

「食品放射能測定方法」

1

原子力発電所事故などで放出される可能性のある放射性物質と測定法

1

緊急時における食品の放射能測定マニュアル

平成14年3月
厚生労働省医薬局食品保健部監視安全課

原子力関連テロ時や原子力施設の事故等緊急時において食品の放射能汚染に関して防災指針や緊急時モニタリング指針に基づいて対処する際に、それらの放射能測定を適切に行い評価することを通じて、食品衛生上の危害発生の防止、食品由来の放射線被ばく線量評価手法及び食品の安全の確認に資するため、環境試料である農畜水産食品における放射能の分析法に関するさらに詳細な実施方法を紹介することを目的とした。

2

モニタリング

(1) 緊急事態発生後の食品試料への対応と開始時期

緊急時モニタリング指針によると、緊急時モニタリングは以下のように、緊急事態発生時に迅速に行う第1段階のモニタリングとその後に行う第2段階のモニタリングに区分されており、事故等の状態に応じて適切に対応することが求められる。

①第1段階のモニタリング

測定の対象核種を迅速に定め、放射能を測定することにより、食品汚染の実態を迅速に把握し、飲食物摂取制限値の放射能濃度を確認する。

第1段階のモニタリングにおける食品試料への対応は、空間線量率や大気試料への対応よりやや遅れるものの、開始時期は原災法や防災指針等との整合性を図りながら対策本部等の判断に十分留意することが肝要である。

②第2段階のモニタリング

迅速性よりも正確性が必要となるため、「国民栄養の現状」にある食品群を可能な限り網羅する各種食品の測定を目標として、その結果を基にしてより正確性の高い経口摂取による住民の被ばく線量評価を行う。したがって、①において迅速に対応すべく、迅速かつ簡易な分析法が肝要であることから、当該分析法について紹介した。

福島第一原子力発電所事故においては、現在は、第2段階のモニタリング時期

3

モニタリングのための測定

①第1段階のモニタリング

第1段階モニタリングにおける測定法として、**Nal(Tl)シンチレーションサーベイメータ**を用いた測定がある。

②第2段階のモニタリング

第1段階モニタリング及び第2段階モニタリングにおいて、**放射性ヨウ素や放射性セシウム等のガンマ線放出核種の測定には、通常ガンマ線のエネルギー分解能の優れたゲルマニウム半導体検出器を用いたガンマ線スペクトロメトリーが有効である。**

第2段階である福島第一原子力発電所事故においてはゲルマニウム半導体測定器を用いた測定を行う。

問題点：ゲルマニウム半導体検出器を用いた測定機器の数が限られていること、ゲルマニウム半導体検出器はエネルギー分解能は優れているが検出効率低い必要とする試料量が比較的多いこと、多数の試料を効率よく検査する必要がある。

スクリーニングの必要性

4

食品中の放射性核種の測定

- ・ 原子力発電所事故起源の放射性物質（ここでは放射性セシウム）を天然に存在する放射性物質と区別して測定する必要がある。
- ・ ただし、核実験起源の放射性セシウムとは区別して測定することはできない。

5

食品中の放射性核種の測定

- ・ 原子力発電所事故起源の放射性セシウムを天然に存在する他の放射性物質と区別しないで測定する機器（サーベイメータ）



GM管式
サーベイメータ



シンチレーション式
サーベイメータ



電離箱サーベイメータ

検出する放射線を全て足しあわせている。

問題点：天然の放射性物質濃度が高い場合には例え放射性セシウムが含まれていない場合でも100Bq/kgを越える。

6

食品から取り込まれる放射性物質



植物が養分として吸収したカリウム-40などの放射性物質により、植物からも放射線が出ている。そして、その植物を摂取した動物や人間もまた、放射線を出している。このように、自然や人間も全て放射線を微量に放出しているが、人体に有害な量ではないので、我々は毎日健康に暮らしている。

体重60kgの平均的な日本人で、約7000ベクレルの放射性物質を体内に含んでいる。

食品中の放射性核種の測定

・原子力発電所事故起源の放射性セシウムを天然に存在する他の放射性物質と**区別して**測定する機器(スペクトルメータ)

ガンマ線スペクトロメータ

・ガンマ線を出す放射性物質の種類毎の濃度(Bq/kg)がわかる
放射性物質の種類によって放出されるガンマ線のエネルギー(eV)が異なる
ガンマ線スペクトル(ガンマ線のエネルギーごとの計数値)を測定

ゲルマニウム半導体測定システム

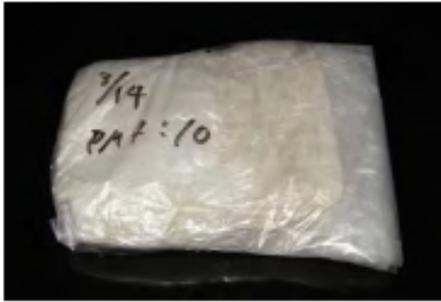
・厚生労働省の定める公定法に記載
・重量1.5~2トン
・価格1,500~2,000万円
・液体窒素・電氣的装置による冷却が必要



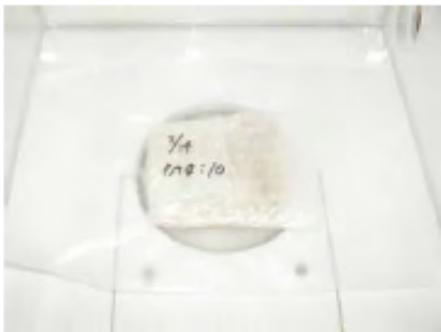
ゲルマニウム半導体測定器



ゲルマニウム半導体検出器で分析



3月14日の試料



試料を検出器に設置



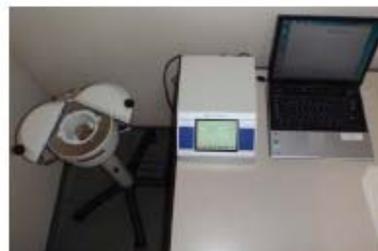
ゲルマニウム半導体検出器
で γ 線のエネルギーを測定

食品中の放射性核種の測定

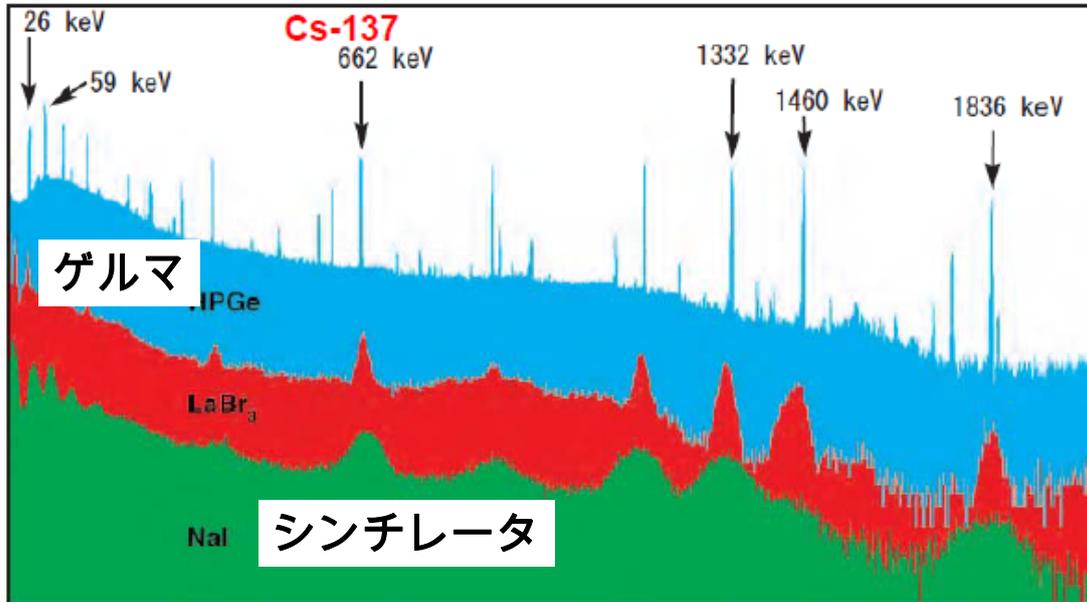
・原子力発電所事故起源の放射性セシウムを天然に存在する他の放射性物質と**区別して**測定する機器(スペクトルメータ)

シンチレーションスペクトロメータ

- ・ヨウ化ナトリウム (NaI) 結晶を検出器に使用
- ・簡易検査(スクリーニング)に利用可能
- ・重量100 kg程度～
- ・価格200～600万円程度
- ・室温で測定可(一定である必要)
- ・鉛の遮蔽体と解析装置とのセットで市販されている



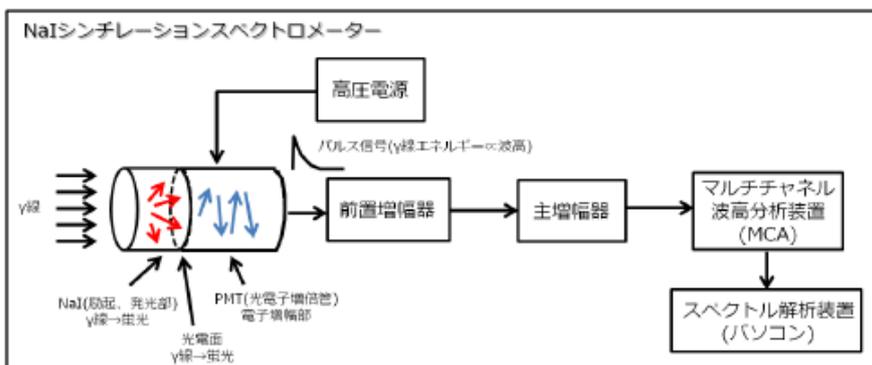
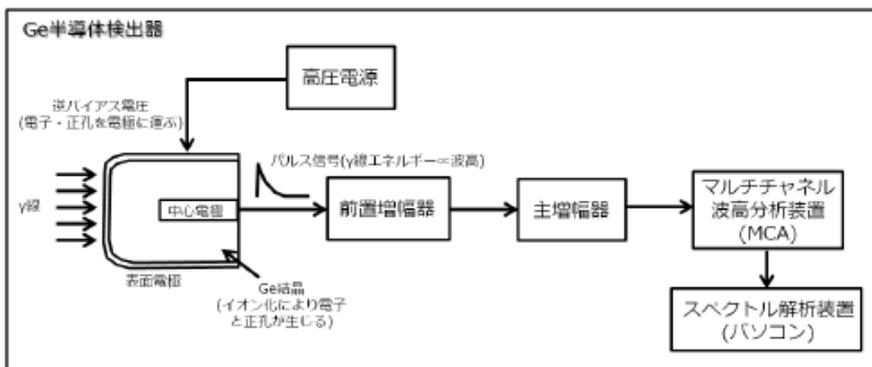
NaIシンチレーションと ゲルマニウム半導体検出器の違い



HPGe: 高純度ゲルマニウム半導体、LaBr₃:ランタンブromaid、NaI: ヨウ化ナトリウム

NaIシンチレーションと ゲルマニウム半導体検出器の測定原理

☆Ge半導体検出器とNaIシンチレーションスペクトロメーターの測定原理



「食品放射能測定方法」

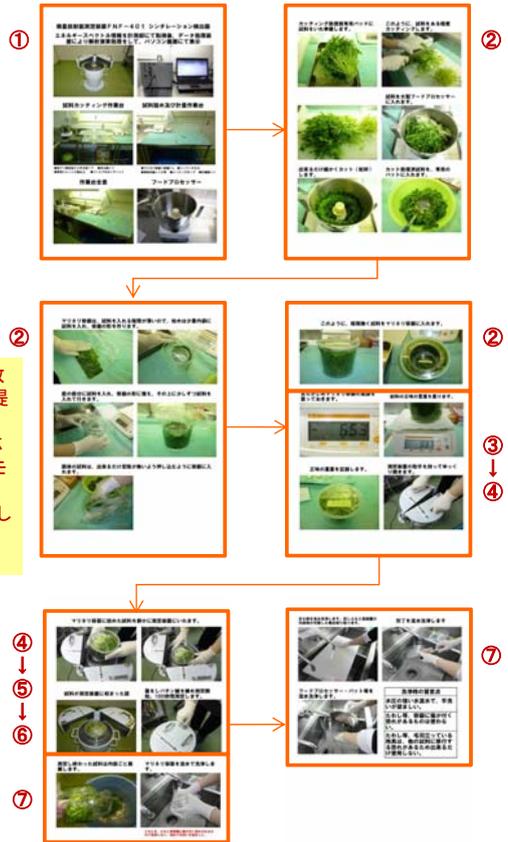
● 流れとモジュールの概要(前提:シンチレーション検出器)



- ②-1 野菜(葉菜類)の場合
- ②-2 キノコの場合
- ②-3 牛乳の場合

右の図は、(株)いちいち様の資料「放射能測定手順」(大貫先生からご提供)に示された要素を、左図のフローチャートのナンバリングに対応して示すことによって、どのようなモジュールを認識するかに関するイメージを具体的に示す目的で作成しています。ただし、②については、「野菜」の場合に該当します。

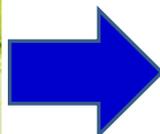
左の①～⑦の各モジュールは(②は3つあるので、全体で9つ)、映像にした場合、できあがりベースで、1モジュールあたり最大でも5分程度を想定しています。基本的には、測定に関する操作を映像の中心に据え、講師や操作者の話がバックグラウンドに流れるという単純な構成を想定しています。



食品中の放射性セシウムの測定に必要なもの

・ 測定器

・ 食品試料



検出器に直接乗せて測定してよいか？

リンゴは？魚は？肉は？

④測定機器

NaIシンチレーション測定器

製品名

NaI単結晶の大きさ:

測定限界値と測定条件

マリネリ容器の容量

鉛遮蔽の厚さ

測定機器の初期設定: 各種パラメータ

高圧電源: V

室内の気温 °C

バックグラウンド測定

測定試料

測定時間

●手順

(1)

(2)

食品中の放射性セシウムを測定するための試料前処理

・幾何学的な形状をそろえる必要がある

・放射線の強さ=1/(距離)²

・試料による吸収



- ・均一な形状の試料にする(できれば水と同じような形)
- ・高さをそろえる
- ・重さを測る

※本ページ以降に掲載した写真は、(株)いち様が作成した資料から引用させていただきました。

試料カッティング作業台



- 包丁=菜切包丁と牛刀各1丁 ●まな板=1
- 専用トレイ=2個以上 ●フードプロセッサー=1

試料詰め及び計量作業台



- マリネリ容器=容量1L ●ペーパータオル
- 専用内袋=12号 ●イージーグローブ ●計量器=1

作業台全景



フードプロセッサー



カッティング処理前専用パッドに試料をいれ準備します。



このように、試料をある程度カッティングします。



試料を大型フードプロセッサーに入れます。



出来るだけ細かくカット（粉碎）
します。



カット処理済試料を、専用の
バットに入れます。



19

容器に詰める

真ん中に穴があいている



U8容器



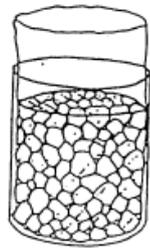
マリネリ容器

20

放射性物質の分析に用いる容器と試料の詰め方

試料は細かく切断し、隙間が生じないようにする
測定容器に入れた試料の高さが底面と水平になるようにする

マリネリ容器

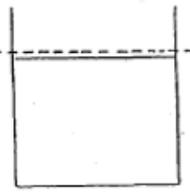
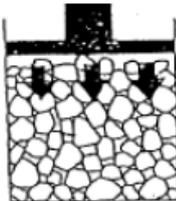
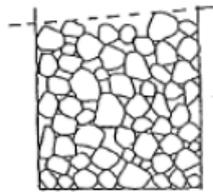


空隙 ×

小型容器 (V型容器など)

軽く試料上面を押す

底面と上面を平行に



文部科学省:放射能測定シリーズ24「緊急時におけるγ線スペクトロメトリーのための試料前処理」 31

21

マリネリ容器は、試料を入れる隙間が薄いので、始めは少量内袋に試料を入れ、容器の形を作ります。



底の部分に試料を入れ、容器の形に整え、その上に少しずつ試料を入れて行きます。



22

このように、隙間無く試料をマリネリ容器に入れます。



23

あらかじめマリネリ容器の風袋を量っておきます。



試料の正味の重量を量ります。



正味の重量を記録します。



試料の前処理(準備)終了

24

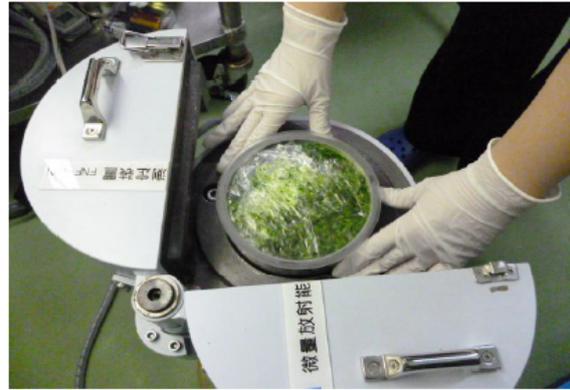
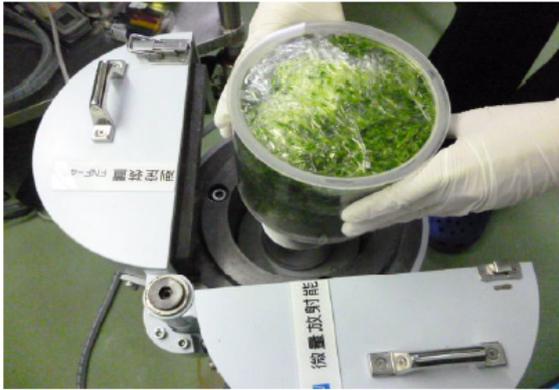
試料を測定器にセットして測定する



測定装置の取手を持ってゆっくり開きます。

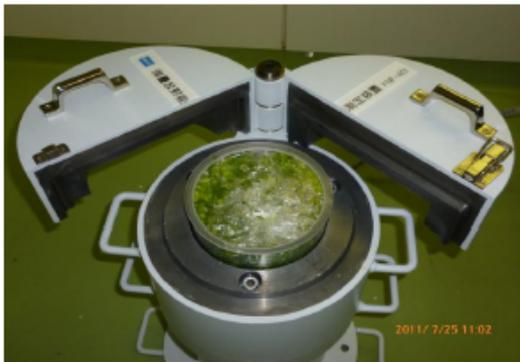


マリネリ容器に詰めた試料を静かに測定装置に入れます。

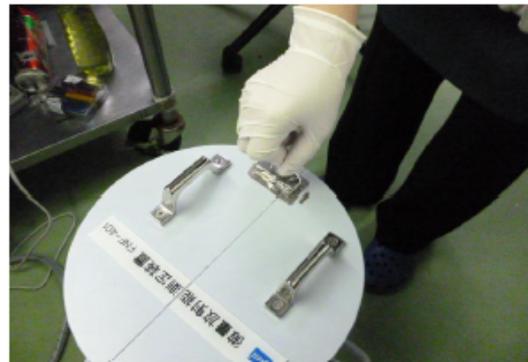


25

試料が測定装置に収まった図



蓋をしパチン鍵を締め測定開始。1000秒間測定します。



測定し終わった試料は内袋ごと廃棄します。



マリネリ容器を流水で洗浄します。



注意: たわしのような傷が付く道具は使わない²⁶

まな板を流水洗浄します。但し土など高線量の汚染物が付着した場合削り取ります。



包丁を流水洗浄します



フードプロセッサー・バット等を流水洗浄します。



洗浄時の留意点

水圧の強い水道水で、手洗いが望ましい。

たわし等、容器に傷が付く恐れがあるものは使わない。

たわし等、毛羽立っている用具は、他の試料に移行する恐れがあるため出来るだけ使用しない。

「食品放射能測定方法」

2

原子力発電所事故などで放出される可能性のある放射性物質と測定法

1

燃料から地下水に溶け出した放射性核種濃度（1）

表1.東電福島第一原子力発電所の集中廃棄物処理施設内滞留水の分析結果

試料名	pH	S.S.*1,2 g/L	S.S.*1,3 g/L	油分*2 ppm	全α放射能*2 Bq/mL	全β放射能*2 Bq/mL	γ核種		金属元素	
							滞留水*4,5 Bq/mL	S.S. Bq/mL	滞留水*5 mg/L	S.S. —
1F集中RW地下2階南東上部	7.5	<1	<0.05	<80	<1.0	3.8E+06	別添1(表2)参照	別添1(表3)参照	別添2(表4)参照	別添2(表5)参照
1F集中RW地下2階南東下部	7.5	<1	0.05g/L程度の可能性有り	<80	<1.0	3.9E+06	別添1(表2)参照	別添1(表3)参照	別添2(表4)参照	別添2(表5)参照

試料名	ウラン*2,7	プルトニウム*7	²³⁸ Pu	²³⁹ Pu+ ²⁴⁰ Pu	塩化物イオン(Cl ⁻)*8	ストロンチウム90(⁹⁰ Sr)	ストロンチウム89(⁸⁹ Sr)	トリチウム(³ H)	テクネチウム(⁹⁹ Tc)	放射性ヨウ素の化学形態*9		乳濁化エマルジョン化の有無
	mg/L	mg/L	Bq/mL	Bq/mL	ppm	Bq/mL	Bq/mL	Bq/mL	Bq/mL	IO ₃ ⁻ (%)	I ⁻ (%)	
1F集中RW地下2階南東上部	<12	全α放射能が検出限界未満のため、実施せず。			12,000	1.3E+05	4.2E+05	1.2E+04	<8.9E+02	15	85	無*10
1F集中RW地下2階南東下部	<12				14,000	1.3E+05	5.8E+05	9.8E+03	<8.9E+02	(~0)	(~100)	暫定値

- *1: 浮遊性物質
- *2: 約20倍の希釈液で測定(原液濃度に換算済み)
- *3: 原液約15mlのろ過による測定。下部液のフィルタは着色していることが観察された。
- *4: 約2,000倍の希釈液で測定(原液濃度に換算済み)
- *5: ⁵⁴Mn, ⁶⁰Co, ⁹⁵Zr, ⁹⁵Nb, ¹⁰³Ru, ¹⁰⁶Ru, ¹²⁵Sb, ¹³¹I, ¹³⁴Cs, ¹³⁷Cs, ¹⁴⁰Ba, ¹⁴⁰La, ¹⁴¹Ce, ¹⁴⁴Ce, ¹⁴⁴Pr, ¹⁵⁴Eu, ¹⁵⁵Eu, ²⁴¹Am
- *6: Na, Mg, K, Ca, B, Zr, Mo, Al, Fe, Ni, Cr, Si, Ru, Pd, Rh, Sr
- *7: 元素濃度
- *8: 100倍の希釈液で測定(原液濃度に換算済み)
- *9: 暫定値とする。より信頼性の高いデータとするためコールド試験等を行う。
- *10 目視観察で溶液は清澄であること、限外ろ過を行っても有意に放射性核種の濃度が変化しないこと別添3(表6参照)から判断

2

燃料から地下水に溶け出した放射性核種濃度（２）

表6.東電福島第一原子力発電所の集中廃棄物処理施設内滞留水の限外ろ過分離溶液のγ 核種分析結果

試料名	フィルタサイズ ¹⁾	核種[Bq/mL] ²⁾																		合計 ³⁾ [Bq/mL]
		Mn-54	Co-60	Zr-95	Nb-95	Ru-103	Ru-106	Sb-125	I-131	Cs-134	Cs-137	Ba-140	La-140	Ce-141	Ce-144	Pr-144	Eu-154	Eu-155	Am-241	
1F集中RW 地下2階 南東上部	原液	ND	ND	ND	ND	ND	ND	ND	2.44E+05	1.31E+06	1.30E+06	5.75E+04	5.17E+04	ND	ND	ND	ND	ND	2.96E+06	
	0.45μ m	ND	ND	ND	ND	ND	ND	ND	3.32E+05	1.83E+06	1.90E+06	1.01E+05	7.54E+04	ND	ND	ND	ND	ND	4.24E+06	
	100kダルトン	ND	ND	ND	ND	ND	ND	ND	3.25E+05	1.73E+06	1.70E+06	7.81E+04	8.57E+04	ND	ND	ND	ND	ND	3.92E+06	
	10kダルトン	ND	ND	ND	ND	ND	ND	ND	2.87E+05	1.63E+06	1.70E+06	7.33E+04	7.58E+04	ND	ND	ND	ND	ND	3.77E+06	
1F集中RW 地下2階 南東上部	原液	ND	ND	ND	ND	ND	ND	ND	2.74E+05	1.42E+06	1.40E+06	7.08E+04	5.17E+04	ND	ND	ND	ND	ND	3.22E+06	
	0.45μ m	ND	ND	ND	ND	ND	ND	ND	2.93E+05	1.73E+06	1.70E+06	ND	6.28E+04	ND	ND	ND	ND	ND	3.79E+06	
	100kダルトン	ND	ND	ND	ND	ND	ND	ND	2.64E+05	1.63E+06	1.60E+06	6.62E+04	7.64E+04	ND	ND	ND	ND	ND	3.64E+06	
	10kダルトン	ND	ND	ND	ND	ND	ND	ND	2.39E+05	1.63E+06	1.60E+06	5.87E+04	5.87E+04	ND	ND	ND	ND	ND	3.59E+06	

*1: ろ過前の原液、及び孔径0.45μ mのフィルタ、分画分子量100kダルトン、10kダルトンの限外ろ過のフィルタによりろ過した後のろ液

*2: I-131及びBa-140+La-140は、平成23年4月29日0:00に半減期補正した後の値

*3: 有意値の合算

【参考】

試料名	フィルタサイズ ¹⁾	Cs-137に対する比			
		I-131	Cs-134	Ba-140	La-140
1F集中RW地下2階 南東上部	原液	0.188	1.008	0.044	0.040
	0.45μ m	0.175	0.963	0.053	0.040
	100k	0.191	1.018	0.046	0.050
	10k	0.169	0.959	0.043	0.045
1F集中RW地下2階 南東上部	原液	0.196	1.014	0.051	0.037
	0.45μ m	0.172	1.018		0.037
	100k	0.165	1.019	0.041	0.048
	10k	0.149	1.019	0.037	0.037

3

天然の放射性物質（放射性同位元素）

- 大地には、ウラン238、トリウム232、カリウム40などの天然の放射性同位元素が含まれる。これらは、約46億年前に地球ができたときから存在。
- 宇宙線が大気中の窒素などにあたることで、トリチウム（三重水素）や炭素14などの天然の放射性同位元素が常に作られている。

放出する放射線の種類	天然の放射性同位元素の例	核実験や原子力施設に由来する放射性物質の例
アルファ線	ウラン(238)、トリウム(232)、ラジウム(226)、ラドン(222)	プルトニウム(239、240)
ベータ線	炭素(14)、トリチウム(3)	ストロンチウム(89、90)
ベータ線とガンマ線	カリウム(40)	ヨウ素(129、131)、セシウム(134、137)

注:()内は質量数

4

食品中の放射能の基準値

5

食品に含まれる放射性セシウムの新しい規制値

厚生労働省は、平成23年12月22日の薬事・食品衛生審議会で公表し、平成24年4月からの導入を目指す。

単位：ベクレル/kg

暫定規制値		新規規制値	
飲料水	200	飲料水	10
牛乳・乳製品		牛乳	50
		乳児用食品	
野菜類	500	一般食品(乳製品を含む)	100
穀類			
肉・卵・魚・その他			

1キログラムあたり1200ベクレルを指標とする米国や、同400～1250ベクレルとする欧州連合(EU)と比べると相当に厳しい。

6

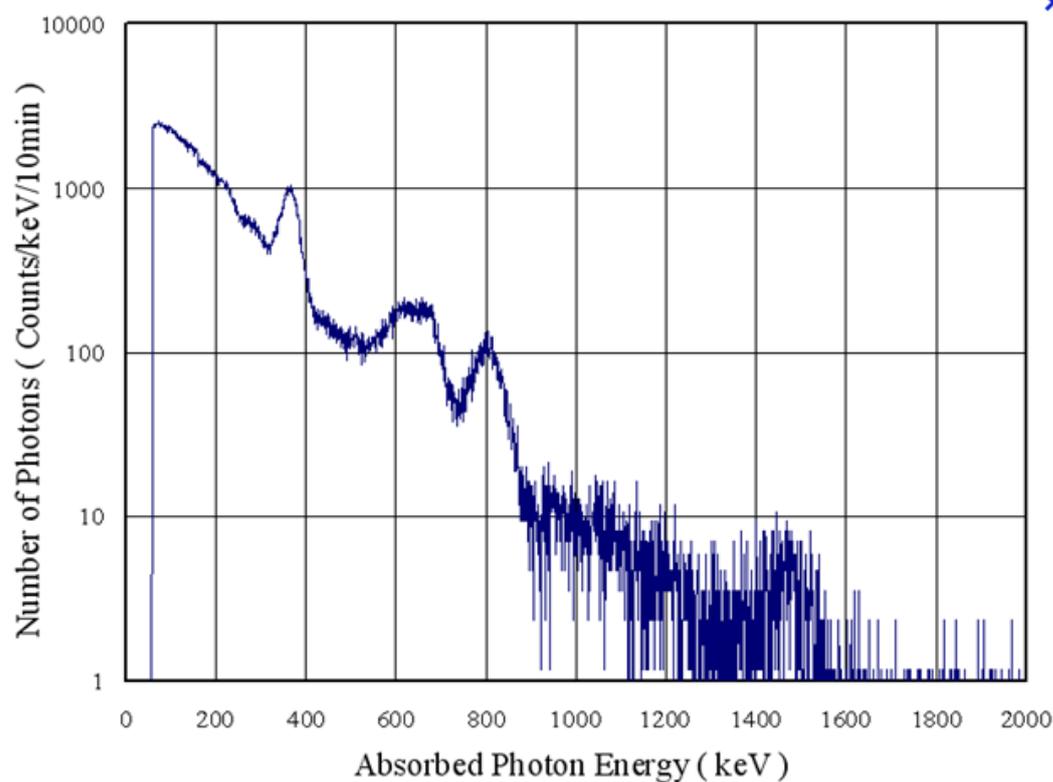
食品中の放射性核種の測定

測定結果の整理

スペクトルを見てみよう

7

NaIシンチレーション検出器で得られるスペクトル(例)



8

放射性物質とガンマ線エネルギーの例

核種名	半減期	エネルギー (keV)	放出比 (%)
Pb-214 (天然に存在)	27分	352	37.6
I-131	8日	365	81.7
		637	7.17
Cs-134	2年	569	15.38
		605	97.62
		796	85.53
Cs-137	30年	662	85.1

⇒ NaI(Tl)シンチレーションスペクトロメータでは、ガンマ線エネルギーが近い核種を、完全に分離して定量出来ない。

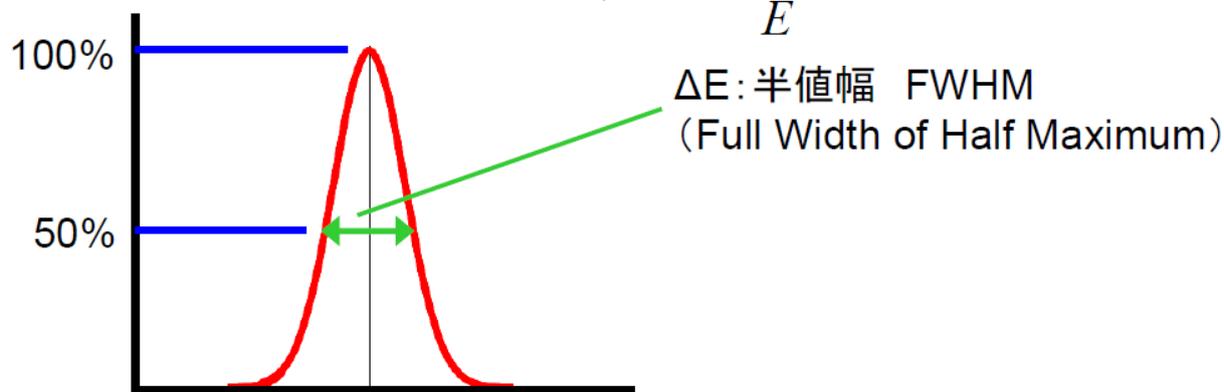
(特に、Pb-214をI-131と誤って検出する可能性に注意が必要)

Bi-214(半減期 20分)のガンマ線エネルギー:609keV

9

ピークのエネルギー(チャンネル)を調べてみよう

$$\text{エネルギー分解能} = \frac{\Delta E}{E} \times 100$$



エネルギー(E) あるいはチャンネル

ピークの中心エネルギー(チャンネル)
強度が半分のエネルギー 低いエネルギー

keV
keV

高いエネルギー

keV₁₀

ピークエネルギーとカウント

放射能濃度はピークの面積(カウント)から求める。

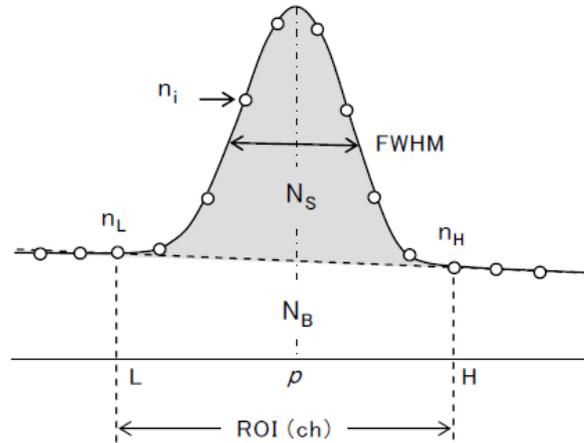
ROI : ピーク領域

GROSSカウント:

NETカウント:

試料からの放射線強度

ROIで設定した領域における
GROSSカウントからバックグラ
ウンドを引いた値: NETカウント



11

放射性物質測定のカウント数と統計誤差

- ・ 放射性物質の原子核が壊変するのはランダムな現象 (バラツキの程度は確率論で計算可能)
- ・ 放射線の計測では、カウント数の標準偏差(σ)は測定カウント数 N の平方根 \sqrt{N} となる。 **カウントの誤差**

<例>

1回の測定でセシウム137が1000カウントであった場合

$$\sigma = \sqrt{N} = \sqrt{1000} = 31.6$$

計数値は、 1000 ± 31.6 と表示

(計数の統計誤差が約3%)

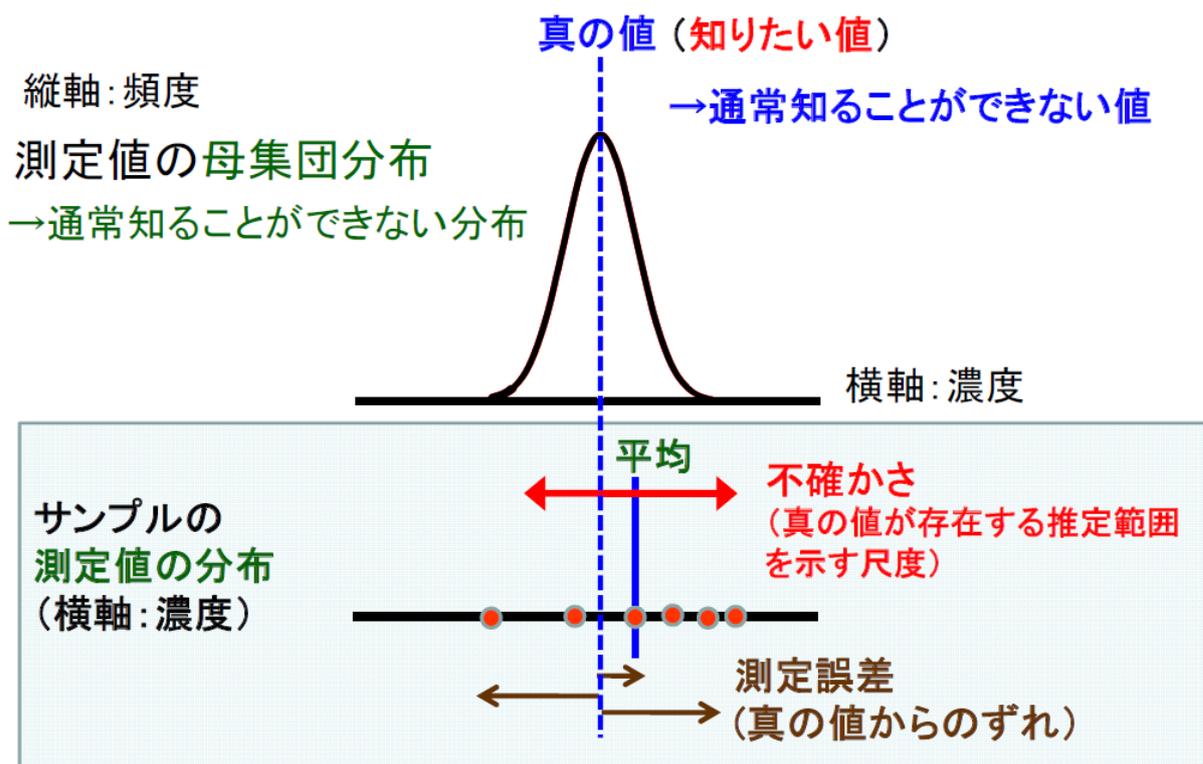
12

分析の基本

- 同じサンプルを用いて、同じ分析法を用いても分析結果は必ず毎回ばらつく。
(どんなに精密な分析法を用いても同様)
- 試料中の放射性核種濃度が低濃度になるほどばらつきの度合いは大きくなる。
- 真の値(量)を知ることはできない。

13

「測定の不確かさ」と「測定誤差」の違い



14

測定の不確かさ

分析結果は $x \pm U$ (拡張不確かさ)の形で報告

(x : 分析値、 U : 拡張不確かさ)

($U = 2u$ 、 u : 標準不確かさ)

標準不確かさの2倍を「拡張不確かさ」とする

(参考) Guidelines on Measurement Uncertainty (CAC/GL 54-2004)

15

<ガンマ線スペクトル分析における不確かさの要因>

- ・分析試料の調製(試料重量、サンプルの不均一性等)
- ・機器のエネルギー校正、効率校正
- ・分析試料の測定(分析用試料と標準試料とでの検出器との空間位置関係の違い、自己吸収によるガンマ線の減衰など)
- ・原子核の崩壊(ガンマ線放出率半減期など)

※ガンマ線放出率: 単位時間あたりに γ 線を放出する原子核崩壊の数

(参考) Guidelines on Measurement Uncertainty (CAC/GL 54-2004)

② トップダウン方式

複数の試験室で、同じ分析法を用いて、同じ(均一な)試料を分析した時(室間共同試験や技能試験)の分析値のばらつきのデータを使用する。

16

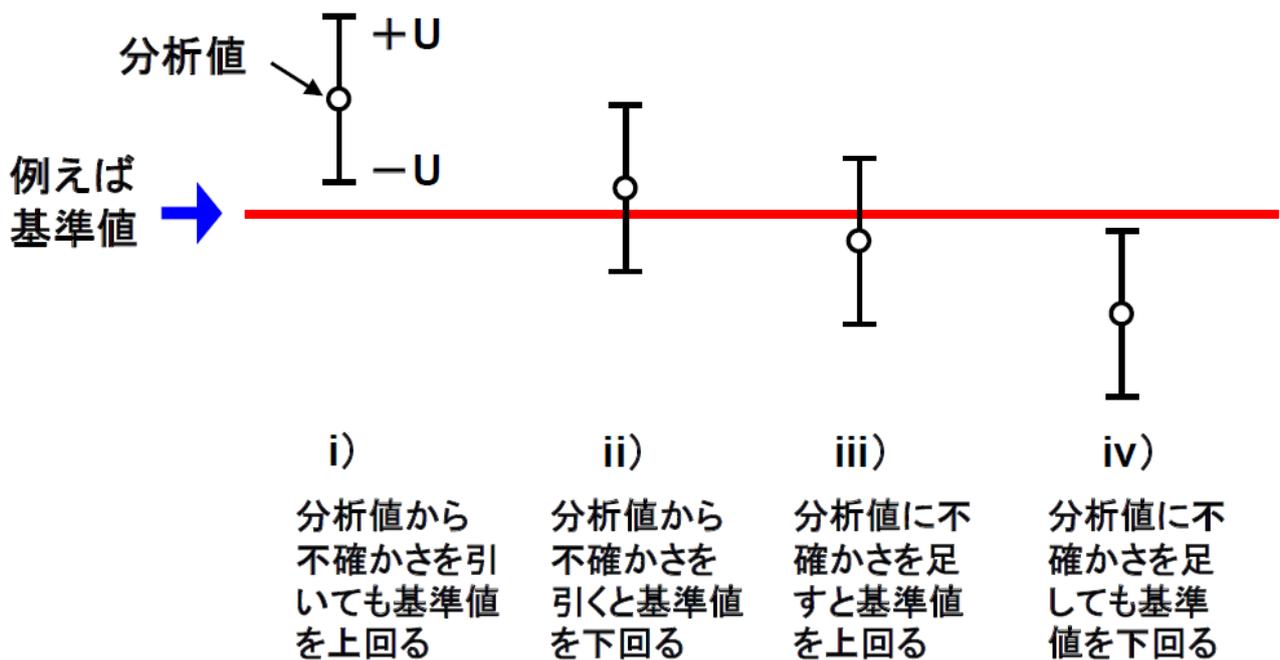
ガンマ線スペクトル分析における不確かさ

要因	不確かさの典型的範囲	不確かさの典型値
カウント数	0.1~20%	5%
ガンマ線放出率	0.1~11%	< 2%
半減期	0.01~1%	< 0.2%
検出器の効率	1~5%	2%
測定手順・操作	1~10%	3%
試料の重量	0.01 ~ 1%	< 0.5 %

IAEA-TECDOC-1401 Quantifying uncertainty in nuclear analytical measurements

17

測定の不確かさが論点となる例



(参考) Guidelines on Measurement Uncertainty (CAC/GL 54-2004)

18

検出下限と定量下限

検出下限: ある分析法で、分析対象物質が存在していることがわかる 最低濃度

→ 検出下限未満の濃度で含まれていたとしても、見つけられない

定量下限: ある分析法で、分析対象物質の濃度がわかる 最低濃度

→ 定量下限未満の濃度で含まれていたとしても、正確な濃度はわからない

検出下限や定量下限は、分析する核種、食品、機器などによって異なる

19

検出下限と定量下限

- ・食品安全の分野では、コーデックス委員会のガイドラインで、**検出下限**を基準値の1/10以下、**定量下限**を基準値の1/5以下とするべきとされている。
- ・消費者の健康を守るためには、より多くの食品を分析できるほうがよく、目的にかなう条件で分析することが必要。
- ・検出下限を小さくすれば、規制値を大幅に下回るわずかな量でも検出することができるが、そのためには時間や経費がかかり、検査できる試料数が減る。
- ・「**ND**: not detected) 検出されない」とは、検出下限未満の濃度であるということ。存在しないということではない。

20

定量下限と測定時間・サンプル量の関係

- ▶ 測定時間が長いほど、より低濃度の放射性物質を検出可能。
(定量下限は小さい値になる)

原理的には定量下限は、 $\frac{1}{\sqrt{X}}$ に比例 X : 測定時間を X 倍

例1: 測定時間を2倍にすると → 定量下限は $\frac{1}{\sqrt{2}}$ になる。

例2: 定量下限を50 Bq/kgから20 Bq/kgにしようとする、測定時間は約6倍の長さが必要。

- ▶ サンプルの量が多いほど、定量下限は小さい値になる。

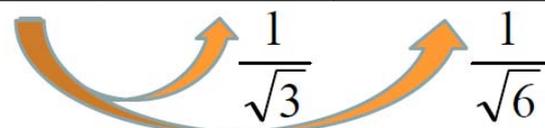
例: サンプル量が 0.2kg の時の定量下限が 200 Bq/kg とすると
サンプル量を 1 kg に増やすことが出来れば、定量下限は 40 Bq/kg。

21

(参考) 定量下限と測定時間の関係の一例

～緊急時における食品の放射能測定マニュアル(厚生労働省)より～
ゲルマニウム半導体検出器

試料名	量	測定時間とCs-137 定量が可能な最低濃度 (単位)Bq/ kg(L) 生		
		10分間	30分間	1時間
穀類、肉類、卵 牛乳 海藻、魚	2 kg 2 L 2 kg	40	24	16
野菜(葉菜)	1 kg	80	48	32



22

ゲルマニウム半導体検出器による放射線測定の実理

ガンマ線を放出する放射性核種を分けて測定するためには、 γ 線のエネルギー（波長）を分析すること、つまりガンマ線の分光が必要です。しかし、可視光線のようにプリズムで屈折させることはできませんし、普通の回折格子は波長が短かすぎて使えません。それではどうやって分光するのでしょうか。その方法は2つあります。

一つは、 γ 線のエネルギーを電流に変えて直接測定する方法です。半導体でできた検出器にガンマ線が飛び込むと、動きが取れない状態にあった電子がエネルギーをもらって動ける状態に飛び上がり、電流が流れるようになります（半導体の話参照）。飛び込むガンマ線の波長が短くエネルギーが大きければ、より多くの電子が飛び上がって多くの電流が流れるのです。ここで疑問に思う人がいるかもしれません。「波長が短ければエネルギーが大きいののはわかるが、波長が長くても強度が大きければ、やはりエネルギーは大きくなるのではないかと」。でも心配はいりません。ガンマ線も含めて電磁波というのは、エネルギーの粒のような性質を持っていて、1個1個の粒が、波長に応じたエネルギーを持って飛んで来ます。電磁波は連続して飛んで来るように見えますが、実は1個ずつバラバラになっているのです。そして強度が大きいというのは、実は粒の数が多ということであって、1個1個の粒のエネルギーの大きさは関係ないのです。そのため、検出器に1個のガンマ線が飛び込むたびに、そのエネルギーに応じた電流がピッと流れ（パルスと言います）、また次のガンマ線が来ると、同じ強さの電流がまたピッと流れることになります。2個のガンマ線が全く同じタイミングで飛び込んで2倍の電流が流れる、というようなことは滅多に起こりませんから、電流パルスの高さを測りさえすれば、個々のガンマ線のエネルギー、つまり波長がわかるのです。一方ガンマ線の強度の方は、単位時間に発生するパルスの数を数えればわかりますから、特定の波長のガンマ線がどのくらいの強さで来ているかが測

定できるわけです。図1の例で言えば、青で示した波長の短いガンマ線が飛び込むと高いパルスが、赤で示した波長の長いガンマ線が飛び込むと低いパルスが発生します(緑はその中間)。そして青と緑と赤のガンマ線はそれぞれ3個、1個、2個飛び込んでいますから、それぞれのパルスの数も3個、1個、2個です(実際にはパルスの数はもっと多いです)。このデータを、横軸にガンマ線のエネルギー(つまりパルスの高さ)、縦軸に強度(つまりパルスの数)をとって表示すれば、ガンマ線分光の完成です。このようにしてガンマ線を分光する方法を、エネルギーの違いを検出するという意味で、エネルギー分散分光(Energy Dispersive X-ray Spectroscopy = EDX または EDS)と呼びます(この方式の検出器のことを EDX と呼ぶ場合もあります)。

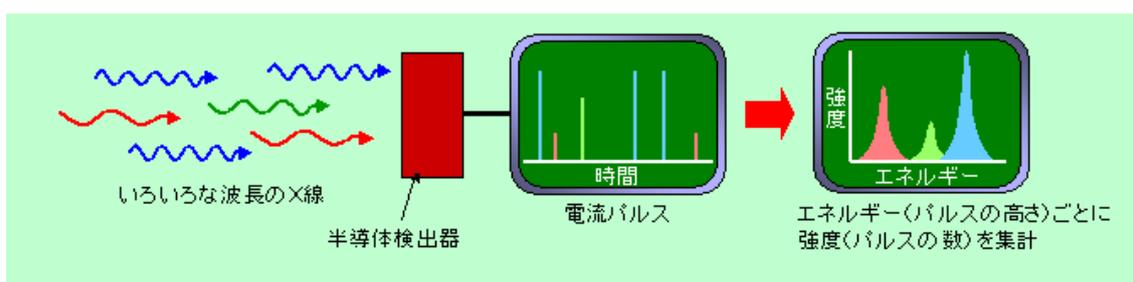


図1 エネルギー分散型による X 線スペクトロメトリの原理(ガンマ線も同じ仕組み)

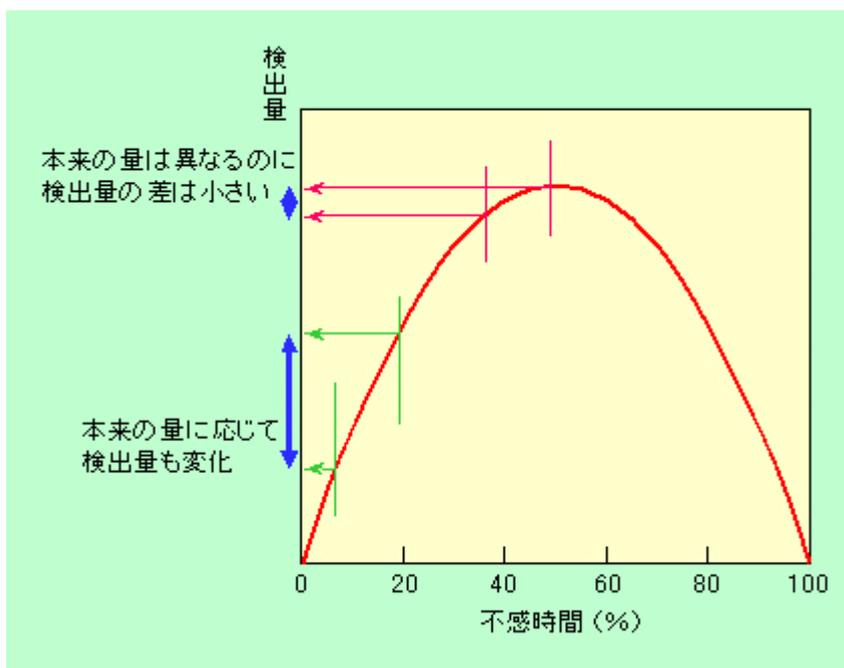
Dead time

不感時間という妙なもの

電磁波にしる電子にしるイオンにしる、これらのエネルギーの粒は最後は何らかの検出器に受けて量を測る必要があります。検出方式にはいろいろなものがありますが、基本的には EDX のところで説明したように、エネルギーの粒が飛び込むたびに信号がピッ、ピッと出るようになっています。この時、検出器には何らかの変化が起きているのですが(だからこそ信号が出るのです)、次々に飛び込んでくる粒を検出するには、そのたびにちゃんと元の状態に戻っていなければなりません。でないと変化が蓄積して、同じ感度で検出を続けることができなくなってしまいます。ところが実際に

は、検出器の状態は一瞬で元に戻るわけではありません。元の状態に戻るには一定の時間が必要で、その間は粒が飛んで来ても反応できない「死んだ」状態になります。この時間を「不感時間(Dead Time)」と呼びます。ちゃんと検出するには、不感時間などはない方がいいように思えます。それなのに EDX のマニュアルなどには、たいてい「不感時間が 20~30%になるように調節しなさい」というようなことが書いてあります。わざわざ 2 割、3 割の時間は検出不能の「死んだ」状態にしろとは、少々妙な話ですね。これはどういうことでしょうか。

エネルギーの粒が一個飛び込んで信号が出た後、検出器が元の状態に回復するまでに 0.01 秒かかるとしましょう。1 秒間に 40 個の粒が飛び込むような条件で測定した場合、不感時間のトータルは 0.4 秒(つまり不感時間 40%)ですから、この検出器が実際に活動しているのは残りの 0.6 秒だけです。単純計算すると、この状況で検出できる粒は、検出器が活着している 0.6 秒の間に飛び込んで来た 24 個だけで、残りの 16 個は数え損ねてしまう、ということになります。次に(例えば EPMA の照射電子線を弱くするなどして)1 秒間に検出器に飛び込む粒の数を 20 個に減らしてみましよう。そうすると確かに不感時間は 0.2 秒に減るのですが、粒の数が全部で 20 個しかありませんから、検出できる粒はその 8 割で 16 個となり、装置の感度としては落ちてしまいます。それでは逆に検出器に飛び込む粒の数を毎秒 80 個まで増やすとどうなるでしょうか。今度は不感時間が 0.8 秒もありますから、結局は全体の 8 割を数え損ねてしまい、やはり 16 個しか検出できないのです。この様子を図 13 にグラフで表しました。(なお、ここでは飛び込んだ全ての粒が全く同じ不感時間を発生させるという単純なモデルで考えました。この他の考え方として、不感時間中に飛び込んだ粒は新たな不感時間を発生させないとするモデルや、その中間のモデルなどいろいろあり、グラフの形も少し違って来ます。どのモデルが実際とよく合うかは、その時々状況によります。)



左の方では粒の絶対数が少ないことが、また右の方では不感時間が長くなって数え損ねが増えたことが影響して、検出される粒の数が減ってしまっています。真中あたりの条件の時に、最も多くの粒が観測できるのです。それでは、いつもこの真中あたりの条件で測ればよいかというと、そうでもない、というのがややこしいところです。その理由はこうです。

真中附近は検出される粒が多くて、確かに検出感度は最大です。しかし、全体の半分ぐらいは不感時間ですから、実際に検出器に飛び込んで来ている粒の半分程度しか検出できていません。つまり、量に関する情報がウソになります（もちろん、さらに右側の領域ではもっと大ウソになります）。また真中附近はグラフの傾斜がなだらかなので、検出器に飛び込む粒の数が少々変化しても（言い換えれば不感時間が少々変化しても）、実際に検出される粒の数はほとんど変わらない、という問題も発生します。要するに、量の変化に鈍感なのです。これに対して、グラフの左の方では、飛び込む粒子数、つまり不感時間の変化に応じて検出される粒子数が大きく変わりますから、量の変化を敏感に感じ取ることができます。最も量の変化に敏感なのは、言うまでもなく、グラフの傾斜が最も急な左端の点、ということになります。

以上のように、真中附近の条件は、或る成分があるかどうかだけを感度を目一杯上げて判定するような時には都合がよいのですが、量についての情報も欲しい場合（普通はそうです）には具合が悪いのです。かといって左端の条件ではあまりに感度が低すぎますから、感度もそこそこ、量を測る目的もそこそこ果たせる、不感時間 20~40%あたりがよく使われるのです。（検出器自体の感度

が非常に高く、精密に量を測る必要がある場合には、不感時間がほとんどない左端に近い条件も使われます。) 放射線測定では、5-10%程度にした方がよいと書かれています。