

# 電子飛跡検出型コンプトンカメラ用 PMT高電圧供給回路開発

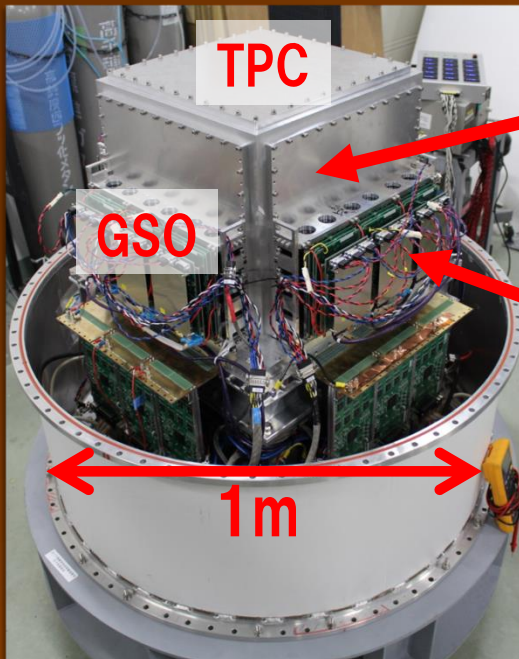
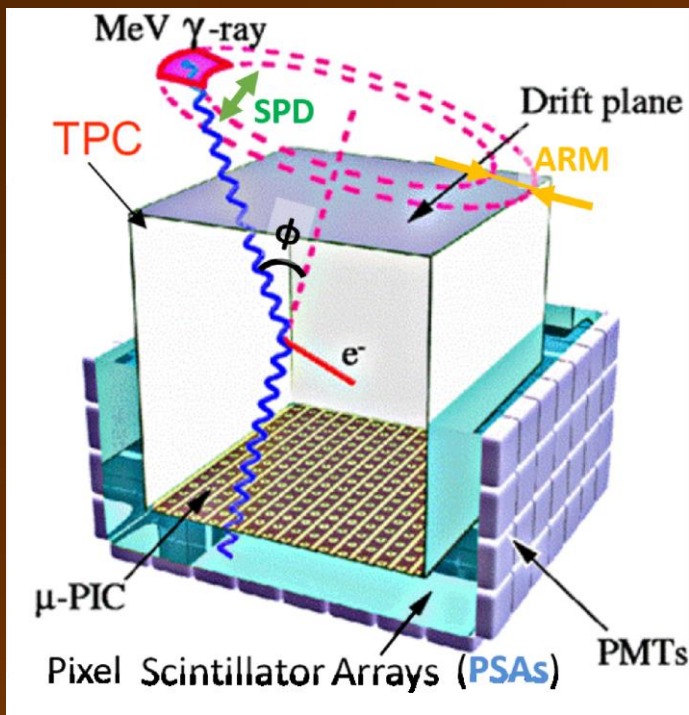
京都大学 宇宙線研究室 水本 哲矢

- ・ 電子飛跡検出型コンプトンカメラ(ETCC)
  - ・ シンチレーションカメラ(散乱 $\gamma$ 線検出部)  
PMT高電圧供給回路開発について(Open-It)
  - ・  $\mu$ -TPC(コンプトン散乱体&反跳電子検出器)  
 $\mu$ PIC信号読み出し回路について(Open-It)
- ・ ETCCのDAQシステムとDAQコントロール回路
- ・ 今後の課題

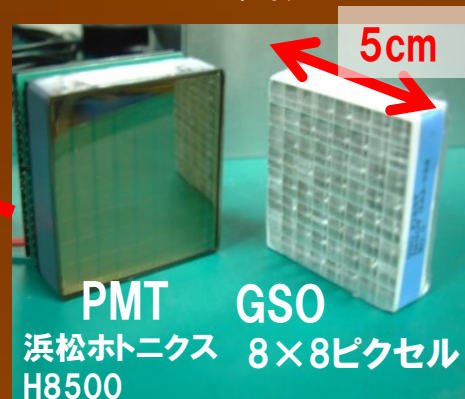
2015年7月24日 計測システム研究会@RCNP 大阪大学

# 電子飛跡検出型コンプトンカメラ ETCC

## SMILE-II FM用ETCC



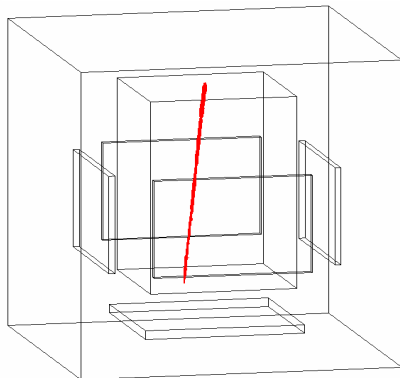
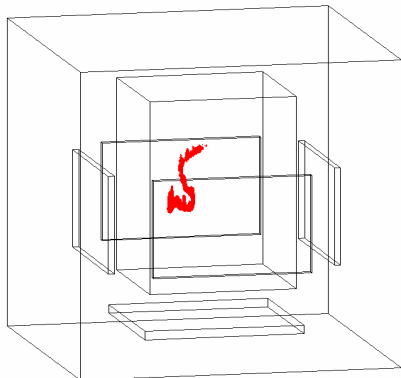
Ar (95%) + isoC4H10 + CF4  
1気圧



GSOシンチレータアレイ  
& 64ch PMT

electron track

muon track

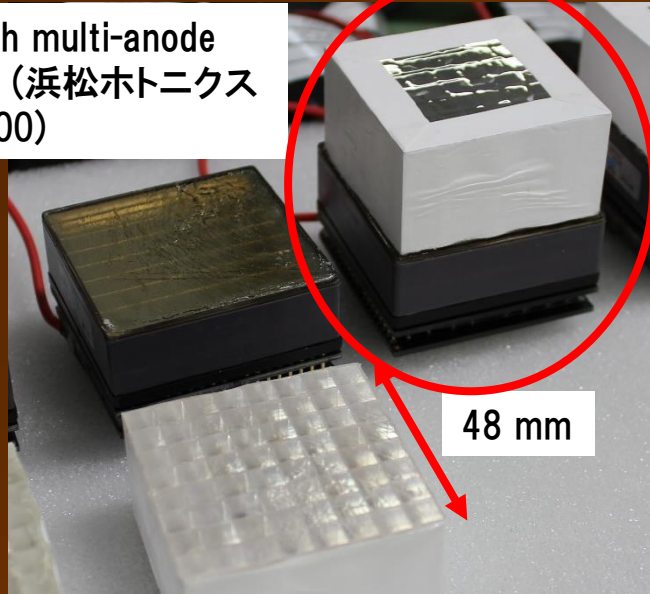


- ガンマ線がコンプトン散乱
- ガス飛跡検出器  $\mu$ -TPC  
⇒ 反跳電子の3次元飛跡とエネルギー
- シンチレーションカメラ  
⇒ 散乱ガンマ線の吸収点とエネルギー

光子毎に到来方向、エネルギーを取得  
高いバックグラウンド除去性能  
広い視野( $\sim 3$  str)

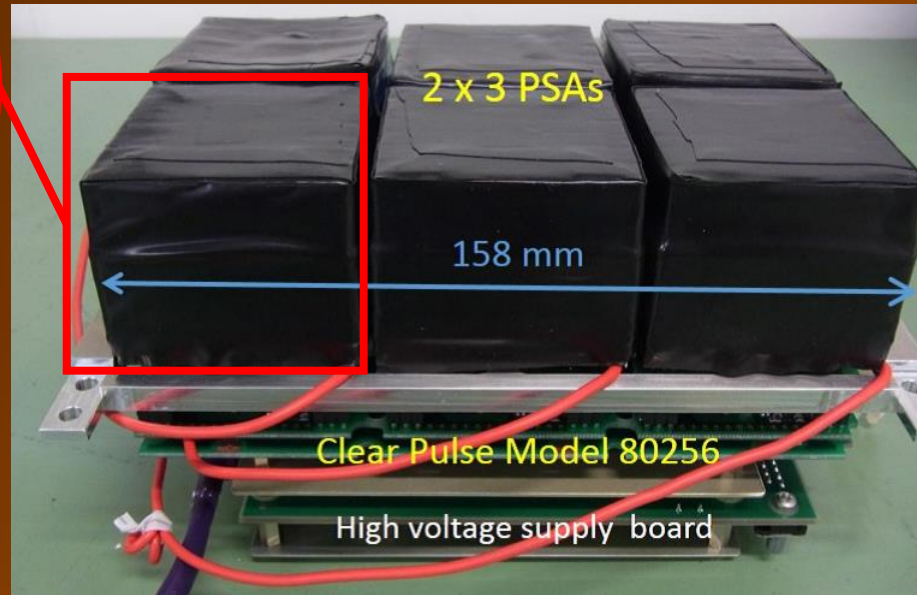
# シンチレーションカメラ

64 ch multi-anode  
PMT (浜松ホトニクス  
H8500)



48 mm

GSO pixel scintillator array  
(PSA) 8×8 pixels



2 x 3 PSAs

158 mm

Clear Pulse Model 80256

High voltage supply board



Clear Pulse Model 80057

- ・シンチレータ信号読み出しにコンパクトで低消費電力の回路を使用
- ・PMTの信号読み出し回路 (Clear Pulse model 80256) は1つにつき6個 (2×3) のPSAの信号読み出しを行うことができる。
- ・PSAの8×8 pixelsは抵抗チェーンで4 chに減らして信号読み出しを行う。
- ・VME module (Clear Pulse Model 80057) を80256とethernetケーブルで接続して使用。読み出し回路へのthreshold値等の設定や、読み出し回路からのデータのbufferとして使用。
- ・SMILE-IIでは当初216個のPSA (読み出し回路36セット) を使用することを想定、PMTの高電圧供給回路も小型、コンパクトなものにしたい。

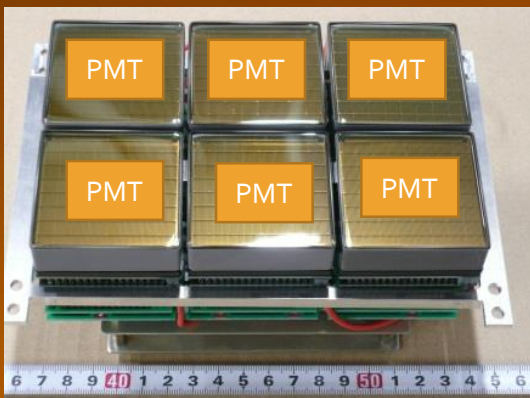
# SMILE-II実験PMT用 PMT 高電圧供給基板

## 要請

- 用いるPMTの数が多い(216個)ので  
軽量、コンパクトにしたい。
- PMTにかける電圧値の命令やPMTに流  
れる電流値のモニターをしたい。

## 設計

- DC-HV DCコンバータとして、EMCO  
Q12N-5 を使用。EMCO 1つにつき  
PMT2つに高電圧を供給。
- DAC、ADCを持つマイコンを使用。マイ  
コンを用いて通信も行う。
- HV供給用の基板をPMT後方の信号読  
み出し回路に取り付けられるようにする。



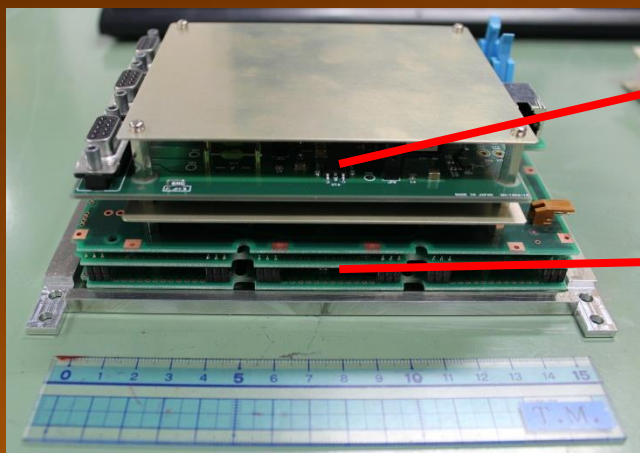
命令・データ  
の送受信  
(RS-232C)

地上



# PMT 高電圧供給基板製作

- ・PCからRS232C通信でどのボードIDのどのchのDAC値を変化させるか命令
- ・マイコンのDAC出力 (0~2.5V) を0~5Vにし、高電圧供給モジュール (EMCO Q12N-5) に入力、入力電圧に応じて0~-1.2kVが出力される。
- ・高電圧出力のラインに直列に抵抗を入れ、抵抗の両端の電圧をモニターすることで電流値を知る。

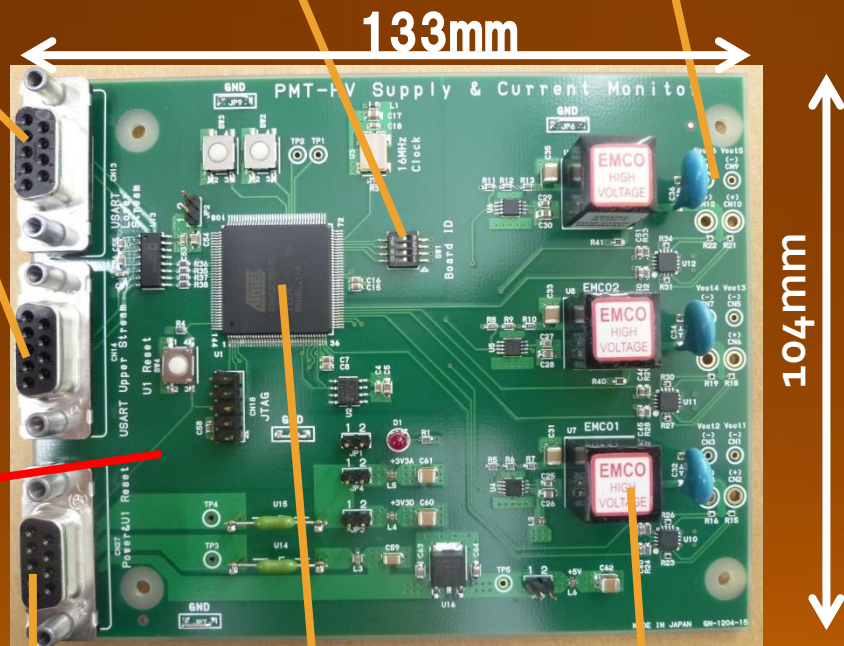


PMTアンプ基板に高電圧供給基板を取り付けた様子。コネクタの干渉等はない。

RS232C通信用  
D-sub9pin

ボードID用  
ディップスイッチ

PMT用  
-HV出力×6か所



PMT高電圧  
供給基板

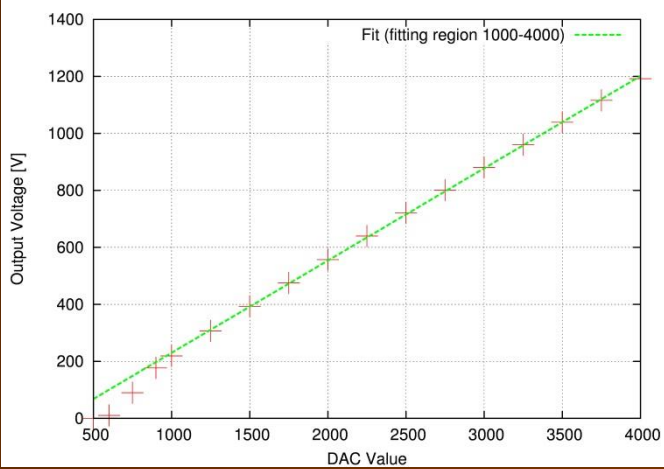
PMT6個分の信  
号読み出し回路

電源入力 (+6V、+3.3V)  
マイコンリセット input

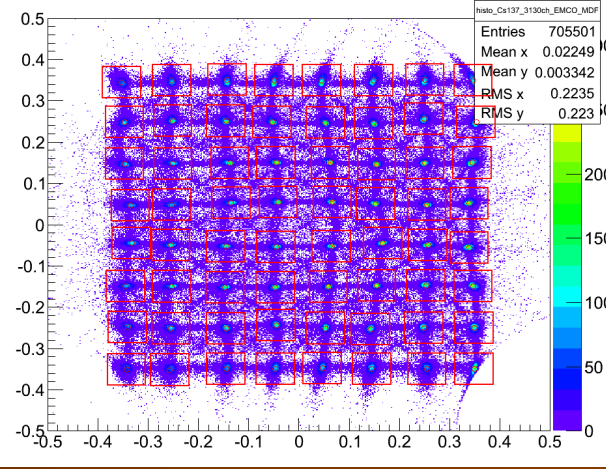
EMCO Q12N-5  
(DC-DC Converter)

ワンチップマイコン  
Atmel社 at32uc3c0512c

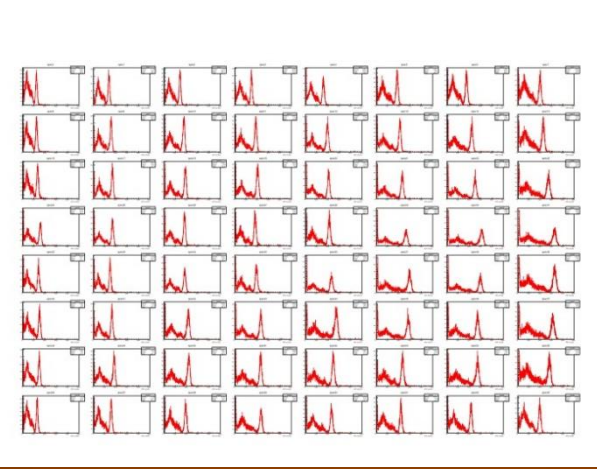
# PMT 高電圧供給基板動作チェック



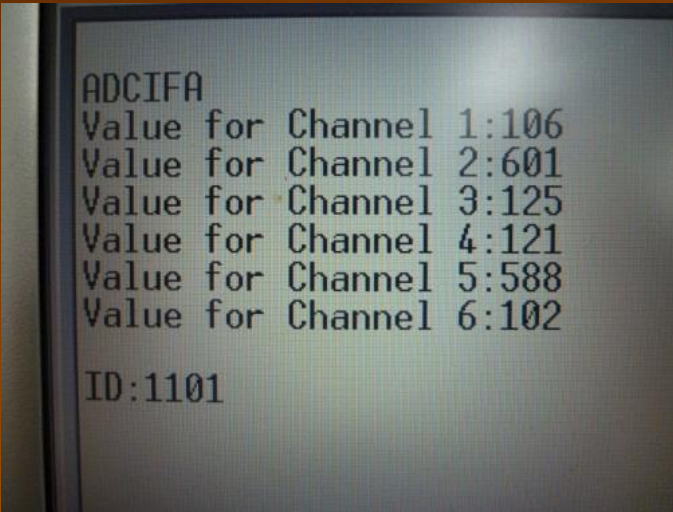
マイコンDAC値と出力電圧の関係  
(高電圧出力にPMTを2つつけたとき)



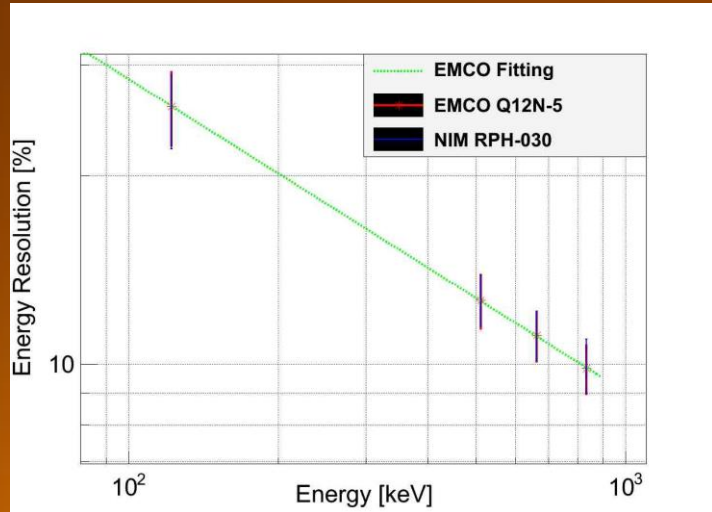
PMT測定データの  
2次元ヒストグラム ( $^{137}\text{Cs}$ )



64ch (PSA1つ) 分のスペクトル  
( $^{137}\text{Cs}$ )



電流モニターとボードIDの  
PCへの送信結果 (電圧出力に数MΩ  
~数十MΩの抵抗をつないだとき)



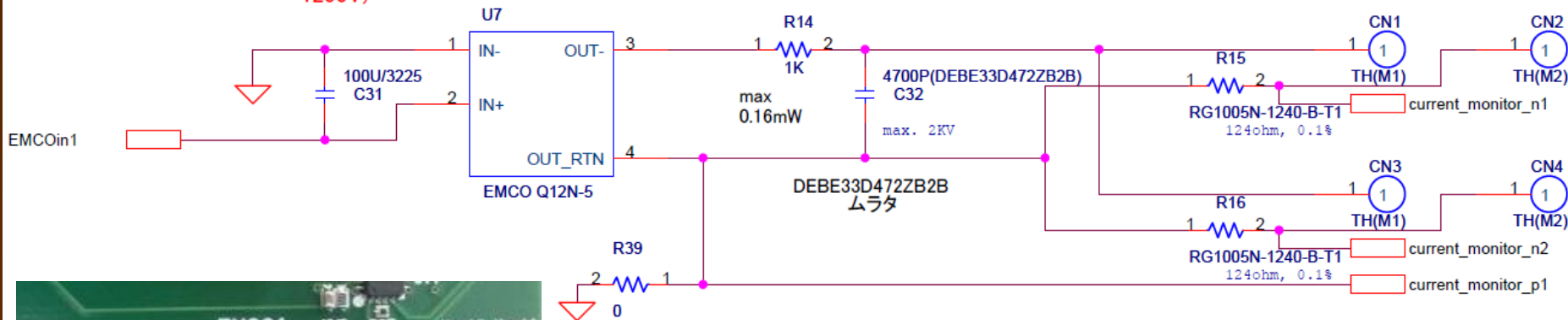
エネルギー分解能 (林栄精器RPH-030  
NIMモジュール使用時と高電圧供給基板使用時)

→製作した基板は  
問題無く動作している  
として量産を行った。

# PMT 高電圧供給基板製作 問題点1

## -電流モニター-

PMT印加用 -HV生成部(EMCO Input0 - +5V、Output 0 - -1200V)



・EMCOのOUT\_RTN直前に抵抗を入れて抵抗両端の電位差(電流に比例)をマイコンのADCで読み取る。しかし、PMTに電圧を供給しても、電流値(ADC値)が0に近い値しか取得できない。

→PMTのHV用GNDとsignal GNDがつながっていて、PMT HV GND～PMT signal GND～信号読み出し回路GND～PMT高電圧供給基板GND～0Ω抵抗の経路で電流が流れているためモニター用抵抗には電流が流れていなかった。

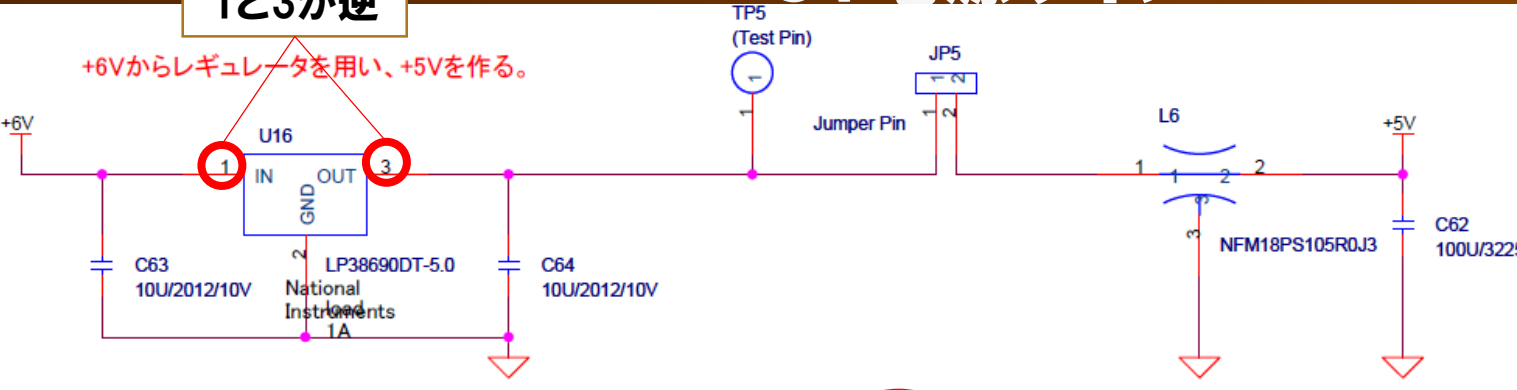
→0Ω抵抗を10uFコンデンサに変更することで対応。

# PMT 高電圧供給基板製作 問題点2

## +5V電源ライン-

1と3が逆

+6Vからレギュレータを使い、+5Vを作る。



+6V入力

+5V出力

三端子

レギュレータ (+5V)  
(1と3が逆の状態)

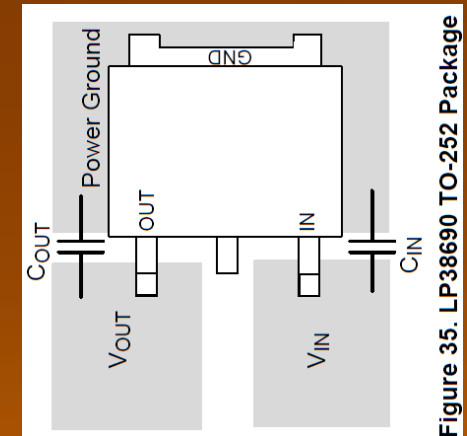
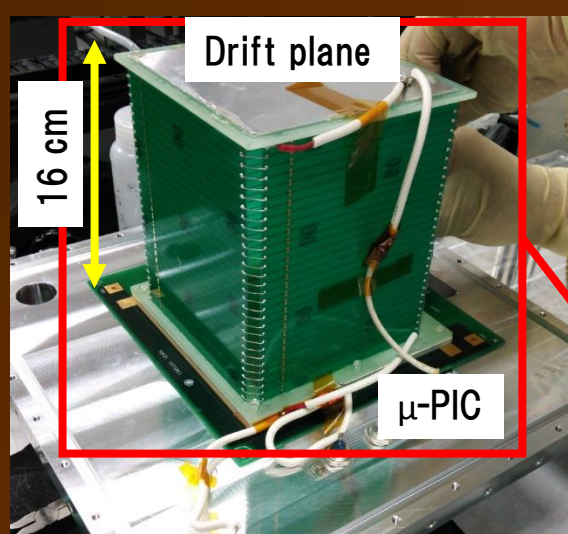


Figure 35. LP38690 TO-252 Package

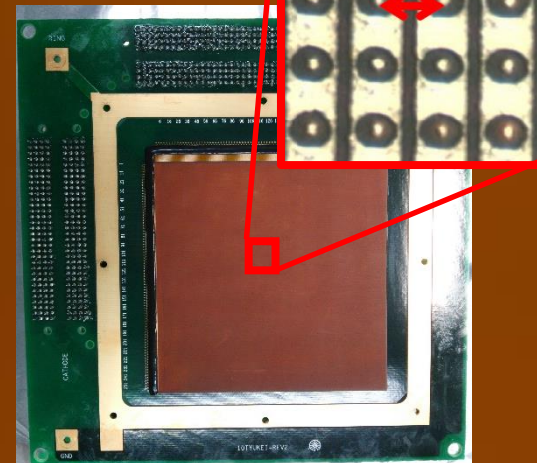
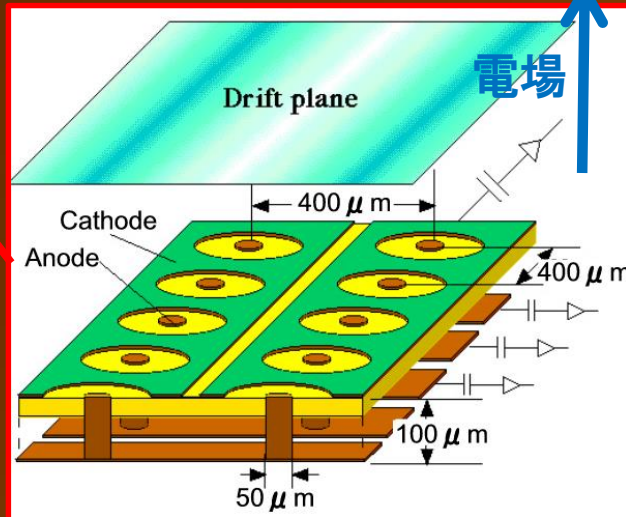
- EMC0の0~5V入力の直前のアンプ用の電源として使用
- +5Vのラインに+5Vと異なる電圧 (+6Vに近い電圧) が出ていることが判明
- 調べると、+6V (基板の外部から入力) → +5V生成用のレギュレータを逆につけていることがわかった。
- レギュレータのpin1とpin3を入れ替えればよいが、基板設計の修正が必要。+5Vを使用している素子は+6Vを入れても問題ないものを使用しているため現状、pin1とpin3をショートさせることで対応している。



# ガス飛跡検出器 $\mu$ -TPC (10cm TPCの場合)

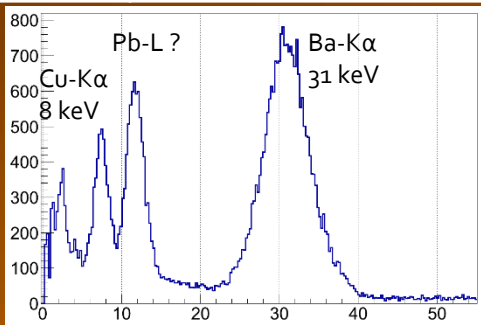


ドリフトケージ  
(TPCガス容器内部)



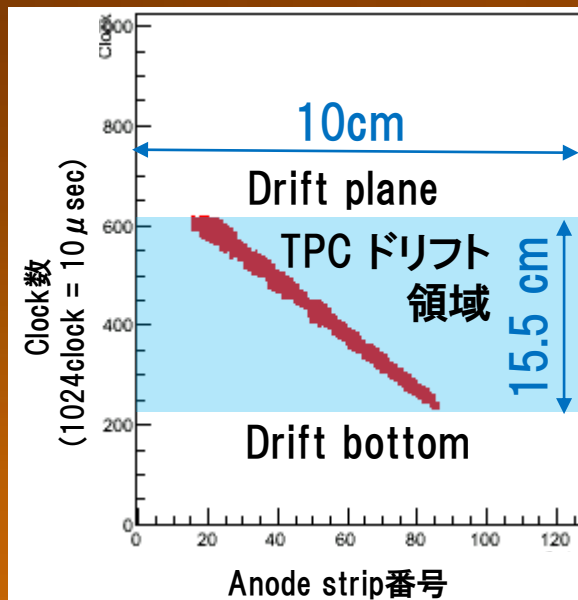
$\mu$ -PIC(10 cm角)写真

ドリフト電場	194 V/cm
ガス	Ar:C <sub>2</sub> H <sub>6</sub> (90:10) 1.5 atm
ガスゲイン	$\sim 2 \times 10^4$
ドリフト速度	$\sim 4 \text{ cm}/\mu\text{s}$
Energy resolution	25 % (FWHM @ 31 keV)

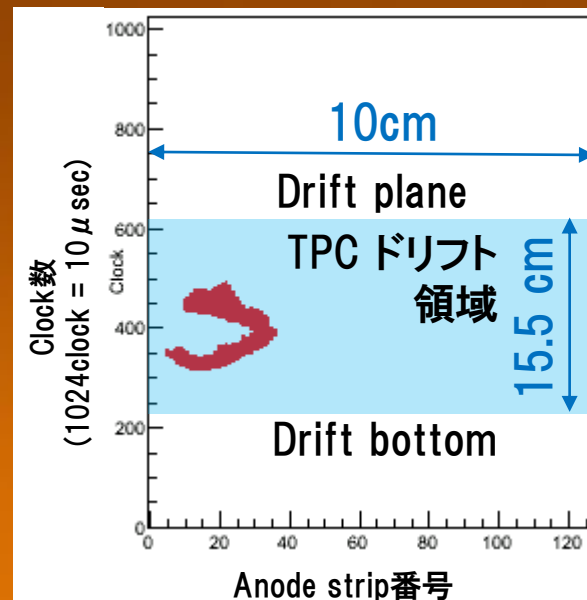


<sup>133</sup>Baスペクトル

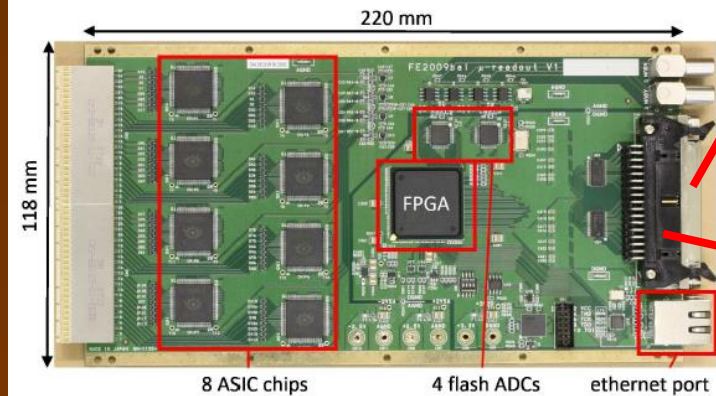
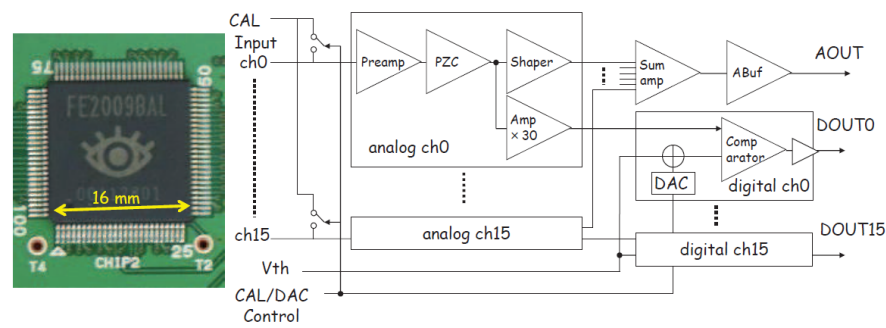
## ミュオン飛跡の例 (Anodeデータ)



## 電子飛跡の例 (Anodeデータ)

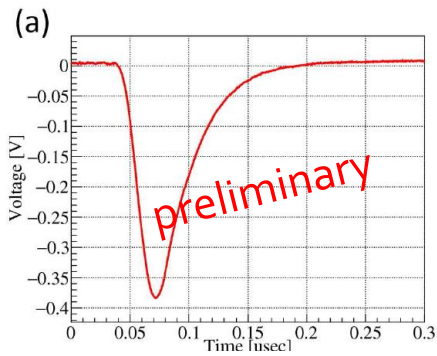


# μPIC信号読み出し回路

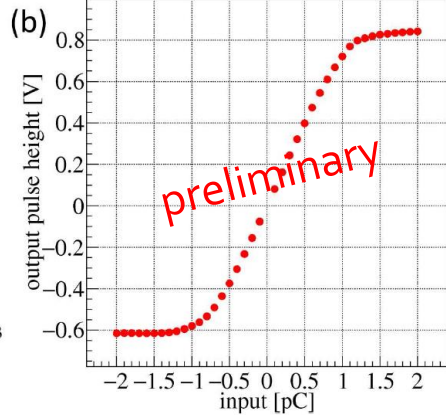


68pinコネクタ  
to VME  
memory board

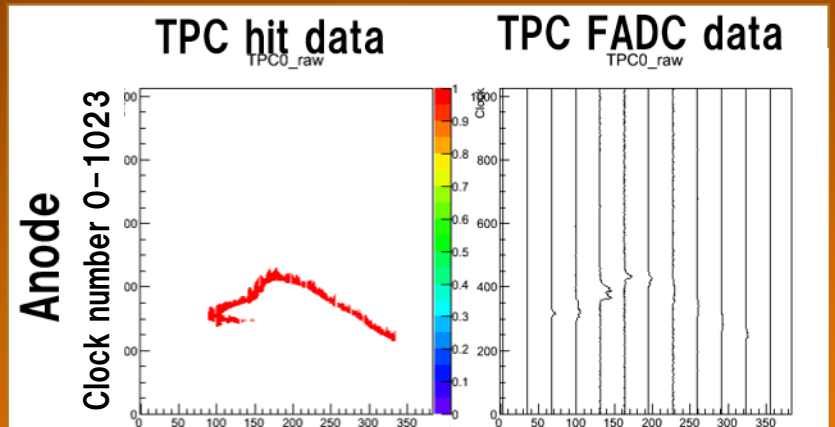
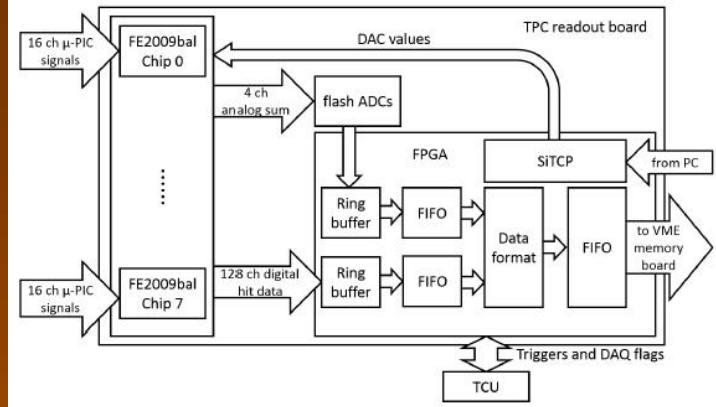
フラットケーブル  
コネクタ  
Trigger信号  
等のI/O用



入力  $-0.5\text{pC}$  のときの  
AOUT出力波形



- ・これまで使用していたASDチップが生産されなくなったこと、回路の省電力化、コンパクト化を求めて新読み出し回路を開発。
- ・KEK測定器開発室で開発されたASICチップ (FE2006) をもとに低消費電力等の修正を行ったチップ (FE2009bal) を開発。FE2009balを8枚のせ、128chのμPIC信号を処理できるμPIC信号読み出し回路を開発。

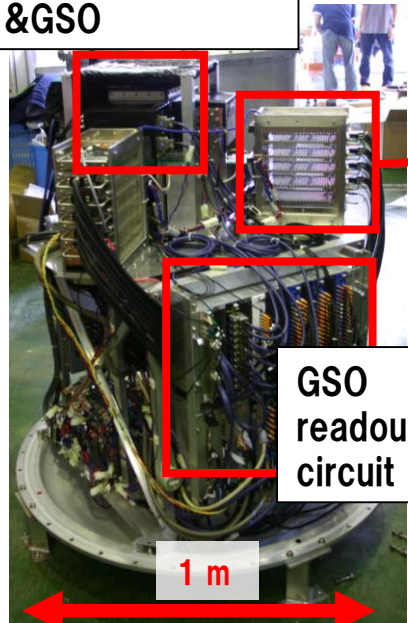


Strip番号0-383 (読み出し回路3枚分)

# SMILE-I (2006) と SMILE-II の TPC 読み出し回路の比較

(10×10×15) cm<sup>3</sup>  
μ-TPC  
& GSO

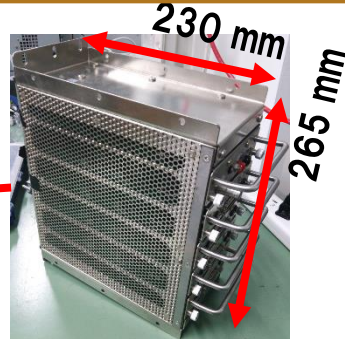
## SMILE-I ETCC



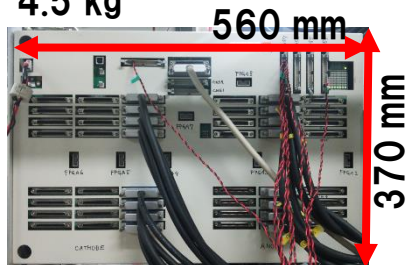
SMILE-I FM ETCC

GSO  
readout  
circuit

1 m



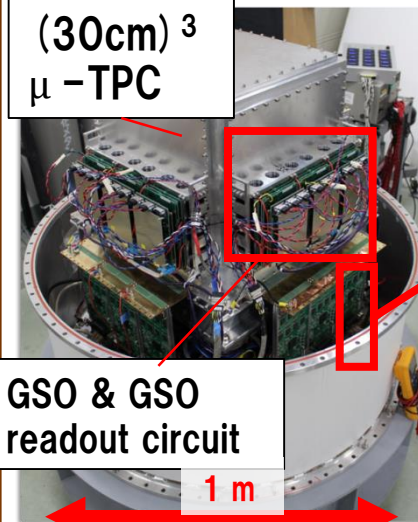
ASD (256ch/10cm)  
4.5 kg



encoder (1 board/1ETCC)  
7.8 kg

## SMILE-II ETCC

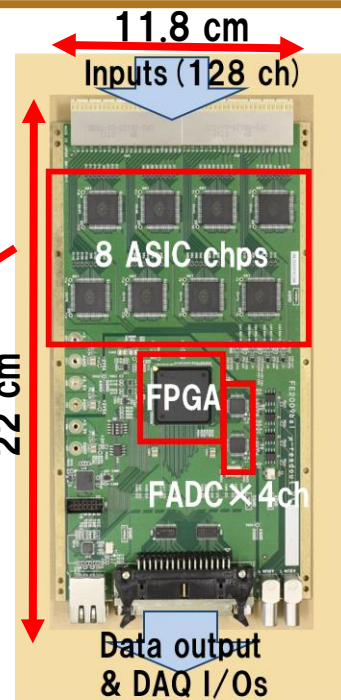
(30cm)<sup>3</sup>  
μ-TPC



GSO & GSO  
readout circuit

1 m

SMILE-II FM ETCC



new readout board  
(128 strips/10 cm)

conventional readout circuit ...

- massive
- takes up a lot of space
- high electric power consumption

→ developed new readout circuit

	ASD system (for SMILE-I)	new readout board (for SMILE-II)
ASIC chip transistor type	bipolar transistor	CMOS transistor
strip number per 1 ASIC chip	4	16
power consumption	0.24 W/strip	0.17W/strip

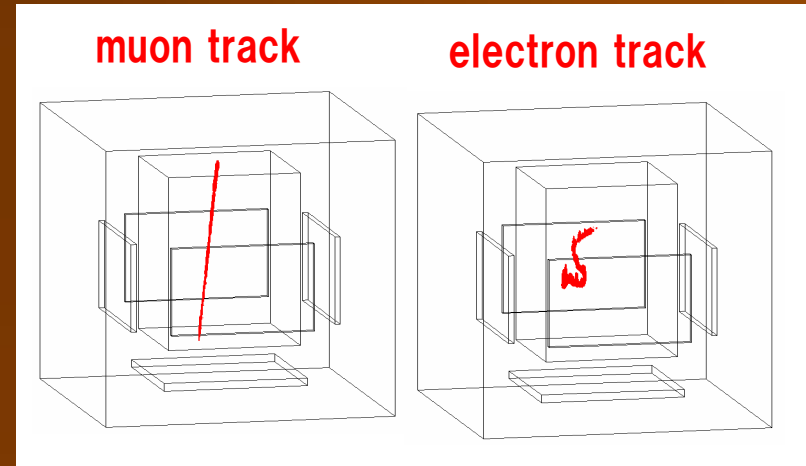
# TPCデータ

- Trigger ID、128ch hit情報 (飛跡)、4ch 波形情報 (FADC) 含む。

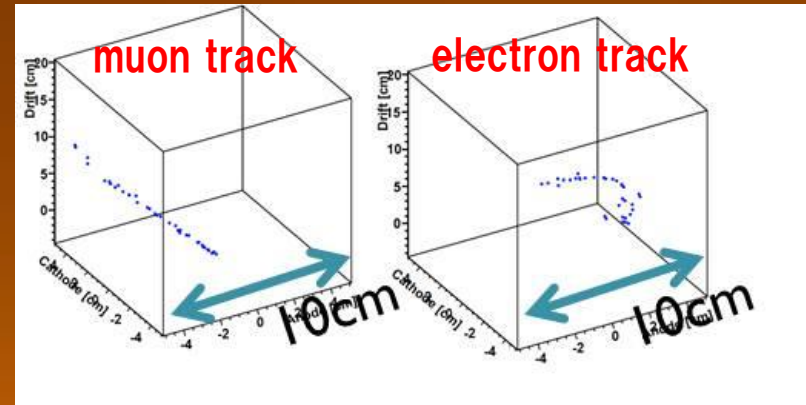
- 1イベントごとにTPC、シンチのデータを取得するシステムではなく、バッファに別々にある程度ためてからCPUで読み出すシステムのため後でTPC、シンチの同一イベントデータを照合するのにtrigger IDが必要。

- 128ch hit信号は100MHz clockで1イベントあたり、10  $\mu$  sec分 (1024clock分) 取得 (ドリフト時間より十分長い)。飛跡のあるclockのみ保存。Hitありのデータはすべて保存 (  $\leftrightarrow$  SMILE-I )。

- 4ch波形情報は10bit 50MHz FADCで取得しているが、データ量削減のため8 bit 25MHzのデータに圧縮して取得している (データ圧縮により生じるエネルギー分解能の劣化は問題のない程度)。



TPC 3D reconstructed track  
(SMILE-II ETCC)

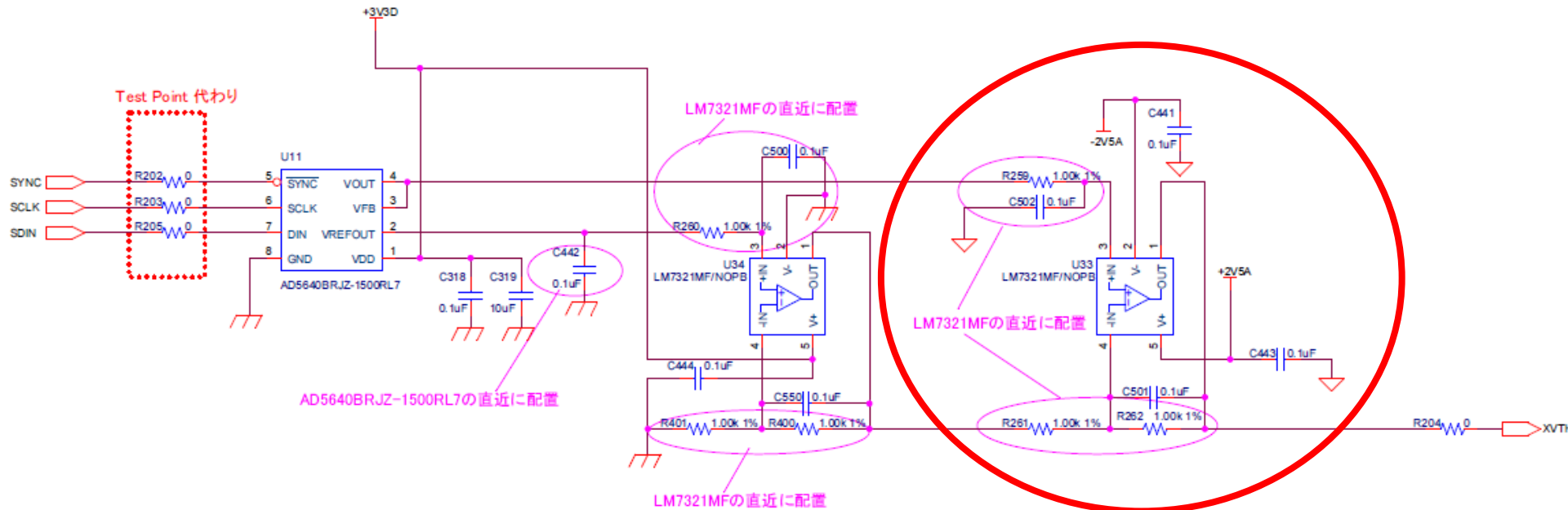


TPC 3D reconstructed hit data  
(SMILE-I ETCC)

1. 信号の立ち上がりを検出
2. 10ns幅でHitしたストリップ番号の最大値と最小値を記録
3. 10ns幅でanodeとcathodeのhitのコインシデンスを取る

# μPIC読み出し回路修正点1

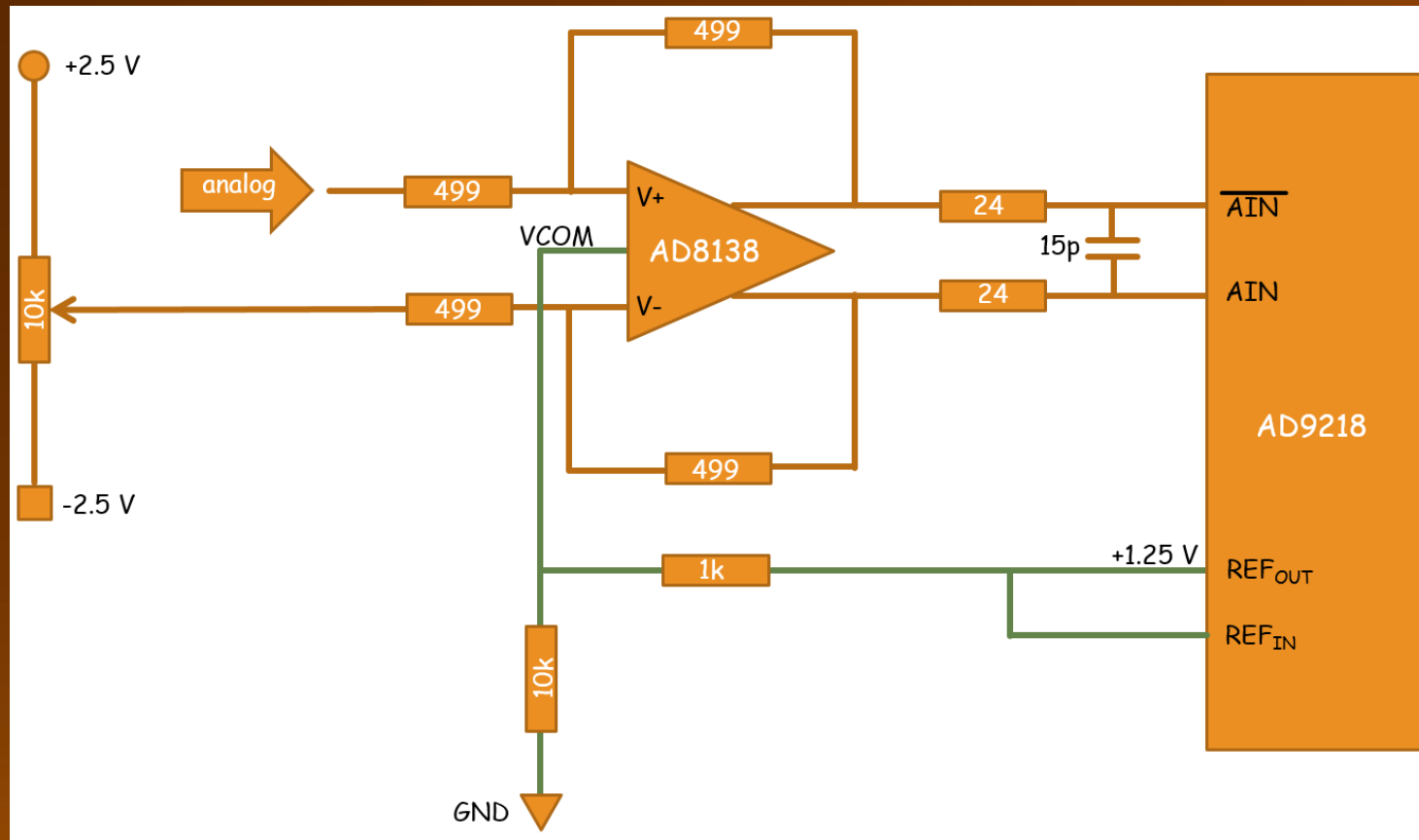
## -Vthの電圧範囲-



- Digital hit信号 (荷電粒子飛跡取得用) のthreshold用のVth電圧の範囲が従来の回路だと0~+3.3V
- 正極性のcathode信号だと問題ない。しかし、負極性のanode信号の場合、電圧マイナス (thresholdを厳しくする方) に設定することができない。
- オペアンプを1つ追加してVthの範囲を-2.5V~+2.5Vに変更。

# μPIC読み出し回路修正点2

## -Flash ADCのbaseline オフセット調整

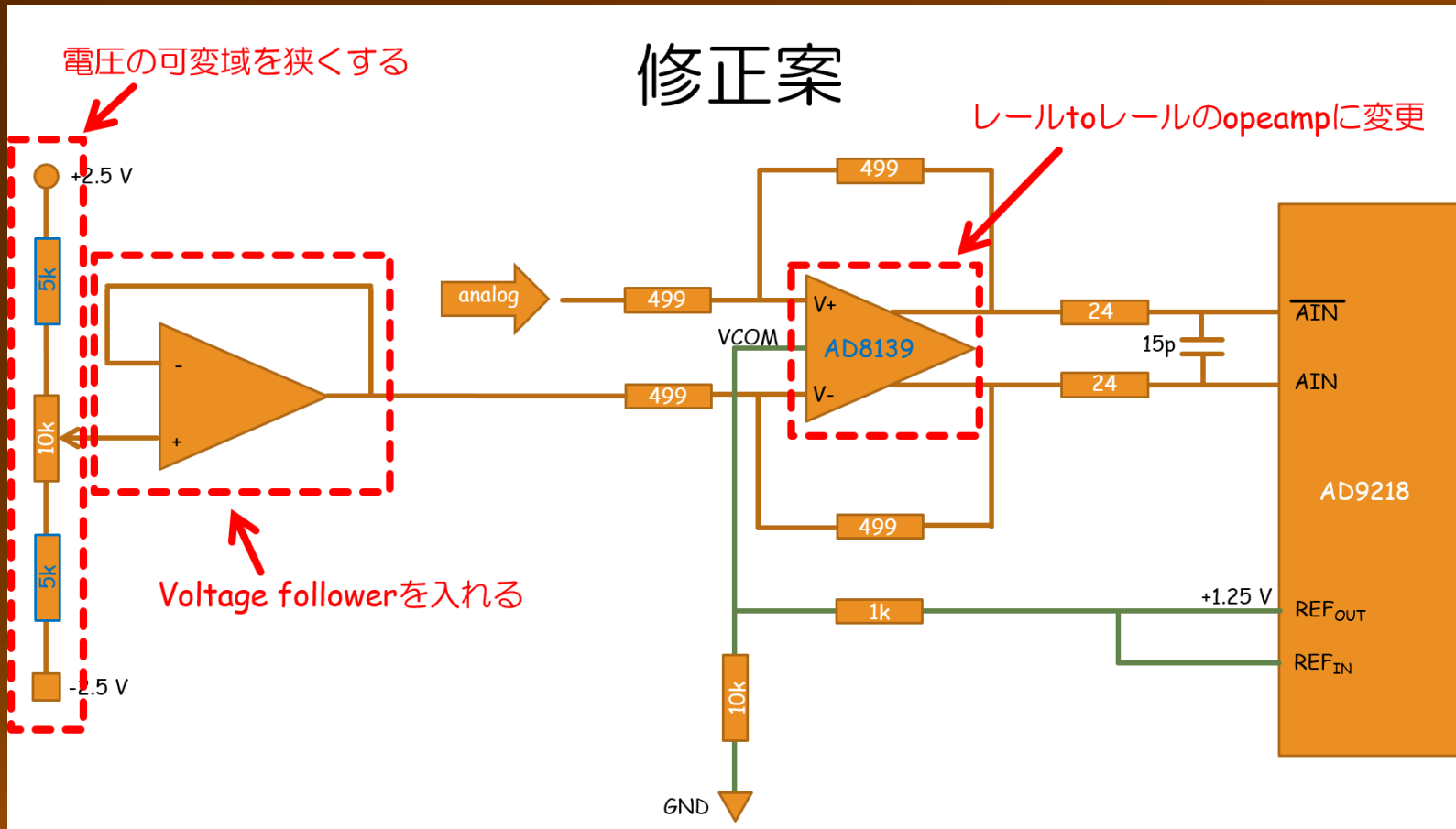


・Flash ADC (AD9218) のbaseline調整用の10kΩ可変抵抗の電圧値がねじ回転数と比例でない。

→可変抵抗以外の回路の影響を受けていると考えられるので、voltage followerを可変抵抗と差動ADコンバータ・ドライバの間に入れる。

# μPIC読み出し回路修正点2

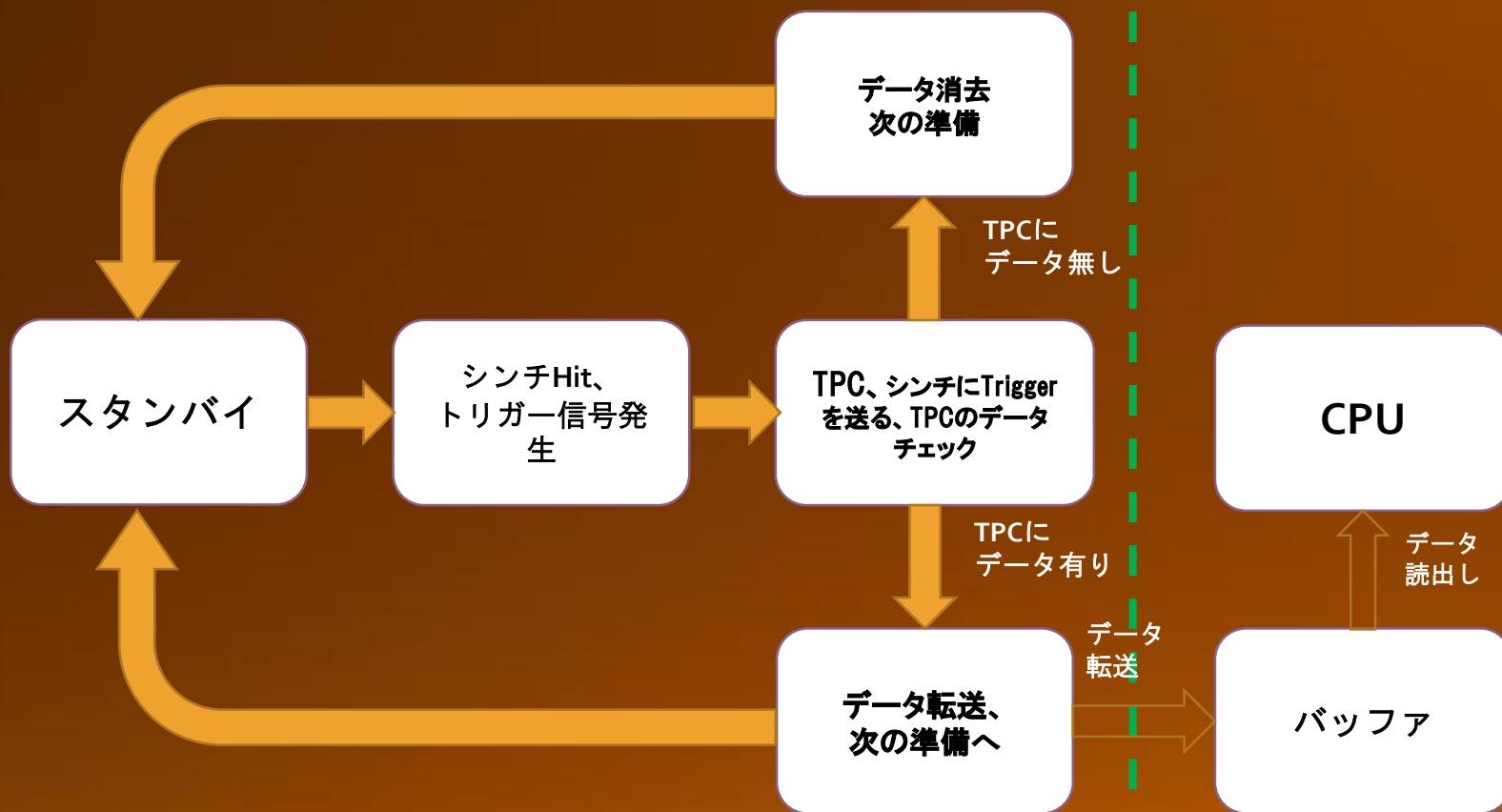
## -Flash ADCのbaseline オフセット調整



・Flash ADC (AD9218) のbaseline調整用の10kΩ可変抵抗の電圧値がねじ回転数と比例でない。

→可変抵抗以外の回路の影響を受けていると考えられるので、voltage followerを可変抵抗と差動ADコンバータ・ドライバの間に入れる。

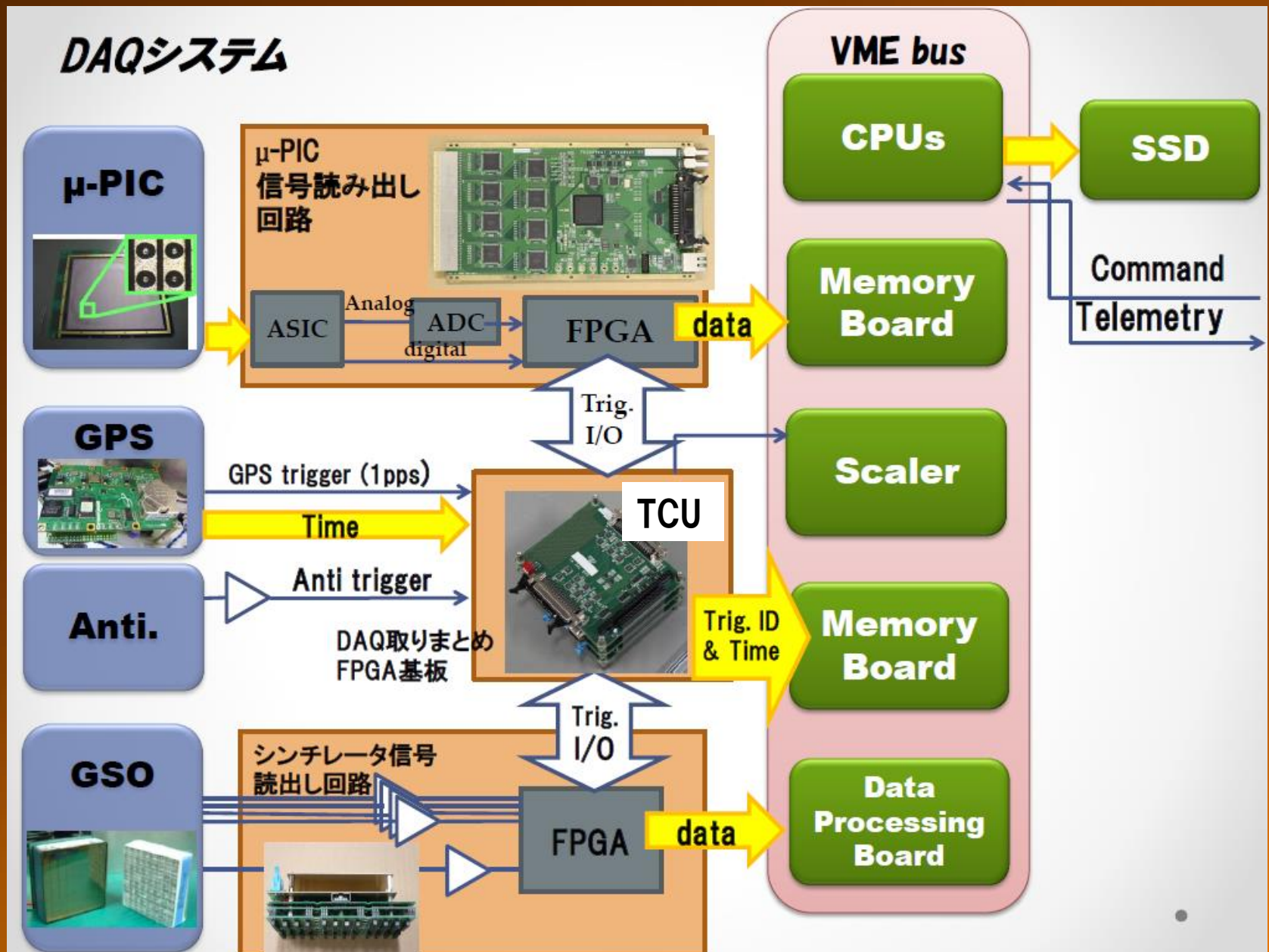
# SMILE-II ETCC DAQシステム1



- ・スタンバイのとき、シンチレータでhitが発生したらシンチレータへすぐtriggerを送る。
- ・TPCのドリフト時間より長い8  $\mu$  sec待ってからTPCにトリガーを送り、ring buffer書込み停止、ring buffer→FIFOの読み出しを行うと同時にTPCにhitがあるかチェック
- ・TPCにhitが無ければTPC、シンチのデータを消去、スタンバイへ。TPCにhitがあればデータのバッファへの転送開始。TPCデータは転送に時間がかかるが転送中もスタンバイ状態に移行可能。また、バッファ書込みとCPUによるバッファ読み出しは同時に行える。



# SMILE-II ETCC DAQシステム2



# Trigger control unit (TCU)



TPC I/Oボード×2

FPGA基板×1

GPS&anti基板×1

シンチレータI/O基板×3

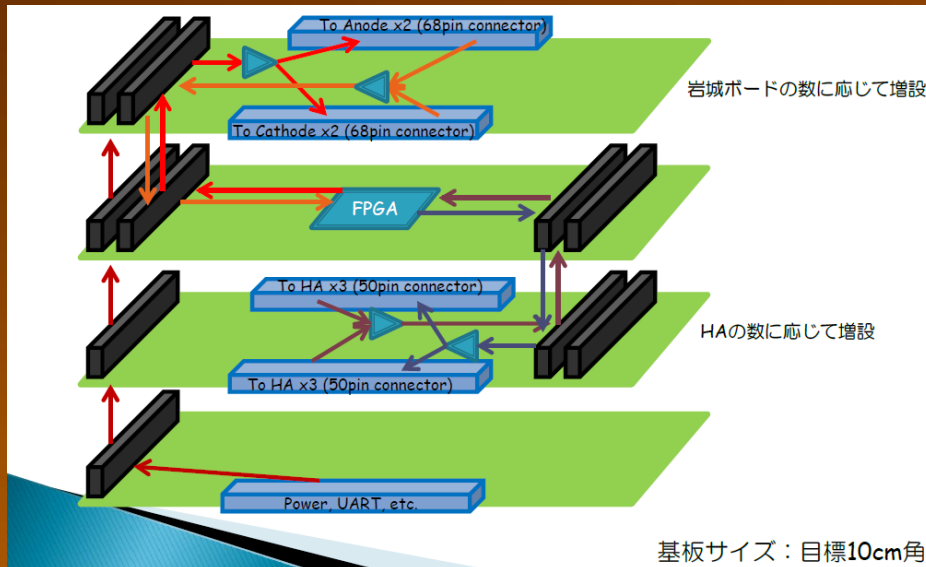
電源基板×1

- TPCとシンチレータからhit (データ有り) 信号を受けたり、trigger、data転送、data消去、veto等の信号を送り、DAQを制御する回路。

- FPGA基板上のethernetコネクタにPCを接続し、PCからDAQスタートなどの指示を送る。

TPC I/O基板 1枚でuPIC読み出し回路4枚

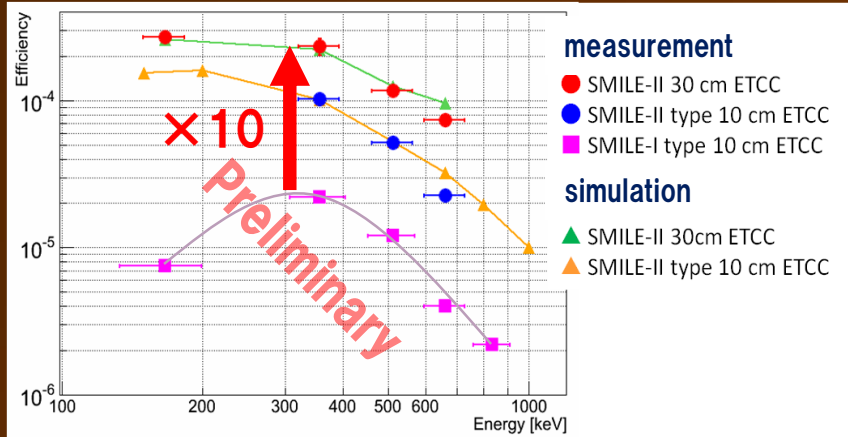
シンチレータI/O基板 1枚でシンチレータ読み出し回路6枚



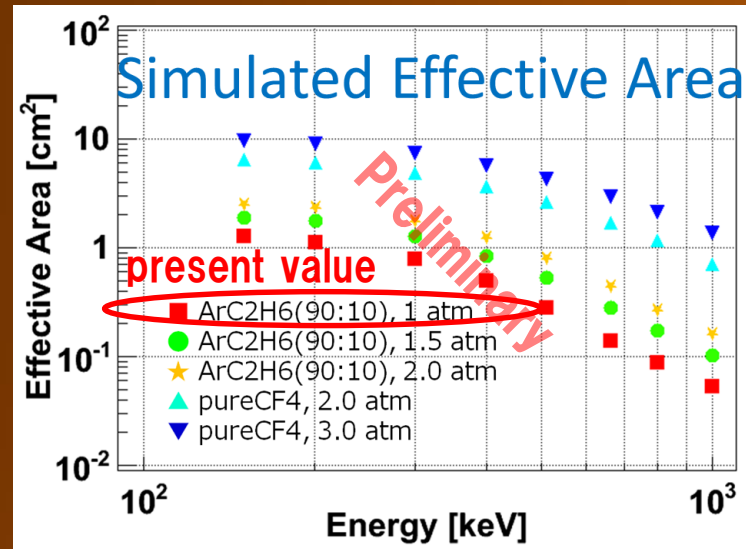
に接続することが可能。多ピンコネクタで基板間の信号、電源のやり取りをし、I/O基板は必要に応じて枚数を増減させることができる。

+3.3Vが電源基板から各基板に配られる構造で基板の枚数が増えると消費電力増で電圧降下がり、動作不安定になる→電源基板の改良など

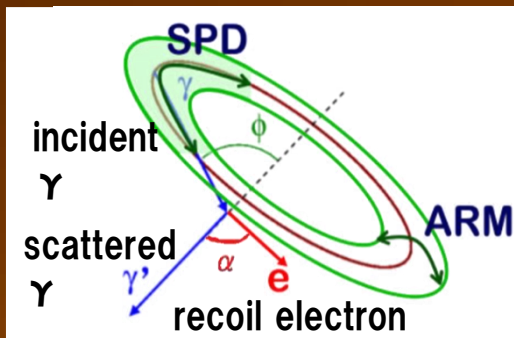
# Performances of SMILE-II FM ETCC



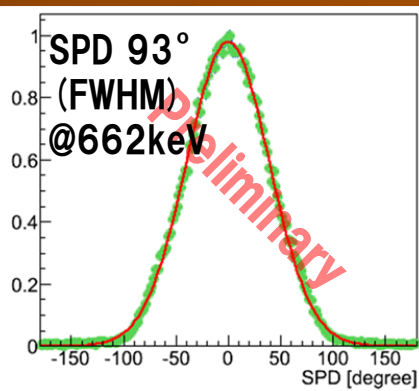
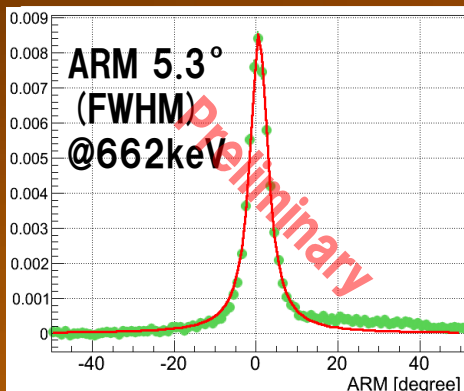
飛跡取得アルゴリズムの変更によりコンプトン散乱イベントの取りこぼしが無くなったので、検出効率のシミュレーション値と実験値が合うようになった。



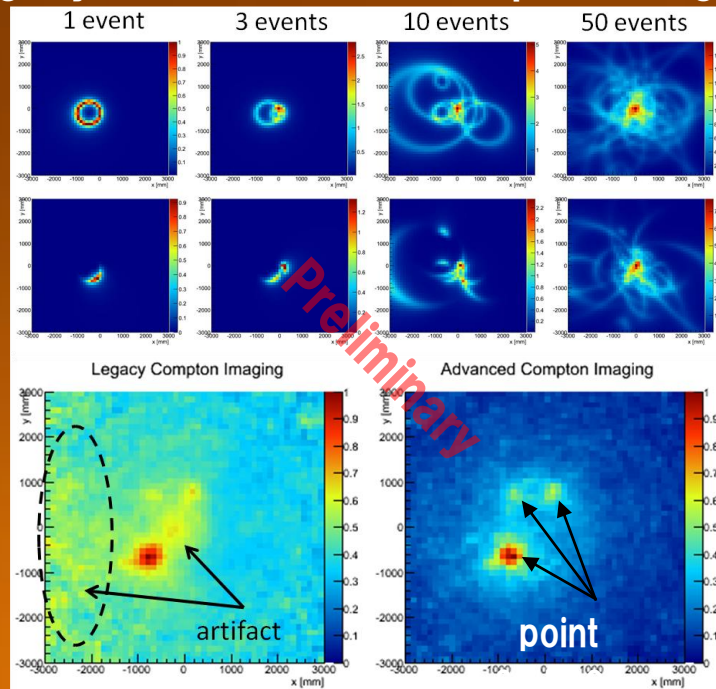
ガスの検討により有効面積 10cm<sup>2</sup>  
→ COMPTTELの感度に到達



ARM : 散乱角の決定精度  
SPD : 散乱平面の決定精度



## Legacy and Advanced Compton Imaging



# 今後の課題1: VMEを無くす方向へ

## μPIC読み出し回路

読み出し回路のSiTCPを利用し、データをTPC通信でVME memory boardを介さずにPCに送るように修正したい(現状SiTCPはDAC設定値をPCから回路に送信するときのみ使用)。

- ・高速でデータが送れるように100MbpsからGbps対応のPHYに変更
- ・VME memory boardへデータを送る必要なくなるので68chコネクタを無くす。

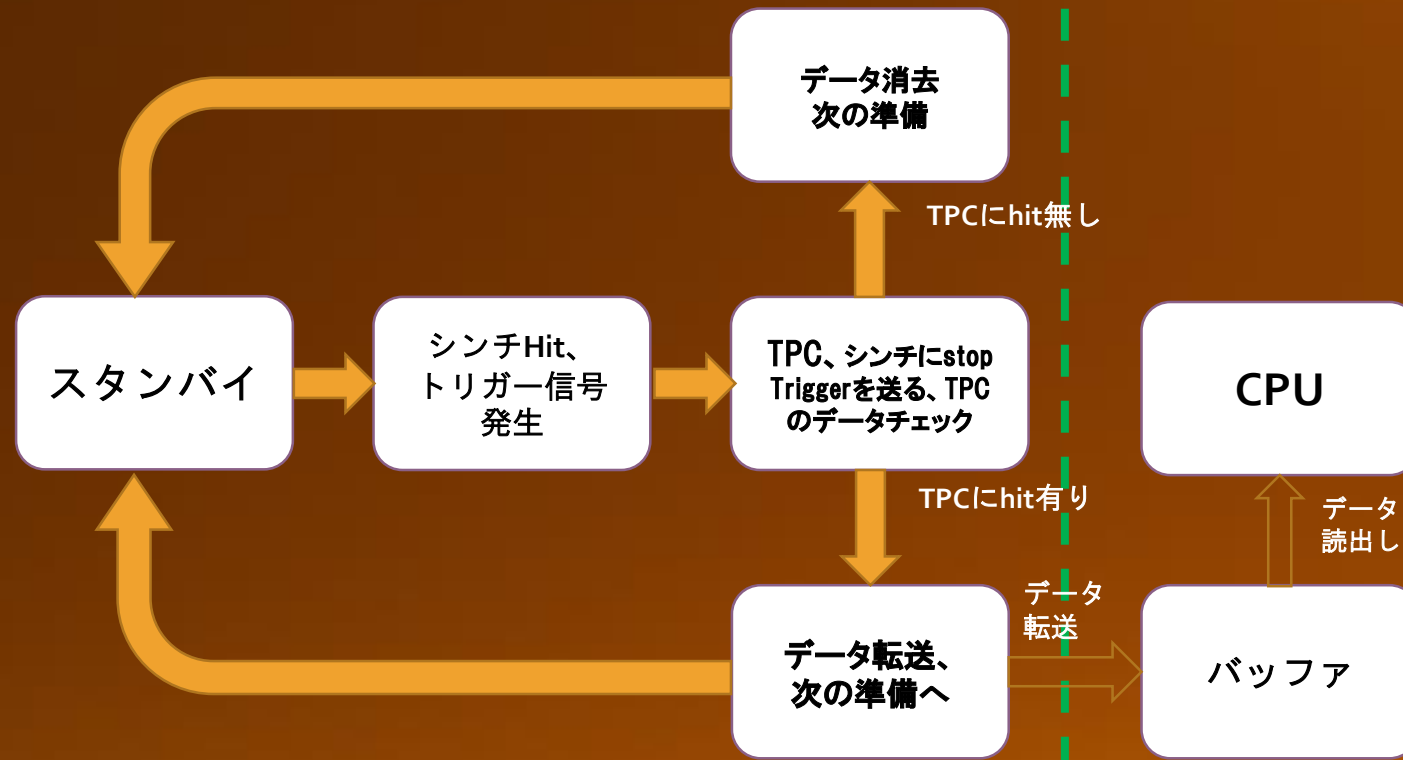
## シンチレーションカメラの読み出し回路

- ・PMTの高電圧が消費電力大
- ・消費電力が小さく、コンパクトなMPPCの使用の検討、読み出し回路の開発(データ取得にVMEを使用しない)。

VMEを無くせば大幅なコンパクト化が実現できる。

# 今後の課題2: 新ETCC DAQ -TPC trigger mode-

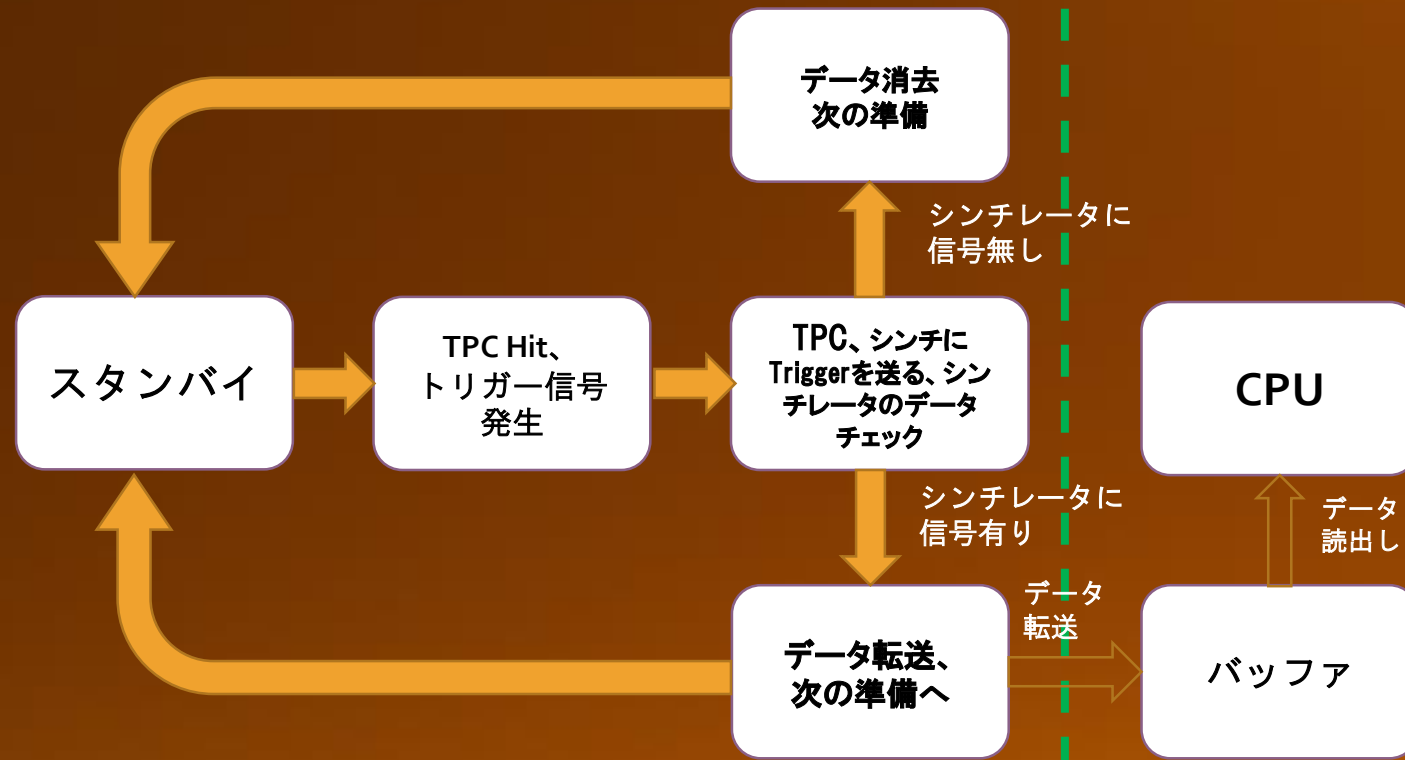
現在のETCC DAQ mode



・シンチレータにhitがあって、TPCにhitがないイベントがほとんど。シンチレータのhit検出からデータを消去して次にスタンバイ状態になるまでの処理時間 (20  $\mu$  sec/event) とそのイベント数でdead timeをほとんど説明できてしまう。

# 今後の課題2: 新ETCC DAQ -TPC trigger mode-

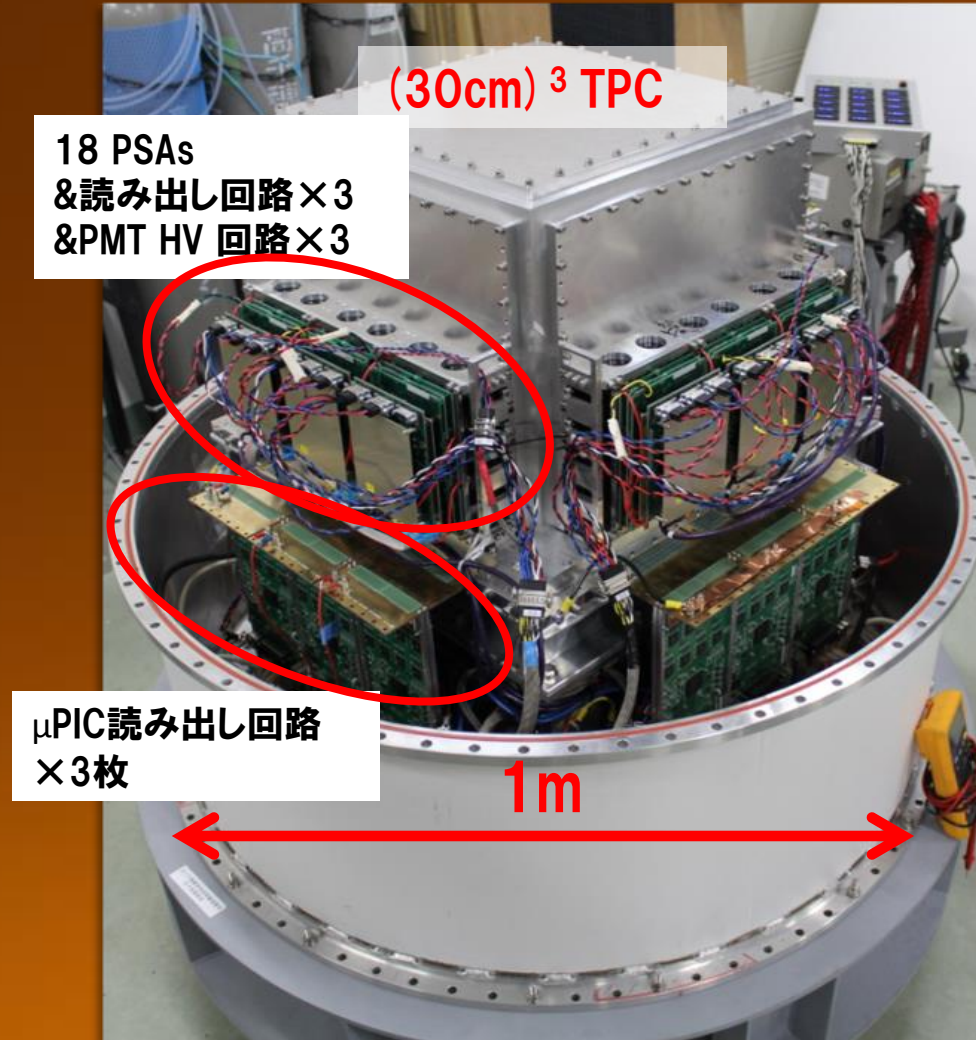
## 新ETCC DAQ mode



- ・シンチレータに比べてhitレートが圧倒的に少ないTPCでトリガーを発生し、シンチレータのデータがあるか見るようにすればdead timeの大幅な削減が見込める。
- ・シンチレータの信号の有無を後で確認するために波形データを一定時間保持する必要があるが、現状の読み出し回路では不可能。また、TCUのFPGAコードの修正、TPCの飛跡のz座標の導出方法の検討が必要。SMILE-Iのシンチレータ用preamp、VME flashADC等を使用し、TCUを使わずNIMモジュールのgate generator等を組み合わせてDAQを構築し動作実証してみる。

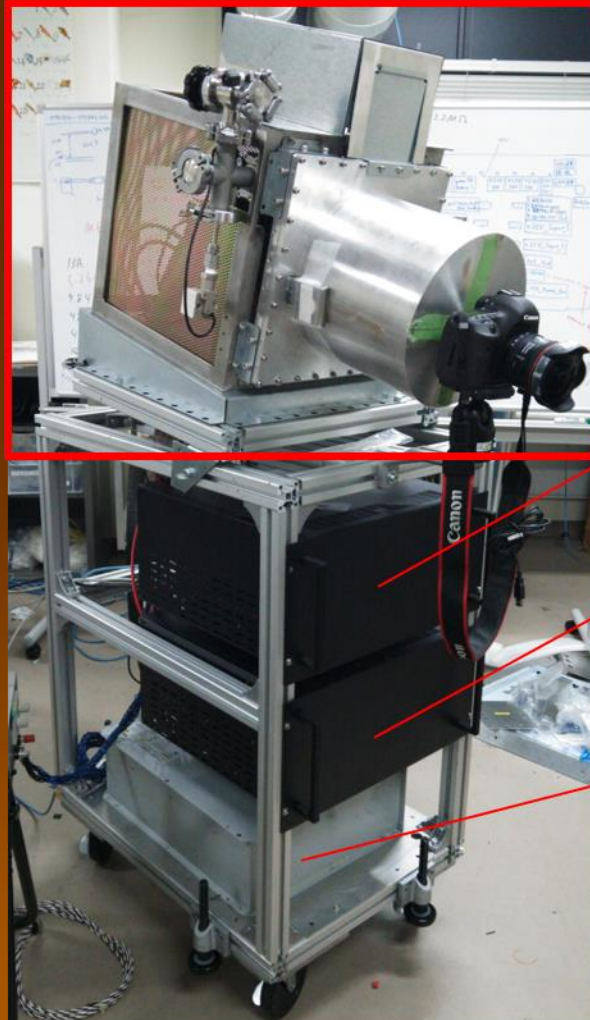
# PMT高圧制御回路、 $\mu$ PIC読み出し回路 使用例 (SMILE-II FM ETCC)

## SMILE-II FM用ETCC



# PMT高圧制御回路、 $\mu$ PIC読み出し回路 使用例 (環境ガンマ線測定用ETCC)

ETCCを外に持ち出して環境ガンマ線測定ができるようにSMILE-II実験用に開発してきた電源を流用し、環境ガンマ測定専用の可搬なETCCシステムを開発



~1.7m

ETCC、信号読み出し回路

VME、データ収集制御回路

DC/DCコンバータ  
( $\pm 12$  V、 $+6.6$  V、 $+3.3$  V、 $\pm 2.5$  V)

Li-Poly充電電池  
(25 V、100 Ah)

- ・重さ ~ 100 kg
  - ・消費電力 ~ 100W
- 1回の充電でおよそ1日動作可能



# まとめ

• MeV  $\gamma$  線天体観測気球実験SMILE-IIIに向けて電子飛跡検出型コンプトンカメラ (ETCC) のコンパクトな回路、新データ取得システムの開発を行ってきた。

• シンチレーションカメラ (散乱  $\gamma$  線検出部)

PMT高電圧供給回路

コンパクトな読み出し回路の使用

•  $\mu$ -TPC (コンプトン散乱体&反跳電子検出器)

$\mu$ PIC信号読み出し回路

• ETCCのデータ取得システムとtrigger制御回路 (TCU)

これらの開発により、SMILE-I ETCC DAQシステムと比べて小型、コンパクト化を実現、飛跡取得アルゴリズムの変更により、検出器の性能の大幅な向上が実現。

検出器性能: Y. Mizumura et al. JINST 2014, Y. Matsuoka et al., JINST 2015, T. Tanimori et al. ApJ accepted [arXiv:1507.03850v1] など

ハードウェア・DAQ: K. Ueno et al. JINST 2012, および近日submit予定

• ETCCの新データ取得方法の検証、シンチレータの検出器としてMPPCの使用・読み出し回路開発、 $\mu$ PIC読み出し回路からethernetでVMEを使わずデータを読み出すシステムの構築を目指す。