

PET 用ガンマ線測定システムの構築

概要

PET 装置開発のためのデータ収集システム (DAQ) を構築した。このシステムは PMT 読み出し用の CAMAC ADC と TDC、そして MPPC 読み出し用の EASIROC モジュールをそれぞれ単体にもしくは同時に制御することができる。GAGG 結晶は C&A 株式会社からサンプルを提供してもらい、 ^{22}Na 密封線源からの $e^+e^- \rightarrow 2\gamma$ 事象を用いてシステムの評価をした。評価測定では以下を実行した: (1) 線源の位置と時間差の関係、(2) コンプトン相互作用と光電効果事象の割合。

1. データ収集システム

位置分解能 0.1 mm を持つ PET 装置開発の実証実験のための DAQ の要請をハードウェアおよびソフトウェア含めて以下に示す。

- PMT(x2)の ADC+TDC, MPPC(x50) ADC の読み出し
- 2つの無機シンチは線源の両側に置き、線源の位置を変更する
- CAMAC + EASIROC モジュールを単体もしくは両方が使用可能

2. セットアップ

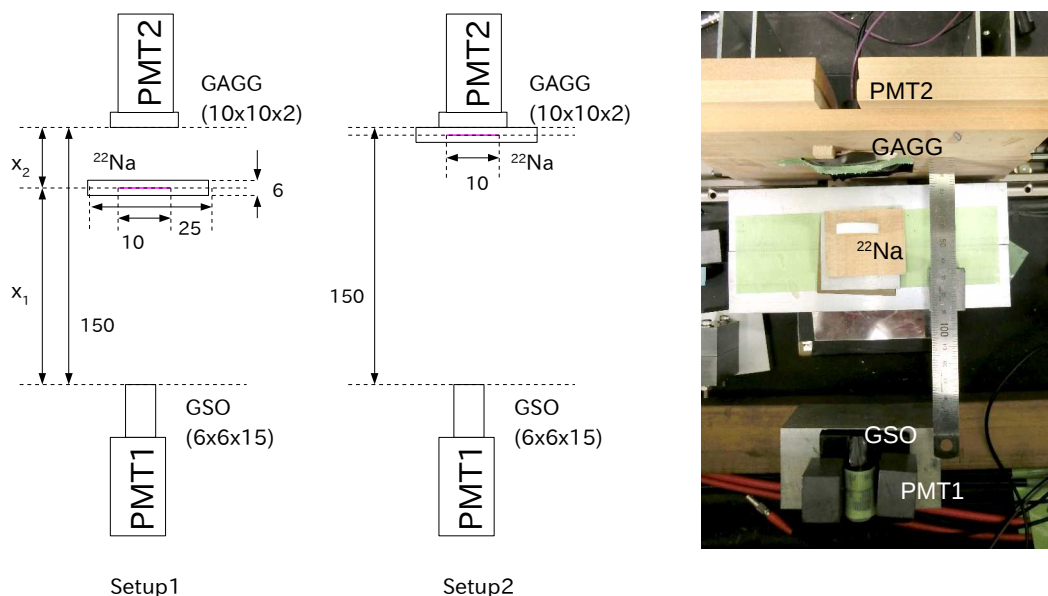


図1. ^{22}Na 線源を用いたガンマ線測定システムのセットアップ。setup1 は光路差と時間差の関係、setup2 は検出効率を調べる。図面の単位は[mm]である。

(1) 線源の位置と時間差の関係: $e^+e^- \rightarrow 2\gamma$ 事象で線源に位置を変えると光の光路差と PMT の応答時間差の関係を調べ正常にシステムが動作しているか確認する。図1の Setup1 のように線源は $x_1 = 6, 75, 144$ mm に置いた時、光路差は $\Delta x = -138, 0, 138$ mm である。誤差は ^{22}Na 線源の内部素材厚さは数 μm で、結晶の厚さによる光路差のゆらぎ $\pm (2 + 15)/2 \sim \pm 8.5$ mm が支配する。PMT1 と PMT2 の ADC 分布で光電ピーク $\pm \sigma$ の事象を抽出した時の、それらの時間差の分布を作成し、線源位置との関係から光速を導く。

(2) コンプトン相互作用と光電効果事象の割合: GAGG 結晶と ^{22}Na 線源を密着させ PMT1 で光電効果が検出された事象はほとんどの場合 GAGG に 511 keV のガンマ線が幾何学的な立体角で入射する。その場合における PMT2 での ADC 分布から、ペDESTAL事象、コンプトン散乱事象、光電効果事象、その他に分類し、それぞれの検出効率を GAGG 結晶の厚さごとに調べる。

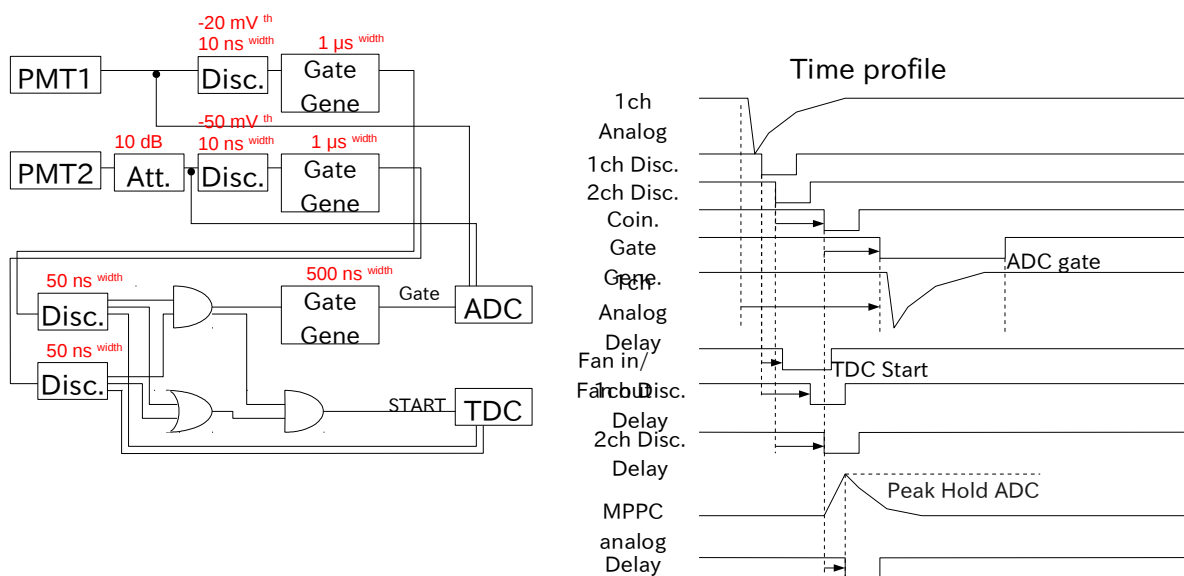
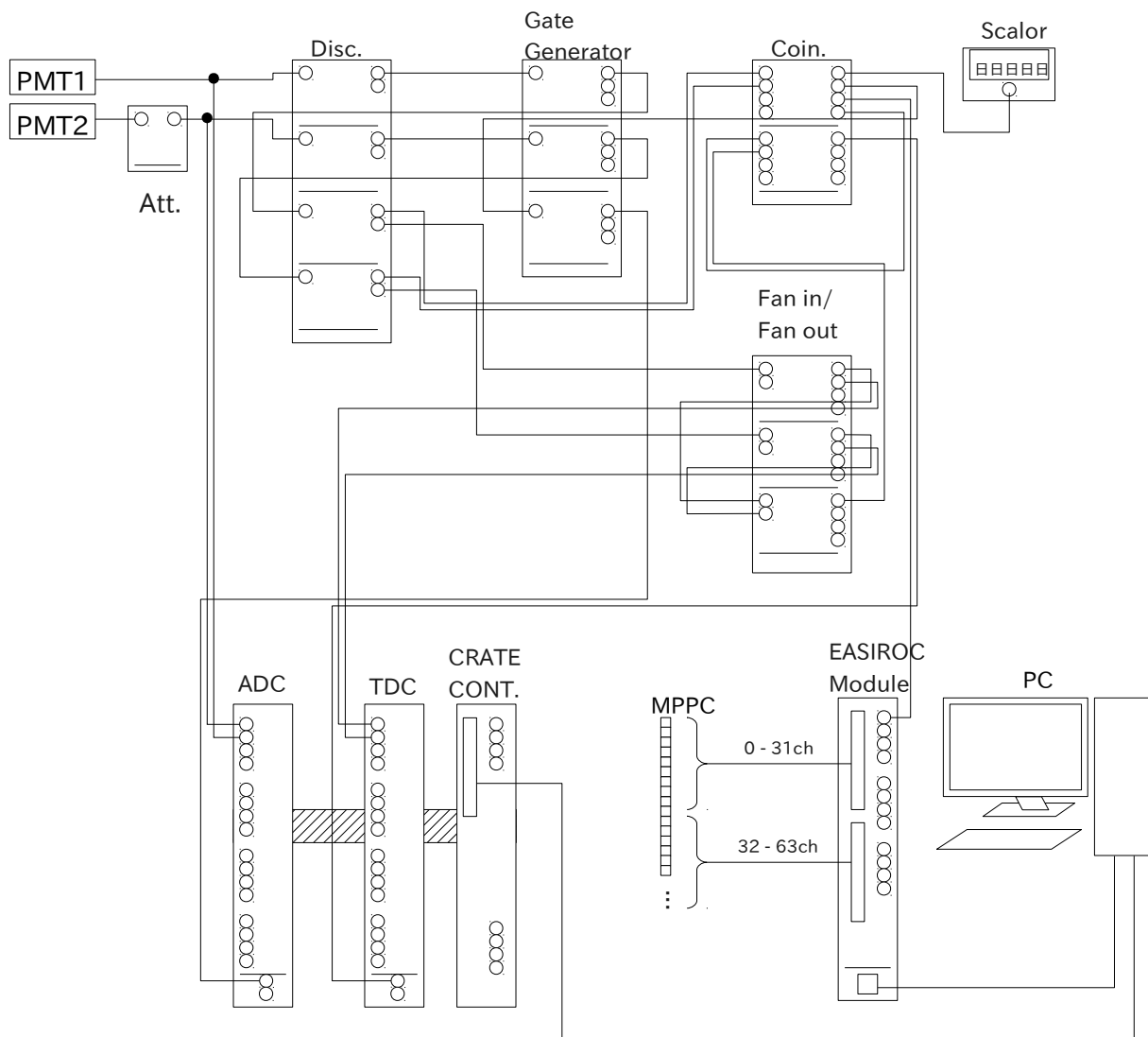


図 2. ハードウェアの回路設計図。NIM モジュールでデジタル信号を処理し同時計測する。

(3) **ハードウェア:** 図2に示すようにハードウェアの回路を設計した。特徴は Discriminator でデジタル化した後 Gate Generator で一回不感時間を作った後、もう一度 Disc.で波形整形している。これは Disc.がアップデート型であることに起因しており、無機結晶の減衰時間までに何度もしきい値を超えた場合、最初の信号の後に何度も信号が発生しご認識の原因になる。不感時間を置きその最初の時刻だけで AND や OR 演算をすることができる。タイミングは図2の Time profile に示す。GAGG 結晶からの発光量は減衰しなければ ADC で over flow してしまう。

(4) **ソフトウェア:** GUI によるソフトウェアを実装した。本測定では CAMAC ADC と TDC をそれぞれ 2ch ずつ使用するだけなので、図3.に示す CAMAC PARAMETER を設定する。チェックボタンは CAMAC だけをチェックし、work DIR をワークスペースのアドレスを入力する。「DAQ START」ボタンを押すと DAQ が実行される。イベント番号は Event Num で設定する。Run 番号は自動で更新される。ADC/TDC モニタは Run 番号を設定して「Go」した時、ROOT のキャンバスが描かれる。

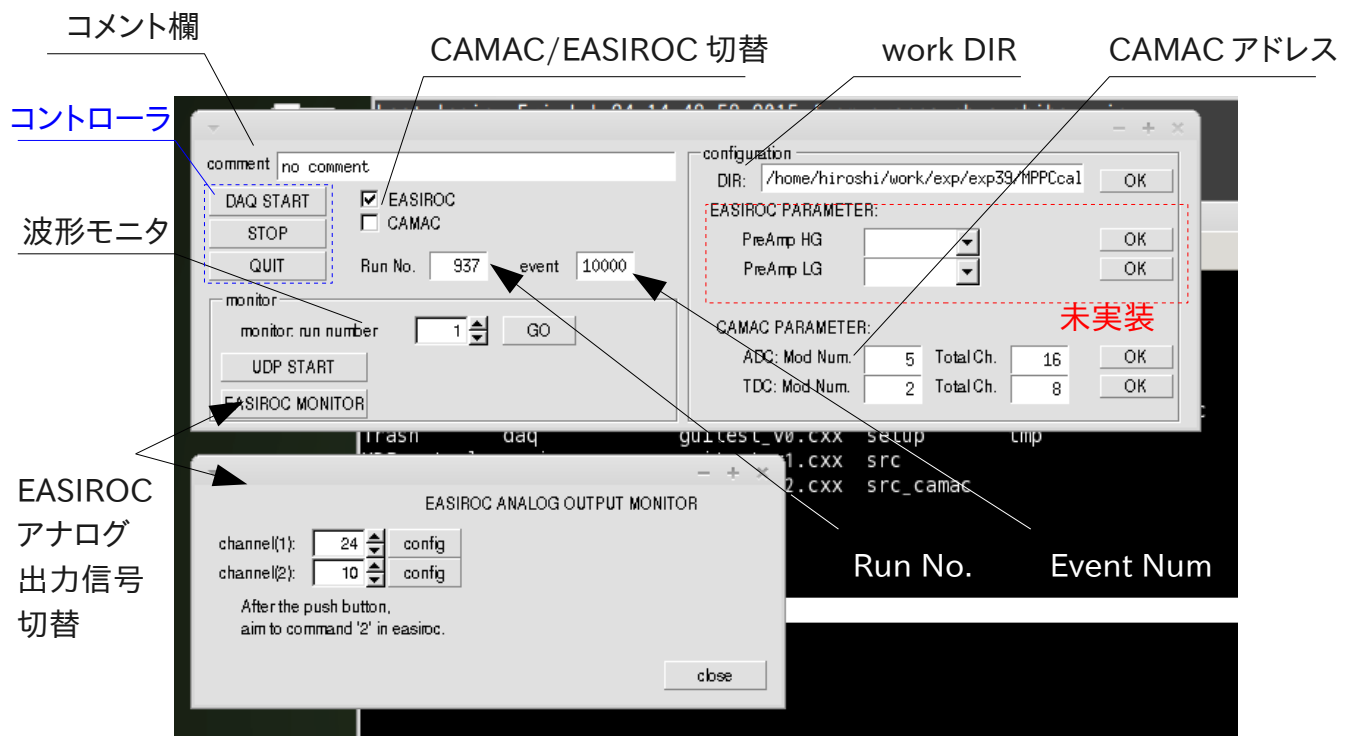


図3. GUIソフトウェアの画面

3. 解析結果

(1) 光路差と時間差の関係

PMT1とPMT2のADC分布を図4にそれぞれ示す。ペDESTALル、コンプトン散乱、光電効果の3つのピークが確認された。どちらも光電効果のピーク値 $\pm\sigma$ の領域を抽出した。

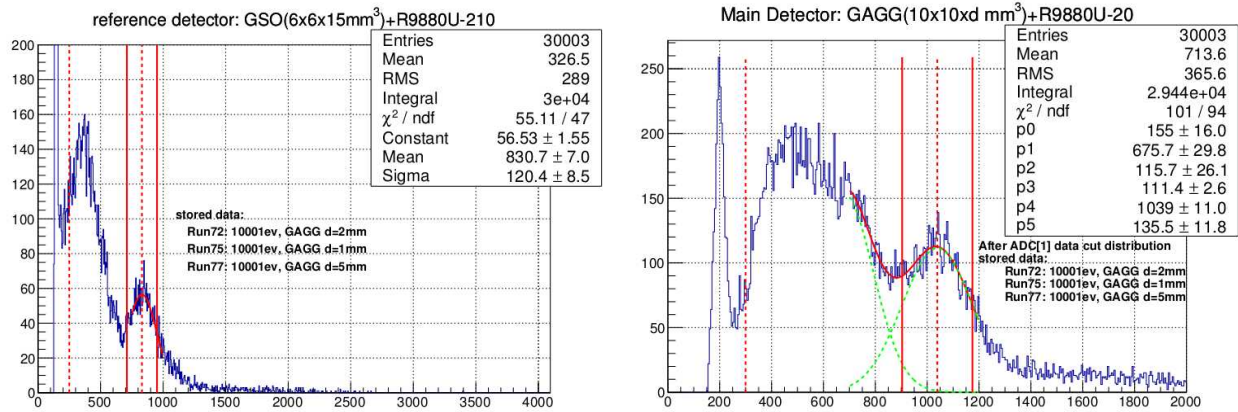


図4. PMT1とPMT2のADC分布:光電ピークについてガウス分布でフィッティングしている。

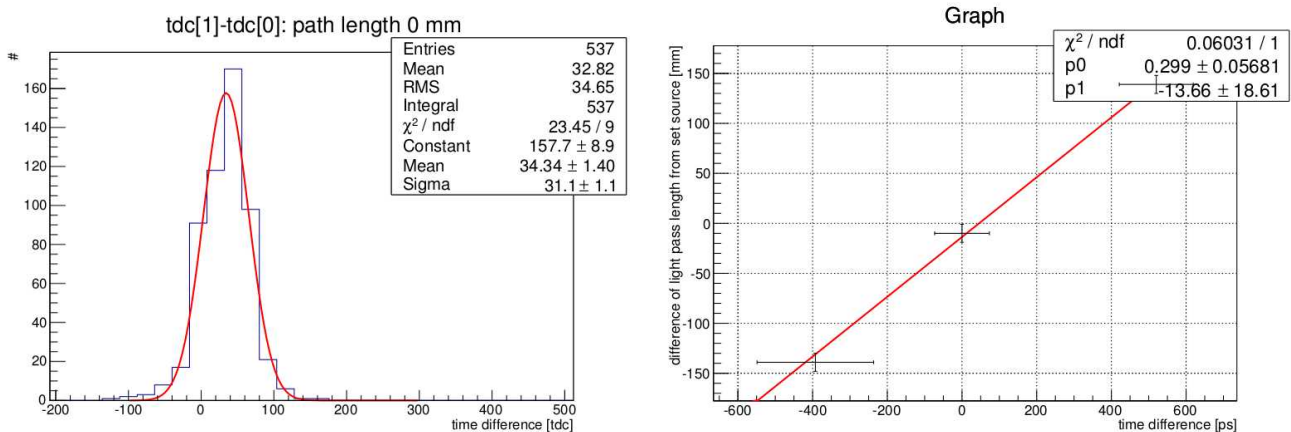


図5. ADCのデータカットした後、抽出後の時間差(TDC1 - TDC0)分布(左)。ガウス分布でフィッティングして平均値と標準偏差を導いた。CAMAC TDCの変換係数は54.6 ps/TDCである。線源位置を変えた時の光路差と時間差平均の関係(右)から、光速(2.99 \pm 0.01) \times 10⁸ m/sが得られた。

(2) 検出効率

PMT1において光電効果事象のピーク $\pm\sigma$ の領域でのPMT2のADC分布について解析した。図6に示す。GAGG結晶の厚さを1, 2, 5 mmと変えていき、ペDESTALル事象、コンプトン散乱事象、光電効果事象に区別して、それぞれのイベントの割合をリストにした。グラフにしてみると次のことがわかる。全体の検出効率は97.7%, 97.5%, 98.2%と多少ゆらぎがある。コンプトン散乱事象は結晶を増やすと割合が減少傾向で、これはコンプトン散乱後に結晶内でエネルギーを落とし合計が511 keVとなる場合が増えるからである。この影響もあり、光電効果事象が増加傾向にある。ただし、厚さ5 mm以降は収束傾向が予想される。

PET装置で光電効果だけでなくコンプトン散乱事象もデータに含めることが出来れば2.3 - 3.3倍統計量を増やすことが出来ることはいえる。コンプトン散乱事象を光電効果の代わりに使用しても統計量は同等である。その他の事象は光電効果の領域以上のエネルギーを観測した事象で主に²²Naから単一の1.2 MeVのガンマ線からの情報であると考えられる。

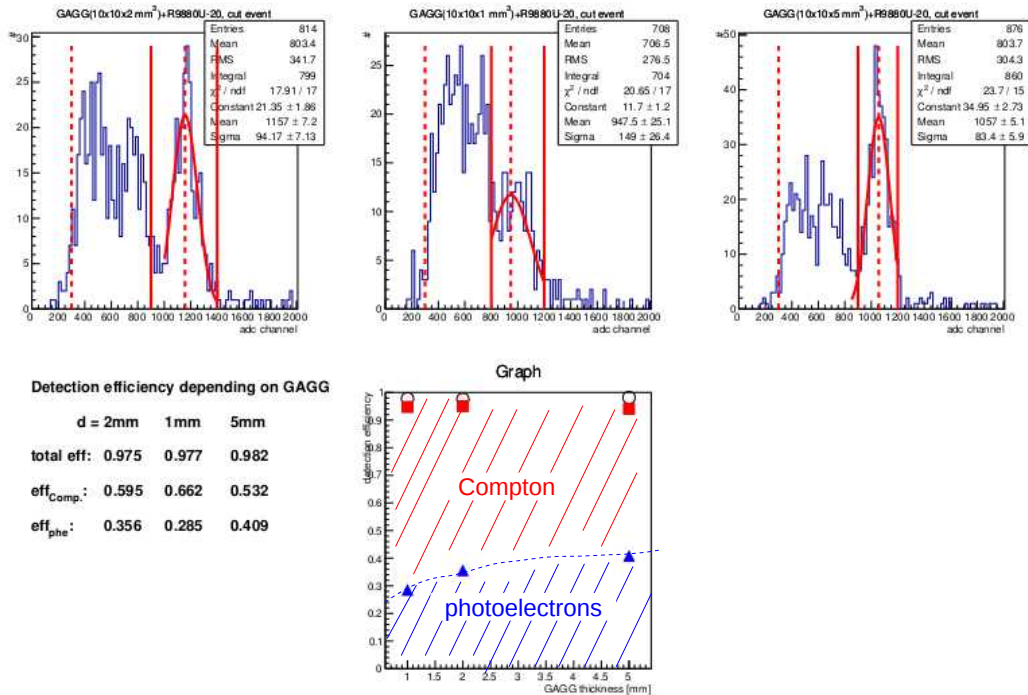


図 6. GAGG 結晶の厚さ 1, 2, 5 mm における全体の検出効率、コンプトン散乱事象の割合、光電効果事象の割合:○は全体の検出効率、■は光電効果+コンプトン散乱事象、▲は光電効果事象の割合を示し、赤斜線領域はコンプトン散乱事象、青斜線領域は光電効果事象をそれぞれ示している。

4. 考察まとめ

GAGG 結晶と GSO 結晶による PET 用ガンマ線測定システムは正常に稼動していることが確認できた。本測定で明らかになったことと、改善点を以下に示す。

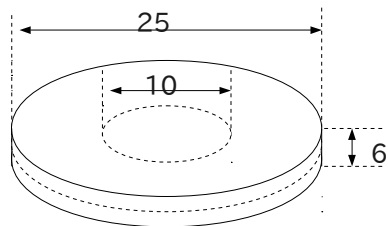
- この装置ではスタートとストップの分解能はそれぞれの結晶の立上りに寄与してしまい、平均時間分解能は標準偏差で 1.6 ns が結果で得られた。これに関しては PMT 1つで1つの結晶からの時間情報を収集していることが分解能がよくない要因であろう。システムの時間分解能向上のためには、一つの結晶に PMT は最低2つは接続し読みだす必要がある。
- 光電効果事象のピークが太い(エネルギー分解能が悪い:FWHM 30 ~ 40%)のは、結晶と PMT の接続部に原因があり、そして結晶サイズの有効面積に対する鉛直方向の割合が支配的である。まず、結晶サイズの鉛直方向が長い場合相互作用した位置によって PMT へ入射される光子数の変化が大きい。なので、なるべく結晶サイズは有効面積に対して鉛直方向は薄くすると良い。PMT との接続部は結晶と空気の屈折率から全反射条件を満たさない光が PMT へ入射される。なので PMT と結晶との間は空気ではなく、屈折率の変化がなるべく少なくするために光学ジェルを使用すると良い。
- GAGG 結晶とガンマ線の相互作用について、結晶の厚さに依存したコンプトン散乱事象と光電効果事象の割合の増加傾向が確認された。現在の PET 装置では光電効果のみを解析イベントに採用しているのでコンプトン散乱事象を含めると約 2 - 3 倍の画像解像度の向上、もしくは検査時間の短縮(被曝量の抑制)につながることが言える。

5. 付録

使用した結晶

	size [mm]	polish
GAGG	10x10x2	機械研磨(2面)
	10x10x1	機械研磨(2面)
	10x10x5	機械研磨(2面)
GSO	6x6x15	機械研磨(1面)

²²Na 線源



光電子増倍管

	型番	増幅率@1200V	感度波長[nm]	最大量子効率
PMT1	R9880U-210: BAC7472	$(1.93 \pm 0.02) \times 10^7$	350 - 550	40%(370 nm)
PMT2	R9880U-20: BCA9345	$(3.41 \pm 0.04) \times 10^7$	400 - 700	20%(500 nm)