

X線教育訓練資料（「原子力・放射線と環境」資料）

To foreign students、Please see the Radiation Protection texts of US Environmental Protection Agency
(<http://www.epa.gov/radiation/topics.html>)

機械工学科 中村祐三

1. はじめに

私達は、日常生活において常に自然界から放射線を浴びている。また、医療などでは積極的に放射線を用いた診断や治療が行われ、工学の分野では人工的に作る電子線、X線などの放射線を利用した技術が多用されている。自然にある放射線も、技術として用いる放射線も、身体に与える影響は同じである。従って、これを安全に利用する知識と技術の修得がとても重要である。平成20年度の教育訓練では、我々の工学部のX線発生装置だけでなく、様々な放射性物質と放射線に関する話をくわえる。なお、この教育訓練は、電離放射線障害防止規則という法律に定められた事項に準拠して実施する。大学や学部のルールとは思わず、遵守に心がけて欲しい。

2. 自然放射線と暮らしや研究の中の放射線

(1) 自然放射線

私達は年間に 2.4 mSv（ミリシーベルト）の放射線を浴びている。放射線の単位の一つである Sv は、放射線が生体に与える影響に関して定義されている（後に説明する）。

自然放射線は、図1に示すように、1) 宇宙からやってくるとても高いエネルギーの粒子が地球の大気に侵入して空気分子と衝突して発生する放射線、2) 地球創成のころから大地に存在する放射性物質による放射線、3) 私達の身体に取り込まれている放射性物質による放射線、で構成されている。

自然放射線による被曝の量は環境によって変わる。例えば、飛行機に乗ったら、高度が高くなる分だけ1)の宇宙放射線の被曝量が増える。また、建物の壁からは放射性物質であるラドンが放出されており、部屋をずっと閉じたままにしているとラドンによる放射線被曝が増える。土壌や鉱石には比較的多量の放射性物質が含まれていることがあり、土地によっても2)の大地からの放射線被曝の量は変わる。肥料や栄養食品に含まれているカリウムは放射線を出す。3)の私達の体内被曝はカリウムがもっとも大きい。

(2) 暮らしの中の放射線

私達が暮らしの中でもっとも放射線の被曝を受けるのは、医療の診断や治療で使われるX線である。図1にあるように、CT検査では自然放射線の数倍の線量のX線を受け、胃の検診等では自然放射線の数分の1程度の線量のX線を受ける。

鹿児島には川内に原子力発電所があるが、発電所の周辺で健康診断程度の線量が1時間あると、原子炉が停止されることになっていて、異常と認められるのはその100分の1程度の線量が1時間で測定された場合になっていることがわかる。

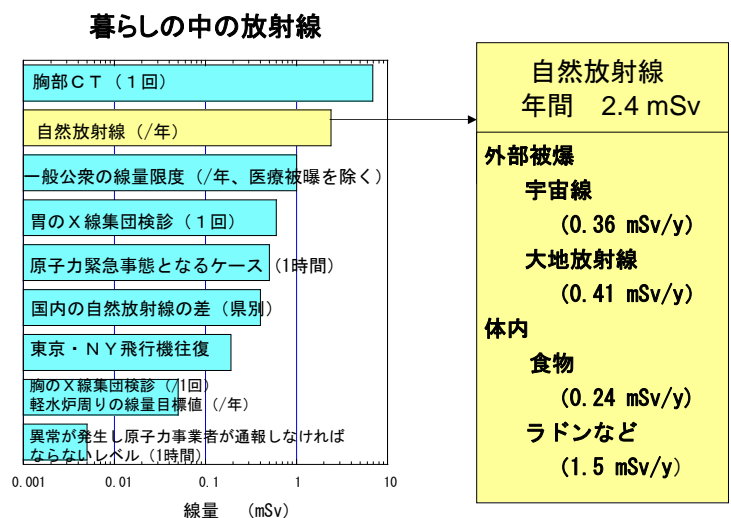


図 1

(3) 研究における放射線

工学部で行っている研究における放射線は、X線回折装置(XRD)、X線光電子分光装置(ESCA)などにおけるX線、走査型電子顕微鏡(SEM)における電子線やX線が専らである。これらについては後に説明する。

また、表1に示すように研究で用いる物質の中にも放射性物質が含まれている。たとえば、塩化カリウム KCl に含まれる天然カリウム K は原子番号 19 で、原子核には 19 個の陽子が含まれるが、原子核とともに構成する中性子の数は 20 個、21 個、22 個の場合があり、陽子と中性子の合計数である質量数は 39、40、41 となる。このように原子番号が同じで、中性子の数が異なるものを同位体(アイソトープ)といい、カリウムの場合には天然の同位体は

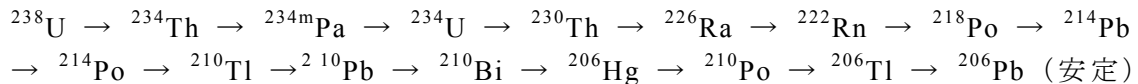
^{39}K	存在比	93.2581%	安定同位体
^{40}K	存在比	0.0117%	放射性同位体
^{41}K	存在比	6.7302%	安定同位体

という割合で構成されていて、このうち 0.012% の ^{40}K が放射性崩壊して放射線(β線、γ線)を放出します。これを放射性同位元素(ラジオアイソトープ、R I)と言う。 ^{40}K のように放射性崩壊をする性質のことを放射能と言う。 ^{39}K や ^{41}K は放射能を持たず、安定同位体と呼ばれる。

図2は、R Iである ^{40}K の崩壊図であり、縦軸が原子核のエネルギーになっている。

^{40}K はエネルギー的に高い不安定な状態にあり、1.33 MeV のβ線を放出して原子番号 41、質量数 40 の ^{40}Ca になるか(89%)、電子捕獲(EC)という反応を起こして 1.46 MeV のγ線を放出して原子番号 18、質量数 40 の ^{40}Ar になる(11%)。この原子核崩壊によって最初の ^{40}K の原子数が半分になるまでの時間を半減期と言う。

表1において、トリウムの内 ^{232}Th 、またウラン ^{235}U 、 ^{238}U はα線を放出する放射性崩壊(一部β崩壊も含まれる)を起こすが、形成された娘核種も次々に放射性崩壊を起こす。このように放射性崩壊を起こす一連の核種のことを放射系列という。ウランの中でもっとも同位体存在比が大きい ^{238}U の場合、



で表されるウラン系列がある。呼吸によって体内被爆を生じるラドン Rn はこうした放射系列に含まれる。

また、表1において、トリウム Th、ウラン U は核分裂反応を起こすことができる。このため、これらは核燃料物質として扱われ、法的規制も異なる。工学部は、核燃料物質を取り扱える施設を有していないので、これらの物質については使用禁止である。

天然の主な放射性同位元素

核種	同位体存在比%	半減期(年)	放射線
$^{40}_{19}\text{K}$	0.0119	1.2×10^9	β、γ
$^{50}_{23}\text{V}$	0.24	6×10^{15}	γ
$^{87}_{37}\text{Rb}$	27.85	5×10^{10}	β
$^{115}_{49}\text{In}$	95.77	6×10^{14}	β
$^{130}_{52}\text{Te}$	34.49	$\sim 10^{22}$	β
$^{138}_{57}\text{La}$	0.089	1.1×10^{11}	β
$^{144}_{60}\text{Nd}$	23.9	2.4×10^{15}	α
$^{147}_{62}\text{Sm}$	15.07	1.4×10^{11}	α
$^{176}_{71}\text{Lu}$	2.6	7.5×10^{10}	β、γ
$^{187}_{75}\text{Re}$	62.93	4×10^{12}	β
$^{232}_{90}\text{Th}$	100	1.39×10^{10}	α
$^{235}_{92}\text{U}$	0.72	7.13×10^8	α
$^{238}_{92}\text{U}$	99.28	4.49×10^9	α

は放射系列を作る
($^{238}\text{U} \cdots > ^{226}\text{Ra} \rightarrow ^{222}\text{Rn}$)

表 1

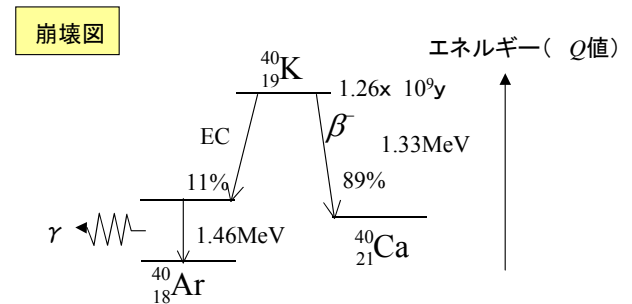


図 2

3. 放射性崩壊と放射線

(1) 原子の質量とエネルギー質量等価則

原子番号 Z の原子では、図 3 に示すように、 Z 個の陽子 (p) と N 個の中性子 (n) からなる原子核の周りを、 Z 個の軌道電子が運動している。陽子の質量は $M_p = 1.00728 \text{ u}$ 、中性子の質量は $M_n = 1.00866 \text{ u}$ であってほぼ等しく、電子の質量 $m_e = 0.000549 \text{ u}$ よりもはるかに大きい (u は原子質量単位と呼ばれ、 $1 \text{ u} = 1.66 \times 10^{-27} \text{ kg}$)。このため、原子の質量はほとんど陽子と中性子によって占められていると言ってよい。

原子核の性質は陽子数と中性子数によって決まってくるため、原子核の種類をあらわすのに、 ${}^A_Z X_N$ のように書く。これを核種と言う。また、 A は質量数と呼ばれ、 $A = Z + N$ 、つまり陽子と中性子の数の合計である。より一般には、質量数の関係から N が省かれた ${}^A_Z X$ 、あるいは、核種 X は元素記号で表すため原子番号も既知であることから ${}^A X$ のように略されることが多い。

ここで、原子番号 6 で中性子数 6、質量数 12 の ${}^{12}_6\text{C}$ の原子の質量を考えてみる (図 4)。陽子、中性子、電子をそれぞれ必要な数だけ取り揃えたときの質量は $M_o = 6M_p + 6M_n + 6m_e = 12.09864 \text{ u}$ である。しかし、実際の ${}^{12}_6\text{C}$ の質量は $M = 12 \text{ u}$ であって、それぞれの粒子がばらばらのときよりも質量は小さくなっている。これを質量欠損といい、 ${}^{12}_6\text{C}$ の場合には、質量欠損は $\Delta M = M - M_o = 0.09894 \text{ u}$ である。

特殊相対性理論によれば、質量 m はエネルギー E と等価であり、 $E = mc^2$ であらわすことができる。ここで c は光の速度 ($2.998 \times 10^8 \text{ m/sec}$) である。エネルギーの単位として、 1 eV (エレクトロンボルト) $= 1.602 \times 10^{-19} \text{ J}$ を用いると、 1 u の質量は 931.5 MeV のエネルギーに相当する。よって、 ${}^{12}_6\text{C}$ の質量欠損は $E = \Delta Mc^2 = 92.16 \text{ MeV}$ である。すなわち ${}^{12}_6\text{C}$ は、それぞれの粒子がばらばらであるときよりも、原子を構成した方が $E = 92.16 \text{ MeV}$ だけエネルギー的に安定であることを意味する。このエネルギーは原子核における陽子と中性子の結合エネルギーとして用いられる (原子核と軌道電子間の結合エネルギーはこれよりもはるかに小さいので無視してよい)。

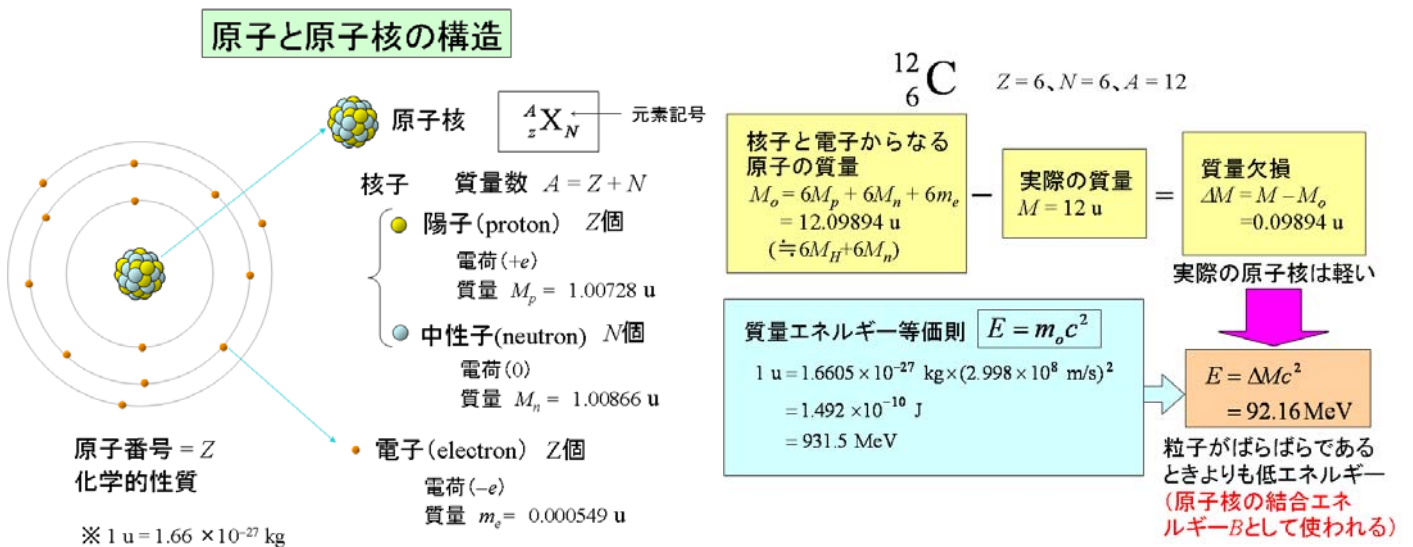


図 3 .

図 4 .

(2) 原子核の安定性

核種 X が安定か、あるいは放射線を放出して別の核種に変換する放射性を持つかは、原子核の安定性による。ここでは、原子核の性質を表す古典的なモデルである液滴モデルで説明する。液滴モデルでは、原子核を水滴のように考える¹⁾。すなわち、原子核のエネルギーは、(1) 陽子と中性子が一樣なエネルギーで結合する体積効果、(2) 原子核の表面にある陽子または中性子の結合が切れているためにエネルギーが高くなる表面効果、(3) 陽子と中性子是对になったほうが安定であることによる対称性効果、(4) 陽子間の静電的反発力によりエネルギーが高くなる静電効果によって表されるとする。原子核の結合エネルギーを B とすると、陽子あるいは中性子（原子核を構成する粒子として核子という）一個あたりの結合エネルギーは以下の式で表される。

$$\frac{B}{A} = \frac{\Delta Mc^2}{A} = 15.75 - \frac{17.8}{A^{1/3}} - 23.7 \frac{(A-2Z)^2}{A^2} - 0.711 \frac{Z^2}{A^{4/3}} - \frac{11.8f}{\sqrt{A}} \text{ (MeV)}$$

第 1、2、3 および 4 項はそれぞれ体積効果、表面効果、対称性効果、静電効果を表す。第 5 項は陽子数、質量数の偶奇によって原子核の安定性が異なることから生じる偶奇性効果である。この式はワイツゼッカーの式と呼ばれ、図 5 に示すように、自然界にある安定な同位元素の結合エネルギーをよく記述していることがわかる。図 5 より、核子あたりの結合エネルギー B/A は、質量数とともに急速に増加し、質量数 60 くらいで最大値となり、減少していくことがわかる。このことは後に述べるように、重い原子核が不安定で、放射性崩壊でより軽い原子核になる性質をもっていることを裏付けている。

また、図 6 は、横軸に中性子数 N 、縦軸に陽子数 Z をとったときの核種の安定性を示すグラフであり、グラフ中の黒印で示される安定同位体については $N/Z = 1.02 + 0.015A^{2/3}$ の関係があり、これからずれると放射性崩壊が生じやすいことを示している（なお、重い原子核では陽子の数が増えて静電的反発力が大きくなると不安定になるために、中性子の数のほうが多い）。

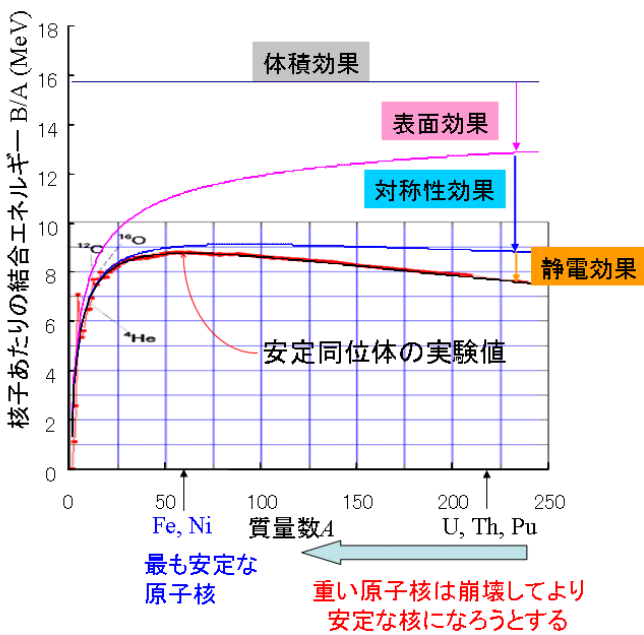


図 5 .

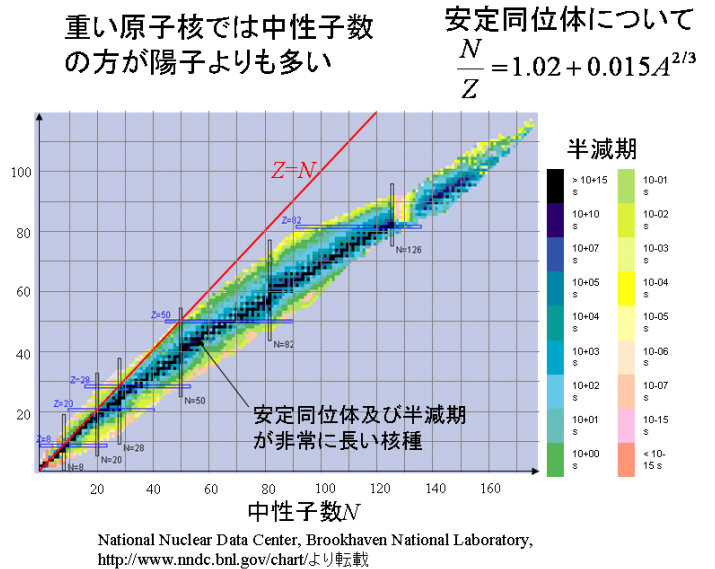
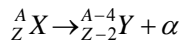


図 6 .

(3) α崩壊

図7に示すように、重い原子核はエネルギー的に不安定であり、ヘリウム (He) の原子核であるα粒子を放出して崩壊する。崩壊前の親核種をXとすると、Heの陽子数は2、中性子数は2、質量数は4であるから、α崩壊は

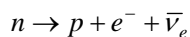


と書くことができる。ここで、Yを娘核種という。

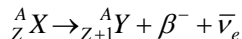
(4) β崩壊

図6、図7に示すように、原子核を構成する陽子と中性子の数の間には安定となる

比率がある。この比率よりも中性子が多い場合には、原子核において中性子 (n) は陽子 (p) になる。すなわち、

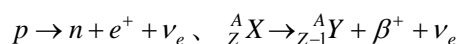


中性子は電荷を持たないため、陽子に変換する際には、負の電荷を持つ電子 (e^-) を放出する。これをβ⁻線という。また、 $\bar{\nu}_e$ は反電子ニュートリノと呼ばれ、電荷を持たず、物質とはほとんど相互作用しない中性微子である。このような原子核の崩壊をβ⁻崩壊という。親核種Xがβ⁻崩壊する場合、



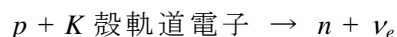
と書くことができ、娘核種Yは質量数は変わらないが、原子番号がひとつだけ増加する。

陽子数を中性子数の安定な比率よりも、陽子の数が多い場合には、原子核における陽子は中性子になる。すなわち、



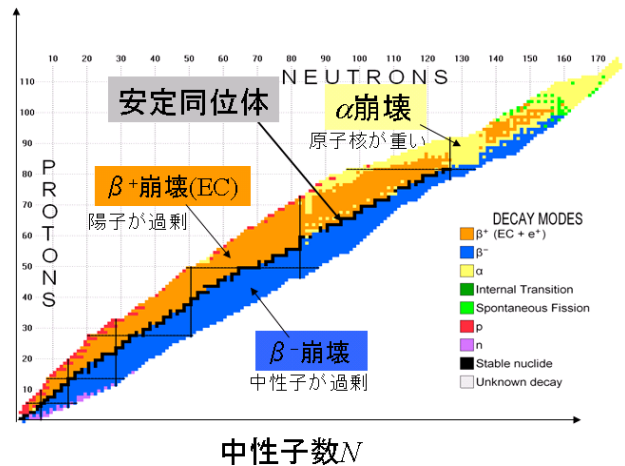
であって、原子核中の陽子は中性子に変換するとともに、正の電荷を持つ陽電子 (e^+) が放出される。この陽電子のことをβ⁺線といい、このような崩壊のことをβ⁺崩壊という。このとき、β⁺崩壊では、親核種Xは、質量数が同じで原子番号が一つだけ減った娘核種Yとなる。また、 ν_e は電子ニュートリノと呼ばれ、中性で物質とほとんど相互作用しない中性微子である。電子と陽電子は、電荷が負と正という違いがあるが、質量は同じであるため、物質との相互作用は同じと考えてよい。このため、β⁻崩壊 (線)、β⁺崩壊 (線) をまとめてβ崩壊 (線) と呼ぶことが多い。β線のエネルギーは連続的であるため、その最大値を用いてエネルギーを表すのが通例である。

また、原子核には陽子が過剰にあるが、β⁺崩壊を起こすほどにはエネルギー的に高くない場合に、原子核にもっとも近いK殻の軌道電子を原子核が捕獲して以下の反応を起こすことがある。



これを電子捕獲 (EC) という。電子捕獲では直接の崩壊反応として物質と相互作用しないニュートリノが放出される。しかし、K殻の軌道電子を失ったために、より高いエネルギー準位の軌道電子がK殻の空位に落ち込んだ際、特性X線が放出される。

陽子数Z



高エネルギー加速器で生成した不安定核種を含む

図7

(5) γ 崩壊

原子核がエネルギー的に高い励起状態にある場合、そのエネルギーを電磁波として放出し、より安定なエネルギー状態に移る。放出される電磁波を γ 線といい、この崩壊を γ 崩壊という。改めて図7に示した ^{40}K の放射性崩壊についてみると、89%の割合で β^- 崩壊により1.33 MeVの β^- 線を放出して原子番号が一つ大きい ^{40}Ca に崩壊する。残り11%は、電子捕獲により原子番号が一つ減った ^{40}Ar の励起状態の原子核に崩壊し、1.46 MeVの γ 線を放出する。 ^{40}Ar は電子捕獲により軌道電子が励起状態にあるため、X線を放出する。 ^{40}K の崩壊により放出される放射線の種類、エネルギー、割合を表2に示す。

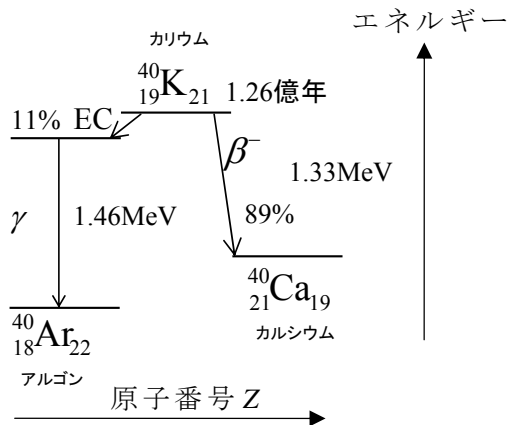


図7.

放射線	エネルギー(keV)	割合(%)
β^+ 線	482.9	0.00104
β^- 線	1311	89.28
γ 線	1461	~11
X線 (^{40}Ar)	0.251	0.001
	0.31	0.00072
	2.88	3.3×10^{-8}
	2.956	0.93
	3.19	0.074

表2. ^{40}K からの放射線

(6) 放射線の種類

自然界の放射性同位元素から生じる α 線、 β 線は電荷を有し、また γ 線は電磁場を持つために、物質と静電相互作用し、物質を構成している原子や分子を電離して陽イオン・電子対を形成する能力があるために、電離放射線と呼ばれる。これに対し、原子炉で発生する中性子、あるいは β 崩壊で発生するニュートリノは電荷がないために、直接的な電離作用はない。しかし、中性子が物質中の原子の原子核と衝突し、これによってはじかれた原子核が電離作用を起こすことから、二次的に電離作用がある。また、放射線は、 α 線、 β 線のような粒子線、 γ 線やX線のような電磁波に分けることもできる。表3には、宇宙線、人工的に作られる放射線も含めた放射線の種類を示す。

放射線

物質を電離する粒子や電磁波を言う。

電離放射線	電磁波	1次電離放射線	γ 線(原子核由来) X線(人工、軌道電子由来)
	粒子	1次電離放射線(直接電離)	β 線 電子(人工) α 線、陽子(宇宙、人工) 重陽子などの荷電粒子(宇宙、人工) 荷電中間子(宇宙、人工) 核分裂片(人工、天然)
		2次電離放射線(間接電離) 他の原子核等に衝突して、散乱や原子核反応により電離作用	中性子線(宇宙、人工) 非荷電中間子(宇宙) 中性微子(宇宙)

表3

4. 放射能

(1) 放射能と放射能の強さ

放射能とは、原子核が放射線を放出して崩壊する性質のことを言う。また、この性質を表す大きさとして、単位時間あたりに生じる原子核の崩壊数をもって放射能の強さと定義する。ただし、放射能の強さもまた放射能と呼ばれることがある。

今、時刻 $t=0$ において、放射性核種 X の原子核の数が N_0 個であったとする。1 個の原子核が単位時間あたりに崩壊する確率を λ とする。時刻 t において N 個の原子核が残っている場合、次の微小時間 dt において、1 個の原子核が崩壊する確率は λdt であるから、原子核の減少数 dN は、

$$dN = -N \times \lambda dt = -\lambda N dt$$

となる。初期条件 $t=0$ 、 $N=N_0$ のもとにこれを解くと

$$N = N_0 e^{-\lambda t}$$

となり、 λ のことを崩壊定数という。

放射性崩壊によって原子核の数が半分になるまでの時間を半減期という。半減期 T を用いると、

$$N = N_0 \left(\frac{1}{2}\right)^{t/T}, \quad \lambda = \frac{\ln 2}{T} \approx \frac{0.693}{T}$$

と表すことができる。また、単位時間当たりの崩壊の頻度である放射能の強さを A とすると、

$$A = -\frac{dN}{dt} = \lambda N = \frac{\ln 2}{T} N$$

となる。放射能の強さの単位は Bq (ベクレル) を用いる。1 Bq は 1 秒当たり 1 回の崩壊頻度である (1 Bq = 1 dps (decays per second、崩壊/秒))。

(2) ケーススタディ：KCl の場合

今、試料として 100 g の KCl を購入したものとする。KCl の分子量は 74.6 g/mol であり、 ^{40}K の同位体存在比は 0.012% であるから、100g の KCl 中に含まれる ^{40}K の個数は、

$$N_0 = \frac{100\text{g}}{74.6\text{g}} \times 6.02 \times 10^{23} \times 0.00012 = 9.7 \times 10^{19}$$

である。また ^{40}K の半減期は $T = 1.26 \times 10^9 \text{y} \times 365 \text{d} \times 24 \text{h} \times 3600 \text{s} = 3.97 \times 10^{16} \text{s}$ である。購入後から使用するまでの時間 t に対して半減期が非常に長いので、 $(1/2)^{t/T} \cong (1/2)^0 = 1$ としてよい。したがって、放射能の強さは

「放射能」の定義

(1) 放射性崩壊をする性質のこと

(α 崩壊、 β 崩壊、 γ 崩壊など)

放射性崩壊の法則

時刻 $t=0$ で N_0 個であった放射性同位体について、時刻 t の個数 N は、以下で表される。

$$N = N_0 \left(\frac{1}{2}\right)^{\frac{t}{T}} \quad T: \text{半減期}$$

(2) 放射能の強さ

単位時間あたりに放射性核種が崩壊する頻度をいう。

$$A = -\frac{dN}{dt} = \frac{0.693N}{T}$$

単位 ベクレル Bq (1 Bq = 1 dps、崩壊/秒)
キュリー Ci (1 Ci = 3.7×10^7 Bq)

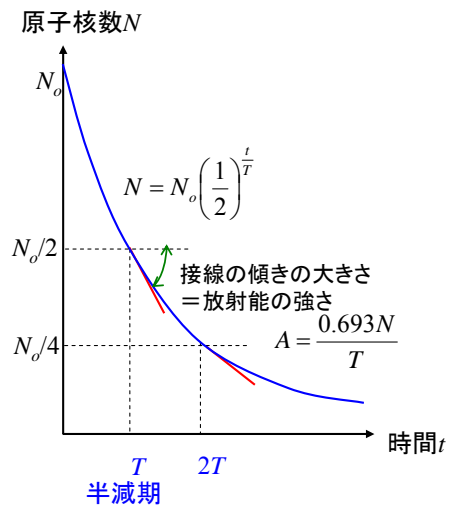


図 8

$$A = \frac{0.693}{T} N \cong \frac{0.693}{T} N_0 = \frac{0.693 \times 9.7 \times 10^{19}}{3.97 \times 10^{16}} = 1.7 \times 10^3 \text{ Bq} = 1.7 \text{ kBq}$$

となる。放射能の強さは崩壊によって出てくる放射線の量を表す。 ^{40}K では89%が β^- 線で残りが γ 線であったから、100gのKClでは1秒当たり1500個の1.3MeVの β^- 線が放出され、11%、すなわち1秒当たり186個の1.46MeVの γ 線が放出されることになる。

5. X線

(1) 電子と物質の相互作用

γ 線もX線も電磁波であるが、前者が原子核から放出される放射線であるのに対し、後者は人工的に作る放射線である。

先に進む前に、大切なこととして、電磁波は量子（光子）として取り扱え、波長を λ とするとき光子の運動量 p を

$$p = h/\lambda$$

エネルギー E を

$$E = h\nu = hc/\lambda$$

で表すことができることに注意しておく。ここで h はプランク定数($h = 6.626 \times 10^{-34} \text{ J}\cdot\text{s}$)、 ν は振動数($= c/\lambda$)、 c は光の速度である。

図9は、材料の観察や分析に用いる電子顕微鏡の原理図である。

電子顕微鏡では、金属フィラメントを加熱して熱電子を表面から放出させた後、観察試料との間に数10kVの電圧をかけて、電子をたたきつける。電子銃にはフィールドエミッションタイプのももあり、電子銃から試料にたたきつけるまでの間に、電子ビームを細くしたり試料表面上を走査できるようにレンズが入っている。このとき入射電子の加速電圧を V 、エネルギーを E とすると、 $E = eV$ である。

図9では、20kVで加速された電子が銅試料に入射した場合を想定しているが、入射電子の侵入深さは数 μm であり、試料の原子番号が低いともっと深くまた広く侵入することになる。入射電子の侵入領域において、表面層からは電子（オージェ電子、二次電子、反射電子）が放出されるとともに、X線（連続X線、特性X線）が放出される。このように試料表面から放出される電子やX線を利用する観察・分析装置として、走査型電子顕微鏡(SEM)、EPMA (electron probe microanalysis)、電子後方散乱回折(EBSD)装置などがある。試料が非常に薄く、加速電圧が高くて入射電子が試料を容易に透過できることを利用して組織観察を行う装置に、透過電子顕微鏡(TEM)がある。

SEM、EPMA、EBSD、TEMでは真空チャンバー内で電子ビームを得るので、真空チャンバー容器の金属壁が試料表面から出た電子やX線をとめている。このため、これらの装置については原則としてX線防護の必要性はない。

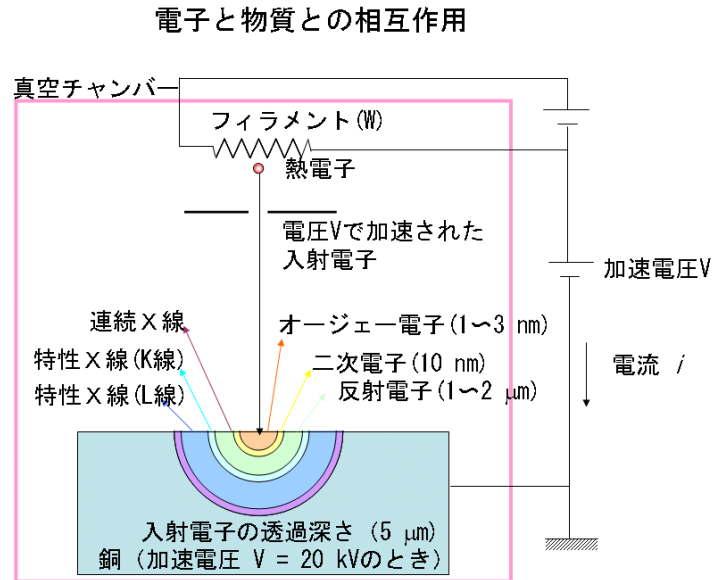


図9. 電子顕微鏡の原理図

(2) X線発生原理：連続X線

図10のように、エネルギー $E = eV$ の電子が物質中に入射した場合、入射電子は物質を構成する原子と相互作用をする。そのうちのひとつが、入射電子と原子核との静電相互作用であり、負の電荷を持つ入射電子は、原子核の有する正の電場によりその軌道を曲げられることになる。電子が軌道を曲げられる場合、電磁波を放出する。電磁波のエネルギーはその曲がり方が大きいほど大きい。

したがって、原子核から遠ければ曲がり方が小さく、原子核に近ければ曲がり方が大きいので、このようにして放出される電磁波のエネルギーは連続的に変化し、これを連続X線（制動X線、白色X線）という。

このとき、連続X線の最大エネルギー E_{max} は、入射電子が失う最大エネルギーに等しく、

$$E_{max} = \frac{hc}{\lambda_{min}} = eV$$

となる。ここで、 λ_{min} は最小波長である。これより、最小波長は電圧 V の単位kVとすると

$$\lambda_{min} = \frac{hc}{eV} = \frac{1.24}{V} \text{ (nm)}$$

で与えられる。

また、原子核との静電相互作用により軌道が曲げられて試料表面から放出される電子を反射電子という。原子核の静電引力はその原子番号 Z に比例して大きくなるので、原子番号の大きい試料ほど、反射電子の放出量が多いことになる。

(2) X線の発生原理：特性X線

図11(a)のように、入射電子が物質を構成する原子の軌道電子と衝突して、これを叩き出す過程がある。このようにして、表面から電子が放出される場合、2次電子という。軌道電子が叩き出された後の原子のエネルギーは高い状態にあるので、図11(b)に示すように、より高いエネルギー準位の軌道電子の殻から電子が空位の軌道に入る。この際、両者のエネルギー差に相当する電磁波が特性X線として放出される。

K殻、L殻、M殻・・・の軌道電子のエネルギー状態は主量子数 $n = 1, 2, 3, \dots$ に対応付けられる。入射電子との衝突によってK殻の電子がはじき出された場合、よりエネルギーの高いL殻電子が落ち込む。この際、放出される特性X線のことを $K\alpha$ 線という。L殻よりも高いエネルギーのL殻電子がK殻の空位に落ち込む

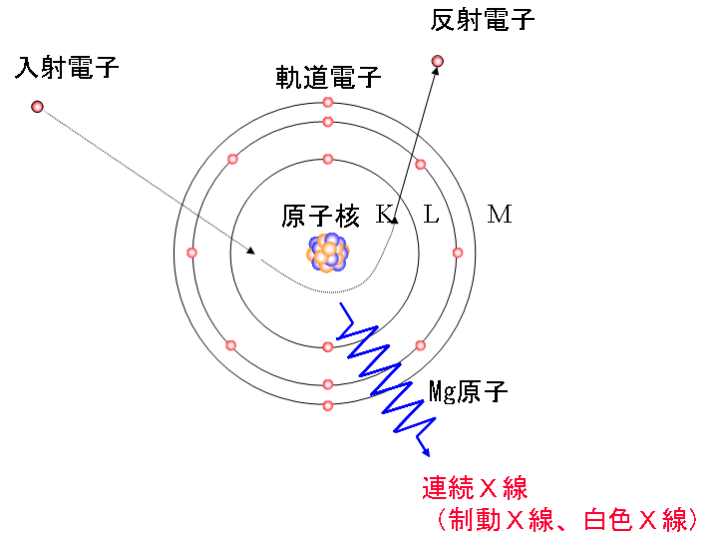


図10.

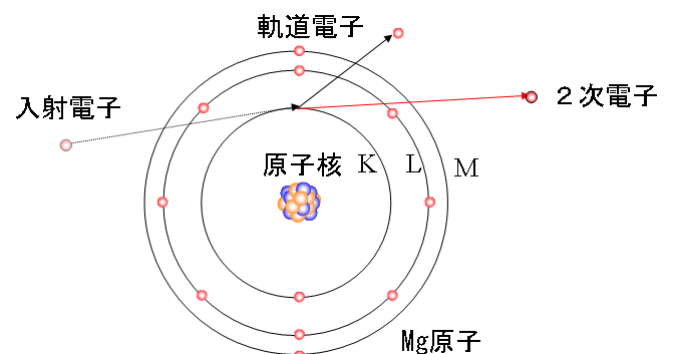


図11(a).

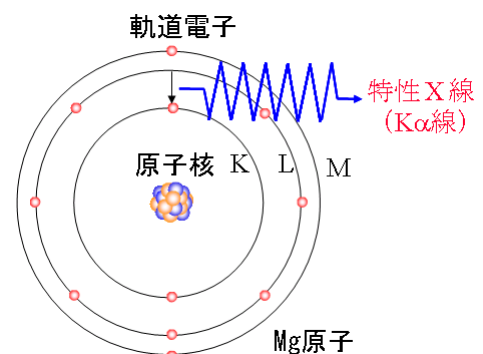


図11(b).

こともあり、このとき放出される特性 X 線を K_{β} 線という。 K_{α} 線、 K_{β} 線のエネルギーは次のように与えられる。

$$K_{\alpha}\text{線: } E(K_{\alpha}) = E_2 - E_1, \quad K_{\beta}\text{線: } E(K_{\beta}) = E_3 - E_1$$

ここで、 E_1 、 E_2 、 E_3 はそれぞれ K 殻、L 殻、M 殻電子のエネルギー順位である（それぞれの殻の電子のエネルギー準位は若干異なっており、たとえば K_{α} 線は $K_{\alpha 1}$ 線とこれより僅少にエネルギーが低い $K_{\alpha 2}$ 線に分けられる）。

各軌道電子のエネルギー準位は、古典的なボーアの水素モデルを、原子番号 Z の原子についても適用することで大まかに評価できる（古典量子論に基づく計算法は図 1 2 に示す）。ボーアの水素モデルと異なり、原子核の正電場が軌道電子の負の電荷分布で遮蔽されているため、電場の大きさがそのまま原子番号を用いるのではなく、有効原子番号 Z_{eff} を用いなければならない。図 1 2 の計算結果に従うと n 番目の軌道のエネルギー準位 E_n は

$$E_n = -E_0 \frac{Z_{eff}^2}{n^2}$$

となる。ここで E_0 は定数である。これより、 n 番目の軌道から m 番目の軌道のエネルギー準位差 E_{mn} は、

$$\begin{aligned} E_{mn} &= E_n - E_m \\ &= E_0 Z_{eff}^2 \left(\frac{1}{m^2} - \frac{1}{n^2} \right) \end{aligned}$$

となる。 K_{α} 線では $m = 1$ 、 $n = 2$ 、 K_{β} 線では $m = 1$ 、 $n = 3$ であるので、

$$\begin{aligned} E(K_{\alpha}) &= E_{12} = \frac{3E_0 Z_{eff}^2}{4} \\ E(K_{\beta}) &= E_{13} = \frac{8E_0 Z_{eff}^2}{9} \end{aligned}$$

となって、特性 X 線のエネルギーは有効原子番号の 2 乗に比例して増加する（モーズリーの法則という）。図 1 3 は、広範囲の元素について、特性 X 線の原子番号依存性を示したものであり、図中の実線は Z_{eff}^2 に比例した最適化曲線である。

モーズリーの法則では、特性 X 線のエネルギー E を

$$E = C(Z - Z_0)^2$$

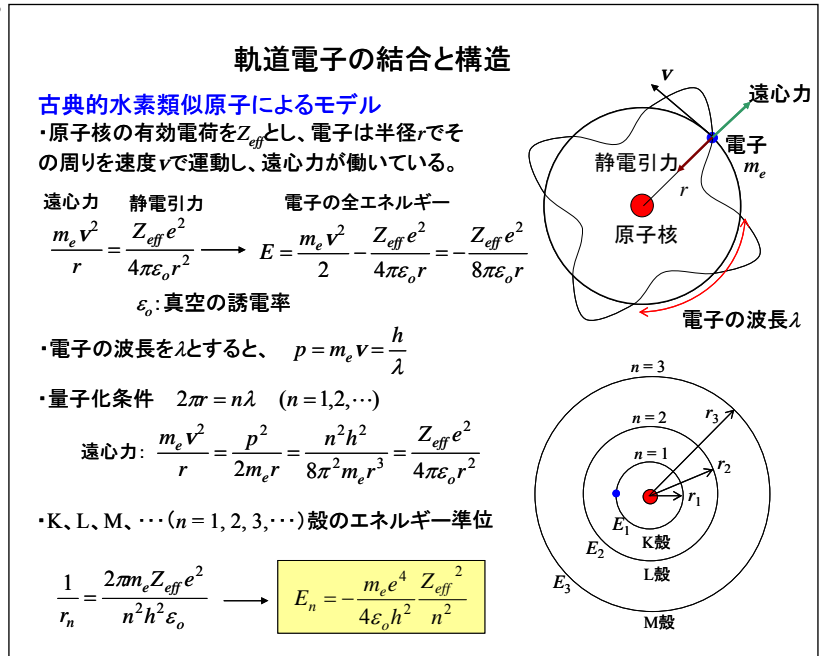


図 1 2 .

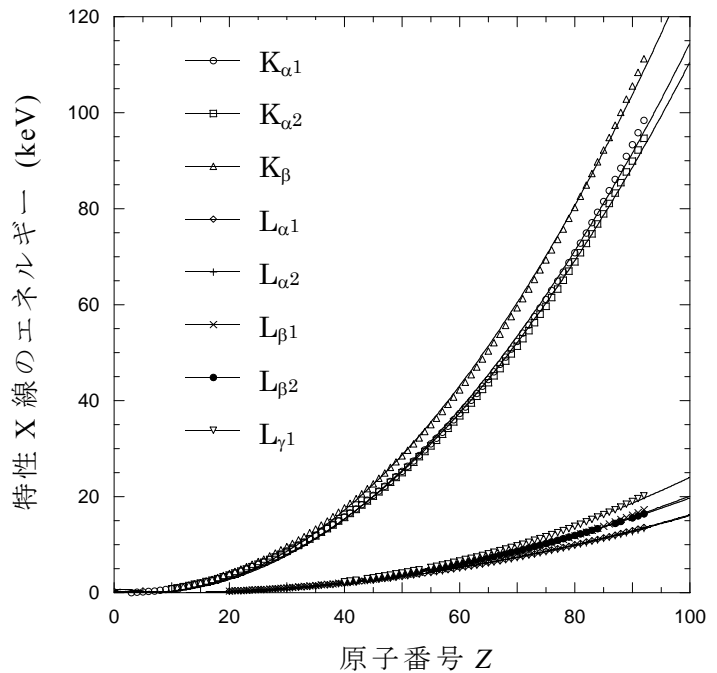


図 1 3 .

で表すことができる。図 1 3 においてこの式を最適化して得られた C 、 Z_0 の値を表 3 に示す。一方、特性 X 線の波長を λ とすると、モーズレーの法則は

$$\lambda = \frac{hc}{E} = \frac{hc}{C(Z-Z_0)^2}$$

と書き直すことができる。このように、特性 X 線のエネルギー及び波長は原子番号に依存するため、これらを測定することにより、物質中に含まれている元素の種類を調べることができる。この原理を利用したのが EPMA や EDX である。なお、モーズレーの法則は低原子番号、高原子番号でずれてくる。このため、実際には実験によって得られた値をもちいて最適化することが必要である。

特性 X 線	C (keV)	Z_0
$K_{\alpha 1}$	0.012794	5.3822
$K_{\alpha 2}$	0.012076	4.3095
$K_{\beta 1}$	0.014602	5.6716
$L_{\alpha 1}$	0.001887	7.2145
$L_{\alpha 2}$	0.00185	6.8484
$L_{\beta 1}$	0.002659	12.935
$L_{\beta 2}$	0.002437	10.005
$L_{\gamma 1}$	0.00338	15.672

表 3.

(3) X 線管

X 線発生装置では X 線の線源に、図 1 4 に模式的に示すような X 線管を用いている。X 線管は真空管であり、加熱したフィラメントから生じる熱電子を電圧 V で加速して、金属のターゲットに照射し、ターゲット表面から連続 X 線と特性 X 線が放出される。X 線管は遮蔽体で覆われており、目的とする大きさのビームが窓あるいは絞りを通して放出される。

ターゲットに入射する電子の運動エネルギーは、その全てが熱エネルギーとなりターゲットを加熱するといつて過言ではない。ターゲットから放出される X 線のエネルギーを W_X 、ターゲットに注入される電気エネルギー W_E とすると、X 線の発生効率 η は、

$$\eta = \frac{W_X}{W_E} = 1.1 \times 10^{-9} Z_t V$$

で与えられる。ここで Z_t はターゲット物質の原子番号である。銅 ($Z_t = 29$) をターゲットに用い、電圧 $V = 40 \text{ kV}$ を用いると、 $\eta = 1.1 \times 10^{-9} \times 29 \times 40 \times 10^3 \approx 0.0013 = 0.13\%$ となり、X 線の発生効率は非常に小さい。

X 線管に流れる管電流を i とすると、注入される電気エネルギーは $W_E = iV$ である。X 線発生装置の一つである X 線回折 (XRD) 装置では大体 $V = 40 \text{ kV}$ 、 $i = 30 \text{ mA}$ 程度の電圧、電流を用いている。ターゲットに 1 cm^3 程度の体積の銅を用いたとしよう。ターゲットに注入される電気エネルギーは $W_E = 1.2 \text{ kW}$ となる。銅の比熱は $0.38 \text{ J/g}^\circ\text{C}$ 、密度は 8.92 g/cm^3 であるので、 $W_E = 1.2 \text{ kW}$ のエネルギーが注入されると、1 秒あたりの温度上昇速度は

$$\frac{dT}{dt} = \frac{1.2 \times 10^3 \text{ J/s}}{0.38 \text{ J/g}^\circ\text{C} \times 1 \text{ cm}^3 \times 8.92 \text{ g/cm}^3} \approx 350 \text{ }^\circ\text{C/s}$$

となり 3 秒ほどで融点に達してしまう。したがって、ターゲットは注入熱量を十分に奪い去ることができるような強制冷却 (通常水冷) が必要となる。逆に、何らかの故障で冷却がと

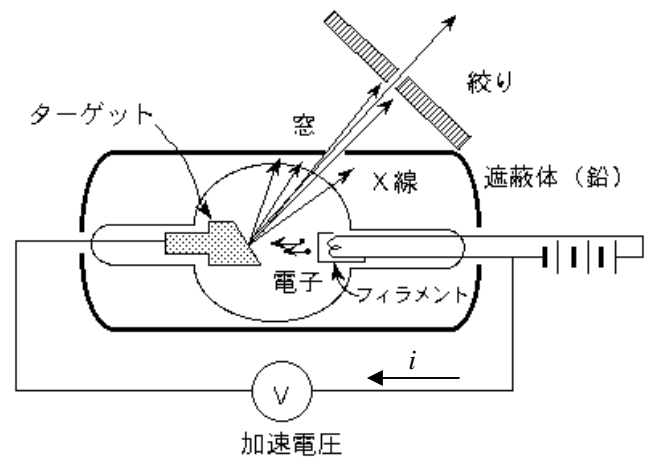


図 1 4.

まった場合には、直ちにX線管のスイッチを切る必要が出てくる。

放出されるX線の強度 I は、十分な有意さをもって計測が可能かどうか、あるいは事故が生じた場合の被爆の度合いを見積もるのに重要である。X線（連続X線）の強度 I は、放出されるX線の全エネルギーに比例するので、

$$I = CW_X = C\eta W_E = C \times 1.1 \times 10^{-9} Z_i V \times iV = C' Z_i i V^2$$

と書ける。ここで、 C 、 C' は定数である。これらのことから、X線発生装置の使用の際には、ターゲット物質、管電流、管電圧の記録が必要であることが理解できるであろう。

(4) X線の波長と強度

図15は、モリブデン (Mo) をターゲットとし、管電圧を 10 kV から 25 kV まで変化させたときに放出されるX線の強度の波長依存性を模式的に示したものである。Moの K_α 線のエネルギーは 17.4 kV、 K_β 線のエネルギーは 19.6 kV である。よって、これ以上のエネルギーをもった電子を入射させなければ特性X線であるK線は出てこない（このために必要な電圧を励起電圧という）。一方、これよりも低い電子のエネルギーを与える電圧では、連続X線のスペクトルが最短波長 λ_{min} を起点として表れる（連続X線の項を参照のこと）。

すでに、連続X線の強度については上の(3)項に述べた。ここでは、特性X線の強度について若干触れる。特性X線は図15に見るように、鋭く大きなピークとなり、その強度を I' とすると、

$$I' = C'' i (V - V_0)^n, \quad i: \text{管電流}, \quad V: \text{管電圧}$$

で表すことができる。ここで V_0 は特性X線の励起電圧であり、指数 n の値は $V \approx 2V_0$ のとき $n \approx 2$ 、 $V > 3V_0$ で $n \approx 1$ である。定数 C'' は実験定数である。

(5) X線回折 (XRD)

結晶は、原子あるいは分子が規則正しく3次的に並んだ構造である。外部から一定波長のX線が結晶に入射したとき、結晶構造に起因して回折現象が生じる。図16のように、ある原子面の間隔を d とすると、隣り合った原子面で反射されるX線の行路差は PBQ で表される。A点ならびにB点から散乱されたX線の位相が一致するとき、互いに強めあう回折が生じる。この反射X線が生じる条件は、行路差 PBQ がX線の波長の整数倍であればよい。よって、

$$PBQ = n\lambda, \quad (n = 1, 2, \dots)$$

が回折条件となる。一方、結晶構造の幾何学から、X線の入射角を θ とすると、上記の回折条件が生じるためには、

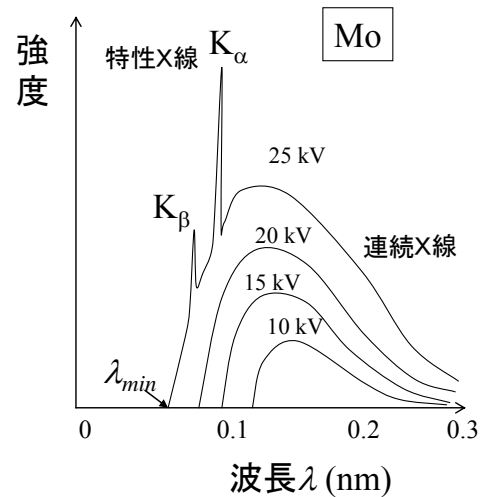


図15.

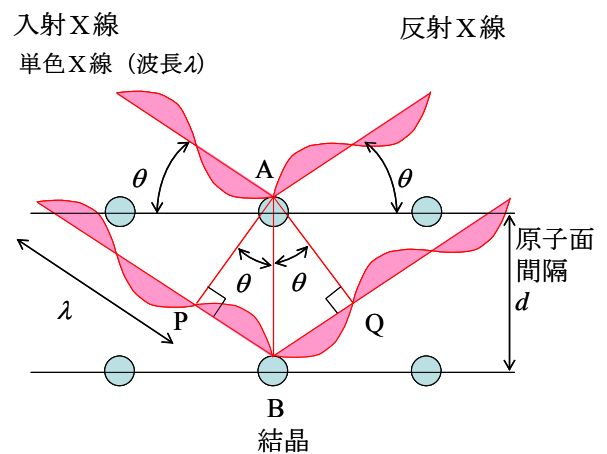


図16.

$$PB = BQ = d \sin \theta$$

でなければならない。よって

$$2d \sin \theta = n\lambda, (n=1,2,\dots)$$

を得る。これをブラッグの回折条件という。より厳密に回折条件を扱うためには、構成原子と X 線の相互作用による原子散乱因子、ならびに結晶構造に起因する構造因子の両者を取り入れた回折理論を勉強する必要がある。

X 線回折装置の簡単な原理を図 1 7 に示す。固定された X 線管から試料に X 線が照射され、試料表面からは散乱 X 線が生じる。試料は θ の角度だけ回転するとともに、散乱 X 線を計測するディテクターが 2θ だけ回転する。散乱波のうち、上に示したブラッグの回折条件を満たすもののみが強い反射 X 線を生じ、ディテクターに強いピークとして記録される。

なお、図 1 7 に示したように、X 線回折装置を使用する際には、装置内は X 線が出ているので、放射線を被爆する区域となる（法律では管理区域という）。X 線回折装置外は、遮蔽・防護措置を施し X 線の漏洩がないなら、管理区域外であって法的な規制は受けないが、被爆事故防止のため、管理区域における規則を準用して予防に努めている。

6. 放射線と物質の相互作用

放射線には、 α 線のような荷電粒子、 β 線（電子、陽電子）のような電荷を持つ軽い粒子、中性子やニュートリノのような電荷を持たない粒子がある。一方で、 γ 線と X 線はそれらの形成機構が異なるものの同じ電磁波であり、一般に γ 線よりも X 線の方がエネルギーが小さい。放射線と物質との相互作用は、放射線の種類ならびにエネルギーによって異なってくる。

逆に放射線の種類とエネルギーによって、物質中の透過能力も異なってくる。図 1 7 は、放射線の遮蔽についてよく説明されている図の焼き直しである。同じエネルギーを有するとき（通常自然界では MeV のエネルギーである）、 α 粒子は紙 1 枚で遮蔽でき、 β 粒子は数 mm 厚のアルミ板で遮蔽できる。しかし、 γ 線の遮蔽は 10 cm 厚の鉛、50 cm 以上の厚さのコンクリートが必要となってくる。このような物質の阻止能の差は、逆に言えば、 α 粒子は非常に短い距離で物質にエネルギーを与え、 β 粒子が物質へのエネルギー付与が α 粒子よりも小さく、さらに γ 粒子は非常にエネルギー付与が小さいことを意味している。

また、放射線により生じる様々な効果は、放射線と物質を構成する原子や分子との物理的

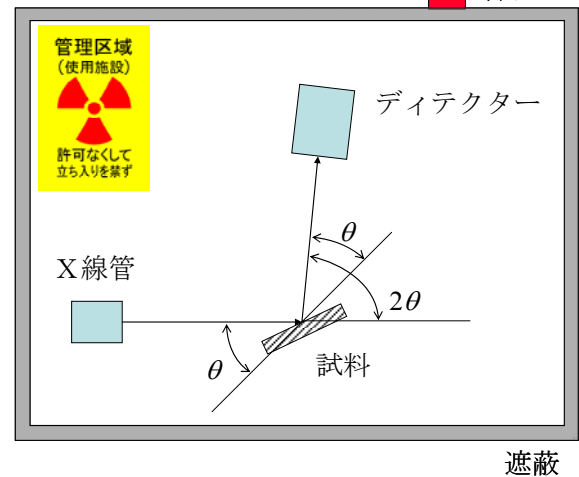


図 1 6 .

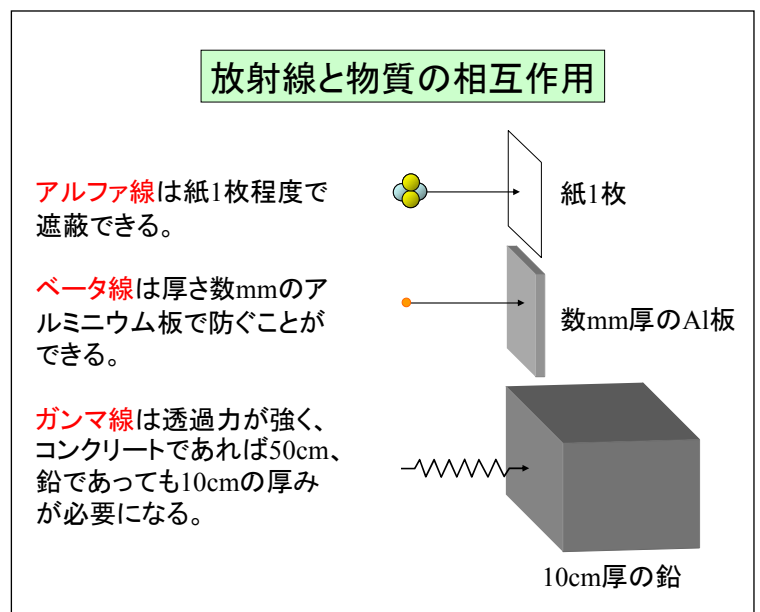


図 1 7 .

過程を起因として派生する。放射線障害として知られる生体への影響は、放射線と原子あるいは分子との物理的相互作用が、本来ない化学的要因をもたらす生体への何らかの障害を拡大していくものである。

(1) 粒子の速度、運動量、エネルギー

粒子のエネルギーが大きくなると、古典力学の適用が不可能となる。相対性理論によれば、粒子が静止しているときの質量を m_0 とすると、速度 v で運動しているときの質量 m は

$$m = m_0 / \sqrt{1 - \beta^2}, \text{ ただし、 } \beta = v/c, \text{ } c \text{ は光の速度}$$

となる。これより、粒子の運動量 p ならびに全エネルギー E は

$$p = mv = m_0 v / \sqrt{1 - \beta^2}, \quad E = mc^2 = m_0 c^2 / \sqrt{1 - \beta^2}$$

で与えられる。粒子が静止しているときのエネルギー、すなわち静止エネルギーは $E_0 = m_0 c^2$ である。よって、粒子の運動エネルギーを KE とすると、

$$KE = E - E_0 = m_0 c^2 (1 / \sqrt{1 - \beta^2} - 1)$$

で与えられる。

今、1.02 MeV のエネルギーで運動する電子 (β 粒子) を考えてみる。電子の静止質量を m_e とすると、質量エネルギー等価則より、電子の静止エネルギーは $m_e c^2 = 0.51 \text{ MeV}$ である。よって、 $2m_e c^2 = 1.02 \text{ MeV}$ となる。古典力学では運動エネルギーは $KE = m_e v^2 / 2$ であるので、

$$KE = \frac{m_e v^2}{2} = 2m_e c^2 \text{ より、 } v = 2c$$

となって、光の2倍の速度となる。速度が光の速度を超えることはないので、古典力学はもはや正しくないことは明らかである。相対性理論を用いると、

$$KE = 2m_e c^2 = m_e c^2 (1 / \sqrt{1 - \beta^2} - 1) \text{ より } \sqrt{1 - \beta^2} = 1/3, \therefore \beta = v/c = 2\sqrt{2}/3 \approx 0.766c$$

を得て、電子 (β 粒子) の速度は光の速度の 76.6% であることがわかる。

次に、1.02 MeV のエネルギーで運動する α 粒子 (He 原子核) を考えてみる。 α 粒子の質量を M_α とすると、 $2m_e c^2 = 1.02 \text{ MeV}$ であることを利用して、

$$KE = 2m_e c^2 = M_\alpha c^2 (1 / \sqrt{1 - \beta^2} - 1) \text{ より、 } \beta = \sqrt{(1 + 2m_e / M_\alpha)^2 - 1} / (1 + 2m_e / M_\alpha)$$

を得る。 $M_\alpha (4.00 \text{ u}) \gg m_e (5.49 \times 10^{-4})$ であるので、 $\beta = v/c \approx 2\sqrt{m_e / M_\alpha} = 0.023$ となり、1.02 MeV の α 粒子の速度は光速の 2.3% に過ぎない。これくらい遅いと粒子の運動を古典力学で扱ってもよい近似値を得る。

次に、電磁波である X 線や γ 線について考えてみる。これらの放射線は、波であると同時に、質量 0 の粒子 (光子) として捕らえることができる。ただし、質量は 0 であっても速度 c 、 $p = h/\lambda$ の運動エネルギーをもち、 $E = hc/\lambda$ のエネルギーを有する。したがって、X 線や γ 線と物質との相互作用において、運動量保存則やエネルギー保存則を用いて力学的な取り扱いを行っても良い。もう一つ重要なことがある。電子 (e^-) と陽電子 (e^+) が合体した場合、以下のように、2 個の γ 線が互いに逆方向に放出される。



これを電子対消滅という。 β^+ 線が物質中に入射した場合、物質内で減速された後、物質中の

電子と合体消滅して γ 線が形成される。陽電子のことをポジトロンという。これを利用した医療技術として、癌の診断に用いられるポジトロン断層法、PET((positron emission tomography))がある)。逆に 1.02 MeV の γ 線を物質中に入射すると、電子と陽電子の対が形成され、それぞれ逆方向に放出される。

$$\gamma \rightarrow e^- + e^+ \quad (\text{電子と陽電子のエネルギーはそれぞれ } 0.51 \text{ MeV 以上})$$

これを電子対生成という。このように、高エネルギーの γ 線は波と粒子性をもつだけでなく、粒子である電子と陽電子の生成・消滅にもかかわっている。

(2) 粒子間の衝突

今、電荷のない粒子 1 (質量 m_1 、運動量 p_1 、運動エネルギー E_1) が、静止している他の粒子 2 (質量 m_2) に衝突する場合を考える。ここでは簡単のため、粒子 1 と粒子 2 は正面衝突をするものとし、衝突後の粒子 1 の運動量、運動エネルギーをそれぞれ p'_1 、 E'_1 、粒子 2 の運動量と運動エネルギーを p'_2 、 E'_2 とする。運動エネルギー以外のエネルギー散逸がない弾性衝突では、運動量とエネルギー保存則より、

$$p_1 = p'_1 + p'_2, \quad E_1 = E'_1 + E'_2$$

である。粒子の速度が小さく古典力学近似ができる時には、運動エネルギーは $E = p^2/(2m)$ なので、エネルギー保存則より

$$\begin{aligned} \frac{p_1'^2}{2m_1} + \frac{p_2'^2}{2m_2} - \frac{p_1^2}{2m_1} &= \frac{p_1'^2}{2m_1} + \frac{(p - p'_1)^2}{2m_2} - \frac{p_1^2}{2m_1} = \frac{p_1'^2}{2m_1} + \frac{p^2}{2m_2} - \frac{2pp'_1}{2m_2} + \frac{p_1'^2}{2m_2} - \frac{p_1^2}{2m_1} \\ &= \frac{m_1 + m_2}{2m_1 m_2} p_1'^2 - 2 \frac{p_1}{2m_2} p'_1 + \frac{m_1 - m_2}{2m_1 m_2} p_1^2 = 0 \end{aligned}$$

だから、衝突後の粒子 1 の運動量は、 $m_2 = 0$ のとき $p'_1 = p$ であることに注意して

$$p'_1 = \frac{2m_1 m_2}{m_1 + m_2} \left\{ \frac{p_1}{2m_2} - \sqrt{\left(\frac{p_1}{2m_2} \right)^2 - \frac{(m_1 - m_2)(m_1 + m_2)}{2m_1 m_2} p_1^2} \right\} = \frac{m_1 - m_2}{m_1 + m_2} p_1$$

で与えられる。

これより粒子 1 と粒子 2 の質量がほぼ等しいときの正面衝突では、 $p'_1 \approx 0$ であって粒子 1 はとまり、粒子 2 が p とほぼ等しい運動量をもって弾き飛ばされる。粒子 1 の質量が粒子 2 の質量よりもはるかに大きく $m_1 \gg m_2$ の場合には $p'_1 \approx p$ であり、粒子 1 は衝突後も前方へ運動する(前方散乱)。一方、粒子 1 の質量が粒子 2 よりもはるかに小さく $m_1 \ll m_2$ の場合には $p'_1 \approx -p$ であり、粒子 1 は衝突によって跳ね返される(後方散乱)。

衝突によって粒子 1 の運動エネルギーの一部が、粒子 2 の励起エネルギー I に用いられる非弾性衝突の場合、エネルギーの保存則は以下ようになる。

$$E_1 = E'_1 + E'_2 + I$$

これより、衝突後の粒子 1、2 の運動エネルギーが弾性衝突の場合よりも減少することがわかる。粒子 1 と粒子 2 が電荷を持っている場合には、それぞれの電荷による静電ポテンシャルがエネルギー保存則に加えて、散乱過程を計算することになる。しかし、上に述べた弾性衝突のように、粒子 1 と粒子 2 の質量の違いによる散乱の違いは本質的に変わらない。

また、古典力学からのずれが大きくなる高エネルギー粒子の場合には、(1)項で述べたように相対性理論を用いた衝突の解析が必要となるが、この場合にも粒子 1 と粒子 2 の質量の違いによる散乱の違いは本質的に変わらない。さらには、X線や γ 線のように電磁波の場合には、 $p = h/\lambda$ 、 $E = hc/\lambda$ とおきおして衝突の解析が必要となる。

(3) α粒子と物質との相互作用

放射線が物質中に入射し、 dx の距離だけ進む間に $-dE$ だけのエネルギーを失うとき、 $-dE/dx$ を阻止能という。α粒子のような荷電粒子の場合には、エネルギー散逸の過程は、物質を構成する原子の原子核との衝突過程によるもの(核的衝突)と、物質中の電子との衝突過程(電子的衝突)の二つに大別され、阻止能は

$$-\frac{dE}{dx} = -\left(\frac{dE}{dx}\right)_n - \left(\frac{dE}{dx}\right)_e$$

と書ける。ここで右辺第1項が核的阻止能であり、第2項が電子的阻止能である。

図18に示すように、入射したα粒子が原子核の近傍を通る際には、原子核(質量M、原子番号Z)との間に静電的な反発力 $F_n = -2Ze^2/(4\pi\epsilon_0 r^2)$ により散乱が生じる(ϵ_0 は真空の誘電率、 r は入射粒子と原子核の距離)。原子核の質量Mはα粒子の質量 M_α よりも大きいので、散乱角が大きくなる(ラザフォード散乱)。しかし、原子核の大きさは原子よりも非常に小さいので、この核的衝突過程が起こる確率は小さい。

一方、α粒子が物質中の1個の電子と衝突する場合には、 $F_e = 2e^2/(4\pi\epsilon_0 r^2)$ の静電引力による静電引力による衝突過程となる。物質中に入射したα粒子のエネルギー散逸過程はもっぱら電子との衝突による。しかし、この電子的衝突過程では、 $M_\alpha \gg m_e$ なので、(2)項に述べたように、α粒子はほとんど運動エネルギーを失わない前方散乱となって、直線的に運動することになる。この際、電子は弾き飛ばされるので、物質中の原子はイオン化する。このとき、α粒子が失うエネルギーは原子のイオン化エネルギーIに相当する。

相対論を取り入れた電子的阻止能は、以下のベータ・ブロッホの式で与えられる²⁾。

$$\left(\frac{dE}{dx}\right)_e = -\frac{z^2 e^4}{4\pi\epsilon_0 m_e v^2} NZ \left(\ln \frac{2m_e v^2}{I} - \ln(1 - \beta^2) - \beta^2 \right)$$

ここで z 、 v は入射粒子の価数(α粒子では $z=2$)と速度であり、 N は物質中の単位体積あたりの原子数である。

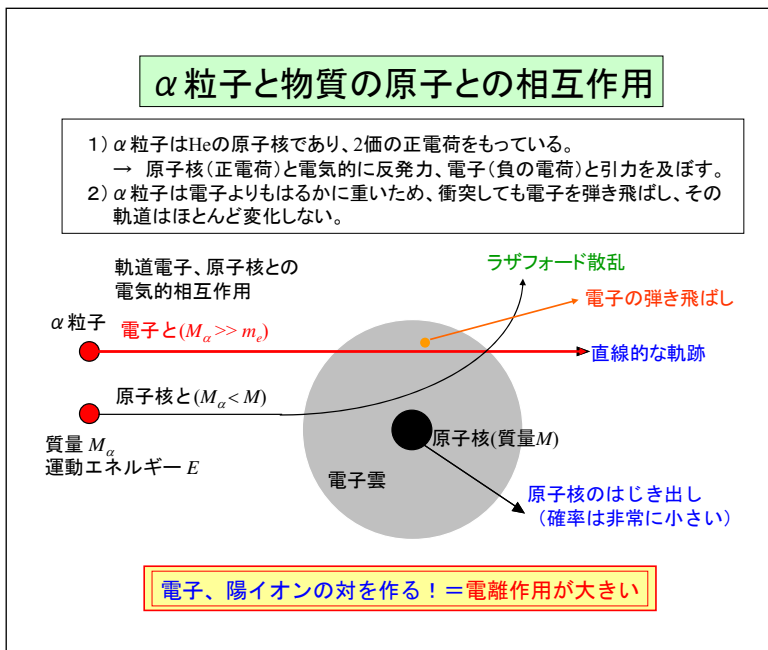


図18.

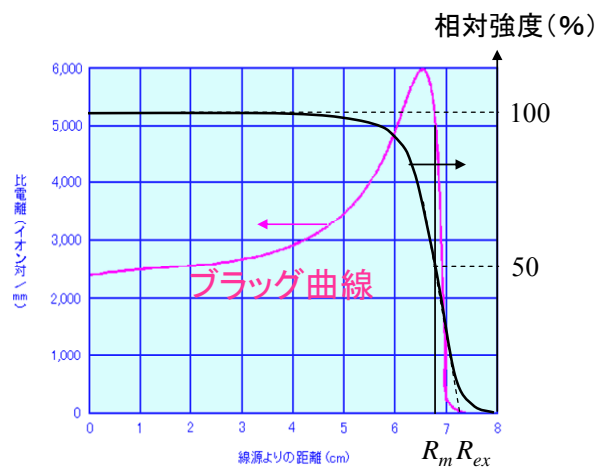


図2 Po-212(RaC')からのα線によるBragg曲線(空気中)

【出典】江藤秀雄ほか・放射線の防護、丸善(1982年12月)、p.58

図19.

図19は、²¹²Poから放出されたα線(8.78 MeV)の空気中での電離数(左の縦軸、 $(dE/dx)_e/I$)、透過したα粒子の割合(右の縦軸)の距離依存性である。図19より、α粒子のエネルギー

が高いときには、運動エネルギーはほぼ一定とみなせ、阻止能はほぼ一定で、 α 粒子が物質中でとめられる割合が非常に小さいことがわかる。しかし、 α 粒子が運動エネルギーを失い速度が小さくなってくると、核的阻止能の寄与が大きくなってきて阻止能が増加し、物質中でとめられる割合が増えてくる（図19に示すように、阻止能の距離依存性をブラッグ曲線と呼ぶ）。物質中で阻止された入射粒子の割合が50%のときの距離をもって平均飛程 R_m 、透過率が0となる外挿値で外挿飛程 R_{ex} を定義する。実験的に測定されたエネルギー $E(\text{MeV})$ の α 粒子の空気中の飛程 $R_{Air}(\text{cm})$ は、

$$R_{Air} = 0.56E \quad (E < 4 \text{ MeV})、\quad R_{Air} = 1.24E - 2.62 \quad (4 \text{ MeV} < E < 8 \text{ MeV})$$

で与えられる。

エネルギー E の α 粒子が物質中に入射した場合、 $n = E/I$ だけの電子・イオン対を形成する。 α 粒子に対して測定されている空気の分子の電離エネルギーは $I = 98 \text{ eV}$ である。よって、 ^{212}Po からの 8.78 MeV の α 粒子は 9.0×10^4 個の電子・イオン対を作ることになる。一方、上の式より飛程は $R = 8.3 \text{ cm}$ であるので、 1 mm 厚の空気層あたり平均で 1800 個程度の電子・イオン対を形成することになる。

阻止能の式より、数 MeV のエネルギーでは $\beta \ll 1$ なので、飛程は古典力学近似で、

$$R = \int_E^0 \frac{dx}{dE} dE = -\frac{8\pi\epsilon_0 m_e}{z^2 e^4 M_\alpha N Z} \int_E^0 \frac{M_\alpha v^2 / 2}{\ln \frac{2m_e M_\alpha v^2}{M_\alpha I}} dE = -\frac{8\pi\epsilon_0 m_e}{z^2 e^4 M_\alpha N Z} \int_0^E \frac{E}{\ln \frac{2m_e E}{M_\alpha I}} dE$$

となる。今、原子番号 Z' 、原子数密度 N' 、電離エネルギー I' の物質に同じエネルギー E の α 粒子が入射した場合の飛程 R' は、上の式で対数の項はあまり変化しないため、 R' と R の比は

$$\frac{R'}{R} \approx \frac{NZ}{N'Z'}$$

とできる。このような考えを基にして、実験的には、以下の Bragg-Kleeman の式が 15% 程度の誤差で飛程を表すことが知られている²⁾。

$$R' = \frac{\rho \sqrt{M'}}{\rho' \sqrt{M}} R, \quad \text{ただし } \rho (\rho'), M (M') \text{ は飛程 } R (R') \text{ のときの物質の密度と原子量}$$

これより、空気 (15°C 、 1 気圧で $\rho = 1.23 \times 10^{-3} \text{ g/cm}^3$ 、 $\sqrt{M} = 3.8$) の飛程 $R_{Air}(\text{cm})$ を用いると

$$R' = 3.2 \times 10^{-4} \sqrt{M'} R_{Air} / \rho' \quad (\text{cm})$$

となる。 ^{212}Po からの 8.78 MeV α 粒子が Al ($M' = 27 \text{ g}$ 、 $\rho' = 2.73 \text{ g/cm}^3$) に入射した場合、 $R' = 0.0051 \text{ cm} = 51 \mu\text{m}$ となる（クッキング用のアルミ фольドは $12 \mu\text{m}$ 程度であるので、1枚で包むだけでは ^{212}Po から出る α 線の遮蔽はできない）。先に与えた R_{Air} のエネルギー依存性を用いると、

$$R' = 1.8 \times 10^{-4} \sqrt{M'} E / \rho' \quad (E < 4 \text{ MeV})、\quad R' = 4 \times 10^{-4} \sqrt{M'} (E - 2.11) / \rho' \quad (4 \text{ MeV} < E < 8 \text{ MeV})$$

を得る。生体では数 MeV の α 粒子の飛程は数 $10 \mu\text{m}$ である皮膚の表皮の厚さは約 $200 \mu\text{m}$ であるので、 α 粒子は表皮内で止められることになる。ただし、飛程が短いということは、それだけ多くの照射損傷が発生するということであり、生体に与えるダメージが大きいことを意味する（後に示すように、生体に与える影響の大きさを表す線質係数として X 線が 1 であるのに対して、 α 粒子では 20 を用いる）。

(4) 電子および β 線と物質の相互作用

電子と物質の相互作用については、X線の発生原理の項ですでに述べたように、入射電子は原子核の静電引力に大きく曲げられる。このとき、運動エネルギーを失わない弾性散乱と、制動放射 X線を放出してエネルギーを失う非弾性散乱の二つの過程がある。また、入射電子は、同じく静電反発力により軌道電子と弾性散乱する場合と、軌道電子をはじき出し電子・イオン対を形成する非弾性散乱を行う。後者の非弾性散乱では特性 X線を放出することは先に述べた。従って、電子が運動エネルギーを失う非弾性散乱において、物質の阻止能は、

$$-\frac{dE}{dx} = -\left(\frac{dE}{dx}\right)_{ion} - \left(\frac{dE}{dx}\right)_{rad}$$

で与えられる (図 20 参照)。ここで右辺第 1 項は電子・イオン対形成の電離による阻止能、第 2 項は制動放射による阻止能を表す。相対論ならびに量子論に基づいてベーテが提案した電離阻止能の式は以下のとおりである³⁾。

$$\left(\frac{dE}{dx}\right)_{ion} = -\frac{e^2NZ}{8\pi\epsilon_0 m_e v^2} \left\{ \ln \frac{m_e v^2 E}{2I^2(1-\beta^2)} - (2\sqrt{1-\beta^2} - 1 + \beta^2) \ln 2 + 1 - \beta^2 + \frac{1}{8}(1 - \sqrt{1-\beta^2})^2 \right\}$$

また、制動放射による阻止能と電離阻止能の比は

$$\frac{(dE/dx)_{rad}}{(dE/dx)_{ion}} \approx \frac{(E + m_e c^2)Z}{1600m_e c^2}$$

で与えられる²⁾。1 MeV 程度の電子の場合、金属において、制動放射の阻止能は電離による阻止能に比べて数%となり飛程の計算においては前者を無視できる。

SEM、EPMA、EBSD などの電子線を試料に照射する装置では、数 10 keV の低エネルギーの電子線を用いる (このように低いエネルギーでは $\beta \approx 0$ として計算してよい)。(1) 項で述べたように、入射粒子とターゲット粒子の質量が同じ場合には、衝突により入射粒子はエネルギーをもっとも失い、軌跡が大きく曲がる。図 21 は、15 keV の電子を 200 個だけ Al 中に入射したときの電子の広がりをもつて電子線が Al 中で止められていることがわかる。また、表面からも入射電子が放出されることがわかる。

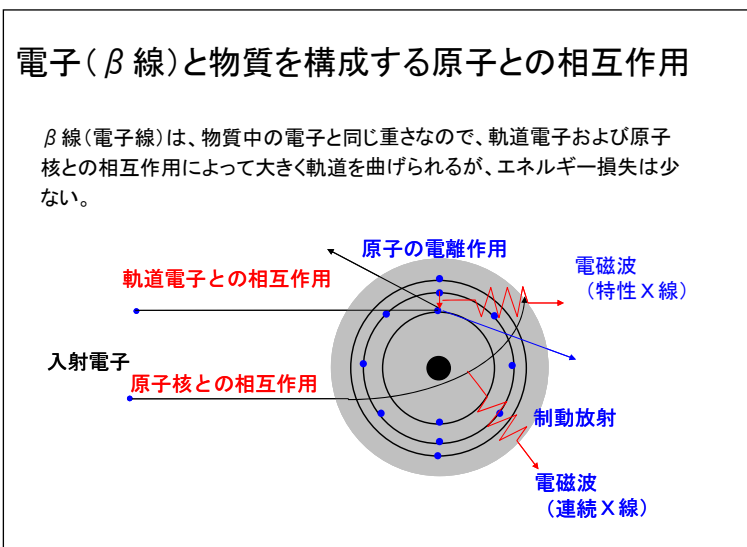


図 20.

単一エネルギーの電子線の場合、図 21 からわかるように物質内で空間的に広がるため、図 22 のよ

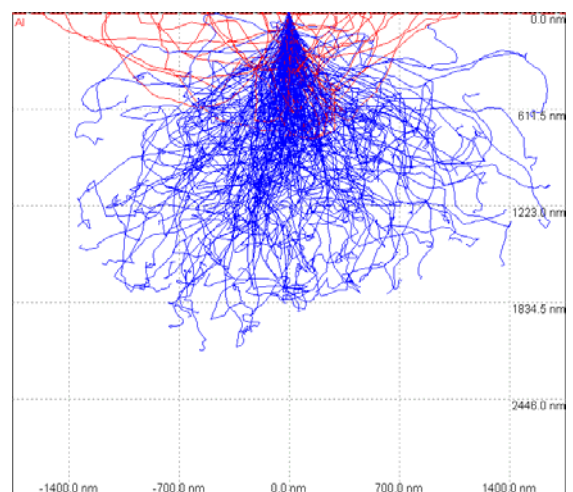
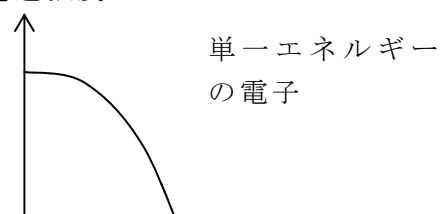


図 21. 15 keV 電子の Al 中での軌跡透過強度 I



うに、電子線の透過率は緩やかな距離依存性をもつ。そこで、透過率の減少率が大きくなる場所をとって外挿した距離を飛程 R として定義すると、以下のようにエネルギーと関連付けられることが実験的に求められている²⁾。

$$0.01 \text{ MeV} < E < 3 \text{ MeV}$$

$$R\rho = 0.412E^n, \quad n = 1.265 - 0.0954 \ln E$$

$$1 \text{ MeV} < E < 20 \text{ MeV}$$

$$R\rho = 0.530E - 0.106$$

ここで、 R の単位は cm、密度 ρ の単位は g/cm^3 、 E の単位は MeV である。

β 線は、これまで述べてきた単一エネルギーの電子線とは異なり、図 2 3 に示すように、連続的なエネルギー分布を持つ。エネルギー分布の最大値を E_{max} とすると、これよりも低いエネルギーでは残りのエネルギーはニュートリノの運動エネルギーとして消費されている。このように、 β 線ではエネルギーが連続的に分布しているために、物質中での阻止能が単一エネルギーの場合と異なり、透過率は図 2 4 に示すように、指数関数的となる。

すなわち、線吸収係数を m とすると、強度 I_0 の線源から平行に入射した β 線の x の位置での強度 I は、

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

で表される。吸収係数は最大エネルギーと以下の関係がある³⁾。

$$\mu = 17\rho / E_{max}^{1.43} \quad (0.15 < E_{max} < 3 \text{ MeV})$$

$$\mu = 22\rho / E_{max}^{1.33} \quad (0.5 < E_{max} < 6 \text{ MeV})$$

ただし μ 、 ρ 、 E_{max} の単位はそれぞれ cm 、 g/cm^3 、MeV である。空気の場合には、密度は $\rho = 1.23 \times 10^{-3} \text{ g/cm}^3$ (15°C 、1 気圧) であったから、 ^{40}K からの 1.3MeV の β 線に対して、線吸収係数は

$$\mu = 22 \times 1.23 \times 10^{-3} / 1.3^{1.33} = 0.019 \text{ cm}^{-1}$$

となる。これより、強度が半分になる距離 X は、 $X = \ln 2 / \mu = 36 \text{ cm}$ となる。Al の場合には、

$$\mu = 22 \times 2.7 / 1.3^{1.33} = 41.9 \text{ cm}^{-1}, \quad X = 0.165 \text{ mm}$$

である。

β 線の場合には縦軸に透過率の対数を取り横軸に物質中の距離をとって、自然放射線によるバックグラウンドの値に外挿した飛程 R を用いることもできる (図 2 4 参照)。このとき飛程はフェザーの式

$$R = (0.543E_{max} - 0.160) / \rho \quad \text{ただし } E > 0.7 \text{ MeV}$$

となる。

図 2 1 .

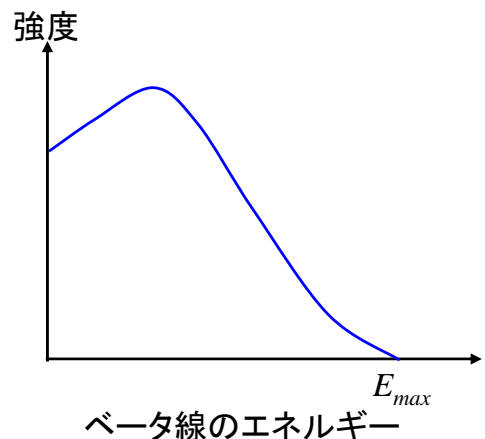


図 2 2 .

β 線の透過強度 I

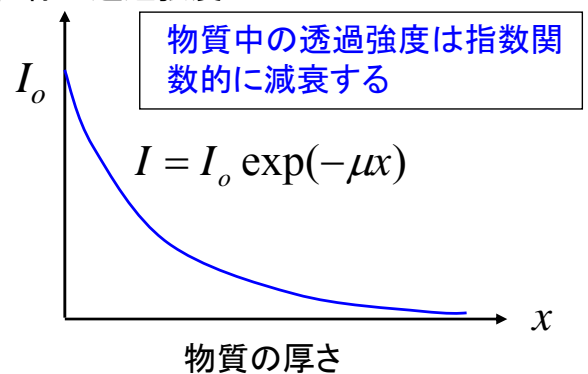


図 2 3 .

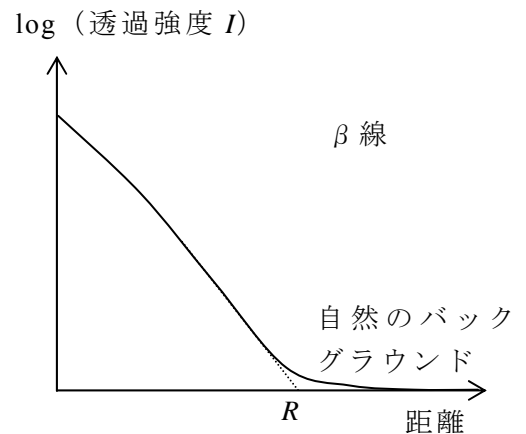


図 2 4 .

フェザーの式を用いると、⁴⁰Kからの1.3MeVのβ線に対して、空気中の飛程はR=4.4m、Al中の飛程はR=2.0mmとなる。生体の場合には、数MeVのβ線の飛程は数10mmである。これらの評価より、数MeVのエネルギーのβ線は同じエネルギーのα線よりもおよそ100倍の大きな飛程をもつことがわかる。逆に、この分だけ電離密度は減るので、生体に与える影響は小さくなり、β線の生体に及ぼす影響の線質係数を1とする。

(5) X線、γ線と物質の相互作用

X線とγ線は発生原理が異なるだけで、ともに電磁波であることは先に述べた。これらの放射線はE=hν(νは振動数 ν=c/λ)のエネルギーを有するが、金属に電子線を照射して形成されるX線では通常100keV以下のエネルギーとなる。

【光電効果】

このように低いエネルギーのγ(X)線は、図25に示すように、物質中の電子と相互作用し、弾性散乱(トムソン散乱)が生じるか、軌道電子をたたき出す非弾性散乱の光電効果が生じる。後者では、電子・イオン対形成の電離作用が発生する。トムソン散乱では、電磁波によって物質中の電子と衝突する断面積σ_Tは、以下のように与えられる³⁾。

$$\sigma_T = \frac{8\pi}{3} \left(\frac{e^2}{4\pi\epsilon_0 m_e c^2} \right)^2 = 6.65 \times 10^{-29} \text{ m}^2$$

これに対し、例えば、K殻の電子をたたき出す光電効果の場合、K殻電子の電離エネルギーをE_Kとすると、はじき出された電子(光電子、photoelectron)のエネルギーは、

$$E_{\text{photoelectron}} = E - E_K$$

となり、断面積は

$$\sigma_{\text{photo}}(K) = \frac{4\sqrt{2}}{137^4} Z^5 \sigma_T \left(\frac{m_e c^2}{E - E_K} \right)^{7/2}$$

で与えられる。

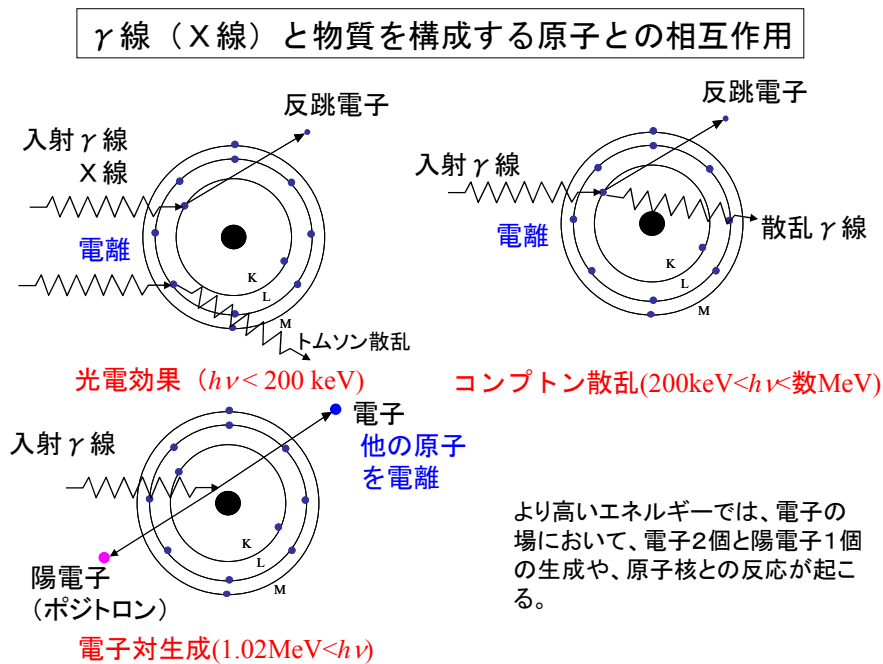


図25.

この式は、物質の原子番号が大きいほどZ⁵に比例して光電効果が生じやすく、エネルギーが

大きくなるほど $E^{7/2}$ に逆比例して光電効果が生じにくいことを示している。また、電磁波のエネルギーが軌道電子の電離エネルギー程度になると光電効果が急激に増大し、電離エネルギーを境にして衝突断面積は不連続となる（図 2 7 参照）。

【コンプトン散乱】

エネルギーがさらに大きくなると、 γ 線の領域となり、軌道電子をたたき出した後、自らも散乱されるコンプトン散乱が生じる（図 2 6 参照）。このとき、 γ 線をエネルギー $E = h\nu = hc/\lambda$ 、運動量 $p = h/\lambda$ をもつ粒子（光子）として、運動量とエネルギーの保存則より、角度 θ の方向への散乱 γ 線のエネルギーは

$$E' = \frac{m_e c^2}{m_e c^2 + E(1 - \cos \theta)} E$$

で与えられる。角度 θ はどのような値をとってもよいので散乱 γ 線のエネルギーは連続的になる。

コンプトン散乱の断面積はクライン・仁科の式で表される^{5), 6)}。

$$\sigma_{Compt} = \frac{3\sigma_T}{4} Z \left[\frac{1+a}{a^3} \left\{ \frac{2a(1+a)}{1+2a} - \ln(1+2a) \right\} + \frac{1}{2a} \ln(1+2a) - \frac{1+3a}{(1+2a)^2} \right]$$

ここで、 $a = E/(m_e c^2)$ であり、断面積は Z 個の軌道電子をもつ原子に対してとっている（通常は電子 1 個に対する断面積で表される）。 $E \ll m_e c^2$ のときには上式は以下のように近似できる。

$$\sigma_{Compt} \approx \frac{3\sigma_T}{4} Z \left(1 - 2 \frac{E}{m_e c^2} \right)$$

$E \gg m_e c^2$ のときには、以下のように近似できる。

$$\sigma_{Compt} \approx \frac{3}{8} \sigma_T Z \frac{m_e c^2}{E} \left(\ln \frac{2E}{m_e c^2} + \frac{1}{2} \right)$$

この式から、コンプトン散乱の起こりやすさは物質の原子番号に比例し、エネルギーとともに減少することがわかる。

【電子対生成】

図 2 5 に示したように、 γ 線のエネルギーが $2m_e c^2 = 1.02 \text{ MeV}$ 以上になると、原子核近傍に入射した際、電子と陽電子が生成される。これを電子対生成（創生）という。生成された電子と陽電子の運動エネルギーをそれぞれ E_1 、 E_2 とすると、

$$E_1 + E_2 = E - 2m_e c^2$$

となる。電子対生成の断面積は以下の近似式で表すことができる。また電子対生成の断面積は、 $m_e c^2 \ll E \ll 137m_e c^2 Z^{-1/3}$ のエネルギー領域で

$$\sigma_{pair} \approx \frac{28\sigma_o Z^2}{9} \left(\ln \frac{2E}{m_e c^2} - \frac{109}{42} \right)$$

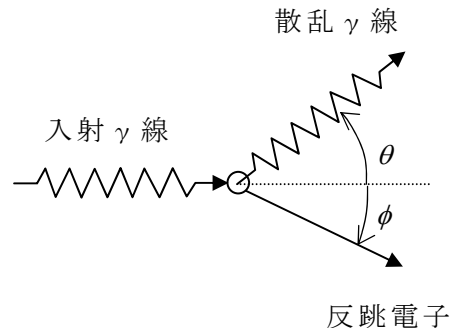


図 2 6 . コンプトン散乱

であり、原子番号の 2 乗に比例して増加し、またエネルギーとともに緩やかに増加する。一方、 $137m_e c^2 Z^{-1/3} \ll E$ のエネルギー領域では、

$$\sigma_{pair} \approx \frac{28\sigma_o Z^2}{9} \left(\ln \frac{183}{Z^{1/3}} - \frac{1}{42} \right)$$

となって高エネルギーでは断面積は飽和する。

【吸収係数】

γ 線と物質の相互作用の全断面積は、これまで述べてきたそれぞれの現象の断面積を足し合わせて得られる。すなわち、

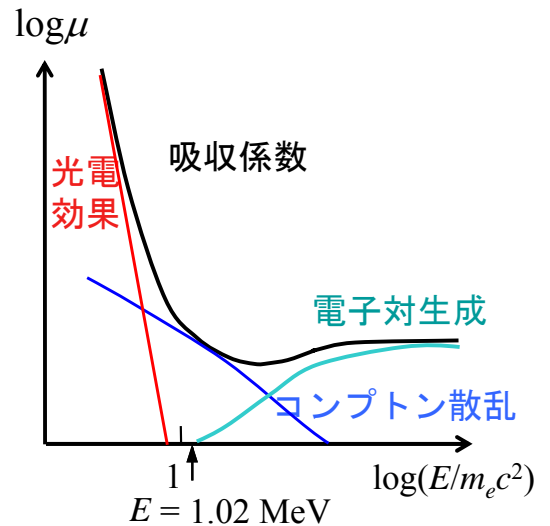
$$\sigma = \sigma_{photo} + \sigma_{Compt} + \sigma_{pair}$$

である（この他にも相互作用があるが断面積が小さいので無視できる）。 N を単位体積あたりの原子数とすると、吸収係数は

$$\begin{aligned} \mu &= N\sigma = N\sigma_{photo} + N\sigma_{Compt} + N\sigma_{pair} \\ &= \mu_{photo} + \mu_{Compt} + \mu_{pair} \end{aligned}$$

となって、やはりそれぞれの現象の吸収係数を足し合わせることで得られる。それぞれの吸収係数と全吸収係数のエネルギー依存性の模式図を図 27 に示す。エネルギーが低い X 線では光電効果による吸収がもっぱらであることは言うまでもない。

図 28 は、 γ (X) 線が板状の物質に入射したときの減衰の様子を模式的に表したものである。表面で強



γ 線のエネルギー

図 27.

γ 線 (X 線) と物質との相互作用

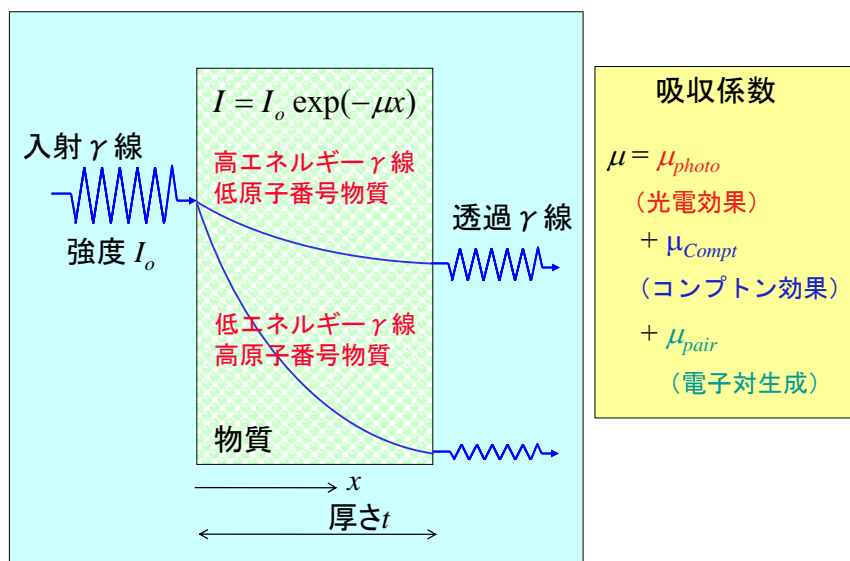


図 28.

度 I_0 のとき、表面から x の位置における強度 I は、全吸収係数を用いて、

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

で表される。物質の原子番号が小さいほど、また γ (X) 線のエネルギーが高いほど吸収係数は小さいので、物質を透過しやすい。逆に、原子番号が大きく、エネルギーが低いほど、 γ (X) 線は吸収されやすい。

図 29 に、鉛 Pb(Z = 82) の吸収係数 μ のエネルギー依存性を示す。低エネルギー側 (X 線領域) では、光電効果が支配しており、M 殻電子の吸収が起こる M 吸収端、L 殻電子の吸収が起こる L 吸収端、K 殻電子の吸収が起こる K 吸収端がエネルギーが高くなるにつれて現れることがわかる。吸収係数はエネルギーとともに減少し、コンプトン散乱が重要となってくる MeV 程度のエネルギーで最小値を示す。さらにエネルギーが増加すると数 MeV 以上では、電子対生成の寄与が大きくなり、吸収係数が増加する。図 30 に、Al、Ni、Mo、Pb の吸収係数のエネルギー依存性を示す。この図からわかるように、一般に原子番号が増加すると吸収係数は増加し、数 10keV の X 線領域では、Pb の吸収係数は Al のそれよりも 100 倍程度大きい。

図 31 は、身近にある素材の吸収係数のエネルギー依存性を表す図である。これより、

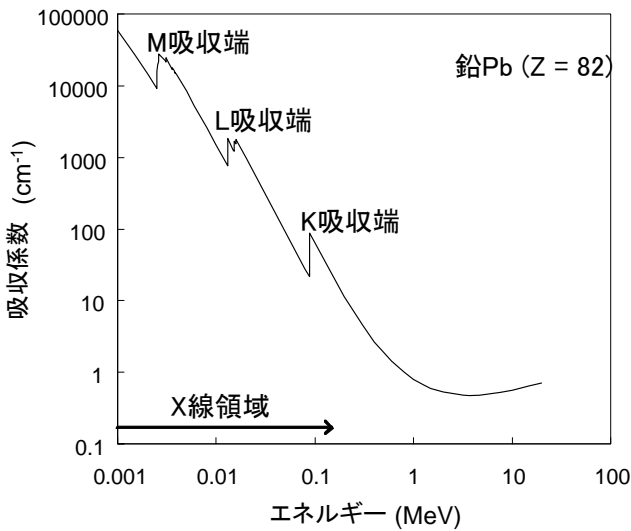


図 29 .

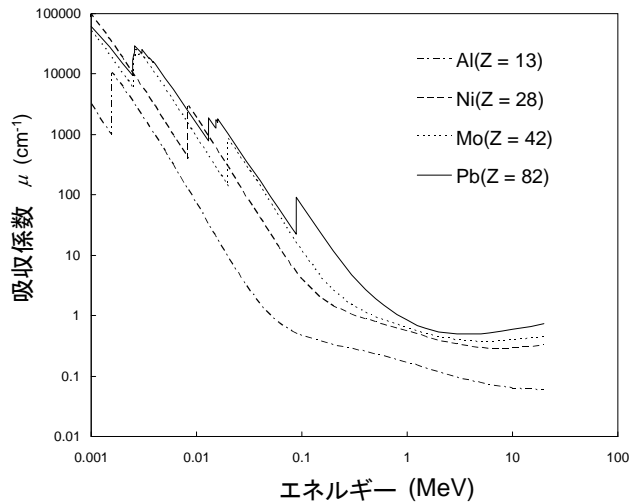


図 30 .

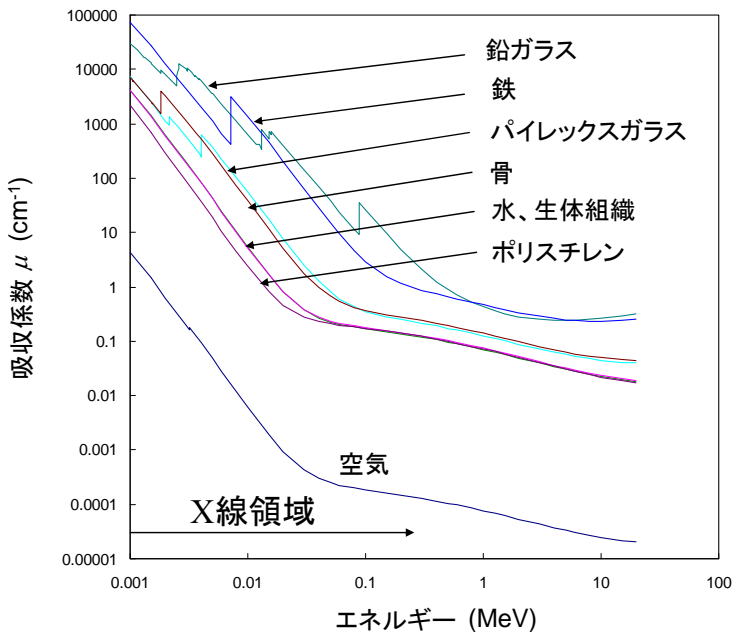


図 31 .

生体組織がほぼ水や高分子材料、骨がガラスの吸収係数に相当することがわかる。また、X線発生装置の遮蔽に用いられている鉛ガラスが鉄の吸収係数に相当し、10 keV以上のX線に対しては鉄よりも大きな遮蔽効果を有することがわかる。一方、空気は吸収係数が著しく小さい。

【半価層】

平行な放射線が物質に入射した際、その強度が半分になる厚さ X を半価層として定義する。 γ (X) 線では、

$$\frac{1}{2} = \exp(-\mu X) \text{ より、 } X = \frac{\ln 2}{\mu} \text{、及び } I = I_0 \left(\frac{1}{2} \right)^{x/X}$$

である。これより、 nX の厚さでは、強度は $(1/2)^n$ まで減少することになる。あるいは 10^m 分の1まで減少させたいとき、 $n = 3.32m$ である。表4には、X線に対する空気、水、生体組織、骨、Al、Fe、Pb いて計算した半価層の値を示す。X線回折装置など工業用に用いられるX線のエネルギーは最大で数10keVであり、医療用では100 keV程度のエネルギーが用いられる。この表より、これらのエネルギーでは空気中でほとんど遮蔽されないことがわかる。また、生体組織や骨の半価層は数 cm であり、レントゲン写真などの透過X線を用いる診断では高エネルギーのX線が望ましいこともわかる。また、例えば30 kVのX線に対しての遮蔽に金属材料を用いる場合、3 mm厚の板を用いると、Alでは $(1/2)^{5/2.28} \times 100 = 40\%$ 、Feでは $(1/2)^{3/0.45} \times 100 = 0.98\%$ 、Pbでは $(1/2)^{3/0.00547} \times 100 \approx 0\%$ の透過率となる。

水は、図3-1、表4に示したように、生体組織とほぼ同じ吸収係数を示す。そこで、1 MeVの α 線、 β 線ならびに γ 線の水中の半価層を評価してみることにする。

α 粒子では

$$R' = 1.8 \times 10^{-4} \sqrt{M'E} / \rho' \quad (E < 4 \text{ MeV})$$

であった。水 (H_2O) の原子量として、 $\sqrt{M'} = (2M_H + M_O) / (2\sqrt{M_H} + \sqrt{M_O}) = (2+16) / (2+\sqrt{16}) = 3$ とする (M_H は水素の原子量、 M_O はOの原子量)。これより、 $\rho' = 1 \text{ g/cm}^3$ 、 $E = 1 \text{ MeV}$ として、

表4. X線の半価層 (単位 mm)

エネルギー (keV)	空気	水	生体組織	骨	Al	Fe	Pb
1	1.60	0.00504	0.00171	0.00095	0.00217	9.69E-05	0.000117
5	143	0.163	0.166	0.0188	0.0133	0.00630	0.000836
10	1123	1.30	1.32	0.127	0.0979	0.03428	0.00468
15	3564	4.14	4.20	0.400	0.323	0.108	0.00911
20	7395	8.56	8.59	0.902	0.746	0.243	0.00377
30	16259	18.5	18.1	2.71	2.28	0.450	0.00547
40	23148	25.8	25.1	5.42	4.52	0.731	0.00567
50	27655	30.5	29.4	8.51	6.97	1.48	0.00411
60	30679	33.7	32.3	11.5	9.24	2.37	0.00431
80	34610	37.7	36.1	16.2	12.7	4.48	0.00454
100	37328	40.6	38.7	19.5	15.1	6.03	0.00395

$R' = 5.4 \times 10^{-4} \text{ cm} = 54 \mu\text{m}$ となる。図 19 に示したように、 α 粒子では半価層は飛程よりも若干小さくなるが、おおよそ $50 \mu\text{m}$ としてよい。

β 線の場合には吸収係数が $\mu = 17\rho/E_{\text{max}}^{1.43}$ で与えられた。よって $\rho = 1 \text{ g/cm}^3$ 、 $E_{\text{max}} = 1 \text{ MeV}$ として、半価層は $\ln 2/\mu = 1/17 \text{ cm} = 410 \mu\text{m}$ となる。

1 MeV の γ 線の場合、水の吸収係数は $\mu = 0.0707 \text{ cm}^{-1}$ であるので、半価層は $\ln 2/\mu = 98 \text{ m}$ となる。

図 3 2 には、1 MeV のエネルギーで計算した α 線の飛程、 β 線の半価層を皮膚の組織写真に組み入れたものである。表皮は $200 \mu\text{m}$ 以下の厚さであり、1 MeV α 粒子は表皮の角質層の中でとまることになる。一方、

β 線の半価層は $400 \mu\text{m}$ なので表皮下の真皮組織まで到達する。半価層 98 m の γ 線は皮膚組織を透過してしまう。

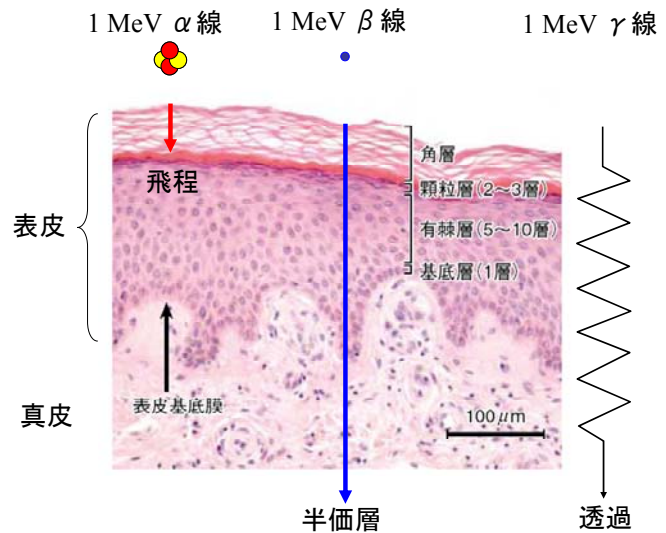


図 3 2 .

7. 放射線の量

(1) フルーエンス、フラックス

図 3 3 に示すように空間中を α 線や β 線などの粒子放射線が透過する場合、時間 t の間に、面積 A を通る粒子の数を N とする。このとき、

$$\psi = \frac{N}{A}$$

をフルーエンスという。また、単位時間当たりのフルーエンスをフラックス（あるいは粒子束）と言い、以下のように定義する。

$$\phi = \frac{d\psi}{dt} = \frac{1}{A} \frac{dN}{dt}$$

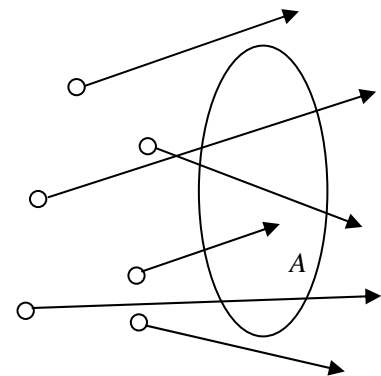
これまで述べてきた放射線の強度はこれらに相当する。

(2) 照射線量

照射線量という場合、二つの用いられ方がある。一つは、理工学分野で専らであり、原子炉や加速器などの放射線発生装置による放射線照射量を取り扱う場合である。これは、上記のフルーエンスに相当し、通常は単位面積当たりの積算量とする。照射線量率は同じく上記のフラックスに相当する。

もう一つは、放射線学で専ら用いられる定義であり、X線や γ 線などの電磁放射線の照射により、ある定められた量の空気中に生成される電離数を言う。古い照射線量の単位の定義では、 0°C 、1気圧の空気（密度 1.293 mg/cm^3 ）中に形成される電離数を使った。すなわち、照射線量の単位として 1 R（レントゲン）を、標準空気 1 cm^3 中に 1 静電単位 (esu) の電離量とする。今日では、1 kg あたりの標準空気において生成される電離量（単位 C）で定義される。よって、SI 単位を用いると、旧単位の R は、

$$1 \text{ R} = 1 \text{ esu/cm}^3 = 2.58 \times 10^{-4} \text{ C/kg}$$



となる。

(3) 吸収線量

放射線の照射によって物質にはエネルギーが付与される。従って、物質に吸収されるエネルギーをもって照射線量を定義できる。すなわち、質量 dM の物質に dW のエネルギーが吸収されたものとする。このとき、

$$\Phi = \frac{dW}{dM}$$

を吸収線量として定義する。吸収線量の単位を Gy (グレイ) として、 $1 \text{ Gy} = 1 \text{ J/kg}$ とする。旧来使われた単位は rad (ラド) であり、 $1 \text{ rad} = 100 \text{ erg/g}$ で定義されていたので、 $1 \text{ Gy} = 100 \text{ rad}$ である。

さて、物質に入射した粒子の数を N 、物質に与えて失ったエネルギーを $-dE$ とすれば、 $dW = -NdE$ である。入射放射線が平行ビームのとき、 ρ を物質の密度、 A を断面積として、 $dM = \rho A dx$ とできる。よって、

$$\Phi = \frac{dW}{dM} = -\frac{N}{\rho A} \frac{dE}{dx} = \frac{\psi}{\rho} \left(-\frac{dE}{dx} \right)$$

とできる。ここで、 $\psi = N/A$ はフルーエンスである。これより、同一フルーエンスであれば、阻止能 $(-dE/dx)$ が大きい放射線ほど、吸収線量が大きいことがわかる。

X線や γ 線では、入射した放射線のエネルギーもまた $E = E_0 \exp(-\mu_{en}x)$ の減衰をしめす。ここで μ_{en} はエネルギー吸収係数と呼ばれ、X線領域では先に述べた吸収係数 μ とほぼ同じ値であるが、エネルギーが高い γ 領域ではエネルギー吸収係数は線吸収係数よりも小さくなる。これより、

$$\frac{dE}{dx} = -\mu_{en}E \text{ だから、 } \Phi = \frac{dW}{dM} = \frac{\psi}{\rho} \left(-\frac{dE}{dx} \right) = \frac{\mu_{en}\psi E}{\rho}$$

となる。

参考文献

- 1) R. D. Evans, "The Atomic Nucleus" (McGraw-Hill Co. Ltd., 1955), Chapter 11.
- 2) R. D. Evans, "The Atomic Nucleus" (McGraw-Hill Co. Ltd., 1955), Chapter 21.
- 3) 大塚徳勝, "Q&A 放射線物理" (共立出版)、4章.
- 4) モンテカルロシミュレーション計算ソフト CASINO を用いて計算.
- 5) 野中到, "核物理学" (倍風館)、3章.
- 6) R. D. Evans, "The Atomic Nucleus" (McGraw-Hill Co. Ltd., 1955), Chapter 23.
- 7) National Institute of Standards and Technology, Physics Laboratory, Physical Reference Data, NSITTR5632, <http://physics.nist.gov/PhysRefData/XrayMassCoef/cover.html>.

特性 X 線のエネルギー (keV)

No.	Element	$K_{\alpha 1}$	$K_{\alpha 2}$	$K_{\beta 1}$	$L_{\alpha 1}$	$L_{\alpha 2}$	$L_{\beta 1}$	$L_{\beta 2}$	$L_{\gamma 1}$
3	Li	0.0543							
4	Be	0.1085							
5	B	0.1833							
6	C	0.277							
7	N	0.3924							
8	O	0.5249							
9	F	0.6768							
10	Ne	0.8486	0.8486						
11	Na	1.04098	1.04098	1.0711					
12	Mg	1.2536	1.2536	1.3022					
13	Al	1.4867	1.48627	1.55745					
14	Si	1.73998	1.73938	1.83594					
15	P	2.0137	2.0127	2.1391					
16	S	2.30784	2.30664	2.46404					
17	Cl	2.62239	2.62078	2.8156					
18	Ar	2.9577	2.95563	3.1905					
19	K	3.3138	3.3111	3.5896					
20	Ca	3.69168	3.68809	4.0127	0.3413	0.3413	0.3449		
21	Sc	4.0906	4.0861	4.4605	0.3954	0.3954	0.3996		
22	Ti	4.51084	4.50486	4.93181	0.4522	0.4522	0.4584		
23	V	4.9522	4.94464	5.42729	0.5113	0.5113	0.5192		
24	Cr	5.41472	5.405509	5.94671	0.5728	0.5728	0.5828		
25	Mn	5.89875	5.88765	6.49045	0.6374	0.6374	0.6488		
26	Fe	6.40384	6.39084	7.05798	0.705	0.705	0.7185		
27	Co	6.93032	6.9153	7.64943	0.7762	0.7762	0.7914		
28	Ni	7.47815	7.46089	8.26466	0.8515	0.8515	0.8688		
29	Cu	8.04778	8.02783	8.90529	0.9297	0.9297	0.9498		
30	Zn	8.63886	8.61578	9.572	1.0117	1.0117	1.0347		
31	Ga	9.25174	9.22482	10.2642	1.09792	1.09792	1.1248		
32	Ge	9.88642	9.85532	10.9821	1.188	1.188	1.2185		
33	As	10.54372	10.50799	11.7262	1.282	1.282	1.317		
34	Se	11.2224	11.1814	12.4959	1.3791	1.3791	1.41923		
35	Br	11.9242	11.8776	13.2914	1.48043	1.48043	1.5259		
36	Kr	12.649	12.598	14.112	1.586	1.586	1.6366		
37	Rb	13.3953	13.3358	14.9613	1.69413	1.69256	1.75217		
38	Sr	14.165	14.0979	15.8357	1.80656	1.80474	1.87172		
39	Y	14.9584	14.8829	16.7378	1.92256	1.92047	1.99584		
40	Zr	15.7751	15.6909	17.6678	2.04236	2.0399	2.1244	2.2194	2.3027
41	Nb	16.6151	16.521	18.6225	2.16589	2.163	2.2574	2.367	2.4618
42	Mo	17.47934	17.3743	19.6083	2.29316	2.28985	2.39481	2.5183	2.6235
43	Tc	18.3671	18.2508	20.619	2.424		2.5368		
44	Ru	19.2792	19.1504	21.6568	2.55855	2.55431	2.68323	2.836	2.9645
45	Rh	20.2161	20.0737	22.7236	2.69674	2.69205	2.83441	3.0013	3.1438
46	Pd	21.1771	21.0201	23.8187	2.83861	2.83325	2.99022	3.17179	3.3287
47	Ag	22.16292	21.9903	24.9424	2.98431	2.97821	3.15094	3.34781	3.51959
48	Cd	23.1736	22.9841	26.0955	3.13373	3.12691	3.31657	3.52812	3.71686
49	In	24.2097	24.002	27.2759	3.28694	3.27929	3.48721	3.71381	3.92081
50	Sn	25.2713	25.044	28.486	3.44398	3.43542	3.6628	3.90486	4.13112
51	Sb	26.3591	26.1108	29.7256	3.60472	3.59532	3.84357	4.10078	4.34779

52	Te	27.4723	27.2017	30.9957	3.76933	3.7588	4.02958	4.3017	4.5709
53	I	28.612	28.3172	32.2947	3.93765	3.92604	4.22072	4.5075	4.8009
54	Xe	29.779	29.458	33.624	4.1099				
55	Cs	30.9728	30.6251	34.9869	4.2865	4.2722	4.6198	4.9359	5.2804
56	Ba	32.1936	31.8171	36.3782	4.46626	4.4509	4.82753	5.1565	5.5311
57	La	33.4418	33.0341	37.801	4.65097	4.63423	5.0421	5.3835	5.7885
58	Ce	34.7197	34.2789	39.2573	4.8402	4.823	5.2622	5.6134	6.052
59	Pr	36.0263	35.5502	40.7482	5.0337	5.0135	5.4889	5.85	6.3221
60	Nd	37.361	36.8474	42.2713	5.2304	5.2077	5.7216	6.0894	6.6021
61	Pm	38.7247	38.1712	43.826	5.4325	5.4078	5.961	6.339	6.892
62	Sm	40.1181	39.5224	45.413	5.6361	5.609	6.2051	6.586	7.178
63	Eu	41.5422	40.9019	47.0379	5.8457	5.8166	6.4564	6.8432	7.4803
64	Gd	42.9962	42.3089	48.697	6.0572	6.025	6.7132	7.1028	7.7858
65	Tb	44.4816	43.7441	50.382	6.2728	6.238	6.978	7.3667	8.102
66	Dy	45.9984	45.2078	52.119	6.4952	6.4577	7.2477	7.6357	8.4188
67	Ho	47.5467	46.6997	53.877	6.7198	6.6795	7.5253	7.911	8.747
68	Er	49.1277	48.2211	55.681	6.9487	6.905	7.8109	8.189	9.089
69	Tm	50.7416	49.7726	57.517	7.1799	7.1331	8.101	8.468	9.426
70	Yb	52.3889	51.354	59.37	7.4156	7.3673	8.4018	8.7888	9.7801
71	Lu	54.0698	52.965	61.283	7.6555	7.6049	8.709	9.0489	10.1434
72	Hf	55.7902	54.6114	63.234	7.899	7.8446	9.0227	9.3473	10.5158
73	Ta	57.532	56.277	65.223	8.1461	8.0879	9.3431	9.6518	10.8952
74	W	59.31824	57.9817	67.2443	8.3976	8.3352	9.67235	9.9615	11.2859
75	Re	61.1403	59.7179	69.31	8.6525	8.5862	10.01	10.2752	11.6854
76	Os	63.0005	61.4867	71.413	8.9117	8.841	10.3553	10.5985	12.0953
77	Ir	64.8956	63.2867	73.5608	9.1751	9.0995	10.7083	10.9203	12.5126
78	Pt	66.832	65.112	75.748	9.4423	9.3618	11.0707	11.2505	12.942
79	Au	68.8037	66.9895	77.984	9.7133	9.628	11.4423	11.5847	13.3817
80	Hg	70.819	68.895	80.253	9.9888	9.8976	11.8226	11.9241	13.8301
81	Tl	72.8715	70.8319	82.576	10.2685	10.1728	12.2133	12.2715	14.2915
82	Pb	74.9694	72.8042	84.936	10.5515	10.4495	12.6137	12.6226	14.7644
83	Bi	77.1079	74.8148	87.343	10.8388	10.73091	13.0235	12.9799	15.2477
84	Po	79.29	76.862	89.8	11.1308	11.0158	13.447	13.3404	15.744
85	At	81.52	78.95	92.3	11.4268	11.3048	13.876		16.251
86	Rn	83.78	81.07	94.87	11.727	11.5979	14.316		16.77
87	Fr	86.1	83.23	97.47	12.0313	11.895	14.77	14.45	17.303
88	Ra	88.47	85.43	100.13	12.3397	12.1962	15.2358	14.8414	17.849
89	Ac	90.884	87.67	102.85	12.652	12.5008	15.713		18.408
90	Th	93.35	89.953	105.609	12.9687	12.8096	16.2022	15.6237	18.9825
91	Pa	95.868	92.287	108.427	13.2907	13.1222	16.702	16.024	19.568
92	U	98.439	94.665	111.3	13.6147	13.4388	17.22	16.4283	20.1671
93	Np				13.9441	13.7597	17.7502	16.84	20.7848
94	Pu				14.2786	14.0842	18.2937	17.2553	21.4173
95	Am				14.6172	14.4119	18.852	17.6765	22.0652