

シンチレータと光半導体素子MPPCを用いた
携帯型放射線スペクトロメータの実用化

広島大学大学院理学研究科
高エネルギー宇宙・可視赤外線天文学研究室

M126733

中川 崇之

主査: 深澤 泰司

副査: 杉立 徹

日付:2014/2/10

概要

福島第一原子力発電所の事故以降、環境中の放射線測定の必要性が高まっている。その中で、環境中や食品中に含まれる放射性核種の同定ができる検出器の需要も高まっている。一般的に放射線検出器で核種同定を行う際は、Ge 半導体検出器のような大型でエネルギー分解能の良いシステムが用いられるが、簡易的に手軽に核種同定を行いたい場合は、携帯型の小型分析器の方が便利であることが多い。そこで、我々は光半導体素子 MPPC と CsI(Tl) シンチレータを組み合わせることにより、安価で、持ち歩くことができ、検出効率が高く、エネルギー分解能の良い γ 線スペクトロメータの開発を行った。また、MPPC は小型で内部増幅率が大きいことから、次世代の X 線 γ 線観測衛星の光センサーとしても期待されており、今回の開発を通してその性能評価も行った。

このスペクトロメータの開発に当たって、株式会社ティーエーシーと協力した。MPPC/CsI(Tl) シンチレータの選定や特性調査と MPPC からの電荷信号を整形/増幅するアナログ回路部分の設計を中川が担当し、モニターや高圧電源の制御などデジタル回路部分の設計と中川担当部分も含めた全系のパッケージ化をティーエーシーが担当した。

MPPC は温度と印加電圧によって増幅率が大きく変動し、また、その特性は個体ごとに異なっている。我々の検出器では、温度による増幅率の変化を印加電圧の調整により一定になるように制御しているため、開発に当たってその差異の傾向を掴む必要がある。また、製品化を考えると、少ない測定項目で個性を把握することが望ましい。

今回、我々は開発した γ 線検出器に使用する 10 個の CsI(Tl) と MPPC の組み合わせについて、温度と印加電圧による増幅率の変動の調査を行った。 ^{137}Cs を照射した時に、662 keV ピークが一定となる温度と印加電圧の関係を調べたところ、オフセットは MPPC 毎に差が大きいが、傾きの差は最大で 3 %であった。この結果から、今後の放射線検出器の製作では、傾きは今回の測定値を使用し、各 CsI(Tl) と MPPC の組み合わせについて単一温度測定のみでオフセットの決定を行うことにした。

本論文では MPPC の個体差調査を始め、 γ 線スペクトロメータの実用化に向けて行った一連の実験について述べる。

目次

第1章 開発の目的	3
1.1 開発の目的	3
1.2 放射線について	3
1.2.1 放射線の種類	3
1.2.2 放射線の放出過程	4
1.2.3 主な放射性物質	5
1.3 放射線に関する量の定義	7
1.3.1 物理量	7
1.3.2 防護量	8
1.3.3 実用量	9
1.4 γ 線と物質との相互作用	10
1.4.1 光電吸収	10
1.4.2 コンプトン散乱	10
1.4.3 電子-陽電子対生成	11
1.5 放射線検出の原理	11
1.5.1 電離作用を利用した検出器	11
1.5.2 蛍光作用を利用した検出器	13
1.6 環境放射線の測定方法	14
1.6.1 空間線量の測定	14
1.6.2 表面汚染の測定	15
1.6.3 個人線量の測定	15
1.7 一般的な環境放射線検出器	15
1.7.1 GM サーベイメータ	16
1.7.2 電離箱サーベイメータ	16
1.7.3 シンチレーションサーベイメータ	16
1.7.4 電子式個人線量計	18
1.7.5 パッシブ型個人線量計	18
1.7.6 Si/Ge 半導体スペクトロメータ	19
1.7.7 シンチレーションスペクトロメータ	20
1.7.8 コンプトンカメラ	21

第 2 章	放射線検出器の設計	22
2.1	開発する検出器の概要	22
2.2	CsI(Tl) について	23
2.2.1	シンチレータの比較	23
2.2.2	CsI(Tl) の特性	25
2.3	MPPC(Multi-Pixel Photon Counter) について	27
2.3.1	光センサの比較	27
2.3.2	MPPC の特徴	27
2.3.3	MPPC の種類	29
2.4	アナログ回路	30
2.4.1	MPPC 接続回路	30
2.4.2	前置増幅回路	31
2.4.3	加算回路	31
2.4.4	PZC(Pole-Zero Cancellation) 回路	33
2.4.5	積分回路	33
2.4.6	非反転増幅回路	34
2.4.7	アナログ回路のまとめ	36
2.5	後続のハードウェアについて	37
第 3 章	実用化に向けた基礎実験	40
3.1	開発項目	40
3.2	基礎実験のセットアップ	41
3.3	MPPC の選定	43
3.4	CsI(Tl) 形状の選定	48
3.5	構築した系でのスペクトル取得	49
3.6	温度-電圧依存性の測定	51
3.7	μSv 変換式の作成	58
3.8	T-GMK2-S の性能調査	62
3.8.1	評価実験のセットアップ	62
3.8.2	実験項目と照射条件	64
3.8.3	線量率特性の調査結果	68
3.8.4	方向特性の調査結果	71
3.8.5	エネルギー特性の調査結果	72
第 4 章	まとめと今後	76
4.1	T-GMK2-S での放射線測定	76
4.2	まとめ	76
4.3	今後の課題 1 - 最適な電圧値での動作	77
4.4	今後の課題 2 - β 線用の検出器	78
4.5	今後の課題 3 - JIS 規格に準拠した評価試験	80

第1章 開発の目的

1.1 開発の目的

福島第一原子力発電所での事故以降、世間的に放射線への関心は高まっている。この事故により、今まで放射線測定を行っていなかった一般家庭や教育現場等でも測定をするようになっており、安価で持ち歩くことができ、簡易に測定できる装置が求められている。また、より詳しく測定するために検出した放射線が ^{134}Cs 、 ^{137}Cs のような人工放射線か、 ^{40}K のような自然放射線かを判別できることが望ましい。我々は光半導体素子 MPPC(Multi-Pixeled Photon Counter) と CsI(Tl) を組み合わせたシンチレーション検出器で、これらの性能を満たすことを目指して開発を行った。

以下、放射線の特性や現在の検出器について述べていく。

1.2 放射線について

1.2.1 放射線の種類

放射線にはいくつかの種類があり、以下、代表的なものについて述べる。

α 線

α 線とは高い運動エネルギーをもったヘリウムの原子核(α 粒子)のことであり、陽子 2 個と中性子 2 個からなる。 $+2$ 荷の荷電粒子であり、物質透過の際は物質中の原子や分子を励起・電離する能力が非常に強く、物質にエネルギーを与え、自らはそのエネルギーを失う。そのため、物質に対する透過力は弱く、紙一枚で阻止できる。

β 線

β 線とは放射性同位体の崩壊の際に放出される電子線のことであり、陰電子の場合(β^- 線)と陽電子の場合(β^+ 線)がある。電離能力は α 線の約 $1/50$ 程度であり、物質透過力は α 線より強いが、薄いアルミニウム板で阻止できる。

X 線、 γ 線

X 線、 γ 線は共に極めて波長の短い電磁波のことである。これらは発生機構により区別され、 γ 線は原子核の壊変の際に、原子核内から放出されるもので、X 線は原子核外で電場や軌道電子が関与した結果放出されるものである。また、X 線は比較的波長が長く、エネルギーが数 keV - 数 10 keV であり、 γ 線は波長が短く、エネルギーが数 100 keV 以上であるといった特徴がある。X 線は更に二つに分類できる。一つは電子が核のクーロン場により急激に減速された時に発生する制動 X 線であり、もう一つは軌道電子が外側の電子殻から内側の電子殻に遷移する過程にそのエネルギー差を放射する特性 X 線である。特性 X 線はその遷移の仕方により $K\alpha$ 線、 $L\alpha$ 線などとも呼ばれる。X 線、 γ 線は電荷を持たず、それ自体では物質を電

離させる能力はないが、物質透過の際、光電効果、コンプトン散乱、電子対生成の過程によって、そのエネルギーの一部または全部を物質中の電子に付与し、それにより運動エネルギーを得た電子が電離作用をもたらす。このため、X線、 γ 線は間接的に電離能力を有する。しかし、物質と反応する確率は小さいため、物質に対する透過能力は強い。そのため、阻止するには厚い鉛板を用いる。

中性子線

中性子線とは核反応や核分裂の際に放出される中性子のことである。中性子は原子核の構成要素の一つで、陽子とほぼ同じ質量を持つが単独では安定でなく半減期 11.7 分で崩壊し、 β 線と反電子ニュートリノを放出して陽子になる。中性子は電荷を持たず、それ自体は直接の電離作用を持たないが、物質中の陽子との衝突、核反応等により生じた荷電粒子による間接的な電離作用を持つ。また、核に吸収されてその核を放射性核種に変えてしまう。その放射性核種は崩壊により各種の放射線を出す。中性子は物質透過力は強いが、中性子と同程度の質量を持つ原子核との衝突でエネルギーを失わせることができるため、阻止するには水やコンクリートの厚い壁が必要である。

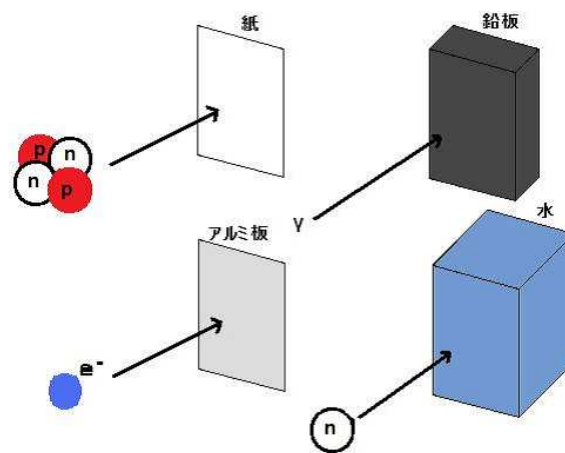


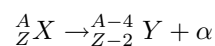
図 1.1: 放射線の透過力

1.2.2 放射線の放出過程

次に、放射性物質がこれらの放射線を放出する過程を見ていく。不安定な原子核が安定な原子核になる際、放射線の放出を伴って壊変していく。

α崩壊

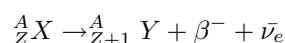
α粒子を放出する崩壊であり、次式で表される。



原子番号は 2、質量数は 4 減少する。α崩壊する核種は一般に高原子番号の核種である。

β⁻崩壊

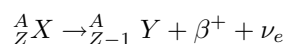
β^- 線を放出する崩壊であり、次式で表される。



原子番号は1増加するが、質量数は変らない。崩壊の際にニュートリノ $\bar{\nu}_e$ も放出されるが、物質との相互作用はほとんどしない。

β^+ 崩壊

β^+ 線を放出する崩壊であり、次式で表される。

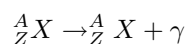


原子番号は1減少するが、質量数は変らない。この崩壊は ν_e を放出する。

電子捕獲崩壊

核内において陽子が過剰にある場合、核外の電子を捕獲し原子核が安定な状態になろうとする崩壊である。捕獲される電子はK殻電子であることが多いが、L殻や更に外側の電子が捕獲される場合もある。捕獲された電子の軌道に外殻からの電子が落ち込んでくるときに特性X線などの放射線が放出される。

これらの崩壊後も、原子核はまだ不安定な場合が多く、電磁波としてエネルギーを放出する。これが γ 線である。



1.2.3 主な放射性物質

ここで、主な放射性物質の崩壊の過程を見ていく。

- ${}^{40}\text{K}$

β^- 線 (1.31 MeV) を放出して ${}^{40}\text{Ca}$ となる。また、軌道電子を捕獲して ${}^{40}\text{Ar}$ にもなり、この時 γ 線 (1.46 MeV) を放出する。

- ${}^{134}\text{Cs}$

多くの場合、 β^- 線 (0.658 MeV) を放出して ${}^{134}\text{Ba}$ となる。この時、多くの γ 線 (0.605 MeV、0.796 MeV 等) が放出される。1%以下の確率で、軌道電子を捕獲して ${}^{134}\text{Xe}$ にもなる。

- ^{137}Cs

94.4 %が β^- 線 (0.514 MeV) を放出して ^{137m}Ba となり、その後、半減期 2.6 分で γ 線 (0.662 MeV)、Ba-K α (0.0315 MeV) 線等を放出して ^{137}Ba となる。残りの 5.6 %は β^- 線 (1.18 MeV) を放出して直接 ^{137}Ba になる。

- ^{60}Co

β^- 線 (0.311 MeV) を放出し、更に 2 本の γ 線 (1.17 MeV、1.33 MeV) をカスケードに放出して ^{60}Ni となる。

- ^{90}Sr

β^- 線 (0.546 MeV) を放出して ^{90}Y となり、 ^{90}Y も β^- 線 (2.28 MeV) を放出して ^{90}Zr となる。

- ^{222}Rn

α 線 (5.49 MeV) を放出し、 ^{218}Po となり、更に $^{214}\text{Pb} \rightarrow ^{214}\text{Bi} \rightarrow ^{214}\text{Po} \rightarrow ^{210}\text{Pb}$ と短時間の間に崩壊し、最終的には安定な ^{206}Pb になる。放出される γ 線には、 ^{214}Pb から 0.295 MeV、0.352 MeV 等があり、 ^{214}Bi から、0.609 MeV、1.12 MeV、1.76 MeV 等がある。

1.3 放射線に関する量の定義

ここで、放射線に関する量の確認をしておく。

1.3.1 物理量

まず、放射線に関する物理量を確認する。

放射能強度

放射性物質が単位時間 (1 秒) 当たりに崩壊する原子の個数。単位はベクレル [Bq]。

フルエンス

ある時間内に、ある球体の大円の断面積に入射する粒子の数。

カーマ - kerma(kinetic energy released in matter)

放射線を受けた物質の微小体積要素内で、間接電離粒子によって 2 次的に作り出された荷電粒子の運動エネルギーの初期値の総和を、その要素の質量で割ったもの。

吸収線量

放射線を受けた物質が微小体積要素内で、吸収するエネルギーの量をその要素の質量で割ったもの。数 MeV 以下の放射線では、カーマと吸収線量はほぼ同じであるとみなせる。単位はグレイ [Gy] = [J/kg]。

1.3.2 防護量

物理量と放射線による健康リスクを関連づける指標として防護量が用いられている。被曝を受ける各組織/臓器の防護量が等価線量であり、全身の防護量が実効線量である。

等価線量

組織又は臓器に対する被曝の効果を評価するために使用される量。吸収線量に放射線の種類の違いによる差を補正する係数（放射線荷重係数）を掛けた値。単位はシーベルト [Sv]。

実効線量

被曝した組織又は臓器の等価線量に、各組織/臓器の相対的な放射線感受性を考慮して補正をする係数（組織荷重係数）を掛けた値。単位はシーベルト [Sv]。

図 1.2、図 1.3 に放射線荷重係数、図 1.4 に組織荷重係数の値を示す。

放射線の種類	放射線加重係数
光子	1
電子とミューオン	1
陽子と荷電パイ中間子	2
α 粒子、核分裂片、重粒子	20
中性子	右図に表示

図 1.2: 放射線荷重係数 [4]

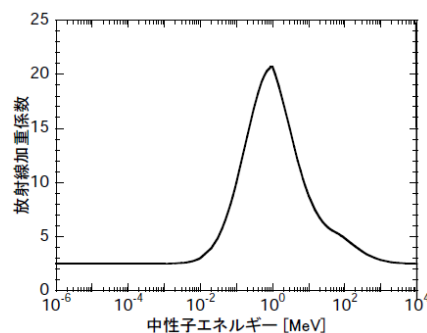


図 1.3: 中性子荷重係数 [4]

組織加重係数 w_T	ICRP の1990年勧告で該当する組織又は器官	ICRP の2007年勧告で該当する組織又は器官
0.20	生殖腺	—
0.12	赤色骨髄、結腸、肺、胃	乳房、赤色骨髄、結腸、肺、胃
0.08	—	生殖腺
0.05	乳房、甲状腺、食道、肝臓、膀胱	—
0.04	—	甲状腺、食道、肝臓、膀胱
0.01	骨表面、皮膚	骨表面、皮膚、脳、唾液腺
	残りの10組織・器官:0.05 副腎、脳、大腸上部、小腸、腎臓、筋肉、脾臓、脾臓、胸腺、子宮	残りの14組織・器官:0.12 副腎、胸腔外(ET)領域、胆嚢、心臓腎臓、リンパ節、筋肉、口腔粘膜、睪臓、前立腺、小腸、脾臓、胸腺、子宮頸部

図 1.4: 組織荷重係数 [4]

1.3.3 実用量

実効線量、等価線量は照射条件が分かれば、計算により求めることができる。しかし、これらの量を実際に測定することは不可能である。そのため、放射線のモニタリングには以下に示す実用量が用いられている。この内、周辺線量当量、方向性線量当量は場のモニタリング（空間線量測定）に使用する量であり、個人線量当量は個人のモニタリング（個人線量測定）に使用する量である。

周辺線量当量

透過力の強い放射線（X線、 γ 線、中性子線）と実効線量を関連づける線量等量。単位はシーベルト [Sv]。吸収線量に放射線荷重係数とその他の修正係数を乗じたものとして定義される。放射線の計測は通常サーベイメータ等によって線量測定を行う。これらの測定値を実効線量と関連づける際は放射線場に ICRU* 球** という仮想的な球ファントムを置き、その球体内部での線量分布から求められる量を測定値とする。放射線が ICRU 球の表面から深さ d mm の位置の周辺線量当量を $H^*(d)$ と表す。実効線量評価には 1 cm 周辺線量当量 $H^*(10)$ が使用されている。

* ICRU：国際放射線単位測定委員会 (International Commission on Radiation Units and Measurements)

** ICRU 球：質量分率が O:76.2 %、C:11.1 %、H:10.1 %、N:2.6 % の元素組成をもつ、密度 1 g/cm^3 で直径 30 cm の球。

方向性線量当量

透過力の弱い放射線（軟 X 線、 β 線）による皮膚、末端部（手足など）、眼の水晶体の被曝の管理に使用される線量等量。単位はシーベルト [Sv]。これらの放射線の測定には薄窓型のサーベイメータを用いて行うため、測定値は放射線の入射方向に依存する。放射線が ICRU 球の表面から深さ d mm の位置に入射方向 Ω から入射した場合の方向性線量当量を $H'(d, \Omega)$ と表す。皮膚などの等価線量評価には $70 \mu\text{m}$ 方向性線量当量 $H'(0.07, \Omega)$ が使用されている。

個人線量当量

人体上の指定された点の、ある深さ d における軟組織中での線量当量。単位はシーベルト [Sv]。個人のモニタリングでは、個人線量計を装着する部位が放射線の入射方向や作業形態によって変わる。このため、個人線量の定義では ICRU 球のようなファントムは具体的に設定されていない。しかし、個人線量計の校正のために ICRU スラブ*** というスラブファントムが採用されている。放射線が ICRU スラブの深さ d mm の位置の個人線量当量を $H_p(d)$ と表す。実効線量評価には $H_p(10)$ が使用され、皮膚や末端部（手足など）の等価線量評価には $H_p(0.07)$ が使用される。

*** ICRU スラブ：質量分率が O:76.2 %、C:11.1 %、H:10.1 %、N:2.6 % の元素組成をもつ、密度 1 g/cm^3 で $30 \times 30 \times 15$ cm の直方体。

1.4 γ 線と物質との相互作用

空間線量を測定する際は、主に γ 線の検出を行う。これは α 線、 β 線は透過能力が低く、空気でも大きく減衰されてしまうためである。

ここでは、主にターゲットとなる γ 線と物質との相互作用について述べる。

1.4.1 光電吸収

吸収物質の原子と相互作用し、 γ 線が全てのエネルギーを原子に受け渡し、消滅する相互作用を光電吸収という。光電吸収は原子全体との間で起き、多くの場合、もっとも強く結合している電子 (K 殻電子) を光電子として放出する。この光電子の持つエネルギーは次式で表される。

$$E_{e^-} = h\nu - E_b$$

ここで、 E_b は光電子が最初に存在した殻の結合エネルギーを表す。

この相互作用では、光電子に加えて1つの空孔を持つイオンが作り出される。この空孔は、物質中の自由電子の捕獲や原子殻内の電子の再配列により直ちに満たされ、その際に特性 X 線光子を1つ以上放出する。この X 線は、発生したすぐ近くで再び光電吸収を起こし、消滅する場合がほとんどである。

光電吸収は比較的低いエネルギーの γ 線の相互作用として重要視される。この作用は原子番号 Z が大きい吸収物質で顕著になる。原子当りの光電吸収確率を表す粗い近似式として次式がある。

$$\tau = A \times \frac{Z^n}{E_\gamma^{3.5}}$$

ここで、 A は定数、 n は対象とする γ 線のエネルギー範囲によって 4-5 の間で変化する。この式から分かるように、光電吸収の確率が原子番号 Z の累乗に比例していることが γ 線の遮蔽に原子番号 Z の大きな物質 (鉛など) を用いる最大の理由である。

1.4.2 コンプトン散乱

入射 γ 線が物質中の電子と散乱し、最初の方向から角度 θ の方向に曲げられてる相互作用をコンプトン散乱という。この作用により、エネルギーの一部を電子に伝達する。全ての角度に散乱することが可能なので、電子に伝えられるエネルギーは 0 から入射 γ 線に近いエネルギーまで変化しうる。放出される電子のエネルギーは、次式で表される。

$$h\nu' = \frac{h\nu}{1 + \frac{h\nu}{m_0c^2}(1 - \cos\theta)}$$

ここで、 m_0c^2 は電子の静止エネルギー (0.511 MeV) である。散乱角 θ が小さい場合には、エネルギーはほとんど伝達されない。 $\theta = \pi$ のような場合でも、最初のエネルギーの一部は常に散乱光子に保存される。散乱 γ 線の角度分布は微分散乱断面積 $d\sigma/d\Omega$ に対するクライン-仁科の式により与えられる。

$$\frac{d\sigma}{d\Omega} = Zr_0^2 \left[\frac{1}{1 + \alpha(1 - \cos\theta)} \right]^2 \left[\frac{1 + \cos^2\theta}{2} \right] \left[1 + \frac{\alpha^2(1 - \cos\theta)^2}{(1 + \cos^2\theta)[1 + \alpha(1 - \cos\theta)]} \right]$$

ここで、 $\alpha \cong h\nu/m_0c^2$ 、 r_0 は古典的電子半径である。 γ 線のエネルギーが高くなると前方散乱が非常に著しくなることが分かる。

1.4.3 電子-陽電子対生成

γ 線のエネルギーが電子の静止エネルギーの 2 倍 (1.02 MeV) 以上になると、 γ 線光子が消失し、電子と陽電子対が生成される相互作用が起きる。電子-陽電子対を生成するのに必要な 1.02 MeV 以上のエネルギーは、全て電子と陽電子に分配される。この相互作用は実際には、入射 γ 線のエネルギーが数 MeV になるまでは反応確率が低いため、この作用の影響は高エネルギーの γ 線に限られる。

1.5 放射線検出の原理

放射線を測定するためには、放射線と物質との相互作用の反応を検出することが必要である。主に電離作用や蛍光作用などの物理現象を検出する方法が用いられる。

1.5.1 電離作用を利用した検出器

放射線には電荷を持ったもの (α 線、 β 線等) と電荷を持っていないもの (γ 線、中性子線等) が存在する。電荷を持った放射線が物質中に入射したとき、入射粒子の電場の影響により、物質中の原子や分子の周りの軌道電子がはぎとられ、自由な電子と電子を失った原子や分子 (陽イオン) とに分離されることがある。この現象を放射線の電離作用という。また、電荷を持たない放射線も物質との相互作用の結果に生じる電子や陽子により電離作用を起こす。これにより発生した電子や陽イオンを検出することで放射線を測定することができる。

この反応を利用した検出器には次のようなものがある。

電離箱

電離箱は最も単純な放射線測定器であり、動作が簡単であることや安定していることから広く利用されている。図 1.5 のように陰極と陽極の間の空間に不活性ガスが封入してあり、そこに放射線が入射することでイオン対 (電子と陽イオン) が生じる。電子は陽極に陽イオンは陰極にそれぞれ向かっていき、電気信号として検出される。単純な構造であるが、電離作用を利用した放射線検出器の基本となるものである。

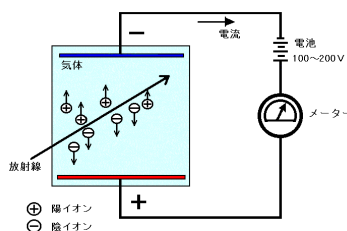


図 1.5: 電離箱の原理 [6]

比例計数管

比例計数管は前述の電離箱において、両電極間の電圧差を一定値以上にし、更に電極間の空間を不活性ガスやメタンガスで満たした構造をしている。この場合、入射した放射線により生成されたイオン対は電極に向かって運動する間に、電場により十分なエネルギーを得てガス分子を電離する。この状態でイオン対は

次々と増幅し、集電極に向かう。このような現象をガス増幅という。印加電圧が適当な場合、ガス増幅率はほぼ一定となる。このため、放射線の入射により生成された一次イオン対の数と最終的に発生するイオン対の数との間には比例関係ができる。つまり、入射放射線のエネルギーとパルス波高が比例した大きな信号が得られる。

ガイガー・ミュラー計数管

前述の比例計数管において両極間の電圧差を更に上げていくと電子なだれが集電極全体で起こり、一次イオン対の数に関係なく一様な大きなパルスがでる。このような使い方をしたものがガイガー・ミュラー計数管である。出力パルスは一次イオン対の数に依存しないため、エネルギーの測定はできず、入射した放射線数を数えることしかできないが、大きな出力パルスの信号が得られる。

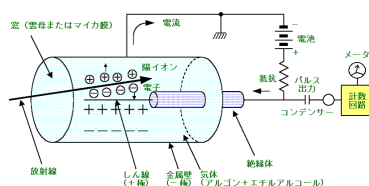


図 1.6: ガイガー・ミュラー管の原理 [6]

半導体検出器

半導体検出器は電離物質として気体の代わりに固体のゲルマニウムまたはシリコンを用いた一種のダイオードである。図 1.7 は p-n 接合型の検出器の構造である。p 層には添加不純物によりホールが生じ、n 層には自由電子が生じており、これに整流方向とは逆向きに電圧を印加するとこれら自由電荷はそれぞれ両電極に引き寄せられ空乏層が生じ電流は流れないが空乏層に電界ができる。この空乏層に放射線が入射し、イオン対（電子とホール）が生成されると、これらは空乏層の電界により逆極性の電極に向かって移動しパルス電流が流れる。

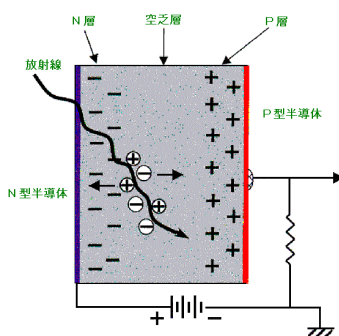


図 1.7: p-n 接合半導体検出器の原理 [6]

1.5.2 蛍光作用を利用した検出器

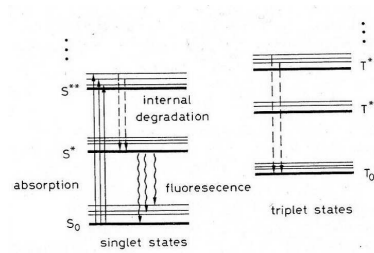


図 1.8: シンチレータと光電子増倍管を組み合わせた例 [21]

物質中に入射した放射線あるいは放射線との相互作用によって発生した荷電粒子により物質中の原子の軌道電子が励起され、その電子が基底状態に戻るときに光としてエネルギーを放出することがある。このような現象を蛍光（ルミネセンス）といい、特に、放射線のエネルギーを吸収すると瞬時に発行する現象をシンチレーションという。図 1.8 はシンチレーションの過程の例を表したものである。荷電粒子により、実線のように基底状態 S_0 から励起状態 S^{**} に軌道電子は遷移する。その後、数 ps で破線のように S^* に落ち、更にその後、数 ns で波線のように基底状態 S_0 に戻る。この時、光としてエネルギーを放出する。また、この時放出される光の総量は放射線のエネルギーに比例しているため、この光を検出することで放射線のエネルギーを測定することができる。

この反応を利用した検出器には次のようなものがある。

シンチレーション検出器

上記のようなシンチレーション現象を効率よく行う物質をシンチレータという。シンチレーション検出器はこのシンチレータからの光を光電子増倍管やアバランシェフォトダイオード (APD) などの光センサーで増幅して電気信号として取り出すものである。

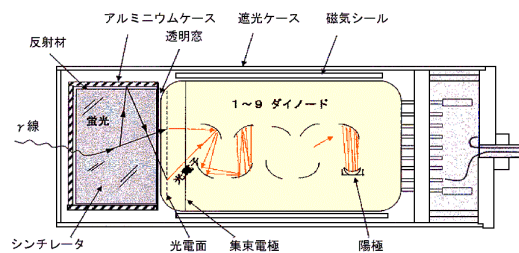


図 1.9: シンチレーション検出器の原理 [6]

図 1.9 はシンチレータからの光を光電子増倍管の光電面で光電効果により電子に変換し、複数のダイノードで更に光電効果を起こし、増幅するものである。一般に、シンチレーション光は非常に微弱なため、このような増幅が必要である。この他の光センサーに APD を使ったシンチレーション検出器もある。APD は p-n 接合の半導体にアバランシェ層というものを付随させたものである。前述の半導体検出器と同様に高い逆電圧を印加することによって空乏層が生じさせ、そこに光が入射することで電子とホールが生成される。その後、電子とホールがそれぞれ n 層と p 層に向かう過程で、アバランシェ層にある格子にぶつかり更にホール電子対生成を起こす。これを繰り返し雪崩増幅し、増倍されるというものである。

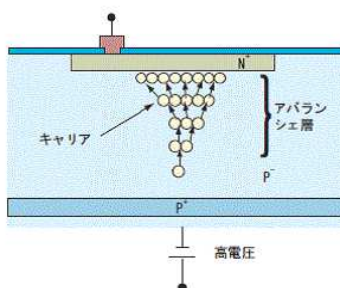


図 1.10: APD の原理 [15]

通常はこれらの反応から得た電気信号を更に電気回路で増幅するが、もともとの信号が大きい場合には少ない増幅ですみ、電気的ノイズが小さくなるという利点がある。

本論文で開発した検出器では、2.2 と 2.3 で述べるように、CsI(Tl) シンチレータと光半導体素子 MPPC を利用している。

1.6 環境放射線の測定方法

環境放射線量の測定方法は、その目的によって異なる。ここでは、空間線量、表面汚染、個人線量の測定方法について述べる。

1.6.1 空間線量の測定

地球上では図 1.11 のように宇宙からの放射線や、地中や建造物中に存在する放射性物質から放出された放射線が飛びかっている。ある特定の場所に着目した時、そこに飛んでくる放射線量を空間線量といい、その場所の放射線量が人体に与える影響の度合を知るために測定される。測定の対象となるのは X 線や γ 線のような比較的透過能力の高い放射線である。空間線量としては周辺線量当量が用いられており、空間線量の測定には周辺線量当量を測定できる測定器を使用する。

空間線量の測定に使用される主な測定器として、電離箱式やシンチレーション式の携帯型のサーベイメータや、ある特定の場所の空間線量を継続的にモニタリングする据付型のモニタリングポストなどがある。

携帯型のサーベイメータを使用して測定したある場所の空間線量を他の場所の空間線量と比較する場合は、測定する高さを統一しておかなければならない。これは、地表付近に放射性物質が広がっている場合、地表ほど放射線量が高くなるためである。

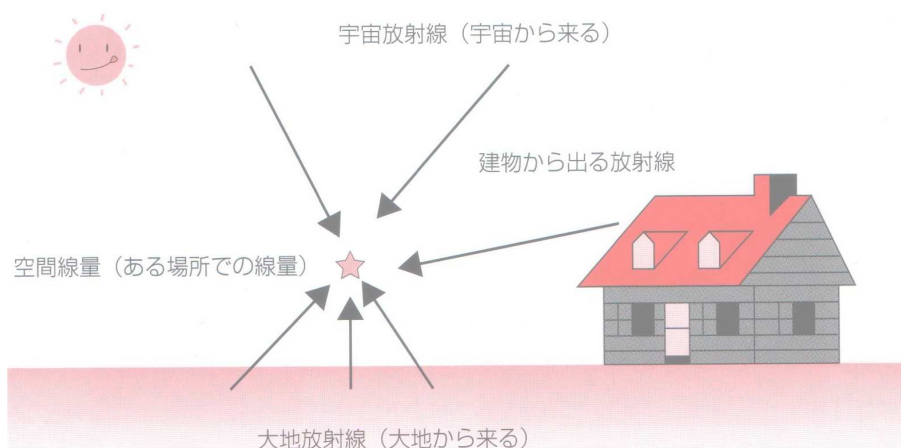


図 1.11: 空間線量 [1]

1.6.2 表面汚染の測定

放射性物質が飛散しているおそれのある地表面や壁面、あるいは衣服に付着しているおそれがある場合は表面汚染の測定を行う。測定の対象となる放射線は空間線量測定と同じ X 線、 γ 線に加え、透過力の弱い α 線、 β 線も対象となる。

表面汚染の測定方法には測定物に測定器をかざして測定を行う直接測定と、測定物の表面を専用のろ紙などで拭き取り、そのろ紙を測定する間接測定がある。直接測定の場合、検出部の大きいサーベイメータを使用する。

1.6.3 個人線量の測定

外部被曝の原因となる放射線は、 β 線、X 線、 γ 線、中性子線である。この内、透過能力の高い γ 線や中性子線は体の深部に影響を与えるが、 β 線やエネルギーの低い X 線は体の表面部分にしか影響を与えない。このため、外部被曝を測定する量としては γ 線、中性子線の場合は 1 cm 線量当量が用いられ、 β 線、X 線の場合は 70 μm 線量当量が用いられる。

1.7 一般的な環境放射線検出器

ここでは、一般的に出回っている環境放射線用の検出器について述べる。

1.7.1 GMサーベイメータ

GMサーベイメータは名前の通り、ガイガーミュラー管（GM管）を用いた放射線検出器である。GM管が β 線や γ 線を検出すると、大きなパルス電流が流れることから、電気回路は容易に作ることができる。そのため、世界中で様々なGMサーベイメータが作られている。ただし、放射線のエネルギーを測定することは不可能である。

γ 線を検出することを目的としたGMサーベイメータは厚い金属やガラスでGM管を覆っており、これにより β 線を遮蔽する構造となっている。 β 線を検出することが目的のGMサーベイメータは β 線が透過できる窓をもっている。 β 線を放出する核種の多くは γ 線も放出している。しかし、大部分の β 線放出核種は γ 線よりも β 線の方を多く放出し、また、一般的なGM管の β 線検出効率は90%を越えるが、 γ 線検出効率は1%に満たない。そのため、表面汚染の測定のように放射性物質に近い位置で測定する場合は β 線を検出した方が高感度で検出が可能である。



図 1.12: GMサーベイメータ [16]

1.7.2 電離箱サーベイメータ

電離箱サーベイメータは電離箱を利用した放射線検出器である。線量測定には最も原理に忠実な検出器で、精度と安定性の面では優れている。ただし、感度は高くなく、エネルギーの測定にも不向きである。X線や γ 線の校正施設では、線量の基準器として使用されている。これは、動作が安定しており信頼性が高く、 γ 線などのエネルギーに依存して感度が大きく変動することがないためである。

大きな電離箱では非常に広い線量率範囲を測定できるので、特に高線量率が予想される場合には電離箱サーベイメータが利用される。

1.7.3 シンチレーションサーベイメータ

シンチレーションサーベイメータはシンチレータを利用した放射線検出器である。シンチレータはX線や γ 線を検出するとエネルギーに比例したシンチレーション光を発する。 γ 線に対する感度（検出効率）は原子番号が大きいほど高くなるが、エネルギーに応じて感度の変わる割合も増加する。例えば、662 keVの



図 1.13: 電離サーベイメータ [16]

γ 線を放出する ^{137}Cs と、1173 keVと1332 keVの γ 線を放出する ^{60}Co では、感度が5割程度異なる。このため、測定物に含まれる放射性核種が不明の場合や、複数存在する場合は測定値が大きくズレる可能性がある。これを防ぐために、多くのシンチレーションサーベイメータにはエネルギーを補償するシステムが搭載されており、この問題を解決している。図 1.14 はエネルギー補償をした場合としていない場合のNaI(Tl)シンチレータの応答関数である。

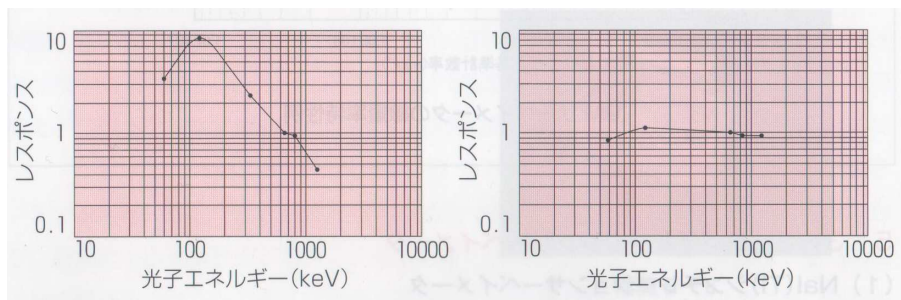


図 1.14: 左 : エネルギー補償無し、右 : エネルギー補償有り [1]

また、 γ 線測定用のシンチレーションサーベイメータはエネルギーに比例した波高値を持つパルス電圧を出力するため、MCA(マルチチャンネルアナライザ)を介すことにより γ 線のエネルギースペクトルを取得することも可能である。

一般的に γ 線測定用のシンチレーションサーベイメータにはNaI(Tl)シンチレータを用いたものが利用される。通常、この検出器が使用できる線量率の上限は数 $10 \mu\text{Sv/h}$ である。

一方、 β 線の検出にはプラスチックシンチレータが用いられ、 α 線の検出にはZnS(Ag)シンチレータが用いられる。プラスチックシンチレータは大面積化が容易なため、 β 線の表面汚染の測定に適しており、国内の原子力発電所等で全身の体表面汚染モニタに広く利用されている。ZnS(Ag)シンチレータは白色の粉末で、 α 線を検出すると肉眼でも確認できるほど明るく発光する。大面積のプラスチックシンチレータに



図 1.15: NaI(Tl) サーベイメータ [16]

ZnS(Ag) を塗布することにより、 β 線と α 線の表面汚染を同時に測定することが可能である。



図 1.16: プラスチックサーベイメータ [16]

1.7.4 電子式個人線量計

電子式個人線量計は検出器に GM 管または Si 半導体を使用した個人線量計である。個人線量計は放射線作業中に身に付けて使用するもので、電子式のものは作業中に線量を直読することが可能である。また、一定の線量値を超えると警報をならす機能を持つものもある。

GM 管を用いたものは線量率範囲が狭いことや、エネルギー特性が悪いことなどの問題点があるため、今日では Si 半導体を用いたものが主流である。

1.7.5 パッシブ型個人線量計

パッシブ型個人線量計のほとんどは蛍光作用を利用したものである。放射線を検出すると線量計内部のエネルギー状態が変化することによって記録された線量を、外部からの刺激により読み出すものである。刺



図 1.17: 様々な個人線量計 [14]

激の種類によって、OSL 線量計、ガラス線量計などに分類される。

OSL(Optically Stimulated Luminescence) 線量計は、 α -酸化アルミニウムという輝尽性蛍光体が放射線照射後に緑色のレーザー光を当てることにより、発生する青色の蛍光量が照射された放射線量に比例する現象を利用した線量計である。放射線照射後、読み取り装置で直ちに線量を読み出せることや、繰り返し使用することが特徴である。

ガラス線量計は、銀を添加したリン酸塩ガラスが放射線照射後に紫外線を当てるとオレンジ色に発光する現象を利用した線量計である。ガラス表面の僅かな汚れやプレトーズと呼ばれる素子固有の雑音成分があるなどの問題があったが、レーザーパルスを用いたガラス深部での読み取りや時間分析によるプレトーズの除去技術により、現在では最も精度と安定性に優れた個人線量計とされている。



図 1.18: OSL 線量計 [14]



図 1.19: ガラス線量計 [14]

1.7.6 Si/Ge 半導体スペクトロメータ

半導体スペクトロメータはエネルギー分析機能を有した放射線検出器である。 α 線やエネルギーの低い X 線など透過力の弱い放射線については Si 半導体を用いられる。

γ 線のエネルギー分析には Ge 半導体スペクトロメータが最もよく用いられる。Ge 半導体スペクトロメータはエネルギー分解能に優れており、一般的なシンチレーション式のスペクトロメータに用いられる NaI(Tl) シンチレータや、市販されているシンチレータの中では最もエネルギー分解能の高い LaBr₃ シンチレータと比較しても圧倒的に優れている。図 1.20 はそれらのエネルギースペクトルを比較したものである。

しかし、Ge 半導体スペクトロメータは -190 °C 以下に冷却しなければならず、測定装置は高価で一般的に大規模なものになってしまう。装置の冷却には液体窒素がよく用いられていたが、近年では電気冷却型のも

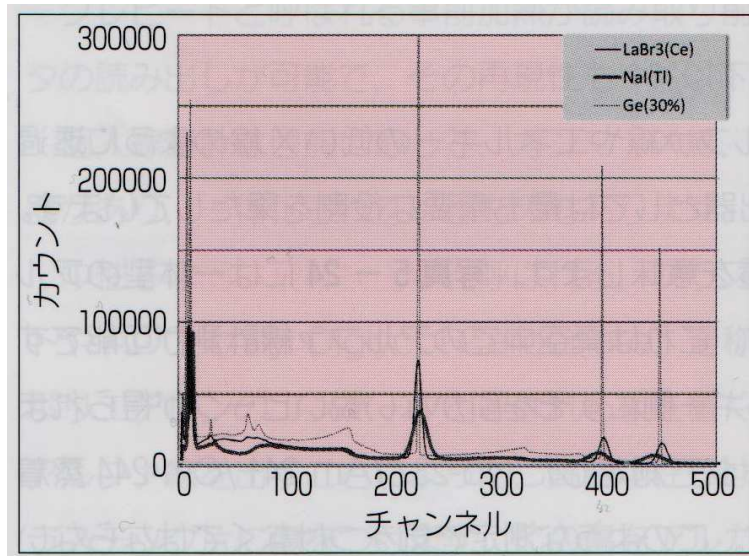


図 1.20: エネルギースペクトルの比較 [1]

のも増えてきている。また、スターリング冷凍器を内蔵することで小型化したポータブル Ge 半導体スペクトロメータも開発されている。



図 1.21: 液体窒素冷却型 Ge 半導体スペクトロメータ [22]



図 1.22: ポータブル Ge 半導体スペクトロメータ [22]

1.7.7 シンチレーションスペクトロメータ

Ge 半導体スペクトロメータの登場以前は、放射線のエネルギー分析はシンチレーションスペクトロメータによって行われていた。特に、NaI(Tl) シンチレーションスペクトロメータは安価であり、 γ 線検出感度が高く、常温でも使えることから広く使用されている。

エネルギー分解能では Ge 半導体スペクトロメータに劣るため、精密なエネルギー分析では使用されなくなりましたが、安価で小型なため、簡易的に核種をサーベイしたり、特定の核種のみを測定対象として空気や食品をモニタする場合には広く用いられている。

1.7.8 コンプトンカメラ

コンプトンカメラは γ 線が検出器の物質中でコンプトン散乱した時に物質に与えたエネルギー、散乱後の γ 線のエネルギー、その散乱角を特定することにより、 γ 線のエネルギーに加え、到来方向までも分析できるようにしたものである。検出部にシンチレータを用いたものと、半導体を用いたものが存在する。

宇宙航空研究開発機構/宇宙科学研究所（JAXA/ISAS）の高橋研究室を中心に開発された超広角コンプトンカメラは、Si と CdTe の半導体撮像素子を用いた Si/CdTe コンプトンカメラで、Si 検出器でコンプトン散乱した γ 線を CdTe 検出器で吸収する。従来の γ 線撮像では、入射方向を特定するためのコリメーターにより視野が限定されていたが、コンプトンカメラの場合はコリメーターが必要ないため、前方の全方向からの γ 線を撮像できる。図 1.23 は飯舘村で撮影された写真とその写真にコンプトンカメラの映像を重ねたものである。



図 1.23: コンプトンカメラで撮像された画像 [13]

第2章 放射線検出器の設計

2.1 開発する検出器の概要

今回、開発する放射線検出器は数 10 keV - 3 MeV 程度の環境 γ 線の空間線量を測定し、 γ 線スペクトルを得ることを目的としたシンチレーション検出器で、光センサに MPPC を使用し、シンチレータに CsI(Tl) を使用する。これらの素子を使用することにより、小型 (10 cm³ 程度) で比較的安価 (10 数万円程度) な γ 線スペクトロメータを製作することが可能である。また、CsI(Tl) の高い発光能力と MPPC の高い量子効率、増幅率により、エネルギー分解能を良くできる可能性がある。その性能を活かすため、検出器自体にスペクトル表示画面を設け、持ち運びながら、その場で放射線核種の同定が可能な検出器を目指して開発を行う。そのため、検出器内部に MPPC を動作させるための高圧電源や、温度によって増幅率が変動する MPPC を制御するための温度センサやソフトウェアを実装する。

図 2.1 に検出器の概念図、図 2.2 に完成した検出器の写真、図 2.3 に開発した検出器で測定したスペクトルを示す。

この章では、検出器に搭載した素子や設計について説明していく。

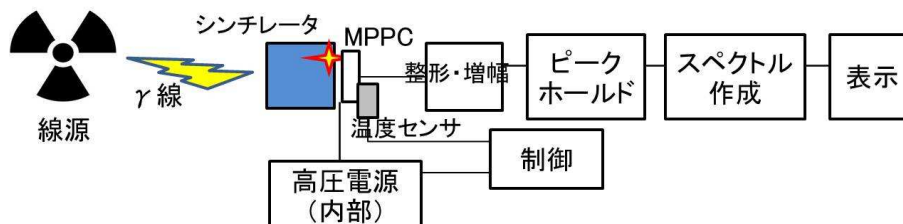


図 2.1: 検出器の概念図



図 2.2: ガンマ線スペクトロメータ [8]

2.2 CsI(Tl) について

2.2.1 シンチレータの比較

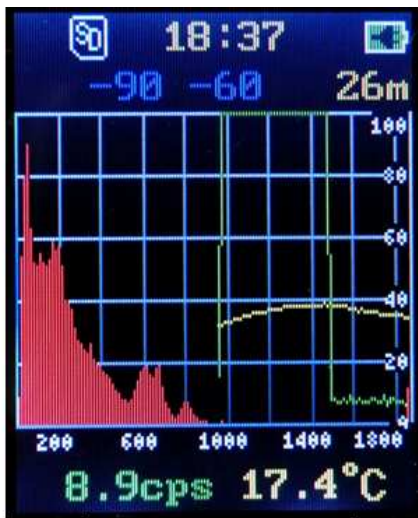
放射線との相互作用により、シンチレーション光という微弱な光を発する物質をシンチレータという。(シンチレータの発光原理は 1 章を参照。) 放射線検出のために用いられるシンチレータには大別すると無機シンチレータと有機シンチレータがあるが、今回は有効原子番号が大きく、 γ 線の測定に適した無機シンチレータを用いる。無機シンチレータには NaI、CsI、BGO などがある。NaI と CsI は純粋な結晶のままでは光量が少ないが、これに Tl または CsI の場合は Na を混ぜた結晶にすると光量は極めて高くなる。これらのシンチレータの特徴を図 2.4 にまとめる。

CsI(Tl) は NaI(Tl) と比べると、密度、発光子数ともに上回っており、潮解性も少ないため、外装無しで使用できる。BGO や GSO に比べると密度は小さいので、反応確率はこれらに劣るが、常温で高い発光能力を持っている。発光子数が多いと統計によるゆらぎが小さくなるので、高いエネルギー分解能を実現できる。

また、CsI(Tl) や NaI(Tl) は BGO や GSO に比べて安価であり、今回のような一般向けの検出器の製作には適している。



カリウム塩



土壌



ウランガラス



マントル

図 2.3: ガンマ線スペクトロメータ表示画面。中央がスペクトル（横軸：エネルギー、縦軸カウント数）、左下の数字は現在のカウンtrate、右下の数字は温度。 [8]

	比重	最高放出波長 (nm)	屈折率	絶対光収率 (光子/MeV)
NaI(Tl) ^{a)}	3.67	415	1.85	38000
CsI(Tl)	4.51	540	1.80	65000
CsI(Na)	4.51	420	1.84	39000
BGO	7.13	480	2.15	8200
GSO	6.71	440	1.80	9000

^{a)} 活性化物質

図 2.4: シンチレータ比較 [15]

2.2.2 CsI(Tl) の特性

上の図にあるように、CsI(Tl) は 1 MeV の放射線が入射すると、約 63000 個の光子を発光する。しかし、温度が低くなるとその発光量は減少する。図 2.5 は温度による、発光子量の変化を表した図である。16.8 °C の時の光子量を 0.98 として規格化されてある。

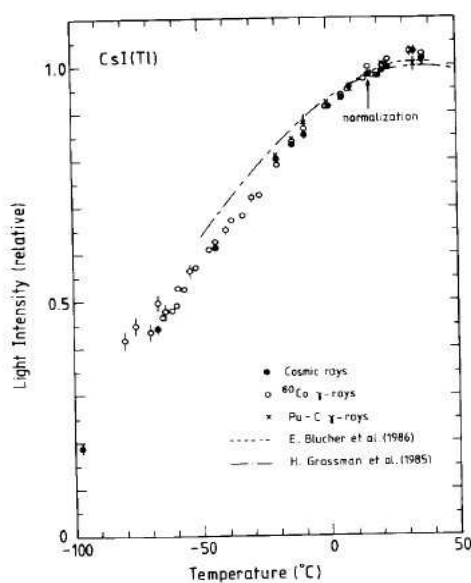


図 2.5: CsI(Tl) の発光量の温度特性 [23]

低温では光子量が減少しているが、一般的に放射線検出器を使用する常温下では光子量が最大であることが分かる。このことから、CsI(Tl) は今回の用途に適していると言える。

ここで、1 cm³ 当りの CsI(Tl) の光電吸収確率を求めておく。

反応確率は以下の式で与えられる。

$$P = 1 - \exp(-\rho d \sigma)$$

ρ :物質の密度

d :物質の厚さ

σ :反応断面積

例えば、1 MeV の放射線が入射した場合の光電吸収確率は、(CsI(Tl) の 1 MeV での光電吸収反応断面積 $\sigma = 4.393 \times 10^{-3} \text{ cm}^2/\text{g}$ 。 [1])

$$P = 1 - \exp(-4.51[\text{g}/\text{cm}^3] \times 1[\text{cm}] \times 4.393 \times 10^{-3}[\text{cm}^2/\text{g}]) = 1.96[\%]$$

となる。図 2.6 に、10 keV から 5 MeV までの放射線と CsI(Tl)[1 cm³] との光電吸収確率を示す。

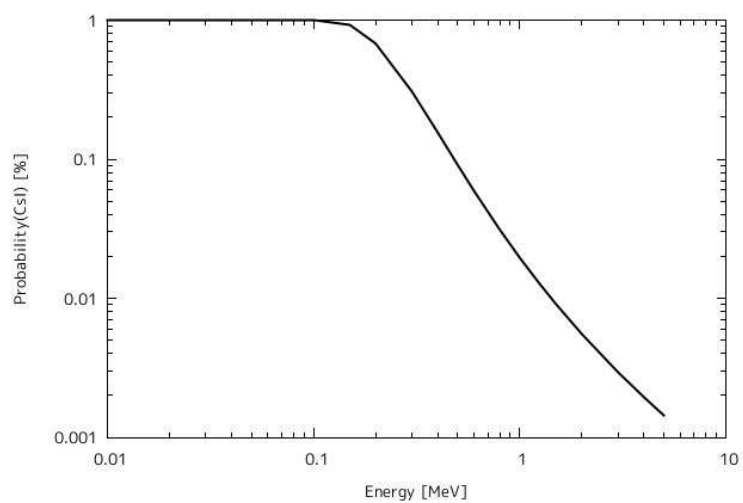


図 2.6: CsI(Tl) の光電吸収確率 [11]

2.3 MPPC(Multi-Pixel Photon Counter) について

2.3.1 光センサの比較

シンチレーション光は微弱なため、光電子増倍管や APD 等で電気信号に変換するとともに増幅しなければならない。今回は浜松ホトニクス社の MPPC(Multi-Pixel Photon Counter) というアレイ型 APD (Si-PM) を使用する。その性能を他の光センサの特徴と比較したものを図 2.7 に示す。

	大きさ	動作電圧	ゲイン	量子効率 (%)
光電子増倍管 (PMT)	10mm~760mm	800V~1800V	$10^5\sim 10^8$	20~30
フォトダイオード (PD)	0.1mm~30mm	~100V	1	~80
アヴァランシェフォトダイオード (APD)	0.04mm~10mm	~400V	1~100	~80
MPPC(multi-pixel photon counter)	1mm~3mm	~80V	$10^5\sim 10^6$	~80

図 2.7: 光センサ性能比較 [15]

光電子増倍管はその構造上ある程度の大きさになってしまい、また、動作させるために数 100 V 以上の電圧が必要である。PD、APD は小型だが、増幅率は光電子増倍管よりかなり低く、APD は動作電圧も 400 V 程度にもなる。これらに比べ、MPPC は大きさは APD 並みに小型であるにも関わらず、光電子増倍管に近い増幅率を持っている。また、動作電圧も 100 V 以下と比較的低い。これらの優れた特徴から MPPC は様々な分野で注目されている。

2.3.2 MPPC の特徴

MPPC は APD をマルチピクセル化したもので、APD に降伏電圧（ガイガーモードで動作させるためのしきい値）以上をかけたガイガーモード状態で使う。

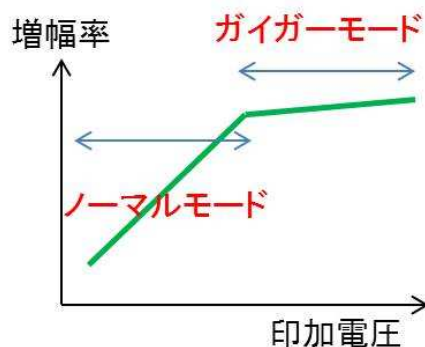


図 2.8: MPPC の動作電圧

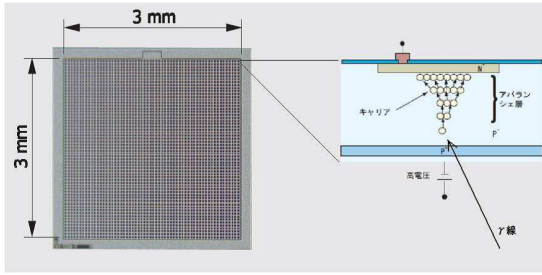


図 2.9: MPPC の概念図 [15]

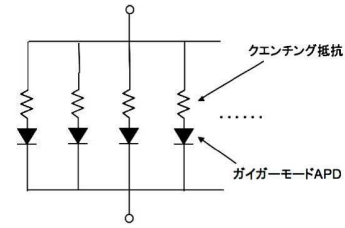


図 2.10: MPPC の等価回路 [15]

図 2.9 のように γ 線が入射すると、光電子が弾きだされ、ガイガーモードの APD で電子雪崩が起きる。また、図 2.10 のように APD にはクエンチング抵抗が直列につながれており、電子雪崩が発生したピクセルに電流が流れることで電圧降下が起こり、電子雪崩は終息するようになっている。

この時、1 ピクセルからの電荷量 Q_{pix} は、1 ピクセルの電気容量 C_{pix} 、印加電圧 V 、APD をガイガーモードで動作するための降伏電圧 V_{bd} とすると次式で表される。

$$Q_{pix} = C_{pix}(V - V_{bd})$$

ガイガーモードの 1 つ 1 つの APD は入ってきたフォトン数によらず一定の値を出力するが、受光面のピクセル数 N を入射光子数 n に対して十分多く分割することで 1 つの APD に複数の光子が入る確率を無視でき、1 つ 1 つのピクセルの出力電荷の和で表される MPPC の出力電荷 Q は入射光子数に比例したものになる。

$$Q = \sum_i^N Q_i = NQ_{pix} \propto n$$

ただし、読み取ることができる光子数はピクセル数によって制限されるので測定できるエネルギーに上限がある。

また、構造上ピクセルの周りには光子を検出できない不感領域があり、ピクセルのサイズが小さいと受光面積に占める不感領域の割合は大きくなる（開口率が小さくなる）。

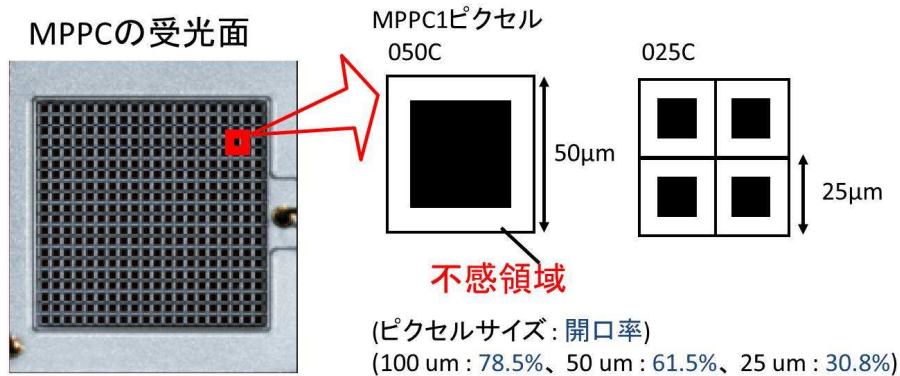


図 2.11: MPPC のピクセルサイズと不感領域の概念図

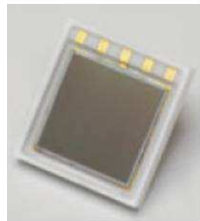
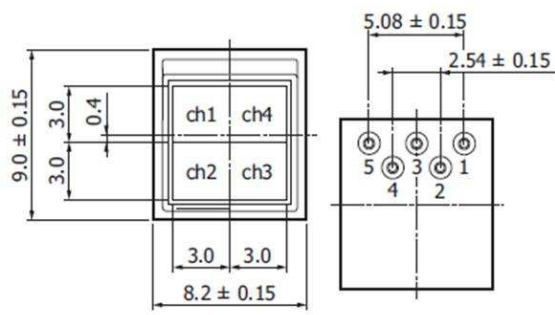
2.3.3 MPPCの種類

MPPCは受光面の大きさ、1ピクセルの大きさやパッケージ方法によって様々な種類がある。図 2.12-3.14 にその一部を示す。



項目	S10362-33		
	-025C	-050C	-100C
有効受光面サイズ	3 × 3		
ピクセル数	14400	3600	900
ピクセルサイズ	25 × 25	50 × 50	100 × 100

図 2.12: MPPC S10362 [10]

項目	S10985		
	-025C	-050C	-100C
チャンネル数	4 (2 × 2)		
有効受光面サイズ/ch	3 × 3		
ピクセル数/ch	14400	3600	900
ピクセルサイズ	25 × 25	50 × 50	100 × 100

図 2.13: MPPC S10985 [10]

現在、浜松ホトニクスから発売されているMPPCはピクセルサイズが $25\ \mu\text{m}^2$ 、 $50\ \mu\text{m}^2$ 、 $100\ \mu\text{m}^2$ のものがある。受光面積はS10362が $3\ \text{mm}^2$ 、S10985が $6\ \text{mm}^2$ 、S10827が $12\ \text{mm}^2$ である。受光面積が $3\ \text{mm}^2$ より大きいものになると、複数の $3\ \text{mm}^2$ 角MPPCを並べることで面積を大きくする構造になっている。本論文では、主に $6\ \text{mm}^2$ 角のS10985を利用した。

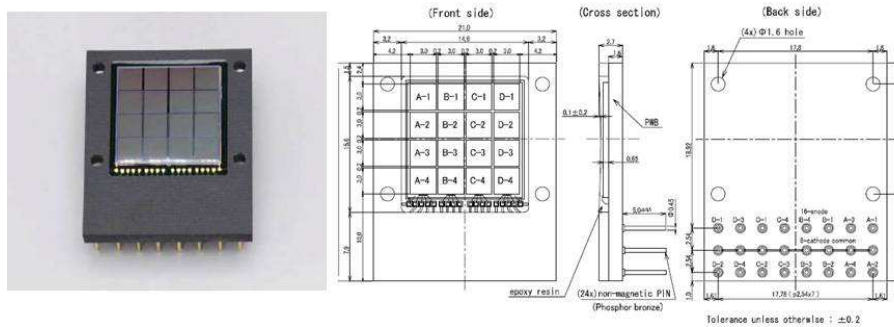


図 2.14: MPPC S10827 [10]

2.4 アナログ回路

ここでは、MPPC からの電荷信号を増幅・整形し、デジタル回路で扱える信号に変換する過程について記述する。

2.4.1 MPPC 接続回路

MPPC に高圧電源をかける回路図は、図 2.15 のようになっている（一部のパラメータは変更して使用する）。これは浜松ホトニクス社の MPPC のデータシートにある標準的な使い方、印加電圧は 70 V 程度で使用する。

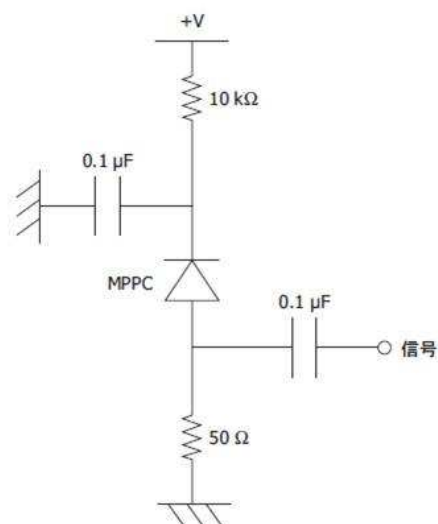


図 2.15: MPPC の接続回路 [10]

ただし、この回路図は MPPC が単体のもの（受光面が 3 mm^2 以下）で、カソード端子とアノード端子が 1 つずつの場合の回路である。受光面が 6 mm^2 などの複数の MPPC を並べてパッケージングしてある

ものは MPPC の個数分、アノード端子があるため、それぞれに MPPC 以降の回路を接続して使用する。

2.4.2 前置増幅回路

MPPC からの電気信号は電荷であり、出力インピーダンスもかなり高い。この回路の後ろに直接、低インピーダンスの回路を接続するとパルスがつぶれ、波形も崩れたものになるなど不都合がある。そのため、高入力インピーダンスの前置増幅回路を MPPC のすぐ後ろに接続し、微少な電荷パルスを積分し、電圧パルスに変換、増幅し低インピーダンスで後ろの回路に出力するのが望ましい。図 2.16 は今回製作する前置

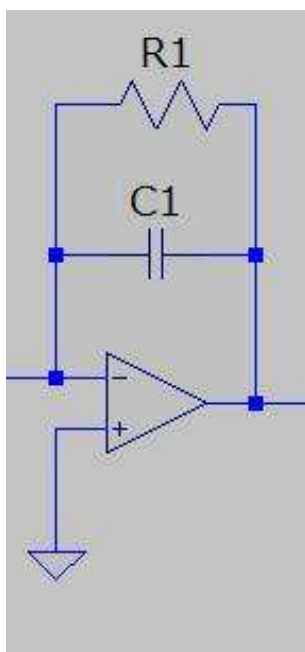


図 2.16: 前置増幅回路の回路図

増幅回路の回路図である。この回路の出力電圧 V_{out} は入力電荷 Q 、コンデンサーの電気容量 C_1 とすると

$$V_{out} = -\frac{Q}{C_1}$$

で表される。また、信号の立ち上がりからの減衰時定数 τ は抵抗 R_1 と電気容量 C_1 の積で決まる。

$$\tau = R_1 \times C_1$$

2.4.3 加算回路

複数の MPPC を並べてパッケージングしてあるタイプのものは、MPPC ごとに電荷信号が出力される。今回の検出器では、どこで MPPC で検出したかを区別する必要は無いので、前置増幅回路を通した後に、

全てのMPPCの信号を合成して使用する。図 2.17 は一般的な加算回路の回路図である。この回路は入力電圧 V_{ina} 、 V_{inb} 、 V_{inc} 、 V_{ind} を

$$V_{out} = -\left(\frac{R_3}{R_{2a}}V_{ina} + \frac{R_3}{R_{2b}}V_{inb} + \frac{R_3}{R_{2c}}V_{inc} + \frac{R_3}{R_{2d}}V_{ind}\right)$$

のように足し合わせて出力する。抵抗の値によって、各入力に重みづけをして合成したり、増幅したりすることも可能であるが、今回の場合は全て同じ抵抗値にする。

$$V_{out} = -(V_{ina} + V_{inb} + V_{inc} + V_{ind})$$

全て 1 倍で合成して反転して出力する。

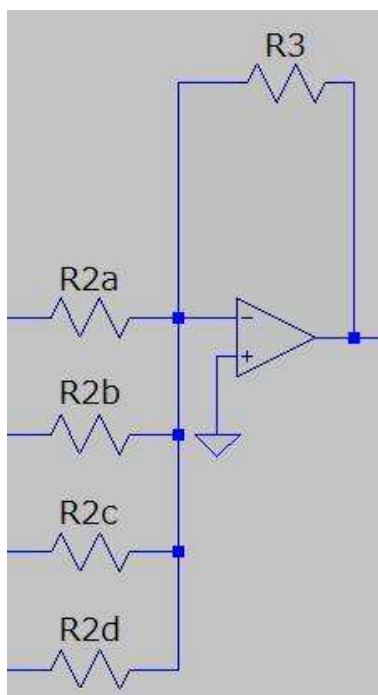


図 2.17: 加算回路の回路図

2.4.4 PZC(Pole-Zero Cancellation) 回路

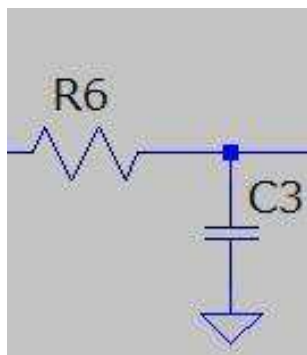


図 2.18: CR 微分回路の回路図

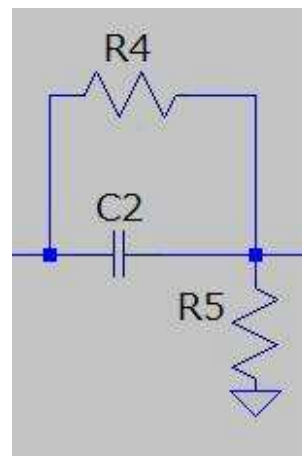


図 2.19: PZC 回路の回路図

前置増幅回路の出力信号は立ち上がった後、指数関数的に減衰するパルスであるため、次のイベントと波形が重なりやすい上、後段の回路での処理もしにくい。そのため、この信号を微分回路を用いて減衰時間を短くするが、図 2.18 のような抵抗とコンデンサを 1 個ずつ組み合わせたのみの CR 微分回路ではアンダーシュートを生じる。このアンダーシュートは前置増幅回路のゆっくりした減衰時定数に従って出力されるので、出力電圧を出力値として読み出す後段の回路にとっては不都合である。そこで、図 2.19 のように CR 微分回路のコンデンサー C_2 に並列に抵抗 R_4 を接続する。こうすることで、 C_2 で微分した波形に R_4 、 R_5 で分圧した波形を足し合わせることで、アンダーシュートを抑えた短いパルスにできる。この時、 C_2 、 R_4 のパラメータは前置増幅回路からの時定数 τ_1 を考慮し

$$\tau_1 = C_2 \times R_4$$

となるように調節すると、この回路からの出力波形の減衰時定数 τ_2 は

$$\tau_2 = \frac{R_4 R_5}{R_4 + R_5} C_2$$

となる。

2.4.5 積分回路

前置増幅回路や PZC 回路の波形は立ち上がりが非常に速く、最大波高値を維持する時間も非常に短い。そこで、この波形を積分回路に通すことで、立ち上がりが緩やかなガウス波形にする。こうすることで後続の ADC がピークを取り逃すことなく AD 変換ができる。

図 2.20 は抵抗とコンデンサを 1 個ずつ組み合わせただけの最も簡単な積分回路である。積分時定数 τ_R はコンデンサ C_3 と抵抗 R_6 の積で決まる。

$$\tau_R = R_6 \times C_3$$

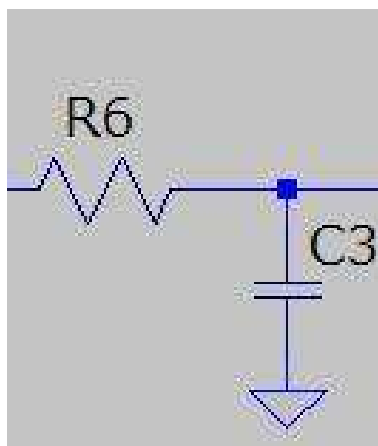


図 2.20: RC 積分回路の回路図

通常、この積分時定数 τ_R は PZC 回路の微分 (減衰) 時定数 τ_2 に合わせて使う。つまり、

$$\frac{R_4 R_5}{R_4 + R_5} C_2 = R_6 \times C_3$$

となるようにパラメータを決定するとよい。

2.4.6 非反転増幅回路

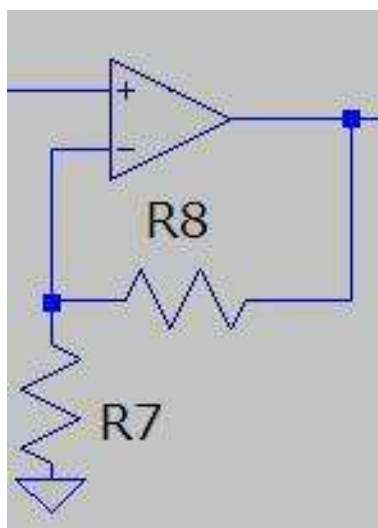


図 2.21: 非反転増幅回路の回路図

図 2.21 の非反転増幅回路でパルス波形の主な増幅を行う。増幅率 A は抵抗 R_7 、 R_8 を使って

$$A = 1 + \frac{R_8}{R_7}$$

と表せる。2つの抵抗を変えるだけで簡単に増幅率を変えられることがこの回路の利点である。また、この回路は前段の回路の出カインピーダンスが後段の回路に影響しないようにするバッファの役割もある。

2.4.7 アナログ回路のまとめ

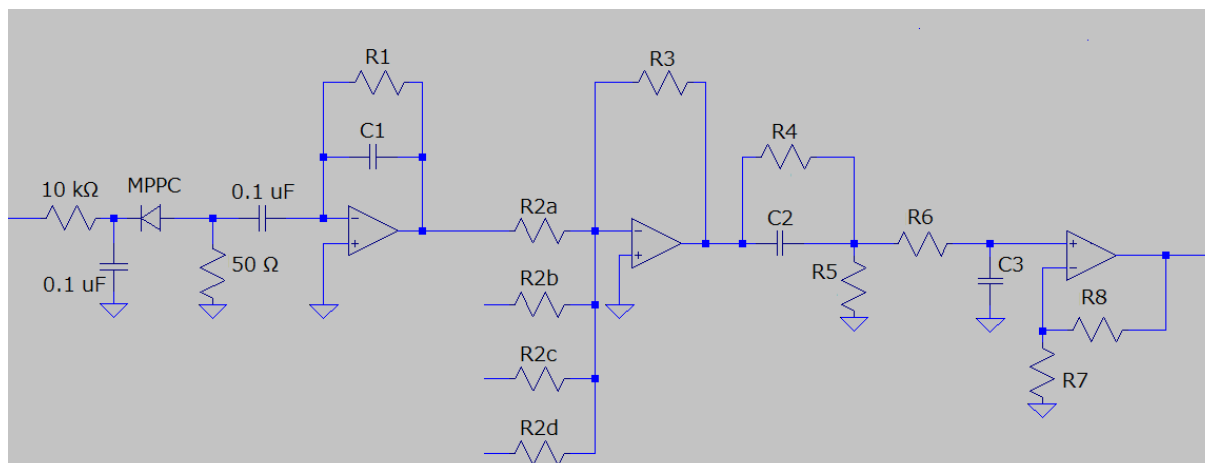


図 2.22: 全体の回路図

以上の回路をまとめると図 2.22 となる。ここで本来、前置増幅回路の時定数は R_1 、 C_1 のみで決定したいが、MPPC の低電圧側のコンデンサ $0.1 \mu\text{F}$ に電荷がたまっていないと MPPC の接地抵抗からも C_1 の電荷が放出されていき、想定している時定数よりも速く減衰するという問題が起きる。MPPC の接地抵抗を 50Ω のままにしておくと、MPPC の低電圧側のコンデンサの放電時定数が $5 \mu\text{s}$ ($0.1 \mu\text{F} \times 50 \Omega$) となっているため、前置増幅回路の時定数はそれより短く決定しなければならない。

今回は、前置増幅回路での電荷電圧変換の利得を大きくするため $R_1 = 100 \text{ k}\Omega$ 、 $C_1 = 1000 \text{ pF}$ ($\tau = 100 \mu\text{s}$) と決定するので、MPPC の低電圧側のコンデンサの放電時定数もそれより大きくなるように接地抵抗を 50Ω から $10 \text{ k}\Omega$ ($\tau = 1 \text{ ms}$) に変更した。逆に接地抵抗をこれより大きくしてしまうと、時定数が長くなり過ぎ、コンデンサが放電しきる前に次のイベントが起きてしまう。この場合には、コンデンサに電荷がたまっている間は低電圧側の電圧が 0 V ではないため、MPPC 両端の電位差が変動してしまい、MPPC の出力が変動するという不具合が生じてしまう。

これらを考慮して、決定した回路パラメータが図 2.23 である。

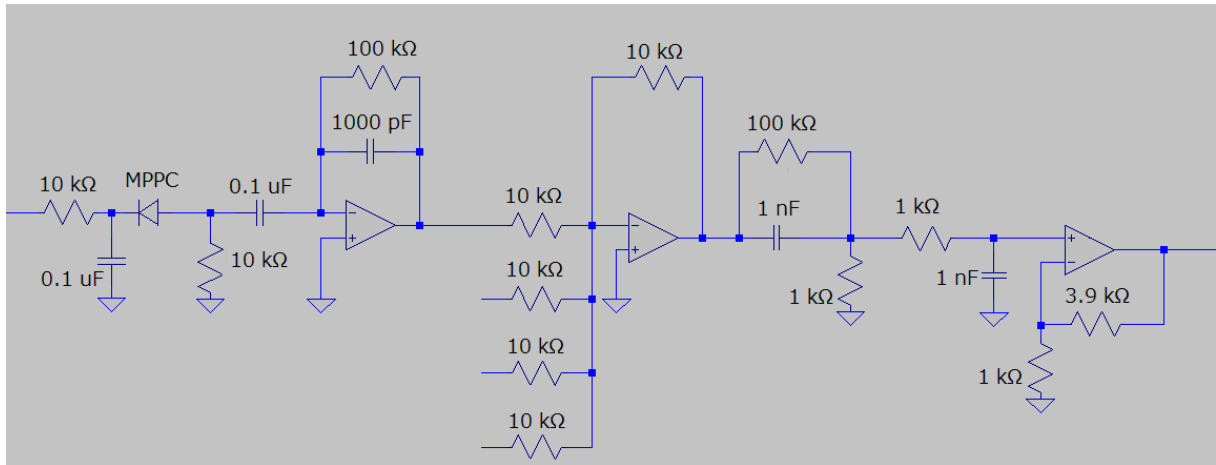


図 2.23: 全体の回路図 (パラメータ決定)

2.5 後続のハードウェアについて

2.4 節の回路以降、ADC(Analog to Digital Converter) を通してデジタル信号に変換した後、波高値分析、スペクトルの作成、ディスプレイに表示などを行う。また、MPPC への印加電圧の供給や温度変化によって電圧を制御する機能なども携帯できるように小型の機器にまとめなければならない。これらの機能と CsI(Tl)、MPPC、アナログ回路も含めたパッケージ化を株式会社ティーエーシー (<http://www.tacinc.jp/>) の協力で行った。パッケージ化する上で、最適化のため図 2.23 の回路のパラメータも一部変更されている。

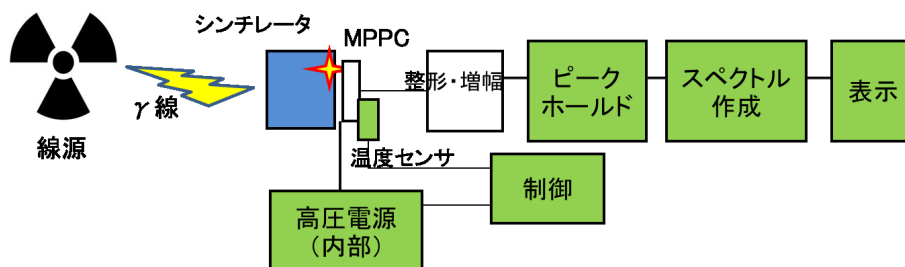


図 2.24: 検出器の概念図：緑が TAC 専門

図 2.25 が今回、株式会社ティーエーシーの協力により完成した γ 線スペクトロメータ「T-GMK2-S」である。小型で安価なスペクトロメータとなっており、検出効率も高くエネルギー分解能も良い。

T-GMK2-S は、単体でエネルギースペクトルを取得し、128 × 160 の画面に表示することが可能で、それと同時に、取得したデータは SD カードに csv ファイルとして保存されていく。保存したデータはパソコン上で Microsoft Excel 等のソフトで閲覧することができる。また、BecquerelMonitor というソフトを使うと、USB ケーブル経由でパソコン上からデータの取得開始、保存等の操作も可能である。



図 2.25: T-GMK2-S [8]

センサー	MPPC (Multi-Pixel Photon Counter) + 1インチ角 CsI(Tl)シンチレータ 温度補償
線量率範囲	0.001 $\mu\text{Sv/h}$ ~ 10 $\mu\text{Sv/h}$ エネルギー補償
エネルギー分解能	7.9%
測定線種	γ 線 50keV ~ 3MeV
ディスプレイ	TFT フルカラー液晶 128×160ドット
スペクトル	1024チャンネル
感度	20000cpm/ $\mu\text{Sv/h}$ Cs137
データ通信	USB 端子
電源	内蔵リチウムポリマー充電電池 または USB から給電
充電時間	約 3 時間
連続動作時間	約 10 時間
外形寸法	130 x 40 x 25mm センサー部寸法 $\phi 45.5 \times 66.5\text{mm}$ 本体の端 (電源スイッチ) からセンサーの先までの長さ 980mm
重量	330g
動作温度範囲	0 ~ 40°C (結露なし)

図 2.26: T-GMK2-S 仕様 [8]

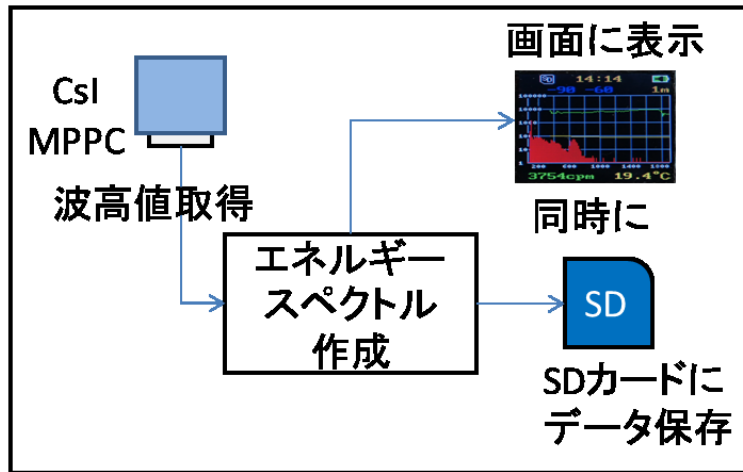


図 2.27: T-GMK2-S のスペクトル処理概念図

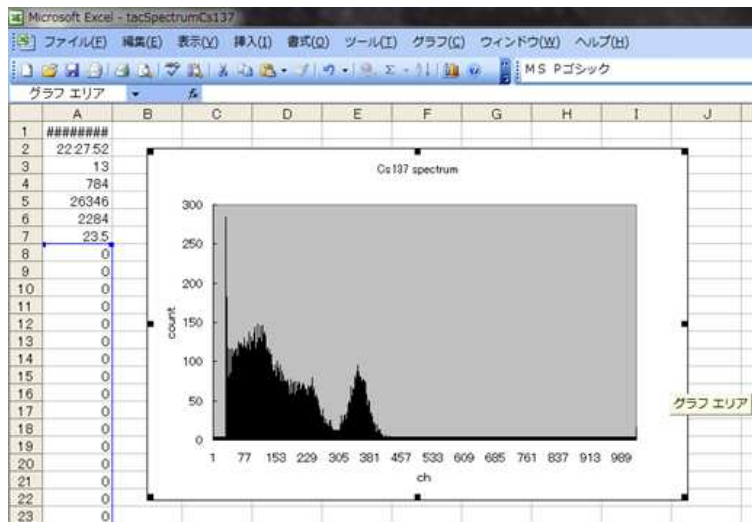


図 2.28: T-GMK2-S で取得したスペクトルを Excel で表示

第3章 実用化に向けた基礎実験

ここでは、図 2.25 の携帯型放射線スペクトロメータを開発および実用化するために行った実験について述べる。

3.1 開発項目

まず、携帯型放射線スペクトロメータを実用化するための開発項目と、中川（私）と株式会社ティーエーシーがそれぞれ担当した項目について述べる。

中川

- アナログ回路部の作成
- MPPC、シンチレータの選定
- 検出器の温度特性の調査
- 周辺線量率換算の計算式の作成

株式会社ティーエーシー

- デジタル回路部の作成
- 電圧制御
- モニター部の作成
- 全系のパッケージ化

MPPC、シンチレータの選定や特性調査、アナログ回路部の作成など、主にセンサー部周辺の開発とエネルギースペクトルから周辺線量率を求める計算式の作成を中川が担当する。一方で、モニターへの表示や電圧の制御などデジタル回路部と中川の開発項目を含めた全系のパッケージ化をティーエーシーが担当する。

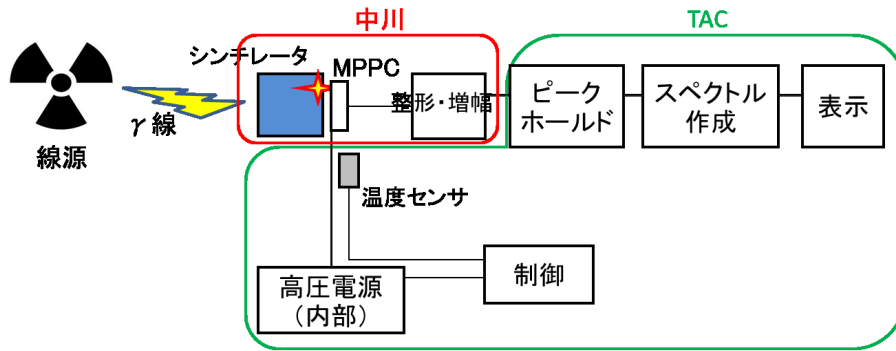


図 3.1: 開発の分担

3.2 基礎実験のセットアップ

CsI(Tl)、MPPC の選定の段階では、図 3.2、3.3 のセットアップで実験を行う。自作回路は図 2.23 のパラメータのもの、MPPC の動作電源は KEITHLEY : 617 PROGRAMMABLE ELECTROMETER、オペアンプの動作電源は MATSUSADA Precision : PLD-18-2、MCA (Multi Channel Analyzer) は AMPTEK : MCA8000A を使用する。

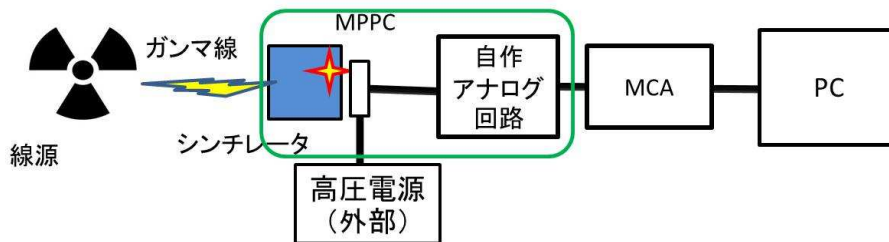


図 3.2: 基礎実験のセットアップ

図 3.4 のように CsI(Tl) には反射材としてゴアテックスを周囲に 2 重に巻き、MPPC との接着には光学グリス (応用光研 : OKEN6262A) を使用して更にシンチレータと MPPC の周囲をテフロンテープで 2-3 重に巻く。

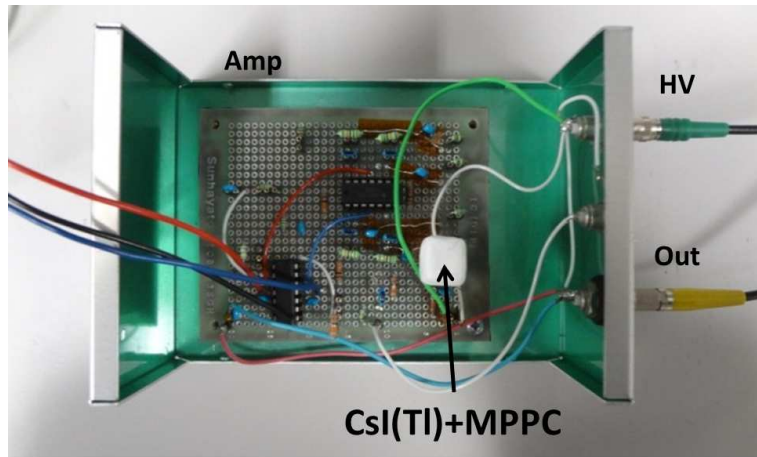


図 3.3: 基礎実験用の回路

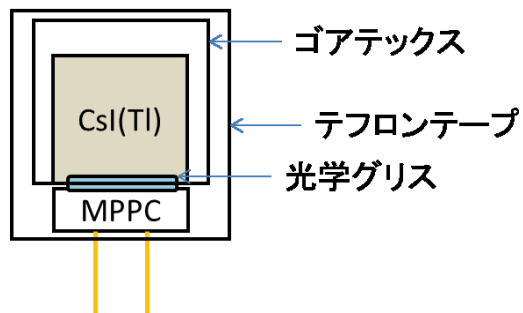


図 3.4: CsI(Tl) と MPPC の接着方法

3.3 MPPCの選定

性能の良い検出器とは、

- シンチレーション光の出力パルス波高が高い
- エネルギー分解能が良い

の2項目から判断される。

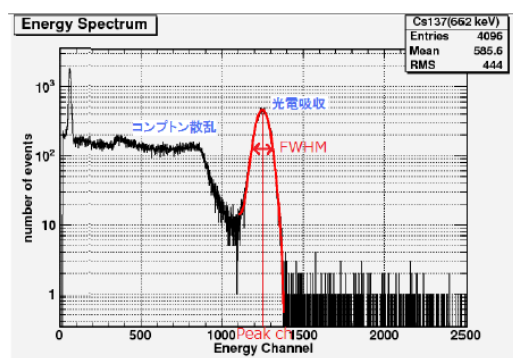


図 3.5: エネルギー分解能の概図

エネルギー分解能は次式で定義される。

$$R \equiv \frac{FWHM}{H_0}$$

FWHM:全エネルギーピークの半値全幅

H_0 :このピークに対応する平均パルス波高値

シンチレーション検出器の FWHM は検出する光子数の揺らぎと電気ノイズで決まる。

$$\Delta FWHM^2 = \Delta Photon^2 + \Delta Noise^2$$

CsI(Tl) の発光子数が多いことと MPPC の内部増幅率が高いことから、光子数の揺らぎに対して電気ノイズは無視できる程小さい。また、シンチレータが発する光子数はポアソン統計になっているので、その揺らぎは次式のようにになる。

$$\Delta Photon = 1/\sqrt{Photon}$$

エネルギー分解能を向上するには、MPPC がシンチレータからの光子をできるだけ損失することなく検出し、多くのピクセルが励起する必要がある。これは高いパルスを得ることにもつながる。

MPPC の励起ピクセル数は次式で表される [9]。

$$N_{fired} = N_{total} \times [1 - \exp(\frac{-N_{photon} \times PDE}{N_{total}})]$$

N_{fired} : 励起ピクセル数

N_{total} : 全ピクセル数

N_{photon} : 入射光子数

PDE : 検出効率

図 3.6 は MPPC の波長と検出効率の関係を 3 種類の MPPC について示したものである。3 種類の MPPC はパッケージ方法と受光面積は同じで、ピクセル数のみ異なったものになっている。型番 S10362-11-100U の下 3 桁の数字部分がピクセルサイズを表しており、-100U が $100\mu\text{m}^2$ 、-050U が $50\mu\text{m}^2$ 、-025U が $25\mu\text{m}^2$ のものである。1 つ 1 つのピクセルサイズが大きく、ピクセル数が少ない MPPC の方が不感領域を小さく（開口率を高く）できるため、検出効率は高くなっている。

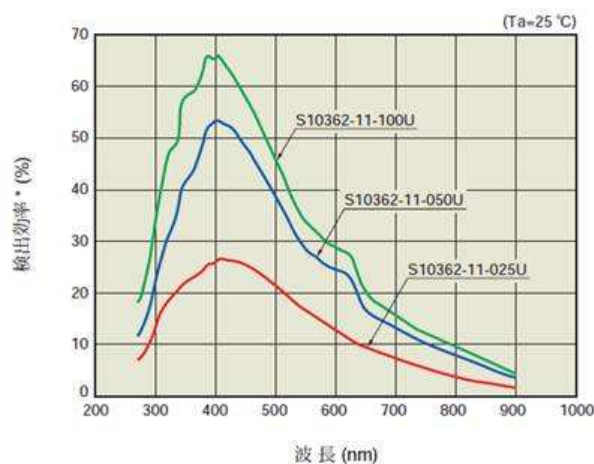


図 3.6: MPPC の検出効率 [9]

一方、ピクセル数が少ない MPPC だと多くの光子が入射した場合、入射光子数に対する励起ピクセル数のリニアリティが悪くなってしまいます。今回の検出器で MPPC と組み合わせる CsI(Tl) シンチレータは 1 MeV 当たり 56000 photon と非常に多くの光子を発生する。図 3.7 は上述の式をもとに、あるエネルギーの γ 線が CsI(Tl) と MPPC の組み合わせに入射した時の、MPPC の励起ピクセル数を表している。左は受光面積 3 mm^2 で、ピクセルサイズ $25\mu\text{m}^2$ 、ピクセル数 14400 個の MPPC、右は受光面積 6 mm^2 で、ピクセルサイズ $25\mu\text{m}^2$ 、ピクセル数 57600 個の MPPC を組み合わせた場合である。ただし、CsI(Tl) の発光時間は考慮しておらず、一瞬で全光子が MPPC に入射すると仮定している。

ピクセル数が少ない MPPC では、高エネルギー側になると励起ピクセル数が飽和していることが見える。また、同じピクセルサイズならば受光面積の大きい MPPC の方が光子を多く検出できる。

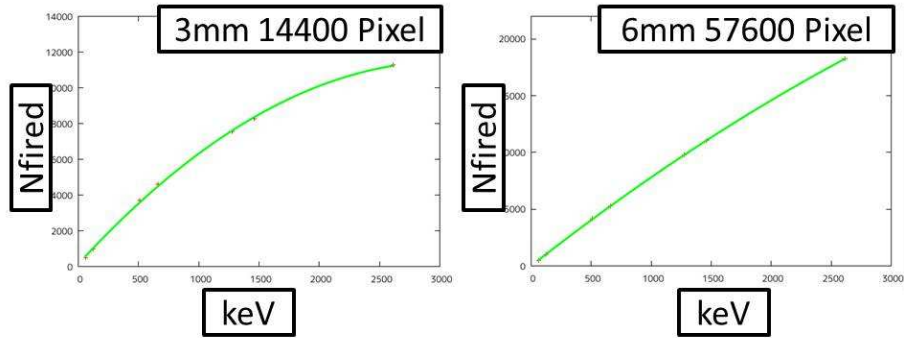


図 3.7: MPPC の検出光子数とエネルギーの対応

図 3.9、3.10 はそれぞれ S10985-025C (受光面積：6 mm²、ピクセルサイズ：25 μm²) と CsI(Tl)1 cm³ の組み合わせで取得したスペクトル、S10362-33-025C (受光面積：3 mm²、ピクセルサイズ：25 μm²) と CsI(Tl)1 cm³ の組み合わせで取得したスペクトルである。参考のため、光電子増倍管 (PMT) と LaBr₃ (市販されているシンチレータで最も分解能が良い) の組み合わせで取得したスペクトルを図 3.8 に示す。

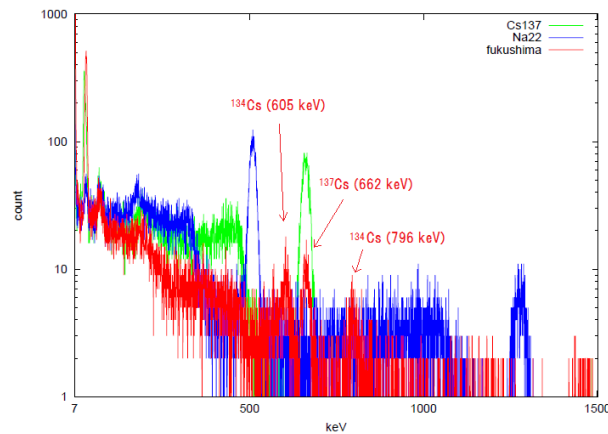


図 3.8: PMT+LaBr₃ の組み合わせで取得した ¹³⁷Cs : 緑、²²Na : 青、汚染土壌のスペクトル : 赤

赤のスペクトルは放射性物質 ¹³⁴Cs、¹³⁷Cs を含んだ汚染土壌で PMT+LaBr₃ の組み合わせでは、エネルギー分解能 3 %(@662 keV) で ¹³⁴Cs の 605 keV ピークと ¹³⁷Cs の 662 keV ピークをはっきりと分離できている。また、MPPC(S10985-025C)+CsI(Tl)1 cm³ の組み合わせでも、エネルギー分解能 8.8 ± 0.2 % で 2 つのピークを見た目で分かるレベルで分離できている。一方、S10362-33-025C+CsI(Tl)1 cm³ の組み合わせではエネルギー分解能が十分で無く、2 つのピークが重なってしまっている。

エネルギー対励起ピクセルの線形性とエネルギー分解能の面から、2012 年にはピクセル数の多い S10985-025C (受光面積：6 mm²、ピクセル数：57600 個、ピクセルサイズ：25 μm²) で開発を行っていた。

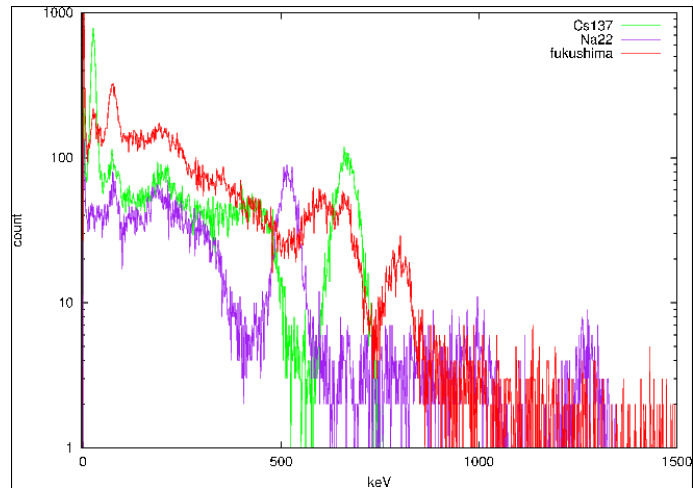


図 3.9: MPPC(S10985-025C)+CsI(Tl)1 cm³ の組み合わせで取得した ¹³⁷Cs : 緑、²²Na : 紫、汚染土壌のスペクトル : 赤

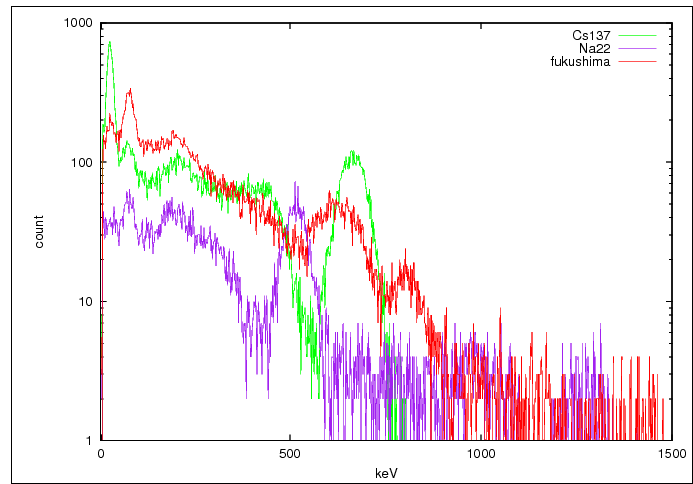


図 3.10: MPPC(S10362-33-025C)+CsI(Tl)1 cm³ の組み合わせで取得した ¹³⁷Cs : 緑、²²Na : 紫、汚染土壌のスペクトル : 赤

ただし、CsI(Tl)の発光時定数は約1050 nsであるのに対し、APDピクセルが励起して復帰するまでの時間は約4 nsである。1 MeVの放射線が入射しても、CsI(Tl)は56000 Photonをおよそ1050 nsかけて発光するので、ある程度のピクセル数があれば著しくリニアリティが崩れるわけではない。そこで、どの程度リニアリティが崩れるかを見比べるために、検出光子数に対する励起ピクセル数の割合

$$\frac{N_{fired}}{N_{photon} \times PDE}$$

図 3.11 で調べた。

56000photons		開口率[%](ピクセルサイズ[um])			
		30.8 (25)	61.5 (50)	78.5 (100)	100
ピクセル数[個]	100	0.007247	0.00363	0.002843	0.002232
	400	0.028989	0.014518	0.011374	0.008929
	900	0.065225	0.032666	0.025591	0.020089
	1600	0.115935	0.058072	0.045496	0.035714
	3600	0.255252	0.1306	0.10236	0.080357
	14400	0.643302	0.445512	0.373853	0.307108
	57600	0.88924	0.794811	0.748418	0.695024
	10000photons		30.8 (25)	61.5 (50)	78.5 (100)
		30.8 (25)	61.5 (50)	78.5 (100)	100
ピクセル数[個]	100	0.040584	0.020325	0.015924	0.0125
	400	0.161995	0.0813	0.063694	0.05
	900	0.341622	0.182154	0.143178	0.112484
	1600	0.510142	0.310182	0.249747	0.198652
	3600	0.724134	0.545155	0.473078	0.401234
	14400	0.919122	0.847068	0.810468	0.767244
	57600	0.978913	0.958482	0.947414	0.933662
	1000photons		30.8 (25)	61.5 (50)	78.5 (100)
		30.8 (25)	61.5 (50)	78.5 (100)	100
ピクセル数[個]	100	0.371309	0.201768	0.158937	0.124958
	400	0.74659	0.575372	0.50443	0.432332
	900	0.874793	0.770348	0.719871	0.662499
	1600	0.926805	0.860869	0.827092	0.786939
	3600	0.966545	0.934676	0.917636	0.896682
	14400	0.991493	0.98311	0.978508	0.97273
	57600	0.997864	0.995741	0.994568	0.993088

図 3.11: MPPC の検出光子数に対する励起ピクセル数の割合

この割合を、複数のMPPCについて56000 photon、10000 photon、1000 photonが入射した場合を算出している。横に開口率(ピクセルサイズ: μm^2)、縦にピクセル数を並べて表示してあり、オレンジ色で塗ってある部分が、現在発売されているMPPCである。(開口率100%は参考のために表示してある。) 開口率が高いほど、検出光子数は多くなるのでエネルギー分解能は向上し、励起ピクセル数の割合が高いほど、エネルギー対励起ピクセル数のリニアリティは保たれる。この図の10000 photon、1000 photonの部分を見ると、ピクセル数: 57600個、ピクセルサイズ: $25 \mu\text{m}^2$ のものが最も励起ピクセル数の割合が多い(図 3.11の緑枠: 0.98)が、開口率が2倍のピクセル数: 57600個、ピクセルサイズ: $50 \mu\text{m}^2$ (0.96)、ピクセル数: 14400個、ピクセルサイズ: $50 \mu\text{m}^2$ (0.85)のものも著しく割合が低いわけではない。また、後

者は受光面積が2012年に利用していたS10985-025Cと同じ6 mm²であり、同様の回路で実験が行えるため、並行して開発することが容易である。

このことから、ピクセル数:14400個、ピクセルサイズ:50 μm²のS10985-050Cで開発を行うこととした(図3.11の赤枠)。

3.4 CsI(Tl) 形状の選定

ここでは、MPPCと組み合わせるCsI(Tl)の形状を決定するために行った実験について述べる。大型のものの方が、γ線に対する検出効率が高いが、MPPCの小さな受光面にシンチレーション光が全て集光されない可能性が高くなる。



図 3.12: 4種類の形状のCsI(Tl)

図3.12にある、4種類のCsI(Tl)1 cm³、3×1×1 cm³、5×1×1 cm³、2.54 cm³(1 inch³)について実際にMPPC(S10985-050C)と組み合わせて、図3.2のセットアップで¹³⁷Csのエネルギースペクトルを取得した。測定条件は温度20℃、印加電圧71Vである。3×1×1 cm³、5×1×1 cm³のCsI(Tl)については、MPPCを1×1面に接着し、¹³⁷Csを反対側の面から照射した。

図??は得られたエネルギースペクトルで、図??は¹³⁷Csの662 keVピークのエネルギー分解能を4種類のCsI(Tl)について、それぞれ算出したものである。

図??から、体積が大きくなるにつれて、662 keVピークの位置が低チャンネル側にシフトしていっていることが分かる。これはγ線がCsI(Tl)で反応して発生するシンチレーション光が、MPPCの受光面に集光されなかったり、受光面に届く前に減衰することが原因だと考えられる。体積が大きくなるほど、シンチレーション光が発生する位置から受光面までの距離の平均値も大きくなるため、このような結果になっている。検出される光子数が減少しているため、体積が大きくなるとエネルギー分解能も悪くなっていることが分かる。1 cm³、3×1×1 cm³ではエネルギー分解能7%程だが、2.54 cm³だと8-9%になっている。

一方、体積が大きくなるとγ線との反応確率は高くなる。2.54 cm³CsI(Tl)が1 MeVのγ線と光電吸収する確率は1 cm³の約16倍である。

$$\frac{P_{2.54}}{P_1} = \frac{1 - \exp(-4.51 \times 2.54 \times 4.393 \times 10^{-3})}{1 - \exp(-4.51 \times 1 \times 4.393 \times 10^{-3})} \times \frac{2.54^2}{1^2} = 16.1$$

反応確率が高いと、より少ない量の放射性物質をより短時間で検出、同定することが可能である。

この結果から、エネルギー分解能を保ちつつ反応確率を高くできるという面から3×1×1 cm³のCsI(Tl)、反応確率を極めて高くできるという面から2.54 cm³のCsI(Tl)を選んで開発を行うこととした。

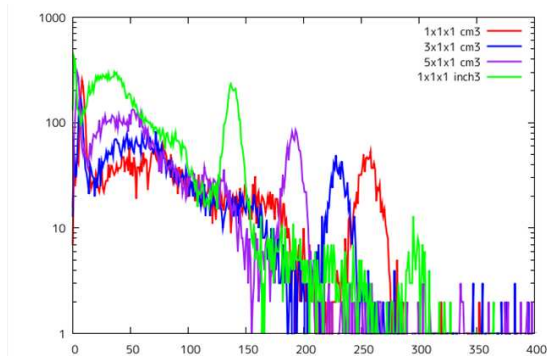


図 3.13: 4 種類の CsI(Tl) の ^{137}Cs のエネルギースペクトル

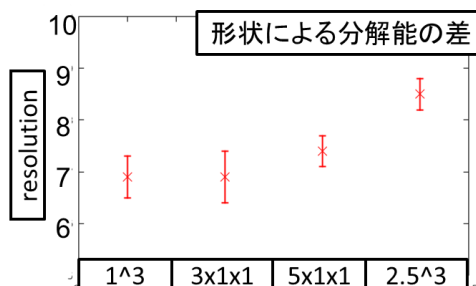


図 3.14: 4 種類の CsI(Tl) の ^{137}Cs の 662 keV ピークのエネルギー分解能

3.5 構築した系でのスペクトル取得

ここまでで選定した MPPC と CsI(Tl) を組み合わせて、図 3.2 のセットアップで実際に様々な放射線源のスペクトルの取得を行った。

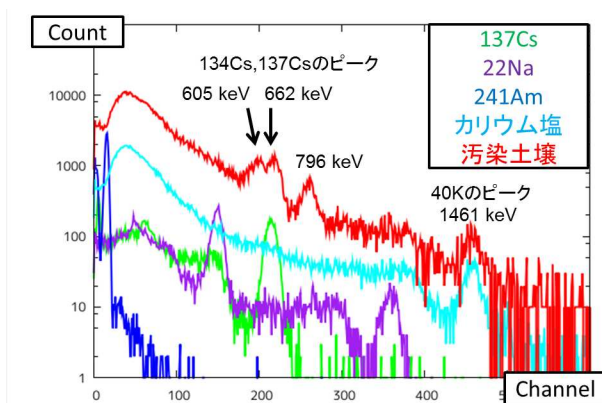


図 3.15: S10985-050C + $3 \times 1 \times 1 \text{ cm}^3$ CsI(Tl) の組み合わせで取得したエネルギースペクトル

図 3.15 は MPPC : S10985-050C と CsI(Tl) : $3 \times 1 \times 1 \text{ cm}^3$ を組み合わせて ^{137}Cs 、 ^{22}Na 、 ^{241}Am 、カリウム塩、汚染土壌のスペクトルを取得したものである。 ^{134}Cs の 605 keV と ^{137}Cs の 662 keV ピークが分離できていることが分かる。簡易スペクトロメータの性能の良し悪しとしては、このピークが分離できるかが 1 つの目安となる。

また、チャンネルとエネルギーの対応を調べたものを図 3.16 に示す。

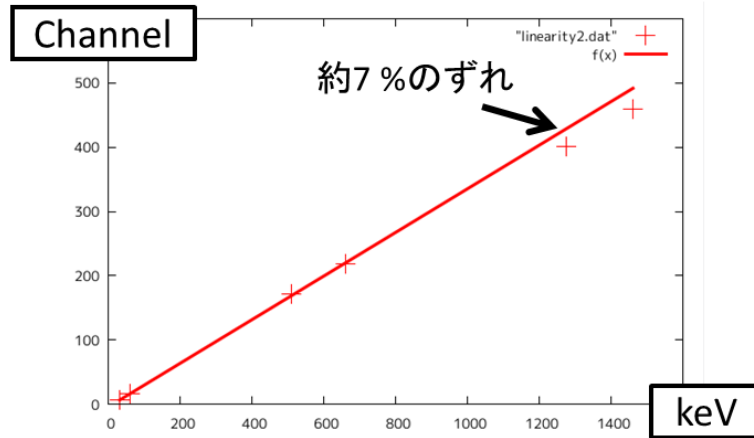


図 3.16: S10985-050C + $3 \times 1 \times 1 \text{ cm}^3 \text{ CsI(Tl)}$ の組み合わせのリニアリティ

この組み合わせでは、 ^{22}Na の 1275 keV ピークがエネルギーに対して約 7 %程下方に見えている。著しくリニアリティが崩れているというわけではないので、チャンネルの目盛をエネルギーに合わせて調節するなどで補正できる範囲である。

3.6 温度-電圧依存性の測定

MPPCは温度や印加電圧によって、増幅率が変動するという性質がある。CsI(Tl)の光量も10%は温度変化するが、MPPCの増幅率の変化に比べると、無視できる。図3.17は電圧一定の状態温度を変化した時の ^{137}Cs のスペクトルである。高温になるにつれて、662 keVピークの位置が低チャンネル側にシフトしている。このままの状態では、測定中に温度変化があると出力も変動してしまい、エネルギーピークの幅が広がってしまい分解能が悪くなってしまふ。そこで、我々の検出器では図3.18のように温度センサーでMPPCの温度を監視し、温度によって印加電圧を制御することで出力を一定に保つようにする。そのため、MPPCの温度-印加電圧特性の調査を行った。

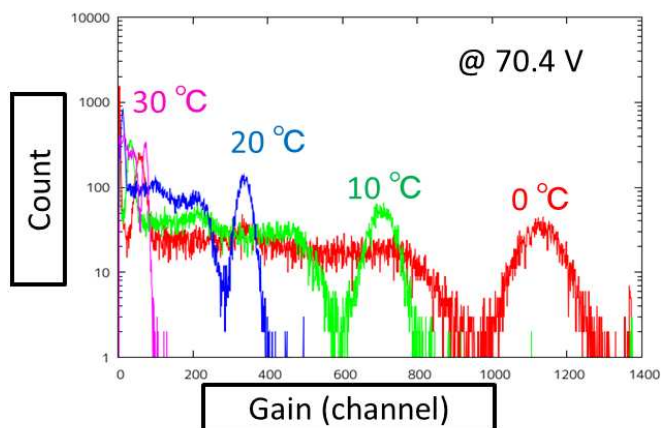


図 3.17: 温度に因る MPPC の出力変化

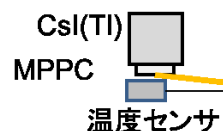


図 3.18: MPPC に接着する温度センサー概念図

図 3.19 のように恒温槽内に ^{137}Cs 線源と MPPC : S10985-050C と CsI(Tl) : $3\times 1\times 1\text{ cm}^3$ を組み合わせて自作回路に設置し、図 3.2 のセットアップと同様に MPPC 用とオペアンプ用の電源は外部のものを使用し、自作回路からの出力を MCA で AD 変換し、パソコンに取り込む。

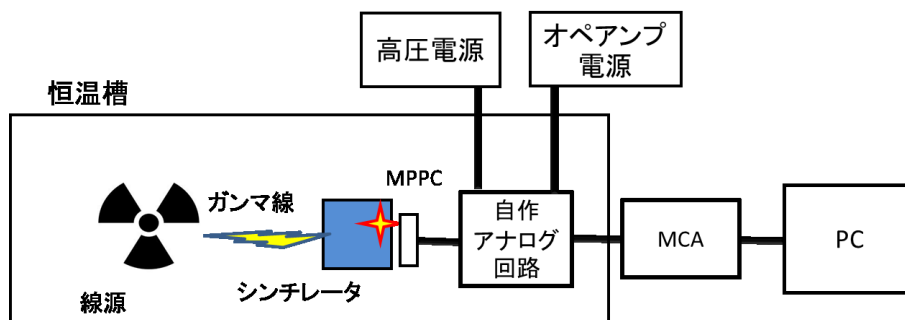


図 3.19: 恒温槽での測定 概念図

恒温槽の温度は-10℃から40℃まで10℃刻みで変更することにし、電圧は出力を見ながら適宜設定して測定した。この実験は当研究室の4年生に協力してもらい、合計で5個のMPPCとCsI(Tl)の組み合わせを測定した。

図3.20は3個体の-10℃、20℃、40℃の印加電圧と出力チャンネルの関係。図3.21は5個体の20℃での温度-出力特性の傾きを示したものである。横軸（印加電圧-基準電圧）が0の値で5個体の出力が一致するように曲線をシフトしてある。（この時の温度は、恒温槽の設定温度であり、温度を設定してから1時間と十分時間を空けて測定を行っているので、実際のMPPCの温度とほぼ一致していると考えられる。）

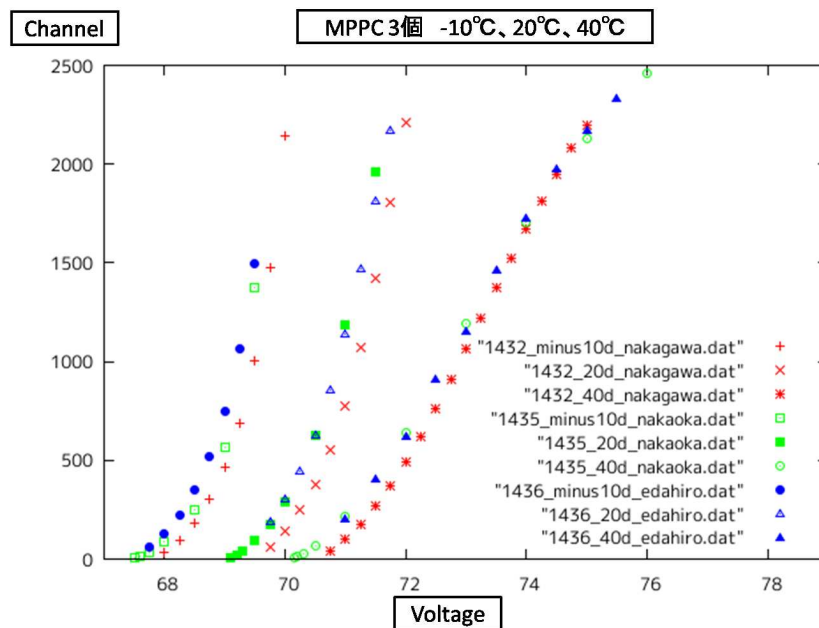


図 3.20: MPPC : S10985-050C と CsI(Tl) : $3 \times 1 \times 1 \text{ cm}^3$ の組み合わせ 3 個体の-10℃、20℃、40℃での電圧-出力特性

これら5個の個体については、温度毎の温度-出力特性の傾きは横軸が 0 ± 0.25 の範囲では10%以内で似ているという結果が得られた。

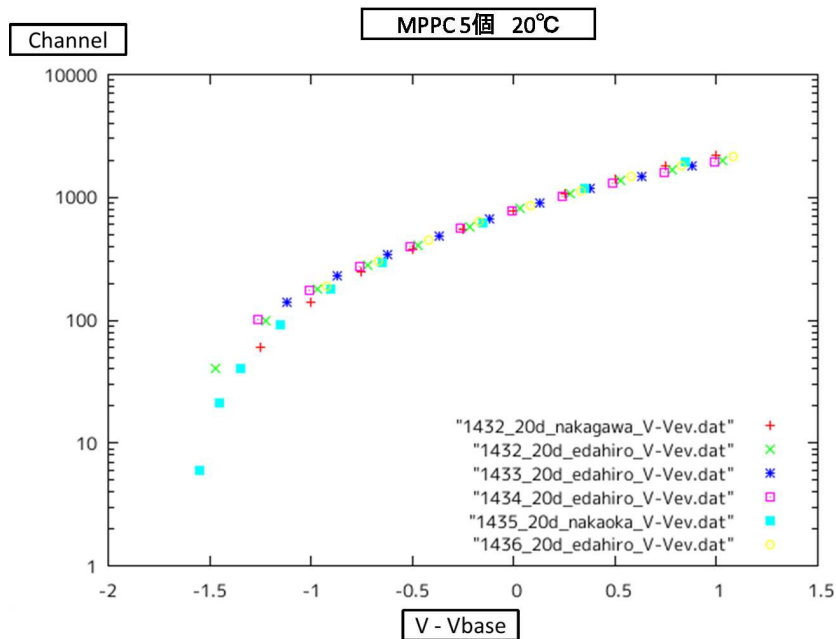


図 3.21: MPPC : S10985-050C と CsI(Tl) : $3 \times 1 \times 1 \text{ cm}^3$ の組み合わせ 5 個体の 20°C での温度-出力特性の傾き

次にティーエーシーの協力により、温度による電圧の制御を除く全ての機能を実装した γ 線スペクトロメータ「T-GMK2-S (CsI(Tl): 2.54 cm^3 版)」で実際に温度-出力特性の調査を行った。図 3.22 のように ^{137}Cs 線源と CsI(Tl)/MPPC からなる検出器部分のみを恒温槽内に入れ、本体部分は恒温槽の外に出して、印加電圧の設定、スペクトルの取得、温度の読み取りを行った。この温度は、MPPC に取り付けられた温度センサーの測定値である。合計で 10 台の T-GMK2-S の測定を行った。

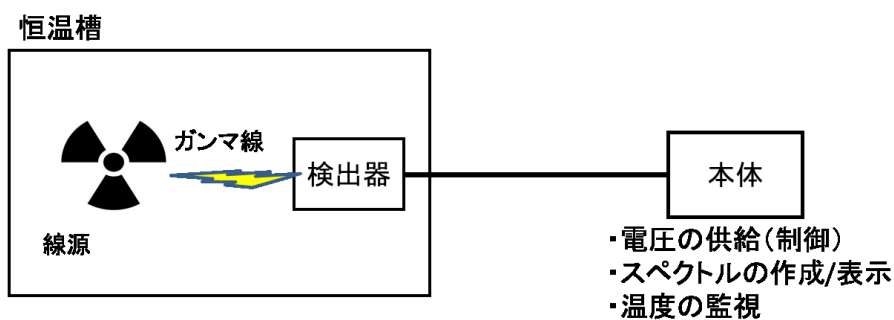


図 3.22: T-GMK2-S の測定図

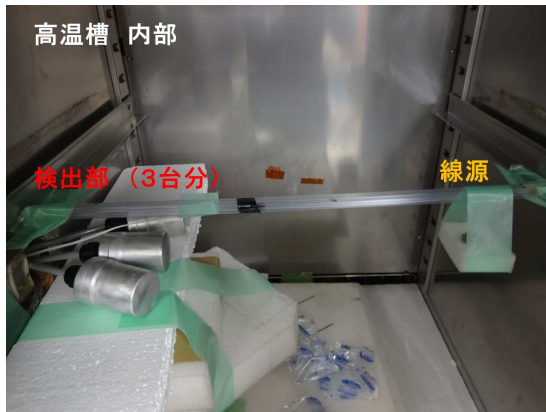


図 3.23: 温度測定 恒温槽内

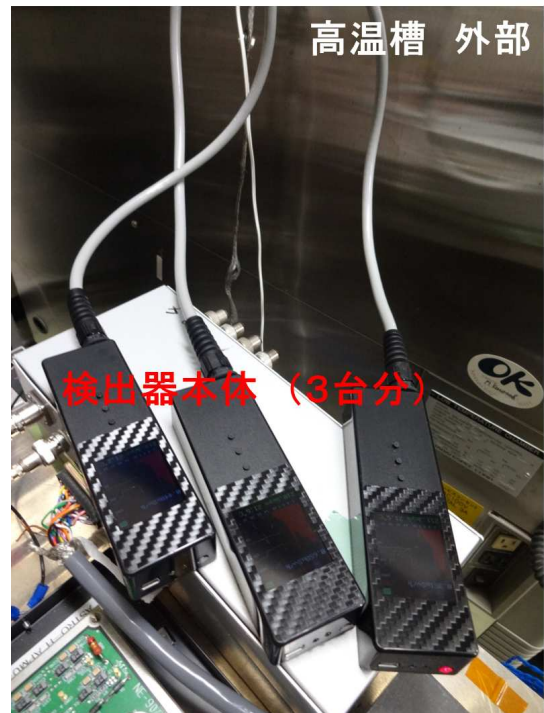


図 3.24: 温度測定 恒温槽外

図 3.25 は 10 台の T-GMK2-S について、 $-20\text{ }^{\circ}\text{C}$ 、 $0\text{ }^{\circ}\text{C}$ 、 $20\text{ }^{\circ}\text{C}$ 、 $40\text{ }^{\circ}\text{C}$ 付近の温度で印加電圧と出力チャンネルの関係を取得したものである。更に、出力が 257 ch で一定になる温度と印加電圧の関係を 10 台全てについて示したものが図 3.26 である。257 ch は、T-GMK2-S が持つ ADC1024 ch で、約 2.5 MeV までを測定レンジとした際に、662 keV に対応する位置である。

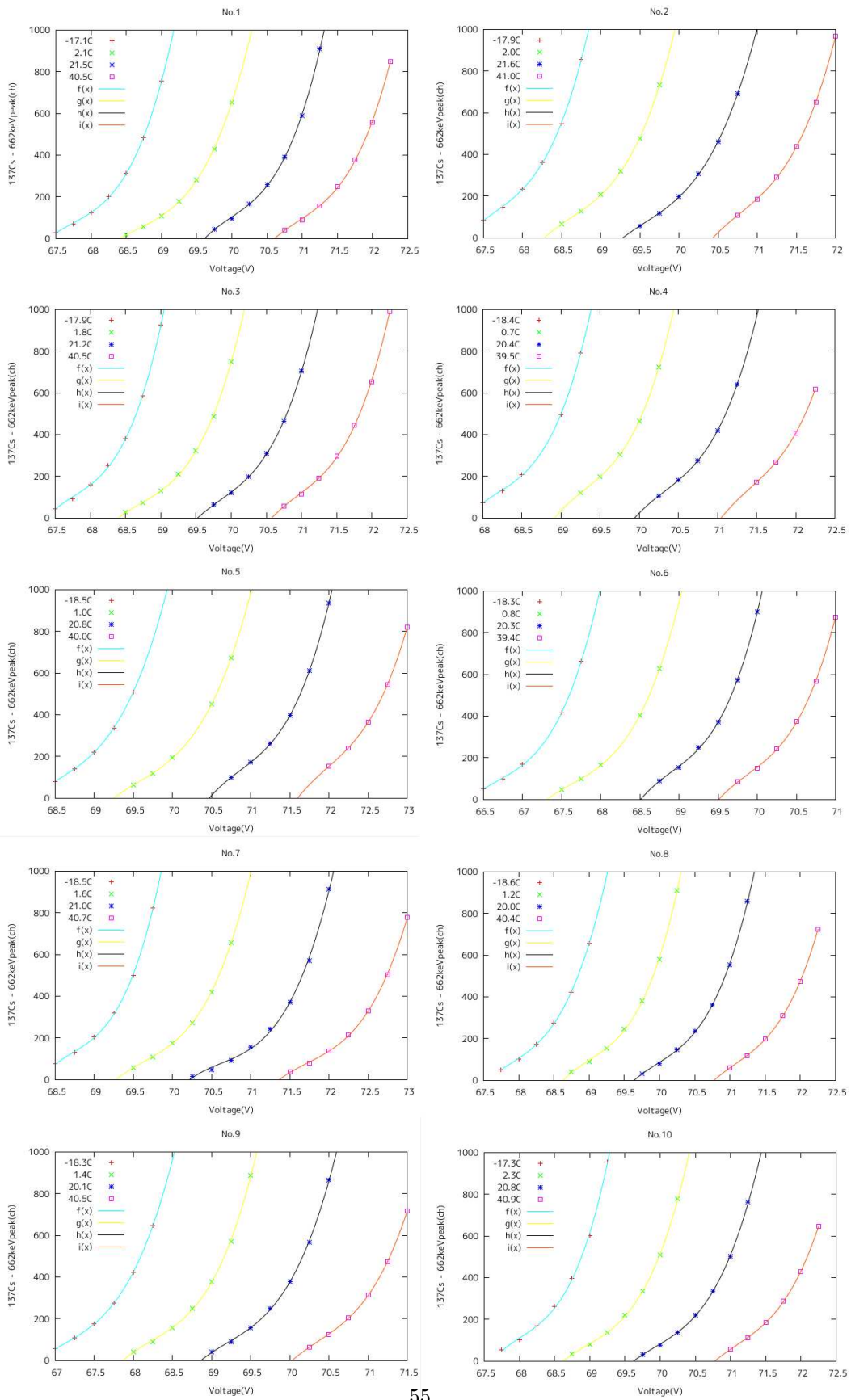


図 3.25: 10 台の印加電圧と出力チャンネルの関係 (-20 °C、0 °C、20 °C、40 °C)

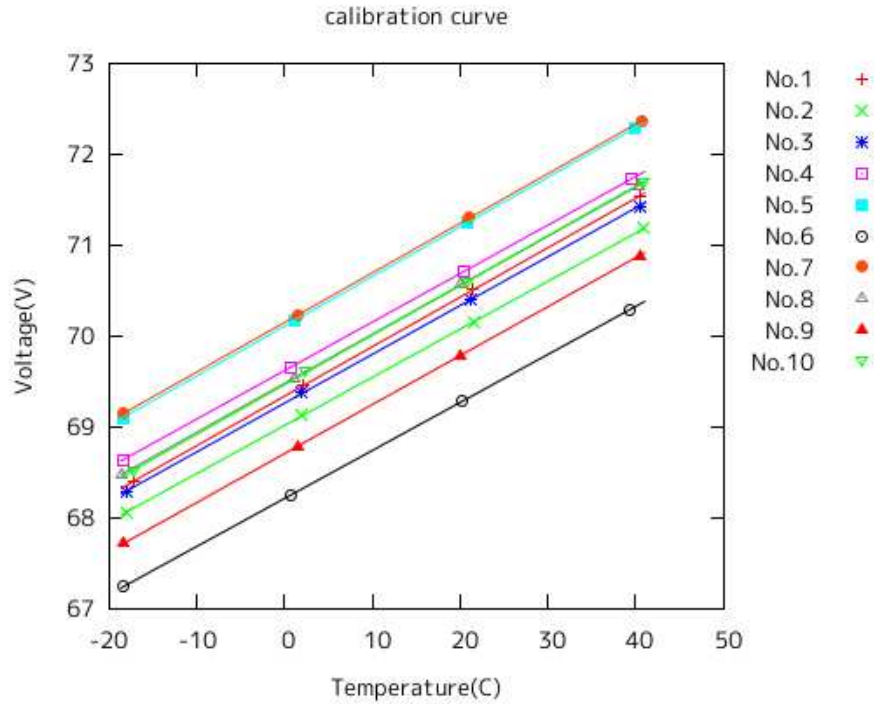


図 3.26: 662 keV の出力が 257 ch で一定になる温度と印加電圧の関係

$y[V] = a \times x[^\circ\text{C}] + b$ としたとき、10 台の温度-印加電圧関係の式は以下の通りである。

no.1 : $y = 0.0544 \times x + 69.3$

no.2 : $y = 0.0529 \times x + 69.0$

no.3 : $y = 0.0537 \times x + 69.3$

no.4 : $y = 0.0533 \times x + 69.6$

no.5 : $y = 0.0546 \times x + 70.1$

no.6 : $y = 0.0528 \times x + 68.2$

no.7 : $y = 0.0546 \times x + 70.1$

no.8 : $y = 0.0539 \times x + 69.5$

no.9 : $y = 0.0539 \times x + 68.7$

no.10 : $y = 0.0546 \times x + 69.5$

オフセットについては、MPPC の出力に大きく影響するレベルの差が見られた。一方、傾きについては、最大のもとの最小のもので差が 3 % 程度であり、仮に 10 個の傾きの平均値を使用して検出器を校正した場合、

$$a_{ave} - a_{min} = 0.539 - 0.528 = 0.0011$$

測定中に温度が 10 °C 変化したとしても電圧のズレは最大でも 0.01V 程度である。662 keV の場合、印加電圧が 0.01V ズレると出力チャンネルは約 4 ch (1.5 %) ズれる。T-GMK2-S は電圧の制御を 0.01 V 刻みで行うので、分解能にはほとんど影響の無いレベルである。この結果から、今後も引き続き詳細な温度依存性

を計測するのは大変なため、製品化に際しては関数の傾きは今回の平均値を使うことにし、オフセットの決定を各検出器について単一温度の測定で行うことにした。

実際に、温度補正を組み込んだ T-GMK2-S で 0°C 、 20°C 、 40°C の 3 温度で ^{137}Cs 線源を照射して、スペクトルを取得した。

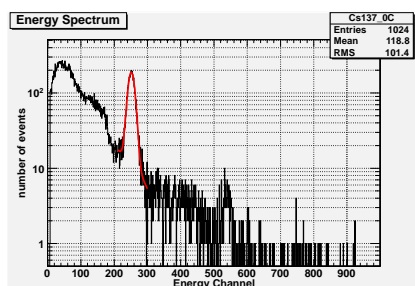


図 3.27: 0°C での ^{137}Cs スペクトル

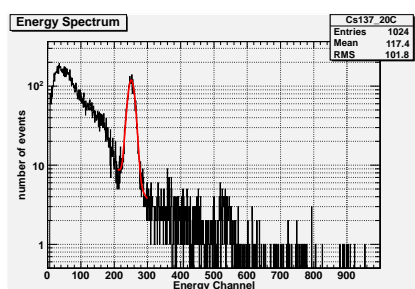


図 3.28: 20°C での ^{137}Cs スペクトル

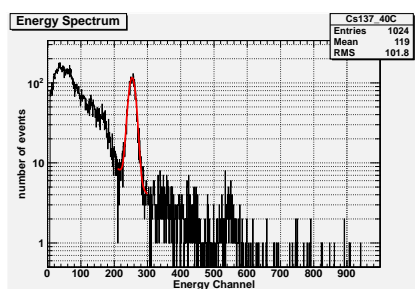


図 3.29: 40°C での ^{137}Cs スペクトル

図 3.27-3.29 がそのスペクトルである。3 温度での ^{137}Cs -662 keV ピークのチャンネルは 0°C : 252 ± 0.2 ch、 20°C : 251 ± 0.2 ch、 40°C : 254 ± 0.2 ch であった。温度によって電圧を制御することにより、MPPC の増幅率を一定に保つことができています。

3.7 μSv 変換式の作成

検出したエネルギースペクトルは、 γ 線と CsI(Tl) の反応を示しており、この結果を人体への影響に換算しなくてはならない。ここで、エネルギースペクトルから周辺線量当量率への換算を 2 つの方法で実施した。

(1 番目)

まず、検出器が捕えた 1 イベントについて、その 1 cm^3 空気における吸収線量を求める。これは、イベントのエネルギーに空気と CsI(Tl) シンチレータの反応確率の比、表面積の比を乗じ、空気の質量で割ることによって求められる。図 3.30 に示すように、CsI(Tl) の周囲を覆っている Al ケースも考慮し、低エネルギー側での検出効率が下がっている。

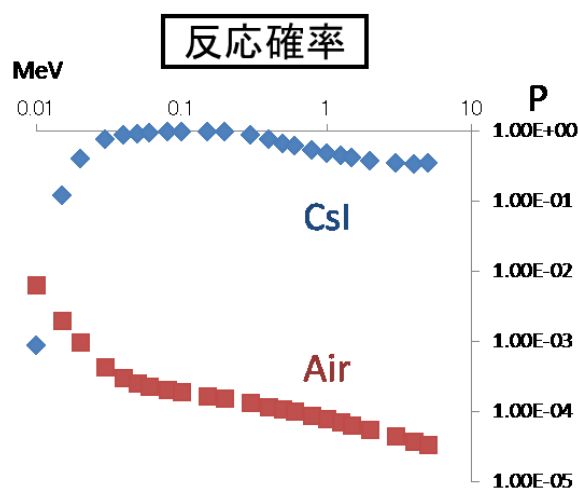


図 3.30: 空気と CsI(Tl) の反応確率

$$a[\text{Gy}] = E[\text{J}] \times \frac{P(\text{Air})}{P(\text{CsI}) \times 1 - P(\text{Al})} \times \frac{S(\text{Air})[\text{cm}^2]}{S(\text{CsI})[\text{cm}^2]} \div M(\text{Air})[\text{kg}]$$

次に、求めた 1 cm^3 空気の吸収線量に図 3.31 の ICRP Pub.74 [Sv/Gy] に示されている 1 cm 線量当量換算係数（場所に関わる 1 cm 線量当量）を乗じて 1 cm 周辺線量当量に変換する。

$$b[\text{Sv}] = a[\text{Gy}] \times \text{ICRPPub.74}[\text{Sv/Gy}]$$

ここまでで求めた 1 cm 周辺線量当量はあるエネルギーの 1 イベントのものなので、全エネルギーの全イベント分を足し合わせる。

$$B[\text{Sv}] = \sum_{E_{all}} b[\text{Sv}] \times n[\text{count}] \quad (3.1)$$

最後に、単位を $\mu\text{Sv/h}$ に合わせ、1 時間当たりの周辺線量当量率とする。

$$C[\mu\text{Sv/h}] = B[\text{Sv}] \times 10^6 \times (3600[\text{s}]/\text{測定時間}[\text{s}])$$

場所にかかわる1cm線量当量	
x線及びγ線のエネルギー MeV	空気カーマから1cm線量当量への換算係数 uSv/h
0.010	0.008
0.015	0.26
0.020	0.61
0.025	0.88
0.030	1.10
0.035	1.30
0.040	1.47
0.045	1.59
0.050	1.67
0.057	1.73
0.060	1.74
0.070	1.75
0.080	1.72
0.090	1.69
0.10	1.65
0.12	1.58
0.124	1.57
0.15	1.49
0.20	1.40
0.30	1.31
0.34	1.29
0.40	1.26
0.50	1.23
0.60	1.21
0.66	1.20
0.78	1.19
0.80	1.19
1.0	1.17
1.25	1.16
1.5	1.15
2.0	1.14
3.0	1.13
4.0	1.12
5.0	1.11
6.0	1.11
8.0	1.11
10	1.10

図 3.31: ICRU Pub.74 場所に関する線量当量換算係数 [19]



図 3.32: T-GMK2-S (左) と TCS-171 (右) の線量率比較実験

以上の計算式で求めた周辺線量当量率を、日立アロカメディカル製のサーベイメータ「TCS-171」によって測定される線量当量率と比較することで、簡易的な評価を行った。図 3.32 のように 2 つの検出器から一定距離離れた位置に放射線源を置き、測定を行った。測定に用いた線源は ^{241}Am 、 ^{57}Co 、 ^{133}Ba 、 ^{22}Na 、 ^{137}Cs 、 ^{60}Co である。

	計算[uSv/h]	TCS-171[uSv/h]	①/②
	①	②	
241Am	0.72	0.28	2.57
57Co	0.844	0.23	3.67
133Ba	7.81	3.7	2.11
22Na	0.767	0.49	1.57
137Cs	1.22	0.75	1.63
60Co	0.423	0.32	1.32

図 3.33: T-GMK2-S と TCS-171 の線量率比較

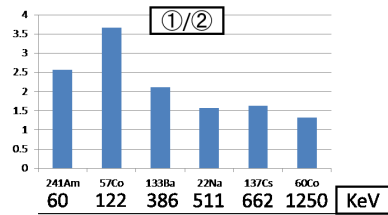


図 3.34: 線量率の比

図 3.33、3.34 がその結果である。上述の計算方法では、「TCS-171」に比べ全体的に高い線量率になっている。これは、CsI(Tl) について計算を行う際に、それぞれのイベントについて光電吸収によるものかコンプトン散乱によるものかを区別せず、すべて光電吸収したイベントとして反応確率の比をとっていることが、原因なのではないかと考えられる。

(2 番目)

次に、反応確率の比をより正確に計算する方法で線量当量率を求める。例として、662 keV の放射線のみを検出した場合を考える。

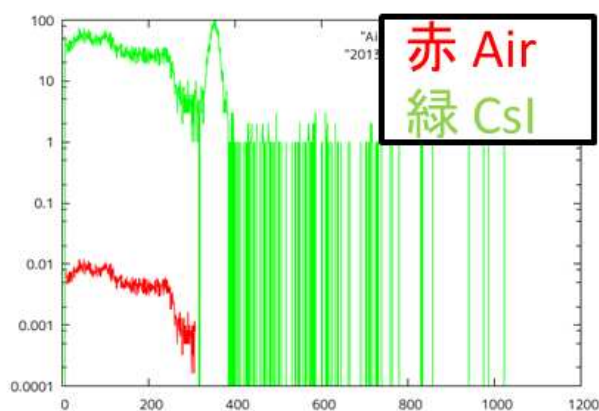


図 3.35: ^{137}Cs を照射した CsI(Tl) のスペクトルとそれを元に作成した空気が 662 keV とのみ反応すると仮定した場合の擬似スペクトル

CsI(Tl) のスペクトル (図 3.35 の緑) から以下の方法で、図 3.35 の赤のような空気 (1 cm^3) の擬似スペクトルを作成する。

1. CsI(Tl) の光電吸収数と光電吸収確率を考慮して、もともとの γ 線の流量を算出。
2. 求めた流量の γ 線が空気 (1 cm^3) を通過した場合の吸収数を算出。(662 keV における空気との反応はほとんどコンプトン散乱。)
3. CsI(Tl) のスペクトルのコンプトン散乱成分に空気の吸収数と CsI(Tl) のコンプトン散乱数の比を乗じて、空気のスペクトル (図 3.35 の赤) とする。

この反応確率の比から求めた周辺線量当量率は、 ^{137}Cs : $0.773\ \mu\text{Sv/h}$ であった。この値は「TCS-171」の測定値 ^{137}Cs : $0.75\ \mu\text{Sv/h}$ とほぼ一致している。

実際には 2 番目の方法のように単一のエネルギーのみを検出するわけではないので、1 番目の方法で求めた値に補正係数をかけて周辺線量当量率を求める。正確な補正係数は、原子力科学研究所の放射線校正施設にて実験を行って決定した。詳細は 3.8.5 節で述べる。

3.8 T-GMK2-S の性能調査

3.8.1 評価実験のセットアップ

2014年2月3、4日の2日間にわたり、東海研究開発センター 原子力科学研究所の放射線校正施設にて T-GMK2-S の性能評価を行った。実験のセットアップを図 3.36 に、校正場の写真を図 3.37、3.38 に示す。

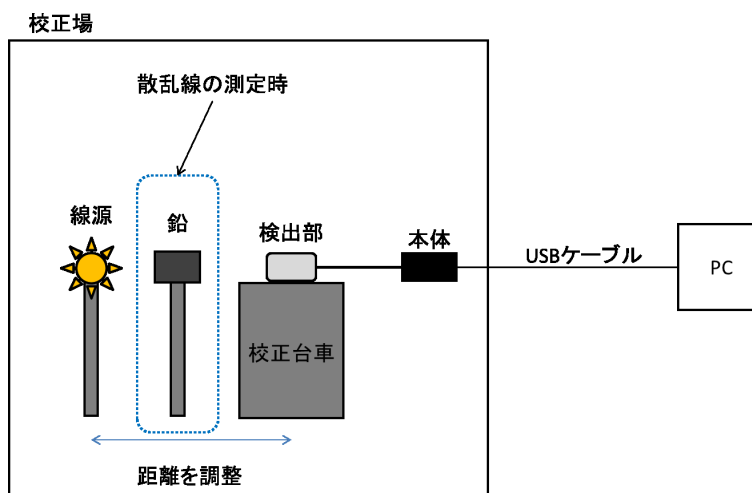


図 3.36: 評価実験のセットアップ

校正場中の校正台車に T-GMK2-S を乗せ、線源からの距離を変化させて周辺線量当量率 $H^*(10)$ を調整する。検出される γ 線は、線源からの直接成分 (Direct) の他に壁や床などで散乱した成分がある。そこで、各測定項目について、図 3.38 のように線源と検出器の間に鉛ブロック (Shadow) を置いて、散乱線のみを検出した場合のスペクトルも測定する。これにより、全方位 (Fore) のスペクトルから散乱線成分 (Shadow) のスペクトルを差し引くことで、直接成分 (Direct) を求めることが可能である。

T-GMK2-S は USB ケーブル経由で、校正場の外に設置したパソコンと接続し、BecquerelMonitor ソフトウェアでスペクトルデータの取得を行う。

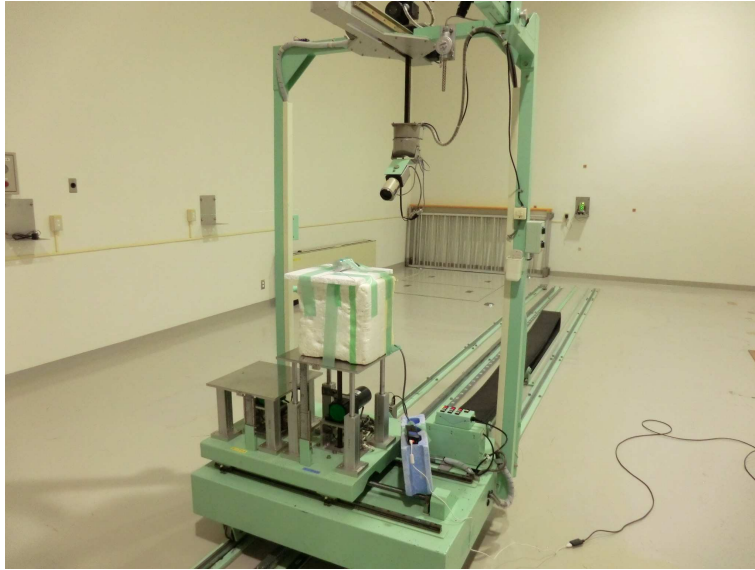


図 3.37: 校正場の写真



図 3.38: 校正場：鉛ブロックを設置した写真

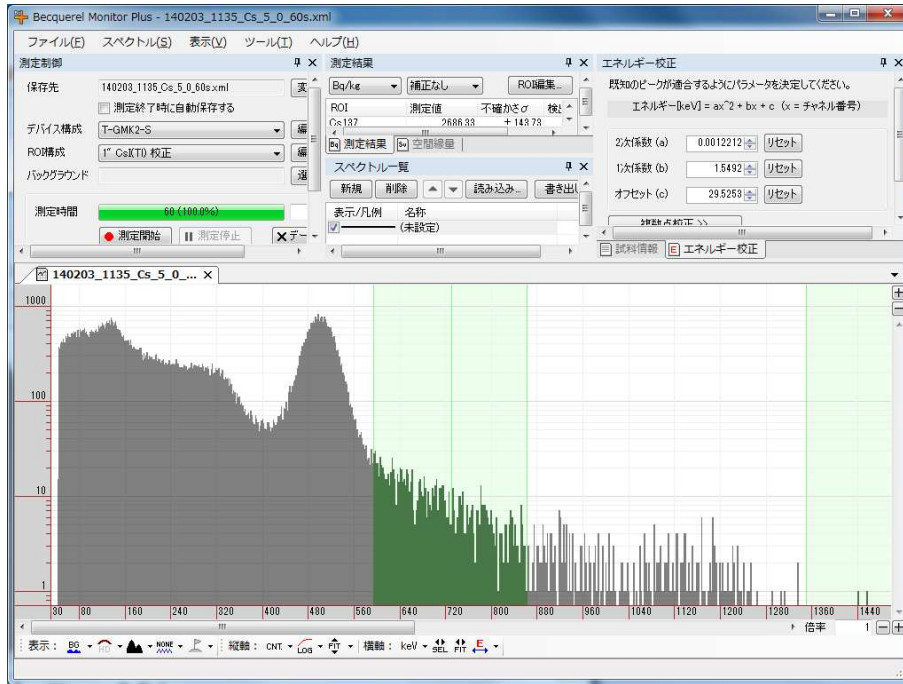


図 3.39: BecquerelMonitor のスペクトル取得画面

3.8.2 実験項目と照射条件

実験項目は以下の3つで、CsI(Tl) : 1 inch³ 版、CsI(Tl) : 3 × 1 × 1 cm³ 版の2種類の検出器について行った。

- 線量率特性の調査

¹³⁷Cs 単体 γ 線源を用いて、1 cm 周辺線量当量率 $H^*(10)$ が 1.08 $\mu\text{Sv/h}$ 、3 $\mu\text{Sv/h}$ 、5 $\mu\text{Sv/h}$ 、10 $\mu\text{Sv/h}$ 、30 $\mu\text{Sv/h}$ となる位置に検出器を設置し、照射を行う。

- 方向特性の調査

¹³⁷Cs 単体 γ 線源を用いて照射を行う。 $H^*(10)$ が 5 $\mu\text{Sv/h}$ となる位置に検出器を設置し、検出器を基準軸に対して水平方向に方位角が 0° から +180° までを 45° ステップで回転させて測定を行い、対称性を確認するために 270° でも測定を行う。同様に垂直方向にも回転させて測定を行う。

- エネルギー特性の調査

¹³⁷Cs 単体 γ 線源を用いて、 $H^*(10)$ が 10 $\mu\text{Sv/h}$ となる位置に検出器を設置し、照射を行う。同様の測定を ⁶⁰Co、²⁴¹Am 単体 γ 線源についても行う。

照射条件は図 3.44 に示す通りである。この表は日本原子力研究開発機構より、提供して頂いた。

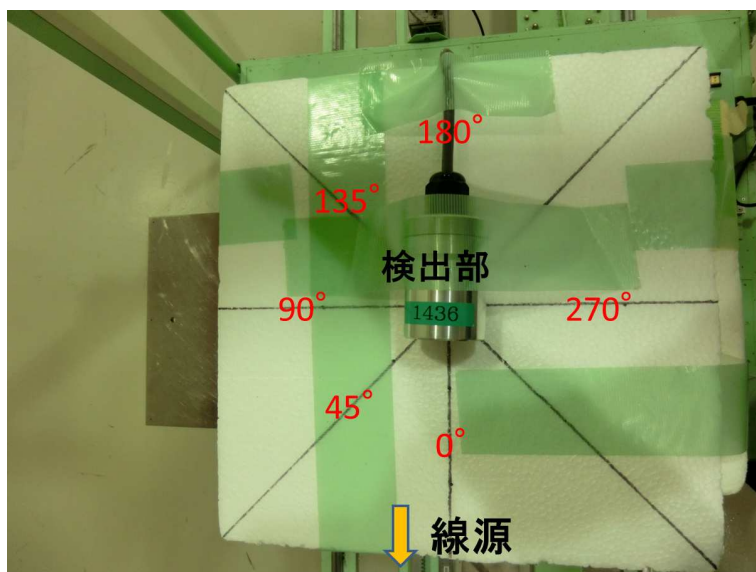


図 3.40: 水平方向の測定セットアップ (1 inch³)

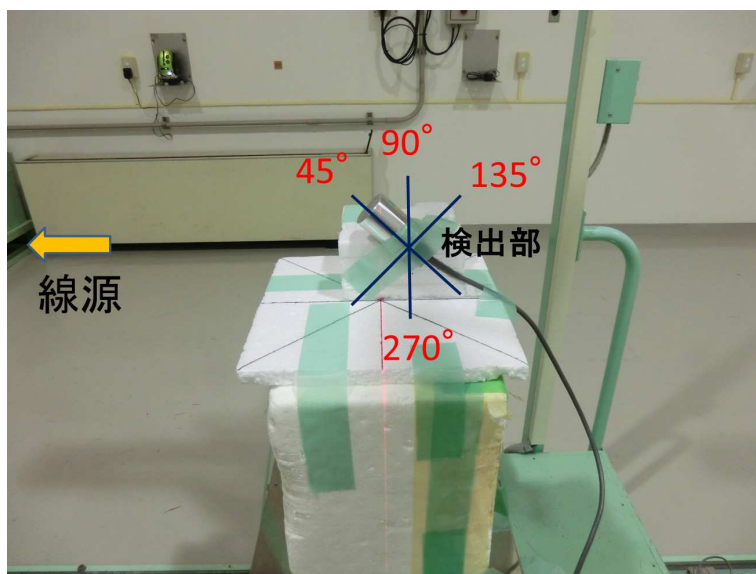


図 3.41: 垂直方向の測定セットアップ (1 inch³)

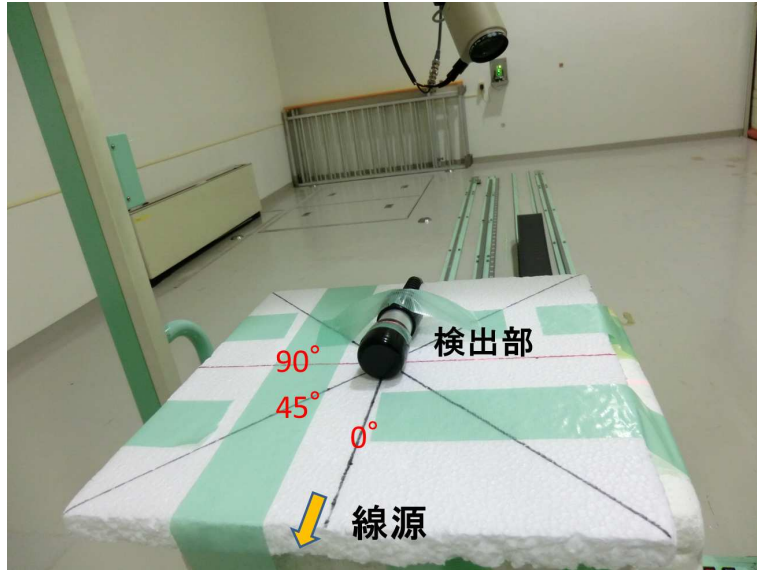


図 3.42: 水平方向の測定セットアップ ($3 \times 1 \times 1 \text{ cm}^3$)

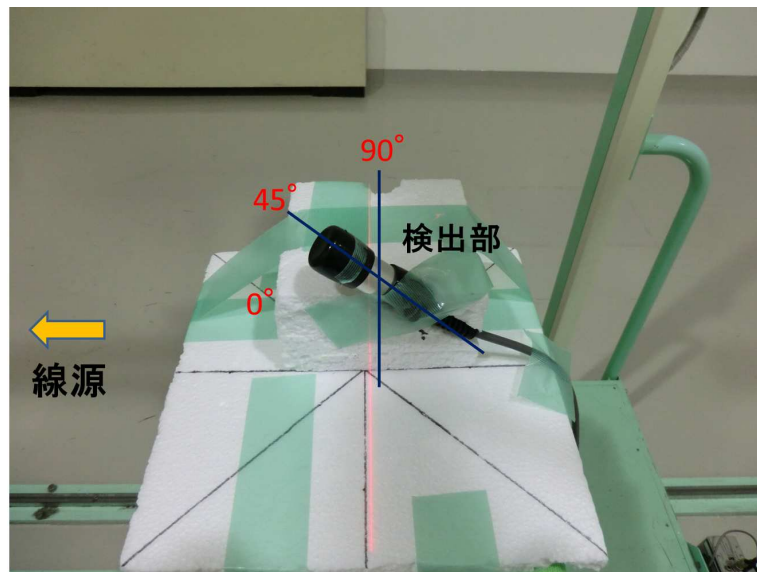


図 3.43: 水平方向の測定セットアップ ($3 \times 1 \times 1 \text{ cm}^3$)



独立行政法人 日本原子力研究開発機構

照射実施条件

平成26年 2月 3日～ 2月 4日

照射室：第3照射室

照射No	線源	照射距離 (m)	1cm線量当量率(H*(10)) (μSv/h)	
			散乱線込み	一次線のみ
1	¹³⁷ Cs (111 MBq)	3.000	1.08	0.94
2	¹³⁷ Cs (111 MBq)	1.748	3.00	2.78
3	¹³⁷ Cs (111 MBq)	1.341	5.00	4.73
4	¹³⁷ Cs (111 MBq)	0.940	10.0	9.67
5	¹³⁷ Cs (1.11 GBq)	3.016	10.0	8.56
6	¹³⁷ Cs (1.11 GBq)	1.682	30.0	27.9
7	⁶⁰ Co (370 MBq)	3.396	3.00	2.69
8	⁶⁰ Co (370 MBq)	2.604	5.00	4.60
9	⁶⁰ Co (370 MBq)	1.822	10.0	9.45
10	²⁴¹ Am (37 GBq)	3.596	10.0	8.30
11	²⁴¹ Am (37 GBq)	2.009	30.0	27.6

大気条件

照射実施日	温度 (℃)	気圧 (hPa)	相対湿度 (%)
2月 3日	19.0 ~ 20.6	999.6 ~ 1002.7	52.0 ~ 60.3
2月 4日	15.7 ~ 18.8	1000.9 ~ 1003.1	43.0 ~ 50.3

図 3.44: 照射条件：「散乱線込み」が Fore、「一次線のみ」が Direct に対応する。

以下、CsI(Tl) : 1 inch³ 版と 3 × 1 × 1 cm³ 版の 2 種類の実験結果である。

3 × 1 × 1 cm³ 版については、検出器本体に実装しているソフトウェアのバージョンが古かったため、USB 経由で PC にデータを転送するレートが著しく低くなるという不具合が生じてしまった。そのため、PC で取得した cps 値と検出器本体に記録している cps 値を比較して、PC で取得したスペクトルを両 cps 値の比で倍することで修正を行った。

3.8.3 線量率特性の調査結果

1 inch³ 版の線量率特性の測定結果を図 3.45、3.46 に示す。

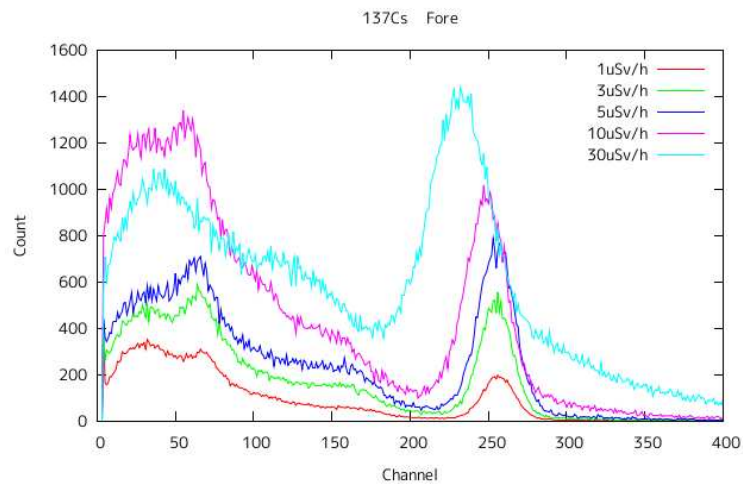


図 3.45: 1 inch³ 版の線量率の違いによる ¹³⁷Cs スペクトル (Fore)

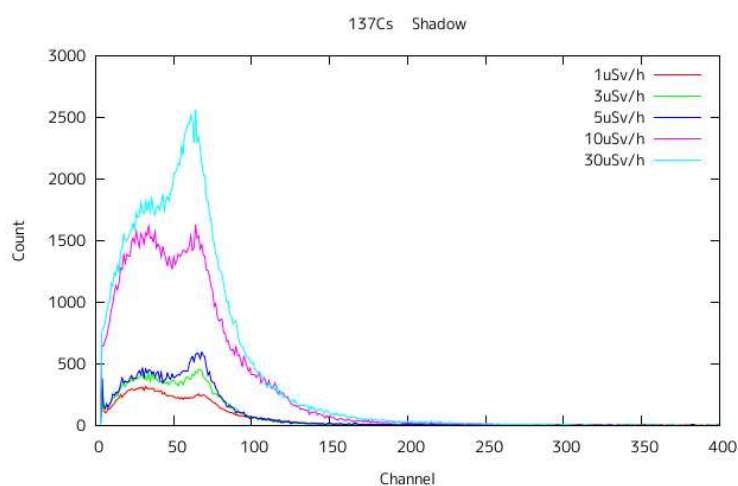


図 3.46: 1 inch³ 版の線量率の違いによる ¹³⁷Cs スペクトル (Shadow)

線量率が高くなるにつれて、カウント数が上昇していることが分かるが、図 3.45 の全方位 (Fore) スペクトルの場合、そのカウント数の倍率は 1.08 $\mu\text{Sv/h}$ から 3 $\mu\text{Sv/h}$ は約 1.9 倍、1.08 $\mu\text{Sv/h}$ から 5 $\mu\text{Sv/h}$ は約 2.6 倍である。これは、線量率が高くなり放射線入射レートが上がると信号処理にデッドタイムが生じるため、カウントし落としているものと考えられる。また、662 keV ピークを見ると、1.08 $\mu\text{Sv/h}$ から 5 $\mu\text{Sv/h}$ まではピーク位置に変動は無いが、10 $\mu\text{Sv/h}$ 以上はピーク位置が下方に移動していることが見える (10 $\mu\text{Sv/h}$ では約 6 ch)。これは 2.4.7 節で述べたように、MPPC 直後のコンデンサが放電しきる前に次のイベントが来ることによって、MPPC 両端の電位差が変動しているために起こる、MPPC の増幅率の減少が見えているものと考えられる。

	Fore	Shadow
照射線量率 ($\mu\text{Sv/h}$)	検出レート (cps)	検出レート (cps)
1	609	366
3	1165	503
5	1603	573
10	2963	2081
30	4037	2741

図 3.47: 1 inch³ 版の線量率の違いによるカウントレート (cps : count per second)

次に、 $3 \times 1 \times 1 \text{ cm}^3$ 版の線量率特性の測定結果を図 3.48 に示す。1 inch³ 版に比べ入射レートが低い
ため、10 $\mu\text{Sv/h}$ でもピーク位置の変動無くスペクトルが取得できている。ただし、30 $\mu\text{Sv/h}$ ではスペクトル
が大きく崩れてしまっていた。

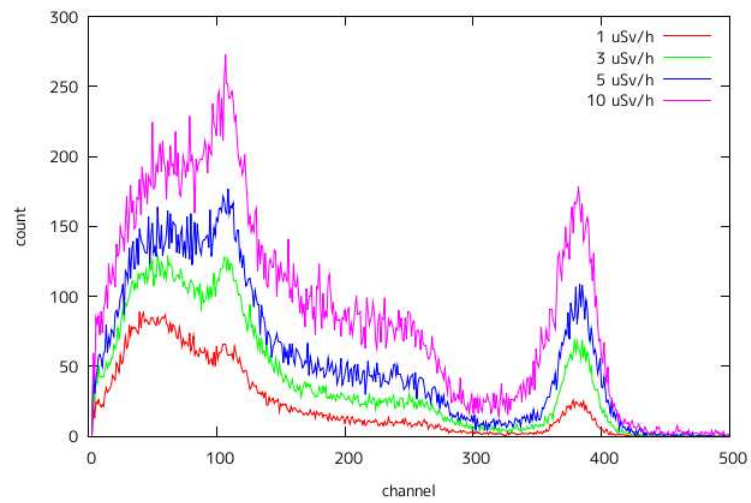


図 3.48: $3 \times 1 \times 1 \text{ cm}^3$ 版の線量率の違いによる ¹³⁷Cs スペクトル (Fore)

3.8.4 方向特性の調査結果

1 inch³ 版、3 × 1 × 1 cm³ 版の方向特性の測定結果を図 3.49、図 3.50 に示す。

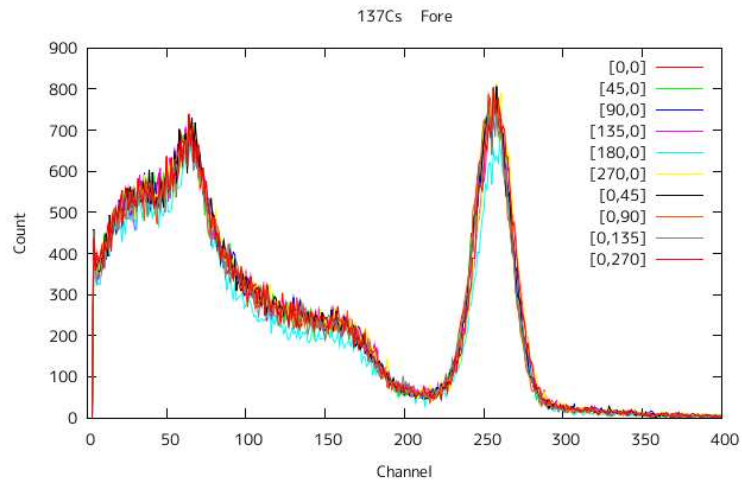


図 3.49: 1 inch³ 版の入射方向による ¹³⁷Cs スペクトル (Fore)

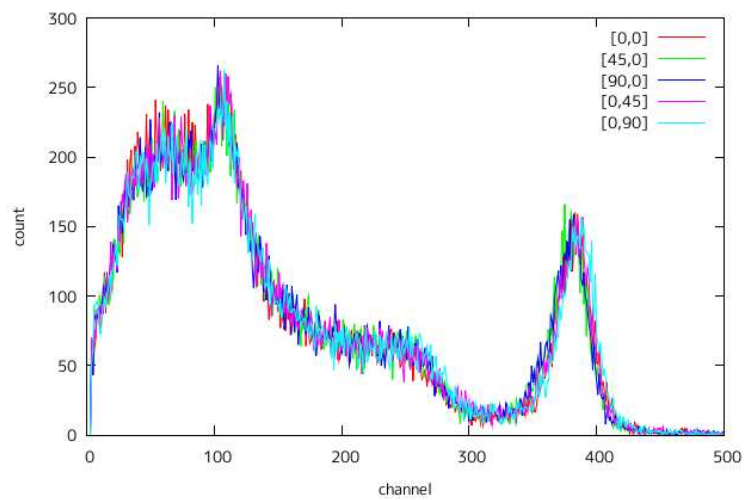


図 3.50: 3 × 1 × 1 cm³ 版の入射方向による ¹³⁷Cs スペクトル (Fore)

1 inch³ 版では、検出部の真後ろ [180°, 0°] から入射した時に 1 割程度カウント数が減少しているが、それ以外の入射方向の違いによる差は、両検出器とも 3 %以内では見られなかった。

3.8.5 エネルギー特性の調査結果

1 inch³ 版に 10 μ Sv/h の線源を照射して、エネルギー特性の測定を行った結果を図 3.51、3.52 に示す。

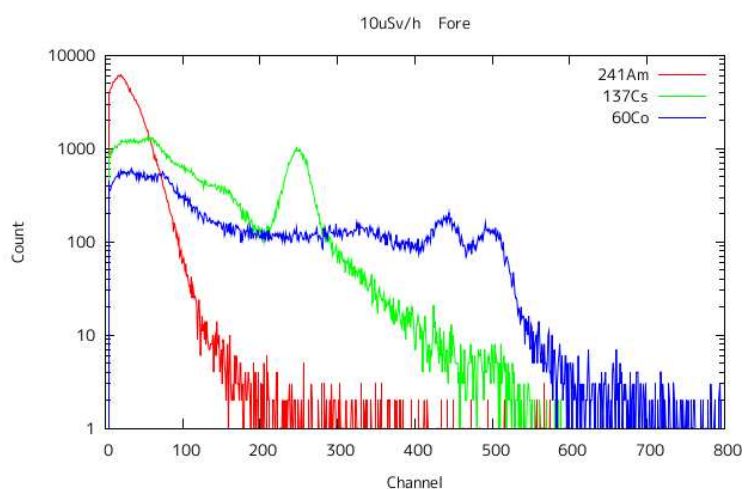


図 3.51: 1 inch³ 版の ¹³⁷Cs、²⁴¹Am、⁶⁰Co のスペクトル (Fore)

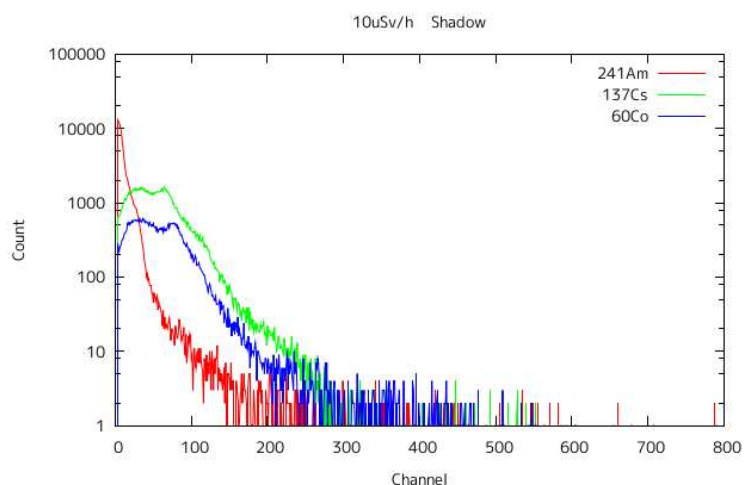


図 3.52: 1 inch³ 版の ¹³⁷Cs、²⁴¹Am、⁶⁰Co のスペクトル (Shadow)

図 3.51 の ²⁴¹Am (59.9 keV)、¹³⁷Cs (662 keV)、⁶⁰Co (1173 keV、1332 keV) ピークから、エネルギー対チャンネルの校正直線を作成した。

4 点とも、ほぼ直線的に分布しており、校正直線は

$$y[ch] = 374.9 \times x[MeV] - 2.038$$

で表される。

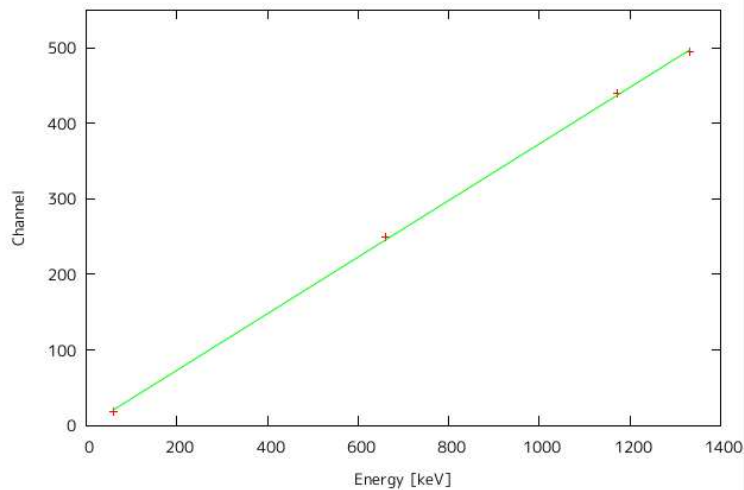


図 3.53: エネルギー対チャンネル校正直線

この校正直線と 3.7 節の 1 番目の（空気と CsI(Tl) の反応確率の比から求める）計算方法（補正なし）で図 3.54 のスペクトル（Fore）の周辺線量率を計算した結果は、図 3.55 となった。

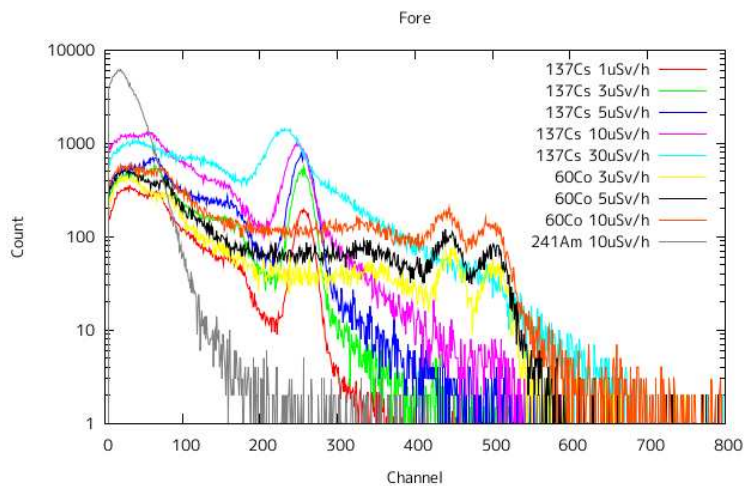


図 3.54: $\mu\text{Sv/h}$ 換算に用いたスペクトル

この結果から補正式を作成していくが、エネルギーの違いだけでなく、線量率の違いによっても照射値対計算値の割合に差が生じていることが分かる。これは、高線量率になり γ 線入射レートが高くなることにより、デッドタイムが生じて、本来よりも γ 線を少くカウントしているためであると推測できる。ただし、 ^{137}Cs と ^{60}Co を見比べた場合、線量率の違いによる照射値対計算値の割合は共に、 $10 \mu\text{Sv/h}$ から $5 \mu\text{Sv/h}$ は約 0.85 倍、 $5 \mu\text{Sv/h}$ から $3 \mu\text{Sv/h}$ は約 0.90 倍となっているので、この割合のエネルギー依存性は無いと推測される。

照射条件(Fore) ①		計算で求めた周辺線量当量率 ②	②/①	
137Cs	1.08 uSv/h	2.65 uSv/h	2.45	
	3 uSv/h	5.83 uSv/h	1.94	← × 0.9
	5 uSv/h	8.67 uSv/h	1.73	←
	10 uSv/h	14.9 uSv/h	1.49	← × 0.85
60Co	3 uSv/h	4.91 uSv/h	1.63	← × 0.9
	5 uSv/h	7.40 uSv/h	1.48	←
	10 uSv/h	12.5 uSv/h	1.25	← × 0.85
241Am	10 uSv/h	8.16 uSv/h	0.816	

図 3.55: 照射値と計算値の割合

現時点では、10 $\mu\text{Sv/h}$ で補正関数を作成し、5 $\mu\text{Sv/h}$ 付近では 0.85 倍、3 $\mu\text{Sv/h}$ 付近では 0.85 \times 0.9 倍して使用することにする。

実験より、10 $\mu\text{Sv/h}$ でのエネルギー補正込みの $\mu\text{Sv/h}$ 変換式は、以下のように求めることができた。

$$y[\text{Sv}] = (-229.43 \times x[\text{MeV}]^3 + 2692.1 \times x[\text{MeV}]^2 - 545.42 \times x[\text{MeV}] + 734.21)/10^{15}$$

この式より、 ^{241}Am 、 ^{137}Cs 、 ^{60}Co の $\text{H}^*(10)=10 \mu\text{Sv/h}$ 照射のスペクトルを $\mu\text{Sv/h}$ 変換したところ、 ^{241}Am : 10.0 $\mu\text{Sv/h}$ 、 ^{137}Cs : 10.3 $\mu\text{Sv/h}$ 、 ^{60}Co : 9.37 $\mu\text{Sv/h}$ となり、誤差 10 %以内で一致している。

ただし、実際に検出器本体に搭載してあるマイコンで、瞬時に 3 次式の計算をするのは現実ではではない。そこで、この 3 次式を 0.03 - 0.1 MeV、0.1 - 0.6 MeV、0.6 - 1 MeV、1 - 3 MeV の 4 区間に分けて、1 次式で補完することにする。以下が、最終的に求めた 1 inch³ 版の $\mu\text{Sv/h}$ 変換の式である。

$$y[\text{Sv}] = (4072.3 \times x[\text{MeV}] + 377.32)/10^{15} : (0.03 - 0.1\text{MeV})$$

$$y[\text{Sv}] = (964.01 \times x[\text{MeV}] + 738.93)/10^{15} : (0.1 - 0.6\text{MeV})$$

$$y[\text{Sv}] = (3127.7 \times x[\text{MeV}] - 762.07)/10^{15} : (0.6 - 1\text{MeV})$$

$$y[\text{Sv}] = (7415.1 \times x[\text{MeV}] - 5521.7)/10^{15} : (1 - 3\text{MeV})$$

次に、 $3 \times 1 \times 1 \text{ cm}^3$ 版に $10 \mu\text{Sv/h}$ の線源を照射して、エネルギー特性の測定を行った結果を図 3.56 に示す。

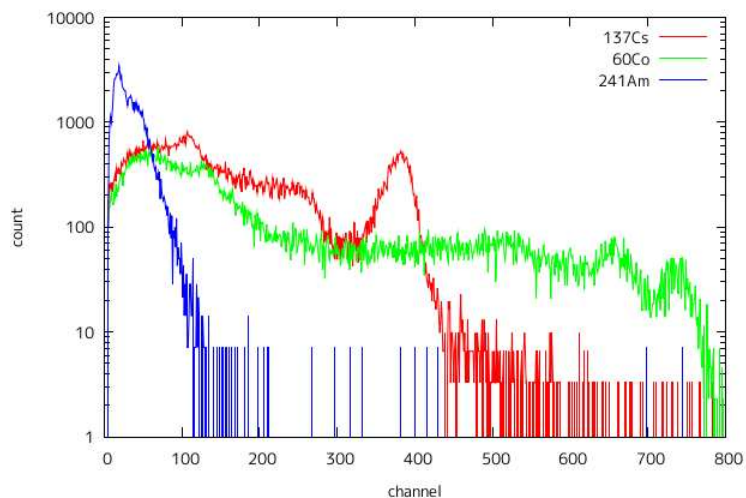


図 3.56: $3 \times 1 \times 1 \text{ cm}^3$ 版の ^{137}Cs 、 ^{241}Am 、 ^{60}Co のスペクトル (Fore)

$3 \times 1 \times 1 \text{ cm}^3$ 版についても、 1 inch^3 版と同様の方法で $\mu\text{Sv/h}$ 変換を求めた。以下が、最終的に求めた $3 \times 1 \times 1 \text{ cm}^3$ 版の $\mu\text{Sv/h}$ 変換の式である。

$$y[\text{Sv}] = (-7258.7 \times x[\text{MeV}] + 5694.3)/10^{15} : (0.03 - 0.1\text{MeV})$$

$$y[\text{Sv}] = (-3570.9 \times x[\text{MeV}] + 5325.5)/10^{15} : (0.1 - 0.4\text{MeV})$$

$$y[\text{Sv}] = (3096.3 \times x[\text{MeV}] + 2658.7)/10^{15} : (0.4 - 0.8\text{MeV})$$

$$y[\text{Sv}] = (23524 \times x[\text{MeV}] - 13684)/10^{15} : (0.8 - 3\text{MeV})$$

第4章 まとめと今後

4.1 T-GMK2-S での放射線測定

実際に T-GMK2-S を持ち歩いて、各地の放射線測定を行った。この測定は当研究室の高橋助教が行った。

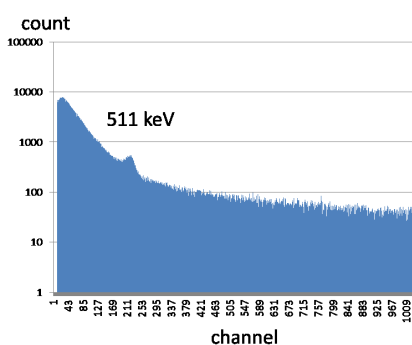


図 4.1: 飛行機中でのスペクトル：測定時間 6806s

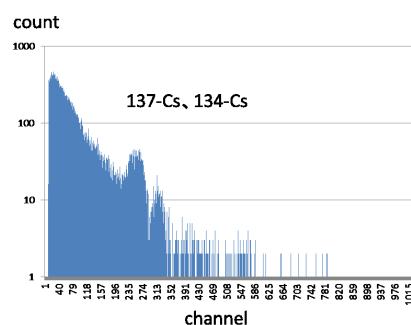


図 4.2: 関東某所でのスペクトル：測定時間 341s

図 4.1 は T-GMK2-S で取得した飛行機中でのエネルギースペクトルで、宇宙線と大気との相互作用により生成される陽電子が対消滅した際に発生する 511 keV の γ 線ピークが観測されている。また、宇宙線が大きなエネルギーを落とし、高エネルギーまでイベントが検出され、更に ADC 値の最大値 1024 ch で検出されているイベントの割合も多い。

図 4.2 は関東のある地域で取得したエネルギースペクトルであり、 ^{134}Cs の 605 keV、796 keV ピークと ^{137}Cs の 662 keV ピークが観測されている。

4.2 まとめ

本研究では、携帯して持ち運べ、安価で、エネルギー分解能の良い γ 線スペクトロメータの実用化を目指して一連の実験を行った。CsI(Tl) シンチレータ、光半導体素子 MPPC を組み合わせることで、検出感度が良く（通常環境なら、1 分以内で ^{40}K の 1461 keV ピークが確認できる程度）、エネルギー分解能が 662 keV で 7% 台の γ 線スペクトロメータを実現した。

実用化のために行った実験としては、最適な MPPC と CsI(Tl) の組み合わせの選定、MPPC の温度と印加電圧による増幅率の関係の調査、 γ 線のエネルギーや入射方向、線量率による検出器の特性調査がある。

選定の結果、MPPC は受光面積が 6 mm^2 、ピクセルサイズが $50 \mu\text{m}^2$ の S10985-050C を、CsI(Tl) は 2.5 cm^3 (1 inch^3) 及び $3 \times 1 \times 1 \text{ cm}^3$ を使用し開発を行うこととした。

MPPCと印加電圧による増幅率の関係は、10組のMPPC+CsI(Tl)で行った結果から、 $y[V] = a \times x[^\circ C] + b$ の傾き a は3%以内で一致しており、今後の製品化に際して傾きは今回の測定値を使用し、各MPPCとCsI(Tl)の組み合わせについて単一温度測定のみでオフセットの決定を行うことにした。

入射方向による検出器の特性調査では、真後からの γ 線に対しては1割程度検出率が下がるが、それ以外の方向に対しては変動は見られなかった。

線量率による特性調査では、線量率が高くなり、放射線レートが上がると検出率は下がっていきまうという結果になった。しかし、周辺線量当量率が $5 \mu\text{Sv/h}$ まではエネルギースペクトルのピーク位置に変動は無く、核種同定については問題なく行える。

エネルギーによる特性調査からは、 $10 \mu\text{Sv/h}$ を基準にした $\mu\text{Sv/h}$ 線量換算式の作成を行った。

今後の課題については、4.3節以降で述べる。

4.3 今後の課題1 - 最適な電圧値での動作

現段階でCsI(Tl)(2.54 cm^3)+MPPC(S10985-050C)を組み合わせた場合、最もエネルギー分解能が良いもので7%程(@662 keV)である。しかし、MPPCへの印加電圧や温度によってエネルギー分解能が変動することが分かっている。図4.3-4.5はCsI(Tl)(2.54 cm^3)+MPPC(S10985-050C)の組み合わせで温度、印加電圧を変えて ^{137}Cs スペクトルを取得したものである。(実際にT-GMK-2に搭載された状態のもの。温度補正はしていないので、ピーク位置はばらばらである。)

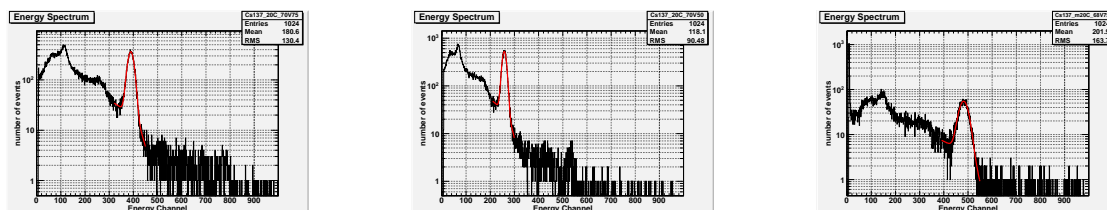


図 4.3: 21.5°C 、 70.75 V での ^{137}Cs スペクトル
 図 4.4: 21.5°C 、 70.50 V での ^{137}Cs スペクトル
 図 4.5: -17.1°C 、 68.75 V での ^{137}Cs スペクトル

これらのスペクトルの662 keVピークのエネルギー分解能は、 21.5°C 、 70.75 V が $7.4 \pm 0.1 \%$ 、 21.5°C 、 70.50 V が $7.8 \pm 0.1 \%$ 、 -17.1°C 、 68.75 V が $8.9 \pm 0.3 \%$ である。図4.6は同様の組み合わせで、 -17.1°C 、 2.1°C 、 21.5°C 、 40.5°C で印加電圧を変化した場合のエネルギー分解能を示したものである。

現在のT-GMK-2の設計では、662 keVピークが400-500 ch付近になる電圧値で最も分解能が良くなっていることが分かる。しかし、エネルギーレンジの面からT-GMK-2は662 keVピークが250 ch付近になるように電圧制御をしている。更にエネルギー分解能を高めるためには、今より0.2-0.4 V程度高い印加電圧でMPPCを動作する必要があるということを表しているの、今後、回路の増幅率（前置増幅器の時定数の変更も考える。）を調整し、260 ch付近で最もエネルギー分解能を良くすることが望ましい。

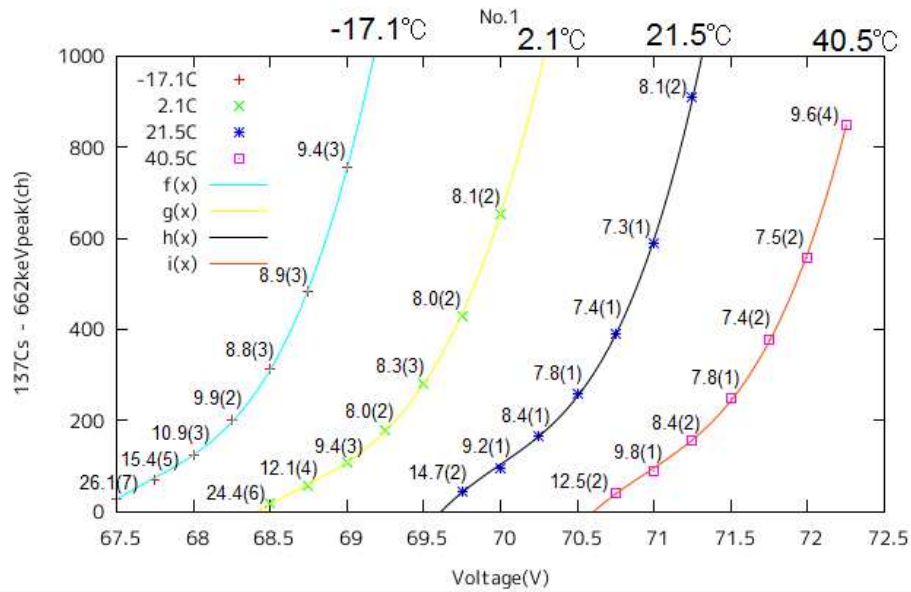


図 4.6: 各電圧、温度でのエネルギー分解能

4.4 今後の課題 2 - β 線用の検出器

福島原子力発電所の事故により放出された放射線源には、 ^{90}Sr といった主に β 線を放射する線源も含まれており、これを検出できる簡易スペクトロメータの需要もある。

T-GMK2-S に使用している CsI(Tl) シンチレータは γ 線のみで無く、 β 線も検出することが可能である。しかし、 β 線は透過能力が低いため、検出部をアルミケースで覆った状態では CsI(Tl) に届く前に減衰してしまう。一般的に β 線検出器は、 β 線を通過させるための密度の低い窓を設けている。T-GMK2-S の場合も、このような窓を設けることで、 β 線検出を行うことが可能はずである。ただし、光センサーに使用している MPPC は、日光のように大量の光子が一瞬で入射する環境では動作を停止してしまう。なので、まずは遮光シートを窓にすることを考えて、図 4.7 のようなセットアップで遮光シートの枚数を増やしながらか、 β 線を検出できるか実験した。

図 4.8 がその結果である。遮光シート 1 枚の厚さは 0.1 mm。遮光シートを通してでも、十分 β 線の検出は可能であることが分かる。

今後、製品化のためには更に適した材質での実験が必要である。また、 β 線は連続スペクトルのため、 γ 線のようにピークを検出することが不可能である。そのため、核種同定まで行う検出器を目指すには、線源からの β 線をどのように他の放射線と切り分けるかが重要であり、その方法の構築も求められる。

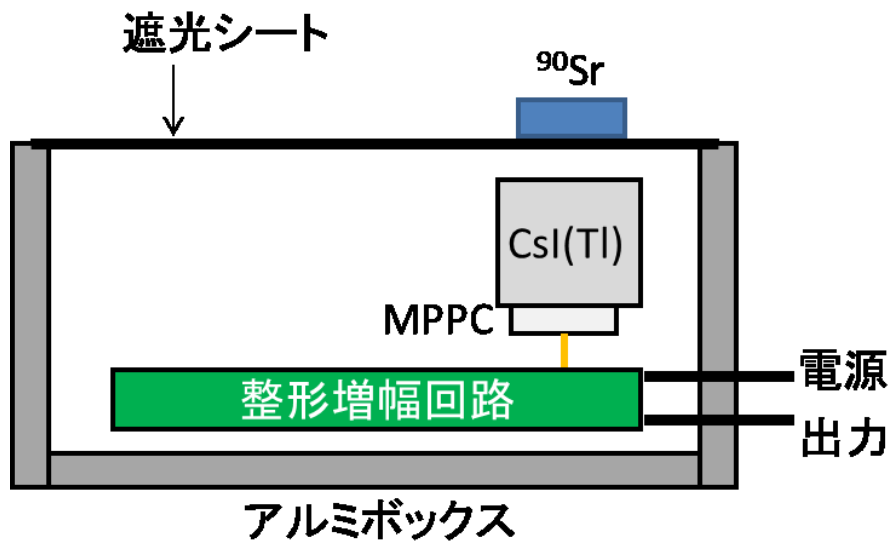


図 4.7: β 線検出実験のセットアップ

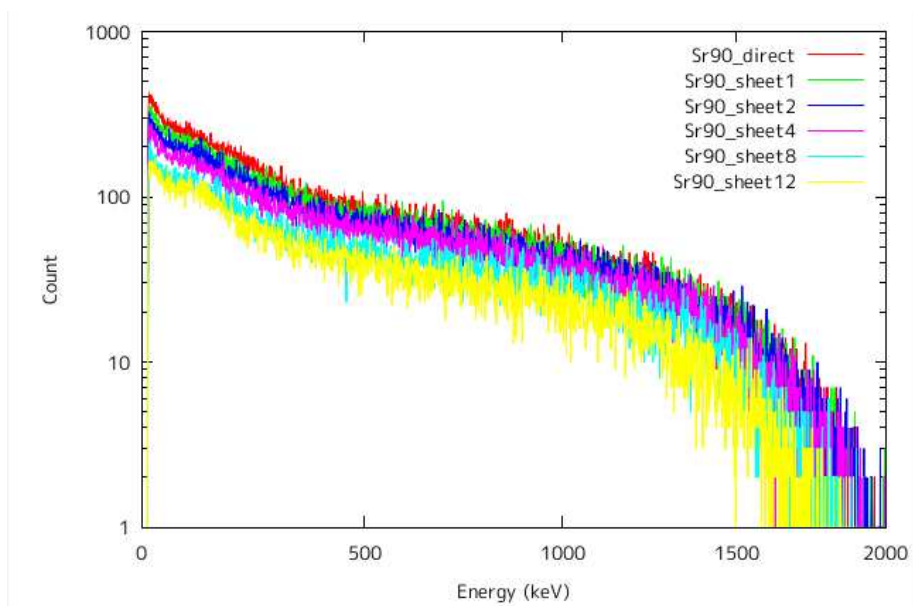


図 4.8: ^{90}Sr - β 線のエネルギースペクトル

4.5 今後の課題 3 - JIS 規格に準拠した評価試験

今回開発したような持ち運び型の 1 cm 周辺線量率を測定する X 線 γ 線検出器の評価試験方法については、JIS Z 4333「X 線及び γ 線用線量率サーベイメータ」に記載されてある。評価試験の項目としては、エネルギー特性試験、方向特性試験、温度特性試験などがあり、一部は今回の原子力科学研究所で行った試験項目に一致する。

今後製造する全ての検出器に対して、JIS 規格準拠の試験を行うことは現実的ではないが、数台に対して性能の評価をしておくことが望ましい。

謝辞

この修士論文を執筆するにあたり、多くの方々に協力して頂きました。

まず、株式会社ティーエーシーの高垣さんに私の卒業論文を見て連絡を頂いたことから、T-GMK2-Sのプロジェクトは始まりました。当時、まだ検出部周りしか構築できていなかったスペクトロメータを、高垣さんの協力によって1年程で形にすることができました。デジタル回路部の製作や全系のパッケージ化等を高垣さんに依頼することで、検出部の実験に専念することができました。同時に実質指導教官の高橋先生には、スペクトロメータの開発に当たって、ティーエーシーと連絡を取って頂いたり、実験や解析を何度も手伝って頂きました。また、本論文だけでなく、スペクトロメータに関する様々な学会/研究会での発表に関してもアドバイスを頂きました。大杉先生には、本論文や実験に関してアドバイスを頂いた他、T-GMK2-Sの普及にも力を入れて頂き、私にとっても面白い経験となりました。深澤先生、水野先生にも実験に関して、何でもアドバイスをして頂きました。

原子力科学研究所で行った T-GMK2-S の性能評価実験の際は、当研究室の卒業生である西野さんに全面協力して頂き、多くの測定項目を終えることができました。シャドー測定の際は、何度も鉛ブロックを運んで頂きました。

MPPC の温度依存性測定の際は、当研究室の4年生（枝廣さん、神田さん、白川君、高田君、中岡君）に協力して貰いました。特に枝廣さんには、4組の CsI(Tl)+MPPC を測定して貰いました。

この他にも多くの方の協力のおかげで、本修士論文を書くことができました。ありがとうございました。

参考文献

- [1] 日本アイソトープ協会 「はじめての放射線測定」
- [2] 日本規格協会 「わかりやすい放射線測定」
- [3] 木村逸郎、坂井英次 訳 「放射線計測ハンドブック 第3版」
- [4] 平山英夫、中島宏、佐波俊哉、山口恭弘、佐藤理、高木俊治、鈴木敏和、岩井敏 「放射線防護に用いられる線量概念」
- [5] 高度情報科学技術研究機構 HP 「環境放射線の測定法」
(http://www.rist.or.jp/atomica/data/dat_detail.php?Title_No=09-01-05-03)
- [6] 緊急被ばく医療研修のホームページ 「詳細版 第五章 放射線検出の原理」
(http://www.remnet.jp/lecture/forum/sh05_01.html)
- [7] 原子力資料室 (CNIC) HP
(<http://cnic.jp/>)
- [8] 株式会社ティーエーシー HP
(<http://www.tacinc.jp/>)
- [9] 浜松ホトニクス 「光半導体素子ハンドブック」
- [10] 浜松ホトニクス 「MPPC データシート」
- [11] NIST XCOM
(<http://physics.nist.gov/PhysRefData/Xcom/html/xcom1.html>)
- [12] 横山将志、魚住聖 「Multi Pixel Photon Counter の研究開発」
- [13] 武田伸一郎、渡辺伸、高橋忠幸 「超広角コンプトンカメラによる福島での実証試験」
- [14] 原子力百科辞典
(<http://www.rist.or.jp/atomica/>)
- [15] 宇井崇紘 「広島大学 2010 年度卒業論文」
- [16] 日立アロカメディカル株式会社 HP
(<http://www.hitachi-aloka.co.jp/>)

- [17] 三浦功、管浩一、俣野恒夫 「放射線計測学」
- [18] 河田燕 「放射線計測技術」
- [19] 日本規格協会 「JIS Z 4333 : X 線及び γ 線用線量当量率サーベイメータ」
- [20] 日本規格協会 「JIS Z 4511 : 照射線量測定器、空気カーマ測定器、空気吸収線量測定器及び線量当量測定器の校正方法」
- [21] William R.Leo 「Techniques for Nuclear and Particle Physics Experiments」
- [22] セイコー・イメージアンドジー株式会社 HP
(<http://www.sii.co.jp/jp/segg/>)
- [23] M. KOBAYASHI, P. CARLSON、S. BERGLUND 「TEMPERATURE DEPENDENCE OF CsI(Tl) SCINTILLATION YIELD FOR COSMIC MUONS」