

概要

オシロスコープでの波形解析が可能になった。 ^{137}Cs , ^{22}Na からのガンマ線で光電効果事象の平均波形から結晶 (GSO, GAGG) の発光特性を調べる。また、リファレンスにおける光電効果事象の取得のためのディスクリミネータしきい値を決定する。

実験1: オシロスコープ波形データ取得による無機シンチ発光特性の測定 セットアップ:

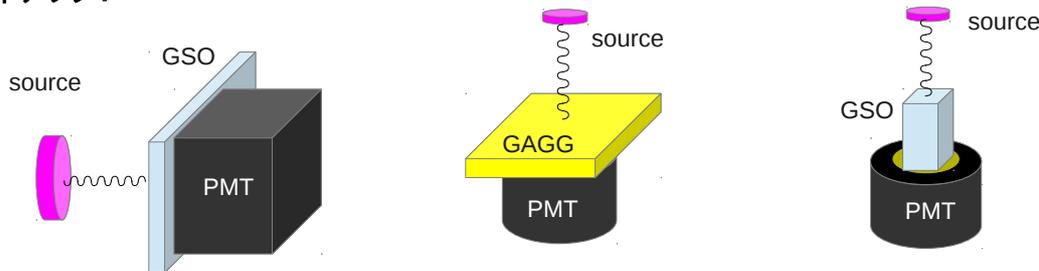


図 1. セットアップ概念図

3つのセットアップで無機シンチレータの発光特性を調べる。セットアップ1は GSO (24.0 x 46.0 x 2.4 mm³) 結晶と PMT (H11934-200)、セットアップ2は GAGG (10 x 10 x 5 mm³) 結晶と PMT (R9880U-20) を、セットアップ3は GSO (6 x 6 x 15 mm³) と PMT (R9880U-210) を使用した。以下に材料の仕様を示す。それぞれ、 ^{137}Cs と ^{22}Na 線源からのガンマ線を用いて測定した。

----- 仕様 -----

●GSO:(CE0.4)

made by 日立化成株式会社 (Hitachi Chemical)

発光量: 8,000 ph/MeV、発光波長: 420 – 470 ns、密度 6.71 g/cm³、放射長: 1.38 cm、減衰係数 30 – 60 ns

セットアップ 1: サイズ: 24.0 x 46.0 x 2.4 mm³

セットアップ 3: サイズ: 6 x 6 x 15 mm³

●GAGG

made by C&A 株式会社

発光量: 56,000 ph/MeV、発光波長: 500 – 600 ns、密度 6.63 g/cm³、減衰係数 92 ns (86%)、174 ns (14%)

セットアップ 2: サイズ: 10 x 10 x 5 mm³

●光電子増倍管 (PMT): 型番 H11934-200 DA0296

made by HAMAMATSU Photonics K.K.

Gain: $(2.44 \pm 0.07) \times 10^7$ @ 1200V、入射窓サイズ: 23 x 23 mm²、カソードサイズ: 18 x 18 mm²、カソード材質: ウルトラバイアルカリ (UBA)、感度波長: 350 – 550 nm

●光電子増倍管 (PMT): 型番 R9880U-20 BCA9435

made by HAMAMATSU Photonics K.K.

Gain: $(3.55 \pm 0.01) \times 10^7$ @ 1200V、入射窓サイズ: 直径 16 mm、カソードサイズ: 直径 8 mm、カソード材質: マルチアルカリ (UBA)、感度波長: 400 – 700 nm

●光電子増倍管 (PMT): 型番 R9880U-210 BAC7274

made by HAMAMATSU Photonics K.K.

Gain: $(1.93 \pm 0.02) \times 10^7$ @ 1200V、入射窓サイズ: 直径 16 mm、カソードサイズ: 直径 8 mm、カソード材質: ウルトラバイアルカリ (UBA)、感度波長: 350 – 550 ns

GSO 結晶は図 1 に示すように PMT に接続される。線源は ^{137}Cs と ^{22}Na を用意した。 ^{137}Cs は 95% の確率でベータ崩壊して準安定状態 $^{137\text{m}}\text{Ba}$ になった後、662 keV のガンマ線を放出して安定状態 ^{137}Ba に崩壊する。 ^{22}Na は β^+ 崩壊して ^{22}Ne の励起状態になり、その後 1.2 MeV のガンマ線を放出して安定状態 ^{22}Ne に崩壊する。 β^+ 崩壊して放出した陽電子は原子内の電子と対消滅して 511 keV のガンマ線を 2 本互いに 180° 逆方向で放出される。本測定では 662 keV と 511 keV のガンマ線の光電ピークからエネルギー・キャリアブレーションを行い、この領域における波形を解析した。

PMT アノードからの信号を 2 つに分割して一方を Discriminator に接続し、タイミングを調節してトリガーとして、もう一方をアナログ信号のままオシロスコープにそれぞれ接続した。Discriminator のしきい電圧値は -45mV に設定した。オシロスコープは Tektronix 製の型番 TDS2012 100MHz 1GS/s で、最小サンプルレート 1 ns の性能を持つ。これは背面の PCI/GP-IB 経由で PC 制御され、データ通信速度は約 10MHz と遅いが、波形データをテキスト形式ファイルで出力することができる。



図 2. オシロスコープ Tektronix TDS2012。正面写真 (左)。背面写真 (右)

解析①: -500 ns から 500 ns までの波形データを PCI/GP-IB 経由でオシロスコープを OC 制御して取得した。縦軸電圧値 mV、横軸時間 ns の波形分布を図 3 に示す。まず、オフセットラインを決定する。信号が着ていないであろう -500 ~ -200 ns の時刻における電圧値の射影 (projection) をとり、ガウス関数でフィッティングした平均値をオフラインとして決定する。

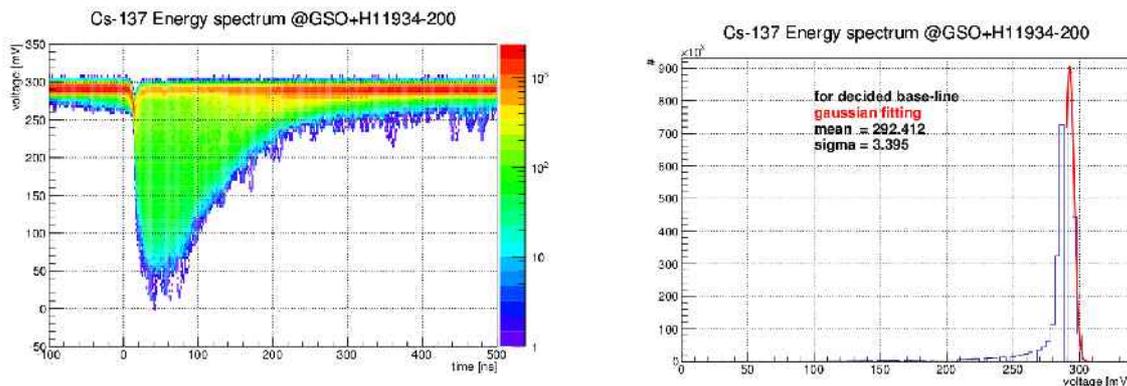


図 3. オシロスコープ波形分布 (左)。電圧値射影分布はガウス関数でフィッティングされ、オフセットラインの平均値と標準偏差を導き出す (右)。

解析②: 解析①の結果、オフセットラインの平均値は 292 mV、標準偏差は 3 mV であることがわかった。そこで、取得した波形のオフセットをゼロにしたときに改める。ランダムに 10 個の波形を図 4a に示す。この波形を -100 ~ 400 ns の積分範囲で積分する。内部抵抗 $R=50\Omega$ を代入して、オシロの離散的なデータの補間のために積分方法は以下の台形積分を採用する。

$$Q = \sum_{t=0}^{t_{max}} \frac{1}{2R} (V(t) + V(t+1)) \Delta t$$

電荷 Q の分布を図 4b に示す。この値はアナログ信号を2分割したので、係数2倍で補正されている。 ^{137}Cs からのガンマ線(662 keV)は物質中で主に光電効果とコンプトン散乱する。光電効果は全エネルギーを電子に与えるので 662 keV のピークが得られる。コンプトン散乱は弾性散乱で連続的なエネルギー分布を持つ。最大エネルギーを損失する場合($\theta=90^\circ$)、損失エネルギーは 447 keV なので、光電ピークと分離することが出来る。また、他の場所でコンプトン散乱した後、GSO 結晶でエネルギーを落とす事象が存在する。これを後方散乱といい、最小で 185 keV のエネルギーのピークを観測される。

図 4b の光電ピークをガウス関数でフィッティングした結果、平均 944pC で標準偏差 79pC であった。エネルギー分解能は標準偏差と平均値の割合で評価され、FWHM の値は標準偏差の約 2.35 倍なので、この結果からエネルギー分解能は 19.8% (FWHM) @ 662 keV と評価される。また、PMT の増幅率と光電子数の関係式

$$N_{p.e.} = \frac{Q}{e\mu(V)}$$

からこのときの光電子数は 240 ± 20 p.e. と評価できる。ここで、 $N_{p.e.}$ は光電子数、 Q は電荷 pC、 e は素電荷 1.6×10^{-19} C、 $\mu(V)$ は供給電圧 V における PMT の増幅率を示す。

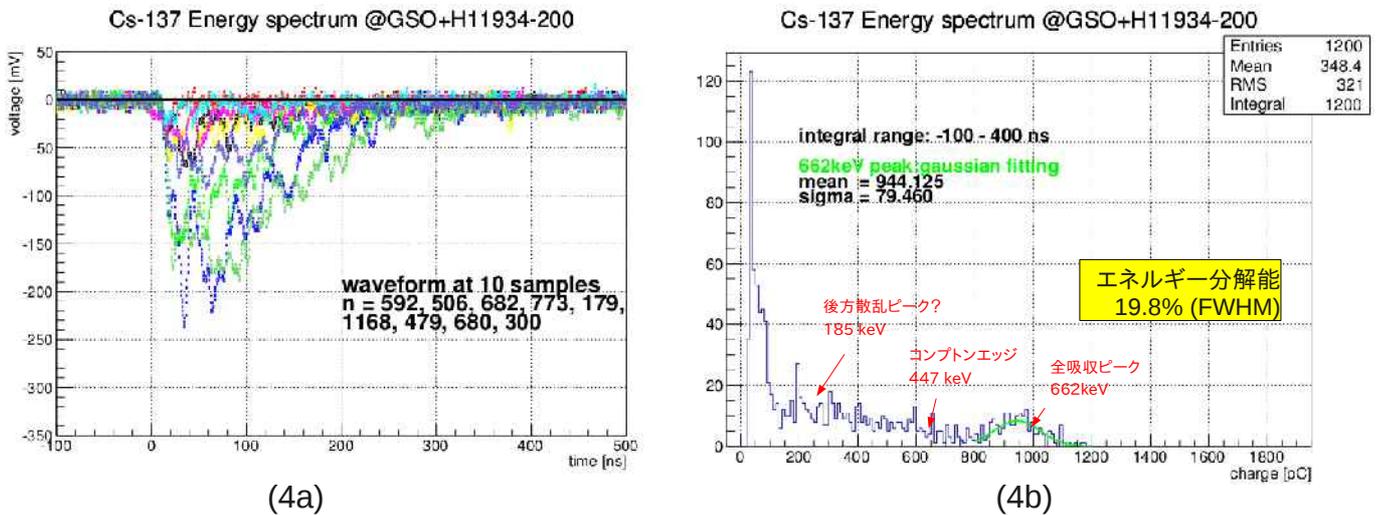


図 4. オシロスコープのサンプル波形 (左)。積分区間 -100 ns から 400 ns までの積分電荷分布 (右) から後方散乱ピーク (185 keV)、コンプトンエッジ (477 keV)、光電ピーク (662 keV) が観測された。

解析③: 光電ピークの $\pm \sigma$ の領域における波形分布を図 5 に示す。この波形から GSO 結晶の発光特性を調べることができる。黒実線は平均波形を示す。平均波形の最大電圧値は 176.1 mV で半値幅(FWHM)は 113.6 ns である。赤破線はフィッティング関数で、この波形を3つの領域に分け単純な関数で表現した。領域①は信号がないので $f = 0$ 。領域②は時刻 5.8 ns から 38.0 ns の領域で、1次関数 $f = p_0 x + p_1$ でフィッティングした。領域②の時間を立ち上がり時間(rise time)という。領域③は減衰領域で指数関数的に光量が減衰している様子が確認できる。波の最大電圧値から $1/e$ の高さになる時間を減衰時間と定義して評価した。平均波形の最大値からの減衰領域に注目して指数関数(マゼンタ破線)でフィッティングした結果、赤線よりよく減衰について説明ができていたので、この時の値を減衰時間として定義する。 e^{-3} (~ 0.03)になる時刻は $t = 3\tau + 38$ ns = 337 ns で、積分範囲は最小で 12 ns から 337 ns の 325 ns あれば十分であることがわかる。平均波形の減衰領域にピックアップして指数関数でフィッティングした結果、減衰時間は 88.1 ns であると評価できた。

Cs-137 662keV waveform @GSO+H1934-200

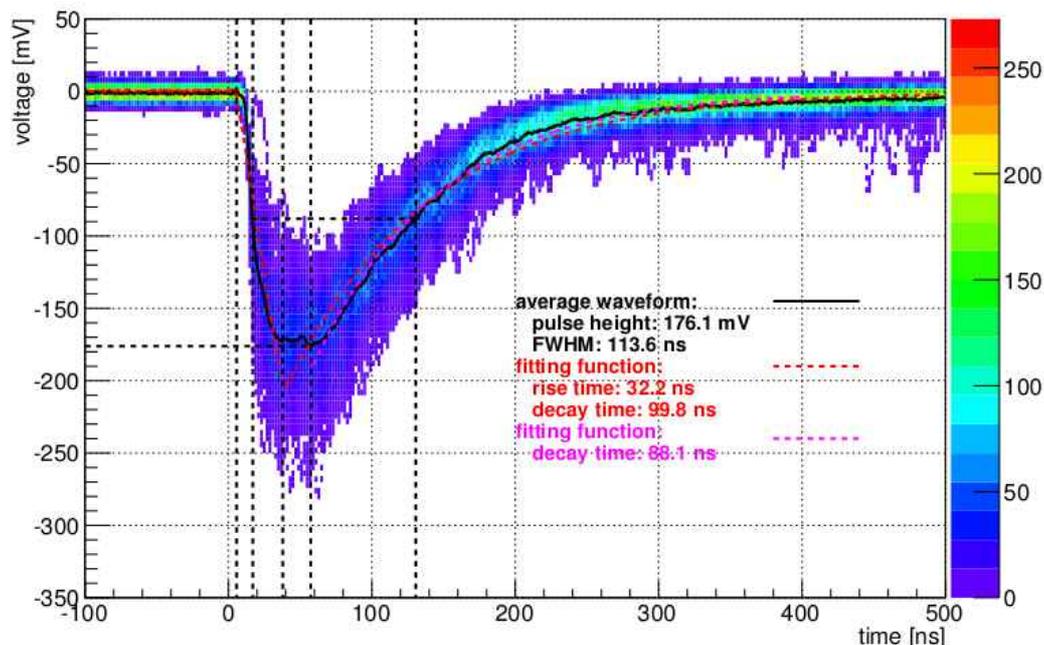


図5. 662 keV 光電ピーク $\pm\sigma$ 領域における波形分布: 黒線は平均波形、赤線は全領域のフィッティング関数、マゼンタ破線は減衰領域におけるフィッティング関数を示す。単純な関数のフィッティングより発光特性は立上がり時間 31.8 ns、減衰時間 88.1 ns、平均パルスハイト 176.1 mV、FWHM113.6 nsを持つ。

解析④: オシロスコープでデータ収集を行った理由は Discriminator のしきい値の決定であり、波の高さと積分電荷の値の関係から光電効果事象を選択してデータ収集を行う。各事象におけるパルスハイトの最大値と積分電荷の2次元分布を図 6a に示すが、良い線形性をもつ。赤縦実線は 662 keV 光電ピークの平均値、赤縦破線はそれぞれ 1σ 、 2σ 、 3σ の領域である。コンプトン散乱事象と分離できそうなパルスハイトのしきい値を -200 mV に設定した場合、光電効果を 3σ の領域で取得することができる。パルスハイトのしきい値 -200 mV でデータをカットする前と後のヒストグラムを図 6b に示す。ちょうど 662 keV 光電ピーク事象のみを選択してデータ収集されている様子が確認できる。このときのエネルギー分解能は 19.0%と若干(ファクター 2 くらい)良くなった程度である。

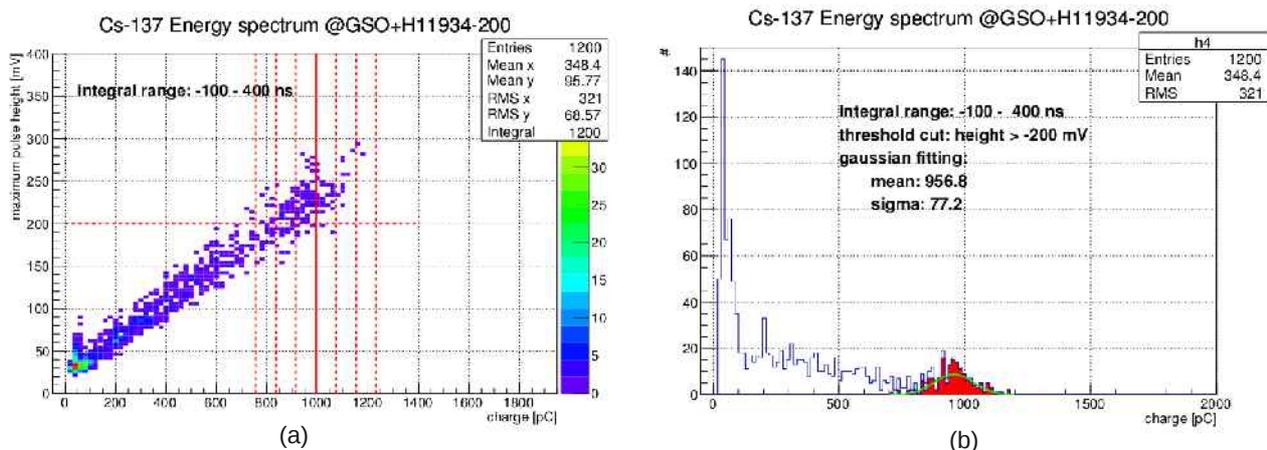


図6. 波形最大高さ \pm 積分電荷量の2次元分布 (a)。しきい値 200mV データカットする前と後の積分電荷量分布 (b)

結果： 同様にセットアップ 2、3 における Cs-137 線源及び Na-22 線源による発光特性を調べた。波形解析の結果を表 1 に示す。セットアップ 1 の結果として、GSO 結晶は立上り時間: 32.2 ns、減衰時間: 88.1 ns、平均波形最大電圧値: 176.1 mV、FWHM 112.6 ns の特性を持つ。-100 ns から 400 ns までの積分区間における積分電荷量分布で光電ピーク、コンプトンエッジ、後方散乱ピークを観測した。662 keV 光電ピークのエネルギー分解能は 19%を得た。662 keV における検出光電子数は 240 ± 20 p.e.を得た。オンライントリガーとして光電効果事象のみ取得のために Discriminator のしきい値は-200 mV が適正である。

	source	エネルギー分解能	検出光電子数	最大電圧値 (mV)	FWHM (ns)	rise time (ns)	decay time (ns)	Th1 (mV)	Th2 (mV)
setup1	¹³⁷ Cs	19.8% (FWHM)	240 ± 20	176.1	113.6	32.2	88.1	-200	
	²² Na	30.7% (FWHM)	206 ± 27	153.3	114.8	33.3	92.7	-160	-250
setup2	¹³⁷ Cs	46% (FWHM)	188 ± 37	168.1	119.6	21.7	136.4	-170	
	²² Na	48% (FWHM)	153 ± 31	138.0	123.6	22.7	136.8	-140	-250
setup3	¹³⁷ Cs	34.6% (FWHM)	128 ± 19	76.0	106.4	31.7	92.0	-100	
	²² Na	44.3% (FWHM)	108 ± 20	62.0	111.0	28.9	97.3	-90	-140

表 1. 結晶発光特性の結果

考察①： ¹³⁷Cs からの 662 keV、²²Na からの 511 keV のガンマ線の光電ピークの $\pm \sigma$ 領域についての発光特性を調べた結果より、単位エネルギー当たりの光電子数はそれぞれ、 363 ± 30 p.e./MeV @ 662 keV、 403 ± 53 p.e./MeV @ 511 keV と評価できる。この差は PMT の直線性の影響が大きい。これらのピークはそれぞれガウス関数で示せるので、重ねあわせた時の最大値と半値幅で評価すると、 368^{+50}_{-39} p.e./MeV、FWHM 89 p.e./MeV である。図 7 に他のセットアップのガウス分布重ね合わせを示し、単位エネルギー当たりの平均光電子数を表 2 に示す。

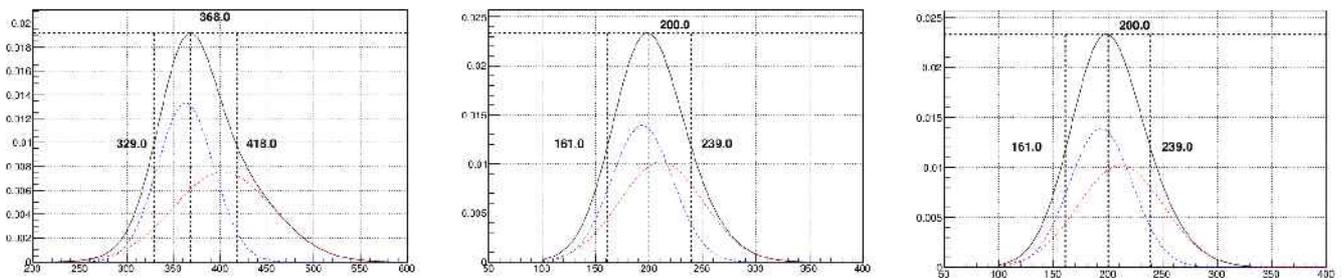


図 7. GSO+H11934-200(a), GAGG+R9880U-20 (b), GSO+R9880U-210 (c) それぞれにおけるガウス関数の重ね合わせによる単位エネルギー当たりの光電子数分布

	p.e./MeV	FWHM
setup1	368^{+50}_{-39}	89
setup2	291^{+68}_{-69}	137
setup3	200^{+39}_{-39}	78

表 2. 単位エネルギー当たりの平均光電子数と FWHM。図 7 のガウス分布の重ね合わせから、それぞれのセットアップにおける値を導いた。

考察②： セットアップ 1 と 3 は同じ GSO 結晶を使用していて、発光特性は同じなはずである。立上り時間および減衰時間におけるパラメータはほぼ一致したのに対して、得られた光量およびエネルギー分解能は使用した PMT や結晶サイズによって異なった。結晶で落としたエネルギー MeV 当たりの発生光子数 N_{ph} は、結晶から PMT の光電面に入射するための集光効率 ϵ_{coll} と PMT の量子効率 ϵ_{QE} そして光電子数 $N_{p.e.}$ の積で以下の式で表せる。

$$N_{p.e.} = \int N_{ph} \epsilon_{coll}(\lambda) \epsilon_{QE}(\lambda) d\lambda$$

セットアップ 1 では、¹³⁷Cs 線源と GSO 結晶 (24.0 x 46.0 x 2.4 mm³) に密着して設置している。結晶と PMT の接着面は空気のギャップが存在し、シンチレーション光が PMT へ入射するためには GSO と空気の

全反射条件を満たす必要がある。GSO の屈折率は約 1.9 で空気はほぼ 1 とするとスネルの法則から臨界角 $\theta = 31.7^\circ$ である。この時の全発光量における PMT に入射される光子数の割合は約 7.49% である。ガンマ線が落とした深さ方向の位置は $\pm 1.2 \text{ mm}$ で、この差における集光効率のゆらぎは無視できると考えられる。光量 PMT への PMT はウルトラバイアルカリの光電面を使用しており、量子効率は感度波長 350 nm で最大 40% で、GSO からの発光波長領域で平均 35% とする (図 9)。したがって、 $N_{\text{ph}} = 1.4 \times 10^4 \text{ ph/MeV}$ と見積ることが出来る。

セットアップ 3 は GSO 結晶のサイズ $6 \times 6 \times 15 \text{ mm}^3$ で PMT に接続されている。ガンマ線が最も PMT 側でエネルギーを落とした場合、結晶と空気ギャップの全反射条件から 7.49% が集光効率となる。最も手前のエネルギーを落とした場合、結晶の側面から漏れ出る影響を考慮する必要が出てくる。このときの立体角は図 8 で示すように 0.013 sr である。すなわち、ガンマ線の相互作用する位置で $0.013 - 0.075$ の集光効率の揺らぎを生じさせている。平均集光効率を 0.044 とすると、 $N_{\text{ph}} = 1.3 \times 10^4 \text{ ph/MeV}$ と見積ることが出来る。

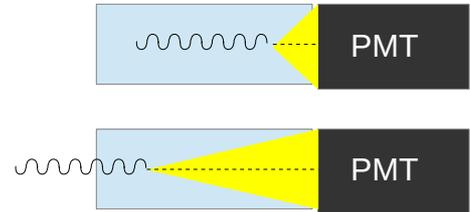


図 8. ガンマ線の相互作用する位置における集光効率の変化

以上から、GSO の発光量は $1.3 - 1.4 \times 10^4 \text{ ph/MeV}$ でセットアップ 1 と 3 で良く一致している。集光効率はセットアップ 1 が良いが、分解能が 20% 程度でわるい。この結果はセットアップ 1 で結晶から発生した光量の 7.5% 程度で結晶の反対面で反射し、その光が PMT に入射されると簡単にふらつくのが原因であると考えられる。セットアップ 3 では主にガンマ線の相互作用する位置によって、集光効率が 70% も変化しているの影響が支配的である。

同様に GAGG 結晶における発光量についても見積る。結晶サイズ $10 \times 10 \times 5 \text{ mm}^3$ でそこにマルチアルカリ光電面をもつ PMT が接続している。これは波長 500 nm で最大 20% の量子効率をもち、GAGG の発光波長領域で平均 18% をもつ (図 9)。結晶と PMT 入射窓には空気ギャップが存在しており、入射窓は直径 8 mm で結晶面積 $10 \times 10 \text{ mm}^2$ を覆いきれていない。ガンマ線が最も PMT 側で相互作用した場合、集光効率は結晶と空気との間の全反射条件から約 7.5% と考えられる。しかし、PMT の感度領域中央に限られ、端で相互作用した場合、不感領域 50% (PMT 感度面積 ÷ 結晶面積) が影響する。平均感度の割合が 75% とすると、 $N_{\text{ph}} = 2.9 \times 10^4 \text{ ph/MeV}$ が見積られる。

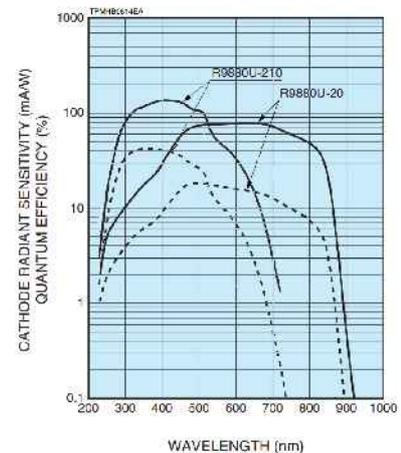


図 9. PMT 量子効率の波長依存性

エネルギー分解能を向上させるために、屈折率約 1.54 のオプティカルグリスを GSO 結晶と PMT の入射窓に挟み、空気ギャップをなくす。これにより立体角が 0.075 から 0.21 へ向上させる。結晶のサイズを相互作用する位置による集光効率が無視できるために、全反射条件の立体角に比べ十分薄い設計にする。面積 S にたいしてこの条件を十分に満たす最大の厚さ d は以下の式で与えられる。

$$d = \sqrt{\frac{S}{4\pi\Omega}}$$

例えば、面積 $6 \times 6 \text{ mm}^2$ の場合、 $d = 3.7 \text{ mm}$ と計算できる。そして結晶の反対側に反射フィルムを貼り、全光量が PMT に入射するセットアップにする。こうすることで、結晶内で発光した光子のほとんどを PMT に入射させることが出来、光量のゆらぎを減らせる。

課題:

①波形をイベントごとに解析していない。平均波形で評価したが、ランダムにサンプル波形を表示すると、電気ノイズやギザギザした波が観測された。これは高周波数の電波が雑音としている可能性がある。フーリエ解析してオフセット時と信号時における波数分布の違いから雑音を除去できるのではないか。

②イベント毎に立ち上がりの位置を全てゼロ地点に補正することで、結晶本来の発光特性を評価することができる。また、GAGG 結晶には減衰時間が 90 ns と 130 ns の2種類存在するので、これらを区別することで、エネルギー分解能の向上や、正しい発光特性を評価する。

③結晶の検出効率について評価していない。ガンマ線の検出効率の見積もりに放射長が使われることがある。放射長は強度が $1/e$ になるまでの物質の深さで単位は $[\text{kg}/\text{cm}^2]$ である。密度との積で約 68% のガンマ線を吸収する厚さを見積ることが出来る。しかし、これはガンマ線のエネルギー領域で変化するので、主に使用する 511 keV 領域における光電効果頻度の割合を実験的に評価して、これを検出効率に組み込む。方法としては ^{22}Na の 2γ を同時に観測し、一方が光電効果したときのイベント数(分母)における、その時の他方が光電効果したときのイベント数(分子)の割合として測定することが可能である。

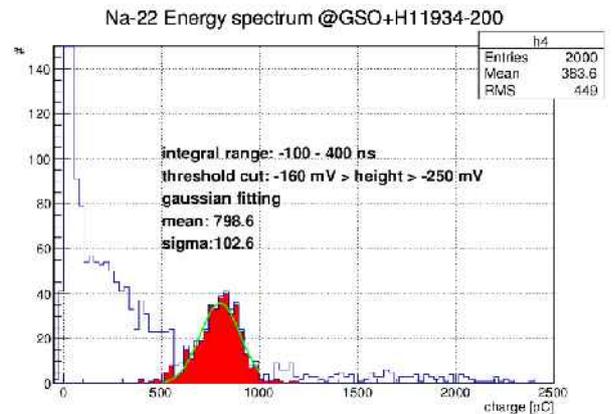
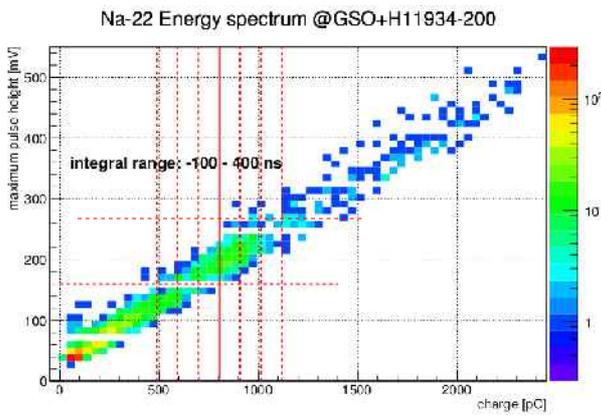
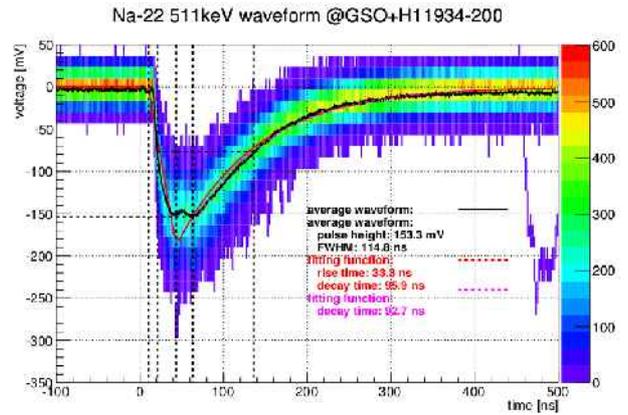
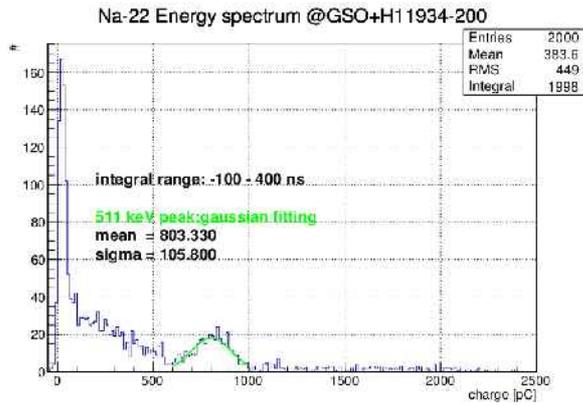
④ WLSF を用いた PET 開発において、GAGG から漏れた光を WLSF に入射させ、そして WLSF 経由で PMT によって読み出す。この時のオシロでの波形を解析し、同様に発光特性を調べる。

まとめ: オシロスコープによる波形解析が可能になった。これにより無機シンチレータ GSO および GAGG の発光特性を調べた。

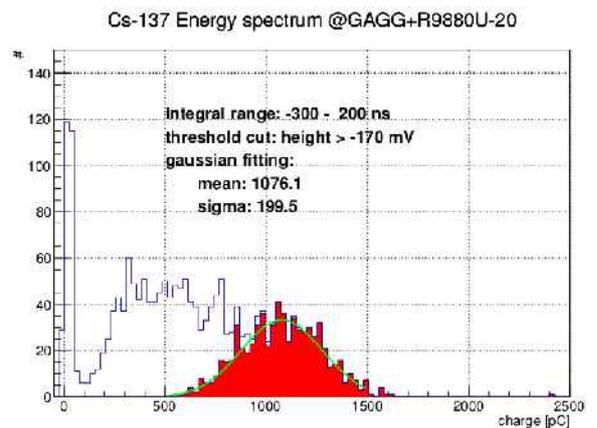
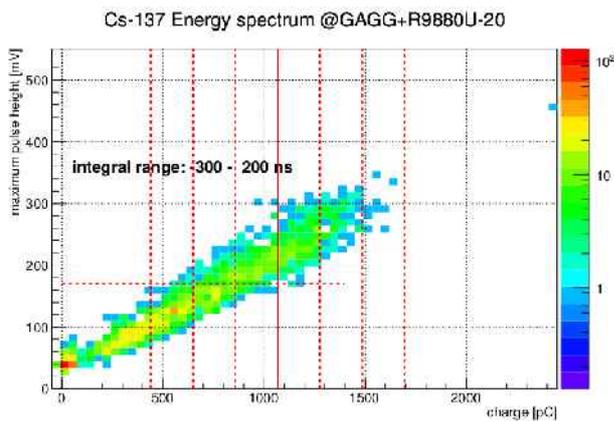
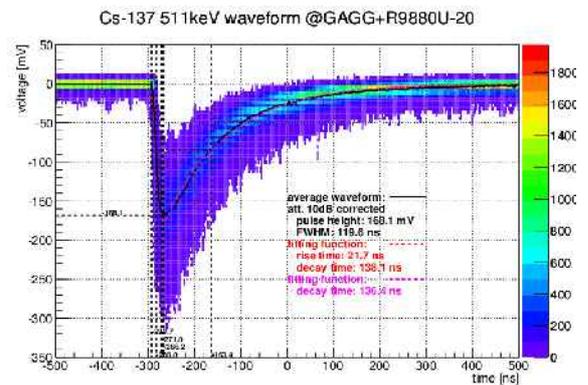
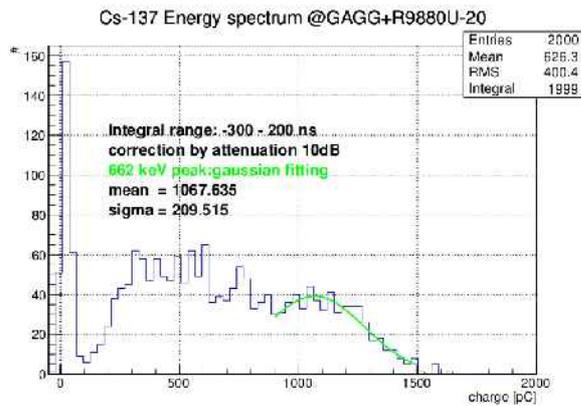
- ・GSO 立上り時間: 32 ns
減衰時間: 90 ns
- ・GAGG 立上り時間: 22 ns
減衰時間: 136 ns

測定の結果、GAGG は GSO より速い速い立上りをもつが、減衰時間が遅い特徴をもつ。今回は 3 種類のセットアップで測定した。それぞれのエネルギー分解能は FWHM 19%, 45%, 40% が得られた。 ^{137}Cs からの 662 keV と ^{22}Na からの 511 keV のガンマ線の光電ピークから単位エネルギー当たりの光電子数を評価した。それぞれの分布を重ねあわせて、平均光電子数を評価した。結晶のサイズ、PMT の量子効率からもとめて結晶から発生した光子数を見積もった結果、GSO は 13,000 – 14,000 ph/MeV で、GAGG は平均 29,000 ph/MeV である。エネルギー分解能を向上させるために結晶と PMT の間にオプティカルグリスを挟み全反射条件を緩める。さらに結晶の厚さを適正にし、ガンマ線の相互作用する位置による揺らぎを抑える。また、結晶の反対側面に反射板を設置することで PMT に入射する光量を増やし光量のゆらぎを減らすことができる。

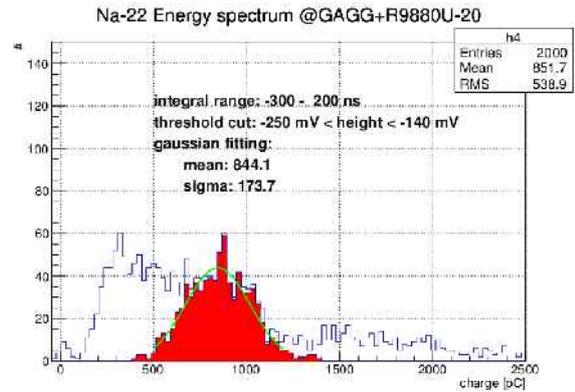
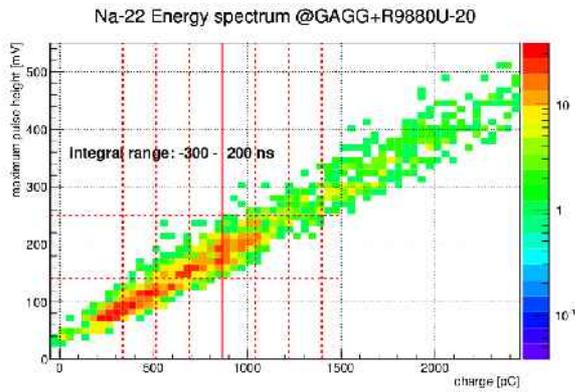
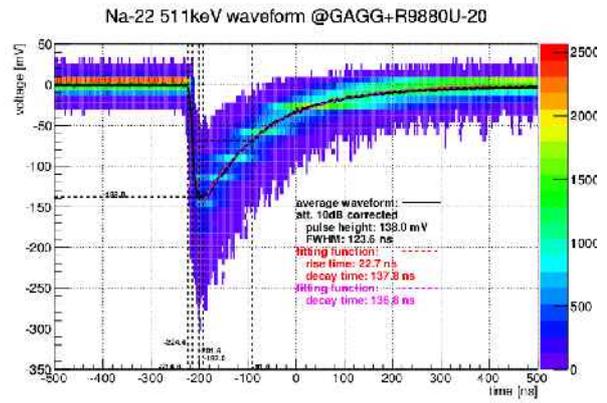
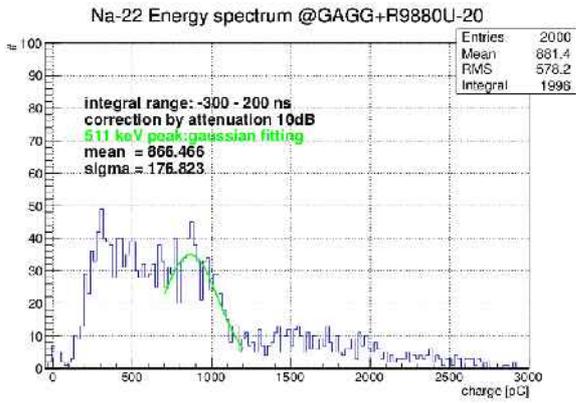
付録： 他セットアップにおける解析結果を以下に示す。
セットアップ 1 Na-22



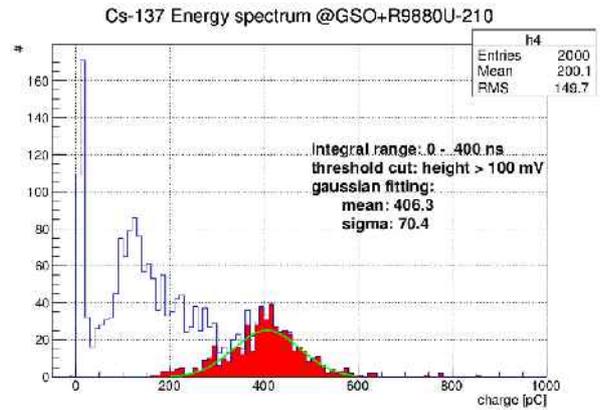
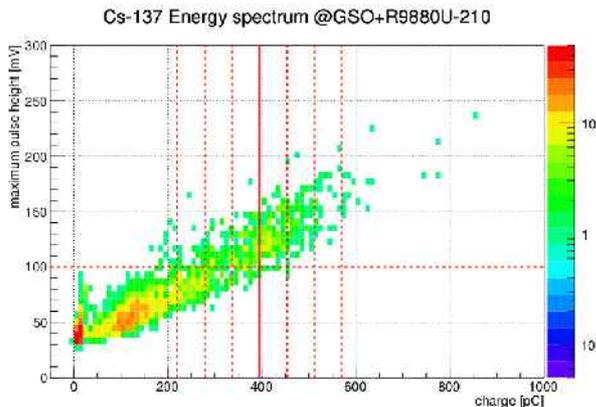
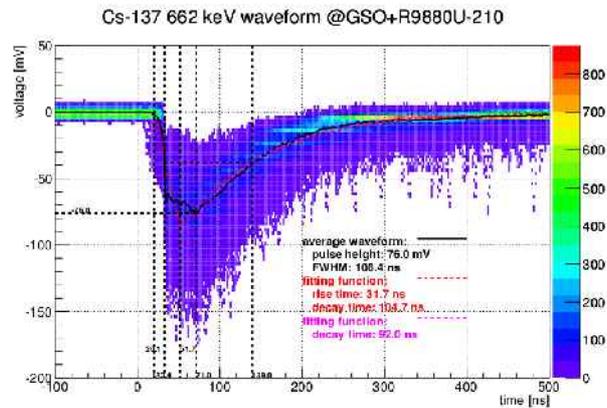
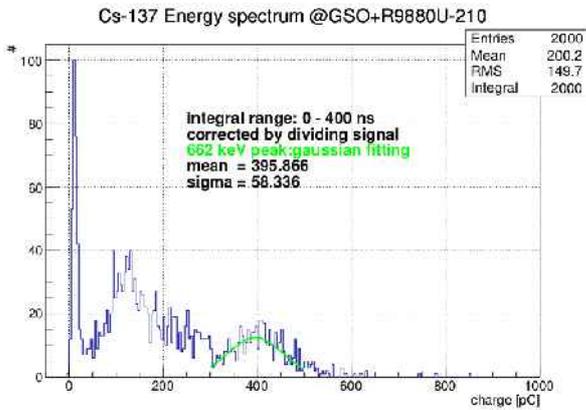
セットアップ 2 Cs-137



セットアップ 2 Na-22



セットアップ 3 Cs-137



セットアップ 3 Na-22

