

第47回 日本食品照射研究協議会  
教育講演会  
2011年12月2日(金) アルカディア市ヶ谷

# 放射線・放射能の基礎とその計測技術 —福島原発事故の影響に伴う放射線計測—

社団法人日本アイソトープ協会  
事業本部 中村吉秀

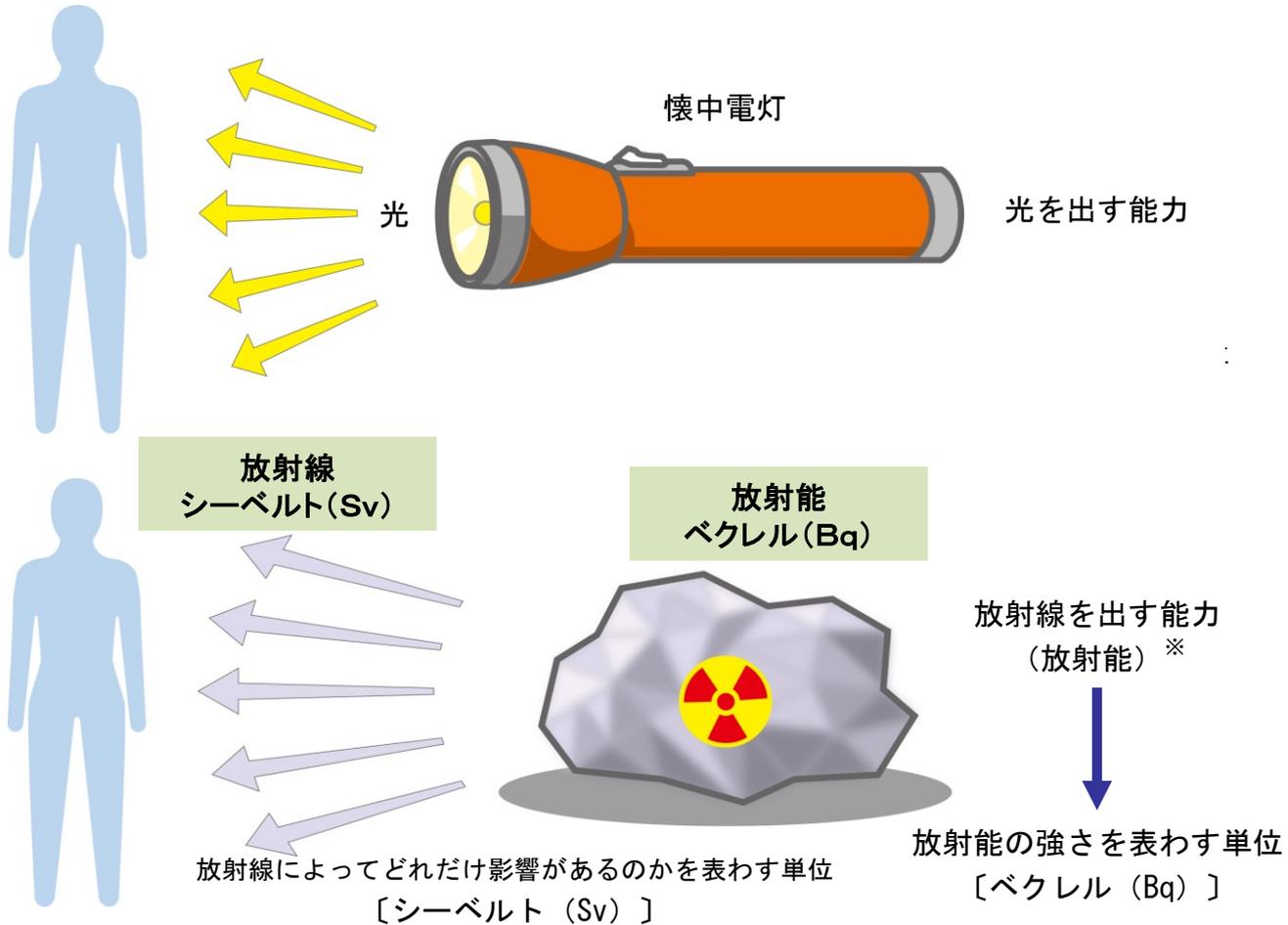
# 放射性壊変

放射線を出して原子核が変化する現象を放射性壊変（壊変）

壊変前を親核種，壊変後を子孫核種

- ◎  $\alpha$  線： 高速（光の5～7%）の $^4\text{He}$ 原子核
- ◎  $\beta$  線： 高速（光の25～98%）の電子または陽電子
- ◎  $\gamma$  線，X線：  
エネルギーの高い光（光子，電磁波）

# 放射能と放射線



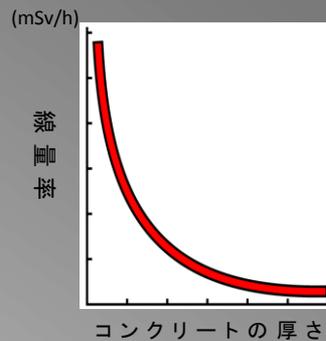
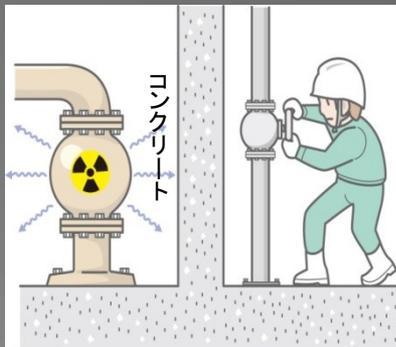
※放射能を持つ物質（放射性物質）のことを指して用いられる場合もあります

# 放射線に関する単位

名 称	単 位 名 (記 号)	定 義
放射能の単位 国際単位系 (SI)		
放射能	ベクレル (Bq)	1 秒間に原子核が崩壊する数を表す単位
放射線量の単位 国際単位系 (SI)		
吸収線量	グレイ (Gy)	放射線のエネルギーがどれだけ物質（人体を含むすべての物質）に吸収されたかを表す単位。 1Gyは 1 kgあたり 1 ジュールのエネルギー吸収があったときの線量。
線 量	シーベルト (Sv)	放射線によってどれだけ影響があるかを表す単位 (1シーベルト=1000ミリシーベルト)
エネルギーの単位		
エネルギー	エレクトロンボルト/ 電子ボルト (eV)	放射線等のエネルギーを表す単位 (1eV=1.6×10 <sup>-19</sup> J)

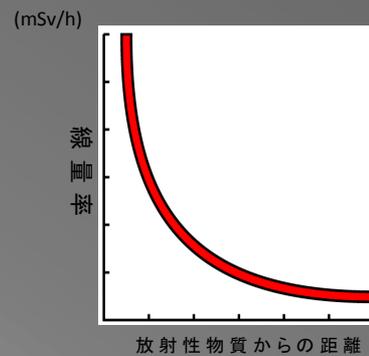
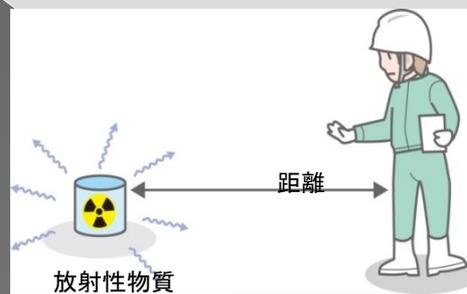
# 放射線防護の3原則

## 1. 遮へいによる防護



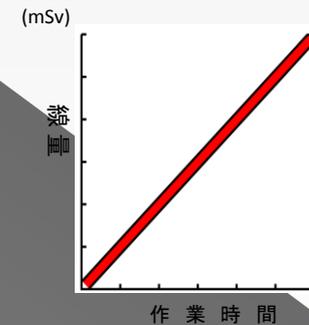
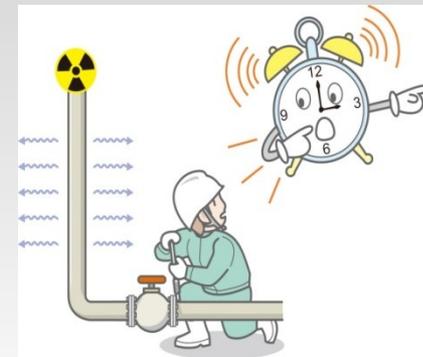
## 2. 距離による防護

(線量率) = (距離)<sup>2</sup> に反比例



## 3. 時間による防護

[線量] = [作業場所の線量率] × [作業時間]



# 電離及び励起作用

$\gamma$  線の場合は光電効果, コンプトン散乱,  
電子対生成による二次電子

荷電粒子線

相互作用

安定状態にある原子

電離

励起

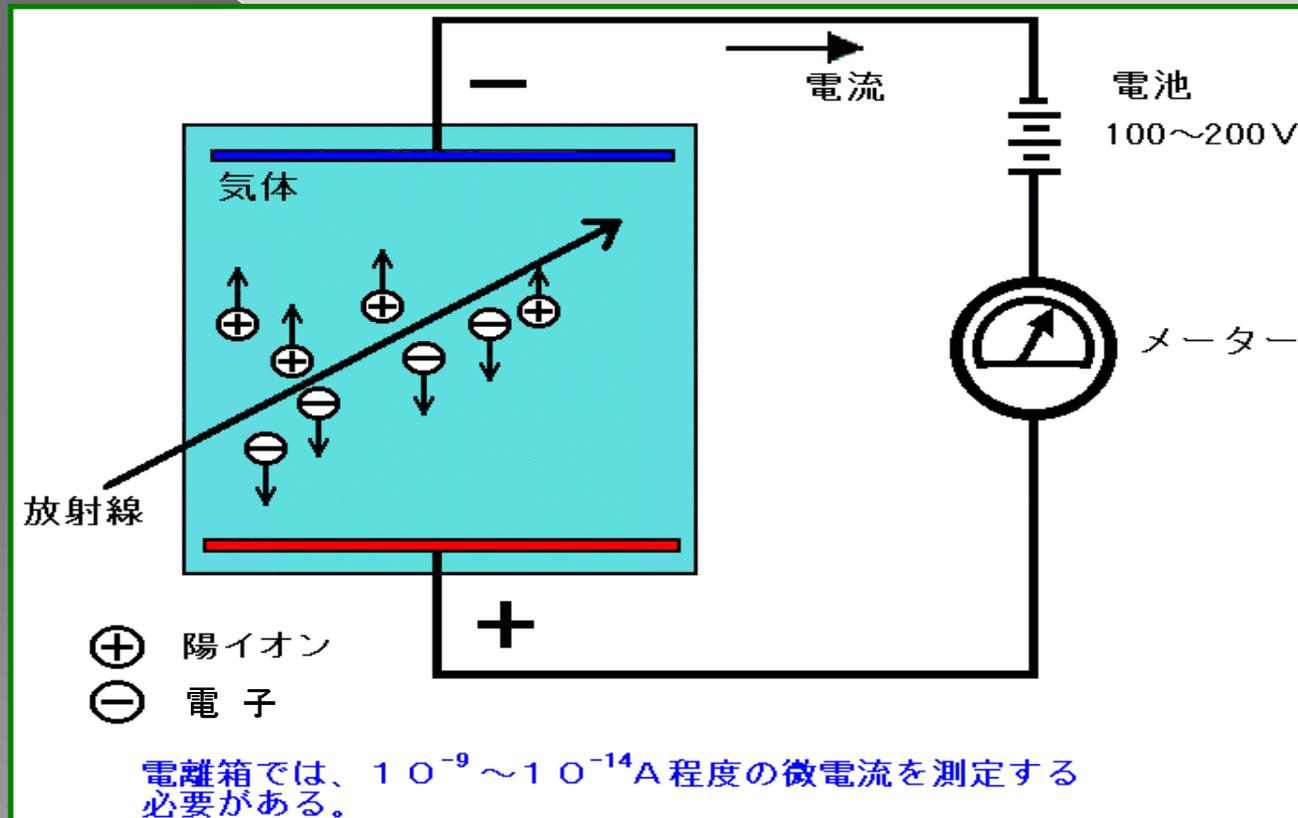
励起状態にある原子

自由電子

電子-  
イオン対

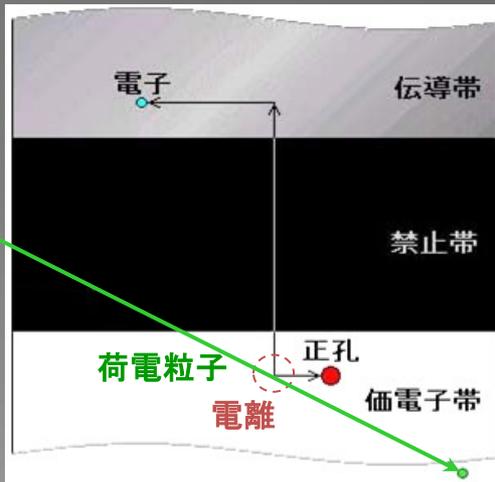
陽イオン

# 電離箱による測定原理(電離作用)



# 半導体検出器の測定原理

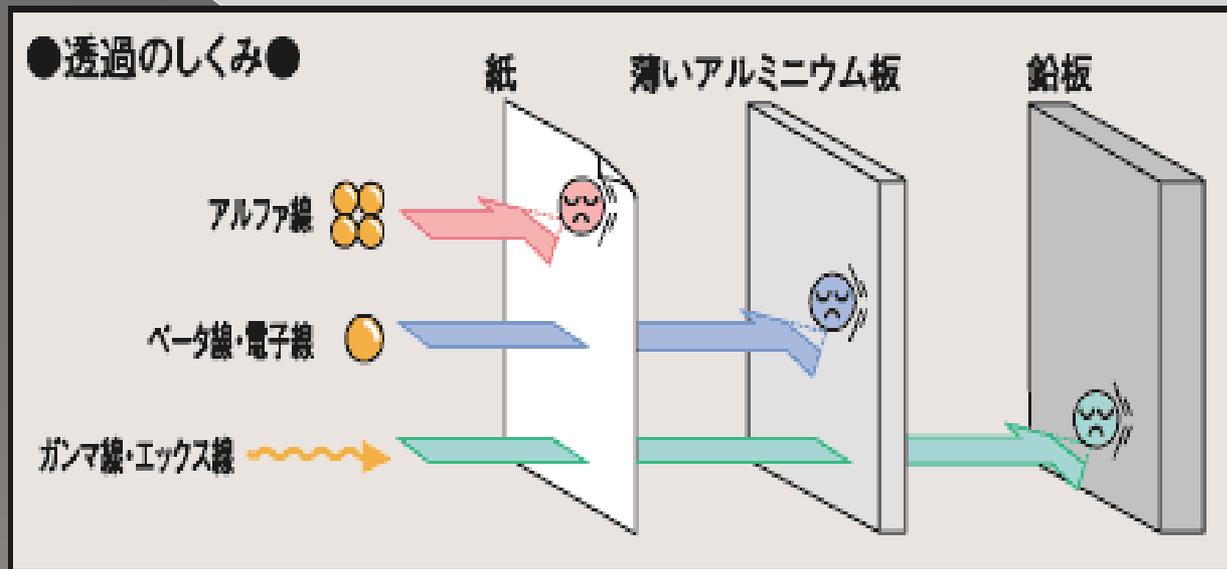
- 固体の電離を利用
- 放射線による価電子帯から伝導帯への電子の移動  
(自由電子-正孔対の生成)
- 電子-正孔対生成 固体 $\epsilon$  値 Ge; 3.0eV, Si; 3.6eV  
気体W値 (27-38eV)のおよそ10分の1  
エネルギー分解能は非常によい



単位: eV

半導体 $\epsilon$ 値					気体 W値			
Si	Ge	GaAs	CdTe	HgI <sub>2</sub>	He	Ar	Xe	空気
3.61	2.96	4.27	4.43	4.15	41.3	26.4	22.1	34.0

# 放射線による透過力の違い

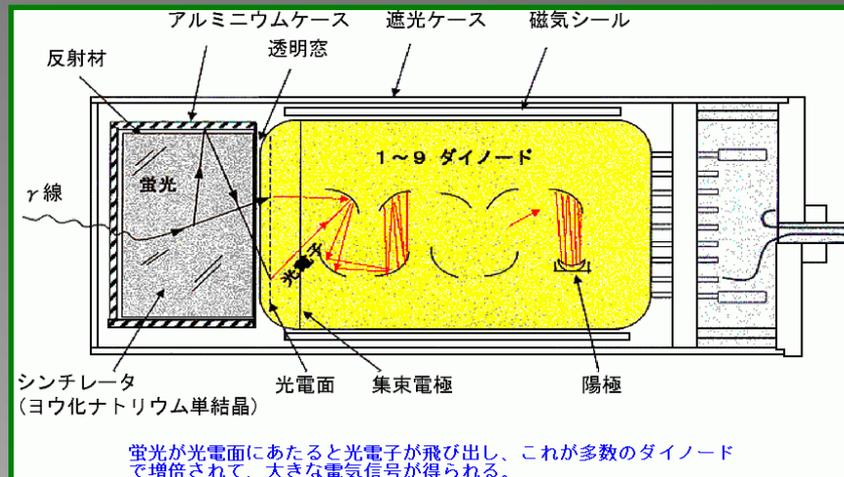
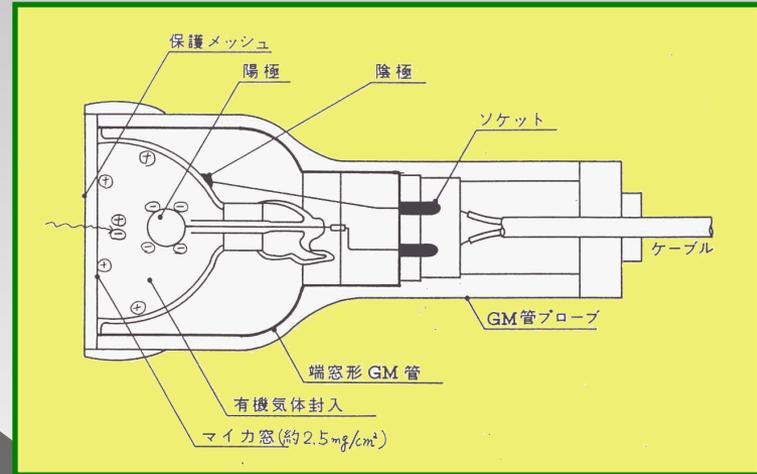


$^{134}\text{Cs}$ ,  $^{137}\text{Cs}$ ,  $^{131}\text{I}$  はベータ線とガンマ線の両方を出す

# NaI(Tl)シンチレーション検出器とGM計数管

## GM計数管:

- ・入射窓厚が薄く(マイカ:  $2 \sim 3 \text{ mg/cm}^2$ )  
β線が検出部に入射する構造
- ・γ線は通過してしまうので, 検出感度は低い
- ・一般的にはβ線専用



## NaI(Tl)シンチレーション検出器:

- ・β線は検出部に入射できない構造であり, 計測できない
- ・一般的にγ線専用

# 放射線量(率) ( $\mu\text{ Sv}$ , $\mu\text{ Sv/h}$ )の測定に用いられるサーベイメータ

電離箱式サーベイメータ



測3 社団法人 日本アイソトープ協会  
放射線取扱主任者部会 ©1992

電離箱式サーベイメータ

## 放射能( $\text{Bq}$ , $\text{Bq/kg}$ )の算出

放射能( $\text{Bq}$ )は直接測れない  
測れるのは「放射線」 $\Rightarrow$ 放射能に換算

シンチレーション式サーベイメータ

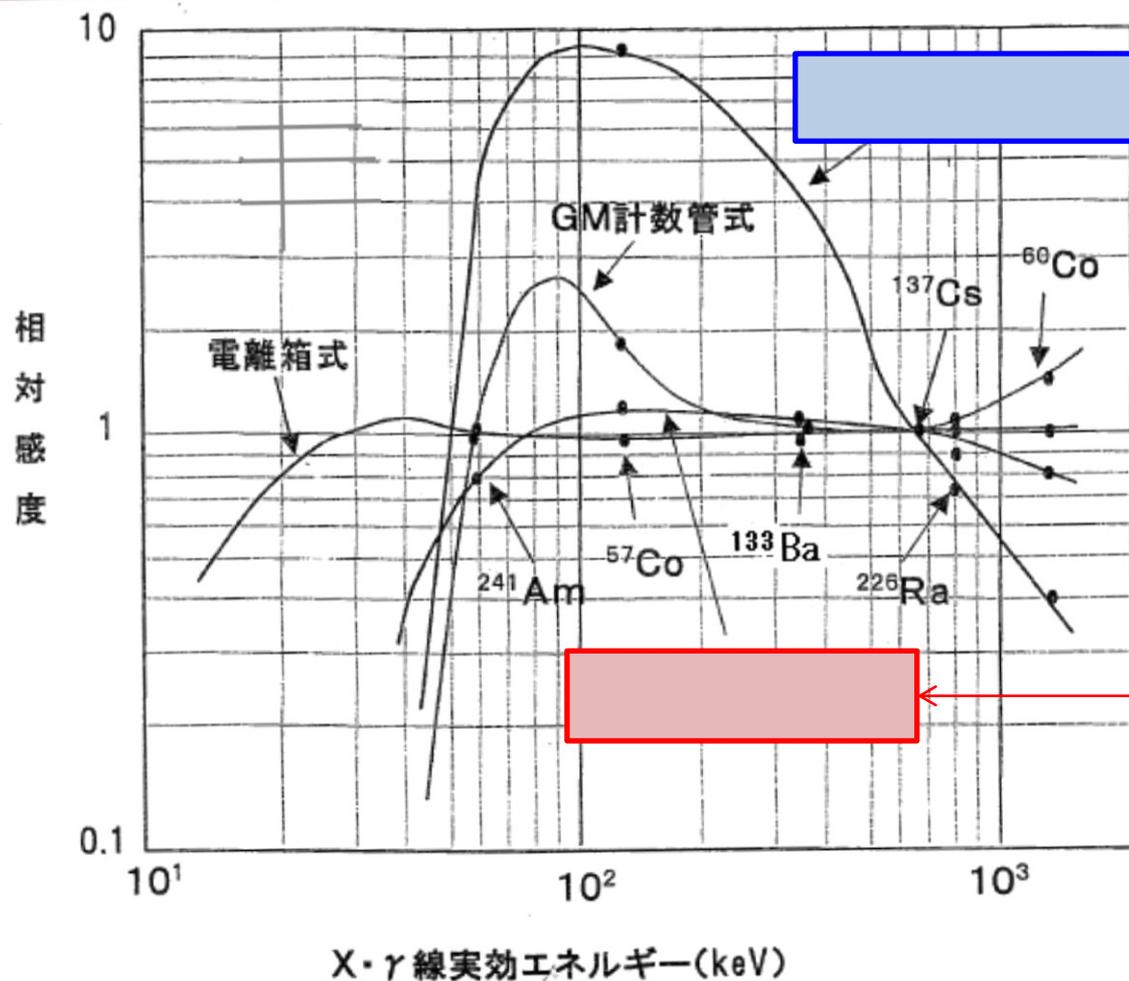


測2 社団法人 日本アイソトープ協会  
放射線取扱主任者部会 ©1992

NaI(Tl)シンチレーション式サーベイメータ

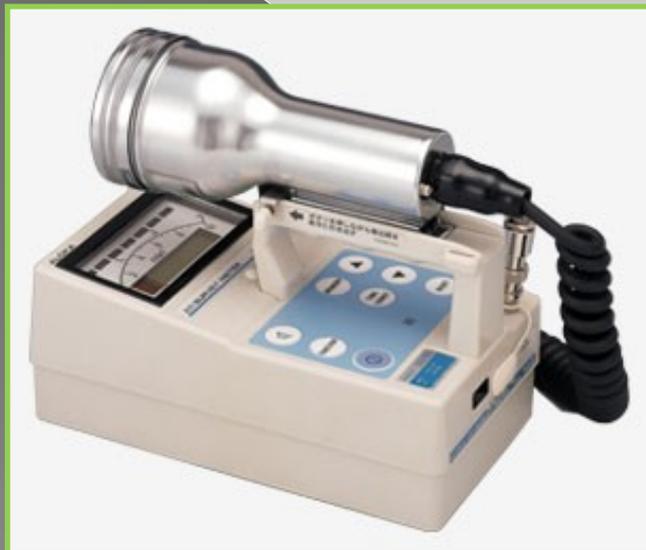
$$\text{放射能 (Bq)} = \text{放射線の量 (数) (cps, cpm)} \times \text{校正定数 (1/計数効率)}$$

# サーベイメータのエネルギー特性



波高弁別による  
エネルギー特性改善

表面汚染測定に用いられるサーベイメータ -β線測定用-



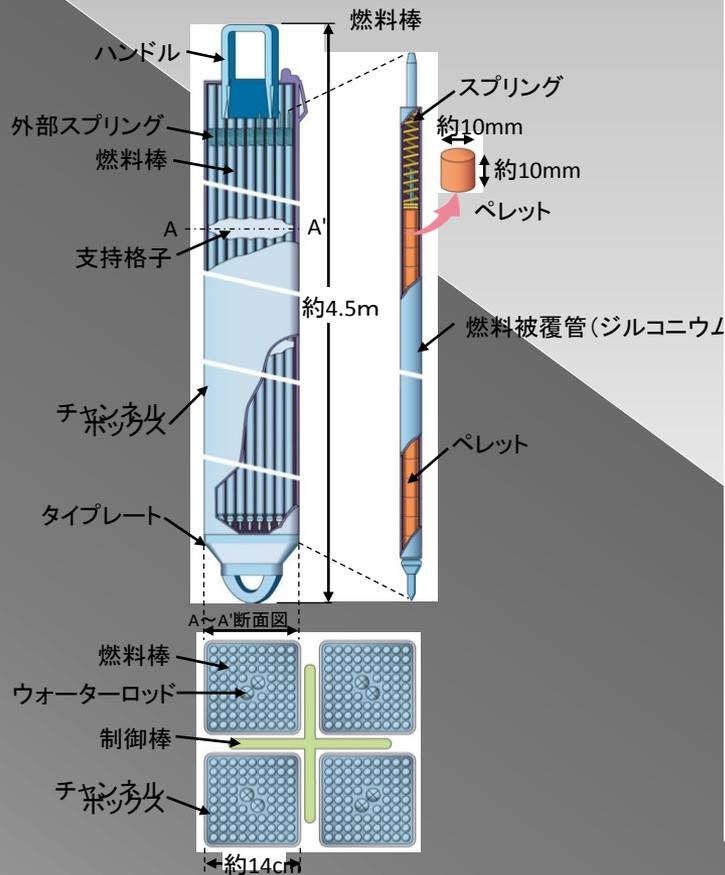
GMサーベイメータ



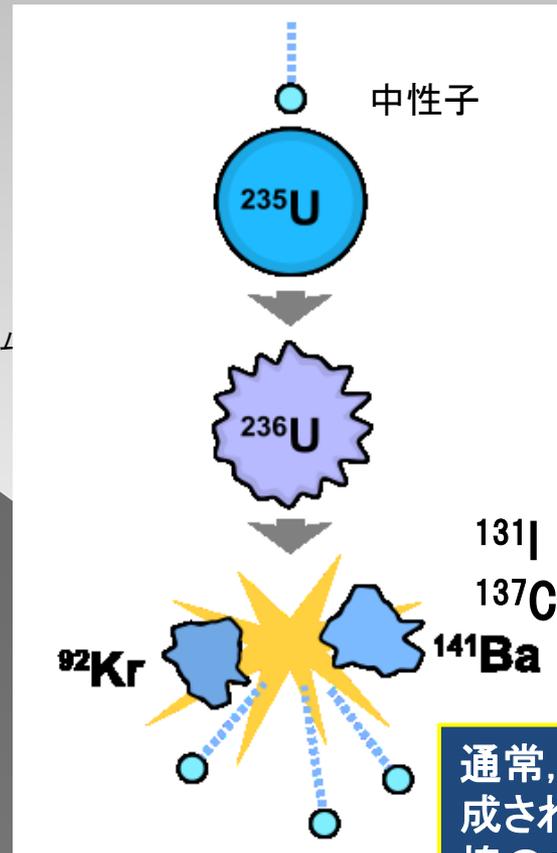
プラスチックシンチレーションサーベイメータ

$$\begin{aligned} \text{表面汚染密度 (Bq/cm}^2\text{)} \\ = \text{放射線の量 (数) (cps, cpm)} \times \text{校正定数} \\ \text{(1/計数効率)} \end{aligned}$$

# 燃料集合体の構造と核分裂反応

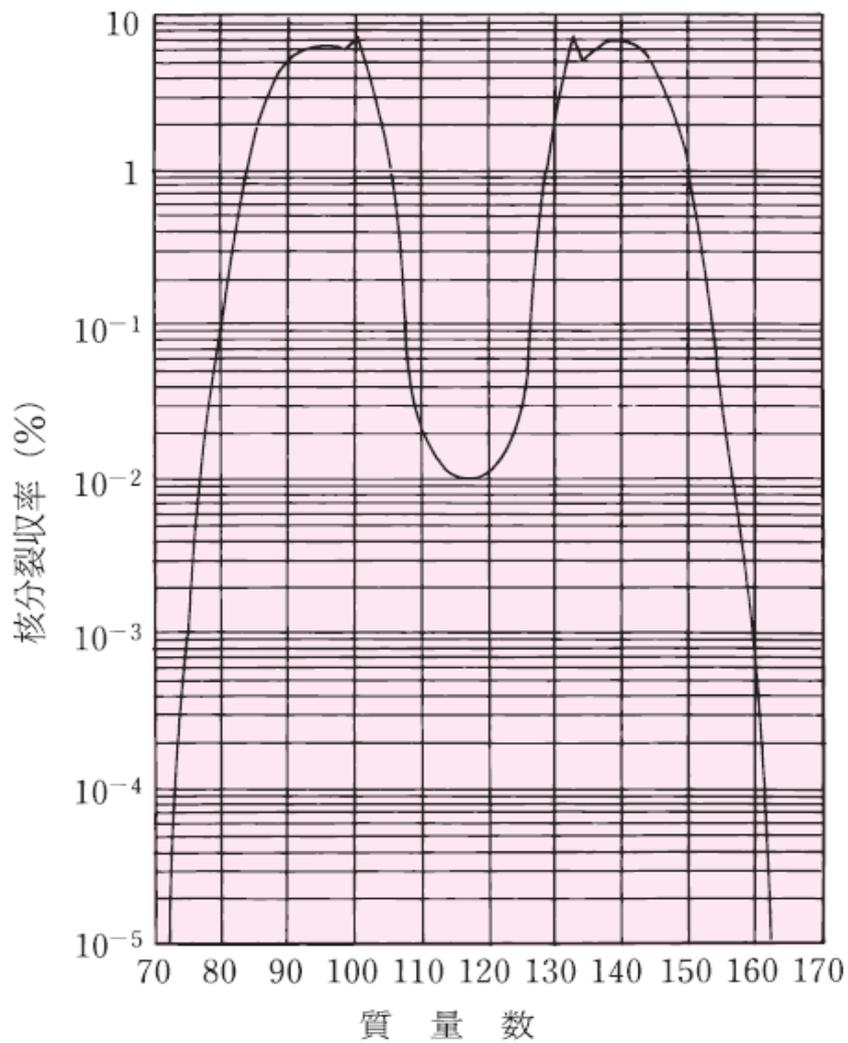


沸騰水型炉 (BWR)



核分裂反応

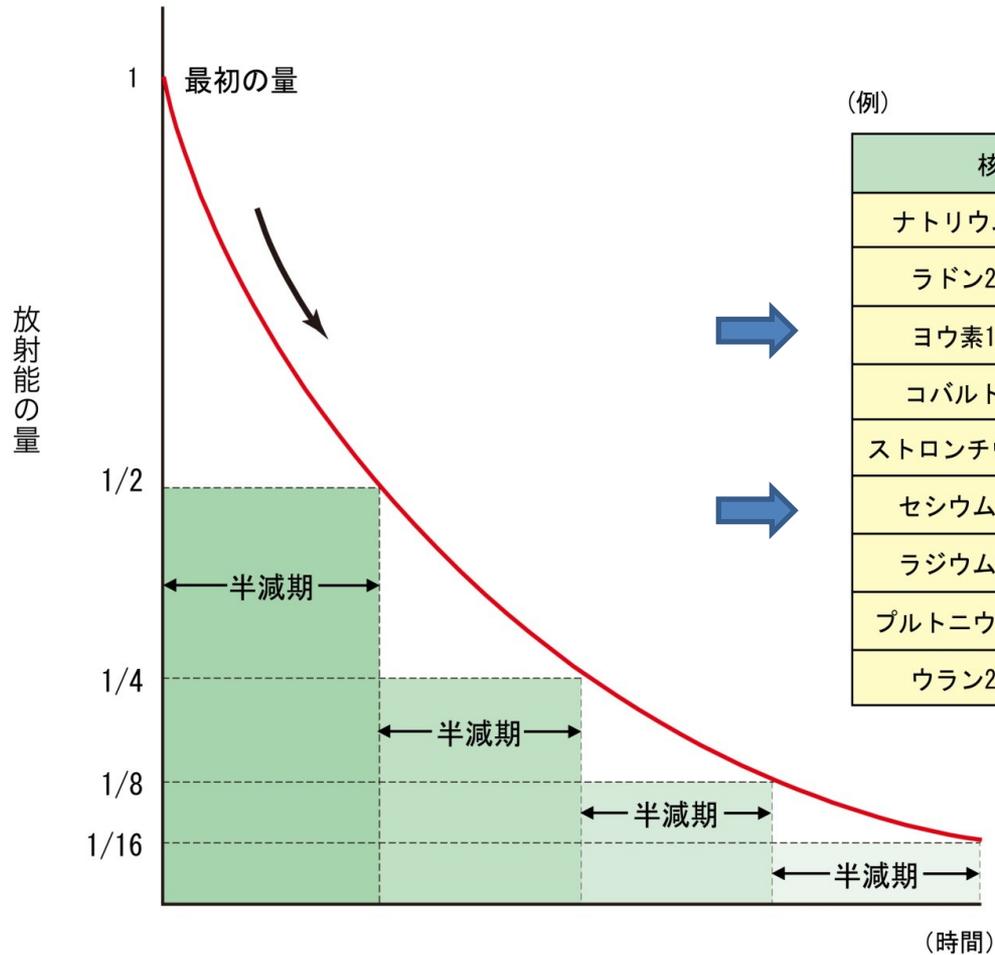
# $^{235}\text{U}$ の低速中性子による核分裂収率曲線



核分裂反応が進んでいるときは  
左図のような核種が生成されて  
いる。

反応終了後は半減期により減  
衰する

# 放射能の減り方(半減期)



(例)

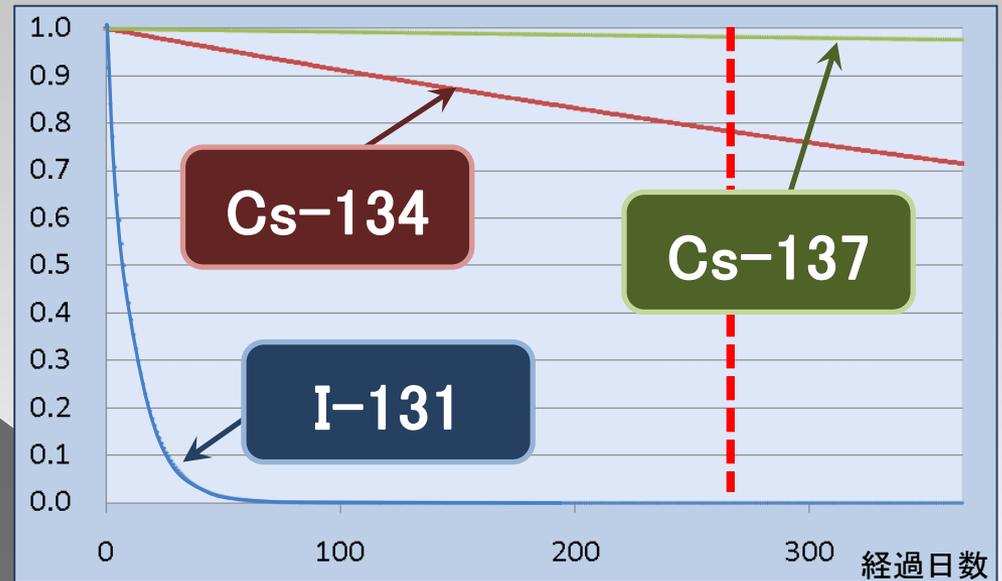
核種		半減期
ナトリウム24	$^{24}\text{Na}$	15.0時間
ラドン222	$^{222}\text{Rn}$	3.8日
ヨウ素131	$^{131}\text{I}$	8.0日
コバルト60	$^{60}\text{Co}$	5.3年
ストロンチウム90	$^{90}\text{Sr}$	28.8年
セシウム137	$^{137}\text{Cs}$	30年
ラジウム226	$^{226}\text{Ra}$	1,600年
プルトニウム239	$^{239}\text{Pu}$	2.4万年
ウラン238	$^{238}\text{U}$	45億年

# 主な残存核種と化学的挙動

2011年3月11日  
事故停止



2011年12月2日  
経過日数: 266日

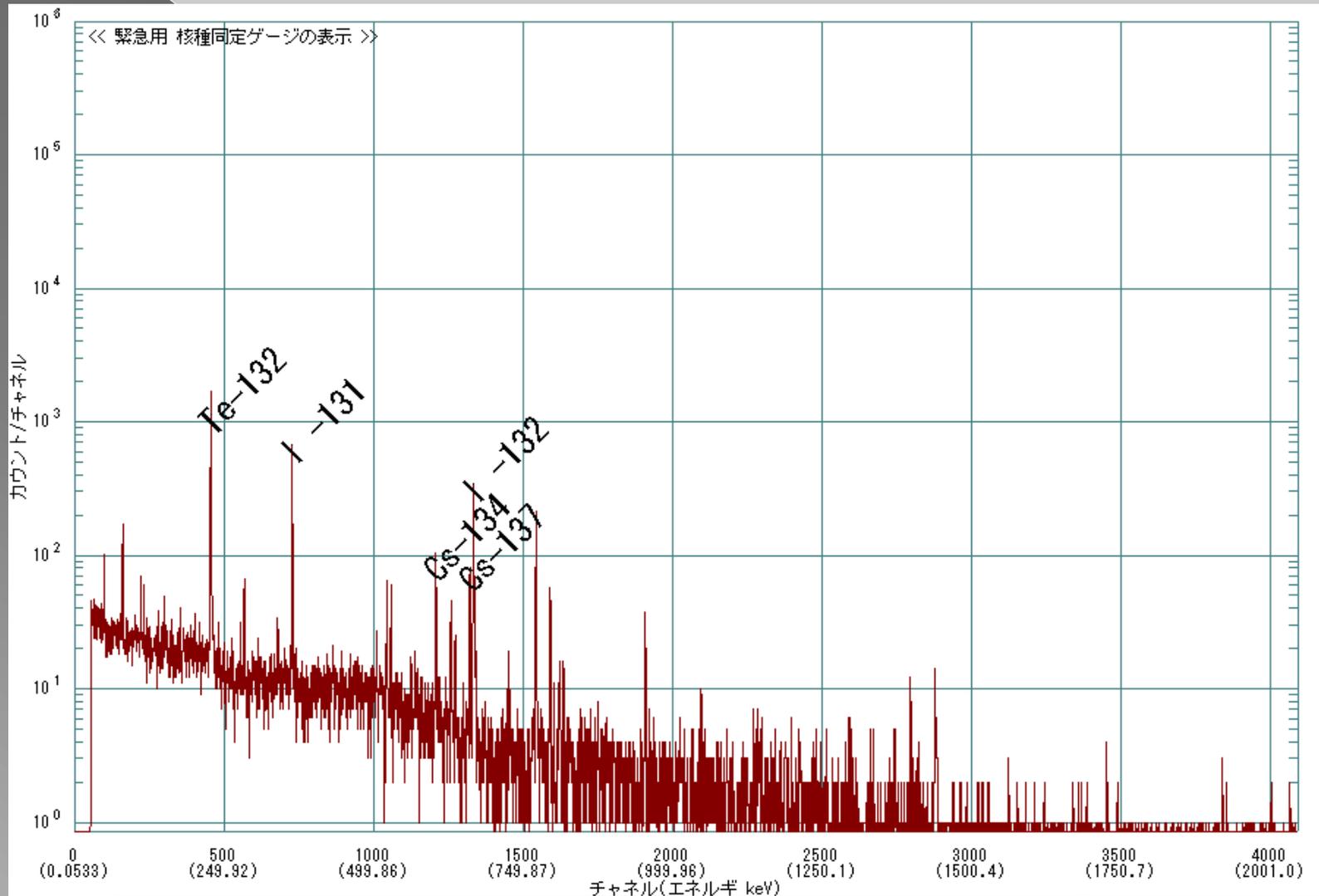


核種	半減期	減衰率
I-131	約8日	約 $9.8 \times 10^{-11}$
Cs-134	約2年	約0.78
Cs-137	約30年	約0.98

主たる化学的性質は元素で決まり、核種の違いにはよらない  
→ 飛散後のCs-134とCs-137の放射能比は一定

# Ge半導体検出器による $\gamma$ 線スペクトル

## 事故直後の $\gamma$ 線スペクトル例



# Ge半導体検出器を用いた $\gamma$ 線スペクトロメトリーの特徴

- 1) エネルギー決定の精度が高いため、核種の同定が容易である。  
ガンマ線のエネルギー分析から核種( $\gamma$ 線放出各種)が決定できる。  
同時に多核種の分析ができる。  
同位体の分別定量ができる。
- 2) 低レベル放射能の分析に適している。  
バックグラウンドが低い。  
数10g ~ 数kgの試料を測定できる。
- 3) 結果の信頼性が高い。  
高分解能のためピークの定量が比較的容易である。  
解析ソフトが整備されている。→文部科学省放射能測定法シリーズ準拠
- 4) 効率の校正がやや面倒である。(ユーザの技術とソフトに依存)
- 5) 日常保守必要である。(液体チツソの補給、電子回路の保守)

# NaI(Tl)シンチレーション検出器を用いた $\gamma$ 線スペクトロメトリの特徴

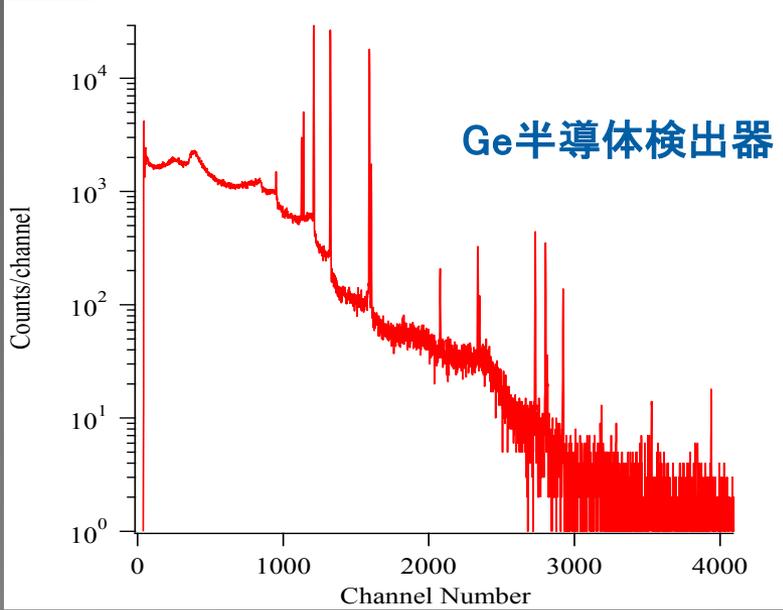
- 1) 計数効率が高い
- 2) メンテナンスが容易  
(液体窒素冷却等を要しない)
- 3) 分解能が悪い。
- 4) 装置によっては事実上エネルギー弁別できない。

対象核種を限定できれば十分活用できる

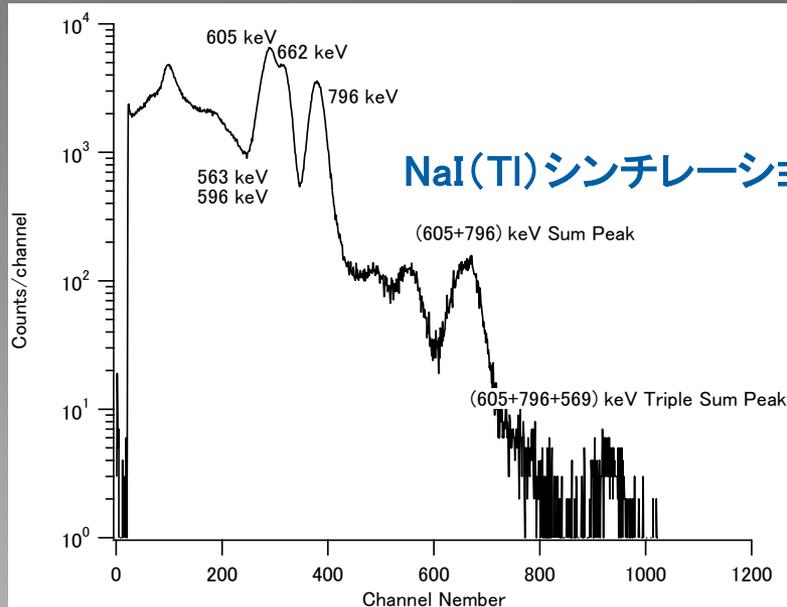
例えば、Cs-134とCs-137

厚生労働省「食品中の放射性セシウムスクリーニング法の一部改正について」等での活用

# エネルギー分解能



	主な $\gamma$ 線 エネルギー keV	放出割合
Cs-134	563	0.084
	569	0.154
	605	0.976
	796	0.850
	802	0.087
	1,365	0.03
Cs-137	662	0.851



# 測定精度にかかるとる要因

## ○ 測定器の性能

計数効率

エネルギー分解能

長期安定性(スペクトロメータの場合は印加電圧等,  
特に重要)

## ○ 測定器の校正

維持・管理

## ○ 測定試料の調整

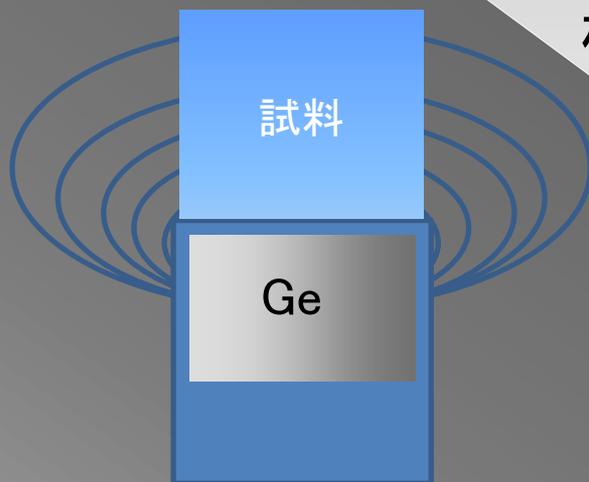
## ○ 測定条件

計測時間

バックグラウンド放射線(遮へい)

■  
■  
■  
■

# 体積線源に対する計数効率



検出効率の等高線

$$V(E_i) = 2 \int_0^h \int_0^R \frac{\varepsilon(E_i, r, z) \cdot r}{hR^2} dr dz$$

検出効率は幾何学的条件と $\gamma$ 線エネルギーで決まる



測定試料の形状毎に効率校正が必要

# Ge半導体検出器校正用放射能標準 $\gamma$ 線源



2Lマリネリタイプ



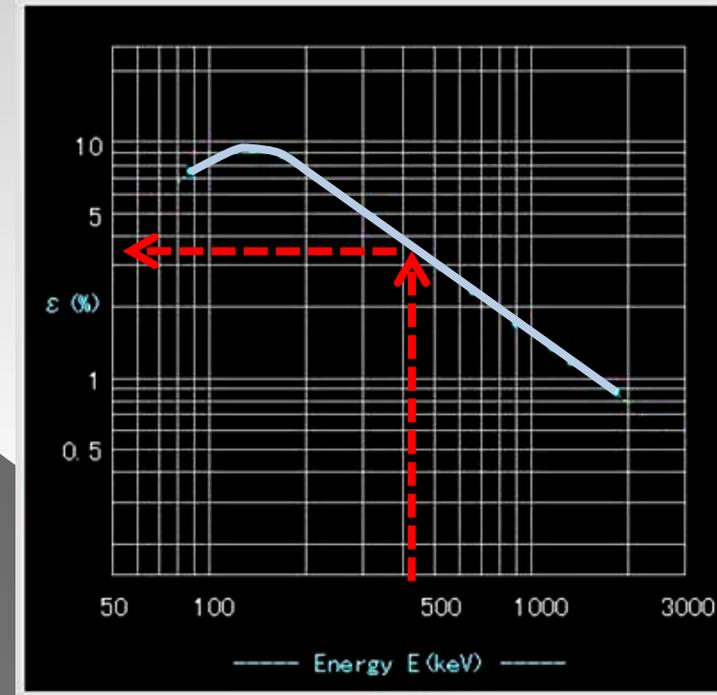
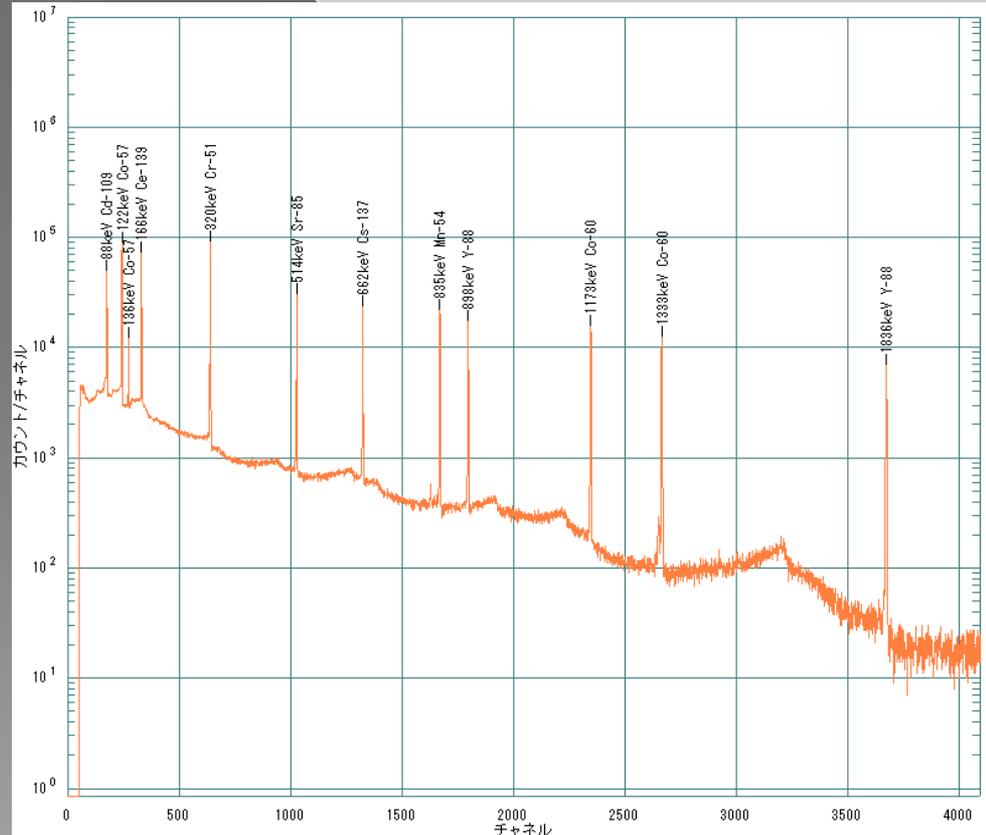
U8タイプ



同一線源の定点測定  
( $^{137}\text{Cs}$ ,  $^{60}\text{Co}$ )

有効な日常点検  
計数効率の確認

# Ge半導体検出器の効率校正 (9核種混合線源)



$$\varepsilon = \frac{N}{t \cdot A \cdot I}$$

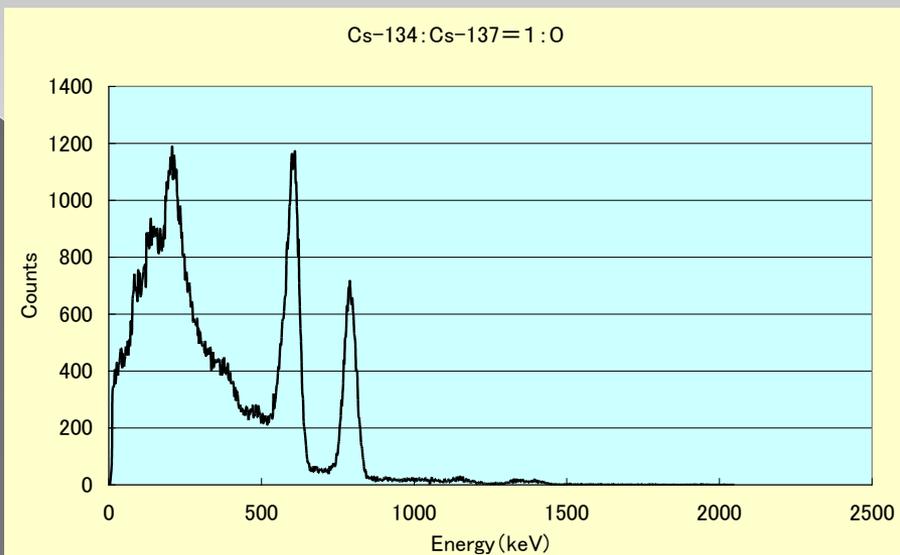
$\varepsilon$ : 検出効率

$N$ : ピーク面積 (計数)  $t$ : 計数時間 (s)

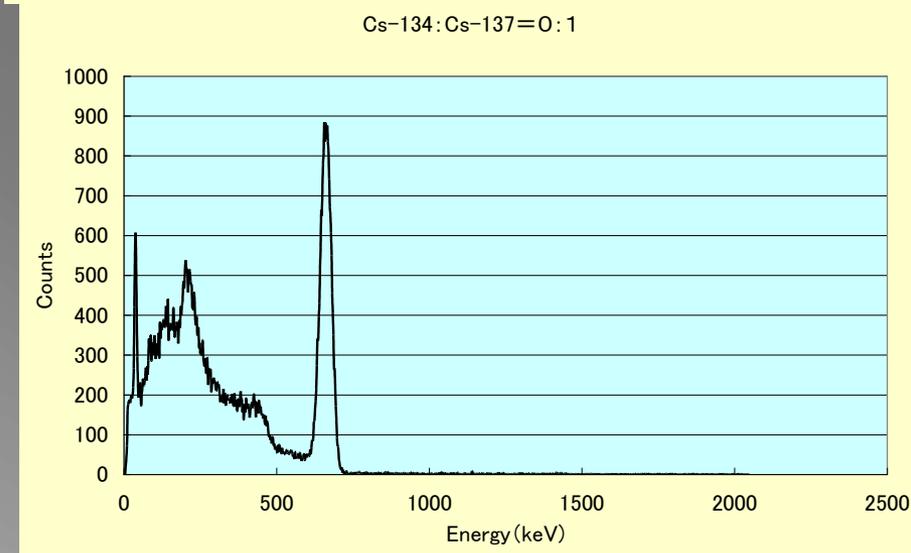
$I_\gamma$ : 線放出割合  $A$ : 標準線源の放射能

# NaI(Tl)検出器の $^{134}\text{Cs}/^{137}\text{Cs}$ 標準線源による校正

$^{134}\text{Cs}$ 単独スペクトル



$^{137}\text{Cs}$ 単独スペクトル



# 放射能標準線源のトレーサビリティ体系

国家標準機関 (NMIJ/AIST)

特定標準器

登録事業者(JRIA)

特定二次標準器

加圧型電離箱  
 $\gamma$  線スペクトロメータ

液体シンチレーションカウンタ

荷電粒子検出器

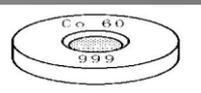
$\gamma$   
emitters

$\alpha/\beta$   
emitters

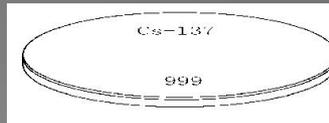
$\alpha/\beta$   
surface  
emission rate



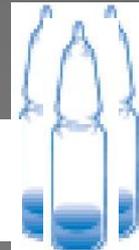
volume sources



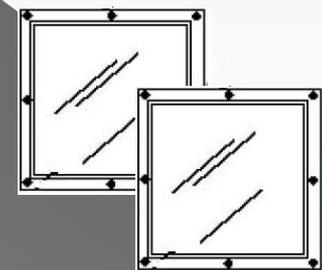
point sources



simulated filter sources



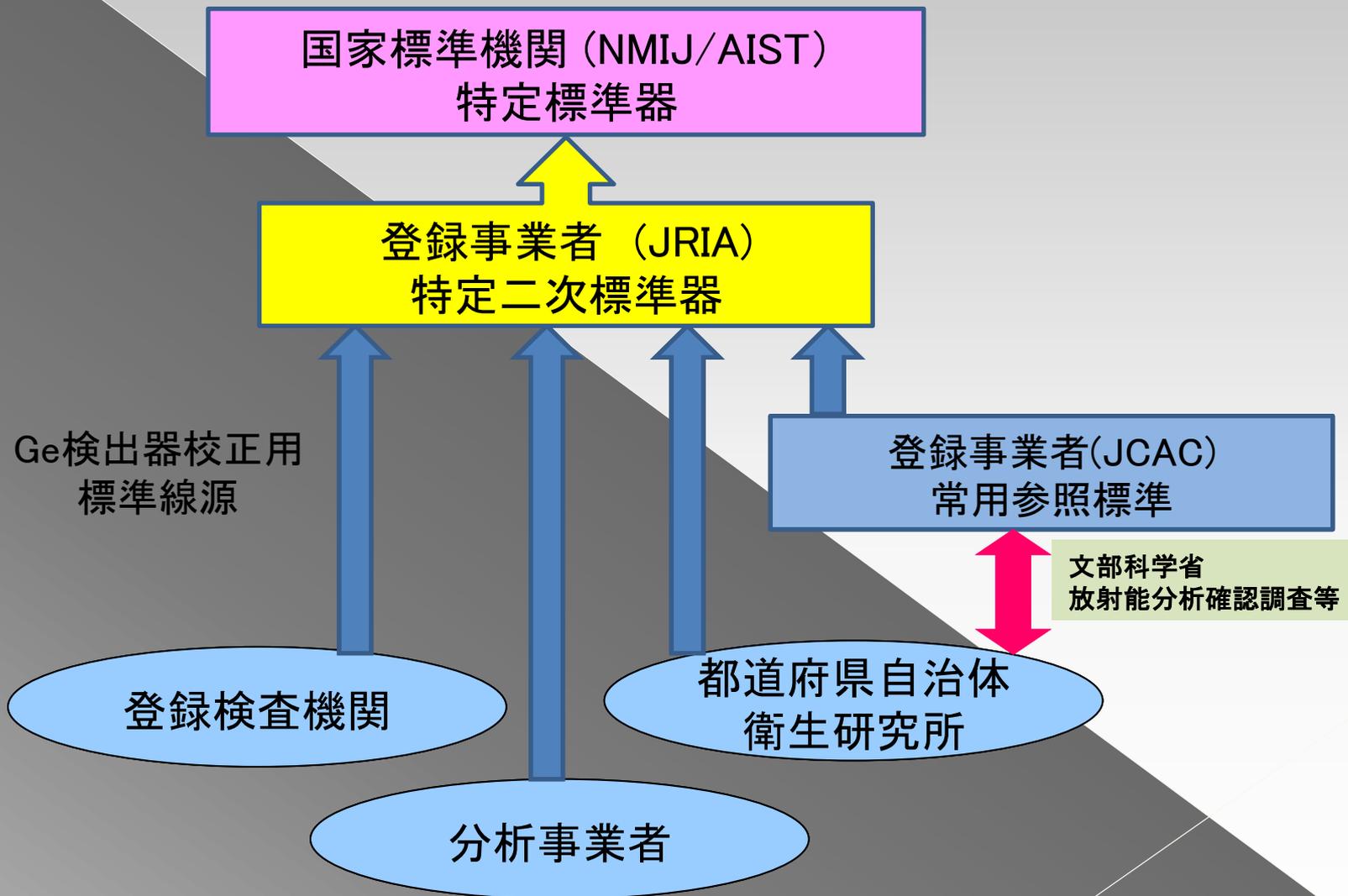
solutions



surface emission rate sources

各種標準線源

# 環境放射能測定に係るトレーサビリティ



# 測定試料の調整

## 放射能測定では試料調整が重要！

試料中の放射能分布は均一と仮定される

例えば肉：筋肉部分と脂身，筋肉部位

単一食材でない場合：加工食品

このような違いは測定結果に検出効率の大きな誤差を与える



マリネリ容器の試料調整は更に注意が必要



# γ 線計測時における 主なバックグラウンド(BG)放射線

- 天然の放射性核種

$^{232}\text{Th}$ (140億年,  $\alpha$  壊変, 壊変系列)

$^{238}\text{U}$ (45億年,  $\alpha$  壊変, 壊変系列)

$^{40}\text{K}$ (13億年,  $\beta$  壊変, 1.46MeV  $\gamma$  線)

- 外部放射線



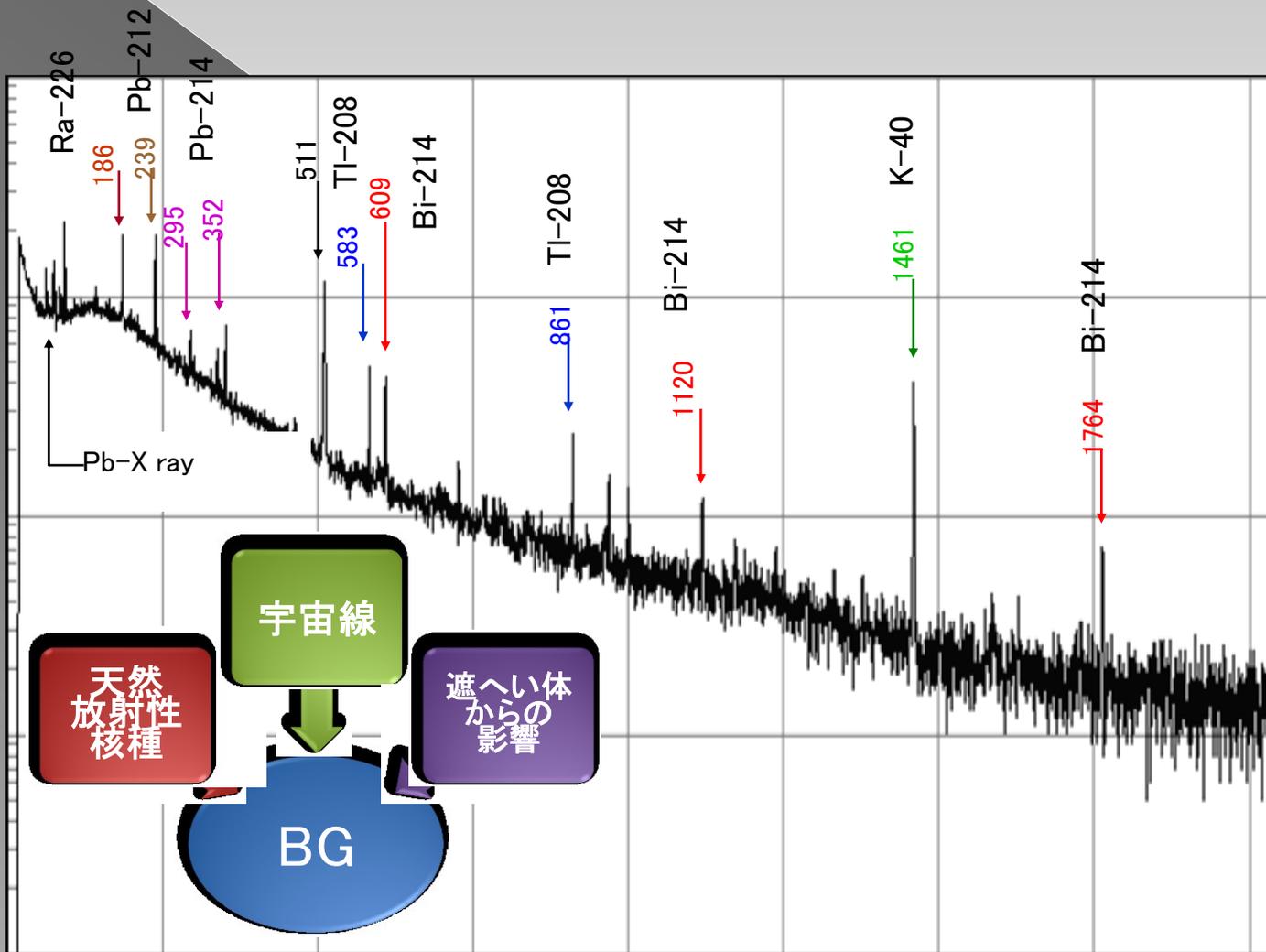
十分な遮へい体:

BGの低減,

BGの変動に対処できる



# バックグラウンドスペクトルの例 — Ge半導体検出器 —



# 食品中の放射能 —バックグラウンド—

## 体内、食物中の自然放射性物質

### ●体内の放射性物質の量

(体重60kgの  
日本人の場合)

カリウム40	4,000ベクレル
炭素 14	2,500ベクレル
ルビジウム87	500ベクレル
鉛 210・ポロニウム 210	20ベクレル

### ●食物中のカリウム40の放射能量(日本)

(ベクレル/kg)



出典：科学技術庁パンフ

人体：約7,000 Bq(体重60 kg)

### 食品中の放射能：

米	30 Bq /kg
ほうれん草	200 Bq /kg
牛肉、魚	100 Bq /kg
干しいたけ	700 Bq /kg
干しコンブ	2,000 Bq /kg

大部分が放射性カリウム(<sup>40</sup>K)による

# 検出限界・検出下限放射能(濃度)

- ◎ 測定結果がバックグラウンドと比較して有意の差→**検出**  
一般的に、 $(\text{正味計数率}) \pm (\text{計数の統計によるばらつき})$ で、正味計数率が計数誤差の3倍を超えた場合を“検出”  
→いわば便宜的な方法であり、妥当でない場合もある。

## 検出限界・定量下限に影響を与える要因

- ◎ 検出器の性能
- ◎ 計数効率、バックグラウンド
- ◎ 検出器以外の環境要因
- ◎ 試料中の測定対象以外の核種(バックグラウンド計数増加)
- ◎ 測定時間
- ◎ (検出限界放射能濃度に対して)試料量

# 検出限界計数率の算出例

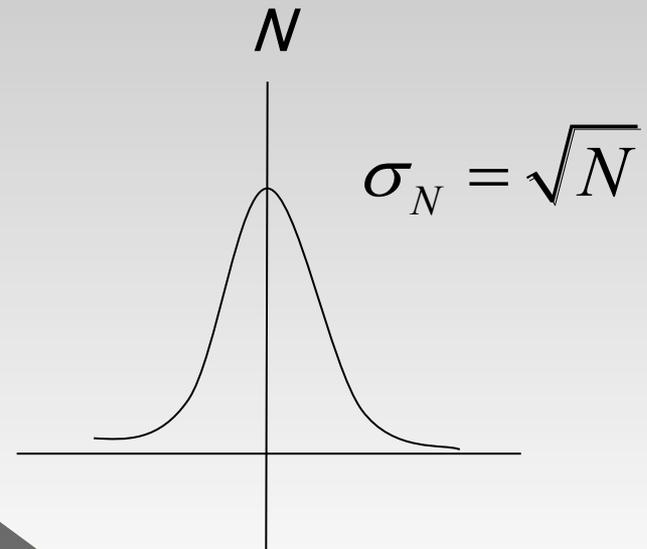
$$n_n = n_s - n_b \quad n_n: \text{正味計数率}$$

$$\sigma = \sqrt{\frac{n_s}{T_s} + \frac{n_b}{T_b}} = \sqrt{\frac{n_n}{T_s} + n_b \left( \frac{1}{T_s} + \frac{1}{T_b} \right)}$$

$$n_n \rightarrow n_d \quad n_d: \text{検出限界計数率}$$

$$(k\sigma)^2 = k^2 \left\{ \frac{n_d}{T_s} + n_b \left( \frac{1}{T_s} + \frac{1}{T_b} \right) \right\} = n_d^2$$

$$n_d = \frac{k}{2} \left\{ \frac{k}{T_s} + \sqrt{\left( \frac{k}{T_s} \right)^2 + 4n_b \left( \frac{1}{T_s} + \frac{1}{T_b} \right)} \right\}$$



(Kaiserの方法)

文部科学省・放射能測定法シリーズ、環境放射線モニタリング指針等で採用  
(定量可能レベル等の計算に使用)  $k=3$

おつかれさまでした

