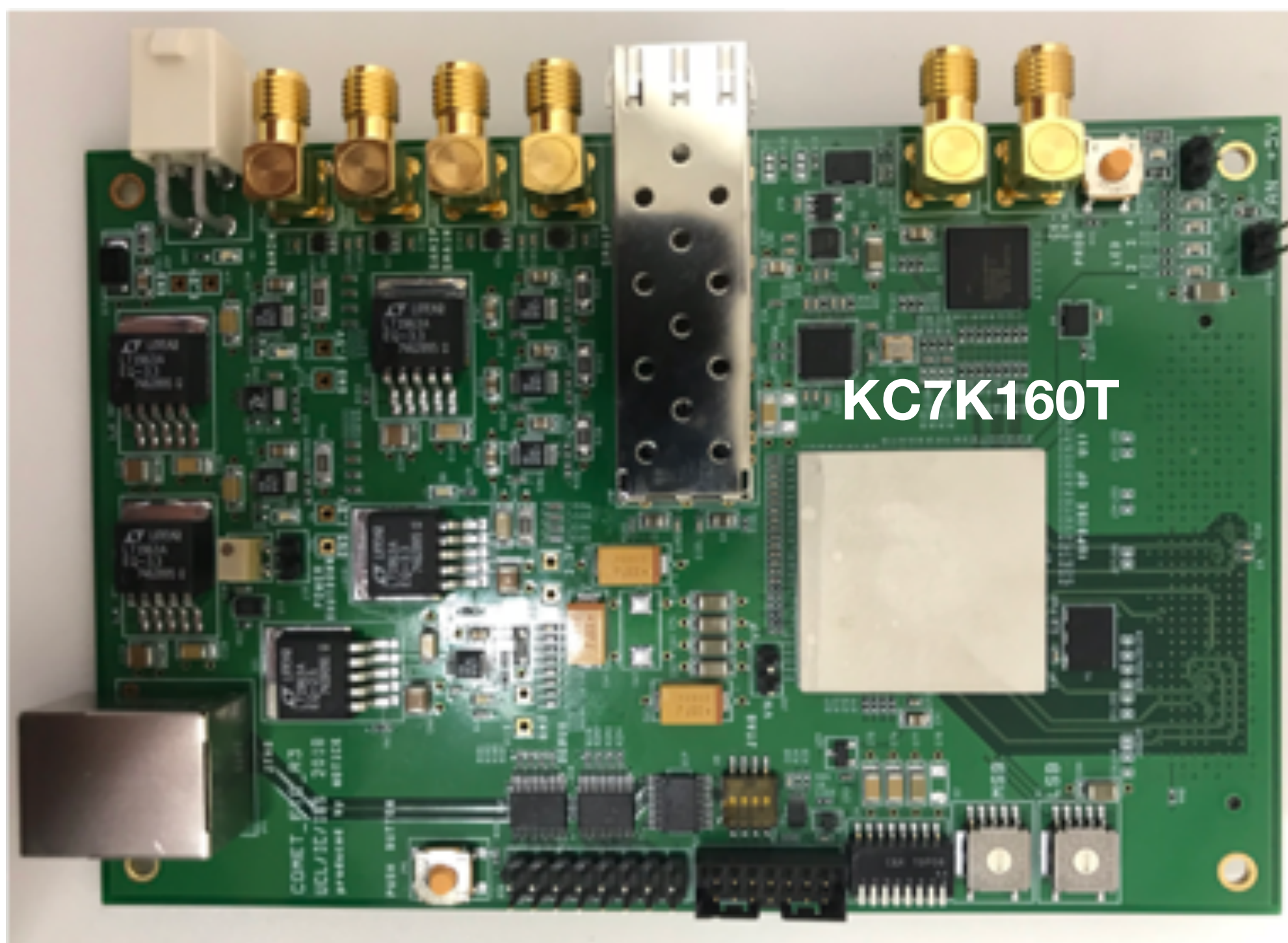


Front-end trigger
system (SFP+)



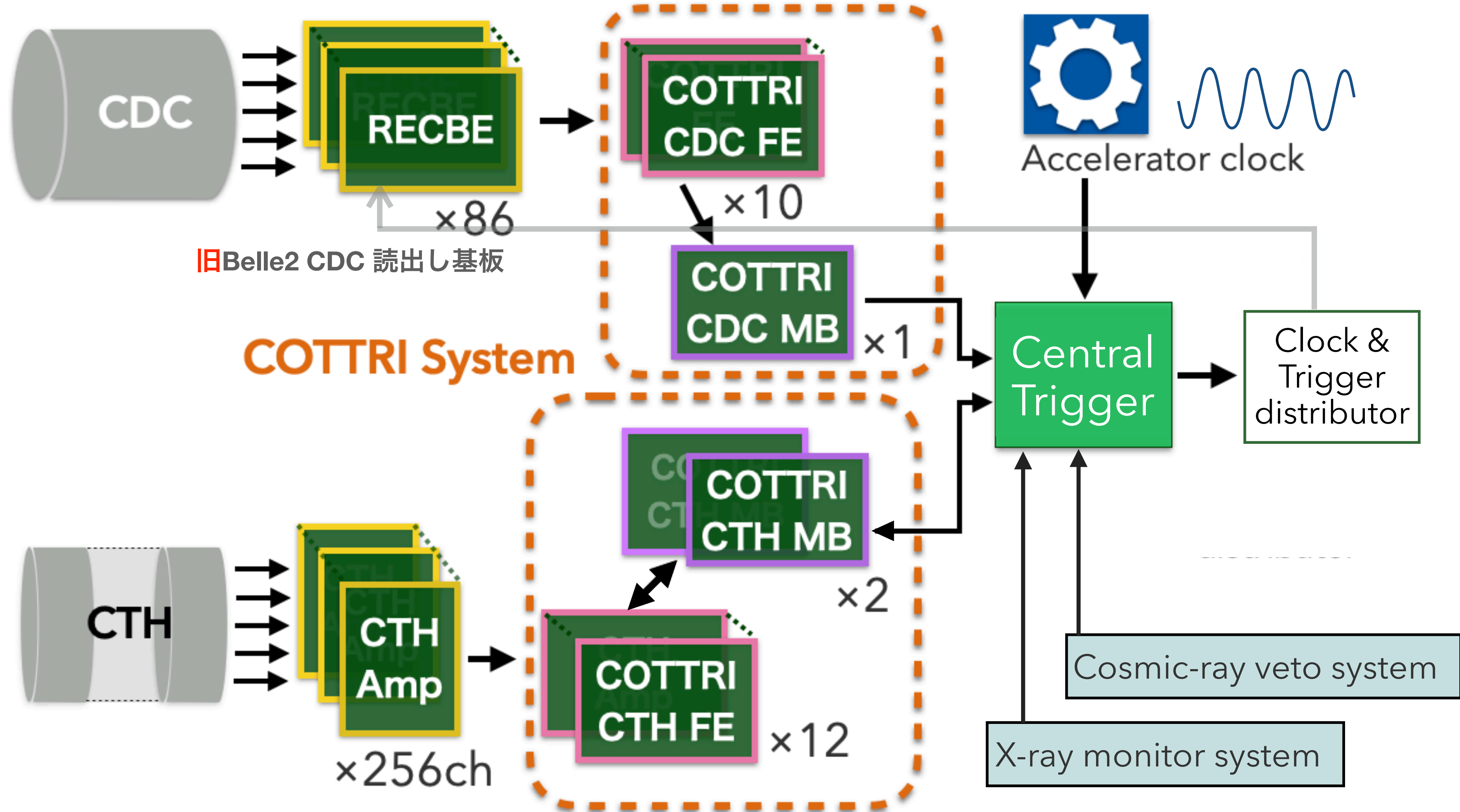
- FC7 (CMS製)
- 韓国グループ担当

トリガー&クロック分配システム



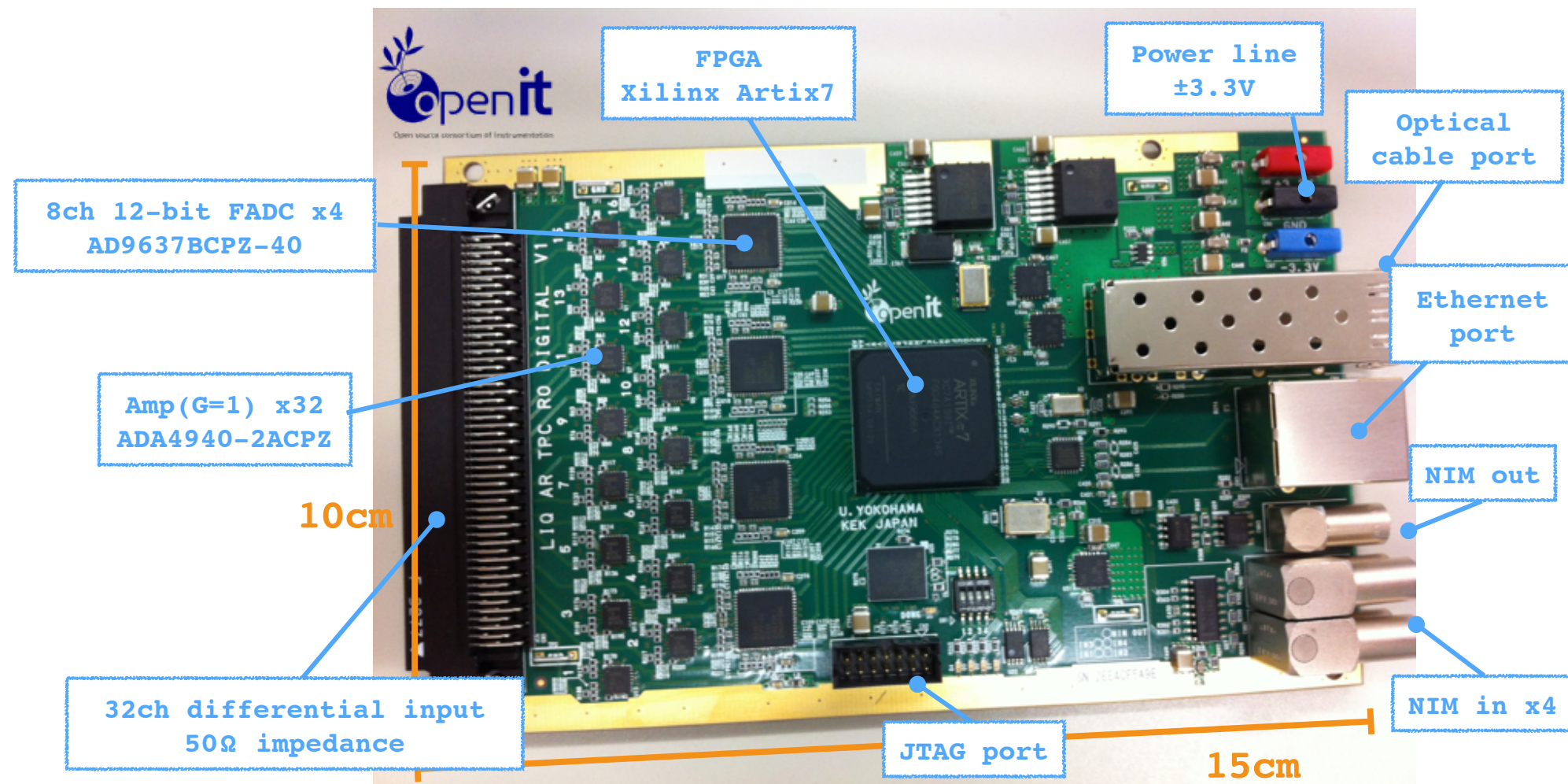
- FMCコネクタ経由でトリガー信号・共通クロックをCDC読出し基板104枚に分配
- 分配基板経由でファームウェアプログラミングも行う

COTTRI (COmeT TRigger)システム



10年前、本研究会にて

1st prototype (2)

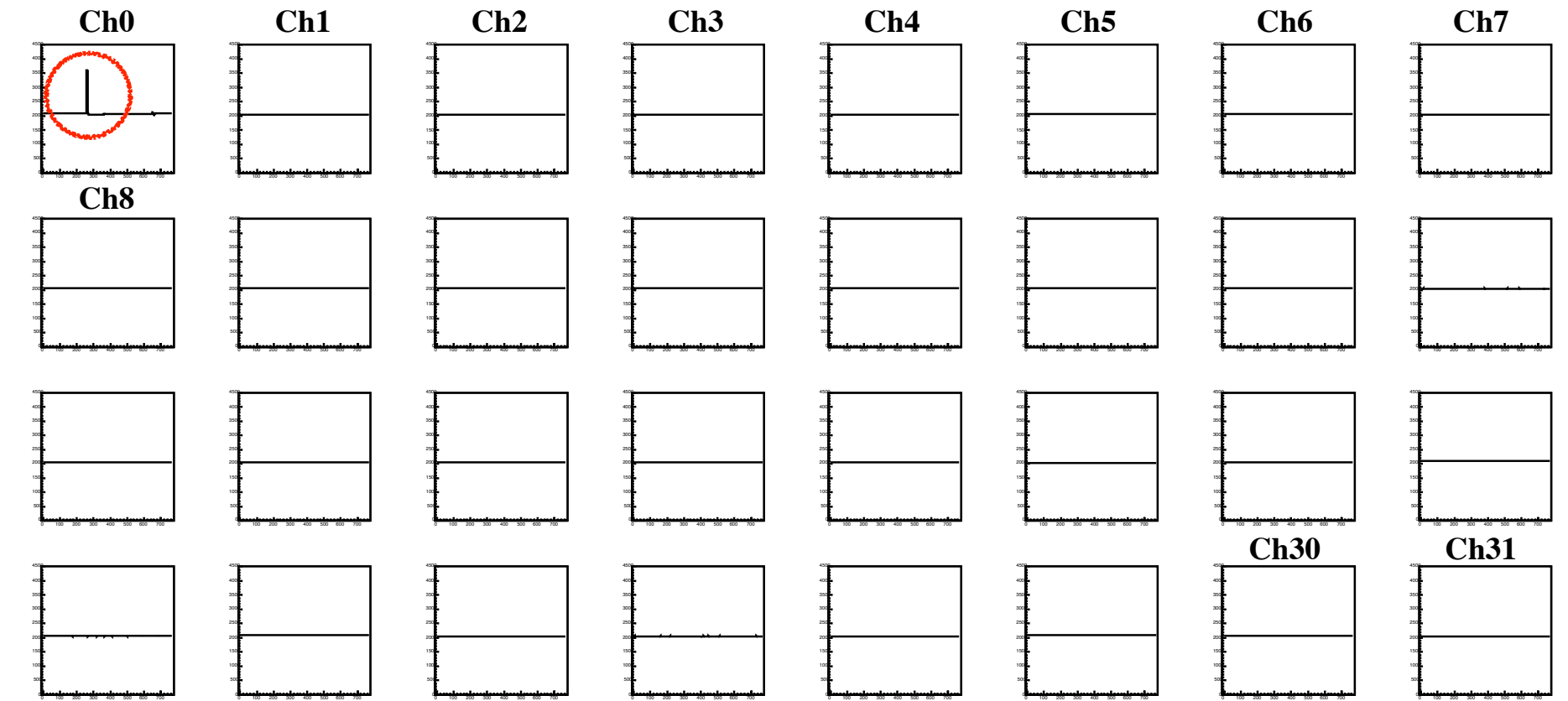


1部のアナログ回路部を除いてほとんどKEK Liquid Arグループからの流用
 なんと読み出し用Firmwareサンプルまで!!!
 Liquid ArグループとOpen-Itのサポートに感謝

10

- FPGAの工の字も知らない状態からスタート
- 坂下さんからボードを借りてFirmwareだけ弄って発表
- 試験結果の報告内容がしょぼい

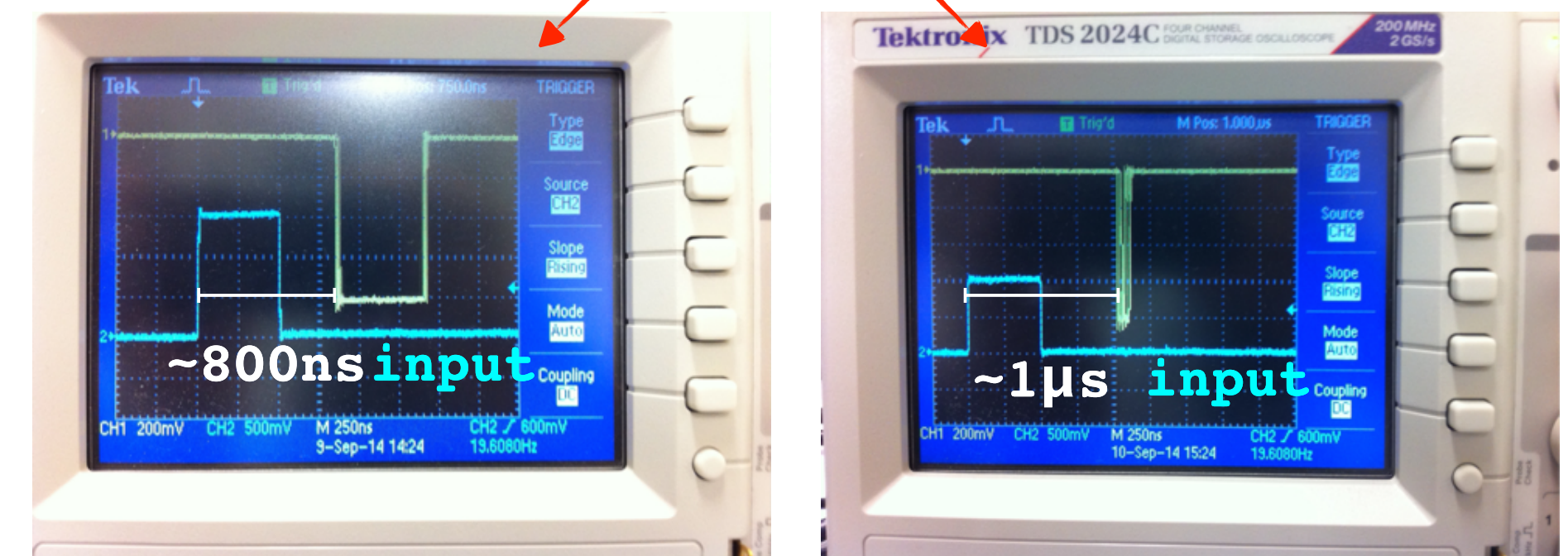
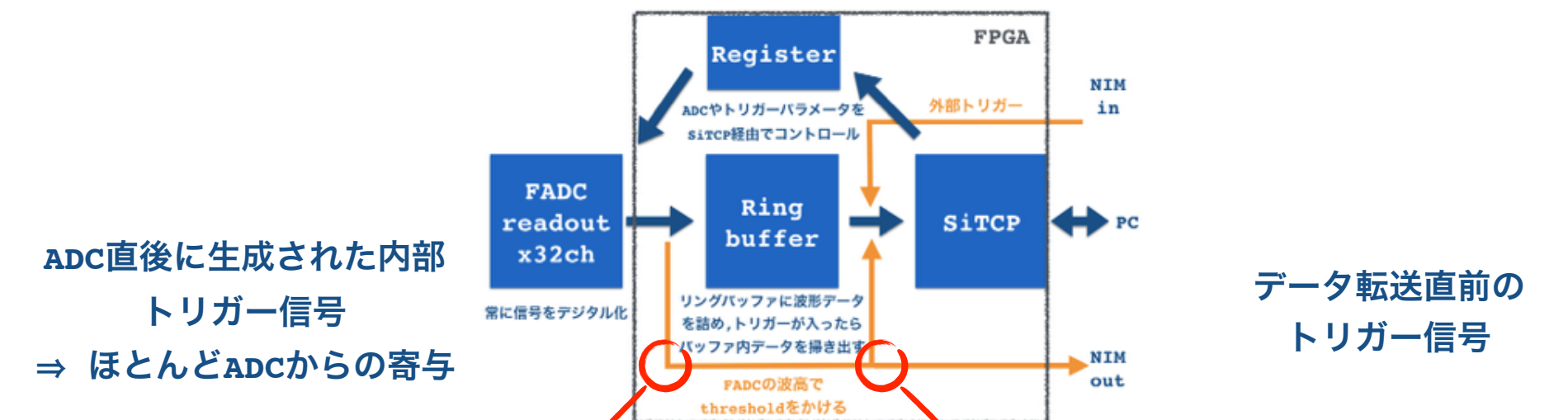
試験結果 (2)



- SiTCP経由で取得したデータをチェックする
- 正しいチャンネルに信号が見えている
- セルフトリガーでデータが取れた

15

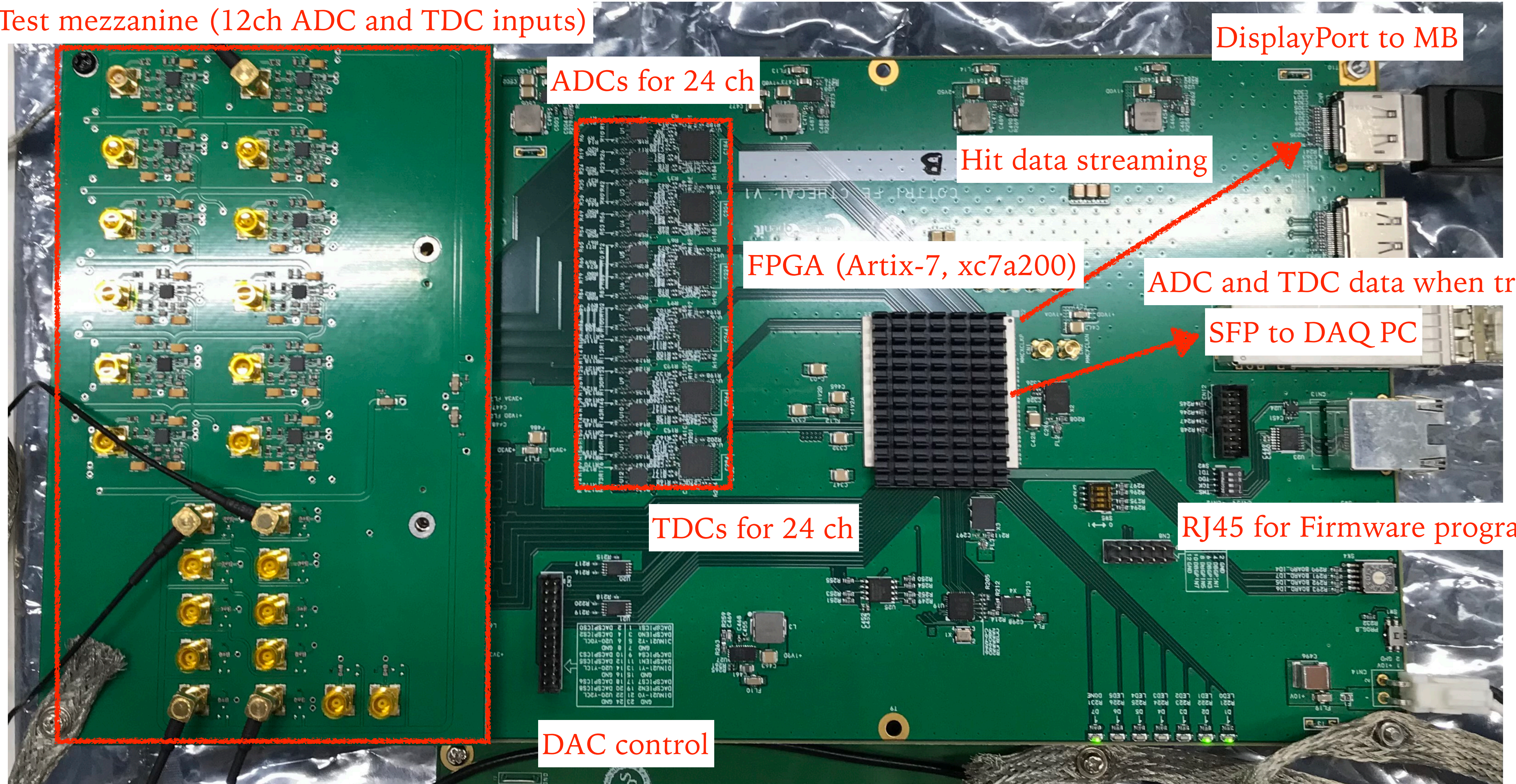
試験結果 (3)



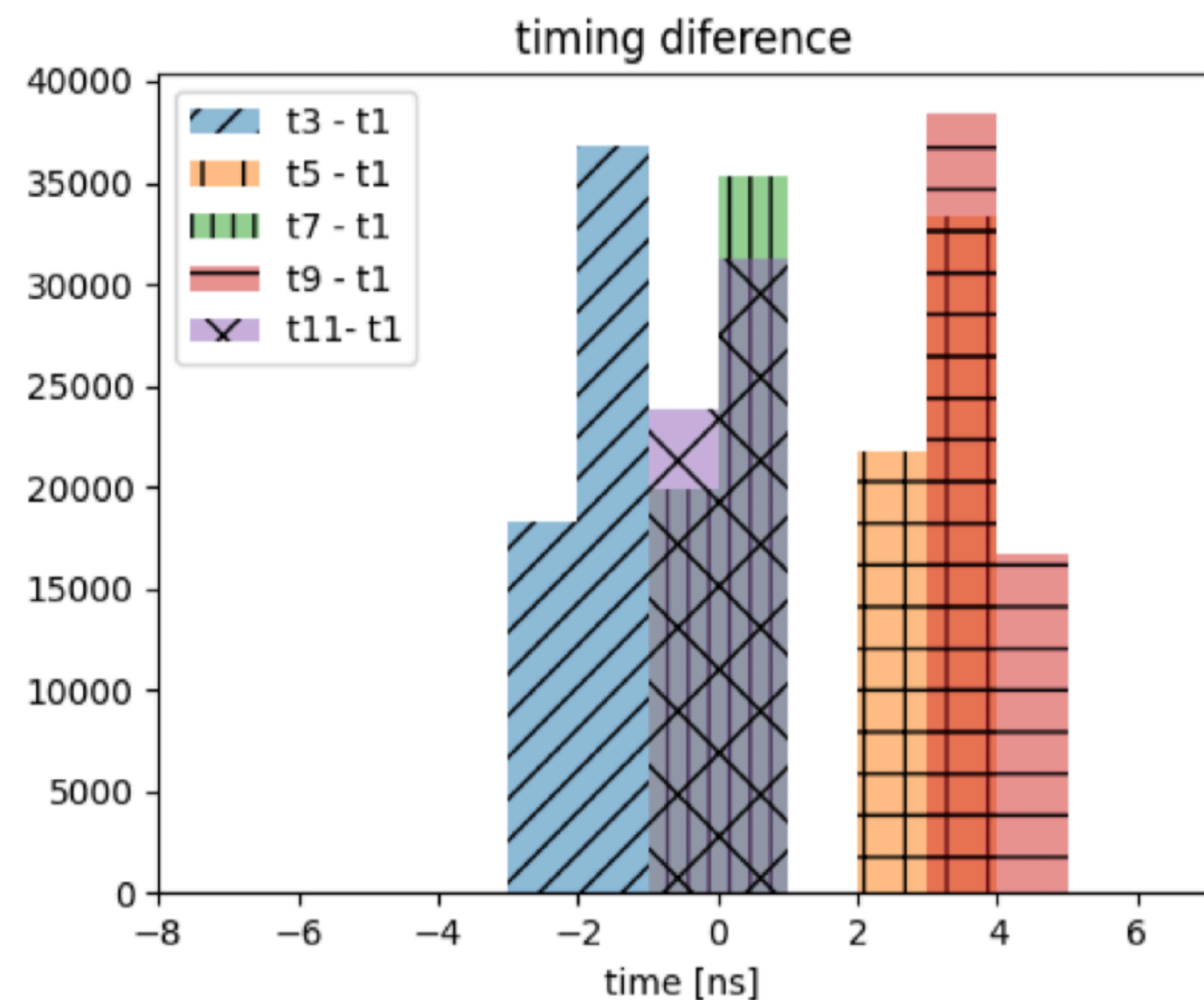
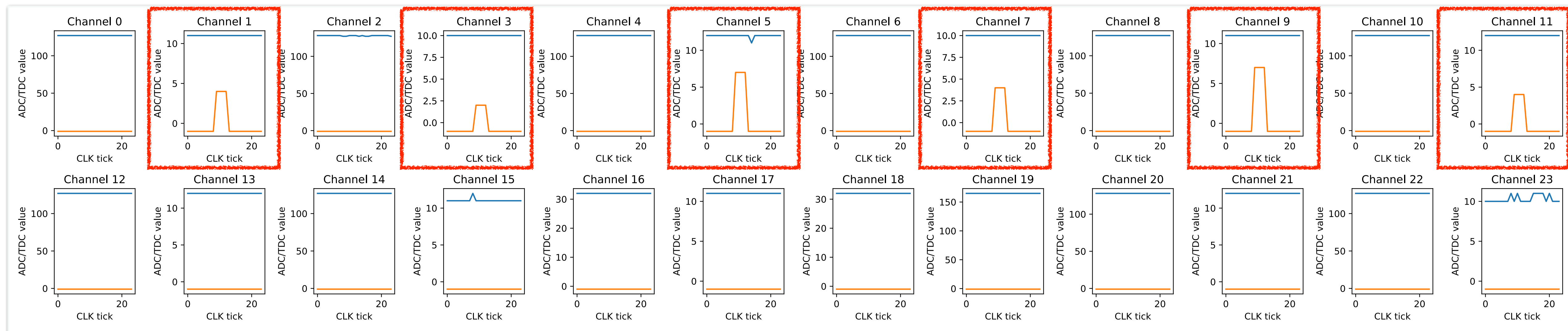
16

ここから先はほぼ全部苦労話

Test mezzanine (12ch ADC and TDC inputs)



COTTRI CTH

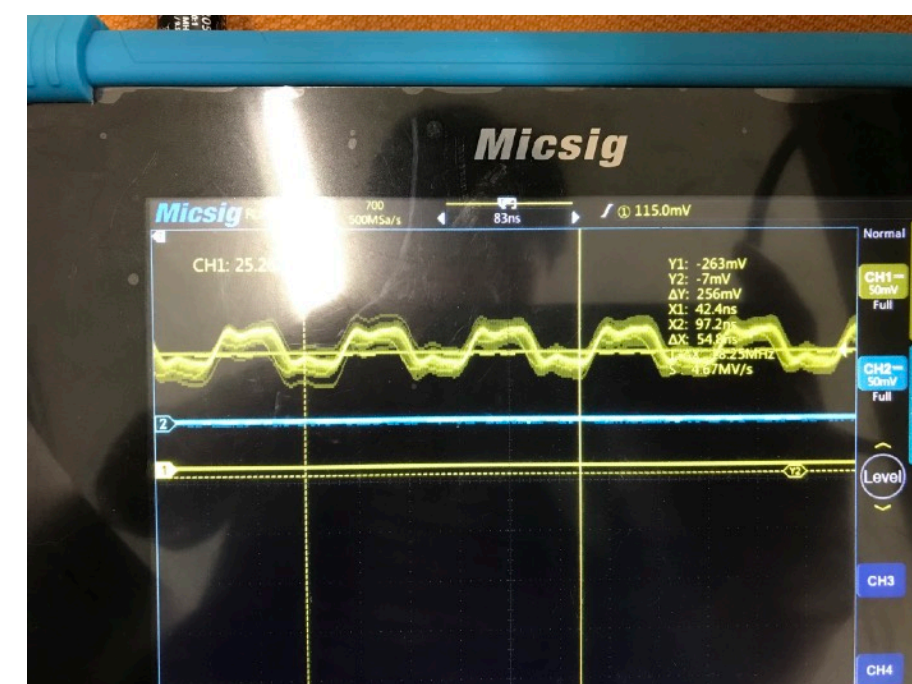
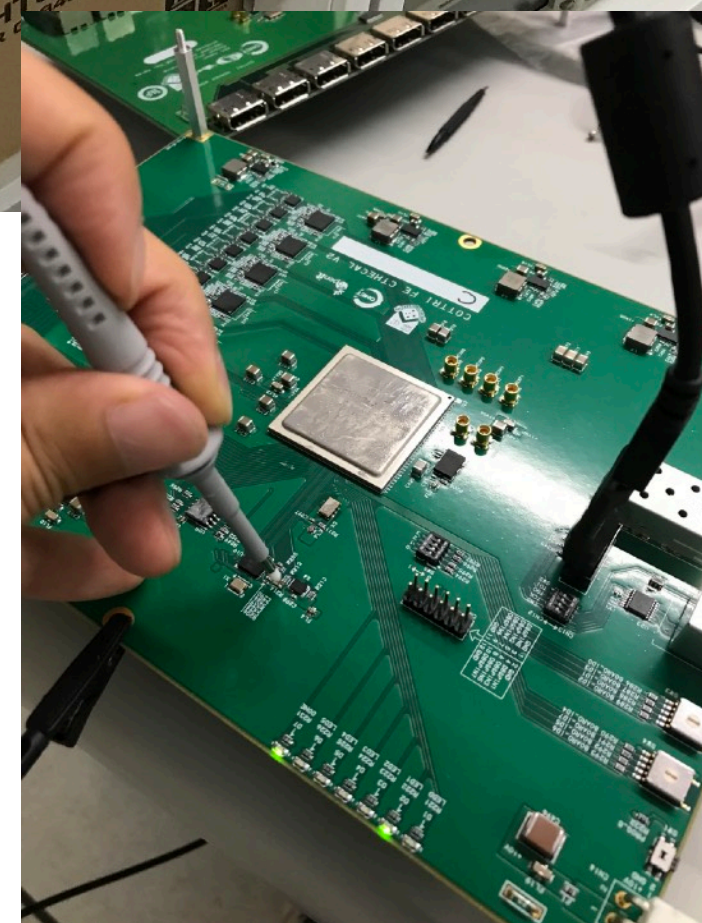


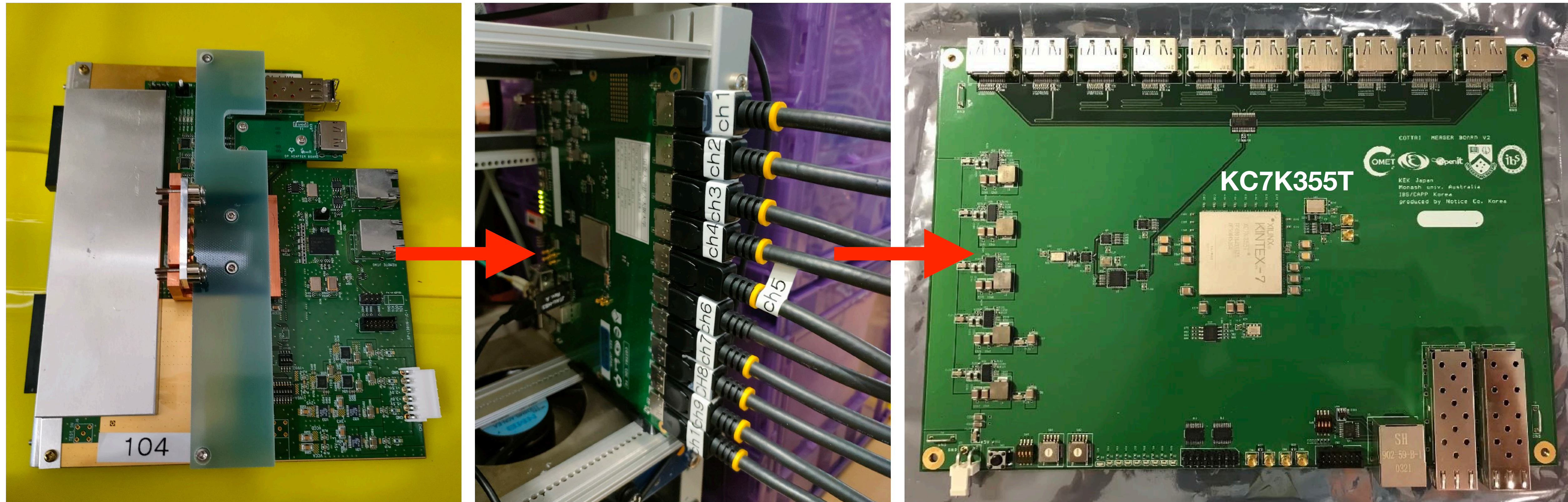
- [sitcpy \(https://github.com/BeeBeansTechnologies/sitcpy\)](https://github.com/BeeBeansTechnologies/sitcpy)
ベースで簡易DAQしてデータを取ってみた
- 1 nsの時間分解能が出ている
- ADCも予想通りに動いていそう (要確認)

COTTRI CTH



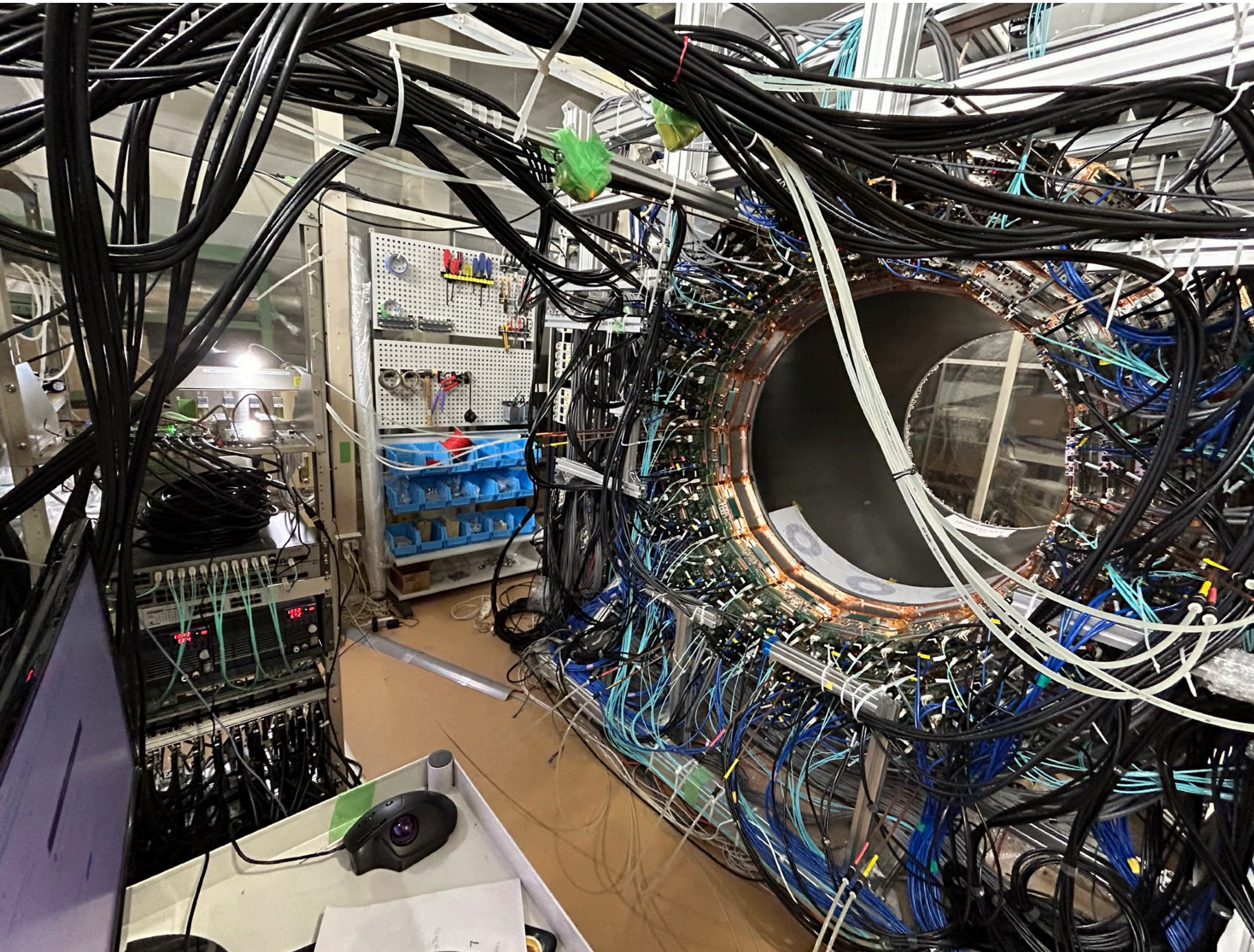
- 2023年量産完了
- 量産してみたら半分の基板でトリガーラインの通信が確立せず
- 動かない基板はオンボードオシレーターがへたっているか、何も出ていない
- よく見ると試作基板に比べシルクが滲んでいたりする





- 中身のアルゴリズムについては阪大・宮滝さんが昨日報告
- トリガー通信はDisplayPortケーブルを使用してAurora 8B/10Bプロトコルを使用 (2.4 Gbps)
- バッファfifoをバイパスして遅延時間を固定 → 通信が落ちると変化することが後に判明

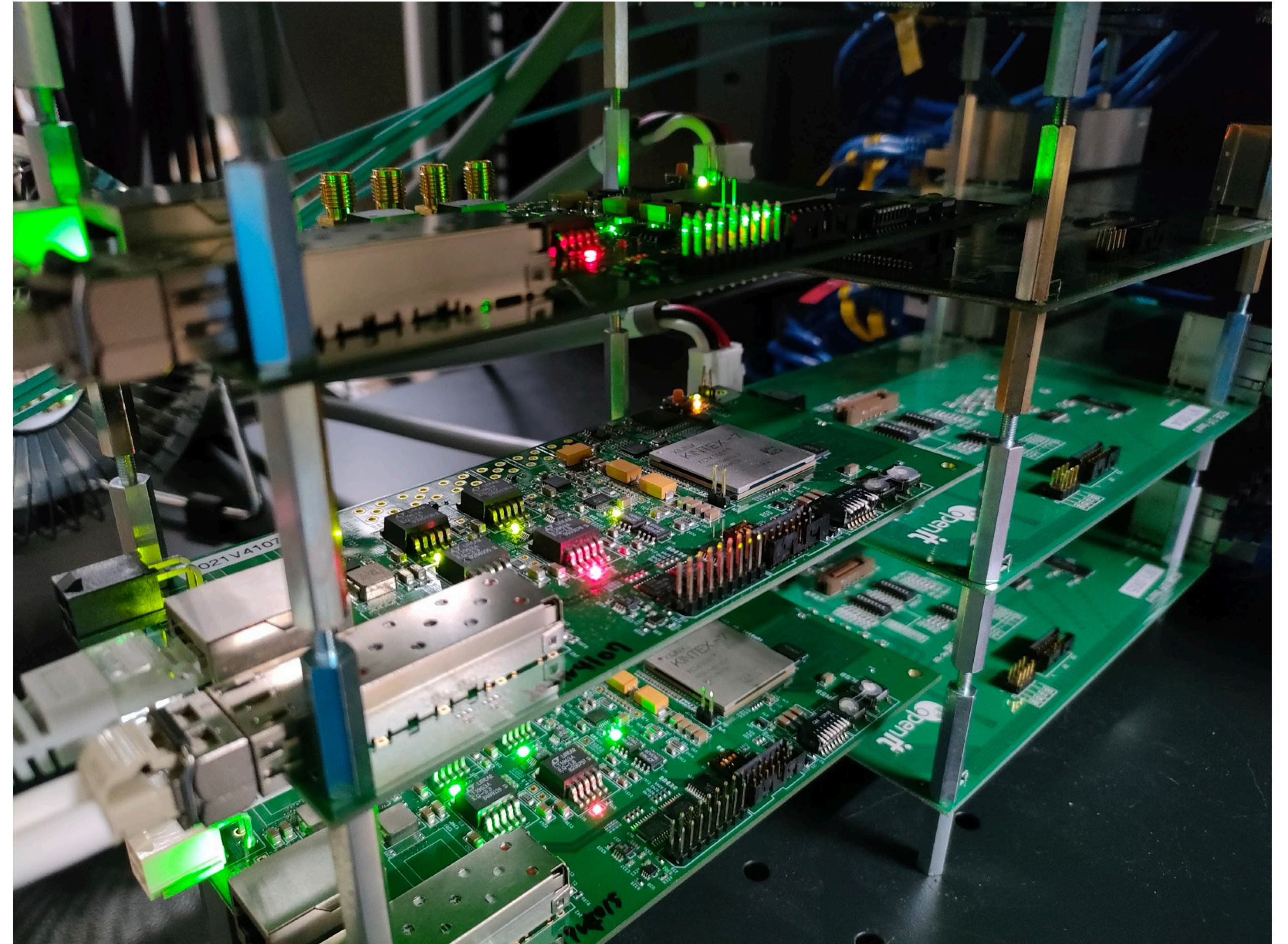
COTTRI CDCの現状



- 色々課題はあるが、とりあえず全部検出器に繋いでみた
(阪大の学生・山田さん主導)
- 硬くて重いDisplayPortケーブルの取り回しに苦労
- 狭い場所で大量のコネクタ抜き差し
- コネクタ部にかなり力がかかる
- DisplayPortケーブルを全て繋ぐと読み出し基板でノイズ増
- トリガーラインの通信は全てエラーなく確立



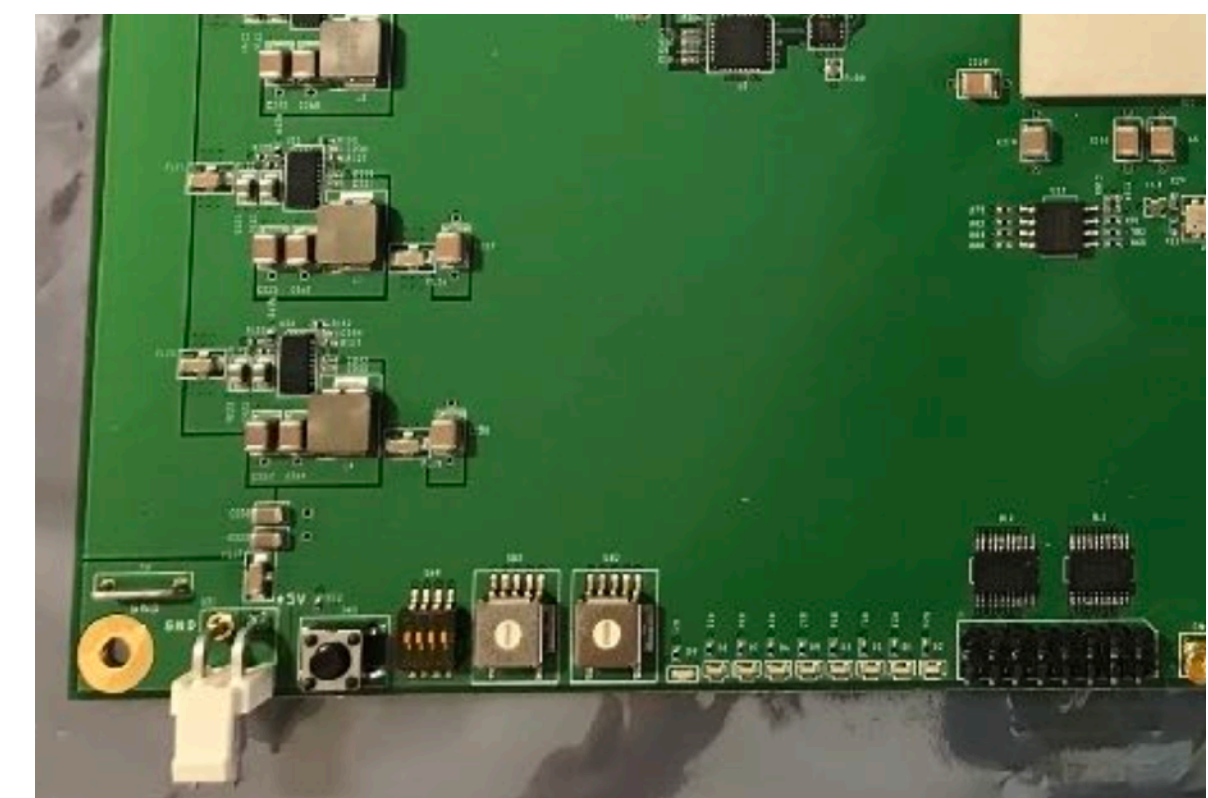
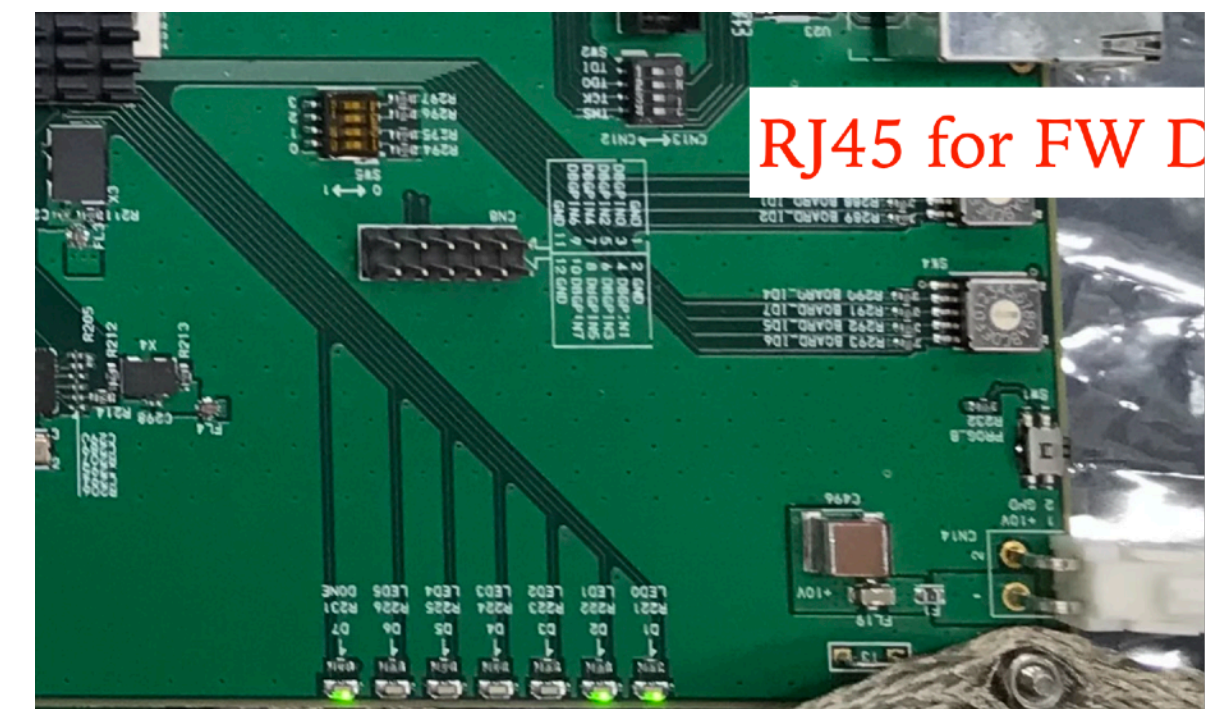
中央トリガーシステム・分配システム



- 中央システムは流石に優秀で（立ち上げ時に不安定になることはあるが）、全CDC読出し基板と繋いでデータ取得が
できている
- 分配基板はいくつかハードウェア的に改修予定（Busy信号ラインの追加、コネクタ位置の修正など）

いろいろな教訓

- 読み出し基板とトリガー基板を、それぞれ違う実験からコピーしている
 - 設計思想の異なるシステムを無理やり繋げる中間システムに皺寄せ
- 試作で動いても本番で動かないこともある
 - 試作と量産で違う基板会社を使うこともあるらしい
- ケーブルを全部繋いでみるまでわからないことがある
 - ベンチテストの結果を鵜呑みにしない
- 電源コネクタのピンアサインは揃えるべき



今後の課題

- 動かない基板を直す
 - オシレーター換装
- ファームウェアの細かいバグ取り
 - 遅延時間固定・Timing violationの解決
- ノイズ落とし
 - グラウンド強化
 - シールド追加(?)
- エレキシステム全体のグラウンディングをもっと真面目に考える必要

まとめ

- COMET実験はミュオン・電子転換を世界最高感度で測定する実験でJ-PARCで2026年に実験開始予定
- 実験開始に向けてトリガーシステムの整備を急ピッチで進めている
- 本番用トリガー基板は全て生産済み
- CDCのトリガーシステムを全て繋いで試験した
- いろいろな問題が発覚した
- 一つ一つ原因を調査して解決に向け奮闘中