

J-PARC COMET実験のための 電磁カロリメータデザイン (+これまでの研究開発)

大石 航 (九州大学)

目次

1. ミューオン電子転換過程とCOMET実験
2. 電磁カロリメータ (ECAL) とデザイン
3. ECAL研究開発

Kyushu
Univ.

BINP

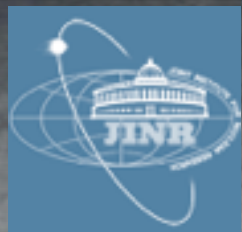
JINR

KEK

UCL

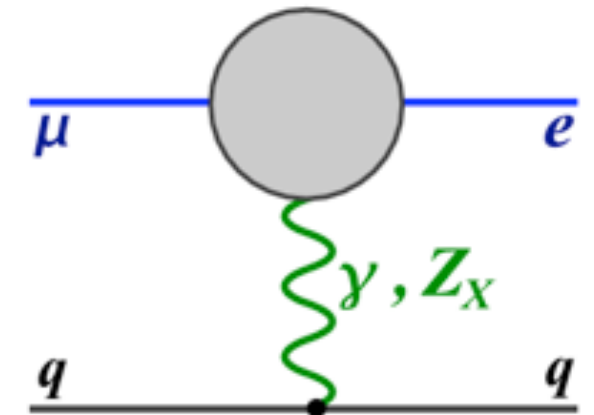
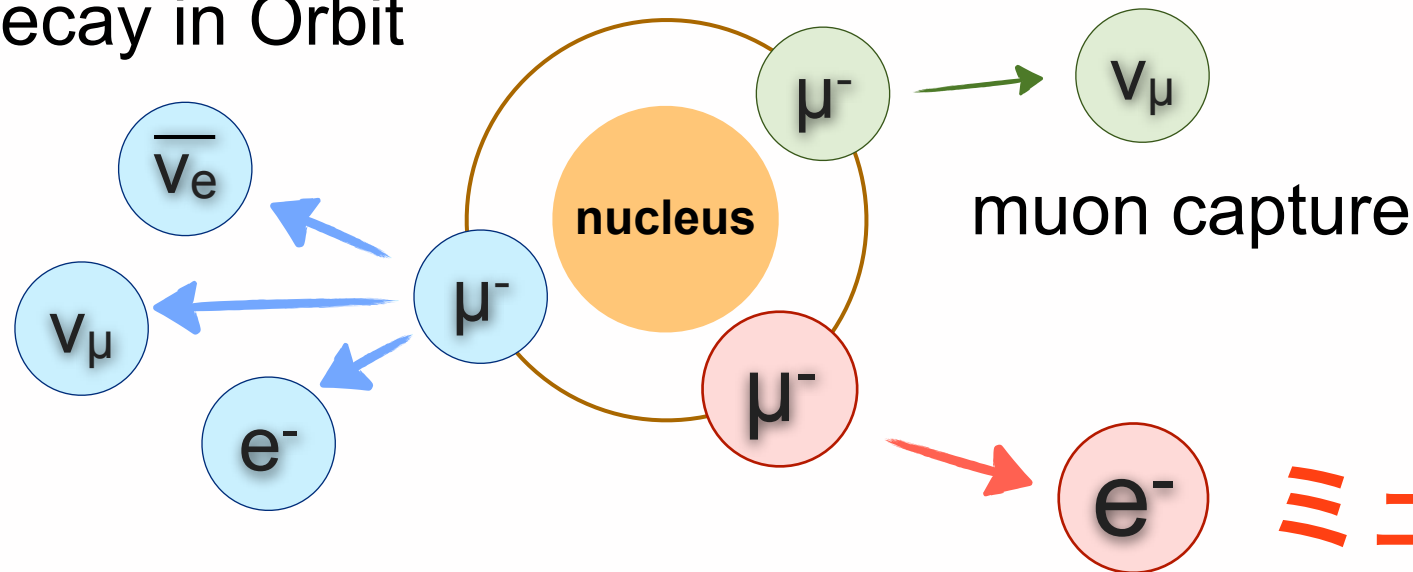
Osaka
Univ.

Kyushu Univ.
RCAPP



ミューオン・電子転換過程

Decay in Orbit



ミューオン電子転換過程

荷電レプトンフレーバー非保存過程 (cLFV)

(中性レプトンフレーバー非保存)

ニュートリノ振動を含む標準模型でも、厳しく制限される。(分岐比 $O(10^{-54})$)
(実験では無視できる。)

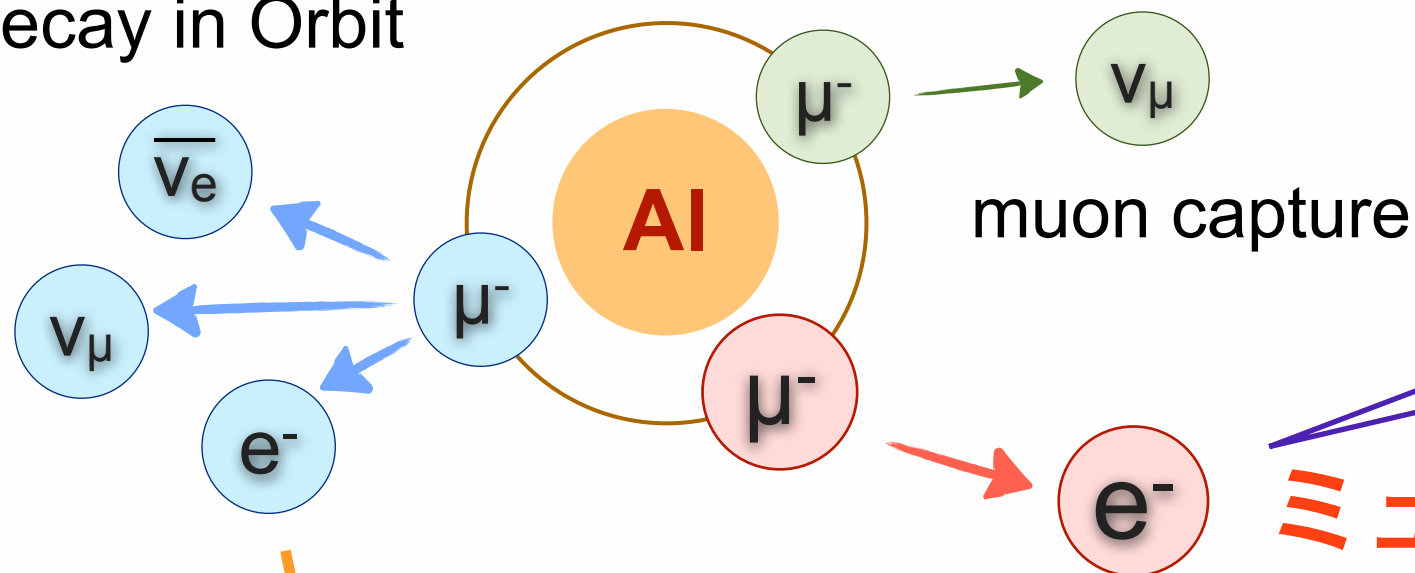
40桁の開き

標準模型を超えた物理 (BSM理論) では $O(10^{-15})$ まで上昇。

転換過程探索はBSM探索にとって非常にクリーンなプローブ

ミューオン・電子転換過程

Decay in Orbit

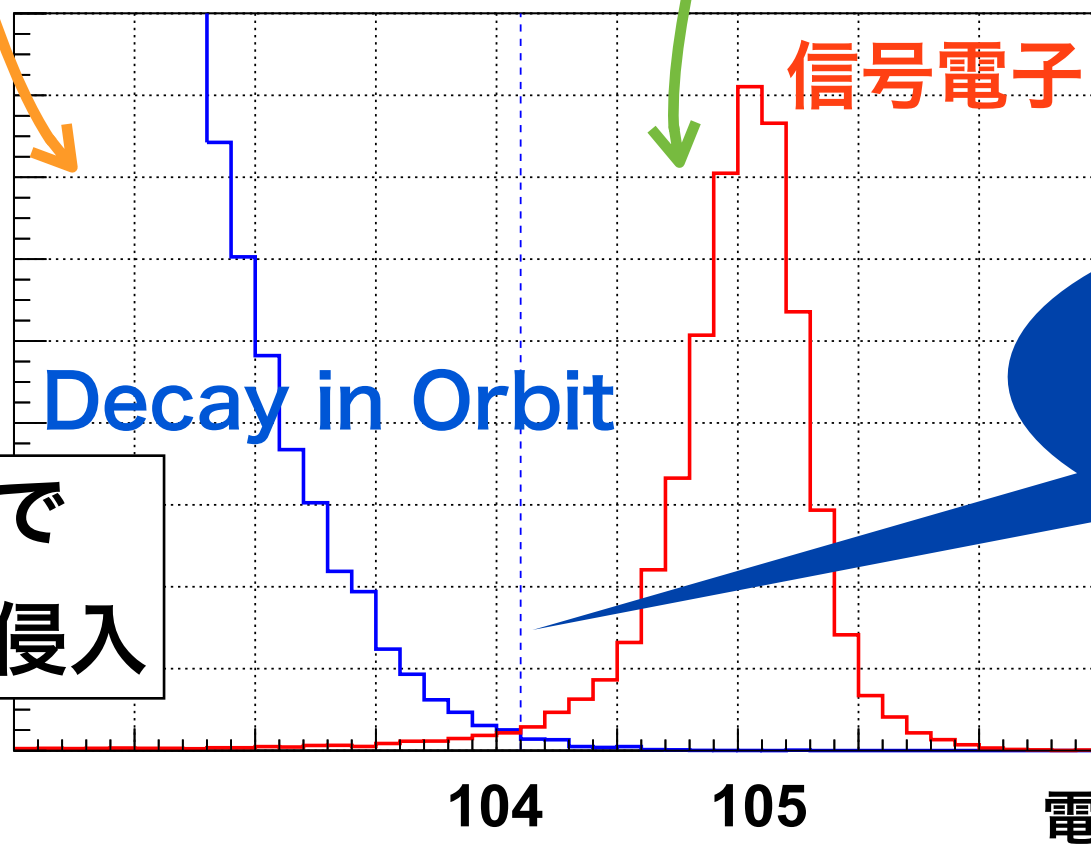


信号電子

単一エネルギー
105 MeV (アルミ)

ミューオン電子転換過程

Signal and DIO (BR=3 × 10⁻¹⁵)



十分に分離したい。

高いレートで
信号領域に侵入

COMET 実験

COherent Muon Electron Transition

- 茨城県東海村J-PARC加速器、ハドロン実験施設。
- 世界最高強度パルスミュオンビームを建設中。
- 実験は二段階(Phase-I & II)で行う。

目標到達感度

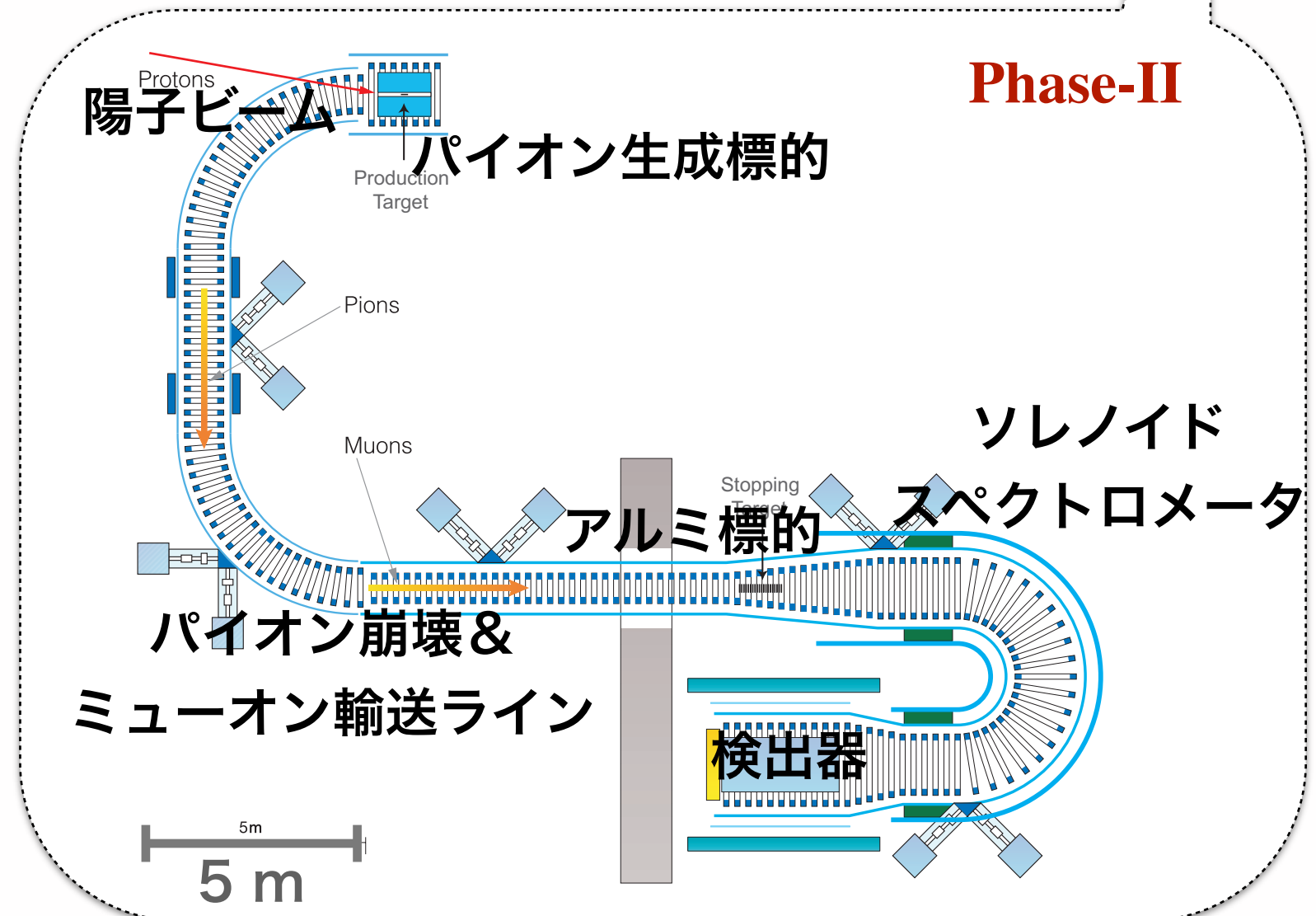
(2017) Phase-I 10^{-15}

(2020~) Phase-II 10^{-17}

Current Limit

7×10^{-13} (SINDRUM-II)

→ **1万倍の感度**
での発見を目指す。



COMET Phase-I 実験

90°ソレノイドまでを建設する。その先に検出器を設置し、実験を行う。2017年の開始を予定。2つの目的を持つ。

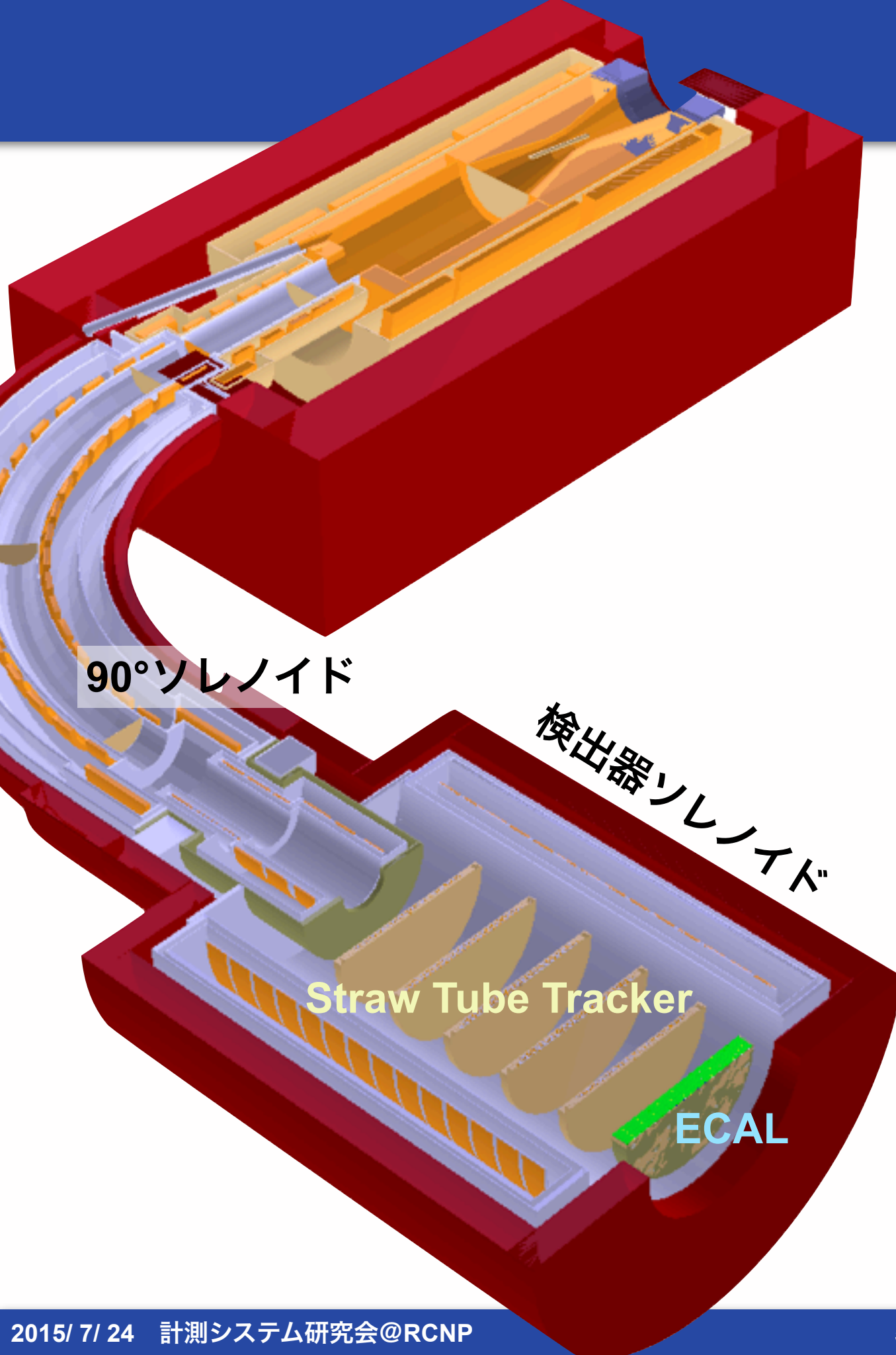
(A) ビーム測定実験

- COMET実験のための新しいビームラインなので、ビーム起源の背景事象を調べる必要がある。
 - ◆ 例：**Radiative Pion Capture**（物質にパイオンが捕獲された後、放出されるガンマ線が信号電子を生む）
 - ◆ 例：**Muon Decay in Flight**（70 MeV/c以上のミュオンが飛行中に崩壊すると105 MeV電子を生成し得る）
- ビームに含まれる粒子の種類や数、運動量分布を詳細に測定。
 - ◆ Phase-I、Phase-II実験にとっての系統誤差を理解する。

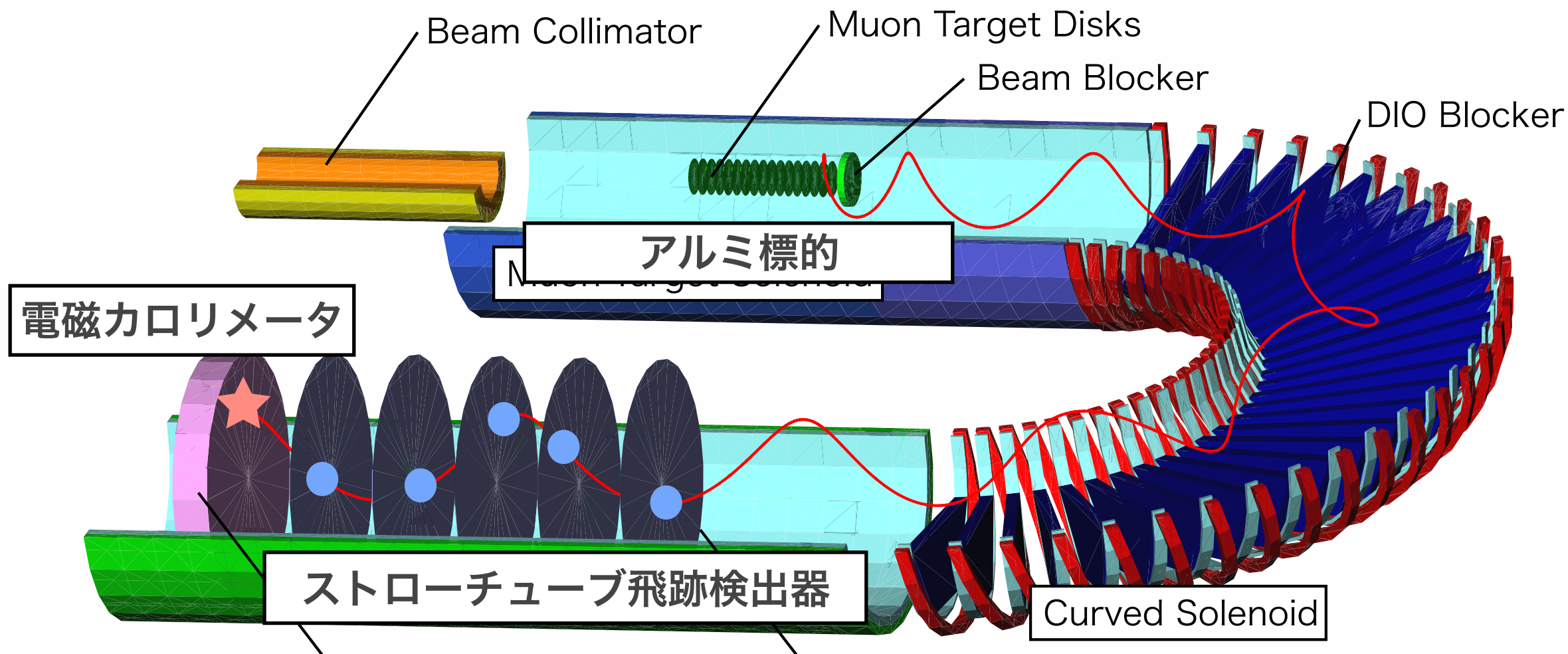
(B) 物理測定実験

- コリメータと静止標的を設置し、ミュオン電子転換過程の探索を行う。

両実験の要請を満たす検出器の開発が必要。



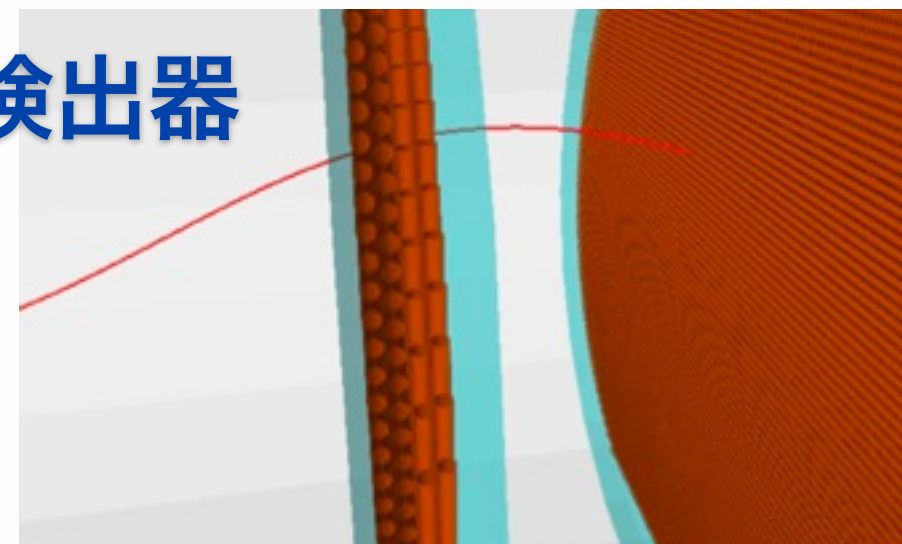
COMET実験：検出器領域



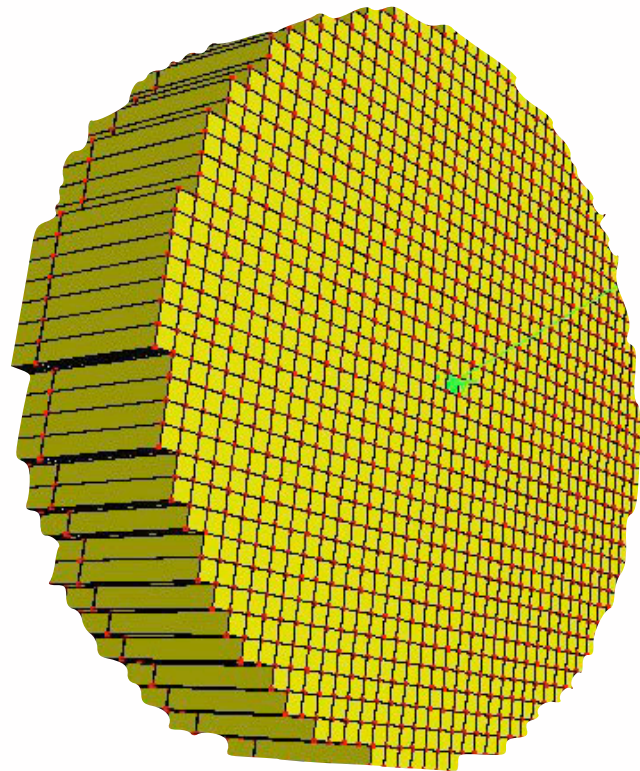
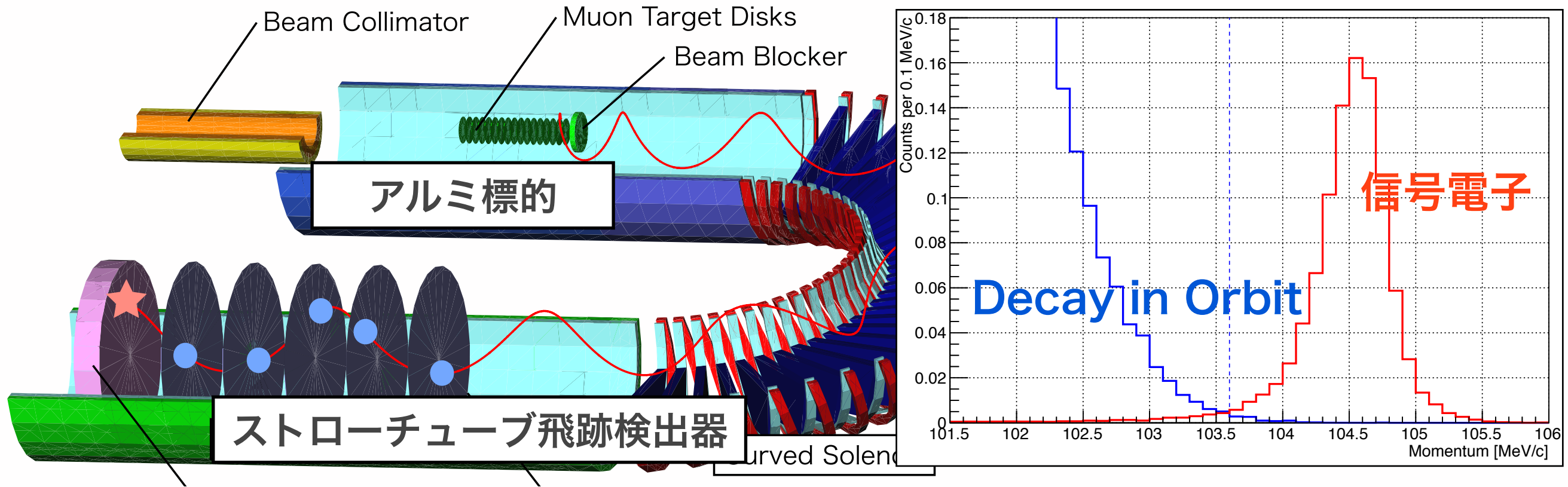
電磁カロリメータ (ECAL)

& ストローチューブ飛跡検出器

粒子の運動量とエネルギーを測定。
粒子識別で背景事象削減。
ECALはトリガー検出器としても働く。



電磁力リメータへの要求性能



(1) エネルギー分解能 $< 5\%$ @ 105 MeV/c

ECAL単体でDecay in orbit BG混入を十分に抑え、信号電子を効率よくトリガーする。

(2) 位置分解能 $< 1\text{ cm}$ @ 105 MeV/c

飛跡検出器の運動量測定を補助する。

(3) 応答時間 $< 100\text{ nsec}$

十分なパイルアップ耐性を保証する。

(4) 真空磁場(1 T)中での動作

(α) 粒子識別能力

電磁カロリメータのデザイン

(1) 無機結晶シンチレータ

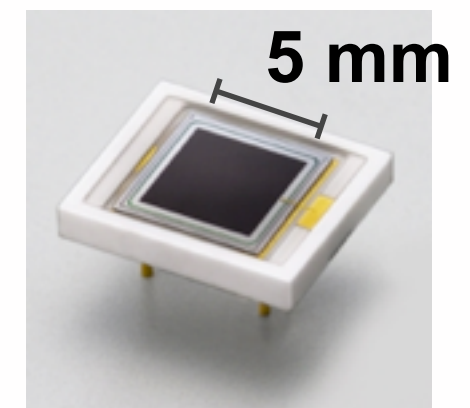
- ◆ 高い光量 → **エネルギー分解能**
- ◆ 短い放射長とモリエール半径 → **エネルギー、位置分解能**
- ◆ **GSO** (Gd_2SiO_5) と **LYSO** ($\text{Lu}_{2-x}\text{Y}_x\text{SiO}_5$) が候補だった。
- ◆ **応答時間** < 100 nsec
- ◆ **結晶の比較試験の結果、LYSOを採用した。**



性能表	GSO(Ce)	LYSO	PWO	CsI(Pure)
光量 (NaI(Tl)=100)	3, 30	83	0.083, 0.29	3.6, 1.1
崩壊定数 (ns)	600, 56	40	30, 10	35, 6
密度 (g/cm ³)	6.71	7.40	8.3	4.51
屈折率	1.85	1.82	2.20	1.95
波長 (nm)	430	420	425, 420	420, 310
放射長 (cm)	1.38	1.14	0.89	1.86
モリエール半径 (cm)	2.23	2.07	2.00	3.57

(2) APD (Avalanche Photo Diode)

- ◆ 真空磁場中の安定動作が可能。
- ◆ 実験中は多量の中性子フラックスが予想される。
- ◆ **九大タンデム加速器を用いて、中性子耐性の試験を実施した。**
 - ★ APDの十分な耐性を確認した。
- ◆ 5 mm角から10 mm角へのデザイン変更を試みている。
 - ★ **来週7/27から神戸大学にて10 mm角APDの中性子耐性も測定する。**



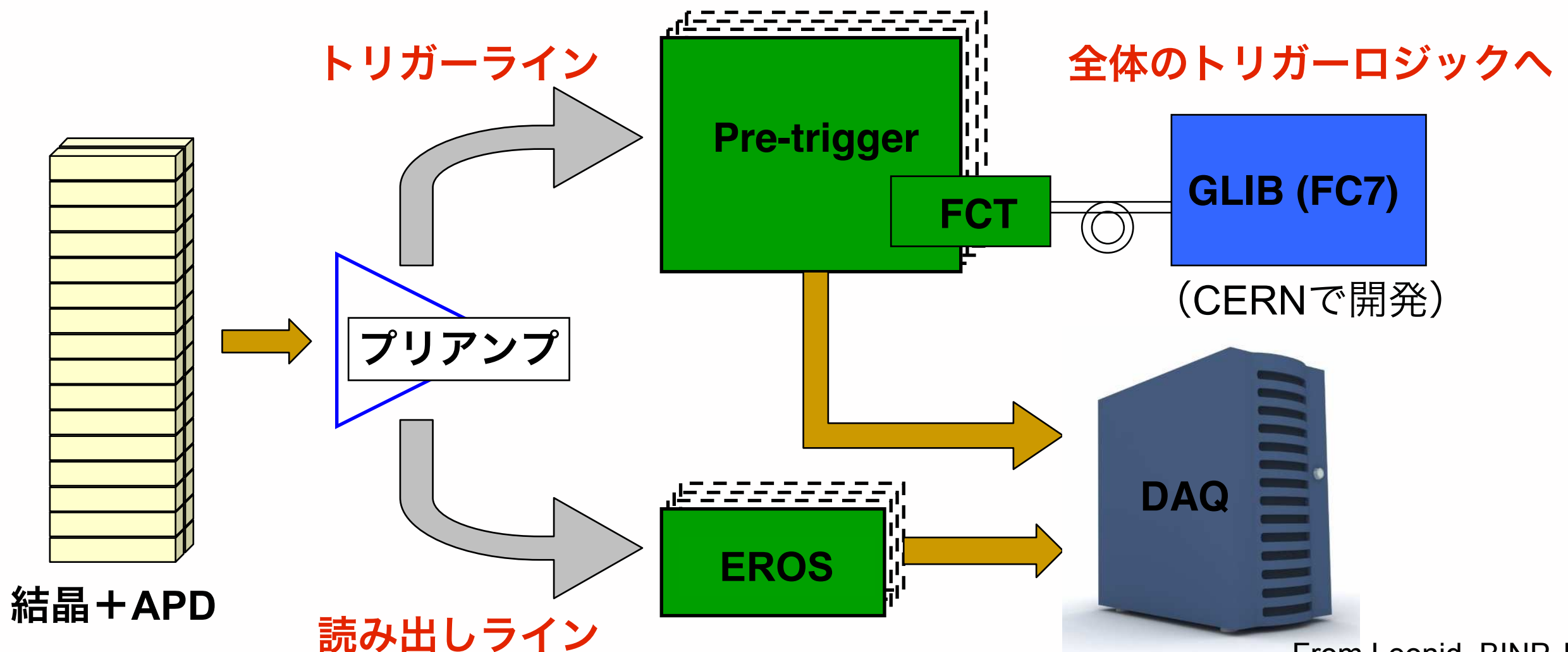
Hamamatsu S8664-55

(3) 早いプリアンプと波形データの記録

- ◆ 高いパイルアップ（イベントの重複）耐性を保証する。

ECALのトリガーと読み出しライン

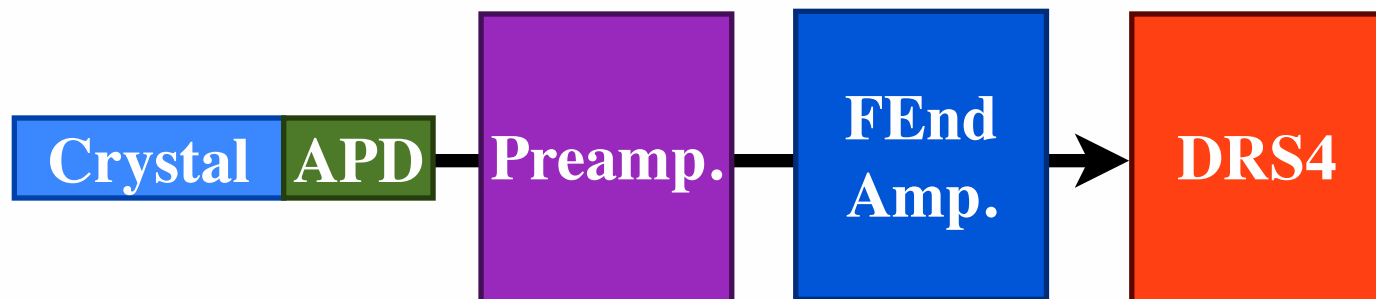
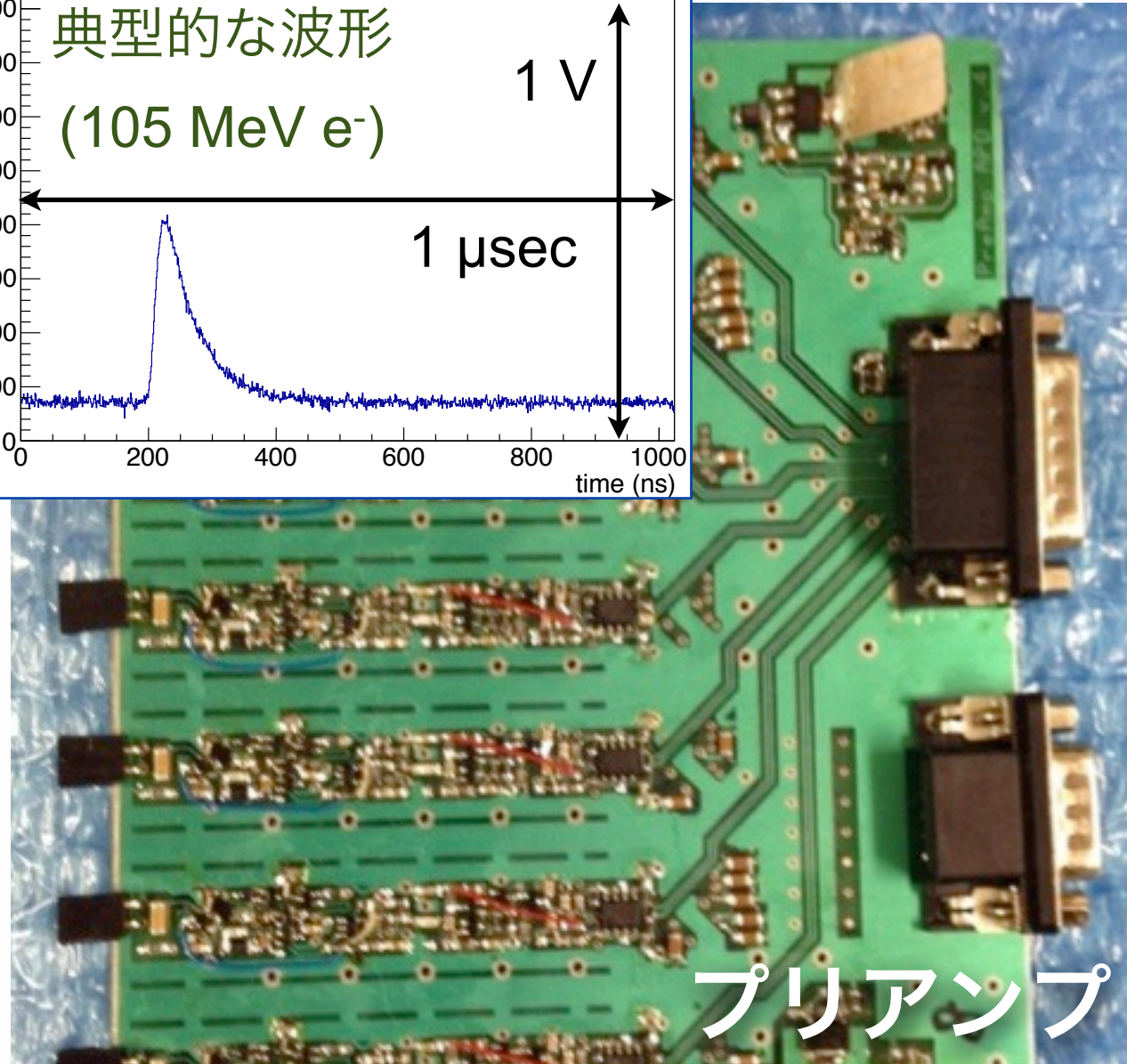
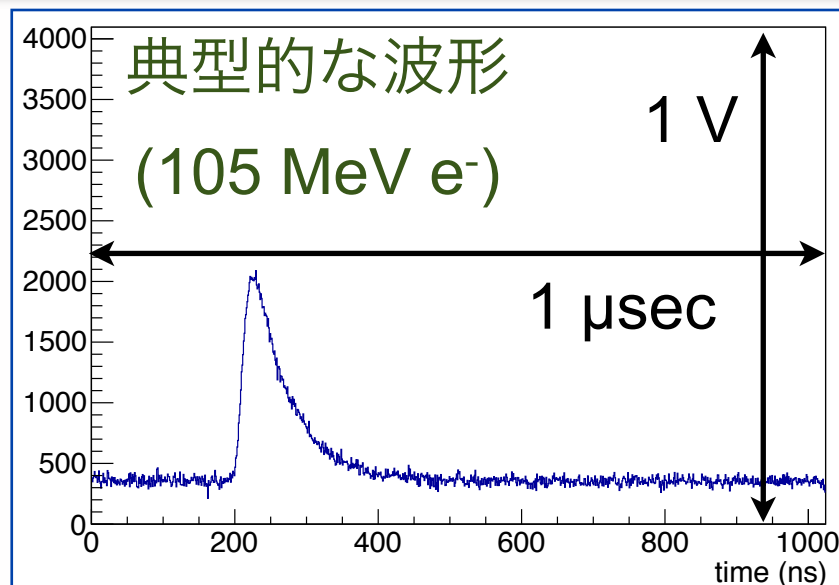
- 結晶+APDからの信号はプリアンプで増幅する。
- 増幅した信号は読み出しラインとトリガーラインに分配。
 - ◆ 読み出しラインは読み出しエレクトロニクスEROSで波形記録。
 - ◆ トリガーラインはECAL用プリトリガーがトリガーを上流トリガーラインへ繋げる。
 - ◆ 上流でトリガーが決定すると、それを通してEROSのデータを記録する。



From Leonid, BINP, Russia

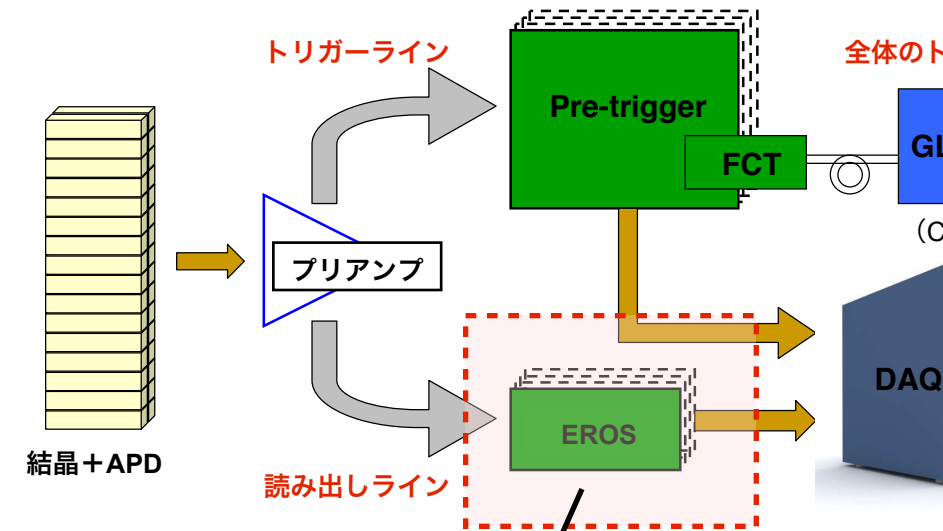
プリアンプ

- エレクトロニクスは独自開発している。
 - ◆ 写真は初代プロトタイプ
 - ◆ 最終プロトタイプは現在開発中
- 現行プロトタイプではプリアンプとフロントエンドアンプの2段増。
 - ◆ プリアンプは速い (~ 10 nsec) 差動出力
 - ◆ 全ゲインは ~ 0.5 V / pC
- 波形の記録にはDRS4チップ (スイスPSI研究所) を用いる。
 - ◆ 波形解析によりパイルアップ除去や粒子識別を行う。

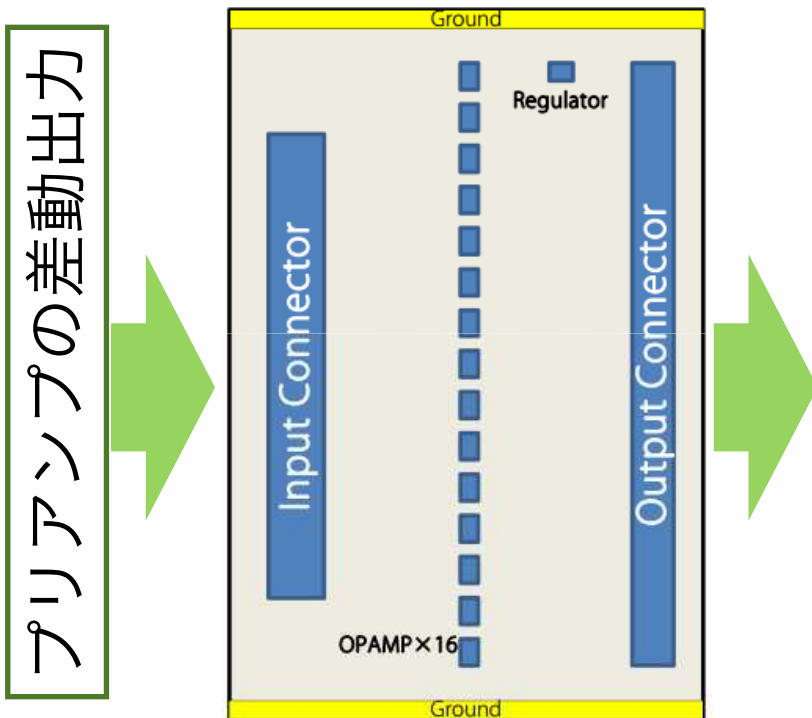


読み出しライン：EROS

- DRS4チップを内包した独自開発の読み出しエレクトロニクスを開発中。
- **EROS** (ECAL ROESTI System)
 - ❖ 飛跡検出器用の**ROESTI** (Read-Out Electronics for Straw Tube Instrument) (Open-Itプロジェクト) から派生。 (<http://openit.kek.jp/workshop/2014/dsys/presentation/ueno.pdf>)
 - ◆ DRS4からのデジタル化と転送部はROESTIと共有できる。
 - ◆ アナログ部は中間基板を用いることで、ROESTIと住み分けをする。



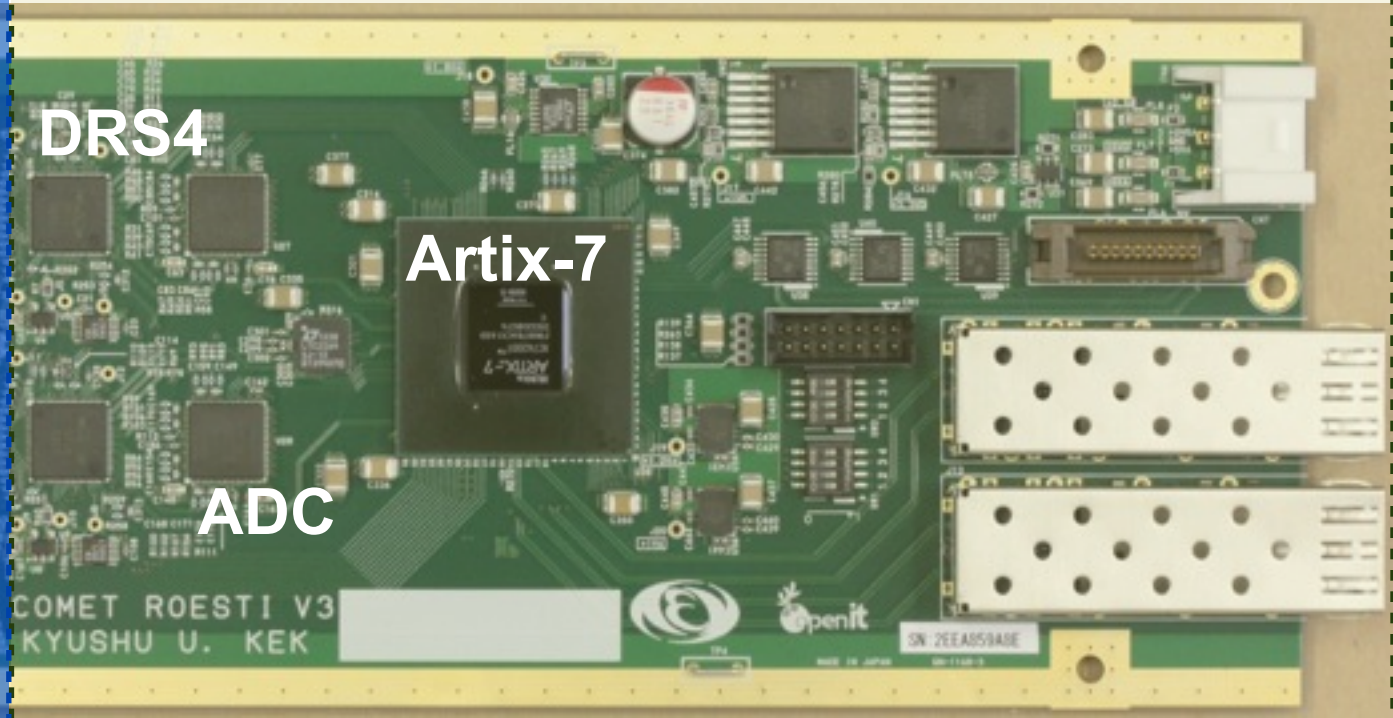
中間基板
(差動→シングルエンド)



プリアンプの差動出力

アナログ部
この部分を
中間基板に分離

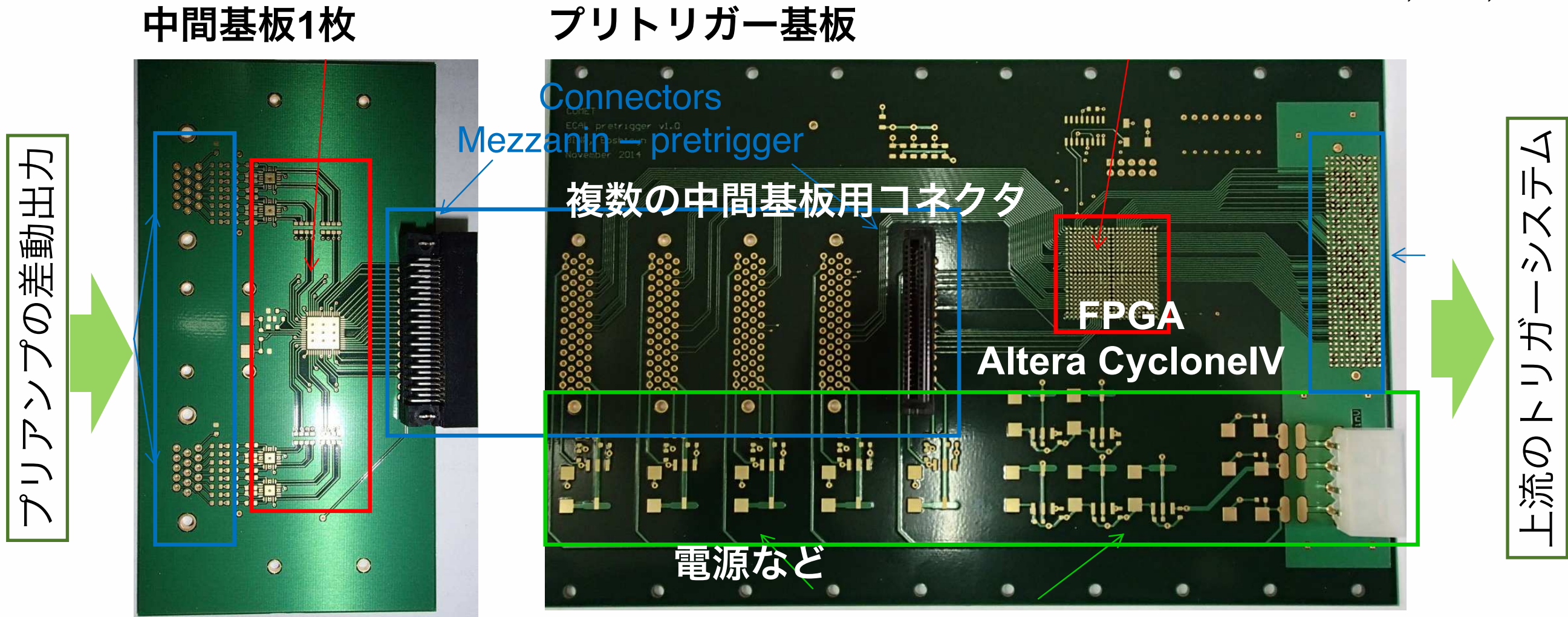
DRS4、デジタル化、転送部
(ROESTIと共有し、中間基板を分けて両者に対応する)



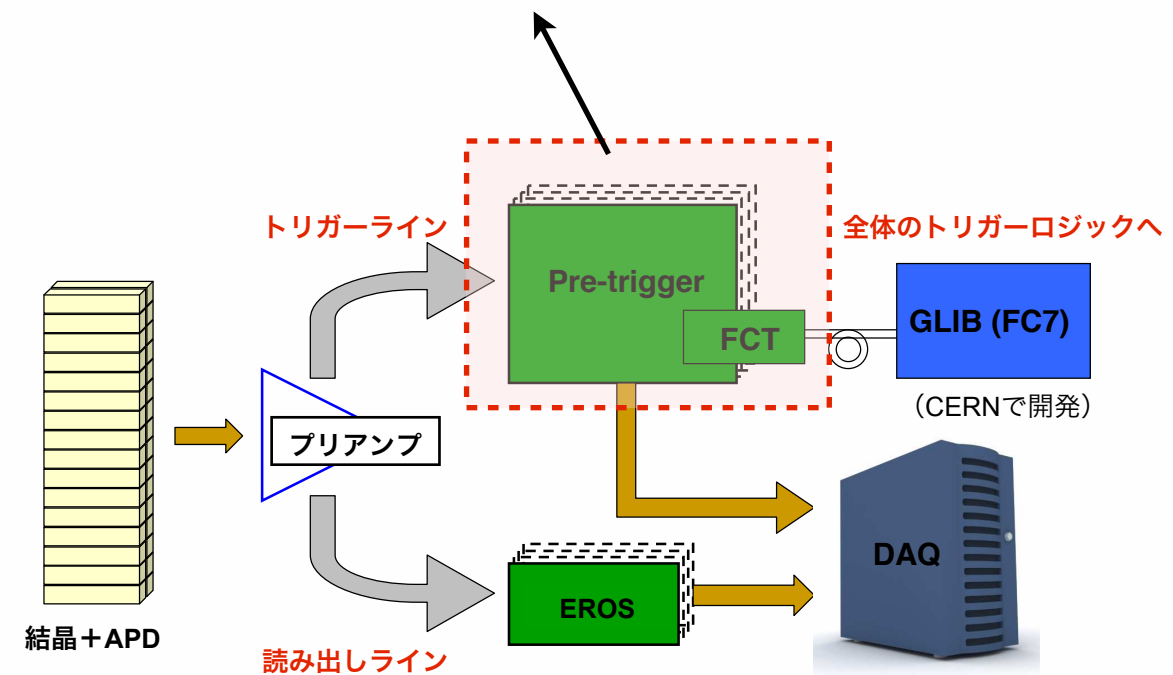
写真はROESTI Prototype Ver.3 (KEKの池野さんより)

トリガーライン：プリトリガー

From Leonid, BINP, Russia



- プリトリガー基板には、複数枚の中間基板 (= プリアンプ) が接続され、近接した結晶の信号を比較する。
- 近接する複数の結晶からの信号を合計、有意な電荷を持つと初段トリガーを生成。
 - ◆ 初段トリガーは上流のトリガーシステムへ。



COMET ECALデザインのまとめ

- COMET実験は精度を4桁向上しミュオン電子転換過程を探索する。
- 電磁カロリメータ (ECAL) はトリガー検出器として働く。
 - ◆ ビーム測定と物理測定の双方の要求を満たす必要がある。
 - ◆ ECALにはLYSO結晶を採用し、APDで読み出す。
 - ◆ プリアンプ、プリトリガーはECALグループで独自開発中。
 - ◆ DRS4を用いたEROS (ROESTIの派生) もKEK Open-Itのプロジェクトで開発中。

ECALの研究開発

開発の履歴

- 2012年12月ごろ、COMET ECAL研究に着手。
- **電子ビームを用いたGSO/LYSO結晶の比較試験**
 - ◆ 2013年3月～5月：J-PARCで月1回の頻度でビーム試験
 - ★ 失敗、事故を繰り返す。なんとか修士論文にする。
 - ◆ 2014年3月：東北大学電子光理学研究センターにてビーム試験
 - ★ 成功。結論としてLYSOに決定。
- **APDの中性子耐性試験**
 - ◆ 2014年10月：九州大学タンDEM加速器実験室にて試験
 - ★ APD（5 mm角）の中性子耐性は確認した。
 - ◆ （2015年7月：神戸大学にて10 mm角APDを試験する。）
- **$\pi/\mu/e$ 混合ビームによるLYSO結晶の応答の測定。**
 - ◆ 2015年6月：スイスPSI研究所にて試験。無事成功し、現在解析中。
- **測定システム開発としては、ビーム試験用DAQの開発、改善を行ってきた。**

開発の履歴

- 2012年12月ごろ、COMET ECAL研究に着手。
- **電子ビームを用いたGSO/LYSO結晶の比較試験**
 - ◆ 2013年3月～5月：J-PARCで月1回の頻度でビーム試験
 - ★ 失敗、事故を繰り返す。なんとか修士論文にする。
 - ◆ **2014年3月：東北大学電子光物理学研究センターにてビーム試験**
 - ★ 成功。結論としてLYSOに決定。
- **APDの中性子耐性試験**
 - ◆ 2014年10月：九州大学タンDEM加速器実験室にて試験
 - ★ APD（5 mm角）の中性子耐性は確認した。
 - ◆ （2015年7月：神戸大学にて10 mm角APDを試験する。）
- **$\pi/\mu/e$ 混合ビームによるLYSO結晶の応答の測定。**
 - ◆ **2015年6月：スイスPSI研究所にて試験。無事成功し、現在解析中。**
- **測定システム開発としては、ビーム試験用DAQの開発、改善を行ってきた。**

特にこの試験について

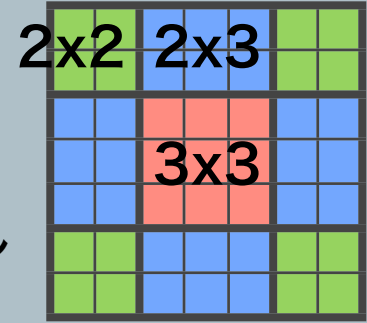


ビーム試験で用いたECALプロトタイプ

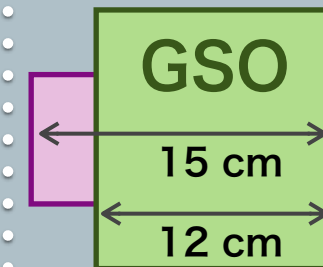
● 測定したデータは3つ

- ◆ ECALの波形データ → VME CAEN V1742
- ◆ フィンガー検出器の時間 → VME CAEN V1290
- ◆ ファイバー検出器 → NIM-EASIROC モジュール

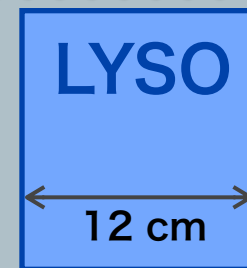
7x7 Crystal Array



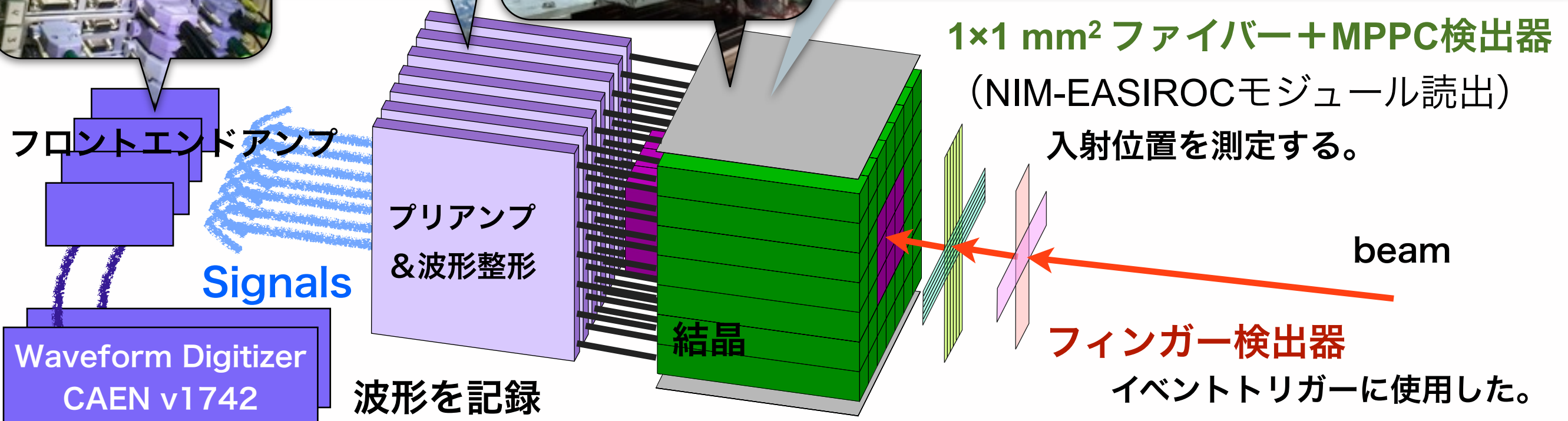
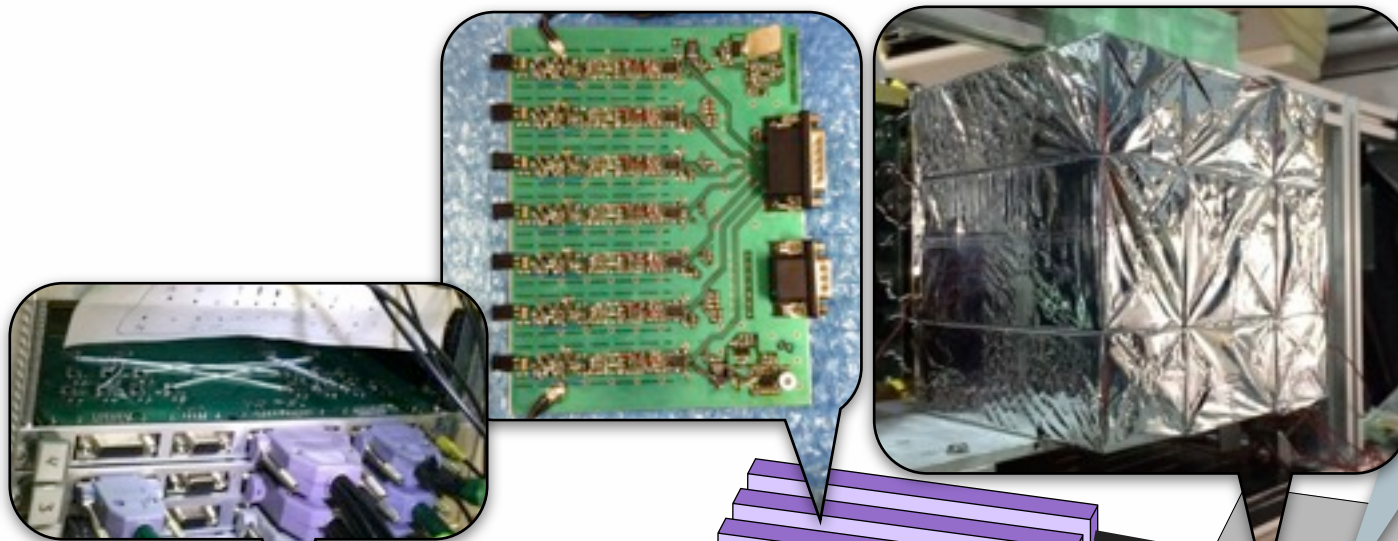
- 結晶断面積 $2 \times 2 \text{ cm}^2$
- (Crystal + APD)をテフロンテープカバー
- 2×2 , 2×3 , 3×3 のかたまりを、さらにアルミナイズドマイラーでカバー



- 製造：日立化成
- 縦方向の長さ
 - ・中央 3×3 : 15 cm ($10.9 X_0$)
 - ・周辺 : 12 cm ($8.72 X_0$)



- 製造：Saint-Gobain
- 縦方向の長さ
 - ・全て : 12 cm ($10.5 X_0$)



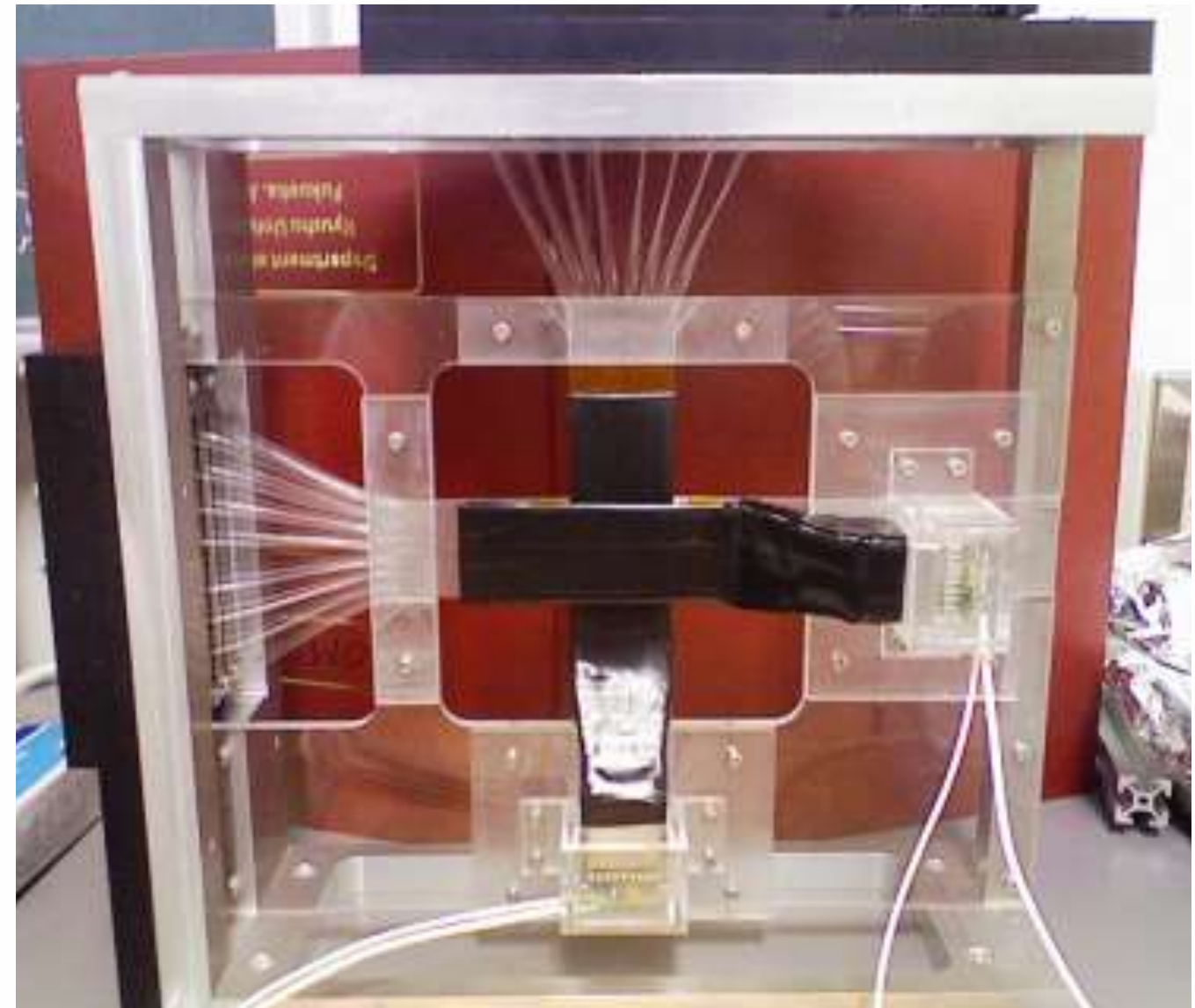
フィンガー検出器とファイバー検出器

- フィンガー検出器

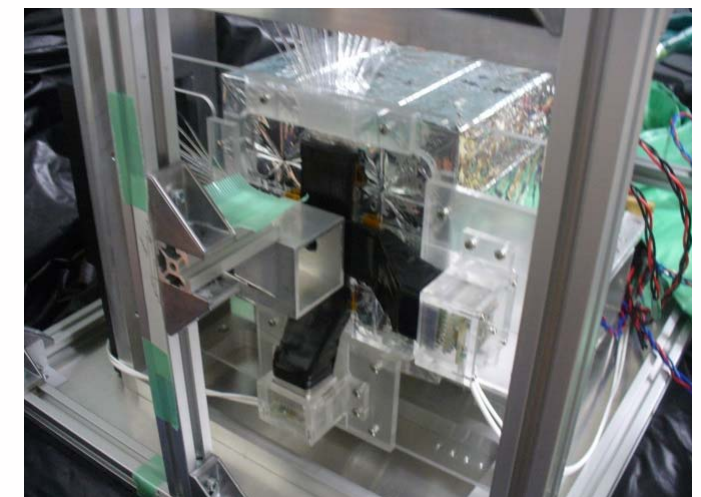
- ◆ 32 mm幅、1 mm厚のシンチレータを使用。
- ◆ 読出しはメタルパッケージ PMT

- ファイバー検出器

- ◆ $1 \times 1 \text{ mm}^2$ を32×32本並べた。
- ◆ 読出しはMPPC + EASIROC汎用MPPC読み出しモジュール (KEK Open-Itプロジェクト)

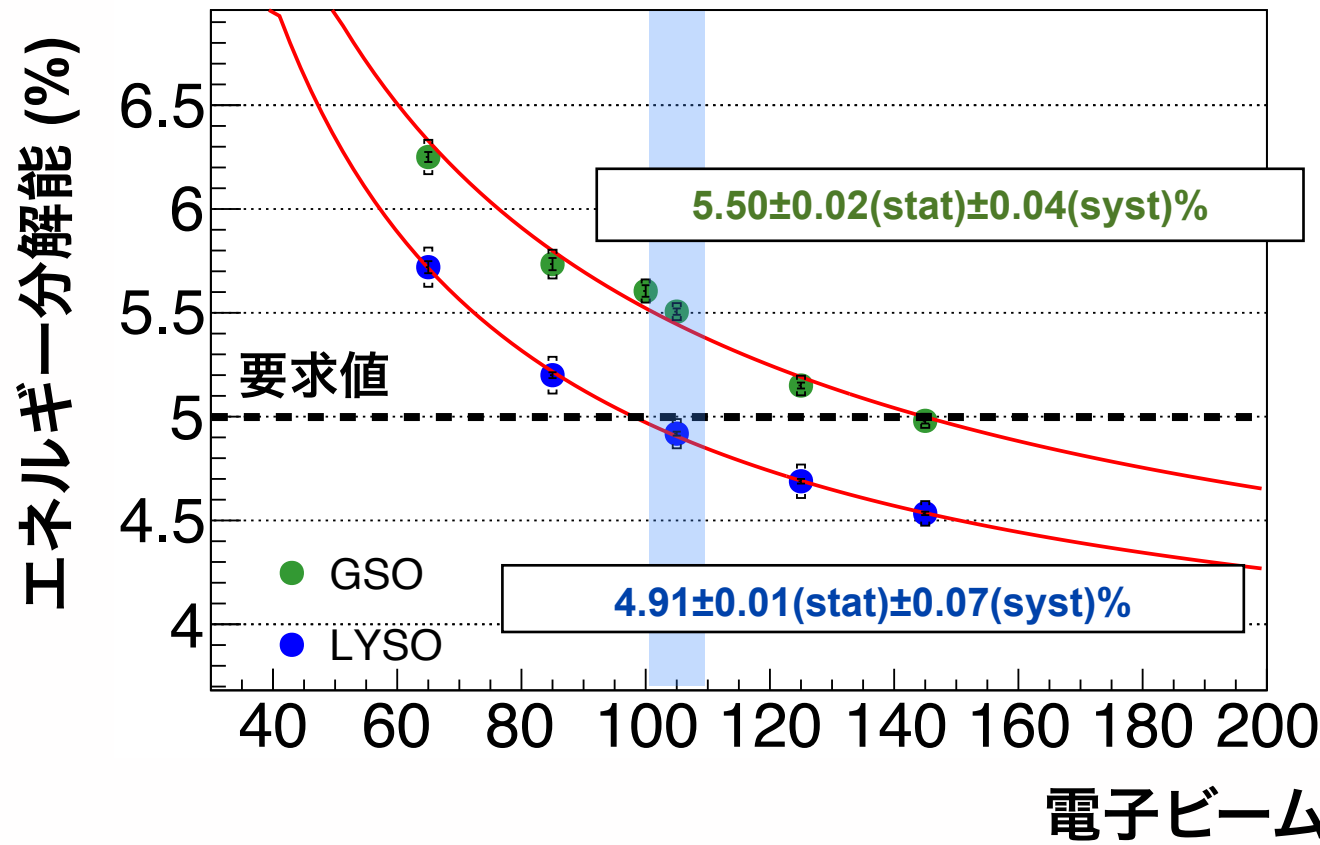


NIM-EASIROC
汎用MPPC読み出しモジュール

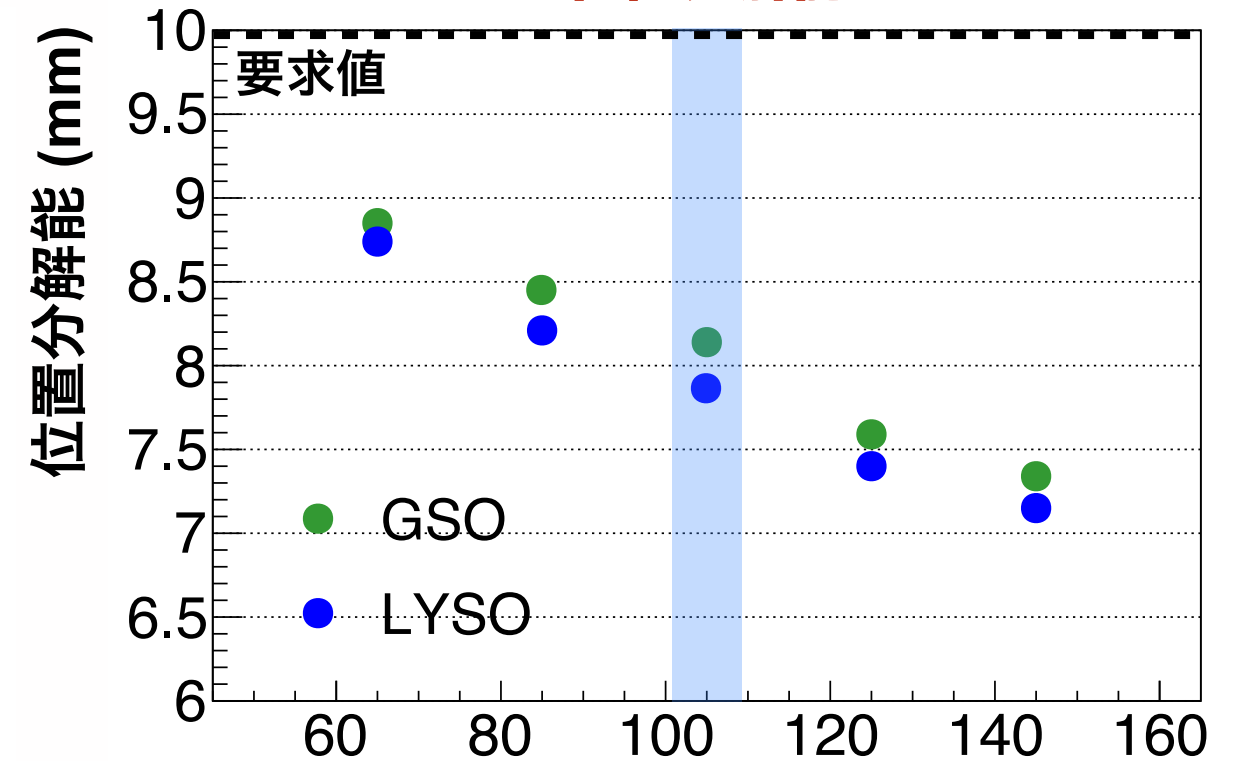


電子ビームに対する応答

エネルギー分解能

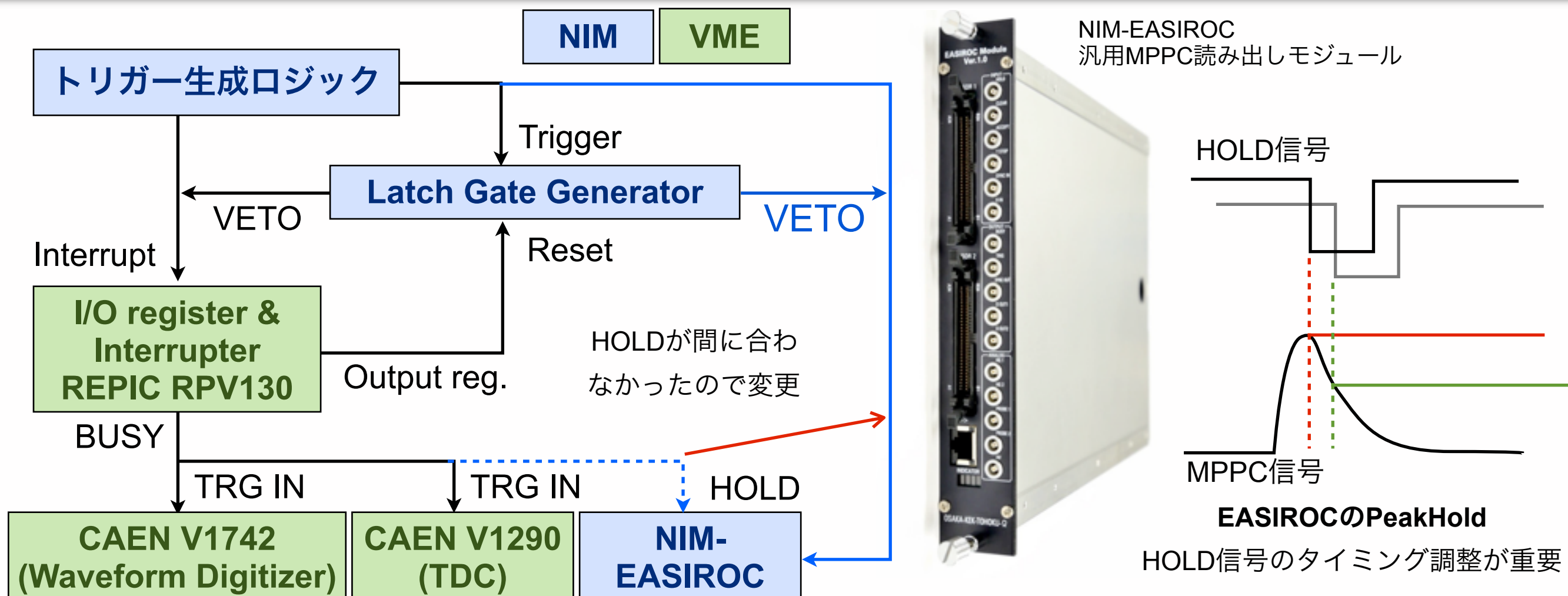


位置分解能



- 結晶性能を電子ビーム運動量の関数で評価、比較した。
 - ◆ 線形性：GSO、LYSO両方とも、とても良い。（直線からの偏差は1%未満）
 - ◆ エネルギー分解能：LYSOのみが5%以下@105 MeV/cを達成した。
 - ◆ 位置分解能：GSO、LYSOの両方が要求値を満たした。
- COMET電磁カロリメータにはLYSOを採用する事に決定した。

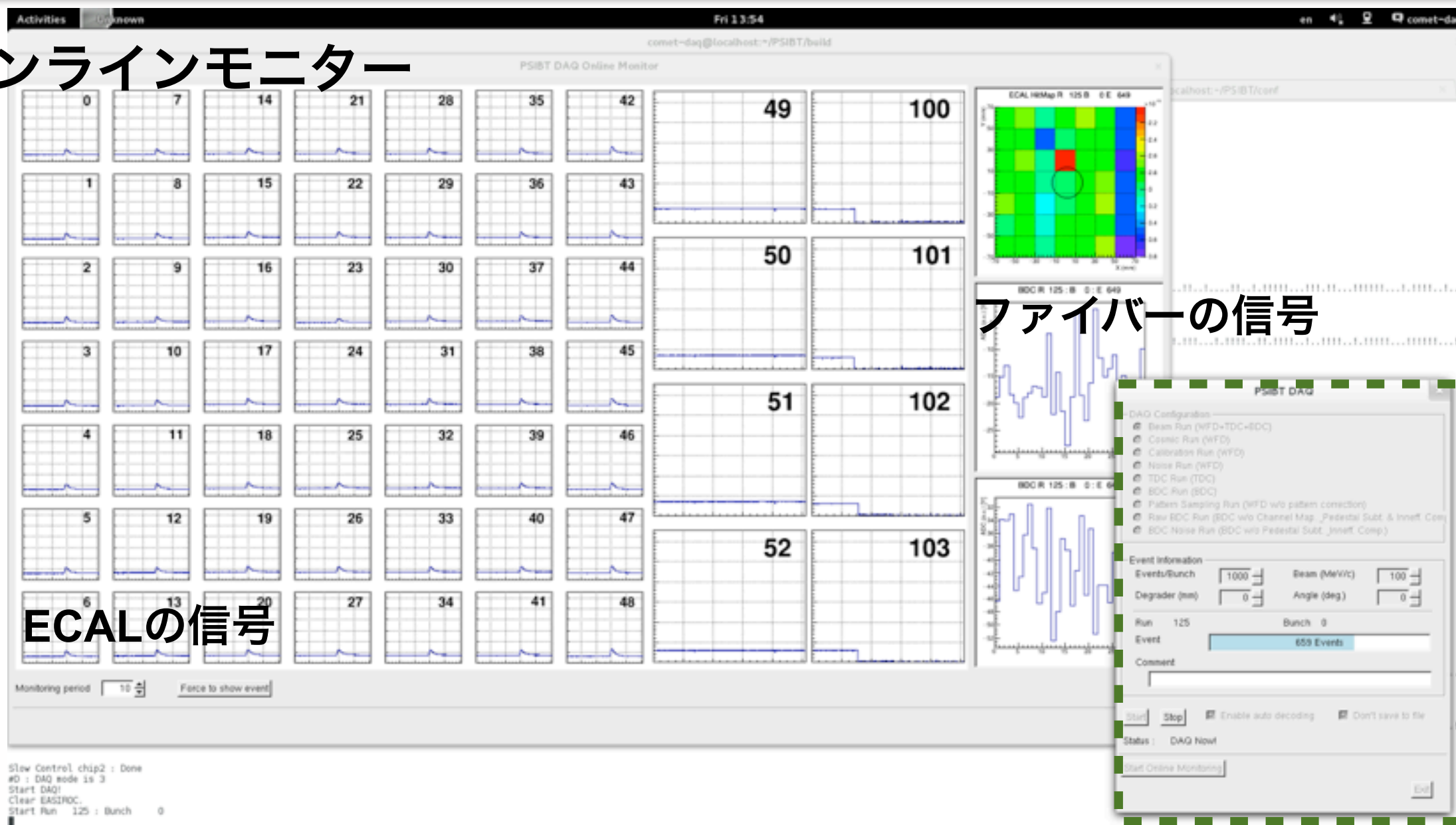
DAQの概要



- CAEN V1742 (DRS4) のDeadTimeが長い (56 ch (7 chips) 読み出しで~3 msec)
 - ◆ DAQ VETOとしてラッチ式のゲートを使った。ResetはVMEのOutputレジスタを用いる。
 - ◆ Interrupterが出すBUSY信号を使ってDAQの各モジュールにトリガーをかけた。
- 現地環境の都合でEASIROCのHOLDが間に合わなくなった、トリガー生成ロジックから直接HOLDした。
- DRS4 56ch読み出し (TDCとEASIROCは無視できる) で400 Hz程度のDAQレートを達成した。
 - ◆ 初期のビーム試験では数十Hz程度しかでなかった。改良を重ねてここまで来た。

DAQソフトウェア

オンラインモニター



ECALの信号

ファイバーの信号

DAQ本体

- DAQソフトウェアも独自にゼロから開発した。
 - ◆ GUIによるコントロールパネルを完備。DAQの設定やコメントを追加できる。
 - ◆ オンライン/オフラインモニターを作成した。
 - ◆ DAQログはSQLによるデータベース管理を行った。

(おまけ) EASIROC使用上の問題点

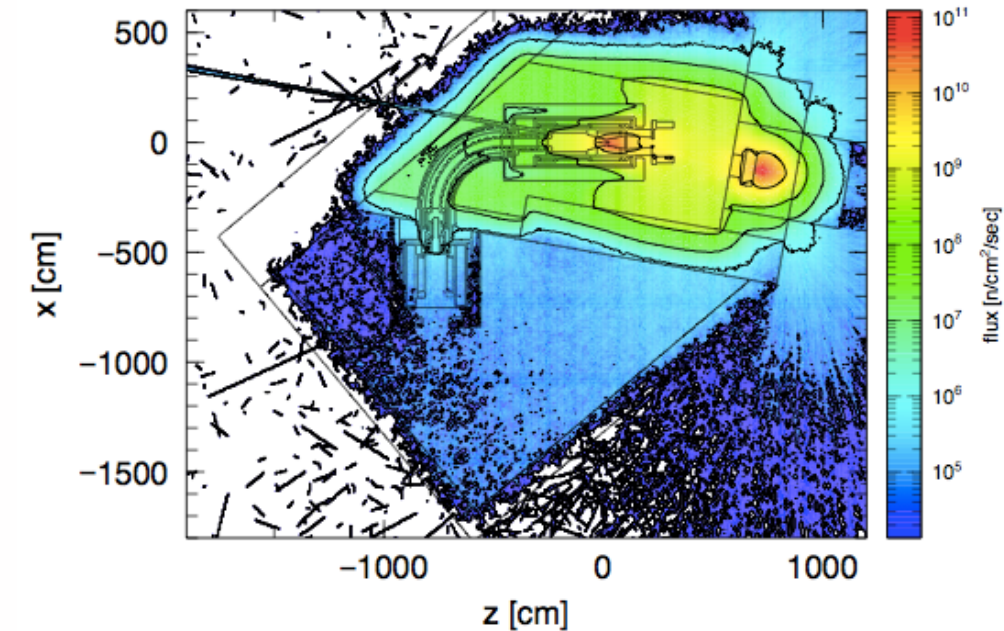
- EASIROCを他モジュールと同期して使う場合に、以下のような問題がおきた。
- **問題1：EASIROCで1イベントずつ読み出そうとすると、なぜか30 msecものDead timeがあった。**
 - ◆ 原因：SiTCP内のNagleアルゴリズムによるもの。
 - ★ (小さすぎるパケットが何度も送受信され帯域を圧迫することを防止する機構)
 - ★ EASIROC単体で使う分にはFIFOに溜まった分から読み出すので起きない問題。
 - ◆ SiTCPのNagleアルゴリズムをデフォルトでOFFにした。
 - ★ ほぼ無視できるDead timeになった。
- **問題2：データが不安定になった。**
 - ◆ 直接的な原因は謎。しかしSiTCPの初期設定時にNagleアルゴリズムがOFFになっているとこの問題が再現する様子。(標準ソフトウェアをそのまま組み込んだ場合)
 - ◆ SiTCPのNagleアルゴリズムをデフォルトでONに戻した。
 - ◆ その代わりに、初期設定後にDAQプログラム中で一時的にNagleアルゴリズムをOFFにする。

開発の履歴

- 2012年12月ごろ、COMET ECAL研究に着手。
- **電子ビームを用いたGSO/LYSO結晶の比較試験**
 - ◆ 2013年3月～5月：J-PARCで月1回の頻度でビーム試験
 - ★ 失敗、事故を繰り返す。なんとか修士論文にする。
 - ◆ 2014年3月：東北大学電子光理学研究センターにてビーム試験
 - ★ 成功。結論としてLYSOに決定。
- **APDの中性子耐性試験**
 - ◆ **2014年10月：九州大学タンDEM加速器実験室にて試験**
 - ★ APD（5 mm角）の中性子耐性は確認した。
 - ◆ （2015年7月：神戸大学にて10 mm角APDを試験する。）
- **$\pi/\mu/e$ 混合ビームによるLYSO結晶の応答の測定。**
 - ◆ 2015年6月：スイスPSI研究所にて試験。無事成功し、現在解析中。
- **測定システム開発としては、ビーム試験用DAQの開発、改善を行ってきた。**

(おまけ) APDの中性子耐性試験

- COMETの実験エリアは多量の中性子フラックスが予想されている。
 - ◆ Phase-Iの180日間で、90度ソレノイド後に $\sim 10^{13}$ n₁ MeV eq./cm²
 - ★ ECAL周辺は 10^{12} 程度を予想。
- 九州大学タンDEM加速器を使用し、APDの中性子耐性を試験した。
 - ◆ 3つのAPD (5 mm角) に以下の中性子量を照射した。
 - ★ 2.2×10^{11} , 7.5×10^{11} , 2.2×10^{12} n₁ MeV eq./cm².
- **[結論] $< 10^{12}$ n_{eq.} / cm² の範囲ではAPDは良い中性子耐性を示した.**
 - ◆ ゲインが落ちるが、電圧の調整で回復できる。
 - ◆ 線形性は保たれる。
 - ◆ ノイズが若干増えるものの、波形解析により影響は抑えられる。
 - ◆ エネルギー分解能は大きく変わらない。



Phase-Iでの中性子フラックス予想値



タンDEM加速器@九州大学タンDEM加速器実験室

まとめ

- ECALの開発の過程では幾度かビーム試験を行ってきた。
 - ◆ ビーム試験用にDAQも開発してきた。
 - ◆ NIM EASIROCモジュールをビーム試験に十分に活用することができた。
 - ★ 1イベントごと読み出すにはいろいろと問題があったが、解決できた。
- COMET環境は過酷な中性子環境となる。
 - ◆ APDの中性子耐性を測定し、十分な耐性を確認できた。