

新刊書籍 発売！ 2012年10月10日 刊行

# 「放射線を科学的に理解する — 基礎からわかる東大教養の講義」

鳥居寛之・小豆川勝見・渡辺雄一郎 著  
中川恵一 執筆協力

丸善出版 本体 2500円+税

- 1章 放射線とは？《放射線入門》
  - 2章 放射線の性質《放射線物理学Ⅰ》
  - 3章 原子力発電で生み出される放射性物質《原子核物理学・原子力工学》
  - 4章 放射線量の評価《放射線物理学Ⅱ》
  - 5章 放射線の測り方《放射線計測学》
  - 6章 環境中での放射性物質《環境放射化学》
  - 7章 放射線の細胞への影響《放射線生物学》
  - 8章 放射線の人体への影響《放射線医学》
  - 9章 放射性物質と農業《植物栄養学・土壤肥科学》
  - 10章 放射線の防護と安全《放射線防護学》
  - 11章 役に立つ放射線《放射線の利用・加速器科学》
- Q&A

放射線を理解するには、物理学・化学・生物学・医学・工学など、多くの分野の知識が必要です。しかしこれらすべてを網羅することは難しく、系統立てて学べる機会は非常に少ないのが実情です。

本書は、東京大学教養学部で行われた講義をもとにし、放射線について多角的に学べるよう配慮しています。日常生活や原発事故にかかわる具体的な例を引きながらやさしくていねいに解説しましたので、高校生や一般の方にも広く読んでいただきたいと願っています。

<http://radphys4.c.u-tokyo.ac.jp/~torii/lecture/radiolect-kn.html>

# 放射線

鳥居 寛之  
小豆川勝見  
渡辺雄一郎  
著

中川 恵一  
執筆協力

科学的に  
理解する

基礎からわかる東大教養の講義

丸善出版

# 2012年度冬学期 主題科目テーマ講義

# 放射線

を

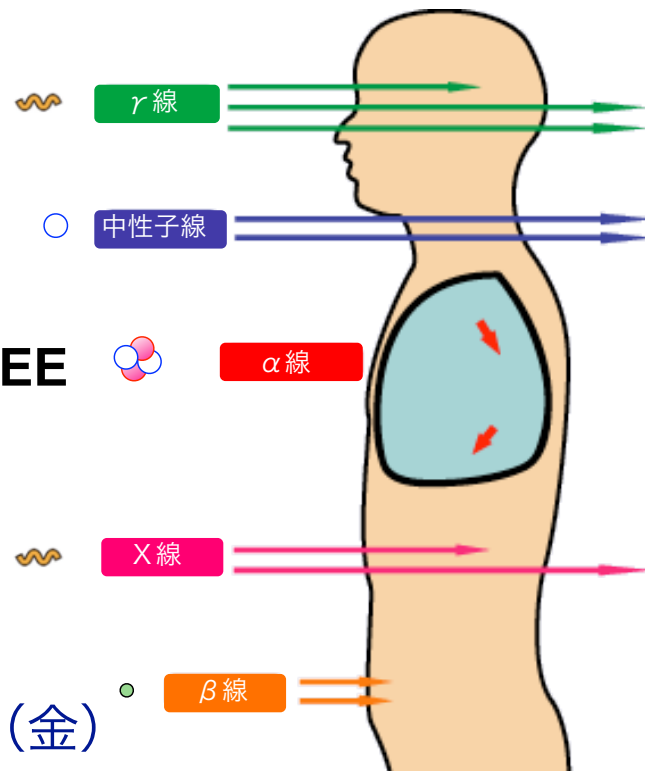
科学的に  
理解する

金曜5限

@ 21 KOMCEE

K402教室

2012 / 10 / 26 (金)



第3回

## 放射線計測学

放射線の測定原理・方法・問題点

小豆川 勝見

東京大学 教養学部 / 大学院総合文化研究科

# 放射線を科学的に理解する

- 10/12 放射線入門 【鳥居】
- 10/19 放射線物理学 【鳥居】
- 10/26 放射線計測学 【小豆川】
- 11/ 2 環境放射化学 【小豆川】
- 11/ 9 放射線生物学 【渡邊】
- 11/16 放射線医療 【作美】
- 11/20 原子核物理学 【鳥居】
- 11/30 環境システム工学 【森口】
- 12/ 7 科学技術社会論 【藤垣】
- 12/14 環境放射化学 【小豆川】
- 12/21 植物栄養・肥料学 【藤原】
- 1/11 放射線の利用 【渡邊】
- 1/25 放射線防護学・加速器科学 【鳥居】

担当教員

ゲスト講師

鳥居 寛之

小豆川 勝見

渡邊 雄一郎

《教養学部》

作美 明 《医学部附属病院放射線科》

森口 祐一 《工学系都市工学》

藤原 徹 《農学部応用生命化学》

藤垣 裕子 《教養学部広域システム》

# 放射線を科学的に理解する (化学分野1回目)

小豆川(しょうずがわ)勝見



# はじめに

- ▶ 福島第一原子力発電所事故前からSv, Bqという単位を知っていた方はどのくらいいますか？
  - 研究室に入ってくる修士課程の院生は「むかしやったような...?」程度。
  - 放射線を専門に扱うラボでもこんなもの。
- ▶ 事故当時、学会発表のためアメリカ・ヒューストンに出張中。
  - 多くの方からお悔やみと励ましの言葉を貰いました。
  - 研究者達からは、「メルトダウンしているから早く帰って核種分析をしろ」と。
- ▶ 外国に出れば間違いなく福島の話題になるでしょう。
  - 事故に対する関心は極めて高い
- ▶ ぜひ、この講義で放射線の基礎知識を身につけて下さい

# 放射線を測定する科学 - 環境放射化学

## ▶ 原子核崩壊図と崩壊モード

## ▶ 放射線の種類と測定機器の特性

- ゲルマニウム半導体検出器
- 液体シンチレーションカウンタ
- アルファスペクトロメトリ
- 空間線量計

ガンマ線

ベータ線

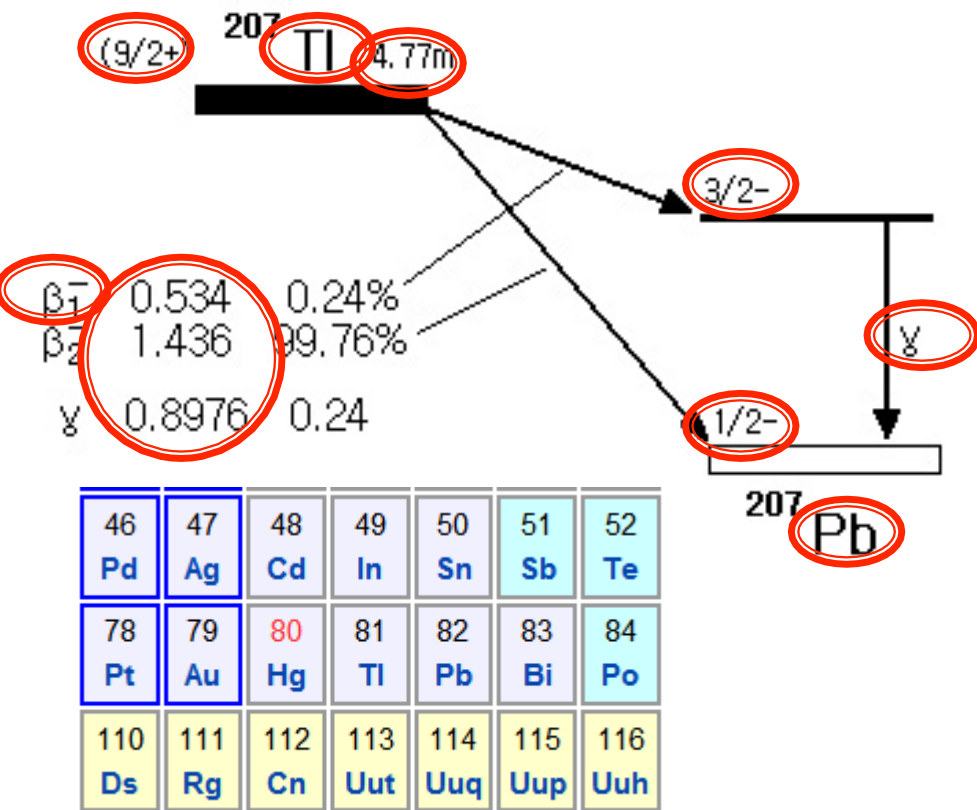
アルファ線

## ▶ 「放射性セシウム100Bq/kgの基準値」の測定

- 100Bqは大きな値に見えるけど....。

# 原子核崩壊図と崩壊モード

それぞれの線や記号、数字が何を表しているのか



▶  $^{207}\text{Tl}$ の原子核崩壊図

▶ 崩壊モードは $\beta$   
◦ ref. 周期律表

▶ パリティ(スピンパリティ)

▶ 半減期

▶ エネルギー

## ベータ線

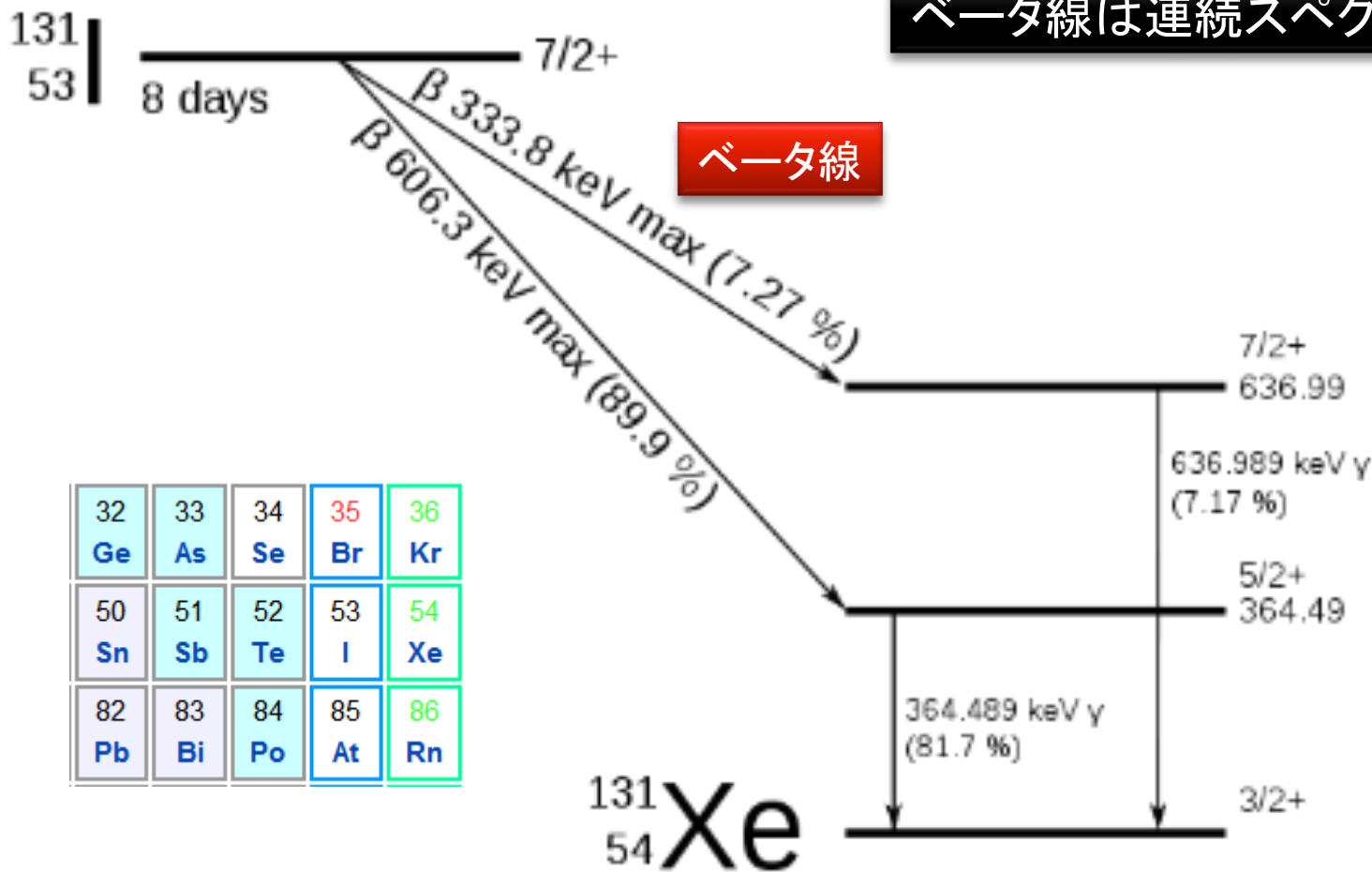
反ニュートリノへのエネルギー供与(質量欠損)のため、電子に与えられるエネルギーは連続的になる。

## ガンマ線

$\beta$ 崩壊後の核異性体からのガンマ線  
核種同定に適している

# $^{131}\text{I}$ の核崩壊図

ベータ線は連続スペクトル！



ベータ線

ガンマ線

32 Ge	33 As	34 Se	35 Br	36 Kr
50 Sn	51 Sb	52 Te	53 I	54 Xe
82 Pb	83 Bi	84 Po	85 At	86 Rn

364.49 keVのガンマ線を見つけた！ ➡  $^{131}\text{I}$ がありそうだ！

# 核エネルギーライブラリ

NUC **γ線用ゲージ.LIV**

γ線用ゲージ.LIV

核種固有パラメータ

核種名:  -  親核種名:

半減期:  日 核種属性:

定量ピーク: 登録数:

Pr	エネルギー	放出率(%)	ピーク属性
1	364.4800	81.0000	

妨害テーブルピーク: 登録数:

Pr	エネルギー	放出率(%)	ピーク属性
0	80.1830	2.6000	
0	284.2980	6.0000	
0	636.9730	7.2000	
0	722.8930	1.8000	

Ac  
Ag  
Am  
As  
Ba  
Be  
Bi  
Ce  
Co  
Cr  
Cs  
Fe  
Ga  
Ge  
I  
I-131  
I-132  
K  
La  
Mn  
Mo  
Nb  
Nd  
Np  
Pa  
Pb



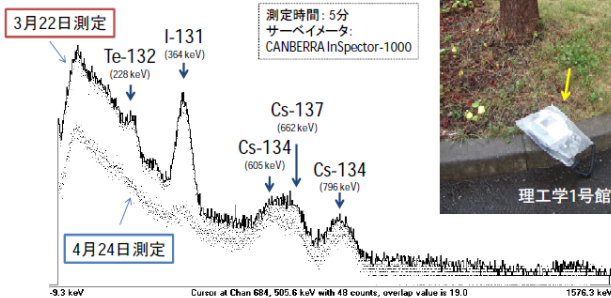
# ガンマ線の測定装置(1)

- ▶ シンチレーションカウンタ
  - シンチレーターにはNaI(Tl)が最もよく使われる
  - 分解能はイマイチ

## サーベイメータによる 芝生上のガンマ線強度定点観測

放射性物質が大量に降下して以降、我々は理工学1号館西側の芝生上でガンマ線の強度を定点観測しています。測定にはガンマ線のエネルギーも測定できるサーベイメータを使用しています。

### NaI(Tl)検出器で測定した ガンマ線エネルギースペクトル



防衛大で観測された福島第1原発事故の影響  
防衛大学校 応用物理学科 放射線計測研究室. 松村徹ら, 2011

## AT1320A

### 食品放射能(セシウム)スクリーニングシステム

食品中の放射能(セシウム)を  
3.7~1,000,000Bq/kgの範囲で測定します

#### 特長

- 2.5" x 2.5" NaI(Tl)検出器を使用した放射線スペクトル測定
- 1リットルマリネリ容器、0.5リットルフラット容器使用
- 鉛遮蔽体装備
- 自動LEDスタビリゼーション機能装備
- 自動バックグラウンド減算機能
- "エネルギーウインドウ"を使用したスペクトル処理
- 128x64 LCD表示部にスペクトルデータを表示
- 不揮発性メモリに300のスペクトルを保存可能
- PCインタフェース

#### アプリケーション

- 放射能スクリーニング
  - 食品(飲料水、農業製品等)
  - ミネラル、建築材料、材木等
  - 金属、石油化学製品、原材料、スクラップ等
  - 放射性廃棄物

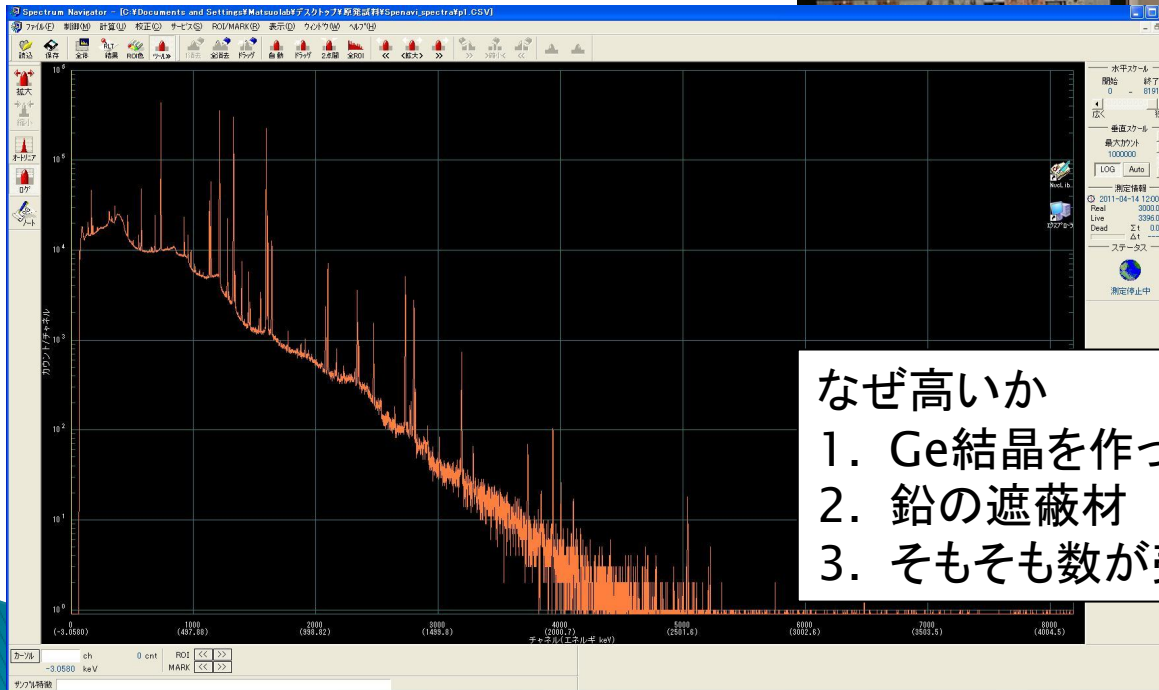


研究用NaI。米俵サイズ→

# ガンマ線の測定装置(2)

## ▶ ゲルマニウム半導体検出器

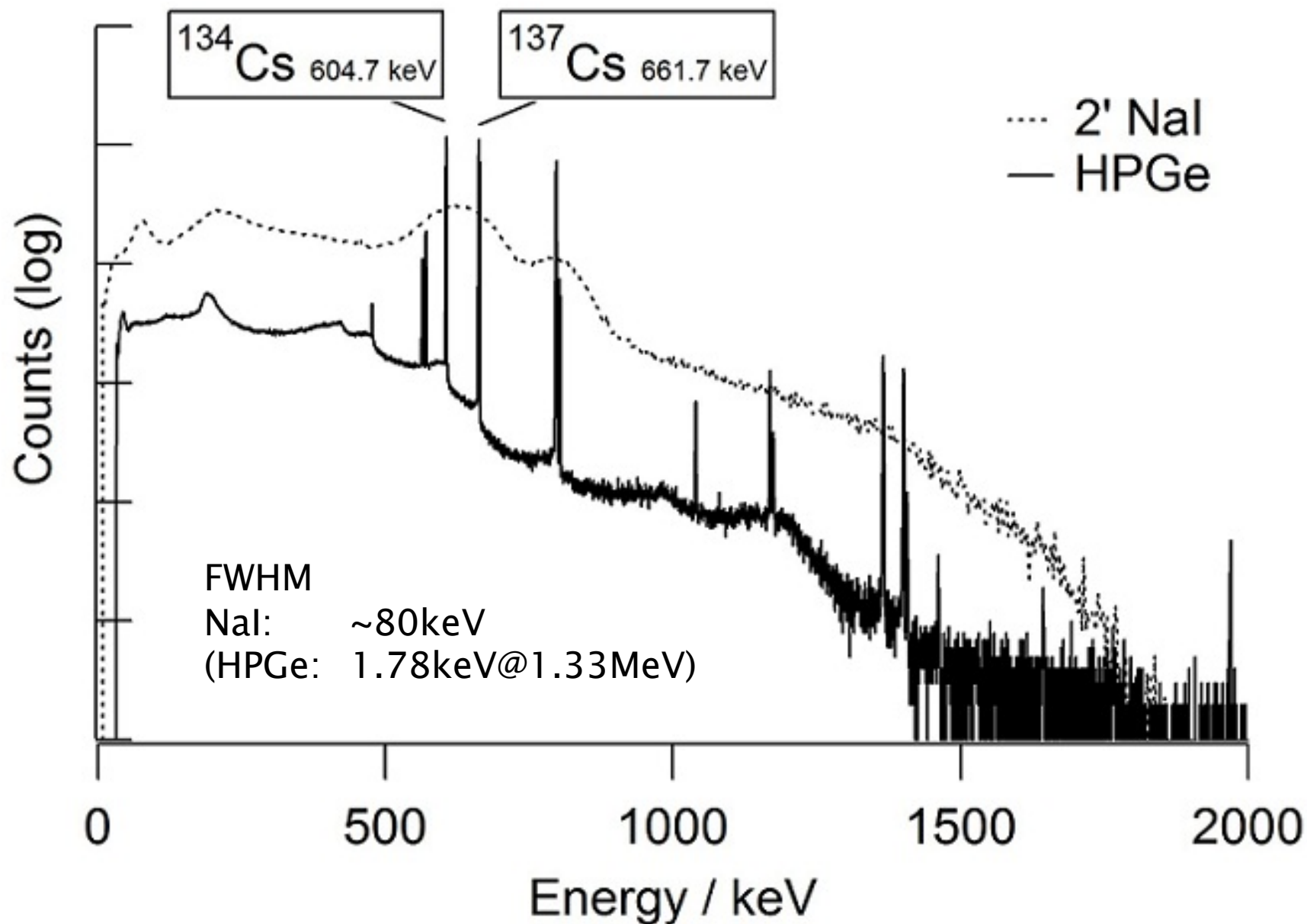
- 最高のエネルギー分解能
- 非常に高価、メンテ必要



なぜ高いか

1. Ge結晶を作っている会社は世界でも3社のみ
2. 鉛の遮蔽材
3. そもそも数が売れるものではない

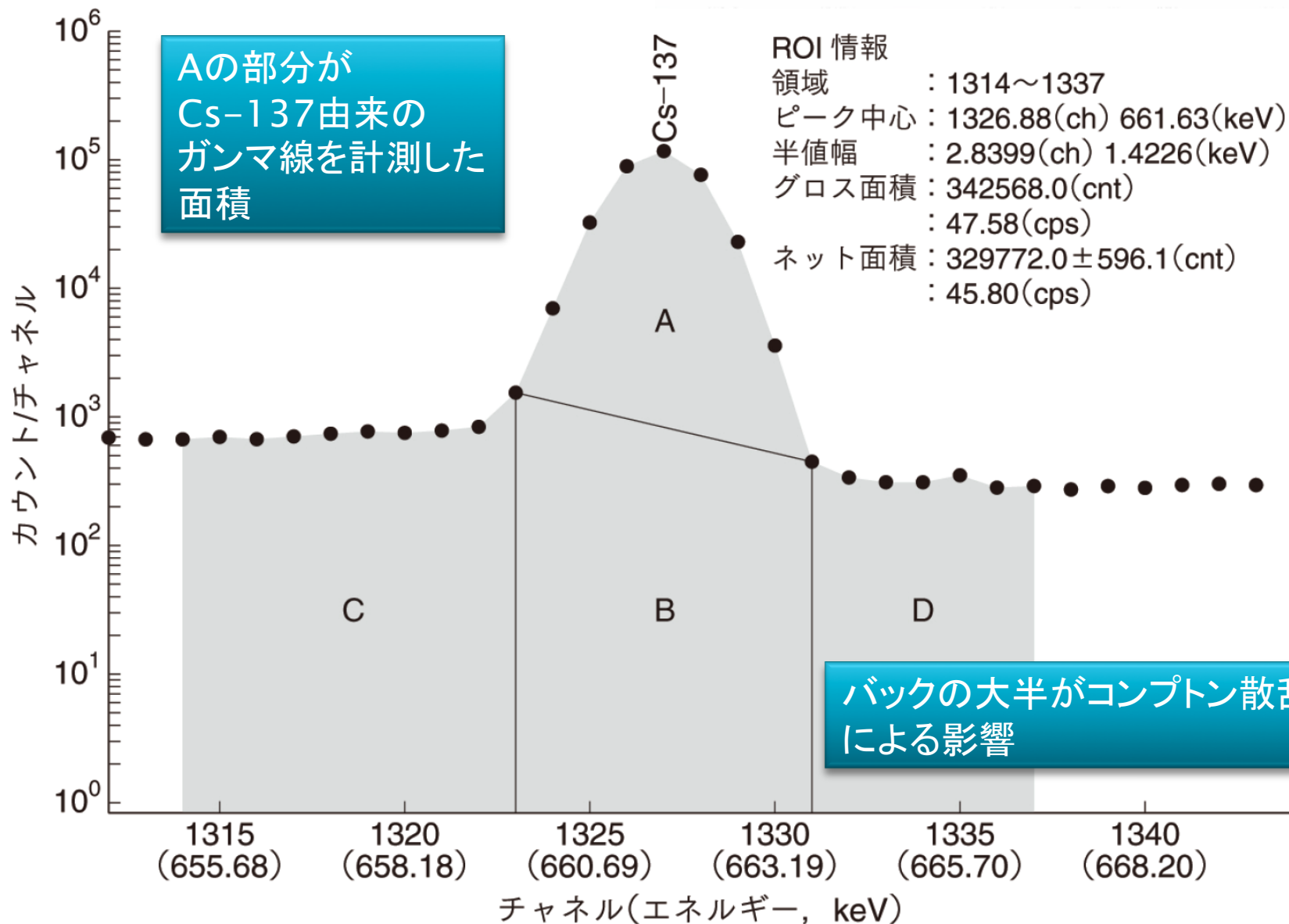
# γ線スペクトルの比較(NaIカウンターvsGe半導体検出器)



# ピークを拡大してみると...

$$DL = 3\sigma = 3\sqrt{(A+B) + \alpha^2 C + \beta^2 D}$$

ただし  $\alpha, \beta$  は定数





# ベータ線の測定装置

- ▶ (例えば) 液体シンチレーションカウンタ
  - ベータ線は連続スペクトル、核種を決めるためには...?

$^{90}\text{Sr}$ はこれ！



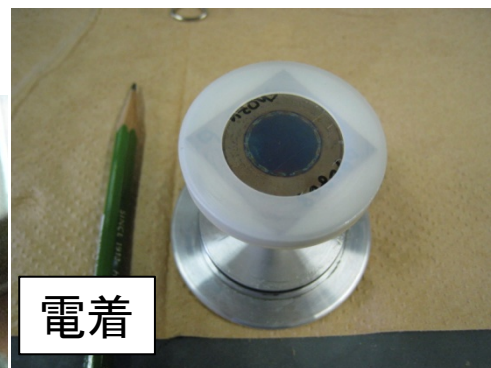
(液シン、なんて略せるとカッコいいね！)



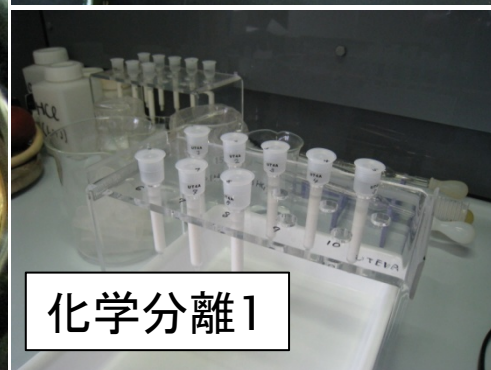
# アルファ線の測定装置

U, Th, Pu, Am, Cm...はこれ！

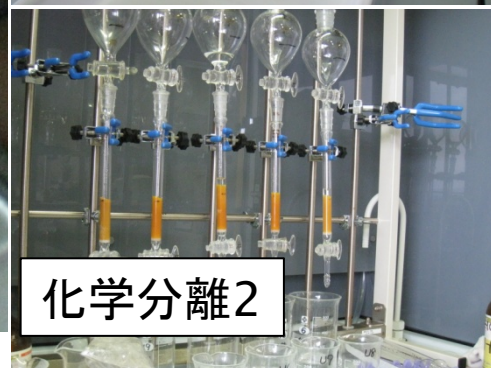
## ▶ アルファスペクトロメトリ



電着



化学分離1



化学分離2

分析はものすごく大変。

ターゲット元素を化学分離 → 精製 → 電着(線源を作る) →  $\alpha$ 線計測

# (余談)半減期が短い核種の存在量を推定するには...?

- ▶  $^{131}\text{I}$ は半減期が約8日。拡散の実態を調べる前に崩壊し尽くしてしまう。どうやって事故初期の $^{131}\text{I}$ を推定するのか。

答え: 直接 $^{131}\text{I}$ を測定するのではなく、同位体( $^{129}\text{I}$  or  $^{127}\text{I}$ )から推定する

## 2. 調査内容

○ヨウ素129( $^{129}\text{I}/^{127}\text{I}$  比)の測定は東京大学のAMS(加速器質量分析装置)を用い、ヨウ素127(安定ヨウ素)の測定は学習院大学のICP-MS(誘導結合プラズマ質量分析装置)を用いて行う。

この結果から見ると、ヨウ素129とヨウ素131は良い相関であると言える( $R^2=0.96$ )。ヨウ素129の土壤中濃度(Bq/kg)に対するヨウ素131の土壤中濃度(Bq/kg; 4月1日に半減期補正)の比率( $^{131}\text{I}/^{129}\text{I}$  比)の平均値は、4,100,000であった。

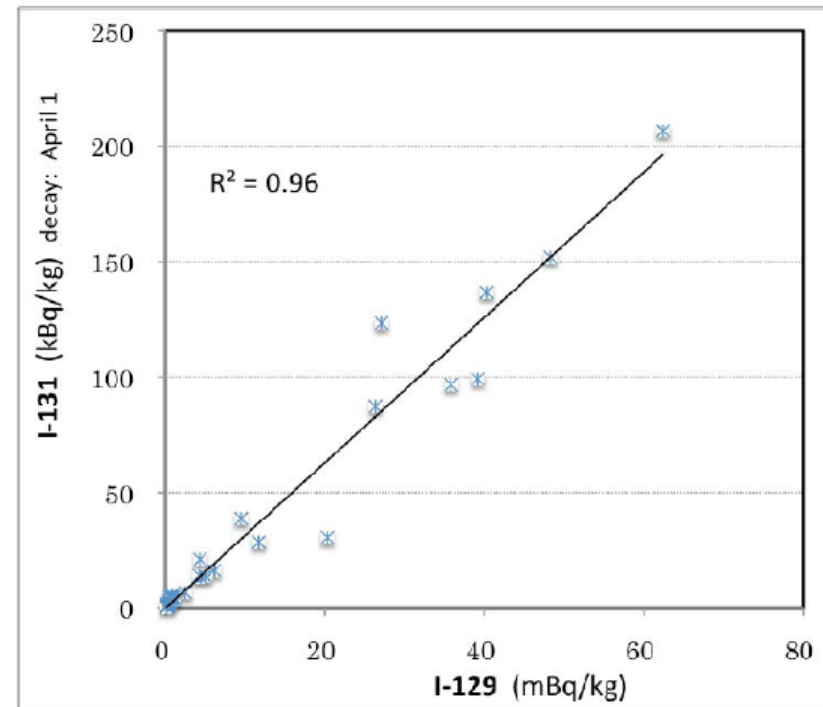


図-3 ヨウ素129とヨウ素131の相関 (n=36) 減衰補正は4月1日  
(学習院大や福島県が採取した試料の分析)

# 核種の測り方の実際

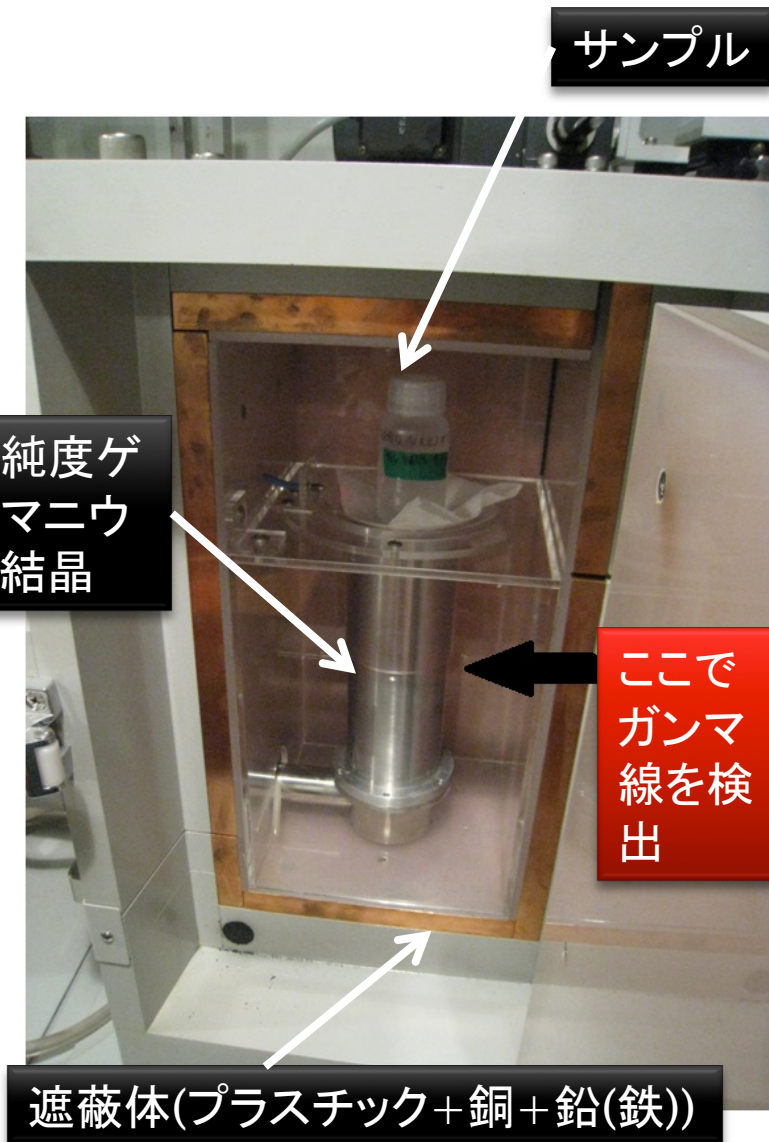
- ▶ 最も測りやすいのはガンマ線
  - 試料の前処理がいない(そのまま測れる)
- ▶  $^{131}\text{I}$ はベータ崩壊、だからベータ線を観測しても良いけど...
  - 分離精製が面倒くさい
  - 放射性廃液が大量に発生する
- ▶  $^{131}\text{I}$ はベータ崩壊時にガンマ線も放出する
  - じゃあガンマ線を測ろう！
- ▶ ガンマ線の測定法を見てみましょう



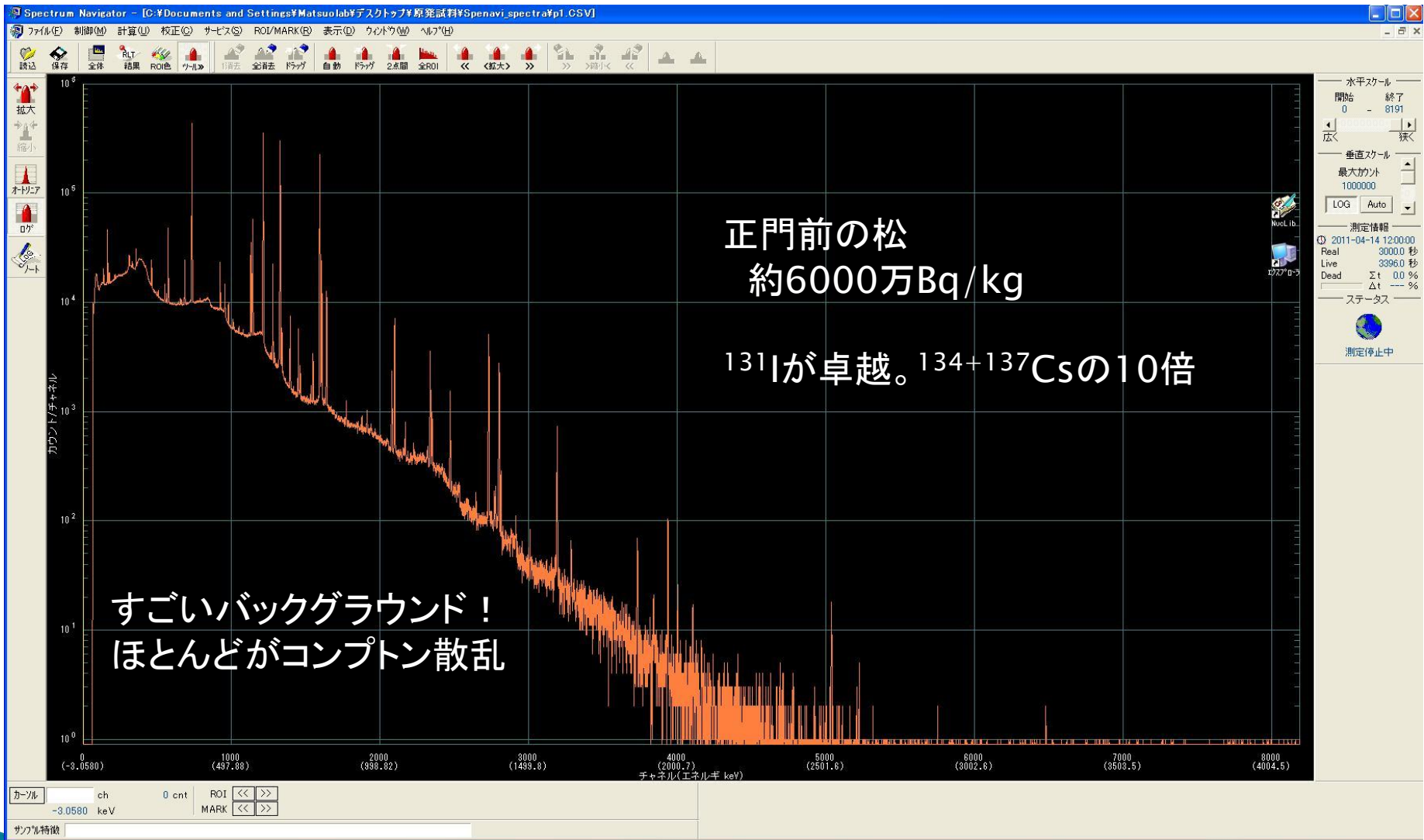
# ゲルマニウム半導体検出器

- ▶ 100Bq/kgのオーダーを狙うには「ゲルマニウム半導体検出器」が最適です。
  - 検出限界は試料や測定条件によります
- ▶ NaIシンチレーションカウンターでも狙うことはできるが相当測定条件をシビアにする必要がある

東京大学アイソトープ総合センター内  
ゲルマニウム半導体検出器



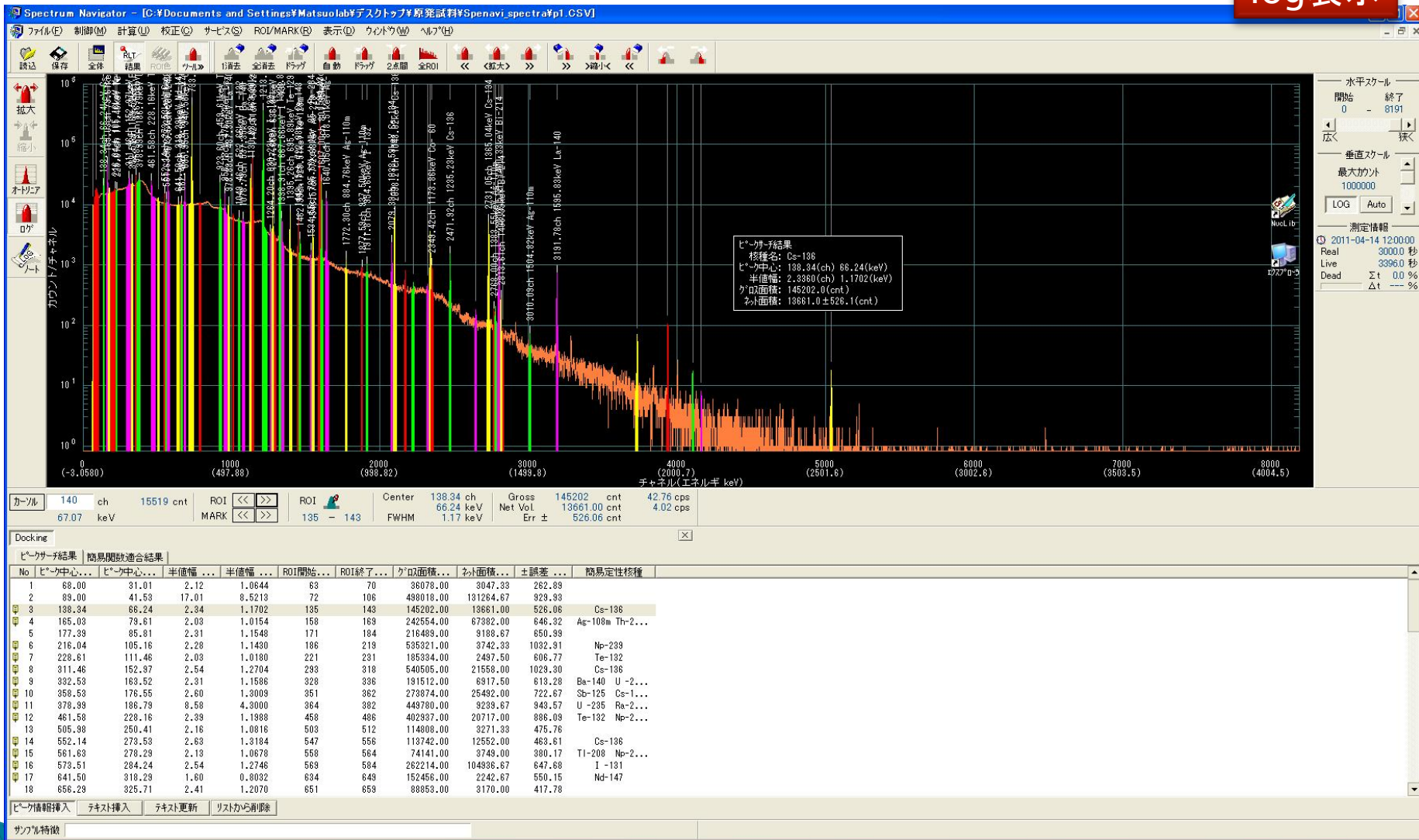
# 福島第一原発正門前の植物試料のガンマ線スペクトル



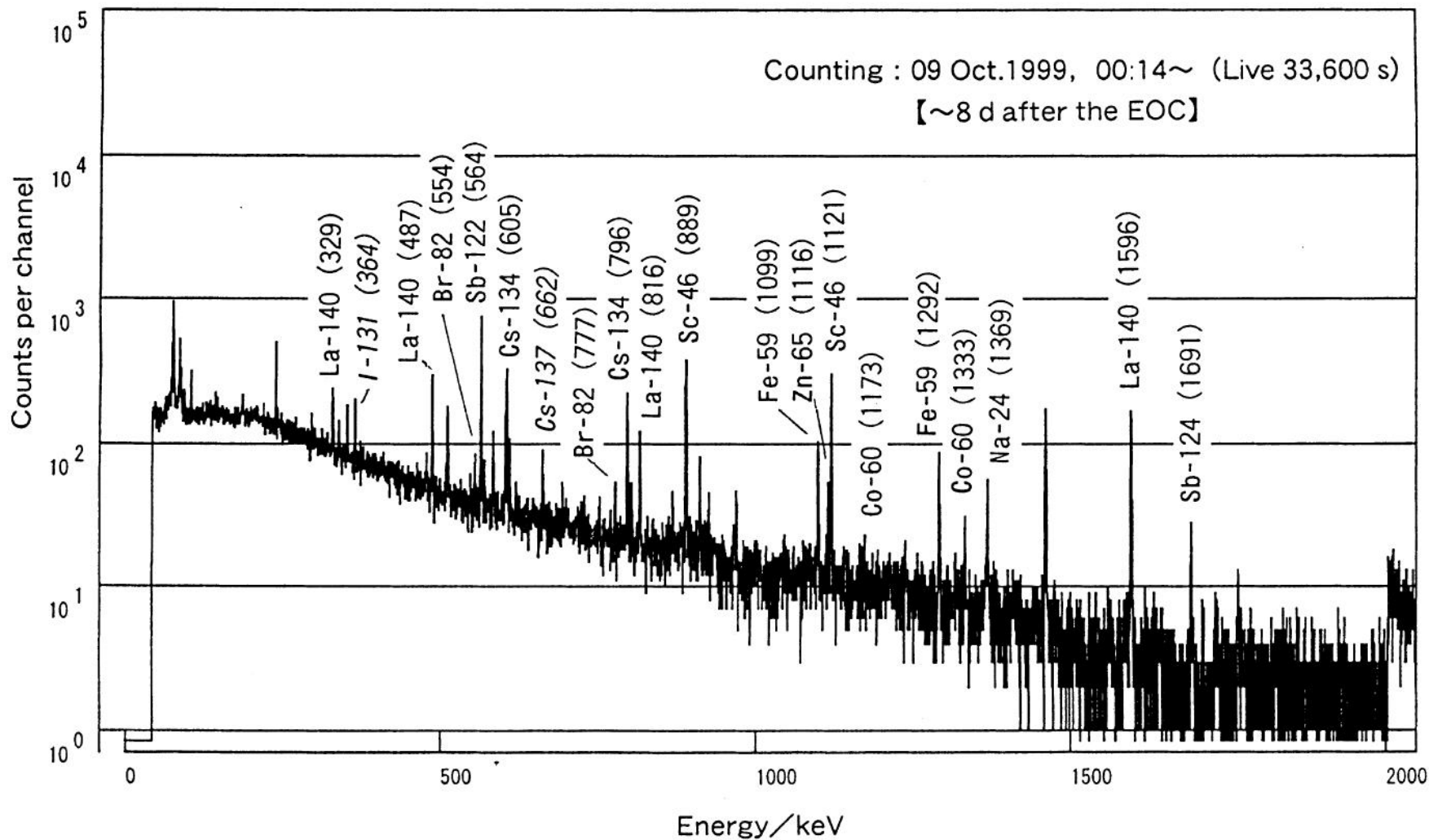


# 福島第一原発正門前の植物試料のガンマ線スペクトル

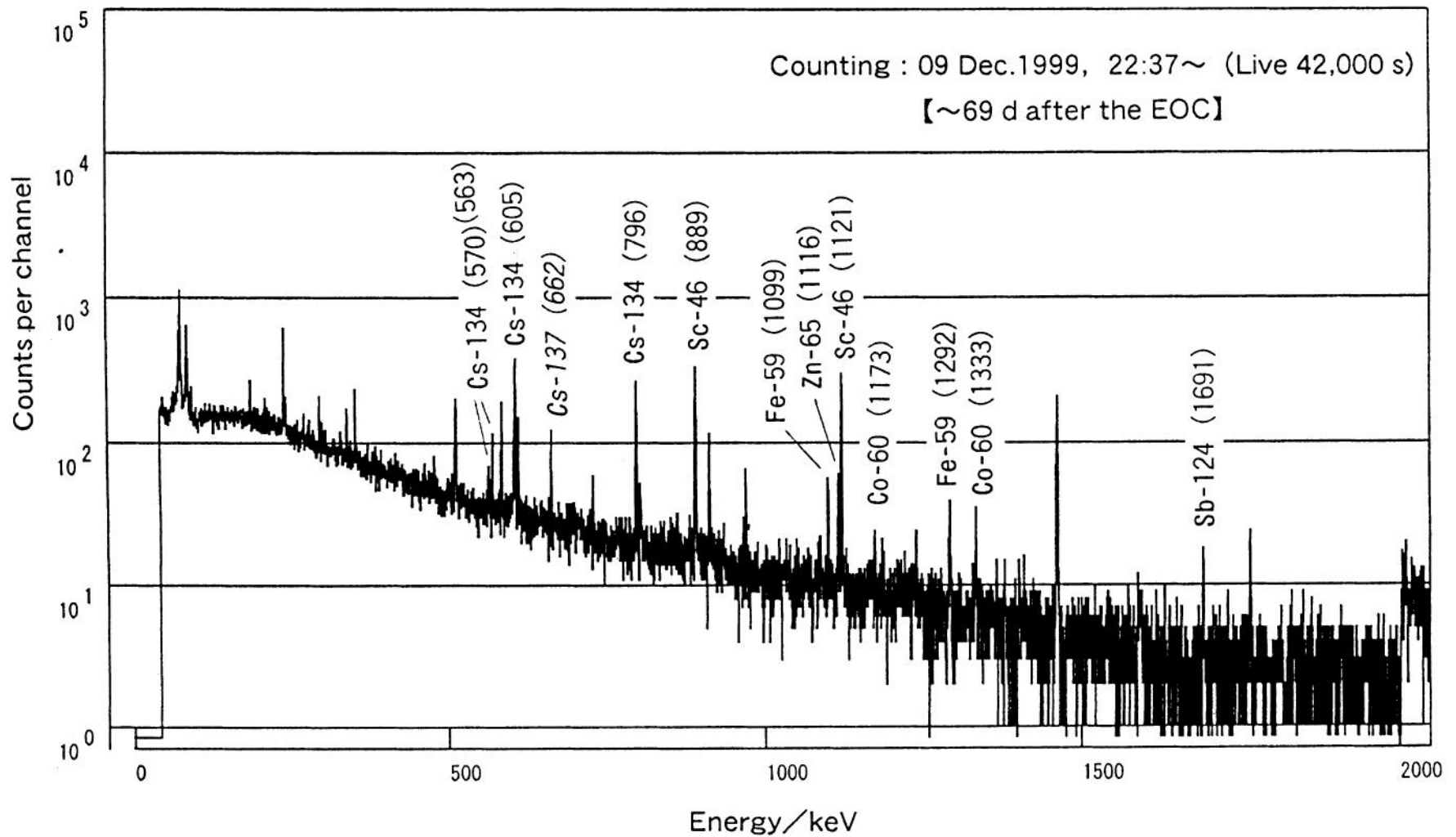
log表示



# (参考)JCO事故のガンマ線スペクトル(土壌)1

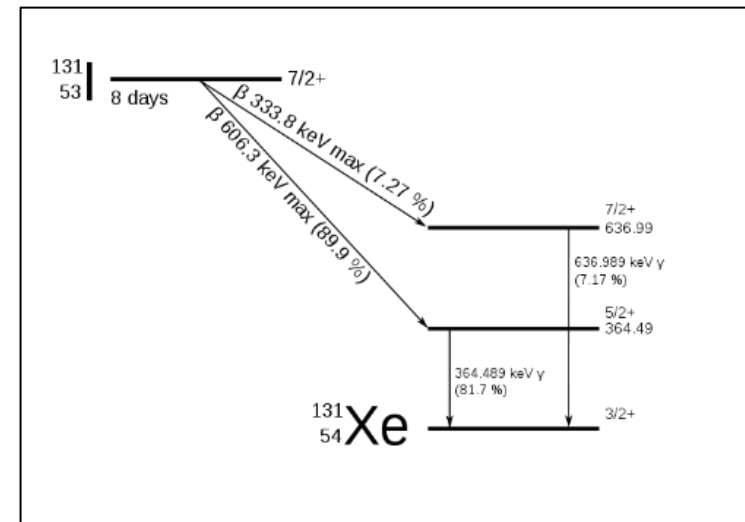


# (参考)JCO事故時のガンマ線スペクトル(土壌)2



# [重要！]放射能(Bq)の計算

- ▶ ピークのネット値の計算
- ▶ 放出率、単位重量換算、半減期補正
- ▶ 親核種と娘核種の間係を考慮する



- 放射性核種が壊変し、新たな放射性核種が生じるとき、生じた核種を娘核種といい、元の核種を親核種と呼ぶ。
- 親核種の半減期を $T_1$ 、娘核種の半減期を $T_2$ とするとき $T_1$ と $T_2$ の大きさに過渡平衡と永続平衡、放射平衡が成立しない場合に分かれる。

$$N_1 = N_1^0 e^{-\lambda_1 t} \quad , \quad N_2 = \frac{\lambda_1}{\lambda_2 - \lambda_1} N_1^0 (e^{-\lambda_1 t} - e^{-\lambda_2 t}) + N_2^0 e^{-\lambda_2 t}$$

# 放射能の半減期補正

- ▶ 今日、ある土壌試料のガンマ線を計測したら、 $^{134}\text{Cs}$ が100 Bq/kgであった。
- ▶ 今日は事故から(簡単のため)1年半経過している。 $^{134}\text{Cs}$ の半減期は2年である。

1.  $^{134}\text{Cs}$ はほとんど $\beta^-$ 崩壊する。生成する核種は何か。

37 Rb	38 Sr	39 Y	40 Zr	41 Nb	42 Mo	43 Tc	44 Ru	45 Rh	46 Pd	47 Ag	48 Cd	49 In	50 Sn	51 Sb	52 Te	53 I	54 Xe
55 Cs	56 Ba	*1	72 Hf	73 Ta	74 W	75 Re	76 Os	77 Ir	78 Pt	79 Au	80 Hg	81 Tl	82 Pb	83 Bi	84 Po	85 At	86 Rn

2. 事故時には $^{134}\text{Cs}$ の放射能はいくらか？

- ▶ 面倒なのは娘核種も崩壊する場合。



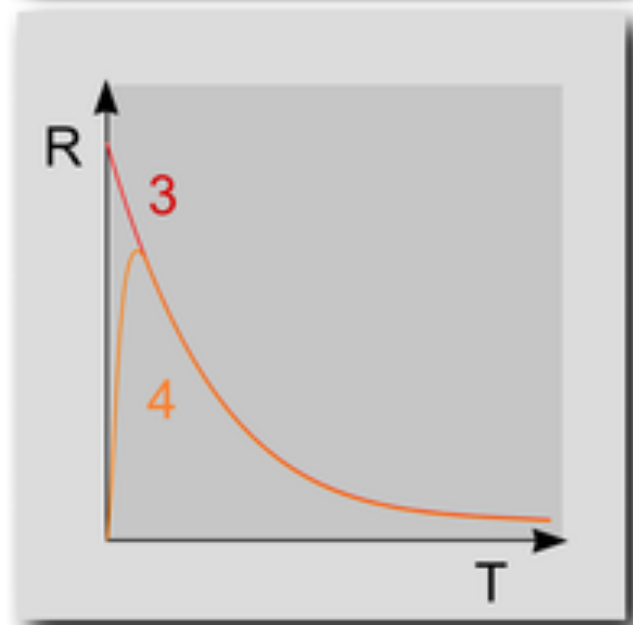
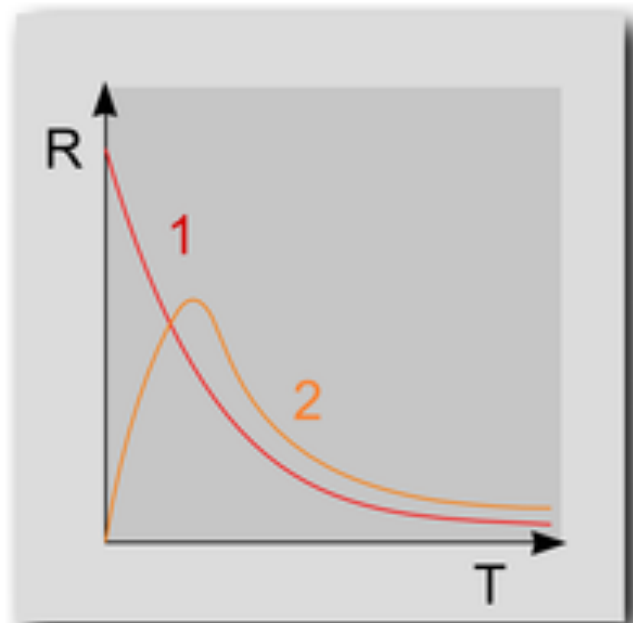
# 過渡平衡と永続平衡

## 過渡平衡

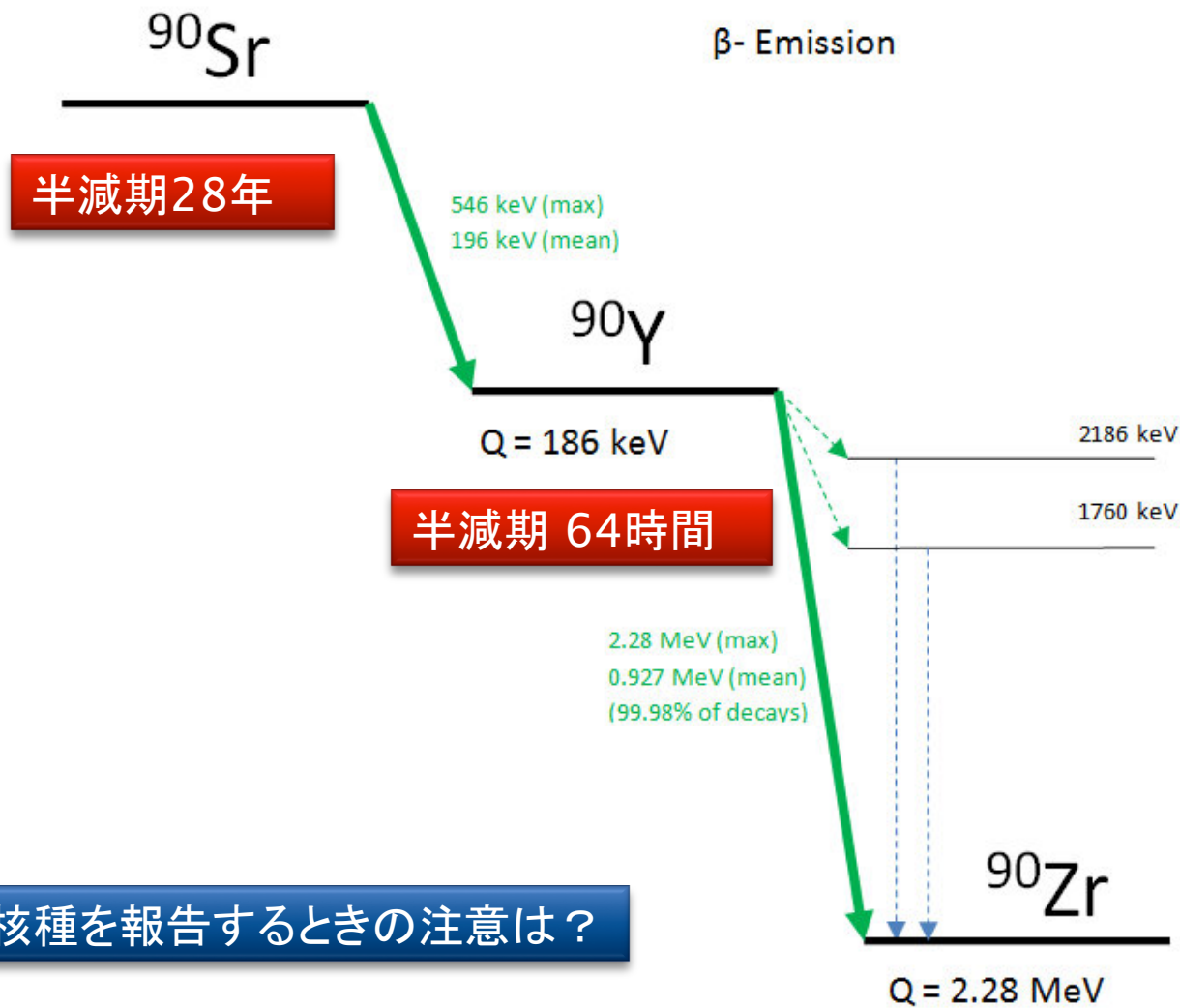
- ▶ 娘核種の放射エネルギーが親核種の放射エネルギーを追い越して、両者の比率が平衡状態になる状態

## 永続平衡

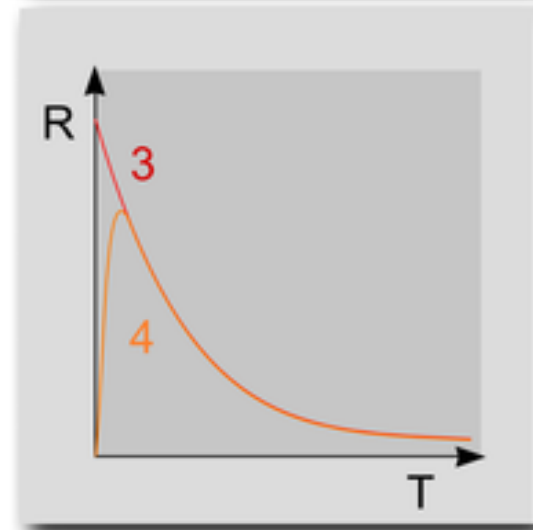
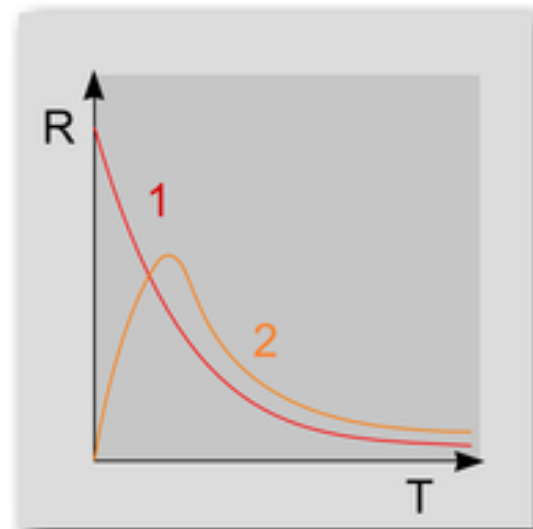
- ▶ 親核種の半減期が娘核種の半減期より圧倒的に長ければ、親核種の崩壊が娘核種の量を決めるために、親核種の放射エネルギーと娘核種の放射エネルギーは等しくなり、親核種の半減期カーブに沿って時間と共に減衰してゆく。



# $^{90}\text{Sr}$ は過渡平衡？永続平衡？



核種を報告するときの注意は？



# 食品中の放射性物質の基準値

核種		基準値 (Bq/kg)	WHOガイドライン (Bq/kg)
放射性ヨウ素( $^{131}\text{I}$ )	飲用水	300	10
放射性セシウム ( $^{134+137}\text{Cs}$ )	飲用水	10	10
	一般食品	100(暫定基準500)	

( $^{137}\text{Cs}$ として、ベラルーシ基準)

小麦粉60Bq/kg

飲料水10Bq/kg

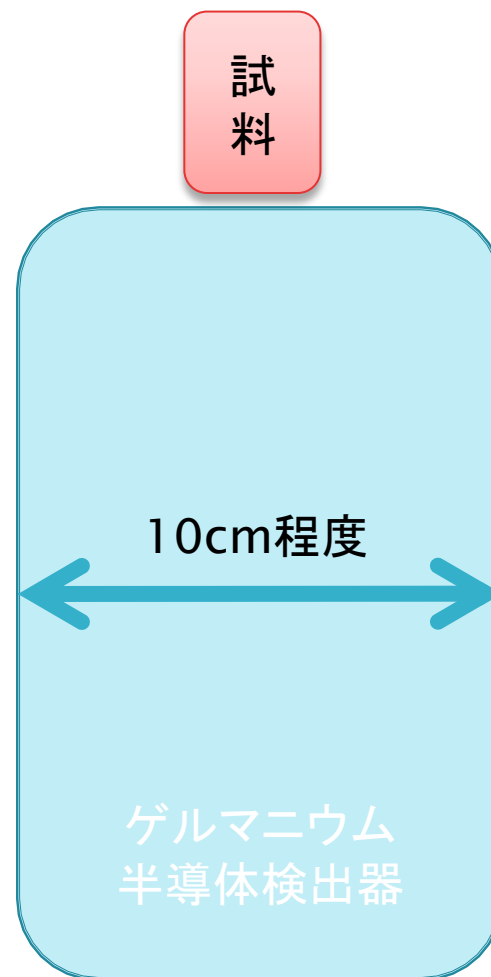
バター100Bq/kg

放射性セシウムは「ベータ線」と「ガンマ線」を出しますが、「ガンマ線」を測る方が楽なので、「ガンマ線」で測定します

もっとも大きな基準値である一般食品「100Bq/kg」について考えてみましょう

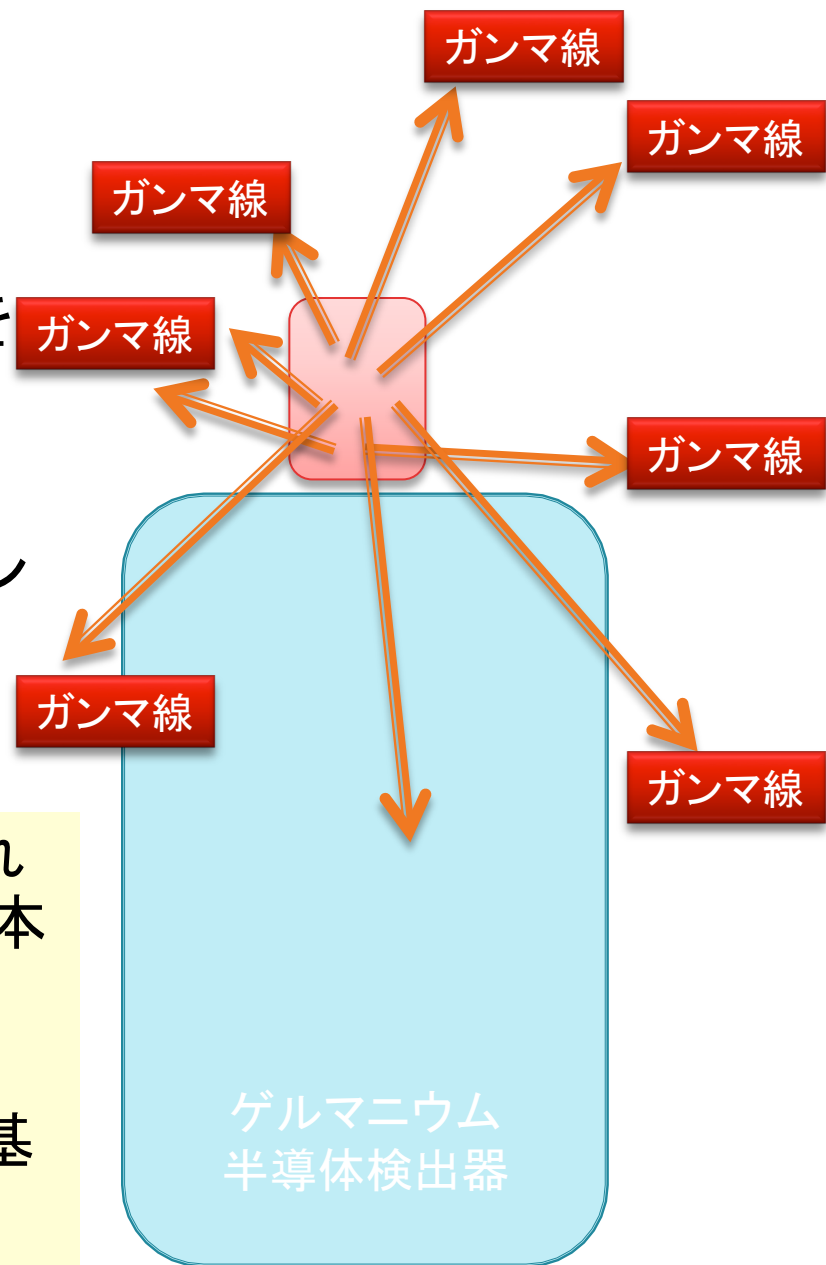
# どうやって測っている？(1)

- ▶ 試料から放出されたガンマ線をゲルマニウム半導体検出器が検出
- ↓
- ▶ 検出器の上に載せられるサンプルの量は100g程度
- ↓
- ▶ 検出器上では「10Bq/100g」が暫定基準値(元々100Bq/kg)



## どうやって測っている？(2)

- ▶ 試料からは四方八方にガンマ線を放出
  - ▶ 検出器に微かにかかる程度のガンマ線は検出できない
- ▶  $^{134}\text{Cs}$ の604keVの場合、放出されたガンマ線のうち、100本のうち1本しか検出できない(検出効率1%)
- ▶ 装置上では0.1 Bq/100gが暫定基準値





## どうやって測っている？(3)

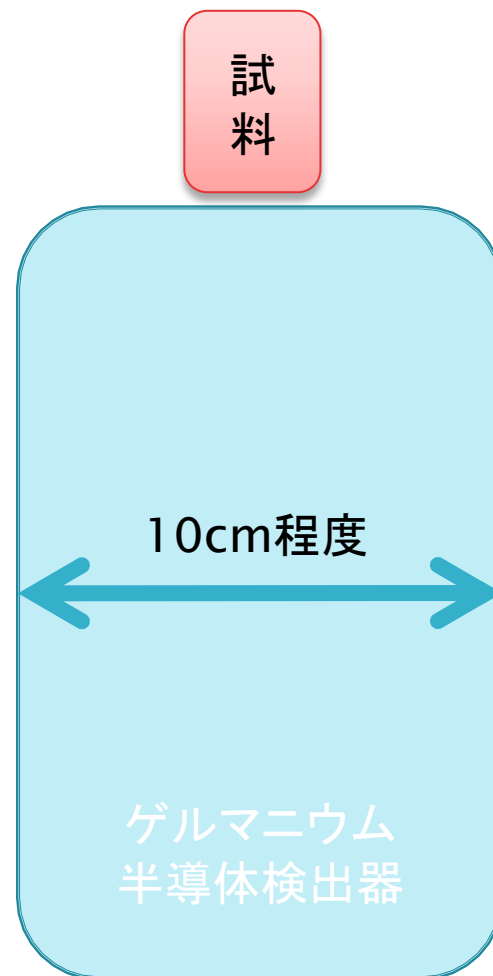
- ▶ 「放射性セシウム」というのは $^{134}\text{Cs}$ と $^{137}\text{Cs}$ の合算値



- ▶ 今回の事故では $^{134}\text{Cs}$ と $^{137}\text{Cs}$ がほぼ同等の放射能



- ▶ それぞれの核種で $0.05\text{Bq}/100\text{g}$ が暫定基準値



## 基準値は100Bq/kgですが...

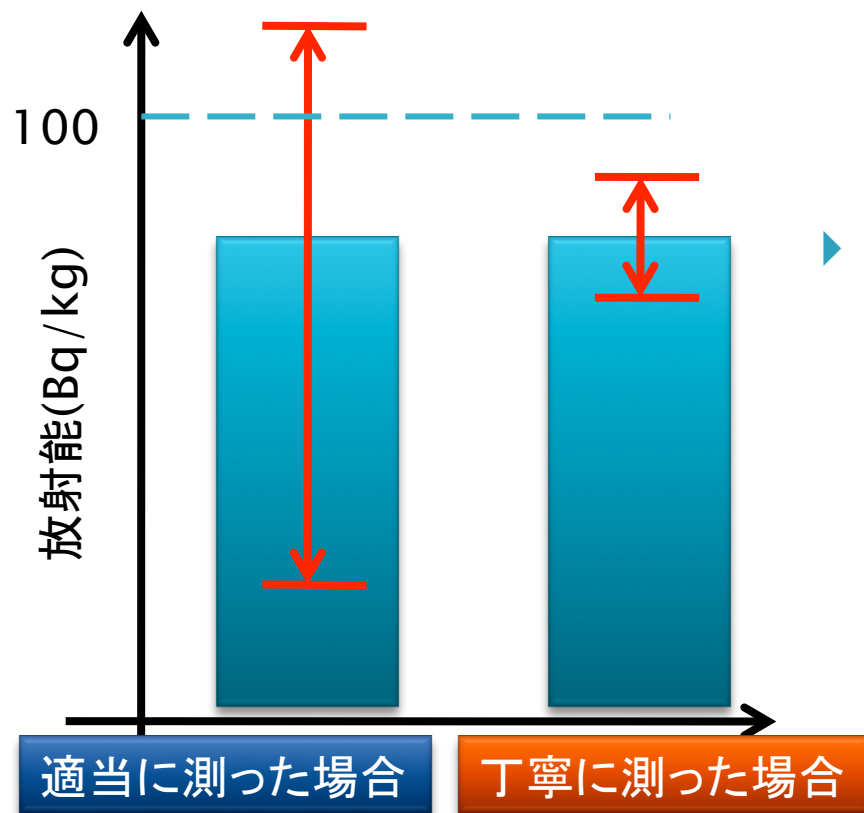
- ▶ 測定の現場では $^{134}\text{Cs}$ ,  $^{137}\text{Cs}$ が0.05Bq/100g越えていれば、「基準値超過」です。
- ▶ 0.05Bq(/100g)とは20秒間に1回崩壊する速度です。
- ▶ 放射線は確率で崩壊しますので、崩壊の感覚が「急に早く」なったり「急に遅くなったり」する揺らぎがあります。
- ▶ 0.05Bq(/100g)の揺らぎの影響を少なくするためには、数時間の測定が必要

# 「不検出」の表記について

- ▶ NDとはNot detected(検出されず)の略です。
- ▶ 仮にたっぷり放射性セシウムが入っていても、1-2分の測定では放射能を決定することができません。この場合、NDと表記されることがあります。
- ▶ 一般的には時間をかければかけるほど、精度良く測れます。(時間の平方根に比例して精度が良くなります)
- ▶ 100Bq/kgの基準値の判定なら、Ge半導体検出器で最低でも1時間以上の測定が必要です。NaIなら特殊な訓練が必要。

# 信頼できる測定とは...

- ▶ エラーバー(誤差)が付いている測定結果です。
- ▶ 誤差の大きさや特徴で、どんな測定をしたのか分かります。



- ▶ 一見すると、100Bq以下でもエラーバーを考慮すると超過していることは十分に考えられます。

# 10試料の測定結果(良くない表記)

No.	試料	採取場所	$^{134}\text{Cs}$ (Bq/kg)	$^{137}\text{Cs}$ (Bq/kg)
1	畑の土	練馬区内	ND	14.1
2	ジャガイモ	練馬区内	4.58	7.16
3	培養土	練馬区内	5.95	9.35
4	梅	練馬区内	ND	ND
5	干し椎茸	群馬産	ND	ND
6	路傍の土	練馬区内	4110	6330
7	生椎茸	富山産	ND	ND
8	カツオ	?	ND	ND
9	田圃の土	練馬区内	185	298
10	ブルーベリー	練馬区内	1.42	ND



# 10試料の測定結果(ちょっと良い)

No.	試料	採取場所	$^{134}\text{Cs}$ (Bq/kg)	$^{137}\text{Cs}$ (Bq/kg)
1	畑の土	練馬区内	ND	14.1±2.17
2	ジャガイモ	練馬区内	4.58±0.55	7.16±0.86
3	培養土	練馬区内	5.95±1.43	9.35±1.89
4	梅	練馬区内	ND	ND
5	干し椎茸	群馬産	ND	ND
6	路傍の土	練馬区内	4110±20.9	6330±38.7
7	生椎茸	富山産	ND	ND
8	カツオ	?	ND	ND
9	田圃の土	練馬区内	185±11.6	298±19.4
10	ブルーベリー	練馬区内	1.42±0.29	ND

# 10試料の測定結果(詳細)

No.	試料	採取場所	$^{134}\text{Cs}$ (Bq/kg)	$^{137}\text{Cs}$ (Bq/kg)
1	畑の土	練馬区内	ND(5.56)	14.1±2.17
2	ジャガイモ	練馬区内	4.58±0.55(0.23)	7.16±0.86(2.33)
3	培養土	練馬区内	5.95±1.43(5.82)	9.35±1.89(6.78)
4	梅	練馬区内	ND(2σ)(3.98)	ND(2σ)(4.04)
5	干し椎茸	群馬産	ND(26.6)	ND(29.4)
6	路傍の土	練馬区内	4110±20.9(24.6)	6330±38.7(21.6)
7	生椎茸	富山産	ND(5.65)	ND(5.73)
8	カツオ	?	ND(4.12)	ND(5.32)
9	田圃の土	練馬区内	185±11.6(37.5)	298±19.4(33.5)
10	ブルーベリー	練馬区内	1.42±0.29(1.01)	ND(2σ)(1.38)

# 食品の測り方

- ▶ 食品の放射能は正確に測りにくい！
  - 水っぽい(水は放射線の遮蔽剤)
  - 隙間があったり密度が一定じゃなかったり
  - サンプルには揺らぎがある

なぜ灰にするの？

1. 焼却炉の灰と同じ理屈、要するに濃縮したい
2. 水分がなくなるので測りやすい

食品(トマト)の前処理

生トマト



凍結乾燥後



灰化後



ゲルマに！



上手に灰(炭)にしてあげる

# 空間線量率の測定器の種類は3種類

$\beta(\gamma)$

$\gamma$

$\gamma$

ガイガーミュラー計数管

NaIシンチレーションカウンタ

CsIシンチレーションカウンタ



日立アロカ社ウェブサイトより



HORIBA社ウェブサイトより

測定器から出る音 = 放射線1発



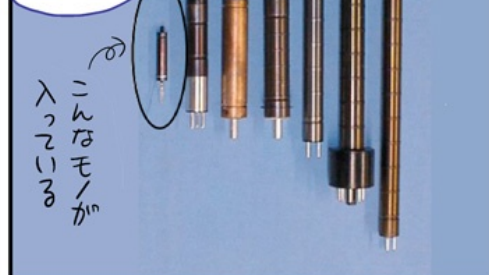
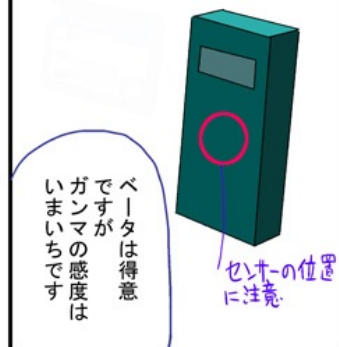
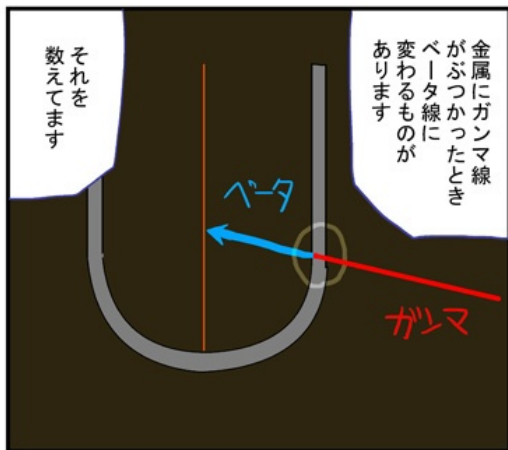
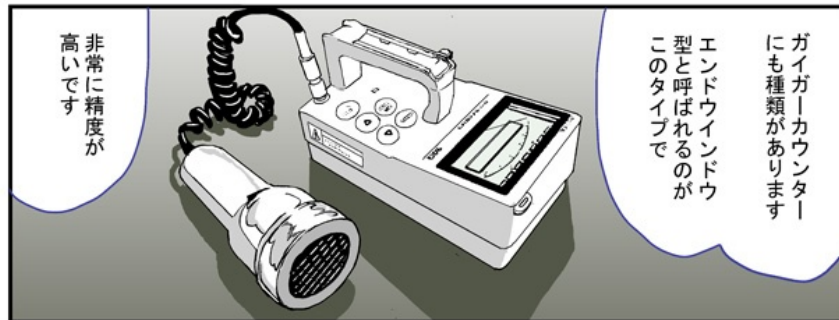
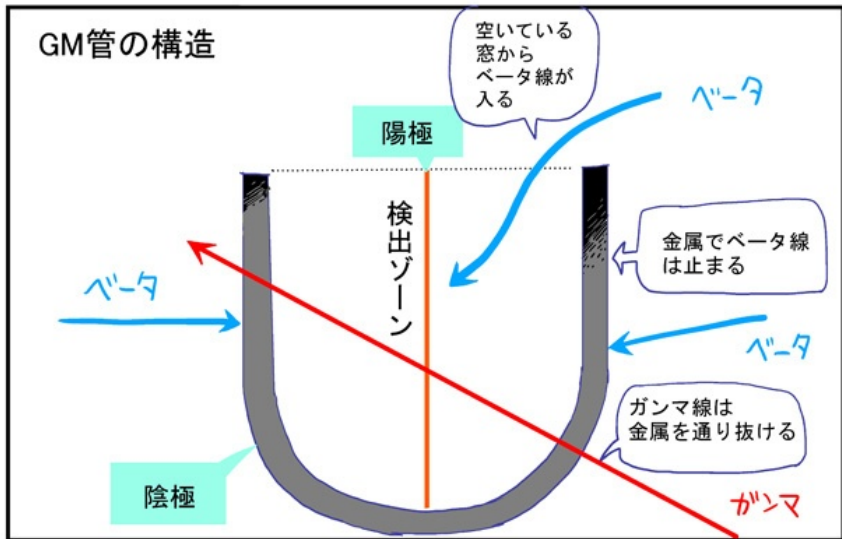
日立アロカ社ウェブサイトより

- ▶ この音、一秒間に何回鳴っていますか？
- ▶ その数がものすごく簡単に言えば「ベクレル」です。

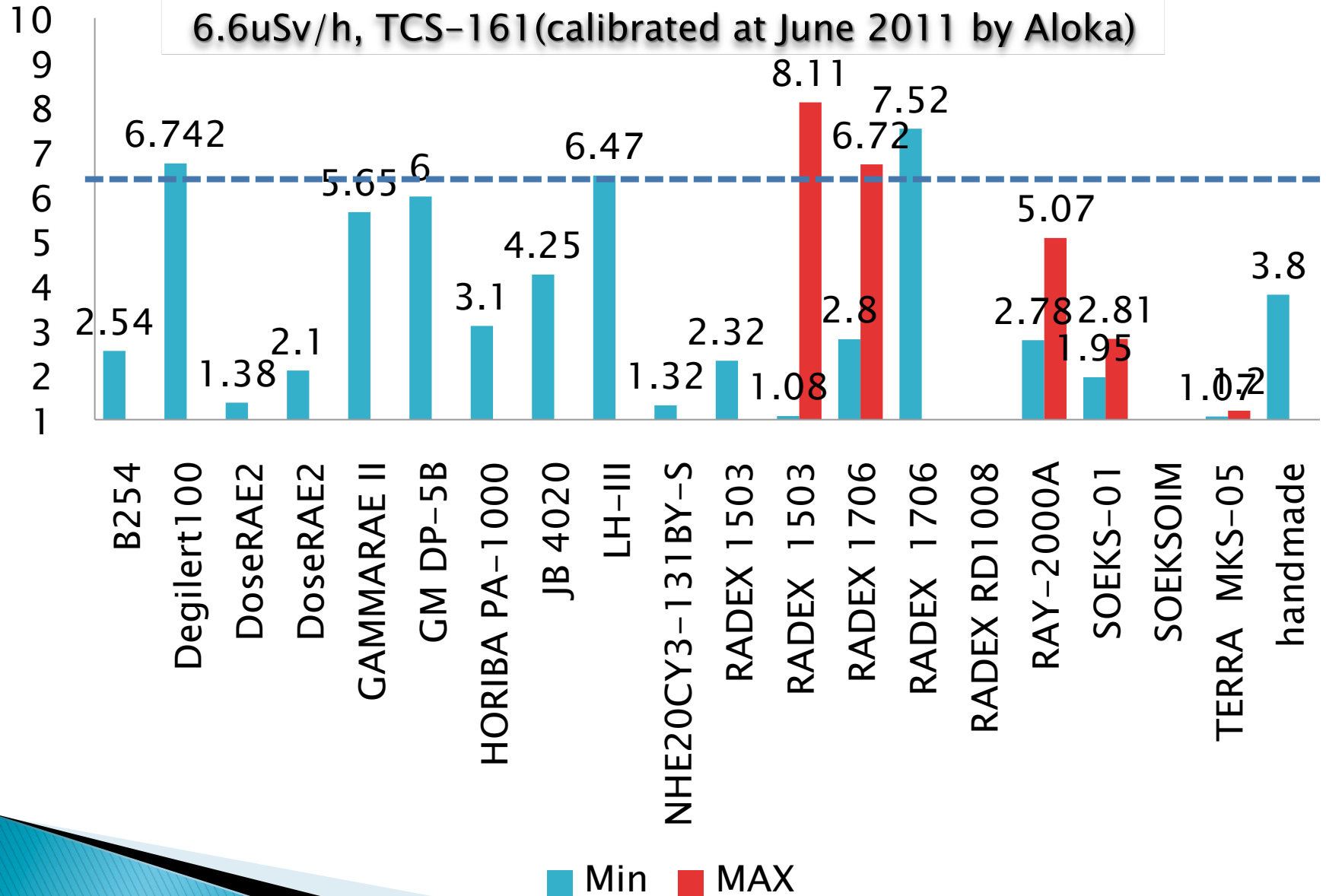
ここで福島第一原子力発電所から採取してきた試料の放射能を測ってみます。



# 放射能の正しい測り方 / 野尻美保子先生解説



# 以前の勉強会での測定結果



## 線量計の正しい見方は

- ▶ 本来なら、『標準線源』を用いて線量値の校正を行うべき。
- ▶ 校正作業ってコストが高い/そもそも校正できないものも。
- ▶ だとすれば、せめて同じ線量計で、「**相対変化**」を見るべき。
- ▶ 近づける距離や、対象を決めて、時間とともにどのように値が変化するか、を観察することが最も正しい姿勢。
  - **今あるホットスポットは今後どうなる？**



# 放射線を測定する科学 - 環境放射化学(2)

## ▶ 環境放射化学

- 福島第一原発周辺(0-35km圏内)の放射能と核種
- 「ホットスポット」の核種の挙動
- 駒場キャンパスの線量

## ▶ 放射性物質の濃縮と拡散(ホットスポットはなぜできる?)

- ▶ 今回の講義で「測定法」を議論した。その結果を踏まえて、環境試料に含まれる放射性物質の挙動について議論したい。

核種のマクロな挙動を理解して欲しい