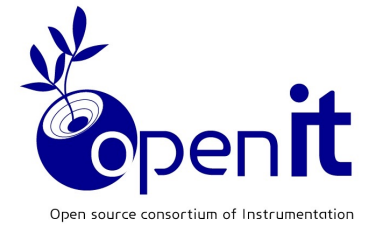




MONASH
University



COMET Phase-I実験における オンライントリガーシステム

目次

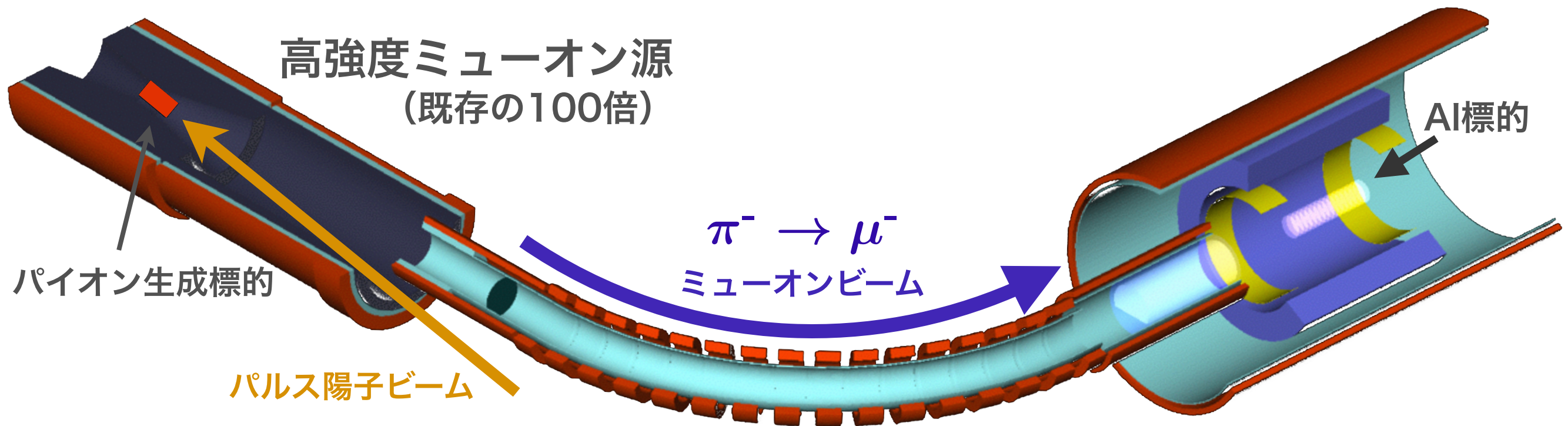
- ◆ COMET Phase-Iの紹介
- ◆ トリガーアルゴリズムと予想性能
- ◆ トリガーシステムの回路

中沢 遊 (大阪大学)

2020/11/26-27

計測システム研究会

COMET Phase-I @J-PARC



目的：Al原子核中におけるミュオン電子転換過程探索

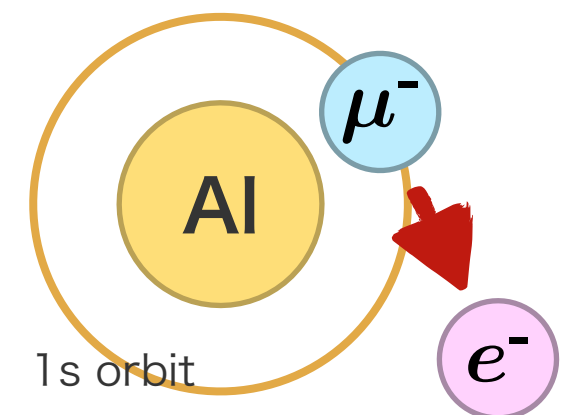
- ・ 標準模型においては検出不可能なレベルで制限 → 観測できれば新物理の証拠
- ・ 150日間の測定で1事象測定感度： $\sim 3 \times 10^{-15}$
- ・ 現在の上限値：SINDRUM-II [1] @PSI

$$BR(\mu^- + \text{Au} \rightarrow e^- + \text{Au}) < 7.0 \times 10^{-13} \text{ (90\% C.L.)}$$

検出器：円筒型検出器システム

信号： $\sim 105\text{-MeV}$ の電子

ミュオン電子転換



[1] Eur. Phys. J. C, 47(2), 2006

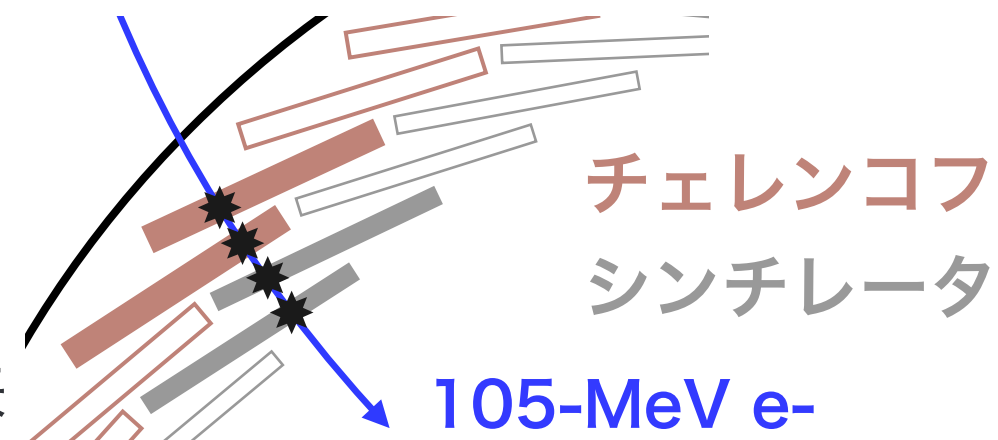
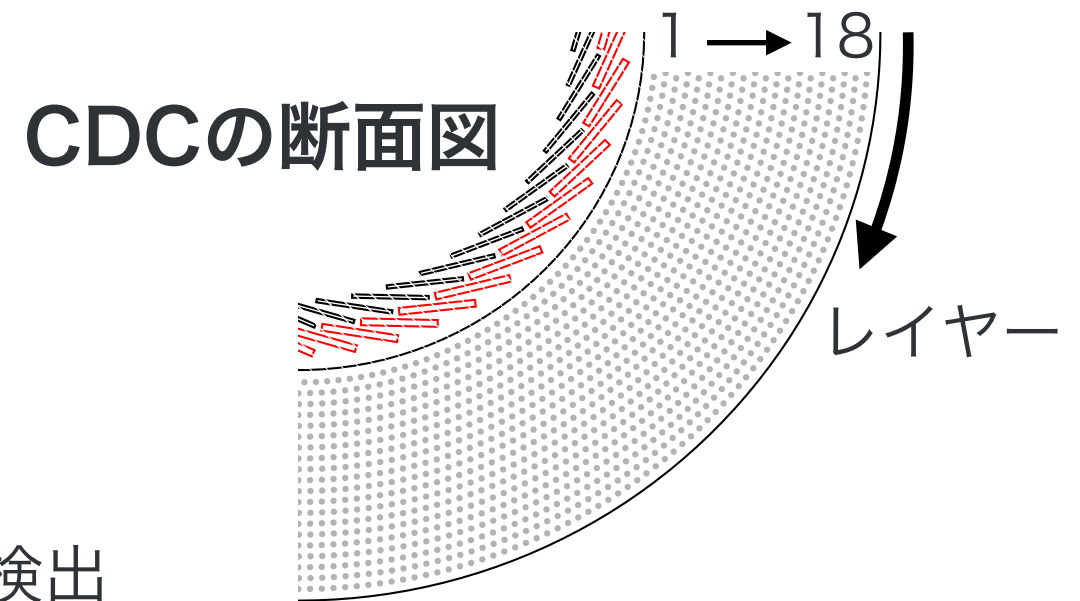
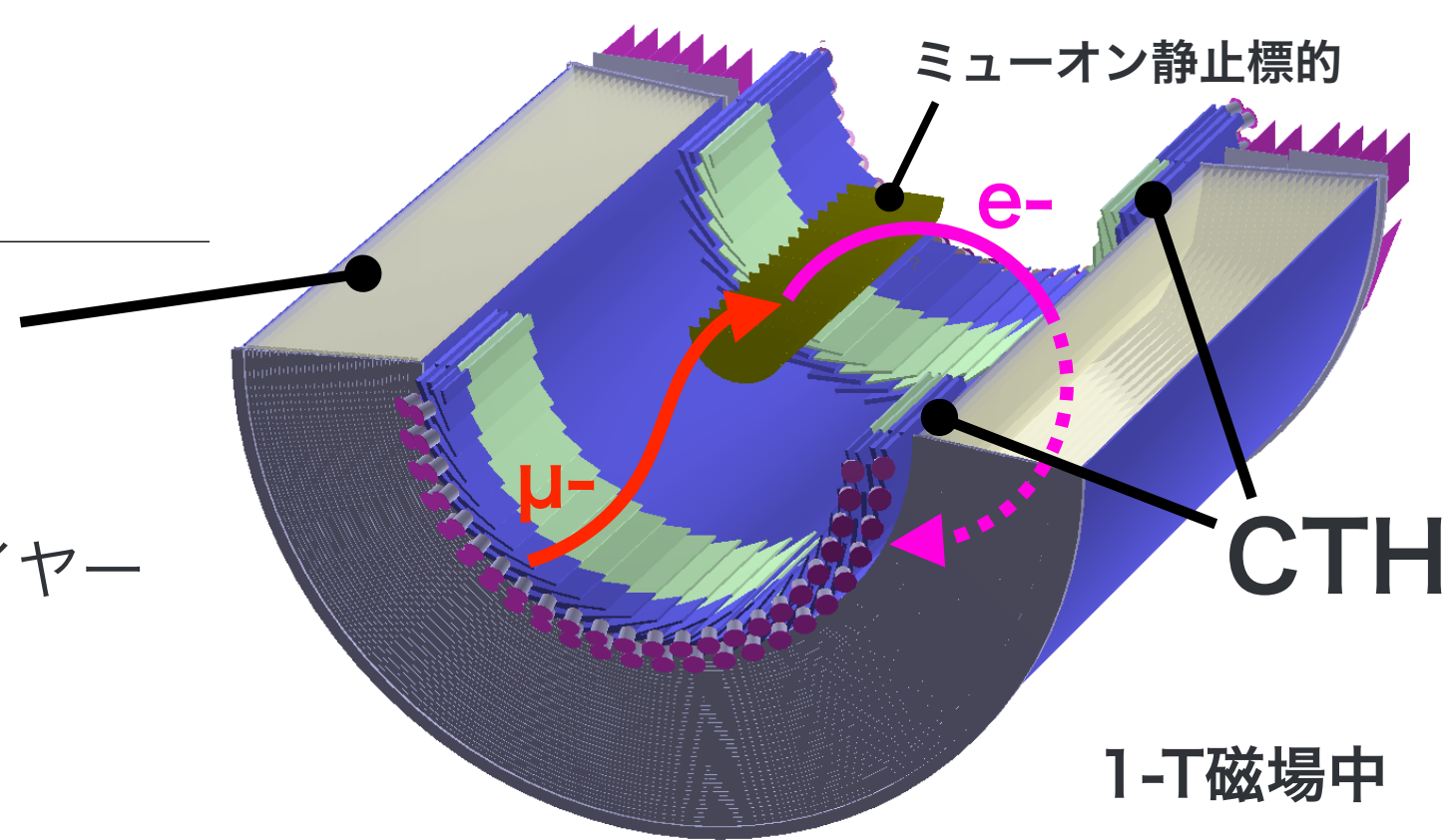
検出器システム

円筒型ドリフトチェンバー (CDC)

- ◆ 電子の運動量評価
- ◆ 4986センスワイヤー, 18ステレオレイヤー
- ◆ 読み出し回路: RECBE x104
 - ・ Belle II CDCグループが開発
 - ・ 波形とタイミング情報

円筒型トリガーホドスコープ (CTH)

- ◆ 電子のタイミング測定
- ◆ トリガーカウンター (48セット x 2)
 - ・ シンチレーションカウンター: 高時間分解能で検出
 - ・ チェレンコフカウンター: 重い粒子の除去
- ◆ トリガー条件: 4枚のカウンターによる同時計測 →
- ◆ 想定トリガーレート: >90 kHz
 - ・ ほとんど全てが偶発事象か低エネルギーの電子由来



トリガーアルゴリズム & 予想される性能評価

オンライントリガーシステム

問題点：高トリガーレート (>90 kHz) ⇔ データ取得システムからの要求：<26 kHz

- ◆ 測定感度向上のための大強度ミュオンビーム

トリガーシステムへの要求

- ◆ トリガーレート：13 kHz (安全係数 2)
- ◆ 遅延時間：<7 μ s
 - ・ [RECBEのデータ保持時間：8.5 μ s] - [測定時間窓：1.1 μ s]

解決策：CDCのヒット情報を使ったオンライントリガーシステム

- ◆ CDCのヒット情報を機械学習を使って処理
 - ・ ヒット情報：エネルギー損失量 & タイミング
 - ・ 機械学習：Gradient Boosted Decision Tree (GBDT)
- ◆ Field Programmable Gate Array (FPGA) のルックアップテーブル (LUT) でヒットを選別

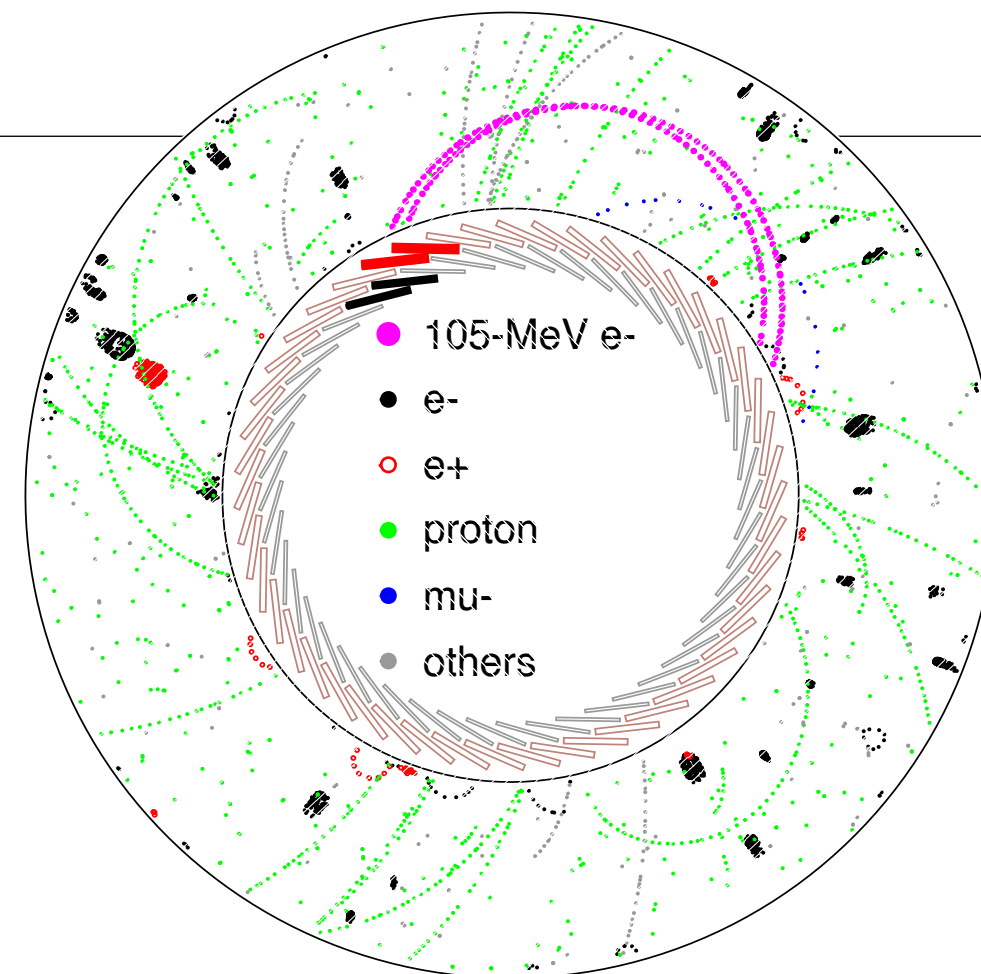


ヒットの特徴

ヒットマップ (MC truth level)

信号電子によるヒット

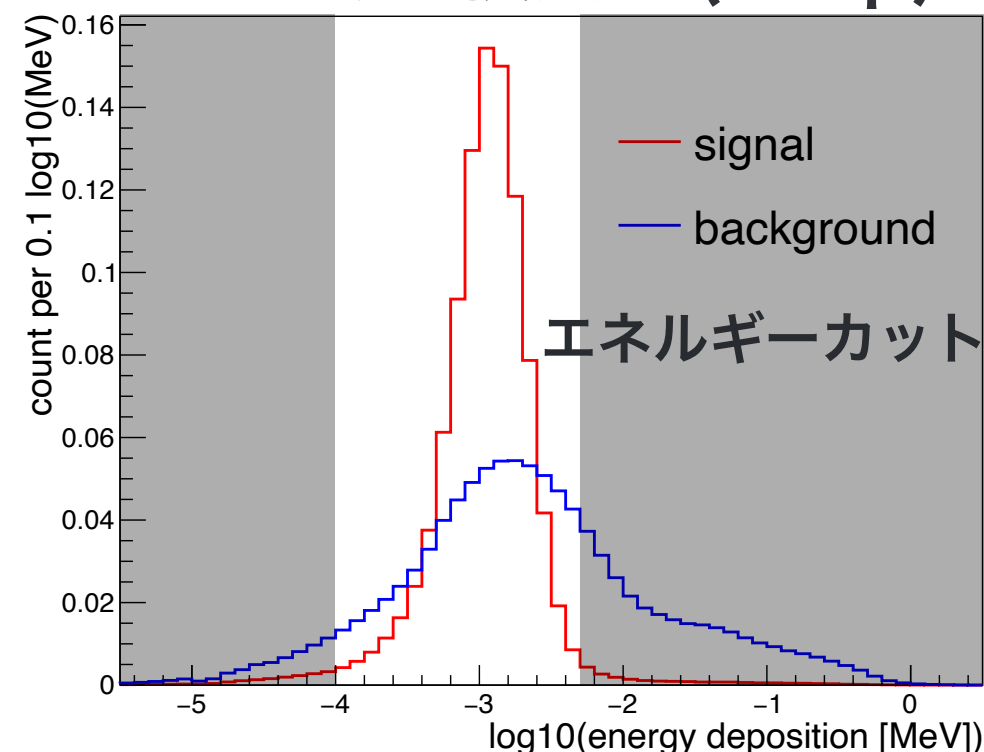
- ◆ **同一レイヤーに連続したヒット**
← CDC内で螺旋軌道の飛跡
- ◆ **外側のレイヤーには届きにくい**
- ◆ 1つのワイヤーにはシングルヒット
- ◆ **MIPレベルのエネルギー損失**



背景事象によるヒット

- ◆ 低エネルギー電子 (光子の相互作用)
 - ・ セル内で小さな半径の螺旋軌道
 - ・ **同じワイヤーに連続してヒット**
- ◆ 陽子 (ミュオン原子捕獲)
 - ・ 高い運動量でCDC中心から外側へ貫通
 - ・ **大きなエネルギー損失**

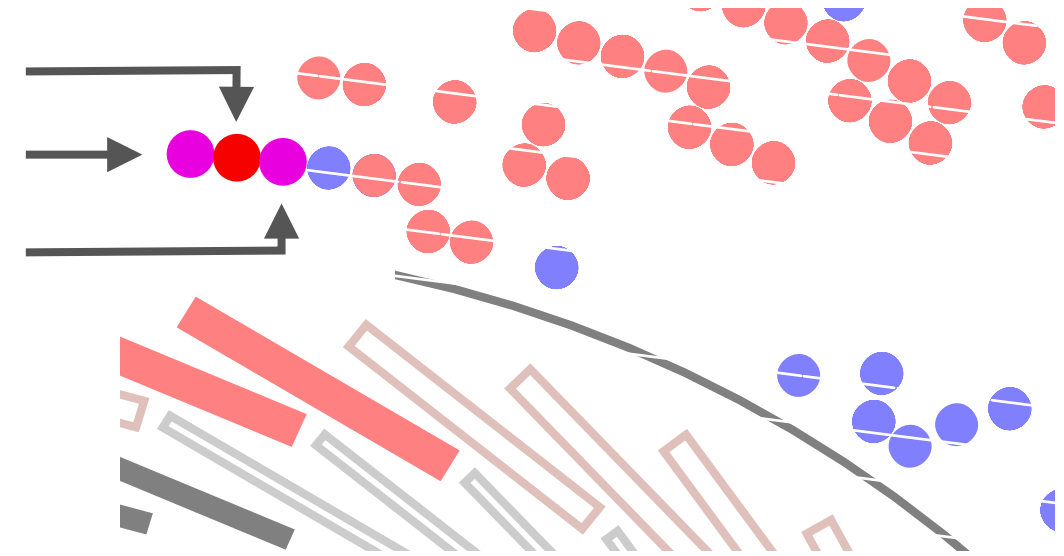
エネルギー損失量 (Edep)



ヒット選別

- ◆ 連続ヒットのワイヤーをカット → 低エネルギー電子による寄与を効率よく削減
- ◆ エネルギー損失量と局所的なパターンから各ワイヤーのヒット情報を機械学習でスコア化

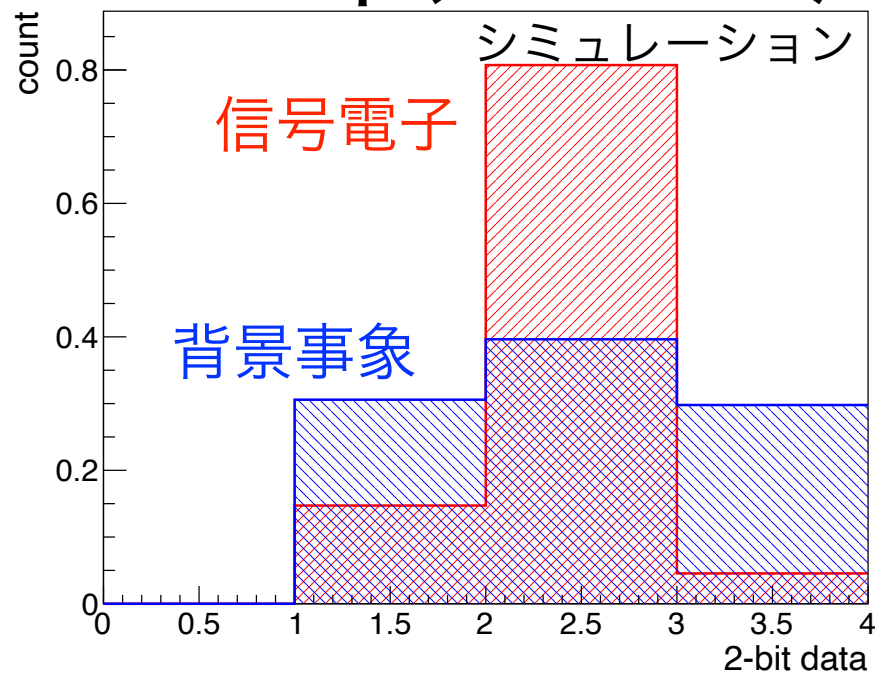
機械学習への入力：Edep @ 着目ワイヤー
 Edep @ 左隣のワイヤー
 Edep @ 右隣のワイヤー
 ワイヤーのレイヤーID



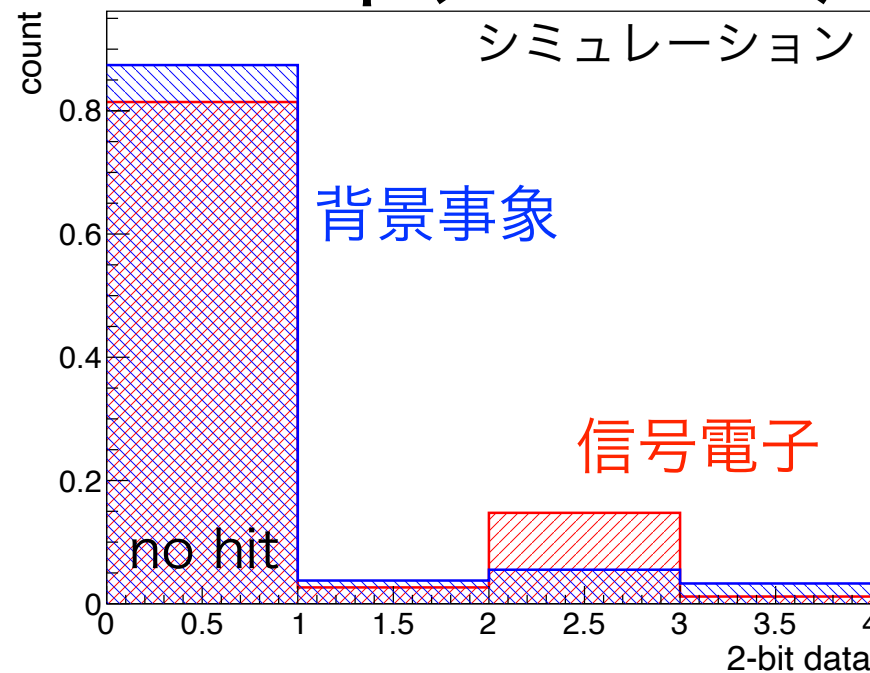
- ・ ハードウェア実装用にEdepを2 bitに圧縮
- ・ FPGAの6入力LUTをワイヤー毎に利用

- ◆ 閾値で高いスコアをもつ信号電子ライクなヒットを選択

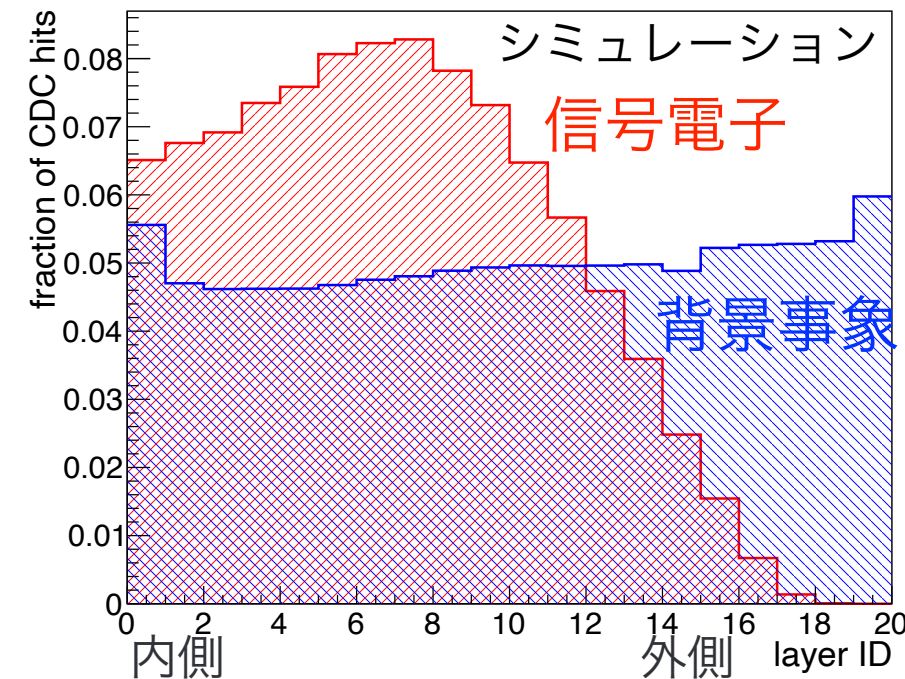
2-bit Edep (着目ワイヤー)



2-bit Edep (隣接ワイヤー)



CDCヒットレイヤー



ヒット選別

- ◆ 連続ヒットのワイヤーをカット → 低エネルギー電子による寄与を効率よく削減
- ◆ エネルギー損失量と局所的なパターンから各ワイヤーのヒット情報を機械学習でスコア化

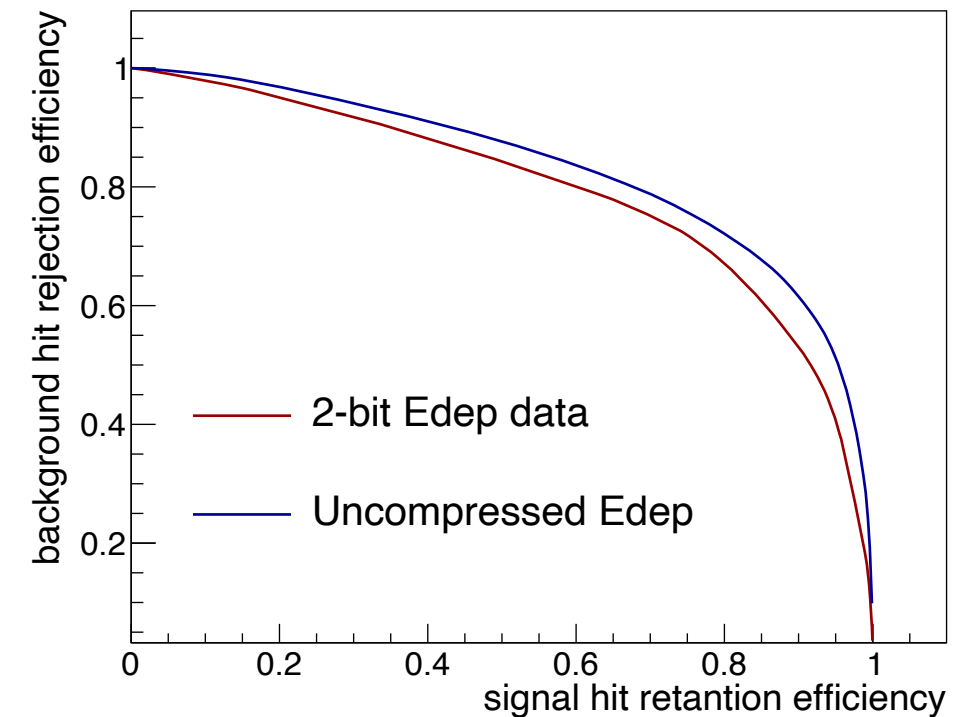
機械学習への入力：Edep @ 着目ワイヤー
Edep @ 左隣のワイヤー
Edep @ 右隣のワイヤー
ワイヤーのレイヤーID

- ・ ハードウェア実装用にEdepを2 bitに圧縮
- ・ FPGAの6入力LUTをワイヤー毎に利用

- ◆ 閾値で高いスコアをもつ信号電子ライクなヒットを選択

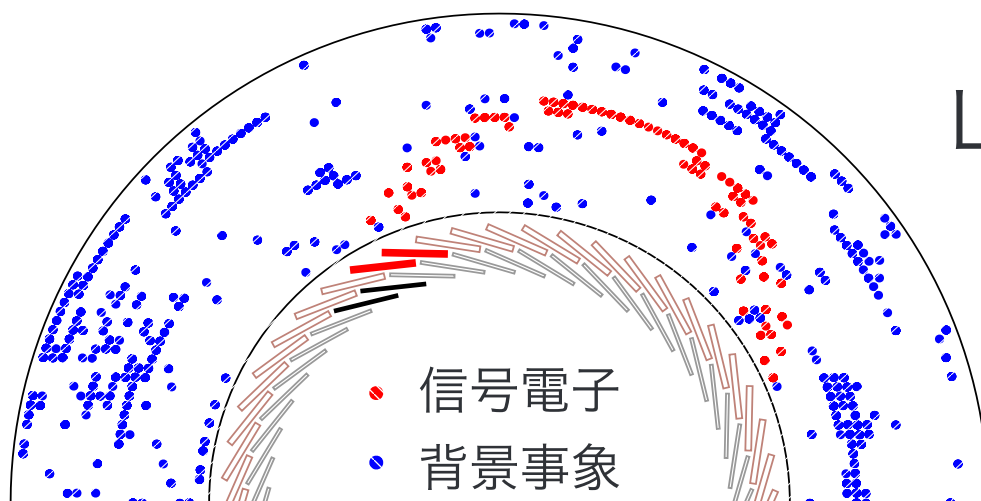
ヒット選別におけるROCカーブ

(Receiver Operating Characteristic : ROC)

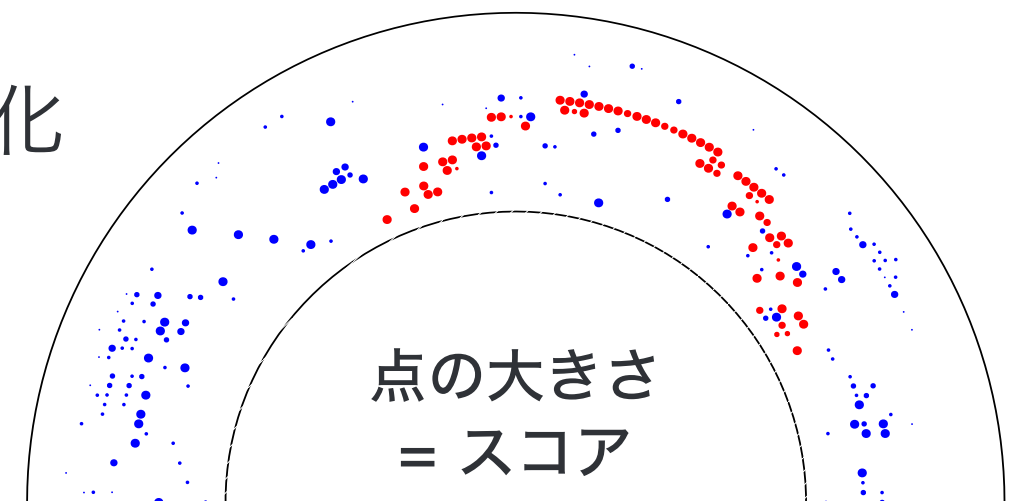
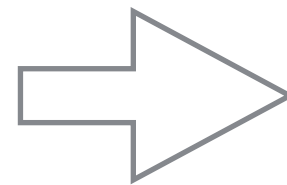


ヒットワイヤーマップ

(信号電子イベント)

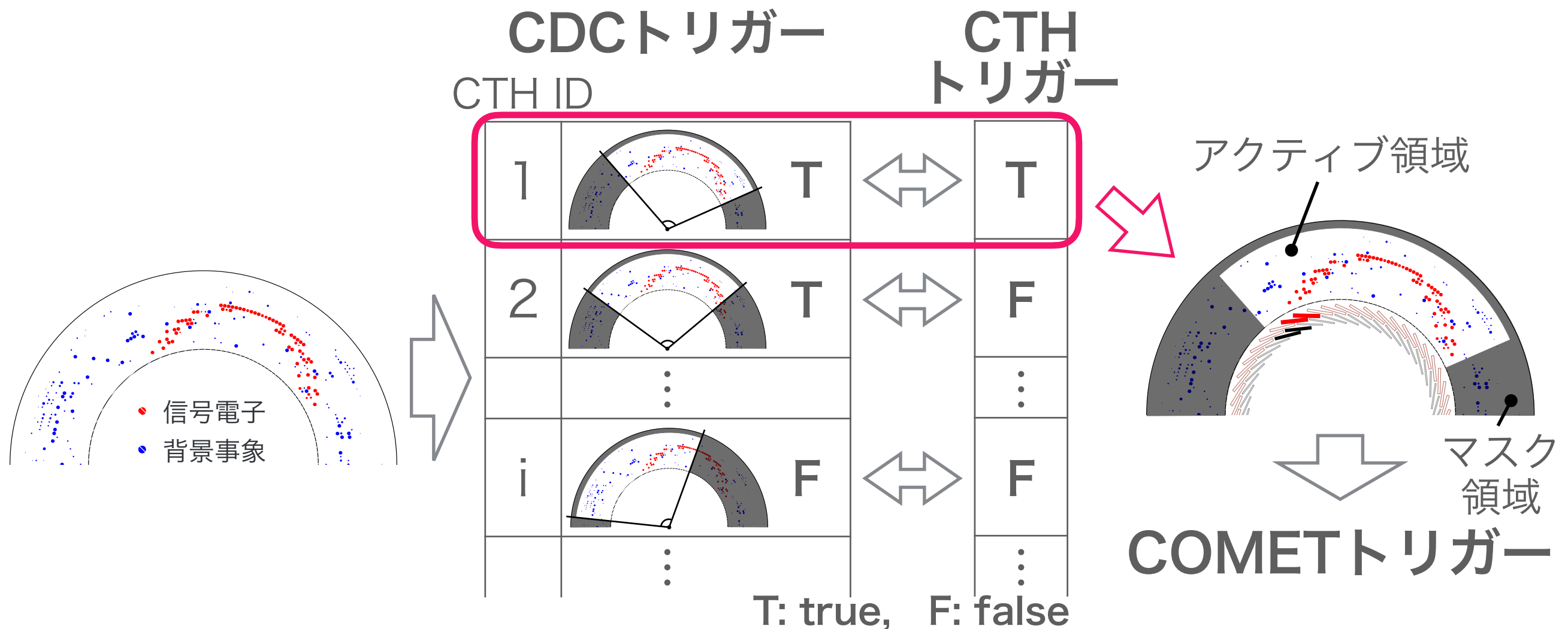


LUTでスコア化



イベント選別

- ◆ CTHカウンタ毎にCDCのアクティブ領域を定義
 - ・ ある信号電子の飛跡はCDCの一部しか通らない
- ◆ 領域内で**信号電子ライクなヒット数**をかぞえる
- ◆ **ヒット数からCDCトリガー**を評価
- ◆ CTHトリガーのカウンタとコインシデンスをとってトリガー判定



イベント選別

トリガータイミング条件

- ◆ 測定タイミング：陽子バンチから0.7 ~ 1.2 μs
 - ・ 背景事象が十分に減った後に物理測定
- ◆ トリガー判別の時間窓：400 ns
 - ・ CDCセル内でのドリフト時間を考慮

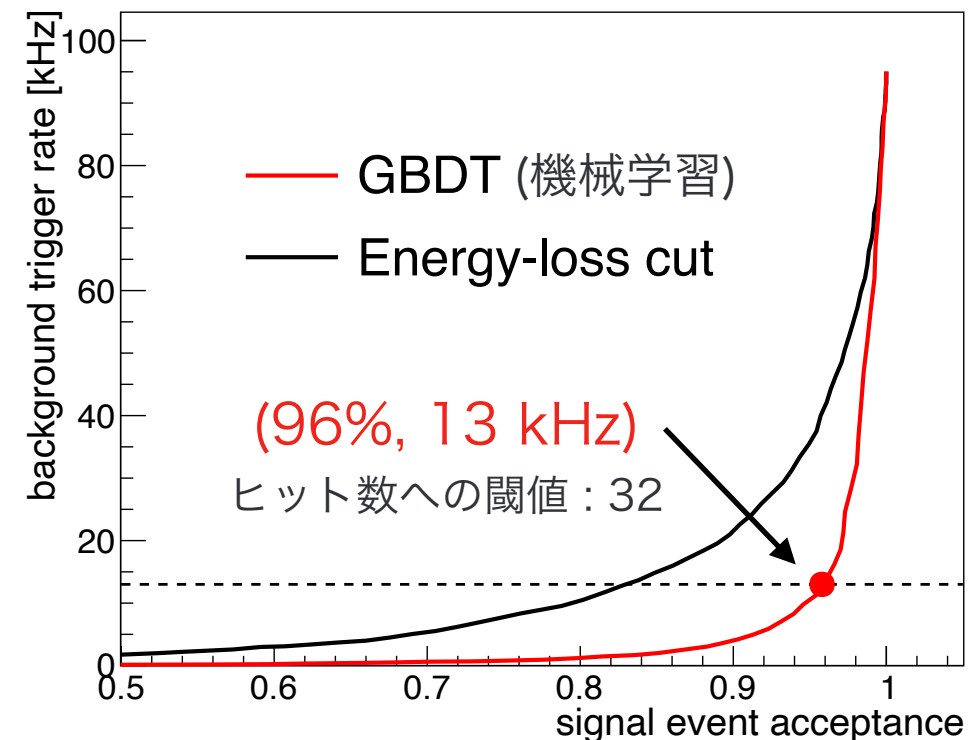
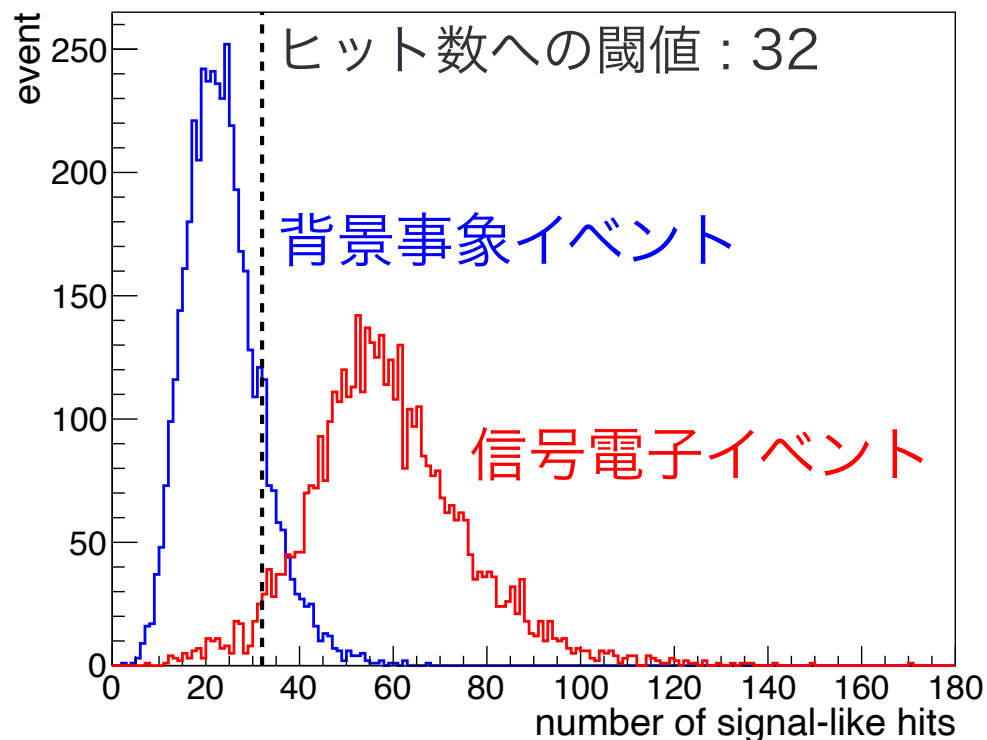
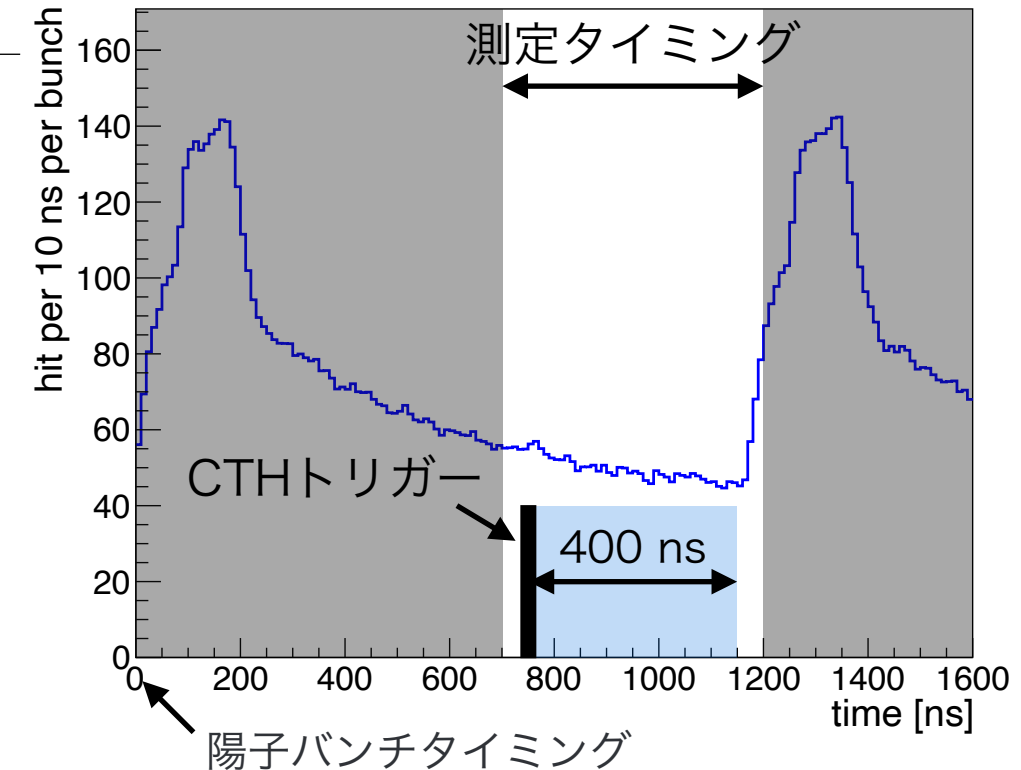
識別性能 w/ トリガーレート13 kHz

- ◆ **信号電子イベントへのアクセプタンス：96%**

↔ エネルギー損失量カット：83%

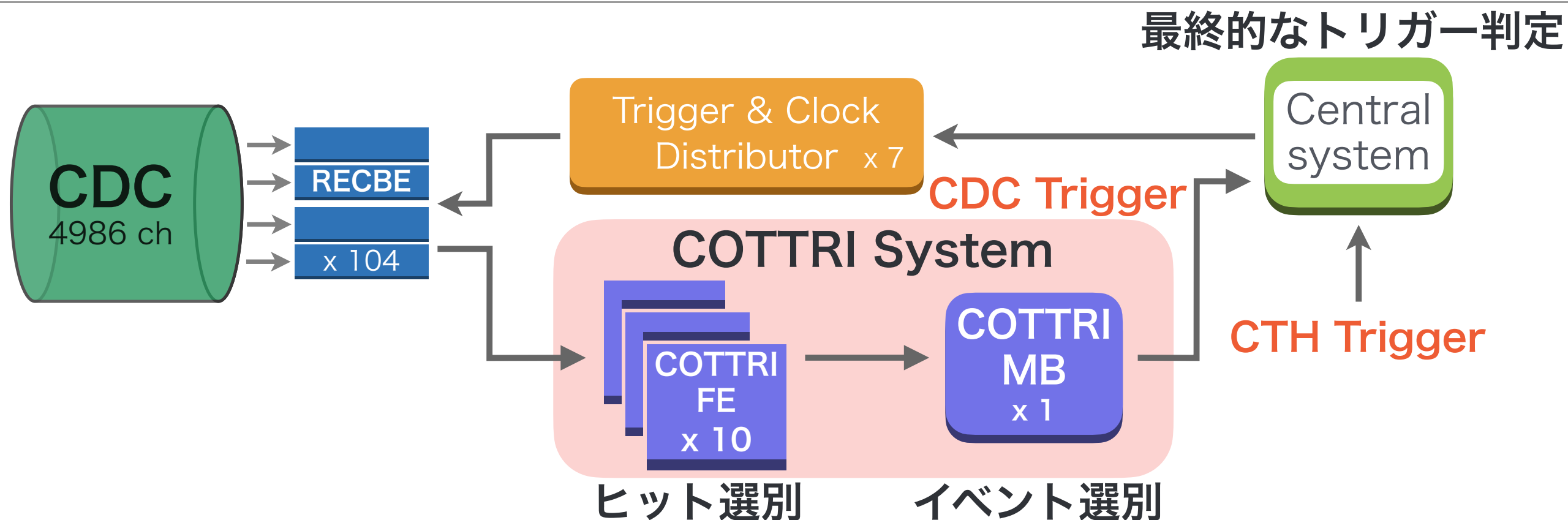
- ・ 着目するワイヤーにおけるヒットをエネルギー損失量に対する閾値のみで選別
- ・ ほぼ100%のDAQライブタイムを達成できる見込み

背景事象ヒットの時間分布



トリガーシステム回路

トリガーシステム



COMET Trigger (COTTRI) システム

- ◆ **分散型トリガーシステム : Front-end boards (FEs) and Merger board (MB)**
 - ・ 4000チャンネル分を超えるCDCのデータを処理
 - ・ FE : ヒット選別 & 各RECBEにおける信号ライクなヒット数をかぞえる
 - ・ MB : イベント選別におけるCDCトリガーの発行
- ◆ COTTRIシステム : 陽子バンチと非同期 & 100 ns毎にパイプライン処理
- ◆ Central system : CTHトリガーとのコインシデンスによるトリガー判別, トリガーの分配, トリガーシステム同期用のクロックの分配

COTTRI FE

2019年夏に完成

Kintex-7 (xc7k355tffg901)

GTX: 24 lanes

最大転送速度 : 12.5 Gbps/lane

DisplayPort (DP) ×11

GTX TX/RX : 各2 lanes

最大転送速度 : 5 Gbps/lane

10 RECBEs & 1 COTTRI MB

SFP+ポート

GTX TX/RX : 各1 lane

DAQシステム用

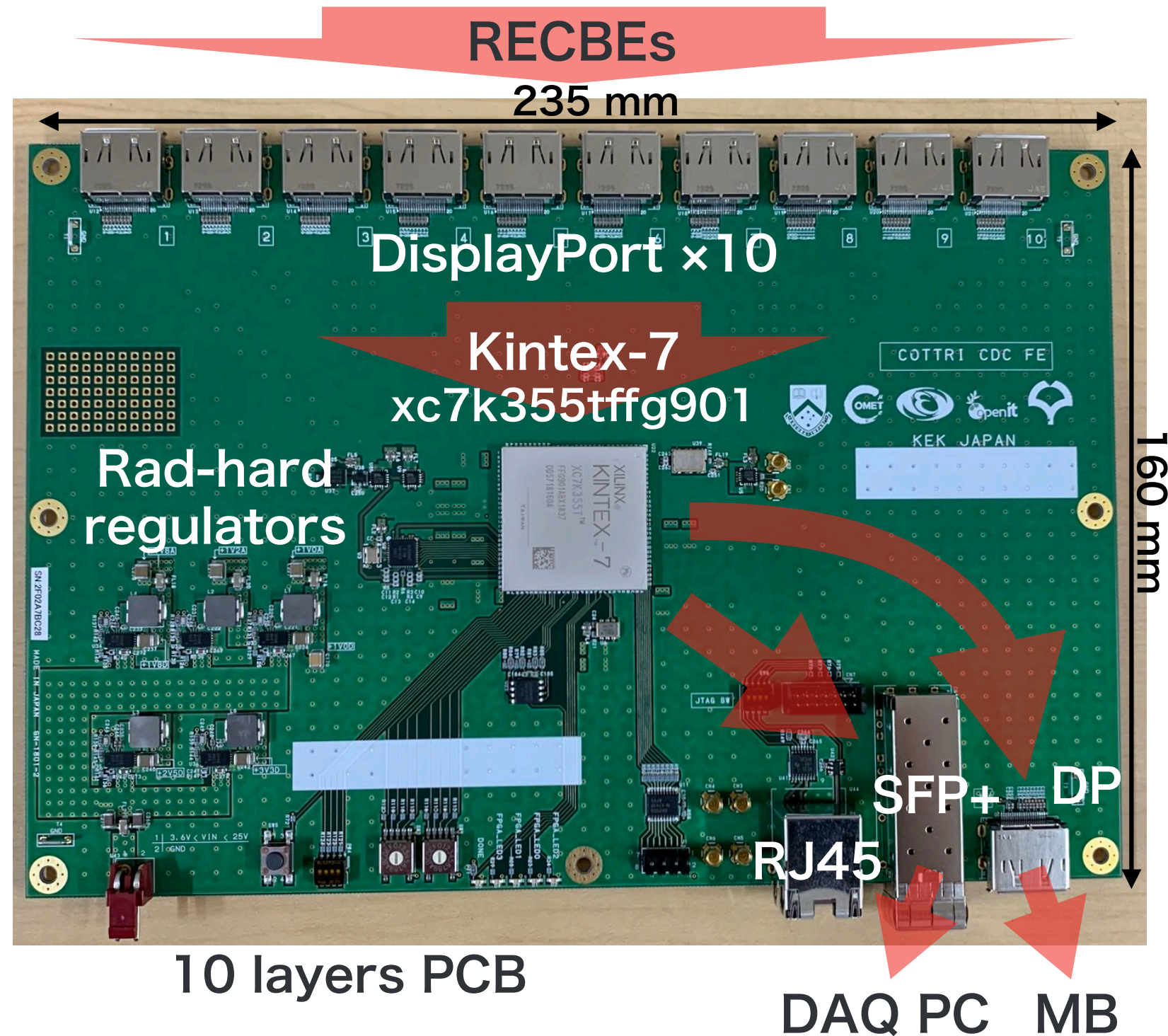
RJ45コネクタ

ファームウェアのダウンロード用

レギュレータ (LT8612)

動作電圧 : 5-23 V

大きな印加電圧を用途毎の電圧に変換



10 layers PCB

DAQ PC MB

COTTRI FE : データ処理

RECBE

- ◆ エネルギー損失量の情報 : 2 bit, 10 MSPS
 - ・ COTTRI FEでは6入力LUTを使用



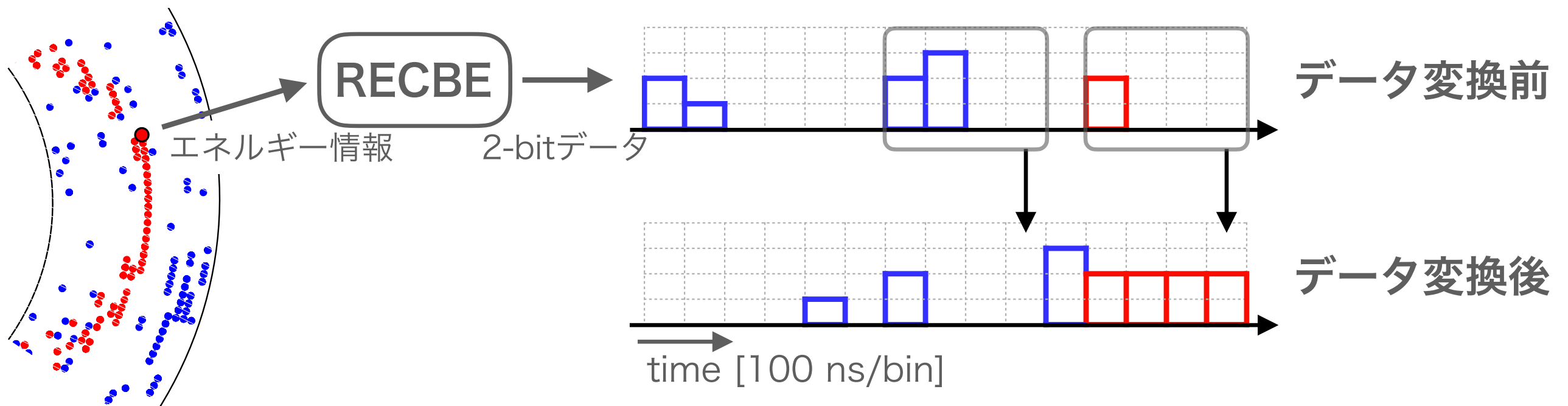
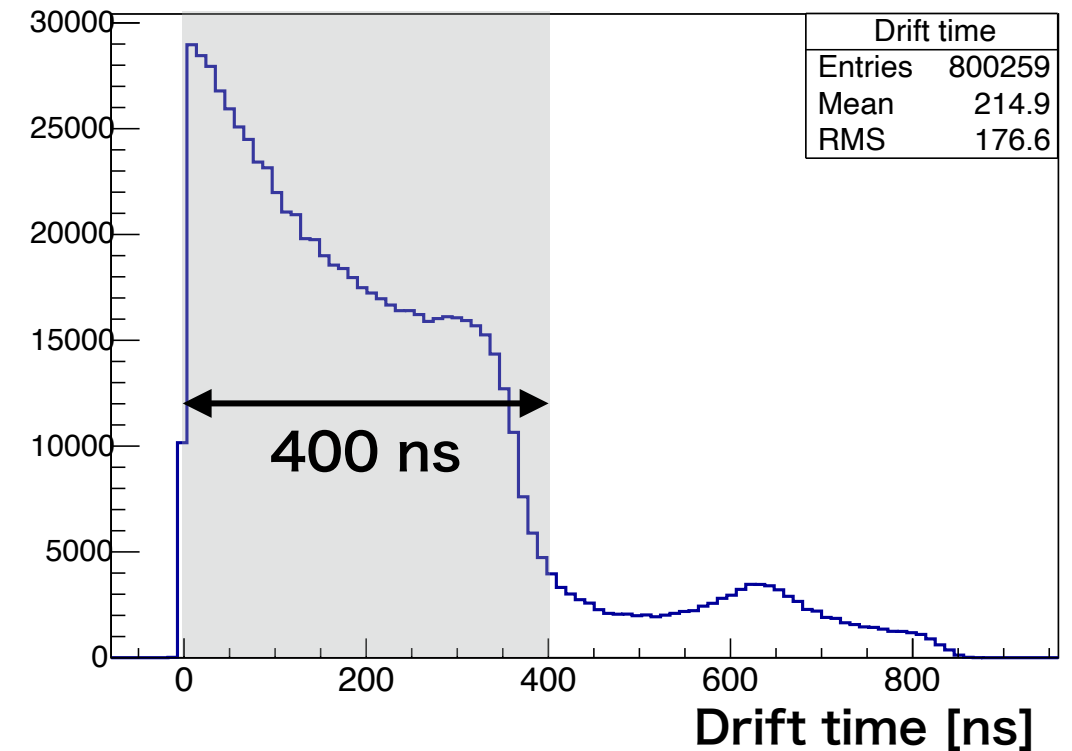
1. 2-bitデータを100 ns毎に受信

- ◆ Aurora 8B/10B プロトコル

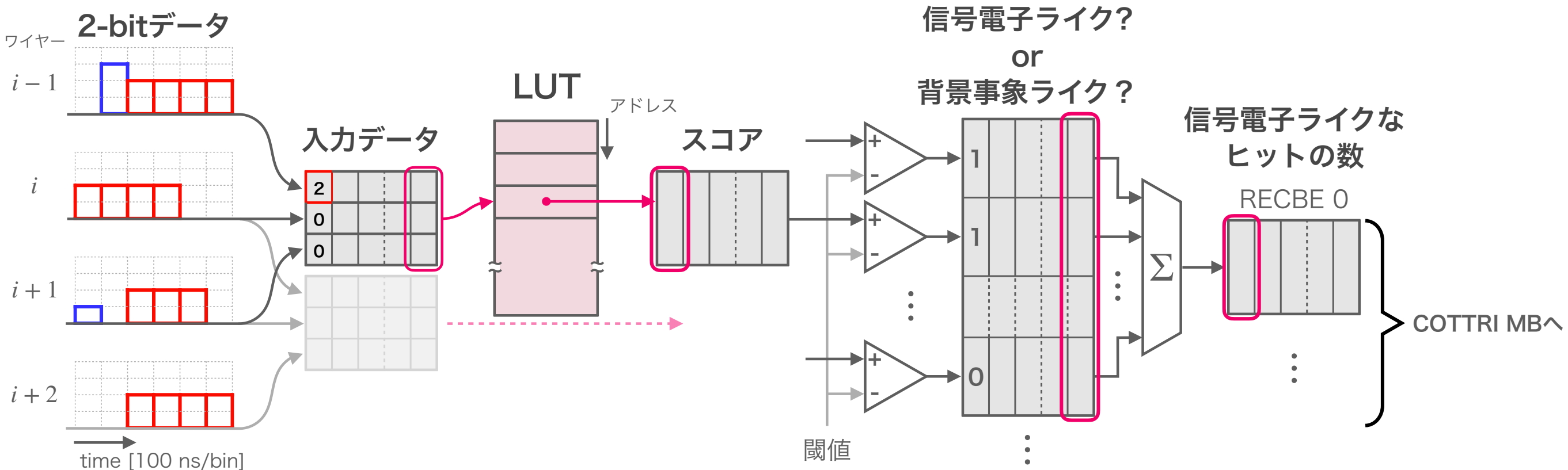
2. データの変換

- ◆ 4サンプル (400 ns分のデータ) を確認
 - ・ CDC内のドリフト時間を考慮
- ◆ 複数ヒットのあるワイヤーをフィルタ

CDC宇宙線測定より



COTTRI FE : データ処理



3. LUTへの入力データ作成 : 2 x 3 bit/wire

- ◆ 着目するワイヤーとその両隣のワイヤー

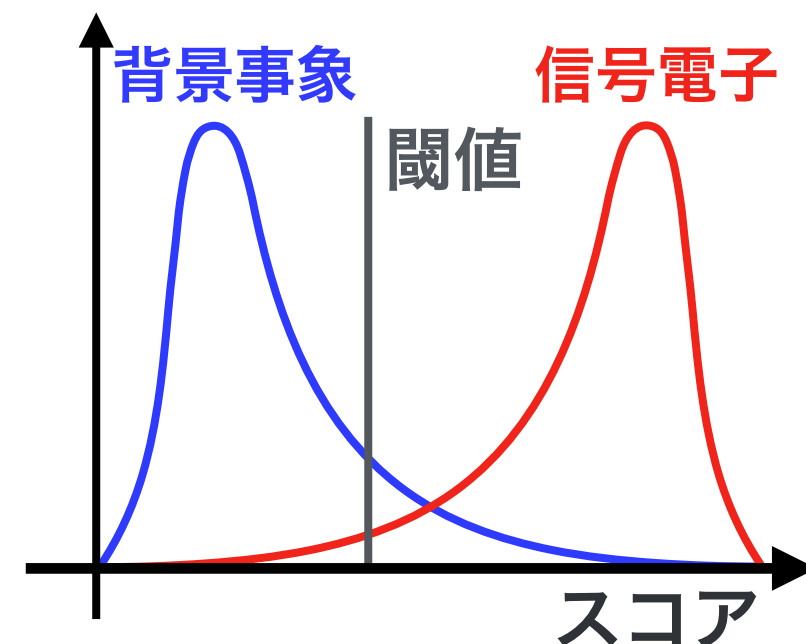
4. LUTによるデータ変換

- ◆ 1クロック周期で入力データをスコアへと変換

5. 信号電子ライクなヒットの数を計算

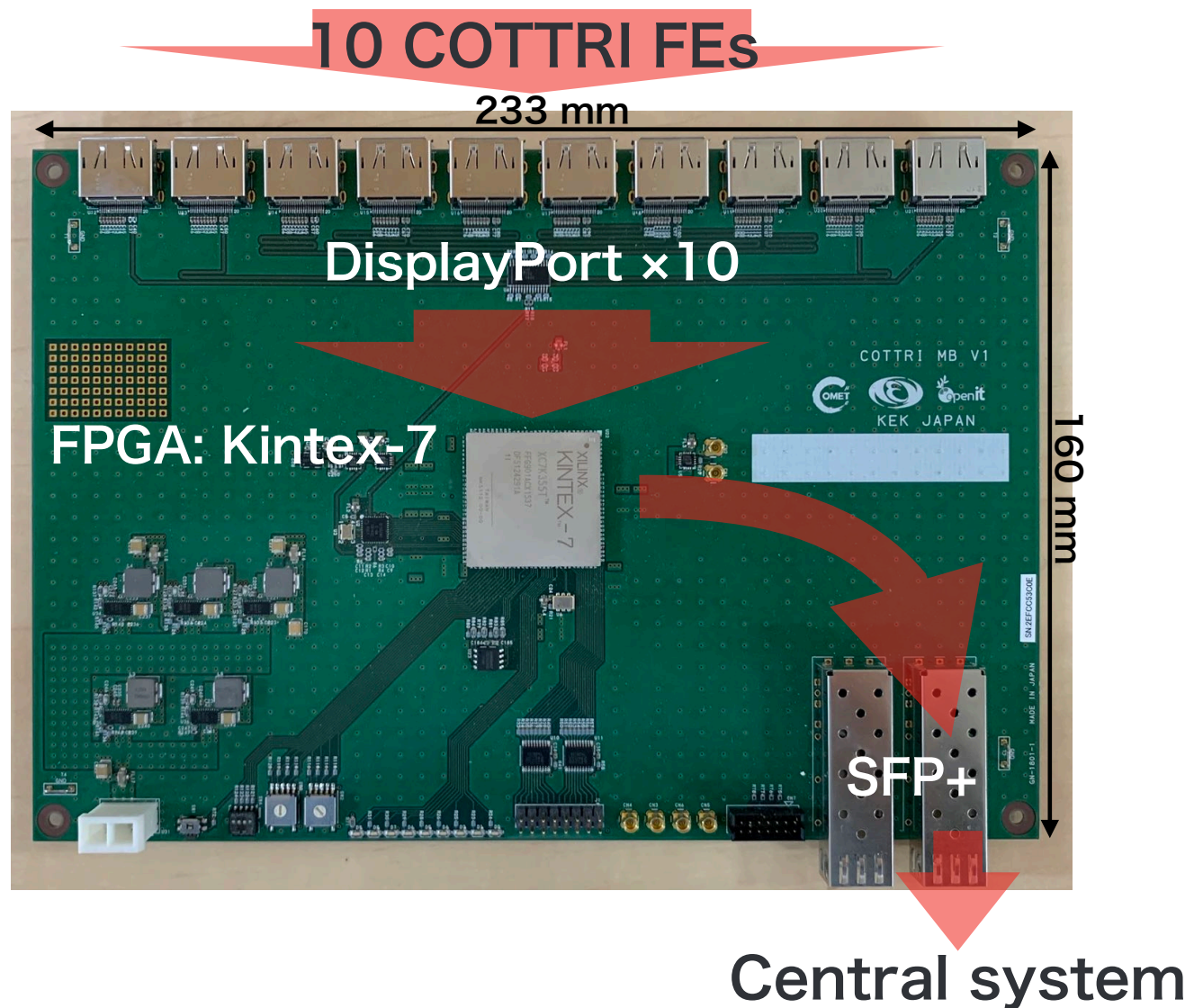
- ◆ スコアに対して閾値を適用
- ◆ RECBE毎のヒット数 (N_{hit})

6. COTTRI MBへ N_{hit} データを転送



COTTRI MB

2017年夏に完成（試作機）
基本的にFEと共通のフロアデザイン



FPGA内のデータ処理

COTTRI FEs

N_{hit} データの受信

RECBE毎の N_{hit}



N_{hit} を合計

各CTHカウンタで定義された
CDCのアクティブ領域毎



CDCトリガー判定

各CTHカウンター毎



CDCトリガーデータ転送

Central system

最後に

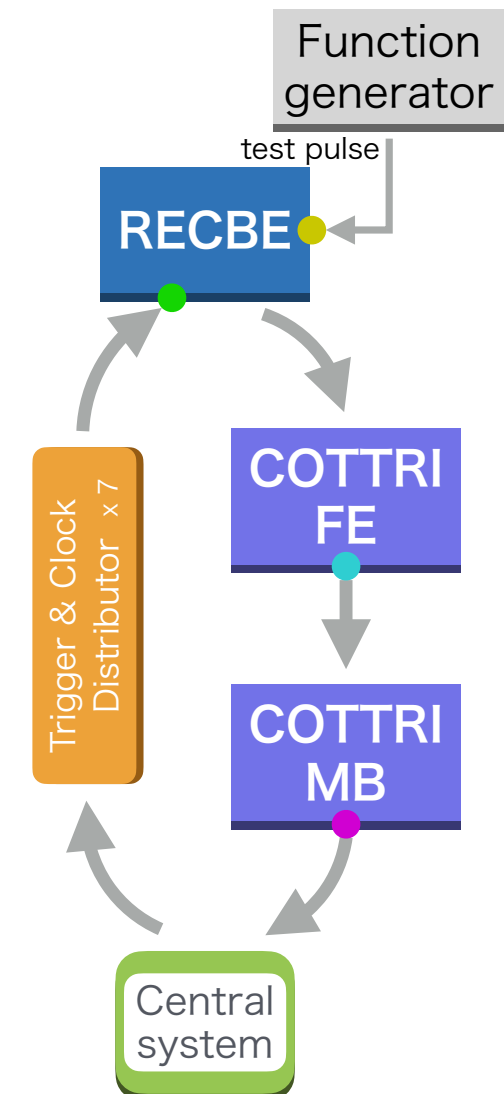
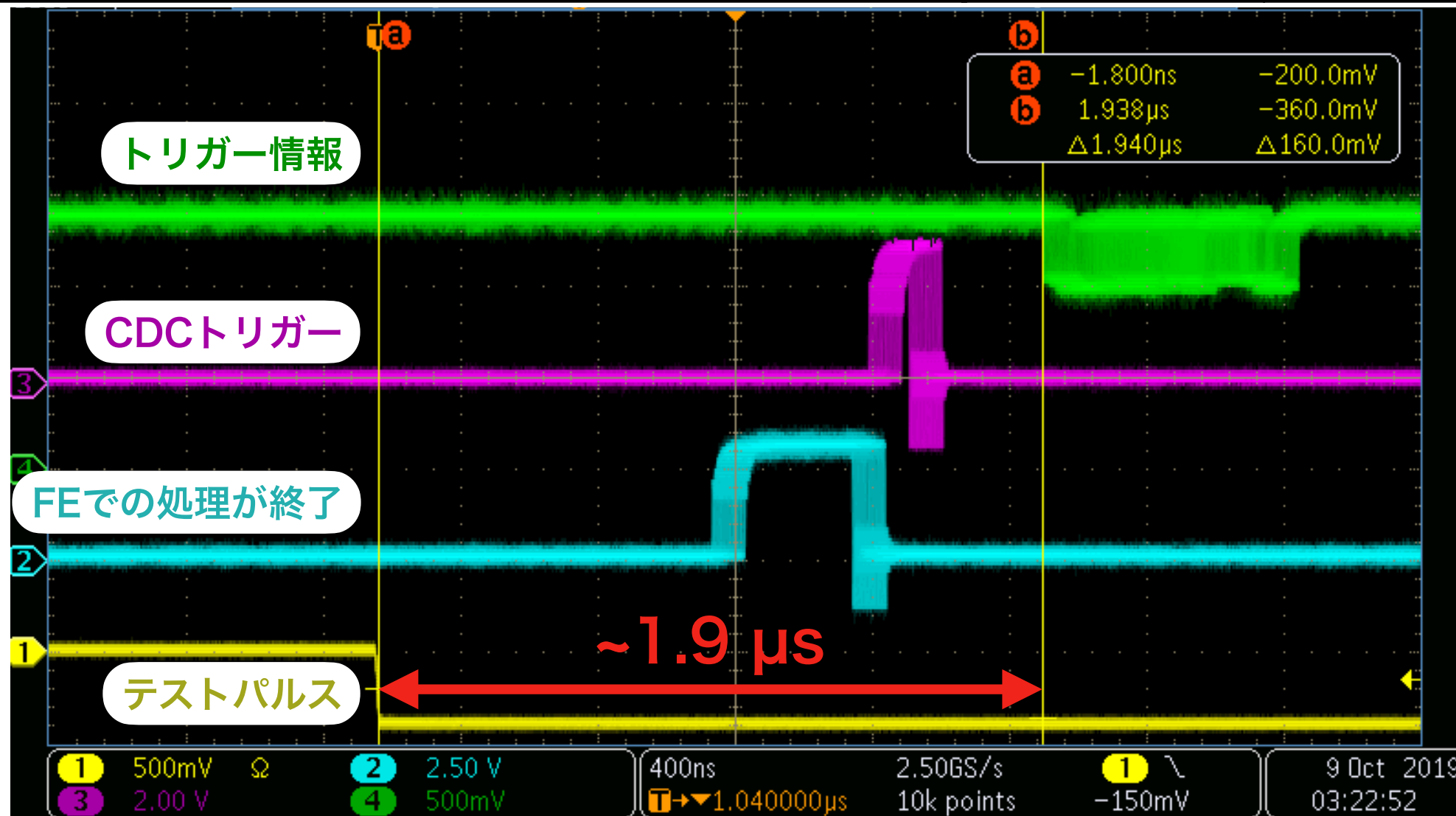
動作試験

- ◆ 遅延時間測定 & CDCの一部を使った宇宙線の検出

遅延時間 : 3.1 μs - 3.2 μs

要求値 7 μs を十分に満たす遅延時間

	遅延時間 [μs]	備考
RECBE \rightarrow COTTRI System \rightarrow Others \rightarrow RECBE	1.9 - 2.0	10 MHzのデータ処理 \rightarrow 100 nsの揺らぎ
ドリフト時間分布の幅	0.4	
RECBEにおけるトリガー情報の受信時間	0.8	32-bitの情報を40 MHzで受信

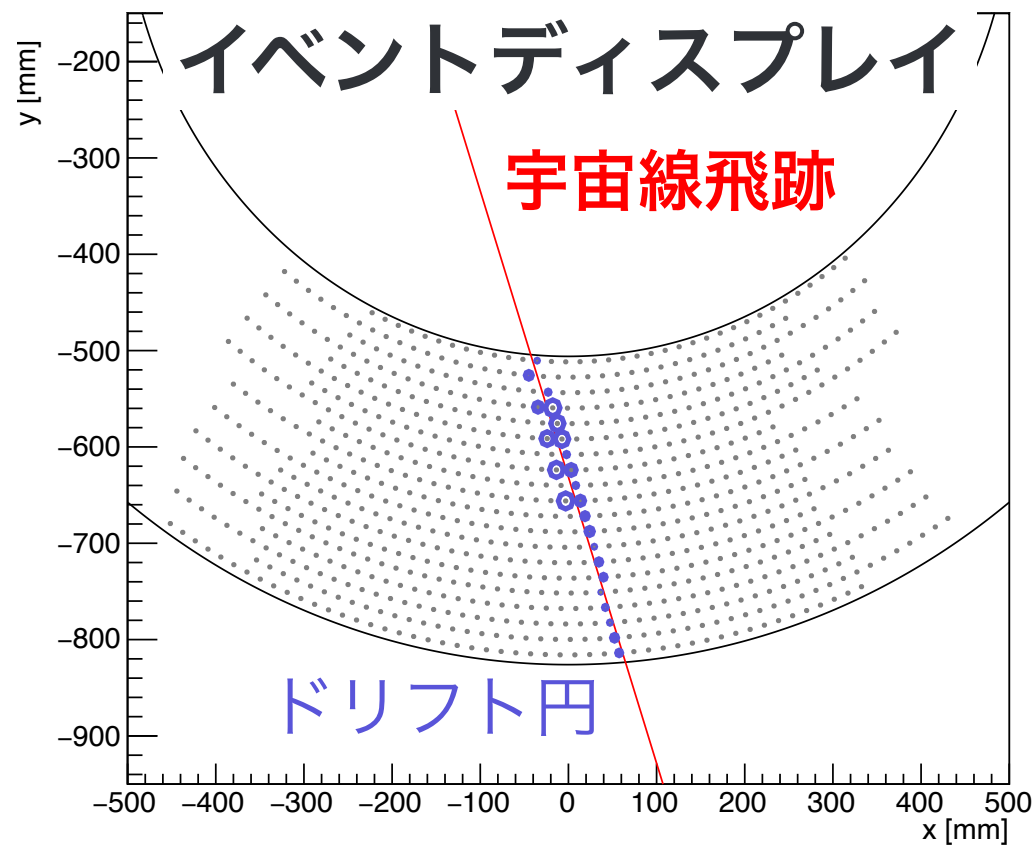


CDCによる宇宙線検出 w/ 18 RECBEs

目的 : COTTRIシステムの動作確認

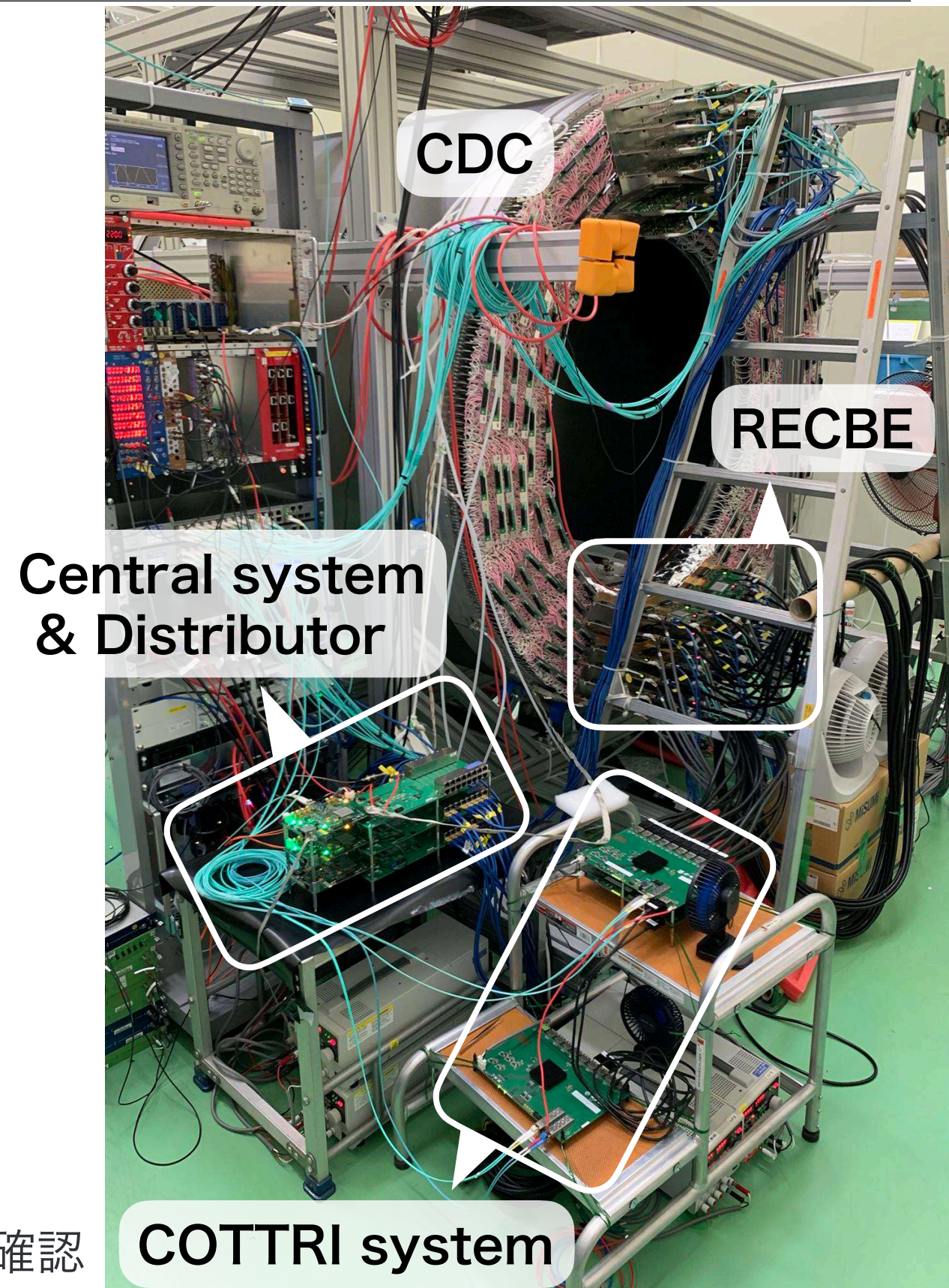
トリガー条件 : CDCセルフトリガー

- ◆ COTTRIでCDC内のヒット数を評価
 - ・ LUTを使ってワイヤーにヒットがあるか判断
 - ・ ヒット数の閾値 : > 17 hits



**COTTRIシステムのみで宇宙線を見つけ、
トリガーをかけることに成功**

今後 : 読み出し領域の拡大と長期ランで安定性を確認



まとめ

- ◆ 大強度ミュオンビームを使ってミュオン電子転換過程探索
 - ・ これまでより100倍の測定感度で新物理探索
 - ・ データ取得システムの性能を超えたトリガーレートの問題
 - ◆ FPGAベースのオンライントリガーシステム (COTTRI) でトリガー問題を解決
 - ・ 機械学習で最適化されたLUTを使ったヒット選別 と イベント選別
 - ◆ 想定されるオンライントリガーの信号検出効率：**96%**
 - ・ トリガーレートの抑制：**>90 kHz → 13 kHz**
 - ◆ **遅延時間： $\leq 3.2 \mu\text{s}$** (要求値 $7 \mu\text{s}$ に比べて余裕がある)
 - ◆ CDCのセットアップを使ったトリガーシステムの動作試験
 - ・ CDCのセルフトリガーによる宇宙線の検出に成功
- 【今後】**
- ・ より多くのRECBEを使ってCOTTRIシステムの性能を評価する予定
 - ・ イベント選別でHough変換 or hls4mlで何か導入する？

hls4ml : <https://fastmachinelearning.org/hls4ml/>

Backup

Signal and Backgrounds for $\mu N \rightarrow e N$

Signal : Single mono-energetic electron

$$E_{\mu e} = m_{\mu} - B_{\mu} - E_{rec}$$

m_{μ} : Muon mass, 105.7 MeV/c²

B_{μ} : Binding energy in the 1st orbit $\sim Z^2 \alpha^2 m_{\mu} / 2$

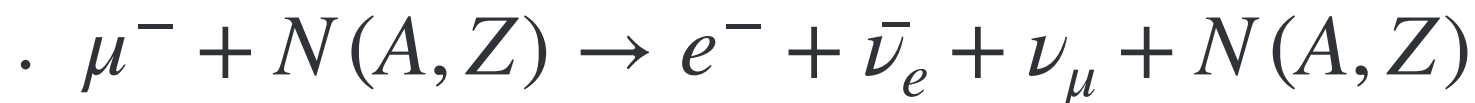
E_{rec} : Nuclear-recoil energy $\sim (m_{\mu} - B_{\mu})^2 / (2m_N)$

For Al : $E_{\mu e} = 105.0$ MeV

($B_{\mu} = 0.48$ MeV, $E_{rec} = 0.22$ MeV)

Backgrounds

◆ Intrinsic physics background : Muon decay-in-orbit (DIO)

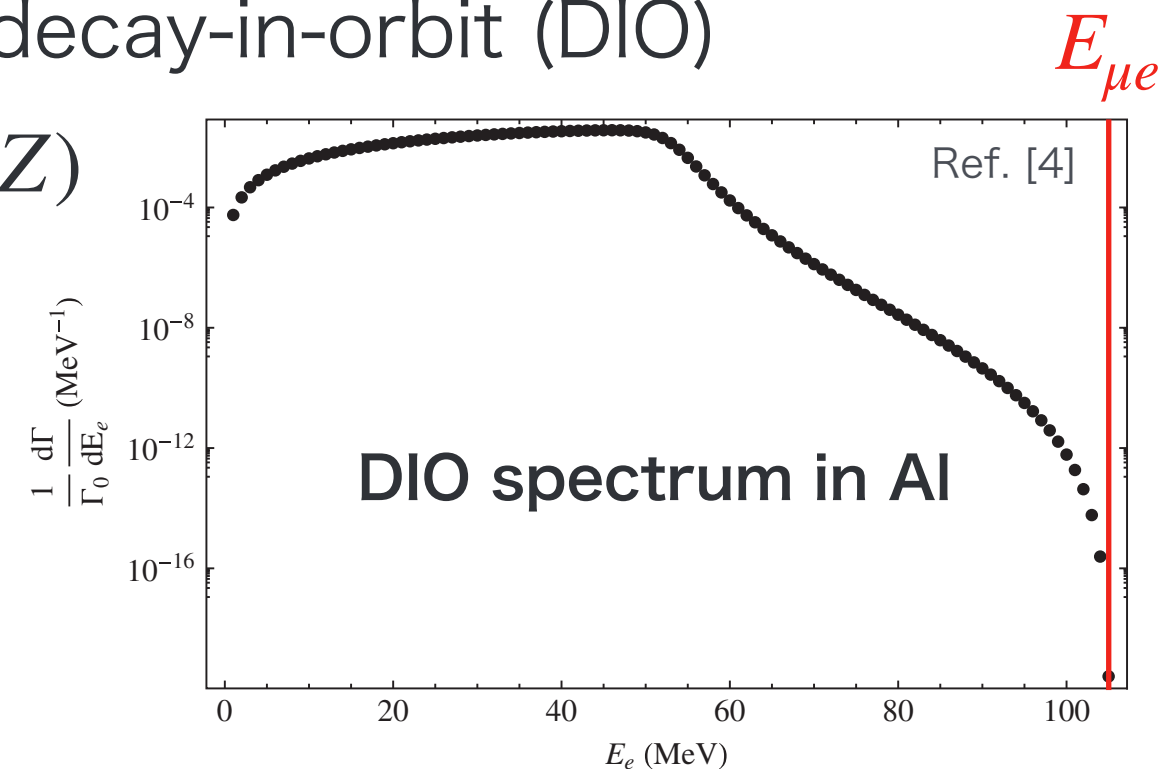


• High energy tail
by the nuclear-recoil effect

• Drop in proportional to $(E_{\mu e} - E_e)^5$

◆ Beam-related background

◆ Cosmic-ray induced background



Trigger system

FCT & Interface

Distributer

- 40-MHz clock & Trigger

Receiver

- Busy from RECBE

FC7

Central system

- Trigger decision

Distributer

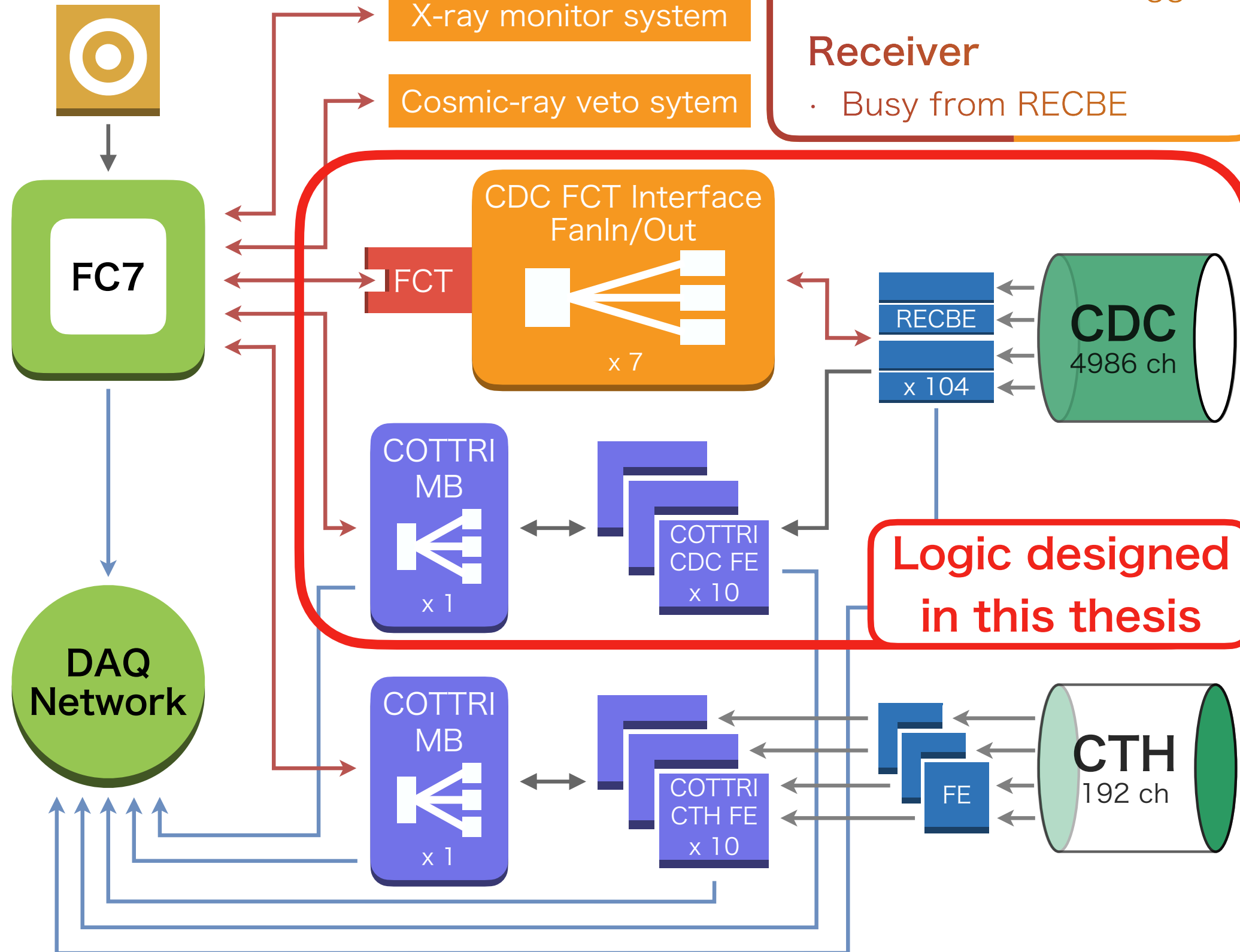
- 40-MHz clock
- Trigger

Monitor

- Accelerator info.
- Cosmic-ray veto

developed by CMS

Accelerator clock

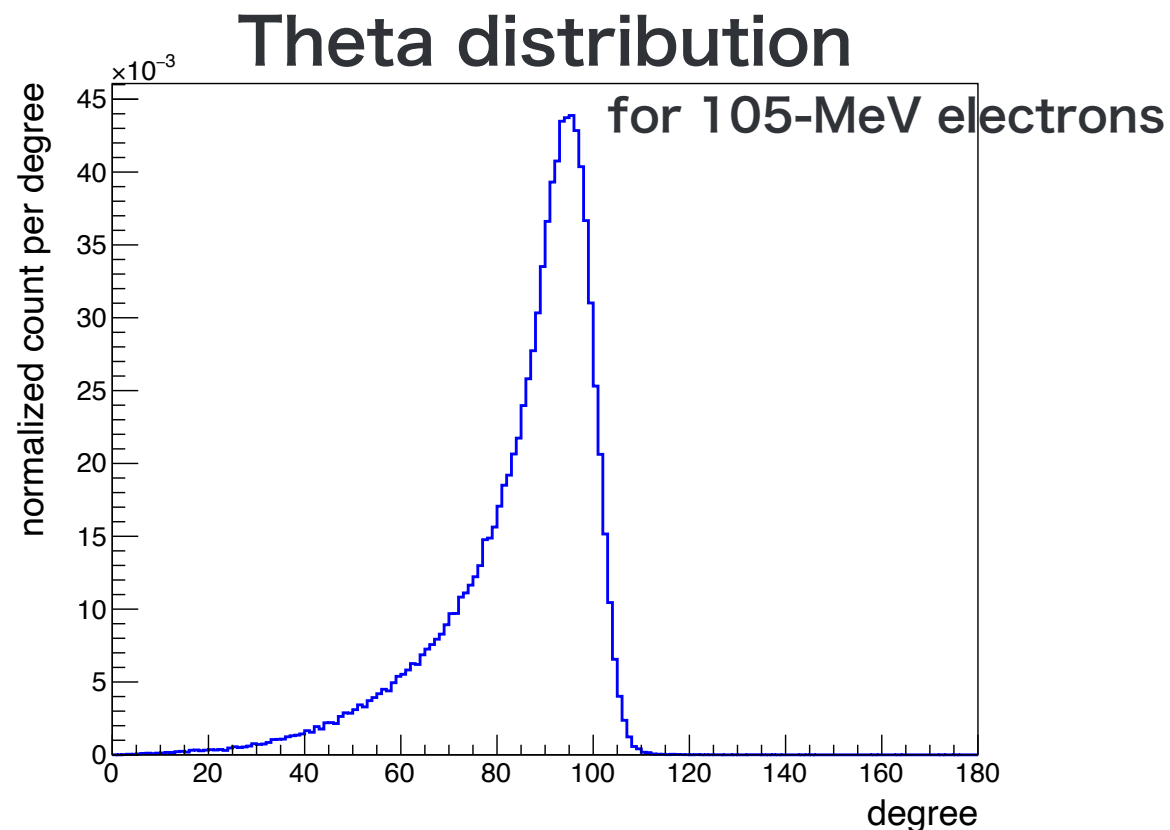
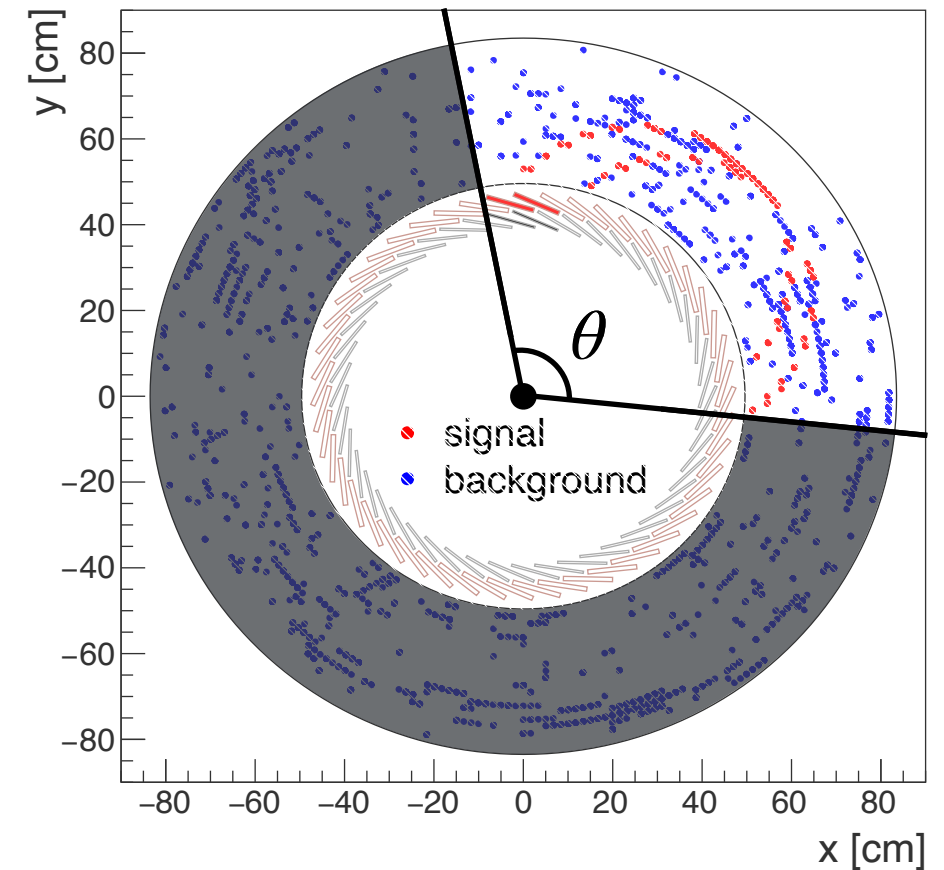


Logic designed in this thesis

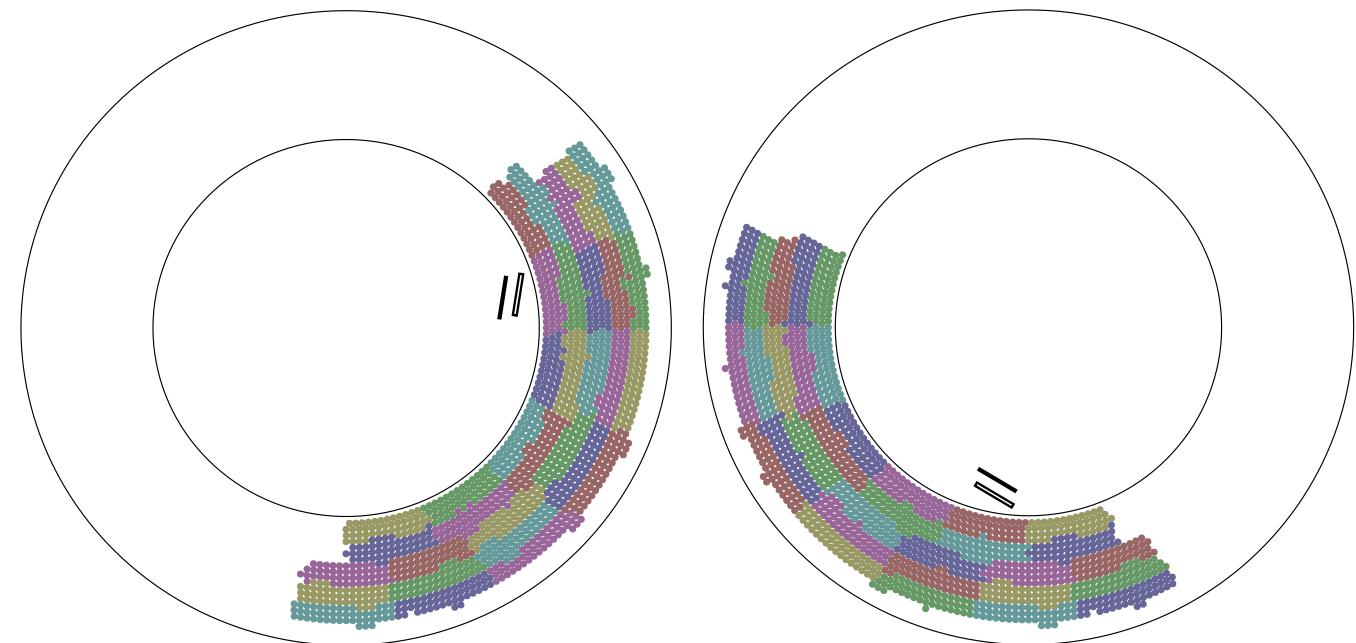
Event classification

CDC active section for each CTH module

- ◆ A 105-MeV electron leaves hits in a part of the readout area.
 - maximum of theta : $\sim 110^\circ$
- ◆ Definition
 - Collaboration between a CTH hit module and an active section of the CDC.
 - 2 innermost layers : 6 RECBs (135°)
 - Others : 7 RECBs (140°)
 - 16 patterns for 48 CTH modules



Examples of the CDC active section



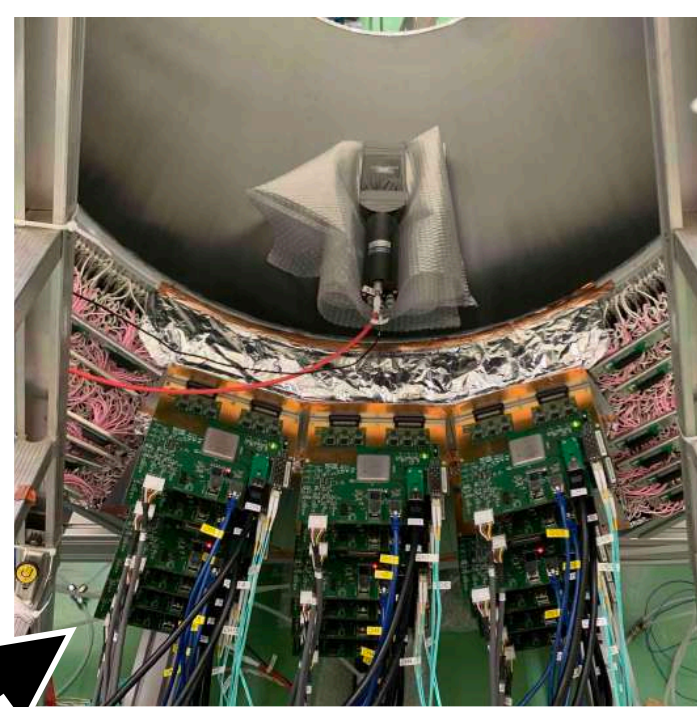
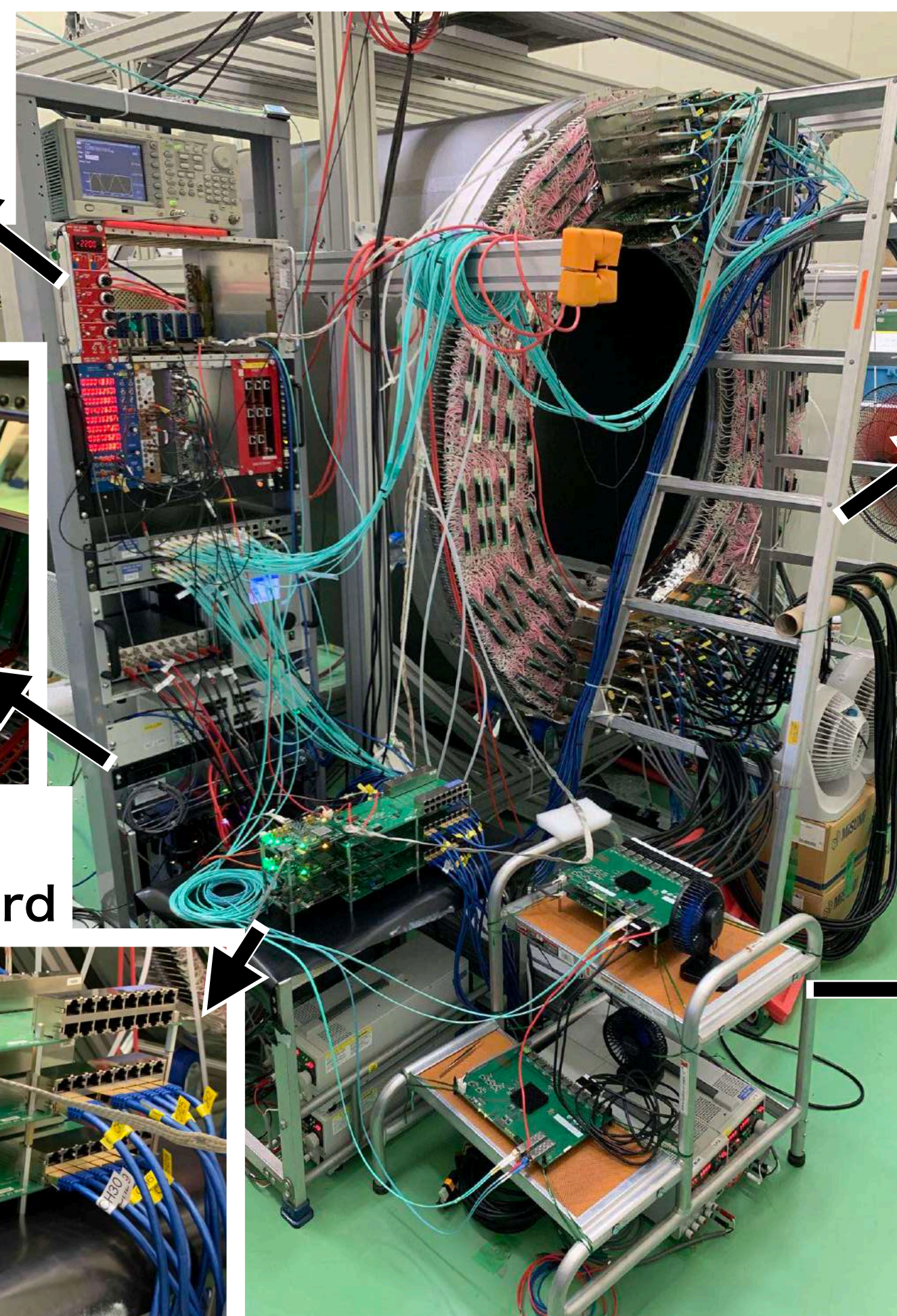


Trigger RECBE

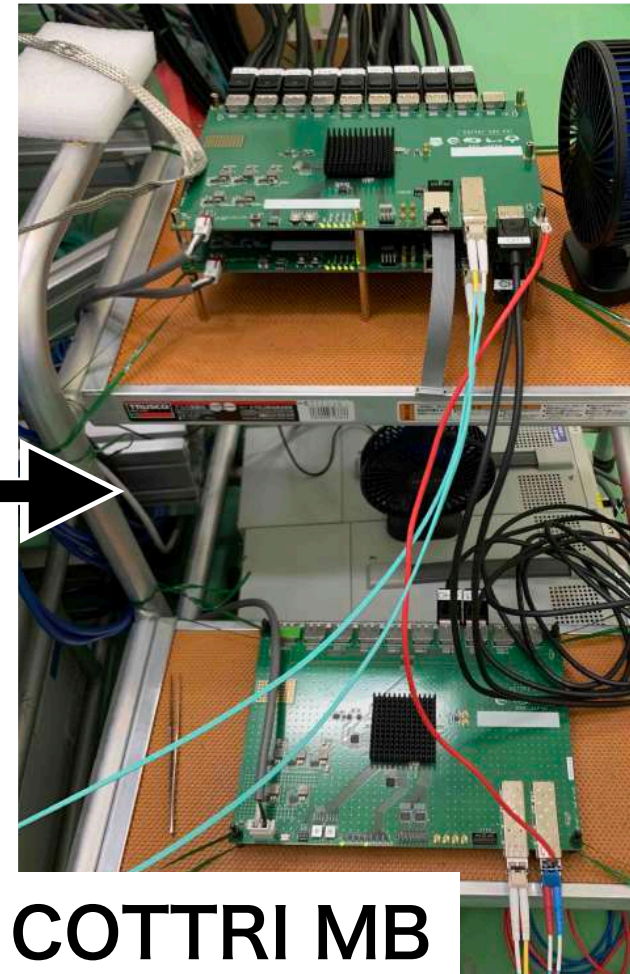
FC7



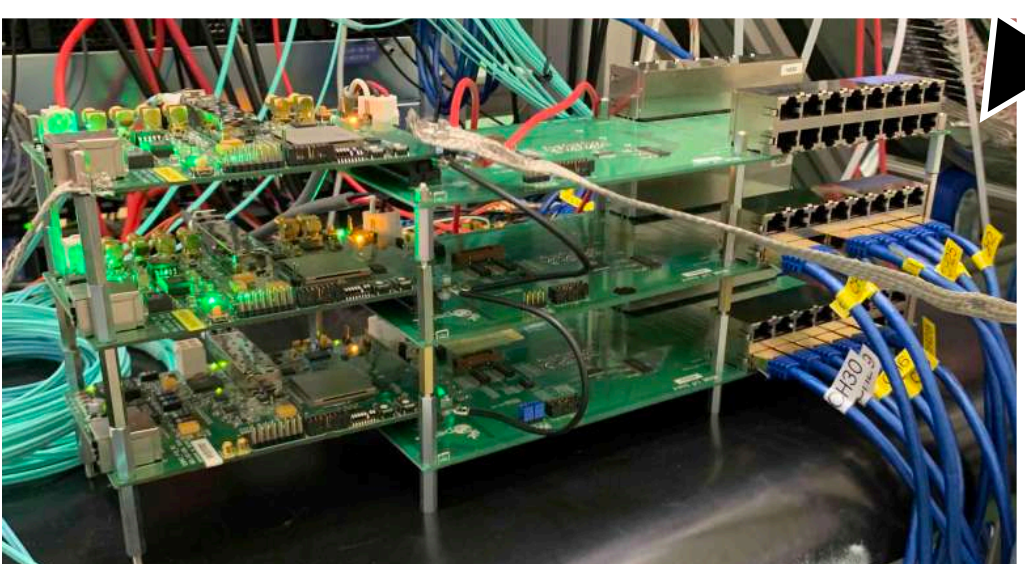
**FCT and
FCT interface board**



**RECBE
COTTRI FE**



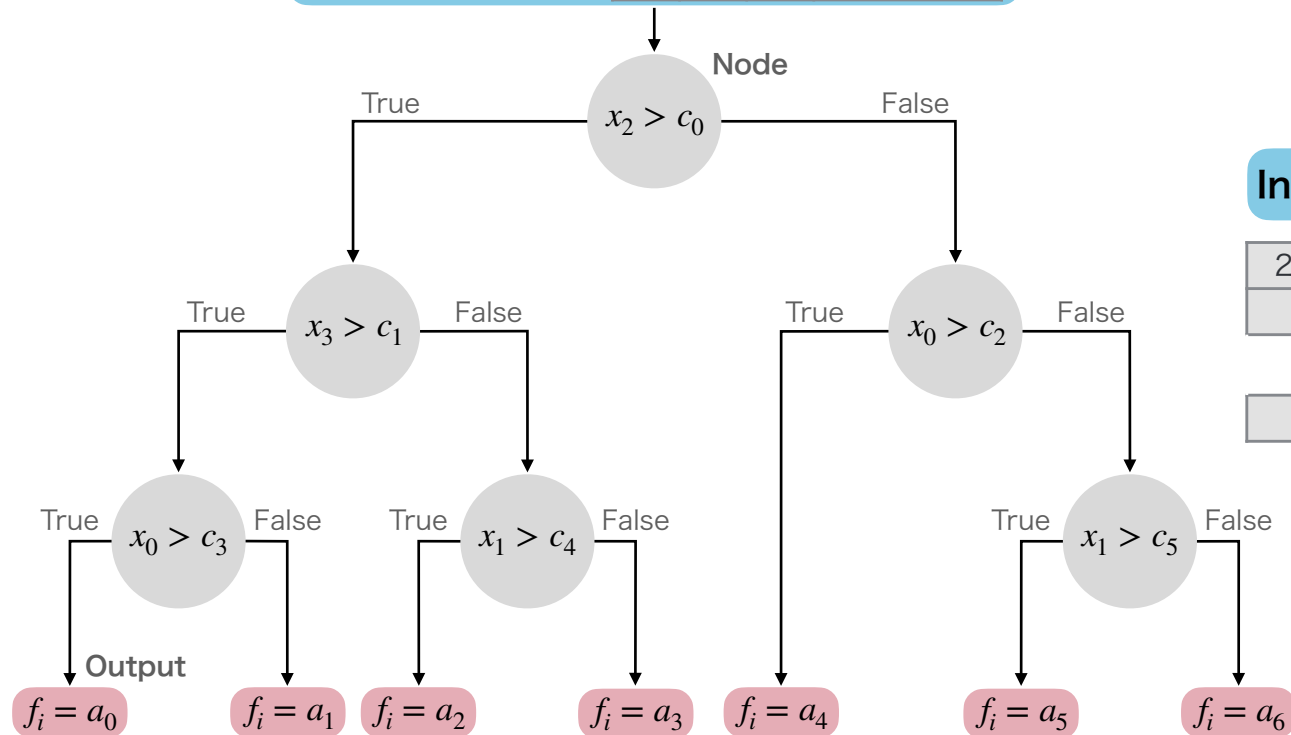
COTTRI MB



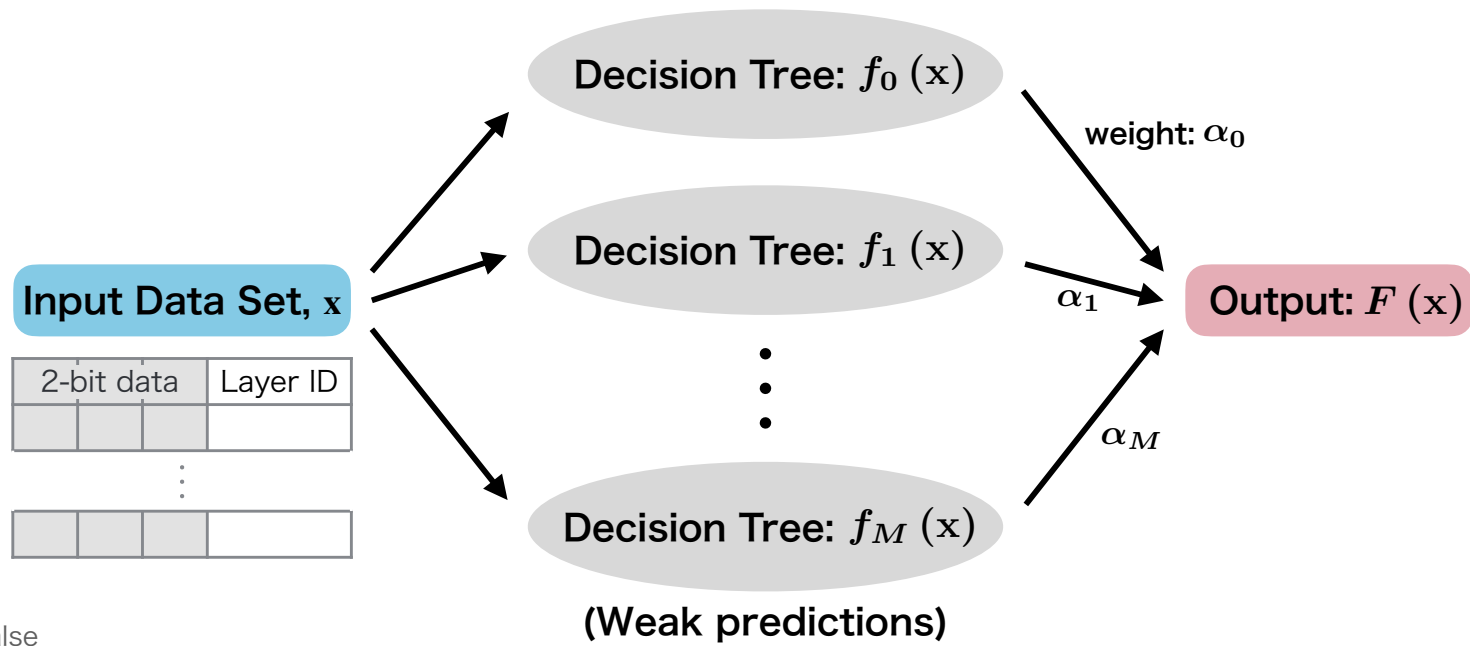
Gradient Boosted Decision Tree

Decision Tree: $f_i(x)$

Input Datum, $x =$	2-bit data			Layer ID
	x_0	x_1	x_2	x_3



Gradient Boosted Decision Trees

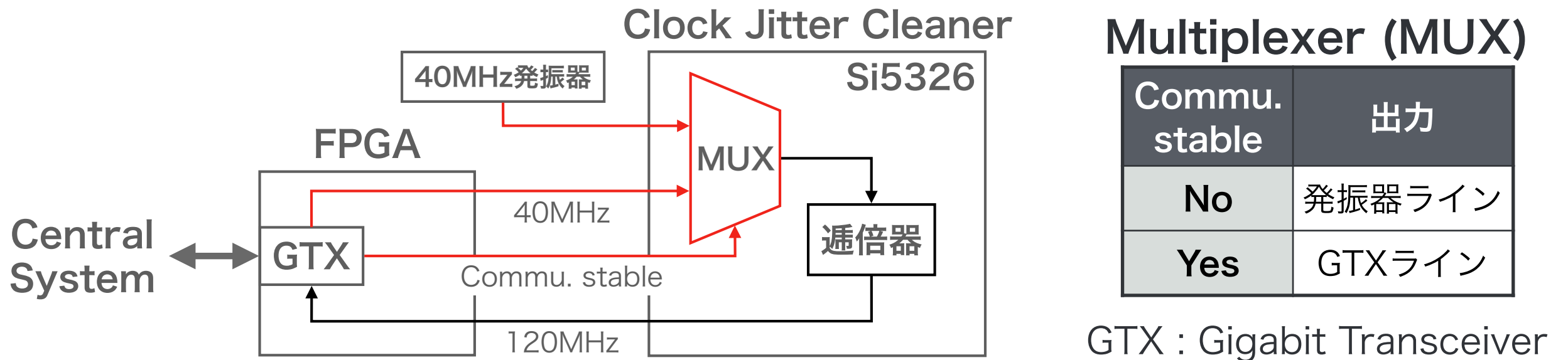


$$F(\mathbf{x}) = \sum_{i=1}^M \alpha_i f_i(\mathbf{x})$$

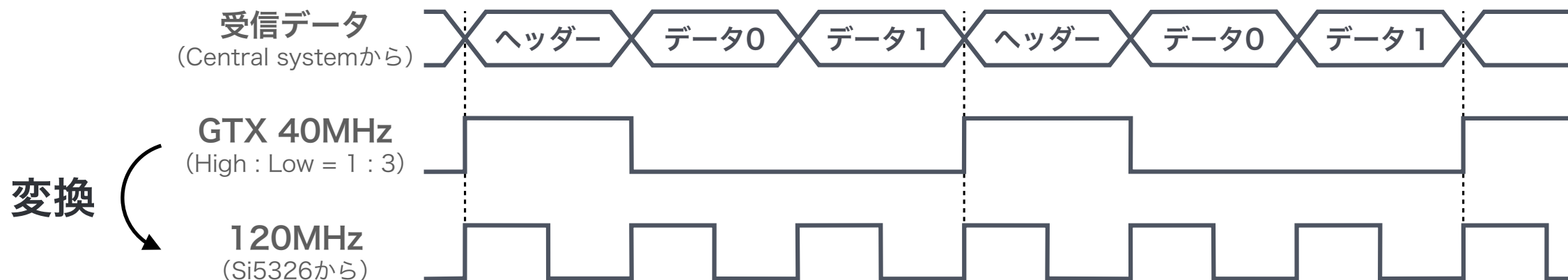
- ◆ GBDT is one of the ML.
- ◆ Decision tree : True or False questions
- ◆ Gradient boosted technique : Combination of small weighted trees
 - Each tree : weak prediction
- ◆ GBDT output : score for each input datum.
 - [Background-like hit] < [signal-like hit]

トリガーシステムの同期

- ◆ 受信データのヘッダータイミングでシステムを同期
 - ・ Clock Jitter Cleaner (Si5326) で精確な120MHzを生成
 - ・ 立ち上げ時は発振器からの40MHzで通信
 - ・ このままだとCentral System側と発振器とで少しずつずれる
 - ・ 通信が安定したタイミングで逡倍器の入力を切り替え



波形のイメージ



Readout electronics : RECBE

Overview

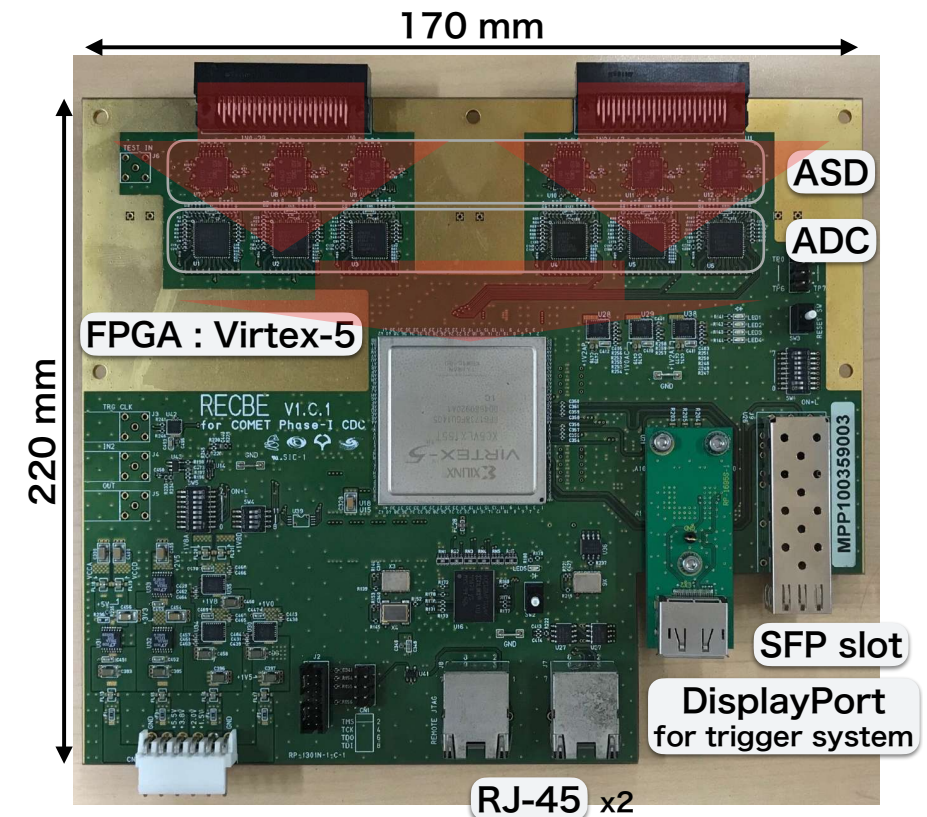
- ◆ 48 ch/board × 104 boards
- ◆ Signal processing by FPGA, Amp-Shaper Discriminator (ASD), and Analog-to-Digital Converter (ADC)

Readout information

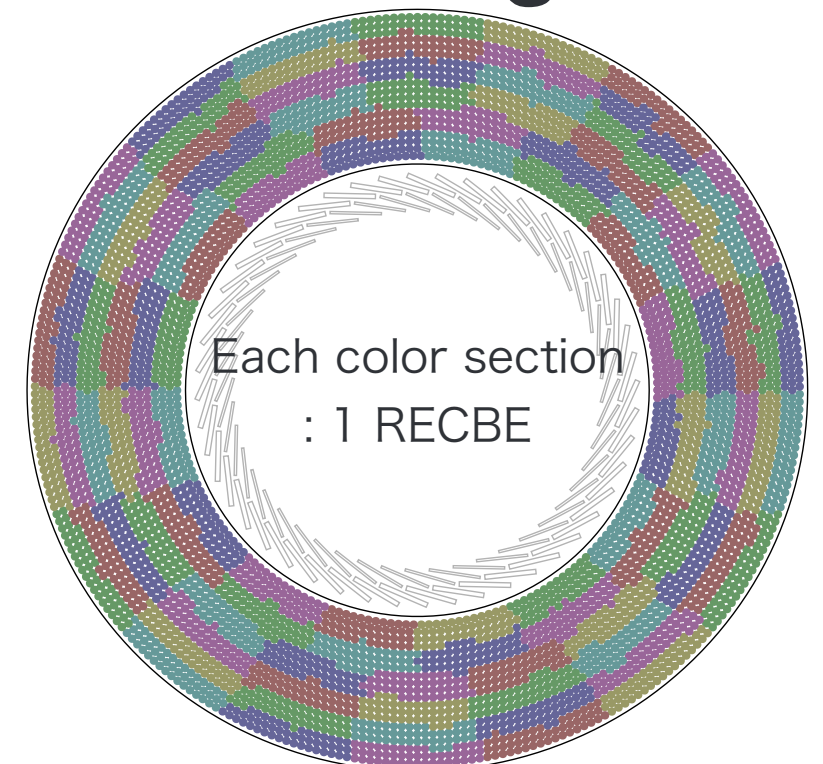
- ◆ Digitized waveform at 30 MHz
 - Energy-loss information
 - ADC : 2 Vp-p with 10-bit resolution
- ◆ Hit timing at 960 MHz

Data compression for COTTRI

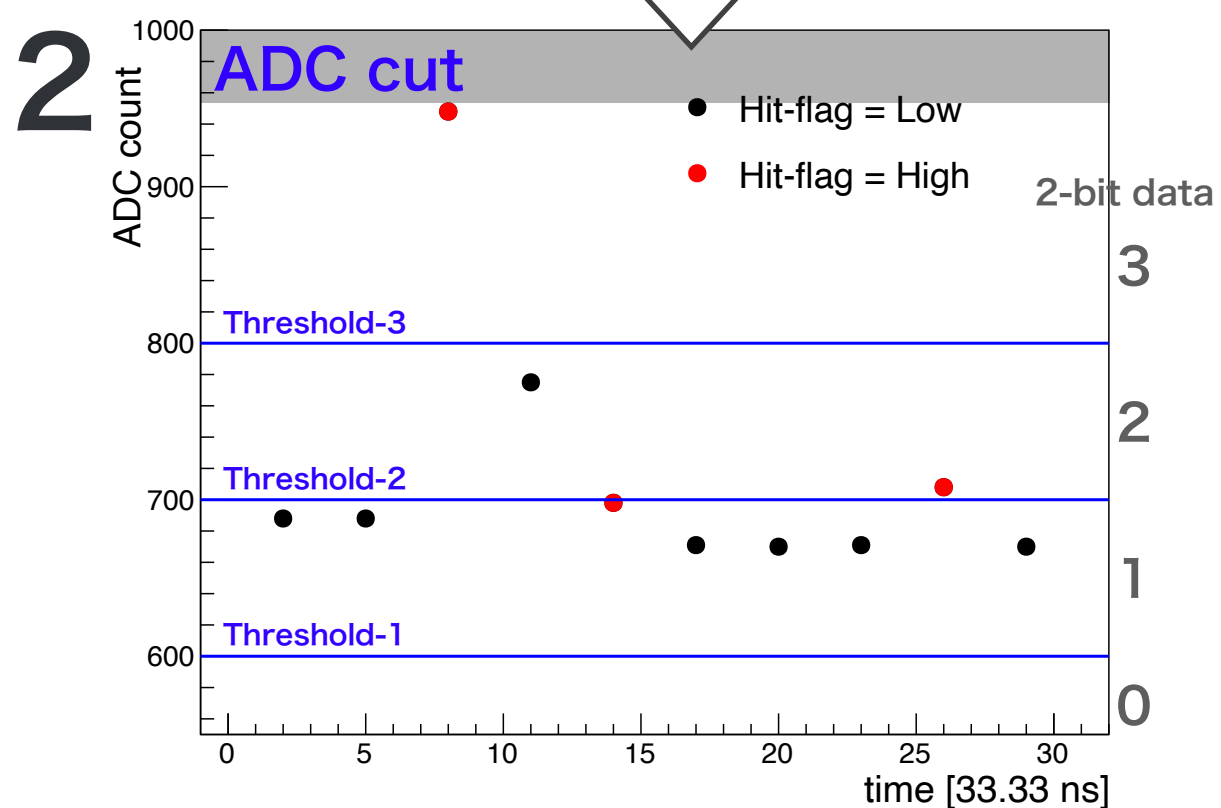
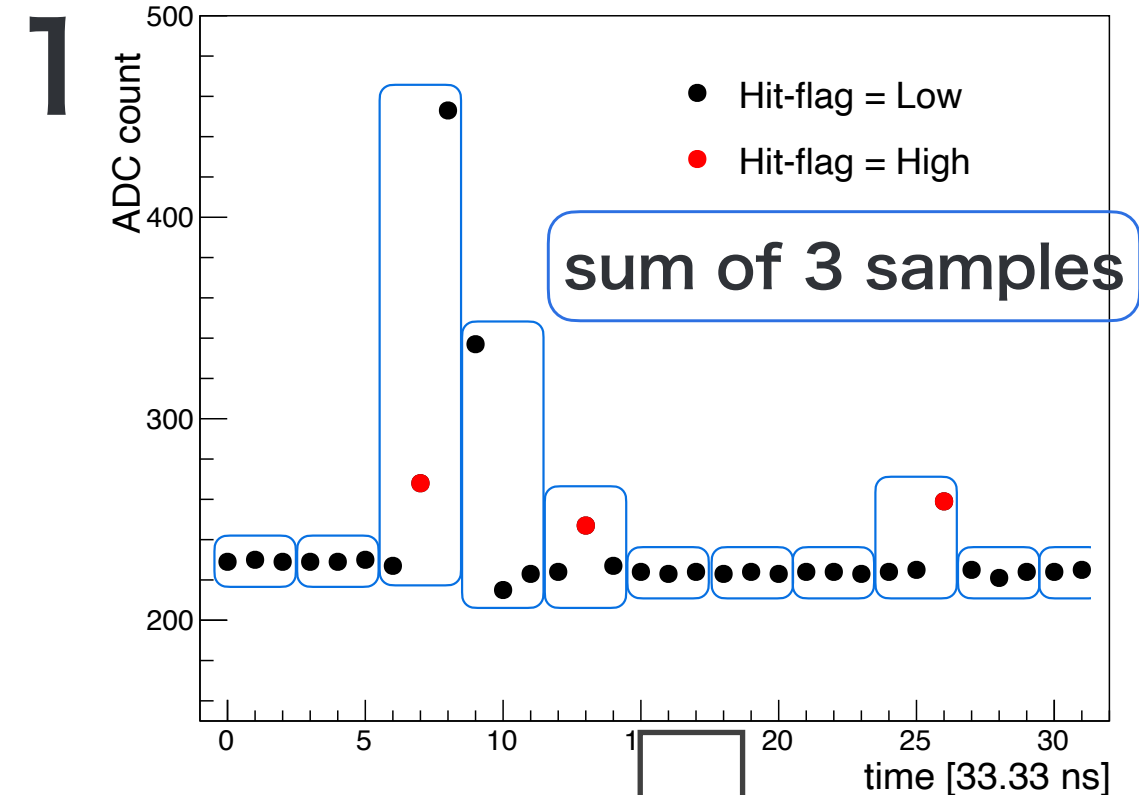
- ◆ Compress the 10-bit ADC sample into 2 bit
 - 6-input LUTs implemented on an FPGA
 - 2 bit/wire for local and 2 neighboring wires



RECBE configuration



Data compression in RECBE

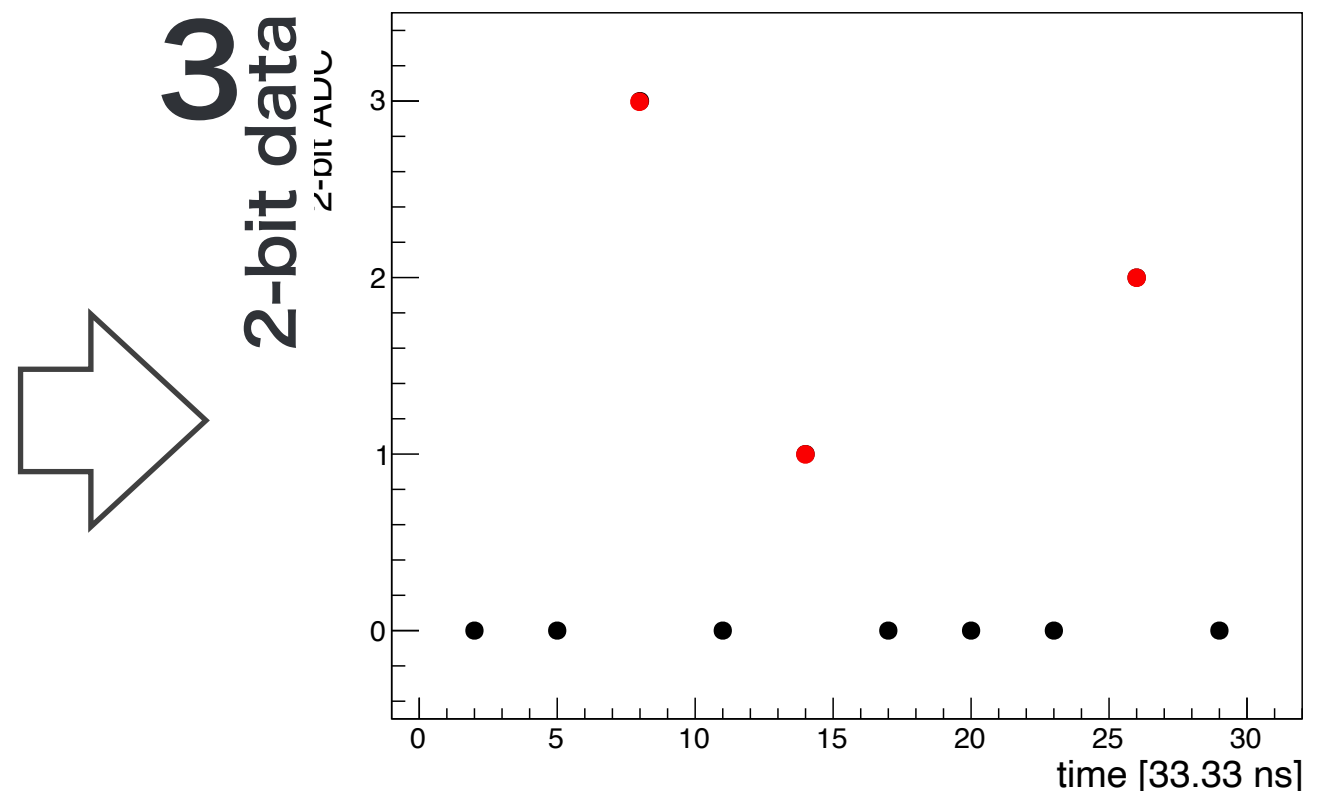


2-bit data generation by wire

- ◆ Create a hit flag using the hit-timing info.
 - High/Low : hit/no-hit
- ◆ Tag the ADC sample with the hit flag

Transceivers (GTXs) on the FPGA

- ◆ Max. rate : 3.125 Gbps/lane × 2 lanes
- ◆ Can transmit [2 bit/wire × 48 wires]



Customization of RECBE

Send the CDC hit information to the COTTRI system

New adopter

- ◆ To transmit the 2-bit data
 - GTXs \Leftrightarrow a DP connector
 - In/Out : 2 GTX lanes for each

New special modules

- ◆ 2-bit data generator
- ◆ Communication protocol

