

地震予知に向けたラドン検出装置の開発

横浜国立大学 理工学部
数物・電子情報学科 物理工学 EP
南野研究室
学籍番号 1964125
島村 蓮

2022年2月14日

概要

ラドンは岩石に含まれるウラン、トリウムの崩壊によって生じる放射性希ガスであり、地震と関わりがあると知られている。特に、地震前に大気中のラドン濃度が変動するという先行研究があり、ラドンの計測は地震予知に役立つと考えられている。更に兵庫県立大学の後藤忠徳先生によってラドン濃度を様々な地点でマッピング測定することで、未知の断層の発見を試みる研究も行われている。しかし先行研究で大気中のラドン濃度の計測に使われている rad7 という機器は非常に高価なため、本研究では、安価で長期間安定してラドン測定が可能なラドン検出器を開発している。ラドン検出器の低コスト化はマッピング計測の大幅な時間短縮を可能にすると考えられている。

本研究では、主に以下の二つを進めた。一つ目はラドン検出器の作成である。筑波大学の三明康郎先生の協力の下、実際に静電捕集法で空気中のラドンを検出することが可能な検出器を作成した。その後、トリウム系列を多く含む線源を用いて、製作したラドン検出器の性能評価を行い、期待どおりの性能を持つことを実証した。二つ目は、地震予知の向けた、大気中のラドン濃度を測定するためのセットアップを構築したことである。地震予知のために屋外や地下の空気中のラドン濃度を測定するために、水槽用エアーポンプを使って外部の空気をラドン検出器に取りこむセットアップを構築した。今後、検出感度を最大化するために、検出器容器の大きさやエアーポンプ流量などの最適化を行う。

目 次

1 地震とラドン	5
1.1 ラドン (Rn) とは	6
1.2 α 線について	7
1.3 半減期	8
1.4 放射平衡	9
1.5 永続平衡	10
2 ラドンの検出原理	11
2.1 Si PIN フォトダイオード	11
2.2 モナズ石	13
2.3 静電捕集法	13
3 ラドン検出器の制作	14
3.1 Front End 基板	15
3.1.1 高電圧分割回路	15
3.1.2 電荷増幅回路	15
3.2 整形アンプ基板	16
3.2.1 整形・增幅回路	17
3.2.2 トリガー回路	17
3.2.3 サンプル&ホールド回路	17
3.2.4 ADC 回路	17
3.2.5 整形アンプ基板の調整	18
3.3 raspberry pi	19
3.4 電源基板	19
4 ラドン検出器の性能評価	20
4.1 整形アンプ基板の線型性の確認	20
4.2 Radon 制御・解析用 web サーバー	21
4.3 ラドン測定	22
4.3.1 測定方法	22
4.3.2 測定結果と考察	22
4.4 ^{220}Rn の娘核の半減期測定	24
4.4.1 測定方法	24
4.4.2 測定結果	24
4.5 電圧と検出効率	26
4.5.1 測定方法	26
4.5.2 測定結果	26
5 空気中のラドン検出装置の構築	27
5.1 エアポンプ	28
5.2 流量計	29
5.3 試料缶と検出缶	30

6 空気中のラドン検出装置のシミュレーション	31
6.1 シミュレーションの手順	31
6.2 シミュレーション結果	34
7 まとめと今後の展望	36
8 参考文献	38
9 補足	40

1 地震とラドン

地震が発生する前後に震源地周辺の空気中のラドン (^{222}Rn) 濃度の変動が確認されている。例えば、国立研究開発法人 量子化学研究開発機構の研究からは 1995 年 1 月 17 日に発生した兵庫県南部地震(図 1)の 1 年前ほどから空気中のラドン濃度の上昇が見られており、東北大学の研究でも 2018 年 6 月 18 日に発生した大阪北部地震(図 2)発生約 1 年前から空気中のラドン濃度の減少が確認されている。よって、空気中のラドン濃度の変動をモニターすることで地震の予知ができると考えられている。更に兵庫県立大学の後藤忠徳先生によって様々な地点でラドン濃度をマッピング測定することによって、未知の断層の発見を試みる研究も行われている。

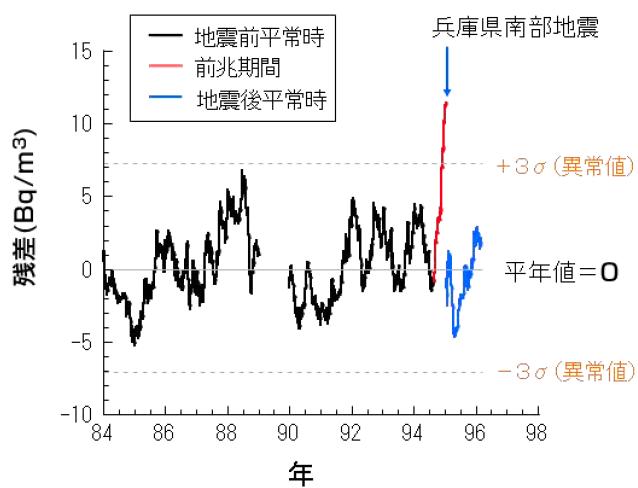


図 1: 兵庫県南部地震発生前後のラドン (^{222}Rn) 濃度の変化 [4]

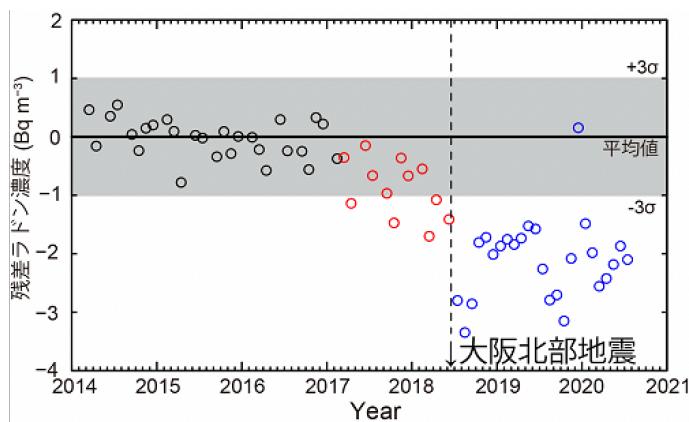


図 2: 大阪北部地震発生前後のラドン (^{222}Rn) 濃度の変化 [5]

1.1 ラドン (Rn) とは

ラドン Rn は原子番号 86、希ガス元素、放射性物質という特徴を持つ。ラドンは空気中に最も多く存在する放射性物質である。図 3、図 4、図 5 に示したとおり、ラドンは岩石や土に含まれているウラン U 系列やトリウム Th 系列の崩壊によって出来る物質であり、私達が日常的に自然界から受けている放射線の約半分はラドンによるものである。

ラドンはウラン系列 (図 3)、トリウム系列 (図 4)、アクチニウム系列 (図 5)、ネプツニウム系列の 4 つの崩壊系列が存在する。

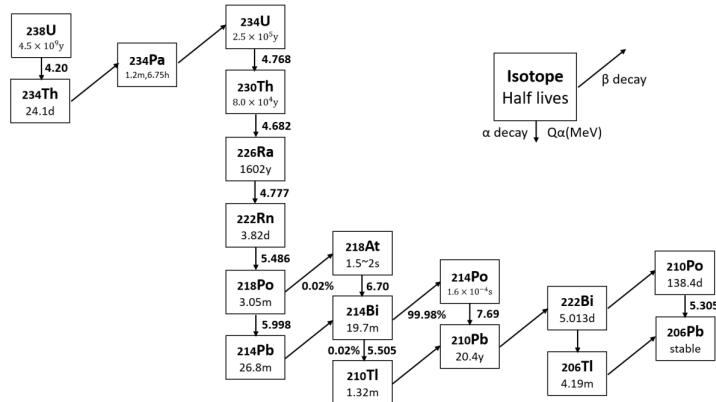


図 3: ウラン系列 [1]

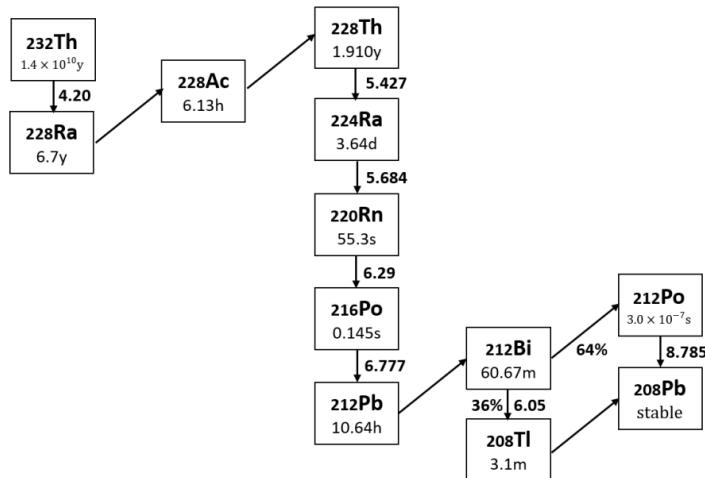


図 4: トリウム系列 [1]

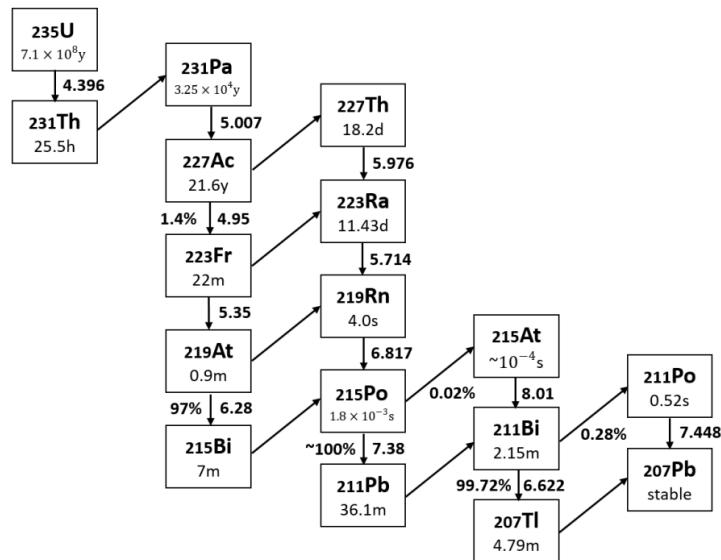


図 5: アクチニウム系列 [1]

1.2 α 線について

放射性核種は崩壊を起こすことによって、 ${}^4\text{He}$ の原子核である α 線、電子である β 線、電磁波である γ 線、中性子線を放出する。これらの放射線は図 6 のようにそれぞれ透過力に違いがあり、 α 線は紙一枚で、 β 線はアルミニウムなどの薄い金属板、 γ 線は鉛や鉄の厚い板を使えば遮ることができます。

放射線は、いろいろな物質で遮ることができます

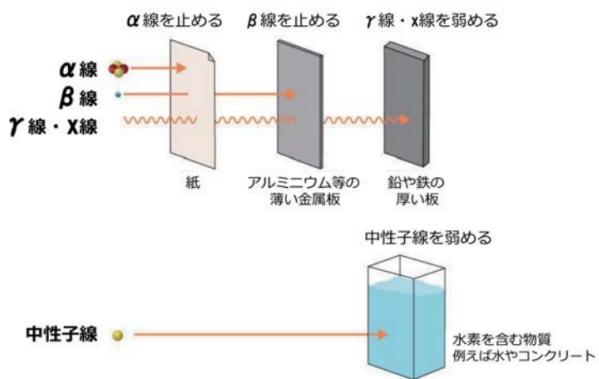


図 6: 放射線と透過力 [6]

α 線は物質中にある原子から電子を弾き飛ばすことによって電子正孔対をつくるという電離作用をもつ。 α 線は空気中では数 cm ほどの飛程しか持たない。 α 崩壊の式 (1) は以下のようになる。

$${}_Z^AX \rightarrow {}_{Z-2}^{A-4}Y + {}_2^4\alpha \quad (1)$$

1.3 半減期

放射性元素が、元の数の半分になるまでの時間を半減期という。半減期を T 、時刻 t のときの原子数を $N(t)$ とすると、 $t = 0$ 、 $t = T$ のときの原子数は以下のように表すとする。

$$N(0) = N_0 \quad (2)$$

$$N(T) = \frac{N_0}{2} \quad (3)$$

これらを使って $N(t)$ を表すと式 (4) のようになる

$$N(t) = N_0 \left(\frac{1}{2} \right)^{\frac{t}{T}} \quad (4)$$

単位時間に放射性元素が崩壊する確率である崩壊定数を λ とする。時刻 t と時刻 $t + \Delta t$ の原子核の個数は $N(t)$ 、 $N(t + \Delta t)$ は式 (5) のような関係がある。

$$N(t) - N(t + \Delta t) = \lambda N(t) \Delta t \quad (5)$$

これは、以下のように書き換えることができる。

$$dN(t) = -\lambda N(t) dt$$

両辺を積分して、式 (2), 式 (3) を用いると

$$\int \frac{1}{N(t)} dN(t) = -\lambda \int dt$$

$$N(t) = N_0 e^{-\lambda t} \quad (6)$$

と表すことができる。ここで式 (3) と式 (6) に $t = T$ を代入すると、

$$T = \frac{\ln 2}{\lambda} \quad (7)$$

と表すことができる。つまり式 (7) のように崩壊定数と半減期の関係を導くことができる。

1.4 放射平衡

1.3 では崩壊を起こす核種が一つである場合の t 秒後の原子核の個数を式 (6) で表すことができた。1.4 では放射性物質の核種の娘核、孫核も放射性物質である場合の時刻 t の原子の個数を表すことを考える。

核種 A の娘核を核種 B、核種 B の娘核を核種 C とする。 $t = 0$ の原子核の個数を $N_A(0) = N_0$ 、 $N_B(0) = 0$ 、 $N_C(0) = 0$ として、時刻 t のそれぞれの原子核の個数は以下のように表すことができる。

$$\frac{dN_A(t)}{dt} = -\lambda_A N_A(t) \quad (8)$$

$$\frac{dN_B(t)}{dt} = \lambda_A N_A(t) - \lambda_B N_B(t) \quad (9)$$

$$\frac{dN_C(t)}{dt} = \lambda_B N_B(t) - \lambda_C N_C(t) \quad (10)$$

N_A の微分方程式 (8) を解いて、 $t = 0$ のとき $N_A = N_0$ を代入すると以下のようになる。

$$N_A(t) = N_0 e^{-\lambda_A t} \quad (11)$$

この値を代入して N_B を求める。

$$\frac{dN_B(t)}{dt} = \lambda_A N_0 e^{-\lambda_A t} - \lambda_B N_B(t) \quad (12)$$

式 (12) の両辺に $e^{\lambda_B t}$ をかけると、以下のように書くことができる。

$$\frac{dN_B(t)}{dt} e^{\lambda_B t} + \lambda_B N_B(t) e^{\lambda_B t} = \lambda_A N_0 e^{(\lambda_B - \lambda_A)t}$$

$$\frac{d}{dt}(N_B(t) e^{\lambda_B t}) = \lambda_A N_0 e^{\lambda_B - \lambda_A t}$$

両辺を積分して $t = 0$ のとき $N_B = 0$ という初期値を代入すると、

$$N_B(t) = \frac{\lambda_A}{\lambda_B - \lambda_A} N_0 (e^{-\lambda_A t} - e^{-\lambda_B t}) \quad (13)$$

同じように N_C の微分方程式を解くと式 (14) になる。

$$N_C(t) = N_0 \lambda_A \lambda_B \left(\frac{e^{-\lambda_A t}}{(\lambda_B - \lambda_A)(\lambda_C - \lambda_A)} + \frac{e^{-\lambda_B t}}{(\lambda_A - \lambda_B)(\lambda_C - \lambda_B)} + \frac{e^{-\lambda_C t}}{(\lambda_A - \lambda_C)(\lambda_B - \lambda_C)} \right) \quad (14)$$

1.5 永続平衡

1.4 の核種 A,B,C の崩壊定数に条件がついた場合を考える。 $\lambda_A \ll \lambda_B, \lambda_C$ のとき $e^{-\lambda_B t}$ と $e^{-\lambda_C t}$ は非常に小さいとして無視することができ、式(11), 式(13), 式(14) は以下のように近似することができる。

$$N_A(t) = N_0 e^{-\lambda_A t} \quad (15)$$

$$N_B(t) = \frac{\lambda_A}{\lambda_B - \lambda_A} N_0 e^{-\lambda_A t} \quad (16)$$

$$N_C(t) = N_0 \lambda_A \lambda_B \left(\frac{e^{-\lambda_A t}}{(\lambda_B - \lambda_A)(\lambda_C - \lambda_A)} \right) \quad (17)$$

また、 $\lambda_B - \lambda_A = \lambda_B$ 、 $\lambda_C - \lambda_A = \lambda_C$ と考えることができるので核種比は

$$\frac{N_A(t)}{N_B(t)} \doteq \frac{\lambda_A}{\lambda_B} \quad (18)$$

$$\frac{N_A(t)}{N_C(t)} \doteq \frac{\lambda_A}{\lambda_C} \quad (19)$$

と書くことができる。

2 ラドンの検出原理

今回作成したラドン検出器は α 崩壊で放出される α 線を検出するものである。検出したいくつかの α 線のエネルギーがラドンの娘核が放出する α 線のエネルギーに一致すればラドンを検出できたということになる。

2.1 Si PIN フォトダイオード

フォトダイオードとは半導体のPN接合部分に光が入ると電流を流すように設計されている受光素子である。本研究では、ラドンの娘核が放出する α 線を検出するためにSi PIN フォトダイオード(浜松ホトニクス S3590-9)を使用した。このSi PIN フォトダイオードの仕様を表1に示した。

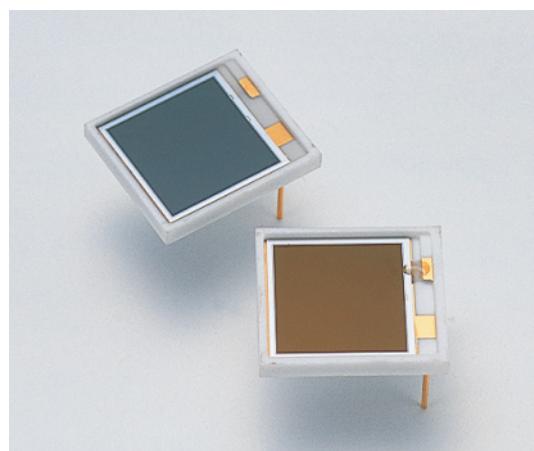


図 7: Si PIN フォトダイオード (浜松ホトニクス S3590-9) [10]

表 1: 浜松ホトニクス S3590-9 の仕様 [10]

受光面サイズ (mm)	10 × 10
空乏層厚 (mm)	0.3
最大逆電圧 (V)	100
最大許容損失 (mW)	100
最大動作温度 (°C)	-20 ~ +60
最大保存温度 (°C)	-20 ~ +80
感度波長範囲 (nm)	340 ~ 1110
最大感度波長 (nm)	960
平均暗電流 (nA)	2
最大暗電流 (nA)	6
遮断周波数 (MHz)	40
端子間容量 (pF)	40

PIN フォトダイオードは、正孔を多く持つ P 型半導体と自由電子を多く持つ N 型半導体の間に真性半導体の i 層である空乏層を挟んだ構造をしている。PIN フォトダイオードに逆バイアスをかけると図 8 のように正孔は陰極側、電子は陽極側に引き寄せられ、電流は流れなくなり空乏層は広がる。

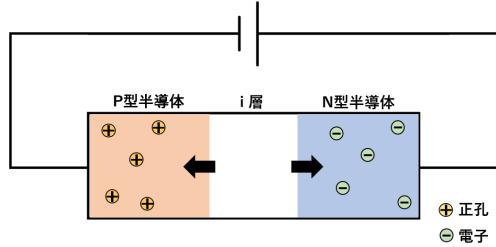


図 8: フォトダイオードに逆バイアスをかけたとき

逆バイアスをかけた状態で α 線が i 層に入射したときの様子を図 9 に示した。 α 線が入射すると空乏層で電子正孔対が作られる。この電子正孔対は電場によって電子が N 型半導体のほうへ、正孔が P 型半導体のほうへ移動し、電流が流れる。

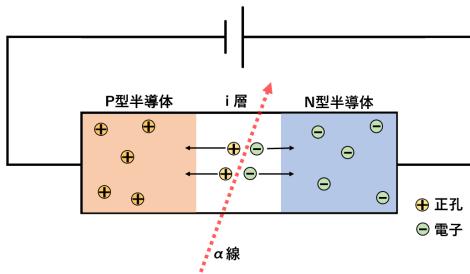


図 9: α 線が入射したとき

電流信号の大きさは α 線のエネルギーに比例する

ここで 5 MeV のエネルギーを持つ α 線が入射したときに PIN フォトダイオードに流れる電流値を求める。Si PIN フォトダイオードは 1 つの電子正孔対を生成するときに約 3.6 eV の α 線のエネルギーが必要なので、生成される電子正孔対の数は次のようにになる。

$$\frac{5.0 \times 10^6}{3.6} = 1.39 \times 10^6 \text{ 個} \quad (20)$$

電子 1 個の電荷は $1.602 \times 10^{-19} \text{ C}$ なので電荷量 Q は、

$$Q = (1.39 \times 10^6) \times (1.6 \times 10^{-19}) \doteq 2.22 \times 10^{-13} \text{ C} \quad (21)$$

となるので、 $I = \frac{dQ}{dt}$ より $t = 1 \mu\text{s}$ とすると、

$$I = \frac{2.22 \times 10^{-13}}{10^{-6}} = 2.2 \times 10^{-7} \text{ A} \quad (22)$$

式 (22) からわかるように、 α 線のエネルギーからの電流信号はとても小さく、検出するには増幅がする必要がある。

2.2 モナズ石

モナズ石は、火成岩や変成岩中の副成分鉱物として普遍的に産出する希土類リン酸塩鉱物である。今回はトリウム系列を多く含むモナズ石3つを線源として使用した。どのモナズ石も2cm角ほどの小さなものである。



図 10: モナズ石

2.3 静電捕集法

今回作成したラドン検出器はペンキ缶の中にPINフォトダイオードを取り付けた構造をしている。ラドンの娘核が α 崩壊するときに放出する α 線をPINフォトダイオードで検出している。 α 線は空気中では数cmほどの飛程しか持たないため、効率的な検出を行うためにPINフォトダイオードのほうへ誘導する必要がある。そこで使われている方法が静電捕集法である。図11は静電捕集法の概要図である。

線源であるモナズ石から気体の ^{220}Rn が放出されると、 ^{220}Rn は崩壊して α 線を放出後、 ^{216}Po の陽イオンになる。PINフォトダイオード側に負の高電圧をかけて、ペンキ缶を接地すると、陽イオンである $^{216}\text{Po}^+$ はPINフォトダイオード側に引き寄せられる。この引き寄せられた状態で ^{216}Po が α 崩壊を起こすことにより α 線を検出できる。同じようにRnの陽イオン化したいくつかの娘核がPINフォトダイオードに引き寄せられた状態で α 崩壊を起こすことによって効率的に α 線を検出することができる。これが静電捕集法の原理である。

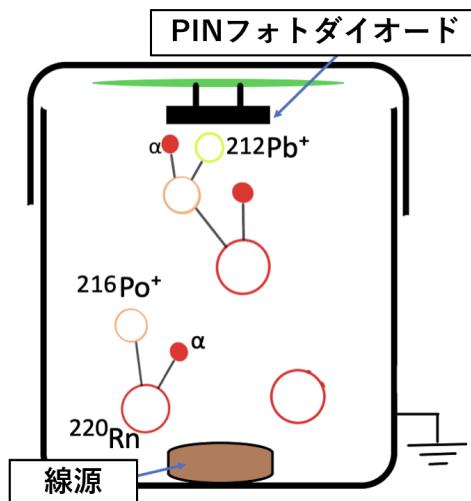


図 11: 静電捕集法

3 ラドン検出器の制作

PIN フォトダイオードで得た α 線の信号は Front End 基板、整形アンプ基板、raspberry pi の順番に送られる。Front End 基板は図 12 の検出缶の中に収納されている。図 13 の検出缶には加工を容易にできるペンキ缶を使用した。このペンキ缶は直径 7.5 cm、高さ 10.8 cm である。図 14 のように蓋には、PIN フォトダイオードが取り付けられた Front End 基板が付いている。この章では検出器に使われている基板の役割を説明する。

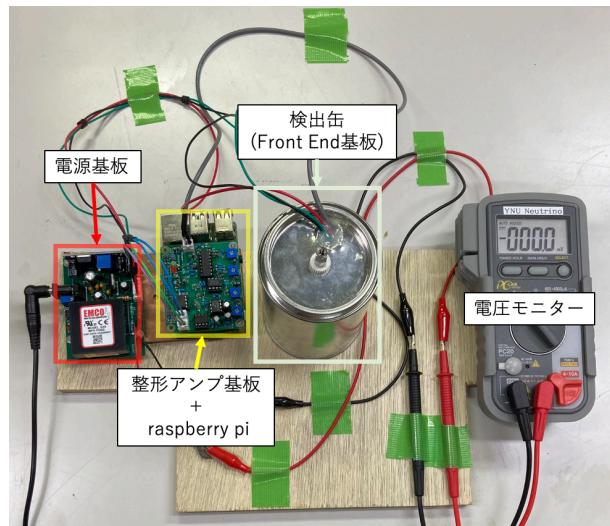


図 12: ラドン検出器の全体図



図 13: 検出缶

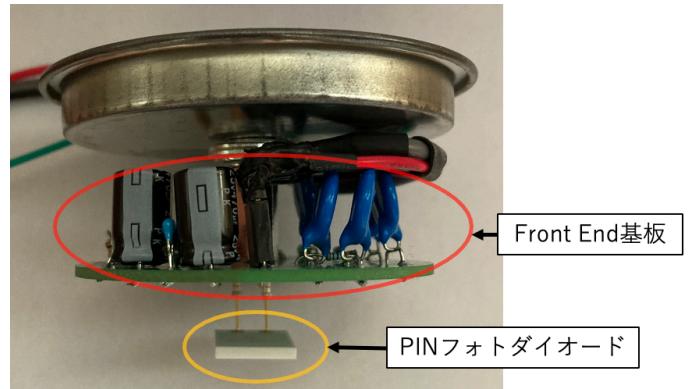


図 14: 検出缶の蓋

3.1 Front End 基板

Front End 基板の写真図 15 に、回路図を図 16 に示す。Front End 基板には主に 2 つの回路を含まれている。

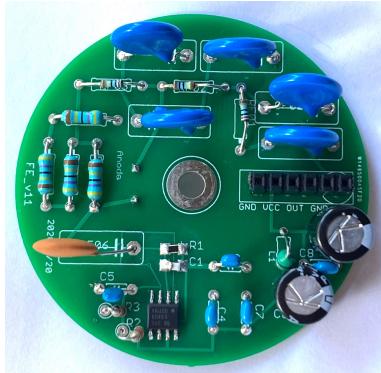


図 15: Front End 基板

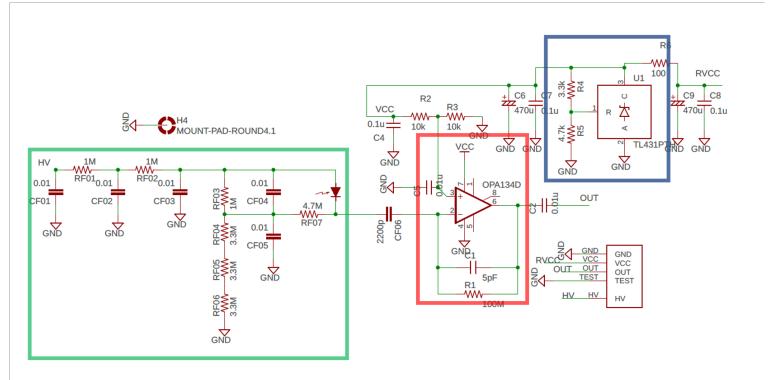


図 16: Front End 基板の回路図

3.1.1 高電圧分割回路

Front End 基板の高電圧分割回路は電源基板から送られてきた負の高電圧を分割する役割を持つ。図 16 の Front End 基板の回路図において、緑線で囲まれた部分が高電圧分割回路である。静電捕集法で α 線を効率よく集めるために PIN フォトダイオードに高い負の高電圧をかけることが求められるが、PIN フォトダイオードに実際にかけられる電圧は-100 V までである。そこでこの回路を組み込むことによって、PIN フォトダイオードのアノードとカソードの間には-100 V 以上はかけずに検出缶と PIN フォトダイオードの間に高い負の高電圧をかけることが可能となる。

3.1.2 電荷増幅回路

電荷増幅回路は電流信号を電圧信号に変換する回路であり、図 16 の回路図の赤線で囲まれた部分である。電荷増幅回路を動かすための電源を安定に保つ回路は図 16 の回路図の青線で囲まれた部分に組み込まれている。

図 17 は電荷増幅回路の図である。この回路では、電流信号を時間で積分して電荷量の信号に変換し、そこから電圧信号に変換する。例えば、2.1 のように PIN フォトダイオードに 5 MeV の α 線が入射した場合を考える。電荷増幅回路に使用したキャパシタ C1 が 4.7 pF なので、式 (17) のように電圧に変換される。

$$V_{out} = \frac{Q_{in}}{C1} = \frac{2.22 \times 10^{-13} C}{4.7 pF} \doteq 4.7 \times 10^{-2} V \quad (23)$$

式 (23) のように 5 MeV の α 線の信号は 47 mV の電圧に変換されることが分かる。この電圧信号は整形アンプ基板に送られる。

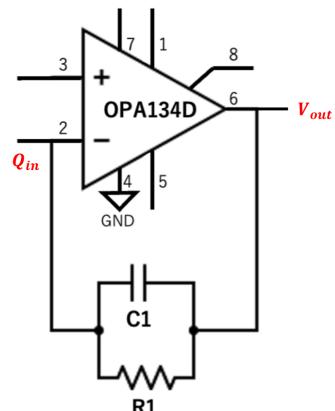


図 17: 電荷増幅回路

3.2 整形アンプ基板

整形アンプ基板の写真を図 18 に、回路図の一部を図 19 に示す。整形アンプ基板の主な回路は 4 つある。

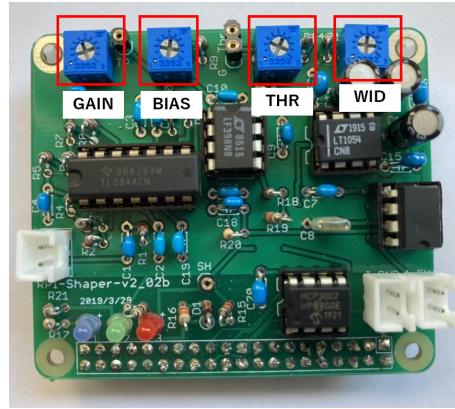


図 18: 整形アンプ基板

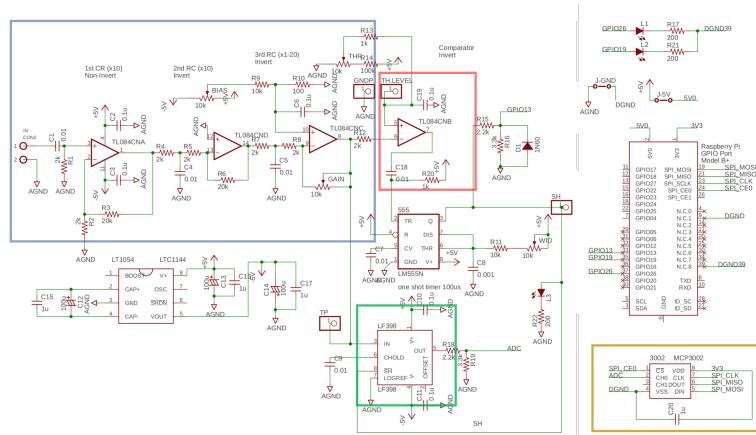


図 19: 整形アンプ基板の回路図 (一部)

3.2.1 整形・增幅回路

整形・增幅回路は図 19 の青線に囲まれた部分であり、信号の増幅・整形を行っている。

CR 回路は微分回路であり、低周波成分を減衰させ高周波成分を通す性質がある。よって矩形波で送られてきた信号は、CR 回路を通すことによって急激に立ち上がりゆっくり減衰していく波形になる。RC 回路は積分回路であり、CR 回路とは逆に低周波成分を通し高周波成分を減衰させる。1 つの CR 回路と 2 つの RC 回路を組み合わせることによって矩形波だった α 線の電圧信号は図 20 のように近似ガウス波形の信号になる。

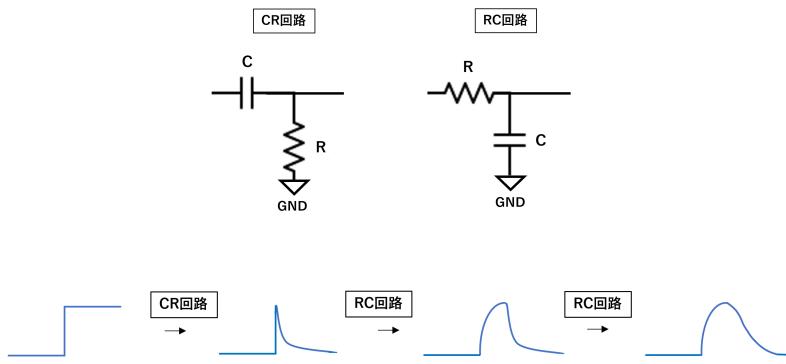


図 20: CR 回路と RC 回路

3.2.2 トリガー回路

トリガー回路は図 19 の赤線で囲まれた回路であり、 α 線の電圧信号が来たことを知らせる役割を果たしている。設定した閾値以上の信号であったときは、 α 線の信号と認識して赤い LED を光らせ、閾値以下の信号が来たときはノイズとして認識して、データをとらない。

3.2.3 サンプル&ホールド回路

近似ガウス波形の波高を記録したいとき、数 ms の間、波高値のまま電圧を維持する必要がある。そのために使われているのがサンプル&ホールド回路で図 19 の緑線で囲まれた回路である。

3.2.4 ADC 回路

近似ガウス波形の波高値は ADC 回路 (図 19 の黄線に囲まれた回路) に送られデジタル信号に変えられる。その後 raspberry pi に送られる。

3.2.5 整形アンプ基板の調整

整形アンプ基板は図 18 の上部にある、GAIN、BIAS、THR、WIDS の 4 つの半固定抵抗を調整を行うことができる。それぞれの説明は以下の通りである。

- GAIN：回路の増幅率を調整
- BIAS：信号が来てないときの出力の調整
- THR：信号とノイズを分ける閾値の調整
- WIDS：サンプル&ホールド回路のタイミングの調整

これらの半固定抵抗は Analog discovery2(図 21) を使用して調整を行った。Analog discovery2 はオシロスコープ、波形発生器、電源として使用することができる。Analog discovery2 を使用して GAIN を 1000 倍、BIAS を 0 V、THR を 150 mV に調整した。



図 21: analog discovery2 [8]

図 25 のように、WIDS の調整は電圧信号のピーク (黄色の波形) のタイミングで、サンプル&ホールド回路のスイッチ制御用矩形波 (青色の波形) が立ち下がるように調整を行った。

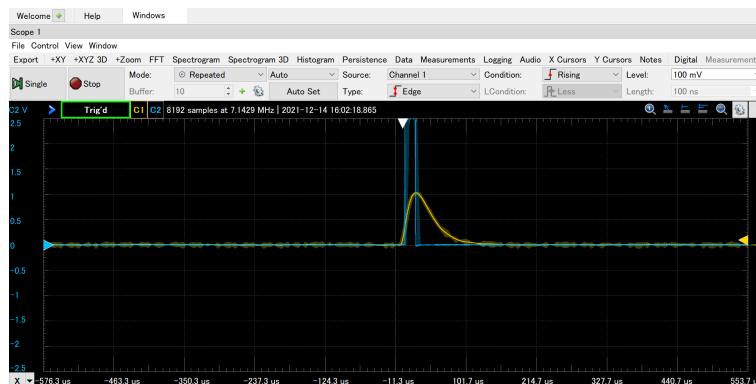


図 22: analog discovery2 による WIDS の調整

3.3 raspberry pi

raspberry pi とはイギリスラズベリーパイ財団によって開発された小型のコンピュータである。デジタル信号に変換された α 線の信号を記録し、無線でパソコンに送るために使われている。

本研究では図 23 の raspberrypi4 modelB を使用した。



図 23: raspberry pi

3.4 電源基板

電源基板は Front End 基板、整形アンプ基板、raspberry pi に電源を送る役割を担っている。

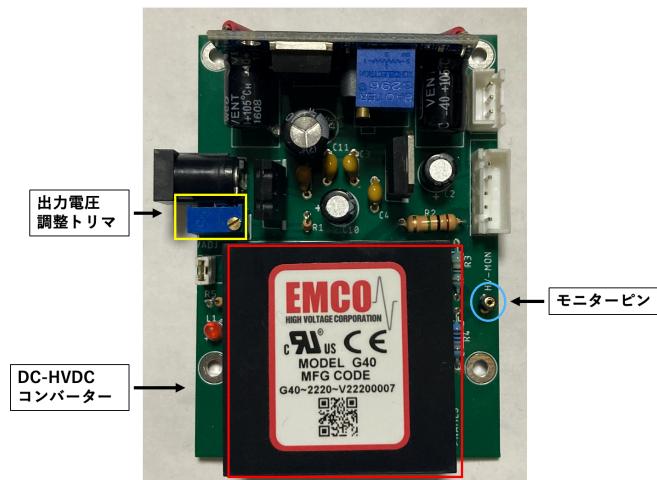


図 24: 電源基板

この基板は電源アダプタから入ってくる 12 V から、整形アンプ基板と raspberry pi に送る 5 V、Front End 基板に送る、負の高電圧と 5 V を作っている。

負の高電圧は、図 24 の DC-HVDC コンバータによって作られている。DC-HVDC コンバータは入力電圧に比例した高電圧を作る素子であり、出力電圧は出力電圧調整トリマのネジを回すことによって調整することができる。モニターピンに図 12 のように電圧テスターの赤いリード線を繋ぎ、黒いリード線を接地する事によって、テスターの画面から出力電圧の 1/1000 の値を見ることができる。

4 ラドン検出器の性能評価

4.1 整形アンプ基板の線型性の確認

α 線のエネルギー信号である電圧信号とデジタル信号の ADC[ch] は比例関係にあるが、使用する整形アンプ基板によって比例する範囲は変化する。作成した整形アンプ基板に 0~70 mV の電圧信号を入れて、どの範囲で ADC と比例しているのかを調べた。結果は図 25 である。これより ADC が 100 ch~350 ch 間のピークであれば、 α 線のエネルギーと ADC の値が比例関係にあると考えてよいことがわかる。

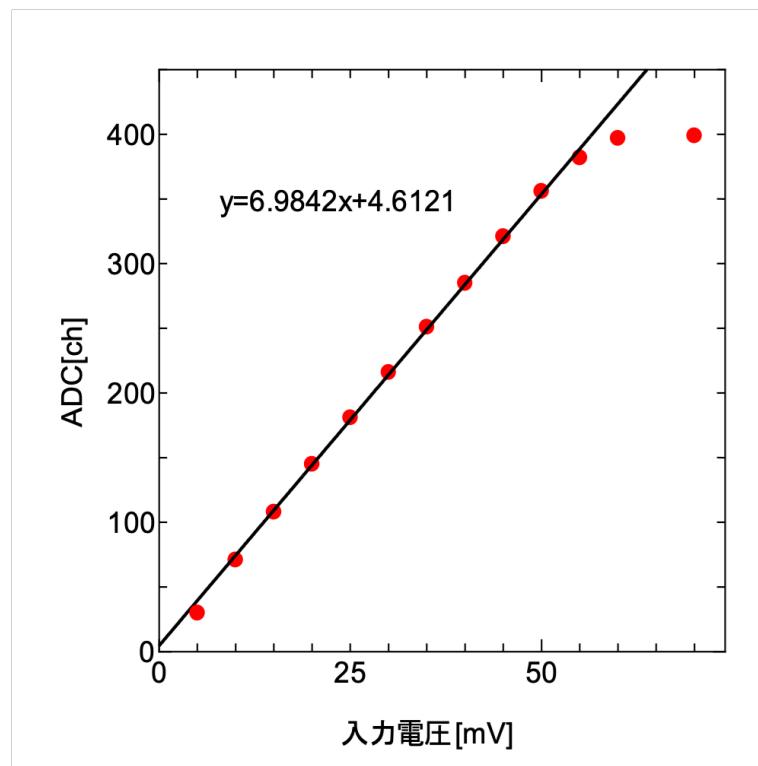
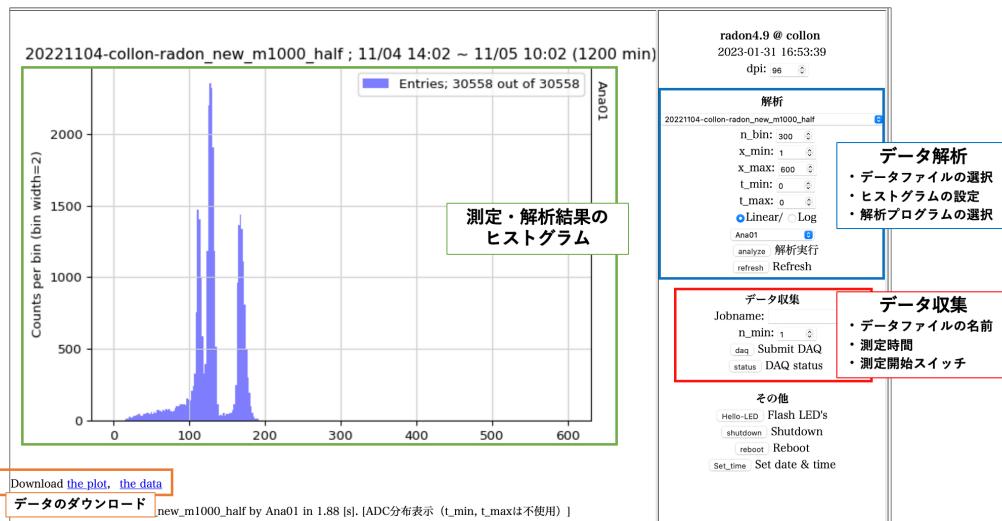


図 25: 整形アンプ基板の線形性

ここからの測定では、100~350 ch に出現したピークのみ α 線のエネルギーとの対応を考えた。

4.2 Radon 制御・解析用 web サーバー

Rn 測定の制御と解析は筑波大学の三明康郎先生によって開発された raspberry pi 上で立ち上がる Radon 制御・解析用 web サーバー図 26 を使用した。web サーバーは raspberry pi を起動すると立ち上がるようになっていて、データ収集とデータ解析の操作ができるようになっている。



4.3 ラドン測定

4.3.1 測定方法

3つのモナズ石を線源としてペンキ缶の中に入れ、20時間測定を行った。Front End 基板に送る高電圧は-1000 V に設定した。陽イオン化したラドンの娘核の収集効率を上昇させるために乾燥剤をモナズ石とともに検出缶の中に入れた。

4.3.2 測定結果と考察

20時間の測定を行った結果を図 27 に示す。

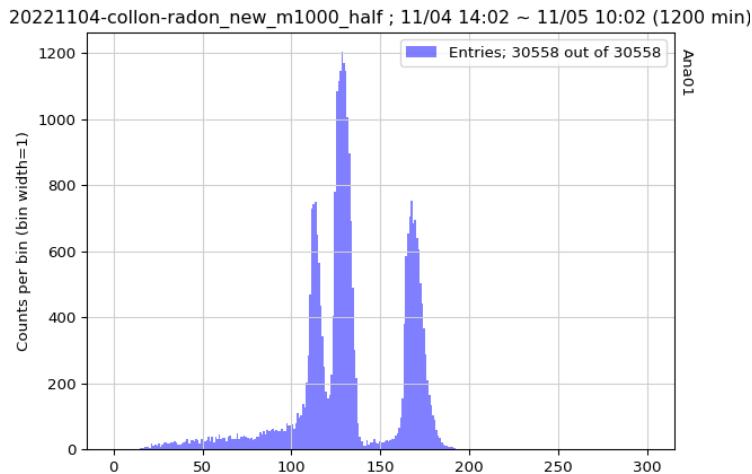


図 27: ラドン測定の ADC 分布

20時間のラドン測定(図 27)のADCピーカーをガウス関数でfitした値は、 113.5 ± 0.1 ch、 129.0 ± 0.0 ch、 169.6 ± 0.1 chである。100 ch 以下はノイズであると考えられる。

3つのピーカーは ^{220}Rn の娘核の中で α 崩壊を起こす ^{216}Po 、 ^{212}Bi 、 ^{212}Po であると考えられる。表 2 のラドンの娘核のエネルギーと ADC ピーカーを対応させたものを図 28 に示す。

表 2: α 線のエネルギー [1]

^{220}Rn の娘核	α 線のエネルギー [MeV]
^{216}Po	6.777
^{212}Bi	6.05
^{212}Po	8.785

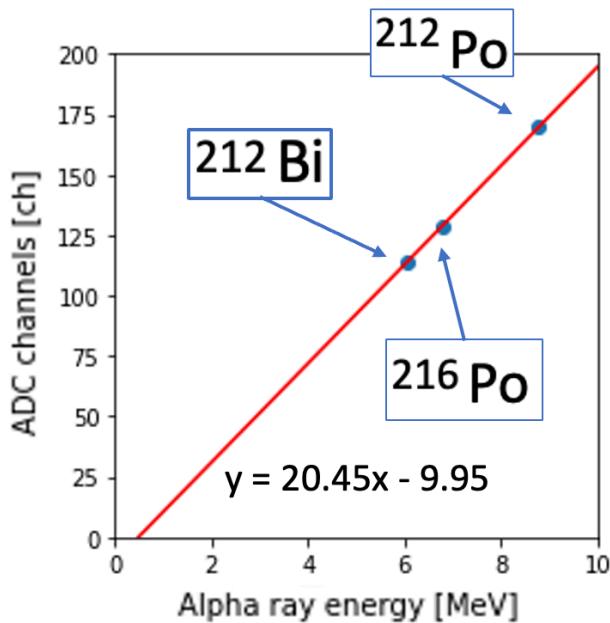


図 28: ADC ピークと α 線エネルギーの関係

3つのピークは x を α 線のエネルギー、 y を ADC ピーク値として一次関数で fit させると次の式になる。

$$y = 20.45x - 9.95$$

3つのピーク値はこの直線上にのっているので、 α 線のエネルギーと ADC ピーク値は比例関係にあり、 113.5 ± 0.1 ch に見られたピークは ^{212}Bi 、 129.0 ± 0.0 ch は ^{216}Po 、 169.6 ± 0.1 ch は ^{212}Po に対応していると言える。

4.4 ^{220}Rn の娘核の半減期測定

4.4.1 測定方法

4-3 のラドン測定を行った直後、モナズ石を取り出した状態で 24 時間測定した。Front End 基板に送る高電圧は-1000 V に設定した。

4.4.2 測定結果

モナズ石を取り除いてから 24 時間の測定を行った結果を図 29 に示す。

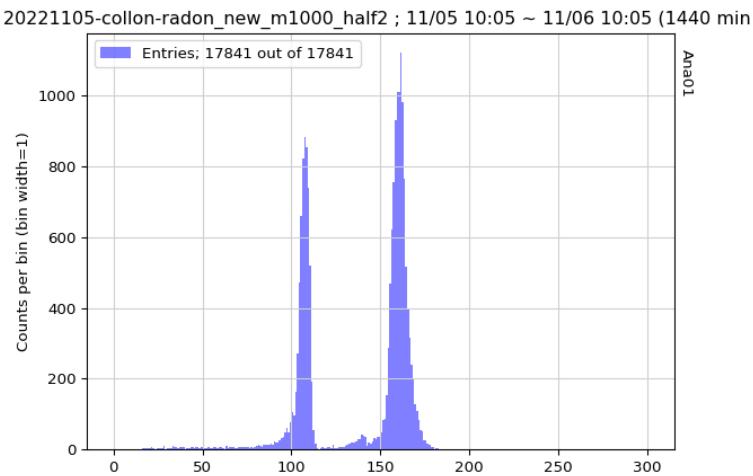


図 29: 半減期測定の ADC 分布

表 3: ^{220}Rn の娘核の半減期 [1]

^{220}Rn の娘核	半減期
^{216}Po	0.145 秒
^{212}Pb	10.64 時間
^{212}Bi	60.67 分
^{212}Po	0.299×10^{-6} 秒

2 つのピークを確認でき、モナズ石を検出缶内に入れていたときに現れていた ^{216}Po と思われるピークは殆ど確認できない。 ^{216}Po は半減期が 0.145 秒 (表 3) と、とても短いためモナズ石を抜いてからすぐになくなってしまったと考えると、現れなかったピークは ^{216}Po と考えられる。

確認できた 2 つのピークを ^{212}Bi と ^{212}Po と仮定して、全体の検知数の半減期と、 ^{212}Bi の分岐比について述べる。

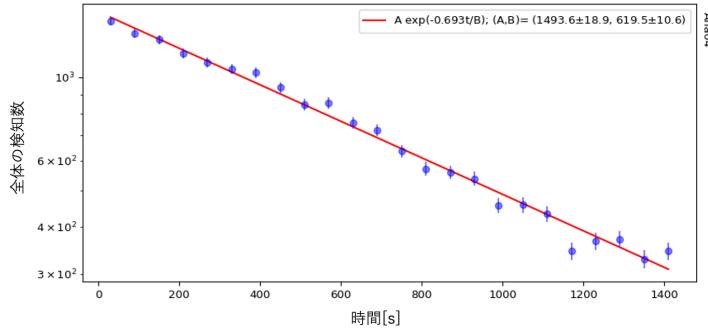


図 30: 全体の検知数の時間変化

^{212}Bi と ^{212}Po を足し合わせた全体の検知数の時間変化は、 ^{212}Pb の半減期に依存すると考えられる。全体の検知数の時間変化を図 30 に示す。

このフィットした直線から全体の検知数の半減期は 619.5 ± 10.6 分、つまり 10.33 ± 0.18 時間と求めることができる。表 3 より ^{212}Pb の半減期の文献値は 10.64 時間なので、この値は誤差 2σ 以内で ^{212}Pb の半減期と一致した。

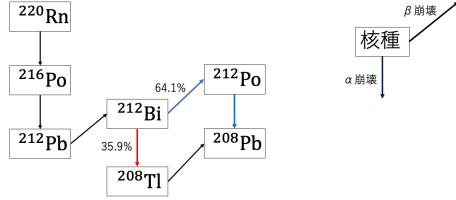


図 31: トリウム崩壊系列の ^{212}Bi の分岐比

次に ^{212}Bi の分岐比について述べる。図 31 に示すように文献値では ^{212}Bi は 35.9 % の確率で α 崩壊を起こし、64.1 % の確率で β 崩壊を起こす。測定した ^{212}Bi と ^{212}Po の検知数を以下に示す。

- ^{212}Bi の検知数 : 5616.4 ± 75.1
- ^{212}Po の検知数 : 10201.9 ± 101.0

^{212}Bi の検知数 = ^{212}Bi の α 崩壊数、 ^{212}Po の検知数 = ^{212}Bi の β 崩壊数と考えられる。それぞれの比率と文献値を表 4 に示す。

表 4: 分岐比の解析値と文献値

	解析値 [%]	文献値 [%]
^{212}Bi の α 崩壊数	35.5 ± 0.5	35.9
^{212}Bi の β 崩壊数	64.5 ± 0.8	64.1

分岐比の解析値は誤差 σ 以内で一致した。半減期と分岐比の結果より、この 2 つのピークは ^{212}Bi と ^{212}Po であり、この検出器は ^{220}Rn を検出することができると言える。

4.5 電圧と検出効率

安定したラドン測定を可能にするためには検出効率を上げることが必要である。Front End 基板にかける負の高電圧を変化させてピークの検知数変化を確認することにより、検出効率の違いを確認する検出効率の電圧依存性の測定では、 ^{216}Po のピークの検知数を比較する。 ^{216}Po の半減期は短く、親核(^{212}Pb)の半減期が長い ^{212}Bi や ^{212}Po に比べて検出効率の電圧依存性がもっとも大きくなると期待されるので、 ^{216}Po の検出数で検出効率を計算した。

4.5.1 測定方法

ペンキ缶内に3つのモナズ石を入れ、ペンキ缶にかける高電圧を-500 V,-750 V,-1000 Vと90分ずつ変化させながら3時間半の測定を行う。

4.5.2 測定結果

測定結果は表6に示す。Front End 基板にかける負の高電圧の絶対値が大きいほど ^{216}Po の検知数が増え、検出効率が上がった。

表 5: 電圧と ^{216}Po の検知数

電圧 [V]	^{216}Po の検知数 [個/90分]
-500	663 ± 26
-750	1023 ± 32
-1000	1110 ± 33

静電捕集法を使った収集法ではFront End 基板にかける負の電圧が高いほど陽イオン化したラドンの娘核が容易に集められ、収集効率が上がると考えられる。

5 空気中のラドン検出装置の構築

作成したラドン検出器を使って、空気中のラドン濃度を測定するためのセットアップ(図32)を開発した。空気中のラドン検出装置はエアポンプ、流量計、試料缶、作成したラドン検出器の4つの器具から構成されている。

空気中のラドン検出装置の構造を図33に示す。エアポンプから放出された空気は、流量の調整のために流量計に流入する。その後試料缶を通ることによってラドン入りの空気が検出器に送られる。最後の流量計は空気の漏れを確認するために配置されている。

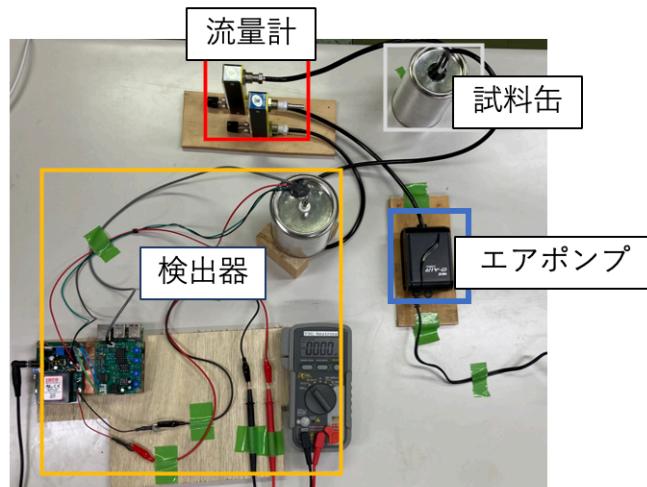


図32: ラドン検出装置

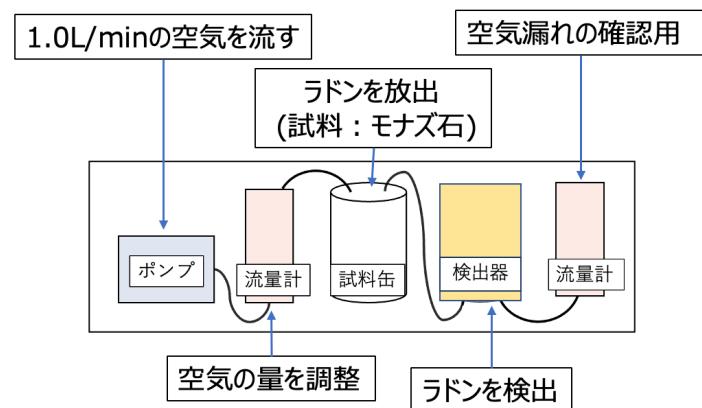


図33: ラドン検出装置の構造

5.1 エアポンプ

エアポンプは空気を供給する機械である。本研究の空気中のラドン検出装置では水槽用のエアーポンプである GEX の e-air 1500SB(図 34) を使用した。GEX の e-air 1500SB の仕様を表 6 に示した。



図 34: エアポンプ (e-air 1500SB) [12]

表 6: エアポンプ e-air1500SB の仕様 [11]

吐出口 (口)	1
定格電圧 (V)	100
定格周波数 (Hz)	50/60
幅 (cm)	5.9
奥行き (cm)	4.5
高さ (cm)	10.3
吐出量 (L/分)	1.0

5.2 流量計

エアポンプからは 1.0 L/min 固定の流量が流れるので、流量の調整を行うために流量計を使う。今回は KOFLOC のニードルバルブ付パージフローメータ MODEL RK1600R SERIES(図 35) を使用した。MODEL RK1600R SERIES の仕様を表 7 に示した。



図 35: 流量計 (MODEL RK1600R SERIES) [14]

表 7: MODEL RK1600R SERIES の仕様 [11]

最大流量 (L/分)	1.0
有効目盛	10:1
精度	± 5 % F.S
耐圧 (MPa)	0.7
最高使用温度 (°C)	60

5.3 試料缶と検出缶

線源を入れる試料缶と、検出を行う検出缶には、どちらも 3 章で示した容量 0.4 L のペンキ缶を加工して使用した。試料缶の蓋に穴を空け、空気を通す銅管を図 36 のようにエポキシ系接着剤のアラルダイトで接着を行った。



図 36: 試料缶

検出缶は蓋の裏に Front End 基板があるため、図 38 のように缶の底部に、空気を通す穴を 2 つ開けて銅管を通した。



図 37: 検出缶

図 38: 検出缶の底

6 空気中のラドン検出装置のシミュレーション

空気中のラドン濃度の安定した測定を実現するためにどのような測定条件が必要なのか調査する。筑波大学の三明康郎先生のシミュレーションプログラムを参考にして空気の流量や検出缶や試料缶の体積を変化させるシミュレーションを行った。

6.1 シミュレーションの手順

空気の流量を変化させたときの検出数をシミュレーションを行った。0.1秒間に検出器缶内で存在した ^{216}Po の数から1分間の検出数を導出した。フローチャートを図39に示す。

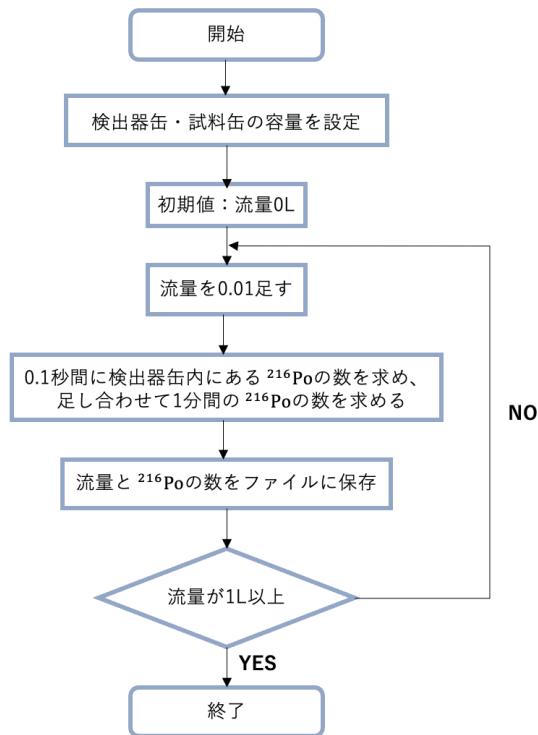


図 39: シミュレーションのフローチャート

0.1秒間に検出器缶内にある ^{216}Po の数は以下のように求めた。試料缶からラドン入りの空気がチューブを通して検出器缶に送られるため、まず試料缶にあるラドン数を求める。

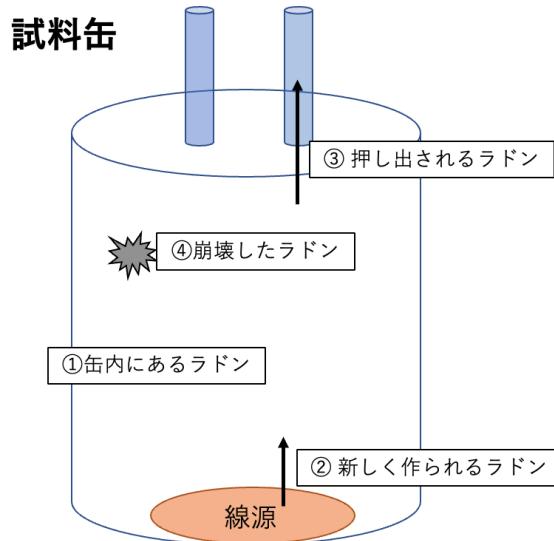


図 40: 試料缶のラドン数

試料缶のラドン数は図 40 から、①0.1秒前に缶内にあったラドンと②線源から放出されたラドンから③押し出されるラドンと④崩壊したラドンを引いたもので表すことができる。

チューブ

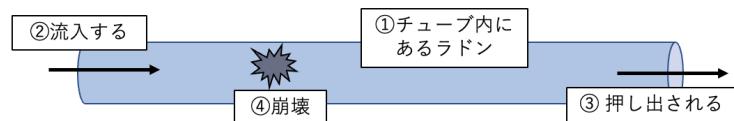


図 41: チューブのラドン数

試料缶から押し出されたラドンは図 41 の②チューブに流入するラドン数と等しい。チューブにあるラドン数は①0.1秒前に缶内にあったラドンと②流入したラドンから③押し出されるラドンと④崩壊したラドンを引いたもので表すことができる。

検出缶

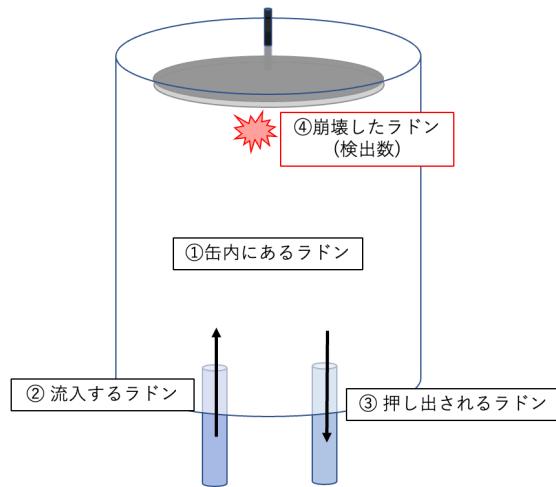


図 42: 検出缶のラドン数

チューブから押し出されたラドンは図 42 の②検出缶に流入するラドン数と等しい。検出器缶にあるラドン数は①0.1秒前に缶内にあったラドン、②流入したラドンから③押し出されるラドンと④崩壊したラドンを引いたもので表すことができる。検出されるラドン数は、④の検出缶で崩壊したラドン (^{216}Po) の数となる

6.2 シミュレーション結果

空気中のラドン濃度を安定して検出をするためには、流量が少し変わっても検出数が大きく変化しない条件が求められる。

空気の流量を変化させるシミュレーションを検出缶と試料缶の容量を変えて行い、図 43、図 44 に結果を表示した。図 43 は検出缶 (V_d) の容量は 0.4 L で固定した状態で試料缶 (V_s) の容量を 0.2 L から 1.0 L まで変化させたグラフであり、図 44 は試料缶 (V_s) の容量を 0.4 L で固定して、検出缶 (V_d) の容量を 0.5 L から 3.0 L まで変化させたグラフである。

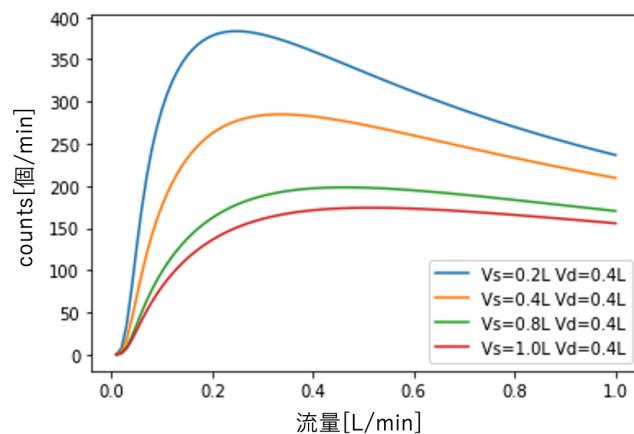


図 43: 流量とラドン検出数 (検出缶:0.4 L)

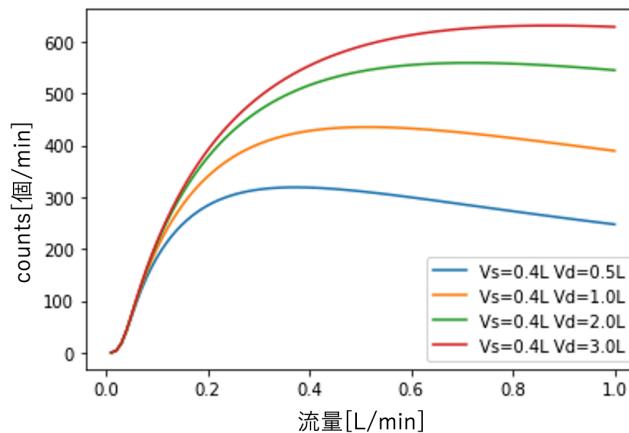


図 44: 流量とラドン検出数 (試料缶:0.4 L)

図 43, 図 44 より検出数を増やすためには検出缶 (V_d) の容量を大きくして、試料缶 (V_s) の容量を小さくする必要があるとわかる。検出数を安定させるためにはピークが緩やかな容量や流量の条件を選ぶ必要がある。例えば、図 43 では

- $V_s=1.0 \text{ L}, V_d=0.4 \text{ L}$ (赤線) 流量 $0.4 \sim 0.8 \text{ L/min}$
- $V_s=0.8 \text{ L}, V_d=0.4 \text{ L}$ (緑線) 流量 $0.4 \sim 0.6 \text{ L/min}$

図 44 では

- $V_s=0.4 \text{ L}, V_d=1.0 \text{ L}$ (黄線) 流量 $0.4 \sim 0.6 \text{ L/min}$
- $V_s=0.4 \text{ L}, V_d=2.0 \text{ L}$ (緑線) 流量 $0.6 \sim 1.0 \text{ L/min}$

の条件が最適であると考えられる。

7　まとめと今後の展望

低コストなラドン検出器を作成し、 ^{220}Rn 線源を用いて性能評価を行った。更に Front End 基板にかける負の高電圧を上げることによって検出効率が上がることも確認した。更に空気中のラドン濃度を測定するためのセットアップを構築を行い、安定した検出を可能にするためのシミュレーションを行った。今後はこのセットアップを使って効率よいラドン測定が可能になるような最適な空気の流量、電圧、容器の体積などの条件を決定する。その後、更に地上や地下などいくつかの場所でラドン濃度の測定を行い、既存のラドン検出器の測定結果と比較したい。

謝辞

本研究を行うに当たり多くの方にご協力を頂いたこと、この場を借りて感謝を申し上げます。

南野彰宏先生には、3年生の頃からまだ右も左もわからない状態の私に機械の設定から、加工の仕方、解析の助言まで本当にたくさんのこと教えて頂きました。また初めて高電圧を使う測定をする際には、長時間の測定に参加してくださったり、毎週の面談では、多くのアドバイスをいただきなど、研究でも研究以外の面でも本当に多くの支援をしていただきました。

三明康郎先生には、検出器作成に必要な多くの部品を送って頂き、多大な御協力を頂きました。さらに躊躇しているときは何度も Zoom を使って質問に答えてくださったり、回路の構造からはんだ付けのアドバイスまで幅広い多くの至らない疑問をとても丁寧に回答してくださいました。

研究室の先輩である先行研究を行っていた鈴木さんには多くの疑問に教えていただき、とても多くのことを学ばせていただきました。また先輩の永井さん、天内さん、工藤さん、守山さんとは研究以外でも様々なお話をさせていただきました。同期である伊藤さん、近藤さん、芝山さん、長村さんには研究だけでなく様々な相談を快く聞いていただきました。研究室のミーティングでは Lluis さんに気づかなかった部分の質問やアドバイスを多数いただきました。

本研究を書き上げることができたのは、支援してくださったすべての皆様の御協力のおかげです。本当にありがとうございます。

8 参考文献

- [1] 港 陽子, 鈴木 彩香, ”小型ラドン検出器の開発”, 奈良女子大学 理学部 数物科学科 卒業論文 (2018)
- [2] 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 理学部 数物科学科 卒業論文 (2019)
- [3] 鈴木芹奈,”コスト・小型ラドン検出器の製作及び性能評価”, 横浜国立大学 数物電子情報系学科 物理工学 EP 卒業論文 (2021)
- [4] 国立研究開発法人 量子化学技術開発機構 (QST) ”兵庫県南部地震前に大気中ラドンの濃度変動を観測。臨界現象数理モデルへ適用し地震予知に活用も”, 量子生命・医療部門,(2018/12/26),(閲覧日 2023/1/21)
<https://www.qst.go.jp/site/qms/1575.html>, 2022/11/13
- [5] Jun Muto, Yumi Yasuoka, Nao Miura, Daichi Iwata, Hiroyuki Nagahama, Mitsuhiro Hirano, Yoshiro Ohmomo, Takahiro Mukai, ” Preseismic atmospheric radon anomaly associated with 2018 Northern Osaka earthquake ”, Scientific Reports(2021),(閲覧日 2023/1/21)
<https://www.nature.com/articles/s41598-021-86777-z>
- [6] 環境省, ”放射線による健康影響等に関する統一的な基礎資料 (令和3年度)” (閲覧日 2023/1/21)
<http://www.env.go.jp/chemi/rhm/h30kisoshiryo/h30kiso-01-03-08.html>
- [7] 星野美保子, 渡辺寧, 石原舜三, ”日本列島の花崗岩質岩石に産出するモナズ石の希土類元素の挙動: 母岩の起源指標として”, 産総研・地圏資源 (閲覧日 2023/2/4) <https://staff.aist.go.jp/hoshino-m/abstract12-5.pdf>
- [8] digilent, 「Analog Discovery 2: 100MS/s USB Oscilloscope, Logic Analyzer and Variable Power Supply」 (閲覧日 2023/2/3)
<https://digilent.com/shop/analog-discovery-2-100ms-s-usb-oscilloscope-logic-analyzer-and-variable-power-supply>
- [9] Glenn F. Knoll (2010). Radiation Detection and Measurement, 4th edition. Wiley.p162,180
- [10] 浜松ホトニクス (2020), 「Si PIN フォトダイオード S3590 シリーズ」,(閲覧日 : 2023/1/21)
https://www.hamamatsu.com/content/dam/hamamatsu-photonics/sites/documents/99_SALES_LIBRARY/ssd/s3590-08_etc_kpin1052j.pdf
- [11] GEX, 「屋内鑑賞魚飼育水槽用エアーポンプ イーエアー」,(閲覧日 ; 2023/2/1)
https://product.gex-fp.co.jp/p_manuals/321/e-air.pdf?1675474432
- [12] GEX, 「e~AIR 1500SB」,(閲覧日 ; 2023/2/1)
<https://product.gex-fp.co.jp/fish/?m=ProductListDetail&cid=345&id=321>
- [13] KOFLOC, 「FLOW INSTRUMENTS General Catalog」,(閲覧日 ; 2023/2/1)
https://www.kofloc.co.jp/ebook/book01/#target/page_no=1
- [14] KOFLOC, 「ニードルバルブ付ページフローメータ MODEL RK1600R SERIES」 p65,(閲覧日 ; 2023/2/1)
<https://www.kofloc.co.jp/product/product-1409/>

[15] 今井一雅 (2017), "Raspberry Pi Zero による IoT 入門", コロナ社

9 補足

検出缶、試料缶の体積を設定して、流量を変化させたときの検知数を求めるシミュレーションのソースコードを以下に示す。

```
#include <stdio.h>
#include <math.h>

int main(void)
{
    double R=20;      //1秒間にRnが生まれる量
    double houkai,houkai2; //1秒間に220Rnが崩壊する確率
    double V,V1;      //1分間にV1L出される空気量 [L]
    double Vm;        //線源の入った瓶の容量
    double Vk;        //検出器の容量
    double Vt;        //チューブの容量
    double A;          //検出器にかかる電圧 [V]
    double Rm1,Rt1,Rk1,Rm2,Rt2,Rk2;
    //線源の入った瓶、チューブ、検出器の内部にあるラドンの数 Rm,Rt,Rk

    FILE *fp;

    int i,j;//線源の入った容器の堆積 i、検出器の堆積 j

    i=400;//mL 試料缶 (設定する)
    j=3000;//mL 検出器缶 (設定する)

    fp = fopen("Vm=400,Vk=3000.txt", "w");

    //1L=1000cm^3
    Vm=i;           //cm^3
    Vt=0.25*0.25*3.14*145; //cm^3  今回はチューブを直径 1cm で長さ 50cm と考えた
    Vk=j;           //cm^3
    V=0;            //L

    Rm1=0; //0.1秒前の線源の入ったラドンの数
    Rt1=0; //0.1秒前のチューブに入っているラドンの数
    Rk1=0; //0.1秒前の検出器のラドンの数
    Rm2=0;
```

```

Rt2=0;
Rk2=0;

houkai=log(2)/55.6;//崩壊定数=一秒間にラドンが崩壊する確率 = loge(2)/(半減期)

double kenti1,kenti2,kenti3;
int t;//時間(今回は0.1秒刻みで変化させたので、t=1で0.1秒経過した換算)

t=0;
kenti1=0;
kenti2=0;
kenti3=0;

printf("Vm=%lf,Vt=%lf,Vk=%lf,houkai=%lf\n",Vm,Vt,Vk,houkai);

while(V<=1){
    //流量が0～1Lに変化する時の検知数
    V=V+0.01;
    V1=1000*V/60; //1秒でどのくらいの流量か (+ cm^3に変換)

    //60秒でどのくらいラドンが集まるか
    double t1;
    t1=0.1;
    kenti1=0;
    kenti2=0;
    for(t=0;t<=600;t=t+1){
        //線源の入った瓶のラドン数
        //ラドン数 = (0.1秒前にあったラドン) + (0.1秒で新しく作られたラドン)
        //           - (押し出されるラドン) - (崩壊したラドン)
        Rm2=Rm1+R*t1-(Rm1/Vm)*V1*t1-Rm1*houkai*t1;
        Rm1=Rm2;

        //チューブのラドン数
        //ラドン数 = (0.1秒前にあるラドン) + (鉱石の瓶から入ってきたラドン)
        //           - (押し出されるラドン) - (崩壊したラドン)
        Rt2=Rt1+(Rm1/Vm)*V1*t1-(Rt1/Vt)*V1*t1-Rt1*houkai*t1;
        Rt1=Rt2;

        //検出器のラドン数
        //ラドン数 = (0.1秒前にあるラドン) + (チューブから入ってきたラドン) -
        //           (押し出されるラドン) - (崩壊したラドン)
        Rk2=Rk1+(Rt1/Vt)*V1*t1-(Rk1/Vk)*V1*t1-Rk1*houkai*t1;
        Rk1=Rk2;
    }
}

```

```
//0.1秒間の検知数（216Poの数）
kenti1=Rk1*houkai*t1+kenti2;
kenti2=kenti1;
}
printf("%lf %lf \n",V,kenti1);
fprintf(fp,"%lf %lf \n",&V,&kenti1);//ファイルに書き込んだ
}

fclose(fp);

return 0;
}
```

整形アンプ基板(図45)と電源基板(図46)の回路図を示す

整形アンプ基板の回路図

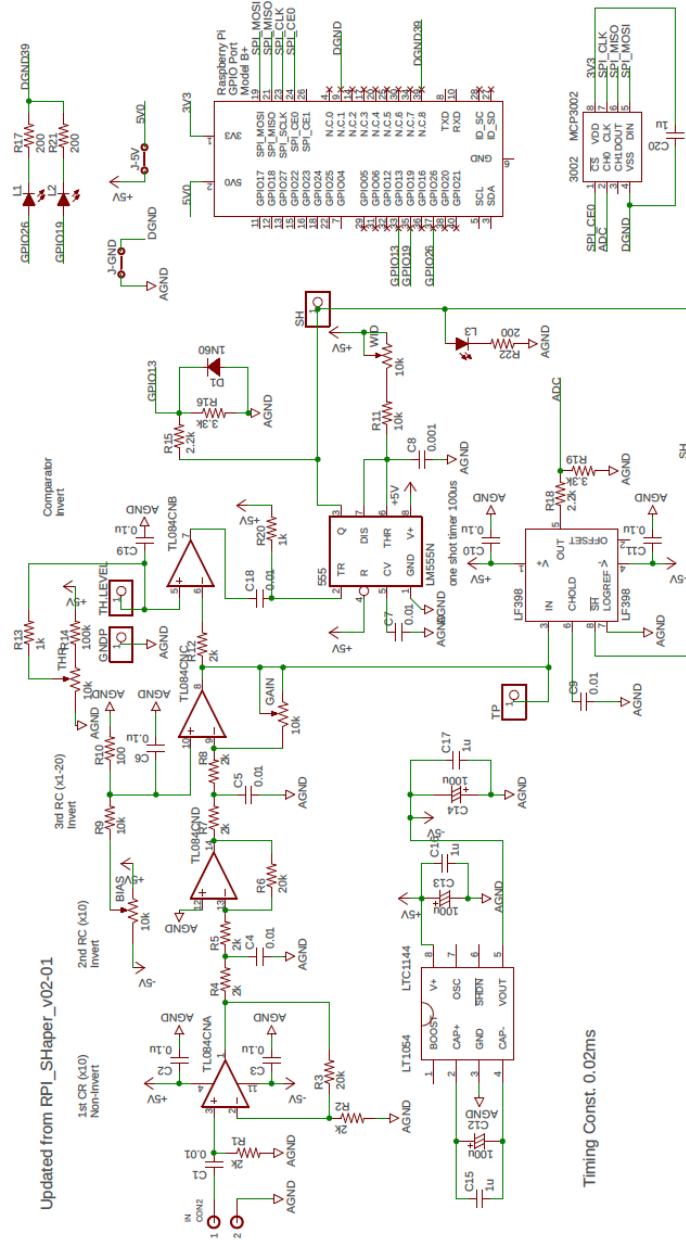


図45: 整形アンプ基板の回路図(全体)

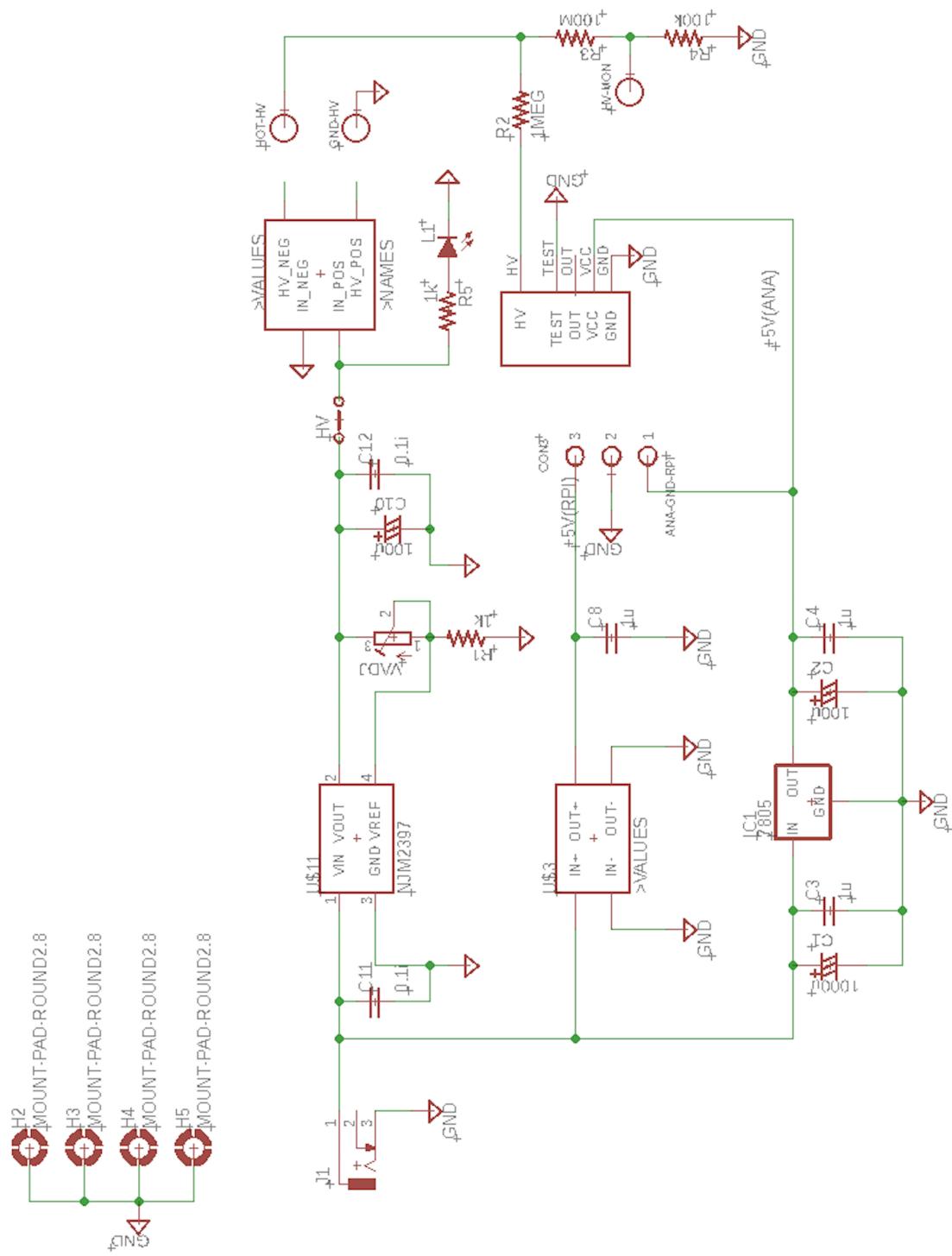


図 46: 電源基板の回路図