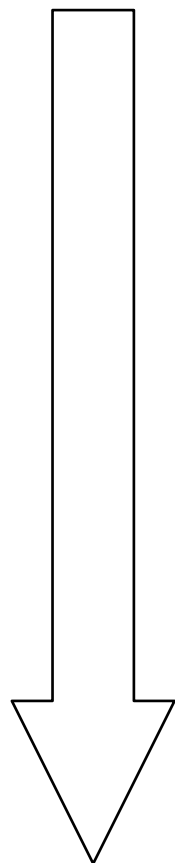


放射線・放射性核種に関する 基礎知識

東京大学大学院 農学生命科学研究科
放射性同位元素施設/放射線植物生理学研究室
廣瀬 農

本日の講義の流れ



放射線の基本的性質

～高いエネルギーで運動する粒子～

放射性核種の基本的性質

～不安定な原子核～

放射線測定的基础

～相互作用を捉える～

放射線の人体影響の基礎

～シーベルトの定義・計算法・活用法～

本日の講義の流れ

放射線の基本的性質

～高いエネルギーで運動する粒子～

放射線とはどんなもの？

放射線と物質の相互作用：荷電粒子・非荷電粒子

放射線と物質の相互作用の可視化：コンピューターシミュレーション

放射線の発生

放射性核種の基本的性質

～不安定な原子核～

Bqという単位：核種の量を壊変数で表す

半減期という単位：核種の不安定さの指標

放射性核種の原子核はなぜ不安定？

陽子数と中性子数がアンバランス： β 壊変

陽子数と中性子数の合計が大きすぎる： α 壊変

壊変で放出されるエネルギーの分配

放射性核種の生成：原子核の融合・分裂・衝突

放射線測定的基础

～相互作用を捉える～

電流を検出する：GM管・Ge半導体検出器

化学反応を検出する：霧箱・シンチレーション検出器
・イメージングプレート・CR-39

放射線の人体影響の基礎

～シーベルトの定義・計算法・活用法～

放射線の人体影響メカニズム

シーベルト（Sv）という単位：目的と計算法

2種類のシーベルト

シーベルト算出の実際

シーベルトとリスクの目安：相対評価

シーベルトとリスクの目安：絶対評価

リスク評価とトランスサイエンス

放射線の基本的性質

～高いエネルギーで運動する粒子～



あさりよしとお「放射線ってナニモノ？」

放射線とはどんなもの？

- 1) 原子よりも小さい何らかの粒子が…
- 2) 通常の数千倍以上のエネルギーを持って運動している場合
- 3) 放射線としての性質を示す

1) 原子よりも小さい何らかの粒子が...

「原子よりも小さい粒子」の例

原子核

陽子、中性子

電子、陽電子、 μ 粒子

光子

2) 通常の数千倍以上のエネルギーを持って
運動している場合

	粒子	エネルギー
可視光線	光子	2~3 eV
^{137}Cs の γ 線	光子	662 keV

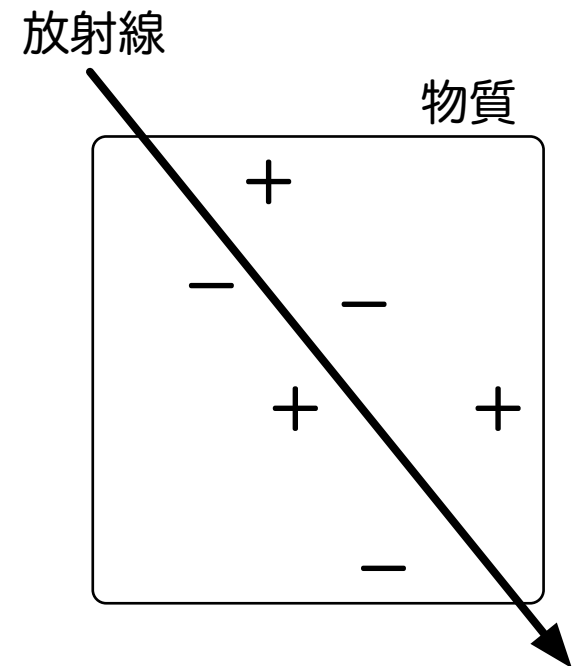
粒子は同じ

エネルギーは20~30万倍

3) 放射線としての性質を示す

放射線が物質を通過すると、物質中の原子を電離する（＝イオン化する）。

この「**電離を起こす性質**」が放射線の特徴で、人体影響を考慮する際、あるいは放射線を測定する際に重要。



放射線とはどんなもの？

- 1) 原子よりも小さい何らかの粒子が、
- 2) 通常の数千倍以上のエネルギーを持って運動している場合、
- 3) 放射線としての性質、すなわち、物質と相互作用して電離を起こす性質を示す。

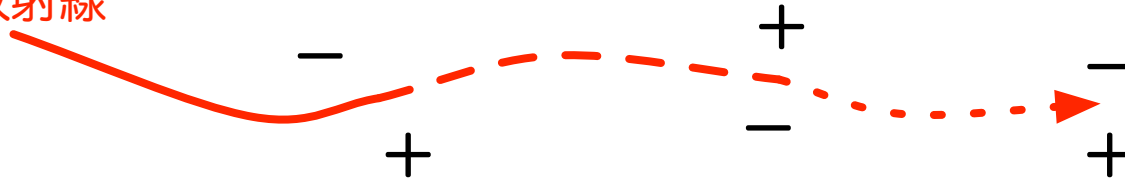
放射線と物質の相互作用

～荷電粒子の場合～

粒子に電荷が有る放射線の場合は、経路
近傍の原子を直接的に電離する。

荷電粒子の例：
Heの原子核、
陽子、電子など

荷電粒子の放射線



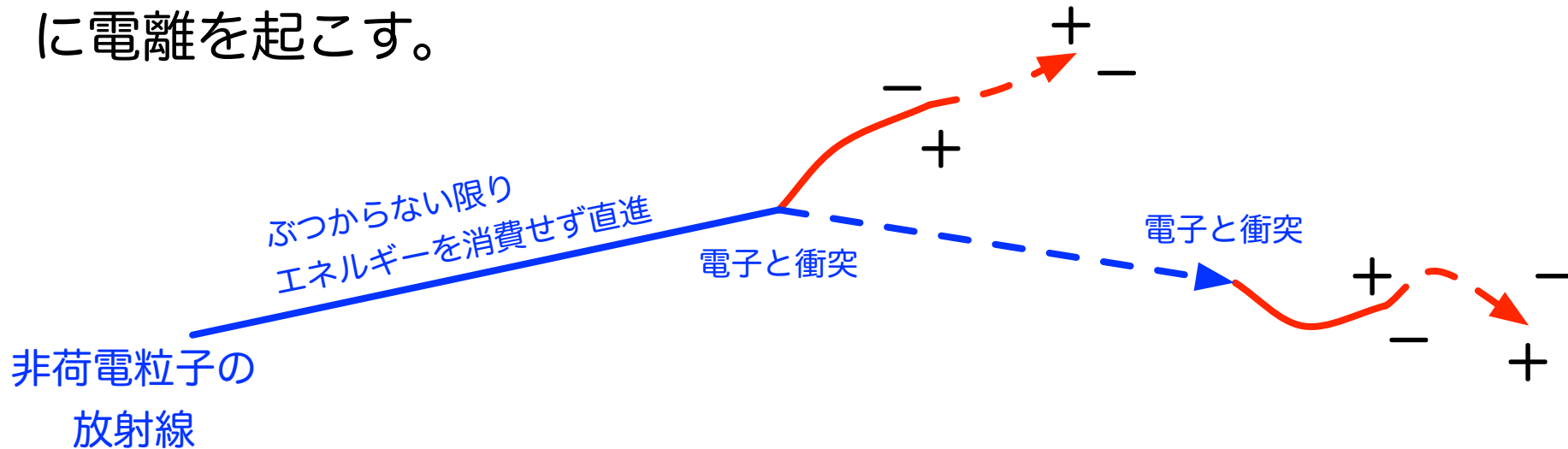
物質を電離することで、放射線の運動エネルギーが
徐々に消費され、最終的には放射線としての性質を
失う。

放射線と物質の相互作用

～非荷電粒子の場合～

粒子に電荷が無い放射線の場合、物質中で電荷を持つ粒子（電子や陽子）に衝突して運動エネルギーを与え、衝突された粒子が間接的に電離を起こす。

非荷電粒子の例：
光子、中性子など



別の粒子との衝突によって放射線の運動エネルギーが消費され、最終的には放射線としての性質を失う。

放射線と物質の相互作用

～まとめ～

粒子に電荷が有る場合は、経路に沿って直接的に電離を起こす。

粒子に電荷が無い場合、物質中で電荷を持つ粒子（電子や陽子）をはじき飛ばし、はじき飛ばされた粒子が間接的に電離を起こす。



直接・間接的に電離を起こすことで放射線の運動エネルギーが消費され、最終的には放射線としての性質を失う。

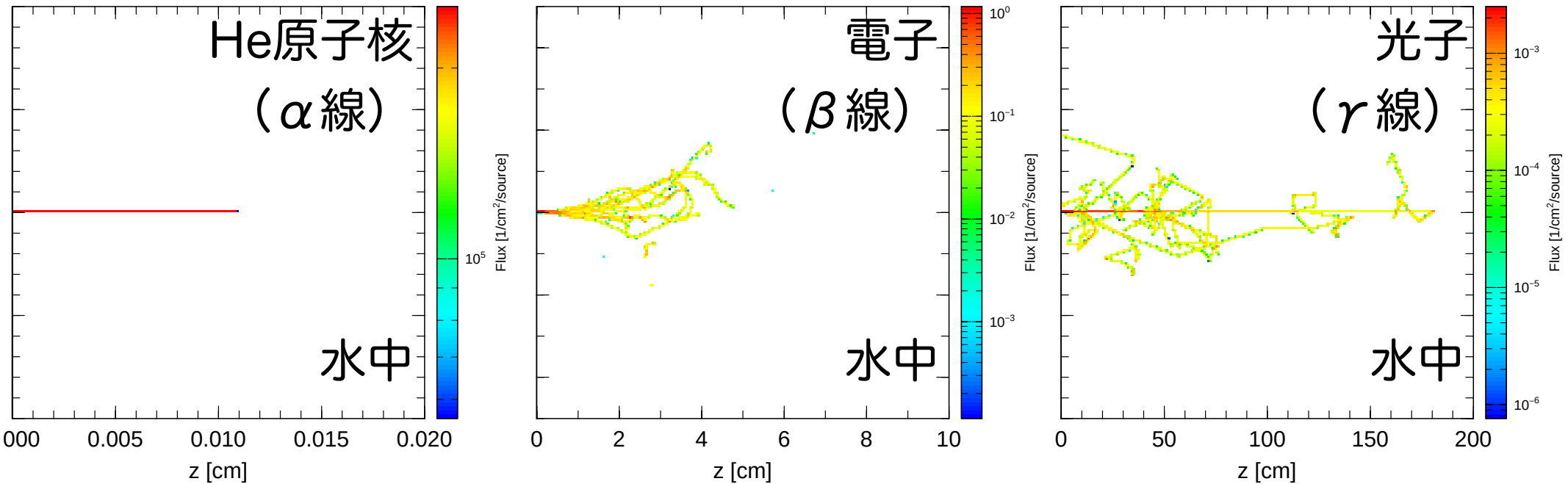
放射線と物質の相互作用の可視化

～コンピューターシミュレーション～

放射線は目に見えないが、放射線の物質中での挙動をコンピューターシミュレーションで可視化することはできる。

これから3枚のスライドでは、一般的な放射線の挙動をPHITSというソフトウェアで可視化した例を示す。

1) 粒子による飛跡の違い



10MeVの運動エネルギーを持つ放射線の水中の飛跡をコンピュータでシミュレーションした図（10回分の飛跡を重ねて表示）。

同じ運動エネルギーでも、粒子によって飛距離は大きく異なる。Heの原子核（ α 線）は飛跡が短かく、狭い範囲に集中してエネルギーを与える。逆に光子線（ γ 線やX線）は飛跡が長く、広い範囲に少しずつエネルギーを与える。



あさりよしとお「放射線ってナニモノ？」

余談：放射線の名前

α 粒子線 (=He線)

電子線

光子線

α 線

β 線

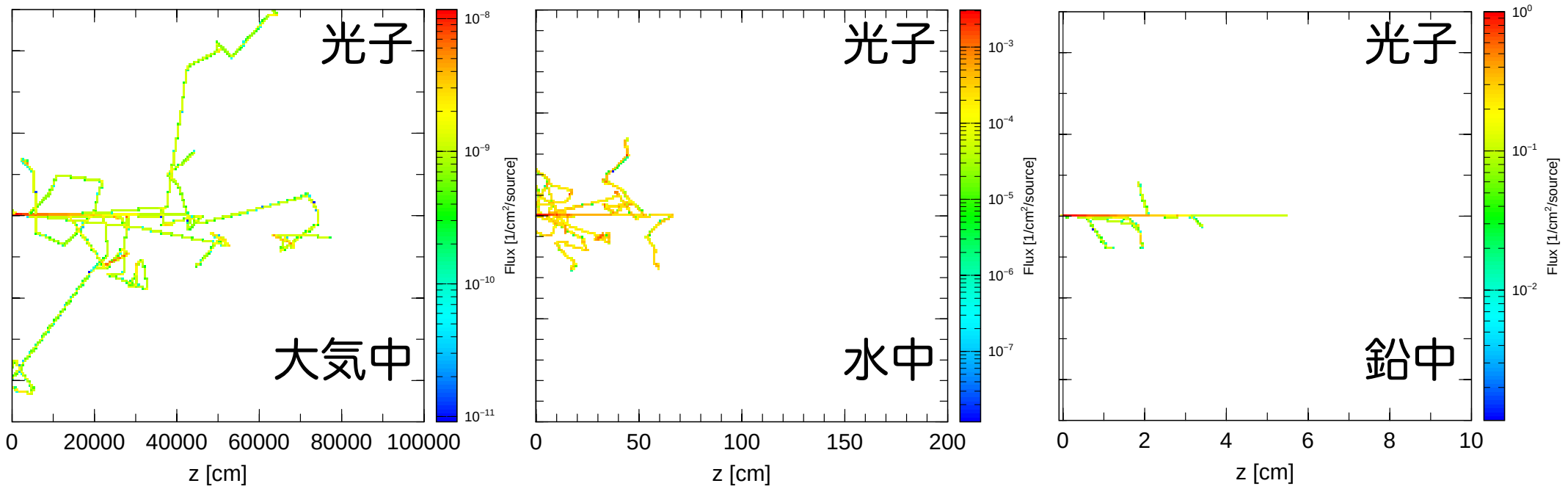
γ 線

X 線

原子核の壊変エネルギーで生じる放射線

電子の軌道遷移エネルギーで生じる放射線

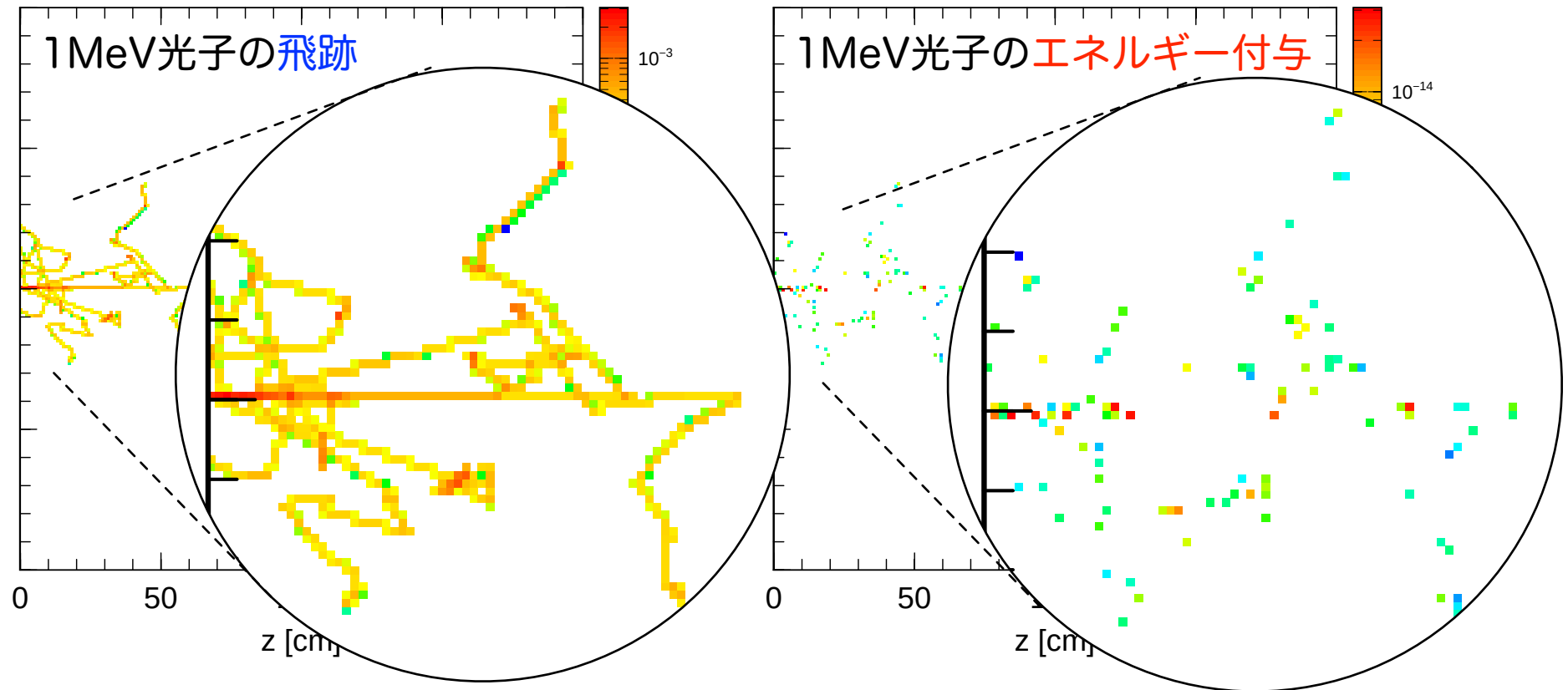
2) 物質による飛跡の違い



異なる物質中での1MeVの光子線の飛跡。

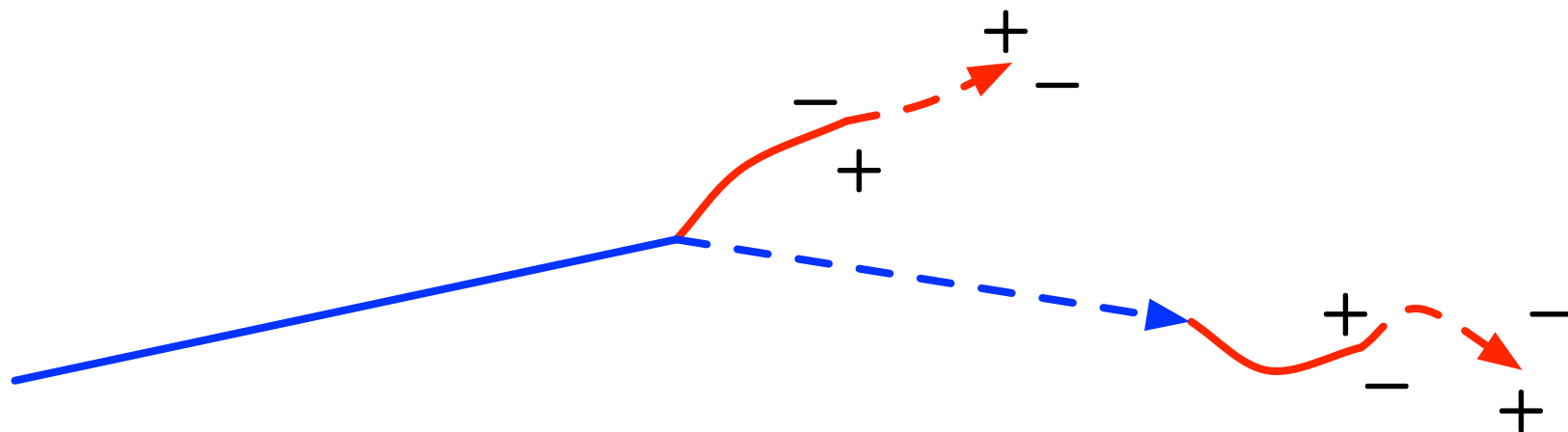
同じ粒子・同じ運動エネルギーの放射線でも、通過する物質によって飛距離は異なる。

3) 光子線の飛跡とエネルギー付与



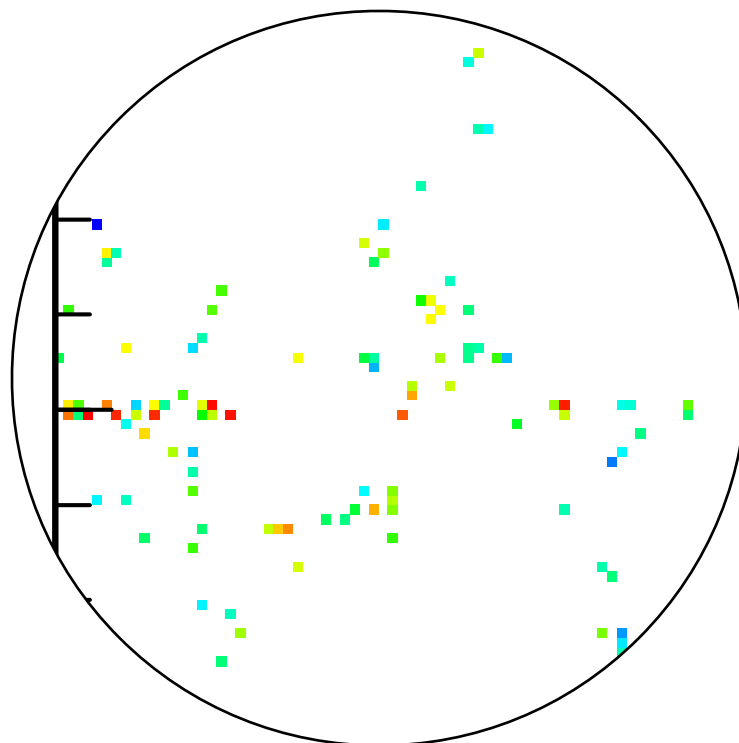
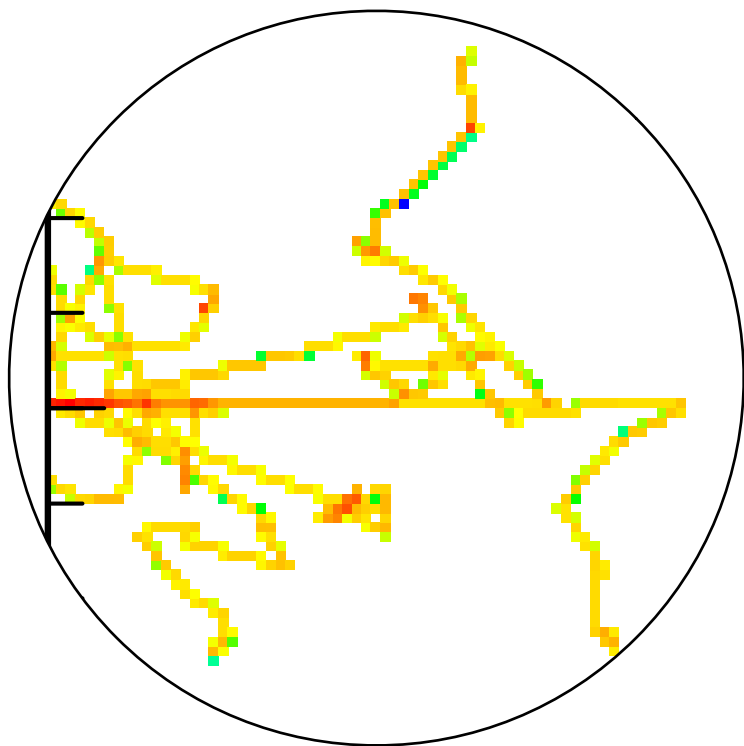
光子線は電荷が無いいため、飛跡そのものには電離を起こさない（エネルギーを付与しない）。

光子線で弾き出された電子が間接的に電離を起こすため、光子によって生じる電離は広範囲に点状（より正確には短い線状）に散らばる。



光子自身の飛跡は青い線

エネルギーが付与されるのは赤い線
(光子線の曲がる位置で生じる)



放射線の発生

～何からエネルギーを得て放射線となるか？～

発生源

エネルギーの由来

放射性核種

放射性核種（放射性同位体）が安定化する際に放出されるエネルギー。

放射線の発生

～何からエネルギーを得て放射線となるか？～

発生源

エネルギーの由来

放射性核種

放射性核種（放射性同位体）が安定化する際に放出されるエネルギー。

加速器

荷電粒子を電場で加速し、運動エネルギーを与えることで放射線とする。この加速した荷電粒子のエネルギーを使って、光子線を発生させることもできる。

放射線の発生

～何からエネルギーを得て放射線となるか？～

発生源

エネルギーの由来

放射性核種

放射性核種（放射性同位体）が安定化する際に放出されるエネルギー。

加速器

荷電粒子を電場で加速し、運動エネルギーを与えることで放射線とする。この加速した荷電粒子のエネルギーを使って、光子線を発生させることもできる。

原子炉

核分裂に伴って中性子線が放出される。

放射線の発生

～何からエネルギーを得て放射線となるか？～

発生源

エネルギーの由来

放射性核種

放射性核種（放射性同位体）が安定化する際に放出されるエネルギー。

加速器

荷電粒子を電場で加速し、運動エネルギーを与えることで放射線とする。この加速した荷電粒子のエネルギーを使って、光子線を発生させることもできる。

原子炉

核分裂に伴って中性子線が放出される。

宇宙線

一次宇宙線の由来の詳細は未解明。地上まで届くのは、一次宇宙線と大気の相互作用で生じた二次的な線が大部分。

放射性核種の基本的性質

～不安定な原子核～

ある原子の原子核が**不安定**な場合、余分なエネルギーを何らかの粒子に与えて放出し、より安定な状態に変化する。



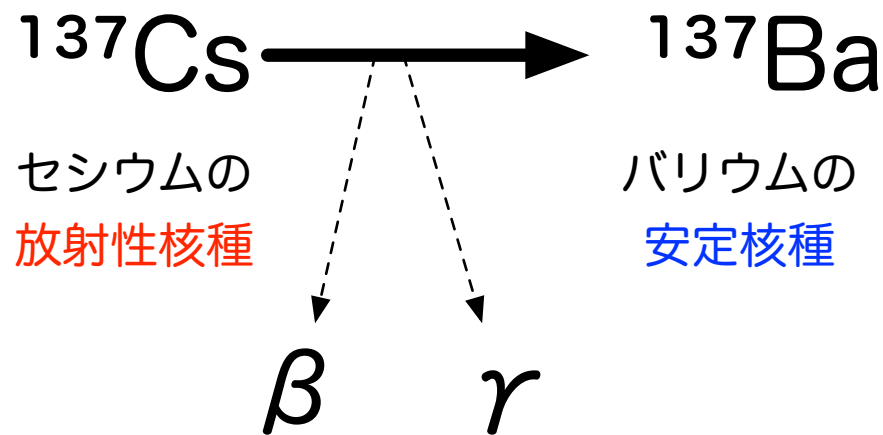
あさりよしとお「放射線ってナニモノ？」

放射性核種の基本的性質

～不安定な原子核～

ある原子の原子核が**不安定**な場合、余分なエネルギーを何らかの粒子に与えて放出し、より安定な状態に変化する。

この変化を**壊変**と呼び、壊変する原子核を**放射性核種**（**放射性同位体**）という。エネルギーを与えられた粒子が放射線となる。



^{137}Cs の場合、余分なエネルギーは β 線および γ 線として放出される。
 β 線は電子、 γ 線は光子の放射線。

Bqという単位

～核種の量を壊変回数で表す～

Bqとは、放射性核種の量を1秒当たりの壊変回数で表す単位。

1秒あたり1%の確率で壊変する
放射性同位体が100個ある場合 ----- 1 Bq

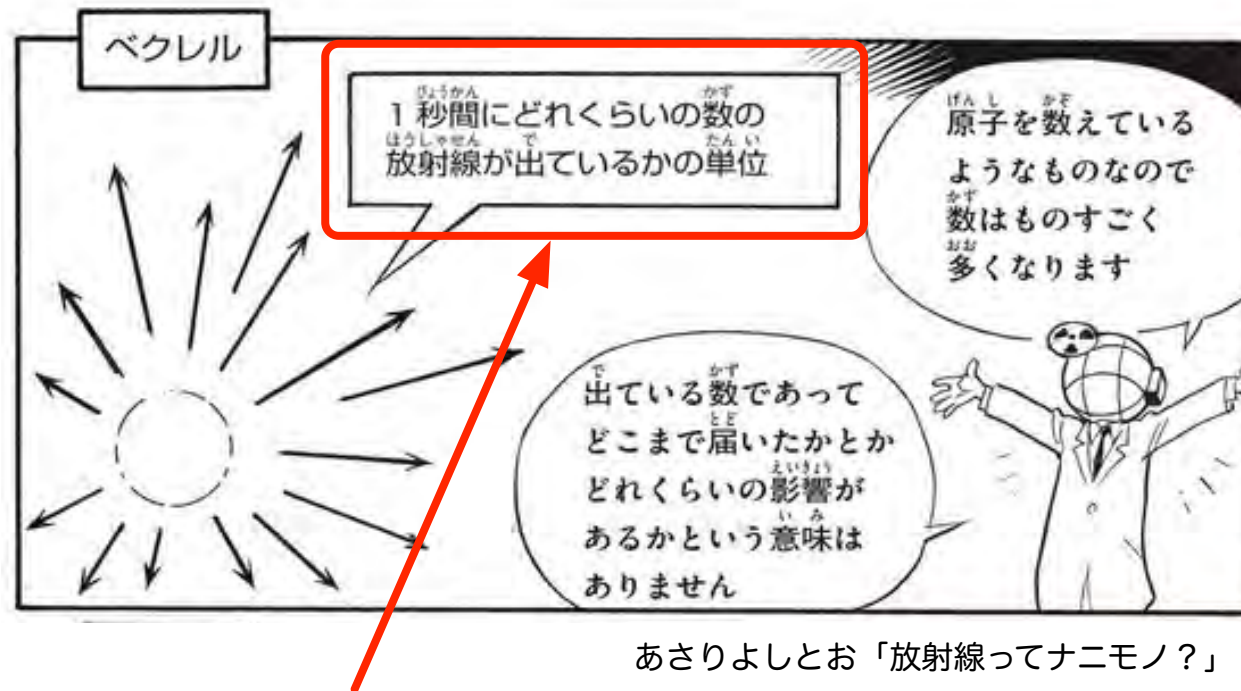
→ 1秒あたり1%の確率で壊変する
放射性同位体が200個ある場合 ----- 2 Bq

→ 1秒あたり2%の確率で壊変する
放射性同位体が100個ある場合 ----- 2 Bq

ちなみに、 ^{137}Cs は約13億7千万個の原子が存在すると1Bq。

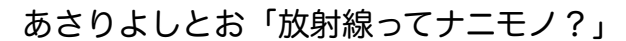
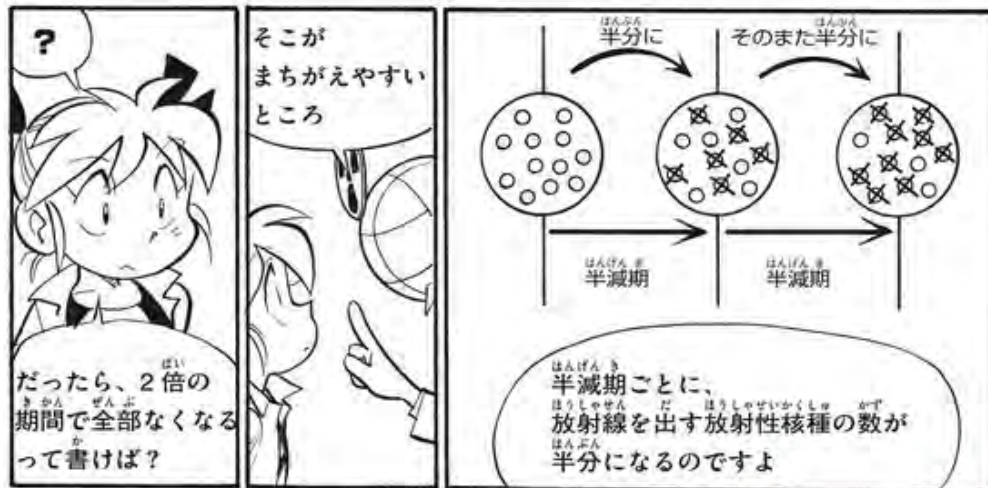
Bqについて補足

Bqとは、放射性核種の量を1秒当たりの**壊変回数**で表す単位。



1壊変あたり1本の放射線が出る核種ではこの記述で良いが、そうでは無い核種もあることに注意（例えば ^{137}Cs の662keVの γ 線は1壊変あたり0.85本）。

～核種の不安定さを表す単位～



$(1/2)^{10} = 1/1024$ なので、
10半減期で約1/1000と覚えて
おくと実用上便利。

例：半減期2年の ^{134}Cs は、20年間で約1/1000に減少する。

不安定な原子核は1秒あたりの壊変確率が高く、半減期が短い。

放射性核種の原子核はなぜ不安定？

～ α 壊変と β 壊変～

原子核が安定であるには、1) 陽子と中性子の比が適正である、
2) 陽子と中性子の合計 (= 質量数) が大きすぎない、という2つの条件が必要と考えられている。

陽子数と中性子数がアンバランス

～ β 壊変～

原子核が安定であるには、1) 陽子と中性子の比が適正である、
2) 陽子と中性子の合計 (= 質量数) が大きすぎない、という2つの条件が必要と考えられている。

原発事故で放出された核種の大部分 (^{90}Sr 、 ^{131}I 、 ^{137}Cs など) は中性子が多すぎる。

このため、中性子が陽子に変わり、余った電子が放出される β 壊変によって安定化する。

β 壊変

中性子 $\rightarrow$ 陽子 + 電子

0

+1

-1

陽子数と中性子数の合計が大きすぎる

～ α 壊変～

原子核が安定であるには、1) 陽子と中性子の比が適正である、
2) 陽子と中性子の合計 (= 質量数) が大きすぎない、という2つの条件が必要と考えられている。

例えば、代表的な天然核種である ^{238}U や ^{232}Th は、**質量数が大きすぎる** (質量数が206より大きい原子は不安定)。

このため、陽子2個と中性子2個 (= ヘリウムの原子核) を放出する **α 壊変**を繰り返し、少しずつ小さい原子核となって安定化して行く。

※時間があれば、この法則を「核図表」で説明します。

壊変で放出されるエネルギーの分配

～ α 、 β 、 γ （複数回）への分配～

ある放射性核種が壊変する際に放出される総エネルギーは一定だが、このエネルギーは様々な放射線に分配される。

例えば ^{134}Cs の β 壊変に伴って放出される総エネルギーは2.06 MeV。この一部が壊変で生じた電子の運動エネルギー（※）となり、 β 線が発生する。

残りのエネルギーは（複数の） γ 線として放出される。

※正確には電子と同時に生じる反電子ニュートリノとエネルギーを分けあう。

β 線のエネルギーが一定ではなく、核種判別に利用しにくいのはこのためである。

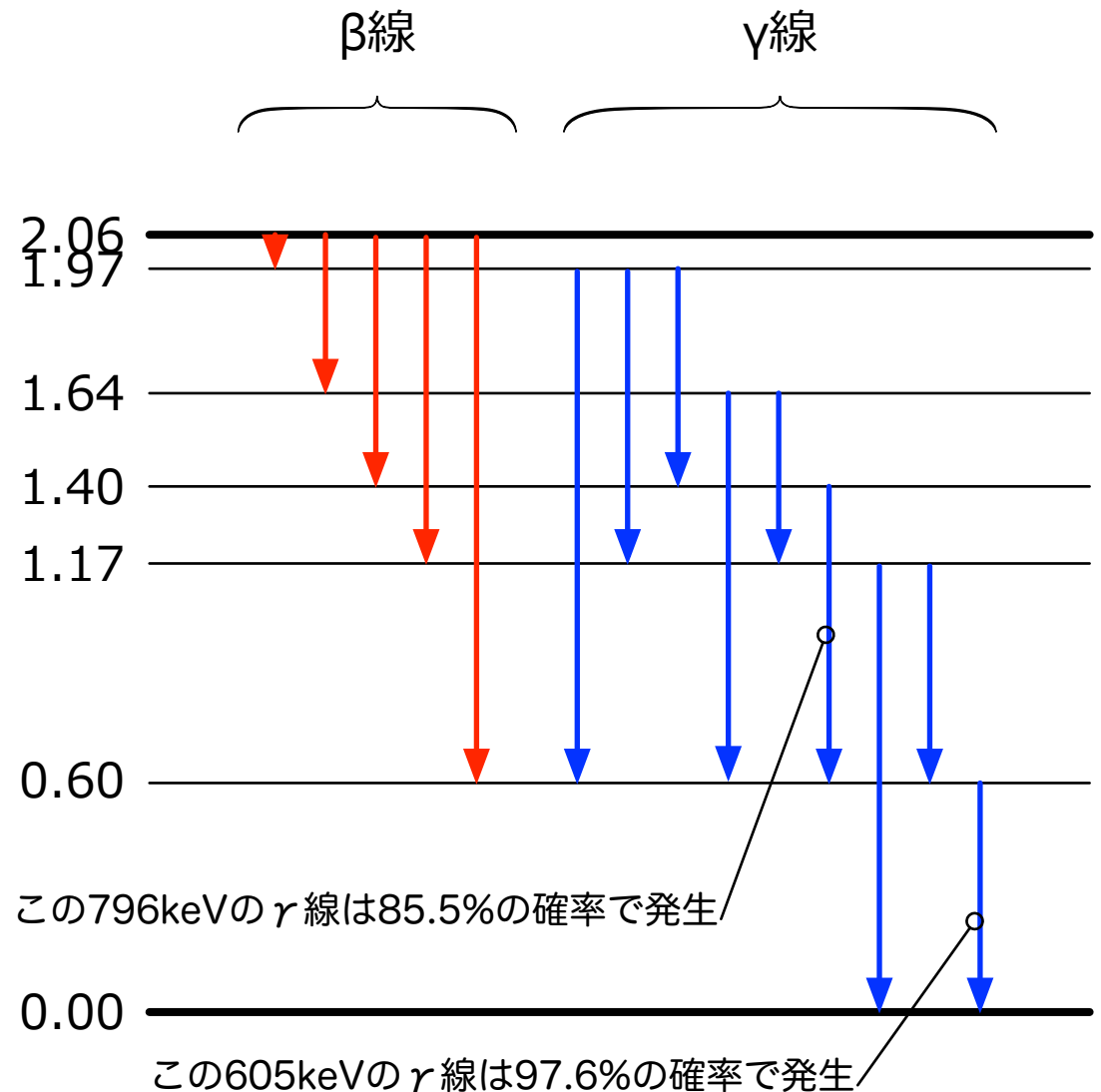
壊変で放出されるエネルギーの分配

～ α 、 β 、 γ （複数回）への分配～

1回の壊変によって、各エネルギーの α 、 β 、 γ 線が放出される確率は一定である。

エネルギー分解能の高いGe半導体検出器等を用いて γ 線スペクトルを解析することで、試料に含まれる γ 線放出核種を特定できる。

Ge半導体検出器で796keVと605keVの γ 線が85.5:97.6の比で観測された場合、 ^{134}Cs が存在する可能性が高い。

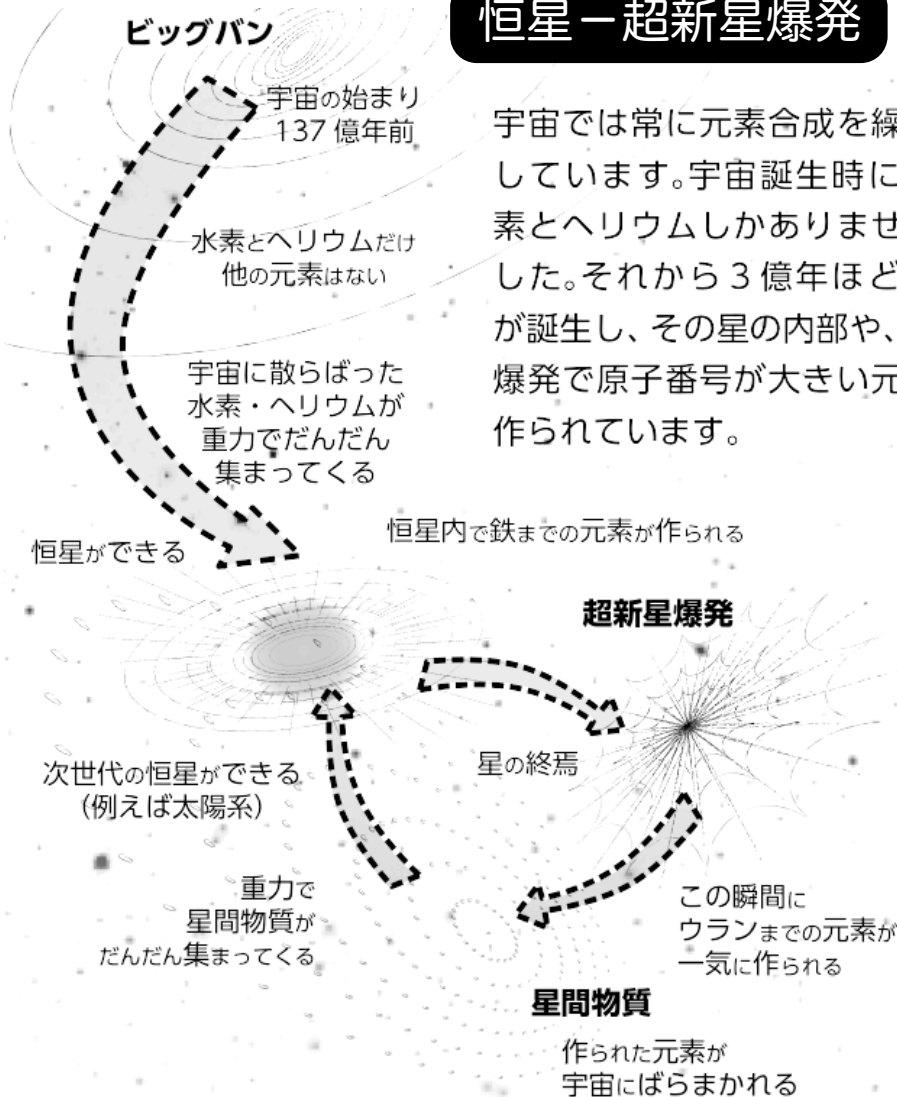


放射性核種の生成

～原子核の融合・分裂・衝突～

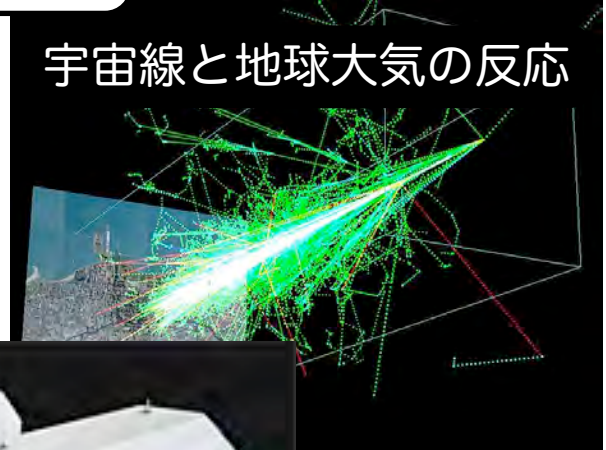
恒星－超新星爆発

宇宙では常に元素合成を繰り返しています。宇宙誕生時には水素とヘリウムしかありませんでした。それから3億年ほどで星が誕生し、その星の内部や、星の爆発で原子番号が大きい元素は作られています。

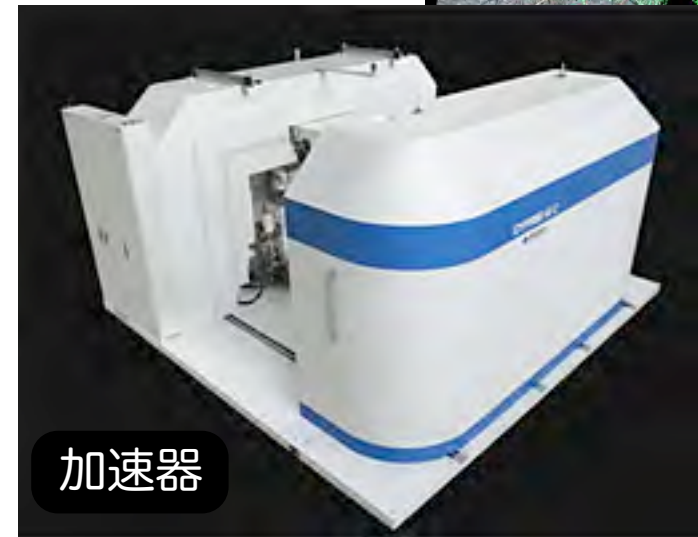


http://www.rarf.riken.go.jp/pub/enjoy/kakuzu/kakuzu_web.pdf

宇宙線と地球大気との反応

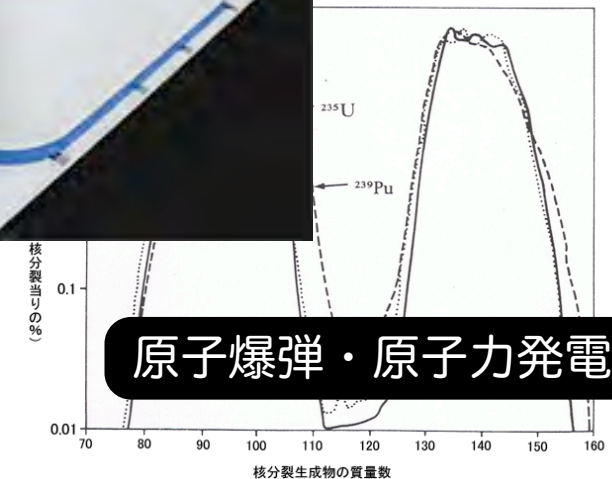


https://en.wikipedia.org/wiki/Air_shower_%28physics%29



加速器

<http://www.shi.co.jp/products/medical/cyclotron/>



原子爆弾・原子力発電

図1 核分裂生成物の質量数分布

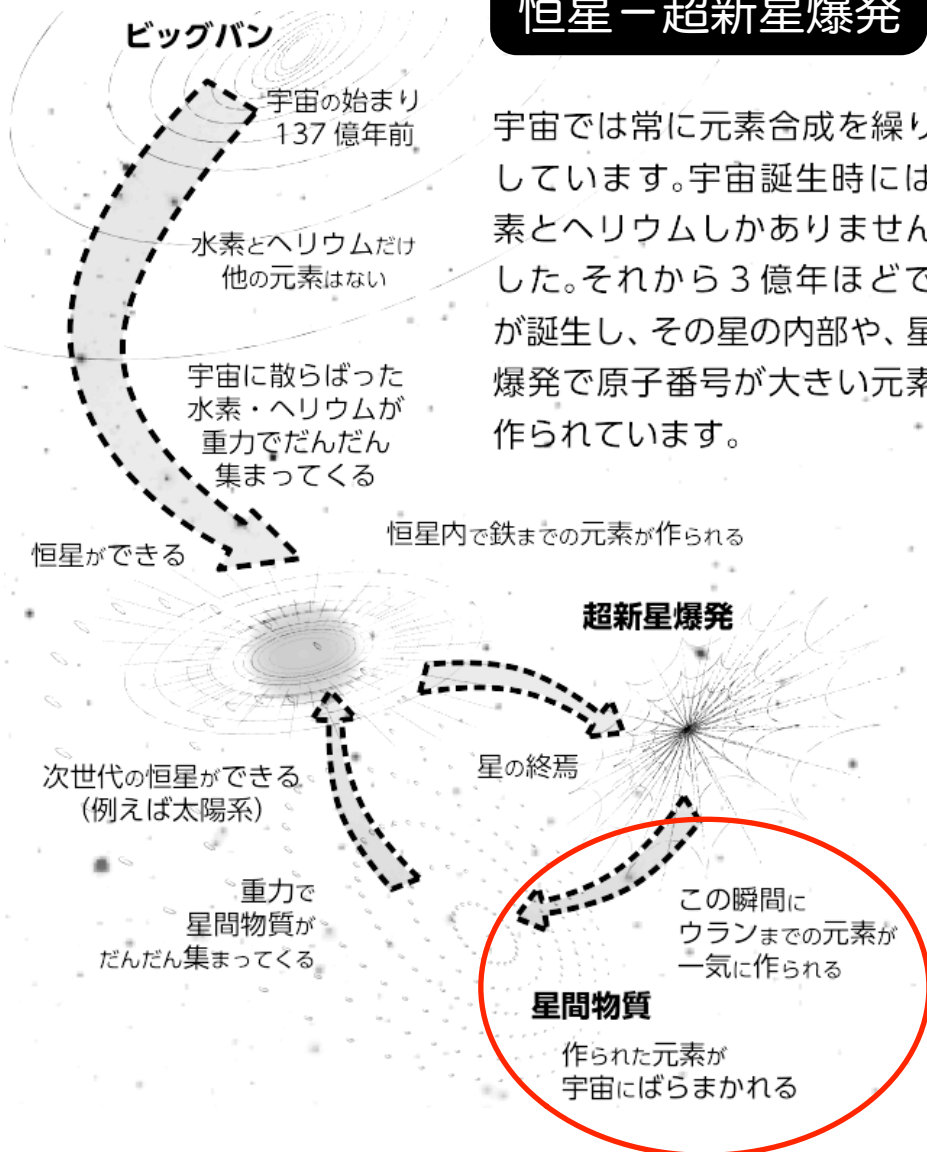
[出典]W.マーシャル編:原子炉技術の発展(上)、裳華房、p.72

放射性核種の生成

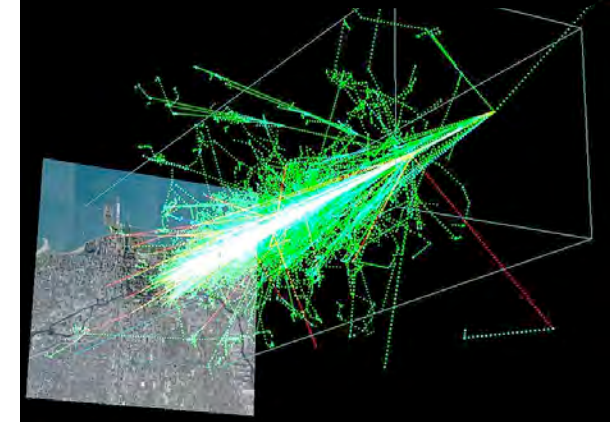
～原子核の融合・分裂・衝突～

恒星－超新星爆発

宇宙では常に元素合成を繰り返しています。宇宙誕生時には水素とヘリウムしかありませんでした。それから3億年ほどで星が誕生し、その星の内部や、星の爆発で原子番号が大きい元素は作られています。



宇宙線と地球大気との反応



大気中で生成する天然核種

→ ^{14}C など

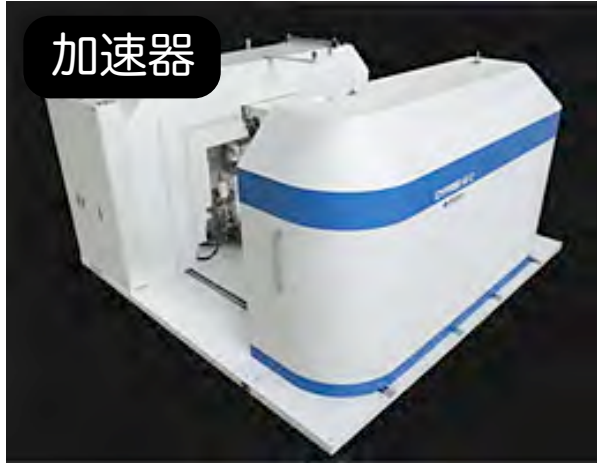
地球誕生時に取り込まれ、
まだ残っている天然核種

→ ^{40}K 、 ^{232}Th 、 ^{238}U など

放射性核種の生成

～原子核の融合・分裂・衝突～

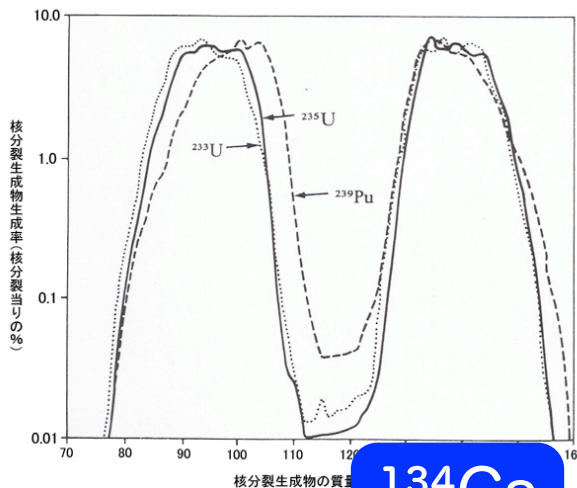
加速器



高速に加速した何らかの粒子を原子核に衝突させ、核反応を起こすことができる。医療用、研究用などの核種製造に使われている（癌の検査に使われる ^{18}F などが有名）。

^{90}Sr 、 ^{131}I 、 ^{137}Cs

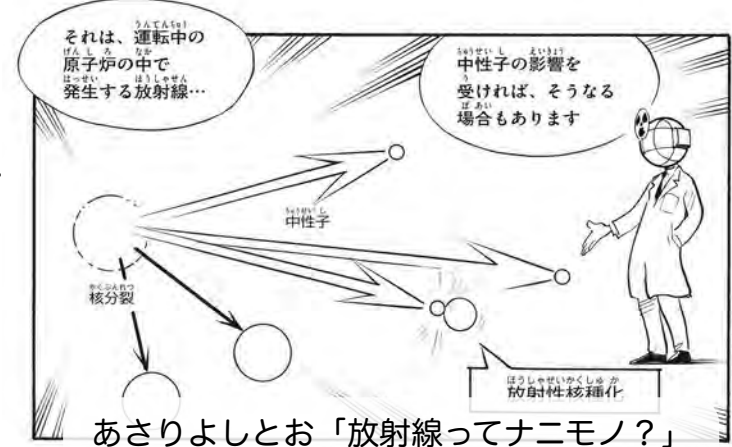
原子爆弾・原子力発電



^{134}Cs

核分裂で ^{235}U や ^{239}Pu の原子核が二つに割れると、中性子過剰な β 壊変核種となる。

原子力発電所では中性子捕獲によって β 壊変核種が生じる場合もある。



放射線測定の基本

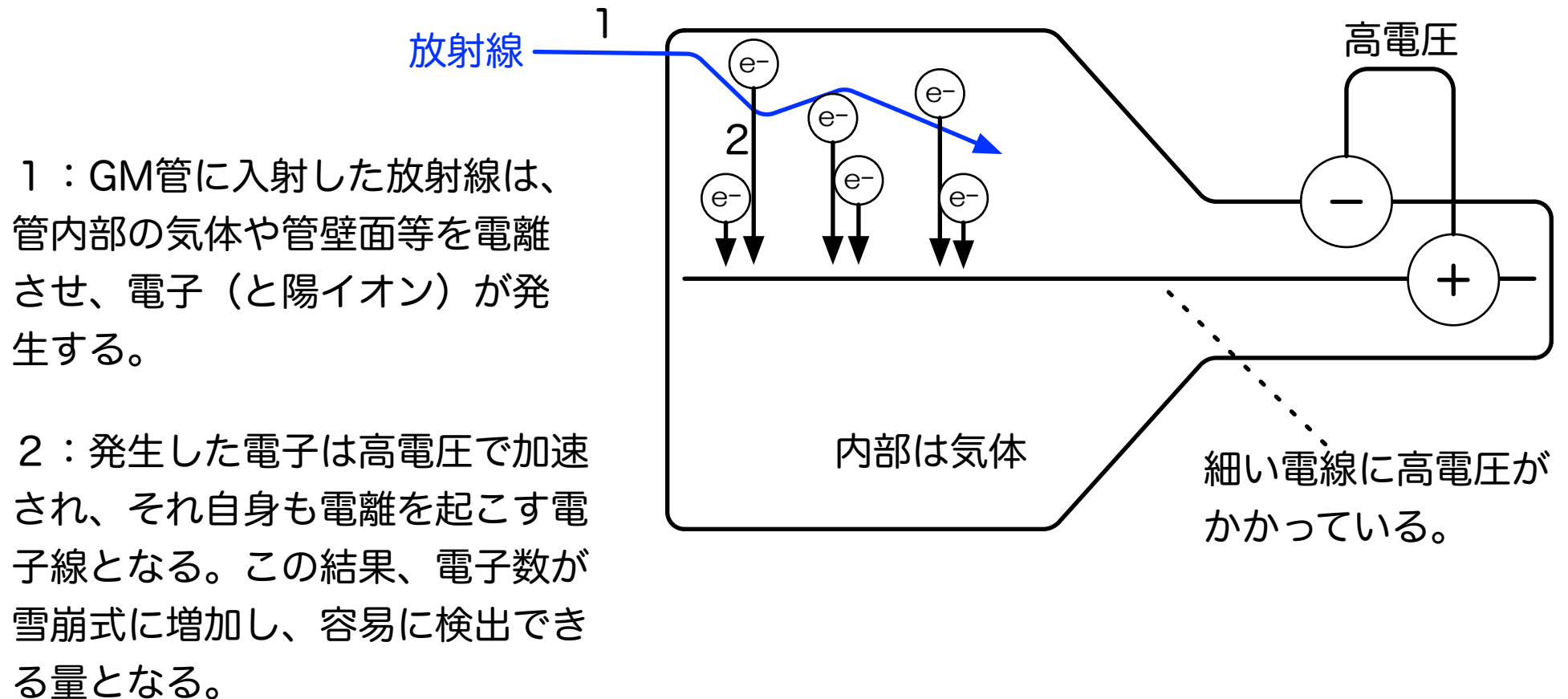
～相互作用を捉える～



あさりよしとお「放射線ってナニモノ？」

電流を検出する

～GM管～



※ GM管（ガイガー・ミュラー管）を用いていない放射線測定器を「ガイガーカウンター」と呼ぶのは不正確。

GM管実演



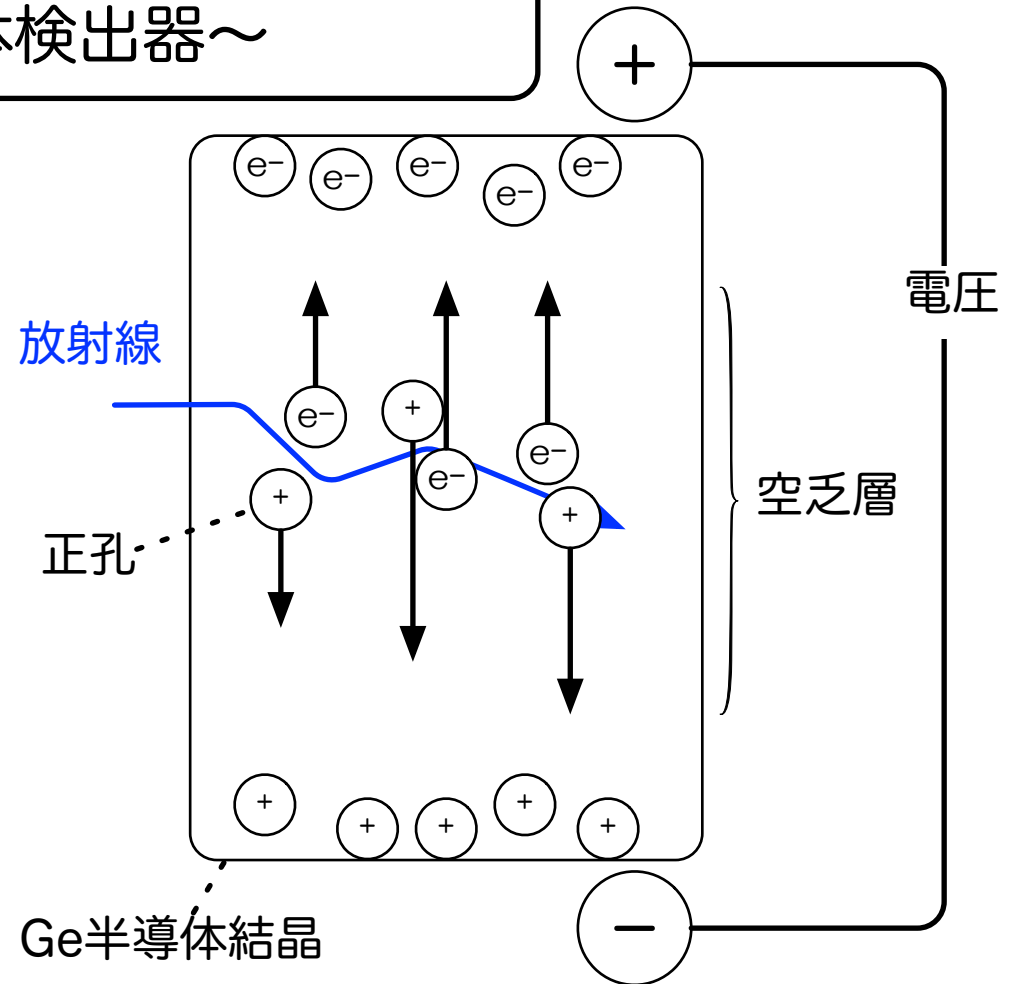
電流を検出する

～Ge半導体検出器～

Ge半導体結晶に逆電圧をかけることで、結晶内に空乏層を形成する。

空乏層に入射した放射線は、電離作用によって結晶内部に電子と正孔を発生させるため、パルス電流が生じる。この電流を測定することで放射線のエネルギーを測定できる。

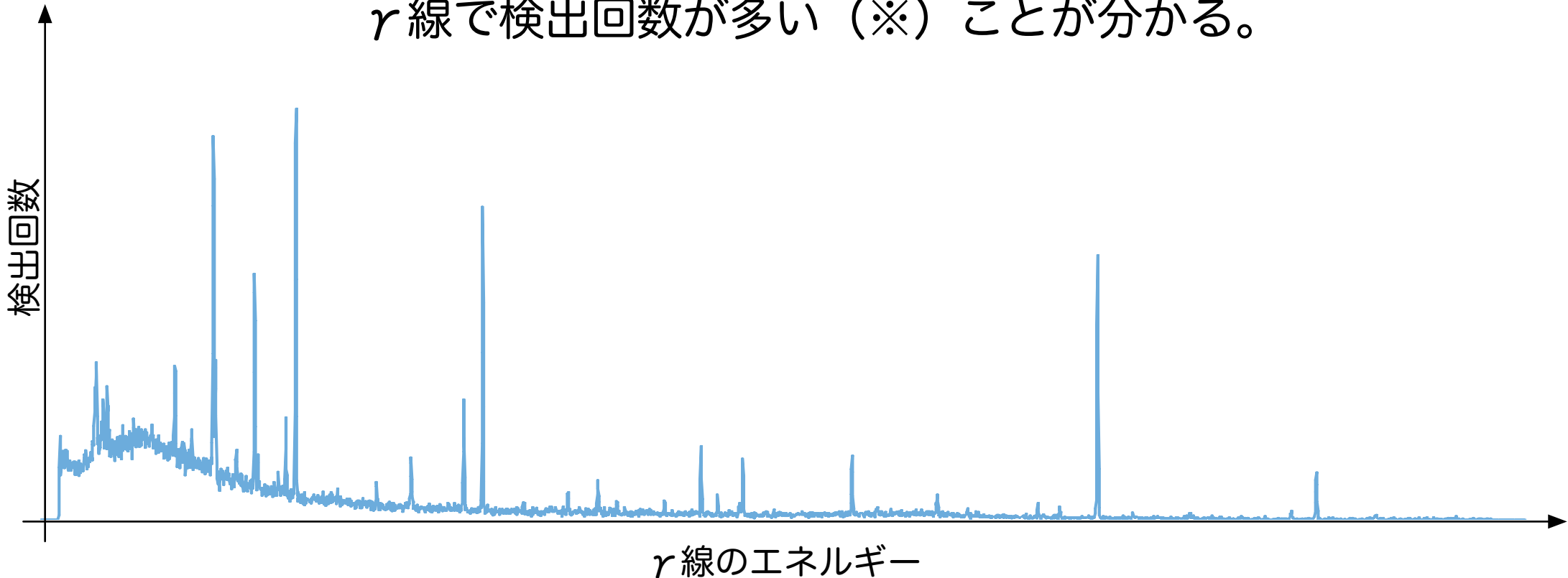
Ge半導体検出器は、**放射線のエネルギー**を正確に測定できる。このため**核種弁別能力**が高いことが最大の利点。ただし、高価であるため台数を揃えることが難しい。



電流を検出する

～Ge半導体検出器～

御影石（花崗岩）から出る γ 線を測定すると、特定のエネルギーの γ 線で検出回数が多い（※）ことが分かる。

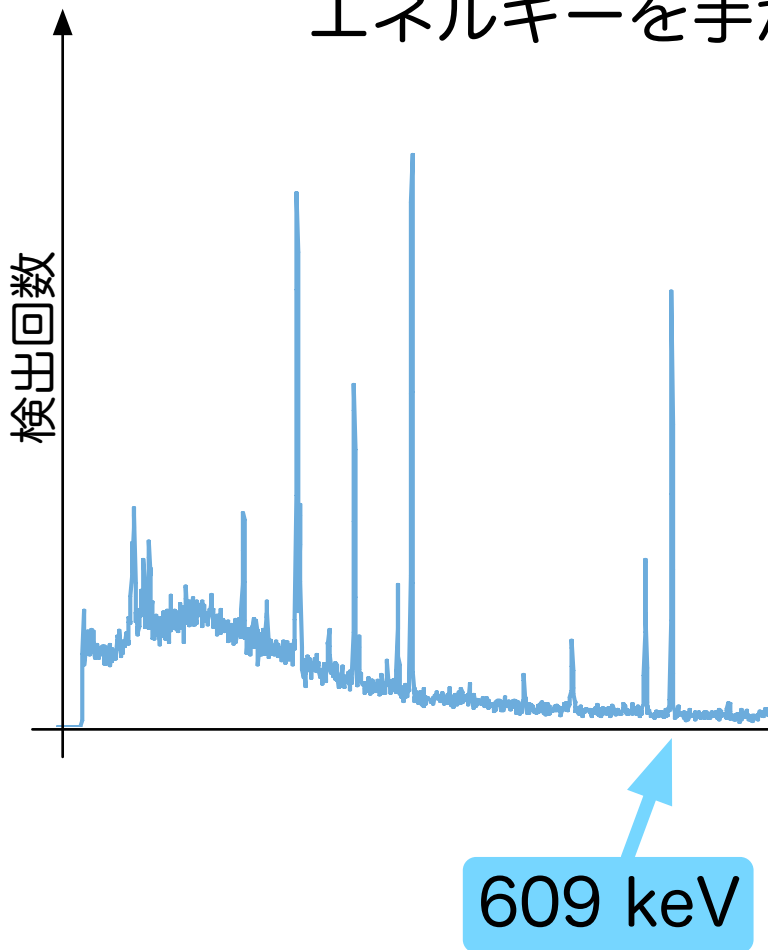


※このような図を「スペクトル」と言い、検出回数の多い場所を「ピーク」という

電流を検出する

～Ge半導体検出器～

核種ごとの γ 線のエネルギーはデータベース化されているため、エネルギーを手がかりに核種を同定することができる。

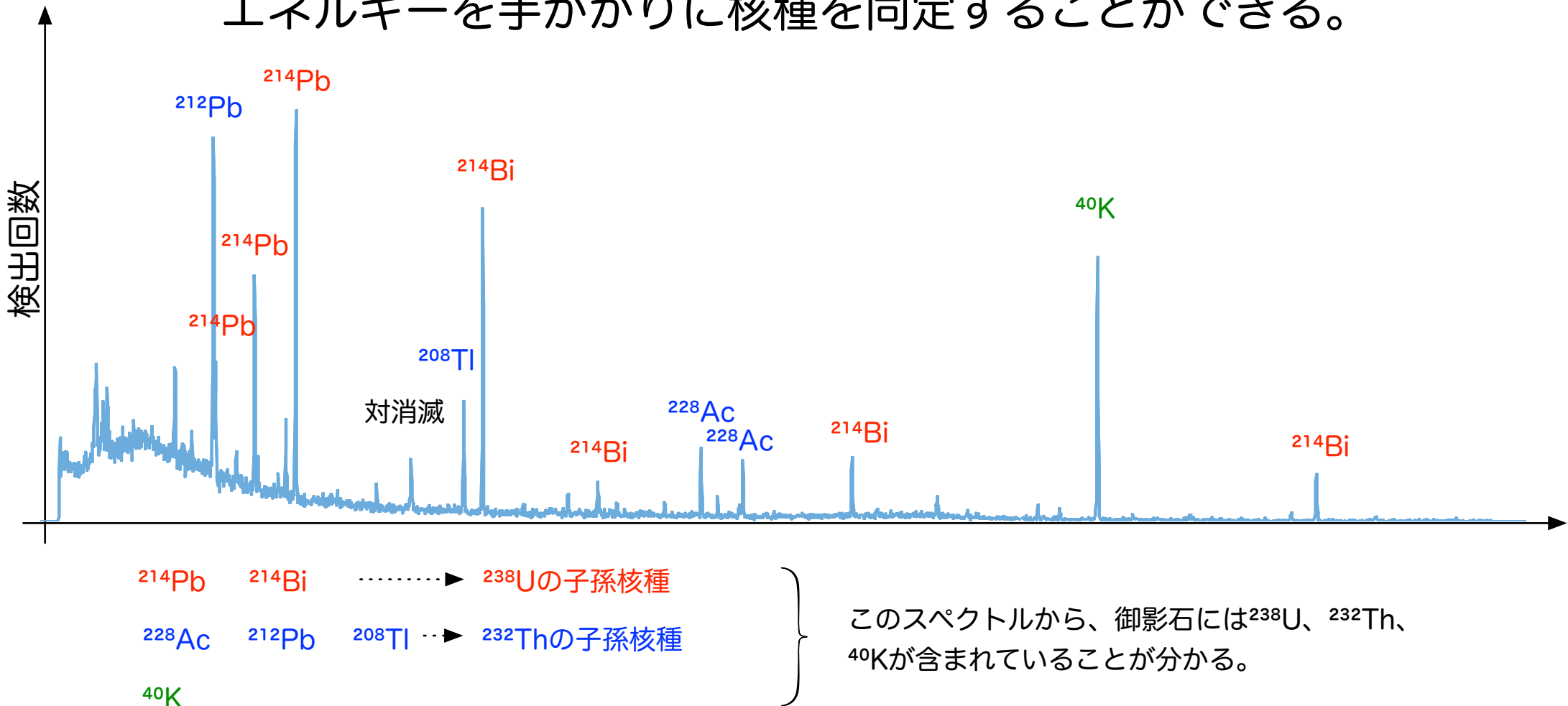


	核 種 名	半 減 期	エ ネ ル ギ ー (keV)		放 出 比
	^{214}Bi	19.7m	主要	609.312₁₀	46.1%
人工	^{103}Ru	252.23d	主要	610.33 ₂	5.4%
人工	$^{108\text{m}}\text{Ag}$		主要	614.37 ₁₀	89.7%
人工	^{106}Ru			616.33 ₁₇	0.8%
人工	$^{110\text{m}}\text{Ag}$			620.34 ₆₁	2.7%
人工	^{132}I			621.0 ₂	2.0%
人工	^{106}Ru		主要	622.2 ₃	9.8%
人工	^{132}I			630.22 ₉	13.7%
人工	^{125}Sb	60.203d		636.15 ₄	12.1%
人工	^{131}I			636.97 ₃₂	7.2%
人工	^{124}Sb			645.82 ₄	7.2%
人工	^{132}I			650.6 ₂	2.7%

電流を検出する

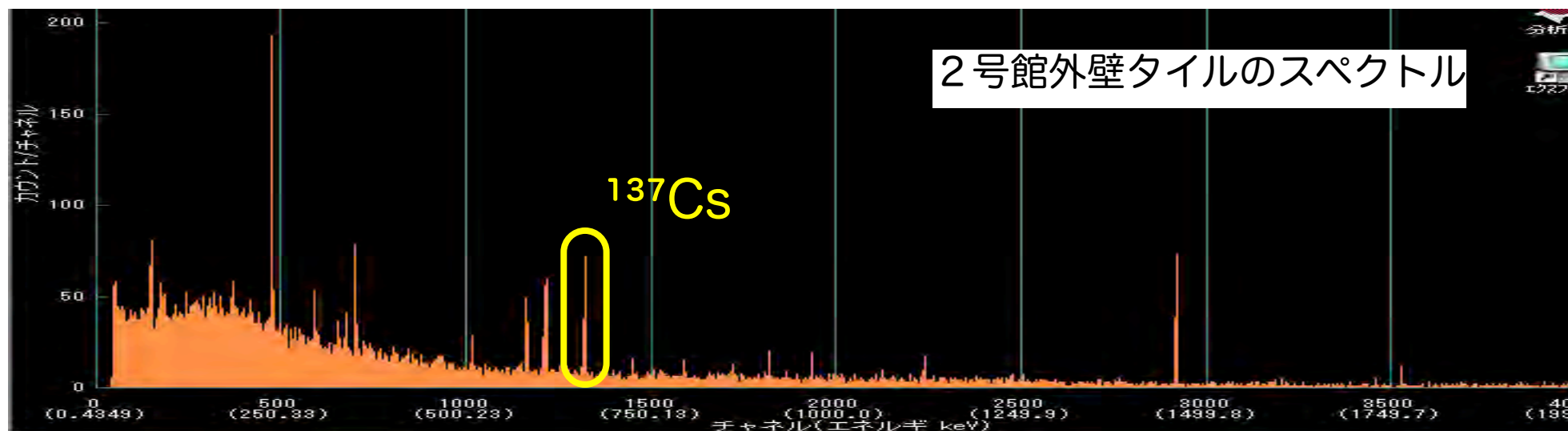
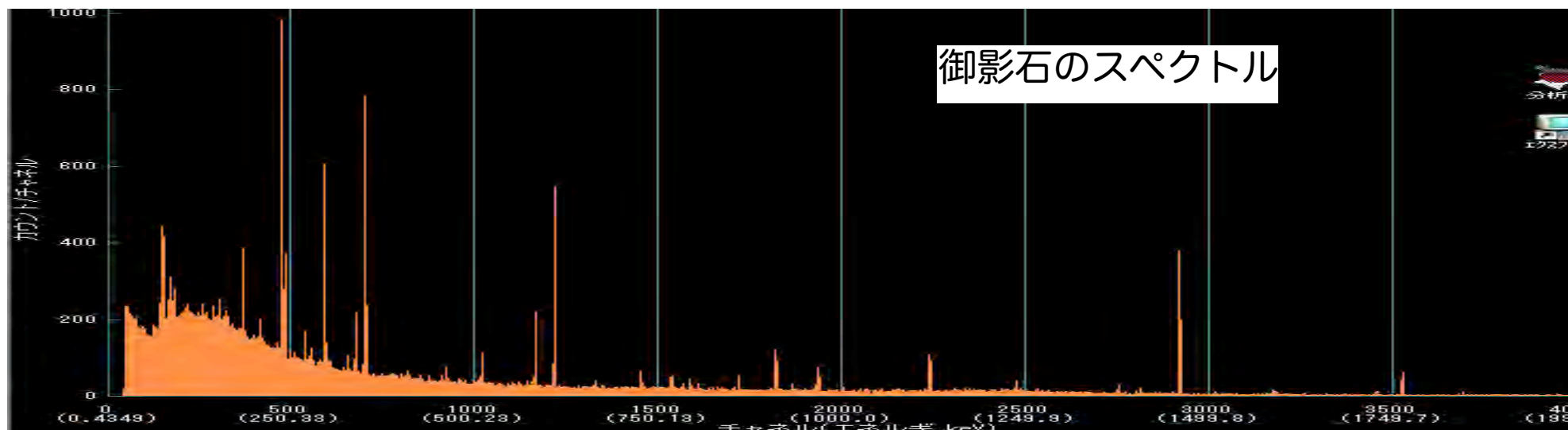
～Ge半導体検出器～

核種ごとの γ 線のエネルギーはデータベース化されているため、エネルギーを手がかりに核種を同定することができる。



Ge半導体検出器測定例

～御影石と2号館外壁のタイルの比較～



化学反応を検出する

～霧箱～

霧箱という装置を用いることで、以下の原理で荷電粒子の飛跡を観察できる。

- 1) エタノールの蒸気が過飽和となっている空間で電離が起きると、電離したイオンを凝結核として霧が発生する。
- 2) 粒子に電荷が有る放射線は、経路に沿って直接的に電離を起こす。
- 3) エタノールの蒸気が過飽和となっている空間を、粒子に電荷が有る放射線が通過すると、**放射線の経路に沿って霧が発生する。**

化学反応を検出する

～霧箱～

私たちがいるこの教室にも、宇宙線や大地・建造物からの放射線が飛びかっている。電荷を持つ宇宙線であるミューオン（ μ 粒子）や、大地放射線で弾き出された電子線などを観察できる。

霧箱で自然放射線を観察した際の様子を動画で紹介します。
希望者には講義終了後、実際にこの場で霧箱をお見せします。

化学反応を検出する

～霧箱～



上図の飛跡は御影石から捕集したラドン（恐らく ^{222}Rn ）の α 線によるもの。太く直線的な飛跡を示す。

右図の細く曲がりくねった飛跡は電子線によるもの。大地・宇宙からの γ 線によって弾き出された電子線か、何らかの天然核種から出た β 線が見えている。

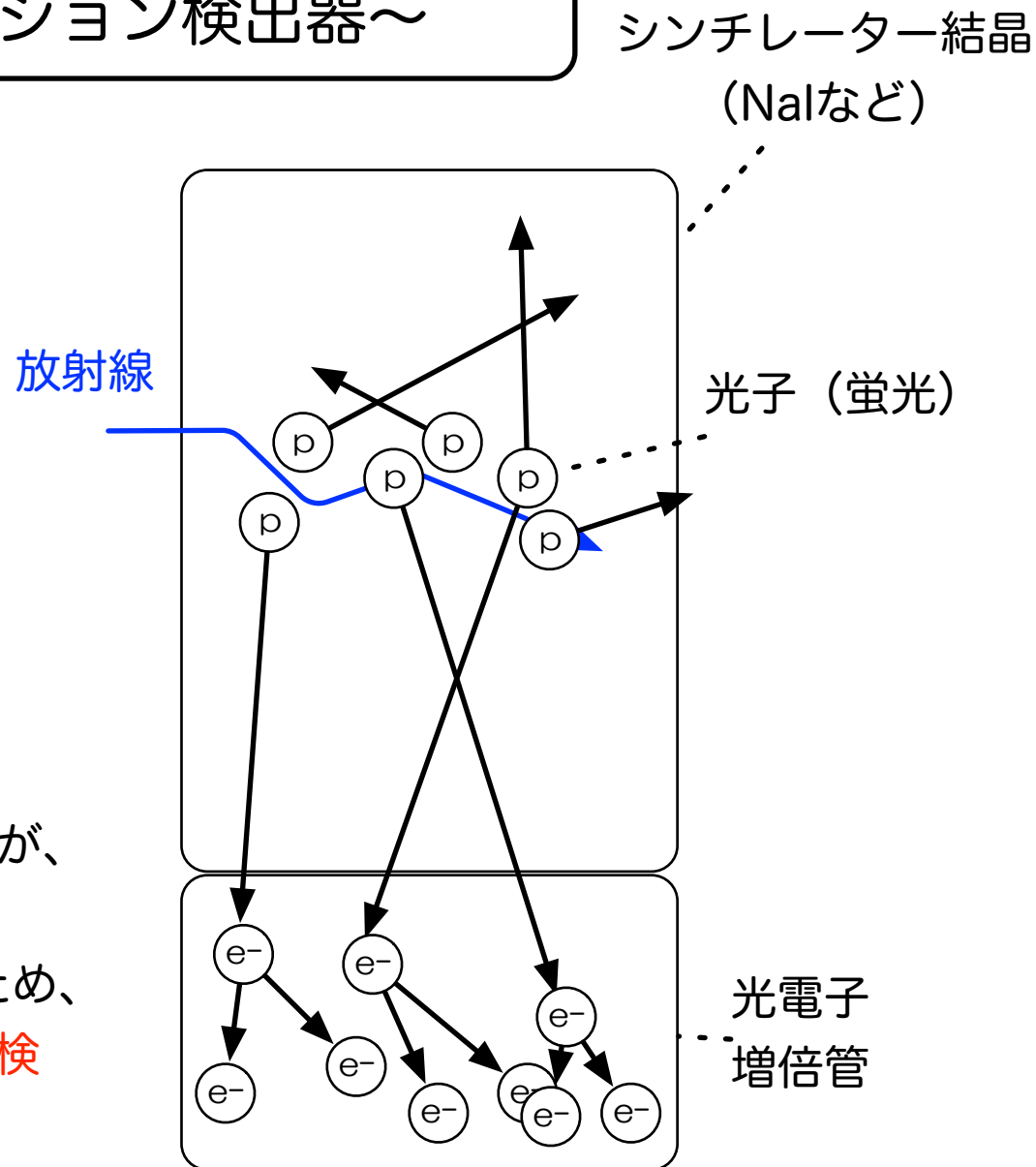
化学反応を検出する

～シンチレーション検出器～

NaI（ヨウ化ナトリウム）、CsI（ヨウ化セシウム）等の結晶に放射線が入射すると、微弱な蛍光（シンチレーション）が発生する。

結晶に光電子増倍管を接続することで、この微弱な蛍光を電子に変換し、増幅・検出することができる。

光の発生量は放射線のエネルギーに比例するが、エネルギー弁別能はGe半導体検出器に劣る。しかし、Ge半導体検出器よりは安価であるため、**多検体のスクリーニング（例えば玄米の全袋検査）**等に活用されている。



化学反応を検出する ～シンチレーション検出器～

福島県は、玄米の全量全袋検査を実施

1000万袋以上の玄米全てを検査！



化学反応を検出する

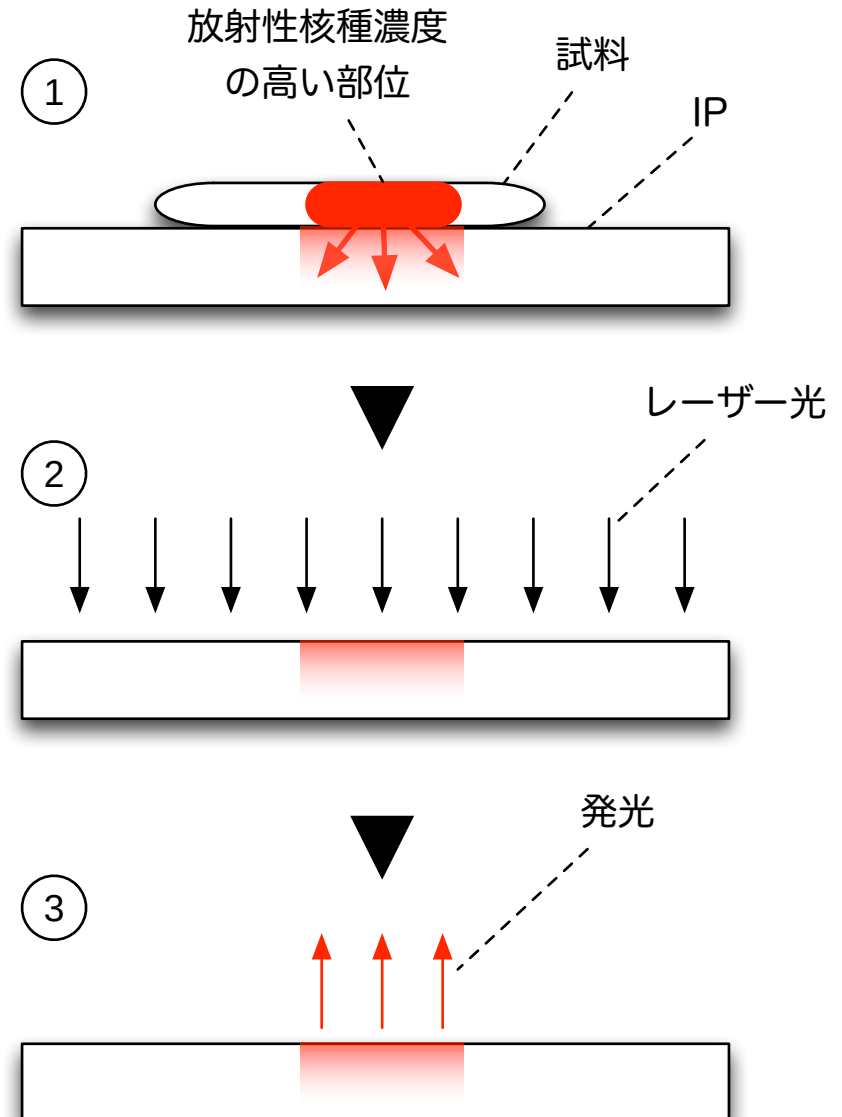
～イメージングプレート～

イメージングプレート（IP）とは、特殊な結晶の粉末を塗布したシートである。この結晶は、照射された放射線のエネルギーを蓄えることができるため、**試料中の放射性核種の2次元分布**を把握するために利用できる。

1) IPに試料を密着させると、試料から出た放射線がIPに吸収される。

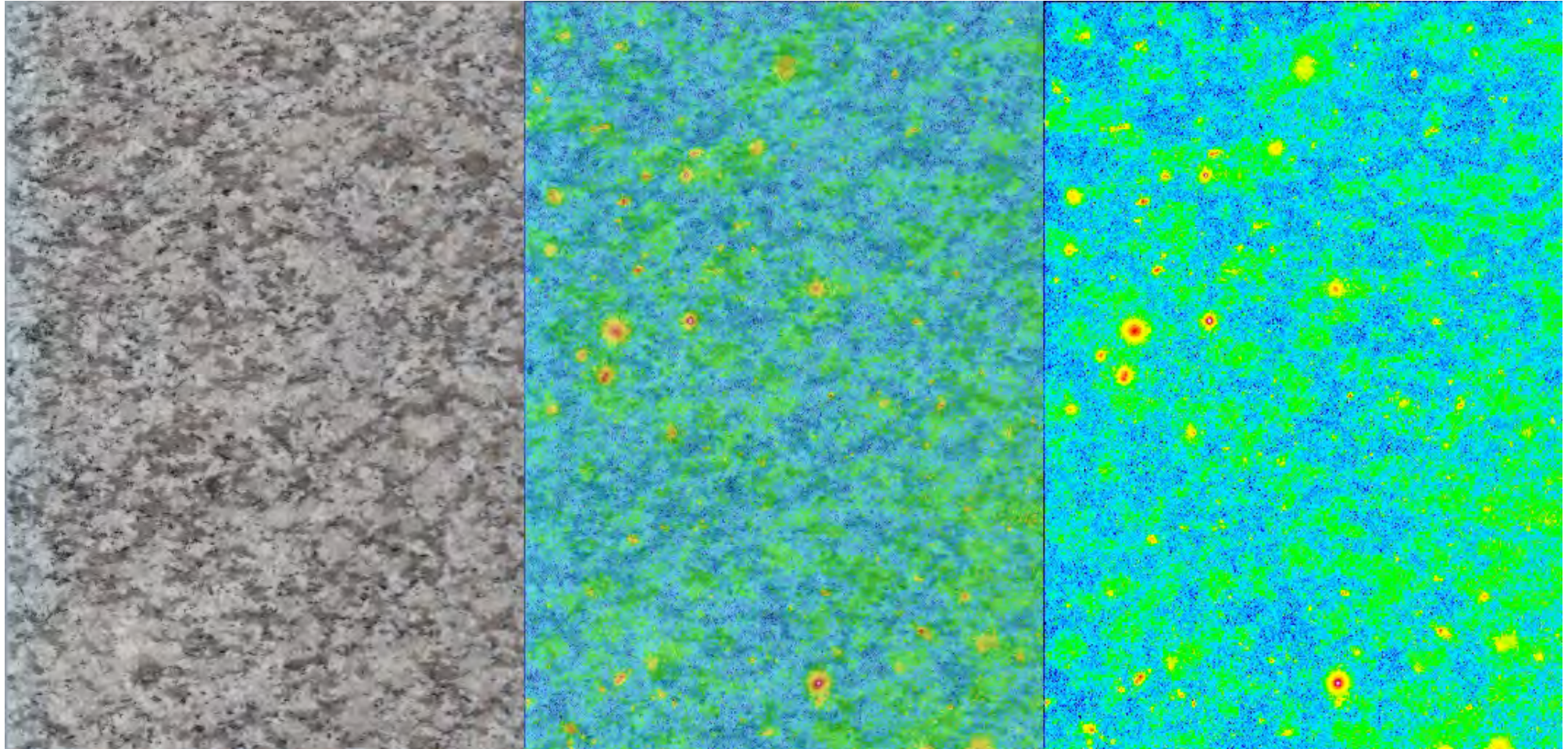
2) 特定の波長のレーザーでIPをスキャンする。

3) IPが吸収した放射線のエネルギーが可視光に変換されて放出される。



IP測定例：御影石中の放射性核種の分布

IPを用いることで、試料中の核種の分布を一目瞭然に把握できる。



御影石表面の写真

重ね合わせ

IPで測定した
放射性核種の分布

化学反応を検出する

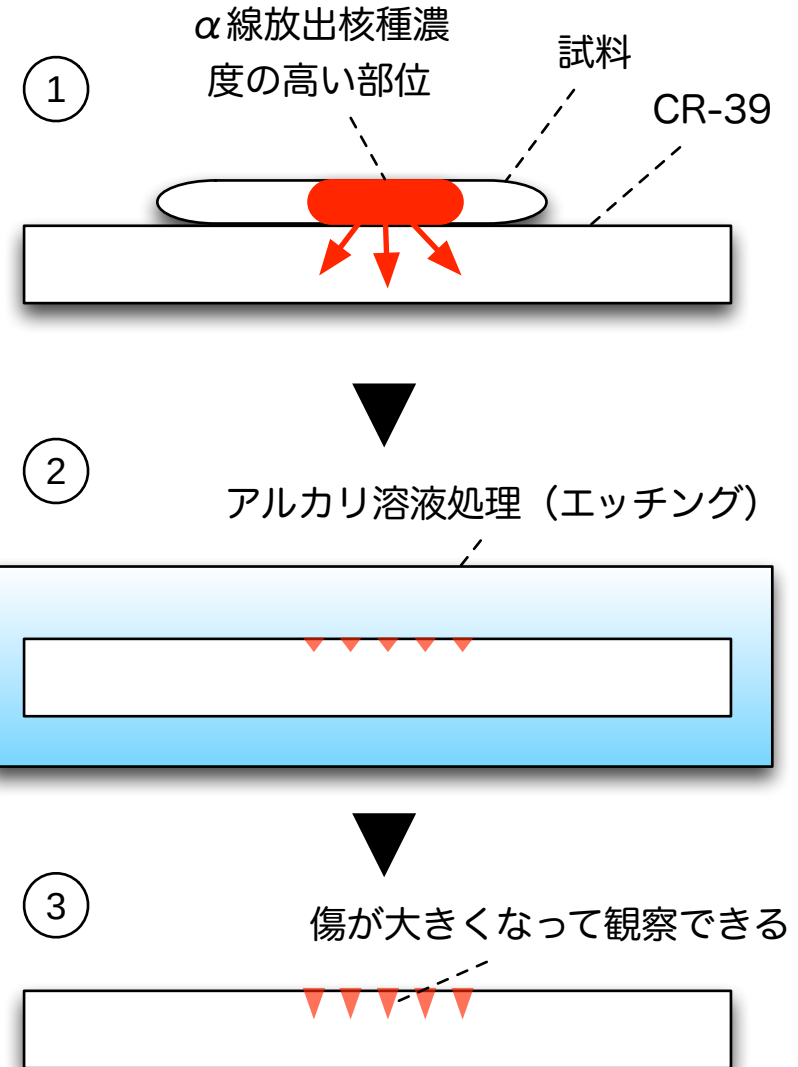
～CR-39～

CR-39は、 α 線等に反応するプラスチック。電子線や光子線には反応しない点が特長。

1) CR-39に試料を密着させると、試料から出た α 線がCR-39に化学反応を起こす。

2) CR-39をアルカリ溶液に浸すと、 α 線が当たったところが選択的に溶けて傷ができる。

3) 顕微鏡で観察したり、側面から光を当てて散乱光を見ることで、 α 線放出核種の分布を2次元的に可視化できる。



CR-39測定例：市販魚類の筋肉と幽門垂

市販されている魚の筋肉と幽門垂をペースト状にしてフリーズドライした試料にCR-39を3ヶ月間コンタクトし、その後エッチング処理を行った。

短冊状のCR-39を
被せて3ヶ月間冷凍



CR-39測定例：市販魚類の筋肉と幽門垂

市販されている魚の筋肉と幽門垂をペースト状にしてフリーズドライした試料にCR-39を3ヶ月間コンタクトし、その後エッチング処理を行った。



水酸化ナトリウムでエッチング後、LEDで照らして散乱光を観察すると、傷が見える

CR-39測定例：市販魚類の筋肉と幽門垂



幽門垂に α 線放出核種が存在する（詳細は後述）

放射線の人体影響の基礎

～シーベルトの定義・計算法・活用法～



あさりよしとお「放射線ってナニモノ？」

放射線の人体影響メカニズム

～DNAの損傷・修復・修復ミス～

放射線のエネルギーによって細胞内で電離が起こる



電離で生じたイオンは不安定な化学種（ラジカル）であることが多く、周囲の分子と化学反応を起こす。



細胞内の分子のほとんどは、化学反応で壊れてしまっても代わりが利くが…

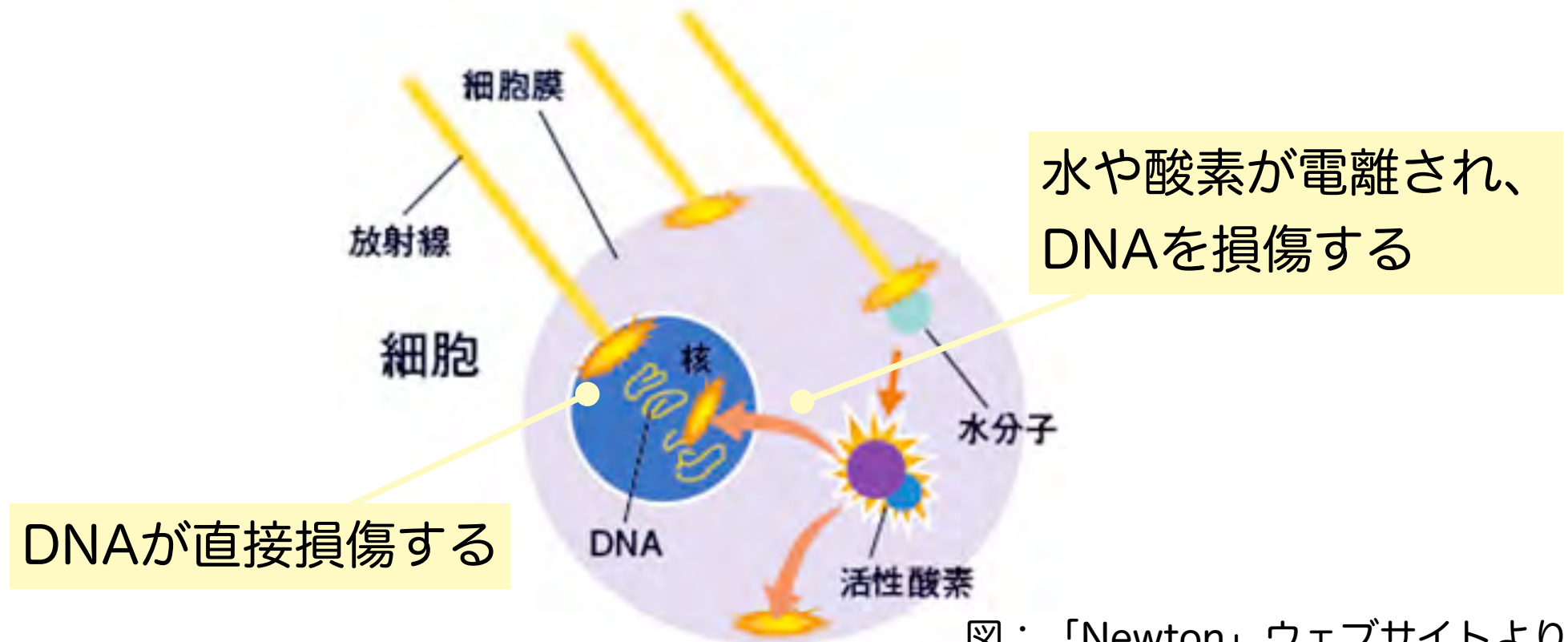
放射線の人体影響メカニズム

～DNAの損傷・修復・修復ミス～

放射線のエネルギーによって細胞内で電離が起こる



DNAが損傷



図：「Newton」ウェブサイトより引用

放射線の人体影響メカニズム

～DNAの損傷・修復・修復ミス～

放射線のエネルギーによって細胞内で電離が起こる



DNAが損傷



DNA修復機構が働く



修復成功



修復失敗



細胞死

※少数なら問題無い

主に細胞死によって引き起こされる影響を「確定的影響」と呼ぶ。詳しくは独習用資料を参照のこと。

放射線の人体影響メカニズム

～DNAの損傷・修復・修復ミス～

放射線のエネルギーによって細胞内で電離が起こる



DNAが損傷



DNA修復機構が働く



修復成功



誤った修復



誤りを含んだ細胞が増殖継続



癌の発生要因の一つ



修復失敗



細胞死

※少数なら問題無い

放射線の人体影響メカニズム

～DNAの損傷・修復・修復ミス～

放射線のエネルギーによって細胞内で電離が起こる

ポイント1

α 線は、 β 線や γ 線よりも
誤った修復を起しやすい。

DNAが損傷

DNA修復機構が働く

修復成功

誤った修復

修復失敗

誤りを含んだ細胞が増殖継続

⋮

癌の発生要因の一つ

細胞死

※少数なら問題無い

放射線の人体影響メカニズム

～DNAの損傷・修復・修復ミス～

放射線のエネルギーによって細胞内で電離が起こる



DNAが損傷



DNA修復機構が働く



ポイント2

癌になりやすさ、癌の重大さは組織によって違う。

た修復



誤りを含んだ細胞が増殖継続



癌の発生要因の一つ

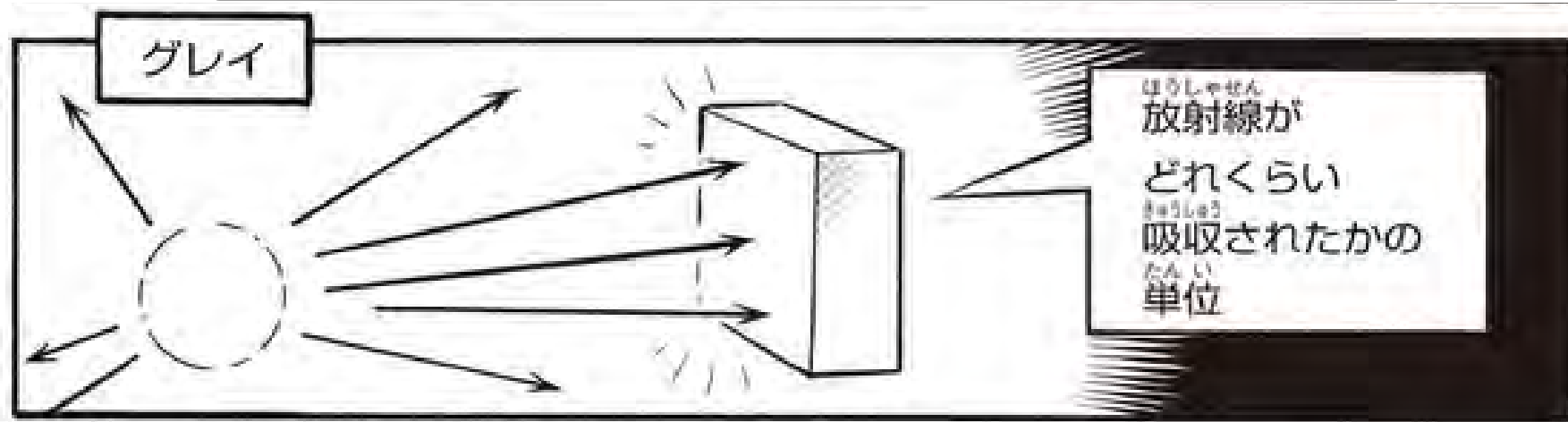
修復失敗



細胞死

※少数なら問題無い

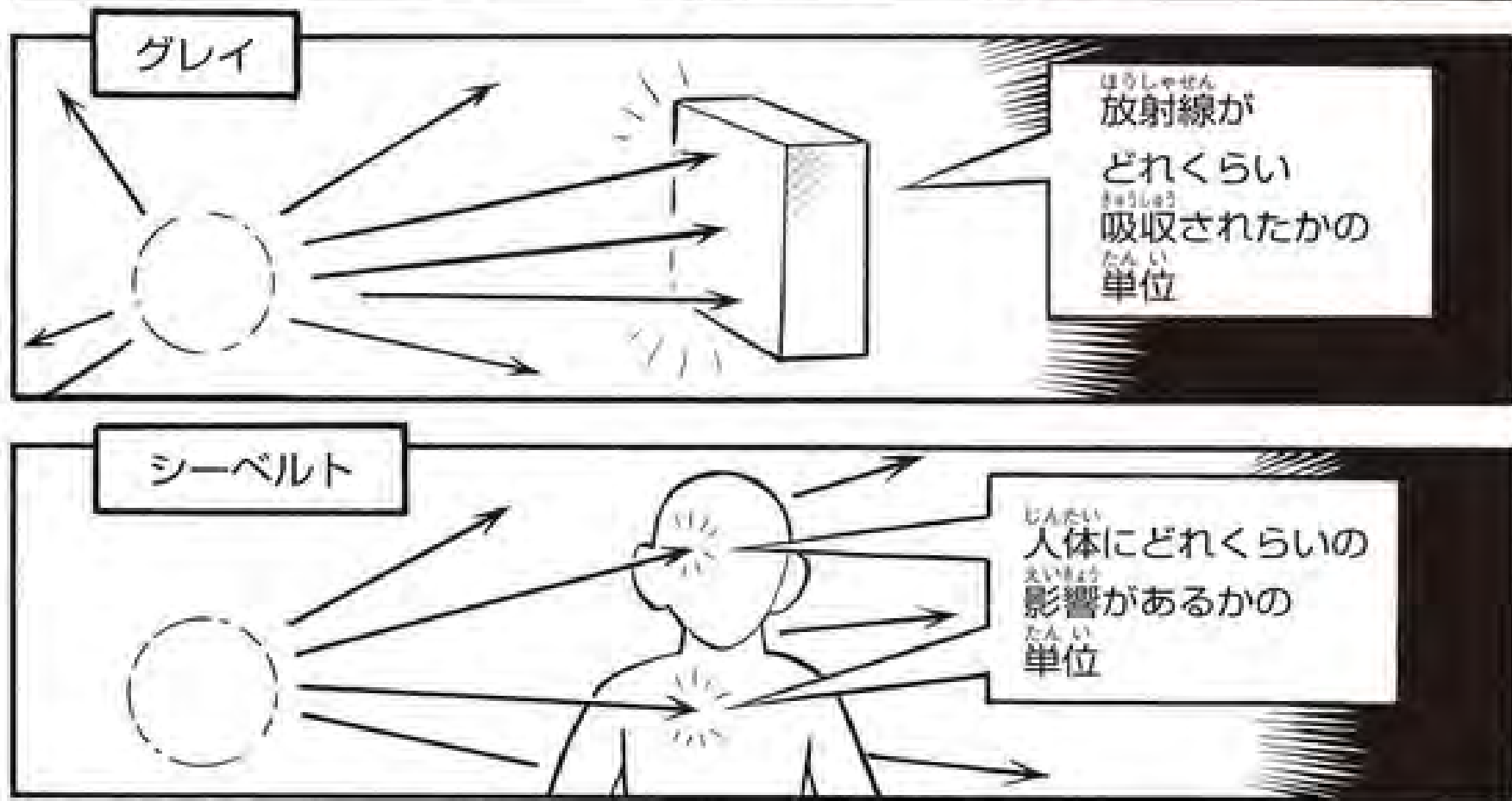
シーベルトという単位



$$\text{Gy (グレイ)} = \text{J/kg}$$

質量 (kg) あたり、どれだけのエネルギー (J) を吸収したか

シーベルトという単位



あさりよしとお「放射線ってナニモノ？」

$$\text{Gy} \times \text{放射線加重係数} \times \text{組織加重係数} = \text{Sv (シーベルト)}$$

誤った修復を起しやすい放射線で大きい

致命的な癌になりやすい組織で大きい

Svの算出に用いられる係数

放射線タイプ	放射線荷重係数
光子	1
電子、ミュー粒子（ミューオン）	1
陽子、荷電パイ中間子	2
α 粒子、重イオン、核分裂片	20
中性子	※

※：エネルギーによって異なり、約2.5～21の値を取る。

Svの算出に用いられる係数

放射線タイプ

放射線荷重係数

光子
電子、ミュー粒子（ミューオン）
陽子、荷電パイ中間子
α 粒子、重イオン、核分裂片
中性子

1
1
2
20
※

※：エネルギーによって異なり、約2.5～21の値を取る。

^{134}Cs 、 ^{137}Cs 、 ^{131}I は光子と電子のみを放出するので、放射線荷重係数は1、つまり $\text{Gy}=\text{Sv}$ となる。
また、外部被ばくの大部分は光子・電子・ミューオンなので、 $\text{Gy}=\text{Sv}$ と見なせる場合が多い。

※ PHITSによるシミュレーションで見たとおり、光子によるエネルギー付与は、実際には光子からエネルギーを受け取った電子によるエネルギー付与である。このことを考えると光子と電子の放射線荷重係数が等しいことが理解しやすい。

Svの算出に用いられる係数

放射線タイプ

放射線荷重係数

光子
電子、ミュー粒子（ミューオン）
陽子、荷電パイ中間子
α 粒子、重イオン、核分裂片
中性子

1
1
2
20
※

※：エネルギーによって異なり、約2.5～21の値を取る。

^{134}Cs 、 ^{137}Cs 、 ^{131}I は光子と電子のみを放出するので、放射線荷重係数は1、つまり $\text{Gy}=\text{Sv}$ となる。
また、外部被ばくの大部分は光子・電子・ミューオンなので、 $\text{Gy}=\text{Sv}$ と見なせる場合が多い。

^{210}Po 、 ^{220}Rn 、 ^{222}Rn 等による内部被ばくは主に α 線。

臓器・組織名

組織荷重係数

肺、胃、結腸、骨髄、乳房、残りの組織・臓器	0.12
生殖腺	0.08
甲状腺、食道、膀胱、肝臓	0.04
骨表面、皮膚、脳、唾液腺	0.01

※これらの表の値はICRPの
2007年勧告から引用している
ことに注意。**1990年勧告**とは
数値が若干異なる。

2種類のSv

※ 細かく言えばもっと沢山あります。
興味がある方は「実用量と防護量」などをキーワードに調べてみて下さい。

実効線量

$$\text{Gy} \times \text{放射線加重係数} \times \text{組織加重係数} = \text{Sv (シーベルト)}$$

誤った修復を起しやすい放射線で大きい

致命的な癌になりやすい組織で大きい

等価線量

$$\text{Gy} \times \text{放射線加重係数} = \text{Sv (シーベルト)}$$

誤った修復を起しやすい放射線で大きい

等価線量と実効線量

等価線量は、特定の組織に集まる性質のある核種による内部被ばくや、 β 線による体表面（皮膚や眼球）の外部被ばくの評価の際に使われることが多い。

例：成人が甲状腺に β 線と γ 線を合計100mGy吸収した場合、 β 線（電子）と γ 線（光子）の放射線荷重係数は両方とも1、甲状腺の組織荷重係数は0.04なので…

$$\text{甲状腺の等価線量} = 100 \times 1 = 100 \text{ (mSv)}$$

$$\text{実効線量} = 100 \times 1 \times 0.04 = 4 \text{ (mSv)}$$

となる。

Svの計算法

外部被ばく + 内部被ばく = 全被ばく量

外部被ばくの場合 → 空間線量率 (Sv/h) × 滞在時間 (h)

各種の測定器で測定可能

測定器は、放射線のエネルギーと入射数から、その場に人体があったらどの程度放射線を吸収するか？を計算してSv/hに換算している。

もしくは特定の放射線（例えば¹³⁷Csのγ線）を想定し、入射数からSv/hを推定している。

内部被ばくの場合 → 摂取量 (Bq) × 実効線量係数 (Sv/Bq)

核種ごとに係数が公表されている

¹³⁴Cs : 0.019 μSv/Bq

¹³⁷Cs : 0.013 μSv/Bq

ICRP Publication 119より引用

内部被ばくの計算例



このコップ1杯の牛乳に、放射性核種である ^{137}Cs が100Bq含まれているとする。

この1杯を飲むことによる内部被ばくを実効線量で示せ。

内部被ばくの計算例



このコップ1杯の牛乳に、放射性核種である ^{137}Cs が100Bq含まれているとする。

この1杯を飲むことによる内部被ばくを実効線量で示せ。

$$\begin{aligned}\text{実効線量} &= 100 \text{ Bq} \times 0.013 \text{ } \mu\text{Sv/Bq} \\ &= 1.3 \text{ } \mu\text{Sv}\end{aligned}$$

実効線量係数とは？

核種、化学形、摂取形態に応じて、1Bqの摂取によって、摂取後50年間（子供は70歳まで）の積算で何Svの被ばくになるのか（※）を示す係数。

1) 摂取された放射性核種が、摂取後一定時間経過後に、体内のどこに移動するか？

2) 体内のある場所に存在する放射性核種から出た放射線が、どの組織・臓器にどの程度吸収されるか？

50年間分の積算値をシミュレーションして、実効線量係数を算出する。

※：この積算値を預託実効線量という。被ばく総量が等しい場合、短期間にまとめて被ばくした方がリスクが高いと考えられている。したがって最大のリスクを考慮するために、内部被ばくの場合は預託実効線量の全量（実際には摂取直後から最大50年間に渡って被ばくする線量）を、摂取した瞬間に受けたと見なして線量管理を行う。

実効線量係数の調べ方

ICRP Database of Dose Coefficients

※ Windows用のデータベースアプリ

ICRP Free CD



実効線量係数の調べ方

ICRP Database of Dose Coefficients



INTERNATIONAL COMMISSION ON RADIOLOGICAL PROTECTION

Home

News

Consultations

Publications

Downloads

ICRP Symposia

ICRP Activities

Downloads

Free Summary Recommendations

ICRP Annual Reports

Free ICRP Posters: Paediatric radiology

Free Guides and Explanatory Notes

Free Educational Downloads

Free Educational CD Downloads

You are here: [Download](#) > Free Educational CD Downloads

Free Educational CD Downloads

The following files are downloadable installation files for CDs of dose coefficients available here at no cost. They can be used by teachers, students, and those interested radiological protection together with their parent ICRP Publications. Please note that while we encourage you to download and use these CDs, ICRP retains copyright and you must not edit or attempt to repackage these materials for sale.

These downloads replace ICRP [CD1](#), [CD2](#) and [CD3](#) which are now out of print. These free downloads are for Windows operating systems, including Win 7, on 32 and 64 bit machines.

ICRP Database of Dose Coefficients: Workers and Members of the Public; Ver. 3.0

Available as a Windows setup file named [ICRPDOSE_setup.exe](#).



実効線量係数の調べ方

ICRP Database of Dose Coefficients: Workers and Members of the Public

File General Info ICRP 68 ICRP 72 Biokinetics Help

INTAKE

Radionuclides

Radionuclide (eg Co-60): Cs-137

Z	Element	Symbol	A	Half-life
55	Caesium	Cs	132	6.475d
55	Caesium	Cs	134	2.062y
55	Caesium	Cs	134m	2.90h
55	Caesium	Cs	135	2.3E6y
55	Caesium	Cs	135m	53m
55	Caesium	Cs	136	13.1d
55	Caesium	Cs	137	30.0y

Subject(s)

Ages at intake: Adult
15 year old
10 year old
5 year old

☐ Adult Worker
☒ Public

Intake Route(s)

Aerosol size (AMAD): 0.03 microns
0.1 microns
0.3 microns
1.0 microns

☒ Ingestion
☐ Inhalation

OUTPUT

Number of Periods: All ☒ Five ☐ Custom ☐

1 day
7 days
30 days
1 year

Organs / Tissues: All ☐ with wT ☐ Custom ☒

Thyroid
Uterus
Remainder
Effective dose

Batch File: Load Save Delete Command Line: Add Remove

Strontium (Sr-90). NINHL INGT ENVI AGE(A) TEN
Iodine (I-131). NINHL INGT ENVI AGE(A) TEN
Caesium (Cs-134). NINHL INGT ENVI AGE(A) TEN
Caesium (Cs-137). NINHL INGT ENVI AGE(A) TEN

Run

Status: Finished

Dose Coefficients (Sv/Bq) - Viewer

File Help

I-131, adult member of the public
Ingestion: f1 = 1.0
Highest committed equivalent dose coefficient: Thyroid, 4.3E-07 Sv/Bq
Remainder formulation: default

Time after intake	1 day	7 days	30 days	1 year	5 years	1
Effective dose	1.3E-09	1.0E-08	2.0E-08	2.2E-08	2.2E-08	2

Result 2 of 4

Print Save Close

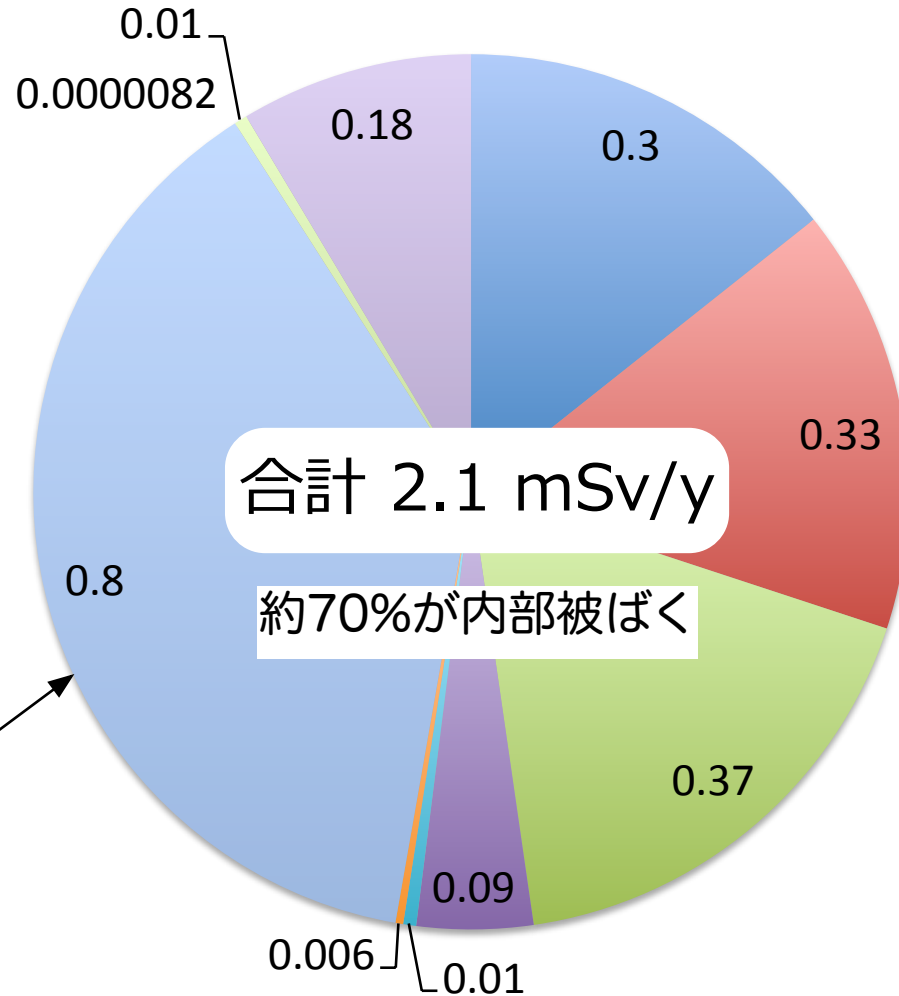
条件を設定して「Run」をクリック → 実効線量係数が表示される

Svとリスクの目安

相対的な評価 → 自然被ばくとの比較

絶対的な評価 → がんリスク上昇

平均的な日本人の自然被ばくの内訳

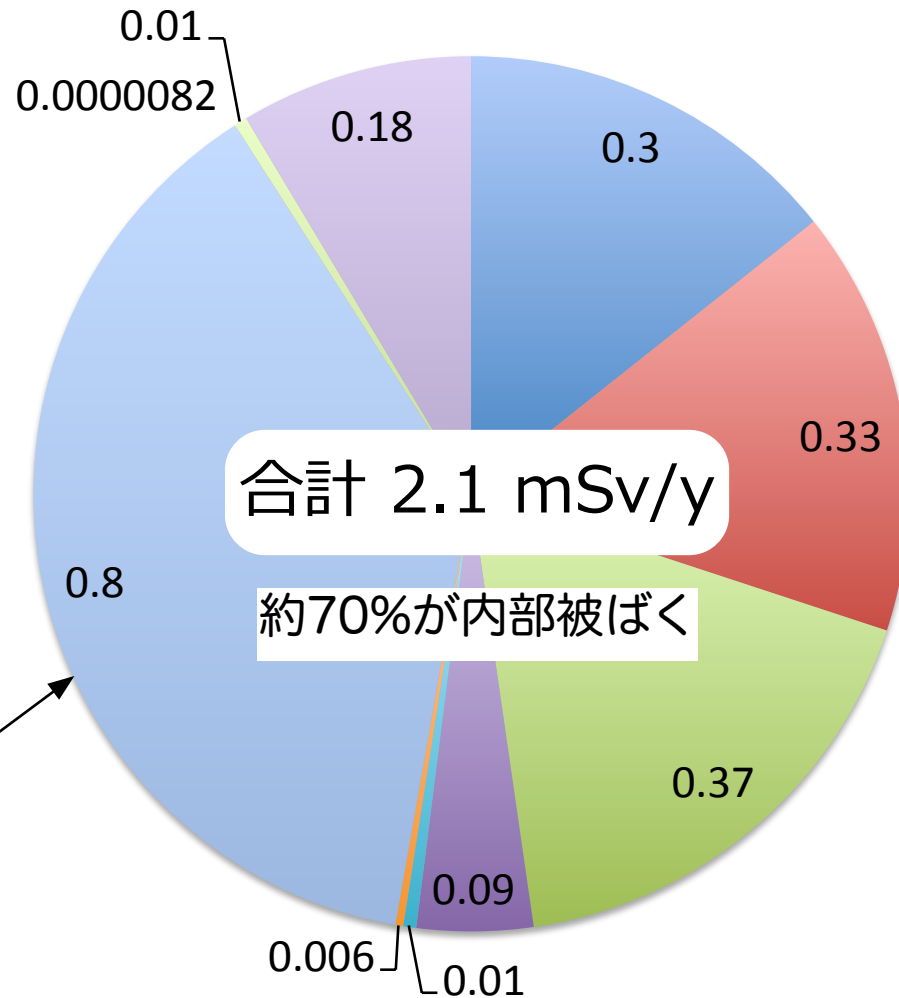


- 外部被ばく 宇宙線
- 外部被ばく 大地放射線
- 吸入摂取 Rn-222
- 吸入摂取 Rn-220
- 吸入摂取 喫煙 (Po-210, Pb-210, etc.)
- 吸入摂取 その他 (U-238, etc.)
- 経口摂取 Po-210, Pb-210, etc.
- 経口摂取 H-3
- 経口摂取 C-14
- 経口摂取 K-40

日本人の特徴として、魚介類に含まれる ^{210}Po の寄与が大きい。

図の数値は「やっかいな放射線と向き合って暮らしていくための基礎知識」(田崎 晴明 2013.1.17版)より引用

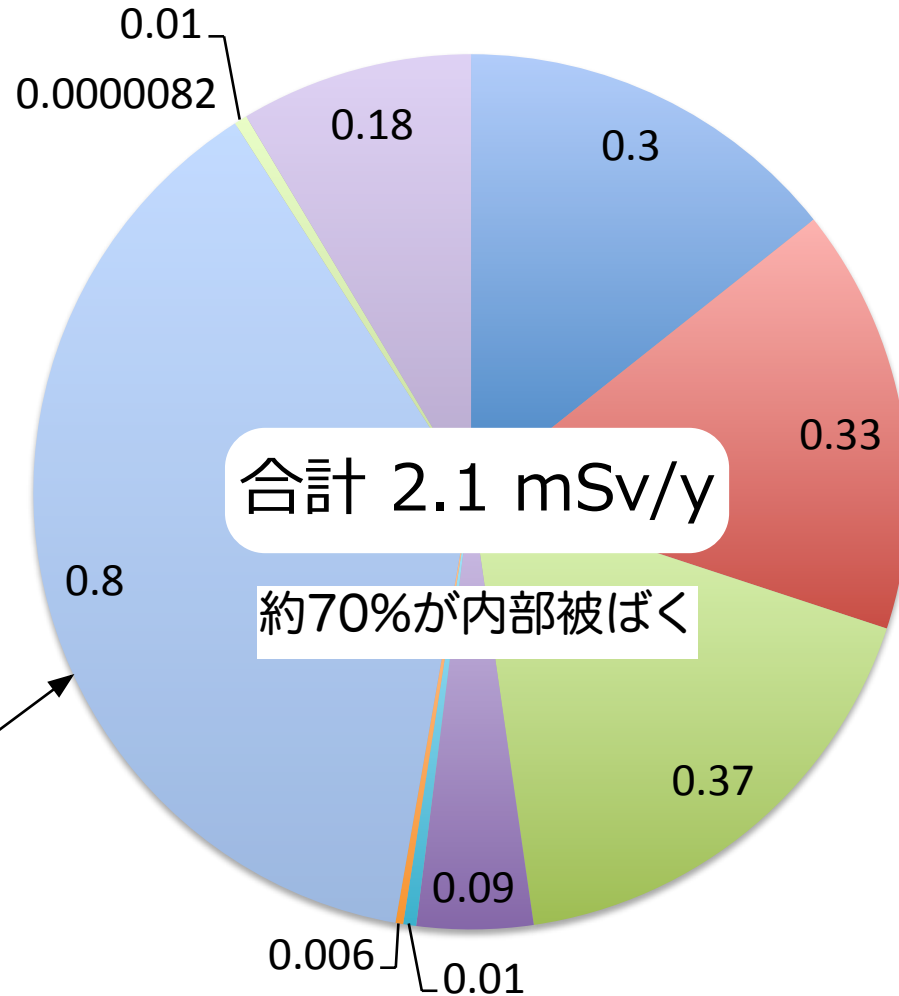
平均的な日本人の自然被ばくの内訳



日本人の特徴として、魚介類に含まれる ^{210}Po の寄与が大きい。

図の数値は「やっかいな放射線と向き合って暮らしていくための基礎知識」(田崎 晴明 2013.1.17版)より引用

平均的な日本人の自然被ばくの内訳



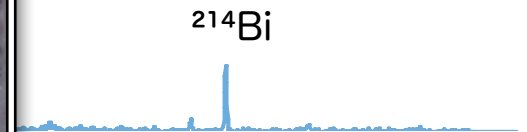
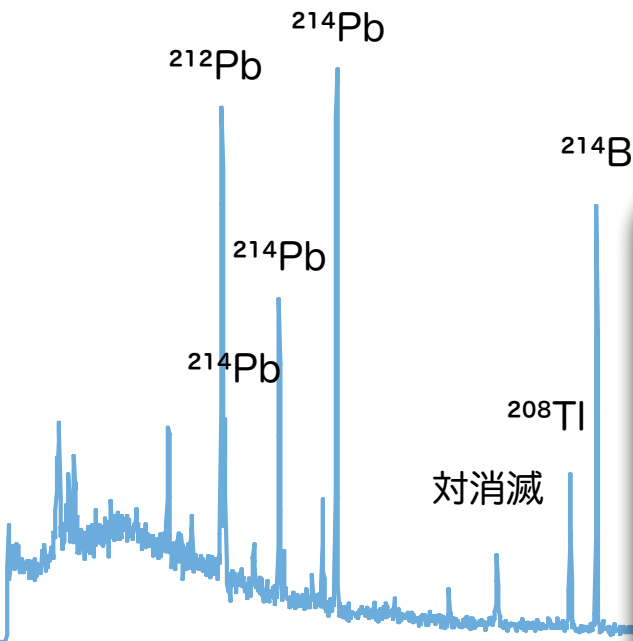
- 外部被ばく 宇宙線
- 外部被ばく 大地放射線
- 吸入摂取 Rn-222
- 吸入摂取 Rn-220
- 吸入摂取 喫煙 (Po-210, Pb-210, etc.)
- 吸入摂取 その他 (U-238, etc.)
- 経口摂取 Po-210, Pb-210, etc.
- 経口摂取 H-3
- 経口摂取 C-14
- 経口摂取 K-40

日本人の特徴として、魚介類に含まれる ^{210}Po の寄与が大きい。

図の数値は「やっかいな放射線と向き合って暮らしていくための基礎知識」(田崎 晴明 2013.1.17版)より引用

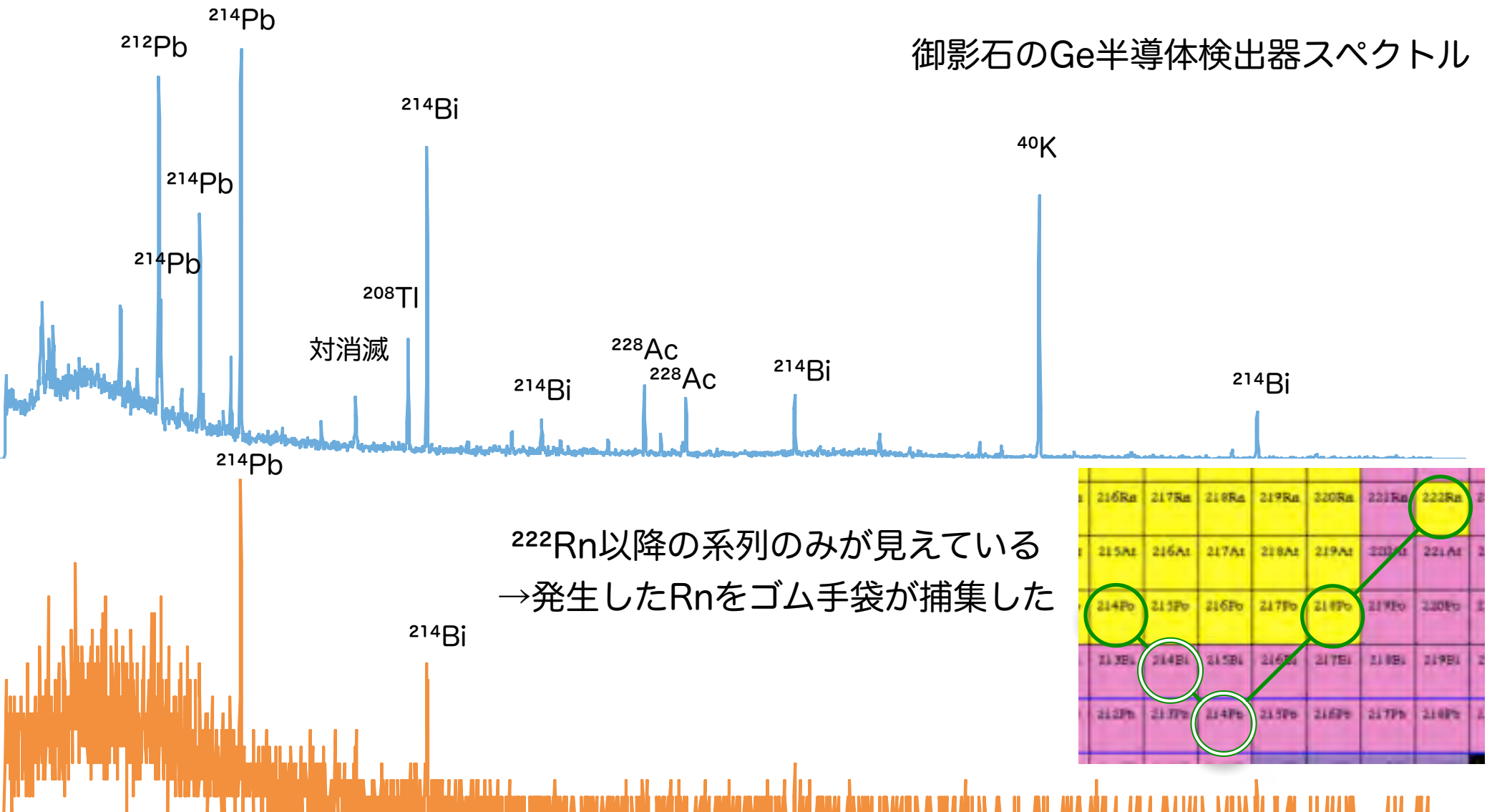
Rnの捕集と検出

御影石のGe半導体検出器スペクトル



Rnの捕集と検出

御影石のGe半導体検出器スペクトル



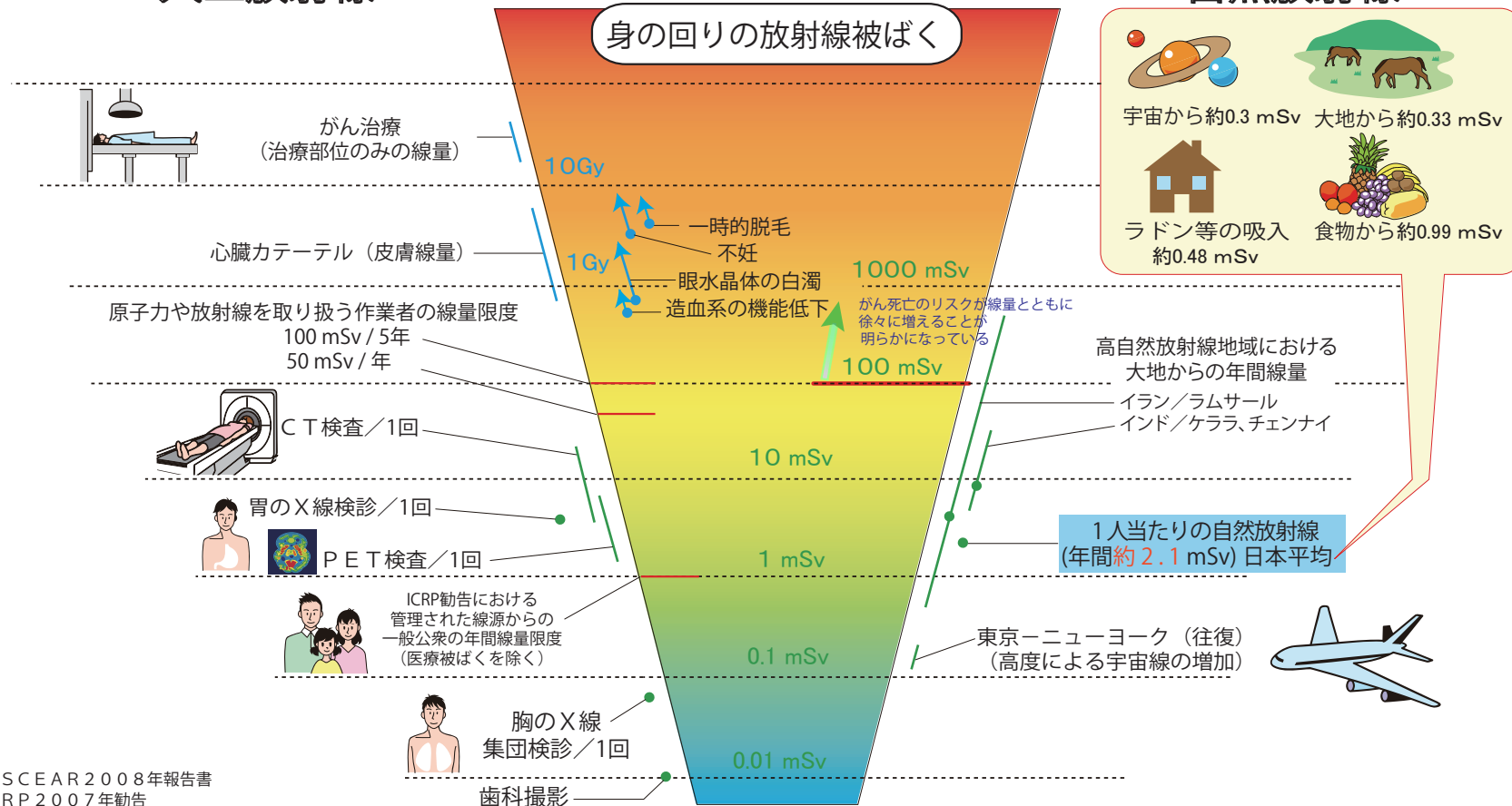
御影石から発生した気体のスペクトル

医療被ばくを含む各種被ばくの比較

放射線被ばくの早見図

人工放射線

自然放射線



・ UNSCEAR 2008 年報告書
・ ICRP 2007 年勧告
・ 日本放射線技術会医療被ばくガイドライン
・ 新版 生活環境放射線 (国民線量の算定)
などにより、放医研が作成(2013年5月)

【ご注意】

- 1) 数値は有効数字などを考慮した概数です。
- 2) 目盛 (点線) は対数表示になっています。
目盛がひとつ上がる度に 10 倍となります。
- 3) この図は、引用している情報が更新された場合
変更される場合があります。

【線量の単位】

各臓器・組織における吸収線量: Gy (グレイ)

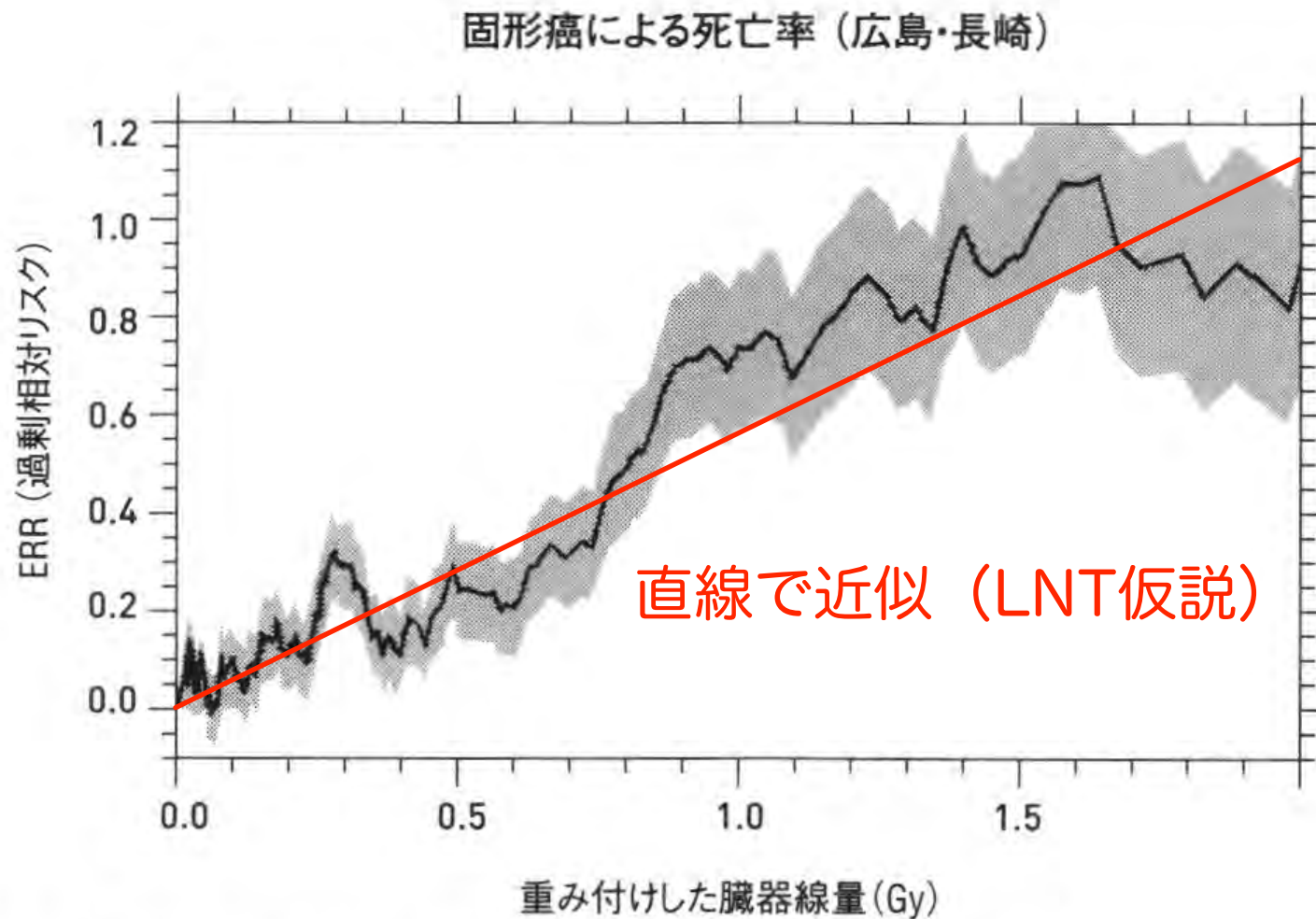
放射線から臓器・組織の各部位において単位重量あたりに
どれくらいのエネルギーを受けたのかを表す物理的な量。

実効線量: mSv (ミリシーベルト)

臓器・組織の各部位で受けた線量を、がんや遺伝性影響の感受性について
重み付けをして全身で足し合わせた量で、放射線防護に用いる線量。

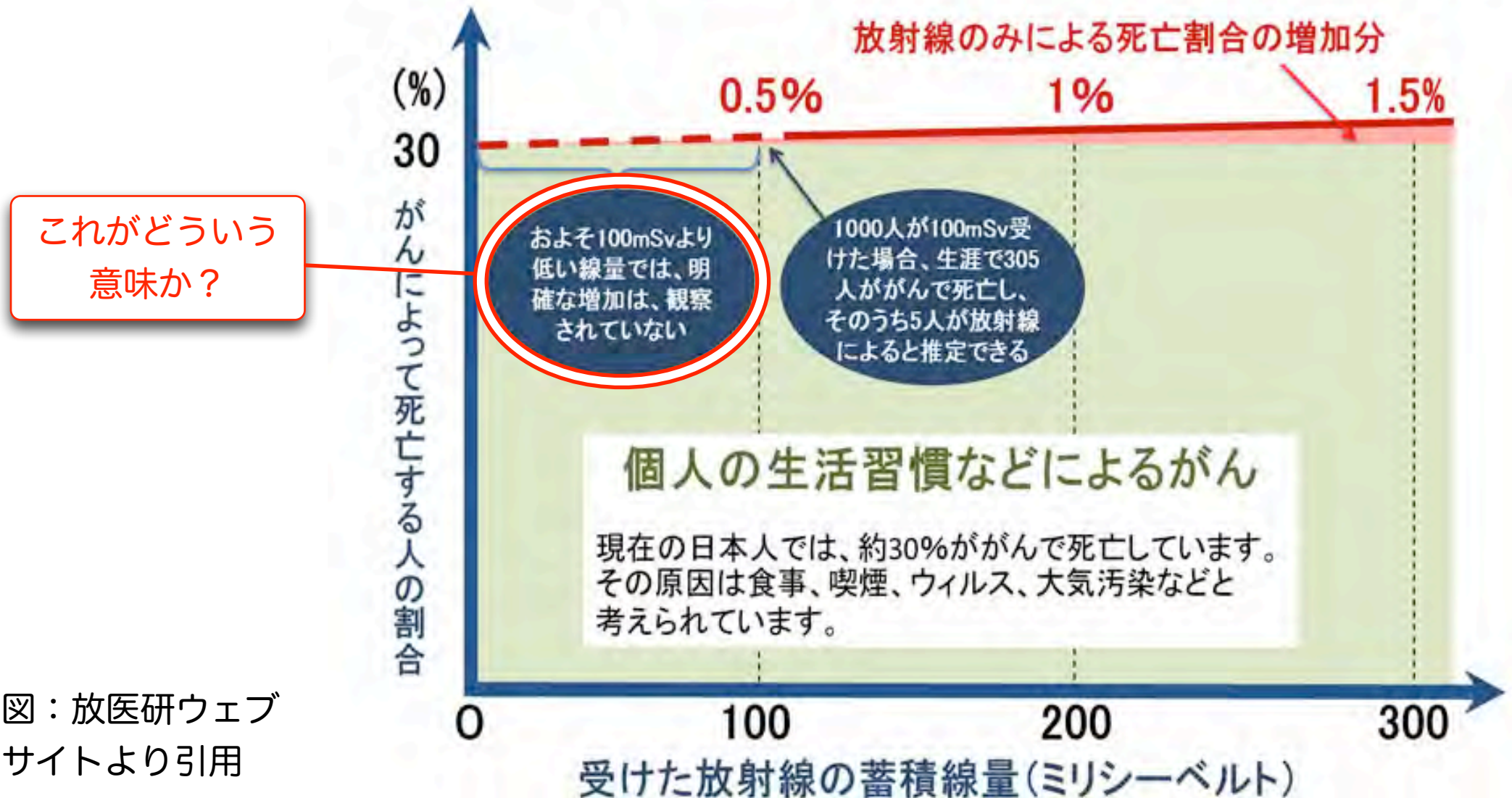
各部位に均等に、ガンマ線 1 Gy の吸収線量を全身に受けた場合、
実効線量で 1000 mSv に相当する。

リスクの絶対評価



Svの数値とリスクの目安

年間で100ミリシーベルトまでゆっくりと被ばくした場合のがん死亡



都道府県別75歳未満がん年齢調整死亡率 (2009年)

Age-adjusted Cancer Mortality Rate under Age 75 by Prefectures (2009)

(1) 全がん All Cancers

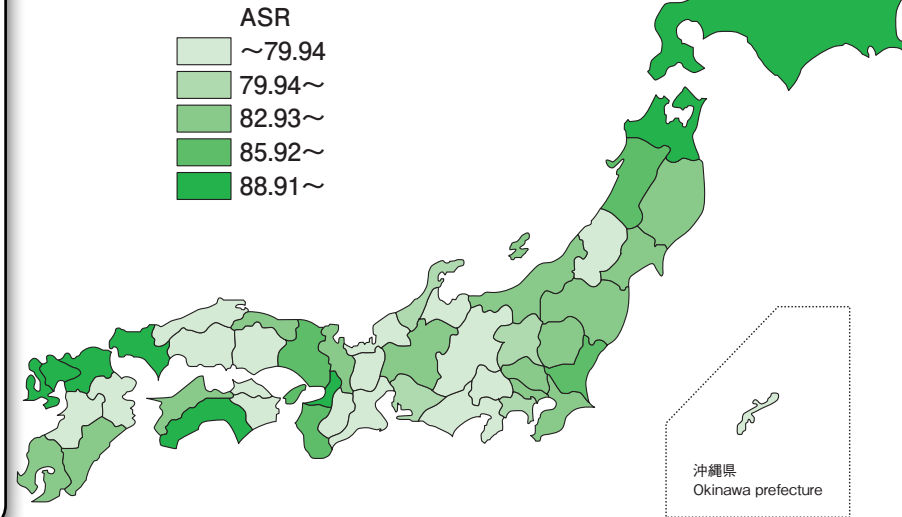
癌の死亡率には様々な変動要因がある。例えば都道府県単位で見ても相対的に10%以上（死亡率30%に対して**3%以上**）異なる。



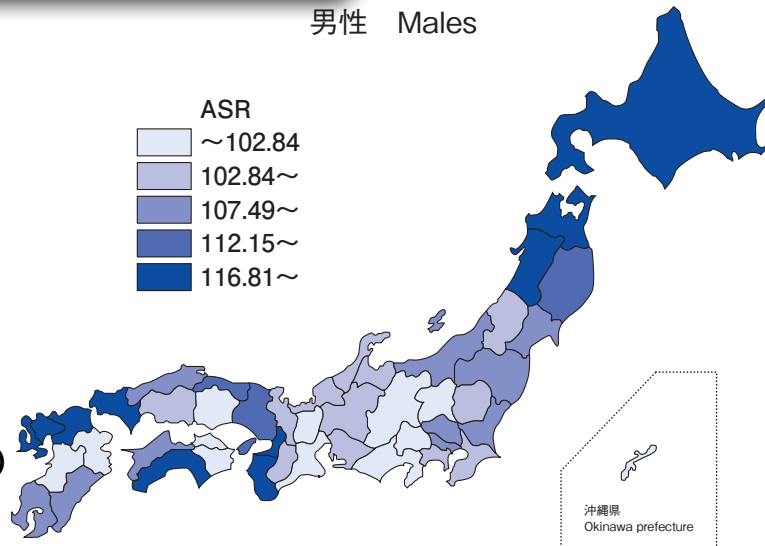
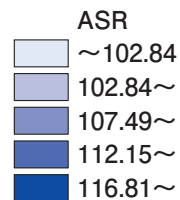
低線量被ばくによる**0.5%未満**の差を検出するのは**統計的に困難**。

男女計 Both Sexes

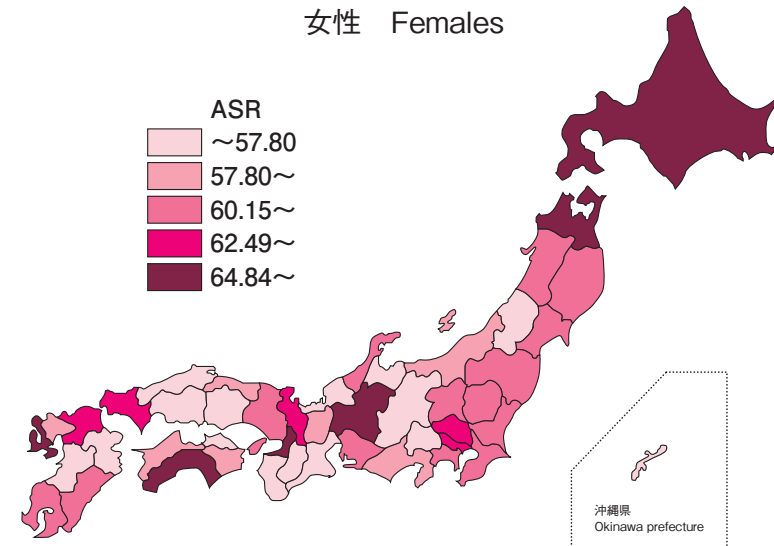
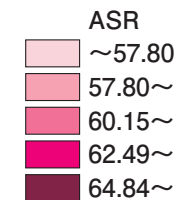
75歳未満年齢調整死亡率（人口10万対）
Age-adjusted mortality rate under age 75 (per 100,000)



男性 Males



女性 Females



図：がん研究振興財団の
ウェブサイトより引用

都道府県別75歳未満がん年齢調整死亡率 (2009年)

Age-adjusted Cancer Mortality Rate under Age 75 by Prefectures (2009)

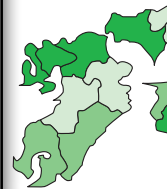
(1) 全がん All Cancers

癌の死亡率には様々な変動要因がある。例えば都道府県単位で見ても相対的に10%以上（死亡率30%に対して**3%以上**）異なる。

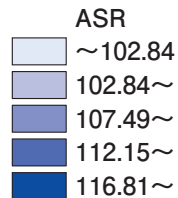


低線量被ばくによる**0.5%未満**の差を検出するのは**統計的に困難**。

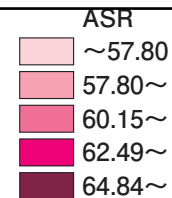
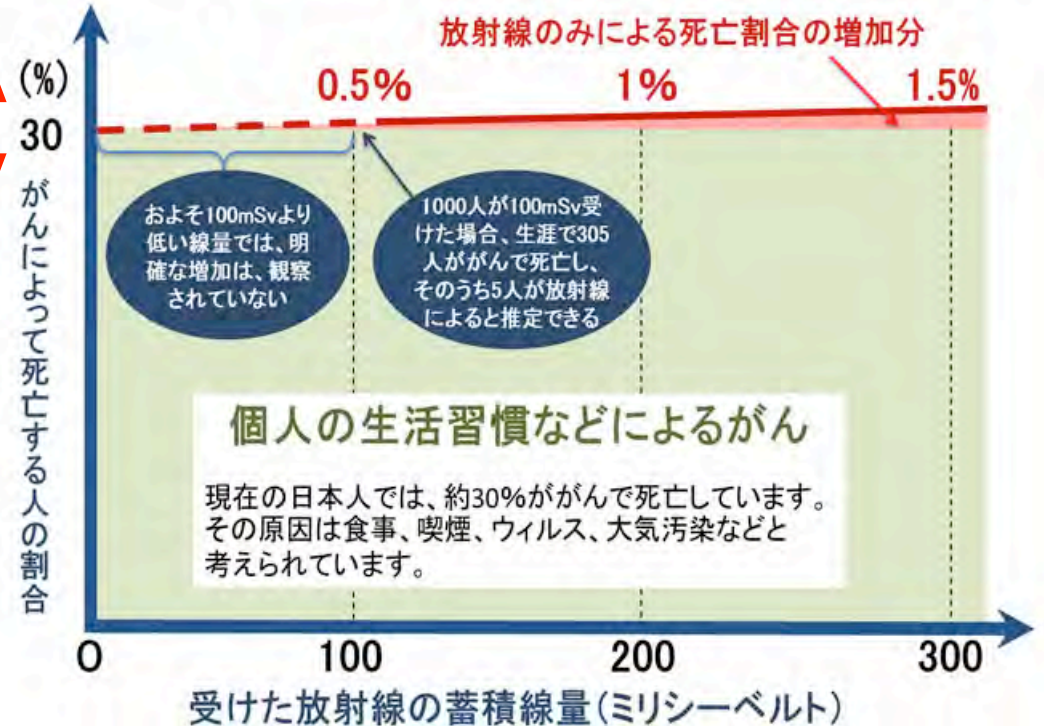
3%以上



男性 Males



年間で100ミリシーベルトまでゆっくりと被ばくした場合のがん死亡

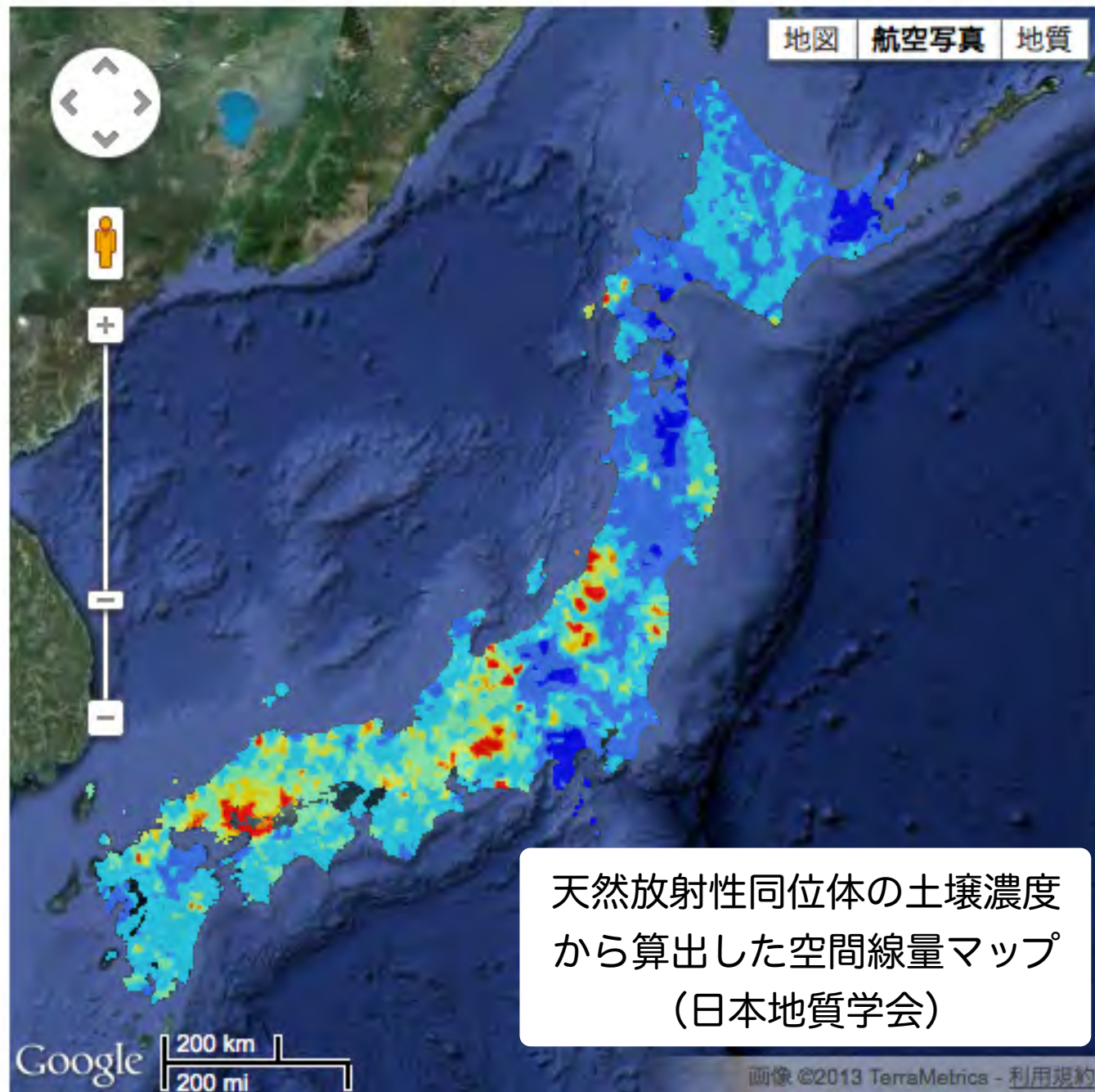


図：がん研究振興財団のウェブサイトより引用

自然被ばく量も全国均一ではないため、個人の線量（先ほどのグラフの横軸）を正確に算出することにも困難が伴う。



※ r 線による全身
均一被ばくの場合
は $\text{Gy}=\text{Sv}$



天然放射性同位体の土壌濃度
から算出した空間線量マップ
(日本地質学会)

自然被ばく量も全国均一ではないため、個人の線量（先ほどのグラフの横軸）を正確に算出することにも困難が伴う。

左：屋内ラドン濃度マップ
右：宇宙線線量率マップ
共に放医研ニュースNo.92より引用

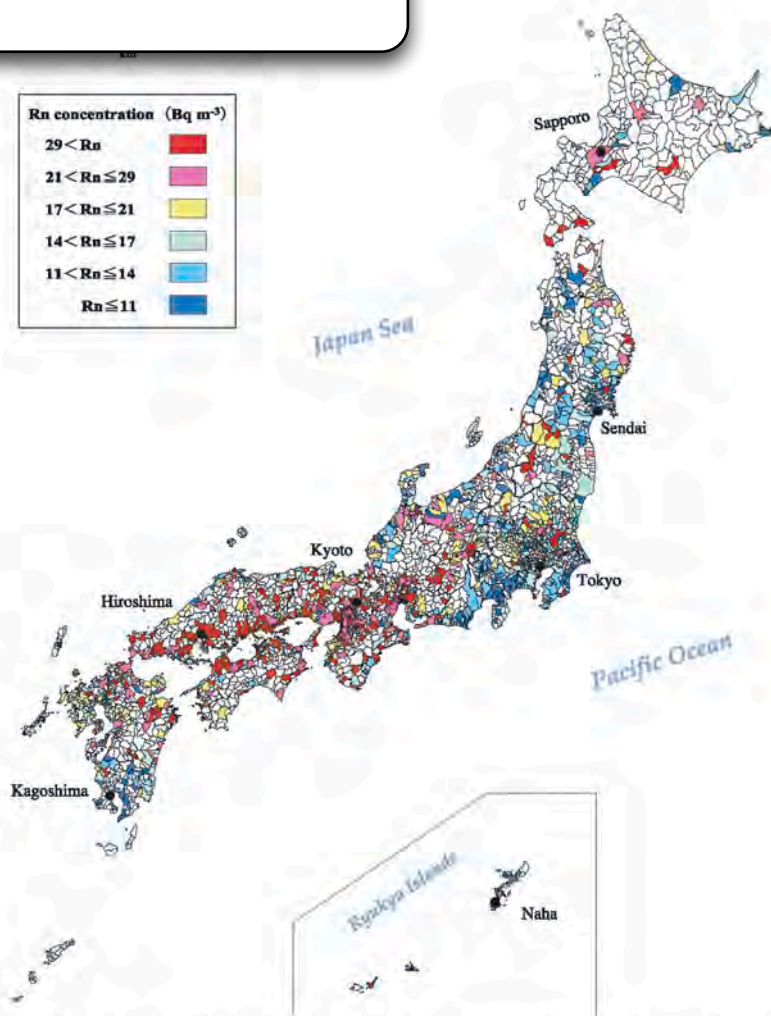
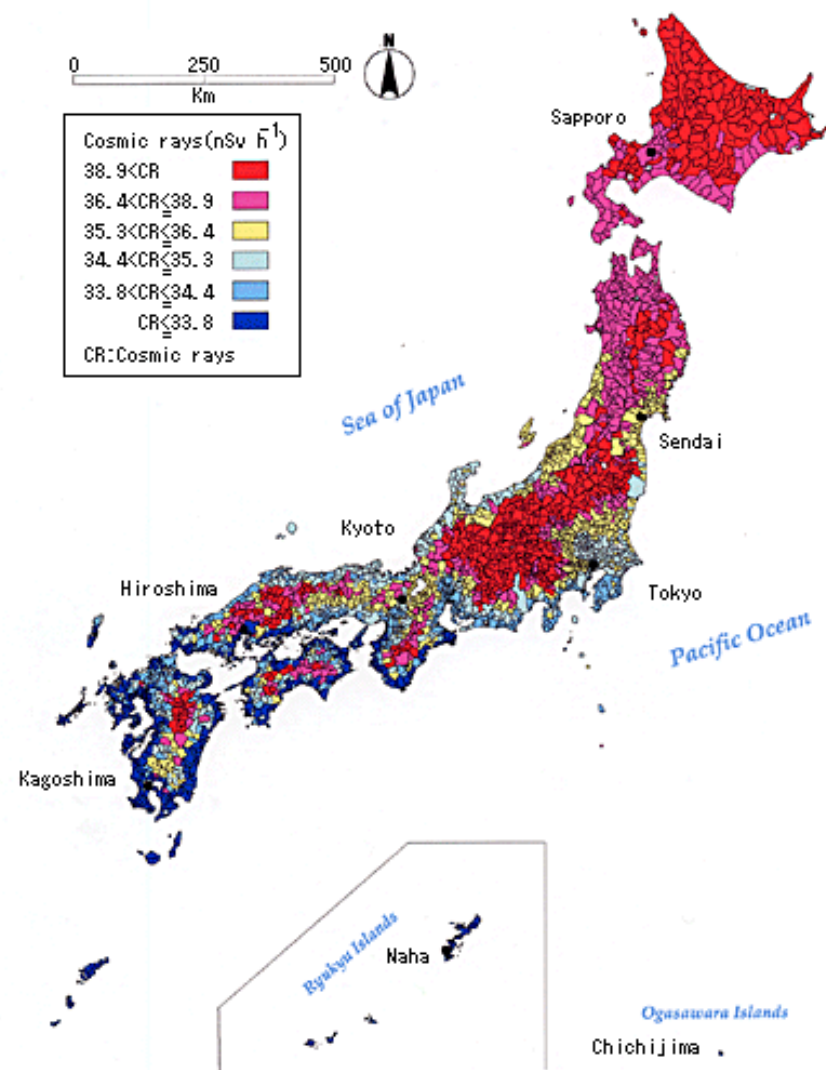
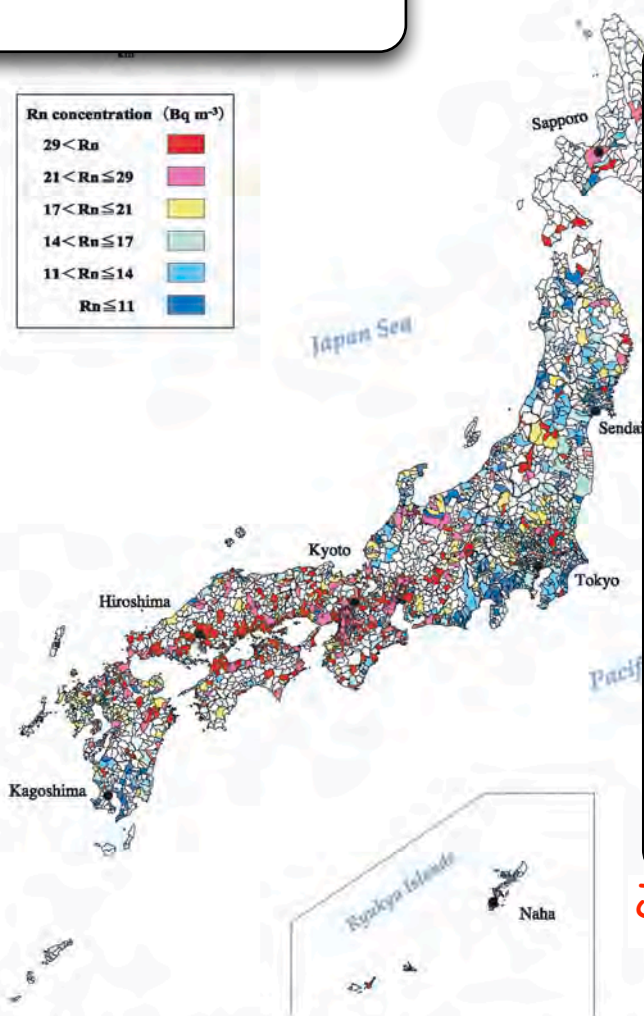


Fig. 4. Graphical expression of annual average indoor radon concentrations in each municipality:
Whole nation

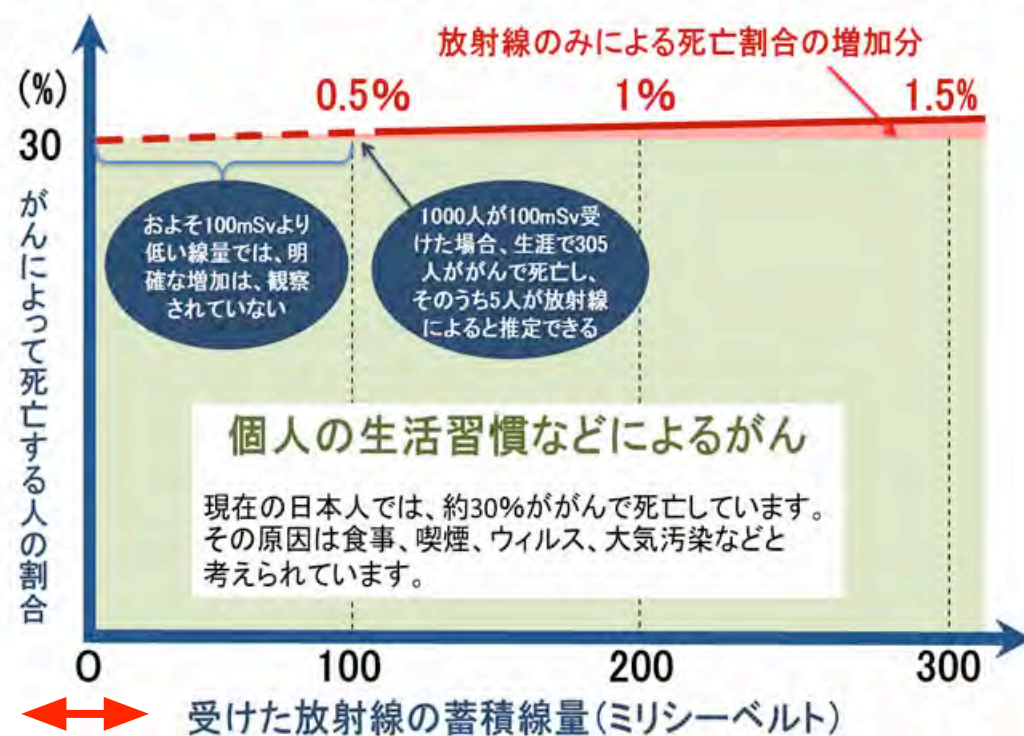


自然被ばく量も全国均一ではないため、個人の線量（先ほどのグラフの横軸）を正確に算出することにも困難が伴う。

左：屋内ラドン濃度マップ
右：宇宙線線量率マップ
共に放医研ニュースNo.92より引用



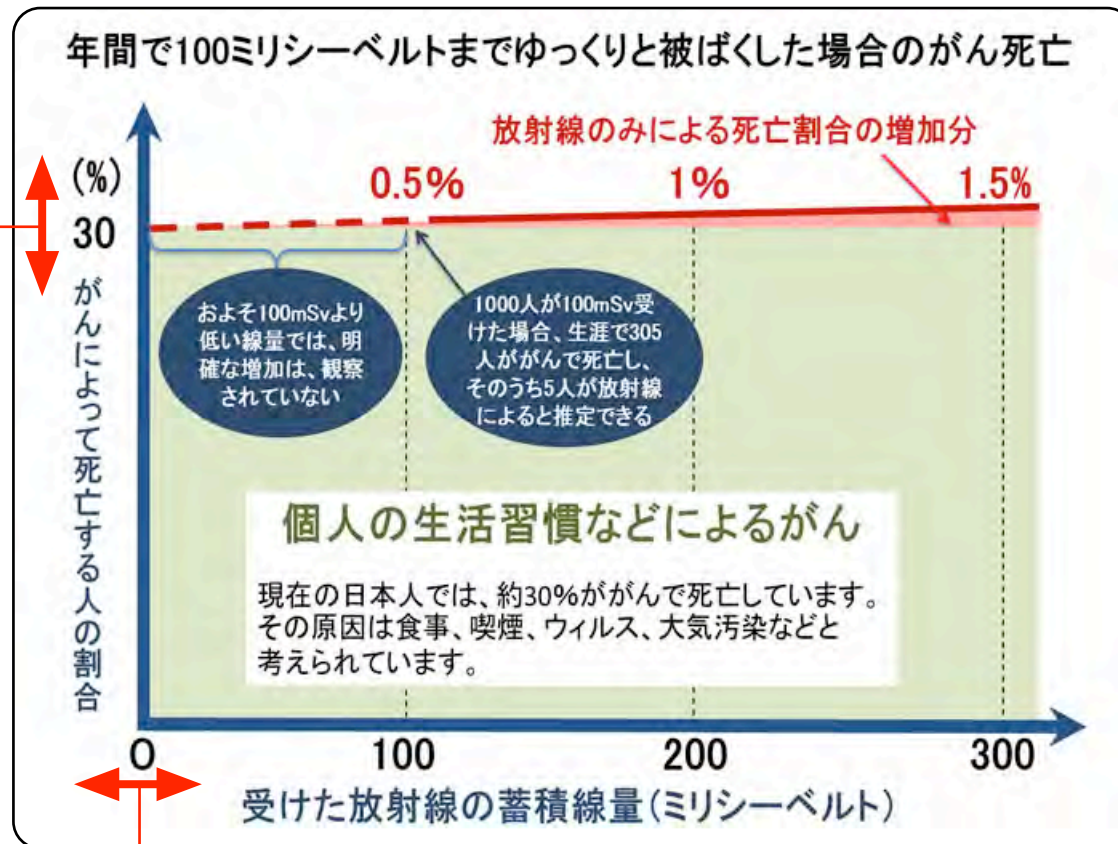
年間で100ミリシーベルトまでゆっくりと被ばくした場合のがん死亡



この数値が変動

Fig. 4. Graphical expression of annual average indoor radon concentrations in each municipality: Whole nation





地域差・個人差があるため、0.5%未満の差を検出することが難しい

現在得られているデータからは、100mSv以下の低線量被ばくによる健康影響があるか否か、統計的に断言することはできない。ただし、その影響は他の様々な要因（例えば県による違い）に紛れて識別できない程度には小さいと考えられる。

トランスサイエンス

現在得られているデータからは、100mSv以下の低線量被ばくによる健康影響があるか否か、統計的に断言することはできない。ただし、その影響は他の様々な要因（例えば県による違い）に紛れて識別できない程度には小さいと考えられる。

ここまでは、科学的に議論できる。
（反論がある場合でも、データの取り方が正しいか？と
いった科学的な議論が成立する）

トランスサイエンス

現在得られているデータからは、100mSv以下の低線量被ばくによる健康影響があるか否か、統計的に断言することはできない。ただし、その影響は他の様々な要因（例えば県による違い）に紛れて識別できない程度には小さいと考えられる。

ここまでは、科学的に議論できる。
(反論がある場合でも、データの取り方が正しいか？と
いった科学的な議論が成立する)

たとえわずかな確率であっても、がん
という重大な結果をまねく以上、追加
の被ばくは避けるべきではないか？

他のリスクと同等であれば、被災地の
復興のためにある程度の被ばくは許容
できるのではないか？

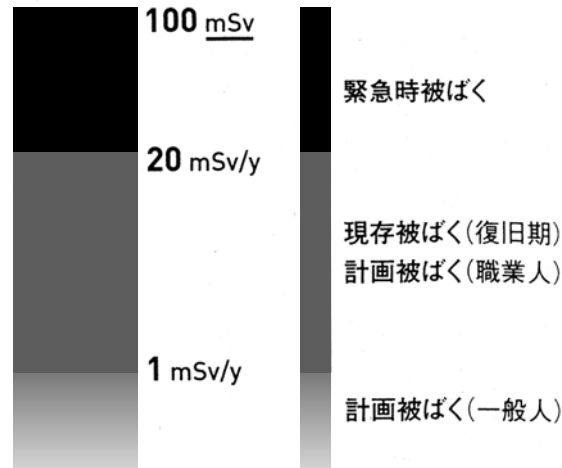
これは、科学的だけでは結論を出せない。

▼
「トランスサイエンス」

緊急時の線量管理に関するICRP勧告のポイント

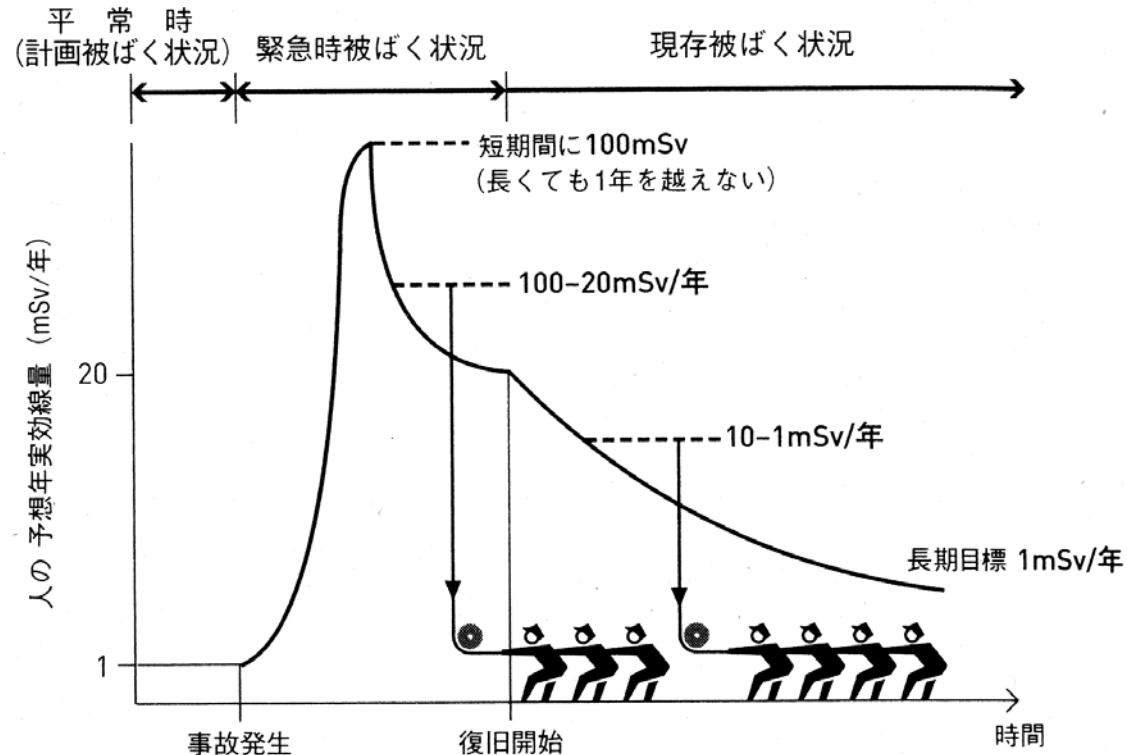
※ ICRP勧告103、109、111は、日本アイソトープ協会のサイトで日本語版が無償公開されている
下図は「語りあうための ICRP 111 -ふるさとの暮らしと放射線防護-」より引用

- 緊急時
短期間（長くて1年以内）で考える。そのため、100 mSv/y ではない
- 事故後の復旧期
1年の単位で考えるが毎年同じではない。回復につれ、状況に応じより低い参考レベルを選択していく



ICRP（国際放射線防護委員会）はチェルノブイリ事故からの回復の経験を踏まえ、ICRP Publ. 111を作成した。

その中で示されている20mSv/yという値は、緊急時被ばくと復旧期の被ばくの境界線である。右図が示すとおり「一旦設定した線量目標が達成されたら、より低い目標を設定し、最終的には1mSv/yを目指すべき」というのがICRPが勧告する内容。



----- 参考レベルは

- 被ばく状況の改善を進める目安とする目標値
- 目標設定→達成→さらに改善する目標に→達成
全体の状況を見ながら、これを繰り返す

「被ばくが参考レベルよりも下に低減されたという事実は、最適化プロセスに従って被ばくをさらに低減できる余地がある限り防護対策を打ち切るための十分条件とはならない。」（ICRP Publ. 111 (53)）

食品の基準値の設定

基準値のもととなる1人当たりの年間線量の上限值
1 ミリシーベルト

水

約 0.1 ミリ
シーベルト

食品

約 0.9 ミリシーベルト (0.88~0.92)

放射性セシウム

放射性
セシウム以外

飲料水の基準値
(10ベクレル/kg) の水を
1年飲んだ場合に
相当する線量を割当て

セシウム以外の放射性物質による
影響を考慮
(例：19才以上では、多めに見積もって食品からの
線量の約12%)
※ストロンチウム90、プルトニウム、ルテニウム106

食品の基準値の設定

放射性セシウムからの
年間の線量を

食品 1 kg
あたりの
量に換算

- ※年齢区分別の摂取量と
換算係数 (実効線量係数)
を用いて算出
- ※流通する食品の半分以上が
基準値上限の放射性物質
を含むと仮定

年齢区分	摂取量	限度値(ベクレル/kg)
1歳未満	男女平均	460
1歳～6歳	男	310
	女	320
7歳～12歳	男	190
	女	210
13歳～18歳	男	120
	女	150
19歳以上	男	130
	女	160
妊婦	女	160
最小値		120

各年齢区分のうち
最も厳しい(小さい)値をもとに

基準値
100ベクレル/kg

レポート課題



このコップ1杯の牛乳に、放射性核種である ^{137}Cs が100Bq、 ^{134}Cs が20Bq含まれているとする。

課題A ^{137}Cs 、 ^{134}Cs 、および天然核種である ^{40}K がどんな放射線を出しているか、調べられる範囲で記述せよ。

課題B この1杯を飲むことによる被ばくリスクを計算し、そのリスクの大きさを自然・医療被ばくとの比較、またはLNT仮説に基づいて論ぜよ。

独習のための参考資料

放射線・放射性核種について独習したい方のためにリンク集を作成してあります。よろしければご利用下さい。

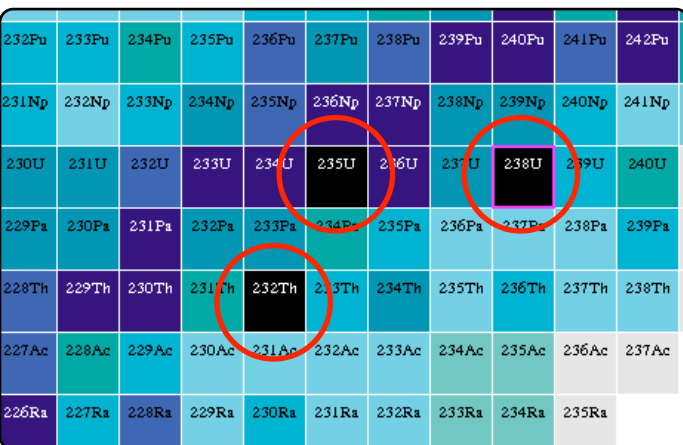
http://www.agc.a.u-tokyo.ac.jp/wp/fg6_150413_learning/

※ アグリコクーン FG6 2015年度のアーカイブからも参照できます。

The image shows a screenshot of the AGRI-COCOON website. On the left, a sidebar contains a list of links: HOME, FG1: 食の科学, FG2: 国際農業と文化, FG3: 農学におけるバイオマス利用研究, FG4: 生物多様性・生態系再生, FG5: 農学における情報利用研究, FG6: 農における放射線影響, and links to the main research areas (農学主眼科目: 食の安全科学, 農学主眼科目: 放射線影響). The 'FG6: 農における放射線影響' link is circled in red. In the center, a banner for the 'Food Science Forum Group, 2015' is visible. On the right, a table titled '農業環境における放射線影響ゼミナール (大学院) / 農業環境の放射線影響 (学部) 日程表 (講義)' lists four seminars. The second seminar, dated April 13th, is titled '放射性物質・放射線の基礎' and lists '広瀬 農 特任助教' as the speaker. Below the speaker's name, the link '独習のための参考資料 (html版)' is circled in red. A red arrow points from this link to the '2015年度のアーカイブ' link in the top navigation bar, which is also circled in red.

2015年度のアーカイブ 2014年度のアーカイブ 2013年度のアーカイブ		
第1回 4月6日	● 農環境の放射能汚染 田野井慶太郎 准教授 (農学生命科学研究科 附属放射性同位元素施設)	PDF link
第2回 4月13日	● 放射性物質・放射線の基礎 広瀬 農 特任助教 (農学生命科学研究科 附属放射性同位元素施設) 独習のための参考資料 (html版)	PDF PDF report
第3回 4月20日	● 放射線の人体影響 広瀬 農 特任助教 (農学生命科学研究科 附属放射性同位元素施設)	PDF report Q&A
第4回 4月27日	● 農学部の放射能汚染に対する取り組み 中西友子 教授 (農学生命科学研究科 附属放射性同位元素施設)	report

補足資料 1 核図表： α 壊変・ β 壊変の規則性



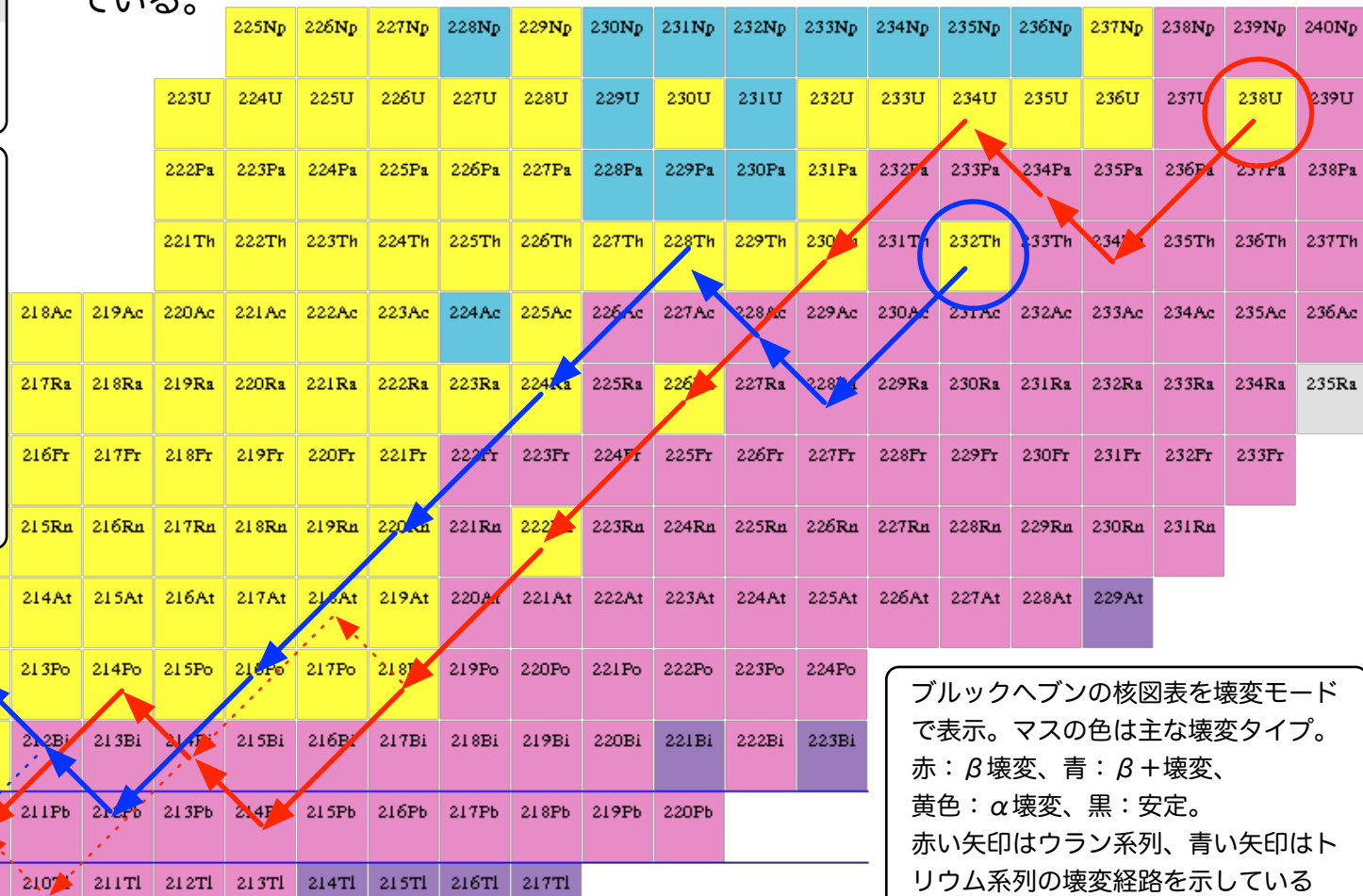
上の図は ^{232}Th 、 ^{238}U 付近のブルックヘブンの核図表を半減期モードで表示したもの。暗色が長半減期を示す。

赤丸で囲んだ3つの核種（特に ^{232}Th 、 ^{238}U ）は半減期が長く、地球誕生の際に取り込まれた成分がまだ残っている。

^{235}U は核分裂を起こすので原発の燃料として重要だが、天然ウランの99%以上は ^{238}U である。

天然に存在する α 壊変核種の多くは ^{232}Th 、 ^{238}U を始点とする子孫核種。 ^{232}Th 、 ^{238}U が環境中に広く分布しているため、その子孫核種も環境中に遍在している。

^{232}Th の子孫（トリウム系列）、 ^{238}U の子孫（ウラン系列）以外では、同じく地球誕生から残存している ^4K や、大気と宇宙線の反応で生成する ^{14}C 、 ^3H 等も遍在している。

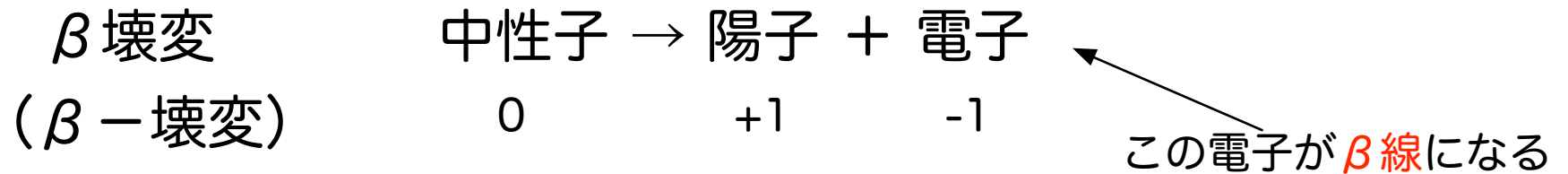


<http://www.nndc.bnl.gov/chart/>

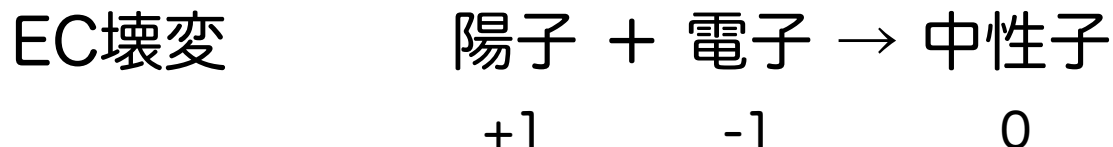
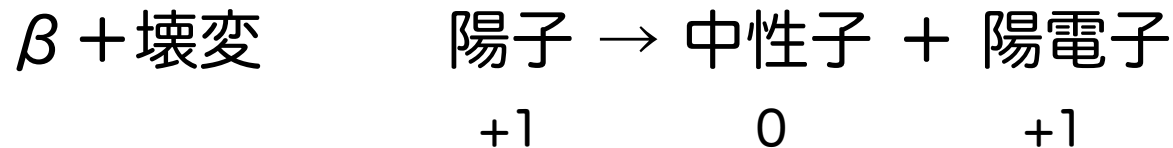
ブルックヘブンの核図表を壊変モードで表示。マスの色は主な壊変タイプ。
赤： β 壊変、青： β +壊変、
黄色： α 壊変、黒：安定。
赤い矢印はウラン系列、青い矢印はトリウム系列の壊変経路を示している（点線はマイナーな経路）。

補足資料 2 広義の β 壊変

■核図表左上に壊変 = 中性子が 1 個減り、陽子が 1 個増える



■核図表右下に壊変 = 陽子が 1 個減り、中性子が 1 個増える



補足資料 2 広義の β 壊変

原子核には安定となる陽子：中性子比が存在し、そこから外れると不安定（＝放射性）になる。

不安定な原子核は、安定な陽子：中性子比を目指して壊変する。これを広義の β 壊変と呼び、 β 壊変、 β^+ 壊変、EC壊変が含まれる。

β 壊変で生じる電子が壊変のエネルギーを受け取ったものが β 線。

