

2011 年度 卒業論文

MPPC を用いた小型放射線 検出器の開発と性能評価

信州大学 理学部
05S2013F 小倉隆義

指導教員
竹下徹 教授
長谷川庸司 准教授

概要

・背景

2011年における福島第一原子力発電所事故以来、わが国では放射線計測への関心が高まっており、web 上では自治体や各種団体、あるいは個人の放射線量計測データを多く見つけることができる。これらのデータの計測によく使われているのが、ガイガー=ミュラー (GM) 計数管であり、1928年の発明以来、チェルノブイリ原発事故から現在まで広く用いられてきた。

GM計数管の欠点の1つは、その γ 線検出効率の低さであり、自然放射線程度の測定では1回の測定に数十分ほど要する。これは、いくつかの自治体が公表しているようなリアルタイムの線量データを取るのには不便である。

γ 線検出効率の高い線量計として、シンチレーション検出器が挙げられるが、これは光電子増倍管 (PMT) を用いるために大型で使いにくいという問題があった。

この相反する問題 (携帯性・検出効率) を克服する試みとしてPMTの代わりにPINフォトダイオードを用いたシンチレーション検出器の試作例や、今年度発表されたMPPCを用いた製品などがある。

・目的と研究内容

信州大学も研究開発に参加している光検出器MPPCとPET研究用の高密度シンチレータを用いて、GM計数管に対して小型・高検出効率・スペクトル分析可能なシンチレーション式放射線検出器 (サーベイメータ) を開発・製作し、動作を密封線源により検証する事が本研究の目的である。

検出器の電子回路は市中で入手可能なアンプやコンパレータ等を使って自作し、MPPCのための80Vの昇圧回路を含めて読み出し回路部は10cmx7cmのサイズの基盤上に構成した。昇圧回路は温度依存性を持たせ、MPPCの増倍率の温度依存性を補償した。シンチレータとMPPCからなるセンサー部の性能として市販のGM計数管と比較して4~5倍の感度であることを示した。

目次

第1章 γ 線

- 1-1 γ 線と物質との相互作用
 - 1-1-1 光電効果
 - 1-1-2 Compton散乱
 - 1-1-3 電子対創生
- 1-2 シンチレーション

第2章 放射線検出器

- 2-1 GM計数管
- 2-2 シンチレーション検出器

第3章 シンチレーション検出器で用いる光検出器

- 3-1 光電子増倍管
- 3-2 MP PC
 - 3-2-1 アバランシェフォトダイオード
 - 3-2-2 MP PC

第4章 検出器の設計と製作

- 4-1 検出器回路の全体構成
- 4-2 シンチレータとMP PCとの結合
- 4-3 Bias Voltage Supply 回路
 - 4-3-1 移相型発振回路
 - 4-3-2 コッククロフト・ウォルトン回路
 - 4-3-3 定電圧回路
- 4-4 アンプ回路
- 4-5 ディスクリミネータ回路

第5章 性能評価

- 5-1 Cs137エネルギースペクトルの確認
- 5-2 MP PC温度係数の補償能力
- 5-3 Cs137によるCPMの測定

第6章 まとめ

- 6-1 まとめ
- 6-2 今後の課題

付録 検出器の全回路図と部品一覧

第1章 γ 線

本研究で扱う放射線検出器の検出対象は、主に γ 線である。本章では、 γ 線について述べる。

γ 線の実体は高エネルギー(およそ 1MeV 弱以上)の光子である。 γ 線とX線はエネルギー領域の一部が重なっており、その区別は発生機構によっている。 γ 線の発生機構の例は、原子核内のエネルギー準位の遷移や、高エネルギー粒子の消滅・崩壊などが挙げられる。

1-1 γ 線と物質との相互作用

γ 線と物質との相互作用には、主に光電効果、Compton 効果、電子対創生の3つがある。 γ 線が物質を通過するとき、これらの相互作用による吸収や散乱によってその強度が減少する。シンチレータ式のガンマ線検出器では、主に光電効果と Compton 効果でたたき出された電子がシンチレータ内で光を出すことを利用している。

1-1-1 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、光電吸収の確率が大きくなる。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、 $\phi_{photo,K}$ 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 ν の増加とともにゆっくり減少する。

L,M,...殻の電子の寄与も考えなければならないが、その寄与は比較的小さく、高エネルギー ($h\nu \sim mc^2$) の γ 線による全光電効果の約 80% は K-電子の光電効果で説明される。そこで、K殻以外の電子の寄与も含めた全光電吸収では近似的に、

$$\phi_{phot} = \frac{5}{4} \phi_{phot,K}$$

としてよい。図1-1は ϕ_{photo} を $h\nu$ の関数として示したものである。

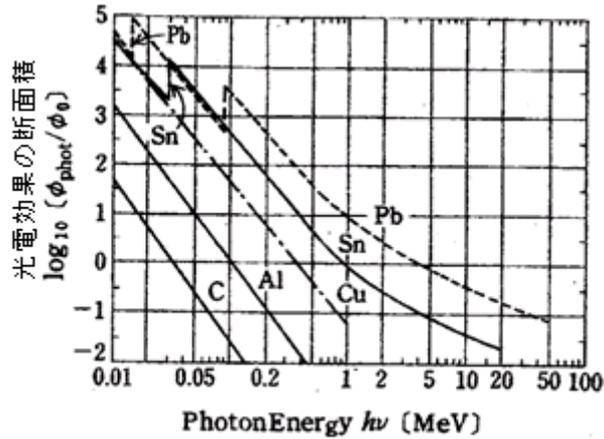


図1-1 各元素の光電効果断面積の比較 [10] p241より

1-1-2 Compton 散乱

γ 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、 γ 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。Compton 散乱の断面積 ϕ_c は $\gamma = h\nu_0/mc^2$ として、

$$\phi_c = \phi_0 \frac{3}{4} \left\{ \frac{1+\gamma}{\gamma^3} \left[\frac{2\gamma(1+\gamma)}{1+2\gamma} - \log(1+2\gamma) \right] + \frac{1}{2\gamma} \log(1+2\gamma) - \frac{1+3\gamma}{(1+2\gamma)^2} \right\}$$

で与えられる。また、

$$\gamma \ll 1 \text{ のとき、 } \phi_c = \phi_0(1-2\gamma)$$

$$\gamma \gg 1 \text{ のとき、 } \phi_c = \phi_0 \frac{3}{8} \frac{1}{\gamma} \left(\ln 2\gamma + \frac{1}{2} \right)$$

となる。

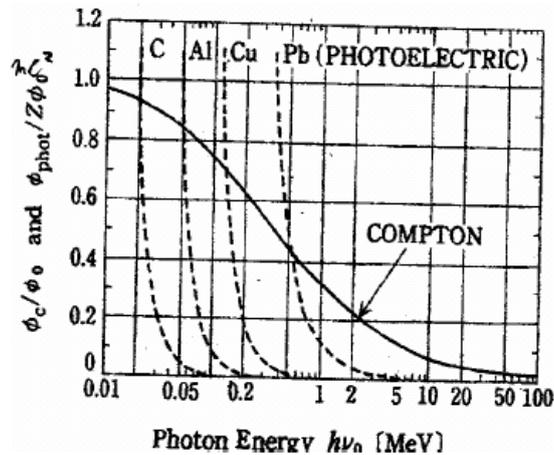


図1-2 Compton 散乱の断面積 [10] p242より

図1-2は、1電子あたりのCompton散乱の全断面積 ϕ_0 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。 γ 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。

1-1-3 電子対創生

γ 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、 γ 線のエネルギーはこれより大きくななければならない。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、

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

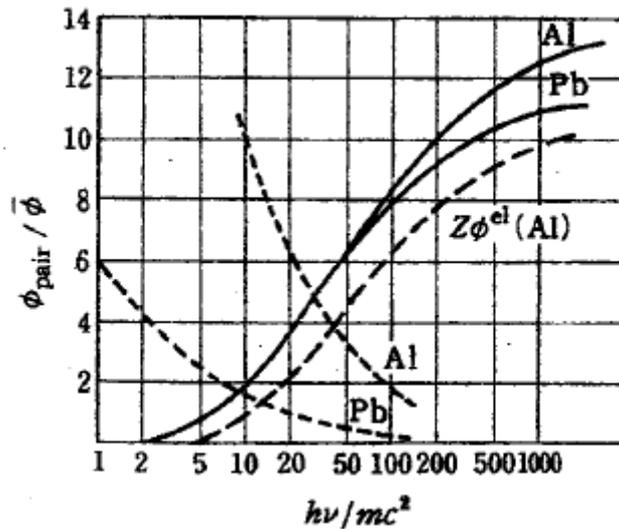


図1-3 対創生の断面積 [10] p243 より

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。

1-2 シンチレーション

γ 線と物質の相互作用によって、物質内には原子から電離された高エネルギーの電子が発生する。一般に、荷電粒子が物質中を通過してエネルギーを失う過程で、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、光を放出する。これをシンチレーションという。

シンチレーション光は通常は非常に微弱なものであり、特に強いシンチレーション光を出す物質をシンチレータという。全ての電離エネルギーがシンチレーションに費やされるわけではなく、

ある程度の損失があるので、損失が少ない物質ほど光量の大きいシンチレータになる。

また、シンチレーション光の強度は最初最も強く、次第に物質固有の時定数で減衰していく。遅い成分と早い成分の二つの発光成分をもつシンチレータも多い。

γ 線を受けるためのシンチレータとしては、原子番号が大きく、密度の高い無機シンチレータが適している。

第2章 放射線検出器

放射線検出器にはGM計数管、シンチレーション検出器、電離箱、比例計数管、半導体検出器などいくつかの種類があり、それぞれ特徴がある。本章では各種放射線検出器のうち、本研究で扱うシンチレーション検出器と、比較対象として用いたGM計数管について述べる。

2-1 GM計数管

GM計数管は1928年、GeigerとMüllerによって作られ、その動作は気体のガス増幅作用を最大限に利用しているため、高いパルス波高が得られ、放射能測定や、高感度サーベイメータとして放射線管理などに広く用いられている。X、 γ 線に対しては、気体では吸収が小さく、GM管外壁の薄い固体との相互作用によりガス中に放出された電子が感度の大半を占めるので計数効率が悪いが、 β 線に対しては100%に近い計数効率をもっていることが特徴である。

2-2 シンチレーション検出器

シンチレーションを利用した検出器で、光検出器の前面にシンチレータを装着して放射線を照射するとシンチレーション発光を起こす。この光を光電子増倍管などによって増幅すると、シンチレータでの放射線吸収エネルギーに比例した電気パルスを得ることができる。また増幅器の後に波高分析器を接続すると、放射線の粒子束を計数すると同時に、エネルギー分析をすることができる。分解時間はGM管よりはるかに短く、密度の高い物質を用いるため、透過力の大きい γ 線や高エネルギー β 線の測定に適している。また、液体シンチレータを利用したものは、低エネルギー β 線の測定に使われる。

第3章 半導体光検出器

シンチレータ式の放射線検出器には高感度の光検出器が必要である。この用途には光電子増倍管(PMT)が良く用いられてきたが、最近では小型、低電圧動作の半導体型のものも登場している。

本研究で用いる光検出器MPPC(Multi Pixel Photon Counter)は、信州大学を始め、多くの大学や研究所と浜松ホトニクス社が開発した新しい半導体光検出器で、現在も研究開発が進められている。PMTに対し、磁場中で使用可能であることや、多チャンネル化にともなうコストパフォーマンスが良い等と言った利点から、PET画像診断や次世代加速器実験計画(ILC)のカロリメータにはMPPCを用いることが提案されている。この章ではMPPC、およびMPPCの構成要素であるアバランシェフォトダイオードについて述べる。

3-1 アバランシェフォトダイオード—MPPCの構成単位

p型半導体とn型半導体を接合させたダイオードを光検出器として用いたデバイスをフォトダイオードと呼ぶ。接合部は互いにキャリアが打ち消しあい、キャリアが少ない領域が存在しており、これを空乏層という。ここに、半導体の禁制帯の幅 E_g よりも大きなエネルギーの光が入ると内部光電効果により、電子が励起され、電子と正孔が対生成される。

$$h\nu = E_g$$

ここで、 h はプランク定数、 ν は入射光の振動数である。通常、pn接合半導体は逆バイアスを掛けてもほとんど電流が流れない。しかし逆バイアス電圧がある一定以上になると、突然電流が流れるようになる。これをブレイクダウンと呼び、この閾値となる電圧のことをブレイクダウン電圧と呼ぶ。ブレイクダウンが起こる原因にはツェナー降伏と電子雪崩降伏の二つがある。ツェナー降伏と電子雪崩降伏の概念図を図3-2に示す。

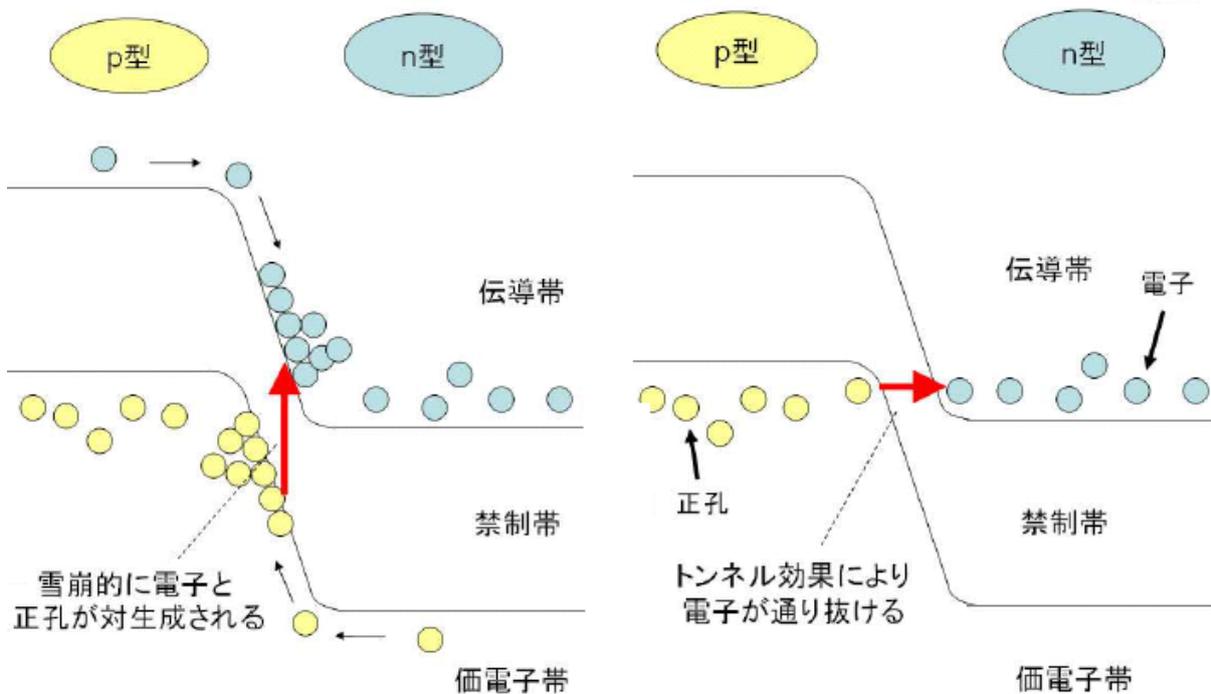


図3-1 電子雪崩降伏(左) とツェナー降伏(右)

逆バイアス電圧が大きくなるとp型の価電子帯の電子がトンネル効果により禁制帯を通り抜けてn型の半導体に移ることがある。このようにして移った電子により電流が流れる現象をツェナー降伏という。

また、逆バイアス電圧が大きくなると空乏層の中において高電場がかかるようになる。この状態で空乏層に電子が入ると電場によって電子が加速され、そのエネルギーによって結晶格子の結合を切り、電子・正孔対を生成する。ここで生成された電子は電場によって加速され、再び電子・正孔対を生成する。このように次々と電子・正孔対が生成されて電子数が雪崩的に増幅する現象をアバランシェ増幅と呼び、これにより大電流が流れるようになる現象を電子雪崩降伏という。

フォトダイオードにブレイクダウン電圧以上の電圧をかけたときに光子が入射すると、生成さ

れた電子は電場により加速され、他の原子と衝突して電子を弾き出す。弾き出された電子も電場で加速され、アバランシェ増幅が起こる。このようにしてアバランシェ増幅を利用して信号を増幅させたフォトダイオードをアバランシェフォトダイオード（APD）と呼ぶ。

APDは通常、ブレイクダウン電圧以下で動作させ、入射光子数に応じた大きさの信号が出る。それに対し、APD をブレイクダウン電圧以上の逆バイアスで動作させると、同時に入射する光子数に関係なく一定の大きさの信号を出す。このモードをガイガーモードと呼ぶ。

増倍率は通常モードのAPDでは100程度だがガイガーモードでは 10^5 程度まで出すことができる。しかしガイガーモードAPD単一素子では光子が来たか来ないかの二値しかわからない。そこで、ガイガーモードAPDを多ピクセル化してフォトンカウンティングをできるようにしようというのが次節に述べるMPPCである。

3-2 MPPC

MPPCは多数のAPDピクセルにより構成されており、実際に受光面を見ると図3-3のようにAPDピクセルが並んでいるのがわかる。

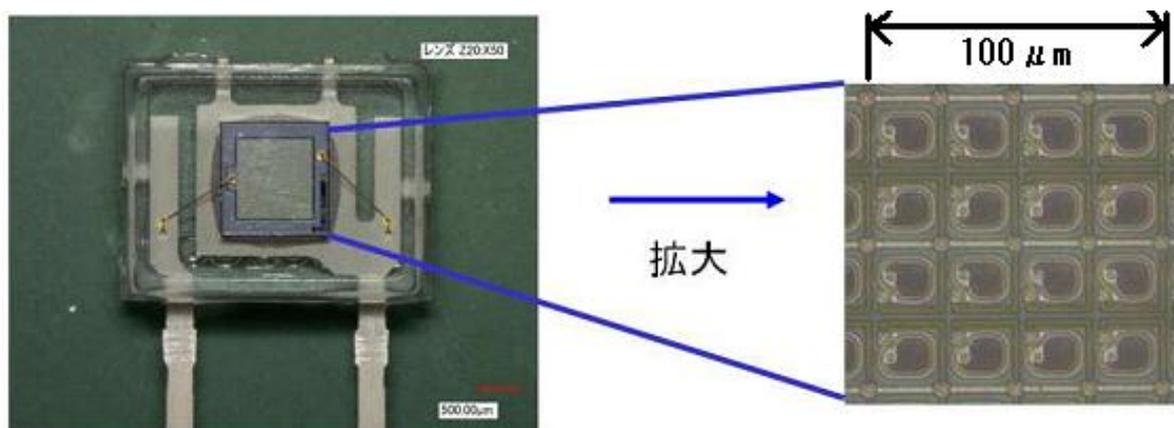


図3-2 MPPCの全体図と受光面の拡大図

MPPCの主な特徴は以下のものが挙げられる。

- ・小型
- ・高ゲイン ($\sim 10^5$)
- ・磁場中・常温で動作可能
- ・低バイアス電圧で動作
- ・優れたフォトンカウンティング能力

次にMPPCの動作について説明する。図3-3 にMPPCの内部回路を、図3-4 にガイガーモードAPD の動作を示す。

APDはブレイクダウン電圧より1～4V程度高い逆バイアス電圧をかけることでガイガーモードで動作する。この時入射光子によりたたき出された電子は増幅領域でアバランシェ増幅を起こす。アバランシェ増幅を起こしたピクセルから電流が流れると、ピクセルに直列に接続されたクエンチング抵抗で電圧降下が起こる。その後、再充電によって逆バイアスは元に戻り再びガイガ

一モードで動作できるようになる。再充電にかかる時間は数nsとされている。

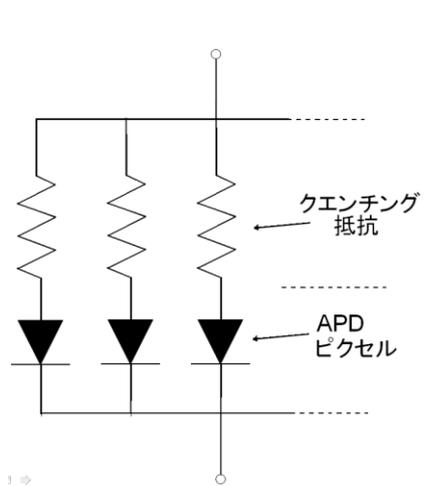


図3-3 MPPCの内部回路

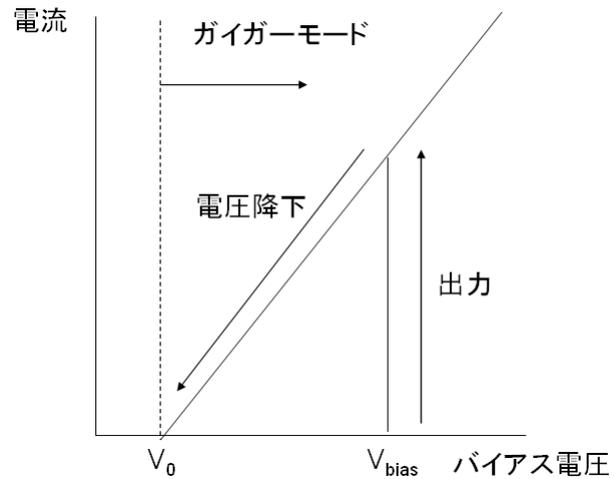


図3-4 ガイガーモードAPDの動作

図3-3からわかるようにMPPCの出力信号は受光面を構成するAPDピクセル全ての出力信号の和になる。したがって同時に複数のピクセルが信号を出した場合、MPPCの出力はそれらの信号の重ね合わせになる。この信号の高さや積分電荷量を測定することで、どのくらいの数の光子が入射したかがわかる。

第4章 検出器の設計と製作

4-1 検出器回路の全体構成と設計の前提条件

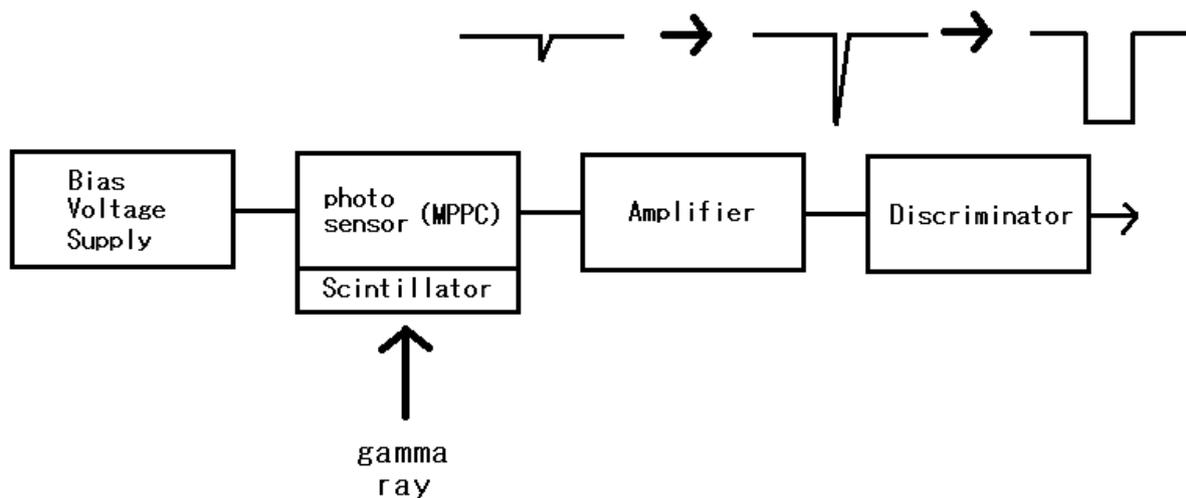


図4-1 シンチレーション検出器の回路ブロック図

今回製作する検出器はシンチレーション検出器というもので、検出器に必要な電子回路のブロック図は参考文献[4]などに例がある。

図4-1にシンチレーション検出器の一般的な回路のブロック図を示す。検出回路の仕組みは

以下のようにになっている。

①Bias Voltage Supply 回路が光検出器の動作に必要な電圧をつくる。

(光電子増倍管なら1kV程度、MPPCならば75V程度)

② γ 線を受けたシンチレータがそのエネルギーに応じた数のシンチレーション光子を放出し、光検出器がその光子数に応じた信号を出す。

③アンプによって光検出器からの信号を後段のDiscriminatorが扱える程度(数百mV～数V)まで増幅される。

④Discriminatorは、threshold(しきい値)を超えた電圧の信号が来た時だけ、パルス信号を出す。これによって電氣的ノイズと γ 線による信号を弁別し、パルスの数を数えれば(あるエネルギー以上の) γ 線がどれだけやって来たかわかる。

今回は光検出器にMPPCを用いるので、それに応じた前提条件が加わる。

Bias Voltage Supply

- ・出力電圧 80V程度
- ・出力電流 $1\mu\text{A}$ 程度 (MPPCに流れる電流はnAオーダー)

Amplifier

- ・Gain 少なくとも100倍以上

4-2 シンチレータとMPPCの結合

今回使用したシンチレータは韓国AMT社製の3x3x15mmのLYSO (Lu_{1.8}Y_{0.2}(SiO₄)₀) シンチレータである。図4-2にLYSOとほかのシンチレータの特性の比較の表を示す。

名称	密度 (g/cm ³)	減衰時定数 (ns)	光量 Tl:NaI=100	潮解性
Tl:NaI	3.67	415	100	強
Tl:CsI	4.51	~1000	45	弱
LYSO	7.4	40~44	75	無

図4-2 LYSOの特性と他のシンチレータとの比較

LYSOはNaI, CsIに比べて、高密度(7.4g/cm³)、高速(40~44ns)、潮解性無しといった利点を持ち、光量も大きくは劣らない。高密度であることは高検出効率につながり、高速(短い減衰時定数)は高計数率での計数能力につながる。LYSOの放射線検出器での欠点は、放射性Lu同位体によるバックグラウンドを持つことである。(3x3x15mmLYSOのもつバックグラウンドは、主要な放射性同位体である¹⁷⁶Luのみを考慮して計算するとおおよそ2200[Counts/min]と見積もれる。)

また、使用したMPPCの型はS10943-85856(x)で、受光面1x1mm、1600pixelのものである。図4-3、4-4にMPPCとシンチレータの結合の様子を示す。LYSO結晶に反射材を巻き、MPPCをはんだ付けした基板にテープで固定して、黒の遮光テープで覆った。

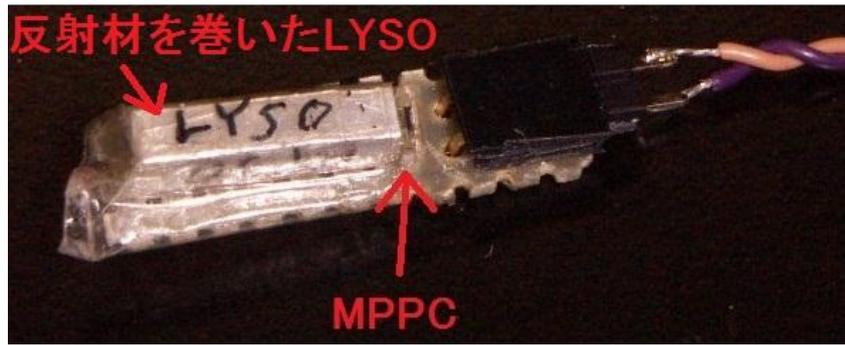


図4-3 MPPCとつないだシンチレータ

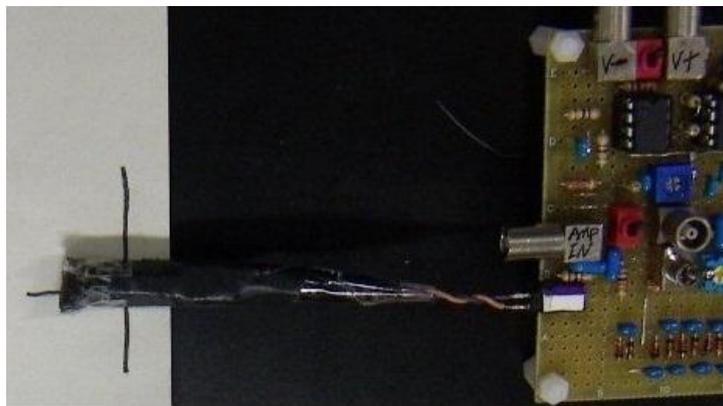


図4-4 遮光後のシンチレータと基板

4-3 Bias Voltage Supply回路

図4-5にBias Voltage Supply回路のブロック図を示す。

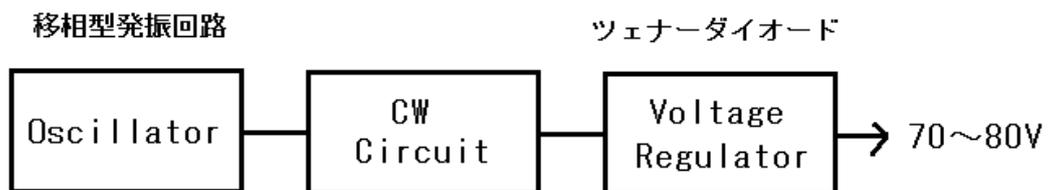


図4-5 Voltage Supply回路

Bias Voltage Supply回路では、電池程度の電圧から80V程度の電圧を作る必要があるが、これにはコッククロフト・ウォルトン回路（以下CW回路）を利用し、発生した高電圧をツェナーダイオードで定電圧化している。CW回路は交流入力なので移相型発振回路用いて交流を発生させている。

4-3-1 移相型発振回路

移相発振回路は、CR回路による移相のずれを利用して正帰還をつくり発振させる回路である。図4-6に移相型発振回路の例を示す。

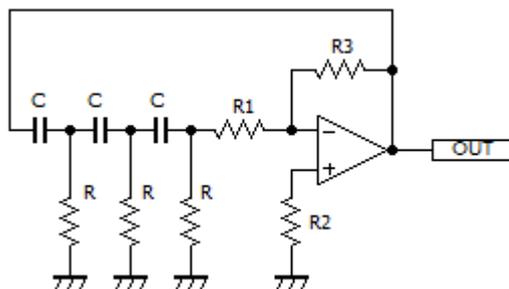


図4-6 移相型発振回路

発振周波数 f は

$$f = \frac{1}{2\pi\sqrt{6}CR}$$

となる。 f を上げるとCW回路の電流出力が上がるがノイズも増えてしまう。実験による検討の結果、 $C=470\text{pF}$ 、 $R=10\text{k}\Omega$ で $f \approx 14\text{kHz}$ となるようにした。

4-3-2 コッククロフト・ウォルトン回路

コッククロフト・ウォルトン(CW)回路は、交流入力電圧を過倍して直流を出力する回路であり、段数を重ねて何倍にでも昇圧できるが電流出力は下がってしまう。CW回路の例(4段)を図4-7に示す。

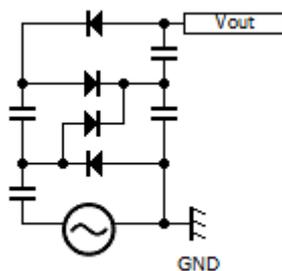


図4-7 コッククロフト・ウォルトン回路

今回の回路は28段とし、AC5V(最大値)入力で出力90V・50 μ Aで動作するようにした。

4-3-3 定電圧回路

定電圧回路は、電源や負荷が変動しても一定の電圧を出力する回路である。今回設計した回路図を図4-8に示す。

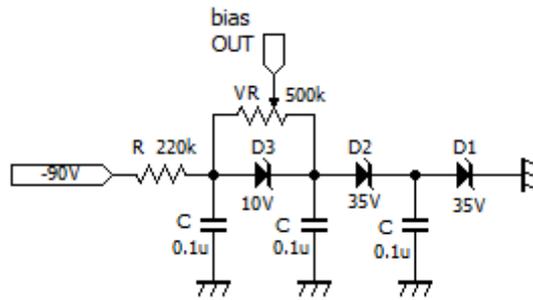


図4-8 定電圧回路

VRを回すと、出力電圧を70V～80Vまで変化させることができる。また、MPPCのブレイク団電圧は正の温度係数(約60mV/°C)をもつが、ツェナーダイオード(35V×2)も同程度の温度係数を持つのでこれを打ち消すことができ、温度補正回路としての役割もある。

4-4 アンプ回路

本検出器のアンプに求められる性能は、幅100ns程度のシンチレーションパルスを少なくとも100倍程度に増幅できることである。今回設計した回路は高速オペアンプLM7171(ユニティゲイン周波数180MHz)を使って非反転増幅回路2段とした。

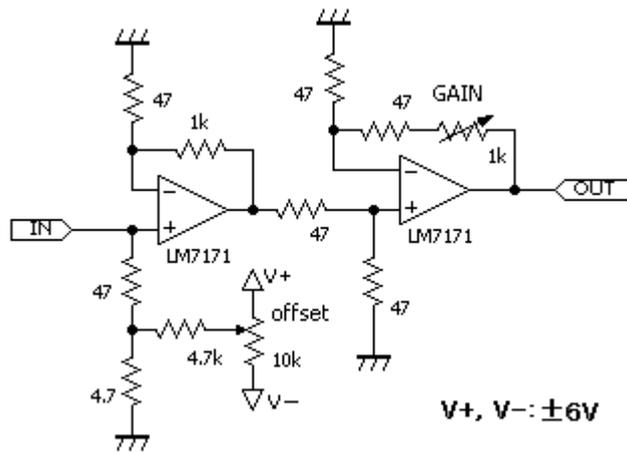


図4-9 アンプ回路

4-5 ディスクリミネータ回路

本検出器のディスクリミネータは、コンパレータと単安定マルチバイブレータの組み合わせで、thresholdは0～約3Vの範囲で調節できる。

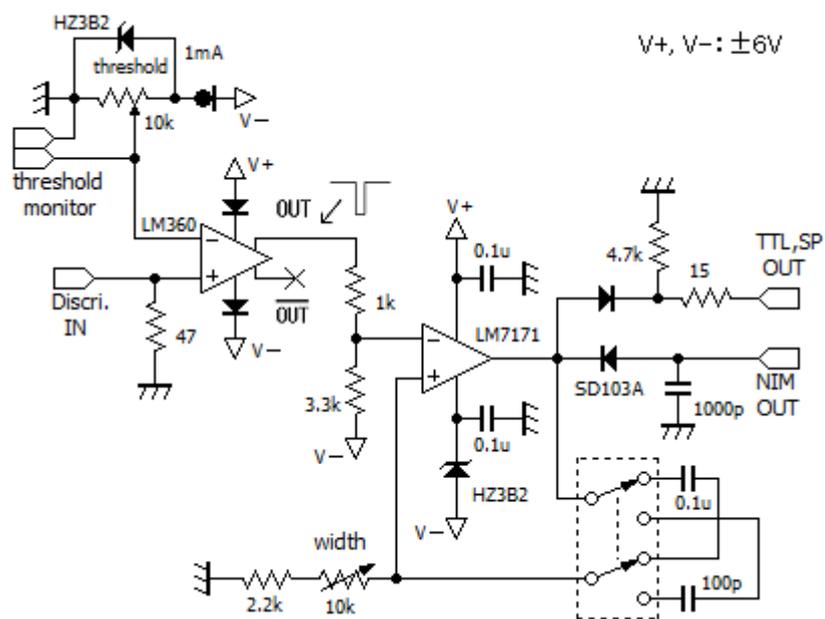


図4-10 ディスクリミネータ回路

第5章 性能評価

5-1 Cs137エネルギースペクトルの確認

試作した検出器の動作確認として、Cs137の γ 線エネルギースペクトルを測定した。エネルギースペクトルの測定にはADCが必要であるが、試作した回路には付いていないので外部モジュール (repic RPC-022) を利用した。

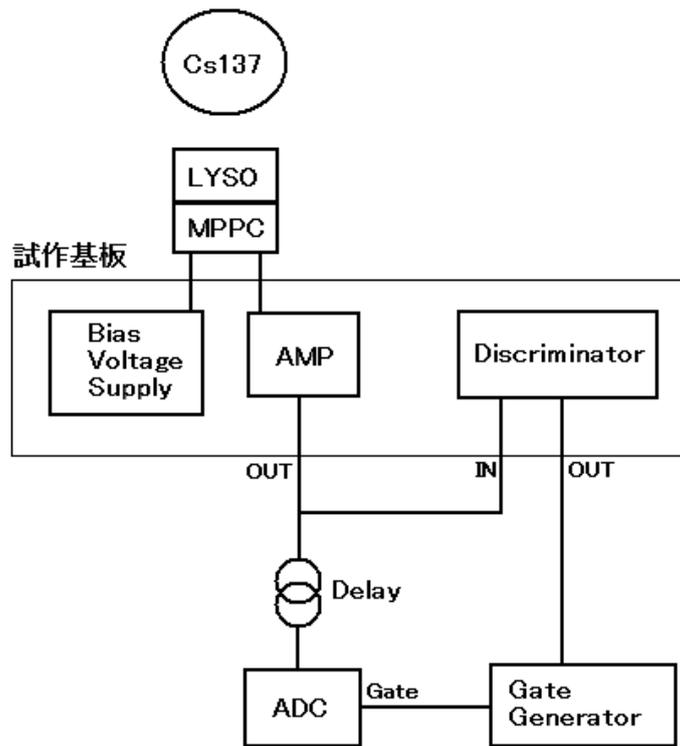


図5-1 エネルギースペクトル測定の設定アップ図

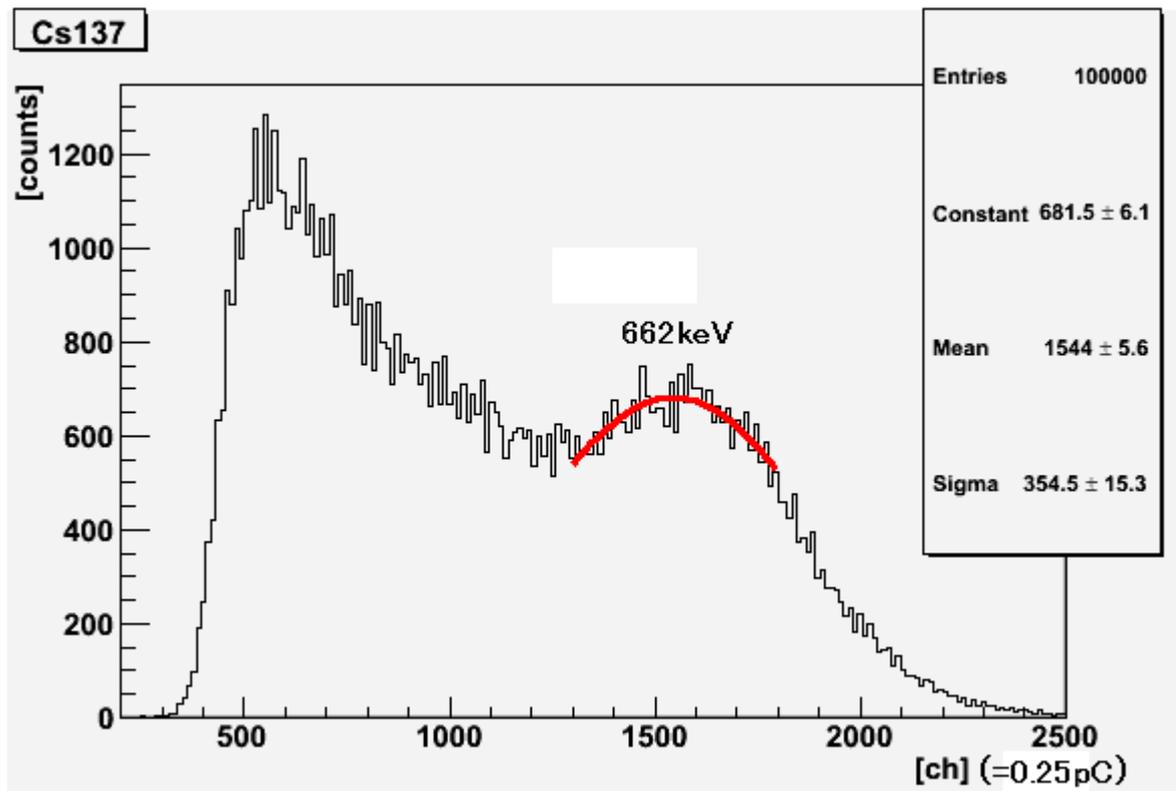


図5-2 測定結果

結果は図5-2のようになった。662keVのピークが見えており、エネルギー分解能(FWHM)は59%である。

5-2 MPPC温度係数の補償能力

MPPCのブレイクダウン電圧は約60mV/Kの温度係数を持つため、Bias Voltage Supply回路に同等の温度係数を持たせて相殺し、補償している。

Bias Voltage Supply回路の温度特性を測定してMPPCと比較した。

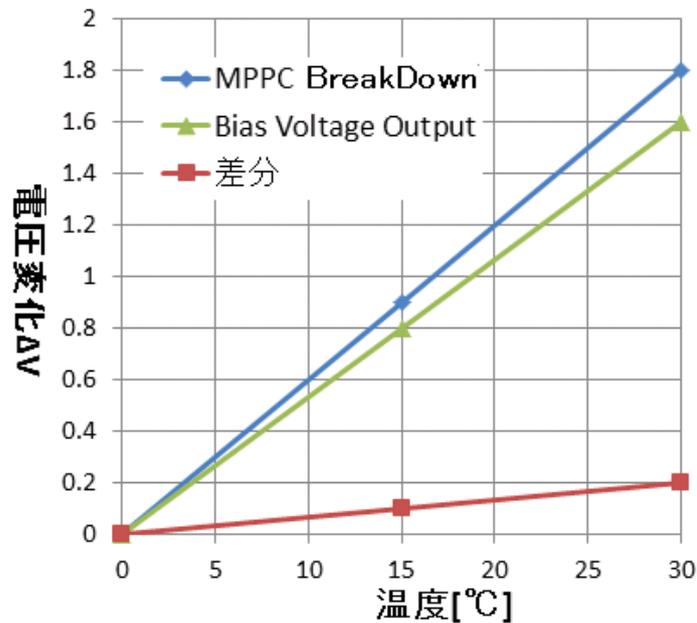


図5-3 0°Cを基準としたMPPC Breakdown電圧とbias回路の電圧変化

MPPCへのバイアス電圧変化が、温度補償により実質10%程度まで抑えられていることがわかる。

5-3 Cs137によるCPMの測定

CPMとは、Counts per Minuteの略で、検出器が1分あたりに放射線をカウントした数を表す。

図5-4のように、Cs137線源を置いてCPM(バックグラウンドは引いた値)を測定し、市販のGM計数管(Monitor4)と比較した。

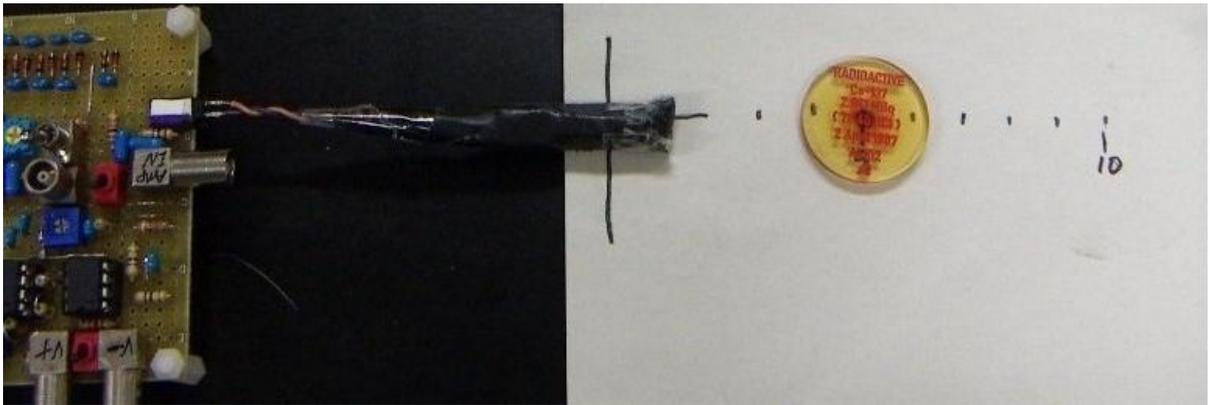


図5-4 測定の様子

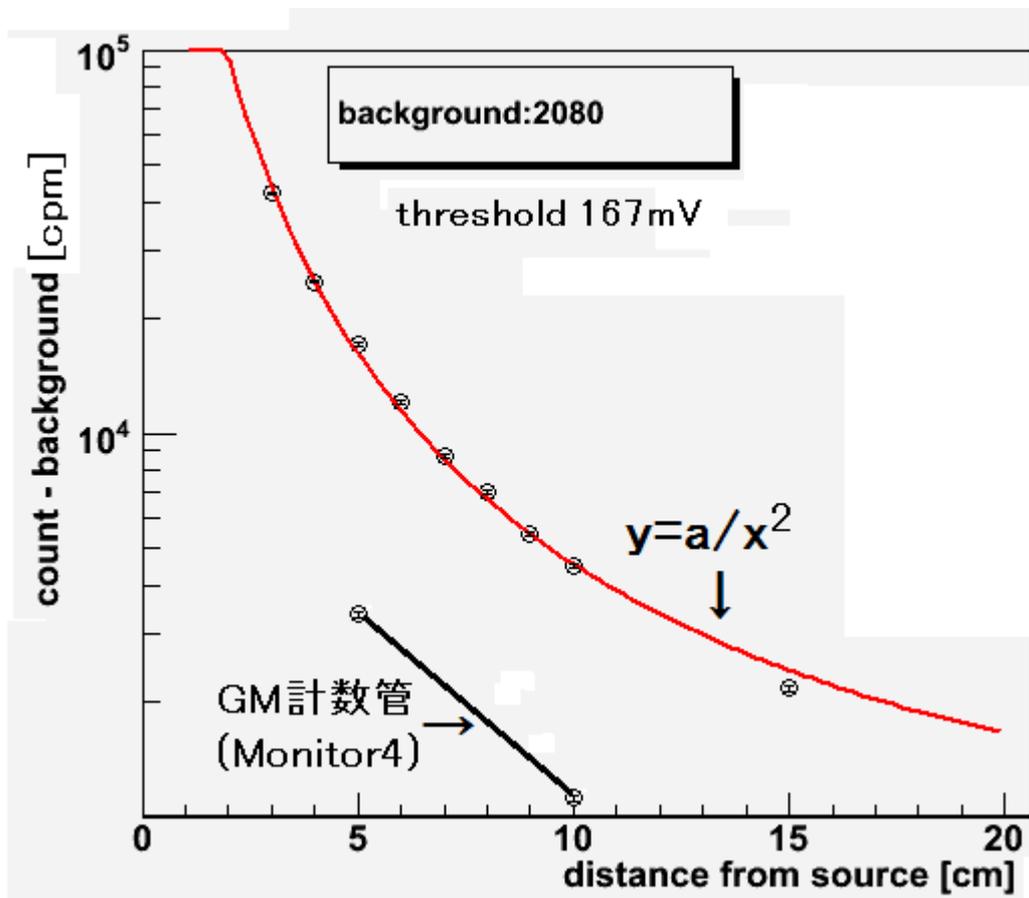


図5-5 CPM測定結果

図5-5から、市販のGM計数管 (Monitor4) に対して4~5倍のCPMを得られていることがわかる。

また、バックグラウンドCPMが市販のGM計数管との検出効率比に比べて大きな値が出ている (2080CPM、Monitor4は16CPMなので100倍以上)が、これはLYSOに含まれる放射性Lu同位体によるものと考えられる。3x3x15mmLYSOの持つバックグラウンドは2200CPM程度と見積もられるから(4-2)、この値は妥当といえる。

また、このときのthreshold電圧は167mVである。thresholdは最終的にはエネルギー(keV)で表す必要があるが、今回は行っていない。

第6章 まとめ

6-1 まとめ

MPPCとLYSOを利用した放射線測定器を開発した。

MPPC用のアンプ、ディスクリミネータ、バイアス印加回路(温度補償付き)を統合した基板を設計・試作し、動作試験としてエネルギースペクトル測定(ADCは別)、温度特性測定、CPM測定を行った結果、

- ・Cs137の γ 線スペクトルを測定して、662keVピークが見えた。
- ・MPPCブレイクダウン電圧の温度係数を約10%に抑えた。
- ・3x3x15mm LYSOでGM計数管(Monitor4)に対し4~5倍の感度であることがわかった。

6-2 今後の課題

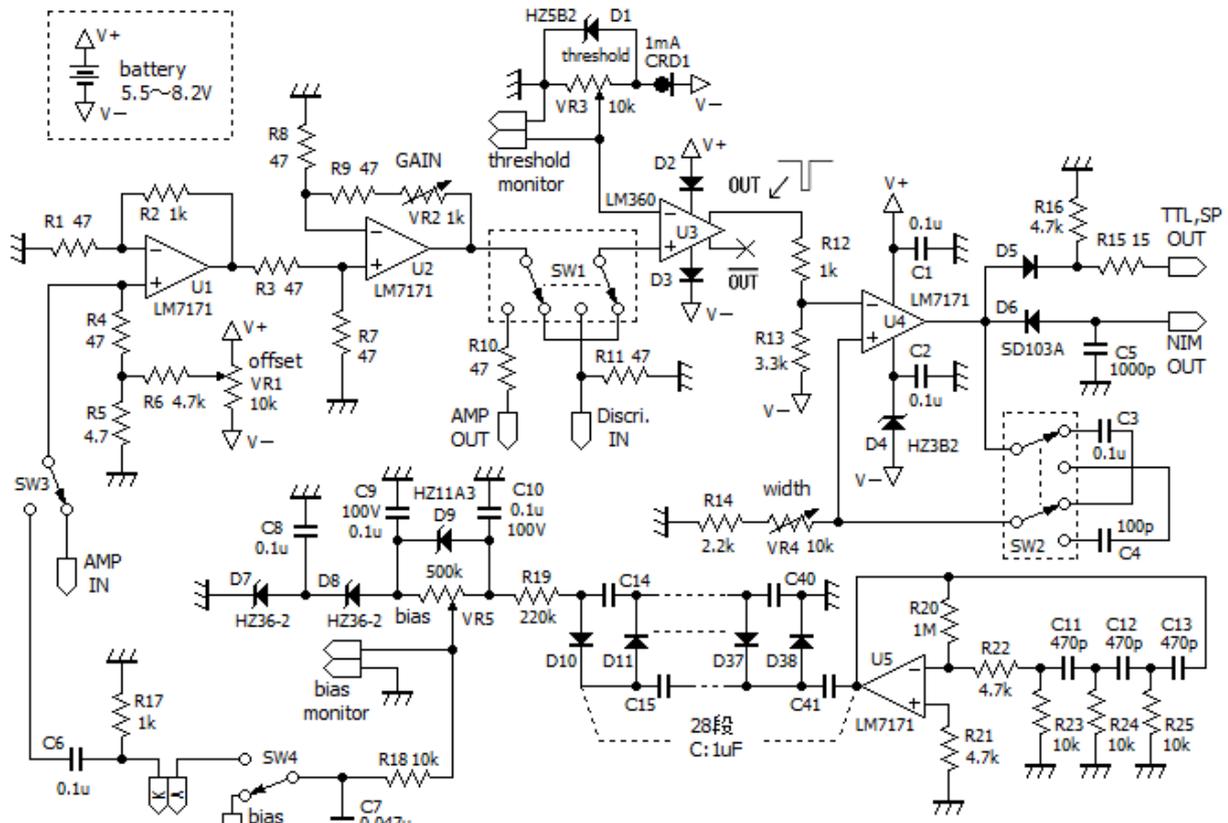
- ・エネルギー分解能の向上

今回得られたエネルギー分解能(59%)は核種分析を行うには不十分であるが、光学グリスや大面積MPPC(3x3mm)を利用して集光効率を上げれば、エネルギー分解能を改善できはざである。

- ・環境放射線の測定

今回使用したLYSOシンチレータには、放射性Luによるバックグラウンド(3x3x15mm LYSOで約2000CPM)があるので、環境放射線程度の弱い放射線は測定できない。これを測定できるようにするためには、放射性同位体をあまり含まないシンチレータ(例えばGSO)などでテストする必要がある。

付録 検出器の全回路図と部品一覧



※U1,2,5のバイパスコンデンサ0.1uF×2は省略
 ※型の明記されていないダイオードはすべて1N4148

部品一覧

・抵抗(1/4Wカーボン)	・コンデンサー(セラミック)	LM7171 × 4
4.7Ω × 1	0.047uF 100V × 1	LM360 × 1
15Ω × 1	0.1uF × 11	1N4148 × 32
47Ω × 8	0.1uF 100V × 2	HZ11A3 × 1
1kΩ × 3	1uF × 28	HZ36-2 × 2
2.2kΩ × 1	100pF × 1	HZ3B2 × 2
3.3kΩ × 1	470pF × 3	SD103A × 1
4.7kΩ × 4	1000pF × 1	定電流ダイオード 1mA × 1
10kΩ × 4		
220kΩ × 1	・スイッチ	
1MΩ × 1	3極2連 × 3	
	3極単連 × 2	
・半固定抵抗		
1kΩ × 1		
10kΩ × 1		
500kΩ × 1		

謝辞

本研究を進めるにあたり、たくさんの方々にお世話になりました。研究の指導をして頂いた指導教員の竹下徹先生、長谷川庸司先生に感謝いたします。また、ゼミ等でお世話になった研究員の小寺克茂さんに感謝いたします。また、研究室のメンバーにも、様々な助言をいただきました。小林秋人さんにはMP P Cの使い方を教わりました。同期入学の浜崎竜太郎君には研究室生活の面でお世話になりました。ありがとうございました。

最後に、7年間もの在学を許してくれた家族に感謝いたします。

参考文献

- [1] 長峯宏昌 「新型Scintillator(LSO, LFS)の性能評価」 信州大学卒業論文 (2008)
- [2] 小林秋人 「新型MPPCの性能評価」 信州大学卒業論文 (2010)
- [3] 山田恵子 「PET 用シンチレータの光量測定」 信州大学卒業論文 (2009)
- [4] 放射線計測ハンドブック Glenn F. Knoll (著) 木村逸郎/坂井英次 (訳)
- [5] 放射線測定技術 山田勝彦 (著)
- [6] 放射線計測学 日本放射線技術学会 (監修)
- [7] <http://www.neutron.co.jp/crystal/12/LYSO.html> LYSOについて
- [8] <http://jp.hamamatsu.com> 浜松ホトニクス
- [9] 実用電源回路設計ハンドブック 戸川 治朗 (著)
- [10] 物理学実験 信州大学物理学実験指導書編集委員会 (著)