

# 放射能測定

住浜水季（岐阜大学教育学部/大阪大学RCNP）

# 今日の話

放射能を、何で、どうやって測るのか

1. 放射線の性質
2. 放射線の観測方法
3. 放射能の算出方法

実際の放射能測定の結果

# 空間線量率( $\mu\text{Sv}/\text{h}$ )測定

空間を飛び交っている放射線の量

主にガンマ線の  
数→空間線量

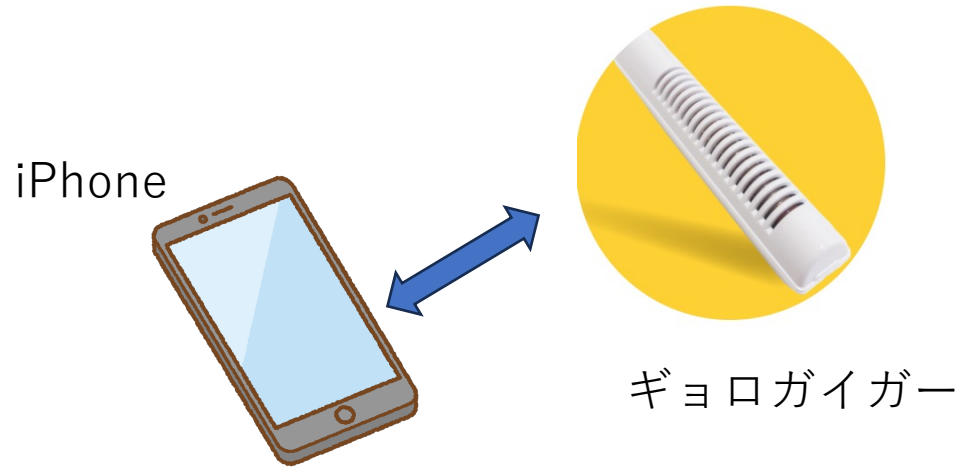


# 空間線量率( $\mu\text{Sv}/\text{h}$ )の測定装置

## 2種類の空間線量計

「ギョロガイガー」

ガイガーカウンター



iPhone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（1班に1台）

「はかるくん」

シンチレーションカウンター（CsI）



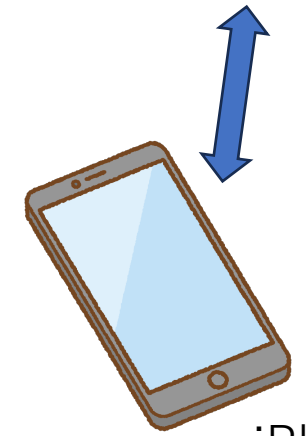
土壌採取の際のデータとして利用（1人1台）

# 双葉松迫地区の空間線量マップ

未除染



ギョロガイガー

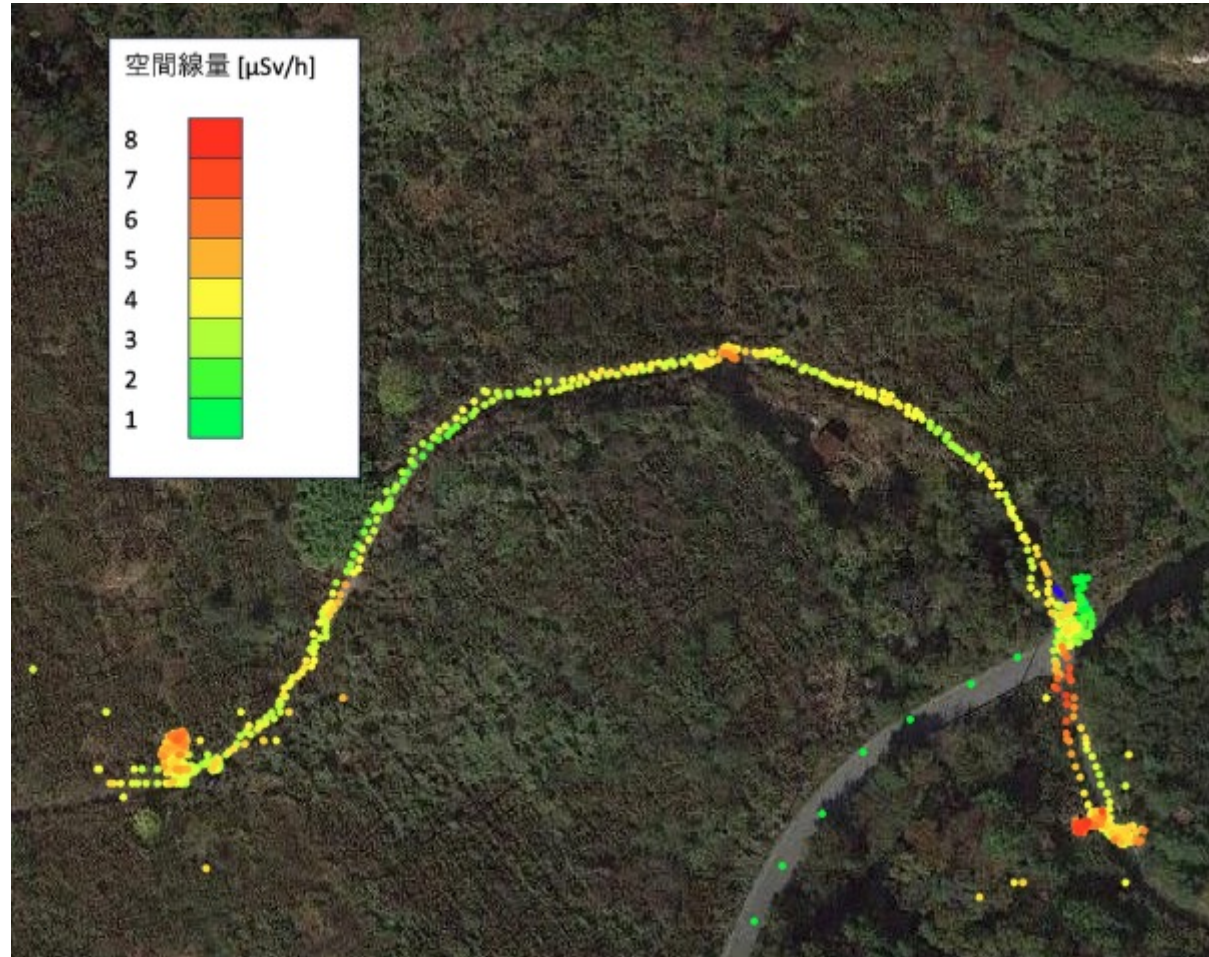


iPhone

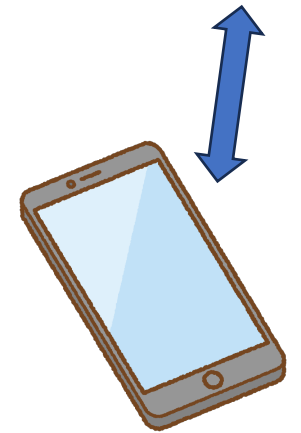
大阪 $\sim 0.04 \mu\text{Sv/h}$   
岐阜 $\sim 0.06 \mu\text{Sv/h}$

# 大熊梨園の空間線量マップ

未除染



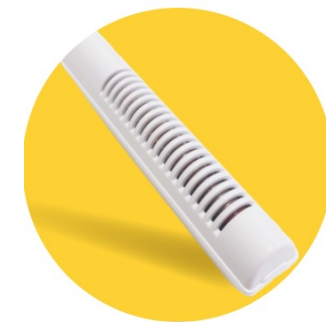
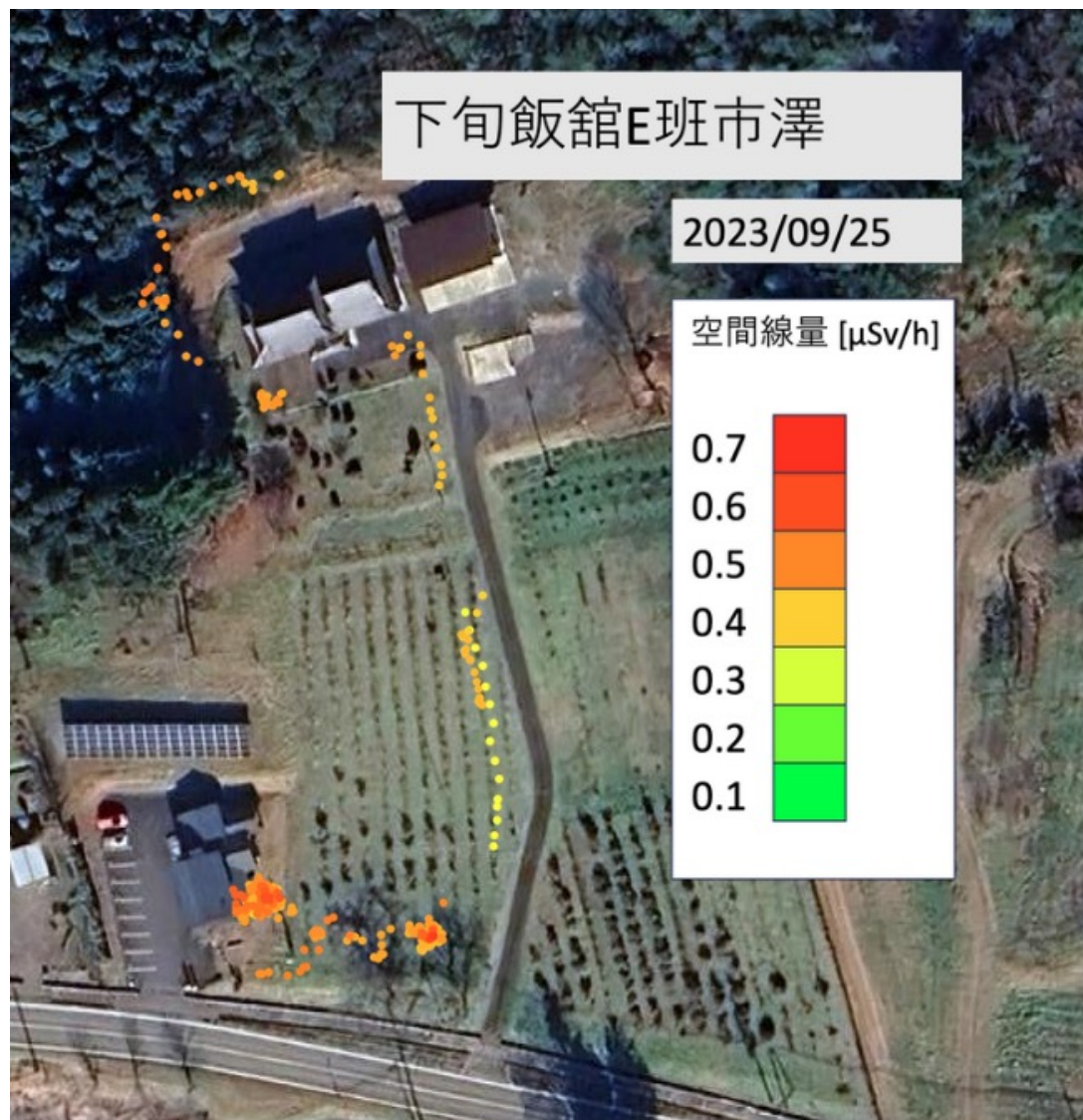
ギョロガイガー



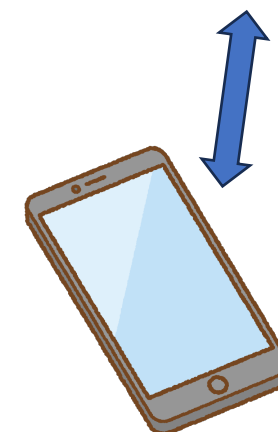
大阪 $\sim 0.04 \mu\text{Sv/h}$   
岐阜 $\sim 0.06 \mu\text{Sv/h}$

# 飯舘市澤畑の空間線量マップ

除染済



ギョロガイガー



大阪 $\sim 0.04 \mu\text{Sv/h}$   
岐阜 $\sim 0.06 \mu\text{Sv/h}$

# 土壌や植物の放射能濃度の測定 —放射線検出器

- 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 ←

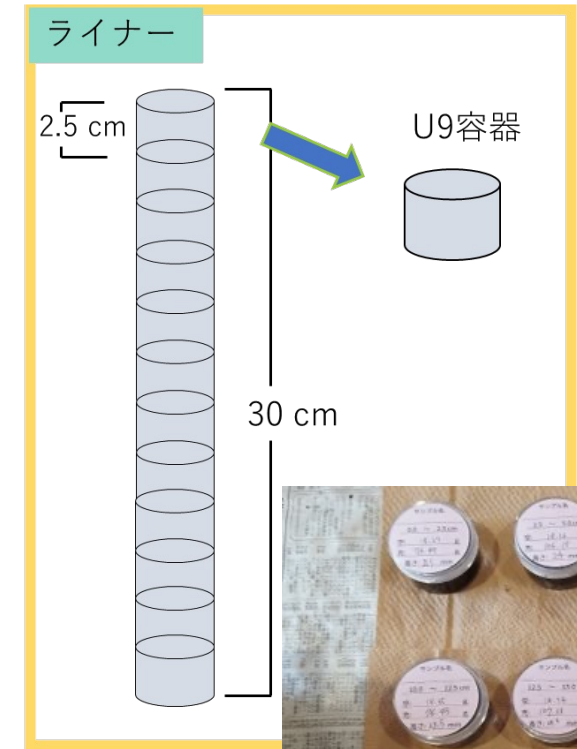
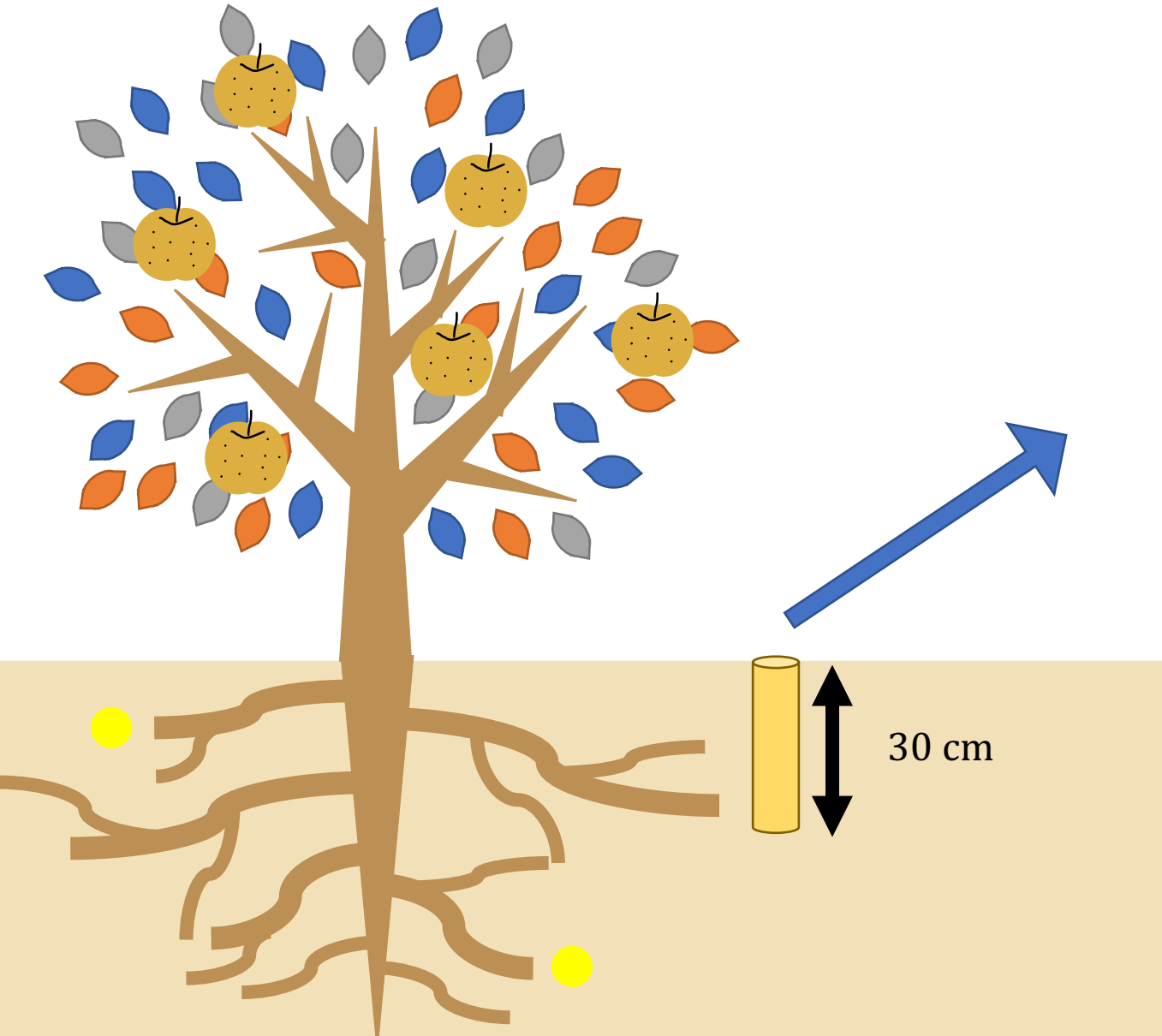
事後実習(発展放射線実習)  
で使用する検出器

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

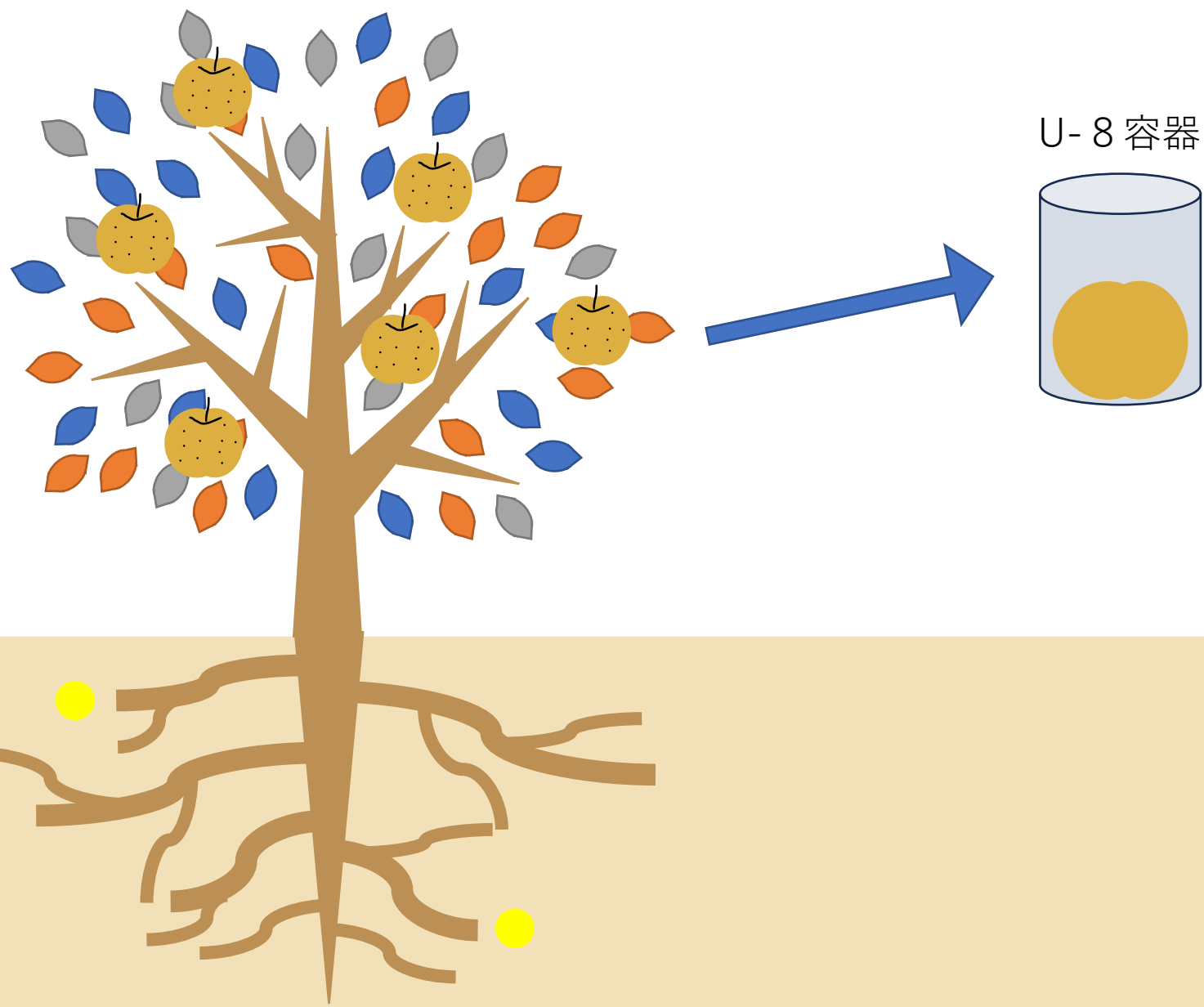


# 梨の木の根元の土壌と梨の放射能濃度



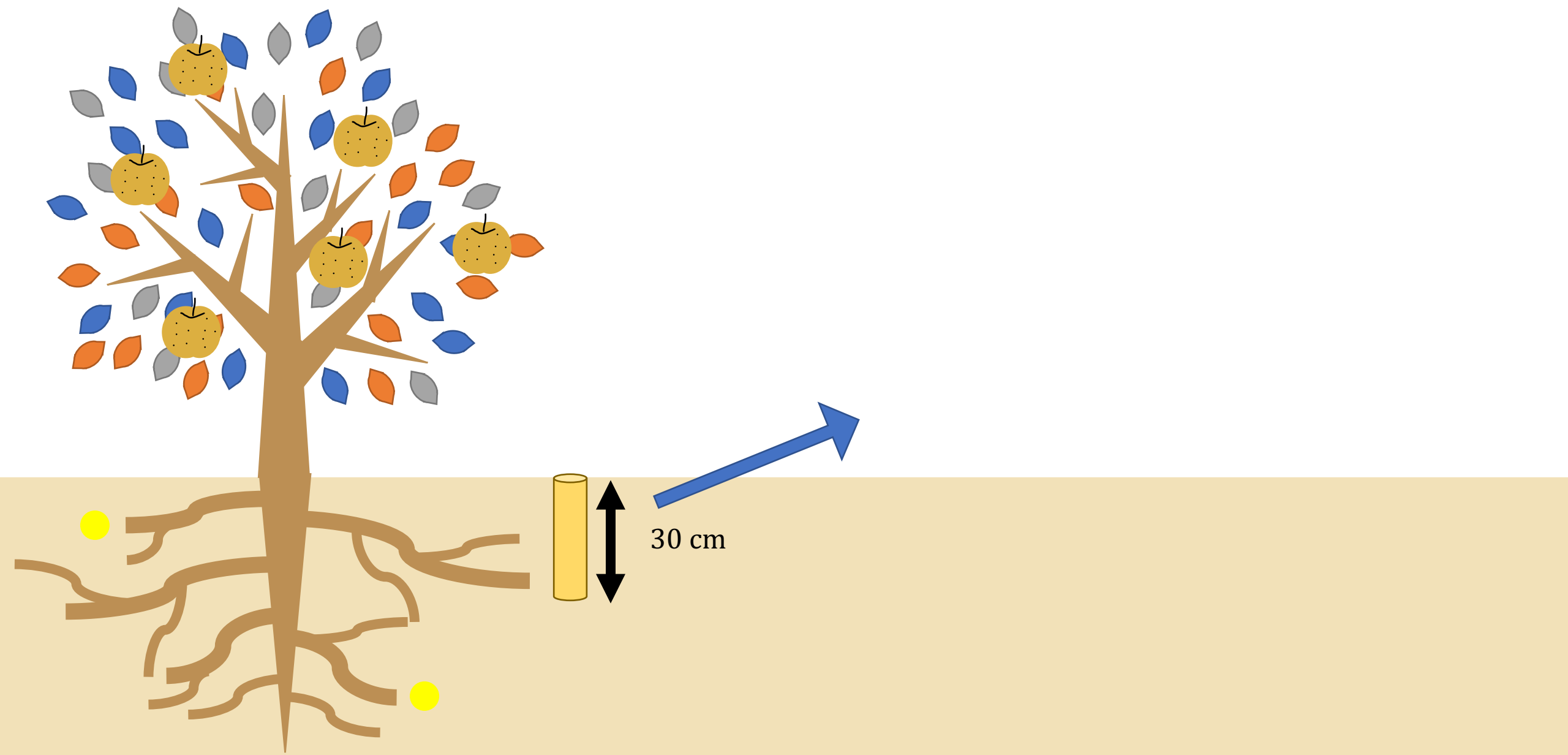
→放射能濃度の測定

# 梨の木の根元の土壌と梨の放射能濃度

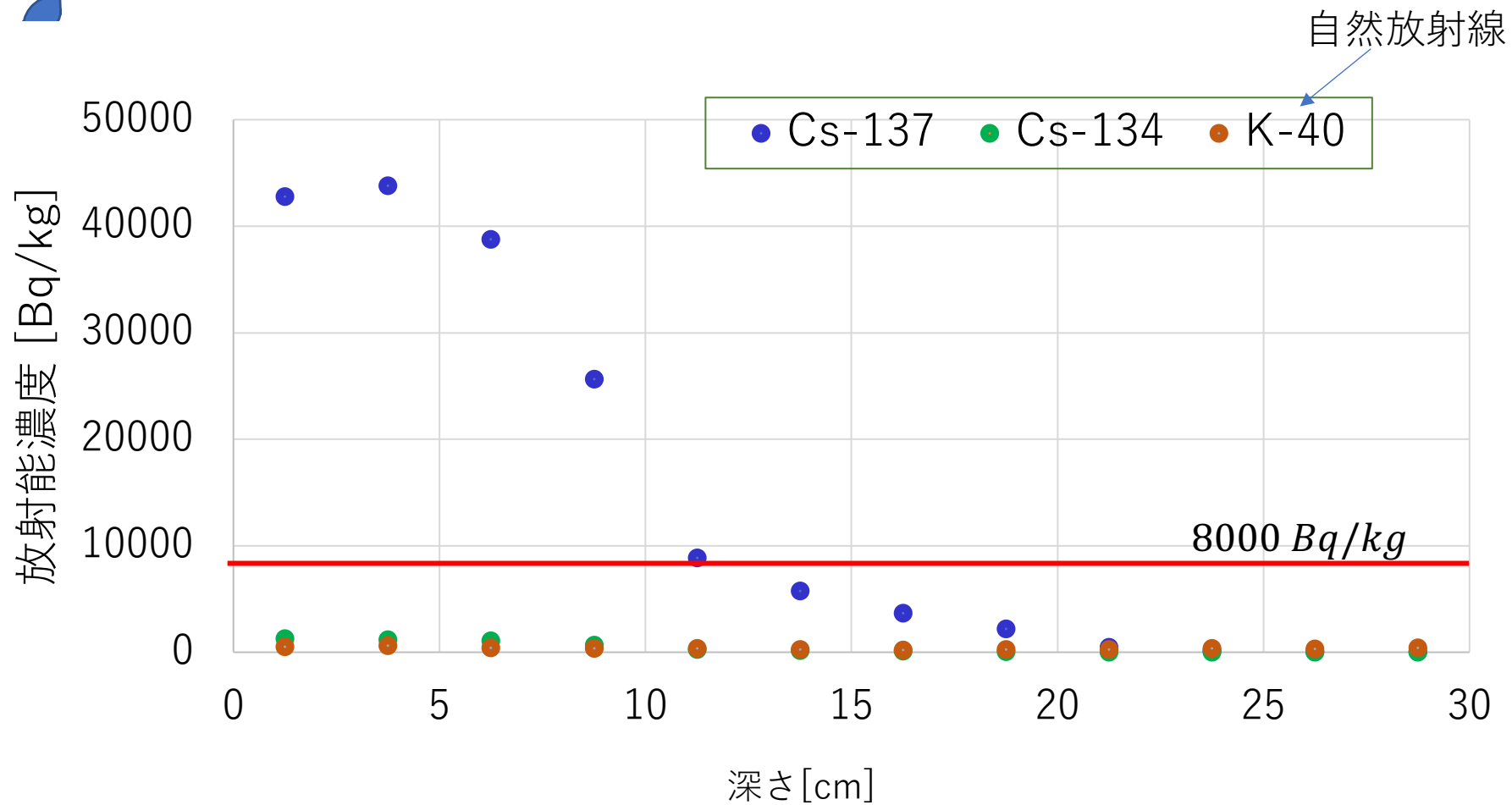


→放射能濃度の測定

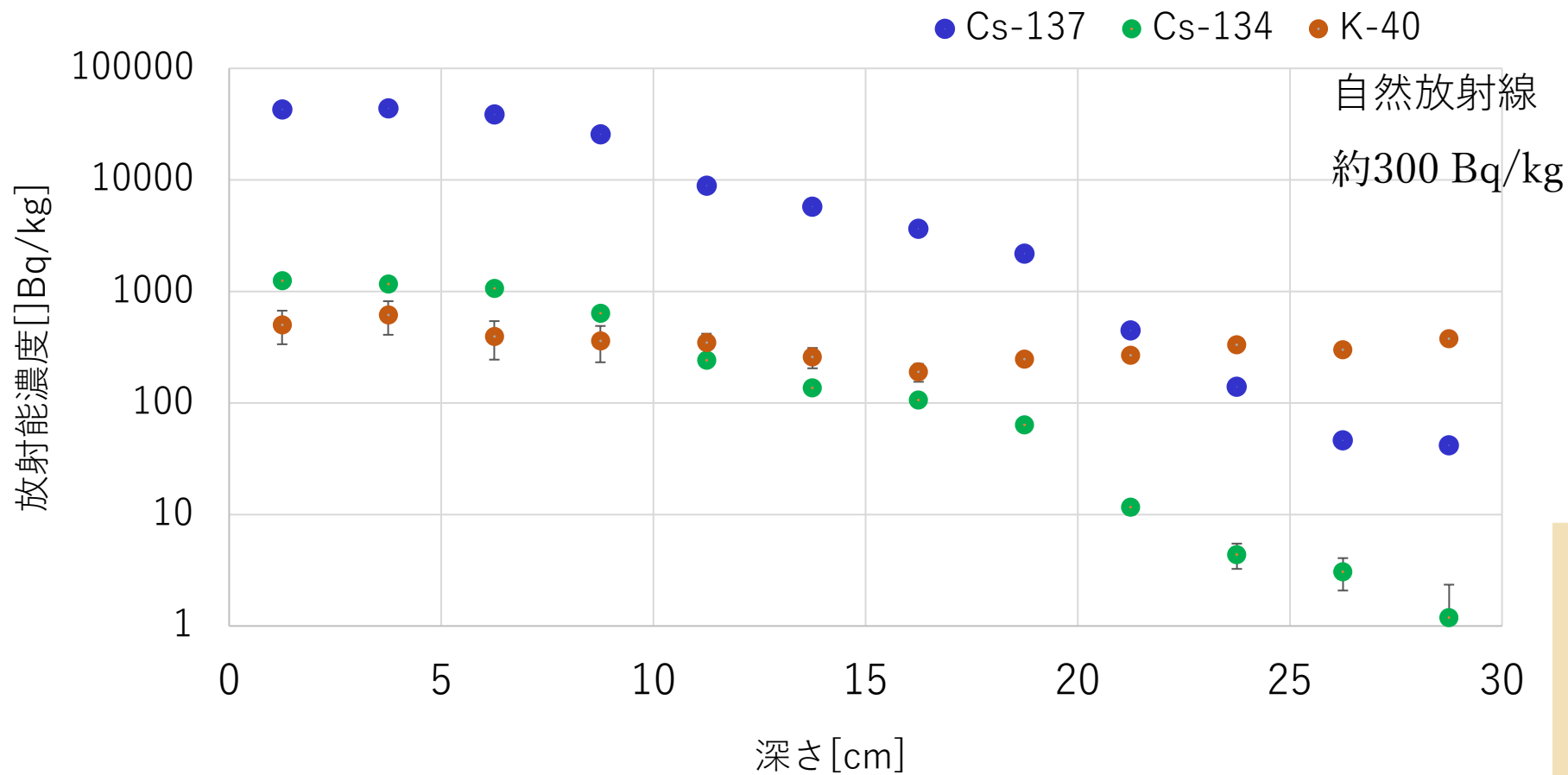
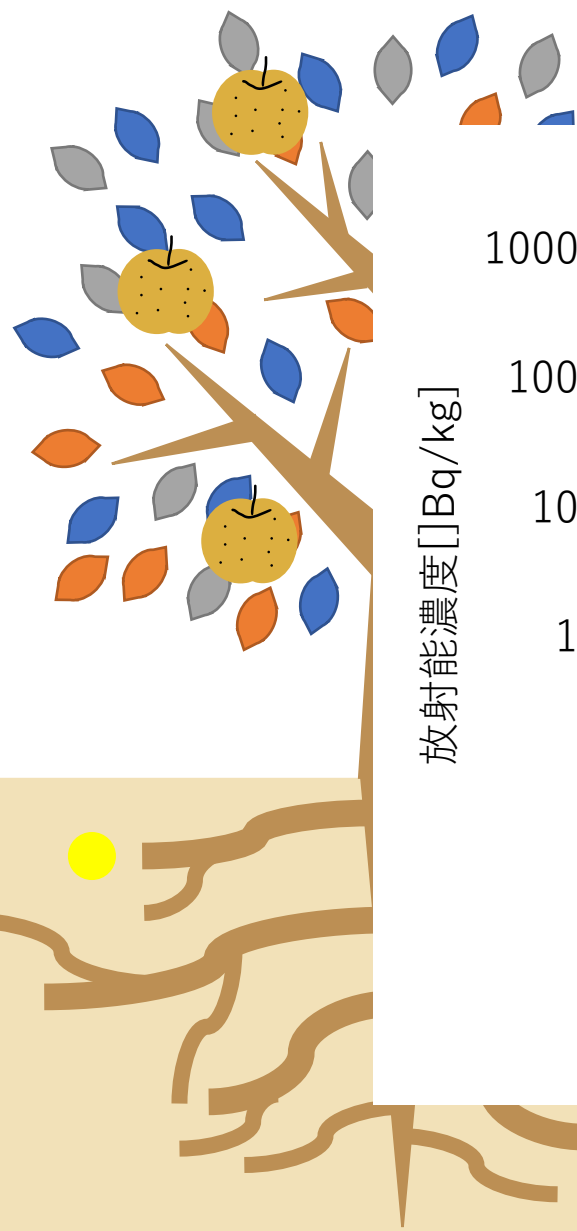
# 梨の木の根元の土壌の放射能濃度



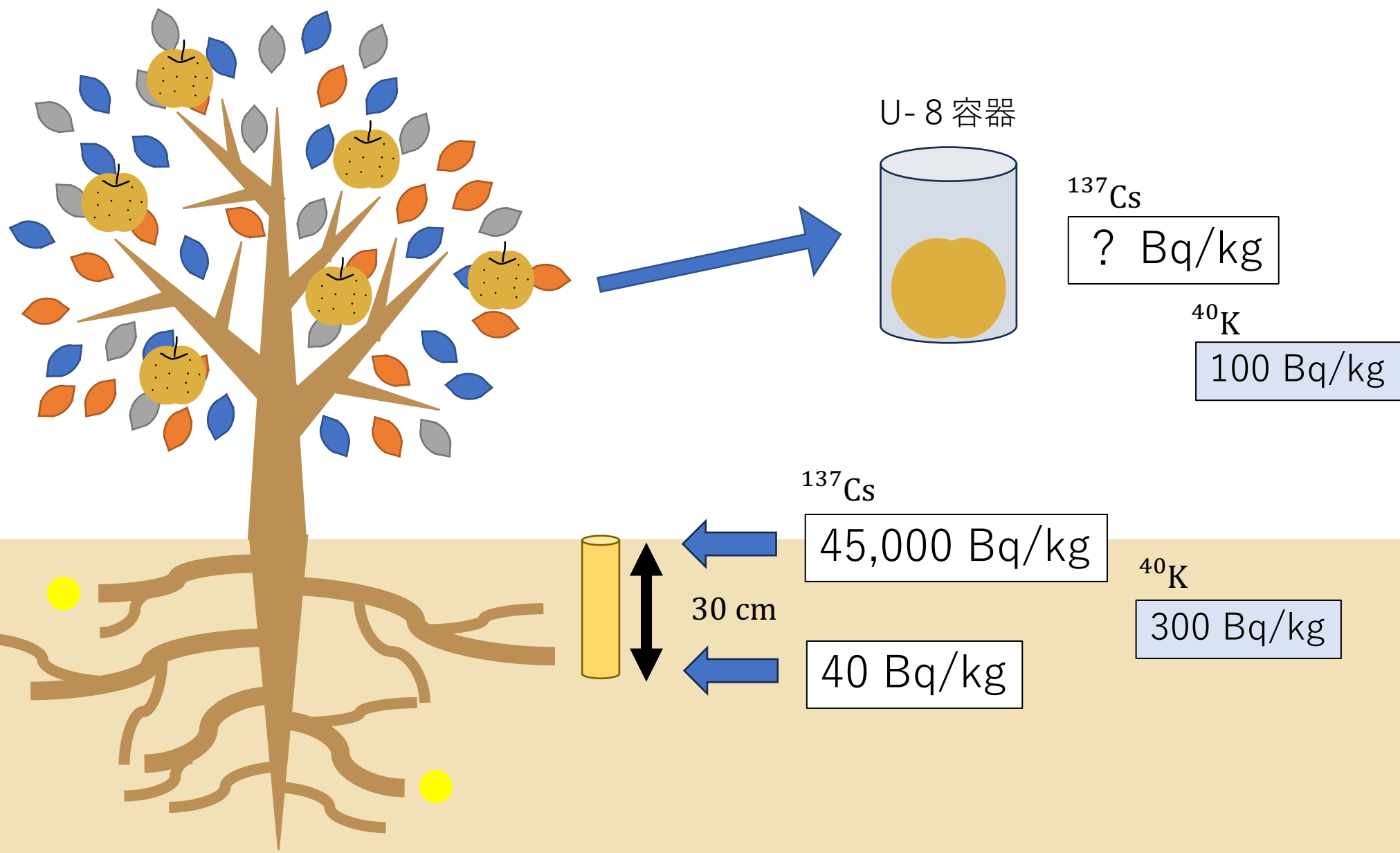
# 梨の木の根元の土壌の放射能濃度



# 梨の木の根元の土壌の放射能濃度



# 梨の木の梨の放射能濃度

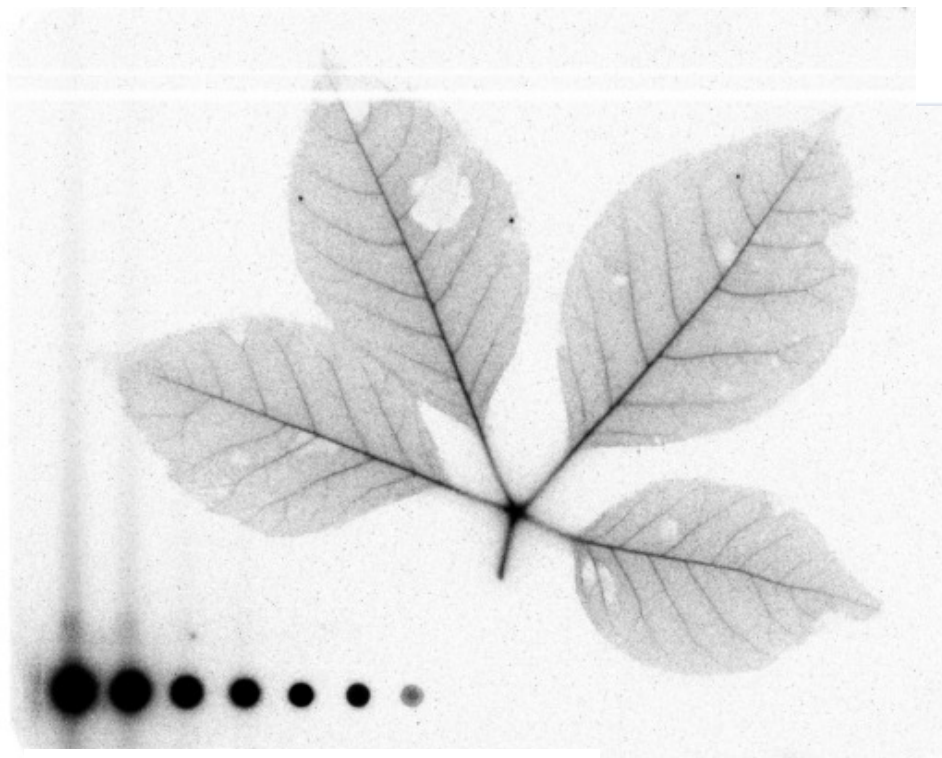


# IP(イメージングプレート)

沼山

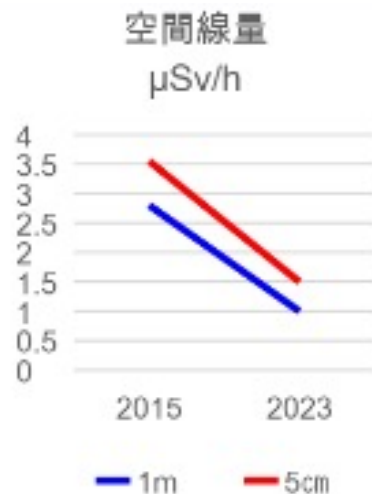
コシアブラ

2015年10月22日

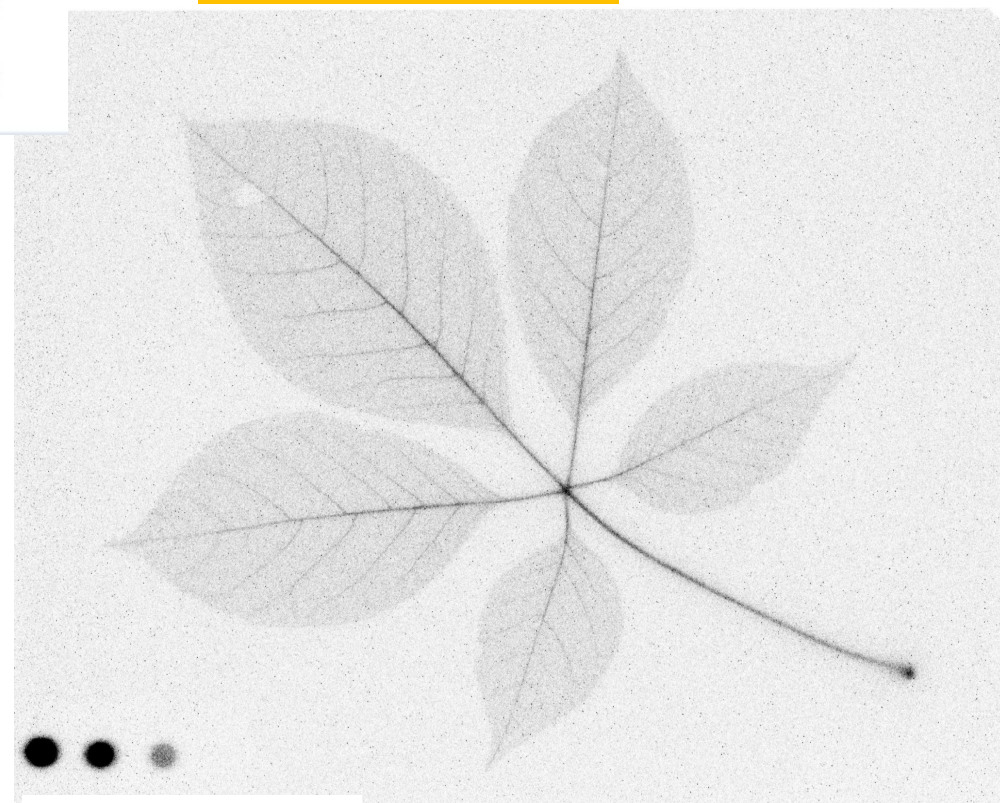


100 50 10 5 1 0.5 0.1 Bq/area

A018 15IKNF 7



2023年6月26日



1 0.5 0.1 Bq/area

B096 23IKN 7

# 測定の実験

- 学生全員が自分で試料を採取し、
- 自分でその試料の放射能測定を行い、
- 自分で放射能濃度 [ $Bq/kg$ ] を求める



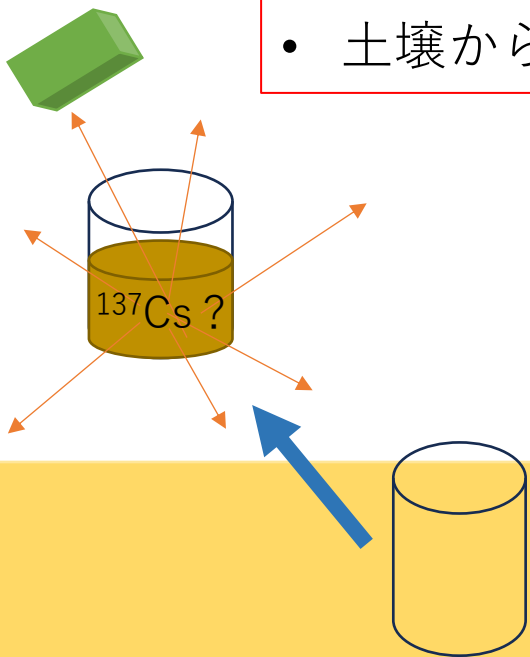
事前実習では、一通り測定をやってみる

土壌や植物の放射能濃度を測る

測るのは $^{137}\text{Cs}$ からの662 keVの $\gamma$ 線

# 土壌や植物の放射能を知りたい

- 土壌中には原発事故由来の $^{137}\text{Cs}$  放射性同位体が入っている
- $^{137}\text{Cs}$ が土壌中にどれだけ入っているか知りたい
- $^{137}\text{Cs}$  は放射性崩壊の際に  $\gamma$  線（放射線）を放出する
- 土壌から放出される  $\gamma$  線を数えて  $^{137}\text{Cs}$ の含有量（放射能）を測る



# エネルギーの単位

電気素量 ( $1e$ ) をもつ荷電粒子  
が  $1V$  の電位差で得るエネルギー

**662 keV** のガンマ線・・・??

$eV$  (電子ボルト) はエネルギーの単位

エネルギーの単位

$1 J$     ジュール

$= 0.239 cal$

$= 1 N \cdot m$

$= 1 C \cdot V$

$= 1 W \cdot s$

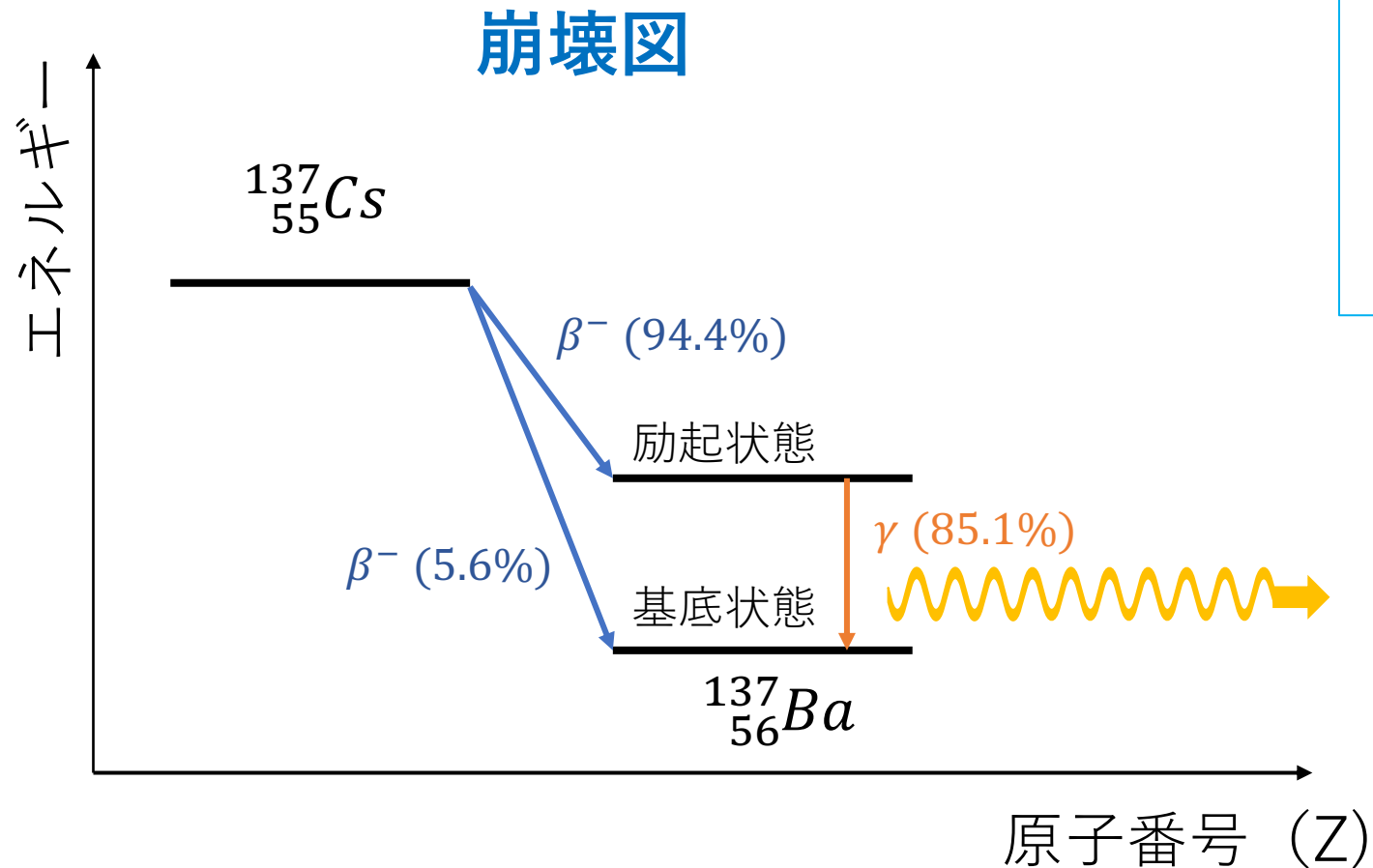
$= \frac{1}{1.6 \times 10^{-19}} eV = 6.24 \times 10^{18} eV$

$1 eV$   
 $= 1.6 \times 10^{-19} J$

$662 keV = 662,000 eV = 1.06 \times 10^{-13} J$  ← このエネルギーを測る

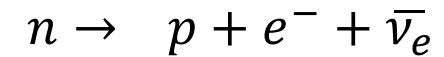
$1 g$  の水を  $1^\circ C$  上げるのに必要なエネルギーは  $4.2 J = 1 cal$

# $^{137}\text{Cs}$ 放射性同位体



$^{137}_{55}\text{Cs}$

$\rightarrow$   $^{137}_{56}\text{Ba}$  (励起状態)  $\beta^-$  崩壊



$\rightarrow$   $^{137}_{56}\text{Ba}$  (基底状態)  $\gamma$  崩壊

**662 keV  $\gamma$ 線**

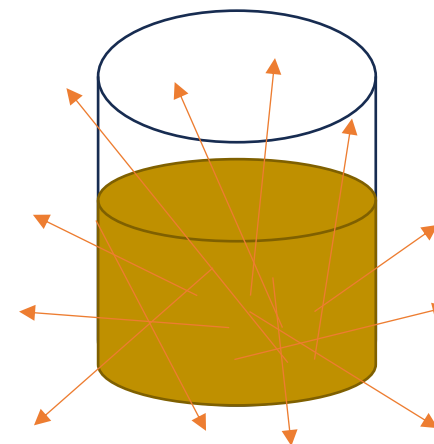
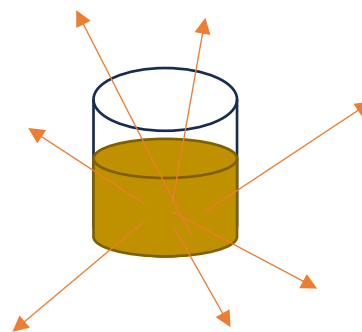
$^{137}\text{Cs}$  固有のエネルギー

# $^{137}\text{Cs}$ の量を測りたい

- 土壌中の $^{137}\text{Cs}$  から放出される $662\text{ keV}$ の $\gamma$ 線（放射線）を数える
- $662\text{ keV}$ の $\gamma$ 線の個数から、土壌中の $^{137}\text{Cs}$ の量を求める  
→ **放射能濃度**

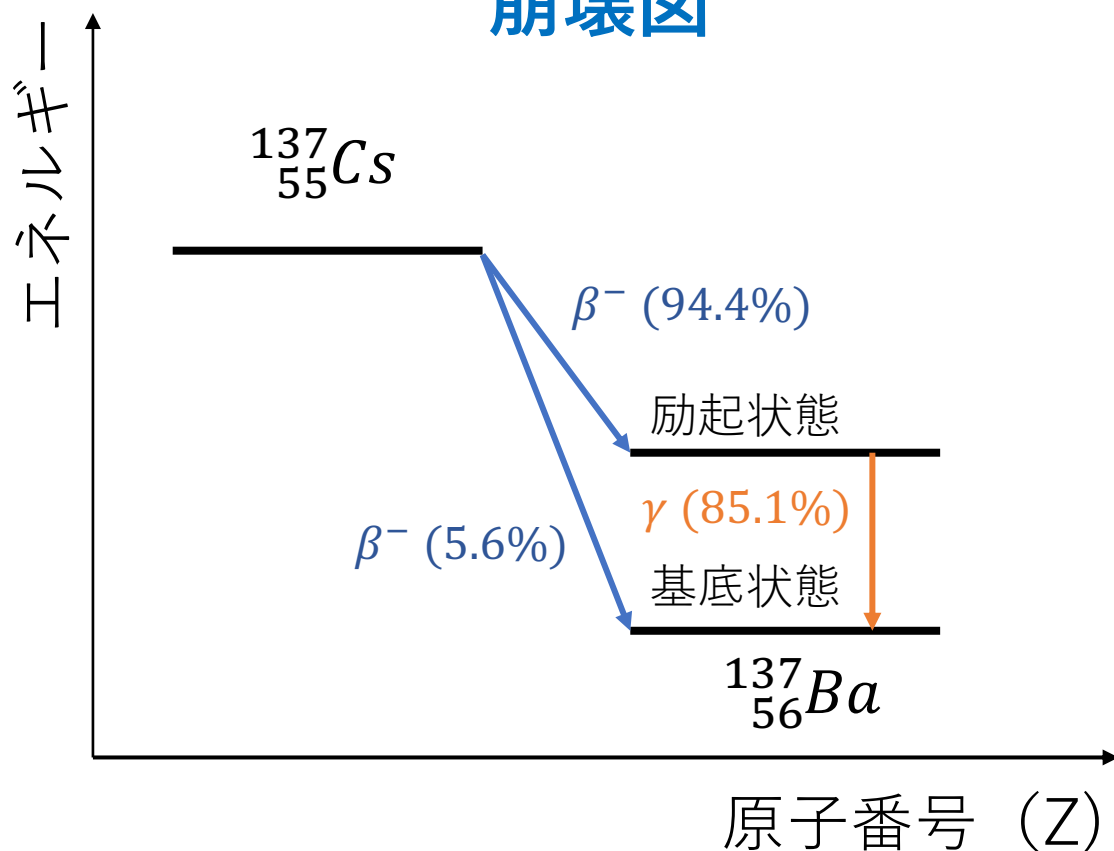
放射能[Bq]とは

- Bq(ベクレル)：1秒間に放射性崩壊する原子の個数
- 放射能濃度[Bq/kg]：土壌1 kg当たりの放射能 (Bq)



# 分岐比

## 崩壊図



放射能  $Bq$ (ベクレル)は、

1秒間に放射性崩壊する原子の個数であり、

$\gamma$  線（放射線）の数ではない！

$^{137}\text{Cs}$ の場合は崩壊する $^{137}\text{Cs}$ のうち85.1%が

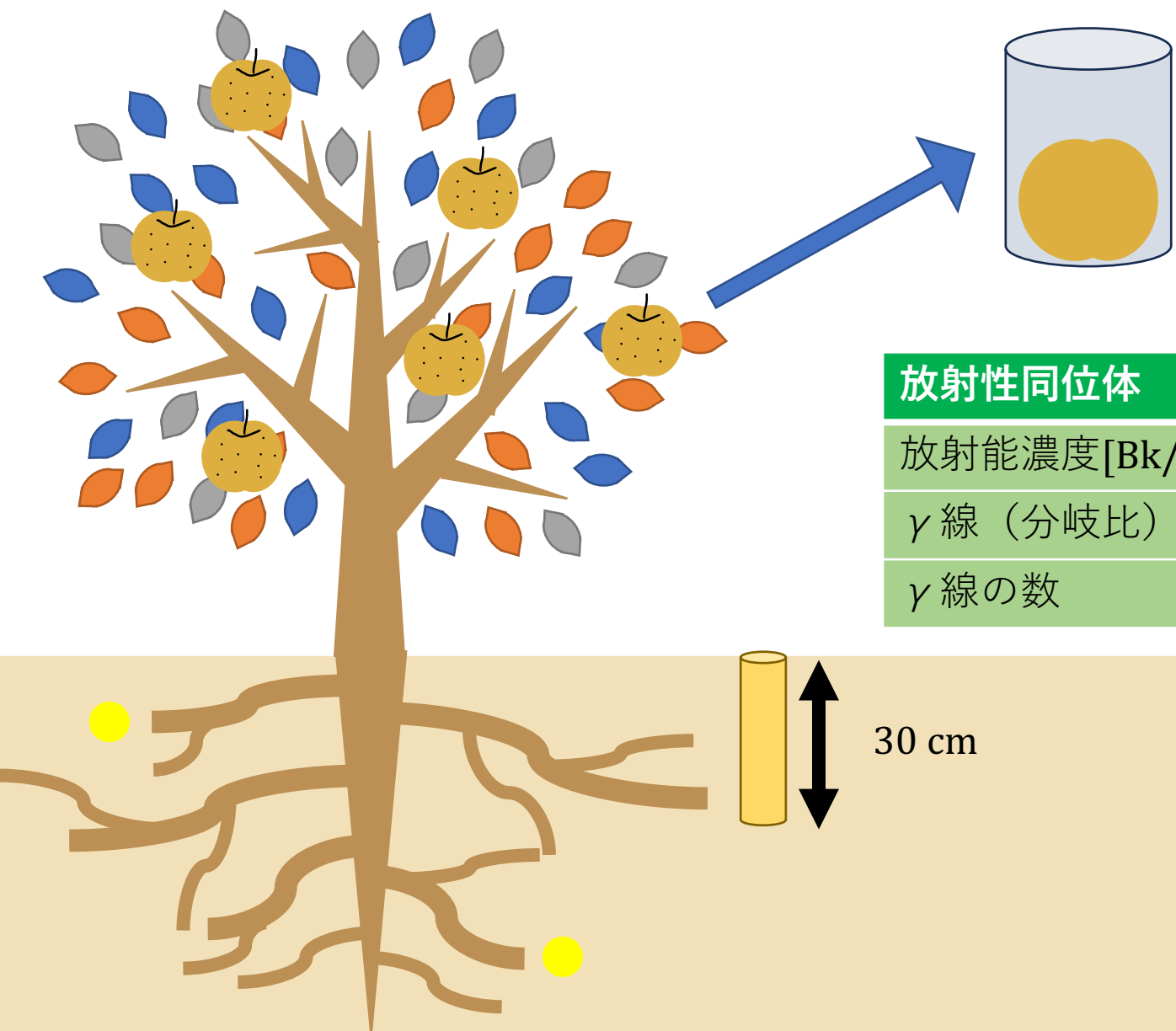
**662 keVの  $\gamma$  線を放出する。**

- $^{137}\text{Cs}$ の94.4%は $^{137}\text{Ba}$ の励起状態へ
- $^{137}\text{Ba}$ の励起状態の90.1%が662 keVの  $\gamma$  線を放出して $^{137}\text{Ba}$ の基底状態へ

“1秒間に放射性崩壊する $^{137}\text{Cs}$ の個数” $\times 0.851$

= “662 keVの  $\gamma$  線の数”

# 梨の木の梨の放射能濃度



| 放射性同位体           | $^{137}\text{Cs}$ (原発由来) | $^{40}\text{K}$ (自然放射線)   |
|------------------|--------------------------|---------------------------|
| 放射能濃度[Bk/kg]     | $29.4 \pm 2.0$           | $101.0 \pm 15.1$          |
| $\gamma$ 線 (分岐比) | $662\text{ keV}$ (85.1%) | $1461\text{ keV}$ (10.7%) |
| $\gamma$ 線の数     | ->?                      | ->?                       |

# $\gamma$ 線（放射線）を検出したい

放射能  
[Bq]

←  $\gamma$  線を数える

←  $\gamma$  線の検出（観測）

どうやって？

放射線を“見る”ためには、放射線のことを知る必要がある  
→放射線的作用について

# 放射線とは？

# 放射線とは？

電離能力のある粒子線または光子線

# 放射線とは？

電離能力のある粒子線または光子線

電離、励起？

# 電離・励起

高校の化学基礎の教科書より

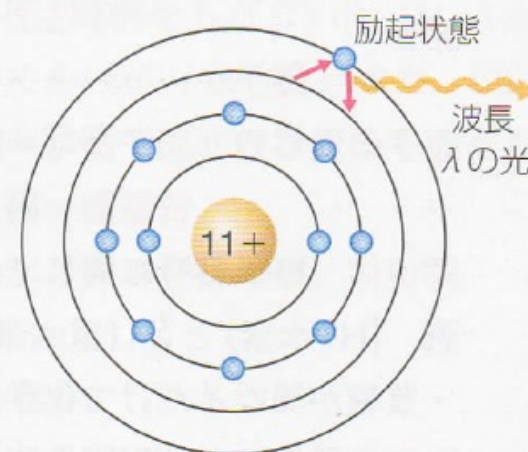
「物質がイオンに分かれることを電離といい、・・・」

- 共有結合
- イオン化
- イオン化傾向
- 電子配置
- K殻、L殻、M殻

## 炎色反応の起こるしくみ

なぜ、炎色反応は起こるのか？

金属塩を白金などの細線につけて炎の中に入れて強熱すると、生じた金属原子中の最外殻にある電子が、熱エネルギーを得て、より高いエネルギーの軌道に移される。エネルギーの低い状態から高い状態へ移させることを励起<sup>れいき</sup>といい、エネルギーの高い状態を励起状態という。励起状態は安定ではないので、励起された電子は再びもとのエネルギーの低い状態に戻る（この状態を基底<sup>きてい</sup>状態という）。このときに放出されるエネルギーが光として放たれる。エネルギー差 $\Delta E$ と放たれる光の波長 $\lambda$ <sup>ラムダ</sup>の間には、



▲ Na原子の発する光

<sup>ラムダ</sup>28

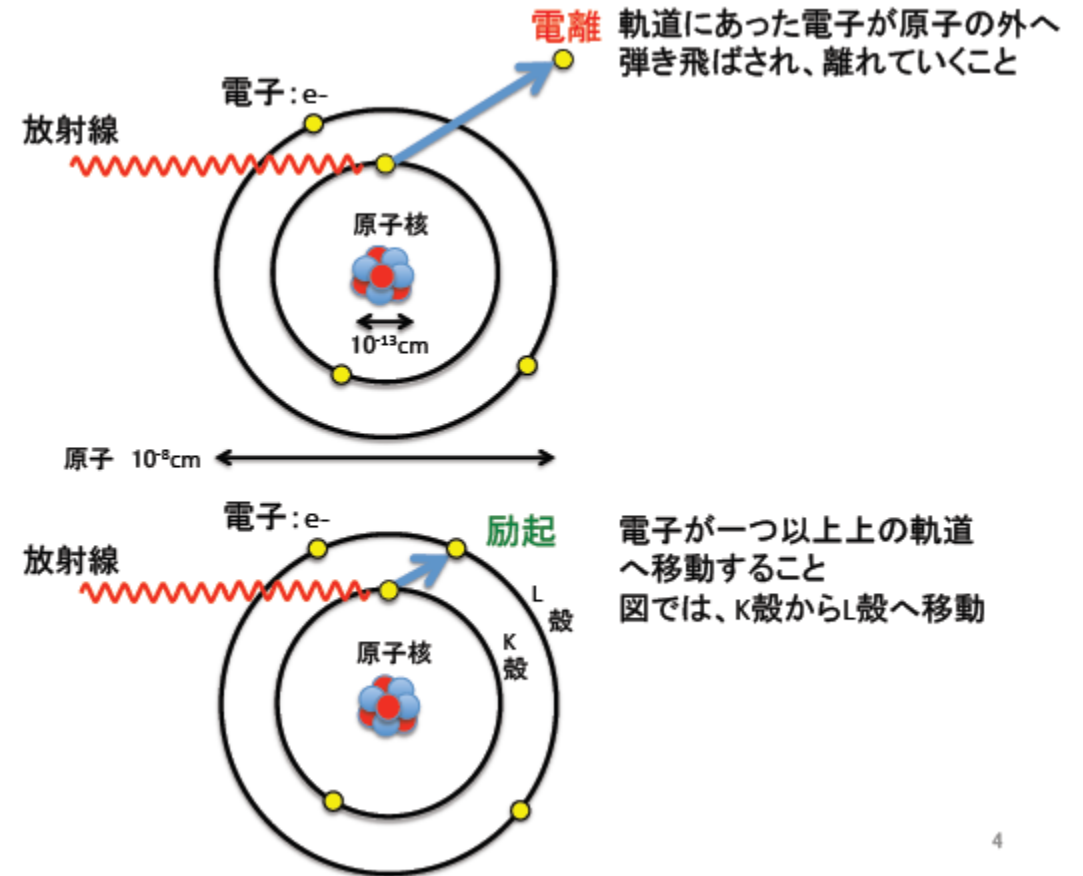
# 放射線の作用

## －粒子と物質の相互作用

### 電離・励起

放射線が  
“原子にエネルギーを与える”  
ことで電離・励起が起こる。

電離＝イオン化  
共有結合が切れる  
電子が原子から離れる現象



# 放射線の作用

## －粒子と物質の相互作用

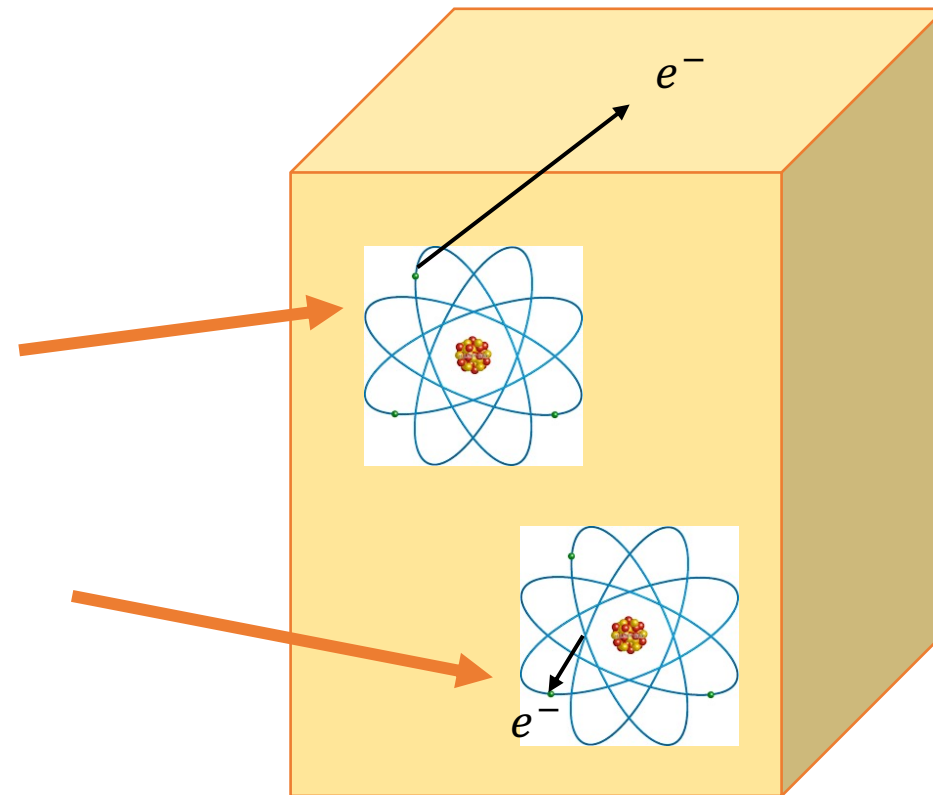
放射線が  
“原子にエネルギーを与える”  
ことで電離・励起が起こる。

電離＝イオン化  
共有結合が切れる  
電子が原子から離れる現象  
励起＝電子が上の軌道に移る



この作用を利用して放射線を見る

電離・励起



# 放射線を“見る”装置－検出器

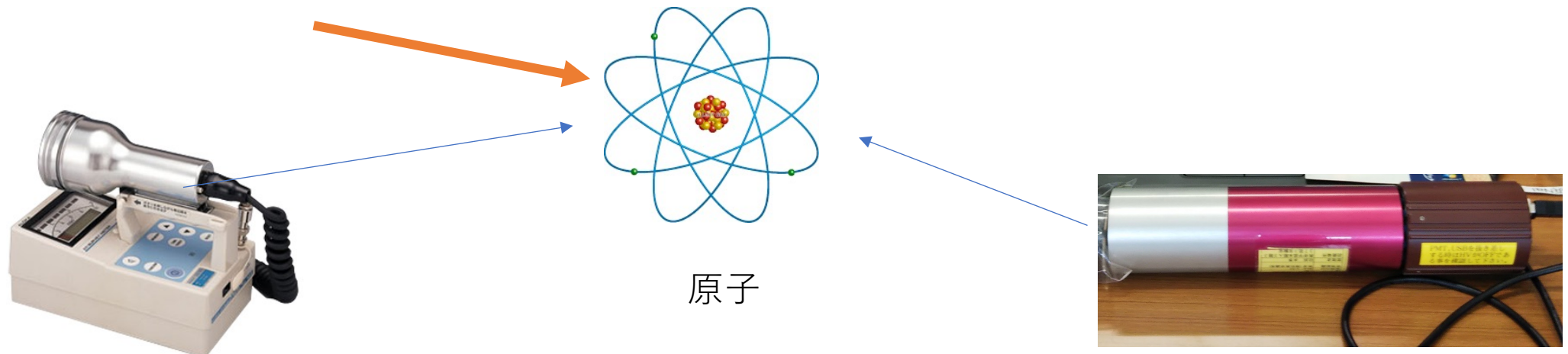
放射線が作用する相手は“原子”

放射線が原子にエネルギーを与える

そのエネルギーを利用して放射線を【見る】

原子の電子がエネルギーを受け取り電離・励起する。

その電離・励起による作用を電気信号に変換して【見る】



# どうやって放射線を“見る”のか －粒子検出器



- 肉眼では見られない小さな粒子を“見る”ための“顕微鏡”
- 原理：

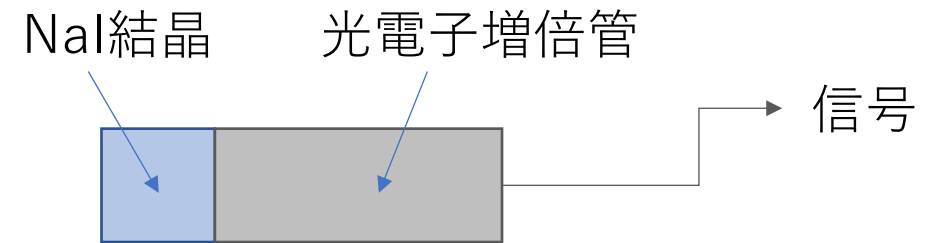
放射線が通ったことを電気信号で知らせる

- ① 放射線と物質（何らかの原子）との相互作用を利用している
- ① 放射線が物質に入射すると、相互作用が起きて、放射線が物質にエネルギーを与える
- ① 放射線からエネルギーを受けとった物質は何らかの変化をする
- ① 変化（エネルギー）を電気信号に変換して“見る”

NaI検出器は？

# NaI検出器

- NaI(ヨウ化ナトリウム) 結晶に光電子増倍管を取り付けたもの

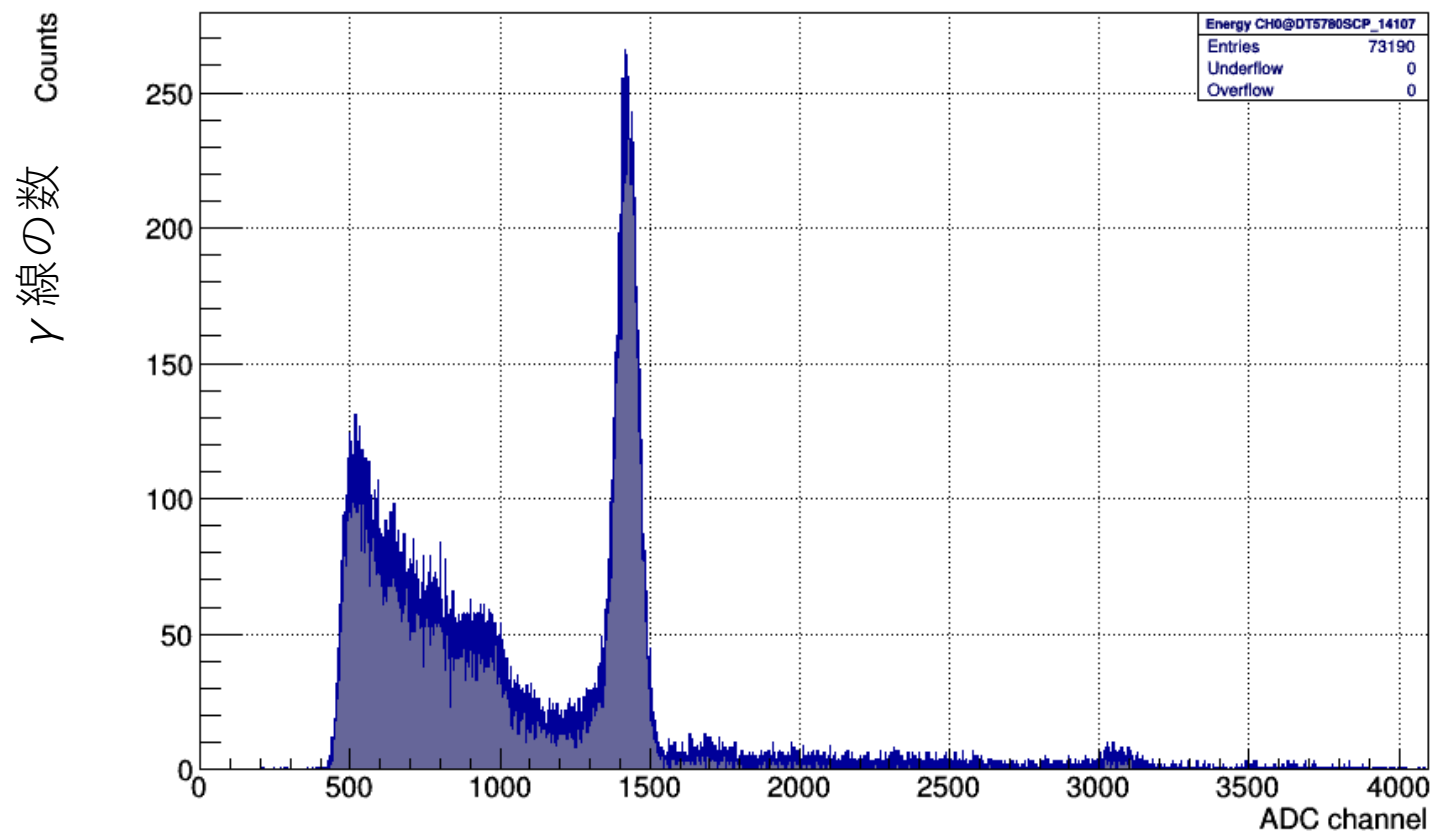


- ① NaI結晶が放射線からエネルギーを受け取り発光する  
“シンチレーション光”
- ② NaI結晶で発光した光を光電子増倍管で電気信号に変換
- ③ 電気信号の大きさを調べて、662 keVの $\gamma$ 線を“見る”

# エネルギースペクトル

度数分布 (ヒストグラム)

大熊町 未除染土壌

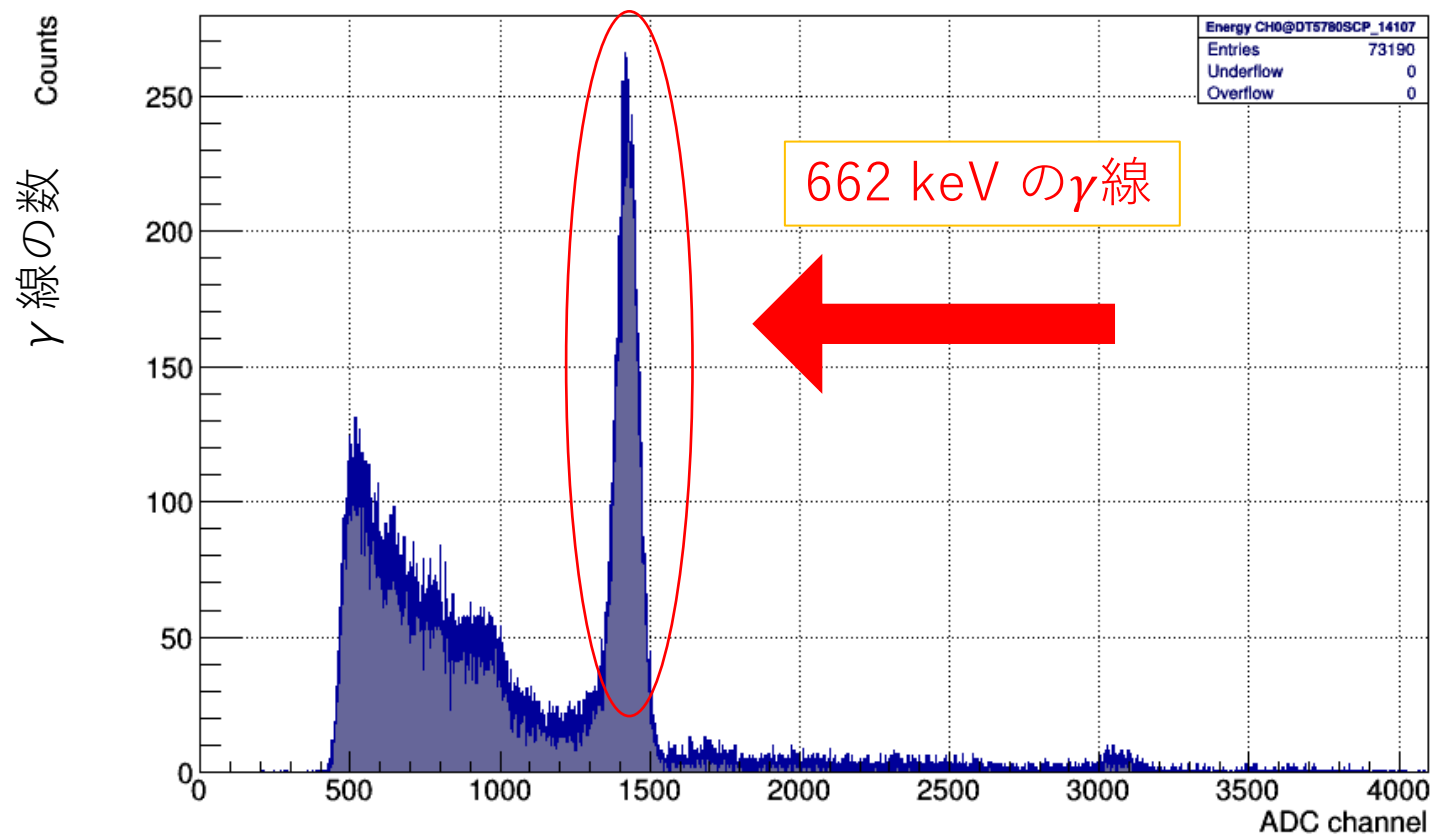


電気信号の大きさ

# エネルギースペクトル

度数分布 (ヒストグラム)

大熊町 未除染土壌

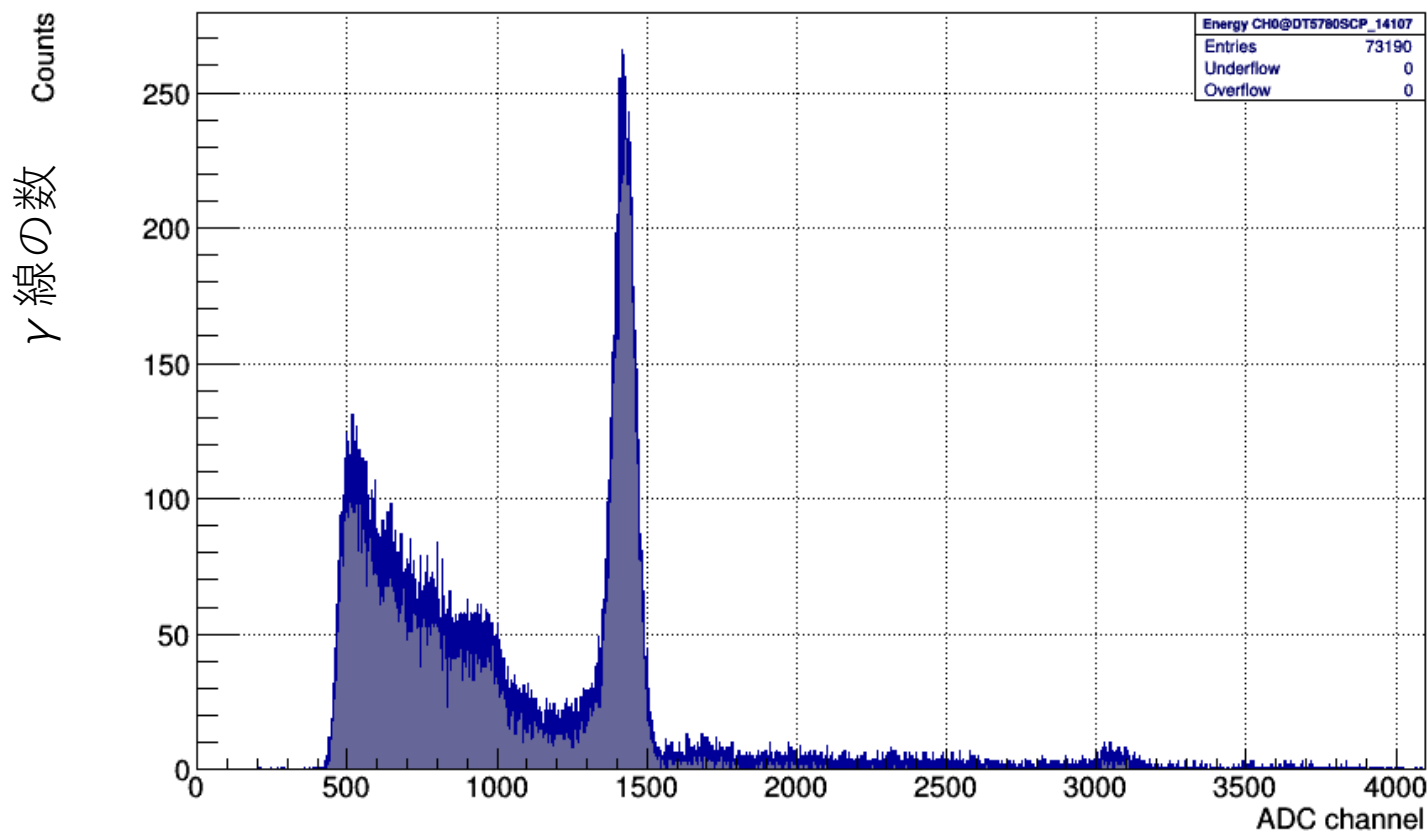


電気信号の大きさ

662 keV のピーク中の数を数えて、Bq/kgにすればいいんだけど・・・

# エネルギー較正（キャリブレーション）

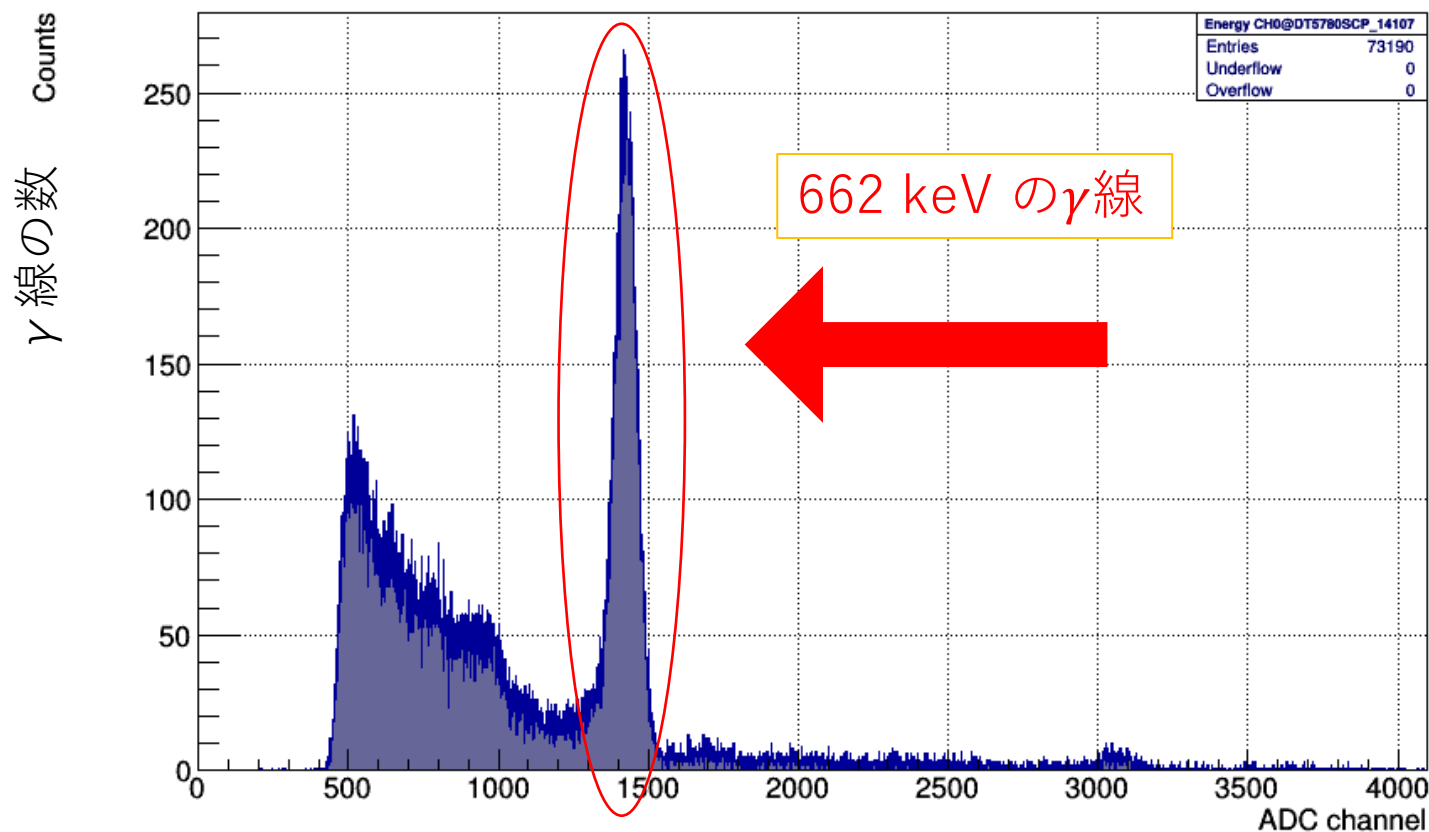
横軸の値(電気信号の大きさ)⇒エネルギーへ変換



電気信号の大きさ→ $\gamma$ 線がNaI結晶に落としたエネルギー

# バックグラウンド（環境放射線）

ピークの中には  
土壌サンプルからの662 keVの $\gamma$ 線と環境放射線が混じっている



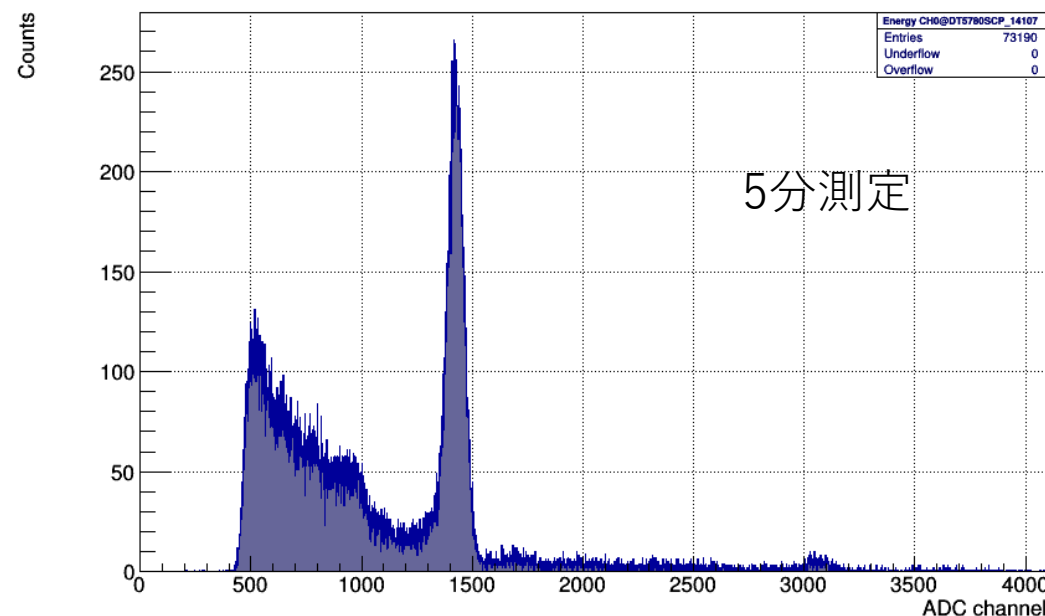
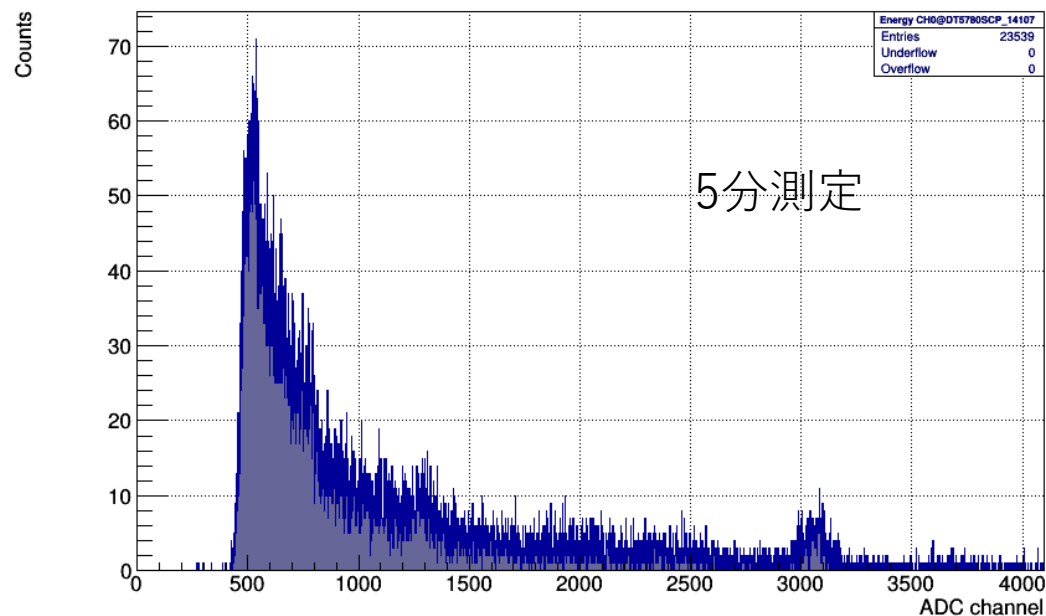
電気信号の大きさ

# バックグラウンド（環境放射線）の差し引き

サンプルなし（環境放射線）

サンプルあり（大熊町 未除染土壤）

計数



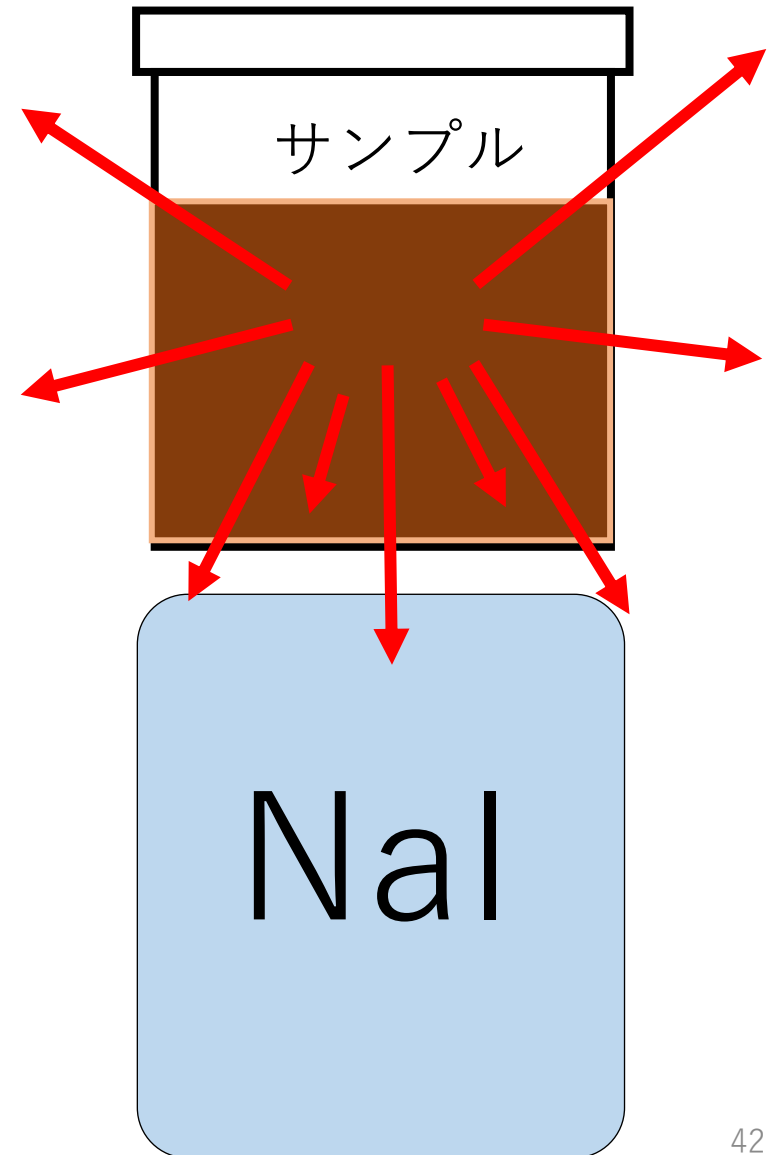
ピーク中の環境放射線を差し引いて  
土壌サンプルからの662 keV の  $\gamma$  線の数数える

# 検出効率の考慮

- 試料から放出された  $\gamma$  線すべてを検出できるわけではない
  - 試料の大きさ・形・位置の幾何学的要因
  - 試料内での吸収（遮蔽効果）
  - 検出器固有の検出効率
  - ガンマ線のエネルギーにも依存する
- 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  $\epsilon = \frac{\text{測定できた放射能}}{\text{既知の放射能}}$



# 放射能濃度を算出するために必要なこと

662 keV のピークの数数を数えて、Bq/kgにすればいいんだけど・・・

- ① エネルギー校正  
(横軸の値(電気信号の大きさ)⇒エネルギーへ変換)
  - ② バックグラウンド (環境放射線) の差し引き  
(試料以外からもガンマ線は飛んできている)
  - ③ 検出効率の算出  
(試料からのガンマ線すべてを検出できるわけではない)
- **Bq/kg** (放射能濃度) の計算  
(試料の質量・測定時間を考慮して)

一般食品中の放射性セシウムの基準値

$100 \text{ Bq/kg}$

$99 \text{ Bq/kg}$

$101 \text{ Bq/kg}$

一般食品中の放射性セシウムの基準値  
 $100 \text{ Bq/kg}$

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

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

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

誤差って必要？

# 一般食品中の放射性セシウムの基準値

$100 \text{ Bq/kg}$



$99 \text{ Bq/kg}$

$101 \text{ Bq/kg}$



# 統計誤差

662 keV の  $\gamma$  線の数 を数えて、放射能濃度を算出する  
 $\gamma$  線の数 には統計誤差が付く

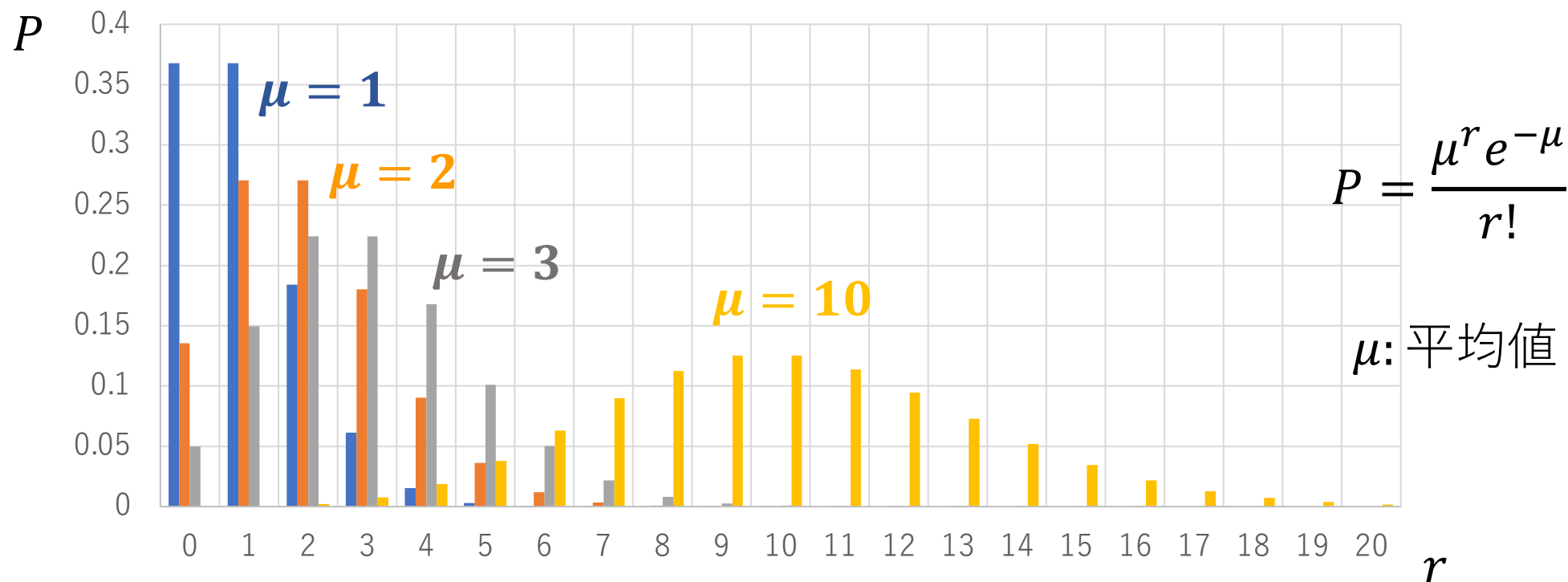
- 放射性物質が 1 秒間に崩壊する数の確率はポアソン分布に従う
- 測定で得られたガンマ線の数  $N$  の統計誤差は  $\sqrt{N}$  である。
- バックグラウンドや検出効率にもこの統計誤差があり、すべての誤差を考慮して、サンプルの放射能濃度の誤差を求めるべきであるが、この実習では、サンプルの  $\gamma$  線の数 の統計誤差のみを考慮することとする。

誤差は必要!

# ポアソン分布

事象が起きる確率が非常に小さく、試行回数が多い時の確率分布

例) 放射性物質（中の沢山の同位体）が1秒間に崩壊する数の確率はこの分布に従う  
平均値 $\mu$ の分散（誤差）は $\sqrt{\mu}$ である。



測ってみよう！

# Backup

# 検出器の性能比較

- NaI検出器（無機シンチレーション検出器）
- Ge検出器（半導体検出器）

# エネルギー分解能

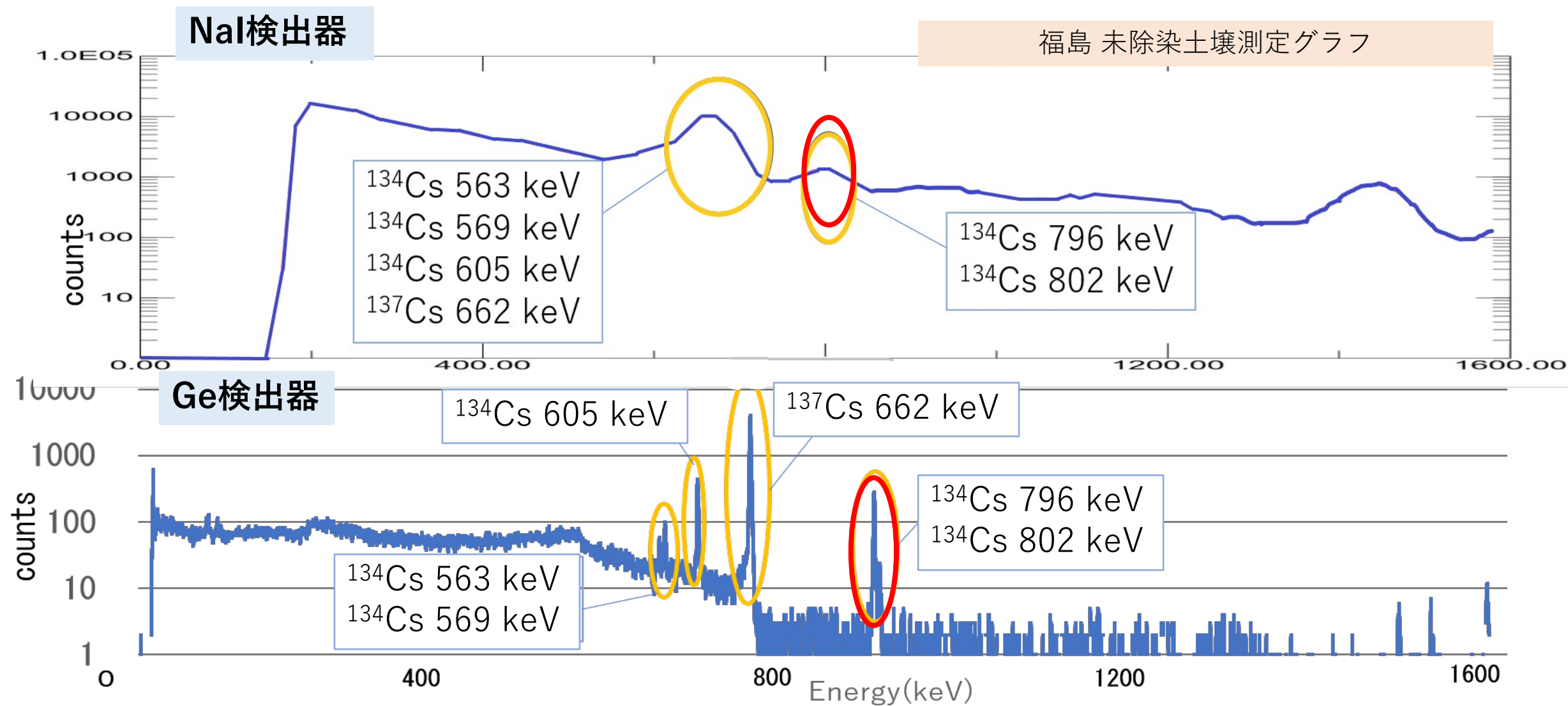
- NaI検出器：50 *keV* @ 662 *keV*

$^{134}\text{Cs}$  と  $^{137}\text{Cs}$  を分けられない

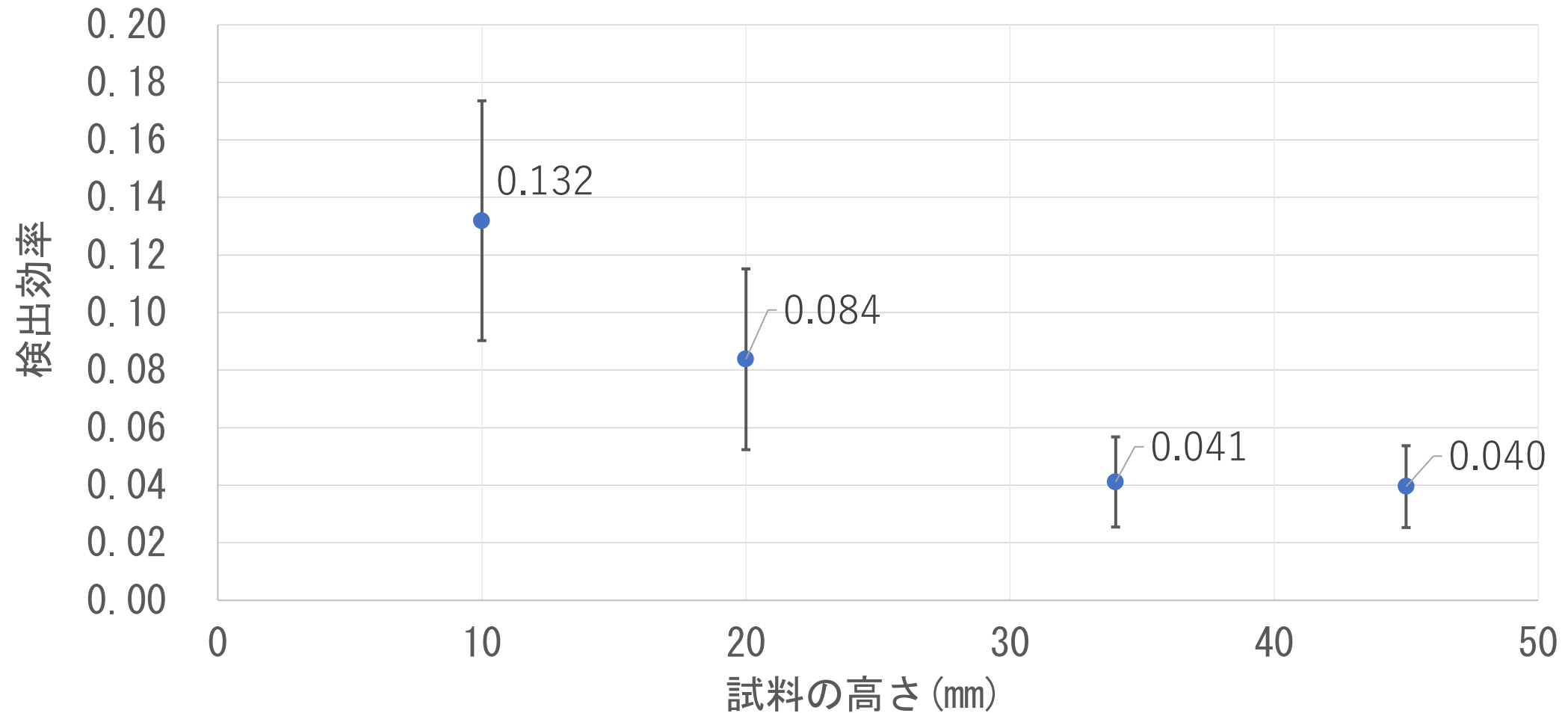
- Ge検出器：1.4 *keV* @ 662 *keV*

$^{134}\text{Cs}$  と  $^{137}\text{Cs}$  を分けられる

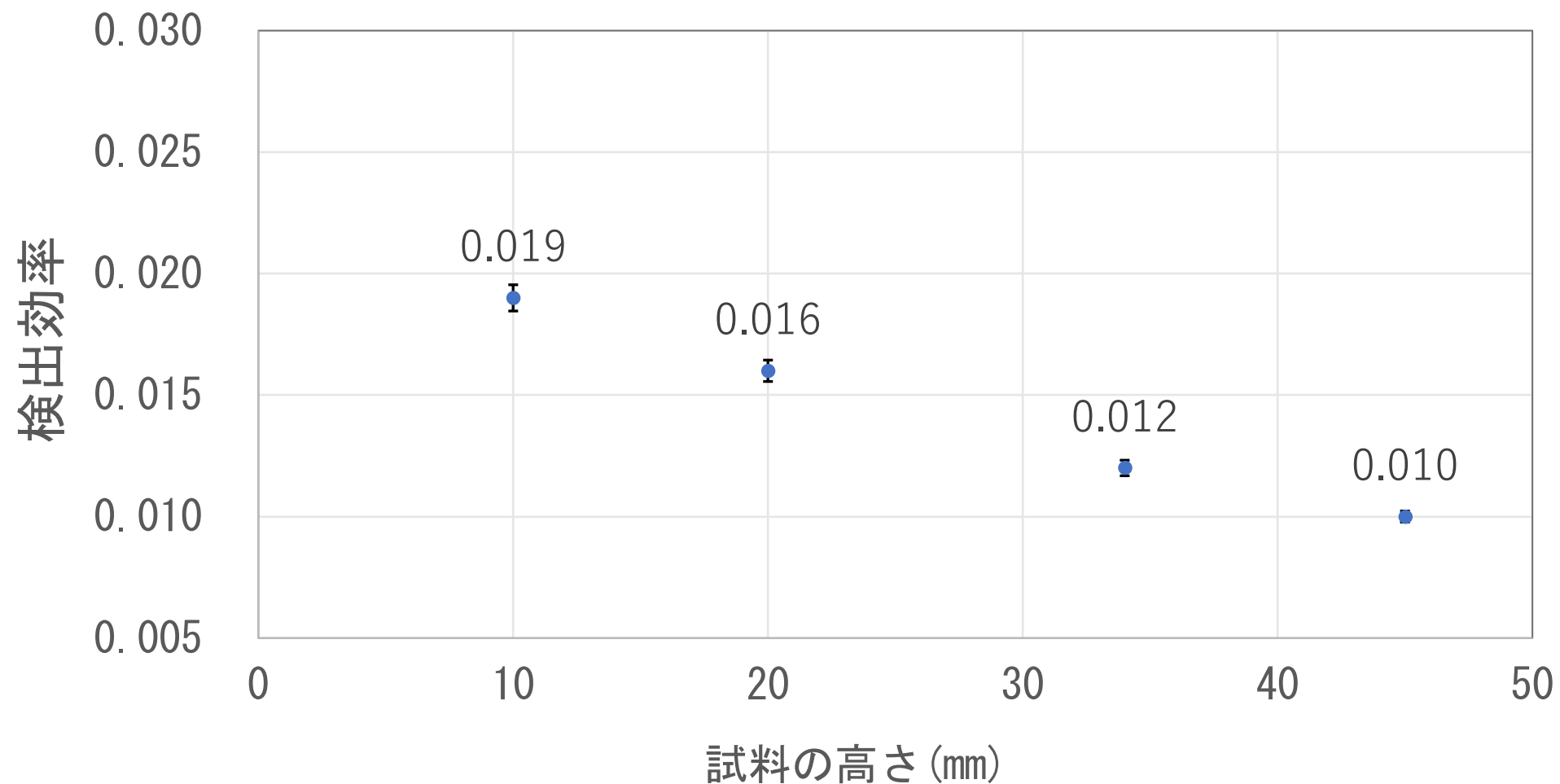
# Nal検出器とGe検出器のエネルギー分解能比較



# NaI検出器の検出効率



# Ge検出器の検出効率



# NaI検出器 vs. Ge検出器

- エネルギー分解能

NaI検出器：50 keV     $^{134}\text{Cs}$  と  $^{137}\text{Cs}$  を分けられない

Ge半導体検出器：1.4 keV     $^{134}\text{Cs}$  と  $^{137}\text{Cs}$  を分けられる

- 検出効率(試料の高さ10 mm)

NaI検出器：13%    同じ統計量を得るのにかかる時間・・・

Ge半導体検出器：1.9%

⇒ NaI検出器

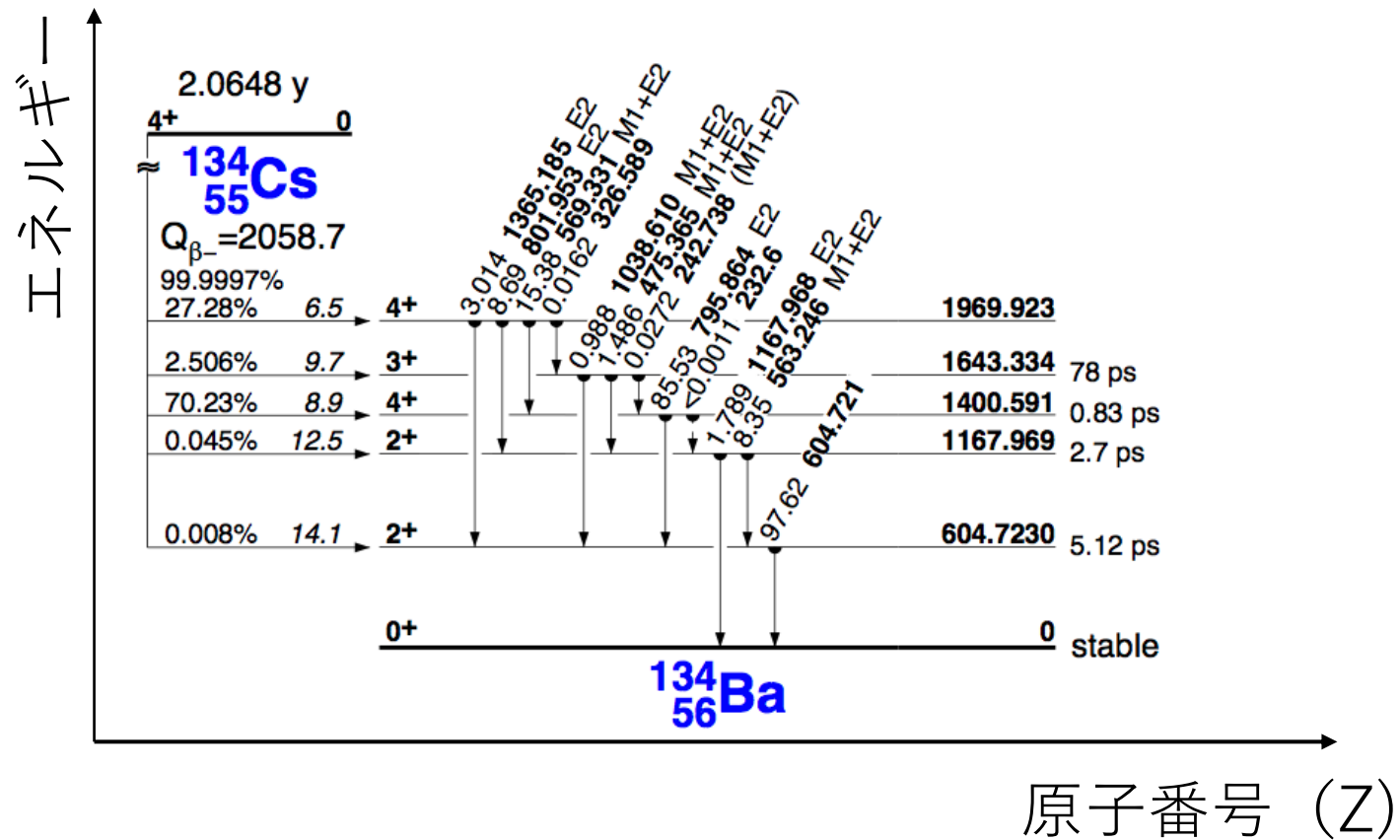
→ 検出効率が高く、エネルギー分解能が悪い

⇒ Ge半導体検出器

→ 検出効率が低く、エネルギー分解能が良い

# $^{134}\text{Cs}$ 放射性同位体

## 崩壊図



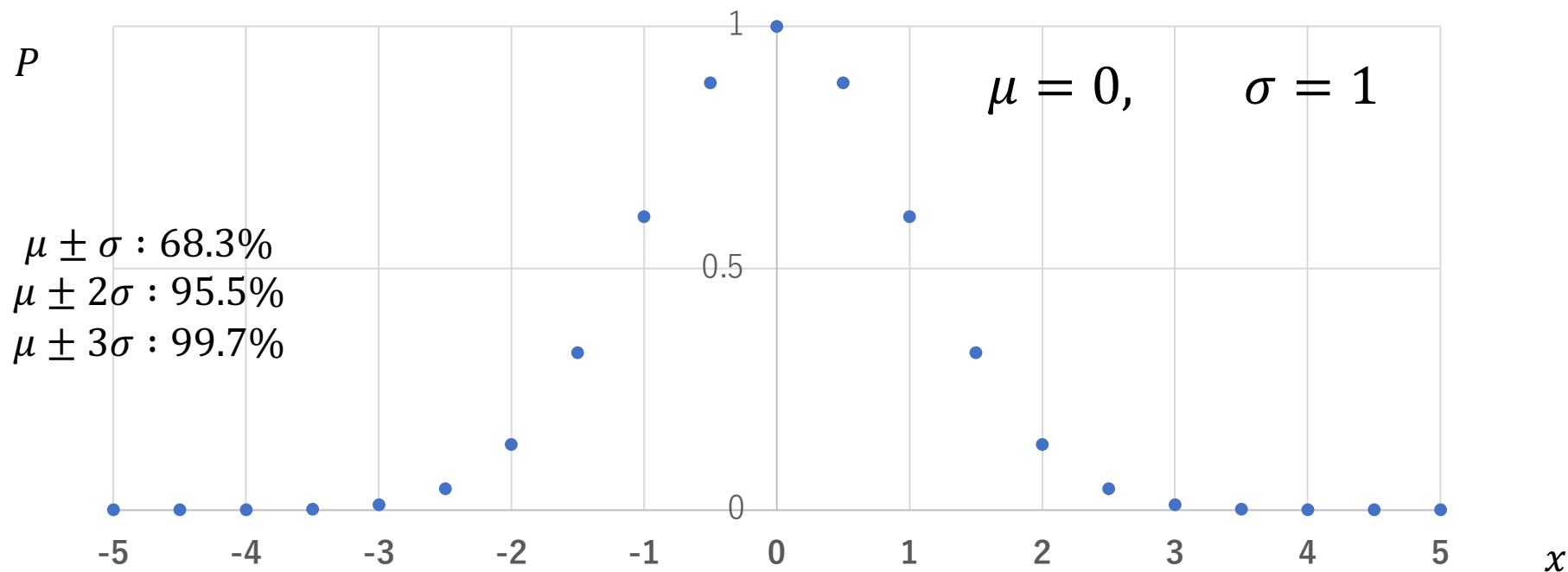
# 正規分布

エネルギースペクトルで観測されるピークは正規分布

$$P = A \exp\left(-\frac{(x - \mu)^2}{2\sigma^2}\right)$$

$\mu$  : 平均値

$\sigma$  : 標準偏差 = 統計誤差



# 実習と測定レポートと成績と単位認定

## 【単位取得に必須】

- ① 事前実習の受講（事前講義中または補講）  
8月2日までに受講すること。

補講：豊中キャンパス→本岡さんに  
吹田キャンパス→吉田さんに

阪大生も他大生も

CLEまたはgoogle form

## 未受講の場合は研修キャンセル

- ② 事前実習の測定レポートを実習後2週間以内に提出  
③ 現地実習の測定レポートを研修終了後2週間以内に提出  
④ 事後実習（発展放射線実習）での測定と考察の“実施”

①②③④は参加学生全員が必須であり、阪大生は単位取得に必須  
\* チューターは③④が必須（①と②が免除される）