

COMET実験における 計測システム開発

13 Oct. 2016

上野 一樹(KEK IPNS)

計測システム研究会2016 @J-PARC

Outline

- **イントロダクション**
- **COMET実験**
- **COMET計測システム**
- **エレキ開発**
- **まとめ**

イントロダクション

Lepton Flavor Violation (LFV)



ニュートリノ間の混合: 発見済
(ニュートリノ振動)



荷電レプトン間の混合: 未発見

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)

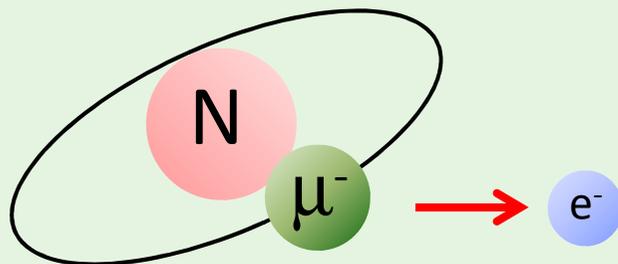
分岐比 $\sim O(-15)$

観測可能!

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

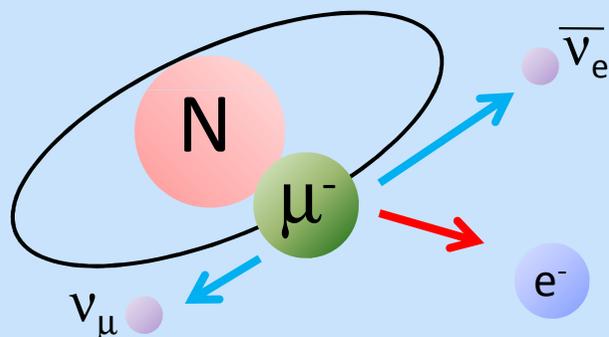


• 単一電子

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

• 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

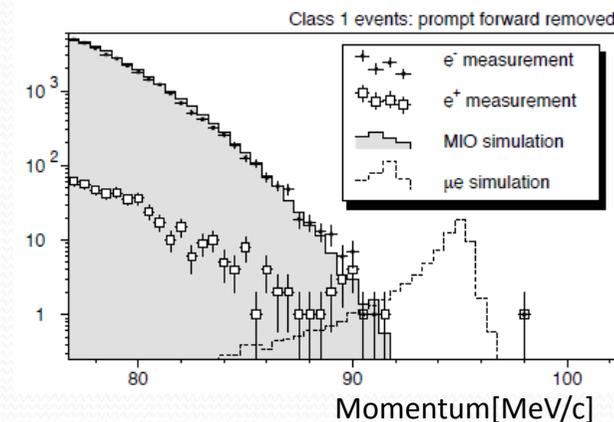
分岐比上限値 $< 7 \times 10^{-13}$ (SINDRUM-II@PSI)

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

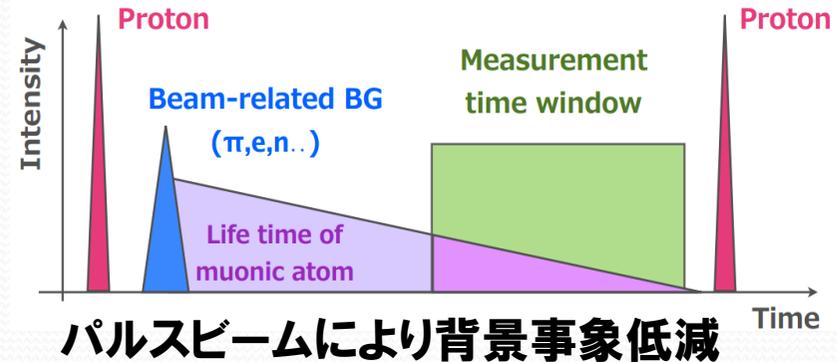


COMET実験

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



大強度パルス状陽子ビーム

陽子ビーム

パイ中間子生成標的

パイ中間子捕獲磁石

高効率パイオン捕獲ソレノイド

湾曲型 π/μ 輸送ソレノイド
-> 低運動量 μ の選別

ミュオン輸送磁石

ミュオン静止標的

電子輸送磁石

湾曲型電子輸送ソレノイド
-> 高運動量電子の選別

パイ中間子 \rightarrow ミュオン

電子

高分解能検出器

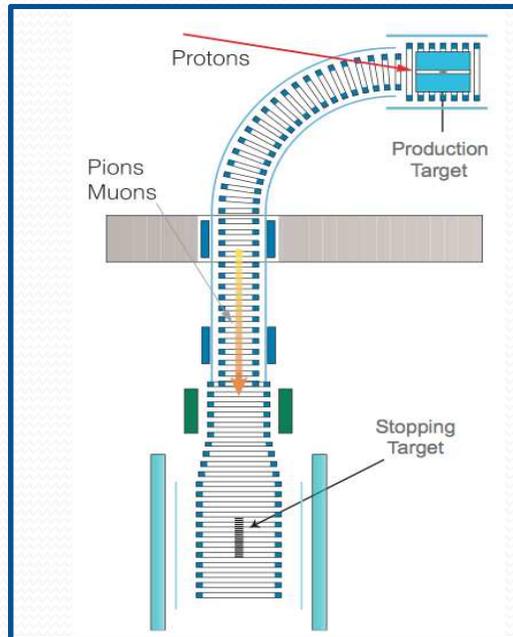
電子検出器

- 検出器ソレノイド磁石
- ストローチューブ飛跡検出器
- LYSOカロリメーター

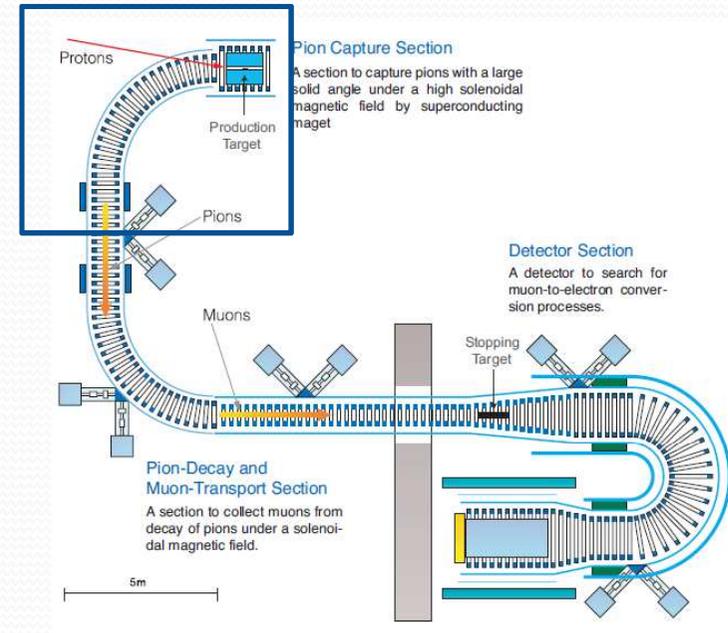
目標感度: 3×10^{-17} (現状の10000倍)

COMET実験

ステージングアプローチ



Phase-I(2019)



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 ⇒ 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

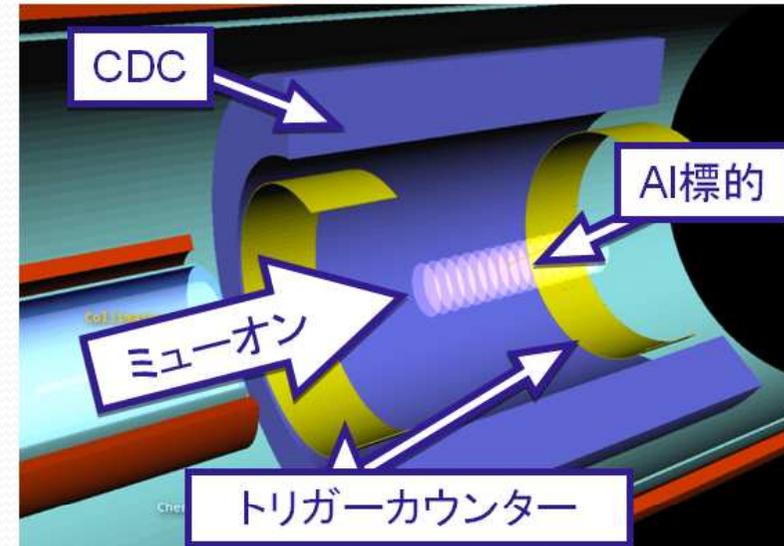
分解能 $< 200 \text{ keV/c @ } 105 \text{ MeV/c}$

CTH (Cylindrical Trigger Hodoscope)

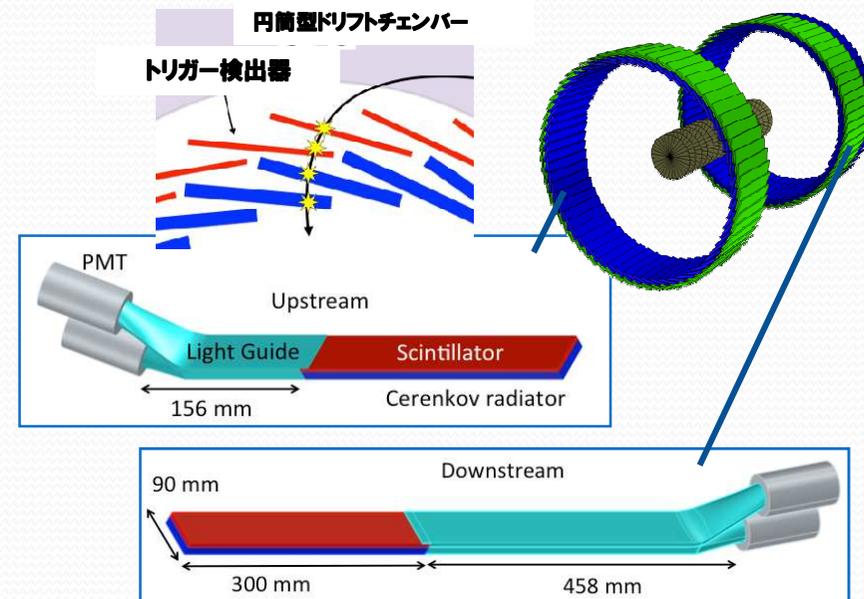
トリガー検出器

シンチレータ + チェレンコフ検出器

光検出器 : Fine-mesh PMT



CDC (実機)



CTH

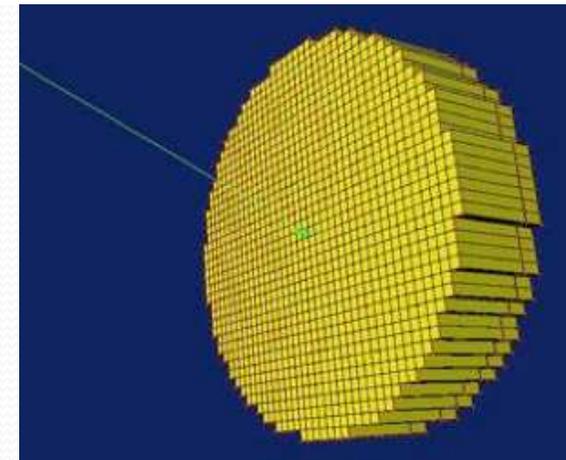
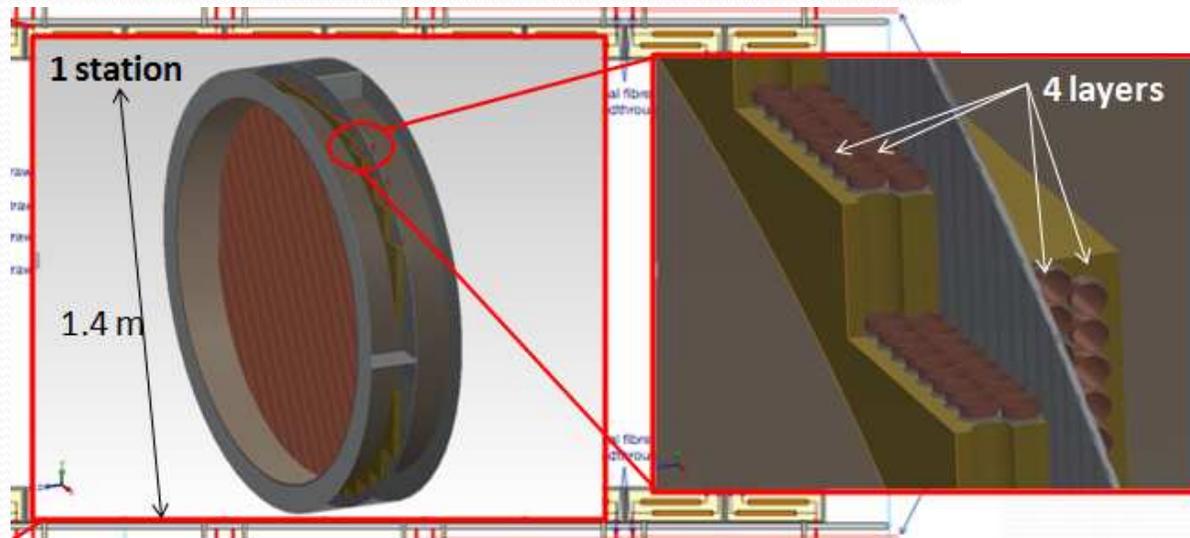
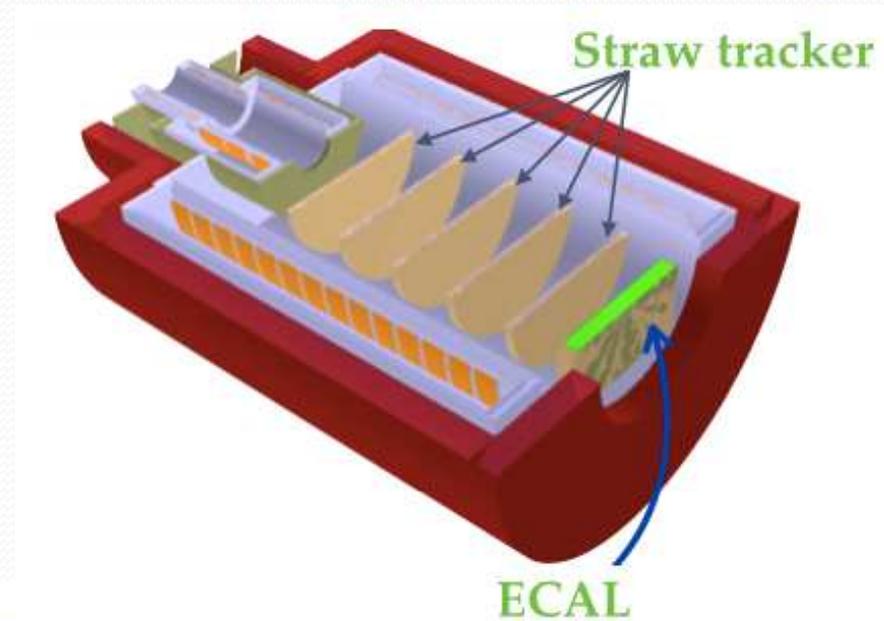
検出器2: StrECAL (Straw tube tracker + Electron calorimeter)

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)

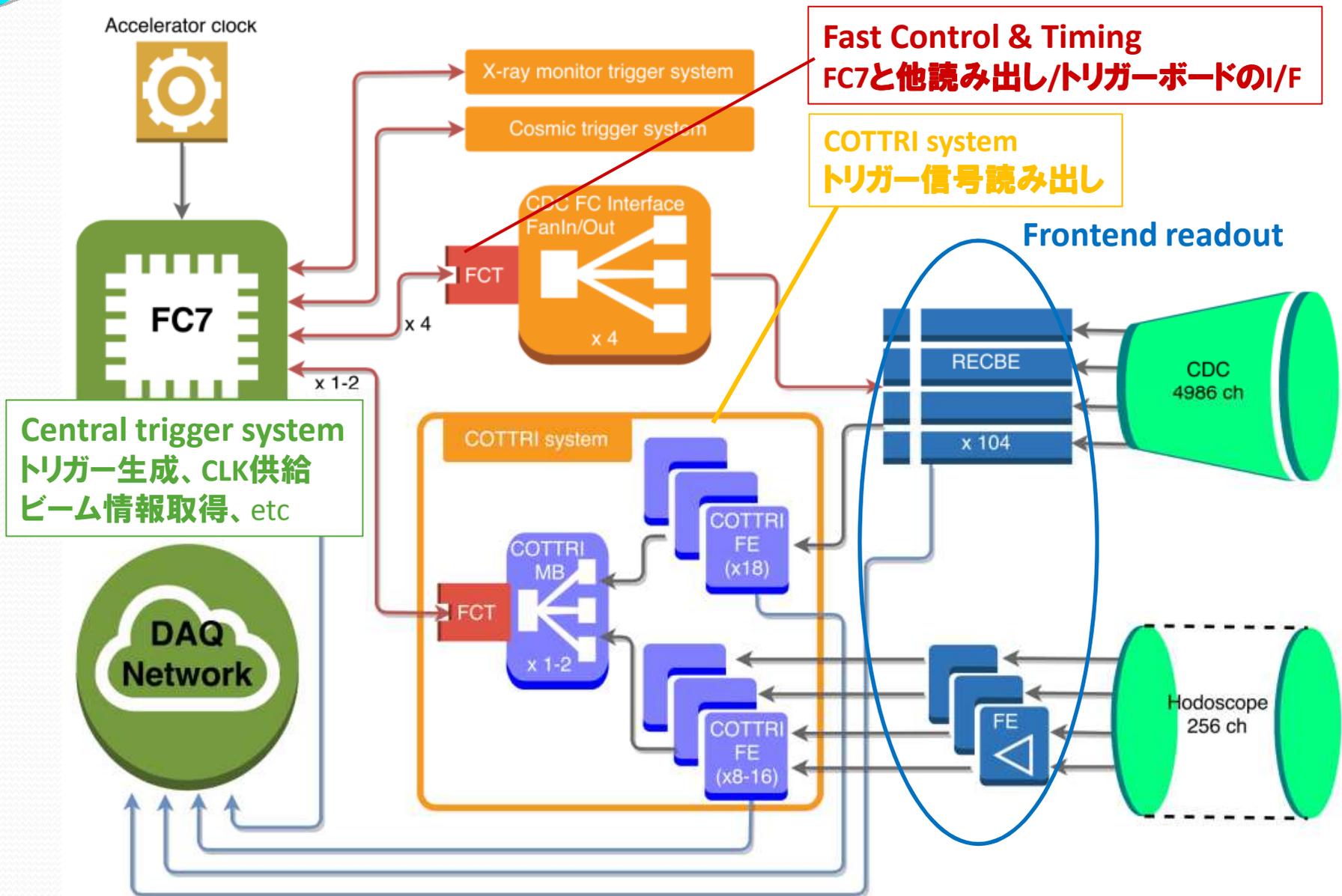
LYSO + APD
エネルギー、タイミング、位置測定
トリガー生成、トラッキング補助、PID



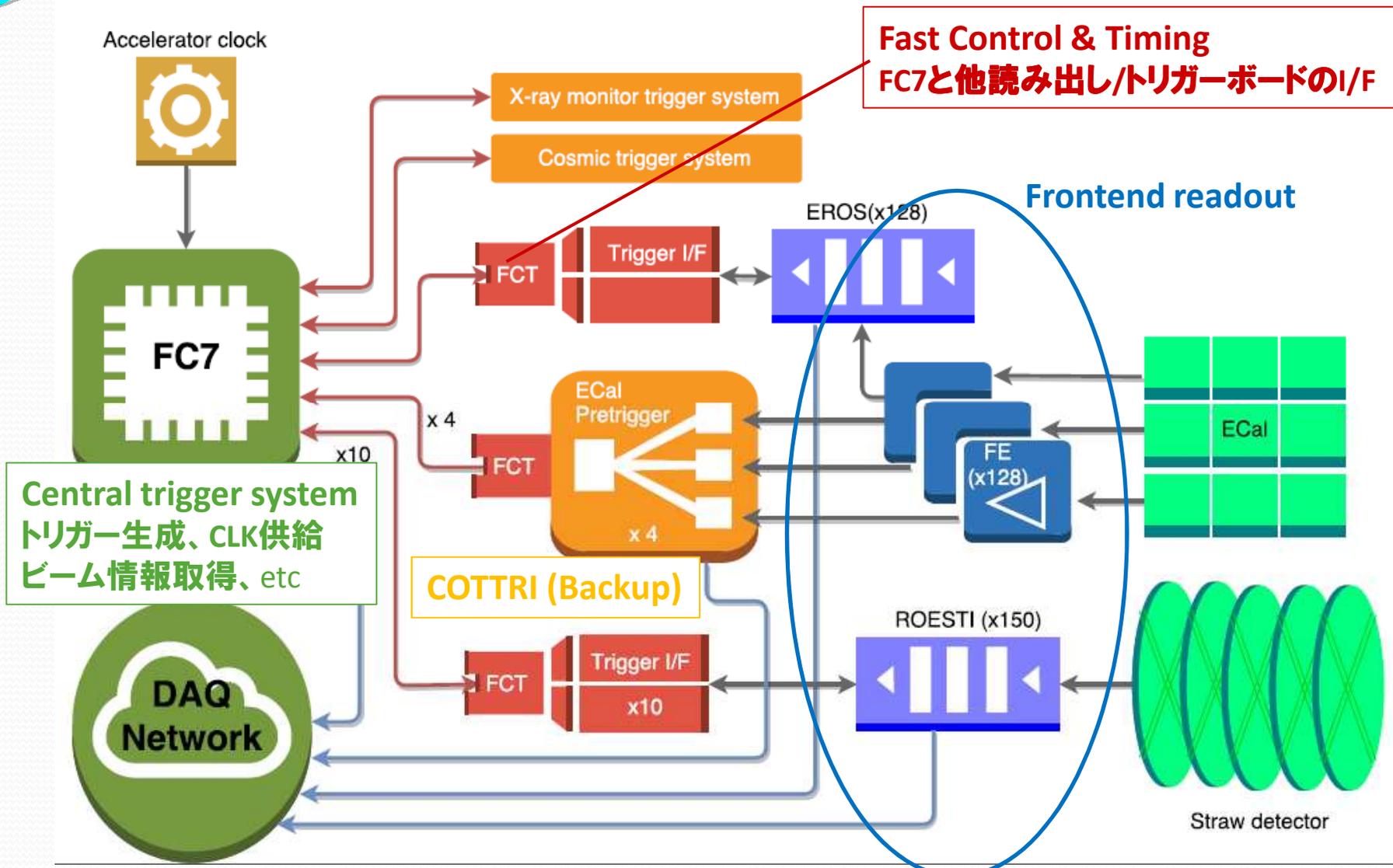
Straw tube tracker

Ecal

計測システム (CyDet)



計測システム (StrECal)



エレキ開発

COMET実験で必要なエレキたち(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

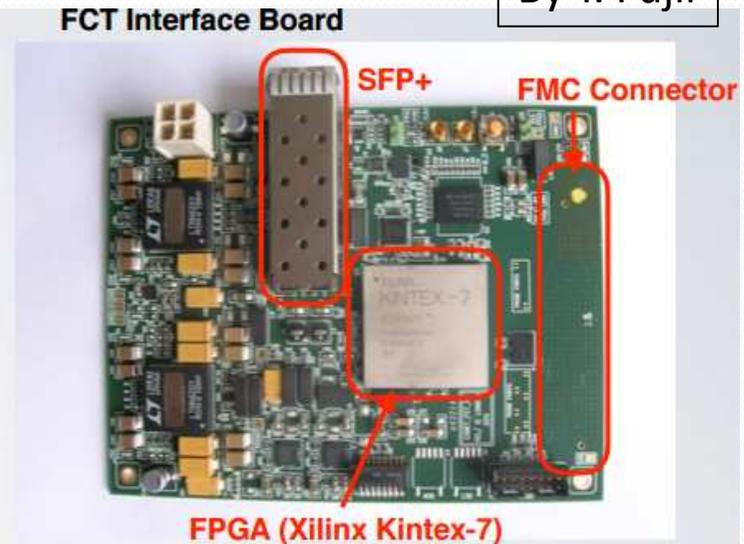
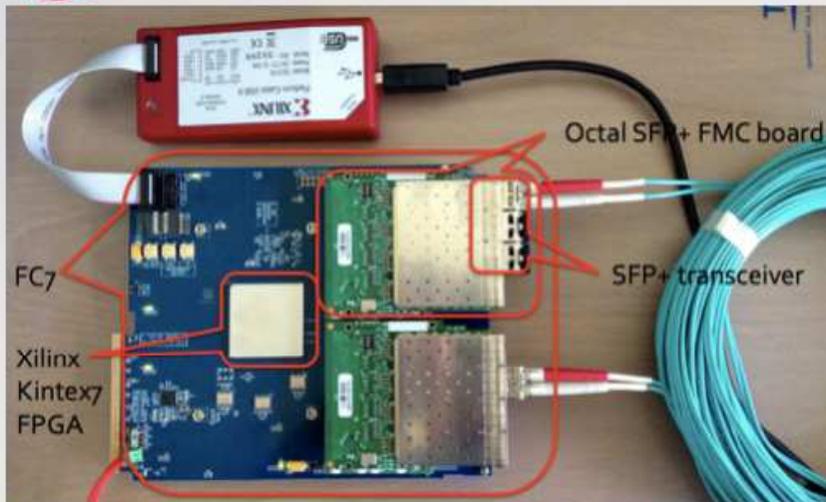
青字: 日本グループが担当

- 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

Central trigger system & FCT

• 韓国、UKグループが開発

By Y. Fujii



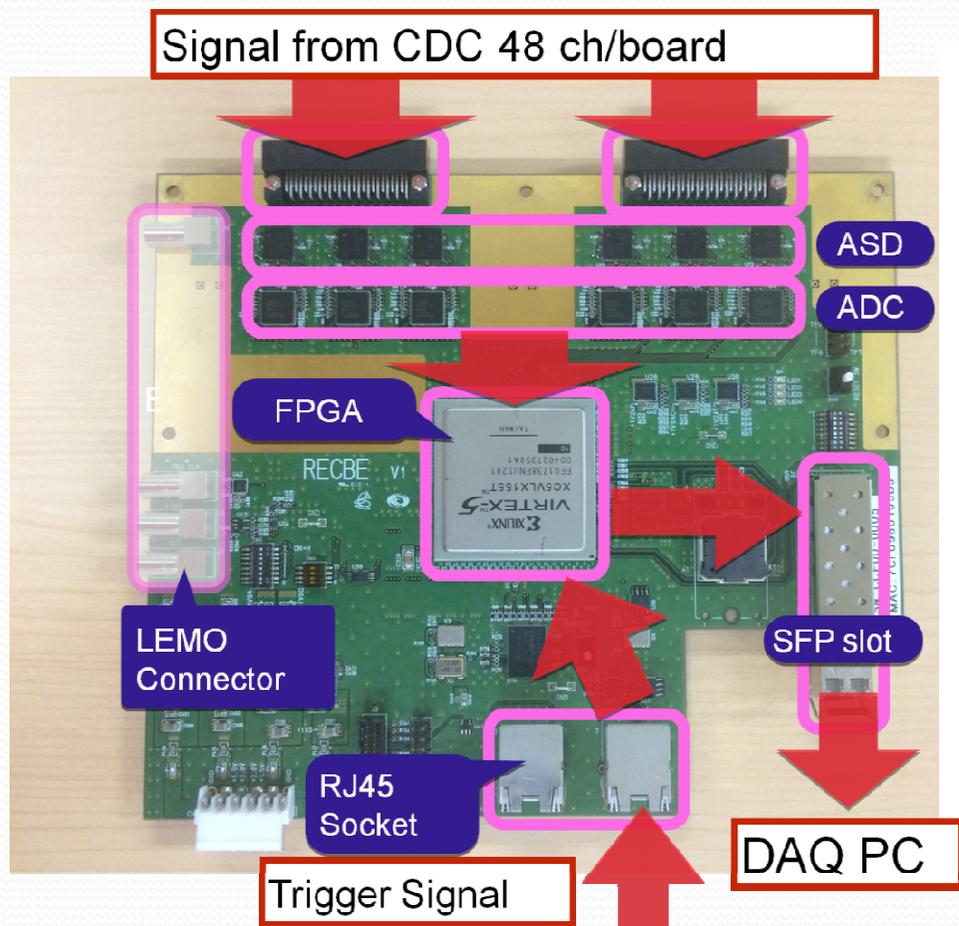
- Being developed in collaborating with COMET Korean group
- FC7
 - Central Trigger Board for COMET
 - New Firmware is being developed
 - 125ns of latency for one-direction is obtained
 - Several FC7 boards will be purchased in 2016
- FCT (Fast Control and Timing)
 - Interface board between FC7 and other read-out/trigger boards
 - Design will be modified to get the higher radiation tolerance

CDC FE readout

- 波形情報とタイミング情報の読み出しが必須
- Belle-IIの資産を利用

RECBE

By Y. Nakazawa



仕様

ASD (Amp Shaper Discriminator)

- 8ch/chip

ADC (AD9212)

- 8ch/chip
- 2 Vp-pを10 bit分解能でデジタル化
- 30 Msp

FPGA (Virtex-5 XC5VLX155T)

基本クロック：120 MHz

RJ-45 (LVDS, JTAG)

LVDS：共通動作クロック(40MHz)

トリガー信号の付与

JTAG：ファームウェアのダウンロード

CDC FE readout

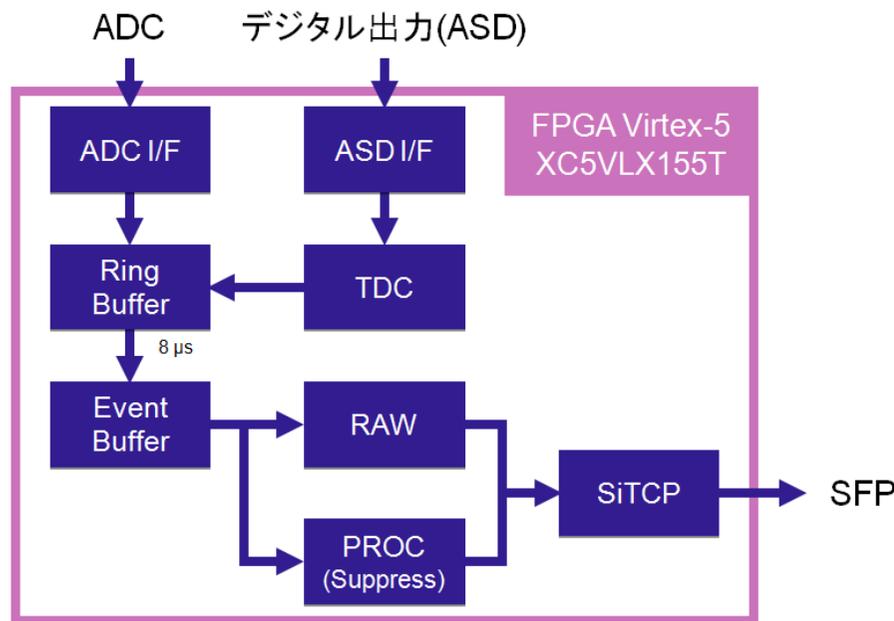
開発項目

- CLK変更
- Firmware開発(Open-Itプロジェクト)
- 放射線耐性研究開発

→ 中沢講演(本日午後一)

By Y. Nakazawa

RECBE: Data Flow



RECBE: データフォーマット

Rawモード

- 全チャンネルのADC、TDC値を時系列に全て転送する
- 波形解析が可能
- データ量が多い
- 評価試験、エンジニアリングランで使用

Suppressモード

- ヒットのあるチャンネルのみデータを転送する。
- データ取得時間窓に対して、ADCの閾値を超えたサンプリング数
- ADCの積分値
- TDC値のうち早いものを2つ
- 波形解析が不可能
- データ量が少ない
- 物理測定時に使用

		Data Name		
Header (12 Bytes)		Mode, Board_ID, Send_No., TRG_time, Length, TRG_No.,		
Event Data	Sample clock #	ADC	ADC CH0 (16 bits)	
			ADC CH1 (16 bits)	
			...	
			ADC CH47 (16 bits)	
	TDC		HitFlag (1 bit)	TDC CH0 (15 bits)
			HitFlag (1 bit)	TDC CH1 (15 bits)
			...	
			HitFlag (1 bit)	TDC CH47 (15 bits)
	Next Sample	...		

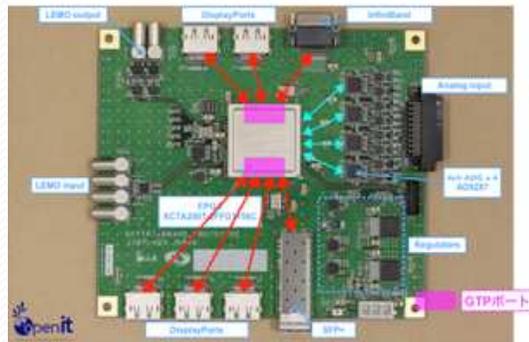
		Data Name	
Header (12 Bytes)		Mode, Board_ID, Send_No., TRG_time, Length, TRG_No.,	
Event Data	Hit Ch# Data	Header	ChID (8 bits) Length (8 bits)
			CountOver Threshold (16 bits)
	ADC (q)	Summed ADC Value (16 bits)	
	TDC		TDC Hit 0 (16 bits)
			(TDC Hit 1 (16 bits))
	Next Hit Ch#	...	

片山修論(大阪)、中沢修論(大阪)など

CTH FE readout

- 要求を基にFE prototype開発、評価
- 読み出し部(COTTRI)Firmware開発(Open-Itプロジェクト)
- 放射線耐性研究開発 → **中沢講演(本日午後一)**

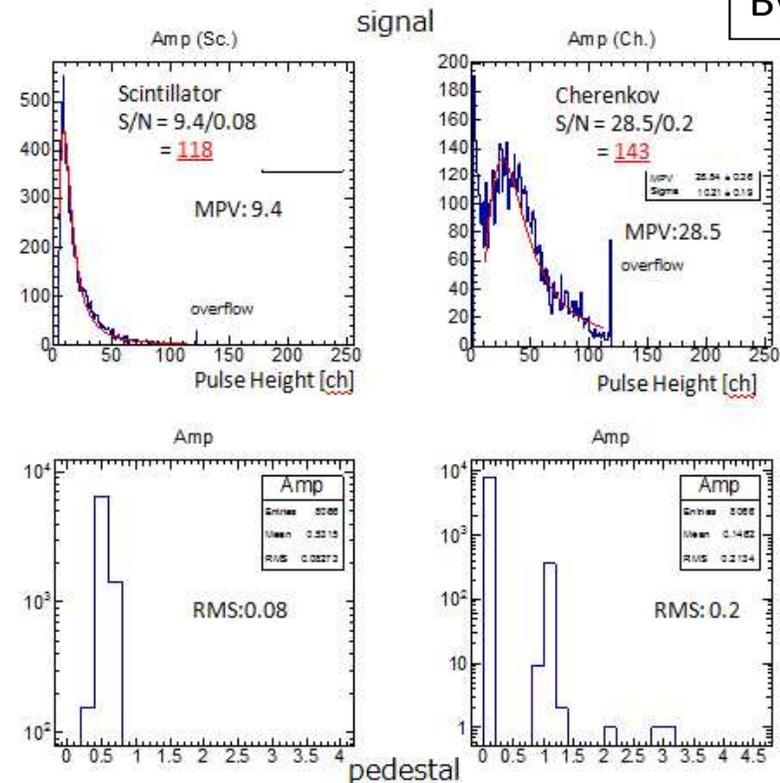
読み出しボード：COTTRI (KEKで開発)



前置増幅器 (九大で開発)



読み出しエレキを使用して
十分なS/N比が得られた



By Y. Nakai

Trigger readout

- 独自開発
- Liquid Ar グループのTPC読み出し回路を参考に開発
(共にOpen-Itプロジェクト)
- COMET環境に合わせたFirmware開発
CTH読み出し(ADC,TDC)、StrECal trigger読み出しのバックアップ
- 放射線耐性研究開発 → 中沢講演(本日午後一)

requirements:

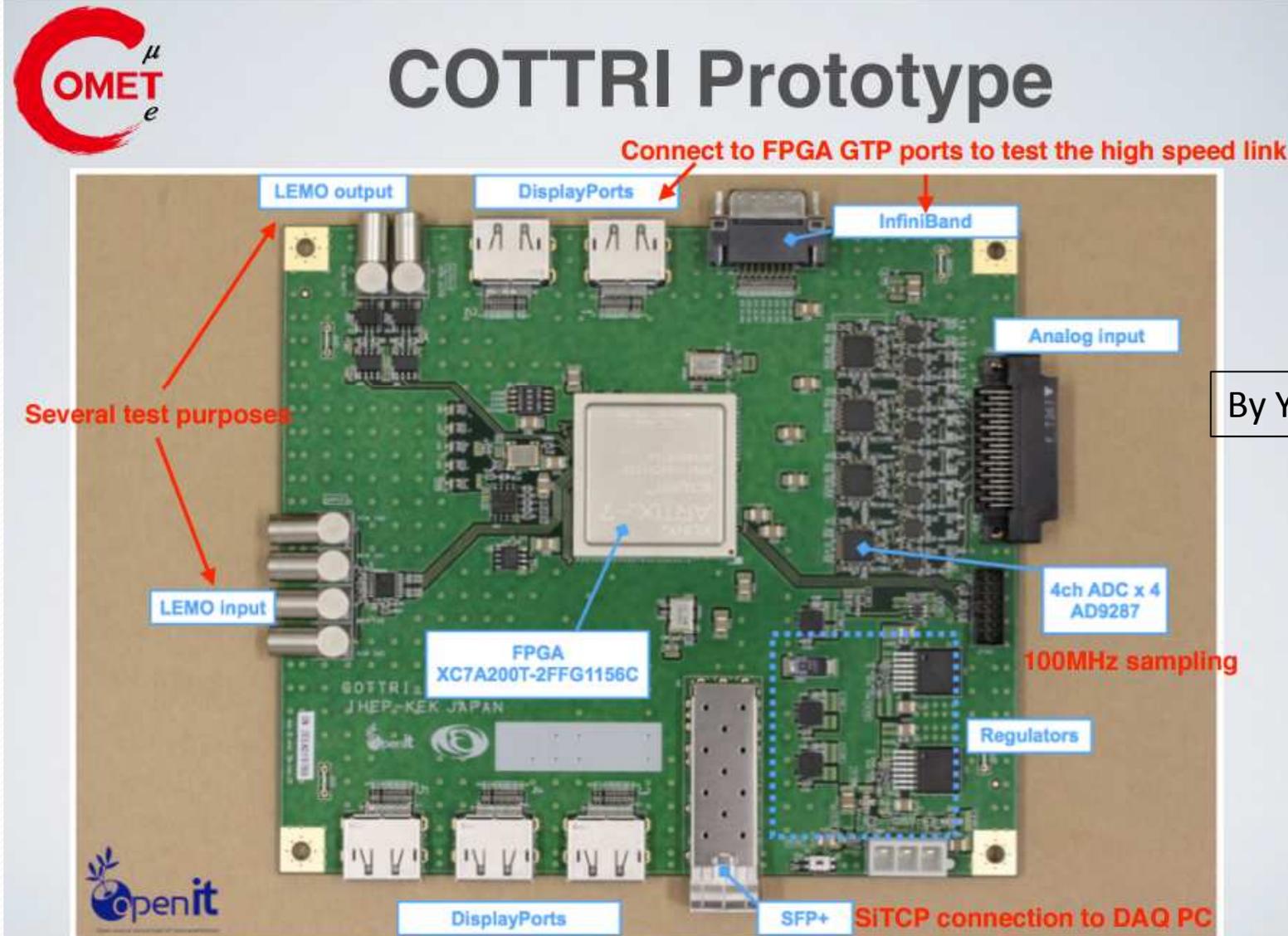
- **Trigger Rate Suppression @front-end level**
 - On-line tracking trigger for CyDet → **FPGA**
 - Good pileup separation for StrECAL → **High speed(+cheap) ADC**
- **Short and fixed trigger latency**
 - 5us for CyDet due to the limitation of RECBE memory buffer size
 - 750ns for StrECAL due to limitation of DRS4 buffer size
 - → **Fast algorithm + Multi Gigabit Rocket I/O**
- **Must be tough (High radiation tolerance)**
 - COMET Experimental hall will become **VERY** high radiation environment
 - *1kGy/cm² of gamma rays can cause permanent deterioration to electronics
 - *10¹² n_{eq}**/cm² for neutrons can make a single bit error (recoverable hopefully)
 - → **Irradiation tests and parts selection are mandatory**

* Including ×10 of safety factor

** Number of neutrons equivalent to 1MeV

By Y. Fujii

Trigger readout

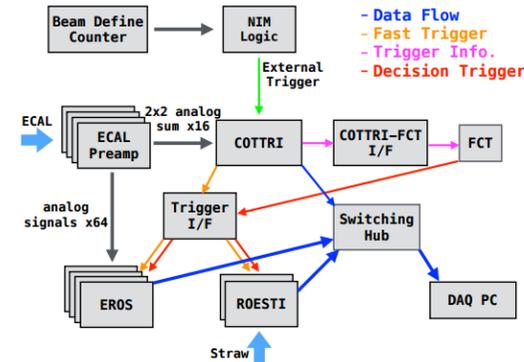


Trigger readout

- FCT、Ecal読み出しを用いたチェーンテスト
- Trigger読み出しの機能を確認
- 読み出し信号も確認
- 今後詳細な開発、評価

Trigger/DAQ Flow

- COTTRI Prototype receives 2x2 analog sum from ECAL and BDC external trigger
- Both self-trigger mode and external-trigger mode were prepared
- ROESTI/EROS received the fast trigger to stop DRS4 sampling and send the data when decision trigger comes from FCT
- DAQ is done in “polling” mode and MIDAS event builder merges the data which have the same trigger#



Preliminary Results

By Y. Fujii



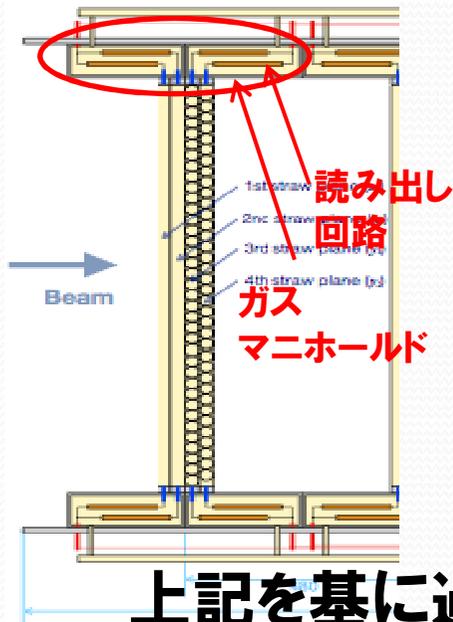
Ecal読み出し

Trigger信号読み出し

Straw readout

要求

時間分解能	: <math>< 1\text{ns}</math>	トラック位置分解能	~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			



真空対応

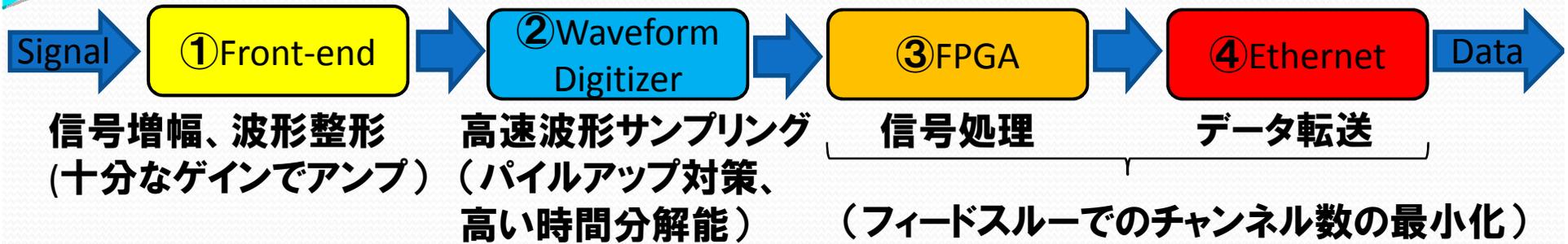
⇒ ガスマニホールド内に回路をインストール
真空対応の必要をなくす

大強度対応

⇒ 早いウェーブフォームデジタルイザ(WFD)使用
波形解析によりパイルアップID

上記を基に過去の資産利用 + 独自開発 (Open-Itプロジェクト)

ROESTI (ReadOut Electronics for Straw Tube Instrument)



ASD

- Gain = 1.1V/pC

ADC

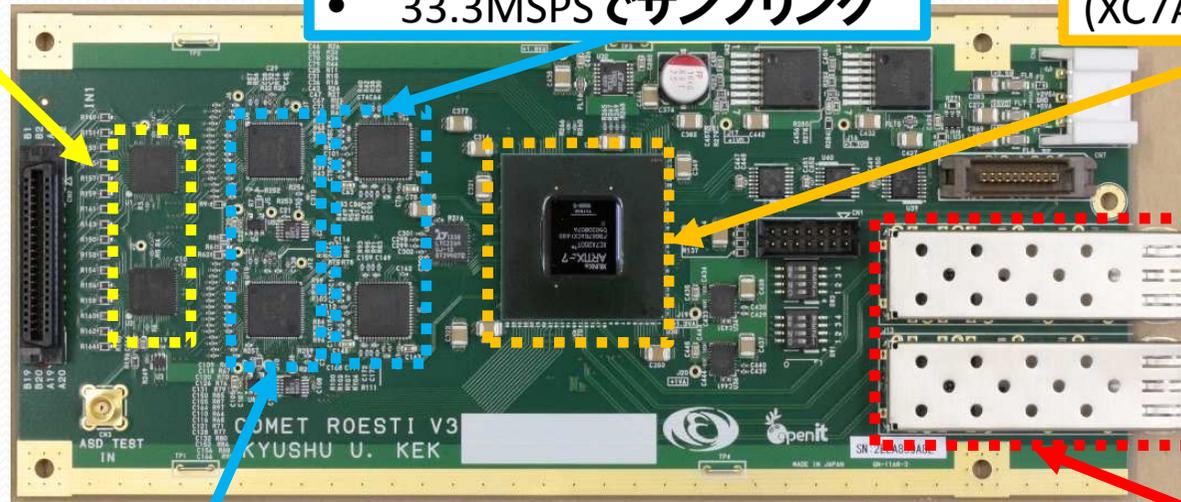
- 12bit
- 33.3MSPSでサンプリング

FPGA

- Artix-7 (XC7A200T)

Signal (16ch)

プロトタイプ ver.3

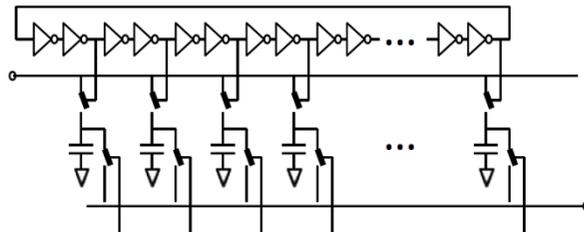


Data

Data

DRS4

- 1024個のスイッチドキャパシタが接続
- 1GSPSでサンプリング



SFP connector

- 1Gbps
- デージーチェーン

ROESTI (ReadOut Electronics for Straw Tube Instrument)

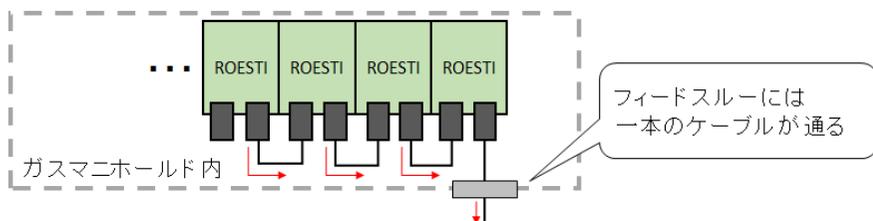
- ver.3で要求は概ね満たすことを確認
- 放射線耐性研究進行中 → 中沢講演(本日午後一)
- Firmware開発もほぼ完了(デジチェーンは新規開発)

By E. Hamada

ネットワーク通信

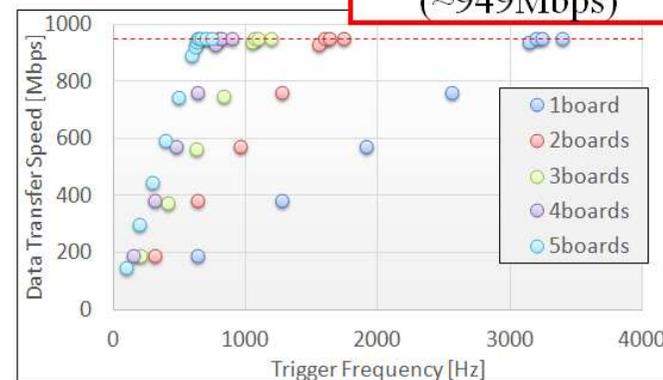
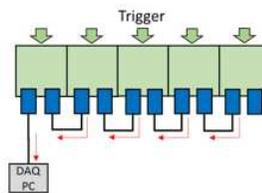
デジチェーンを用いたネットワーク通信

- 複数枚ボードをひとつなぎに配線した方式
→ フィードスルーでのチャンネル数の最小化を実現
- TCPもUDPもデジチェーンによる通信が可能
→ ROESTIオリジナルの技術
- 最大データ転送速度1Gbpsが可能
→ 大データ量への対応



データ転送速度測定

利用するボードの数を1枚~5枚で変えて試験
トリガーレートを変えながらデータ転送速度を測定



※1イベントは37112バイトに固定されている

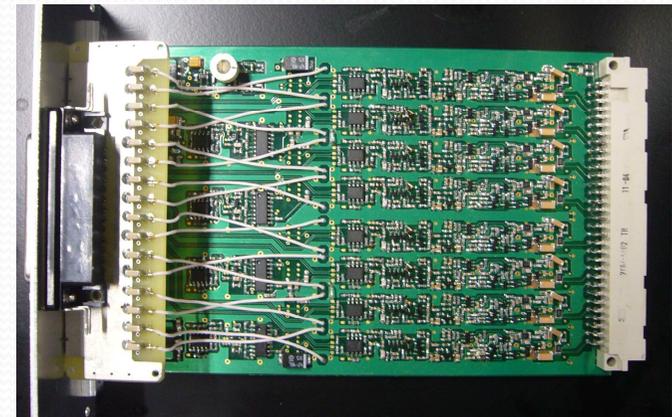
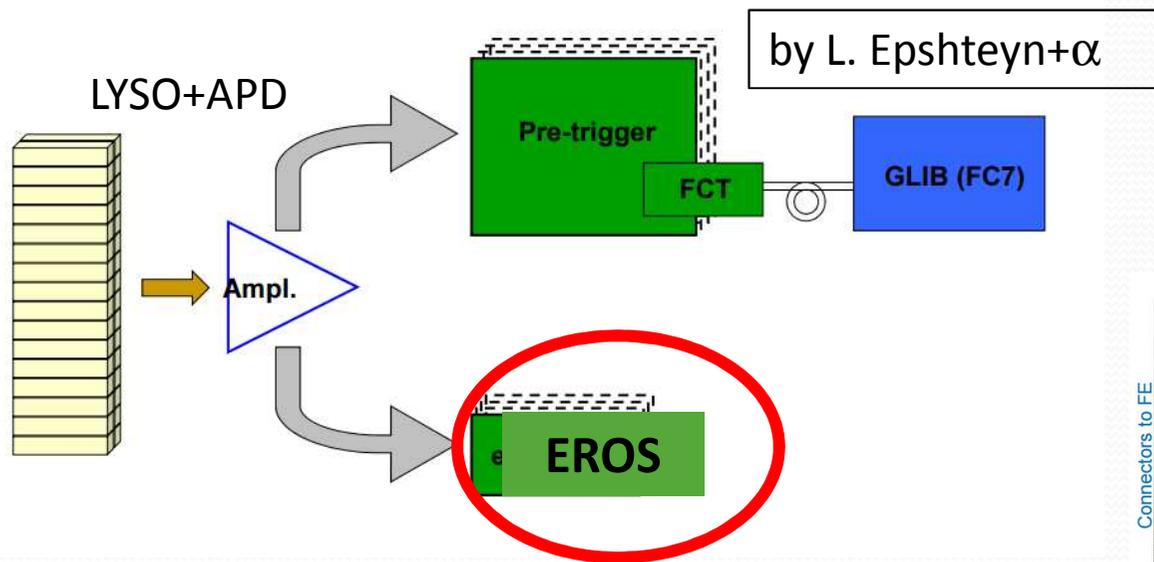
どの枚数でも理論限界値である949Mbpsが出ることを確認

H. Yamaguchi et al. JPS Conf Proc. 8 025007 (2015)、林修論(大阪)、岡本修論(大阪)など

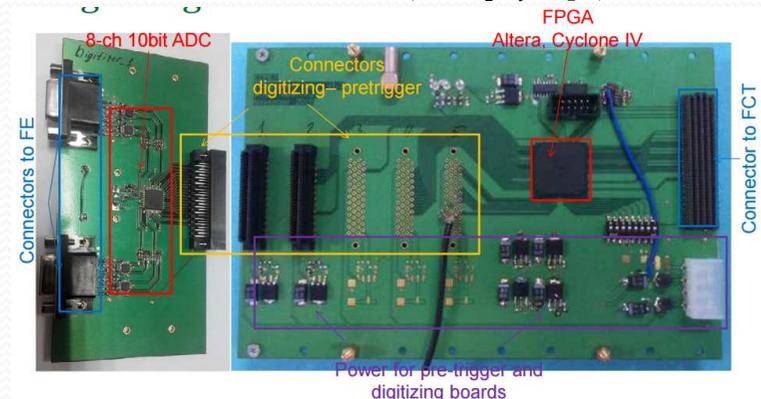
Ecal readout

- FE、トリガー読み出し部はロシアグループが開発
- トリガー部バックアップとしてCOTTRIを採用)
- 読み出し部は独自開発⇒ROESTIの応用

The ECAL electronics block diagram



Ecal FEプロトタイプ



Ecal pre-trigger board 23

Ecal readout

EROS = **E**cal **RO**ESTI **S**ystem

- ROESTIのアナログ部とデジタル部を分離
- アナログ部(メザニンボード)を変えるだけで様々な検出器に対応
- 現在性能評価中



まとめ

- **COMET実験**
- **Phase-IではCyDetとStrECalの2種類の計測システム**
- **各パートのエレキ開発、性能評価進行中**
- **特に日本グループ担当のエレキは過去の資産、Open-Itを活用しつつ新規開発**
- **放射線耐性については本日午後一中沢講演参照**