

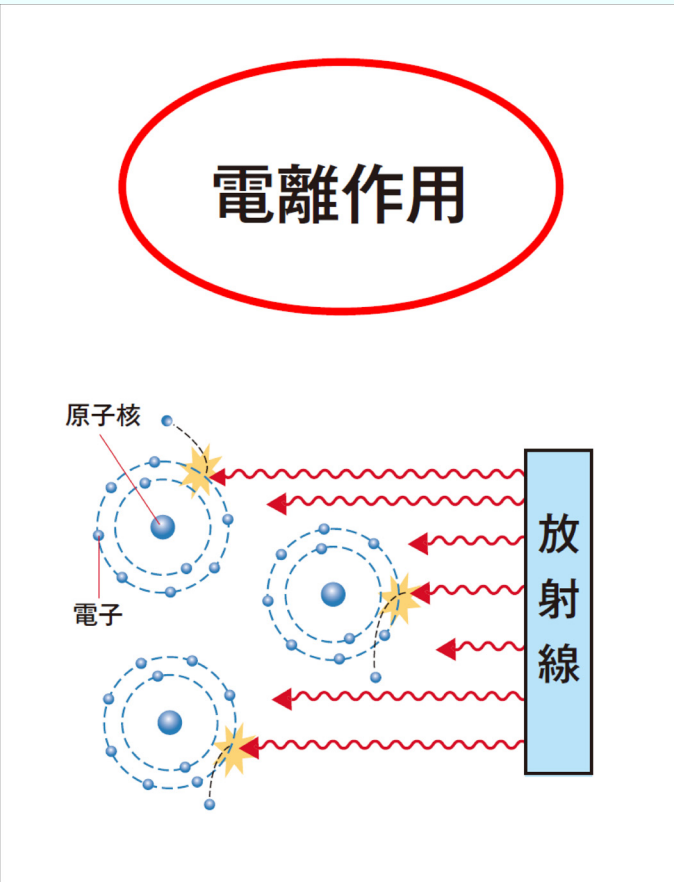
量子放射線の世界

# 放射線安全管理

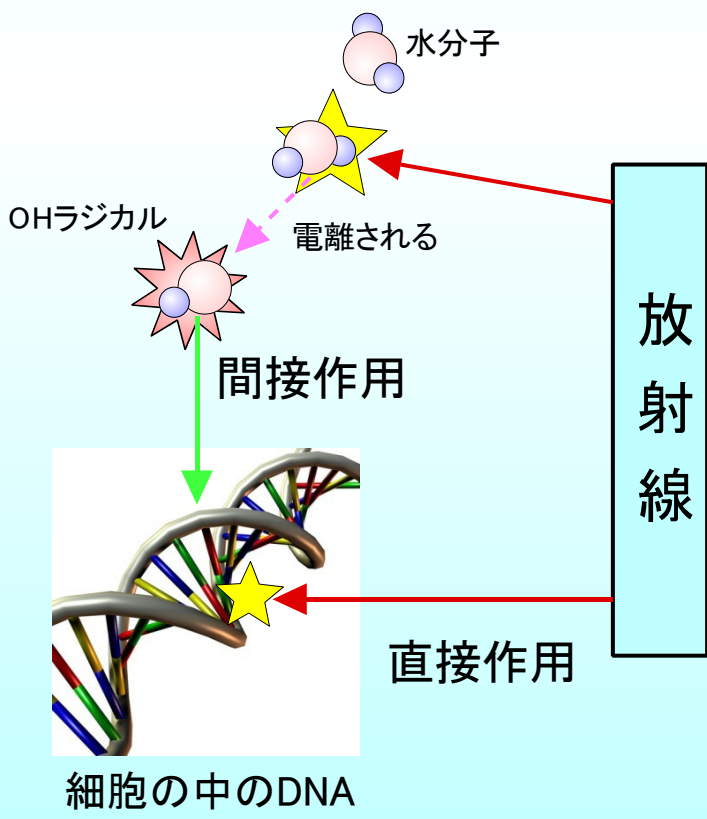
大阪府立大学 量子放射線系専攻  
秋吉 優史

# 放射線を身体に受けると何が起ころの

放射線は原子の周りの電子を弾き飛ばしてしまい、結合している手を切ってしまう「電離作用」を示します。



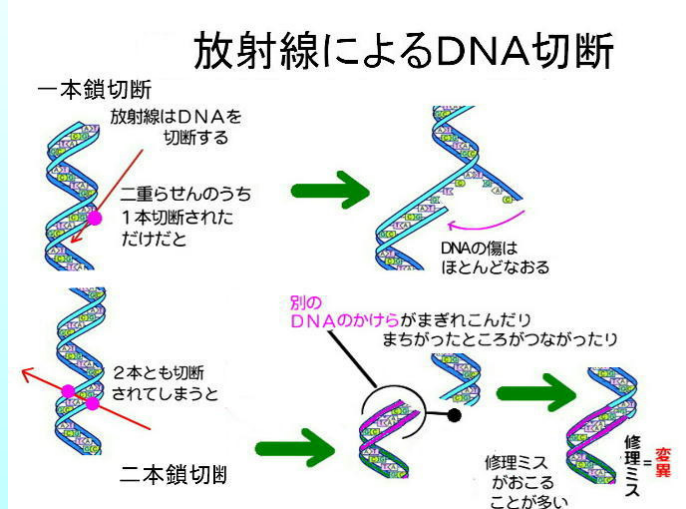
直接DNAを構成する原子を電離して切断するほかに、水を電離して、活性酸素のような化学的に活性なラジカルを作り出します。このラジカルが、間接的にDNAを切断します。



細胞のDNAは放射線以外にも呼吸により発生する活性酸素などで常に攻撃されています。

このため、細胞は切断されたDNAを元通りに修復しています。修復できないほどDNA切断が多い場合には、アポトーシス(自分のDNAを細かく切り刻む現象)によって細胞は自ら死んでしまい影響を後に残しません。

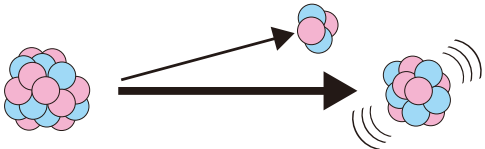
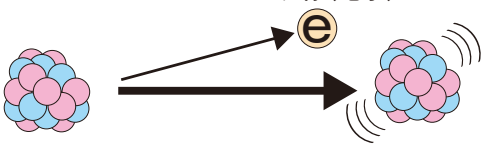
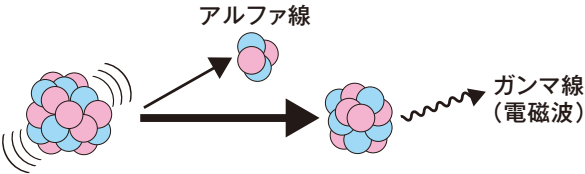
余りにもたくさんの攻撃を受けると、ごくまれに起こるDNA修復誤りによって遺伝子突然変異が起こり、発がんの原因になると考えられています。



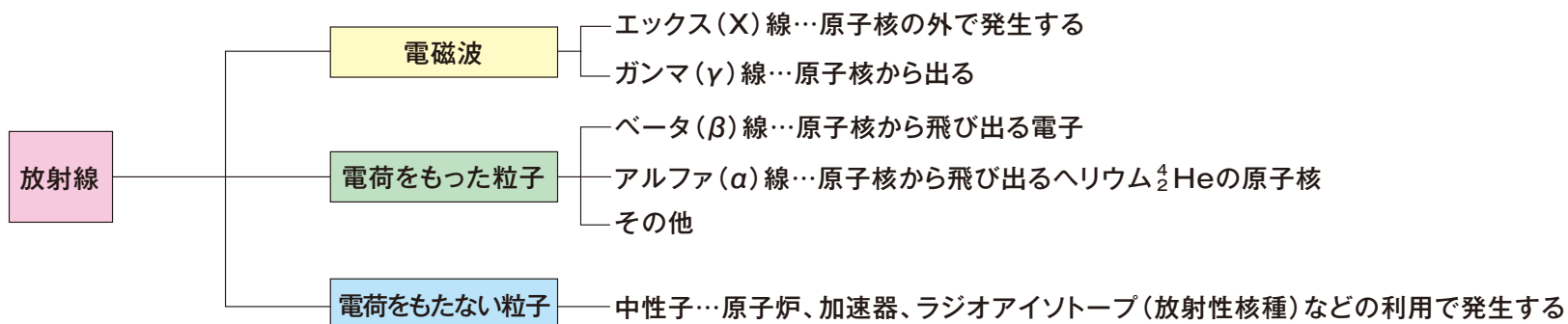
# 講義内容

- **放射線とは何か**
- 物質と放射線の相互作用
- 放射線の検出
- 天然の放射性核種と半減期
- 放射線の人体への影響
- 放射線の単位
- 放射線防護
- 量子放射線系専攻について

# 放射線の種類

|   |   |   |
|---|---|---|
| <p>アルファ (<math>\alpha</math>) 壊変 (崩壊)</p> | <p>アルファ線 (<math>{}^4_2\text{He}</math>原子核)</p>  | <p>(例)</p> ${}^{226}_{88}\text{Ra} \xrightarrow{\alpha} {}^{222}_{86}\text{Rn}$ |
| <p>ベータ (<math>\beta</math>) 壊変 (崩壊)</p>   | <p>ベータ線 (電子)</p>                                | <p>(例)</p> ${}^{24}_{11}\text{Na} \xrightarrow{\beta} {}^{24}_{12}\text{Mg}$    |
| <p>ガンマ (<math>\gamma</math>) 線の放出</p>     | <p>アルファ線</p>  <p>ガンマ線 (電磁波)</p>                 |   |

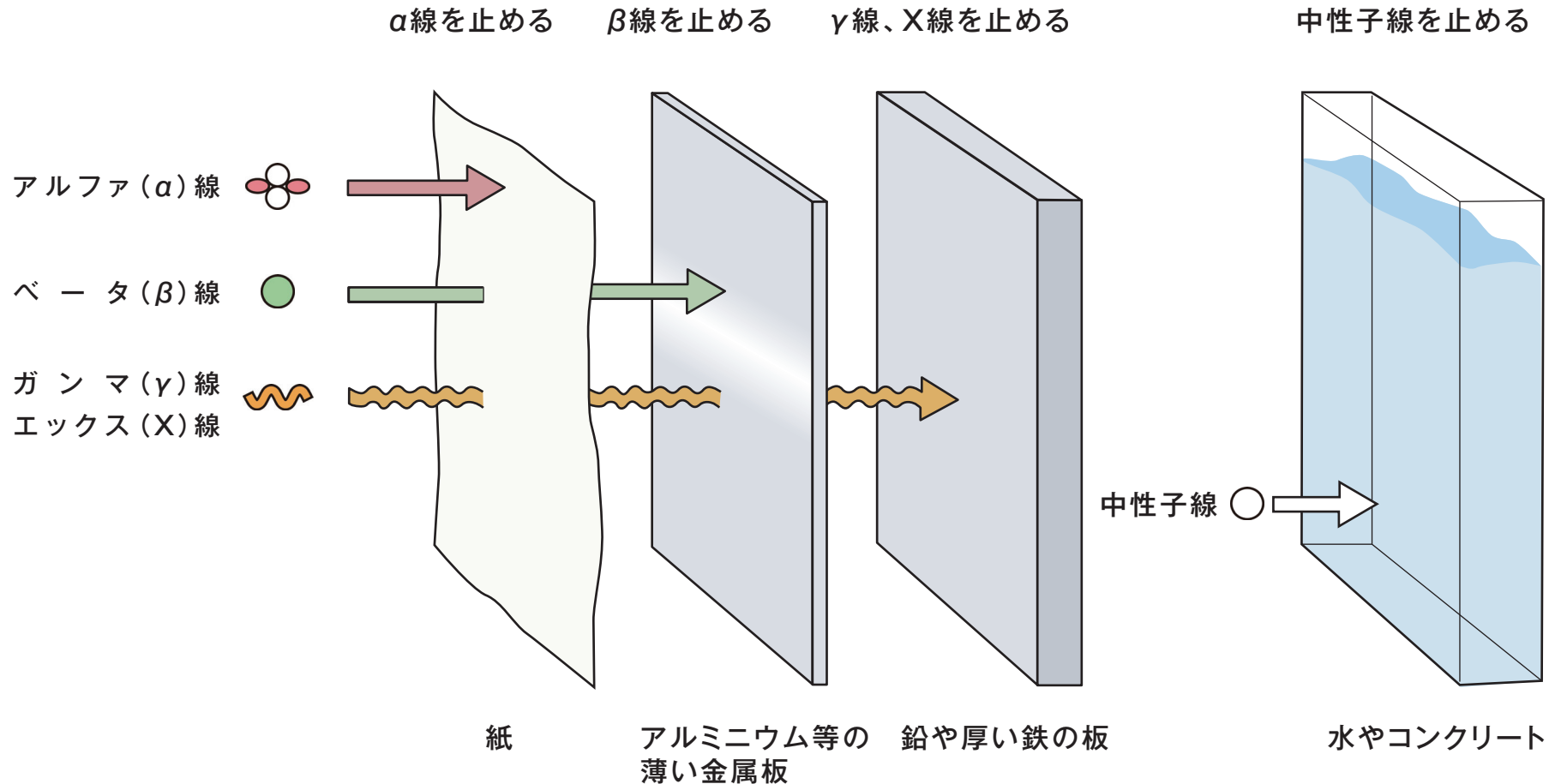
● 陽子 ● 中性子





# 放射線の種類と透過力

線は紙一枚で止まってしまいますが、逆に言うと紙一枚の厚さの範囲に持っているエネルギーを全部一気に放出してしまうため、体の中で線を出されるととても影響が大きくなります。

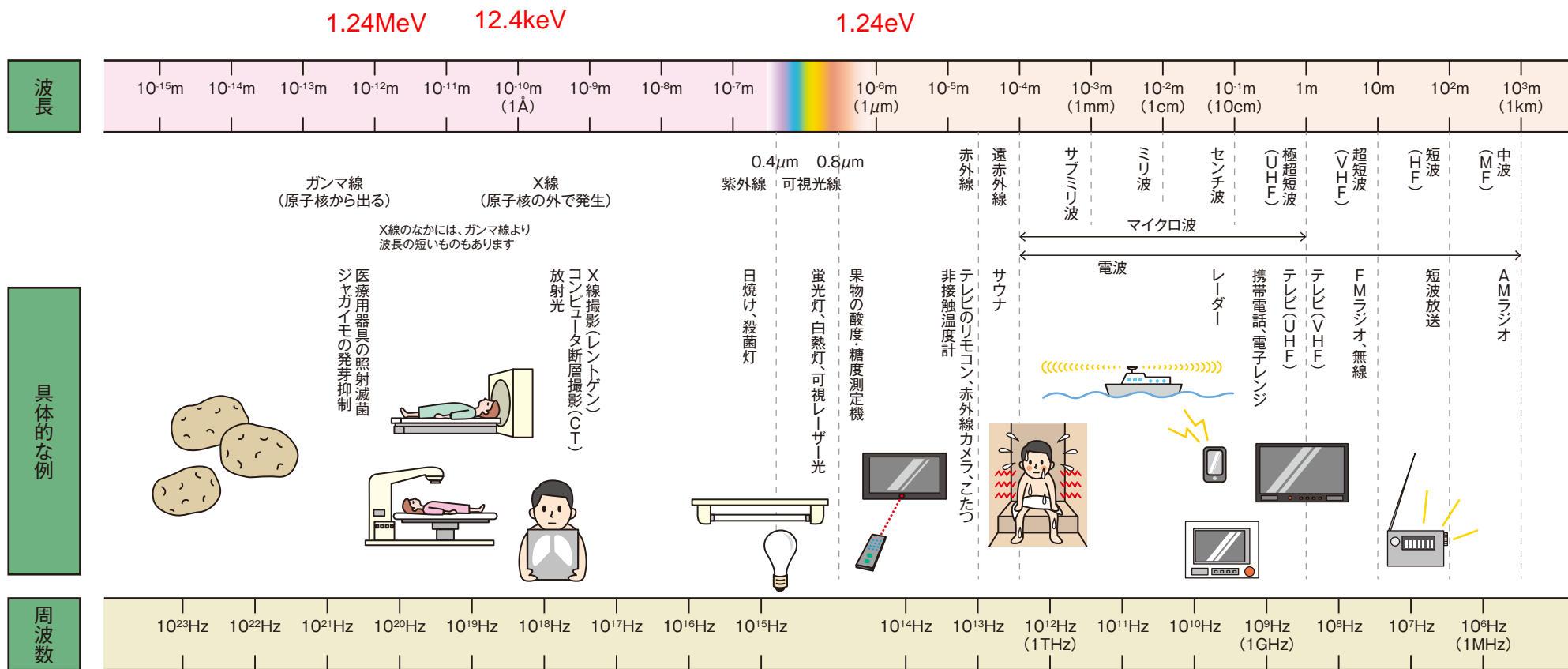


線は水の中(=体の中)を最大で2mm弱進むことが出来、細胞から見ると比較的広い範囲にエネルギーを落としていき、また体の外から来た場合はほとんど皮膚で止まります。

線は透過能力は高く、遠くから飛んできて体の中までやってきますが、逆に体内で放出されてもほとんど素通りしていきます。

# 電磁波の仲間

光子のエネルギー  $E \approx 1240 / \lambda$  [eV],  $\lambda$ : 波長[nm]



線、X線は光・電磁波の仲間ですが、とても波長が短く、エネルギーが高いため、物質を透過したり、原子の周りを回っている電子を弾き飛ばして様々な影響を与えます。

# 講義内容

- 放射線とは何か
- **物質と放射線の相互作用**
- 放射線の検出
- 天然の放射性核種と半減期
- 放射線の人体への影響
- 放射線の単位
- 放射線防護
- 量子放射線系専攻について

# 放射線と物質の相互作用

## イオンビーム ( $\alpha$ 線)

質量が電子に比べてはるかに重いため、電子との衝突によりほとんど曲げられず、少しずつエネルギーを失う。相互作用は電荷の二乗に比例、速度の二乗に反比例(エネルギーに反比例)し、ブラッグピークで急激にエネルギーを放出し、原子核の弾き出しを起こす。

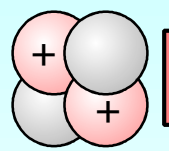
## 電子線 ( $\beta$ 線)

物質中の電子との衝突によって、簡単に方向やエネルギーが変化するため、まっすぐに進まず、広い範囲に広がる。このため、平均的な飛程という物は求めにくく、最大飛程で評価される。重元素に入射すると、原子核周辺の強い電場で急激に曲げられることにより、制動放射X線の発生割合が大きくなる。

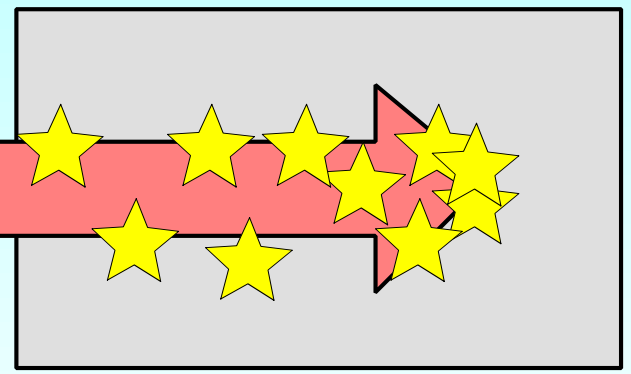
## $\gamma$ 線、X線

物質を進むにつれて指数関数的に強度が弱くなっていくが、その際の線減弱係数は光子のエネルギーによって関与する素過程の違いが変化するため大きく異なる。数MeVの領域では高エネルギーの方が透過力は高い。光電効果、コンプトン効果により物質中で電子線を生成するため、高エネルギーの光子はごく僅かではあるが原子核の弾き出しも起こす。

アルファ  
**α線**



ヘリウムの  
原子核



狭い範囲に一気に  
エネルギーを放出します

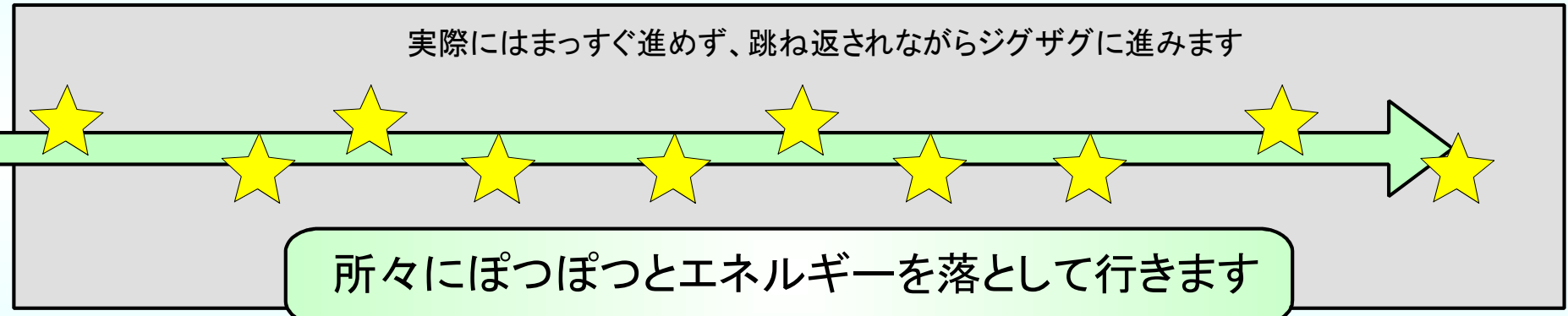
★  
放射線がエネルギーを  
物質に与えたところ  
(電離、励起など)

水の中では数十μm程度、空気の中でも数cmしか飛ばず、紙一枚で止まってしまいますが、その範囲に一気にエネルギーを放出します。

ベータ  
**β線**



電子  
ヘリウムの原子核の7000分の1の重さしか有りません



実際にはまっすぐ進めず、跳ね返されながらジグザグに進みます

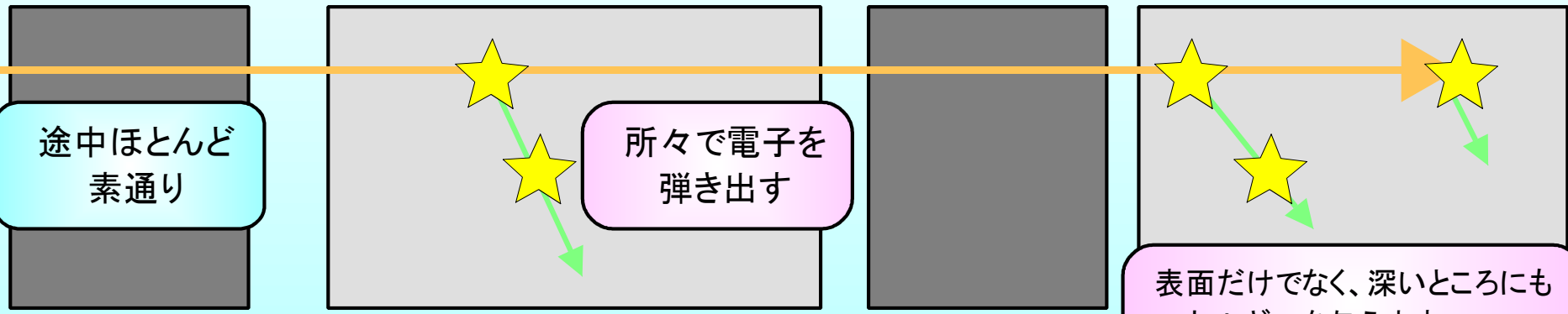
所々にぽつぽつとエネルギーを落として行きます

水の中でも1cm程度、空気の中では数m飛んでいき、少しずつしかエネルギーを落としません。

ガンマ  
**γ線**

波長の短い  
光の仲間

プラスやマイナスの電気を  
持っていないため、ほとんど  
素通りしていきます



途中ほとんど  
素通り

所々で電子を  
弾き出す

表面だけでなく、深いところにも  
エネルギーを与えます。

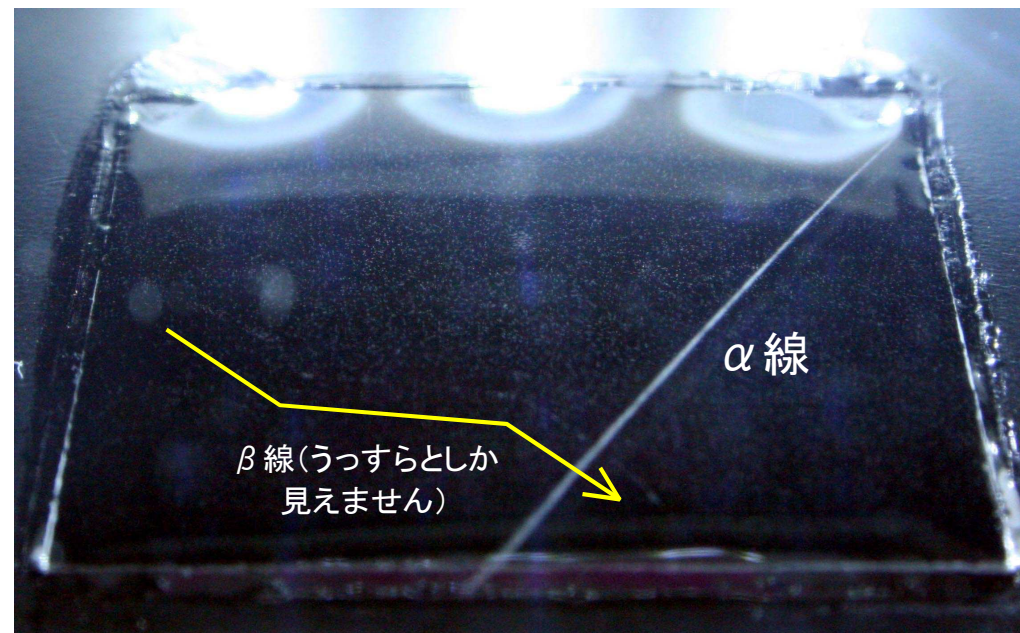
弾き出された電子は、β線と同じように振る舞います

# 「霧箱」を使って放射線 を見てみよう!

放射線は普通目に見えませんが、音も聞こえず人間には感じ取ることが出来ないため、どんなものなのか良く分かりませんよね。

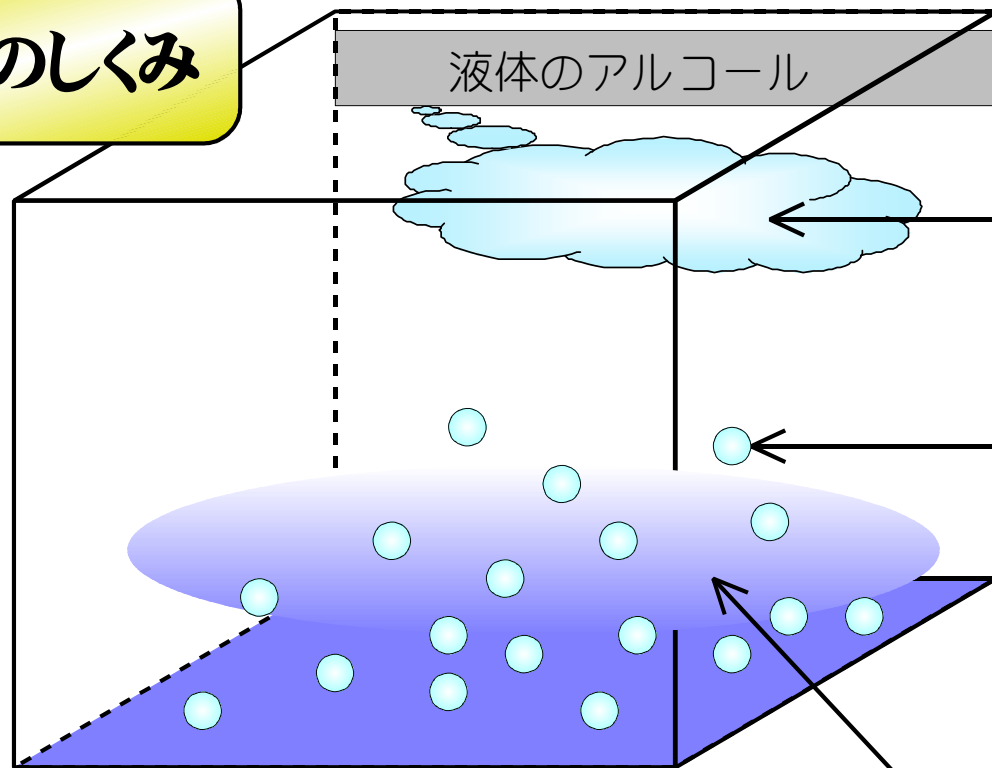
そこで、100年ほど前に発明された「霧箱」という装置を使って放射線が通った後を目で見えてみましょう!

普段、何もないと思っていた空気の中にも、放射線はたくさん飛び交っているんですよ。



放射線にも色々種類があって、その種類によって飛び方が違うんですよ。

## 霧箱のしくみ



温度が高いとたくさん蒸発します

アルコールの蒸気

液体のアルコールの  
小さな粒

温度が低いと蒸気では居られません

過飽和の蒸気

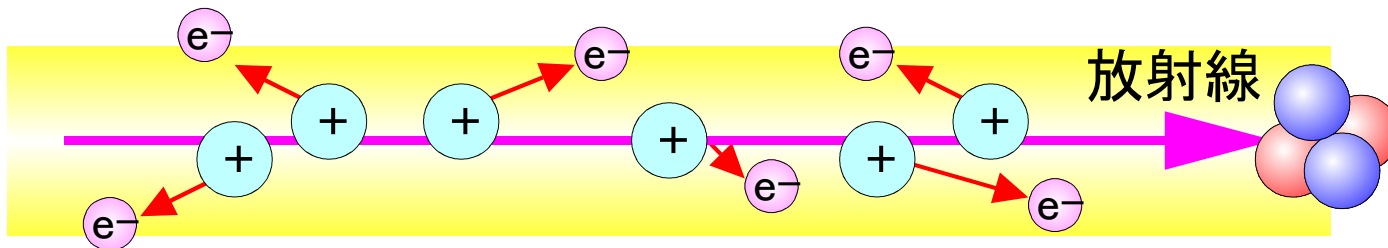
ドライアイスやペルチエ素子で  
とても冷たく冷やされています

温度が低くなると、蒸発した気体のアルコールは液体に戻ろうとします。霧のように見える白い点々は液体のアルコールの小さな粒です。でも、温度が下がったのに液体の粒を作らずにためらっている蒸気も漂っています（過飽和状態と言います）。そこにちょっとした刺激を加えてやると、過飽和の蒸気は次々に液体の粒に変化していきます。



## どうして白い筋の様に見えるの？

放射線が空気中を走ると、たくさんの電子を弾き飛ばしてプラスとマイナスのイオンのペアを作ります。このイオンが過飽和の蒸気の中に出来ると、そこを中心核にして小さな液体の粒になります。この液体の粒が放射線が通った後にたくさん出来るので、白い筋の様に見えるのです。（放射線の飛跡と言います）

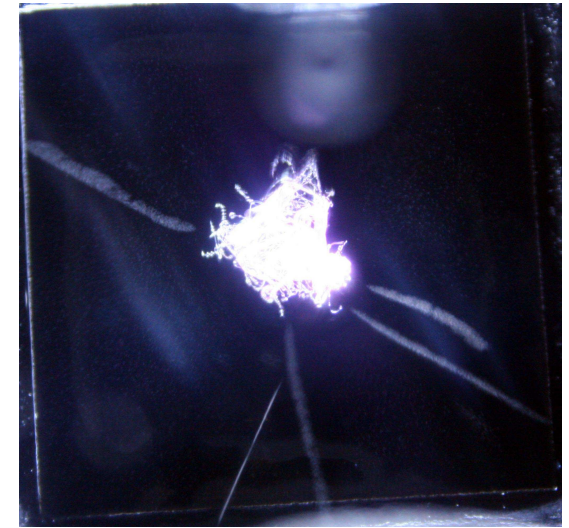


### 電離によるイオン対の生成

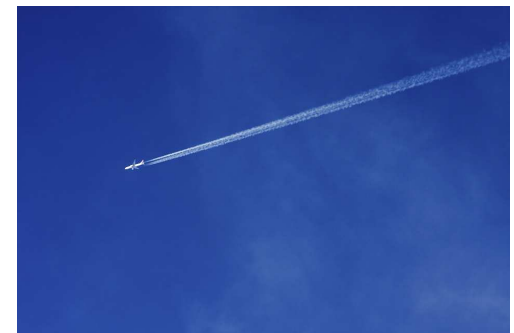
放射線として飛んで行っている原子核や電子は小さすぎてとても目では見られませんし、とても素早いので超スピードのカメラでも追いつきません。

でも、飛んでいった跡が残って、目で見えるのです。

これは、空の上の飛行機雲と同じです。飛行機が飛んでいった後にもしばらく飛行機雲が残っているのを見ることができます。飛行機雲は、空の上の寒いところで過飽和になった水蒸気が、飛行機のエンジンから出てきた排気ガスなどが刺激になって小さな液体の水の粒、つまり雲になった物です。



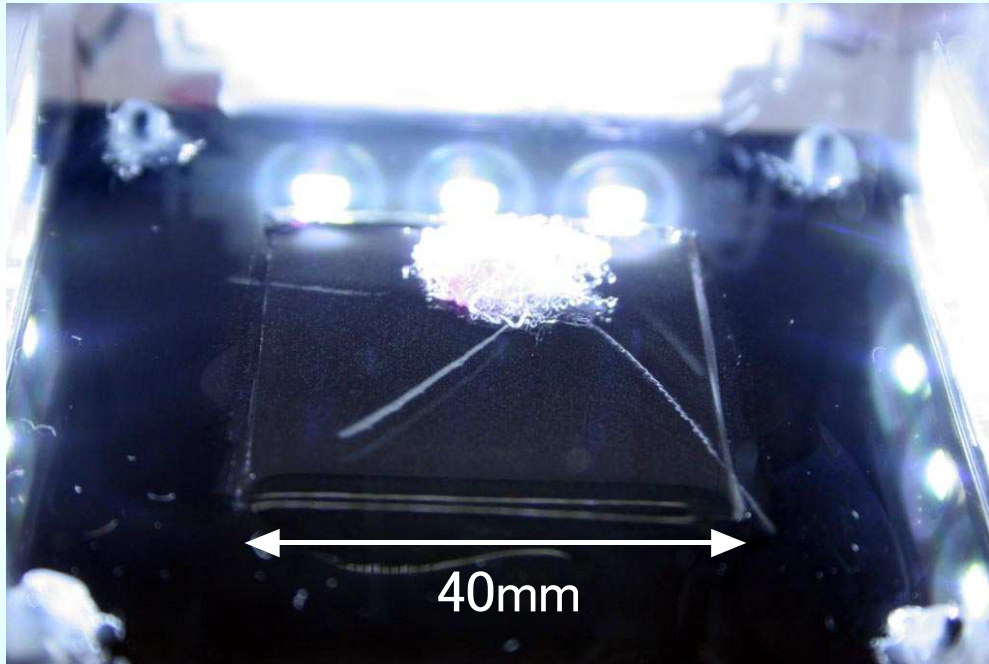
過飽和の蒸気は冷やされている容器の底に薄く広がっているだけなので、底に平行に走った放射線しか見ることができません。また液体の粒はすぐ蒸発してしまって、数秒で見えなくなってしまいます。





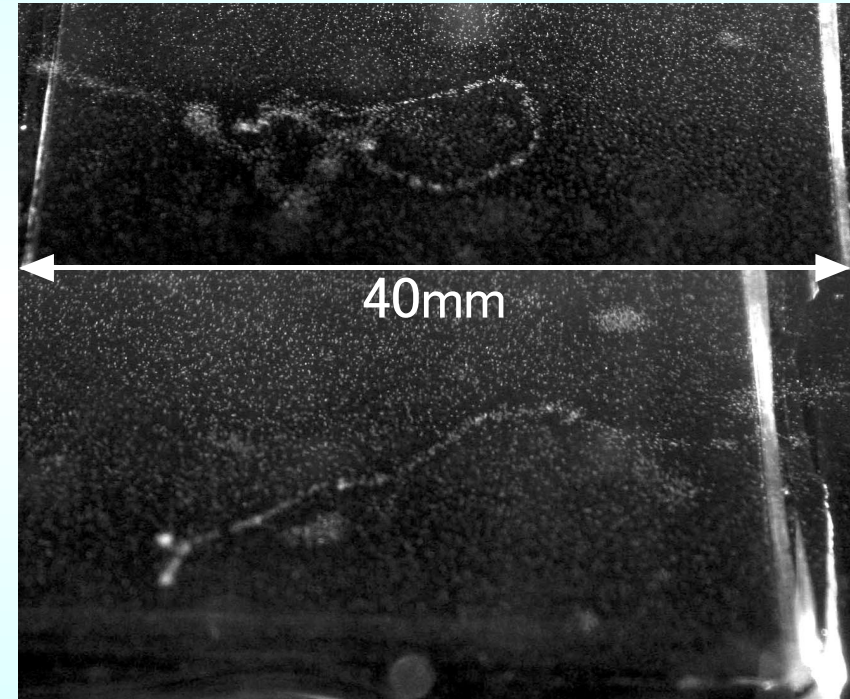
## 霧箱での飛跡の観察

### $\alpha$ 線の飛跡



真っ直ぐで、はっきりとしています。  
空気中を数cm飛んだだけで  
止まってしまいます。

### $\beta$ 線の飛跡



糸くずのよううっすらとした、  
曲がりくねった跡を残します。  
よく見ないと、見ることはできません。

# 電子線(β線)とα線の比較

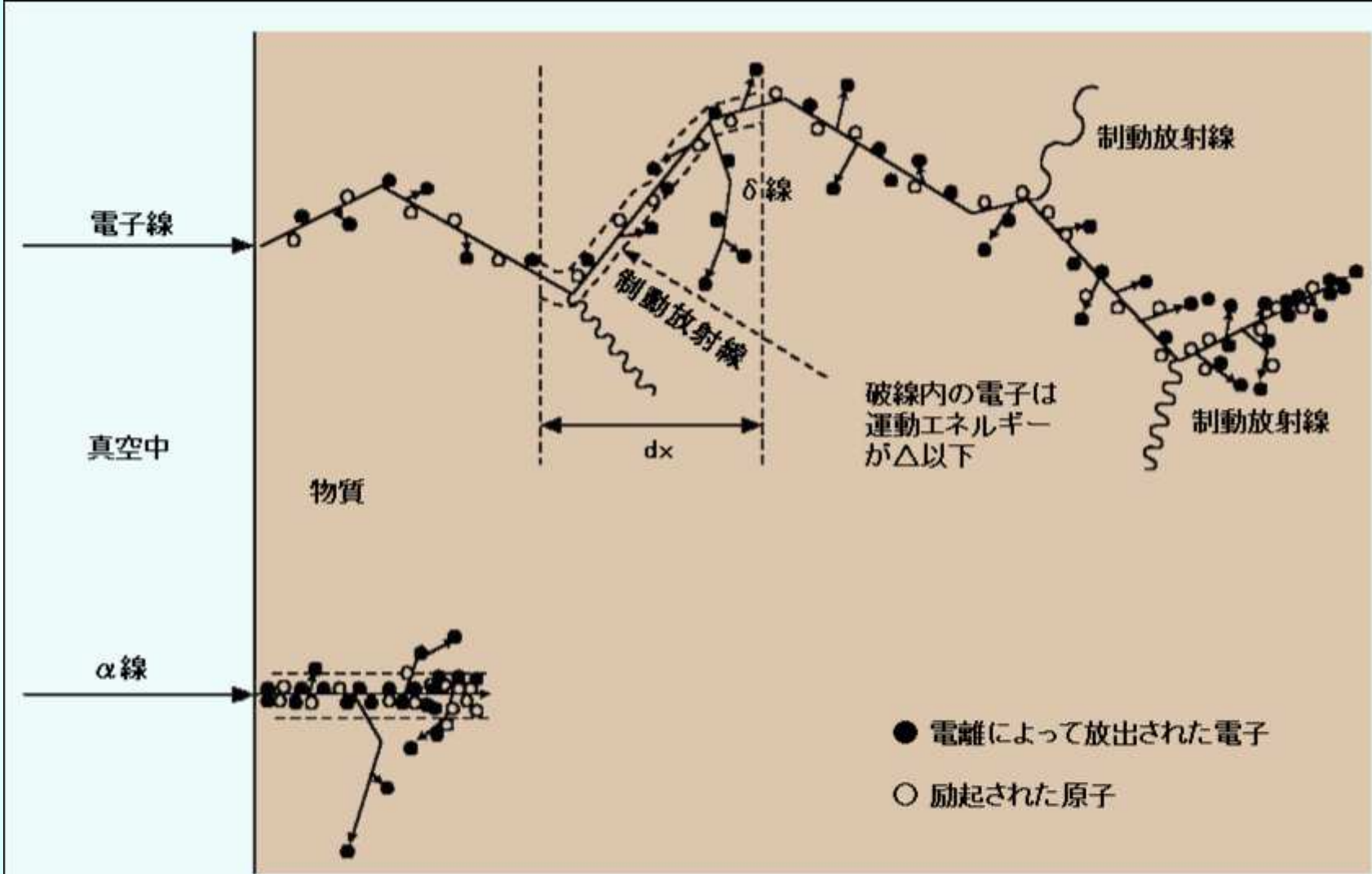


図1 荷電粒子と物質の相互作用

[出典]江藤秀雄(ほか):放射線防護、丸善(1982年12月)、p.54

# 電子線(β線)の飛程

β線は、そもそも放出される時点でエネルギーが一樣ではない。これはベータ崩壊の際に反電子ニュートリノが絡む三体崩壊であり電子のエネルギーが決まらないためである。さらに物質に入射後は非常に複雑な散乱過程を示すのであるが、概ね物質の厚さの増加に伴い指数関数的に強度が減少する。なお、入射する物質が変わっても質量衝突阻止能はほとんど変わらない。数MeV程度のβ線では制動放射に伴う放射阻止能は衝突阻止能よりずっと小さいが、ターゲットの原子番号Zに比例して大きくなるため、遮蔽の際には低Zの材料を使用する。

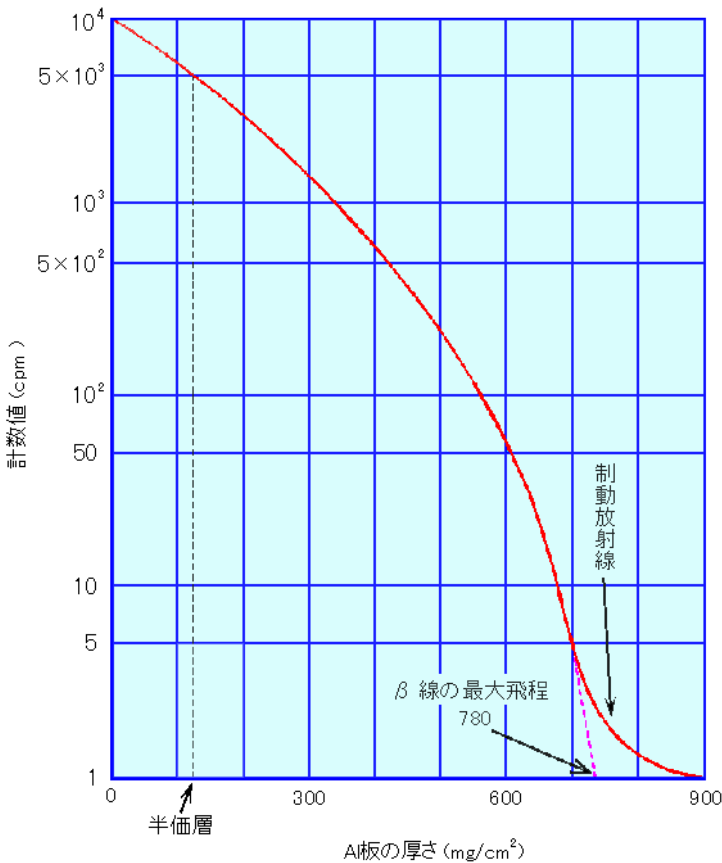


図3  $^{32}\text{P}$ のβ線のアルミニウムによる吸収曲線

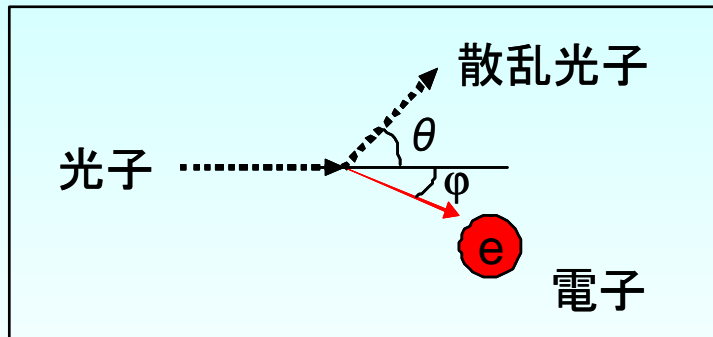
[出典] 江藤秀雄(ほか): 放射線の防護, 丸善(1982年12月), p.56

入射電子線のエネルギー  $E$  (MeV),  
 最大飛程  $R$  ( $\text{g}/\text{cm}^3$ ) とすると、  
 アルミ中での最大飛程は以下の様に与えられる

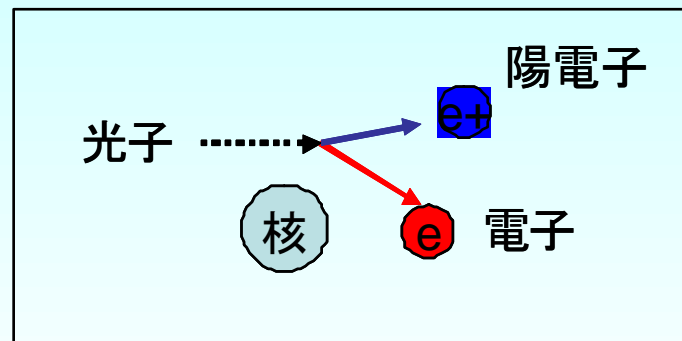
$$R = 0.542 E - 0.133 \quad (0.8 < E)$$

$$R = 0.407 E^{1.38} \quad (0.15 < E < 0.8)$$

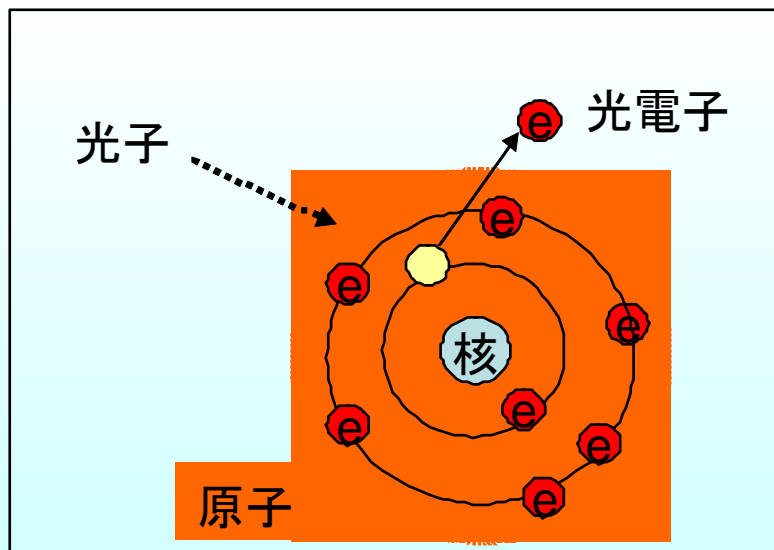
# ガンマ線と電子・原子核・原子との反応



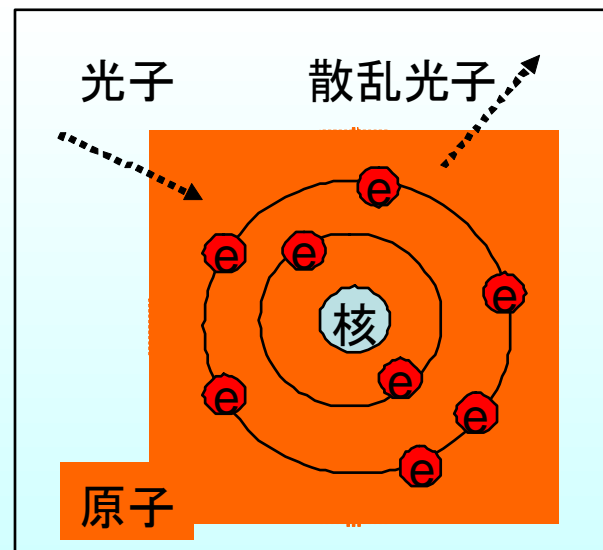
コンプトン散乱



電子対生成



光電効果



レイリー散乱

# $\gamma$ 線・X線と物質の相互作用

## レイリー散乱

弾性散乱。入射光のエネルギーが変化しない散乱過程。

## 光電効果

軌道電子に入射光子のエネルギーを全て与えて、軌道エネルギーを差し引いたエネルギーを持つ高速電子(光電子)を生成する。断面積は入射光子のエネルギーの $-3.2$ 乗に比例する。

## コンプトン散乱

軌道電子に入射光子のエネルギーの一部を与えて、高速電子(コンプトン電子)を生成する。散乱後のエネルギーは散乱角に依存し、連続スペクトルとなる。

## 電子対生成

入射光子のエネルギーが  $1.022\text{MeV}$  以上の場合、原子核近傍のクーロン場中で電子と陽電子の対を生成する。入射光子は全エネルギーを失い消滅し、電子・陽電子の静止質量エネルギーの残りは運動エネルギーとして分配される。

## 光核反応

高エネルギーの光子が原子核と直接反応し、様々な素粒子が放出される。 $Z=50$ 程度の核種では中性子の結合エネルギーが $10\text{MeV}$ 程度であり、これ以上のエネルギーの光子の入射により $(\gamma, n)$ 反応を起こして中性子が放出される。



# γ線・X線の減衰

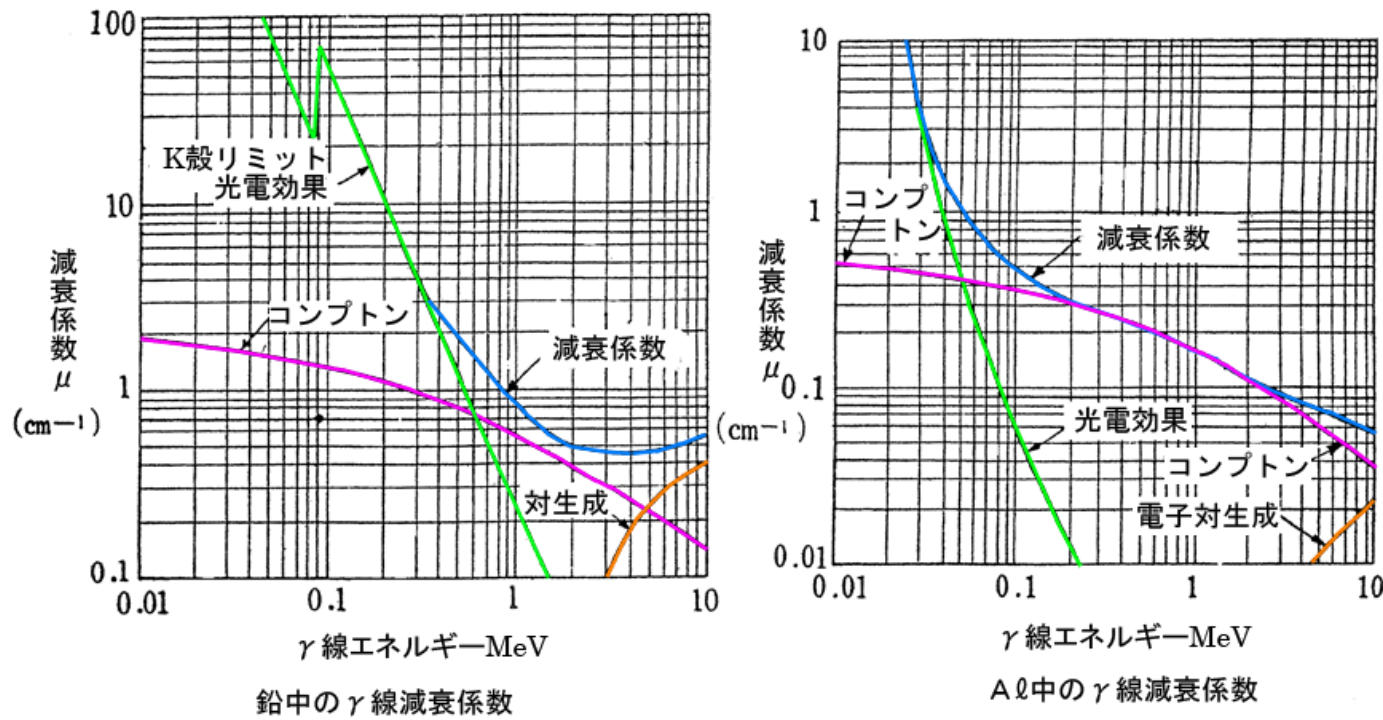


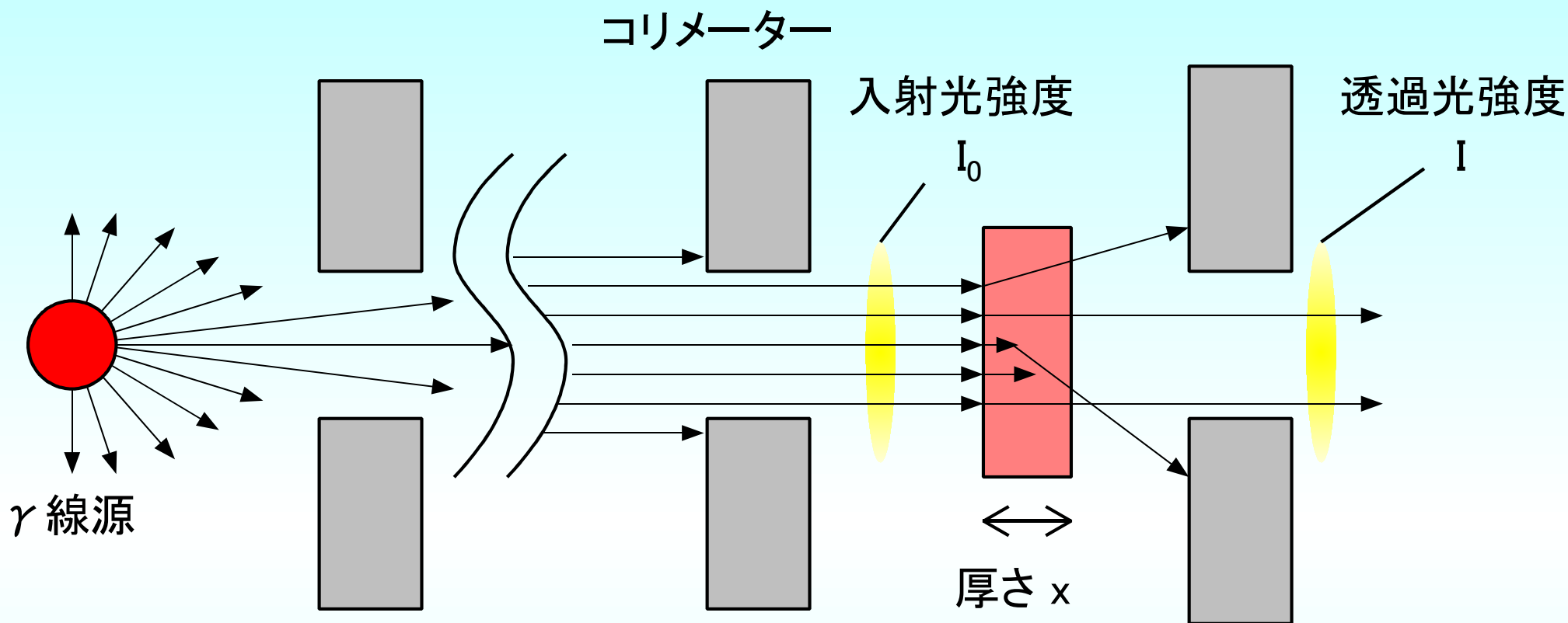
図3 γ線のコンプトン効果

[出典] 三浦 功、菅 浩一、俣野恒夫:「放射線計測学」、裳華房、p.21

ターゲットとなる物質の原子番号  $Z$  の増加と共に、線源弱係数は

光電効果  $Z^4 \sim 5$  に比例  
 コンプトン効果  $Z$  に比例  
 電子対生成  $Z(Z+1)$  に比例  
 となって  $Z$  が大きくなると急激に遮蔽能力が高くなる。

入射光子のエネルギー増加と共に、物質との相互作用を起こす効果が変わっていく。比較的低エネルギーではレイリー散乱、光電効果が主であり、次第にコンプトン散乱が支配的となる。高エネルギーでは電子対生成が主となる。光核反応は12-24MeV 付近で最大断面積となるが  $\mu$  への寄与は5%程度である。また、低エネルギーではK殻電子やL殻電子の電離エネルギー以上になると光電効果を起こせるがそれ以下では起こせないため、光電効果の効率が不連続に変化する。これをK吸収端、L吸収端と呼ぶ。



単一エネルギーで狭い平行線束  $\gamma$  線・X線の減衰は、

$$I = I_0 \exp(-\mu x)$$

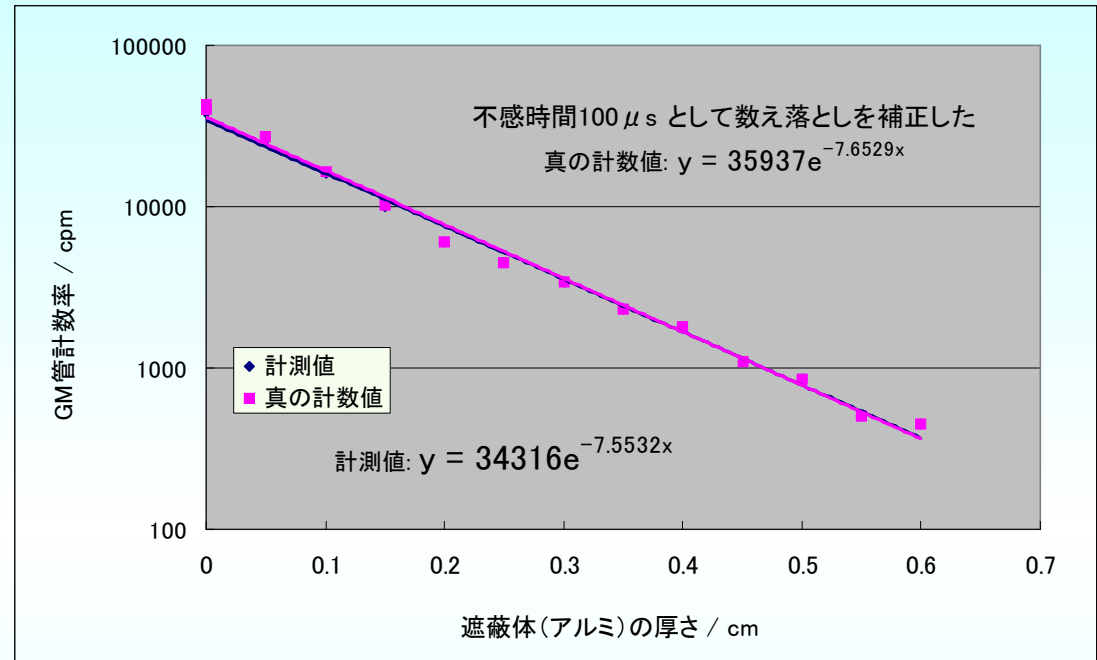
で表わされる。ここで  $I, I_0$  は光子のフラックスであり、

散乱、吸収により試料の厚さ  $x$  に伴って指数関数的に減衰していく。

線減弱係数  $\mu$  の単位は  $m^{-1}$  などで、密度で除した  $\mu_m$  が様々な物質、

エネルギーに対して与えられている。

# GMサーベイメーターによるX線エネルギー評価



GMサーベイメーターの前にアルミ遮蔽板を置いていき、透過率を測定した。測定結果から線減衰係数を求めると、 **$7.65\text{cm}^{-1}$**  となり、放電針距離の20mm から想定されるエネルギー20keV強でのアルミの線減衰係数と**非常に良い一致を示した**。

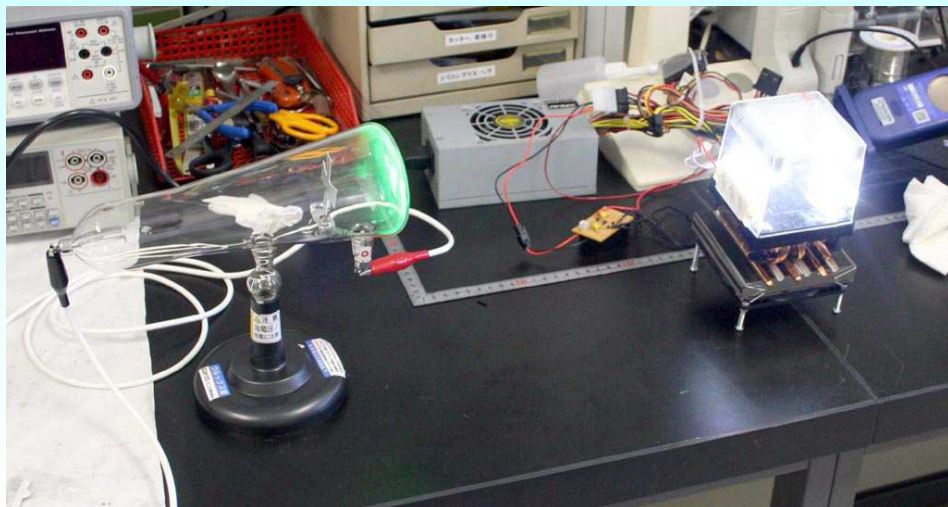
当初低エネルギー側に尾を引いたスペクトルを想定しており、遮蔽が薄い領域で計数率が高くなる事が予想されたが、**単一のエネルギーだけで説明できてしまった**。

遮蔽体を用いた測定前後での遮蔽無しでの測定値はほぼ一致しており安定していた。また、クルックス管から30cm位置、50cm位置で測定し、評価結果はほぼ同じであった。

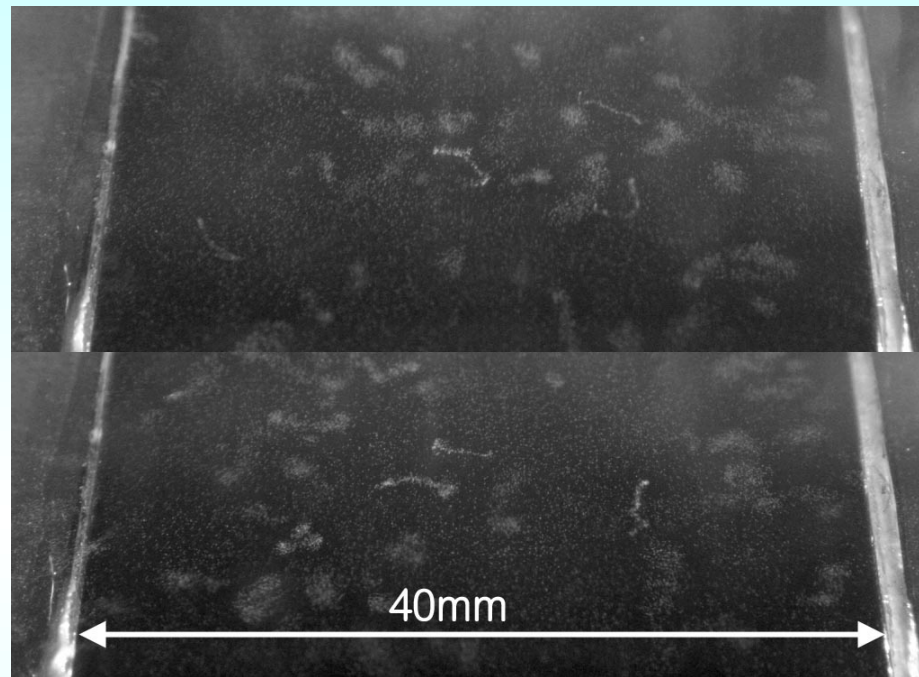
| X線エネルギー<br>(keV) | アルミ中の<br>線減衰係数<br>$\mu$<br>( $\text{cm}^{-1}$ ) |
|------------------|---|
| 10               | 69.5  |
| 15               | 20.8  |
| 20               | 8.9   |
| 30               | 2.8   |



# クルックス管を利用したX線のエネルギー評価



飛跡の長さは4mm程度であり、  
空気中での20keV電子線の飛程  
4mm程度と良く一致している。



クルックス管からのX線によって弾き出された  
光電子の霧箱観察結果(放電針距離20mm)。

エネルギー既知のX線を入射して飛跡の長さのヒストグラムを作成し、エネルギーに拡がりを持つX線のスペクトルが評価できないか？

**霧箱を用いた低エネルギーX線の  
エネルギースペクトル評価の可能性**

# クルックス管からのX線による光電子放出

①

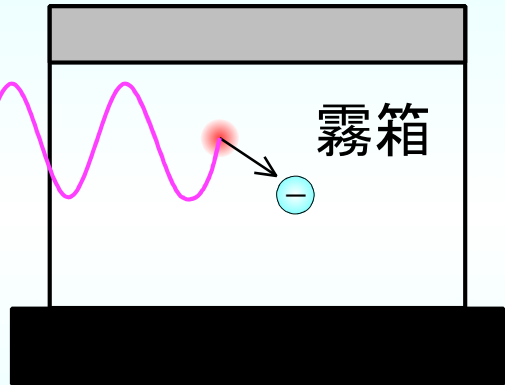
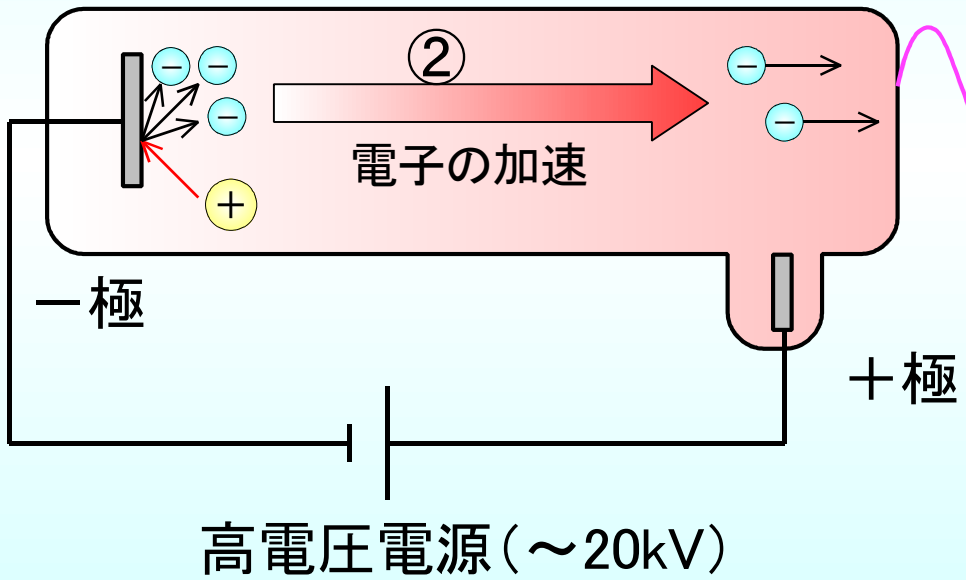
＋のイオンが一極に引きつけられて電子を叩き出す  
(二次電子放出)

③

電子がガラス管の壁に衝突するとき、制動放射X線を放出する

④

X線は最終的に原子の周りを回る電子を光電効果などで弾き飛ばして(電離作用)、弾き飛ばされた高速電子はβ線と同じように振る舞う。



単色のX線でも飛跡の長さは有限の幅のスペクトルを持つ。

弾き出された光電子のエネルギーは、最大でもクルックス管にかけた電圧程度。実際には、放出されるX線スペクトルのピークは印加電圧の半分程度だがガラスの吸収により大きく変化する。光電子のエネルギーはX線のエネルギーから軌道電子の結合エネルギーの分だけ低くなる。コンプトン電子では角度によってさらにエネルギーは低くなる。

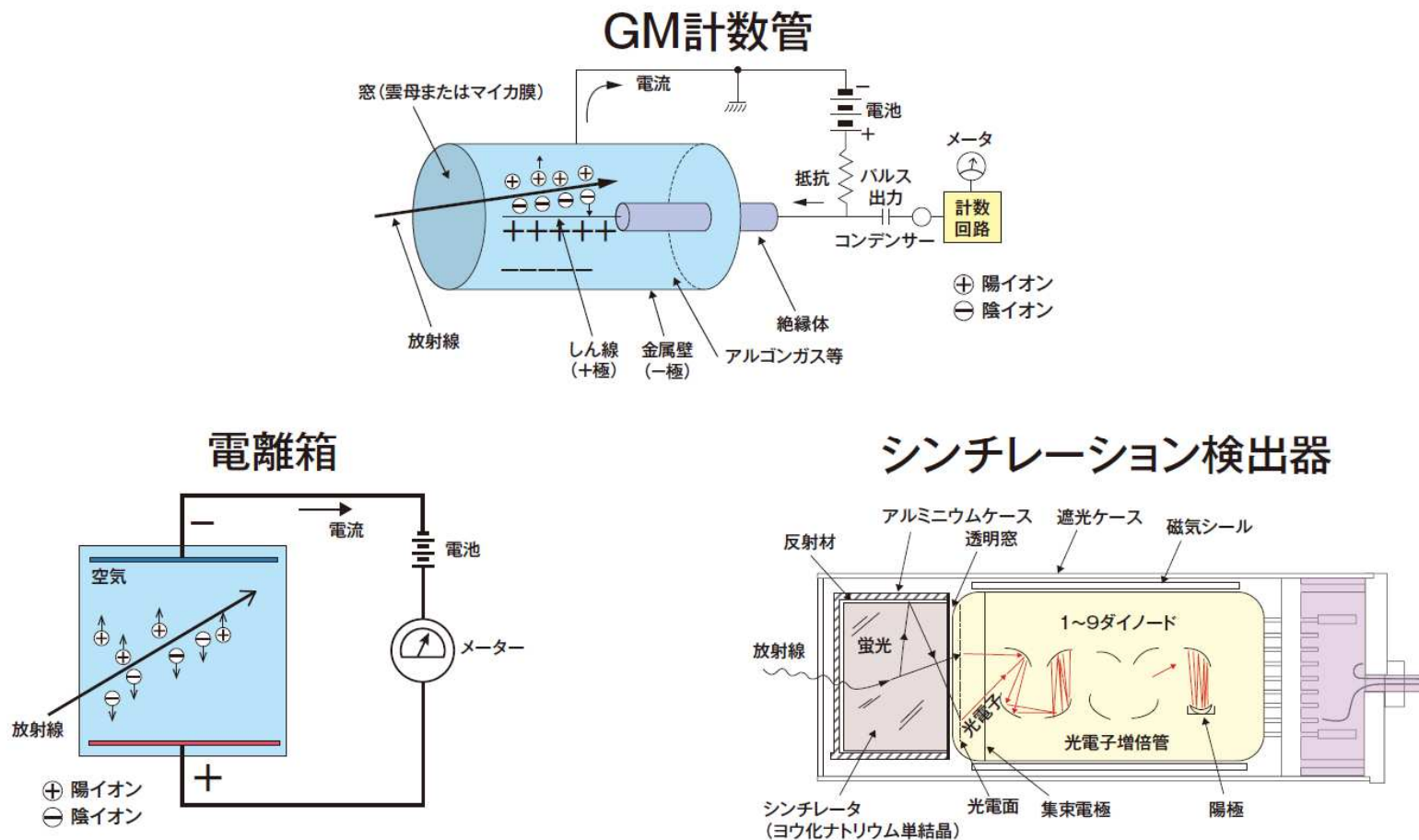
# 講義内容

- 放射線とは何か
- 物質と放射線の相互作用
- **放射線の検出**
- 天然の放射性核種と半減期
- 放射線の人体への影響
- 放射線の単位
- 放射線防護
- 量子放射線系専攻について

# 様々な検出器による測定

- 放射性同位元素を用いた実験を行うにあたり、自分が使用する核種に合わせた測定器を用いて、空間線量と汚染の測定を行う必要がある。
- 線種やエネルギーの違いによる検出器の応答の違いを理解していないと、正しく評価できなかつたり、全く測定することが出来ない場合がある。

# 放射線計測器の測定原理



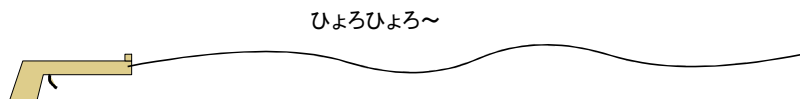
(注) 電離箱では、 $10^{-9}$ ~ $10^{-14}$ A程度の微電流を測定する必要がある

シンチレーション検出器では、蛍光が光電面に当たると光電子が飛び出し、これがダイノード(増倍電極)で増倍されて、大きな電気信号が得られる

## 高エネルギーの放射線



ズバツ!

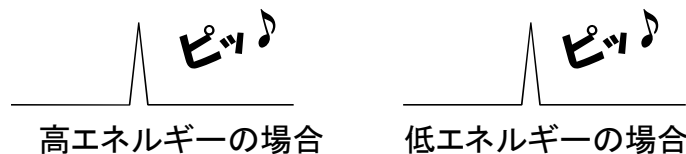


ひよろひよろ~

低エネルギーの放射線

## 放射線のエネルギーって何?

$\alpha$ 線や $\beta$ 線など、粒子が飛んでくる放射線の場合はその粒子のスピードと違って頂ければ理解しやすいと思います。もちろんスピードが速いほどエネルギーは高くなります。 $\gamma$ 線、X線は光の仲間、エネルギーはその光の波長とすることが出来ます。赤外線、可視光線、紫外線とだんだん波長が短くなるに従ってエネルギーが高くなります。ここで光の強さ(明るさ)と、エネルギーの大きさは違います。光の強さは放射線の本数に相当します。低いエネルギーの光が何本集まっても、高いエネルギーの光になることはありません。高いエネルギーの放射線ほど、物質を突き抜ける透過力が強くなります。



GM管や、シリコン半導体検出器  
(フォトダイオード)

**一発は一発!**

入射する放射線のエネルギーによらず、同じ大きさのパルスを出します。一定時間内に何発放射線が飛んできたか、と言う情報だけを知ることが出来ます。一部の製品は、Cs-137の661keVの $\gamma$ 線が飛んできた、と言うことにより線量を評価しています。



シンチレーターや、Ge半導体検出器

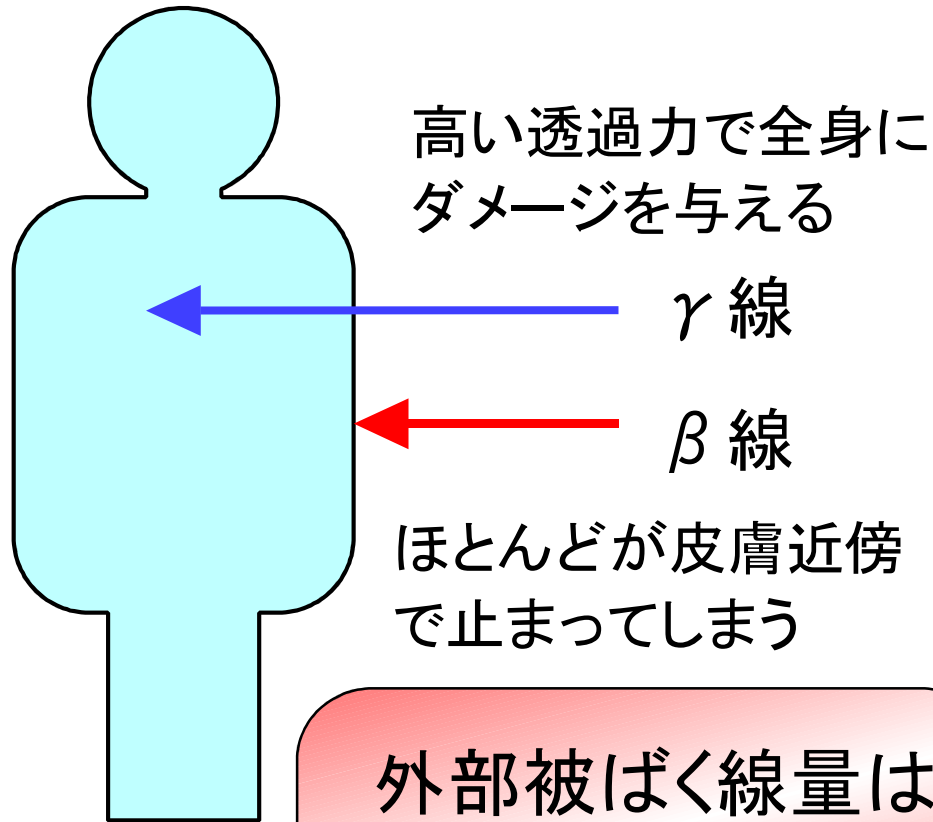
**きちんとエネルギーを区別**

入射する放射線のエネルギーによって、出力するパルスの大きさが異なります。どのぐらいのエネルギーの放射線が何発来たかという情報を合わせて、線量を評価します。



# 実効線量 [Sv]

人体に与えられたダメージ  
→ 各臓器へのダメージを合計

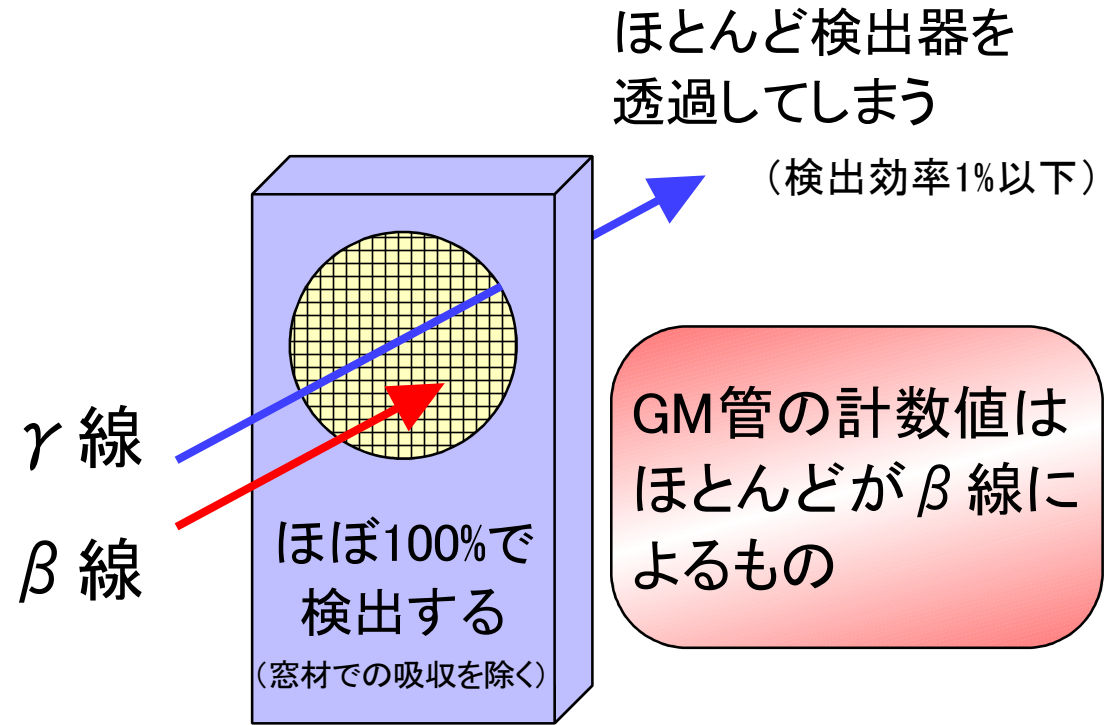


外部被ばく線量はγ線によるもの

皮膚自体へのダメージは、別途、等価線量[Sv] (組織ごとのダメージ)として管理されている

# GM管の計数値 [count]

検出器が捕捉した放射線の数  
(種類やエネルギーは分からない)



GM管の計数値はほとんどがβ線によるもの

実効線量率を表示する検出器 → Cs-137のγ線の検出効率から逆算して計数値から実効線量を計算している

β線は遮蔽されていることが前提

# Ge半導体検出器

- 放射性物質はそれぞれの核種に固有のエネルギーを持った  $\gamma$  線を放出するため、その  $\gamma$  線のエネルギーを測定することにより未知試料中に含まれる核種を同定することが可能である
- Ge半導体検出器はp層/空乏層/n層から構成されており、p-n 接合部の空乏層に電荷のキャリアがほとんど存在しないため、逆電圧を印加してもほとんど電流が流れないが、空乏層結晶中に高速の荷電粒子が入射すると、価電子帯にある電子は伝導帯におしあげられ、多数の電子-正孔対が生成される。
- ただし、 $\beta$  線は(もちろん  $\alpha$  線も)検出器を覆うステンレス製のハウジングを透過できないため、検出することは出来ない →  $\gamma$  線が結晶中に入射した後に発生する光電子などを検出する。
- 一組の電子-正孔対を作るのに要するエネルギーはGe の場合  $2.96\text{eV}$  であり、これがエネルギー分解能となる。

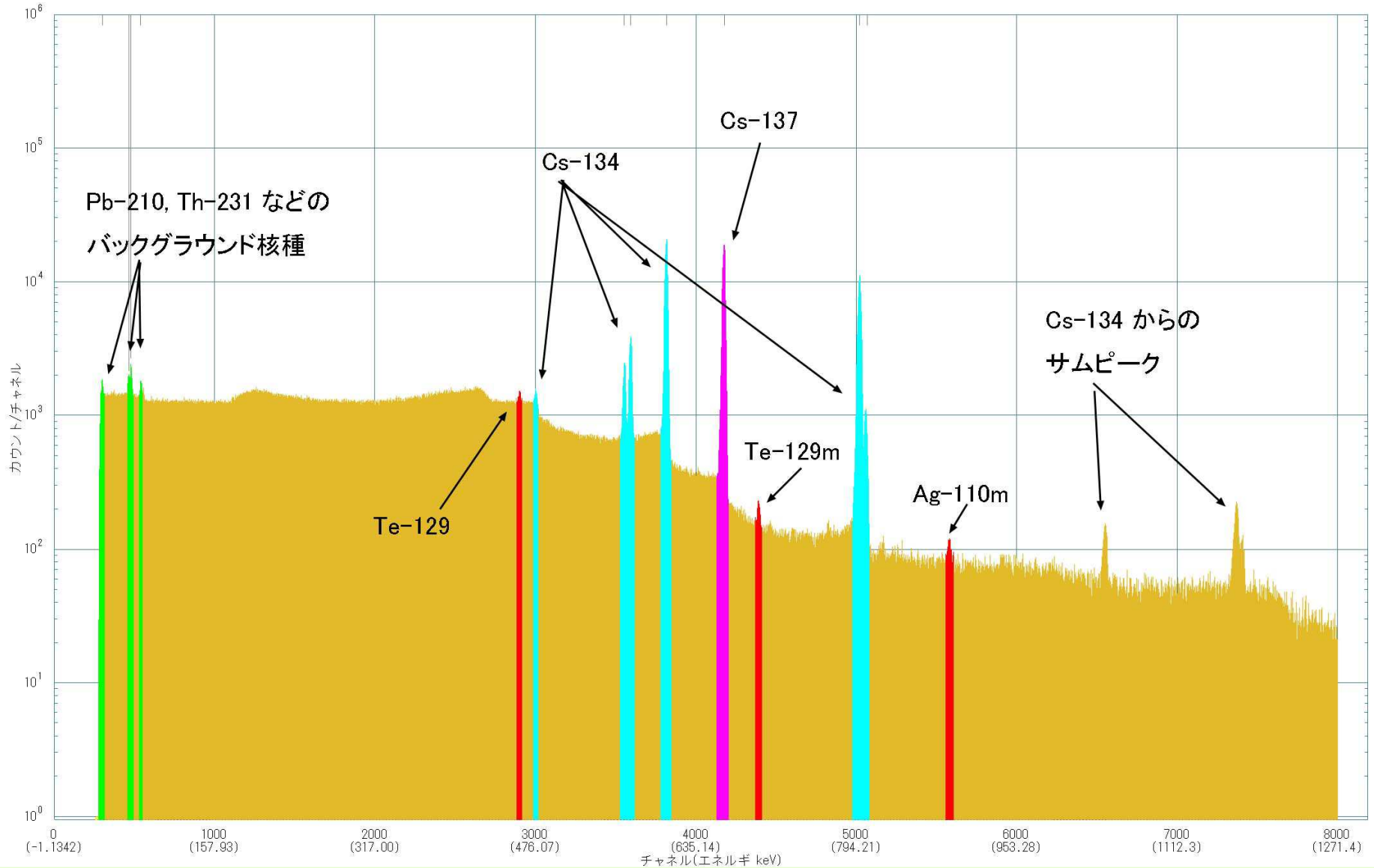
**非常に高価だが詳細なスペクトルを得ることが出来る**



# γ線スペクトル測定の一例

20110608\_南相馬市馬事公苑-土\_110620.CHN

Acquired:2011-06-20 12:30:07 Real Time:30068.1(sec) Live Time:30000.0(sec)



# 直接測定法とスミヤ法

- 汚染検査を行いたい場所の空間線量率が高かったり、通常のサーベイメーターでは測定できないトリチウムなどを測定したい場合、その場で対象物を測定する直接測定ではなく、スミヤろ紙で表面をぬぐって、バックグラウンドの低い場所で測定を行う、スミヤ法が用いられる。
- 対象物の表面汚染密度を求める場合には、拭き取る面積と、どの程度の効率で表面の汚染を拭き取ることが出来るかという拭き取り効率を知る必要がある。

***Radiation?***

空間線量率が問題か、

***or***

表面汚染が問題か？

***Contamination?***

非密封の RI を使用する実験で、  
GM サーベイメーターや、NaI シンチレーションカウンターなどで  
空間線量率を測定して大した値でなければ問題無い、というのは

**大間違い!**

表面が少しぐらい汚染されていても空間線量率は大して変わらないが、  
汚染によって内部被ばくの危険があり、RIを「管理」して使用する施設で  
有ってはいけないところに汚染が広がると、大問題!

# 講義内容

- 放射線とは何か
- 物質と放射線の相互作用
- 放射線の検出
- **天然の放射性核種と半減期**
- 放射線の人体への影響
- 放射線の単位
- 放射線防護
- 量子放射線系専攻について

# 宇宙からの放射線

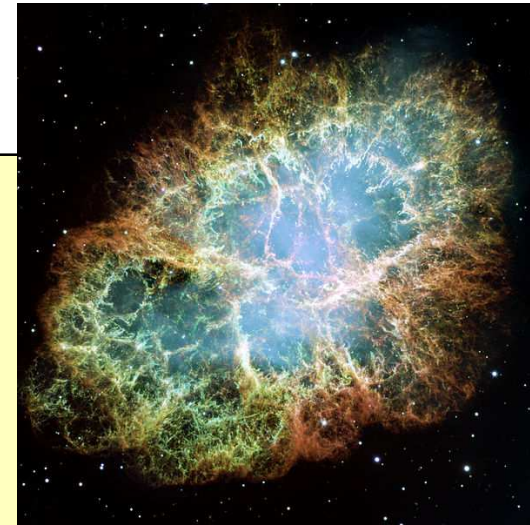
大気で地球上の生物は守られている



アラスカ、フェアバンクスで観察されたオーロラ

太陽から帯電した粒子が大量に放出されています。  
地球の磁場に捉えられた一部がオーロラとして観測されます。

超新星爆発などで発生した非常にエネルギーの高い ( $\sim 10^{20}$  eV) **銀河宇宙線**も飛んできています。  
上空で大気とぶつかって核反応により**放射性核種の生成**が起きています。  
(一年間に C-14:  $10^{15}$  Bq, H-3 (トリチウム):  $10^{18}$  Bq 程度が生成されています)



おうし座のかに星雲。  
超新星爆発の残骸。



国際宇宙ステーション ISS の完成予想図

大気で遮蔽されていない上空では放射線量が増加します。  
**欧米への飛行機での往復で100~200  $\mu$  Sv程度被ばく**します。  
宇宙ステーション (ISS: 高度400km) では、1日当たり0.5~1mSv程度にもなります。



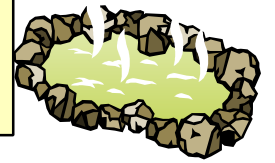
# 大地からの放射線

ウランは地殻中でありふれた元素



花崗岩

地中の岩石の中には少しずつウランが含まれていて、平均で1トンあたり2.4g、花崗岩には11gも含まれていて、140kBqに相当します。ウランの娘核種もまた放射線を出して別の放射性核種となる、壊変系列を形成しています。



ラドン温泉

地球の内部が暖かく、温泉が出るのも、地球の内部の放射性物質の崩壊によるエネルギーだと言われています。



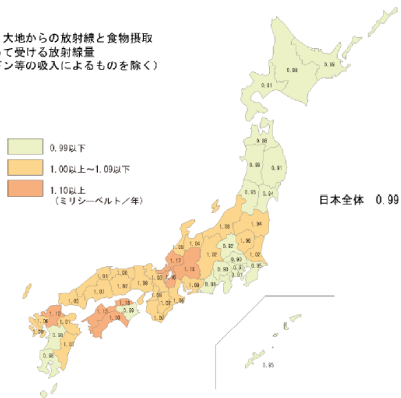
トンネルの中は周囲を岩石に囲まれてるため地表よりも放射線量が高くなります。

(東名高速の日本坂トンネルで0.13  $\mu$  Sv/h など地表の倍程度)

壊変系列の中に気体の放射性核種、ラドンが含まれていて、石の中から出てきて空気中を飛んでいます。これが肺の中で $\alpha$ 線を放出して内部被曝を起こします。

## 全国自然放射線量

宇宙、大地からの放射線と食物摂取によって受ける放射線量 (ラドン等の吸入によるものを除く)



世界には日本よりはるかに自然放射線量が高い(年間10mSv以上)地域があります。国内でも岩盤が多く露出している地域では比較的放射線量が高く、火山灰で覆われている地域などは低く、県単位の比較でも年間で300  $\mu$  Sv程度異なります。



ピサの斜塔

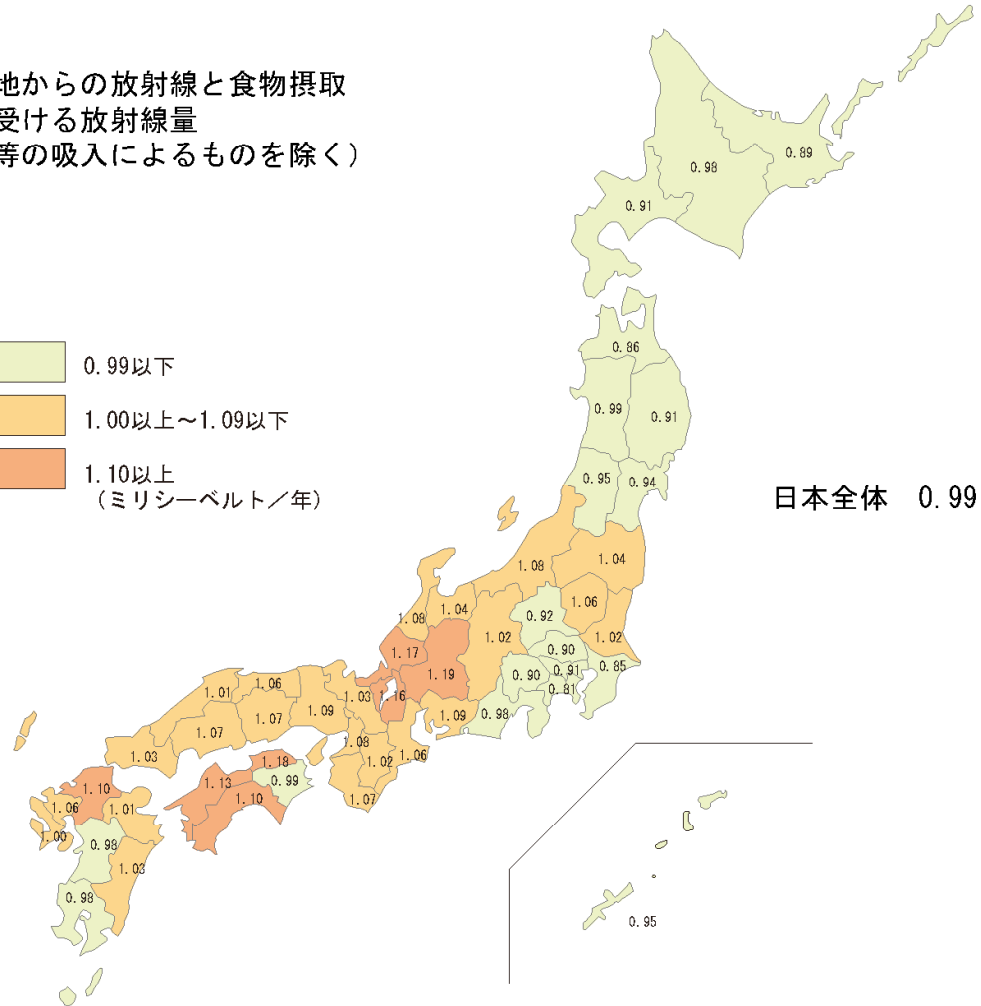
イタリア・ピサの大聖堂



# 全国の自然放射線量

宇宙、大地からの放射線と食物摂取  
によって受ける放射線量  
(ラドン等の吸入によるものを除く)

- 0.99以下
- 1.00以上~1.09以下
- 1.10以上  
(ミリシーベルト/年)



# 食品からの放射線

福島事故以前から  
含まれる放射能



カリ肥料

天然のカリウム1gには30BqのK-40が入っています。カリウムは作物に、そして人間にとっても必須の元素の一つです。昆布や椎茸、キュウリなどに沢山含まれており、人間の体の中にも体重60kgで4000BqのK-40が含まれていて一年間で170  $\mu$  Sv 被曝しています。

60kgの日本人の体の中にはおよそ 20BqのPo (ポロニウム) -210と言う放射性核種が含まれています。K-40が $\beta$ 線/ $\gamma$ 線を放出するのに対して、このPo-210は $\alpha$ 線を放出するため、内部被曝量は年間で800  $\mu$  Svにもなります。



タバコ1本には 0.024Bq のPo-210が含まれており、一日一箱の喫煙で年に100  $\mu$  Sv 被曝します。

# 天然の放射性核種

地球が誕生して約50億年、未だに天然の放射性核種が残る。

放射性核種の半減期則より

10半減期の後では元の1024分の1、

40半減期では1兆分の1 となるため、半減期の短い核種は既に消滅している。

## 壊変系列をつくる放射性核種

親となる核種の寿命が長く (U-238 45億年, Th-232 140億年)、  
 $\alpha$ 崩壊に伴って質量数が親核種から4ずつ小さくなる。

## 系列を作らない核種

大気上層で宇宙線により  $^3\text{H}$  ( $10^{18}\text{Bq/y}$ )、 $^{14}\text{C}$  ( $1.3 \times 10^{15}\text{Bq/y}$ ) が生成される。

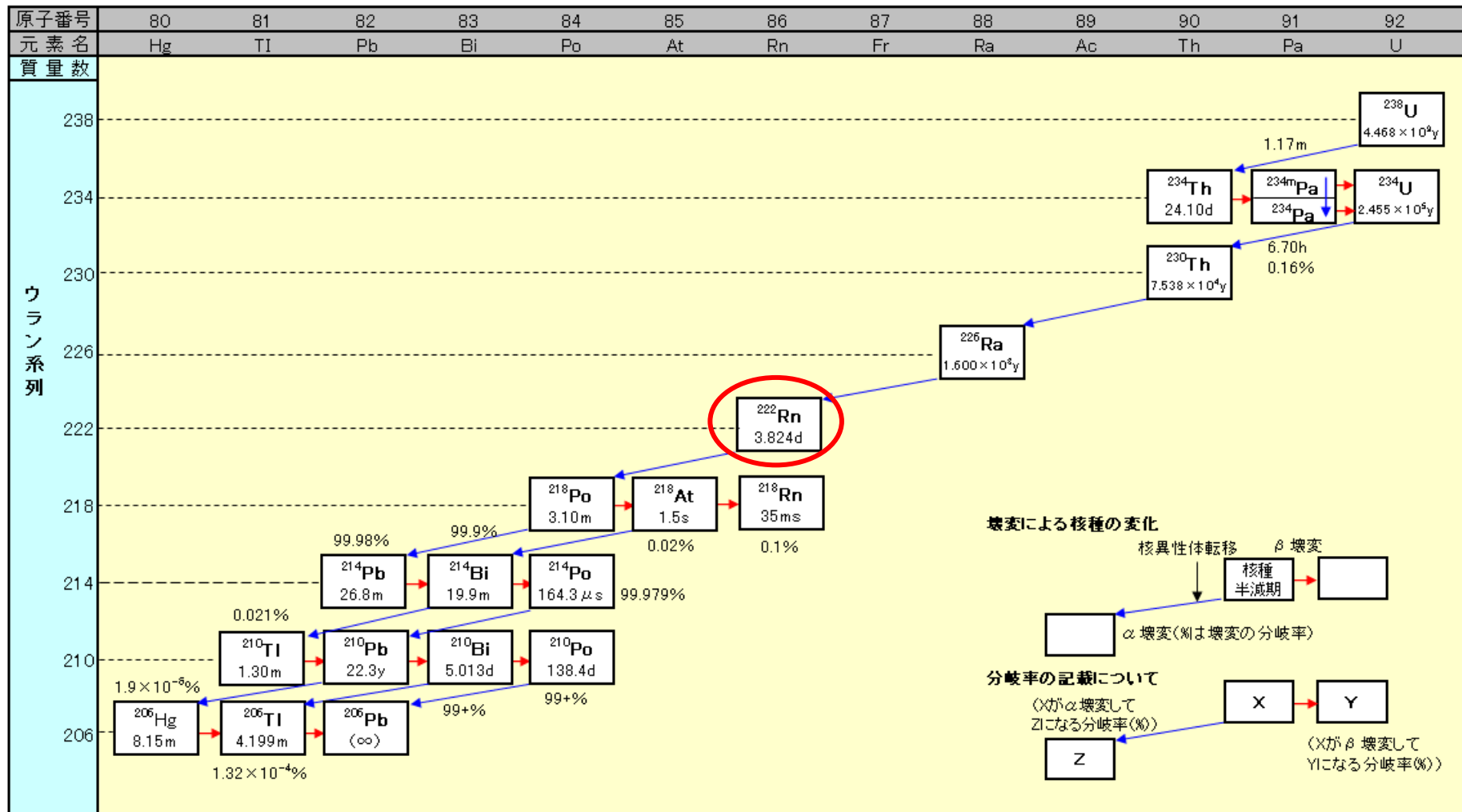
$^3\text{H}$  は半減期12.3年、 $^{14}\text{C}$ は5730年と短い。

一方、地球誕生時から存在したものとして以下の核種などが知られている。

|                   |                                 |
|-------------------|---------------------------------|
| $^{40}\text{K}$   | (半減期12.8億年, 天然のK中の存在比 0.0117%)、 |
| $^{87}\text{Rb}$  | (480億年、27.8%)                   |
| $^{147}\text{Sm}$ | (1060億年, 15.1%)                 |
| $^{148}\text{Sm}$ | (8000兆年, 11.3%)                 |
| $^{115}\text{In}$ | (510兆年, 95.7%)                  |
| $^{113}\text{Cd}$ | (9000兆年, 12.2%)                 |
| $^{187}\text{Re}$ | (400億年, 62.6%)                  |
| $^{144}\text{Nd}$ | (2100兆年, 23.8%)                 |

# 放射壊変系列 1: ウラン系列 (4n+2)

親核種: U-238

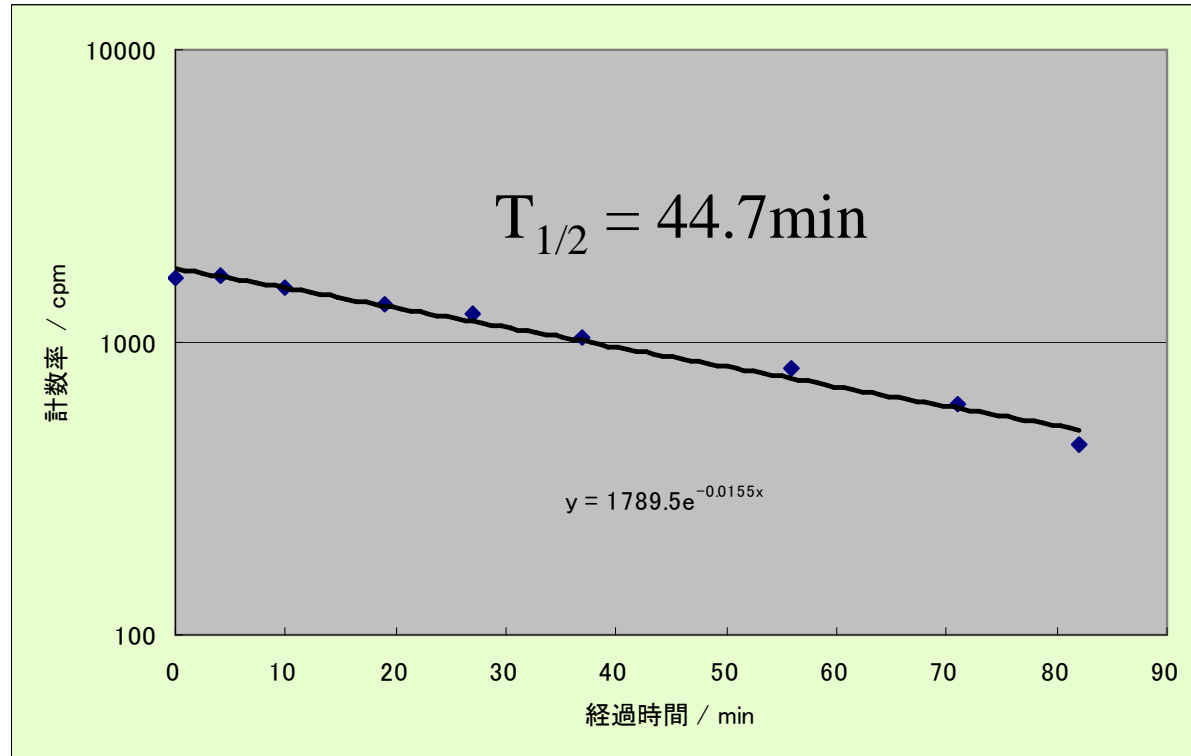


半減期の記号;s(秒), ms(10<sup>-3</sup>秒), μs(10<sup>-6</sup>秒), m(分), h(時), d(日), y(年)

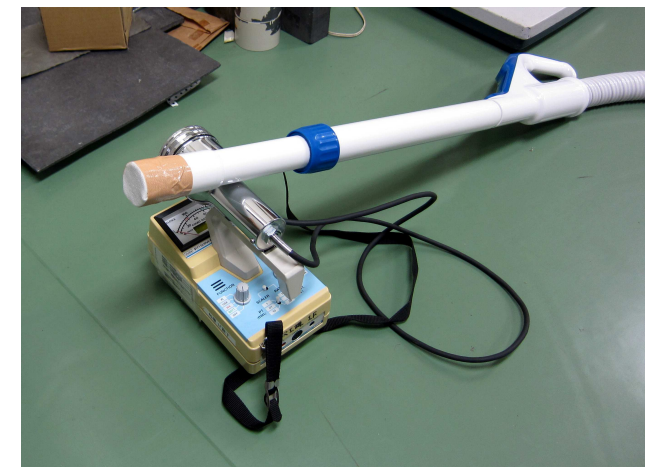
図1-1 天然放射性核種の壊変系列図(ウラン系列)(1/4)

[出典] 国立天文台(編):理科年表 2010年版、丸善(2009年10月)、p.468-469

## 空気中のラドンの娘核種の捕集と崩壊曲線



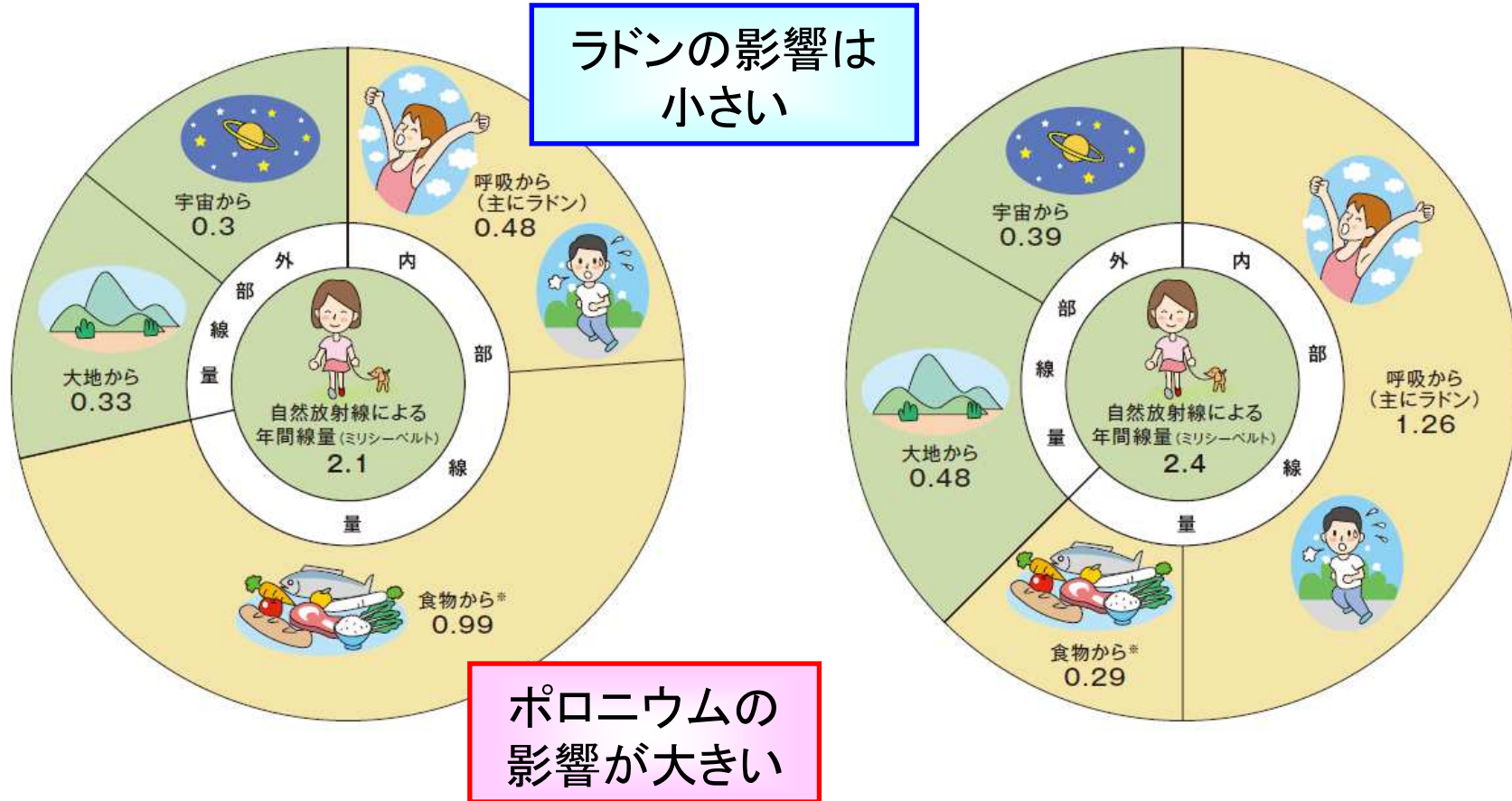
市販の掃除機吸入口先端にガーゼ(ベンコット)をかぶせて5分ほど吸引し、広窓型GMサーベイメータ TGS-136のスケーラーモードで1分間計数した



# 自然放射線から受ける線量

一人あたりの年間線量(日本平均)

一人あたりの年間線量(世界平均)



※欧米諸国に比べ、日本人は魚介類の摂取量が多く、ポロニウム210による実効線量が多い



# 免除レベルの $10 \mu\text{Sv}$ はどれぐらいの値なのか

歯科レントゲン撮影1回:  
 $10 \mu\text{Sv}$



0.01mSv  
( $10 \mu\text{Sv}$ )

胸部レントゲン撮影1回:  
 $50 \mu\text{Sv}$



0.1mSv  
( $100 \mu\text{Sv}$ )

胃がん検診1回:  
 $600 \mu\text{Sv}$

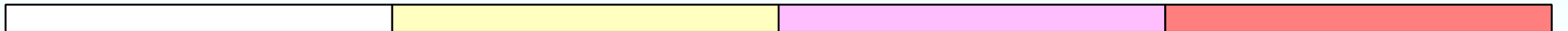


1mSv

CTスキャン1回:  
数mSv

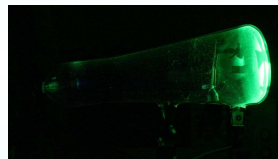


ICRP 1990/2007年勧告  
一般公衆への追加線量限度  
年間 1mSv



国内線の飛行機1回:  
 $3 \mu\text{Sv}$ 程度

クルックス管プロジェクトの  
到達目標:  $10 \mu\text{Sv}/\text{年}$



1ヶ月のBG線量:  
 $50 \mu\text{Sv}$   
( $0.07 \mu\text{Sv}/\text{h}$ の場合)



国際線の飛行機での  
欧米への旅行1回:  
 $100\text{--}200 \mu\text{Sv}$



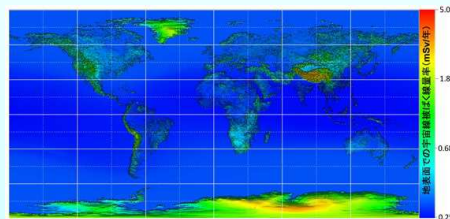
日本人が特有に持っている  
 $20\text{Bq}$ のポロニウム  
 $210$ による年間被ばく  
線量:  $800 \mu\text{Sv}$

イランのラムサル地方や  
インドのケララ地方などでの  
大地からの年間被ばく線量:  
 $\sim 10\text{mSv}$

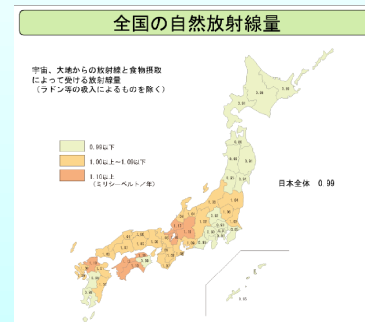


ランタンのマントル\*を  
1時間体に貼付ける:  
Hp(10)  $1 \mu\text{Sv}$  ( $\gamma$ 線)  
Hp(0.07)  $10 \mu\text{Sv}$  ( $\beta$ 線 +  $\gamma$ 線)

\*トリウム使用のサウスフィールド ハイパワーDXマントル



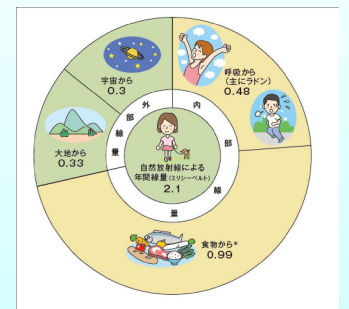
年間の宇宙線量の世界平均と  
日本平均の差:  
 $50 \mu\text{Sv}$  (日本の方が小さい)



年間の平均外部線量が最も  
高い岐阜県と最も低い神奈  
川県の差:  $400 \mu\text{Sv}$



世界平均と日本平均  
でのラドンによる年間  
被ばく量の差:  
 $800 \mu\text{Sv}$   
(日本の方が小さい)

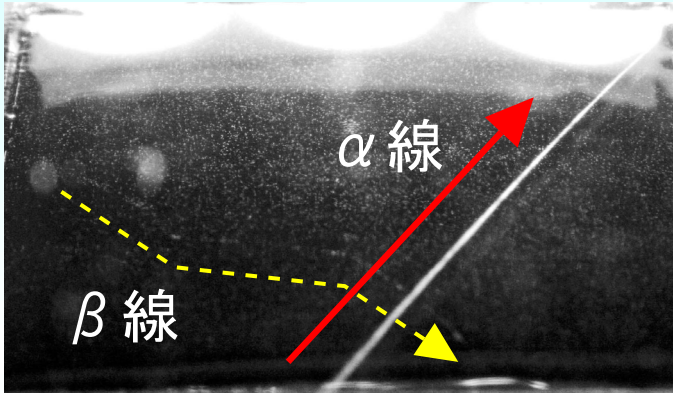
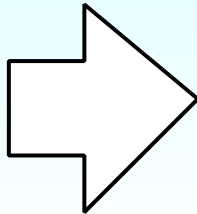


自然放射線による  
年間の被ばく線量  
日本平均  $2.1\text{mSv}$   
世界平均  $2.4\text{mSv}$

# 放射線の種類によって影響が違います

同じエネルギーの放射線を吸収した場合でも、**アルファ線**と、**ベータ線**、**ガンマ線**とでは、**20倍**も影響の大きさが違います。

相互作用の違いを反映



\*体重60kgの日本人

体内の放射能

1年間に被ばくする実効線量

カリウム  
K-40: 4,000Bq

0.17 ミリシーベルト

β・γ線のみ

ポロニウム  
Po-210: 20Bq

0.80 ミリシーベルト

α線を放出

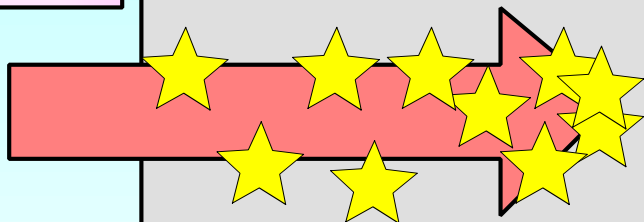
| 100ベクレル を肺に吸入したときの被ばく線量 |                   |
|-------------------------|-------------------|
| プルトニウム-239              | 12 ミリシーベルト        |
| セシウム-137                | 1000分の3.9 ミリシーベルト |
| トリチウム(H-3)              | 1億分の2.6 ミリシーベルト   |

**同じベクレルの放射能でも  
体に与える影響は全く異なります!**

プルトニウム-239: 5.1MeV の α 線、半減期 2.4万年、肺や肝臓などに沈着  
セシウム-137: 0.51MeV の β 線と 662keVの γ 線、半減期 30年、カリウムなどとともに体外に排出  
トリチウム(H-3): 18.6keV の β 線、半減期 12.3年、水と共に体外に排出

# α線

水中での最大飛程: 50 μm程

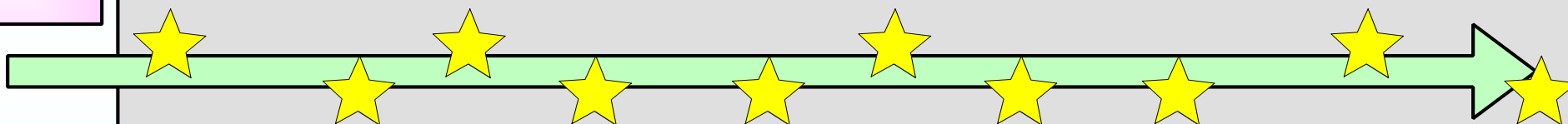


狭い範囲に一気に  
エネルギーを放出する

止まる直前は特に沢山エネルギーを落とす

# β線

水中での最大飛程: 1cm 程度



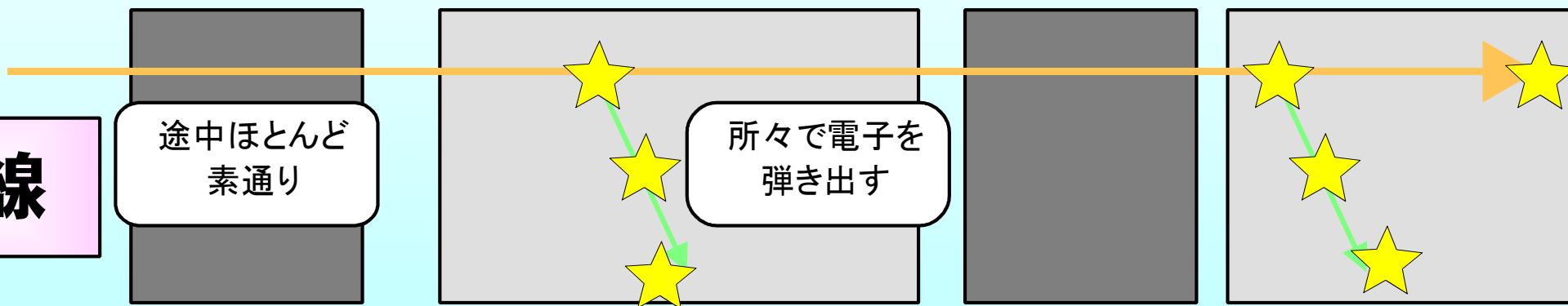
所々にぽつぽつとエネルギーを落とす

実際にはまっすぐ進まず跳ね返されながらジグザグに進む

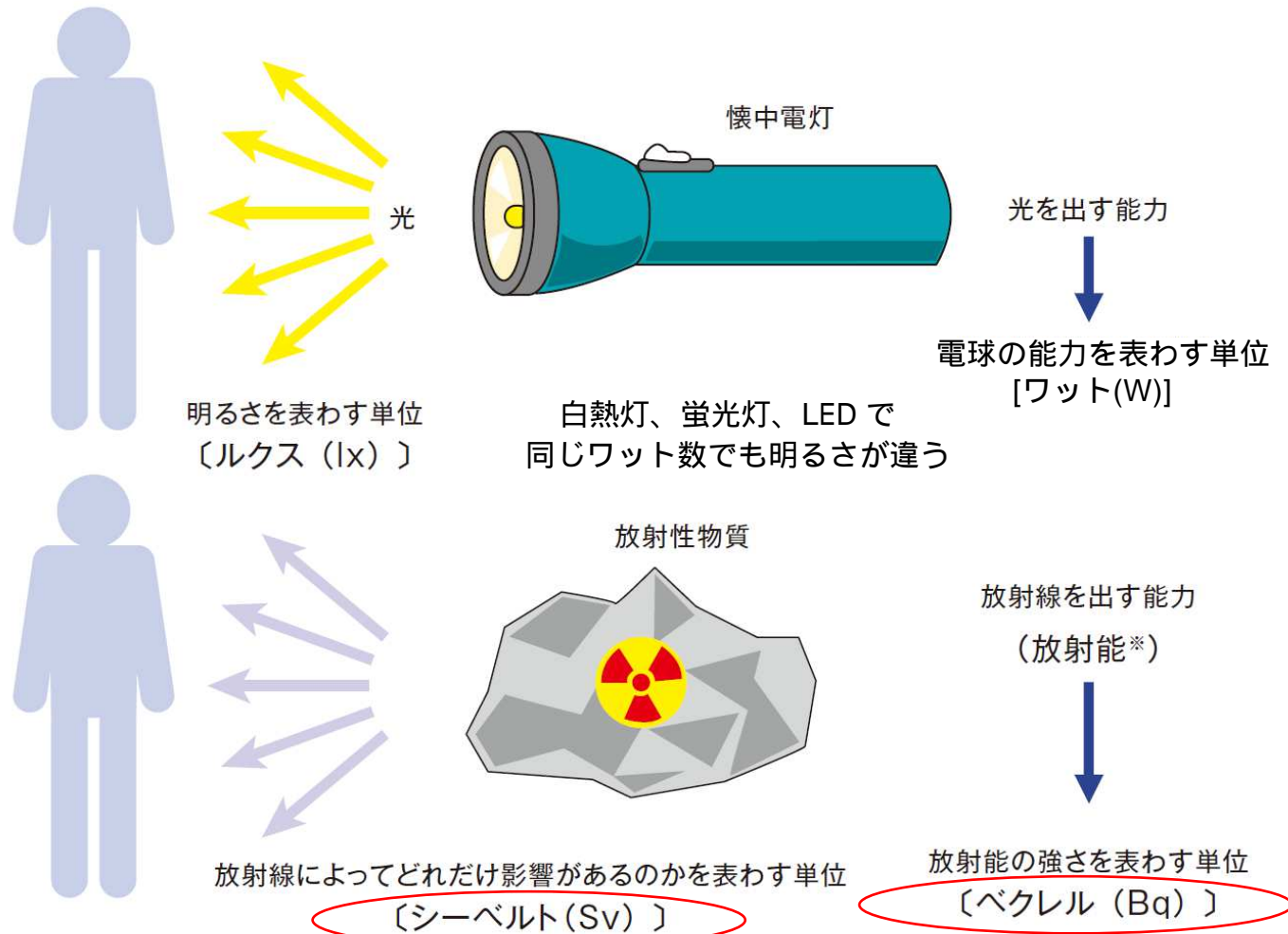
# γ線

途中ほとんど  
素通り

所々で電子を  
弾き出す



# 放射能と放射線



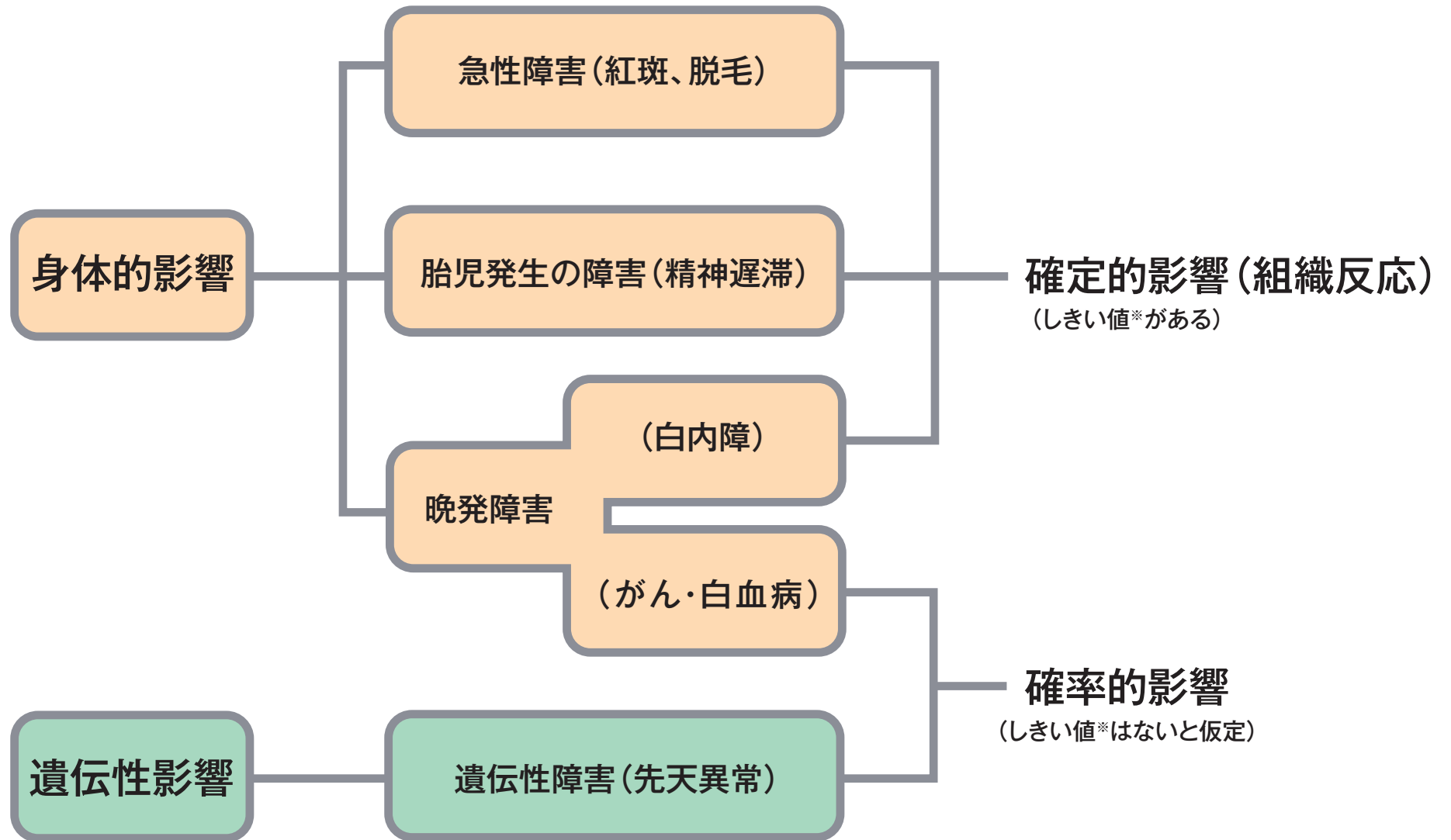
※放射能を持つ物質(放射性物質)のことを指して用いられる場合もある

核種によって同じベクレル数でも  
人体に対する影響が違う

# 講義内容

- 放射線とは何か
- 物質と放射線の相互作用
- 放射線の検出
- 天然の放射性核種と半減期
- **放射線の人体への影響**
- 放射線の単位
- 放射線防護
- 量子放射線系専攻について

# 放射線の人体への影響

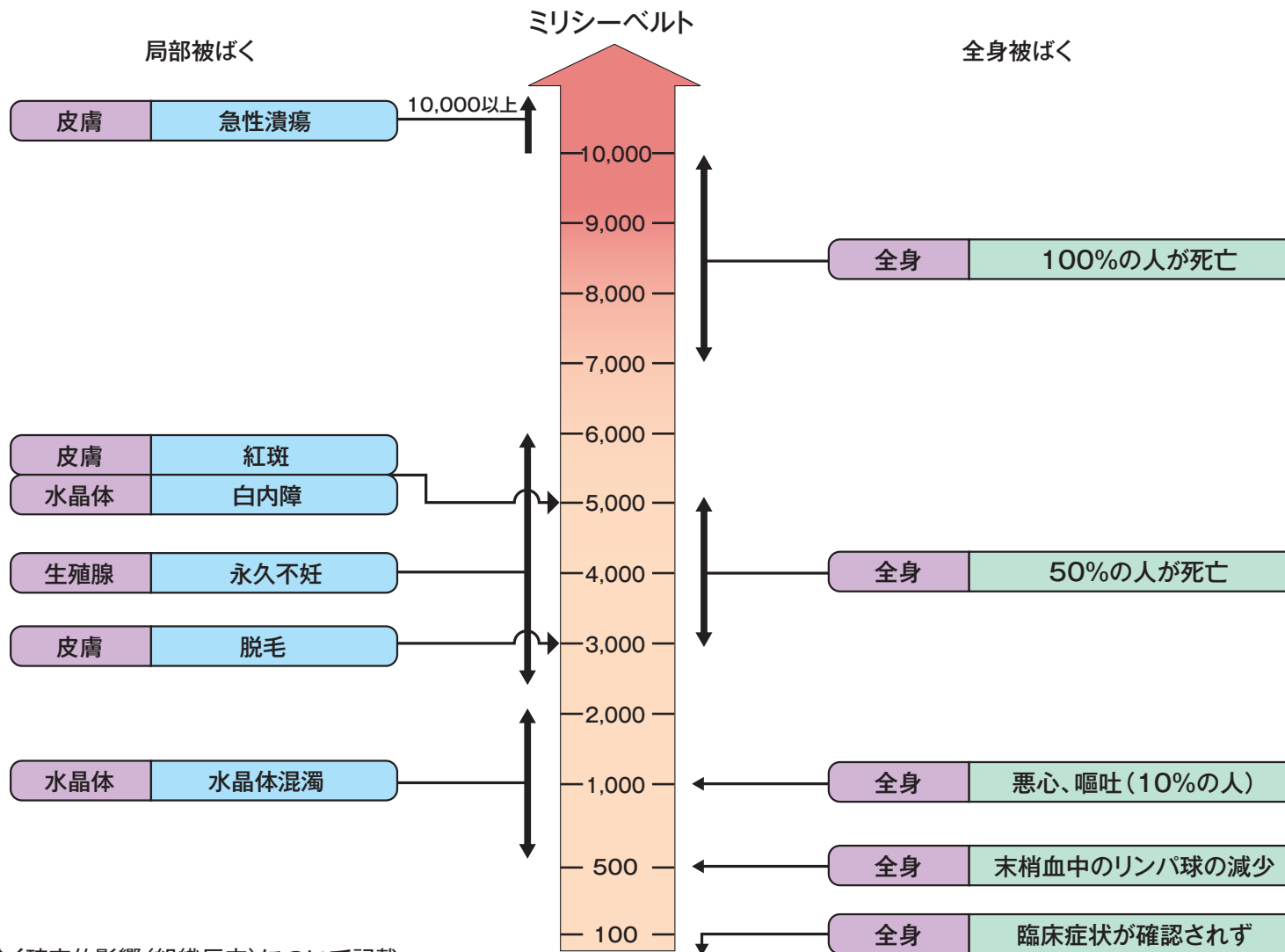


※しきい値:ある作用が反応を起こすか起こさないかの境の値のこと



# 放射線を一度に受けたときの症状

凡例 部位 症状



(注1) がんや遺伝性影響を除く確定的影響(組織反応)について記載

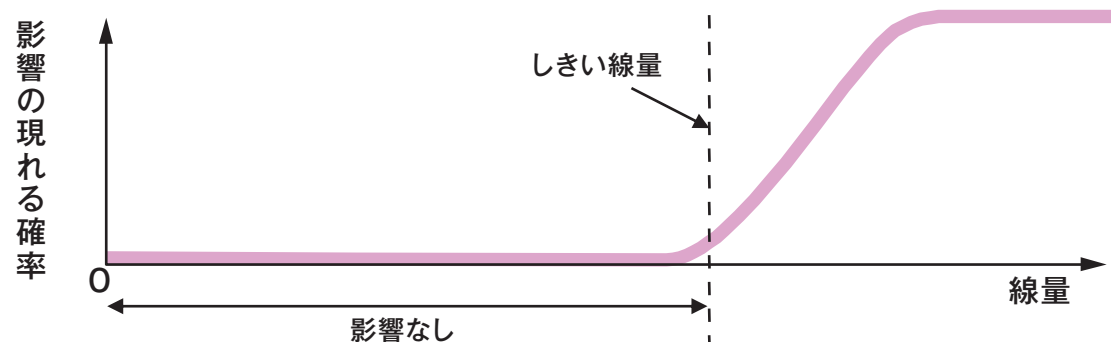
(注2) 一般の人の線量限度1.0 mSv/年、原子力発電所周辺の線量目標0.05 mSv/年

# 放射線防護の考え方

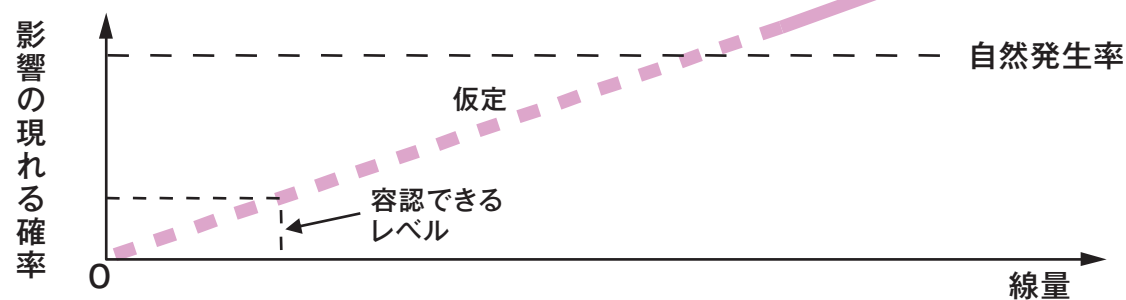
確定的影響(組織反応)は、しきい線量\*以下に抑えることで影響をなくす。

確率的影響は、しきい線量は無いと仮定し、影響の現れる確率が容認できるレベル以下の線量に抑える。

〔確定的影響(組織反応):脱毛・白内障等〕

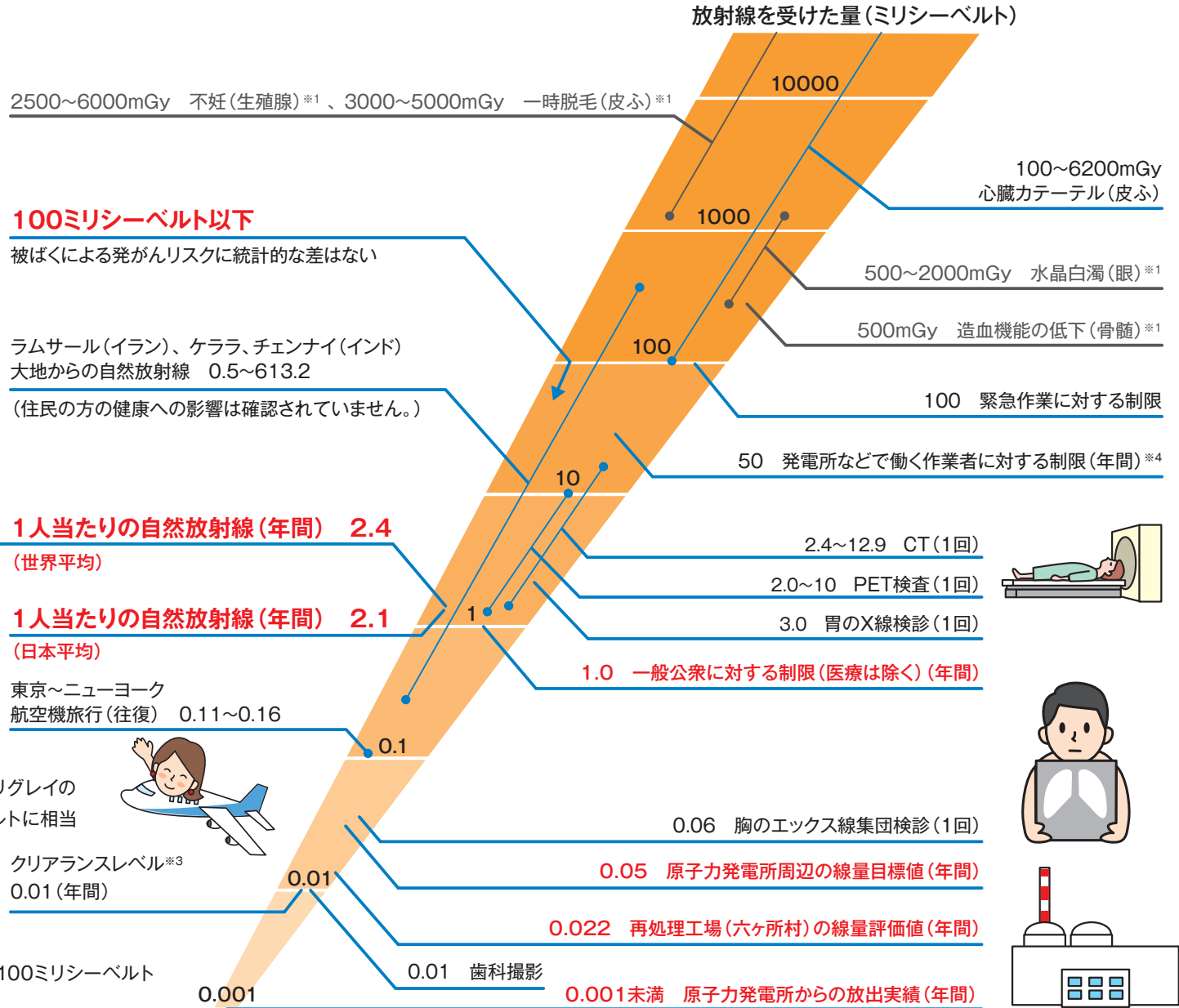
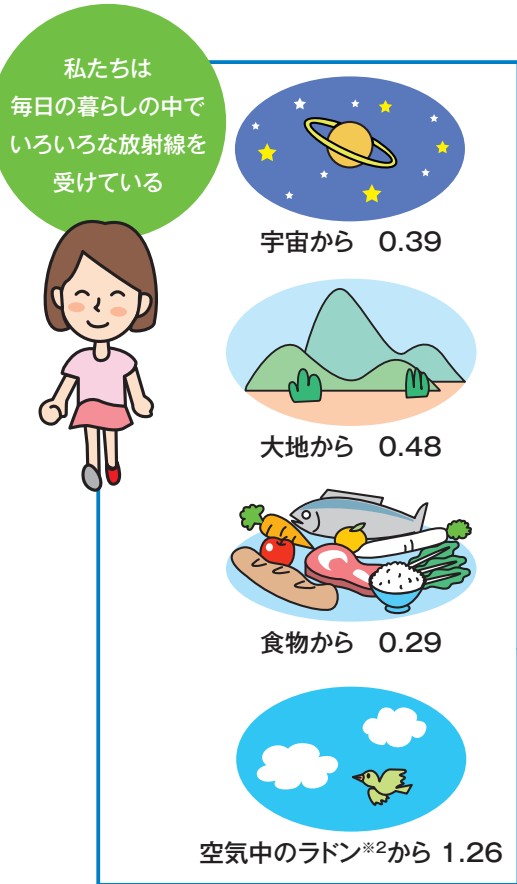


〔確率的影響:がん・白血病等〕



\*しきい線量:ある作用が反応を起こすか起こさないかの境の値のこと

# 日常生活と放射線



※1 放射線障害については、各部位が均等に吸収線量1ミリグレイのガンマ線を全身に受けた場合、実効線量1ミリシーベルトに相当するものとして表記

※2 空気中に存在する天然の放射性物質

※3 自然界の放射線レベルと比較して十分小さく、安全上放射性物質として扱う必要のない放射線の量

※4 発電所などで働く作業員に対する線量は5年間につき100ミリシーベルトかつ1年間につき50ミリシーベルトを超えない

# ICRPの放射線防護体系

国際放射線防護委員会 ICRP の勧告

放射線防護の基準を決める三つの原則

**正当化** Justification

リスクを上回る利益がなければならない

**防護の最適化** Optimization

できるだけ被ばくを抑える(経済、社会的な要因の考慮)

**ALARA**(as low as reasonably achievable)の原則

**線量限度** Dose Limit

線量限度を超えてはならない(緊急時と医療を除く)

# 線量限度について

| 区分       |     | 実効線量限度(全身)   | 等価線量限度(組織・臓器)   |
|----------|-----|--|---|
| 放射線業務従事者 | 平常時 | 100mSv/5年 <sup>※1</sup><br>50mSv/年 <sup>※2</sup><br>女子 5mSv/3月間 <sup>※3</sup><br>妊娠中の女子 1mSv<br>(出産までの間の内部被ばく) | 眼の水晶体 150mSv/年 <sup>※2</sup><br>皮膚 500mSv/年 <sup>※2</sup><br>妊娠中の女子 2mSv<br>(出産までの間の腹部表面) |
|          | 緊急時 | 100mSv <sup>※4</sup>   | 眼の水晶体 300mSv<br>皮膚 1Sv <sup>※5</sup>  |
| 一般公衆     | 平常時 | 1mSv/年 <sup>※2</sup>   | 眼の水晶体 15mSv/年 <sup>※2</sup><br>皮膚 50mSv/年 <sup>※2</sup>                                   |

(注) 上記表の数値は、外部被ばくと内部被ばくの合計線量  
自然放射線による被ばくと医療行為による被ばくは含まない

※1 平成13年4月1日以後5年ごとに区分

※2 4月1日を始期とする1年間

※3 4月1日、7月1日、10月1日、1月1日を始期とする各3月間

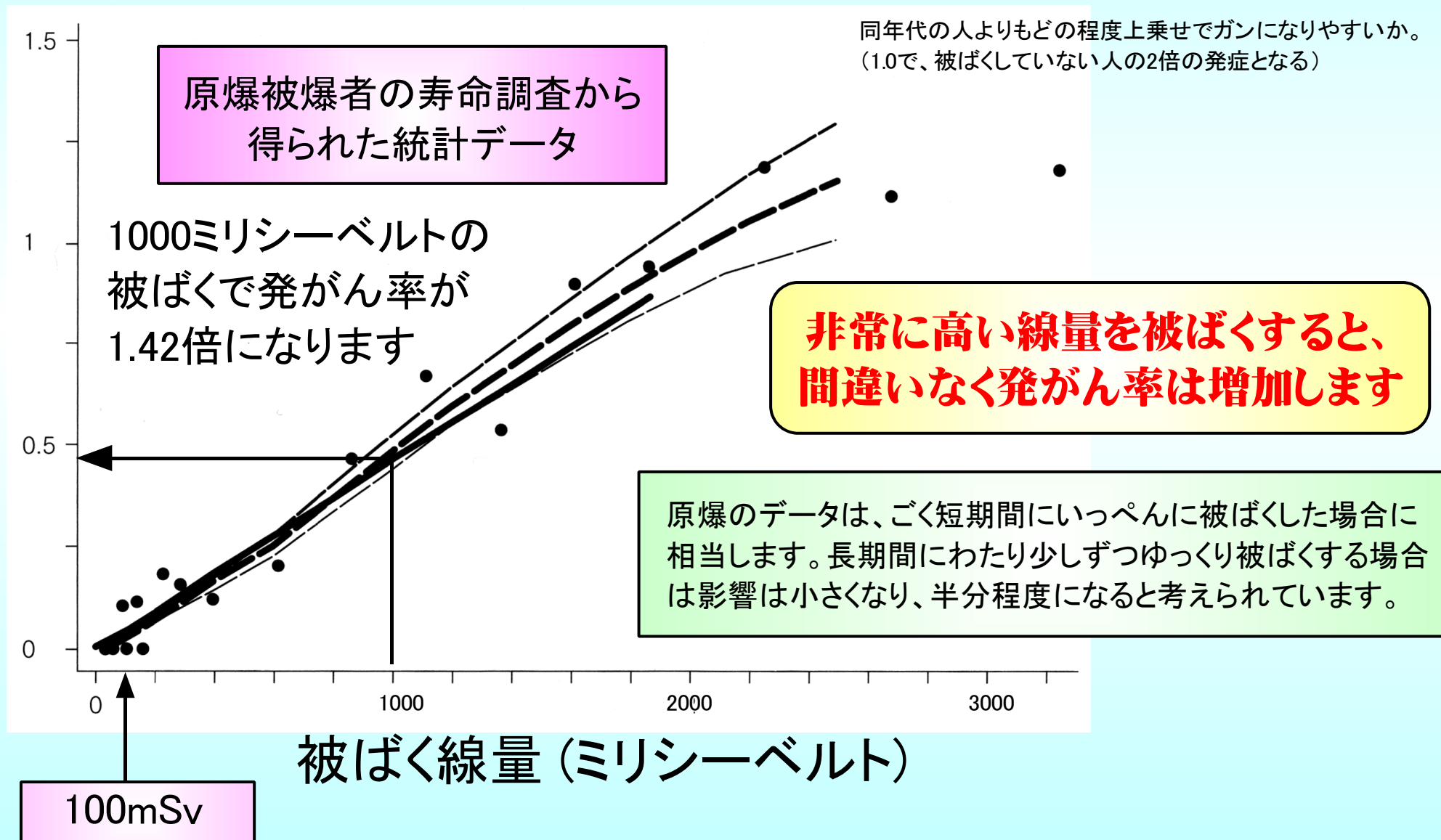
※4 平成23年3月14日に福島第一原子力発電所の緊急作業に従事する者は、250mSvに引き上げられた(平成23年12月16日廃止)

※5 1Sv(シーベルト) = 1,000 mSv(ミリシーベルト) = 1,000,000  $\mu$ Sv(マイクロシーベルト)

# 発がんへの影響はどのぐらいなの？

30歳の時に被ばくした人が、70歳になったときの過剰相対リスク

固形ガン発症の過剰相対リスク





# 低線量放射線の影響はどのぐらいなの？

固形ガン発症の過剰相対リスク

生涯にわたってどこかでガンによって死亡するリスクは、被ばく時の年齢、性別などを全世界で平均化した場合、慢性被ばく100mSvで0.5ポイントだけ「**上乗せ**」されます。

高い線量での関係から、直線的だと考えて管理・規制しています

高い線量での発がん率から計算すると、100mSvを短時間に被ばくすることにより、被ばくしていない人より、ガンの発症リスクが1.05倍に増加となります\*。  
(被ばくしていない人の発症率を20%とすると、21%になります)

\* 30歳で被ばくした人が70歳になったときの値で、被ばくしたときの年齢、その時の年齢で上乗せのリスクは変わってきます。

0.05

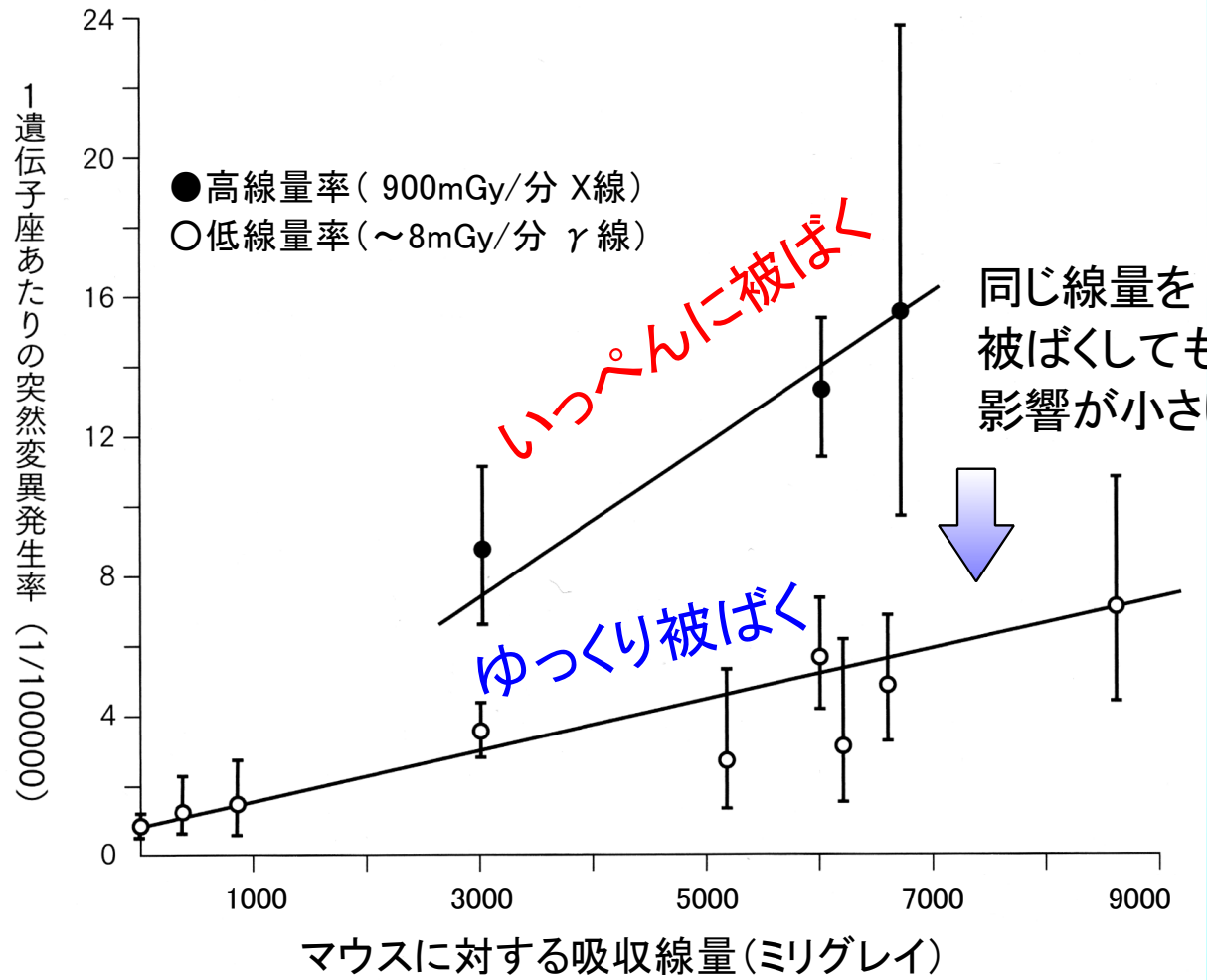
100mSv

これ以下の線量でも影響はあるかも知れませんが、影響が小さすぎて、他の生活習慣などに隠れてしまっているのか無いのか良く分からない、というのが100ミリシーベルトという線量です。

被ばく線量（短時間での被ばくの場合）

# 長期間の被ばくの方が危険じゃないの？

合計で同じ線量を被ばくするなら、  
時間あたりの線量が小さい方が影響は少ない！



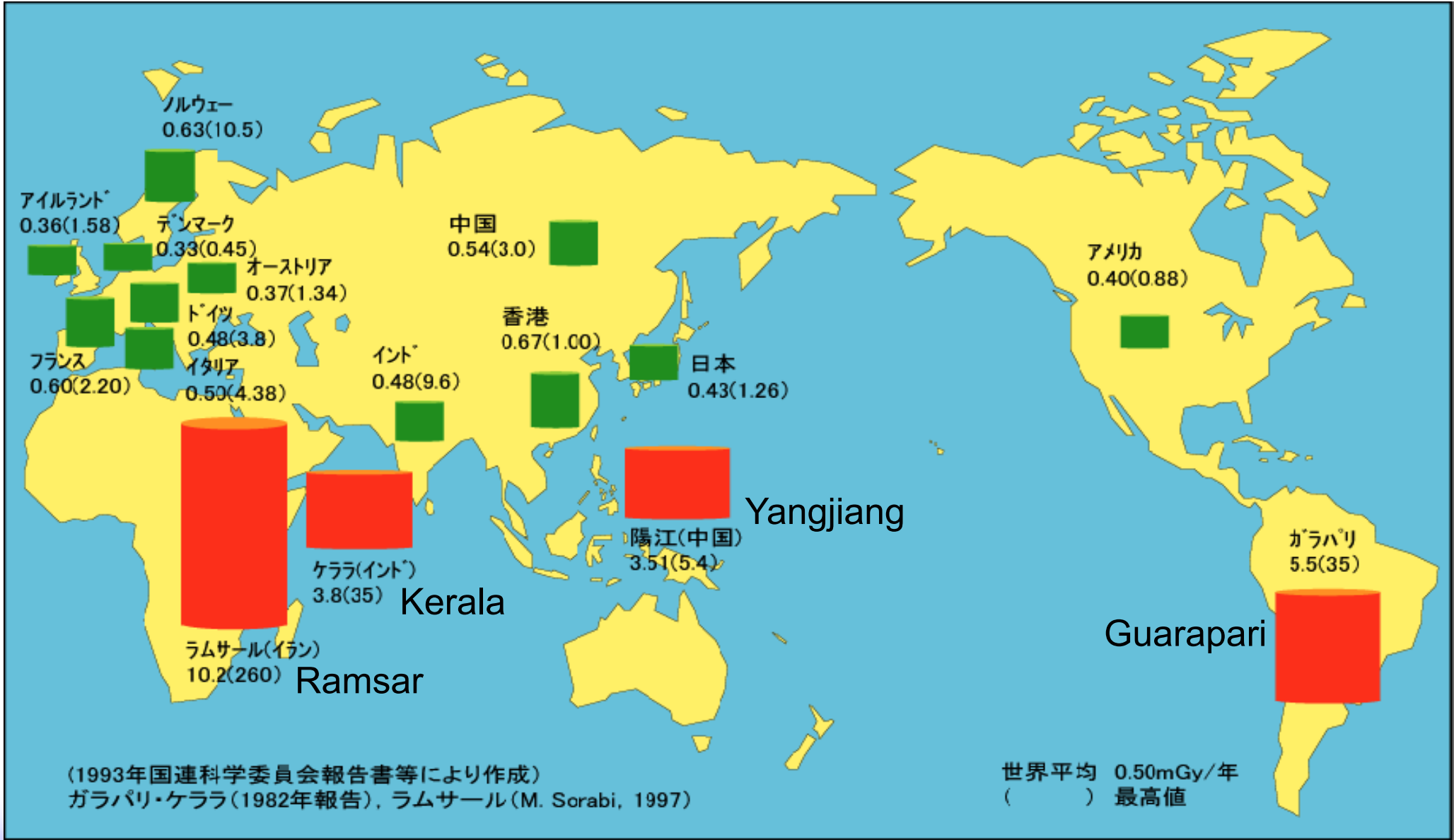
細胞にはDNAを修復する力があります

1950年代に行われた、700万匹にも及ぶマウスを用いた、「メガマウスプロジェクト」からのデータです。これほど大規模な実験は現在では国家レベルでも不可能です。

グレイは物質に吸収される放射線のエネルギーです。100ミリグレイのX線やガンマ線を人間が吸収した場合、100ミリシーベルトと同じ数値になります。

放射線必須データ32、創元社、p.20。(メガマウスプロジェクトの論文より引用、原典では横軸単位はレントゲン)

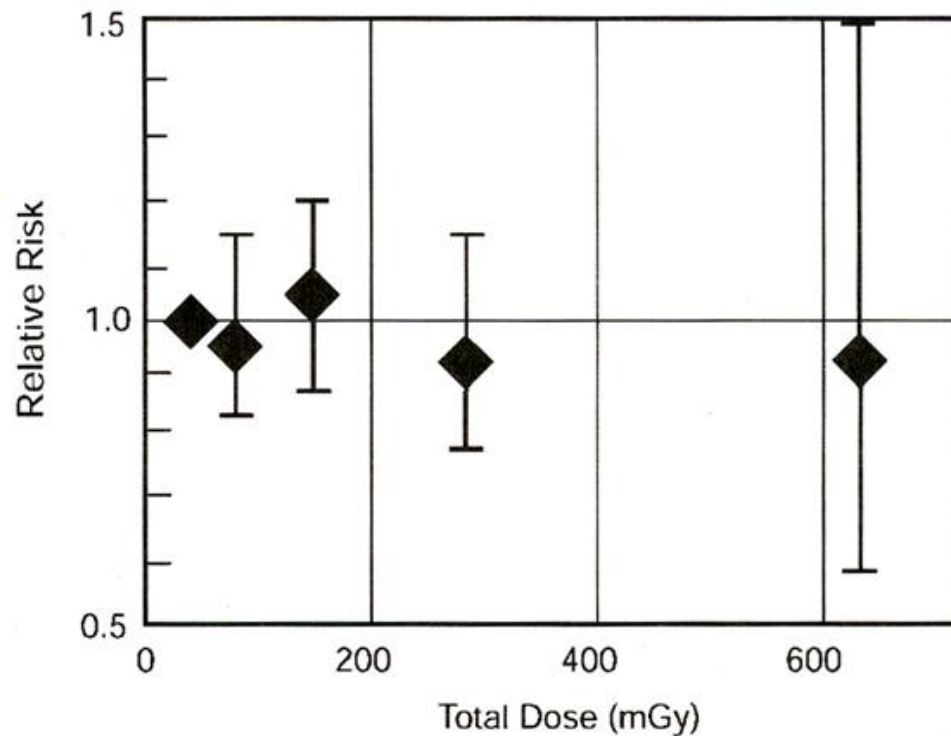
# 世界の自然放射線



# 高自然放射線地域でのがん罹患率

## インドケララ州高自然放射線地域

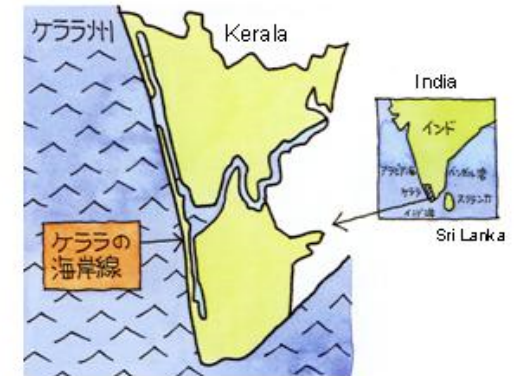
全がん(白血病を除く)の相対リスク



推定累積線量

地域住民の発がんリスクは  
高くない

トリウムを含む黒い砂浜で暮らす漁民

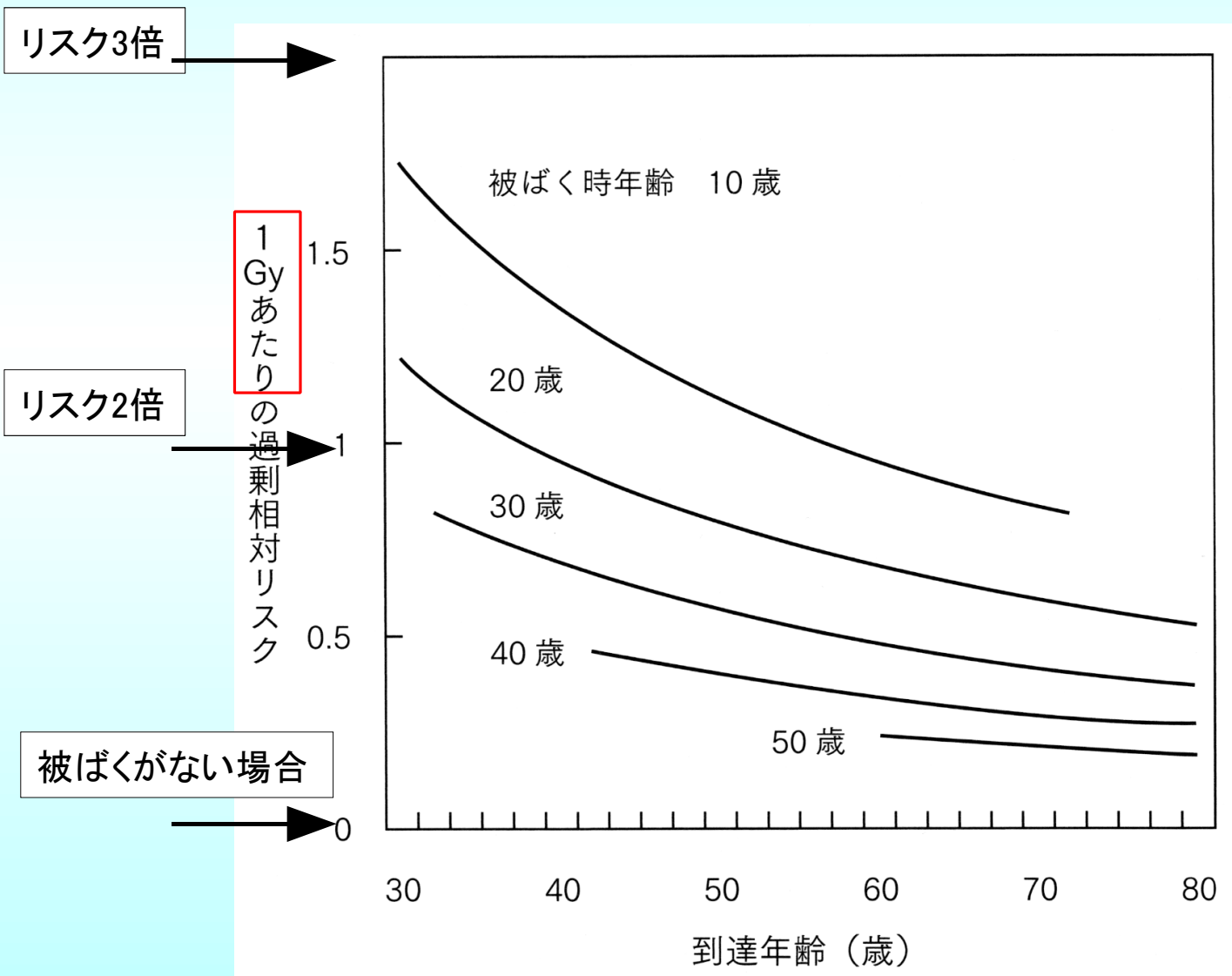


(「世界の大地放射線」放射線照射利用促進協議会)

(Nair, R. R. K. et al., *Health Phys.*, 96, 55-66, 2009)

# 子供は被ばくの影響が大きいんじゃないの？

原爆被爆者の被ばく時年齢による  
全固形ガンによる死亡リスクの比較 \*白血病は除外



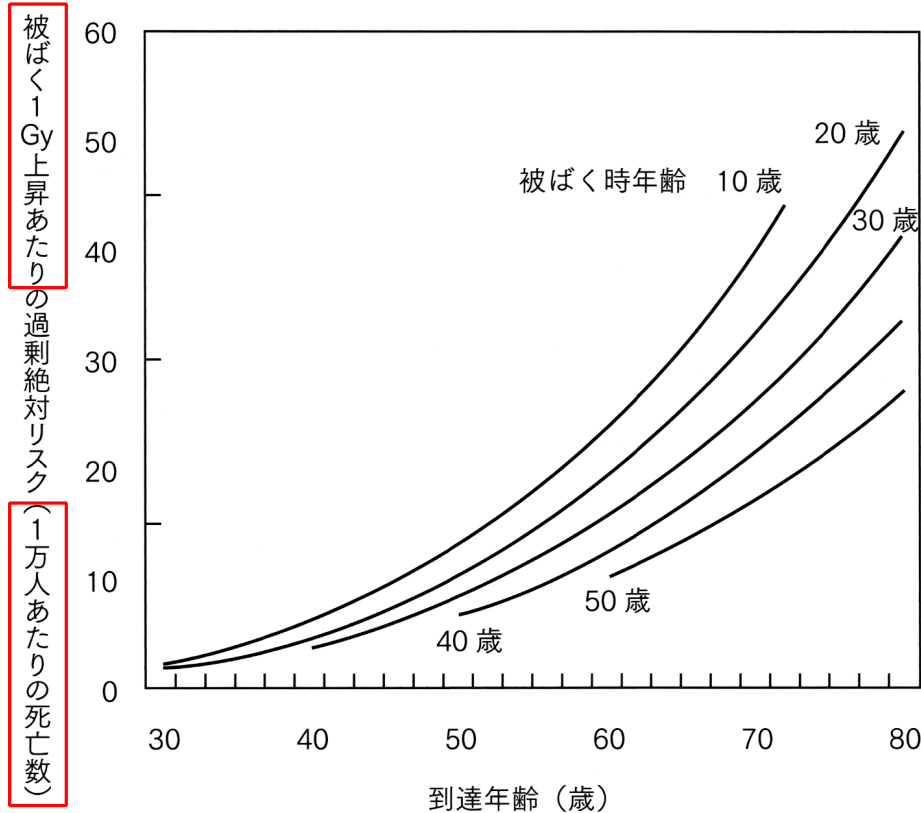
1000mGy 被ばくした場合のガンによる過剰相対死亡リスクを、被ばく時の年齢、およびその後生存していった場合の各年齢で整理したグラフ。

被ばく時に若いほどその後の影響は大きく、また若い時点ほど相対的なリスクは大きい。

ただし、被ばくがない場合のそもそものリスクは年齢が上がるほど大きくなるため、絶対的なリスクは高齢者ほど上昇している。

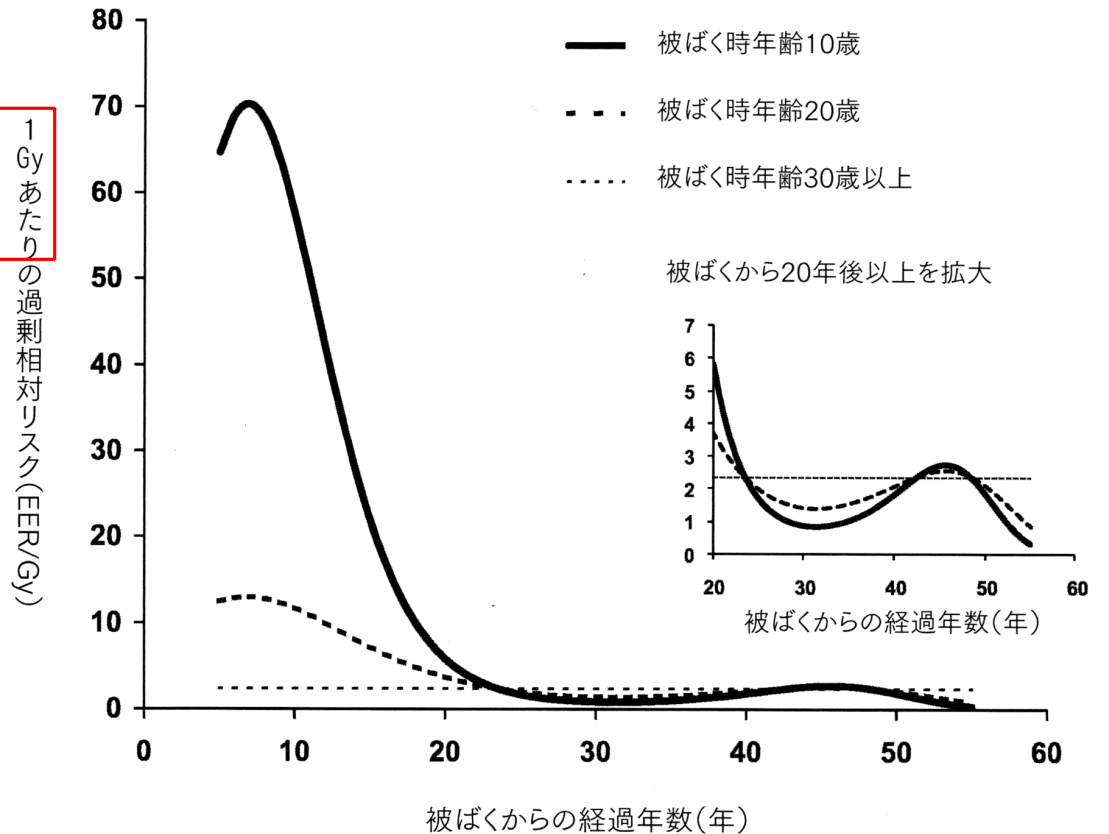
# 子供は被ばくの影響が大きいんじゃないの？

原爆被爆者の被ばく時年齢による  
全固形ガンによる過剰死亡絶対リスクの比較



絶対的な死亡者数は、高齢になってからの方が多し。  
ただし、被ばく年齢が低いほどその後も継続的に高い。

白血病の死亡過剰相対リスク



子供が被ばくした場合の白血病による死亡相対リスクは非常に高い。  
ただし、そもそも白血病による死亡者は固形ガンの1/40以下で、  
20歳程度までの若年時の死亡率は非常に低い(10万人中1人程度)。



# 講義内容

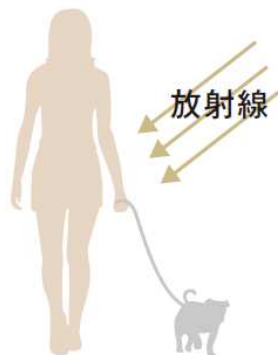
- 放射線とは何か
- 物質と放射線の相互作用
- 放射線の検出
- 天然の放射性核種と半減期
- 放射線の人体への影響
- **放射線の単位**
- 放射線防護
- 量子放射線系専攻について

この場合は実効線量を表わす

## グレイとシーベルトの関係

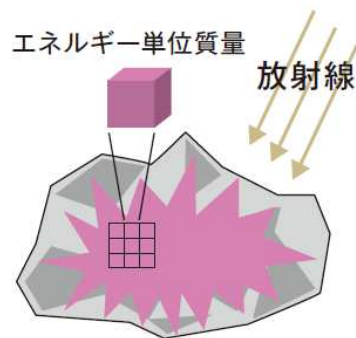
$$\text{シーベルトの値} = \text{グレイの値} \times \text{放射線加重係数}^{\ast 1} \times \text{組織加重係数}^{\ast 2}$$

シーベルトにも色々あることに注意!



シーベルト (Sv)

放射線が人に対して、がんや遺伝性影響のリスクをどれくらい与えるのかを評価するための単位  
(1シーベルト=1000ミリシーベルト)



グレイ (Gy)

放射線が物や人に当たったときに、どれくらいのエネルギーを与えたのかを表す単位  
1グレイは1キログラムあたり1ジュールのエネルギー吸収があったときの線量

### ◆放射線加重係数

| 放射線の種類            | 放射線加重係数                     |
|-------------------|-----------------------------|
| 光子(ガンマ線、エックス線)    | 1                           |
| 電子(ベータ線)          | 1                           |
| 陽子                | 2                           |
| アルファ粒子、核分裂片、重い原子核 | 20                          |
| 中性子線              | 2.5 ~ 20<br>(エネルギーの連続関数で設定) |

### ◆組織加重係数

| 組織・臓器 | 組織加重係数 | 組織・臓器    | 組織加重係数 |
|-------|--------|----------|--------|
| 乳房    | 0.12   | 食道       | 0.04   |
| 赤色骨髄  | 0.12   | 甲状腺      | 0.04   |
| 結腸    | 0.12   | 唾液腺      | 0.01   |
| 肺     | 0.12   | 皮膚       | 0.01   |
| 胃     | 0.12   | 骨表面      | 0.01   |
| 生殖腺   | 0.08   | 脳        | 0.01   |
| 膀胱    | 0.04   | 残りの組織・臓器 | 0.12   |
| 肝臓    | 0.04   |          |        |

- ※1 放射線の種類による影響の違いを表す  
 ※2 臓器等の組織別の影響の受けやすさを表す

# 被ばく管理に用いられる量(防護量)

**等価線量** equivalent dose, Sv

放射線加重係数 × 吸収線量(Gy) (組織、臓器で平均)

放射線加重係数: (≠生物学的効果比 RBE、線質係数→空間のある一点)

X線、 $\gamma$ 線、電子線→1

中性子 → 5~20(エネルギーにより異なる)

$\alpha$ 線、重イオン → 20

**実効線量** effective dose, Sv

組織加重係数 × 等価線量(Sv)

組織加重係数: 全身被ばくの場合を1とし、

各組織単体での被ばくの影響を相対評価

## 被ばく管理に用いられる量(実用量)

等価線量や実効線量は実際には  
直接測定することが出来ない

**周辺線量当量** ambient dose equivalent, Sv

ある放射線場の中に置いたICRU球の深さ 1cm, 70  $\mu$ m での  
線量当量 → 1cm線量当量、70  $\mu$ m線量当量

線量当量(Sv) = **線質係数** × 吸収線量(Gy) (空間の一点)

線質係数: 放射線の水中における衝突阻止能  
= 線エネルギー付与 LTE の関数

# 被ばく管理に用いられる量(外部被ばく)

**実効線量率定数  $\Gamma$**  effective dose rate constant,  
 $\text{mSv} \cdot \text{m}^2 \cdot \text{MBq}^{-1} \cdot \text{h}^{-1}$

| $\gamma$ 線源<br>実効線量率定数 $\Gamma$<br>( $\mu\text{Sv} \cdot \text{m}^2 \cdot \text{MBq}^{-1} \cdot \text{h}^{-1}$ ) | $^{241}\text{Am}$ | $^{137}\text{Cs}$ | $^{192}\text{Ir}$ | $^{226}\text{Ra}$ | $^{60}\text{Co}$ |
|--|-------------------|-------------------|-------------------|-------------------|------------------|
|  | 0.00576           | 0.0779            | 0.117             | 0.217<br>娘核種を含む   | 0.305            |

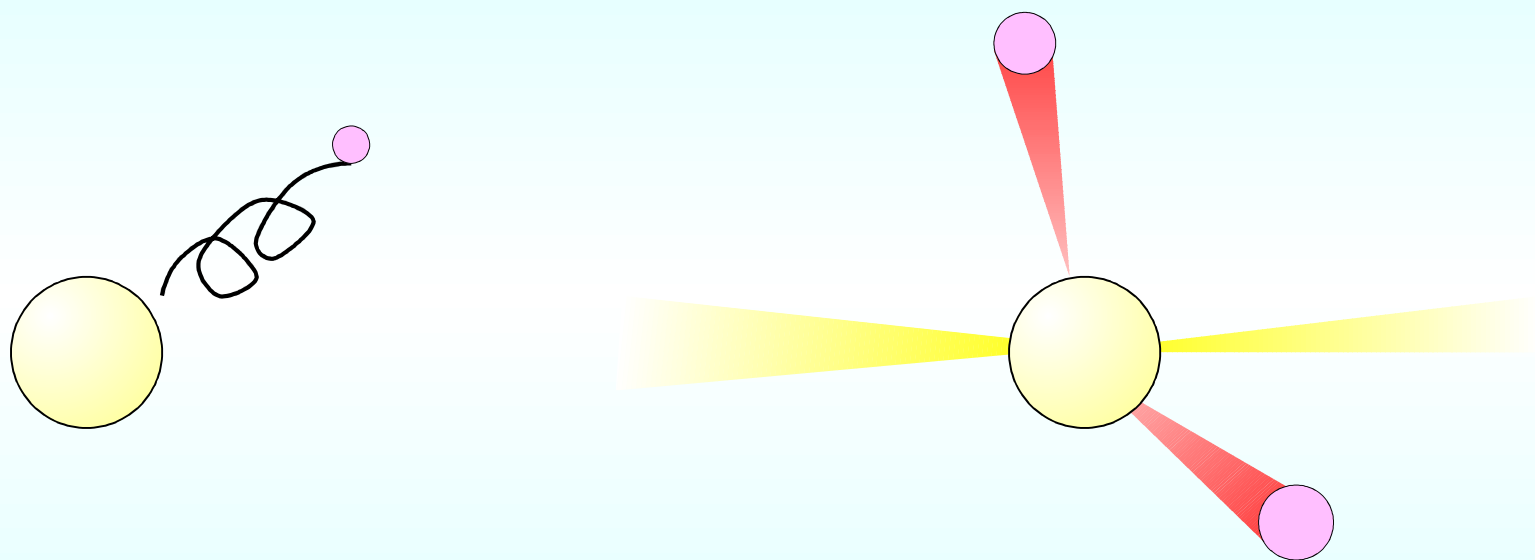
実効線量率定数が  $\Gamma$  である核種の放射能を  $Q$  (MBq)としたとき、距離  $r$  (m) における実効線量率  $\dot{E}$  ( $\mu\text{Sv}/\text{h}$ ) を以下の様に求められる。

$$\dot{E} = \Gamma \times Q / r^2$$

$\Gamma$  は、線源が放出する  $\gamma$  線のエネルギー、本数、放出確率を加味している。  
 $\gamma$  線のエネルギーと線束が求めれば実効線量率は一義的に求められる。  
Bq とは、一秒間の壊変数であり放射線の放出回数ではないことに注意。

## 核種による違い

同じ 1 Bq でも核種によって人体に与える影響 (Sv) は全く異なる!



1Bq とは、ある核種が1秒間に1回別の核種に壊変する、という量で、核種によって放出する放射線の種類( $\alpha$ 、 $\beta$ 、 $\gamma$ )、エネルギー、本数が異なり、さらにそれぞれの放射線を放出する確率も異なっている。



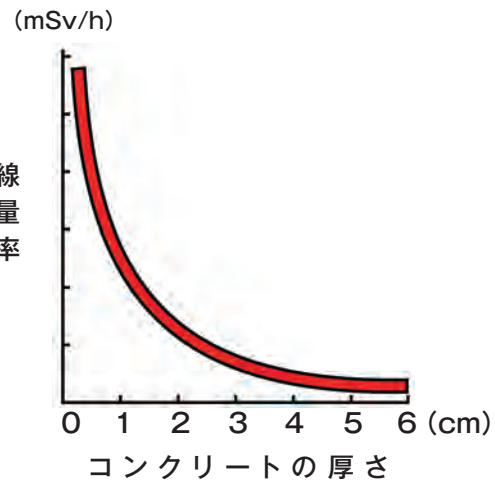
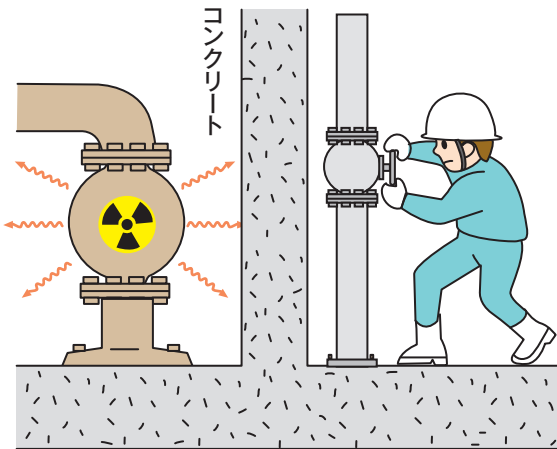
# 講義内容

- 放射線とは何か
- 物質と放射線の相互作用
- 放射線の検出
- 天然の放射性核種と半減期
- 放射線の人体への影響
- 放射線の単位
- **放射線防護**
- 量子放射線系専攻について

# 放射線防護の基本

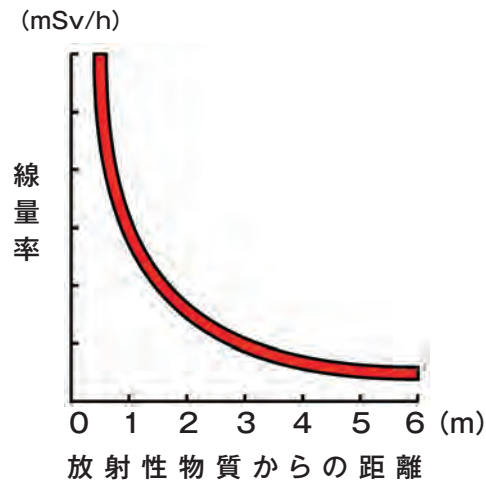
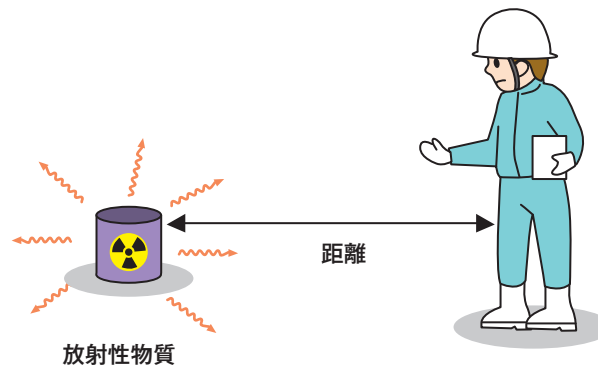
## 1. 遮へいによる防護

(線量率) = 遮へい体が厚い程低下



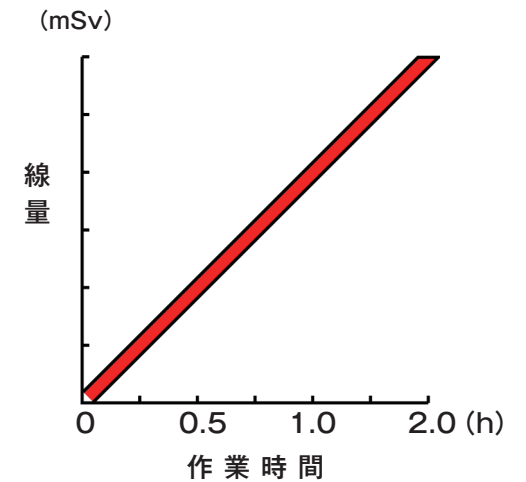
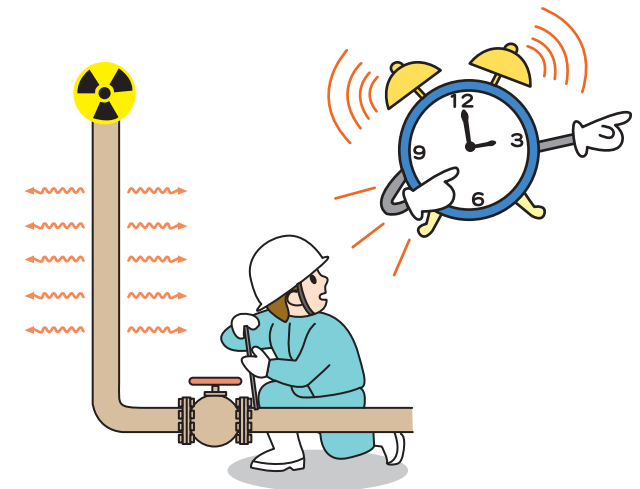
## 2. 距離による防護

(線量率) = 距離の二乗に反比例



## 3. 時間による防護

(線量) = (作業場所の線量率) × (作業時間)



# RI取扱時の遮蔽



鉛ブロック



鉛ガラス

RIと作業者の間に適切な遮蔽を行い、被曝線量を可能な限り低減する。

→ 作業時間が多少長くかかっても、遮蔽による低減を行った方が有効な場合が多い

→ 事前に作業内容を良く確認して適切な遮蔽体の配置を検討する

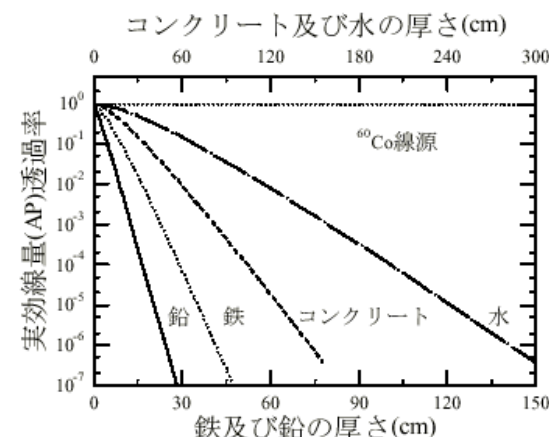
# しゃへい計算

○  $\gamma$ 線・X線 → それぞれの核種に対して実効線量率定数が与えられている。これで求めた実効線量率に、**実効線量透過率**(effective dose transmission) をかけて求めるが、実効線量透過率は放射線の**エネルギー**、しゃへい体の**原子番号**、しゃへい体の**厚さ**によって異なるため、主要な核種ごとに鉛、鉄、コンクリート、水の厚さに対する実効線量透過率のグラフが与えられている。

**光電効果などの光子と物質の相互作用はエネルギー、Zで大きく変化する!**

○  $\alpha$ 線 → 考慮する必要なし

○  $\beta$ 線 → アクリル容器で囲んだ場合に発生する制動放射X線に対する実効線量率定数が与えられており、さらに代表的な $\beta$ 核種に対してしゃへい体ごとの透過率が数表で与えられている(遮蔽計算実務マニュアルなど)。



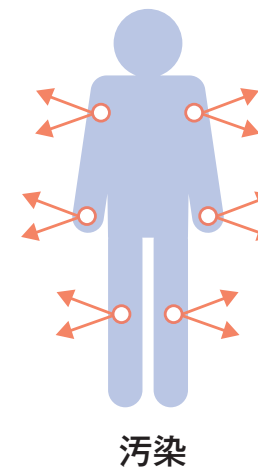
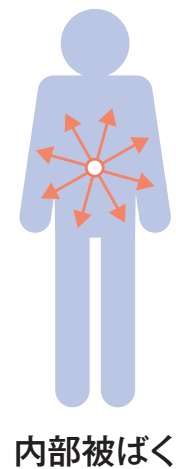
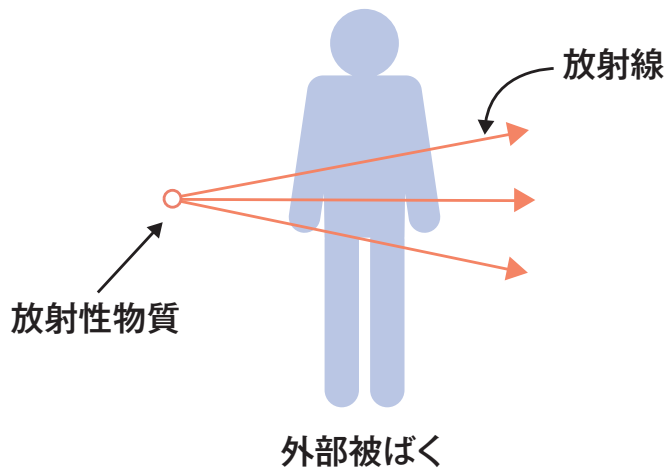
# 被ばくと汚染の違い

## 被ばく

放射線を受けること

## 汚染

放射性物質が皮膚や衣服に付着した状態



# 内部被ばくはずっと体内で放射線を出すから危ないんじゃないの？

クイズ: 1kg あたりセシウム-137 を 100 Bq 含む米を、一食あたり1合(精米で150g、炊きあがりでは330g)、一日三食、365日食べつづけたとして、そのあと50年間で被ばくする線量はどの程度になるでしょう？

答え: 0.21ミリシーベルト

現在一般食品中の放射能濃度の基準値は、放射性セシウムで 100ベクレル/kg となっており、この設定は基準値の上限値の場合となっています。現在も福島県産の米については全量検査が続けられていますがほぼ全てのサンプルで検出できないぐらい放射能は少なくなっています。ですので、今回のクイズは有り得ないぐらい高い濃度の食品だけをずっと摂取し続けた場合、と言う極端な例だとお考え下さい。



欧米に飛行機で旅行すると、宇宙線の増加により0.2ミリシーベルト程度被ばくします。

## 「内部被ばく」による影響

- ・どんな放射線の種類か( $\alpha$ 、 $\beta$ 、 $\gamma$ )
- ・どのぐらいのエネルギーか
- ・物理的な半減期
- ・排出されやすさ(生物学的半減期)
- ・どんな臓器に蓄積されやすいか
- ・蓄積される臓器の感受性

全部考慮して評価しています

その後 50年間にわたる影響を、取込んだ時点でいっぺんに被ばくしたとして被ばく線量(シーベルト)の計算をします。

このようにして求められた**内部被ばくの線量**と、**外部被ばくの線量**とは、**同じリスク**になります。

実際には、**同じ量**を**少しずつ長い期間にゆっくり**被ばくするのと、**いっぺん**に被ばくするのとでは、DNA修復のメカニズムがあるため、**ゆっくりの方が影響は小さくなります**。



# 被ばく管理に用いられる量(内部被ばく)

## 預託線量 committed dose, Sv

体内に取込んだ放射性物質により内部被曝する場合、取込んでから50年間(子供に対しては70年間)先まで被ばくする線量を時間積分して、取込んだ時点にいっぺんに被ばくしたとして被ばく管理を行う。線量として等価線量を用いると預託等価線量、実効線量を用いると預託実効線量である。

ここで被ばくする線量は、物理的な壊変や生物学的な排泄などにより時間と共に減少していき、簡単に求めることが出来ない。放射する線質、壊変速度や化学的性質から、核種ごとに**実効線量係数**(Sv/Bq)が求められており、取込んだ放射能から預託実効線量を求めることが出来る。経口及び吸入摂取についてそれぞれ定められている。

# 被ばく管理に用いられる量(内部被ばく)

## ベクレルからシーベルトへの変換

**実効線量率定数** effective dose rate constant

- ・放出される放射線の種類と、エネルギー
- ・放出確率

外部  
被ばく

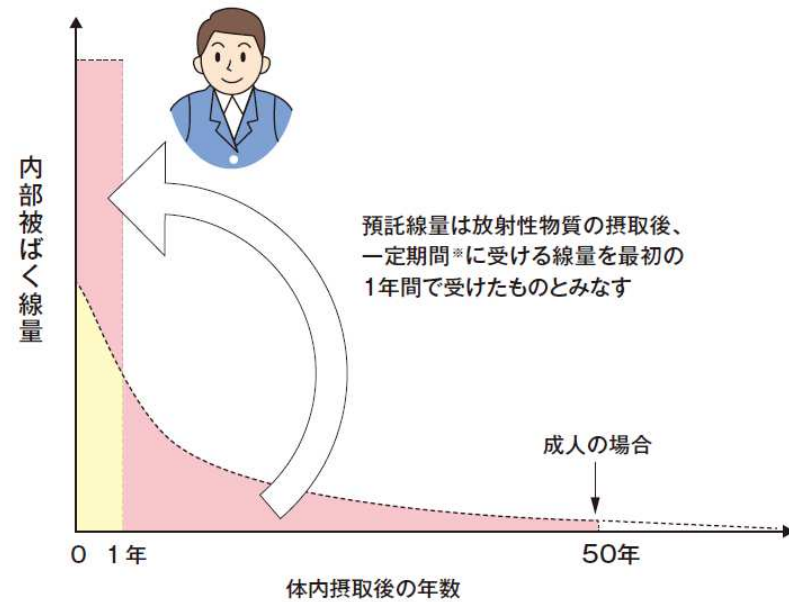
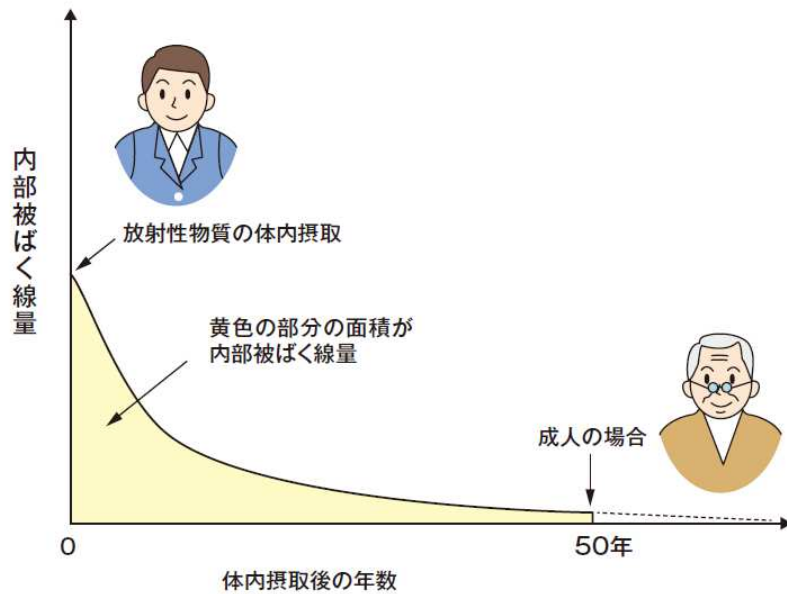
**実効線量係数** effective dose coefficient

上記二つに加えて、

- ・物理的半減期
- ・生物的半減期
- ・特異臓器集積と組織加重係数

内部  
被ばく

## 内部被ばくの評価（預託線量の概念図）



※成人:50年間、子供:取り込み時から70歳まで

## 例題(内部被曝量の評価)

・精米された状態で1kg あたり Cs-137 を 100Bq 含む米を毎日食べた場合、1年間でどれだけ内部被ばくすることになるか計算せよ。

ただし、一食あたり1合(精米で150g、炊きあがりでは330g)食べるものとし、一日三食、365日毎日食べたとして計算せよ。

A:

$$0.15\text{kg} \times 3 \times 365 \times 100\text{Bq/kg} \times 1.3 \times 10^{-5} \text{ mSv/Bq} \\ = 0.21\text{mSv}$$

# 講義内容

- 放射線とは何か
- 物質と放射線の相互作用
- 放射線の検出
- 天然の放射性核種と半減期
- 放射線の人体への影響
- 放射線の単位
- 放射線防護
- **量子放射線系専攻について**

量子放射線系専攻 ホームページ

<http://www.riast.osakafu-u.ac.jp/index2.html>

秋吉 ホームページ

<http://bigbird.riast.osakafu-u.ac.jp/~akiyoshi/>

講義資料の配布

<http://bigbird.riast.osakafu-u.ac.jp/~akiyoshi/Lecture/>