CsI結晶シンチレータを用いたコンプトンカメラγI(ガンマアイ)の開発

茨城大学大学院　理工学研究科
加賀谷　美佳

内田智久[E,F]　梅原克典[A]　榎本良治[B]　片桐秀明[A]　田中真伸[E,F]
中山浩平[A]　花房龍治[D]　村石浩[C]　柳田昭平[A]　吉田龍生[A]

茨城大理[A]　東大宇宙線研[B]　北里大医衛[C]
富士電機[D]　KEK素核研[E]　Open-It[F]

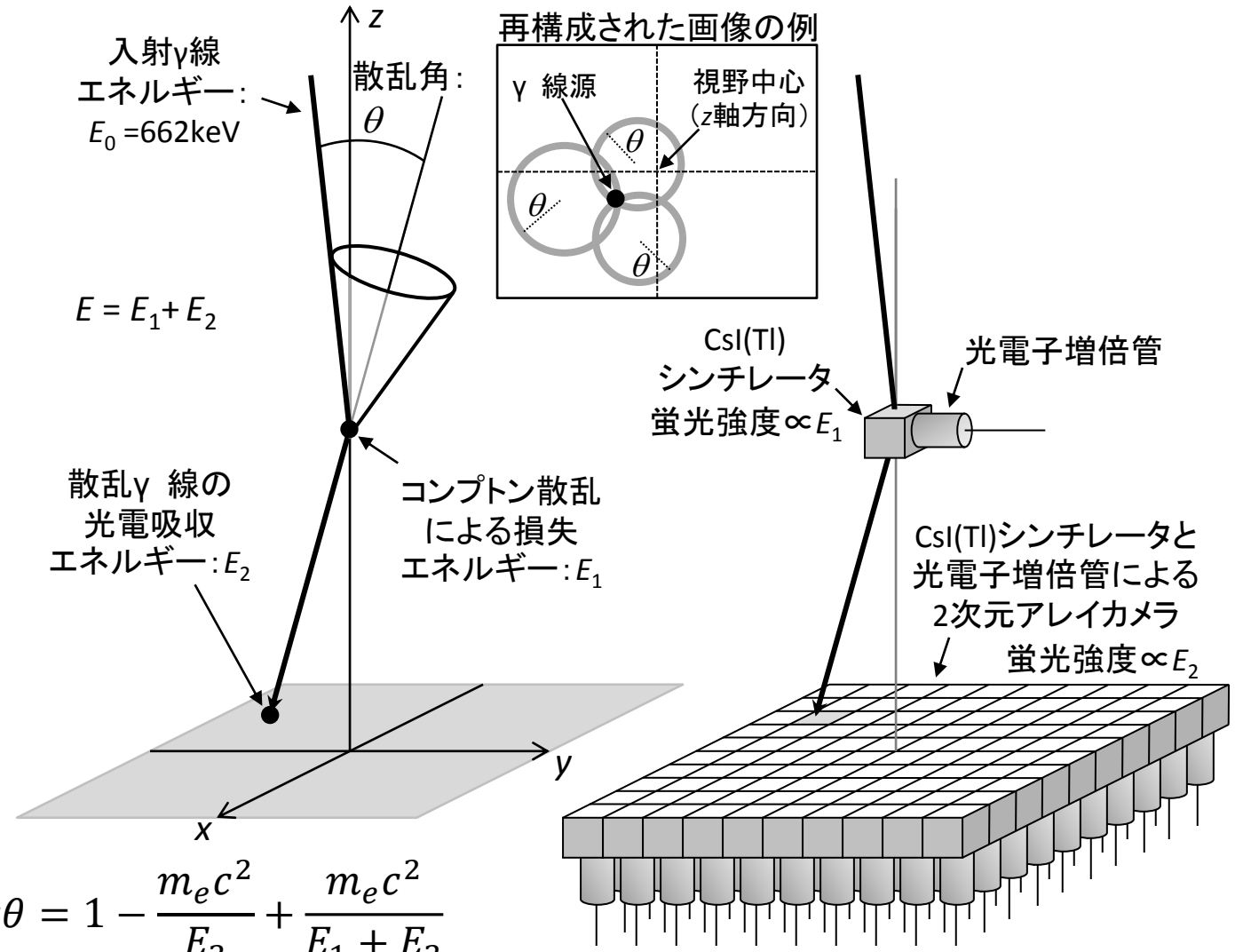
研究の背景

- 福島第一原発の事故による汚染地域のサーベイ
- 核医療施設における汚染状況
- 核医療の治療への応用
- 天文分野への応用

研究の目的

- 低レベルの汚染地域での測定
  - 0.1μSv/h以上のすべての地域での測定可能
- 角度分解能5度以下の測定を目指す。(最終的には1度)
  - 10m離れた場所から1mのホットスポットが判別できる。

コンプトンカメラーガンマアイ計画



$$cos\theta = 1 - \frac{m_e c^2}{E_2} + \frac{m_e c^2}{E_1 + E_2}$$

コンポーネントの最適化

2層のコンプトンカメラ

- $E_2=E-E_1$であるので1層目のエネルギー分解能が数keVならOK。

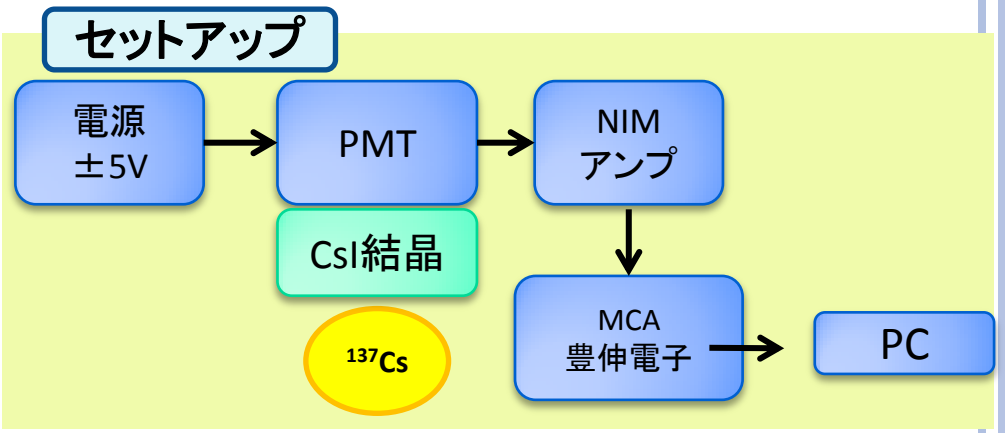
（例えば^{57}Coの14.4keVのガンマ線ではエネルギー分解能2keVを目指す）

- 検出部分となる光電子増倍管・CsI結晶シンチレータの組み合わせを変えて試験
- 最もエネルギー分解能の高い組み合わせを選択

光電子増倍管 評価

H11432-100

- 光電面のサイズ38mm
- コッククロフトウォルトン回路付
- スーパーバイアルカリPMT



PMH8820MOD

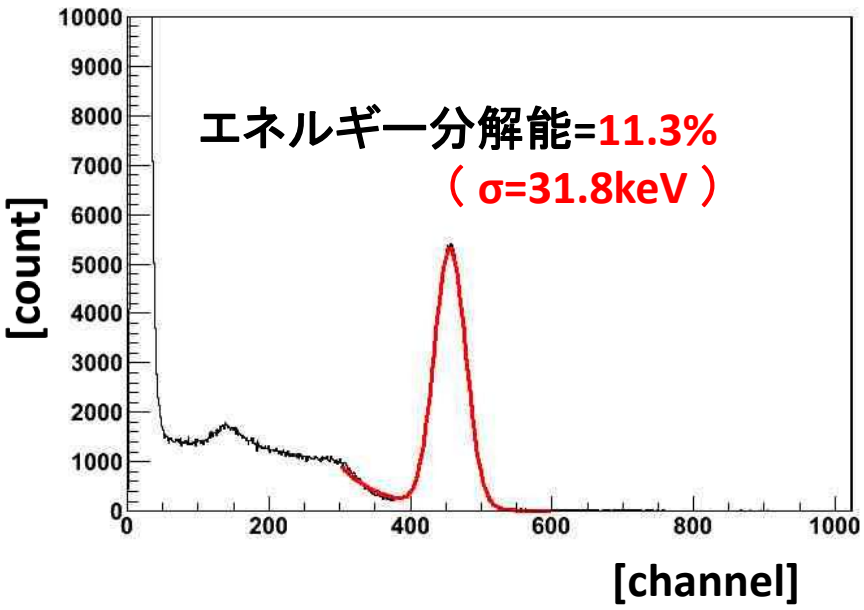
- 光電面のサイズ20mm
- プリアンプ付
- HVは外部から接続

CANGAROO望遠鏡に使用していたPMTがいくつかあったため、我々のコンプトンカメラに使用できるか評価した。

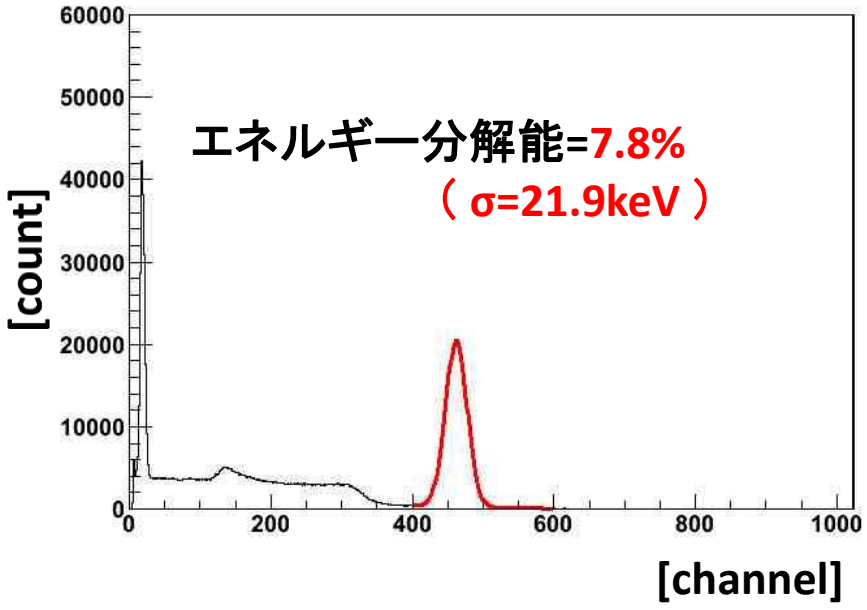
左：H8820MOD
右：H11432-100

^{137}Cs　662keVで比較

H8820MOD



H11432-100



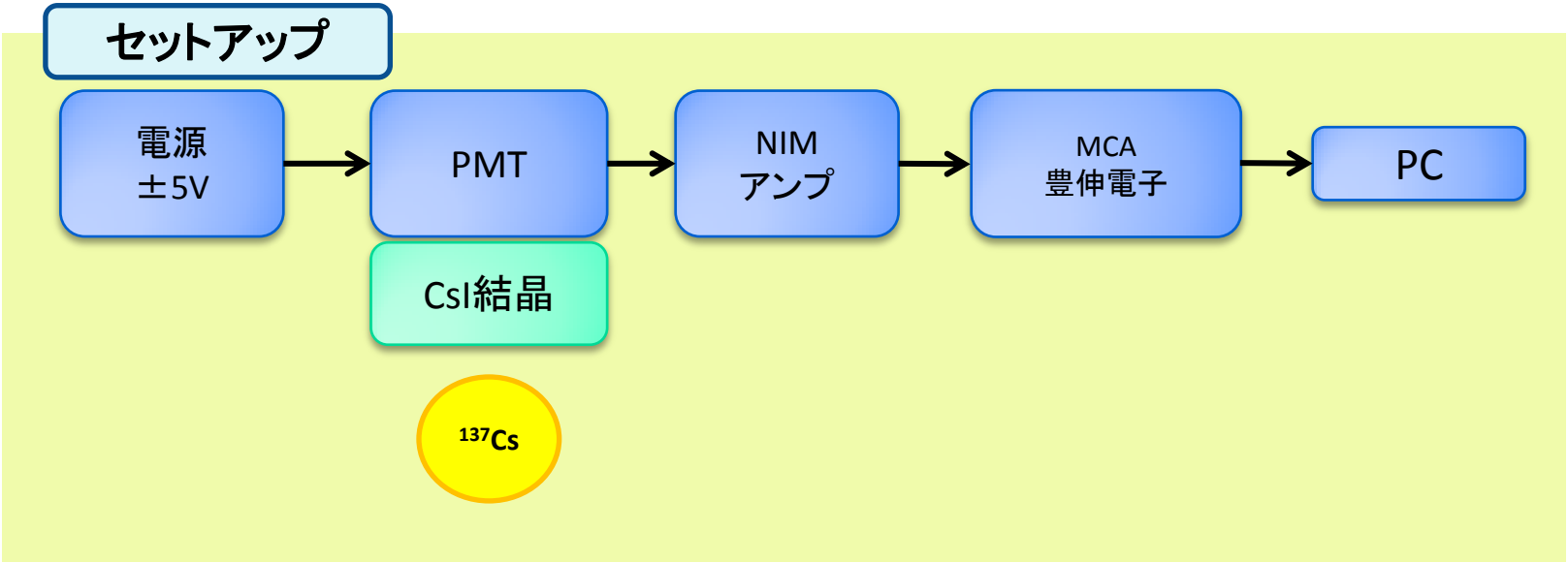
実験条件
- 3.5cmCsI（応用光研　研磨なし）
- NIM 200倍
- HV　1630V

実験条件
- 3.5cmCsI（応用光研　研磨なし）
- NIM 150倍
- HV 1500V

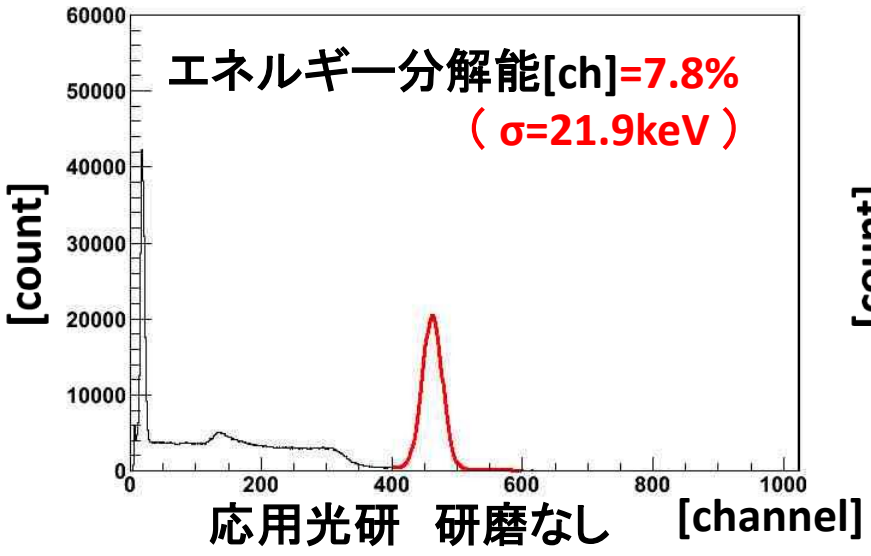
結晶比較

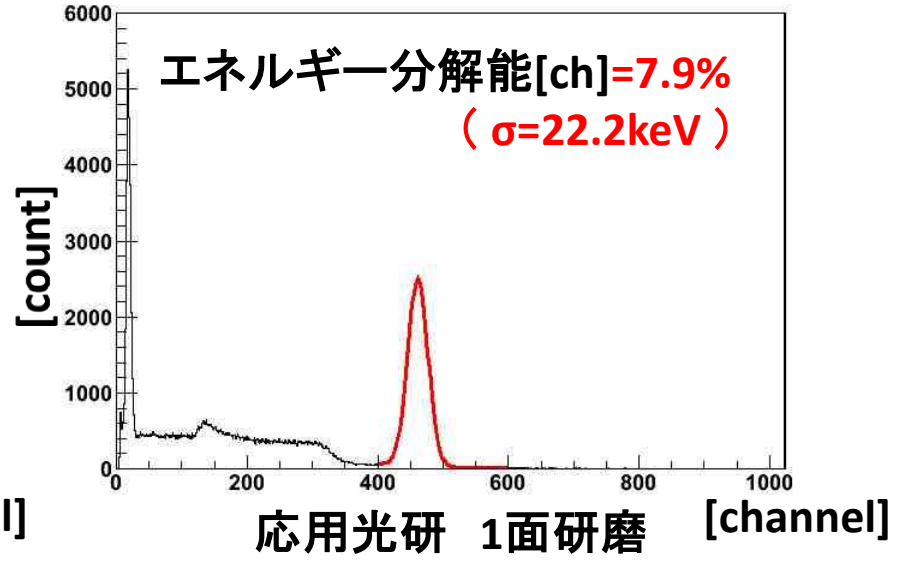
結晶の種類

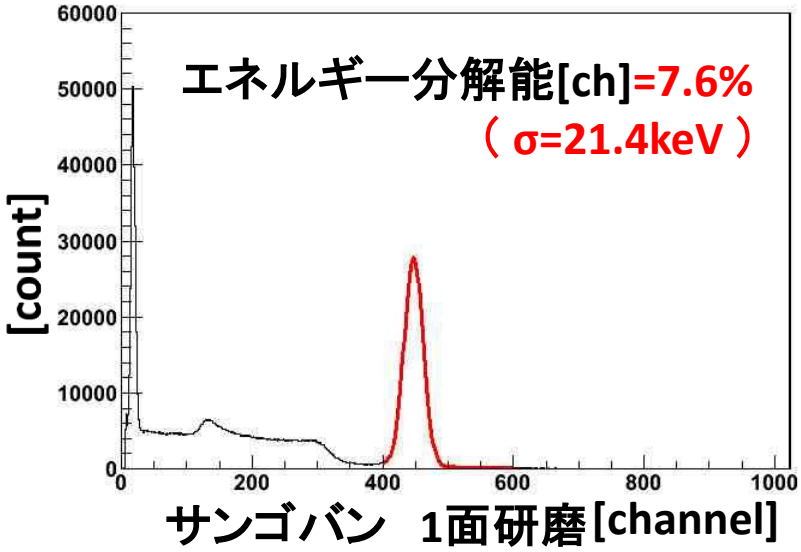
- 応用光研3.5cm角CsI　研磨なし
- 応用光研3.5cm角CsI　研磨あり（1面）
- サンゴバン3.5cmCsI　研磨あり（1面）
- Belle 3.5cmCsI　研磨なし

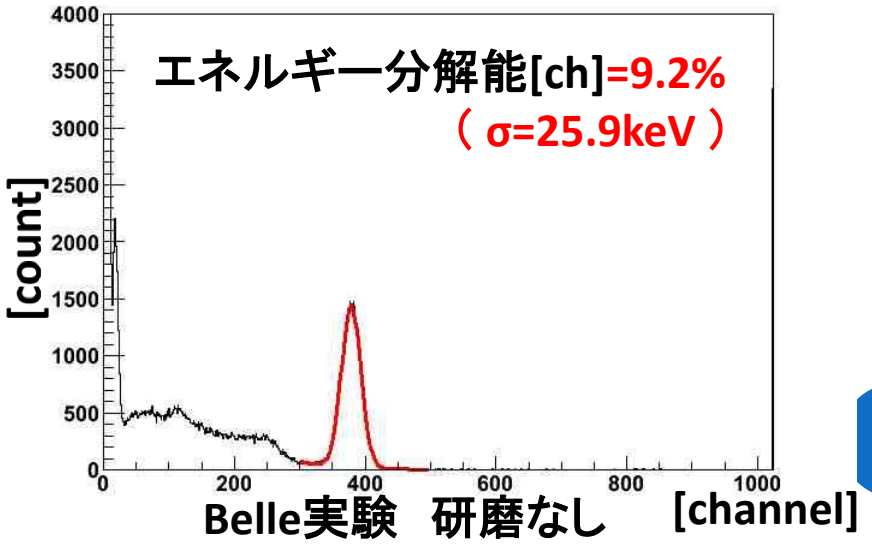


^{137}Cs　662keVで比較



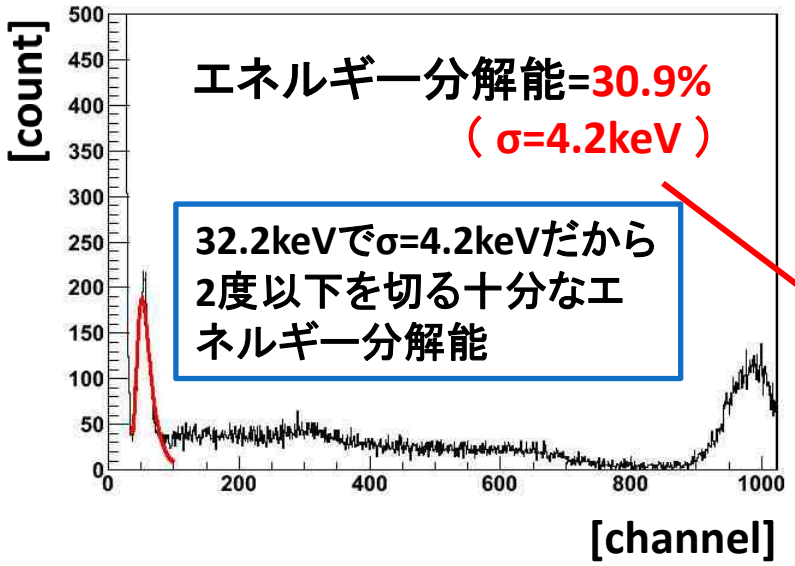


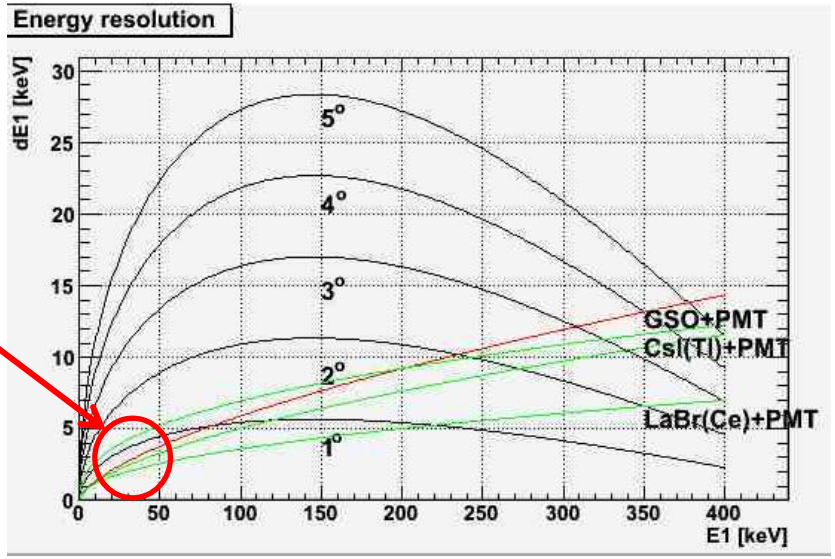




コンポーネントの最適化の結果

光電子増倍管としてはH11432-100を採用
結晶はどれも^{137}Csの662keVで同等の分解能が出ている





今後

- オプティカルグリスの種類
- 反射材の種類
- 遮光・ノイズ落とし

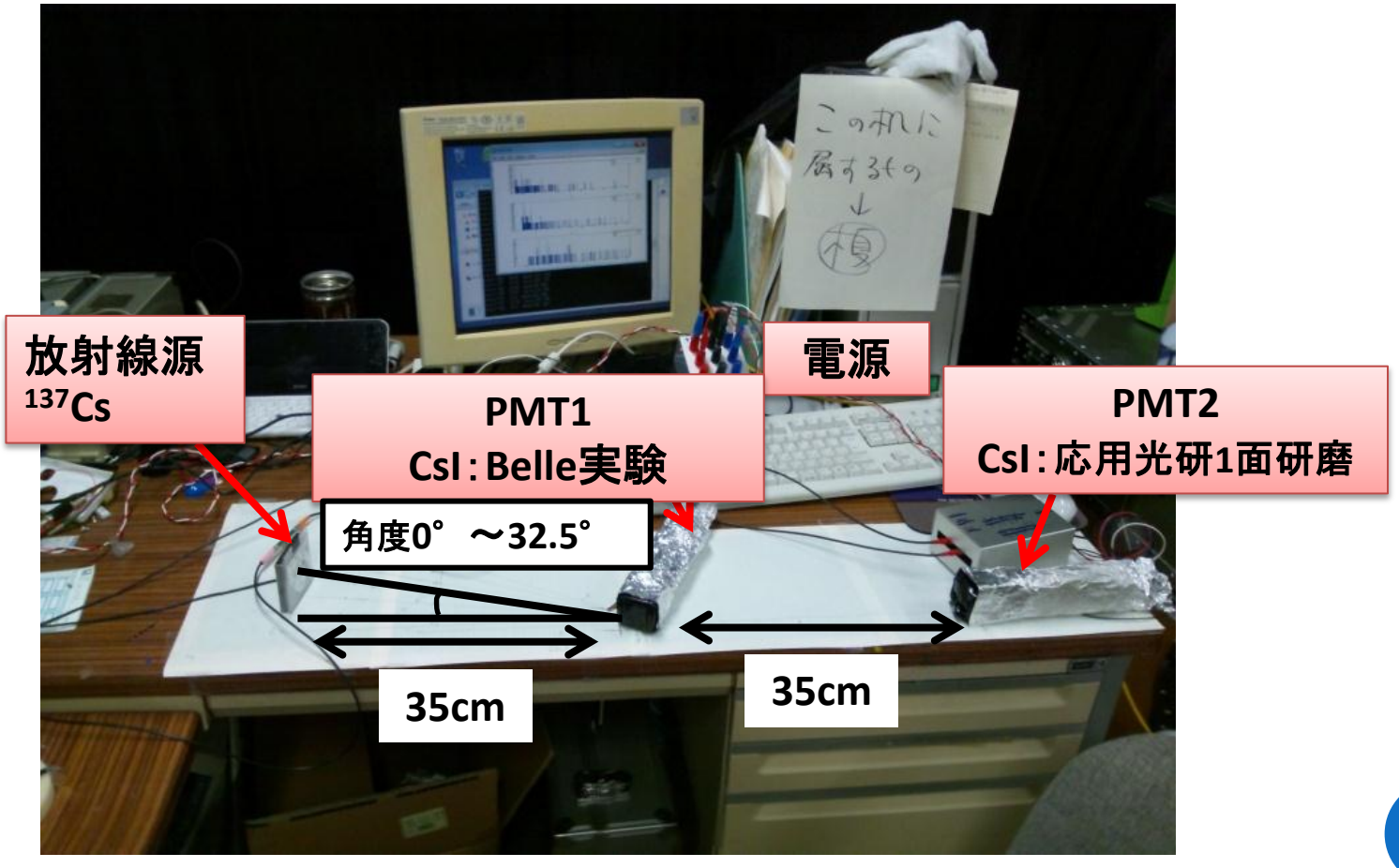
などにより、よりエネルギー分解能の向上を検討

CAMACを使用して多チャンネル測定

2カウンター、4カウンターによる測定

放射線源の角度を変えながら測定

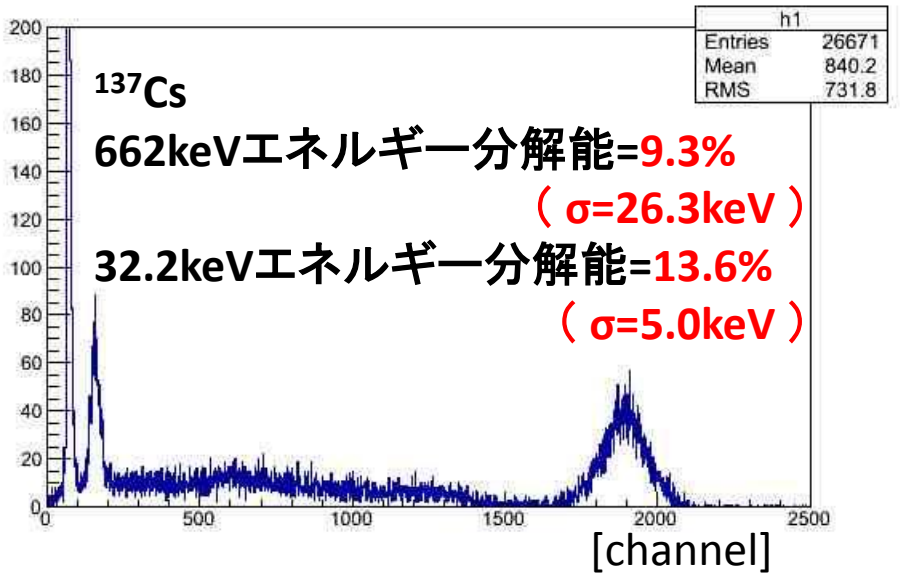
2カウンター測定　セットアップ

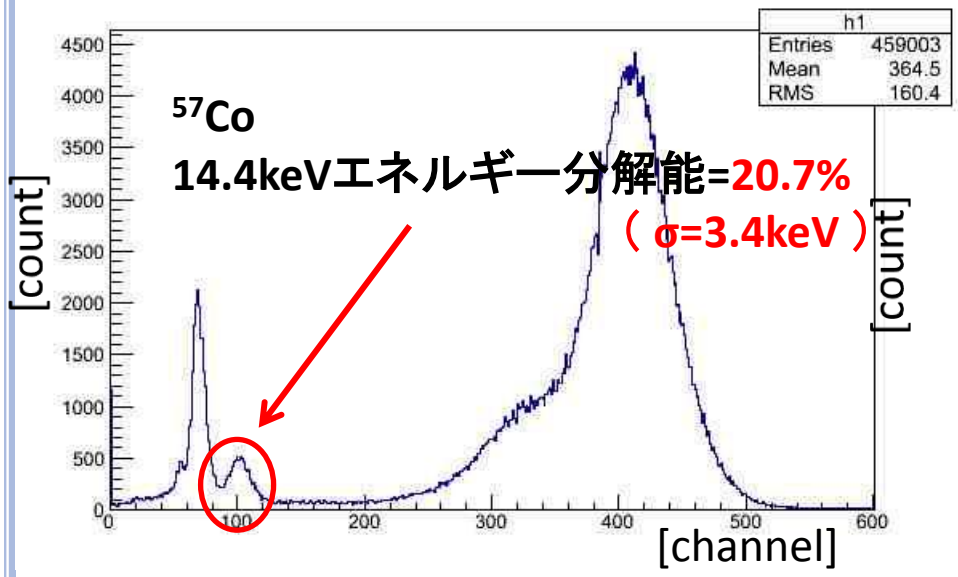


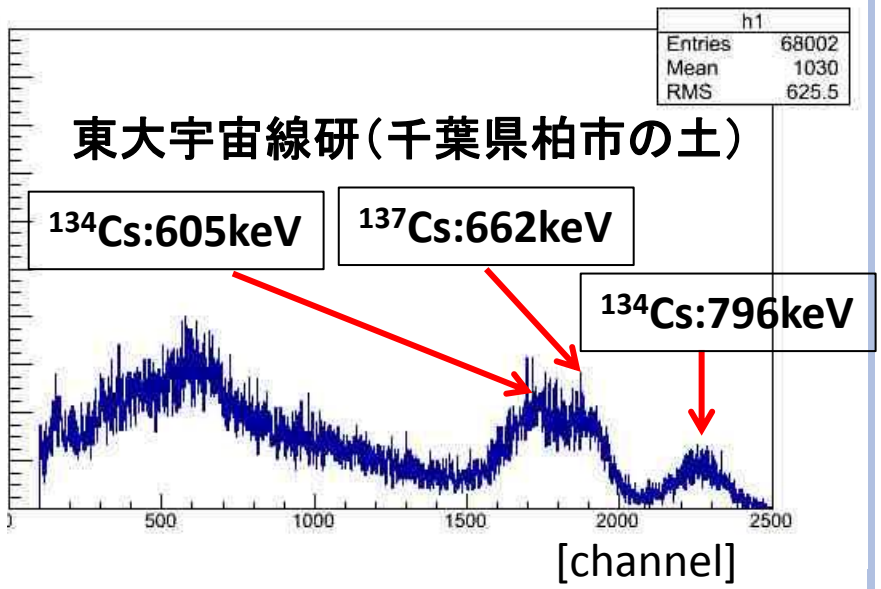
CAMAC ADC 多チャンネル測定　1カウンターテスト

CAMAC ADC による多チャンネル測定

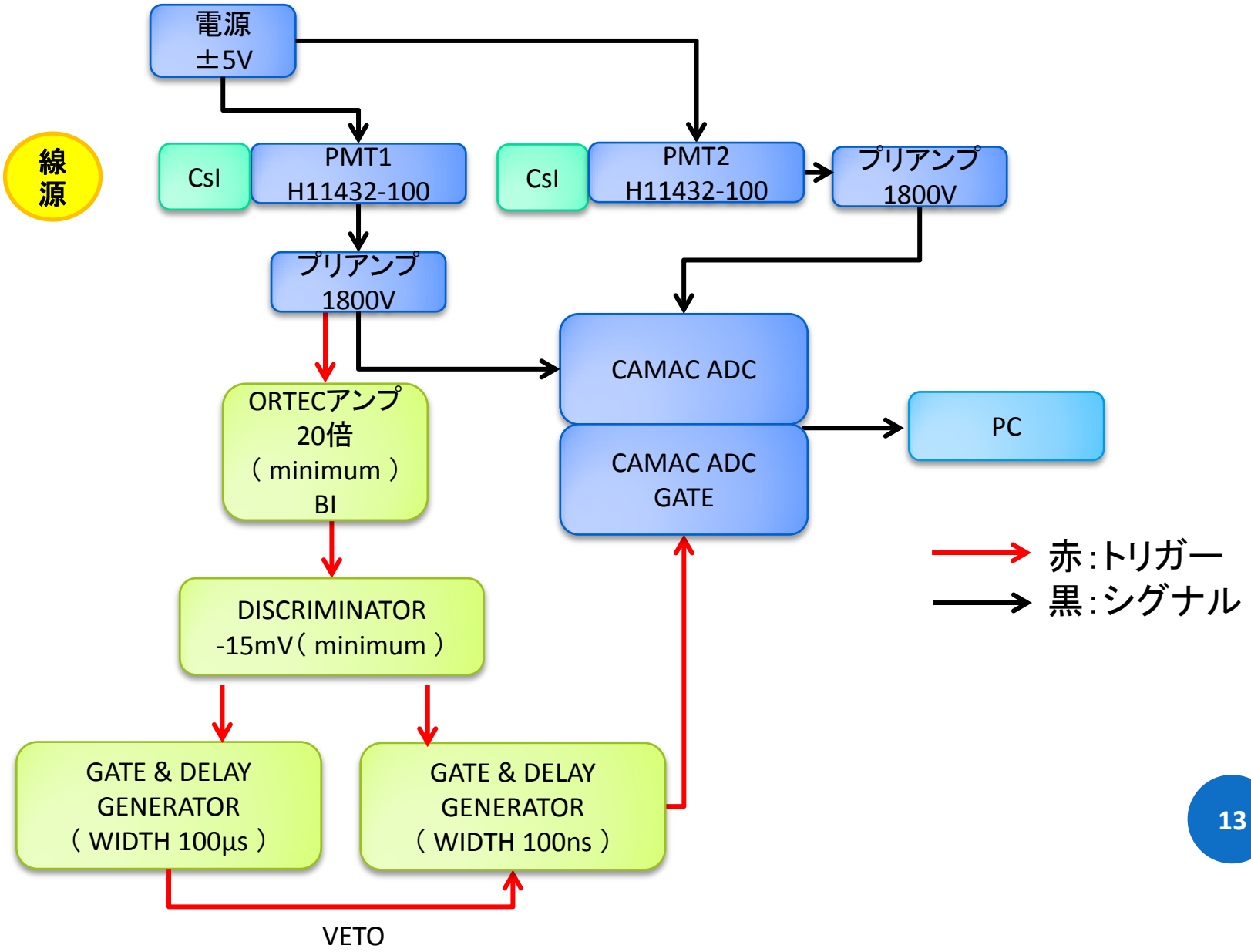
- コンプトンイベントを抽出するために多チャンネルのCAMAC ADCを使用。まずは1chでスペクトルがちゃんととれているか試した。



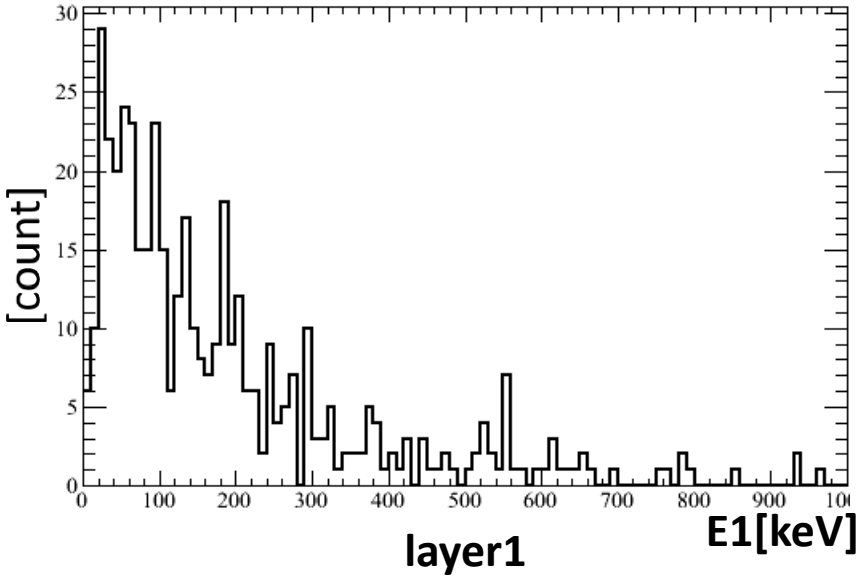


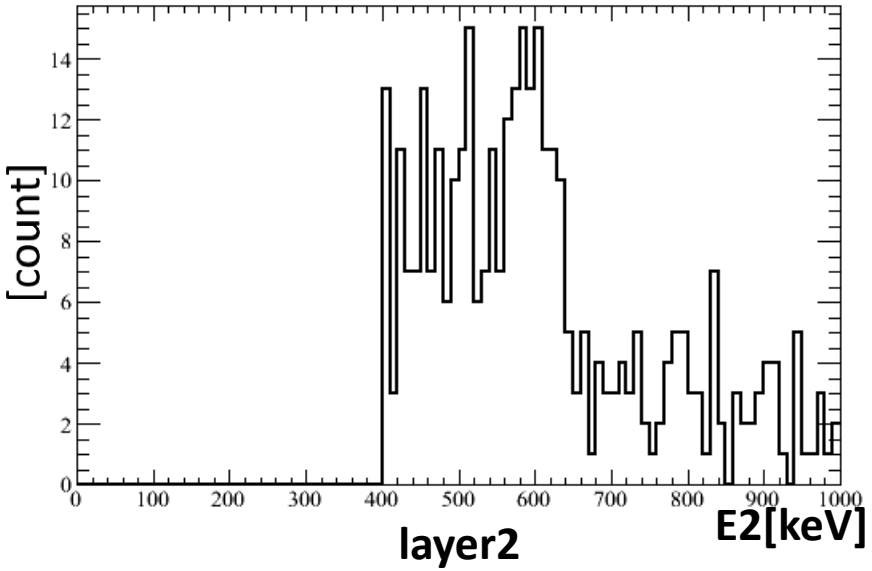


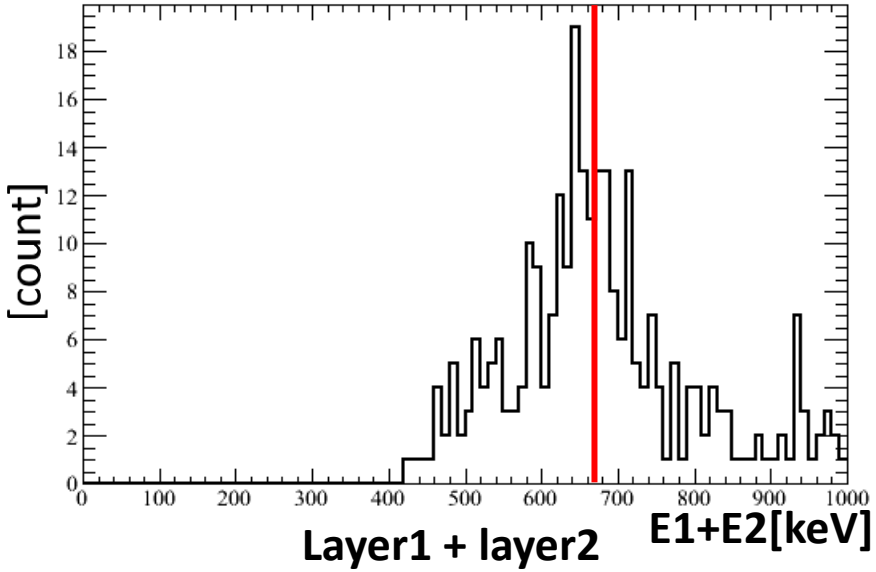
2カウンター測定　セットアップ 概略図



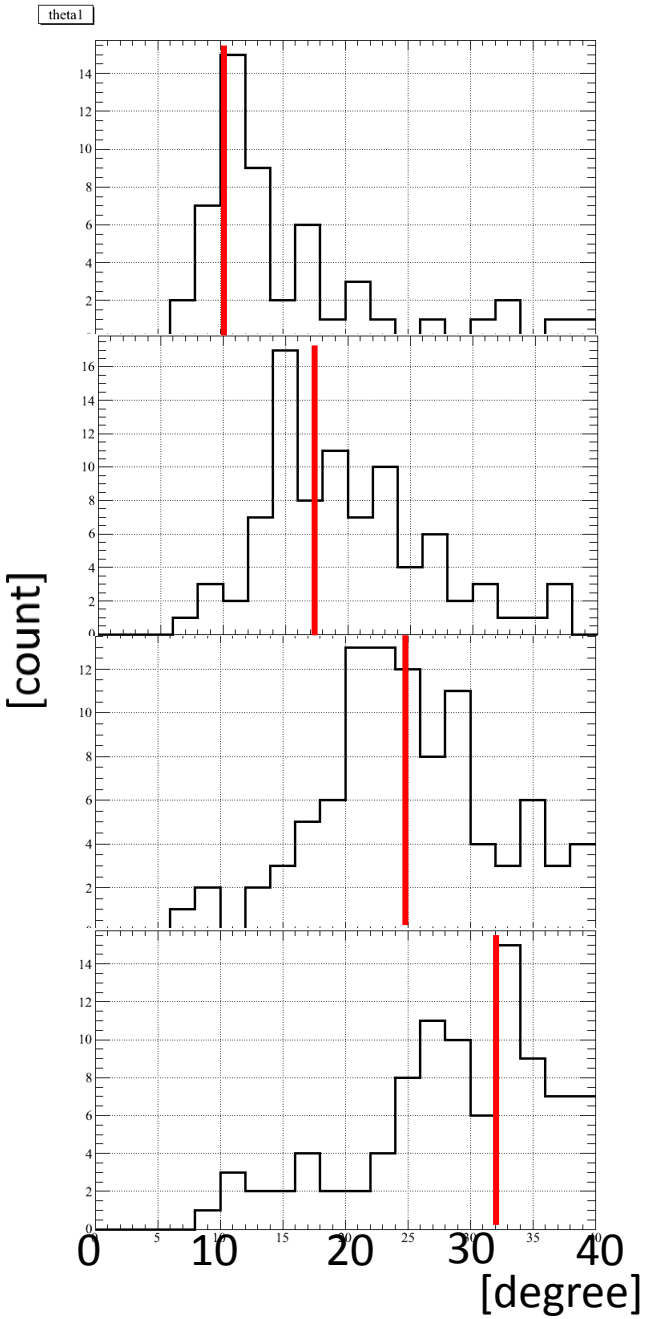
2カウンター測定
^{137}Cs スペクトル　放射線源の設置角度　25°

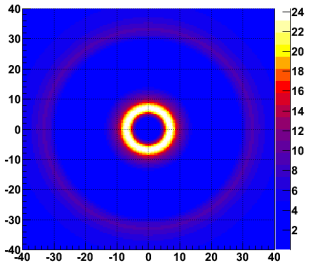




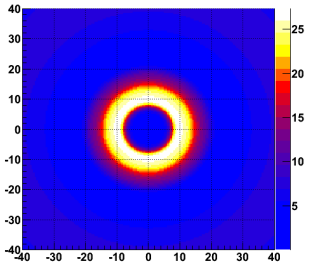


layer1：E1が7keV以上のイベントを抽出。
期待されるエネルギー：72keV
layer2：E2が400keV以上のイベントを抽出
期待されるエネルギー：590keV
Layer1+layer2:E1+E2=662keVのイベントが抽出できている

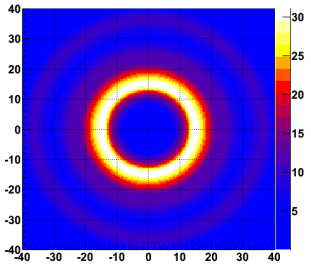




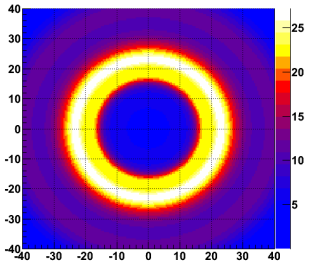
線源の位置　10°



線源の位置　17.5°



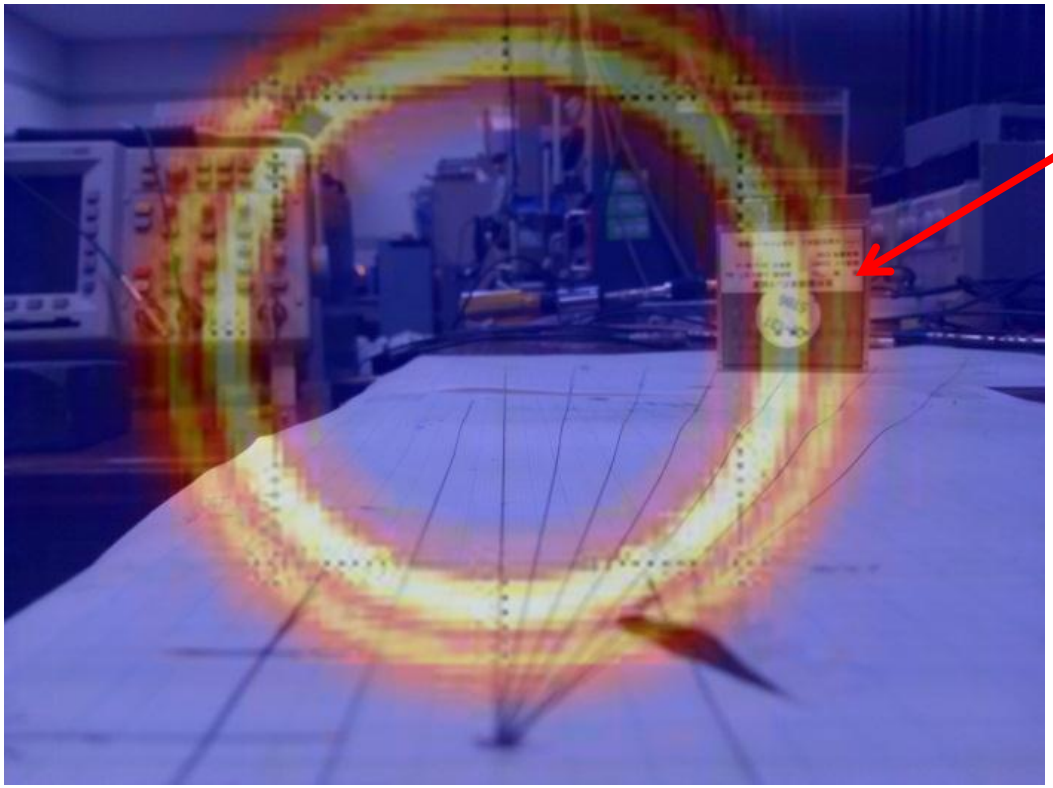
線源の位置　25°



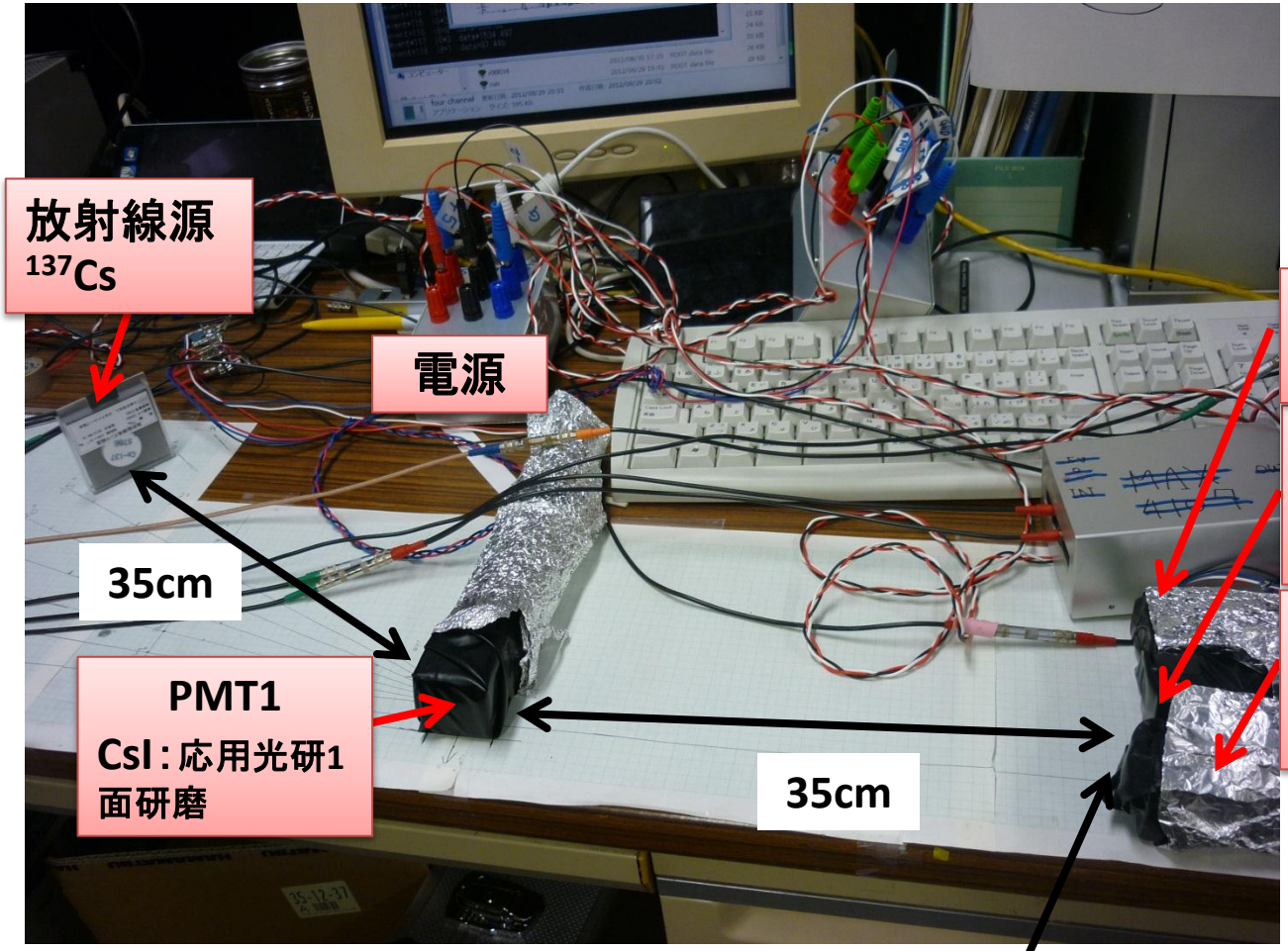
線源の位置　32.5°

コーン解析結果と線源の位置

- 1層目のPMTから見える写真とコーン解析の結果を重ねあわせた

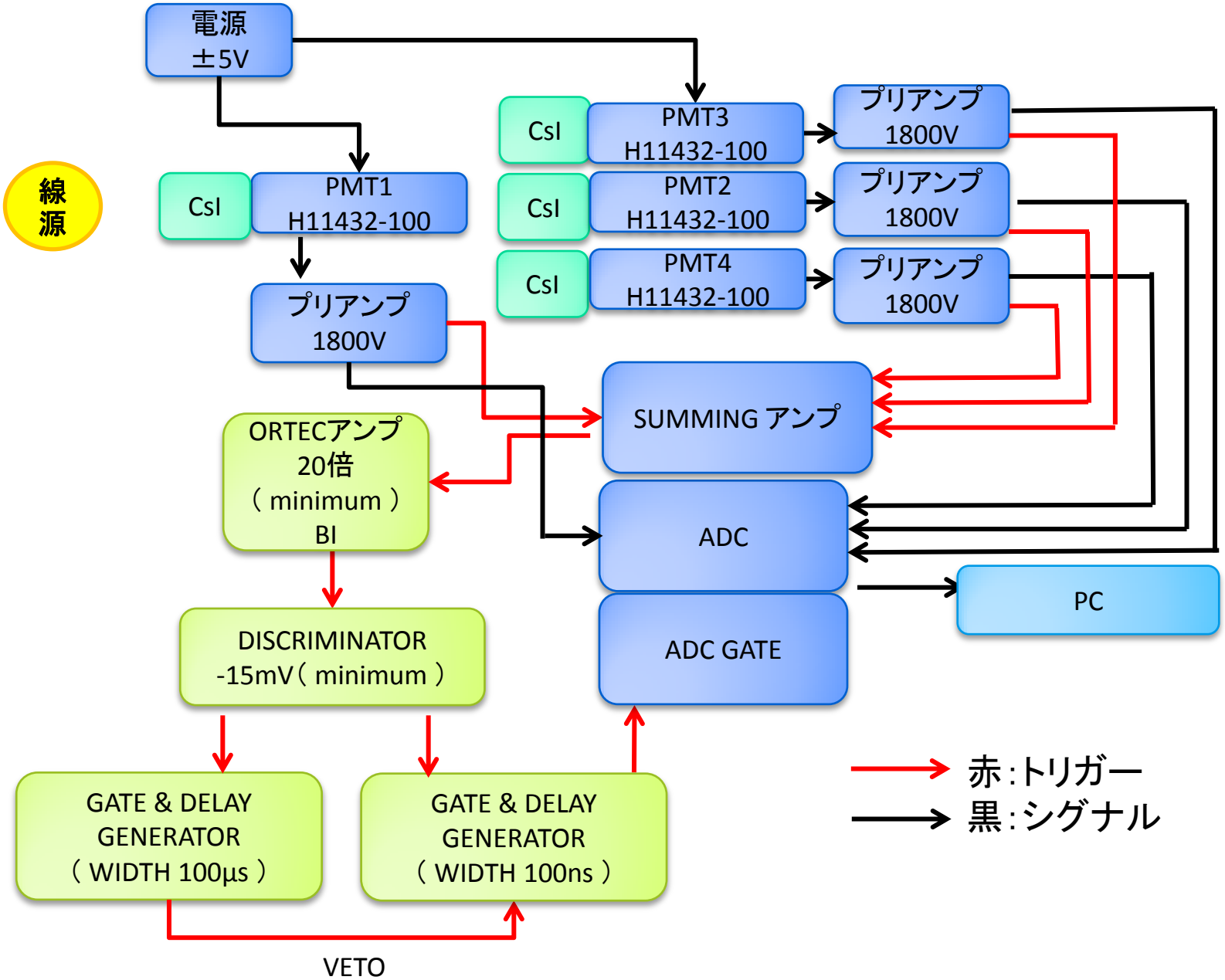


4カウンター測定　セットアップ

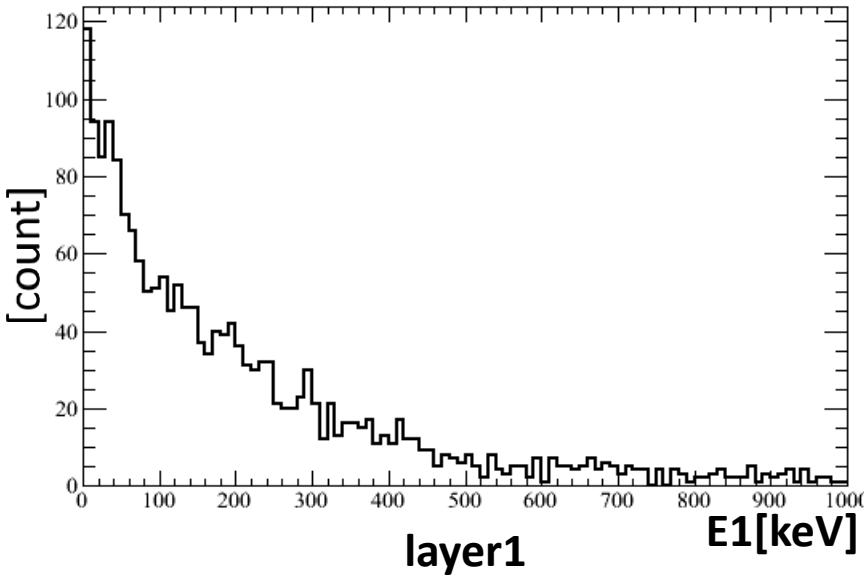


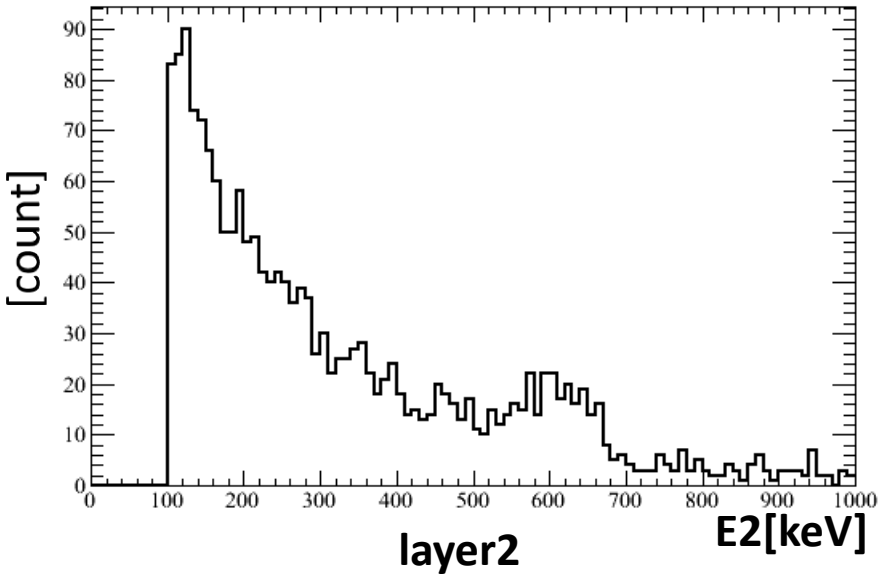
中心部分から奥の方に
2.5cmずれている

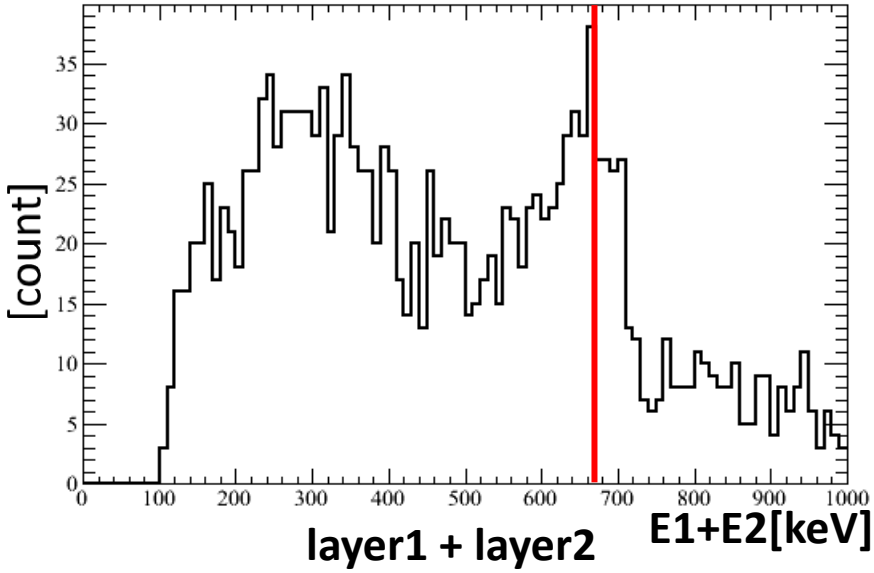
4カウンター測定　セットアップ 概略図



^{137}Cs スペクトル　放射線源の設置角度　20°

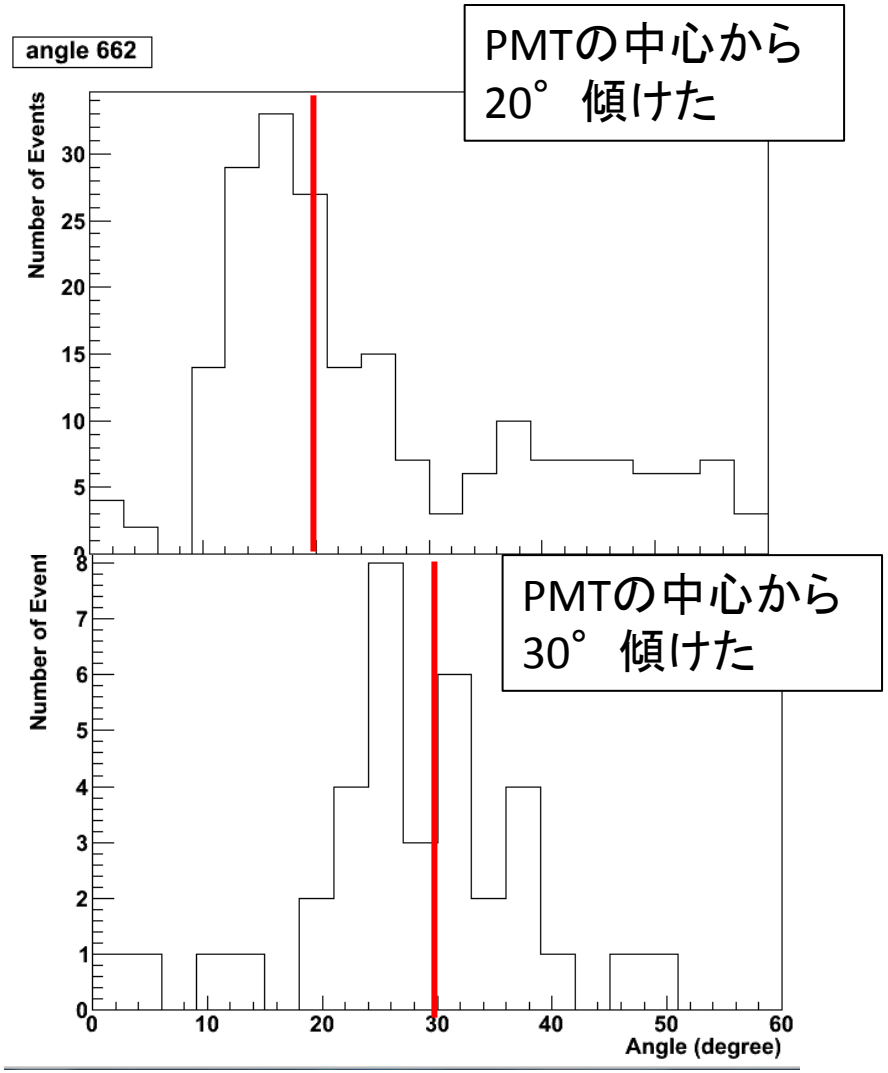


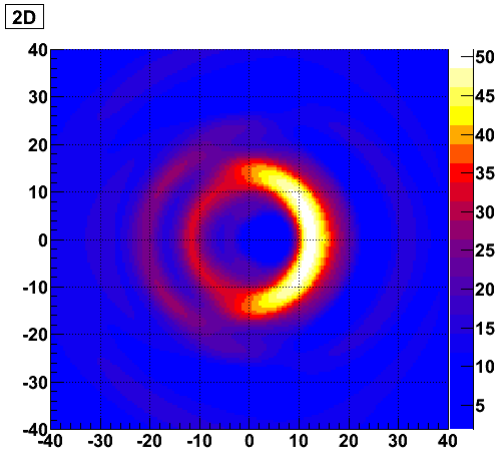




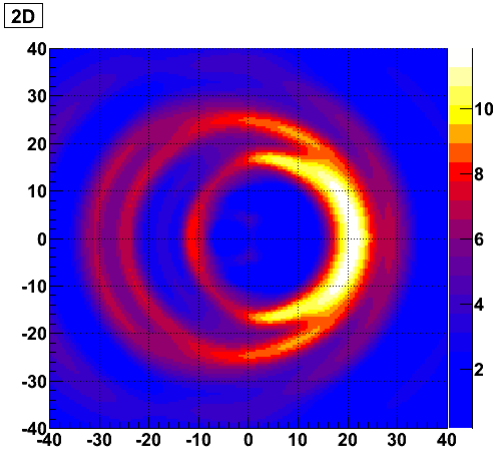
layer1：E1が7keV以上のイベントを抽出。
期待されるエネルギー：48keV
layer2：E2が100keV以上のイベントを抽出
期待されるエネルギー：614keV
layer1+layer2:E1+E2=662keVのイベントが抽出できている

線源の位置と放射線の到来方向





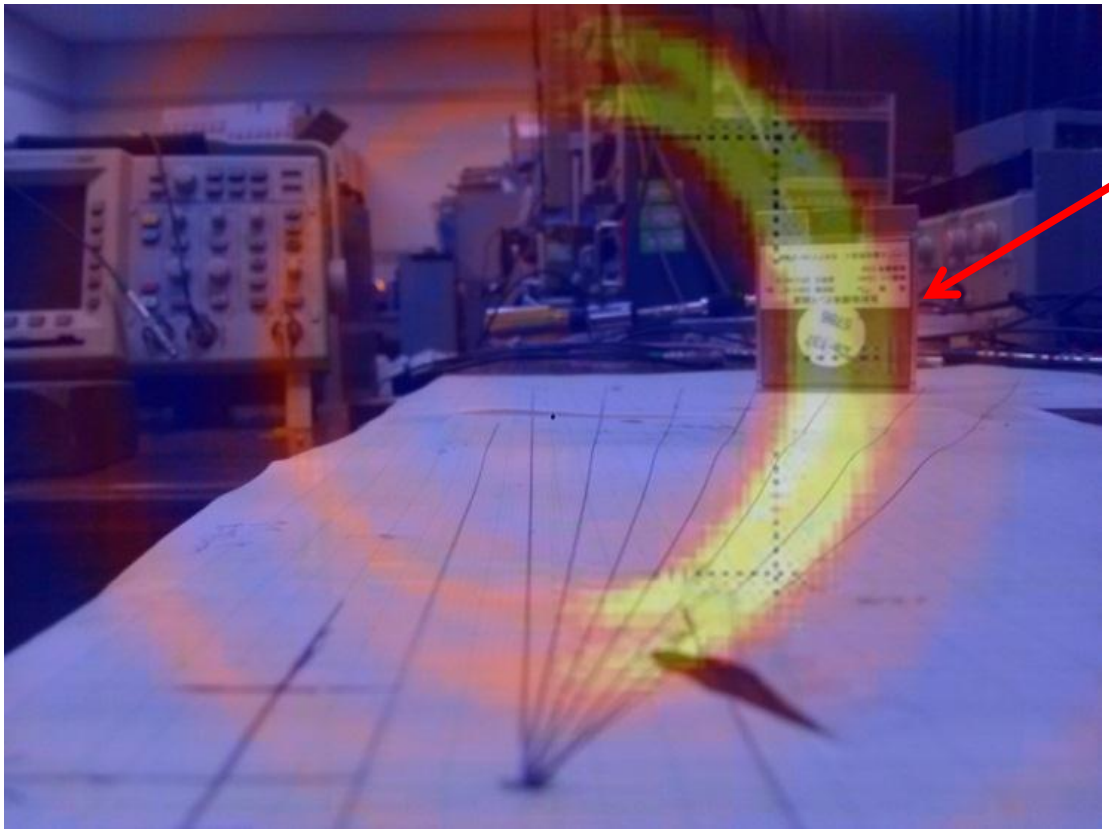
PMTから20°
（距離12cm）に線源設置



PMTから30°
（距離17.5cm）に線源設置

コーン解析結果と線源の位置

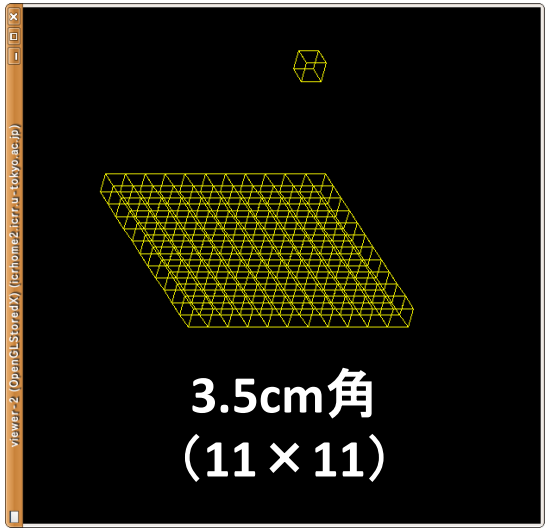
- 1層目のPMTから見える写真とコーン解析の結果を重ねあわせた

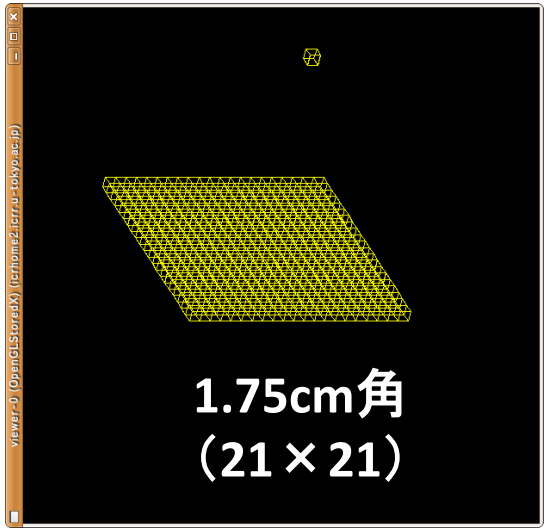


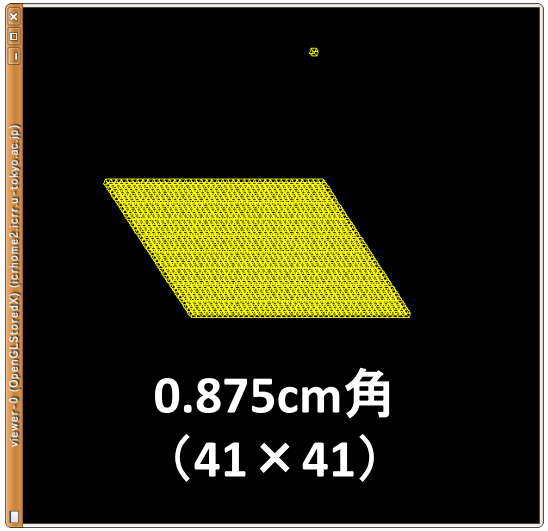
Geant4によるシミュレーション

すべての結晶サイズを変化

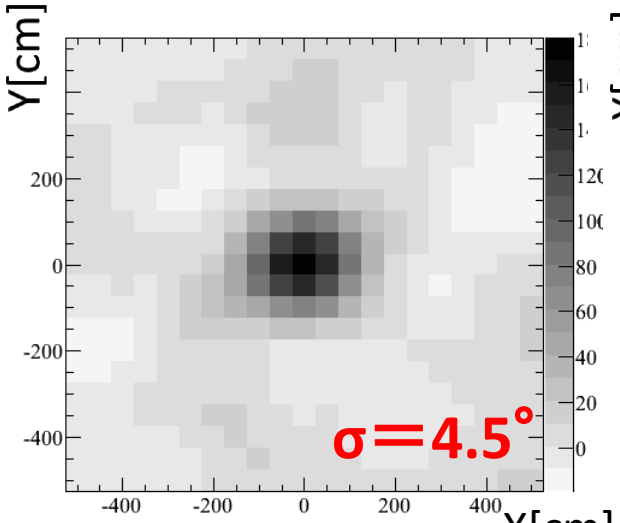
結果:すべての結晶サイズを変更





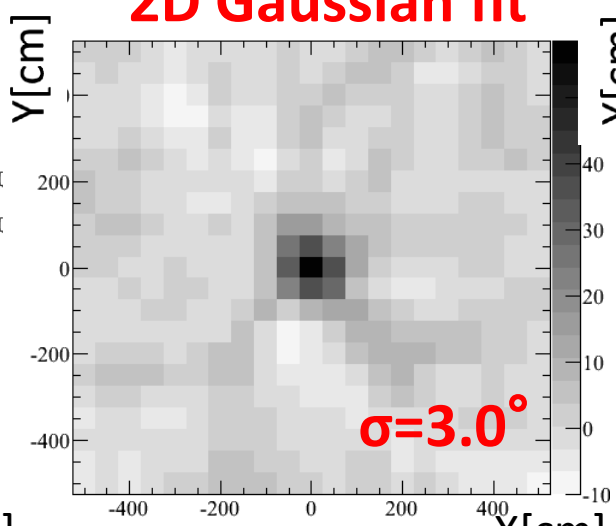


2D Gaussian fit



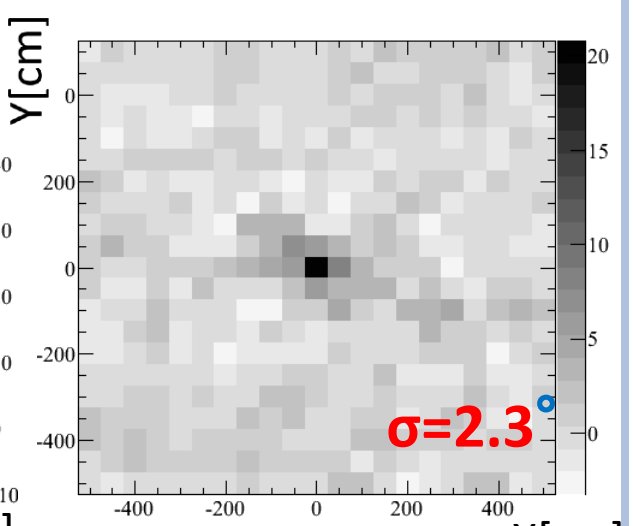
349/10000 event

(3.5%)



105/10000 event

(1.1%)



44/10000 event

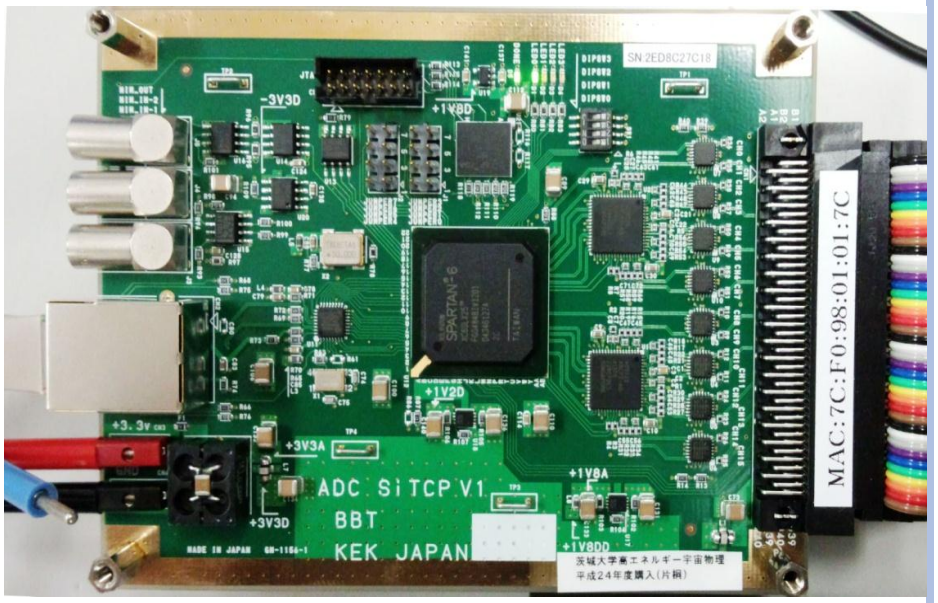
(0.4%)

SiTCPボードを用いた多チャンネルデータの読み出し

SiTCPボードを用いた複数チャンネルデータ読み出し試験状況

SiTCPとは

- 多チャンネルで高速にデータ収集を行うために、1チップ（FPGA）上にネットワーク処理回路を実装することで、
  FPGAをイーサネットに接続する技術
- データをTransmission Control Protocol (TCP)を用いてイーサネットの転送上限値で転送する事が可能

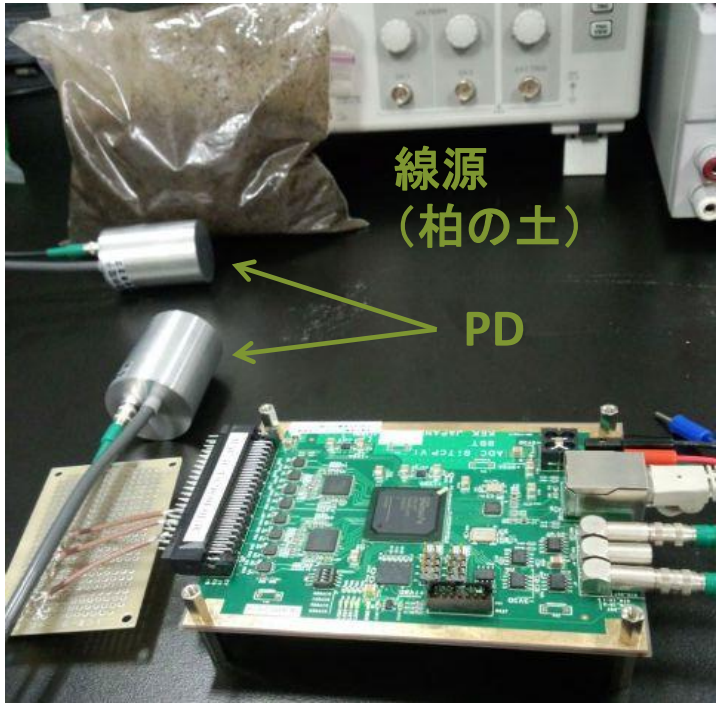


KEKで製作されたSiTCPボード

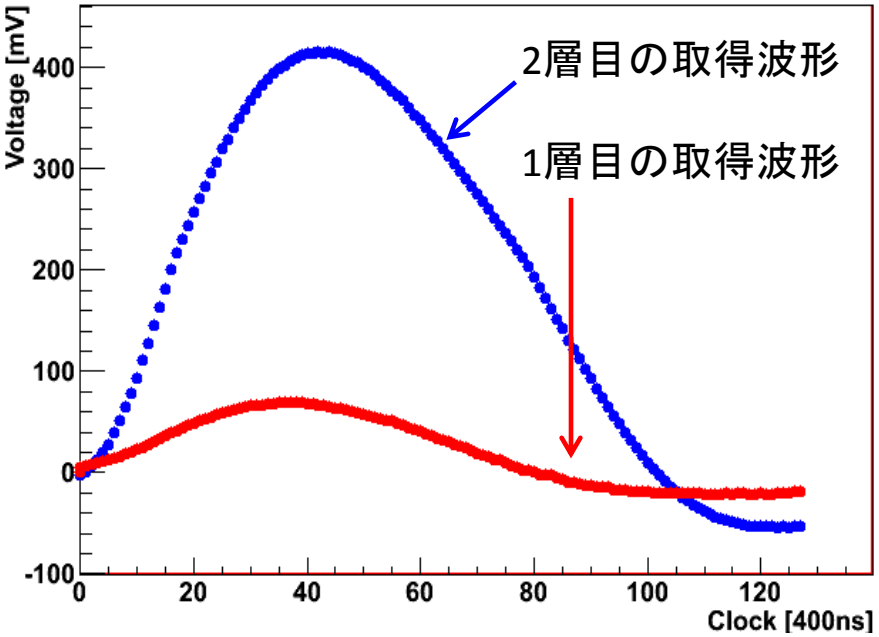
SiTCPボードを使用するメリット

- ボード一つで最大16chのデータの読み出しができ、カメラの小型・軽量化が可能
- TCP読み出しなので汎用性が高く、また1.25万円/ch と安価
- ボードに搭載されたFPGAにより、目的に合わせてトリガーロジックを変更可能

SiTCPボードを用いた複数チャンネルデータ読み出し試験状況



2ch同時読み出し試験



2ch同時読み出し時の取得波形

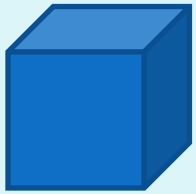
見たいイベントの複数チャンネルでの
波形データの取得に成功！

今後の試験

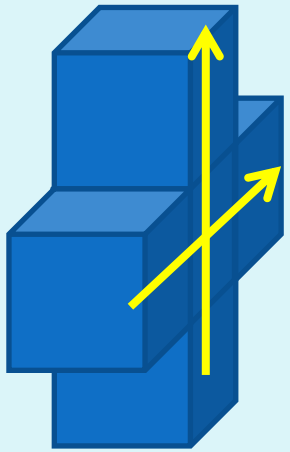
6カウンター測定

X軸、Y軸で到来方向を特定

次回の学会で発表



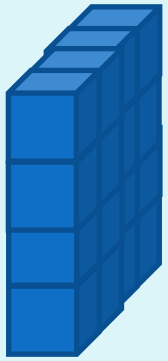
1層目



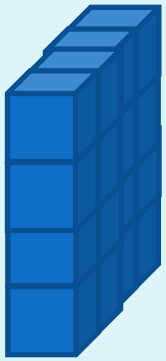
2層目

プロトタイプ1

実験室用小型プロトタイプ製作
設計、製作、試験、シミュレーション



1層目



2層目

例：4ピクセル×4ピクセルなど

まとめ

- PMT、CsI結晶シンチレータを接続して1カウンター測定試験を行った。
- 1.5インチサイズのPMTと3.5cmCsI結晶シンチレータを用いたセットアップ。
- 2カウンター、4カウンター測定により、放射線源の到来方向をσ～5度程度で特定することができた。

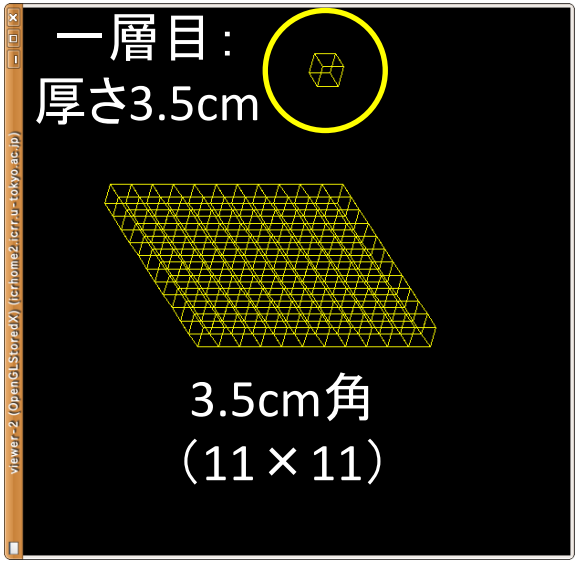
- シミュレーションにより結晶の配置を最適化を行っている。
- SiTCPボードを使った測定を目指す。

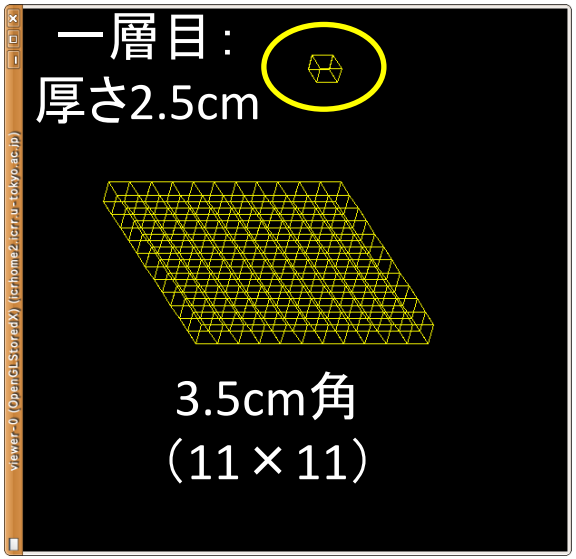
～今後～

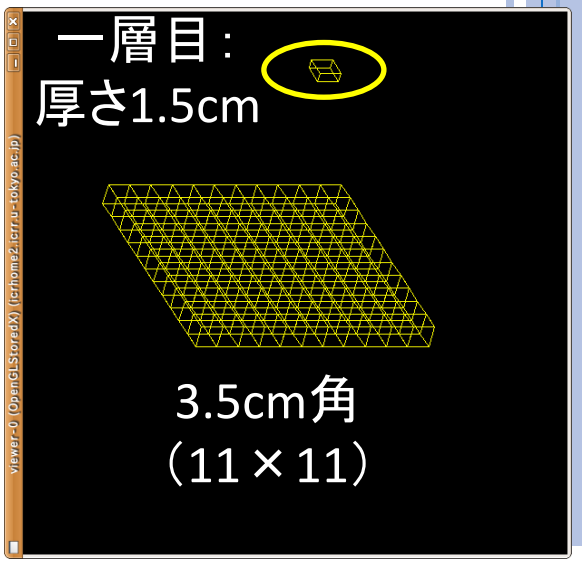
- プロトタイプ1の製作に向けて試験、シミュレーションを行う。

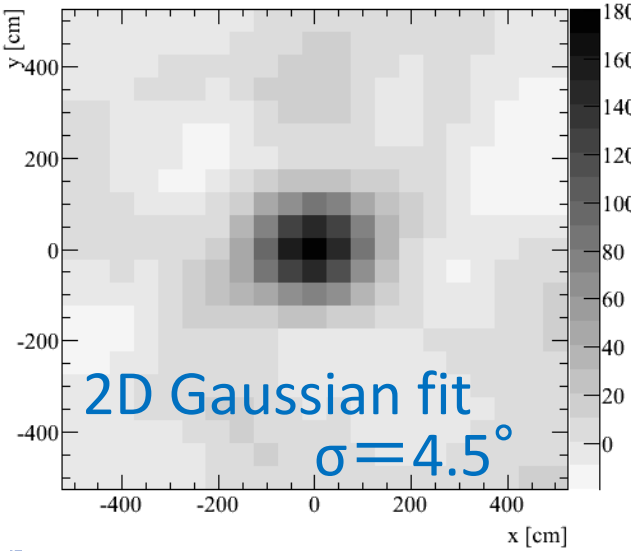
Back Slides

結果1:1層目の厚さだけを変えた時

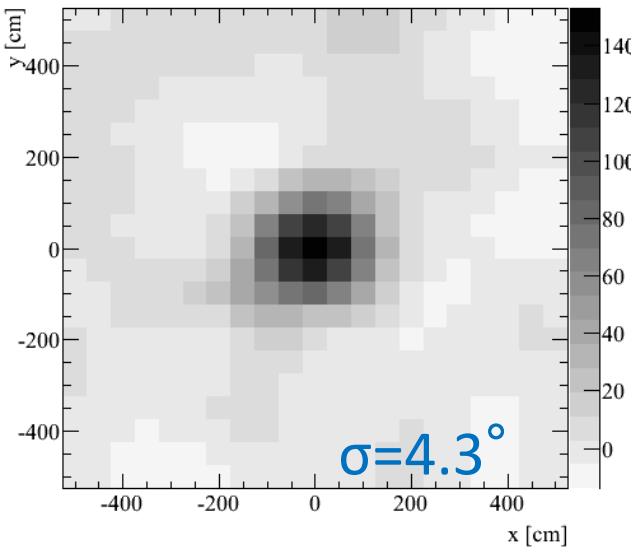




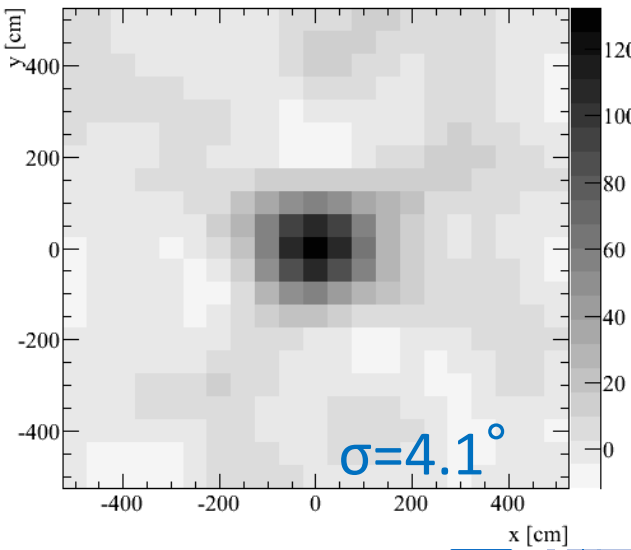




349/10000 event
(3.5%)

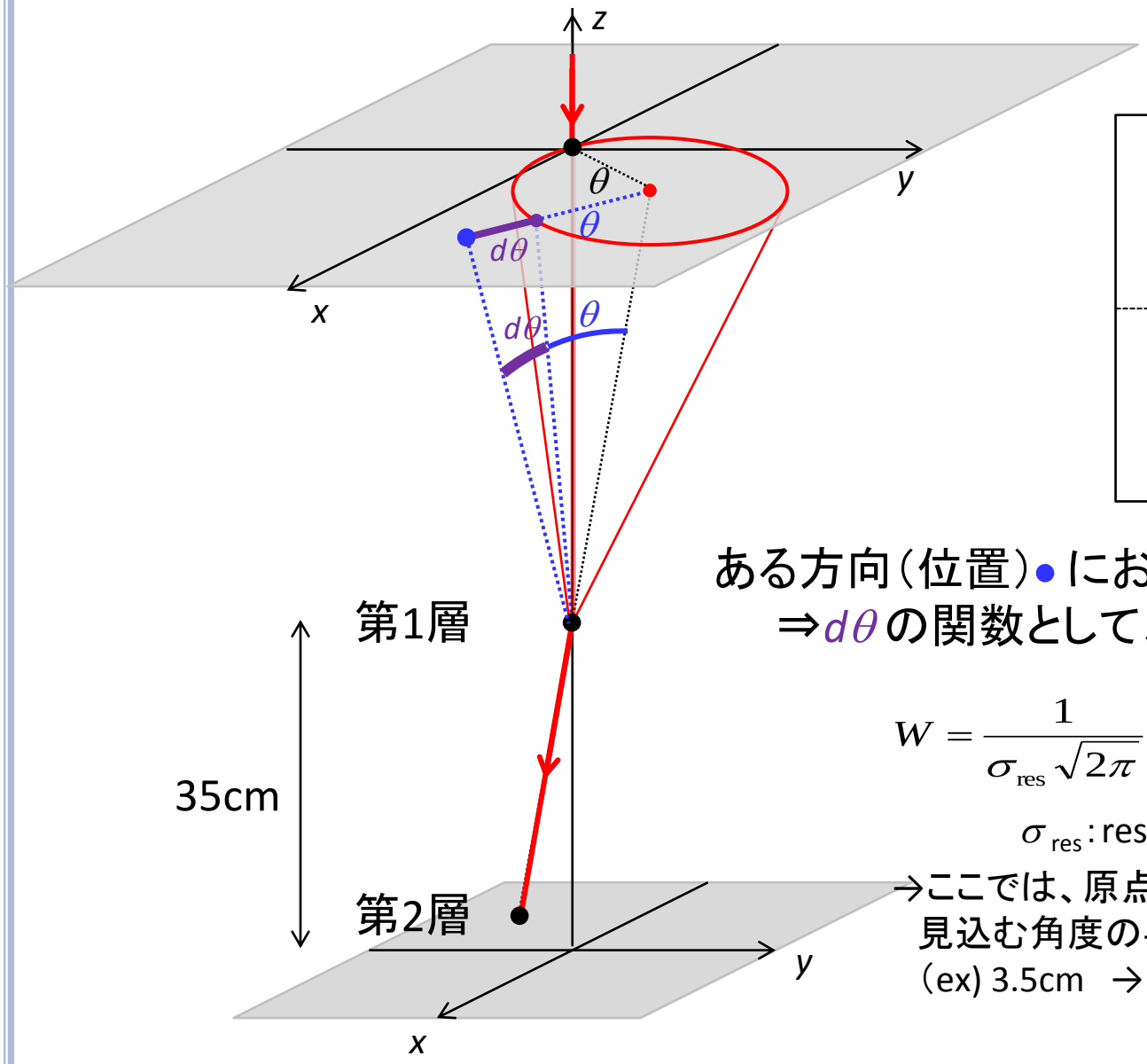


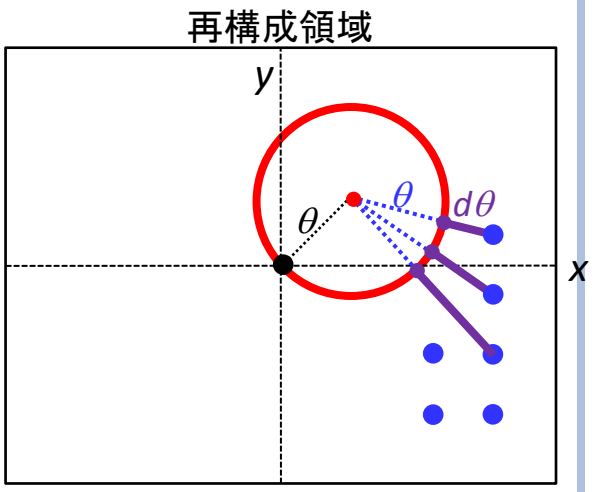
306/10000 event
(3.1%)



249/10000 event
(2.5%)

コーン解析





ある方向（位置）● におけるγ線到来の確率
⇒$d\theta$の関数として、今回は以下の式で計算

$$W = \frac{1}{\sigma_{\mathrm{res}}\sqrt{2\pi}} \exp\left[-\frac{1}{2}\left(\frac{d\theta}{\sigma_{\mathrm{res}}}\right)^2\right]$$

σ_{res} : resolution

→ここでは、原点から第1層の結晶を見込む角度の半分と仮定
（ex) 3.5cm → σ_{res} =arctan(1.75/35)
=2.9°

プロトタイプ製作

平成24年度	平成25年度	平成26年度	平成27年度	平成28年度

プロトタイプ1
（設計、製作、試験、フィードバック）
シュミレーション、学会発表

プロトタイプ2a
（設計、製作、試験、フィードバック）
シュミレーション、学会発表、改良

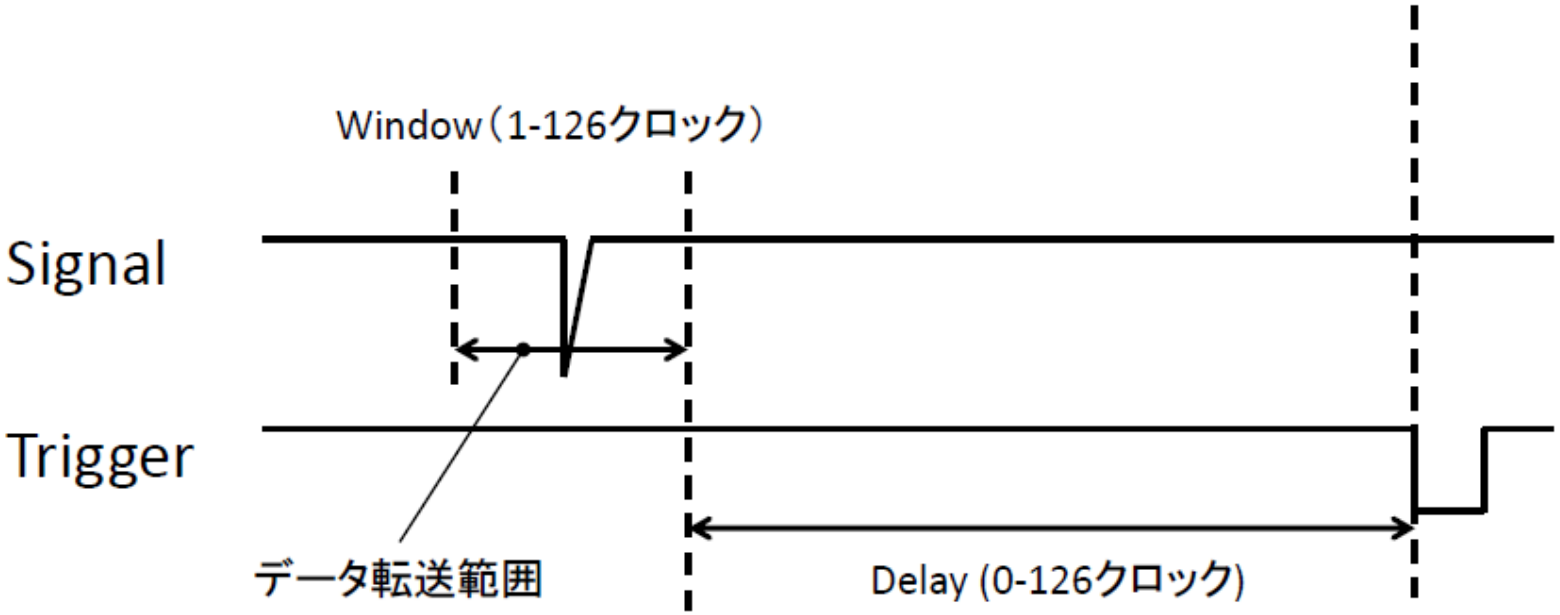
プロトタイプ2b
（設計、製作、試験、フィードバック）
シュミレーション、長期試験、学会発表、改良

プロトタイプ3
（設計、製作、試験、フィードバック）

プロトタイプ4
（設計、製作、試験、フィードバック）
LaBr3テスト、総括、製品化検討

SiTCPボード
BACK SLIDES

データ取得方法



クロック数の単位はADCサンプリングクロック

上図のように取得するデータ範囲は、Triggerが立ち下がった時にDelayだけさかのぼった後のWindowの範囲である。
このデータ転送範囲（Window）内に取得したい波形が来るように、WindowやDelayの設定値の調整が必要。

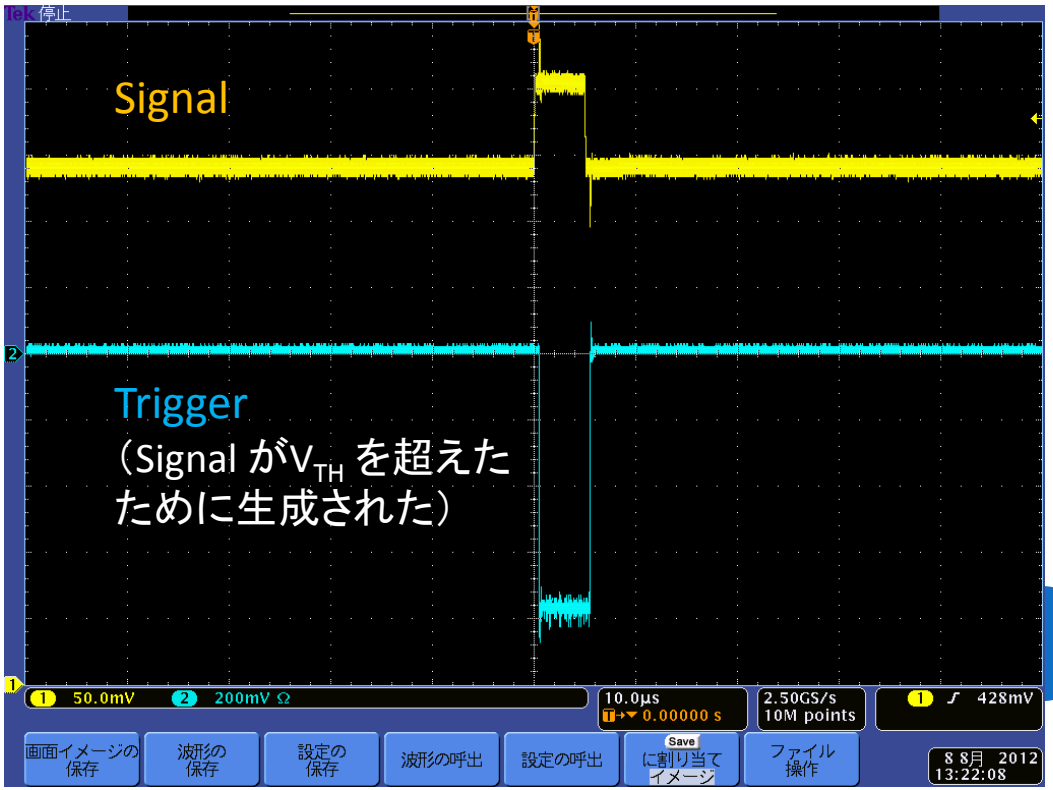
Trigger の生成方法

γI ではカメラの1層目で取得したデータが、ある閾値（=V_{TH}）を超えた時に2層目のチャンネルを読みだすという仕様にする。
（self trigger）

Trigger 生成

入力信号情報

Signal: Pulse
Frequency：10kHz
High: 325mV
Low: 275mV
Width: 5μs
V_{TH}：300mV

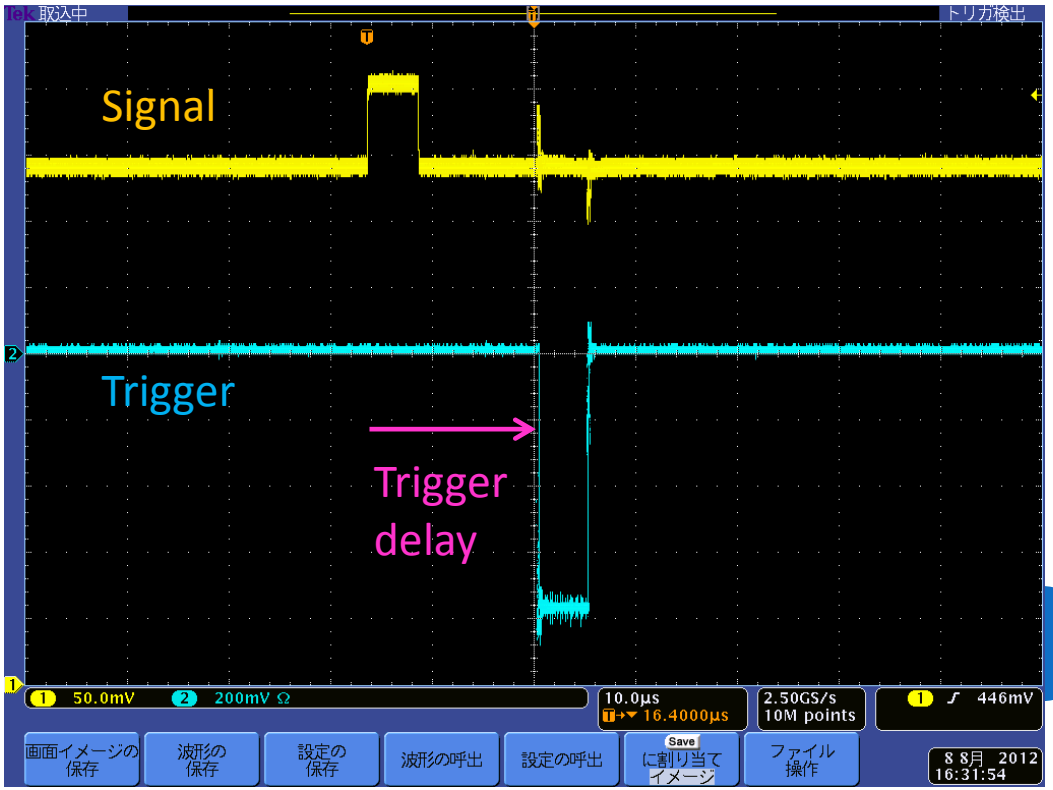


生成したTrigger のDelay

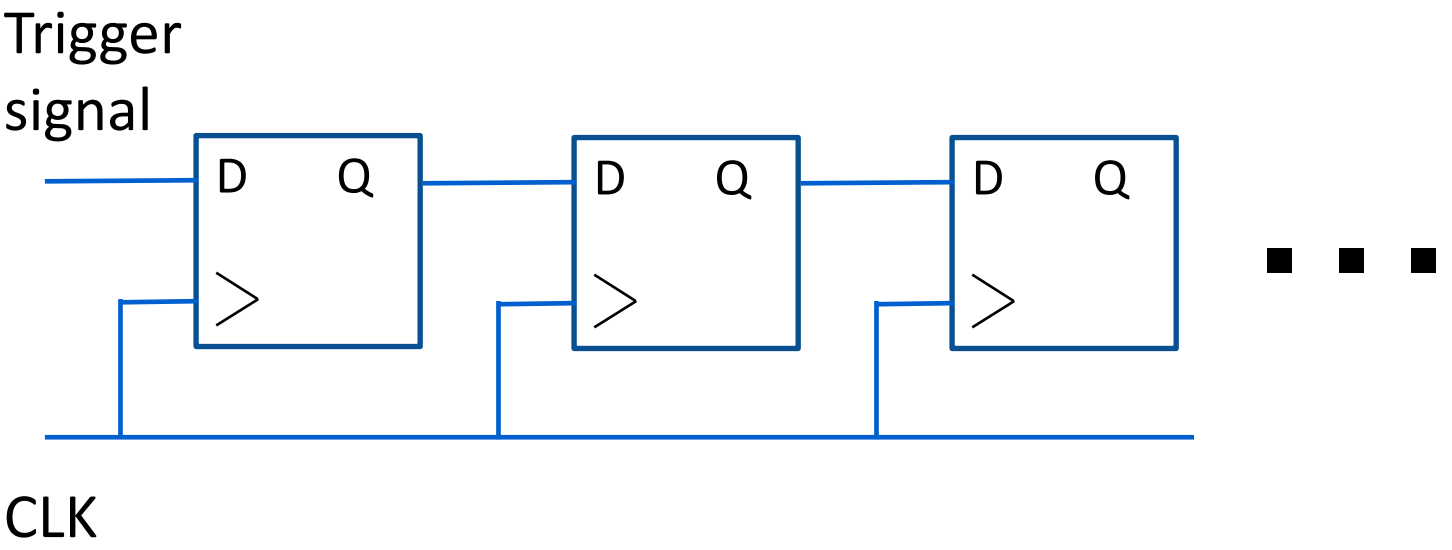
トリガー信号の生成後、今度は取得したいデータをWindow内に入れるために生成したトリガー信号を遅らせる。
（前ページの図からもわかるように、このままではWindow内に取得したい信号が入らないため。）

Trigger 生成 & Delay

Delay方法
FPGA内でDFFをいくつか用いてdelay time を調整（詳しくは明日作ります。。。）



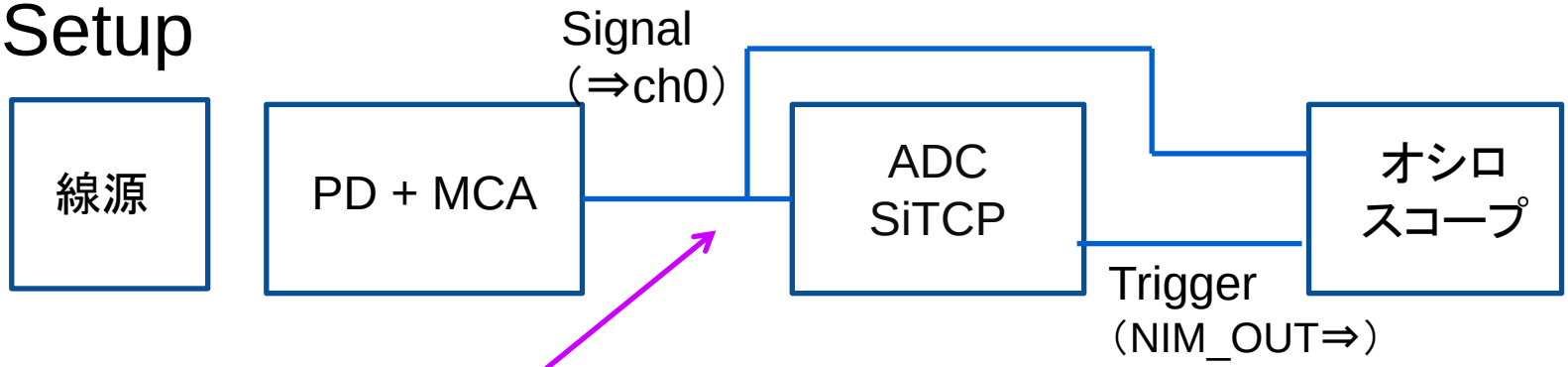
生成したTrigger のDelay



このような論理回路をFPGA内に組むことで、
「DFFの個数 × CLK 」だけTrigger signal を
遅らせることができる。

動作確認

Setup

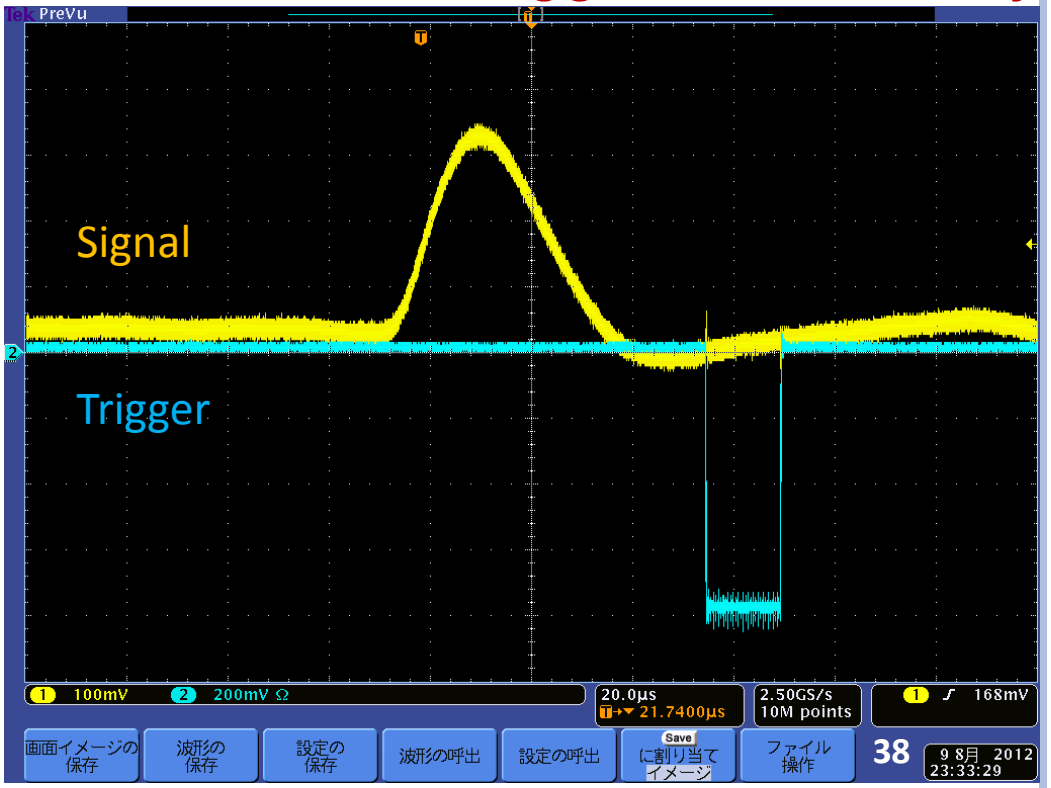


入力信号情報

V_{pp}: 300mV

Width: 25μs

Trigger 生成 & Delay



<各パラメータ設定値>

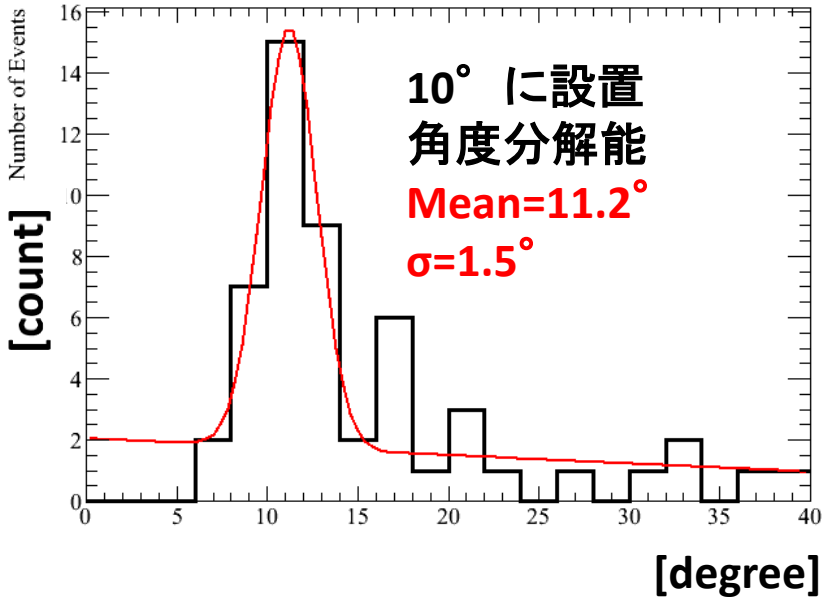
Trigger delay : 50μs

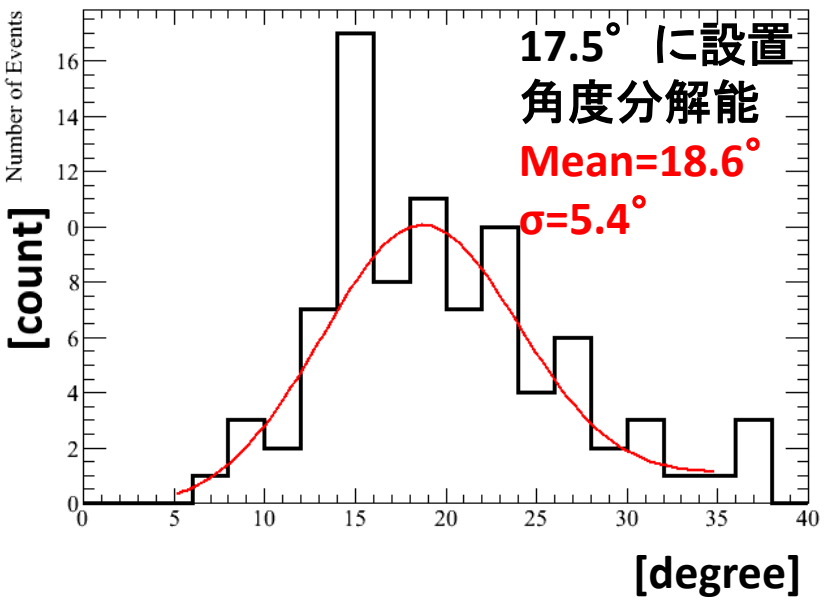
Window size : 50μs

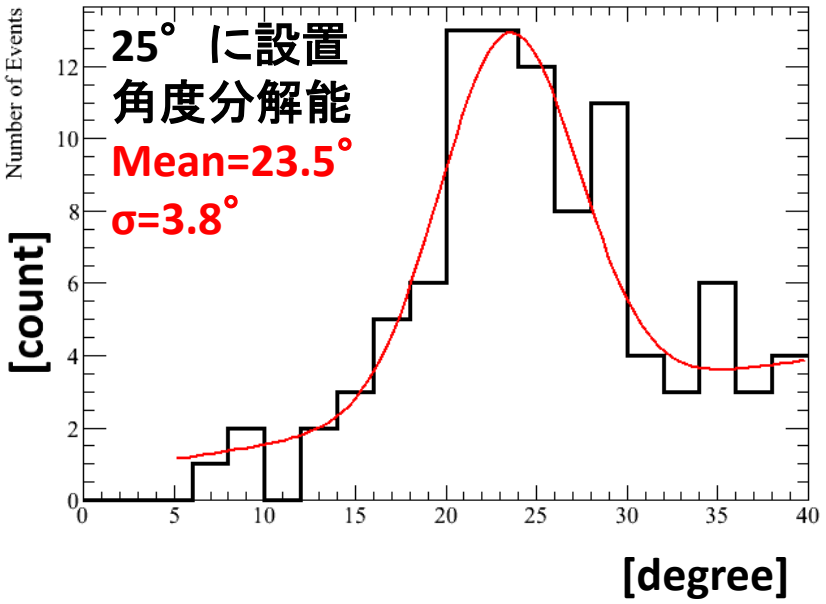
Delay : 15μs

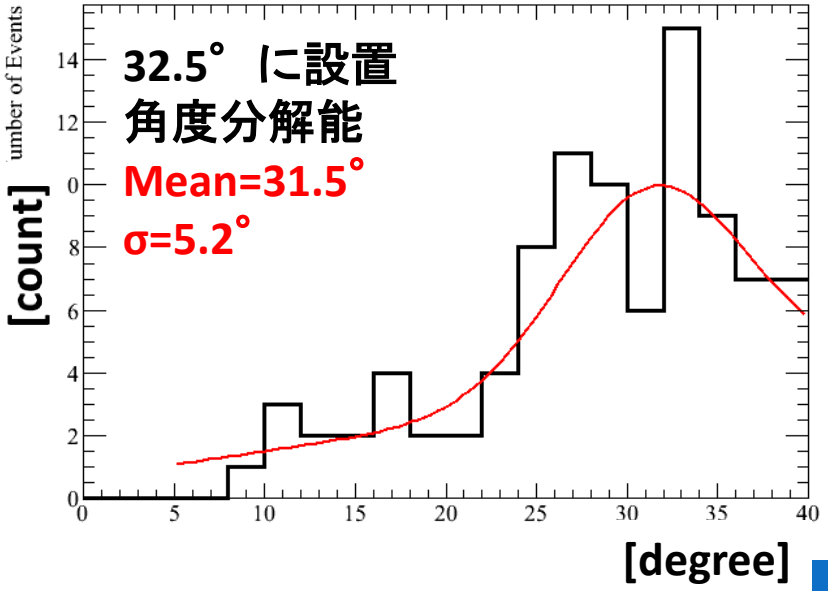
V_{TH} : 250mV

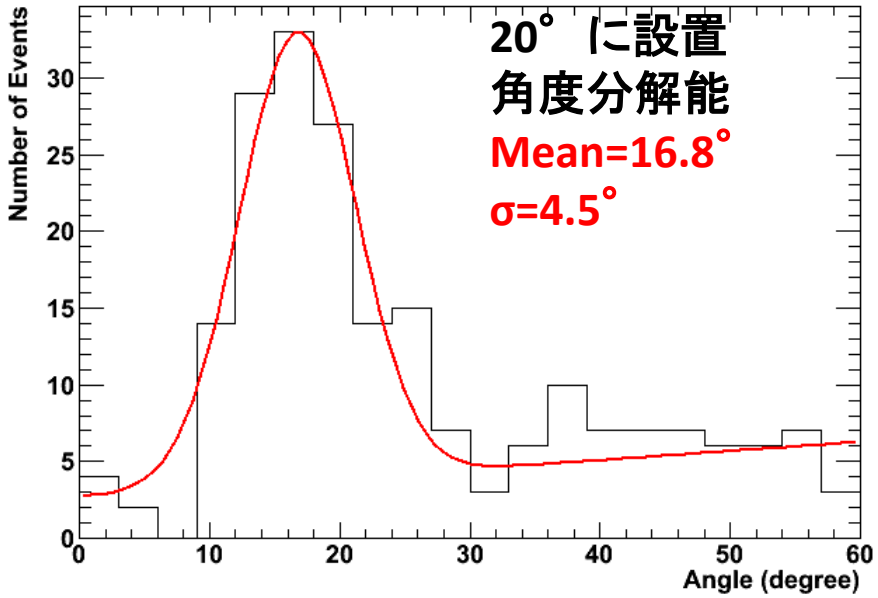
角度分解能
BACK SLIDES

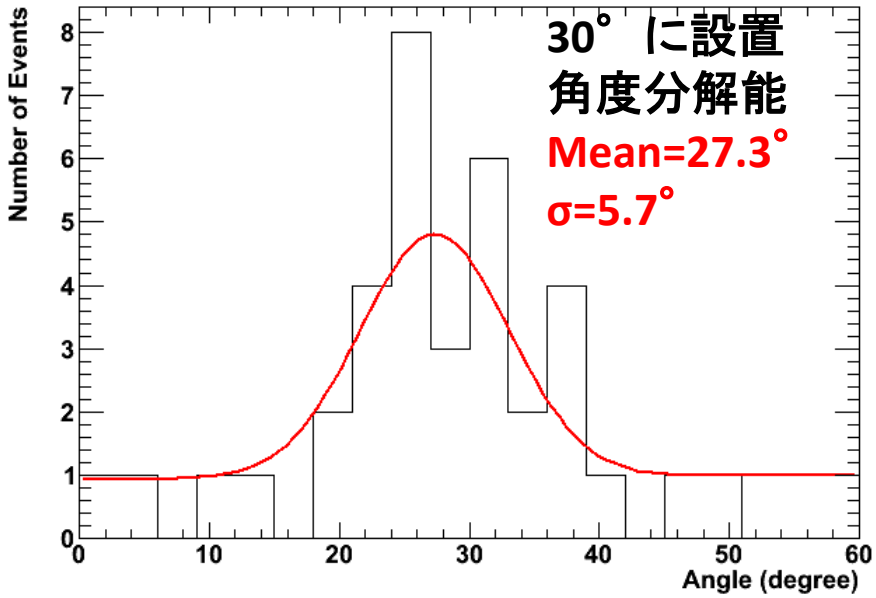

Number of Events
[count]
10° に設置
角度分解能
Mean=11.2°
σ=1.5°
[degree]

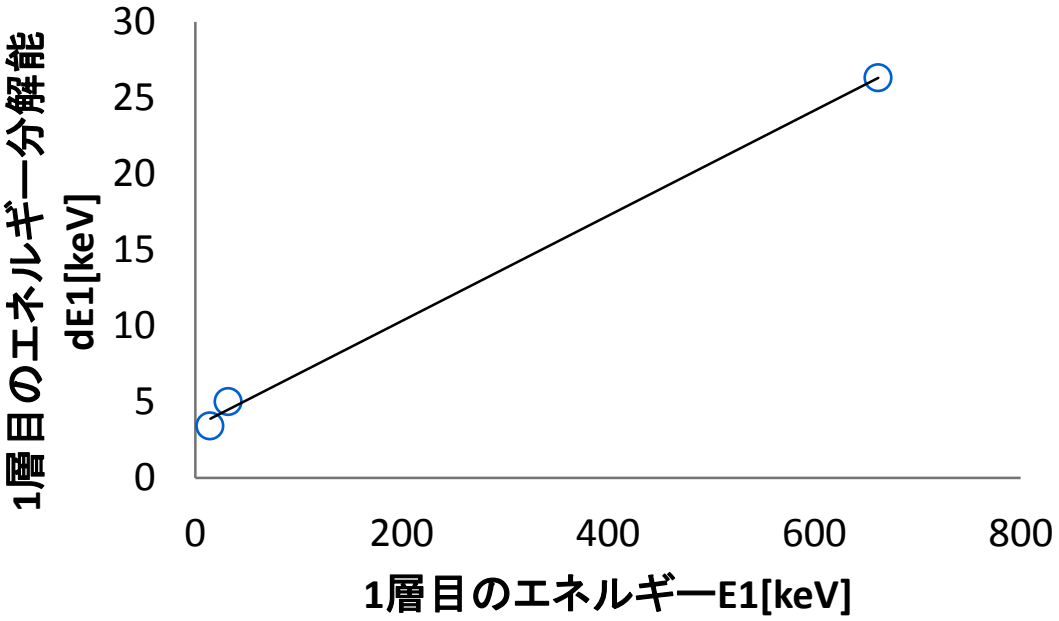

Number of Events
[count]
17.5° に設置
角度分解能
Mean=18.6°
σ=5.4°
[degree]


Number of Events
[count]
25° に設置
角度分解能
Mean=23.5°
σ=3.8°
[degree]


umber of Events
[count]
32.5° に設置
角度分解能
Mean=31.5°
σ=5.2°
[degree]


20°に設置
角度分解能
Mean=16.8°
σ=4.5°
Number of Events
Angle (degree)


30°に設置
角度分解能
Mean=27.3°
σ=5.7°
Number of Events
Angle (degree)


1層目のエネルギー分解能
dE1[keV]
30
25
20
15
10
5
0
0
200
400
600
800
1層目のエネルギーE1[keV]