

# 1.27 MeV $\gamma$ 線ベトー検出器の Calibration 測定

2016/02/02 - 02/

Hiroshi Ito

## 概要

高位置分解能  $\gamma$  線検出器開発のための細い  $\gamma$  線照射装置の製作している。 $^{22}\text{Na}$  からの 2 本の  $\gamma$  線を用いているが、1.27 MeV の  $\gamma$  線が分解能を悪化させる要因でベトー検出器を導入する必要が出てきた。本稿はこの  $\gamma$  線検出器の概要とエネルギー校正測定について報告する。また結晶の放射長測定のトリガーも同時に作成でき、Geant4 モンテカルロシミュレーションで評価し考察する。

## 1. はじめに

幅 0.1 mm の  $\gamma$  線照射のために  $^{22}\text{Na}$  の  $\beta^+$ 崩壊から電子陽電子対消滅によって生成される 2 本の  $\gamma$  線を使用する。片方の 511 keV の  $\gamma$  線を参照することで他方の  $\gamma$  線の素性がはっきりするのだ。参照検出器側に幅 0.2 mm のコリメータを設置し、運動学的にその間を通り抜けて検出された  $\gamma$  線の立体角が反対の標的検出器に入射する (図 1)。入射位置を変えていくと波長変換ファイバーによって読み出され再構成された位置の分布が比例して変化している様子を観測することができた。

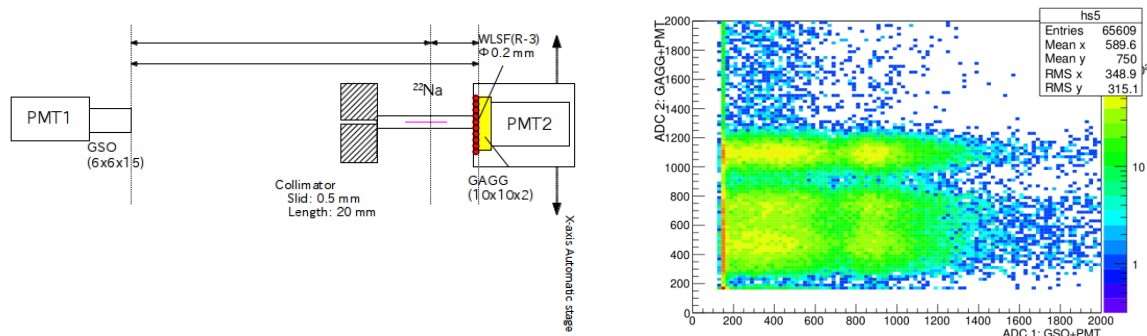


図 1. Setup 概念図と ADC スキャッタプロット

しかし、 $\gamma$  線位置分解能評価測定において  $^{22}\text{Na}$  崩壊後の  $^{22}\text{Ne}$  の励起状態から 1.27 MeV の  $\gamma$  線をほぼ同時に放射し、これがバックグラウンドになる。従って線源の側面に検出器を設置して 1.27 MeV の  $\gamma$  線が標的に当たっていないことを保証する必要がある。

## 2. 1.27 MeV $\gamma$ 線検出器

図2にセットアップを示す。2つの GSO ブロックで線源を挟み、その片側を1つの光電子増倍管 (PMT) で読み出す。PMT は浜ホトの R6231-100 No.ZE6271 で、増幅率は電圧 1800 V で  $10^6$  程度だ。増幅率が低いけどエネルギー分解能が高い PMT の種類である。GSO 結晶はサイズ  $48 \times 24 \times 2.6 \text{ mm}^3$  を6枚重ねて1つのブロックにした (3面研磨なので問題ないはず)。つまり、結晶ブロックは  $48 \times 24 \times 15.6 \text{ mm}^3$  のサイズである。結晶ブロックの5面には白色の自己融着テープを巻き乱反射させて収集効率を上げた。GSO で 1.27 MeV の  $\gamma$  線が光電吸収された事象は必ず標的検出器に 511 keV の  $\gamma$  線だけがまっすぐ照射されていることを保証する。

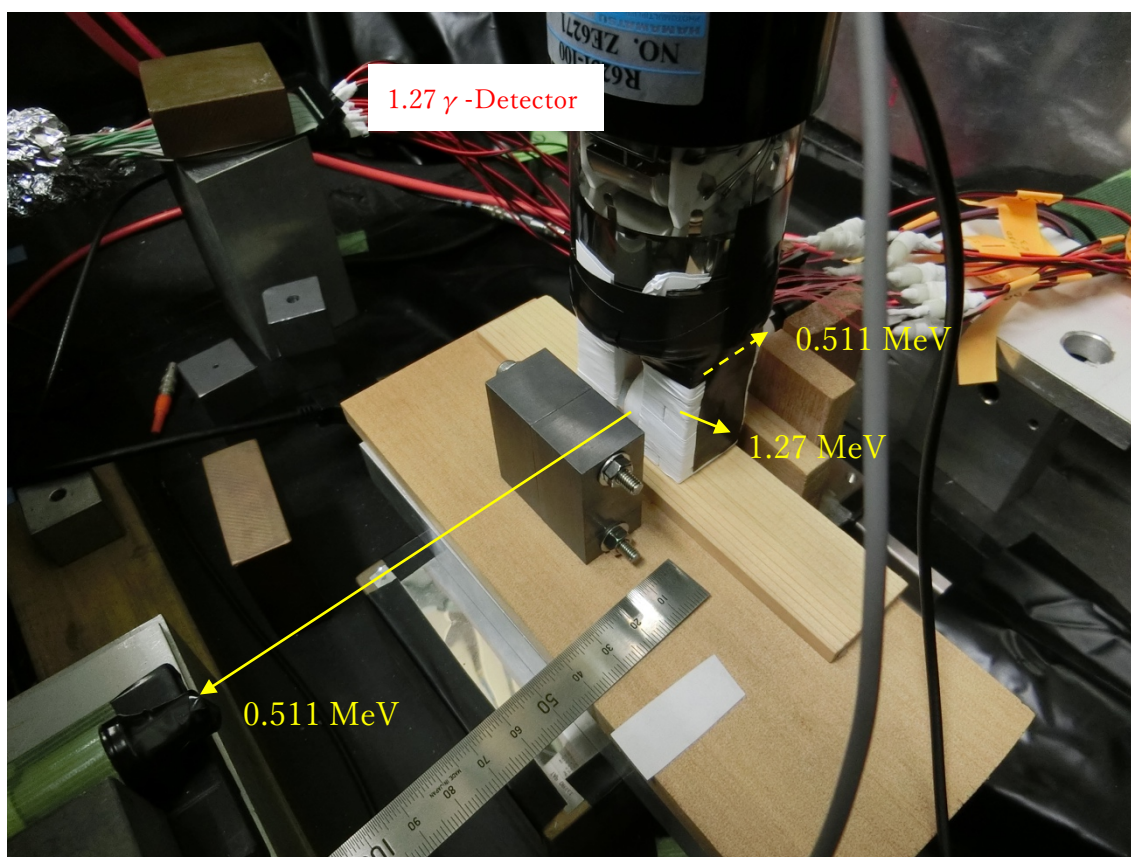


図 2. Setup 写真

### 3. Calibration 測定

1.27  $\gamma$  線検出器に据え付けられた2つの GSO ブロックの間に  $^{22}\text{Na}$  線源を設置しエネルギー校正を行った。セルフトリガーによる測定では  $\beta^+$ 崩壊した陽電子による対消滅後の2本の  $\gamma$  線が片方(511 keV)もしくは両方検出された事象(1022 keV)が観測された。また、 $\beta^+$ 崩壊後の  $^{22}\text{Ne}$  の励起状態から遷移する時に 1275 keV の  $\gamma$  線をほぼ同時に放出する事象、そしてサム効果によって  $511 + 1275 = 1786$  keV も観測された。そして 1.27 MeV の  $\gamma$  線が電子陽電子対生成によって 1022 keV 事象と、もしくはその片割れが 511 keV が事象に含まれている (図 3 左)。

ADC 分布と比較して良い線形性を見せた。1次関数でフィットした結果校正係数  $1.908 \pm 0.06$  ADC/MeV を得ることができた。各エネルギーピークにおけるエネルギー分解能はそれぞれ FWHM 17.5% @511 keV, FWHM 14.5% @1.02 MeV, FWHM 18.8% @1.27MeV, FWHM 16.8% @1.79 MeV と評価した(図 3 右)。

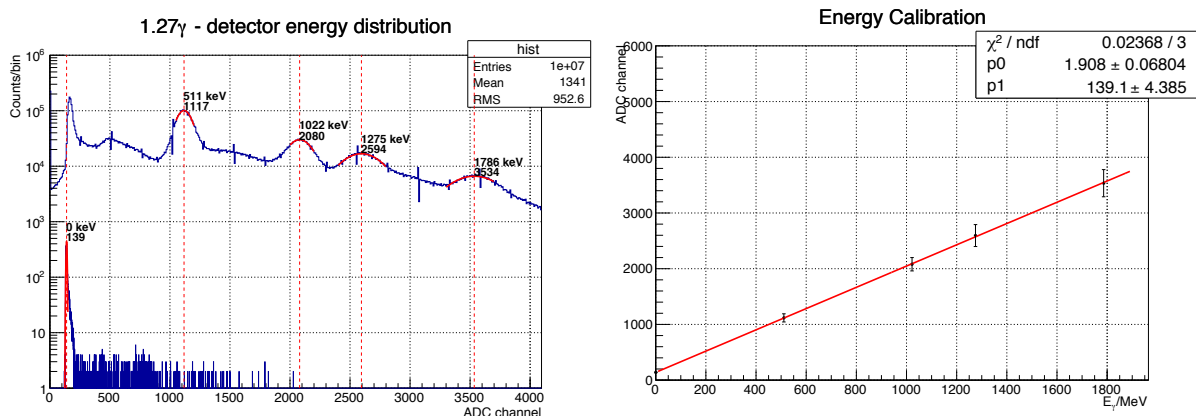


図 3. 1.27  $\gamma$  -Det のエネルギー校正結果

また、参照検出器と標的検出器の同時計測をトリガーにし、両方 511 keV デポジットしたイベントをセレクトしたとき、サム効果が消えて 1.27 MeV のコンプトン散乱事象、光電吸収事象、電子陽電子対生成事象のみが生き残るはず。校正測定の一環でエネルギーの整合性を実証した。

図 4 左は参照検出器と標的検出器の ADC 分布のスキッタプロットを示す。どちらも 511 keV エネルギーを落とした事象を赤線枠で囲っている。図 4 右は 1.27 MeV  $\gamma$  線検出器の ADC 分布である。トリガー段階で 1.02 MeV のサムピークが消え (白ヒストグラム)、イベントセレクトで 511 keV のピークが消えて

いることが確認できる（青ヒストグラム）。これらのピーク(511 keV, 1.27 MeV)はセルフトリガーによる校正値に一致しているので整合性は実証できた。

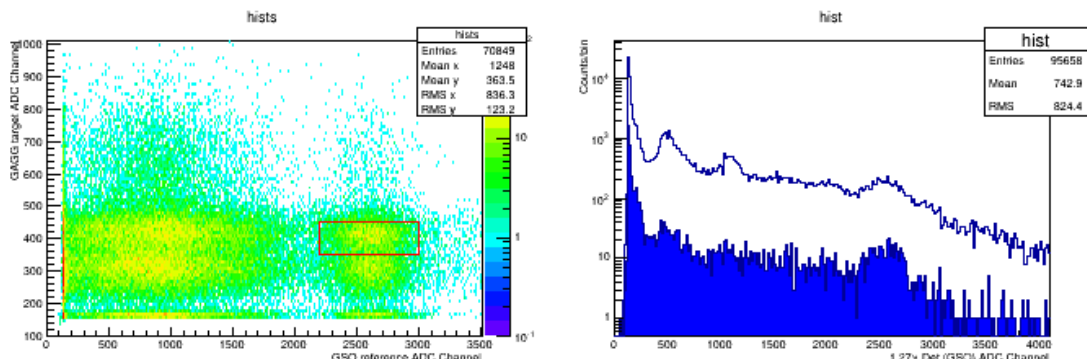


図 4. 参照検出器と標的検出器の ADC 分布のスカッタプロットと 1.27 $\gamma$ -Det の ADC 分布

#### 4. 放射長測定のための 511 keV $\gamma$ 線照射トリガー

シンチレーションの  $\gamma$  線に対する検出効率を評価する場合、荷電粒子でないためトリガーを作成することが困難である。セルフトリガーでは検出器自身のしきい値によって正しく検出効率を評価することができない。また  $\gamma$  線が出たことを証明するために  $^{22}\text{Na}$  からの 2 本の  $\gamma$  線の片方をトリガーにした場合は 1.27 MeV の  $\gamma$  線のコンプトン散乱や宇宙線のバックグラウンドを無視できない。そこで 1.27 MeV  $\gamma$  線ベトー検出器のしきい値を 1.27 MeV 相当(ディスクリミネータしきい値-200 mV)に設定し、511 keV  $\gamma$  線の片割れと同時に検出された事象をトリガーに設定する

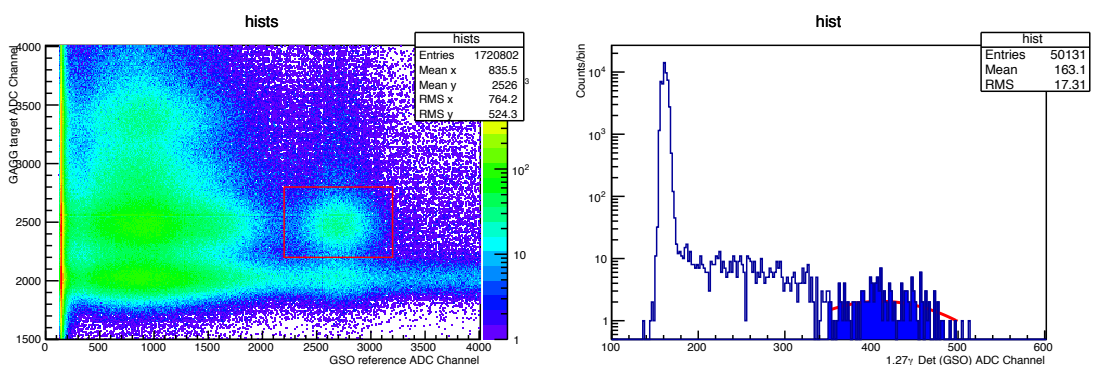


図 5. 参照検出器と 1.27 $\gamma$ -Det の ADC 分布スカッタプロットと標的検出器の ADC 分布

図 5 左は 1.27  $\gamma$  線検出器と参照検出器の ADC 分布のスキッタプロットを示す。赤線枠で囲んでいる事象は、参照検出器で 511 keV エネルギーを落とし、かつ側面で 1.27 MeV のエネルギーを落としているので、つまり標的方向に 511 keV の  $\gamma$  線を照射したことを保証される。

図 5 右は事象選択された標的検出器の ADC 分布である。ちょうど 350-500 ADC channel が 511 keV の領域とあらかじめ校正されているとして、GAGG 結晶の厚さ 0.5 mm のとき光電吸収事象は全体の約 0.27%であった。これで結晶の厚さを変えて同様の測定することはつまり、各結晶の放射長測定が可能になったことを意味する。

Geant4 によるモンテカルロシミュレーションにおいて、511 keV の  $\gamma$  線を GAGG 結晶( $\text{Gd}_3\text{Al}_8\text{Ga}_3\text{O}_{12}$ )に入射させ、損失エネルギーを測定した。ただしマテリアルは実験と同様に結晶のサイズは 10 mm  $\times$  10 mm で厚さ 0.5 mm、密度 6.63 g/cm<sup>3</sup>に設定して、セットアップは単純に入射位置固定にした。そのときの  $\gamma$  線照射の様子を図 6 に示す。緑線が光子、赤線が不電荷粒子、黄色点が相互作用したバーテックスを示している。

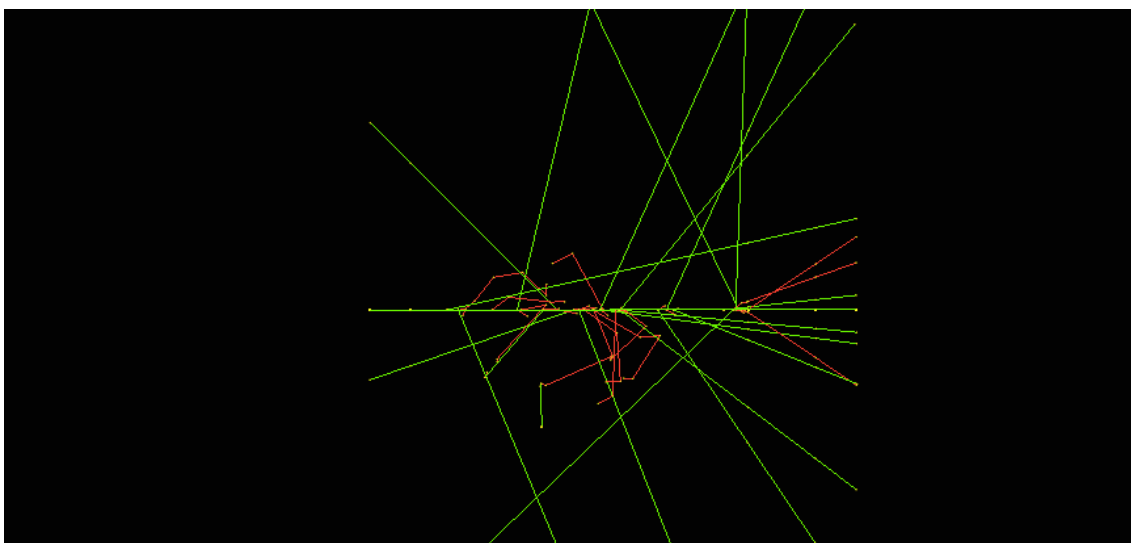


図 6. Geant4 モンテカルロシミュレーション

結晶の厚さを変えながら損失エネルギー(Deposit energy)を測定した結果、図 7 左に示すように光電吸収ピークとコンプトン散乱、ペDESTAL事象を観測することができた。ここで検出器によるエネルギー分散は考慮していない。結晶の厚さを増やしていくと  $\gamma$  線の全エネルギーを落とす事象が増えることは定性的に説明できる。

放射長の定義は「 $\gamma$  線の強度が  $1/e$  になる厚さ」である。つまり、 $\gamma$  線を照射して結晶内で光電吸収事象が  $1 - 1/e (=0.632)$  の割合になる厚さを意味している。光電吸収ピーク (500–520 keV) の事象数の割合を図 7 右のグラフに示すが、緩やか曲線を描いていて増加している。ちょうど割合が 0.632 になる厚さは 30 mm であった。誤差は結晶厚さ変位が 0.5 mm が統計誤差として支配している。従って、Geant4 によるシミュレーションで GAGG 結晶の放射長は約  $30.0 \pm 0.05$  mm である。厚さ 0.5 mm のときの 511 keV 事象の割合は約 0.54% であった。実験値 0.27% と比較してオーダーは矛盾していないが、実験値が約半分低い結果である。実験セットアップにおいて、幅 0.2 mm のスリッドを用いて照射位置を制限したがそれだけでは結晶入射の立体角が結晶面積をはみ出している。つまり結晶に入射していない事象が含まれていることが原因であると考えられる。改善策として、今後の実験では鉛コリメータはスリッド型ではなくペンシルビーム型にすることで立体角を調整する。

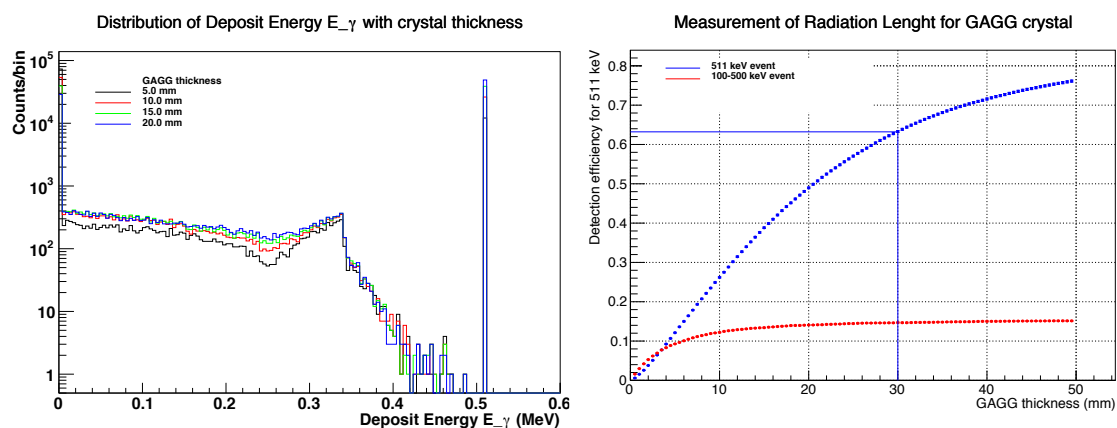


図 7. シミュレーション結果：結晶厚さにおける損失エネルギー分布と結晶の厚さと 511 keV 事象の割合の関係

## 5. まとめ

GSO 結晶 12 枚とエネルギー分解能の高い PMT を使用して 1.27 MeV  $\gamma$  線ベトー検出器を PET/WLSF システムに導入し校正測定を行った。損失エネルギー校正係数  $1.908 \pm 0.06$  ADC/MeV が得られ、分解能は FWHM 18.8% @1.27MeV と評価された。トリガーを選択することで GAGG 結晶の放射長測定が可能になり、Geant4 によるシミュレーションでは  $30.0 \pm 0.5$  mm の放射長を評価することができた。実験ではセットアップの不具合を発見したので次回の測定で改善する予定だ。