

PET/WLSF 開発における基礎研究：  
 $\gamma$  線検出効率とシンチレータ結晶の厚さとの関係  
2016年03月10日 伊藤博士

## 概要

光子と物質との相互作用は光電効果、コンプトン散乱そして電子対生成が知られている。エネルギー511 keV の光子は主に前者2つが支配的である。 $\gamma$  線検出器の検出効率は往々にして結晶の厚さに依存すると考えられているが、電荷を持たないため入射時刻を取得できないことから検出効率測定が困難である。従来では、放射能が既知な $\gamma$  線線源を用いて立体角と計数率から検出効率を導く方法が知られている。モンテカルロシミュレーションのように $\gamma$  線を数万発入射させて光電吸収事象の割合から導きたい。我々は $^{22}\text{Na}$  線源から放出される1.27 MeV の $\gamma$  線と陽電子放出後対消滅して放出される片方の511 keV の $\gamma$  線を捉えることで511 keV の $\gamma$  線の入射事象を選別するシステムを構築した。結晶の厚さとの関係からシミュレーション結果との比較が可能になった。PET 装置の検出効率は光電効果事象の同時計測のため、非常に検出効率が低いことは知られており、光電吸収事象のうちコンプトン散乱事象も解析に使用できれば統計数向上による画像解像度向上、そして患者被曝量を低減が期待できる。

## 1. はじめに

一般に $\gamma$  線源として用いられる $^{137}\text{Cs}$  は94.6%の崩壊分岐比で最大運動エネルギー512 keV の電子と662 keV の光子を放出する。この領域の光子と物質との主な相互作用はコンプトン散乱と光電効果が知られているので、エネルギー分布は662 keV の光電吸収ピークと478 keV のコンプトンエッジが観測できる。この光電吸収事象とベダスタル事象からエネルギー校正の測定やエネルギー分解能を評価することができる。セルフトリガーの測定では自身のしきい値エネルギーによって透過した事象を含むことができないため、検出効率を測定することはできない。

PET (Positron Emission Tomography: 陽電子放出核断層法) は陽電子放出核( $^{11}\text{C}$ ,  $^{15}\text{O}$ ,  $^{18}\text{F}$ ,  $^{22}\text{Na}$ ) から放出された陽電子がその後対消滅しエネルギー511 keV の180度の角度で2個放出する光子を同時計測することでその核種の3次元画像分布を取得できる技術だ。このような線源は直線上に2本の511 keV の $\gamma$  線を放出するので片方をよく測定すればもう片方は保証できるはず。線源を中心にして参照検出器(Ref-detector)と標的検出器(Target-detector)を設置する。この時、線源から放出される光子の参照検出器における立体角がそのまま反対側の標的への立体角になる。

ちなみに、標的と参照検出器がどちらも 511 keV の光子を観測した事象をデータ収集のトリガーにすると、線源の位置を変えるに応じて検出時刻が変化する。この時間差は  $\gamma$  線の光路差から計算でき光速を求めることができる上に時間分解能を評価することができる。

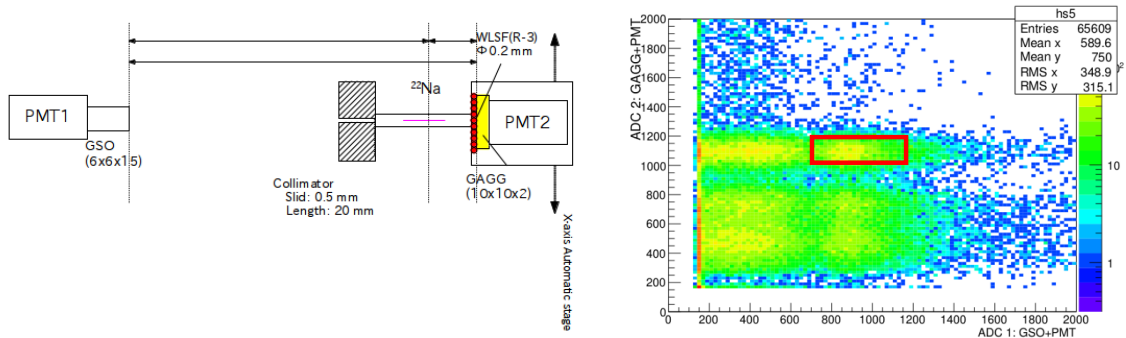


図 1. 同時計測法セットアップ模式図(左)と ADC スキャッタプロット(右)

## 2. 従来の検出効率測定

日本アイソトープ協会が校正した放射能( $A_{Cs}$ )をもつ  $\gamma$  線源(例えば  $^{137}\text{Cs}$ )を使用して、無機シンチレータ結晶と PMT で構成されたシンチレーション検出器の検出効率 ( $\epsilon_{det}$ ) を評価することを考える。検出器が覆う線源からの光子の立体角を  $\Omega$  とする。バックグラウンド事象を  $t$  時間測定し、その後  $^{137}\text{Cs}$  からの 622 keV の  $\gamma$  線を結晶に同じ時間だけ当てる。それぞれの光電吸収領域の事象数の差から測定時間を割ったものを  $\gamma$  線によるカウント頻度  $R$  とする。 $^{137}\text{Cs}$  線源から 622 keV の  $\gamma$  線は  $\epsilon_{BR}=94.6\%$  の崩壊分岐比をもつので、これらより 622 keV の  $\gamma$  線の検出効率は

$$\epsilon_{det} = \frac{R}{A_{Cs}\epsilon_{BR}\Omega}$$

と評価できる。しかし、 $^{137}\text{Cs}$  の半減期が約 30 年だからといって年代が経つにつれて放射能は減衰し、カウント頻度が低い場合宇宙線ミュオンによるバックグラウンドに埋もれる可能性があるので間接的な評価ではなく直接検出効率を測定したい。

## 3. 検出効率の直接測定

$^{22}\text{Na}$  は陽電子を放出後 1.27 MeV の光子を放出するので、対消滅して生成された光子の片方と 1.27 MeV の光子を観測することで 511 keV の光子ビームの事象タグを取得することができる。入射光子数に対して標的検出器の 511 keV 光電吸収領域の事象数の割合から直接検出効率を評価するシステムを構築した。

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は浜松ホトニクス社のR6231-100 No.ZE6271で、増幅率は電圧1800Vで $10^6$ 程度だ。増幅率が低いエネルギー分解能が高い機種である。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。

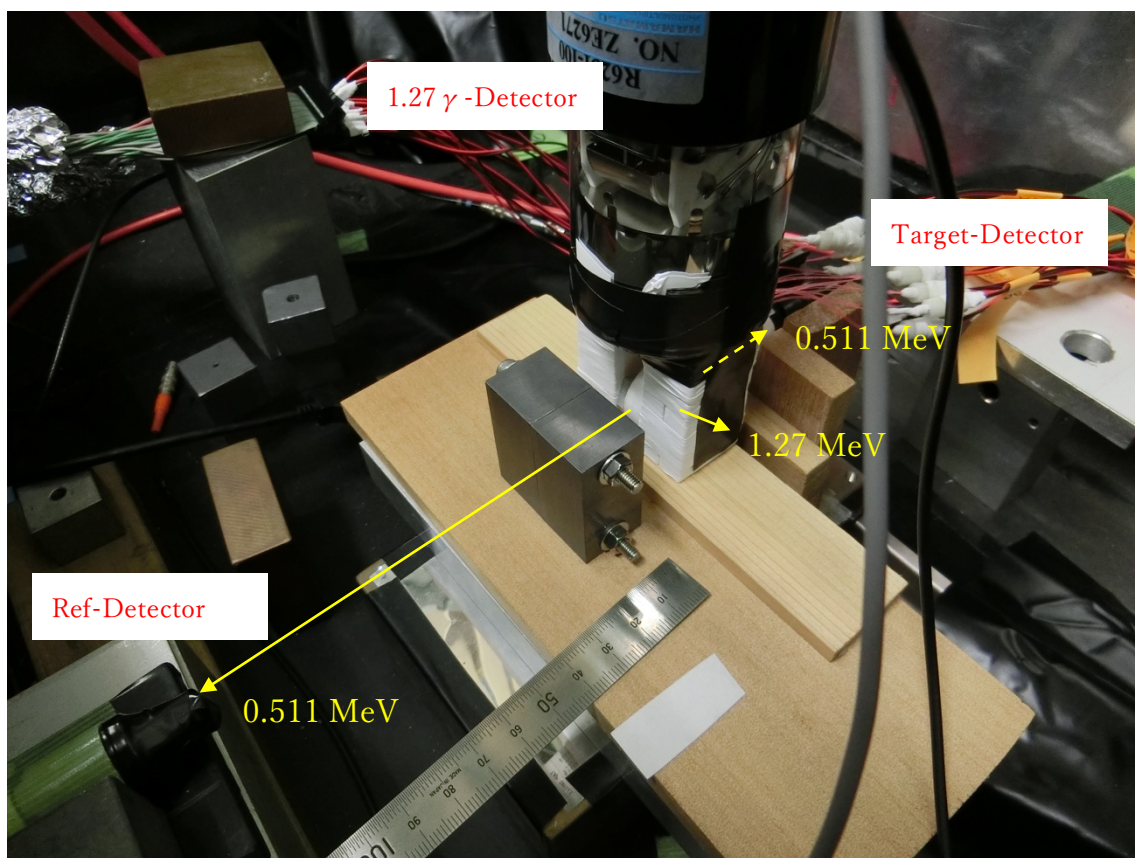


図2. Setup 写真

### 3.1. 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 $511 + 1275 = 1786 \text{ keV}$ 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)。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。

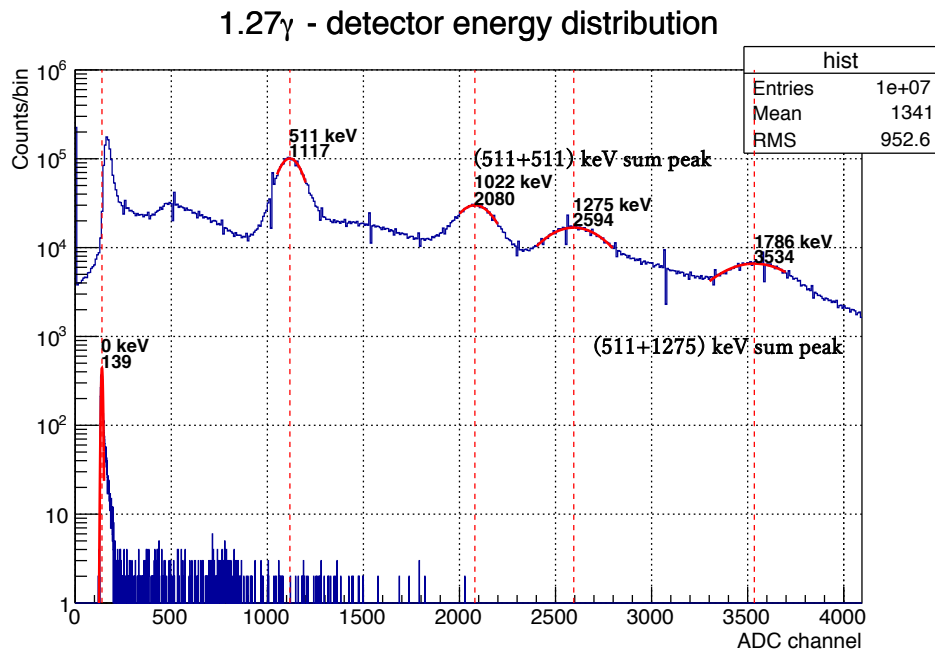


図 3. 1.27 $\gamma$  -Detector のエネルギー校正結果

### 3.2. $\gamma$ 線(511 keV)事象選択による結果

1.27 $\gamma$  検出器のしきい値を 1 MeV 相当(ディスクリミネータしきい値-150 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 4 は 1.27 $\gamma$  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 1.27 $\gamma$  検出器で 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 は事象選択された標的検出器の ADC 分布で、400-600 keV が光電吸収事象の領域であることがわかる。標的検出器の GAGG 結晶の厚さを 0.5 mm、1.0 mm、2.0 mm、5.0 mm と変えた時、511 keV 光電吸収事象の割合が次第に向上していることが確認できた。

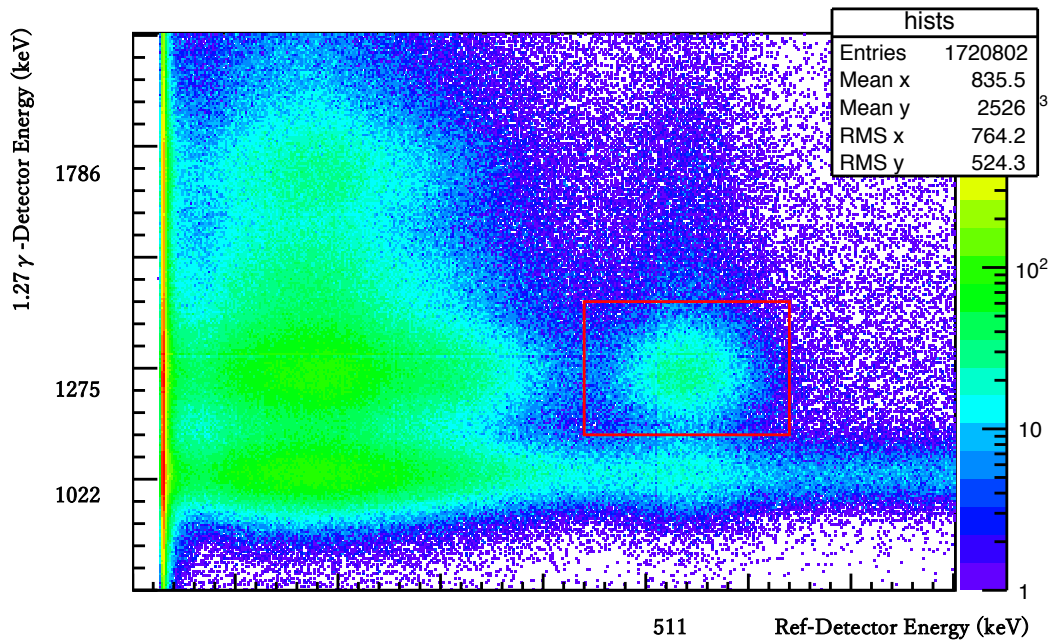


図 4. 1.27  $\gamma$ -Detector と参照検出器のエネルギースキッタプロット

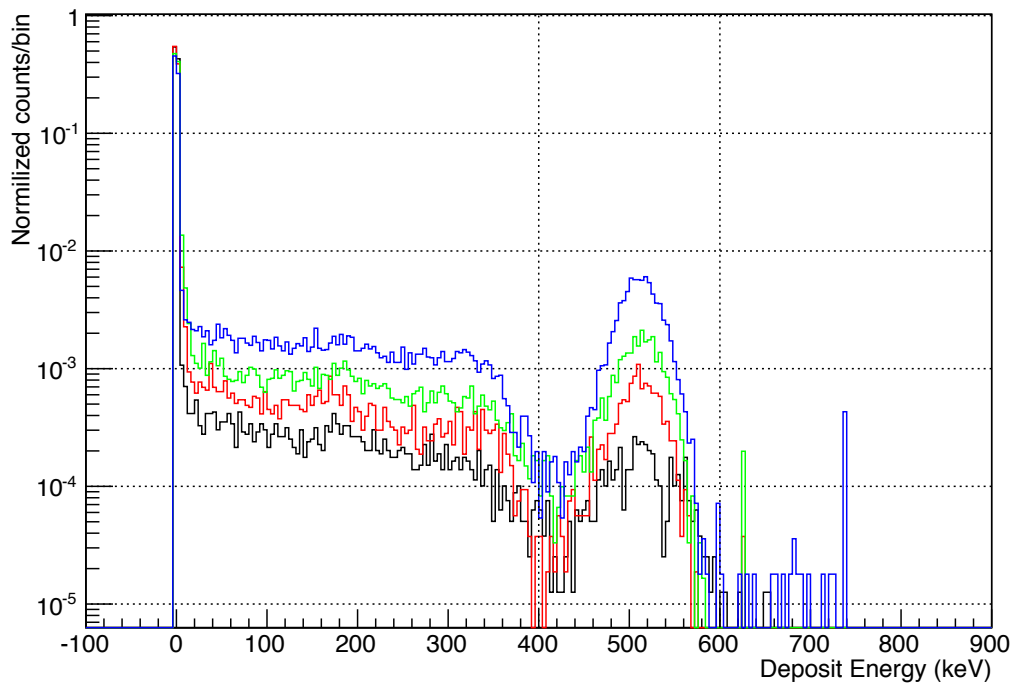


図 5. 事象選択された標的検出器のエネルギー分布。黒、赤、緑、青線は GAGG 結晶の厚さがそれぞれ 0.5, 1.0, 2.0, 5.0 mm である。

#### 4. モンテカルロシミュレーションによる比較

Geant4 によるシミュレーションで比較するためのジオメトリセットアップは、511 keV の  $\gamma$  線を GAGG 結晶( $\text{Gd}_3\text{Al}_2\text{Ga}_3\text{O}_{12}$ )に入射させ、損失エネルギーを測定するだけなので比較的容易に検証できる。ただしマテリアルは実験と同様に結晶のサイズは 10 mm×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。

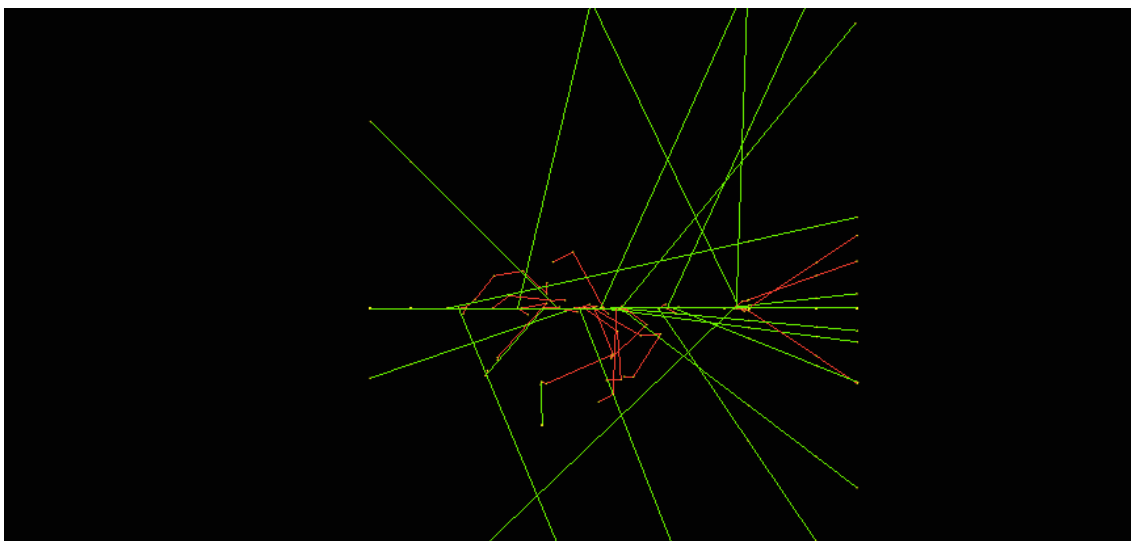


図 6. Geant4 モンテカルロシミュレーション

結晶の厚さを変えながら損失エネルギー(Deposit energy)を計算した結果、[図 7](#) に示すようなエネルギー分布が得られる。ただし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。全事象に対する光電吸収領域の割合を検出効率として定義し、結晶厚さに対する検出効率は計算値と実測値は一致しなかった。計算値は実測値より高く見積もっているようで、これは何かの情報を計算に入れていない可能性がある。

Distribution of Deposit Energy  $E_{\gamma}$  with crystal thickness

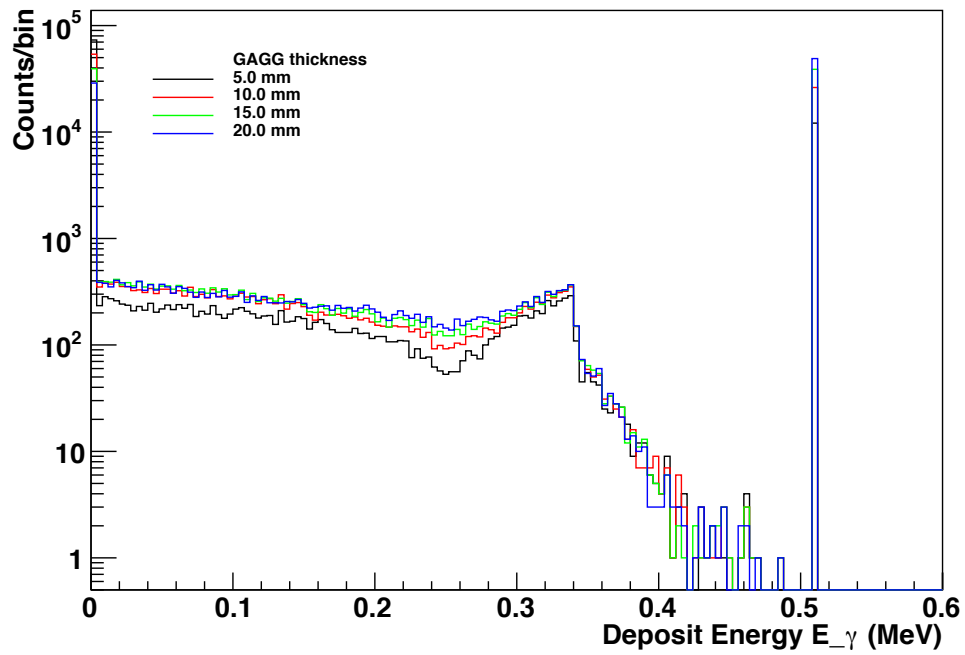


図 7. Geant4 による損失エネルギーの計算結果

Relation of Detection efficiency and Thickness of crystal

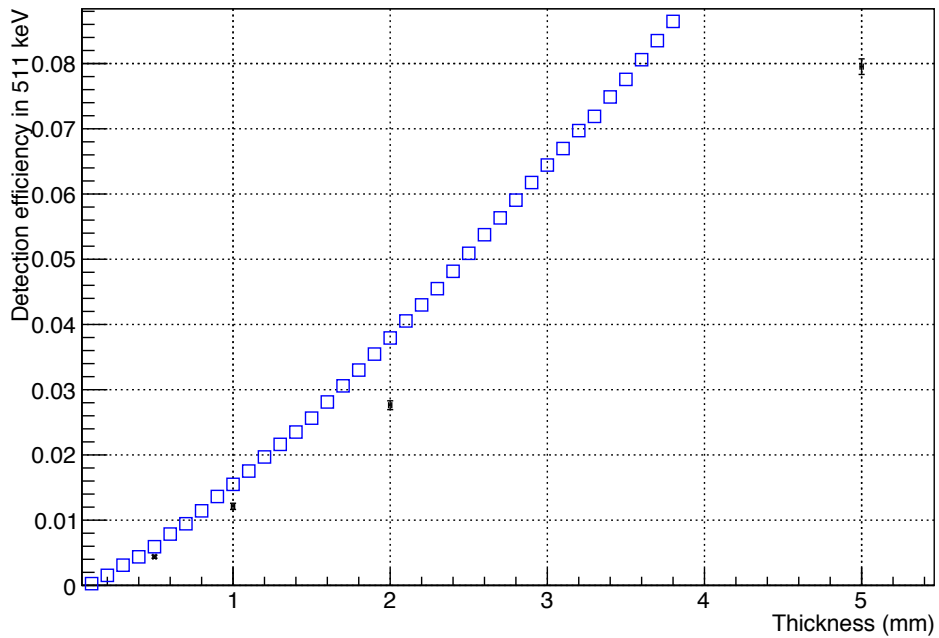


図 8. 結晶厚さと検出効率の関係における Geant4 の計算値と実測値の比較

## 5. まとめ

エネルギー1.27 MeVの $\gamma$ 線と対消滅した片割れの511 keVの $\gamma$ 線を同時観測し、511 keVの $\gamma$ 線のイベントタグを取得するシステムを構築した。Calibration測定では1.27 MeVで $1.908 \pm 0.06$  ADC/MeVの校正係数が得られ、分解能FWHM 16.8%が確認された。トリガーを選択することで標的検出器の検出効率が測定可能になった。結晶の厚さと検出効率の関係はGeant4によるシミュレーション結果と一致しなかった。結晶模型が正しくない可能性がある。

$\gamma$ 線(511 keV)のイベントタグは取得できるようになった。結晶の厚さに依存した検出効率も測定方法を確立した。今後の展望として511 keV光電吸収事象のなかにコンプトン散乱事象がどのくらいの割合で存在しているのか測定する。PET装置において光電吸収事象はトリガーで収集されるがコンプトン散乱事象を捨ててしまうため、今後の測定結果をもとにコンプトン散乱事象を解析に使用すればどれだけ画像統計を向上できるか、または患者被曝量を低減できるかについて議論できる。