

放射線・放射物質とは

東北大学

高等教育開発推進センター/大学院理学研究科物理学専攻

金田 雅司

kaneta@lambda.phys.tohoku.ac.jp

<http://lambda.phys.tohoku.ac.jp/~kaneta/>

今日のプレゼンテーションのファイルは以下の場所にあります。

http://lambda.phys.tohoku.ac.jp/~kaneta/presentation/2011_12_13_Masashi_Kaneta_Ichinoseki_Senmaya.pdf

講演の概要

- 放射線・放射能とは？
 - 物質は何から出来ているのか
 - 放射性物質と放射線
 - 放射線の検出方法
- 放射線とどうつきあうか？
 - 東日本・仙台市での放射線量率を例に
 - 放射線のリスクとその評価



素粒子・原子核を研究している物理屋が知りたいこと

物質は何から できているのか

元素

元素周期表

Periodic Table of the Elements

自然も暮らしもすべて元素記号で書かれている



メンデレーエフ (Mendeleev) *Иванъевичъ Мендѣлѣевъ*, 1834~1907)
1869年、ロシアのペテルブルグ大学の化学者メンデレーエフは、当時
知られていた63種類の元素を(1)原子量順に並び、(2)酸素や塩素
と結合してできる酸の価数(たとえば ナトリウムはNaClを、マグネシ
ウムはMgCl₂をつくる)などの性質が周期的に変わるという「周期律」を
見つけた。性質が似た元素が同じ列に並ぶように配列した周期表を作
った。その年のうちに大々有名になり、当時知られていなかった元素の
性質を予言した。そのメンデレーエフの周期表はほぼ正確なものが
1875年にギリシア人、1886年にドイツ人が独立に発見した。それらの
性質が彼の予言のとおりであつたため、世界的に有名された。
戦後の日本には、すべての人々が利用する化学や物理学の基本となつてい



THE JOURNAL OF THE

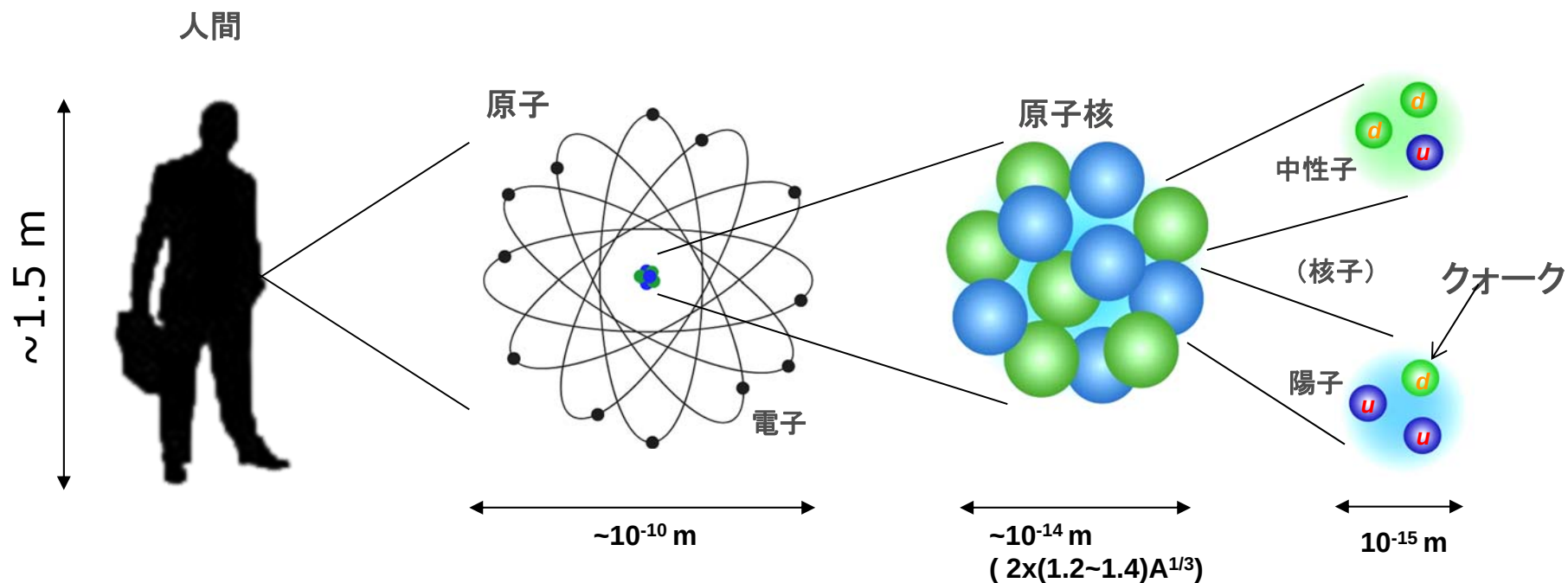
◎ 俗文化語彙 · 一

◎ 俗文化語彙 · 一

謝國興：「社會主義」與「社會民主主義」的區別，載謝國興（2000）：《社會主義與社會民主主義》，頁150-151。

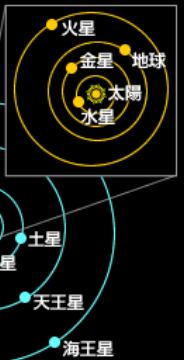
この「一家に一枚周期表」は http://www.mext.go.jp/a_menu/kagaku/week/1298266.htm からダウンロード出来ます。

原子・原子核・素粒子

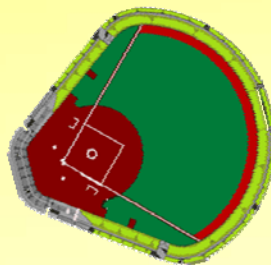


同じ比率のもの

人の身長:
太陽から土星までの距離
1,400,000,000 [km]



原子:
野球場の外野まで距離
約 100 m



原子核:
ビー玉
約 1 cm



陽子・中性子:
ボールペンのボール
約 1 mm



素粒子・原子核物理

- 我々の世界は何から出来ているのだろうか？
 - 小さな世界
 - ものを小さくしていったらどうなるのだろうか？
 - そこではどのような規則が働いているのだろうか？
 - 大きな世界
 - 宇宙はどのようにして出来たのか？
 - 星のなかはどうなっているのだろうか？
- 素粒子・原子核物理の目指す物
 - 我々の起源を解き明かしたい

素粒子・原子核物理

・役に立たないか？

- 「たちません」
 - ・何かに役に立とうとして研究していない
- 「たちます」
 - ・後から役に立つことが見つかる：応用

・応用の例

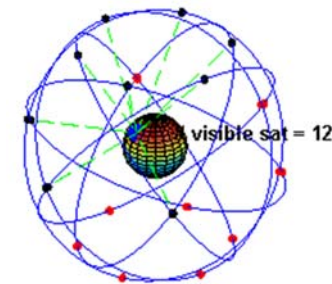
- X線写真
 - ・病気の発見、治療の手助け
- 量子力学
 - ・エレクトロニクスの世界
- 特殊・一般相対性理論
 - ・GPS（カーナビゲーション）
- 加速器・検出器技術
 - ・放射光を用いた、物質の構造の解明
 - ・PET, MRI での画像診断
 - ・陽子線・重粒子線による癌治療



ヴィルヘルム・レントゲン



彼の妻の手の
X線写真



地球の周りを回るGPS衛星

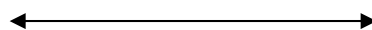
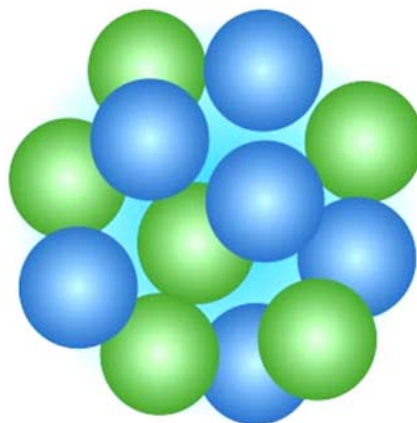
原子核

- 陽子と中性子からなる
 - 陽子と中性子をまとめて核子と呼ぶ
- 元素の種類
 - 電子の数＝原子核中の陽子の数
 - 物質の性質は、電子軌道がどのような状態であるかで決まる
- 同位体
 - 陽子の数が同じで中性子の数が異なる
 - 安定な原子核と不安定な原子核の存在
- 原子核の構造
 - 陽子や中性子は、原子中の電子のように、とることの出来るエネルギーや軌道が決まっている
 - 量子力学の世界なので、そのエネルギーは飛び飛びの値しか持てない

原子核

- 陽子と中性子からなる
 - 陽子と中性子をまとめて核子と呼ぶ

原子核



約 10^{-14} [m]

= 0.000000000000001 [m] = 10兆分の1メートル

ギリシャ語由来の -on
に対応するのが「子」
proton: 陽子
neutron: 中性子
nucleon: 核子

原子核

- 元素の種類

- 電子の数＝原子核中の陽子の数、で決まる

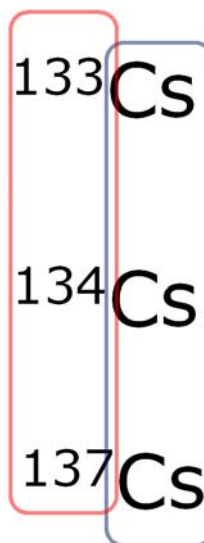
- 同位体

- 陽子の数が同じで中性子の数が異なる

質量数：
陽子と中性子の個数の合計

安定な物と不安定なものがある
不安定なものは放射線を出
して安定な物に変わる

セシウムの同位体
質量数が112から151まで
安定なのは セシウム133



名前が同じ
原子番号が同じ
＝原子核中の陽子の個数が同じ
化学的性質が同じ

例：セシウムは原子番号55



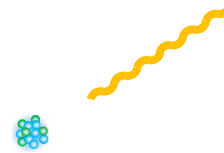
その性質

放射性物質と 放射線

放射能と放射線

放射性物質

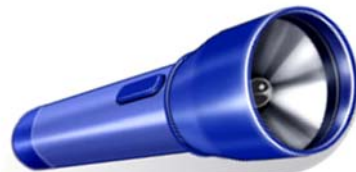
放射線を出す能力を持った物
＝ 放射能



放射性物質から放射されるもの
＝ 放射線

光子・電子・陽電子・陽子
ヘリウム原子核・中性子

例えると



懐中電灯

光を出す能力を持った物

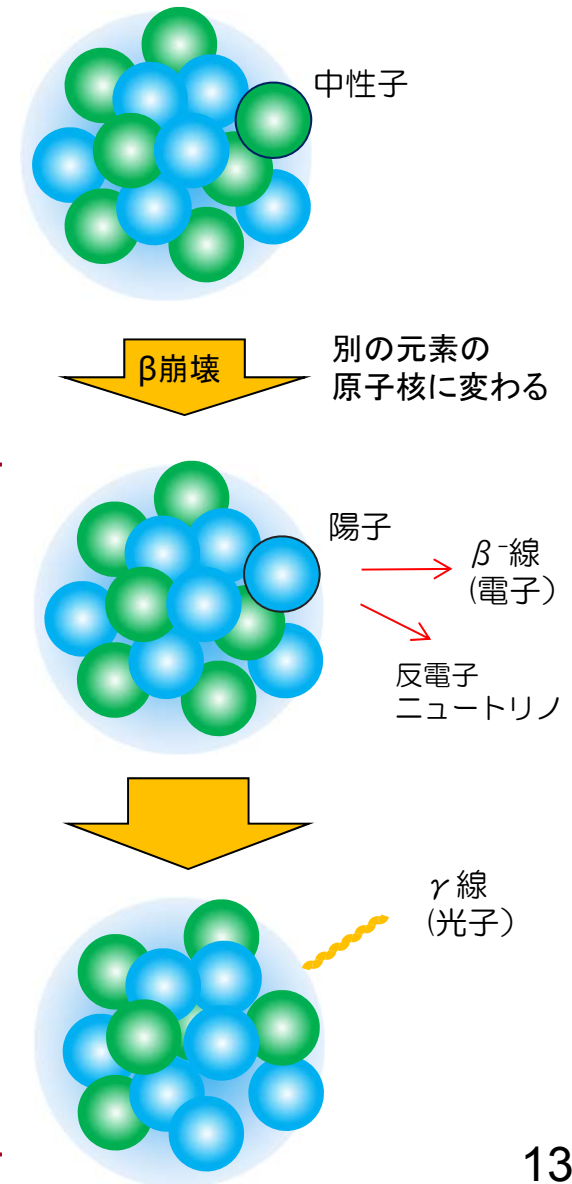
光

懐中電灯から放射されるもの

放射性物質

・不安定原子核

- 余分なエネルギーを外に出して安定な原子核になる
 - ・ 別種類の原子核になる
 - 崩壊または壊変と呼ばれる
 - ・ 原子核内部の構造（陽子や中性子の軌道）の変化
 - 励起状態から基底状態へ
- 放射される物
= 放射線
- 不安定原子核を持つ物質
= 放射性物質
- 一つの原子核がいつ壊変するかは分からない
 - ・ しかし、沢山集めれば、平均的にどのくらい時間が経つと壊変するかは分かる



核分裂

- 重たい原子核が、二つ（まれに三つ以上）の原子核に分裂
 - 自然に起きる
 - 中性子、陽子、 γ 線、 β 線の吸収によって起きる
- 原子炉のウラン燃料
 - ^{235}U が3-5% その他は核分裂をしないウラン

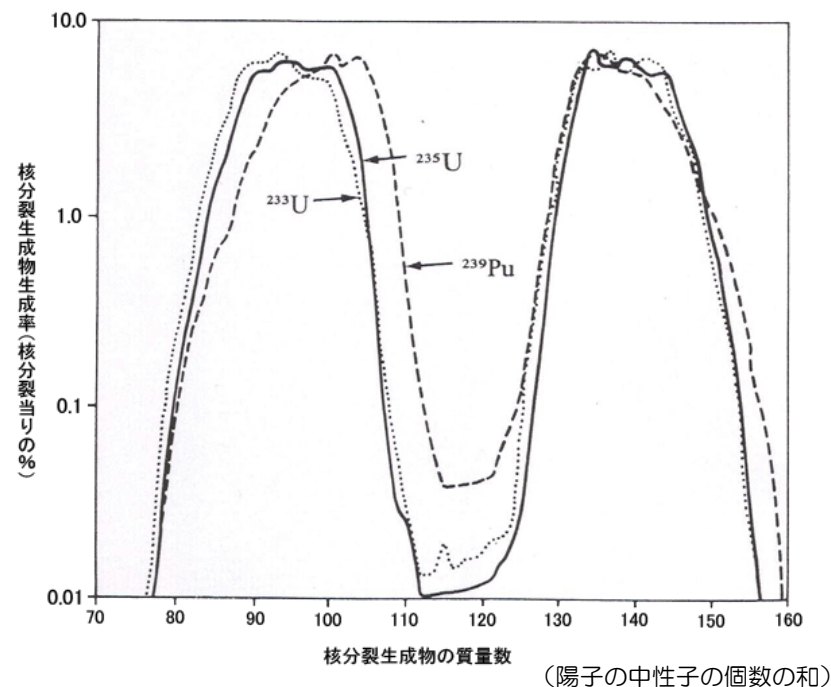
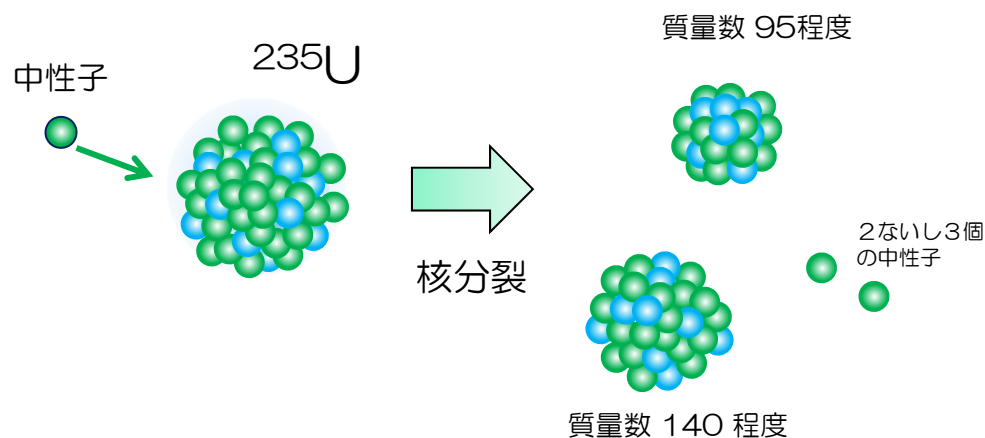


図1 核分裂生成物の質量数分布

[出典]W.マーシャル編:原子炉技術の発展(上)、養華房、p.72

<http://www.rist.or.jp/atomica/data/pict/03/03060304/03.gif>

福島第一原発から大気中に放出したと考えられる放射性同位体で、量が多いと予想されているもの

キセノン133 (1.1×10^{19} Bq)

ヨウ素131 (1.6×10^{17} Bq)

セシウム134, 137 (1.8×10^{16} Bq, 1.5×10^{16} Bq)

保安院の発表より

<http://www.meti.go.jp/press/2011/06/20110606008/20110606008-2.pdf>

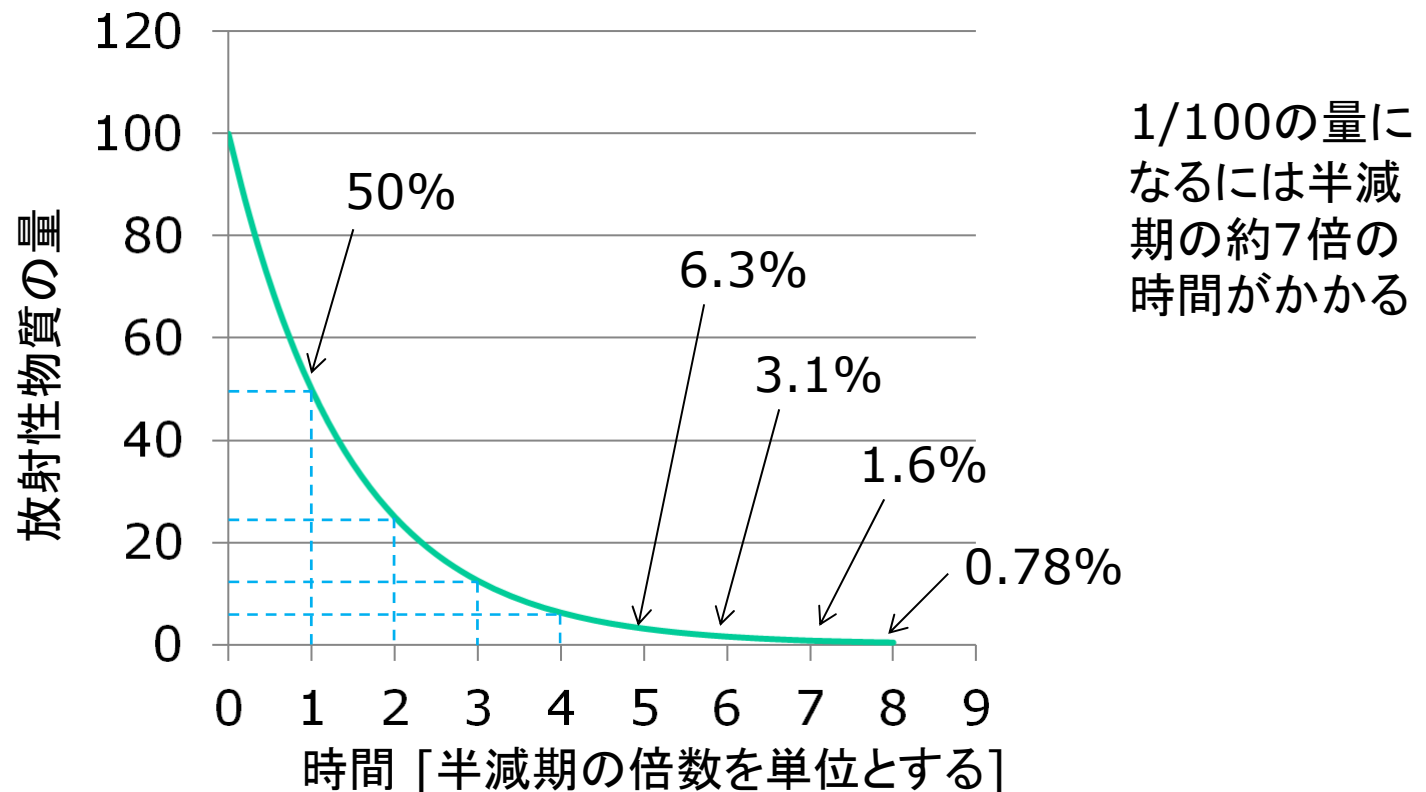
ストロンチウム89と90の和と、セシウム134と137の和の比は、福島県では、1:2000~1:4000

文部科学省の測定結果を基にした原子力安全委員会の資料

http://www.nsc.go.jp/nsc_mnt/110610_3.pdf

半減期

- 放射性物質は崩壊（壊変）と共に減っていく
- 元々あった量が半分になる時間＝半減期
 - 原子核によって半減期は異なる
 - マイクロ秒のオーダーから ^{238}U の45億年までいろいろ



放射線の種類

- 原子の中から発生する物

- 電子軌道から

- X線 = 光子

- 原子核から

- α (アルファ)線 = ヘリウム4の原子核

- β (ベータ)線 = 電子・陽電子

- γ (ガンマ)線 = 光子

- 中性子

- 宇宙から降り注ぐもの

- 宇宙線

- μ (ミュー)粒子 = 素粒子の一種、電子の仲間

- 人工放射線

- 加速器を使用

- 電子、陽子、イオン自身を加速し取り出す

- シンクロトロン放射・制動放射を利用し電磁波
(紫外光、X線、 γ 線)を生成させる

個々の放射線について
詳しい説明は付録を
参照してください

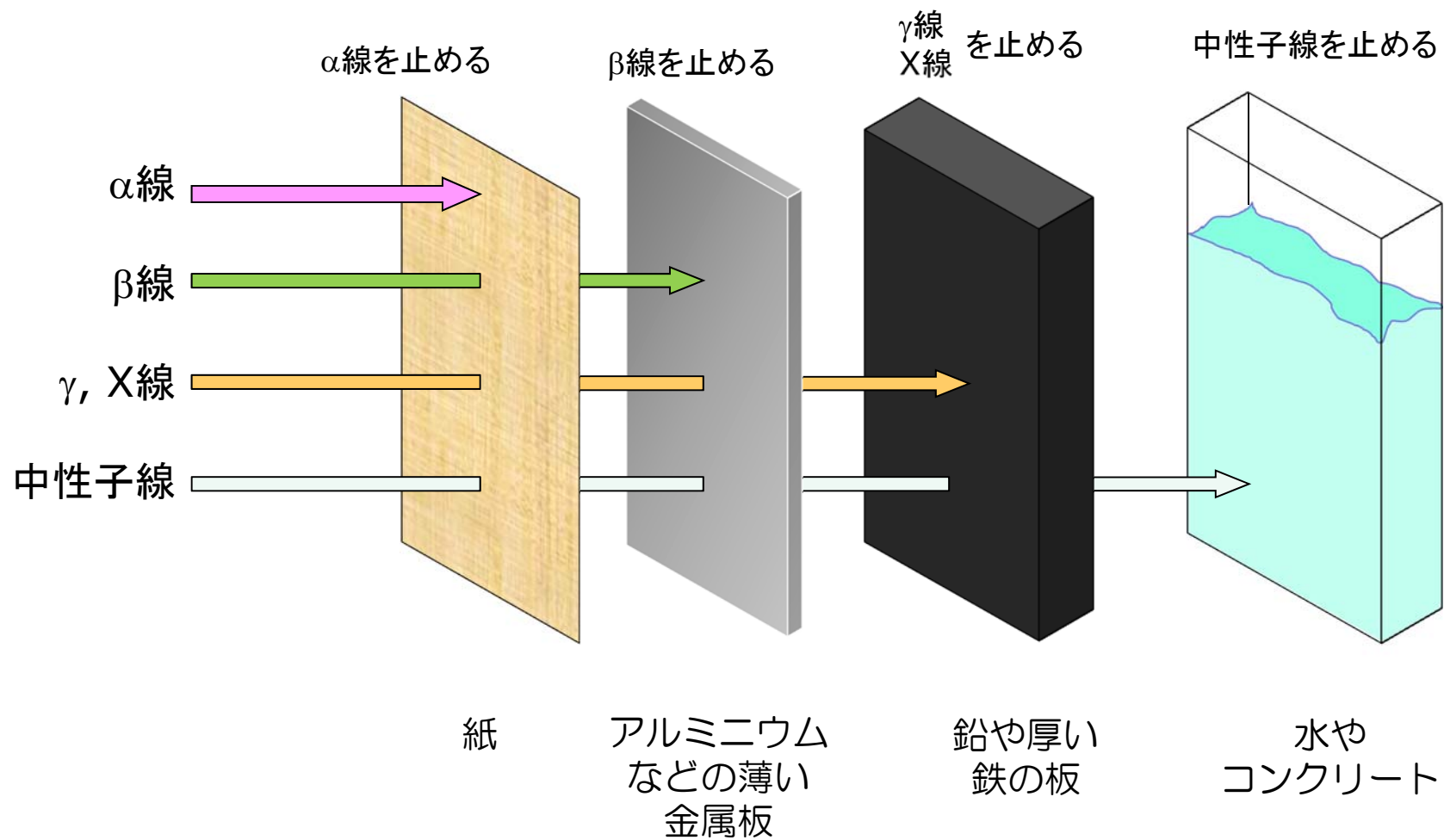
放射性物質の性質

- 放射線を出すプロセス
 - 100兆分の1 m（原子核の大きさ）という、極小の世界の現象
- 化学反応では原子核を変えることは出来ない
 - 錬金術が成功しなかった理由
 - 化学反応は、原子核の周りを回っている電子の状態が決める
 - 電子がどこにいるか、何個いるか
- 当然、生物の力でも原子核は変わらない
 - 「〇〇が放射性物質を別の物に変える」という物を売っていたら詐欺
- 一方、特定の元素を集める生物は存在する
 - 一時期話題になった、ヒマワリ、菜種などは、セシウムを集めやすいと言われた
 - 農水省の実験によると期待していたほどの効果がなかった
 - 生物で放射性物質を集めたとして、それをどう処理してどこに持って行くかということ
を常に考える必要がある

電離化

- 電離化 (Ionization) とは
 - 原子中の電子がはがされてイオンになる
 - イオン化させるのに十分なエネルギーを持っている放射線
＝ 電離性放射線
 - 電離をさせない放射線もある
 - 一般に言う放射線は、電離放射線を指す
- 生体への影響
 - 分子中の原子をイオン化、分子を壊す
 - 電離化によって発生したラジカルが分子に影響を与える
 - たとえば
 - 酸素からオゾン
 - 水から、水素と過酸化水素
 - 同じ放射線量を被曝しても個体差がある
 - 統計的（確率的）にしか影響が述べられない

放射線の遮り方（遮蔽）



放射線の測定単位

- 吸収線量

- 1 [Gy(グレイ)]: 1 kg の物質に 1 J のエネルギーを与える
 - 同じ吸収線量でも、放射線の種類によって生物学的影響が異なる

- 等価線量

- 1 [Sv(シーベルト)] = 放射線荷重係数 × [Gy]
 - 放射線荷重係数
 - γ , X線: 1
 - β , μ 粒子: 1
 - 中性子: 5~20 (エネルギーによって異なる)
 - α 線: 20
- 等価線量に生体組織による影響の違いを考慮したものが、実効線量

- 線量率

- ある時間あたりにあびる線量
 - $\mu\text{Sv/時}$ (マイクロ・シーベルト毎時)
- 線量率と線量の違い
 - 速度 (km/時) と距離 (km) の違いと同じ
 - 報道等でも、線量率と線量の混乱が見られるので注意が必要

放射能の測定単位

• 放射能の量

– ベクレル, [Bq]

- 1 [Bq] = 1秒あたり、一つの原子核が崩壊して放射線をだす
 - 例：ラドン温泉
 - » ラドン222が 74 [Bq/l] 以上、ラジウムが 100 ng/l 以上含まれる
(ng = ナノ・グラム = 10億分の1グラム)

– キュリー, [Ci]

- 1 g のラジウムの放射能に相当
- ベクレルとの関係
 - $1 \text{ [Bq]} = 2.7 \times 10^{-11} \text{ [Ci]}$ (10^{-11} は1000億分の1)
 - $1 \text{ [Ci]} = 3.7 \times 10^{10} \text{ [Bq]}$ (10^{10} は100億)
- 現在では使われない
 - チェルノブイリ事故による土壌中の放射能の量を示すのには、Ci/km² が使われていたので、今でも見かけることがある
 - $1 \text{ [Ci/km}^2\text{]} = 37000 \text{ [Bq/m}^2\text{]}$

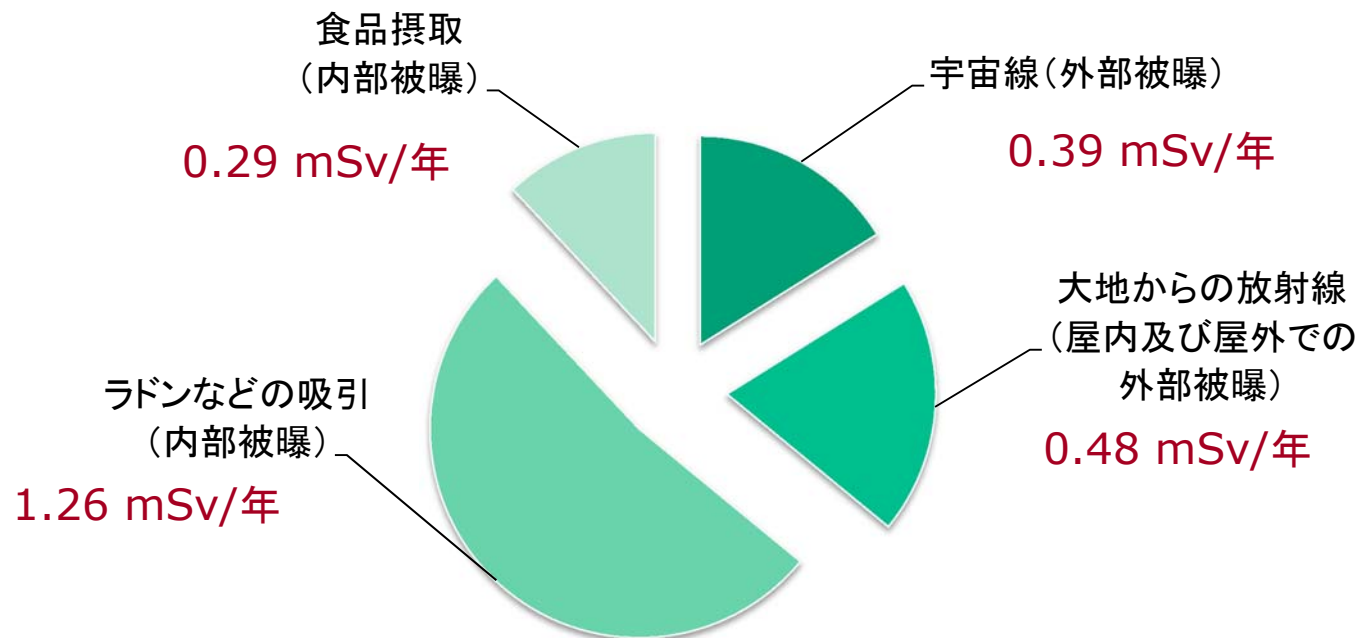
桁を表す単位

記号	読み方	漢数字表示	指数表示
P	ペタ	千兆	10^{15}
T	テラ	一兆	10^{12}
G	ギガ	十億	10^9
M	メガ	百万	10^6
K	キロ	千	10^3
		一	10^0
m	ミリ	千分の一	10^{-3}
μ	マイクロ	百万分の一	10^{-6}
n	ナノ	十億分の一	10^{-9}

自然放射線

- 自然界に存在する放射線
 - 天然放射線
 - ^{40}K 、ラドンなどから
 - 宇宙線
- 地球上での典型的範囲 1~10 mSv/年、平均値 2.4 mSv/年
 - 日本全国平均値 0.99 mSv/年

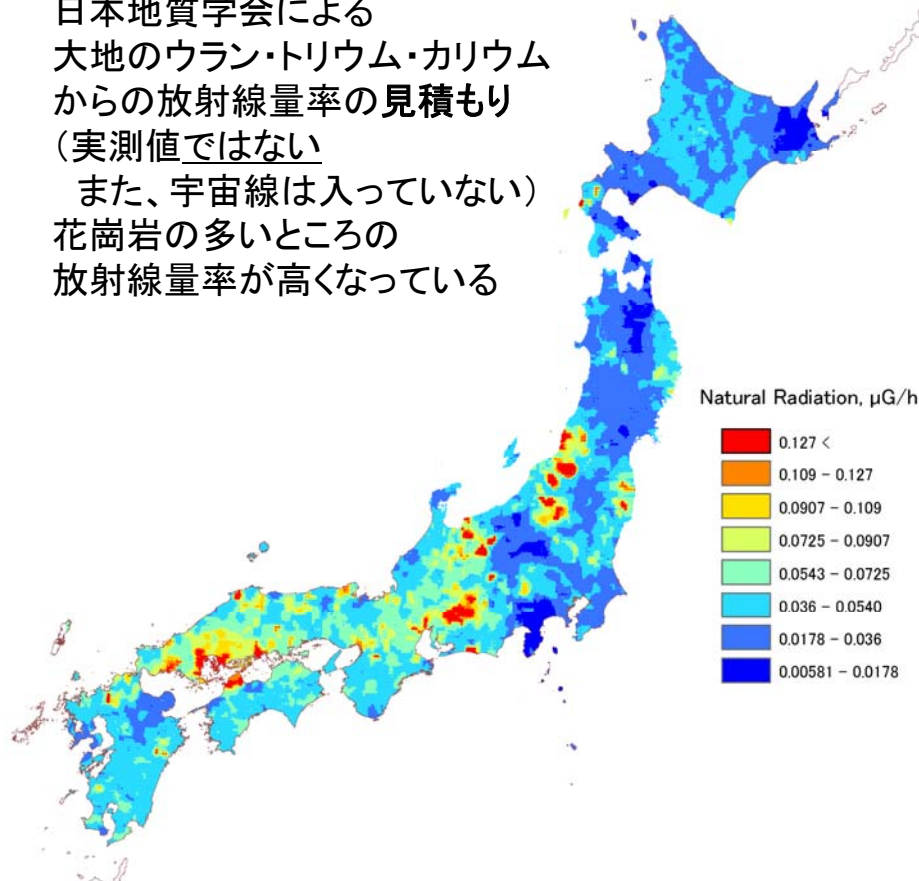
自然放射線による年間実効線量の世界平均的な値(国連科学委員会の推定)



数値の出典: http://www.rist.or.jp/atomica/data/dat_detail.php?Title_No=09-01-05-04

日本地域別の自然放射線

日本地質学会による
大地のウラン・トリウム・カリウム
からの放射線量率の見積もり
(実測値ではない)
また、宇宙線は入っていない
花崗岩の多いところの
放射線量率が上がっている



<http://www.geosociety.jp/hazard/content0058.html>

宇宙、大地からの放射線と食糧摂取
によって受ける放射線の量(ラドンなど
の吸入によるものを除く)

日本全体 0.99 mSv/年
(0.113 $\mu\text{Sv/h}$)

0.99以下
(0.114 $\mu\text{Sv/h}$ 以下)
1.00以上~1.09以下
(0.114以上~0.124以下 $\mu\text{Sv/h}$)
1.10以上
(mSv/年)
(0.126 $\mu\text{Sv/h}$ 以上)

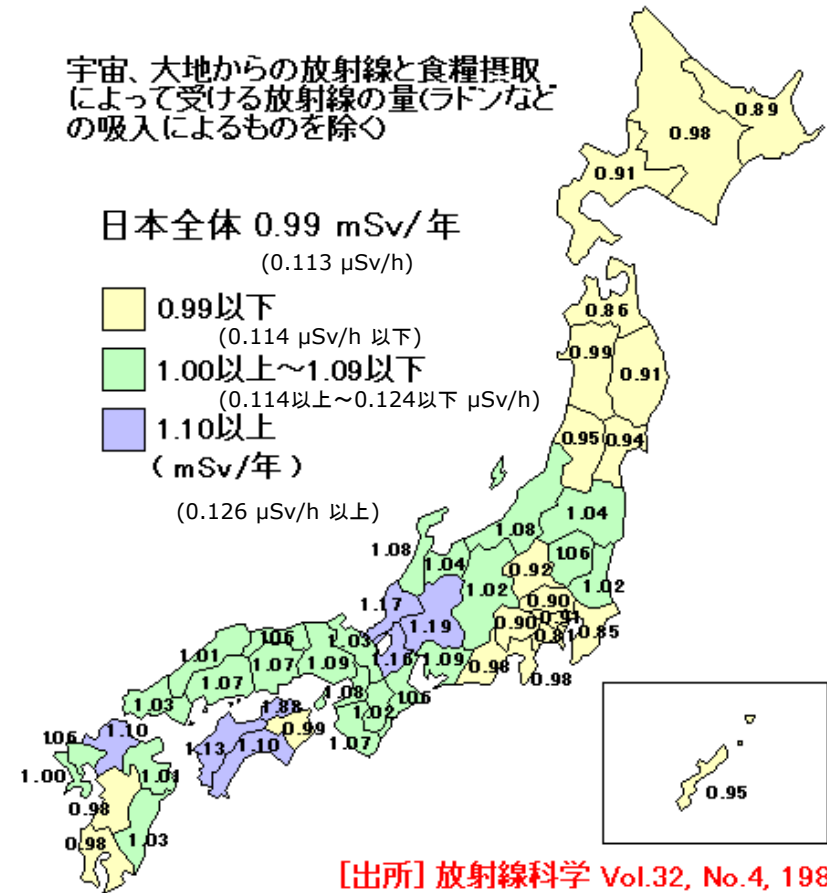
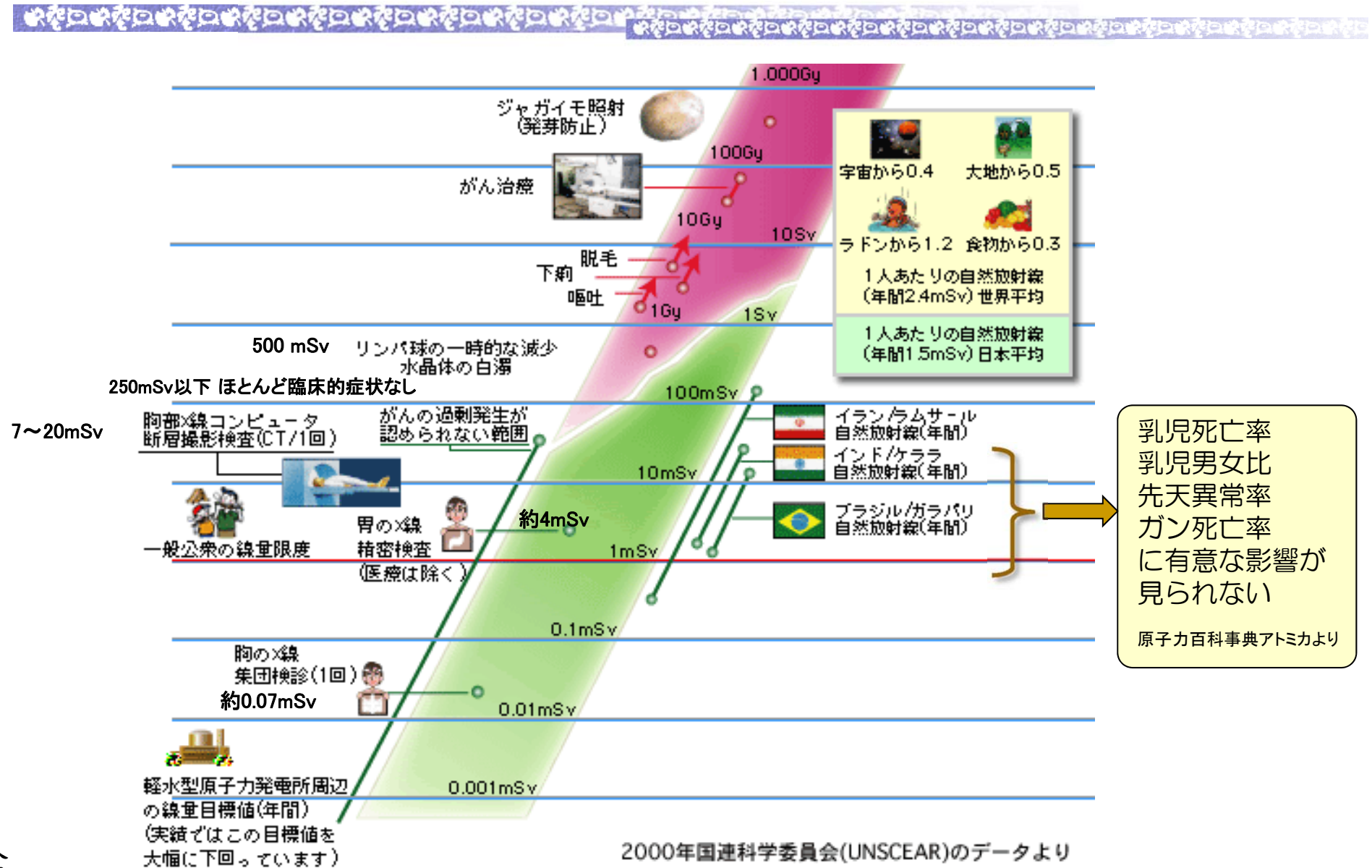


図1 わが国における自然放射線量

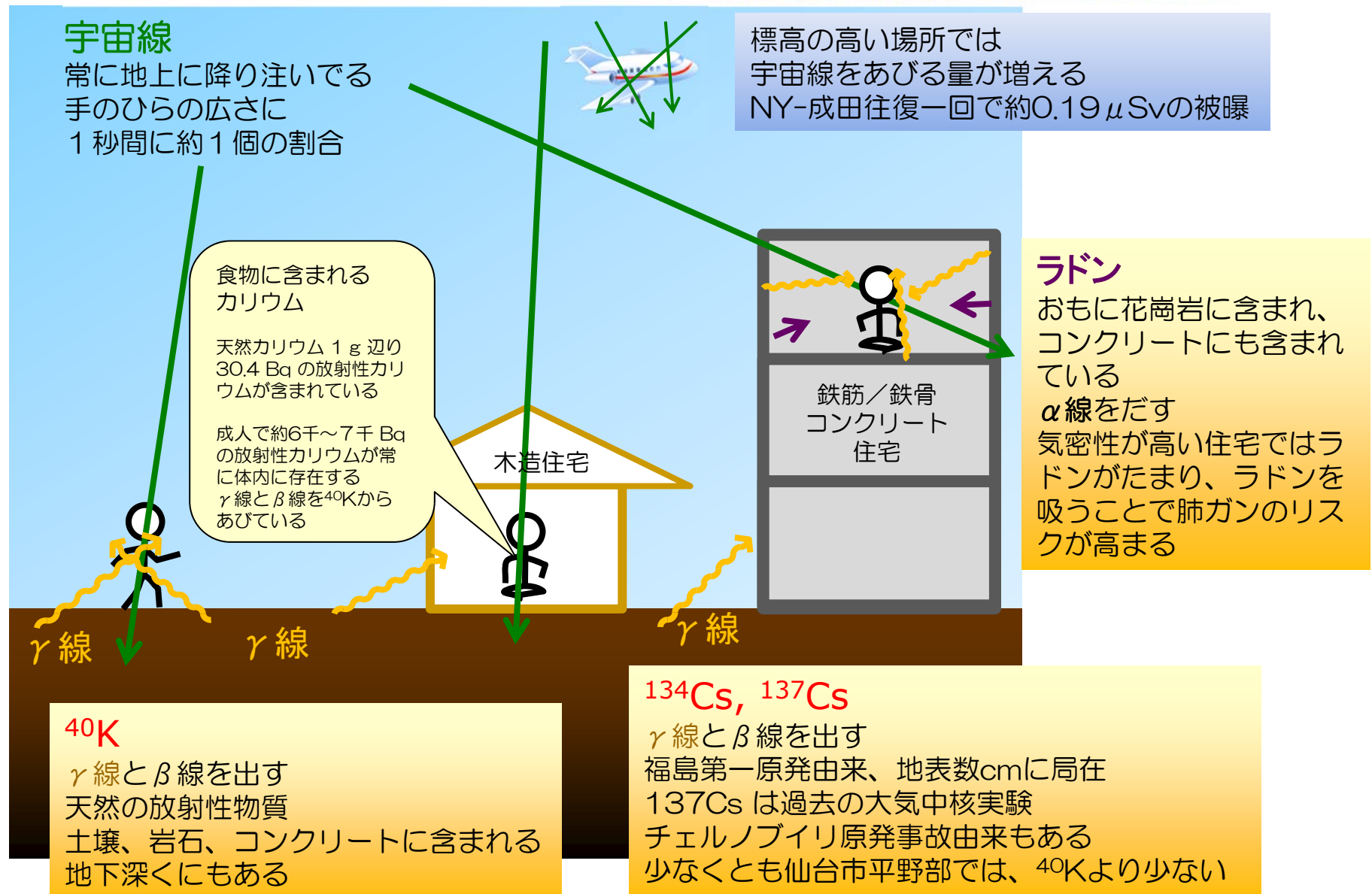
[出典] 電気事業連合会:「原子力」図面集(2000)、p.120

<http://www.rist.or.jp/atomica/data/pict/09/09010504/03.gif>

いろいろな放射線量



私たちがあびている放射線



β 線は空気中では数m飛んで止まってしまうので、遠くからは飛んでこない

ここまでのまとめ

• 放射線

- 原子の内部から放射される、粒子・電磁波
- 他の物質を電離させる能力を持ったものを「電離性放射線」と呼ぶ
 - 一般的には、電離性放射線を「放射線」と呼んでいる
- その種類ごとに特徴的な振る舞いをする
 - 素粒子・原子核の研究で得られている知見で説明できる

• 放射線の生物学的影響

- 相互作用自体が確率的な振る舞いをする
 - 微量な放射線について（ $\mu\text{SV/h}$ のオーダー）
 - ある量以上被曝したらすぐ危険というわけではないし、ある値以下だから絶対に大丈夫とはいえない
 - が、これ以上浴びないようにしなければならないという目安が法律で設定されている（放射線作業従事者について）
 - » 5年間で100 mSvを越えない、かつ1年間に付き 50 mSvを越えない
 - » 自然放射線（約 2 mSv/year）はこの中に含めない

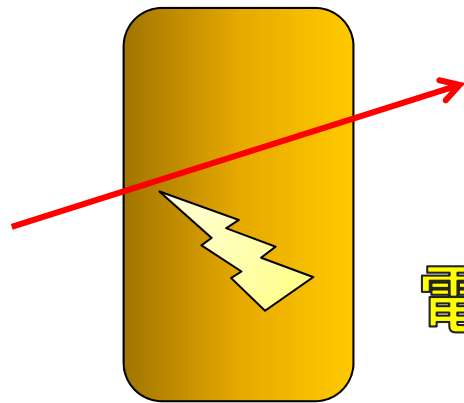


素粒子・原子核物理で使われている測定器の応用

放射線の検出方法

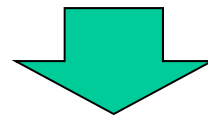
検出器

概念図

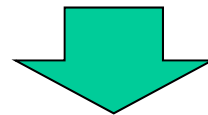


放射線が通過

電気パルス(信号)が発生



電気パルスの个数(と大きさ)を測定



時間あたりの測定個数、あるいは
放射線量率($\mu\text{Sv/h}$)に換算

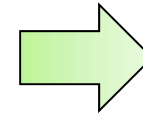
検出器の種類

- 放射線の個数だけ測定できるもの

- ガイガー・ミュラー・カウンター

本来は

大量の放射性物質が体についていたり、
体内に取り込んだ可能性があるときに使用



微量な(マイクロ・シーベルトを単位
とするような)放射線量を測るもの
ではない

- 放射線の個数とエネルギーが測定できるもの

- シンチレーション・カウンター
- 電離箱
- 半導体検出器

空間線量の測定には掌サイズでも良いが
食品や体内被曝の検査には大型のものが必要

空間線量率の測定

いろいろなところから
飛んでくる γ 線を測定



γ 線

γ 線

γ 線

γ 線

^{40}K

γ 線と β 線を出す
天然の放射性物質
土壌、岩石、コンクリートに含まれる
地下深くにもある

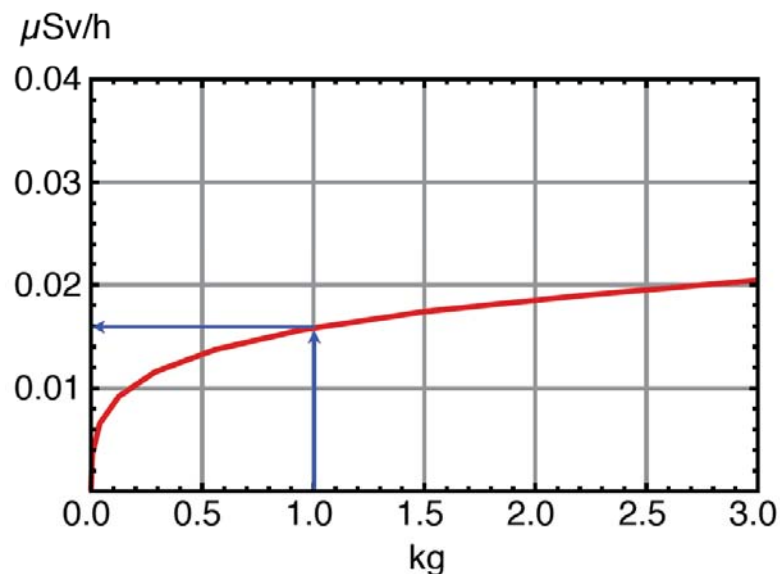
^{134}Cs , ^{137}Cs

γ 線と β 線を出す
福島第一原発由来、地表数cmに局在
 ^{137}Cs は過去の大気中核実験
チェルノブイリ原発事故由来もある
少なくとも仙台市平野部では、 ^{40}K より少ない

β 線は空気中では数m飛んで止まってしまうので、遠くからは飛んでこない

食べ物に含まれる放射能の測定

セシウム 500Bq/kg の食品表面の空間線量



Thursday, October 20, 11

このページ内のスライドは、東京大学大学院理学系研究科
早野龍五氏提供

2011年10月21日のニコニコ生放送

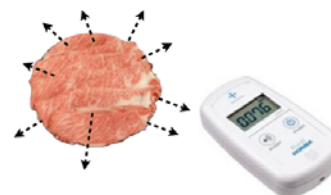
「緊急報告！アナタの食べ物は大丈夫？～放射線による食品
汚染の実態に迫る～」で使われた説明のスライドから。

全てのスライドは

<http://www.slideshare.net/RyuHayano/nicohou>

で見れます。

500Bq/kg のセシウム汚染食品 1kg
表面線量は 0.01μSv/h 程度



これなら楽勝？

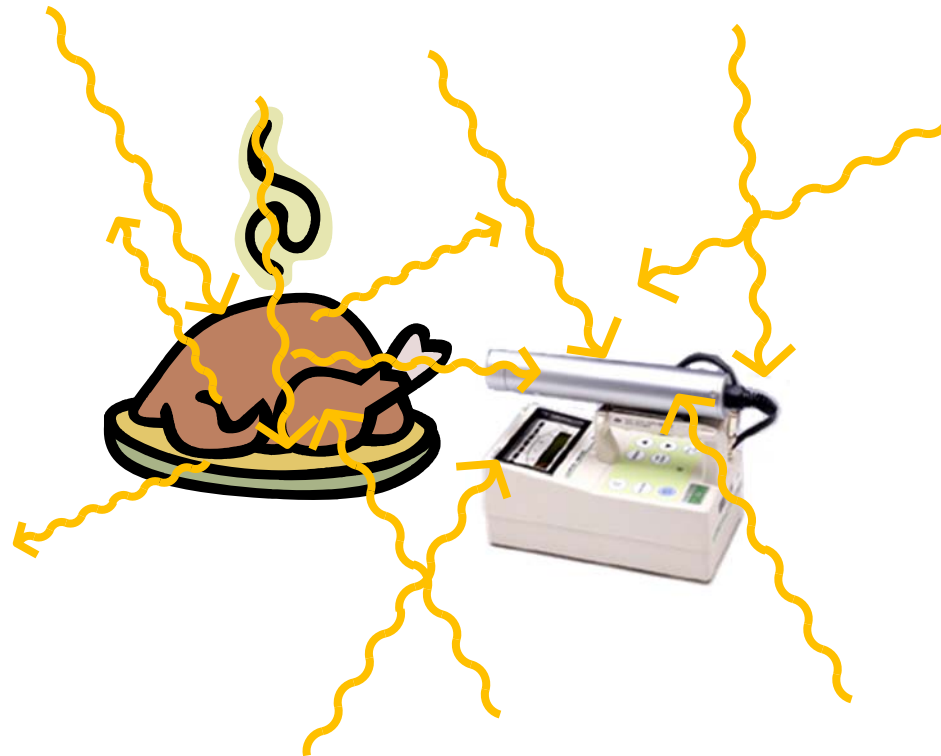
注意) 1kg, 5kg, 10kgと増やしても, 0.03μSv/hぐらいで頭打ち

Thursday, October 20, 11

食べ物に含まれる放射能の測定

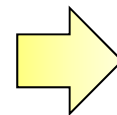
食べ物の表面に測定器を近づけた場合

食べ物の内部に
放射性物質があっても
周りから来たγ線も測定
してしまう。



どこから来たγ線を測定しているのか分からない！

そして殆どは、測りたいものの以外から！
土、コンクリートから

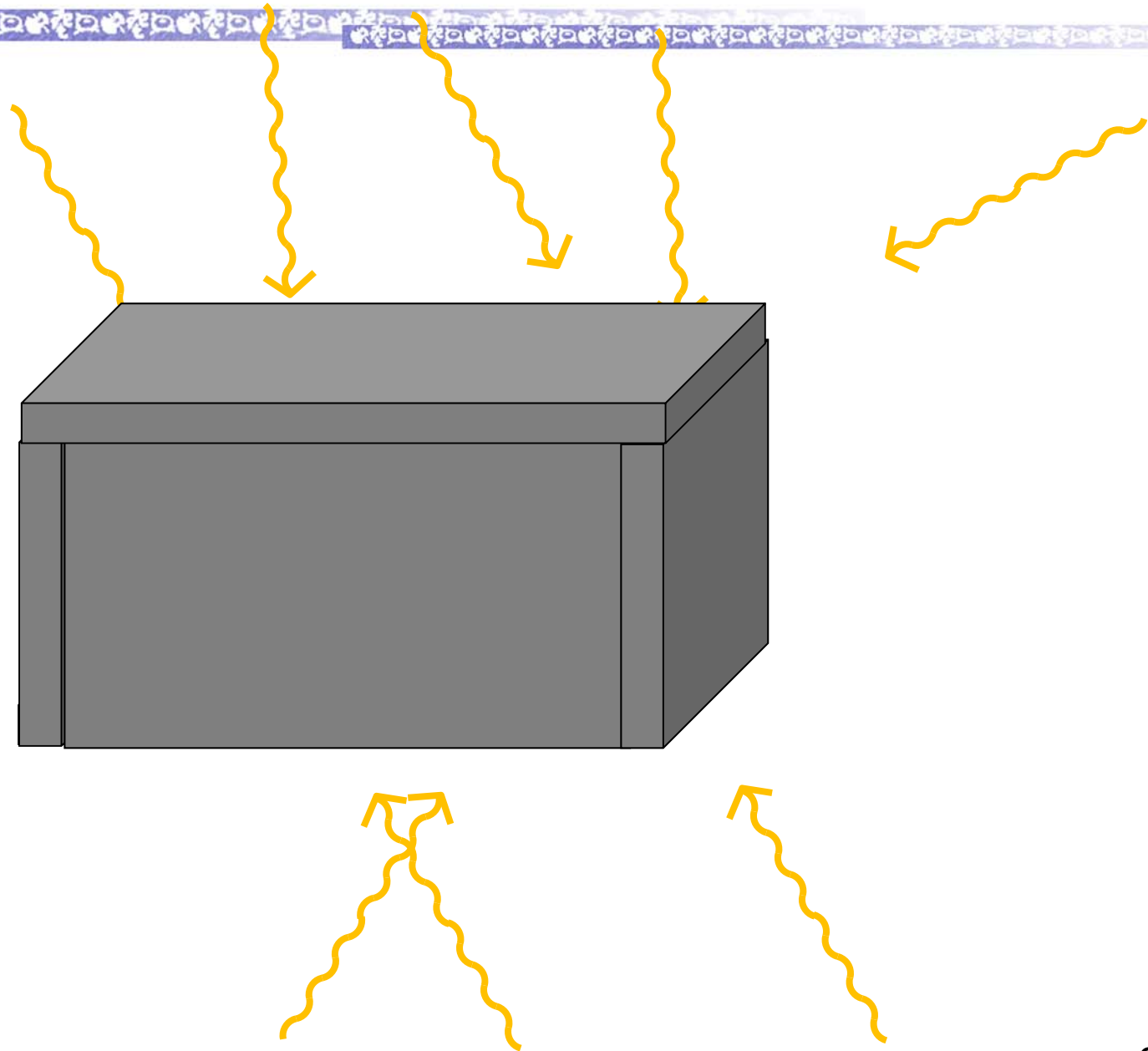


測りたいものの以外からくる物
= バックグラウンド

食べ物に含まれる放射能の測定

食べ物以外から
くる放射線を止め
なければならな
い(遮蔽)

通常は数センチ
以上の厚さの鉛
が使われる

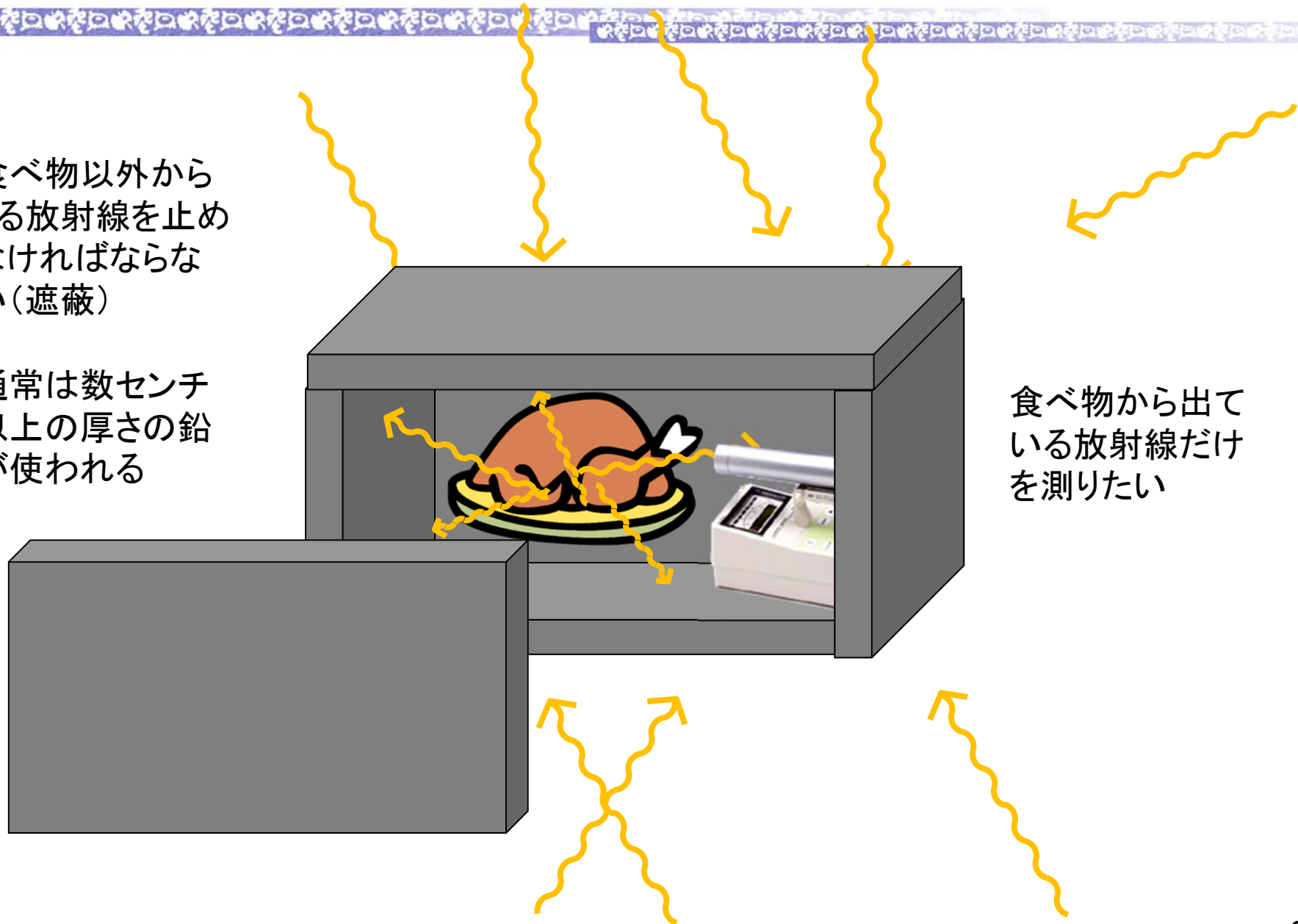


食べ物に含まれる放射能の測定

食べ物以外から
くる放射線を止め
なければならな
い(遮蔽)

通常は数センチ
以上の厚さの鉛
が使われる

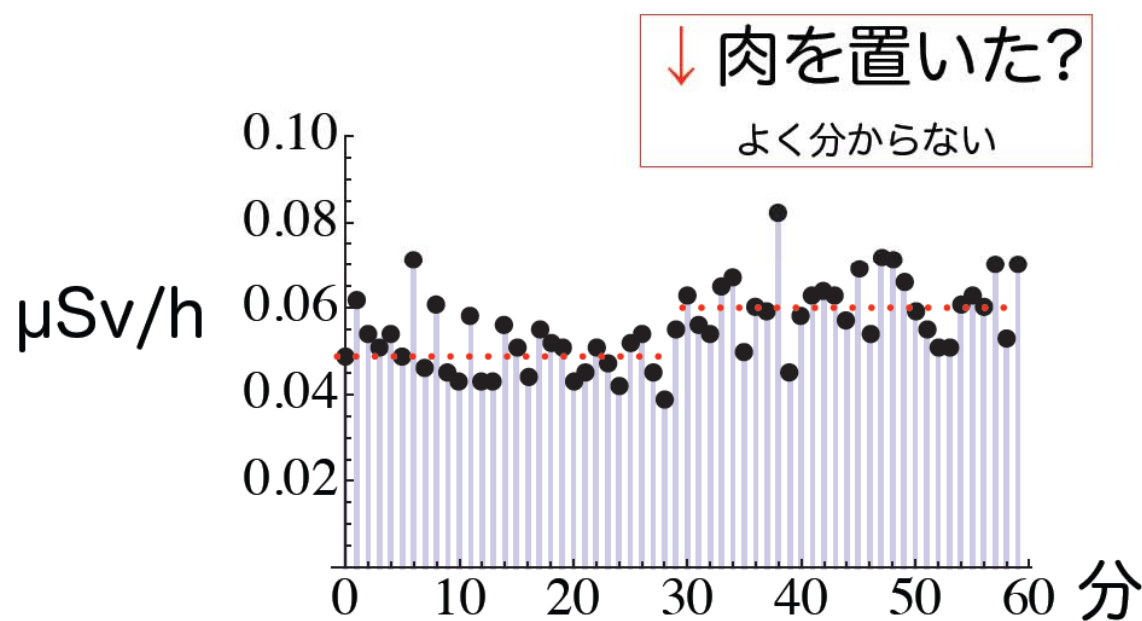
食べ物から出て
いる放射線だけ
を測りたい



バックグラウンドの影響

1分測定

空間線量 $0.05\mu\text{S}/\text{h}$



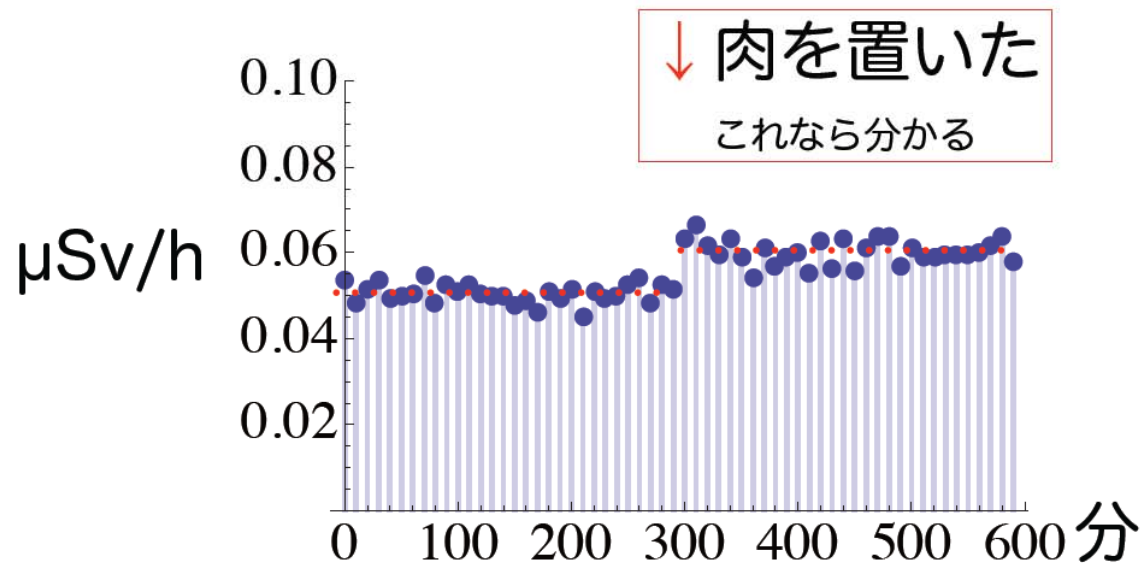
コンピューターを用いたシミュレーション

このページ内のスライドは、東京大学大学院理学系研究科の早野龍五氏提供。
2011年10月21日のニコニコ生放送
「緊急報告！アサタの食べ物は大丈夫？～放射線による食品汚染の実態に迫る～」で使われた説明のスライドから。
全てのスライドは <http://www.slideshare.net/Ryuhayano/nicohou> で見えます。

バックグラウンドの影響

今度は**10分**測定

空間線量 $0.05\mu\text{S}/\text{h}$

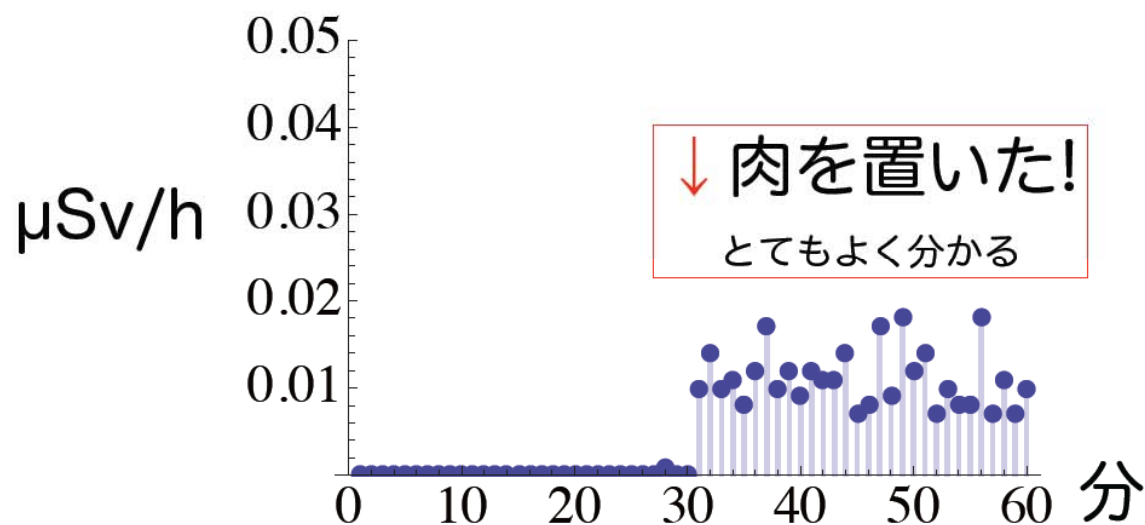


コンピューターを用いたシミュレーション

このページ内のスライドは、東京大学大学院理学系研究科の早野龍五氏提供。
2011年10月21日のニコニコ生放送
「緊急報告！アサタの食べ物は大丈夫？～放射線による食品汚染の実態に迫る～」で使われた説明のスライドから。
全てのスライドは <http://www.slideshare.net/Ryuhayano/nicohou> で見れます。

バックグラウンドの影響

鉛で遮蔽して 1分測定

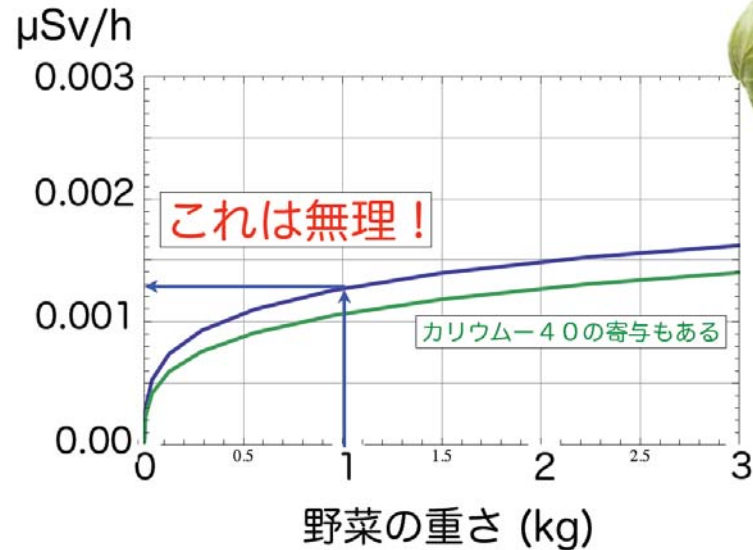


コンピューターを用いたシミュレーション

このページ内のスライドは、東京大学大学院理学系研究科の早野龍五氏提供。
2011年10月21日のニコニコ生放送
「緊急報告！アサタの食べ物は大丈夫？～放射線による食品汚染の実態に迫る～」で使われた説明のスライドから。
全てのスライドは <http://www.slideshare.net/Ryuhayano/nicohou> で見れます。

線量計でベクレル数を正確に測れるか？

ウクライナ基準の野菜 セシウム 40Bq/kg



40Bq/kg の野菜の表面線量率

1 kg の野菜に対して 0.0013 μSv/h

サーベイメーター（線量計）

1. 感度の良い線量計（ガイガー無理）
2. 遮蔽
3. 長時間測定

で 500Bq/kg の汚染発見は可能

ウクライナ基準の野菜スクリーニングは
線量計では無理

このページ内のスライドは、東京大学大学院理学系研究科
早野龍五氏提供

2011年10月21日のニコニコ生放送

「緊急報告！アナタの食べ物は大丈夫？～放射線による食品
汚染の実態に迫る～」で使われた説明のスライドから。

全てのスライドは

<http://www.slideshare.net/RyuHayano/nicohou>

で見れます。

放射能の量を決める場合の注意

- 鉛ブロックによる遮蔽は必須
 - 測りたいもの以外からくる放射線は止めなければならない
- 空間線量計（サーベイ・メータ）では食品検査は無理
- γ 線の性質と測定器でどう見えるかを知らない
と誤検出をしてしまう
 - 市販されているものにも誤検出をするひどいものがある
 - 食品検査用
 - ホール・ボディ・カウンターによる体内被曝の検査用
- γ 線の測定から放射性物質を見積もるために
 - 測定器での反応の知識
 - 物理（素粒子・原子核物理）の研究に基づく
 - データをどうやったらきちんと扱うか
 - 数学（数理統計学、情報処理）の知識に基づく

食品検査に使用される測定器の例

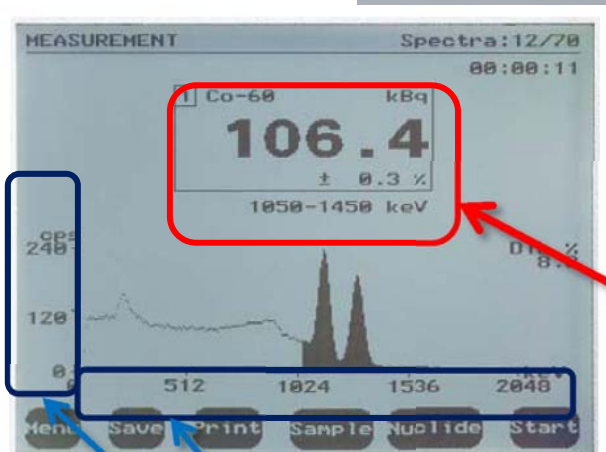
あるメーカーの
カタログから



サンプルを専用容器
に入れて設置する場所

周りは鉛で
バックグラウンドを
遮蔽している

下の筒状の部分：
NaI（ヨウ化ナトリウム）
結晶とセンサーの入って
いる場所



横軸： γ 線のエネルギー
縦軸：一秒あたりの γ 線の個数

あるエネルギーの γ 線が1秒辺り
何個来たかという数字からベクレルに
換算（この換算方法に注意が必要）



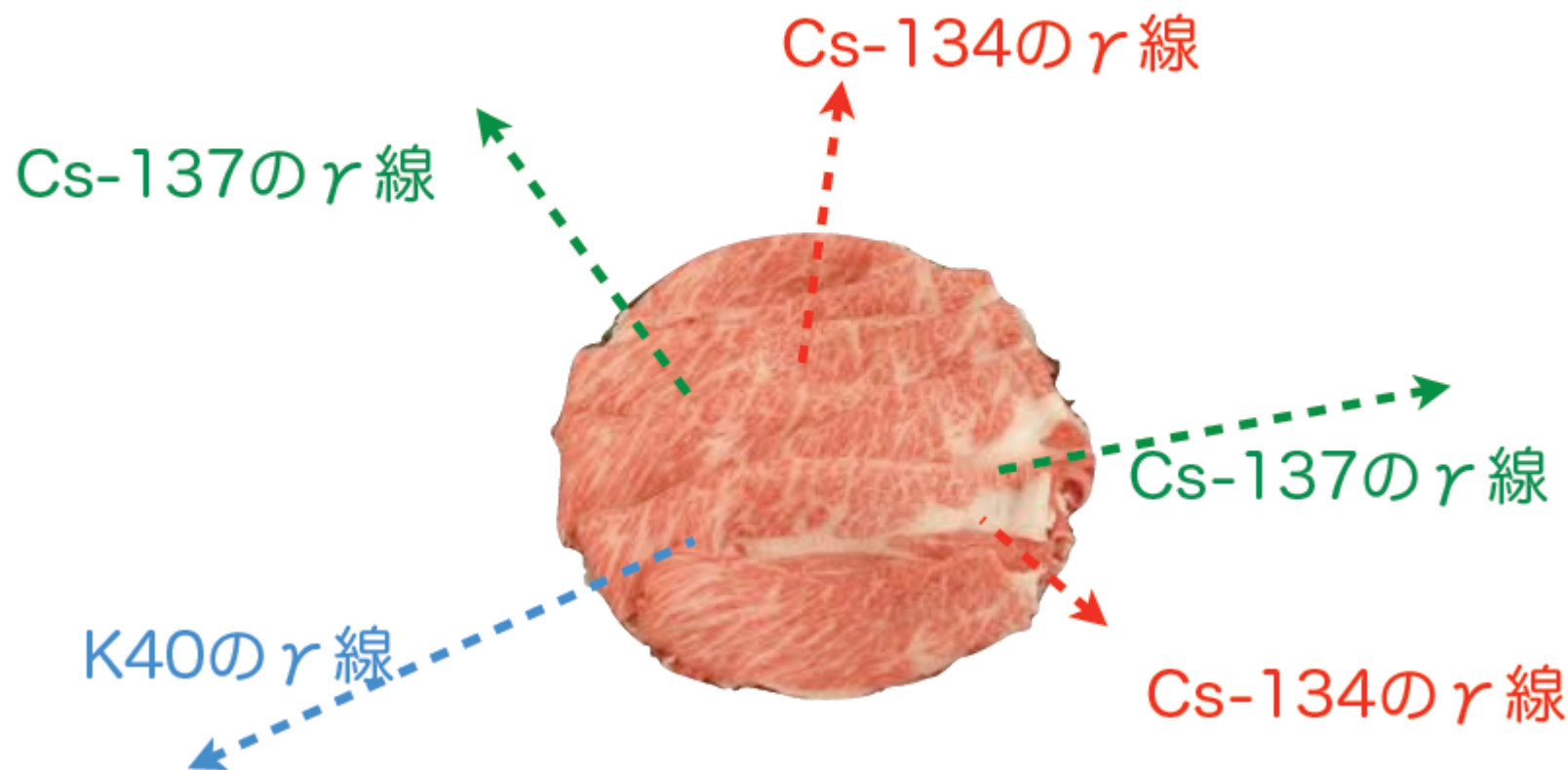
以下25ページ、早野龍五氏のスライドから

放射能の測り方と 注意

ガンマ線スペクトル測定編



ガンマ線の「色」を見分ける測定



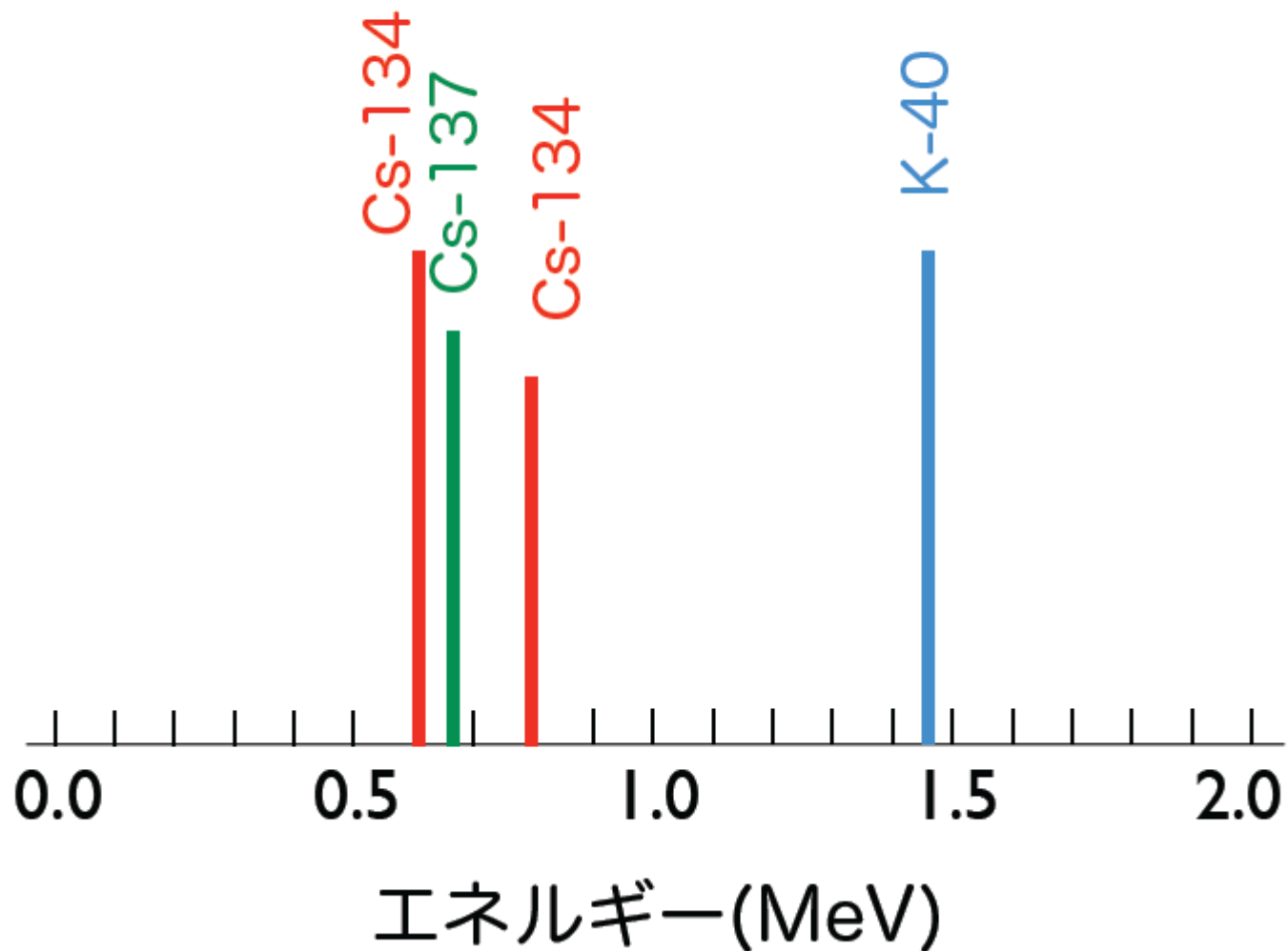
ガンマ線の色というのは言葉のアヤ

ガンマ線の「エネルギー」の測定

セシウム-137, ヨウ素-131, など

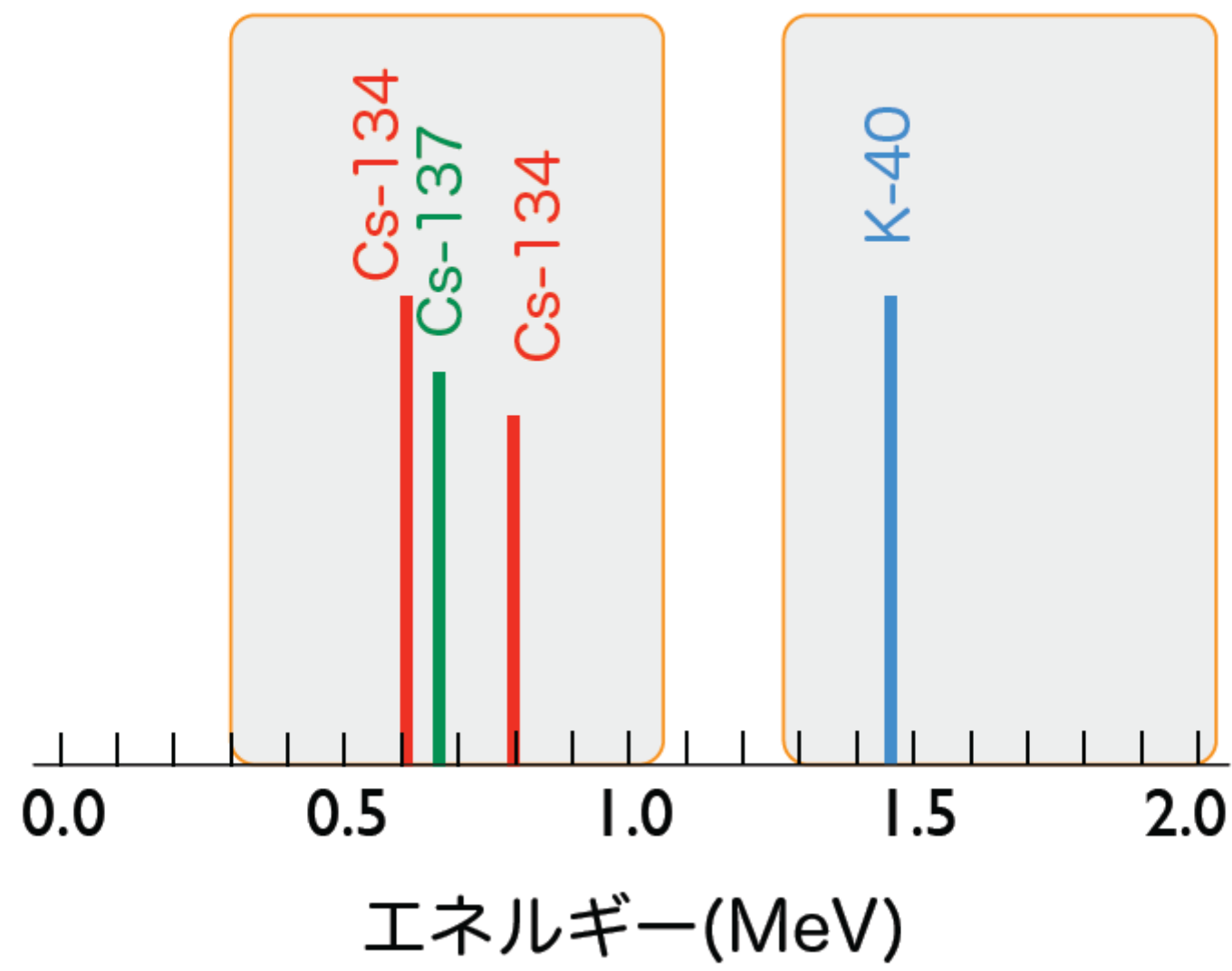
区別できる

セシウム134, 137, カリウム 40の ガンマ線エネルギー



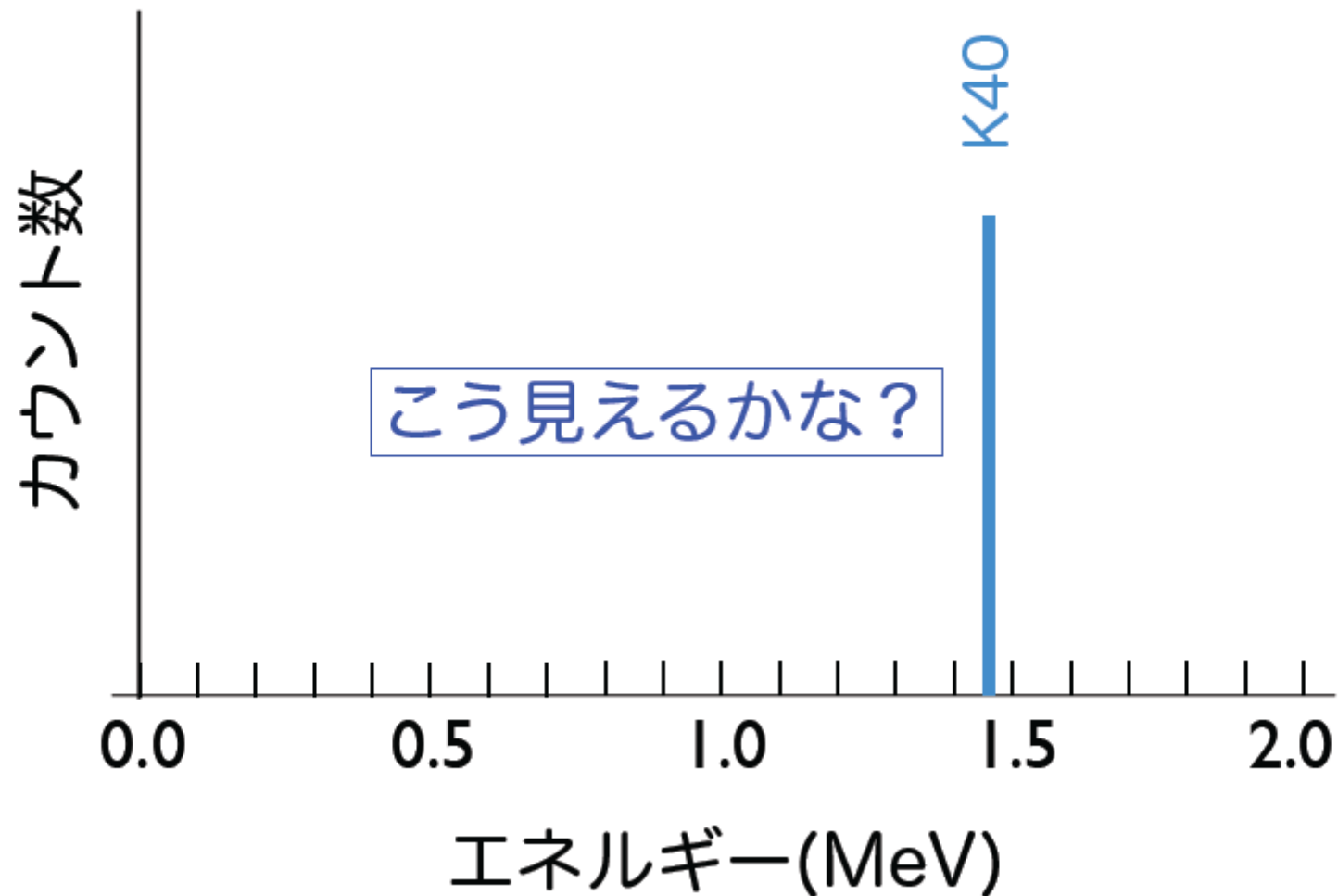
セシウム三兄弟

孤高のカリウム

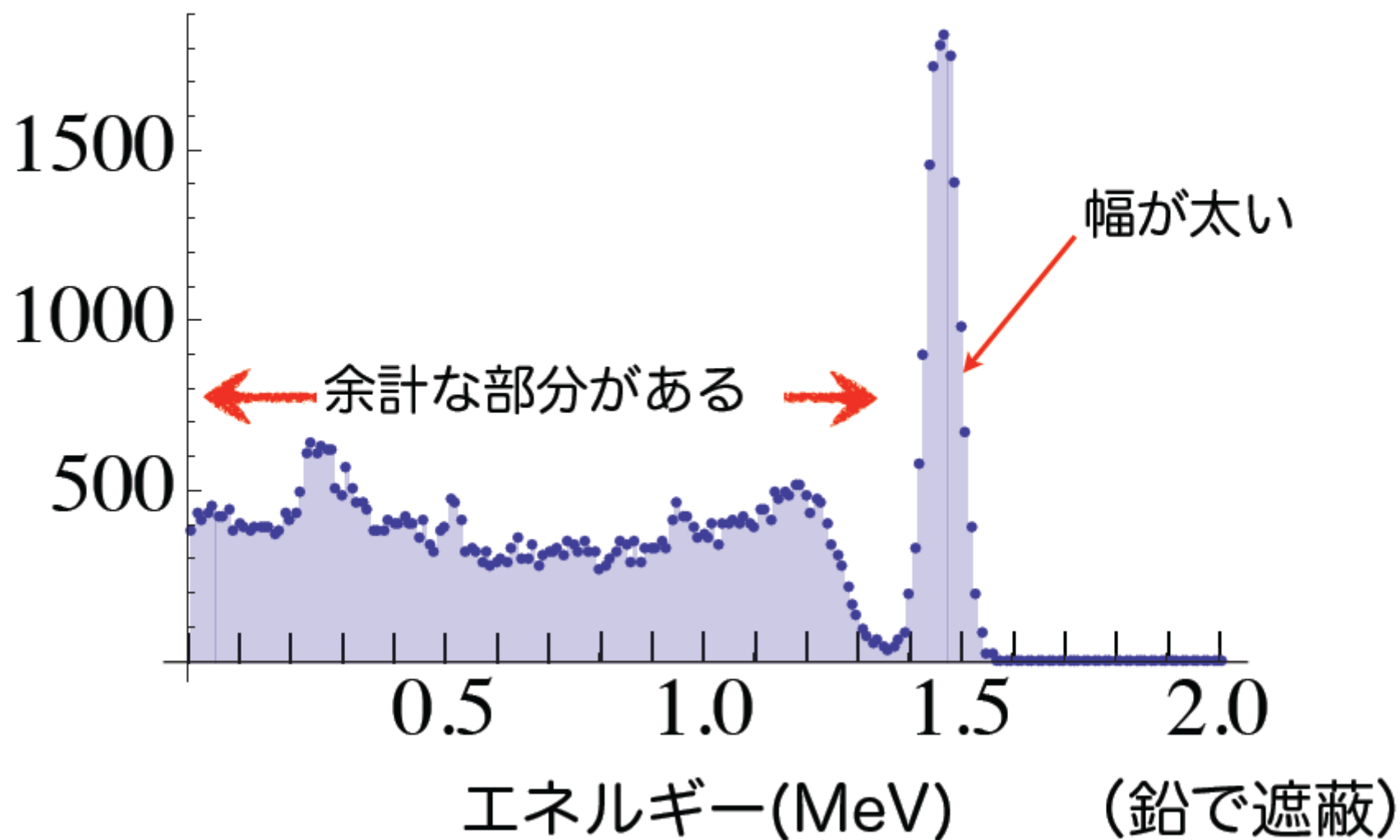


Nal 検出器で「やさしお®」を測定してみる

(天然放射性物質であるK40を多く含む)



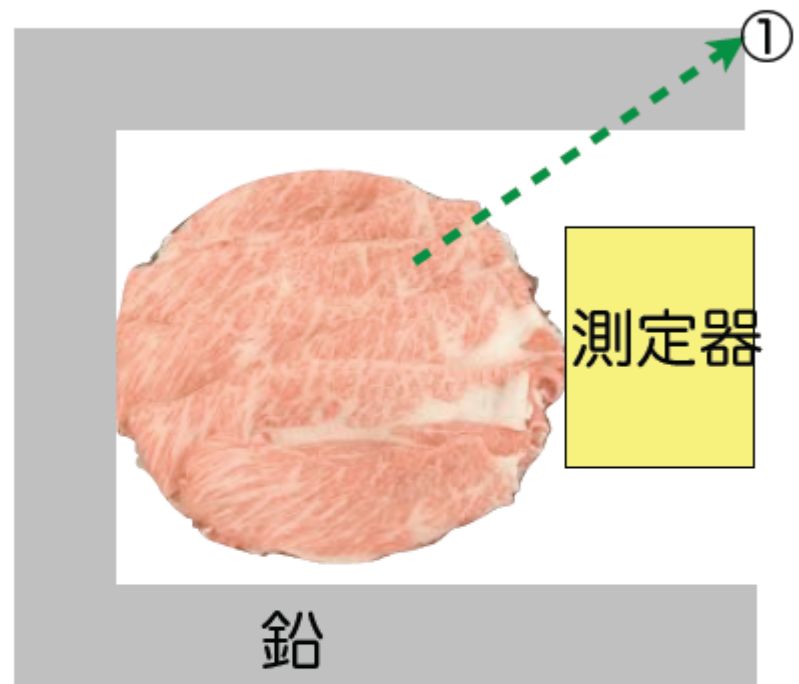
おや, どうしてこうなっちゃうの?



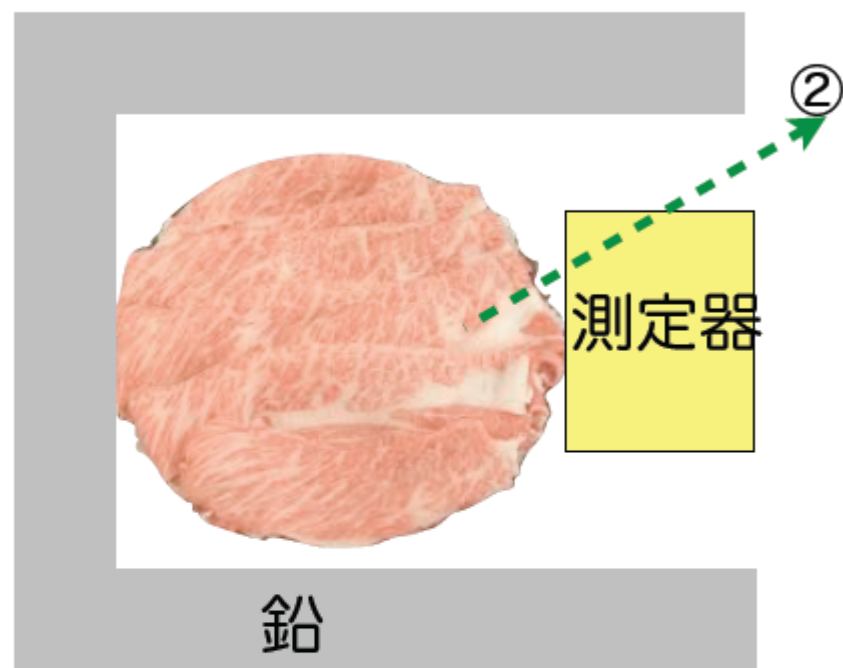
ぱらぱら漫画

ガンマ線の5つの運命

なぜ余計な物が見えるのか



① ハズレ

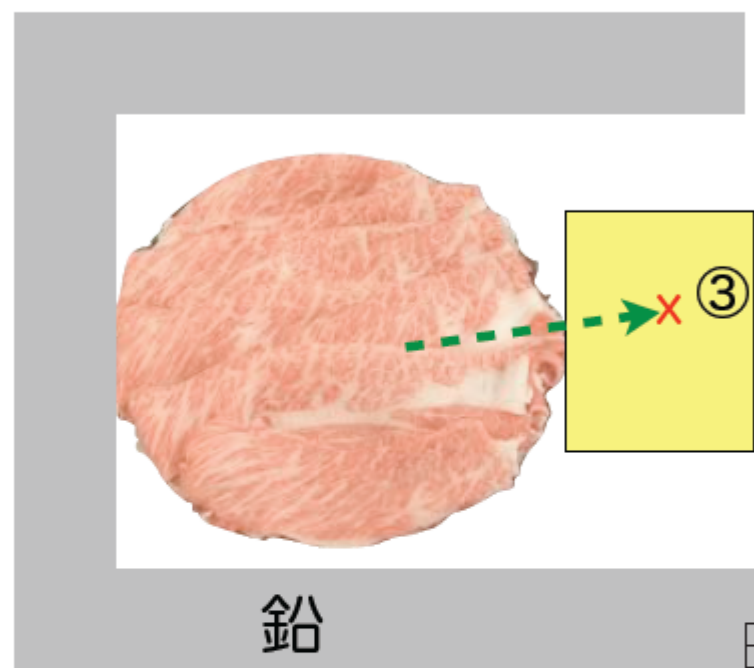


② 透過

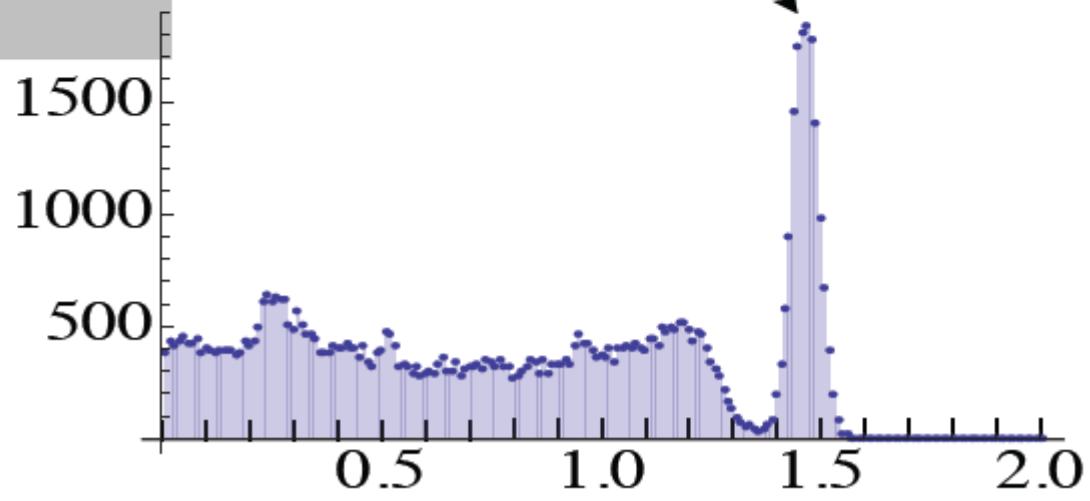
勝

2011年10月

<http://www.slideshare.net/RyuHayano/nicohou>



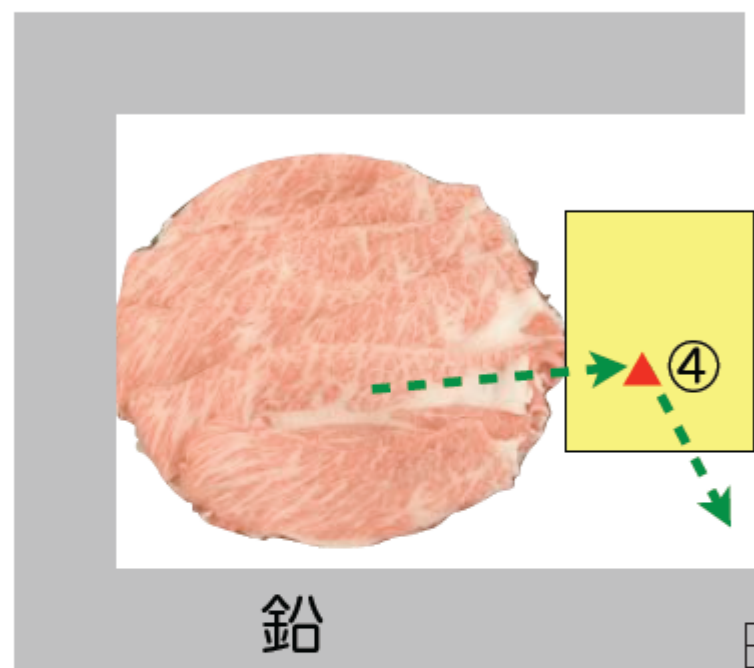
③ 大当たり！



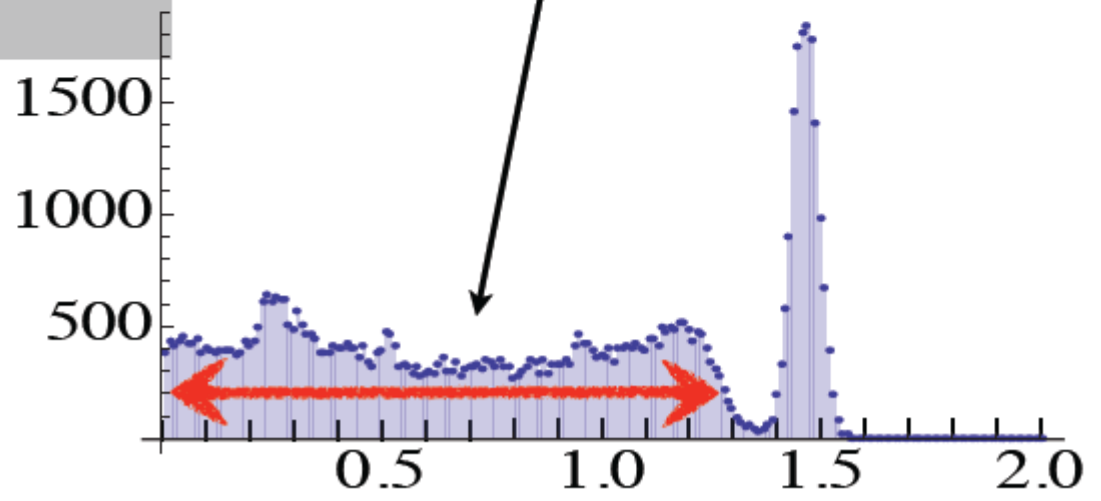
勝

放射線

<http://www.slideshare.net/RyuHayano/nicohou>



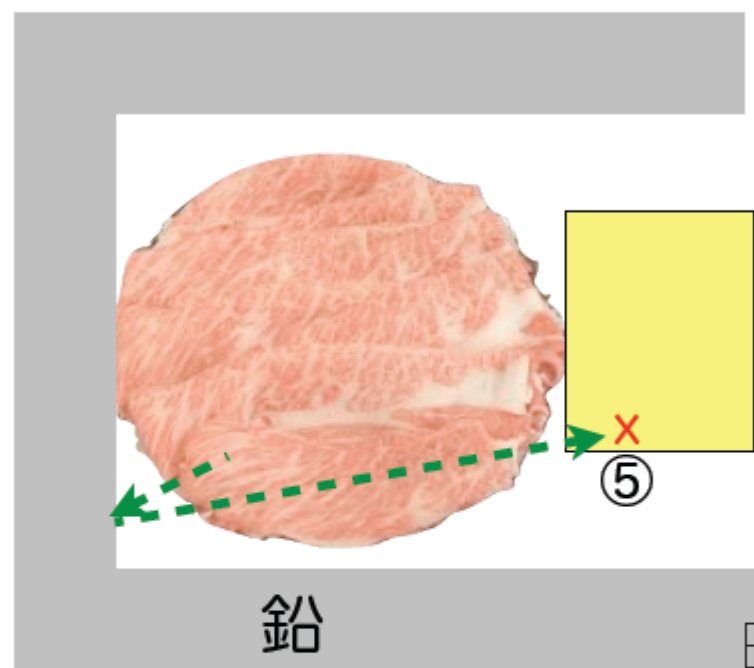
④ 当て逃げ！
(コンプトン散乱)



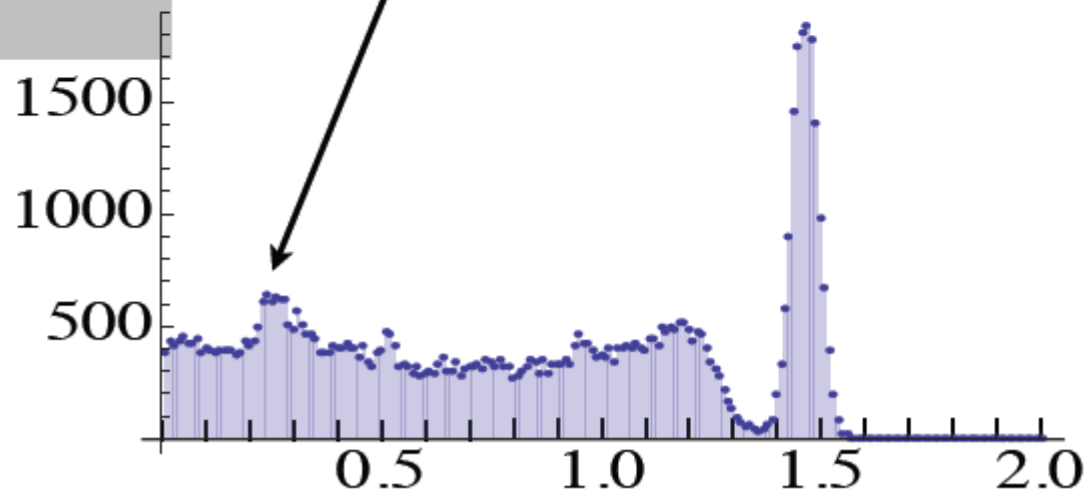
勝

2011年10月

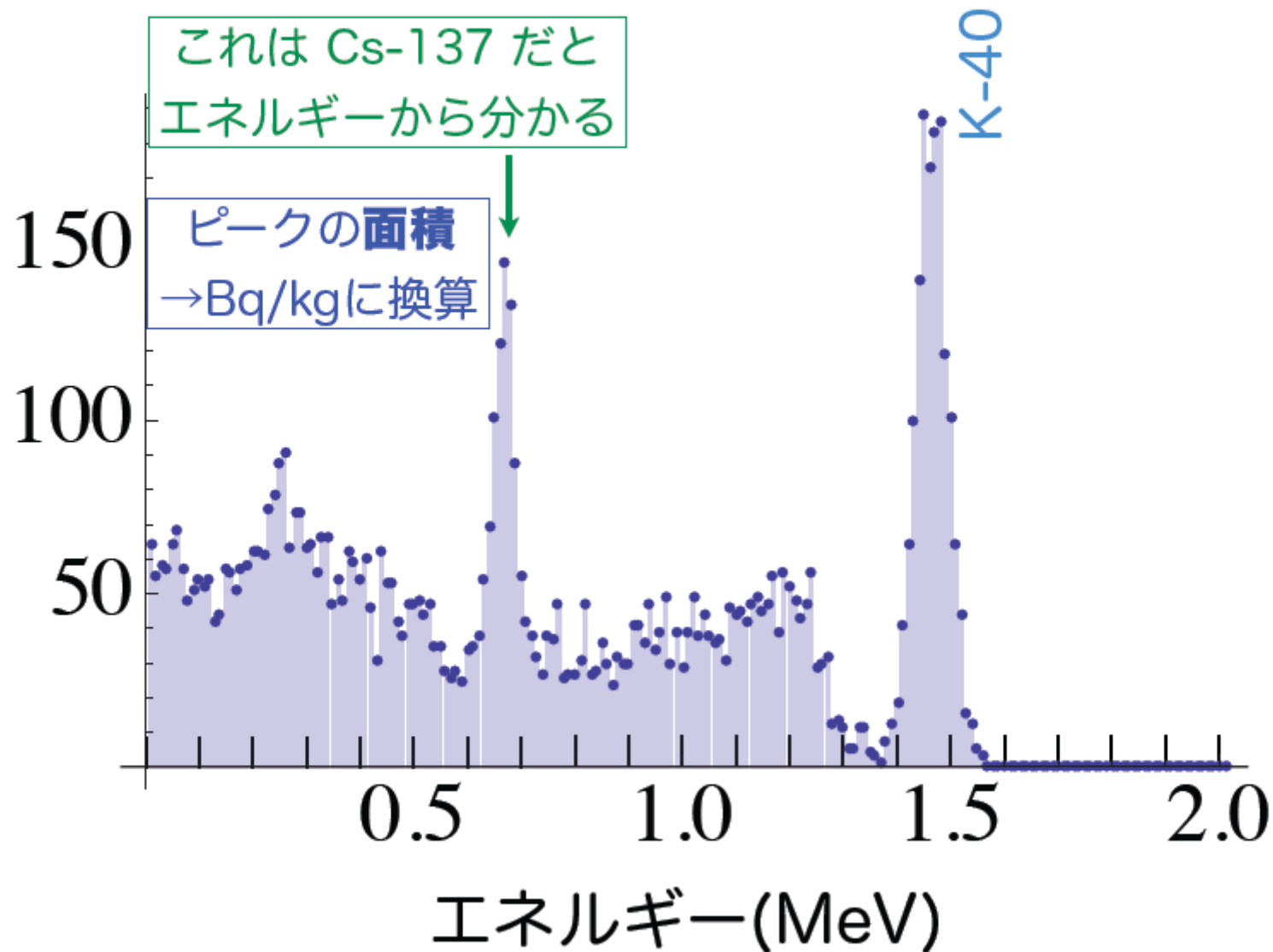
<http://www.slideshare.net/RyuHayano/nicohou>



⑤ とばっちり

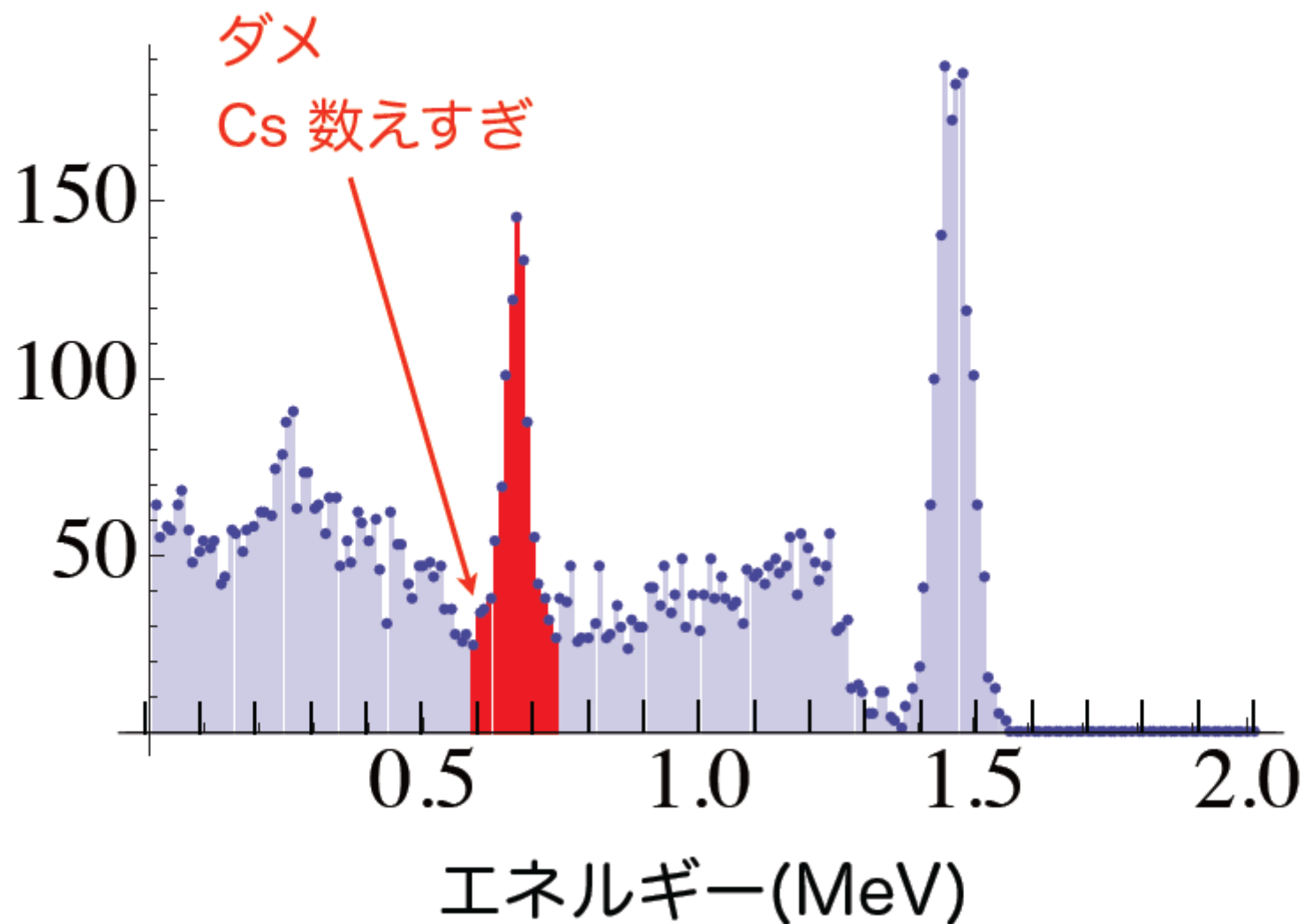


Cs-137の Bq/kg を知りたい

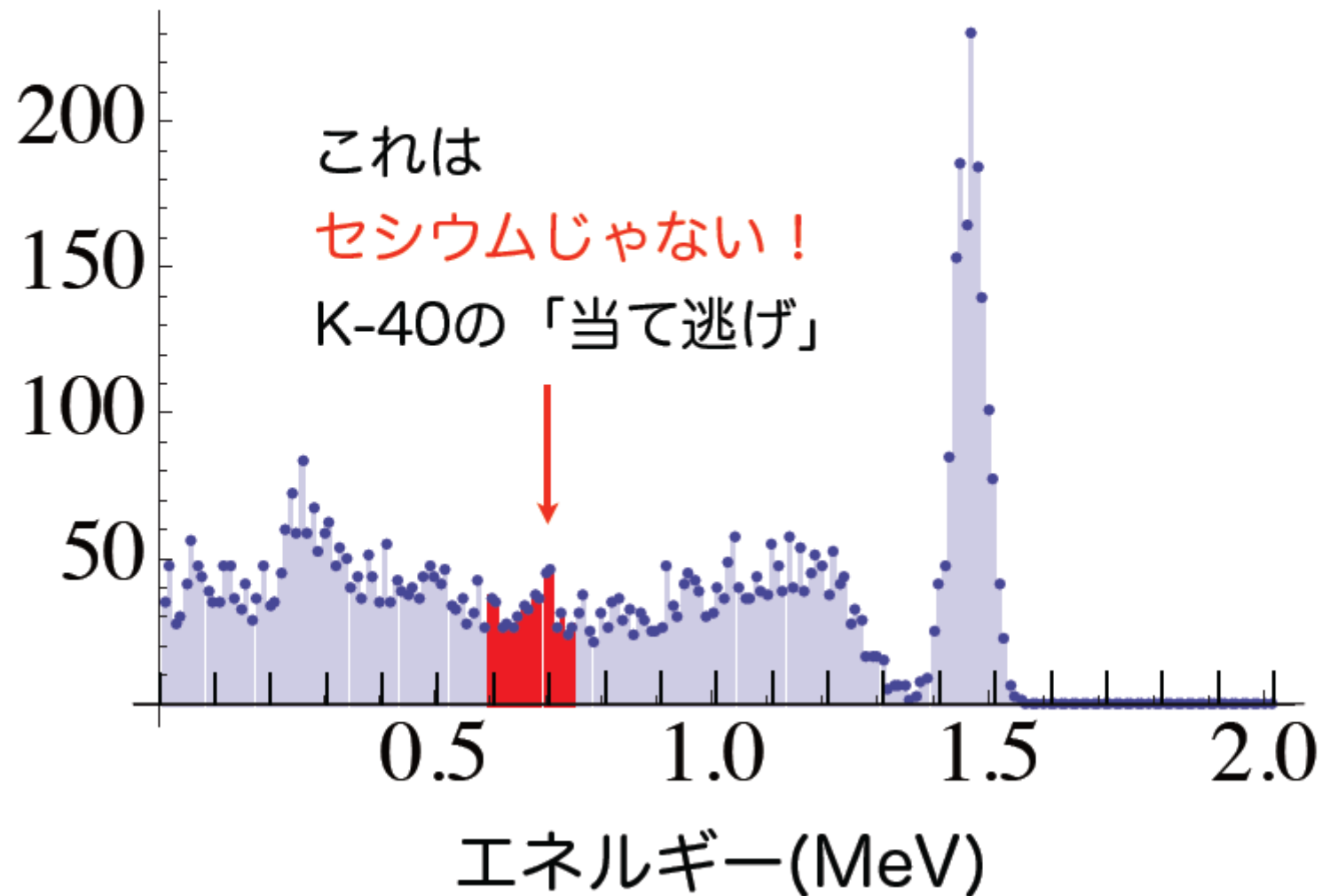


Cs-137の定量(1) - 「ここから…ここまで」 法

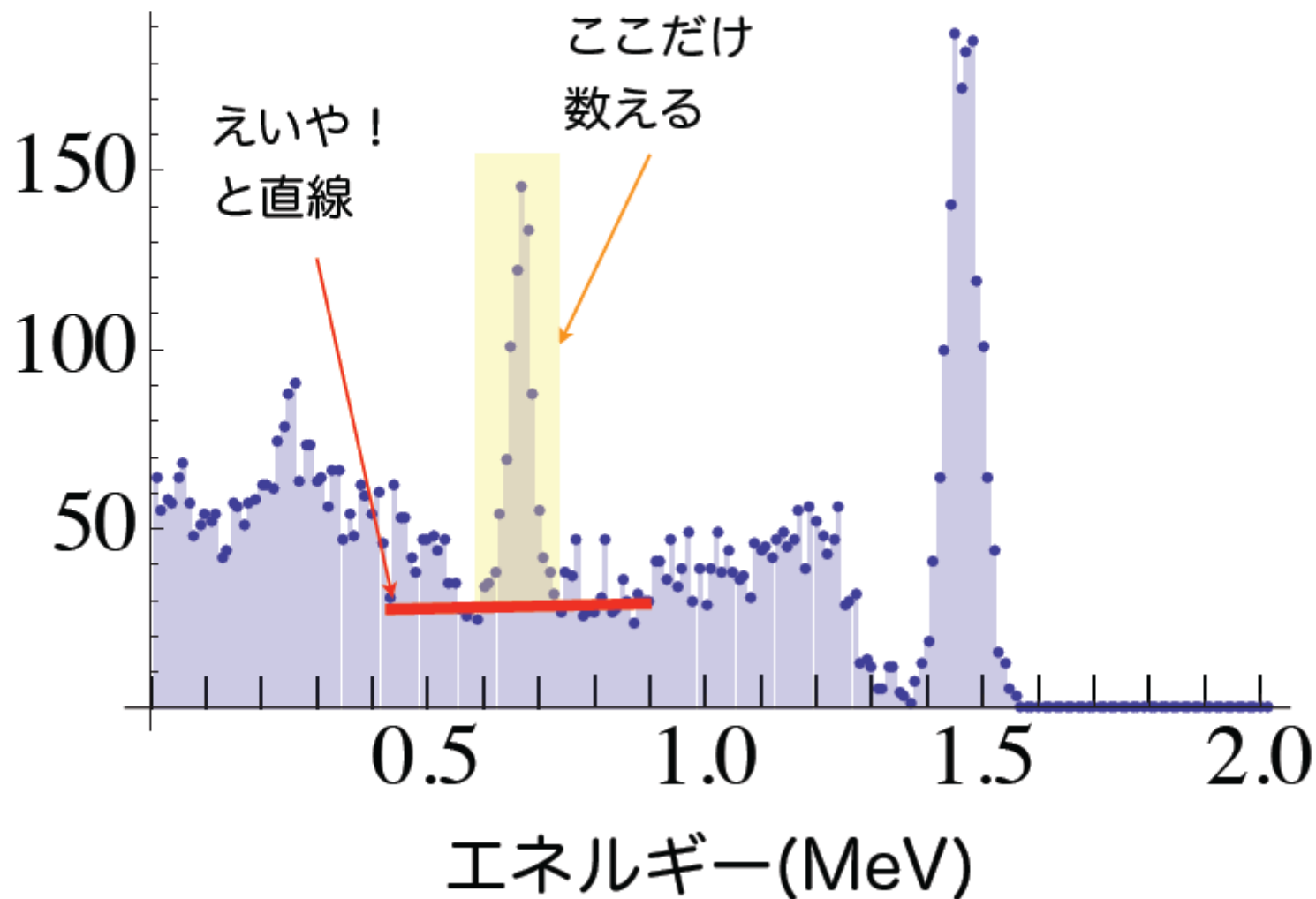
ROI: region of interest



よくある誤検出



Cs-137の定量（２） - 「えいや！と直線」 法



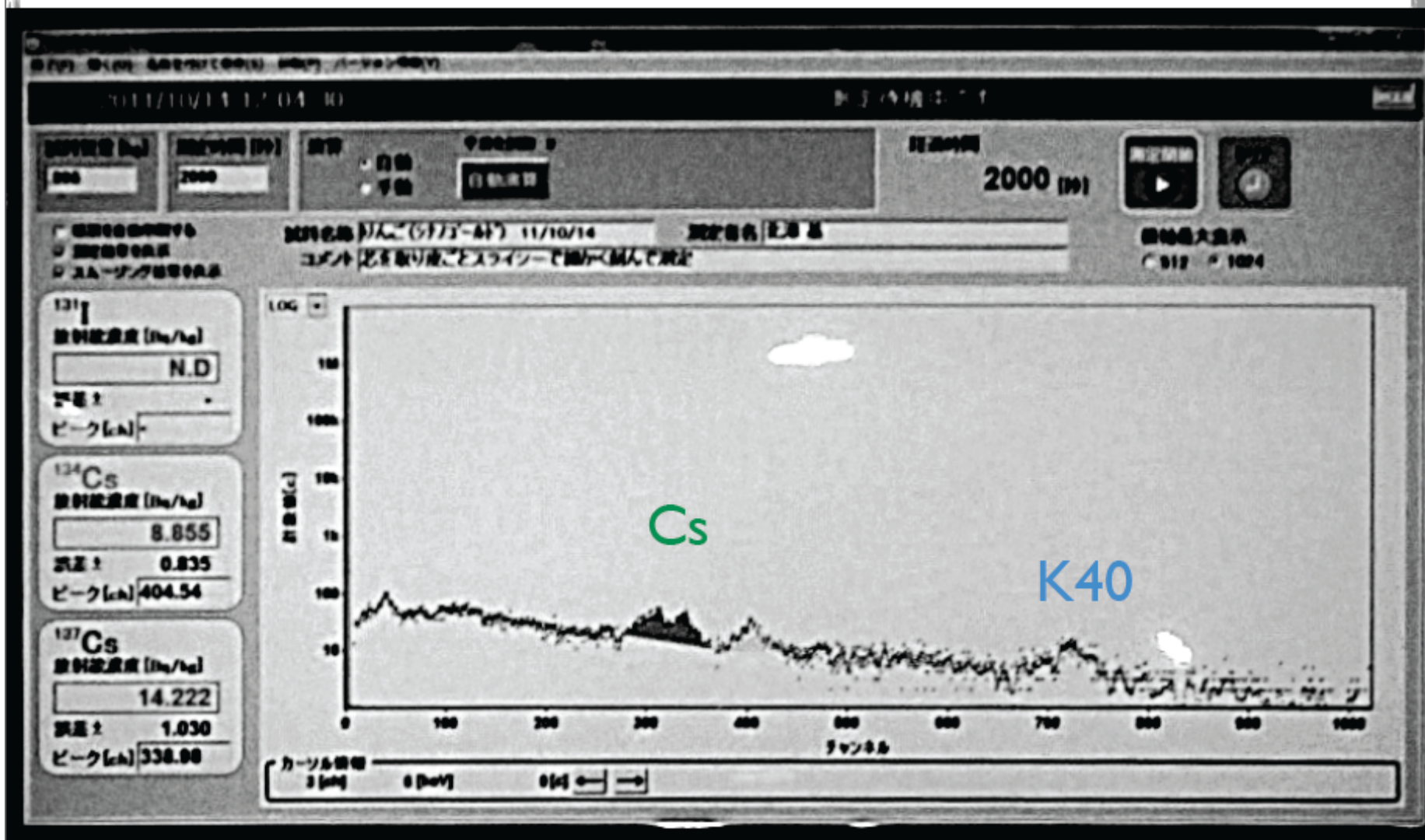
直線を引いている例

カタログハウス新橋にて

片

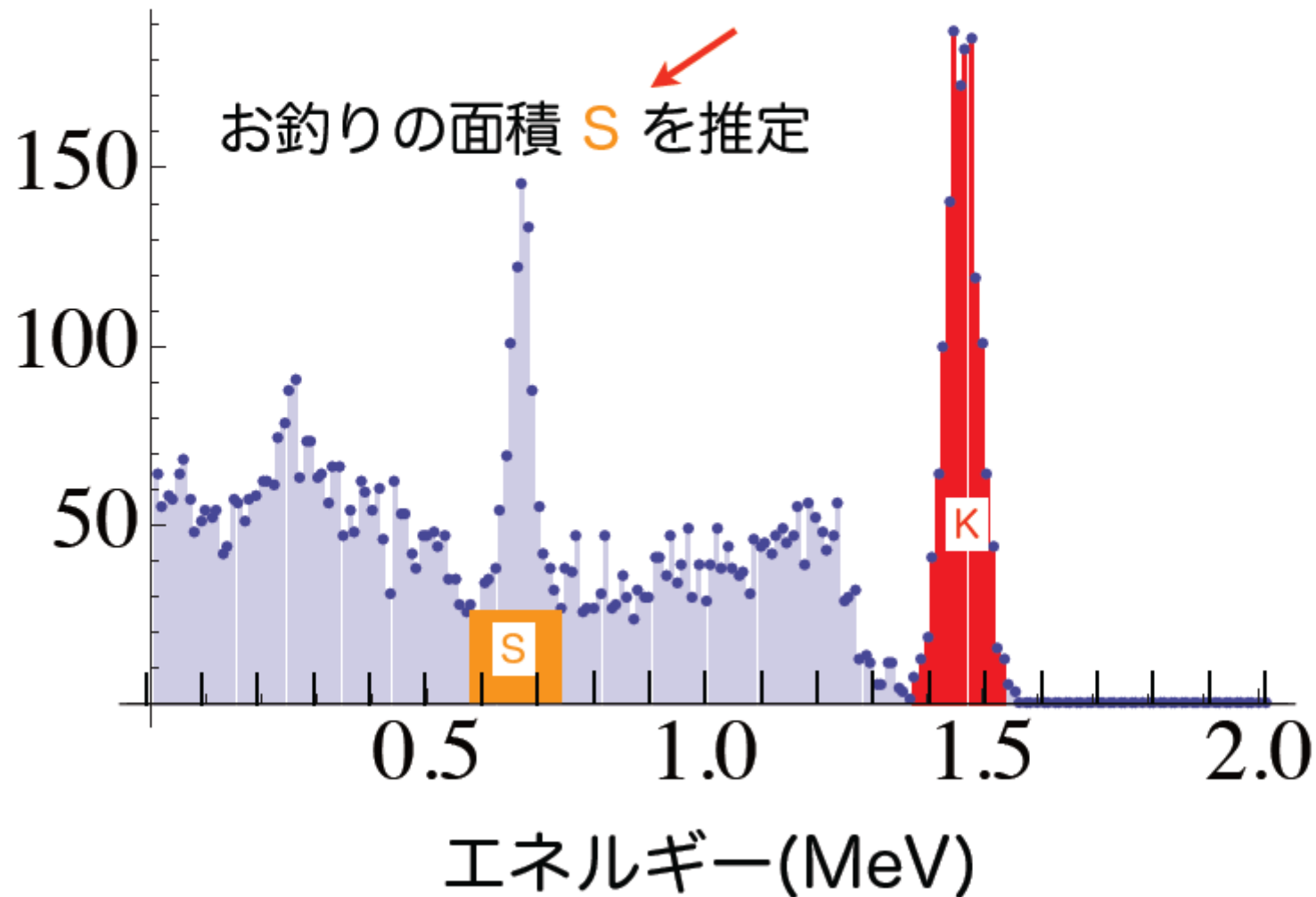
2014/10/11

<http://www.slideshare.net/RyutHayano/nicohou>



Cs-137の定量 (3) - 「K-40のお釣り」法

K-40のピーク面積 K から



勝

2011年10月

<http://www.slideshare.net/RyuHayano/nicohou>

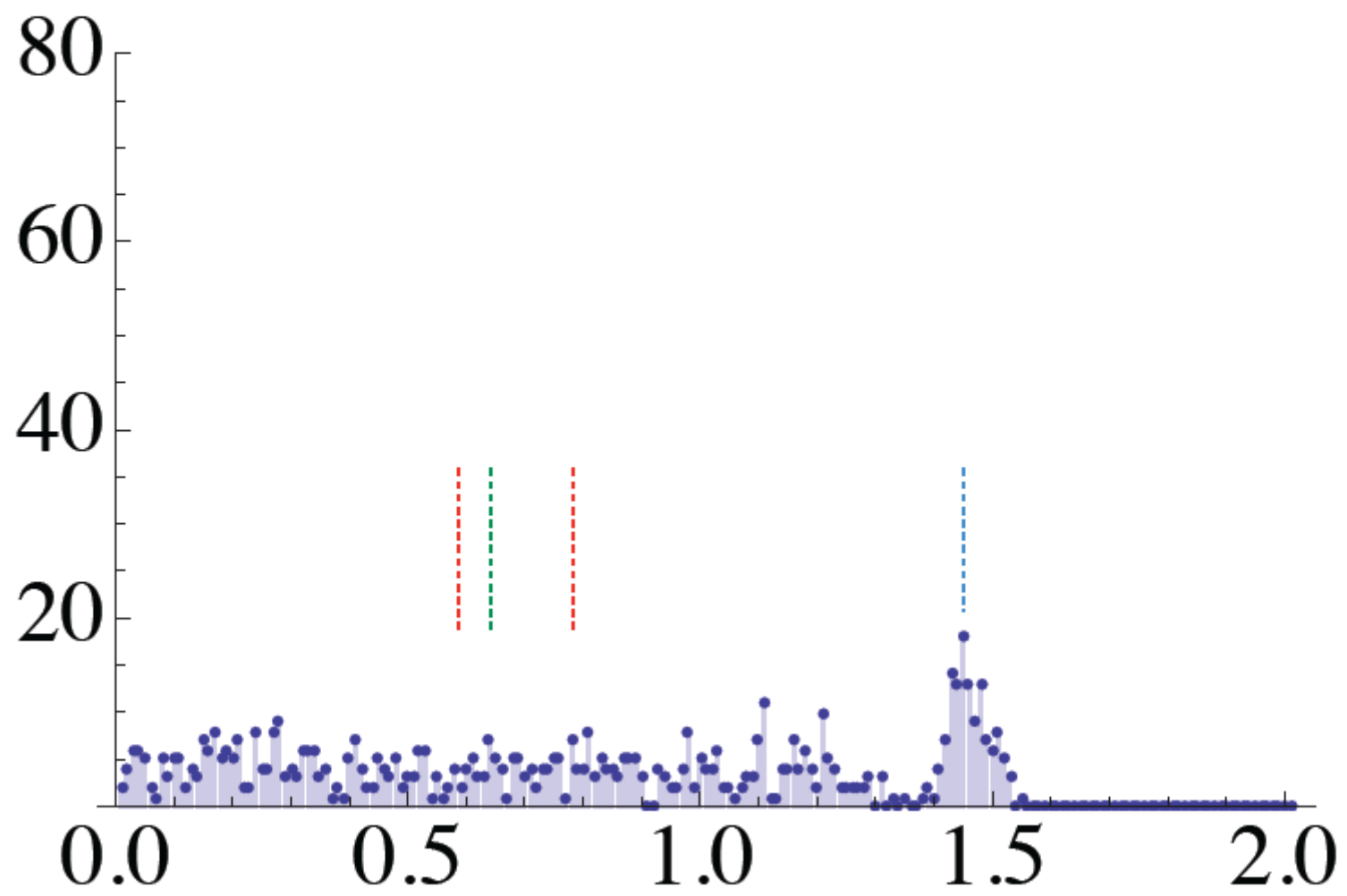
パラパラ 漫画 検出限界

常

2011年10月20日

<http://www.slideshare.net/RyuHayano/nicohou>

セシウム 1+1 Bq/kg

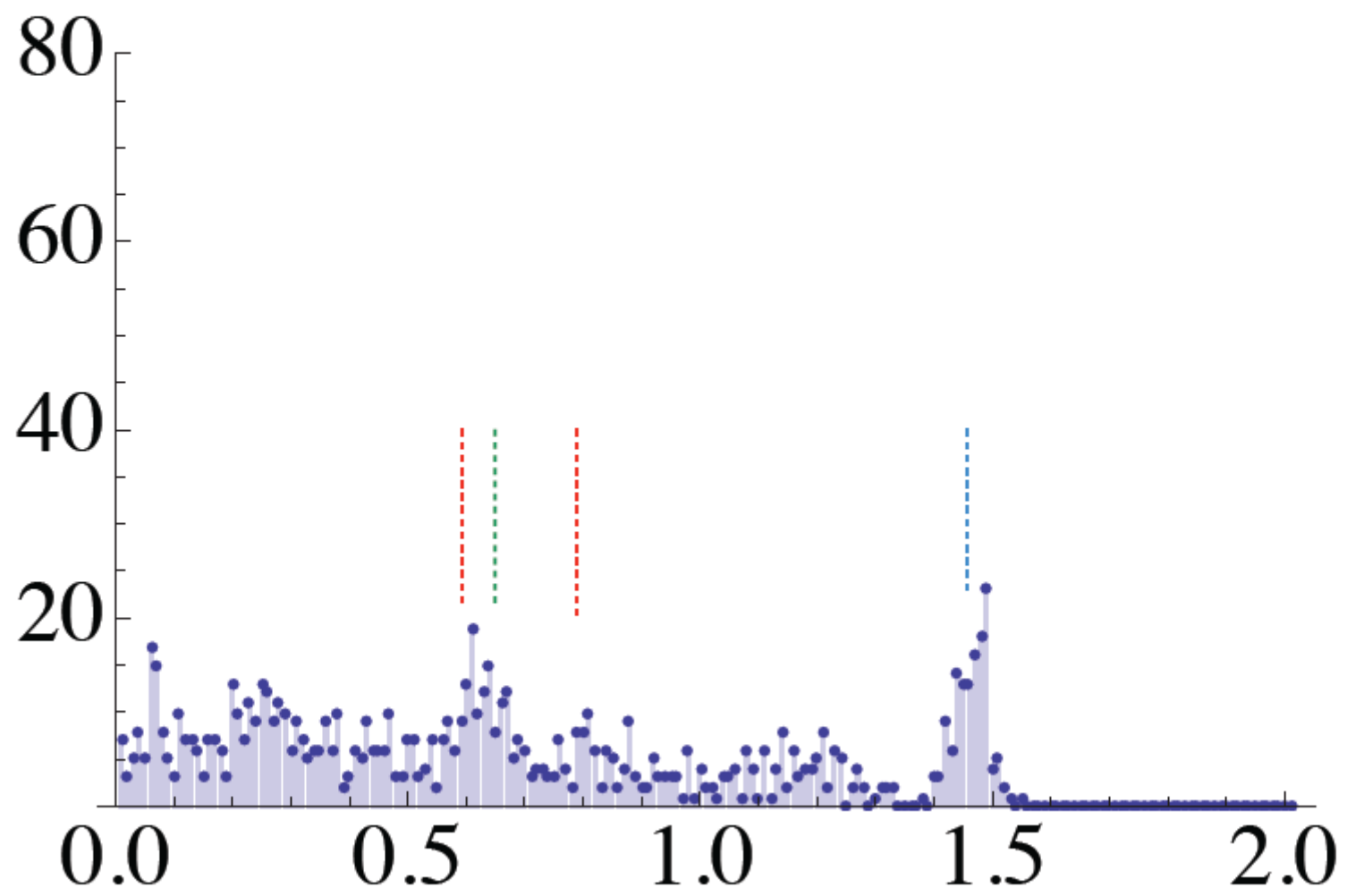


第17回

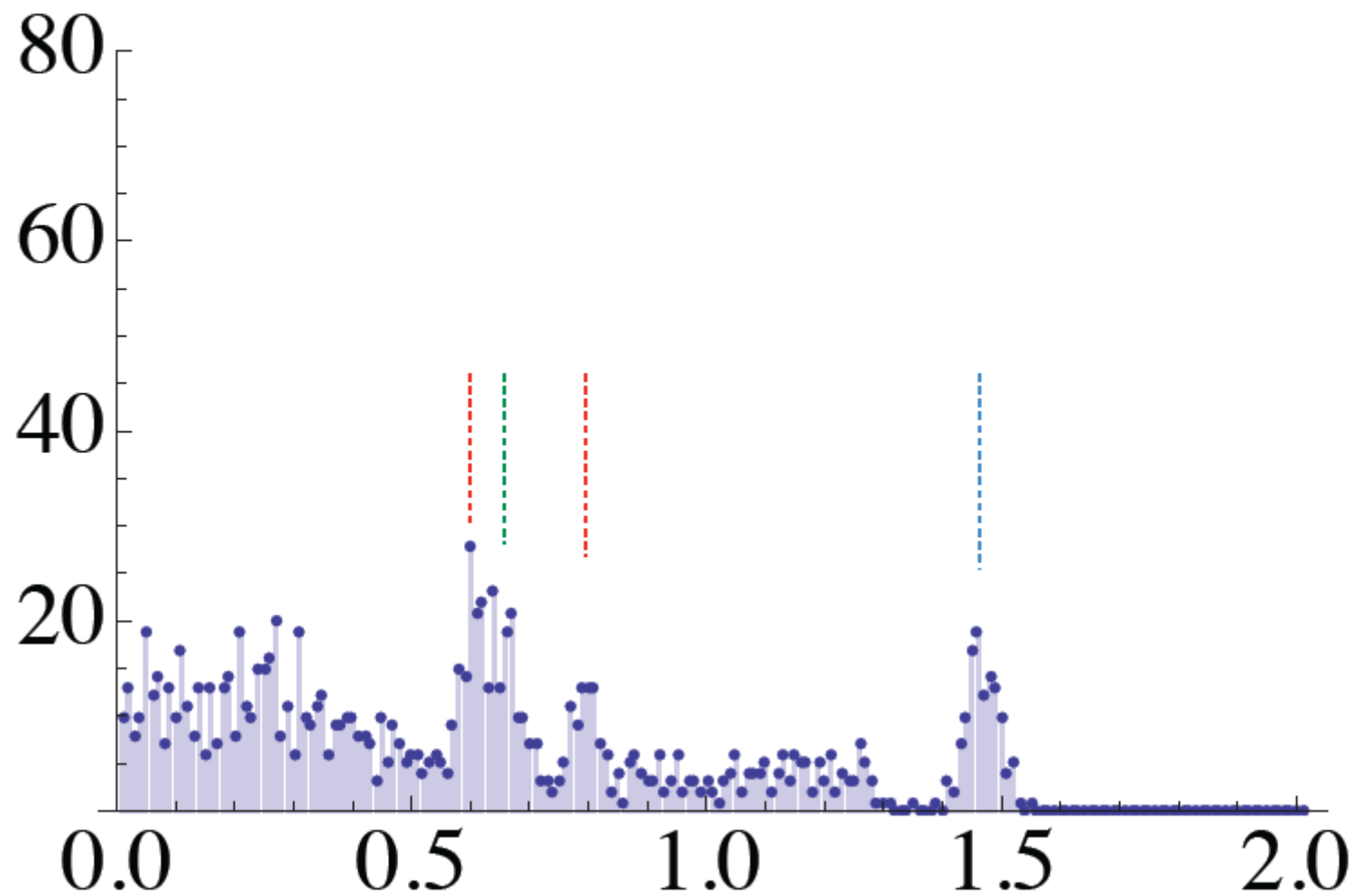
2011年10月

<http://www.slideshare.net/RyuHayano/nicohou>

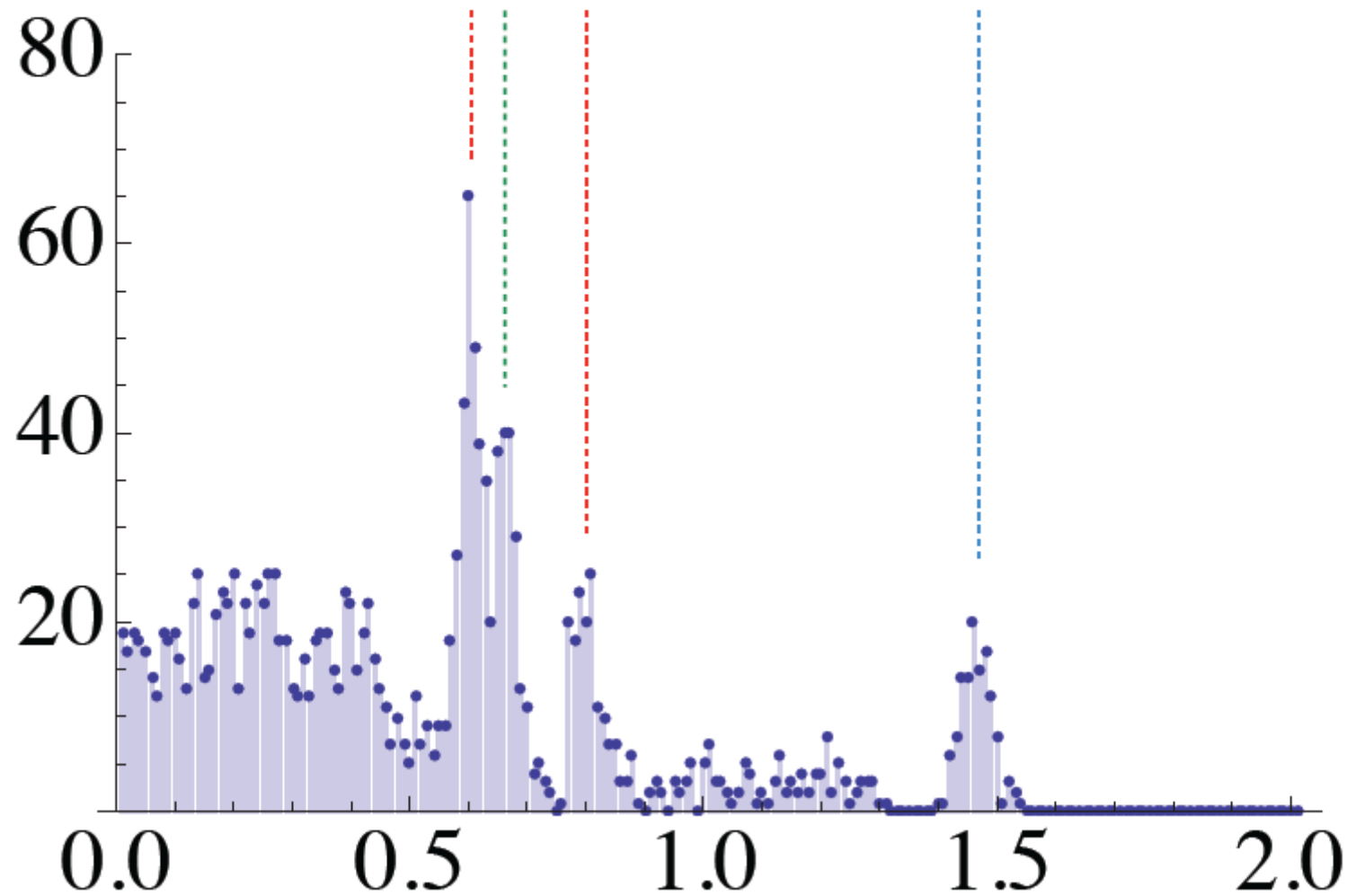
セシウム 5+5 Bq/kg



セシウム 10+10 Bq/kg



セシウム 20+20 Bq/kg



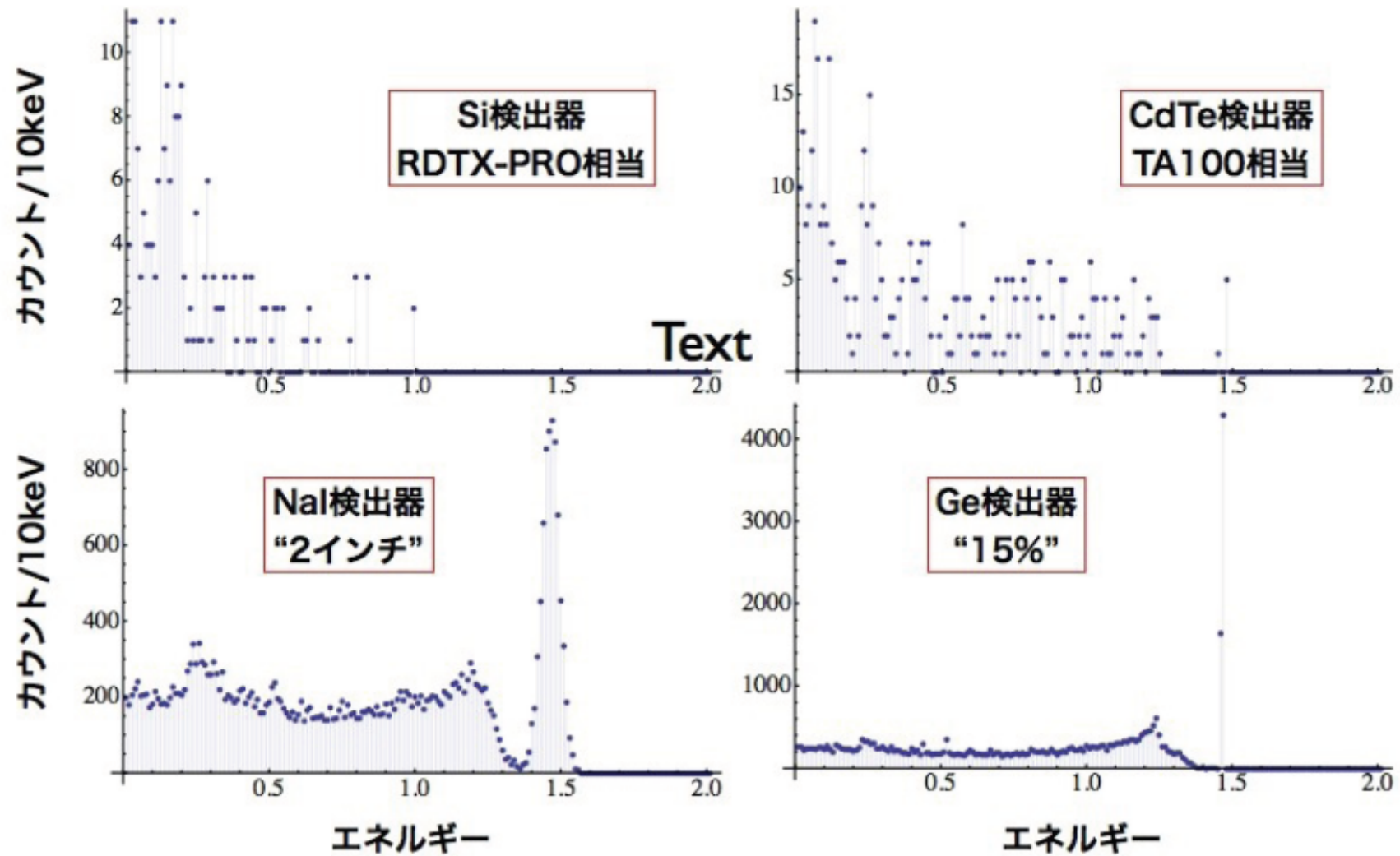
スペクトロメーター編

1. 鉛必須 - 鉛があっても「blank」測定必要
2. 大型の検出器で長時間測定
3. 遮蔽と検出器が似ていてもソフトウェアに優劣あり

	Nal	ゲルマニウム
価格	大きさの割に安価	高価
エネルギー分解能	ほどほど	抜群
検出限界目安	10 Bq/kg 程度	1 Bq/kg 未満 (1時間)

(参考出品) 「やさしお®」をいろんな測定器で測定

(「やさしお®」一袋を鉛で遮蔽して1時間測定した場合のシミュレーション)



放射能の測定について

- γ 線のエネルギーと個数を測る
 - = エネルギー・スペクトルの測定
 - 放射性物質から直接来たと思える場所にも、それ以外のものがある（当て逃げ、とばっちり、と呼んだもの）
 - = バックグラウンド
 - きちんとバックグラウンドを測らないと、本当の値より大きかったり小さかったり間違った値を表示する
 - ・市販の装置の中には解析ソフトがひどく、デタラメな値を示すものもある
 - ・機械の表示する数値が本当に正しいかどうかの判断が必要
 - 個人や自治体で購入する場合には、放射線測定の専門家の意見を聞くべき
- 測定器による違い
 - 測定精度・必要な測定時間
 - 値段
 - ・食品検査：200万円～2千万円程度
 - ・体内被曝検査：数百万から1億程度

装置が高くても解析ソフトが
デタラメだと意味が無くなる！

γ 線を出さない放射性物質の測定

- ストロンチウム90/イットリウム90
 - β 線しか出さない
 - 一方殆どの放射性物質は β 線と γ 線を出す
 - β 線は連続的なエネルギー分布を示す
 - γ 線の様にピークを作らない
 - β 線が来たことが分かって、放射性物質の種類を決定出来ない
 - 化学的に他の物質からストロンチウムだけ取り出し、その後で β 線量を測定する必要がある
 - 実験室が必要
 - つまり、非常に手間がかかる

ストロンチウム90/イットリウム90の測定方法の例

- 財団法人 日本分析センター の方法
 - http://www.jcac.or.jp/method_fish.html

魚に含まれるストロンチウム90の分析

魚の前処理

(1) 魚を入手

魚を市場や漁港で入手します。

(2) 魚を割く

人への影響を調べるため、魚は割いて、人が食べる部分を分析試料にします。頭から食べる小さな魚は全体を試料にします。



(3) 電気炉で焼く

試料は、磁器の皿に入れて乾燥後、電気炉で焼きます。



(4) 灰になるまで焼く(灰化)

魚が全て灰になるまで450℃で焼き、分析試料とします。



試料の調製

1. 灰試料の化学的前処理(ストロンチウムの分離)

(1) 酸分解

灰試料に王水を加えて成分を分解し、硝酸や塩酸で溶解処理します。



灰試料に王水を加える

(2) 炭酸塩沈殿生成操作

酸分解された試料溶液に水酸化ナトリウムを加えてアルカリ性とします。さらに炭酸ナトリウムを加えて、炭酸塩沈殿を生成します。



炭酸塩沈殿生成

(3) シュウ酸塩沈殿生成操作(ストロンチウムとカルシウムの分離)

炭酸塩の沈殿に塩酸を加えて溶解し、これにシュウ酸を加えてシュウ酸塩の沈殿を生成させます。この操作では、ストロンチウム及び同属のカルシウムなどが沈殿として、他の金属類から分離されます。沈殿物を乾燥・加熱分解したのち、塩酸で溶解します。



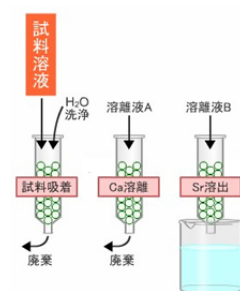
シュウ酸塩沈殿を乾燥・加熱分解

2. イオン交換法によるストロンチウムの精製

イオン交換法とはイオン交換樹脂を利用してカルシウム等の妨害元素を分離除去する操作です。

試料溶液中のストロンチウムなどをイオン交換樹脂に吸着させます。次に溶離液Aでストロンチウムより分配係数の小さなカルシウムなどを溶離し除去します。最後に溶離液Bでストロンチウムを溶出します。(右図参照)

ストロンチウムの溶出液は蒸発乾固したのち、希硝酸に溶かします。次にスカベンジング操作によりイットリウム90(90Y)を除去したのち、2週間以上放置して、90Yの生成を待ちます。



イオン交換分離

3. 放射能測定試料の調整

イットリウム90(90Y)のスカベンジング操作後、2週間以上経過した試料からミルキング操作によりイットリウム90(90Y)を水酸化鉄沈殿に共沈分離し、その放射能を測定します。

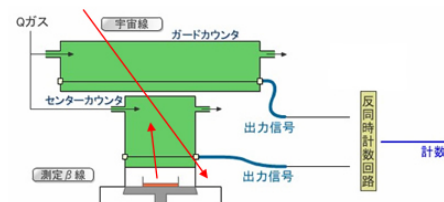


沈殿による90Yの共沈分離

低バックグラウンドベータ線測定器による放射能測定

ベータ線の測定は、宇宙線等の放射線によるノイズを排除するため、低バックグラウンドベータ線測定装置(以下LBC)を用います。

LBCには、センターカウンタとガードカウンタと呼ばれる2個のGM計数管が用いられています。試料からのベータ線はセンターカウンタのみに信号を発生させますが、エネルギーの大きな宇宙線等の放射線は、ガードカウンタとセンターカウンタ両方のカウンタを置いて同時に信号を発生させます。LBCでは反同時計数回路で両方同時に発生した信号を除去し、センターカウンタの信号のうち、試料中のベータ線に由来するものをカウントしています。



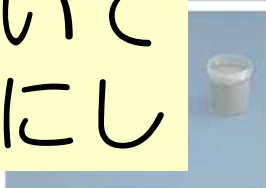
ストロンチウム90/イットリウム90の測定方法の例

- 財団法人 日本分析センター の方法
 - http://www.jcac.or.jp/method_fish.html

魚に含まれるストロンチウム90の分析

魚の前処理

- (1) 魚を入手
魚を市場や漁港で入手します。
- (2) 魚を割く
人への影響を調べるため、魚は割いて、人が食べる部分を分析試料にします。頭から食べる小さな魚は全体を試料にします。
- (3) 電気炉で焼く
試料は、磁器の皿に入れて乾燥後、電気炉で焼きます。
- (4) 灰になるまで焼く
魚が全て灰になるまで45分焼きます。



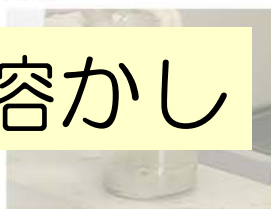
焼いて
灰にし

試料の調製

1. 灰試料の化学的前処理(ストロンチウムの分離)

- (1) 酸分解
灰試料に塩酸を加える。

酸で溶かし



灰試料に塩酸を加える。

(2) 炭酸塩沈殿生成操作

酸分解された試料溶液に水酸化ナトリウムを加えてアルカリ性とします。さらに炭酸ナトリウムを加えて、炭酸塩沈殿を生成します。



さらに薬品を使って分離

(3) 炭酸

炭酸にシュウ酸を加えてシュウ酸塩沈殿の生成を促します。この操作では、ストロンチウム及び同族のカルシウムなどが沈殿として、他の金属類から分離されます。沈殿物を乾燥・加熱分解したのち、塩酸で溶解します。

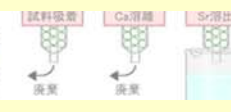


シュウ酸塩沈殿を乾燥・加熱分解

2. イオン交換法によるストロンチウムの精製

イオン交換樹脂を使って純化

ストロンチウムの溶出液は蒸発乾燥したのち、希硫酸に溶かします。次にスカベンジング操作によりイットリウム90(90Y)を除去したのち、2週間放置し、90Yの生成

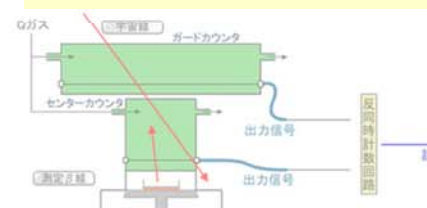


2週間放置し
イットリウム
だけにする

低バック

ベータ線の測定装置(LBC)には、試料から発生するベータ線信号を発生ターカウ

β線個数の測定





東日本、宮城県、仙台市の測定値を例に

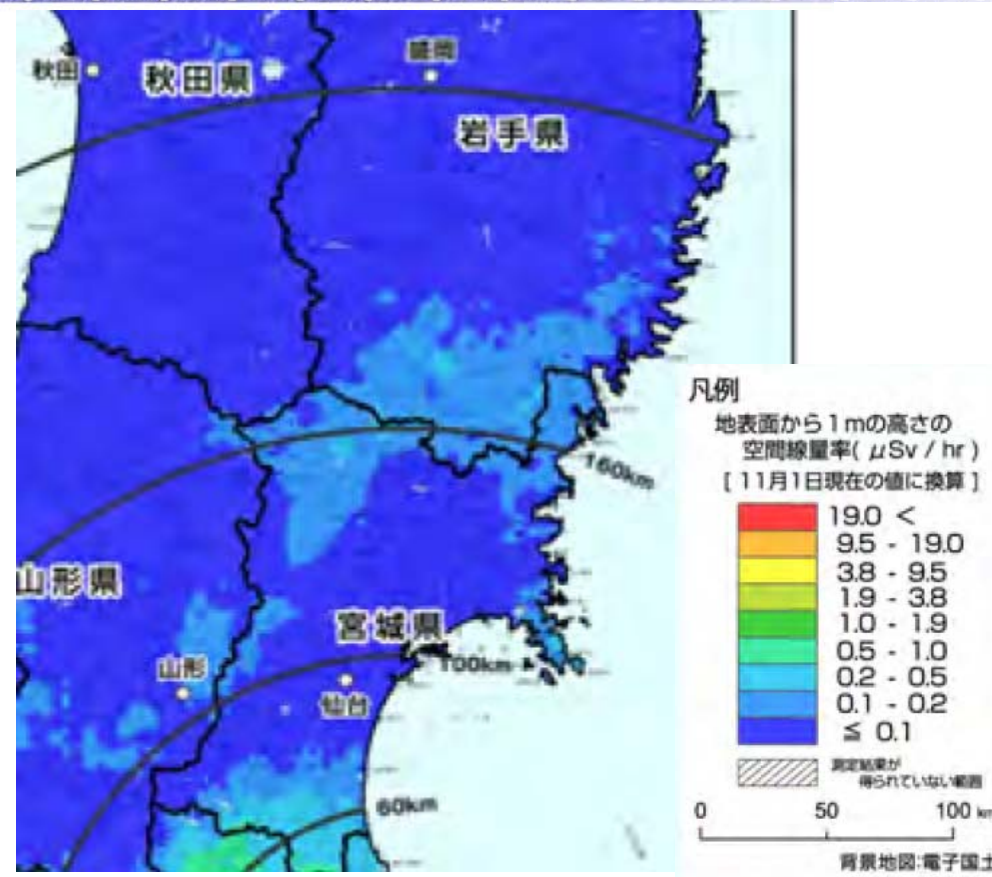
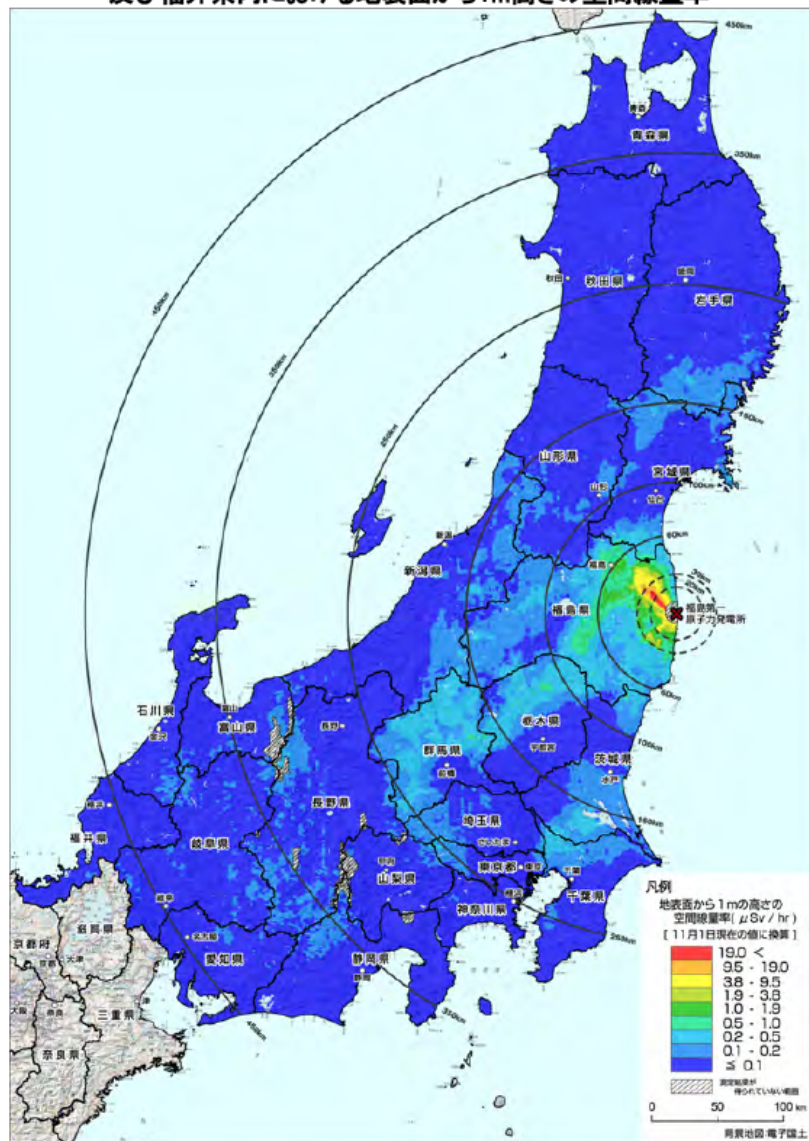
放射線と どうつきあうか

知彼知己
百戰不殆
不知彼而知己
一勝一負
不知彼而知己
每戰必殆

孫子兵法

放射線量分布（地表1mに換算）

文部科学省がこれまでに測定してきた範囲及び愛知県、青森県、石川県、及び福井県内における地表から1m高さの空間線量率

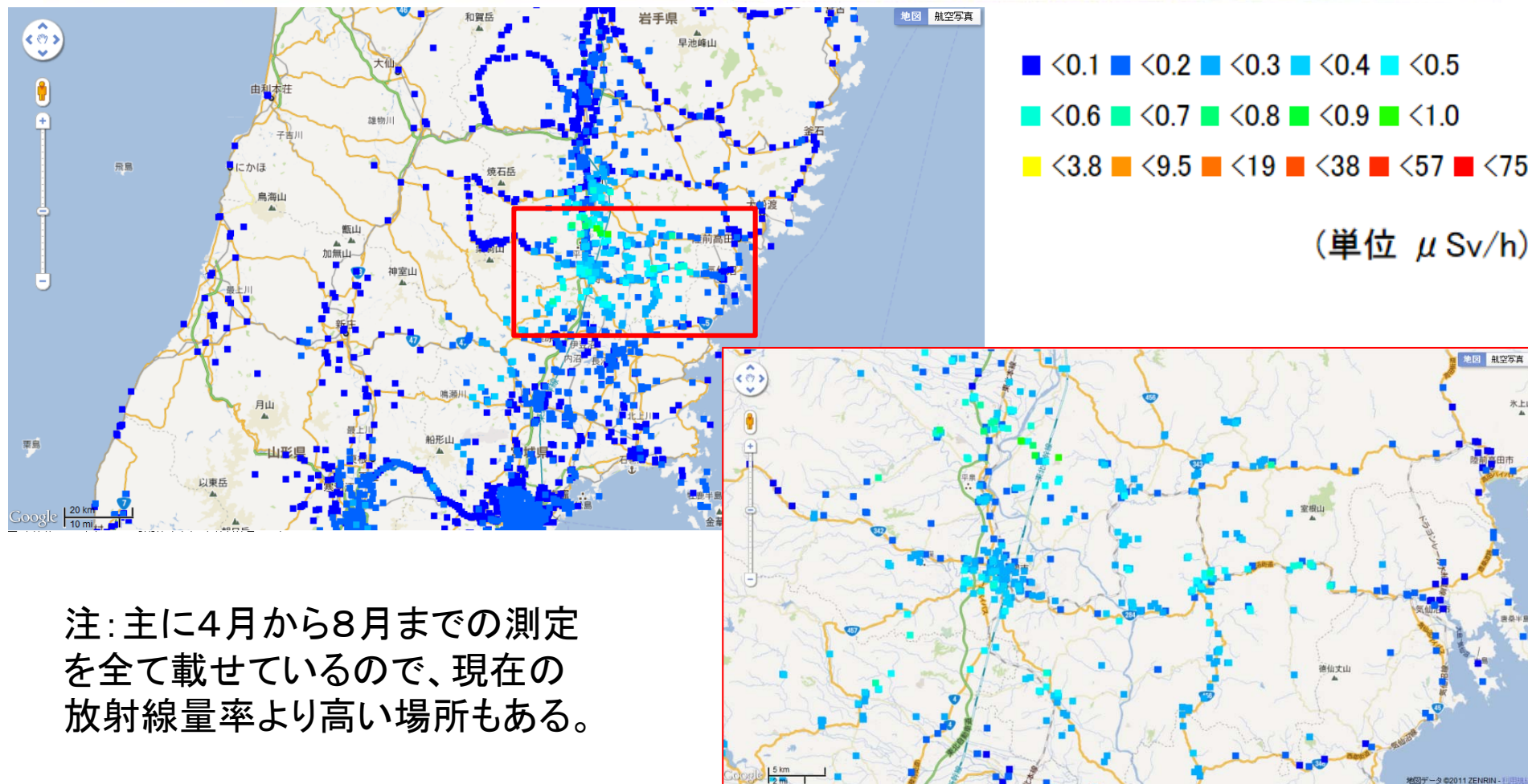


文部科学省による航空機モニタリングの測定結果
http://radioactivity.mext.go.jp/ja/1910/2011/11/1910_1125_2.pdf
 (2011/11/25 発表の資料) より
 ヘリコプターにより、地表150～300mの高度で測定

注意

実際に地表で測定した値と比べると、20～30%の誤差がある。
 ヘリコプターと地表の距離が短くなると、高めの値になる
 この地図はあくまでも傾向を知る為のもの。

放射線量率分布 (地表1m, 50cmの測定値より)



国・自治体による高さ1m・0.5m計測、を中心とした放射線量マップ
<http://www.nnistar.com/gmap/fukushima.html>

国・自治体から表で発表されているものを有志の方が地図に載せた物

仙台市青葉区の放射線量率の推移

https://sites.google.com/site/radmonitor311/sendai_aobaku

測定地点: 仙台市青葉区
測定器具: γサーベイメーター ALOKA TCS171 (NaI カウンター)
測定者: 田村裕和 (東北大学理学研究科物理学専攻)
各測定点には±10%程度の誤差があります。また、これは簡易測定であり、測定方法による誤差もあります。
図の作成: 金田雅司 (東北大学理学研究科物理学専攻)
放射線量のデータ: <http://bit.ly/i3j1B7>
降水量: 日本気象協会 <http://tenki.jp>
天気: 測定者の観測

放射線量
●屋外
■雨の当たらない軒下
▲屋外の土に接触させて測定
●室内(鉄筋コンクリート)

天気
○晴れ
●曇り
●雨
○雪

□降水量

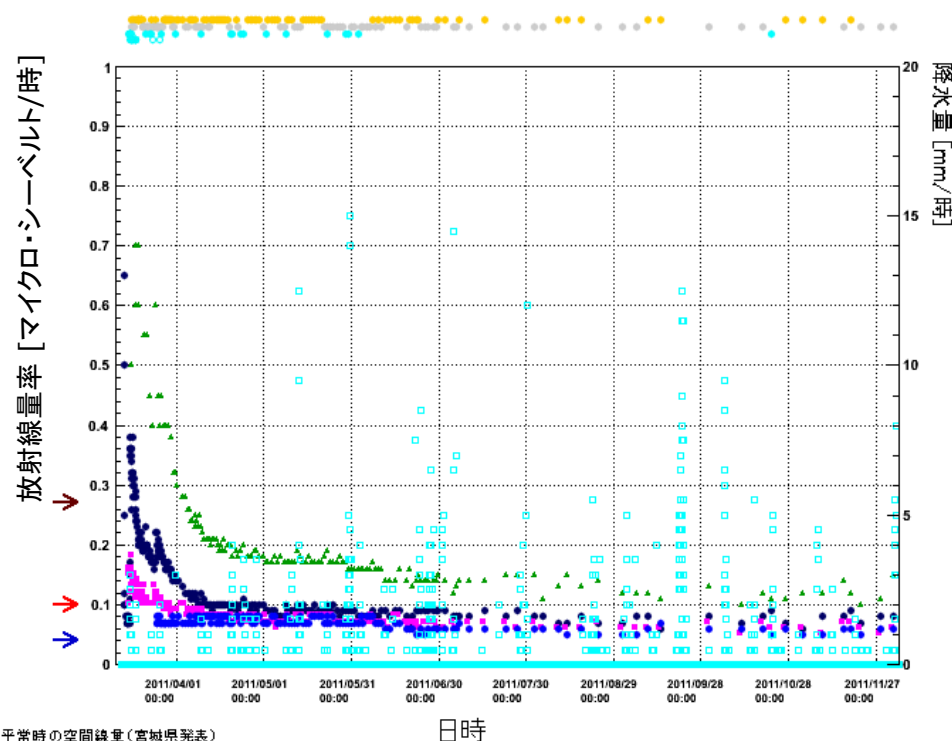
国連科学委員会(UNSCEAR)の2000年版の報告書による
内部被曝と外部被曝の和の世界平均は
年間 2.4 mSv (ミリシーベルト)
= 年間 2400 μ Sv (マイクロシーベルト)
= **1時間あたり 0.27 μ Sv (マイクロシーベルト)**

外部被曝 (宇宙線 + 大地) のみでは、
年間 0.87 mSv = **1時間あたり 0.10 μ Sv**
m(ミリ)は、1/1000 を意味し、 μ (マイクロ)はミリの1/1000。つまり、マイクロは、100万分の1。



金田雅司

仙台市青葉区の放射線量モニター (2011/3/13 - 2011/12/2)



平常時の空間線量 (宮城県発表)
1時間あたり 0.03 ~ 0.05 μ Sv
<http://www.pref.miyagi.jp/gentai/Press/soudan/soudan00.htm>

- 3月13~16日のベント、水素爆発以降放射性物質の大量放出は観測されていない

- 仙台での測定と、原子力発電所敷地内での測定値比較から

- 3月24日の仙台での増加は上空にあったものが雨で降下したと考えられる

- この日以降では、降雨後0.01~0.02 [μ Sv/h]の増加し、また線量が落ちているがこれは、大気中にある天然放射性物質ビスマス(Bi)214と考えられる

- 日本分析センターの測定では、降雨後にBi-214が増加してすぐ減少しているのが見えている。

• http://www.jcac.or.jp/lib/senryo_lib/nodo.pdf

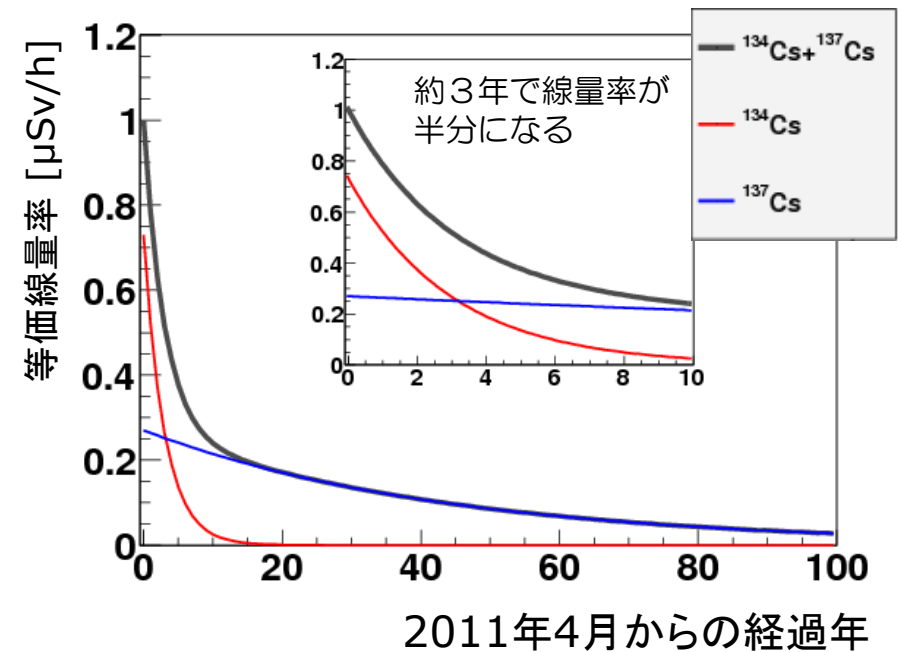
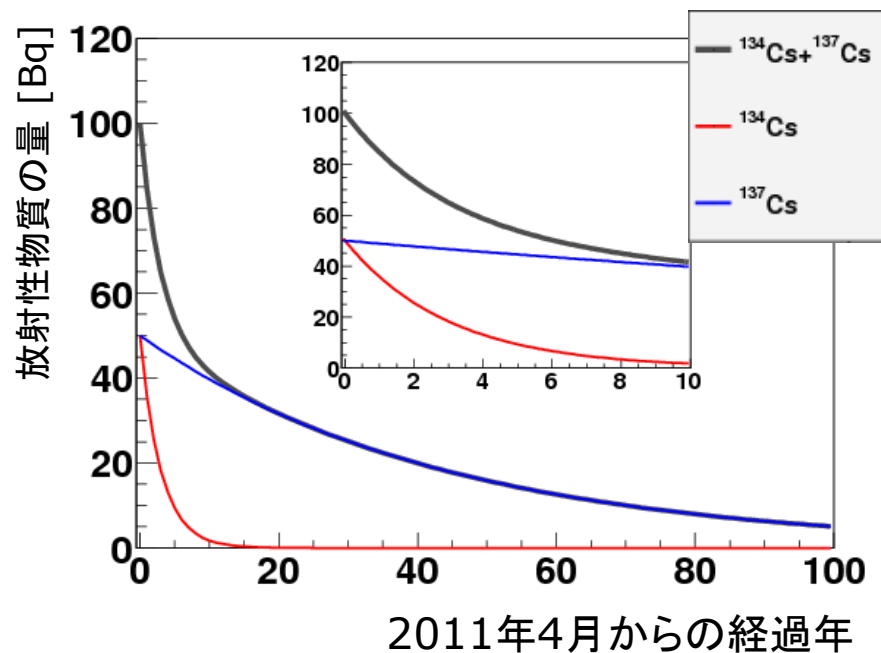
- 6月末以降

- ヨウ素131 (半減期8日) は殆ど無い
- 主にセシウム134と137



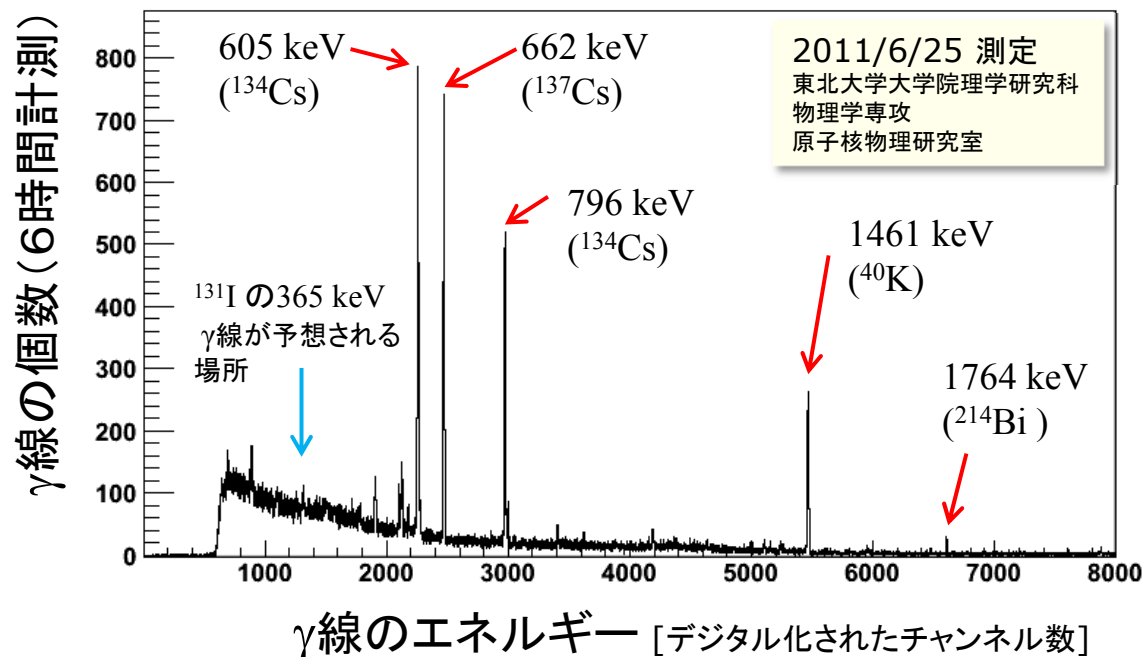
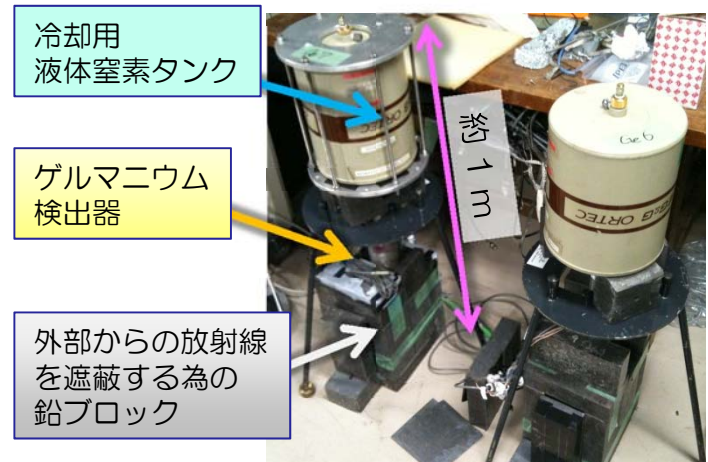
今後の放射線量の変化

- 2011年4月の時点で ^{134}Cs : ^{137}Cs のベクレル数での比は約1:1
 - ^{134}Cs : 半減期 約2.06年
 - ^{137}Cs : 半減期 約30.17年
- 同じベクレル数でも、放射線の強さ（等価線量率, Sv/h の単位で測る）は、核子の種類によって異なる
 - ^{134}Cs は、 ^{137}Cs の約2.7倍



青葉山キャンパスの土壌中の放射性物質

- ゲルマニウム検出器で測定
 - 高エネルギー分解能の検出器
- ピークが放射性物質から出た γ 線に対応
 - ピークの下にある連続して分布している物はバックグラウンド
 - 知りたい γ 線の個数はバックグラウンドの上に乗っている
- 6月末に見えている γ 線の由来は
 - セシウム(Cs)-134, -137
 - カリウム(K)-40: 天然放射線
 - ビスマス(Bi) -214: 天然放射線 (ラドンから)



測定装置は、 γ 線のエネルギーをデジタル化したチャンネル数として記録
チャンネルからエネルギーに換算するのが較正
(keV はエネルギーの単位)

バックグラウンドがギザギザしているは、統計的揺らぎの為

ヨウ素-131 (^{131}I) は、バックグラウンドの揺らぎに埋もれて見えない
= 検出限界以下

カリウム-40 が γ 線を出すのは、その量の10%程度。

天然にある放射性物質

- カリウム40

- 半減期：12.77億年、地球が出来る以前から存在している
- 天然カリウムの中に0.0117%の割合で存在
 - 天然カリウム 1g あたり 30.4 Bq の放射能を持つ
 - 成人で体内に数千Bqある
- カリウムは、生物にとって必須元素
 - カリウム不足は、高血圧、低カリウム血症等を起こす
- 1年あたり 165 μSv の内部被曝と評価されている

- 炭素14

- 宇宙線による生じた中性子が窒素に吸収されて生成される
- 1年あたり 10 μSv の内部被曝と評価されている

- ラドン及びその娘核種

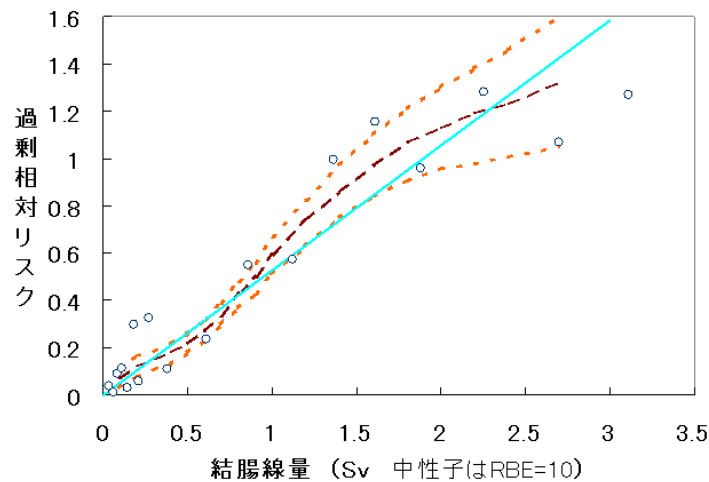
- よく知られているのは温泉
- 花崗岩に多く含まれている
- 呼吸による内部被曝の主な原因（肺がんのリスク要因の一つ）
 - 日本は世界平均よりも少ないレベル

食品中の放射性物質

- 流通しているもの
 - 多くの農協、流通業者が独自測定をしている
 - もちろん、測定もれがある可能性はゼロではない
 - 限られた測定装置・人員の中で、牛肉の検査が飛び抜けて多い
 - 食物検査報告のうち6割が牛肉（<http://bit.ly/sUaD9j>）
- 自家農園、山、川で自分で採取したもの
 - 危険なものが含まれていても気づかない可能性がある
 - 厚生労働省の発表資料から抜粋
 - 野生のキノコ類、野生の鳥獣（猪、熊、鹿）、川魚、等
 - キノコはセシウムをため込むことが知られている

放射線のリスク評価

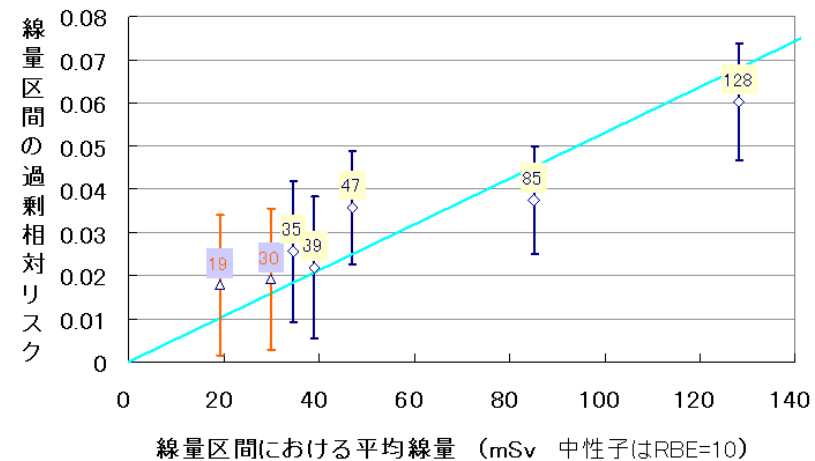
・放射線による影響の研究 － 原爆被爆者への調査から



注: ○は線量区分別のERR推定値、破線は○から得られた平滑化推定値(点線はその±σ値)

図2 原爆被爆者における固形がんERRの線量-反応関係
(1950-1997年の死亡率調査)

[出典]D. L. Preston, 清水由紀子ら:放射線報告書No.24-02、原爆被爆者の死亡率調査 第13報
固形がんおよびがん以外の疾患による死亡率:1950-1997年、p.11



注: 図中の数字は5-50, 5-100, 5-125, 5-150, 5-200, 5-500及び5-1,000mSv区間における平均線量(mSv)。
◇: 統計的に有意($p < 0.05$)、△: 有意でない($p > 0.05$)。直線は図1と同じリスク係数0.53/Sv。
下記の出典の数値をもとに作成した。(平均線量は混成対数正規分布により推定)

図3 低線量域における原爆被爆者の固形がんERRにおける直線性
(1950-1997年調査)

[出典]D. L. Preston, 清水由紀子ら:放射線報告書No.24-02、原爆被爆者の死亡率調査 第13報
固形がんおよびがん以外の疾患による死亡率:1950-1997年、p.15

RBE:線質係数、GyからSvに換算するときに使われる係数

左図の横軸の単位は右図の1000倍であることに注意

図の出展:「放射線のリスク評価」

http://www.rist.or.jp/atomica/data/dat_detail.php?Title_No=09-02-03-06

放射線のリスク評価

- ICRP(国際放射線防護委員会)の考え方
 - 放射性への生体への影響
 - 線量の増加に応じて増えている
 - しかし、その関数がどうなっているかはよく分からない
 - 特に 1 Sv 以下については、統計誤差も大きく不明
 - リスクの増加は、放射線量に比例すると“仮定”
 - 閾値なし・線形モデル (Linear, Non Threshold (LNT) model)
 - LNTモデルによる評価 (ICRP1990勧告)
 - 致死性の発癌率の増加を、1 mSv あたり、0.005% と評価
- このリスクは他のリスクに比べて大きいか
 - タバコによるがんのリスク： 男性（女性）の非喫煙者の2(1.6)倍
 - 出展： 国立がん研究センター
http://ganjoho.jp/public/pre_scr/cause/smoking.html
- ただし、平均的個人は存在しない

内部被曝の評価

- 核種ごとに評価
 - 元素によって体内に蓄積される場所が違う
 - ヨウ素：甲状腺
 - セシウム：全身（主に筋肉）、カリウムと同じ場所に蓄積される
 - ストロンチウム：骨
 - 代謝によって体外に排出される影響も考慮
 - 摂取後50年後（乳児・幼児は70歳まで）までの全被曝量を評価
- 福島第一原発から放出された放射性物質
 - ヨウ素：半減期8日なので現在は土壌中には殆どない
 - セシウム： ^{134}Cs （半減期約2年）と ^{137}Cs （半減期約30年）
 - 土壌中の比は、おおよそ 1:1
 - ストロンチウム：地表には殆ど降っていない（セシウムの1/2000～1/4000）文部科学省の調査

内部被曝の評価：仙台の例

出典: <http://www.mhlw.go.jp/stf/houdou/2r9852000001558e-img/2r98520000015cfn.pdf>

注: 元のデータの換算係数は、mSv/Bq ですが、ここではμSv/Bq になおしています。

- 仙台青葉区(東北大青葉山キャンパス内)での土壌中の放射性セシウム(Cs-134とCs-137を足したもの)の値は、高いところで 500 Bq/kg(6月時点)で、Cs-134とCs-137の比はおおよそ1:1(どちらの数値も、当研究室調べ)
- 幼児が外遊びをしていて、毎日1 g の土が口に入って飲み込んだと仮定。それぞれのセシウムは、年間 $250 \times 0.001 \times 365 = 91.25$ Bq。実効線量は、 $91.25 \times 0.013 + 91.25 \times 0.010 = 1.18625 + 0.9125 = 2.1$ [μSv] になる
- 食物による内部被曝の世界平均が、一年あたり $0.29 \text{ mSv} = 290 \text{ μSv}$ であることを考えると、100分の1弱だけリスクが増えたことに相当
- 私(金田)はこの100分の1弱のリスク増は気にしない
 - 自分の子供が外で遊ぶことを止めさせていないし、マスクもさせていない

別表4 経口摂取による実効線量及び甲状腺等価線量への換算係数

核種	線量係数 [μSv/Bq]				
	乳児	幼児	少年	青年	成人
Sr-89	0.036	0.0089	0.0058	0.0040	0.0026
Sr-90	0.23	0.047	0.060	0.080	0.028
I-131	0.14	0.075 (0.038)	(0.025)	(0.016)	0.016
I-133	0.038	0.017 (0.0072)	(0.0049)	(0.0031)	0.0031
Cs-134	0.026	0.013	0.014	0.019	0.019
Cs-137	0.021	0.010	0.010	0.013	0.013
U-234	0.37	0.088	0.074	0.074	0.049
U-235	0.35	0.085	0.071	0.070	0.047
U-238	0.34	0.080	0.068	0.067	0.045
Pu-238	4.0	0.31	0.24	0.22	0.23
Pu-239	4.2	0.33	0.27	0.24	0.25
Pu-240	4.2	0.33	0.27	0.24	0.25
Pu-241	0.056	0.0060	0.0050	0.0050	0.0050
Pu-242	4.0	0.32	0.26	0.23	0.24

半減期: 28.90年
半減期: 8.02 日

半減期: 2.06 年
半減期: 30.07年

核種	等価線量(甲状腺)				
	乳児	幼児	少年	青年	成人
I-131	2.8	1.5 (0.76)	(0.50)	(0.32)	0.32
I-133	0.73	0.33 (0.14)	(0.093)	(0.059)	0.059

ICRP-56(1989)、- 67(1993)、- 69(1995)、- 72(1996)より引用。()内の数値はICRP-72(1996)及び「環境放射線モニタリングに関する指針」(平成12年8月一部改訂2000)を基に年齢補正を行った試算値。

(出典:平成12年度厚生科学特別研究「原子力施設の事故等緊急時における食品中の放射能の測定と安全性評価に関する研究」)

差別を広げない為に

- 無知は罪

- 分からないことが不安をあおる
 - ただし、分かっても怖がる人もいます
- 正しい知識を持ってリスクの評価をしてください

差別を広げない為に

- 今回の福島第一原発由来の放射性物質から放射線をあびても、その人・物が放射線を出すようにはならない
 - 自然界にある ^{40}K 及び福島第一原発から飛んできた ^{134}Cs , ^{137}Cs が出す放射線は β 線と γ 線
 - 安定な原子核が放射線を出す原子核（不安定原子核）に変わる為には、大量の中性子あるいは、加速器で生成する高エネルギーの陽子・電子ビームを照射する必要がある

差別を広げない為に

- 広島・長崎の原爆被害者子孫の方々への調査では放射線被曝による遺伝的影響は観測されていない
 - 被曝2世、3世の世代で遺伝病は増えていない
 - 国連科学委員会（UNSCEAR）による遺伝的影響のリスク推定値
 - 自然突然変異の発生率に対して倍の割合になるのは 1 Gy の被曝（動物実験より）
- インド、中国、ブラジルの高自然放射線地域での調査
 - 一年あたり数 Sv の被曝
 - 乳児死亡率、生まれる男女比、新生児の先天異常、ガン死亡率（全ての年齢）について、自然放射線の低い地位と比べて有意な差は見られない

注：

自然放射線の場合は、同じ線量を一生あび続ける
一方、原発事故由来の放射性物質は毎年減っていく

差別を広げない為に

- 広島・長崎の原爆被害者子孫の方々への調査では放射線被曝による遺伝的影響は観測されていない
 - 被曝2世、3世の世代で遺伝病は増えていない
 - 国連科学委員会（UNSCEAR）による遺伝的影響のリスク推定値
 - 自然突然変異の発生率に対して倍の割合になるのは 1 Gy の被曝（動物実験より）
- インド、中国、ブラジルの高自然放射線地域での調査
 - 一年あたり数 mSv の被曝
 - 乳児死亡率、生まれる男女比、新生児の先天異常、ガン死亡率（全ての年齢）について、自然放射線の低い地位と比べて有意な差は見られない

注：

自然放射線の場合は、同じ線量を一生あび続ける
一方、原発事故由来の放射性物質は毎年減っていく

情報を集める

- 正しい情報を得る

- テレビ・本・インターネットでの情報は玉石混交
- ある一方に偏った情報ではなく、いろいろな情報をつきあわせて考える

- 情報源の一つとして：出前授業

- 東北大学 大学院理学研究科・理学部の連絡先
 - 大学院理学研究科 教育研究支援部 アウトリーチ支援室
 - <http://www.sci.tohoku.ac.jp/shien/outreach/>
- ただし、出来ないことがあります。
 - 例：原子炉について、放射線の医学的影響の詳細、農作物への放射性物質の集約など、工学、医学、農学に関連することは専門の学部におたずね下さい

科学の適応範囲

・ 科学が答えられること・ 答えが出ないことがある

－ 科学が答えられること

- ・ 客観的な事実、観測・実験による測定値
 - － 放射性物質とはなにか
 - － 現在の放射線量率
 - － 疫学調査に基づいた放射線・放射性物質によるリスクの確率

－ 科学で答えが出ないこと

- ・ 個人の価値観に基づくもの
 - － どこまでの空間線量率であれば安心できるか
- ・ 絶対安全か・絶対危険か
 - － 科学では絶対に〇〇という答えは出ない

まとめ

- 放射線と放射性物質

- 素粒子・原子核物理の知見で理解でき取り扱える

- 放射線の生物学的影響

- 急性被曝（かねがね 1 Sv 以上を一度にあびる）
 - 下痢・嘔吐・脱毛、内臓粘膜からの出血、が知られている
- 微量（ $\mu\text{Sv/h}$ 程度）放射線の長期的な影響
 - 病気の原因になるという決定的な証拠はない
 - 他の要因（喫煙、ストレス、肥満、食事等）の影響の方が大きい
 - インド、中国の高自然放射線地域での調査（数 mSv/年 ）
 - 乳児死亡率・男女比・先天異常、ガン死亡率に有意な差異が見られない
- 国際放射線防護委員会の勧告は、量に比例したリスクがあると仮定して考えられている

- リスクの判断

- 定量的に判断する必要がある
- 低線量被曝に対する影響をどう考えるかは、個人の価値観に依存する面がある

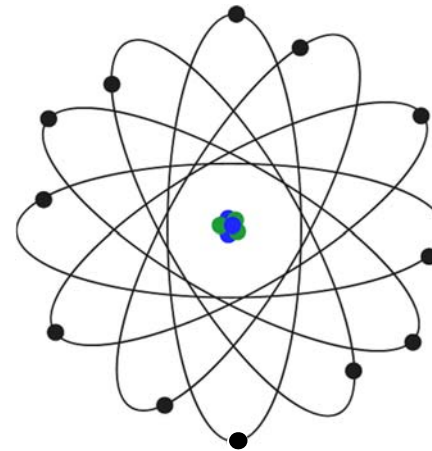
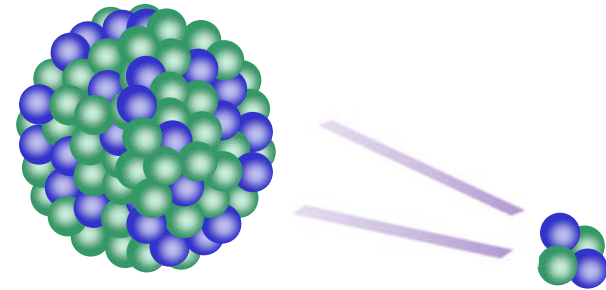
いろく

付録

α 線

• 物理的性質

- 主に質量数の大きい不安定原子核から放出される
 - トンネル効果
- 電荷 +2
- 陽子2個と中性子2個から成る (${}^4\text{He}$ の原子核)
- 電子の側を通過するとき電子をはがす
 - 電離



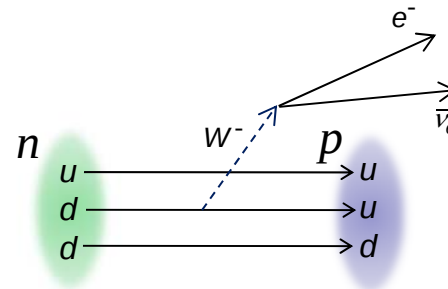
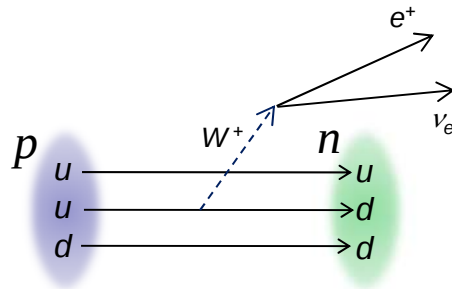
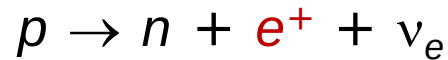
α線

- 飛距離 (Range)
 - 短い距離でエネルギーを失う
 - 透過能力は高くない
 - 空気に対して数cm程度
- 防御物 (Shield)
 - 紙
 - 皮膚の表面
- 生物学的危害 (Biological hazard)
 - 体外被曝
 - 外からα線を人体に照射しても表皮で止まってしまうので影響はない
 - 体内被曝
 - もしα線源を体内に取り込んでしまうと、放射性物質が無くなるまで浴び続ける

β線

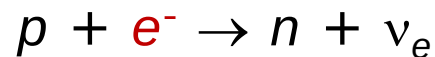
- 物理的性質

- 電荷 1
- β^- (電子)と β^+ (陽電子)
 - α 線に比べると質量は7000分の1程度
- 原子核中で陽子（中性子）が中性子（陽子）に崩壊するときに放出される



このプロセスは三体崩壊

- 電子の持つエネルギーは0からある最大値までいろいろな値を持つ
- β線を出さずに陽子が中性子に変わるプロセスもある（電子捕獲, Electron Capture）
 - 軌道上の電子を陽子が捕獲



- 空いた軌道に上の軌道が電子が移動する際にX線(電磁波)が放出される

β線

- 飛距離 (Range)
 - α線よりは遠くまで届く
 - 空気に対して数m程度
 - 皮膚の表面に線源をおいた場合でも2,3mm程度しか進まない
- 防御物 (Shield)
 - 数ミリ圧のプラスチック、アルミ、ガラス、木
 - 密度の高い物質（鉛など）は電子が当たることによってX線を出すので逆に危険
- 生物学的危害 (Biological hazard)
 - 体外被曝
 - 皮膚や眼球に対して危険
 - 内蔵や骨までには届かない
 - 体内被曝
 - α線源よりはダメージが少ない

γ 線/X線

• 物理的性質

- 電磁波
- 電荷を持たない
- γ 線とX線の違いは発生機構
 - γ 線
 - 原子核内の核子が励起状態からエネルギーの低い状態へ遷移する時に余分なエネルギーが電磁波として放出される
 - X線
 - 軌道電子が励起状態からエネルギーの低い状態に遷移する際に放出される
 - » 電子捕獲によるもの
 - » 陽子が軌道電子を捕獲、空いた軌道に上の軌道から電子が落ちて来るときにX線が放出される
 - » 内部転換によるもの
 - » 原子核のエネルギーが直接電子の軌道に与えられることがあり、主にK殻の電子が放出され、L殻等の電子がK殻に落ちて来るときにX線が放出される
 - X線が出る代わりに別の電子が放出されることもある：オージェ電子

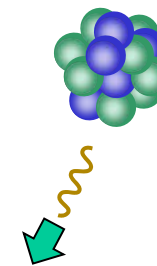
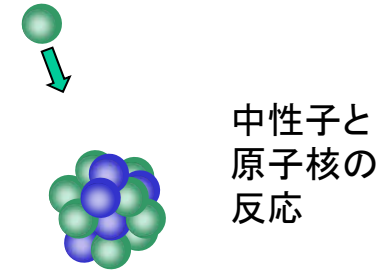
γ線/X線

- 飛距離 (Range)
 - 長く透過力が強い
 - 電離作用は強くない
- 防御物 (Shield)
 - 密度の高い物質を用いる
 - 鉛、鉄、コンクリートなど
- 生物学的危害 (Biological hazard)
 - 体外被曝
 - 透過力が高いことから体全体が被曝する
 - 体内被曝
 - 放射性物質の近くだけではなく体の広い範囲で被曝する

中性子

• 物理的性質

- 不安定原子核から放出
- 中性子は電荷を持たない
- 質量は陽子とほぼ同じ
 - $m_n = 939.6$ ($m_p = 938.3$) [MeV/c²]
- 電子とは相互作用しない
- 中性子と反応した原子核から放出される放射線により、間接的に電離が行われる



中性子が吸収され
 γ 線が原子核から
放出される



核子を原子核から
はじき飛ばす

中性子

- 飛距離 (Range)

- 他の放射線に比べて比較的遠くまで届く
- 空気中での平均自由行程（一回相互作用するまでに進む距離の平均）
 - 220 m

- 遮蔽 (Shield)

- 水、ポリエチレン、コンクリート
 - 同程度の質量の陽子との衝突では、陽子に運動量の殆どを渡して中性子は静止する。
 - ボールの集めたなかに、ボール一つを投げるとすぐ静止する
 - 質量数の大きな物質とでは、壁にボールをぶつけるようなもの

- 生物学的危害 (Biological hazard)

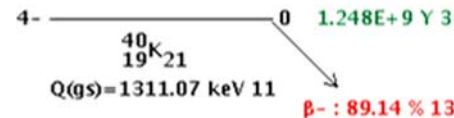
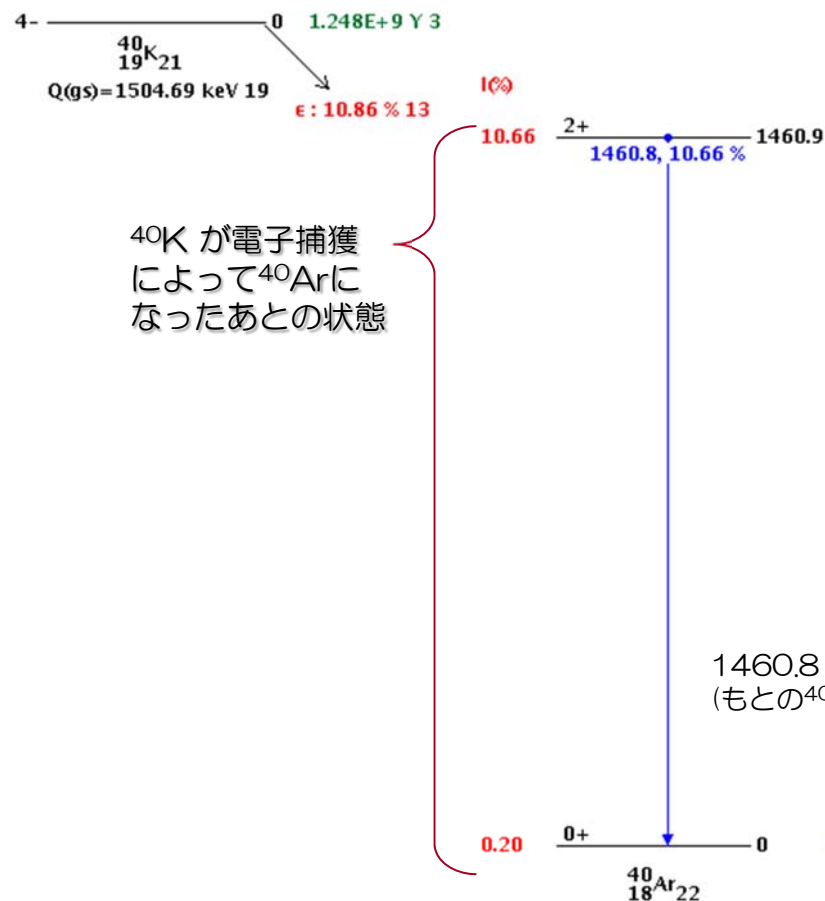
- 体全体で被曝する
- 強い透過力を持つ

その他の放射線

• 宇宙線

- 常に地球に降り注いでいる
 - 10 cm^2 辺り 1秒間に一個程度
- 最初に地球の大気に突入するのは陽子や原子核等
- 地表から5km程度では殆ど μ 粒子
 - 大気との相互作用でパイ中間子を生成、パイ中間子が μ 粒子に崩壊し地上に届く
 - 平均寿命は $2.2 \times 10^{-6} \text{ [s]}$
 - 光速($3 \times 10^8 \text{ [m/s]}$)近くまで加速された場合
 - » 相対論効果を考えないと、進む距離は $6 \times 10^2 \text{ [m]}$
 - » 相対論効果を考慮
 - » μ 粒子の質量は 105.7 [MeV] ,
 - » $1 \text{ GeV}/c$ の運動量を持つ場合、静止系で観測した寿命は約10倍に伸び、 $6 \times 10^3 \text{ [m]}$ 程度まで届く

40Kの崩壊図

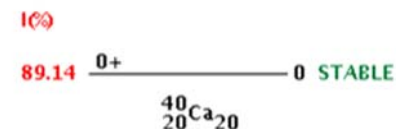


^{40}K の
89.14%は
 β 崩壊によって
 ^{40}Ca になる

^{40}Ca の安定状態に
壊変するので、 γ 線
はださない

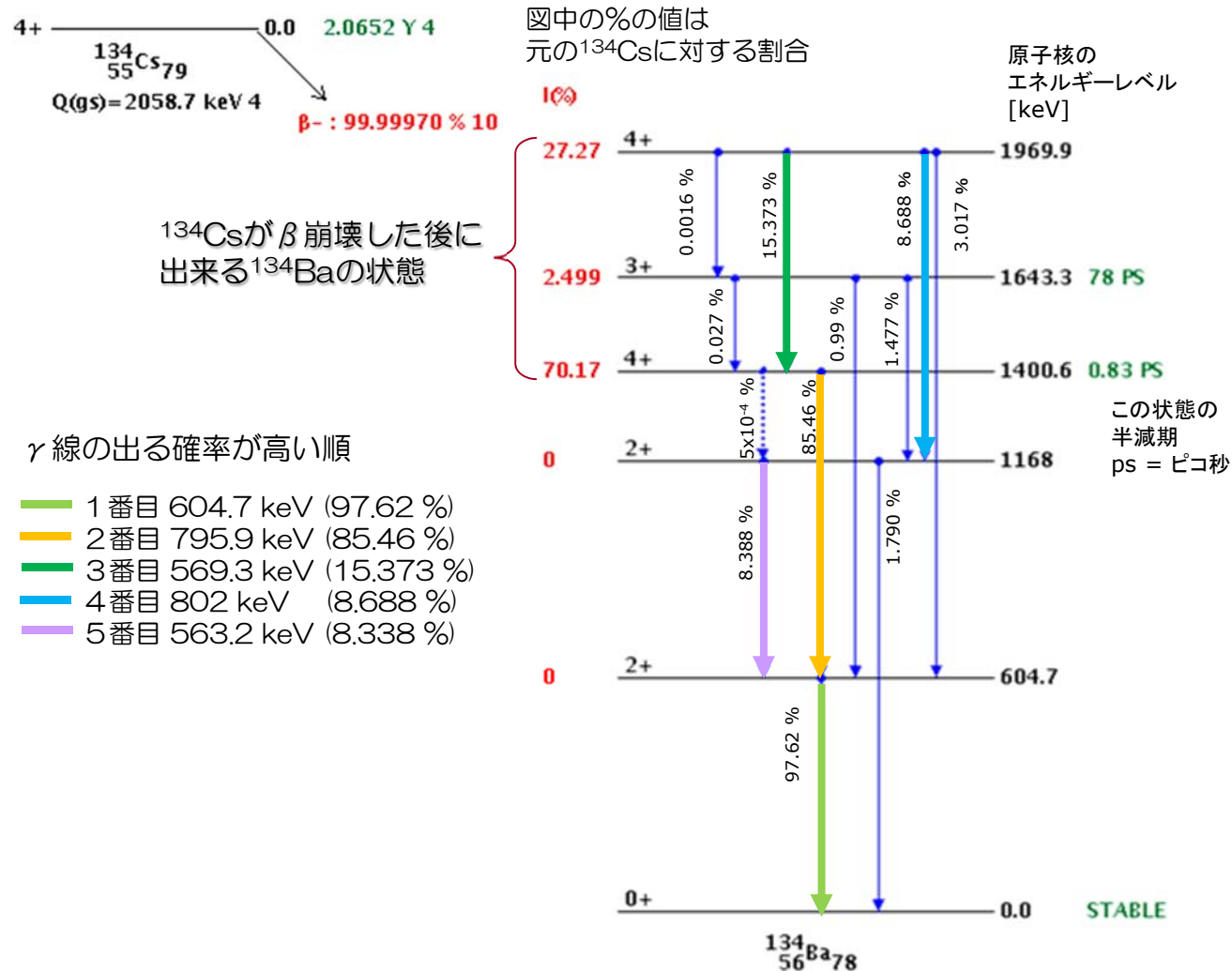
誤差
平均値の最後の桁にあわせた数字
この場合、 89.14 ± 0.13 を意味する

平均値

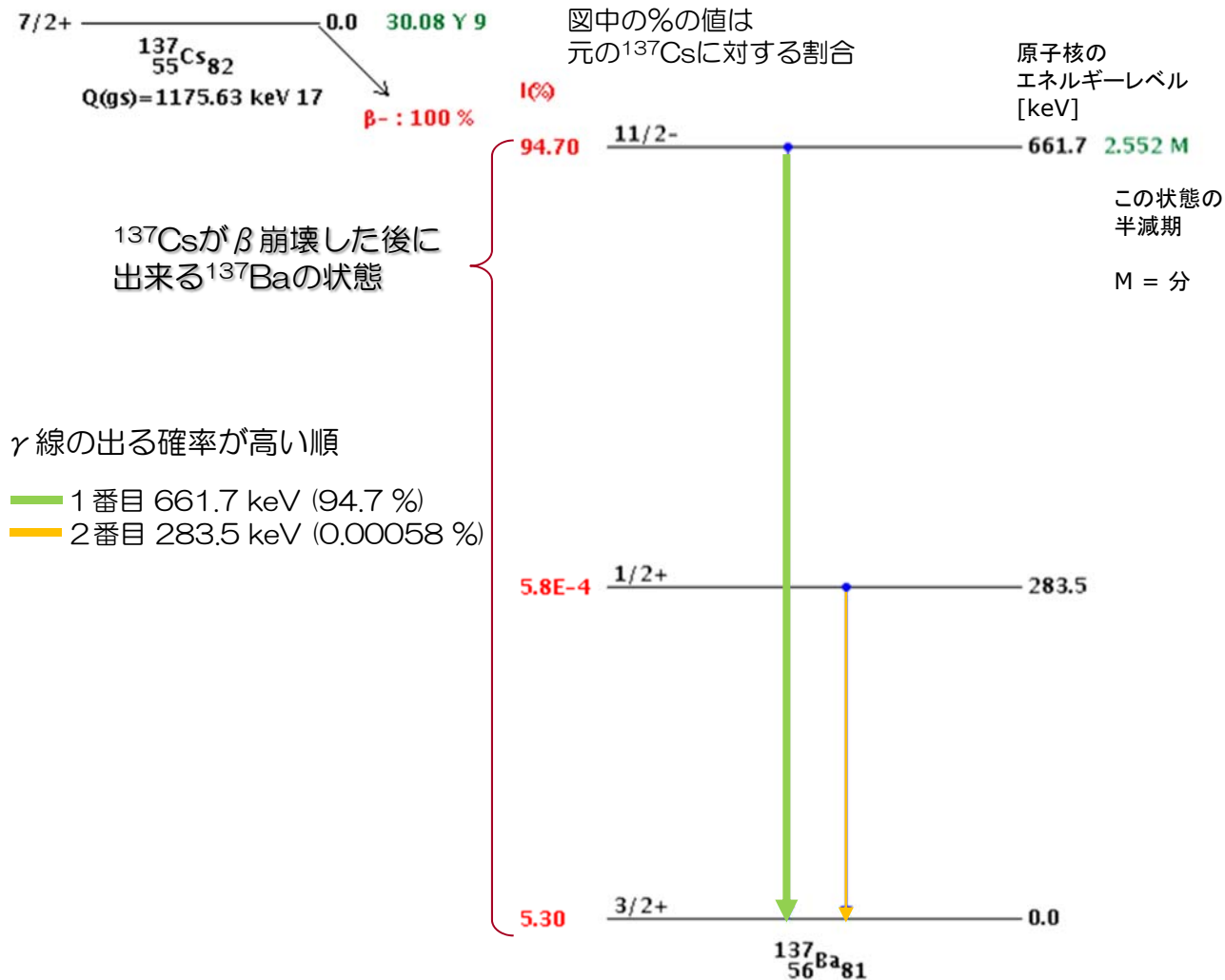


^{40}K の出す γ 線を数えて個数/秒が分かったとする、
実際に崩壊している ^{40}K は γ 線の個数の約10倍存在している。
たとえば、 γ 線が100 [個/秒] 出ているとすると、 ^{40}K は 938 [Bq]あることを意味する。

134Csの崩壊図



^{137}Cs の崩壊図



原子核がとれる
エネルギー状態
は飛び飛び

高いエネルギー状態から
低い方になっていく

この時、二つの状態の
エネルギー差が γ 線
として放出される

とれる状態が複数あると
経路も増える
→ 複数個の γ 線を出す

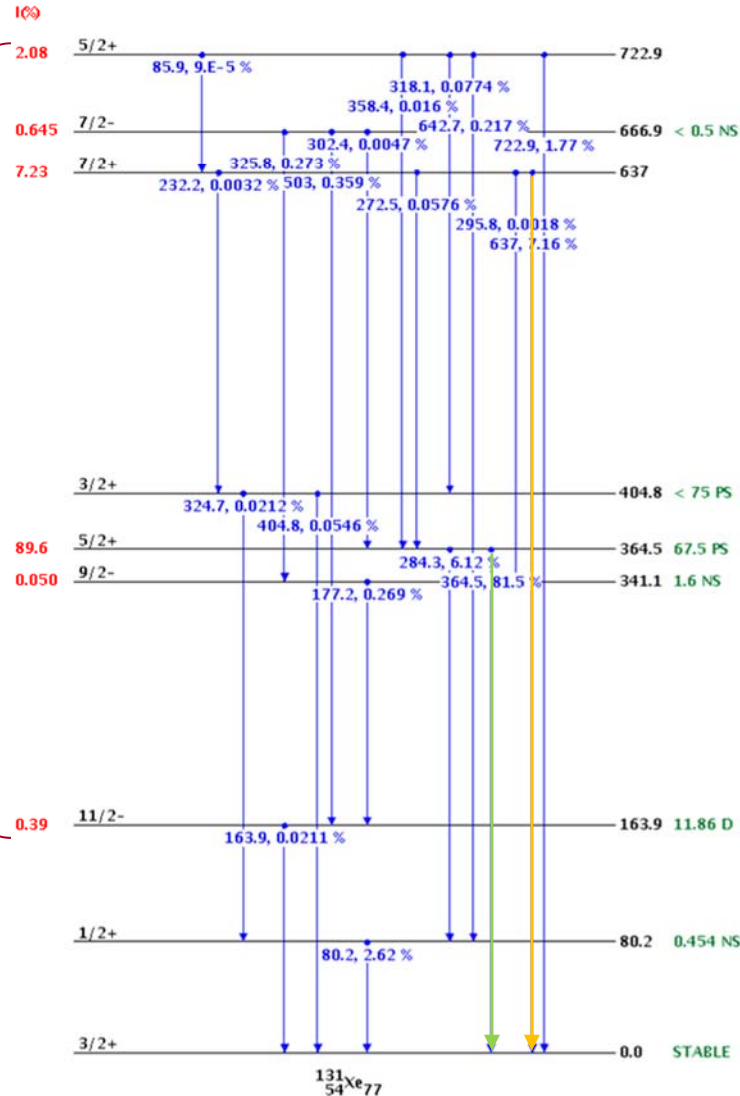
^{137}Cs の場合、
一個の原子核が β 崩壊
すると、661.7 keV
の γ 線が0.947個で
ると考えて差し支えない

131Iの崩壊図

7/2+ $^{131}_{53}\text{I}$ 0.0 8.0252 D 6
 $Q(\beta^-) = 970.8 \text{ keV}$
 $\beta^- : 100 \%$

^{131}I が β 崩壊
 した後に出来る
 ^{131}Xe の状態

1(%) の数値が
 表示されている
 ところにしか
 いかない



γ 線の出る確率が高い順

- 1 番目 364.5 keV (81.5 %)
- 2 番目 637 keV (7.16 %)

降雨と放射線量率の関係

縦軸は対数表示

雨が降ると大気中に浮かんでいる天然放射性物質
Bi-214（半減期20分）が落ちてきて線量率が上がる

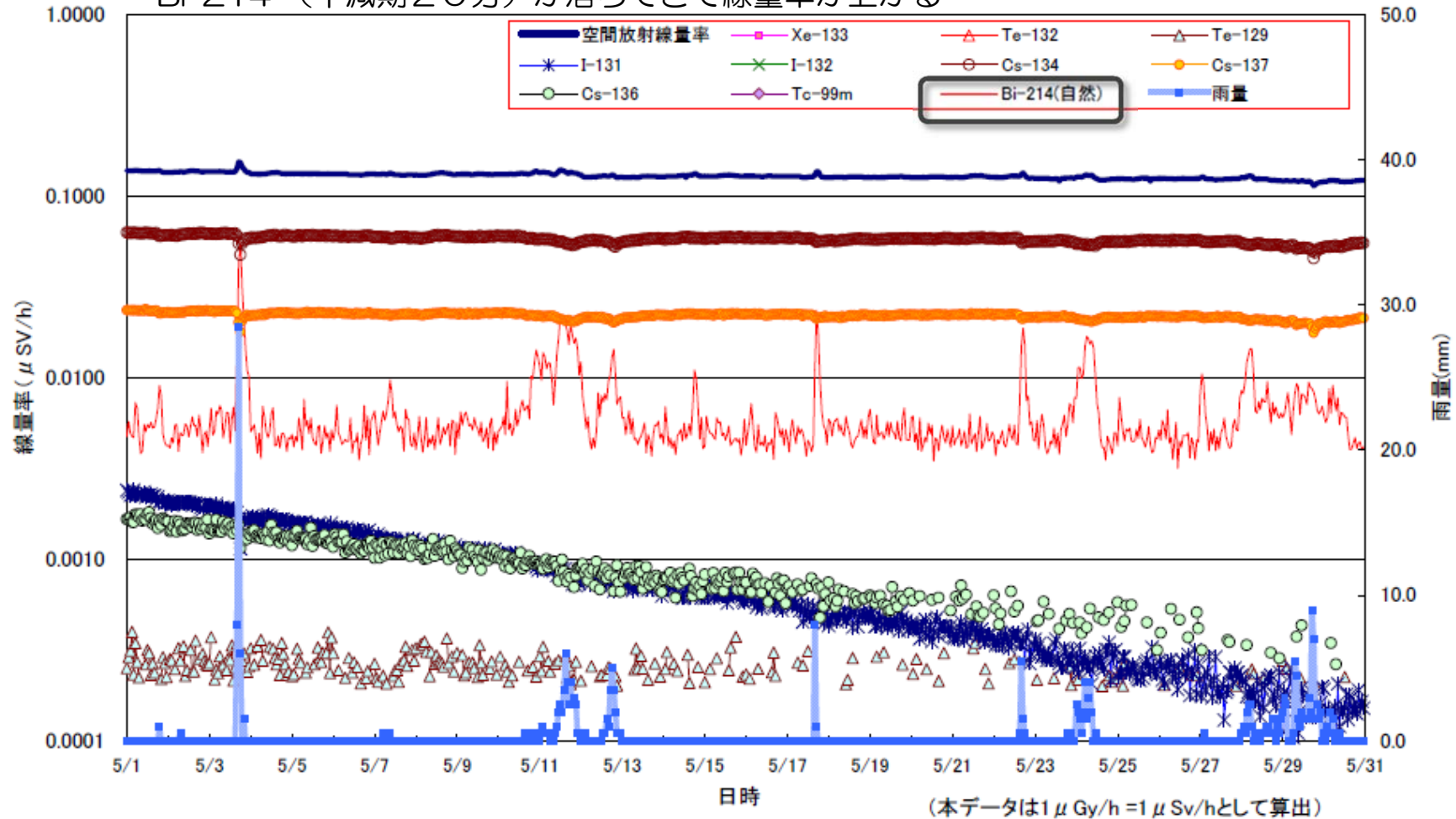


図 日本分析センターにおける空間放射線量率の測定結果

2011/5/31
日本分析センター調べ

出典: http://www.jcac.or.jp/lib/senryo_lib/nodo.pdf 4ページ

38Cl誤検出にまつわる話

早野龍五(@hayano)氏のツイートより

2011年4月10日
(ちょっとテクニカルだけど、質問が多かったので) **Cl-38**検出のみに基づいて再臨界を論じてはいけないわけ(及び、塩素38m検出誤りについて再掲 <http://bit.ly/h5xRwZ>)
<http://plixi.com/p/91019372>

2011年4月1日
【April Foolにしても、ありえない！】ガンマ線による東電の核種の同定に、明らかな間違いあり。プロなら全員同意するはず。もとのガンマ線スペクトル、一度見せてください→ @OfficialTEPCO
<http://plixi.com/p/88437524>

<https://twitter.com/#!/hayano/status/53594238520270848>

Cl-38検出のみに基づいて再臨界を論じてはいけないわけ

▶ 3/25夜、塩素-38検出と報道。

▶ 再臨界→大量の中性子→海水中の塩素-37が中性子捕獲→塩素-38。
塩素-38が見えた→再臨界というのがロジック
(塩素-37の中性子捕獲断面積は 0.43b、同位体存在比 24%、塩素-38の半減期37分、1642.7 keVと2167.4 keVのガンマ線を出す。)

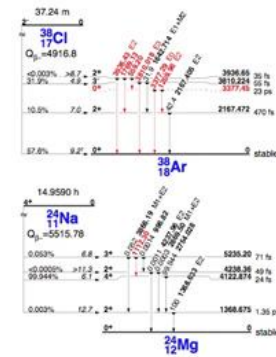
▶ しかし待て

▶ 塩=NaCl。海水中にはナトリウム-23もある。
ナトリウム-23が中性子捕獲→ナトリウム-24も検出されるはず。
(ナトリウム-23の中性子捕獲断面積は 0.40b、同位体存在比 100%、ナトリウム-24の半減期14.9時間、1368.6 keVと2754.0 keVのガンマ線を出す。
塩素-38が 1.6×10^6 Bq/cm³あったなら、ナトリウム-24も 2.6×10^6 Bq/cm³ - 溜まり水で検出されたヨウ素-131と同じくらいの線量 - は検出されるはずだ。)

▶ しかし、ナトリウム-24は検出されていない！

▶ 東電が4/1に塩素-38m検出という、明らかな間違いをやったことも考えると (<http://bit.ly/h5xRwZ>)、塩素-38が見えた→「すわ再臨界」は早計。

23 : 10 1号機に隣し、タービン建屋1階にある水溜りから380万ベクレルの放射線量を検出
※ 1号機タービン建屋地下溜まり水の測定結果
Cl (塩素)-38 濃度: 1.6×10^6 Bq/cm³
As (砒素)-74 濃度: 3.9×10^6 Bq/cm³
Y (イットリウム)-91 濃度: 5.2×10^6 Bq/cm³
I (ヨウ素)-131 濃度: 2.1×10^6 Bq/cm³
Cs (セシウム)-134 濃度: 1.6×10^6 Bq/cm³
Cs (セシウム)-136 濃度: 1.7×10^6 Bq/cm³
Cs (セシウム)-137 濃度: 1.8×10^6 Bq/cm³
La (ランタン)-140 濃度: 3.4×10^6 Bq/cm³
<http://www.kantei.go.jp/saigai/pdf/201104091700genpatsu.pdf> より



April Foolにしても、これはありえない。

<http://www.nisa.meti.go.jp/earthquake/monitor.pdf>

にて公開された福島【第二】原発敷地内空気から塩素-38m検出。

これは東電の測定が間違っていると断言できます。プロなら誰でもすぐに変だと分かる。

ガンマ線スペクトルを見せてください→TEPCO

核種	3月17日		3月18日		3月19日		3月20日	
	①検出濃度 (Bq/cm ³)	②検出濃度 (Bq/cm ³)	①検出濃度 (Bq/cm ³)	②検出濃度 (Bq/cm ³)	①検出濃度 (Bq/cm ³)	②検出濃度 (Bq/cm ³)	①検出濃度 (Bq/cm ³)	②検出濃度 (Bq/cm ³)
陽性	I-131	9.432E-05	3.351E-06	0.09	8.630E-04	3.145E-05	0.86	4.298E-03
	I-132	ND	—	—	1.720E-03	3.821E-05	0.02	2.825E-03
	I-133	3.304E-06	4.478E-06	0.00	ND	—	—	5.246E-05
陰性	Cs-134	3.314E-04	1.660E-05	0.17	3.343E-04	1.666E-05	0.17	4.663E-04
	Cs-136	6.107E-05	1.299E-05	0.01	5.882E-05	1.012E-05	0.01	8.416E-05
	Cs-137	3.232E-04	1.702E-05	0.11	3.147E-04	1.683E-05	0.10	4.306E-04
	Cl-38m	ND	—	—	ND	—	—	3.180E-03
	Cl-38	ND	—	—	ND	—	—	3.292E-02

図はWiley-Interscience Table of Isotopes
CD-ROM Eighth Edition: 1998より転載

<http://lockerz.com/s/91019372>
(plixi.com は、現在lockerz.com に変わっている)

<http://lockerz.com/s/88437524>

38Cl誤検出にまつわる話(続き)

<http://www.meti.go.jp/press/2011/04/20110420006/20110420006-7.pdf>

6ページ目

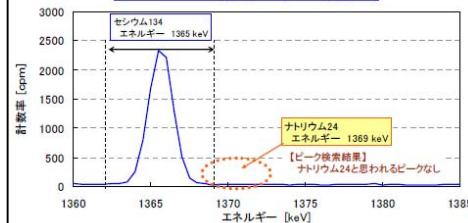
(参考) 福島第一 1号機タービン建屋地下1階のたまり水 Cl-38核種分析の評価について

○再評価結果

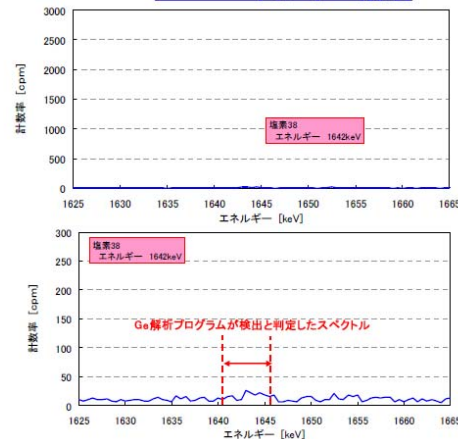
福島第一1号機では、3月23日～25日の間、原子炉に海水注入しているため、Cl-37(n, γ)Cl-38反応により、塩素38が生成されているとの可能性はあった。

しかし、この場合、塩素と同様に炉内に持ち込まれたナトリウムも放射化され、塩素38より半減期が長いナトリウム24も検出されることが推測されるものの、ナトリウム24は検出されていない。このため、Cl-38が生成されたとは考えにくく、他の核種の散乱線などの影響でわずかに検出限界を超えたものと推測している。

Na-24エネルギー領域



Cl-38エネルギー領域



縮尺: 1/10

注：Cl-37(n, γ)Cl-38 反応というのは、中性子がCl-37にあたり、Cl-38と γ 線が出るという反応です。Cl-38が出来るのは、海水中に含まれる塩化ナトリウム (NaCl) が中性子と反応したということを意味します。中性子があるということは、原子炉内で再臨界が起こって核分裂反応が起きているの証拠だと騒がれたのですが、データを見なかったこととデータを総合的に判断しなかった (Na-24が検出されていないことを無視していた) ことが間違いの原因です。

2011年4月20日

東京電力が同じデータを再解析した結果についての発表

Cl-38は検出限界以下

http://www.tepco.co.jp/cc/press/betu11_j/images/110420j.pdf

1ページ目

福島第一 1号機タービン建屋地下階の溜まり水の核種分析結果

	(再評価)	(3月25日参考配布)	(変更理由) ※
採取場所	福島第一1号機タービン地下溜まり水 (1回目)	福島第一1号機タービン地下溜まり水 (1回目)	—
試料採取日	平成23年3月24日	平成23年3月24日	—
検出核種 (半減期)	試料濃度 (Bq/cm ³)	試料濃度 (Bq/cm ³)	—
Cl-38 (約37分)	検出限界未満	1.6×10^5	①
As-74 (約18日)	検出限界未満	3.9×10^2	①
Y-91 (約59日)	5.2×10^4	5.2×10^4	—
I-131 (約8日)	2.1×10^5	2.1×10^5	—
Cs-134 (約2年)	1.6×10^5	1.6×10^5	—
Cs-136 (約13日)	1.7×10^4	1.7×10^4	—
Cs-137 (約30年)	1.8×10^5	1.8×10^5	③
La-140 (約2日)	3.0×10^2	3.4×10^2	②

※再発防止対策に基づき、①主要ピークによる核種の同定及び放射能濃度の決定、②放射平衡を踏まえた放射能濃度の評価により再評価を実施。その他、③データの転記誤りの修正を実施。

ホール・ボディ・カウンター(WBC)

A社



椅子型

遮蔽がない
自分で遮蔽を用意するか、
バックグラウンドの放射線
レベルの低い場所に設置
しなければならない。

F社



ベッド型



チェア型
周りに遮蔽がある

C社

