

2018年度 初年次ゼミ（水5）

「放射線」をキーワードとした総合的学習

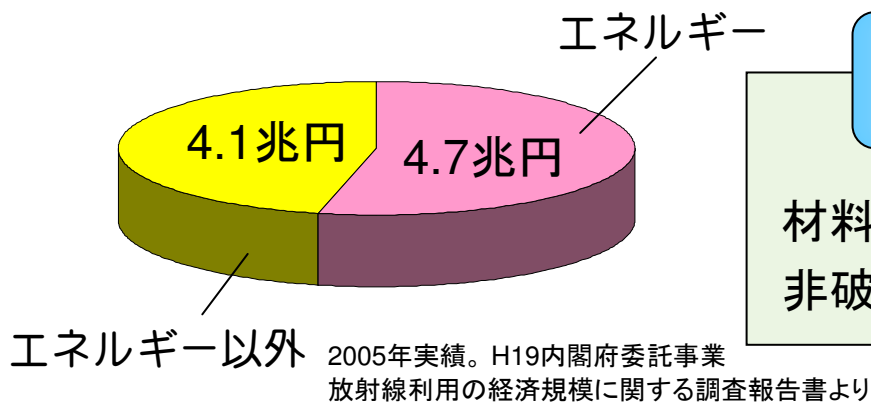
第1回

原子と放射線

工学研究科 量子放射線系専攻 /
研究推進機構 放射線研究センター
准教授 秋吉 優史

原子力発電以外でも放射線は関係している

様々な分野での放射線応用の経済規模は、エネルギー利用(原子力発電)と同程度の巨大な産業



工業利用

材料改質、微細加工、
非破壊検査、元素分析

農業利用

品種改良、食品照射

医療(診断、治療)

レントゲン撮影、CT、PET
ガンマ線・重粒子線治療、BNCT

滅菌

手術器具、医薬品原料、
食品包装材

年代測定

C-14 年代測定法など
による考古学・文化財
の評価

工業材料の性質の改良

工業

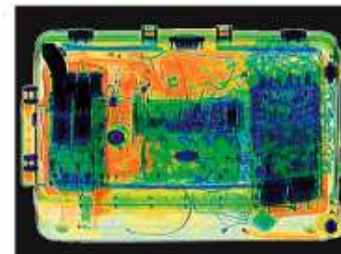


放射線照射により、ラジアルタイヤの耐久性やエンジンルームに使われる配線コードの耐熱性が向上する。

放射線照射により、ゴムやプラスチックなどの高分子材料の構造が弾力性や耐熱性の高いものに変化します。放射線照射によって、材料の分子間に網目状の「橋かけ」ができるからです。

非破壊検査

工業



画像提供 ポニー工業

放射線は空港での手荷物検査などの非破壊検査に使われる。

放射線の物質を透過する性質を利用することにより、モノを破壊することなく(非破壊)、モノの内部を調べることができます。

品種改良

農業



放射線照射により形や色が異なる新品种の花ができる。



放射線照射により黒斑病に強いゴールド二十世紀ナシが誕生した。

放射線照射により農作物の遺伝子を改良して、新しい品種を作ることができます。

食品照射:ジャガイモの発芽防止

農業



放射線照射したジャガイモは発芽しない



発芽したジャガイモは有毒物質(ソラニン)を含む

放射線はジャガイモの芽の細胞分裂を止める作用があります。放射線の発芽防止作用によって、ジャガイモの長期保存が可能になります。

病気の診断

医療



身体にX線を照射し、透過したX線の強弱をコンピューターで処理することにより、身体内部の鮮明な透視画像が得られる。

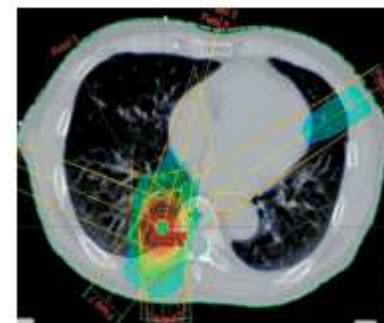
放射線による身体の透視写真は、怪我や病気の診断に革新的な進展をもたらしました。

病気の治療：がんの放射線療法

医療



様々な方向から身体に放射線を照射できる放射線治療装置。



複数の方向から照射することにより病巣に放射線を集中させる。

放射線には細胞を殺す作用があります。この作用を上手に利用するとがん組織を切らずに治すことが可能になります。これをがんの放射線療法といいます。

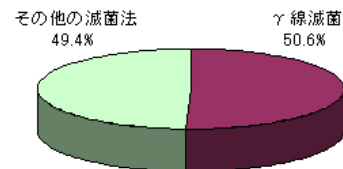
医療用具の滅菌

医療



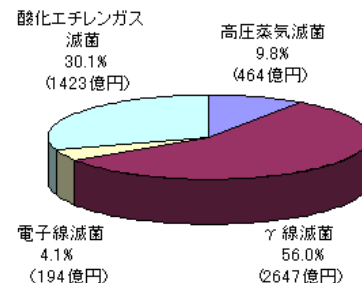
放射線は、投薬びん、注射器、チューブ等の各種医療用具の滅菌に利用される。

放射線を用いると、密封した状態で均一に滅菌でき、有害な残留物はありません。また、多量の製品を連続して処理することができ、効果は半永久的に持続するなどの特徴があります。



滅菌医療用具等の総体積(60万m³)

1997年



総額(4728億円)

1999年

わが国の滅菌医療用具に占める滅菌法の割合

[出典]東京都立産業技術研究所(編): 滅菌医療用具の市場動向と滅菌バリデーション(2000年3月)、p127

放射光 X線分析

科学捜査一和歌山毒物カレー事件(1998)



図2 SPring-8 施設概観 (平成11年10月撮影)
(提供: 高輝度光科学研究センター, URL: http://www.spring8.or.jp/JAPANESE/general_info/overview/intro.html)

SPring8 の高強度放射光を用いて、

ヒ素のX線分析を行った。

放射光 → 加速器を用いて作られる「強度」
が非常に強い赤外線～X線。

「エネルギー」が高いガンマ線とは異なる。

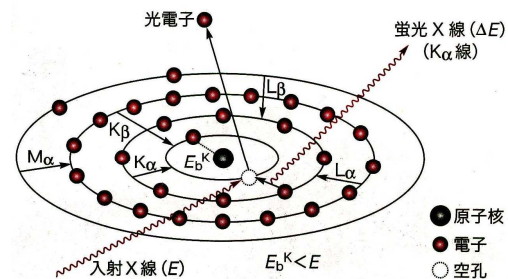


図2 蛍光 X 線分析の原理

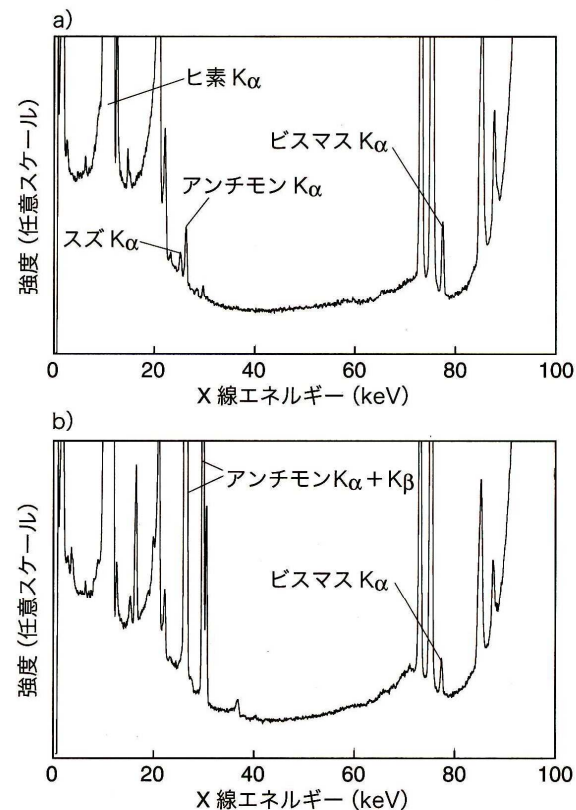
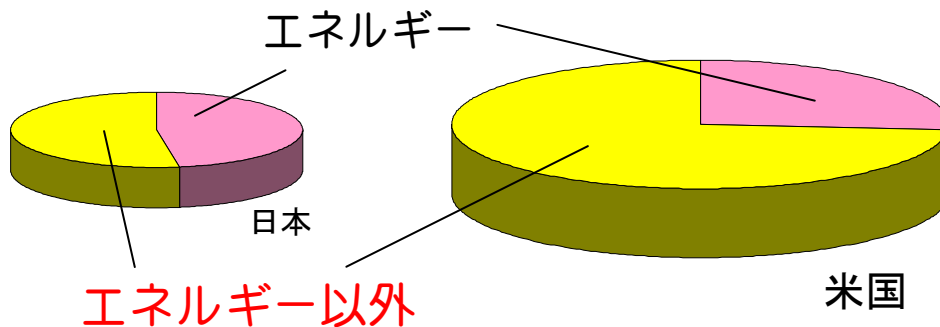


図4 産地の異なる亜ヒ酸の蛍光 X 線スペクトル
a) 中国産, b) メキシコ産.

平成9年(1997年)

平成11年度科技庁委託事業
「放射線利用の国民生活に与える影響
に関する研究」報告書



	日本	米国
エネルギー	5.7兆円	5兆円
エネルギー以外	6.3兆円	14兆円

・半導体加工、非破壊検査などの工業分野での需要は非常に大きい

・先端の物性測定装置の多くが何らかの形で放射線を利用

・海外では香辛料や食肉などへの食品照射が大きな市場となっている

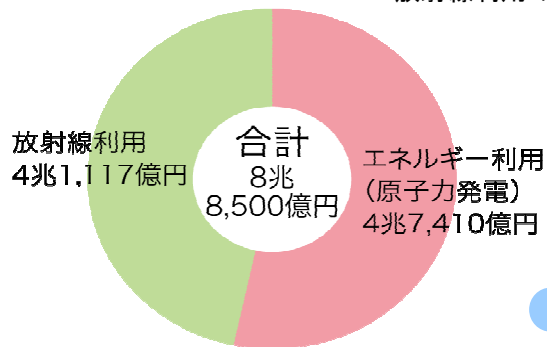
・CT、PET等の診断、ガン治療などの医療でも放射線の利用は必須。

・福島第一原子力発電所事故収束へ技術開発の必要性

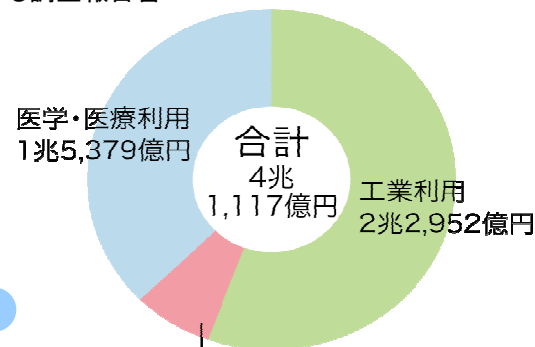
平成17年(2005年)

経済効果

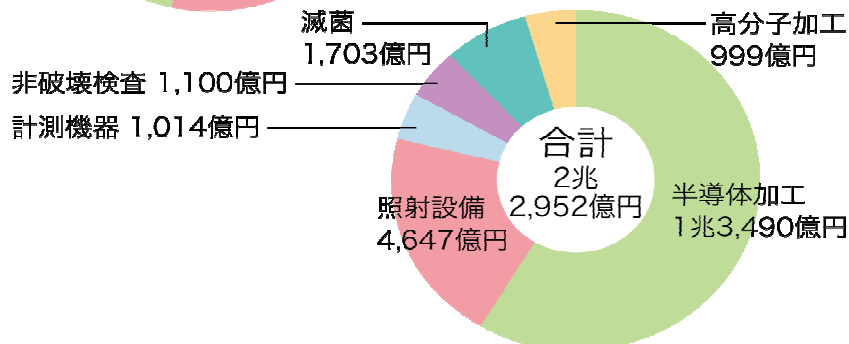
H19内閣府委託事業
放射線利用の経済規模に関する調査報告書



放射線利用

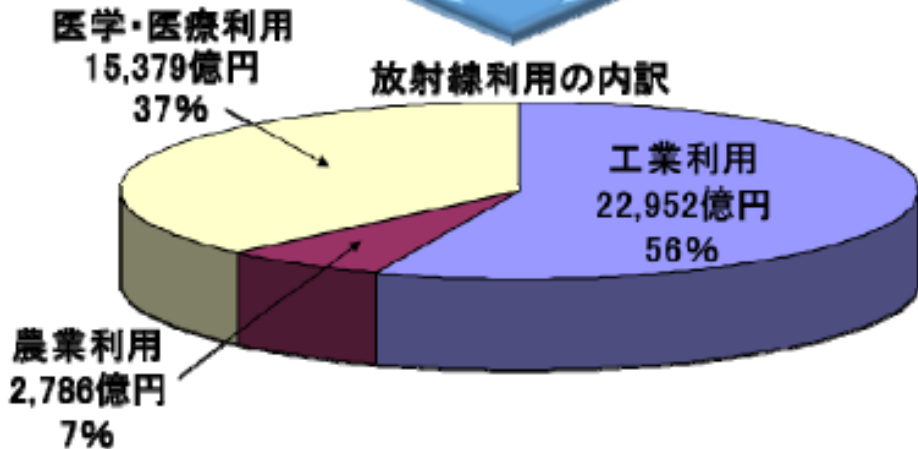
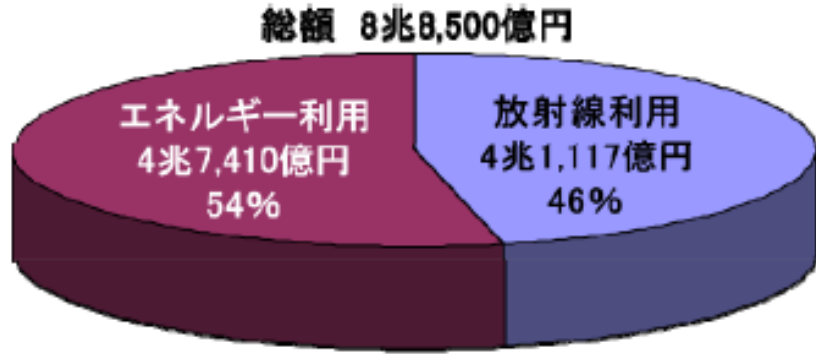


工業利用



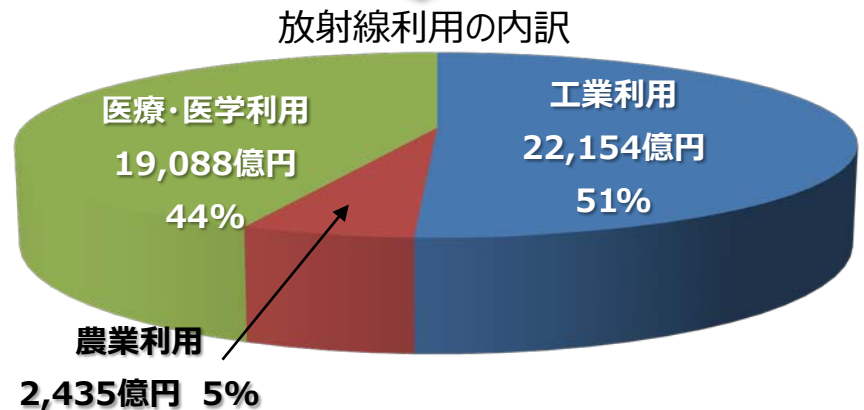
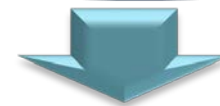
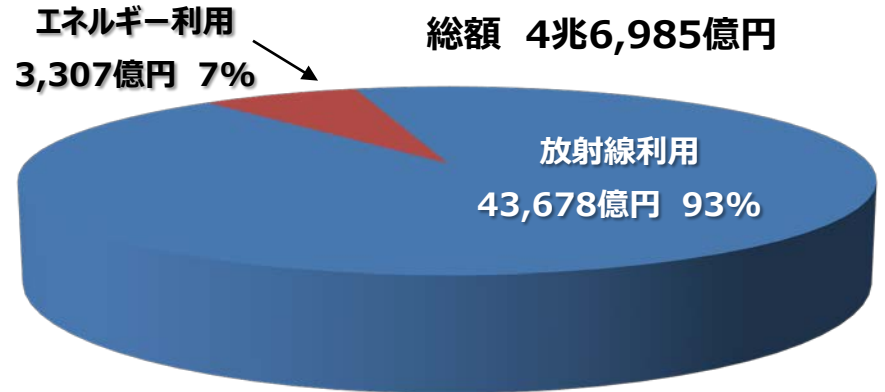
内閣府 放射線利用の経済規模調査（平成27年度）

平成17年度の調査結果



平成17年度
放射線利用 経済規模
4兆1,117億円

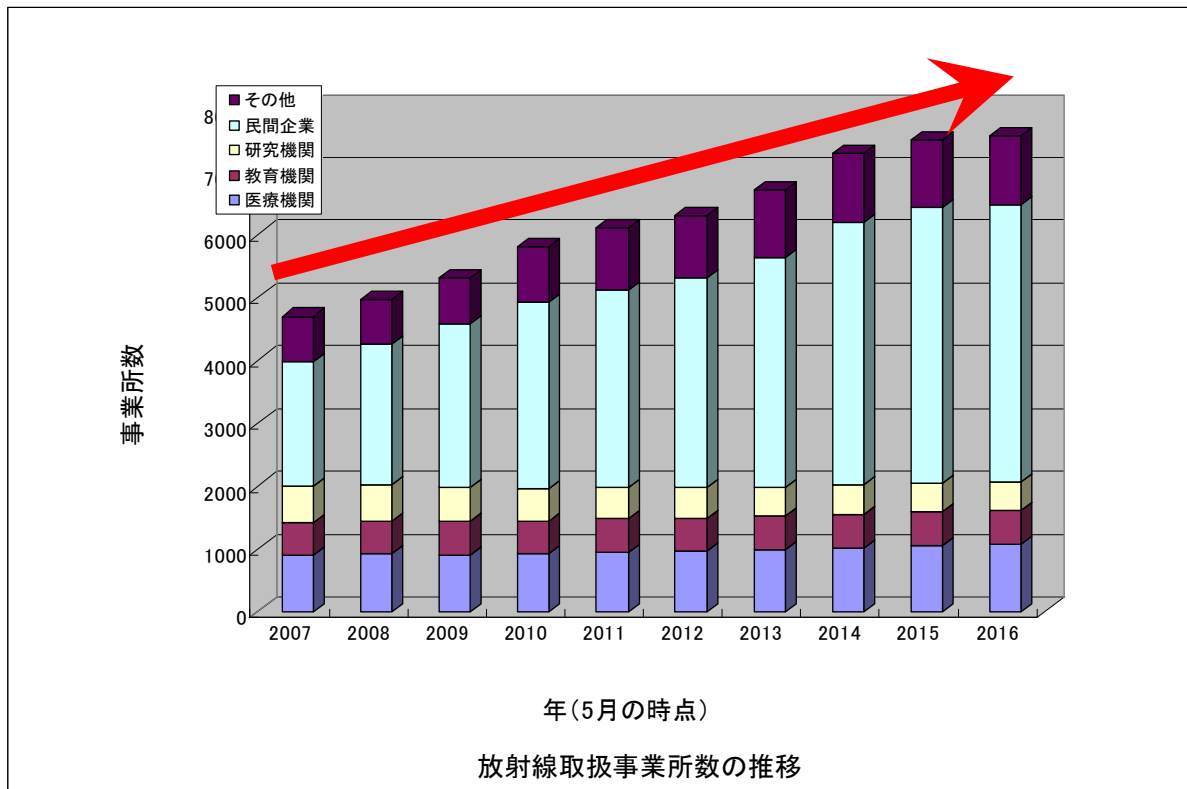
平成27年度の調査結果



平成27年度
放射線利用 経済規模
4兆3,678億円

1.06倍
(GDP; 1.03倍)

放射線取扱施設の需要について



年	2007	2008	2009	2010	2011	2012	2013	2014	2015	2016
医療機関	897	915	910	920	951	962	991	1,019	1,053	1,080
教育機関	525	535	538	529	531	528	526	537	537	526
研究機関	575	563	527	507	493	478	462	459	458	448
民間企業	1,979	2,237	2,603	2,977	3,151	3,351	3,651	4,172	4,379	4,430
その他	723	716	741	866	990	987	1,073	1,098	1,088	1,093
総数	4,699	4,966	5,319	5,799	6,116	6,306	6,703	7,285	7,515	7,577

放射線について

エックス線の発見

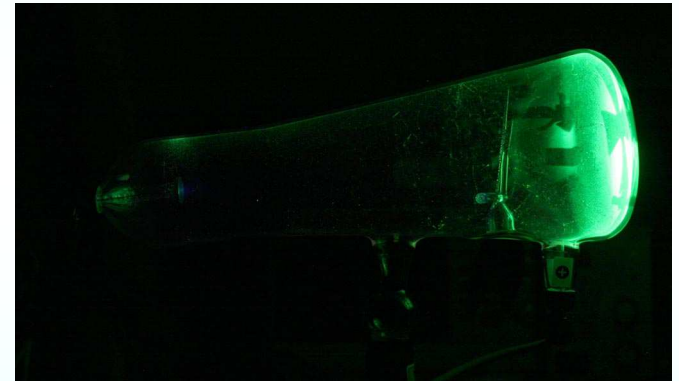
Wilhelm Konrad Röntgen

1895年放電の実験で偶然発見

1901年第1回ノーベル物理学賞受賞

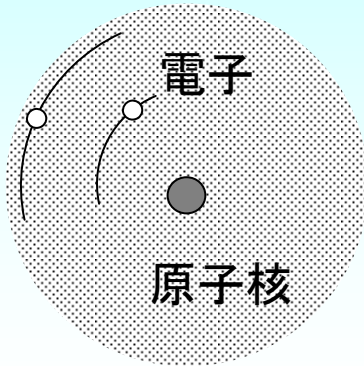


透視写真 → 診断への応用



X線を放出するクルックス管

原子の大きさと構造



原子

$\sim 10^{-10}$ m
(1 Å)



原子を1円玉の大きさまで拡大すると...

1円玉が本州を覆うぐらいの大きさになる



1×10^{-2} m (1cm)

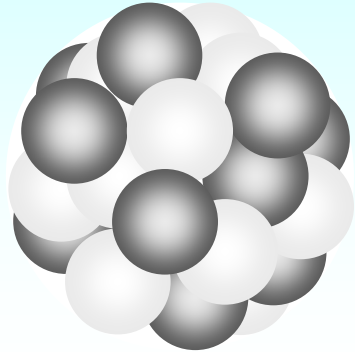
10^8 倍に拡大



青森-広島間 約1000km

原子の大きさと構造

原子核



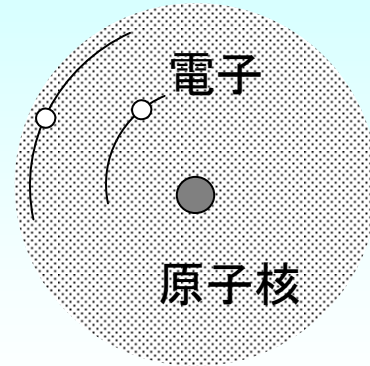
陽子



中性子

10^{-15} m (fm)

5×10^{-15} m



原子

電子

原子核

$\sim 10^{-10}$ m
(1 Å)

原子核を1円玉の大きさまで
拡大すると...

原子は東京ドームぐらいの
大きさになる



1×10^{-2} m (1cm)

2×10^{12} 倍に拡大



200m

1cmの一円玉は 2×10^7 kmとなり、
 1.4×10^6 kmの太陽より大きくなる

放射性同位元素 (ラジオアイソトープ、RI)

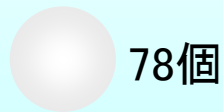
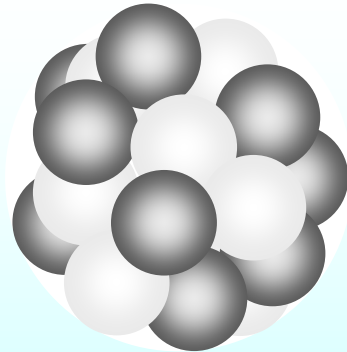
原子核の種類 (核種)

原子番号 55
セシウム



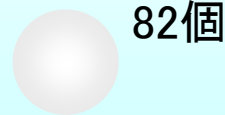
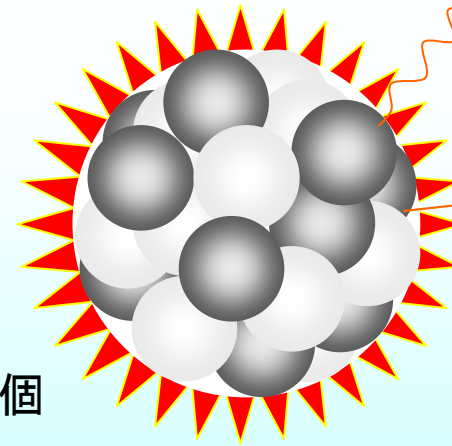
自然にある
安定な原子核

^{133}Cs



原子炉で作られた
不安定な原子核

^{137}Cs



中性子79個の ^{134}Cs も放射性だが、 β 線・ γ 線のエネルギー、本数も寿命も異なる全くの別物

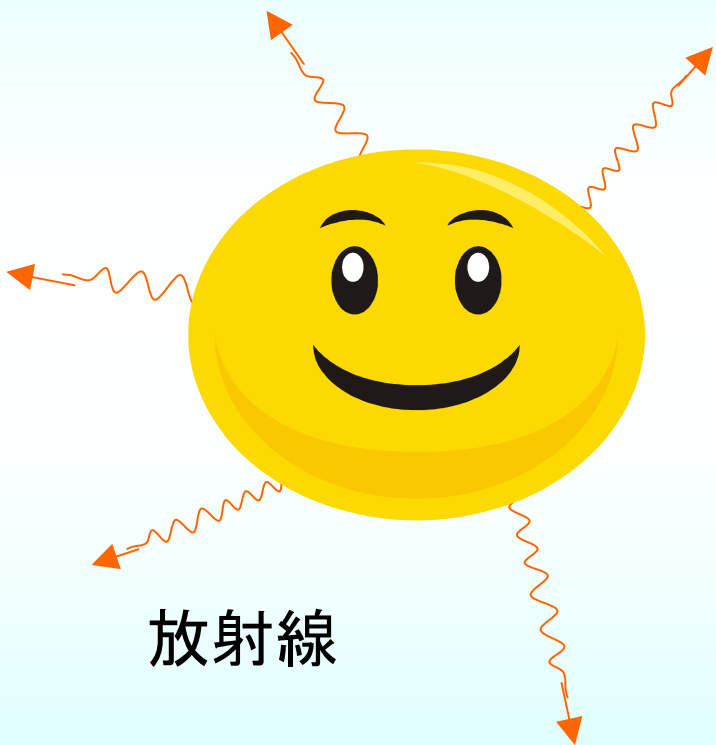
放射性物質と放射能

放射能: 放射線をだす能力
(Radioactivity) という意味と、
放射性物質 (Radioactive
material) という意味の両方がある

単位 Bq ベクレル

一秒間に崩壊する原子核の数
(放出される放射線の数ではない)

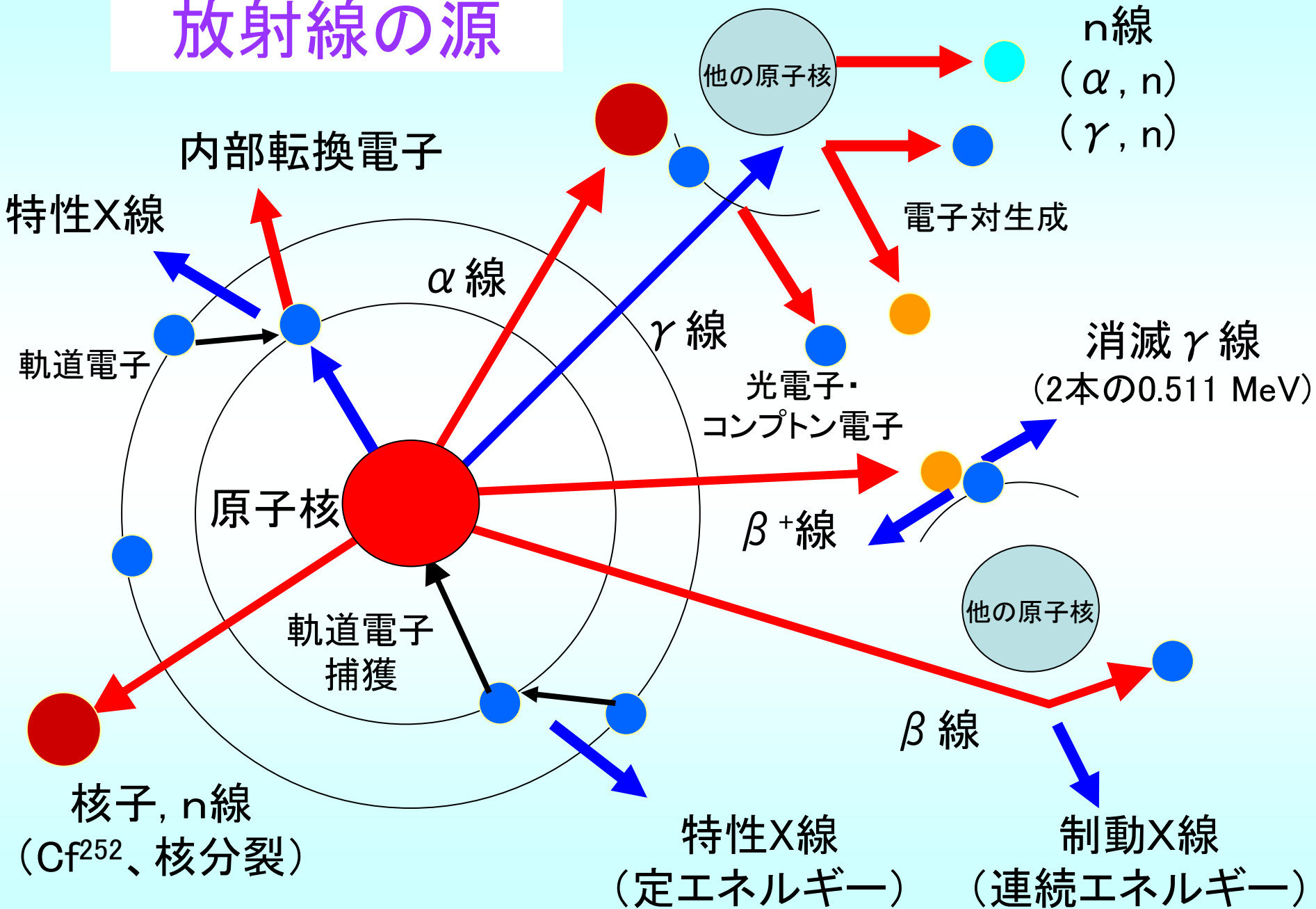
参考: 数10 gの物質中に約 10^{24} 個の原子



放射線

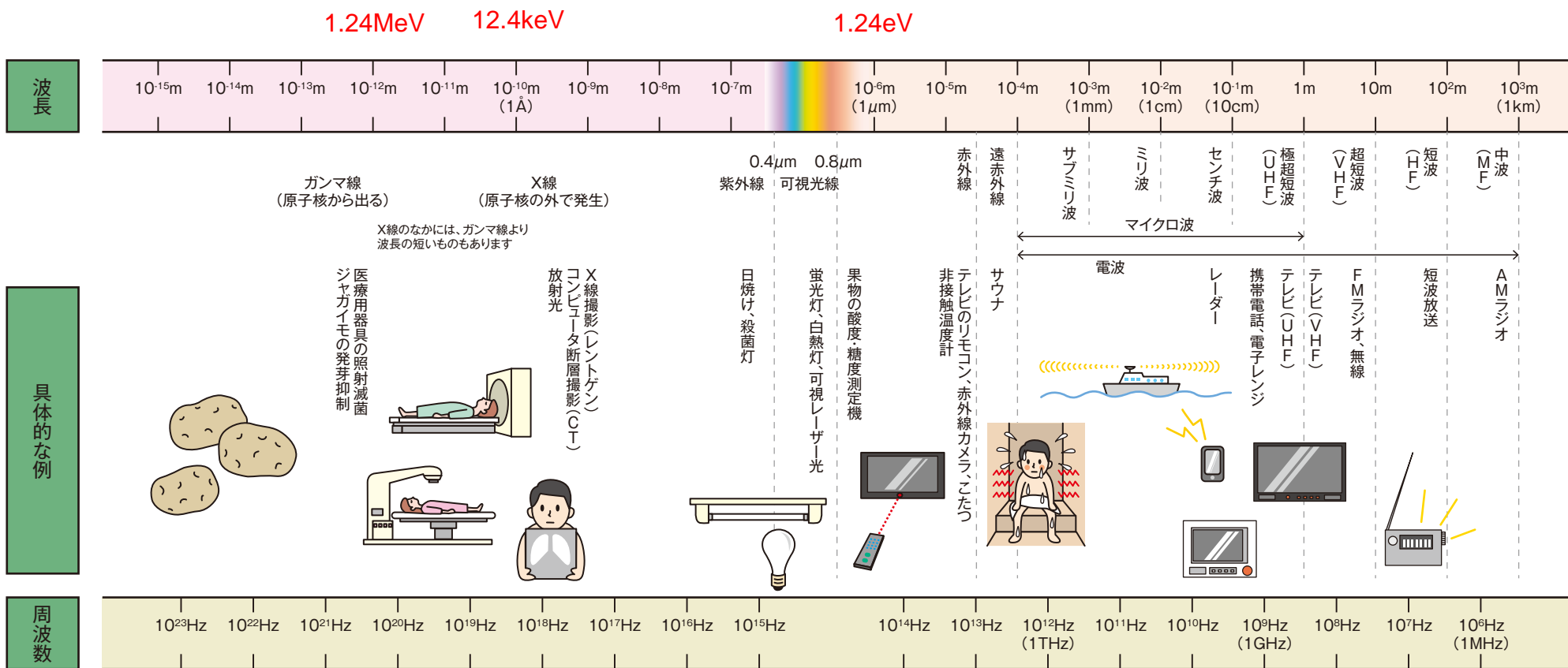
放射性物質
(原子の集団)

放射線の源



電磁波の仲間

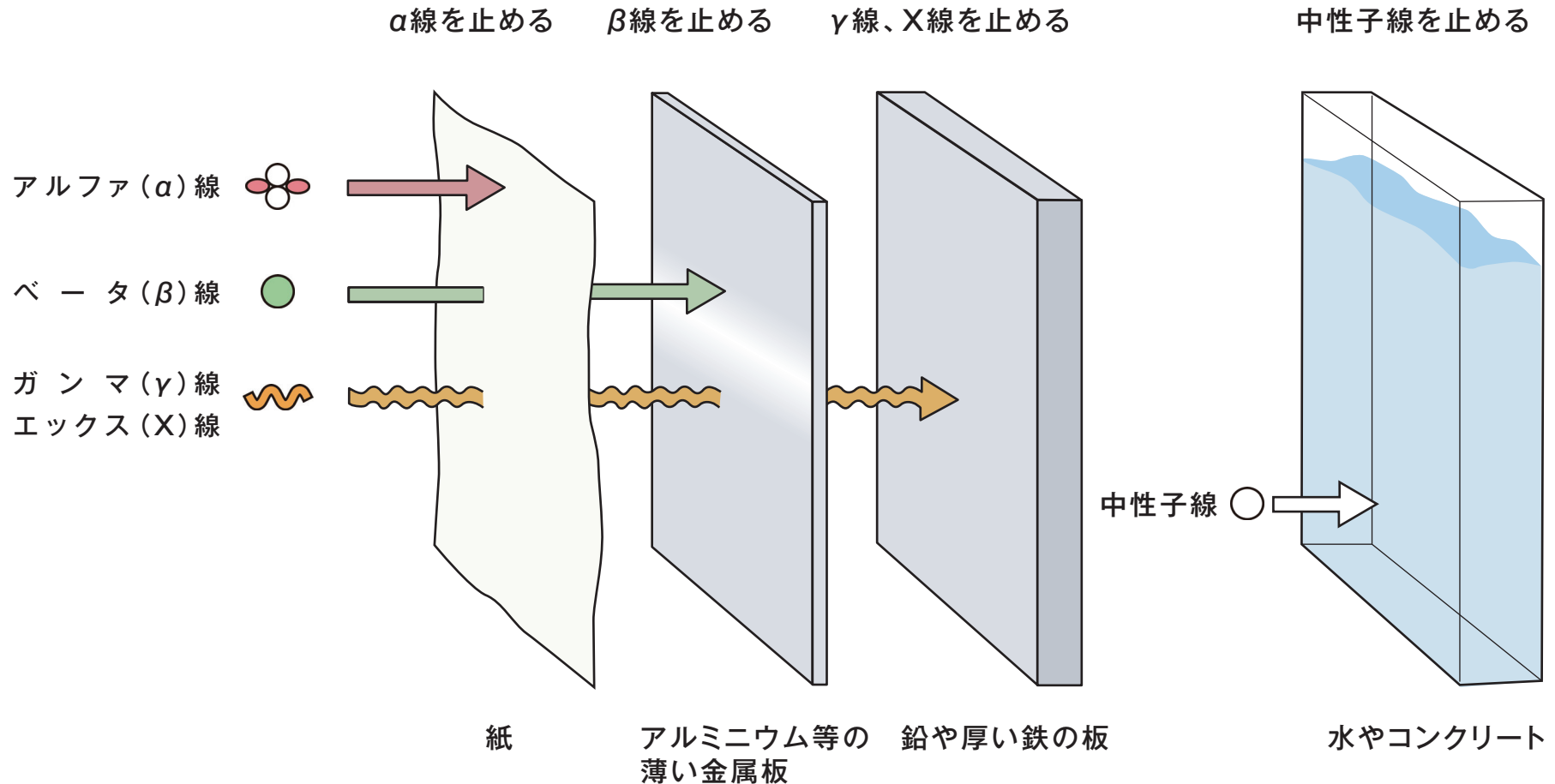
光子のエネルギー $E \approx 1240 / \lambda$ [eV], λ : 波長[nm]



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。

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。

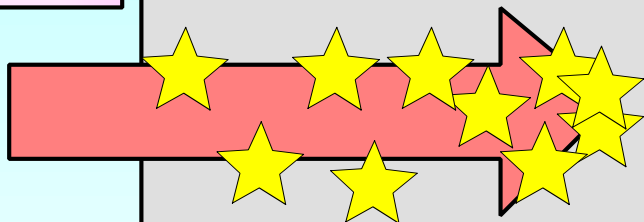


線は水の中(=体の中)を最大で2mm弱進むことが出来、細胞から見ると比較的広い範囲にエネルギーを落としていき、また体の外から来た場合はほとんど皮膚で止まります。

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。

α 線

水中での最大飛程: $50 \mu\text{m}$ 程

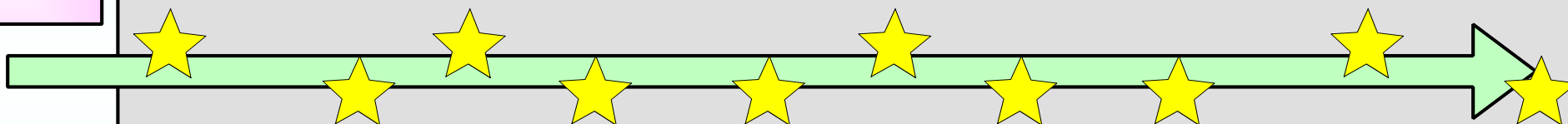


狭い範囲に一気に
エネルギーを放出する

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



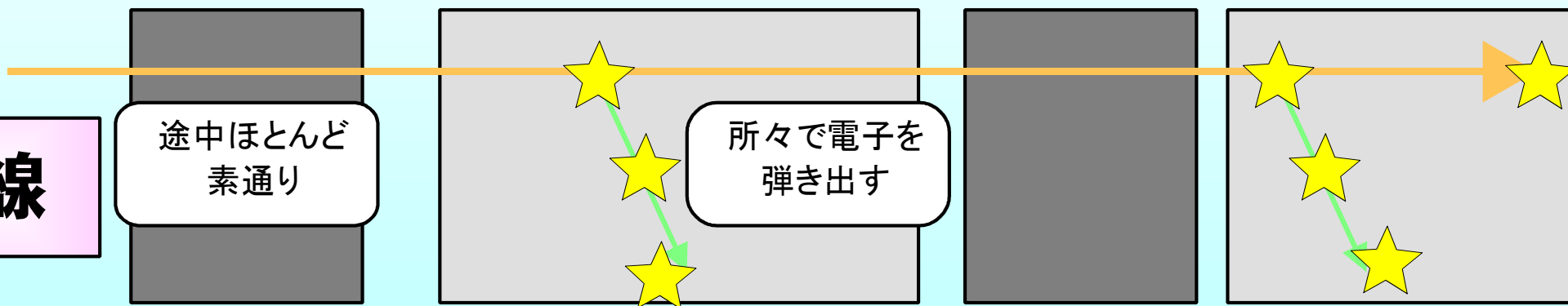
所々にぽつぽつとエネルギーを落とす

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

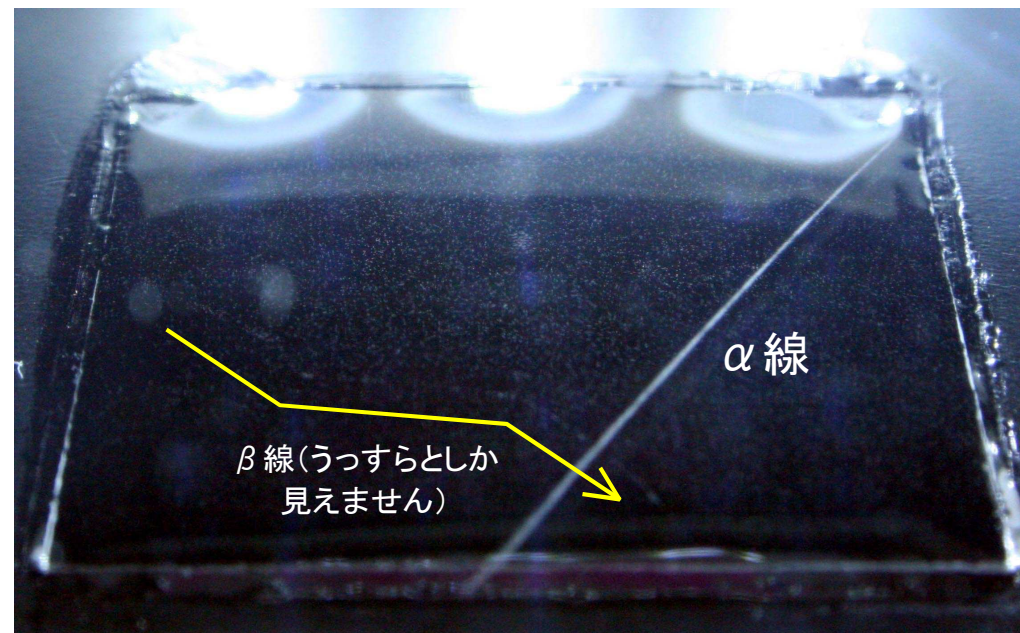


「霧箱」を使って放射線 を見てみよう!

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。

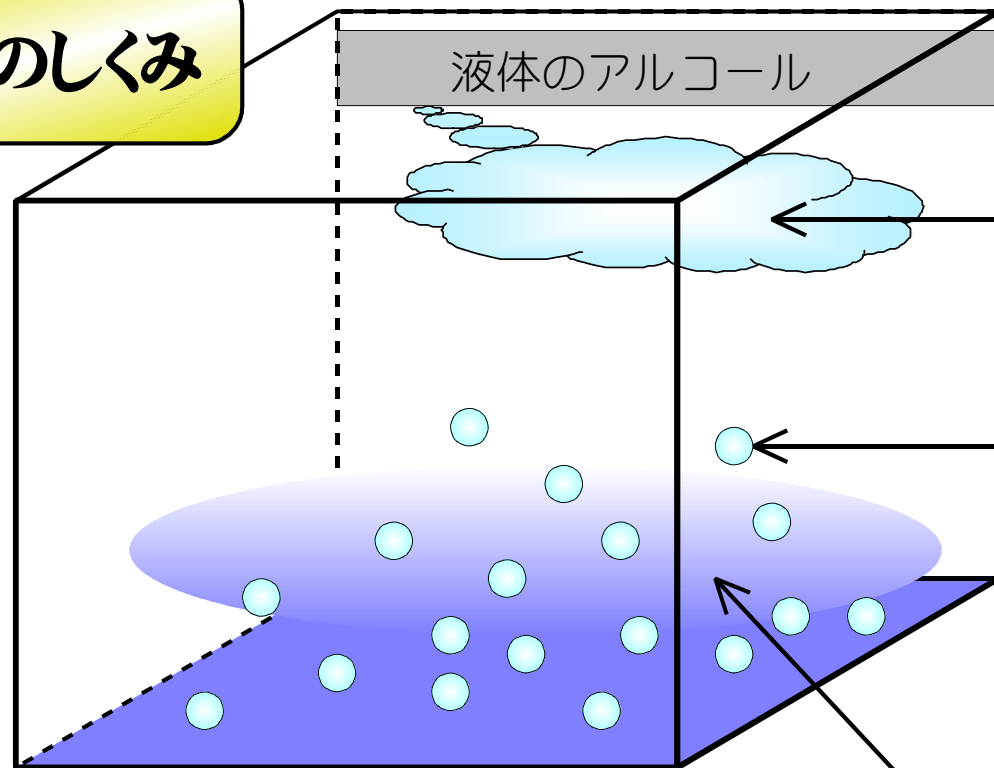
そこで、100年ほど前に発明された「霧箱」という装置を使って放射線が通った後を目で見えてみましょう!

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



温度が高いと蒸発圧が高い

アルコールの蒸気

液体のアルコールの
小さな粒

温度が低いと飽和蒸気圧が
下がり過飽和となる

ドライアイスやペルチエ素子で
-20℃以下に冷やされています

過飽和の蒸気

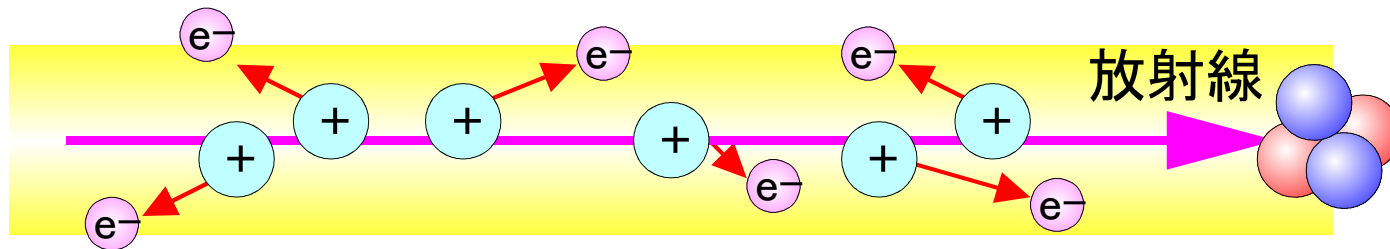
温度が低くなり飽和蒸気圧が低くなると、蒸発した気体のアルコールは液体に戻ろうとします。霧のように見える白い粒子は液体のアルコールの小さな粒です。しかし、温度が下がったのに液体の粒にならずに過飽和状態の気体も漂っています。そこに刺激を加えてやると、過飽和の蒸気は次々に液体の粒に変化していきます。

どうして白い筋の様に見えるのか?

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（電離作用）。このイオンが過飽和のアルコール蒸気の中に出ると、そこを中心核にして小さな液体の粒になります。

（アルコールは極性を持つ分子です）

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、白い筋として放射線の飛跡が観察されます。

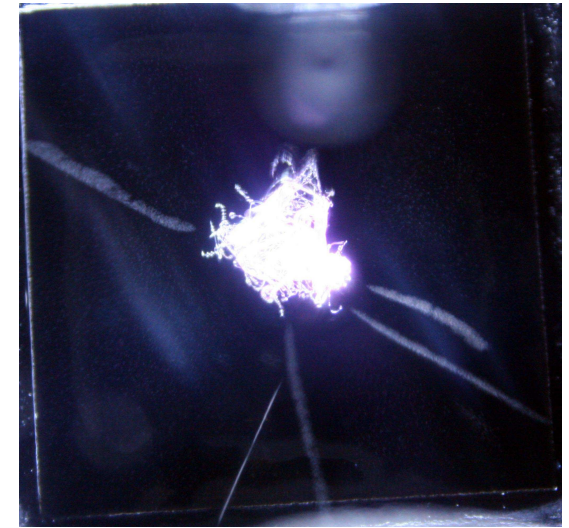


電離によるイオン対の生成

放射線として飛んで行っている α 粒子や電子は小さすぎてとても目では見られませんし、MeVエネルギーの粒子の速度は超高速カメラでも追いつきません。

しかし、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

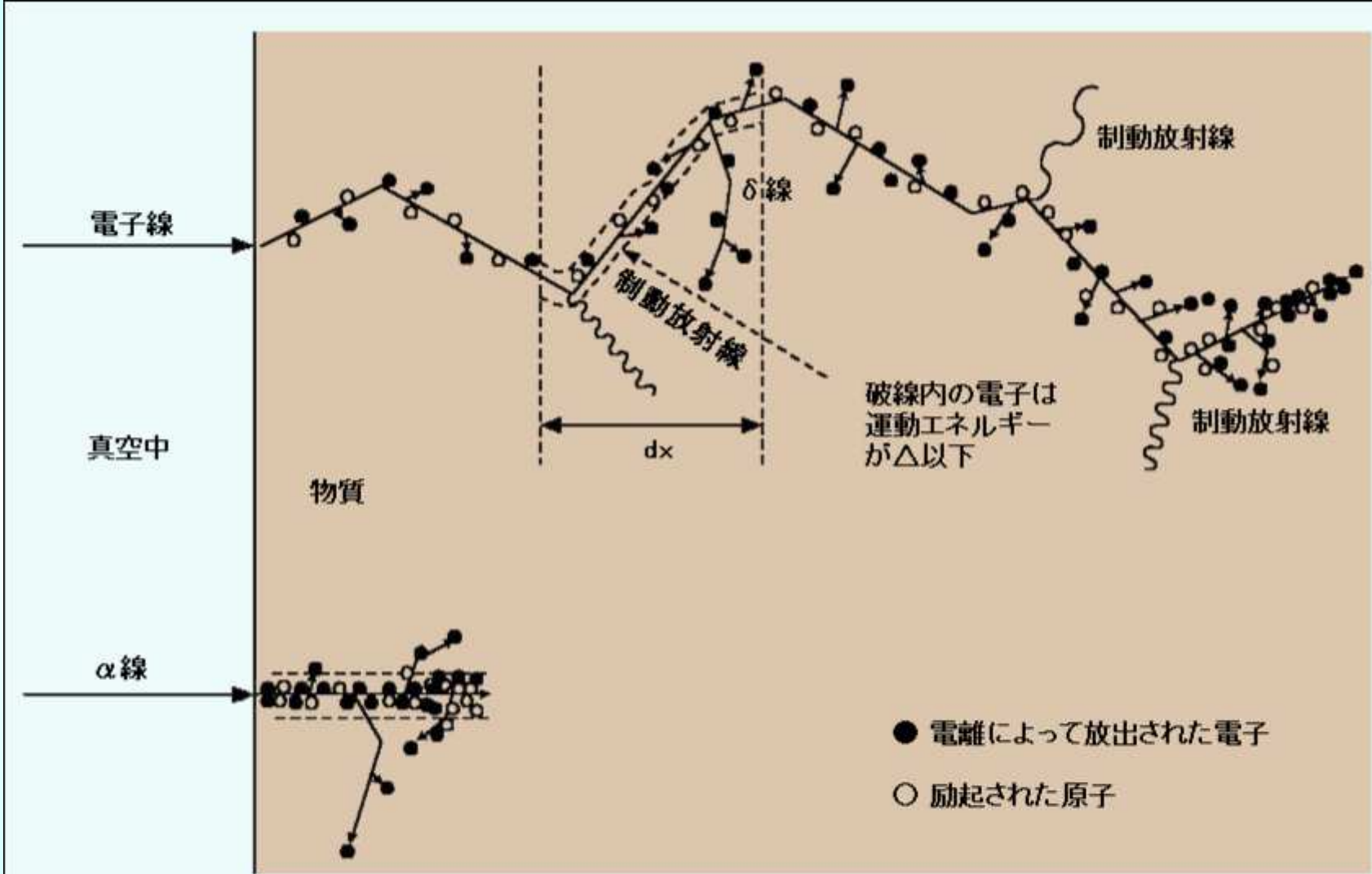
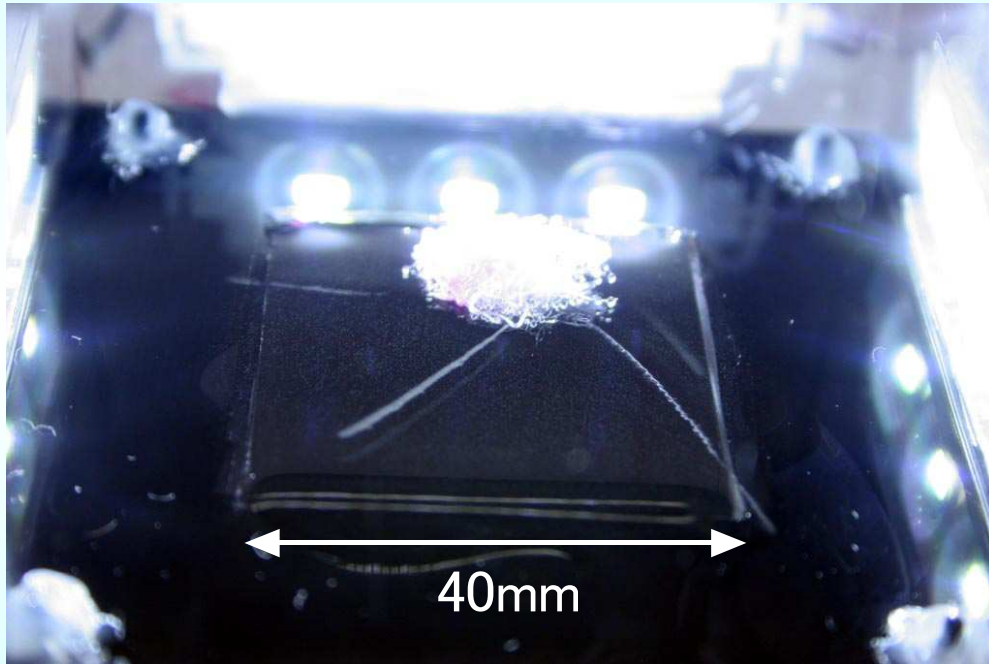


図1 荷電粒子と物質の相互作用

[出典]江藤秀雄(ほか):放射線防護、丸善(1982年12月)、p.54

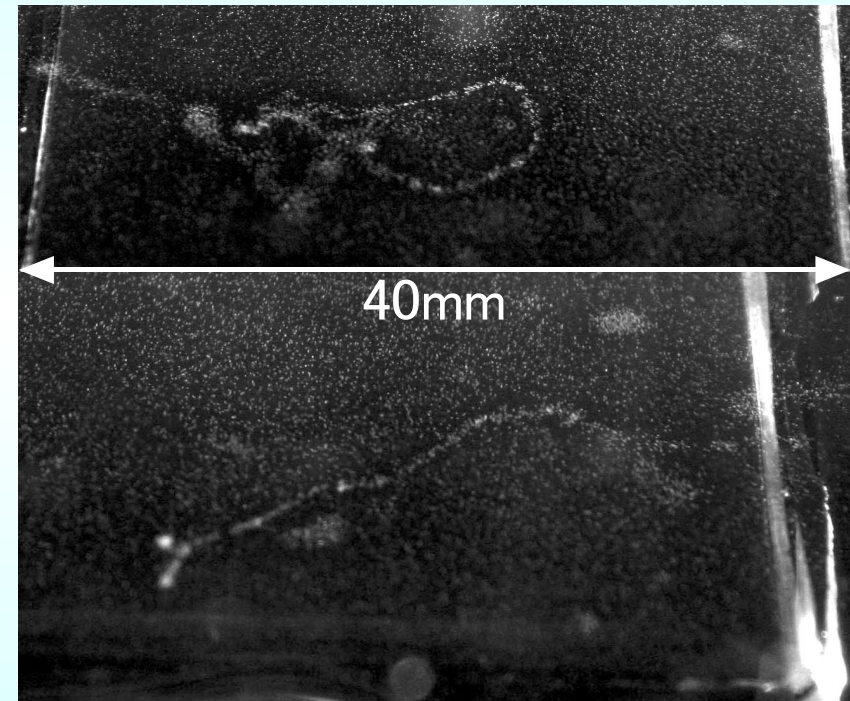
霧箱での飛跡の観察

α 線の飛跡



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。

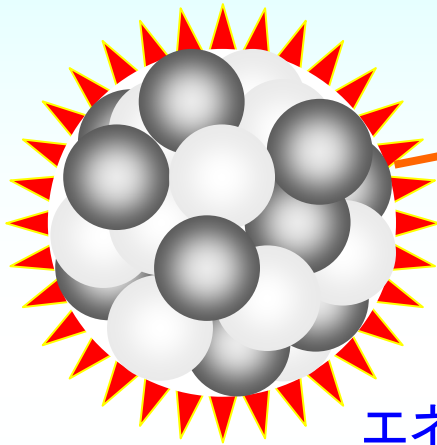
β 線の飛跡



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。

放射線の正体

不安定な原子核

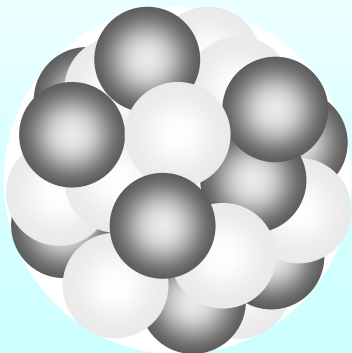


放射線

^{60}Co

エネルギーをはき出して
安定に

安定な原子核へ



^{60}Ni

別の元素に変化する!

錬金術師が煮ても焼いても変化しなかった原子が変化する

放射線(エネルギーの運び手)の種類



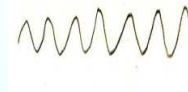
アルファ線



ベータ線



中性子線



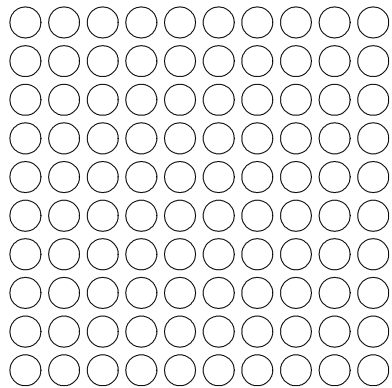
エックス線
ガンマ線

電磁波

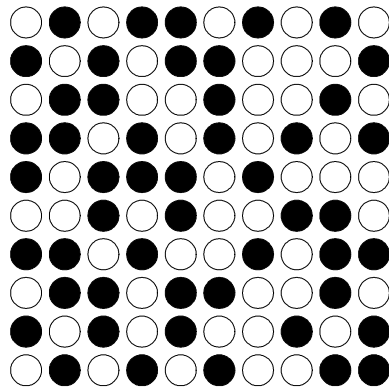
加速器などでも作れるが、
 α 線、 β 線、 γ 線は原子核
内起因の物だけをそう呼ぶ

放射能の減衰挙動について

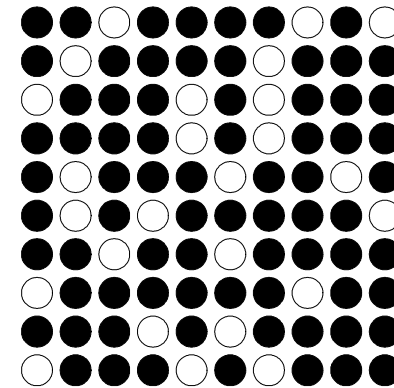
・放射性核種は、放射線を放出すると別の原子核に変わってしまい、どんどん数が減っていきます。



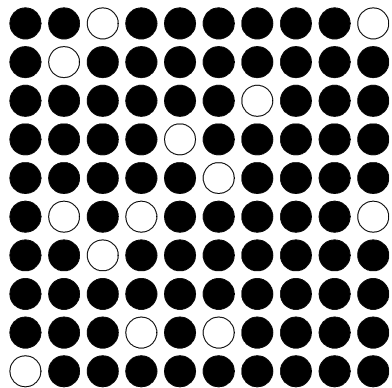
スタート時
白: 100個 黒: 0個



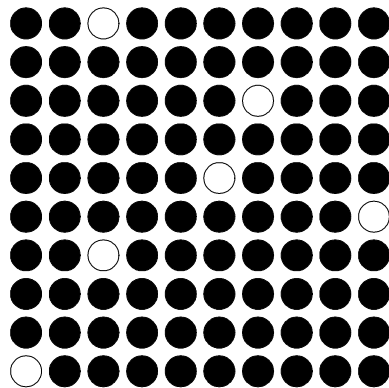
一回目
白: 50個 黒: 50個
→ 黒に変わった数: 50個



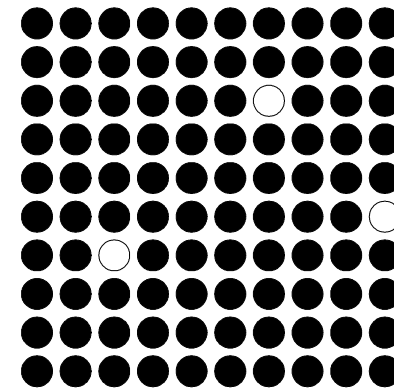
二回目
白: 25個 黒: 75個
→ 黒に変わった数: 25個



三回目
白: 13個 黒: 87個
→ 黒に変わった数: 12個

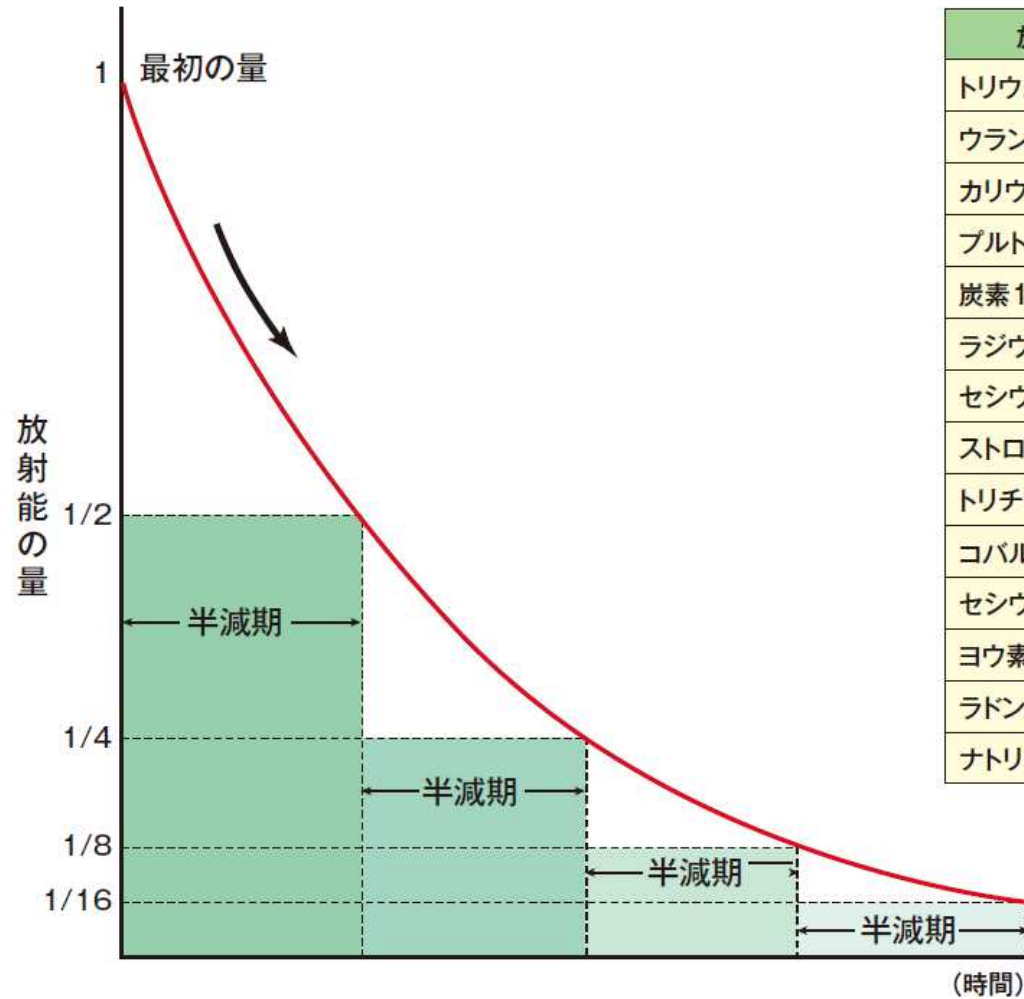


四回目
白: 6個 黒: 94個
→ 黒に変わった数: 7個



五回目
白: 3個 黒: 97個
→ 黒に変わった数: 3個

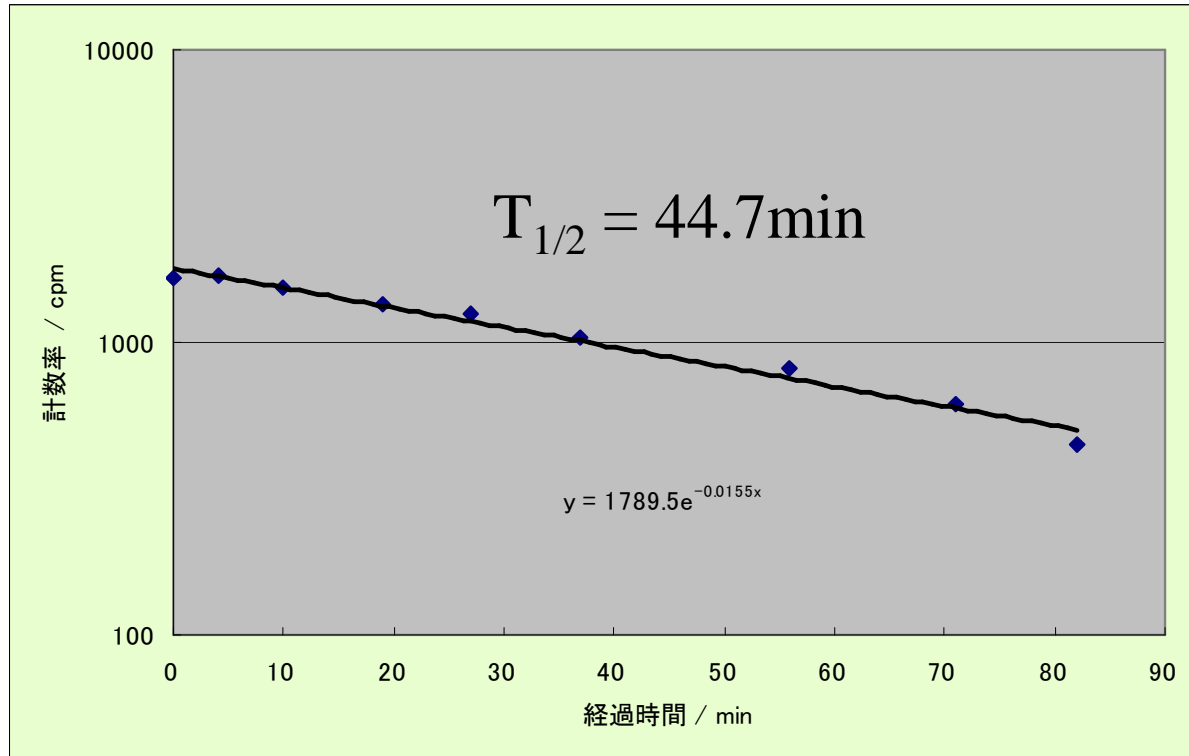
放射能の減り方



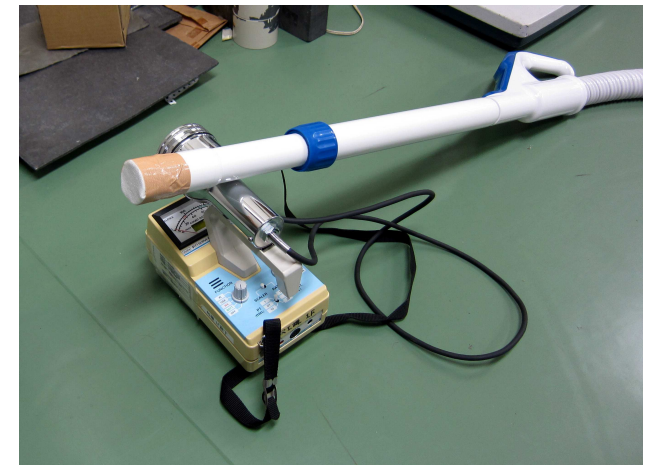
放射性物質	放出される放射線*	半減期
トリウム232	$\alpha \cdot \beta \cdot \gamma$	141億年
ウラン238	$\alpha \cdot \beta \cdot \gamma$	45億年
カリウム40	$\beta \cdot \gamma$	13億年
プルトニウム239	$\alpha \cdot \gamma$	2.4万年
炭素14	β	5,730年
ラジウム226	$\alpha \cdot \gamma$	1,600年
セシウム137	$\beta \cdot \gamma$	30年
ストロンチウム90	β	28.7年
トリチウム	β	12.3年
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



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%)

宇宙からの放射線

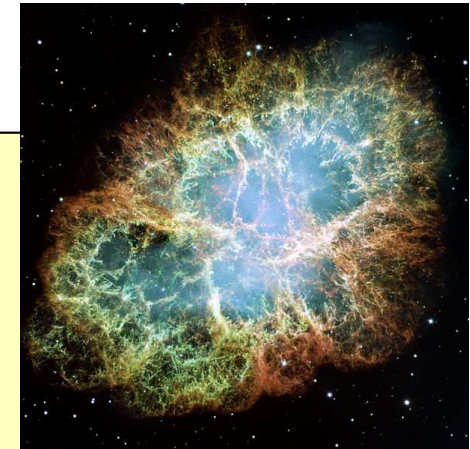
大気で地球上の生物は守られている



アラスカ、フェアバンクスで観察されたオーロラ

太陽から放出された帯電した粒子は地球の磁場に捉えられて、その一部は北極や南極の近くで大気にぶつかってオーロラとして観測される。

超新星爆発などで発生した非常にエネルギーの高い ($\sim 10^{20}\text{eV}$) 宇宙線も飛んできており、大気とぶつかって二次的な放射線のシャワーを降らせる。
また、核反応により放射性核種の生成が起こる (C-14: 10^{15}Bq/y , H-3: 10^{18}Bq/y)。



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

上空では、まだ十分に宇宙線が弱くなっていないので、飛行機に乗ると放射線量が増加する (ヨーロッパへの往復で $100\sim 200\mu\text{Sv}$ 程度)。
宇宙ステーション (ISS: 高度 400km) 滞在中の宇宙飛行士の被ばく線量は、1日当たり $0.5\sim 1\text{mSv}$ 程度にもなる。

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U-238とその娘核種などから沢山の放射線が出ている。地殻全体の平均で1tあたりウランは2.4g含まれている。花崗岩には11gも含まれていて、140kBqに相当する。U-238の娘核種もまた放射能を出して別の核種となる、壊変系列を形成している。岩石中にはこれらの系列核種も一緒に含まれているので、実際の放射能はずっと大きな値となる。



トンネルの中は周囲を岩石に囲まれているため地表よりも放射線量が高い。(東名高速の日本坂トンネルで $0.13 \mu\text{Sv/h}$ など地表の倍程度)

壊変系列の中には、気体元素のラドンが含まれており、肺の中で内部被曝を起こす。またラドンの娘核種は気体ではないが、埃などに付着して漂っており、地下室などでは高い濃度になっている。



パリ・シャンゼリゼ通りの石畳 ($0.389 \mu\text{Sv/h}$)

ヨーロッパは岩盤で覆われており日本よりはるかに(10倍以上)自然放射能が高い地域が多い。国内でも岩盤が多く露出している岐阜県などでは比較的放射線量が高く、富士山の火山灰で覆われている関東は比較的低い。

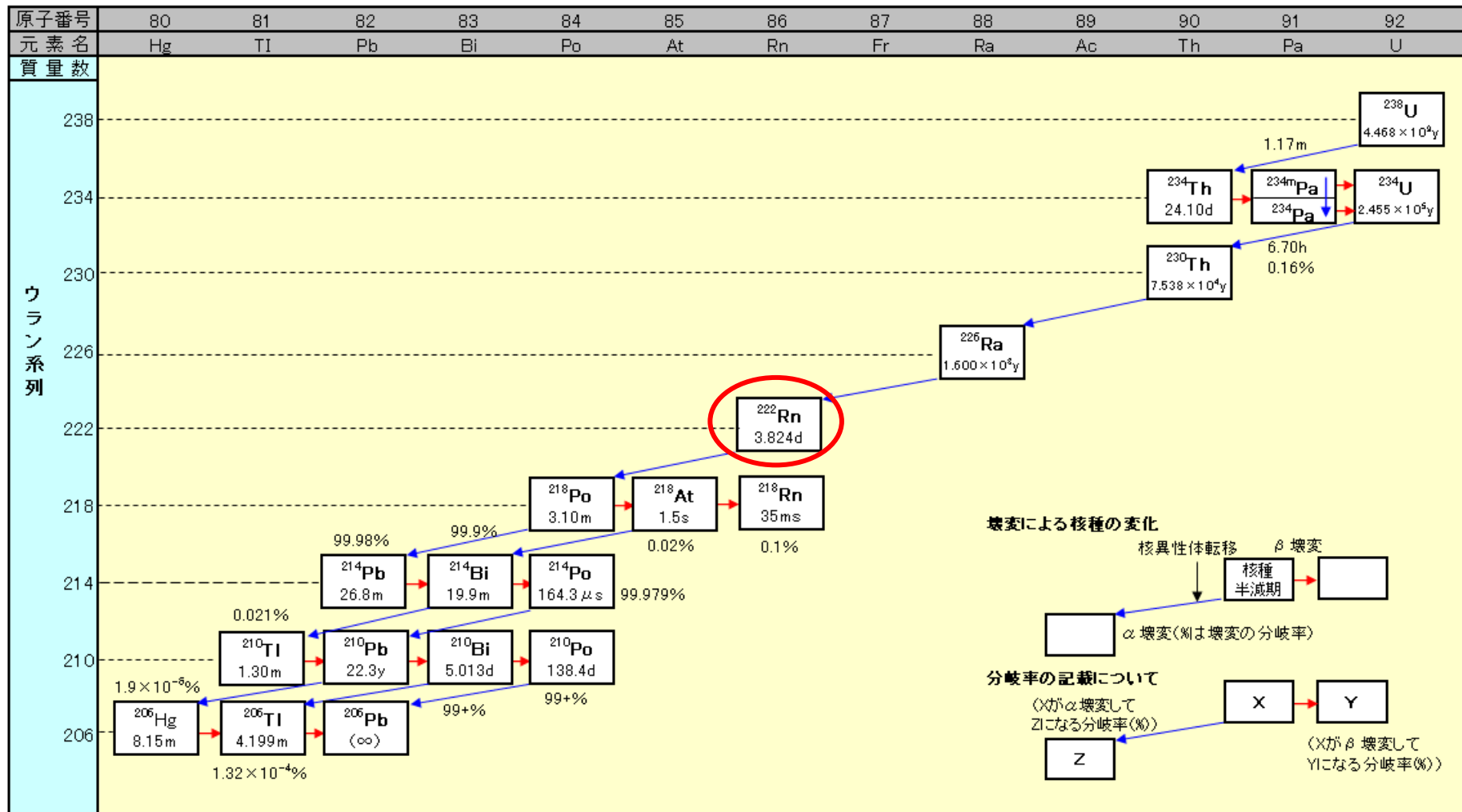


ピサの斜塔

イタリア・ピサの大聖堂

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

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

K-40は半減期12.5億年、同位体比0.012%の放射性核種であり、天然のカリウム1gに30BqのK-40が入っている。畑にまく肥料の一つにカリ肥料があり、カリウムは作物に、そして人間にも必須の元素の一つである。昆布や椎茸、キュウリなどに沢山含まれており、これらの食物を通して人間の体の中にはおよそ4000BqのK-40が存在しており一年間で170 μ Sv被曝する。

Po-210はU-238系列に属する放射性物質で魚介類に多く含まれ、日本人は特に多く摂取しており、60kgの人間の体の中にはおよそ20Bq存在する。カリウム-40が β 線/ γ 線を放出するのに対して、このPo-210は α 線を放出するため、内部被曝量は年間で800 μ Svにもなる。



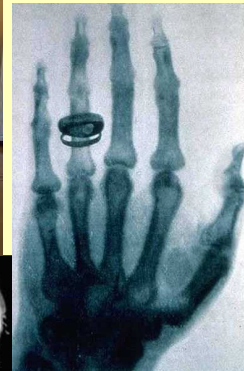
タバコ1本には24mBqのポロニウム-210が含まれており、一日一箱の喫煙で年に100 μ Sv被曝する

内部被曝の実効線量を求める際は、対象となる放射能を摂取した瞬間に成人の場合今後50年間、子供は70歳までに体内に放射能が存在することによって被曝するであろう線量を積算して、いっぺんに被曝した物として線量評価を行う、預託線量という考え方が取り入れられている。

実際に被曝する線量は、放射能の物理的半減期に加え、代謝による排泄で体内の量が減る生物学的半減期も加味して実効線量係数が算出される。

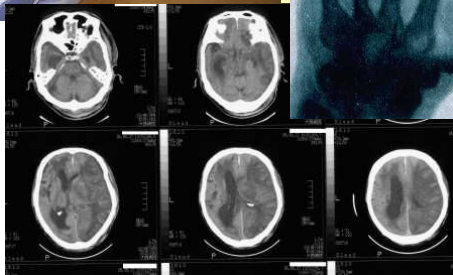
医療での放射線

先進医療により
被曝線量は増える



胸のX線検診で $50 \mu\text{Sv}$
胃のX線検診で $600 \mu\text{Sv}$ 、
CT スキャンでは 数mSv

これらの被曝による健康への影響は、ゼロではない
→ 検査をせずに命を失うリスクよりもずっと小さい
→ トータルでメリットがある
★ 100mSv でガンによる死亡率 0.5% 上昇



より積極的に、放射線による治療も行われている。
いかに患部に集中的に放射線を当てるかがポイント

基本は正常細胞と癌細胞の放射線感受性の違いを利用

- ・ 高精度放射線治療：多方向からの照射や
画像誘導でのピンポイントの照射
- ・ 甲状腺ガン：3.7~7.4GBqの大量のヨウ素-131を投与

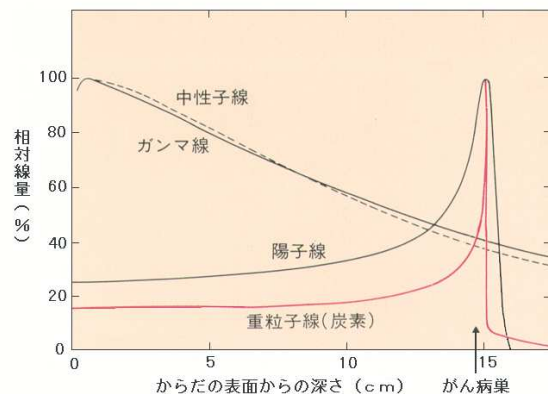
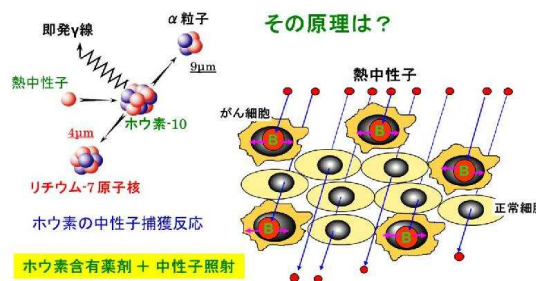


図2 重粒子線照射治療の利点(2)

この図では深さ約15cmのところにおいて最大線量となり、がん病巣に大きな線量を与えることができる。深さは調節できる。

[出典]放射線医学総合研究所：重粒子線がん治療装置HIMAC、1995年8月

ホウ素中性子捕捉療法
Boron Neutron Capture Therapy (BNCT)



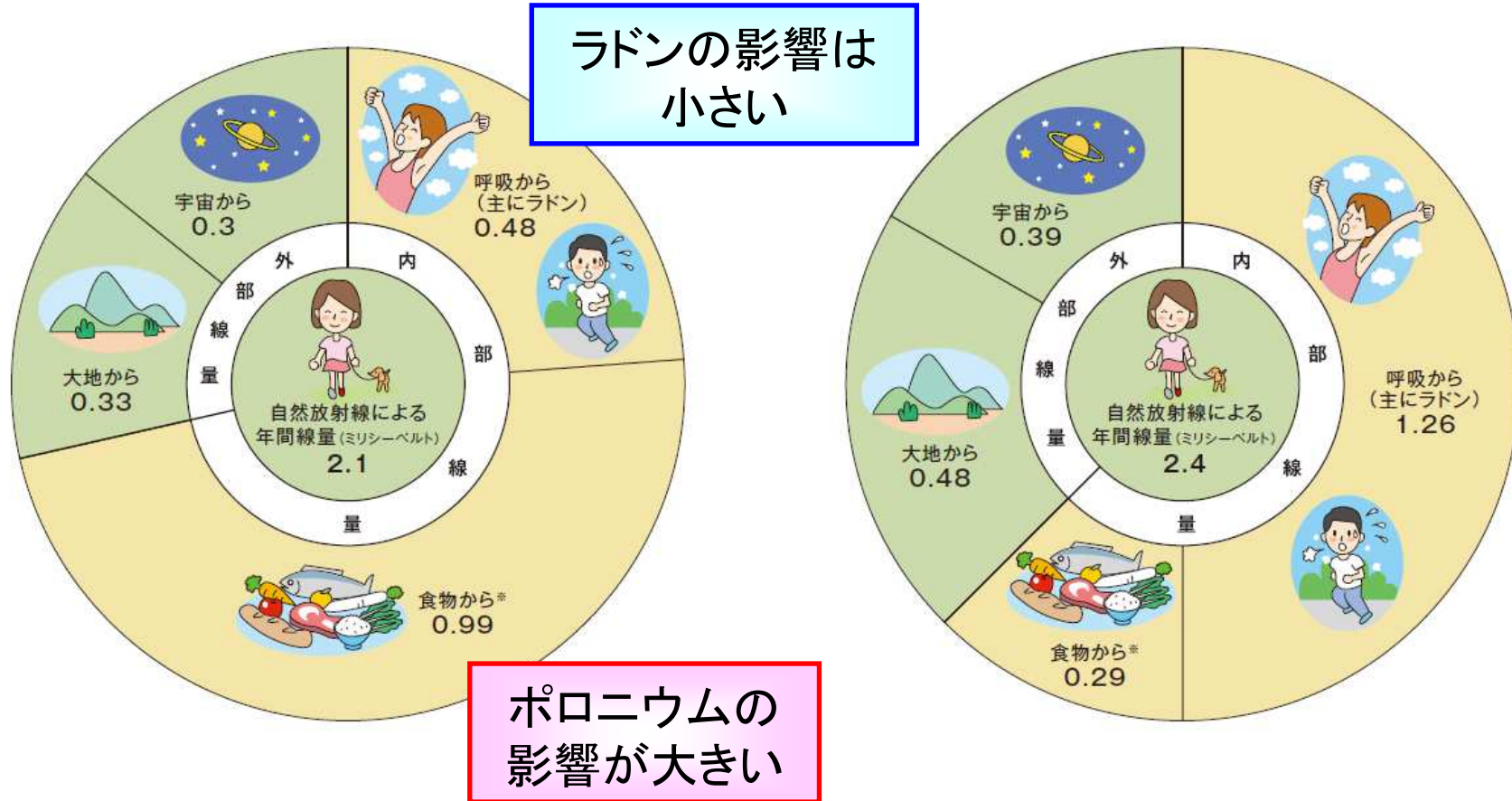
- ・ 体の奥の手術が難しいガン：
加速器からの粒子線の
ブラッグピークを利用
- ・ 広範囲に分散したガン：
ホウ素を取込ませた癌細胞に
中性子をあてる

熊取町ウェブサイトより

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