

PIN フォトダイオードを用いた ラドン検出器の開発

横浜国立大学 理工学部
数物・電子情報系学科 物理工学EP
学籍番号 1664092
儀間 智美

2020年2月22日

概要

私たちの身の回りに多く存在する放射性元素のラドンは、私たちの生活に影響を与えて いるだけでなく、宇宙素粒子実験において背景事象(バックグラウンド)となることがある。例えば、神岡鉱山内で行われるスーパーカミオカンデ実験では、鉱山内での比較的濃度の高いラドンが背景事象となる。したがって、ラドンおよびそれにまつわる放射性元素の性質を理解することは、私たちの身の回りの放射線について深く考えるきっかけとなるだけでなく、低バックグラウンド実験のバックグラウンドを理解する上で極めて重要である。

本研究では Si PIN フォトダイオードを用いたラドン検出器を制作し、その性能評価を行なった。

目次

第1章 ラドンとα線	3
1.1 ラドンとは	3
1.1.1 ラドンの性質	3
1.1.2 自然放射線とラドン	5
1.2 α 線とは	6
1.3 荷電粒子の相互作用	7
1.3.1 阻止能	7
1.3.2 荷電粒子の飛程	8
1.3.3 薄い吸収物質中におけるエネルギー損失	9
1.4 放射線の半減期	10
第2章 ラドンの検出方法	12
2.1 静電捕集法	12
2.2 PIN フォトダイオード を用いた検出	13
第3章 ラドン検出器	15
3.1 ラドン 線源	17
3.2 ラドン検出器	18
3.2.1 PIN フォトダイオード	18
3.2.2 チャージセンシティブアンプ	19
3.2.3 高電圧分割回路とアンプ回路	20
第4章 ラドン測定	22
4.1 チャージセンシティブアンプ の線型性	22
4.2 ラドンの測定	25
4.2.1 PIN フォトダイオードと線源の距離	26
4.2.2 半減期の測定	28
4.2.3 α 線のエネルギーの較正	34
第5章 結論	36

第1章 ラドンと α 線

1.1 ラドンとは

1.1.1 ラドンの性質

原子番号 86 のラドン (Rn) は無味無臭の放射性希ガス元素であり、自然界では一般的にラドンガスと呼ばれる気体で存在する。ラドンには 34 種類の同位体が知られており、最も安定な ^{226}Ra の娘核である ^{222}Rn (ウラン系列) の他、 ^{220}Rn (トリウム系列)、 ^{219}Rn (アクチニウム系列)などの同位体が存在する。図 1.1 から図 1.3 には、自然界に存在する放射性核種の崩壊系列であるウラン系列、トリウム系列、アクチニウム系列を示す。

ラドンの大きな特徴の一つが、空気中に最も多く存在する放射性元素であるということだ。これは、ウランやトリウムが非常に長い半減期を持ち、自然界に多く存在していることによる。ウランは自然界で大量に存在している元素のうち最も原子番号と原子量が大きい元素であり、半減期は ^{238}U では約 44 億年、 ^{235}U では約 7 億 380 万年もの長さで、地殻中や海水中に多く存在している。また、天然に存在するトリウム (^{232}Th) の半減期は 140.5 億年と非常に長く、地殻中に豊富に存在している。

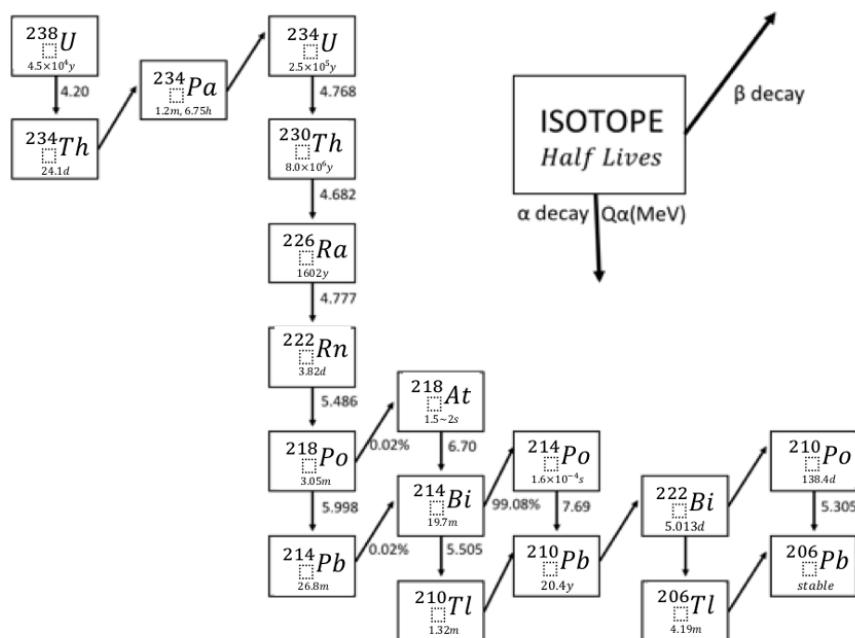


図 1.1: ウラン系列

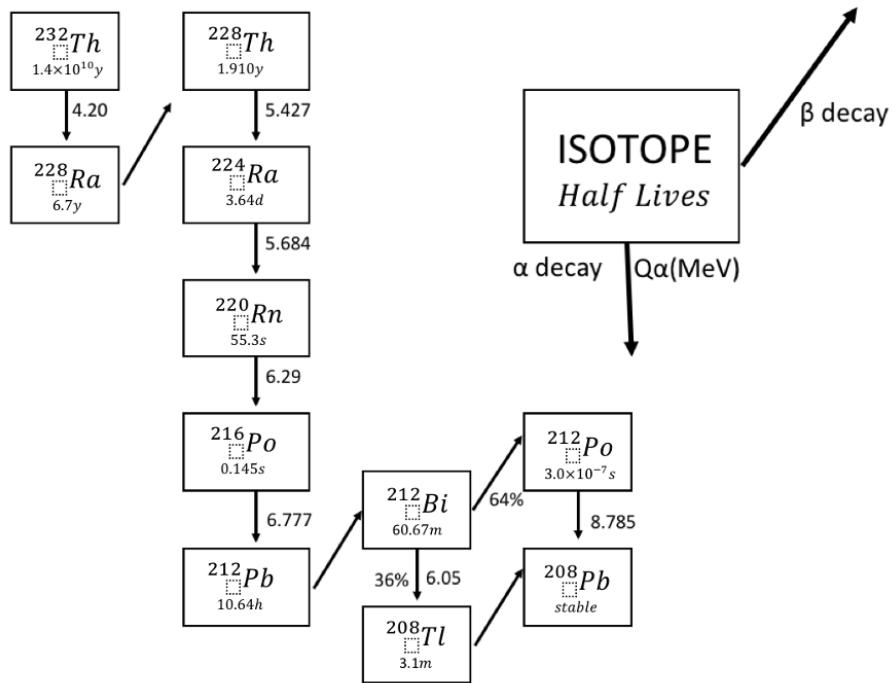


図 1.2: トリウム系列

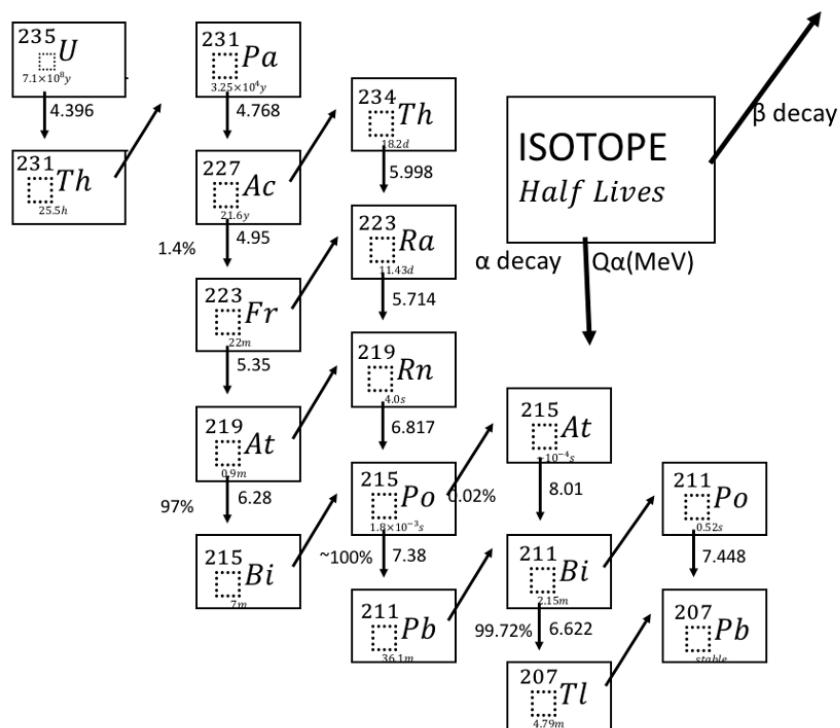


図 1.3: アクチニウム系列

1.1.2 自然放射線とラドン

2011年3月11日に起きた東日本大震災に伴う福島第一原子力発電所の事故により、日本に住む多くの人々が放射線に関心を寄せた。被曝は一見我々の生活から遠い出来事のような気がするが、実際、私たちは日常生活の中で知らないうちに放射線による被曝を受けている。

放射線には人間により作り出される人工放射線と、自然界に存在する自然放射線がある。自然放射線には宇宙からやってくるもの、大地からやってくるもの、食物から体内に入るものの、そして大気中に存在するものが挙げられる。図1.4が示すように、世界中の人が1年間で自然放射線から受ける線量を一人当たりで平均すると、その内訳の半数以上は呼吸時に吸い込んでしまう大気中の放射性元素(主にラドン)であるとされている。つまり、ラドンは私たちにとって最も身近な放射性元素であると言える。

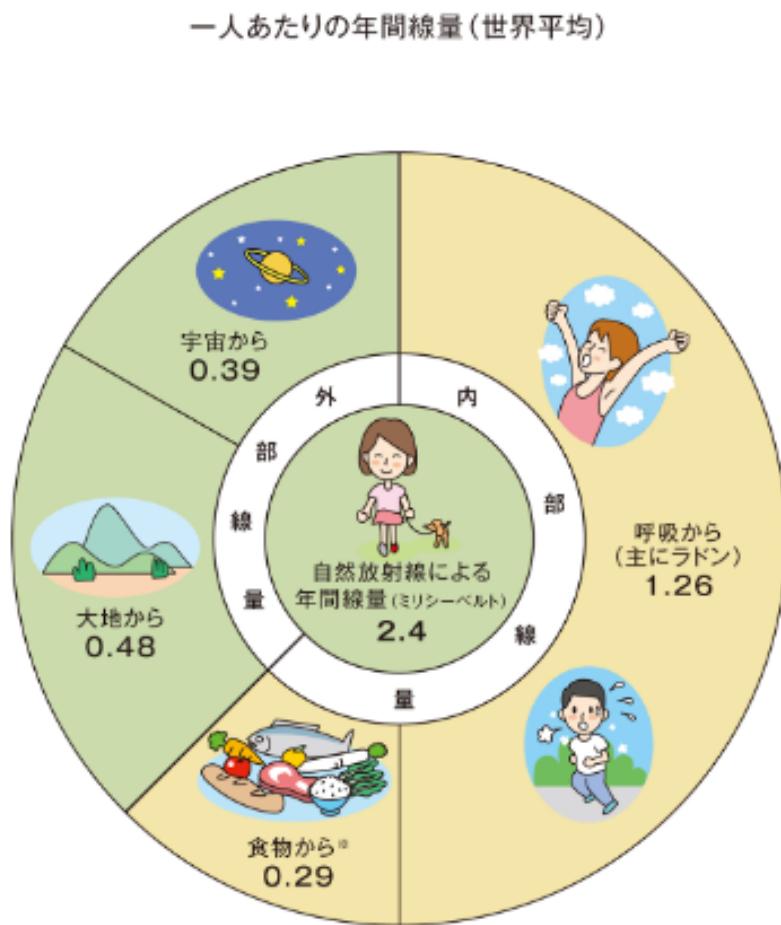


図1.4: 自然放射線から受ける線量の一人当たりの平均年間線量 [1]

1.2 α 線とは

α 粒子とは、電子と陽子がそれぞれ 2 個ずつ結合したヘリウム (4He) 原子核のことである。この α 粒子が運動エネルギーを持ったものが放射線の一つである α 線である。エネルギー的に不安定な重い原子核が α 線を放出し崩壊するメカニズムを α 崩壊という。 α 崩壊の過程は式 (1.1) で表される。



ここで、 X および Y はそれぞれ崩壊前と崩壊後の核種である。

放射線には、 α 線の他に、原子核から電子が放射される β 線や、不安定な状態にある原子核が、より安定な状態に移る時に発生する電磁波である γ 線、原子核を構成する粒子である中性子線が存在する。これらの放射線は粒子の重さや大きさがそれぞれ異なるため、透過力に大きな違いが生じる。図 1.5 が示すように、 α 線は紙一枚で遮ることができるに対し、 β 線はアルミニウムなどの金属板で遮ることができる。さらに γ 線は厚い鉄や鉛でやっと遮ることが出来るが、中性子線は水素を含む厚い層を用意しないと遮ることが出来ない。

放射線の種類と透過力

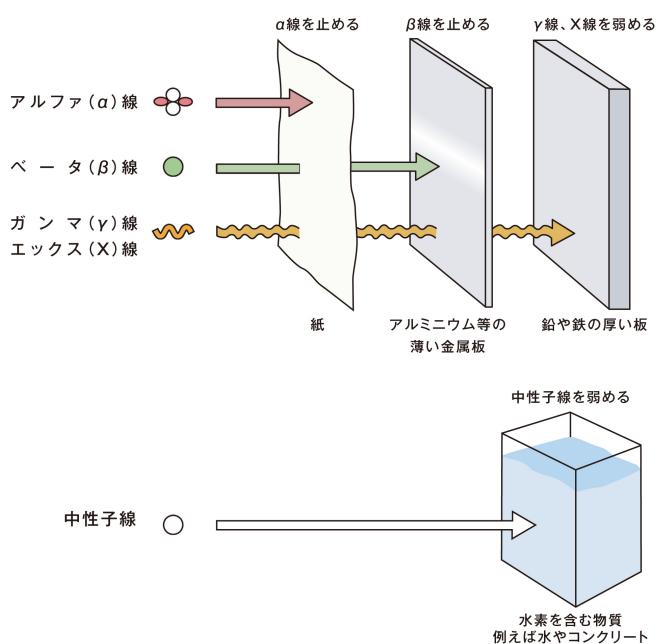


図 1.5: 放射線の透過力 [1]

1.3 荷電粒子の相互作用

α 粒子を含む荷電重粒子は、標的物質中の電子に対して励起、電離等の相互作用を多数回繰り返すが、電子と比べ質量がはるかに重いため、電子との相互作用によりほとんど曲げられることなく直線上に進む。

1.3.1 阻止能

荷電粒子が標的物質に入射すると、物質中の原子を電離または励起することによりエネルギーを失う。阻止能とは、標的物質中で粒子が単位長さあたりに失うエネルギーのことを使う。

$$S = -\frac{dE}{dx} \quad (1.2)$$

また、阻止能は古典的に以下のベーテの式で表される。

$$-\frac{dE}{dx} = \frac{4\pi e^4 z^2}{m_0 v^2} N B \quad (1.3)$$

ただし、

$$B = Z \left[\ln \frac{2m_0 v^2}{I} - \ln \left(1 - \frac{v^2}{c^2} \right) - \frac{v^2}{c^2} \right] \quad (1.4)$$

である。ここで、 v, e は入射荷電粒子の速度と電荷、 z は入射荷電粒子の電荷、 I はイオン化ポテンシャル、 N は単位面積辺りの吸収物質原子個数、 Z は標的物質の原子番号、 m_0 は入射荷電粒子の静止質量を表す。阻止能は v^2 に反比例することから、入射荷電粒子の速度が遅くなるにつれ、標的物質中で失うエネルギーは大きくなる。また、阻止能は NZ の項に依存しているため、原子番号と密度が高い標的物質ほど大きな阻止能を示す。

1.3.2 荷電粒子の飛程

標的物質に照射された荷電粒子が、エネルギーを失い標的物質中で止まるまでに進んだ距離を飛程と呼ぶ。ここで、飛程には2種類の定義がある。図1.6のように、線源と検出器の間に厚さ t の吸収物質を設置した場合、粒子の検出率と吸収物質の厚さの関係を示したもののが図1.7の透過曲線である。図1.7中の I は検出された粒子数、 I_0 は線源から放射された粒子数を表す。また、 R_m は平均飛程と呼ばれるもので、粒子の数がちょうど $\frac{1}{2}$ まで減少する吸収物質の厚さを表す。また、 R_e は外挿飛程と呼ばれ、透過曲線の直線上の端部を係数値0まで外挿して求めたものである。図1.8は、温度15[°C]および圧力760[mmHg]の空气中における α 粒子の飛程とエネルギーの曲線を表す。

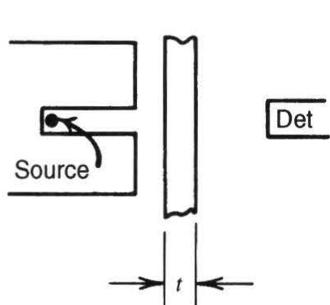


図1.6: α 線の透過実験

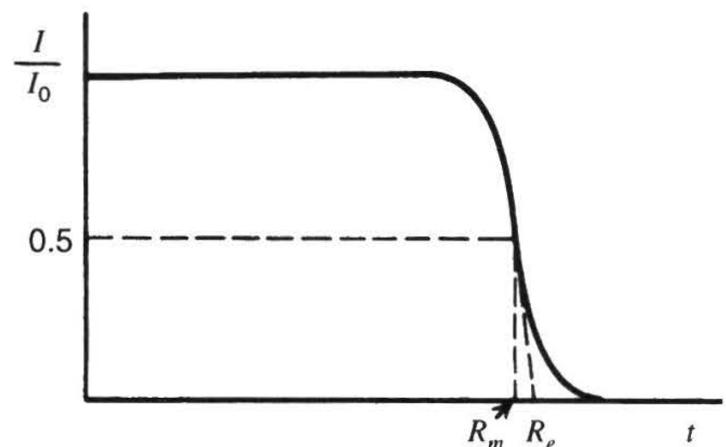


図1.7: α 線の透過曲線

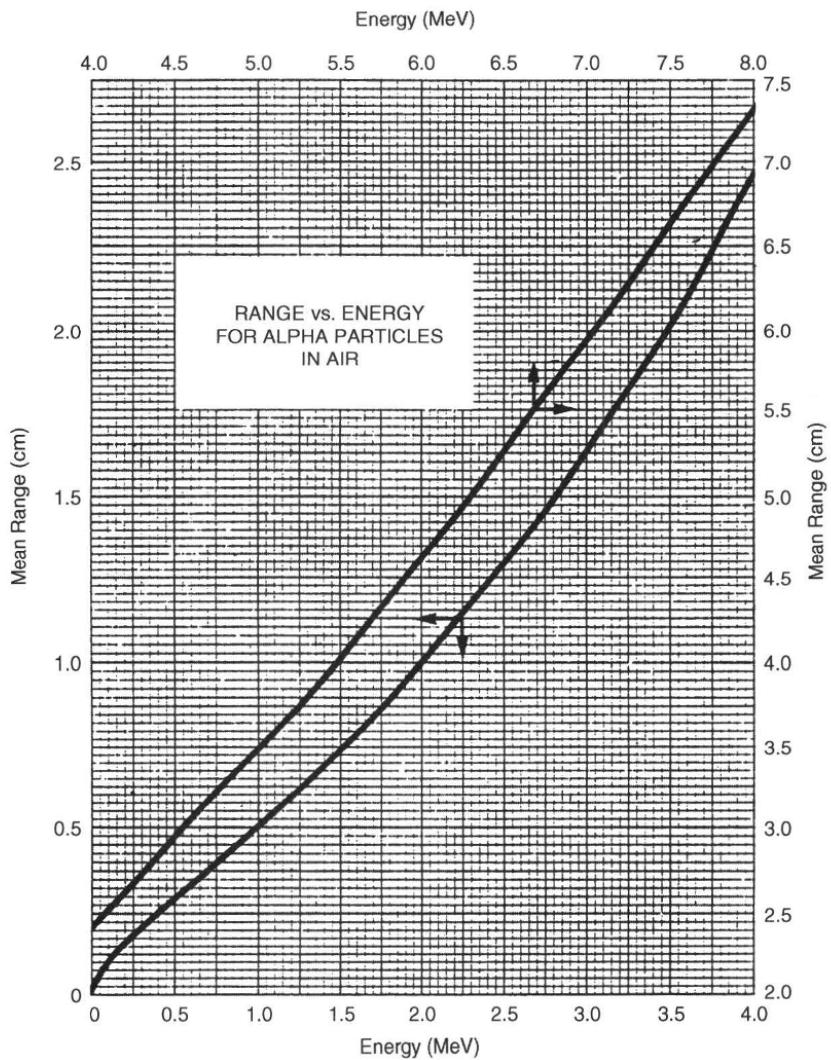


図 1.8: α 粒子の飛程とエネルギー [2]

1.3.3 薄い吸収物質中におけるエネルギー損失

ある荷電粒子が薄い標的物質や検出器を透過する場合、吸収物質に付与されるエネルギーは次式で表される。

$$\Delta E = \left(-\frac{dE}{dx} \right)_{avg} \cdot t \quad (1.5)$$

ここで、 t は吸収物質の厚さ、 $\left(-\frac{dE}{dx} \right)$ は吸収物質中での粒子のエネルギーで平均した阻止能の値である。

1.4 放射線の半減期

不安定な物質が放射線を放出することで安定な状態へ変化すると、放射能も弱まっていく。このように放射性元素の原子の量が、はじめの半分になるまでの時間のこと半減期と言う。ここで、半減期と崩壊数の数の関係について考える。

時刻 t および $t + \Delta t$ で残っている放射性原子核数をそれぞれ $N(t)$, $N(t + \Delta t)$ とすると、その間の崩壊数 $N(t + \Delta t) - N(t)$ は $N(t)$ および Δt に比例し、放射性元素に固有な崩壊定数 λ を用いて以下のように表せる。

$$N(t) - N(t + \Delta t) = \lambda N(t) \Delta t \quad (1.6)$$

これを微分方程式の形に変形すると以下のように表せる。

$$\frac{N(t + \Delta t) - N(t)}{\Delta t} = \frac{dN}{dt} \quad (1.7)$$

$$\frac{dN}{dt} = -\lambda N(t) \quad (1.8)$$

この微分方程式を変数分離形として解くと

$$\frac{dN}{N(t)} = -\lambda dt \quad (1.9)$$

$$\int \frac{dN}{N(t)} = -\lambda \int dt \quad (1.10)$$

$$\log N(t) = -\lambda t + c \quad (1.11)$$

$$N(t) = e^{-\lambda t + c} \quad (1.12)$$

$t=0$ の放射性原子核数を N_0 とすると

$$N_0 = e^c \quad (1.13)$$

$$N = N_0 e^{-\lambda t} \quad (1.14)$$

ここで、半減期 T をとすると、 $t = T$ の時 $N = \frac{N_0}{2}$ になるので

$$\begin{aligned} \frac{N_0}{2} &= N_0 e^{-\lambda T} \\ \frac{1}{2} &= e^{-\lambda T} \\ N(t) &= N_0 e^{-\lambda t} \\ &= N_0 (e^{-\lambda T})^{\frac{t}{T}} \\ &= N_0 \left(\frac{1}{2}\right)^{\frac{t}{T}} \end{aligned} \quad (1.15)$$

以上から、時刻 t の時の放射性原子核数を式(1.15)のように求めることができる。図1.9は式(1.15)より得られる崩壊曲線である。ここで、図1.9中の T は半減期を表す。

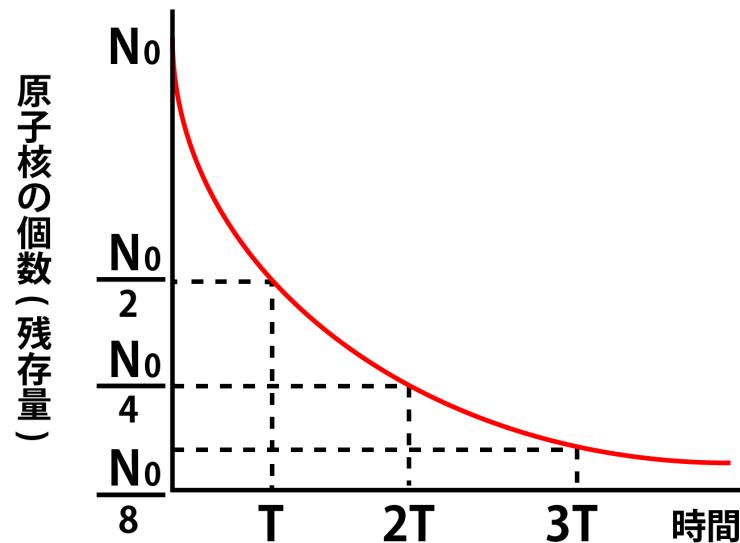


図1.9: 崩壊曲線

第2章 ラドンの検出方法

2.1 静電捕集法

本研究では、ラドンを測定する方法として『静電捕集法』を採用した。静電捕集法とは、その名の通り、電場を利用して効率よくターゲットを集めめる方法である。図1.1から図1.3に示した崩壊系列によれば、ラドンは α 線を放出しポロニウムへ崩壊する。静電捕集法では、その崩壊直後のポロニウムが陽イオンとなることを利用する。具体的には、密閉したアルミニウム製の缶の表面を接地し、PINフォトダイオードの表面に負の電位を与えることで、缶表面とPINフォトダイオードの間に電場を発生させ、ポロニウムの陽イオンをPINフォトダイオード表面へ吸着させる。PINフォトダイオード表面に付着したポロニウムは一瞬(トリウム系列の場合は3分)で α 線を放出する。その際に生じた α 線がPINフォトダイオードに入射することで発生する信号を観測することで、間接的に缶中のラドンの測定を行う。図2.1に、缶の中で発生したラドンがポロニウムの陽イオンに崩壊し、そのポロニウムを静電捕集法でPINフォトダイオードに吸着させる様子を示す。

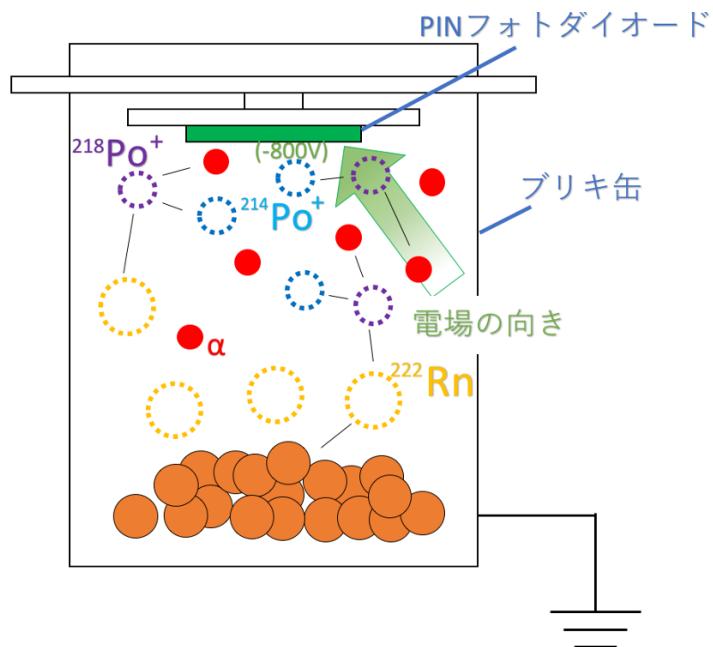


図2.1: 静電捕集法

2.2 PIN フォトダイオード を用いた検出

放射線を検出する際、放射線による電離作用が度々利用される。電離作用とは、図 2.2 に示すように、放射線が物質中を通過する際、物質を構成する原子の軌道電子を原子の外まではじき飛ばし、正に帯電した原子と自由電子とに分離させる事である。 α 線、 β 線等の電荷を持った荷電粒子線は、物質を直接電離する。特に α 線は、電離密度が高く、 β 線の数百倍の密度の電離を引き起こす。また、 γ 線や X 線は、物質との相互作用で二次電子を発生させ、その二次電子が物質を間接的に電離する。

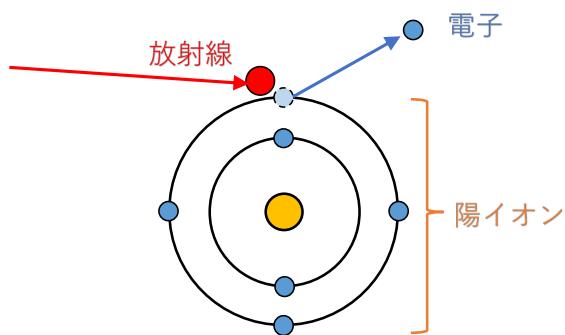


図 2.2: 原子の電離作用

同様に、半導体に放射線が入射すると電離作用が生じる。今回使用した PIN ダイオードは、P 型半導体と N 型半導体の間に絶縁性の I 型半導体が挟み込まれた構造を持つ。この PIN フォトダイオードに逆バイアスを印加すると、電流は流れず、正孔は陰極に引きつけられ、電子は陽極に引きつけられる。すると P 層と N 層の間に空乏層が形成される。この空乏層に α 線が入射すると、原子の電離作用よりも少ないエネルギーで電離作用が起こる。電離作用により生じた正孔と電子は、逆バイアスにより生じた電場により陽極や陰極に引きつけられ、電気信号として観測される。この電気信号の大きさにより α 線のエネルギーを測定できる。図 2.3 に PIN フォトダイオードに逆バイアスをかけ、空乏層に入射した α 線が電離作用により正孔と電子を生成する様子を示す。

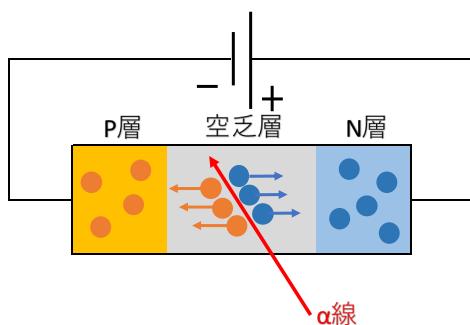


図 2.3: PIN フォトダイオードの動作原理

ここで、得られる電気信号の大きさについて考える。一般に、気体の電離作用において、価電子にエネルギーを与え電子正孔対を作るには数十[eV]が必要とされる。一方、ダイオードを構成するシリコンでは3.6[eV]で電子正孔対が発生する。ここで、5[MeV]の α 線がPINフォトダイオードに入射した時に流れる電流を考えると、

$$\frac{5.0 \times 10^6 [eV]}{3.6 [eV]} = 1.39 \times 10^6 [\text{個}] \quad (2.1)$$

の電子対が生じる。この電気量を考えると、素電荷は $1.6 \times 10^{-19} [C]$ であるので

$$1.39 \times 10^6 [\text{個}] \times 1.6 \times 10^{-19} [C] = 2.22 \times 10^{-13} [C] \quad (2.2)$$

の電気量が生じる。この電気量が信号として流れる電流は、 $I = \frac{dQ}{dt}$ より、 $t = 1[\mu s] = 1 \times 10^{-6} [s]$ とすると

$$I = 2.22 \times 10^{-13} [C] \times \frac{1}{1 \times 10^{-6} [s]} = 2.2 \times 10^{-7} [A] \quad (2.3)$$

このように、PINフォトダイオードに流れる α 線の電気信号はとても小さいことがわかる。

第3章 ラドン検出器

図1.1から図1.3によると、ラドンは α 線を放出してポロニウムへ崩壊する。今回はポロニウム崩壊時に放出される α 粒子をPINフォトダイオードで検出することにより間接的にラドンを検出した。

図3.1、図3.2にラドン検出器の概略図と写真を示す。検出器本体は2Lの円柱型のブリキ缶である。中には線源としてラジウムセラミックボールの他に、PINフォトダイオードへの吸着率を上げるために乾燥剤が入っている。蓋部分には検出用のPINフォトダイオードと、高電圧分圧回路とアンプ回路からなる基盤が設置されている。基盤を金属製のネジで取り付けることで基盤の接地を行っている。この基盤に繋がっているのが、アンプ回路の直流電源、PINフォトダイオードに高電圧分圧回路用の高圧電源、出力信号を読み出すオシロスコープである。ラドン検出器本体とこれらの電源とオシロスコープは、缶の上部に小さく空けた穴を通じて、ケーブルで繋がっている。PINフォトダイオードは僅かな光も信号として捉えてしまうため、密閉した缶に二重に暗幕を巻きつけ、室内の電気を消して測定を行なった。データ収集は、アンプ回路で増幅したPINフォトダイオードの信号を、オシロスコープのセグメント・メモリー機能を用いて記録した。

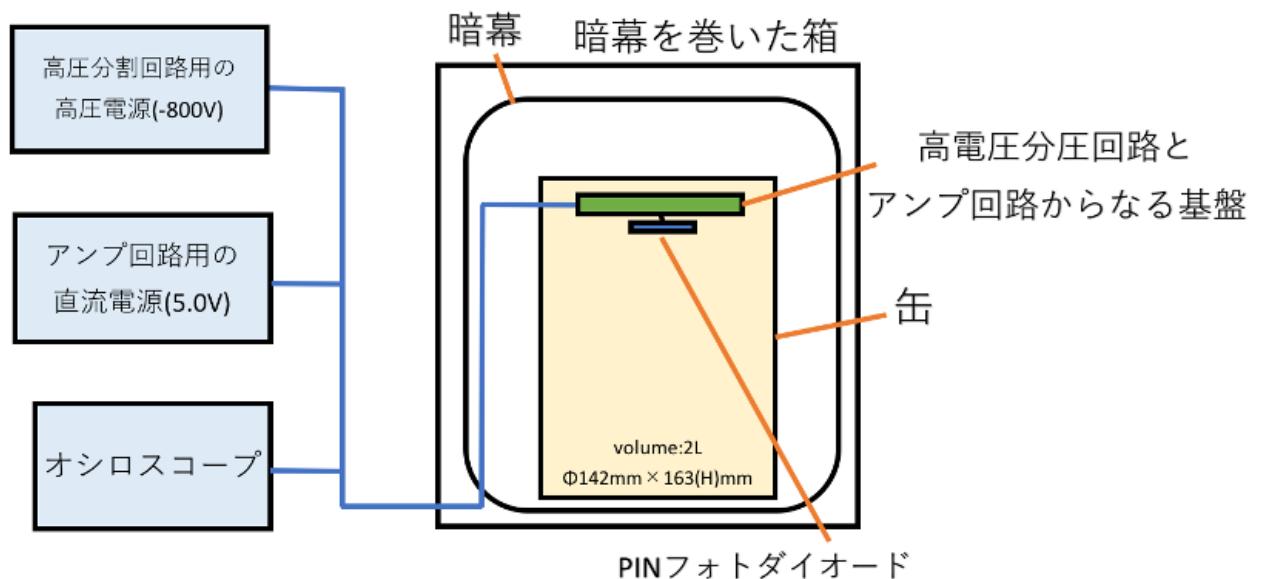


図3.1: ラドン検出器の概略図



図 3.2: ラドン検出器の写真

3.1 ラドン 線源

ラドン線源に関して、サイトカイン社製のラジウムセラミックボールを使用した。表3.1は、サイトカイン社のホームページに記載されているラジウムセラミックボールの定量分析値である。実際のラジウムセラミックボールの写真を図3.3に示す。

表 3.1: ラジウムセラミックボールの定量分析値 [3]

直径	8[mm]
質量	100[g]
定量分析値	[%]
二酸化ケイ素	51.5
アルミナ	13.0
酸化鉄	0.37
酸化チタン	0.44
酸化カルシウム	0.4
酸化マグネシウム	0.41
酸化カリウム	0.24
酸化ナトリウム	0.09



図 3.3: ラジウムセラミックボール [3]

使用しているラジウムセラミックボールの放射能について、製造元のサイトカイン社のホームページに掲載されている値は1gあたり2176.2Bqとなっている。

3.2 ラドン検出器

3.2.1 PIN フォトダイオード

PIN フォトダイオードとは、フォトダイオードの一つであり、受光面側の P 層と基板側の N 層の間に I 型半導体が挟み込まれた構造になっている。I 型半導体の層により、PN 型ダイオードに比べ、逆電圧を印加した際に形成される空乏層が広くなる。空乏層に光や放射線が入射すると、前述した電離作用により、電子と正孔が生成され、電流が流れる。空乏層が広い PIN フォトダイオードはその優秀な感度や高速な応答特性より、光通信システムや光制御に利用されている。

本研究で使用した浜松ホトニクス製の PIN フォトダイオード S3590-09 は、高速応答・高安定性・高エネルギー分解能であり、X 線検出や放射線検出に適したものになっている。S3590-09 の写真と特性を、図 3.4 と表 3.2 に示す。

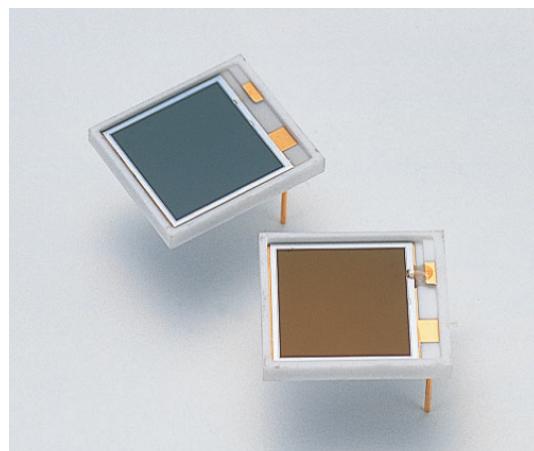


図 3.4: SiPIN フォトダイオード S3590-09[4]

表 3.2: PIN フォトダイオード S3590-09 の特性 [4]

受光面サイズ	10 × 10 [mm]
空乏層厚	0.3 [mm]
逆電圧 $V_{Rmax.}$	100[V]
許容損失 P	100[mW]
動作温度	-20 ~ +60[°C]
最大感度波長	960[nm]
暗電流 $I_{Dmax.}$	6 [nA]
遮断周波数 f_c	40 [MHz]
端子間容量 C_t	40 [pF]

3.2.2 チャージセンシティブアンプ

2章で述べたように、PIN フォトダイオードから出力され、プリアンプに入る電流はとても小さい。そのため、PIN フォトダイオードから出力された微弱な信号をアンプ回路により増幅した。本研究では、アンプ回路にチャージセンシティブアンプを採用した。

チャージセンシティブアンプとは負帰還回路の一種であり、オペアンプにコンデンサを接続した回路で作られる。多くの放射線検出器は電流出力であり、時間積分した出力電荷量と放射線エネルギーが比例するため、チャージセンシティブアンプは、光電子増倍管や比例計数管等の增幅にも広く用いられる。本研究に用いたチャージセンシティブアンプの回路図を図 3.5 に示す。

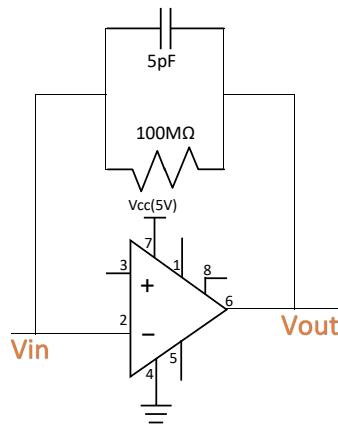


図 3.5: チャージセンシティブアンプ

チャージセンシティブアンプに使用したオペアンプは、超低歪、低ノイズ、完全な FET 入力が特徴の Texas Instruments 社の OPA134 シリーズの OPA134UA である。表 3.3 は OPA134UA の特性をまとめた表である。

表 3.3: オペアンプ OPA134UA の特性 [5]

素子数	8
最大供給電圧 V_{max}	36[V]
最小供給電圧 V_{min}	5[V]
最低動作温度 T_{min}	- 40[°C]
最高動作温度 T_{max}	85[°C]
チャンネル数	1

ここで、エネルギーが 5[MeV] の α 線が入射した時に検出される波高を考える。式 2.2 より、PIN フォトダイオードで生じる電気量は $2.22 \times 10^{-13}[\text{C}]$ である。全ての電荷が 5pF のコンデンサへ入ると仮定した場合、

$$Q_{in} \times C_f = V_{out} \quad (3.1)$$

より

$$V = \frac{2.22 \times 10^{-13}[C]}{5[pF]} = 0.0444[V] \quad (3.2)$$

と求められ、44.4mV の信号が出力される。

3.2.3 高電圧分割回路とアンプ回路

検出部の回路図を図 3.6 に示す。図 3.6 の HV 入力部分から PIN フォトダイオードまでが高電圧分割回路となっており、右側がチャージセンシティブアンプを含むアンプ回路になっている。高電圧分割回路に使用している抵抗やコンデンサーは全て耐高電圧のものを使い、全て自分でプリント基板 (PCB) に実装した。高電圧分割回路とは、-800[V] の高電圧をかけて接地した缶との間に電場を作ると同時に、高電圧を抵抗分割して PIN フォトダイオードには逆バイアス電圧 (< 100[V]) を印加するというものである。そうすることで、静電捕集用の高電圧と PIN フォトダイオードにかける逆バイアス電圧を同じ電源から供給することができる。

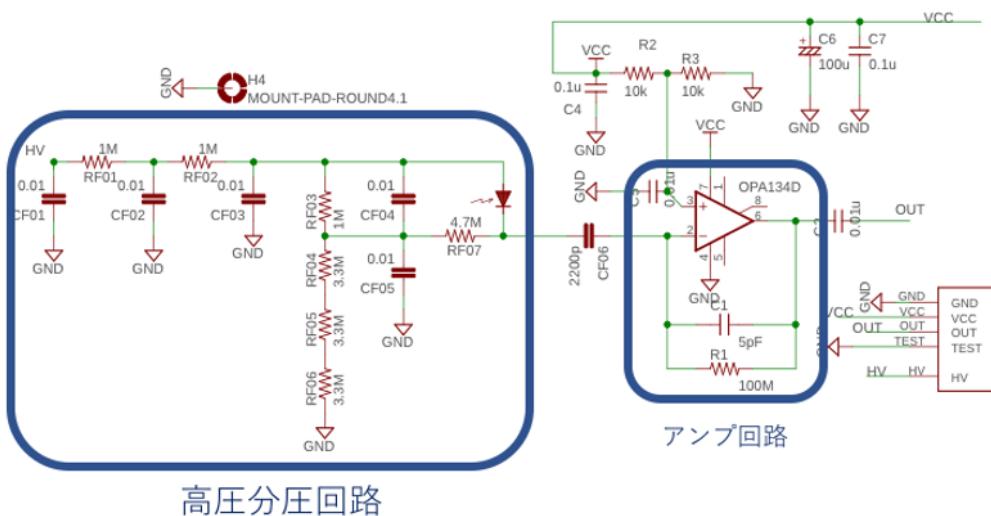


図 3.6: ラドン検出器の基盤

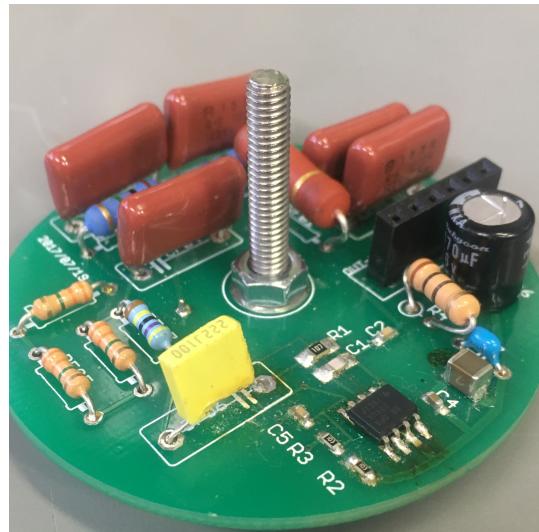


図 3.7: 高電圧分圧回路とアンプ回路からなる基盤(蓋側)

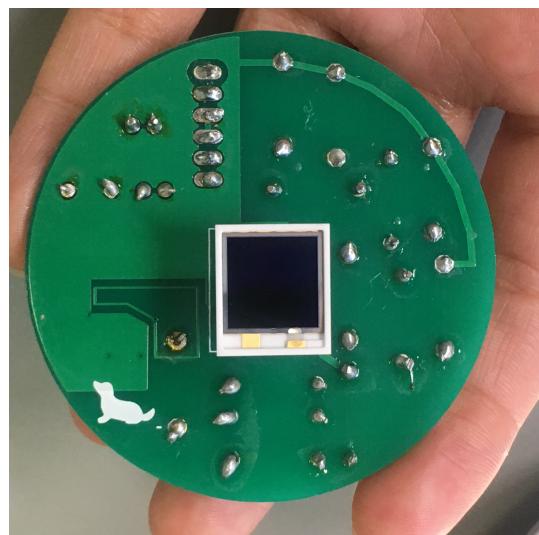


図 3.8: 高電圧分圧回路とアンプ回路からなる基盤(Si PIN フォトダイオード 側)

第4章 ラドン測定

4.1 チャージセンシティブアンプの線型性

基盤の作成が完了し、チャージセンシティブアンプが正常に動作しているかの確認のため、その線型性を確かめた。まず、図4.1のようにプリアンプの2200pFのコンデンサとプリアンプの間から導線を延ばし、5pFのコンデンサを取り付け、ファンクションジェネレーターから矩形波を入力し、プリアンプの出力を確認した。

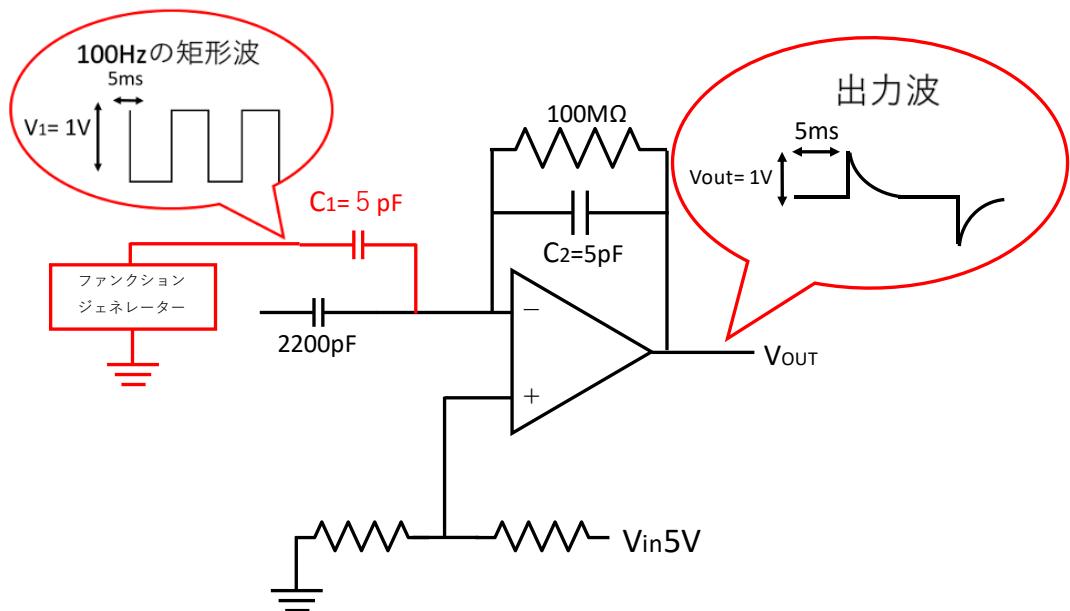


図 4.1: チャージセンシティブアンプの性能評価のためのセットアップ

ここで、入力電圧を $V_{in}[V]$ 、取り付けるコンデンサを $C_1 = 5[pF]$ 、チャージセンシティブアンプのコンデンサ $C_2=5[pF]$ 、出力される電圧を V_{out} 、コンデンサに蓄えられる電荷量をそれぞれ Q_1 、 Q_2 とすると、電荷保存則より $V \times C = Q$ より

$$V_{in} \times C_1 = Q_1 \quad (4.1)$$

$$V_{out} \times C_2 = Q_2 \quad (4.2)$$

$$Q_1 = Q_2 \quad (4.3)$$

$$(4.4)$$

が成り立つので

$$V_{out} = \frac{Q_2}{C_2} = \frac{C_1}{C_2} V_{in} \quad (4.5)$$

が得られ、ファンクションジェネレータから入力する V_{in} に比例して V_{out} が変化することがわかる。チャージセンシティブアンプが正常に動作している場合、入力電圧 V_{in} に比例し V_{out} が変化する。図 4.2 はファンクションジェネレーターで 1V を入力した時にオシロスコープで読み出された信号である。図 4.3 は、ファンクションジェネレーターからの入力電圧を 100[mV] から 1[V] まで 100[mV] 刻みで増加させた時、チャージセンシティブアンプの出力の最大波高電圧値をオシロスコープで観測した結果である。



図 4.2: 1V を入力した際のチャージセンシティブアンプの出力波形

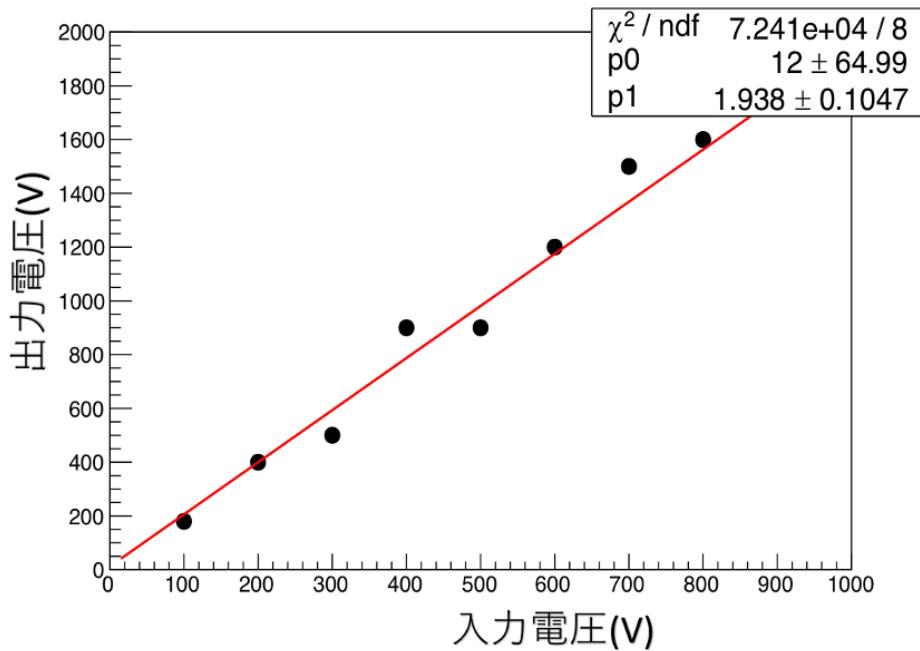


図 4.3: チャージセンシティブアンプの入力電圧と出力電圧の関係

図 4.3 の傾きが 1.938 なので、

$$\frac{C_2}{C_1} = 1.938 \quad (4.6)$$

となった。これは実際のコンデンサの静電容量比 $\frac{C_2=5[pF]}{C_1=5[pF]} = 1$ から大きく離れてしまっていることがわかる。この不一致の原因として、使用しているコンデンサの精度や浮遊容量の影響、ファンクションジェネレーターから電圧を入力するために取り付けた 3cm 程度の長さの導線の影響が考えられる。入力信号に対する出力信号の大きさは期待したものからはずれたが、チャージセンシティブアンプの線型性は確認できた。以上の測定から、チャージセンシティブアンプは正常に動作すると判断した。

4.2 ラドンの測定

チャージセンシティブアンプの動作確認等が完了したのち、3章で示したセットアップで、ラドンの測定を開始した。オシロスコープのトリガーを 30[mV] に設定し、オシロスコープのセグメント・メモリー機能を使用し 1 時間ごとに測定を行った。図 4.4 は、オシロスコープで観測されたラドンの信号である。

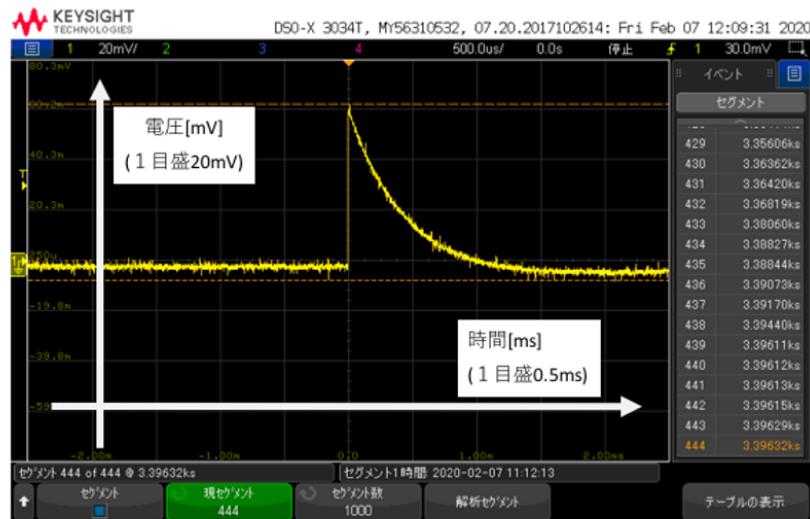


図 4.4: オシロスコープで観測したラドンの信号

オシロスコープで取集したデータは、ROOT[6] で解析した。ROOT とは、CERN によって開発されたデータ解析用のライブラリ群である。ROOT では、グラフやヒストグラムの作成のほか、高エネルギー物理学の研究に不可欠な機能が組み込まれており、様々な分野で広く使用されている。

4.2.1 PIN フォトダイオードと線源の距離

ラジウムセラミックボールと PIN フォトダイオード の距離を近づけた場合と離した場合とで測定を行い、信号の違いを調べた。図 4.5 のように、まずラジウムセラミックボールを入れた箱を底上げし、ラジウムセラミックボールと PIN フォトダイオード の距離を 1cm 程度に近づけて測定を行なった。次に図 4.2.1 のように底上げを除き、ラジウムセラミックボールと PIN フォトダイオード の距離を 4cm 程に離して測定を行なった。

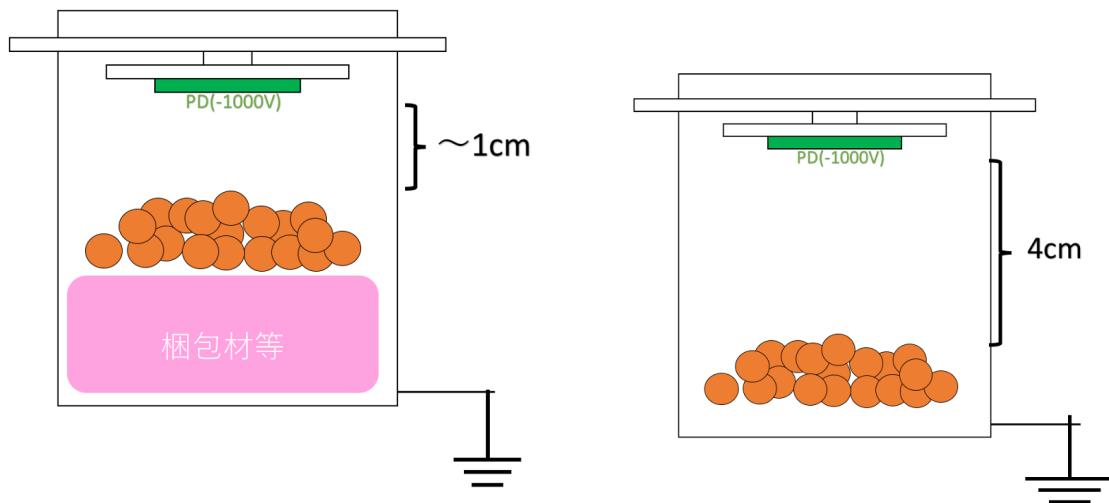


図 4.6: ラジウムセラミックボールを底に置いた場合

図 4.5: ラジウムセラミックボールを底上げした場合

ラジウムセラミックボールをラドン検出器に入れてから 1 時間測定を行ったデータの波高分布はそれぞれ図 4.7 と図 4.8 のようになった。

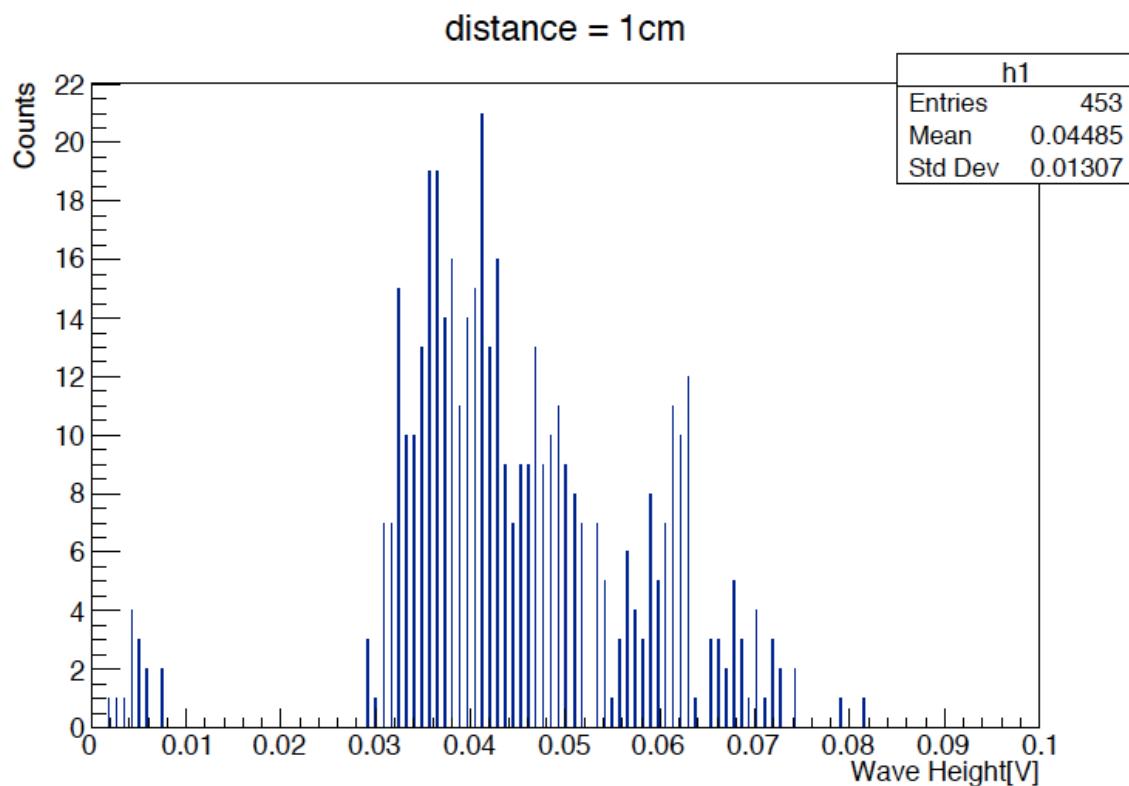


図 4.7: ラジウムセラミックボールと PIN フォトダイオードの距離が 1cm の場合の信号

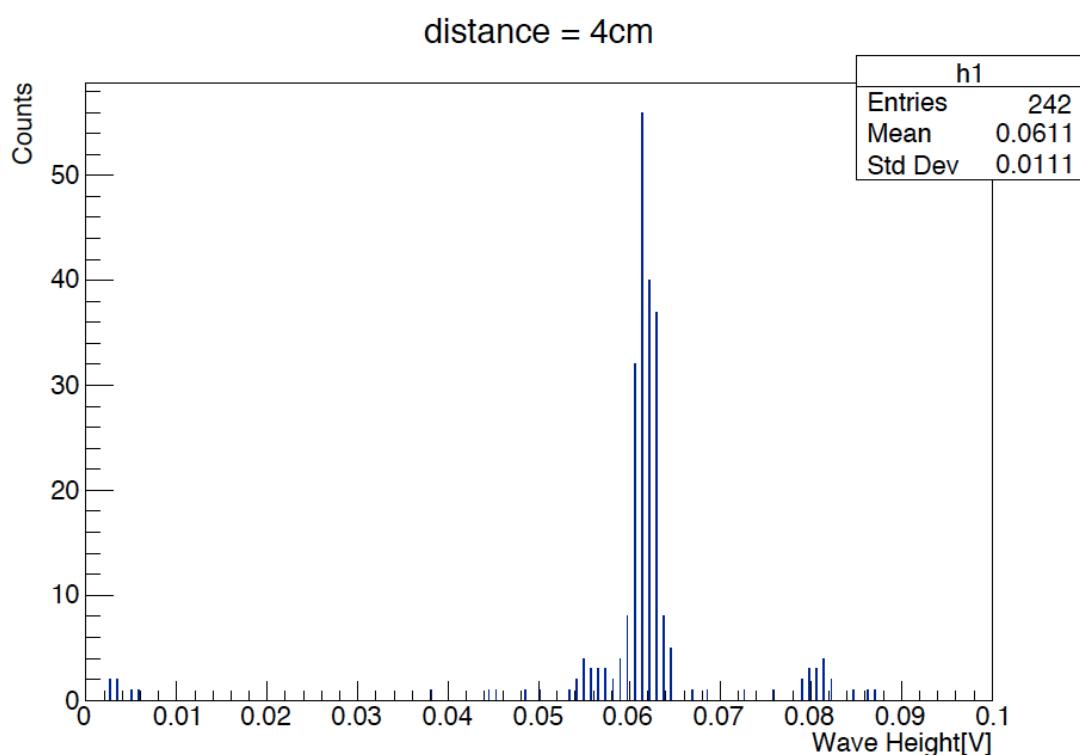


図 4.8: ラジウムセラミックボールと PIN フォトダイオードの距離が 4cm の場合の信号

図4.7では、底上げをしたときは0.03[V]から0.05[V]にかけて、連続的な分布が観測された。一方、図4.8では、0.06[V]にピークが現れている。

この結果について考察する。まず図4.7のラジウムセラミックボールとPINフォトダイオードの距離が1cmの場合、主に、ラジウムセラミックボールでの α 崩壊で生成された α 線が観測されたと考えられる。この α 線は、空气中でエネルギーの一部を失った後に、PINフォトダイオードに入射するため、連続的なエネルギー分布を持つ。一方、図4.8のラジウムセラミックビールとPINフォトダイオードの距離が4cmの場合、主に信号として検出されるのは、イオン化したポロニウムがPINフォトダイオードに吸着し、その後崩壊した際に放出される α 線だと考えられる。この時、PINフォトダイオードとポロニウムの距離はほとんどゼロなので、 α 線は空气中でほとんどエネルギーを損失しないでPINフォトダイオードに入射し、 α 線のエネルギーに対応するピークが観測される。図1.8の α 線の飛程とエネルギーのグラフによると、 α 線のエネルギーが5[MeV]の時、空中での飛程は約3.5[cm]である。つまり、ラジウムセラミックボールとの距離を3.5[cm]以上にするとラジウムセラミックボールから放射された α 粒子がPINフォトダイオードに入射する確率は低くなる。

4.2.2 半減期の測定

1章で述べたように、ラドンにはウラン系列、トリウム系列、アクチニウム系列が存在する。このうち、ラジウムセラミックボールに含まれているラジウムはトリウム系列の ^{224}Ra 、ウラン系列の ^{226}Ra である。そこで、検出されている信号が主にどちらの系列のラドンによる信号かを判断するため、半減期の測定を行なった。

まず、ウラン系列における ^{222}Rn 以降の放射性元素の半減期を考える。 ^{222}Rn のガスがラドン検出器中に存在している時、 ^{218}Po が α 崩壊により発生し、PINフォトダイオードに吸着する。 ^{218}Po から ^{210}Pb までには、寿命の長い放射性元素は存在しないので、ラジウムセラミックボールをラドン検出器に入れてから2,3時間後には ^{218}Po から ^{210}Pb までの崩壊がある程度進み、主に ^{218}Po と ^{214}Pb の α 線のエネルギーのピークが現れることが期待される。

一方で、トリウム系列の場合、 ^{220}Rn から崩壊した ^{216}Po は半減期0.145秒で ^{212}Pb へ崩壊する。 ^{212}Pb の半減期は10時間以上あることから、ジウムセラミックボールをラドン検出器に入れてすぐに ^{216}Po の α 線のエネルギーのピークが現れ、 ^{212}Pb の半減期である10時間程度の時間が経過すると ^{212}Pb の娘核である ^{212}Bi 、 ^{212}Po の α 線のエネルギーのピークが現れる始める。

以上の結果、ウラン系列とトリウム系列で、ラジウムセラミックボールをラドン検出器に入れた後の最初の10時間の α 線のエネルギー分布に違いが生じる。ラジウムセラミックボールをラドン検出器にいれた直後から10時間後までの、1時間毎の α 線のエネルギー分布を図4.9から図4.18に示す。

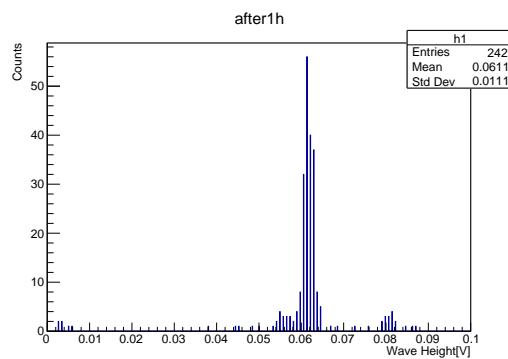


図 4.9: ラジウムセラミックボールをラドン検出器にいれてから 1 時間後の α 線のエネルギー分布

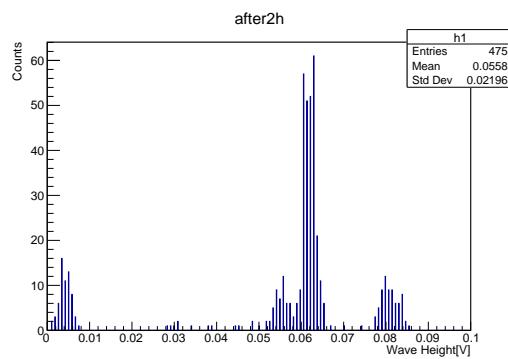


図 4.10: ラジウムセラミックボールをラドン検出器にいれてから 2 時間後の α 線のエネルギー分布

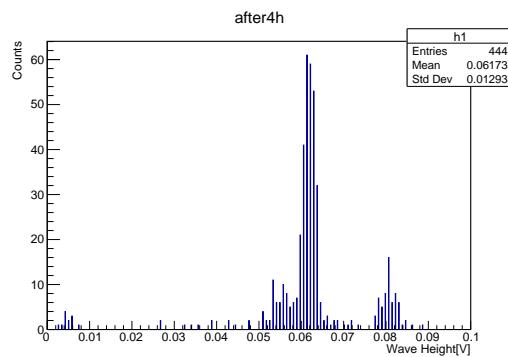


図 4.11: ラジウムセラミックボールをラドン検出器にいれてから 3 時間後の α 線のエネルギー分布

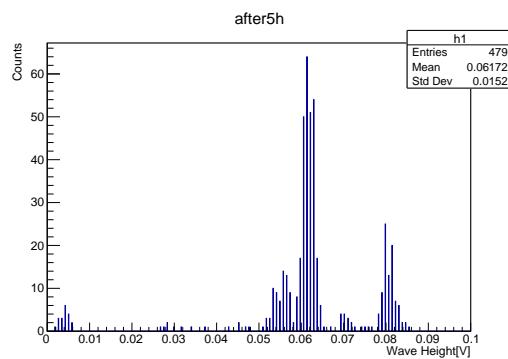


図 4.12: ラジウムセラミックボールをラドン検出器にいれてから 4 時間後の α 線のエネルギー分布

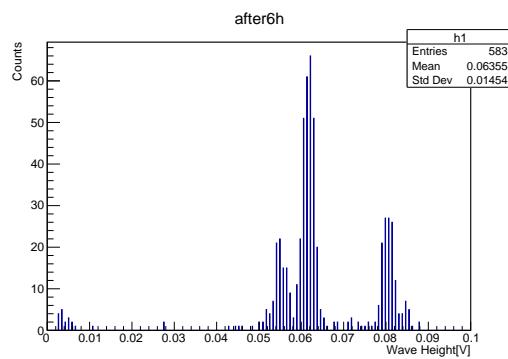


図 4.13: ラジウムセラミックボールをラドン検出器にいれてから 5 時間後の α 線のエネルギー分布

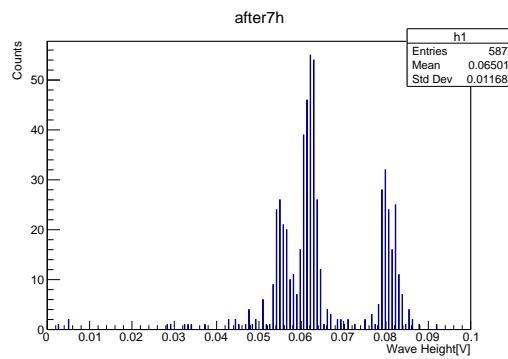


図 4.14: ラジウムセラミックボールをラドン検出器にいれてから 6 時間後の α 線のエネルギー分布

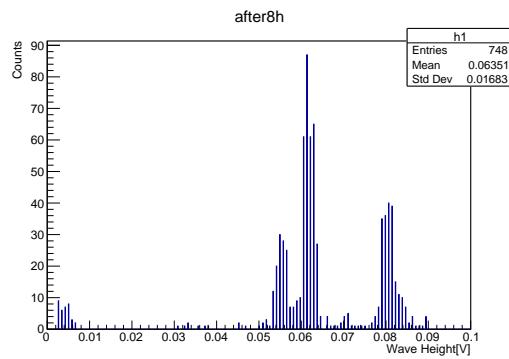


図 4.15: ラジウムセラミックボールをラドン検出器にいれてから 7 時間後の α 線のエネルギー分布

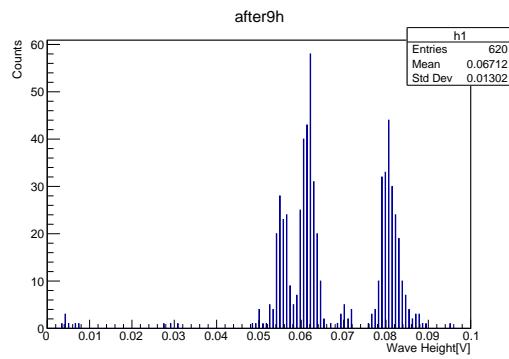


図 4.16: ラジウムセラミックボールをラドン検出器にいれてから 8 時間後の α 線のエネルギー分布

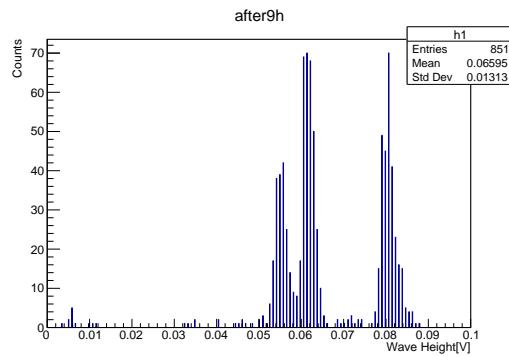


図 4.17: ラジウムセラミックボールをラドン検出器にいれてから 9 時間後の α 線のエネルギー分布

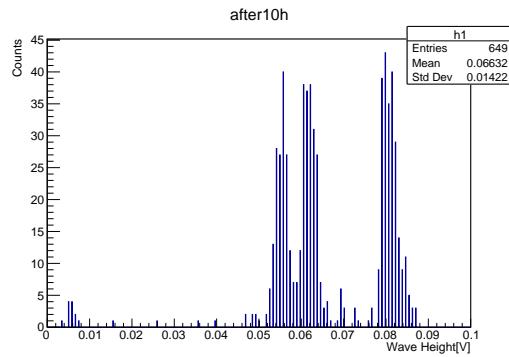


図 4.18: ラジウムセラミックボールをラドン検出器にいれてから 10 時間後の波高分布

図 4.9 から図 4.18 を見ると、はじめに 0.06[V] 付近にピークが現れ、徐々に 0.055[V] と 0.08[V] 付近にピークが現れ始め、10 時間後にははっきりと 3 つのピークが現れている。

3 つのピークが見えている点、10 時間の測定で徐々に 2 つのピークが大きくなる様子から、これらのピークはそれぞれトリウム系列の ^{212}Bi 、 ^{216}Po 、 ^{212}Po が崩壊したときの α 線の信号だと図 4.19 のように仮定した。以下、この仮定の検証を行う。

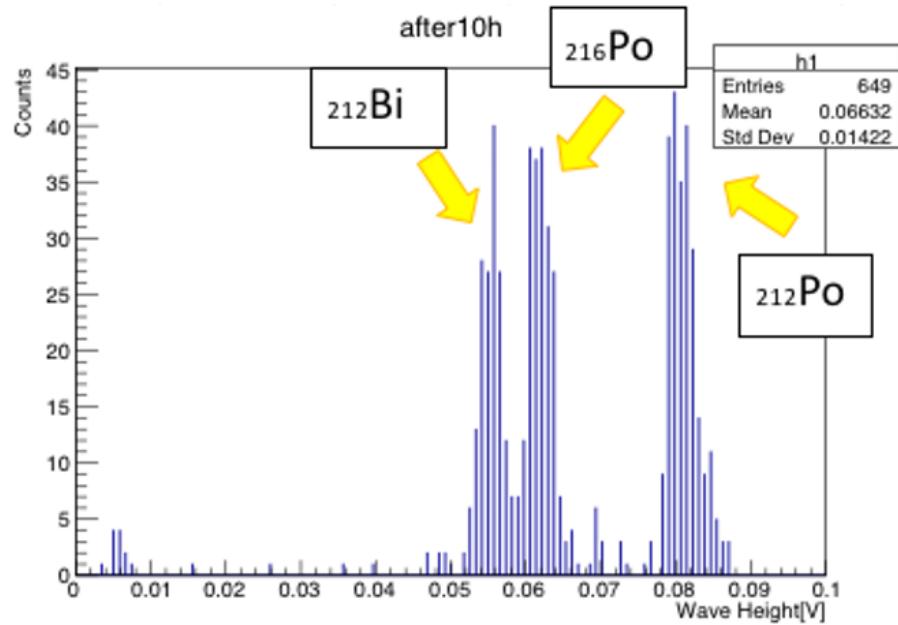


図 4.19: ラジウムセラミックボールをラドン計に入れてから 10 時間後の波高分布とトリウム系列の α 線エネルギーの対応

もし観測された信号がトリウム系列のラドン起源の場合、 ^{220}Rn の半減期が 55 秒であり、 ^{216}Po の半減期が 0.145 秒であることから、ラジウムセラミックボールをラドン検出器に 10 時間測入された直後に、缶からラジウムセラミックボールを取り出し測定すると、 ^{216}Po の α 線のエネルギーのピークと予想した 0.06[V] 付近のピークが急激に減っていく様子が見れるはずである。そこで、ラジウムセラミックボールをラドン検出器から取り出して 1 時間後、3 時間後、5 時間後の波高分布を図 4.20 から図 4.22 に示す。

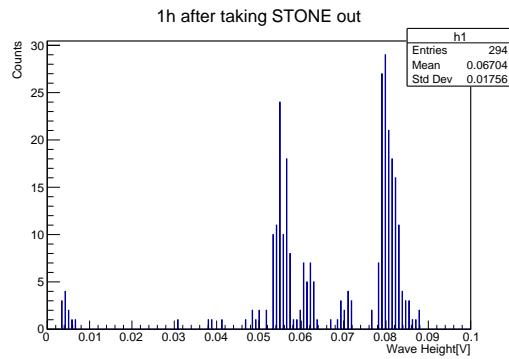


図 4.20: ラジウムセラミックボールをラドン計から取り出して 1 時間後の波高分布

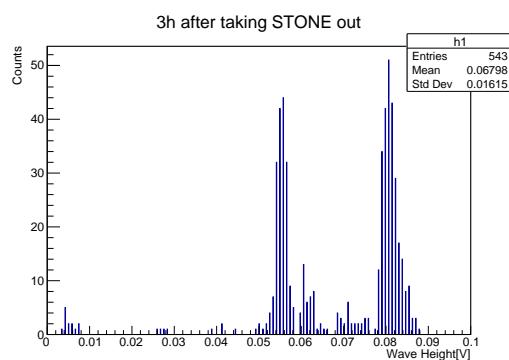


図 4.21: ラジウムセラミックボールをラドン計から取り出して 3 時間後の波高分布

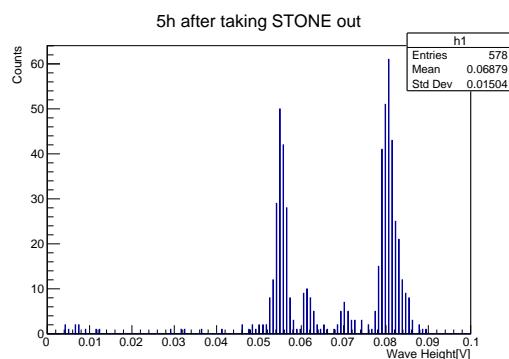


図 4.22: ラジウムセラミックボールをラドン計から取り出して 5 時間後の波高分布

図 4.20 から図 4.22 を見ると、石を取り出した直後に 0.06[V] 付近の信号が急激に減少したことがわかる。一方で、両側の 0.055[V]、0.08[V] 付近のピークは増え続けている。これは、トリウム系列の崩壊図（図 1.2）で ^{212}Pb より下流の α 崩壊で生成される α 線が観測されていると考えられる。これにより、先程の仮定は正しいことが示せた。

4.2.3 α 線のエネルギーの較正

図 4.19 の 3 つのピークは、それぞれトリウム系列の ^{212}Bi 、 ^{216}Po 、 ^{212}Po が α 崩壊したときの α 線のエネルギーに対応する。これらのピークをそれぞれガウス分布で fitting した結果を図 4.23 から図 4.25 に示す。

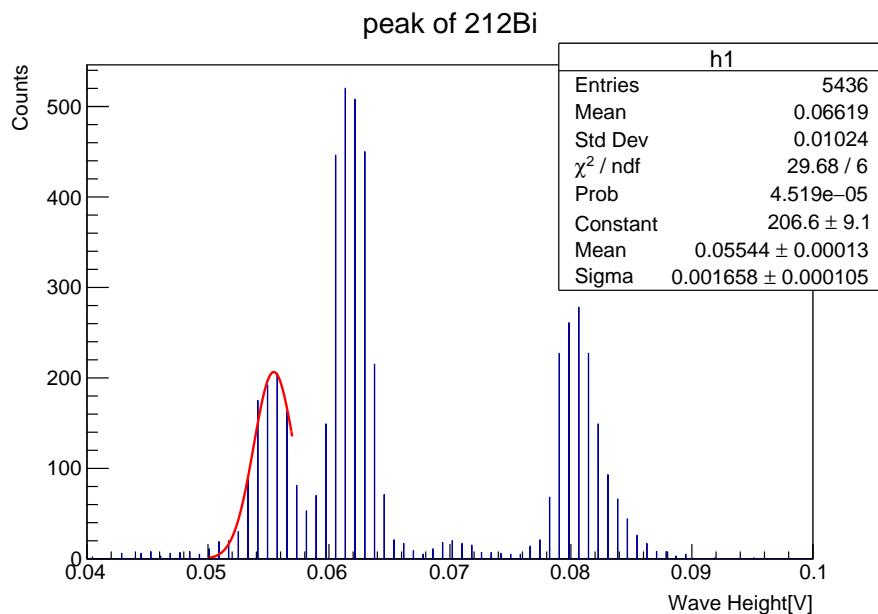


図 4.23: ^{216}Bi のピークの fitting

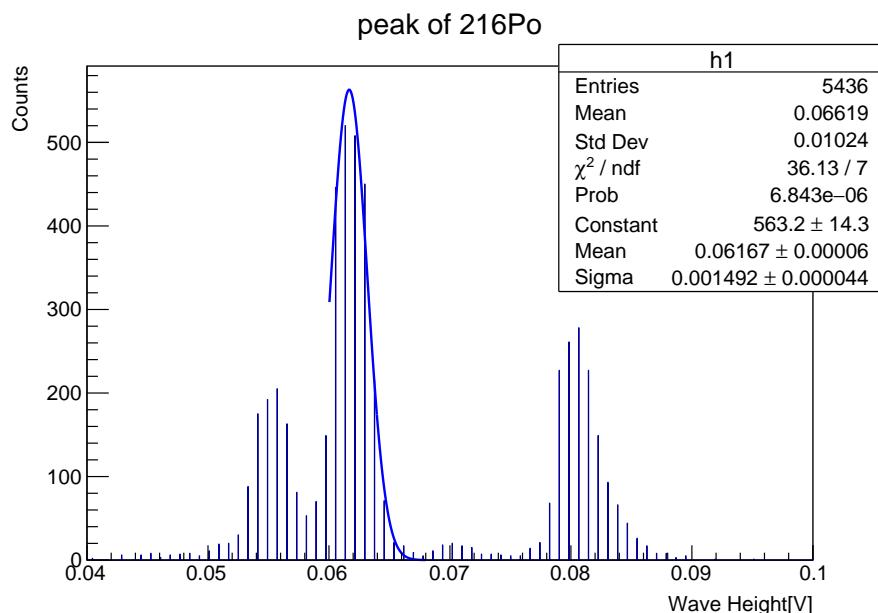


図 4.24: ^{216}Po のピークの fitting

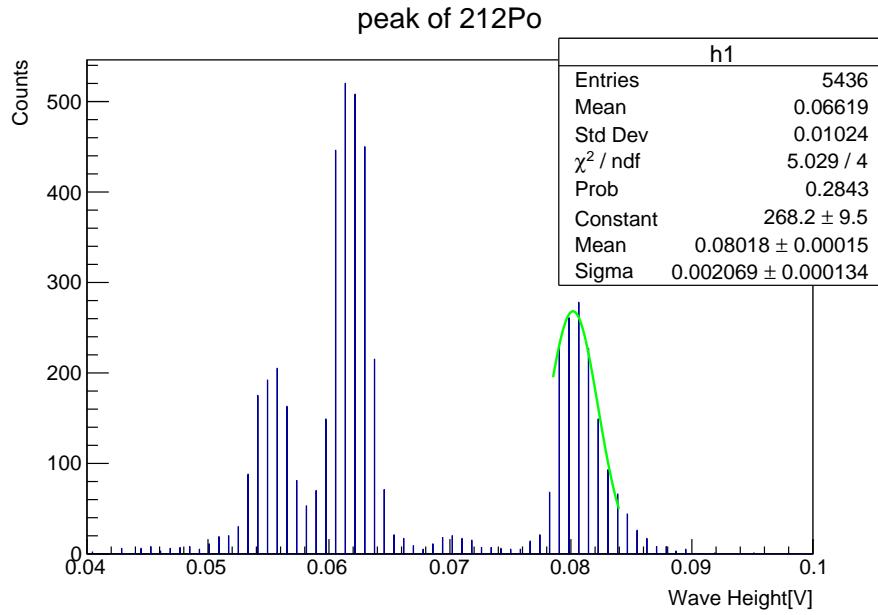


図 4.25: ^{212}Po のピークの fitting

fitting した結果より、 ^{212}Bi のピークは $55.44 \pm 0.13 [mV]$ 、 ^{216}Po のピークは $61.67 \pm 0.06 [mV]$ 、 ^{212}Po のピークは $80.18 \pm 0.15 [mV]$ である。それぞれの α 線のエネルギーの文献値と信号電圧と、その 3 点を一次関数で fitting した直線を図 4.26 に示す。

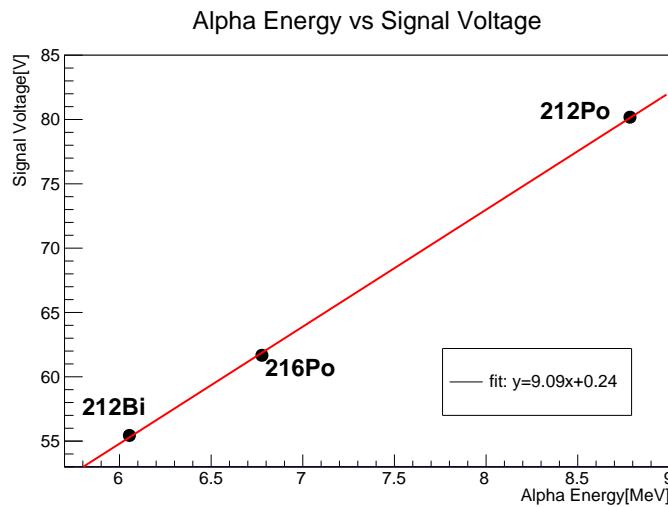


図 4.26: ^{212}Po 、 ^{212}Bi 、 ^{212}Po と 3 点を fitting して求められた信号電圧と α 線のエネルギーの関係

図 4.26 より、 ^{212}Po 、 ^{212}Bi 、 ^{212}Po の座標と、3 点を fitting して求められた直線 $y = 9.09x + 0.24$ がほとんど一致し、 $x = 0$ での切片も 0 に近くなっている。このため、 α 線のエネルギーの文献値と、測定される信号電圧の関係がよく対応していることから、今回制作したラドン検出器では α 線のエネルギーを正確に測定していることが確認できた。

第5章 結論

我々にとって最も身近な放射性元素であるラドンは、宇宙素粒子実験において背景事象(バックグラウンド)となる。本研究では、簡易的なラドン検出器として PIN フォトダイオードを用いたラドン検出器の制作を行なった。

本論文では最初に、放射性の性質や PIN フォトダイオードの原理などを述べ、ラドン検出器の制作過程を記述した。まず、本体の制作に加えて、高電圧分割回路とアンプ回路からなる基盤を製作した。プリント基板には回路部品を自分で実装し、動作の確認を行った。その後、放射線源であるラジウムセラミックボールをラドン検出器の内部に入れ、ラドン信号の測定に成功した。また、信号の時間変化を観測することで、観測されたラドンがトリウム系列であることを実証した。さらに、観測された3つのエネルギー分布のピークがそれぞれ ^{212}Bi 、 ^{216}Po 、 ^{212}Po からの α 線のエネルギーの文献値と一致することを確認した。

今後、高圧電源や Raspberry Pi などのマイクロコンピューターを内蔵することによりさらなる小型化が期待できる他、スーパーカミオカンデなどの宇宙素粒子実験での実際のラドンバックグラウンド測定に向け、更なる検出器の高精度化を行なっていきたい。

謝辞

本研究を進めるにあたり、多くの方のご協力及びご指導いただきましたのでここにお礼申し上げます。

まず、私の指導教官である南野准教授には、本研究に関わる機会を与えてくださっただけでなく、ご多忙の中、理論や研究の基本的な事から熱心にご指導していただきました。時には研究会や講習会など、様々な経験ができる機会を積極的に与えてくださいり、初めて研究に携わる私にとって、とても有意義な一年にしてくださいました。心から感謝申し上げます。

さらに、研究を進めるにあたって訪問させていただき、さらには装置の一部を快くくださった筑波大学の三明康郎先生は、右も左も分からなかつた私に、回路に関する知識から測定に関するここまで手取り足取り教えてくださいました。毎日お忙しい中、お時間を割いて丁寧にご指導してくださり、言うに尽くせない感謝の気持ちでいっぱいです。

また、突然のご連絡にも関わらず、ご丁寧にご相談に乗って頂いた下村真弥先生をはじめとする、奈良女子大学の高エネルギー物理学研究室の皆さん。特に、先行研究をされて、ご相談に乗って頂いた港陽子さん、鈴木彩香さん。当初は勝手ながら参考にさせていただいておりましたが、本当にお世話になりました。

また、様々な面で助けて頂いた本研究室の先輩方。淺田さん、岡本さん、ジョジョには回路の知識を始め、研究にまつわる様々な事を教えて頂き、アドバイスを頂きました。谷原さんには、回路の仕組みや ROOT の使い方などで相談した際はとても親身に相談に乗っていただきました。片山さんには、研究に関わることだけでなく、様々なご相談に乗っていただき、大変お世話になりました。佐々木さんは、困った時にはすぐに助けを求めていましたが、いつも親身に教えていただき、気にかけてくださいました。そして同期の佐野君、栗田君にも多くの場面で助けていただき、感謝を申し上げます。

最後に、私をいつも支えてきてくださった両親に心より感謝いたします。

改めまして、本研究においてご支援賜りました全ての方々に深く御礼致します。この研究で得られた知識を活かして、今後も研究生活を送っていきたいと思っております。

参考文献

- [1] 電気事業連合会,”放射線の種類と性質”,<https://www.fepc.or.jp>
- [2] Glenn F. Knoll ”放射線計測ハンドブック”(オーム社; 第4版; 2013年)
- [3] サイトカイン社, ”セラミック鉱石本舗”, <https://www.ceramic-kouseki.com/product/2>
- [4] S3690-09 データシート (浜松ホトニクス社)
- [5] OPA1334UA データシート (Texas Instruments 社)
- [6] CERN, ”ROOT a Data analysis Framework”, <https://root.cern.ch>
- [7] 港陽子, 鈴木彩香, ”小型ラドン検出器の開発”, (奈良女子大学, 卒業論文, 2018,)
- [8] 青山美嶺, 西川愛, ”小型ラドン検出器の性能評価及び改良”, (奈良女子大学, 卒業論文, 2019)
- [9] 清水暁生 (浜松ホトニクス社), ”しくみ図解シリーズ 電子回路が一番わかる”, (加藤文明社, 2016)