



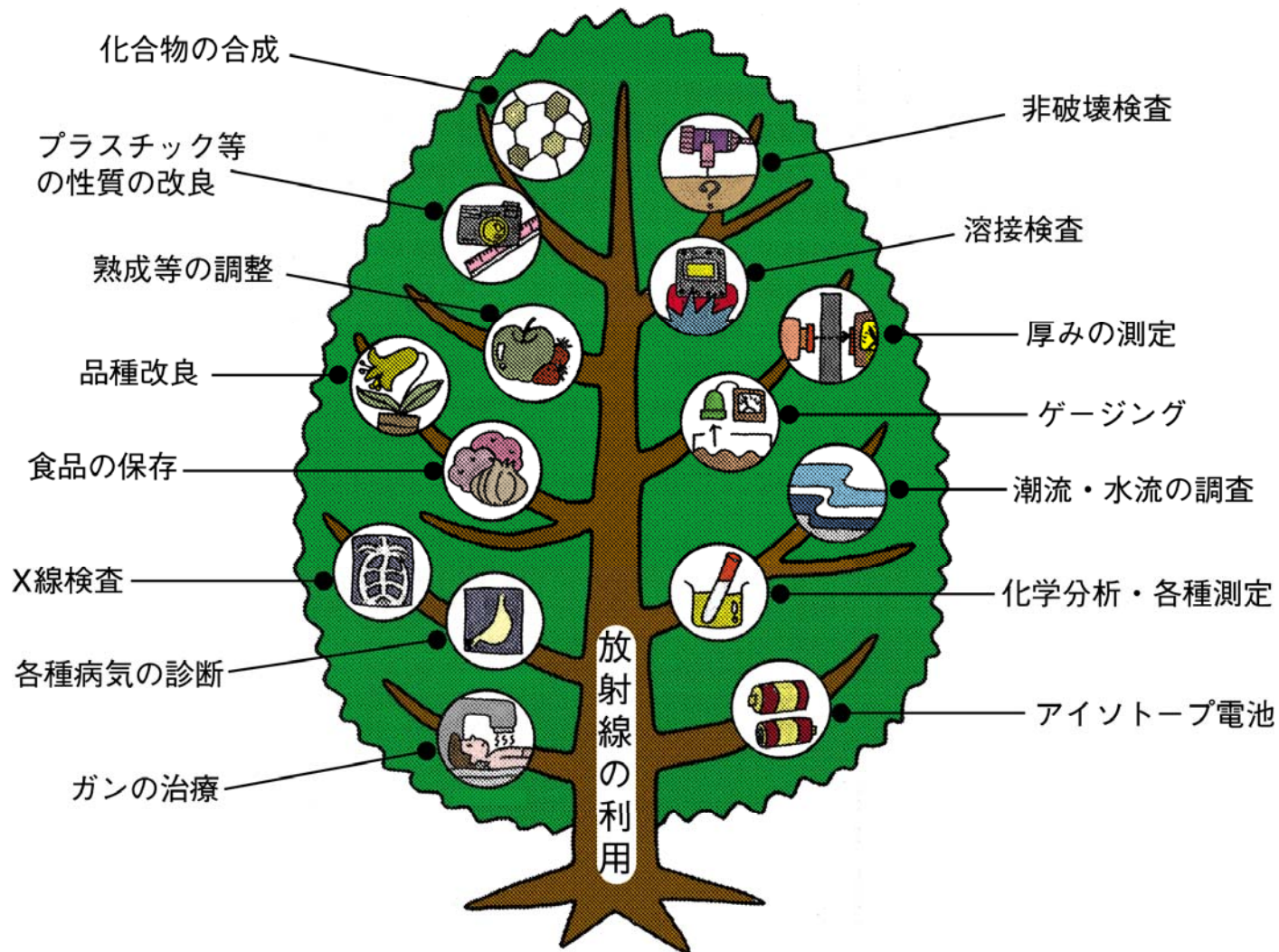
放射性崩壊と放射能



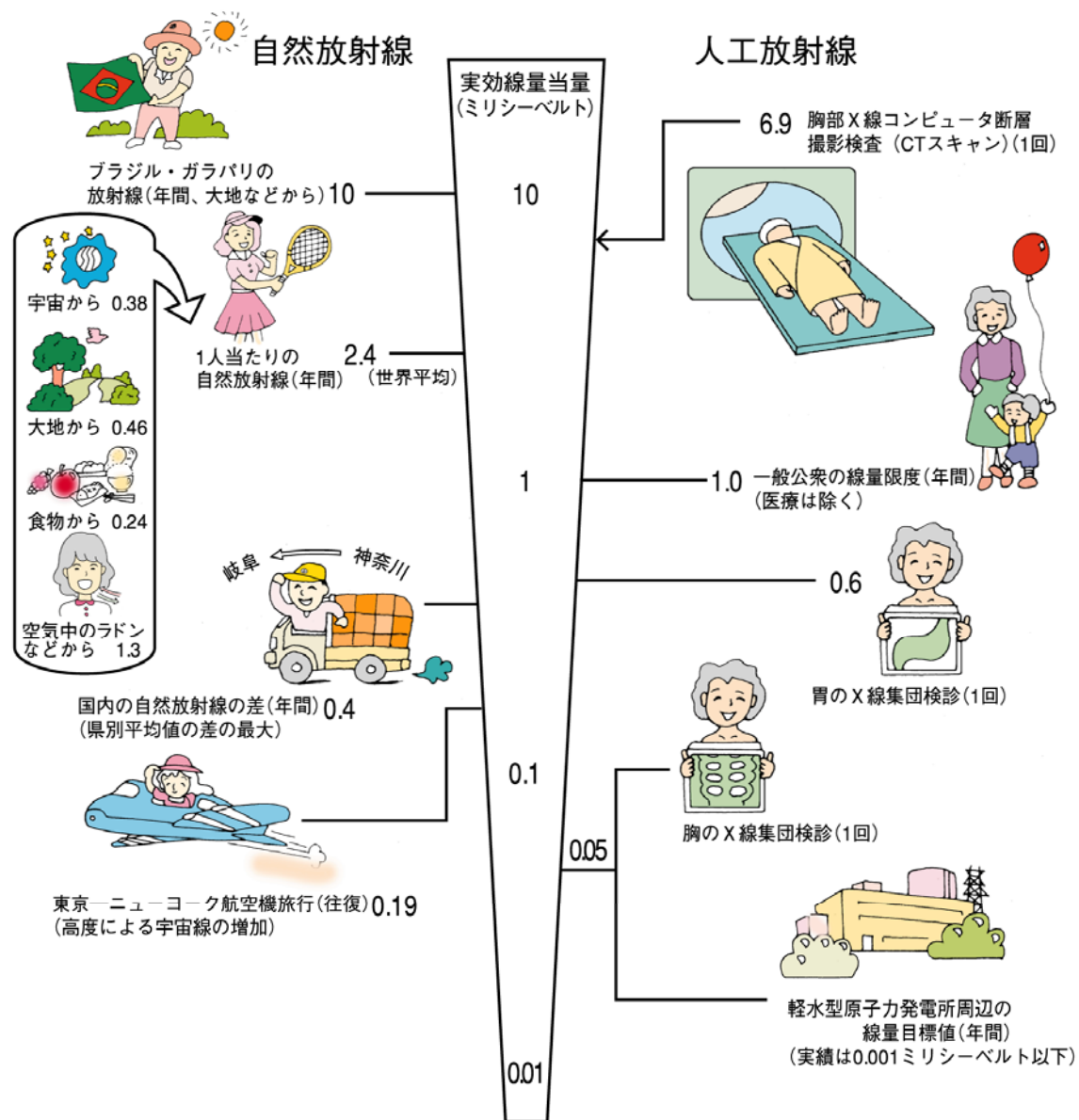
平成22年度年間予定表

- 第1週 原子核と結合エネルギー、質量欠損
- 第2週 放射性崩壊と放射能
- 第3週 中性子と原子核の反応
- 第4週 反応断面積
- 第5週 臨界状態と中性子経済、6因子公式
- 第6週 中性子空間ふるまい
- 第7週 中性子拡散方程式
- 第8週 中性子の減速
- 第9週 原子炉の臨界、臨界方程式と原子炉方程式
- 第10週 原子炉の動特性と制御、反応度、妨害作用
- 第11週 期末試験

放射線のいろいろな利用



日常生活と放射線





レントゲンによるX線の発見

- 1895年末ドイツのヴュルツブルグ(Wuerzburg)大学の物理学教授兼学長レントゲン(Wilhelm Conrad Roentgen、独、1845～1923)は陰極線管(クルックス管)の実験を行っていた。
- 陰極線管を黒いボール紙で覆い糊付けして、管内で発する蛍光が外へ漏れないようにし、また部屋のカーテンを閉めて室内を真暗にし、陰極線を発生させると、意外なことが観測された。テーブルの上に置いてある蛍光板(白金シアン化バリウム塗布)が暗闇の中で光り始めたのである。
- 蛍光板を管から遠ざけても発光はつづいていた。蛍光板は管から1m以上離れたときでも相変わらず光っていた。未だ知られていない放射線が陰極線管から発し遠くの蛍光板を光らせているにちがいないとレントゲンは考えた。この放射線は未知の線という意味でX線と呼ばれるようになった。

Versuchsapparat Röntgens
aus dem Jahre 1895

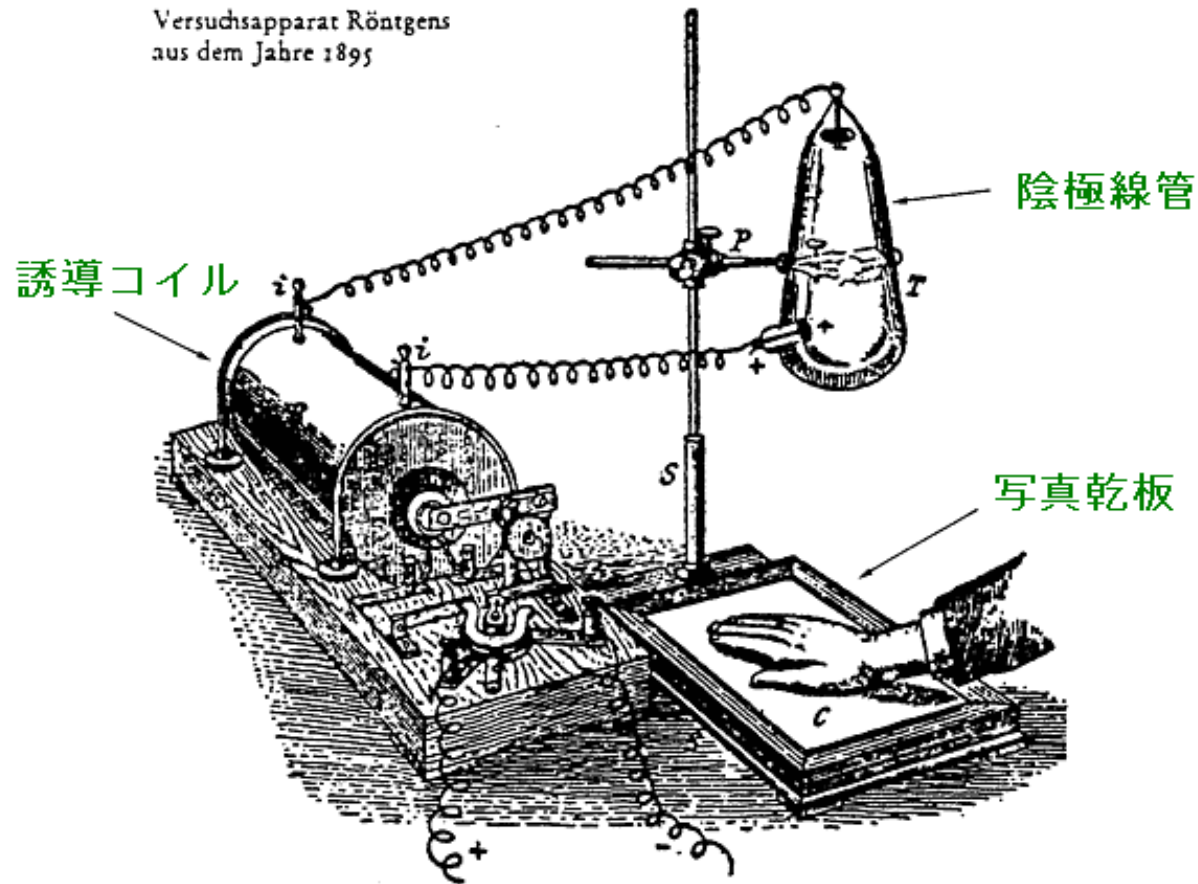


図1 レントゲンの装置の概念図

[出典]W. Robert Nitske、山崎政男（訳）：X線の発見者レントゲンの生涯、考古堂(1989年)



← 指輪が
写っている

図 2 レントゲンがX線で撮影した写真
(1895年12月22日撮影、
ミュンヘン、ドイツ博物館)

[出典] エミリオ・セグレ、久保亮五、矢崎裕二(訳)：
X線からクオークまで、みすず書房(1982年)



ポアンカレの予測

- レントゲンの報告は、当時フランスの指導的な学者であったポアンカレによって1896年の1月、パリの学士院に紹介された。
- 当時の学士院記事には「強い蛍光を発する物質は、光線と共にX線も放出している可能性がある。」というポアンカレの予測が残されている。



ベクレルによる放射線の発見

- 太陽光などの刺激によって蛍光や燐光を発する物質は数多く知られていた。パリの科学博物館の物理学教授であったベクレル(Antoine Henri Becquerel、佛、1852～1908)は、これを確認しようと思い立った。
- いろいろな物質を写真乾板の上に置いて実験してみると、蛍光を発する性質や化学形とは無関係に、ウランを含んだ物質であればすべて乾板を黒化させることが判明した。特に金属ウランの場合に黒化度は大きかった。
- ウランからはX線に似た感光作用を持つ放射線が出ていると考えられた。この放射線はしばらくの間、ベクレル線と呼ばれていた。



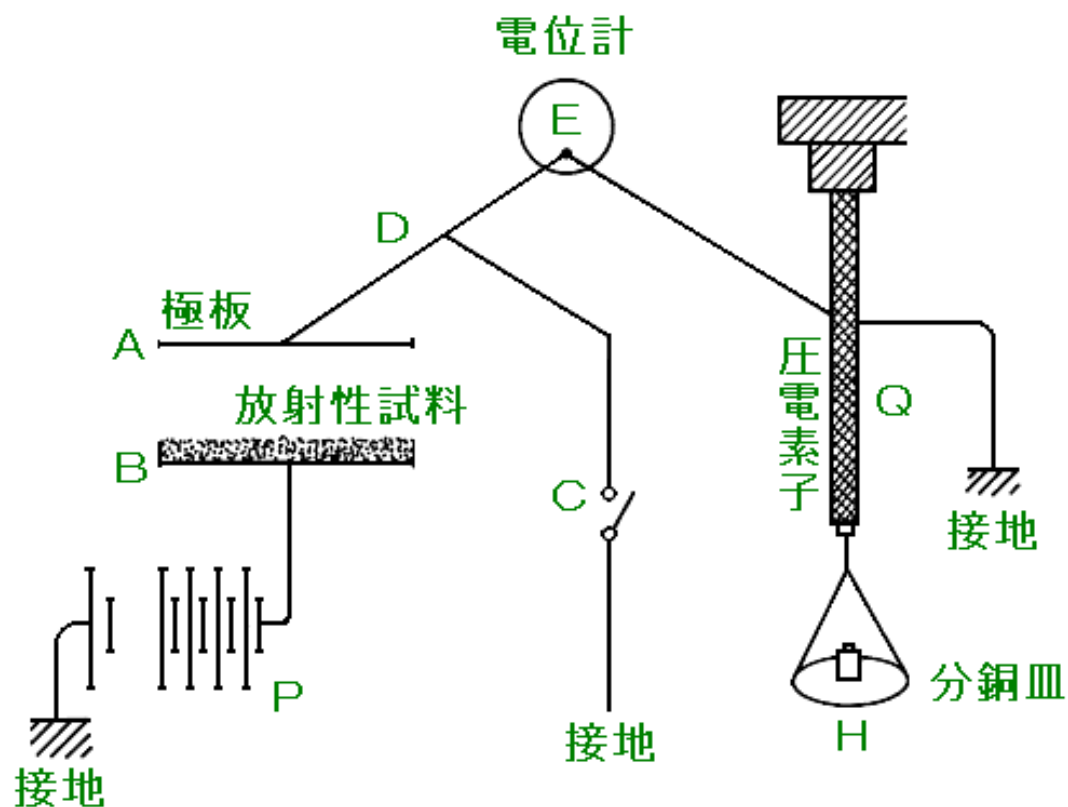
キュリー夫妻の研究

- ピエール(Pierre Curie、佛、1859～1906)と結婚し、研究者としてスタートしようとしていたキュリー夫人(Marie Sklodowska Curie、ポーランド、佛、1867～1934)は、学位取得のテーマとしてベクレル線の研究を始めた。
- その結果、二種類のウラン鉱、ピッチブレンド(酸化ウラン)とシャルコリット(銅とウラニルの燐酸塩)はその中に含有するウランの量からは説明できない大きな放射能を示した。
- シャルコリットを手持ちの材料で合成して測定したが、放射能はウランの含有量の分だけしか存在しなかった。この事実は1898年4月、パリの科学アカデミーに報告された。キュリー夫人は、天然のウラン鉱石には放射能を持った未知の元素が微量に混入しており、それが鉱石の放射能を高くしているのだと考え、未知の放射性元素の探求を始めた。



キュリー夫妻の研究

- マリー・キュリー (Marie Curie) とピエール・キュリー (Pierre Curie) 夫妻は、ウラン線に関するベクレルの論文に興味をもち、ウラン線の研究を始めた。
- 彼等は従来用いられていた写真乾板よりも正確な放射線強度測定を行うため、電離箱、キュリー式電気計、ピエゾ電気計などを用いた
- あまり知られていないことであるが、ピエール・キュリーはピエゾ電気現象の発見者であり、微弱電流測定に用いる水晶板ピエゾ電気計を発明している。
- これにより 10×10^{-11} アンペアオーダーの電流測定が可能となった。



放射性試料によって極板A B間に電離電流が生ずる。一方、分銅皿Hに乗せられた錘の重力によって圧電素子Qにも電流が生じる。錘の調節によって電位計の針が振れないようにすれば、電離電流の値が精度よく求まる。

図3 ラジウムの発見に役立ったピエールキュリーの考案した微弱電流計

[出典] 物理学史研究刊行会 (編) : 放射能、東海大学出版 (1970年)



放射能の発見

- ウラン線の強さはウラン化合物中に含まれるウランの量に比例すること、ウラン線はウラン化合物の温度や圧力等の状態に左右されず、絶えず自発的に放射されていることが確認された。
- また、ウラン線以外の化合物についても調べ、トリウム化合物もウラン化合物と同様の放射線を出すことを発見し、マリーは、このような放射線を出す性質を「放射能」と名付けた。
- 種々の化合物の持つ放射能を調査した結果、天然銅ウラン鉱が純粋銅ウラン鉱よりもずっと強い放射能を持つことを見つけた。
- このことから、ウラン化合物がウラン以外の放射性物質を含んでいるのではないかと考え、ピッチブレンド(瀝青ウラン鉱)という鉱物が強い放射能を持つことを突き止めた。



ポロニウムの発見

- 大量のピッチブレンド鉱石（瀝青ウラン鉱）から、高放射能の成分が濃縮された。
- 未知の放射性元素はビスマスに似た挙動を示し、硫化ビスマスと放射性硫化物の混合物として取出された。
- 発見された未知の放射性元素の一つは、1898年7月、夫妻連名の報告によって科学アカデミーに提出された。
- この報告の中で、元素名はキュリー夫人の生まれた国の名ポーランドに因んで、ポロニウムと名付けるよう提案されている。



新元素ラジウムの予測

- その後もピッチブレンドの分析を進めた2人は、ポロニウムの分析の際にバリウム族の中にも強い放射能があることを見出した。
- ピッチブレンドの中には、その中に含まれているウランやポロニウムよりも放射能の強い物質があると考えた2人は、同じく1989年Ba(バリウム)に性質が似た放射性物質があると発表した。
- この新元素は[放射するもの]という意味の、「Ra;ラジウム」と命名された。
- しかしこの時点では未だ純粹のラジウムは抽出されておらず、この発表に賛成しない科学者もいた。



ラジウムの抽出

- キュリー夫妻は、次の仕事として、純粋なラジウムを抽出することに取り組んだ。
- 化学反応ではバリウムと同じ挙動をするが、水、水とアルコールの混合液、塩酸溶液中での塩化物の溶解度の差を利用して、この未知なる放射能成分が分別結晶法により分離された。
- ラジウム抽出作業は多くの困難を伴った。裕福でない彼等は、原鉱はオーストリア政府から譲り受け、物理化学学校から借りた物置を実験室にして、夏の暑さと冬の寒さに耐えながら作業を続け、4年後の1902年3月、ついに純粋ラジウム塩を抽出に成功した。
- 数十トンもの原鉱から得られたラジウムはたった0.1 グラムの白い粉末であったという。



ラジウムの発見

- このようにしてもう一つの放射性新元素ラジウムが発見された。この発見は1898年9月、キュリー夫妻と同僚のペモンとの共同研究として発表された。
- これらの業績により、マリーはノーベル物理学賞(1903年)及びノーベル化学賞(1911年)を、ピエール(1906年に事故死)はノーベル物理学賞(1903年)を授賞している。
- マリー・キュリーはまた、古典化学的な手法を用いてRaの質量数を求め、「225 (現在では226.03とされている)」という値を得ている。
- なお、マリー・キュリーの親友であるアンドレ・ドゥビエルヌ(A. Debierne; ソルボンヌ大学)は1899年に、キュリー夫妻が用いたピッチブレンドの残渣の中に第3の新放射性元素があることを発見し、「アクチニウム」と名付けた。

10 - 11 - 96. Sulfide of Uranium & Radium
Papier noir. Curie & Curie
Expérience de la R. de la Curie & Curie
Bismuth & Radium



図1 アンリ・ベクレルとウラン化合物に感光した乾板

[出典] 日本原子力学会 (編・刊) : 原子力がひらく世紀、1998年3月、p4



図2 研究室でのキュリー夫妻

[出典] ワインバーグ (本間三郎訳) : 電子と原子核の発見、日本経済新聞 (1986)



電子の発見

- J. J. トムソン(Joseph John Thomson)は、ケンブリッジ大学キャベンディッシュ研究所において陰極線の実験を行い、電気の運び手であり全ての物質の基本的構成要素の1つである電子を発見した(1897年)。



α 線、 β 線、 γ 線の発見

- 1898年、ラザフォードは、U(ウラン)やTh(トリウム)などの天然の放射性物質から出ている放射線の物質による吸収の測定から、UやThから放出される放射線には性質の異なる少なくとも2種類のものがあり、1つは電離能力が非常に大きく、そのため物質に吸収されやすく、薄い紙でも止ってしまうが、もう1つは、これよりも電離能力が小さく、透過力が大きいことを明らかにした。
- ギリシャ語のアルファベットの最初の2文字を用いて、前者を α 線、後者を β 線と命名した。この他に β 線よりもさらに透過力が大きい放射線も存在することが分り、それを γ 線と名付けた。



α 線の正体

- α 線を電気や磁場で曲げることは、電子の場合よりはるかに困難であった。しかし、ラザフォード(当時マギル大学)はこの実験に成功し(1903年)、 α 線の質量／電荷比を求める端緒を開いた。
- 測定精度を上げる努力を続けた結果、1906年にこの比が水素イオンの値の約2倍であることが分った。原子量が2の元素は存在しないから、水素に次ぐ軽い元素で、電荷が2、原子量が4のヘリウムイオンと考えれば辻褄が合う。
- こうして α 粒子が正の電荷を持つヘリウム原子核であることが分った。



β 線の正体

- ベクレル(Antoine Henri Becquerel)は、「ウランによって放出される放射線の一部(ラザフォードによって β 線と呼ばれた放射線)は、磁場によって曲げられ、その方向は陰極線と同じ向きである」と述べた(1899年)。
- ベクレルは、トムソンと同じような方法を使って、 β 線の質量／電荷比を測定し、トムソンの測定した電子の値に近いことを見出した。
- これによって、 β 線が負の電荷を持つ電子であることは明らかとなった。しかしその速度は陰極線の速度よりはるかに速かったのである。



γ 線の正体

- γ 線は、高い透過性をもち、磁場によって容易に曲げられなかった。この放射線はフランスのP. ヴィラルール(Paul Ulrich Villard)が1900年に観測し、ラザフォードが「 γ 線」と名付けた(1903年)。
- ラザフォードは、 γ 線がX線のように波長の短い光であると考えたが、このことは、 γ 線を結晶に当てたときの散乱を観測して、これから γ 線の波長を測定することによって証明された(1914年、ラザフォード及びE. N. ダコスタ・アンドラード)。

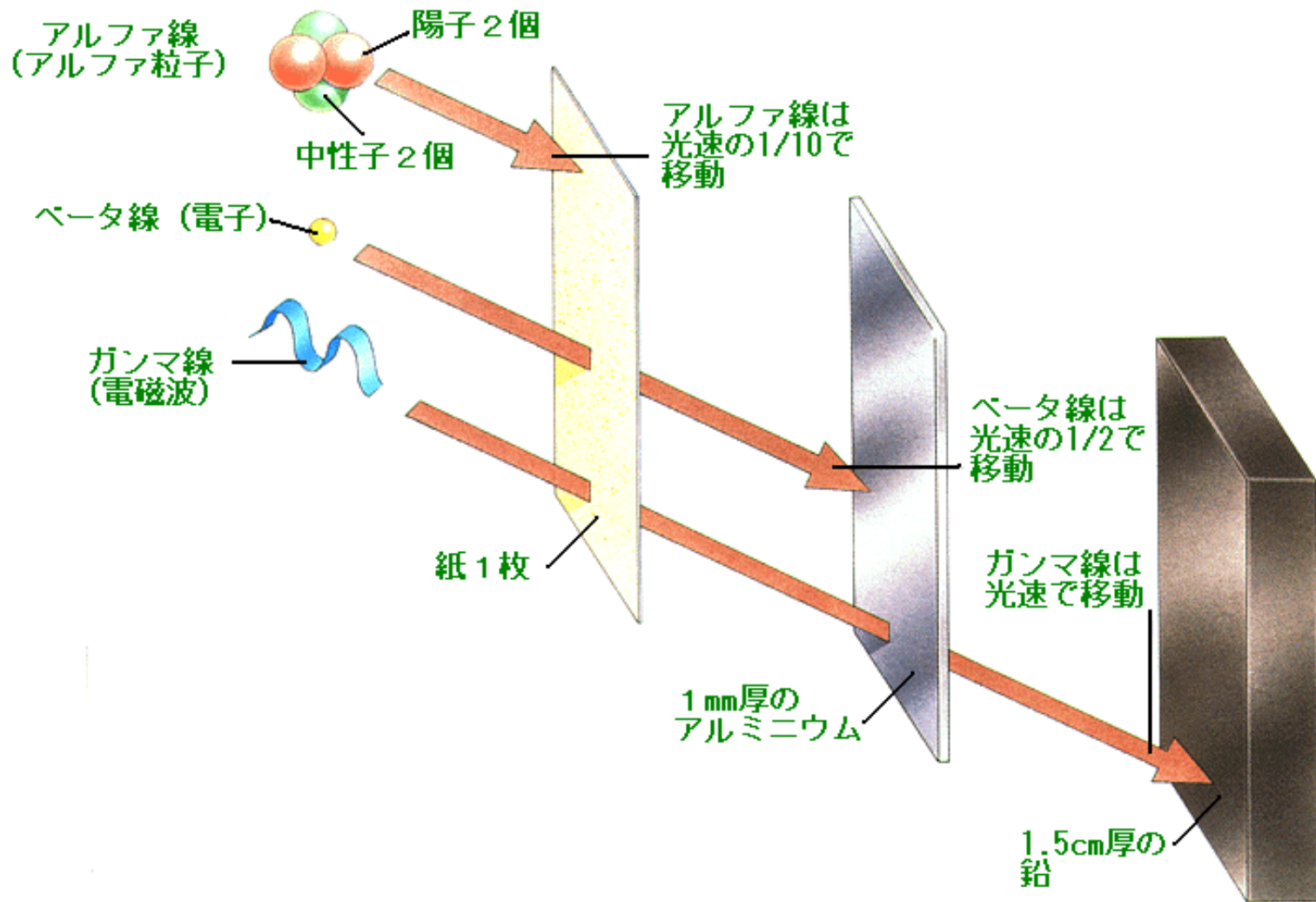


図2 α 線、 β 線、 γ 線の放射線遮へい

[出典] S.McKeever, M. Foote (監・編) : Science Encyclopedia, Dorling Kindersley(1994)

人工的な原子核変換実験

- 1919年ラザフォードは、Po(ポロニウム)からの α 線を窒素ガス中に置いて、 α 線の到達距離の実験をしていた。このとき、Poから放出される α 線の到達距離は1気圧空气中で数cm程度であるにもかかわらず、Po線源から40cm以上の距離に蛍光板スクリーン(硫化亜鉛粉末を塗ったガラス)を置いてもときどきこれが輝いて(シンチレーション)、何らかの粒子が蛍光板に衝突していることが観測された。
- ラザフォードは、シンチレーションを起こさせている粒子が水素の原子核(陽子)であると結論し、実験結果から、窒素-14 ($N-14$)の原子核に α 線($He-4$ の原子核)が衝突し、酸素-17($O-17$)の原子核と陽子に変わり、陽子が蛍光板を光らせることを発見した。これが人工的に原子核を他の原子核に変換した最初の実験であった。
$$^{14}N + \alpha(^4_2He) \rightarrow ^{17}O + ^1_1p$$



サイクロトロン の 考案

- メンデレエフ(ロシア)が最初の周期律表を発表したのは1869年のことであった。それまでに発見されていた元素も、それ以後に発見された元素も、全てこの周期律表の予想どおりであった。したがって新しい元素の発見は周期律表を手がかりにして進められていった。しかしながら、1925年にRe(レニウム)が発見されて以後、周期律表にはまだ4つの空白が残されていたが、Reの発見以後、10年以上も新しい元素は発見されなかった。
- 一方、ラザフォードの弟子たちは原子核の性質について研究を進め、原子核は陽子と中性子からできており、元素の性質は陽子の数で決まることを明らかにし、陽子の数を人工的に変えてやれば新しい元素ができるはずだ、と考えた。
- そのために、粒子に高いエネルギーを与えて原子核を壊すための装置(サイクロトロン)が考案された(1929年)。



最初の人工元素

- 当時既に放射線を出して他の元素に変わってしまう元素もあることが分っており、自然界になければ人工的に作ってみようと考えた科学者がいた。
- イタリアの物理学者エミリオ・セグレは、1936年の夏アメリカのカリフォルニア大学のサイクロトロンで原子番号42のMo(モリブデン)に重陽子(陽子1個と中性子1個からなる水素の原子核)を照射しイタリアに持ち帰った。
- Moの原子核が陽子を1個取り込めば、陽子数43(原子番号43)の未発見元素ができるはずであった。彼は、新しい元素の存在を確認した。原子番号43の放射性元素であった。
- 彼は、人工的に作られた最初の元素であるから、「人工」という意味の「テクネシウム」という名前を新元素につけた。1937年のことであった。



核分裂の発見(1)

- 1938年12月、ドイツのハーンとシュトラッスマン(シュトラスマン)は、U(ウラン)を遅い中性子で衝撃する際の(n、 γ)反応で生ずるかもしれない超ウラン元素(原子番号 >92)を探す目的で、このときに生ずる放射性元素の詳細な研究を行っていた。
- 彼等は、ウランを遅い中性子で衝撃した際に生ずる数多くの放射性同位元素の中から、従来Ra(ラジウム)の同位体と考えられていた半減期86分の元素が、Raではなく原子番号56のBa(バリウム)であることを確認した。
- それまでは、核反応で新しくできる原子核は初めの原子核に近い種類のものに限られると考えられており、**彼等の発見はその考えを完全に覆すものであった。**



核分裂の発見(2)

- マイトナーとフリッシュはこの現象を次のように考えた。UからBaができたとすると、核の電荷が $36e$ 失われなければならないが、これらが多くの α 粒子や陽子の放出により運び去られるよりは、例えば原子番号36(Kr; クリプトン)のような大きな粒子によって一気に運び去られたと考える方がエネルギー的により低くなり妥当である。
- すなわち、Uが中性子の作用でBaとKrのような2つの核に割れたとしなければならない。そしてこのように考えると、質量欠損から考えて約200MeVのエネルギーが放出されるはずである。
- このエネルギーは主に割れた2つの破片の運動エネルギーになると考えられるので、このようなエネルギーをもった2つの破片粒子が放射線測定器で直接観測されるはずである。これらの考えはすべて現実に確認された。

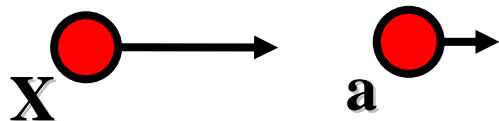


核分裂

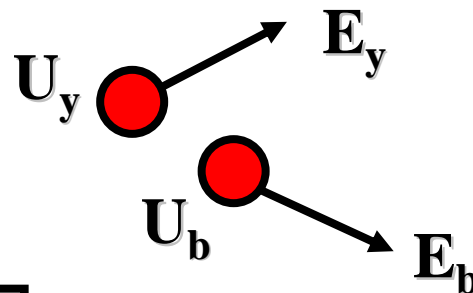
- このように原子核が同じ程度の大きな破片に割れる現象は「核分裂」と名付けられた。
- 割れてできた物質を「核分裂生成物」と呼ぶ。U-235が遅い中性子によって核分裂すると、約40種の核分裂生成物ができ、これらは次々に β 崩壊しながら最終的には安定な核になる。
- その過程で発生する核種は 160種にも達する。これらの内で放射性のものは「人工放射能」である。

核反応後の粒子エネルギー

(反応前)



(反応後)



エネルギー保存式 ;

$$Q = E_Y + E_b$$

運動量保存式 ;

$$P_Y = P_b$$

ここで、

$$\begin{array}{l} P_Y = M_Y U_Y \\ P_b = M_b U_b \end{array} \longrightarrow \begin{array}{l} U_b = \frac{P_b}{M_b} \\ U_Y = \frac{P_Y}{M_Y} \end{array}$$

核反応後の粒子エネルギー

$$E_Y = \frac{1}{2} M_Y U_Y^2 = \frac{1}{2} M_Y \left(\frac{P_Y}{M_Y} \right)^2 = \frac{P_Y^2}{2M_Y} = \frac{P_b^2}{2M_Y}$$

$$E_b = \frac{1}{2} M_b U_b^2 = \frac{1}{2} M_b \left(\frac{P_b}{M_b} \right)^2 = \frac{P_b^2}{2M_b}$$

これより、

$$E_Y \cdot \cancel{2M_Y} = P_b^2 = E_b \cdot \cancel{2M_b} \longrightarrow \boxed{E_Y = \frac{M_b}{M_Y} \cdot E_b}$$

であるから、

$$Q = E_Y + E_b = \frac{M_b}{M_Y} E_b + E_b = \left(\frac{M_b}{M_Y} + 1 \right) E_b = \frac{M_b + M_Y}{M_Y} \cdot E_b$$

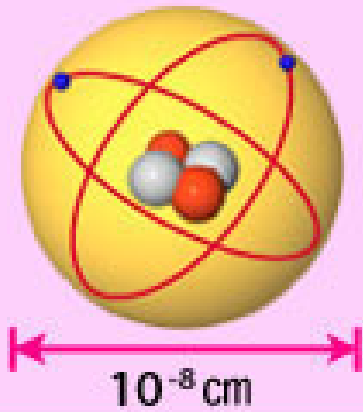
∴

$$E_b = \frac{M_Y}{M_b + M_Y} \cdot Q$$

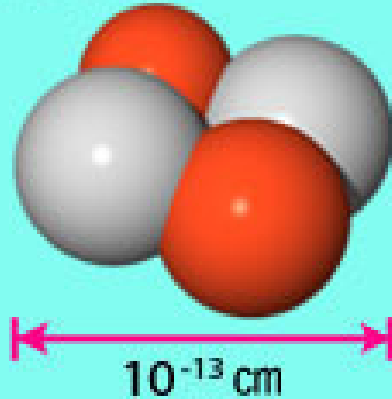
$$E_Y = \frac{M_b}{M_Y} \cdot E_b = \frac{M_b}{M_Y} \times \frac{\cancel{M_Y}}{M_b + M_Y} \cdot Q = \frac{M_b}{M_b + M_Y} \cdot Q$$

原子と原子核の大きさ

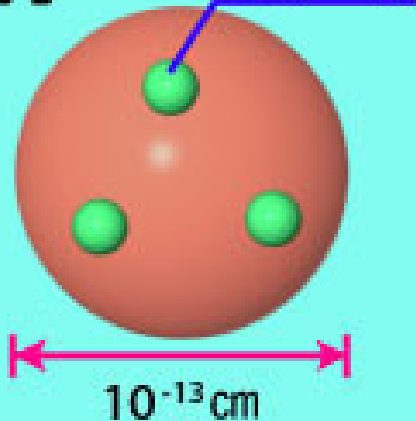
酸素原子



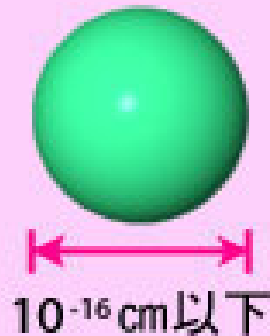
原子核



陽子



クォーク



原子核の半径:

$$R = 1.25 \times 10^{-13} A^{1/3} (\text{cm})$$

$$1(\text{\AA}) = 1.0 \times 10^{-10} (\text{m})$$

$$1(\text{\AA}) = 0.1(\text{nm})$$

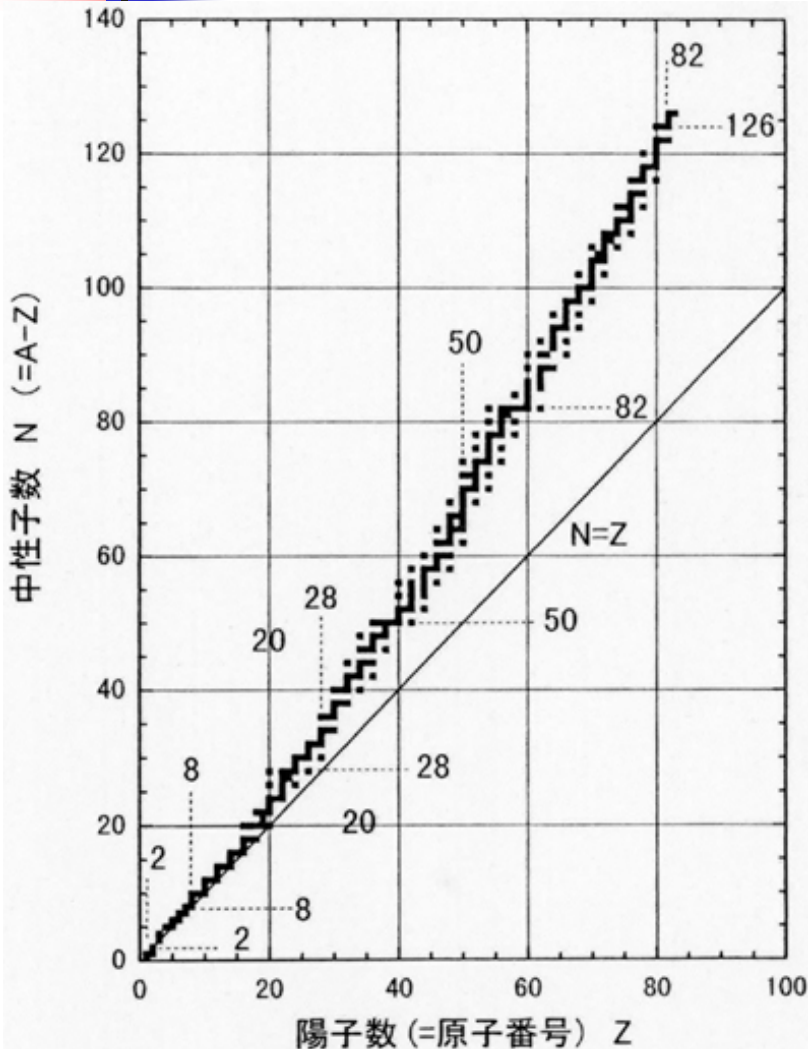
・核力:

核子同士の間約 10^{-12} cm 程度の距離でのみ働く近達性の引力
→ ほぼ核内の核子の数に比例

・クーロン力:

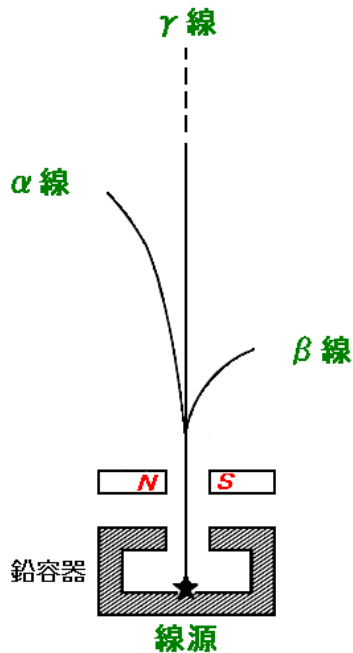
陽子同士の間には斥力として働く力
→ (陽子数: Z)²に比例

原子核の安定性

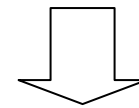


- 原子核内では、陽子と中性子が対である方が安定である性質があるため、質量数の小さい原子核では、基本的にN/Zの比が1に近いものが安定となる。
- 質量数が多くなるとクーロン斥力が強くなるため、それを弱めるために核力を強くする必要があり、中性子数が相対的に増える。
- 質量数が増すほど安定な原子核のN/Zの比が大きくなり、Z=84以上においては安定な原子核は存在しなくなる。

放射性壊変



- ・安定なZとNの組合せの範囲の外にある原子核は不安定
- ・核種によって決まっている一定の確率で放射線を出して、別の原子核へと壊変していく。



α崩壊、β崩壊、γ崩壊

α線はヘリウム (He) の原子核で、電荷 +2e、質量 4u (注1) をもつ。飛程は空気中で数 cm (注2) と短く、磁場の影響を受けにくい(注3)。
β線は電子で、電荷 -e、質量約 0.0005u をもつ。飛程は空気中で数 m オーダー (注2) で、磁場の影響を強く受ける。
γ線は電磁波であり、電荷も質量ももたない。従って磁場の影響は受けない。飛程は空気中で数 10m オーダー (注2) である。

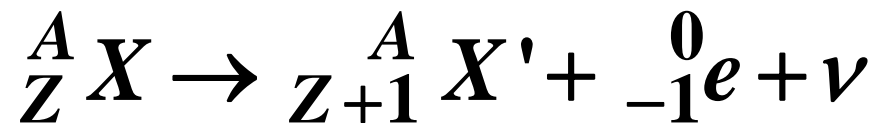
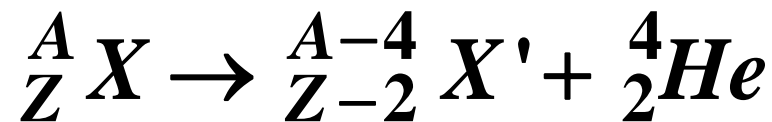
(注1) 陽子の質量を 1u とする。
(注2) 放射線エネルギーによって異なる。
(注3) 運動する荷電粒子は磁場により力を受け、その進行方向を変える (フレミングの左手の法則)。

図1 α線、β線、γ線の性質の概念



α 崩壊、 β 崩壊

- 質量数の大きい核種は α 粒子 (4He の原子核) を放出するか、 β - 粒子 (これは電子そのものである) を放出して核内の中性子を陽子に変えて壊変していく。

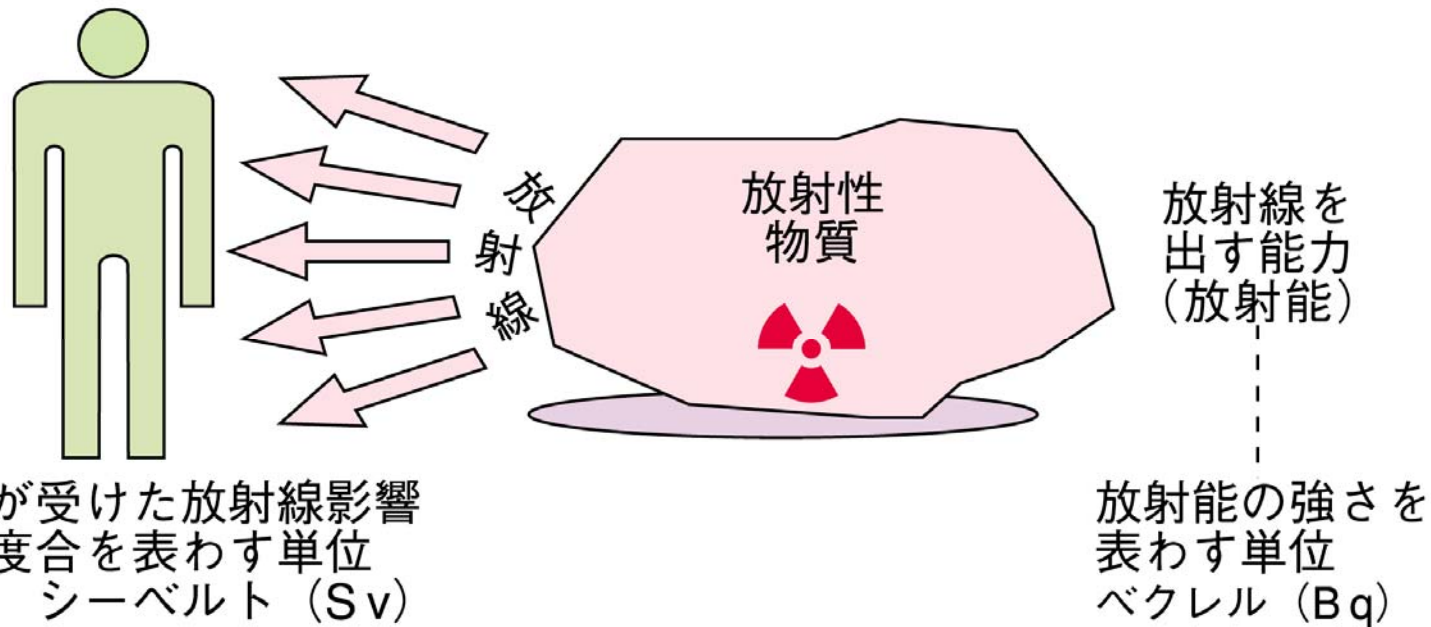
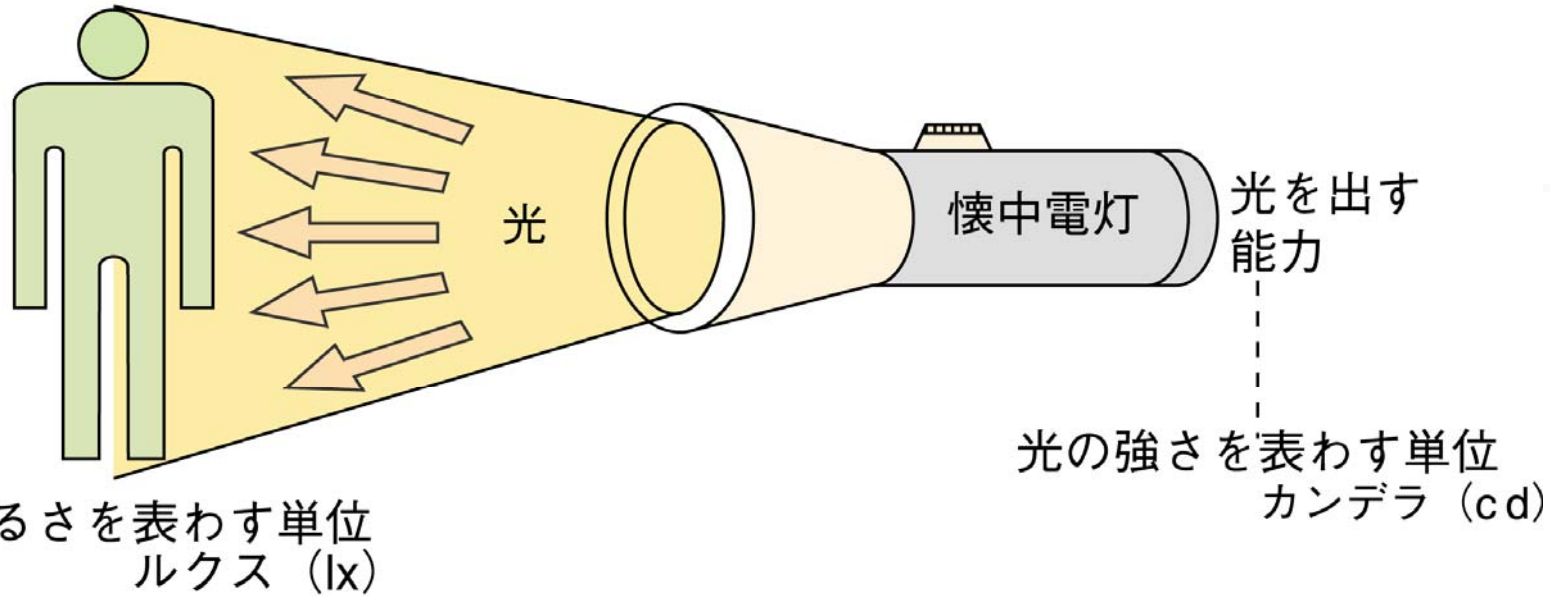




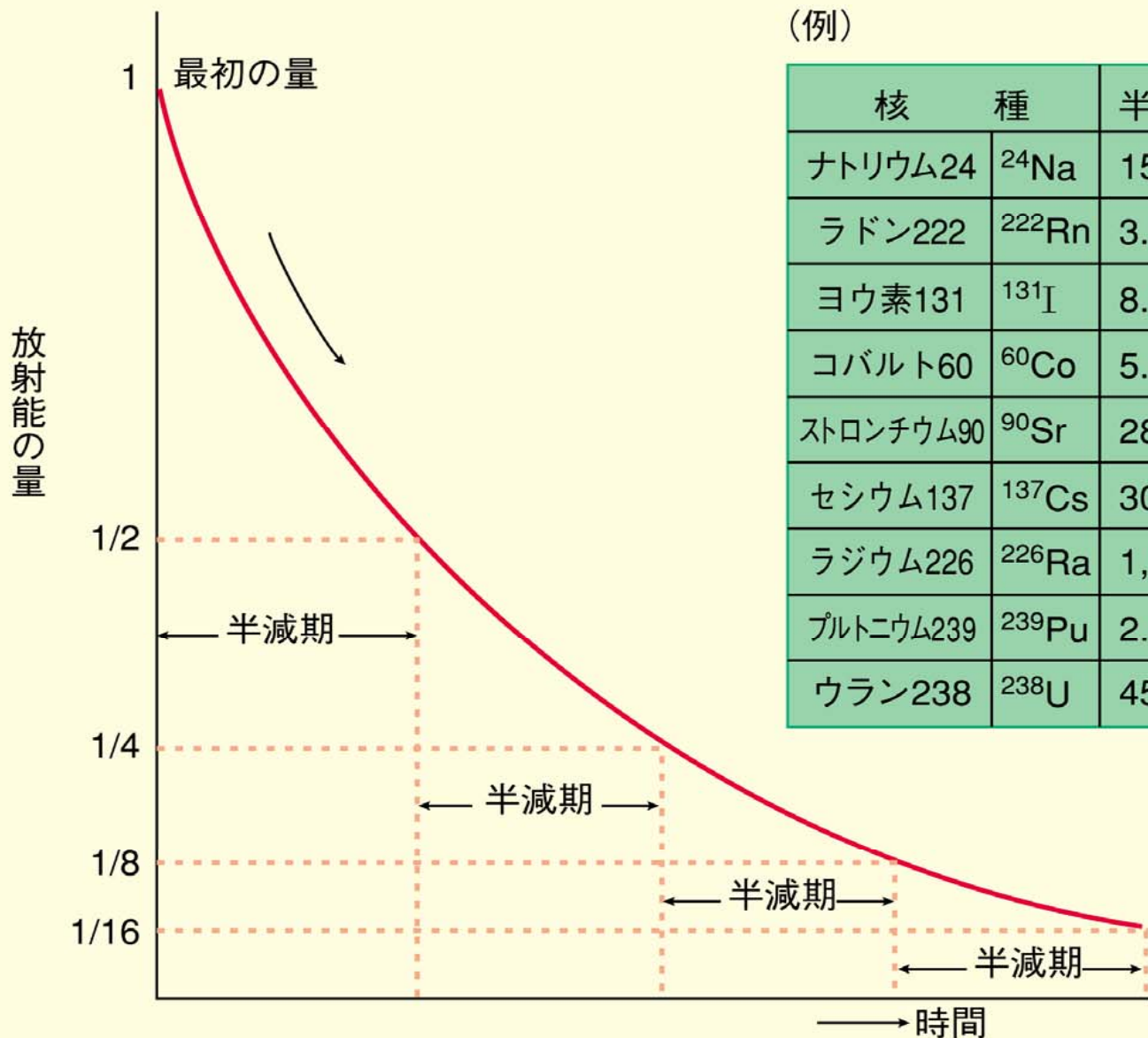
γ 崩壊

- 放射性壊変に伴って生じた核は、その核の一番エネルギーの低い状態(基底状態)にできることは稀で、大抵はエネルギーの高い状態(励起状態)にできる。
- この場合、原子核はそのエネルギーを γ 線の形で放出して基底状態の核になる。この壊変を γ 壊変と呼ぶ。
- γ 壊変の際、放出される γ 線の数は一本の場合もあるが、通常複数の γ 線が放出される。

放射能と放射線



放射能の減り方



(例)

核種	半減期
ナトリウム24 ^{24}Na	15.0時間
ラドン222 ^{222}Rn	3.8日
ヨウ素131 ^{131}I	8.0日
コバルト60 ^{60}Co	5.3年
ストロンチウム90 ^{90}Sr	28.8年
セシウム137 ^{137}Cs	30年
ラジウム226 ^{226}Ra	1,600年
プルトニウム239 ^{239}Pu	2.4万年
ウラン238 ^{238}U	45億年

半減期 $T_{1/2}$

- λ : 壊変定数 (decay constant) \sim 確率
- 原子数が半分になる時間 \Rightarrow 半減期: $T_{1/2}$

$$\frac{dN}{dt} = -\lambda N \quad \longleftrightarrow \quad N = N_0 e^{-\lambda t}$$

$$\downarrow \quad N = \frac{1}{2} N_0$$
$$\frac{1}{2} = e^{-\lambda T_{1/2}}$$

$$\downarrow$$
$$\lambda = 0.6931 / T_{1/2}$$

$$\text{平均寿命: } t_m = \frac{1}{\lambda}$$



放射能

$$A = -\frac{dN}{dt} = \lambda N \quad \text{単位(ベックレル): } Bq(1/s)$$

$$\ln(A) = \ln\left(-\frac{dN}{dt}\right) = \ln(\lambda N_0) - \lambda t$$

1キュリー: $1(Ci) = 3.7 \times 10^{10} Bq \quad (1/s)$

(例)体内放射能: **0.01(μCi)**



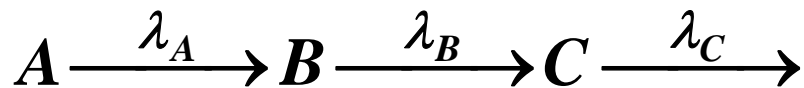
放射線の単位:

- **シーベルト(Sv)**: 放射線防護の目的に用いられている放射線量の単位。種々の放射線に被ばくした際、線量の合計は各放射線の物理的線量(単位はグレイ)にそれぞれの放射線の生物学的な影響の強さに対応する係数を掛けて合計する。ガンマ線に対する係数は1なので $1\text{ Sv} = 1\text{ Gy}$ (1ミリシーベルト[mSv] = 0.001 Sv)となる。
- **グレイ(Gy)**: 電離放射線により1物質に与えられた単位質量当たりのエネルギー量。わかりやすくいえば、放射線の当たった物質の温度がどれだけ上昇したかで測定される量。組織1kgに付き1ジュールのエネルギー。



崩壊系列

- 壊変後の原子核が続けて不安定である場合もある。
- その場合には安定になるまで連続的に放射線を出して壊変していく。





放射性炭素による年代測定

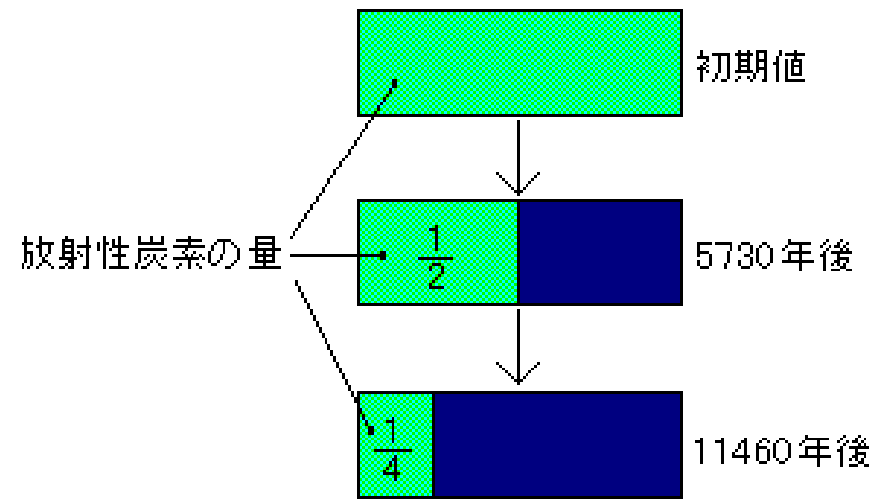
- 1946年、シカゴ大学のリビー教授は、天然における放射性炭素の存在を証明。1949年には半減期 5568 ± 30 年を採用した放射性炭素年代測定法を確立した。
- 現在行われている測定方法としては、 β -線計数法(気体計数法・液体シンチレーション法)、加速器質量分析法(AMS法)がある。

放射性炭素年代測定法の原理

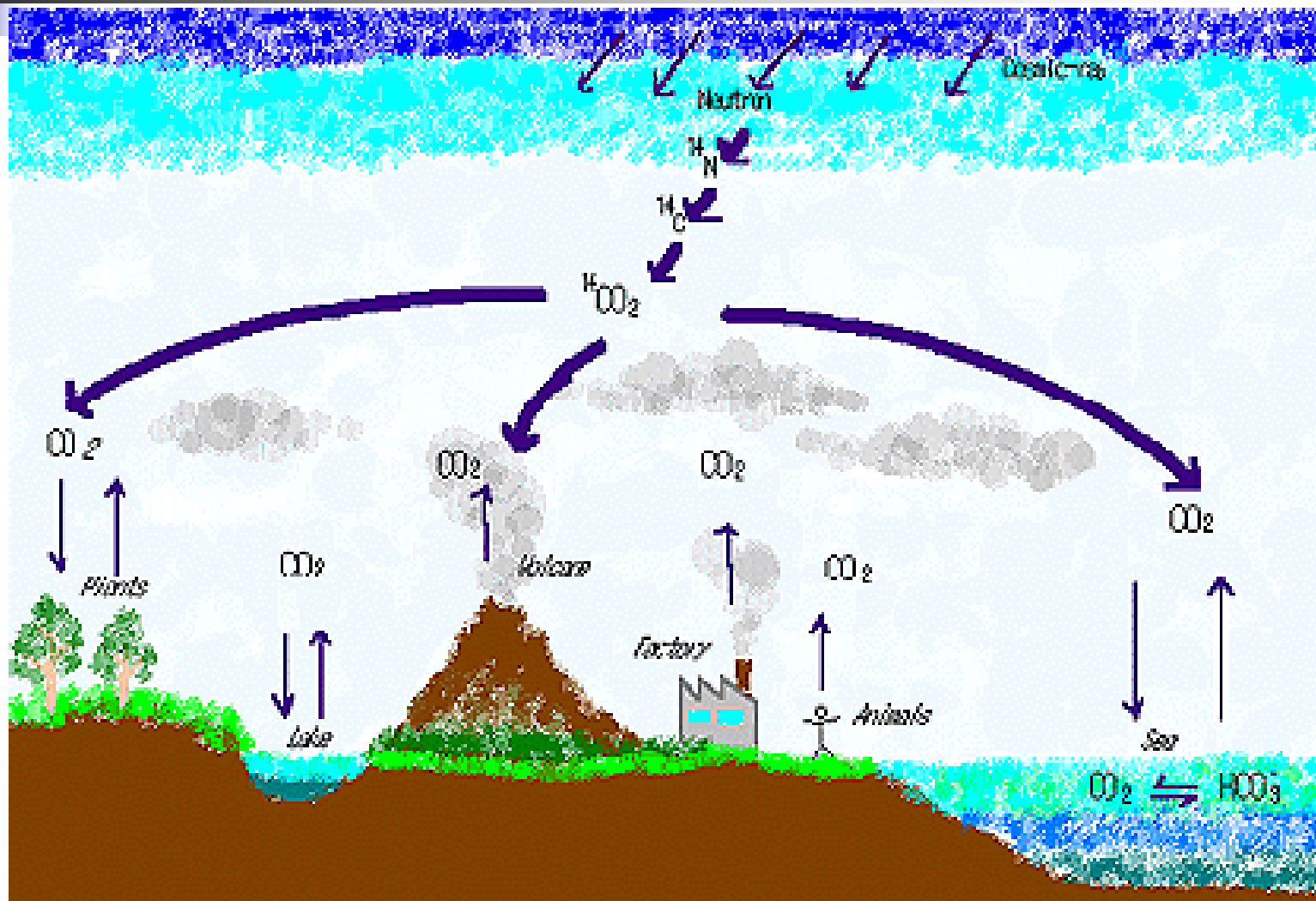
- 天然の炭素には、 ^{12}C ^{13}C ^{14}C の同位体が存在し、そのほとんどが ^{12}C で占められている。その比率は、 $^{12}\text{C} : ^{13}\text{C} : ^{14}\text{C} = 0.99 : 0.01 : 1.2 \times 10^{-12}$ である。
- このうち、 ^{12}C と ^{13}C は安定同位体と呼ばれ、時間の経過に関係なく一定であるが、 ^{14}C は放射性同位体と呼ばれ、半減期5,730年で半減してゆく。
- ある試料にもともと含まれていた炭素14の量が既知であれば、現在の炭素14の量を調べることにより、その試料ができてからの経過時間が分かる。

放射性炭素年代測定法の原理

- 例えば、もともとの量の4分の1しか炭素14が含まれていないのであれば、その試料の年齢は11460年と評価される。
- もともとの炭素14の量が分かれば、
- 現在の大気中の ^{14}C 濃度と有機物中の ^{14}C 濃度を測定、比較することで、その生物が生命活動を止めた年代を求めることができます。



天然の炭素循環図



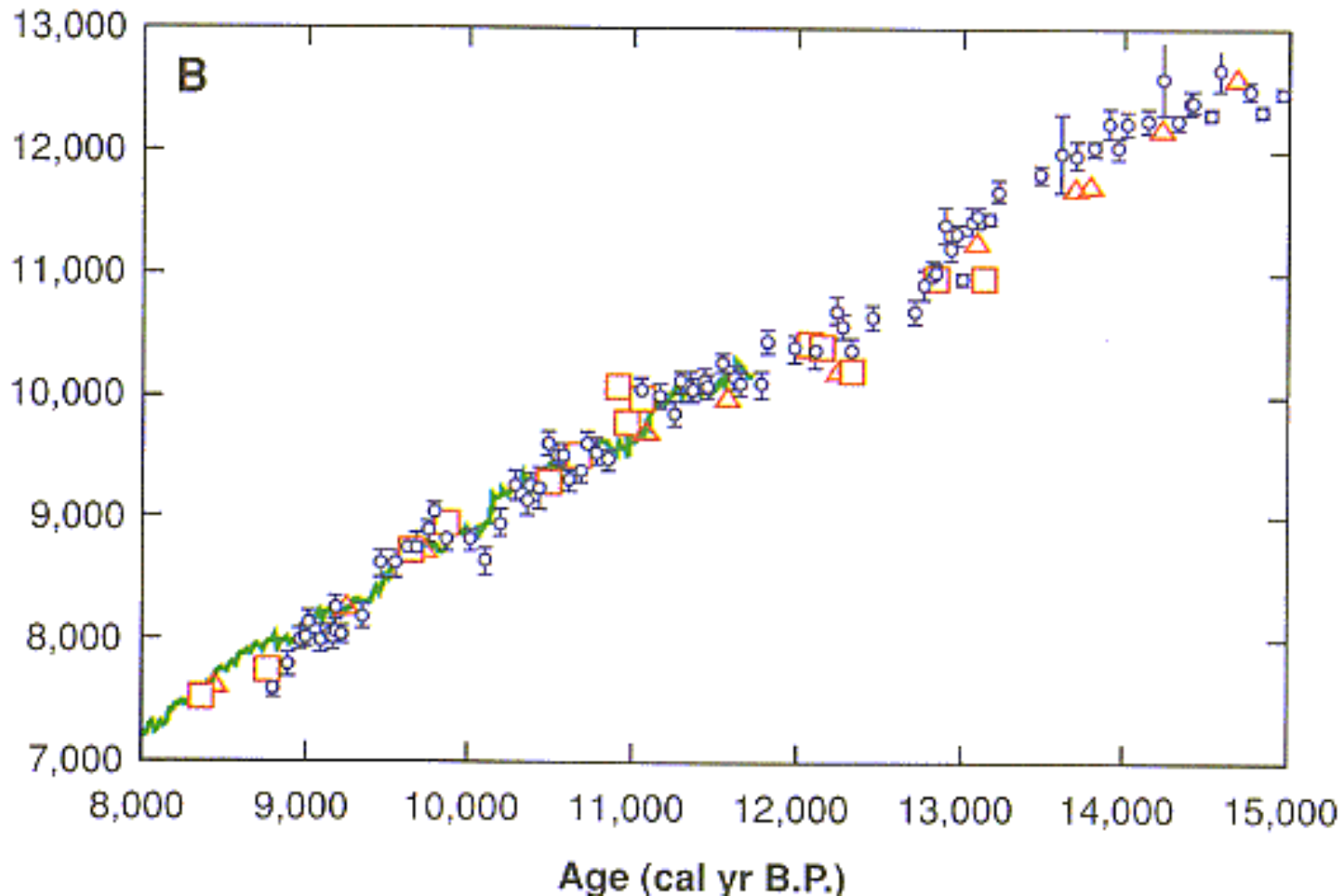


天然の炭素循環

- 天然の ^{14}C は上空の窒素に宇宙線の2次中性子が衝突して作られ、ただちに酸化されて炭酸ガスになり、大気中に一様に分布していきます。故に、 ^{14}C は生成と崩壊の平衡になるところで大気中の炭酸ガス中にほぼ一定の濃度で過去現在を通じて存在していたと考えられています。
- 大気中の炭酸ガスは植物の同化作用(光合成)によって植物体内に有機物として取り込まれ、さらに食物連鎖に関わる動物等の体内の有機物もいずれも大気中の ^{14}C 濃度にほぼ等しいはずですが、その生物が生命活動を止めると外部からの ^{14}C の供給がなくなるので、その生物遺体中の ^{14}C は減少していき

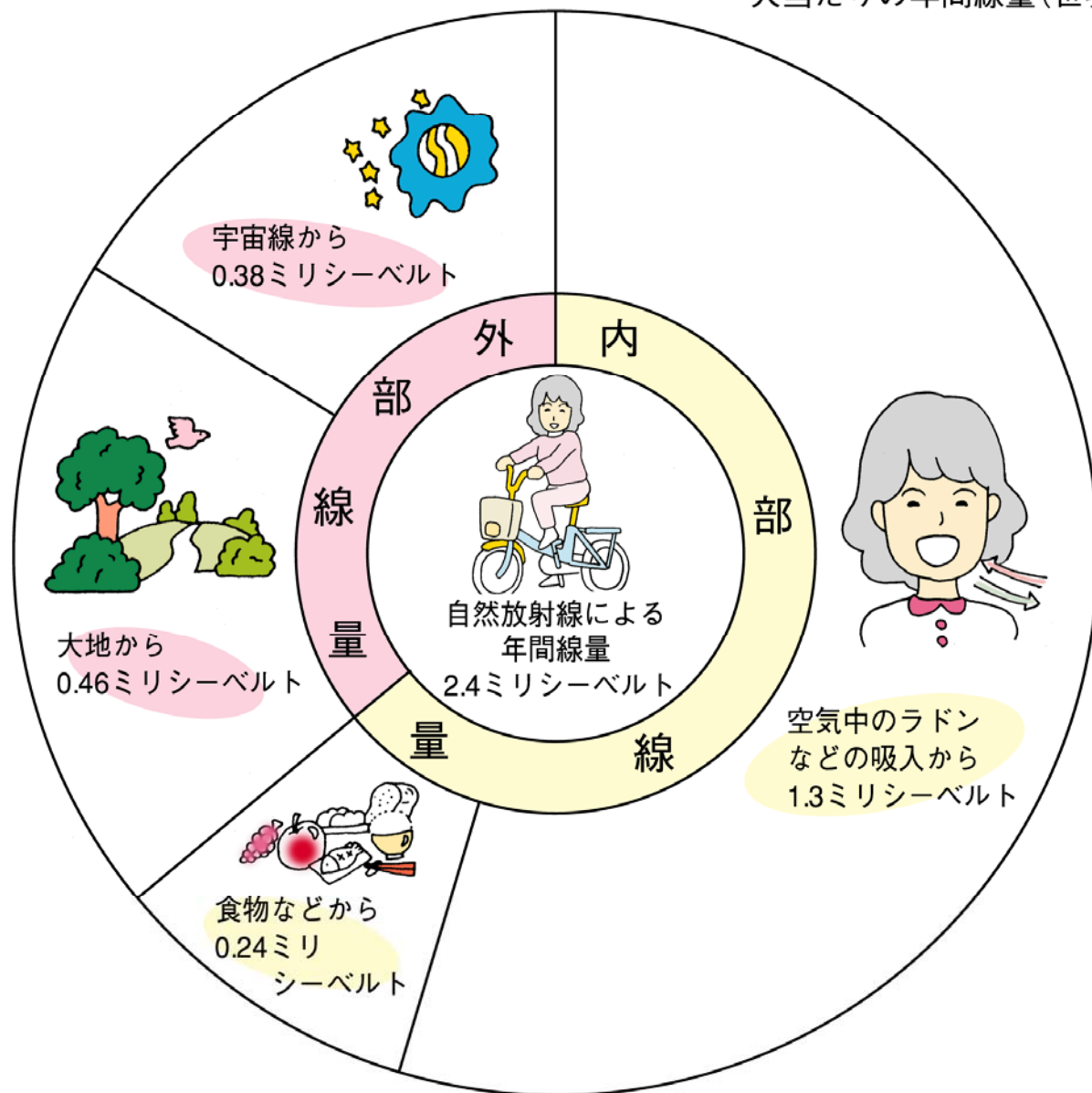
放射性炭素年代と暦年代

■ 水月湖の10000年前近傍の実年代（暦年代）と放射性炭素年代のグラフ。青丸は堆積物による年代測定、緑の線は年輪法、赤のシンボルはサンゴ礁のU-Th法（Kitagawa、1998）



自然放射線から受ける線量

一人当たりの年間線量(世界平均)



体内、食物中の自然放射性物質

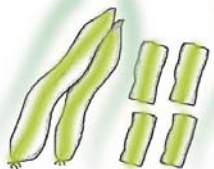
●体内の放射性物質の量

(体重60kgの
日本人の場合)

カリウム40	4,000ベクレル
炭素14	2,500ベクレル
ルビジウム87	500ベクレル
鉛210・ポロニウム210	20ベクレル

●食物中のカリウム40の放射能量(日本)

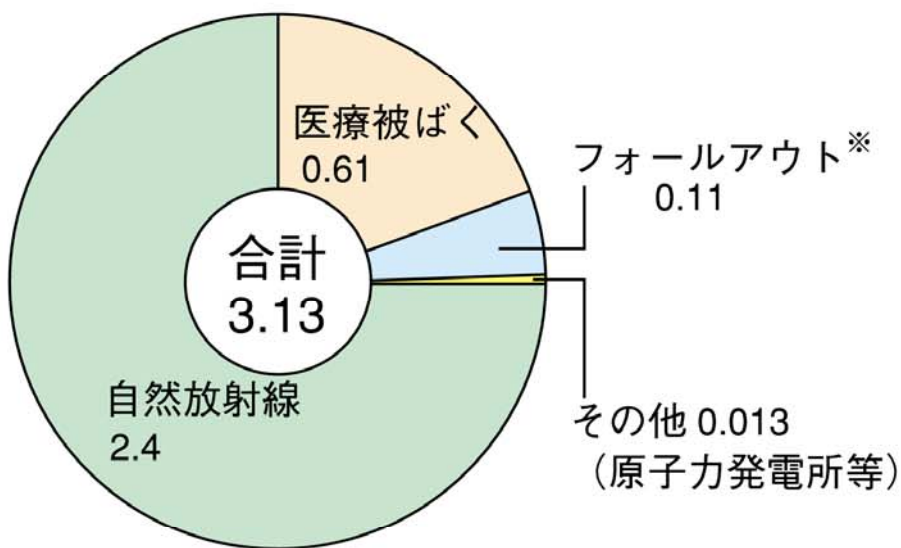
(ベクレル/kg)



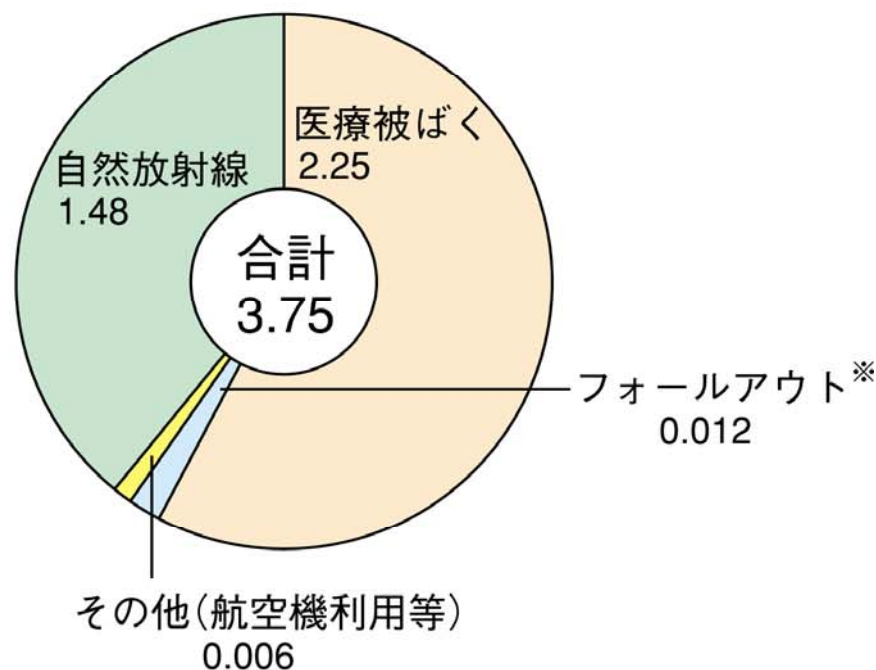
自然および人工放射線源から受ける一人あたりの年間線量

(単位：ミリシーベルト)

世界平均



日本平均

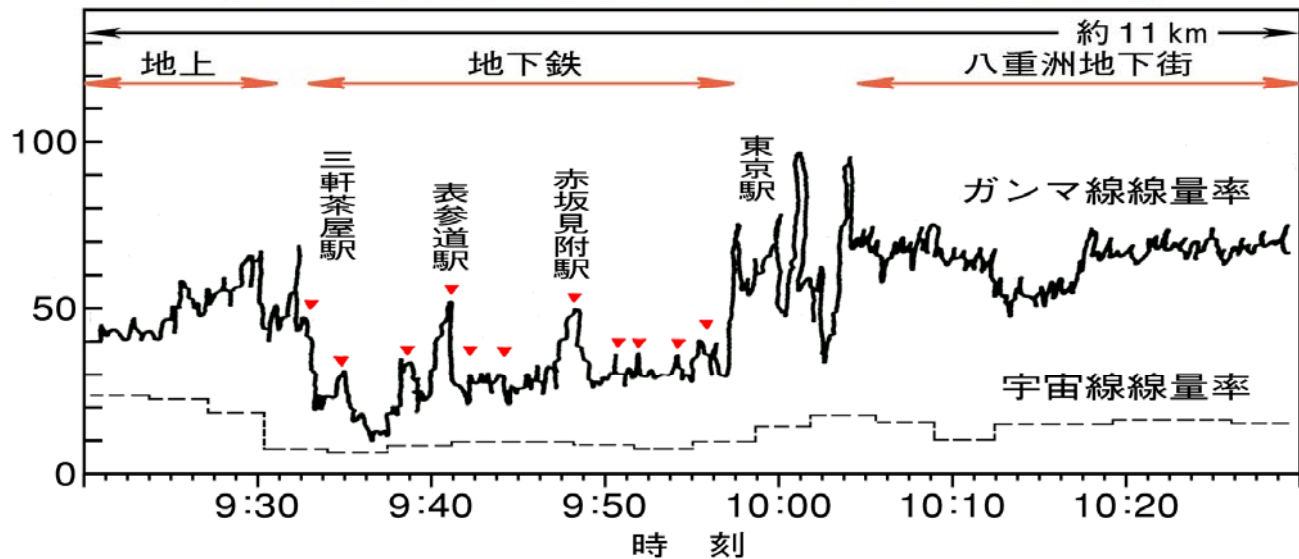


※フォールアウトとは、核実験による放射性降下物

いろいろな場所での自然放射線レベル

世田谷区住宅街から八重洲地下街における線量率分布

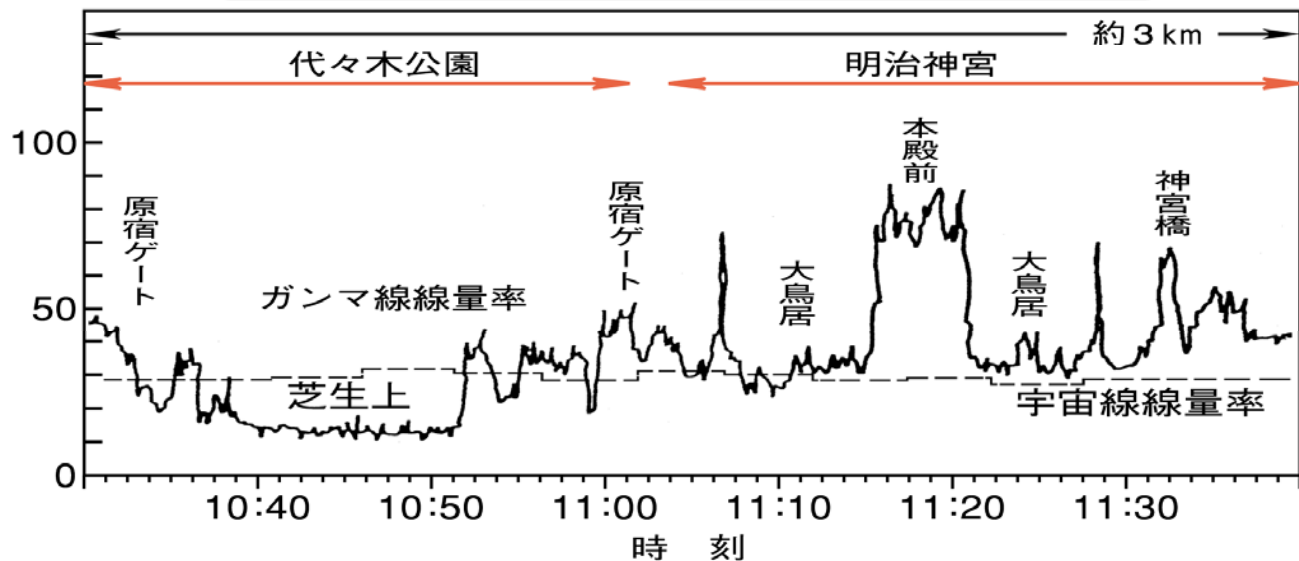
線量率
(ナノグレイ毎時)



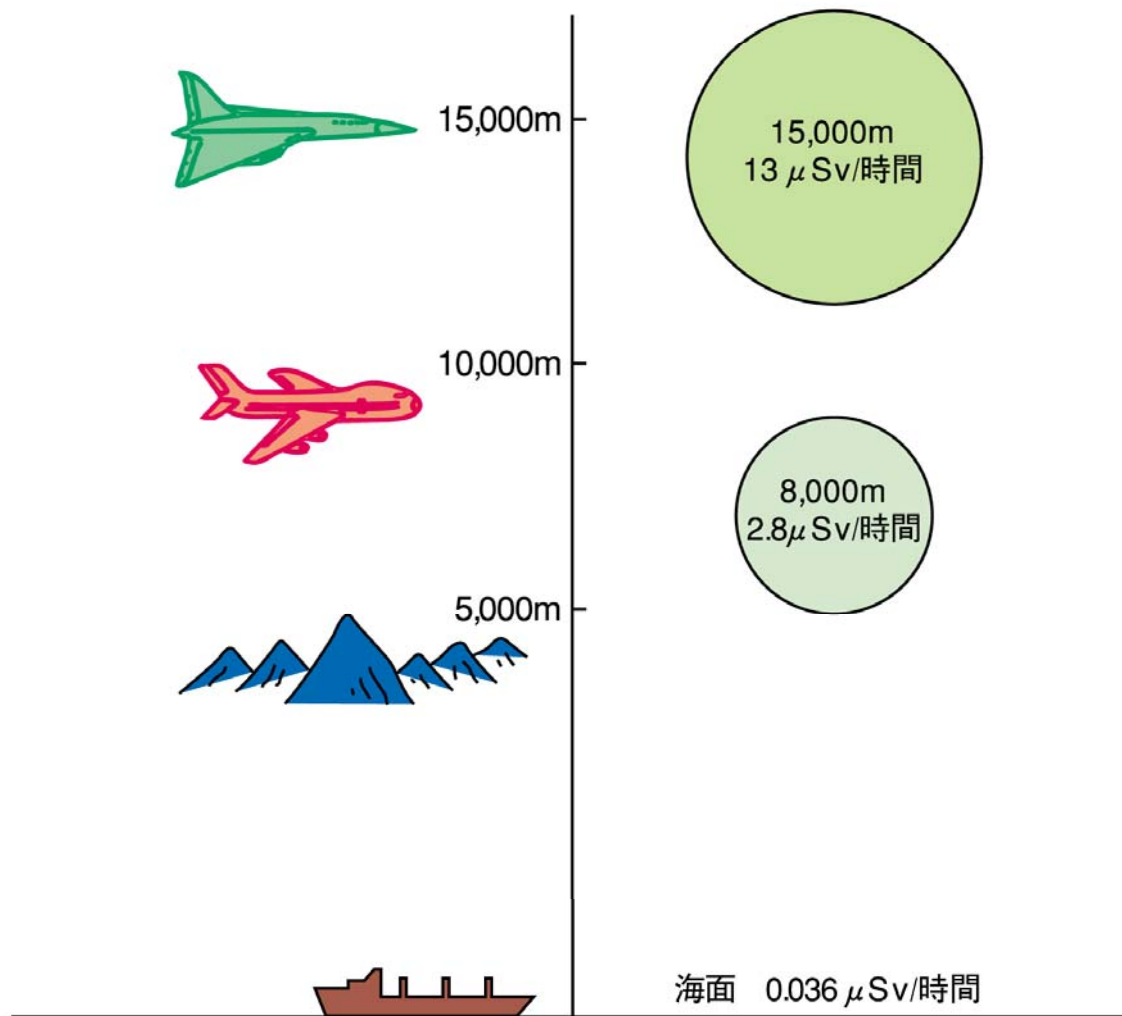
駅

代々木公園、明治神宮における線量率分布

線量率
(ナノグレイ毎時)



宇宙線の高度変化

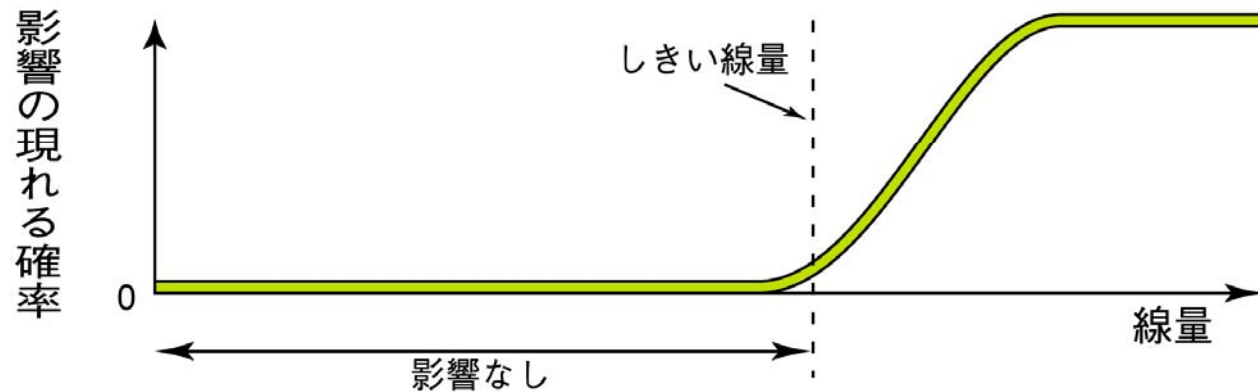


(注) μ Sv=マイクロシーベルト
出典：「1993年国連科学委員会報告」

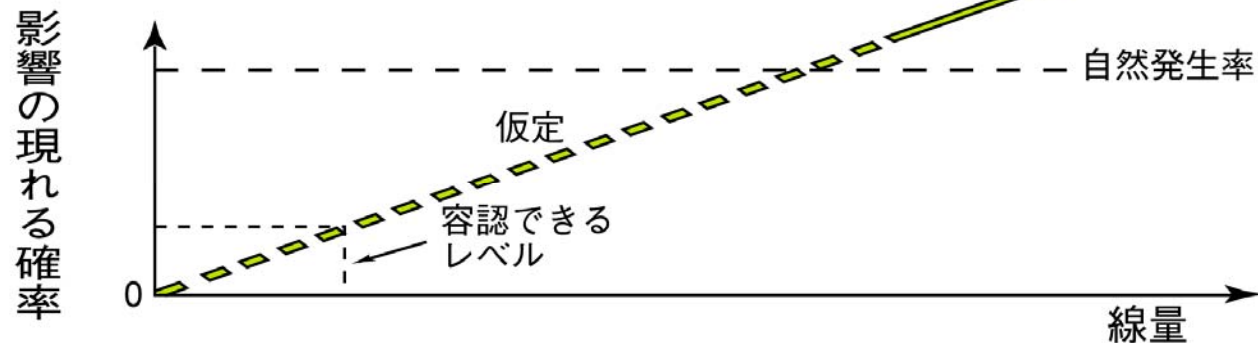
放射線防護の考え方

確定(非確率)的影響は、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、できるだけ線量を低くすることで影響を少なくする。

〔確定(非確率)的影響(脱毛・白内障など)〕



〔確率的影響(ガン・白血病など)〕

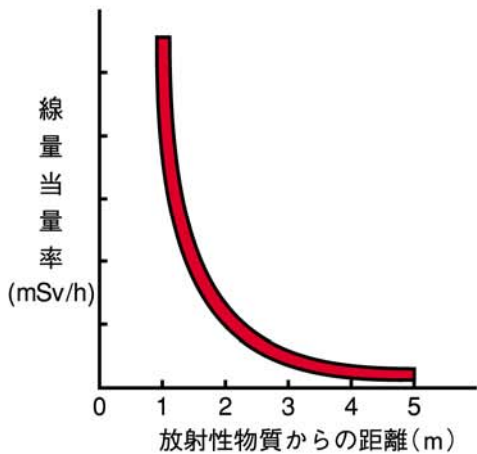
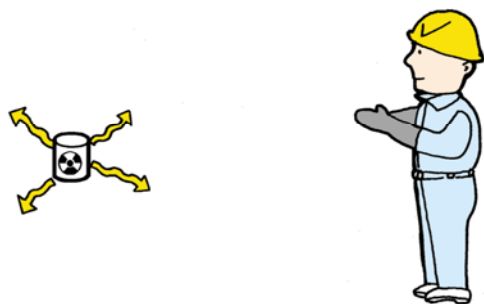


(注) しきい値…ある作用が反応を引き起こすか起こさないかの境の値のこと。

放射線防護の基本

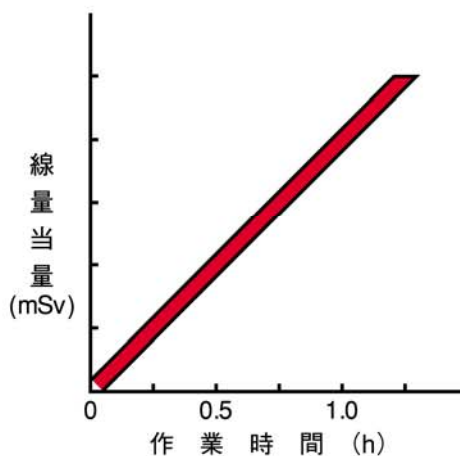
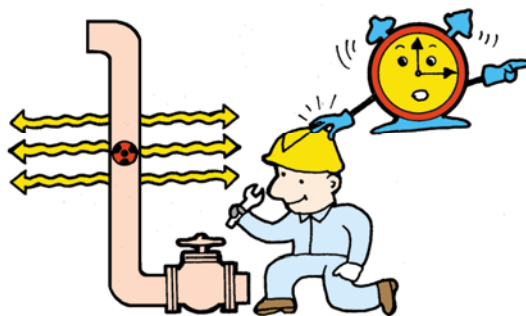
距離による防護

[線量当量率] = [距離]²に反比例

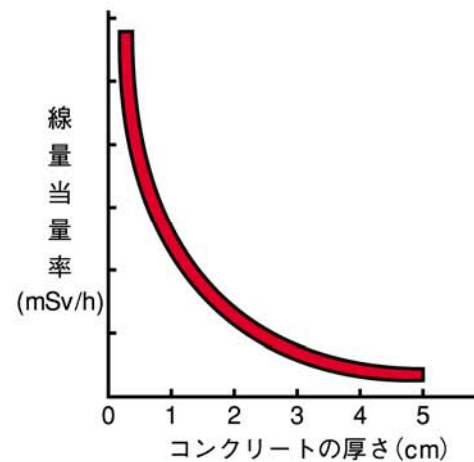
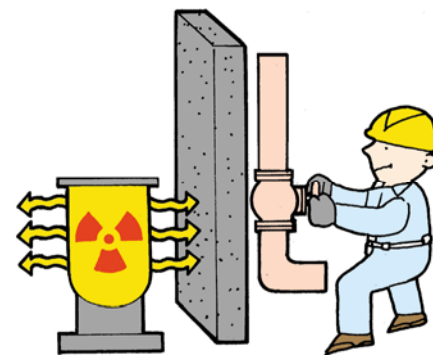


時間による防護

[線量当量] = [作業場所の線量当量率] × [作業時間]

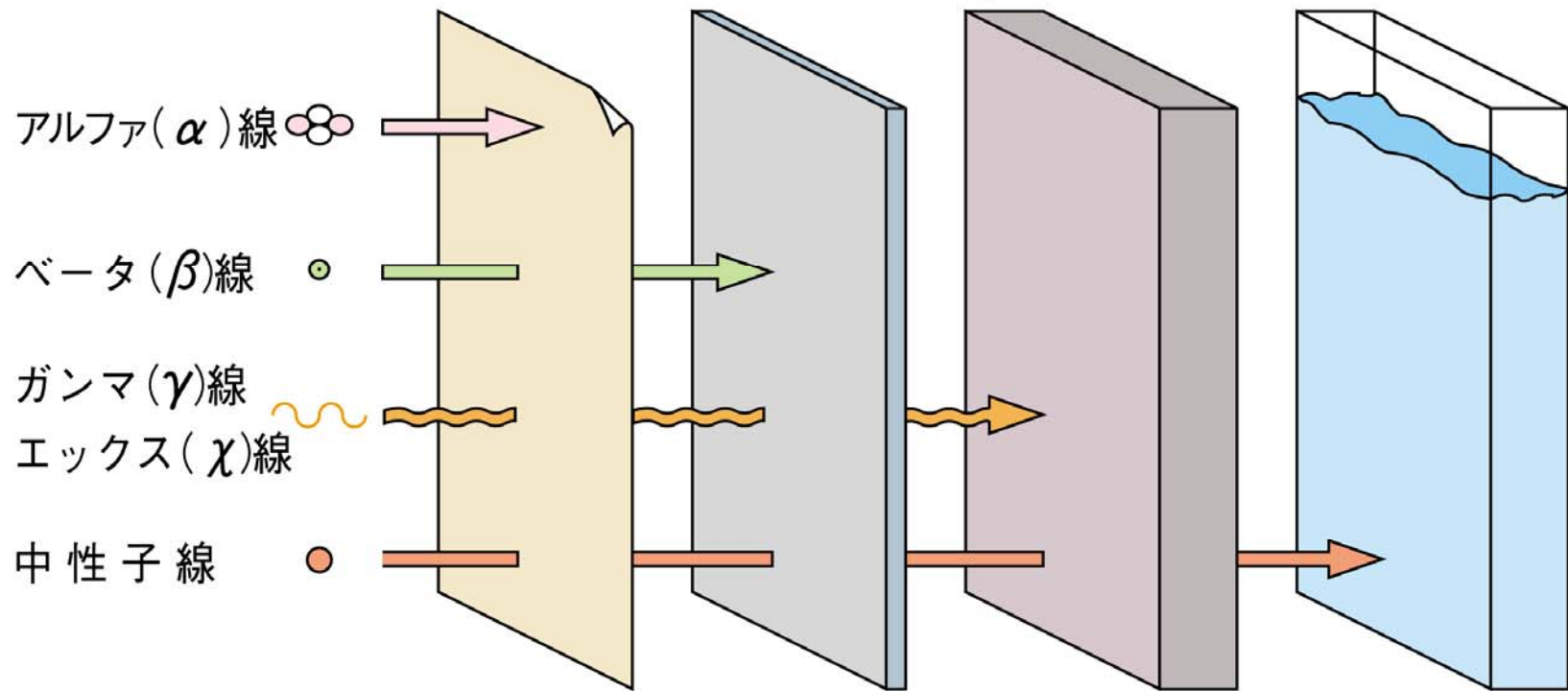


遮へいによる防護



放射線の種類と透過力

α 線を止める β 線を止める γ 線
 χ 線を止める 中性子線を止める



〔紙〕

〔アルミニウム
などの薄い
金属板〕

〔鉛や厚い
鉄の板〕

〔水や
コンクリート〕