



ラドン検出器の開発における 静電捕集効果の評価

水上 寧音

奈良女子大学理学部数物科学科

高エネルギー研究室

2023年3月3日

目次

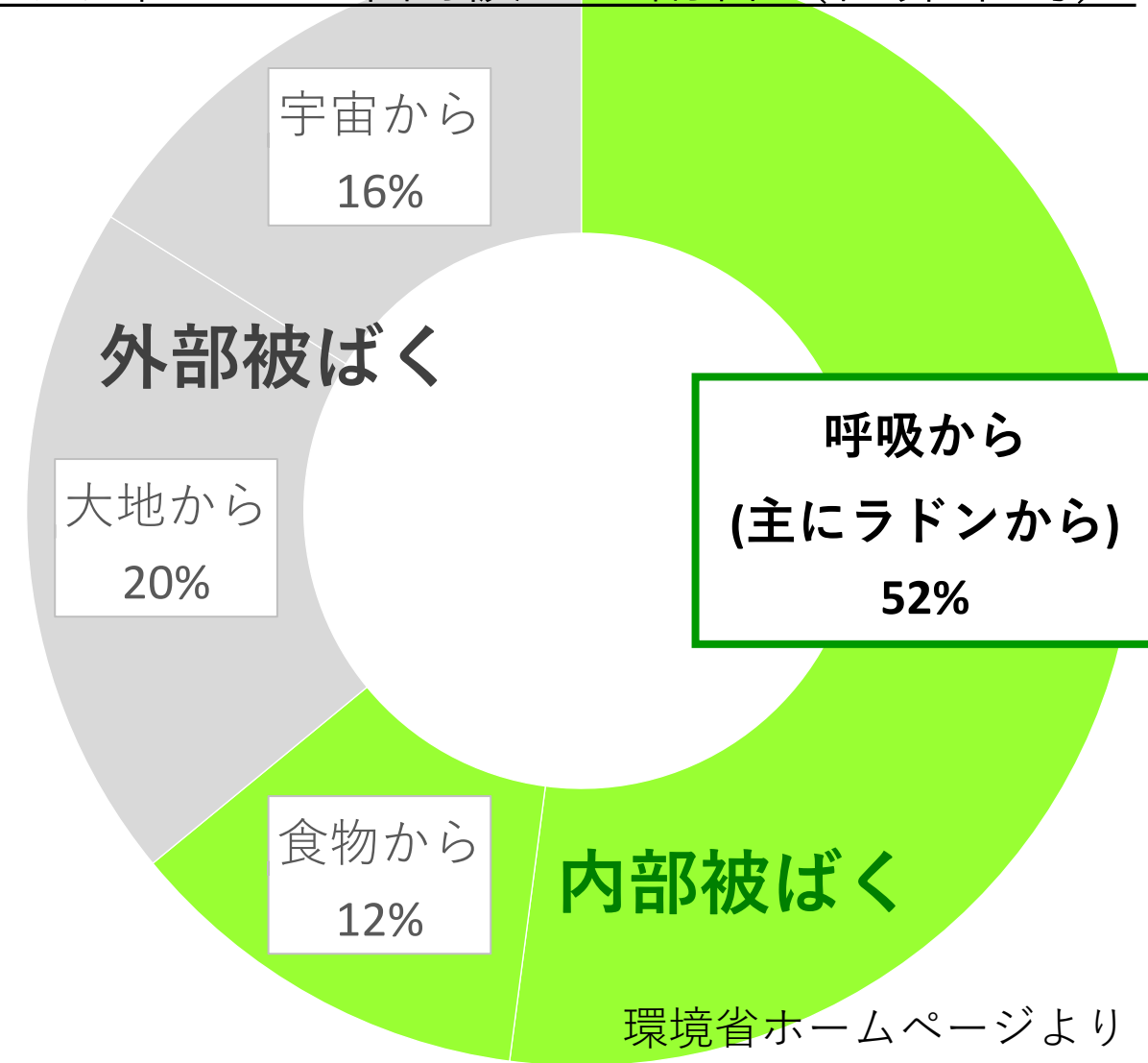
- 1 研究背景と目的
- 2 検出器の概要と測定手法
- 3 性能評価
- 4 まとめ・今後の展望

研究背景

ラドンRn 原子番号86

- ・ 無色無臭、**気体の希ガス**
- ・ 質量数195～228の**同位体が存在**
- ・ **放射能**をもつ
年間被ばく量の約半数を占める

1人当たりの年間被ばく割合（世界平均）



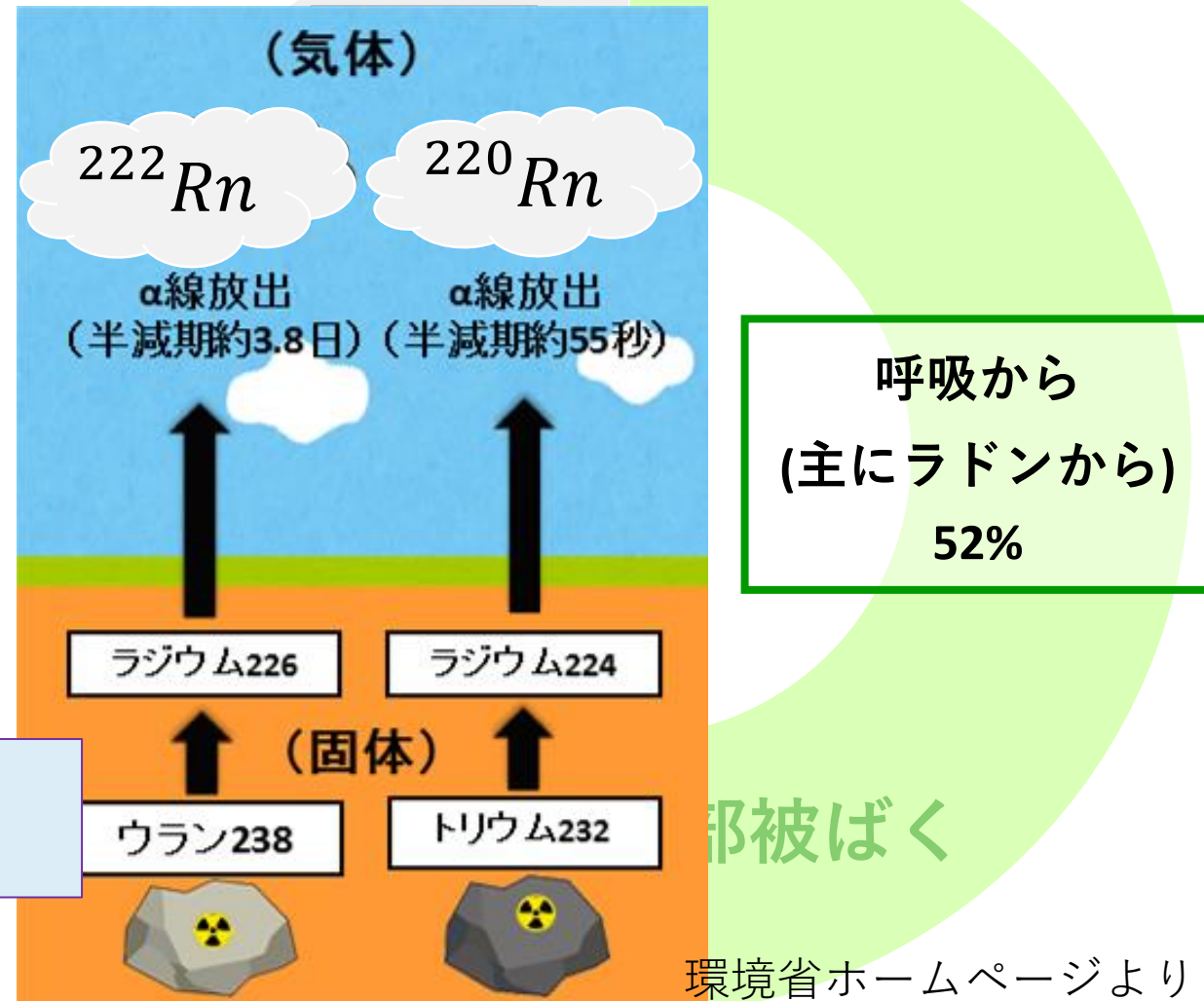
研究背景

ラドンRn 原子番号86

- ・ 無色無臭、**気体の希ガス**
- ・ 質量数195～228の**同位体が存在**
- ・ **放射能**をもつ
年間被ばく量の約半数を占める

最も**身近**にある**放射性物質**！

1人当たりの年間被ばく割合（世界平均）

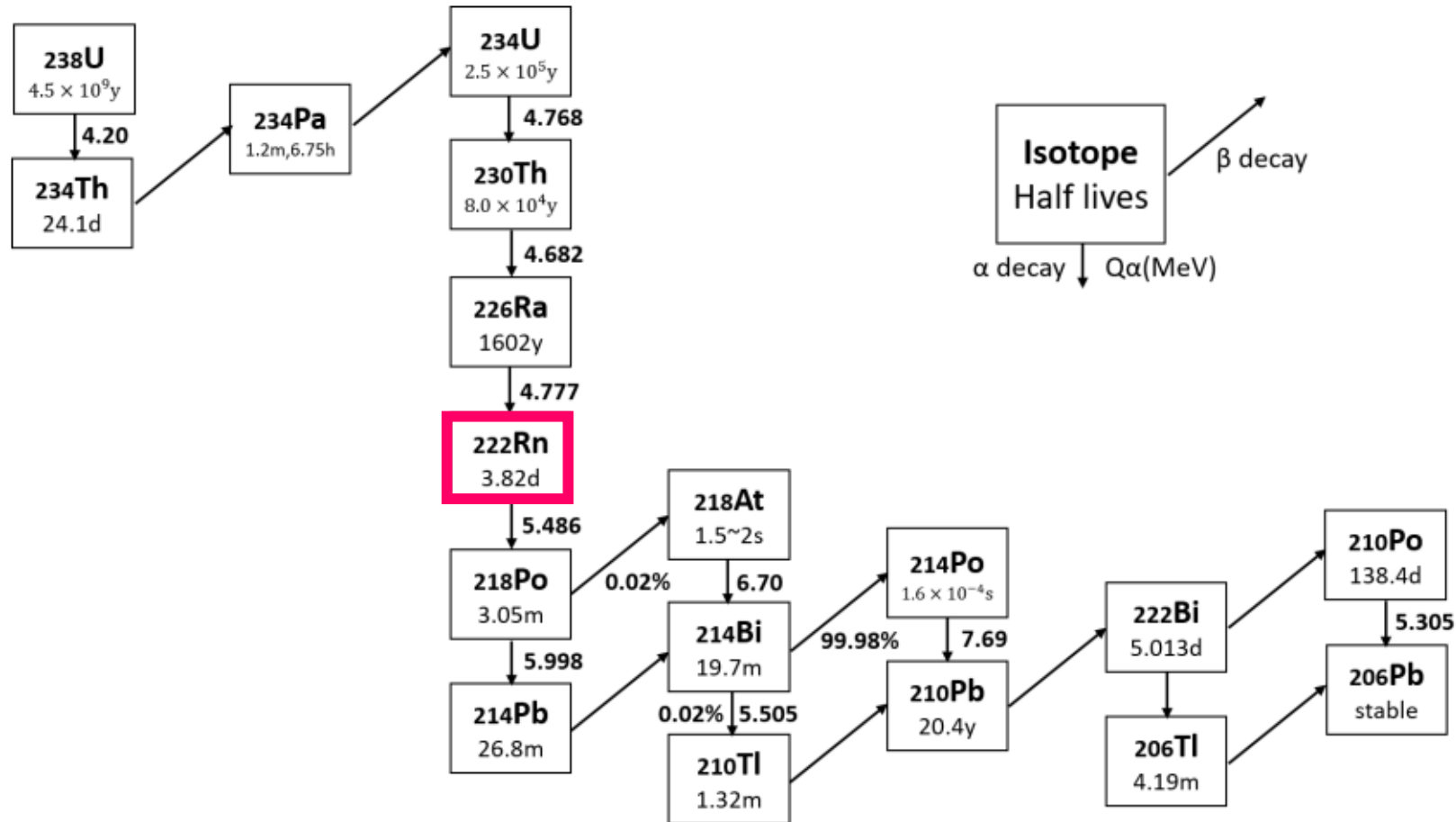


- ・天然のラドン

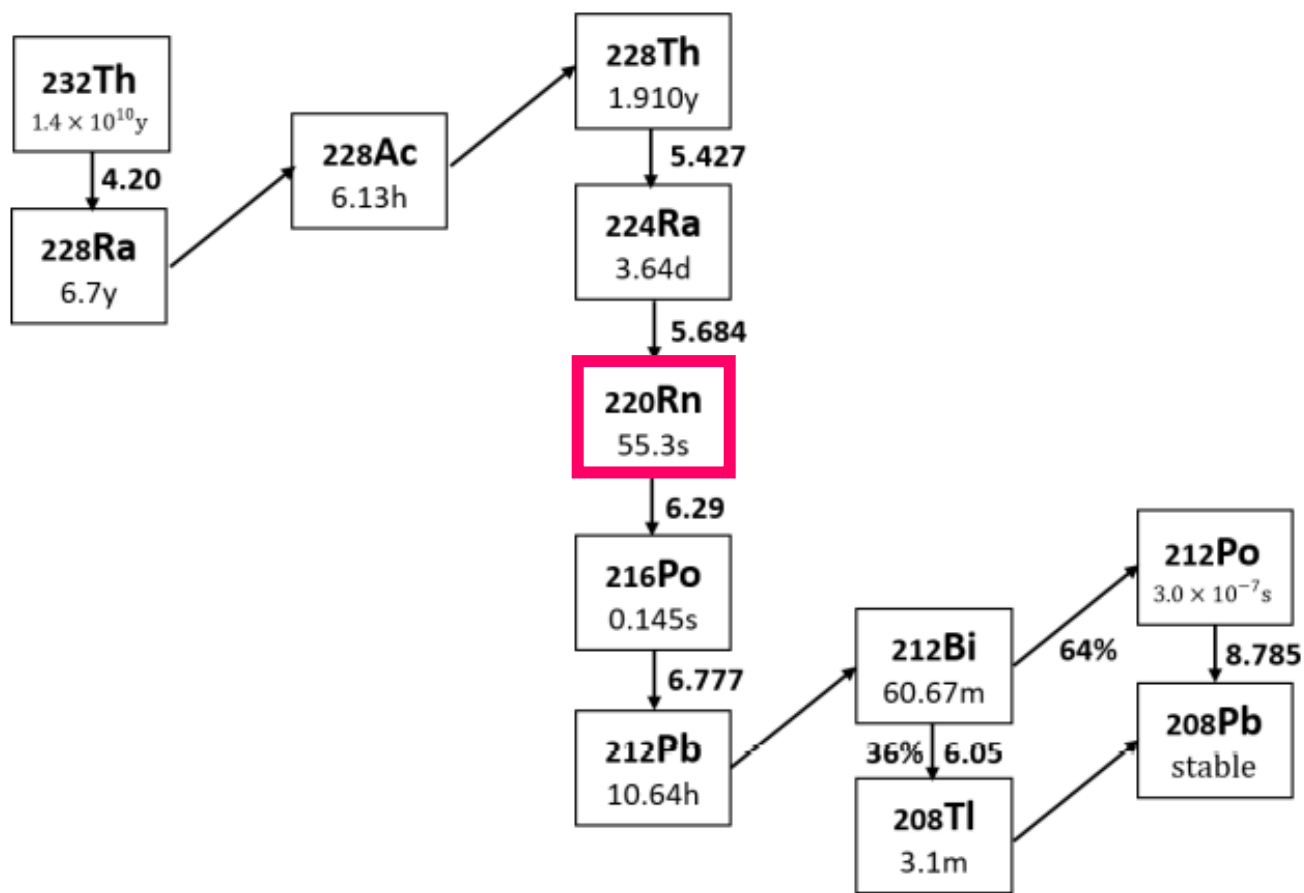
ウラン系列 ^{222}Rn , トリウム系列 ^{220}Rn , アクチニウム系列 ^{219}Rn に存在

- ・ **連続崩壊中** で生成され、原子番号84のPoに α 壊変する

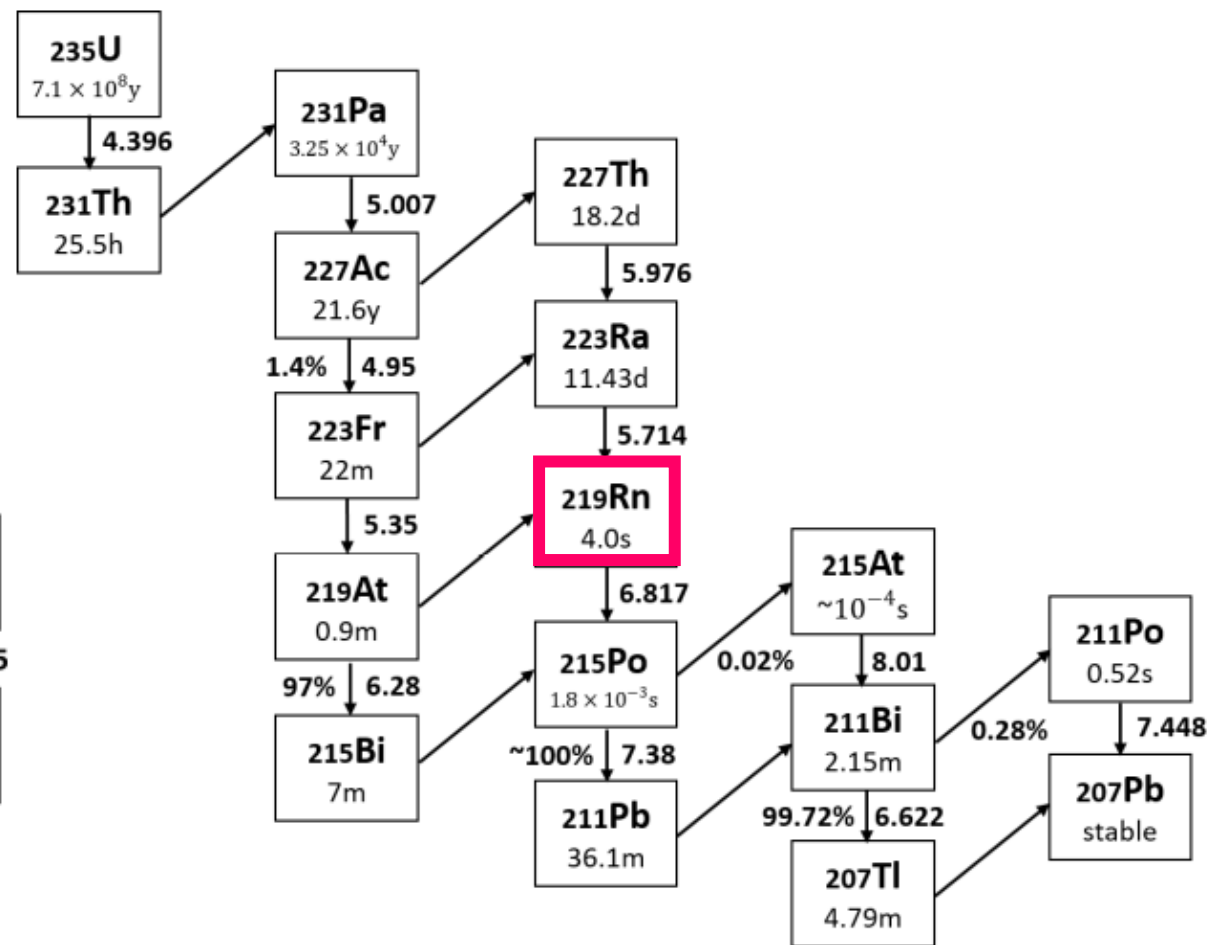
ウラン系列



トリウム系列



アクチニウム系列



連続崩壊を利用することで、身近な放射性物質ラドンを測定したい！

物理教育の原子核崩壊や半減期を学ぶ際、教材として使用してもらいたい！

→ラドン検出器

先行研究

スーパーカミオカンデ検出器の主要なバックグラウンドの1つ

- ✓ 根本、田阪、堀、奥村、梶田、竹内、RADIOISOTOPES46(1997)710
 - ✓ Takeuchi et.al., NIM A421(1999)334
 - ✓ 筑波大修士論文H11年度志賀薫氏（田岸研）
 - ✓ 佐賀大H15年度修士論文 能戸信行氏（大隅研）
- 等

本実験で使用したラドン検出器の研究

- ✓ 筑波大H19,22-24年度卒研, 修士論文
- ✓ 奈良女子大2018-19年度卒研
- ✓ 横国大2020-21年卒研

- ①波高分析システムの向上
- ②シングルボードコンピュータの搭載
- ③検出部にあたるステンレス缶の向上

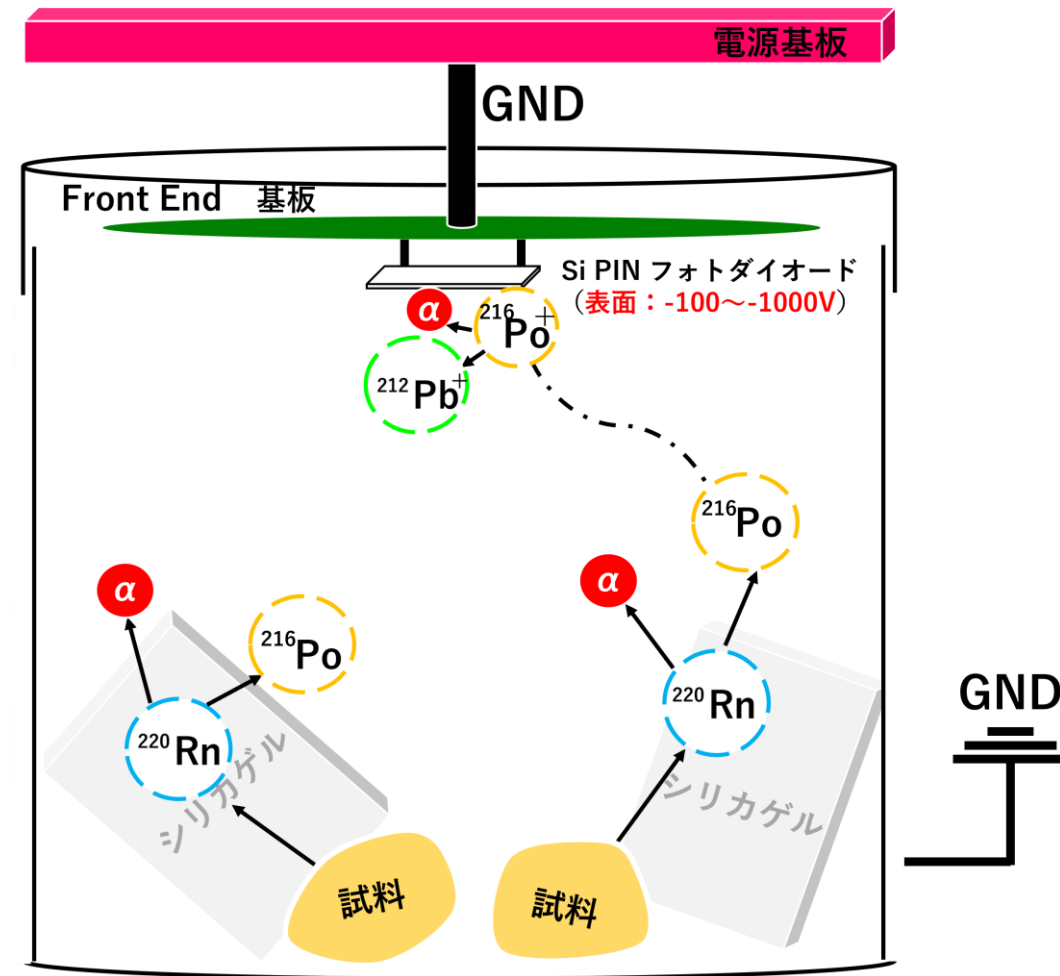
教育現場でも **手ごろ** かつ **安全** に使用できるように
年々、安価・小型・低電圧な構成へ



検出原理

静電捕集法

1. 鉱石からラドンが放出
2. ラドンが α 崩壊し、娘核へと壊変
3. その後、娘核は帯電し、高電圧に引きよせられ PD の表面に吸着
4. PD に吸着した娘核が α 線を放出し、娘核へ壊変
→ α 線のエネルギーを検出
5. 3～4のように、 α 崩壊を繰り返し、 α 線を放出
→ α 線のエネルギーを検出



研究目的

<ラドン検出器の開発>

安価・小型・**低電圧**な構成へ

をモットーに開発が行われてきた

安全面

低電圧

VS

測定精度

高電圧



研究目的

<ラドン検出器の開発>

安価・小型・**低電圧**な構成へ

をモットーに開発が行われてきた

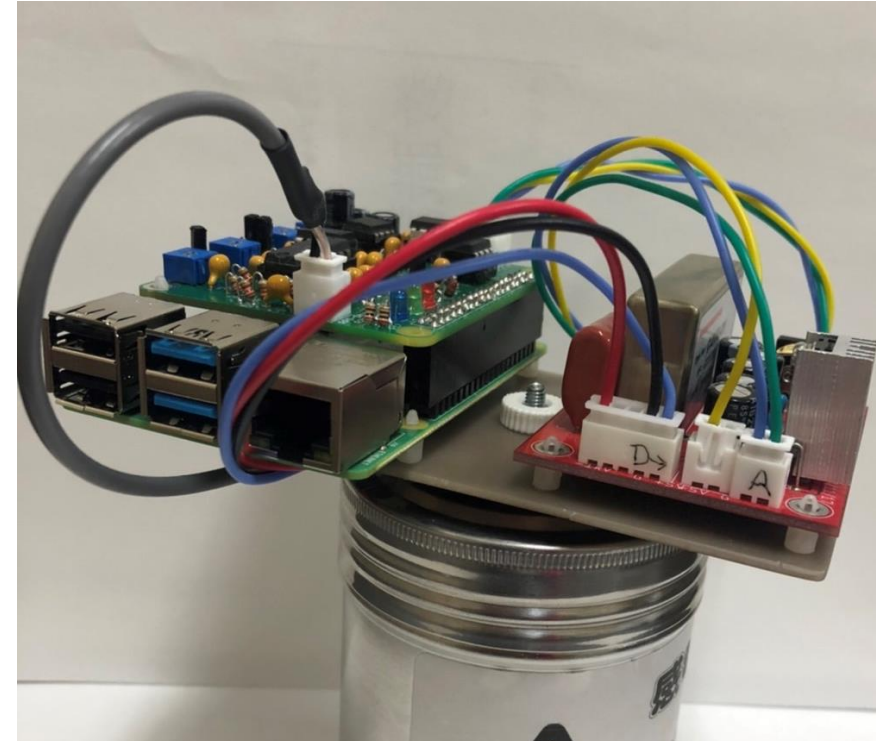
安全面

低電圧

VS

測定精度

高電圧



本研究では

静電捕集電圧の変化に対する検出割合・精度から

最適な捕集電圧を探る

目次

- 1 研究背景と目的
- 2 検出器の概要と測定手法**
- 3 性能評価
- 4 まとめ・今後の展望

検出器の概要

アナログ部

シェイパーアンプ

データ収集・制御部

Raspberry Pi 4

検出部

ステンレス缶(高さ9cm)

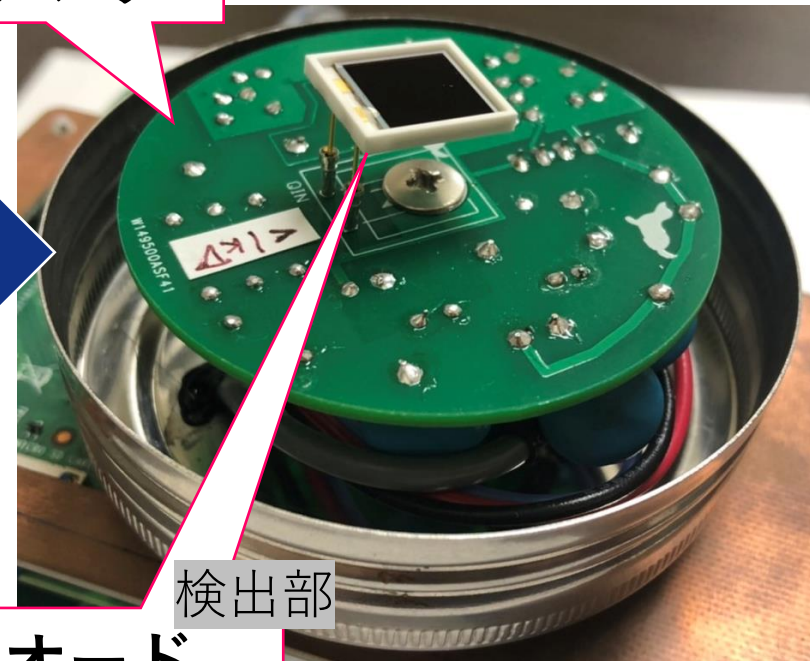


アナログ部

電源基板

アナログ部

プリアンプ



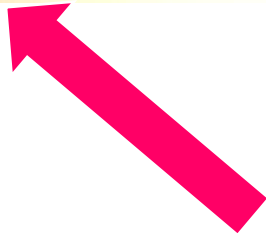
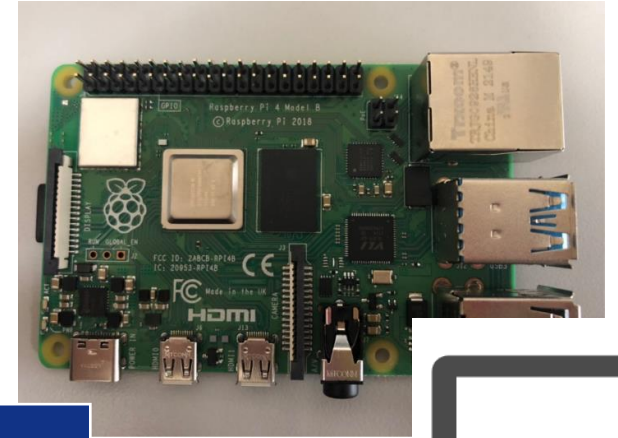
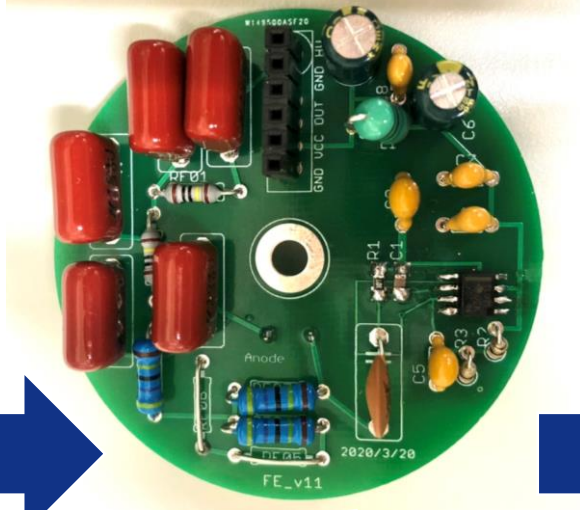
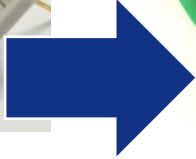
検出部

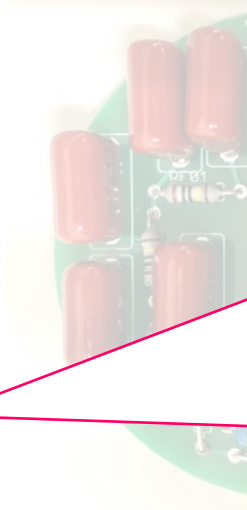
Si PIN フォトダイオード

検出部

アナログ部

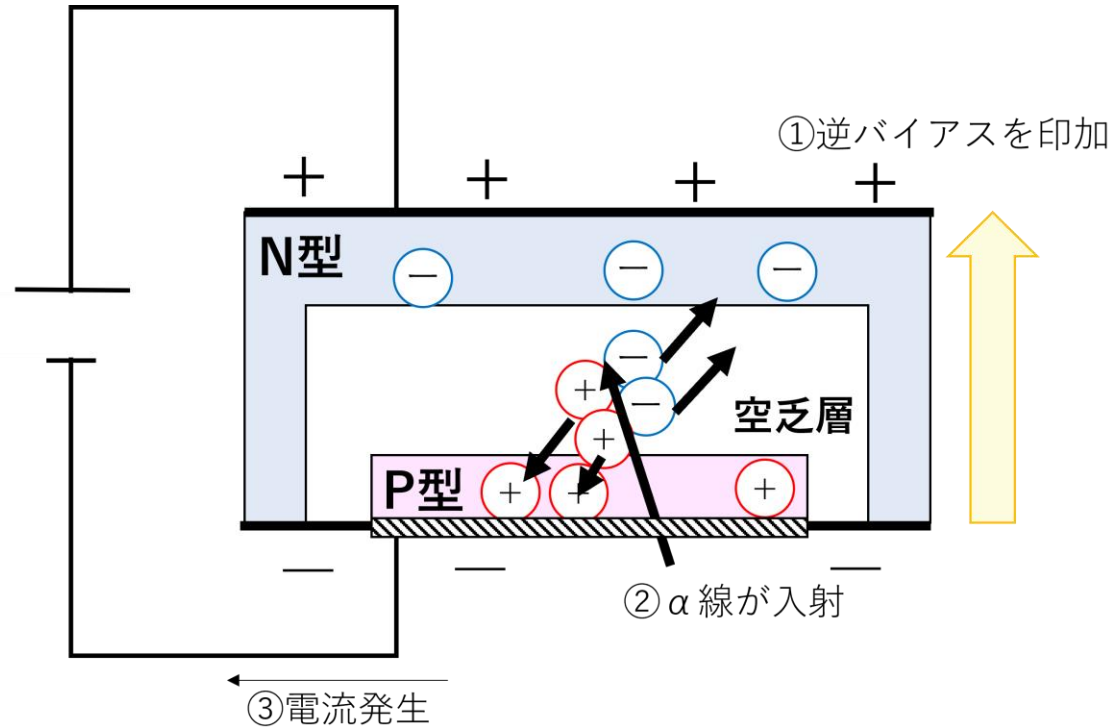
データ制御・収集部





Si PIN フォトダイオード

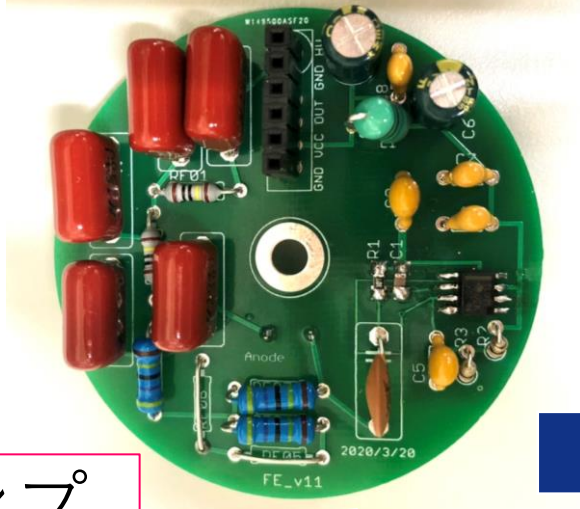
P層とN層の間にI層（空乏層）を挟み込んだ3層構造



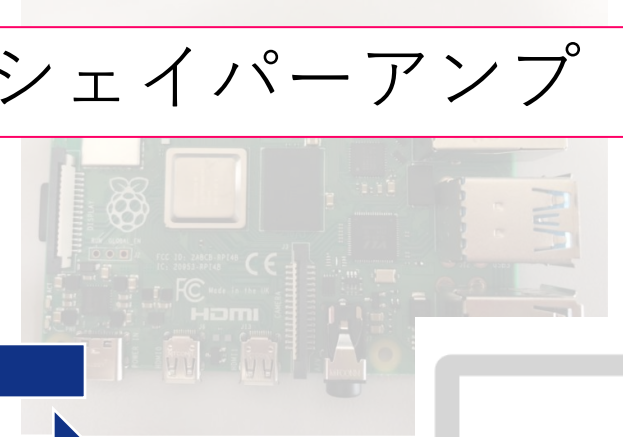
PD付近で崩壊した際のみα線が入射する



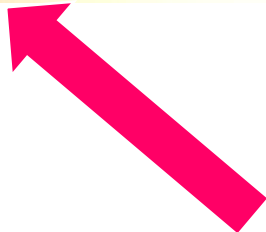
プリアンプ

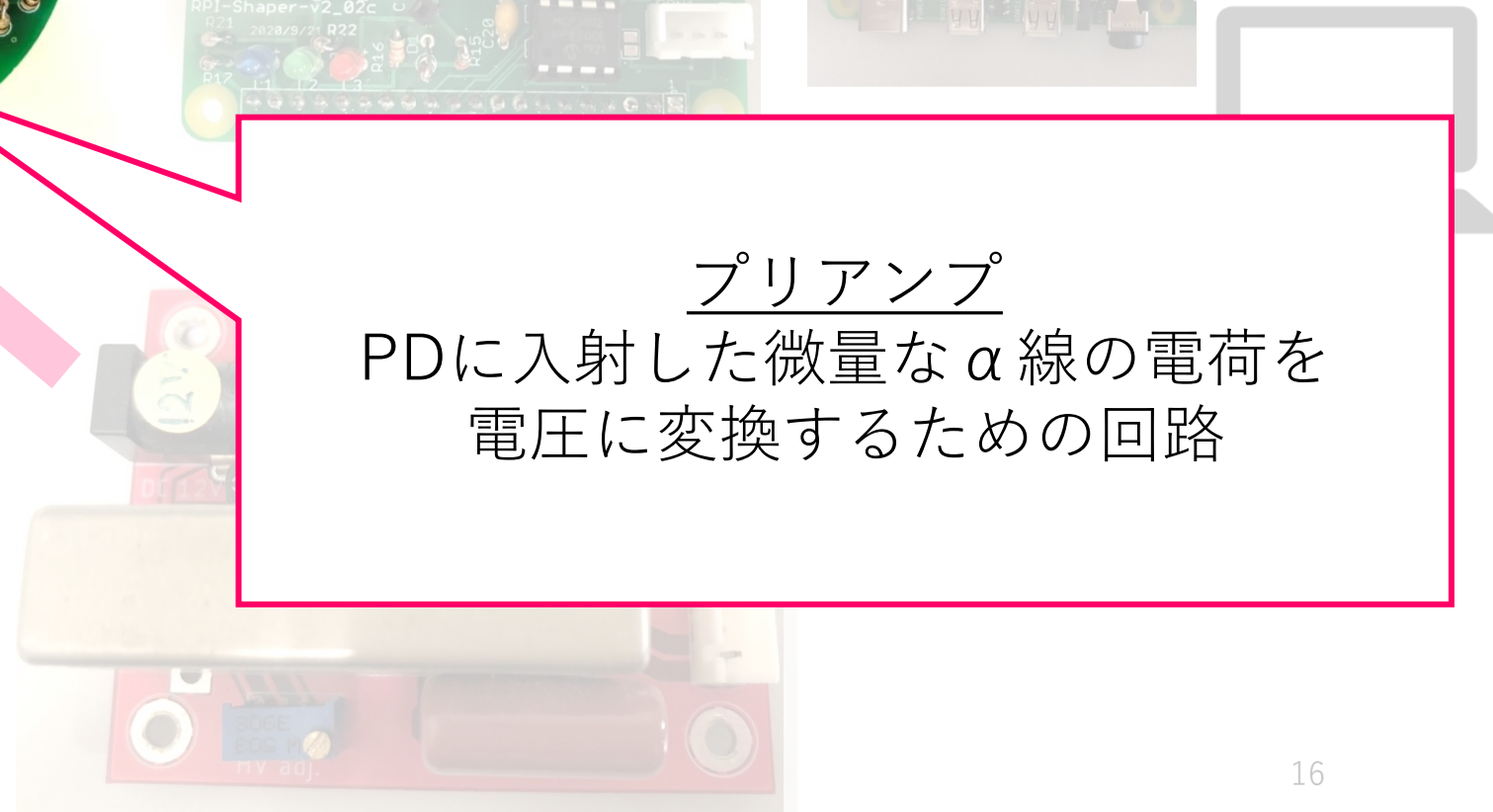
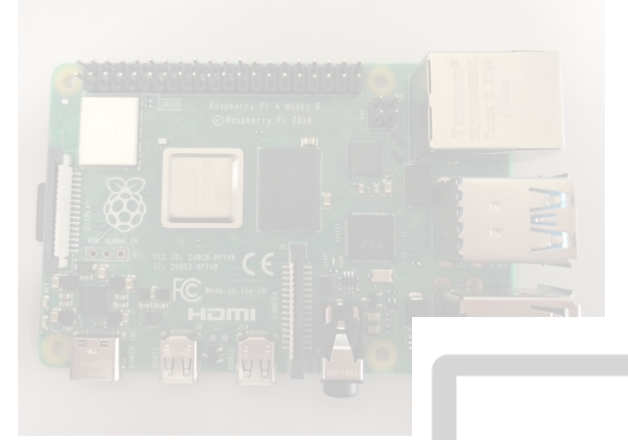
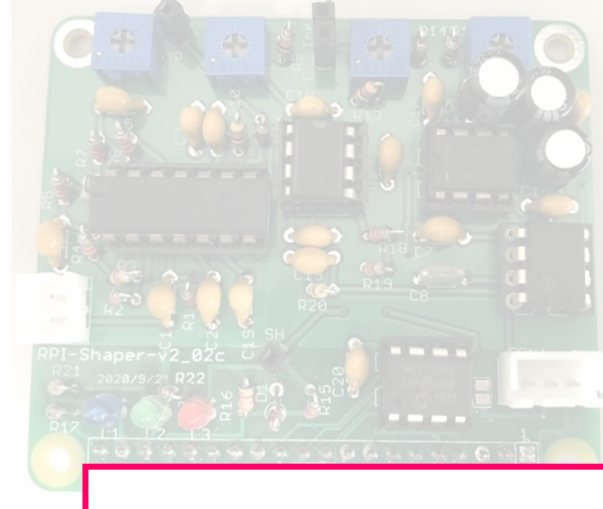
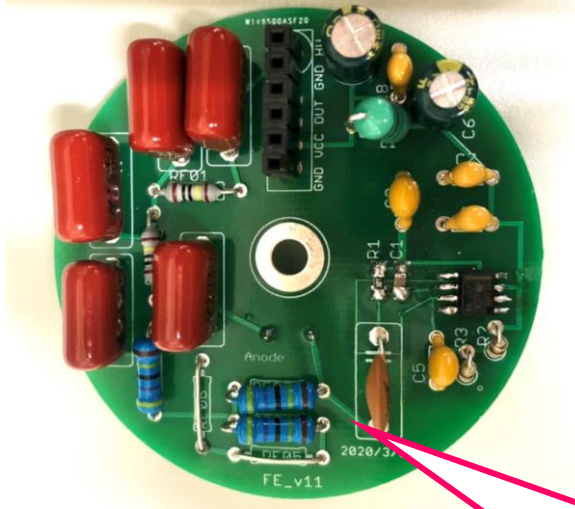


シェイパーアンプ



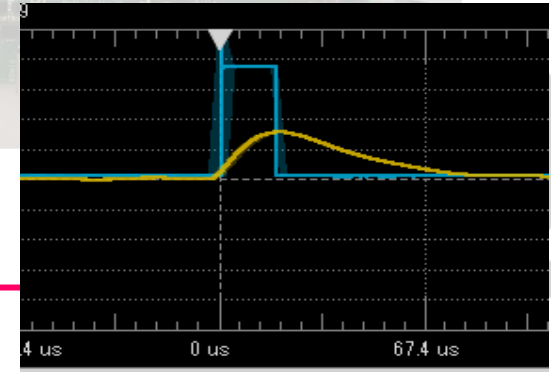
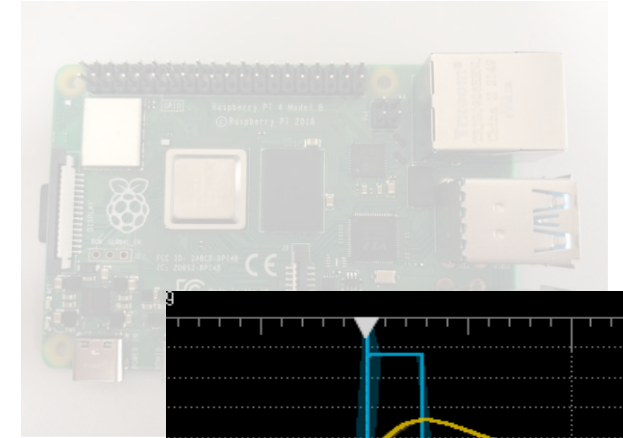
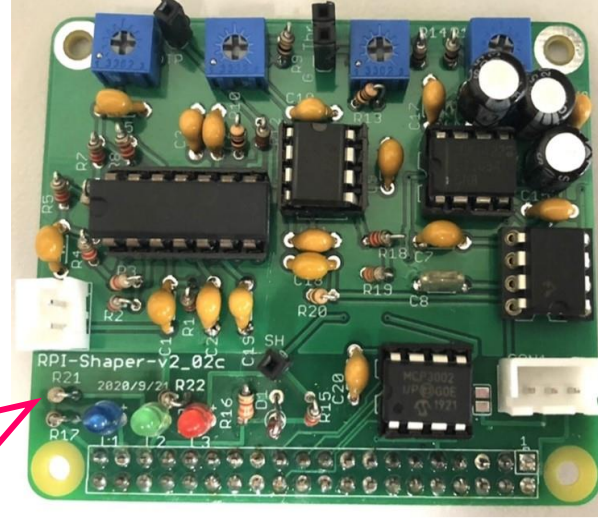
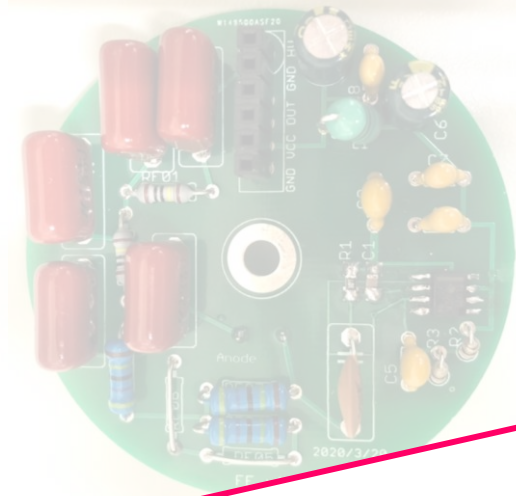
電源基板



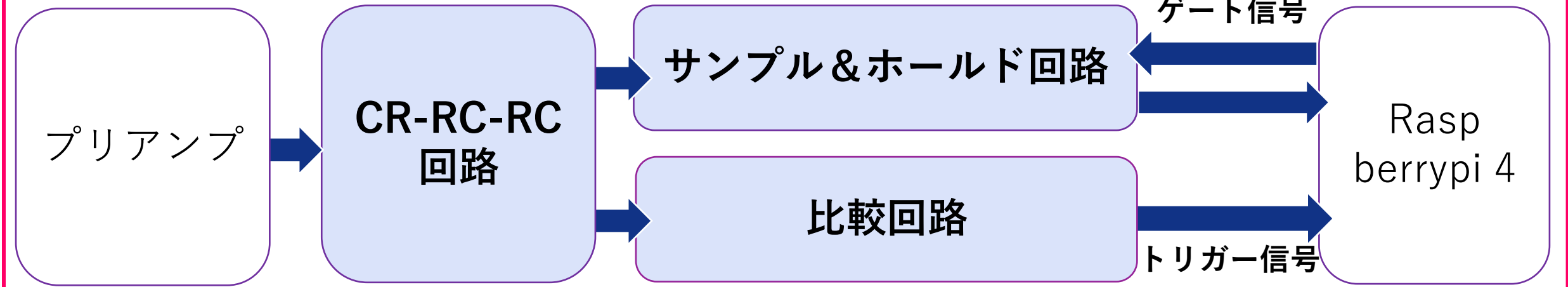


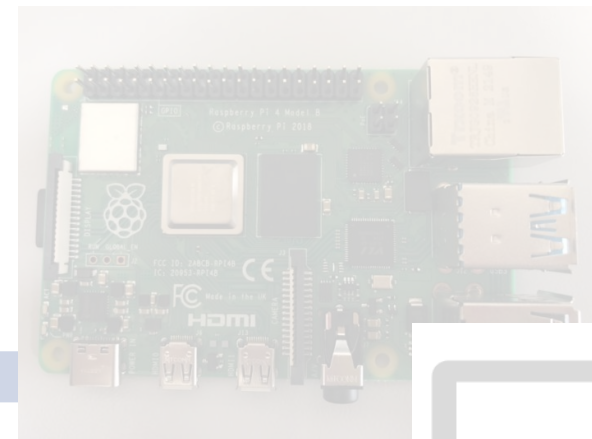
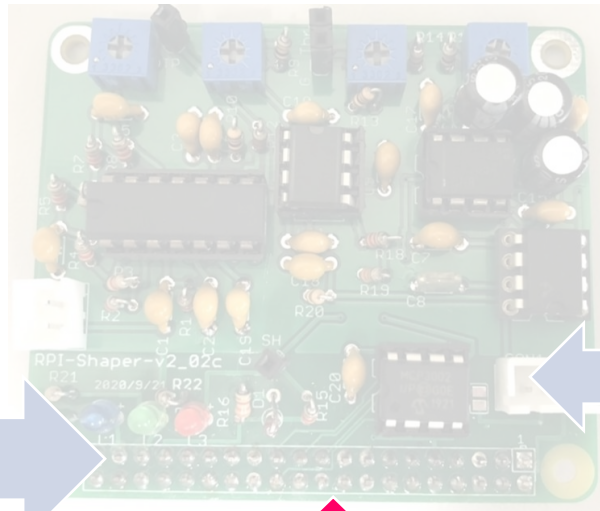
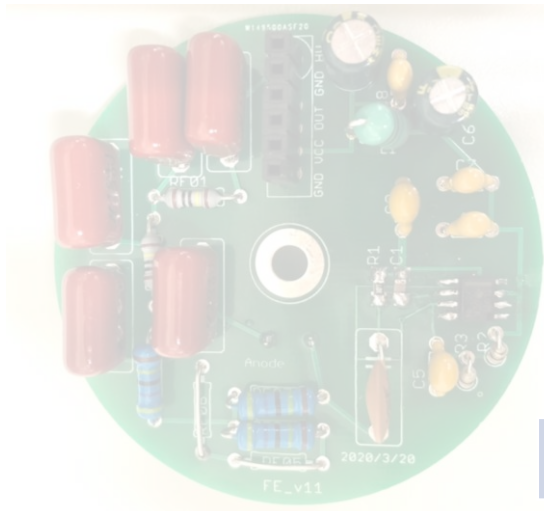
プリアンプ

PDに入射した微量な α 線の電荷を
電圧に変換するための回路



シェーパアンプ

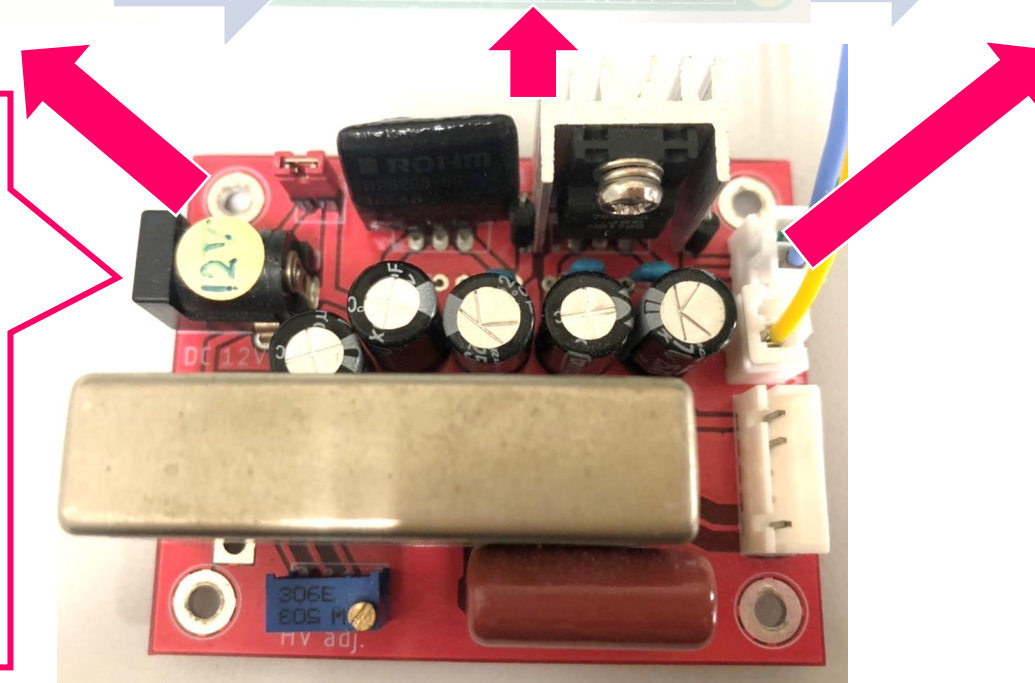




電源基板

各々の基板に電源供給を行う

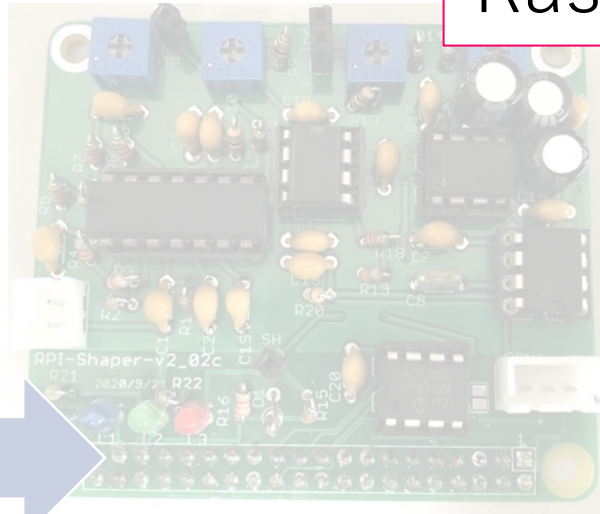
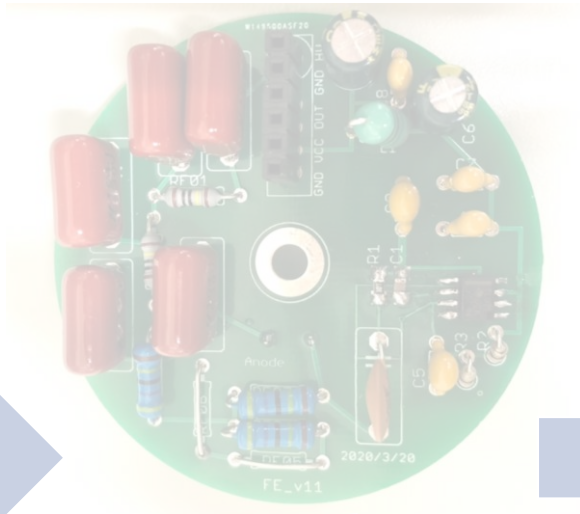
PDへの静電捕集電圧の調整は
高電圧電源を使用



検出部

アナログ部

データ制御・収集部



Raspberry Pi 4

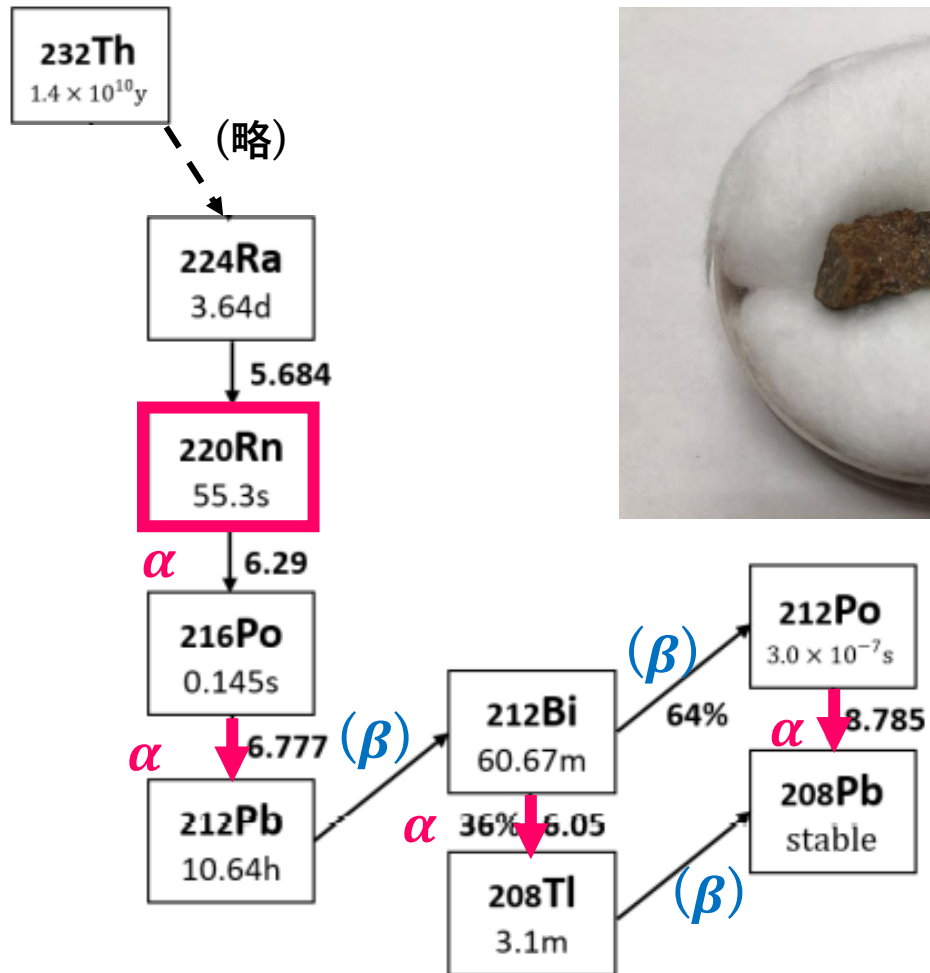


タブレット端末等



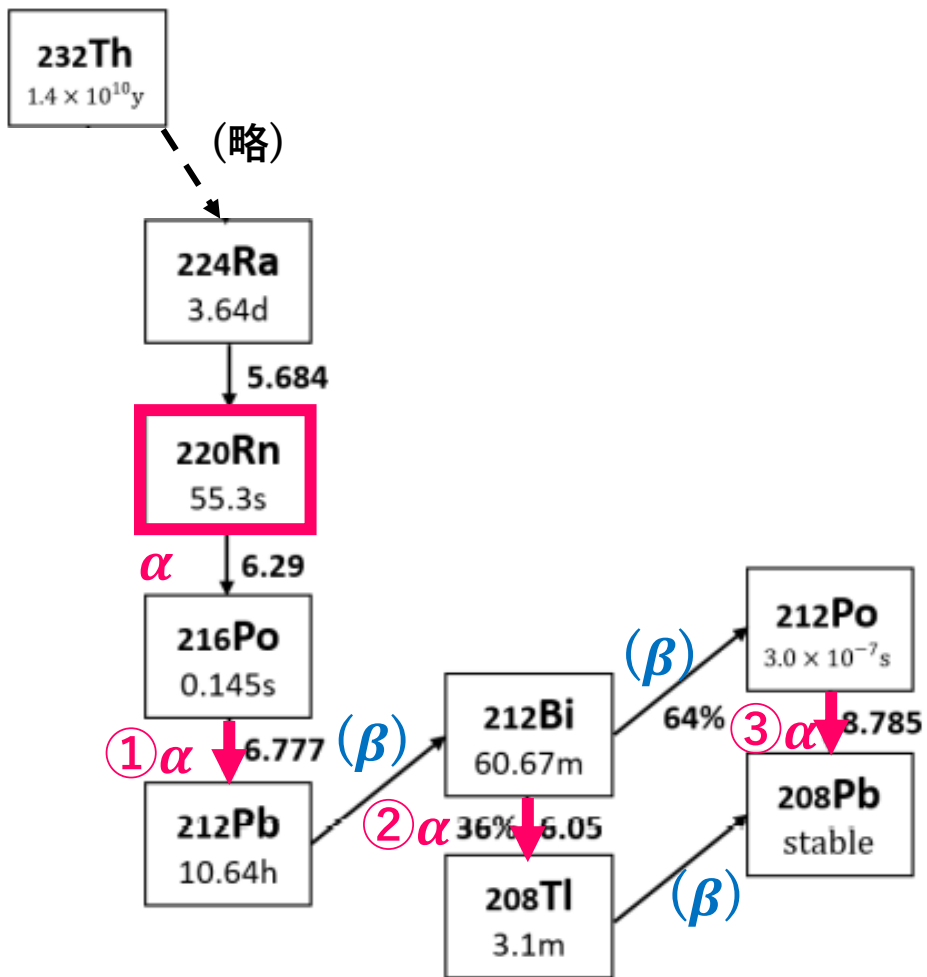
測定手法

Rnの線源：モナズ石 (Thを含む)

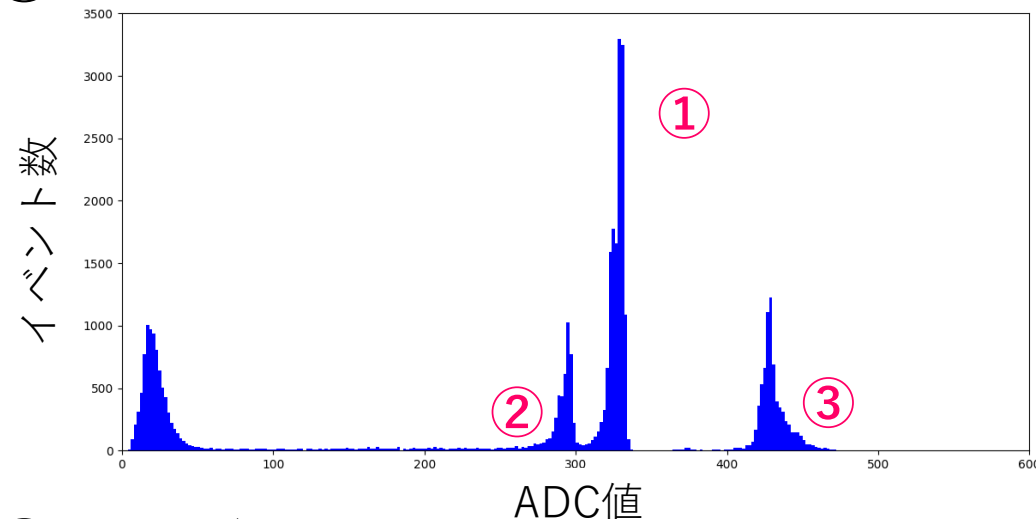


- 実験手順
- 崩壊元素の同定

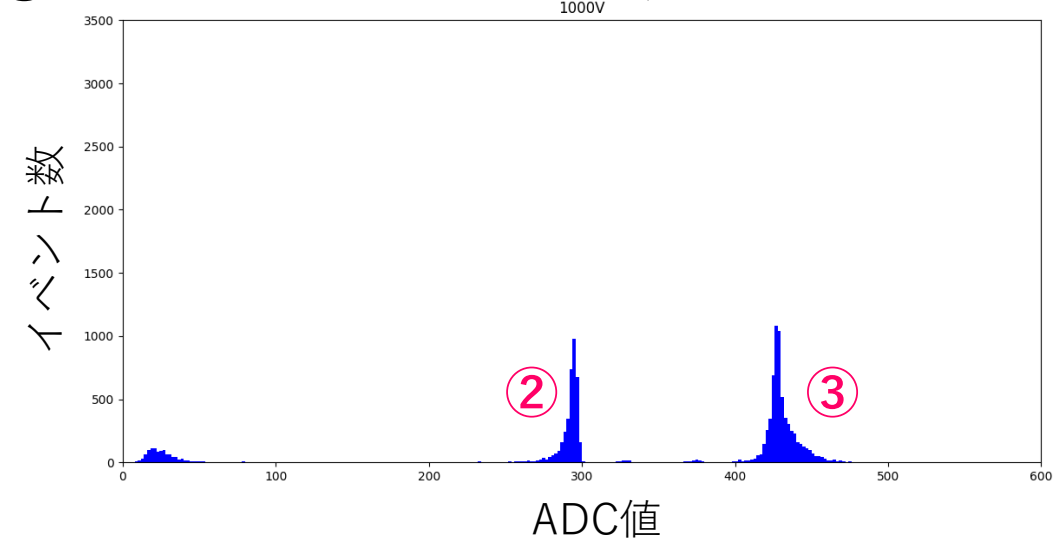
Rnの線源：モナズ石 (Thを含む)



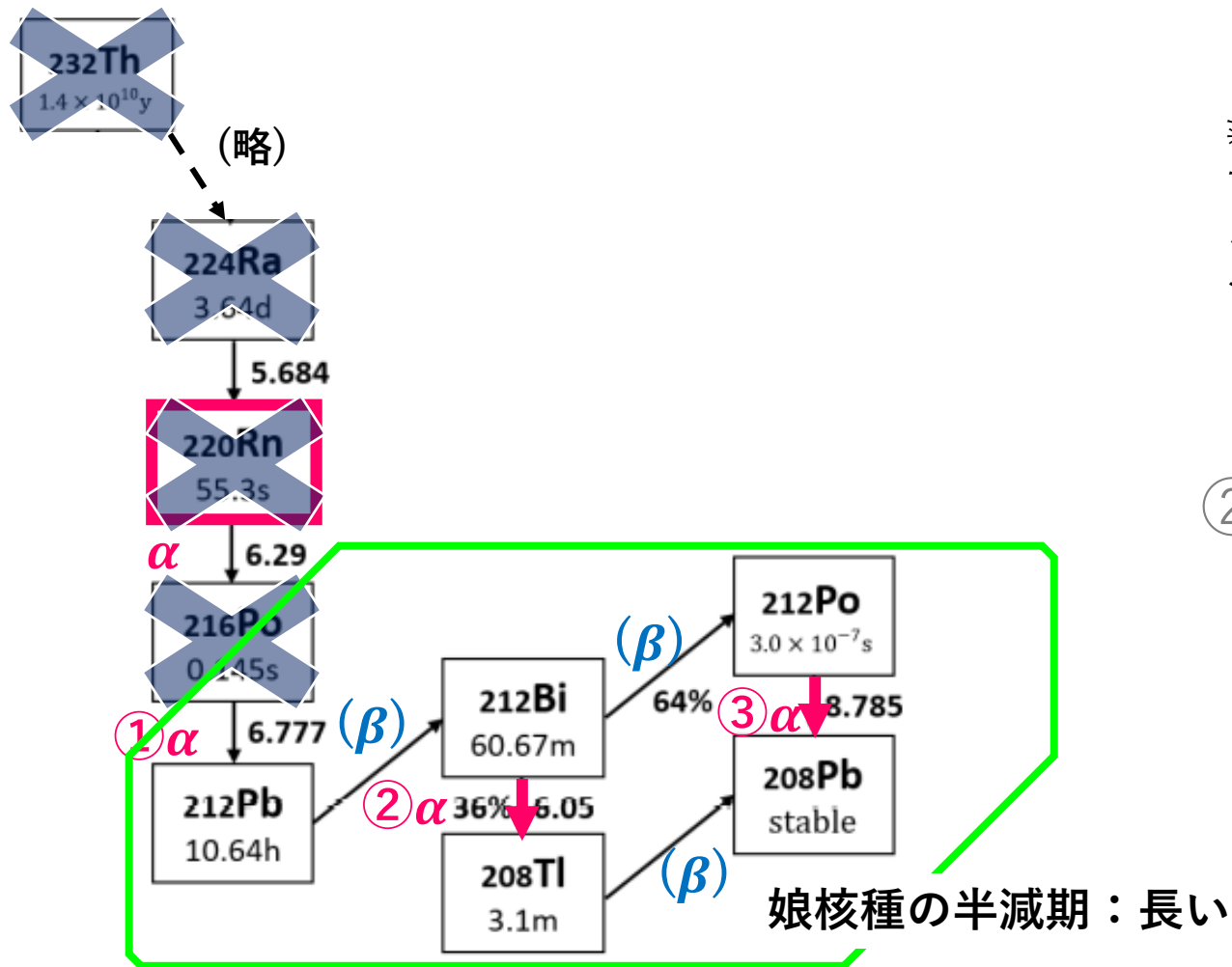
①モナズ石を入れて1日測定



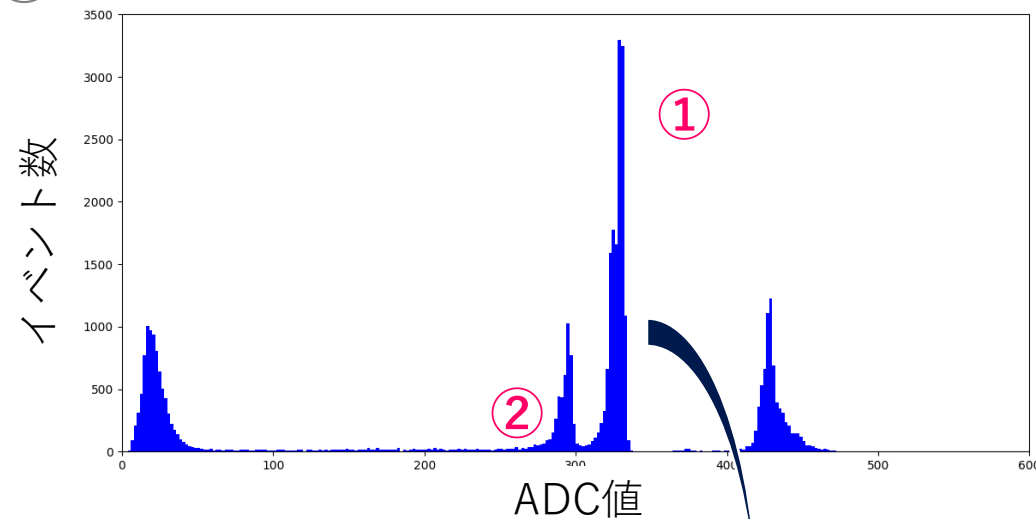
②モナズ石を取り除き、更に2日測定



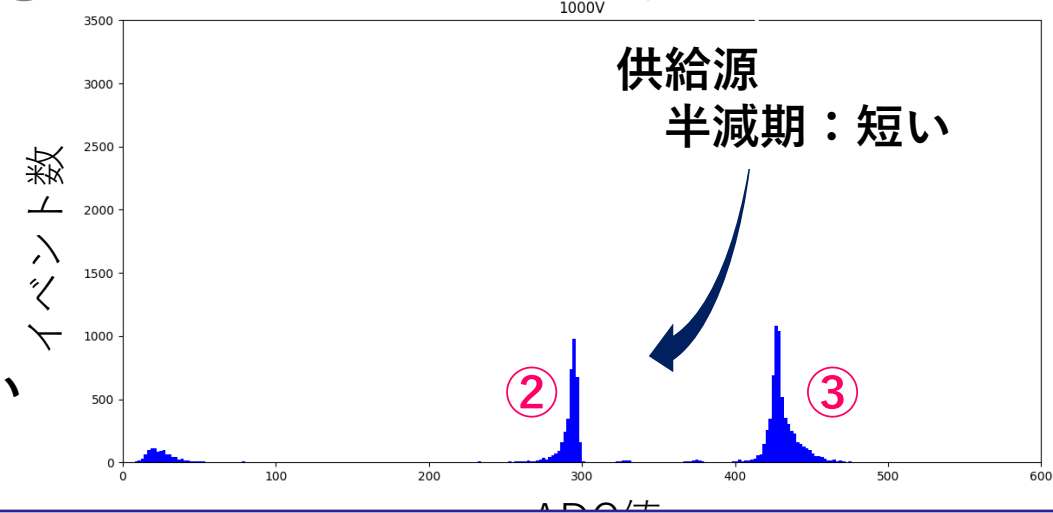
Rnの線源：モナズ石 (Thを含む)



①モナズ石を入れて1日測定



②モナズ石を取り除き、更に2日測定



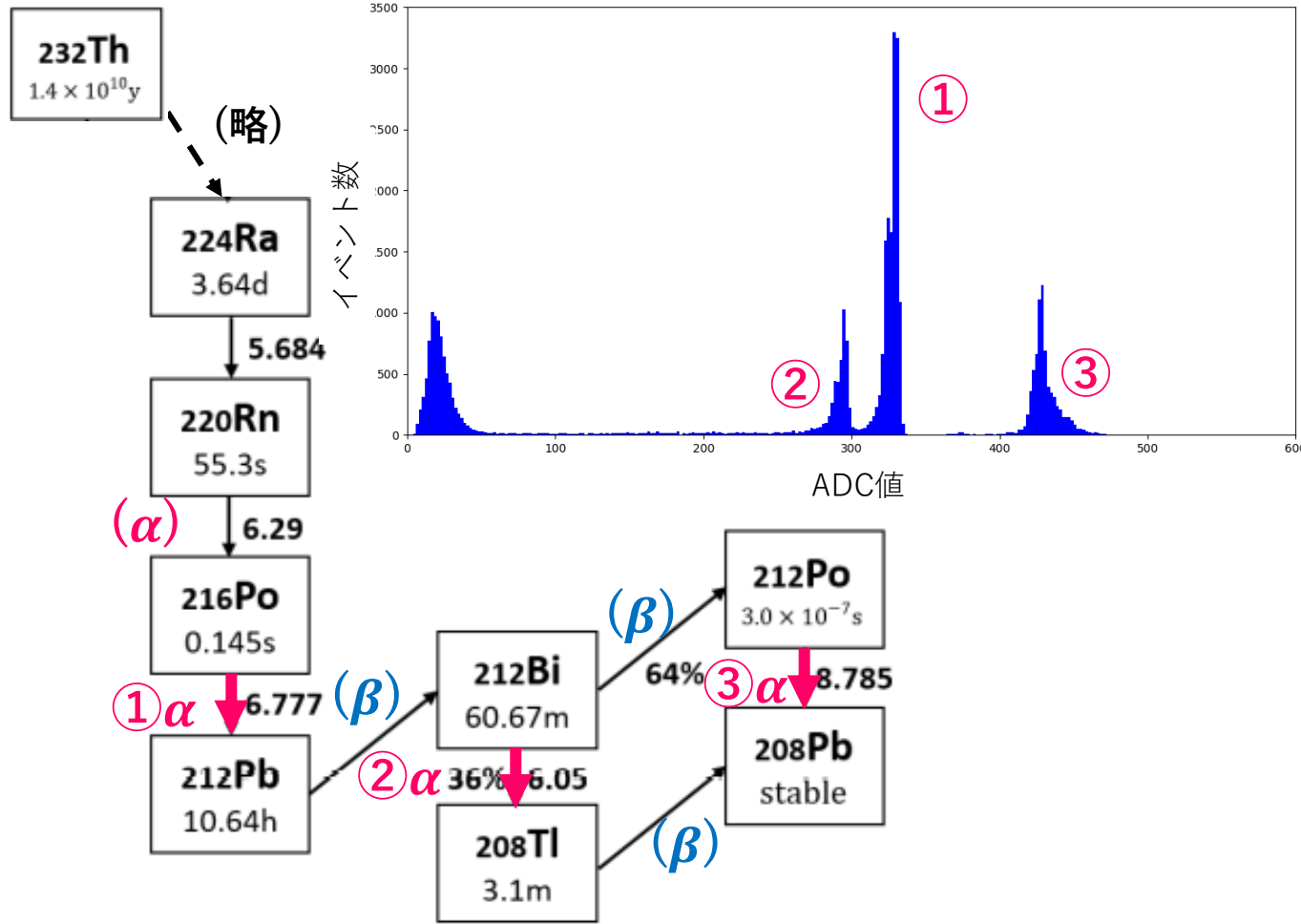
崩壊元素の同定について

①ADC値とエネルギー値の関係

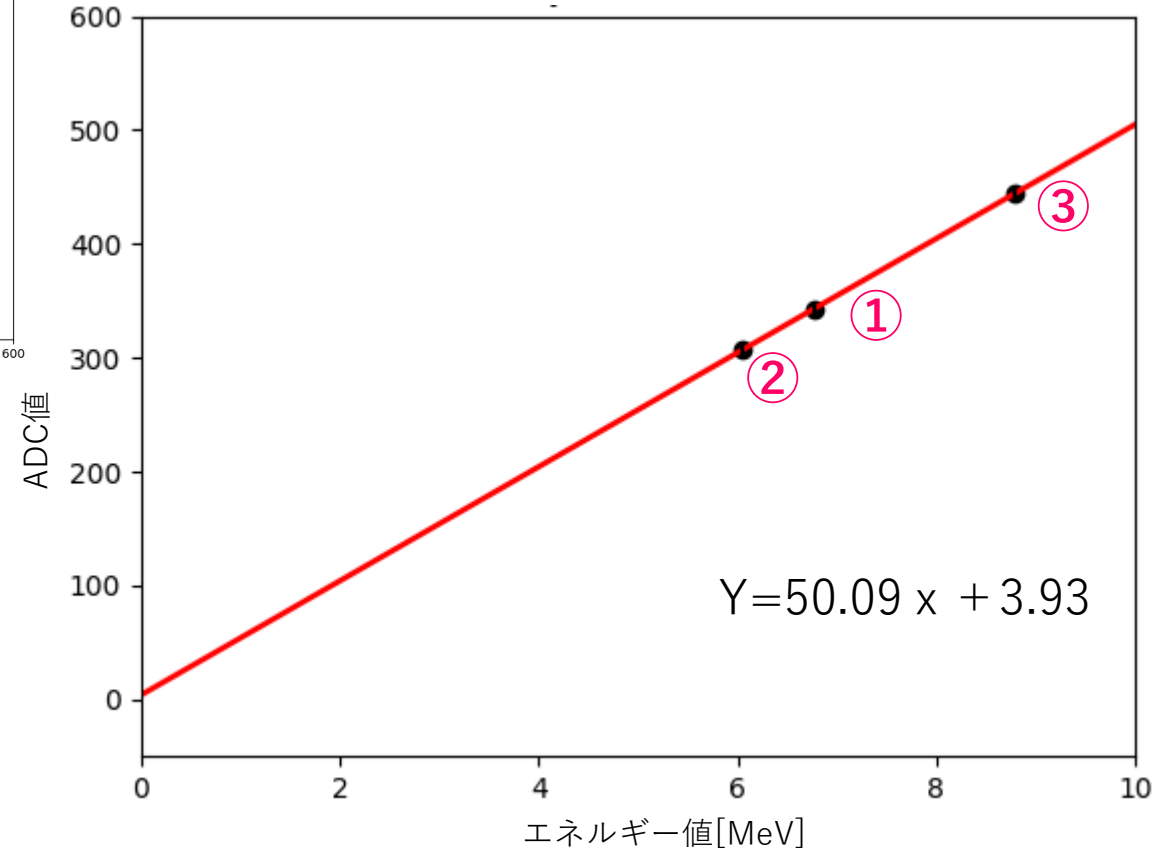
②半減期

から判断した

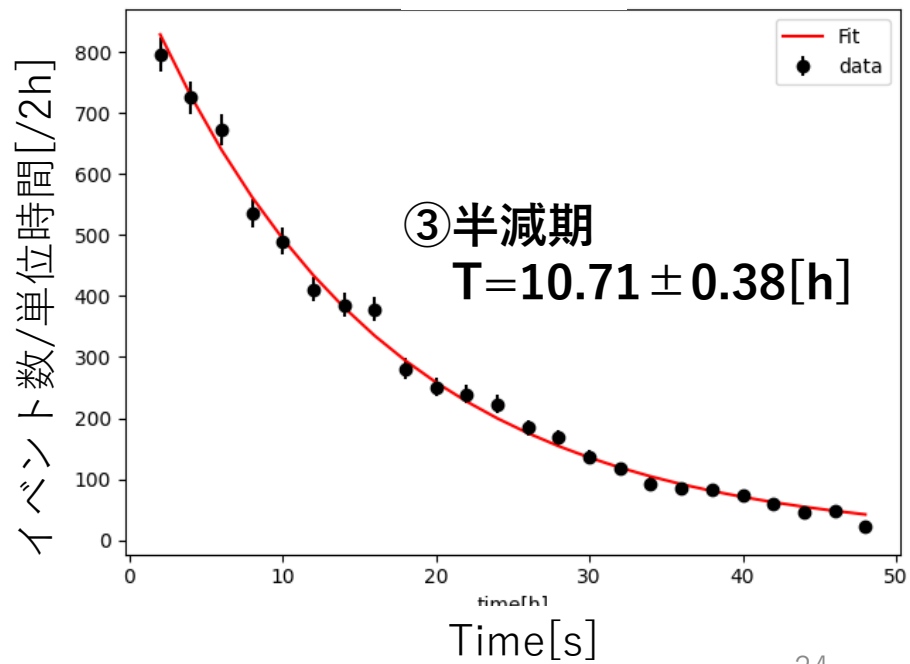
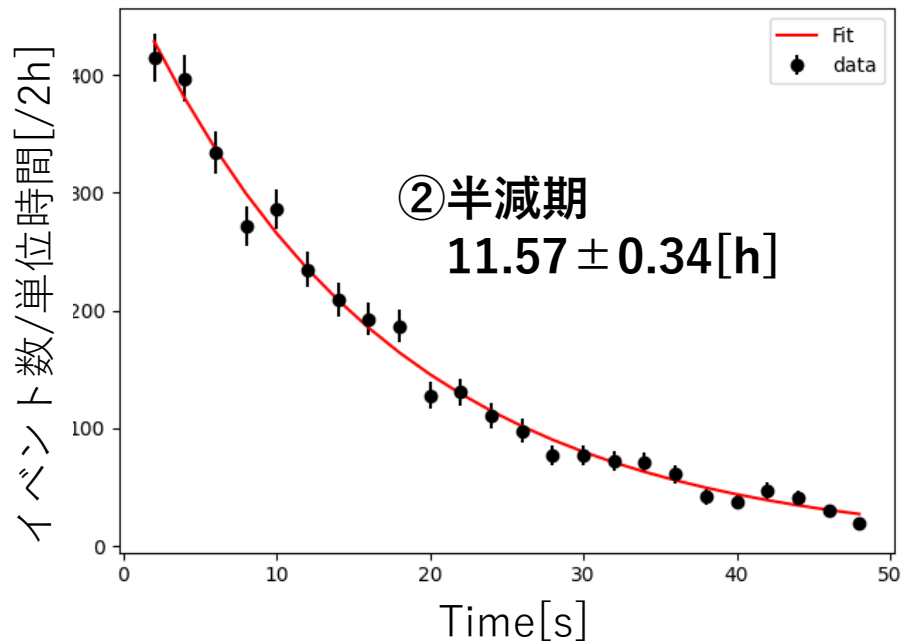
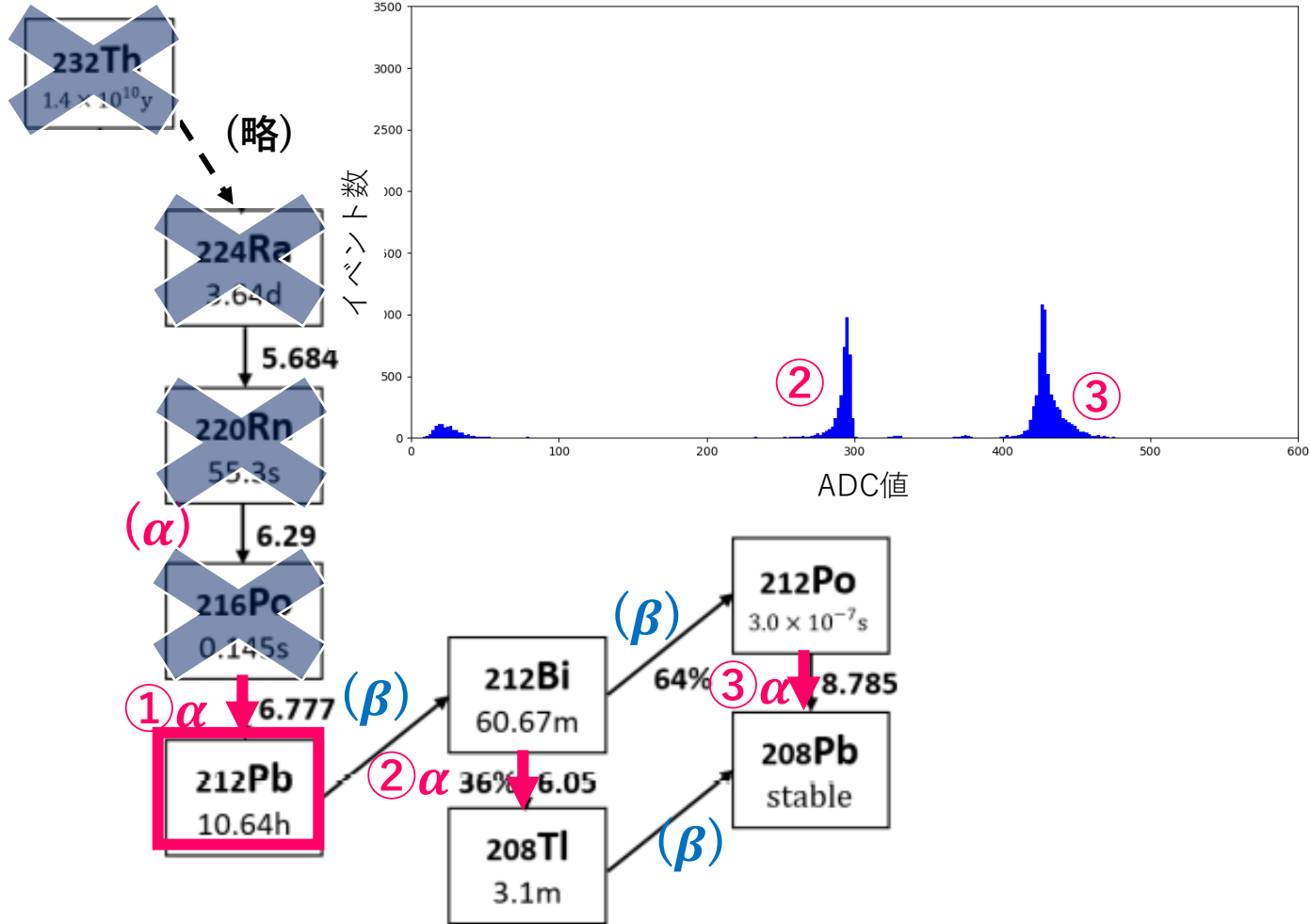
①ADC値とエネルギー値の関係



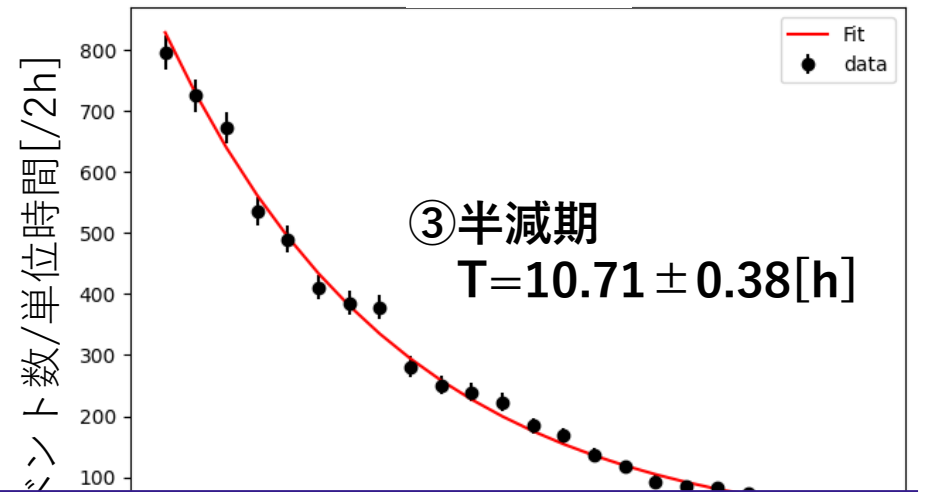
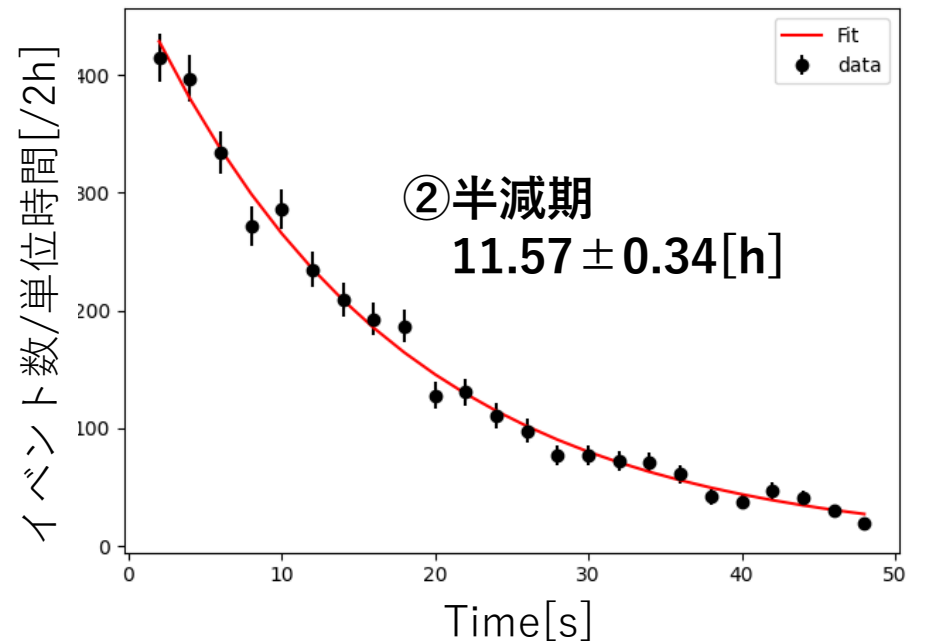
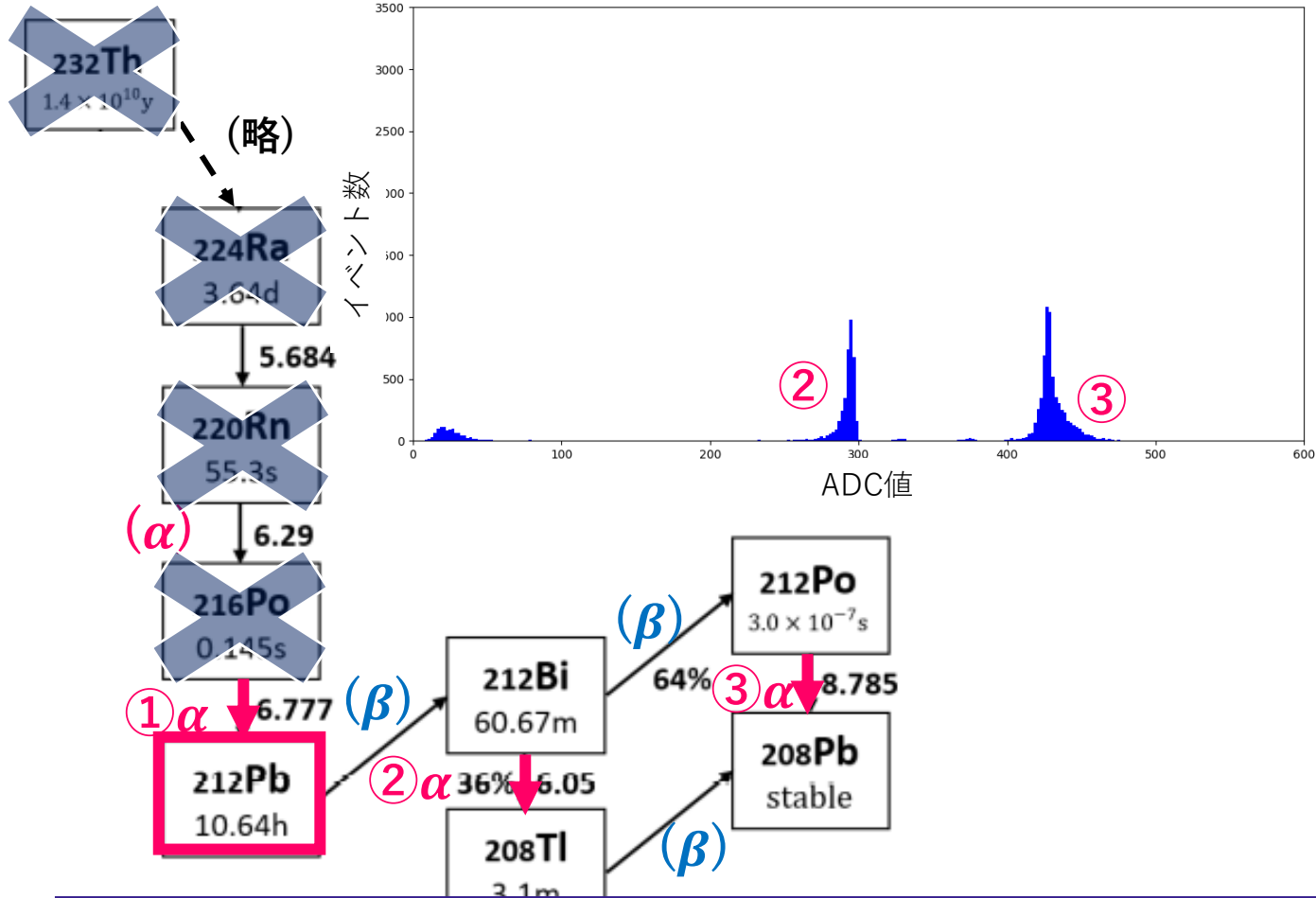
エネルギー値とADC値の関係



②半減期



②半減期



3つのピークは①～③の崩壊で発生する α 線のエネルギー
 → 静電捕集電圧を変化させ同様の実験を行い検出器の性能評価を行う

目次

- 1 研究背景と目的
- 2 検出器の概要と測定手法
- 3 性能評価**
- 4 まとめ・今後の展望

検出器の性能評価

静電捕集電圧の変化による

①検出割合

測定値とシミュレーション値のイベント数をfittingし
ラドンの娘核種の付着割合を算出

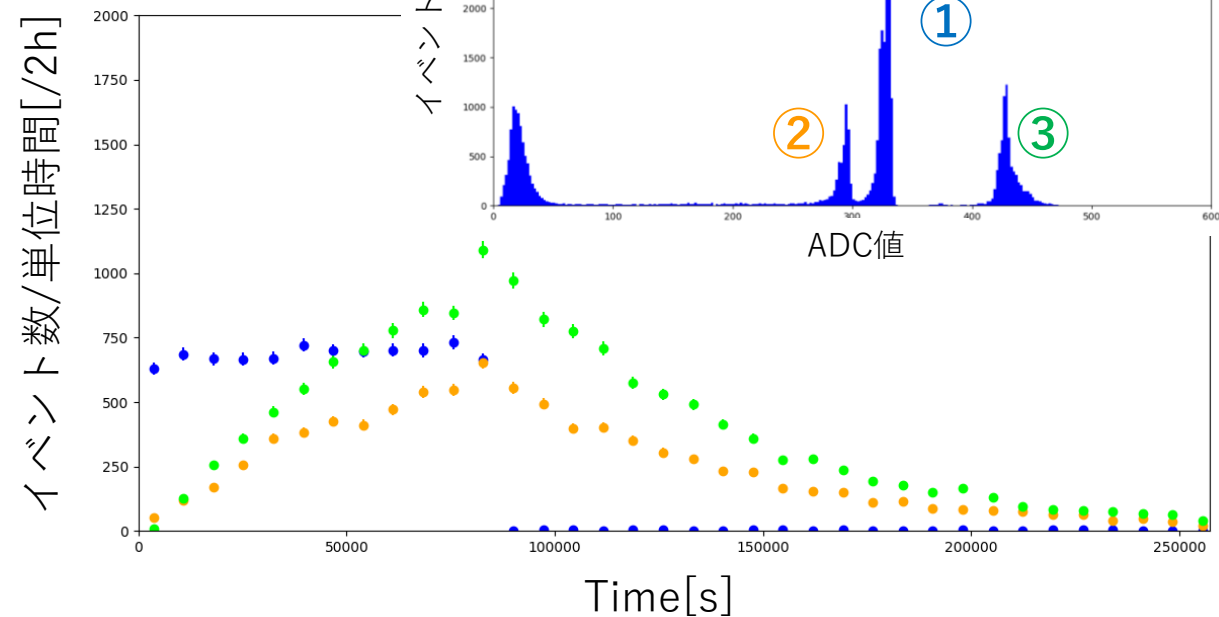
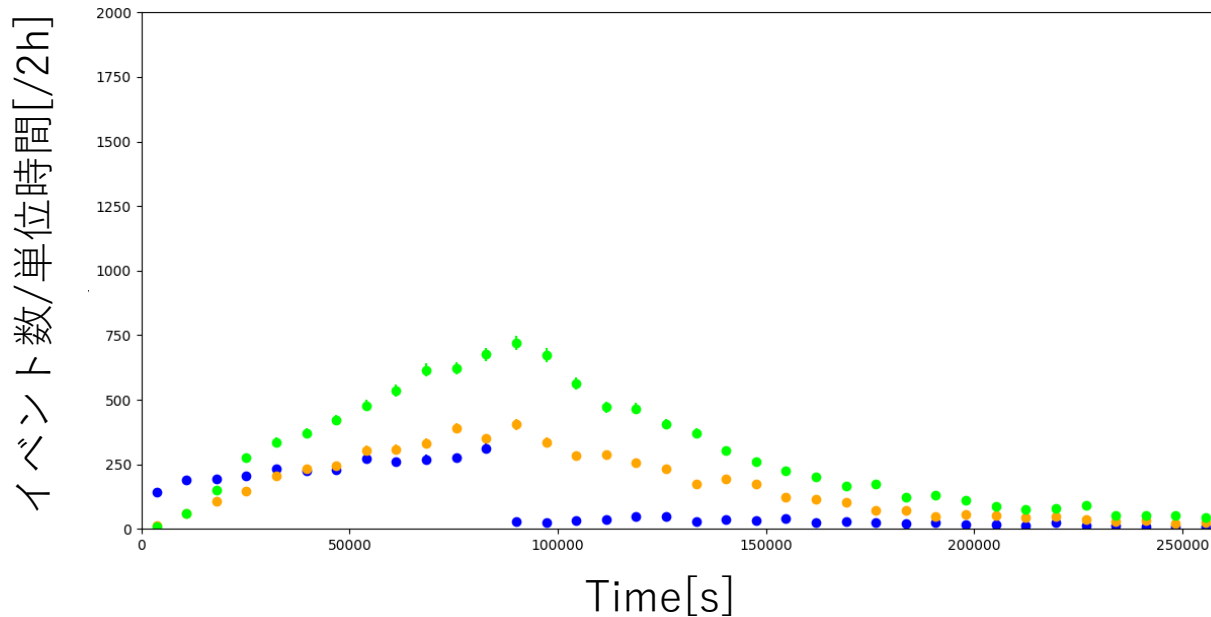
②半減期の測定精度

測定で得られた半減期と、文献値の比較から判断

から評価を行う

①検出割合

<電圧の異なるデータ>



どのピークから取り出したデータも**電圧の変化に伴い検出割合が変化していた**

→**連続崩壊**をもとに**検出割合を考慮したシミュレーション値**のfittingから
各々の放射性物質の検出割合を算出した

連続崩壊をもとに検出割合を考慮したシミュレーション

1. 初期値の設定

$$N_a(t) = N_0$$

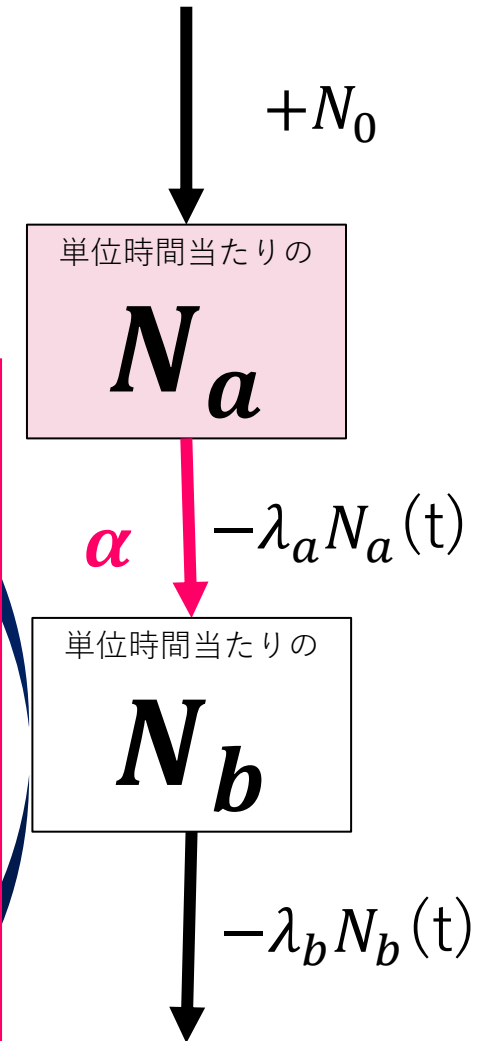
2. α 崩壊直前に、カイ二乗の値が一番低くなるようfittingし
PDに付着している物質の物質量を計算、保存

$$N_a(t) \times \text{付着割合} \text{〇〇}\%$$

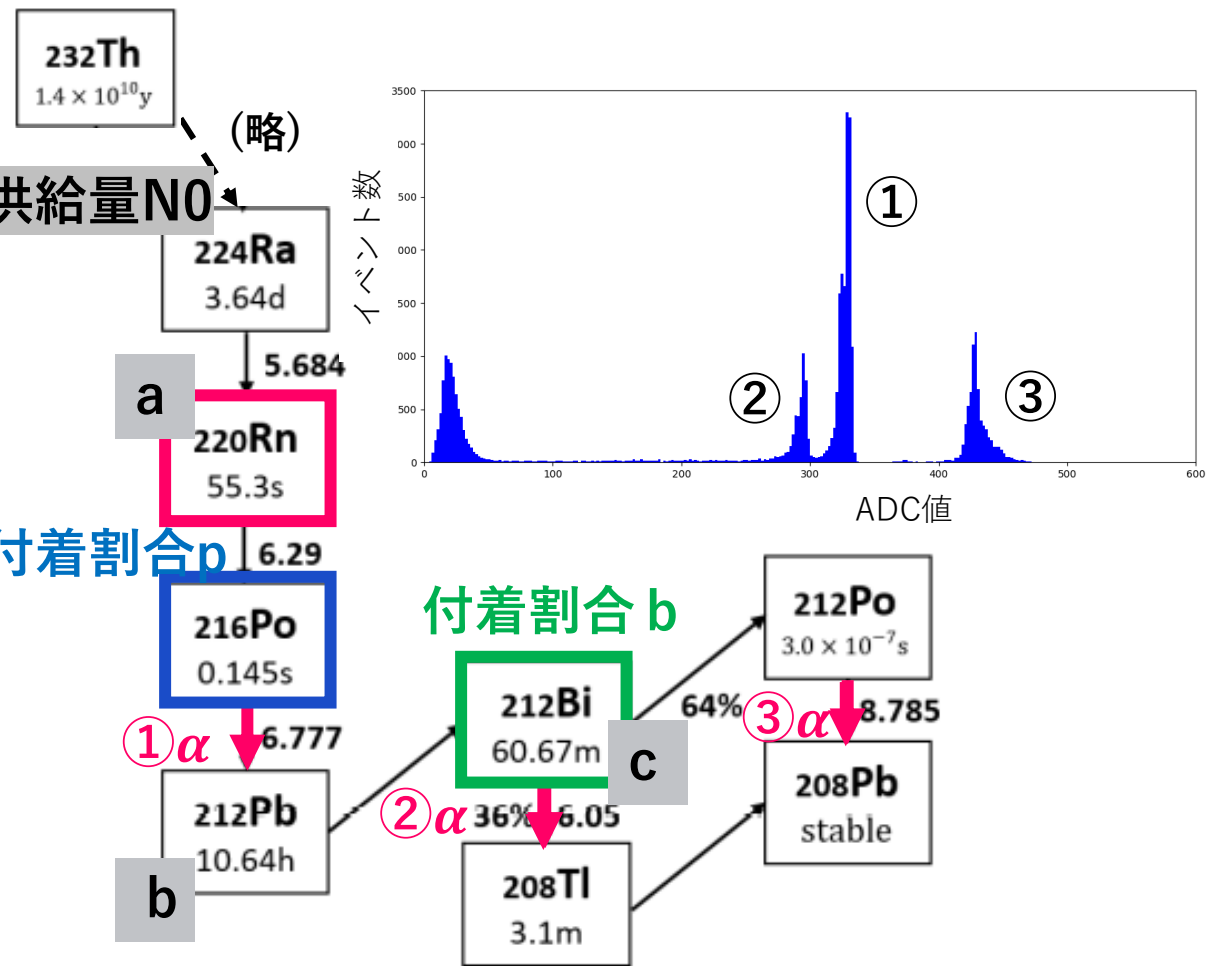
3. 単位時間あたりの各々の変化量を計算し、足す

$$\begin{aligned} \Delta N_a(t) &= -\lambda_a N_a dt + N_0 dt \\ &\rightarrow N_a(t) + dN_a(t) \end{aligned}$$

繰り返し



線源あり



1.初期値の設定

$$N_a = N_0, N_b = 0, N_c = 0$$

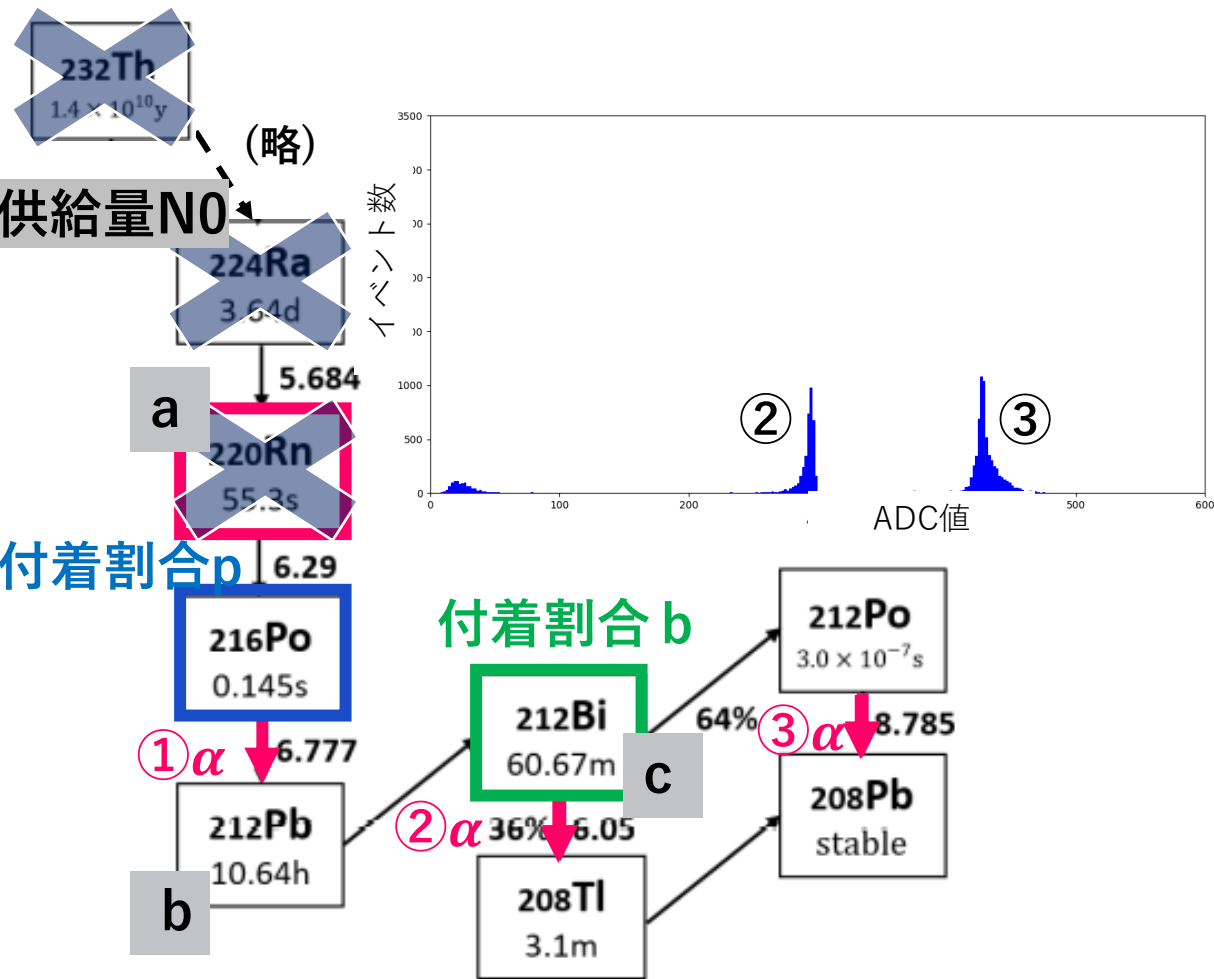
2. α 崩壊直前、PDに付着している物質量を計算

$$\begin{aligned} \textcircled{1} & N_a(t) \times \text{付着割合 } p \\ \textcircled{2} & N_b(t) \times \text{付着割合 } b \times 36\% \\ \textcircled{3} & N_c(t) \times \text{付着割合 } b \times 64\% \end{aligned}$$

3. 単位時間あたりの各々の変化量を計算し、足す

$$\begin{aligned} dN_a(t) &= -\lambda_a N_a dt + N_0 dt \\ dN_b(t) &= -\lambda_b N_b dt + \lambda_a N_a dt \\ dN_c(t) &= -\lambda_c N_c dt + \lambda_b N_b dt \end{aligned}$$

線源なし



1.初期値の設定

$$N_a = 0, N_b = 0, N_c = 0$$

2. α 崩壊直前、PDに付着している物質量を計算

- ① ~~$N_a(t) \times$~~ 付着割合 p
- ② $N_b(t) \times$ 付着割合 $b \times 36\%$
- ③ $N_c(t) \times$ 付着割合 $b \times 64\%$

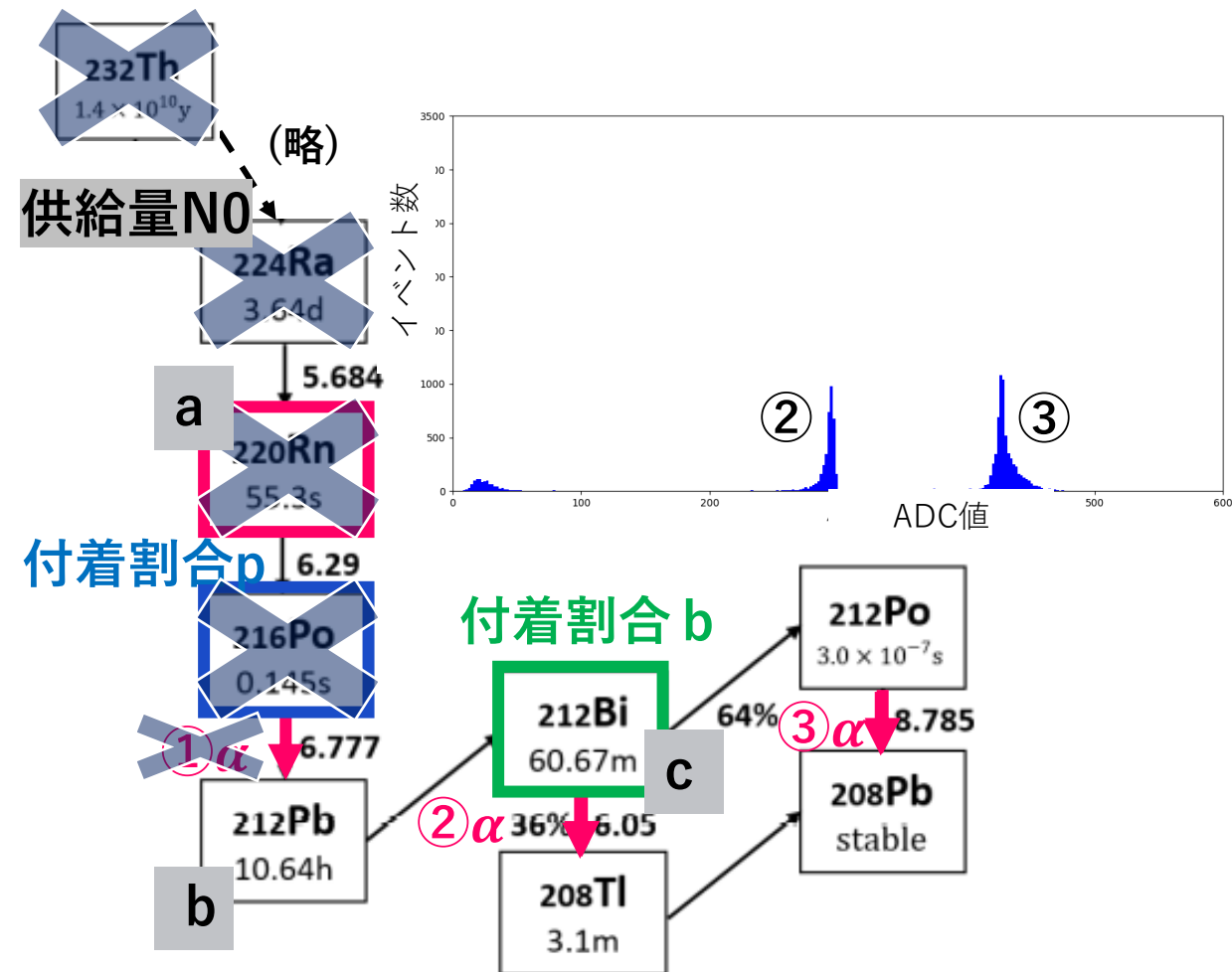
3. 単位時間あたりの各々の変化量を計算し、足す

$$dN_a(t) = -\lambda_a N_a dt + N_0 dt$$

$$dN_b(t) = -\lambda_b N_b dt + \lambda_a N_a dt$$

$$dN_c(t) = -\lambda_c N_c dt + \lambda_b N_b dt$$

線源なし



1. 初期値の設定

$$N_a = 0, N_b = 0, N_c = 0$$

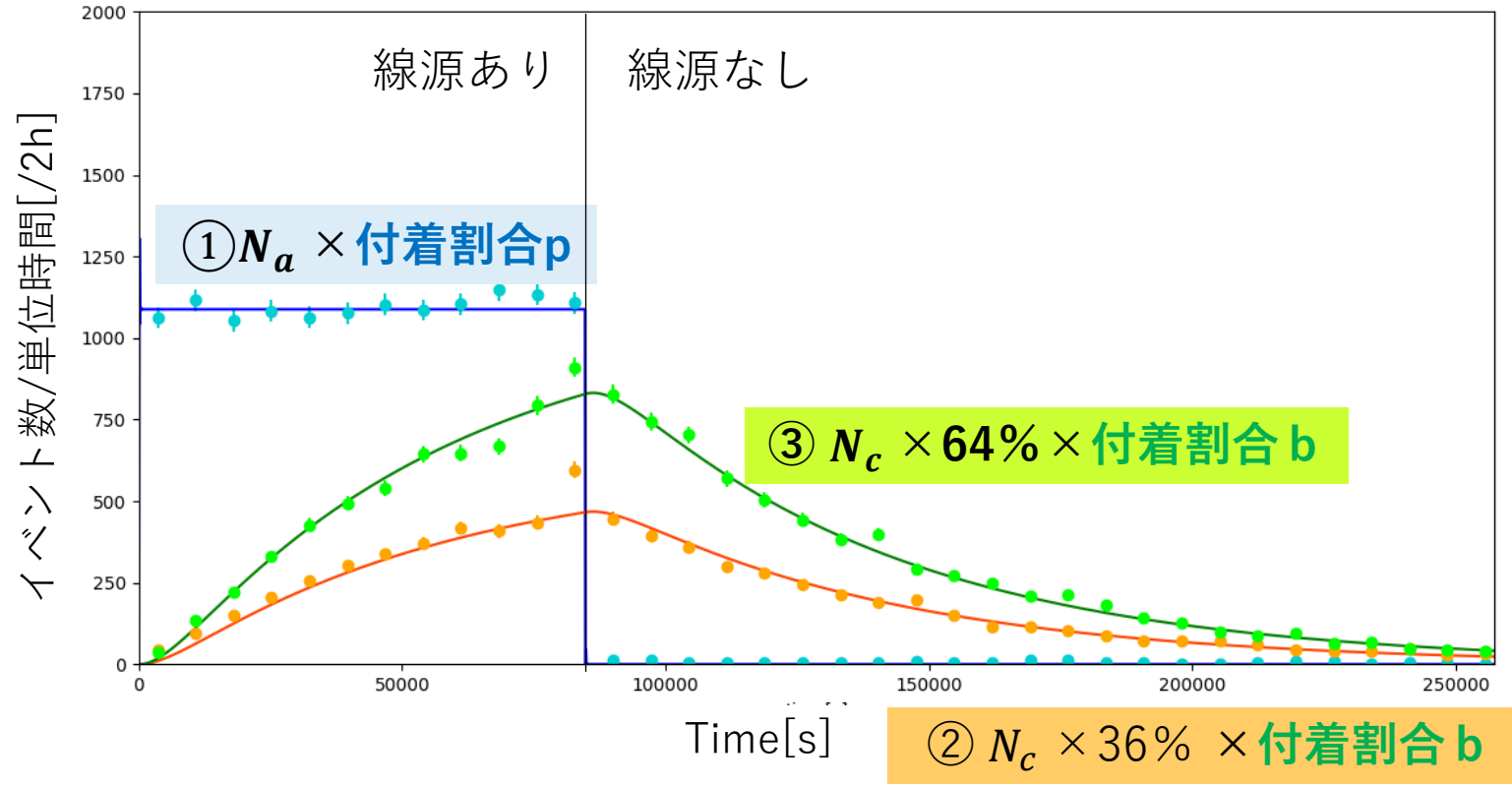
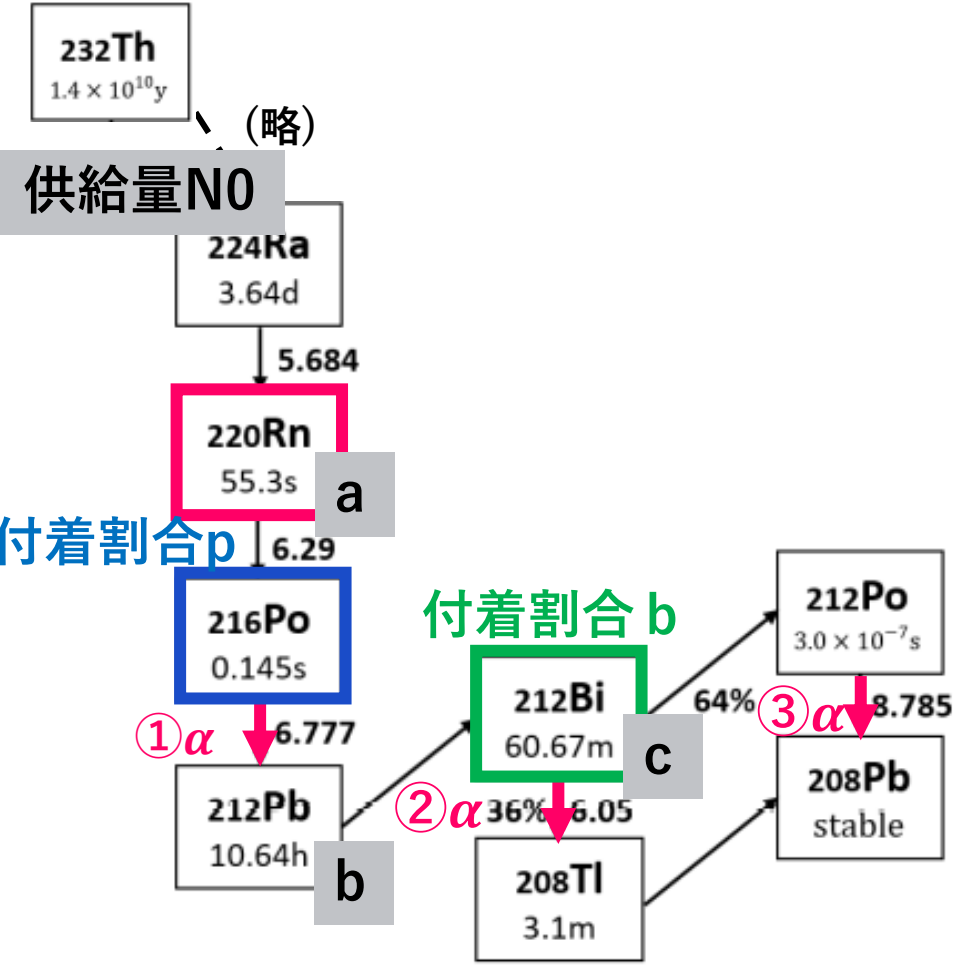
2. α 崩壊直前、PDに付着している物質量を計算

- ① ~~$N_a(t) \times$ 付着割合 p~~
- ② $N_b(t) \times$ 付着割合 $b \times 36\%$
- ③ $N_c(t) \times$ 付着割合 $b \times 64\%$

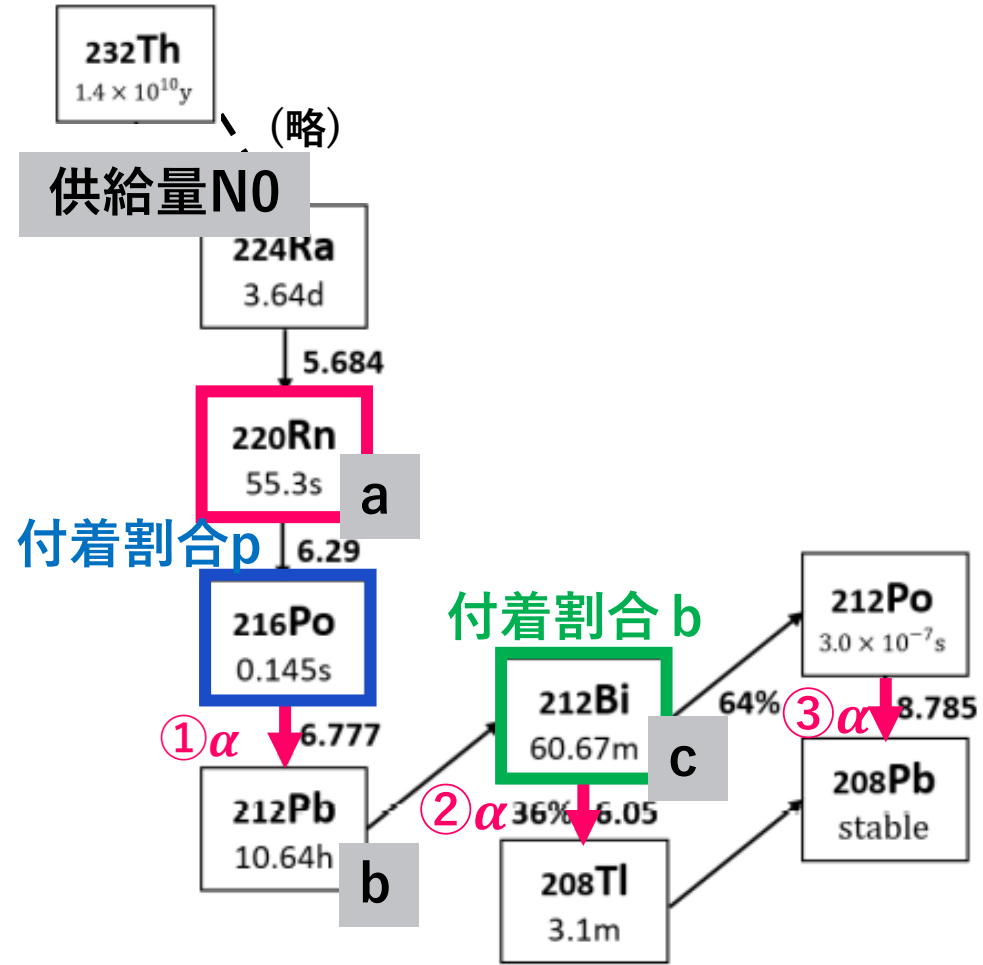
3. 単位時間あたりの各々の変化量を計算し、足す

$$\begin{aligned} dN_a(t) &= -\lambda_a N_a dt + N_0 dt \\ dN_b(t) &= -\lambda_b N_b dt + \lambda_a N_a dt \\ dN_c(t) &= -\lambda_c N_c dt + \lambda_b N_b dt \end{aligned}$$

Fitting の例



静電捕集電圧－150Vと－250Vでの比較結果

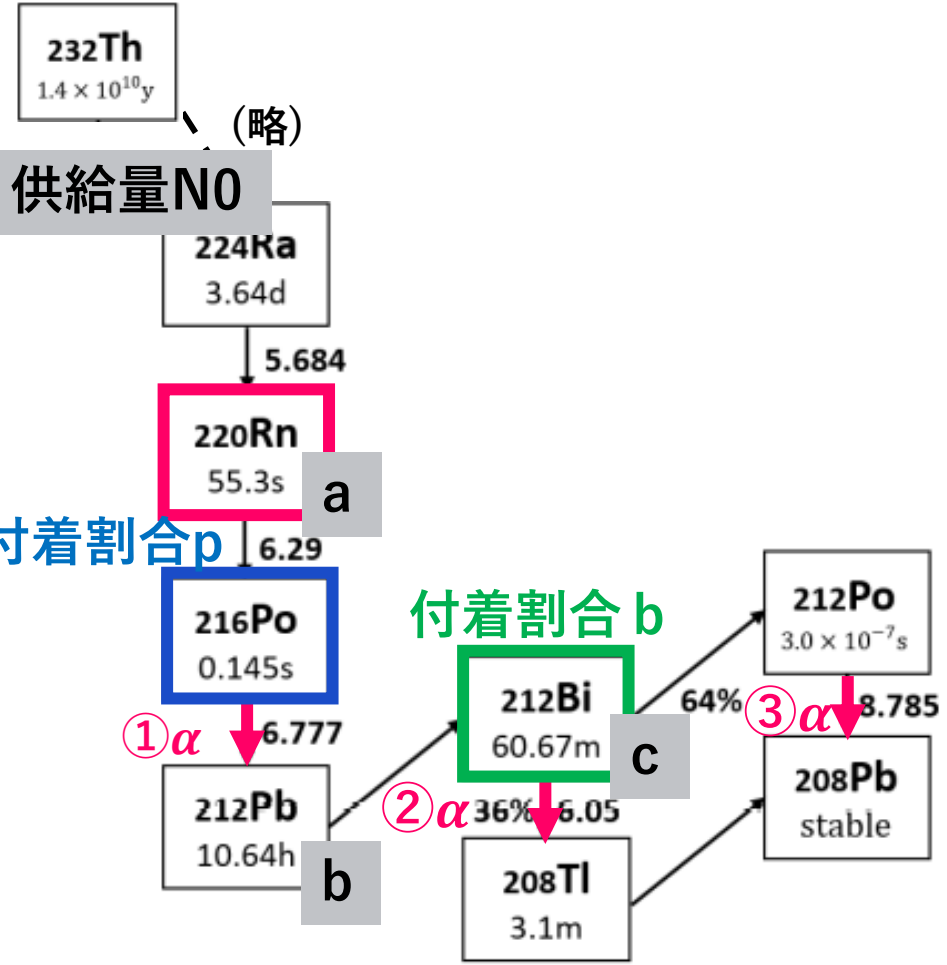


静電捕集電圧	附着割合 p	供給量1950 附着割合 b
－250V	27.0%	100%
－150V	10.5%	75%

< -150Vと-250Vの比較 >

供給量1950

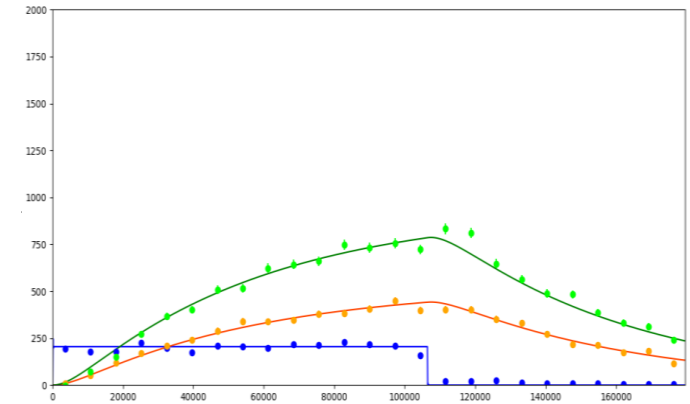
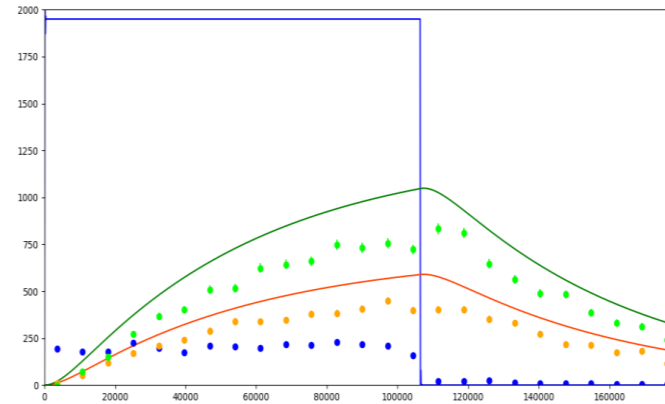
静電捕集電圧	付着割合 p	付着割合 b
-250V	27.0%	100%
-150V	10.5%	75%



-250Vから算出した供給量N0：1950で
-150Vにおける付着割合

< 考慮なし >

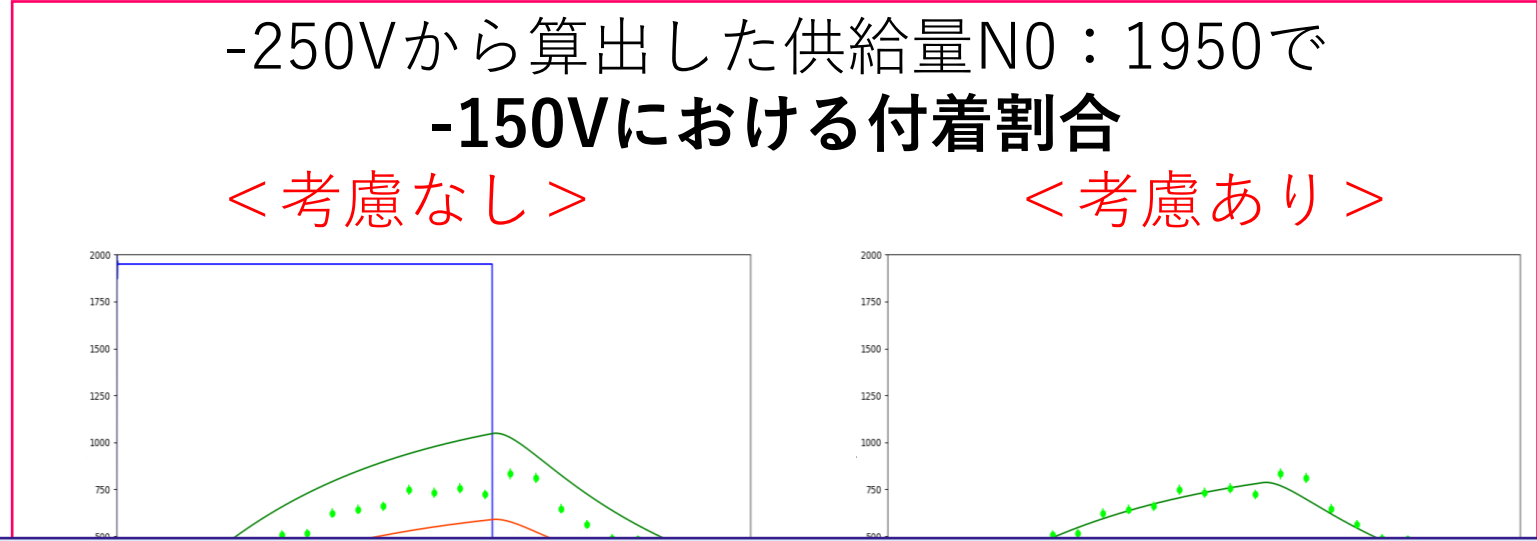
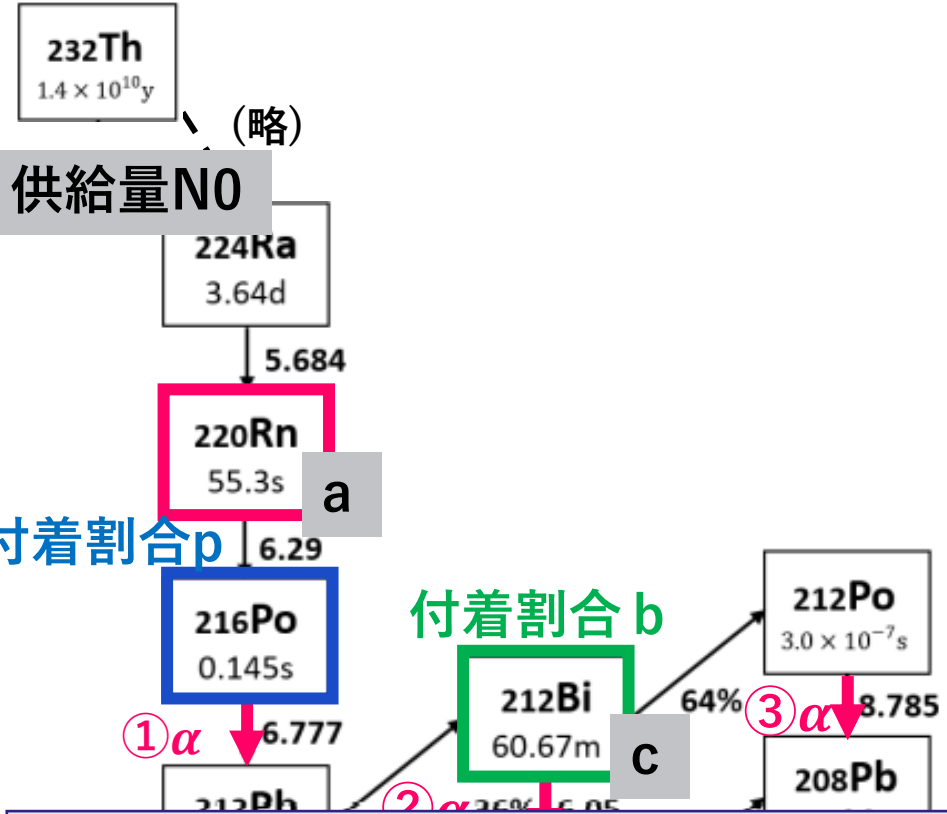
< 考慮あり >



< -150Vと-250Vの比較 >

供給量1950

静電捕集電圧	付着割合 p	付着割合 b
-250V	27.0%	100%
-150V	10.5%	75%

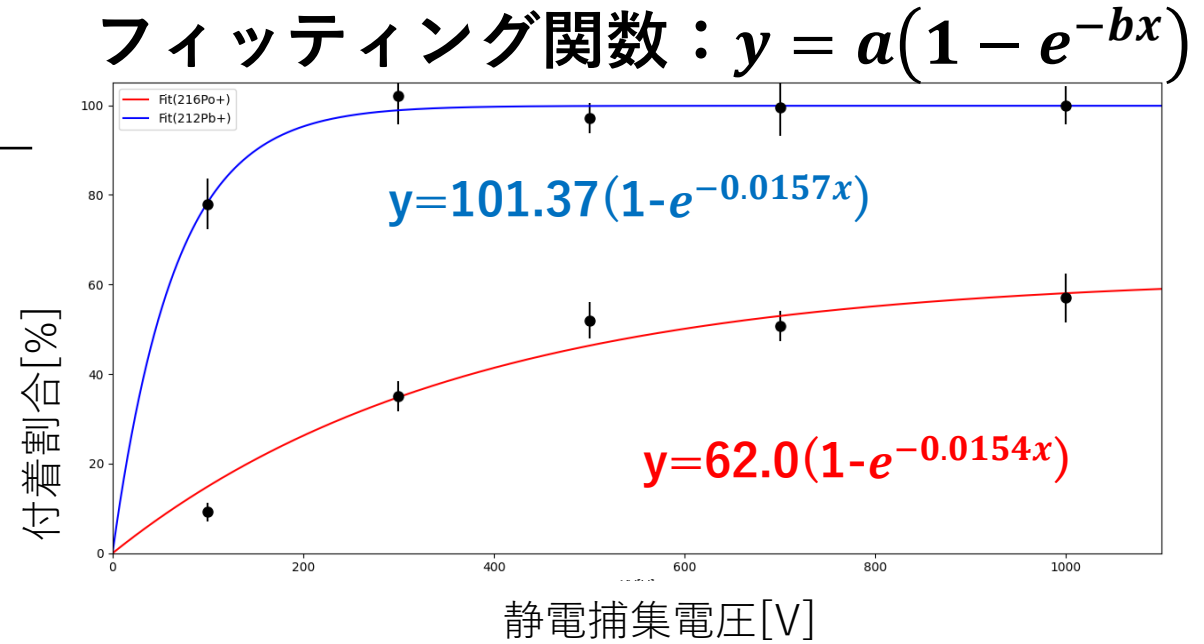


半減期が長くても**電圧の依存性があった**
-250Vでは、ほぼ100%であることを示唆しているが
 それを確かめるため、さらに**電圧を上げて測定**

静電捕集電圧の比較結果

供給量1950

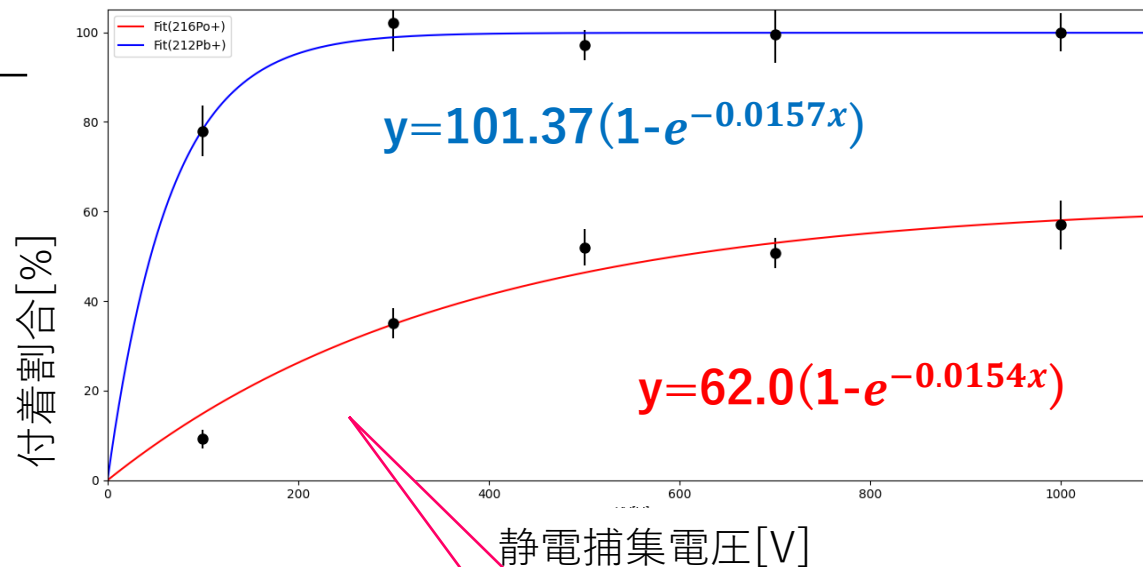
静電捕集電圧	付着割合p	付着割合b
-1000V	57.0 ± 5.4%	100.0 ± 4.2%
-700V	50.7 ± 3.4%	99.6 ± 6.4%
-500V	52.0 ± 4.1%	97.2 ± 3.4%
-300V	35.0 ± 3.4%	101.1 ± 6.4%
-100V	9.2 ± 2.1%	78.0 ± 5.6%



静電捕集電圧の比較結果

供給量1950

静電捕集電圧	付着割合p	付着割合b
-1000V	57.0 ± 5.4%	100.0 ± 4.2%
-700V	50.7 ± 3.4%	99.6 ± 6.4%
-500V	52.0 ± 4.1%	97.2 ± 3.4%
-300V	35.0 ± 3.4%	101.1 ± 6.4%
-100V	9.2 ± 2.1%	78.0 ± 5.6%



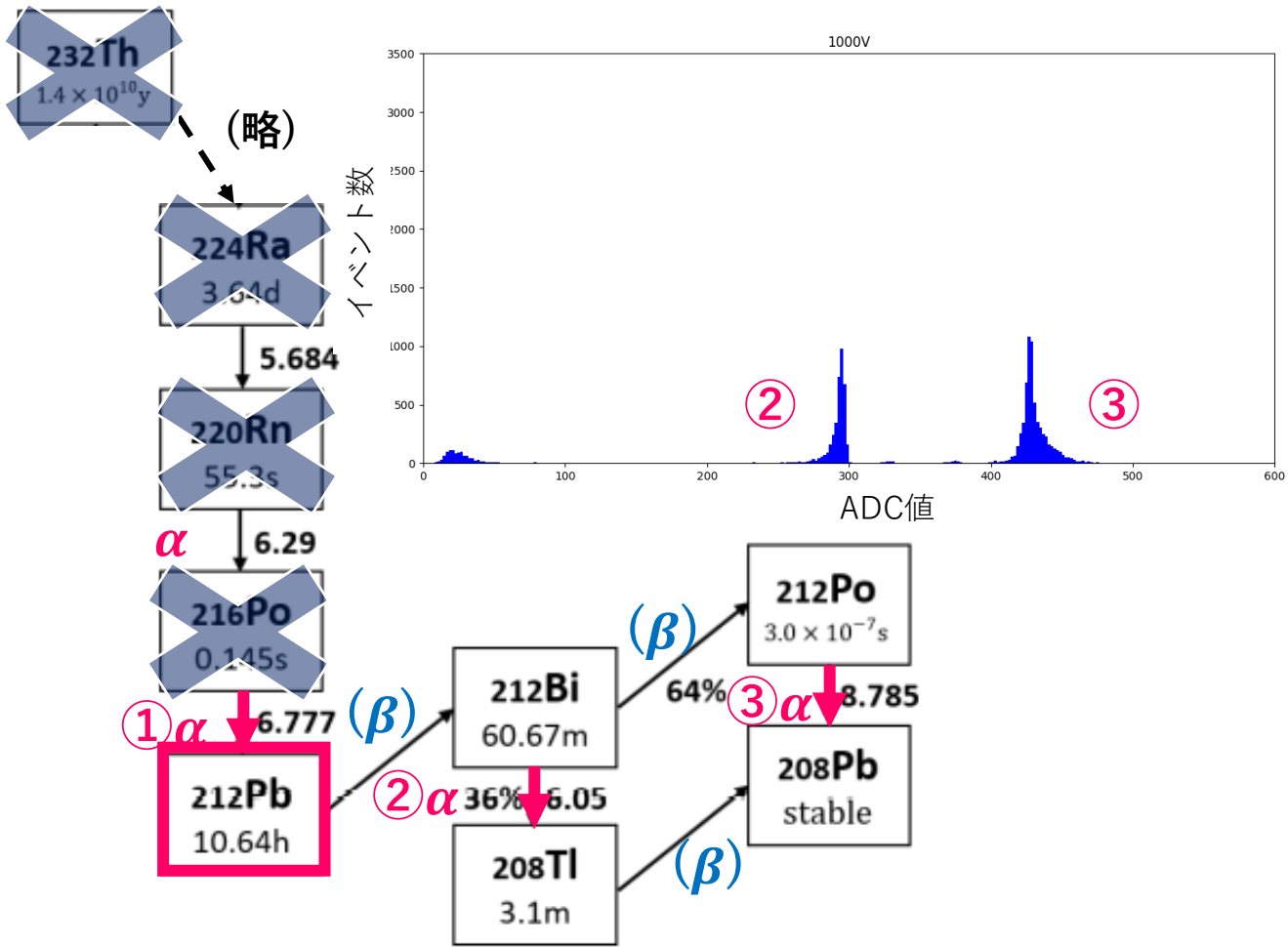
付着に必要なHV
 90%以上 -140V以下
 95%以上 -180V以下
 100% -280V以下

- ・半減期に関わらず、電圧の依存性があった
 - ・半減期が長いほど、低電圧で一定になった
- 付着割合 b 100%を求めるならば、-280V以下必要**

付着に必要なHV
 50%以上 -611V以下
 40%以上 -370V以下
 30%以上 -230V以下

②半減期の測定精度

文献値(T=10.64[h])と測定で得られた半減期の比較



単一原子核崩壊

$$\Delta N = -\lambda N \Delta t$$

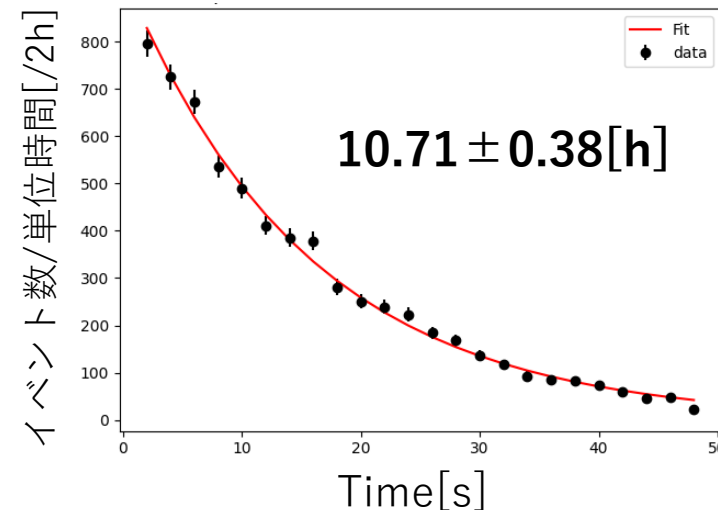
$$\therefore N(t) = N_0 e^{-\lambda t}$$

ここで λ と半減期 T の関係は

$$T = \frac{\log 2}{\lambda}$$

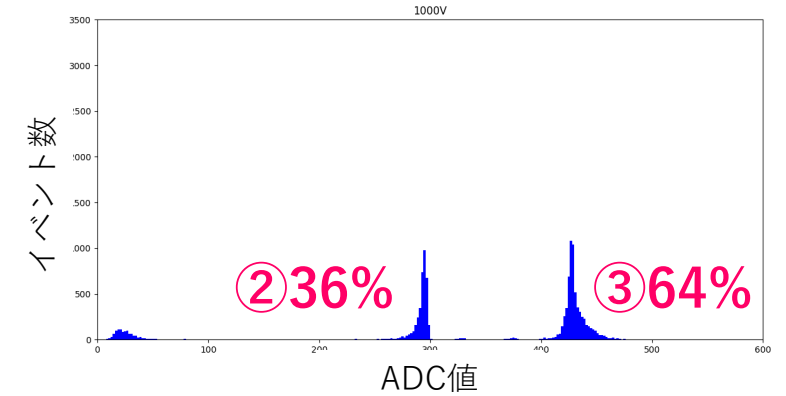
時間に対する物質量の関係

→ $N(t) = N_0 e^{-\lambda t}$ で fitting し半減期 T を算出



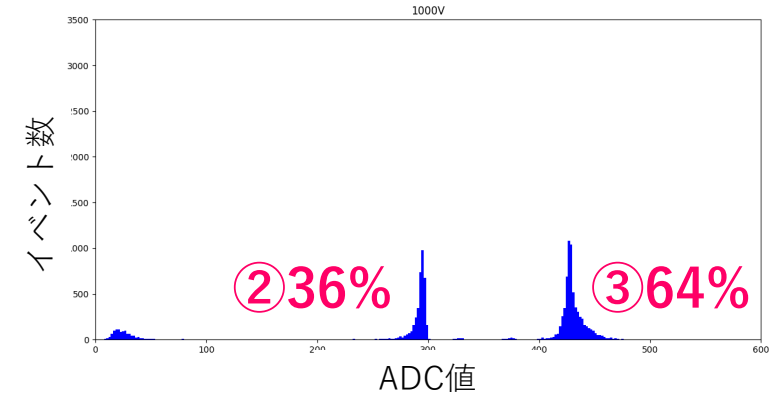
文献値 (T=10.64[h]) との比較

静電捕集電圧	②Bi → Tl	③Bi → Pb
−1000V	11.57 ± 0.34	10.71 ± 0.38
−700V	11.01 ± 0.31	10.76 ± 0.24
−500V	11.01 ± 0.34	10.85 ± 0.21
−300V	11.62 ± 0.36	10.67 ± 0.27
−100V	11.60 ± 0.45	10.98 ± 0.32



文献値 (T=10.64[h]) との比較

静電捕集電圧	②Bi → Tl	③Bi → Pb
−1000V	11.57 ± 0.34	10.71 ± 0.38
−700V	11.01 ± 0.31	10.76 ± 0.24
−500V	11.01 ± 0.34	10.85 ± 0.21
−300V	11.62 ± 0.36	10.67 ± 0.27
−100V	11.60 ± 0.45	10.98 ± 0.32

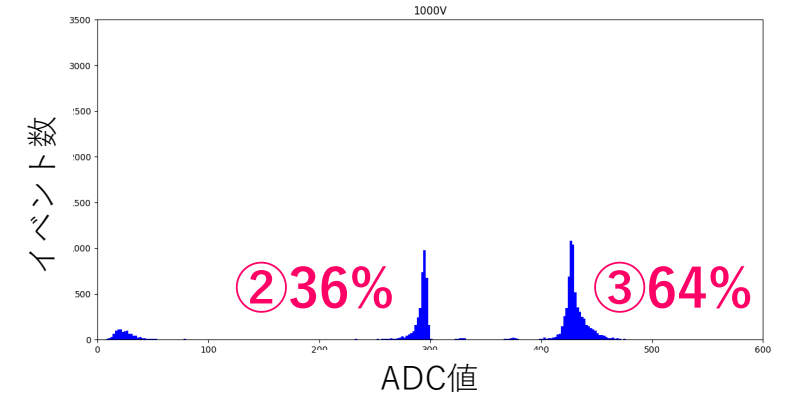


Biが約100%
付着している

Bi ≠ 100%

文献値 ($T=10.64[h]$) との比較

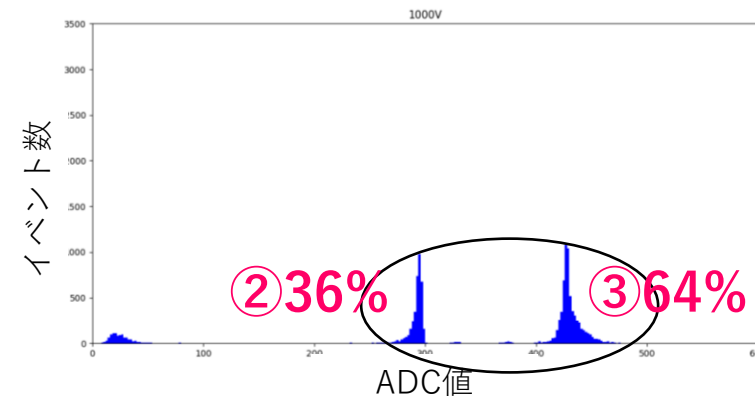
静電捕集電圧	② $Bi \rightarrow Tl$	③ $Bi \rightarrow Pb$
-1000V	11.57 ± 0.34	10.71 ± 0.38
-700V	11.01 ± 0.31	10.76 ± 0.24
-500V	11.01 ± 0.34	10.85 ± 0.21
-300V	11.62 ± 0.36	10.67 ± 0.27
-100V	11.60 ± 0.45	10.98 ± 0.32



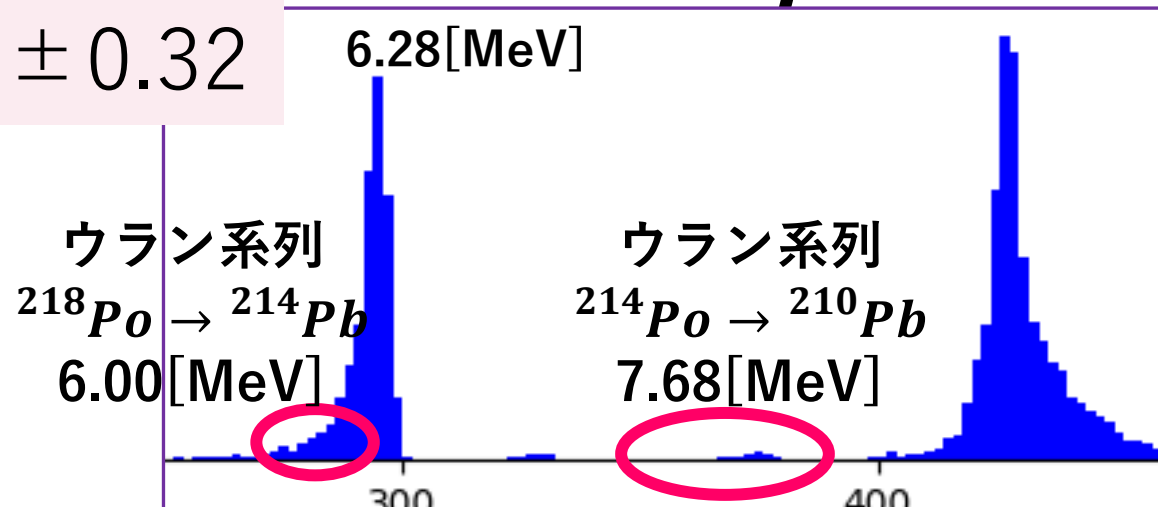
- イベント数が③より少ない
- ウラン系列が、少々混じっている
- 電氣的なノイズがある

文献値 (T=10.64[h]) との比較

静電捕集電圧	② $Bi \rightarrow Tl$	③ $Bi \rightarrow Pb$
-1000V	11.57 ± 0.34	10.71 ± 0.38
-700V	11.01 ± 0.31	10.76 ± 0.24
-500V	11.01 ± 0.34	10.85 ± 0.21
-300V	11.62 ± 0.36	10.67 ± 0.27
-100V	11.60 ± 0.45	10.98 ± 0.32

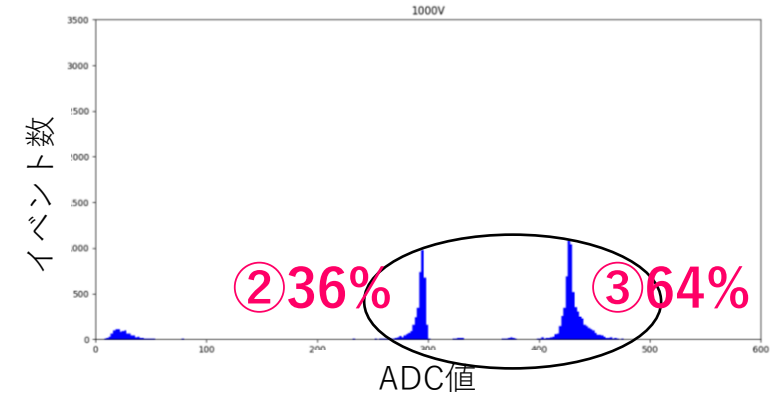


- ・ イベント数が③より少ない
- ・ **ウラン系列が、少々混じっている**
- ・ 電氣的なノイズがある



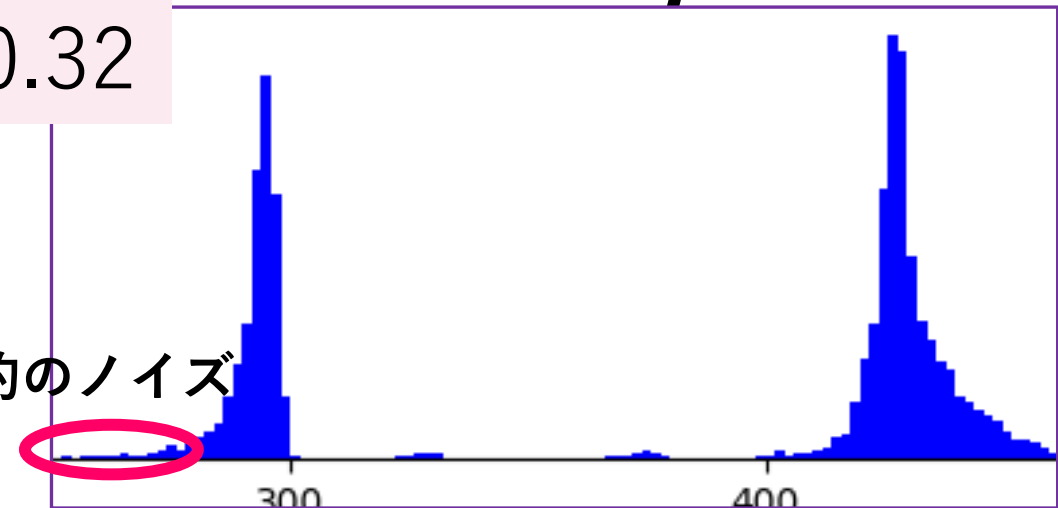
文献値 ($T=10.64[h]$) との比較

静電捕集電圧	② $Bi \rightarrow Tl$	③ $Bi \rightarrow Pb$
-1000V	11.57 ± 0.34	10.71 ± 0.38
-700V	11.01 ± 0.31	10.76 ± 0.24
-500V	11.01 ± 0.34	10.85 ± 0.21
-300V	11.62 ± 0.36	10.67 ± 0.27
-100V	11.60 ± 0.45	10.98 ± 0.32



- イベント数が③より少ない
- ウラン系列が、少々混じっている
- **電氣的なノイズがある**

電氣的のノイズ



文献値 (T=10.64[h]) との比較

静電捕集電圧	② $Bi \rightarrow Tl$	③ $Bi \rightarrow Pb$	
-1000V	11.57 ± 0.34	10.71 ± 0.38	Biが約100% 付着している
-700V	11.01 ± 0.31	10.76 ± 0.24	
-500V	11.01 ± 0.34	10.85 ± 0.21	
-300V	11.62 ± 0.36	10.67 ± 0.27	
-100V	11.60 ± 0.45	10.98 ± 0.32	Bi ≠ 100%

③のピークのうち-100V以外で誤差範囲以内に文献値が収まった

- **Biが約100%付着していることに関係**
- ③の方がイベント数が多い
- 電氣的ノイズやウラン系列が混っていないため正確

目次

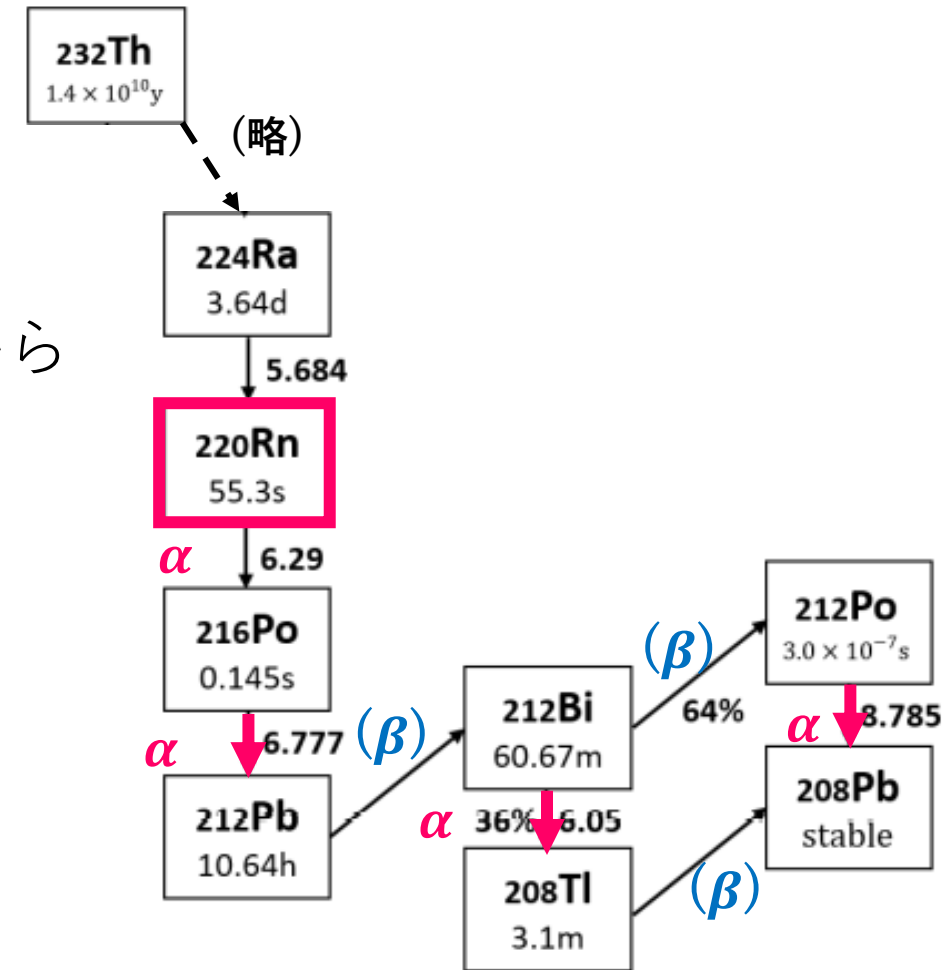
- 1 研究背景と目的
- 2 検出器の概要と測定手法
- 3 性能評価
- 4 まとめ・今後の展望**

まとめ

Th系列のラドンの線源を用いて

ラドン検出器における**捕集効率の電圧依存性の測定**

- ①連鎖崩壊のシミュレーションとデータとの比較から捕集効率を定量的に評価
- ②データと半減期の文献値の比較から半減期の測定精度を評価



①検出割合

- ・ Poの付着割合：50%以上 -611V以下 /40%以上 -370V以下 /30%以上 -230V以下
→ 100%付着することは困難なものの、[-100Vでは少ない](#)
- ・ Biの付着割合：90%以上 -140V以下 / 95%以上 -180V以下 / **100% -280V以下**

②半減期の精度

- ・ 誤差範囲以内で文献値に収まった静電捕集電圧
→ ③のピークから算出した半減期のうち、-300V以下

以上の研究結果と安全面を考慮すると

必要な静電捕集電圧は-300Vと考える

今後の展望

比較実験をより正確に行うため

- ・線源：モナズ石とシリカゲルの位置や向きを固定し実験を行う
- ・線源がある際に生じるノイズについて厳密に考慮する
- ・測定回数や他の静電捕集電圧で測定を行う

結果が妥当であるか確かめるため

ステンレス缶内の電場中でのイオンの動きについてシミュレーションを行う

その他

- ・ステンレス缶の大きさを変える
- ・静電捕集電圧と逆バイアスを独立させ実験を行う

参考文献

中島朋, "ラドン検出器を用いた放射線教育—教材開発と実践—"筑波大学理工学群物理学類 卒業論文(2012)

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)

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)

儀間 智美. "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 卒業論文(2020)

鈴木 芹奈, "低コスト・小型ラドン検出器の製作及び性能評価", 横浜国立大学 理工学部 数物・電子情報系学科 卒業論文(2021)

環境省ホームページより.第1章放射線の基礎

[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年度版）目次 \(env.go.jp\)](#)

国立研究開発法人 日本原子力研究開発機構, 原子力百科事典ATOMICA.

<https://atomica.jaea.go.jp/index.html>

浜松ホトニクス公式ホームページより.フォトダイオード

<https://www.hamamatsu.com/jp/ja/product/optical-sensors/x-ray-sensor/x-ray-si-photodiodes.html>

日本アイソトープ協会, 「改訂4版 ラジオアイソトープ 密封線源とその取扱」, 丸善株式会社, 1977年

小川岩雄, 「放射線（改訂版）基礎原子力講座2」, コロナ社, 1964年

日本の環境放射能と放射線ホームページ. 公益財団法人日本分析センター

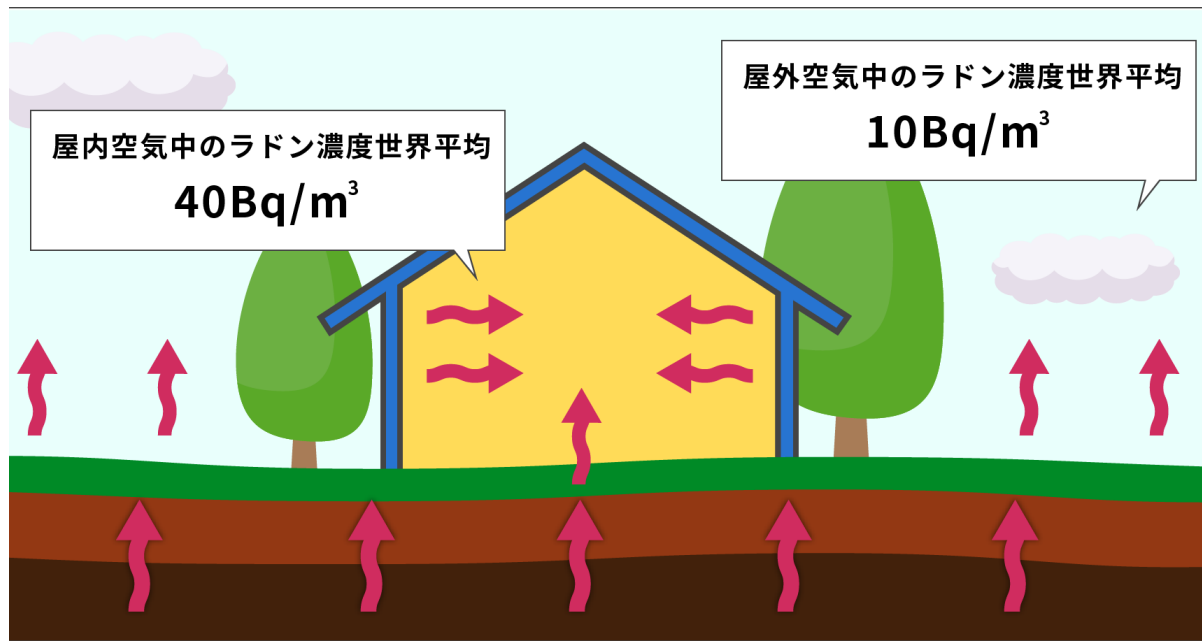
[日本の環境放射能と放射線 – 環境の放射能と放射線についてわかりやすく説明しているサイトです。原子力規制庁が行っている環境放射能調査の結果などをみることができます。\(kankyo-hoshano.go.jp\)](#)

ご清聴ありがとうございました

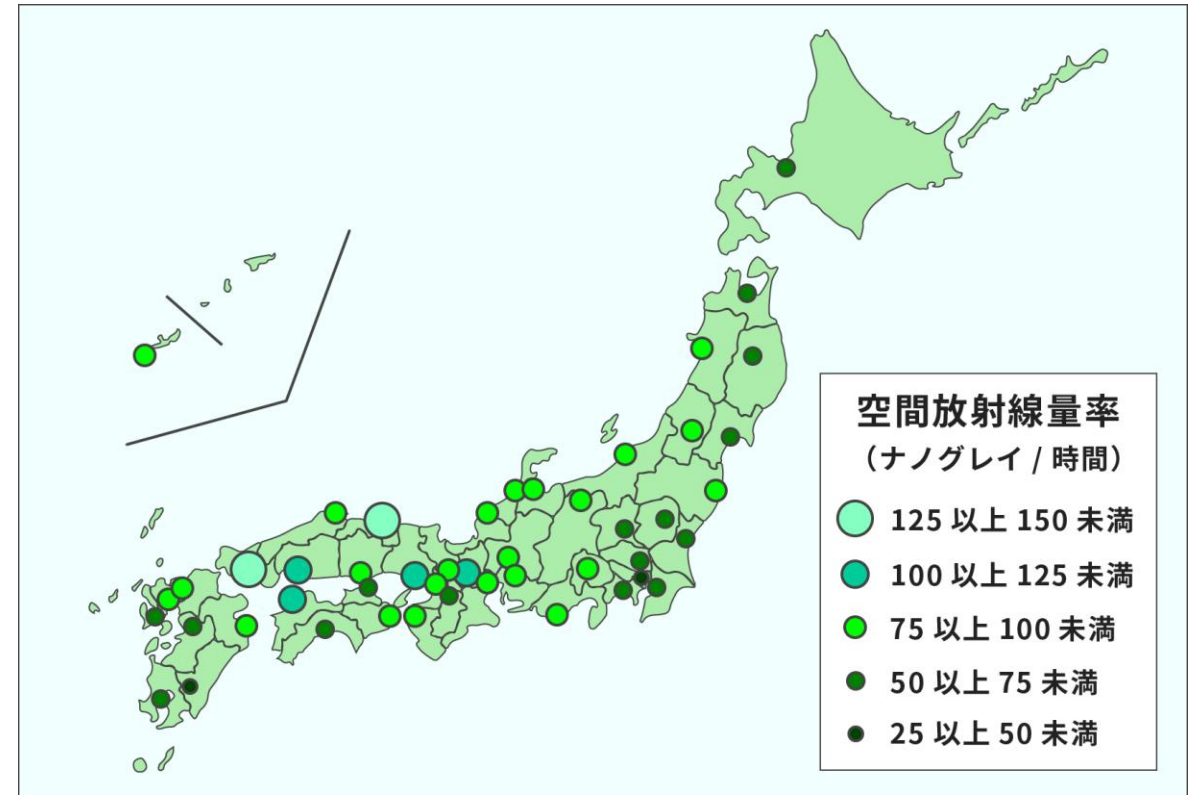
Back up

<ラドンの起源>

地下深部においてマグマの上昇とともに地表にもたらされた
→マグマが比較的ゆっくりと固まると、花崗岩などになり、花崗岩を含む
コンクリートなどから徐々に湧き出てくる



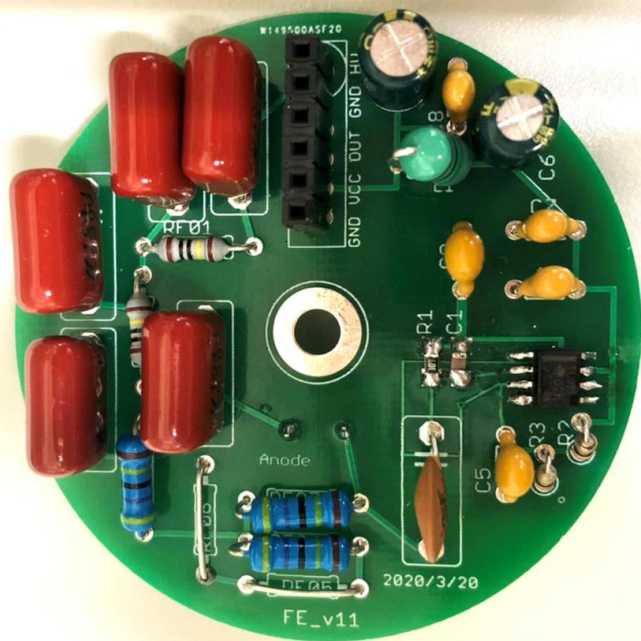
(Bq/m³: 空気1立方メートル中のラドン量) (2000年国連科学委員会報告)



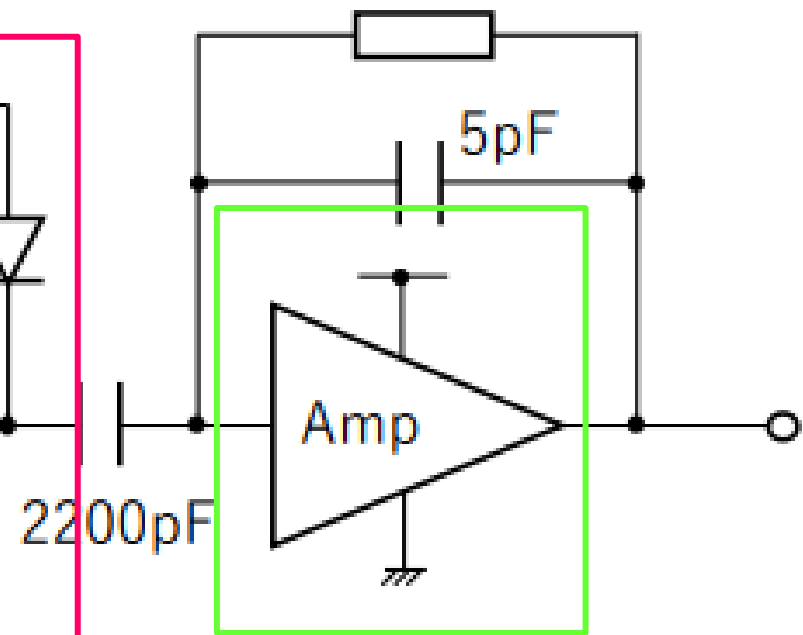
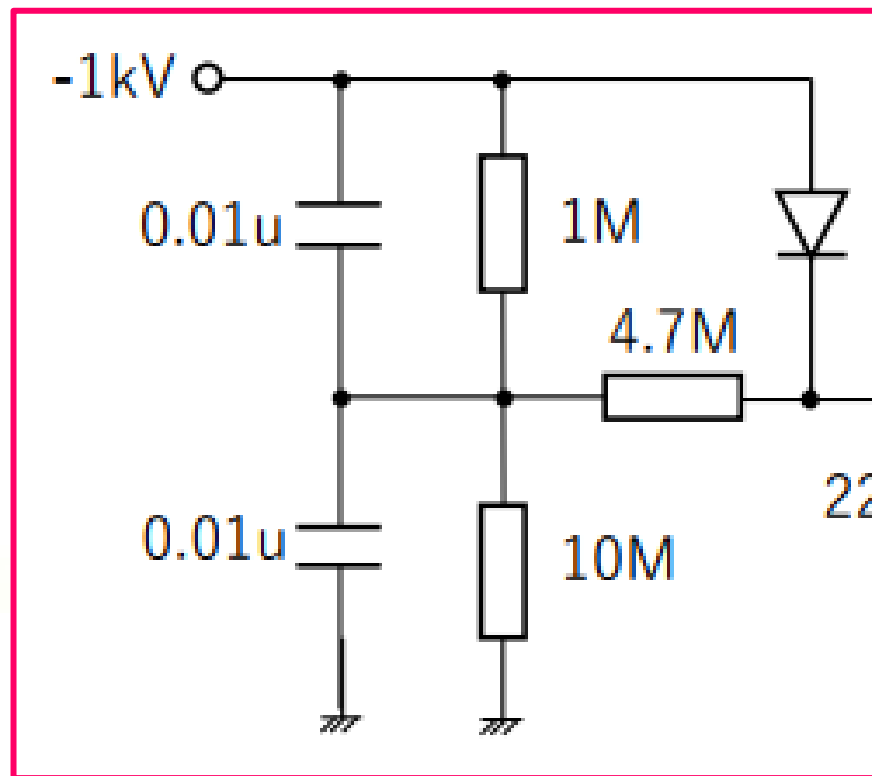
日本各地の空間放射線量率 (2008 年度)

日本の環境放射能と放射線ホームページより

■プリアンプ

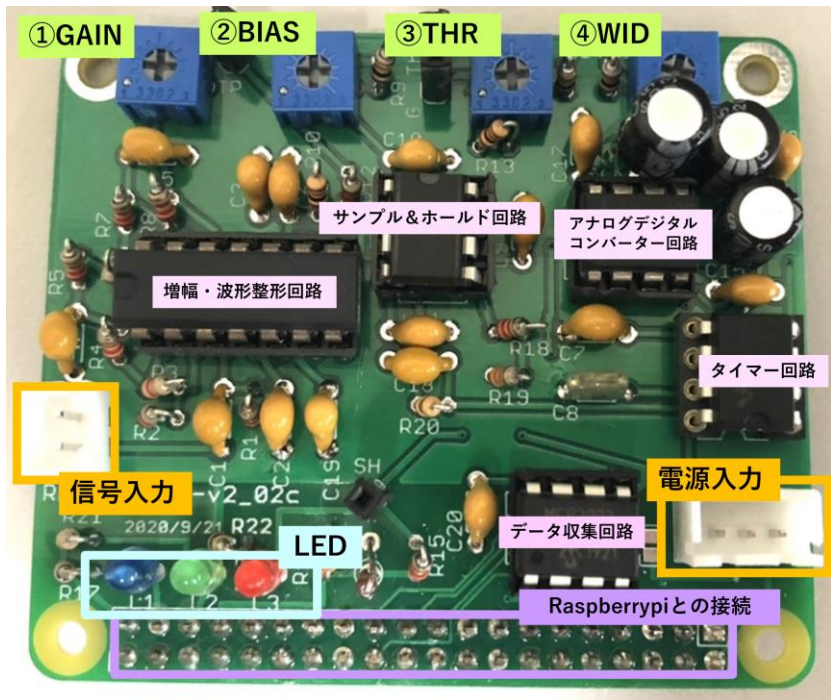


高電圧分圧回路



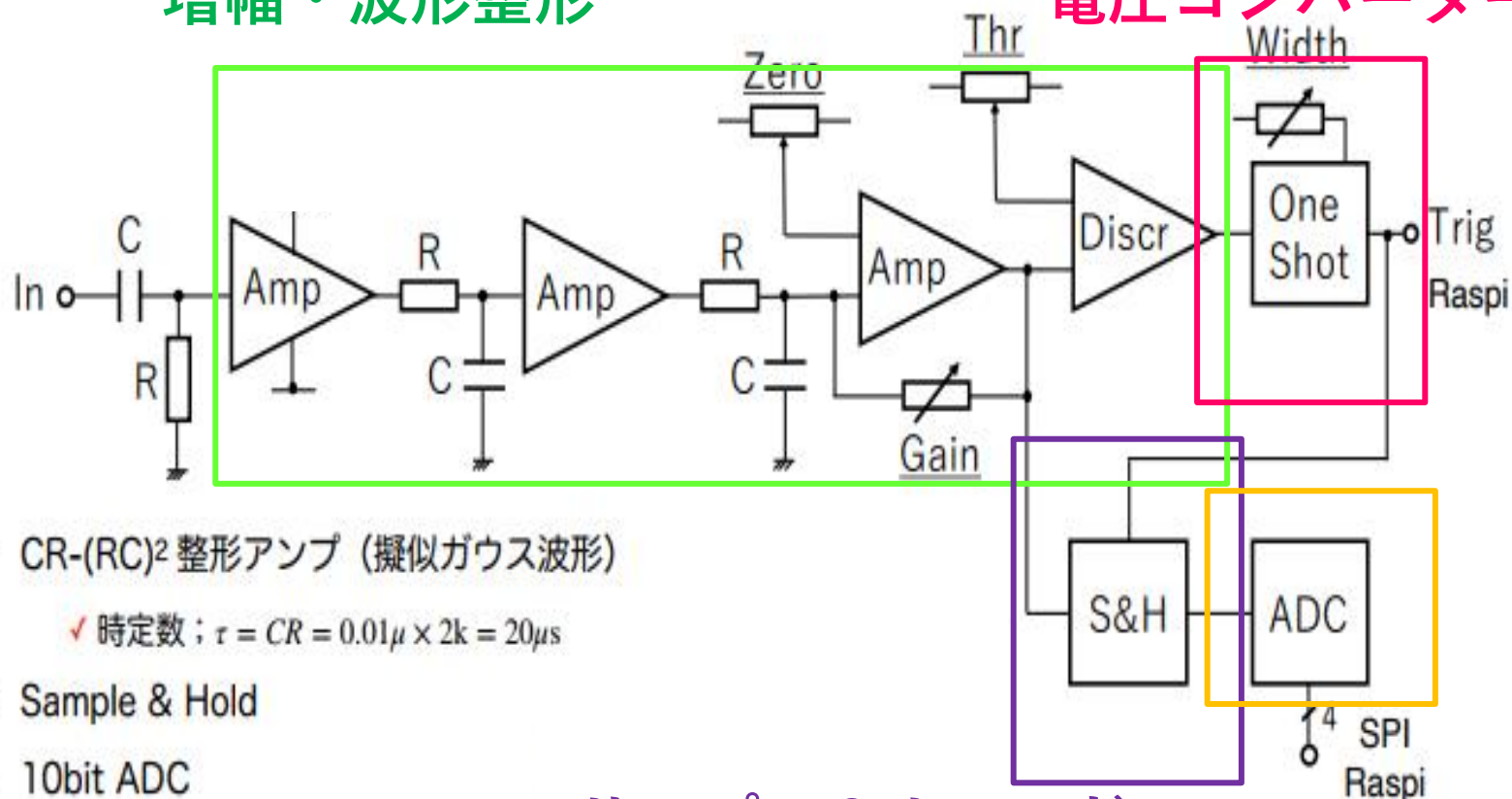
チャージセンシティブ
アンプ

■シェイパーアンプ



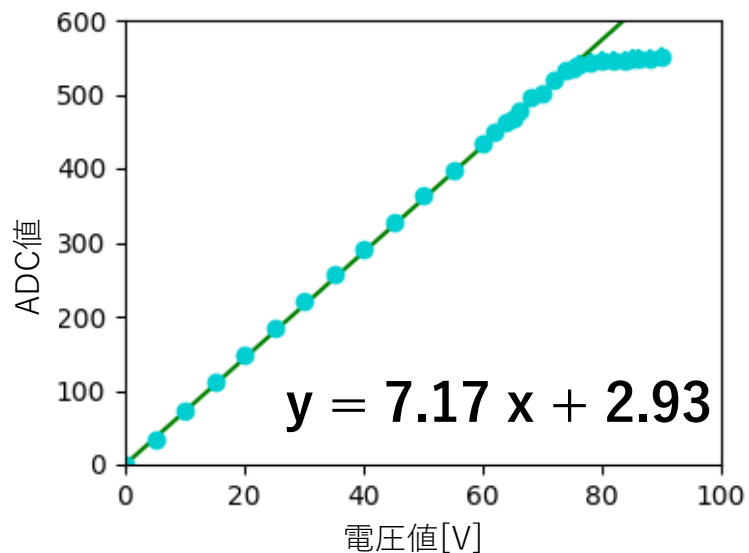
増幅・波形整形

電圧コンバーター

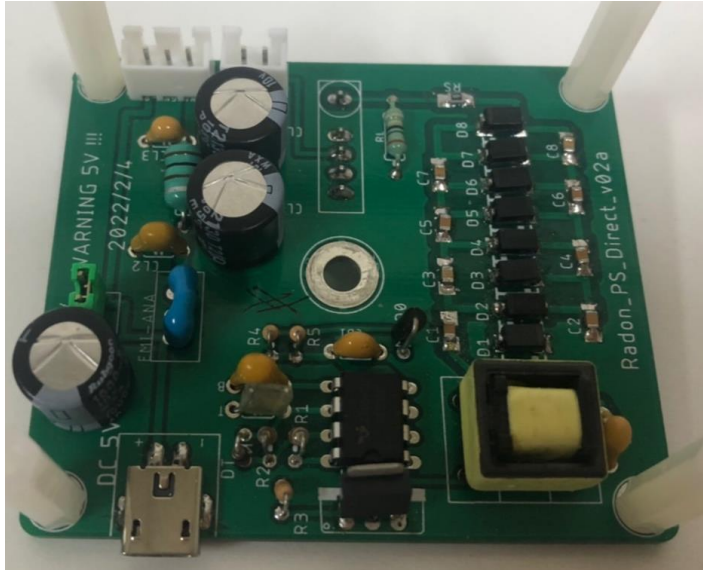


- ・ CR-(RC)² 整形アンプ (擬似ガウス波形)
 - ✓ 時定数; $\tau = CR = 0.01\mu \times 2k = 20\mu s$
- ・ Sample & Hold
- ・ 10bit ADC

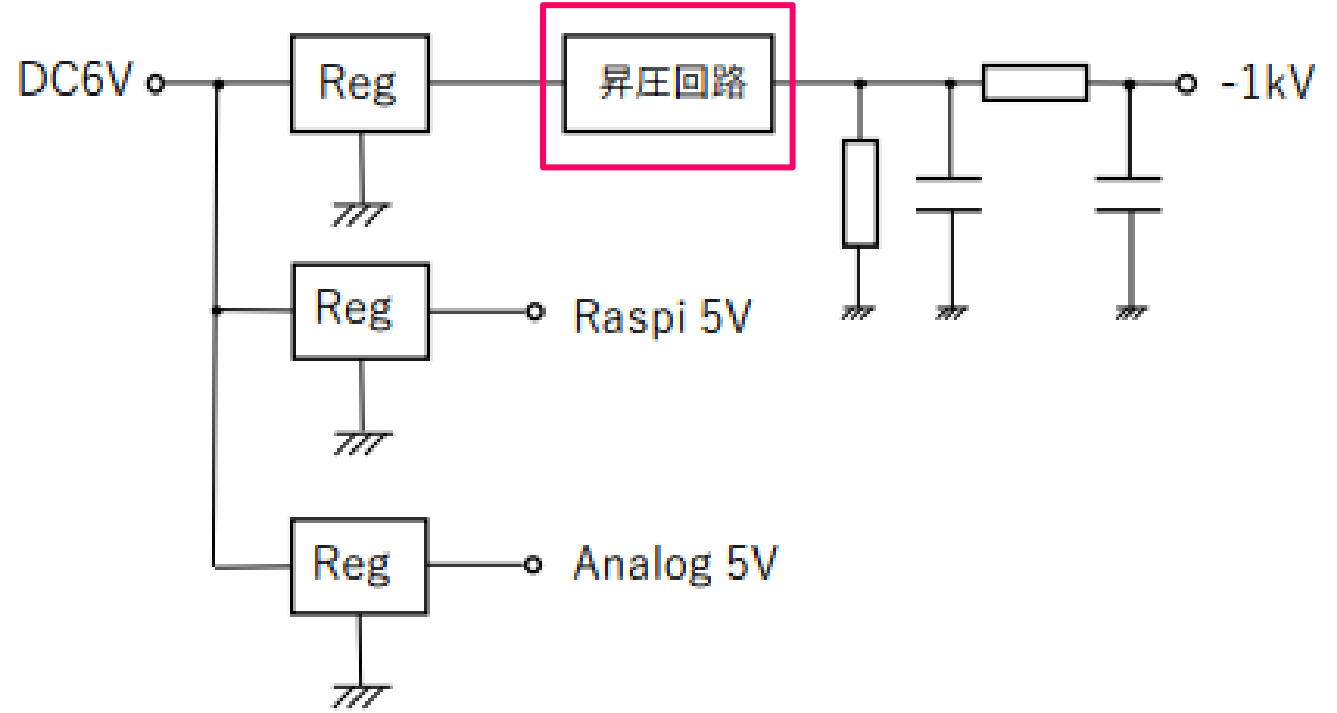
サンプル&ホールド データ収集



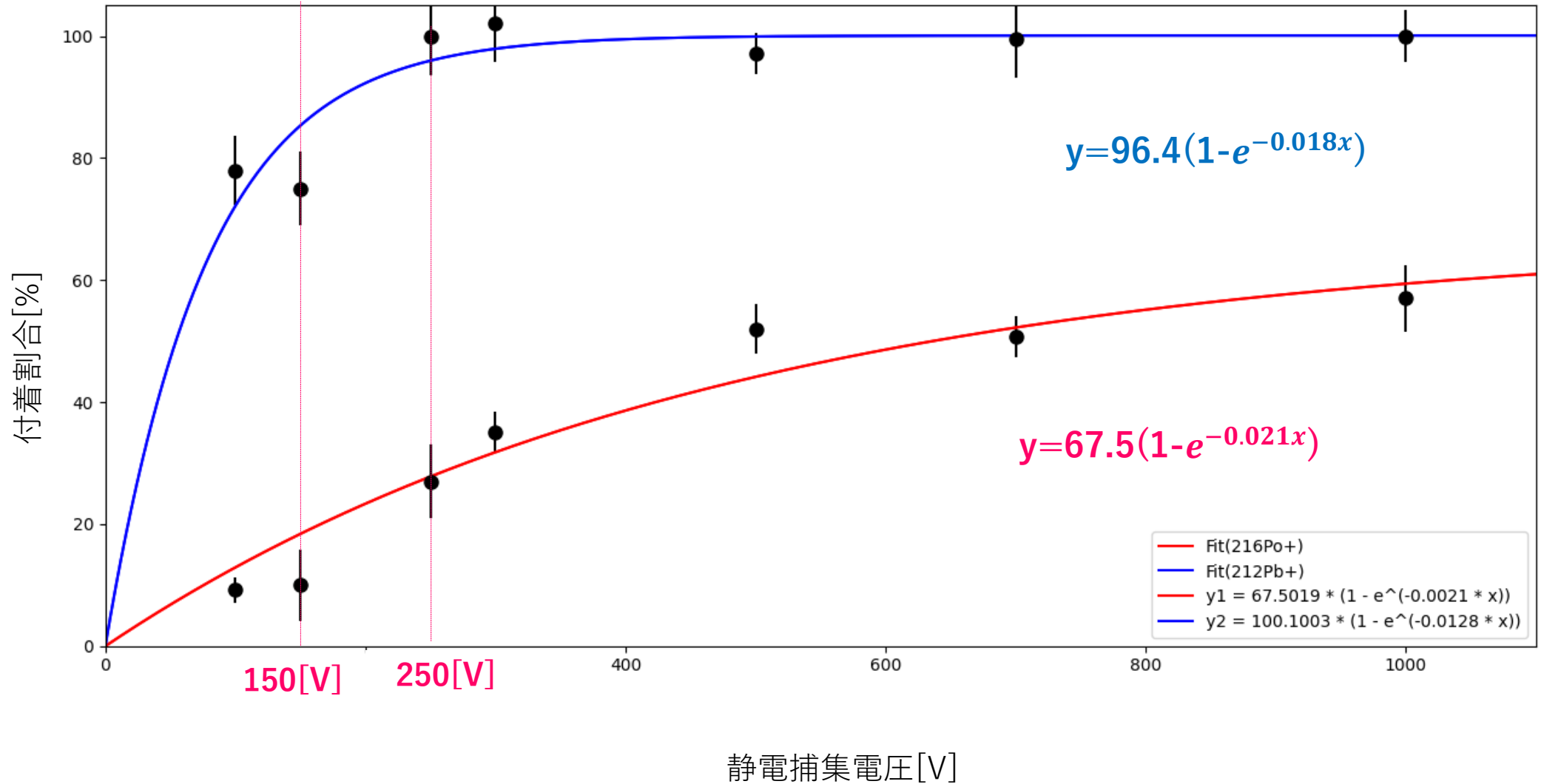
■電源基板



高電圧電源の調整
静電捕集電圧の調整を担う



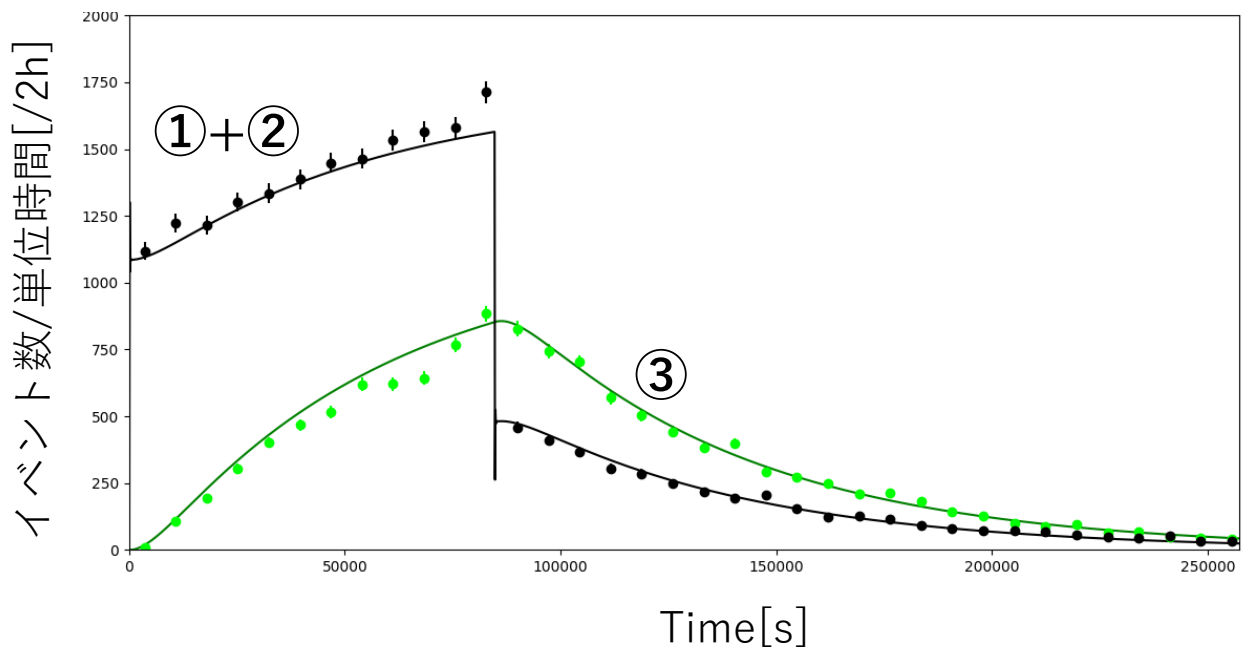
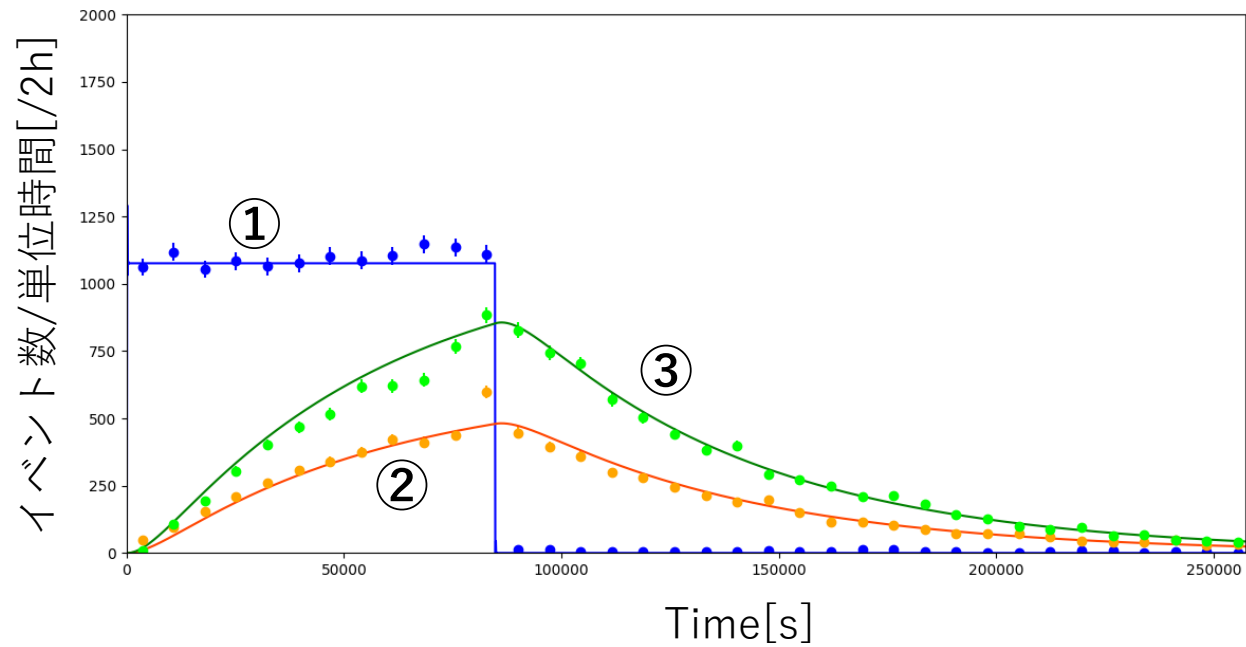
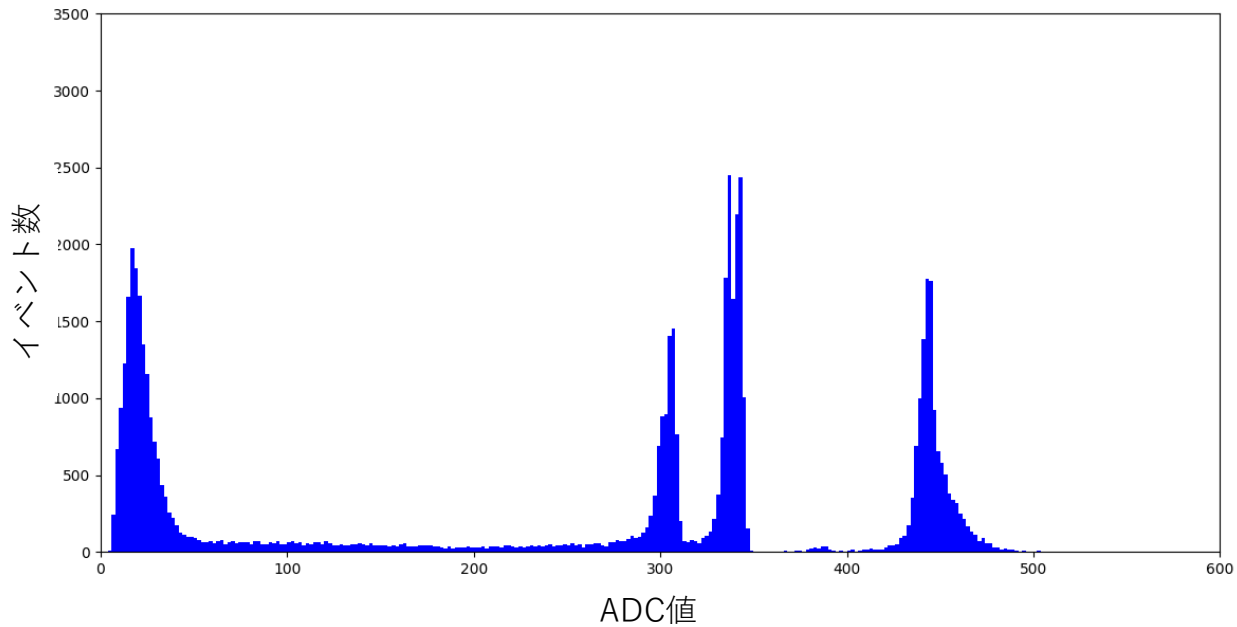
■-100V, -250V込みのdata



-1000V

付着割合 p
付着割合 b

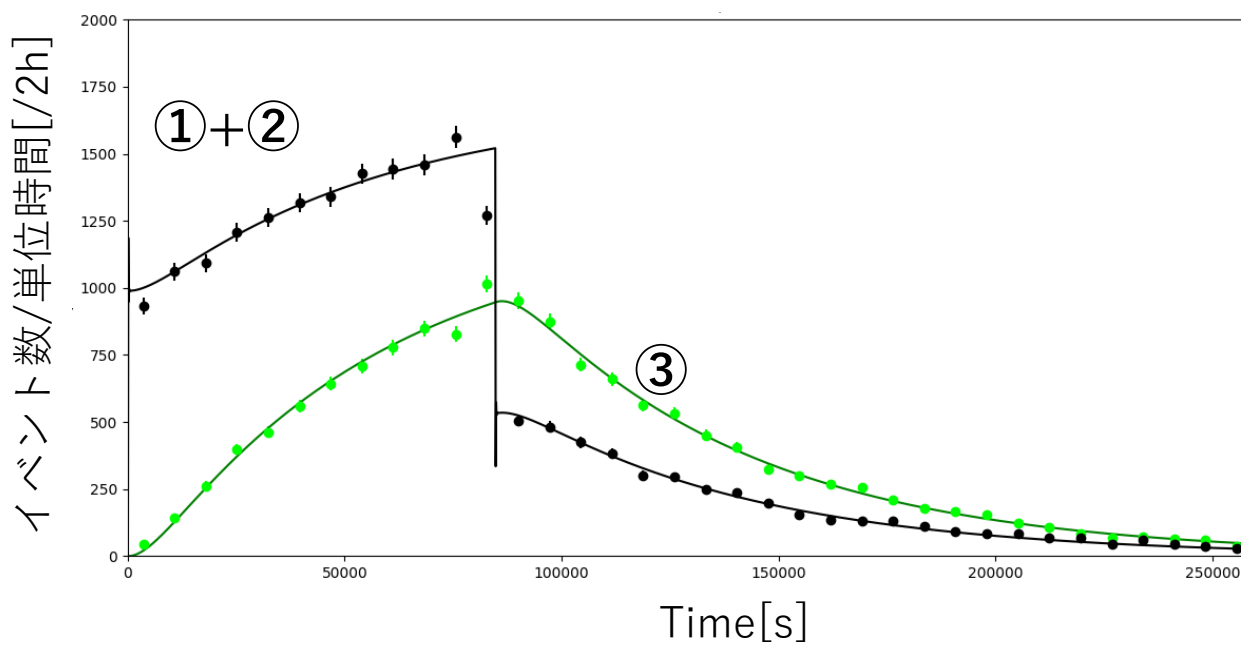
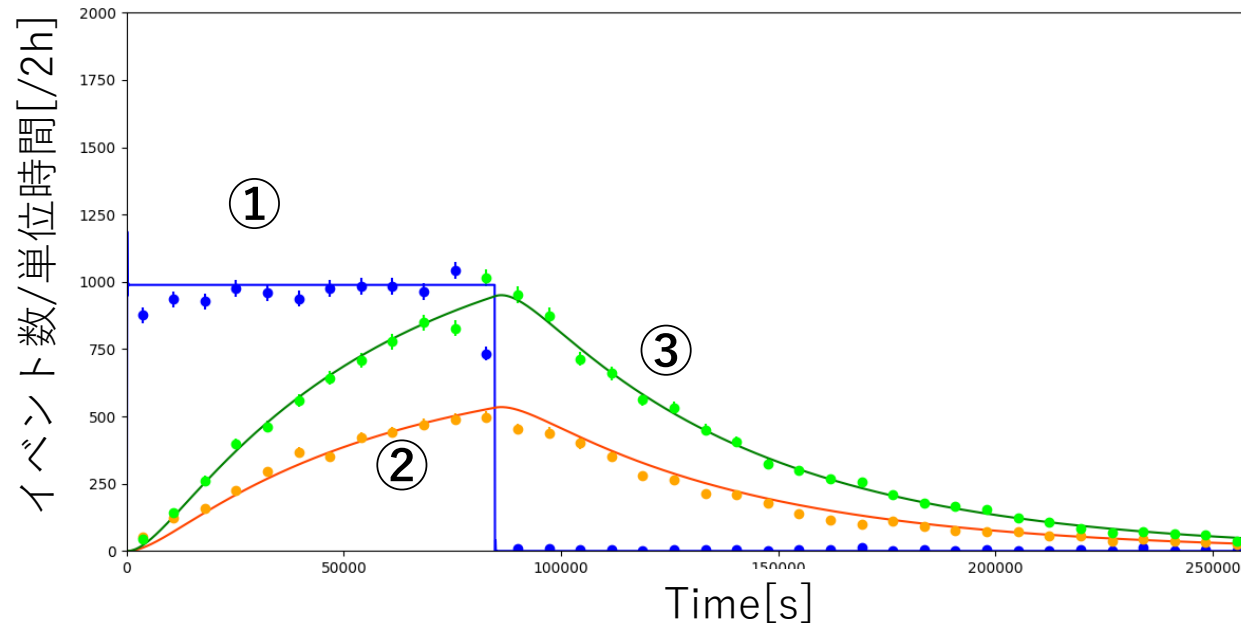
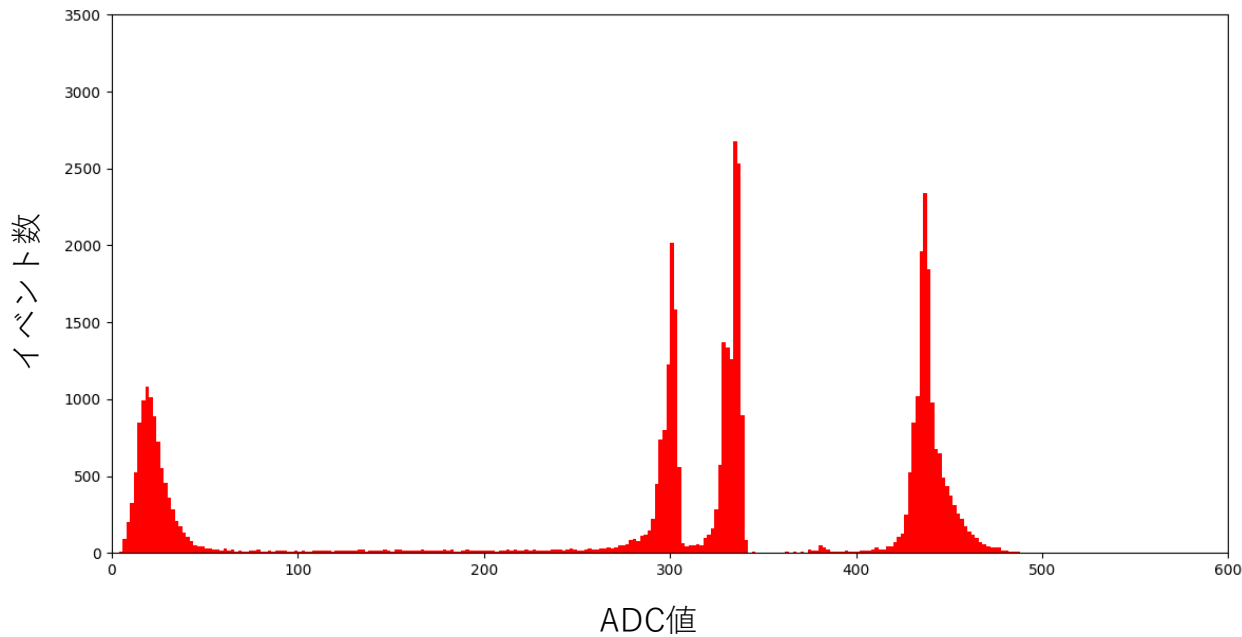
$\chi^2/\text{ndf}=1.2$
 $\chi^2/\text{ndf}=1.6$



-700V

付着割合 p
付着割合 b

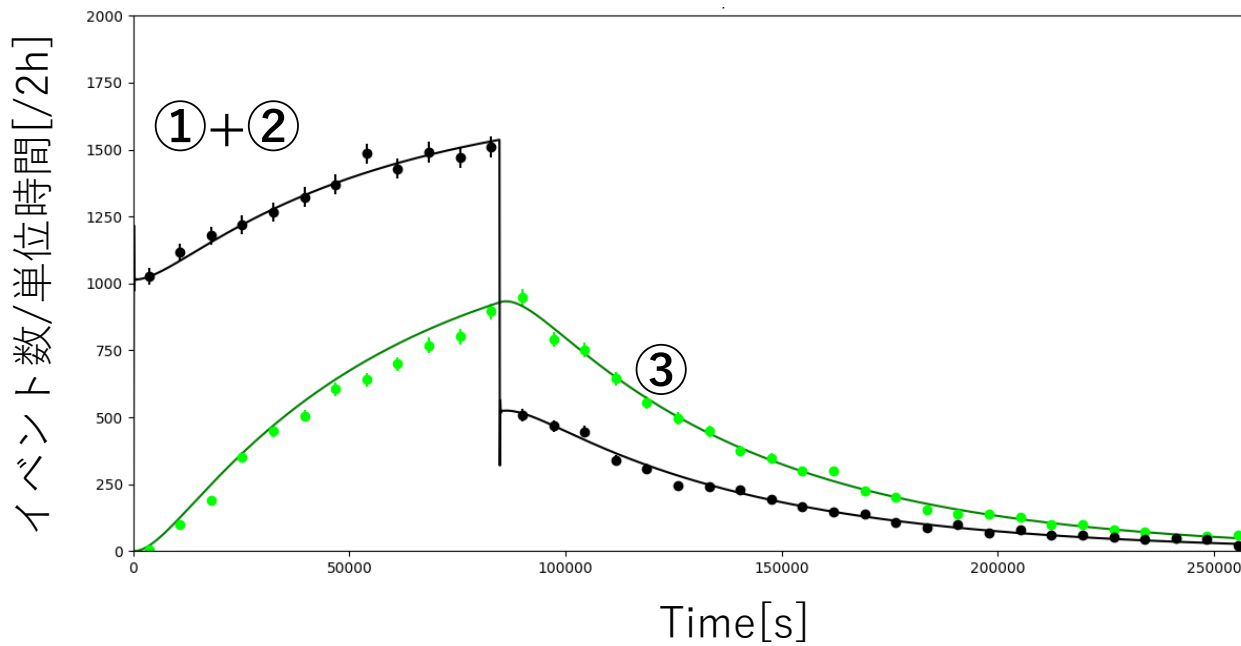
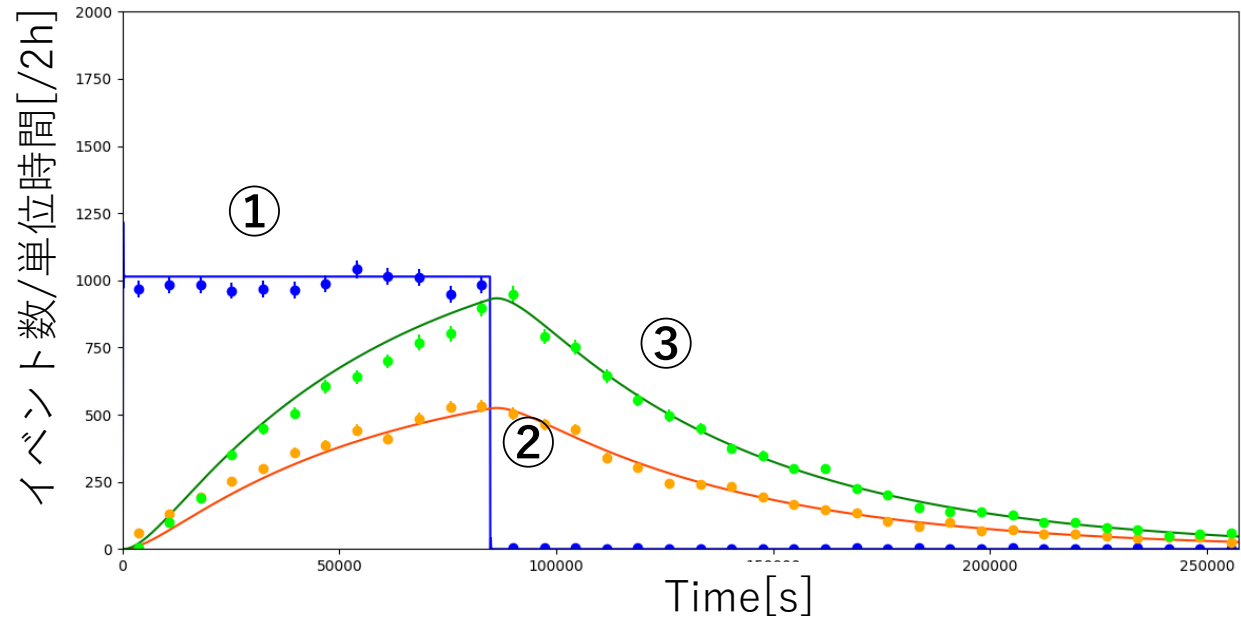
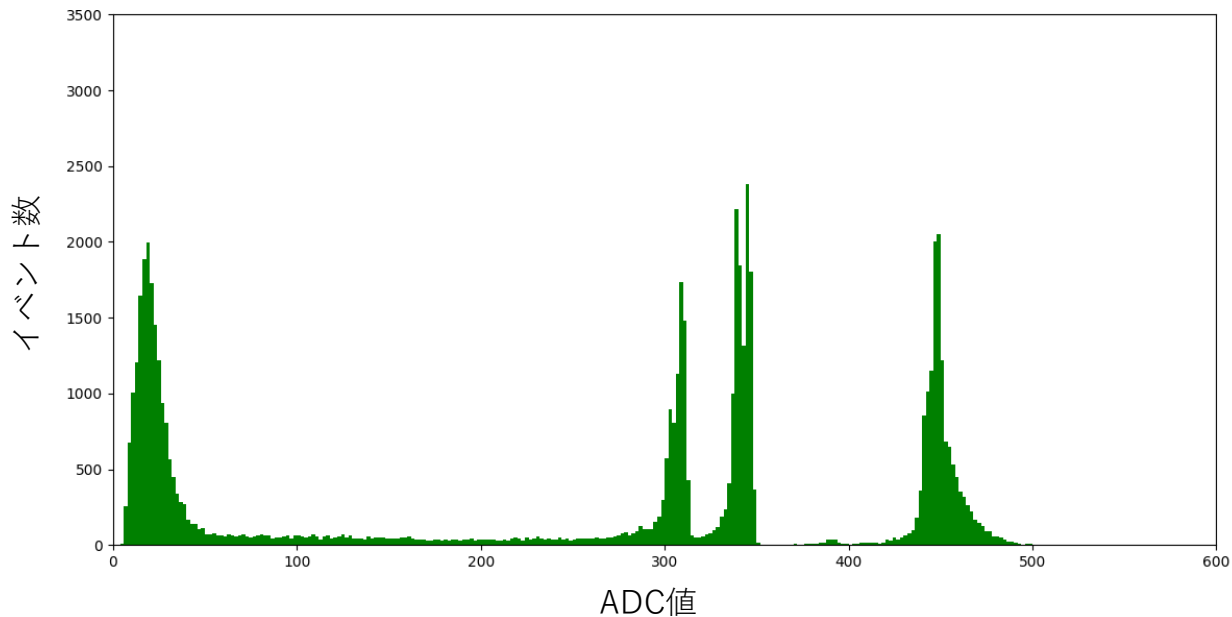
$\chi^2/\text{ndf}=2.4$
 $\chi^2/\text{ndf}=0.92$



-500V

付着割合 p
付着割合 b

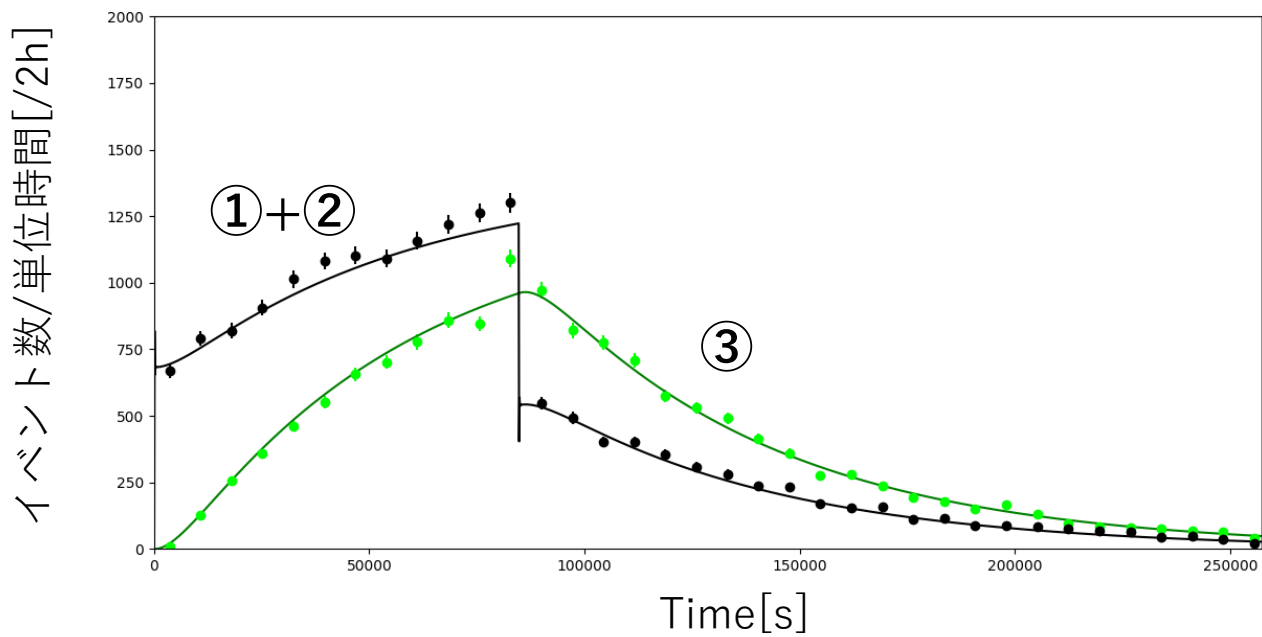
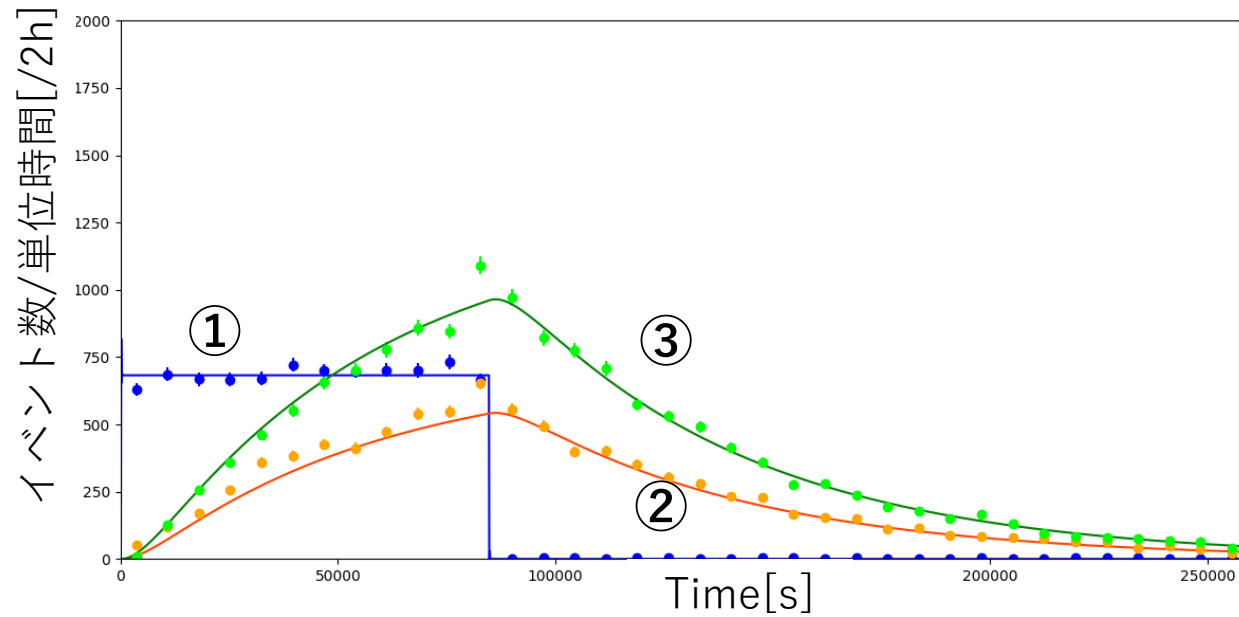
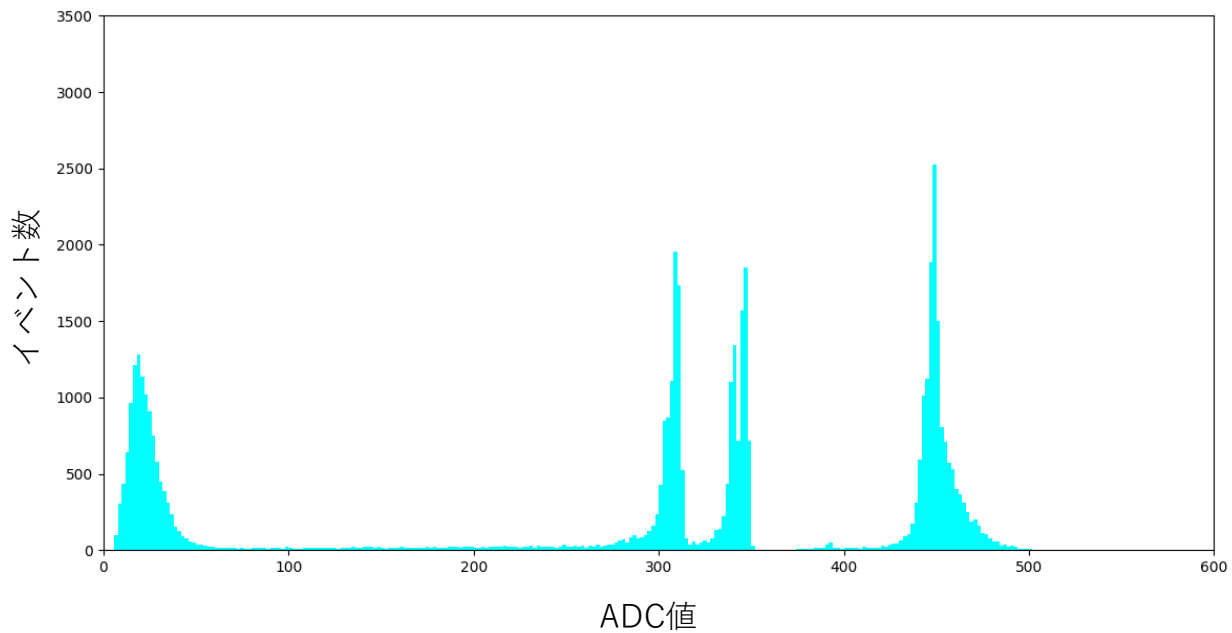
$\chi^2/\text{ndf}=1.1$
 $\chi^2/\text{ndf}=1.1$



-300V

付着割合 p
付着割合 b

$\chi^2/\text{ndf}=1.9$
 $\chi^2/\text{ndf}=1.2$



-100V

付着割合 p
付着割合 b

$\chi^2/\text{ndf}=1.5$
 $\chi^2/\text{ndf}=1.1$

