原子・原子核・放射線

小倉昭弘

2024/09/20

はじめに

メールとホームページ

1. [E-mail] ogura.akihiro@nihon-u.ac.jp
2. [演習問題の解答など] manaba に掲載いたします．https://kokushikan.manaba.jp/ct/login
3. [講義日程表] http://physweb.mascat.nihon-u.ac.jp/ogu/lecture/
4. [アイソトープ研究センター] http://physweb.mascat.nihon-u.ac.jp/isotope/

参考書

- 『やさしい放射線とアイソトープ』日本アイソトープ協会 (丸善)

上記アイソトープ研究センターのホームページに本の紹介があります．

用意するもの

1. 関数電卓
2. A4 ミリ方眼グラフ用紙
3. 20〜30cm 程度の定規
4. このテキスト

成績

1. **前提条件：**放射線関連の本を 1 冊読み，講義最終日までに内容と感想を manaba のレポートから提出すること．これを第 16 回オンデマンドに充当する．
2. **試験：**テキスト・関数電卓持ち込み可

放射線関連の資格試験

資格	省庁	試験機関
第一種放射線取扱主任者 第二種放射線取扱主任者 第三種放射線取扱主任者	環境省 原子力規制委員会	(財) 原子力安全技術センター http://www.nustec.or.jp/
核燃料取扱主任者 原子炉主任技術者		原子力規制委員会
エックス線作業主任者 ガンマ線透過写真撮影作業主任者	厚生労働省	(財) 安全衛生技術試験協会 http://www.exam.or.jp/
第一種作業環境測定士 第二種作業環境測定士		
診療放射線技師		厚生労働省

日程

回数	月日	大項目	小項目
1	09/20	光・電子・原子	光の粒子性，制動 X 線，eV の定義
2	09/27		原子構造，ボーアの模型
3	10/04		特性 X 線，多電子原子と周期表
4	10/11	放射線物理学	原子核の構成，結合エネルギー
5	10/18	放射線化学	原子核の壊変と放射線，壊変系列
6	10/25		壊変法則，半減期
7	11/08		放射能と質量，放射平衡
8	11/15		荷電粒子と物質との相互作用
9	11/22		ガンマ線と物質との相互作用
10	11/29		中性子と物質との相互作用，核反応，原爆と原発
11	12/06	放射線測定	測定器，測定実習
12	12/13	放射線生物学	放射線影響の分類，生体への影響，しきい値
13	12/20		内部被曝，実効線量係数
14	01/10	管理・法令	防護の目的と体系，法の目的，放射線の管理
15	01/24	秋期試験	
16	01/31	オンデマンド	読書課題レポート

目 次

はじめに i

第 1 章 光・電子・原子 1
1.1 光の粒子性 1
1.2 電子の波動性 2
1.3 原子の構造 4
1.4 電離と発光 7
1.5 特性 X 線 7

第 2 章 放射線物理学・化学 9
2.1 原子核の構成 9
2.2 結合エネルギー 10
2.3 原子核の壊変と放射線，壊変系列 12
2.4 放射性核種の分類 15
2.5 壊変法則と放射能 18
2.6 放射能と質量 19
2.7 放射平衡 20
2.8 放射線と物質との相互作用（総論） 22
2.9 荷電粒子と物質との相互作用 24
2.10 γ 線と物質との相互作用 26
2.11 核反応，中性子と物質との相互作用 29

第 3 章 放射線測定 33
3.1 概略 33
3.2 測定器の種類と特性 34
3.3 気体の検出器 34
3.4 固体，液体の検出器 35
3.5 個人の被曝線量の測定器 36
3.6 測定値の取扱い 37
3.7 放射線測定実習 38

第 4 章 放射線生物学 39
4.1 放射線影響の分類 39
4.2 放射線に関する単位 40
4.3 原子・分子レベルの影響と修飾要因 42
4.4 細胞レベルの影響 43

4.5 組織・臓器レベルの影響 45
4.6 個体（胎児を含む）レベルの影響 48
4.7 内部被曝 49

第 5 章 法令・放射線管理 53
5.1 日常生活と放射線 53
5.2 防護の目的と体系，法の目的 54
5.3 法律の成立と ICRP 55
5.4 原子力基本法 56
5.5 RI 規制法 56
5.6 作業環境管理 57
5.7 線源管理 58
5.8 個人管理 58

付 録 A 単位 61
A.1 国際単位（SI 単位） 61
A.2 10 の整数乗倍を表す SI 接頭語 62
A.3 電子ボルト 62
A.4 基礎定数 63
A.5 原子単位 64

付 録 B 古典物理学 65
B.1 力学 65
B.2 光波 68

付 録 C 周期表 71
C.1 水素原子類のエネルギー準位 71
C.2 周期表 71
C.3 核外電子配置 73

付 録 D 同位体 77

付 録 E 年表 99

関連図書 101

索引 102

第1章　光・電子・原子

1.1　光の粒子性

光は，Newton の粒子説があったにせよ，波動説の方が優勢であった．特に回折や干渉などの現象は光が波である証拠と考えられてきた．

§1.1.1　光のエネルギーと運動量

光はマクロには，波としての性質を示す．干渉や回折はその良い例である．しかし，ミクロには，粒子としての性質を示す．粒子と考えられるということは，1 個 1 個数えることができるということだ．その光のツブツブのことを**光子**（こうし）とよぶ．

振動数 ν をもつ光子のエネルギー E は，光子の数 n を使って

$$E = nh\nu = nh\frac{c}{\lambda} \qquad (n = 0, 1, 2, 3, \cdots) \tag{1.1}$$

と表される．ここで，h は**プランク定数**といい，定義値は付録 A にあたえてある．また，最右辺は，波の振動数 ν と波長 λ との関係式

$$c = \nu\lambda \tag{1.2}$$

を使った．ここで，c は光の速さであり，やはり定義値は付録 A にあたえてある．光の波長と振動数の例を付録 B.2 にあたえている．

注 1 なぜ夜空の星は見えるのか？

光が波だとすると，三次元空間を伝わるにしたがってエネルギーがどんどん分散してしまう．したがって，星からの光は遠くには届くことができない．しかしながら，粒子だと考えると，星から地球上の我々の目に届くことが説明できる．

注 2 明るい光／暗い光

日常生活で，電灯などが明るい・暗いと言うが，明るいとは光子の数 n が大きいことをいう．

注 3 エネルギーの単位

国際単位系のエネルギーの単位は，J（ジュール）である．しかし，原子・原子核・放射線の分野では，eV（電子ボルト）がよく使われる．この単位については，付録 A.3 で説明する．

一方，一個の光子の持つ運動量 p は，プランク定数と光の波長を使って

$$p = \frac{h}{\lambda} \tag{1.3}$$

と表される．

§1.1.2　制動 X 線

1895 年ドイツのレントゲンは，陰極線の実験中に X 線を発見した．実験の装置の概略を図 1.1 に示した．陰極から発した電子が電圧で加速され，陽極（ターゲット）に衝突すると，目には見えない光が出る．これは当時未知だったため，“X 線”と名付けられた．現在の用語として，**制動 X 線**とよばれる．

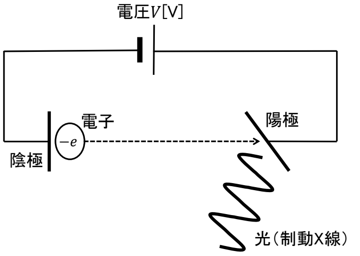

図 1.1: Röntogen の発見（1895 年）

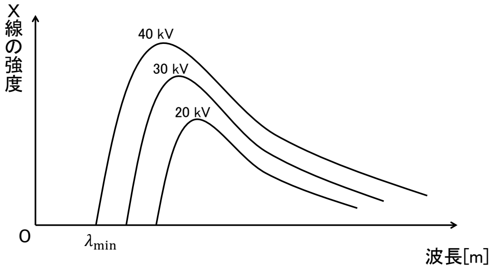

図 1.2: X 線スペクトル : 電子の加速電圧 V が大きくなると，最短波長 $\lambda_{\min}$ が小さくなる．

図 1.2 は，制動 X 線の強度を縦軸に，波長を横軸に取ったグラフの概形である．電圧 V を決めると，ある最小波長 $\lambda_{\min}$ より小さい波長をもった制動 X 線はでてこない．この最小波長を求めよう．

陰極と陽極で加速された電子の持つ運動エネルギーは，電子の持つ電荷 e に加速電圧 V をかけたものである．このエネルギーが光のエネルギーに転換される．電子のもつ運動エネルギーが光の最大エネルギーとなるので，

$$h\nu_{\max} = h\frac{c}{\lambda_{\min}} \leq eV \tag{1.4}$$

という数式が得られる．これより，光の最小波長は

$$\lambda_{\min} \geq \frac{hc}{eV} = \frac{hc/e}{V} \tag{1.5}$$

となる．この最右辺の式を見ると，分子にある h，c，e は自然定数であり，現在は定義値となっている．付録 A.1 の数値を代入すると

$$\frac{hc}{e} \sim 1.24 \times 10^{-6}\ \mathrm{V \cdot m}$$

となる．

また，人間がコントロールできるのは，電圧 V のみであることがわかる．図 1.2 では，加速電圧 V が大きくなると，最短波長 $\lambda_{\min}$ が左にずれ，短くなることもわかる．

1.2　電子の波動性

電子は前小節で述べた陰極線の実験を通して，1897 年イギリスの J. J. Thomson によって電荷と質量をもつ粒子として考えられた．1927 年になり G. P. Thomson によって[*1]，電子が波としての性質をもつことを示す実験が行われた．前節では，始め波と考えられた光が，粒子の性質を示す光子だと実験が行われた．この節では，始め粒子と考えられた電子が，のちに波としての性質を示す実験が行われた．

[*1] J. J. Thomson の息子

§1.2.1　物質波

1924 年フランスのド・ブロイは，すべての物質について波としての性質をもつのではないかと考えた．この波を**物質波**または**ド・ブロイ波**という．

質量 m，速さ v で運動する粒子の運動量の大きさを $p = mv$ として，その粒子の物質波の波長 λ はプランク定数を用いて

$$\lambda = \frac{h}{p} = \frac{h}{mv} \tag{1.6}$$

で表されるという仮説を立てた．

§1.2.2　電子顕微鏡

小さい物体を目で見るのに，光学顕微鏡が使われる．そもそも人間が目で物体を見るというのは，その物体に反射された光が目に入ることで物体を認知しているのである．

海面から頭を出している岩を考えよう．この岩に平行な波面をもつ波が押し寄せると考える．これを平面波という．図 1.3 のように，この岩の大きさに比べて長い波長の波が押し寄せてくる．すると波は岩が無かったと同じように通過してゆく．逆に図 1.4 のように，岩に対して短い波長の波が押せ寄せると，岩にあたった波は半円を描いて進行する波となる．これを球面波という．つまり，物体の大きさより短い波長の波があたることによって波の進行方向が変化することで物体を見ることができるのである．

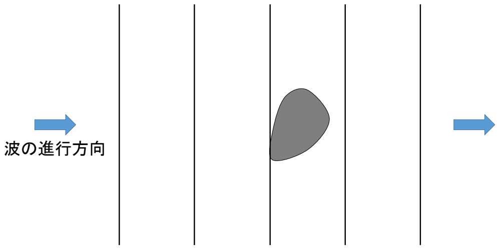

図 1.3: 物質より波の波長が長い場合

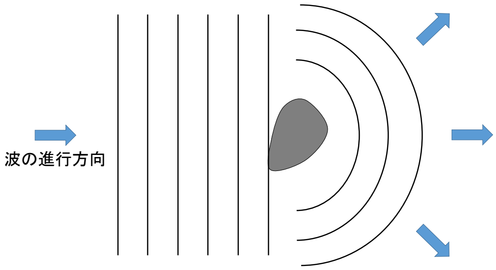

図 1.4: 物質より波の波長が短い場合

ここで光学顕微鏡をふりかえってみると，光学顕微鏡で見える物体の大きさは可視光線の波長（約 10^{-7} m）程度である[*2]．この波長以下の大きさの物体は見ることができない．

そこで，電子の波を利用したものが**電子顕微鏡**である．電圧 V [V] で加速された電子のもつ速さは，運動エネルギー保存則より

$$\frac{1}{2} m_e v^2 = eV \tag{1.7}$$

となる．式 (1.7) から求めた電子の速さ v を，物質波の式 (1.6) に代入すると

$$\lambda = \frac{h}{\sqrt{2 m_e e V}} \tag{1.8}$$

が得られる．ここで電圧を調整することによって 10^{-11} m 程度の波長を作り出すことができる．したがって，10^{-10} m 程度の分子が見えることとなる．

[*2] 付録 B.2 節参照

1.3　原子の構造

§1.3.1　ボーアの原子模型

原子は，中心に原子核があり，その周りに電子があるという構造をしている．例として He 原子の概念図を図 1.5 に描いてみる．円の中心に電荷 $+Ze$ の原子核，その周囲に電荷 $-e$ の電子が周回している．お互いにクーロン力 F を及ぼしあう．電子より原子核の質量が大きいので，以下，原子核は静止しているものとして考えよう．

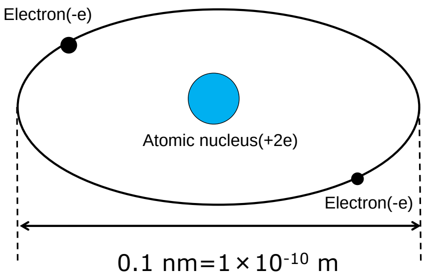

図 1.5: 原子模型

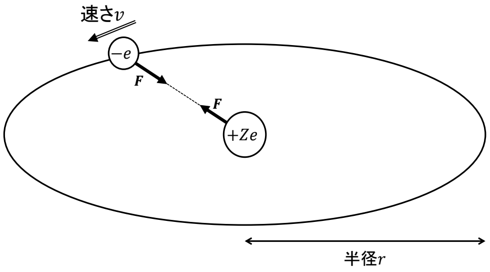

図 1.6: ボーア模型

まず，周回運動する質量 m_e の電子の運動方程式は

$$m_e\frac{v^2}{r}=\frac{1}{4\pi\varepsilon_0}\frac{Ze^2}{r^2}$$

と書くことができる．ここで $\beta=\frac{e^2}{4\pi\varepsilon_0}$ を導入すると

$$m_e\frac{v^2}{r}=\beta\frac{Z}{r^2} \tag{1.9}$$

となる．

一方，半径 r の円周上を，電子のド・ブロイ波が安定に存在するための共鳴条件

$$2\pi r=n\lambda=n\frac{h}{m_e v}\qquad(n=1,2,3,4,\cdots) \tag{1.10}$$

がある．式 (1.9) と式 (1.10) から速さ v を消去すると

$$r_n=\frac{\hbar^2}{m_e\beta}\frac{n^2}{Z}=a_B\frac{n^2}{Z} \tag{1.11}$$

が得られる．ここで，

$$a_B=\frac{\hbar^2}{m_e\beta}=5.26\times10^{-11}\ \mathrm{m}$$

は**ボーア半径**と呼ばれる物理量である．また，この電子の持つエネルギーは，電子の運動エネルギーと原子核の作るポテンシャルエネルギーとの和で表される．

$$E=\frac{m_e}{2}v^2-\beta\frac{Z}{r}$$

これより，式 (1.10) と式 (1.11) を代入すると

$$E_n = -\frac{m_e \beta^2}{2\hbar^2}\frac{Z^2}{n^2} \tag{1.12}$$

となる．ここで，

$$\frac{m_e \beta^2}{2\hbar^2} = 2.19 \times 10^{-18}\ \mathrm{J} = 13.6\ \mathrm{eV}$$

という数値を持っている．水素原子の半径とエネルギー準位を合わせると，図 1.7 のように描くことができる．

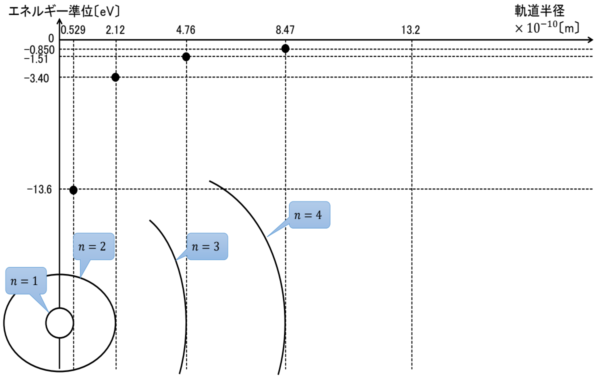

図 1.7: 水素原子の半径とエネルギー準位

§1.3.2 水素原子類

原子番号が大きくなれば電子の数も増えるわけだが，電子は原子核の作るポテンシャル $\frac{1}{r}$ の中を運動する．各電子は以下のような量子数によって指定されている．

主量子数	$n = 1, 2, 3, 4, 5, \cdots$
方向量子数	$l = 0, 1, 2, 3, \cdots, n-1$
磁気量子数	$m = -l, -l+1, \cdots, l-1, l$
スピン量子数	$s = +\frac{1}{2}, -\frac{1}{2}$

これを模式的に示したのが表 1.1 である．各マスには，パウリ原理よりスピンがアップ $(s = +\frac{1}{2})$ とダウン $(s = -\frac{1}{2})$ の電子が一つづつ入ることができる．アップとダウンを↑と↓で表せば，$\boxed{\uparrow\downarrow}$ となると，そのマスにはこれ以上の電子を入れることはできない．

原子番号が増えれば電子は各マスの小さい方から順に占めていくことになる．実際にはもう少し複雑であり，それは付録 C にまわす．こうして周期表の説明ができる．

表 1.1: 水素原子類の電子配置

主量子数 n	s($l=0$)	p($l=1$)	d($l=2$)	f($l=3$) 磁気量子数 m	エネルギー [eV]
⋮					⋮
Q 殻 ($n=7$)	□	□□□	□□□□□	□□□□□□□	$\cdots\ E_7 = -0.278$
P 殻 ($n=6$)	□	□□□	□□□□□	□□□□□□□	$\cdots\ E_6 = -0.378$
O 殻 ($n=5$)	□	□□□	□□□□□	□□□□□□□	$\cdots\ E_5 = -0.544$
N 殻 ($n=4$)	□	□□□	□□□□□	□□□□□□□	$\cdots\ E_4 = -0.85$
M 殻 ($n=3$)	□	□□□	□□□□□		$\cdots\ E_3 = -1.51$
L 殻 ($n=2$)	□	□□□			$\cdots\ E_2 = -3.4$
K 殻 ($n=1$)	□				$\cdots\ E_1 = -13.6$

方向量子数 l

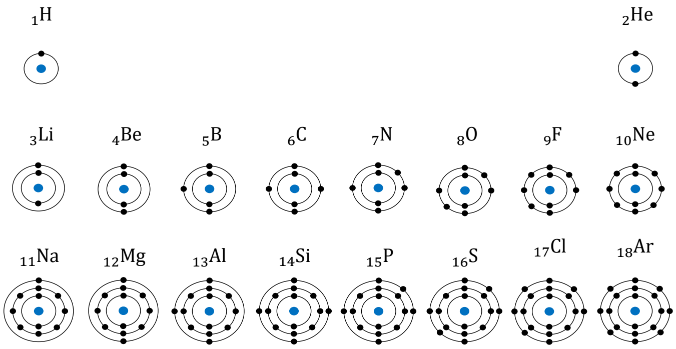

図 1.8: 周期表

1.4　電離と発光

原子外部からエネルギーをもらうと，電子は外側の軌道に飛び移ることができる．これを**励起** (excitation) という．励起された電子は不安定なエネルギー状態 (励起状態) にいるため，光を放出して内側の軌道へと遷移する．この光は，軌道間のエネルギー差によって決められた波長をもつので，**特性 X 線** (characteristic X ray) または**蛍光** (fluorescence) とよばれる．

また，原子外部からもらうエネルギーがより大きいと，電子は原子核の束縛から離れて自由に運動できるようになる．つまり正に帯電した陽イオンと自由電子にわかれる．これを**電離**または**イオン化** (ionization) という．

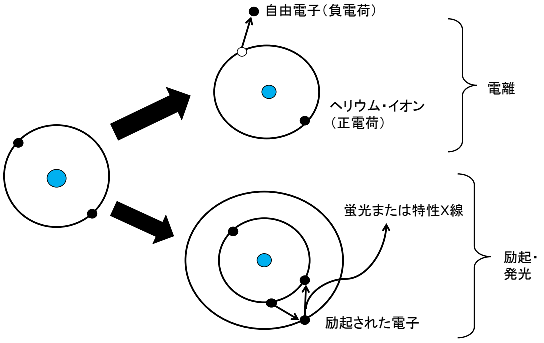

図 1.9: 原子の電離と励起・発光

1.5　特性 X 線

水素原子類の電子配置は表 1.1 のようになっていることは既に述べた．外部からエネルギーを得ると，電子は上の軌道に上がることができる．これを励起ということも前節で述べた．しかし，電子は原子核の近くの軌道にいるときが一番安定となるので，何もしなければ自然に下の軌道に飛び移ることになる．このとき，エネルギー準位の差に対応するエネルギーを光子の形で放出するのである．この光を**特性 X 線**という．「特性」というのは，エネルギー準位間の差に対応したエネルギーの光子しか放出しないからである．§1.1.2 の制動 X 線は，電子の持つエネルギー以下のエネルギーを持った光が放出され，そのエネルギーは連続的に変化している．

エネルギー準位が $E_{n'}$ から E_n に電子が移るときに放出される光の波長を求めよう．ここで，$n < n'$ とする．

$$h\nu = h\frac{c}{\lambda} = E_{n'} - E_n \tag{1.13}$$

水素原子類のエネルギーの式 (1.12) を代入し，$Z = 1$ の場合を考えよう．

$$h\frac{c}{\lambda} = \frac{m_e \beta^2}{2\hbar^2}\left(\frac{1}{n^2} - \frac{1}{n'^2}\right)$$

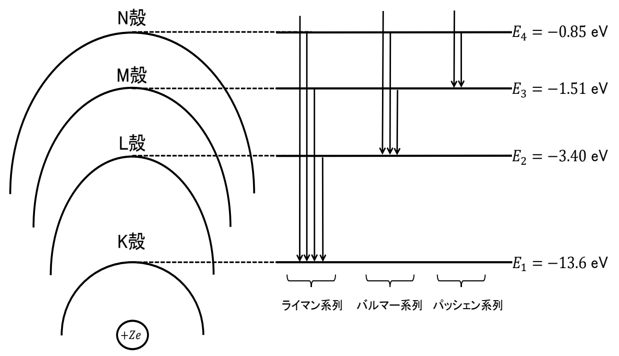

図 1.10: 特性 X 線

したがって，

$$\frac{1}{\lambda} = \frac{m_e \beta^2}{4\pi\hbar^3 c}\left(\frac{1}{n^2} - \frac{1}{n'^2}\right) \equiv R\left(\frac{1}{n^2} - \frac{1}{n'^2}\right) \tag{1.14}$$

が得られる．ここで，

$$R = \frac{4\pi\hbar^3 c}{m_e \beta^2} = 1.10 \times 10^7 \ \mathrm{m}^{-1} \tag{1.15}$$

を**リュードベリ定数**という．

これらの光の波長のなかで，電子が $n = 1, 2, 3$ に落ちてくるときに放出される光については，発見者の名前をとって以下のように名前が付けられている．

$n = 1,$	$n' = 2, 3, 4 \cdots$	ライマン系列（紫外線）
$n = 2,$	$n' = 3, 4, 5 \cdots$	バルマー系列（可視光）
$n = 3,$	$n' = 4, 5, 6 \cdots$	パッシェン系列（赤外線）

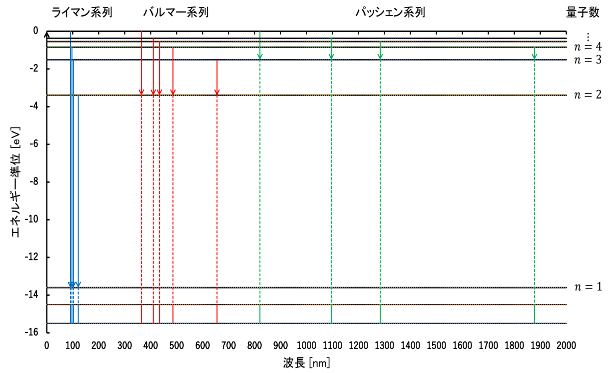

図 1.11: 特性 X 線の系列

第2章　放射線物理学・化学

この章から放射線の話しに入っていく．原子の直径がだいたい 10^{-10} m 程度の大きさとすると，原子核の直径はだいたい 10^{-15} m 程度である．より小さい世界の話しとなる．

2.1　原子核の構成

原子核に関する用語を列記する．この節と次の節は，安定な元素についての記述である．

構成要素

前章でもみたように，原子は中心に原子核があり，そのまわりを電子が特定の軌道を動くという構成をしている．以下に用語をもう一度整理しよう．

- 原子 (atom)
  - 核子 (nucleon)
    - 陽子 (proton)　: Z 個 (原子番号 atomic number)
    - 中性子 (neutron)　: N 個
  - 電子 (electron) : Z 個

電荷と質量

原子核は Z 個の陽子から成っているので，原子核は $+Ze$ [C] の電荷を持っている．また，原子の中の陽子と電子は同数なので，原子全体では電荷を持たない．最外殻を回っている電子がとれると，陽イオンとなる．上の構成要素の電荷と質量を表 2.1 に掲げる．

陽子と中性子の質量は，ほぼ同じ大きさであるが，中性子のほうが少し大きいことは記憶しておこう．

表 2.1: 電荷と質量

粒子	電荷	質量
陽子	$+e = +1.60 \times 10^{-19}$ C	$m_{\mathrm{p}} = 1.67262 \times 10^{-27}$ kg
中性子	0	$m_{\mathrm{n}} = 1.67493 \times 10^{-27}$ kg
電子	$-e = -1.60 \times 10^{-19}$ C	$m_{\mathrm{e}} = 9.10938 \times 10^{-31}$ kg

質量数

原子核の中の，陽子の数 Z と中性子の数 N を足したものを，**質量数** (mass number)A という．質量数は，ほぼ原子量に等しい．

$$A = Z + N \sim \text{原子量 [g]} \tag{2.1}$$

表記

周期表で使われる元素記号を X とすると,

$$^{A}_{Z}X \tag{2.2}$$

と書き表す．この表記から，中性子の数 N は，$N=A-Z$ で求めることができる．例えば，表 2.2 のようである．

表 2.2: 中性子数の計算

元素	中性子数
$^{4}_{2}\mathrm{He}$	$4-2=2$
$^{16}_{8}\mathrm{O}$	$16-8=8$
$^{1}_{0}\mathrm{n}$	$1-0=1$

元素記号は各元素に対して特有なので，原子番号 Z を書かなくても元素は指定できる．そこで，普通，質量数のみ書いて，原子番号を省略することが多い．例えば次のようである．

$$^{233}\mathrm{U},\qquad ^{235}\mathrm{U},\qquad ^{238}\mathrm{U}$$

原子核の大きさ

原子核は，ほぼ球形をしている．その半径 R は質量数 A を使って

$$R = 1.4\times10^{-15}A^{1/3}\ [\mathrm{m}] \tag{2.3}$$

である．断面積とは，原子核に投射された粒子が原子核に衝突する確率を表す．原子核の半径が R で与えられるとき，断面積 σ は,

$$\sigma = \pi R^2 \sim R^2 = 10^{-28}\ \mathrm{m}^2 = 1\ \mathrm{barn}$$

で与えられる．

同位体

原子番号 Z が同じで，質量数 A が異なる (すなわち，中性子の数 N が異なる) 原子核を**同位体** (isotope) という[*1]．元素の化学的性質は原子番号 Z で決まるので，同位体の化学的性質は変わらない．同位体の例を図 2.1 に掲げる．

同位体以外にも，いくつかの用語が放射線の世界で見られる．それらを図 2.2 にまとめておこう．

2.2 結合エネルギー

§2.2.1 統一原子質量単位

国際単位系で質量は kg であるが，10^{-27} kg とあまりに小さいので，原子の世界では，**統一原子質量単位** (unified atomic mass unit) [u] が使われる．

[*1] F. Soddy(英) の命名である．iso は同じ，tope は位置を意味するギリシャ語からの造語である．Nature, 92 (1913) 399

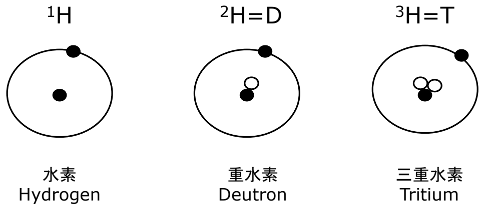

図 2.1: 水素の同位体

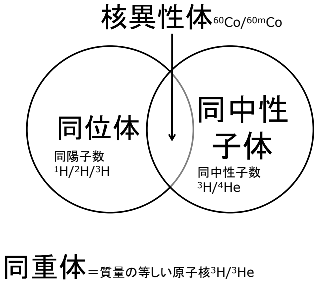

図 2.2: 同位体の種類

$^{12}_{6}$C の原子 1 個の質量を 12.00 u と定める．

$^{12}_{6}$C の原子 12 g の中に含まれる原子の数は，Avogadro 数 $N_A = 6.02214076 \times 10^{23}$ 個（定義値）である．

$$^{12}_{6}\text{C の原子 1 個の質量} = 12 \text{ u} = \frac{12 \times 10^{-3} \text{ kg}}{6.02214076 \times 10^{23} \text{ 個}} \tag{2.4}$$

したがって，

$$1 \text{ u} = \frac{1 \times 10^{-3}}{6.02214076 \times 10^{23}} = 1.66053906 \times 10^{-27} \text{ kg} \tag{2.5}$$

陽子，中性子と電子の質量の一覧表を表 2.3 に掲げる．

表 2.3: 質量とエネルギー

	質量			エネルギー		
		kg	u		MeV	J
陽子	m_p	$= 1.67262 \times 10^{-27}$	$= 1.007276$	$m_\mathrm{p}c^2$	$= 938.27$	$= 1.503 \times 10^{-10}$
中性子	m_n	$= 1.67493 \times 10^{-27}$	$= 1.008665$	$m_\mathrm{n}c^2$	$= 939.57$	$= 1.505 \times 10^{-10}$
電子	m_e	$= 9.10938 \times 10^{-31}$	$= 0.00054858$	$m_\mathrm{e}c^2$	$= 0.5110$	$= 8.187 \times 10^{-14}$
μ 粒子				$m_\mu c^2$	$= 105.66$	

§2.2.2 静止エネルギー

Einstein の特殊相対性理論から，質量とはエネルギーの存在様式の 1 つである．物体の質量を m [kg] とすると，エネルギー E [J] は

$$E = mc^2 \tag{2.6}$$

である．ここで c は光速で，$c = 3.0 \times 10^8$ m/s である．

すると，統一原子質量単位 1 u は，

$$\begin{aligned} 1 \text{ u} \times c^2 &= 1.6605402 \times 10^{-27} \text{ kg} \cdot (3.00 \times 10^8 \text{ m/s})^2 \\ &= 1.492 \times 10^{-10} \text{ J} = 931.5 \text{ MeV} \end{aligned} \tag{2.7}$$

となる．ここで，第 A.3 節により，単位を J から eV に換えた．

陽子，中性子と電子の質量の一覧表を表 2.3 に掲げる．SI 単位での質量は kg であるが，原子核では「統一原子質量単位」を使うことが多い．さらに，質量をエネルギーの単位で表すことも多い．一番右の J の欄はほとんど使われることはないが，参考のため載せておいた．

§2.2.3　結合エネルギー

陽子は正の電荷を持っているにもかかわらず，小さな原子核の中に閉じ込められるのは核子どうしに**核力** (nuclear force) が働いているからである．原子核を構成している核子をバラバラにするには，核力に抗して仕事をしなければならない．逆に核子がまとまって原子核を作るには，エネルギーを放出する．このエネルギーを**結合エネルギー** (binding energy) という．

一方，Z 個の陽子と N 個の中性子からなる原子の質量を M とすると，

$$Zm_{\mathrm{p}} + Nm_{\mathrm{n}} + Zm_{\mathrm{e}} > M \tag{2.8}$$

となる．そこで，

$$\varDelta m = Zm_{\mathrm{p}} + Nm_{\mathrm{n}} + Zm_{\mathrm{e}} - M \tag{2.9}$$

を**質量欠損** (mass defect) という．

原子核を構成するときに，質量欠損に相当する結合エネルギーを放出する．この結合エネルギー E は，

$$E = \varDelta m \times c^2 = (Zm_{\mathrm{p}} + Nm_{\mathrm{n}} + Zm_{\mathrm{e}} - M)c^2 \tag{2.10}$$

と表される．

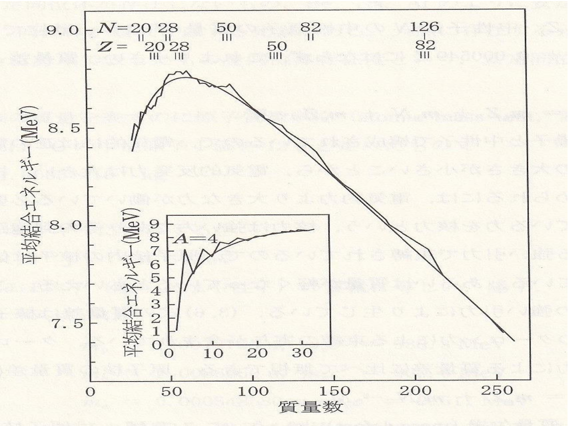

図 2.3: 核子 1 個あたりの結合エネルギー [2]

2.3　原子核の壊変と放射線，壊変系列

この節から放射線のお話しに入ろう．

§2.3.1 原子核の壊変

陽子は正の電荷を持っているにもかかわらず，小さな原子核の中に閉じ込められるのは，核子どうしに**核力**が働いているからである[*2]．核力は，とても短い距離でしか働かないので，原子番号 (つまり原子核) が大きくなると，陽子どうしの電気的反発力によって原子核が不安定となる．また，原子番号が小さくても，核力とクーロン力のバランスの悪い原子核が存在する。これらの不安定な原子核は，**放射線** (radiation) を放出して安定な原子核になってゆく．これを原子核の**壊変** (decay) という[*3]．

放射線を出す原子核を，**放射性同位体** (RI : radioisotope) という．逆に，放射線を出さない原子核を**安定同位体**という．原子番号が 83 の $_{83}$Bi 以上の原子核には，安定なものは存在しない．付録 D に同位体を掲載している．

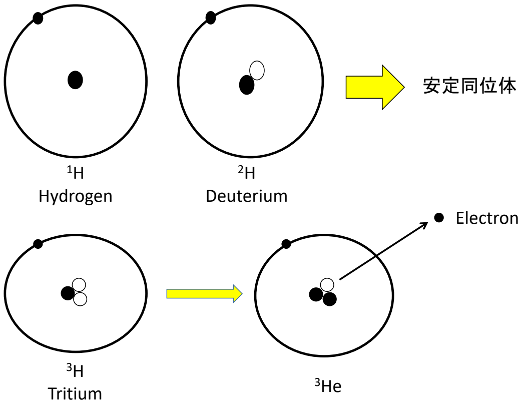

図 2.4: 安定同位体 (^{1}H，^{2}H) と放射性同位体 (^{3}H)

§2.3.2 壊変と放射線の種類

壊変には，次に述べる種類がある．壊変前の核種 X を**親核** (parent nucleus)，壊変後の核種 Y を**娘核** (daughter nucleus) という．これらの壊変の前後で，Z と A の総和は変化しない．一覧表を表 2.4 にまとめたあと，それぞれ解説しよう．

α 壊変

ラジウム $^{226}_{88}$Ra は，α 粒子を放出して，ラドン $^{222}_{86}$Rn と壊変する．この α 粒子は，のちに $^4_2$He であることがわかった．

(例) $^{226}_{88}$Ra, $^{210}_{84}$Po, $^{241}_{95}$Am

β^- 壊変

中性子過剰な原子核の中性子 n が陽子 p に変わる過程である．

$$\mathrm{n} \to \mathrm{p} + e^- + \bar{\nu} \tag{2.11}$$

[*2] 核力は湯川によって 1935 年に導入された．核力を媒介する粒子として π 中間子の存在を予言した．
[*3] 崩壊という言葉もかつて使われたが，いまでも高校物理では使われている．

表 2.4: 壊変の種類

壊変の種類	壊変過程	例
α 壊変	${}^{A}_{Z}X \to {}^{A-4}_{Z-2}Y + {}^{4}_{2}\mathrm{He}$	${}^{226}_{88}\mathrm{Ra} \to {}^{222}_{86}\mathrm{Rn} + {}^{4}_{2}\mathrm{He}$
β^- 壊変	${}^{A}_{Z}X \to {}^{A}_{Z+1}Y + \mathrm{e}^- + \bar{\nu}$	${}^{90}_{38}\mathrm{Sr} \to {}^{90}_{39}\mathrm{Y} + \mathrm{e}^- + \bar{\nu}$
β^+ 壊変	${}^{A}_{Z}X \to {}^{A}_{Z-1}Y + \mathrm{e}^+ + \nu$	${}^{22}_{11}\mathrm{Na} \to {}^{22}_{10}\mathrm{Ne} + \mathrm{e}^+ + \nu$
電子捕獲 (EC)	${}^{A}_{Z}X + \mathrm{e}^- \to {}^{A}_{Z-1}Y + \nu$	${}^{57}_{27}\mathrm{Co} + \mathrm{e}^- \to {}^{57}_{26}\mathrm{Fe} + \nu$
核異性体転移（γ 壊変）	${}^{A\mathrm{m}}_{Z}X$(励起状態) $\to {}^{A}_{Z}X$(基底状態) $+ \gamma$(光子)	${}^{60\mathrm{m}}_{27}\mathrm{Co} \to {}^{60}_{27}\mathrm{Co} + \gamma$

このとき，電子 e^- と反ニュートリノ (antineutrino)$\bar{\nu}$ を放出する．この電子は，原子核のまわりを回っている電子 (軌道電子) ではなく，原子核から放出される．この壊変では，原子番号は 1 つ上がるが，質量数は変化しない．

(例) ${}^{90}_{38}\mathrm{Sr}$, ${}^{14}_{6}\mathrm{C}$, ${}^{35}_{16}\mathrm{S}$, ${}^{63}_{28}\mathrm{Ni}$, ${}^{147}_{61}\mathrm{Pm}$

β^+ 壊変

陽子過剰な原子核の陽子 p が中性子 n に変わる過程である．

$$\mathrm{p} \to \mathrm{n} + e^+ + \nu \tag{2.12}$$

このとき，**陽電子** (positron)e^+ とニュートリノ (neutrino)ν を放出する．ただし，e^+ は単体では存在しないので，β 線というときには電子 e^- を意味する．この壊変では，原子番号は 1 つ下がるが，質量数は変化しない．

電子捕獲 (EC : Electron caputure)

陽子過剰な原子核の中にある陽子が，軌道電子を捕獲し中性子に変わる過程である．

$$\mathrm{p} + e^- \to n + \nu \tag{2.13}$$

この結果，原子番号は 1 つ下がるが，質量数は変化しない．この過程は，(2.12) と同等な過程であり，陽子過剰な原子核ではどちらかが起こる．これを**競合過程**という．

核異性体転移（IT : Isomer transition，γ 壊変）

原子核が α 変壊や β 壊変をおこすと，原子核は興奮 (励起) 状態にある．そこで，光子を放出して安定な基底状態になる．この壊変の前後の核種は，陽子数も中性子数も変わらない．ただ，核種のエネルギー状態が違うだけである．これらの核種を，**核異性体** (nuclear isomer) という．そして，壊変前の核種の質量数に m(metastable の意) をつけて区別する．

(例) ${}^{60}_{27}\mathrm{Co}$, ${}^{137}_{55}\mathrm{Cs}$, ${}^{192}_{77}\mathrm{Ir}$, ${}^{131}_{53}\mathrm{I}$, ${}^{24}_{11}\mathrm{Na}$, ${}^{198}_{79}\mathrm{Au}$

§2.3.3　壊変図

壊変図とは，前節の壊変を模式的に描いたものである．壊変前の核種を上に書き，壊変後の核種を下に書く．矢印の向きは，図 2.5 の α 壊変のように原子番号が減少するときは左下，図 2.6 の β 壊

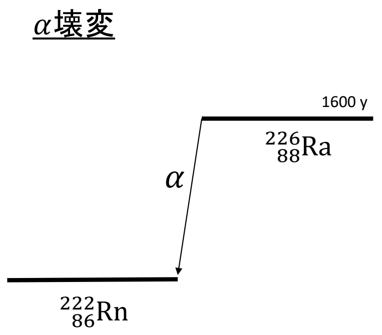

図 2.5: 壊変によって原子番号が下がるときは，左下に進む．

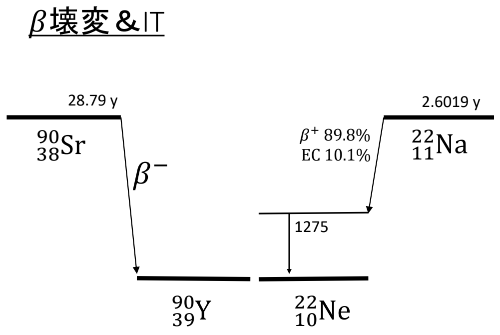

図 2.6: 壊変によって原子番号が上がるときは，右下に進む．核異性体転移のときは，真下に進む．

変のように原子番号が増加するときは右下となるようにする．また，核異性体転移のときは真下に書く．

その他の核種については，アイソトープ手帳 [8] を見るとよい．

2.4　放射性核種の分類

放射性核種は以下のように三つに分類しよう．付録 D には，原子番号順に同位体が並べてある．

§2.4.1　天然誘導放射性核種

宇宙線は，地球の外に起源を持つ放射線である．宇宙から地球に降り注ぐ**一次宇宙線**は，ほとんどが陽子，中性子や α 粒子である．

この一次宇宙線が大気上層部で窒素や酸素の原子と衝突すると，^{3}H や ^{14}C のような多くの種類の放射線が発生する．これらを**二次宇宙線**または**天然誘導放射性核種**という．

$$^{14}\mathrm{N} + \mathrm{n} \to {}^{14}\mathrm{C} + \mathrm{p}\ ({}^1_1\mathrm{H}) \tag{2.14}$$

$$^{14}\mathrm{N} + \mathrm{n} \to {}^{12}\mathrm{C} + \mathrm{T}\ ({}^3_1\mathrm{H}) \tag{2.15}$$

§2.4.2　壊変系列に属さない天然放射性核種

地球誕生のときから存在する放射性核種のことで，**天然放射性核種**という．付録 D には,「天」と書いてある．

この中でカリウム K は植物にとって必須の元素であり，その中に放射性の ^{40}K がある。したがって，植物の中には必ず ^{40}K があり，日々私たちは野菜を食べることによって体内に放射性物質を取り込んでいる．

§2.4.3　壊変系列をつくる核種

壊変系列をつくる放射性同位元素の一番初めにくる核種は ^{238}U，^{232}Th，^{235}U，^{237}Np の 4 種である．この 4 核種を**一次放射性核種**という．この一次放射性核種の壊変で生成する核種を**二次放射性核種**という．

ウラン系列 (4n+2)：図 2.7

^{238}U から始まり，^{206}Pb で終わる．この間に，α 壊変を 8 回，β 壊変を 6 回おこす．この系列に属する原子核の質量数は，4 で割ると 2 余る．

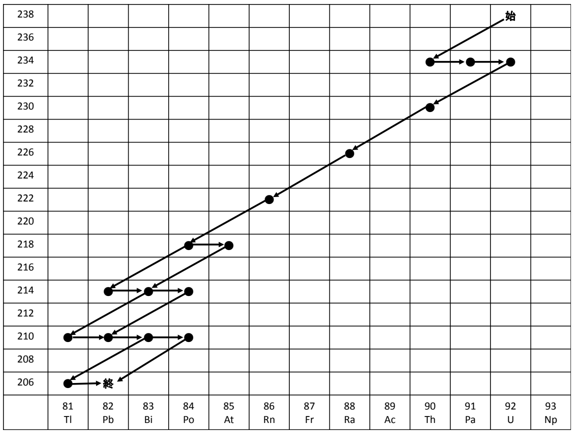

図 2.7: ウラン系列．縦軸は中性子数.

トリウム系列 (4n)：図 2.8

^{232}Th から始まり，^{208}Pb で終わる．この間に，α 壊変を 6 回，β 壊変を 4 回おこす．この系列に属する原子核の質量数は，4 で割りきれる．

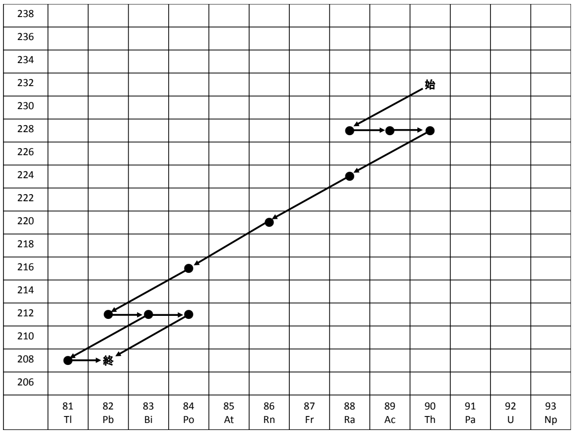

図 2.8: トリウム系列．縦軸は中性子数.

アクチニウム系列 (4n+3)：図 2.9

^{235}U から始まり，^{207}Pb で終わる．この間に，α 壊変を 7 回，β 壊変を 4 回おこす．この系列に属する原子核の質量数は，4 で割ると 3 余る．

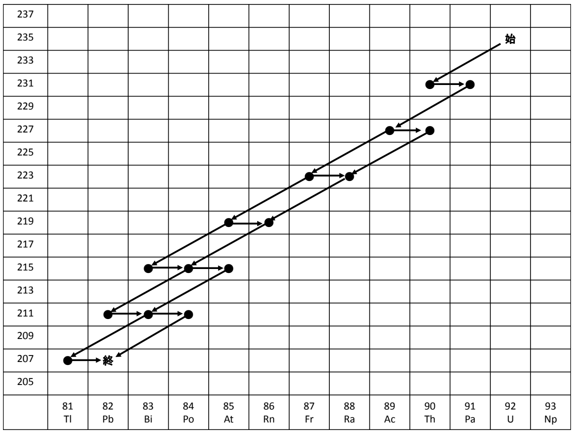

図 2.9: アクチニウム系列．縦軸は中性子数．

ネプツニウム系列 (4n+1)：図 2.10

^{237}Np から始まり，^{205}Tl で終わる．この間に，α 壊変を 8 回，β 壊変を 4 回おこす．この系列に属する原子核の質量数は，4 で割ると 1 余る．^{237}Np の半減期は 2.14×10^6 年と地球の年齢 (46 億年 $= 4.6 \times 10^9$年) より短いので現在では天然にはこの系列は存在しない．人工的に作ることはできる．

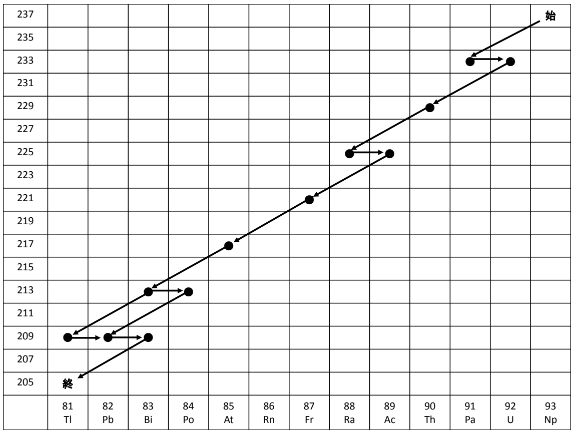

図 2.10: ネプツニウム系列．縦軸は中性子数．

2.5　壊変法則と放射能

放射性元素は，時間の経過にしたがって壊変してゆく．その壊変を支配する**壊変法則** (decay law) を調べよう．

1 秒間に壊変する原子核の個数を**放射能** (radioactivity) という． 単位は Bq(ベクレル)= 個/s=s^{-1} である．

元素の数 N の時間 t の経過による減少は，その時刻における元素の数 N に比例する．この比例定数を**壊変定数** (decay constant)λ という．

$$(\text{放射能}) = -\frac{dN}{dt} = \lambda N \tag{2.16}$$

この微分方程式を解くと

$$N(t) = N_0 e^{-\lambda t} \tag{2.17}$$

となる．ここで，N_0 は，$t=0$ での元素の数である．式 (2.17) を，横軸に時刻 t，縦軸に原子核の個数 N をとってグラフに描けば図 2.11 となる．

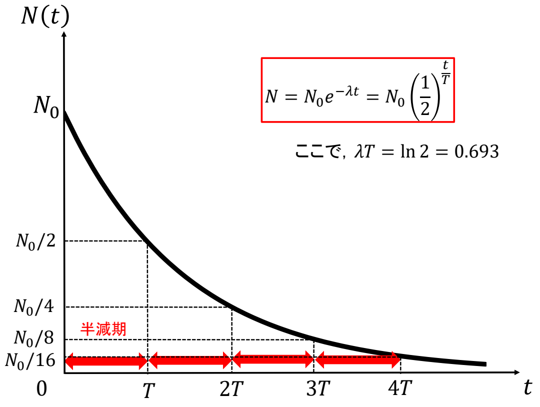

図 2.11: 壊変法則

$N = \dfrac{N_0}{2}$ となるまでの時間 T を**半減期** (half-life) という．

$$\frac{N_0}{2} = N_0 e^{-\lambda T} \tag{2.18}$$

より

$$\lambda T = \ln 2 = 0.693 \tag{2.19}$$

となる．式 (2.19) を式 (2.16) に代入すると

$$(\text{放射能}) = -\frac{dN}{dt} = \frac{0.693}{T} N \tag{2.20}$$

が得られる．これは次節で使う．また，式 (2.19) を式 (2.17) に代入すると

$$N(t) = N_0 \left(\frac{1}{2}\right)^{\frac{t}{T}} \tag{2.21}$$

が得られる．

式 (2.21) を時刻 t の関数としてグラフを描けば，同様に図 2.11 のようになる．この図 2.11 より半減期の意味がはっきりすると思う．各原子核の半減期は，付録 D を参照すること．

2.6　放射能と質量

放射能の式 (2.20) は，原子核の個数 N を使って表されている．しかし，一般に原子核の個数を数えることは不可能である．そこで，通常，質量で測ることになる．いま，放射性物質の粒子数が N 個とし，その質量が m[g] だったとする．

		質量数		アボガドロ数
1 mol	$\cdots$	A[g]	$\cdots$	N_A
		m[g]	$\cdots$	N

この比例式を使うと放射能の式 (2.20) は，

$$(\text{放射能}) = -\frac{dN}{dt} = \frac{0.693}{T}N = \frac{0.693}{T}\frac{mN_A}{A} \tag{2.22}$$

と表される．この式によって，放射性物質の質量 (m) と放射能 ($-dN/dt$) との関係がわかる．

単位量あたりの放射能が便利なときもある．

1. 1 g あたりの放射能を**比放射能**という．式 (2.22) より

$$(\text{比放射能})〔\text{Bq/g}〕= -\frac{\text{放射能}}{m} = \frac{0.693}{T}\frac{N_A}{A} \tag{2.23}$$

と書くことができる．

2. 1 mol あたりの放射能も用いられる．同じく式 (2.22) より

$$(\text{1 mol あたりの放射能})〔\text{Bq/mol}〕= -\frac{\text{放射能}}{N/N_A} = \frac{0.693}{T}N_A \tag{2.24}$$

と書くことができる．ここで，生命科学に使われる代表的な核種をあげる．

表 2.5: 半減期と最大比放射能

核種	半減期	最大比放射能
^{3}H	12.36 y	1.07 TBq/mmol
^{14}C	5760 y	2.31 GBq/mmol
^{32}P	14.3 d	338 TBq/mmol
^{35}S	87.4 d	55.3 TBq/mmol
^{45}Ca	164 d	29.4 TBq/mmol
^{125}I	60.1 d	80.3 TBq/mmol

いづれの場合でも，半減期 T の逆数に比例していることがわかる．つまり半減期 T が短い核種の比放射能は大きくなる．

2.7　放射平衡

ある核種が放射性で壊変を起こして別の核種となる．このとき，元の核種を**親核**といい，壊変した核種を**娘核**という．その娘核がさらに放射性である場合，壊変をして別の核種となる．この核種を**孫核**と呼ぶ．このような時には，連続して放射線がでることとなる．

		放射線		放射線	
		↗		↗	
	親核	⟶	娘核	⟶	孫核
個数	N_1		N_2		
壊変定数	λ_1	$<$	λ_2		
半減期	T_1	$>$	T_2		

§2.7.1　放射平衡

親核の個数 N_1 は，λ_1 の割合で減少する．微分方程式は

$$\frac{dN_1}{dt} = -\lambda_1 N_1 \tag{2.25}$$

である．親核の減少は娘核の増加であり，娘核は λ_2 の割合で減少する．娘核の個数を N_2 とすると，

$$\frac{dN_2}{dt} = +\lambda_1 N_1 - \lambda_2 N_2 \tag{2.26}$$

となる．親核と娘核の時間変化は，式 (2.25)，(2.26) の連立微分方程式を解くことになる．

まず，式 (2.25) を解く．これは前回の式 (2.16) と同じで，初期条件 $t = 0$ のとき $N_1 = N_0$ とすると

$$N_1 = N_0 e^{-\lambda_1 t} \tag{2.27}$$

となる．これを式 (2.26) に代入した微分方程式は

$$\frac{dN_2}{dt} + \lambda_2 N_2 = \lambda_1 N_0 e^{-\lambda_1 t} \tag{2.28}$$

となる．これを解くのに，まず式 (2.28) の左辺をゼロとした同次方程式

$$\frac{dN_2}{dt} + \lambda_2 N_2 = 0 \tag{2.29}$$

を解く．これは式 (2.25) と同じ形なので，積分定数を C として

$$N_2 = Ce^{-\lambda_2 t} \tag{2.30}$$

と解くことができる．ここで，定数変化法を用いる．すなわち，定数 C を時刻 t の関数 $C(t)$ とみなして，式 (2.30) を式 (2.28) に代入する．

$$\frac{dC}{dt} e^{-\lambda_2 t} = \lambda_1 N_0 e^{-\lambda_1 t} \tag{2.31}$$

を変形して，

$$\frac{dC}{dt} = \lambda_1 N_0 e^{(\lambda_2 - \lambda_1)t} \tag{2.32}$$

となる．これを解く．積分定数を C' として

$$C = \frac{\lambda_1 N_0}{\lambda_2 - \lambda_1} e^{(\lambda_2 - \lambda_1)t} + C' \tag{2.33}$$

これを式 (2.30) に戻すと

$$N_2 = \frac{\lambda_1 N_0}{\lambda_2 - \lambda_1} e^{-\lambda_1 t} + C' e^{-\lambda_2 t} \tag{2.34}$$

ここで娘核の初期条件 $t = 0$ のとき $N_2 = 0$ とすると，

$$C' = -\frac{\lambda_1 N_0}{\lambda_2 - \lambda_1} \tag{2.35}$$

これを式 (2.34) に戻して

$$N_2 = \frac{\lambda_1 N_0}{\lambda_2 - \lambda_1} \left(e^{-\lambda_1 t} - e^{-\lambda_2 t} \right) \tag{2.36}$$

が初期条件を含んだ最終解となる．

§2.7.2 過渡平衡

親核の半減期 T_1 が娘核の半減期 T_2 より長いとき，$\lambda T = \ln 2$ であることより，

$$T_1 > T_2 \quad \text{または} \quad \lambda_1 < \lambda_2$$

のとき，式 (2.36) の括弧内第 2 式は無視される．したがって，(2.27) より

$$N_2 = \frac{\lambda_1 N_0}{\lambda_2 - \lambda_1} e^{-\lambda_1 t} = \frac{\lambda_1}{\lambda_2 - \lambda_1} N_1 \tag{2.37}$$

となる．これを変形すると，

$$\frac{N_2}{N_1} = \frac{\lambda_1}{\lambda_2 - \lambda_1} = \frac{T_2}{T_1 - T_2} < 1 \tag{2.38}$$

これから，放射能の比は

$$\frac{A_2}{A_1} = \frac{\lambda_2 N_2}{\lambda_1 N_1} = 1 + \frac{N_2}{N_1} > 1 \tag{2.39}$$

となる．また，式 (2.38) を使って，

$$\frac{A_2}{A_1} = \frac{\lambda_2}{\lambda_2 - \lambda_1} = \frac{T_1}{T_1 - T_2} > 1 \tag{2.40}$$

と表すことができる．これより $A_2 > A_1$ なので，このときは必ず娘核種の放射能のほうが大きい．

過渡平衡の例としては，以下のようなものがある．

$$^{132}\mathrm{Te} \xrightarrow[3.204\ \mathrm{d}]{\beta} {}^{132}\mathrm{I} \xrightarrow[2.295\ \mathrm{h}]{\beta} {}^{132}\mathrm{Xe}$$

$$^{87}\mathrm{Y} \xrightarrow[79.8\ \mathrm{h}]{\mathrm{EC}} {}^{87m}\mathrm{Sr} \xrightarrow[2.815\ \mathrm{h}]{\mathrm{IT}} {}^{87}\mathrm{Sr}$$

$$^{140}\mathrm{Ba} \xrightarrow[12.752\ \mathrm{d}]{\beta} {}^{140}\mathrm{La} \xrightarrow[1.6781\ \mathrm{d}]{\beta} {}^{132}\mathrm{Ce}$$

§2.7.3　永続平衡

親核の半減期 T_1 が娘核の半減期 T_2 より非常に長いとき，すなわち

$$T_1 \gg T_2 \quad \text{または} \quad \lambda_1 \ll \lambda_2$$

のとき，式 (2.37) の分母 λ_1 は無視される．したがって，

$$N_2 = \frac{\lambda_1}{\lambda_2} N_1 \tag{2.41}$$

となる．これを変形すると，

$$\frac{N_2}{N_1} = \frac{\lambda_1}{\lambda_2} = \frac{T_2}{T_1} \tag{2.42}$$

これから，放射能の比は

$$\frac{A_2}{A_1} = \frac{\lambda_2 N_2}{\lambda_1 N_1} = 1 \tag{2.43}$$

となり，放射能は等しく $(A_1 = A_2)$ なる．

永続平衡の例としては，以下のようなものがある．

$$\begin{array}{ccccc}
{}^{90}\mathrm{Sr} & \xrightarrow[28.79\ \mathrm{y}]{\beta} & {}^{90}\mathrm{Y} & \xrightarrow[64.00\ \mathrm{h}]{\beta} & {}^{90}\mathrm{Zr} \\
{}^{137}\mathrm{Cs} & \xrightarrow[30.167\ \mathrm{y}]{\beta} & {}^{137m}\mathrm{Ba} & \xrightarrow[2.552\ \mathrm{m}]{\mathrm{IT}} & {}^{137}\mathrm{Ba} \\
{}^{226}\mathrm{Ra} & \xrightarrow[1600\ \mathrm{y}]{\alpha} & {}^{222}\mathrm{Rn} & \xrightarrow[3.8235\ \mathrm{d}]{\alpha} & {}^{218}\mathrm{Po}
\end{array}$$

2.8　放射線と物質との相互作用（総論）

放射線と物質との相互作用は，以下の目的のために重要である．

1. 放射線からの防護

2. 放射線の測定

3. 生体への影響（放射線治療も含む）

放射線が物質に与える影響としては次のものが考えられる．

1. 電離作用，励起・発光作用（図 1.8 参照）

2. 物質透過力（図 2.12 参照）

特に前者は放射線の測定に，後者は放射線防護や核医学について重要である．以下，各放射線についてみていこう．

α 粒子

電荷は $+2e$ と大きいため，物質を構成する分子の中の電子を電離しやすく，物質への影響は大きい．しかし，4 つの核種から構成されるほどの大きさなので，物質と相互作用してすぐに停止してしまう．したがって，物質透過力は小さい．

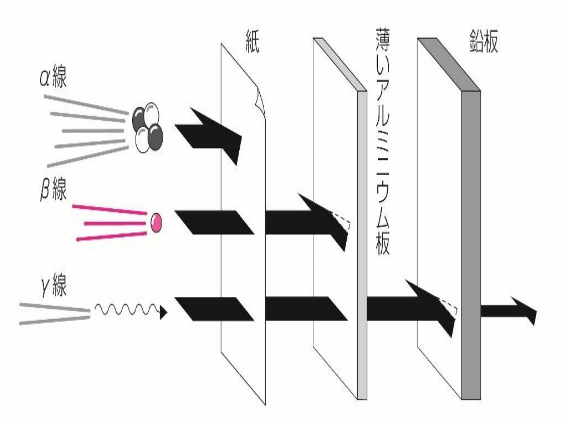

図 2.12: 放射線と物質との相互作用 [5]

β^- 粒子

電荷と粒子の大きさともに，α，β 粒子の中間に位置するため，電離作用や物質透過力も中間に位置する．

γ 粒子

電荷を持たないため，電子に直接ぶつかれば影響はあるが，電離作用は小さい．逆に相互作用が小さいということは，物質透過力は大きくなる．

今までの話を表 2.6 にまとめておこう．そして，以下の節では，放射線と物質との相互作用を，荷電粒子と γ 線にわけて考えよう．

表 2.6: 放射線の特徴

	高 LET	低 LET	
	α 線	β^- 線	γ 線
本体	${}^4_2$He	e$^-$(電子)	光子
電荷	$+2e$	$-e$	0
電離作用	大	中	小
物質透過力	小	中	大
遮蔽（しゃへい）	紙 1 枚	プラスチック アルミニウム	鉛 コンクリート

2.9　荷電粒子と物質との相互作用

§2.9.1　阻止能

放射線が物質に入射すると，徐々にエネルギーを失い，最後にはすべてのエネルギーを失って止まる．物質中 (dx) を通る間に失うエネルギー (dE) とすると，**線阻止能** S を

$$S = -\frac{dE}{dx} = S_{rad} + S_{col} \tag{2.44}$$

と定義する．この値が大きいほど，物質中で放射線が早くエネルギーを失って止まることを意味する．この線阻止能は，二つの和によって与えられる．

1. 線制動放射阻止能 S_{rad}

荷電粒子が原子核の電場によって曲げられて，制動放射をしてエネルギーを失う．重荷電粒子のときは通常無視できる．

2. 線衝突阻止能 S_{col}

物質を構成する電子との相互作用によってエネルギーを失う．原子の電離・励起によってエネルギーを失う．

荷電粒子が物質中の単位長さ当たり電子に与えるエネルギー，すなわち，物質が得るエネルギーのことを**線エネルギー付与**（LET : linear energy transfer）という．

$$\text{LET} \sim S_{col} \tag{2.45}$$

であり，放射線生物学で重要な量となる．

§2.9.2　衝突阻止能

荷電粒子の質量 M，電荷 z，速さ v，エネルギー $E = Mv^2/2$ とする．物質の原子番号 Z，質量数 A，電子の質量 m，密度 ρ とする．このとき，衝突阻止能は以下に与えられる[*4]．

$$S \propto \rho \frac{z^2}{v^2}\frac{Z}{A} \propto \frac{Mz^2}{E} \tag{2.46}$$

衝突阻止能を物質の密度 ρ で割ったものを**質量衝突阻止能**という．

$$S_m = \frac{S}{\rho} \tag{2.47}$$

これは物質に依存しない量となる．

[*4] 衝突する物質の原子番号 Z が大きいほど，衝突阻止能は大きくなる．つまり，放射線をさえぎるためには，できるだけ大きな原子番号をもつ物質を使うと良い．安定同位体のある最大原子番号は鉛 Pb である．

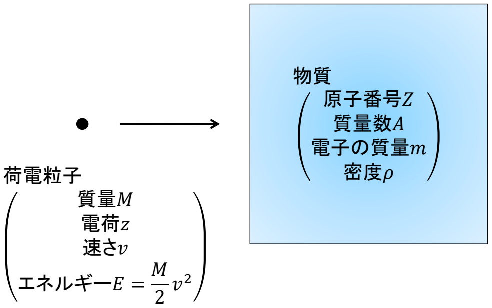

図 2.13: 荷電粒子と物質との衝突

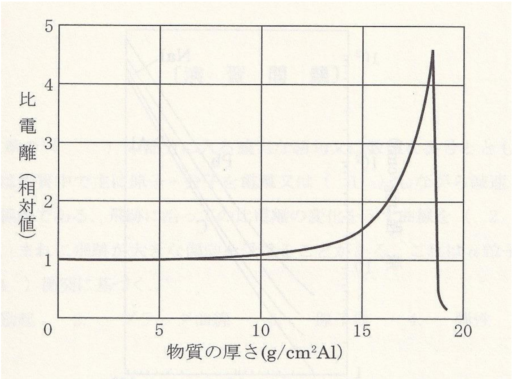

図 2.14: ブラッグ・ピーク [2]

§2.9.3 飛程

荷電粒子が物質中で運動エネルギーを全部失い止まるまでに進む距離を**飛程** R[cm] という．

$$R \propto \int \frac{dE}{S} \propto \frac{E^2}{Mz^2} \propto \frac{Mv^4}{z^2} \tag{2.48}$$

飛程 R と物質の密度 ρ[mg/cm^3] の積を**質量飛程** [mg/cm^2] という．A を原子量とすると，次の**ブラッグ・クレーマン則**が成り立つ．

$$R \times \frac{\rho}{\sqrt{A}} \sim 一定 \tag{2.49}$$

β 線のアルミニウム中での質量飛程 [g/cm^2] は以下のように与えられている．

$$R = 0.542E - 0.133 \qquad 0.8 \text{ MeV} < E \tag{2.50}$$

$$R = 0.407E^{1.38} \qquad 0.15 \text{ MeV} < E < 0.8 \text{ MeV} \tag{2.51}$$

α 線の空気中での飛程 R[cm] は以下のように与えられている．

$$R = 0.318E^{1.5} \qquad 4 \text{ MeV} < E < 7 \text{ MeV} \tag{2.52}$$

§2.9.4 W 値

エネルギー E の荷電粒子が空気中で止まった時に生じるイオン数を N とすると，イオン対 1 個を作る平均エネルギー W は

$$W = \frac{E}{N} \tag{2.53}$$

で与えられる．

表 2.7: W 値

気体	α 線 [eV]	β 線 [eV]
空気	35	34
ヘリウム	43	42
アルゴン	26	26
メタン	29	27

2.10　γ 線と物質との相互作用

§2.10.1　線減弱係数と半価層

物質に光子が照射されると，光子の減衰は指数関数的と仮定される．物質の厚さを x とすると，γ 線の強度 I は**線減弱係数** $\mu[\mathrm{cm}^{-1}]$ を使って

$$-\frac{dI}{dx} = \mu I \tag{2.54}$$

と表すことができる．γ 線の入射強度を I_0 として，この微分方程式を解けば，

$$I = I_0 e^{-\mu x} \tag{2.55}$$

となる．入射 γ 線の強度が半分になる物質の厚さ X を**半価層**という．

$$\mu X = \ln 2 = 0.693 \tag{2.56}$$

の関係がある．

表 2.8: 光子の半価層と 1/10 価層 [cm]

エネルギー	鉛		水	
MeV	半価層	1/10 価層	半価層	1/10 価層
1	1.1	3.5	19	63
2	1.9	6.0	23	75

§2.10.2　相互作用の種類

γ 線が物質に照射されると，光子のエネルギーにより，光電効果・コンプトン効果・電子対生成が起こり，γ 線のエネルギーが失われる．

光電効果：

光電効果とは，図 2.15 のように金属板に光（紫外線）を照射すると電子が飛び出してくるという現象である．これは入射光子のエネルギーが低い（0.5 MeV 以下）ときに優勢な相互作用である．

金属は熱や電気を運ぶことから，自由に動ける電子（自由電子）が存在することは以前から知られていた．自由電子は金属内に束縛されているのであるから，電子を金属の外に飛び出させ

るためには，ある一定以上の仕事を加える必要がある．電子を金属から引き出すのに必要なエネルギーを W とする．このエネルギーを**仕事関数**とよぶ．金属に照射する光の振動数を ν とすると，電子が金属から飛び出すための条件は

$$h\nu > W \qquad \text{より} \qquad \nu > W/h = \nu_0$$

である．さらに，出てきた電子の運動エネルギーの最大値 $K_{\max}$ は，エネルギー保存則の立場から

$$K_{\max} = h\nu - W = h\nu - h\nu_0$$

となる．

光電効果の実験は図 2.16 のような装置ですることができる．光を金属陰極 K に照射すると，光電効果により電子が飛び出してくる．陽極 P の電圧を正にしておくと，電位差に対応する運動エネルギーを持った電子が陽極に到達することができ，その時にだけ電流が測定できる．電圧を大きくしていくと，電子が最大運動エネルギー $K_{\max}$ を持っていても陽極に到達できなる．このときの電圧を V_c とすれば，$K_{\max} - eV_c = 0$ が成り立つ．

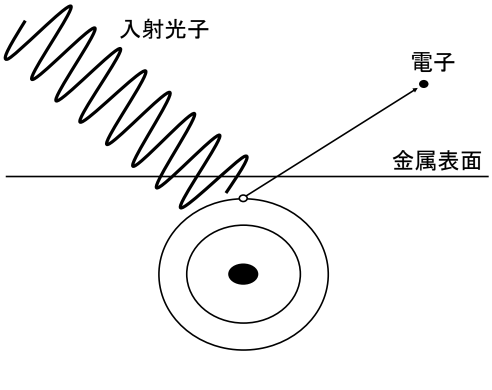

図 2.15: 光電効果

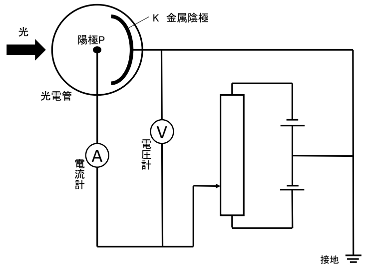

図 2.16: 光電効果の実験装置

コンプトン効果：

図 2.17 のように，静止した質量 m_e の電子に，波長 λ の光が衝突する．衝突後，光は角度 θ の方向に波長 λ' となって進み，電子は角度 ϕ，速さ v で動き出す．このとき，エネルギーと運動量は保存されるので，

$$\text{エネルギー} \qquad h\frac{c}{\lambda} = h\frac{c}{\lambda'} + \frac{m_e}{2}v^2 \tag{2.57}$$

$$\text{運動量 } x \text{ 方向} \qquad \frac{h}{\lambda} = \frac{h}{\lambda'}\cos\theta + m_e v\cos\phi \tag{2.58}$$

$$\text{運動量 } y \text{ 方向} \qquad 0 = \frac{h}{\lambda'}\sin\theta - m_e v\cos\phi \tag{2.59}$$

が成り立つ．式 (2.58) と式 (2.59) から ϕ を消去し

$$(m_e v)^2 = \left(\frac{h}{\lambda}\right)^2 - 2\frac{h^2}{\lambda\lambda'}\cos\theta + \left(\frac{h}{\lambda'}\right)^2$$

これを式 (2.57) から v を消去すると

$$\lambda' - \lambda = \frac{h}{2m_e c}\left(\frac{\lambda'}{\lambda} + \frac{\lambda'}{\lambda'} - 2\cos\theta\right)$$

が得られる．ここで，衝突による X 線の波長の変化は小さいとすると，$\lambda' \sim \lambda$ より

$$\lambda' - \lambda = \frac{h}{m_e c}(1 - \cos\theta) \tag{2.60}$$

となり，衝突後の光の波長は，衝突前より長くなる．これは，エネルギー $E = h\nu$ の光子が，エネルギーの一部を電子に与え，自身は消滅せずに残る．ここで，

$$\frac{h}{m_e c} = 2.43 \times 10^{-12}\ \mathrm{m} = 2.43\ \mathrm{pm}$$

は**コンプトン波長**と呼ばれる．また，エネルギーの変化として書き直してみると

$$E' = \frac{E}{1 + \frac{E}{m_e c^2}(1 - \cos\theta)} \tag{2.61}$$

で与えられる．この過程は，$0.5 < E < 5$ MeV で優勢な反応である．

なお，光のエネルギーが変化しない散乱を**レイリー（トムソン）散乱**という．

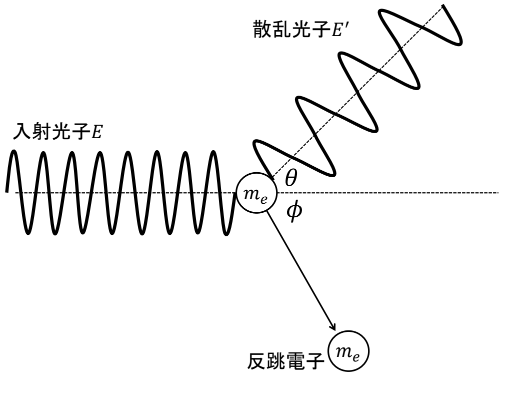

図 2.17: コンプトン効果

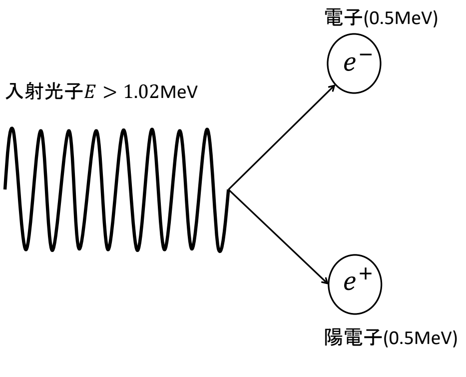

図 2.18: 電子対生成

電子対生成：図 2.18

エネルギー $h\nu$ の光子が原子核付近で消滅し，電子と陽電子が生成される．電子と陽電子の質量の和から，入射光子のエネルギーが 1.02 MeV 以上でないと起こらない．

§2.10.3　相互作用と減弱係数

減弱係数を物質の密度で割ったものを**質量減弱係数**という．

$$\mu_m = \frac{\mu}{\rho} \tag{2.62}$$

減弱係数 μ は，$\mu = \tau + \sigma + \kappa$ で表される．

表 2.9: 相互作用と減弱係数

	減弱係数	断面積	エネルギー
光電効果	τ	$Z^5 E_\gamma^{-3.5}$	0.5 MeV 以下
コンプトン効果	σ	Z^1	0.5∼5 MeV
電子対生成	κ	Z^2	1.02 MeV 以上

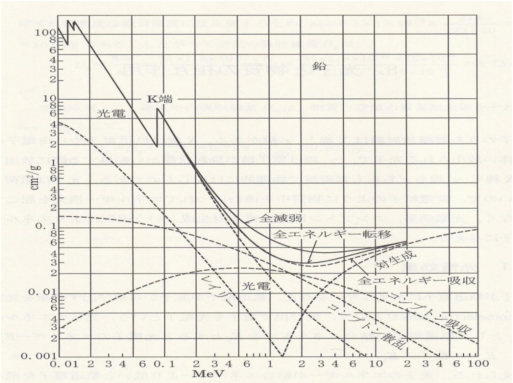

図 2.19: 鉛に対する光子の質量減弱係数 [2]

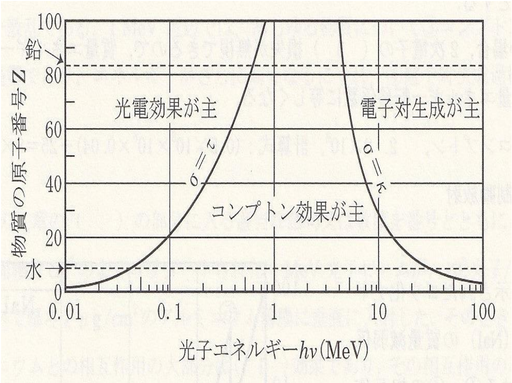

図 2.20: 水の実効原子番号は 7.5，鉛の原子番号は 82 [2].

§2.10.4　照射線量

質量 dm の空気中に γ 線が入射し，γ 線のエネルギーがすべて失われるまでに生成するイオン対の電荷量を dQ とすると，

$$X = \frac{dQ}{dm} \text{ [C/kg]} \tag{2.63}$$

を**照射線量**という．放射線ででてくる単位は表 A.2 にまとめた．

2.11　核反応，中性子と物質との相互作用

§2.11.1　核反応

1898 年ころに発見されたヘリウム原子核（${}^4_2$He または α 粒子）をラザフォードが物質にぶつけたのが始まりである．1919 年に初めて行われた．

$$ {}^{14}\mathrm{N} + {}^4\mathrm{He} \to {}^{17}\mathrm{O} + {}^1\mathrm{H} - 1.2 \text{ MeV} \tag{2.64}$$

加速器を作り出したコッククロフトとワルトンは 1932 年に

$$ {}^7\mathrm{Li} + {}^1\mathrm{H} \to {}^8\mathrm{Be} \to {}^4\mathrm{He} + {}^4\mathrm{He} + 17.6 \text{ MeV} \tag{2.65}$$

の反応を起こさせた．同じ年，チャドウィックは中性子を発見する[*5]．

$$ {}^9\mathrm{Be} + {}^4\mathrm{He} \to {}^{12}\mathrm{C} + {}^1\mathrm{n} + \gamma(6 \text{ MeV}) \tag{2.66}$$

[*5] ちなみに同じ年，ディラックの予言（1928 年）した**陽電子**も発見された．加速器，中性子，陽電子が見つかったこの年を「奇跡の年」と言われる所以である．

§2.11.2　中性子の分類と相互作用

中性子は，その速さ（エネルギー）によって以下のように分類される．

熱中性子	E <0.025 eV
熱外中性子	0.1 eV $< E <$ 1 keV
高速中性子	0.1 MeV$< E$

荷電粒子は電荷があるために原子核に近づくとクーロン力による反発が大きくなり，原子核から遠ざけられる．ところが中性子は電荷を持たないため，中性子は原子核に近づくことができる．そこで原子核が中性子を吸収または捕獲するという反応が起こる．ただし，速く動く中性子は捕獲され難いので，中性子を減速させ，熱中性子として捕獲されやすいようにする必要がある．例えば，コバルト 60 を生成するのに使われる．

$$^{59}\mathrm{Co} + {}^{1}\mathrm{n} \rightarrow {}^{60}\mathrm{Co} + \gamma \tag{2.67}$$

これを次のようにも表す．

$$^{59}\mathrm{Co}\,(\mathrm{n}, \gamma)\,{}^{60}\mathrm{Co} \tag{2.68}$$

§2.11.3　核分裂

この熱中性子を使えば，中性子を原子核に吸収させることができ，もっと大きな原子核ができると考えられた．ハーンとシュトラスマンは 1938 年に実験を行い，大きな原子核を作る代わりに**核分裂**を発見した．

$$^{235}\mathrm{U} + {}^{1}\mathrm{n} \longrightarrow {}^{92}\mathrm{Kr} + {}^{144}\mathrm{Ba} + 3{}^{1}\mathrm{n} + 174\ \mathrm{MeV} \tag{2.69}$$

また，ウラン 238 に中性子を吸収させると，次の反応が起こった．

$$^{238}\mathrm{U} + {}^{1}\mathrm{n} \longrightarrow {}^{239}\mathrm{U} \longrightarrow {}^{239}\mathrm{Np} \longrightarrow {}^{239}\mathrm{Pu} \tag{2.70}$$

このプルトニウム 239 もウラン 235 と同じ核分裂性核種であることがわかった．これら核分裂反応では，原子核が 2 個の原子核に分裂するのである．これらの原子核を**核分裂生成物**という．図 2.21 に見るように，これら核分裂性生成物は質量数が 95 と 138 付近の核種が生成される確率が高い．

§2.11.4　原子力

式 (2.69) の右辺で，2〜3 個の中性子がでることがわかった．その中性子を別の ^{235}U に吸わせれば，連続的に核分裂が起きる（**連鎖反応**という）ことになる．この反応を一気に行わせたのが原子爆弾であり，徐々に行い人工にコントロールしたものが原子力発電である．原子力発電では水を沸騰させて蒸気の力でタービンを回して電気を作る．蒸気の力でタービンを回すという意味では，火力発電となんら仕組みは変わらない．水を沸騰させるのに，化石燃料を使うか，核反応を使うかである．ちなみに水力発電は，高い位置にある水の位置エネルギーをタービンを回すエネルギーとしている．

式 (2.69) では，1 回の核分裂で 174 MeV のエネルギーが放出される．一般の化学反応が数 eV 程度であるので，いかに大きなエネルギーかが理解できる．このエネルギーで水を沸騰させ，その蒸気でタービンを回して電気を作るのが原子力発電である．

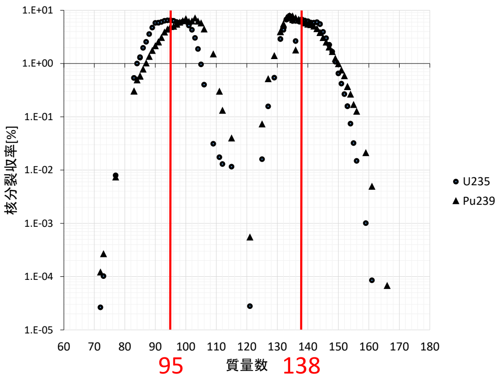

図 2.21: ^{235}U と ^{239}Pu の核分裂収率．アイソトープ手帳 [8] から作成．

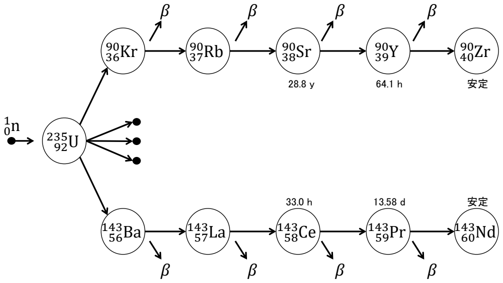

図 2.22: ^{235}U の核分裂生成物

また，図 2.22 に見るように，核分裂生成物は，長半減期の核種が多く，原子力発電から出されるこれらの核種を放射性廃棄物とよんでいる．これらを地層深く埋設し，半減期の 10 倍の期間管理する計画であるが，その場所すら未だ決定されていない．

第3章　放射線測定

3.1　概略

§3.1.1　目に見えないものを捕える

放射線は，見ることも触ることも匂いも味もない．人間の五感では捕えることができない．そこで，放射線が物質と相互作用することを利用して放射線が存在するかどうかを調べるわけである．その物理的背景 (原理) となるものは，次の 2 つである．図 1.8 参照．

電離作用

放射線が空気中を通過すると，電離能力によりイオンが生ずる．そのイオンを電場をかけて集める．単位質量 (1 kg) の空気に放射線を通過させ，生じたイオンの量を**照射線量** (exposure) という．したがって，単位は C/kg である．

励起発光作用

放射線が原子の近くを通過すると，原子内の電子がエネルギーの高い準位に励起される．その電子は，自発的に低い軌道に移り，光を放出する．その光を捕えることによって，放射線が来たことを感知する．発光した光の多くは微弱なものなので，光子を倍増させて検知する．

§3.1.2　何を測定するのか？

放射線の測定も次の 2 つの内容がある．

放射線の測定

放射線の種類やエネルギーを測定する．これがわかると，放射線を放出している核種や放射能（壊変率）がわかる．

線量の測定

放射線を区別しないで，平均値として測定．例えば物質が吸収するエネルギー，生成する電気量，生物が受ける損傷など次の 5 つがある．

1. 吸収線量〔Gy=J/kg〕
ある物質が放射線から与えられるエネルギー

2. 線量等量〔Sv〕
放射線の種類による重みを加味したもの

3. 70 μm，3 mm，1 cm 線量等量〔Sv〕
人の軟組織に等価な線量等量．それぞれ皮膚，目，それ以外の臓器に対応する．

4. カーマ〔Gy〕
物質中で非荷電粒子によってたたきだされたすべての荷電粒子の持つ運動エネルギーの合計.

5. 照射線量〔C/kg〕
空気中で光子によって生成するイオン対の全電荷量.

3.2 測定器の種類と特性

前節の物理的性質をいかして，種々の測定器がある．表 3.1 にまとめておこう．放射線の持つエネルギーによって，測定できないものもあるので，使用核種によって測定器を選択しなければならない.

表 3.1: 放射線の測定器

物質	測定器	測定対象	原理
気体	電離箱	γ(1μSv/h〜)	電離
	比例計数管	α，低エネルギー β	
	GM 計数管	高エネルギー β，γ(0.1μSv/h〜)	
固体	半導体検出器	γ，エネルギー分解能が良い	
	NaI シンチレーションカウンタ	γ(0.01〜30μSv/h)	蛍光
液体	液体シンチレーションカウンタ	低エネルギー β	

3.3 気体の検出器

電離現象を利用している．放射線が気体を電離し，電場によってイオンを回収する．電場を作るためにかける電圧によって，以下の種類がある.

§3.3.1 電離箱

- γ 線による放射線の強さの測定
- 空気の W 値は，約 34 eV である．表 2.7 参照.
- 電離箱に Q〔C〕の電荷が流れたとすると，電離箱内に生成したイオン対の数 N は，電子の電荷を e〔C〕とすると

$$N = \frac{Q}{e} \tag{3.1}$$

である．電離箱内の気体の質量を m〔kg〕とすると，気体の吸収線量 D〔Gy=J/kg〕は，

$$D = \frac{WN}{m} = \frac{WQ}{me} \tag{3.2}$$

と表すことができる.

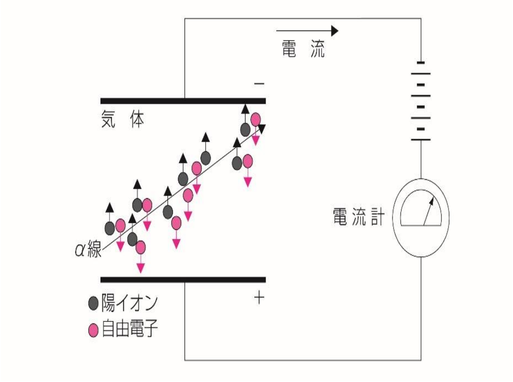

図 3.1: 電離箱の原理 [5]

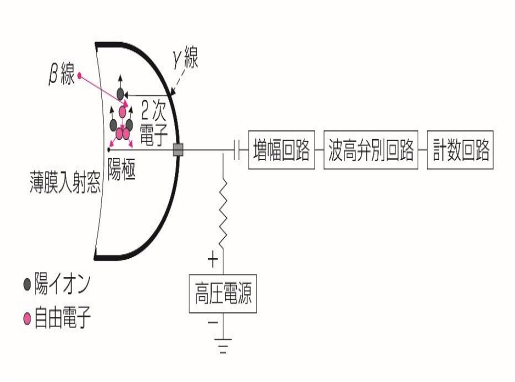

図 3.2: GM 計数管の原理 [5]

§3.3.2 GM 計数管

- 数え落とし
- 幾何学的効率

§3.3.3 比例計数管

- 気体中に発生したイオンは，電極に加速される途中で他のガス分子に衝突する．衝突により新たなイオンが生ずる．これを電子なだれという．放射線による電離以上のイオンが集まるので，**ガス増幅**という．
- 比例領域では，最初に発生したイオン対に比例するイオンが電極に集まる．
- 測定試料を計数管内に直接挿入するので，飛程の短い α 線や低エネルギー β 線の測定が可能である．

3.4 固体，液体の検出器

§3.4.1 半導体検出器

- 半導体が放射線によって電子―正孔対を作ること利用した検出器である．
- 電子―正孔対を生成するのに，ゲルマニウム半導体で 3.0 eV，シリコン半導体で 3.6 eV である．
- 空気のときの約 30 eV と比較して小さいので，エネルギー分解能がよい．

§3.4.2 シンチレーション・カウンタ

- シンチレータの励起作用を利用している．

- γ(X) 線によってシンチレータが励起し，基底状態にもどるときに発する光を測定する．一般的にこの光は微弱なため，光電子増倍管によって光を電子に変換して増幅する．
- シンチレータとしては，個体 (NaI) や液体のものがある．特に低エネルギー β 線の計測に有利で，^{3}H では唯一の手段である．

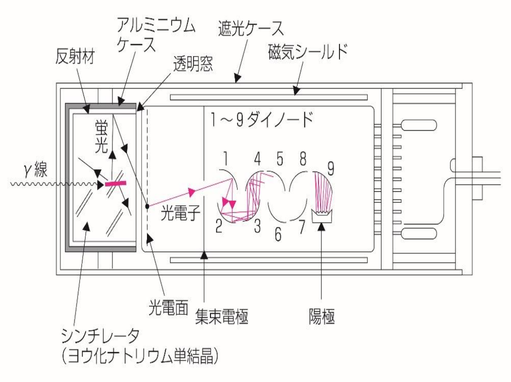

図 3.3: NaI(Tl) シンチレーション検出器 [5]

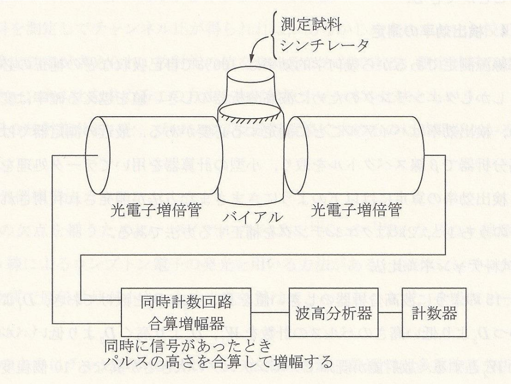

図 3.4: 液体シンチレーションカウンタの構造 [2]

3.5　個人の被曝線量の測定器

§3.5.1　測定器の種類

大きく分けて積分型と直読式に分類される．

- 積分型
  - 蛍光ガラス線量計
  - OSL(Optically Stimulated Luminescence)
  - TLD(熱蛍光線量計)
  - フィルムバッチ
- 直読式
  - 電子式ポケット線量計

§3.5.2　測定部位

男性は胸部，女性は腹部に装着して測定する．

3.6 測定値の取扱い

§3.6.1 分布関数

放射性核種は，いつ壊変するのかは確率的な問題であり全くわからない．実際の計測では，ある値を中心にしてばらついた値になる．これらの変動を取り扱う数学的モデルとして，

- 二項分布

$$p(x) = {}_n\mathrm{C}_x p^x (1-p)^{n-x} \tag{3.3}$$

- ポアソン分布

$$p(x) = \frac{m^{-x}}{x!} e^{-m} \tag{3.4}$$

- 正規 (ガウス) 分布

$$p(x) = \frac{1}{\sqrt{2\pi m}} e^{-\frac{(x-m)^2}{2\sigma}} \tag{3.5}$$

などがある．ここで，m は，分布の平均値である．これらの分布の中では，ガウス分布がよく使われる．

ガウス分布は，2 つの数すなわち平均値 m と分散 σ によって表される分布である．

$$p(x) = \frac{1}{\sqrt{2\pi\sigma}} e^{-\frac{(x-m)^2}{2\sigma}} \tag{3.6}$$

この分布は平均値 m の周りにばらつき，

- $m \pm \sigma$ の範囲に 68.26 %
- $m \pm 2\sigma$ の範囲に 95.44 %
- $m \pm 3\sigma$ の範囲に 99.73 %

が入る．

§3.6.2 誤差の伝搬

バックグラウンドならびに測定試料を計数したら，以下の計数値を得たものとする．

	計数時間	計数値と誤差	計数率と誤差
測定試料	t	$N \pm \sqrt{N}$	$\frac{N}{t} \pm \frac{\sqrt{N}}{t}$
バックグラウンド	t_b	$N_b \pm \sqrt{N_b}$	$\frac{N_b}{t_b} \pm \frac{\sqrt{N_b}}{t_b}$

このとき，正味の計数率

$$\frac{N}{t} - \frac{N_b}{t_b} \tag{3.7}$$

のもつ誤差 σ_n は

$$\sigma_n = \sqrt{\left(\frac{\sqrt{N}}{t}\right)^2 + \left(\frac{\sqrt{N_b}}{t_b}\right)^2} = \sqrt{\frac{N}{t^2} + \frac{N_b}{t_b^2}} \tag{3.8}$$

となる．さらに，

$$\frac{\sqrt{N}}{N} \tag{3.9}$$

で表されるものを計測誤差という．

3.7　放射線測定実習

ここで用いられる放射線源の壊変図を下に掲げる．

植物の三大栄養素は，K，N，P である．つまり，カリウムは，全ての植物に含まれている．

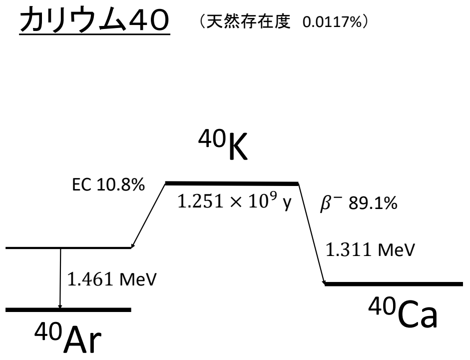

図 3.5: カリウム 40

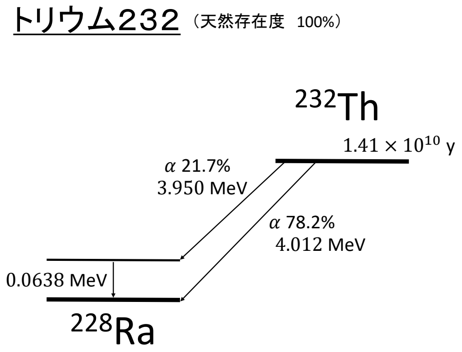

図 3.6: トリウム 232

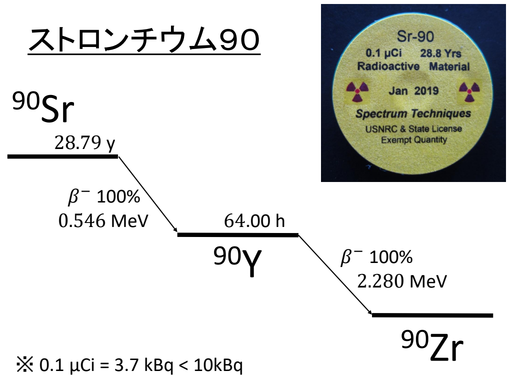

図 3.7: ストロンチウム 90

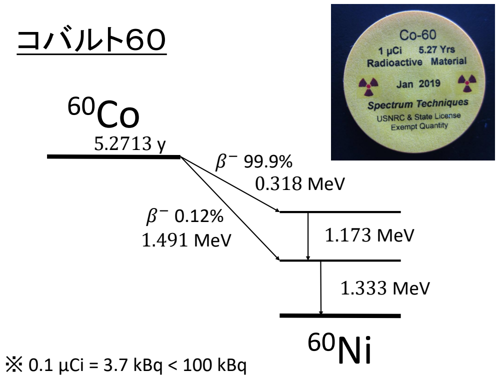

図 3.8: コバルト 60

第4章　放射線生物学

放射線生物学は，原子・分子，細胞，組織・臓器，個体の各レベルごとに整理するとわかりやすい．

4.1　放射線影響の分類

放射線影響の全体構成を図 4.1 にまとめる．

図中，高 LET・低 LET の分類は，表 2.6 を参照のこと．一般に，高 LET は質量の大きい荷電粒子で，電離作用の大きいものをさす．これらの粒子は，DNA 2 本鎖を引きちぎるような損傷を与える可能性がある．これらを**直接作用**とよぶ．一方，低 LET は電子や光子に対応している．これらの粒子は DNA を直接損傷を与えることはないが，生体を作っている水からラジカル *OH を生成させ，

$$H_2O \to {}^*H + {}^*OH$$

そのラジカルが DNA を損傷させるのである．そこで，これらを**間接作用**とよぶ．

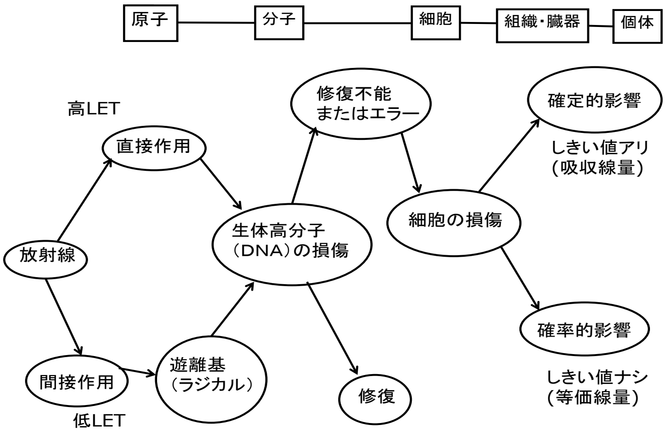

図 4.1: 放射線影響の分類

生物は原子・分子レベルで損傷を受けても，自己修復機能によって元通りに直すことができる．しかし，細胞レベルで修復が出来なければ，それが個体の影響として現れる．このとき，一定量を被曝すると必ず影響が出る線量を**しきい値**という．しきい値のある影響を**確定的影響**という．図 4.2 に見るように，しきい値を超える被曝をすれば，ほぼ 100%の人に影響が現れる．

これに対し，しきい値のはっきりしない影響を**確率的影響**という．図 4.3 に見るように，100 mSv を超える被曝をすれば影響が出るが，それ以下では影響の出現がはっきりしない．これを直線で結ぶのを LNT **仮説** (Linear Non-Threshold) とよぶ．この直線より下になる，つまり少量の放射線は健康に良いという考えもある．放射線ホルミシスという．

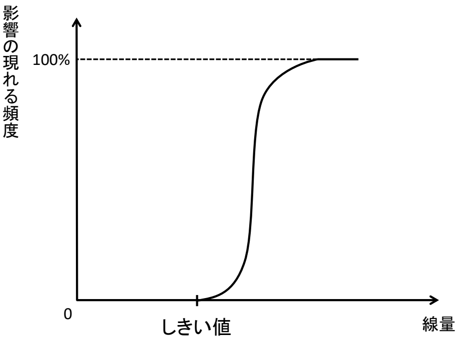

図 4.2: 確定的影響

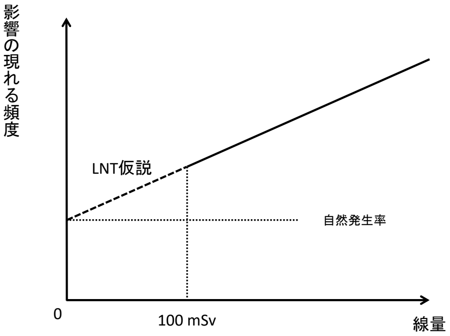

図 4.3: 確率的影響

個体に現れる影響を表 4.1 にまとめよう．この表は，まるごと覚えよう．

表 4.1: 放射線の影響

<table>
<tr><td rowspan="3">身体的影響</td><td>早期影響
(数週間以内)</td><td>脱毛，嘔吐，精子減少
白血球減少，不妊</td><td rowspan="2">確定的影響
≪ しきい値アリ ≫
≪ しきい値アリ ≫</td><td rowspan="2">吸収線量
[Gy]
[Gy]</td></tr>
<tr><td rowspan="2">晩発影響</td><td>再生不良性貧血，白内障，
寿命短縮 ，染色体異常，
胎児の影響，</td></tr>
<tr><td>癌，白血病</td><td rowspan="2">確率的影響
≪ しきい値ナシ ≫</td><td rowspan="2">等価線量
[Sv]</td></tr>
<tr><td>遺伝的影響</td><td></td><td></td></tr>
</table>

4.2 放射線に関する単位

放射線生物学で使われる単位を列挙しよう．放射線ででてくる国際単位は表 A.2 にまとめた．

吸収線量

物質の単位質量 (1 kg) あたりに吸収された放射線のエネルギーを**吸収線量** (absorbed dose) D という．単位は J/kg であるが，これに特別な名称グレイ (Gray [*1]記号 Gy) をあてる．

等価線量

上の吸収線量 D は，物質が吸収した放射線のエネルギーであり，物理的な量である．しかし，放射線には，γ 線以外にも，α 線や中性子などがある．そして，線種によって与えられる寄与が違う．したがって，γ 線以外の放射線を γ 線に換算するレートが決められている．それを**放射線加重係数** (radiation weighting factor)w_R という．

こうして線種による重み付けをされた値を**等価線量** (equivalent dose) H という．放射線加重係数は単位はないので，等価線量も吸収線量と同じ J/kg であるのだが，放射線防護に関する

[*1] Gray, Louis Harold イギリス 1905〜1965．評伝に [11] がある．

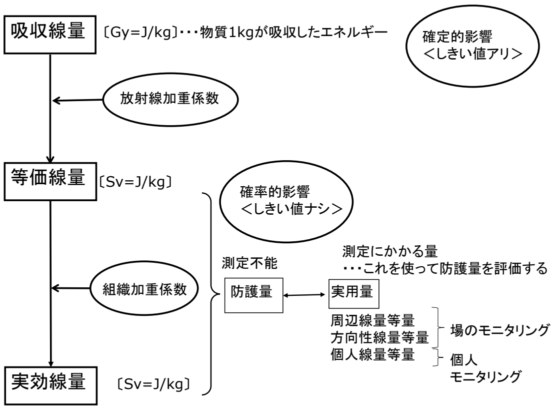

図 4.4: 放射線に関する単位

単位となるため，特別な名称シーベルト (Sievelt [*2]記号 Sv) をあてる．等価線量は，確定的影響を評価するのに用いられる．

$$H = w_R D \text{ [Sv]} \tag{4.1}$$

放射線加重係数 (ICRP2007 年勧告) を表 4.2 にまとめておこう．

表 4.2: 放射線加重係数 (ICRP2007 年勧告)

放射線の種類	エネルギー範囲	放射線加重係数 w_R
γ 線，β 線，μ 粒子		1
陽子，荷電 π 粒子		2
α 線，重荷電粒子		20
中性子線	〜 10 keV	2.5
	10 keV 〜 1000 MeV	2.5〜20
	1000 MeV 〜	2.5

実効線量

放射線による被曝（ひばく）を受けたとき，体の組織によって感受性の高低が存在する．この臓器による重みを**組織加重係数** w_T という．被曝に対する単位は，この重みをつけた**実効線量** (effective dose)E によって表わされる．単位は Sv(シーベルト) = J/kg である．実効線量は，確率的影響を評価するのに用いられる．

$$E = w_T H = w_T w_R D \text{ [Sv]} \tag{4.2}$$

組織加重係数 (ICRP2007 年勧告) を表 4.3 にまとめておこう．

[*2]Sievert, Rolf スウェーデン 1886〜1966．評伝に [13] がある．

表 4.3: 組織加重係数 (ICRP2007 年勧告)

組織・臓器	組織加重係数 w_T	Σw_T
骨髄，大腸，肺，胃，乳房，残りの組織	0.12	0.72
生殖腺	0.08	0.08
膀胱，食道，肝臓，甲状腺	0.04	0.16
骨表面，脳，唾液腺，皮膚	0.01	0.04
合計		1.00

4.3　原子・分子レベルの影響と修飾要因

§4.3.1　直接作用と間接作用

1. 直接作用：高 LET(陽子，中性子，α 線) 放射線が，直接，原子・分子を電離する．

2. 間接作用：低 LET(β 線，γ(X) 線) が，水分子を電離する．

$$H_2O \rightarrow H^* + OH^*$$

ここで OH^* をラジカルといい，このラジカルが生体高分子と反応して影響を与える．

§4.3.2　間接作用の修飾要因

1. 希釈効果：溶質の濃度を低くすると，放射線の影響が大きくなる．

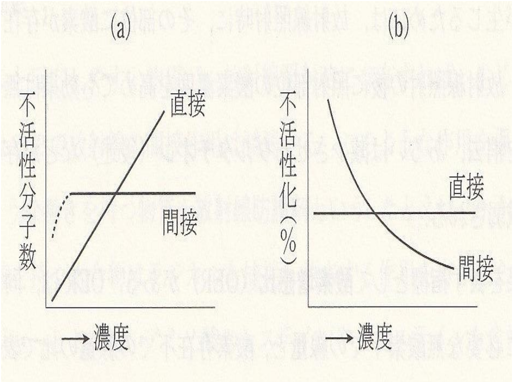

図 4.5: 希釈効果を示す濃度ー効果曲線 [2]

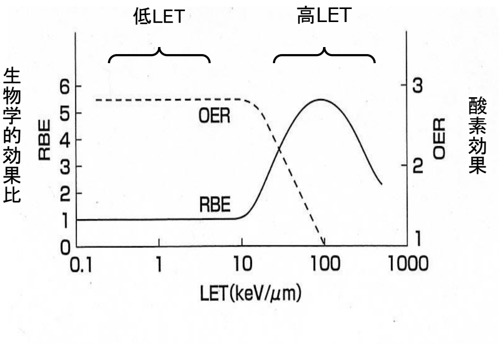

図 4.6: LET に対する RBE および OER の関係 [6]

2. 酸素効果：酸素存在下での放射線の影響は大きくなる．酸素分子が電子を取り込んでラジカルとなるから．酸素増感比 (OER：Oxygen Enhansment Ratio) によって表わす．

$$\mathrm{OER} = \frac{\text{無酸素下である効果を引き起こすのに必要な線量}}{\text{酸素下で同じ効果を引き起こすのに必要な線量}} \tag{4.3}$$

3. 生物学的効果比：放射線の線質の違い，すなわち LET の違いによる影響の違いを表す指標．RBE(Relative Biological Effectiveness) という．基準放射線は X(γ) 線であり，RBE=1 となる．

$$\mathrm{RBE} = \frac{\text{ある生物効果を引き起こすのに必要な基準放射線の吸収線量}}{\text{同じ効果を引き起こすのに必要な試験放射線の吸収線量}} \tag{4.4}$$

4. 保護効果：ラジカルと反応しやすい物質を混ぜると間接作用の働きをおさえることができる．この物質を放射線防護剤 (ラジカルスカベンジャー) という．

5. 温度効果 : 温度が低いときのほうが，ラジカルの運動が不活発になり，放射線の影響が減少する．

4.4 細胞レベルの影響

§4.4.1 細胞死

細胞がある程度の放射線照射を受けると細胞死が起こる．細胞死は，その形態と細胞周期の観点から分類される．

1. 細胞死の形態から

(a) ネクローシス…病理的で受動的な死

(b) アポトーシス…生理的で能動的な死

2. 細胞周期の観点から

(a) 分裂死（増殖死）…活発に細胞分裂している細胞が，放射線照射を受けたのちに数回の分裂を経て死に至る．巨細胞が形成されたり，細胞同士で融合が起きたりする．

(b) 間期死…もう細胞分裂しない細胞に現れ，間期にある細胞が放射線照射を受けたのち，分裂することなく死に至る．

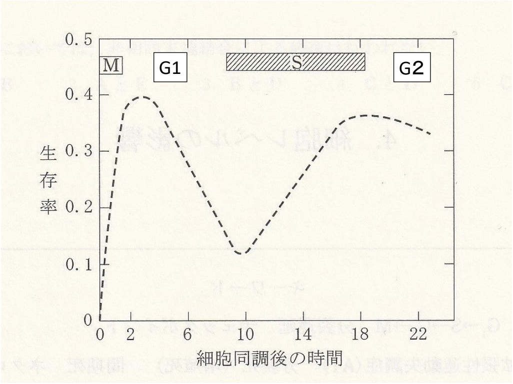

図 4.7: 細胞周期による放射線感受性の変化 [2]

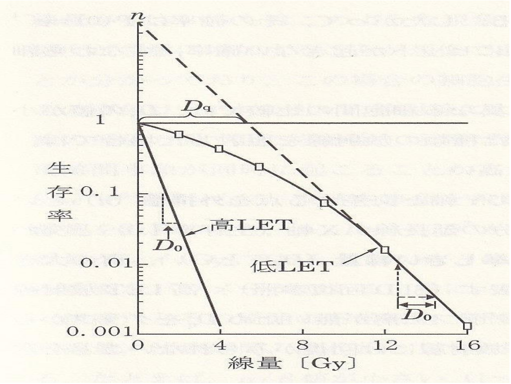

図 4.8: 細胞の生存率曲線 [2]

§4.4.2　標的説と生存率曲線

細胞内には，細胞としての機能を維持するための必要不可欠な構造体（標的／ターゲット）があって，このターゲットがヒットされると細胞死が起こると考える説を**標的説**という．

1. 1 標的 1 ヒットモデル：高 LET

   細胞内には標的は 1 つしかないとし，その標的にヒットを 1 つでも受けたら細胞死が起こる．

2. 多標的 1 ヒットモデル：低 LET

   細胞内には標的が多数あり，全てがヒットされなければ細胞死は起こらない．

§4.4.3　損傷からの回復

細胞が受けた損傷からの回復には，次の 2 つがある．

1. SLD 回復（sub-lethal damage：亜致死損傷）

   低 LET 放射線の分割照射を行い，1 回目の照射で細胞死に至らなかった細胞の損傷は，全て回復する．高 LET 放射線では，SLD 回復はほとんどない．

   線量率効果：同一線量が照射されるとき，高線量で短時間に照射するより，低線量で長時間にわたって照射した方が影響は小さい．

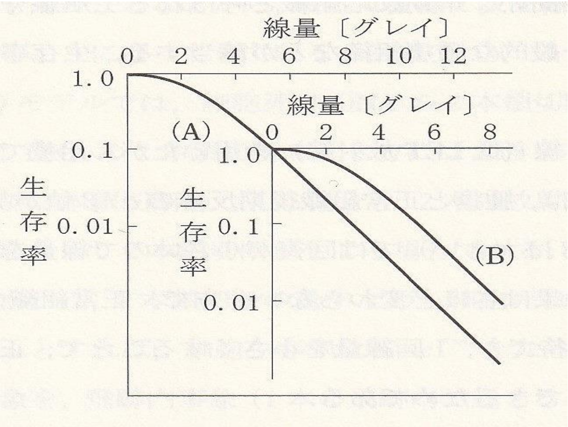

図 4.9: 2 分割照射による亜致死損傷からの回復 [2]

2. PLD 回復（potentially lethal damage：潜在的致死損傷）

   本来死に至る細胞が，照射後に置かれる状況によって回復する場合がある．高 LET では，PLD 回復はないか小さい．照射後 1 時間以内に回復するものと，2〜6 時間かけて回復するものがある．したがって，6 時間以上経過してから条件を変えても PLD 回復はない．

4.5 組織・臓器レベルの影響

§4.5.1 放射線感受性

放射線感受性は，

1. 細胞分裂の頻度が高い細胞

2. 将来行う細胞分裂の数が多い細胞

3. 形態・機能が未分化な細胞

ほど高いと考えられる．これを**ベルゴニー・トリボンドーの法則**という．成人の組織・臓器別の放射線感受性を表 4.4 にまとめておこう．**細胞再生系**は，常に盛んな細胞分裂を行い，細胞が新しく作られている組織や臓器である．**潜在的再生系**は，普段はあまり分裂をしないが，損傷などを受けると分裂を開始する組織や臓器である．**非再生系**は，一度出来上がった後は全く分裂しない組織や臓器である．

表 4.4: 放射線感受性

<table>
<tr><td rowspan="4">放射線感受性</td><td rowspan="4">高
⇕
低</td><td>細胞再生系</td><td>造血組織
生殖腺
消化管
体表，眼</td><td>リンパ組織，骨髄
精巣，卵巣
腸
皮膚，毛のう，水晶体</td></tr>
<tr><td>潜在的再生系</td><td>内臓
腺</td><td>肺，血管，結合組織
甲状腺</td></tr>
<tr><td rowspan="2">非再生系</td><td>支持</td><td>骨，血管，結合組織，
脂肪組織，筋肉</td></tr>
<tr><td>神経</td><td>神経</td></tr>
</table>

小児・胎児は活発な成長・発達をしており，将来行う細胞分裂の数も多いので，細胞再生系に限らず高感受性である．

以下ででてくる線量は，X 線や γ 線のように低 LET 放射線を照射した場合の吸収線量である．高 LET 放射線では，これらの値を RBE で割った値が対応する線量とする．

§4.5.2　造血組織および血液

血液の放射線影響のしきい値を下表にまとめておこう．

赤血球（1Gy 以上）		
白血球	リンパ球（0.25Gy）	
	顆粒球（0.5Gy）	好酸球
		好中球
		好塩基球
		単球
血小板（1Gy）		

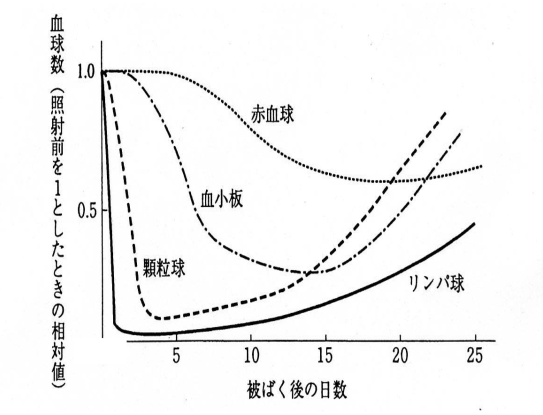

図 4.10: 数 Gy 被曝後の血球数の経時変化 [2]

リンパ球のしきい値は 0.25 Gy であり，被曝後すぐにアポトーシスを起こす．したがって，被曝するとすぐにリンパ球の減少が認められる．

§4.5.3　生殖腺

放射線の生殖腺に対するしきい値を表 4.5 にまとめておこう．生殖腺では，低線量では一時不妊が起こるが回復する．高線量となると永久不妊が起こる．

表 4.5: 生殖腺の放射線影響

	一時不妊	永久不妊
精巣	0.15 Gy	3.5〜6 Gy
卵巣	0.65〜1.5 Gy	2.5〜6 Gy

§4.5.4　小腸（1 cm）と皮膚（70 μm）

小腸の吸収上皮細胞を作るところをクリプトというが，10 Gy で細胞死が起こる．このクリプトが体表面から 1 cm 下にあると見積もられている．

皮膚の下 70 μm に皮下組織があり，ここを放射線からダメージを受けると皮膚が生産されなくなる．

線量〔Gy〕	放射線影響
3	脱毛
3〜6	紅斑，色素沈着
7〜8	水泡形成
10〜	潰瘍形成
20〜	難治性潰瘍（皮膚がんへの移行）
30〜	壊死

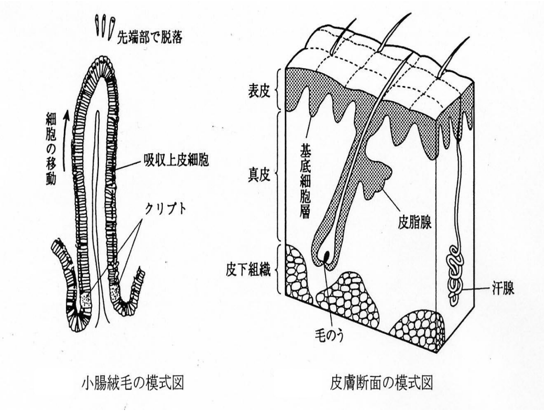

図 4.11: 小腸と皮膚の断面図 [2]

§4.5.5　水晶体（3 mm）

眼球表面より 3 mm 下に放射線が照射されると，白濁が起こる．

	1 回照射	慢性被曝
水晶体混濁	2 Gy	5 Gy
白内障	5 Gy	8 Gy

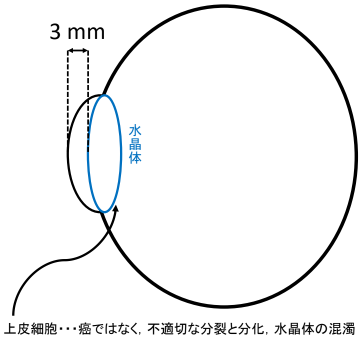

図 4.12: 目の模式図

4.6　個体（胎児を含む）レベルの影響

§4.6.1　線量と死亡率

被曝した個体の半数が一定期間に死亡する線量を**半数致死線量**といい，$LD_{50(60)}$ と表す．( ) 内は，被曝してからの観察期間（日数）である．被曝した個体すべてが死亡する線量を**全数致死線量**といい，$LD_{100(30)}$ と表す．表 4.6 にまとめておこう．

表 4.6: 放射線障害

吸収線量〔Gy〕	影響
1	嘔吐，放射線宿酔
1.5	死亡しきい値（骨髄死）
3〜5	被曝した半数が死亡 $LD_{50(60)}$
7〜10	被曝した全数が死亡 $LD_{100(30)}$

§4.6.2　急性放射線死

1. 骨髄死…白血球の減少による抵抗力の低下，血小板の減少による出血性傾向の増大が起こる．

2. 腸死…小腸クリプト細胞の吸収上皮細胞の細胞死による脱水症状が起こる．

表 4.7: 急性全身被曝による死亡に関する線量と生存期間

全身吸収線量〔Gy〕	影響	被曝から死亡するまでの期間
4	骨髄死 $LD_{50(60)}$	数週間
約 10	腸死	10 日
50〜100 以上	中枢神経死	1〜2 日

§4.6.3　胎児への影響

胎児は一個体とみなされるので，胎児への影響は遺伝的影響ではなく，身体的影響に分類される．表 4.8 にまとめておこう．

表 4.8: 胎児の放射線障害

胎生期の区分	期間	発生する影響	しきい線量〔Gy〕
着床前期	受精 8 日まで	胚死亡	0.1
器官形成期	受精 9 日〜8 週	奇形（小頭症）	0.15
胎児期	受精 8 週〜25 週	精神発達遅滞	0.2〜0.4
	受精 8 週〜40 週	発育遅延	0.5〜1.0

4.7 内部被曝

図 4.13 に見るように，体外に存在する放射性物質からの放射線から被曝することを**外部被曝**という．これらは遮蔽することにより防ぐことが可能である．このとき，α 線のように飛程の短い核種は遮蔽物がなくても，空気中で止まってしまうため，あまり重要ではない．

しかし，放射性物質が体内に入ると，その挙動により放射線の影響が外部被曝の場合と異なることになる．これを**内部被曝**とよぶ．内部被曝では放射性物質が臓器や組織に張り付いて放射線をだすため，飛程は短いが電離作用の強い α 線が重要となる．要点をまとめておこう．

外部被曝

- 体外にある線源から放射線を被曝する．
- 密封線源でも非密封線源でも起こる．
- α 線は飛程が短いので重要ではない．式 (2.52) 参照．

内部被曝

- 放射性物質が体内に取り込まれ，体内にある線源から放射線を被曝する．
- 非密封線源のみ起こる．
- α 線や β 線が重要である．表 2.6 参照．

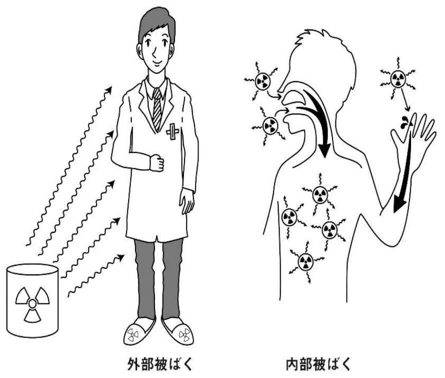

図 4.13: 外部被曝と内部被曝 [5]

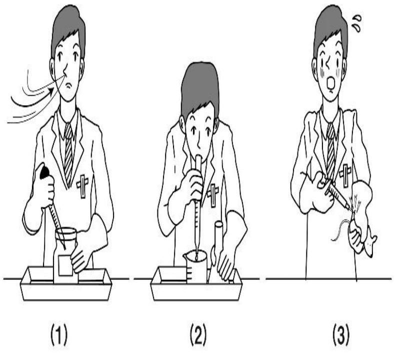

図 4.14: 体内摂取の経路 [5]

§4.7.1 放射性物質の体内への摂取経路

非密封線源を扱うときは，液体状の放射性物質が蒸発などにより気体状になったりするため，体内に取り込まれる危険性がある．図 4.14 に見るように，体内に取り込まれる経路として，以下のものが考えられる．

(1) 呼吸器を通しての吸入摂取

(2) 口，消化管を通しての経口摂取

(3) 皮からの吸収や傷口を通しての経皮摂取

§4.7.2　臓器親和性

体内に取り込まれた放射性物質は，その化学形によって集積する臓器が異なる．表 4.9 にまとめておこう．付録 D にも掲載してある．

表 4.9: 集積臓器，核種および障害

集積臓器	核種	発生する影響
骨	^{45}Ca，^{90}Sr，^{226}Ra，^{241}Am	白血病 (骨髄が照射されるため)
骨髄	^{55}Fe	白血病
甲状腺	^{125}I，^{131}I	甲状腺がん
肺	^{239}Pu，^{222}Rn	肺がん
肝臓，脾臓	^{60}Co	
全身	^{3}H，^{137}Cs	突然変異，白血病，不妊

§4.7.3　放射性物質の体内動態

体内に取り込まれた放射性物質は，種々の臓器・組織に分布し，その後排泄される．排泄は，尿・大便・呼気・汗など様々である．これらを生物学的減少といい，減少が指数関数的と仮定し，体内量が 2 分の 1 になるまでの時間を**生物学的半減期** T_b という．

放射性物質の体内量の減少は，

1. 放射性壊変による物理的減衰…物理学的半減期 T_p
2. 排泄機構による生物学的減少…生物学的半減期 T_b

の 2 つに支配されている．この両者による体内量の減少を表すものを**有効半減期** T_{eff} という．

$$\frac{1}{T_{\mathrm{eff}}} = \frac{1}{T_p} + \frac{1}{T_b} \tag{4.5}$$

§4.7.4　体内除染材

体内に放射性物質を取り込んだ場合，すみやかに除染材を投与する．表 4.11 に見るように，摂取した放射性核種により除染材を選ぶことになる．

表 4.10: 主な核種の体内動態 [10]

核種	臓器・組織	物理的半減期	生物学的半減期	実効半減期
^{3}H	全身	12.33 y	12 d	12 d
^{22}Na	全身	2.609 y	11 d	11 d
^{32}P	骨	14.26 d	1155 d	14.1 d
^{35}S	精巣	87.51 d	90 d	44.4 d
^{60}Co	全身	5.271 y	9.5 d	9.5 d
^{65}Zn	全身	244.3 d	933 d	194 d
^{89}Sr	骨	50.53 d	1.8×10^4 d	50.4 d
^{90}Sr	骨	28.74 y	1.8×10^4 d	18.2 y
^{131}I	甲状腺	8.021 d	138 d	7.6 d
^{137}Cs	全身	30.04 y	70 d	70 d
^{140}Ba	骨	12.75 d	65 d	10.7 d
^{226}Ra	骨	1600 y	1.64×10^4 d	43.7 y
^{238}U	腎臓	4.468×10^9 y	15 d	15 d
^{239}Pu	骨	24110 y	7.3×10^4 d	198 y

表 4.11: 体内除染材

核種	薬剤
Cs	プルシアンブルー
U や Pu などの超ウラン元素	Ca-DTPA，Zn-DTPA
I	ヨウ化カリウム
Ra	アルギン酸ナトリウム
Pb, Hg, Po, Au などの重金属	ジメルカプロール
Co, Cu, Au, Pb などの重金属	ペニシラミン
Fe	メシル酸デフェロキサミン

第5章　法令・放射線管理

5.1　日常生活と放射線

レントゲンによる X 線 (1895 年) の発見，その翌年のベクレルによるウランからの放射線の発見以来，放射線の利用が様々に行われてきた．放射線が人類に与えた恩恵は，医学やエネルギーの面で計り知れないものがあるが，同時に放射線による被曝が恐ろしい障害を引き起こすこともわかってきた．放射線の被曝による障害は良くないが，上手に管理すれば有用な道具であるので適正な管理が求められる．

放射線を利用することによる利益と放射線をあびることによる危険とは表裏一体であるので，メリットとデメリットの比較によって利用をきめるべきだというのが現在の放射線に対する考え方である．例えば，病気の早期発見というようなきわめて大きな利益のためにはある程度の被曝は許されるという考えに立っている．

§5.1.1　自然放射線

放射線が人類に意識されるようになる前から，放射線は人類とともにあった．鉱物や建物から放射される放射線や，地球に降り注ぐ宇宙線もある．高所では宇宙線の量は多くなり，富士山頂では地上のほぼ 2 倍ある．そういう放射線を**自然放射線**という．地球上の生命は，自然放射線の降り注ぐ環境で生息してきたわけであり，自然放射線が細胞の突然変異を起こさせ進化に寄与してきたともいえる．

人間が地球で暮らすときに浴びる年間被曝量を表 5.1 にまとめよう．

表 5.1: 自然放射線からの被曝 [mSv]

線源		外部被曝	内部被曝	合計
宇宙線電離成分		0.30	–	0.30
中性子成分		0.055	–	0.005
宇宙線生成核種		–	0.015	0.015
原始放射性核種	^{40}K	0.15	0.18	0.33
	^{87}Rb	–	0.006	0.006
	^{238}U	0.1	1.24	1.34
	^{232}Th	0.16	0.18	0.34
合計		0.8	1.6	2.4

ここで，^{238}U の寄与は，ウラン系列の中の ^{222}Rn からの被曝であり，年間被曝量の約半分を占めることになる．図 2.7，図 2.8 参照．

§5.1.2　人工放射線

世の中には，人間が作り出した放射線もある．これを**人工放射線**という．人工放射線には，医療・検査用 X 線，放射性物質を使った医薬品や核実験によるフォールアウト（放射性降下物）から浴びるものなどがある．特徴的な放射線による被曝量を表 5.2 にまとめよう．

表 5.2: さまざまな線量

線量〔mSv〕		事例
10^5	18000	JCO 事故死亡者 (1999 年 9 月 30 日)
10^4		
	6000	第五福竜丸 (1954 年 3 月)
	4000	被曝した人の半数が一月以内に死亡
10^3	2000	吐気，嘔吐，脱毛
10^2	120	チェルノブイリ原発から半径 30 km 圏内の年間被曝量
10^1		
	2.4	1 年間あたりの自然放射線
10^0	1	一般公衆の線量限度
	0.6	胃の X 線集団検診
10^{-1}	0.19	ヨーロッパへの飛行機往復
10^{-2}	0.05	胸の X 線集団検診

5.2　防護の目的と体系，法の目的

ICRP では，表 5.3 のように被曝の状況を 3 つに分類している．

§5.2.1　防護体系

1990 年勧告では，被曝に伴う人間活動を，行為と介入に分類している．

行為: 被曝を増加させる人間の活動

介入: 被曝を減少させる人間の活動

表 5.3: 被曝状況

計画被曝状況	現存被曝状況	緊急時被曝状況
計画的に線源を導入または操業することによる被曝状況	自然放射線による被曝や過去の行為の結果として存在する被曝状況	不測の事態または悪意の行為から生じる予期せぬ被曝状況
線量限度	参考レベル	参考レベル
（一般公衆）1 mSv/年（職業人）100 mSv/5 年かつ 50 mSv/年	1〜20 mSv/年のうち低線量域，長期目標は 1 mSv/年	20〜100 mSv/年

§5.2.2 防護の目的

ICRP(国際放射線防護委員会) の勧告

- 確定的影響…被曝線量を閾値より低くおさえて発生を完全に防止する．
- 確率的影響…その発生を容認できるレベルまで制限する．

そのために…

- 行為の正当化

  放射線の利用が他の手段では望めない利益が得られ，その利益が放射線の被曝による損害を上まわると考えられるときに使用が認められる．

- 防護の最適化

  すべての被曝は経済的及び社会的に合理的に達成できる限り低くおさえる．(ALARA=as low as reasonably achievable)

- 個人の線量限度

  いかなる場合にも線量の限度を超えてはいけない．

以上の目的を達成するために，以下の図 5.1 に掲げる管理をする必要がある．以下の節では，個々に見ていこう．

5.3 法律の成立と ICRP

1895 年の Röntogen による X 線の発見直後から，放射線はさまざまな用途に利用されてきた。一方で，Röntogen 自身の助手が被曝（ひばく）による火傷を負うという影響があった．さらに，第二次世界大戦に前後して，核兵器開発が活発に行われるようになった．その副産物として，放射線による人体への影響が広く知られるようになった．一定の線量を超えて被曝するとすぐに障害がおこる（確定的影響）場合もあるが，被曝後数年を経てから障害がおこる（確率的影響）こともしだいに知られるようになった．

そこで 1950 年 7 月，国際放射線防護委員会 ICRP(International Commission on Radiological Protection) が誕生した．そこでは,『許容線量』という概念がだされ，そこまでなら被曝してよいと

いう考え方だったという．1977 年勧告では,『線量限度』という概念に変更され，すべての被曝を合理的に達成できる限り低くする．この値は，決して超えることのない被曝線量の天井値とした．

ICRP の勧告に基づき，日本国内の法律を決めている．この法律を RI 規制法という．

5.4　原子力基本法

日本の放射線関係の法律の根幹は**原子力基本法**であり，1955(昭和 30) 年 12 月 19 日制定された．その特徴は第 2 条でうたうように，民主・自主・公開の三原則である．

(目的)

第 1 条　この法律は，原子力の研究，開発及び利用を推進することによって，将来におけるエネルギー資源を確保し，学術の進歩と産業の振興とを図り，もって人類社会の福祉と国民生活の水準向上とに寄与することを目的とする．

(基本方針)

第 2 条　原子力の研究，開発及び利用は，平和の目的に限り，安全の確保を旨として，民主的な運営の下に，自主的にこれを行うものとし，その成果を公開し，進んで国際協力に資するものとする．

この原子力基本法のもとに,『核燃料物質，核原料物質，原子炉及び放射線の定義に関する政令（原子炉等規制法）』と『放射性同位元素等の規制に関する法律（RI 規制法）』という法律がある．前者は原子力発電所などに適用される法律である．後者が我々に関係する法律であり，次の第 20 条にその条文がある．

(放射線による障害の防止措置)

第 20 条　放射線による障害を防止し，公共の安全を確保するため，放射性物質及び放射線発生装置に係る製造，販売，使用，測定等に対する規制その他保安及び保険上の措置に関しては，別に法律で定める．

5.5　RI 規制法

原子力基本法第 20 条を受けて，1957(昭和 32) 年 6 月 10 日**放射線障害防止法**が制定された．2019 年には核セキュリティ勧告に適合させるために条文を見直し，**放射性同位元素等規制法**（略称として，**RI 規制法**）と名称変更された．基本的なことは法律で定められているが，法律を施行するために，施行令（政令）・施行規則・告示が定められていて，これらを総称して法令という．

(目的)

第 1 条　この法律は，原子力基本法の精神にのっとり，放射性同位元素の使用，販売，賃貸，廃棄その他の取扱い，放射線発生装置の使用及び放射性同位元素又は放射線発生装置から発生した放射

線によって汚染された物（以下「放射性汚染物」という。）の廃棄その他の取扱いを規制することにより，これらによる放射線障害を防止し，及び特定放射性同位元素を防護して，公共の安全を確保することを目的とする。

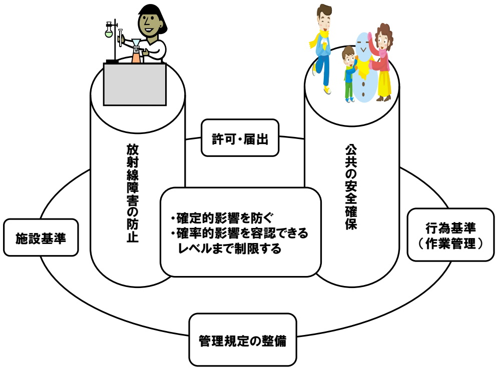

図 5.1: RI 規制法の目的

<table>
<tr><td rowspan="2">作業環境管理</td><td>場所の測定
表面汚染の測定
排気，排水</td><td>＜記録＞
場所の測定</td><td rowspan="4">5年保存</td></tr>
<tr><td>施設点検</td><td rowspan="3">＜記帳＞</td></tr>
<tr><td>線源管理</td><td>受入，使用
保管，廃棄
運搬</td></tr>
<tr><td rowspan="2">個人管理</td><td>教育訓練</td></tr>
<tr><td>個人の被曝線量
健康診断</td><td>＜記録＞
人の測定</td><td>永久保存</td></tr>
</table>

図 5.2: 管理技術

5.6　作業環境管理

非密封放射性同位元素を扱う施設では，管理区域を設けなければならない．管理区域の中には，作業室・汚染検査室・廃棄物保管室などを整備しなければならない．その上で，管理区域内外において放射線の量が法令で定められた量を超えないように作られなければならない．

放射線障害を防止するために，以下のような基準をもうけている．

（注）3 月=13 週，1 週=40 時間，1 年=50 週という換算を考えている．

§5.6.1　表面密度限度

表面密度限度とは，放射線施設内の人が常時立ち入る場所において，人が触れる物の表面の放射性同位元素の密度限度である．核種によって表のように定められている．

表 5.4: 表面密度限度

区分	密度〔$\mathrm{Bq/cm^2}$〕
α 線を放出する放射性同位元素	4
α 線を放出しない放射性同位元素	40

管理区域から持ち出す物に係る表面の放射性同位元素の密度は，表 5.4 の 10 分の 1 とするよう定められている．

§5.6.2　場所による線量限度

事業所境界の線量限度を 4 倍すると 1 mSv/年となり，一般公衆が 1 年間にあびる自然放射線の量と等しくなる．

表 5.5: 場所による線量限度

場所	線量限度
人が常時立入る場所 (使用施設)	1 mSv/週 = 20 μSv/h
管理区域境界	1.3 mSv/3 月
事業所境界	250 μSv/3 月=1mSv/年
病院・診療所の病室	1.3 mSv/3 月

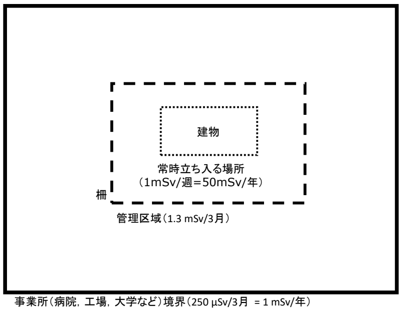

図 5.3: 告示第 10 条しゃへい物に係る線量限度

5.7　線源管理

さらに，実験をするにあたっては，放射線を使わないで実験作業をやってみる (Cold run)．作業内容が上の三原則にあてはっまているか考えてみる．その後に，放射性物質を使って本番の実験を行う (Hot run)．

5.8　個人管理

密封線源や RI が生成されない放射線発生装置を取り扱うときは，**体外照射** (external exposure) のみ考慮すればよい．しかし，非密封放射性同位元素を扱うときは，放射性同位元素が気化するなどして体内に入ってしまうことがある．体内に入った放射性同位元素は，体内で放射線を出し体の内側から臓器を照射する．これを**体内照射** (internal exposure) という．体内に RI が入り込む経路には次の３つがある．

1. 呼吸器を通しての摂取

2. 口・消化管を通しての摂取

3. 皮膚，とくに傷口を通しての摂取

§5.8.1　外部被曝を防ぐには

放射線による被曝を防止するためには，次の三原則がいわれている．

1. 放射線を適当な物質で**遮蔽**し，線量を下げる．

2. 放射能物質から**距離**を置いて操作する．線源が点状の場合，線量は距離の 2 乗に反比例する．

3. 放射能物質を扱う**時間**を短くする．

§5.8.2 人の線量限度

実効線量は確率的影響を評価し，等価線量は確定的影響を評価するための量である．

表 5.6: 線量限度

区分	実効線量限度	等価線量限度
下記以外のもの	100 mSv/5 年 50 mSv/年	眼の水晶体 50 mSv/年 皮膚 500 mSv/年
女子	5 mSv/3 月	
妊娠中の女子	本人の申し出等により使用者が 妊娠の事実を知ったときから出産まで の期間につき，内部被曝について 1 mSv	腹部表面について 左記と同じ期間につき 2 mSv
緊急作業時	100 mSv	眼の水晶体 300 mSv 皮膚 1Sv

前の表 5.5 で決められるように，人が常時立入る場所における線量限度は 1 mSv/年であり，その場所で 1 年間作業すると考えて表 5.6 の値 50 mSv/年となる．

付 録 A　単位

A.1　国際単位（SI 単位）

2019 年 5 月 20 日[*1]から始まった新 SI 単位系では，基本単位を定義するために，表 A.1 の物理量を定義値として採用することになった．どの物理量も，電磁気学や量子力学に基づいた測定から得られる数値であり，直感的にはわかりづらくなったが，人工物に頼らずに標準を決めることができるようになった．

表 A.1: 定義値

物理量	記号	数値		単位
Cs の超微細遷移周波数	$\Delta\nu_{\mathrm{Cs}}$	9.192 631 770	$\times 10^{9}$	Hz
真空中の光速	c	2.997 924 58	$\times 10^{8}$	m/s
プランク定数	h	6.626 070 15	$\times 10^{-34}$	J·s
電気素量	e	1.602 176 634	$\times 10^{-19}$	C
ボルツマン定数	k_B	1.380 649	$\times 10^{-23}$	J/K
アボガドロ定数	N_A	6.022 140 76	$\times 10^{23}$	mol^{-1}
視感効果度	K_{cd}	6.83	$\times 10^{2}$	lm/W

本書で取り上げられる国際単位は下表のとおりである．

表 A.2: 放射線で使われる SI 単位

名称		SI 記号	
エネルギー		J	
放射能	ベクレル（Becquerel）	Bq	s^{-1}
吸収線量	グレイ（Gray）	Gy	J/kg
実効線量	シーベルト（Sievert）	Sv	J/kg
照射線量		C/kg	

また，質量の単位として，統一原子質量単位（§2.2.1）が使われる．エネルギーの単位としては J（ジュール）よりも，電子ボルト eV（付録 A.3）がもっぱら使われる．

[*1] 1875（明治 8）年 5 月 20 日，17 か国でメートル条約が締結され，国際度量衡局が設立された．日本の加盟は 1885（明治 18）年である．

A.2 10の整数乗倍を表すSI接頭語

とても大きい数や小さい数を表すのに，数字のゼロをたくさん書くのは，とてもわかり難い．そこで以下のような**接頭語**というものを決めてゼロをできるだけ少なく書くようにする．

表 A.3: SI 接頭語

名称	記号	大きさ	名称	記号	大きさ
クエタ (quetta)	Q	10^{30}	デシ (deci)	d	10^{-1}
ロナ (ronna)	R	10^{27}	センチ (centi)	c	10^{-2}
ヨタ (yotta)	Y	10^{24}	ミリ (milli)	m	10^{-3}
ゼタ (zetta)	Z	10^{21}	マイクロ (micro)	µ	10^{-6}
エクサ (exa)	E	10^{18}	ナノ (nano)	n	10^{-9}
ペタ (peta)	P	10^{15}	ピコ (pico)	p	10^{-12}
テラ (tera)	T	10^{12}	フェムト (femto)	f	10^{-15}
ギガ (giga)	G	10^{9}	アト (atto)	a	10^{-18}
メガ (mega)	M	10^{6}	ゼプト (zepto)	z	10^{-21}
キロ (kilo)	k	10^{3}	ヨクト (yocto)	y	10^{-24}
ヘクト (hecto)	h	10^{2}	ロント (ronto)	r	10^{-27}
デカ (deca)	da	10^{1}	クエクト (quecto)	q	10^{-30}

A.3 電子ボルト

国際単位でのエネルギーの単位はジュール [J] が用いられる．しかし，原子・原子核や放射線の世界では，エネルギーをジュールを単位で表すと非常に小さい数字となる．そこで次に述べる単位が使われる．すなわち，真空中で一個の電子が電位差 1 V で加速されたときに得られるエネルギーを**電子ボルト**（electron Volt）といい，記号で [eV] と表す．電子の電荷は $e = 1.60 \times 10^{-19}$ C と与えられているので，

$$1 \text{ eV} = e[\text{C}] \times 1 \text{ V} = 1.60 \times 10^{-19} \text{ J} \tag{A.1}$$

と与えられている．

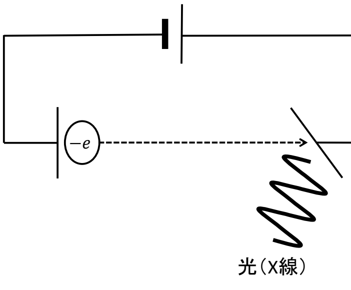

図 A.1: Röntgen の発見（1895 年）

エネルギー値が大きかったり小さかったりするときは，表 A.3 の SI 接頭語をつけて表すことにする．例えば，

$$1\ \mathrm{keV} = 10^3\ \mathrm{eV}$$
$$1\ \mathrm{MeV} = 10^6\ \mathrm{eV}$$
$$1\ \mathrm{GeV} = 10^9\ \mathrm{eV}$$

といった具合である．それぞれ，ケヴ，メヴ，ジェヴと読んだりする．

A.4　基礎定数

本書の中で必要となる物理定数として表 A.1 のほかに次のようなものがある．

表 A.4: 物理定数表

物理量	記号	数値		単位
電子質量	m_e	9.11	$\times 10^{-31}$	kg
電気定数	ε_0	8.854	$\times 10^{-12}$	F/m
	$k_0 = 1/4\pi\varepsilon_0$	8.988	$\times 10^{9}$	m/F

この k_0 に電気素量の二乗をかけたものもしばしば現れる．

$$\beta = k_0 e^2 = \frac{e^2}{4\pi\varepsilon_0} = 2.30 \times 10^{-28}\ \mathrm{J \cdot m} = 1.44\ \mathrm{eV \cdot nm} \tag{A.2}$$

プランク定数を 2π で割った値もしばしば使われる．

$$\hbar = \frac{h}{2\pi} = 1.05 \times 10^{-34}\ \mathrm{J \cdot s} \tag{A.3}$$

また，プランク定数に光速の掛け算もよく出てくる．

$$hc = 19.89 \times 10^{-26}\ \mathrm{J \cdot m} \sim 1240\ \mathrm{eV \cdot nm} \tag{A.4}$$
$$\hbar c = 3.167 \times 10^{-26}\ \mathrm{J \cdot m} \tag{A.5}$$

これらの量から微細構造定数 α が作られる．

$$\alpha = \frac{\beta}{\hbar c} \sim \frac{1}{137} \tag{A.6}$$

A.5　原子単位

電子質量 m_e，プランク定数 $\hbar$，電気素量 e または $\beta = k_0 e^2$ から作られる単位を**原子単位**という．この４つの量から MLT の規準値を作る．

質量

$$m_e = 9.11 \times 10^{-31}\ \mathrm{kg} \tag{A.7}$$

長さ

$$a_B = \frac{\hbar^2}{m_e \beta} = 5.26 \times 10^{-11}\ \mathrm{m} : \text{ボーア半径} \tag{A.8}$$

時間

$$\frac{\hbar^3}{m_e \beta^2} = 2.40 \times 10^{-17}\ \mathrm{s} \tag{A.9}$$

さらに，その他の物理量の規準値を作る．

速さ

$$v_0 = \frac{\beta}{\hbar} = 2.19 \times 10^6\ \mathrm{m/s} \tag{A.10}$$

微細構造定数

$$\alpha = \frac{\beta}{\hbar c} = \frac{v_0}{c} \sim \frac{1}{137} \tag{A.11}$$

エネルギー

$$\frac{m_e \beta}{\hbar^2} = 27.3\ \mathrm{eV} = 2 \times 13.6\ \mathrm{eV} \tag{A.12}$$

付 録B　古典物理学

原子や原子核のようなミクロな世界を扱う分野を**量子物理学**という．それ以前の物理学は総称して**古典物理学**とよばれる．その中には，力学・熱学・光学・電磁気学・相対論などがある．それらの中で本書に必要となる事項をまとめた．

B.1　力学

§B.1.1　力

万有引力

質量 M と m の物体が距離 r 隔てられているとき，お互いに万有引力 F を及ぼしあう．

$$F = G\frac{Mm}{r^2} \tag{B.1}$$

ここで，$G = 6.67428(67) \times 10^{-11}\ \mathrm{N \cdot m^2 \cdot kg^{-2}}$ は万有引力定数である．

クーロン力

電荷 Q と q の物体が距離 r 隔てられているとき，万有引力に似た形をしたクーロン力 F をお互いに及ぼしあう．

$$F = k_0\frac{Qq}{r^2} = \frac{1}{4\pi\varepsilon_0}\frac{Qq}{r^2} \tag{B.2}$$

ここで，k_0 は表 A.4 で与えた．

§B.1.2　Newton の運動方程式

速さ v を時間 t で微分したものを加速度 $\frac{dv}{dt}$ という．この加速度に質量 m をかけたものが，物体に加わる力 F に等しいというのが，運動方程式の主張するところである．

$$m\frac{dv}{dt} = F \tag{B.3}$$

ここで力 F が決定されると，加速度 $\frac{dv}{dt} = \frac{F}{m}$ が決定され，これを積分することによって速さ v，さらにもう一度積分することによって位置 x が求まる．

特別な場合として，半径 r の円周上を速さ v で運動している質量 m の物体を考えよう．このとき，物体に働く力 F は常に円の中心を向いている力で**向心力**とよばれる．このとき運動方程式は

$$m\frac{v^2}{r} = F \tag{B.4}$$

と書くことができる．

§B.1.3　エネルギー

運動方程式 (B.3) の両辺に速さ $v = \frac{dx}{dt}$ をかけ，両辺時間 t で積分することを**エネルギー積分**という．

$$mv\frac{dv}{dt} = F\frac{dx}{dt}$$

より両辺を置換積分することとなり

$$\frac{m}{2}(v_2)^2 - \frac{m}{2}(v_1)^2 = \int_{x_1}^{x_2} F dx \tag{B.5}$$

が得られる．右辺の量は**仕事**とよばれる．ここで，時刻 t_1 のときの位置 x_1，速さ v_1 であり，時刻 t_2 のときの位置 x_2，速さ v_2 である．

運動エネルギー

上の式の左辺の物理量を運動エネルギー K とよぶ．

$$K = \frac{m}{2}v^2 \tag{B.6}$$

質量 m の物体が速さ v で運動するとき，この物体は**運動エネルギー**をもっている．

位置エネルギー

ポテンシャル・エネルギーともよばれる．

質量 M の物体のまわりに質量 m の物体を持ってくると，式 (B.1) の万有引力が働く．すなわち，質量 M の物体の周りには他に力を及ぼす場（力場）が存在すると考え，それを**位置エネルギー** U という．位置エネルギーは，ある基準点から力に抗して物体を運ぶための仕事として定義される．

したがって，式 (B.5) から位置エネルギーは

$$U = -\int F dx \tag{B.7}$$

と書くことができる．

- 万有引力の式 (B.1) の場合は，

$$U = -G\frac{Mm}{r} \tag{B.8}$$

  となる．

- クーロン力の場合は

$$U = -k_0\frac{Qq}{r} = -\frac{1}{4\pi\varepsilon_0}\frac{Qq}{r} \tag{B.9}$$

  となる．単位電荷 (+1 C) あたりの位置エネルギーを考えるのが便利なこともある．そこで，電荷 Q の粒子のまわりの力場を考えて，

$$V = \frac{U}{q} \tag{B.10}$$

  を**ポテンシャル**または**電位**という．電位は位置の関数として与えられているが，その差を考えて**電位差**という．したがって，電荷 q の粒子が，電位差 V の場を移動したとき粒子が得るエネルギーは

$$E = qV \tag{B.11}$$

  と書くことができる．

力学的エネルギー

位置エネルギーの積分の式 (B.7) が積分可能であれば，その式は

$$\frac{d}{dt}\left[K+U\right]=0$$

と書くことができる．時間微分したものがゼロとなるので，左辺の括弧内の運動エネルギー K と位置エネルギー U を足したものは時間的に定数となる．そこで，$E=K+U$ という物理量を**力学的エネルギー**とよぶ．万有引力のときは

$$E=\frac{m}{2}v^2-G\frac{Mm}{r} \tag{B.12}$$

となる．同様にクーロン力のときは

$$E=\frac{m}{2}v^2-k_0\frac{Qq}{r} \tag{B.13}$$

となる．

B.2　光波

光は波動と考えられ，振動数 ν と波長 λ で特徴づけられている．これらの積は波動の速度

$$c = \nu\lambda = 2.997\ 924\ 58 \times 10^8\ \mathrm{m/s}\ (\text{定義値}^{*1}) \tag{B.14}$$

である．この式からわかるように，振動数と波長は，反比例の関係となっている．

§B.2.1　可視光の振動数と波長

我々の目に映る色は，光の波長の違いなのである．赤や紫の外側は，人間の目には見えないが，光としては連続的に存在しているのである．それを次ページの表のようにまとめよう．

振動数 [Hz]		波長 [nm]	エネルギー [eV]
	紫外線		
7.9×10^{14}	・・・・・・・・・・・・・・・	380	
	紫		3
7.0×10^{14}	・・・・・・・・・・・・・・・	430	
	青紫		
6.5×10^{14}	・・・・・・・・・・・・・・・	460	
	青		
6.1×10^{14}	・・・・・・・・・・・・・・・	490	
	緑		2.5
5.5×10^{14}	・・・・・・・・・・・・・・・	550	
	黄		
5.1×10^{14}	・・・・・・・・・・・・・・・	590	
	だいだい		
4.7×10^{14}	・・・・・・・・・・・・・・・	640	
	赤		2
3.9×10^{14}	・・・・・・・・・・・・・・・	770	
	赤外線		

*1 表 A.1 参照のこと．

§B.2.2　光の振動数と波長

振動数 [Hz]			波長 [m]	エネルギー
3×10^{23}			10^{-15}(1 fm)	
				1 GeV
3×10^{22}	γ 線	医療	10^{-14}	
3×10^{21}			10^{-13}	
3×10^{20}	……………	……コンプトン波長 (2.4 pm)……	10^{-12}(1 pm)	
				1 MeV
3×10^{19}			10^{-11}	
	X 線	医療検査		
3×10^{18}		結晶構造決定	10^{-10} (1 Å)	
3×10^{17}	……………	…………………………………………	10^{-9} (1 nm)	
				1 keV
3×10^{16}	紫外線	殺菌	10^{-8}	
3×10^{15}	……………	…………………………………………	10^{-7}	
	可視光			
3×10^{14}	……………	…………………………………………	10^{-6} (1 μm)	
	赤外線			1 eV
3×10^{13}	……………	…………………………………………	10^{-5}	
	遠赤外線			
3×10^{12}	……………	…………………………………………	10^{-4}	
	サブミリ波			
3×10^{11}	……………	…………………………………………	10^{-3} (1 mm)	
	EHF ミリ波	レーダー		
3×10^{10}	……………	…………………………………………	10^{-2}	
	SHF センチ波	衛星放送		
3×10^{9}	……………	…………………………………………	10^{-1}	
	UHF 極超短波	テレビ放送，携帯電話，電子レンジ		
3×10^{8}	……………	…………………………………………	10^{0} (1 m)	
	VHF 超短波	FM 放送，テレビ放送		
3×10^{7}	……………	…………………………………………	10^{1}	
	HF 短波	国際向ラジオ放送		
3×10^{6}	……………	…………………………………………	10^{2}	
	MF 中波	AM 放送		
3×10^{5}	……………	…………………………………………	10^{3} (1 km)	
	LF 長波	航空用無線		
3×10^{4}	……………	…………………………………………	10^{4}	
	VLF 超長波	船舶用無線，胎児の映像		
3×10^{3}	……………	…………………………………………	10^{5}	

付 録C　周期表

C.1　水素原子類のエネルギー準位

第 1.3 節では水素原子類の電子配置を議論した．模式的に図 1.5 で表したが，実際のエネルギー準位は図 C.1 のようになっている．この各マスに下から順にアップとダウンの電子が詰まっていく．これら電子の配置を表したのが，付録 C.3 の表である．

	s($l=0$)	p($l=1$)	d($l=2$)	f($l=3$)	
第 7 周期	7s□	7p□□□	6d□□□□□	5f□□□□□□□	$_{118}$Og
第 6 周期	6s□	6p□□□	5d□□□□□	4f□□□□□□□	$_{86}$Rn
第 5 周期	5s□	5p□□□	4d□□□□□		$_{54}$Xe
第 4 周期	4s□	4p□□□	3d□□□□□		$_{36}$Kr
第 3 周期	3s□	3p□□□			$_{18}$Ar
第 2 周期	2s□	2p□□□			$_{10}$Ne
第 1 周期	1s□				$_{2}$He

図 C.1: 水素原子類の電子配置

C.2　周期表

上の図を見て，各マスにアップとダウンの電子を下から詰めていく．周期表の各周期の第 18 族になると閉殻をなす．このようにして周期表が説明することができる．

	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18
1	1 H																	2 He
2	3 Li	4 Be											5 B	6 C	7 N	8 O	9 F	10 Ne
3	11 Na	12 Mg											13 Al	14 Si	15 P	16 S	17 Cl	18 Ar
4	19 K	20 Ca	21 Sc	22 Ti	23 V	24 Cr	25 Mn	26 Fe	27 Co	28 Ni	29 Cu	30 Zn	31 Ga	32 Ge	33 As	34 Se	35 Br	36 Kr
5	37 Rb	38 Sr	39 Y	40 Zr	41 Nb	42 Mo	43 Tc *1	44 Ru	45 Rh	46 Pd	47 Ag	48 Cd	49 In	50 Sn	51 Sb	52 Te	53 I	54 Xe
6	55 Cs	56 Ba	57-71 ラン	72 Hf	73 Ta	74 W	75 Re	76 Os	77 Ir	78 Pt	79 Au	80 Hg	81 Tl	82 Pb	83 Bi *2	84 Po	85 At	86 Rn
7	87 Fr	88 Ra	89-103 アク	104 Rf	105 Db	106 Sg	107 Bh	108 Hs	109 Mt	110 Ds	111 Rg	112 Cn	113 Nh	114 Fl	115 Mc	116 Lv	117 Ts	118 Og
イオン価数	+1	+2	複雑									+2	+3	−	−3	−2	−1	−
	典型元素 s ブロック		遷移元素 d ブロック									典型元素 p ブロック						

ランタノイド	57 La	58 Ce	59 Pr	60 Nd	61 Pm *1	62 Sm	63 Eu	64 Gd	65 Tb	66 Dy	67 Ho	68 Er	69 Tm	70 Yb	71 Lu
アクチノイド	89 Ac	90 Th	91 Pa	92 U	93 Np *3	94 Pu	95 Am	96 Cm	97 Bk	98 Cf	99 Es	100 Fm	101 Md	102 No	103 Lr
	遷移元素 f ブロック														

***1** 安定同位体なし．

***2** 原子番号 83 以降の原子核には，安定同位体はない．

***3** 原子番号 93 以降の原子核はすべて人工的に作られ，超ウラン元素とよばれる．すなわち，原子番号 92 までは天然に存在する．

C.3 核外電子配置

		殻	K	L		M			N				イオン化
周期		元素	1s	2s	2p	3s	3p	3d	4s	4p	4d	4f	エネルギー [eV]
1	1s	$_{1}$H	1										13.5984
		$_{2}$He	2										24.5874
2	2s	$_{3}$Li	2	1									5.3917
		$_{4}$Be	2	2									9.3227
	2p	$_{5}$B	2	2	1								8.2980
		$_{6}$C	2	2	2								11.2603
		$_{7}$N	2	2	3								14.5341
		$_{8}$O	2	2	4								13.6181
		$_{9}$F	2	2	5								17.4228
		$_{10}$Ne	2	2	6								21.5645
3	3s	$_{11}$Na	2	2	6	1							5.1391
		$_{12}$Mg	2	2	6	2							7.6462
	3p	$_{13}$Al	2	2	6	2	1						5.9858
		$_{14}$Si	2	2	6	2	2						8.1517
		$_{15}$P	2	2	6	2	3						10.4867
		$_{16}$S	2	2	6	2	4						10.3600
		$_{17}$Cl	2	2	6	2	5						12.9676
		$_{18}$Ar	2	2	6	2	6						15.7596
4	4s	$_{19}$K	2	2	6	2	6		1				4.3407
		$_{20}$Ca	2	2	6	2	6		2				6.1132
	3d	$_{21}$Sc	2	2	6	2	6	1	2				6.5615
		$_{22}$Ti	2	2	6	2	6	2	2				6.8281
		$_{23}$V	2	2	6	2	6	3	2				6.7462
		$_{24}$Cr	2	2	6	2	6	5	1				6.7665
		$_{25}$Mn	2	2	6	2	6	5	2				7.4340
		$_{26}$Fe	2	2	6	2	6	6	2				7.9024
		$_{27}$Co	2	2	6	2	6	7	2				7.8810
		$_{28}$Ni	2	2	6	2	6	8	2				7.6398
		$_{29}$Cu	2	2	6	2	6	10	1				7.7264
	4p	$_{30}$Zn	2	2	6	2	6	10	2				9.3942
		$_{31}$Ga	2	2	6	2	6	10	2	1			5.9993
		$_{32}$Ge	2	2	6	2	6	10	2	2			7.8994
		$_{33}$As	2	2	6	2	6	10	2	3			9.7886
		$_{34}$Se	2	2	6	2	6	10	2	4			9.7524
		$_{35}$Br	2	2	6	2	6	10	2	5			11.8138
		$_{36}$Kr	2	2	6	2	6	10	2	6			13.9996

周期		殻	N				O				P			イオン化
		元素	4s	4p	4d	4f	5s	5p	5d	5f	6s	6p	6d	エネルギー [eV]
5	5s	$_{37}$Rb	2	6			1							4.1771
		$_{38}$Sr	2	6			2							5.6949
	4d	$_{39}$Y	2	6	1		2							6.2173
		$_{40}$Zr	2	6	2		2							6.6339
		$_{41}$Nb	2	6	4		1							6.7589
		$_{42}$Mo	2	6	5		1							7.0924
		$_{43}$Tc	2	6	5		2							7.28
		$_{44}$Ru	2	6	7		1							7.3605
		$_{45}$Rh	2	6	8		1							7.4589
		$_{46}$Pd	2	6	10									8.3369
		$_{47}$Ag	2	6	10		1							7.5762
	5p	$_{48}$Cd	2	6	10		2							8.9938
		$_{49}$In	2	6	10		2	1						5.7864
		$_{50}$Sn	2	6	10		2	2						7.3439
		$_{51}$Sb	2	6	10		2	3						8.6084
		$_{52}$Te	2	6	10		2	4						9.0096
		$_{53}$I	2	6	10		2	5						10.4513
		$_{54}$Xe	2	6	10		2	6						12.1298
6	6s	$_{55}$Cs	2	6	10		2	6			1			3.8939
		$_{56}$Ba	2	6	10		2	6			2			5.2117
	4f	$_{57}$La	2	6	10		2	6	1		2			5.5769
		$_{58}$Ce	2	6	10	1	2	6	1	2				5.5387
		$_{59}$Pr	2	6	10	3	2	6		2				5.473
		$_{60}$Nd	2	6	10	4	2	6		2				5.5250
		$_{61}$Pm	2	6	10	5	2	6		2				5.582
		$_{62}$Sm	2	6	10	6	2	6		2				5.6437
		$_{63}$Eu	2	6	10	7	2	6		2				5.6704
		$_{64}$Gd	2	6	10	7	2	6	1	2				6.1498
		$_{65}$Tb	2	6	10	9	2	6		2				5.8638
		$_{66}$Dy	2	6	10	10	2	6		2				5.9389
		$_{67}$Ho	2	6	10	11	2	6		2				6.0215
		$_{68}$Er	2	6	10	12	2	6		2				6.1077
		$_{69}$Tm	2	6	10	13	2	6		2				6.1843
		$_{70}$Yb	2	6	10	14	2	6		2				6.2542
		$_{71}$Lu	2	6	10	14	2	6	1	2				5.4259

6	5d	$_{72}$Hf	2	6	2		2					6.8251
		$_{73}$Ta	2	6	3		2					7.5496
		$_{74}$W	2	6	4		2					7.8640
		$_{75}$Re	2	6	5		2					7.8335
		$_{76}$Os	2	6	6		2					8.4382
		$_{77}$Ir	2	6	7		2					8.9670
		$_{78}$Pt	2	6	9		1					8.9588
		$_{79}$Au	2	6	10		1					9.2255
	6p	$_{80}$Hg	2	6	10		2					10.4375
		$_{81}$Tl	2	6	10		2	1				6.1082
		$_{82}$Pb	2	6	10		2	2				7.4167
		$_{83}$Bi	2	6	10		2	3				7.2855
		$_{84}$Po	2	6	10		2	4				8.414
		$_{85}$At	2	6	10		2	5				–
		$_{86}$Rn	2	6	10		2	6				10.7485
		殻	O				P			Q		イオン化
周期		元素	5s	5p	5d	5f	6s	6p	6d	7s	7p	エネルギー [eV]
7	7s	$_{87}$Fr	2	6	10		2	6		1		4.0727
		$_{88}$Ra	2	6	10		2	6		2		5.2784
	5f	$_{89}$Ac	2	6	10		2	6	1	2		5.17
		$_{90}$Th	2	6	10		2	6	2	2		6.3067
		$_{91}$Pa	2	6	10	2	2	6	1	2		5.89
		$_{92}$U	2	6	10	3	2	6	1	2		6.1941
		$_{93}$Np	2	6	10	4	2	6	1	2		6.2657
		$_{94}$Pu	2	6	10	6	2	6		2		6.0260
		$_{95}$Am	2	6	10	7	2	6		2		5.9738
		$_{96}$Cm	2	6	10	7	2	6	1	2		5.9914
		$_{97}$Bk	2	6	10	9	2	6		2		6.1979
		$_{98}$Cf	2	6	10	10	2	6		2		6.2817
		$_{99}$Es	2	6	10	11	2	6		2		6.42
		$_{100}$Fm	2	6	10	12	2	6		2		6.50
		$_{101}$Md	2	6	10	13	2	6		2		6.58
		$_{102}$No	2	6	10	14	2	6		2		6.65
		$_{103}$Lr	2	6	10	14	2	6		2	1?	4.9?
	6d	$_{104}$Rf	2	6	10	14	2	6	2	2?		6.0?

付 録D　同位体

表中に出てくる記号は以下の通り．

1. 核種記号

単 単核種元素：安定同位体が 1 つしかなく天然にはそれ以外の安定同位体が存在しない元素．

天 天然放射性元素：天然に存在する放射性核種．

系 壊変系列：壊変系列の最初と最後の核種．

2. 半減期

半減期に数値がないものは，安定同位体である．

y; 年	d; 日	h; 時	m; 分	s; 秒

ちなみに，地球の年齢は 46 億年 $= 4.6 \times 10^9$ y

3. 集積臓器

PET	PET 製薬剤
標的 RI	ガン治療放射性薬

第 1 周期

原子番号	名前	核種記号	半減期	壊変形式	エネルギー MeV	集積臓器	存在度 %
0	Neutron	^{1}n	10.4 m	β^-			
1	Hydrogen	^{1}H	—				99.9885
	Deuterium	^{2}D	—				0.0115
	Tritium	^{3}T	12.32 y	β^-	0.0186	全身	
2	Helium	^{3}He	—				0.0002
		^{4}He	—				99.9998

第 2 周期

原子番号	名前	核種記号	半減期	壊変形式	エネルギー MeV	集積臓器	存在度 %
3	Lithium	^{6}Li	—				
		^{7}Li	—				
4	Beryllium	^{7}Be	53.29 d	EC			
		^{9}Be 単	—				100
		^{10}Be	1.51×10^{6} y	β^{-}			
5	Boron	^{10}B	—				
		^{11}B	—				
6	Carbon	^{11}C	20.39 m	β^{+}, EC		PET	
		^{12}C	—				98.93
		^{13}C	—				1.07
		^{14}C	5730 y	β^{-}	0.165	全身	1.2×10^{-8}
7	Nitrogen	^{13}N	9.965 m	β^{+}, EC		PET	
		^{14}N	—				
		^{15}N	—				
8	Oxygen	^{15}O	2.037 m	β^{+}, EC		PET	
		^{16}O	—				
		^{17}O	—				
		^{18}O	—				
9	Fluorine	^{18}F	109.8 m	β^{+}, EC	0.634	PET-FDG	
		^{19}F 単	—				100
10	Neon	^{20}Ne	—				
		^{21}Ne	—				
		^{22}Ne	—				

第 3 周期

原子番号	名前	核種記号	半減期	壊変形式	エネルギー MeV	集積臓器	存在度 %
11	Sodium	^{22}Na	2.609 y	β^+, EC			
		^{23}Na 単	—				100
		^{24}Na	14.96 h	β^-			
12	Magnesium	^{24}Mg	—				
		^{25}Mg	—				
		^{26}Mg	—				
		^{27}Mg	9.458 m	β^-			
		^{28}Mg	20.915 h	β^-			
13	Aluminium	^{26}Al	7.4×10^5 y	β^+, EC			
		^{27}Al 単	—				100
		^{28}Al	2.241 m	β^-			
14	Silicon	^{28}Si	—				92
		^{29}Si	—				5
		^{30}Si	—				3
		^{31}Si	2.622 h	β^-			
15	Phosphorus	^{30}P	2.498 m	β^+, EC	3.210	骨	
		^{31}P 単	—				100
		^{32}P	14.26 d	β^-	1.711		
		^{33}P	25.34 d	β^-	0.249		
16	Sulfur	^{32}S	—				
		^{33}S	—				
		^{34}S	—				
		^{35}S	87.51 d	β^-	0.167		
		^{36}S	—				
17	Chlorine	^{35}Cl	—				
		^{36}Cl	3.01×10^5 y	β^-, EC, β^+			
		^{37}Cl	—				
		^{38}Cl	37.24 m	β^-			
18	Argon	^{36}Ar	—				0.3365
		^{37}Ar	35.04 d	EC			
		^{38}Ar	—				0.0632
		^{40}Ar	—				99.6003
		^{41}Ar	1.822 h	β^-			
		^{42}Ar	32.9 y	β^-			

第 4 周期

原子番号	名前	核種記号	半減期	壊変形式	エネルギー MeV	集積臓器	存在度 %
19	Potassium	^{39}K	—				93.2581
		^{40}K 天	1.227×10^9 y	β^-, EC	1.311		0.0117
		^{41}K	—				6.7302
		^{42}K	12.36 h	β^-			
		^{43}K	22.3 h	β^-			
20	Calcium	^{40}Ca	—				
		^{42}Ca	—				
		^{43}Ca	—				
		^{44}Ca	—				
		^{45}Ca	162.6 d	β^-	0.257	骨	
		^{46}Ca	—				
		^{47}Ca	4.536 d	β^-			
		^{48}Ca	—				
21	Scandium	^{44m}Sc	58.61 h	IT, EC			
		^{44}Sc	3.97 h	β^+, EC			
		^{45}Sc 単	—				100
		^{46}Sc	83.79 d	β^-			
		^{47}Sc	3.3492 d	β^-			
		^{48}Sc	43.67 h	β^-			
		^{49}Sc	57.2 m	β^-			
22	Titanium	^{44}Ti	60.0 y	EC			
		^{45}Ti	184.8 m	β^+, EC			
		^{46}Ti	—				
		^{47}Ti	—				
		^{48}Ti	—				
		^{49}Ti	—				
		^{50}Ti	—				
		^{51}Ti	5.76 m	β^-			
23	Vanadium	^{48}V	15.9735 d	EC, β^+			
		^{49}V	330 d	EC			
		^{50}V	—				
		^{51}V	—				
		^{52}V	3.743 m	β^-			
24	Chromium	^{50}Cr	—				
		^{51}Cr	27.70 d	EC			
		^{52}Cr	—				
		^{53}Cr	—				
		^{54}Cr	—				

原子番号	名前	核種記号	半減期	壊変形式	エネルギー MeV	集積臓器	存在度 %
25	Manganese	^{52m}Mn	21.1 m	β^+, EC, IT			
		^{52}Mn	5.591 d	EC, β^+			
		^{53}Mn	3.7×10^6 y	EC			
		^{54}Mn	312.1 d	EC			
		^{55}Mn 単	—				100
		^{56}Mn	2.579 h	β^-			
26	Iron	^{52}Fe	8.275 h	β^+, EC		骨髄	
		^{54}Fe	—				5.845
		^{55}Fe	2.73 y	EC			
		^{56}Fe	—				91.754
		^{57}Fe	—				2.119
		^{58}Fe	—				0.282
		^{59}Fe	44.50 d	β^-			
27	Cobalt	^{55}Co	17.53 h	EC, β^+		肝臓	
		^{56}Co	77.23 d	EC, β^+			
		^{57}Co	271.7 d	EC	0.122		
		^{58m}Co	9.10 h	IT			
		^{58}Co	70.86 d	EC, β^+			
		^{59}Co 単	—				100
		^{60m}Co	10.467 m	IT, β^-			
		^{60}Co	5.2714 y	β^-	1.173, 1.333		
28	Nickel	^{56}Ni	6.075 d	EC			
		^{57}Ni	35.60 h	EC, β^+			
		^{58}Ni	—				68.0769
		^{59}Ni	7.6×10^4 y	EC			
		^{60}Ni	—				26.2231
		^{61}Ni	—				1.1399
		^{62}Ni	—				3.6345
		^{63}Ni	101.2 y	β^-			
		^{64}Ni	—				0.9256
		^{65}Ni	2.5175 h	β^-			
		^{66}Ni	54.6 h	β^-			
29	Copper	^{61}Cu	3.333 h	β^+, EC			
		^{62}Cu	9.673 m	β^+, EC			
		^{63}Cu	—				
		^{64}Cu	12.70 h	EC, β^+, β^-		PET	
		^{65}Cu	—				
		^{66}Cu	5.120 m	β^-			
		^{67}Cu	61.83 h	β^-			

原子番号	名前	核種記号	半減期	壊変形式	エネルギー MeV	集積臓器	存在度 %
30	Zinc	^{62}Zn	9.186 h	EC, β^+			
		^{63}Zn	38.47 m	β^+, EC			
		^{64}Zn	—				
		^{65}Zn	244.3 d	EC, β^+			
		^{66}Zn	—				
		^{67}Zn	—				
		^{68}Zn	—				
		^{69m}Zn	13.76 h	IT, β^-			
		^{69}Zn	56.4 m	β^-			
		^{70}Zn	—				
		^{72}Zn	46.5 h	β^-			
31	Gallium	^{66}Ga	9.49 h	β^+, EC			
		^{67}Ga	3.261 d	EC			
		^{68}Ga	67.71 m	β^+, EC			
		^{69}Ga	—				
		^{70}Ga	21.14 m	β^-, EC			
		^{71}Ga	—				
		^{72}Ga	14.10 h	β^-			
32	Germanium	^{68}Ge	270.8 d	EC			
		^{69}Ge	39.05 h	EC			
		^{70}Ge	—				
		^{71}Ge	11.43 d	EC			
		^{72}Ge	—				
		^{73}Ge	—				
		^{74}Ge	—				
		^{75}Ge	82.78 m	β^-			
		^{76}Ge	—				
		^{77m}Ge	53.7 s	β^-, IT			
		^{77}Ge	11.211 h	β^-			
33	Arsenic	^{71}As	65.30 h	β^+, EC			
		^{72}As	26.0 h	β^+, EC			
		^{73}As	80.30 d	EC			
		^{74}As	17.77 d	EC, β^+, β^-			
		^{75}As 単	—				100
		^{76}As	26.24 h	β^-			
		^{77}As	38.83 h	β^-			

原子番号	名前	核種記号	半減期	壊変形式	エネルギー MeV	集積臓器	存在度 %
34	Selenium	^{72}Se	8.40 d	EC			
		^{74}Se	—				
		^{75}Se	119.8 d	EC			
		^{76}Se	—				
		^{77m}Se	17.36 s	IT			
		^{77}Se	—				
		^{78}Se	—				
		^{79}Se	3.27×10^5 y	β^-			
		^{80}Se	—				
		^{81m}Se	57.28 m	IT, β^-			
		^{81}Se	18.45 m	β^-			
		^{82}Se	—				
35	Bromine	^{76}Br	16.2 h	EC, β^+			
		^{77}Br	57.036 h	EC, β^+			
		^{79}Br	—				
		^{80m}Br	4.4205 h	IT			
		^{80}Br	17.68 m	β^-, EC, β^+			
		^{81}Br	—				
		^{82}Br	35.30 h	β^-			
		^{83}Br	2.374 h	β^-			
36	Krypton	^{78}Kr	—				
		^{79}Kr	35.04 h	EC, β^+			
		^{80}Kr	—				
		^{81m}Kr	13.10 s	IT, EC			
		^{81}Kr	2.29×10^5 y	EC			
		^{82}Kr	—				
		^{83m}Kr	1.83 h	IT			
		^{83}Kr	—				
		^{84}Kr	—				
		^{85m}Kr	4.480	β^-, IT			
		^{85}Kr	10.76 y	β^-			
		^{86}Kr	—				

第 5 周期

原子番号	名前	核種記号	半減期	壊変形式	エネルギー MeV	集積臓器	存在度 %
37	Rubidium	^{81m}Rb	30.5 m	IT, EC			
		^{81}Rb	4.576 h	EC, β^+			
		^{82}Rb	1.273 m	β^+, EC			
		^{83}Rb	86.2 d	EC			
		^{84}Rb	32.77 d	EC, β^+, β^-			
		^{85}Rb	—				72.17
		^{86}Rb	18.642 d	β^-, EC			
		^{87}Rb 天	4.923×10^{10} y	β^-			27.83
		^{88}Rb	17.78 m	β^-			
38	Strontium	^{82}Sr	25.36 d	EC			
		^{83}Sr	32.41 h	β^+, EC			
		^{84}Sr	—				
		^{85}Sr	64.84 d	EC			
		^{86}Sr	—				
		^{87m}Sr	2.815 h	IT, EC			
		^{87}Sr	—				
		^{88}Sr	—				
		^{89}Sr	50.53 d	β^-			
		^{90}Sr	28.74 y	β^-	0.546	骨	
		^{91}Sr	9.65 h	β^-			
39	Yttrium	^{86m}Y	47.4 m	IT, β^+, EC			
		^{86}Y	14.74 h	EC, β^+			
		^{87}Y	79.8 h	EC, β^+			
		^{88}Y	106.65 h	EC, β^+			
		^{89}Y 単	—				100
		^{90}Y	64.00 h	β^-	2.280		
		^{91m}Y	49.71 m	IT			
		^{91}Y	58.51 d	β^-			

原子番号	名前	核種記号	半減期	壊変形式	エネルギー MeV	集積臓器	存在度 %
40	Zirconium	^{88}Zr	83.4 d	EC			
		^{89m}Zr	4.161 m	IT, EC, β^+			
		^{89}Zr	78.41 h	β^+, EC			
		^{90}Zr	—				
		^{91}Zr	—				
		^{92}Zr	—				
		^{93}Zr	1.61×10^6 y	β^-			
		^{94}Zr	—				
		^{95}Zr	64.02 d	β^-			
		^{96}Zr	—				
		^{97}Zr	16.749 h	β^-			
41	Niobium	^{90}Nb	14.60 h	β^+, EC			
		^{92m}Nb	10.15 d	EC, β^+			
		^{93m}Nb	16.13 y	IT			
		^{93}Nb 単	—				100
		^{94}Nb	2.03×10^4 y	β^-			
		^{95m}Nb	3.61 d	IT, β^-			
		^{95}Nb	34.98 d	β^-			
		^{97m}Nb	58.7 s	IT			
		^{97}Nb	72.1 m	β^-			
42	Molybdenum	^{92}Mo	—				
		^{93}Mo	4.0×10^3 y	EC			
		^{94}Mo	—				
		^{95}Mo	—				
		^{96}Mo	—				
		^{97}Mo	—				
		^{98}Mo	—				
		^{99}Mo	65．94 h	β^-			
		^{100}Mo	—				
43	Technetium[*1]	^{92}Tc	4.25 m	β^+, EC			
		^{95m}Tc	61 d	EC, IT, β^+			
		^{95}Tc	20 h	EC			
		^{99m}Tc	6.01 h	IT, β^-			
		^{99}Tc	2.111×10^5 y	β^-			

[*1]安定同位体なし．

原子番号	名前	核種記号	半減期	壊変形式	エネルギー MeV	集積臓器	存在度 %
44	Ruthenium	^{96}Ru	—				
		^{98}Ru	—				
		^{99}Ru	—				
		^{100}Ru	—				
		^{101}Ru	—				
		^{102}Ru	—				
		^{103}Ru	39.26 d	β^-		骨髄	
		^{104}Ru	—				
		^{105}Ru	4.44 h	β^-			
		^{106}Ru	373.6 d	β^-			
45	Rhodium	^{99}Rh	16.1 d	EC, β^+			
		^{103m}Rh	56.114 m	IT			
		^{103}Rh 単	—				100
		^{105m}Rh	42.9 s	IT			
		^{105}Rh	35.36 h	β^-			
		^{106}Rh	30.07 s	β^-			
46	Palladium	^{102}Pd	—				
		^{103}Pd	16.991 d	EC			
		^{104}Pd	—				
		^{105}Pd	—				
		^{106}Pd	—				
		^{108}Pd	—				
		^{109}Pd	13.59 h	β^-			
		^{110}Pd	—				
		^{111}Pd	23.4 m	β^-			
		^{112}Pd	21.04 h	β^-			
47	Silver	^{105}Ag	41.29 d	EC			
		^{107m}Ag	44.3 s	IT			
		^{107}Ag	—				
		^{108}Ag	2.382 m	β^-, EC, β^+			
		^{109m}Ag	39.79 s	IT			
		^{109}Ag	—				
		^{110m}Ag	249.83 d	β^-, IT			
		^{110}Ag	24.56 s	β^-, EC			
		^{111m}Ag	64.8 s	IT, β^-			
		^{111}Ag	7.45 d	β^-			
		^{112}Ag	3.130 h	β^-			

原子番号	名前	核種記号	半減期	壊変形式	エネルギー MeV	集積臓器	存在度 %
48	Cadmium	^{106}Cd	—				
		^{107}Cd	6.50 h	EC, β^+			
		^{108}Cd	—				
		^{109}Cd	461.4 h	EC			
		^{110}Cd	—				
		^{111m}Cd	48.50 m	IT			
		^{111}Cd	—				
		^{112}Cd	—				
		^{113}Cd 天	7.7×10^{15} y				12.22
		^{114}Cd	—				
		^{115m}Cd	44.56 h	β^-			
		^{115}Cd	53.46 h	β^-			
		^{116}Cd	—				
		^{117m}Cd	3.36 h	β^-			
		^{117}Cd	2.49 h	β^-			
49	Indium	^{109}In	4.2 h	EC, β^+			
		^{110}In	4.9 h	EC, β^+			
		^{111}In	2.8047 d	EC			
		^{112}In	14.97 m	EC, β^-, β^+			
		^{113m}In	1.6579 h	IT			
		^{113}In	—				4.281
		^{114m}In	49.51 d	IT, EC, β^+			
		^{114}In	71.9 s	β^-, EC, β^+			
		^{115m}In	4.486 h	IT, β^-			
		^{115}In 天	4.41×10^{14} y	β^-			95.719
		^{116m}In	54.29 m	β^-, EC			
		^{117m}In	116.2 m	β^-, IT			
		^{117}In	43.2 m	β^-			
		^{119m}In	18.0 m	β^-, IT			
		^{119}In	2.4 m	β^-			

原子番号	名前	核種記号	半減期	壊変形式	エネルギー MeV	集積臓器	存在度 %
50	Tin	^{112}Sn	—				
		^{113}Sn	115.09 d	EC, β^+			
		^{114}Sn	—				
		^{115}Sn	—				
		^{116}Sn	—				
		^{117m}Sn	14.00 d	IT			
		^{117}Sn	—				
		^{118}Sn	—				
		^{119m}Sn	293.1 d	IT			
		^{119}Sn	—				
		^{120}Sn	—				
		^{121m}Sn	43.9 y	IT, β^-			
		^{121}Sn	27.03 h	β^-			
		^{122}Sn	—				
		^{123m}Sn	40.06 m	β^-			
		^{123}Sn	129.2 d	β^-			
		^{124}Sn	—				
		^{125}Sn	9.64 d	β^-			
51	Antimony	^{121}Sb	—				
		^{122}Sb	2.7238 d	β^-,EC, β^+			
		^{123}Sb	—				
		^{124}Sb	60.20 d	β^-			
		^{125}Sb	2.75856 y	β^-			
		^{127}Sb	3.85 d	β^-			
52	Tellurium	^{120}Te	—				0.11
		^{121m}Te	164.2 d	IT, EC			
		^{121}Te	19.17 d	EC			
		^{122}Te	—				2.55
		^{123m}Te	119.25 d				
		^{123}Te 天	9.2×10^{16} y	EC			0.89
		^{124}Te	—				4.74
		^{125m}Te	57.40 d	IT			
		^{125}Te	—				7.07
		^{126}Te	—				18.84
		^{127m}Te	106.1 d	IT, β^-			
		^{127}Te	9.35 h	β^-			
		^{128}Te	—				31.74
		^{129m}Te	33.6 d	IT, β^-			
		^{129}Te	69.6 m	β^-			
		^{130}Te	—				34.08
		^{132}Te	3.204 d	β^-			

原子番号	名前	核種記号	半減期	壊変形式	エネルギー MeV	集積臓器	存在度 %
53	Iodine	^{121}I	2.12 h	EC, β^+			
		^{123}I	13.27 h	EC			
		^{124}I	4.1760 h	EC, β^+			
		^{125}I	59.40 d	EC	0.0355, 0.0275		
		^{126}I	12.93 d	EC, β^+, β^-			
		^{127}I 単	—				100
		^{128}I	24.99 m	β^-, EC, β^+			
		^{129}I	1.57×10^7 y	β^-			
		^{130}I	12.36 h	β^-			
		^{131}I	8.021 d	β^-	0.606	甲状腺	
		^{132}I	2.295 h	β^-			
		^{133}I	20.8 h	β^-			
		^{134}I	52.5 m	β^-			
		^{135}I	6.58 h	β^-			
54	Xenon	^{124}Xe	—				
		^{126}Xe	—				
		^{128}Xe	—				
		^{129}Xe	—				
		^{130}Xe	—				
		^{131}Xe	—				
		^{131m}Xe	11.84 d	IT			
		^{132}Xe	—				
		^{133m}Xe	2.19 d	IT			
		^{133}Xe	5.243 d	β^-			
		^{134}Xe	—				
		^{135m}Xe	15.29 m	IT, β^-			
		^{135}Xe	9.14 h	β^-			
		^{136}Xe	—				

第 6 周期

原子番号	名前	核種記号	半減期	壊変形式	エネルギー MeV	集積臓器	存在度 %
55	Caesium	^{129}Cs	32.06 h	EC, β^+			
		^{130}Cs	29.21 m	EC, β^+, β^-			
		^{131}Cs	9.689 d	EC			
		^{132}Cs	6.479 d	EC, β^+,β^-			
		^{133}Cs 単	—				100
		^{134m}Cs	2.903 h	IT			
		^{134}Cs	2.065 y	β^-, EC	0.658	全身	
		^{135}Cs	2.3×10^6 y	β^-	0.269		
		^{137}Cs	30.04 y	β^-	0.662	全身	
56	Barium	^{130}Ba	—				
		^{131}Ba	11.50 d	EC			
		^{132}Ba	—				
		^{133m}Ba	38.9 h	IT, EC			
		^{133}Ba	10.51 y	EC			
		^{134}Ba	—				
		^{135}Ba	—				
		^{136}Ba	—				
		^{137m}Ba	2.552 m	IT	0.662		
		^{137}Ba	—				
		^{138}Ba	—				
		^{139}Ba	82.93 m	β^-			
		^{140}Ba	12.75 d	β^-			
57	Lanthanum*2	^{138}La 天	1.05×10^{11} y	EC, β^-			0.090
		^{139}La	—				99.910
		^{140}La	1.678 d	β^-			
58	Cerium	^{136}Ce	—				
		^{138}Ce	—				
		^{139}Ce	137.641 d	EC			
		^{140}Ce	—				
		^{141}Ce	32.508 d	β^-			
		^{142}Ce	—				
		^{143}Ce	33.039 h	β^-			
		^{144}Ce	284.9 d	β^-			

*2原子番号 57〜71 まではランタノイドである．

原子番号	名前	核種記号	半減期	壊変形式	エネルギー MeV	集積臓器	存在度 %
59	Praseodymium	^{141}Pr 単	—				100
		^{142}Pr	19.12 h	β^-, EC			
		^{143}Pr	13.57 d	β^-			
		^{144m}Pr	7.2 m	IT, β^-			
		^{144}Pr	17.28 m	β^-			
60	Neodymium	^{142}Nd	—				
		^{143}Nd	—				
		^{144}Nd 天	2.29×10^{15}y	α			23.8
		^{145}Nd	—				
		^{146}Nd	—				
		^{147}Nd	10.98 d	β^-			
		^{148}Nd	—				
		^{149}Nd	1.728 h	β^-			
		^{150}Nd	—				
		^{151}Nd	12.44 m	β^-			
61	Promethium[*3]	^{147}Pm	2.623 y	β^-			
		^{149}Pm	53.08 h	β^-			
		^{151}Pm	28.40 h	β^-			
62	Samarium	^{144}Sm	—				
		^{147}Sm 天	1.06×10^{11} y	α			14.99
		^{148}Sm 天	7×10^{15} y	α			11.24
		^{149}Sm	—				
		^{150}Sm	—				
		^{151}Sm	90 y	β^-			
		^{152}Sm	—				
		^{153}Sm	46.284 h	β^-			
		^{154}Sm	—				
		^{155}Sm	22.3 m	β^-			
63	Europium	^{151}Eu	—				
		^{152m}Eu	9.3116 h	β^-, EC, β^-			
		^{152}Eu	13.537 y	EC, β^+, β^-			
		^{153}Eu	—				
		^{154}Eu	8.593 y	β^-, EC, β^+			
		^{155}Eu	4.7611 y	β^-			
		^{156}Eu	15.19 d	β^-			

[*3]安定同位体なし.

原子番号	名前	核種記号	半減期	壊変形式	エネルギー MeV	集積臓器	存在度 %
64	Gadolinium	^{152}Gd 天	1.08×10^{14} y	α			0.20
		^{153}Gd	240.4 d	EC			
		^{154}Gd	—				
		^{155}Gd	—				
		^{156}Gd	—				
		^{157}Gd	—				
		^{158}Gd	—				
		^{159}Gd	18.479 h	β^-			
		^{160}Gd	—				
65	Terbium	^{157}Tb	71 y	EC			
		^{159}Tb 単	—				100
		^{160}Tb	72.3 d	β^-			
		^{161}Tb	6.89 d	β^-			
66	Dysprosium	^{156}Dy	—				
		^{157}Dy	8.14 h	EC, β^+			
		^{158}Dy	—				
		^{160}Dy	—				
		^{161}Dy	—				
		^{162}Dy	—				
		^{163}Dy	—				
		^{164}Dy	—				
		^{165}Dy	2.334 h	β^-			
		^{166}Dy	81.6 h	β^-			
67	Holmium	^{165}Ho 単	—				100
		^{166m}Ho	1.20×10^{3} y	β^-			
		^{166}Ho	26.83 h	β^-			
68	Erbium	^{162}Er	—				
		^{164}Er	—				
		^{166}Er	—				
		^{167}Er	—				
		^{168}Er	—				
		^{169}Er	9.40 d	β^-			
		^{170}Er	—				
		^{171}Er	7.516 h	β^-			
69	Thulium	^{169}Tm 単	—				100
		^{170}Tm	128.6 d	β^-, EC			
		^{171}Tm	1.92 y	β^-			

原子番号	名前	核種記号	半減期	壊変形式	エネルギー MeV	集積臓器	存在度 %
70	Ytterbium	^{168}Yb	—				
		^{169}Yb	32.026 d	EC			
		^{170}Yb	—				
		^{171}Yb	—				
		^{172}Yb	—				
		^{173}Yb	—				
		^{174}Yb	—				
		^{175}Yb	4.185 d	β^-			
		^{176}Yb	—				
		^{177}Yb	1.911 h	β^-			
71	Lutetium	^{175}Lu	—				97.401
		^{176m}Lu	3.664 h	β^-, EC			
		^{176}Lu 天	3.76×10^{10} y	β^-			2.599
		^{177}Lu	6.647 d	β^-			
72	Hafnium	^{174}Hf 天	2.0×10^{15} y	α			0.16
		^{175}Hf	70 d	EC			
		^{176}Hf	—				
		^{177}Hf	—				
		^{178}Hf	—				
		^{179}Hf	—				
		^{180m}Hf	5.5 h	IT, β^-			
		^{180}Hf	—				
		^{181}Hf	42.39 d	β^-			
73	Tantalum	^{180}Ta	8.152 h	EC, β^-			
		^{181}Ta	—				
		^{182}Ta	114.74 d	β^-			
74	Tungsten	^{180}W	—				
		^{181}W	121.2 d	EC			
		^{182}W	—				
		^{183}W	—				
		^{184}W	—				
		^{185}W	75.1 d	β^-			
		^{186}W	—				
		^{187}W	24.000 h	β^-			
		^{188}W	69.78 d	β^-			
75	Rhenium	^{183}Re	70.0 d	EC			
		^{185}Re	—				37.40
		^{186}Re	3.7183 d	β^-, EC			
		^{187}Re 天	4.33×10^{10} y	β^-			62.60
		^{188}Re	17.0040 h	β^-			

原子番号	名前	核種記号	半減期	壊変形式	エネルギー MeV	集積臓器	存在度 %
76	Osmium	^{184}Os	—				
		^{185}Os	93.6 d	EC			
		^{186}Os 天	2.0×10^{15} y	α			1.59
		^{187}Os	—				
		^{188}Os	—				
		^{189}Os	—				
		^{190}Os	—				
		^{191m}Os	13.10 h	IT			
		^{191}Os	15.4 d	β^-			
		^{192}Os	—				
		^{193}Os	29.830 h	β^-			
77	Iridium	^{191m}Ir	4.899 s	IT			
		^{191}Ir	—				
		^{192}Ir	73.83 d	β^-, EC			
		^{193m}Ir	10.53 d	IT			
		^{193}Ir	—				
		^{194}Ir	19.28 h	β^-			
78	Platinum	^{190}Pt 天	6.5×10^{11} y	α			0.014
		^{192}Pt	—				
		^{193m}Pt	4.33 d	IT			
		^{193}Pt	50 y	EC			
		^{194}Pt	—				
		^{195}Pt	—				
		^{196}Pt	—				
		^{197}Pt	19.8915 h	β^-			
		^{198}Pt	—				
		^{199}Pt	30.08 m	β^-			
79	Gold	^{195}Au	186.10 d	EC			
		^{197m}Au	7.73 s	IT			
		^{197}Au 単	—				100
		^{198}Au	2.695 d	β^-	0.961		
		^{199}Au	3.139 d	β^-			

原子番号	名前	核種記号	半減期	壊変形式	エネルギー MeV	集積臓器	存在度 %
80	Mercury	^{196}Hg	—				
		^{197m}Hg	23.8 h	IT, EC			
		^{197}Hg	64.94 h	EC			
		^{198}Hg	—				
		^{199}Hg	—				
		^{200}Hg	—				
		^{201}Hg	—				
		^{202}Hg	—				
		^{203}Hg	46.61 d	β^-			
		^{204}Hg	—				
		^{206}Hg	8.32 m	β^-			
81	Thallium	^{200}Tl	26.1 h	EC, β^+			
		^{201}Tl	3.0421 d	EC			
		^{202}Tl	12.31 d	EC			
		^{203}Tl	—				29.52
		^{204}Tl	3.783 y	β^-, EC, β^+			
		^{205}Tl 系 1	—				70.48
		^{206}Tl	4.202 m	β^-			
		^{207}Tl	4.77 m	β^-			
		^{208}Tl	3.053 m	β^-	2.615		
		^{209}Tl	2.162 m	β^-			
		^{210}Tl	1.30 m	β^-			
82	Lead	^{200}Pb	21.5 h	EC			
		^{201}Pb	9.33 h	EC, β^+			
		^{202m}Pb	3.53 h	IT, EC			
		^{202}Pb	5.25×10^4 y	EC, α			
		^{203}Pb	51.873 h	EC			
		^{204}Pb	—				1.4
		^{206}Pb 系 2	—				24.1
		^{207m}Pb	0.806 s	IT			
		^{207}Pb 系 3	—				22.1
		^{208}Pb 系 0	—				52.4
		^{209}Pb	3.234 h	β^-			
		^{210}Pb	22.20 y	β^-, α			
		^{211}Pb	36.1 m	β^-			
		^{212}Pb	10.64 h	β^-			
		^{214}Pb	27.06 m	β^-			

壊変系列			α 壊変	β 壊変
トリウム系列	4n	^{232}Th→^{208}Pb	6	4
ネプツニウム系列	4n+1	^{237}Np → ^{205}Tl	8	4
ウラン系列	4n+2	^{238}U → ^{206}Pb	8	6
アクチニウム系列	4n+3	^{235}U → ^{207}Pb	7	4

原子番号	名前	核種記号	半減期	壊変形式	エネルギー MeV	集積臓器	存在度 %
83	Bismuth*4	^{206}Bi	6.243 d	EC, β^+			
		^{207}Bi	31.55 y	EC, β^+			
		^{208}Bi	3.68×10^5 y	EC			
		^{209}Bi	2.01×10^{19} y	α			100
		^{210}Bi	5.012 d	β^-, α			
		^{211}Bi	2.14 m	α, β^-			
		^{212}Bi	60.55 m	β^-, α			
		^{213}Bi	45.59 m	β^-, α			
		^{214}Bi	19.9 m	β^-, α	0.609		
		^{215}Bi	7.6 m	β^-			
84	Polonium	^{208}Po	2.898 y	α, EC, β^+			
		^{210}Po	138.376 d	α			
		^{211}Po	0.516 s	α			
		^{213}Po	3.72×10^{-6} s	α			
		^{214}Po	1.643×10^{-4} s	α	7.6		
		^{215}Po	1.781×10^{-3} s	α			
		^{216}Po	0.145 s	α			
		^{218}Po	3.098 m	EC, α			
85	Astatine	^{211}At	7.214 h	EC, α		標的 RI	
86	Radon	^{220}Rn	55.6 s	α			
		^{222}Rn	3.824 d	α		肺	

*4原子番号 83 以上の原子核には，安定な原子核は存在しない．つまり $_{83}$Bi 以降の原子核は，すべて放射性である．

第 7 周期

原子番号	名前	核種記号	半減期	壊変形式	エネルギー MeV	集積臓器	存在度 %
87	Francium	^{221}Fr	4.9 m	α			
		^{223}Fr	22.00 m	β^-, α			
88	Radium	^{223}Ra	11.43 d	α		標的 RI	
		^{224}Ra	3.66 d	α			
		^{225}Ra	14.9 d	β^-			
		^{226}Ra	1600 y	α	4.784	骨	
		^{228}Ra	5.75 y	β^-			
89	Actinium[*5]	^{225}Ac	9.9203 d	α			
		^{227}Ac	21.772 y	β^-, α			
		^{228}Ac	6.15 h	β^-			
90	Thorium	^{227}Th	18.697 d	α			
		^{228}Th	1.9116 y	α			
		^{229}Th	7.88×10^3 y	α			
		^{230}Th	7.54×10^4 y	α			0.02
		^{231}Th	25.52 h	β^-			
		^{232}Th 系 0	1.40×10^{10} y	α			99.98
		^{233}Th	21.83 m	β^-			
		^{234}Th	24.10 d	β^-			
91	Protactinium	^{231}Pa	3.276×10^4 y	α			100
		^{233}Pa	26.975 d	β^-			
		^{234m}Pa	1.159 m	β^-, IT			
		^{234}Pa	6.70 h	β^-			
92	Uranium	^{232}U	68.9 y	α			
		^{233}U	1.592×10^5 y	α, SF			
		^{234}U	2.455×10^5 y	α, SF			0.0054
		^{235m}U	26 m	IT			
		^{235}U 系 3	7.04×10^8 y	α, SF			0.7204
		^{236}U	2.342×10^7 y	α, SF			
		^{237}U	6.752 d	β^-			
		^{238}U 系 2	4.468×10^9 y	α, SF			99.2742
		^{239}U	23.45 m	β^-			
93	Neptunium[*6]	^{237}Np 系 1	2.144×10^6 y	α, SF			
		^{238}Np	2.099 d	β^-			
		^{239}Np	2.356 d	β^-			

[*5]原子番号 89〜103 はアクチニウムである．

[*6]原子番号 93 の $_{93}$Np 以降の原子核は，すべて人工的に作られ，超ウラン元素という．

原子番号	名前	核種記号	半減期	壊変形式	エネルギー MeV	集積臓器	存在度 %
94	Plutonium	^{238}Pu	87.7 y	α, SF		肺	
		^{239}Pu	2.411×10^4 y	α, SF			
		^{240}Pu	6.564×10^3 y	α, SF			
		^{241}Pu	14.35 y	β^-, α			
		^{242}Pu	3.75×10^5 y	α, SF			
95	Americium	^{241}Am	432.2 y	α, SF	5.486	骨	
		^{242}Am	16.02 h	β^-, EC			
		^{243}Am	7.364×10^3 y	α			
96	Curium	^{242}Cm	162.8 d	α, SF			
		^{244}Cm	18.10 y	α			
			1.344×10^7 y	SF			
		^{246}Cm	4.706×10^3 y	α, SF			
		^{248}Cm	3.48×10^5 y	α, SF			
97	Berkelium	^{247}Bk	1.38×10^3 y	α			
98	Californium	^{252}Cf	2.730 y	α			
			85.5 y	SF			
99	Einsteinium	^{254}Es					
100	Fermium	^{253}Fm					
101	Mendelevium	^{255}Md					
102	Nobelium	^{255}No					
103	Lawrencium	^{257}Lr					
104	Rutherfordium	^{261}Rf					
105	Dubnium	Db					
106	Seaborgium	Sg					
107	Bohrium	Bh					
108	Hassium	Hs					
109	Meitnerium	Mt					
110	Darmstadtium	Ds					
111	Rentgenium	Rg					
112	Copernicium	Cn					
113	Nihonium	^{278}Nh					
114	Flerovium	Fl					
115	Moscovium	Mc					
116	Livermorium	Lv					
117	Tennessine	Ts					
118	Oganesson	^{294}Og					

付 録E　年表

本書に関連した事項の年表をまとめておこう．

人類が原子や分子の存在を考え始めたのは，古代ギリシャに始まる．これ以上分割できないものとしての Atom を考えたが，思弁的なものであり，定性的な議論にとどまっていた．

18 世紀終わりころから 19 世紀初頭にかけて，質量を測ることによって定量的な化学が発展する．そのなかで，ある決まった整数の単位で化学反応が進むことが認識され，背後に分子や原子のような単位があると考え始めた．

1895 年から世紀末までに，X 線，電子，ゼーマン効果，放射能という発見がなされた．

世紀	年	事	人
17	1662	ボイルの法則	R. Boyle(英)
18	1789	『化学要論』	A. Lavoisier(仏)
	1799	定比例の法則	J. L. Proust(仏)
19	1803	『化学哲学の新体系』	J. Dalton(英)
	1805	気体反応の法則	J. Gay-Lussac(仏)
	1811	アボガドロの法則	A. Avogadro(伊)
	1827	ブラウン運動	R. Brown(英)
	1860	気体分子運動論	L. E. Boltzmann(オーストリア)
	1869	周期律と周期表	D. Mendeleev(露)
	1885	バルマー系列の発見	J. J. Balmer(スイス)
	1895	X 線の発見	W. C. Roentgen(独)
	1896	ウランの放射能の発見	A. H. Becquerel(仏)
		正常ゼーマン効果の発見	P. P. Zeeman(オランダ)
	1897	電子の発見	J. J. Thomson(英)
		電子論	H. A. Lorentz(オランダ)
	1898	Th の放射能の発見	M. Curie(仏)
	1900	輻射に関するプランクの法則	M. Planck(独)

1913 年のボーアによる原子模型により分光学の説明ができるようになり，1925 年から量子力学（行列力学と波動力学の総称）の完成により，原子構造は解明された．

その後はさらに原子の中，つまり原子核へと興味は移っていく．戦時だったとはいえ，1938 年の核分裂の発見から 1945 年の原爆までの期間はとても短い．

世紀	年	事	人
20	1902	光電効果の発見	P. Lenard(独)
	1905	特殊相対論，光電効果の説明	A. Einstein(独)
	1908	パッシェン系列	L. C. Paschen(独)
	1913	原子模型	N. Bohr(デンマーク)
		isotope の命名	F. Soddy(英)
	1914	ライマン系列	T. Lyman(米)
	1919	人工核変換	E. Rutherford(英)
	1923	コンプトン効果	A. H. Compton(米)
		物質波	L. de Broglie(仏)
	1925	行列力学	W. Heisenberg(独)
	1926	波動力学	E. Shroedinger(オーストリア)
	1928	相対論的量子力学	P. A. M. Dirac(英)
	1931	サイクロトロンの発明	E. O. Lawrence(米)
	1932	陽電子の発見	C. D. Anderson(米)
		中性子の発見	J. Chadwick(英)
		加速器による核変換	J. D. Cockcroft & E. Walton(英)
	1935	π 中間子の予言	湯川秀樹 (日)
	1938	核分裂の発見	O. Hahn & L. Meitner(独)
	1945	原子爆弾（広島・長崎）	
	1950	ICRP 発足	
	1951	水素爆弾	
	1953	Atoms for peace	D. D. Eisenhower 米大統領
	1954	ビキニ環礁・第五福竜丸の被曝	
	1955	原子力基本法	
	1957	放射線障害防止法	
	1975	ベクレルとグレイ単位の決定	
	1979	シーベルト単位の決定	
		スリーマイル島原発事故（米）	
	1986	チェルノブイリ原発事故（ウクライナ）	
	1999	JCO 臨界事故（東海村）	
21	2011	原発事故（福島）	
	2019	放射性同位元素等規制法	

関連図書

[1] 赤羽利昭『見て学ぶ放射線』(通商産業研究所，2001)

[2] 柴田徳思編『放射線概論第 13 版』(通商産業研究社，2022)

[3] エミリオ・セグレ『X 線からクォークまで』(みすず書房，2009)

[4] 鶴田　隆雄『放射線入門』(通商産業研究社，2008)

[5] 日本アイソトープ協会『やさしい放射線とアイソトープ 5 版』(丸善，2014)

[6] 日本アイソトープ協会『放射線取扱の基礎 5 版』(丸善，2008)

[7] 日本アイソトープ協会『アイソトープ法令集 I』(丸善，2022)

[8] 日本アイソトープ協会『アイソトープ手帳 11 版机上版』(丸善，2012)

[9] 藤永茂『ロバート・オッペンハイマー』(ちくま学芸文庫，2021)

[10] 野口邦和『放射能のはなし』(新日本出版，2001)

[11] 山崎岐男『グレイの生涯』(考古堂，2000)

[12] 山本義隆『原子・原子核・原子力』(岩波現代文庫，2022)

[13] H. Weinberger『シーベルトの生涯』(考古堂，1994)

索 引

■あ■
アクチニウム系列, 17
安定同位体, 13
イオン化, 7
位置エネルギー, 66
一次宇宙線, 15
一次放射性核種, 16
ウラン系列, 16
運動エネルギー, 66
LNT 仮説, 39
■か■
壊変, 13
壊変系列, 77
壊変図, 14
壊変定数, 18
壊変法則, 18
核異性体, 14
確定的影響, 39, 55
確率的影響, 39, 55
核力, 12, 13
間接作用, 39
外部被曝, 49
吸収線量, 40
競合過程, 14
クーロン力, 65
蛍光, 7
結合エネルギー, 12
原子単位, 64
原子力基本法, 56
光子, 1
古典物理学, 65
コンプトン波長, 28
■さ■
しきい値, 39
仕事関数, 27
自然放射線, 53
質量欠損, 12
質量衝突阻止能, 24
質量数, 9
質量飛程, 25
照射線量, 33
実効線量, 41
人工放射線, 54
制動 X 線, 2
生物学的半減期, 50
線エネルギー付与, 24
線減弱係数, 26
線阻止能, 24
組織荷重係数, 41
■た■
単核種元素, 77
超ウラン元素, 97
直接作用, 39
天然放射性核種, 15
天然放射性元素, 77
天然誘導放射性核種, 15
電位, 66
電位差, 66
電気定数, 63
電子顕微鏡, 3
電子ボルト, 62
電離, 7
統一原子質量単位, 10
等価線量, 40
特性 X 線, 7
トリウム系列, 16
同位体, 10
ド・ブロイ波, 3
■な■
内部被曝, 49
二次宇宙線, 15
二次放射性核種, 16
ネプツニウム系列, 17
■は■
半価層, 26
半減期, 18
万有引力, 65
飛程, 25
比放射能, 19
物質波, 3
プランク定数, 1
崩壊, 13
放射性同位元素等規制法, 56
放射性同位体, 13
放射線, 13
放射線荷重係数, 40
放射線障害防止法, 56
放射能, 18
ボーア半径, 4
ポテンシャル, 66
ポテンシャル・エネルギー, 66
■や■
有効半減期, 50
陽電子, 14, 28, 29
■ら■
力学的エネルギー, 67

リュードベリ定数, 8
量子物理学, 65
励起, 7