

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

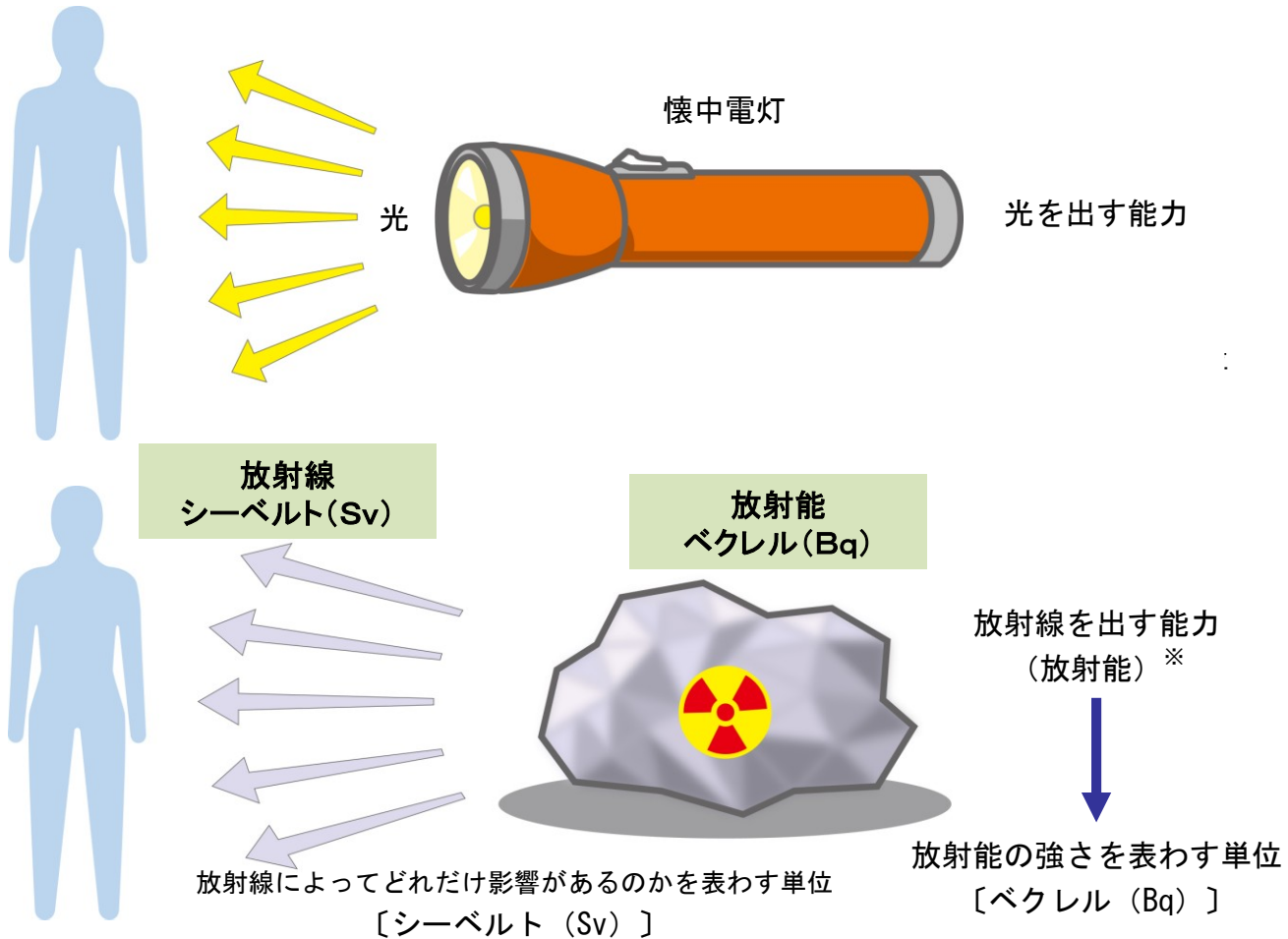
放射性壊変

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

- α 線： 高速（光の5～7%）の ^4He 原子核
- β 線： 高速（光の25～98%）の電子または陽電子
- γ 線，X線：
エネルギーの高い光（光子，電磁波）

放射能と放射線



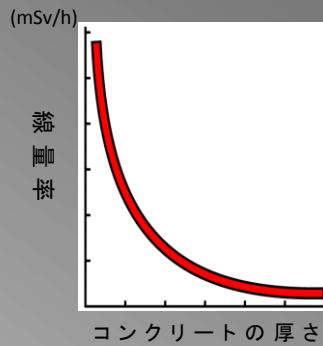
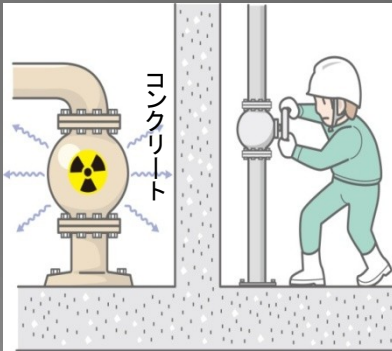
※放射能を持つ物質（放射性物質）のことを指して用いられる場合もあります

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 ⁻¹⁹ J)

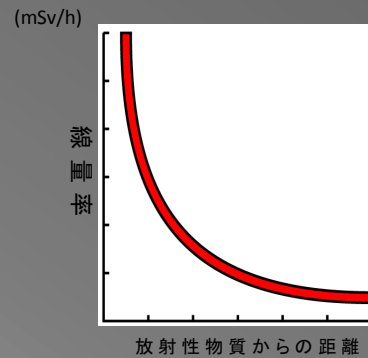
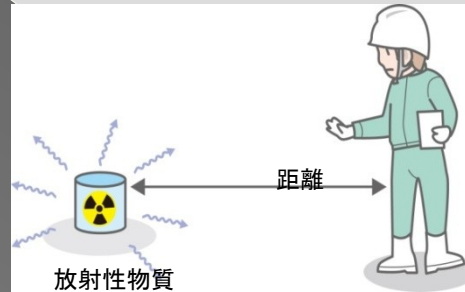
放射線防護の3原則

1. 遮へいによる防護



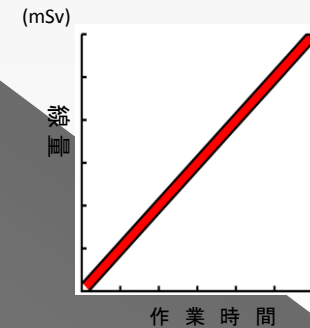
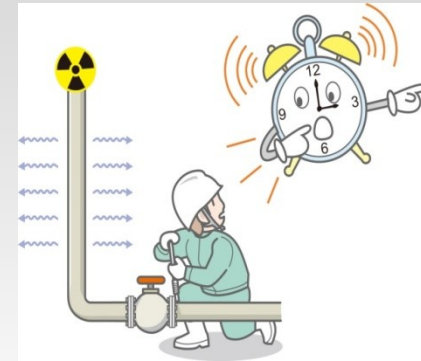
2. 距離による防護

(線量率) = (距離)² 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

γ 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

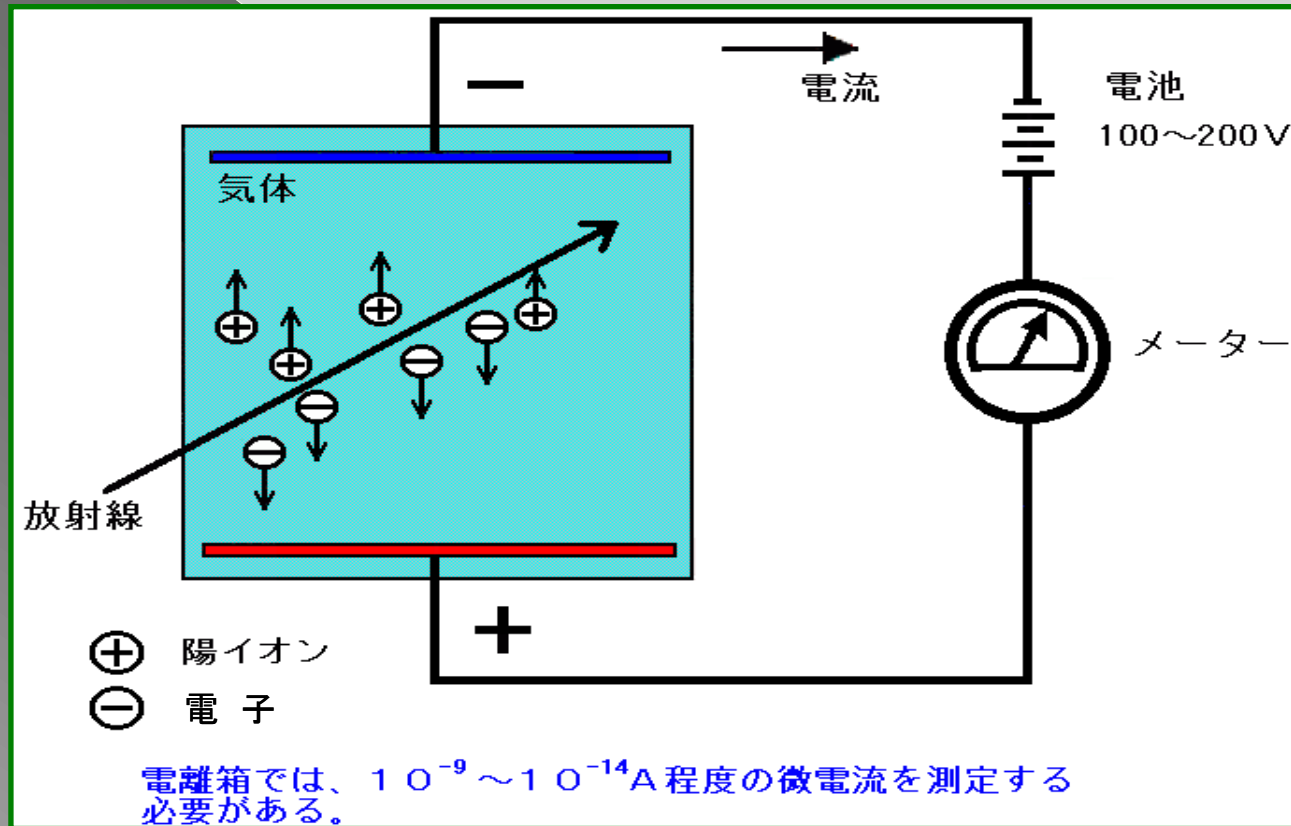
励起状態にある原子

自由電子

電子-
イオン対

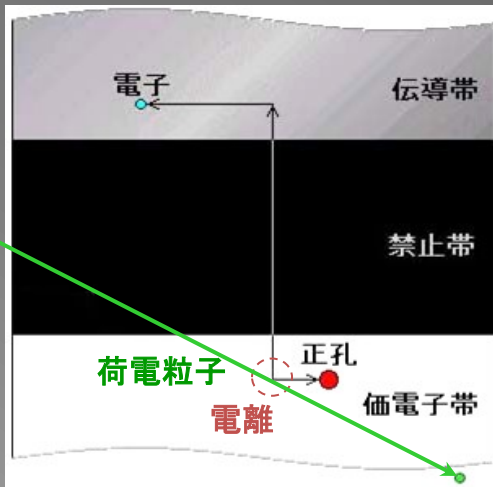
陽イオン

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

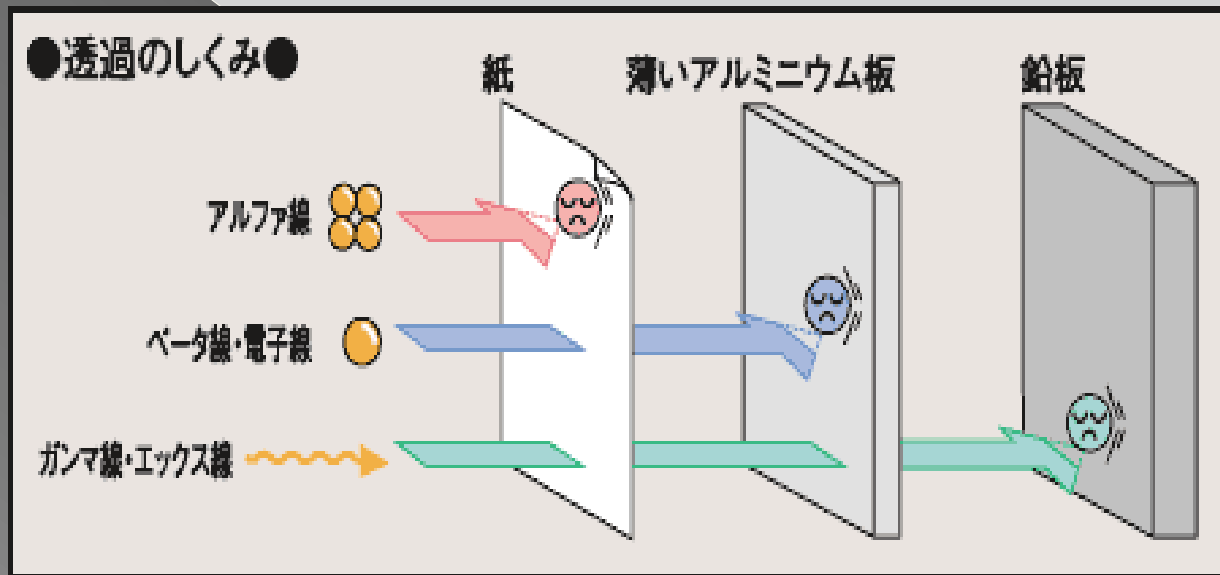
- 固体の電離を利用
- 放射線による価電子帯から伝導帯への電子の移動 (自由電子-正孔対の生成)
- 電子-正孔対生成 固体 ϵ 値 Ge; 3.0eV, Si; 3.6eV
 気体W値 (27-38eV)のおよそ10分の1
 エネルギー分解能は非常によい



単位: eV

半導体 ϵ 値					気体 W値			
Si	Ge	GaAs	CdTe	HgI ₂	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

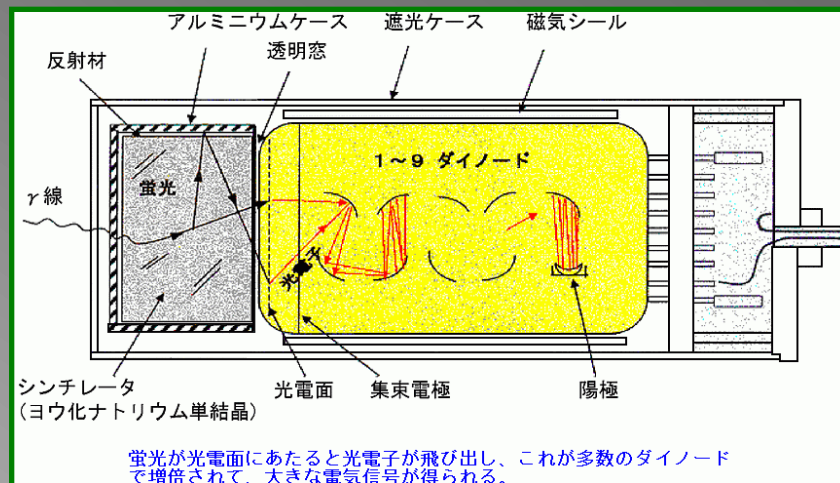
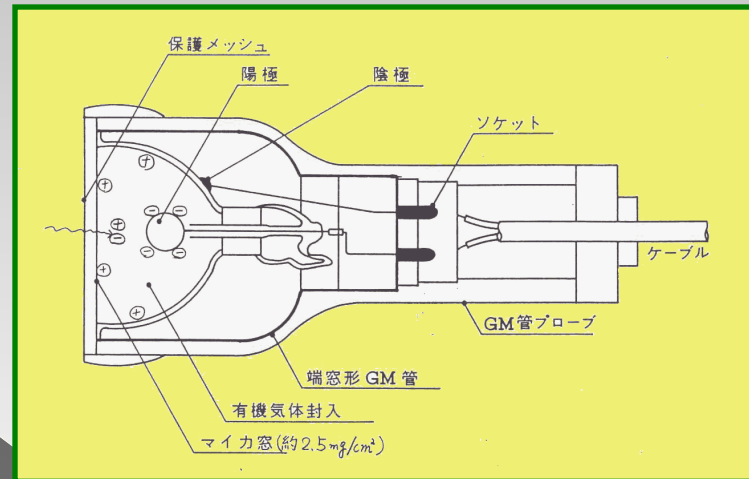


^{134}Cs , ^{137}Cs , ^{131}I はベータ線とガンマ線の両方を出す

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(Bq , Bq/kg)の算出

放射能(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

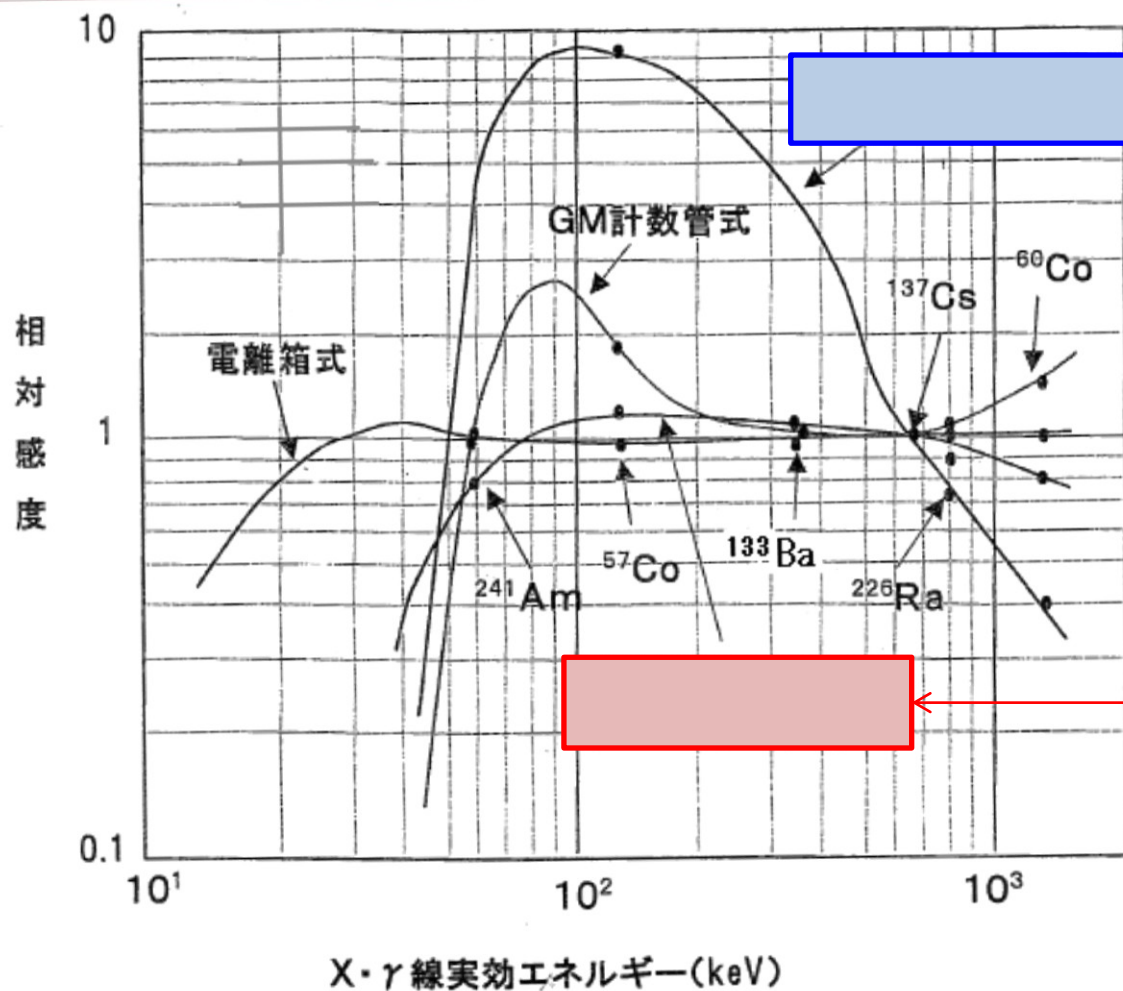


測2 社団法人 日本アイソトープ協会
放射線取扱主任者部会 ©1992

NaI(Tl)シンチレーション式サーベイメータ

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

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-



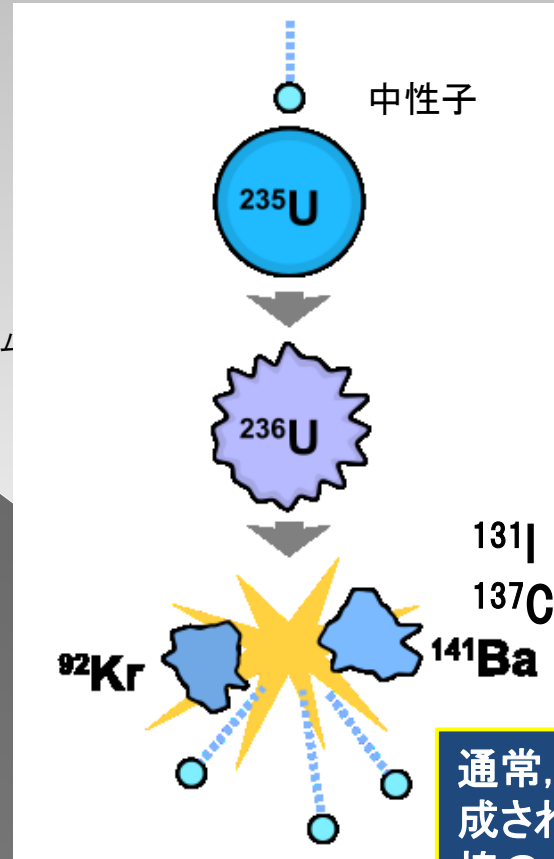
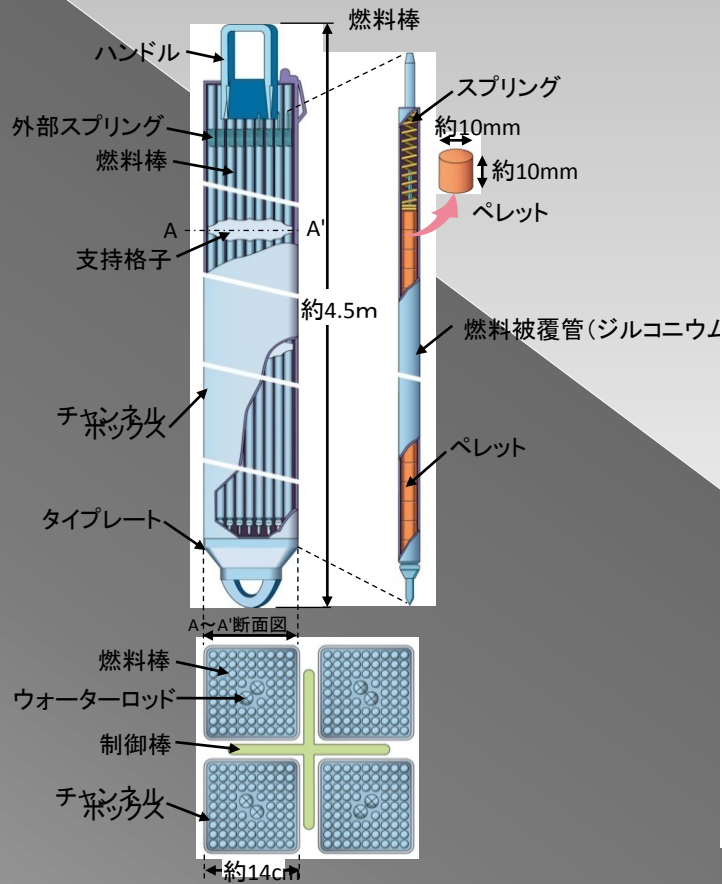
GMサーベイメータ



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

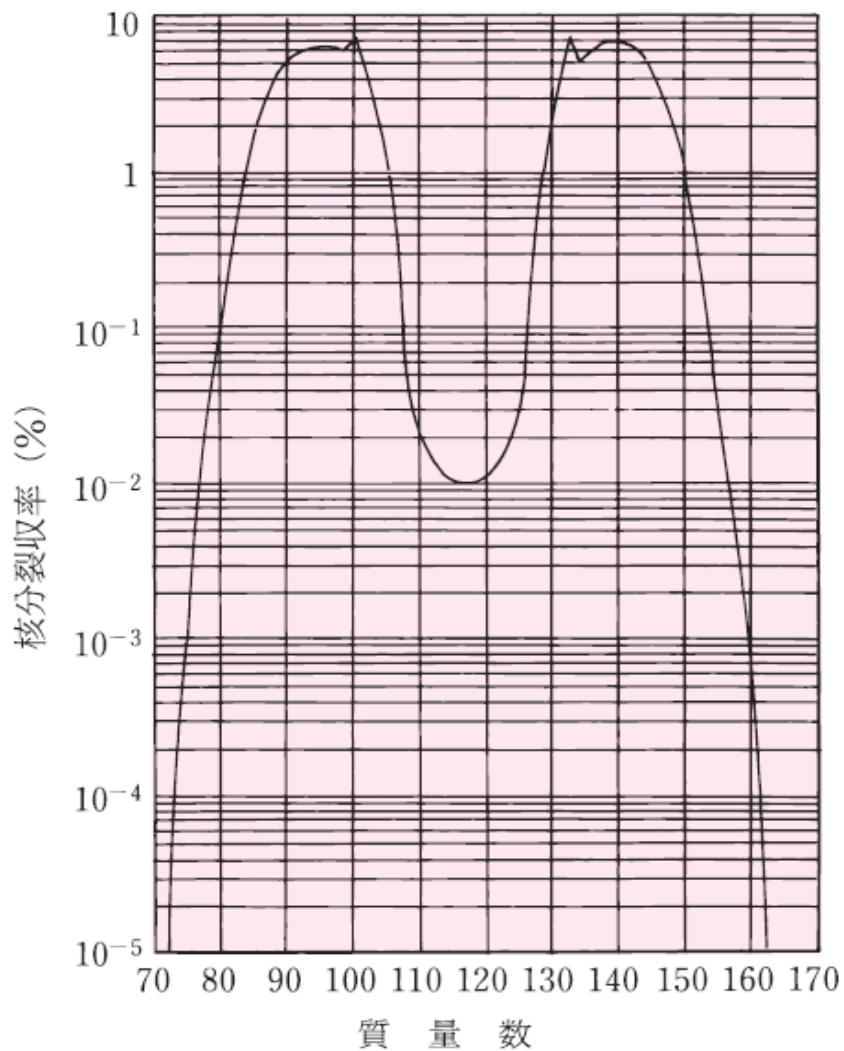


通常、核分裂反応によって生成される放射性核種は燃料棒の中に封じ込められている

沸騰水型炉 (BWR)

核分裂反応

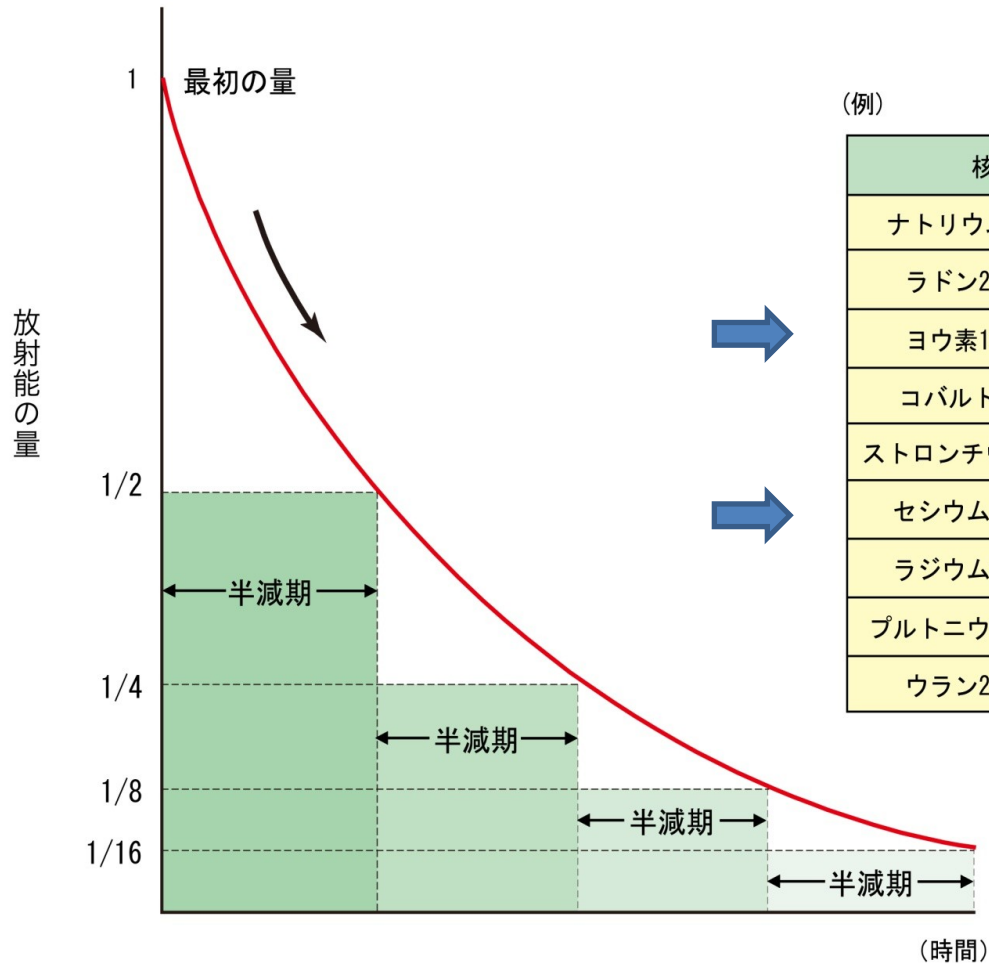
^{235}U の低速中性子による核分裂収率曲線



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)

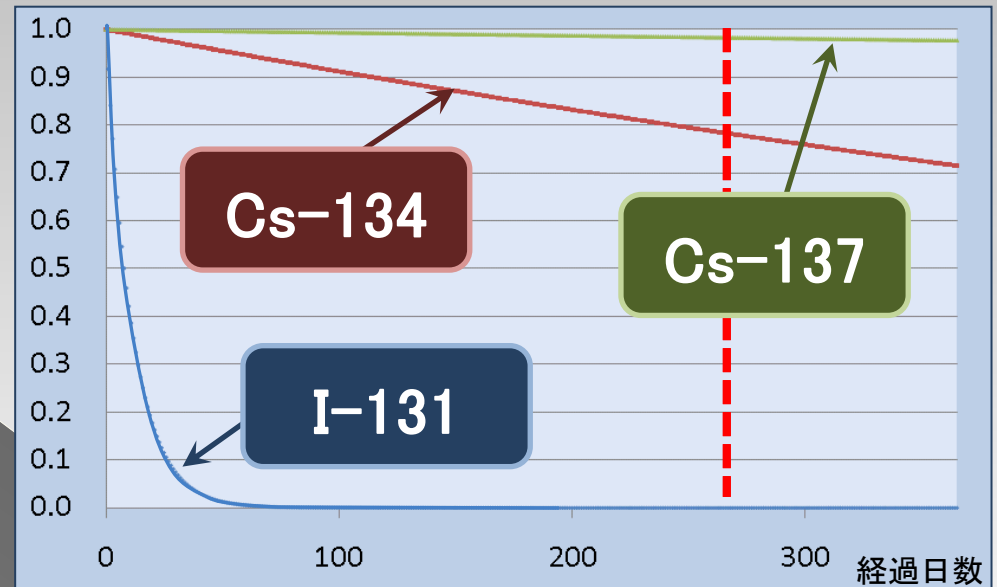
核種		半減期
ナトリウム24	^{24}Na	15.0時間
ラドン222	^{222}Rn	3.8日
ヨウ素131	^{131}I	8.0日
コバルト60	^{60}Co	5.3年
ストロンチウム90	^{90}Sr	28.8年
セシウム137	^{137}Cs	30年
ラジウム226	^{226}Ra	1,600年
プルトニウム239	^{239}Pu	2.4万年
ウラン238	^{238}U	45億年

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

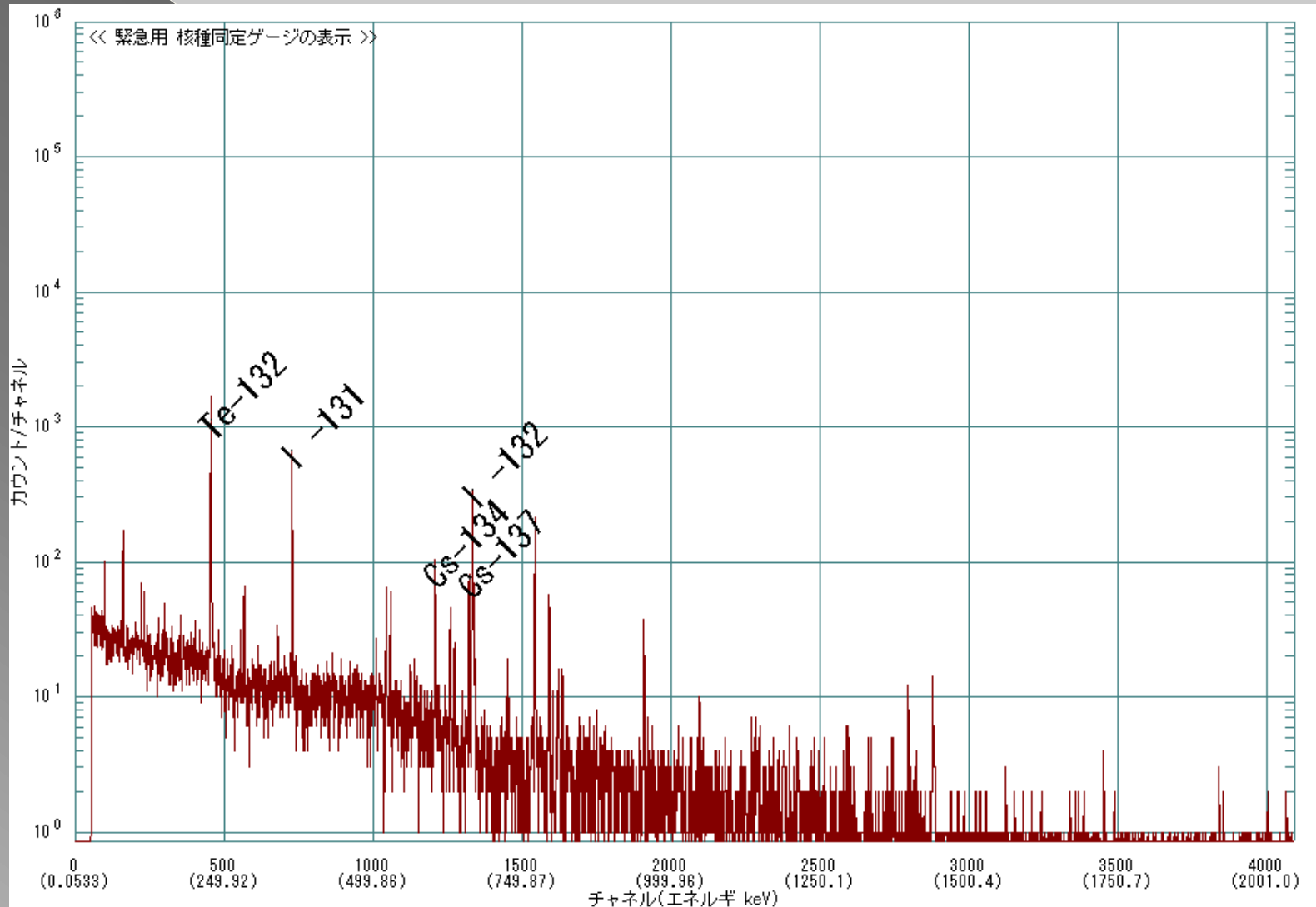


核種	半減期	減衰率
I-131	約8日	約 9.8×10^{-11}
Cs-134	約2年	約0.78
Cs-137	約30年	約0.98

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 γ 線スペクトル

事故直後の γ 線スペクトル例



Ge半導体検出器を用いた γ 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(γ 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 γ 線スペクトロメトリの特徴

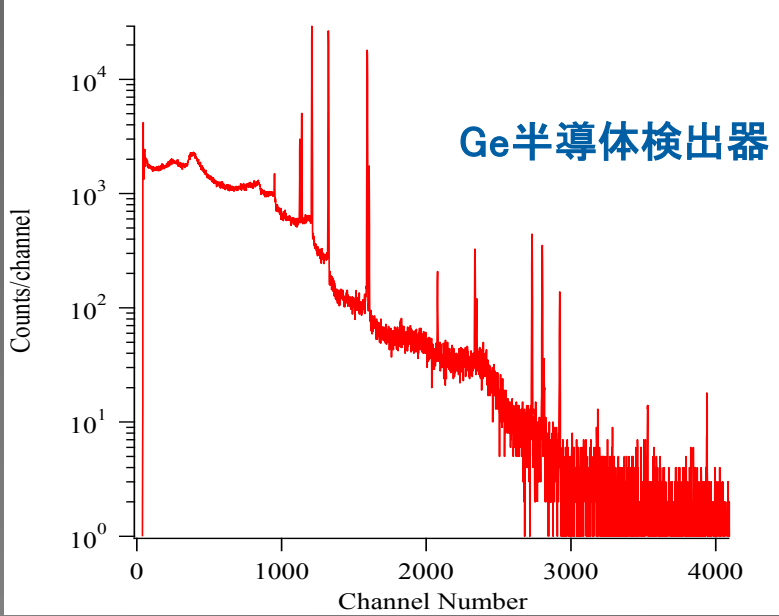
- 1) 計数効率が高い
- 2) メンテナンスが容易
(液体窒素冷却等を要しない)
- 3) 分解能が悪い。
- 4) 装置によっては事実上エネルギー弁別できない。

対象核種を限定できれば十分活用できる

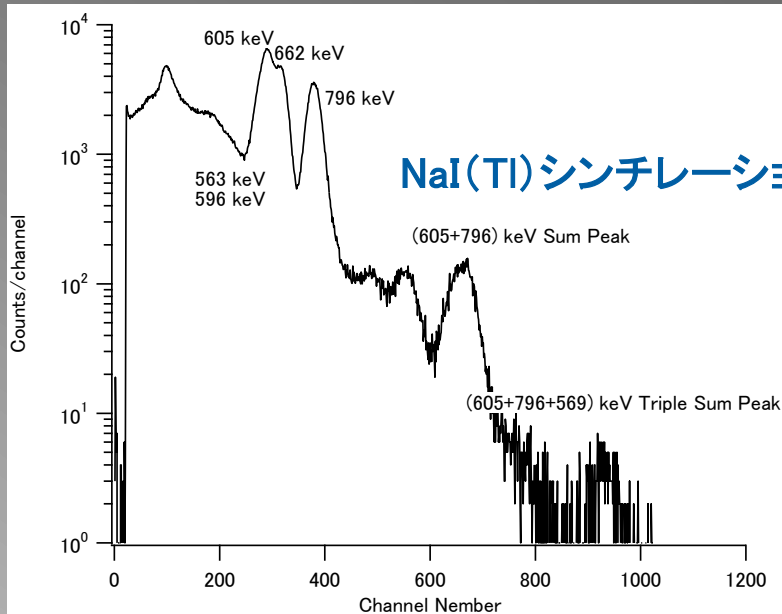
例えば、Cs-134とCs-137

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 γ 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 γ 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 γ 線源



2Lマリネリタイプ



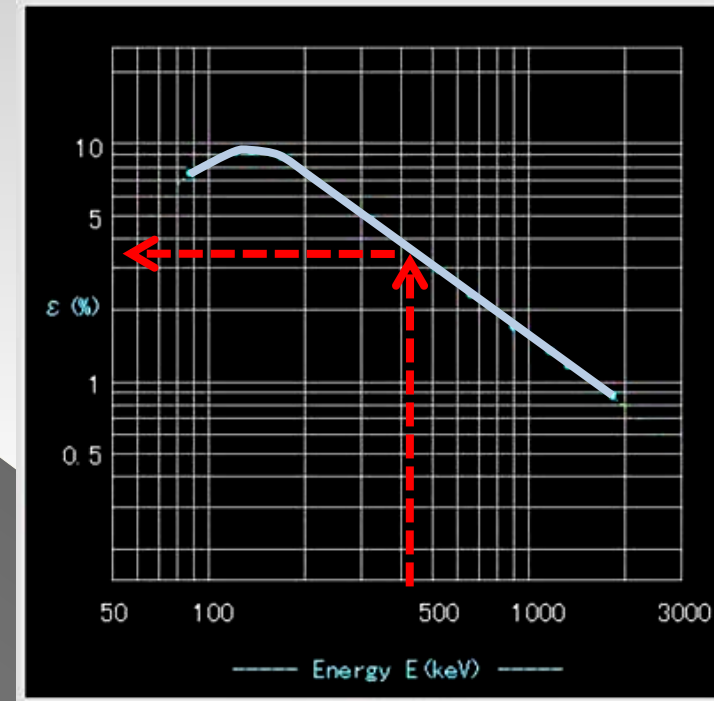
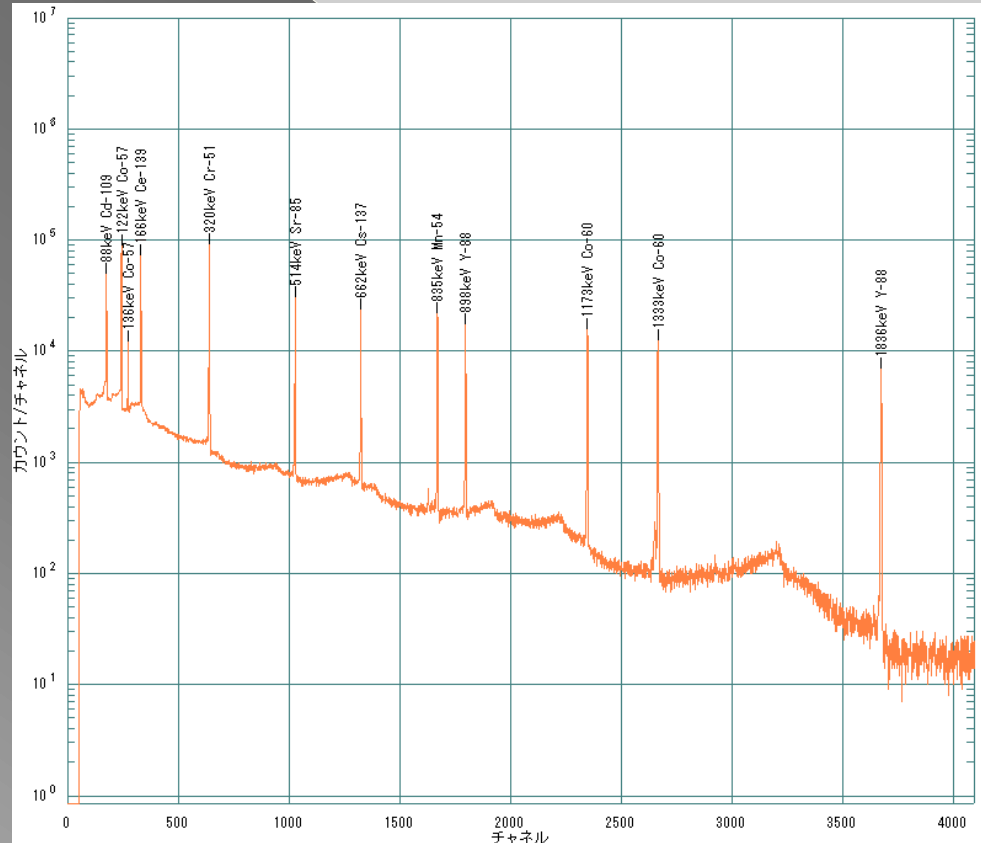
U8タイプ



同一線源の定点測定
(^{137}Cs , ^{60}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)



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

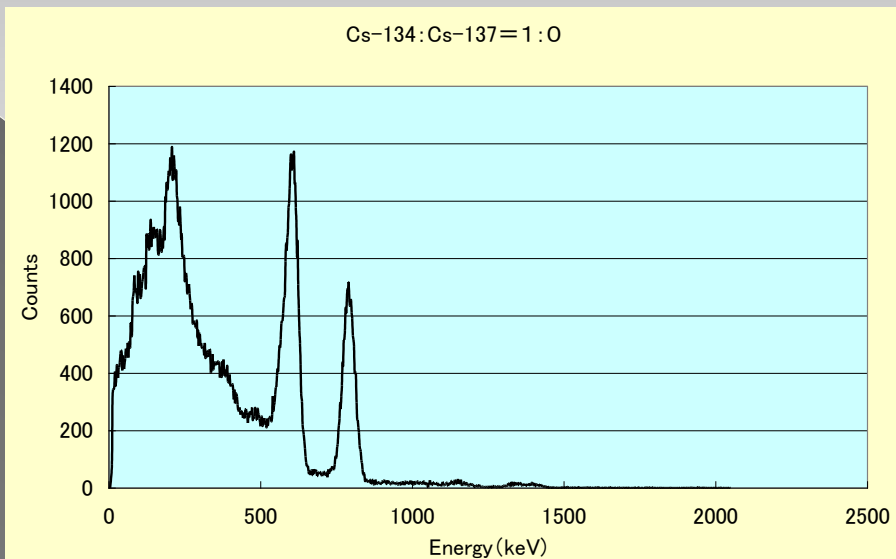
ε : 検出効率

N : ピーク面積(計数) t : 計数時間(s)

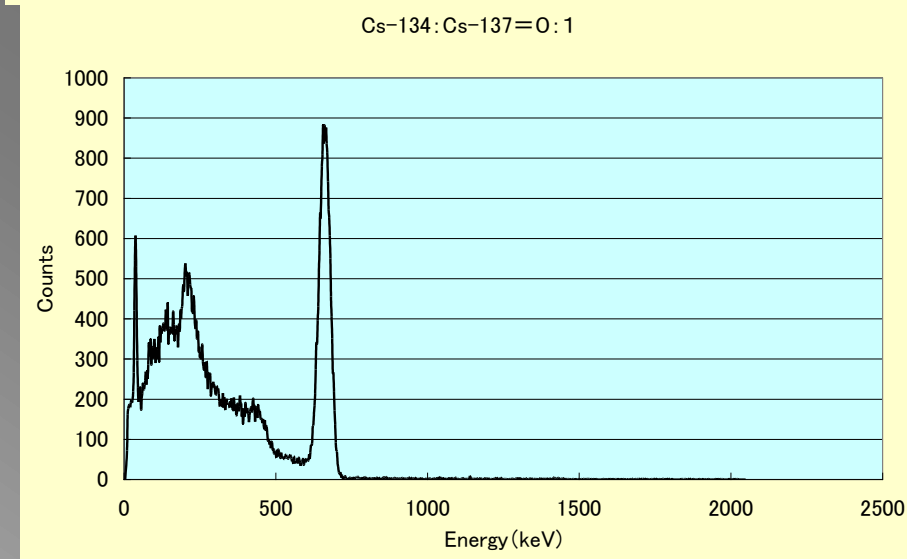
I_γ 線放出割合 A : 標準線源の放射能

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

^{134}Cs 単独スペクトル



^{137}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
 γ 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

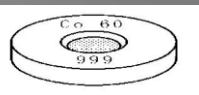
γ
emitters

α/β
emitters

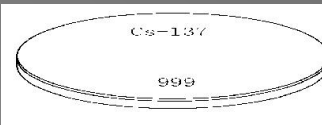
α/β
surface
emission rate



volume sources



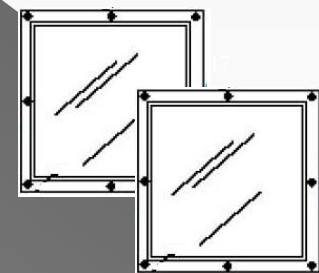
point sources



simulated filter sources



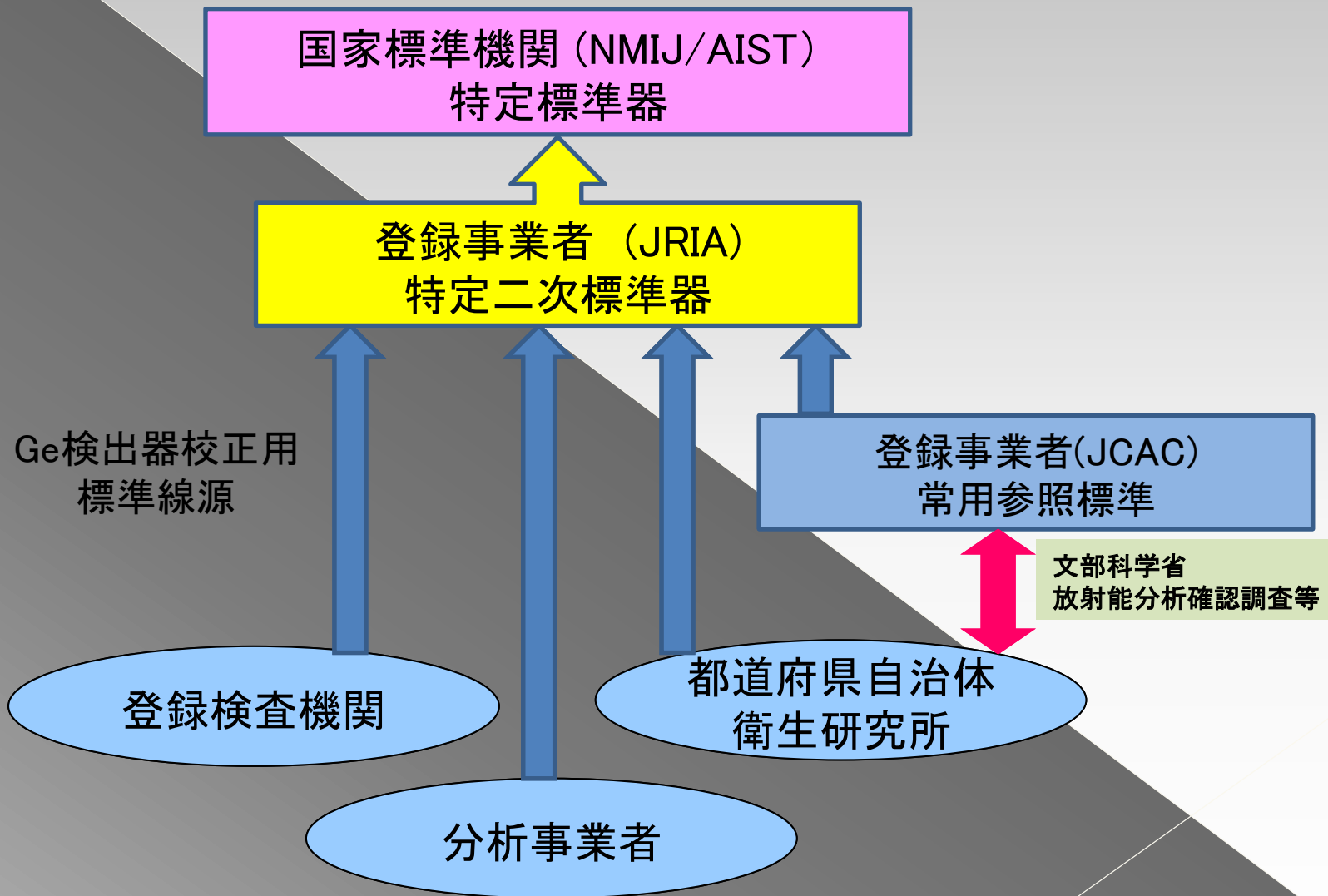
solutions



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}Th (140億年, α 壊変, 壊変系列)

^{238}U (45億年, α 壊変, 壊変系列)

^{40}K (13億年, β 壊変, 1.46MeV γ 線)

- 外部放射線



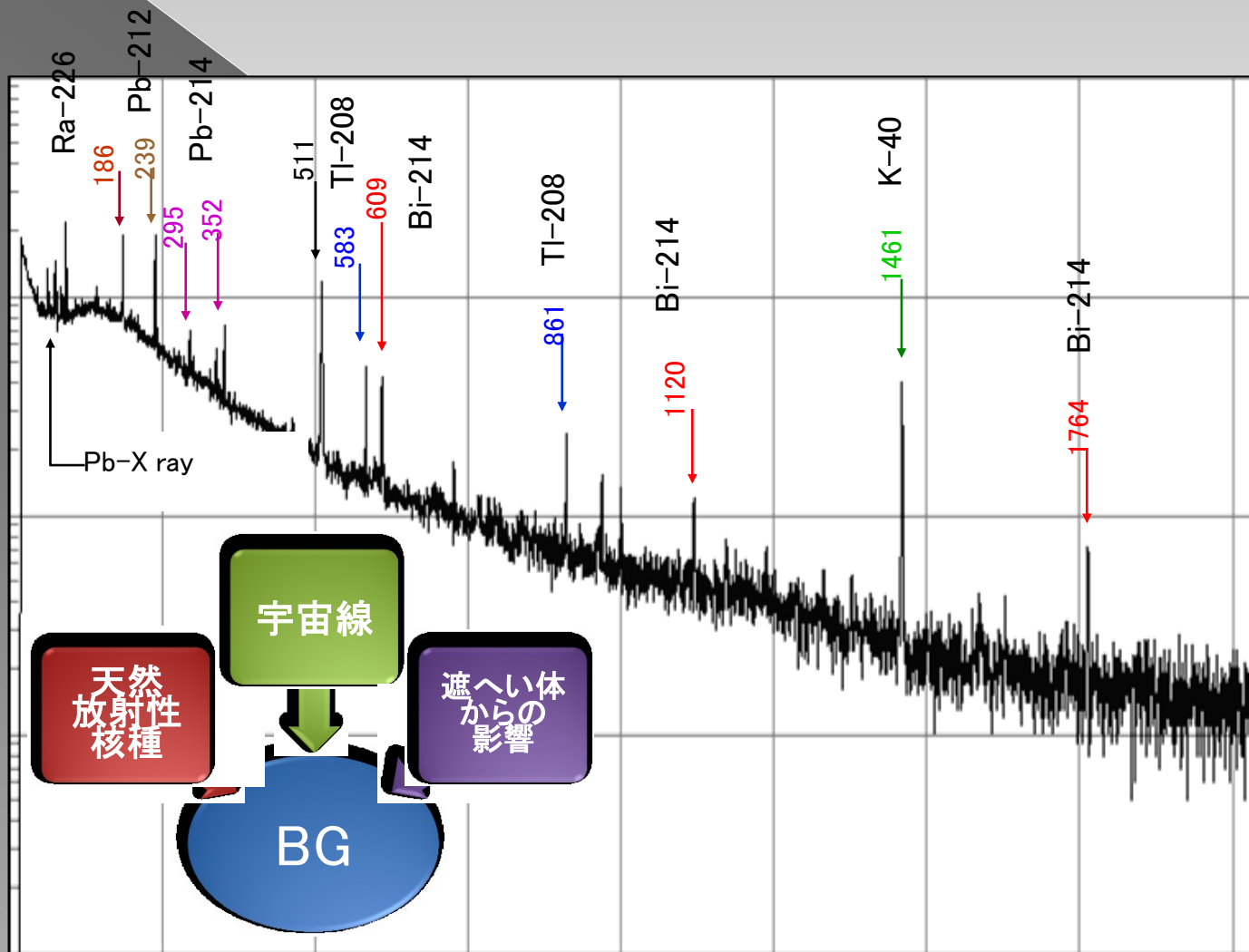
十分な遮へい体:

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(⁴⁰K)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

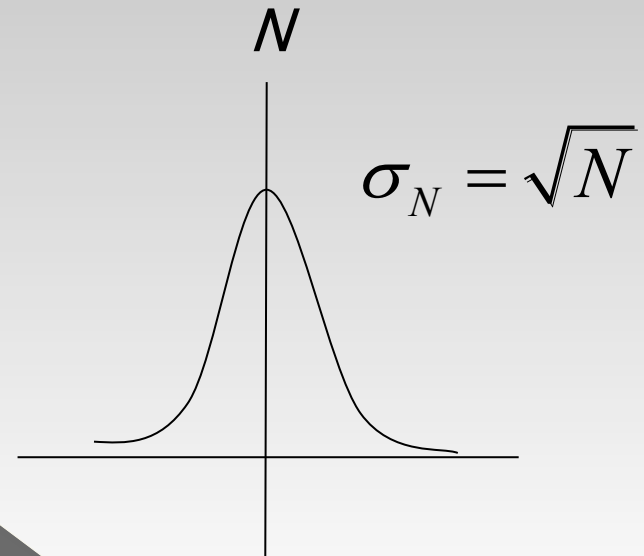
$$n_n = n_s - n_b \quad n_n: \text{正味計数率}$$

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

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

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

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



(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

