

# 放射線測定の方法と統計処理

NaI検出器による測定から放射能濃度の評価まで

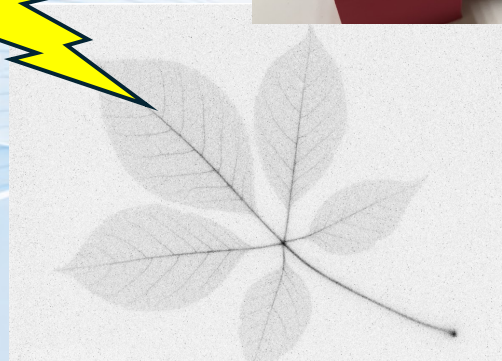
核物理研究センター 吉田裕介

# 今日の内容

## 放射能の測定

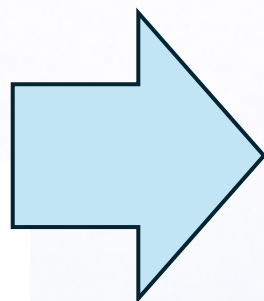
- ・何を測るのか
- ・どうやって測るのか
- ・何がわかるのか

NaI(Tl)シンチレーション検出器



イメージングプレート(IP)

サーベイメータ



12,050

385<sup>?</sup> 0.29<sup>?</sup>

? 1,675

0.012

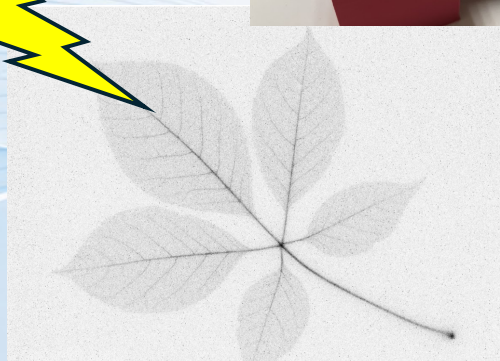
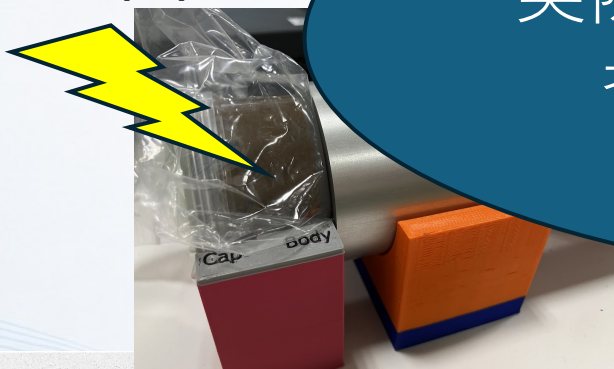
# 今日の内容

## 放射能の測定

- ・何を測るのか
- ・どうやって測るのか
- ・何がわかるのか

実際に土壌サンプル測定して、  
考察できるようになろう

NaI(Tl)シンチ



イメージングプレート(IP)



サーベイメータ

385<sup>?</sup> 0.29<sup>?</sup>

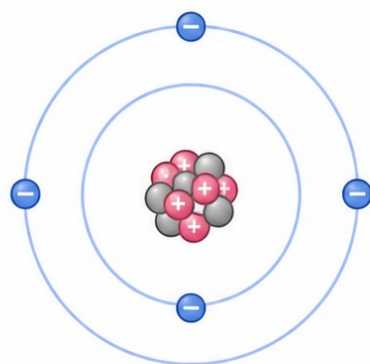
? 1,675 0.012

# 放射線とは

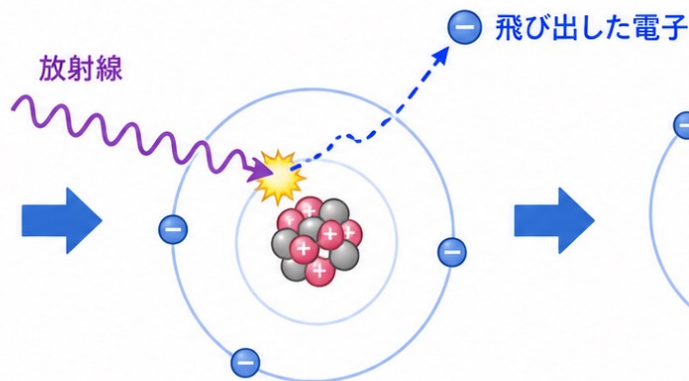
放射線とは、空間や物質中を伝わり、物質にエネルギーを与える粒子または電磁波です。

物質を構成する原子から電子を弾き飛ばし、イオンに変える能力（電離作用）を持つ。

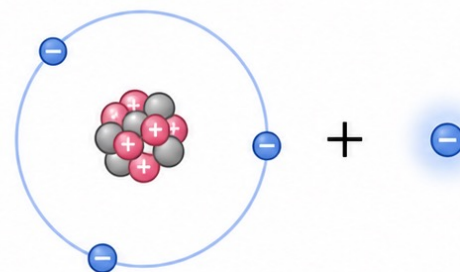
1 中性原子（電荷はゼロ）



2 放射線が原子に当たり、電子をはじき出す



3 陽イオンと自由電子に分かれる



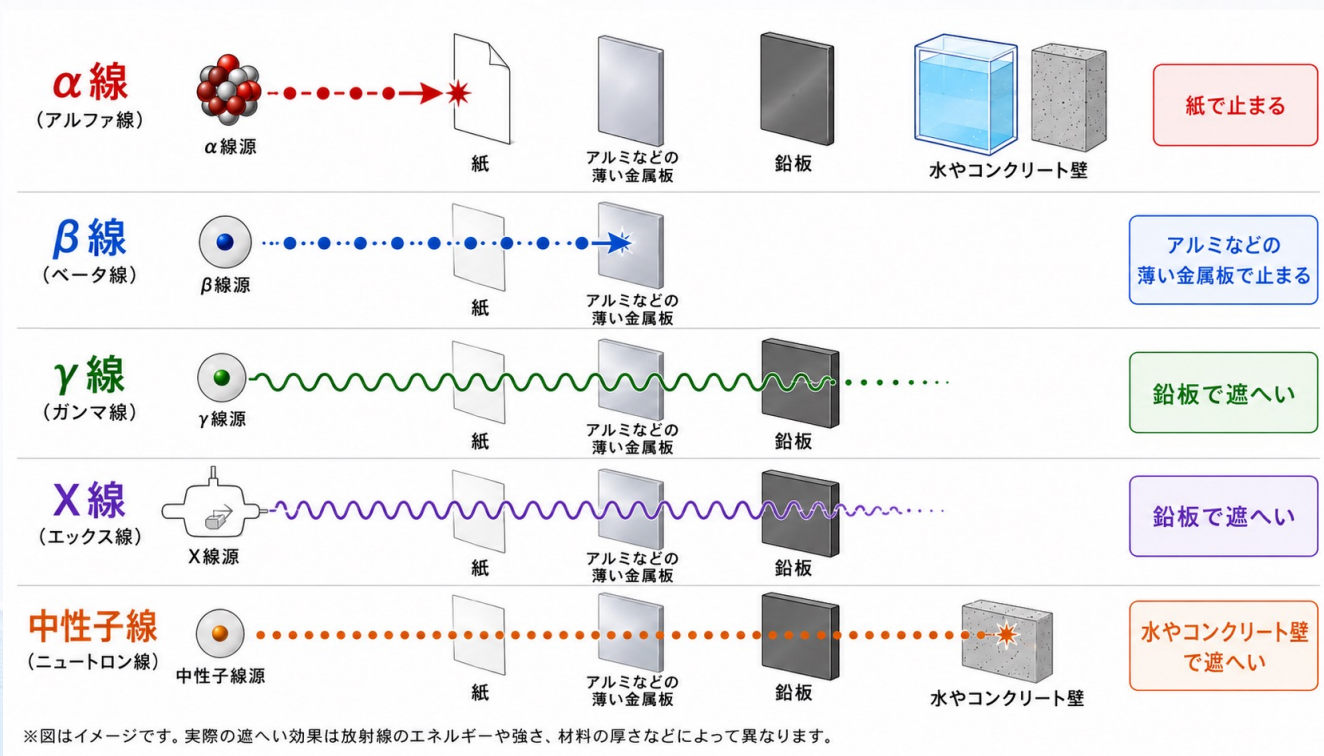
放射線が原子や分子にエネルギーを与え、電子を飛び出させることで、イオンが生じる。

# 放射線とは

放射線とは、空間や物質中を伝わり、物質にエネルギーを与える粒子または電磁波です。

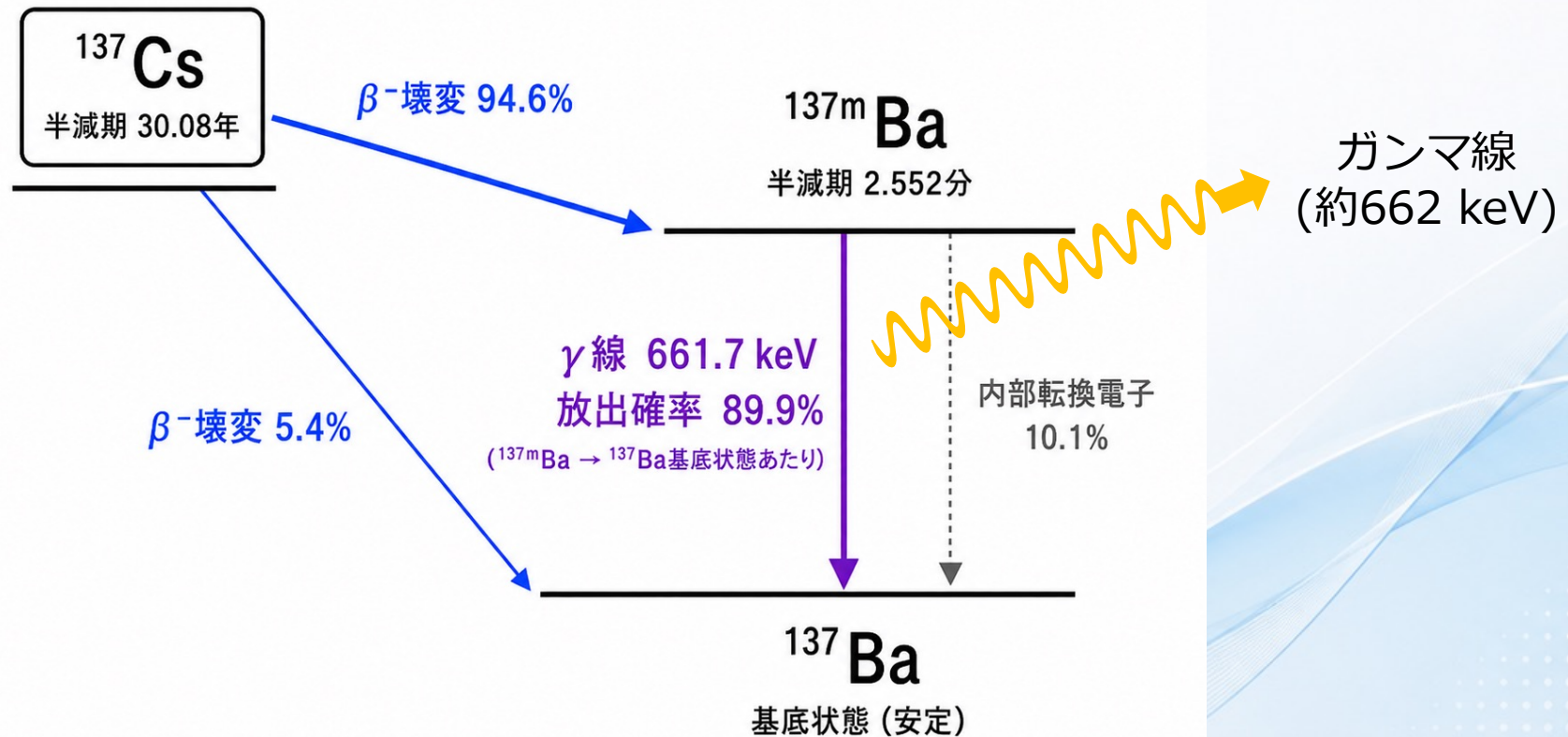
物質を構成する原子から電子を弾き飛ばし、イオンに変える能力（電離作用）を持つ。

- $\alpha$ 線
- $\beta$ 線
- $\gamma$ 線
- X線
- 中性子線



# $^{137}\text{Cs}$ (セシウム-137)とは

- 福島第一原子力発電所事故では、主に $^{134}\text{Cs}$ と $^{137}\text{Cs}$ が環境中へ放出された  
→ $^{137}\text{Cs}$ の半減期は約30.1年と長いため、現在土壌などには $^{137}\text{Cs}$ が残っている
- 以下の壊変図のように、壊変によって約662keVのガンマ線を放出する  
→ 662keVのガンマ線の数で測定することで $^{137}\text{Cs}$ がどれだけ存在するかがわかる



※  $^{137}\text{Cs}$  1壊変あたりの661.7 keV  $\gamma$ 線放出確率 = 85.1%

# 放射線に関する単位



放射性物質の壊変



物質が受けるエネルギー



人体への影響

## 1) ベクレル (Bq)

Bq は、放射性物質が1秒間に起こす壊変の回数を表す単位。

サンプルの放射能

1 Bq = 1秒間に1回の壊変

・ NaI  
・ IP



(例) 1秒間に何回壊変しているか

## 2) グレイ (Gy)

Gy は、吸収線量を表す単位。物質が吸収したエネルギーの大きさを表す。

放射線

空間線量

1 Gy = 1 kgあたり1 Jの

物質がどれ



(例) 物質1 kg が受け取ったエネルギーはどれくらいか

## 3) シーベルト (Sv)

Sv は、等価線量 (実効線量) を表す単位。放射線防護のために用いられる、放射線の影響を考慮した量の目安。

吸収線量 (Gy) をもとに、放射線の種類や人体への影響を考慮した量

の目安



大きさを表す量 (防護のための指標)  
(例) 健康への影響はどのくらいか



Bq・Gy・Sv はそれぞれ表しているものが異なる。



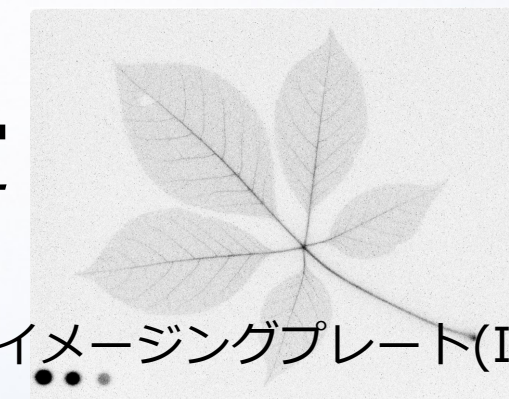
単位を掛けたり割ったりして変換することはできません。  
それぞれの意味を理解して、正しく使い分けることが大切です。

# 研修で測定するもの・そのために採取するもの

- 空間線量( $\mu\text{Sv}/\text{h}$ )測定  
採取はせず、その場で計測



- 植物の葉の放射能濃度( $\text{Bq}/\text{area}$ )分布測定  
→植物の葉をそのままの状態で採取



イメージングプレート(IP)

- 土壌や植物の放射能濃度( $\text{Bq}/\text{kg}$ )測定  
→土や植物を採取(容器に詰める)



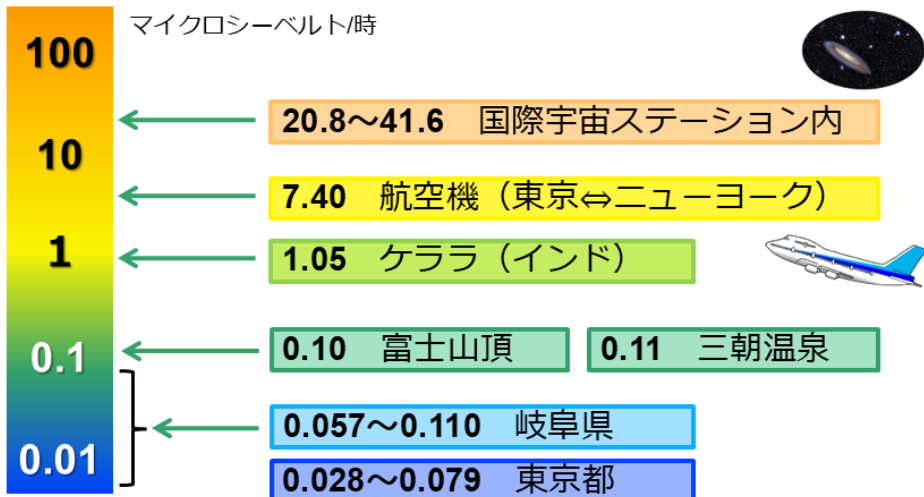
# 測定 1 : 空間線量( $\mu\text{Sv/h}$ )測定



# 測定 1 : 空間線量( $\mu\text{Sv}/\text{h}$ )測定

## 身の周りの放射線 時間当たりの被ばく線量の比較

### 空間線量率の比較



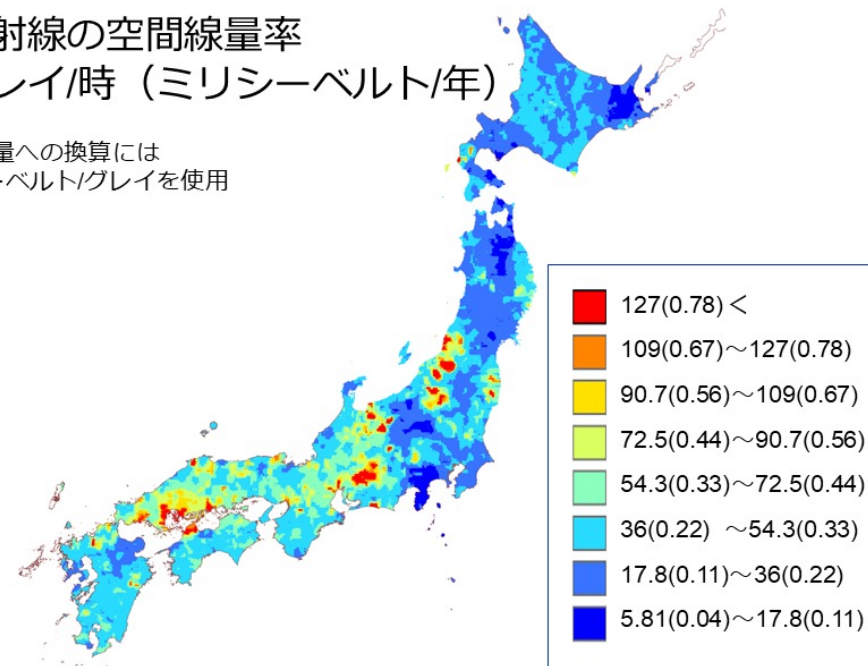
出典：JAXA宇宙ステーションきぼう広報・情報センターサイト「放射線被ばく管理」2013、放射線医学総合研究所ウェブサイト「航路線量計算システム (JISCARD)」、放射線医学総合研究所ウェブサイト「環境中の空間ガンマ線線量調査」、古野、岡山大学温泉研究所報告、51号、P25-33、1981、原子力規制委員会放射線モニタリング情報 (モニタリングポストの過去の平常値の範囲) より作成

<https://www.env.go.jp/chemi/rhm/current/02-05-02.html>  
環境省(2026)

## 身の周りの放射線 大地の放射線 (日本)

### 自然放射線の空間線量率 ナノグレイ/時 (ミリシーベルト/年)

・実効線量への換算には  
0.7シーベルト/グレイを使用



出典：日本地質学会ウェブサイトより作成

<https://www.env.go.jp/chemi/rhm/current/02-05-06.html>  
環境省(2026)

大阪府の空間線量率：約0.05~0.08  $\mu\text{Sv}/\text{h}$   
岐阜県の空間線量率：約0.06~0.09  $\mu\text{Sv}/\text{h}$

# 測定 1 : 空間線量( $\mu\text{Sv}/\text{h}$ )測定

## 2種類の空間線量計

「Radiacode」 「ギョロガイガー」  
ガイガーカウンター



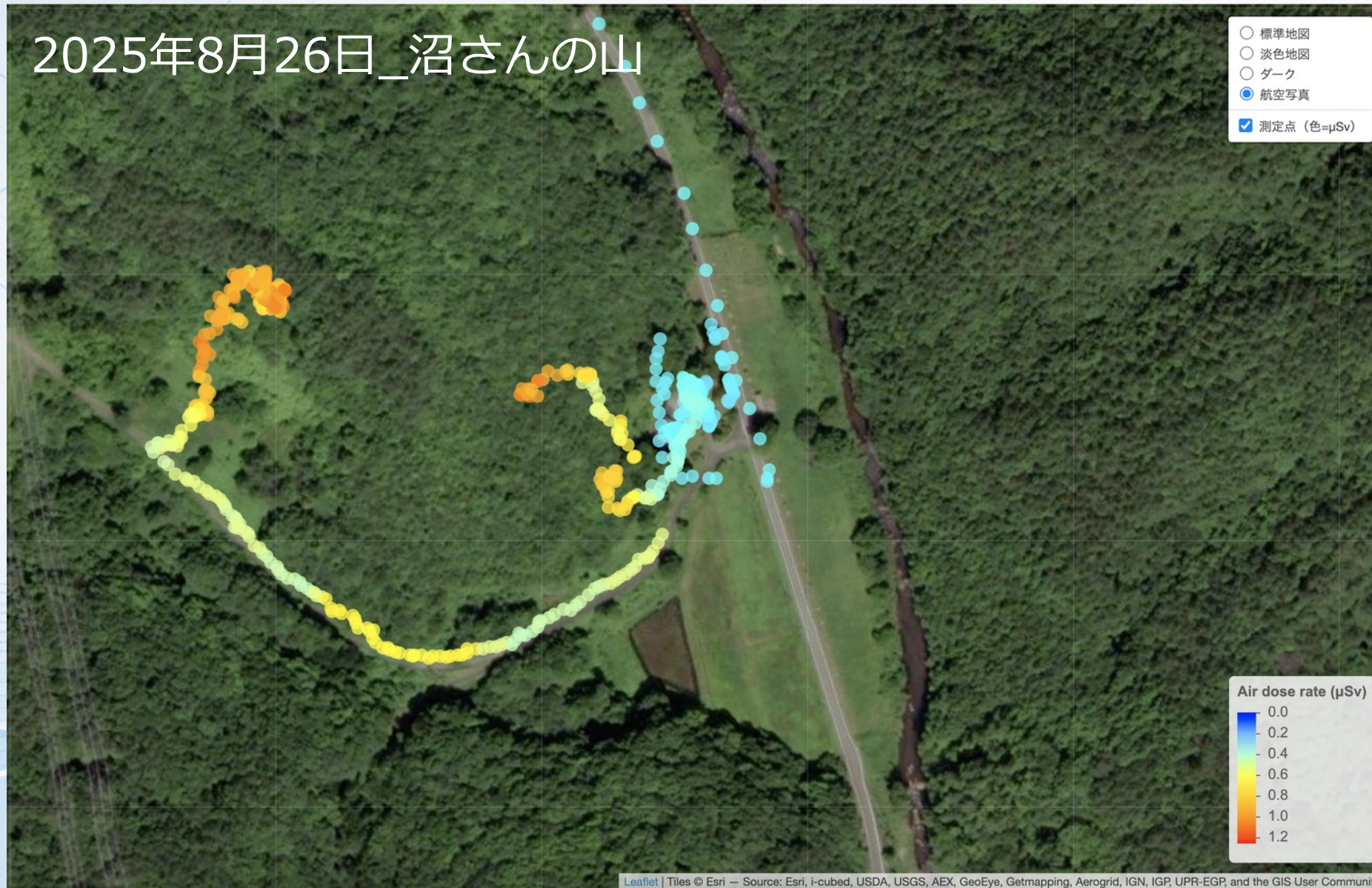
スマホとBluetooth接続してGPS情報とリンクさせ、  
空間線量をマッピングできる (教員持ち?)

「はかるくん」  
シンチレーションカウンター (CsI)



土壌採取の際のデータとして利用 (1人1台)

# 測定 1 : 空間線量( $\mu\text{Sv}/\text{h}$ )測定



「ギョロガイガー」  
で測定

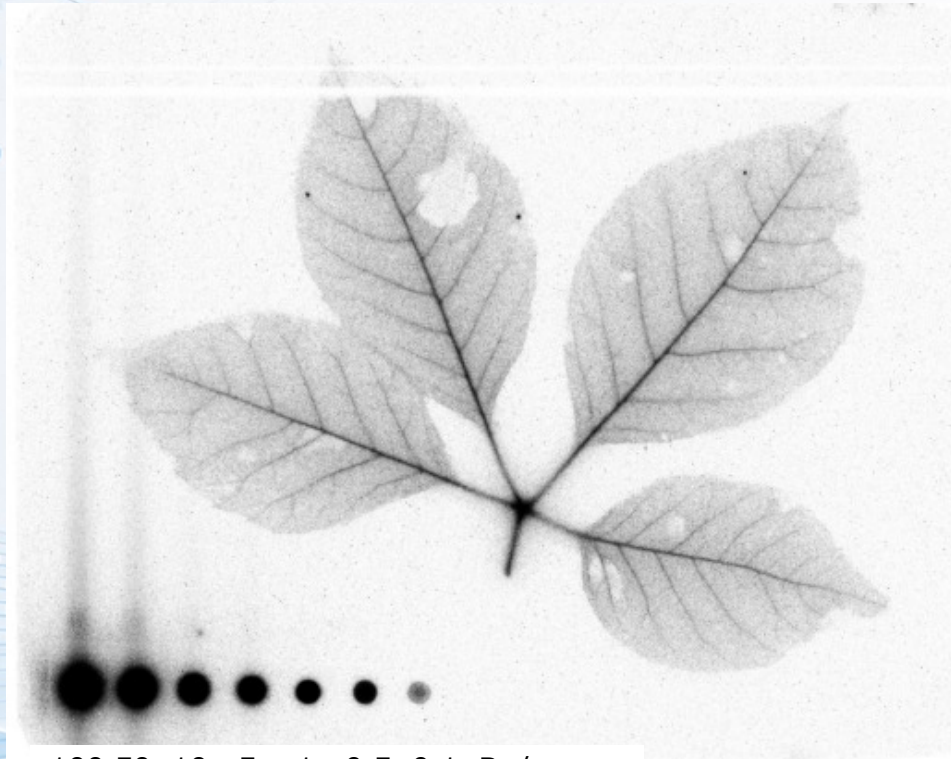
大阪府の空間線量率：  
約 $0.05\sim 0.08 \mu\text{Sv}/\text{h}$

岐阜県の空間線量率：  
約 $0.06\sim 0.09 \mu\text{Sv}/\text{h}$

# 測定2：葉の放射能濃度分布測定

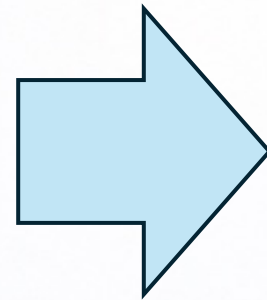
飯舘村 沼さんの山のコシアブラ

2015年10月22日

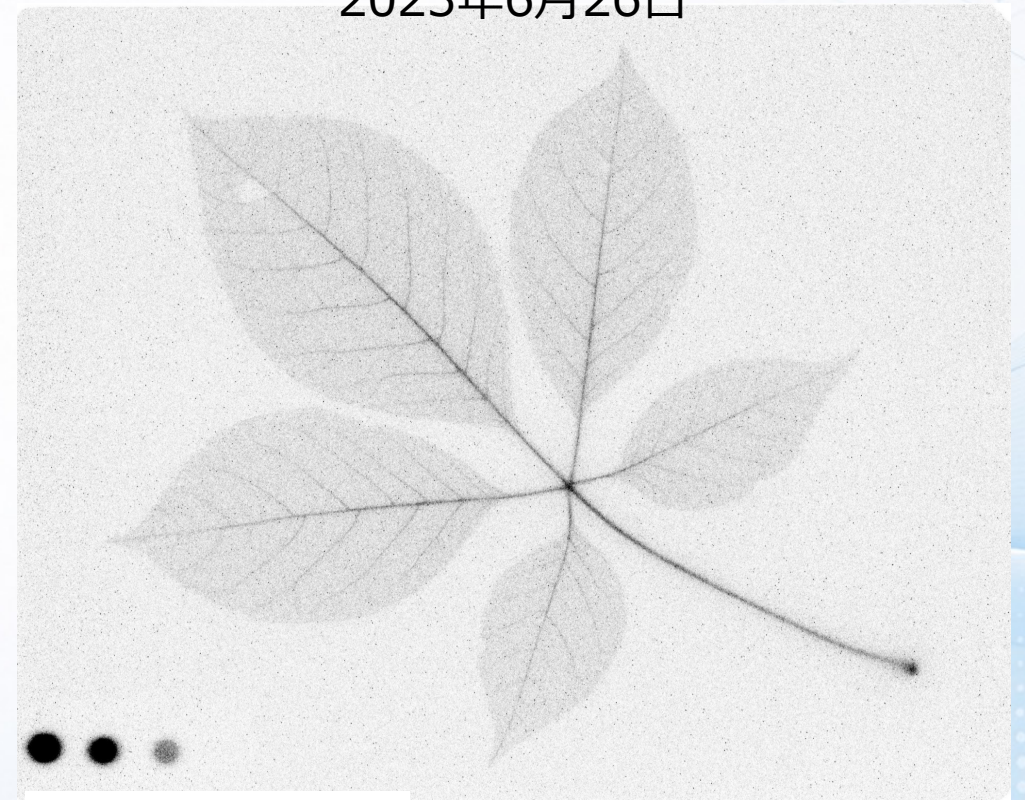


100 50 10 5 1 0.5 0.1 Bq/area

A018 15IKNF 7



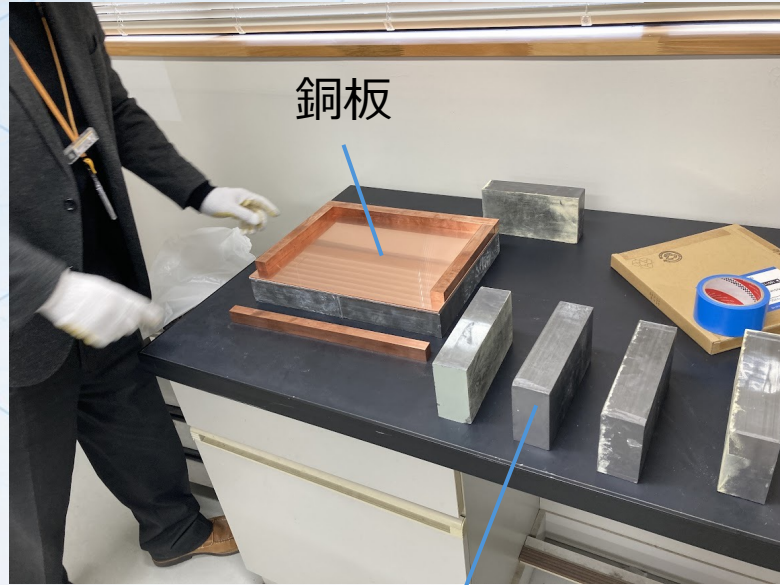
2023年6月26日



1 0.5 0.1 Bq/area

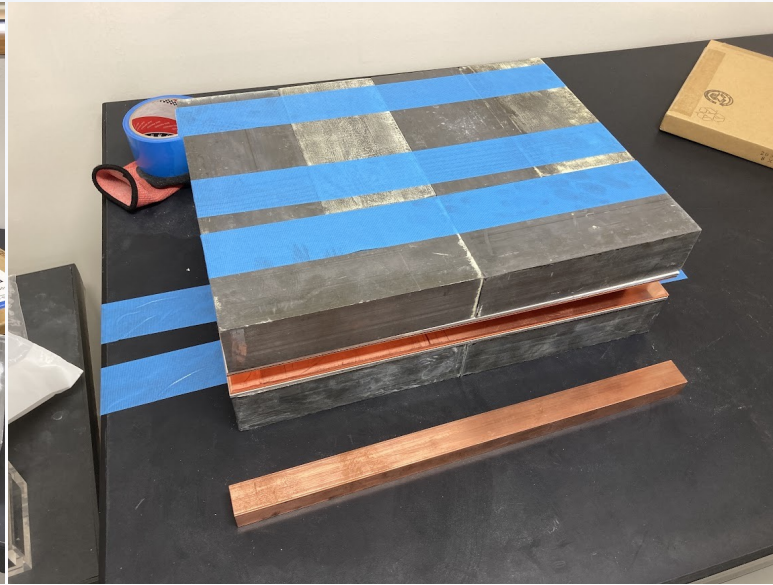
B096 23IKN 7

# 測定2：葉の放射能濃度分布測定



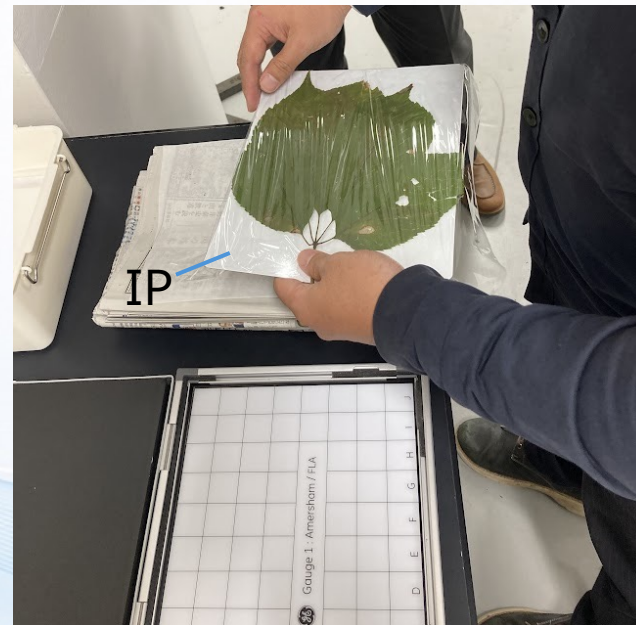
銅板

鉛ブロック



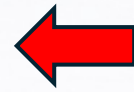
イメージング  
プレート(IP)

イメージングプレート(IP)に葉を密着させ、放射線を露光させる。レーザーによる読み出しを行うと、放射線が入射した位置から入射量に応じた光が放出され、それを観測することでイメージング像を得ることができる。



# 測定3：土壌や植物の放射能濃度(Bq/kg)測定

## NaI（ヨウ化ナトリウム）検出器



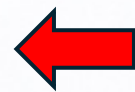
事前実習と現地実習で使用

種類： 無機シンチレーション検出器

原理： 放射線を光（シンチレーション光）に変換  
光をPMT（光電子増倍管）で電気信号に変換



## Ge（ゲルマニウム）検出器



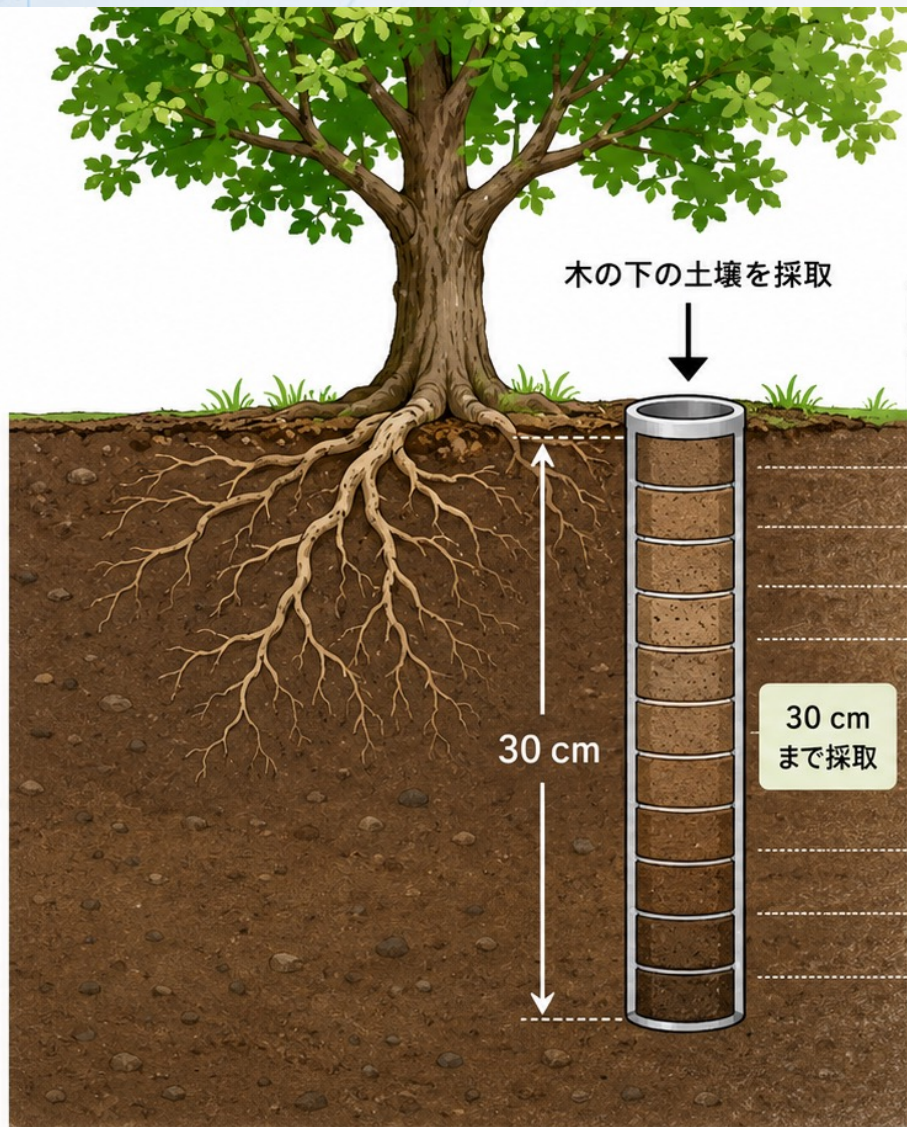
事後実習(発展放射線実習)  
で使用する検出器

種類： 半導体検出器

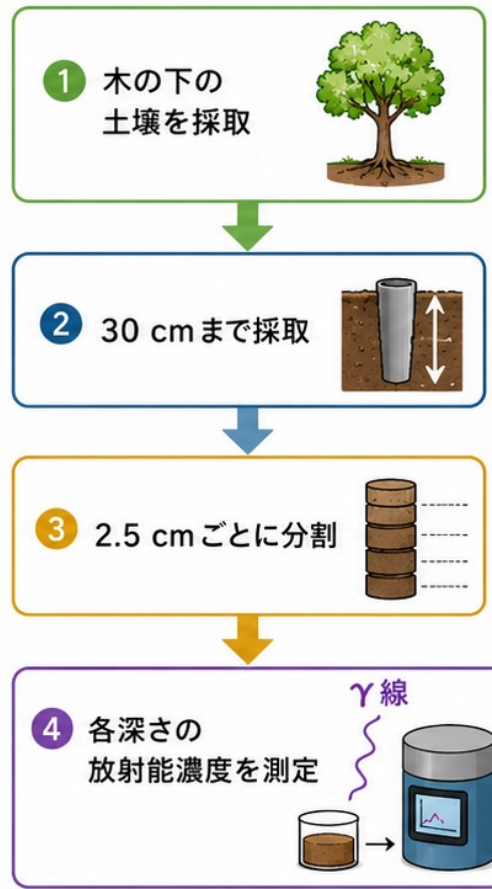
原理： 放射線を電荷に変換  
その電荷を増幅器で増幅



# 測定3：土壌や植物の放射能濃度(Bq/kg)測定



深さ (cm)	区分 (2.5 cmごと)
① 0-2.5 cm	
② 2.5-5.0 cm	
③ 5.0-7.5 cm	
④ 7.5-10.0 cm	
⑤ 10.0-12.5 cm	
⑥ 12.5-15.0 cm	
⑦ 15.0-17.5 cm	
⑧ 17.5-20.0 cm	
⑨ 20.0-22.5 cm	
⑩ 22.5-25.0 cm	
⑪ 25.0-27.5 cm	
⑫ 27.5-30.0 cm	

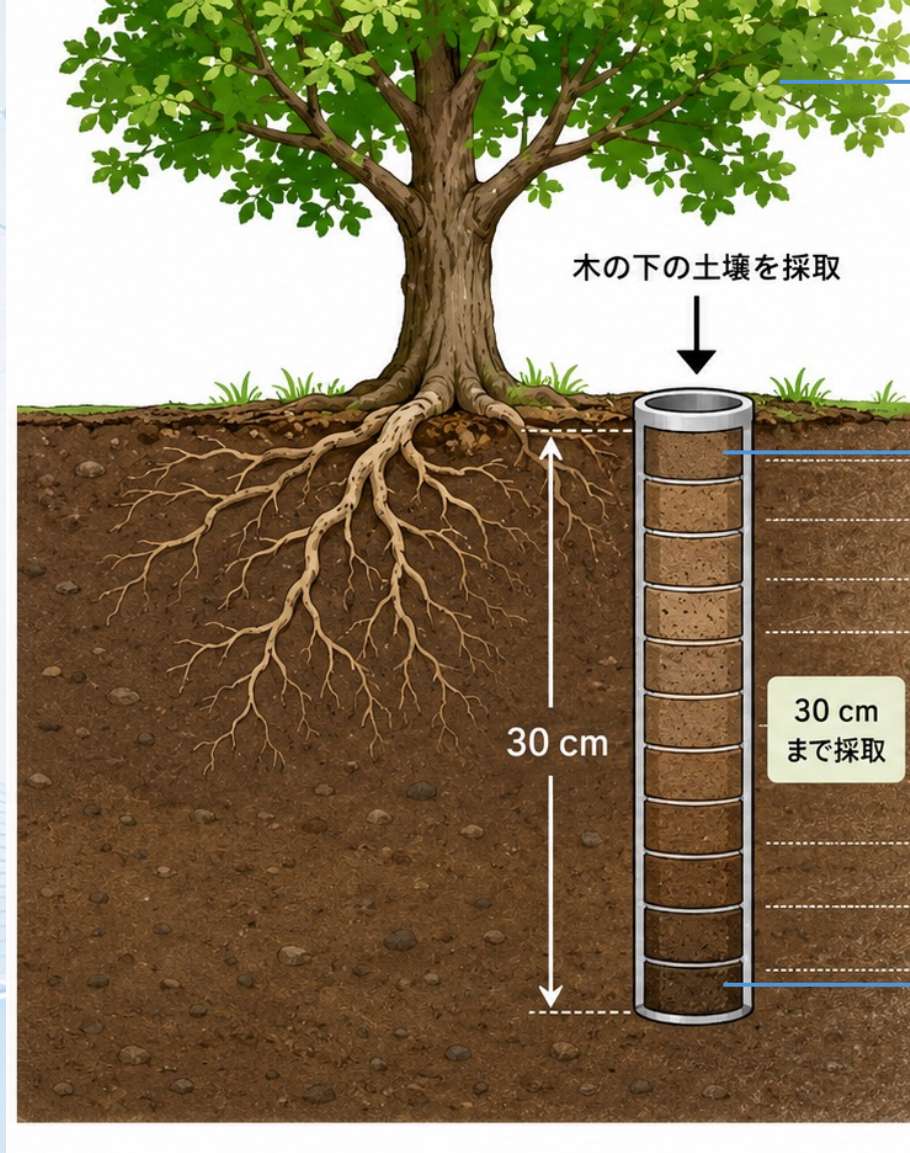


各区分 (2.5 cm ごとの土壌試料) について、放射能濃度 (ベクレル/kg 乾土など) を測定します。



U9容器

# 測定3：土壌や植物の放射能濃度(Bq/kg)測定



$^{137}\text{Cs}$  ??? Bq/kg

どれだけの量が移動しているか調べることができる。

$^{137}\text{Cs}$  45,000 Bq/kg

深さによる放射能濃度の違いがわかる。  
放射性物質が下にどれだけ移動しているか調べることができる。

$^{137}\text{Cs}$  450 Bq/kg

# 測定3：土壌や植物の放射能濃度(Bq/kg)測定



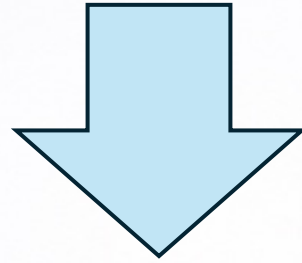
【2022年度版】 サンプル採取\_ライナー採土器の使い方

# 測定3：土壌や植物の放射能濃度(Bq/kg)測定



【2022年度版】 サンプル採取\_採土補助器の使い方

研修会では土壌や植物の放射能濃度を測定したい



- 学生全員が自分で試料を採取し、
- その試料の放射能測定をNaI検出器を用いて行い、
- 自分で放射能濃度(Bq/kg)を計算する

来週、一連の操作を練習してもらいます

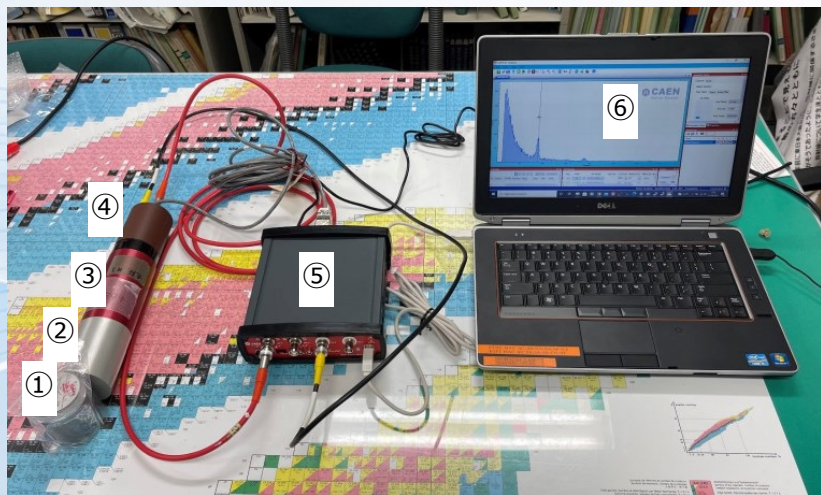
# NaI検出器の仕組み

## NaI(Tl)シンチレーション検出器

① サンプル

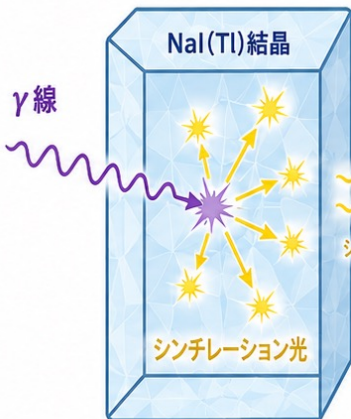


④ プリアンプ



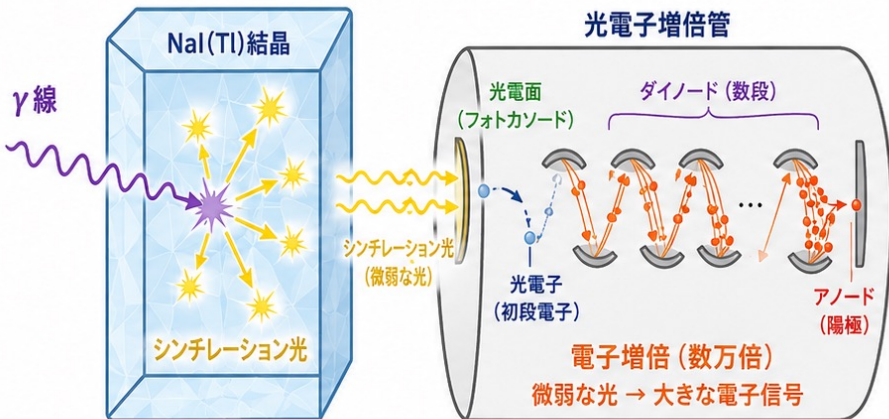
①  $\gamma$ 線の入射

② シンチレーション光の発生



$\gamma$ 線がNaI(Tl)結晶内で相互作用し、エネルギーを失ってシンチレーション光(可視光)を発生する。

③ 光電子増倍管で電子増倍



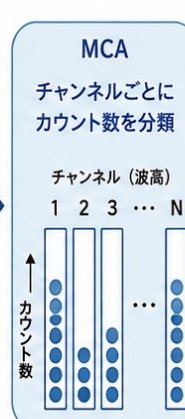
シンチレーション光が光電面で光電子に変換され、ダイノードで二次電子放出を繰り返して電子が増倍される。(全体で数万倍程度に増幅)

④ プリアンプ



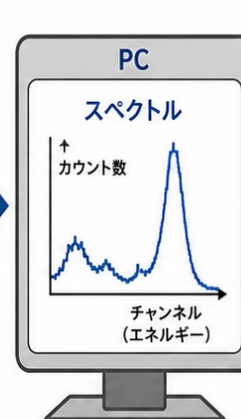
増倍管からのパルス信号を増幅し、微分・積分などの回路で波形を整える。

⑤ MCA(多重波高分析器)

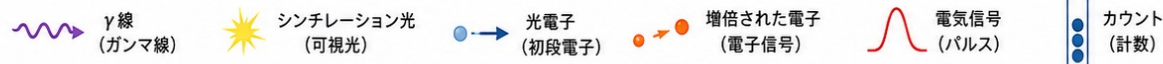


パルスの高さ(波高)をチャンネルごとに分類し、それぞれのカウント数を計数する。

⑥ PC



MCAで得られたカウントをPCに取り込み、スペクトル(カウント数 vs チャンネルまたはエネルギー)として表示・保存する。



$\gamma$ 線が上記の過程で電気信号に変換され、各エネルギーごとの $\gamma$ 線の入射数が求められる  
→662 keVの $\gamma$ 線の数があれば、 $^{137}\text{Cs}$ の放射能濃度がわかる

# 放射能濃度の求め方

放射能濃度(Bq/kg):

試料1 kgあたりに、どれだけ放射能が含まれているかを表す量

例えば、0.50 kgの土壤に100 Bqの $^{137}\text{Cs}$ が含まれる場合、

**この土壤サンプルの $^{137}\text{Cs}$ 放射能濃度 = 200 Bq/kg**

つまり、同じ状態の土壤1 kgあたり、200回/秒の放射性壊変が起こる量に相当する

$$\text{放射能濃度 } S[\text{Bq/kg}] = \left( \frac{N_{\text{Sample+Background}}}{T_{\text{Sample+Background}}} - \frac{N_{\text{Background}}}{T_{\text{Background}}} \right) \frac{1}{M} \frac{1}{B} \frac{1}{\varepsilon}$$

サンプルから検出器に入ってきた  
放射線(662keVの $\gamma$ 線)の数

$S$  : 放射能濃度[Bq/kg]

$N$  : 放射線の計数(カウント)

$T$  : 測定時間[s]

$M$  : サンプルの重量[kg]

$B$  :  $^{137}\text{Cs}$ の分岐比( $\gamma$ 線放出確率) = 0.851

$\varepsilon$  : 検出効率

# 放射線に関する単位



放射性物質の壊変



物質が受けるエネルギー



人体への影響

## 1) ベクレル (Bq)

Bq は、放射性物質が1秒間に起こす壊変の回数を表す単位。

サンプルの放射能

1 Bq = 1秒間に1回の壊変

・ NaI  
・ IP



(例) 1秒間に何回壊変しているか

## 2) グレイ (Gy)

Gy は、吸収線量を表す単位。物質が吸収したエネルギーの大きさを表す。

放射線

空間線量

1 Gy = 1 kgあたり1 Jの

物質がどれ



(例) 物質1 kg が受け取ったエネルギーはどれくらいか

## 3) シーベルト (Sv)

Sv は、等価線量 (実効線量) を表す単位。放射線防護のために用いられる、放射線の影響を考慮した量の目安。

吸収線量 (Gy) をもとに、放射線の種類や人体への影響を考慮した量

の目安

大きさを

表す量 (防護のための指標)

(例) 健康への影響はどのくらいか



Bq・Gy・Sv はそれぞれ表しているものが異なる。

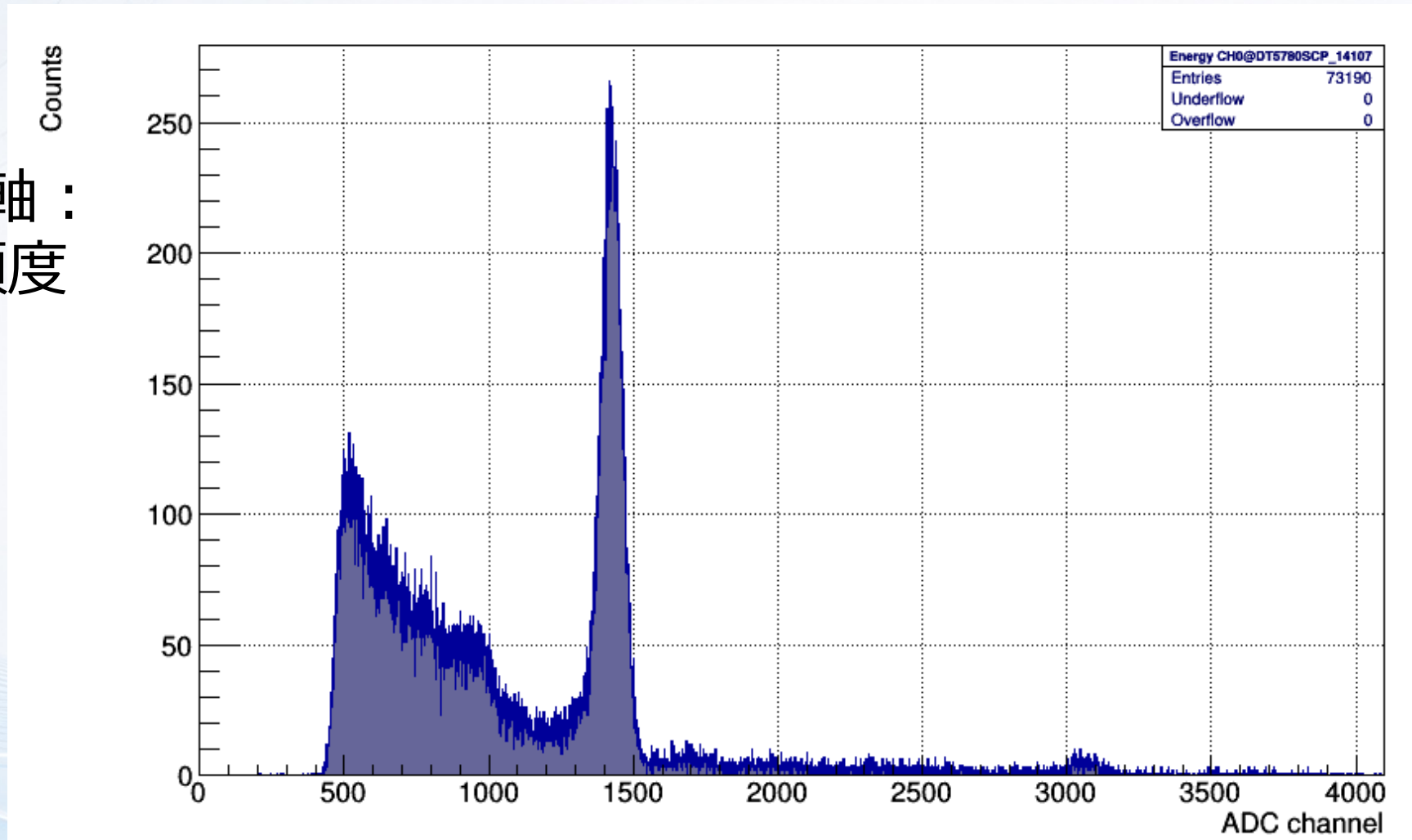


単位を掛けたり割ったりして変換することはできません。

それぞれの意味を理解して、正しく使い分けることが大切です。

# 検出器に入射したガンマ線をカウントする

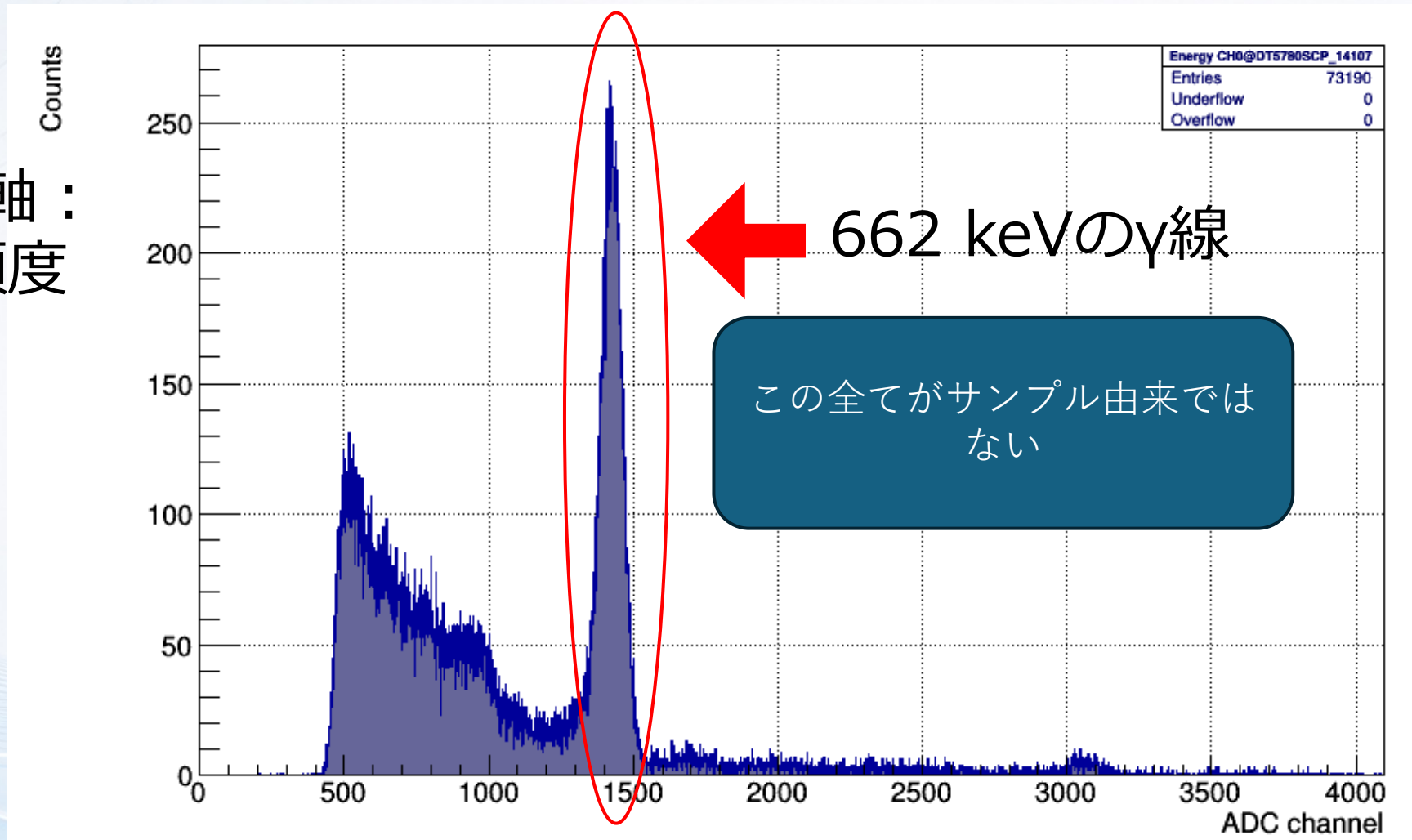
横軸：  
頻度



横軸：channel  $\propto$  電気信号の大きさ  $\propto$  ガンマ線のエネルギー

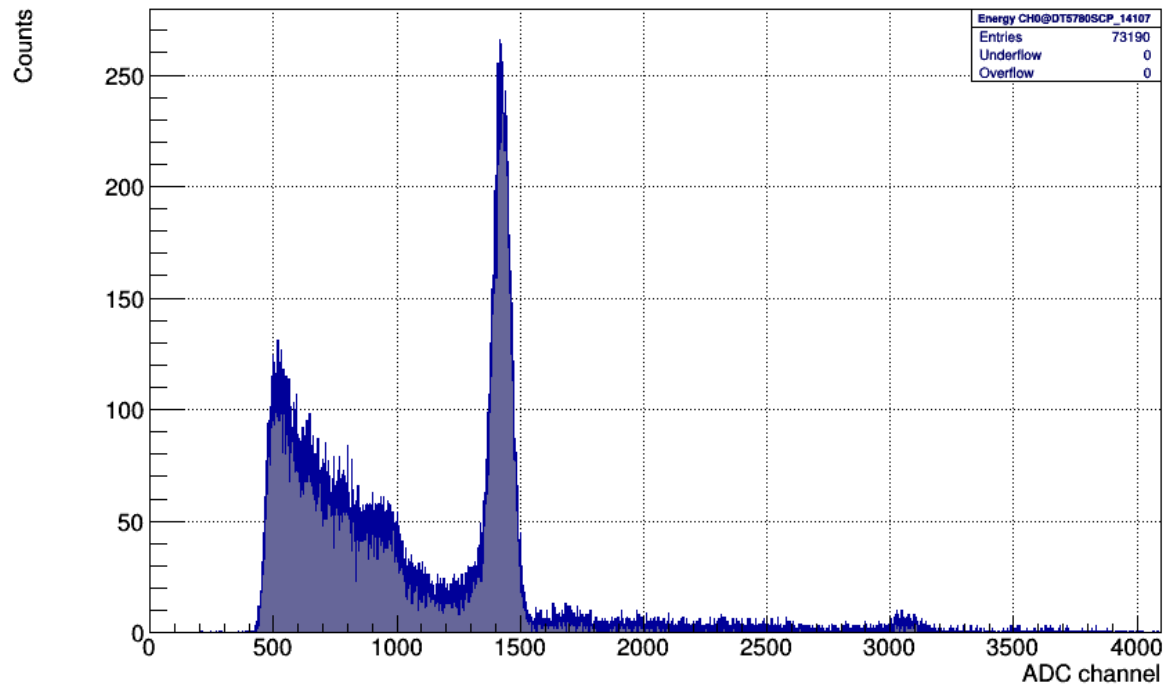
# 検出器に入射したガンマ線をカウントする

横軸：  
頻度

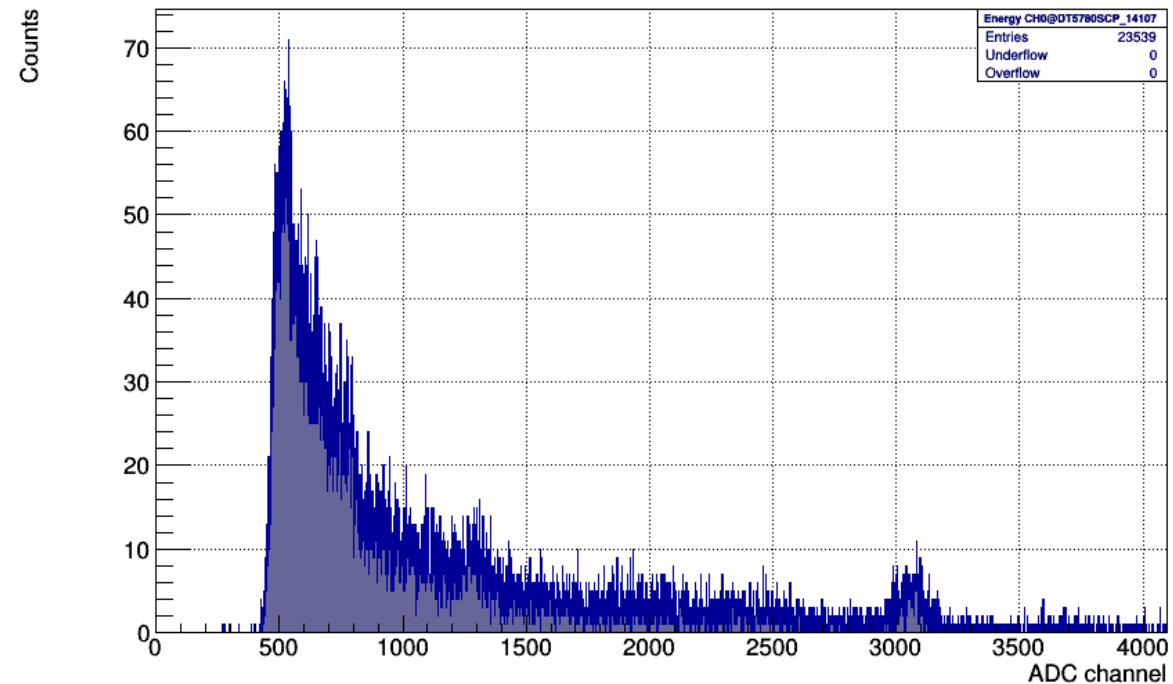


横軸：channel  $\propto$  電気信号の大きさ  $\propto$   $\gamma$ 線のエネルギー

# バックグラウンド



サンプルあり  
(大熊町 土壌サンプル)

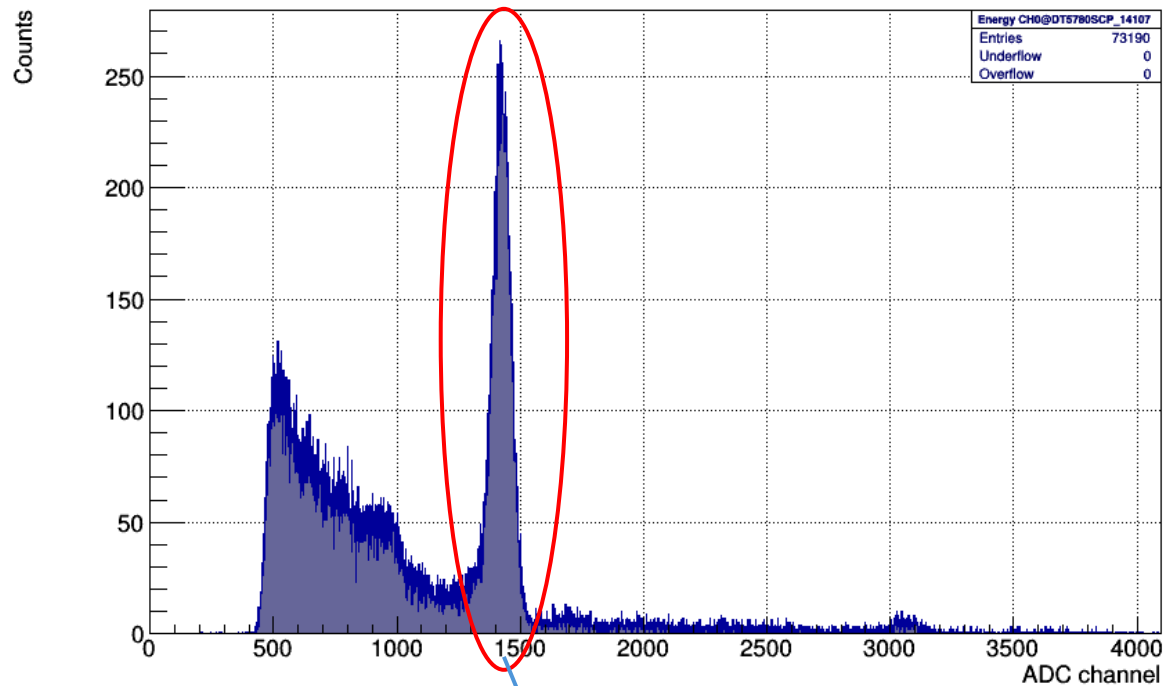


サンプルなし  
(環境放射線など)

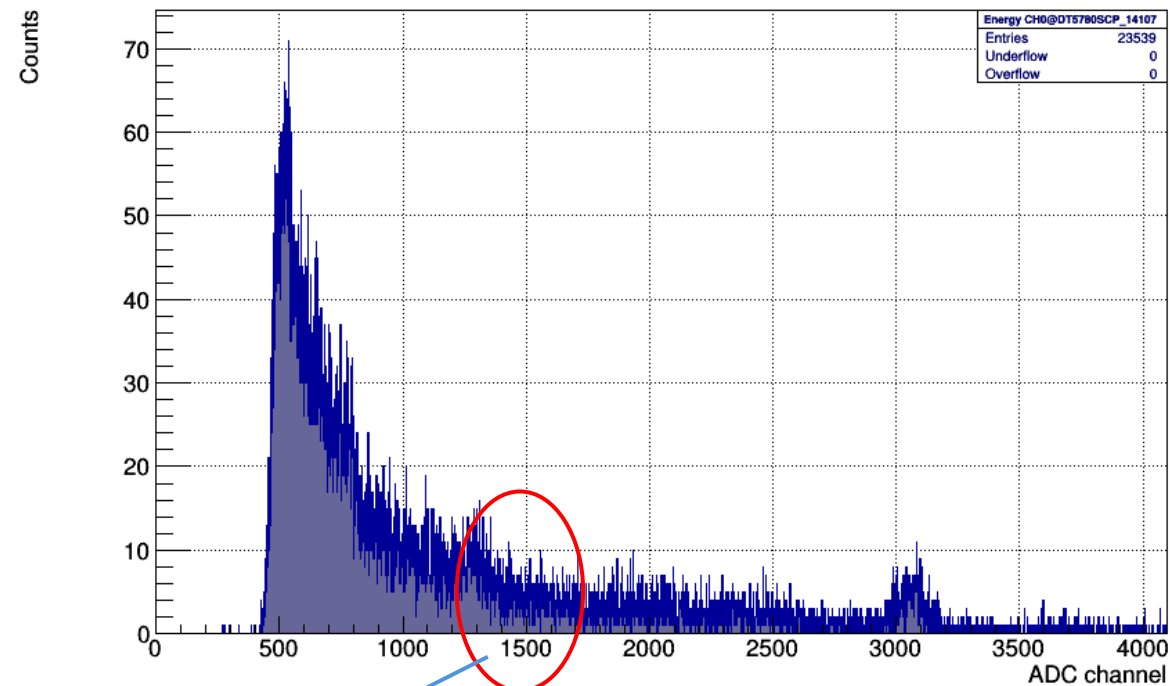
どちらも5分間測定

- 放射線検出器は、測定試料を置いていない場合でも、一定のカウントを記録する。
- この試料以外に由来する信号を、バックグラウンド (BG) という。
- 試料を測定した総カウントには、試料由来の放射線とバックグラウンドの両方が含まれる。

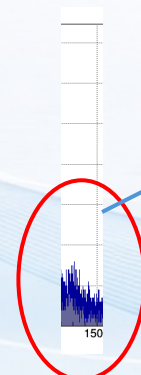
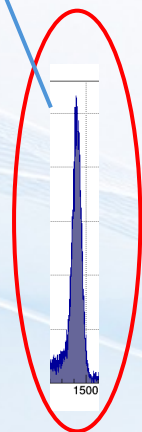
# バックグラウンド



サンプルあり  
(大熊町 土壌サンプル)



サンプルなし  
(環境放射線など)



=

サンプルから検出器に入ってきた  
放射線(662keVの $\gamma$ 線)の数

# 検出効率・分岐比( $\gamma$ 線放出確率)の考慮

サンプル中の  
 $^{137}\text{Cs}$ の壊変数

$\propto$

サンプルから検出器に入ってきた  
放射線(662keVの $\gamma$ 線)の数

比例関係ではあるが同じではないことに注意  
1つ壊変しても必ず1つの放射線が検出器に入るわけではない

$$\text{放射能濃度 } S [\text{Bq/kg}] = \left( \frac{N_{\text{Sample+Background}}}{T_{\text{Sample+Background}}} - \frac{N_{\text{Background}}}{T_{\text{Background}}} \right) \frac{1}{M} \frac{1}{B} \frac{1}{\varepsilon}$$

サンプルから検出器に入ってきた  
放射線(662keVの $\gamma$ 線)の数

補正する係数  
が必要

$S$  : 放射能濃度 [Bq/kg]

$N$  : 放射線の計数(カウント)

$T$  : 測定時間 [s]

$M$  : サンプルの重量 [kg]

$B$  :  $^{137}\text{Cs}$ の分岐比( $\gamma$ 線放出確率) = 0.851

$\varepsilon$  : 検出効率

# 検出効率

検出器は、サンプルから放出された全ての放射線(ガンマ線)を検出することはできない  
⇒全放射線中、検出できる割合を検出効率という

- ・検出器方向へ飛んだγ線だけが入射



- ・一部は試料内部で自己吸収



- ・一部は容器や空気中で減弱

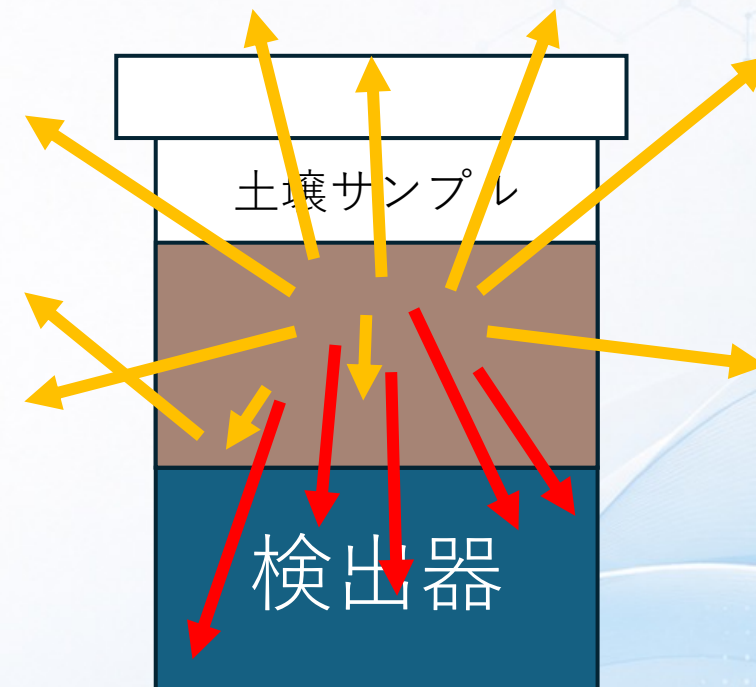


- ・検出器が放射線と相互作用できた場合のみカウントされる

検出効率の測り方

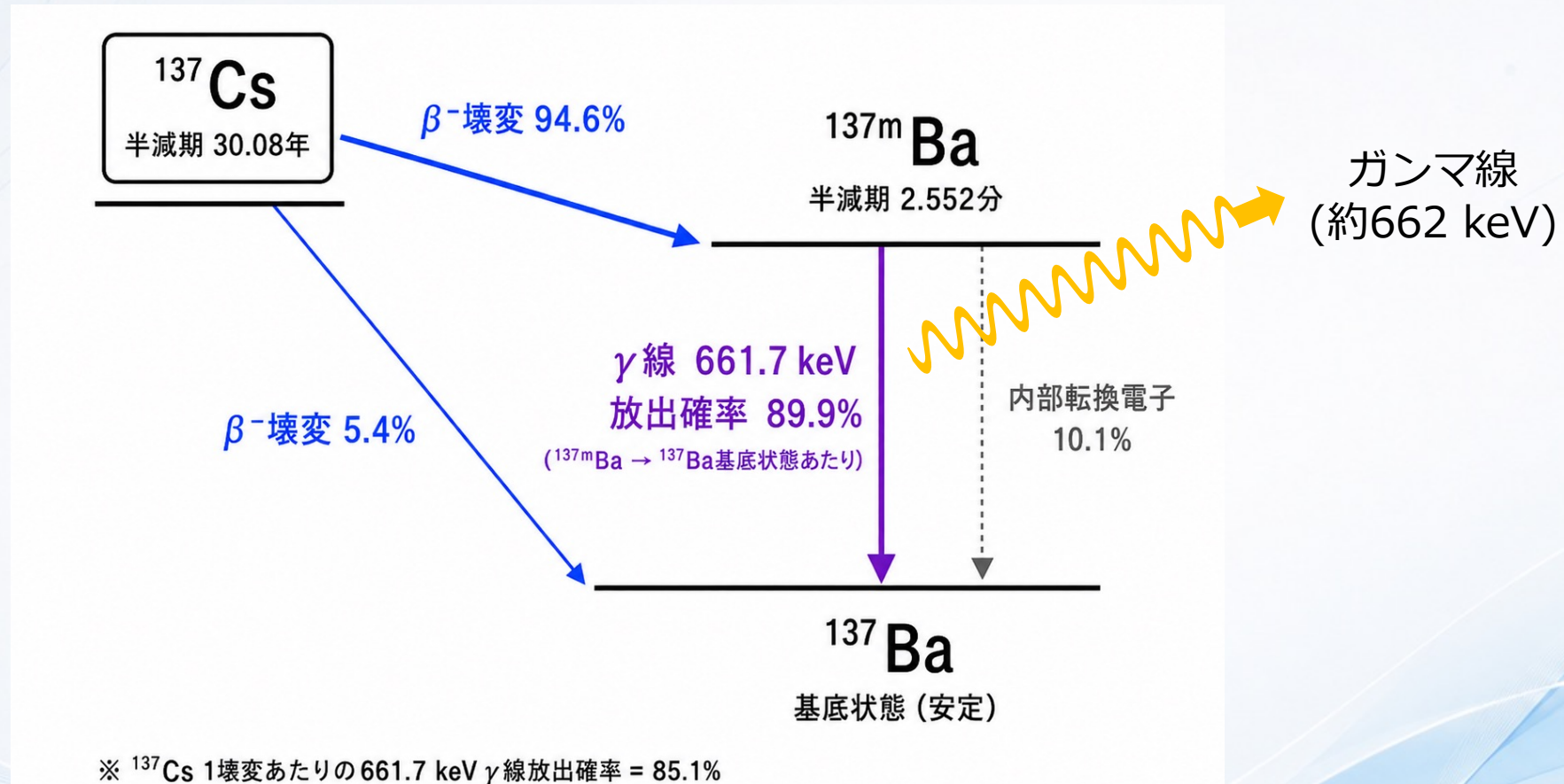
放射能既知の試料で放射能を測定して比率から検出効率を求める

$$\varepsilon = \frac{\text{測定できた放射能}}{\text{既知の放射能}}$$



検出器に入ってきた放射線しか  
検出できない

# 分岐比( $\gamma$ 線放出確率)



$^{137}\text{Cs}$ が一つ壊変する際に $^{137\text{m}}\text{Ba}$ が生じる確率が約94.6%

$^{137\text{m}}\text{Ba}$ が基底状態になる際に約662 keVの $\gamma$ 線が生じる確率が約89.9%

→  $^{137}\text{Cs}$ が一つ壊変する際に約662 keVの $\gamma$ 線が生じる確率は約85.1%

# 放射能濃度の計算(おさらい)

$$\text{放射能濃度 } S [Bq/kg] = \left( \frac{N_{\text{Sample+Background}}}{T_{\text{Sample+Background}}} - \frac{N_{\text{Background}}}{T_{\text{Background}}} \right) \frac{1}{M} \frac{1}{B} \frac{1}{\varepsilon}$$

サンプルから検出器に入ってきた  
放射線(662keVのγ線)の数

補正する係数  
が必要

$S$  : 放射能濃度 [ $Bq/kg$ ]

$N$  : 放射線の計数(カウント)

$T$  : 測定時間 [ $s$ ]

$M$  : サンプルの重量 [ $kg$ ]

$B$  :  $^{137}\text{Cs}$  の分岐比(γ線放出確率) = 0.851

$\varepsilon$  : 検出効率

# 不確かさの計算(統計処理)

同じサンプルでも測定値は一定にならない

放射性崩壊はランダムに起こる。

したがって、同じサンプルを同じ時間測定しても、毎回完全に

同じカウント数にはならない

例：

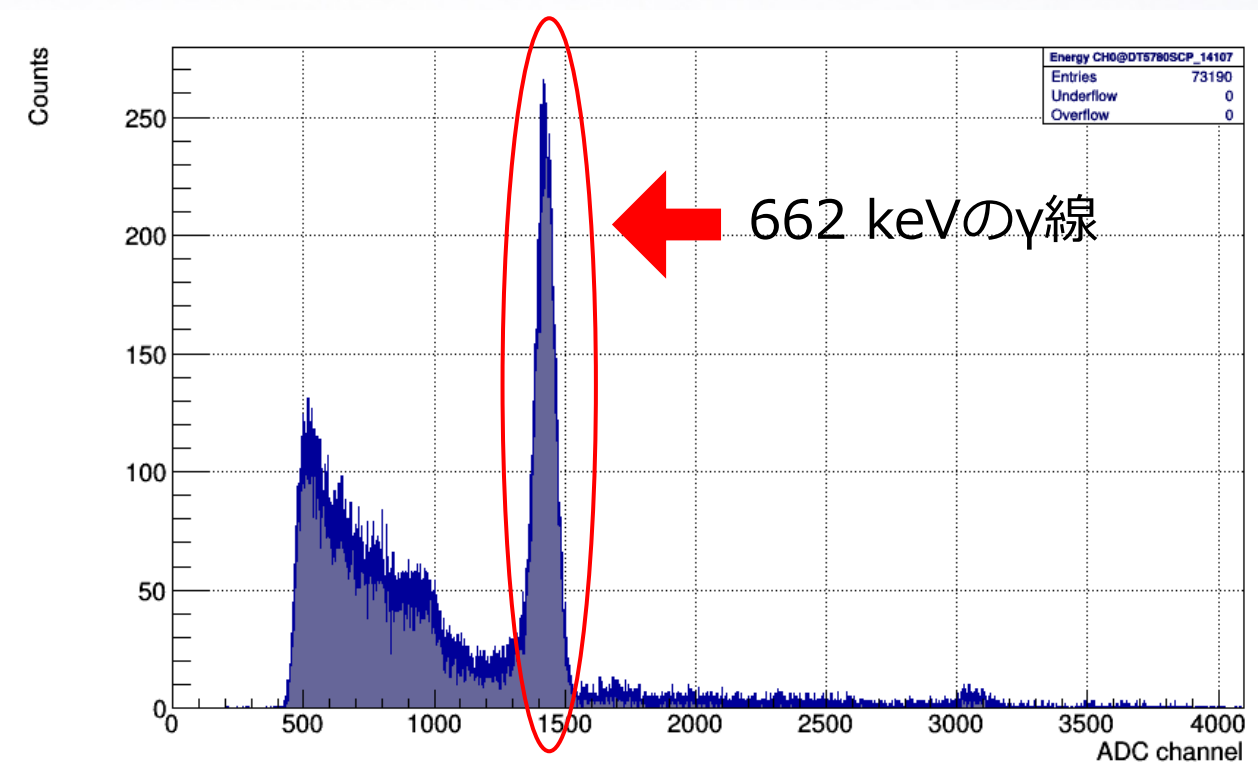
1回目：100カウント

2回目：94カウント

3回目：107カウント

4回目：101カウント

不確かさがどれくらいかを含めて評価する  
必要がある



「不確かさ」の評価って必要？

一般食品中の放射性セシウムの基準値

$100 \text{ Bq/kg}$

$99 \pm 10 \text{ Bq/kg} ?$

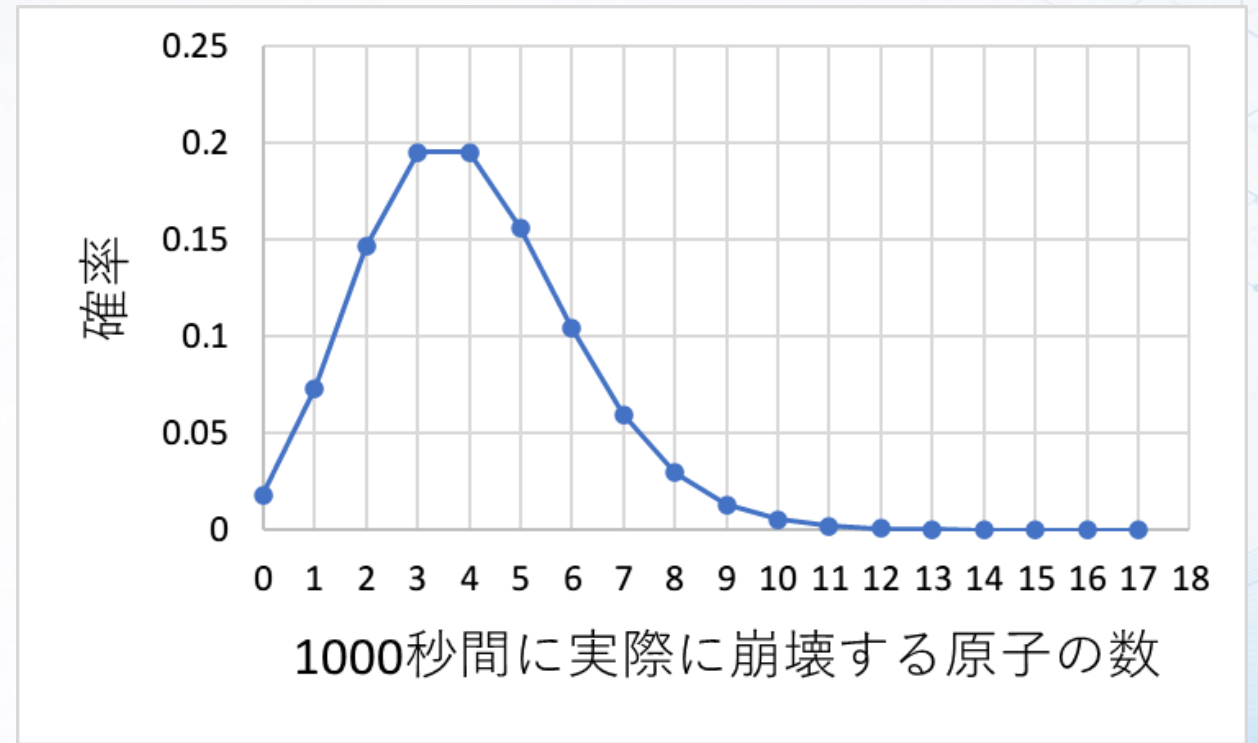
$99 \pm 1 \text{ Bq/kg} ?$

$99.0 \pm 0.1 \text{ Bq/kg} ?$

# 放射線のカウント数の不確かさの計算

1000秒間に平均4回壊変する原子の集団があるとき、実際に1000秒間測って4回壊変する確率はいくつでしょう？

- 3回崩壊：約20%
- 4回崩壊：約20%
- 5回崩壊：約15%



放射線のカウント数の不確かさはポアソン分布に従う

→ポアソン分布に従う場合、

放射線のカウント数の不確かさ =  $\sqrt{\text{カウント数}}$

となることが知られている

# 放射線のカウント数の不確かさの計算

この部分の不確かさ =  $\sqrt{N}$  となる

$$\text{放射能濃度 } S [Bq/kg] = \left( \frac{N_{\text{Sample+Background}}}{T_{\text{Sample+Background}}} - \frac{N_{\text{Background}}}{T_{\text{Background}}} \right) \frac{1}{M} \frac{1}{B} \frac{1}{\varepsilon}$$

$S$  : 放射能濃度 [Bq/kg]

$N$  : 放射線の計数(カウント)

$T$  : 測定時間 [s]

$M$  : サンプルの重量 [kg]

$B$  :  $^{137}\text{Cs}$  の分岐比( $\gamma$ 線放出確率) = 0.851

$\varepsilon$  : 検出効率

# 放射線のカウント数の不確かさの計算

$$\text{放射能濃度の不確かさ } \Delta S [Bq/kg] = \sqrt{\frac{N_{\text{Sample+Background}}}{T_{\text{Sample+Background}}^2} + \frac{N_{\text{Background}}}{T_{\text{Background}}^2} \frac{1}{M} \frac{1}{B} \frac{1}{\varepsilon}}$$

もし測定時間が同じならば、

$$\Delta S = \sqrt{N_{\text{Sample+Background}} + N_{\text{Background}} \frac{1}{T} \frac{1}{M} \frac{1}{B} \frac{1}{\varepsilon}}$$

$\Delta S$  : 放射能濃度の不確かさ [Bq/kg]

$N$  : 放射線の計数(カウント)

$T$  : 測定時間[s]

$M$  : サンプルの重量[kg]

$B$  :  $^{137}\text{Cs}$ の分岐比( $\gamma$ 線放出確率) = 0.851

$\varepsilon$  : 検出効率

最終的に放射能濃度は不確かさを考慮して、

$$S \pm \Delta S [Bq/kg]$$

と表記できる。

# 例題

飯舘村山中の土壌サンプルの放射線計測の測定結果が以下ようになりました。  
サンプル中の $^{137}\text{Cs}$ の放射能濃度を計算してください。

## 測定結果：

サンプル+バックグラウンド由来の $\gamma$ 線(662keV)の計数：62000[カウント]

上記の測定時間：1000[s]

バックグラウンド由来の $\gamma$ 線(662keV)の計数：22000[カウント]

上記の測定時間：1000[s]

(分岐比 $B$ ：0.851、検出効率 $\varepsilon$ ：0.010、サンプルの重量 $M$ ：0.10[kg])

$$S = \left( \frac{N_{\text{Sample+Background}}}{T_{\text{Sample+Background}}} - \frac{N_{\text{Background}}}{T_{\text{Background}}} \right) \frac{1}{M} \frac{1}{B} \frac{1}{\varepsilon}$$

$S$ ：放射能濃度[Bq/kg]

$N$ ：放射線の計数(カウント)

$T$ ：測定時間[s]

$M$ ：サンプルの重量[kg]

$B$ ： $^{137}\text{Cs}$ の分岐比( $\gamma$ 線放出確率) = 0.851

$\varepsilon$ ：検出効率

$$\begin{aligned} \Delta S &= \sqrt{\frac{N_{\text{Sample+Background}}}{T_{\text{Sample+Background}}^2} + \frac{N_{\text{Background}}}{T_{\text{Background}}^2}} \frac{1}{M} \frac{1}{B} \frac{1}{\varepsilon} \\ &= \sqrt{N_{\text{Sample+Background}} + N_{\text{Background}}} \frac{1}{T} \frac{1}{M} \frac{1}{B} \frac{1}{\varepsilon} \end{aligned}$$

$$S \pm \Delta S = 47,000 \pm 340 \text{ [Bq/kg]}$$

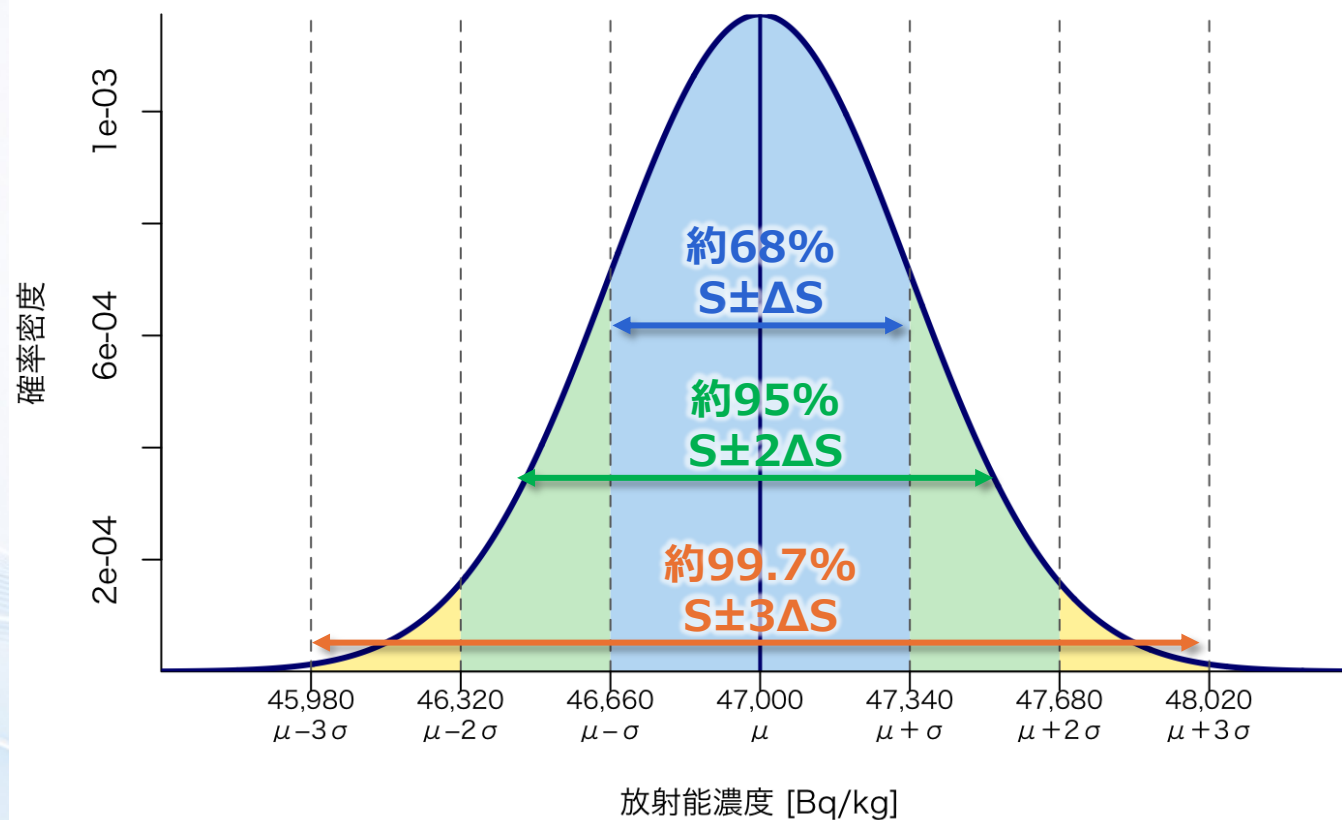
- ・ 不確かさは一体何を意味しているのか
- ・ 何度測定しても結果が100%この間に入るとのこと？

# 不確かさの解釈

$$S \pm \Delta S = 47,000 \pm 340 \text{ [Bq/kg]}$$

何度測定しても結果が100%この間に入るということではない

正規分布と不確かさの範囲



## 【不確かさの意味】

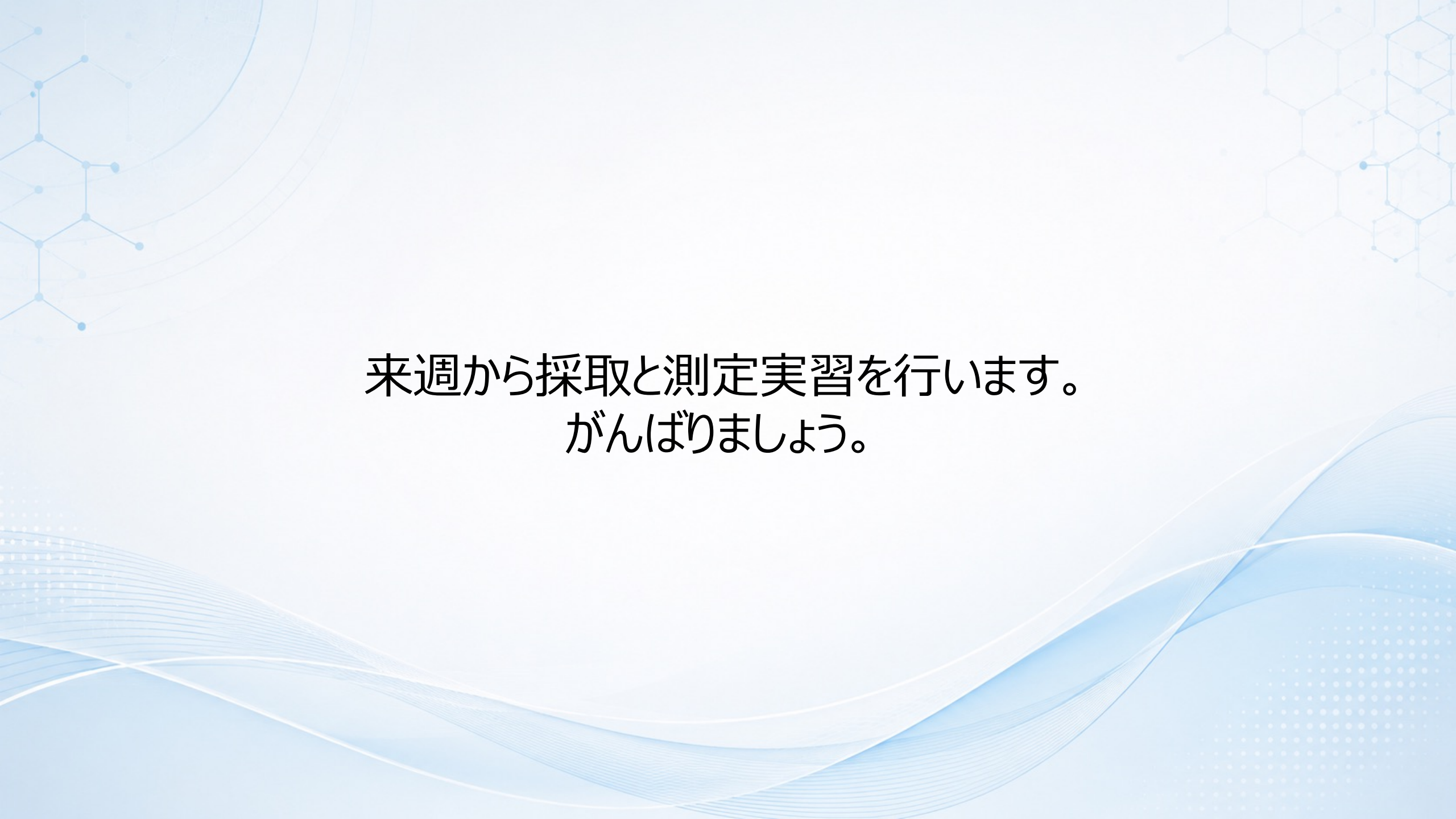
同じ条件で何度も測定を繰り返すと、得られる測定値は中心値のまわりにはばつく。

カウント数が十分多く、正規分布で近似できる場合、測定値の

約68%が  $S \pm \Delta S$ 、

約95%が  $S \pm 2\Delta S$ 、

約99.7%が  $S \pm 3\Delta S$  の範囲に入る。

The background features a light blue gradient with decorative elements. On the left, there are faint molecular structures and circular patterns. On the right, there are more molecular structures and a grid of dots. At the bottom, there are flowing, wavy lines in shades of blue.

来週から採取と測定実習を行います。  
がんばりましょう。