

SMILE44:長期気球実験に向けた MPPCシンチレーションカメラの 性能評価

京都大学 齋藤要

谷森達,高田淳史,水村好貴,古村翔太郎,岸本哲朗,竹村泰斗,吉川慶,中増勇真,
中村優太,谷口幹幸,小野坂健,阿部光,水本哲矢,園田真也,窪秀利

黒澤俊介（東北大NICHe、山形大理）、身内賢太郎（神戸大理）

澤野達哉（金沢大数物）

目次

開発中のシステムについて

性能評価

- ・ エネルギー分解能
- ・ 時間分解能

温度補償について



次期 長期気球実験 SMILE-3



SMILE-3

南半球 Super Pressure Balloon

観測時間：～1ヶ月

COMPTONの5倍の感度で半球のサーベイ

- ・ 銀河面に広がる ^{26}Al
- ・ 電子陽電子対消滅線の銀河面分布
- ・ GRBの偏光観測 など

求められる性能

- ・ 省電力

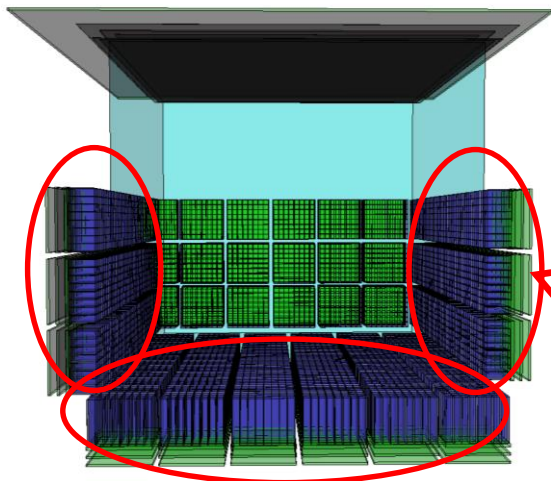
$3.7 \text{ W/PSA} \rightarrow < 0.1 \text{ W/PSA}$

- ・ ゲインの安定性

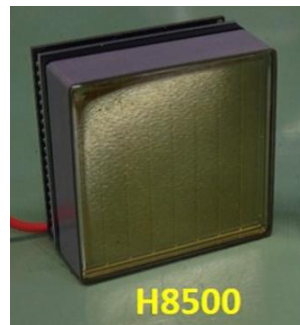
- ・ 広いダイナミックレンジ

$0.2-3 \text{ MeV} \rightarrow 0.3-6 \text{ MeV}$

SMILE-2+



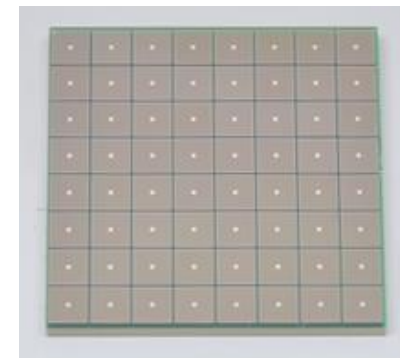
PMT



+
Scintillator
(GSO)

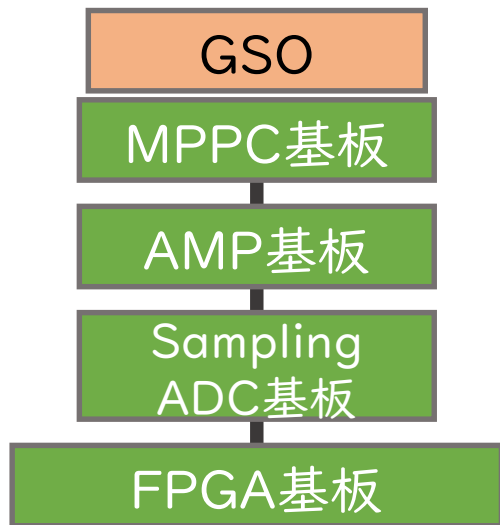
Pixel Scintillator Array

MPPC



- ・ 省電力
- ・ ゲインの安定性

開発の歩み



MPPC & AMP & Peak Hold ADC

$$\Delta E/E \sim 9\% @662 \text{ keV}$$

SMILE-2+ (GSO & PMT & Peak Hold ADC)

$$\Delta E/E \sim 11\% @662 \text{ keV} \text{ (2016.3 JPS 中増講演)}$$

Peak Hold ADC \rightarrow Sampling ADC

TPCトリガーによるデッドタイム削減

(2016.3 JPS 吉川講演)

MPPC & AMP & Sampling ADC & FPGA

$$\Delta E/E \sim 10.7\% @662 \text{ keV}$$

(ADC一部破損) (2017.9 JPS 齋藤講演)

本講演

↓ 修理

MPPC & AMP & Sampling ADC & FPGA

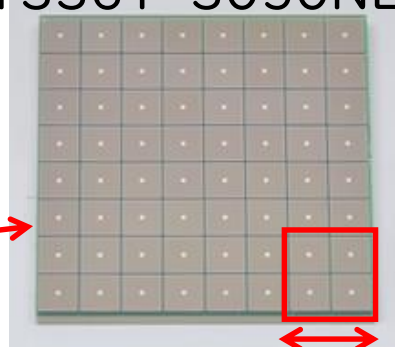
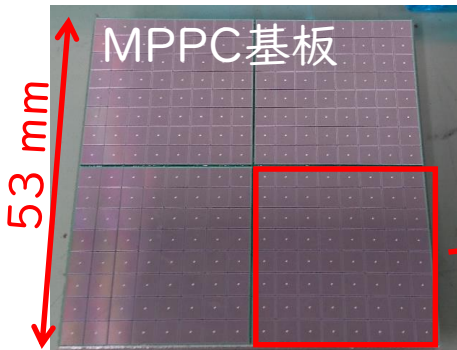
- ・エネルギー分解能
- ・時間分解能
- ・温度補償について



MPPC, AMP, ADC基板



SI 3361-3050NE-08



3584 cells/ch

4ch直列接続 → 1 pixel (6 mm角)

合計64pixelを抵抗分割し
4端読み出し

6 mm

(GSOピクセルサイズと同等)



電荷積分

波形整形

差動増幅

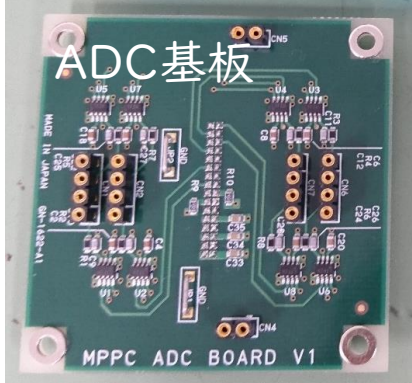
High Gain

Low Gain

× 3.5

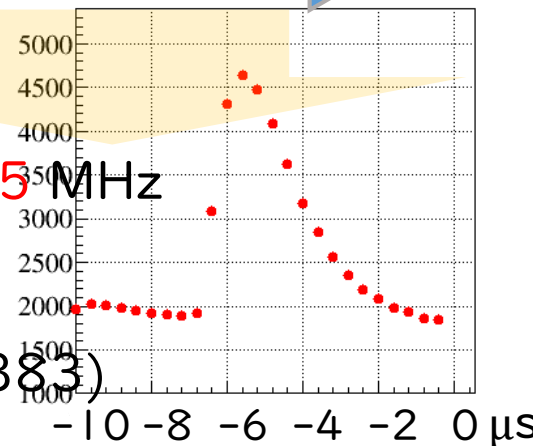
時定数 ~ 6 μ s

ダイナミックレンジの拡大



Sampling ADC

- ・ sampling rate : 2.5 MHz
- ・ 逐次比較型ADC
- ・ 入力 0-4096 mV
- ・ 出力 14bit (0-16383)



低消費電力
LTC2313-14
(2.5 MHz)
25 mW × 8

FPGA基板 (version 3)

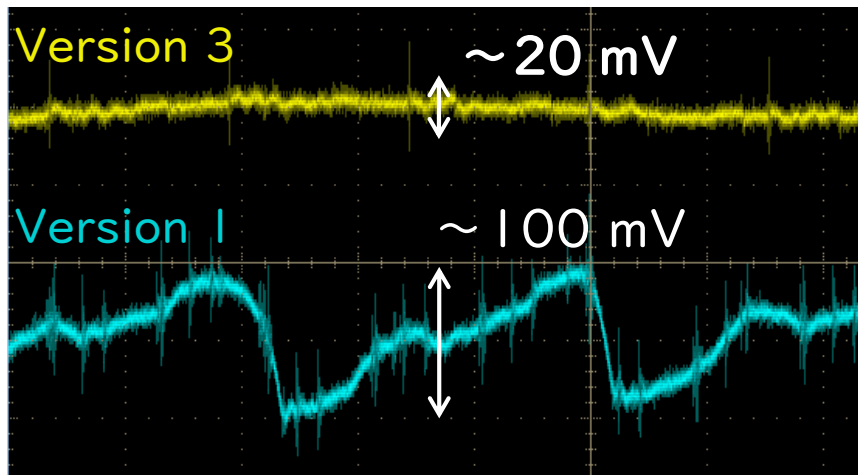
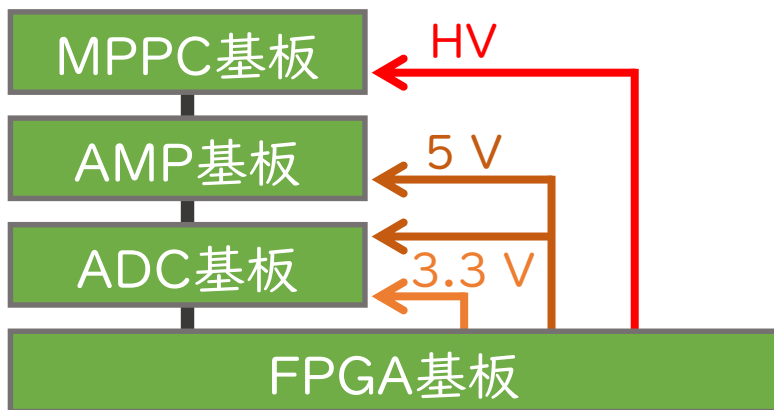
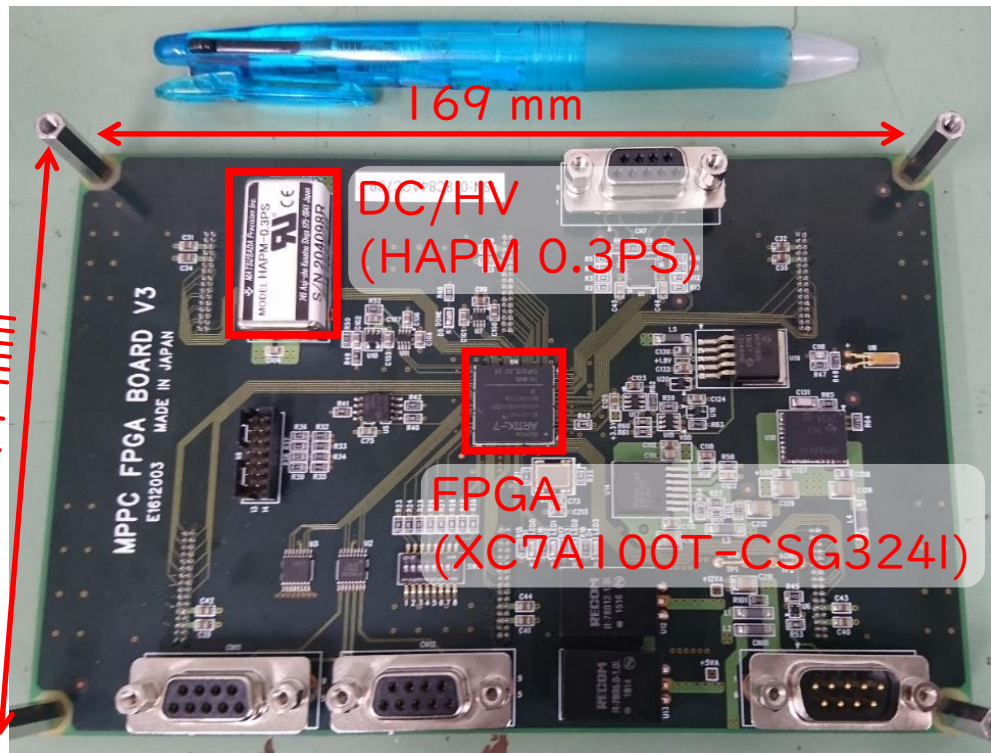


- ①データ収集・通信
- ②回路(ADC)の制御
- ③温度計
- ④各基板へ電源供給

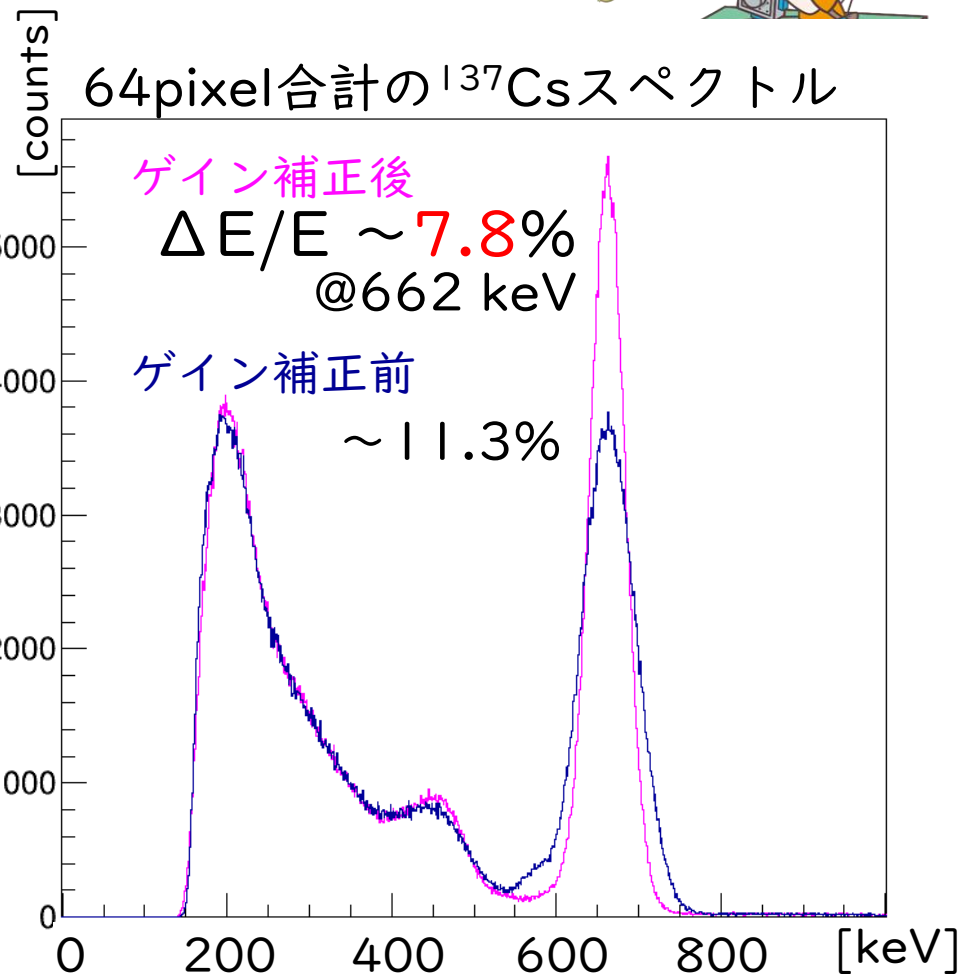
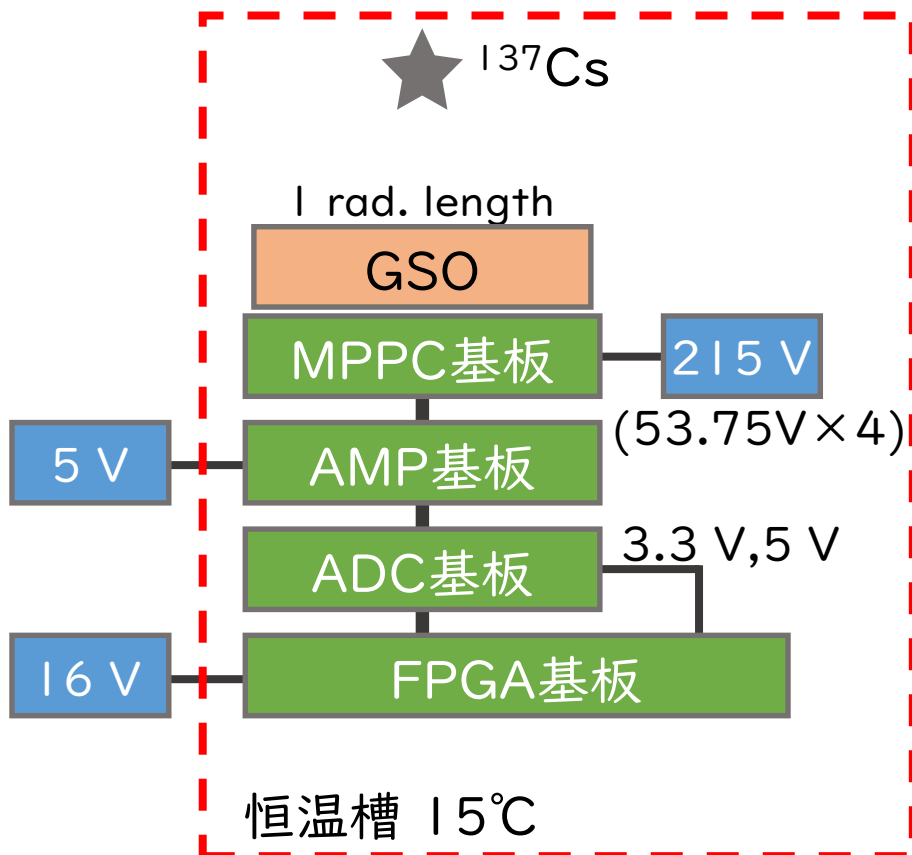
version 1 → 3

低ノイズDC/DCに変更

電源ラインのノイズの低減

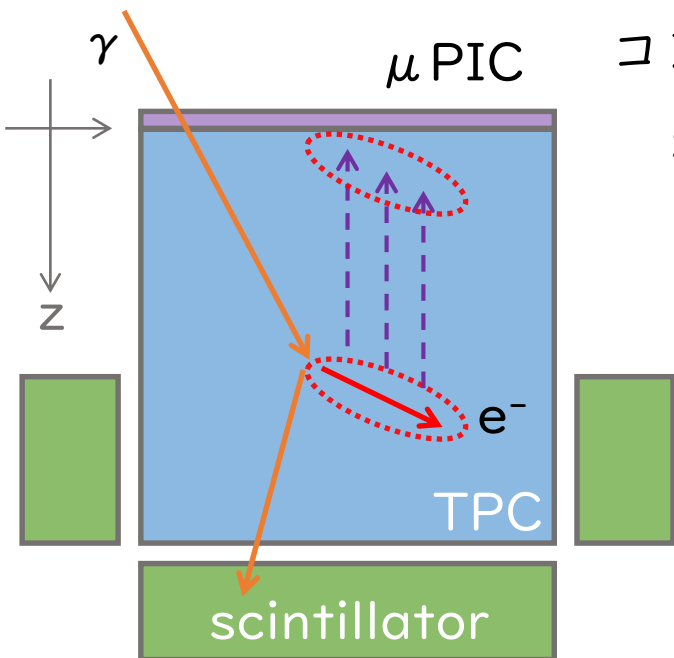


エネルギー分解能



MPPCピクセル間ゲイン補正をすることで
エネルギー分解能 **7.8%** @662 keV

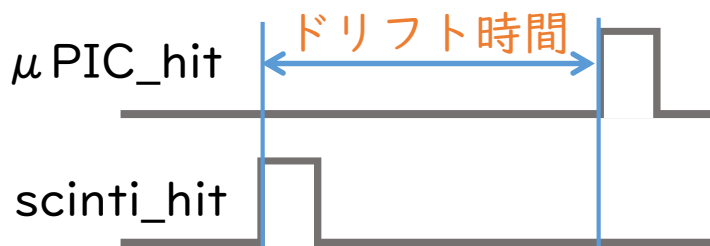
時間分解能について



コンプトン散乱点のz情報

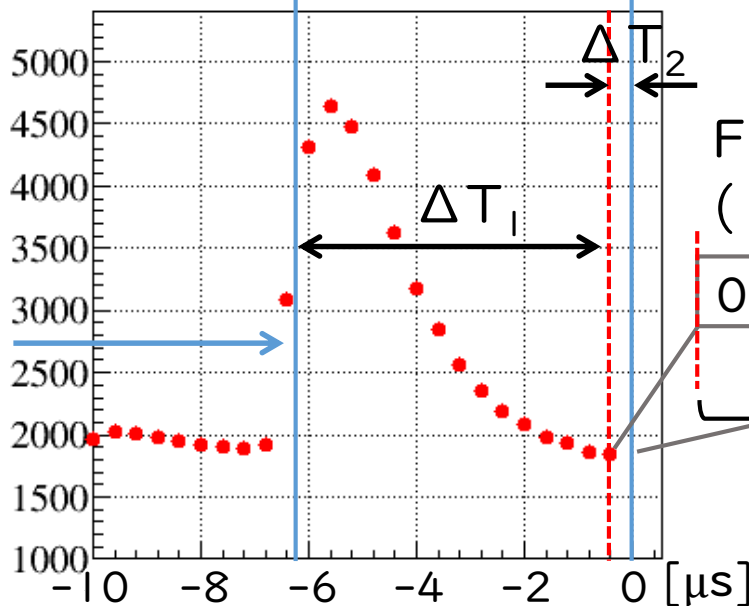
$$z = \text{ドリフト速度} \times \text{ドリフト時間}$$

ADC 2.5 MHz (/400 ns) では粗い

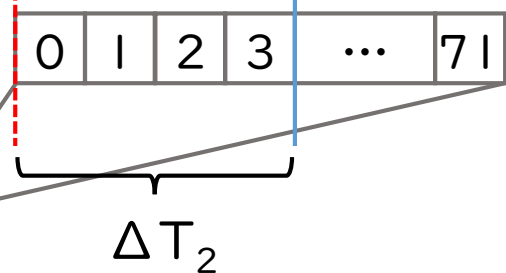


TPCでは
タイミングを
取得できない

波形の立ち上がり時刻を
フィッティングにより求める

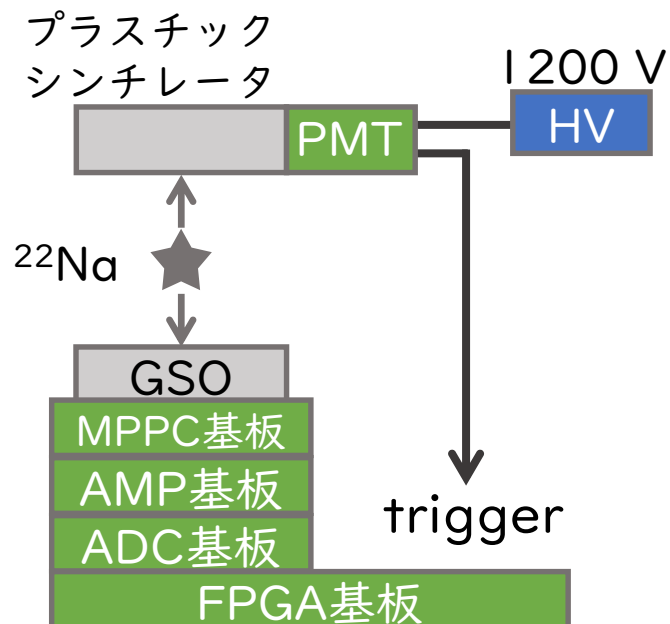


FPGA内クロック
(180 MHz)で計測



時間分解能

電子対消滅線による同時計測

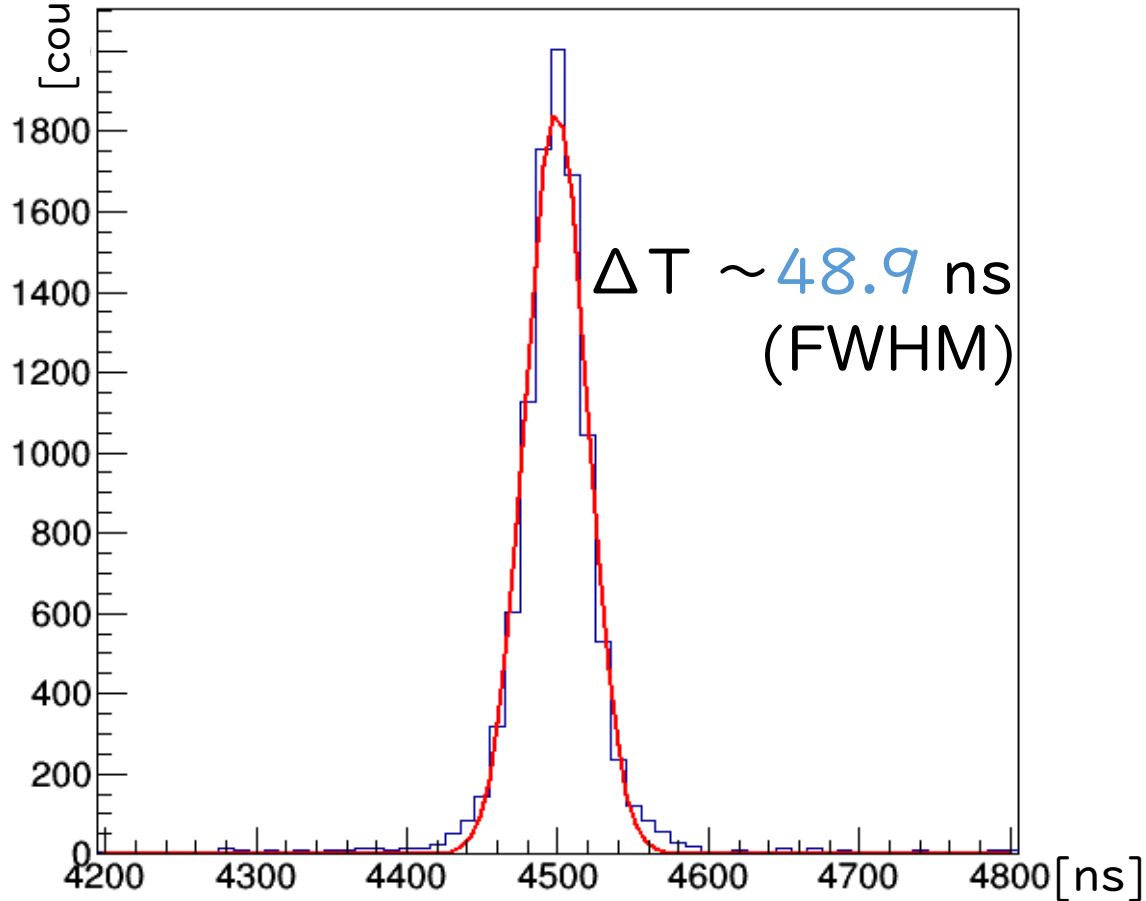


要求値 $\Delta T \sim 20$ ns に対して
約2.5倍の分解能

ADC Sampling rate
2.5 MHz \rightarrow 4.5 MHz
への変更を検討



波形のピークからトリガー入力までの時間



消費電力

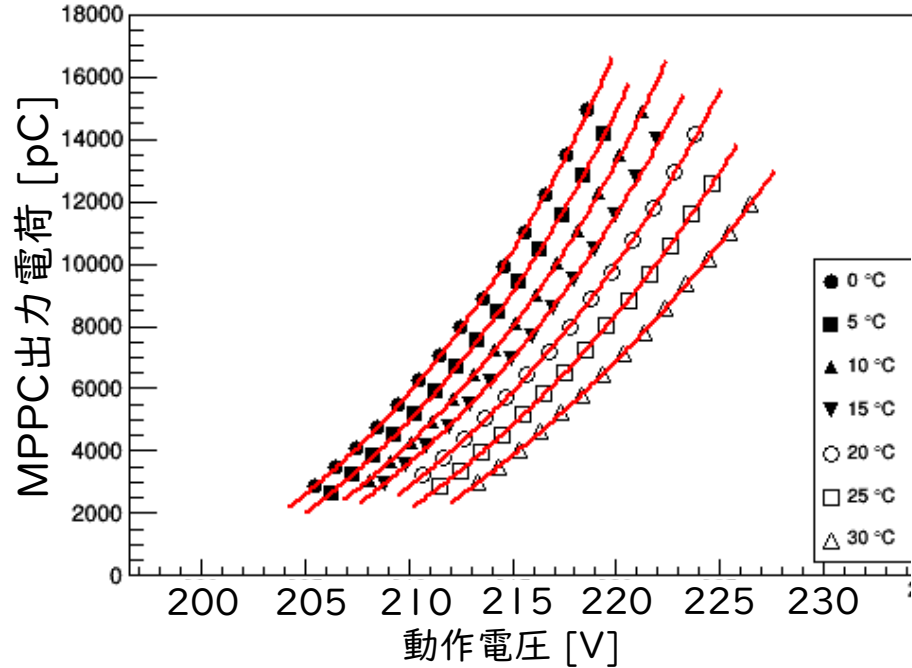
LTC2313-14 (2.5 MHz)

25 mW \times 8

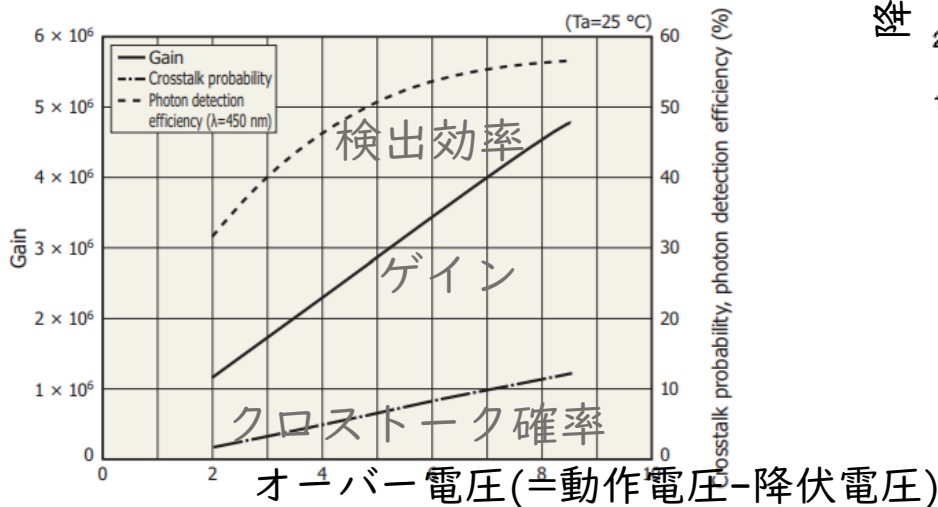
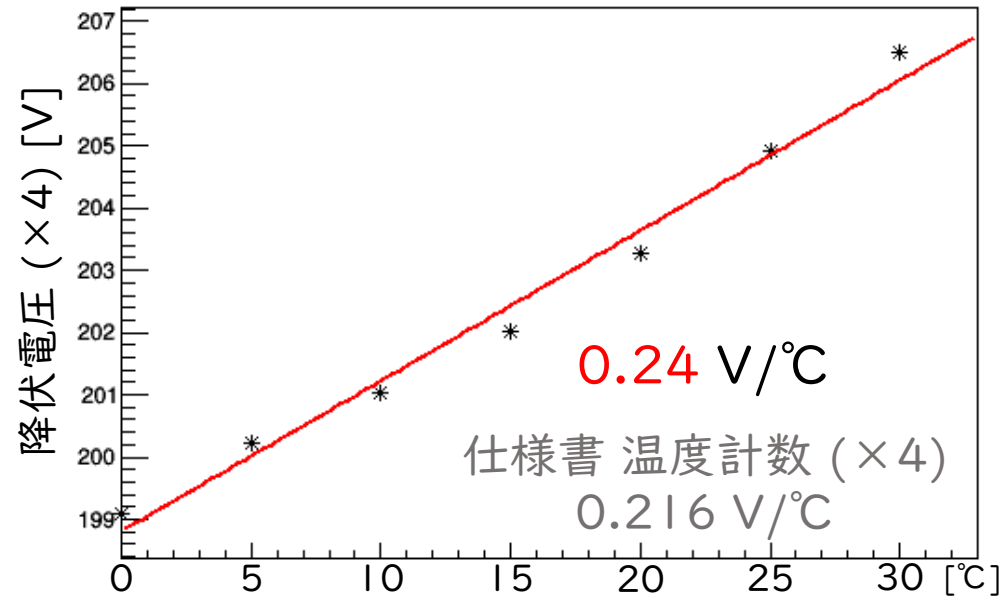
LTC2314-14 (4.5 MHz)

31 mW \times 8

温度補償について

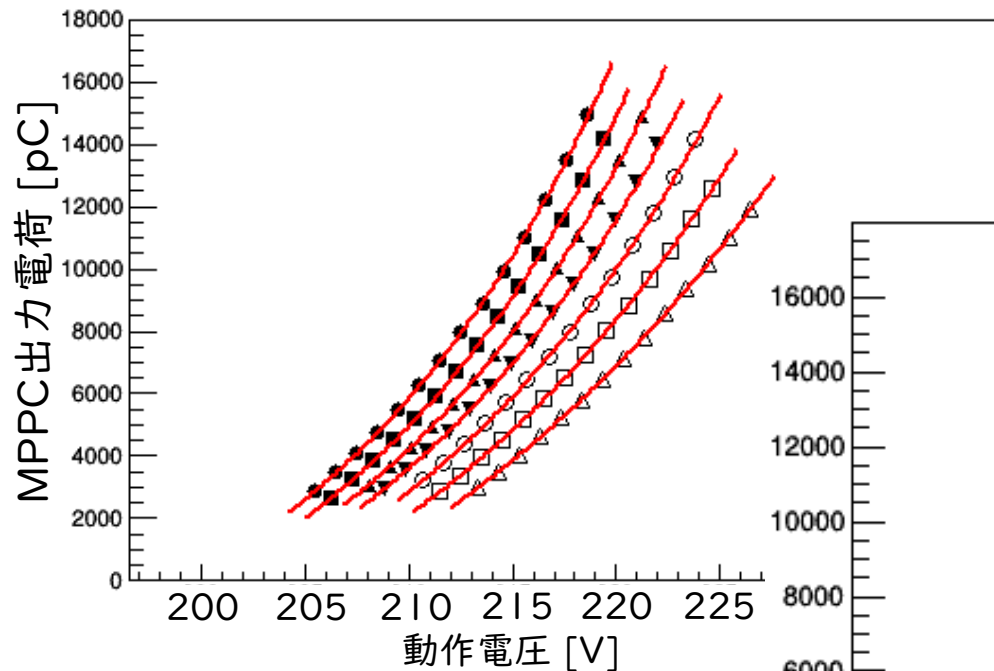


降伏電圧の温度変化

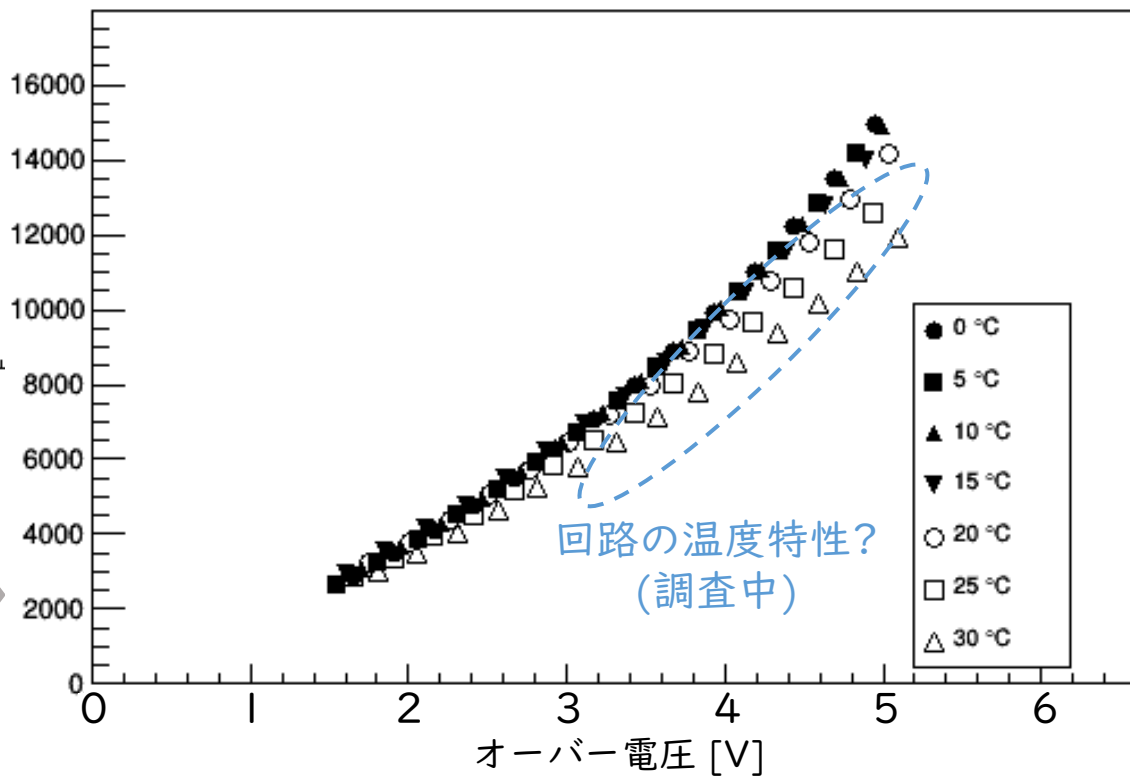


動作電圧を0.24 V/°Cで変化させる
→ **オーバー電圧を一定に保てる**

温度補償について



オーバー電圧に変換



オーバー電圧を一定に保つように温度に応じて動作電圧を変化させることで温度特性を打ち消すことができると思われる

まとめと今後



次期計画:長期気球実験 SMILE-3 に向けて
MPPCシンチレーションカメラの開発を進めている

(GSO + MPPC) ピクセル間ゲイン補正により
エネルギー分解能 **7.8%** @662 keV にまで向上

時間分解能 要求値 20 nsに対して **~50 ns**
→2.5 MHzから4.5 MHzへ変更を検討

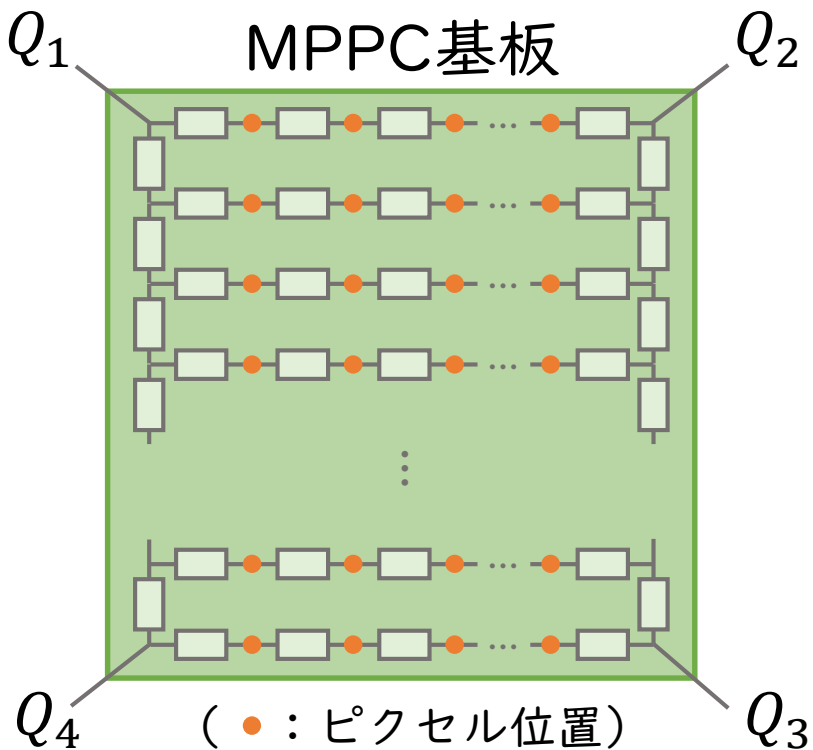
MPPCの温度補償

→FPGA基板に搭載の温度計とDC/HVを用いて
オーバー電圧を一定に保つことで
MPPCの温度特性を打ち消す

0.24 V/°C



MPPC ゲイン補正①

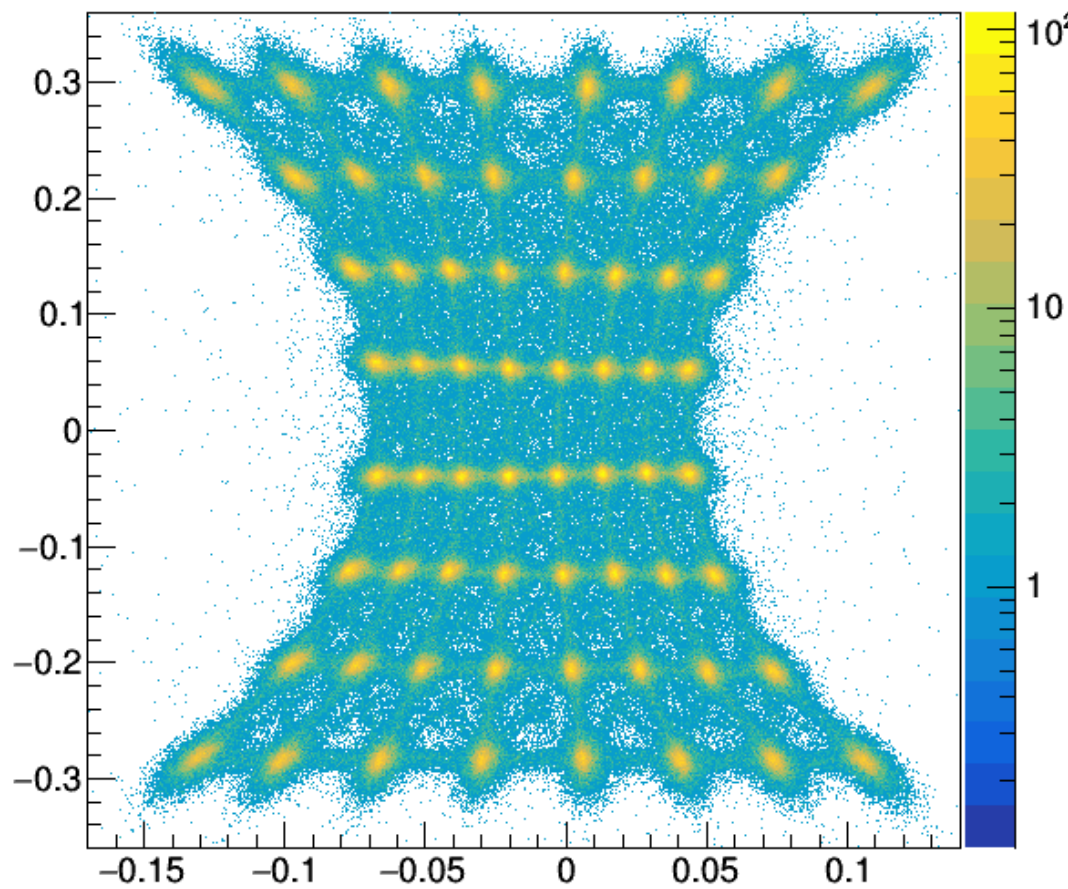


電荷重心座標

$$x = \frac{Q_2 + Q_3 - (Q_1 + Q_2)}{Q_{\text{total}}}$$

$$y = \frac{Q_1 + Q_2 - (Q_3 + Q_4)}{Q_{\text{total}}}$$

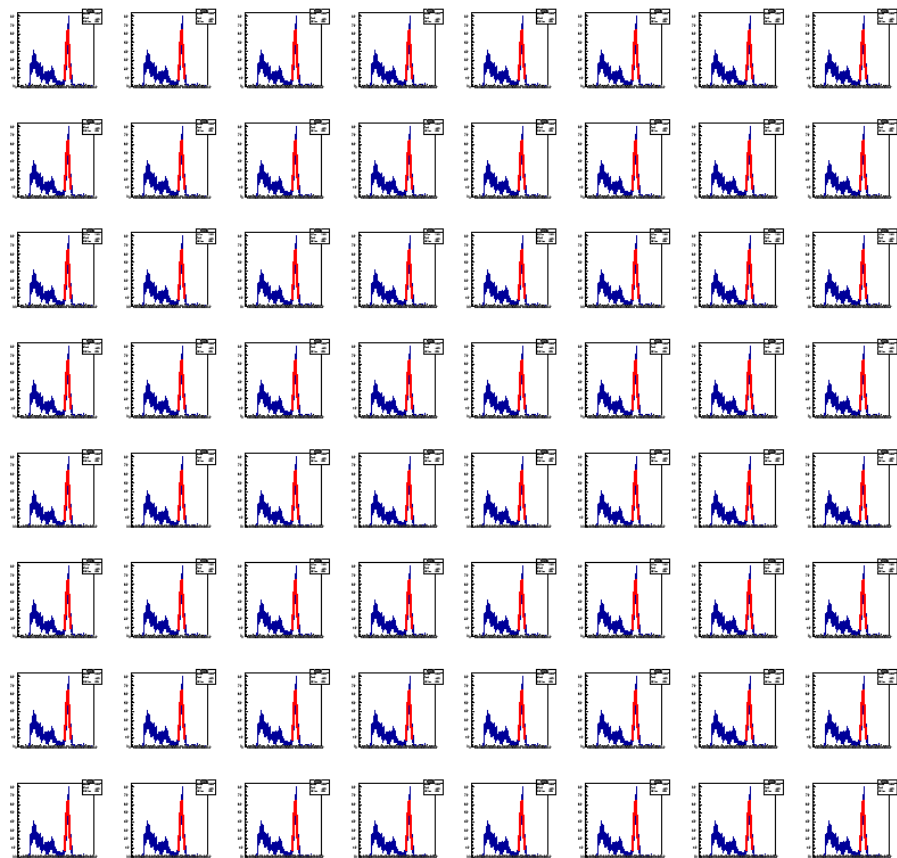
電荷重心マップ



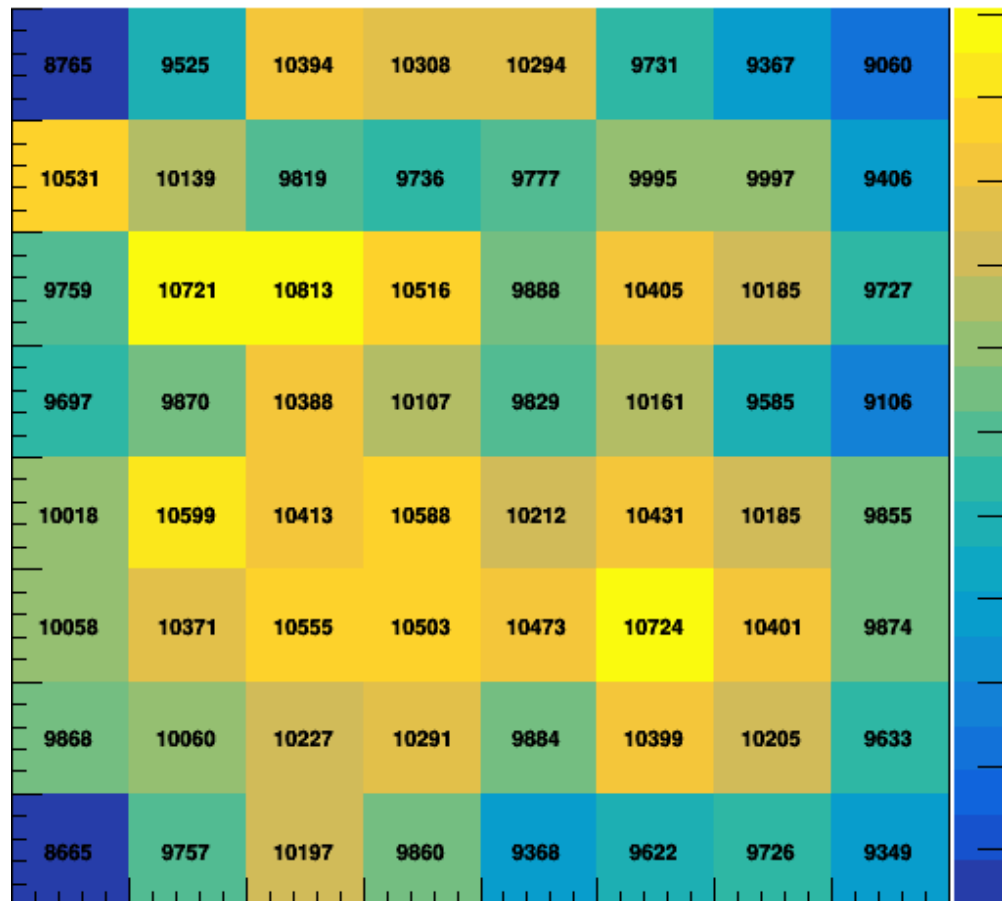
MPPC ゲイン補正②



^{137}Cs スペクトル



ゲイン(相対値)のばらつき

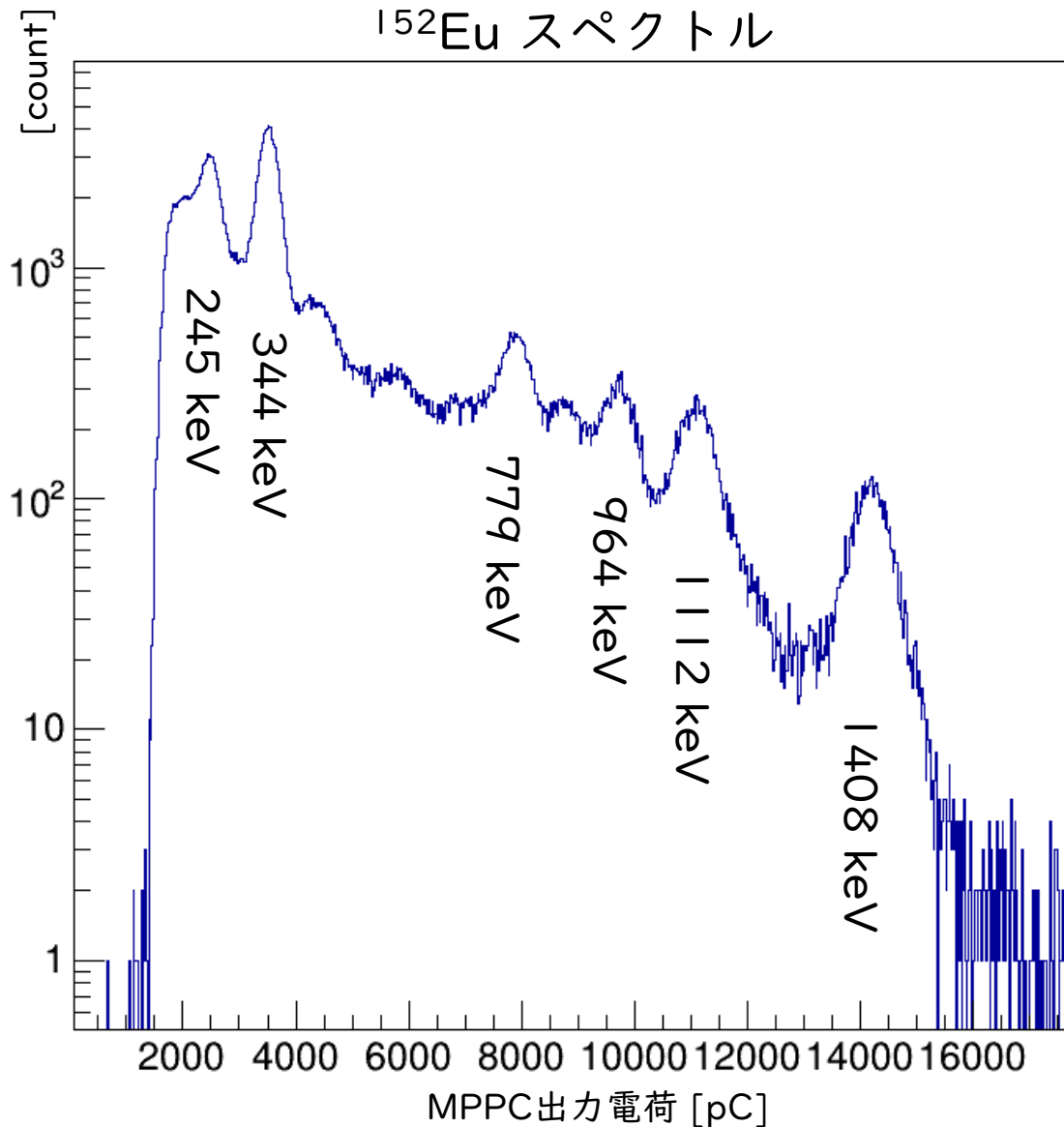


基準：10000

ダイナミックレンジ①

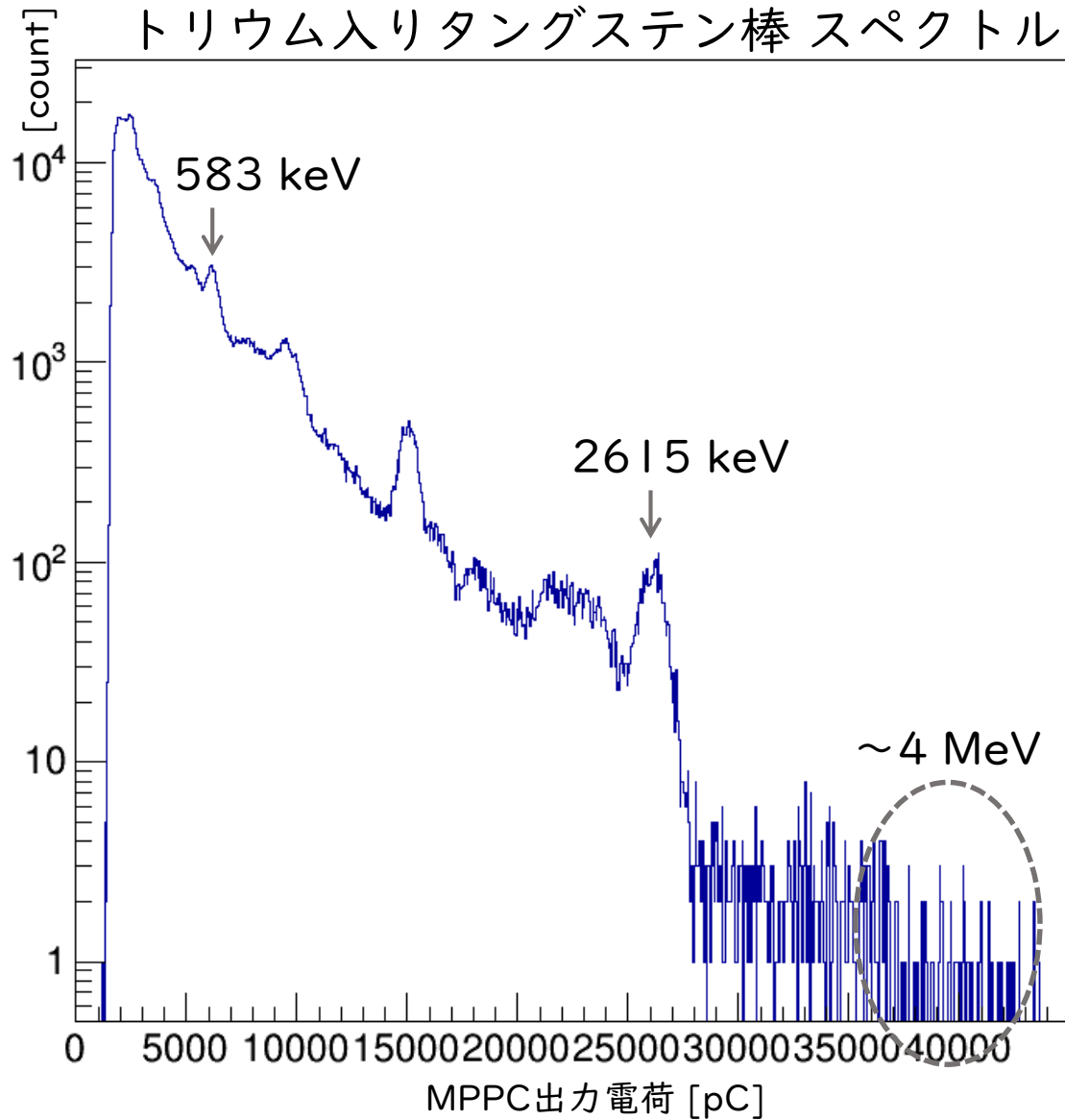


^{152}Eu スペクトル



温度 15°C
HV 215 V

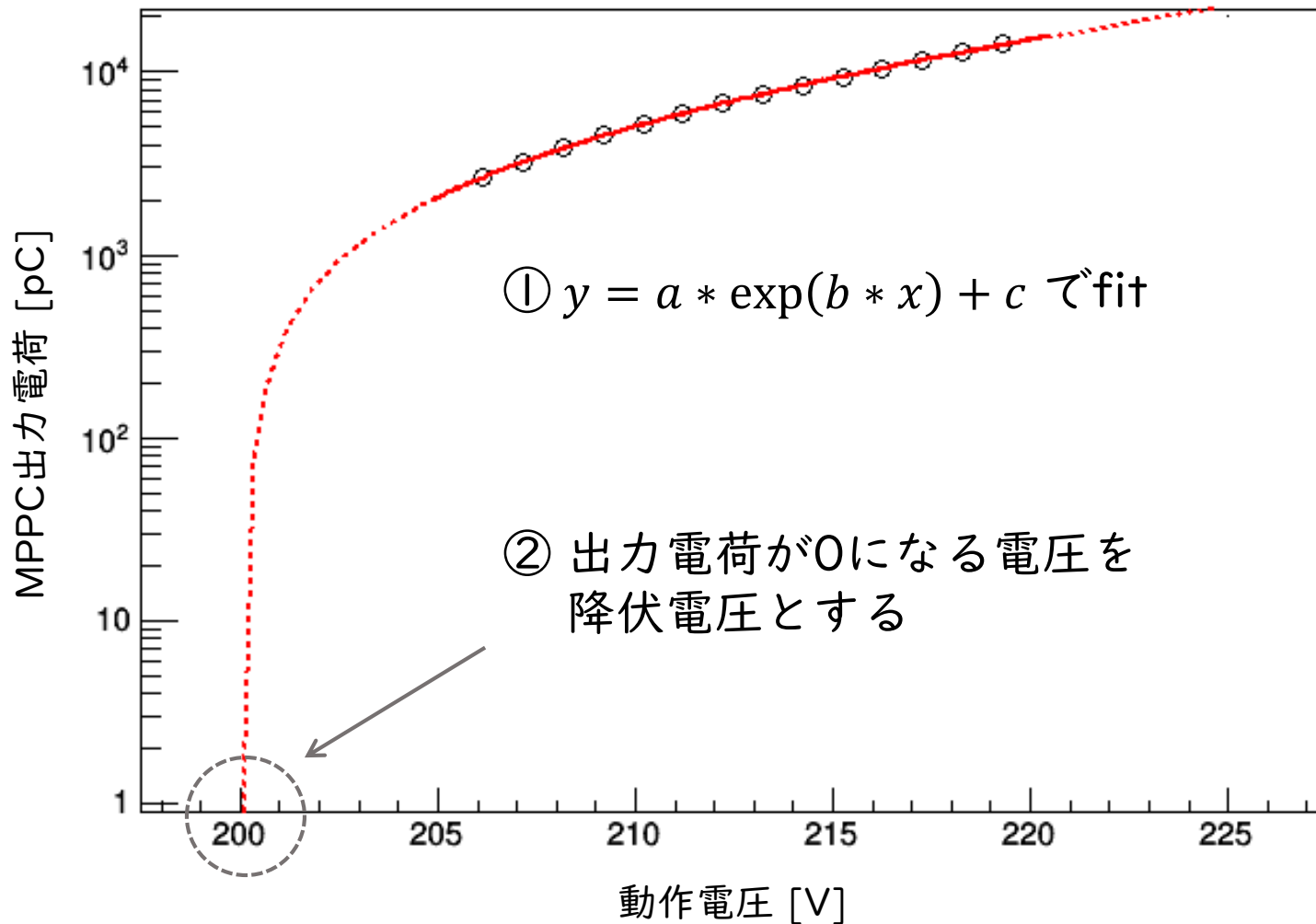
ダイナミックレンジ②

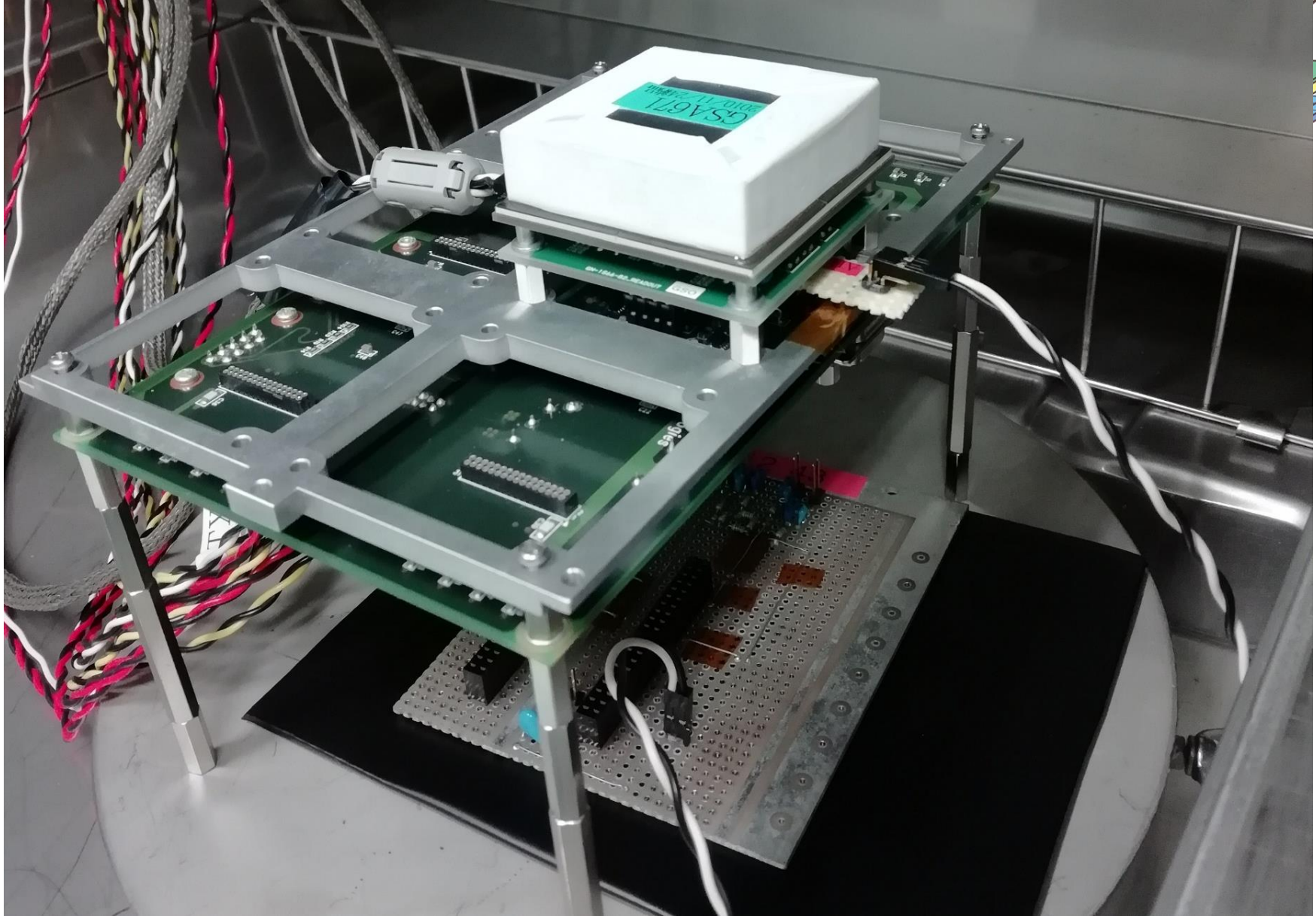


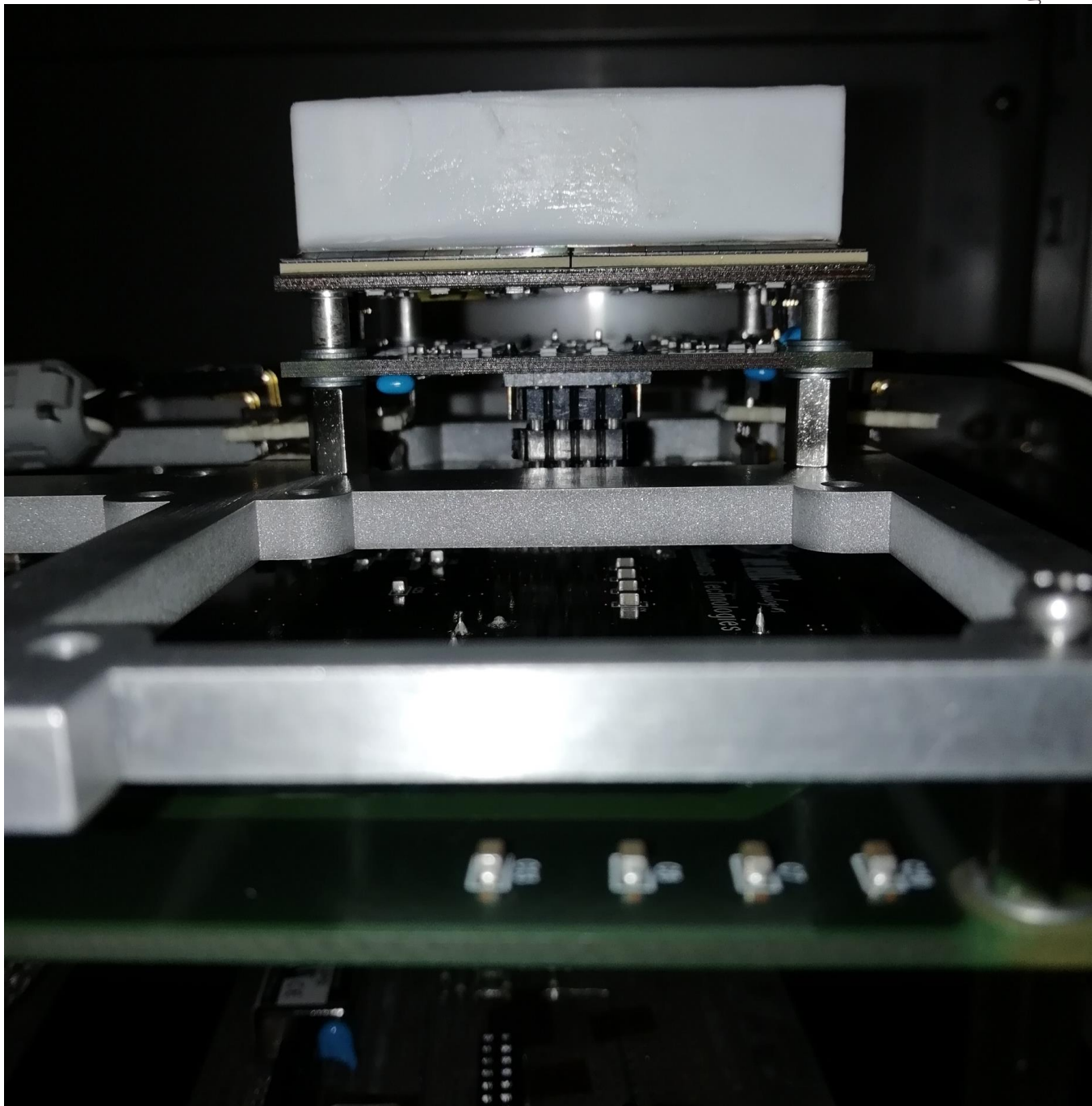
降伏電圧の測定



^{137}Cs 662 keVピークの実出力電荷



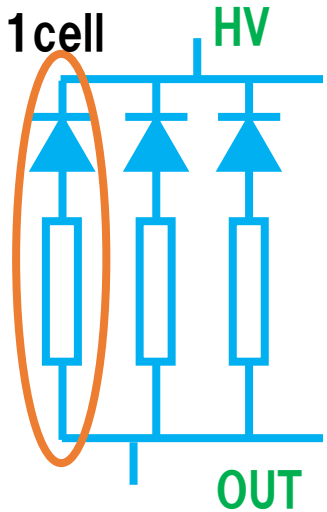




Multi-Pixel Photon Counter



電子雪崩を利用した光子計測半導体素子

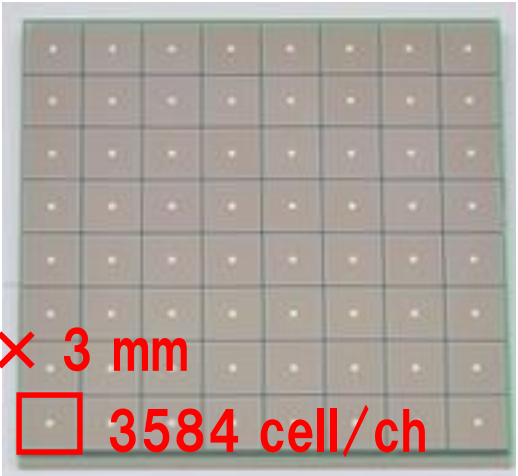


* ガイガーモードAPD
• 入射光子数によらず一定出力
• gain: $\sim 10^6$ 倍

* クエンチング抵抗

s13361-3050NE-08 (25°C)

有感波長領域	320 - 900 nm
光子検出効率	40 %
ゲイン	1.7×10^6
端子間容量	320 pF
降伏電圧 (V_{BD})	53 ± 5 V
推奨動作電圧	$V_{BD} + 3$ V



3 × 3 mm

3584 cell/ch