

放射線量の概念と放射線防護

早川 恭史

日本大学 量子科学研究所 電子線利用研究施設

2011 年 4 月 16 日

1. 放射線と放射能

1.1 放射線・放射能とは？

放射線とは一般に高いエネルギーを持った粒子線のことであり、放射能とは放射線を放出する能力を定量的に表すための物理量である。しかし、「放射能」は一般的には放射線を放出する物質のことを指すことが多い。放射性物質とは放射性同位体 (RI:Radio Isotope; 法律用語では放射性同位元素) を含む物質である。

放射性同位体は、その原子核が崩壊して別の原子核に変わるときに放射線を放出する (放射性壊変)。物理量としての放射能は放射性壊変率として定義され、単位として Bq(ベクレル) が用いられる。1 Bq は原子核が 1 秒あたりに 1 個壊変する割合である。

1.2 放射線の種類

放射線として、歴史的に X 線, α 線, β 線, γ 線が知られている。後に α 線はヘリウム原子核、 β 線は電子、 γ 線は電磁波がそれぞれの正体であることが判明した。これらに中性子のような核子などが加わり、代表的な放射線は荷電粒子 (α 線, β 線, 陽子線、イオンビーム)、光子 (X 線, γ 線)、中性子と大別できる。法律による規制の対象となっているのは、照射した物質に対して、直接あるいは間接的に電離作用を及ぼすものであり、これらは電離放射線とも呼ばれる。

Table I: 種々の放射線

名称	物質に与える影響	法規制の対象
荷電粒子		
α 線 (He 原子核)	直接電離作用	○
β 線 (電子)	直接電離作用	○
陽子線・イオン線	直接電離作用	○
中性粒子		
X 線・ γ 線 (光子・電磁波)	直接電離作用	○
中性子	原子核変換 (放射化) 間接電離作用	○
ニュートリノ	弱い相互作用	×

2. 放射線と物質の相互作用

放射線が物質に入射すると様々な相互作用によって、物質にエネルギーを与える。このエネルギー付与が、放射線による人体や機器などの損傷を引き起こす。放射線と物質の相互作用を理解することは、効果的な放射線遮蔽を行なう上でも重要である。

2.1 荷電粒子と物質の相互作用

荷電粒子は電荷を持っているため、物質中にある電子や原子核と電磁相互作用を行い、運動エネルギーを失っていく。この結果として生ずるのが物質原子のイオン化（電離）であり、最終的には熱エネルギーに変換される。イオン化によるエネルギーの損失を電離損失という。

また電子のように質量の軽い荷電粒子の場合、物質原子の原子核とのクーロン相互作用によって加速度運動し、それに伴う電磁波（ γ 線）の放出（制動放射）によりエネルギーを失う。制動放射によるエネルギー損失を放射損失という。高エネルギー電子は電離損失と放射損失の両方でエネルギーを失うが、その遮蔽において制動放射への対策を十分に考慮する必要がある。

- 阻止能

荷電粒子は物質中を進むにつれて、物質原子のイオン化と制動放射という形で運動エネルギーを失い、最終的に停止する。物質が粒子を減速し、静止させる能力のことを阻止能（stopping power）という。粒子が物質中を単位長さ進む間に失う平均エネルギーを線阻止能（ $-dE/dl$ ）、これを物質の密度で割った量を質量阻止能と呼ぶ。

α 線のように重い荷電粒子の質量阻止能 $S_{\alpha m}$ はイオン化によるものがほとんどであり、

$$S_{\alpha m} = -\frac{1}{\rho} \frac{dE}{dl} = \frac{4\pi e^4 z^2 N_0}{mv^2 A} Z \left[\log \frac{2mv^2}{I(1-\beta^2)} - \beta^2 \right] \quad (1)$$

とあらわされる。ここで m, e は電子の質量と電荷、 z, v は入射粒子の電荷と速度、 $\beta = v/c$ 、 Z, A は物質の原子番号と質量数、 N_0 はアボガドロ数、 I は物質の平均電離エネルギーであり、近似的には $I \approx 12Z[\text{eV}]$ である。

電子の場合、イオン化による質量阻止能は

$$S_{\beta m} = \frac{2\pi e^4 N_0}{mv^2 A} Z \left[\log \frac{mv^2 E}{2I^2(1-\beta^2)} - (2\sqrt{1-\beta^2} - 1 + \beta^2) \log 2 + 1 - \beta^2 \right] \quad (2)$$

となる。ここで、 $E = mc^2/\sqrt{1-\beta^2} = m\gamma c^2$ は電子の全エネルギー、 $mc^2 = 0.511 [\text{MeV}]$ は電子の静止質量であり、電子の運動エネルギーは、 $T = mc^2(\gamma - 1)$ となる。

イオン化質量阻止能の物質の種類に対する依存性は Z/A と平均電離エネルギー I によるものであるが、前者は物質の種類による違いが少なく、ほぼ $1/2$ である。後者も対数関数中であるため、大きく変化しない。つまり、イオン化質量阻止能は物質の種類によらずほぼ一定であり、線阻止能は物質の密度にほぼ比例する。一方、荷電粒子については主に（エネルギーでは無く）速度に依存し、低速な粒子ほど阻止能が大きくなる。相対論的な効果を考慮すると、電子の場合は運動エネルギーが 1 MeV 程度の時に阻止能が最小となり、質量阻止能でおよそ $2 \text{ MeV g}^{-1} \text{ cm}^2$ 程度である。

電子の場合に問題となる制動放射による阻止能は

$mc^2 < E < 137mc^2 Z^{-1/3}$ のとき

$$S_{\gamma m} = \frac{N_0 E}{A} \frac{Z(Z+1)}{137} \left(\frac{e^2}{mc^2} \right)^2 \left[4 \log \frac{2E}{mc^2} - \frac{4}{3} \right] \quad (3)$$

$E > 137mc^2 Z^{-1/3}$ のとき

$$S_{\gamma m} = \frac{N_0 E}{A} \frac{Z(Z + \zeta)}{137} \left(\frac{e^2}{mc^2} \right)^2 \left[4 \log \frac{183}{Z^{1/3}} + \frac{2}{9} \right] \quad (4)$$

と表される。 ζ は原子番号で決まる 1 よりやや大きい値である。電子に対する阻止能はイオン化阻止能と制動放射阻止能の和となる。

放射損失の物質依存性は電離損失の場合とは異なり、 $Z+1$ と荷電粒子のエネルギー E にほぼ比例する。つまり、物質が重い元素ほど、粒子のエネルギーが高いほど起こりやすい。放射線遮蔽の観点で見ると、重い元素で構成された遮蔽体の場合、薄くとも効率よく荷電粒子を静止させることが可能である反面、制動放射によって二次的な放射線がより多く生成される可能性があるので注意が必要である。(電磁カスケードシャワー参照)

● 飛程

荷電粒子が物質に入射にて徐々にエネルギーを失っていき、完全に止まるまで走る距離を飛程 (range) という。飛程 R は線阻止能で定義され、

$$T = \int_0^R \frac{dE}{dl} dl \quad (T: \text{粒子の運動エネルギー}) \quad (5)$$

という線積分で関係づけられる。入射粒子の運動エネルギーが大きいほど飛程は長くなり、物質の奥深くまで侵入する。Fig. 1 の左図は、様々な物質に対する低エネルギー陽子の飛程のエネルギー依存性を表している。ここで飛程は物質の質量を掛けて規格化している。

α 線のように重い荷電粒子はエネルギーを物質に付与しながら、ほぼ直進していく。単位長さ当りのエネルギー損失は、おおむね v^2 に反比例するので、深さ方向のエネルギー損失 (生成されるイオンの数) の分布は Fig. 1 右図のような関数となる。この曲線はブラッグ曲線と呼ばれ、粒子が止まる箇所の周辺にエネルギー損失が集中することを意味している。陽子ビーム・イオンビームによる癌治療は、このような性質を利用している。

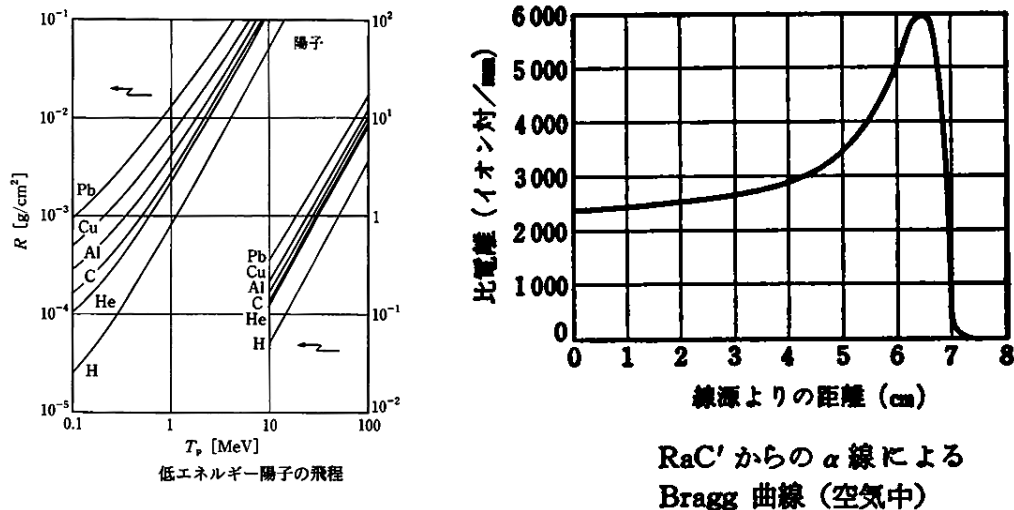


Figure 1: 左):陽子の飛程 (放射線計測 : 培風館); 右):ブラッグ曲線 (放射線の防護 : 丸善)

電子の場合、質量が軽い散乱によって方向が大きく変わる。そのため、Fig.2 左図のように電子は物質中をジグザグに進み、停止する深さにはバラツキがある。物質を透過する電子の数は、物質の厚さが増すとともに指数関数的に減少する。透過する電子数が $1/2$ になる厚さを半価層という。このような振舞いのため、電子の飛程を議論する場合には、この指数関数的な曲線を外挿して得られる最大飛程が用いられる (Fig.2 右図)。

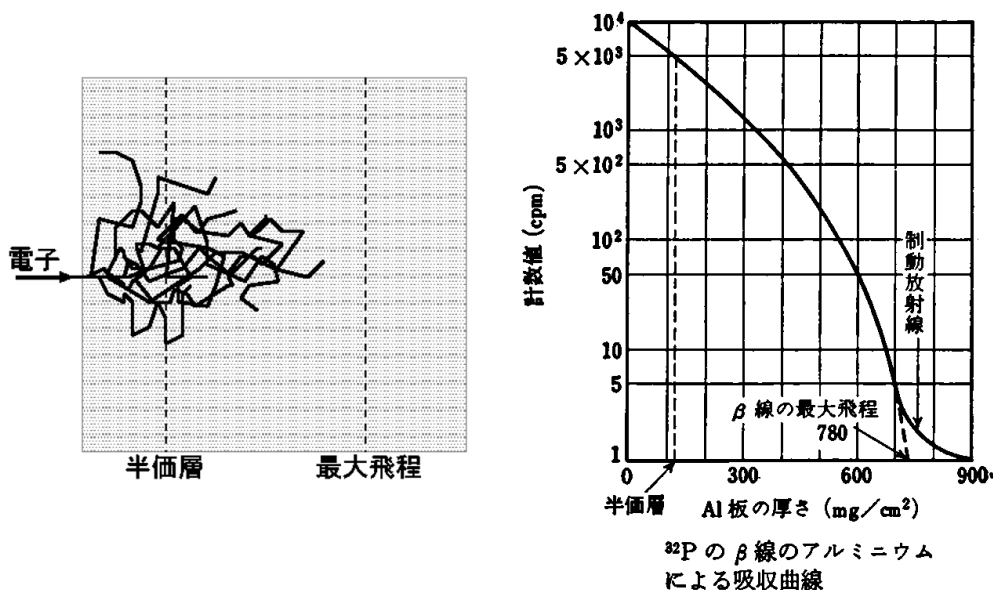


Figure 2: 電子の飛程（放射線の防護：丸善）

2.2 光子と物質の相互作用

光子はそれ自体は電氣的に中性であるが、物質と3種類の電磁氣的な相互作用によって荷電粒子を発生させ、物質に電離を生じさせる。このため、その正体が光子であるX線やγ線は、荷電粒子とともに電離放射線に含まれる。

光子は物質との相互作用で吸収・散乱され、その数が減少していく。 I_0 個の光子を厚さ x の物質に照射して透過する個数は

$$I = I_0 \exp(-\mu x) \quad (6)$$

となり、 μ をこの物質の線減弱係数と呼び、物質の種類と光子のエネルギーに依存する。これを物質の密度で割った μ/ρ を質量減弱係数と呼ぶ。光子の吸収・減弱を引き起こす相互作用の主なものとして、以下の3種類が挙げられる。

- 光電効果

光子が原子に吸収され、原子核に強く束縛されているK殻電子やL殻電子が放出される現象である。電子は光子のエネルギーから束縛エネルギーを差し引いた分を運動エネルギーとして持つことになる。放出された電子のエネルギーは、電離損失によって熱エネルギーになる。光電効果によって出来た空孔は外殻電子が埋めるため、特性X線やオージェ電子が放出される。

光電効果による線減弱係数は、原子番号を Z 、光子のエネルギーを E とすると、近似的に $Z^5/E^{7/2}$ に比例する。つまり、光子のエネルギーが高くなると減衰しにくくなり、重い元素のほうが吸収の効果が大きいという傾向が光電効果では顕著である。

- コンプトン効果

光子が物質中の電子によって散乱され、向きとエネルギーが変わる現象をコンプトン効果という。エネルギー $\hbar\omega$ の光子が角度 θ 散乱された場合、散乱後の光子のエネルギーは

$$\hbar\omega' = \hbar\omega / \left[1 + \frac{\hbar\omega}{mc^2} (1 - \cos \theta) \right] \quad (7)$$

となり、散乱前に比べ減少する。コンプトン効果による線減弱係数は Z に比例する。

- 電子 – 陽電子 対生成

光子のエネルギーが電子の質量 (511keV) の2倍を越えると、光子が消滅して電子とその反粒子である陽電子のペアが生成される現象が起こるようになる。光子のエネルギーが高くなるにしたがい、対生成が生じる確率も高くなっていく。また、対生成による線減弱係数は $Z(Z+1)$ に比例し、重い元素の方が起こりやすい。これは、対生成が原子核が作る電場によって引き起こされることに起因する。

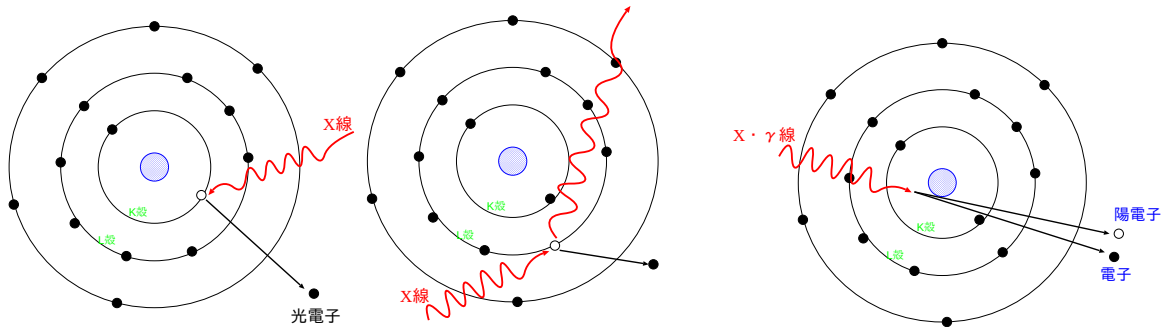


Figure 3: 左) 光電効果; 中) コンプトン効果; 右) 対生成

光子の全減弱係数は上記3種類の相互作用による減弱係数の和となり、光子のエネルギーと、原子番号 Z すなわち物質の種類に強く依存している。低エネルギーの光子に対しては光電効果が、1 MeV を越える高エネルギーでは対生成が優位である。(Fig. 4) また、重い元素ほど減弱係数が多いので、X線やγ線の遮蔽には鉛のような重い物質がよく使われる。

実際の光子に対する遮蔽において厚い遮蔽体を用いる場合には、遮蔽体内部で散乱される光子の寄与を考慮して、

$$I = BI_0 \exp(-\mu x) \quad (8)$$

という式で評価される。ここで B は物質の種類や形状の効果を考慮に入れた係数で、ビルドアップ係数と呼ばれる。その遮蔽体の適当な値が得られない場合は、

$$B \approx 1 + \mu x \quad (9)$$

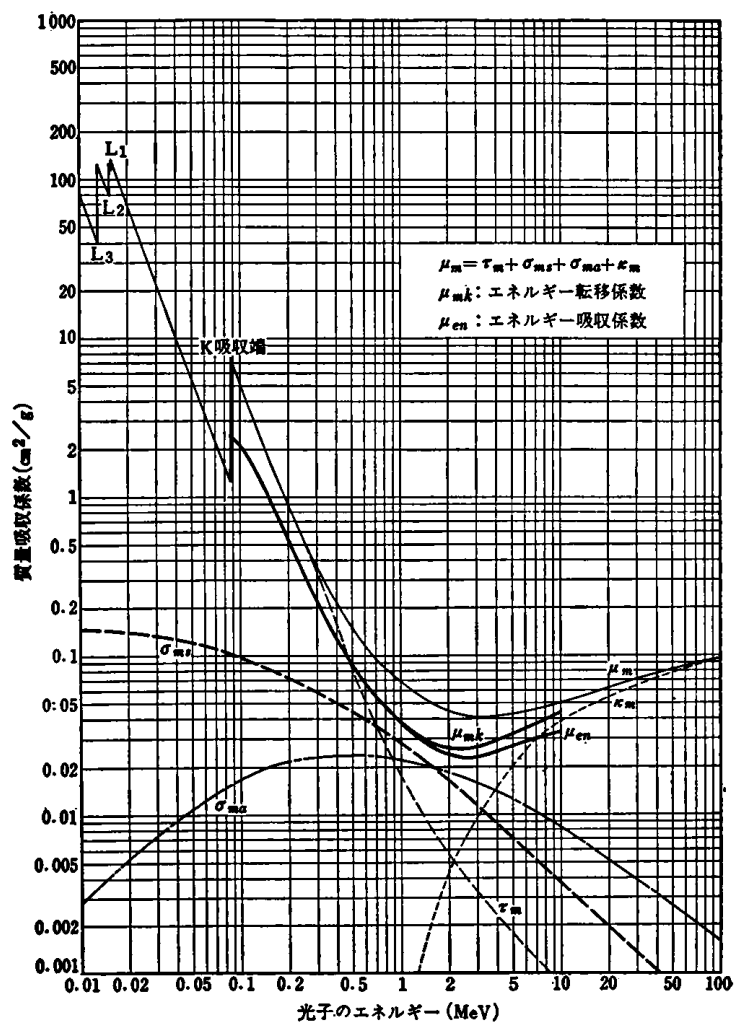
で代用する。(ただし、 $\mu x \gg 1$ の場合)

2.3 電磁カスケードシャワー

非常に高いエネルギー (数 10 MeV 以上) を持つ電子や光子が物質に入射すると、制動放射による光子の放出や、光子による電子-陽電子対生成が繰返し生じ、なだらかに放射線の「個数」が増加する現象が起こる。これは電磁カスケードシャワーと呼ばれ、原子番号の大きな物質で起こりやすい。(Fig. 5) 相互作用をする度、電子あるいは光子1個当たりのエネルギーは小さくなっていくが、放射線の個数の増加によって人体や物質への影響がより深刻になる場合があるので注意が必要である。また、重い物質中で数 MeV のγ線が多数生成されると、 (γ, n) 反応による中性子生成も問題となる。従って、高エネルギー粒子を遮蔽する際には、電磁カスケードシャワーを十分考慮する必要がある。高エネルギー電子のように制動放射を起こしやすい荷電粒子を遮蔽するには、できるだけ軽い元素でできた物質を使って停止させ、制動放射によるγ線の発生を少なくする方が重い物質を用いるよりもむしろ遮蔽の効率が良くなる場合がある。

2.4 光核反応

光子と物質の相互作用においては、物質の原子との相互作用が主であるが、光子エネルギーが、原子核を構成する核子あたりの結合エネルギー (比結合エネルギー: およそ 8MeV) を越え



鉛に対する γ 線の吸収係数

Figure 4: 鉛に対する γ 線の減弱係数（放射線の防護：丸善）

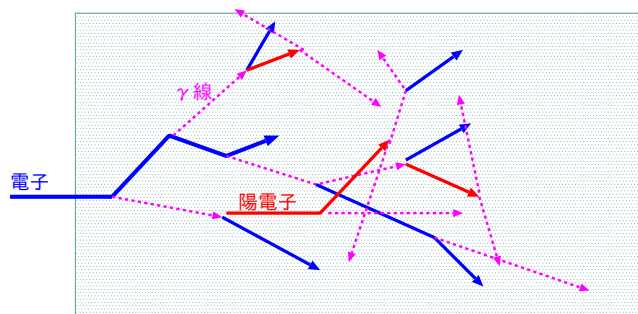


Figure 5: 電磁カスケードシャワー

ると、光子が原子核に吸収され、陽子や中性子を放出する反応が起こるようになる。これを光核反応といい、光子エネルギーに対する閾値は原子核の種類で決まる。

光核反応により、物質の原子核は別の核種に変換されるが、その結果として放射性の核種となることがある。(放射化)。エネルギーの高い光子による放射化は、炭素や酸素のような軽元素でも鉛のような重元素でも生じうるが、質量数の大きな核種からのほうが比較的長寿命のRIができやすい傾向がある。また、入射粒子が電子であっても、電磁カスケードを介して光核反応が生じうる。高エネルギーの光子や電子の遮蔽に、鉛のような物質を用いる場合、放射化によるRIの生成と残留にも注意を払う必要がある。

2.5 中性子と物質の相互作用

放射線として規制されるレベルの中性子線は、 ^{252}Cf のようなRIの壊変、原子炉での核分裂反応、加速器などで発生する高エネルギー γ 線による (γ, n) 反応などによって生成される。中性子は電氣的に中性であるため、荷電粒子や光子のように電磁相互作用によって物質に直接電離を生じさせることはない。しかし、物質を構成する原子の原子核との相互作用を通じて二次的な荷電粒子を発生させ電離を引き起こすため、放射線として扱い安全管理をする必要がある。

- 弾性散乱

中性子のエネルギーが高い、すなわち速度が大きいとき（速中性子）には、物質の原子核による弾性散乱が主要な相互作用となる。このときに反跳を受けた原子核が二次荷電粒子として電離を引き起こす。

運動エネルギー T_0 の速中性子が質量数 A の原子核に衝突する場合、反跳核が獲得するエネルギーの平均値 $\langle T_A \rangle$ はその最大値 T_{max} の半分となり、

$$\langle T_A \rangle = T_{max}/2 = \frac{2AT_0}{(1+A)^2} \quad (10)$$

と表せる。ここで $A=1$ すなわち水素が標的のときに最大値 $T_0/2$ となり、質量数が大きいほど小さくなる。したがって、軽元素の方が速中性子の運動エネルギーを減らす効果が高いことが分かる。このことから、速中性子を減速させるのに効果的な物質は水素を多く含むものであり、水やパラフィンが減速材としてよく用いられる。減速材によってエネルギーが数 10 meV 以下になった中性子は熱中性子と呼ばれる。

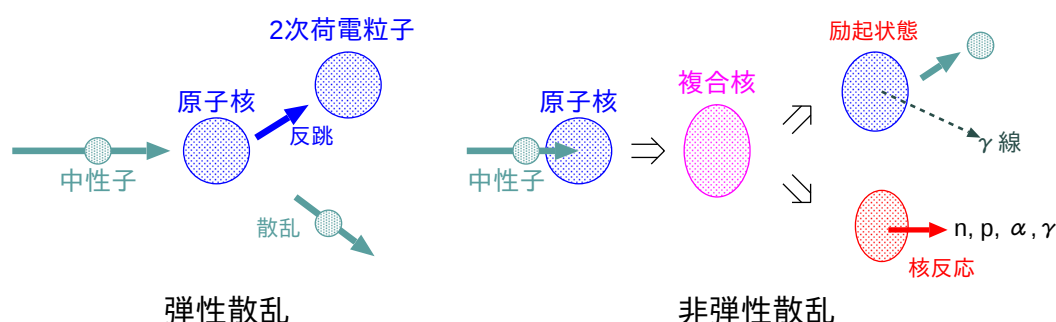


Figure 6: 中性子と物質 (原子核) との相互作用

- 非弾性散乱

中性子は原子核と非弾性散乱することによって、原子核の状態を変化させ、励起状態にしたり核反応を引き起こす。このときに二次的な電離放射線が発生する。

核反応を伴わない非弾性散乱の場合、中性子は一時的に原子核に捕獲されて複合核を形成し、再び中性子は再放出されるが、その際、原子核は励起状態となり、余分なエネルギーを γ 線として放出して基底状態に戻る。

核反応を伴う非弾性散乱には様々な種類があり、標的となる原子核が同じでも中性子のエネルギーによって反応の様子が大きく変わる。中性子が熱中性子 (数 10 meV) の場合は、中性子捕獲反応が主となり、中性子は原子核に吸収され、多くの場合は γ 線 (捕獲 γ 線) を放出する。0.1 eV ~ 1 keV の領域では、中性子の捕獲によって作られる複合核の励起エネルギーと同程度となるため、共鳴によって散乱が起こる確率が非常に大きくなる。共鳴が生じるエネルギーは核種に依存する。また、ウランのような重い元素の場合は、熱中性子を含む遅い中性子により核分裂反応が発生する。

中性子が100keV程度異常の速中性子の場合は、陽子や α 線を放出する反応が起こりはじめ、エネルギーが高くなるにつれて複数の中性子や荷電粒子を放出する反応が生じるようになり、さらに核破碎反応などを引き起こすようになる。このような反応は、中性子の数が増大する原因となる。

2.6 中性子に対する遮蔽

中性子特に速中性子は透過力が高く、直接吸収されにくい性質であるため、まずは減速材で減速して熱中性子にした後、捕獲反応を利用して吸収する方法が一般的である。(Fig. 7) 減速材としては水素を多く含む水やパラフィン、ポリエチレンなどがよく用いられる。鉛のような重い物質は、速中性子に対する減速効果が小さく、中性子数を増やす反応が起こる可能性もあるため、中性子の遮蔽には不向きである。

減速し熱化した後の中性子の吸収材としては、熱中性子に対する吸収断面積が大きい ^{10}B や ^{113}Cd がよく使われる。ただし、カドミウムなどは捕獲 γ 線を放出するため、それに対する遮蔽も考慮する必要がある。

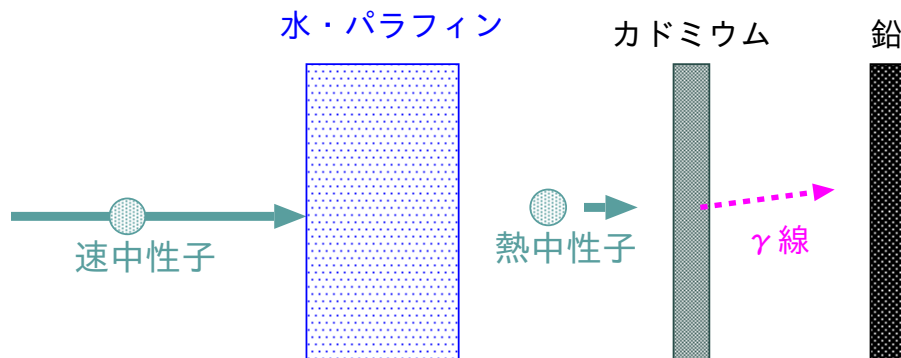


Figure 7: 中性子に対する遮蔽

3. 放射線の生体への影響

放射線を物質に照射すると、様々な相互作用によって放射線のエネルギーが物質に付与され、何らかのダメージを引き起こす。しかしながら、通常の物体が損傷したり目に見える変化が生じるには相当な大線量が必要となる。それに対し、照射を受けるのが生命体である場合、比較的少量の放射線で障害が生じるリスクがある。

3.1 生体の放射線高感受性と標的理論

生体には放射線による小さな損傷でも大きな影響を受ける構造体 (標的) があり、それが生命にとって重要な機能を持つと考えられる。これが生体の放射線高感受性の理由である。標的物質は具体的にはDNA(遺伝物質)であり、放射線の生体への影響のほとんどがDNAへの作用によると考えてよい。

早くから生体の放射線高感受性は注目されており、放射線の照射による細胞の不活性化 (死) に関して、その生存率 S と線量 D の間には、

$$S = \exp(-kD) \quad (k : \text{定数}) \quad (11)$$

という関係があることが知られていた。これは、

- 生物を構成する細胞には放射線に極めて高感受性の構造体が存在し、そこに放射線で小さい損傷が生じただけで、その構造体の機能が失われる。
- 放射線でその構造体に生じる損傷は、こわされるかこわされないかのいずれかで中間型はなく、損傷が複数生じる場合は互いに独立である。

という仮定の元で、細胞に生じる損傷数の平均が線量に比例するとして、ポアソン分布を考えると説明できる。このような理論は「標的理論 (target theory)」と呼ばれ、放射線生物学の最も基本的な考え方となっている。現在では、DNA が「標的」の特性をすべて備えていることが明らかになっている。

3.2 DNA の損傷

DNA は生体を構成する高分子の一つであり、1 回転につき 10 段の塩基対が向かい合った二重らせん構造を持っており、細胞内には 2 組 (性細胞では 1 組) しかない。DNA は遺伝情報をになっており、生体を構成するあらゆる成分は DNA の情報に基づいてつくられる。RNA やタンパク質といった高分子は、放射線による尊称を受けても、同一分子が多数存在しており、DNA が健在ならば新しい分子がつくられるので影響は小さい。それに対し、DNA が損傷を受けると、DNA の複製だけでなく、あらゆる成分の合成に支障が生じ、細胞にとって致命的な影響が生じる。たとえ細胞は死ななくても、遺伝情報の異常から正しくない構造の成分がつくられることになり、いわゆる突然変異が発生する。

電離放射線は高分子の化学結合を壊すのに十分なエネルギーを有しているので、DNA に多種多様な損傷を与える。特に DNA としての機能に大きな障害を与えるのは、塩基の損傷とリン酸エステル結合の切断と考えられる。DNA の複製や、RNA を通じてタンパク質へ情報を伝えるのに障害が生じるためである。中でも、DNA 鎖が 2 本とも同じ場所で切断される二重鎖切断は DNA の基本特性を失わせるもので、致命的となる。

電離放射線が DNA を損傷するプロセスとして 2 種類挙げられる。1 つは、放射線の電離作用により直接物理的な破壊を発生させるプロセス (直接作用) である。もう 1 つは、放射線によって水の放射線分解物として OH のような (フリー) ラジカル (活性酸素) が発生し、そのラジカルが化学反応によって有害な影響を与える、というプロセス (間接作用) である。組織の酸素分圧が高いと、ラジカルの存在比も高まり、結果として放射線感受性が高まる。(酸素効果)

3.3 DNAの修復

放射線障害に対し、生体には回復能力があることが経験的に知られていた。例えば、同じ線量を1回にまとめて照射した場合と、2回以上に分けて時間をおいて照射した場合を比べると、後者の方が効果が小さい。これは、DNA自体に修復機能が備わっていることに由来する。

電離放射線によるDNA損傷では、1本鎖切断は多数生じるが、ほぼ完全に修復されることが示された。DNA修復は標的理論を否定するものではなく、標的の損傷をDNAが修復されなかった、あるいは修復されそなかったと考えることで理解できる。

ヒトの細胞では、除去修復と呼ばれる正確なDNA修復が主に働いていると考えられるが、複数の損傷が生じた場合、複製による誤りの多い修復が発生し、突然変異を誘発する。未解明な点もまだ多いが、この機構が放射線による発がんに関与していると考えられている。

3.4 線エネルギー付与と生物学的効果比

放射線は物質中では飛跡に沿ってエネルギーを失い、結果としてそのエネルギーが物質に付与される。単位長さ当たりのエネルギー付与の大きさを、線エネルギー付与 (LET: linear energy transfer) という。LETは物質の種類や放射線の種類、エネルギーに依存する。(表 II)

Table II: 水中における LET の例

放射線 (エネルギー)	LET [keV/ μ m]
X 線 (0.03MeV)	2.0
γ 線 (1.3MeV)	0.3
β 線 (0.01MeV)	2.3
β 線 (1.0MeV)	0.2
陽子線 (1MeV)	28
陽子線 (10MeV)	4.7
α 線 (1MeV)	264
α 線 (10MeV)	56

LETの高い放射線はイオン化を密に起こすため、DNAの二重鎖切断が生じる可能性が高くなる。つまり、同じ線量でも、放射線の種類やエネルギーによって生体への影響すなわち式(11)の定数 k の値が異なる。このような効果を、生物学的効果比 (RBE: relative biological effectiveness) といい、X線を1としたときの同一効果を与える線量の逆数として定義される。高LETの放射線は一般にRBEが高いとされるが、実験的には複雑な関係が得られている。放射線防護においては、RBEは放射線荷重係数や線質係数として便宜的な形で取り入れられている。

3.5 生体への放射線照射効果の例

端的に言えば、放射線は生体に有害である。この有害性が人間に対して現れた場合には、健康障害ということになる。しかしながら、この有害性を制御された形で利用することにより、人間にとって有益な影響をもたらすこともできる。

- (人間にとって) 否定的な影響
発がん, 白内障, 消化器官幹細胞の死滅, 皮膚の火傷, 神経の損傷, ...

- 肯定的な影響
放射線がん治療, 食品等の殺菌, 発芽の防止, 害虫の不妊化, 植物の品種改良...

4. 放射線の人体への影響

放射線の生体への影響については、標的理論に見られるように、分子レベルでの生命現象の理解とともに進歩してきた。しかしながら、人体に対する影響については、広島・長崎の被爆者から得られたデータに依存している。

4.1 急性障害と放射線死

人間の場合、全身に一度に 4Gy 以上の放射線を浴びた場合、比較的短期間 (1ヶ月以内) に死亡する、放射線死が起こる。

- 中枢神経死:
200Gy 以上の大線量を全身に浴びた場合には、脳の機能障害が原因で短時間で死亡する。脳には分裂期の細胞が無いので放射線感受性は低い、生命を維持するのに最も重要な器官であるため、他の細胞への障害よりも早く致命的な障害となって現れる。
- 腸死:
10~200Gy の範囲で起こり、生存期間は人間の場合は 10~14 日前後である。小腸の内側 (腸上皮) で栄養を吸収するじゅ毛の表面の細胞は先端から脱落し、それを根元の幹細胞の分裂で補っているが、放射線により幹細胞の分裂が停止するため、じゅ毛の表面は 3~7 日で裸になり、出血 (下血) して死亡する。
- 骨髓死:
4~10Gy の範囲で起こり、腸上皮の障害は回復するが、骨髓の造血組織が放射線により分裂できなくなり、血球、特に白血球の減少により 1ヶ月くらいで死亡する。ただし、個人差があるので 5Gy 以上でも生存者がある。

4.2 晩発効果

骨髓への傷害が完全に回復したように見えるが、何年か後に放射線による障害をもたらすことがある。(晩発効果) 致命的な効果としては白血病、発がんがある。

広島・長崎のデータでは、発がんに関しては、発がん年齢は早まらないが頻度は高まる傾向がはっきり現れており、被曝線量にほぼ比例して増加している。放射線発がんの線量と効果の関係についてはいくつかのモデルが提唱されており、そのモデルにも依存するが、0.01Gy の被曝につき 100 万人当たり約 100 人のがん死増加と推定される。

4.3 遺伝的影響

遺伝的影響とは、性細胞を通じて子孫に伝えられる障害によって子孫に現れる影響で、遺伝物質に生じた突然変異による。生殖腺に放射線を受け、性細胞に損傷が生じ、それが受精して子供に成長して伝えられる場合に限られる。胎児は極めて放射線感受性が高く、放射線の被曝により奇形が生じることがあるが、それは遺伝的影響ではない。

男性の場合、約 0.5Gy 以上の放射線を生殖腺に浴びると精子形成が停止するが、5Gy 以下では 2~3 年で回復する。しかしながら、精原細胞に放射線による損傷が残り、精子の持つ遺伝情報に異常が生じ、遺伝的影響の原因となることが考えられる。一方、女性の場合は卵子が早

くから作られることから、精子形成とは異なる反応を示し、突然変異頻度も低いことが知られている。

遺伝的影響は被曝線量に直線的比例関係にあり、しきい値が無いとされているが、量的な推定は容易ではない。一応の推定値として、0.01Gyにつき100万人の新生児に6~15人の遺伝的異常が生じるとされている。(放射線被曝の無い場合の遺伝的異常をもつ子供は1~1.5%であるので、増加分としては少ない)

5. 放射線・放射能を表す量と単位

ここでは、放射線の量や人体・物体への影響を定量的に表す物理量とそれに対応する国際単位を挙げていく。

5.1 物理的な量

- 放射能
不安定な原子核が壊変（崩壊）して放射線を放出する程度をあらわす物理量である。その強さは単位時間内に壊変する原子核の個数で示される。単位は 1Bq(ベクレル)=1decay/sec である。
- 吸収線量
放射線を照射された物質の単位質量あたりに吸収されたエネルギーを表す。放射線や物質の種類には無関係に定義される量であり、単位は 1Gy(グレイ)=1J/kg である。
- 照射線量
3 MeV 以下の X 線・γ 線を空気に照射する場合に、単位体積あたりに放射線の電離作用で生じる電荷（一方の符号のみ）の総和として定義される量である。単位として C(クーロン)/kg が用いられる。
- エネルギーフルエンス
単位面積当たり通過するエネルギー量として定義されるもので、あらゆる種類の放射線に適用できる。単位として J/m² が用いられる。
- 粒子フルエンス
単位面積当たり通過する粒子の個数として定義される。中性子の線量を表すのに用いられることがある。単位は個/m² である。
- カーマ
kinetic energy released in material に由来するもので、光子や中性子による間接電離で発生した 2 次荷電粒子の運動エネルギーの単位体積当たりの総和である。物質中の荷電粒子平衡が成立し、制動放射によるエネルギー損失が無視できる場合は吸収線量と等しくなる。したがって、単位には Gy が用いられる。

5.2 放射線防護のための量

放射線防護のための量には、人体への影響の評価に主眼をおいた「防護量」と、測定に主眼をおいた「実用量」がある。防護量は直接測定するには適さない量であるため、実用量が用いられる。

- 等価線量: H_T
同じ吸収線量でも、放射線の種類やエネルギーによって人体への影響が変わるため、同一の尺度で計量することを目的として導入された防護量の一種である。臓器（組織） T の放射線 R による平均吸収線量を $D_{T,R}$ （臓器線量）に対し、放射線の違いを補正する放射線荷重係数 w_R （表 III）で重みを掛けて足し合わせた量として定義される。

$$H_T = \sum_R w_R \cdot D_{T,R} \quad (12)$$

が組織・臓器 T の等価線量と呼ばれる。単位は本来は J/kg であるが、吸収線量と区別するために Sv(シーベルト) という特別な単位が用いられる。

Table III: 放射線荷重係数 (ICRP2007)

放射線の種類	w_R
光子 (全エネルギー)	1
電子、 μ 粒子 (全エネルギー)	1
中性子 (E_n)	
($E_n < 1\text{MeV}$)	$2.5 + 18.2 \exp(-(\ln(E_n))^2/6)$
($1\text{MeV} \leq E_n \leq 50\text{MeV}$)	$5.0 + 17.0 \exp(-(\ln(2E_n))^2/6)$
($E_n > 50\text{MeV}$)	$2.5 + 3.25 \exp(-(\ln(0.04E_n))^2/6)$
陽子、荷電 π 粒子 (全エネルギー)	2
α 線、核分裂片、重原子核	20

- 実効線量: E

放射線による全身のリスク評価を目的とした防護量であり、臓器 T の等価線量にその臓器の組織荷重係数 w_T (表 IV) で重みを掛けて和をとったものである。

$$E = \sum_T w_T \cdot H_T \quad (13)$$

単位は同様に、Sv を用いる。

Table IV: 組織荷重係数 (ICRP2007)

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

実効線量は、発がんや遺伝的影響といった「確率的影響」は組織・臓器ごとに異なることから、それを考慮して加算し、人体全体の総合的な確率的影響の指標となる線量として導入された。

- 線量当量: H

実効線量の定義を考えると、実際に線量計で測定するのは実務上困難な量である。そこで放射線管理計測のための「実用量」として、線量当量が用いられる。線量当量 H は、吸収線量を D と放射線の種類とエネルギーで決まる線質係数 Q の積で定義される。

$$H = Q \cdot D \quad (14)$$

線質係数も放射線荷重係数と同様に、放射線の種類とエネルギーによる生物学的影響の違いを補正する係数であるが、線質係数は水中の LET の関数 ($Q-L$ 関係) として定義されており、着目点での放射線の種類とエネルギー分布で決まる。

線量当量はサーベイメータや個人線量計で計測可能な線量であり、外部被ばく算定の基本となる。線量当量も単位は Sv を用いる。

古い測定器や文献には旧単位が用いられている。Table V に、現在の単位と旧単位との対応を示す。

Table V: 放射線に関する量の単位

物理量	単位	旧単位
放射能	Bq (= decay/sec)	1Ci(キュリー) = 3.7×10^{10} Bq
吸収線量	Gy (= J/kg)	1rad(ラド) = 1×10^{-2} Gy = 100erg/g
吸収線量率	Gy/s	1rad/s = 1×10^{-2} Gy/s
照射線量	C/kg	1R(レントゲン) = 2.58×10^{-4} C/kg
照射線量率	C/kg·s	1R/s = 2.58×10^{-4} C/kg·s
エネルギーフルエンス	J/m ²	—
エネルギーフルエンス率	J/m ² ·s	—
粒子フルエンス	個/m ²	—
粒子フルエンス率	個/m ² ·s	—
等価線量・実効線量・線量等量	Sv	1rem(レム) = 1×10^{-2} Sv

6. 被ばく線量の算定

放射線被ばくには、体の外から放射線を浴びることによる外部被ばくと、RI を体内に取り込んでしまった結果として生じる内部被ばくに区分される。

被ばく線量の算出は、外部被ばくと内部被ばくによるそれぞれの実効線量を算出し、その合算で求められる。内部被ばくのおそれが無い場合は、外部被ばくの評価のみでよい。

6.1 1cm 線量当量、70 μ m 線量当量

外部被ばくの評価には、線量計で実際に計測可能でしかも実効線量を下回ることのない安全側に評価できる量が必要である。そのような「実用量」として線量当量が用いられることになるが、放射線障害防止法においては、1cm 線量当量と 70 μ m 線量当量を測定して用いることになっており、サーベイメータや個人線量計といった市販の放射線防護用線量計はこれらの量を計測できるようになっている。

- 1cm 線量当量: H_{1cm}
組織等価物質の深さ 1cm で指定される線量当量であり、外部被ばくによる実効線量の測定・評価の基本となる。体幹部均等被ばくの場合は H_{1cm} をそのまま、外部被ばくによる実効線量として用いる。また、妊娠を申告した女子の腹部における等価線量としても用いる。
- 70 μ m 線量当量: $H_{70\mu m}$
組織等価物質の深さ 70 μ m で指定される線量当量であり、外部被ばくによる皮膚の等価線量として用いられる。 $H_{70\mu m}$ は主に β 線や 30keV 以下の X・ γ 線などの透過力の弱い放射線が対象となる。

6.2 外部被ばく

外部被ばくとして評価することが法令上義務付けられているのは、全身の実効線量、皮膚の等価線量、眼の水晶体の等価線量、妊娠を申告した女子の腹部の等価線量である。外部被ばくの評価は、均等被ばくの場合と不均等被ばくの場合で分けられる。

1. 体幹部均等被ばく

- 実効線量
基本着用部位 (男性: 胸部; 女性: 腹部) につけた個人線量計の 1cm 線量当量 H_{1cm} をそのまま実効線量とする。
- 皮膚の等価線量
基本着用部位につけた個人線量計の 70 μ m 線量当量 $H_{70\mu m}$ をそのまま皮膚の等価線量とする。ただし、 β 線や低エネルギー (30keV 以下) の X・ γ 線による被ばくのおそれの無い場合は、 $H_{70\mu m} \approx H_{1cm}$ となるので、 H_{1cm} で代用できる。中性子の場合はエネルギーによらず $H_{70\mu m} \approx H_{1cm}$ となるので、中性子による H_{1cm} を加算する。
- 眼の水晶体の等価線量
本来は 3mm 線量当量を用いるべきだが、一般には基本着用部位につけた個人線量計の H_{1cm} または $H_{70\mu m}$ のどちらか大きい方を眼の水晶体の等価線量とする。皮膚と同様に、 β 線や低エネルギー (30keV 以下) の X・ γ 線による被ばくのおそれの無い場合は、 H_{1cm} で代用できる。また、中性子による被ばくがある場合は中性子による H_{1cm} を加算する。

2. 体幹部不均等被ばく

- 実効線量

体幹部不均等被ばくの場合は、複数の部位で測定した H_{1cm} から、次式で実効線量を求める。

$$E = 0.08H_a + 0.44H_b + 0.45H_c + 0.03H_m \quad (15)$$

ここで、 H_a : 頭頸部における H_{1cm} , H_b : 胸部・上腕部における H_{1cm} , H_c : 腹部・大腿部における H_{1cm} , H_m : $H_a \sim H_c$ のうち最大となるおそれのある部分における H_{1cm} である。

- 皮膚の等価線量

体幹部につけた個人線量計の $70 \mu m$ 線量当量 $H_{70\mu m}$ のうち、最大値をもって皮膚の等価線量とする。また、中性子による被ばくがある場合は中性子による H_{1cm} を加算する。

- 眼の水晶体の等価線量

頭頸部につけた個人線量計の H_{1cm} または $H_{70\mu m}$ のどちらか大きい方を眼の水晶体の等価線量とする。中性子による被ばくがある場合は中性子による H_{1cm} を加算する。

6.3 内部被ばく

非密封 RI の取扱作業などにより、RI を吸入摂取あるいは経口摂取して内部被ばくを生じる場合やそのおそれのある場合は、摂取量を計算し、告示別表第 2 の第 2 欄、3 欄に掲げる実効線量係数を用いて実効線量を算出する。

摂取量の測定評価には、主に 3 種類ある。

- 体外計測法 (主に γ 線放出核)

被ばくしたおそれのある者の体幹部 (胸部、腹部)、あるいは肺や甲状腺などの臓器・器官を体の外から計測して体内に残留している放射エネルギーを測定する。次に、RI 摂取後の時間経過に伴い、体内に残留する放射エネルギーの割合を示す体内残留率を用いることにより、体内残留放射エネルギーから摂取量を計算する。

- バイオアッセイ法 (主に α 線、 β 線放出核)

便や尿を採取して体内から排泄される放射エネルギーを測定する。次に、RI 摂取後の時間経過に伴い、体内から排泄される放射エネルギーの割合を示す排泄率を用いることにより、排泄放射エネルギーから摂取量を計算する。

- 空気中濃度計算法 (限定されない)

作業環境中において測定した空気中放射エネルギー濃度、あるいは取り扱った放射性物質からの飛散率などを用いて、作業者が吸引したと考えられる空気中放射エネルギー濃度を計算する。次に呼吸率と吸入時間を乗じて摂取量を計算する。

ここで、体内残留率や排泄率は体内動態モデルに従って計算された値が ICRP により提示されている。(ICRP Publ. 78)

内部被ばくの場合、ある時間にわたって連続的に線量を与えられるが、ある時点で摂取した放射性物質による被ばくを将来にわたって管理するのは合理的ではない。そこで、摂取した時点であらかじめ将来にわたって被ばくする線量を算定しておく預託線量の概念を採用し、内部被ばくの評価に用いる。預託線量を求める積分期間は成人では 50 年 (子供の場合は 70 歳まで) であり、それに基づいて実効線量係数 (告示別表第 2) が決められている。

ある放射性物質を摂取量 $I(\text{Bq})$ だけ摂取した場合の内部被ばく実効線量 $D(\text{mSv})$ は、放射性物質の核種および化学形に応じた実効線量係数 $K(\text{mSv/Bq})$ 用い、

$$D(\text{mSv}) = I(\text{Bq}) \cdot K(\text{mSv/Bq}) \quad (16)$$

と算出される。

(計算例 1) ^{131}I の蒸気を 10kBq 吸引した場合

告示別表第 2 の第 2 欄より、 ^{131}I の蒸気を吸入摂取した場合の実効線量係数は、 $K = 2.0 \times 10^{-5}(\text{mSv/Bq})$ であるから、実効線量 D は

$$D = 1.0 \times 10^4(\text{Bq}) \times 2.0 \times 10^{-5}(\text{mSv/Bq}) = 0.20(\text{mSv})$$

(計算例 2) ^{137}Cs を 100kBq 経口摂取した場合

告示別表第 2 の第 3 欄より、 ^{137}Cs を経口摂取した場合の実効線量係数は、すべての化合物で $K = 1.3 \times 10^{-5}(\text{mSv/Bq})$ であるから、実効線量 D は

$$D = 1.0 \times 10^5(\text{Bq}) \times 1.3 \times 10^{-5}(\text{mSv/Bq}) = 1.3(\text{mSv})$$

6.4 外部被ばく線量と内部被ばく線量の記録と合算

被ばくの線量測定記録については外部被ばくと内部被ばくで異なる。

- 外部被ばく

集計期間:

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月1日始期とする1年間

(妊娠の事実を申し出た女子)

出産までの間毎月1日を始期とする1月間

当該期間毎に集計し、集計のつど記録する。

記録事項:

測定対象者の氏名、測定をした者の氏名、放射線計測器の種類および型式、測定方法、測定部位および測定結果

- 内部被ばく

集計期間:

測定のつど記録する。

記録事項:

測定日時、測定対象者の氏名、測定をした者の氏名、放射線計測器の種類および型式、測定方法、測定結果

外部および内部被ばくの測定結果について、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、および4月1日始期とする1年間、妊娠の事実を申し出た女子については出産までの間毎月1日を始期とする1月間について、当該期間ごとに合算した上で実効線量および等価線量を算定し、以下の項目を記録する。

算定年月日、対象者の氏名、算定をした者の氏名、算定対象期間、実効線量、等価線量および組織名

上記の1年間についての記録に加え、当該1年間を含む5年間の累積実効線量も当該期間について毎年度集計し、そのつど記録する必要がある。

7. 放射線防護の基本

7.1 放射線防護体系（線量制限体系）

放射線の影響は放射線防護の観点から、ある一定の値（しきい値）を超えると障害が発生する確定（非確率）的影響と、しきい値のない確率的影響とに分類している。

- 確定的影響（しきい値）
脱毛（3Sv）、男性の永久不妊（3.5～6Sv）、女性の永久不妊（2.5～6Sv）、白内障（5Sv）、造血機能低下（0.5Sv）、胎児の異常（0.1Sv）
- 確率的影響
発がん、遺伝的影響

確率的影響はどんなに少ない被ばくでも何らかの影響があると考えなければならない。したがって、確定的影響の発生を完全に防止し、確率的影響の発生を社会的に容認される程度に抑制することが放射線防護の目的である。これを達成するため、以下の3つの原則が設定されている。

- 行為の正当化
いかなる行為もその導入が正味でプラスの利益を生むものでなければ、採用してはならない。
- 防護の最適化
すべての被ばくは経済的および社会的要因を考慮に入れながら、合理的に達成できるかぎり低く保たなければならない。
- 個人線量制限
個人に対する線量当量（線量）は、委員会（ICRP：国際放射線防護委員会）がそれぞれの状況に応じて勧告する限度を超えてはならない。

7.2 被ばくの種類

放射線の被ばくについて、それが発生する社会的要因をふまえて、以下の用に分類している。

- 職業被ばく
職業上の放射線あるいは放射性物質の取扱いに起因する人工放射線源による被ばくを「職業被ばく」と呼ぶ。放射線取扱作業中の被ばくであっても、地上での自然放射線による被ばくは原則として放射線防護の対象とする線源には含めない。ただし、高い高度を飛行する旅客機の乗務員や宇宙飛行士など、あるいはラドンなどの自然放射性物質の濃度の高い場所での作業に伴う被ばくなど、業務形態を工夫すれば被ばく管理が可能な場合には、自然放射線源からの被ばくであっても職業被ばくとして扱うことがある。
- 医療被ばく
放射線診断や治療に伴う患者・被検者の被ばくと、診断・治療中の付き添いや介護を行う人が承知の上で自発的に受ける被ばくのことを「医療被ばく」という。医学・生物学研究のために志願者が受ける被ばくも医療被ばくとして扱われる。
患者の診断に係わる医療被ばくに関しては、放射線の照射による医療的なメリットと副作用としての放射線障害について医師が熟知し、両者のバランスを勘案したうえで最適な線量を与えるという前提であるため、線量限度は設定されていない。医療被ばくによる線量は、放射線防護の対象とする線量には含めない。

- 公衆被ばく

職業被ばく、医療被ばく以外の被ばくを「公衆被ばく」と呼ぶ。自然放射線による被ばくは放射線防護の対象とする線量には含めない。表 VI に日本における一般公衆が年間に被ばくする線量 (2011 年 3 月 11 日以前) の内訳を示すが、ほとんどが医療被ばくと自然放射線による被ばくであり、事故が無い限りは放射線防護の対象としての公衆被ばくはごくわずかである。

Table VI: 日本の一般公衆が年間に被ばくする線量の内訳

被ばくの種類		線量 (mSv)	割合 (%)
医療被ばく		2.3	60
自然放射線	宇宙放射線	0.29	7.7
	大地放射線	0.38	10
	内部被ばく (食物など)	0.41	11
	ラドン	0.40	11
その他 (放射性降下物・原子力施設等)		0.01	0.3
合計		3.79	100

7.3 放射線防護の原則 (安全取扱いの 3 原則)

放射線防護の原則として以下のものが挙げられ、これはその頭文字から 3C の原則と呼ばれている。

- **Contain**
限られた空間に閉じ込め、広がらないようにする。
- **Confine**
効果的に利用し、その量は必要最小限にする。
- **Control**
適切に管理できる状態で使用する。

3C の原則は、放射線や放射性物質の取扱作業を管理区域と呼ばれるところに限定する、といった形で実際の放射線防護の実務に取り入れられている。

7.4 外部被ばくの防護の 3 原則

外部被ばく防護 3 原則としてよく知られているものを一般に優先度の高いとされているものから挙げる。

1. 遮蔽

作業中の被ばくを最小限にするように適切な遮蔽を設ける。放射線源の種類や配置などを考慮し、遮蔽体の材質、厚さ、形状を最適化する必要がある。

2. 距離

できるだけ線源から離れて作業する。線量率が線源からの逆 2 乗則に従うことを念頭において防護の対策を立てる。

3. 時間

作業時間をできるだけ短くする。被ばく線量は作業時間に概ね比例すると考えて、時間短縮のための実験計画等を立てる。

人的なミスや作業の遅延などの影響を受け難い順序ということから、このような優先度になっている。中でも γ 線や中性子のような透過力が強い放射線に対しては遮蔽が特に重要となる。例として、Table VII に種々の RI から放出される γ 線に対する遮蔽材の半価層（線量が半分になる厚さ）と 1/10 価層（線量が 1/10 になる厚さ）を示す。鉛で 5 cm, コンクリートで 30 cm というのが 1/10 価層のおよその目安である。

Table VII: γ 線に対するおよその半価層と 1/10 価層。上段は薄い遮蔽材（減衰が $1 \sim 10^{-1}$ ）、括弧内は厚い遮蔽材（ $10^{-5} \sim 10^{-6}$ ）の場合。（放射線管理の実際：丸善）

遮蔽材	鉛 [cm]		鉄 [cm]		コンクリート [cm]	
核種	半価層	1/10 価層	半価層	1/10 価層	半価層	1/10 価層
^{60}Co	1.3 (1.1)	4.2 (3.7)	2.6 (1.8)	7.7 (6.0)	8.7 (5.8)	25.3 (19.2)
^{131}I	0.3 (0.6)	1.3 (2.1)	1.6 (1.3)	4.7 (4.4)	6.0 (4.2)	16.7 (13.9)
^{137}Cs	0.7 (0.6)	2.2 (2.0)	2.0 (1.3)	5.9 (4.4)	7.1 (4.3)	20.0 (14.3)
^{198}Au	0.3 (1.0)	1.1 (3.3)	1.6 (1.3)	4.7 (4.6)	6.1 (4.1)	16.9 (13.8)
^{226}Ra	1.3 (1.4)	4.6 (4.7)	2.5 (2.2)	7.8 (7.4)	8.2 (7.3)	25.3 (24.4)

7.5 内部被ばくの防護の 5 原則

内部被ばく防護の原則は 3D・2C の原則と呼ばれる。RI を体内に取り込むリスクを下げる事が重要である。

- Dilute
希釈（担体添加、低濃度溶液にによる希釈など）

- Disperse
分散（換気、放射性廃液の希釈など）
- Decontaminate
除去（汚染除去、フードの使用など）
- Contain
閉じ込め（容器への収納、グローブボックスの使用など）
- Concentrate
集中（線源の保管、RIの濃縮分離など）

7.6 放射線源の安全取扱

放射線源を大まかに分類すると、密封線源(RI)、非密封線源(RI)、放射線発生装置に分けられる。これらを取り扱う際に共通して注意すべき点として、作業や安全管理を行ないやすい場所や施設で作業する、作業内容を十分に理解して不必要な被ばくを避ける、記録・記帳（個人線量測定を含む）を徹底する、といったことが挙げられる。

RIの場合、放射能の強さや濃度が定められた基準（下限数量）を超えない場合は法規制の対象とならず、使用の際に特別な申請などは必要ない（免除レベル）。旧法令では密封RIと非密封RIで扱いが分かれ、密封RIの場合一律3.7 MBqが下限数量であった。しかしながら、平成17年6月より施行された法令では「電離放射線に対する防護と放射線源の安全のための国際基本安全基準」(BSS)が取り入れられ、これに基づいて免除レベルが設定されることになった。下限数量に関しては旧法と異なり、密封・非密封の区別が無くなり核種毎に決められている（元素によっては化学形態にも依存）。そのため、これまで規制対象外であったチェックソースなどが下限数量を超えることとなった（例： ^{137}Cs 10 kBq; ^{60}Co 100 kBq; ^{90}Sr 10 kBq; ^{241}Am 10 kBq）。Table VIIIに主な核種の下限数量を示す。法律上の経過措置として、平成19年3月までに製造された線源に関しては通常の使用と保管においては旧法令が適用され、廃棄の時のみ新法令の規制対象となる。（新法令の下限数量を超える古いチェックソースの廃棄処分には、監督官庁の許可が必要）

以下に線源毎の注意事項を挙げる。

- 密封RI
法令上の密封線源とは、
 - － 正常な使用状態においては、開封または破壊されるおそれがない
 - － 漏えい、浸透等により散逸して汚染することがない

ことを基準にしており、日本工業規格(JIS Z 4821-1:2002, JIS Z 4821-2:2002)に従ってステンレス鋼やアクリルなどの容器に封入して製造されたもので、認可を受けた販売業者(日本アイソトープ協会)から入手できる。取扱者が蒸着等で自作したものは密封線源とはみなされない。

密封線源は直径2～3cm程度の密封容器にはいった市販の小線源と、放射能が10TBqにもおよぶような大線源がある。大線源は放射線発生装置と同様な施設に設置されているので、取扱はそれに準ずる。

小線源を取り扱う際には、密封材料の温度特性や機械的強度に注意し、化学反応によって腐食したりピンホールができていないか、プラスチックの密封材料が放射線損傷によって脆くなったりガスが発生して密封体内の圧力が上昇して破裂を引き起こさないかといっ

たことに注意する必要がある。また、密封線源を真空中で使用したりすると密封容器が破裂することがあるので、密封容器がその使用条件に適應するものかどうか注意を払わなければならない。

旧法令においては法律上の密封線源には事業所毎に総量規制が適用されて、届出 / 許可の区分をしていたが、新法令では総量規制が撤廃され、密封線源 1 個あたりの放射能の最大値で判断される。(届出使用の範囲内の密封線源を多数所持しても許可使用にはならない。)

また、小線源は小さく紛失しやすいのでその点特に注意が必要である。

新法令の経過措置のために免除レベルを超える線源を無申請で使用する機会がありうるので、後のトラブルを防ぐためにも貯蔵施設からの持ち出しの記録を怠らず、紛失・盗難の無いように管理すべきである。

日本における放射線関係のトラブルの中で、法律施行前に入手していた「線源」を「発見」してしまう事例が多い。管理と共に、その記録や業務内容の引き継ぎなども重要な問題である。(特定の一個人に依存する状況を避ける)

大線源の場合、その規模にもよるが、重厚な遮蔽やインターロックの装備などが必要になり、放射線発生装置に近い扱いとなる。

- 非密封 RI

下限数量を超える量の RI で、密封線源の条件を満たさないものはすべて非密封 RI として扱われる。非密封の場合は BSS 規制では従来に比べて免除レベルが緩くなる傾向であるが、人体に取り込んでしまう可能性があるので注意が必要である。特に α 粒子放出核や Sr のように骨などの体内組織に取り込まれやすい元素は厳しく管理すべきである。RI の経気道摂取、経口摂取、経皮膚摂取による内部被ばくを防止するために、管理区域での飲食や喫煙の禁止の徹底や、マスクやゴム手袋の着用などの作業に対する十分な備えが求められる。

また、非密封 RI の取扱にあたっては、汚染は起こり得るものとして考え、十分な予防措置、拡大予防措置を講じなければならない。具体的には、フードのように対策がなされたところで作業を行なうのは当然として、RI を用いないコールド実験で十分訓練する、放射性のものを扱う者と非放射性のものを扱う者が協力して作業を進める、サーベイメータで汚染のチェックをする、ポリエチレン濾紙などを敷いて汚染の除去がしやすいようにする、といったことが挙げられる。実際に汚染を生じさせてしまった場合は、放射線取扱主任者や管理区域責任者の指示・助言に従い、危険のない方法ですみやかになるべく完全に除去しなければならない。管理区域から出る時には、汚染検査室で十分にチェックし、汚染を拡散させないよう注意を払わなければならない。

余分な被ばくを避け、また放射性廃棄物を減らすという観点からも作業内容を十分検討し、効率化をはかるべきである。

(日本大学理工学部は非密封 RI についての使用許可は受けていない。また、非密封 RI を扱うのに必要な排気・排水設備や汚染検査室・測定器を完備した研究棟(ホットラボ)を現時点(2010 年度)では所有していない。法律的には日大理工学部内で非密封 RI を用いることは現状ではあり得ないとの認識で良い。)

- 放射線発生装置

人工的に放射線を発生させる装置であり、粒子加速器がこれに該当する。法令に放射線発生装置として定義されて規制の対象になっているのはエネルギーが 1MeV 以上の電子線および X 線を発生する装置であり、具体的には以下のタイプの装置が挙げられている。サイクロトロン、シンクロトロン、シンクロサイクロトロン、直線加速装置、ベータト

ロン、ファン・デ・グラフ型加速装置、コッククロフト・ワルトン型加速装置、変圧器型加速装置、マイクロトロン、プラズマ発生装置 (重水素とトリチウムとの核反応における臨界プラズマ条件を達成する能力を持つ装置)

ただし、装置表面から 10cm 離れたところの空間線量率が 600nSv/hr を超えないものは法規制の対象外。

加速器施設のような放射線発生装置や密封大線源による照射施設には安全のためのインターロックや自動表示灯などが備えられている。放射線発生装置の場合、特殊なものが多いので一般化して考えるのは難しい。使用する装置の特性を理解し、それに適した対応が求められる。施設・装置の管理者の指示に従い、定められた手順で十分な安全確認をとりながら装置を使用すべきである。(日本大学理工学部 (船橋校舎) にはエネルギー 100MeV の電子線形加速器を有する施設があるために、放射線発生装置を持つ特定許可使用施設となっている。)

詳細なルールはそれぞれの放射線施設ごとに放射線障害予防規程として定められているので、それを遵守しなければならない。

Table VIII: 主な核種の下限数量。現在の法律では、密封線源と非密封線源で違いは無い。

核種	数量 (Bq)	核種	数量 (Bq)	核種	数量 (Bq)
^3H	1×10^9 (1G)	^{22}Na	1×10^6 (1M)	^{32}P	1×10^5 (100k)
^{40}K	1×10^6 (1M)	^{55}Fe	1×10^6 (1M)	^{59}Fe	1×10^6 (1M)
^{57}Co	1×10^6 (1M)	^{60}Co	1×10^5 (100k)	^{63}Ni	1×10^8 (100M)
^{65}Zn	1×10^6 (1M)	^{90}Sr	1×10^4 (10k)	^{109}Cd	1×10^6 (1M)
^{137}Cs	1×10^4 (10k)	^{133}Ba	1×10^6 (1M)	^{210}Po	1×10^4 (10k)
^{226}Ra	1×10^4 (10k)	^{241}Am	1×10^4 (10k)	^{252}Cf	1×10^4 (10k)

7.7 法令で定められた線量限度

人についての線量限度

ICRP(国際放射線防護委員会) 勧告によって、人の被ばくに関する線量限度が設定されている。確定的影響を防止し、確率的影響を許容できると思われるレベルまで制限することを目的とし、対象者に応じて2種類定められている。

- 職業被ばく

放射線を扱うことによって利益を受ける人を対象としている。危険性が一般の職業生活に伴う事故などのリスク(職業上の危険による平均年死亡率が 10^{-4} を超えない)のレベルに相当する線量としている。

- ・ 実効線量

50 mSv/年 および 100 mSv/5 年

内部被ばくに係る年摂取限度は 20 mSv/年 にもとづいて算出される。

- ・ 組織等価線量

眼の水晶体：150 mSv/年

皮膚：500 mSv/年

- ・ 妊娠女性

申告後の残りの妊娠期間中、腹部表面において 2 mSv

- 公衆被ばく

放射線の業務に直接関係しない、一般の人が対象。自然放射線源(宇宙線、 ^{40}K など)からの線量と同程度以下に制限されている。

- ・ 実効線量

1 mSv/年

- ・ 組織等価線量

眼の水晶体：15 mSv/年

皮膚：50 mSv/年

場所についての線量限度

放射線同位元素等による放射線障害の防止に関する法律(放射線障害防止法)によって、放射線の線量、空気中の RI の濃度、RI によって汚染された物の表面の RI 密度が定められた値を超えるおそれのある場所を管理区域として放射線管理を行なうように定められている。管理区域に関して、場所ごとに線量限度が決められている。

Table IX: 場所ごとの線量限度値

場所	放射線施設内の人が常時立入る場所	管理区域境界	事業所境界及び事業所内の人の居住区域	病院又は診療所の病室
実効線量限度値	1 mSv/週	1.3 mSv/3 カ月	250 μSv /3 カ月	1.3 mSv/3 カ月

空気中濃度限度に関しては、放射線施設内の人が常時立入る場所における RI の濃度限度が、1 週間についての平均濃度が RI の核種ごとに規定されている。

表面密度限度に関しては、放射線施設内の人が常時立入る場所において、人が触れる物の表面の RI の密度の限度は、

- ・ α 線を放出する RI : $4 \text{ Bq} / \text{cm}^2$
- ・ α 線を放出しない RI : $40 \text{ Bq} / \text{cm}^2$

と定められている。汚染された物を 管理区域から持ち出す には、その密度が表面密度限度の 1/10 であることが求められる。加速器による放射化物もこれによって規制される。

- * 加速器や非密封 RI を扱う施設では、管理区域内に持ち込んだ物品が区域外に持ち出せなくなる場合があるので注意すること。
- * 放射化や汚染により上記の管理区域外持出し基準を超える物は、そのままその管理区域で保管するか別の管理区域間に輸送して保管する。
- * 上記のように RI や放射化物を輸送する場合には、持出し、受け入れ双方の管理区域の責任者 (放射線取扱主任者 and/or 管理区域責任者) の了解を取り、必要な手続きを行うこと！
- * RI、放射化物の輸送の際には線量に応じて使用する容器や輸送手段が法的に定められているので、これを遵守すること。

7.8 管理区域と放射線業務従事者

管理区域に立入って放射線を取り扱うには、放射線業務従事者に登録される必要がある。放射線業務従事者には職業被ばくの線量限度が適用されるが、登録には以下の条件が必要となる。

1. 教育訓練

放射線業務従事者は初めて管理区域に立入る前に法令で定められた時間数の教育訓練を受けなければならない (付録 A 参照)。また、1 年を超えない期間毎に再教育 (時間数の規定は特になし) を受ける必要がある。

2. 健康診断による健康管理

放射線業務従事者は初めて管理区域に立入る前に (電離放射線用の) 健康診断を受けなければならない (付録 B 参照)。また管理区域に立ち入った後 1 年を超えない期間毎に受診する必要がある (定期検診)。上記にかかわらず、放射線業務従事者が、

- 放射線同位元素を誤って吸入摂取し、または経口摂取したとき
- 放射線同位元素により表面汚染限度を超えて皮膚が汚染され、その汚染を容易に除去することができないとき
- 放射線同位元素により皮膚の創傷面が汚染された、または汚染されたおそれのあるとき
- 実効線量限度または等価線量限度を超えて放射線に被ばくした、または被ばくしたおそれのあるとき

のいずれかに該当する時には、遅滞なくその者について健康診断を実施する。

3. 被ばく線量の管理 (個人線量管理)

フィルムバッジのような個人線量計による被ばく線量の管理を受けなければならない(付録C参照)。線量限度としては、職業被ばくの線量限度が適用される。

女子(妊娠不能・妊娠の意志の無い者を除く)に関しては、3カ月ごとの管理となり、線量限度は5 mSv/3カ月である。(ただし、本人の自発的な意志により書面を提出すれば3カ月管理の適用を除外できる。)また、妊娠中である場合は、本人の申し出から出産までの期間の内部被ばく1 mSvが限度値として加わる。

放射線業務従事者でない者が見学などで管理区域に一時的に立入る場合、外部被ばくによる実効線量が100 μ Sv, 内部被ばくによる実効線量が100 μ Svを超えるおそれが無いときは被ばく線量の測定をする必要が無い。

付録

A. 新規教育訓練

Table X: 法令で定められた新規教育時間数

項目	放射線の人体に与える影響	RI または放射線発生装置の安全取扱い	RI および放射線発生装置による放射線障害の防止に関する法令	放射線障害予防規程
時間数	30 分	4 時間	1 時間	30 分

管理区域立ち入り前の新規教育は内容の項目、時間数共に法令で定められている (計 6 時間)。再教育の場合は、教育訓練の項目については新規と同様、ただし時間数は法令では定められていないので予防規程などによる。

B. 健康診断の項目

放射線障害防止法では、初めて管理区域に立ち入る前の検診、および立ち入った後に行う定期検診として問診と検査・検診を義務付けている。

● 問診

1. 放射線 (1MeV 未満のエネルギーを有する電子線および X 線を含む) の被ばく歴の有無
2. 被ばく歴を有する者については、作業の場所、内容、期間、線量、放射線障害の有無その他放射線による被ばくの状況

● 検査または検診

1. 末梢血液中の血色素量またはヘマトクリット値、赤血球数、白血球数および白血球百分率
2. 皮膚
3. 眼 (医師が必要と認める場合に実施)
4. その他文部科学大臣が定める部位および項目 (現在は特に定められていない)

管理区域立ち入り後の定期検診においては、検査・検診の項目 1,2 についても医師が必要と認める場合に限り実施する。

C. 被ばく線量記録

通常、放射線業務従事者は個人線量計 (フィルムバッジ) によって 1ヶ月単位で被ばく線量が管理され、本人に被ばく線量が通知される。通知される線量は、身体全体の実効線量と部位毎の等価線量の値などであり、当該月、四半期 (3ヶ月)、年度、5年ブロック、累積、といった形で集計されているので、注意事項を参照しながら各自確認すること。ここで、「X」(内部被ば

くの場合は「Y」)という表記は検出限界以下であったことを意味し、「10X」は累積で10ヶ月検出限界以下であったことを表す。(検出限界は放射線やフィルムバッジの種類によって異なるが、おおむね 0.05 ~ 0.2 mSv である。)大学等での教育研究における被ばく線量は検出限界以下であることがほとんどであるので、「0」や「X」以外の数値が出たときには注意すること。

年	実効線量	水晶体	皮膚	女子腹部
2006	0.00 (10X)	0.00 (10X)	0.00 (10X)	0.00 (10X)
2007	0.00 (10X)	0.00 (10X)	0.00 (10X)	0.00 (10X)
2008	0.00 (10X)	0.00 (10X)	0.00 (10X)	0.00 (10X)
2009	0.00 (10X)	0.00 (10X)	0.00 (10X)	0.00 (10X)
2010	0.00 (10X)	0.00 (10X)	0.00 (10X)	0.00 (10X)

Figure 8: 被ばく量の通知 (フィルムバッジによる)

参考文献

- [1] 江藤 秀夫 他, 放射線の防護, 丸善 (1972).
- [2] 放射線取扱者教育研究会, 放射線同位元素等取扱者必携, オーム社 (1983).
- [3] 多田 順一郎, わかりやすい 放射線物理学, オーム社 (1997).
- [4] 加藤 貞幸, 放射線計測, 培風館 (1994).
- [5] 日本アイソトープ協会, 放射線管理の実際, 丸善 (2006). (ハンドブックとして推奨)
- [6] 日本アイソトープ協会, アイソトープ手帳 10 版, 丸善 (2001).
- [7] 日本アイソトープ協会, アイソトープ法令集, 丸善 (2001).