

2008 年度卒業論文

新型 scintillator
(LSO,LFS)の性能評価

信州大学理学部物理科学科
高エネルギー物理学研究室

05S2033A
長峯 宏昌

目次

1．はじめに

- 1 - 1．研究の背景と目的
- 1 - 2．研究の概要

2．シンチレーター内の物理現象

- 2 - 1．光電効果
- 2 - 2．コンプトン効果
- 2 - 3．電子対創生
- 2 - 4．制動放射
- 2 - 5．シンチレーション光

3．GEANT4 によるシミュレーション

- 3 - 1．GEANT4
- 3 - 2．シンチレーター
- 3 - 3．入射粒子
- 3 - 4．シミュレーション結果

4．実験装置

- 4 - 1．シンチレーター
- 4 - 2．MPPC
- 4 - 3．DISCRIMINATOR
- 4 - 4．GATE GENERATOR
- 4 - 5．ADC
- 4 - 6．放射線源

5．実験結果

- 5 - 1．LFS の光量測定
- 5 - 2．プラスチックシンチレーターとの比較

6．まとめ

- 6 - 1．まとめと考察
- 6 - 2．今後の課題

1 . はじめに

1 - 1 . 研究の背景と目的

シンチレーターは放射線などの荷電粒子が通過した際に発光（シンチレーション）する蛍光物質であり、この発光過程で放出された光を受光素子で検出することにより、放射線のエネルギーや方向などの情報を得ることができる。僅かな光を電気信号に変換・増幅する光電子増倍管を組み合わせた放射線検出器は、自然科学の分野で広く利用されてきた。

現在では、シンチレーターは素粒子物理学実験から医療の現場に至るまで、多様な分野で盛んに利用されている。

これまでは NaI や CsI が主流として使われてきたが、PET 装置などの医療機器分野では高い変換効率と大きな光量を持つシンチレーターの開発が切望されている。そんな中、比較的高い変換効率を持つ LSO と LFS が多くの注目を集めている。

本研究では、最近新しく開発されたシンチレーターである LSO , LFS の性能を評価する。

1 - 2 . 研究の概要

LSO とは、 Lu_2SiO_5 の略称であり、高い密度や変換効率を持つ。また LFS については、組成式はわかっていないものの、LFS は LSO に近い性質を持ち、LSO よりも比較的安価であることが特徴として挙げられる。

つまり、LSO は入手しにくいのが、組成式や密度などがわかっているため、LSO についてはシミュレーションを行うことができる。LFS については、組成式を知ることは困難だが、比較的入手しやすいため、これを用いた実験を行うことができる。

これらのことを踏まえて、LSO については GEANT4 によるシミュレーションを、LFS については MPPC を用いた光量測定を $3\text{mm} \times 3\text{mm} \times 15\text{mm}$ の LFS について行うことによって、それぞれの性能を評価することにした。

2 . シンチレーター内の物理現象

2 - 1 . 光電効果

入射光子のエネルギー $h\nu$ が原子内の束縛電子をそのエネルギー準位からたたき出すのに十分な大きさを持つ場合、光子の全エネルギーは電子に吸収され、電子は $h\nu - I_n$ (I_n はそのときのイオン化エネルギー) という運動エネルギーを持って原子の外に飛び出す。この際、エネルギーと運動量の保存則を同時に満たす必要性から、電子が強く束縛されているほど、光電吸収の確率が高くなる。そこで、K 殻の電子による吸収を考える。

原子番号 Z の原子の K-電子による光電効果の断面積は、光子のエネルギーが K-吸収端より十分高く、かつ非相対論的 ($h\nu \ll mc^2$) な場合、Born 近似によれば、

$$\phi_{phot,K} = \phi_0 4\sqrt{2} \frac{Z^5}{137^4} \left(\frac{mc^2}{h\nu} \right)^{7/2}$$

となる。ここで、 ϕ_0 は Thomson 散乱の断面積で、

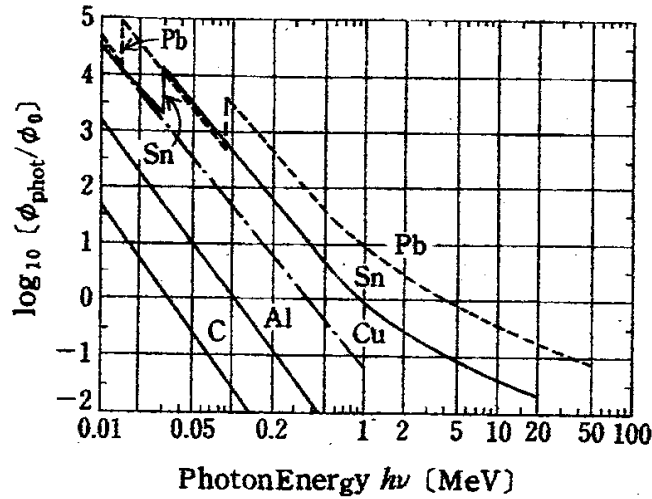
$$\phi_0 = \frac{8\pi}{3} \left(\frac{e^2}{mc^2} \right)^2 = 6.651 \times 10^{-25} [cm^2]$$

である。一方、相対論的なエネルギー領域 ($h\nu \ll mc^2$) では、すべての Z に対して Hall の式が良い近似で成り立つ。

$$\phi_{phot,K} = \phi_0 \frac{3}{2} \frac{Z^5}{137^4} \frac{mc^2}{h\nu} \exp\{-\pi\alpha + 2\alpha^2(1 - \ln \alpha)\} \quad \left(\alpha = \frac{Z}{137} \right)$$

このように、 $\phi_{phot,K}$ は光子のエネルギーが電子の静止エネルギー ($mc^2 = 0.5MeV$)

に比べて十分低いときは $(h\nu)^{-7/2}$ に従い、反対に高くなると $(h\nu)^{-1}$ に従って の増加とともにゆっくり減少する。



2 - 2 . コンプトン散乱

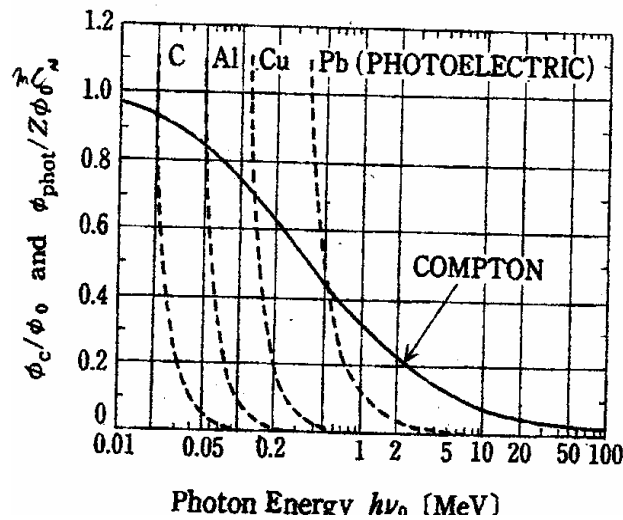
線のエネルギーが高くなると、束縛電子の結合エネルギーは無視することができる。したがって、線の散乱は静止した自由電子による Compton 散乱と考えることができる。

() $h\nu_0 \ll mc^2$ のとき、 $\phi_{comp} = Z\phi_0(1-2r)$

ここで、 $r = h\nu_0/mc^2$ である。

() $h\nu_0 \gg mc^2$ のとき、 $\phi_{comp} = Z\phi_0 \frac{3}{8} \cdot \frac{1}{r} \left(\ln 2r + \frac{1}{2} \right)$

となる。



上の図は、1 電子あたり Compton 散乱の全断面積 ϕ_c と光電吸収の断面積の

$1/Z(\phi_{\text{phot}}/Z)$ を $h\nu$ の関数として ϕ_0 を単位として表したものである。線のエネルギーがさらに高くなると、次に述べる対創生が効き始めるため、Compton効果が顕著になるエネルギー領域は、Alでは0.1~30Mev、Pbでは1~10Mevである。

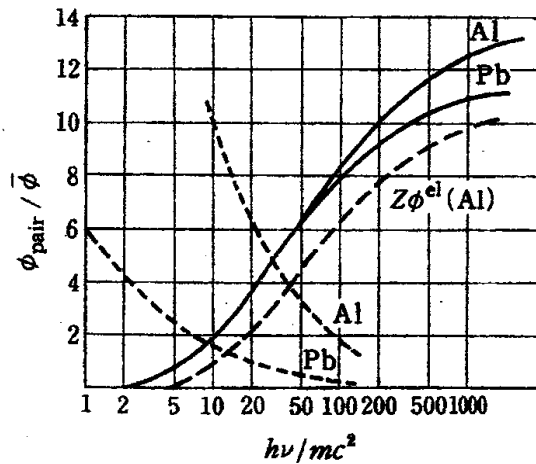
2 - 3 . 電子対創生

線が他の粒子（例えば原子核）のクーロン場中で消滅して陽電子と陰電子の対が創生される過程を電子対創生という。電子対の全静止エネルギーは、 $2mc^2(=1.02\text{Mev})$ であるから、線のエネルギーはこれより大きくなければならない。Bethe と Heitler により、Born の近似を使って求められた対創生の全断面積は $mc^2 \ll h\nu \ll 137mc^2 Z^{1/3}$ のとき、

$$\phi_{\text{pair}} = \bar{\phi} \left(\frac{28}{9} \cdot \ln \frac{2k}{mc^2} - \frac{218}{27} \right)$$

$h\nu \gg 137mc^2 Z^{1/3}$ のとき、

$$\phi_{\text{pair}} = \bar{\phi} \left\{ \frac{28}{9} \cdot \ln \left(183Z^{-1/3} - \frac{2}{27} \right) \right\}$$



ここで、 $\bar{\phi} \equiv (Z^2/137)r_0^2$, $r_0 = e^2/mc^2 = 2.82 \times 10^{-13} \text{ cm}$ (r_0 : 古典電子半径)。また、 $1/137 = e^2/\hbar c$ は微細構造定数である。

2 - 4 . 制動放射

電子や陽電子は電場によって大きな加速を受けたときに光（電磁波）を放出する。これを制動放射という。加速度 a を受けた電子は、 $2a^2 e^2/3c^3$ の確率で光子を放出する。電子が原子核の近傍を通過する際、核が持つ強い電場によって、

大きな加速を受ける。したがって、電子は電磁波の形でエネルギーを失うことになる。この場合、加速の大きさは核電子に比例し、質量に反比例するため $a \approx Ze/m$ となる。よって、電磁波放出の確率は Z/m に比例することが明らかである。Bethe, Heitler によると、高速の電子が 1cm あたりに失う放射によるエネルギー損失量は、

$$-\left(\frac{dE}{dx}\right)_{rad} = -\frac{4r_0^2}{137} \cdot Z^2 E_0 N \log \frac{183}{Z^{1/3}}$$

となる。(E_0 : 入射エネルギー、 N : 物質中の原子密度、 r_0 : 古典電子半径)

放射過程によるエネルギー損失量は電子エネルギー E_0 と、 Z^2 に比例することが特徴である。入射粒子のエネルギーが $1/e$ に減少する長さを導入すると便利のため、その長さ X_0 を導入する。この長さを放射長 (radiation length) とよぶ。定義により、

$$E = E_0 \exp\left(-\frac{x}{X_0}\right)$$

となる。したがって放射長 X_0 は、

$$\frac{1}{X_0} = 4Z^2 r_0^2 \frac{N}{137} \log \frac{183}{Z^{1/3}}$$

である。

電子のエネルギーが増大すると、衝突過程によるものよりも遥かに放射過程によるエネルギー損失が増大する。両者のエネルギー損失がほぼ等しいエネルギーを臨界エネルギー ε とよぶ。Bethe, Heitler によると、この ε は近似式として次の 2 式が成立する。(c : 光速)

$$\varepsilon \approx \frac{1600mc^2}{Z} = \frac{800}{Z}$$

$$\left(\frac{dE}{dx}\right)_{col} \approx \left(\frac{1600mc^2}{E_0 Z}\right) \left(\frac{dE}{dx}\right)_{rad} = \left(\frac{800}{E_0 Z}\right) \left(\frac{dE}{dx}\right)_{rad}$$

例えば、鉛中での 10MeV 電子の場合には $\left(\frac{800}{E_0 Z}\right)$ の値は約 1 になる。すなわち、

衝突過程と放射過程の二つの過程によるエネルギー損失量はほぼ同程度ということになる。

2 - 5 . シンチレーション光

荷電粒子が気体、液体または固体の中を通過すると、原子または分子を励起する。この励起状態から基底状態に落ちるとき、原子や分子は光を放出する。これをシンチレーションという。この光は非常に微弱なものであるが、シンチレーターなどの場合にはシンチレーション光が強くなる構造をとっている。また、シンチレーターが有機物のときには分子内の電子が励起される。最初の励起は高いエネルギー状態にあると考えられるが、それがどのようにして低いエネルギーの可視蛍光になって放出されるかというのは、次の二通りの過程が考えられる。

(i) 分子間の特殊な相互作用によって、光の状態を通らずに、他の分子の低いエネルギーの電子励起を引き起こす。

(ii) 高く励起された分子は短波長の光を放出する。これを他の分子が吸収して低いエネルギー励起を起こし、やや波長の長い光を放出する。これを次の分子が吸収する。このような過程が繰り返され、その結果、可視蛍光となって放出される。

3 . GEANT4 によるシミュレーション

3 - 1 . GEANT4

GEANT4 は、陽子・中性子・電子・ γ 線・ α 粒子・ μ 粒子などの素粒子が物質中で起こす複雑な振舞や反応をシミュレートする大規模測定器シミュレータであり、高エネルギー物理学実験のコンピュータ・シミュレーションにおいて中核的な存在となりつつあるソフトウェアで、宇宙科学や放射線医学の分野への応用も期待されている。

3 - 2 . シンチレーター

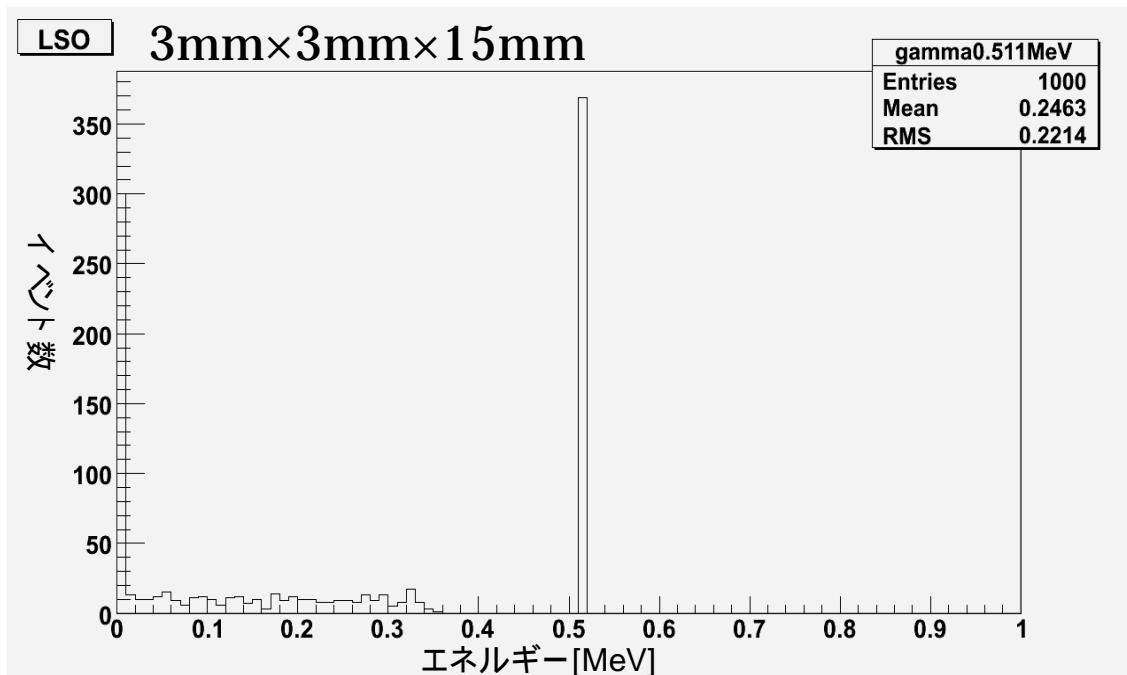
GEANT4 を用いて性能を比較するシンチレーターとして LSO と CsI を、そしてそれぞれに必要な元素や組成式を Detector Construction に追加し、二種類のシンチレーターは $3\text{mm} \times 3\text{mm} \times 15\text{mm}$ の Gap としてそれぞれ用いた。 $3\text{mm} \times 3\text{mm} \times 15\text{mm}$ という大きさは、実験で用いる $3\text{mm} \times 3\text{mm} \times 15\text{mm}$ の LFS と条件を近づけることで比較を容易にするためである。

3 - 3 . 入射粒子

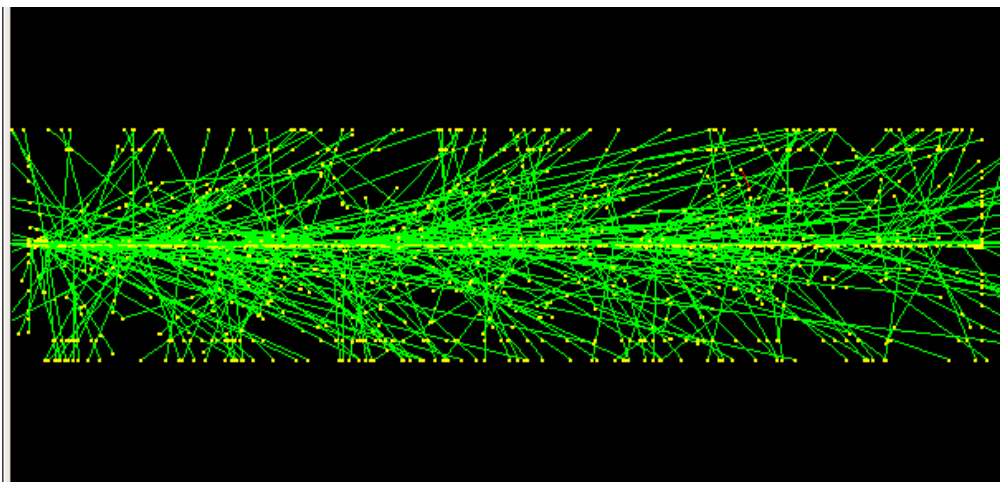
シンチレーターに入射させる荷電粒子として、 0.511MeV の γ 線を選択した。その理由としては、糖の放射性同位体を血液中に投与して悪性腫瘍を検知する PET 検査と条件を近づけるためである。

3 - 4 . シミュレーション結果

まず、 0.511MeV の γ 線を 1000 イベント入射させた際の $3\text{mm} \times 3\text{mm} \times 15\text{mm}$ の LSO のシミュレーション結果は次の通りである。エネルギー分布の横軸はエネルギー [MeV]、縦軸はイベント数である。シンチレーションの図は粒子の飛跡を表している。緑色の線が γ 線の飛跡である。

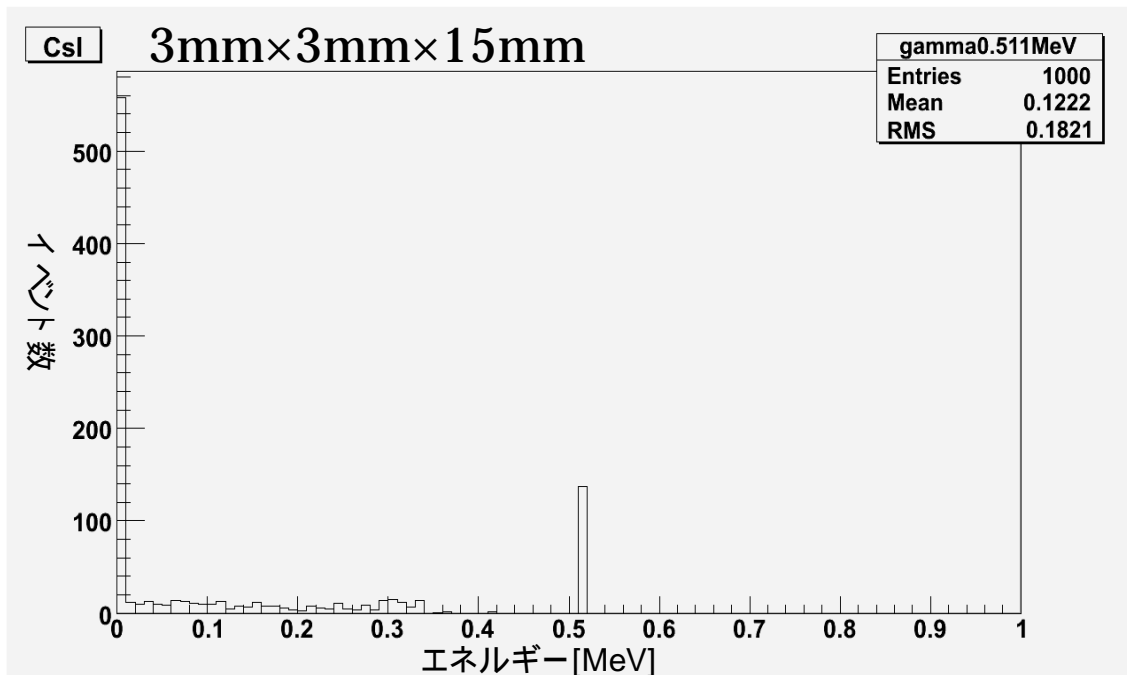


LSO のエネルギー分布

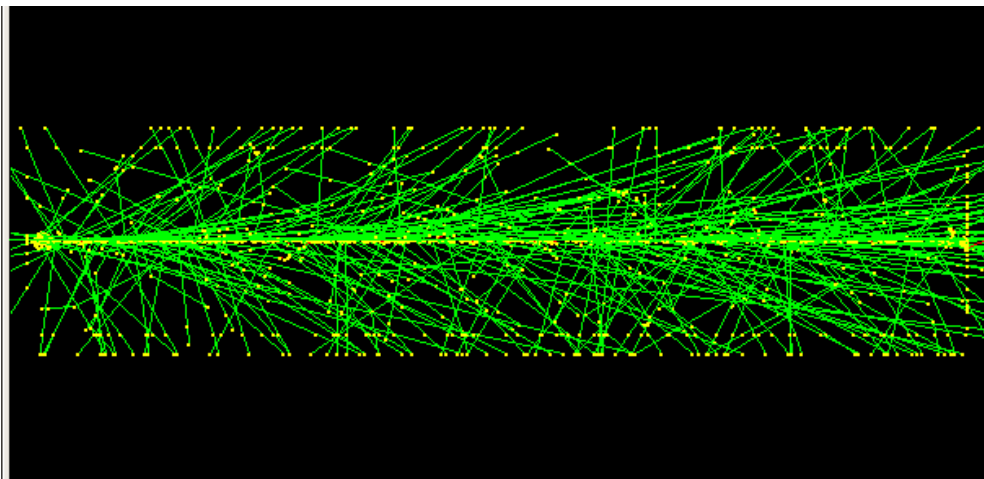


LSO のシンチレーション

次に、3mm×3mm×15mm の CsI のシミュレーション結果を示す。こちらも、0.511MeV の 線を 1000 イベント入射させた。同じく、エネルギー分布の横軸はエネルギー[MeV]、縦軸はイベント数である。



CsI のエネルギー分布



CsI のシンチレーション

LSO では約 37% の 線が全エネルギーを落とし、CsI では約 12% の 線が全エネルギーを落としている。

これらの結果から、シミュレーション上では 3mm × 3mm × 15mm の LSO は同じ大きさの CsI に比べ、約 3.1 倍の変換効率を示すと言える。その違いはシンチレーションの様子からも判断することができる。

4 . 実験装置

4 - 1 . シンチレーター

実験に用いたシンチレーターは、 $3\text{mm} \times 3\text{mm} \times 15\text{mm}$ の LFS と、その性能を比較するための $3\text{mm} \times 5\text{mm} \times 43.7\text{mm}$ の一般的なプラスチックシンチレーターである。比較対象としては $3\text{mm} \times 3\text{mm} \times 15\text{mm}$ のプラスチックシンチレーターを用いるのが妥当だが、それでは光量が小さすぎるため、実験の進めやすさを考慮して $3\text{mm} \times 5\text{mm} \times 43.7\text{mm}$ のプラスチックシンチレーターを用いることにした。

$3\text{mm} \times 5\text{mm} \times 43.7\text{mm}$ のプラスチックシンチレーターの光量を求め、その結果からシミュレーションを用いて LFS と同じ大きさの $3\text{mm} \times 3\text{mm} \times 15\text{mm}$ のプラスチックシンチレーターの光量を求める。



LFS



プラスチックシンチレーター

4 - 2 . MPPC

MPPC とは、複数のガイガーモード APD(アバランシェ・フォトダイオード)のピクセルから成り、常温で使用できる新しいタイプのフォトンカウンティング・デバイスである。優れたフォトンカウンティング能力をもち、低電圧動作で磁場の影響を受けない小型の光半導体素子である。また、従来型の光検出器である光電子増倍管よりも優れた検出効率を示す。

4 - 3 . DISCRIMINATOR

信号に閾値 (Volt-threshold) をかけると共に、信号をアナログ信号からデジタル信号に変換することができる装置。閾値を超えた信号のみがデジタル信号として出力される。

4 - 4 . GATE GENERATOR

幅や出力するタイミングを指定することで、デジタル信号を受けてデジタル

信号のゲートパルスを開く装置。この信号が開いているときに ADC で積分を行うタイミングになる。

4 - 5 . ADC

デジタル信号のゲートが開いているタイミングで入ってきたアナログ信号を積分し、その大きさに応じた分布をヒストグラムで表すことができる装置。本研究では、この装置で出力されたヒストグラムを用いて光量を求める。

4 - 6 . 放射線源

線源には Na22 を用いた。これを用いた理由は、シミュレーション時と同様、PET 検査の条件と近づけるためである。Na22 は主に 0.511MeV の 線を放射することから、実験の線源に適切であると判断した。

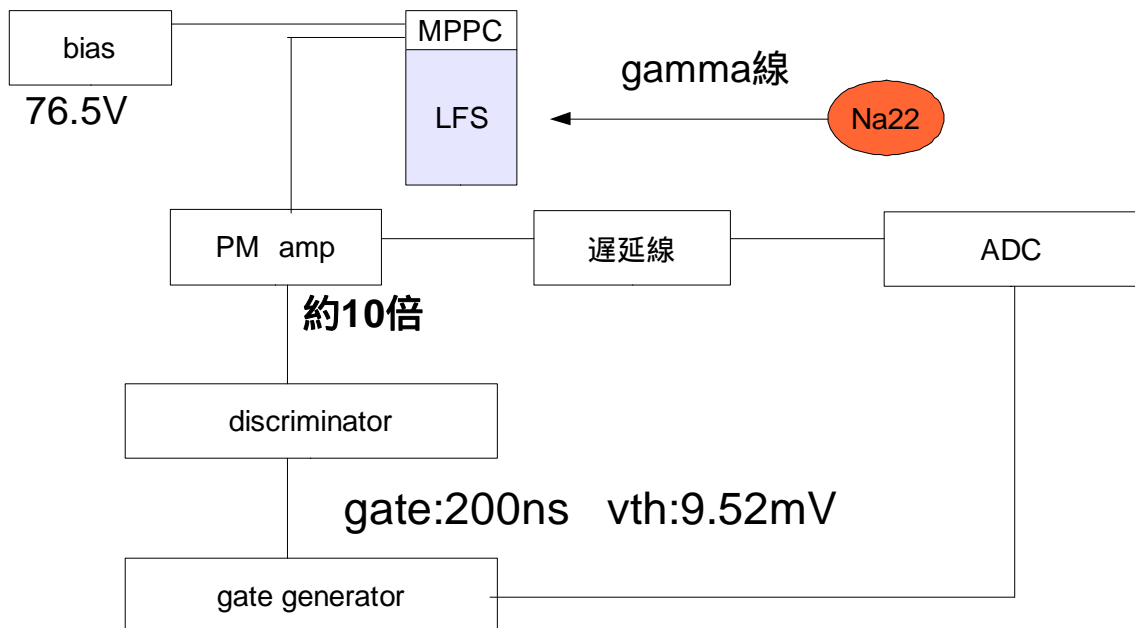
5 . 実験結果

5 - 1 . LFS の光量測定

まず、3mm×3mm×15mm の LFS の最大光量を測定した。セットアップは次の通りである。線源は Na22 である。gate の幅は本実験を通して 200ns に統一してある。

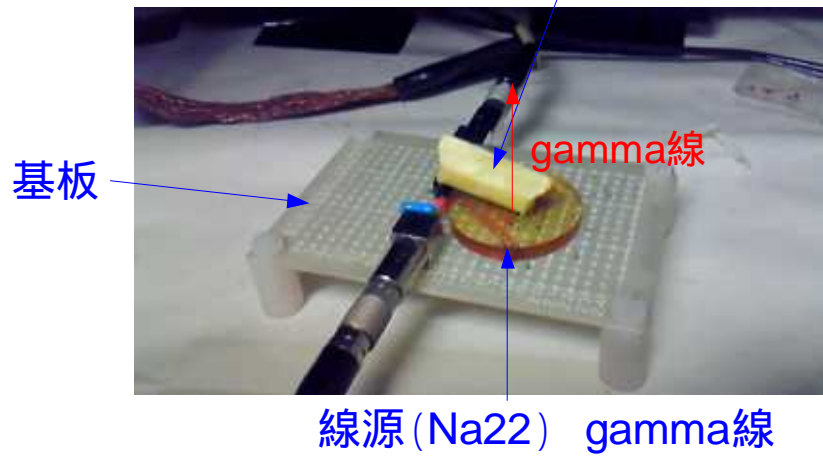
vth(Volt-threshold)の値は、その時々に応じて信号や ADC 分布の結果が最も明瞭な領域を探し出し、その値でそれぞれ測定を行った。

また、ADC に入るアナログ信号とデジタル信号のタイミングを合わせるため、ADC に直接入るアナログ信号側に遅延線を入れている。

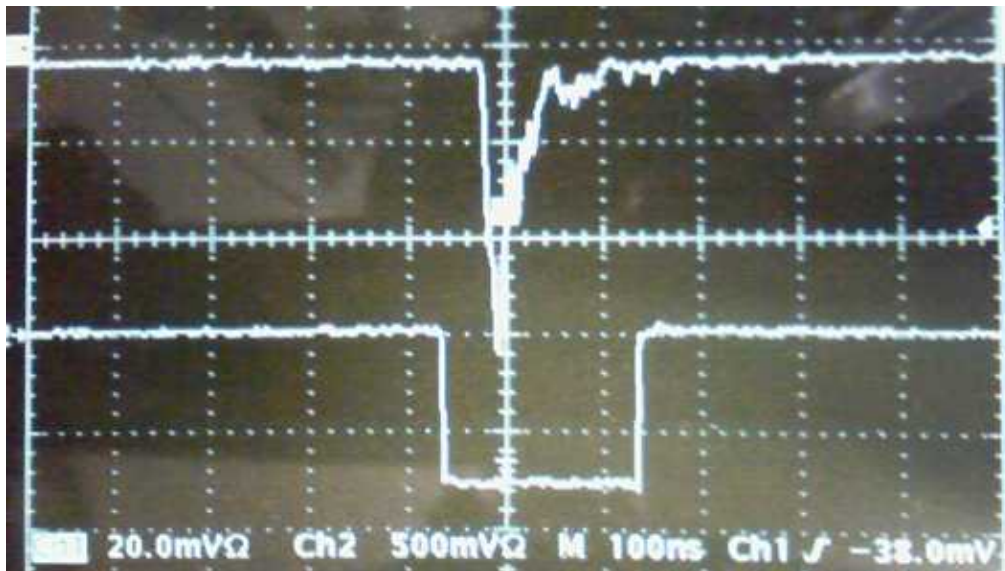


ここで、MPPC と LFS、線源は次のように設置した。

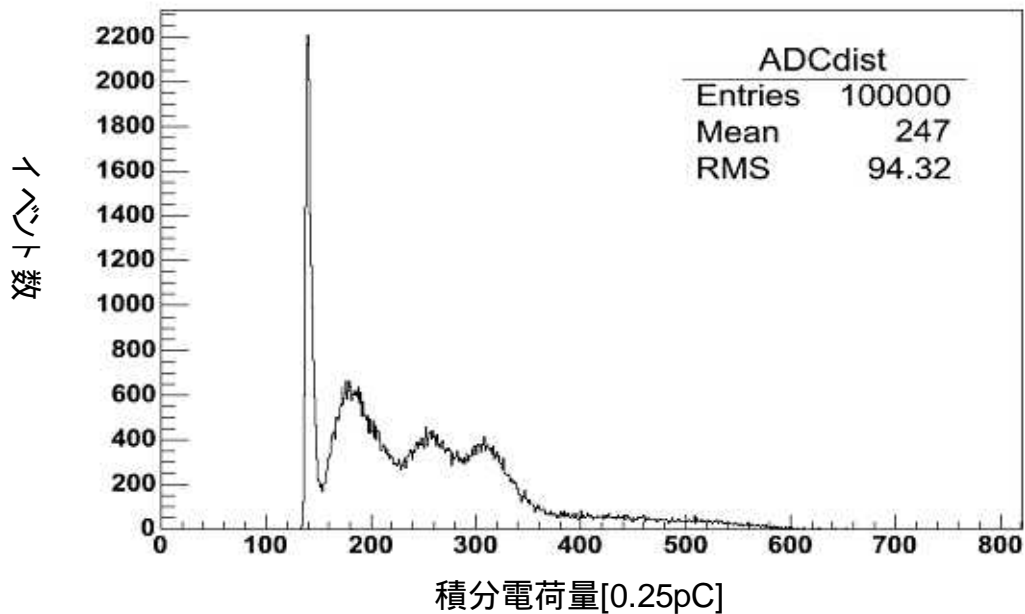
LFS (MPPCとともに反射材で覆った)



このセットアップによって得られたオシロスコープ上の信号と ADC 分布を次に示す。



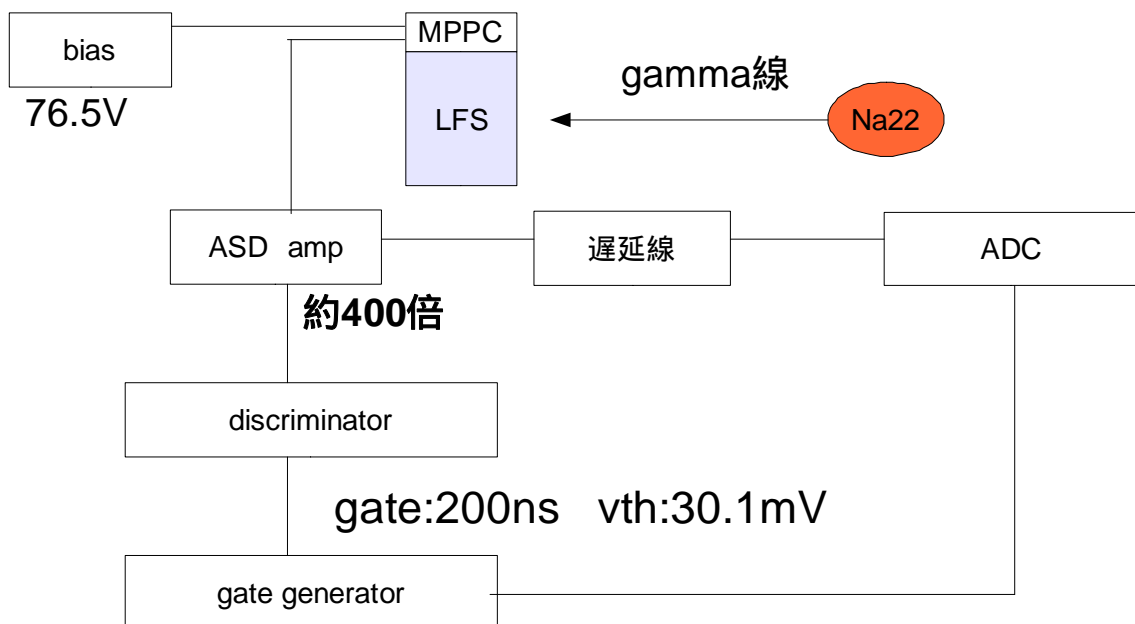
LFS のオシロスコープ上の信号 (PM-amp)

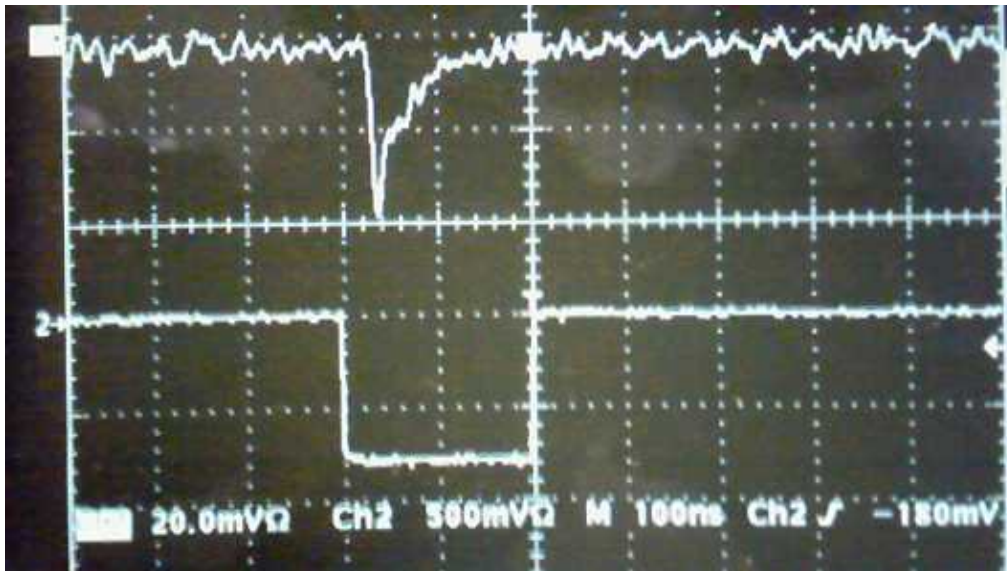


LFS の ADC 分布 (PM-amp)

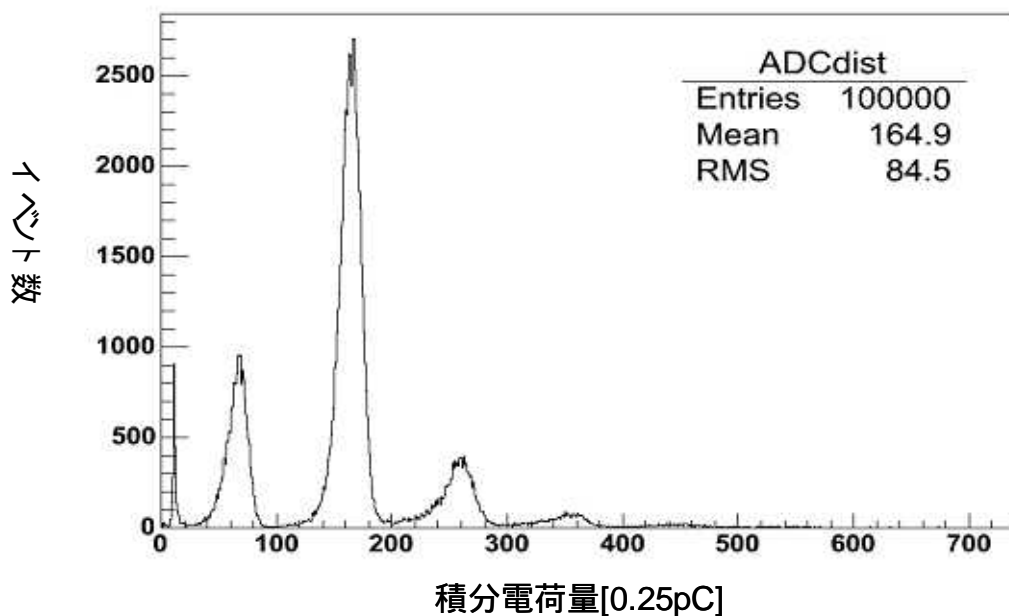
ADC 分布の結果から、3mm × 3mm × 15mm の LFS の最大光量のピークは約 310 を示した。

これが何 p.e.(photo-electron)なのかを知るために、ペDESTアルと 1p.e.の値を知る必要がある。それらを次のセットアップによって求めてみた。大きな違いは、増幅率 10 倍の PM-amp から増幅率 400 倍の ASD-amp に変更した点である。





LFS のオシロスコープ上の信号 (ASD-amp)



LFS の ADC 分布 (ASD-amp)

このとき、amp の倍率が 400 倍となったため、10 倍のときに見えていた最大光量のピークは ADC 分布の限界である 4000 を超えており、ADC 分布では 4000 以上のものは全て 4000 として判断される。この機能を利用して、表示範囲を狭めて 4000 のピークを除くと、上の図のように LFS のペDESTAL や 1p.e. 付近のピークを見ることができる。上の図によると、ペDESTAL が約 65、1p.e. が約 162

であることがわかる。

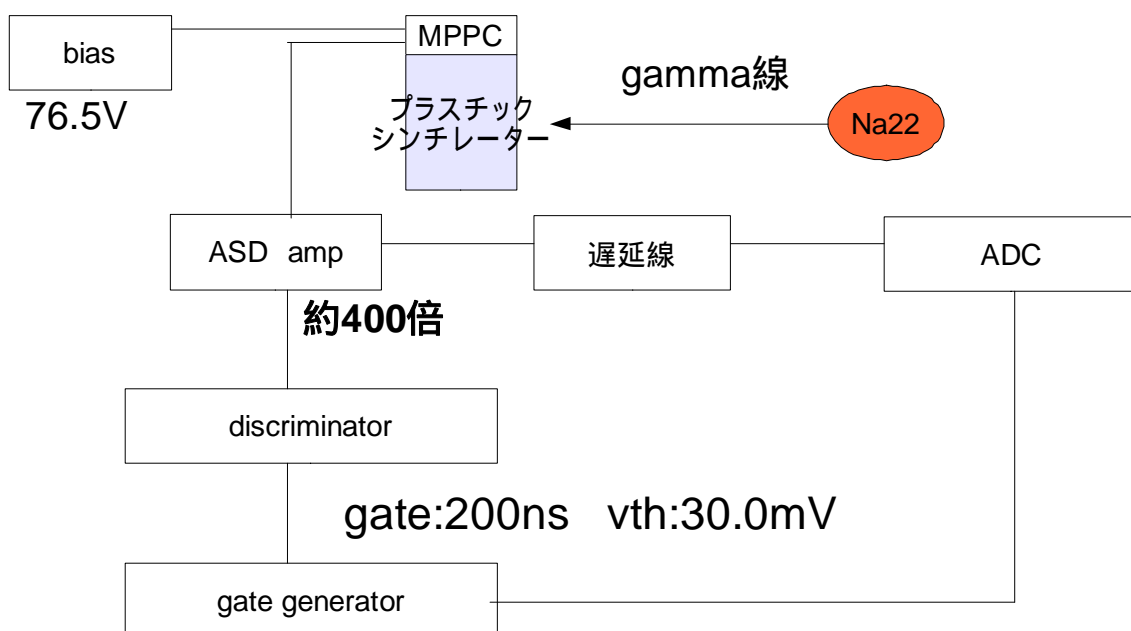
これらの結果から、 $3\text{mm} \times 3\text{mm} \times 15\text{mm}$ の LFS の光量を計算により求めたところ、光量は約 101p.e.であることがわかった。

5 - 2 . プラスチックシンチレーターとの比較

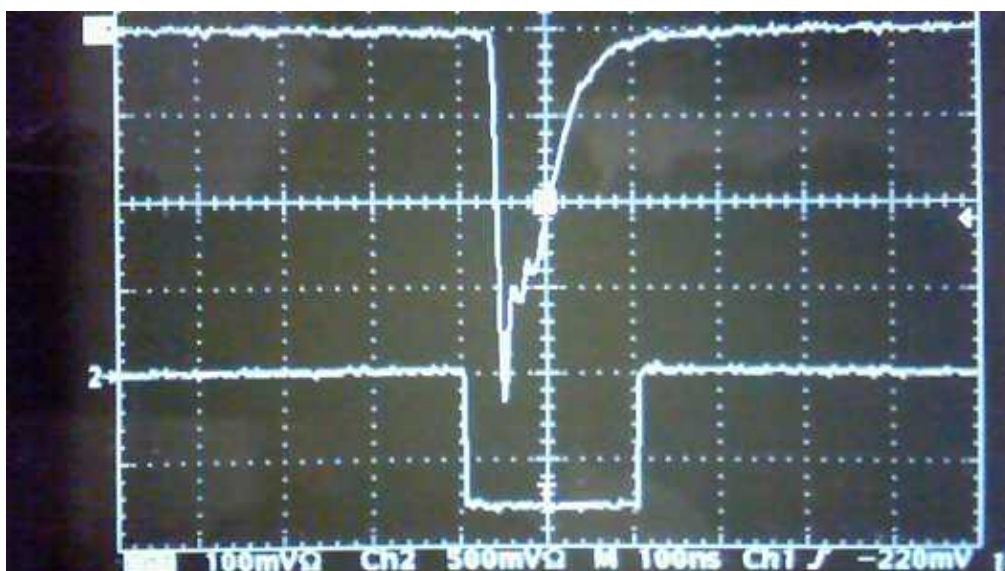
次に、 $3\text{mm} \times 3\text{mm} \times 15\text{mm}$ の LFS の光量をプラスチックシンチレーターの光量と比較するために、 $3\text{mm} \times 3\text{mm} \times 15\text{mm}$ のプラスチックシンチレーターの光量を求める。

しかし、測定のしやすさを考慮して、 $3\text{mm} \times 3\text{mm} \times 15\text{mm}$ よりも大きめの $3\text{mm} \times 5\text{mm} \times 43.7\text{mm}$ のプラスチックシンチレーターの光量を測定し、その結果をシミュレーションにより $3\text{mm} \times 3\text{mm} \times 15\text{mm}$ のプラスチックシンチレーターの光量に変換する方法で比較対象を求めることにした。

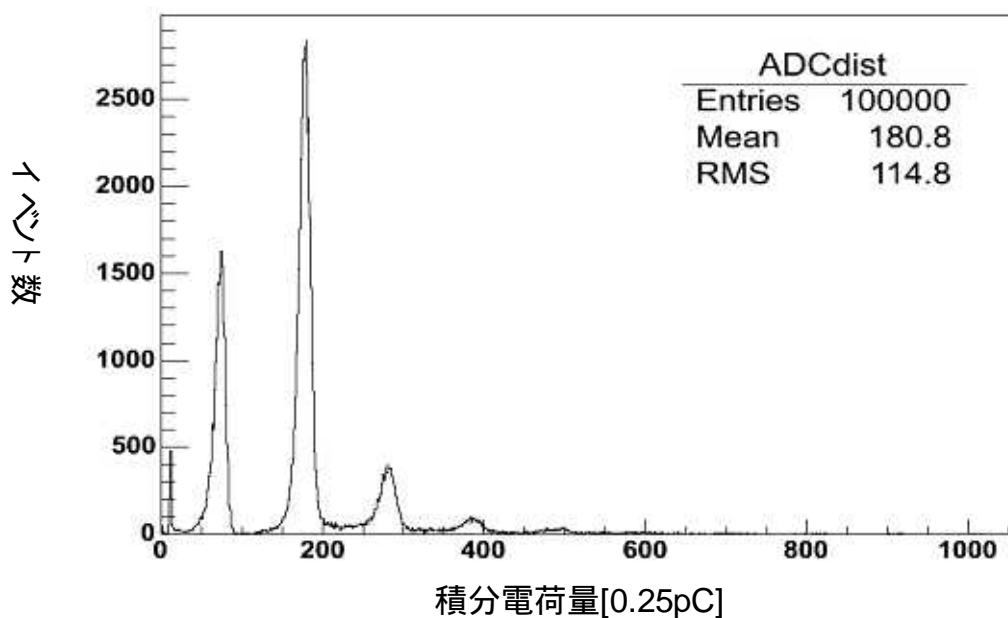
セットアップは次の通りである。線源は Na22 である。



このセットアップによって得られたオシロスコープ上の信号と ADC 分布を次に示す。



プラスチックシンチレーターのオシロスコープ上の信号



プラスチックシンチレーターの ADC 分布

この ADC 分布によると、ペDESTALが約 70、1p.e.が約 175 である。

ADC 分布の結果を、光量を求めるプログラムに入力したところ、3mm×5mm×43.7mm のプラスチックシンチレーターの光量は約 1.46p.e.であることがわかった。

そして、この結果を用いて 3mm×3mm×15mm のプラスチックシンチレーターの光量をシミュレーションにより求めたところ、約 2.92p.e.であった。

これらの結果から、Na22 を線源として 1mm × 1mm の MPPC で光量を測定したところ、3mm × 3mm × 15mm の LFS の光量は同じ大きさのプラスチックシンチレーターの約 34.6 倍であることがわかった。

6 . まとめ

6 - 1 . まとめと考察

本研究では LSO と LFS の性能評価を行った。

まず、LSO について GEANT4 によるシミュレーションを行った。シミュレーション上で $3\text{mm} \times 3\text{mm} \times 15\text{mm}$ の LSO に 0.511MeV の 線を入射させたところ、変換効率は約 37% で、同じ条件下の $3\text{mm} \times 3\text{mm} \times 15\text{mm}$ の CsI の約 3.1 倍であった。

次に、 $1\text{mm} \times 1\text{mm}$ の MPPC を用いて $3\text{mm} \times 3\text{mm} \times 15\text{mm}$ の LFS の光量を測定した。Na22 を線源としたところ、 $3\text{mm} \times 3\text{mm} \times 15\text{mm}$ の LFS の光量は約 101p.e. であった。これは、同様に $1\text{mm} \times 1\text{mm}$ の MPPC を用いた実験で求めた $3\text{mm} \times 5\text{mm} \times 43.7\text{mm}$ のプラスチックシンチレーターの光量を、シミュレーションによって LFS と同じ条件下・大きさにしたときの光量と比較して、約 34.6 倍であった。

これらの結果から、LSO と LFS は共に PET 装置などの医療機器用のシンチレーターとしても十分な性能や結果が期待できる。

6 - 2 . 今後の課題

PET 装置への LFS の実践的な利用を評価するためには、チャンネル数を増やすなどして PET の簡易的なモデルの試作を試みる必要がある。

また、LFS の性能評価については、位置分解能やエネルギー分解能など、まだ評価が必要な項目が多くある。

これらの点を研究することで、LSO・LFS の PET への適用性を本格的に検討することができる。それに加えて、これらのシンチレーター以外に適したシンチレーターを考案するきっかけにつながるかもしれない。

世界中が注目している医学の進歩に、僅かながら素粒子物理学が関わることのできる良い機会であることは確かだと思う。今後の研究に期待したい。

謝辞

竹下先生、長谷川先生、小寺さん、1年間という短い期間ではありましたが、幾度ものご指導本当にありがとうございました。度重なる私の疑問にも、いつも的確な答えを与えていただきました。先生方のおかげで卒業研究を終えることができました。深く感謝いたします。

HE 研究室の皆さん、学部生のみならず院生の方々にも大変お世話になりました。理論の理解から装置の使い方に至るまで、本当にたくさんのことを教えていただきました。皆さんの御協力がなければ、この卒業研究は今以上に見るに耐えないものになっていたことと思います。本当にありがとうございました。

物理の知識を蓄えることなく卒業研究を迎えた私でしたが、皆さんのおかげで何とか研究を終えることができました。十分な結果とは言えず、最後まで本当にご迷惑をおかけし恥ずかしい限りではありますが、研究を通して経験できた数多くの出来事は、これからの私にとってとても価値のあるものであったと思います。このような機会を与えていただき本当にありがとうございました。これからの信州大学 HE 研究室のご活躍を期待しております。

参考文献

- [1] 原子核物理学 永江知文・永宮正治 共著 裳華房
- [2] 放射線計測学 三浦功・菅浩一・俣野恒夫 著 裳華房
- [3] 素粒子物理入門 基礎概念から最先端まで 渡邊靖志 著 培風館