

平成28年度放射線業務従事者のための
新規教育訓練講習会

放射線安全取扱いの基礎

大阪府立大学 放射線研究センター
秋吉 優史

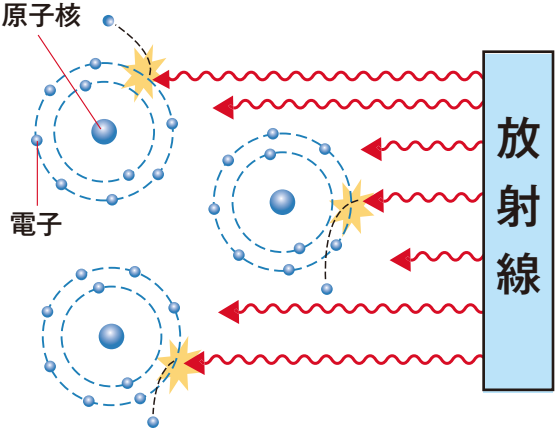
講義内容

- **放射線と物質の相互作用**
- **霧箱で放射線の性質を知ろう**
- **天然の放射性物質と半減期**
- **様々な検出器による測定**
- **放射線防護と遮蔽**
- **外部被ばくと内部被ばく**

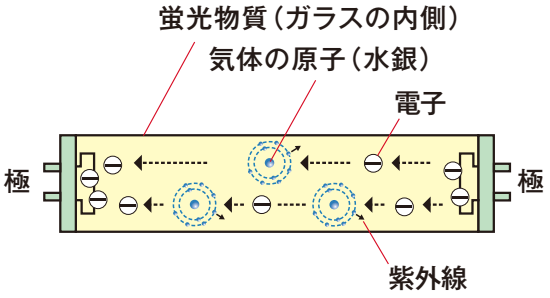
- **放射線と物質の相互作用**
- 霧箱で放射線の性質を知ろう
- 天然の放射性物質と半減期
- 様々な検出器による測定
- 放射線防護と遮蔽
- 外部被ばくと内部被ばく

放射線の性質

電離作用

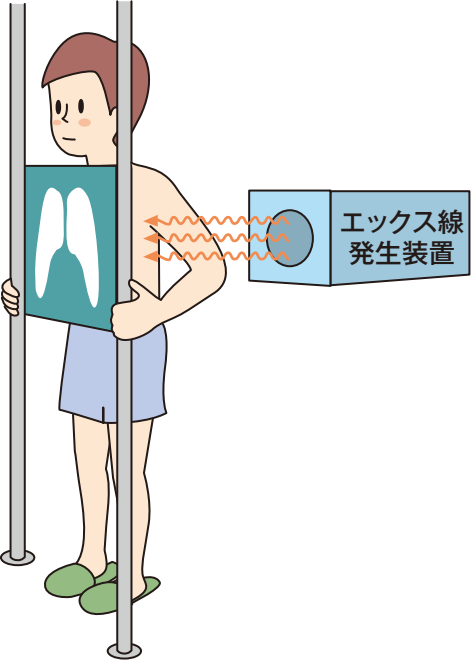


蛍光作用

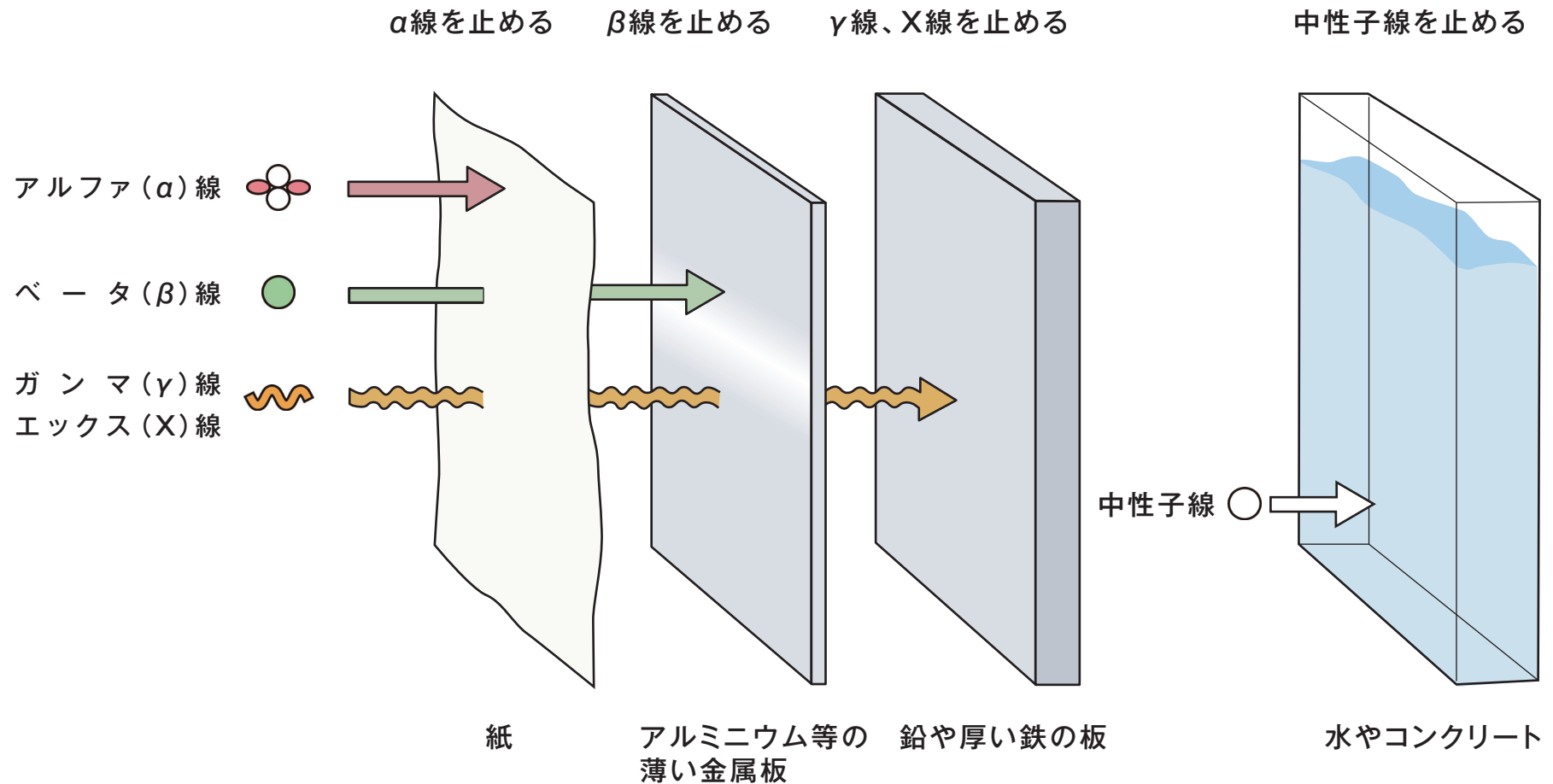


蛍光灯の仕組み
管の両端に電圧が加わると、極から極に電子が流れます。電子が管に封入された水銀に衝突すると、紫外線が発生します。紫外線は蛍光物質を光らせます。

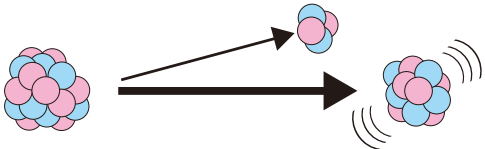
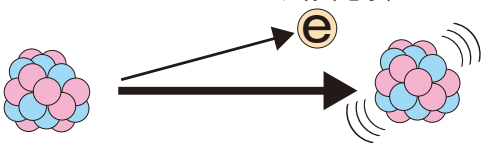
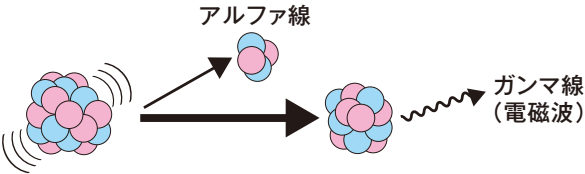
透過作用



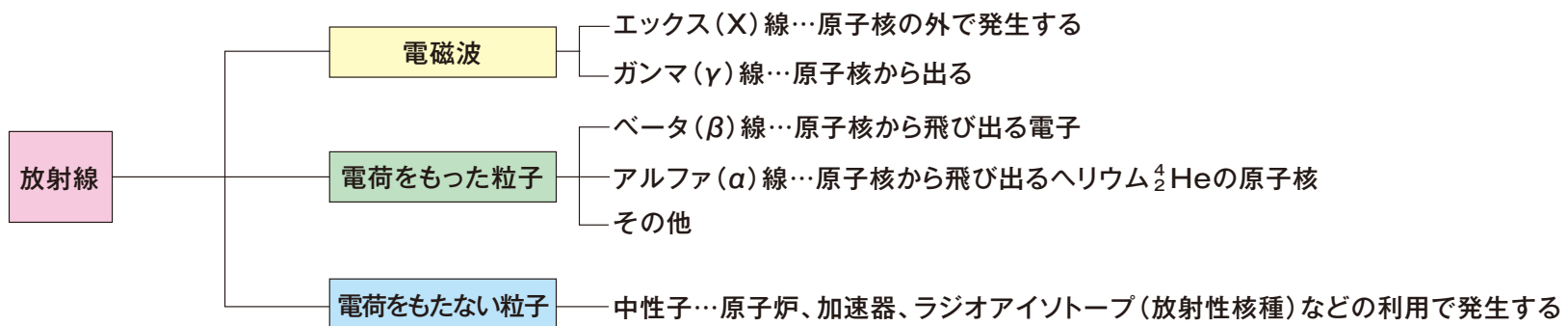
放射線の種類と透過力



放射線の種類

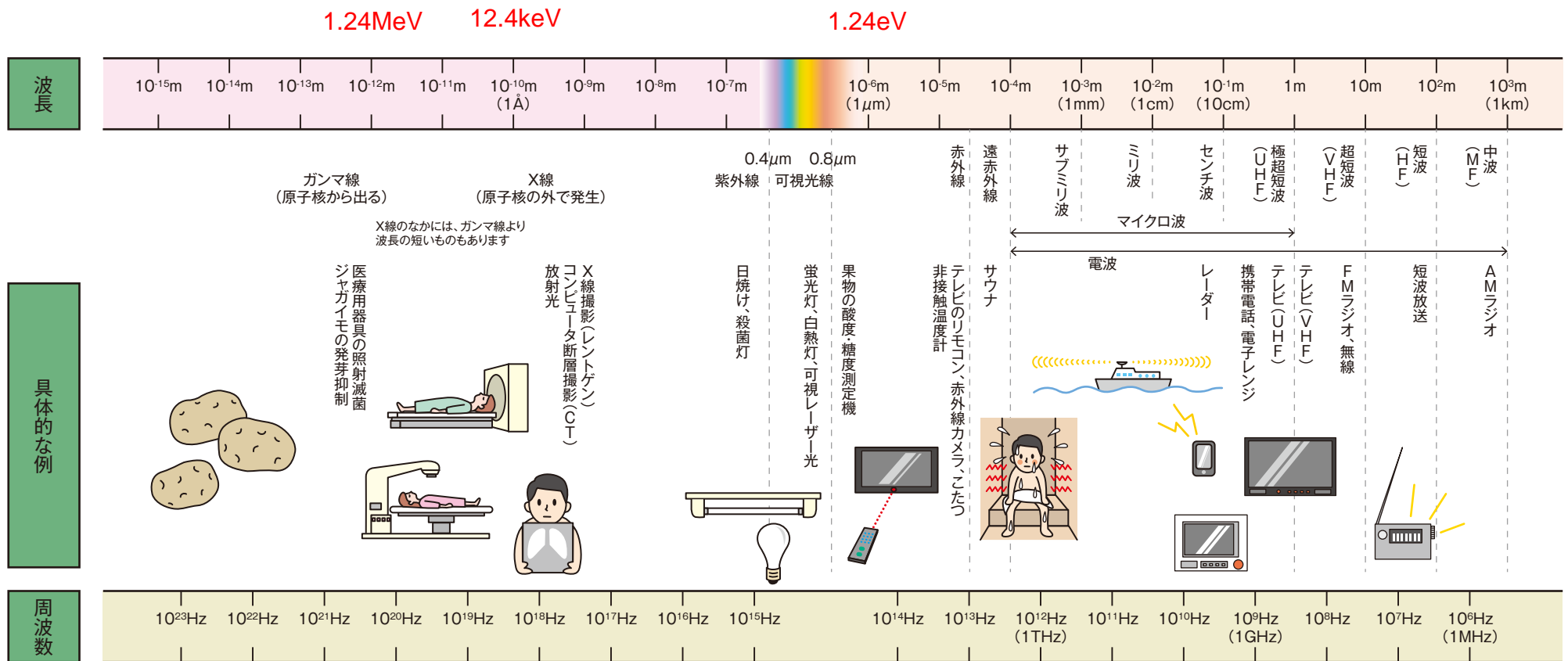
<p>アルファ (α) 壊変 (崩壊)</p>	<p>アルファ線 (${}^4_2\text{He}$原子核)</p> 	<p>(例)</p> ${}^{226}_{88}\text{Ra} \xrightarrow{\alpha} {}^{222}_{86}\text{Rn}$
<p>ベータ (β) 壊変 (崩壊)</p>	<p>ベータ線 (電子)</p> 	<p>(例)</p> ${}^{24}_{11}\text{Na} \xrightarrow{\beta} {}^{24}_{12}\text{Mg}$
<p>ガンマ (γ) 線の放出</p>	<p>アルファ線</p>  <p>ガンマ線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

● 陽子 ● 中性子



電磁波の仲間

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



放射線と物質の相互作用

イオンビーム (α 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 (β 線)

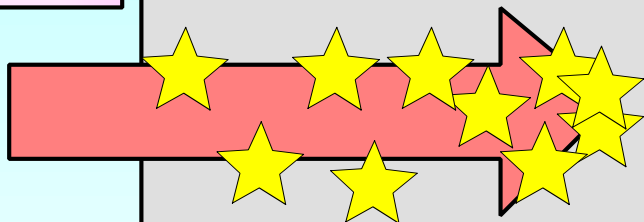
物質中の電子との衝突によって、簡単に方向やエネルギーが変化するため、まっすぐに進まず、広い範囲に広がる。このため、平均的な飛程という物は求めにくく、最大飛程で評価される。重元素に入射すると、原子核周辺の強い電場で急激に曲げられることにより、制動放射X線の発生割合が大きくなる。

γ 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。

α 線

水中での最大飛程: $50 \mu\text{m}$ 程

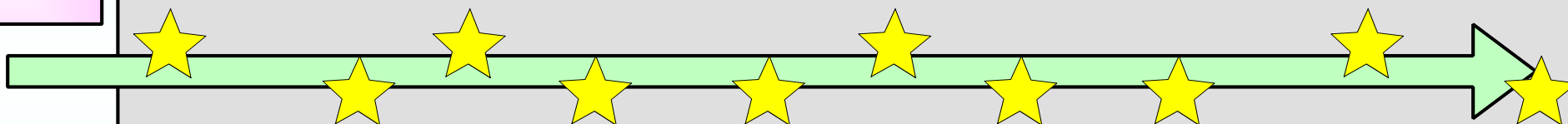


狭い範囲に一気に
エネルギーを放出する

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



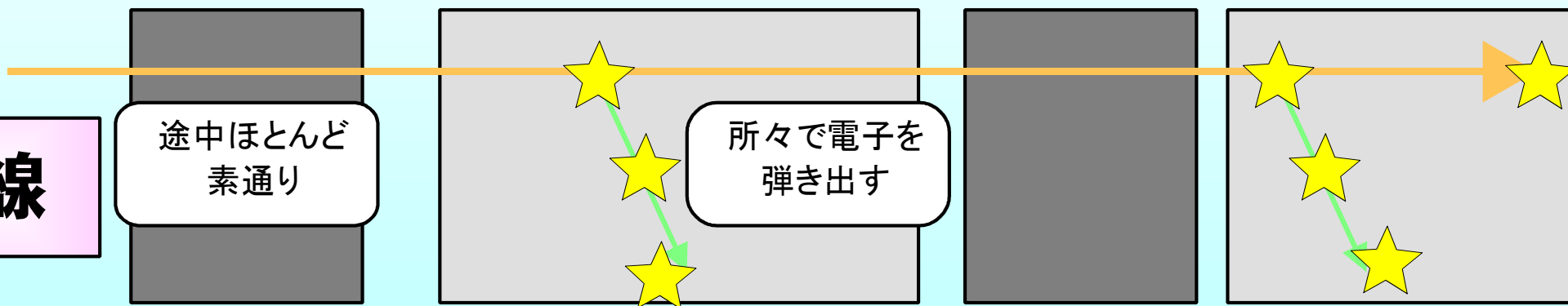
所々にぽつぽつとエネルギーを落とす

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

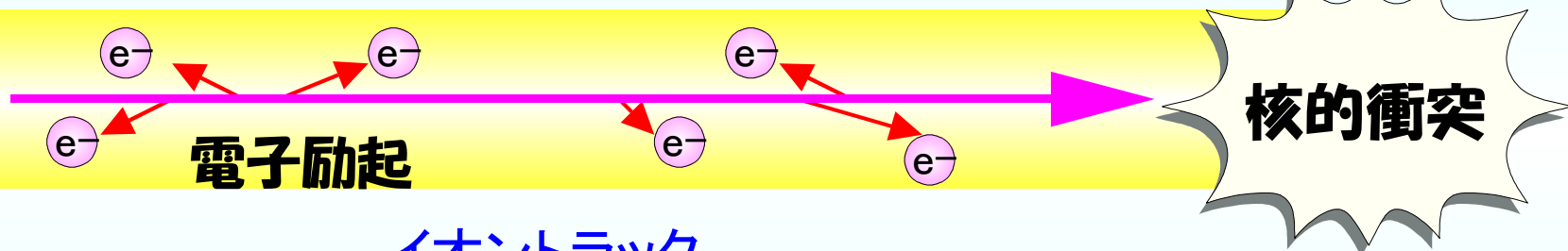


イオンビーム(α 線)の場合

物質に入射したイオンビームはそのほとんどのエネルギーを電子励起により徐々に失い、それに伴い阻止能が増加し(粒子の速度の二乗に反比例)、最終的に核的な衝突を起こす。弾性散乱された物質の原子はさらに他の原子をはじき飛ばしカスケードを形成する。

Primary Knock-on Atom (PKA)

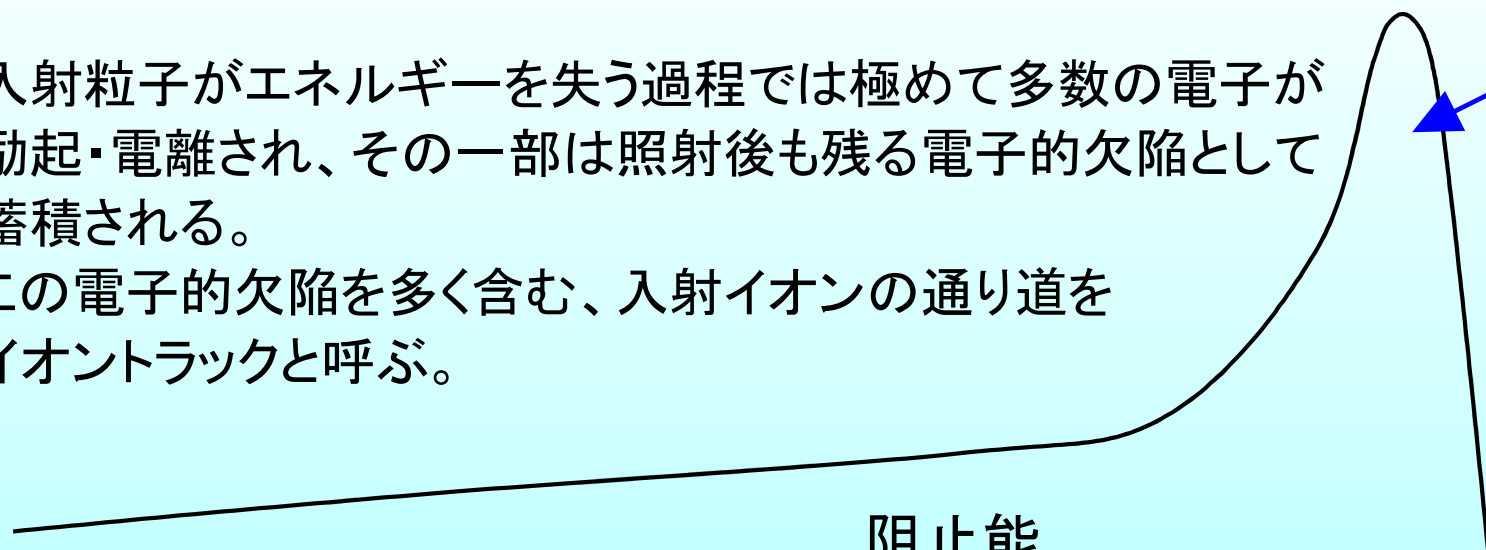
弾性散乱
(弾き出し)



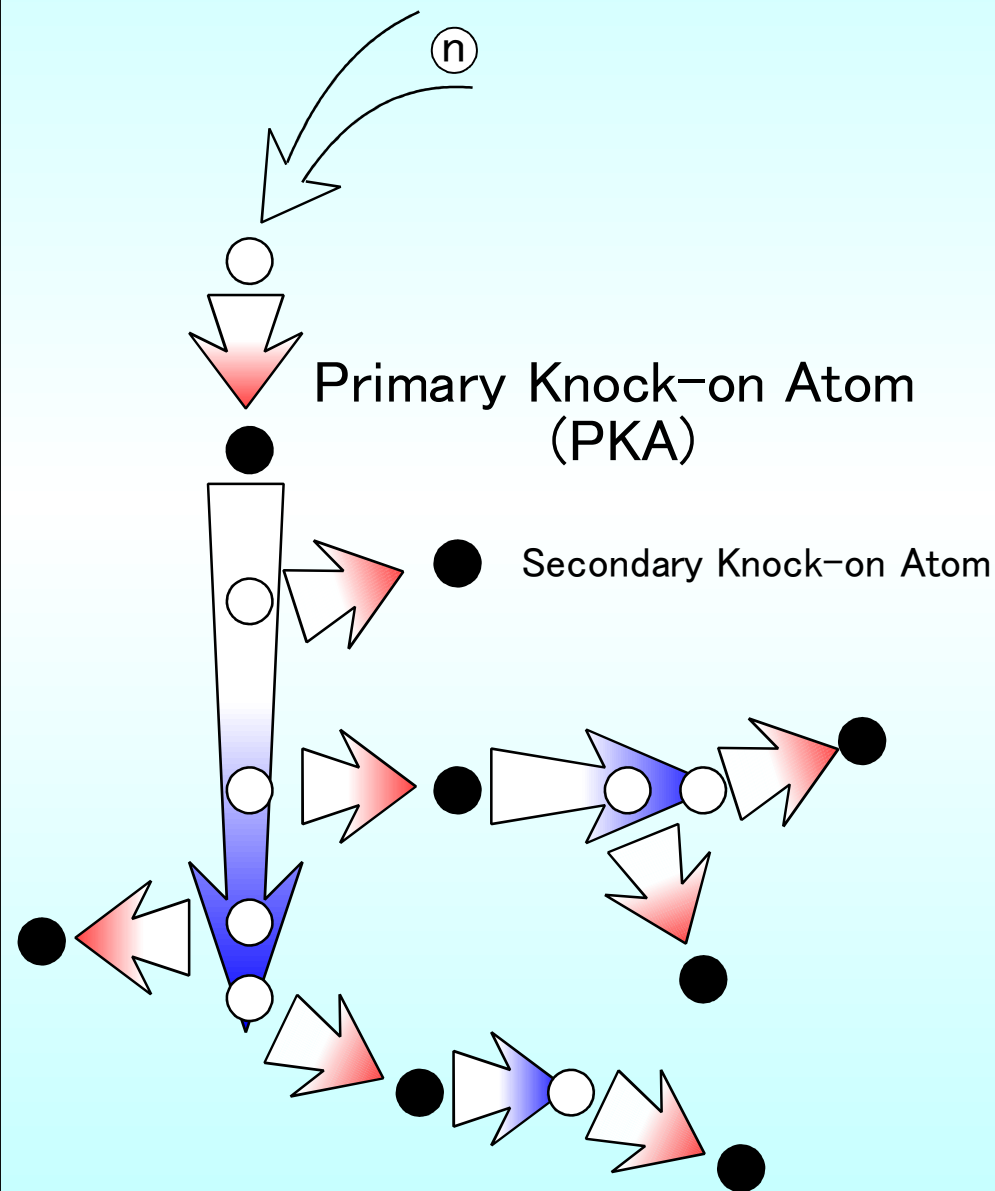
入射粒子がエネルギーを失う過程では極めて多数の電子が励起・電離され、その一部は照射後も残る電子的欠陥として蓄積される。この電子的欠陥を多く含む、入射イオンの通り道をイオントラックと呼ぶ。

阻止能

ブラッグピーク



照射カスケード



入射粒子がある格子原子をはじき飛ばすと、その原子は Primary Knock-on Atom (PKA) となり、この原子がまた別の格子原子をはじき飛ばす。

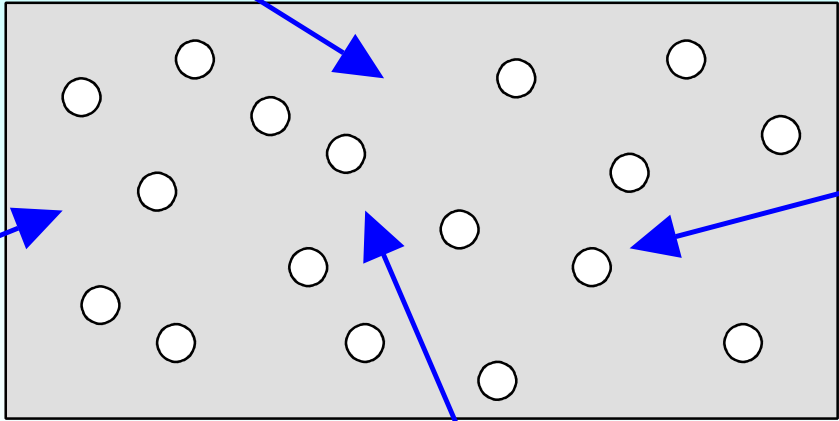
エネルギーが高いうちは弾き出しの確率は低いが、電子励起により徐々にエネルギーを失い、速度が落ちてくると弾き出しの断面積が増加するため、次々と弾き出しを起こして止まる。

この終端付近の連続して弾き出しが起こる領域を照射カスケードと呼び、瞬間的にその領域にエネルギーが解放されるため超高温状態となり、局所的な溶解状態となる。

入射粒子による欠陥導入形態の違い

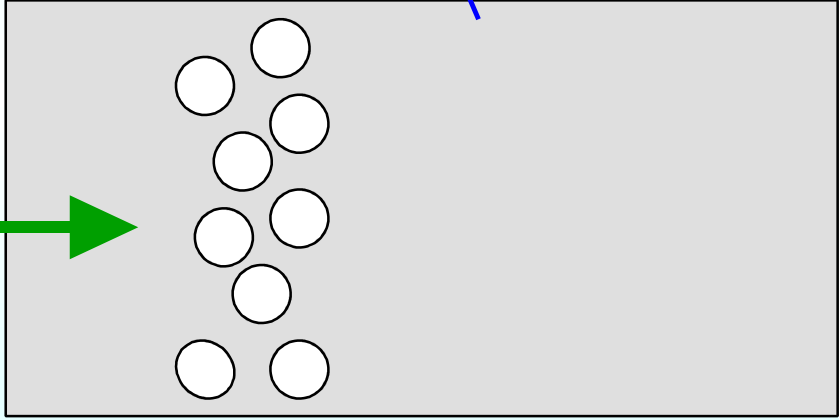
中性子照射

透過力の高い $E > 0.1\text{MeV}$ の高速中性子により試料全体に均質に欠陥が導入される。
Primary Knock-on Atom (PKA) をはじき出した後は狭い領域に欠陥が集中し、カスケードを形成する。



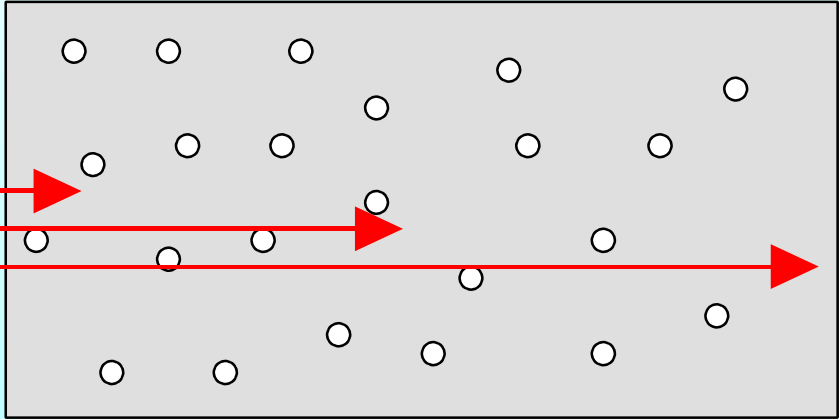
イオンビーム照射

電子励起によりエネルギーを失っていき、ブラッグピーク付近に集中的に欠陥が導入される。
PKAをはじき出した後の挙動は中性子照射と似ていて、カスケードを形成する。

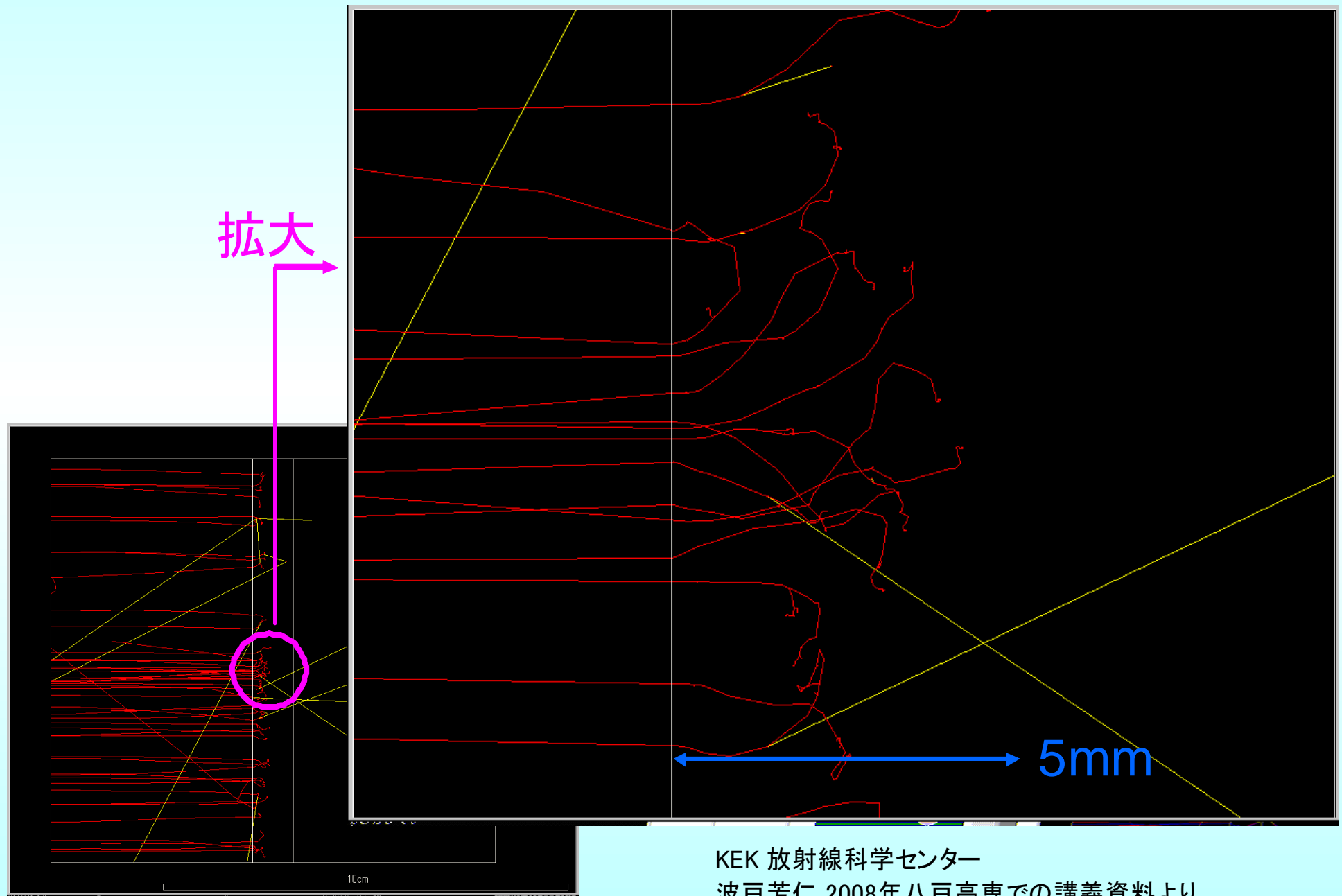


電子線照射

30MeV の電子線は、セラミックス中でおおよそ 10cm 程度の飛程を持つが、平均 PKA エネルギーは 225eV にとどまるため損傷関数は 3.75個となり、フレンケル対などの点欠陥のみが導入されると考えられる。



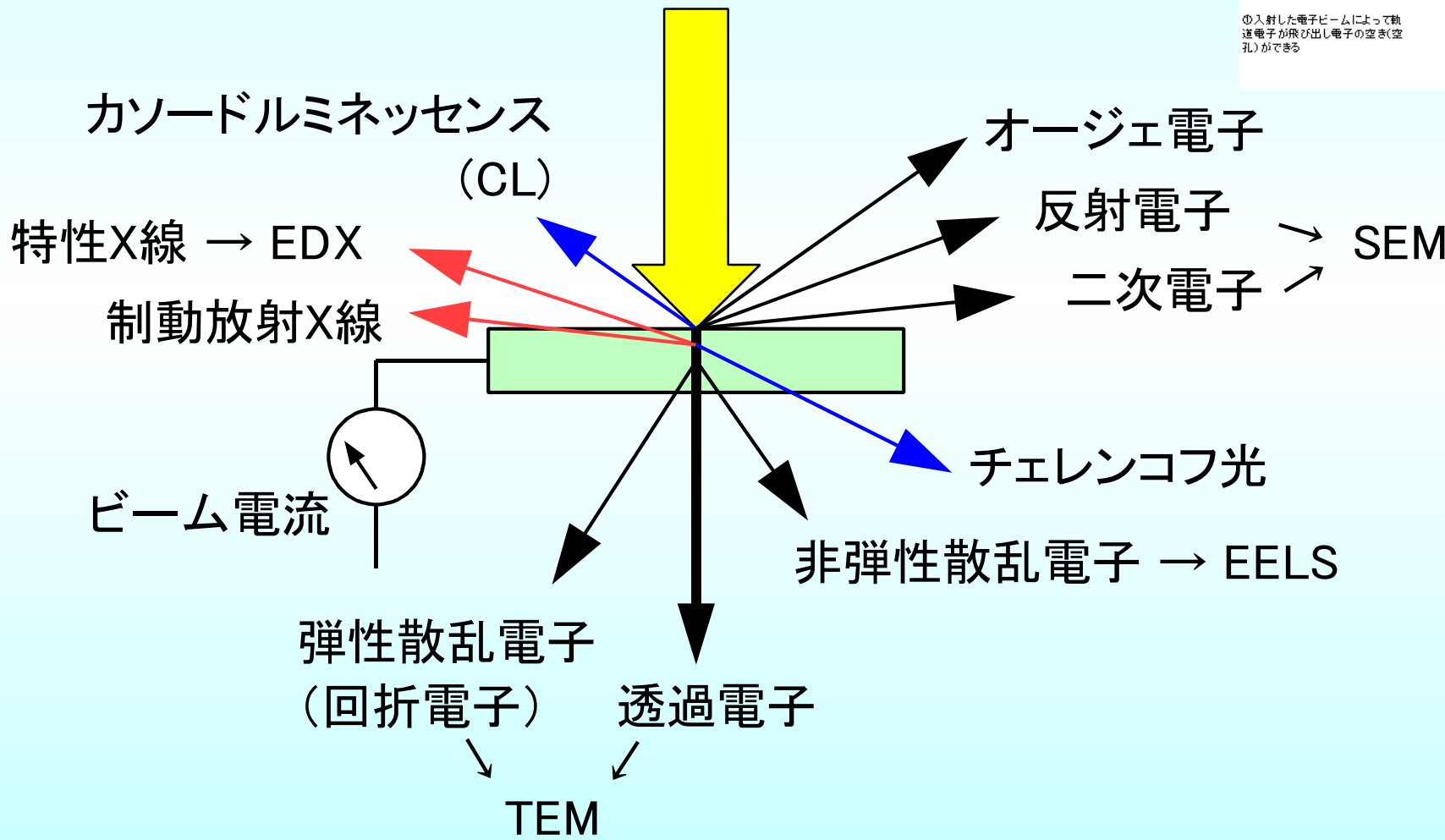
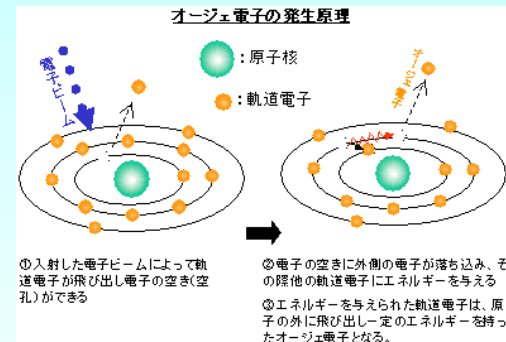
ベータ線と物質の相互作用



KEK 放射線科学センター
波戸芳仁 2008年八戸高専での講義資料より

電子線の入射で出てくるもの

入射電子



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。

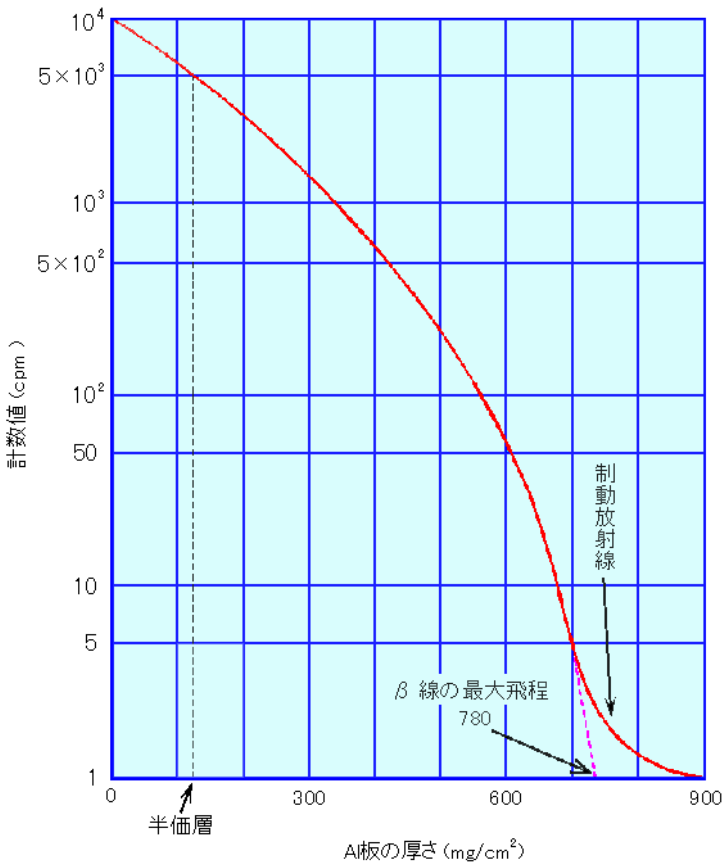


図3 ^{32}P のβ線のアルミニウムによる吸収曲線

[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 (g/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

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

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

α 線の飛程

Q: ウラン系列の核種を含むラジウムボールから放出される α 線の空気中での最大飛程を求めよ。

- ・ウラン系列の核種のうち、最大のエネルギーの α 線を放出するのはPo-210でそのエネルギーは7.69MeVである。
- ・ α 線の空気中での飛程は $R = 0.318E^{3/2}$ で表わされる (R: 飛程(cm), E: エネルギー(MeV))。

A: 6.78cm

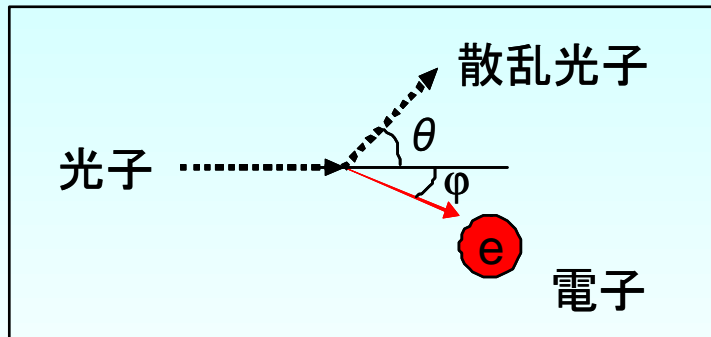
電子線 (β 線) の飛程

Q: ウラン系列の核種を含むラジウムボールから放出される β 線を遮蔽するのに必要なアルミ板の厚さを求めよ

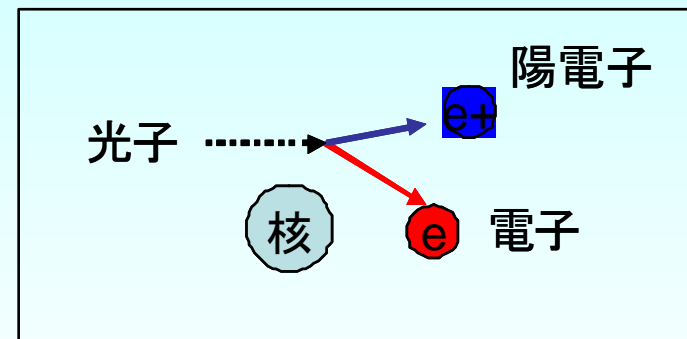
- ・ウラン系列で最も大きいエネルギーの β 線は Bi-214 からの 3.27MeV である。
(Tl-210 4.21MeVもあるが分岐比率0.021%でほとんど出ていない)
- ・アルミの密度は 2.70g/cm^3 である。

A: 0.607cm

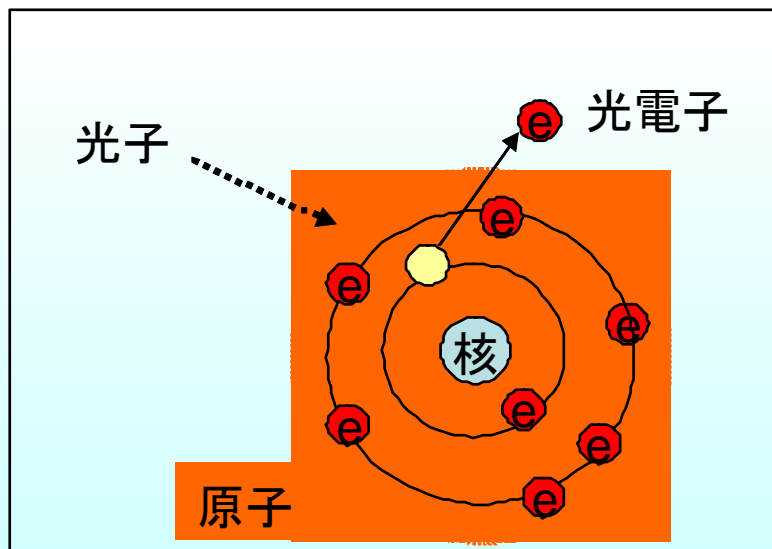
ガンマ線と電子・原子核・原子との反応



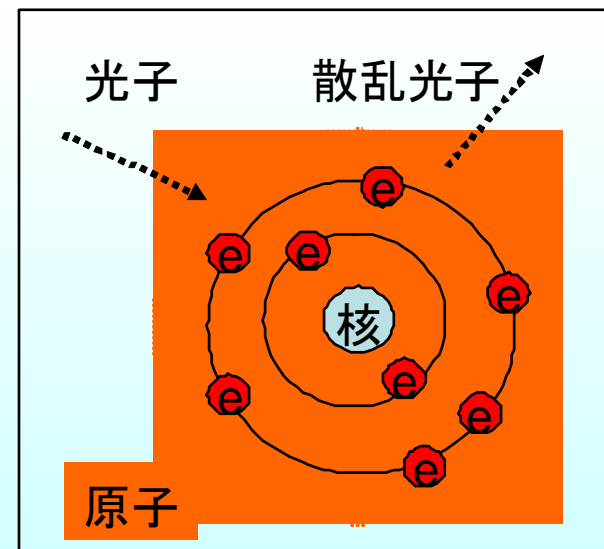
コンプトン散乱



電子対生成



光電効果



レイリー散乱

γ 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 1.022MeV 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 10MeV 程度であり、これ以上のエネルギーの光子の入射により (γ, n) 反応を起こして中性子が放出される。

γ線・X線の減衰

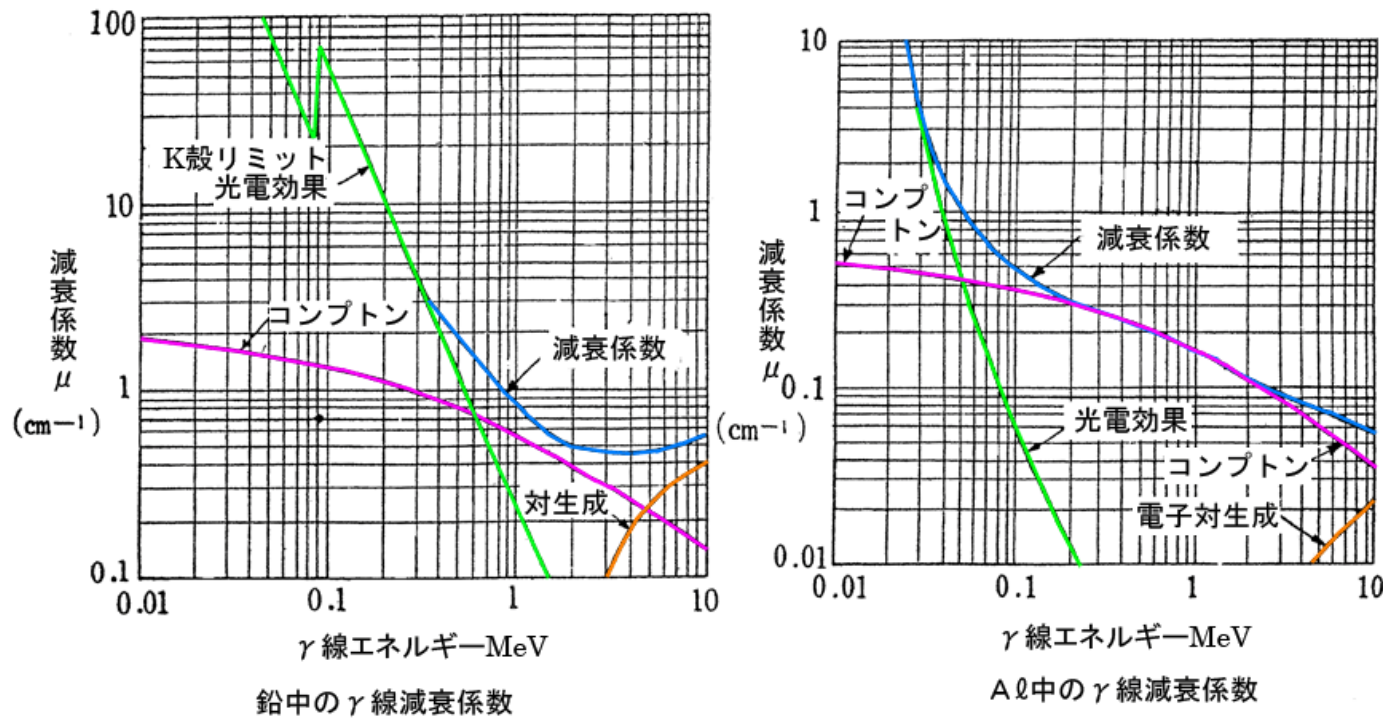


図3 γ線のコンプトン効果

[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

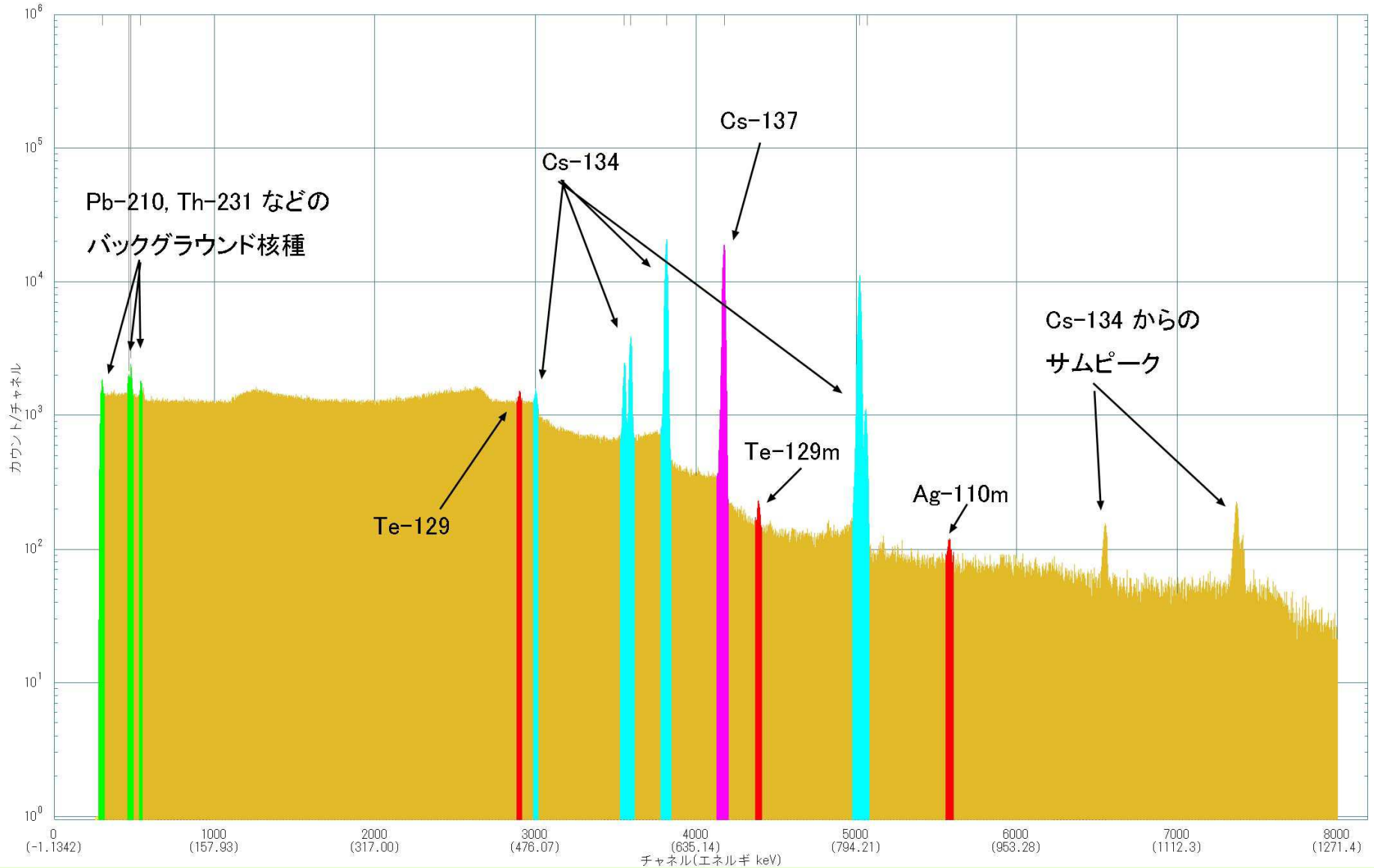
光電効果 $Z^4 \sim 5$ に比例
 コンプトン効果 Z に比例
 電子対生成 $Z(Z+1)$ に比例
 となって Z が大きくなると急激に遮蔽能力が高くなる。

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 μ 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。

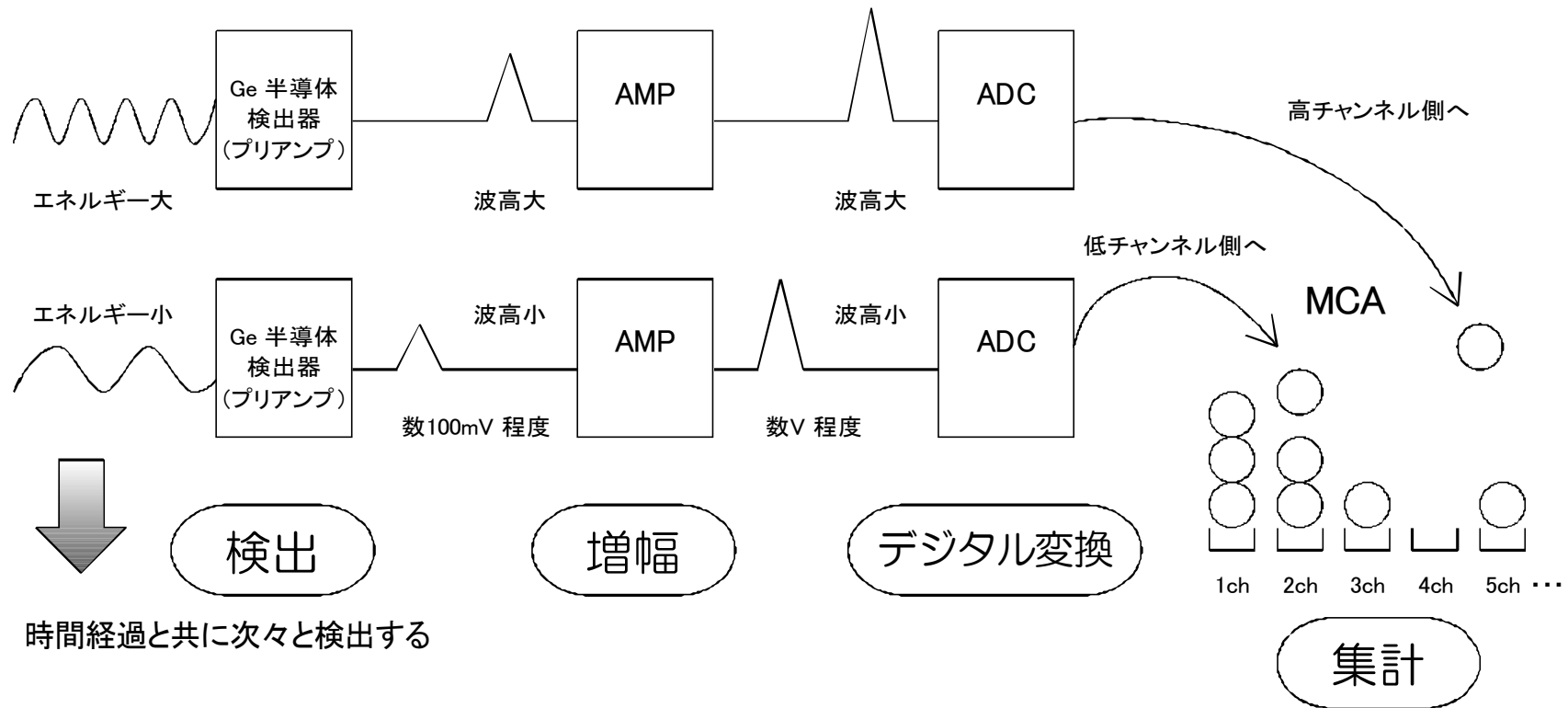
γ線スペクトル測定の一例

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)



ガンマ線スペクトルの見方



MCA (マルチチャンネルアナライザー) で得られるスペクトルは、有限の幅のエネルギーの大きさごとに分類した、小さな棒グラフの集合で出来ている。

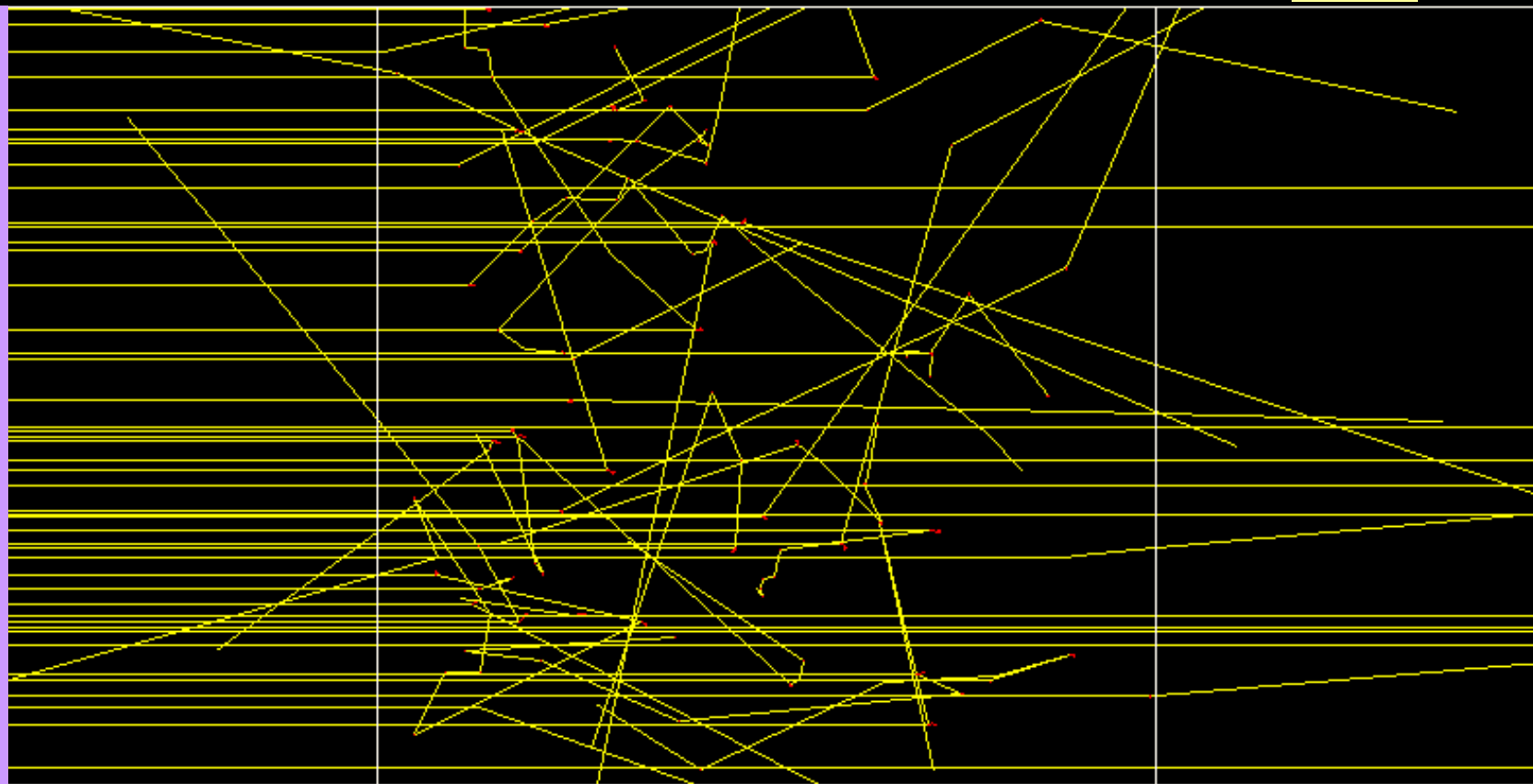
1.25 MeV ガンマ線 → Al 10cm

空気

Al

空気

ガンマ線源

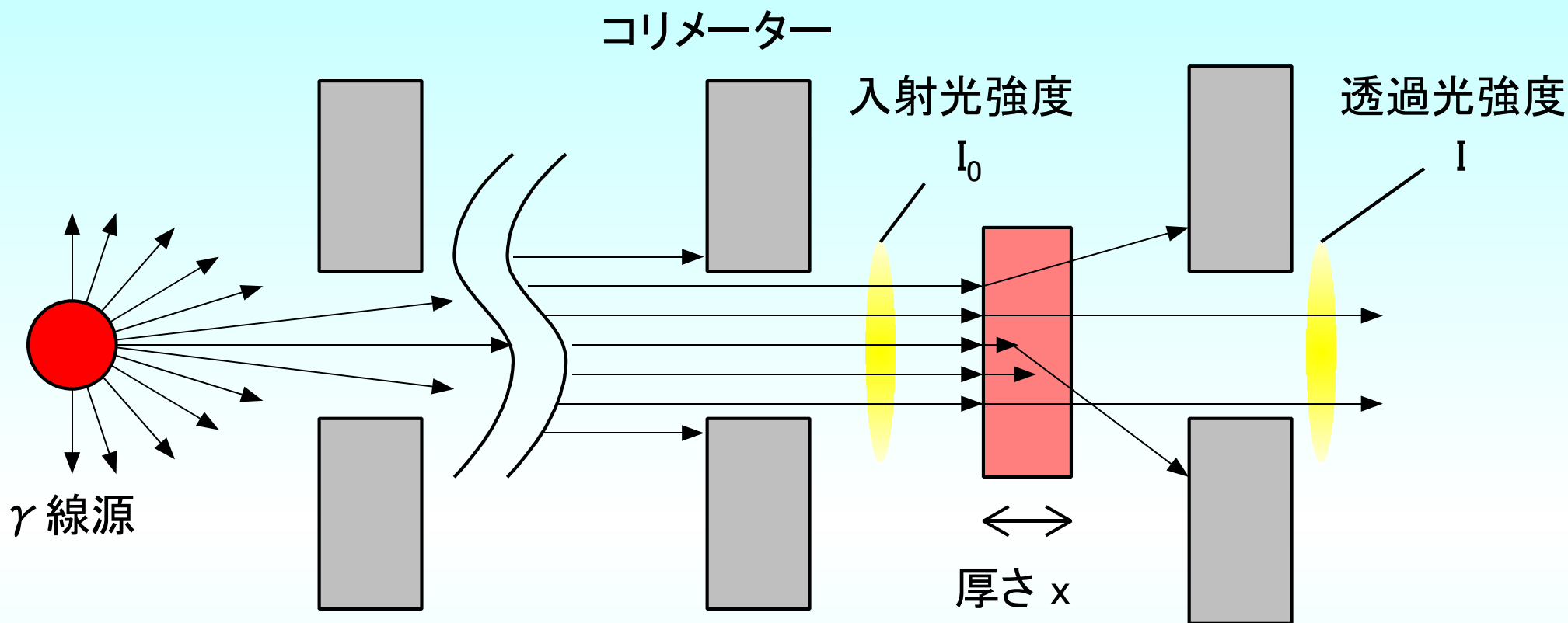


透過：直接線11、散乱線8；反射4

KEK 放射線科学センター

波戸芳仁 2008年八戸高専での講義資料より

10cm



単一エネルギーで狭い平行線束 γ 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 μ の単位は m^{-1} などで、密度で除した μ_m が様々な物質、

エネルギーに対して与えられている。

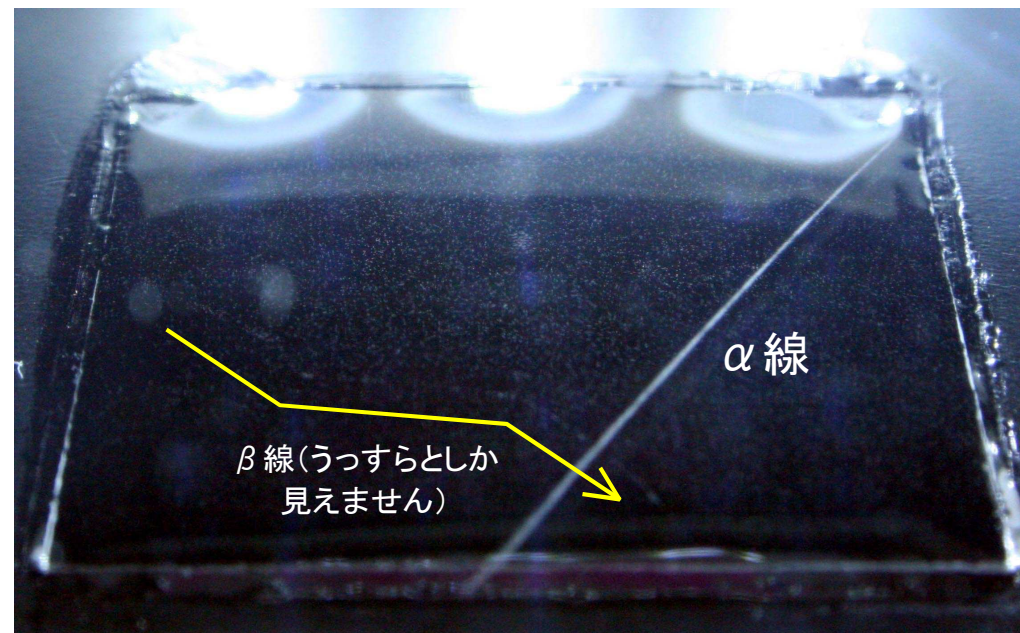
- 放射線と物質の相互作用
- **霧箱で放射線の性質を知ろう**
- 天然の放射性物質と半減期
- 様々な検出器による測定
- 放射線防護と遮蔽
- 外部被ばくと内部被ばく

「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。

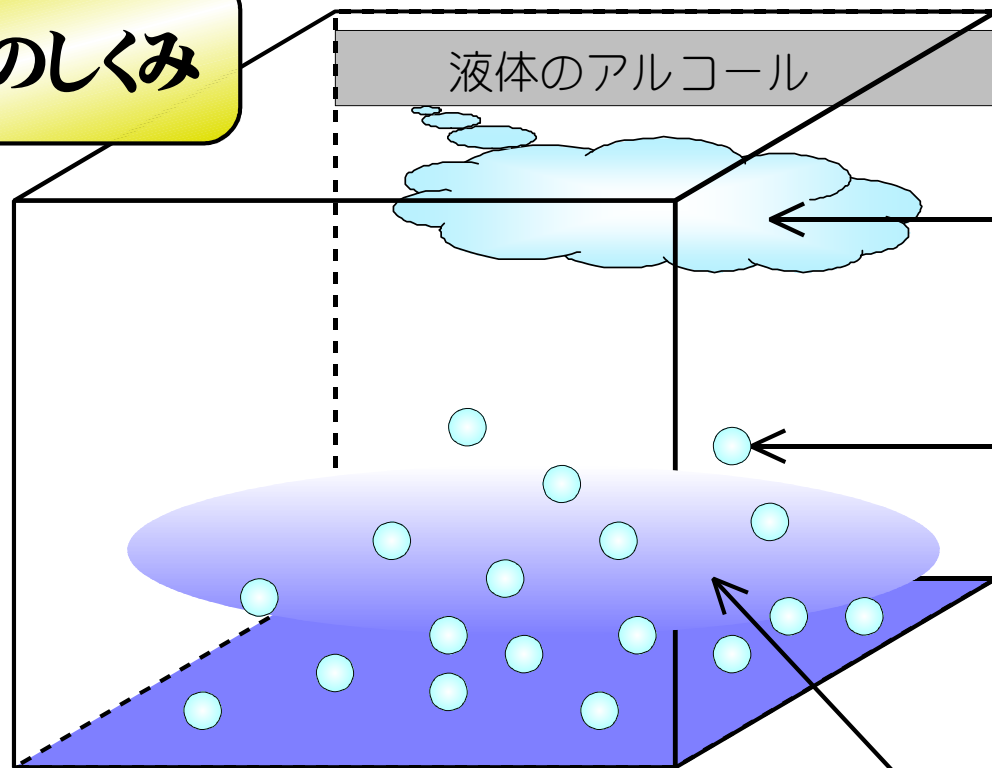
そこで、100年ほど前に発明された「霧箱」という装置を使って放射線が通った後を目で見えてみましょう!

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

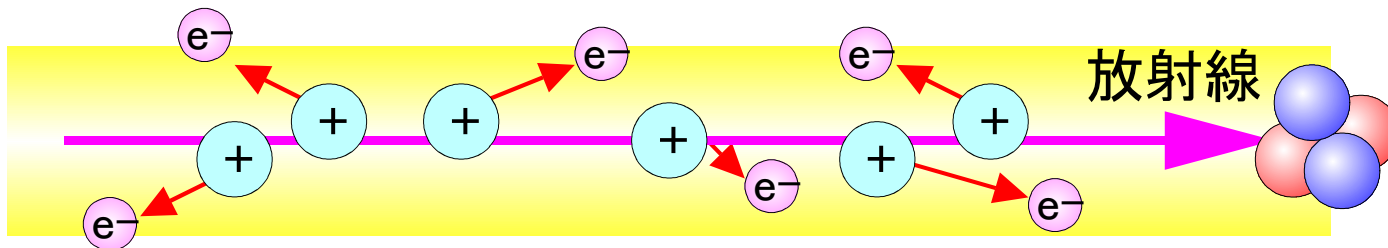
過飽和の蒸気

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）

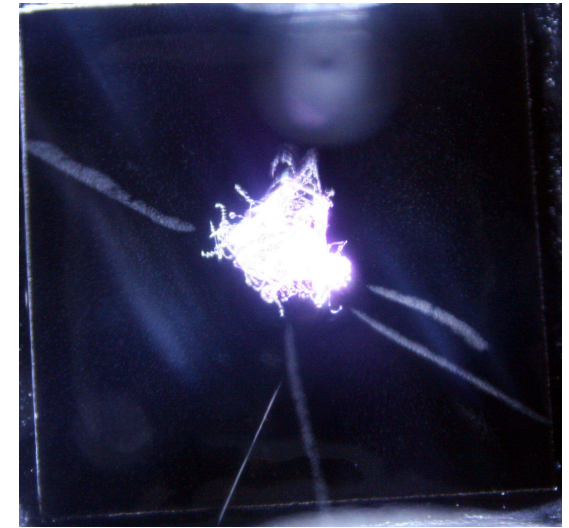


電離によるイオン対の生成

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う。



電子線(β線)とα線の比較

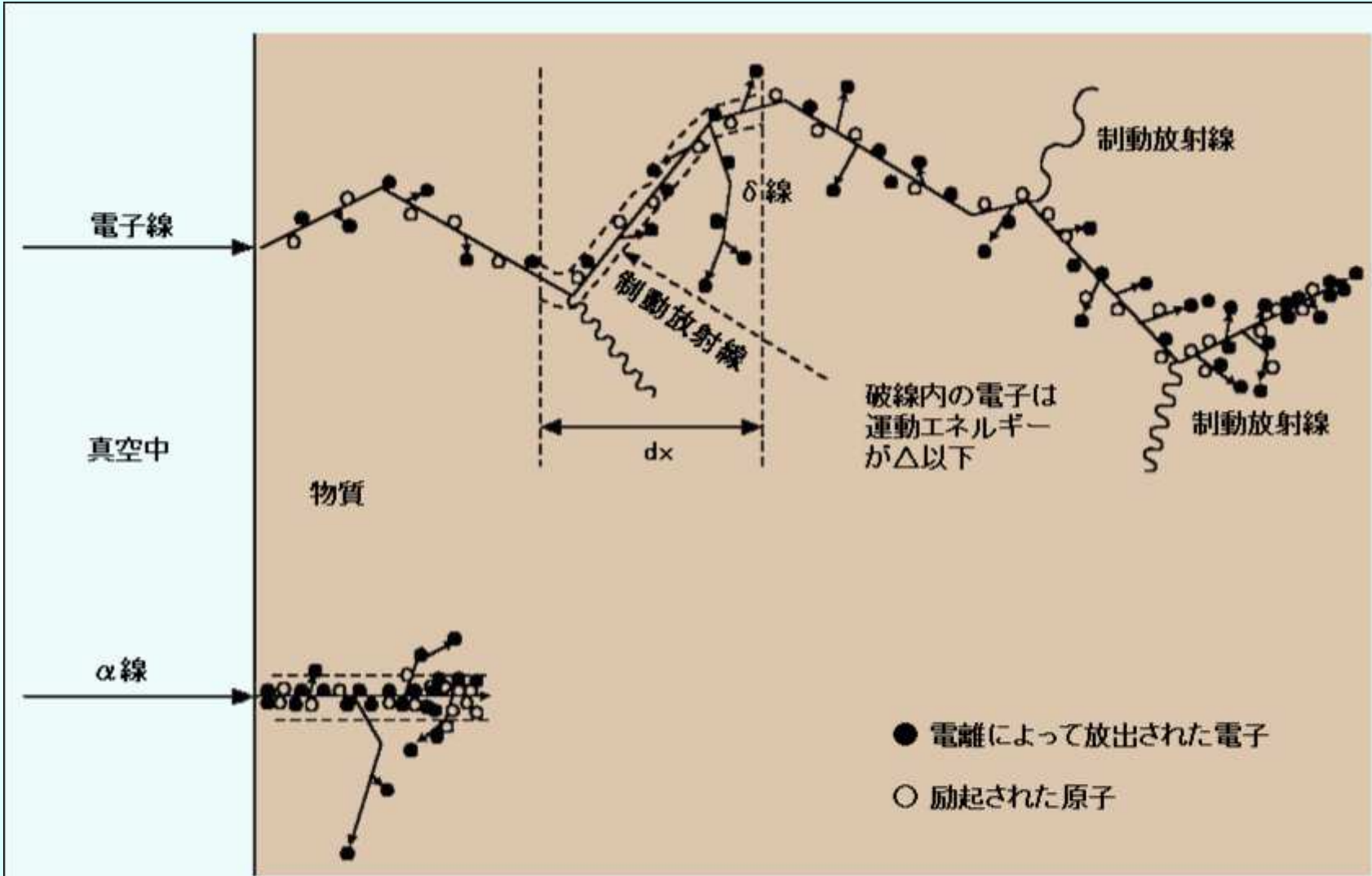
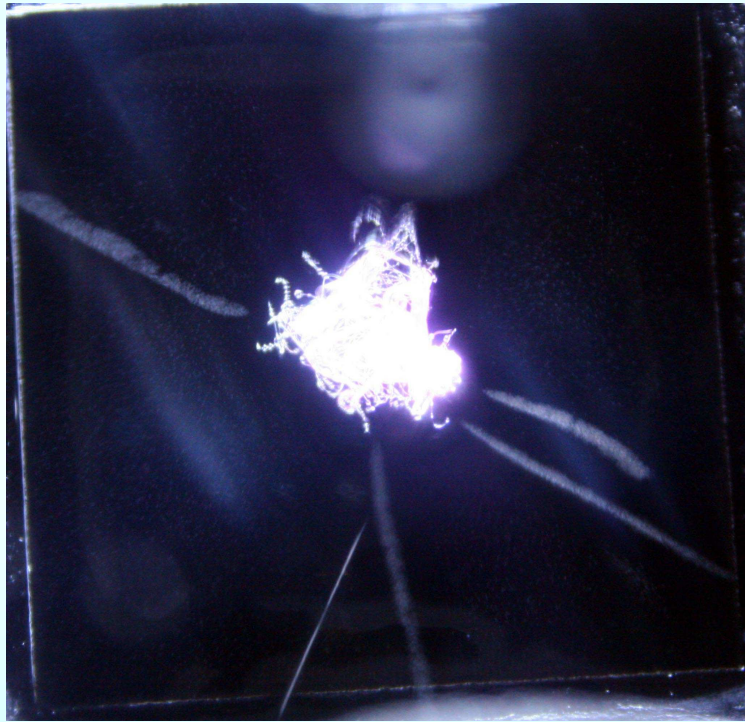


図1 荷電粒子と物質の相互作用

[出典]江藤秀雄(ほか):放射線防護、丸善(1982年12月)、p.54

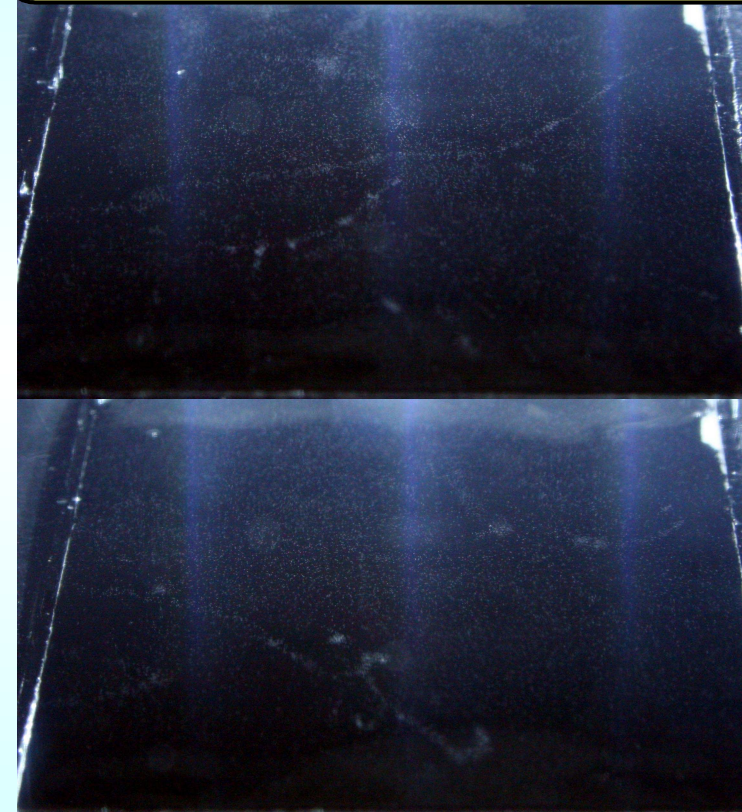
霧箱での飛跡の観察

α 線の飛跡



直線的ではっきりとした飛跡を示す。気流の関係で生成した霧がたなびく事で曲がって見えることがあるが、散乱や磁石による偏向ではない。

β 線の飛跡

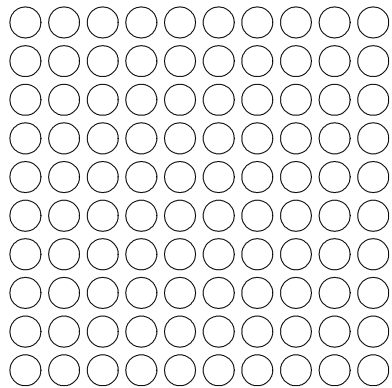


霧の液滴の密度が低く、うっすらとした飛跡しか示さない。電子線の入射方向と関係なく様々な方向に飛び、空気中에서도散乱されている様子を確認できる。

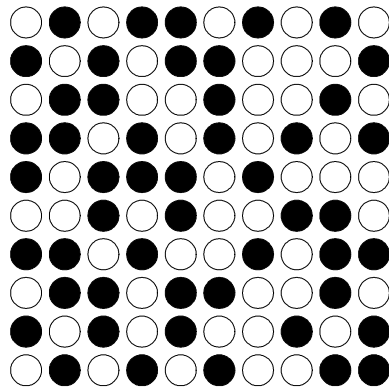
- 放射線と物質の相互作用
- 霧箱で放射線の性質を知ろう
- **天然の放射性物質と半減期**
- 様々な検出器による測定
- 放射線防護と遮蔽
- 外部被ばくと内部被ばく

放射能の減衰挙動について

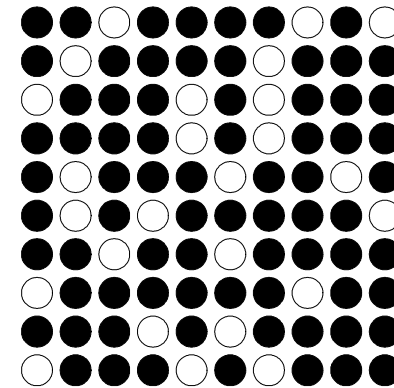
・放射性核種は、放射線を放出すると別の原子核に変わってしまい、どんどん数が減っていきます。



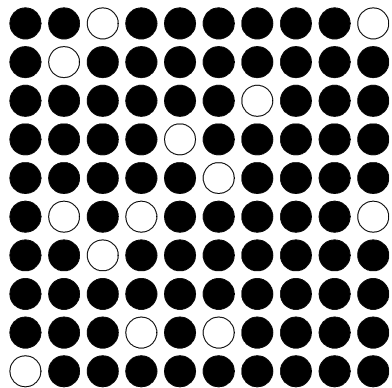
スタート時
白: 100個 黒: 0個



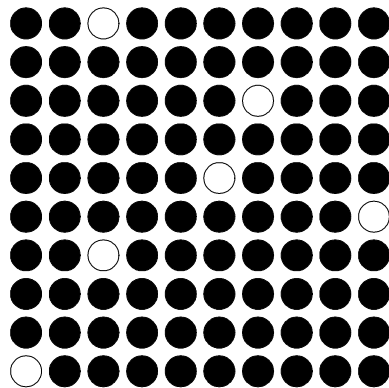
一回目
白: 50個 黒: 50個
→ 黒に変わった数: 50個



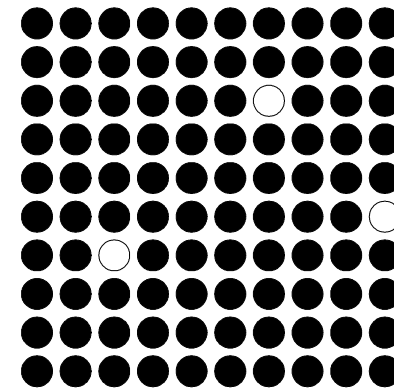
二回目
白: 25個 黒: 75個
→ 黒に変わった数: 25個



三回目
白: 13個 黒: 87個
→ 黒に変わった数: 12個

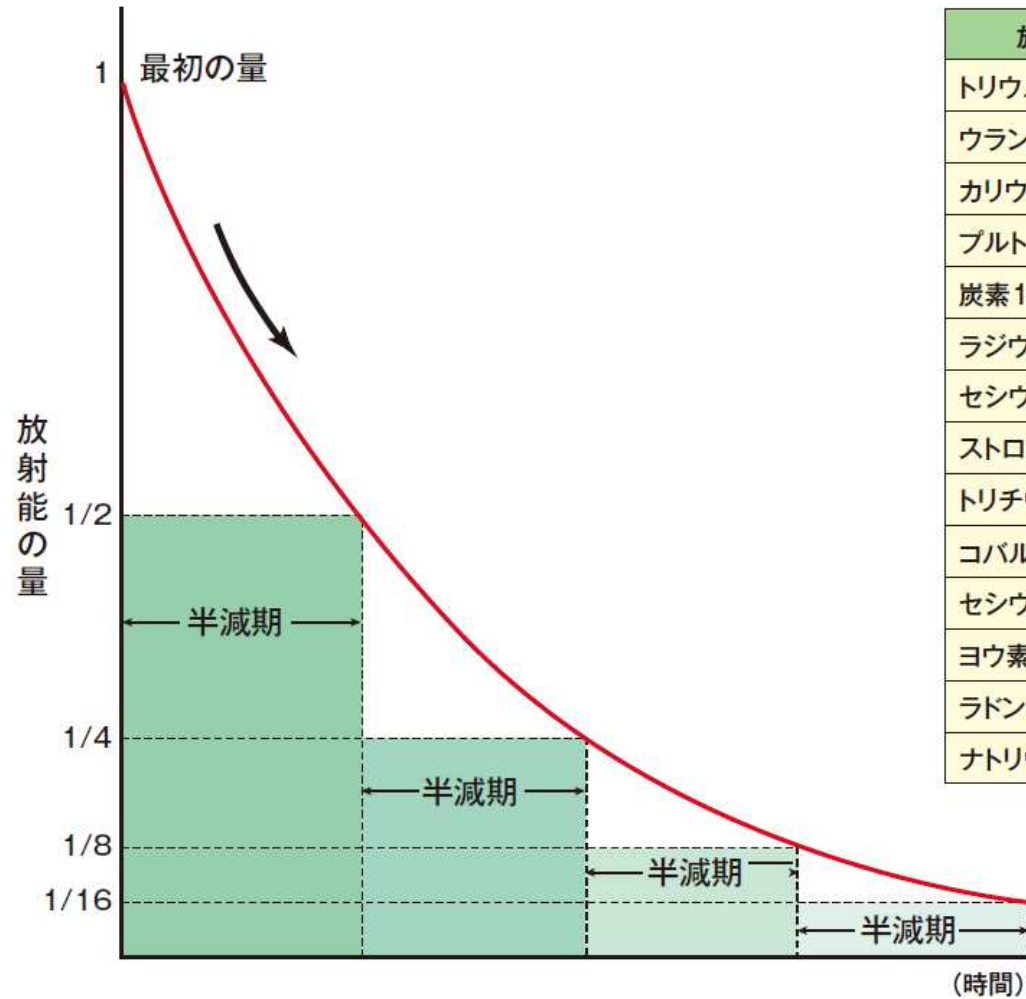


四回目
白: 6個 黒: 94個
→ 黒に変わった数: 7個



五回目
白: 3個 黒: 97個
→ 黒に変わった数: 3個

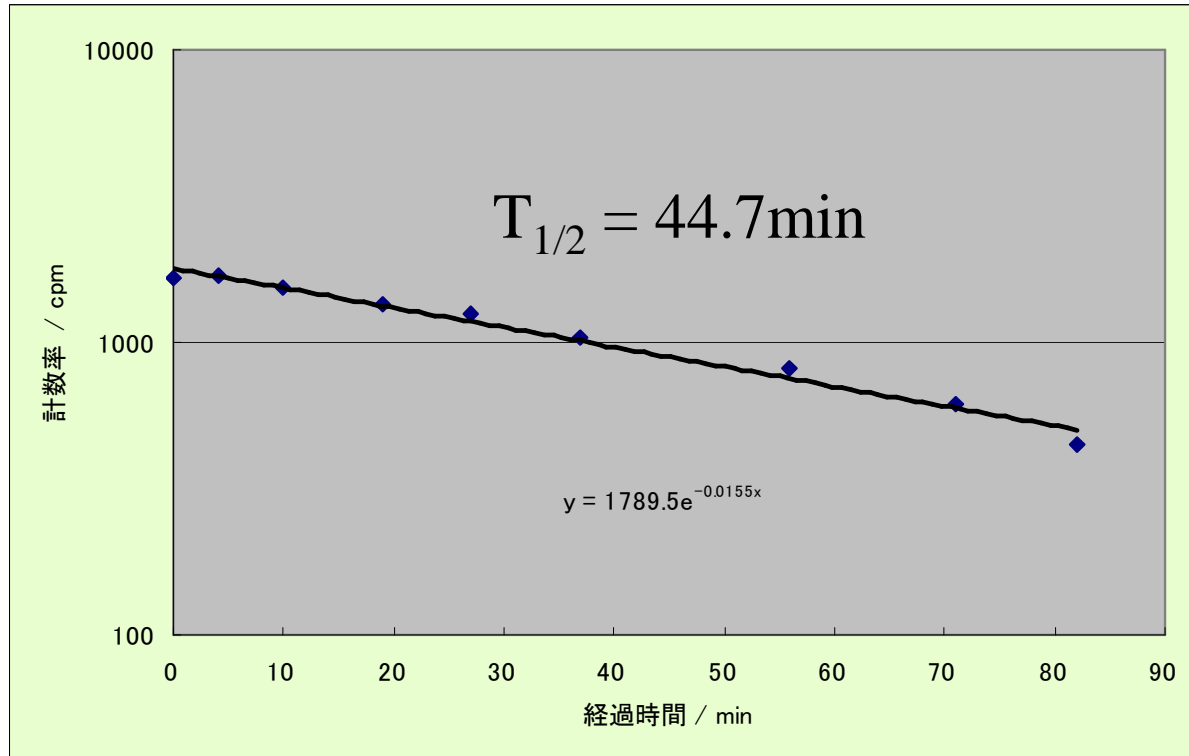
放射能の減り方



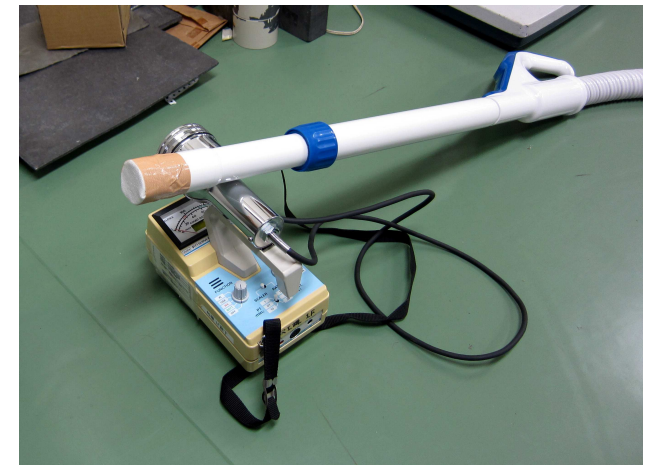
放射性物質	放出される放射線*	半減期
トリウム232	$\alpha \cdot \beta \cdot \gamma$	141億年
ウラン238	$\alpha \cdot \beta \cdot \gamma$	45億年
カリウム40	$\beta \cdot \gamma$	13億年
プルトニウム239	$\alpha \cdot \gamma$	2.4万年
炭素14	β	5,730年
ラジウム226	$\alpha \cdot \gamma$	1,600年
セシウム137	$\beta \cdot \gamma$	30年
ストロンチウム90	β	28.7年
トリチウム	β	12.3年
コバルト60	$\beta \cdot \gamma$	5.3年
セシウム134	$\beta \cdot \gamma$	2.1年
ヨウ素131	$\beta \cdot \gamma$	8日
ラドン222	$\alpha \cdot \gamma$	3.8日
ナトリウム24	$\beta \cdot \gamma$	15時間

*壊変生成物(原子核が放射線を出して別の原子核になったもの)からの放射線も含む

空気中のラドンの娘核種の捕集と崩壊曲線

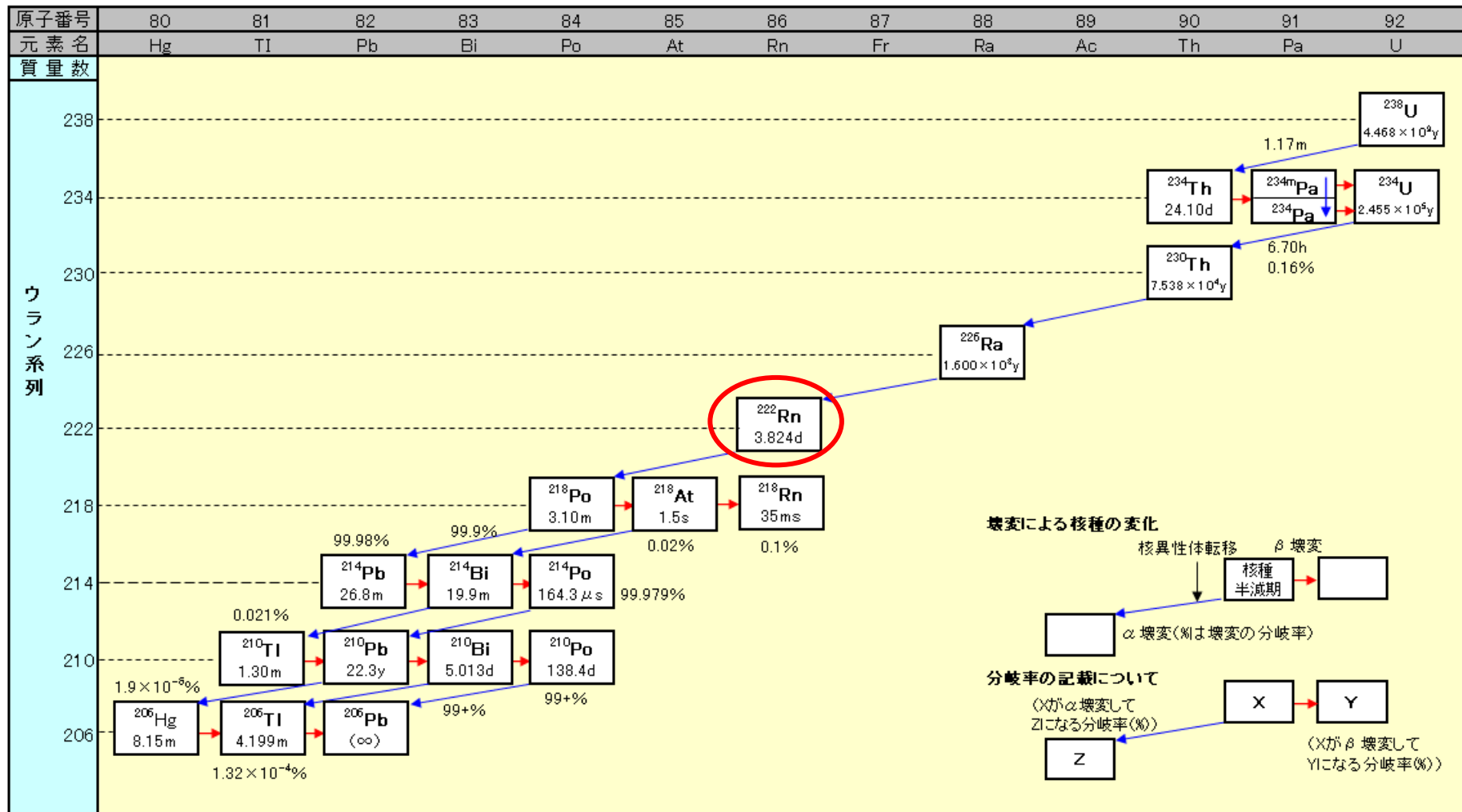


市販の掃除機吸入口先端にガーゼ(ベンコット)をかぶせて5分ほど吸引し、広窓型GMサーベイメータ TGS-136 のスケーラーモードで1分間計数した



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(10⁻³秒), μs(10⁻⁶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

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)、
 α 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 ^3H (10^{18}Bq/y)、 ^{14}C ($1.3 \times 10^{15}\text{Bq/y}$) が生成される。

^3H は半減期12.3年、 ^{14}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。

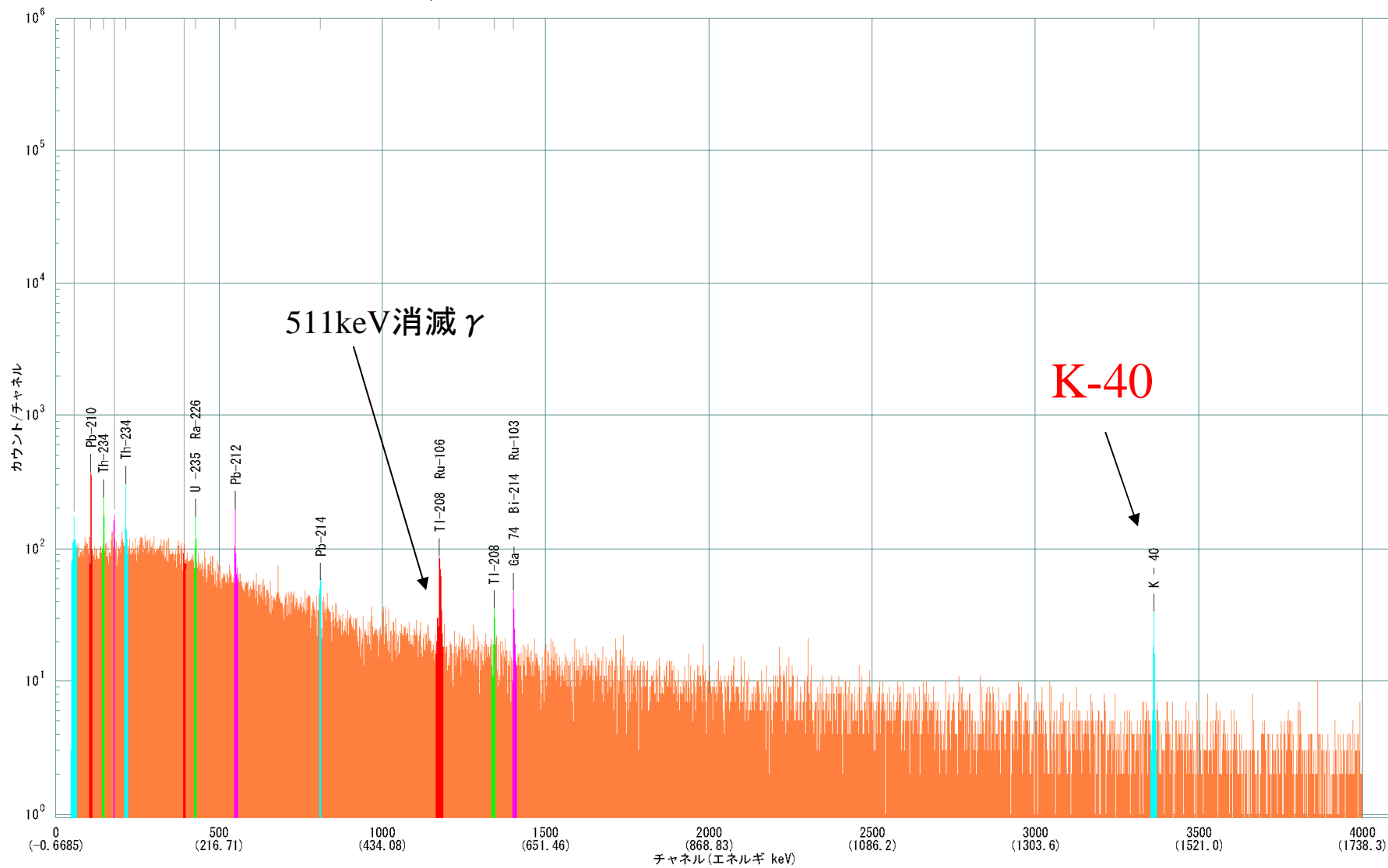
^{40}K	(半減期12.8億年, 天然のK中の存在比 0.0117%)、
^{87}Rb	(480億年、27.8%)
^{147}Sm	(1060億年, 15.1%)
^{148}Sm	(8000兆年, 11.3%)
^{115}In	(510兆年, 95.7%)
^{113}Cd	(9000兆年, 12.2%)
^{187}Re	(400億年, 62.6%)
^{144}Nd	(2100兆年, 23.8%)

バックグラウンド放射線のスペクトル

131126_BackGround.CHN

(5~10cmの鉛で遮蔽)

Acquired:2013-11-26 01:11:53 Real Time:60006.5(sec) Live Time:60000.0(sec)



- 放射線と物質の相互作用
- 霧箱で放射線の性質を知ろう
- 天然の放射性物質と半減期
- **様々な検出器による測定**
- 放射線防護と遮蔽
- 外部被ばくと内部被ばく

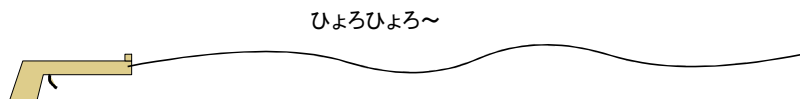
様々な検出器による測定

- 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。

高エネルギーの放射線



ズバッ!

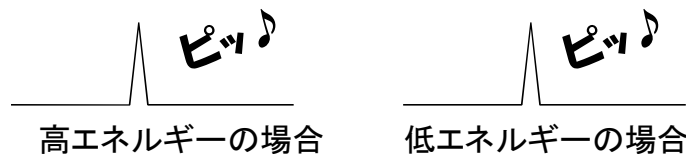


ひよろひよろ~

低エネルギーの放射線

放射線のエネルギーって何?

α 線や β 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。 γ 線、X線は光の仲間で、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 γ 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

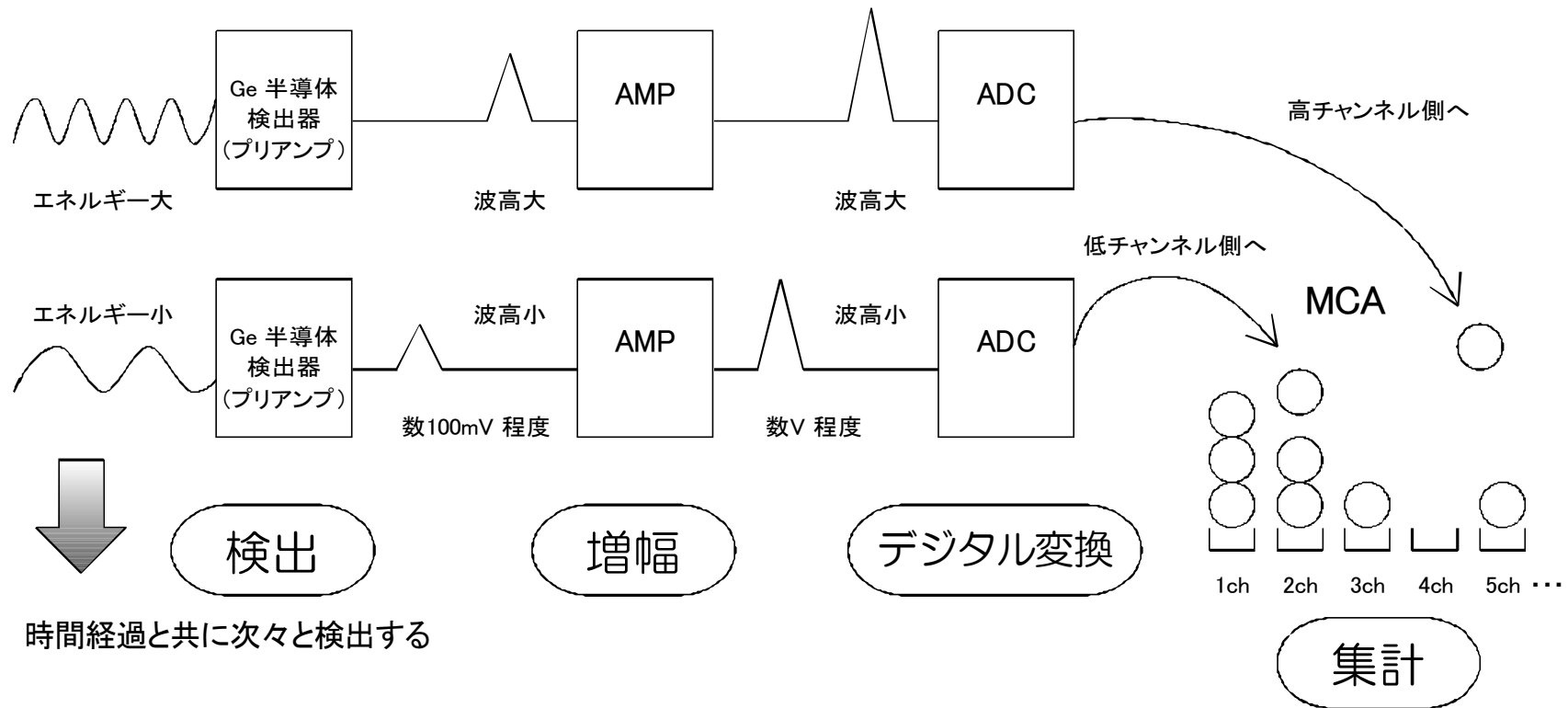
入射する放射線のエネルギーによって、出力するパルスの大きさが異なります。どのぐらいのエネルギーの放射線が何発来たかという情報を合わせて、線量を評価します。

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 γ 線を放出するため、その γ 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、 β 線は(もちろん α 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 → γ 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 2.96eV であり、これがエネルギー分解能となる。

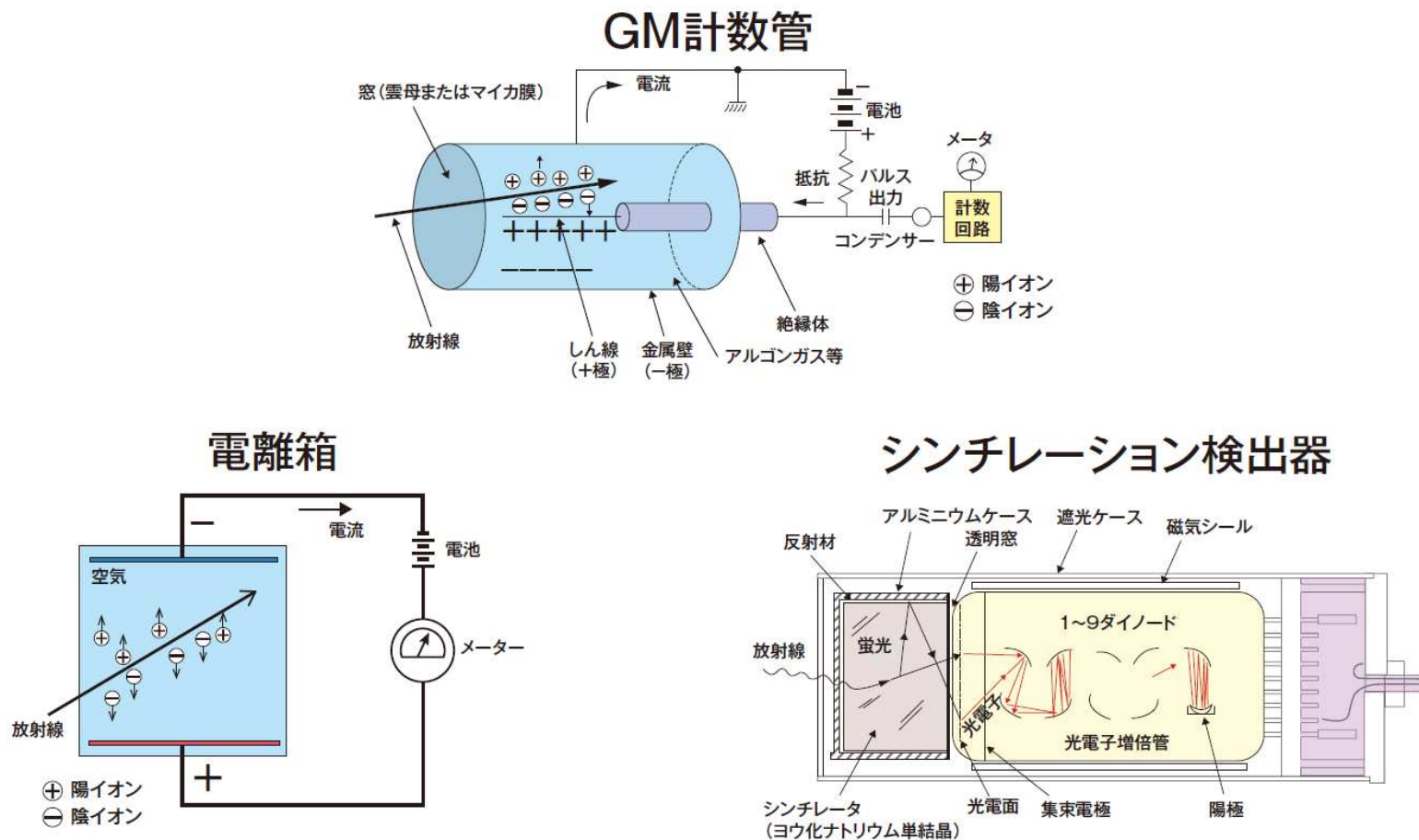
非常に高価だが詳細なスペクトルを得ることが出来る

ガンマ線スペクトルの見方



MCA (マルチチャンネルアナライザー) で得られるスペクトルは、有限の幅のエネルギーの大きさごとに分類した、小さな棒グラフの集合で出来ている。

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

GMサーベイメーター

- **最も一般的に用いられるサーベイメーター**であり、GM管からの出力パルスそのまま計数する。 β 線と γ 線の両方に対して用いることが出来るが、検出器の前面を覆っている雲母の膜を透過することが出来ないような**低エネルギーの β 線や α 線は検出することが出来ない**。さらに、50keV以下の γ /X線に関しては急激に感度が落ちる。
- 計測を行う単位は、**放射線を何発検出したか**を示す count であり、機器により count/s (CPS) の場合と、count/m (CPM) の場合がある。放射線がどれだけエネルギーを持っていたのかにはほとんど関係が無く、検出器が何発検出したか、だけの計測であるため、空間線量などの定量的な測定には向いていない。 $\mu\text{Sv/h}$ の単位が書いてあるサーベイメーターも存在するが、良く見ると(^{137}Cs)とあり、目盛値は ^{137}Cs からの662keV γ 線を使った校正値であるため、それ以外の場合では目安程度にしかない点に注意する必要がある。
- また、検出を行った後の不感時間が $100\mu\text{s}$ 程度有るため、比較的低い計数率でも数え落としが起こり、せいぜい数100cps程度までしか正しく計数出来ない。さらに強い放射線場ではGM管の中の芯線の周りに発生したイオンのさやが取り除かれる暇が無くなり、計数率が逆に下がってしまうという窒息現象を起こすため、注意を要する。

電離箱サーベイメーター

- 原理的には最も単純な、気体電離箱式のサーベイメーターは、放射線により気体が電離した量を電流としてそのまま取り出すため、良好なエネルギー特性と、均一な方向特性、各種サーベイメーターのうちで最も強い放射線場でも用いることができるという特徴を持つ。
- しかし、感度が比較的低く、 $1 \mu\text{Sv/h}$ 程度が測定限界であるため、バックグラウンドレベル ($0.05 \mu\text{Sv/h}$ 程度) の測定を行うことは出来ない。
- また、回路が安定するまでやや時間を要し、使用する10分程度前には電源を入れる必要がある。

NaI シンチレーションサーベイメーター

- NaI(Tl) シンチレーターに光電子増倍管(フォトマル)を組み込んで、その出力パルスを計数するサーベイメーターで、**感度が高く、エネルギー特性がよい**ことが特徴としてあげられる。
- もともと NaI シンチレーター自体はエネルギー依存性(入射 γ 線エネルギーに対する検出効率の依存性)はフラットではないのだが、出力波高から検出した γ 線のエネルギーを求められるため、電子回路を用いて**線量等量率(Sv/h)を求めることができる**。このため、空間線量の測定に適している。
- 構成元素の原子番号が大きく比重も大きいため検出効率が良く、バックグラウンドレベル ($0.05 \mu\text{Sv/h}$ 程度)でも測定可能である。
- しかし、NaI 結晶は吸湿性があるため密閉する必要があり、ステンレスハウジングを β 線は通過できず、また 50keV 以下の γ 線も補償回路によりカットされてしまうため測定することは出来ない。このため、強度が強くてもエネルギーの低い X線や、遮蔽体による散乱線は測定することが出来ないため、注意を要する(そのような場合は電離箱を用いる)。

ZnSシンチレーションサーベイメーター

- ZnSシンチレーターは透過型電子顕微鏡やイオンビーム加速器で蛍光板として多用されているが、多結晶の粉末としてしか利用できないため、透明度が低く、薄い膜としてしか利用できない。
- しかし、高い検出効率を持ち、バックグラウンド計数が殆ど無いなどの特徴から、 **α 線用のサーベイメーター**として用いられている。測定はパルス波高が閾値を超えるかどうか0か1のカウントのみであり、CPMなどの単位で出力される。
- シンチレーター表面は薄いアルミ箔で覆われており、光を通さないようにしているが、容易に破れるため、突起物等に注意して使用する必要がある。
- なお、ZnS粉末をシート状に形成しているため、線エネルギー付与(LET)の低い β 線や、 γ 線はほとんど素通りして発光しないため検出することが出来ない。(弱く発光したとしても内部のパルス波高弁別回路によりカットされる)→このためバックグラウンドが殆ど無い。

中性子サーベイメーター

- 熱中性子検出器には ^3He 比例計数管、 $^{10}\text{BF}_3$ 比例計数管、LiI シンチレーターなどが存在する。
- それぞれ、 $^3\text{He}(n, p)^3\text{H}$ 、 $^{10}\text{B}(n, \alpha)^7\text{Li}$ 、 $^6\text{Li}(n, \alpha)^3\text{H}$ などの中性子を吸収する核反応により放出される高速荷電粒子が検出される。
- 厚さ10cm程度のポリエチレン製減速材で覆い、検出器の感度を線量当量換算係数に合わせてあるため、熱中性子から約 15MeVまでのエネルギー範囲で正確な中性子による線量当量を指示することが可能である。(白い減速材で丸く覆われて、重さを支える足が四本付いていることから、白豚と呼ばれることが多い)
- γ 線のパルスも検出されるが、中性子線によるパルスの方が大きい
ため内部の波高弁別値の設定によって計数しないようになっており、
中性子だけを検出することができる。

液体シンチレーションカウンター

- シンチレーターとは放射線が入射すると発光する性質を持った物質の総称であり、固体の物と液体の物があり、後者は液体シンチレーションカウンターとして使用される。
- 試料をシンチレーターに浸して測定するため、非常にエネルギーの低い β 線(^3H からの18.6keVの β 線など)も検出可能である。
- 液体シンチレーターは一種の有機溶媒であり、測定毎に捨て、バイアルを洗浄する必要があるため、手間と費用がかかるが、 ^3H や、 ^{14}C による汚染の恐れがある場合、この液体シンチレーションカウンターか、後述のガスフローカウンターを用いて検査する必要がある。
- シンチレーターであるため、発光強度からエネルギーを評価できる。このため、ある程度の核種同定が可能である。

ガスフローカウンター

- 原理はGMサーベイメーターと同じであり、放射線による気体分子の電離に伴う電子雪崩をパルスとして測定するが、クエンチガスを雲母の膜などで密封したGM管と異なり、試料を入れたチャンバーの中に流し込んで測定を行うため、液体シンチレーションカウンター同様、非常にエネルギーの低い β 線(^3H からの18.6keVの β 線など)も検出可能である。
- 据置のチャンバーに試料を回転台などを用いて挿入する、 2π ガスフローカウンターと、ハンディタイプのプローブに小型のガスボンベからクエンチガスを供給し、プローブ表面のメッシュから垂れ流し続けるサーベイメーターが存在する。
- GMサーベイメーター同様にエネルギー評価はできず、countだけが出力される。

直接測定法とスミヤ法

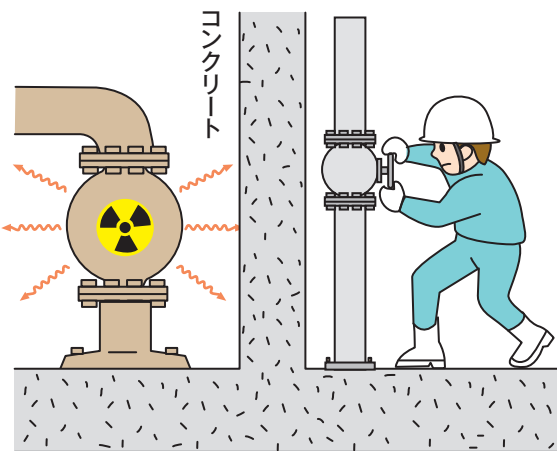
- 汚染検査を行いたい場所の空間線量率が高かったり、通常のサーベイメーターでは測定できないトリチウムなどを測定したい場合、その場で対象物を測定する直接測定ではなく、スミヤろ紙で表面をぬぐって、バックグラウンドの低い場所で測定を行う、スミヤ法が用いられる。
- 対象物の表面汚染密度を求める場合には、拭き取る面積と、どの程度の効率で表面の汚染を拭き取ることが出来るかという拭き取り効率を知る必要がある。

- 放射線と物質の相互作用
- 霧箱で放射線の性質を知ろう
- 天然の放射性物質と半減期
- 様々な検出器による測定
- **放射線防護と遮蔽**
- 外部被ばくと内部被ばく

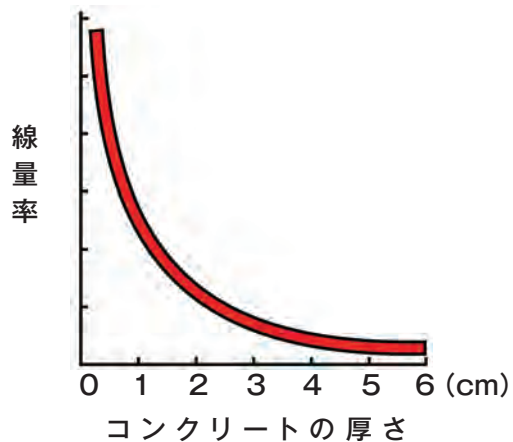
放射線防護の基本

1. 遮へいによる防護

(線量率) = 遮へい体が厚い程低下

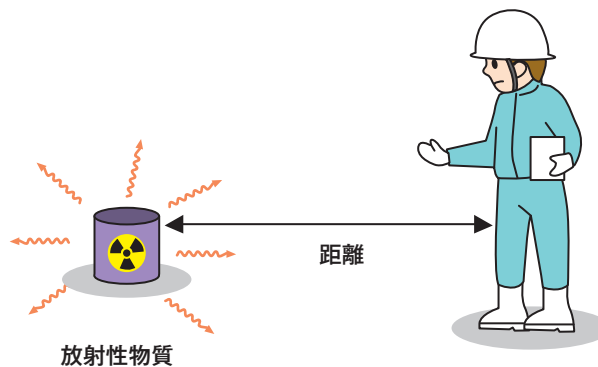


(mSv/h)

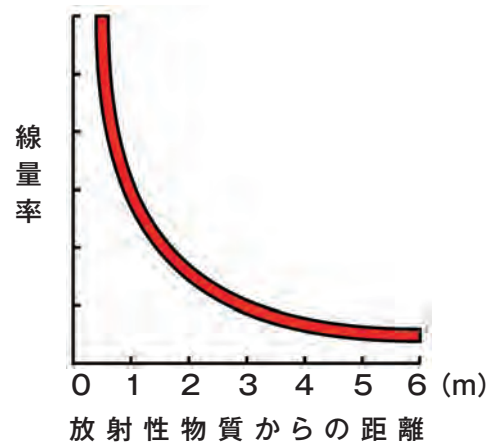


2. 距離による防護

(線量率) = 距離の二乗に反比例

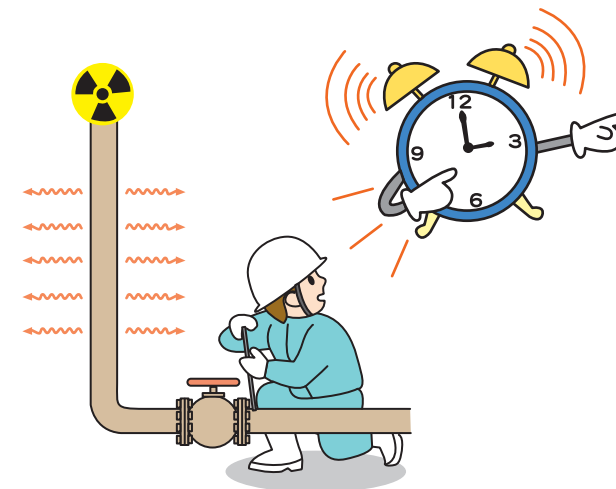


(mSv/h)

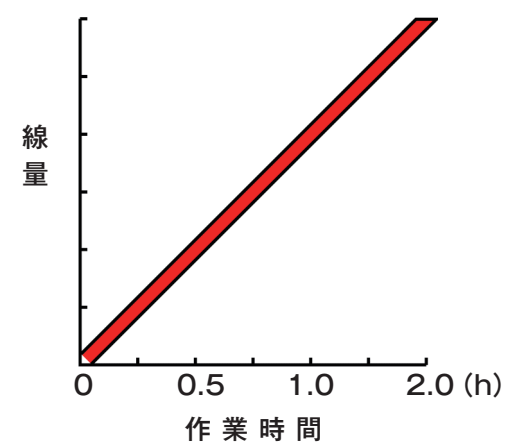


3. 時間による防護

(線量) = (作業場所の線量率) × (作業時間)



(mSv)



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

遮蔽

α 線

空気中の α 線の飛程 = $3.18E^{3/2}$ (E(MeV)) mm

→たかだか数cm程度、0.25mmのゴム手袋で止まる

β 線

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

$R=0.542E-0.133$ (0.8MeV < E)

R は g/cm² の単位で、遮蔽体の密度で割って飛程を求める

・エネルギーが大きい β 線を、重元素で遮蔽する場合は、制動放射X線が出やすいので注意する(転換率はエネルギーと原子番号に比例)。

遮蔽

γ 線、X線

細いビーム状に絞られて強度 I_0 で物質に入射する場合、

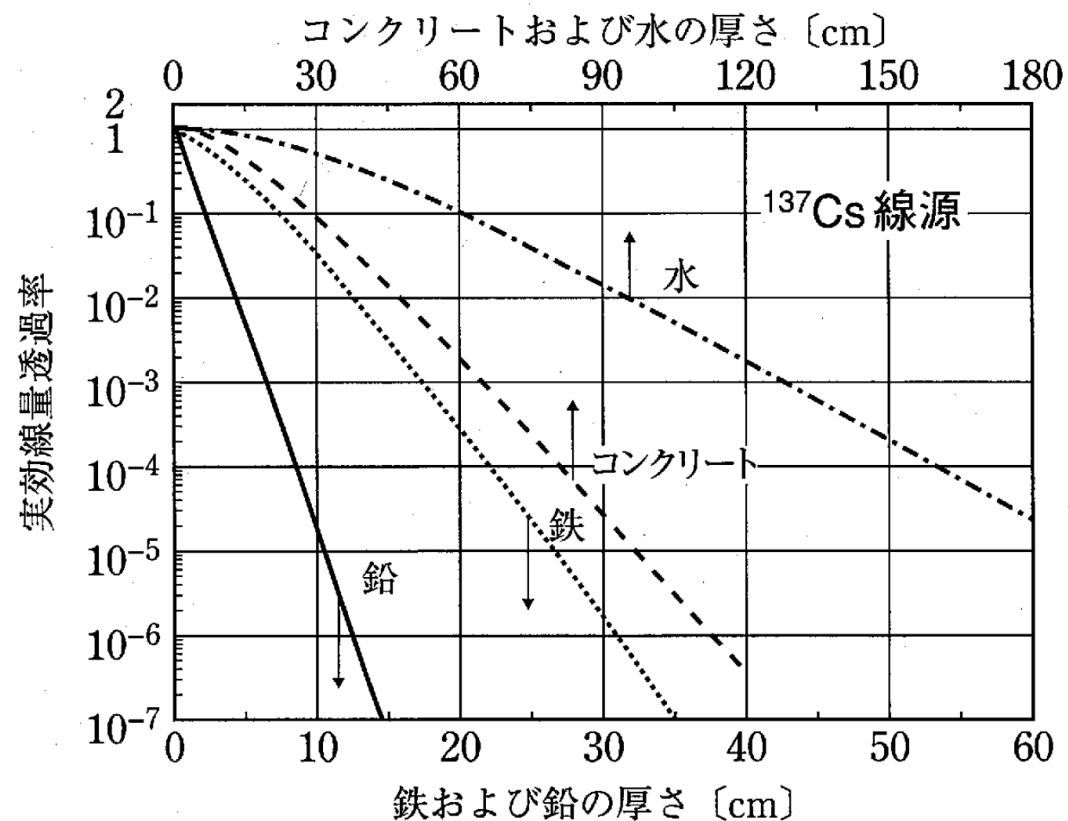
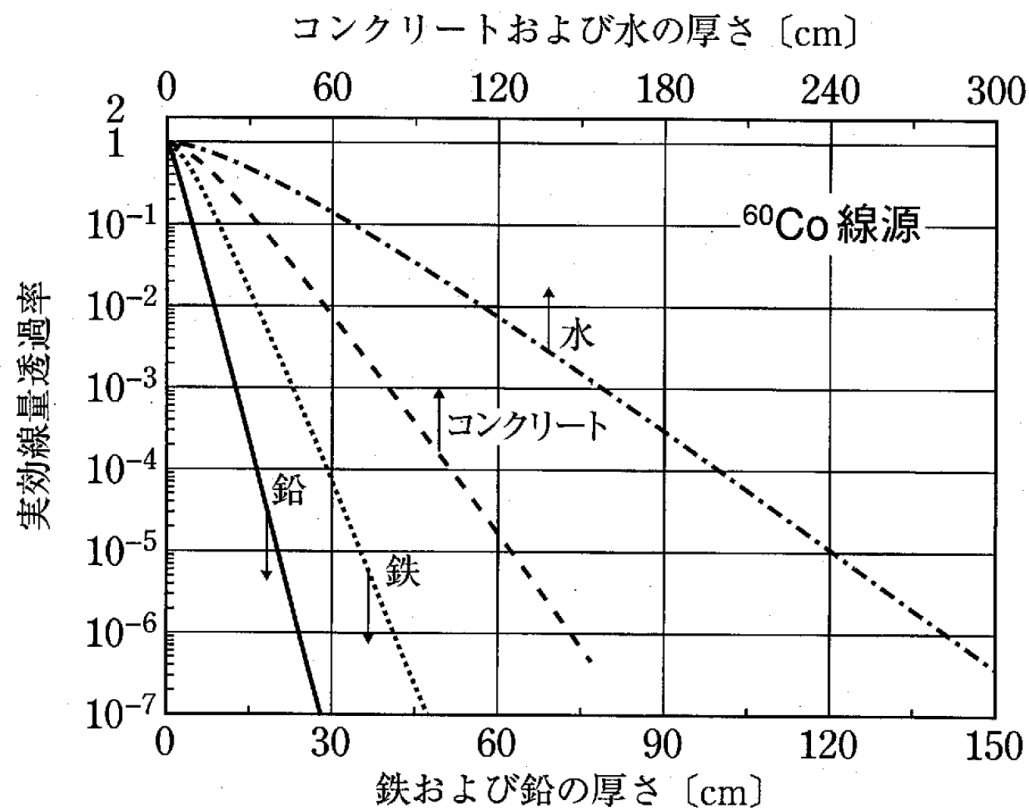
$$I = I_0 \exp(-\mu x)$$

μ : 物質の線減弱係数、 x : 入射後の距離 で減衰していく。

ただし、入射光が細いビーム状でない場合、広がっていった入射光の散乱線が測定位置に戻ってくる、ビルドアップが考えられるため、ビルドアップ係数 $B \geq 1$ を用いて $I = I_0 B \exp(-\mu x)$ と表わされる。

μ は物質、エネルギーによって異なる。物質を透過する間にコンプトン散乱によりエネルギースペクトルが変化して、実際には単純に指数関数的には減少しないため、数表などを用いて計算を行う必要がある。

代表的な γ 線源の実効線量透過率



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 ^{※1} 50mSv/年 ^{※2} 女子 5mSv/3月間 ^{※3} 妊娠中の女子 1mSv (出産までの間の内部被ばく)	眼の水晶体 150mSv/年 ^{※2} 皮膚 500mSv/年 ^{※2} 妊娠中の女子 2mSv (出産までの間の腹部表面)
	緊急時	100mSv ^{※4}	眼の水晶体 300mSv 皮膚 1Sv ^{※5}
一般公衆	平常時	1mSv/年 ^{※2}	眼の水晶体 15mSv/年 ^{※2} 皮膚 50mSv/年 ^{※2}

(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

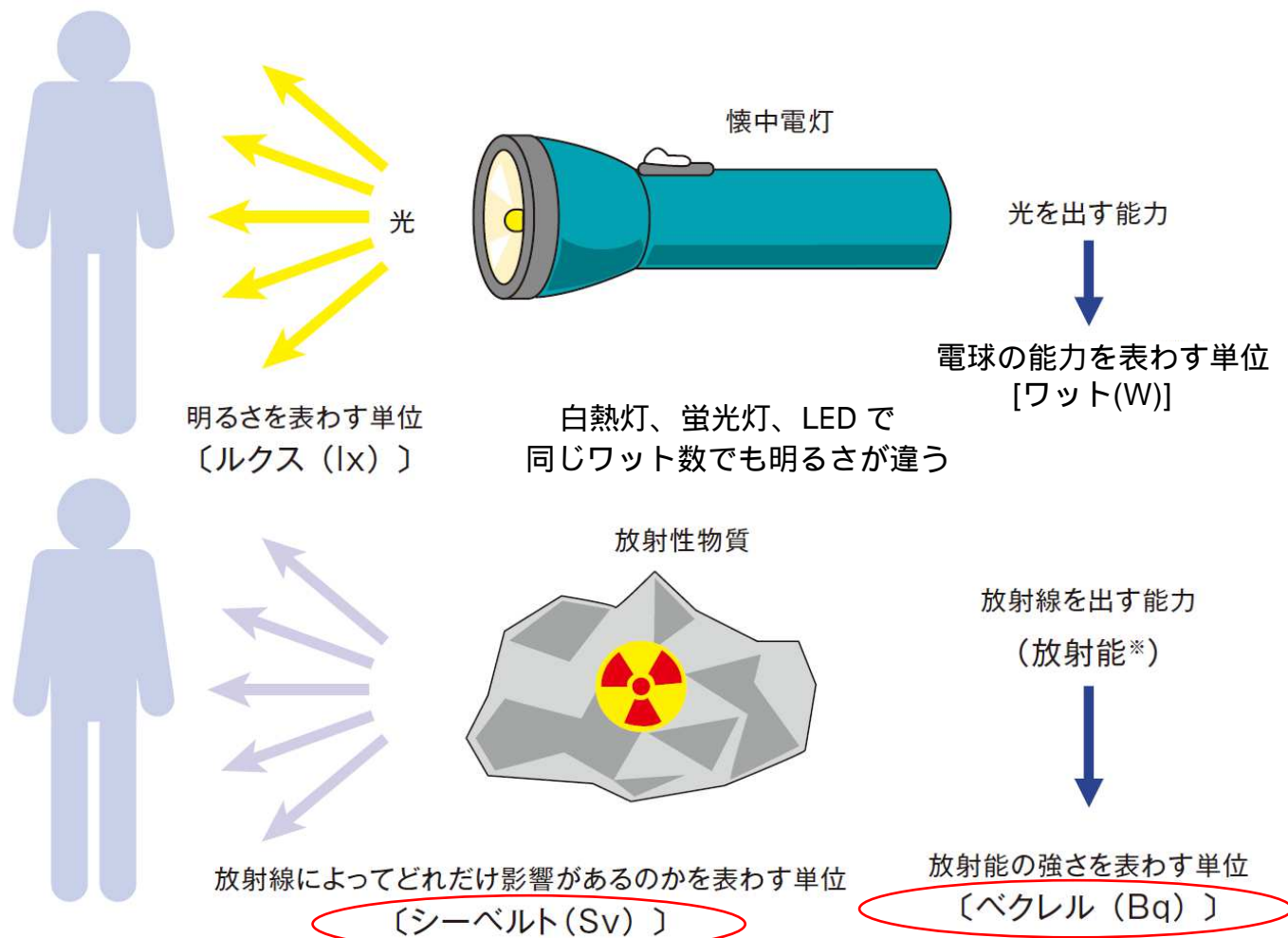
※3 4月1日、7月1日、10月1日、1月1日を始期とする各3月間

※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 μSv(マイクロシーベルト)

- 放射線と物質の相互作用
- 霧箱で放射線の性質を知ろう
- 天然の放射性物質と半減期
- 様々な検出器による測定
- 放射線防護と遮蔽
- **外部被ばくと内部被ばく**

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

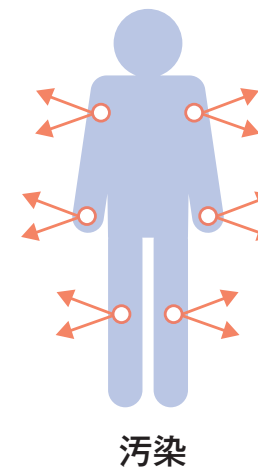
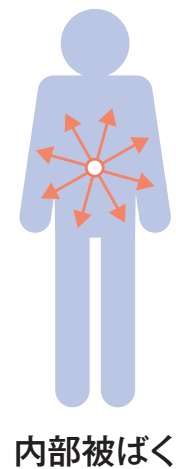
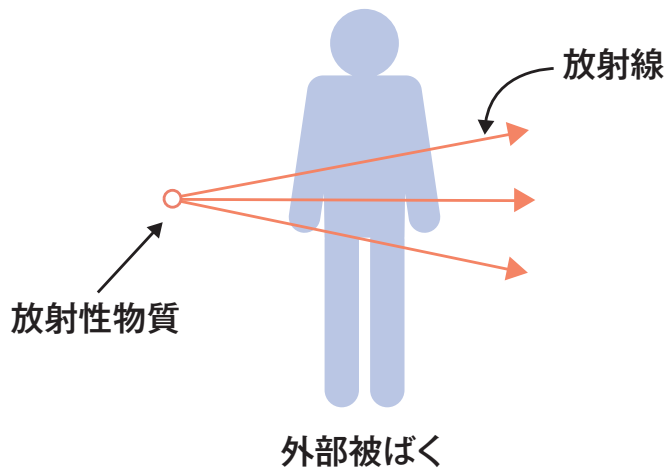
被ばくと汚染の違い

被ばく

放射線を受けること

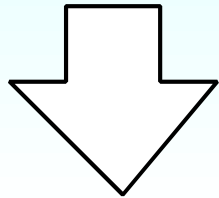
汚染

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？

内部被ばくによる影響



- ・どんな放射線の種類か (α 、 β 、 γ)
- ・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

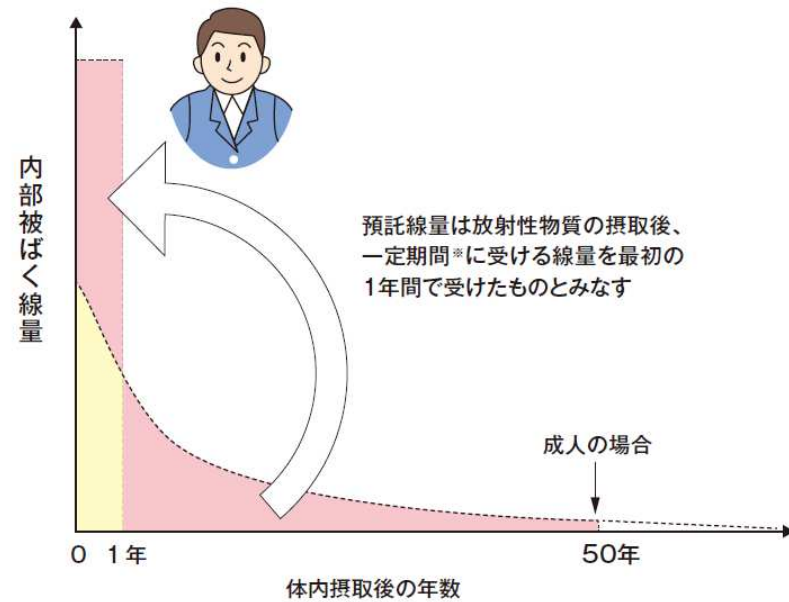
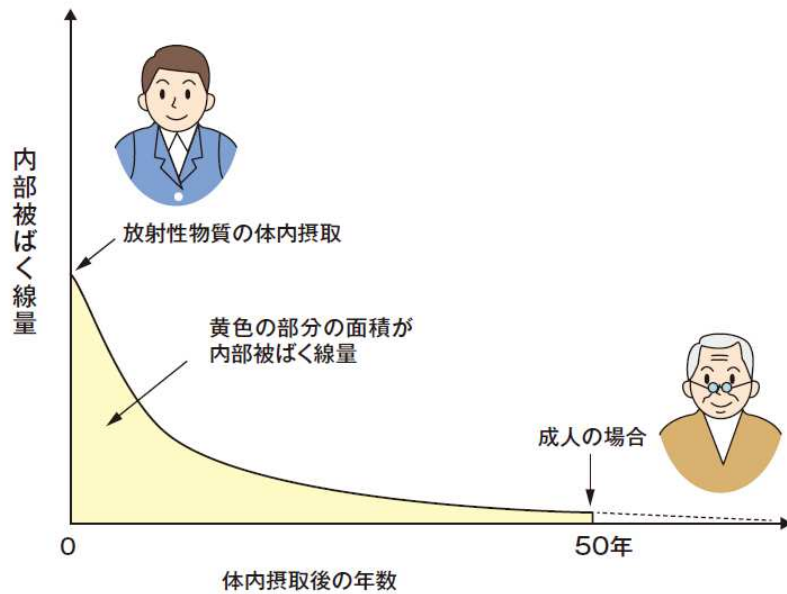
50年間にわたる影響を積算して、
摂取した時点でいっぺんに被ばく
した物として管理する (預託線量)

実際には、少しずつ長い期間に被ばくするのと、同じ量をいっぺんに被ばくするのでは、損傷修復のメカニズムがあるため、ゆっくり被ばくした方が影響は小さい。

様々な放射性核種 (Sr-90, Cs-137, Pu-239 など) に対して、1Bq 摂取すると何mSv内部被ばくするかという、実効線量係数が求められている。(Cs-137 では 1.3×10^{-5} mSv/Bq)

精米された状態で1kg あたりCs-137 を100Bq 含む米を、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1年間でどの程度内部被ばくするでしょうか? → 答えは 0.21mSv

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

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!

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)

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

被ばく管理に用いられる量(外部被ばく)

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

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

実効線量率定数が Γ 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} ($\mu\text{ Sv/h}$) を以下の様に求められる。

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

Γ は、線源が放出する γ 線のエネルギー、本数、放出確率を加味している。
 γ 線のエネルギーと線束が求ま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。

内部被ばく線量（預託線量）への換算方法

$$\text{預託線量 (mSv)} = \text{飲食物摂取量 (kg/日)} \times \text{摂取日数 (日)} \times \text{実効線量係数 (mSv/Bq)} \times \text{放射性核種の濃度 (Bq/kg)}$$

放射性核種	半減期	1Bqを経口または吸入摂取した場合の成人の実効線量係数 (mSv/Bq)	
		経口摂取した場合	吸入摂取した場合
プルトニウム239	2.4万年	2.5×10^{-4}	1.2×10^{-1}
セシウム137	30年	1.3×10^{-5}	3.9×10^{-5}
ヨウ素131	8日	2.2×10^{-5}	7.4×10^{-6}
ストロンチウム90	28.8年	2.8×10^{-5}	1.6×10^{-4}
トリチウム	12.3年	4.2×10^{-11}	2.6×10^{-10}

(注) 市場希釈係数（評価対象者の当該食品摂取量に対する汚染された食品の摂取割合）および調理等による減少補正については1としている
化学形等により複数の値が示されている核種については最も大きい実効線量係数を示す

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。

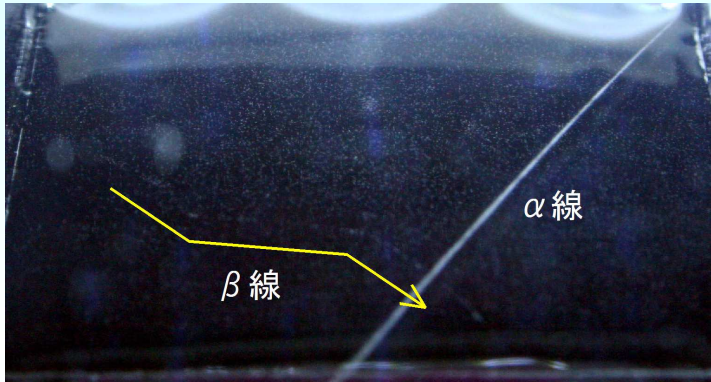
A:

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

放射線加重係数の説明

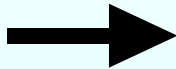
実効線量(Sv) = 吸収線量(Gy) × **放射線加重係数** × 組織加重係数
→ **α線: 20, β、γ線: 1**

相互作用の違いを反映



体内の放射能 *体重60kgの日本人 年間に被ばくする実効線量

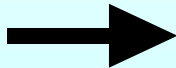
K-40: 4,000Bq



170 μSv/年

β・γ線のみ

Po-210: 20Bq



800 μSv/年

α線を放出

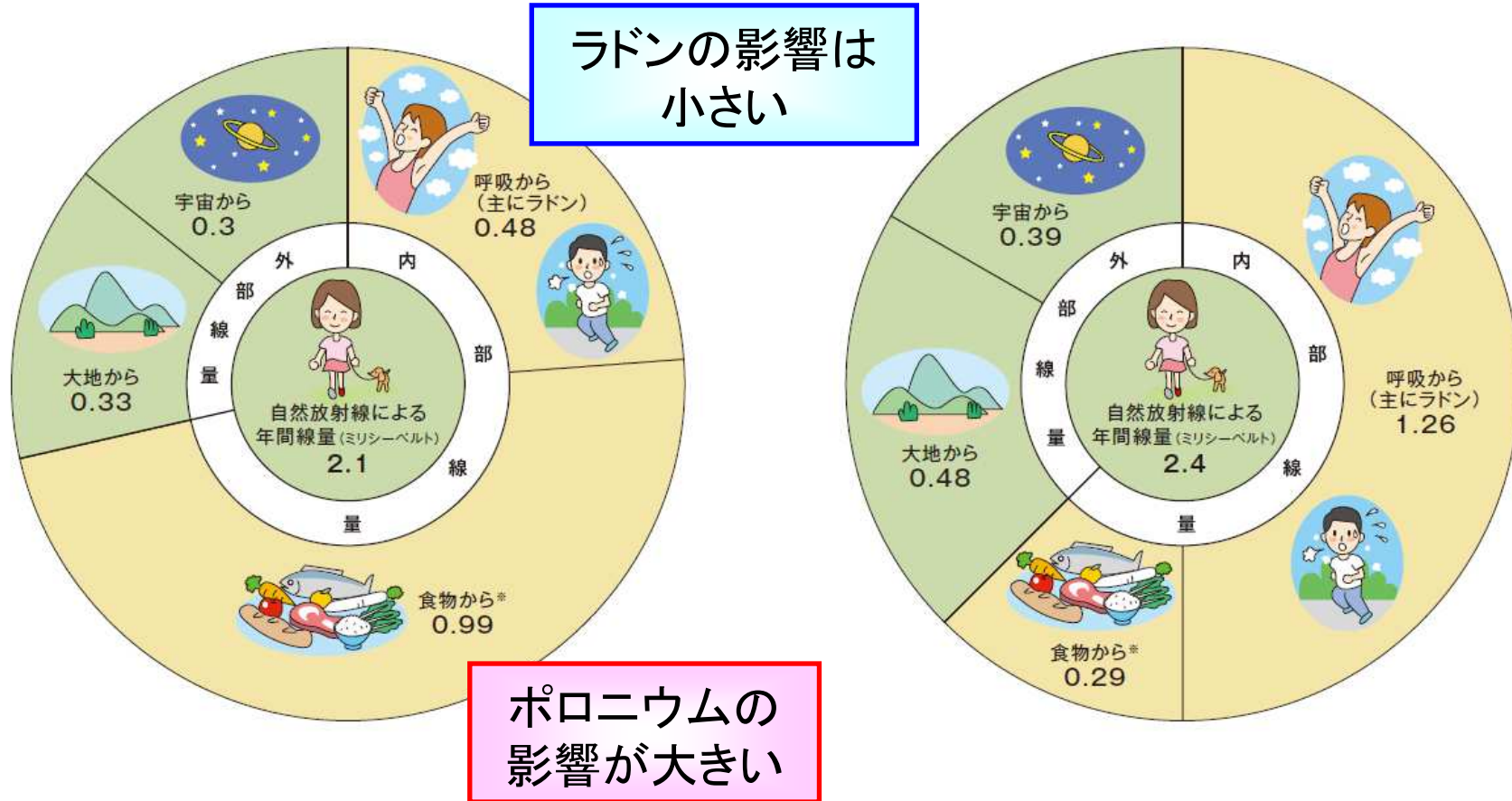
空気中のラドントロンもα線を放出 → 世界平均で 1.26mSv/年
日本は木造建築が多く比較的被ばく量は少ない → 0.48mSv/年

*そもそもの吸収線量、
組織加重係数
なども異なる

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