

2008年度P6発表会

# 新型半導体検出器MPPCによる 放射線測定

2009年3月11日

福間・今野班

# 目次

福  
間

- 実験の目的
- MPPCとシンチレータ、原理と解説

今  
野

- 測定での困難
- 測定結果と考察
- まとめと課題

# 実験の目的

- **MPPC (Multi Pixel Photon Counter)**

最近になって開発された新しい光検出器  
優れたフォトンカウンティング能力  
低電圧で動作  
コンパクト

- **LaBr<sub>3</sub>**

最近になって小さくパッケージできるようになった  
エネルギー分解能の良いシンチレータ

⇒どれほどの分解能が出せるか

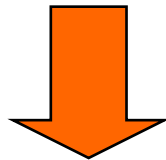
# 実験①

**MPPC (Multi Pixel Photon Counter)**

+

**GSO ( $\text{Gd}_2\text{SiO}_5$ ) (Ce)**

- MPPCの最大感度波長400nmに近い光を出す
- 小型で潮解性がないので扱いやすい



様々な線源の放射線を測定し、  
MPPCの基本的性質や扱いに慣れる

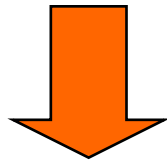
# 実験②

**MPPC (Multi Pixel Photon Counter)**

+

**LaBr<sub>3</sub>(Ce)**

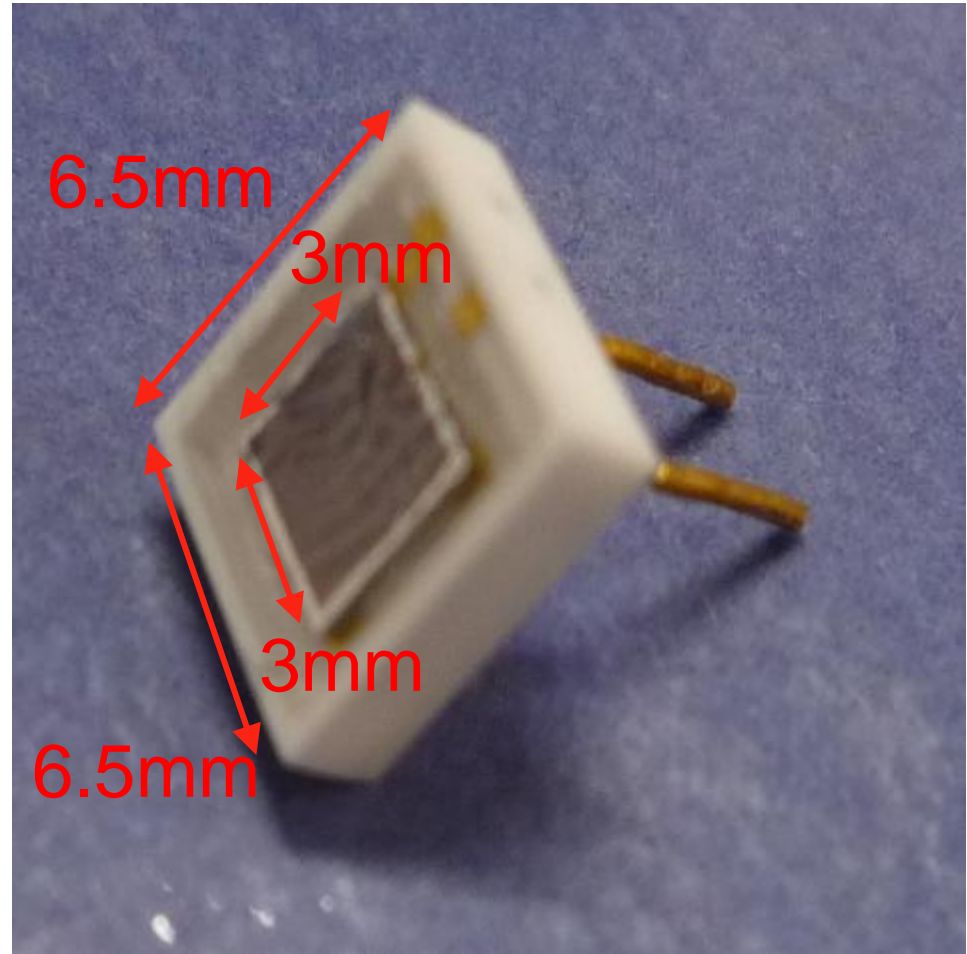
- MPPCの最大感度波長400nmに近い光を出す
- 非常に発光量が多い
- エネルギー分解能が良い



**MPPCとLaBr<sub>3</sub>を組み合わせてガンマ線を測定し、エネルギー分解能を求め、GSO(Ce)とMPPCの組み合わせと比較する。**

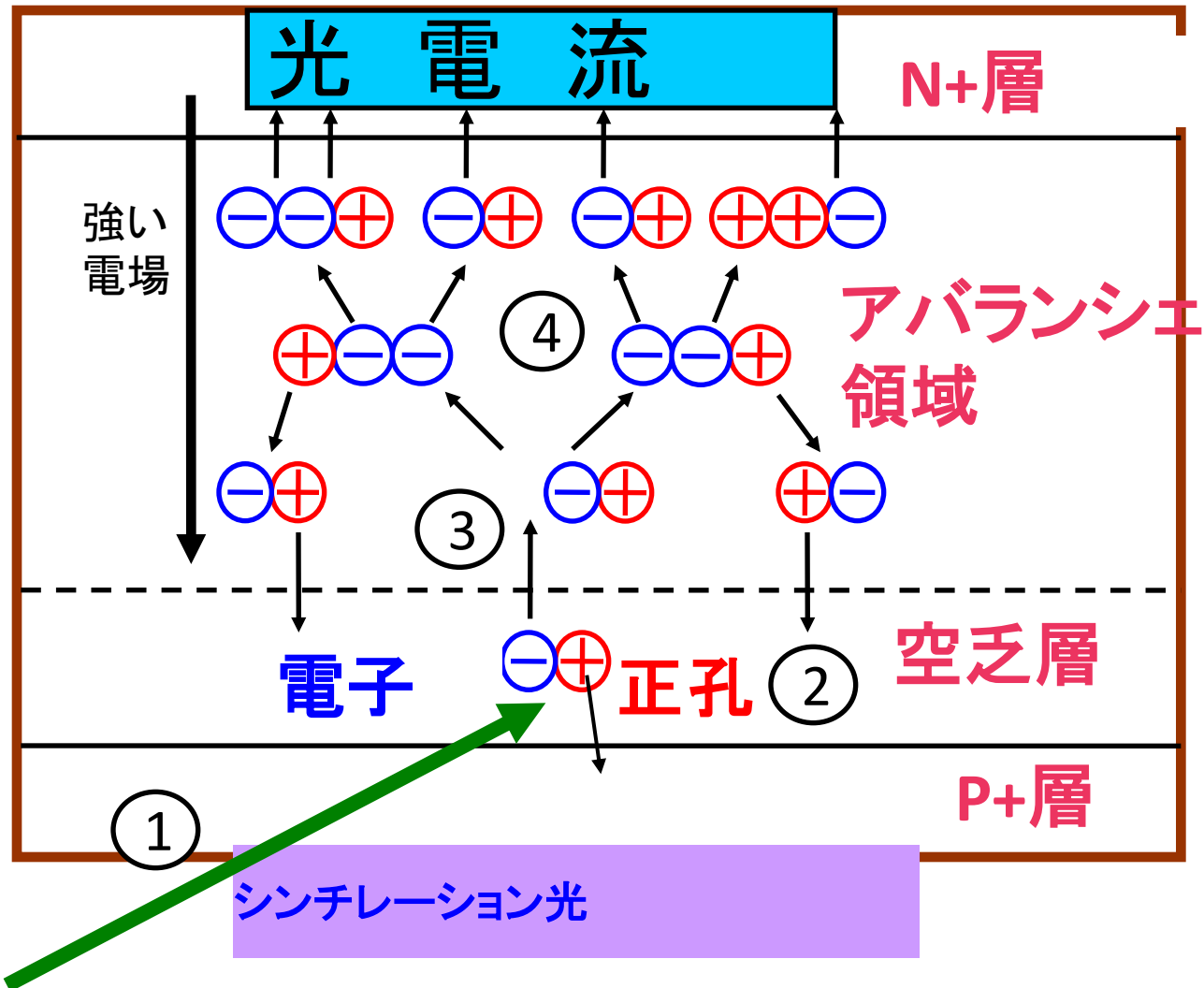
# MPPC (Multi Pixel Photon Counter)

- 多数のAPDピクセルが並列に接続
- APDはガイガーモードで動作
- 各ピクセルの出力の和で光子数を測定



# 1ピクセル (APD) の動作原理

- 可視光入射①
- 電子・正孔対の生成②
- 電場により加速され、他の束縛電子と激しく衝突③
- **なだれ増幅④**



# APD の2つのモード

## 1. ノーマルモード

- $V_i < V_{bd}$
- ゲイン  $< 100$
- 電荷量

→ 光子数に比例

$V_i$  : 逆電圧

$V_{bd}$  : ブレイクダウン電圧

C : 各APDピクセルの容量 ( $\sim 90\text{fF}$ )

## 2. ガイガーモード

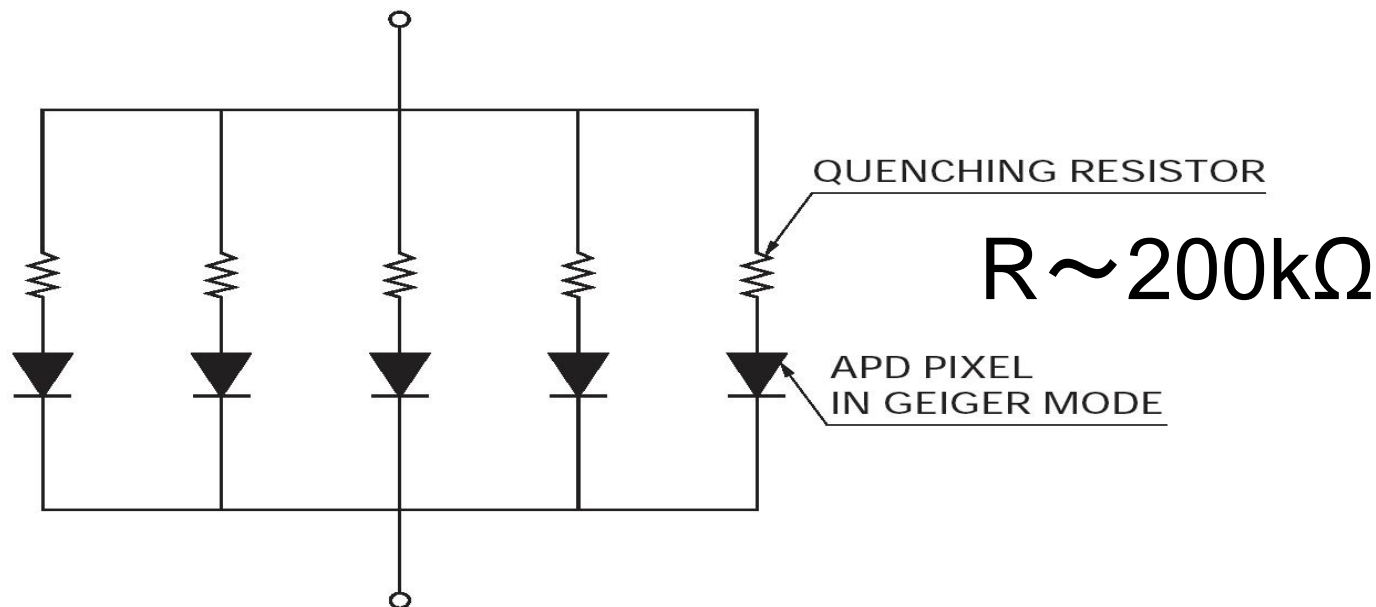
- $V_i \geq V_{bd}$
- ゲイン  $\sim 10^6$
- 電荷量 Q

→  $C(V_i - V_{bd})$

← 光子数に無関係



# MPPCの構造



出力 : シグナルの総和  
励起ピクセル数  $N_{\text{fired}}$  に  $Q$  をかけた値

$$Q_{\text{total}} = N_{\text{fired}} \times Q$$

$$Q_{\text{total}} \propto N_{\text{fired}} \propto \text{入射光子数}$$

# 使用したMPPC

型番の異なる2種類のMPPC(浜松ホトニクス社製)を使用

型番	S10362-33-050C	S10362-33-025C
ピクセル数	3600	14400
ピクセルサイズ	50 $\mu$ m $\times$ 50 $\mu$ m	25 $\mu$ m $\times$ 25 $\mu$ m
最大感度波長(nm)	400	
有効受光面サイズ	3mm $\times$ 3mm	
ブレイクダウン 電圧 (V)	68.79 (at 25 $^{\circ}$ C)	69.07 (at 10 $^{\circ}$ C)
ゲイン	$7.48 \times 10^5$ (at 25 $^{\circ}$ C)	$2.75 \times 10^5$ (at 10 $^{\circ}$ C)

# 検出効率 (PDE)

$$\text{検出効率} = \text{量子効率} \times \text{開口率} \times \text{励起確率}$$

## 量子効率

1光子に対して何%の確率で電子正孔対が出来るか  
(70% at 400nm)

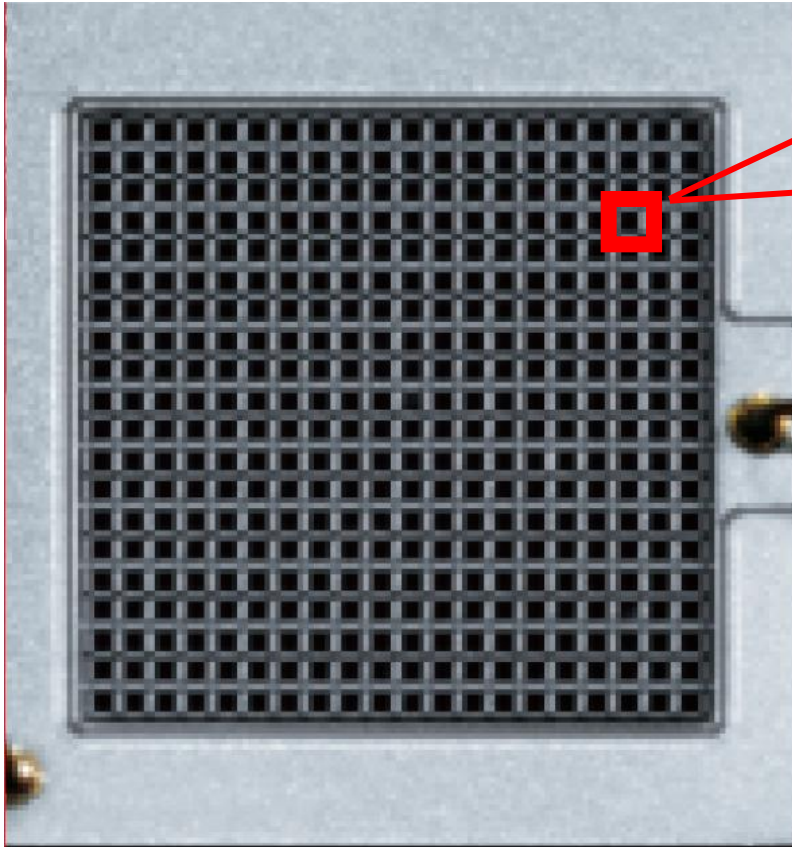
## 開口率

1ピクセル中で受光部の占める割合

## 励起確率

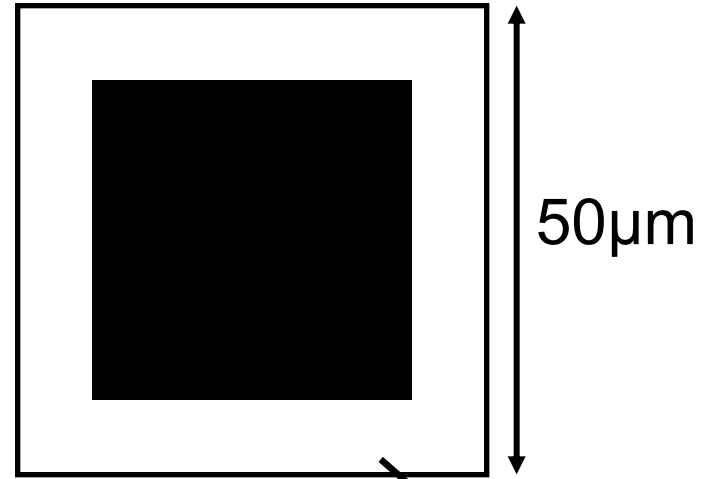
1電子に対してガイガー放電が起こる確率

# MPPCの受光面の拡大写真

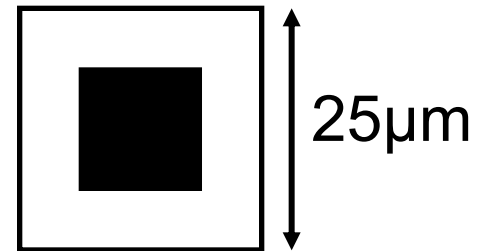


# MPPC1ピクセル

050C



025C



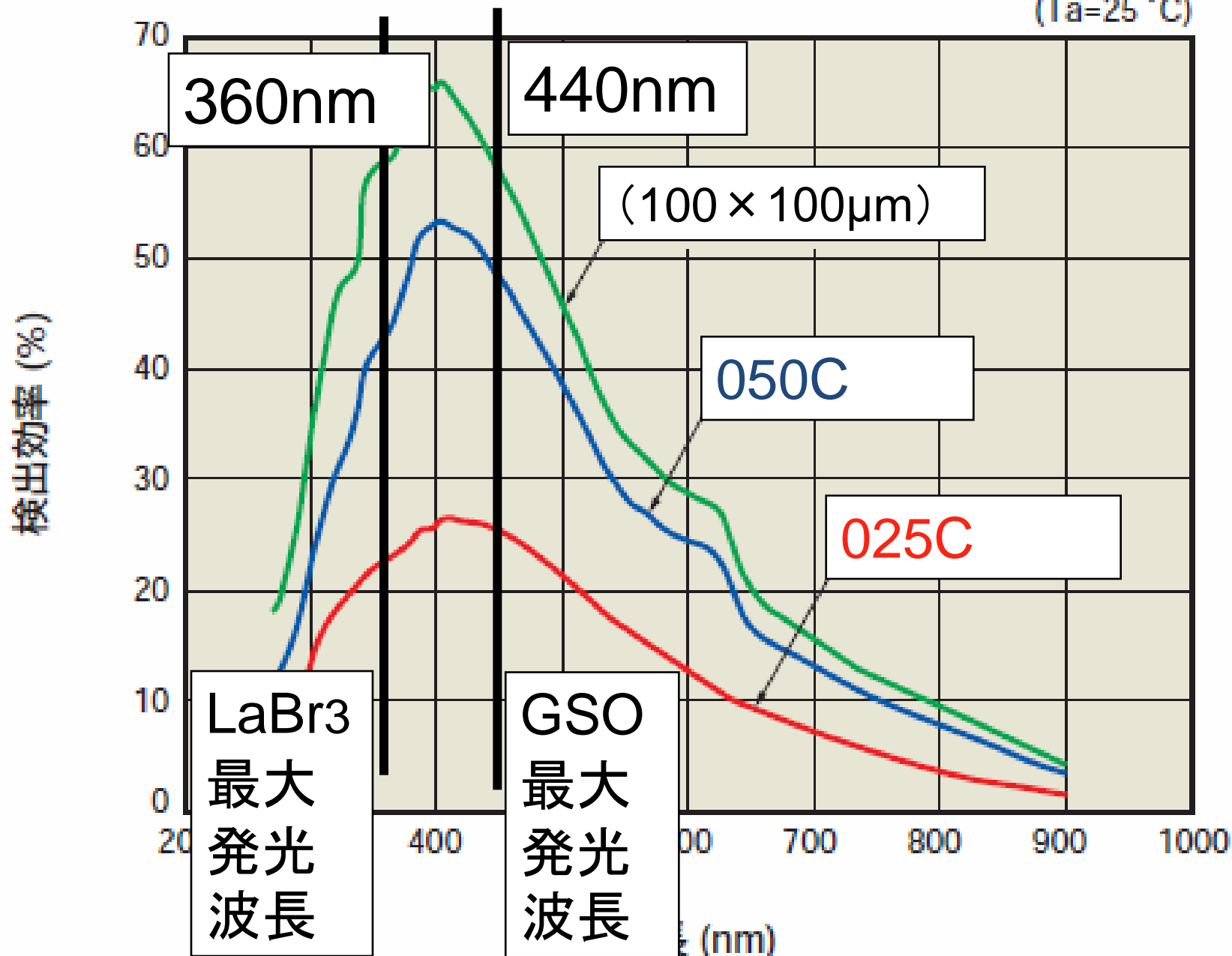
不感領域

開口率

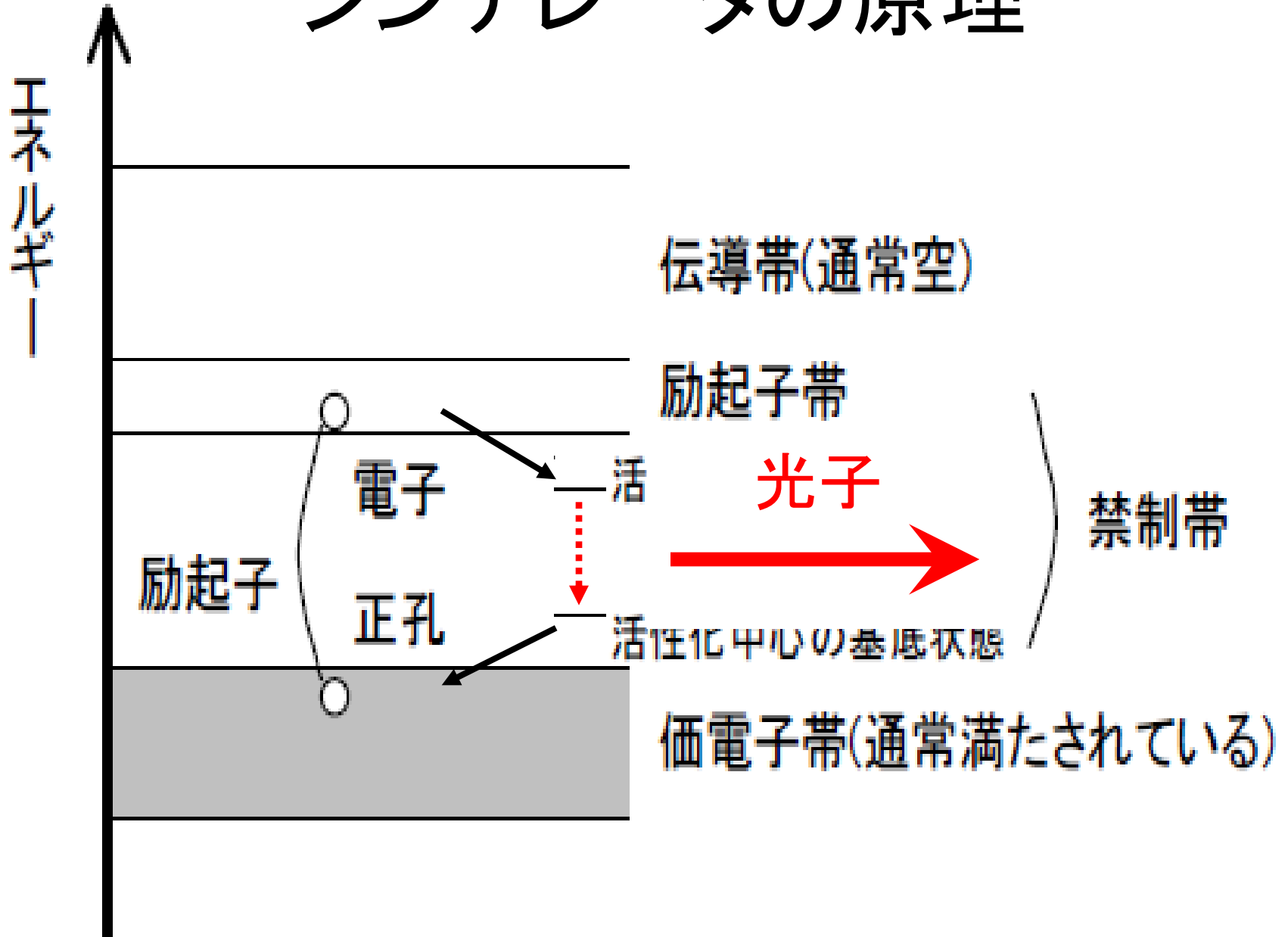
(050C : 61.5%、025C : 30.8%)

# MPPPCの検出効率

(Ta=25 °C)



# シンチレータの原理

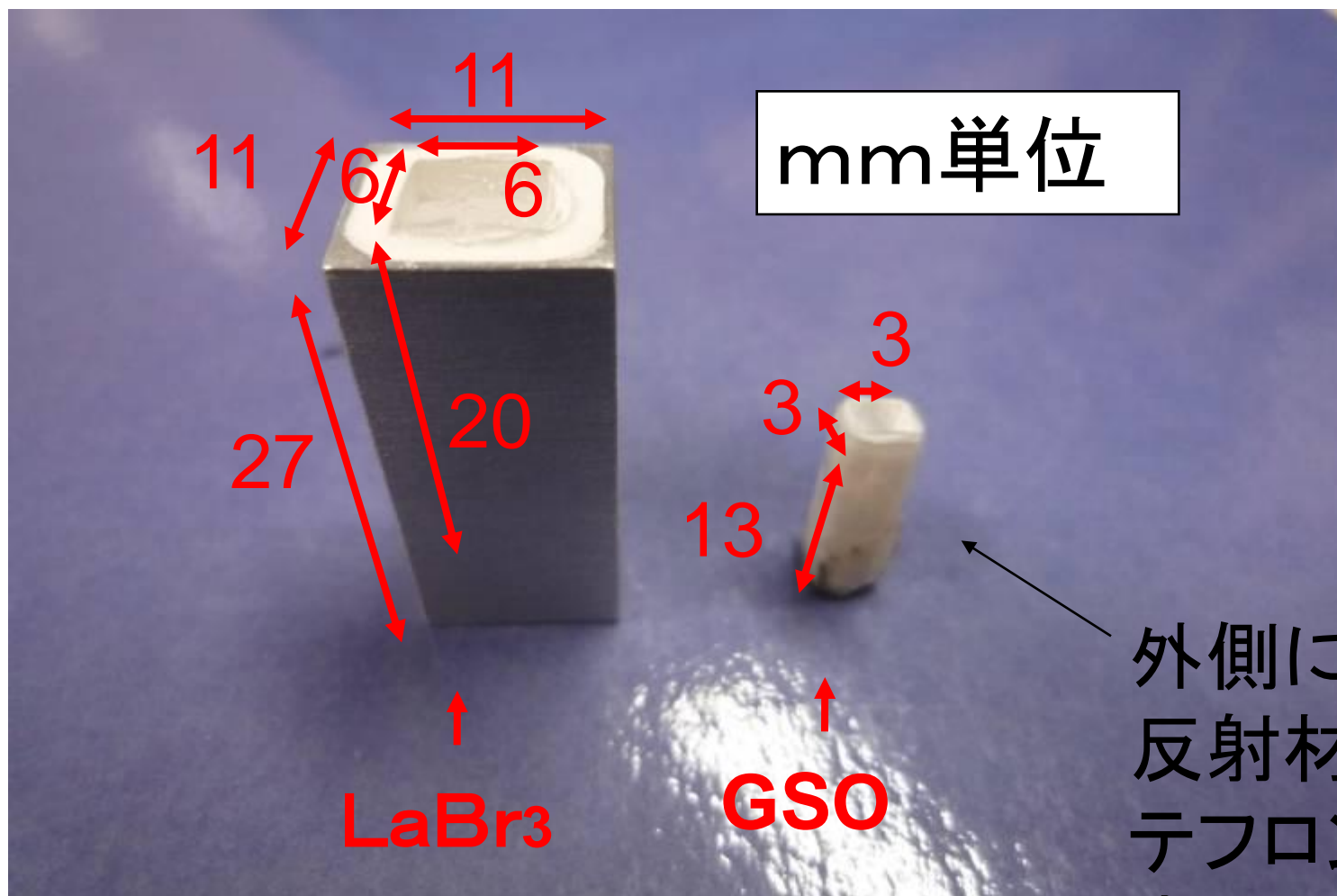


# シンチレータの特徴

	密度 (g / cm <sup>3</sup> )	蛍光減衰時間 (ns)	最大発光波長 (nm)	エネルギー分解能(%) *(FWHM @662keV)	Light output ( / MeV )	潮解性
NaI (TI)	3.67	230	415	6-7	39,000	強
GSO (Ce)	7.13	30 - 60	440	8-9	9,000	なし
LaBr <sub>3</sub> (Ce)	5.29	20	360	3	63,000 GSOの7倍	非常に強

\*PMT測定

# 使用したシンチレータ



外側には  
反射材の  
テフロンが  
まいてある

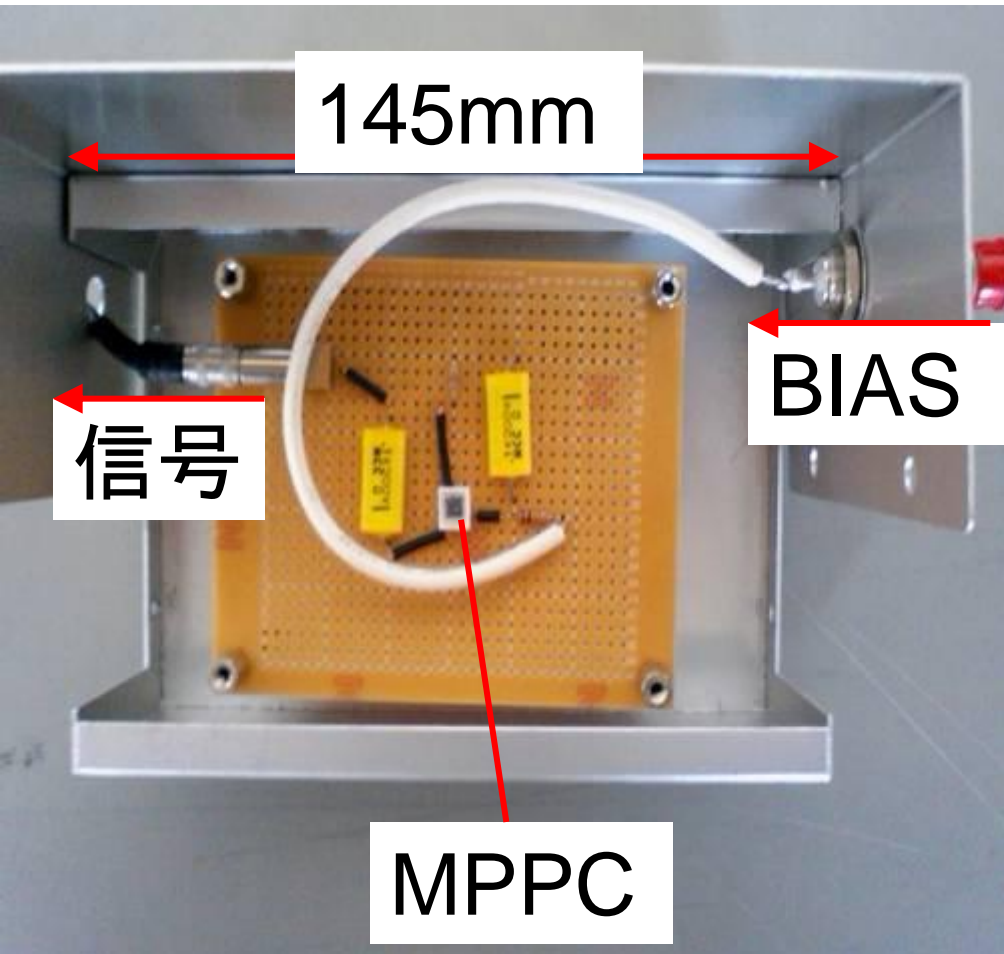


# MPPPCとシンチレータの取り付け

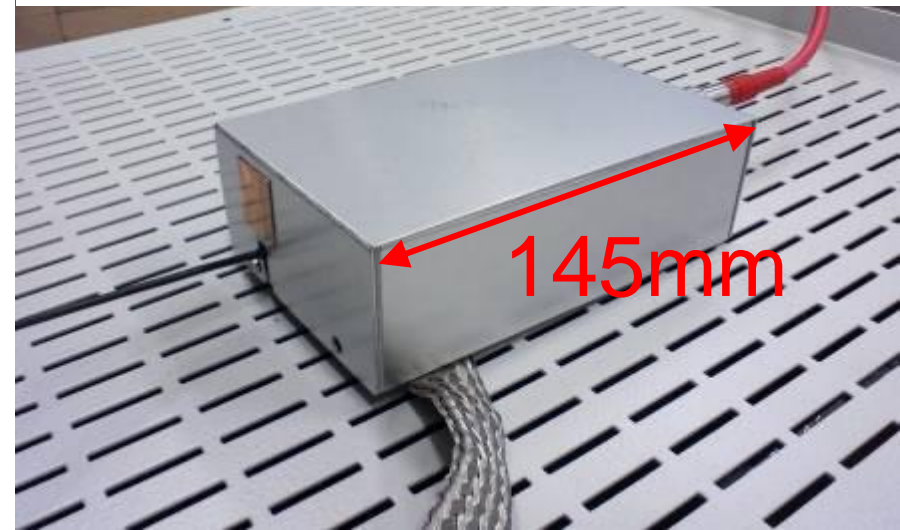
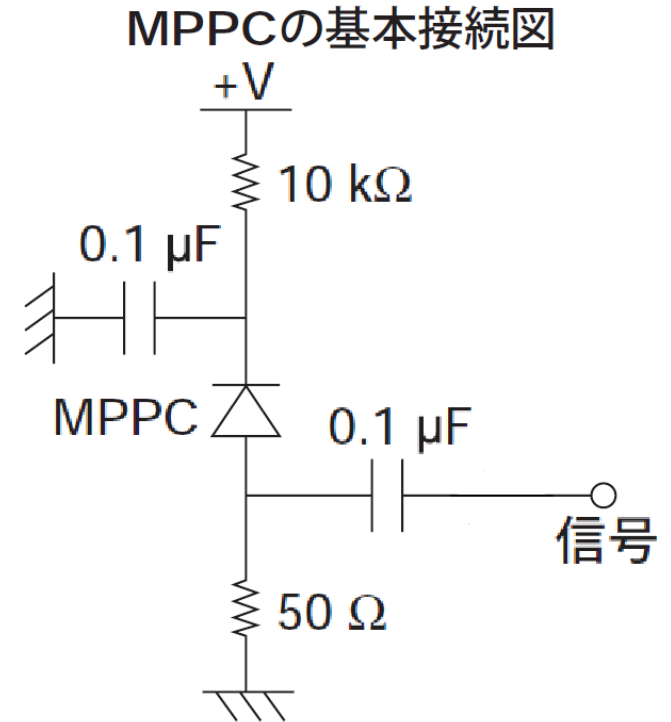


- MPPPCとシンチレータをテープで巻いて固定
- MPPPCとシンチレータの接触面にはオプティカルグリスを塗る

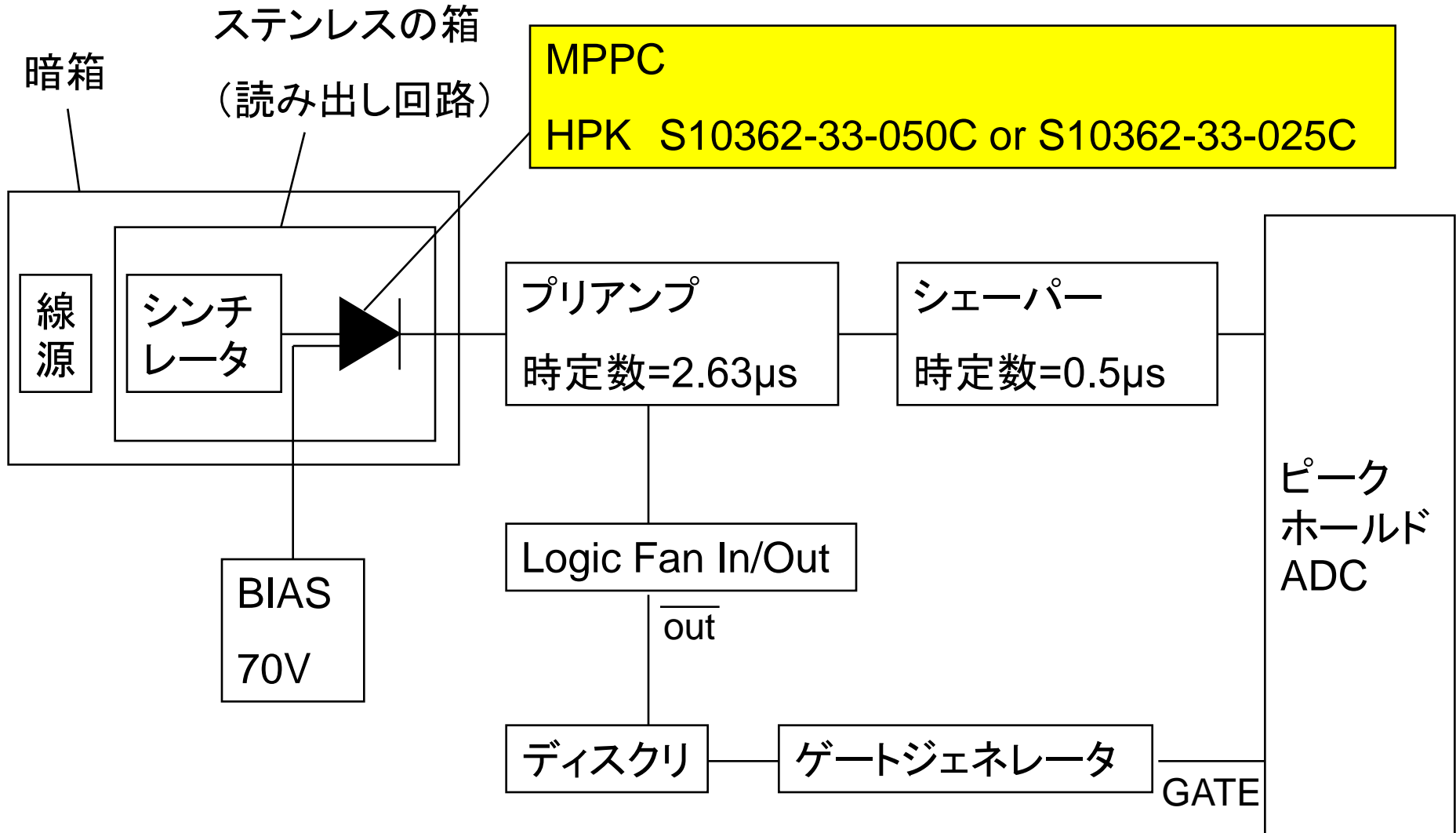
# 読み出し回路(自作)



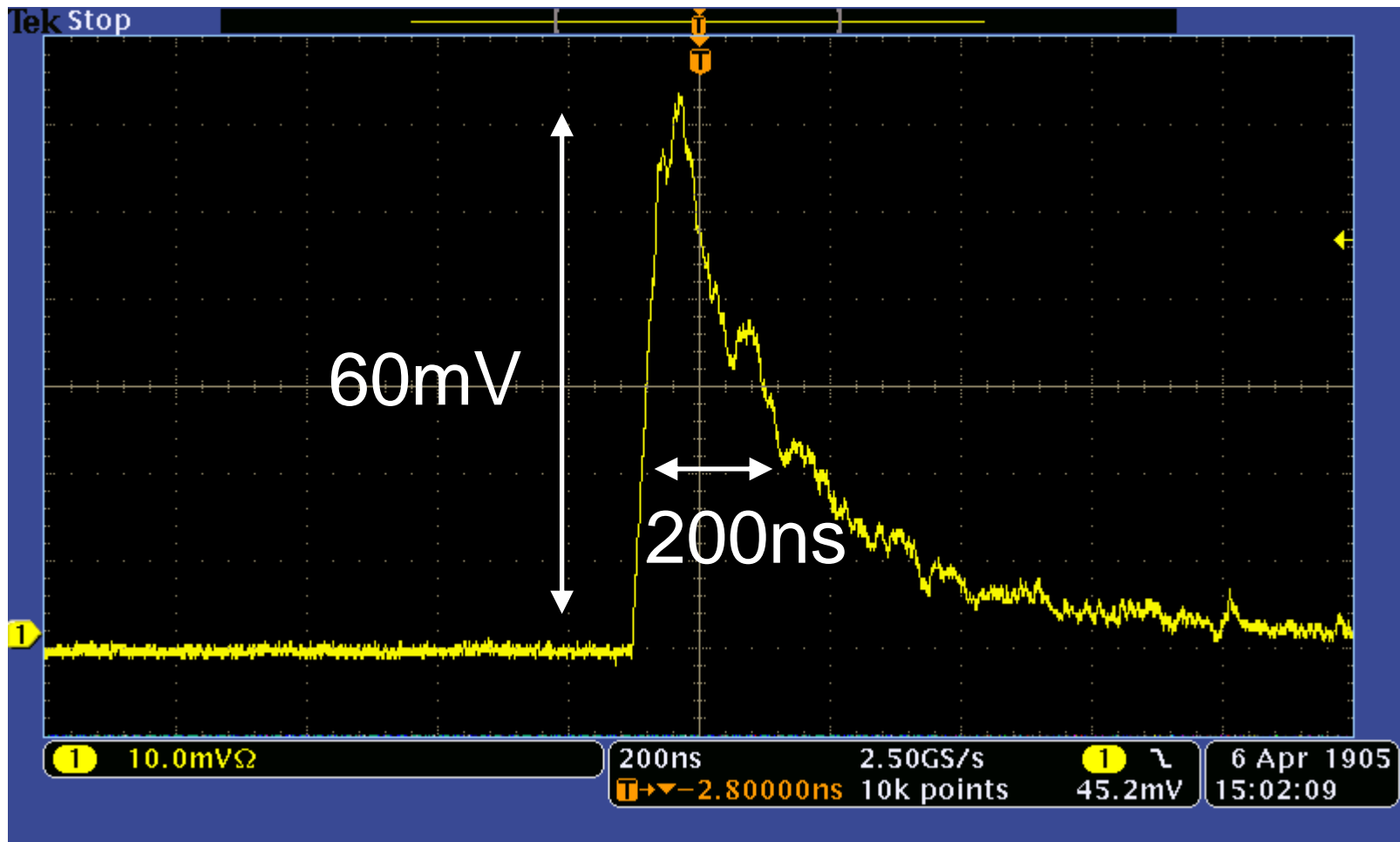
箱を閉じて遮蔽  
(ノイズカット)



# MPPPCのセットアップ



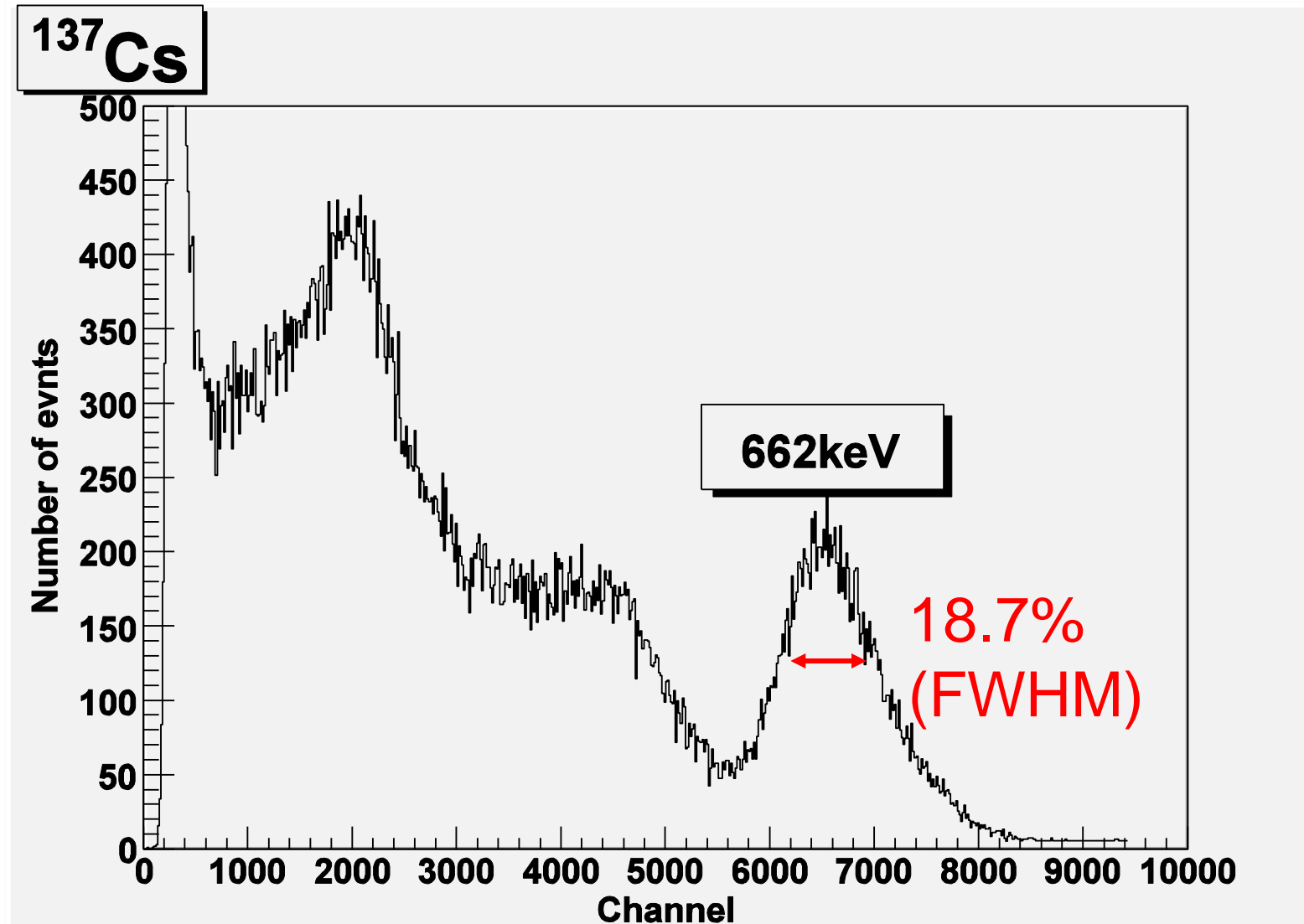
# MPPPCからの生信号



GSO+050C

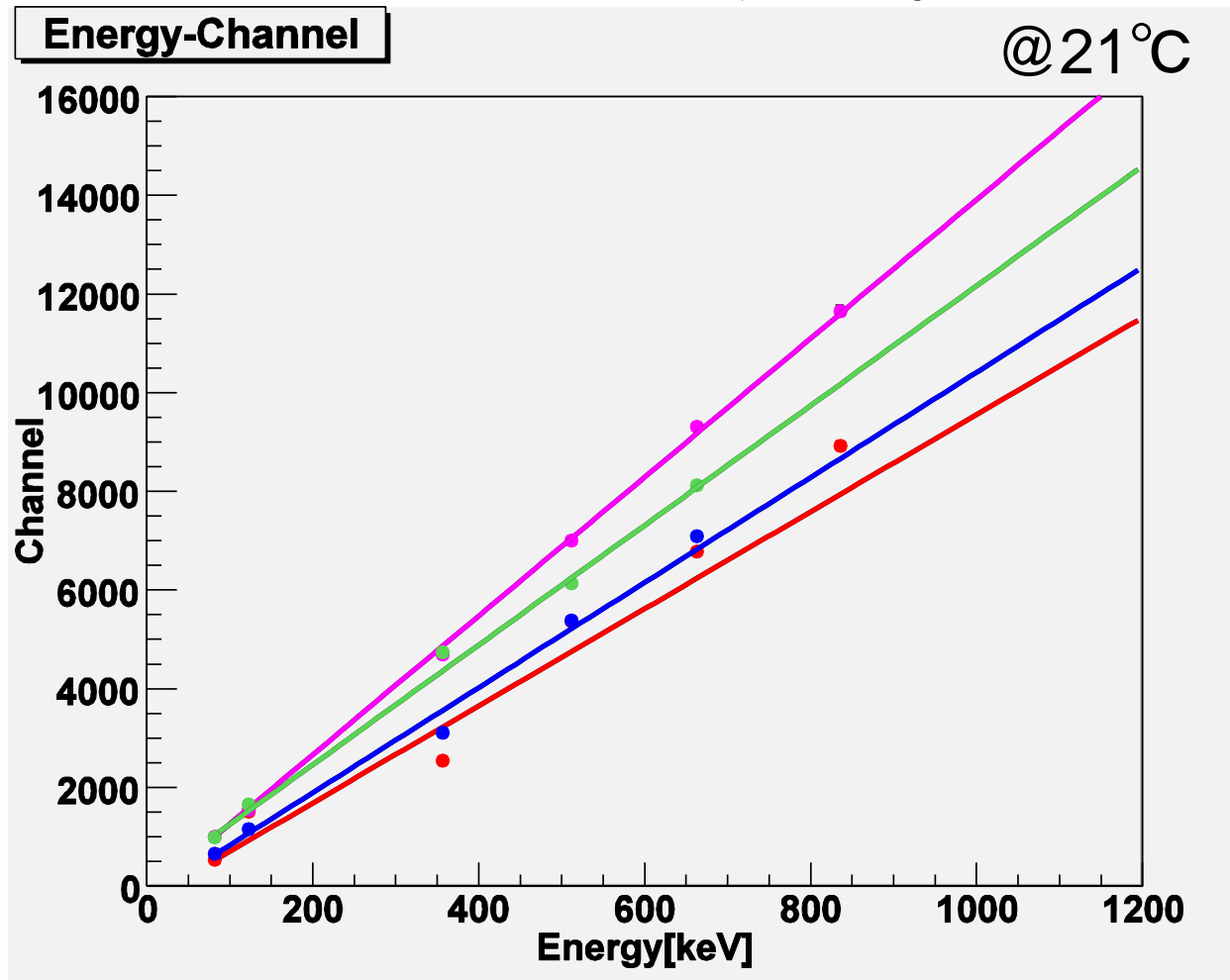
線源は $^{137}\text{Cs}$

# GSO+MPPC (050C:3600ピクセル)での スペクトル



# ピーク位置のずれ

GSO+050C 4回の測定結果



- まずはGSOで測定

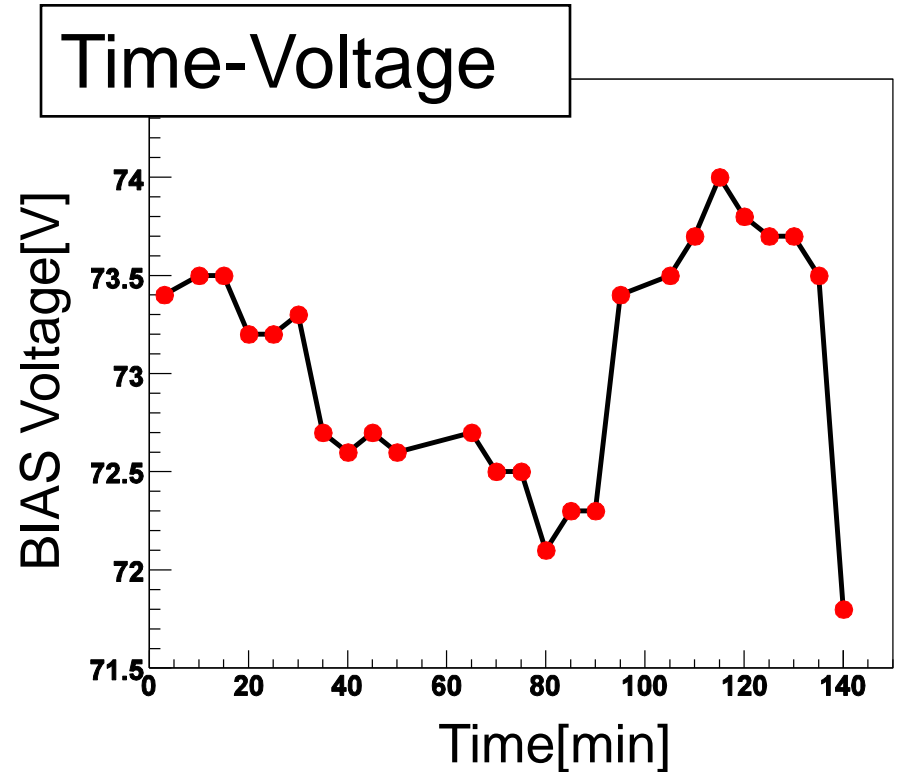
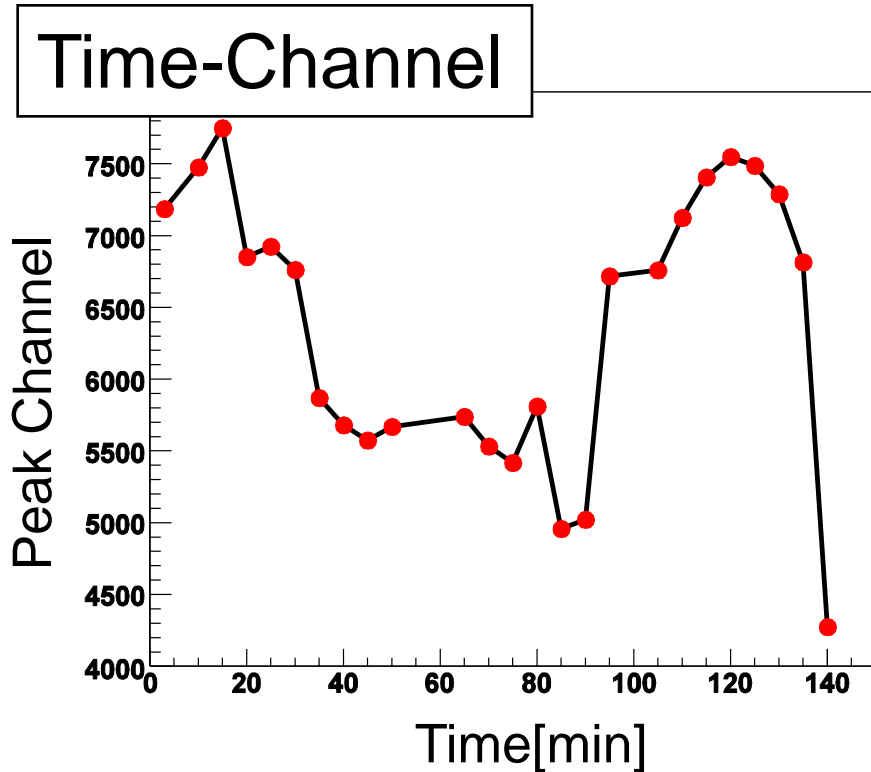
- 全く同じセットアップでも測定する度にピークチャンネルが変化

- 662keVでのピークのずれ

7836 ± 1142 (Ch)

$\sigma$ : 14.6%

# バイアス電圧の時間変化



- 662keVのピーク位置の時間変化を測定
- バイアス電源の電圧値が変動しているためにピーク位置がずれることがわかった

# バイアス電源の変更

CLEAR-PULSE社 E6625→E6665へ変更



《主な仕様(CLEAR-PULSE社カタログより)》

## E6665

出力電圧 0~+500V  
入力電圧変動  $\pm 0.2\%$ 以下  
(AC100V $\pm 10\%$ 変動に対して)  
長時間安定度  $\pm 0.03\%$ 以下

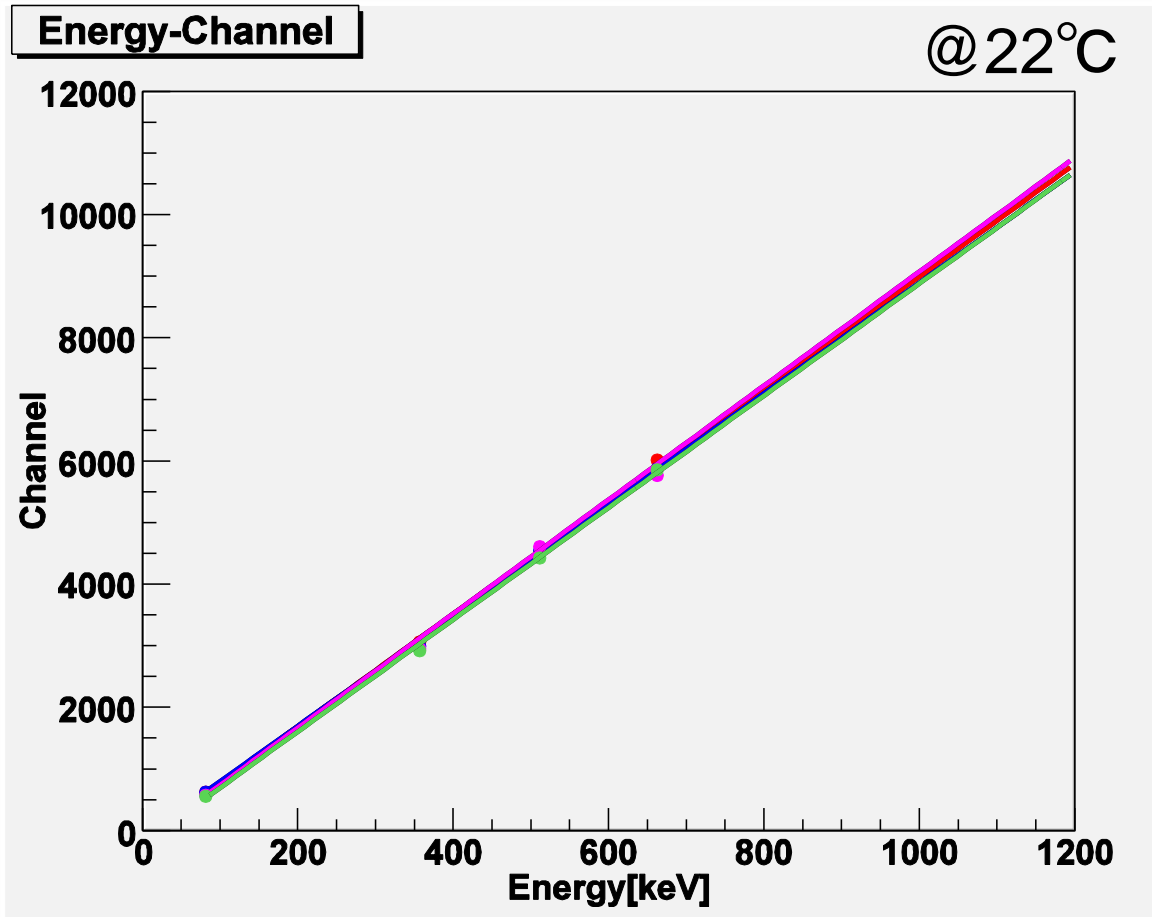
## E6625

出力電圧 0~200V  
出力安定度  $\pm 1\%$ 以下



# バイアス電源の変更(2)

セットアップを変えずに4回測定



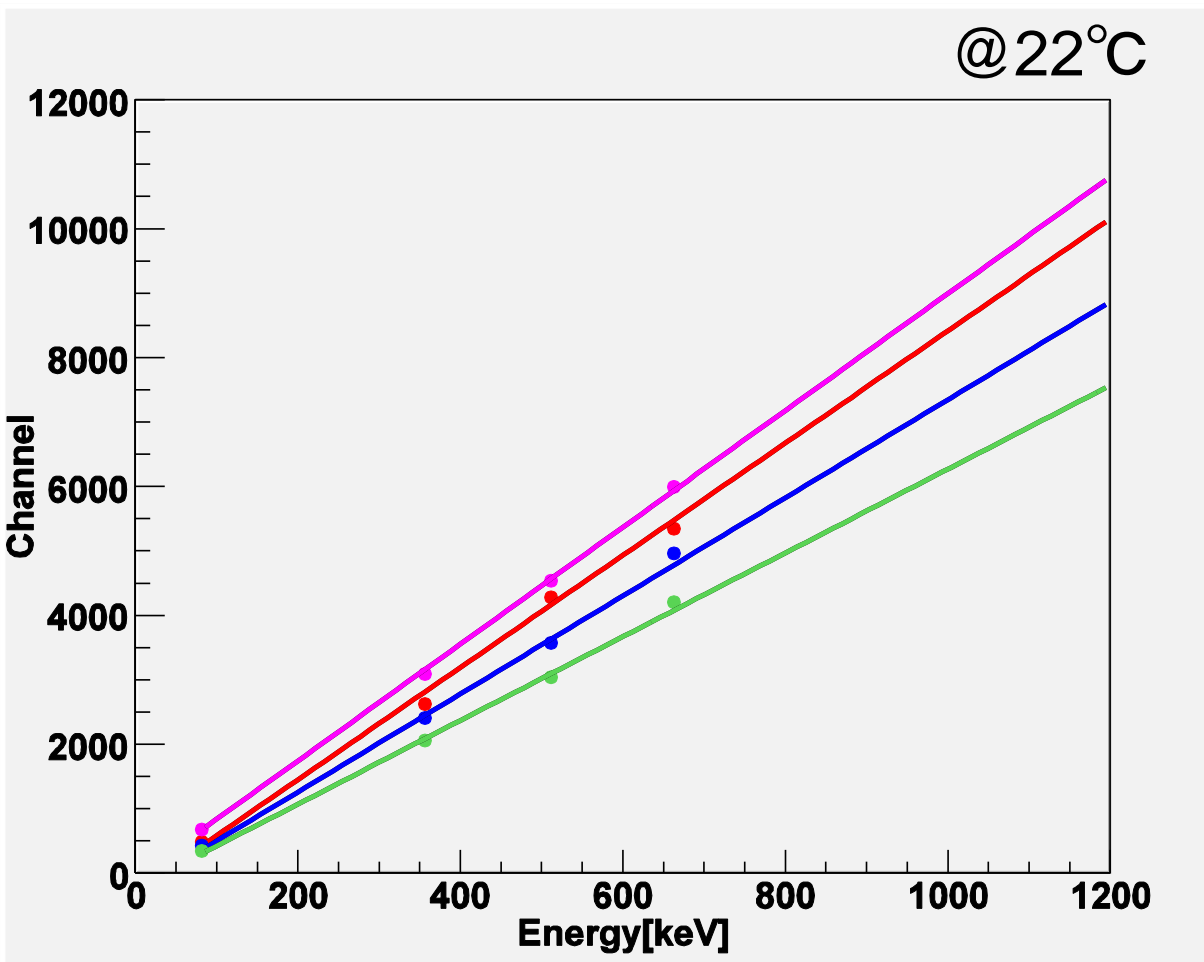
- 全く同じセットアップでの測定ではピーク位置はほぼずれなくなった。

- 662keVでのピークのずれ  
 $5882 \pm 103$  (Ch)  
 $\sigma: 1.8\%$

電源変更前  $\sigma: 14.6\%$

# GSOを取り付けなおしての測定

測定するごとにGSOをMPPPCからはずし、取り付けなおして4回測定



- 再びピーク位置のずれがみられた

- 取り付ける際の位置のずれにより入射光量が変わる。

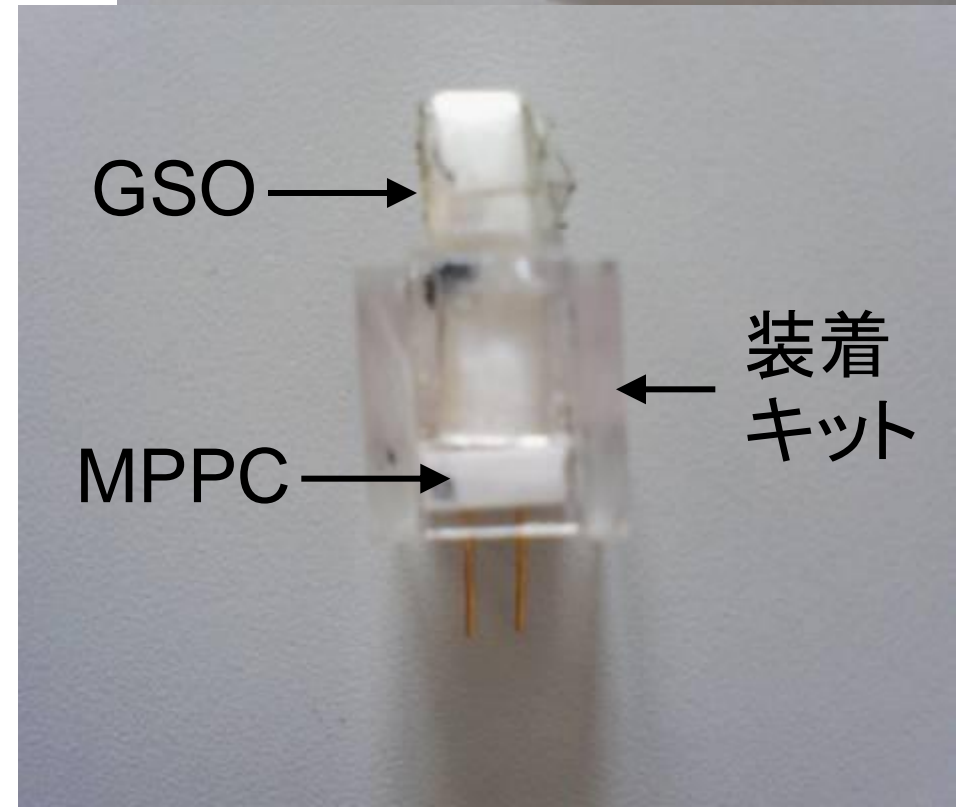
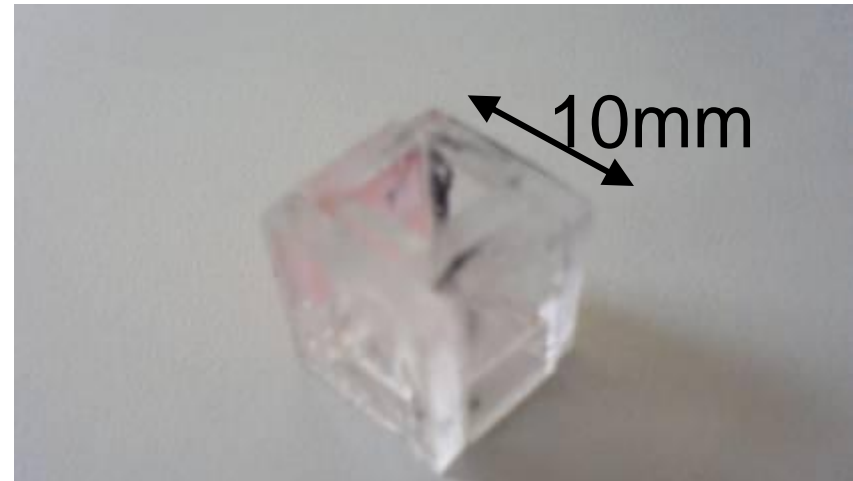
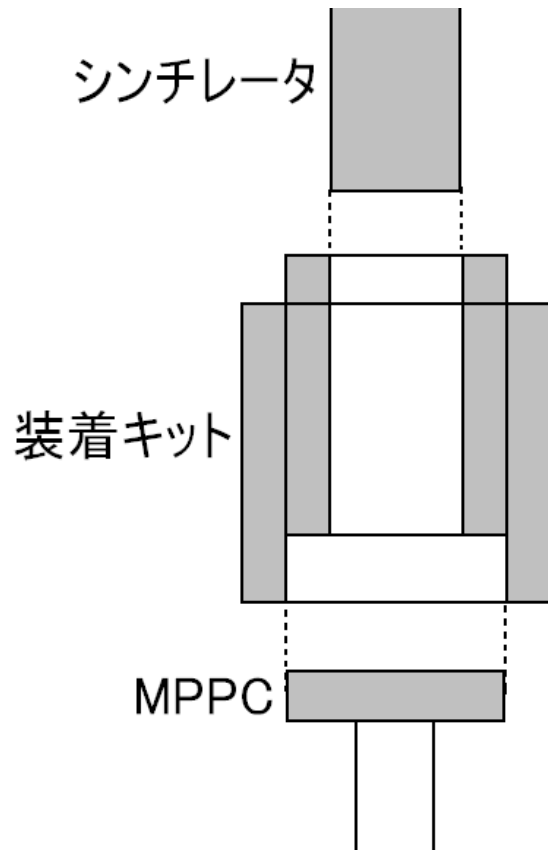
- 662keVでのピークのずれ

5136 ± 749 (Ch)

$\sigma$ : 14.6%

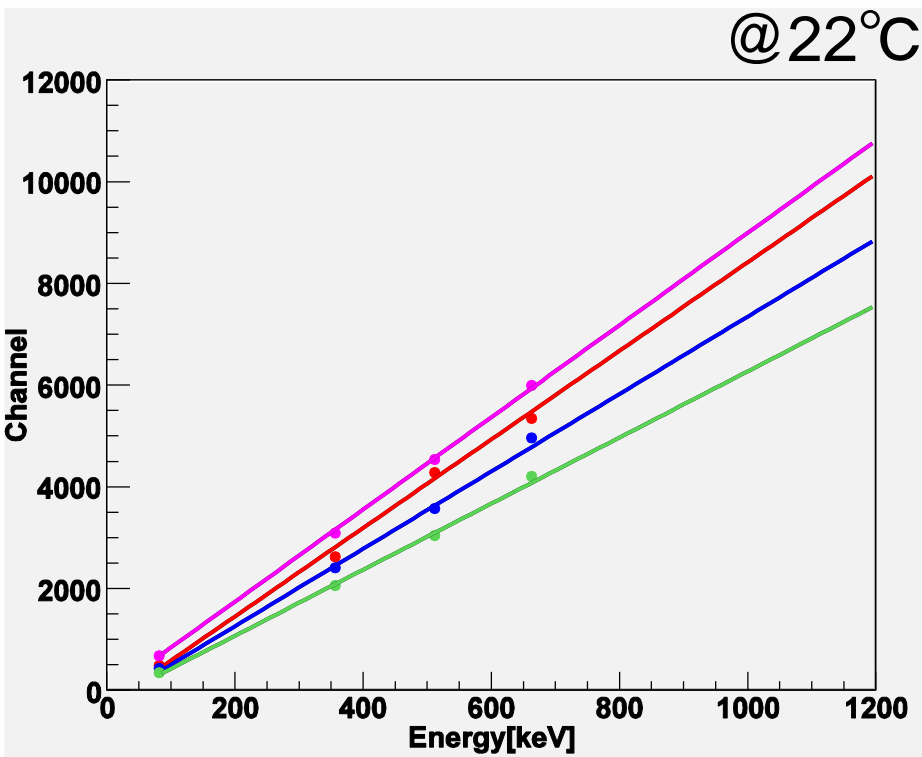
# 装着キットの作成

できるだけ同じ状態でシンチレータとMPPCを取り付けられるようにアクリル板で装着キットを作成した

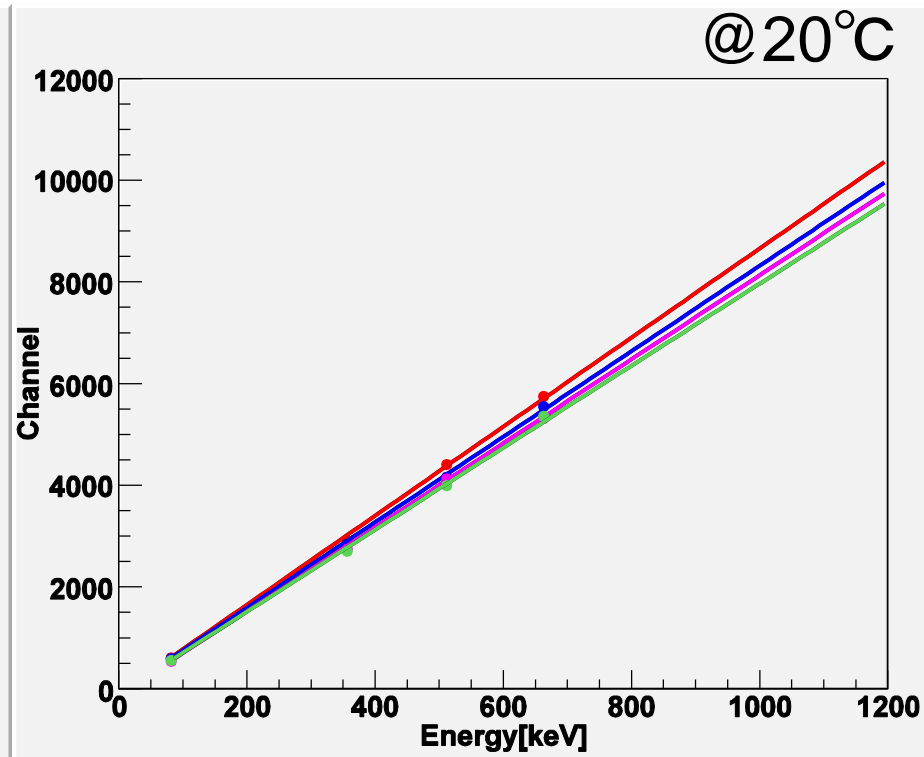


# GSOを毎回取り付けなおして4回測定(装着キットの効果)

## テープで取り付け



## 装着キットで取り付け



## $^{137}\text{Cs}$ 662keVピーク的位置のずれ

5136 ± 749 (Ch)

$\sigma$ : 14.6%

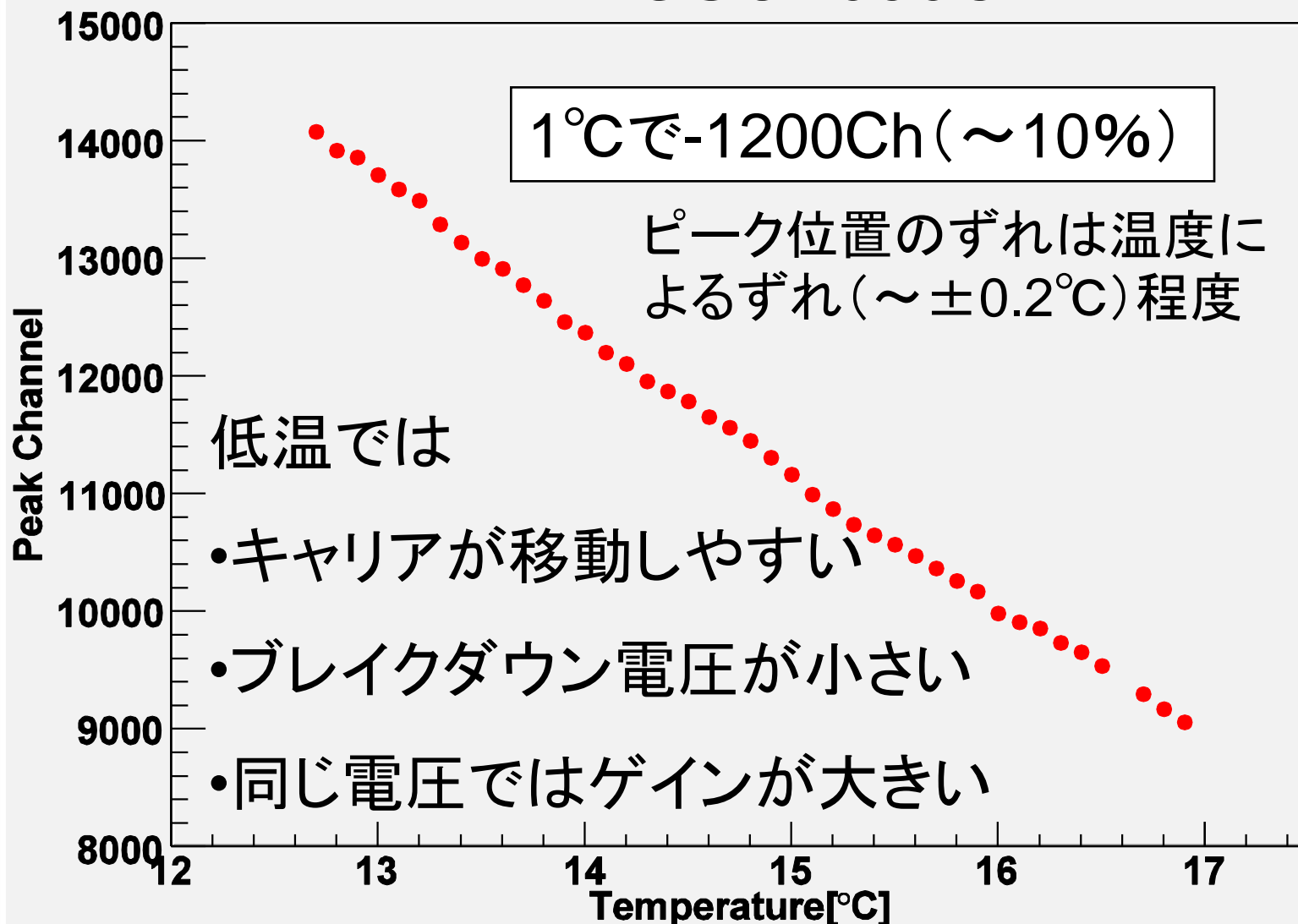
5501 ± 201 (Ch)

$\sigma$ : 3.7%

# 温度によるピーク位置の変化

<sup>137</sup>Cs Peak Channel

GSO+050C



# GSO+MPPC (050C) でのエネルギー較正 @17°C

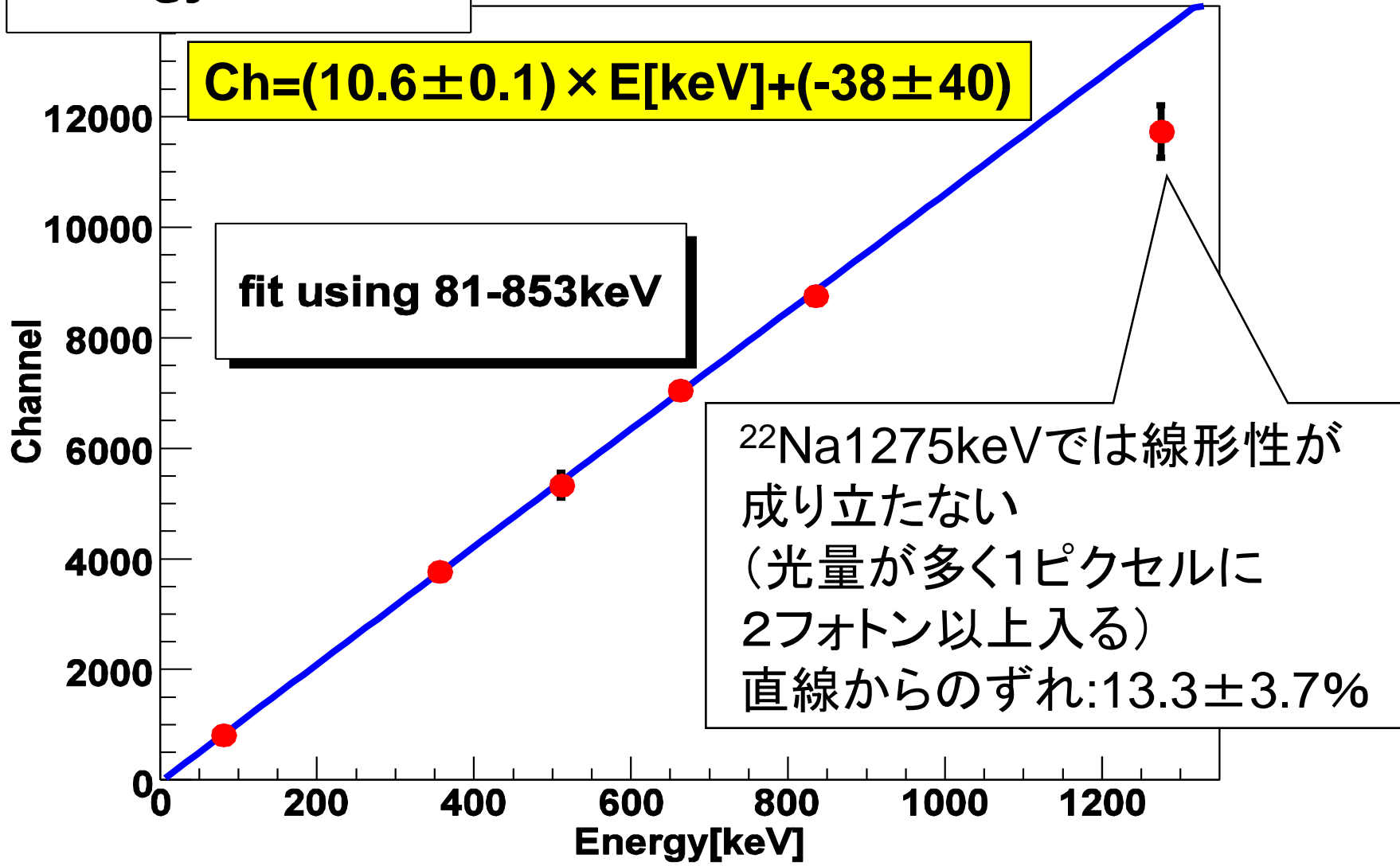
@17°C

Energy-Channel

$$Ch = (10.6 \pm 0.1) \times E[\text{keV}] + (-38 \pm 40)$$

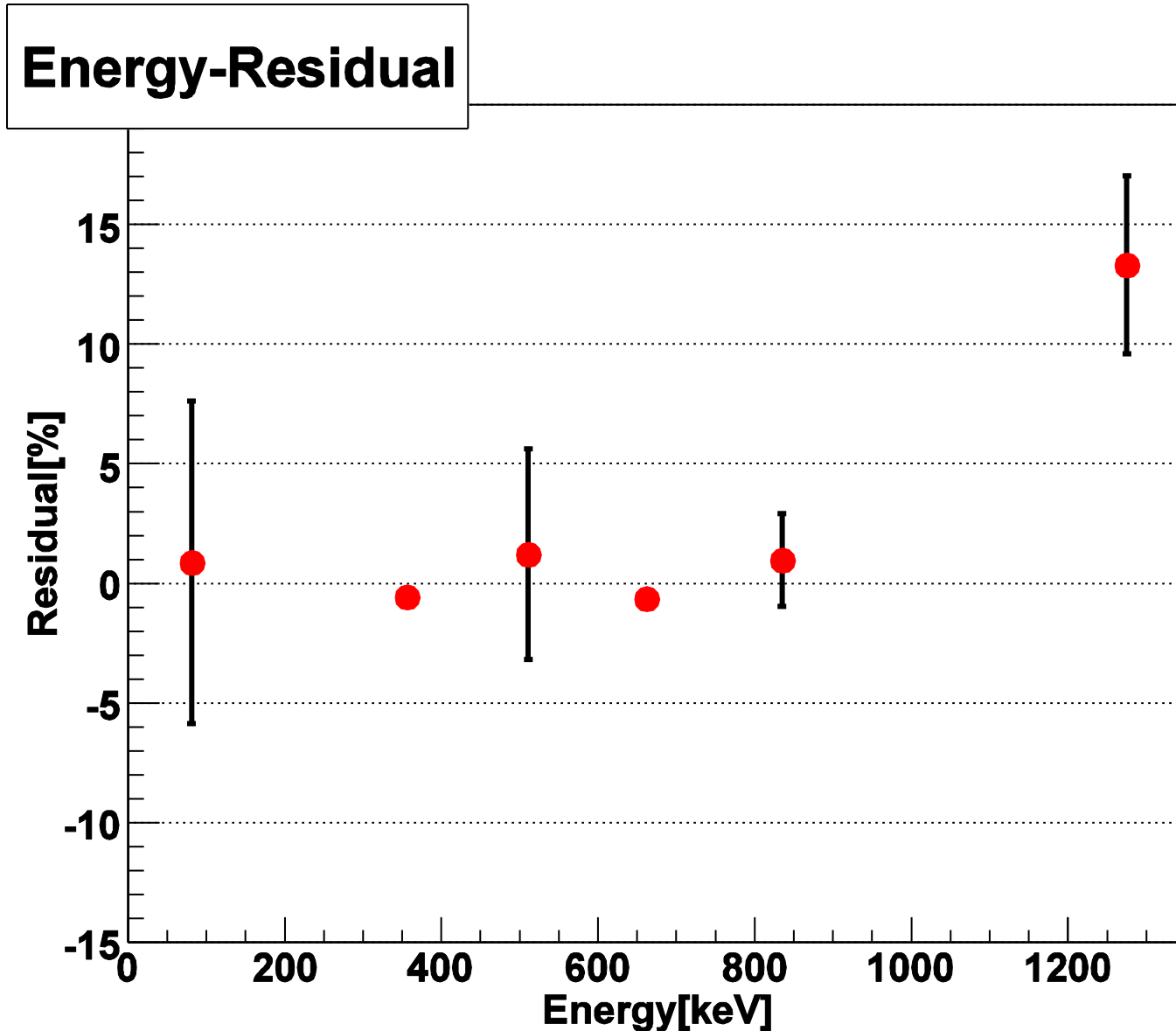
fit using 81-853keV

$^{22}\text{Na}$  1275keVでは線形性が成り立たない  
(光量が多く1ピクセルに2光子以上入る)  
直線からのずれ:  $13.3 \pm 3.7\%$



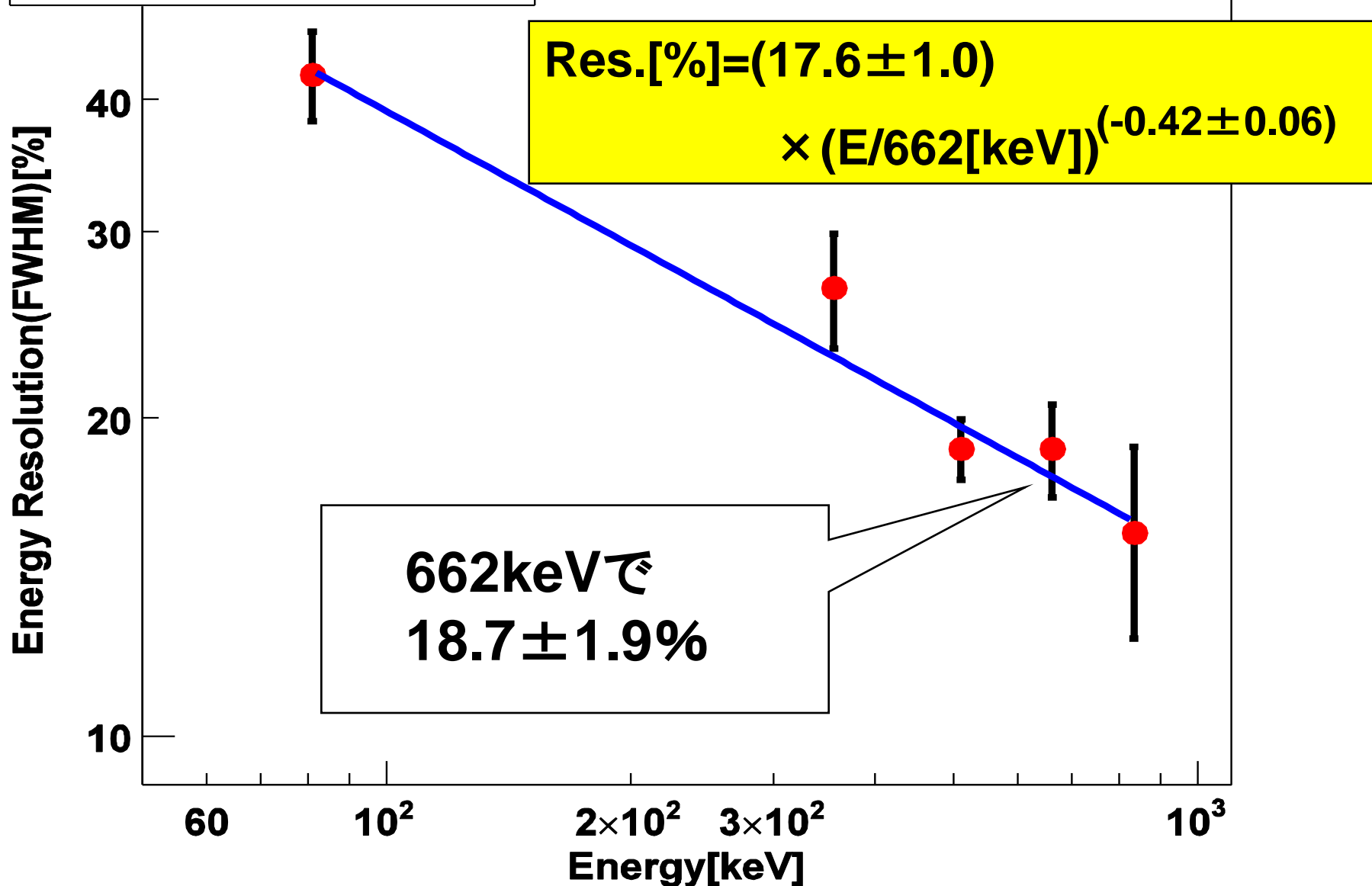
同じ測定を4回行い、平均値をプロットして標準偏差で誤差棒をつけた

# 直線からの残差



# GSO+MPPC(050C)でのエネルギー分解能

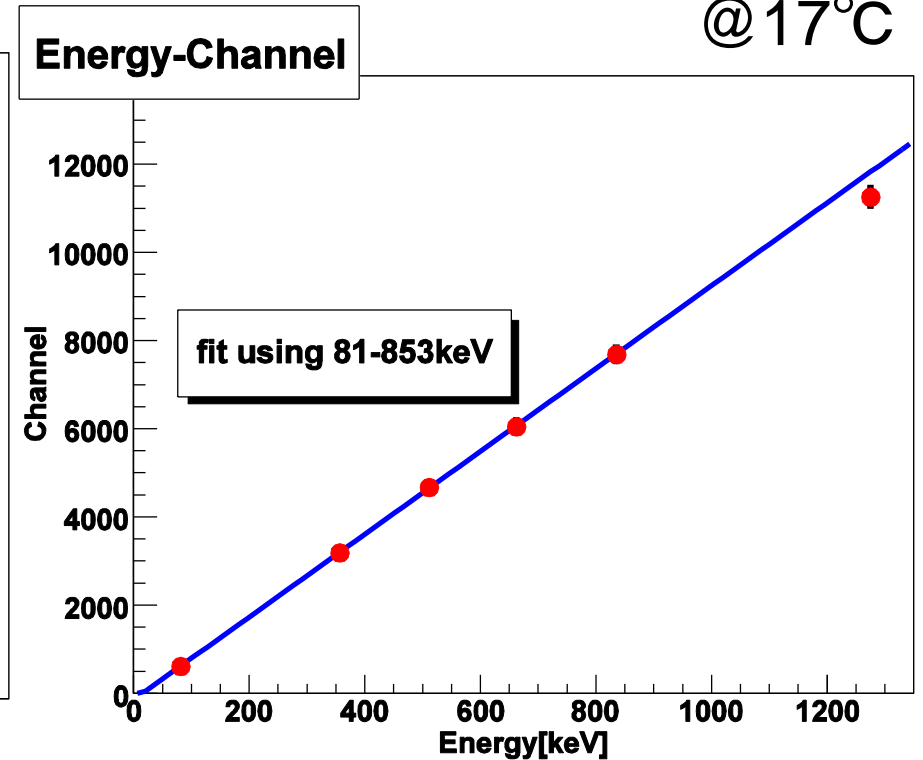
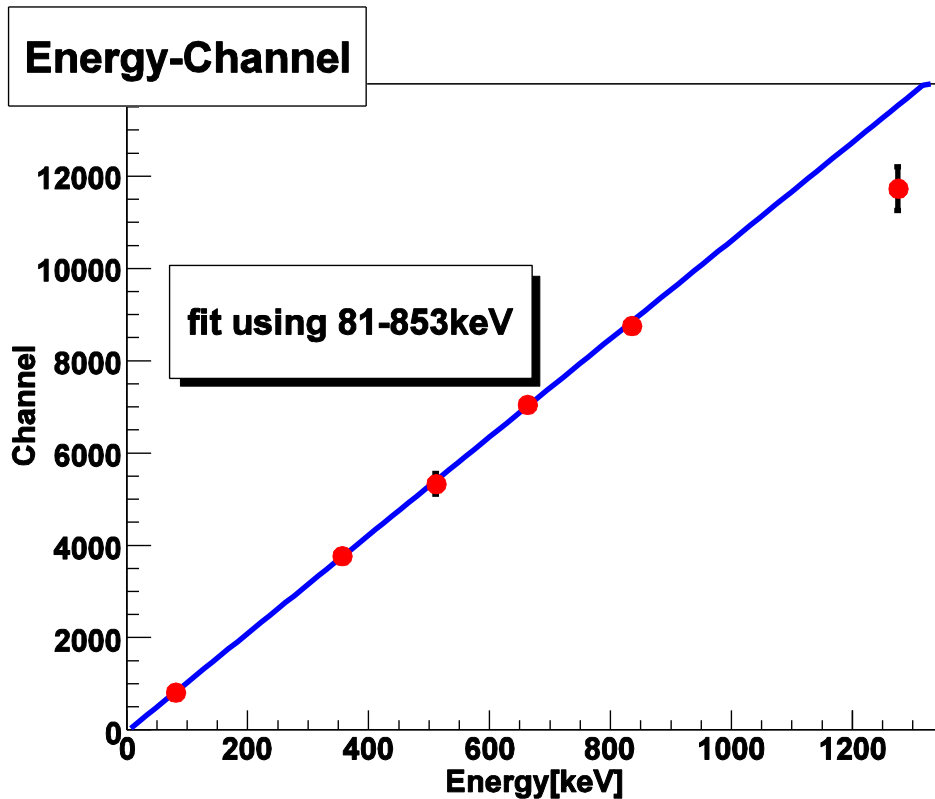
## Energy resolution





# ピクセル数による線形性の比較 シンチレータ: GSO

@ 17°C



050C (3600ピクセル)

025C (14400ピクセル)

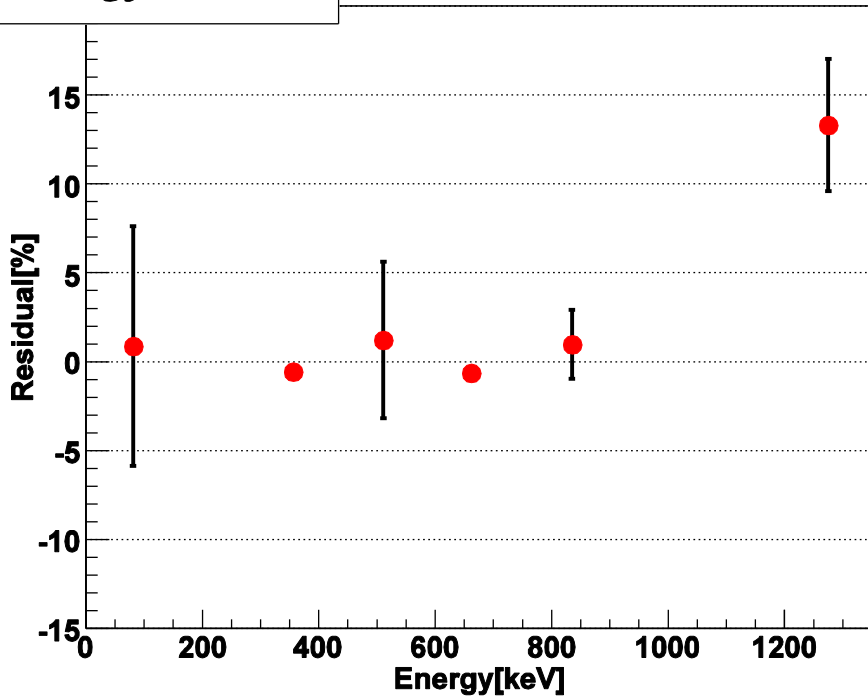
1275keVでの直線からのずれ

$13.3 \pm 3.7\%$

$4.7 \pm 2.5\%$

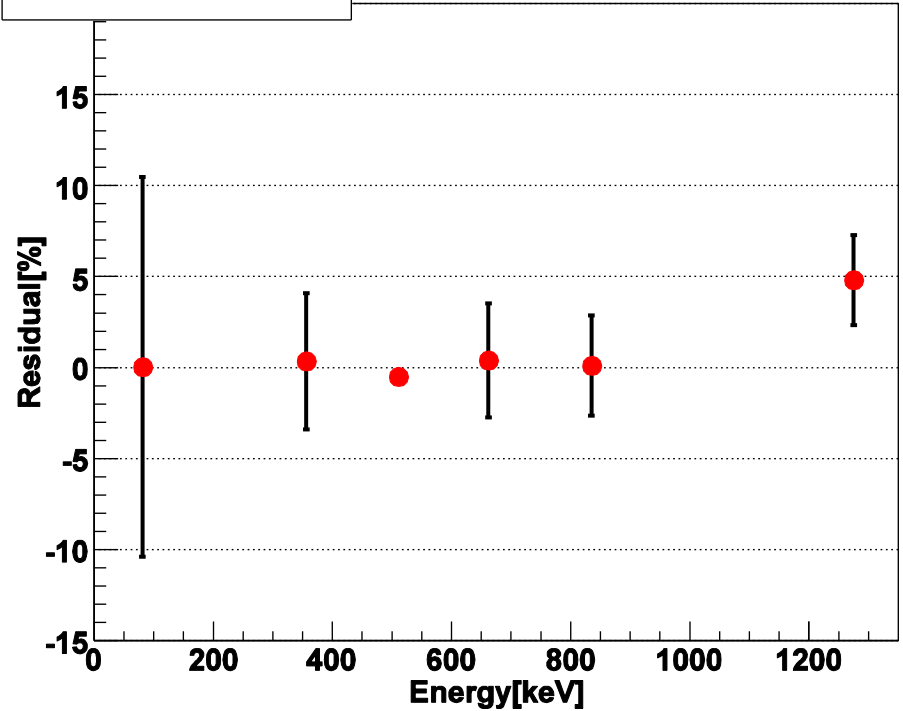
# 直線からの残差

Energy-Residual



050C (3600ピクセル)

Energy-Residual

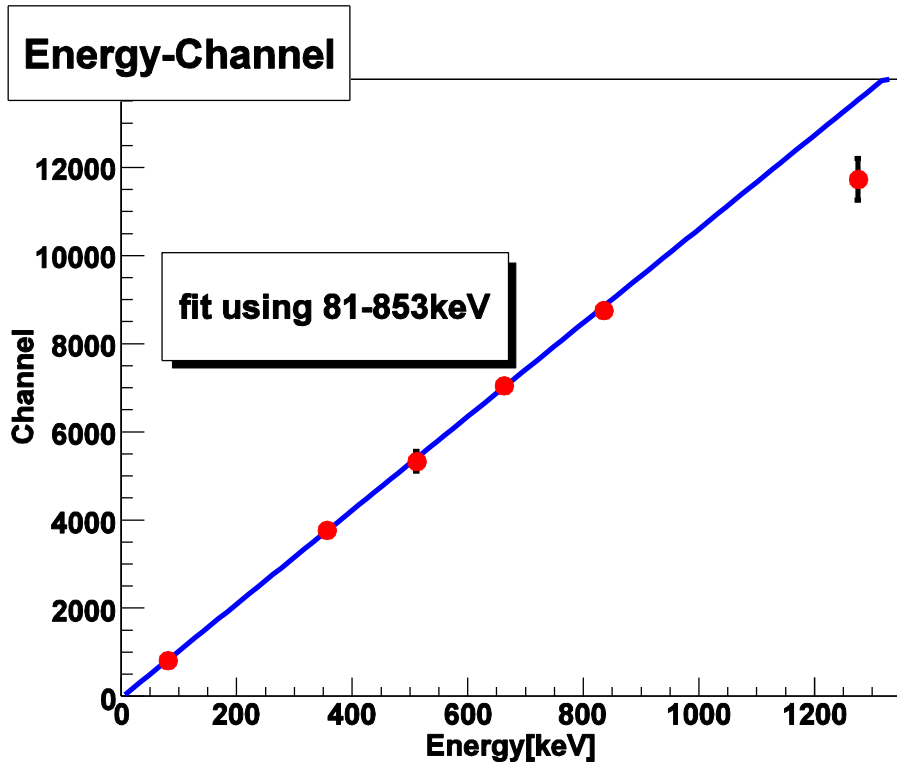


025C (14400ピクセル)

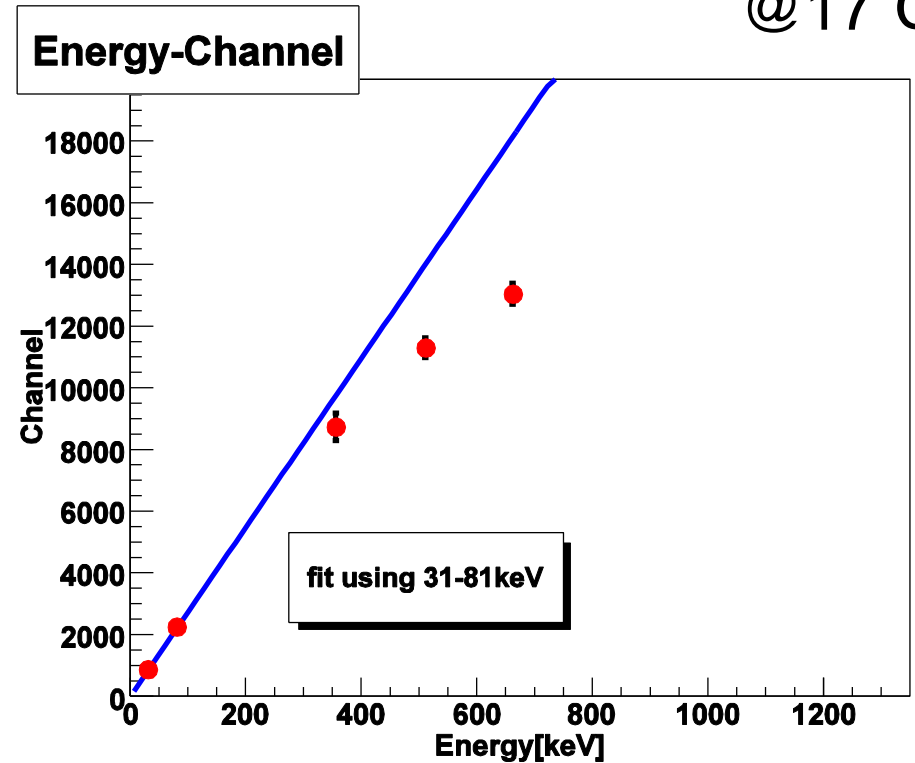
# シンチレータによる線形性の比較

## MPPC: 050C (3600ピクセル)

@17°C



GSO

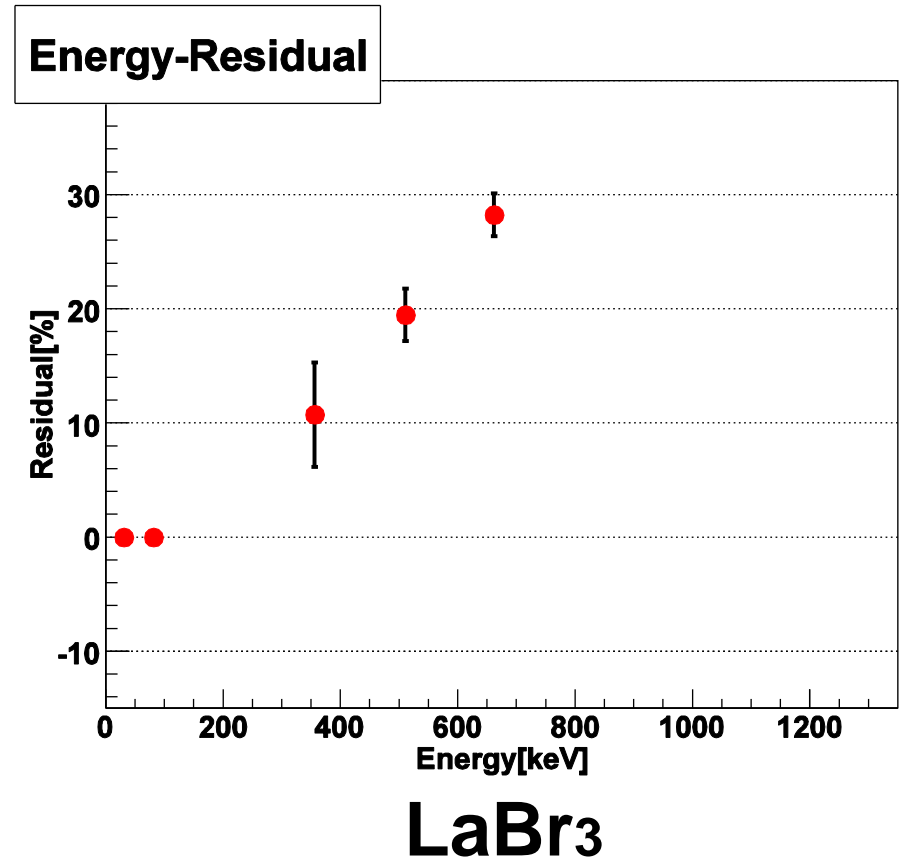
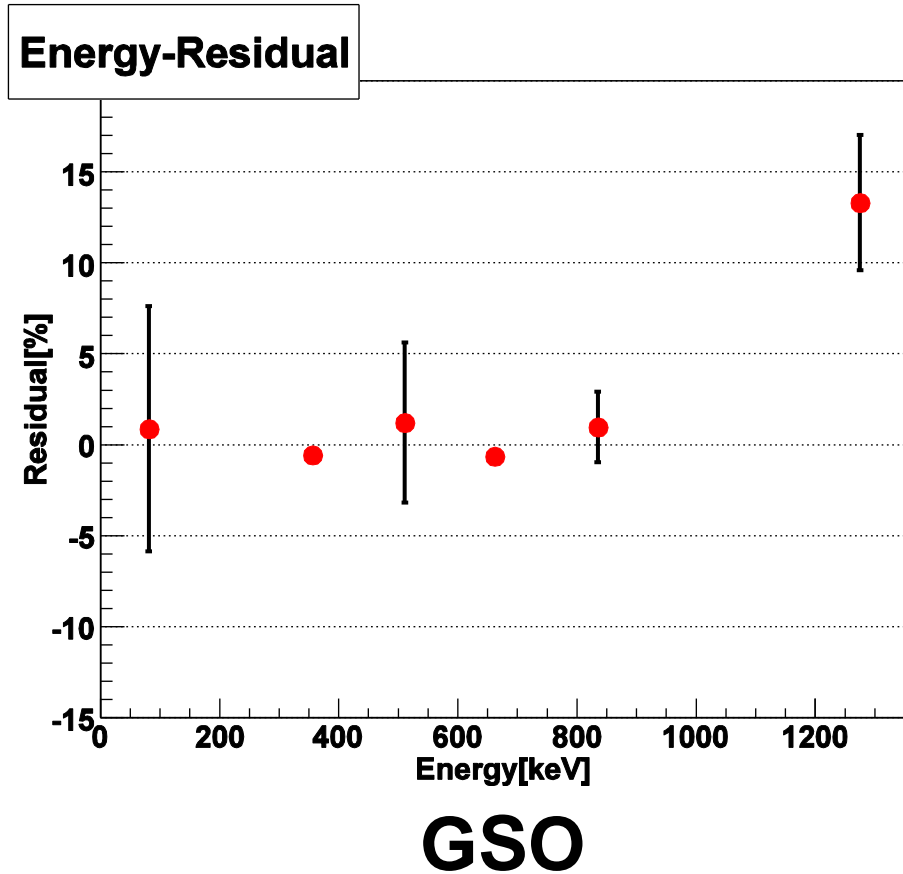


LaBr3

LaBr3では線形性が大きく低下

↑  
光量が大きい

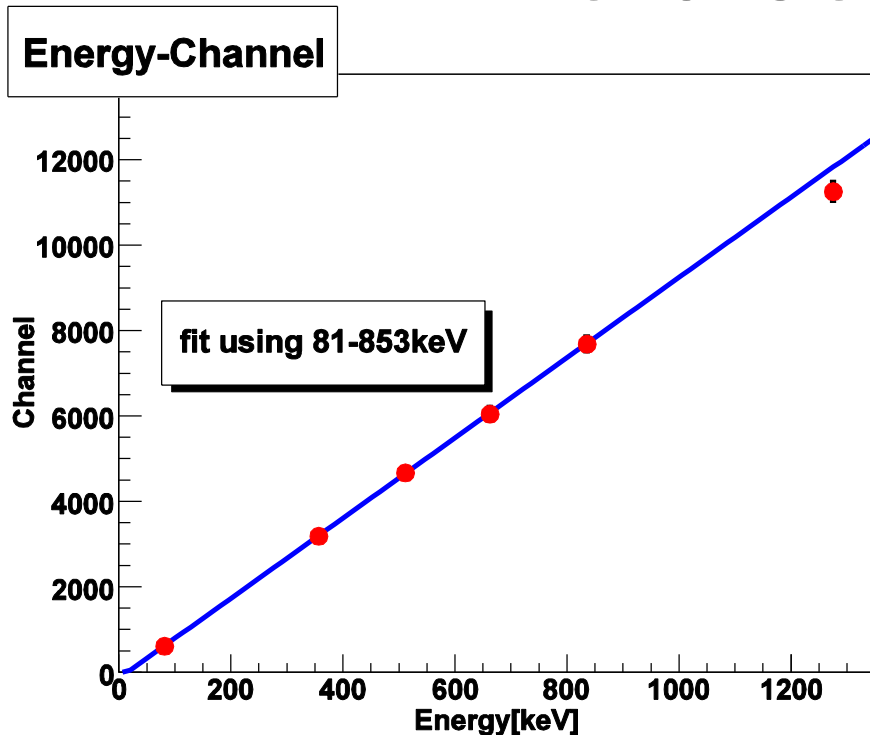
# 直線からの残差



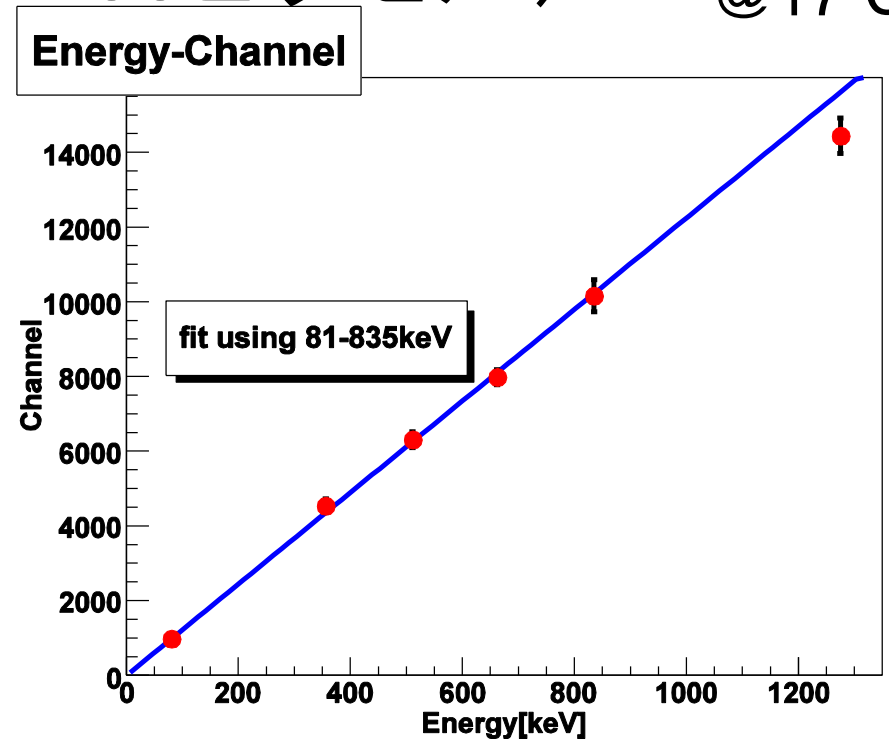
# シンチレータによる線形性の比較

MPPC: 025C (14400ピクセル)

@17°C



**GSO**



**LaBr<sub>3</sub>**

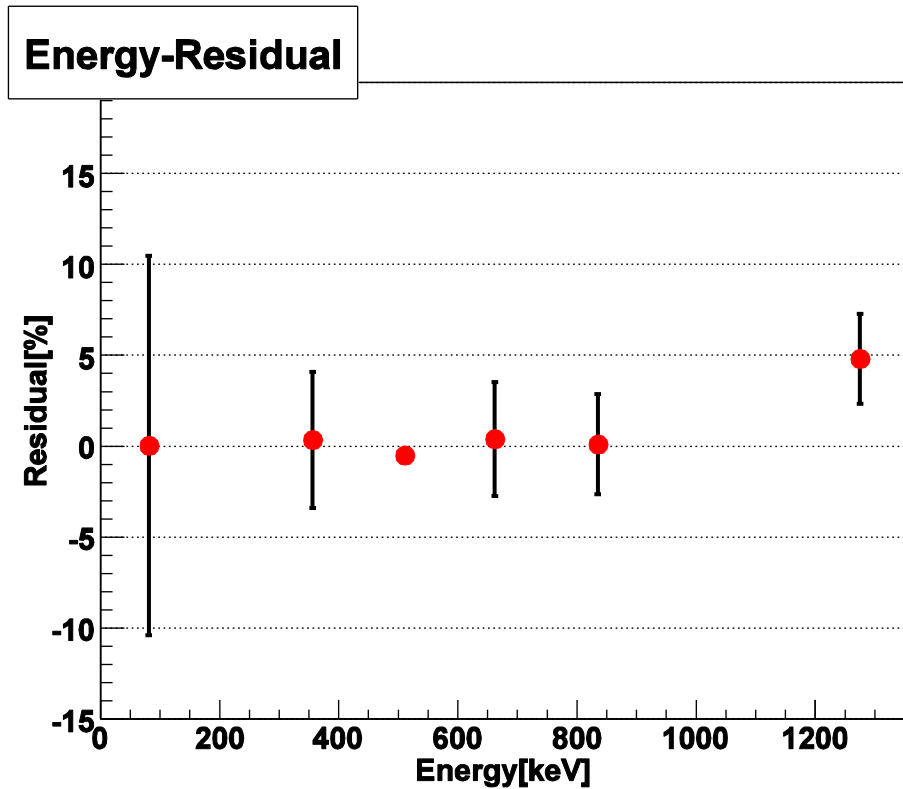
1275keVでの直線からのずれ

$4.7 \pm 2.5\%$

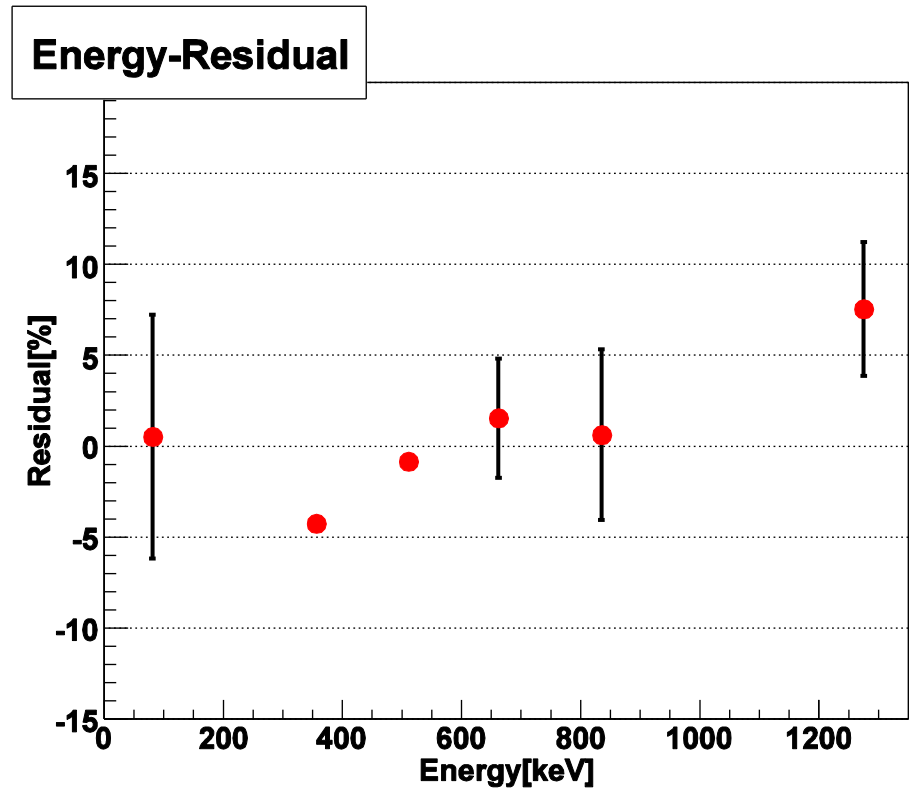
$7.5 \pm 3.7\%$

025C (14400ピクセル) ではLaBr<sub>3</sub>でも線形性が大きく低下することはなかった。

# 直線からの残差



**GSO**



**LaBr<sub>3</sub>**

# ピクセル数による分解能の比較 (GSO使用)

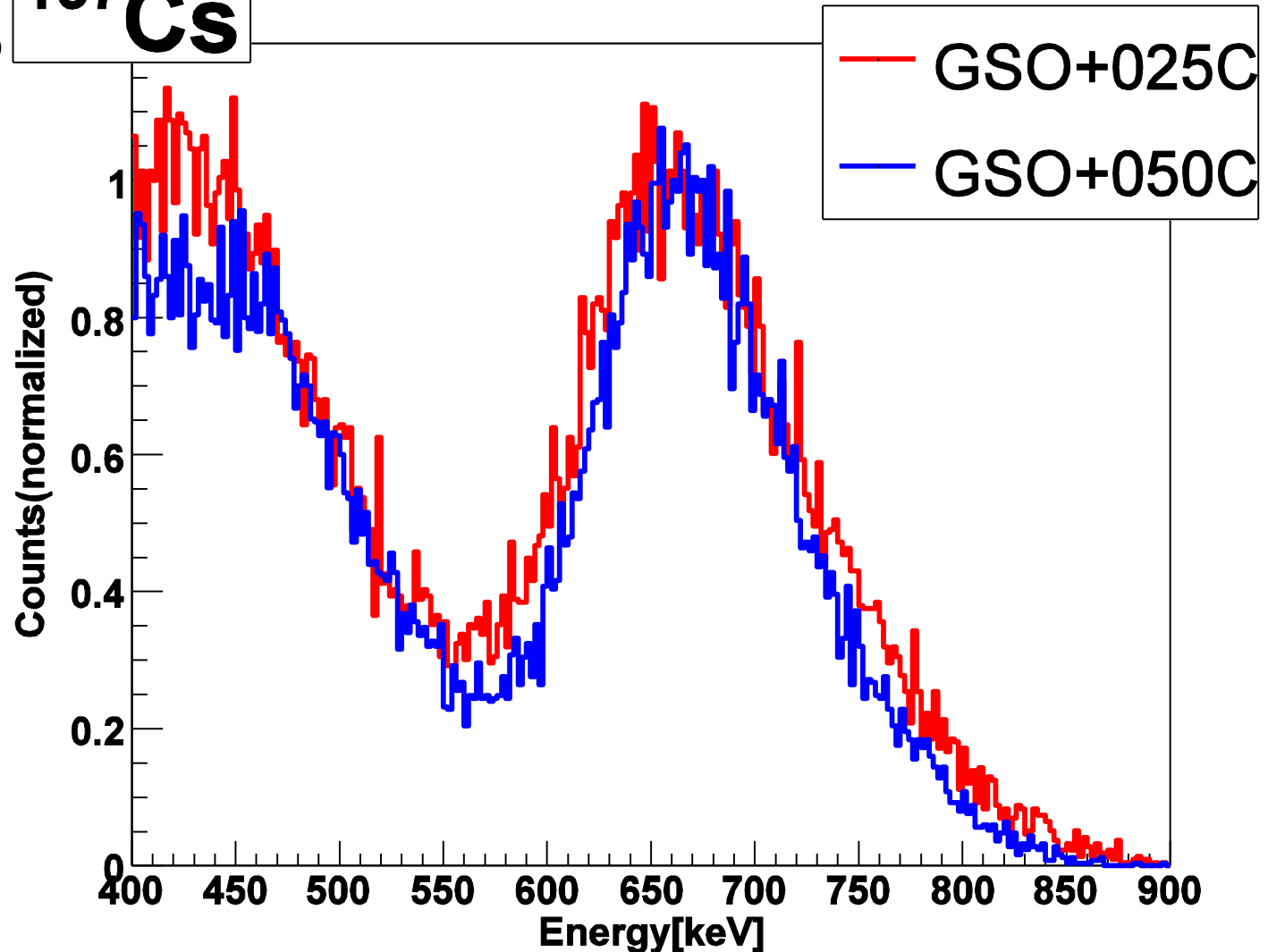
@17°C

**$^{137}\text{Cs}$**

662keVにおける  
エネルギー分解  
能 (FWHM)

**050C:**  
 **$18.7 \pm 1.9\%$**

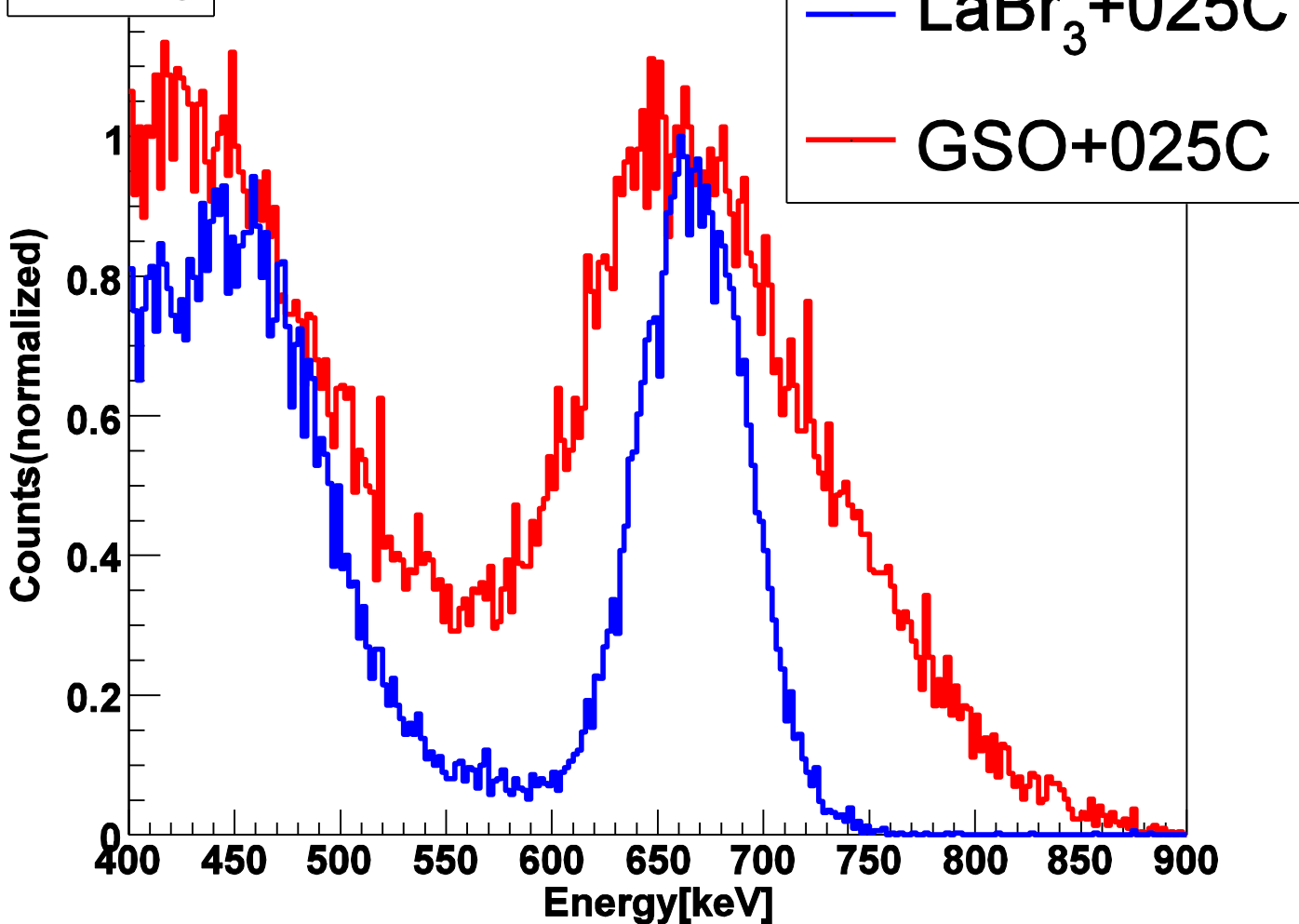
**025C:**  
 **$20.4 \pm 1.4\%$**



# シンチレータによる分解能の比較(025Cを使用)

@17°C

$^{137}\text{Cs}$



662keVにおける  
エネルギー分解  
能(FWHM)

**LaBr<sub>3</sub>:**  
**8.6 ± 0.3%**

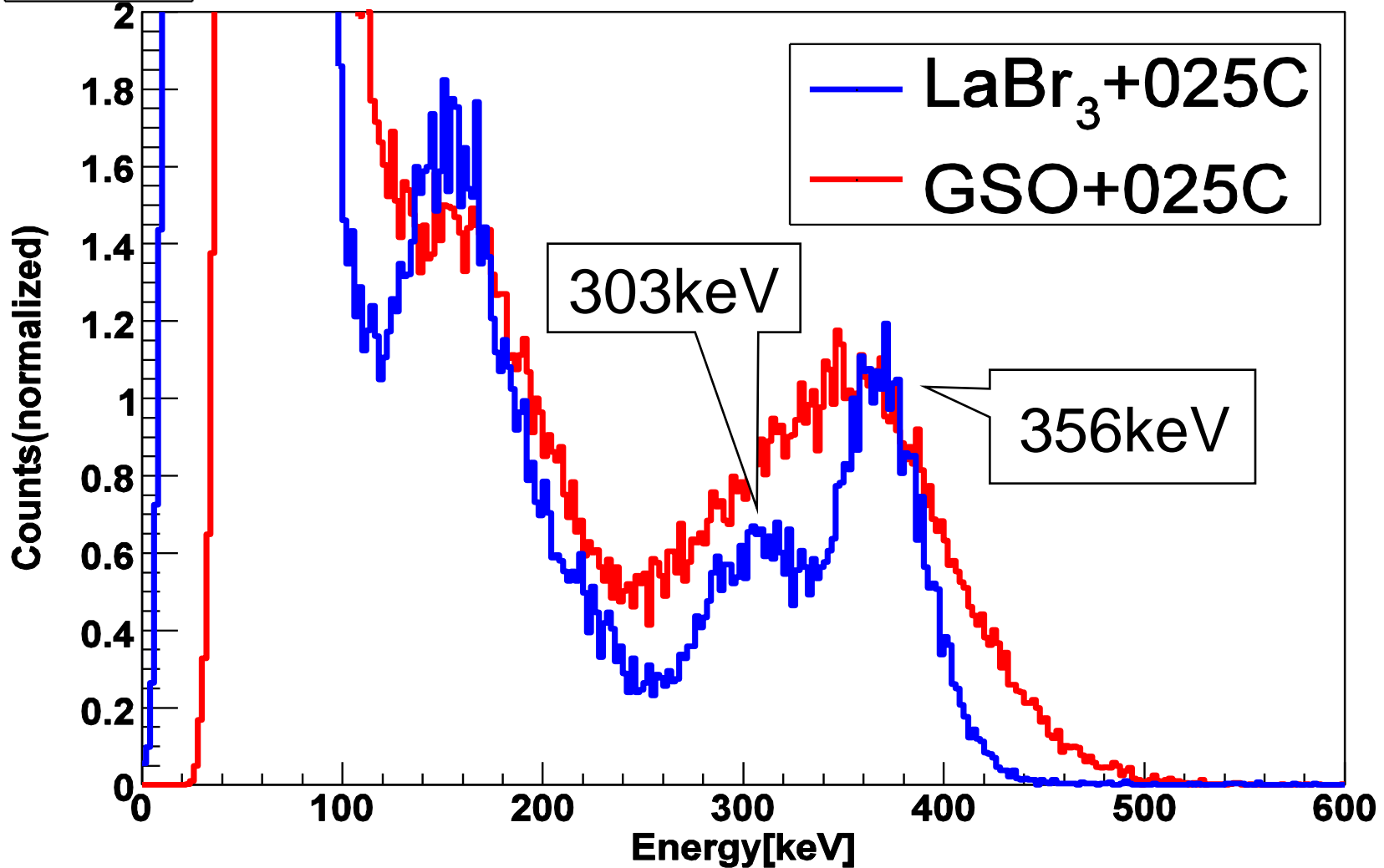
**GSO:**  
**20.4 ± 1.4%**

LaBr<sub>3</sub>の方が圧倒的に分解能が良かった



# シンチレータによる分解能の比較(2)

$^{133}\text{Ba}$



LaBr<sub>3</sub>では356keVと前のピークが分離

# MPPCの型番とシンチの組み合わせによる エネルギー分解能@662keV

MPPC \ シンチ	S10362-33-050C (3600ピクセル)	S10362-33-025C (14400ピクセル)
GSO (Ce)	18.7 ± 1.9%	20.4 ± 1.4%
LaBr <sub>3</sub> (Ce)	9.9 ± 1.5%	8.6 ± 0.3%

# まとめと今後の課題

- ピクセル数の大きなMPPC(025C)の方がダイナミックレンジが広く、LaBr<sub>3</sub>においても線形性がみられた。
- シンチレータにLaBr<sub>3</sub>を用いるとGSOより格段に分解能が良くなった。  
LaBr<sub>3</sub>+MPPC(025C)で8.6% (FWHM@662keV)
- 他の検出器との比較(APD,PMT等)
- MPPCの特徴であるフォトンカウンティングによる光量測定(ノイズにまぎれて1フォトンの検出ができない)

**以上です。**

**ありがとうございました。**

Back up

# MPPCのダイナミックレンジ

- 入射光子数と励起ピクセル数

( $E$ と $Ch$ に対応) の線形性が成り立つ範囲

- 全ピクセル数に対し入射光子数が多くなると線形性が低下

- 1ピクセルに2光子以上入ることによる

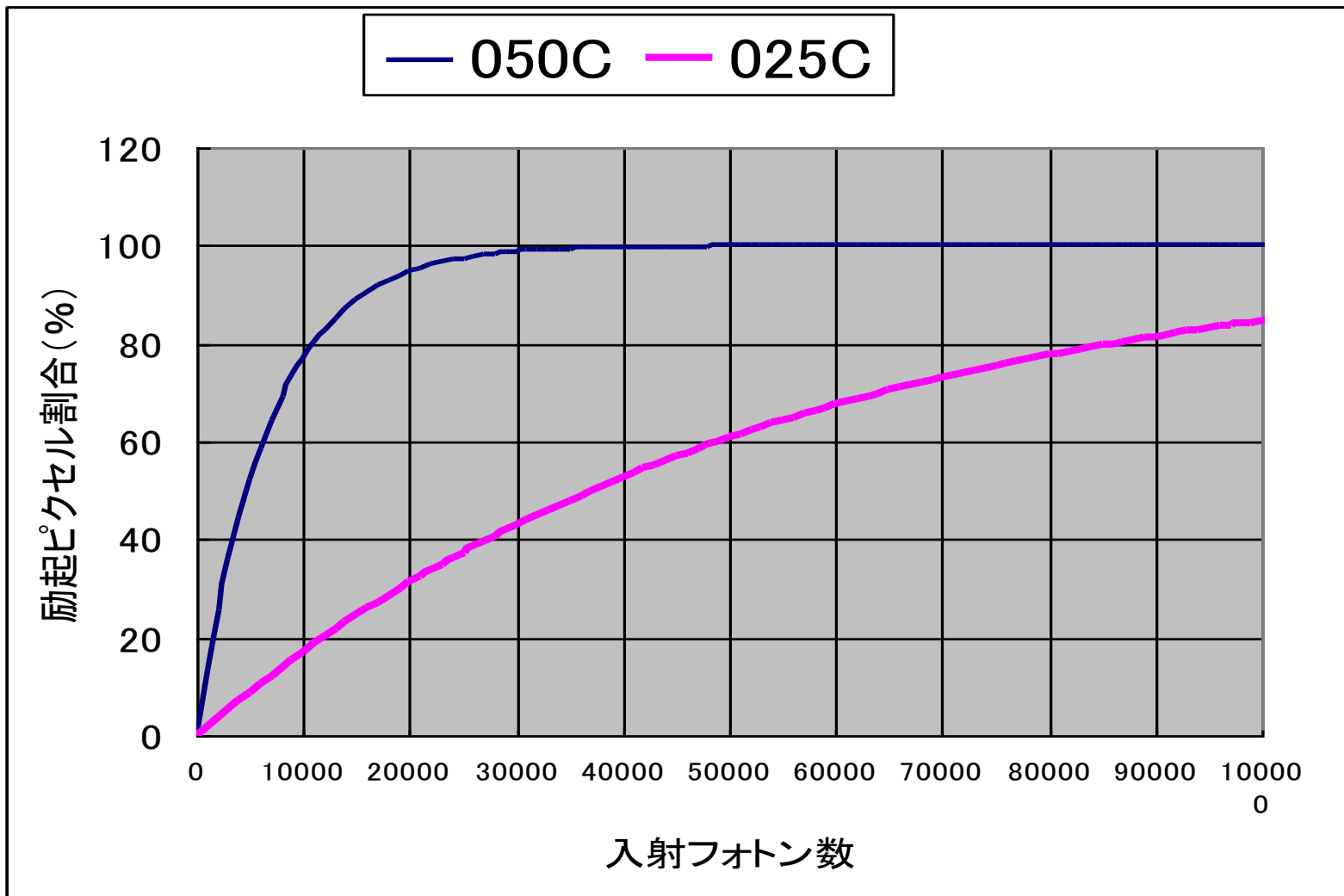
(各ピクセルは光子数によらず一定の出力)

$$P(\%) = 100 \times \left[ 1 - \exp \left( \frac{-N_{\text{photon}} \times \text{PDE}}{N_{\text{total}}} \right) \right]$$

$P(\%)$  : 励起ピクセル割合

$N_{\text{total}}$  : 全ピクセル数

$N_{\text{photon}}$ : 入射フォトン数



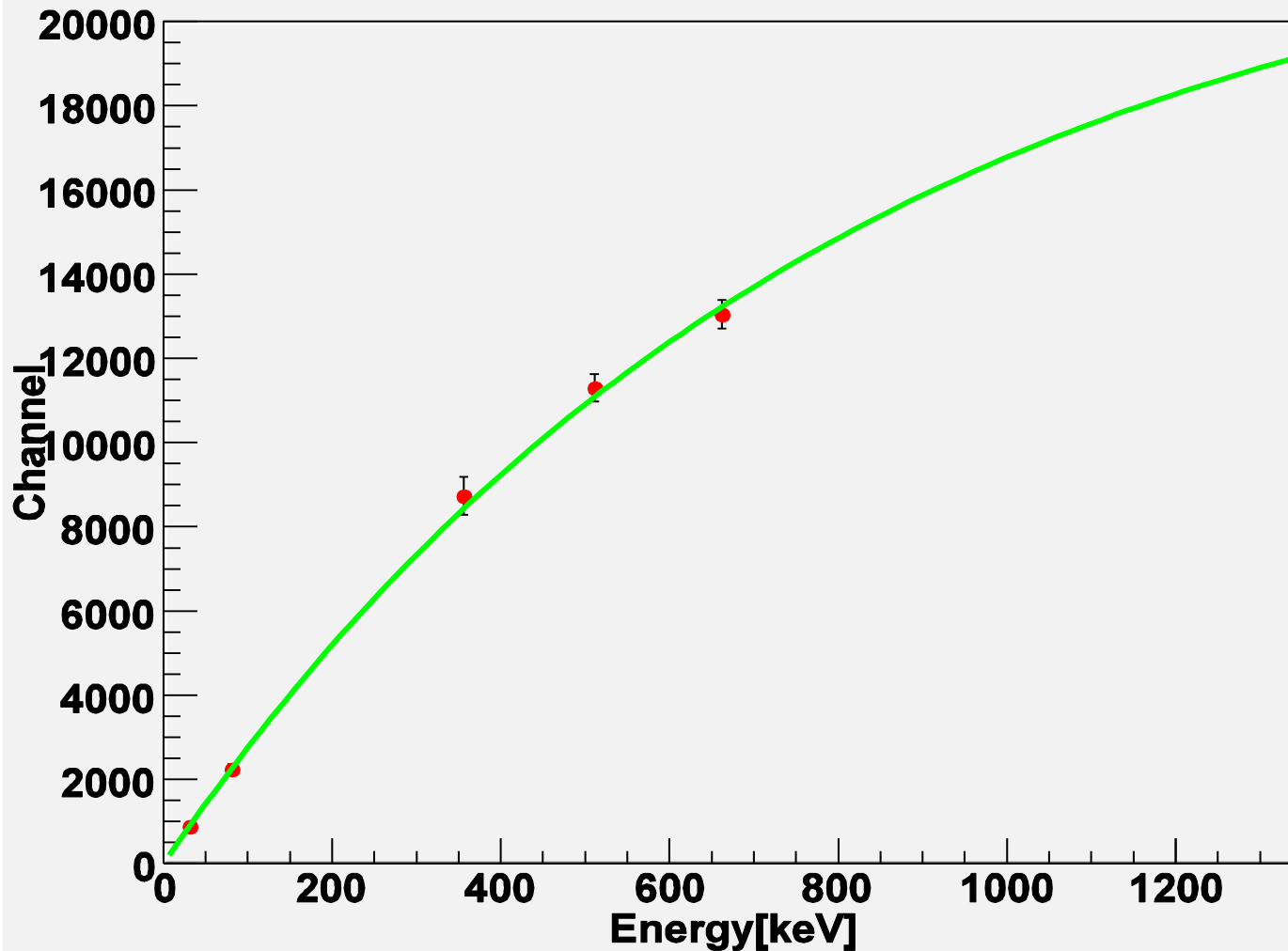
線形性が成り立つ範囲

050C < 025C



Energy-Channel

LaBr<sub>3</sub>+050C

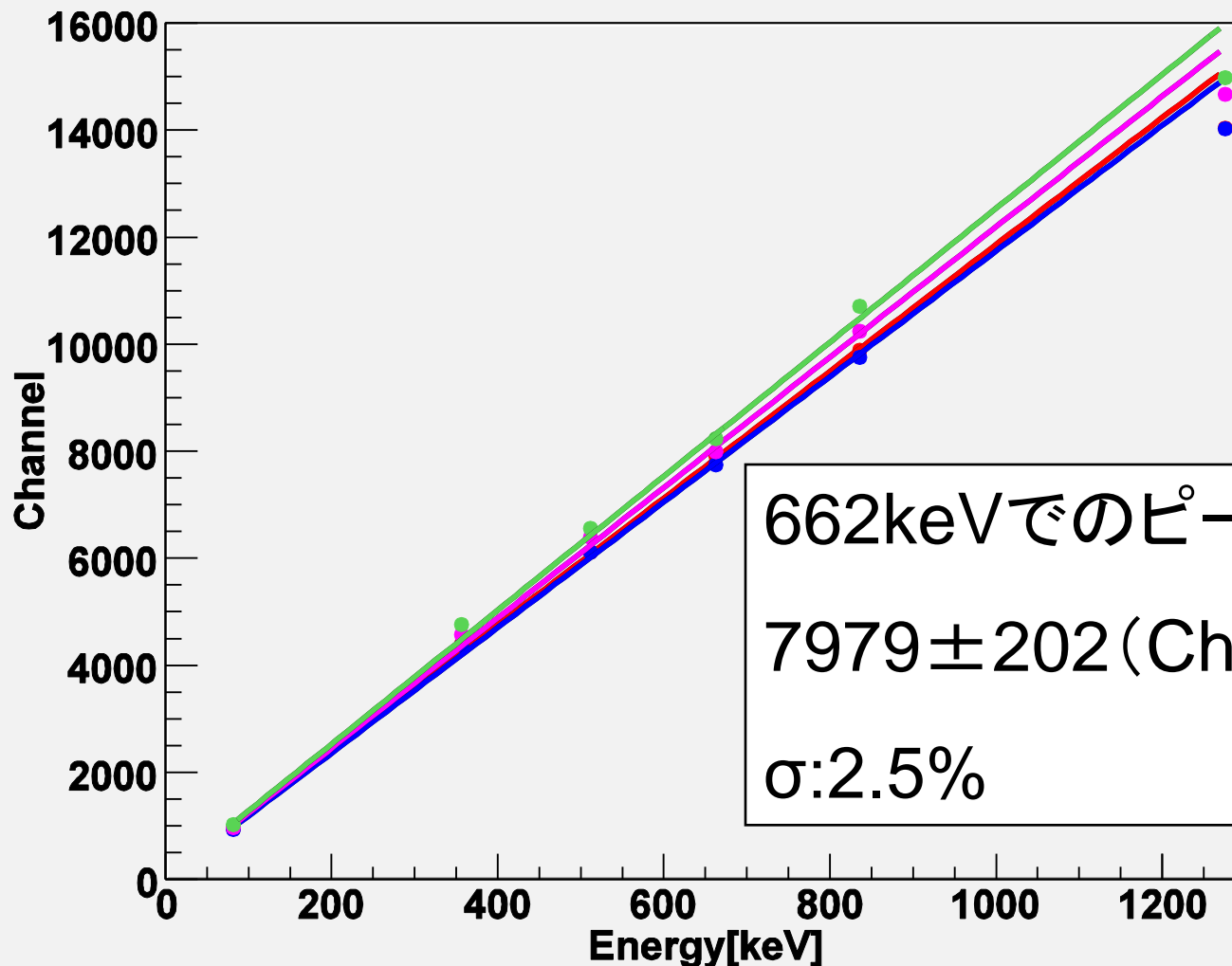


$$Ch = (2.4 \times 10^4 \pm 2.5 \times 10^3) \times$$

$$[1 - \exp(- (1.2 \times 10^{-3} \pm 1.7 \times 10^{-4}) \times E[\text{keV}])]$$

# LaBr<sub>3</sub>+MPPC(025C)での 測定ごとのピーク位置のずれ

025C+LaBr<sub>3</sub>\_cal



# LaBr<sub>3</sub>(Ce)

～高いエネルギー分解能～



シングルアノード  
PMT  
浜松ホトニクス社  
R6231 で測定.

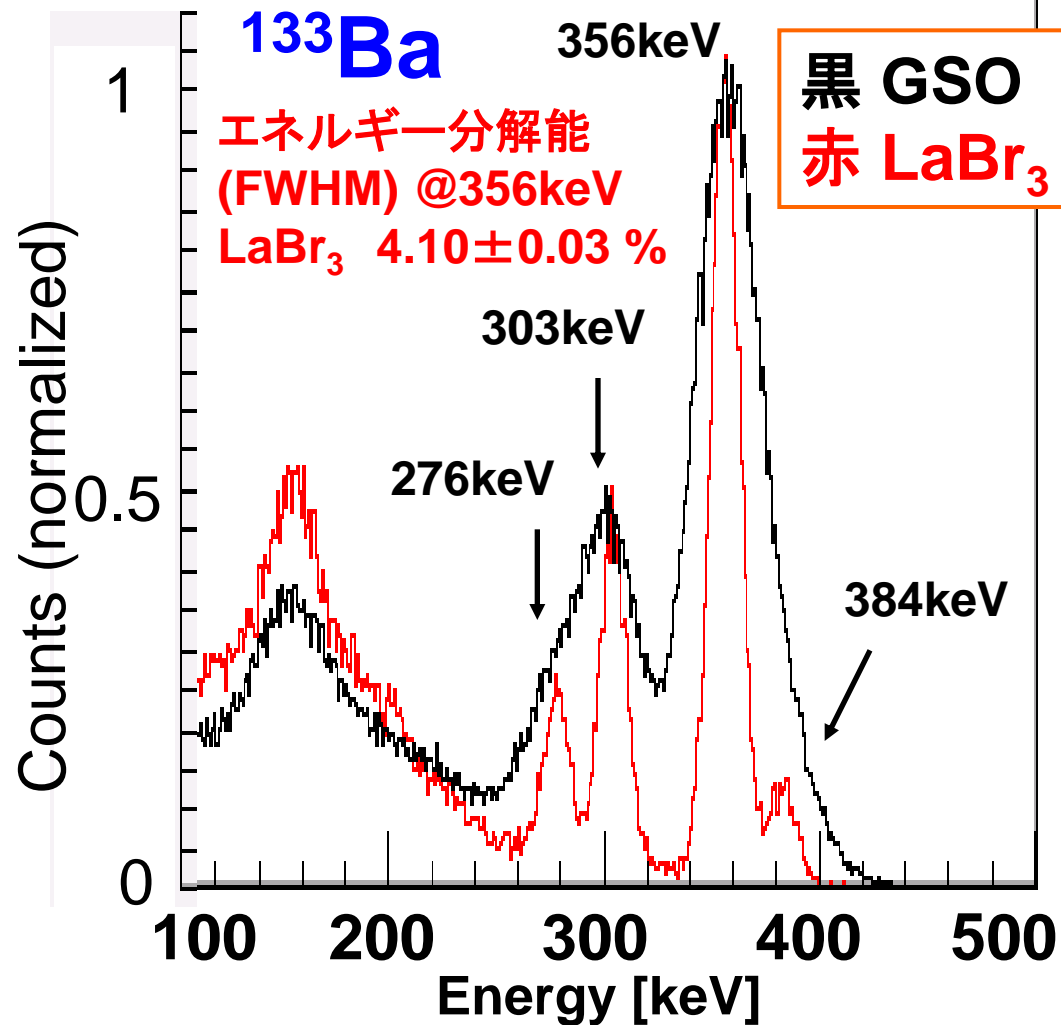


Saint-Gobain 社製  
φ13 × 13mm<sup>3</sup>大LaBr<sub>3</sub>

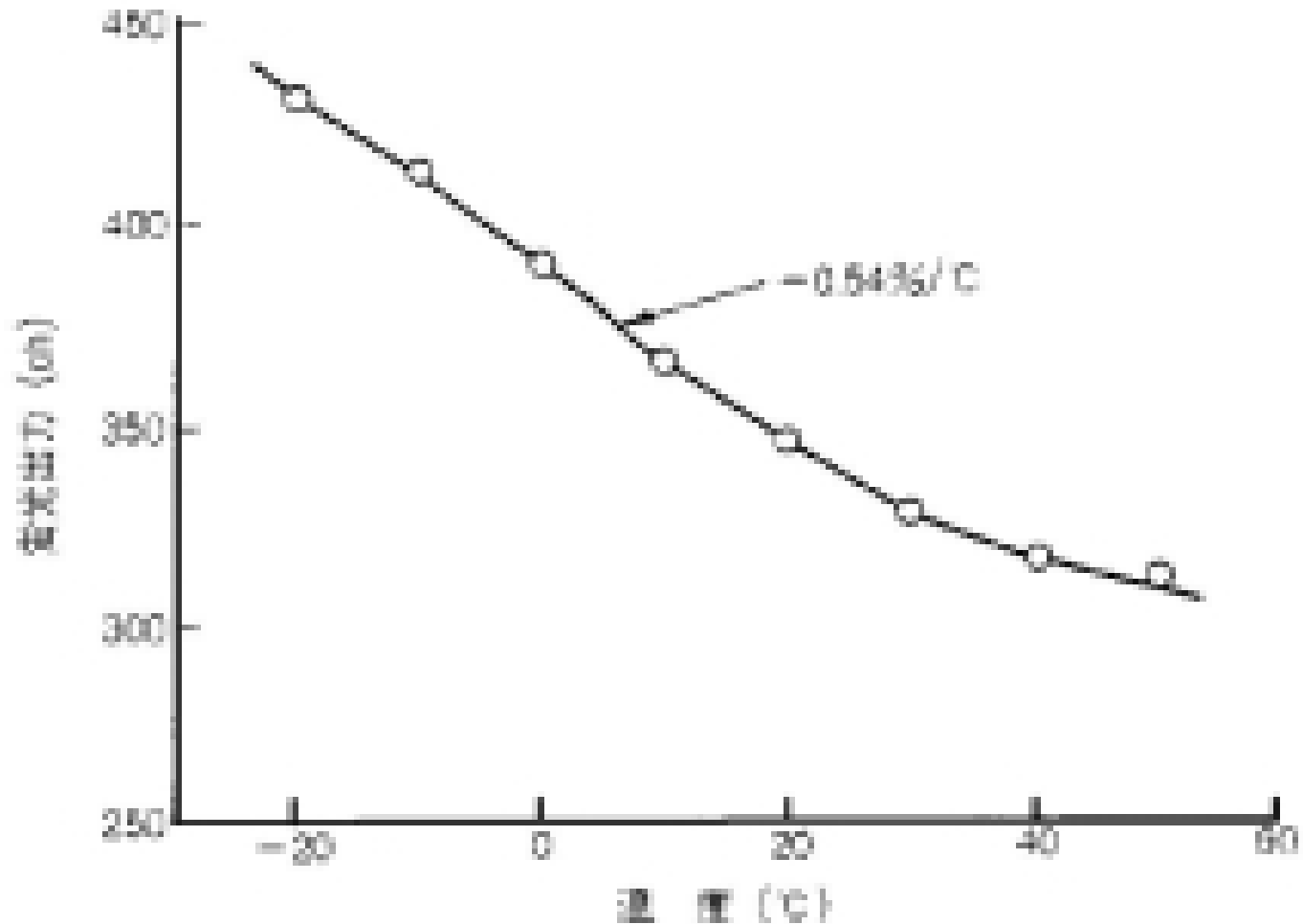
Energy Resolution  
@662keV (FWHM) :  
LaBr<sub>3</sub> 3.1 ± 0.1 %

Decay time : ~25 nsec  
Light Output : 1.6  
(参考 GSO(Ce) : 0.2)  
(NaI(Tl)のそれを1とする)

※潮解性あり



LaBr<sub>3</sub>(写真)とGSO(25 × 25 × 13mm<sup>3</sup>)の  
エネルギースペクトル比較(<sup>133</sup>Ba)

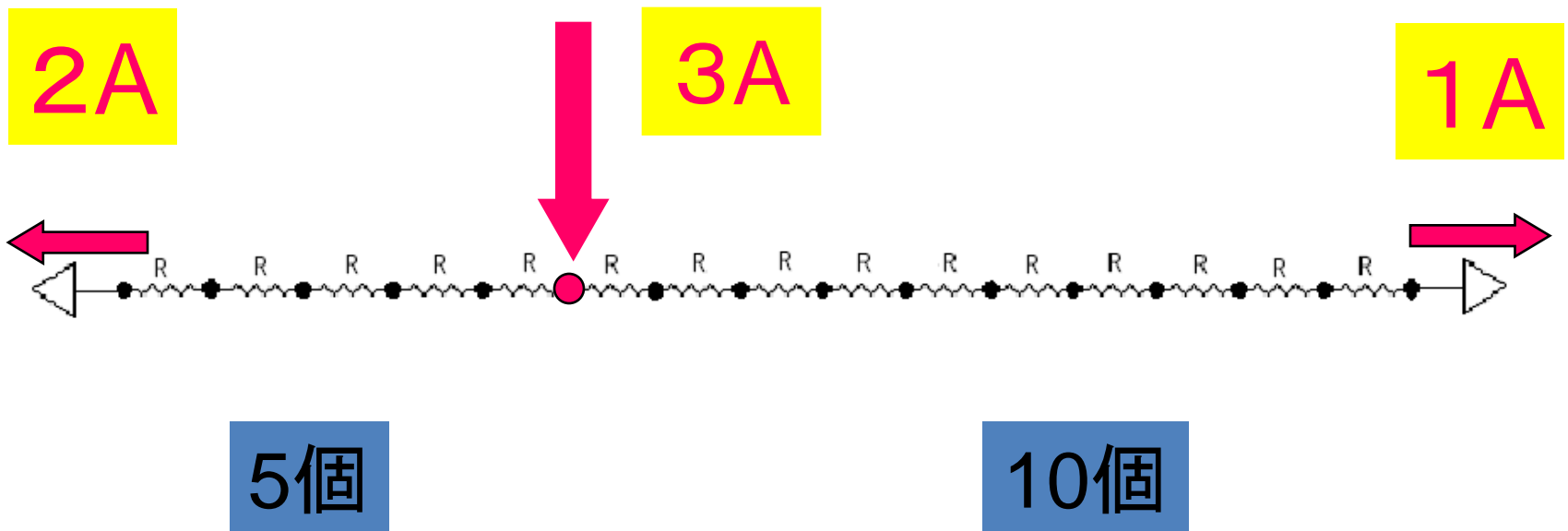


GSOの室温近傍における蛍光出力の温度依存性

# MPPCの利点

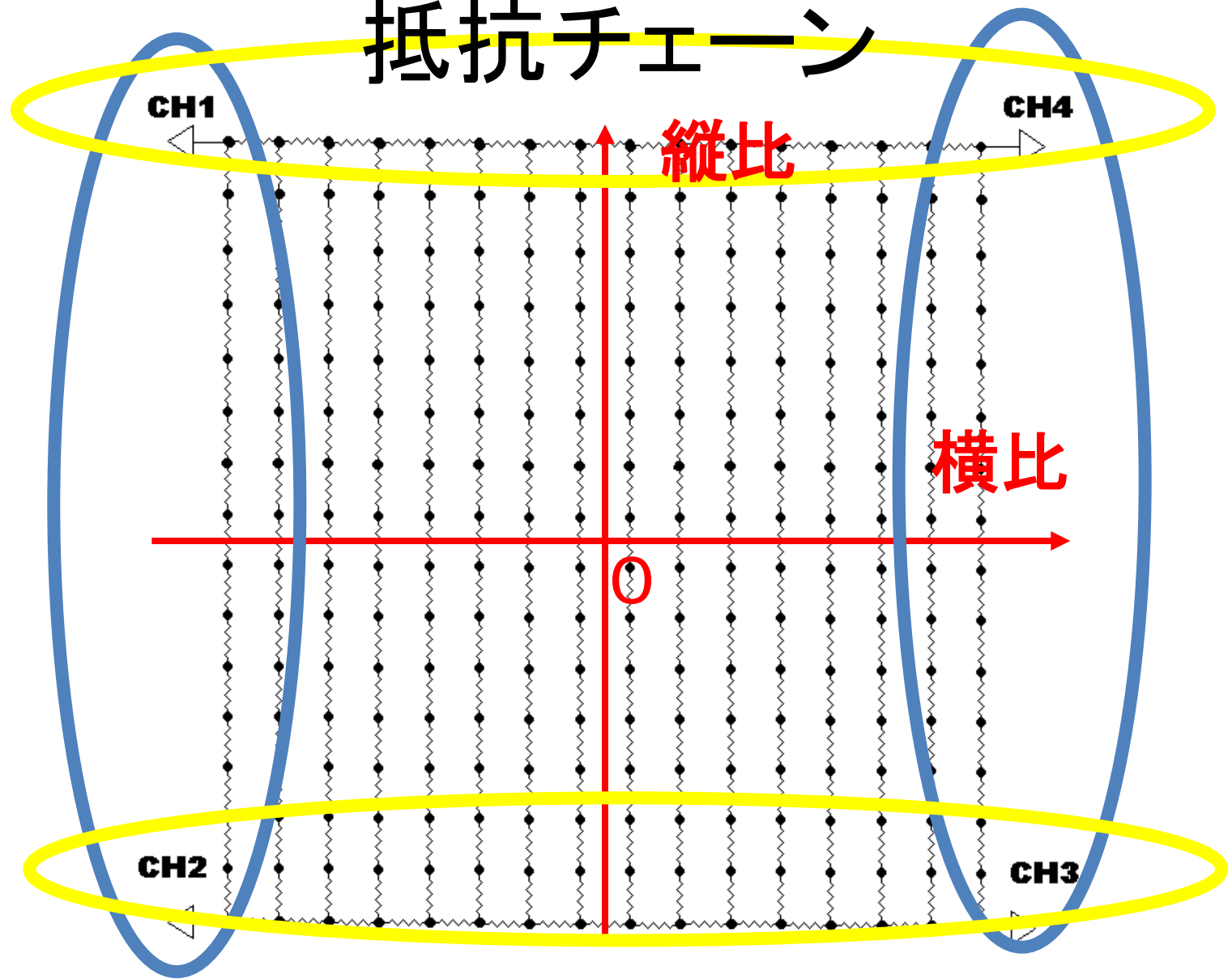
- 磁場中でも使える(PMTは磁場に弱い)
- 低バイアスで動作  
(APD $\sim$ 50-500V, MPPC $\sim$ 70V)
- ゲインが高い(抵抗チェーンが使える)
- Timing Resolutionが良い  
(APD $>$ 1000ps, MPPC $\sim$ 50ps)

# 抵抗分割の仕組み



- 抵抗チェーンの左右に流れる電荷量の比から位置を算出

# 抵抗チェーン



$$\text{横比} = \frac{(ch3 + ch4) - (ch1 + ch2)}{ch1 + ch2 + ch3 + ch4}$$

$$\text{縦比} = \frac{(ch2 + ch3) - (ch1 + ch4)}{ch1 + ch2 + ch3 + ch4}$$