

放射線科学概論

小倉昭弘¹

2019/09/18

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. [ホームページ 1] <http://a8095.mascac.nihon-u.ac.jp/ogu/lecture/>
4. [ホームページ 2] <http://a8095.mascac.nihon-u.ac.jp/isotope/>

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. 教科書とこの冊子

教科書

- 『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)

参考書

ホームページ 2 に紹介があります。

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。
2. 試験：教科書・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1種放射線取扱主任者 第2種放射線取扱主任者 第3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.mustec.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1種作業環境測定士 第2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	項目	節番号
1	09/18	ガイダンス	放射線の利用	
2	10/02	放射線物理学 放射線化学	原子核の構成, 結合エネルギー	1.1~1.3
3	10/09		原子核の壊変と放射線, 壊変系列	1.4, 1.5
4	10/16		壊変法則, 半減期	1.6
5	10/23		放射能と質量	1.7
6	10/30		放射平衡	1.8
7	11/06		放射線と物質との相互作用	1.9~1.11
8	11/13		核反応, 原爆と原発	1.12
9	11/20		放射線測定	測定器
10	11/27	測定実習		2.7
11	12/04	放射線生物学	放射線影響の分類	3.1~3.4
12	12/11		生体への影響, しきい値	3.5, 3.6
13	12/18		内部被曝, 実効線量係数	3.7
14	01/08	放射線管理 法令	防護の目的と体系, 法の目的	4.1
15	01/15		作業環境管理, 線源管理, 個人管理	4.2~4.5
16	01/22	秋期試験		

目次

はじめに	i
第 1 章 放射線物理学・化学	1
1.1 特性 X 線と電離	1
1.2 原子核の構成	1
1.3 結合エネルギー	2
1.4 原子核の壊変と放射線, 壊変系列	7
1.5 放射性核種の分類	8
1.6 壊変法則と放射能	13
1.7 放射能と質量	18
1.8 放射平衡	22
1.9 放射線と物質との相互作用	27
1.10 荷電粒子と物質との相互作用	28
1.11 γ 線と物質との相互作用	33
1.12 中性子と物質との相互作用, 核反応	38
第 2 章 放射線測定	41
2.1 概略	41
2.2 測定器の種類と特性	42
2.3 気体の検出器	42
2.4 固体, 液体の検出器	43
2.5 個人の被曝線量の測定器	43
2.6 測定値の取扱い	43
2.7 放射線測定実習	49
第 3 章 放射線生物学	53
3.1 放射線影響の分類	53
3.2 放射線に関する単位	53
3.3 原子・分子レベルの影響と修飾要因	54
3.4 細胞レベルの影響	55
3.5 組織・臓器レベルの影響	60
3.6 個体 (胎児を含む) レベルの影響	65
3.7 内部被曝	70
第 4 章 放射線管理・法令	77
4.1 日常生活と放射線	77
4.2 防護の目的と体系, 法の目的	77
4.3 作業環境管理	83
4.4 線源管理	85
4.5 個人管理	88
付 録 A SI 単位系	91
A.1 放射線で使われる SI 単位	91
A.2 10 の整数乗倍を表す SI 接頭語	92

付録 B 周期表	93
B.1 周期表	93
B.2 核外電子配置	94
付録 C 同位体	97

第1章 放射線物理学・化学

1.1 特性 X 線と電離

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。電子の運動する軌道は決まっていて、内側から K 殻, L 殻, M 殻, N 殻, …とよばれている。

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電子にわかれる。これを電離またはイオン化 (ionization) という。

1.2 原子核の構成

原子核に関する用語を並べる。

構成要素

$$\text{原子 (atom)} \left\{ \begin{array}{l} \text{核子 (nucleon)} \left\{ \begin{array}{l} \text{陽子 (proton)} : Z \text{ 個 (原子番号 atomic number)} \\ \text{中性子 (neutron)} : N \text{ 個} \end{array} \right. \\ \text{電子 (electron)} : Z \text{ 個} \end{array} \right. \quad (1.1)$$

電荷と質量

表 1.1: 電荷と質量

粒子	電荷	質量
陽子	$+e = +1.60 \times 10^{-19} \text{ C}$	$m_p = 1.67262 \times 10^{-27} \text{ kg}$
中性子	0	$m_n = 1.67493 \times 10^{-27} \text{ kg}$
電子	$-e = -1.60 \times 10^{-19} \text{ C}$	$m_e = 9.10938 \times 10^{-31} \text{ kg}$

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。

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。

$$A = Z + N \sim \text{原子量 [g]} \quad (1.2)$$

表記

周期表で使われる元素記号を X とすると、

$${}^A_Z X \quad (1.3)$$

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 1.2 のようである。

表 1.2: 中性子数の計算

元素	中性子数
${}^4_2\text{He}$	$4 - 2 = 2$
${}^{16}_8\text{O}$	$16 - 8 = 8$
${}^1_0\text{n}$	$1 - 0 = 1$

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

$$R = 1.4 \times 10^{-15} A^{1/3} [\text{m}] \quad (1.4)$$

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、

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

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) ¹ という。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。

表 1.3: 同位体の例

${}^1_1\text{H}$	水素	Hydrogen
${}^2_1\text{H}$	重水素	Deutrium
${}^3_1\text{H}$	三重水素	Tritium

1.3 結合エネルギー

§1.3.1 原子質量単位

原子の世界では、原子質量単位 (amu : atomic mass unit) [u] が使われる。

${}^{12}_6\text{C}$ の原子 1 個の質量を 12.00 [u] と定める。

${}^{12}_6\text{C}$ の原子 12g の中に含まれる原子の数は、Avogadro 数 $N_A = 6.022 \times 10^{23}$ 個である。

$${}^{12}_6\text{C} \text{ の原子 1 個の質量} = 12 [\text{u}] = \frac{12 \times 10^{-3} \text{ kg}}{6.022 \times 10^{23} \text{ 個}} \quad (1.5)$$

したがって、

$$1 [\text{u}] = \frac{1 \times 10^{-3}}{6.022 \times 10^{23}} = 1.661 \times 10^{-27} \text{ kg} \quad (1.6)$$

§1.3.2 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

$$E = mc^2 \quad (1.7)$$

である。ここで c は光速で、 $c = 3.0 \times 10^8 \text{ m/s}$ である。

¹F. Soddy(英) の命名, Nature, **92** (1913) 399

原子・原子核の分野ではエネルギーの単位として電子ボルト (electron Volt) [eV] を使う。これは、電子が電圧 1 V の間に加速されて得るエネルギーで、

$$1\text{eV} = e [\text{C}] \times 1 [\text{V}] = e [\text{J}] = 1.60 \times 10^{-19} \text{ J} \quad (1.8)$$

となっている。そうすると、原子質量単位 1 [u] は、

$$\begin{aligned} 1 [\text{u}] \times c^2 &= 1.6605402 \times 10^{-27} \cdot (3.00 \times 10^8)^2 \\ &= 1.492 \times 10^{-10} \text{ J} = 931.5 \text{ MeV} \end{aligned} \quad (1.9)$$

陽子、中性子と電子の質量の一覧表を表 1.4 に掲げる。

表 1.4: 質量とエネルギー

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

SI 単位での質量は kg であるが、原子核では「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。

§1.3.3 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、

$$Zm_p + Nm_n + Zm_e > M \quad (1.10)$$

となる。そこで、

$$\Delta m = Zm_p + Nm_n + Zm_e - M \quad (1.11)$$

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、

$$E = \Delta m \times c^2 = (Zm_p + Nm_n + Zm_e - M)c^2 \quad (1.12)$$

と表される。

演習問題

1. 次の原子核の陽子と中性子の数を答えなさい。

原子核	陽子数	中性子数
${}^4\text{He}$		
${}^{12}\text{C}$		
${}^{14}\text{C}$		
${}^{32}\text{P}$		
${}^{226}\text{Ra}$		
${}^{227}\text{Ac}$		
${}^{232}\text{Th}$		
${}^{235}\text{U}$		
${}^{237}\text{Np}$		

2. ヘリウム原子核 ${}^4\text{He}$ の結合エネルギー (MeV) を求めなさい。

(a) 陽子 2 個, 中性子 2 個, 電子 2 個の質量の和は何 u か。

(b) ${}^4_2\text{He}$ の質量は 4.002603 u である。質量欠損は何 u か。

(c) ヘリウム原子核 ${}^4\text{He}$ の結合エネルギー [MeV] として最も近い値は, 次のうちどれか。 [2008 年物理問 6]

- (i) 0.3
- (ii) 1
- (iii) 3
- (iv) 10
- (v) 30

主任者試験問題

1. 次の記述のうち、正しいものはどれか。 [2016 年物理問 1]
 - (a) 電子の質量は、陽電子の質量より小さい。
 - (b) 陽電子の質量は、消滅光子のエネルギーの総和を質量に換算したものに等しい。
 - (c) 中性子の質量は、陽子と電子の質量の和より大きい。
 - (d) ミュー粒子の質量は、陽子の質量より小さい。
2. 原子核の平均の密度 $[\text{g}/\text{cm}^3]$ として最も近いものはどれか。 [2016 年物理問 4]
 - (a) 1.5×10^{12}
 - (b) 7.5×10^{12}
 - (c) 3.0×10^{13}
 - (d) 1.5×10^{14}
 - (e) 6.5×10^{14}
3. 次の記述のうち、正しいものはどれか。 [2015 年物理問 4]
 - (a) 原子核の半径は原子番号の $1/3$ 乗にほぼ比例している。
 - (b) 原子核の半径は質量数の $1/3$ 乗にほぼ比例している。
 - (c) 原子核の体積は反応断面積の $3/2$ 乗にほぼ比例している。
 - (d) 原子核の半径は、原子の半径の 10^{-3} 倍程度である。
 - (e) 鉛 (^{208}Pb) の原子核の半径は 10 fm を超える。
4. 次の記述のうち、正しいものはどれか。 [2015 年物理問 5]
 - (a) 原子番号 50 以上の安定な原子核では陽子数が中性子より少ない。
 - (b) ^{14}C と ^{18}O は同中性子体である。
 - (c) 同重体は互いに原子核の質量が等しい。
 - (d) 同位体は互いに陽子の数が等しい。
5. 4.0 pg の質量に相当するエネルギー $[\text{J}]$ として最も近い値は、次のうちどれか。 [2014 年物理問 1]
 - (a) 1.5×10^1
 - (b) 3.6×10^1
 - (c) 1.5×10^2
 - (d) 3.6×10^2
 - (e) 1.5×10^3
6. ^{56}Fe 原子核の核子 1 個当たりの結合エネルギーは、水素原子における電子の結合エネルギーの何倍か。 次のうち、最も近い値はどれか。 [2014 年物理問 5]
 - (a) 10^3
 - (b) 10^4
 - (c) 10^6
 - (d) 10^8
 - (e) 10^{12}
7. 次の記述のうち、正しいものはどれか。 [2013 年物理問 3]

- (a) μ 粒子は電荷を持った粒子である。
- (b) 安定な原子核のうち、陽子数と中性子数が共に偶数であるものの数は、そのどちらか一方が奇数であるものの数より大きい。
- (c) 電子は陽電子よりも質量が大きい。
- (d) 陽子は中性子よりも質量が大きい。

8. 次の記述のうち、正しいものはどれか。[2012年物理問3]

- (a) 核子とは中性子、陽子及び中間子をいう。
- (b) 原子核の体積は質量数にほぼ比例する。
- (c) 核子間の結合は強い相互作用によるものである。
- (d) 核子当たりの結合エネルギーは質量数が増えるほど高くなる。

9. 次のうち、正しいものはどれか。[2011年物理問2]

- (a) 原子の半径は原子番号に比例する。
- (b) 水素原子のイオン化エネルギーは 1.36 eV である。
- (c) 原子質量単位 u は ^{12}C の質量を基準にして、その 12 分の 1 を 1u として定義される。
- (d) 原子質量単位 1u はエネルギーに換算すると約 931MeV に相当する。

1.4 原子核の壊変と放射線, 壊変系列

§1.4.1 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. 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, 陽子どうしの電氣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.

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 ${}_{83}\text{Bi}$ 以上の原子核には, 安定なものは存在しない. 付録 C に主な同位体を掲載している.

${}^1\text{H}$	安定同位体
${}^2\text{H}$	安定同位体
${}^3\text{H}$	放射性同位体

§1.4.2 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. これらの壊変の前で, Z と A の総和は変化しない. 一覧表を表 1.5 にまとめたあと, それぞれ解説しよう.

表 1.5: 壊変の種類

壊変の種類	壊変過程	例
α 壊変	${}^A_Z X \rightarrow {}^{A-4}_{Z-2} Y + {}^4_2\text{He}$	${}^{226}_{88}\text{Ra} \rightarrow {}^{222}_{86}\text{Rn} + {}^4_2\text{He}$
β^- 壊変	${}^A_Z X \rightarrow {}^A_{Z+1} Y + e^- + \bar{\nu}$	${}^{90}_{38}\text{Sr} \rightarrow {}^{90}_{39}\text{Y} + e^- + \bar{\nu}$
β^+ 壊変	${}^A_Z X \rightarrow {}^A_{Z-1} Y + e^+ + \nu$	${}^{22}_{11}\text{Na} \rightarrow {}^{22}_{10}\text{Ne} + e^+ + \nu$
電子捕獲 (EC)	${}^A_Z X + e^- \rightarrow {}^A_{Z-1} Y + \nu$	${}^{57}_{27}\text{Co} + e^- \rightarrow {}^{57}_{26}\text{Fe} + \nu$
γ 壊変	${}^A_m X (\text{励起状態}) \rightarrow {}^A X (\text{基底状態}) + \gamma (\text{光子})$	${}^{60m}_{27}\text{Co} \rightarrow {}^{60}_{27}\text{Co} + \gamma$

α 壊変

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

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

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.

$$n \rightarrow p + e^- + \bar{\nu} \quad (1.13)$$

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) ${}^{90}_{38}\text{Sr}$, ${}^{14}_6\text{C}$, ${}^{35}_{16}\text{S}$, ${}^{63}_{28}\text{Ni}$, ${}^{147}_{61}\text{Pm}$

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.

$$p \rightarrow n + e^+ + \nu \quad (1.14)$$

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 Capture)

原子核が、軌道電子を捕獲する過程である。



この結果、原子番号は1つ下がるが、質量数は変化しない。

γ 壊変 (核異性体転移)

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

§1.4.3 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。

1.5 放射性核種の分類

放射性核種は以下のように分類される。

§1.5.1 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、 ${}^3\text{H}$ や ${}^{14}\text{C}$ のような多くの種類の放射線の集合である二次宇宙線が発生する。

§1.5.2 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である。代表的なものを表 1.6 にあげよう。付録 C には、天と書いてある。

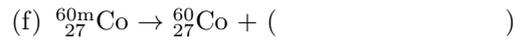
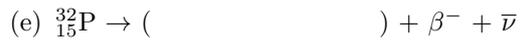
この中でカリウム K は植物にとって必須の元素であり、その中に放射性的な ${}^{40}\text{K}$ がある。したがって、植物の中には必ず ${}^{40}\text{K}$ があり、日々私たちは体内に放射性物質を取り込んでいる。

表 1.6: 壊変系列に属さない天然放射性核種

核種	半減期 [y]
${}^{40}\text{K}$	1.3×10^9
${}^{87}\text{Rb}$	4.8×10^{10}
${}^{113}\text{Cd}$	7.7×10^{15}
${}^{115}\text{In}$	4.4×10^{14}
${}^{123}\text{Te}$	$\leq 1 \times 10^{13}$
${}^{138}\text{La}$	1.1×10^{11}
${}^{144}\text{Nd}$	2.3×10^{15}
${}^{147}\text{Sm}$	1.1×10^{11}

演習問題

1. 次の壊変過程の () をうめなさい.



2. 次の壊変について, α 壊変と β^{-} 壊変をそれぞれ何回行うか.

(a) トリウム系列 ($4n$): トリウム ${}_{90}^{232}\text{Th}$ が鉛 ${}_{82}^{208}\text{Pb}$ になるまで. [2010 年物理問 9]

(b) ネプツニウム系列 ($4n+1$): ネプツニウム ${}_{93}^{237}\text{Np}$ がタリウム ${}_{81}^{205}\text{Tl}$ になるまで.

(c) ウラン系列 ($4n+2$): ウラン ${}_{92}^{238}\text{U}$ が鉛 ${}_{82}^{206}\text{Pb}$ になるまで. [2018 年化学問 2]

(d) アクチニウム系列 ($4n+3$): ウラン ${}_{92}^{235}\text{U}$ が鉛 ${}_{82}^{207}\text{Pb}$ になるまで.

主任者試験問題

- 次の記述のうち、正しいものはどれか。[2017年物理問 7]
 - 電子捕獲においては核内の陽子 1 個が中性子に変わる。
 - α 壊変する核種で β 線が放出されることはない。
 - β^- 壊変が起きると必ず γ 線が放出される。
 - β^- 壊変と電子捕獲の両者が起きる核種も存在する。
- 次の同位体のうち、安定同位体のみのはどれか。[2017年化学問 1]
 - ^{11}C , ^{12}C , ^{13}C
 - ^{15}O , ^{16}O , ^{18}O
 - ^{32}S , ^{33}S , ^{34}S
 - ^{40}Ca , ^{42}Ca , ^{44}Ca
- 次の過程のうち、ニュートリノが放出されるものはどれか。[2016年物理問 7]
 - 軌道電子捕獲
 - 核異性体転移
 - β^+ 壊変
 - 電子対生成
- ^{210}Po に関する次の記述のうち、正しいものはどれか。[2016年化学問 14]
 - 酸素や硫黄と同じく 16 族元素である。
 - ウラン系列に属する。
 - ^{210}Bi の娘核種である。
 - α 壊変して ^{206}Pb になる。
- 次のうち、放射性元素（安定同位体のない元素）のみのはどれか。[2015年化学問 1]
 - Ac, Am, Co
 - Cs, Np, Pa
 - Pm, Po, Pu
 - Ra, Rn, Sr
 - Tc, Th, U
- ^{237}Np に始まる壊変系列に関する次の記述のうち、正しいものはどれか。[2015年化学問 27]
 - Np は、アクチノイドに属する。
 - 壊変系列に属する核種は、質量数を 4 で除した際には余りが 1 となる。
 - 壊変系列には、 ^{233}U が含まれる。
 - 最終壊変生成物は、鉛の同位体である。
- 次の現象のうち、ニュートリノが放出されるものはどれか。[2014年物理問 2]
 - α 壊変
 - β^+ 壊変
 - 電子捕獲壊変

- (d) 内部転換
8. 放射性元素に関する次の記述のうち、正しいものはどれか。[2014年化学問13]
- (a) テクネチウムは、モリブデンと同族元素である。
 - (b) プロメチウムは、ランタノイドに属する。
 - (c) ラジウムは、アクチノイドに属する。
 - (d) アスタチンは、17族元素（ハロゲン）である。
9. トリウム系列、ウラン系列、アクチニウム系列に関する次の記述のうち、正しいものはどれか。[2014年化学問16]
- (a) 半減期の最も長いRaの同位体は、ウラン系列に属する。
 - (b) 半減期の最も長いRnの同位体は、トリウム系列に属する。
 - (c) ^{235}U は、アクチニウム系列に属する。
 - (d) 3系列とも最終壊変生成物は、Pbの安定同位体である。
10. 放射性壊変に関する次の記述のうち、正しいものはどれか。[2013年物理問7]
- (a) α 壊変ではニュートリノが放出されない。
 - (b) α 壊変と β^- 壊変は同一核種では起きない。
 - (c) β^+ 壊変が起きる核種では競合してEC壊変が起きる。
 - (d) EC壊変ではニュートリノが放出されない。
11. それぞれの放射性核種と壊変系列の組合せのうち、誤っているものはどれか。[2013年化学問15]
- (a) ^{232}Th — トリウム系列
 - (b) ^{234}Ra — ウラン系列
 - (c) ^{208}Tl — トリウム系列
 - (d) ^{234}U — ウラン系列
 - (e) ^{235}U — アクチニウム系列
12. 次のうち、質量数に変化がなく、原子番号が1増加する過程はどれか。[2012年物理問8]
- (a) α 壊変
 - (b) β^- 壊変
 - (c) β^+ 壊変
 - (d) γ 遷移
 - (e) 電子捕獲
13. 放射性元素に関する次の記述のうち、正しいものはどれか。[2012年化学問14]
- (a) テクネチウムはマンガンの同族元素である。
 - (b) ラドンはウランの同族元素である。
 - (c) プロメチウムはアクチノイド元素である。
 - (d) トリウムはアクチノイド元素である..

1.6 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 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。

$$(\text{放射能}) = -\frac{dN}{dt} = \lambda N \quad (1.16)$$

この微分方程式を解くと

$$N(t) = N_0 e^{-\lambda t} \quad (1.17)$$

となる。ここで、 N_0 は、 $t = 0$ での元素の数である。 $N = \frac{N_0}{2}$ となるまでの時間 T を半減期 (half-life) という。

$$\frac{N_0}{2} = N_0 e^{-\lambda T} \quad (1.18)$$

より

$$\lambda T = \ln 2 = 0.693 \quad (1.19)$$

となる。したがって、

$$N(t) = N_0 e^{-\frac{\ln 2}{T} t} = N_0 \left(\frac{1}{2}\right)^{\frac{t}{T}} \quad (1.20)$$

主な RI の半減期を表 1.7 にまとめておこう。詳しいデータは、付録 C にあたる。

表 1.7: 半減期

半減期	RI	
4.468×10^9 y	$^{238}_{92}\text{U}$	ウラン
1.227×10^9 y	$^{40}_{19}\text{K}$	カリウム
7.038×10^8 y	$^{235}_{92}\text{U}$	ウラン
2.411×10^4 y	$^{239}_{94}\text{Pu}$	プルトニウム
5,730 y	$^{14}_6\text{C}$	炭素
1,600 y	$^{226}_{88}\text{Ra}$	ラジウム
100.1 y	$^{63}_{28}\text{Ni}$	ニッケル
30.07 y	$^{137}_{55}\text{Cs}$	セシウム
28.78 y	$^{90}_{38}\text{Sr}$	ストロンチウム
12.33 y	^3_1H	トリチウム
5.2714 y	$^{60}_{27}\text{Co}$	コバルト
73.831 d	$^{192}_{77}\text{Ir}$	イリジウム
14.262 d	$^{32}_{15}\text{P}$	リン
8.02070 d	$^{131}_{53}\text{I}$	ヨウ素
3.8235 d	$^{222}_{86}\text{Rn}$	ラドン
2.69517 d	$^{198}_{79}\text{Au}$	金
14.9590 h	$^{24}_{11}\text{Na}$	ナトリウム
12.700 h	$^{64}_{29}\text{Cu}$	銅
12.360 h	$^{42}_{19}\text{K}$	カリウム
6.01 h	$^{99\text{m}}_{43}\text{Tc}$	テクネチウム
2.5785 h	$^{56}_{25}\text{Mn}$	マンガン

演習問題

1. 放射性原子核の壊変は、確率的な現象である。確率的現象のモデルとしてサイコロの目の出方を考える。初めに N_0 個あったサイコロをふって、1の目が出たものを取り除く。1の目は $\lambda = \frac{1}{6}$ の確率で出るとする。

(a) k 回ふった後の、残りのサイコロの個数 $N(k)$ を求めなさい。

(b) 初めのサイコロの個数の半分 ($\frac{N_0}{2}$) になるまでの回数 $k_{1/2} = T$ は、何回か。

2. $N_0 = 120$ として理論値を計算し下の表を完成させなさい。小数第3位を四捨五入しなさい。

回数 k	残りの個数 $N(k)$	放射能 $A = \lambda N(k)$
0	120	
1		
2		
3		
4		
5		
6		
7		
8		
9		
10		
11		
12		
13		
14		
15		
16		
17		
18		

3. 放射能をミリグラフと片対数グラフに描きなさい。2つのグラフから半減期を読み取り、グラフの中に書き込みなさい。

4. 30回目に残っているサイコロの数 $N(30)$ はいくつか。

5. 次の問いに答えなさい。

(a) ^{131}I は半減期は 8 日で β 壊変する。80 日経過したとき、最初の量との比はいくらか。

(b) 当初 10.0 GBq あった ^{60}Co は、半減期 $T = 5.2$ 年経つと半分の 5.0 GBq となる。では、購入後 2.6 年経ったときは、およそ何 GBq となるか。

6. 次の問いに答えなさい。

(a) リン ^{32}P の半減期は約 2 週間である。元の量の 1000 分の 1 になるのは何ヶ月後か。

(b) リン ^{30}P の半減期は 2.55 分である。このリンが最初の量の 8 分の 1 になるのは何分後か。

(c) ある放射性物質の核子が 1280 個あった。6 時間後には 320 個に減少していた。この放射性物質の半減期はいくらか。

主任者試験問題

1. 次の放射性同位体の組合せのうち、半減期が短いものから長いものの順に並んでいるものはどれか。[2016年化学問2]
- (a) $^{15}\text{O} < ^{13}\text{N} < ^{11}\text{C} < ^{68}\text{Ge} < ^{18}\text{F}$
 (b) $^{11}\text{C} < ^{15}\text{O} < ^{18}\text{F} < ^{13}\text{N} < ^{68}\text{Ge}$
 (c) $^{15}\text{O} < ^{11}\text{C} < ^{68}\text{Ge} < ^{18}\text{F} < ^{13}\text{N}$
 (d) $^{11}\text{C} < ^{18}\text{F} < ^{13}\text{N} < ^{15}\text{O} < ^{68}\text{Ge}$
 (e) $^{68}\text{Ge} < ^{13}\text{N} < ^{18}\text{F} < ^{15}\text{O} < ^{11}\text{C}$
2. 1年間で放射能が1,000分の1に減衰する核種がある。4,000分の1に減衰するのは、およそ何年後か。[2016年化学問5]
- (a) 1.1
 (b) 1.2
 (c) 1.5
 (d) 2.0
 (e) 3.0
3. 放射能で等量の ^{137}Cs （半減期30年）と ^{134}Cs （半減期2年）がある。15年後の ^{137}Cs と ^{134}Cs の放射能比として最も近い値は、次のうちどれか。[2015年化学問2]
- (a) 64:1
 (b) 91:1
 (c) 128:1
 (d) 181:1
 (e) 256:1
4. ある核種の放射能が、4時間後に30,000 dpm、6時間後に7,500 dpmであった。初めにあった放射能[Bq]として、最も近い値は次のうちどれか。[2014年化学問4]
- (a) 8.0×10^3
 (b) 1.6×10^4
 (c) 4.8×10^4
 (d) 8.0×10^4
 (e) 4.8×10^5
5. ある放射性同位元素3.7 GBqは5年後に37 MBqに減衰した。この37 MBqが3.7 kBqに減衰するのは、およそ何年後か。最も近い値は、次のうちどれか。[2013年化学問1]
- (a) 5
 (b) 10
 (c) 20
 (d) 40
 (e) 50
6. 次の放射性核種のうち、半減期が3倍以上異なるものはどれか。[2013年化学問12]
- (a) ^{11}C と ^{13}N

- (b) ^{99}Mo と ^{99m}Tc
 (c) ^{60}Co と ^{137}Cs
 (d) ^{125}I と ^{131}I
7. ^3H , ^{14}C , ^{32}P , ^{35}S , ^{45}Ca について半減期が短い順に正しく並んでいるものは、次のうちどれか。 [2013 年化学問 14]
- (a) $^{35}\text{S} < ^{32}\text{P} < ^{14}\text{C} < ^3\text{H} < ^{45}\text{Ca}$
 (b) $^{35}\text{S} < ^{32}\text{P} < ^{45}\text{Ca} < ^3\text{H} < ^{14}\text{C}$
 (c) $^{32}\text{P} < ^{35}\text{S} < ^{14}\text{C} < ^{45}\text{Ca} < ^3\text{H}$
 (d) $^{45}\text{Ca} < ^{32}\text{P} < ^{35}\text{S} < ^3\text{H} < ^{14}\text{C}$
 (e) $^{32}\text{P} < ^{35}\text{S} < ^{45}\text{Ca} < ^3\text{H} < ^{14}\text{C}$
8. 放射能で等量の ^{134}Cs (半減期 2.0 年) と ^{137}Cs (半減期 30 年) がある。10 年後の ^{134}Cs と ^{137}Cs の原子数比として最も近い値は、次のうちどれか。ただし、 $\sqrt[3]{2} = 1.26$ とする。 [2012 年化学問 2]
- (a) 0.0013:1
 (b) 0.0026:1
 (c) 0.039:1
 (d) 0.067:1
 (e) 0.13:1
9. ある核種の放射能が、5 時間後に 12,000 dpm, 6 時間後に 3,000 dpm であった。はじめにあった放射能 [Bq] として、最も近い値はいくらか。 [2011 年化学問 1]
- (a) 1×10^5
 (b) 2×10^5
 (c) 1×10^7
 (d) 2×10^8
 (e) 7×10^8
10. 放射能が等しい ^{54}Mn (半減期 312 日) と ^{60}Co (半減期 5.27 年) があるとき、5 年後の放射能の比 ($^{54}\text{Mn}/^{60}\text{Co}$) に最も近い値は、次のうちどれか。 [2011 年化学問 2]
- (a) 0.001
 (b) 0.005
 (c) 0.03
 (d) 0.08
 (e) 0.2

1.7 放射能と質量

放射能の式 (1.16) 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 $m[\text{g}]$ だったとする。

$$\begin{array}{ccccccc}
 & & \text{質量数} & & \text{アボガドロ数} & & \\
 1 \text{ mol} & \cdots & A[\text{g}] & \cdots & N_A & & \\
 & & m[\text{g}] & \cdots & N & &
 \end{array}$$

この比例式を使うと放射能の式 (1.16) は、

$$(\text{放射能}) = -\frac{dN}{dt} = \frac{0.693}{T} N = \frac{0.693}{T} \frac{mN_A}{A} \quad (1.21)$$

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。

演習問題

- ^{226}Ra の半減期は 1600 年である。 ^{226}Ra の 1.0 g の放射能は何 Bq か。

主任者試験問題

1. 無担体の ^{54}Mn (半減期: 312 d), ^{60}Co (半減期: 5.27 y), ^{131}I (半減期: 8.02 d) があるとき, 比放射能 [Bq/g] が大きいものから順に正しく並んでいるものは, 次のうちどれか. [2017 年化学問 2]
- (a) $^{131}\text{I} > ^{54}\text{Mn} > ^{60}\text{Co}$
 (b) $^{54}\text{Mn} > ^{131}\text{I} > ^{60}\text{Co}$
 (c) $^{131}\text{I} > ^{60}\text{Co} > ^{54}\text{Mn}$
 (d) $^{54}\text{Mn} > ^{60}\text{Co} > ^{131}\text{I}$
 (e) $^{60}\text{Co} > ^{54}\text{Mn} > ^{131}\text{I}$
2. ^{232}Th 900 g の放射能 [MBq] として最も近い値は, 次のうちどれか. ただし, ^{232}Th の半減期を 1.4×10^{10} 年 (4.4×10^{17} 秒) とする. [2016 年化学問 6]
- (a) 0.4
 (b) 1.2
 (c) 2.4
 (d) 3.7
 (e) 18
3. 放射性核種のみからなる物質 A と B がある. それぞれの単位質量当たりの放射能 S_A 及び S_B , それぞれの核種の質量 (原子質量単位) を M_A 及び M_B , 半減期を T_A 及び T_B とする. これらの間に $S_B = 2S_A$, $T_B = 5T_A$ の関係があるとき, M_A/M_B の値として正しいものは次のうちどれか. [2015 年物理問 9]
- (a) 0.1
 (b) 0.4
 (c) 1
 (d) 2.5
 (e) 10
4. 無担体の ^3H , ^{14}C , ^{32}P , ^{35}S , ^{45}Ca について 1 モル当たりの放射能 [Bq/mol] の低い順に正しく並んでいるのはどれか. [2015 年化学問 6]
- (a) $^{35}\text{S} < ^{32}\text{P} < ^{45}\text{Ca} < ^{14}\text{C} < ^3\text{H}$
 (b) $^3\text{H} < ^{35}\text{S} < ^{14}\text{C} < ^{45}\text{Ca} < ^{32}\text{P}$
 (c) $^{14}\text{C} < ^{35}\text{S} < ^{45}\text{Ca} < ^3\text{H} < ^{32}\text{P}$
 (d) $^{14}\text{C} < ^3\text{H} < ^{35}\text{S} < ^{45}\text{Ca} < ^{32}\text{P}$
 (e) $^{14}\text{C} < ^3\text{H} < ^{45}\text{Ca} < ^{35}\text{S} < ^{32}\text{P}$
5. 1.0 Bq の ^{90}Sr (半減期 28.8 年: 9.1×10^8 秒) を含むストロンチウム水溶液 100 mL (ストロンチウム濃度 1.0 mg/L) がある. 全ストロンチウムに対する ^{90}Sr の原子数比として, 最も近い値は次のうちどれか. ただし, ストロンチウムの原子量は 87.6 とする. [2015 年化学問 7]
- (a) 1.1×10^{-11}
 (b) 2.1×10^{-11}
 (c) 2.0×10^{-10}
 (d) 1.1×10^{-9}
 (e) 1.9×10^{-9}

6. 放射能の等しい ^{55}Fe (半減期 1,000 日) と, ^{106}Ru (半減期 374 日) があるとき, それらの質量の比 ($^{55}\text{Fe}/^{106}\text{Ru}$) に最も近いものは, 次のうちどれか. [2014 年化学問 6]
- (a) 0.37
(b) 0.72
(c) 1.4
(d) 2.7
(e) 5.2
7. 70 MBq の ^{201}Tl (半減期 73 時間 = 2.6×10^5 秒) の質量 [g] に最も近い値は, 次のうちどれか. [2013 年化学問 3]
- (a) 4.4×10^{-9}
(b) 8.7×10^{-9}
(c) 1.3×10^{-8}
(d) 2.7×10^{-8}
(e) 5.2×10^{-8}
8. 半減期が 12.5 億年 (3.9×10^{16} 秒) の放射性同位体 3.9 mg の放射能が 1,040 Bq であった. この同位体のモル質量 [g/mol] に最も近い値はどれか. [2012 年化学問 3]
- (a) 40
(b) 60
(c) 80
(d) 120
(e) 140
9. 次の放射性核種を, 比放射能 [Bq/g] の大きい順に並べたものはどれか. ただしそれぞれの核種の半減期を ^{14}C は 5,700 年, ^{60}Co は 5.3 年, ^{32}P は 0.04 年とする. [2012 年化学問 4]
- (a) $^{60}\text{Co} < ^{32}\text{P} < ^{14}\text{C}$
(b) $^{60}\text{Co} < ^{14}\text{C} < ^{32}\text{P}$
(c) $^{14}\text{C} < ^{60}\text{Co} < ^{32}\text{P}$
(d) $^{14}\text{C} < ^{32}\text{P} < ^{60}\text{Co}$
(e) $^{32}\text{P} < ^{14}\text{C} < ^{60}\text{Co}$
10. 1.0 MBq の ^{59}Fe (半減期 3.8×10^6 秒) を含む水溶液 10 mL がある. この水溶液中の非放射性鉄のモル濃度が 0.1 mol/L のとき, ^{59}Fe の全鉄に対する原子数比 ($^{59}\text{Fe}/\text{Fe}$) として最も近い値は, 次のうちどれか. [2011 年化学問 5]
- (a) 1×10^{-8}
(b) 4×10^{-8}
(c) 1×10^{-7}
(d) 4×10^{-7}
(e) 1×10^{-6}
11. 1 TBq の ^7Be (半減期 4.6×10^6 秒) の質量 [g] に最も近い値は, 次のうちどれか. [2011 年化学問 6]
- (a) 6.6×10^{-5}
(b) 7.7×10^{-5}

(c) 1.1×10^{-4}

(d) 3.7×10^{-3}

(e) 6.0×10^{-1}

1.8 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。その核種がさらに放射性である場合、連続して放射線がでることとなる。

	親核	→	娘核	→	孫核
個数	N_1		N_2		
壊変定数	λ_1		λ_2		

§1.8.1 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

$$\frac{dN_1}{dt} = -\lambda_1 N_1 \quad (1.22)$$

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、

$$\frac{dN_2}{dt} = +\lambda_1 N_1 - \lambda_2 N_2 \quad (1.23)$$

となる。親核と娘核の時間変化は、(1.22)、(1.23) の連立微分方程式を解くことになる。

まず、(1.22) を解く。これは前回と同じで、初期条件 $t = 0$ のとき $N_1 = N_0$ とすると

$$N_1 = N_0 e^{-\lambda_1 t} \quad (1.24)$$

となる。これを (1.23) に代入した微分方程式は

$$\frac{dN_2}{dt} + \lambda_2 N_2 = \lambda_1 N_0 e^{-\lambda_1 t} \quad (1.25)$$

となる。これを解くのに、まず (1.25) の左辺をゼロとした同次方程式

$$\frac{dN_2}{dt} + \lambda_2 N_2 = 0 \quad (1.26)$$

を解く。これは (1.22) と同じ形なので、積分定数を C として

$$N_2 = C e^{-\lambda_2 t} \quad (1.27)$$

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、(1.27) を (1.25) に代入する。

$$\frac{dC}{dt} e^{-\lambda_2 t} = \lambda_1 N_0 e^{-\lambda_1 t} \quad (1.28)$$

を変形して、

$$\frac{dC}{dt} = \lambda_1 N_0 e^{(\lambda_2 - \lambda_1)t} \quad (1.29)$$

となる。これを解く。積分定数を C' として

$$C = \frac{\lambda_1 N_0}{\lambda_2 - \lambda_1} e^{(\lambda_2 - \lambda_1)t} + C' \quad (1.30)$$

これを (1.27) に戻すと

$$N_2 = \frac{\lambda_1 N_0}{\lambda_2 - \lambda_1} e^{-\lambda_1 t} + C' e^{-\lambda_2 t} \quad (1.31)$$

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

$$C' = -\frac{\lambda_1 N_0}{\lambda_2 - \lambda_1} \quad (1.32)$$

これを (1.31) に戻して

$$N_2 = \frac{\lambda_1 N_0}{\lambda_2 - \lambda_1} (e^{-\lambda_1 t} - e^{-\lambda_2 t}) \quad (1.33)$$

が最終の解となる。

§1.8.2 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,

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

のとき, (1.33) の括弧内第 2 式は無視される. したがって, (1.24) より

$$N_2 = \frac{\lambda_1 N_0}{\lambda_2 - \lambda_1} e^{-\lambda_1 t} = \frac{\lambda_1}{\lambda_2 - \lambda_1} N_1 \quad (1.34)$$

となる. これを変形すると,

$$\frac{N_2}{N_1} = \frac{\lambda_1}{\lambda_2 - \lambda_1} = \frac{T_2}{T_1 - T_2} < 1 \quad (1.35)$$

これから, 放射能の比は

$$\frac{A_2}{A_1} = \frac{\lambda_2 N_2}{\lambda_1 N_1} = 1 + \frac{N_2}{N_1} > 1 \quad (1.36)$$

となる. また, (1.35) を使って,

$$\frac{A_2}{A_1} = \frac{\lambda_2}{\lambda_2 - \lambda_1} = \frac{T_1}{T_1 - T_2} > 1 \quad (1.37)$$

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.

§1.8.3 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

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

のとき, (1.34) の分母 λ_1 は無視される. したがって,

$$N_2 = \frac{\lambda_1}{\lambda_2} N_1 \quad (1.38)$$

となる. これを変形すると,

$$\frac{N_2}{N_1} = \frac{\lambda_1}{\lambda_2} = \frac{T_2}{T_1} \quad (1.39)$$

これから, 放射能の比は

$$\frac{A_2}{A_1} = \frac{\lambda_2 N_2}{\lambda_1 N_1} = 1 \quad (1.40)$$

となり, 放射能は等しく ($A_1 = A_2$) なる.

演習問題

1. 過渡平衡

No.3 で考えたサイコロをもう一度考える. 初め N_0 個あったサイコロをふって, 1 の目が出たサイコロを除いた残りの個数を N_1 とする. 次に除いたサイコロをふり, 1, 2, 3 の目のでたサイコロを除いた残りの個数を N_2 とする. $k = 0, 1, 2, 3, \dots$ として,

$$\begin{cases} N_1(k+1) = N_1(k) - \lambda_1 N_1(k) \\ N_2(k+1) = N_2(k) - \lambda_2 N_2(k) + \lambda_1 N_1(k) \end{cases} \quad (1.41)$$

と書くことができる. ここで, $\lambda_1 = \frac{1}{6}$, $\lambda_2 = \frac{3}{6}$ は, それぞれ 1 個のサイコロをふったとき指定の目の出る確率である. この確率と残りのサイコロの数をかけたものを放射能 $A_1 = \lambda_1 N_1$, $A_2 = \lambda_2 N_2$ という.

$N_0 = 120$ として理論値を計算し下の表を完成させなさい. 小数第 3 位を四捨五入しなさい. N_1 と A_1 は, No.3 と同じである.

回数	N_1	N_2	$A_1 = \lambda_1 N_1$	$A_2 = \lambda_2 N_2$	$A_1 + A_2$
0	120	0	20		
1	100	20.00	16.67		
2	83.33	26.67	13.89		
3	69.44	27.22	11.57		
4	57.87	25.19	9.65		
5	48.23	22.24	8.04		
6	40.19	19.16	6.70		
7	33.49	16.28	5.58		
8	27.91	13.72	4.65		
9	23.26	11.51	3.88		
10	19.38	9.63	3.23		
11	16.15	8.05	2.69		
12	13.46	6.71	2.24		
13	11.22	5.60	1.87		
14	9.35	4.67	1.56		
15	7.79	3.89	1.30		
16	6.49	3.24	1.08		
17	5.41	2.70	0.90		
18	4.51	2.25	0.75		

2. 放射能 A_1 , A_2 , $A_1 + A_2$ を片対数グラフに描きなさい。

3. 永続平衡

前と同じモデル実験で, $\lambda_1 = \frac{1}{1000}$ とすると, 放射能は以下の表のようになる。

回数	N_1	N_2	$A_1 = \lambda_1 N_1$	$A_2 = \lambda_2 N_2$	$A_1 + A_2$
0	120	0	0.12	0.00	0.12
1	119.88	0.12	0.12	0.06	0.18
2	119.76	0.18	0.12	0.09	0.21
3	119.64	0.21	0.12	0.10	0.22
4	119.52	0.22	0.12	0.11	0.23
5	119.40	0.23	0.12	0.12	0.24
6	119.28	0.24	0.12	0.12	0.24
7	119.16	0.24	0.12	0.12	0.24
8	119.04	0.24	0.12	0.12	0.24
9	118.92	0.24	0.12	0.12	0.24
10	118.81	0.24	0.12	0.12	0.24
11	118.69	0.24	0.12	0.12	0.24
12	118.57	0.24	0.12	0.12	0.24
13	118.45	0.24	0.12	0.12	0.24
14	118.33	0.24	0.12	0.12	0.24
15	118.21	0.24	0.12	0.12	0.24
16	118.09	0.24	0.12	0.12	0.24
17	117.98	0.24	0.12	0.12	0.24
18	117.86	0.24	0.12	0.12	0.24

4. 放射能 A_1 , A_2 , $A_1 + A_2$ を片対数グラフに描きなさい。

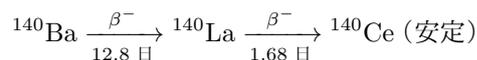
主任者試験問題

1. 10 mg の ^{226}Ra (半減期 1,600 年) を密閉容器に 40 日間保管した時, 容器内に存在する ^{222}Rn (半減期 3.8 日) の原子数として最も近い値は, 次のうちどれか. [2017 年化学問 4]
- (a) 7.3×10^7
 (b) 2.0×10^9
 (c) 1.8×10^{11}
 (d) 7.3×10^{12}
 (e) 1.8×10^{14}

2. 逐次壊変する親核種 X (壊変定数 λ_X) とその娘核種 Y (壊変定数 λ_Y) に関する次の記述のうち, 正しいものはどれか. [2017 年化学問 5]
- (a) λ_Y が λ_X に比べて小さいとき, 過渡平衡が成り立つ.
 (b) 過渡平衡では, 親核種の原子数は娘核種の半減期で減少する.
 (c) 永続平衡では, 親核種と娘核種の放射能は等しくなる.
 (d) λ_X が λ_Y に比べて無視できるほど小さいとき, 永続平衡が成り立つ.

3. 半減期が 1 時間の核種 A から半減期 10 時間の核種 B が生成する. 1 GBq の核種 A のみがあったとき, 10 時間後の核種 B の放射能 [MBq] として最も近い値は, 次のうちどれか. [2016 年化学問 3]
- (a) 25
 (b) 39
 (c) 56
 (d) 78
 (e) 111

4. ^{140}Ba は以下のように 2 回 β^- 壊変して ^{140}Ce になる. 分離精製した ^{140}Ba 試料に関する次の記述のうち, 正しいものはどれか.



[2016 年化学問 8]

- (a) ^{140}La の放射能が最大となる前に, ^{140}La と ^{140}Ba の放射能の和に極大が表れる.
 (b) ^{140}La の放射能が最大となると, ^{140}La と ^{140}Ba の放射能の和は, その時点における ^{140}Ba の放射能の 2 倍に等しい.
 (c) ^{140}La の放射能が最大となった後, ^{140}La の放射能と ^{140}Ba の放射能の比は, 次第に一定になる.
 (d) ^{140}La の放射能が最大となった後, ^{140}La の原子数と ^{140}Ba の原子数の比は, 次第に一定になる.
5. 次の逐次壊変にある核種の組合せのうち, 放射平衡となり得るのはどれか. なお, 括弧内に半減期を示す. [2013 年化学問 5]

親核種	娘核種
(a) ^{57}Ni (1.5 日)	^{57}Co (272 日)
(b) ^{68}Ge (271 日)	^{68}Ga (68 分)
(c) ^{87}Y (79.8 時間)	^{87m}Sr (2.8 時間)
(d) ^{140}Ba (12.8 日)	^{140}La (1.7 日)

6. 精製した ^{140}Ba から生成した ^{140}La の放射能が, 精製時より 25.6 日後に 5.0 kBq であった. 精製時における ^{140}Ba の放射能 [kBq] として最も近いものはどれか. ただし, ^{140}Ba の半減期を 12.8 日, ^{140}La の半減期を 1.7 日とする. [2012 年化学問 8]

- (a) 2
- (b) 7
- (c) 12
- (d) 17
- (e) 22

7. ^{238}U を 234 g 含む試料中の ^{222}Rn の放射能 [Bq] として最も近い値は、次のうちどれか。ただし、この試料中のウラン系列核種は永続平衡にあり、 ^{238}U 1 g の放射能は $1.2 \times 10^4 \text{Bq}$ である。[2011 年化学問 8]

- (a) 1.2×10^4
- (b) 2.8×10^5
- (c) 1.2×10^6
- (d) 2.8×10^6
- (e) 1.2×10^7

8. 次の逐次壊変において放射平衡となる得るのはどれか。[2011 年化学問 9]

- (a) ^{42}Ar (32.9 年) → ^{42}K (12.4 時間) →
- (b) ^{51}Mn (46.2 分) → ^{51}Cr (27.7 日) →
- (c) ^{132}Te (3.20 日) → ^{132}I (2.30 時間) →
- (d) ^{140}Ba (12.8 日) → ^{140}La (1.68 日) →

1.9 放射線と物質との相互作用

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. 生物への影響（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
2. 物質透過力

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 $+2e$ と大きいので、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。

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。

1. 光電効果
2. コンプトン効果
3. 電子対生成

今までの話を表 1.8 にまとめておこう。

表 1.8: 放射線の特徴

	α 線	β^- 線	γ 線
本体	${}^4_2\text{He}$	e^- (電子)	光子
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

1.10 荷電粒子と物質との相互作用

§1.10.1 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

$$S = -\frac{dE}{dx} \quad (1.42)$$

と定義する。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。

$$\text{LET} \sim S_{col} \quad (1.43)$$

であり、放射線生物学で重要な量となる。

§1.10.2 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。

$$S \propto \rho \frac{z^2 Z}{v^2 A} \propto \frac{Mz^2}{E} \quad (1.44)$$

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。

$$S_m = \frac{S}{\rho} \quad (1.45)$$

これは物質に依存しない量となる。

§1.10.3 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 $R[\text{cm}]$ という。

$$R \propto \int \frac{dE}{S} \propto \frac{E^2}{Mz^2} \propto \frac{Mv^2}{z^2} \quad (1.46)$$

飛程 R と物質の密度 $\rho[\text{mg}/\text{cm}^3]$ の積を質量飛程 $[\text{mg}/\text{cm}^2]$ という。 A を原子量とすると、次のブラッグ・クレマン則が成り立つ。

$$R \times \frac{\rho}{\sqrt{A}} \sim \text{一定} \quad (1.47)$$

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

$$R = 0.542E^{-0.133} \quad 0.8 \text{ MeV} < E \quad (1.48)$$

$$R = 0.407E^{1.38} \quad 0.15 \text{ MeV} < E < 0.8 \text{ MeV} \quad (1.49)$$

α 線の空気中での飛程 $R[\text{cm}]$ は以下のように与えられている。

$$R = 0.318E^{1.5} \quad 4 \text{ MeV} < E < 7 \text{ MeV} \quad (1.50)$$

§1.10.4 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

$$W = \frac{E}{N} \quad (1.51)$$

で与えられる.

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

主任者試験問題

1. 5 MeV の α 線が透過するものは、次のうちどれか。 [2017 年物理問 12]
 - (a) 4.8 cm の空気層 (0 °C, 1 気圧)
 - (b) 12 mg/cm² のアルミニウム箔
 - (c) 12 mg/cm² の銅箔
 - (d) 12 mg/cm² の金箔
2. 40 MeV α 粒子及び 10 MeV 陽子に対する水中での衝突阻止能をそれぞれ S_α 及び S_p とするとき、その比 (S_α/S_p) として正しいものはどれか。 [2017 年物理問 15]
 - (a) 0.2
 - (b) 0.5
 - (c) 2
 - (d) 4
 - (e) 8
3. 阻止能に関する次の記述のうち、正しいものはどれか。 [2016 年物理問 13]
 - (a) 全阻止能に対する放射阻止能の割合は入射荷電粒子の運動エネルギーによらない。
 - (b) 放射阻止能は荷電粒子が入射する物質の原子番号によらない。
 - (c) 衝突阻止能を運動エネルギーに関して積分すると飛程となる。
 - (d) 衝突阻止能は入射荷電粒子の電荷の 2 乗に比例して大きくなる。
4. 次の線エネルギー付与 (LET) に関する次の記述のうち、正しいものはどれか。 [2016 年物理問 16]
 - (a) 全ての物質に対して適用される。
 - (b) 荷電粒子にのみ適用される。
 - (c) 線質係数は放射線の生体軟組織中における LET の関数である。
 - (d) 同じ種類の放射線の場合、エネルギーの小さい方が LET は小さくなる。
5. 次の記述のうち、正しいものはどれか。 [2015 年物理問 13]
 - (a) W 値は気体の密度の増加とともに大きくなる。
 - (b) W 値はイオン化ポテンシャルと等しい。
 - (c) W 値は荷電粒子の電荷の平方根に比例して増加する。
 - (d) ヘリウムの W 値はアルゴンの W 値より大きい。
 - (e) 電子に対する空気の W 値は約 34 eV である。
6. 水中における飛程が 35 μm である α 線の空気中での飛程 [cm] に最も近い値は、次のうちどれか。ただし、空気の密度は 0.0013 g/cm³ とする。 [2015 年物理問 14]
 - (a) 0.27
 - (b) 0.51
 - (c) 1.2
 - (d) 2.7
 - (e) 5.1

7. 5.3 MeV の α 粒子が 2 気圧の空气中で停止するまでに生成するイオン対数として、正しい値は次のうちどれか。ただし、標準状態での空気の密度を 0.0013 g/cm^3 とする。[2015 年物理問 15]
- (a) 3.0×10^4
 (b) 7.5×10^4
 (c) 1.5×10^5
 (d) 3.0×10^5
 (e) 7.5×10^5
8. 電子線に関する次の記述のうち、正しいものはどれか。[2014 年物理問 11]
- (a) 線衝突阻止能は入射した物質の原子番号に比例して大きくなる。
 (b) 強度は、透過する物質の厚さに関して指数関数的に減弱する。
 (c) 同じエネルギーの陽子線に比べて制動放射によるエネルギー損失が大きい。
 (d) 同じエネルギーの陽子線に比べて後方散乱の割合が大きい。
9. α 粒子と重陽子が同じ速度の場合に、 α 粒子の阻止能 (S_α) と重陽子の阻止能 (S_d) の比 (S_α/S_d) として最も近い値は、次のうちどれか。[2014 年物理問 12]
- (a) 1
 (b) 2
 (c) 4
 (d) 8
 (e) 16
10. 原子番号 Z 、質量 M の荷電粒子 (速度 v) が物質中で停止する際の粒子飛程 R と、 Z 及び M の関係として正しいものはどれか。[2013 年物理問 12]
- (a) $R \propto Z^2 \cdot M \cdot v^4$
 (b) $R \propto Z^{-2} \cdot M \cdot v^4$
 (c) $R \propto Z \cdot M \cdot v^4$
 (d) $R \propto Z^{-1} \cdot M \cdot v^4$
 (e) $R \propto Z \cdot M^{-1} \cdot v^4$
11. 5.5 MeV α 線のシリコン ($A=28$) における飛程を $R_1 [\text{mg}\cdot\text{cm}^{-2}]$ 、金 ($A=197$) における飛程を $R_2 [\text{mg}\cdot\text{cm}^{-2}]$ としたとき、 R_2/R_1 の値として最も近いものは次のうちどれか。[2011 年物理問 11]
- (a) 0.8
 (b) 1.0
 (c) 1.5
 (d) 2.0
 (e) 2.7
12. 1.0 MeV の陽子の空气中における飛程 [cm] に最も近い値は、次のうちどれか。ただし、エネルギー $E[\text{MeV}]$ の α 線の空气中における飛程 $R[\text{cm}]$ は $R = 0.32E^{3/2}$ で与えられるとする。[2011 年物理問 12]
- (a) 0.16
 (b) 0.64
 (c) 2.6

(d) 4.0

(e) 10

13. 次の3種類の荷電粒子について、空気中の飛程の大きい順に正しく並んでいるものはどれか。 [2011年物理問13]

(a) 1 MeV 陽子 > 2 MeV 重陽子 > 3 MeV α 粒子

(b) 1 MeV 陽子 > 3 MeV α 粒子 > 2 MeV 重陽子

(c) 2 MeV 重陽子 > 1 MeV 陽子 > 3 MeV α 粒子

(d) 2 MeV 重陽子 > 3 MeV α 粒子 > 1 MeV 陽子

(e) 3 MeV α 粒子 > 1 MeV 陽子 > 2 MeV 重陽子

14. ある物質中に核子当たり 2.5 MeV のエネルギーを持つ ${}^4\text{He}^{2+}$ と ${}^1\text{H}^+$ が入射するとき、その物質の ${}^4\text{He}^{2+}$ に対する阻止能 S_1 と ${}^1\text{H}^+$ に対する阻止能 S_2 の比 (S_1/S_2) として最も近い値はどれか。 [2011年物理問14]

(a) 0.5

(b) 1

(c) 2

(d) 4

(e) 16

1.11 γ 線と物質との相互作用

§1.11.1 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

エネルギー $h\nu$ の光子が、軌道電子にすべてのエネルギーを与え、自身は消滅し、軌道電子は原子の束縛から離れて自由電子となる。これを光電子という。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。

コンプトン効果

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。散乱光子のエネルギーを $E' = h\nu'$ とすると、 $\nu' < \nu$ または $\lambda' > \lambda$ であり、散乱光子の波長は長くなる。エネルギーと運動量の保存則より、散乱角を ϕ とすると

$$\Delta\lambda = \lambda' - \lambda = \frac{h}{m_e c} (1 - \cos\phi) \quad (1.52)$$

となる。ここで、 m_e は電子の質量であり、 c は光速である。また、エネルギーの変化は

$$E' = \frac{E}{1 + \frac{E}{m_e c^2} (1 - \cos\phi)} \quad (1.53)$$

で与えられる。この過程は、0.5~5 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。

電子対生成

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。

§1.11.2 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 $\mu[\text{cm}^{-1}]$ を使って

$$-\frac{dI}{dx} = \mu I \quad (1.54)$$

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、

$$I = I_0 e^{-\mu x} \quad (1.55)$$

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。

$$\mu X = \ln 2 = 0.693 \quad (1.56)$$

の関係がある。

表 1.9: 光子の半価層と 1/10 価層

エネルギー MeV	鉛		水	
	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

§1.11.3 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。

$$\mu_m = \frac{\mu}{\rho} \quad (1.57)$$

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

表 1.10: 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

§1.11.4 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、

$$X = \frac{dQ}{dm} [\text{C/kg}] \quad (1.58)$$

を照射線量という。放射線ででてくる単位は表 A.1 にまとめた。

主任者試験問題

1. 光子と物質との相互作用に関する次の記述のうち、正しいものはどれか。 [2017年物理問 18]
 - (a) 0.2 MeV の光子と水との相互作用は主に光電効果である。
 - (b) 1.0 MeV の光子と鉛との相互作用は主に光電効果である。
 - (c) 2.0 MeV の光子と水との相互作用は主にコンプトン効果である。
 - (d) 10 MeV の光子と鉛との相互作用は主に電子対生成である。
2. 次の記述のうち、正しいものはどれか。 [2016年物理問 18]
 - (a) K 吸収端のエネルギーは、金より鉛の方が高い。
 - (b) 100 keV の光子と空気との相互作用において、コンプトン散乱の断面積は、レイリー散乱の断面積の方が大きい。
 - (c) 1 MeV の光子に対するコンプトン散乱の断面積は、鉄よりアルミニウムの方が大きい。
 - (d) 5 MeV の光子と水との相互作用において、電子対生成の断面積よりコンプトン散乱の断面積の方が大きい。
3. コンプトン散乱に関する次の記述のうち、正しいものはどれか。 [2015年物理問 18]
 - (a) 断面積は原子番号にほぼ比例する。
 - (b) 反跳電子のエネルギーは入射光子のエネルギーに等しくなることがある。
 - (c) 散乱光子のエネルギーは入射光子のエネルギーに等しくなることがある。
 - (d) 散乱光子と入射光子の波長の差は、入射光子の波長に逆比例する。
 - (e) 散乱光子と入射光子の波長の差は、散乱角によって定まる。
4. 次の記述のうち、正しいものはどれか。 [2015年物理問 19]
 - (a) 光電効果は、光子と束縛電子との相互作用により起こる。
 - (b) 光電効果は、光子と軌道電子との弾性衝突である。
 - (c) 光電効果に伴って、オージェ電子が放出されることがある。
 - (d) 光電効果の原子当たりの断面積は、原子番号の 2 乗に比例する。
 - (e) 光電効果の原子当たりの断面積は、光子エネルギーの増加とともに増加する。
5. 単位面積あたりの質量（面密度）の単位で与えられた半価層と等価なものは次のうちどれか。ただし、質量減弱係数を μ_m とする。 [2015年物理問 20]
 - (a) $0.368\mu_m$
 - (b) $\frac{0.368}{\mu_m}$
 - (c) $0.693\mu_m$
 - (d) $\frac{0.693}{\mu_m}$
 - (e) $2.718\mu_m$
6. コンプトン散乱に関連する次の記述のうち、正しいものはどれか。 [2014年物理問 15]
 - (a) 入射光子の波長と 90 度方向に散乱された光子の波長との差は、入射光子エネルギーや散乱物質によらず一定である。
 - (b) 物質の単位体積あたりに起こる確率は物質の電子密度に比例する。
 - (c) 入射光子エネルギーが高いほど後方散乱の割合が多くなる。
 - (d) コンプトン効果は軌道電子に対しては起こらない。

7. 次の記述のうち、正しいものはどれか。[2014年物理問17]
- (a) 0.1 MeV の光子による鉛の吸収線量においては、光電効果が最も大きく寄与する。
 - (b) ^{137}Cs γ 線による鉄の吸収線量において、光電効果が最も大きく寄与する。
 - (c) ^{60}Co γ 線による水の吸収線量において、コンプトン効果が最も大きく寄与する。
 - (d) 3 MeV の光子による鉄の吸収線量においては、電子対生成が最も大きく寄与する。
8. ある遮蔽材に対して、半価層が1 cm である細い線束の γ 線の強度を1/100に減ずるのに要する遮蔽材厚さ [cm] として、最も近いものは次のうちどれか。ただし、ビルトアップ効果は考慮しないものとする。[2013年物理問17]
- (a) 2
 - (b) 5
 - (c) 7
 - (d) 9
 - (e) 10
9. γ 線と物質との相互作用に関する次の記述のうち、正しいものはどれか。[2012年物理問15]
- (a) 光電効果では γ 線のエネルギーがすべて光電子に転移する。
 - (b) コンプトン効果の断面積は物質の原子番号に比例して増加する。
 - (c) コンプトン効果では γ 線のエネルギーが高いほど前方に散乱されやすい。
 - (d) K吸収端はコンプトン効果に起因して生じる。
10. 1 MeV の γ 線がアルミニウムに当たってコンプトン効果を起こし、0.5 MeV の電子が放出された。この場合、散乱 γ 線の散乱角はいくらか。次のうちから最も近いものを選び。[2012年物理問16]
- (a) 15°
 - (b) 30°
 - (c) 45°
 - (d) 60°
 - (e) 135°
11. 電子対生成に関する次の記述のうち、誤っているものはどれか。[2012年物理問17]
- (a) 生成された電子と陽電子の運動エネルギーの和は1.022 MeV である。
 - (b) 断面積は原子番号に比例する。
 - (c) 電子対生成が起こった位置で消滅放射線が発生する。
 - (d) 4 MeV γ 線と鉄の主たる相互作用は電子対生成である。
12. 光子と物質との相互作用に関する次の記述のうち、正しいものはどれか。[2012年物理問18]
- (a) コンプトン効果によって放出される二次電子の最大エネルギーは、入射光子のエネルギーに等しい。
 - (b) コンプトン効果は光子の波動性を示す現象である。
 - (c) 光電効果は光子の粒子性を示す現象である。
 - (d) 2 MeV の制動放射線は電子対生成が可能である。
13. 2 MeV の光子がコンプトン散乱を起こした場合、散乱角 90° の光子のエネルギー E_1 と散乱角 180° の光子のエネルギー E_2 の比 (E_1/E_2) として最も近い値は、次のうちどれか。[2011年物理問16]
- (a) 1.2

- (b) 1.4
 - (c) 1.6
 - (d) 1.8
 - (e) 2.0
14. 0.1 MeV の光子がタングステンと光電効果を起こし、K 軌道電子が放出された。またこれに伴い、 K_{α} -X 線が発生した。それぞれのエネルギー [keV] を求めなさい。ただし、K 軌道と L 軌道における結合エネルギーはそれぞれ 69.5 keV 及び 10.9 keV とする。[2011 年物理問 17]
- (a) 10.9
 - (b) 30.5
 - (c) 58.6
 - (d) 69.5
 - (e) 89.1
15. 次の記述で正しいものはどれか。[2011 年物理問 18]
- (a) 0.1 MeV の光子と水の相互作用は主にコンプトン効果である。
 - (b) 1 MeV の光子と鉛の相互作用は主に光電効果である。
 - (c) 2 MeV の光子と水の相互作用は主に電子対生成である。
 - (d) 10 MeV の光子と鉛の相互作用は主に電子対生成である。

1.12 中性子と物質との相互作用, 核反応

§1.12.1 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	$E < 0.025 \text{ eV}$
熱外中性子	$0.1 \text{ eV} < E < 1 \text{ keV}$
高速中性子	$0.1 \text{ MeV} < E$

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ることができる. 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.



これを次のようにも表す.



§1.12.2 核反応

1898 年ころに発見されたヘリウム原子核 (${}^4_2\text{He}$ 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.



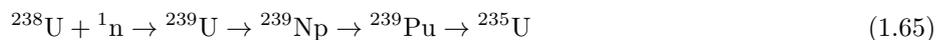
加速器を作り出したコッククロフトとワルトンは 1932 年に



の反応を起こさせた. 同じ年, チャドウィックは中性子を見出す.



もっと大きな原子核を作ろうとして, 1938 年にハーンとシュトラスマンは核分裂を見出す.



主任者試験問題

1. ^{235}U の熱中性子核分裂により生成しやすい (累積核分裂収率の大きい) 核種の組合せは次のうちどれか. [2017 年化学問 6]
 - (a) $^7\text{Be} \ ^{131}\text{I}$
 - (b) $^{75}\text{As} \ ^{137}\text{Cs}$
 - (c) $^{90}\text{Sr} \ ^{160}\text{Gd}$
 - (d) $^{99}\text{Mo} \ ^{140}\text{Ba}$
 - (e) $^{104}\text{Ru} \ ^{114}\text{Cd}$

2. 次の核反応のうち, アルカリ金属元素が生成する反応として, 正しいものはどれか. [2016 年化学問 1]
 - (a) $^{10}\text{B}(\text{n}, \alpha)$
 - (b) $^{20}\text{Ne}(\text{d}, \alpha)$
 - (c) $^{40}\text{Ar}(\alpha, \text{p})$
 - (d) $^{44}\text{Ca}(\text{p}, \text{n})$
 - (e) $^{81}\text{Br}(\alpha, 2\text{n})$

3. 熱中性子による ^{235}U の核分裂に関する次の記述のうち, 正しいものはどれか. [2016 年化学問 9]
 - (a) 分裂に際して中性子が平均して 2.5 個放出される.
 - (b) 放出される中性子の運動エネルギーは平均で 0.1 MeV 程度である.
 - (c) 分裂片の質量分布は質量数 95 付近と 140 付近にピークを持つ.
 - (d) 生成する核種は中性子不足核である.

4. 次の核反応のうち, 誤っているものはどれか. [2015 年物理問 12]
 - (a) $^3\text{He} + ^3\text{He} \rightarrow \alpha + \text{p}$
 - (b) $\text{d} + \text{d} \rightarrow ^3\text{He} + \text{n}$
 - (c) $\text{d} + ^3\text{He} \rightarrow \alpha + \text{p}$
 - (d) $\text{d} + \text{d} \rightarrow \text{p} + \text{t}$
 - (e) $\text{d} + ^6\text{Li} \rightarrow 2\alpha$

5. 熱中性子による ^{235}U の核分裂で, 累積収率が 1 % 以上で生成する核種は次のうちどれか. [2015 年化学問 3]
 - (a) ^{77}As
 - (b) ^{90}Sr
 - (c) ^{111}Ag
 - (d) ^{133}Xe
 - (e) ^{153}Eu

6. 次の核反応のうち, 正しいものはどれか. [2014 年化学問 9]
 - (a) $^{11}\text{B}(\text{n}, \text{p})^{11}\text{C}$
 - (b) $^{20}\text{Ne}(\text{d}, \alpha)^{18}\text{F}$
 - (c) $^{32}\text{S}(\text{p}, \text{n})^{32}\text{P}$
 - (d) $^{54}\text{Fe}(\text{n}, \text{p})^{54}\text{Mn}$

7. 次の核反応のうち, 17 族元素 (ハロゲン) の同位体を生成するものはどれか. [2014 年化学問 10]

- (a) $^{18}\text{O}(\text{p}, \text{n})$
- (b) $^{35}\text{Cl}(\text{n}, \gamma)$
- (c) $^{76}\text{Se}(\text{d}, \text{n})$
- (d) $^{124}\text{Xe}(\text{n}, \text{p})$

8. 次の核反応のうち、アルカリ金属元素の同位体を生成するものはどれか。 [2013年化学問6]

- (a) $^{10}\text{B}(\text{n}, \alpha)$
- (b) $^{23}\text{Na}(\text{p}, \text{pn})$
- (c) $^{40}\text{Ar}(\alpha, \text{p})$
- (d) $^{84}\text{Kr}(\text{d}, 2\text{n})$

9. 次のうち、アルカリ金属元素の同位体を生成する反応はどれか。 [2012年化学問16]

- (a) $^{10}\text{B}(\text{n}, \alpha)$
- (b) $^{24}\text{Mg}(\text{d}, \alpha)$
- (c) $^{40}\text{Ar}(\alpha, \text{p})$
- (d) $^{81}\text{Br}(\alpha, 2\text{n})$

10. 熱中性子による ^{235}U の核分裂で生成する収率が大きい核種はどれか。 [2011年化学問11]

- (a) ^{60}Co
- (b) ^{90}Sr
- (c) ^{99}Mo
- (d) ^{111}Ag
- (e) ^{133}Xe

第2章 放射線測定

2.1 概略

§2.1.1 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。

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。

§2.1.2 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 μ m, 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。

2.2 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 2.1 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 2.1: 放射線の測定器

物質	測定器	測定対象	原理
気体	電離箱	$\gamma(1\mu\text{Sv/h}\sim)$	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 , $\gamma(0.1\mu\text{Sv/h}\sim)$	
固体	半導体検出器	γ , エネルギー分解能が良い	蛍光
	NaI シンチレーションカウンタ	$\gamma(0.01\sim 30\mu\text{Sv/h})$	
液体	液体シンチレーションカウンタ	低エネルギー β	

2.3 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。

§2.3.1 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。
- 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

$$N = \frac{Q}{e} \quad (2.1)$$

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、

$$D = \frac{WN}{m} = \frac{WQ}{me} \quad (2.2)$$

と表すことができる。

§2.3.2 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。

§2.3.3 GM 計数管

- 数え落とし
- 幾何学的効率

2.4 固体, 液体の検出器

§2.4.1 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.

§2.4.2 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.
- $\gamma(X)$ 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, ^3H では唯一の手段である.

2.5 個人の被曝線量の測定器

§2.5.1 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

§2.5.2 測定部位

男性は胸部, 女性は腹部に装着して測定する.

2.6 測定値の取扱い

放射性核種は, いつ壊変するの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

$$p(x) = {}_n\text{C}_x p^x (1-p)^{n-x} \quad (2.3)$$

- ポアソン分布

$$p(x) = \frac{m^{-x}}{x!} e^{-m} \quad (2.4)$$

- 正規 (ガウス) 分布

$$p(x) = \frac{1}{\sqrt{2\pi m}} e^{-\frac{(x-m)^2}{2\sigma}} \quad (2.5)$$

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。

$$p(x) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma} e^{-\frac{(x-m)^2}{2\sigma^2}} \quad (2.6)$$

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。

§2.6.1 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

$$\frac{N}{t} - \frac{N_b}{t_b} \quad (2.7)$$

のもつ誤差 σ_n は

$$\sigma_n = \sqrt{\left(\frac{\sqrt{N}}{t}\right)^2 + \left(\frac{\sqrt{N_b}}{t_b}\right)^2} = \sqrt{\frac{N}{t^2} + \frac{N_b}{t_b^2}} \quad (2.8)$$

となる。さらに、

$$\frac{\sqrt{N}}{N} \quad (2.9)$$

で表されるものを計測誤差という。

主任者試験問題

1. シンチレーション検出器で試料を 30 秒間測定して 600 カウントを得た。次に試料を除いて 4 分間バックグラウンドを測定したところ、1600 カウントを得た。この場合の試料の正味計数率に対する標準偏差 [cpm] に最も近い値は、次のうちどれか。[2016 年物理問 25]
 - (a) 10
 - (b) 20
 - (c) 30
 - (d) 40
 - (e) 50

2. エネルギー分解能は、気体検出器よりも半導体検出器の方が優れているが、この理由として電離効率の違いがあげられる。ゲルマニウムの 1 個の電子・正孔対を作るのに必要な平均エネルギー (ϵ) に対するアルゴン気体の W 値 (W) の比 (W/ϵ) として最も近い値は、次のうちどれか。[2016 年物理問 28]
 - (a) 3
 - (b) 6
 - (c) 9
 - (d) 12
 - (e) 15

[2012年管理測定技術問2]

次の文章の□の部分に入る最も適切な語句を、それぞれの解答群から1つだけ選べ。

1. 低レベル放射能の測定にとって大切な事柄として、バックグラウンド計数率の低減、高い□A□の確保、長時間測定などが共通的に挙げられる。

また、測定対象の□B□を求める場合には、測定試料の量を多くすることが有効である。

バックグラウンドの原因として、次のようなものがある。

- (a) 建材、土壌、空気など周囲の環境中に存在する放射性物質。
 (b) 検出器自体や遮蔽材などに含まれる放射性物質。
 (c) □C□などの宇宙線。
 (d) 他の電気機器からの高周波信号や電源スイッチの開閉にともなう電磁的ノイズ。

これらの原因のうち、(a)の環境中の放射性物質として、□ア□や□イ□の壊変生成物や□ウ□などの天然の放射性物質が主なものであるが、原子力発電所事故により放出された ^{134}Cs 、 ^{137}Cs によるバックグラウンドにも注意すべきである。□ウ□は高いエネルギーの β 線、 γ 線を放出し、 γ 線バックグラウンドスペクトルの1.46 MeV相当位置に顕著なピークを出現させる。また、2.6 MeV付近にも顕著なピークが認められるが、これは□ア□の子孫核種の□エ□から放出される γ 線によるものである。また、□イ□の子孫核種である ^{214}Bi から609 keVの γ 線が放出されるが、このエネルギーは□オ□から放出される605 keV γ 線エネルギーに近接しているため、□オ□の測定に際し、妨害となることがある。これらの検出器外部からの放射線の影響を低減させるためには、厚い鉛や鉄のような遮蔽材によって検出器部を取り囲む。

(b)については、(a)で述べたような核種が検出器自体や遮蔽体に含有されると、ここから放出される放射線に対して遮蔽も有効に機能しないため、材料の吟味が必要である。例えば、遮蔽体の鉛には半減期22年の□カ□が含まれることがあり、この場合、その娘核種の□キ□からの□D□に起因する□E□によるバックグラウンドが問題になることがある。また、半田(はんだ)には□ア□や□イ□の壊変生成物が含まれることがあり、ガラスには□ウ□が含有することがあるので注意する必要がある。

(c)に対して、□C□は極めて透過力が強いので、遮蔽体の使用もあまり効果がない。これを効果的に除去するためには、計数管の周囲や上部にガード計数管を配置し、この出力パルスで主計数管のパルスに対して□F□を行うとよい。これは、特に β 線の低レベル放射能測定にとって有効である。

(d)における電磁的ノイズ対策として、金属箱などによる電磁的遮蔽や電源部のフィルタの使用などがある。

高い□A□を確保するためには、測定試料を検出器に近づけたり、大きな検出器を用いて幾何効率を大きくすることが有効であるが、大きな検出器を用いると、バックグラウンド計数率も高くなるので、その兼ね合いに配慮する必要がある。また、測定器がスペクトロメータの場合、□A□が同じであっても、□G□が高い方が連続的なバックグラウンドスペクトルとピークとの識別に関して有利である。

＜A～Gの解答群＞

- 1 放射能濃度 2 検出効率 3 時間分解能 4 逆同時計数 5 同時計数
 6 波高弁別 7 エネルギー分解能 8 ニュートリノ 9 制動放射線 10 β 線
 11 μ 粒子

＜ア～キの解答群＞

- 1 ^{14}C 2 ^{40}K 3 ^{60}Co 4 ^{131}I 5 ^{134}Cs
 6 ^{137}Cs 7 ^{208}Tl 8 ^{210}Po 9 ^{210}Pb 10 ^{201}Bi
 11 ^{214}Bi 12 ^{232}Th 13 ^{238}U

2. 低レベル β 線の測定において、測定試料からの放射線による計数率 n_S は、バックグラウンドを含めた全体の計数率 n_G から、バックグラウンド n_B を差し引いて求める。すなわち、

$$n_S = n_G - n_B = \frac{N_G}{T_G} - \frac{N_B}{T_B}$$

となる。ここで、 N_G は試料を置いた状態で計数を時間 T_G の間行ったときに得られた計数値、 N_B は試料を置かないで計数を時間 T_B の間行ったとき得られた計数値である。この場合、 n_S の標準偏差を σ_S とすると、 n_S の分散 V_S は

$$V_S = \sigma_S^2 = \boxed{\text{H}}$$

で与えられる。全体の計数時間 T が一定、すなわち $T = T_G + T_B$ が一定の場合、上式において $T_G = T - T_B$ とし、 σ_S^2 を T_B で微分すると、

$$\frac{d\sigma_S^2}{dT_B} = \boxed{\text{I}}$$

の関係が得られる。バックグラウンド計測に関わる最適配分時間は $\frac{d\sigma_S^2}{dT_B} = 0$ とおいて、

$$\frac{T - T_B}{T_B} = \frac{T_G}{T_B} = \boxed{\text{J}}$$

として求めることができる。したがって、たとえば、測定試料を置いた時の計数率が毎分 20 カウント、バックグラウンド計数率が毎分 10 カウントであることが予備測定で分かっているとき、測定にかかわる時間 T が一定という制約の中で計数率の統計誤差を最小にするためには、 $\frac{T_G}{T_B}$ を $\boxed{\text{ク}}$ にするのがよい。したがって、 $T = 100$ min の場合、 $T_G = \boxed{\text{ケ}}$ min、 $T_B = \boxed{\text{コ}}$ min とする。

< H~J の解答群 >

1 $\frac{n_G}{n_B}$	2 $\frac{n_G}{n_G + n_B}$	3 $\sqrt{\frac{n_G}{n_B}}$	4 $\sqrt{\frac{n_G}{n_G + n_B}}$
5 $\sqrt{\frac{N_G}{N_B}}$	6 $\sqrt{\frac{N_G}{N_G + N_B}}$	7 $\frac{N_G}{T - T_B} + \frac{N_B}{T_B}$	8 $\frac{N_G}{(T - T_B)^2} - \frac{N_B}{T_B^2}$
9 $\frac{n_G}{(T - T_B)^2} + \frac{n_B}{T_B^2}$	10 $\frac{n_G}{(T - T_B)^2} - \frac{n_B}{T_B^2}$	11 $\frac{n_G}{T_G} - \frac{n_B}{T_B}$	12 $\frac{n_G}{T_B} + \frac{n_B}{T_B}$
13 $\frac{N_G}{T_G} + \frac{N_B}{T_B}$	14 $\frac{N_G^2}{T_G} + \frac{N_B^2}{T_B}$		

< ク~コの解答群 >

1 1.0	2 1.4	3 2.0	4 2.4	5 3.0
6 24	7 33	8 41	9 50	10 59
11 67	12 76			

[2014 年管理測定技術問 2]

次の文章の□の部分に入る最も適切な語句を、それぞれの解答群から1つだけ選べ。

放射線防護計測に際して、サーベイメータがしばしば用いられる。サーベイメータは、放射性同位元素又は放射線に関する情報を簡便に得ることを目的とした、小型で可搬型の放射線測定器のことを総括的に言う。サーベイメータの使用や購入にあたっては、その測定対象放射線や目的などを良く理解した上で、それに則した機能や性能を持つものを選択することが重要である。

1. この種の測定器の使用目的は、二つに大別される。第一は、周辺の場合における線量率の測定を目的とするもので、多くの場合、□A□率 ($\mu\text{Sv/h}$) で目盛がつけられているが、□B□率 ($\mu\text{Gy/h}$) で目盛られたものもある。また、スイッチ切換えによりこれらの積算値を知ることができるようにしたものもある。第二は、放射性同位元素による表面汚染の測定を意識したもので、この場合、目盛は□C□率 (cps, cpm 又は min^{-1}) とした場合が多く、窓面を測定対象に 5 mm 程度近づけた状態で測定を行い、この測定値から、検出器の□D□、機器効率、線源効率を用いて、使用者が□E□を算出する。また、検出器の窓に着脱可能なキャップをつけ、双方の目的を兼ね備えた形式のものもある。なお、中性子の測定については、専用のサーベイメータが必要である。

< A~E の解答群 >

- | | | | | |
|-----------|----------|-------------|-------------------------|---------|
| 1 照射線量 | 2 空気吸収線量 | 3 1 cm 線量等量 | 4 70 μm 線量等量 | 5 実効線量 |
| 6 放射能表面密度 | 7 フルエンス | 8 計数 | 9 窓面積 | 10 窓の厚さ |

2. サーベイメータは、使われる検出器の種類により分類されることが多い。電離箱式、GM 管式、シンチレーション式が主なものであるが、そのほか、検出器として、比例計数管、Si 半導体検出器なども用いられることがある。

電離箱式サーベイメータは、 γ 線などの光子が主に電離箱の□F□でコンプトン効果などの相互作用を起こし、その結果生じた高速電子の一部が電離箱の□G□を電離させ、その際の電流を読み出すもので、主に周辺の場合の線量 (率) の測定に用いられる。感度はそれほど良くないものの、□H□特性が優れている。また、線量率依存性が少なく、加速器からの放射線のように極短時間に放射線がバースト状に到来する場合にも対応できる。

電離箱は壁材における吸収線量率の測定に基づいているが、壁材がプラスチック (内面に薄い炭素膜を塗布) のような低原子番号物質で作られている電離箱は、ほぼ□I□率を与える。この値から□J□率を直読できるようにするには、この値に光子エネルギーの関数として与えられている換算係数を乗じて、□J□率に換算した目盛とする必要がある。ICRP による換算係数は、□K□から□J□への換算係数を光子エネルギーの関数として与えたものであるが、入射光子のエネルギーが 1.5 MeV 程度以下の場合には、□K□と□I□との差違は少ないから、□K□を□I□に読み替えても、実用上は差し支えない。しかしながら、この換算係数は光子エネルギーに依存するので、光子エネルギーによらず□J□率を直読できるようにするには、測定器の□I□率に対するレスポンスを換算係数曲線の形に□L□必要がある。この目的のために電離箱壁の材料や中心電極の材料を吟味することにより、□J□率に関する□H□特性を改善することができる。

< F~L の解答群 >

- | | | | |
|----------------|----------|-------------|-------------------------|
| 1 照射線量 | 2 空気吸収線量 | 3 1 cm 線量等量 | 4 70 μm 線量等量 |
| 5 エネルギーフルエンス | 6 空気カーマ | 7 実効線量 | 8 充填気体 |
| 9 壁 | 10 中心電極 | 11 エネルギー | 12 感度 |
| 13 線量率 | 14 適合させる | | |
| 15 逆比例の関係を持たせる | | | |

3. GM管式サーベイメータで光子を測定する場合、主に計数管の[M]における光子の相互作用の結果生じる高速電子による放電パルス測定している。この放電パルスは波高がほぼ一定で、エネルギー情報を持たないため、放射線の入射に関する個数情報しか得られない。レスポンスには主に計数管の[M]における光子との相互作用確率と発生した電子の飛程によって決定される。[N]率測定を目的とする場合、その[O]特性は、電離箱式サーベイメータの場合と比較するとかなり悪い。通常、校正は ^{137}Cs 線源からの662 keV γ 線によって行われるが、これ以外のエネルギー、とくに低エネルギー光子の測定や散乱光子を多く含む場の測定に関しては誤差が大きくなるので、注意が必要である。また、検出器の[P]によって指示値も変化する。すなわち、[P]特性はあまり良くない。さらに、分解時間が長いために、[Q]特性も悪い。このように、 $X\cdot\gamma$ 線用線量率測定器としてGM管式サーベイメータは性能に限界があるが、端窓型GM管を用いた場合、パルス数は入射窓から入射した β 線の個数を反映するため、表面汚染の測定には都合が良い。

シンチレーション式サーベイメータは、シンチレータとしてNaI(Tl)やCsI(Tl)が使われるのが一般的であるが、これらは密度が高く、シンチレータ全体が光子の有感領域となっているので、感度は良い。シンチレーション計数管の場合も、パルスの計数率の測定が基本であるので、そのまま計数率を測定する方式では、[O]特性は著しく悪い。しかしながら、[R]は入射光子のエネルギー情報を有するので、これを利用して[O]特性を補償することは可能であり、最近はこうした技術を取り入れた製品が多くなった。

< F~Lの解答群 >

- | | | | |
|-------------|-------------------------|-----------|---------|
| 1 1 cm 線量等量 | 2 70 μm 線量等量 | 3 実効線量 | 4 計数率 |
| 5 パルス幅 | 6 パルス波高 | 7 発光スペクトル | 8 エネルギー |
| 9 方向 | 10 管壁 | 11 中心電極 | 12 充填気体 |

4. α 線源、 β 線源の探査や表面汚染の測定を目的とするサーベイメータは、入射窓の面積が広く、かつ入射窓の窓厚が薄いことが望まれる。この目的のために、端窓型GM計数管を用いたサーベイメータが主に用いられるが、プラスチックシンチレーション式サーベイメータも用いられる。また、 α 線専用の測定には[S]シンチレーション式サーベイメータがある。また、トリチウム測定の場合のように極端にエネルギーの低い β 線の測定には、薄窓型の[T]を用いたサーベイメータも開発されている。

< S, Tの解答群 >

- | | | | |
|-------------|-------------|-----------|-----------|
| 1 Si 半導体検出器 | 2 薄いNaI(Tl) | 3 CsI(Tl) | 4 ZnS(Ag) |
| 5 BGO | 6 ガスフロー式計数管 | 7 パルス電離箱 | 8 空気比例計数管 |

2.7 放射線測定実習

§2.7.1 実習1：自然放射線（バックグラウンド）の測定

目的 自然放射線の存在を確認し、バックグラウンドを測定する。

方法

1. サーベイメータのまわりに放射線がでていないものがないか確認する。
2. サーベイメータの電源を入れ、その状態で1分間待つ。
3. 表示された数値を3回（10秒ごとに変化）記録し、平均をとる。

データ

測定器		
型式		
1		
2		
3		
平均値 BG		

感想 今日の実習を通しての感想を以下にまとめなさい。

§2.7.2 実習2：放射性物質の測定

目的 カリ肥料，ガスランプ用マンツルの放射線を測定する。

方法

1. サーベイメータの電源を入れる。
2. サーベイメータのプローブ窓面を試料より約1 cm 離して固定する。
3. その状態のまま1分間待つ。
4. 表示された数値を3回（10秒ごとに変化）記録する。

データ

測定器	TSC-172	TGS-146
測定試料	ガスランプ用マンツル	カリ肥料
1		
2		
3		
平均値 BG		
正味の値 (平均値 - BG)		

考察

§2.7.3 実習3：距離の実験

目的 放射性物質からの距離と放射線量の間係を探る。

方法

1. サーベイメータを試料より 5 cm, 10 cm, 15 cm, 20 cm 離れたときの放射線量を測定する。
2. その状態のまま 1 分間待つ。
3. 表示された数値を 3 回 (10 秒ごとに変化) 記録する。

データ

測定試料： β 線源，測定器：TGS-146

測定距離	5 cm	10 cm	15 cm	20 cm
1				
2				
3				
平均値				

解析

1. 両対数グラフに，放射線量－距離のグラフを描く。
2. 両対数グラフから直線の傾きを求める。

考察 放射性物質からの距離と放射線量の間係を述べる。

§2.7.4 実習4：遮蔽の実験

目的 放射性物質の上にケント紙をおき，放射線量の変化を測定する。

方法

1. サーベイメータを放射性物質から 5 cm の位置に固定する。
2. ケント紙を置いて，放射線量を測定する。
3. その状態のまま 1 分間待つ。
4. 表示された数値を 3 回（10 秒ごとに変化）記録する。

データ

測定試料： β 線源，測定器：TGS-146

ケント紙枚数	1	2	3	4	5
1					
2					
3					
平均値					

解析

1. 片対数グラフに，線量－厚さのグラフを描く。
2. 片対数グラフより，半価層を求める。

考察 ケント紙は，放射線を防ぐのに有効であるか述べる。

第3章 放射線生物学

3.1 放射線影響の分類

放射線の生物学的影響は、原子・分子、細胞、組織・臓器、全身の各レベルごとに整理するとわかりやすい。ここで出てくる用語については、のちのち説明をする。図 3.1 にまとめる。

生物は放射線によって原子・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。

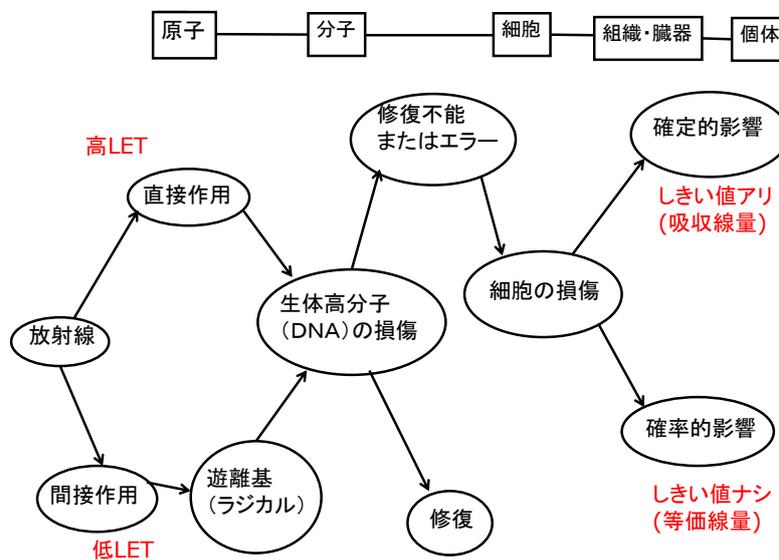


図 3.1: 放射線影響の分類

個体に現れる影響を表 3.1 にまとめる。ここで出てくる用語ものちのち説明する。

表 3.1: 放射線の影響

身体的影響	早期影響 (数週間以内)	脱毛，嘔吐，精子減少 貧血，白血球減少，不妊	確定的影響 ≪しきい値アリ≫	吸収線量 [Gy]
	晩発影響 (数ヶ月以上)	白内障，寿命短縮 胎児の影響，染色体異常 癌，白血病		
遺伝的影響			確率的影響 ≪しきい値ナシ≫	等価線量 [Sv]

3.2 放射線に関する単位

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 (Gray¹記号 Gy) をあてる。

¹Gray, Louis Harold イギリス 1905~1965.

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単位となるため、特別な名称シーベルト (Sievert² 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。

$$H = w_R D \text{ [Sv]} \quad (3.1)$$

放射線加重係数 (ICRP2007 年勧告) を表 3.2 にまとめておこう。

表 3.2: 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。

$$E = w_T H = w_T w_R D \text{ [Sv]} \quad (3.2)$$

組織加重係数 (ICRP2007 年勧告) を表 3.3 にまとめておこう。

表 3.3: 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

放射線ででてくる単位は表 A.1 にまとめた。

3.3 原子・分子レベルの影響と修飾要因

§3.3.1 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。

²Sievert, Rolf スウェーデン 1886~1966.

2. 間接作用：低 LET(β 線, γ (X) 線) が, 水分子を電離する.



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.

§3.3.2 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.
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 Enhancement Ratio) によって表わす.

$$\text{OER} = \frac{\text{無酸素下である効果を引き起こすのに必要な線量}}{\text{酸素下で同じ効果を引き起こすのに必要な線量}} \quad (3.3)$$

3. 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.
4. 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.
5. 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.

$$\text{RBE} = \frac{\text{ある生物効果を引き起こすのに必要な基準放射線の吸収線量}}{\text{同じ効果を引き起こすのに必要な試験放射線の吸収線量}} \quad (3.4)$$

3.4 細胞レベルの影響

§3.4.1 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) ネクロシス…病的で受動的な死
- (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.

§3.4.2 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.

§3.4.3 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時、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。

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。

主任者試験問題

1. 次のうち放射線による身体的影響に分類されるものはどれか。 [2017 年生物問 23]
 - (a) 白内障
 - (b) 白血病
 - (c) 小頭症
 - (d) 再生不良性貧血
2. 放射線加重係数 (ICRP 2007 年勧告) に関する次の記述のうち、正しいものはどれか。 [2017 年生物問 28]
 - (a) 確定的影響をもとにして定められている。
 - (b) 電子とミュー粒子で値は同じである。
 - (c) 中性子ではエネルギーが大きくなると値が大きくなる。
 - (d) 放射線の線量率にかかわらず同一の値が与えられている。
3. 預託実効線量に関する次の記述のうち、正しいものはどれか。 [2016 年生物問 20]
 - (a) 単位は Sv・年である。
 - (b) 特に指定しない場合、子供に対しては摂取時から 50 年間の実効線量を積算する。
 - (c) 長期にわたる内部被曝を評価するために使用する。
 - (d) すべての臓器・組織の確率的影響のリスクを評価するために使用する。
4. 放射線による身体的影響に関する次の記述のうち、正しいものはどれか。 [2016 年生物問 25]
 - (a) 白血病は早期影響である。
 - (b) 再生不良性貧血は晩発障害である。
 - (c) 固形腫瘍は晩発障害である。
 - (d) 耳下腺炎は晩発障害である。
5. 放射線による遺伝性 (的) 影響に関する次の記述のうち、正しいものはどれか。 [2016 年生物問 26]
 - (a) 遺伝性 (的) 影響にはしきい線量は存在しないと評価されている。
 - (b) 高線量急性被曝した本人に現れる。
 - (c) 原爆被爆者で有意な増加が報告されている。
 - (d) ヒトの遺伝性 (的) 影響のリスク推定では、動物実験のデータが利用されている。
6. 放射線の確定的影響に関する次の記述のうち、正しいものはどれか。 [2015 年生物問 19]
 - (a) 吸収線量が 10 mGy でも発生する。
 - (b) 線量が増加すると重篤度が増す。
 - (c) 被曝線量をしきい線量以下に制限することで発生を防止できる。
 - (d) 甲状腺機能低下症は確定的影響ではない。
7. 放射線の確率的影響に関する次の記述のうち、正しいものはどれか。 [2015 年生物問 20]
 - (a) 急性被曝は確率的影響ではない。
 - (b) 内部被曝では確率的影響は起こらない。
 - (c) 遺伝性 (的) 影響は確率的影響である。
 - (d) 胎内被曝では確率的影響は起こらない。

8. 確率的影響に関する次の記述のうち、正しいものはどれか。[2014年生物問 19]
- (a) 早期反応に確率的影響はない。
 - (b) 晩発影響はすべて確率的影響である。
 - (c) 胎内被曝では確率的影響は生じない。
 - (d) 確率的影響の重篤度は線量には依存しない。
9. 放射線加重係数に関する次の記述のうち、正しいものはどれか。[2014年生物問 26]
- (a) 放射線の種類によっては、そのエネルギーにより値が異なる場合がある。
 - (b) 確定的影響を評価するための係数である。
 - (c) 線量率が高くなるとその値は大きくなる。
 - (d) 外部被曝及び内部被曝いずれの評価にも考慮されている。
10. ICRP2007年勧告における放射線加重係数に関する次の記述のうち、正しいものはどれか。[2014年生物問 27]
- (a) すべてのエネルギーの光子に対して1が与えられている。
 - (b) すべてのエネルギーの電子に対して2が与えられている。
 - (c) すべてのエネルギーの陽子に対して2が与えられている。
 - (d) すべてのエネルギーの中性子に対して10が与えられている。
 - (e) すべてのエネルギーの α 粒子に対して20が与えられている。
11. 組織加重係数に関する次の記述のうち、正しいものはどれか。[2014年生物問 30]
- (a) 確率的影響を評価するための係数である。
 - (b) 臓器・組織の等価線量にこの係数を乗じ、全身にわたって積算することによって実効線量が与えられる。
 - (c) 線量率の高低によらず、臓器・組織ごとに一定の値が与えられている。
 - (d) 年齢によらず、臓器・組織ごとに一定の値が与えられている。
12. 次の放射線による影響のうち、確定的影響として正しいものはどれか。[2013年生物問 19]
- (a) 胎児被曝による発がん
 - (b) 胎児被曝による奇形
 - (c) 白内障
 - (d) 皮膚潰瘍
13. 放射線加重係数(ICRP2007年勧告)に関する次の記述のうち、正しいものはどれか。[2013年生物問 30]
- (a) 光子では1である。
 - (b) α 粒子と重イオンでは20である。
 - (c) 陽子では5である。
 - (d) 中性子では25である。
14. 預託実効線量に関する次の記述のうち、正しいものはどれか。[2012年生物問 25]
- (a) 成人の場合、組織・臓器が受ける吸収線量率を50年にわたって積算した線量である。
 - (b) 単位はシーベルトである。
 - (c) 預託等価線量とその組織・臓器の組織加重係数との積の総和として求められる。
 - (d) 長期にわたる外部被曝を評価するために用いられる。
15. 放射線加重係数に関する次の記述のうち、正しいものはどれか。[2012年生物問 28]

- (a) 電子線の場合はエネルギーによって値が異なる.
- (b) 確定的影響を評価するための係数である.
- (c) 線量率に関わらず同一の値が与えられている.
- (d) X線と γ 線については同一の値が与えられている.

16. 組織加重係数の大小関係について正しいものはどれか. [2011年生物問 15]

- (a) 皮膚 > 肝臓
- (b) 骨髄 (赤色) > 結腸
- (c) 結腸 > 食道
- (d) 肺 > 膀胱

17. 確率的影響と確定的影響に関する次の記述のうち、正しいものはどれか. [2011年生物問 21]

- (a) 遺伝的影響は確率的影響である.
- (b) 早期反応には確率的影響はない.
- (c) 組織加重係数は確率的影響を考慮した係数である.
- (d) 晩発影響には確定的影響はない.
- (e) 内部被曝では確定的影響は起こらない.

18. γ 線急性全身被曝による身体的影響に関する次の記述のうち、正しいものはどれか. [2011年生物問 25]

- (a) 高線量率で被曝した場合に生じる生殖細胞の減少は身体的影響である.
- (b) 低線量率で被曝した場合に生じる体細胞のがん化は身体的影響である.
- (c) 高線量による影響は急性障害のみで、晩発影響はない.
- (d) 晩発影響には、しきい線量のあるものとないものがある.

19. 放射線による遺伝的影響に関する次の記述のうち、正しいものはどれか. [2011年生物問 26]

- (a) 遺伝的影響には、しきい線量があるものとないものがある.
- (b) 胎内被曝による奇形は遺伝的影響である.
- (c) 生殖年齢又は生殖年齢以前に被曝した場合のみに生じる可能性がある.
- (d) 生殖器官が被曝しなければ生じることはない.

3.5 組織・臓器レベルの影響

§3.5.1 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・トリポ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3.4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、損傷などを受けたら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。

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。

表 3.4: 放射線感受性

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

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。

§3.5.2 造血組織および血液

表3.5にまとめておこう。

表 3.5: 血液の放射線影響

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)		

§3.5.3 生殖腺

表3.6にまとめておこう。

表 3.6: 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

§3.5.4 小腸 (1cm) と皮膚 (70 μ m)

小腸の吸収上皮細胞を作るところをクリプトというが、10Gy で細胞死が起こる。皮膚の影響を表 3.7 にまとめておこう。

表 3.7: 皮膚の放射線影響

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

§3.5.5 水晶体 (3mm)

表 3.8 にまとめておこう。

表 3.8: 水晶体の放射線影響

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

主任者試験問題

1. γ 線急性被曝による次の障害のうち、しきい値が最も大きいものはどれか。 [2017年生物問 12]
 - (a) 湿性落屑
 - (b) 白内障による視力障害
 - (c) 造血機能低下
 - (d) 一時的脱毛
 - (e) 女性の永久不妊
2. γ 線による皮膚障害に関する次の記述のうち、正しいものはどれか。 [2017年生物問 14]
 - (a) 同程度の障害を起こすのに必要なエネルギーは熱傷の場合よりも大きい。
 - (b) 4 Gy 急性被曝すると、2~3週間程度後に一時的脱毛が生じる。
 - (c) 総線量が同一であれば1回で被曝した場合の方が分割して被曝した場合よりも障害が小さい。
 - (d) 3 Gy 急性被曝すると、数時間から24時間後に紅斑が生じる。
 - (e) 4 Gy 急性被曝すると、6ヶ月以内に皮膚の萎縮が生じる。
3. 甲状腺の γ 線急性外部被曝の影響に関する次の記述のうち、正しいものはどれか。 [2016年生物問 13]
 - (a) 被曝前の安定ヨウ素剤の内服により影響は軽減する。
 - (b) 10 Gy の被曝で甲状腺機能低下が生じる。
 - (c) 3 Gy の被曝で甲状腺良性結節が増加する。
 - (d) 1 Gy の被曝で急性甲状腺炎が生じる。
4. 眼とその付属器の γ 線急性被曝が直接的原因とならないものは次のうちどれか。 [2016年生物問 16]
 - (a) 白内障
 - (b) 緑内障
 - (c) 角膜炎
 - (d) 眼乾燥症候群（ドライアイ）
 - (e) 眼球突出
5. 皮膚の10 Gy γ 線急性被曝の影響に関する次の記述のうち、正しいものはどれか。 [2015年生物問 14]
 - (a) 被曝中に軽度の熱感を感じる。
 - (b) 被曝中に痛みを感じる。
 - (c) 被曝後2日以内に一過性の紅斑を認める。
 - (d) 被曝後3日以内に脱毛が起こる。
 - (e) 被曝後に色素沈着が起こるとはしない。
6. 次のX線被曝部位とその障害の組合せのうち、正しいものはどれか。 [2015年生物問 18]
 - (a) 眼 — 緑内障
 - (b) 肺 — 肺線維症
 - (c) 脊髄—動静脈奇形
 - (d) 胆嚢—胆石
7. γ 線による急性被曝後の障害と、障害を受けた臓器・組織におけるしきい線量の関係として、正しいものはどれか。 [2014年生物問 14]

- (a) 白内障（視力低下）—15~20 Gy（眼）
 - (b) 女性の永久不妊 —2.5~6.0 Gy（卵巣）
 - (c) 男性の一時的不妊 —1.0~1.5 Gy（精巣）
 - (d) 男性の永久不妊 —3.5~6.0 Gy（精巣）
8. ベルゴニー・トリボンドーの法則に関する次の記述のうち、正しいものはどれか。 [2013 年生物問 15]
- (a) 形態及び機能において未分化な細胞ほど放射線感受性は高い。
 - (b) 将来の分裂回数が少ない細胞ほど放射線感受性は高い。
 - (c) 細胞分裂頻度の高い細胞ほど放射線感受性は低い。
 - (d) ベルゴニー・トリボンドーの法則はリンパ球には当てはまらない。
9. 2 Gy の γ 線急性全身被曝後の末梢血の変化に関する次の記述のうち、正しいものはどれか。 [2013 年生物問 16]
- (a) 赤血球の減少率は血小板に比べ小さい。
 - (b) 赤血球の減少は顆粒球の減少よりも早く認められる。
 - (c) リンパ球の減少は血球の中で最も遅く起こる。
 - (d) 顆粒球は被曝後数日の間に一過性に増加する。
10. 次の放射線のうち、高 LET 放射線に分類されるものはどれか。 [2013 年生物問 26]
- (a) γ 線
 - (b) β 線
 - (c) 中性子線
 - (d) 炭素イオン線
11. 次の放射線障害のうち、8 Gy の γ 線急性局所被曝で認められるものはどれか。 [2012 年生物問 13]
- (a) 男性の永久不妊
 - (b) 女性の永久不妊
 - (c) 一時的脱毛
 - (d) 皮膚の潰瘍(かいよう)
12. 放射線被曝による白内障に関する次の記述のうち、正しいものはどれか。 [2012 年生物問 14]
- (a) 潜伏期間は線量が大きくなると短くなる。
 - (b) 3 Gy の X 線被曝では、被曝後 1 ヶ月以内に生じる。
 - (c) 線量率が低下するとしきい線量は低下する。
 - (d) 進行した放射線白内障では、他の原因による白内障と区別できない。
13. X 線による皮膚障害に関する次の記述のうち、正しいものはどれか。 [2012 年生物問 16]
- (a) 被曝してすぐに痛みを感じる。
 - (b) 同程度の障害を起こすのに必要なエネルギーは熱傷の場合よりも大きい。
 - (c) 同一吸収線量を分割して被曝した場合は、1 回で被曝した場合に比べてしきい線量が高くなる。
 - (d) 初期紅斑のしきい線量はおおよそ 2 Gy である。
14. 放射線被曝による乳がんの発生に関する次の記述のうち、正しいものはどれか。 [2012 年生物問 20]
- (a) 自然発生した乳がんと異なる病理学的特徴を持つ。

- (b) 被曝後約 30 年してから増加する.
 - (c) 被曝時年齢が低いほど発生の過剰相対リスクが高い.
 - (d) 女性ホルモンが影響する.
15. 10 Gy の γ 線急性全身被曝の数時間後に生じる急性障害に関する次の記述のうち、正しいものはどれか。 [2011 年生物問 18]
- (a) 皮膚に痛みを感じる.
 - (b) 皮膚に水泡が形成される.
 - (c) 消化管から下血が起こる.
 - (d) 毛細血管の透過性亢進が起こる.
 - (e) 肝機能障害が起こる.
16. 1 Gy の X 線急性全身被曝によって引き起こされる可能性のある影響として、正しいものはどれか。 [2011 年生物問 20]
- (a) 脱毛
 - (b) 男性の一時的不妊
 - (c) 皮膚の紅斑 (こうはん)
 - (d) 放射線宿酔

3.6 個体（胎児を含む）レベルの影響

§3.6.1 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 3.9 にまとめておこう。

表 3.9: 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 $LD_{100(30)}$

§3.6.2 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 3.10: 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

§3.6.3 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 3.11 にまとめておこう。

表 3.11: 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

主任者試験問題

1. γ 線 2 Gy の急性全身被曝の数時間後に生じる可能性のある症状として、正しいものはどれか。 [2017 年生物問 15]
 - (a) 下痢
 - (b) 意識障害
 - (c) 嘔吐
 - (d) 下血
 - (e) 軽い頭痛
2. 胎内被曝による精神遅滞に関する次の記述のうち、正しいものはどれか。 [2017 年生物問 22]
 - (a) 受精後 0~7 週の被曝で精神遅滞が観察される。
 - (b) 受精後 8~15 週の被曝で精神遅滞が観察される。
 - (c) 受精後 16~25 週の被曝で精神遅滞が最も顕著に観察される。
 - (d) 受精後 26 週以降の被曝では精神遅滞が観察されない。
3. γ 線急性全身被曝に関する次の記述のうち、正しいものはどれか。 [2016 年生物問 12]
 - (a) ヒトの半数致死線量 (LD₅₀) を決めるための観察期間は 60 日である。
 - (b) LD₅₀ に近い線量を被曝した場合には生存率を改善する治療法はない。
 - (c) 前駆症状の始まる時期は 1~10 Gy の線量域で違いはない。
 - (d) 8 Gy 以上の被曝により意識を喪失することがある。
4. X 線を急照射した場合に半数の個体が死ぬ線量が最も小さいのは次のうちどれか。 [2016 年生物問 17]
 - (a) 大腸菌
 - (b) 酵母
 - (c) ヒト
 - (d) マウス
 - (e) クマムシ
5. 次の放射線被曝と発がんの関係のうち、正しいものはどれか。 [2016 年生物問 18]
 - (a) ウラン鉱夫 一肺がん
 - (b) ラジウム時計文字盤工 一胃がん
 - (c) 頭部白癬 X 線治療患者 一甲状腺がん
 - (d) トロトラスト被注入患者 一大腸がん
6. 原爆被爆者の疫学調査において、統計的に有意ながん死亡リスクの増加がみられたがんはどれか。 [2016 年生物問 19]
 - (a) 胃がん
 - (b) 肺がん
 - (c) 脾臓がん
 - (d) 白血病
7. 原爆被爆者における胎内被曝の影響に関する次の記述のうち、正しいものはどれか。 [2016 年生物問 23]
 - (a) 幼児期被曝に比べて小児がんのリスクが有意に高い。

- (b) 発育遅延の有意な増加が観察されている。
- (c) 小頭症の有意な増加が観察されている。
- (d) 精神遅滞の有意な増加が観察されている。
8. γ 線急性全身被曝による身体的影響に関する次の記述のうち、正しいものはどれか。 [2016年生物問 24]
- (a) 1 Gy の被曝で脱毛が生じる。
- (b) 2 Gy の被曝で白血球減少が生じる。
- (c) 3 Gy の被曝で消化管の穿孔が生じる。
- (d) 8 Gy の被曝で放射線肺臓炎が生じる。
9. X線を急性全身被曝した場合の影響に関する次の記述のうち、正しいものはどれか。 [2015年生物問 11]
- (a) 哺乳類の半数致死線量は種によらず3~5 Gyの範囲内にある。
- (b) ヒトの場合には半致死線量は60日以内に半数の個体が死亡する線量をいう。
- (c) 30 Gy 全身被曝した場合には中枢神経の変化が死の原因として重要である。
- (d) 骨髄死では感染症と出血傾向が死の原因として重要である。
10. 放射線被曝と発がんの関係のうち、正しいものはどれか。 [2015年生物問 16]
- (a) 頭部白癬X線治療患者 一皮膚がん
- (b) ウラン鉱夫 一肺がん
- (c) 放射線高バックグラウンド地域住民一直腸がん
- (d) 原爆被爆者 一胆嚢がん
- (e) ラジウム時計文字盤工 一胃がん
11. ヒトの胎内被曝による放射線影響に関する次の記述のうち、正しいものはどれか。 [2015年生物問 26]
- (a) 奇形が最も起こりやすいのは、受精後8日までの時期に被曝した場合である。
- (b) 精神発達遅滞が最も起こりやすいのは、受精後8週から25週間の時期に被曝した場合である。
- (c) 小頭症が最も起こりやすいのは、受精後25週から40週間の時期に被曝した場合である。
- (d) 受精から出生までのいずれの時期の被曝でも、遺伝性(的)影響が発生する可能性がある。
- (e) 原爆被爆者の調査では、胎内被曝の発がんの過剰絶対リスクは、小児期(0歳~5歳)の被曝よりも大きい。
12. γ 線による急性全身被曝後の骨髄死に関する次の記述のうち、正しいものはどれか。 [2014年生物問 12]
- (a) 被曝後3日以内に起きる。
- (b) 血小板減少は、骨髄死の原因の一つである。
- (c) LD_{50/60}の放射線量を被曝したときの主な死因である..
- (d) 5 Gy以下の被曝ではサイトカイン治療は必要ない。
13. 次の放射線障害のうち、幹細胞の障害が関与するものとして正しいものはどれか。 [2014年生物問 13]
- (a) 中枢神経死
- (b) 腸死
- (c) 骨髄死
- (d) 男性不妊
14. 職業被曝及び医療被曝による発がんに関する次の記述のうち、正しいものはどれか。 [2014年生物問 16]
- (a) ウラン鉱夫において、肺がんの増加が見られた。

- (b) 胸部 X 線透視を行った結核患者において、乳がんの増加が見られた。
- (c) トロトラストを用いた血管造影を行った患者において、白血病の増加が見られた。
- (d) ラジウム時計文字盤工において、骨腫瘍の増加が見られた。
15. 原爆被爆者の疫学調査で有意な増加が観察された胎内被曝影響として、正しいものはどれか。[2014 年生物問 23]
- (a) 精神遅滞
- (b) 低身長
- (c) 小頭症
- (d) 四肢の奇形
16. γ 線急性全身被曝による骨髄死に関する次の記述のうち、正しいものはどれか。[2013 年生物問 11]
- (a) 白血球の異常増殖による。
- (b) 晩発障害である。
- (c) 治療方法として骨髄移植がある。
- (d) 治療しなければ、4 Gy の被曝で約半数のヒトが骨髄死で死亡する。
17. γ 線急性全身被曝による腸管への影響に関する次の記述のうち、正しいものはどれか。[2013 年生物問 12]
- (a) 腺下細胞（クリプト細胞）は絨毛上皮細胞よりも放射線感受性が高い。
- (b) 腺下細胞（クリプト細胞）がすべて死に至っても、絨毛上皮細胞が生き残れば腸死に至ることはない。
- (c) 一般に腸死は被曝後 2 日以内に起こる。
- (d) 脱水は腸死の直接の原因の一つである。
18. 原爆被爆者における発がんの潜伏期間に関する次の記述のうち、正しいものはどれか。[2013 年生物問 18]
- (a) 白血病では被曝時の年齢が若いほど短い。
- (b) 白血病では被曝線量が大きいほど短い。
- (c) 肺がんでは被曝時の年齢が若いほど短い。
- (d) 肺がんでは被曝線量が大きいほど短い。
19. X 線による胎内被曝の影響に関する次の記述のうち、正しいものはどれか。[2013 年生物問 21]
- (a) 小頭症のしきい線量は 10 mGy 程度である。
- (b) 精神遅滞が生じやすいのは妊娠 25 週目以降である。
- (c) 精神遅滞のしきい線量は 10 mGy 程度である。
- (d) 致死感受性が最も高いのは着床前期である。
20. X 線による胎内被曝の影響に関する次の記述のうち、正しいものはどれか。[2013 年生物問 22]
- (a) 奇形が生じやすい時期は、受精後 1 週間までの期間である。
- (b) 発がんリスクは、小児と比較して非常に高い。
- (c) 器官形成期に胎児が 0.5 Gy 被曝すると奇形発生のリスクが増す。
- (d) 遺伝性(的)影響も想定されている。
21. 6 Gy の γ 線急性全身被曝において被曝者の半数以上で認められる前駆症状のうち、正しいものはどれか。[2012 年生物問 11]
- (a) 嘔吐

- (b) 呼吸障害
 - (c) 意識障害
 - (d) 発熱
22. 器官形成期における胎内被曝に関する次の記述のうち、正しいものはどれか。 [2012 年生物問 26]
- (a) 胎児に奇形が発生する可能性が妊娠期間中で最も高い。
 - (b) 出生前死亡の頻度が高くなる。
 - (c) 発がんリスクは増加しない。
 - (d) 精神遅滞は起こらない。
23. 器官形成期の胎児が γ 線全身被曝した場合に、奇形発生のおしきい線量 [Gy] として適切なものはどれか。 [2012 年生物問 27]
- (a) 0.01
 - (b) 0.03
 - (c) 0.1
 - (d) 0.5
 - (e) 1
24. ヒトの γ 線急性全身被曝に関する次の記述のうち、正しいものはどれか。 [2011 年生物問 16]
- (a) 臓器により細胞致死感受性が異なる。
 - (b) 前駆症状として体温低下をきたす。
 - (c) 線量率が低い方が致死線量は高い。
 - (d) ヒトの 50%致死線量はマウスの 50%致死線量よりも高い。
25. 外部放射線による胎内被曝に関する次の記述のうち、正しいものはどれか。 [2011 年生物問 24]
- (a) 重度精神発達遅滞は受精後 26 週以降の被曝で多い。
 - (b) 生じる影響は確定的影響のみである。
 - (c) 着床前に被曝すると奇形の発生頻度が高い。
 - (d) 被曝線量推定には母親の子宮線量が用いられる。
26. 放射線による遺伝的影響に関する次の記述のうち、正しいものはどれか。 [2011 年生物問 26]
- (a) 遺伝的影響には、しきい線量があるものとないものがある。
 - (b) 胎内被曝による奇形は遺伝的影響である。
 - (c) 生殖年齢又は生殖年齢以前に被曝した場合にのみ生じる可能性がある。
 - (d) 生殖器官が被曝しなければ生じることはない。

3.7 内部被曝

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。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、飛距離は短いが高電離作用の強い α 線が重要になる。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。

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。

§3.7.1 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。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. 吸入摂取
2. 経口摂取
3. 経皮摂取…傷口などから。

§3.7.2 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3.12にまとめておこう。付録Cにも掲載してある。

表 3.12: 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	肺がん
全身	^3H , ^{137}Cs	突然変異, 白血病, 不妊

§3.7.3 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。

$$\frac{1}{T_{\text{eff}}} = \frac{1}{T_p} + \frac{1}{T_b} \quad (3.5)$$

表 3.13: 主な核種の体内動態

核種	臓器・組織	物理的半減期	生物学的半減期	実効半減期
^3H	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

§3.7.4 体内除染材

表 3.14: 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

主任者試験問題

1. 次の放射性核種と内部被曝の影響の組合せとして、誤っているのはどれか。 [2017年生物問 20]
 - (a) プルトニウム 239 — 肝がん
 - (b) コバルト 60 — 肝がん
 - (c) ラジウム 226 — 肝がん
 - (d) 鉄 59 — 白血病
 - (e) ラドン 222 — 肺がん

2. 生体内に入った場合に主要な集積部位が骨ではない核種は次のうちどれか。 [2016年生物問 15]
 - (a) ^{32}P
 - (b) ^{90}Sr
 - (c) ^{210}Po
 - (d) ^{226}Ra
 - (e) ^{241}Am

3. 体内に取り込まれたある放射性核種の放射能が1年でちょうど16分の1に減少した。この放射性核種の物理的半減期が2年であるとき、生物学的半減期 [日] として最も近い値は次のうちどれか。 [2015年生物問 23]
 - (a) 23
 - (b) 81
 - (c) 91
 - (d) 104
 - (e) 639

4. 放射性核種と体内での集積部位の関係として、正しいものの組合せは、次のうちどれか。 [2013年生物問 13]
 - (a) ^{32}P — 肝臓
 - (b) ^{60}Co — 肺
 - (c) ^{90}Sr — 骨
 - (d) ^{137}Cs — 全身
 - (e) ^{226}Ra — 骨

5. 次の放射性核種と主な分布臓器の組み合わせで正しいものはどれか。 [2012年生物問 23]
 - (a) ^{32}P — 脳
 - (b) ^{90}Sr — 骨
 - (c) ^{137}Cs — 全身
 - (d) ^{222}Rn — 胃

6. 内部被曝に関する次の記述のうち、正しいものはどれか。 [2012年生物問 24]
 - (a) 放射性核種の摂取経路は主として、経皮（創傷を含む）、経気道（吸入）および経口である。
 - (b) 主として遺伝性（的）影響をもたらす。
 - (c) 生物学的半減期が影響する。
 - (d) 飛程の短い放射線の影響は小さい。

7. ^{125}I の物理的半減期を60日、生物学的半減期を140日としたとき、有効半減期 [日] として最も近い値は、次のうちどれか。 [2011年生物問 22]

- (a) 20
- (b) 40
- (c) 80
- (d) 120
- (e) 140

§3.7.5 実効線量係数

[2011年管理測定技術問6]

次の文章の□の部分に入る最も適切な語句、数値又は数式を、それぞれの解答群から1つだけ選べ。

1. 放射性物質が体内に侵入する経路には経口摂取、吸入摂取、経皮侵入（創傷からの侵入を含む）の3つがある。経口摂取された放射性物質の消化管吸収率は、ヨウ素のように高いものや□Aのように非常に低いものがあり、吸収率は放射性物質の種類により異なる。血液中に入った放射性核種は、その化学的性質に従って特有の分布をする。トリチウムや□Bは全身にほぼ均等に分布し、カルシウムや□Cは骨に、ヨウ素は甲状腺に集積する。組織に集積した放射性物質はやがて、主に□Dにより体外に排出される。排出速度は生物学的半減期により表され、被曝線量率は物理学的半減期と生物学的半減期から計算される有効半減期に従って減少する。有効半減期は、式□Eにより計算される。

< A～Eの解答群 >

- | | | | | | | | | | | | |
|----|--|---|------|---|---------|----|--|----|------|---|----|
| 1 | プルトニウム | 2 | セシウム | 3 | ストロンチウム | 4 | 鉄 | 5 | マンガン | 6 | 呼吸 |
| 7 | 尿, 糞 | 8 | 汗 | 9 | 毛髪 | 10 | 痰 | 11 | 脳脊髄液 | | |
| 12 | $\sqrt{\text{生物学的半減期} \times \text{物理的半減期}}$ | | | | | 13 | $\frac{\text{生物学的半減期} + \text{物理的半減期}}{\text{生物学的半減期} \times \text{物理的半減期}}$ | | | | |
| 14 | $\frac{\text{生物学的半減期} \times \text{物理的半減期}}{\text{生物学的半減期} + \text{物理的半減期}}$ | | | | | | | | | | |

2. 体内に取り込まれた放射性物質は、減衰するとともに排泄される。この過程で長期間にわたって周囲の組織の被曝が続く。組織の吸収線量に放射線の線質を考慮した□Fを乗じて摂取時から□G年間（成人の場合）にわたって積分した量を□Hと呼ぶ。これに、組織ごとに定められている□Iを乗じた上で、これらすべてを足し合わせて□Jが定義される。内部被曝に伴う実効線量とはこれを指す。放射線管理上、放射性物質を摂取した時点でこの線量を受けたものとして取り扱う。なお、乳幼児や子供については摂取時から□K歳までの期間を積分の対象とする。

< Fの解答群 >

- 1 組織加重係数 2 放射線加重係数 3 実効線量係数 4 線量・線量率効果係数

< Gの解答群 >

- 1 1 2 5 3 10 4 20 5 50 6 70

< Hの解答群 >

- 1 照射線量 2 吸収線量 3 預託等価線量 4 預託実効線量

< Iの解答群 >

- 1 組織加重係数 2 放射線加重係数 3 実効線量係数 4 線量・線量率効果係数

< Jの解答群 >

- 1 照射線量 2 吸収線量 3 預託等価線量 4 預託実効線量

< Kの解答群 >

- 1 20 2 30 3 40 4 50 5 60 6 70

3. 実効線量の算出は、核種と化学形ごとに告示（放射線を放出する同位元素の数量等を定める件）別表第2により与えられた **L** を用いる。その例を次表に示す。

核種と化学形	吸入摂取した場合の L [mSv/Bq]
³ H メタン	1.8×10^{-10}
³ H 水	1.8×10^{-8}
³ H 有機物（メタンを除く）	4.1×10^{-8}

これをもとに算定するとトリチウム水蒸気を吸入摂取された量が 7.2×10^6 Bq の場合の実効線量は **M** mSv と評価できる。

また、¹³⁷Cs の、吸入摂取した場合の **L** と経口摂取した場合の **L** は次のとおりである。

核種と化学形	吸入摂取した場合の L [mSv/Bq]	経口摂取した場合の L [mSv/Bq]
¹³⁷ Cs（すべての化合物）	6.7×10^{-6}	1.3×10^{-5}

吸入摂取2日後に残留している ¹³⁷Cs が全身で 4.7×10^6 Bq であったとした場合、摂取された ¹³⁷Cs は **N** Bq と見積もられ、この摂取による実効線量は **O** mSv と評価できる。

なお、¹³⁷Cs 摂取後の体内残留率は次の表で与えられるものとする。

経過日数 [日]	1	2	3	4	5
吸入摂取後の体内残留率 [%]	60	50	46	44	43
経口摂取後の体内残留率 [%]	98	95	93	91	89

また、経口摂取した場合に実効線量 10 mSv を与える ¹³⁷Cs の摂取された量は **P** Bq で、経口摂取5日後に残留している ¹³⁷Cs は全身で **Q** Bq となる。

< L の解答群 >

- 1 組織加重係数 2 放射線加重係数 3 実効線量係数 4 線量・線量率効果係数

< M の解答群 >

- 1 1.3×10^{-4} 2 3.0×10^{-4} 3 1.3×10^{-3} 4 3.0×10^{-3}
 5 1.3×10^{-2} 6 3.0×10^{-2} 7 1.3×10^{-1} 8 3.0×10^{-1}

< N の解答群 >

- 1 4.9×10^6 2 5.1×10^6 3 8.0×10^6 4 9.4×10^6

< O の解答群 >

- 1 3.4×10^1 2 6.3×10^1 3 6.6×10^1 4 1.2×10^2

< P の解答群 >

- 1 1.5×10^5 2 7.7×10^5 3 7.7×10^6 4 1.5×10^6

< Q の解答群 >

- 1 3.3×10^5 2 6.9×10^5 3 3.3×10^6 4 6.9×10^6

第4章 放射線管理・法令

4.1 日常生活と放射線

レントゲンによる X 線 (1895 年), 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。

§4.1.1 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 4.1 にまとめよう。

表 4.1: 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, ²³⁸U の寄与は, ウラン系列の中の ²²²Rn 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。

§4.1.2 人工放射線

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。

4.2 防護の目的と体系, 法の目的

§4.2.1 防護体系

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 4.2: 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		
10 ⁰	2.4	1 年間あたりの自然放射線
	1	一般公衆の線量限度
10 ⁻¹	0.6	胃の X 線集団検診
	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

§4.2.2 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、以下の表 4.3 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。

主任者試験問題

1. 天然放射性核種に関する次の記述のうち、正しいものはどれか。 [2017 年化学問 13]

- (a) トリチウム T は、海水中では T₂O の形で存在する。

表 4.3: 行為基準の内容

作業環境管理	線量等量率 表面汚染密度の測定 排気・排水	記録 ≪ 場所の測定 ≫
	施設の点検	
線源管理	受入・使用・保管 廃棄・運搬	記帳
個人管理	教育訓練	
	個人の被曝線量 健康診断	記録 ≪ 人の測定 ≫

- (b) 化石燃料の使用により大気中の ^{14}C 濃度が増加している.
- (c) 地球生成時に存在した ^{87}Rb は, 消滅している.
- (d) ^{222}Rn は, 水温が上がると大気から水に移行する.
- (e) 地球生成以来, ^{235}U の同位体存在度は徐々に低下している.

2. 自然放射線に関する次の記述のうち, 正しいものはどれか. [2017 年生物問 13]

- (a) 宇宙線は高度が同じなら緯度にかかわらずほぼ均一に降り注ぐ.
- (b) 日本人の食品による内部被曝の実効線量に最も大きく寄与する放射性核種は ^{14}C である.
- (c) 日本人の体内に存在する放射性核種のうち, 最も放射能が高いものは ^{40}K である.
- (d) 世界全体の年平均の実効線量で, 大地からの放射線による外部被曝の実効線量は, ラドン及びその子孫核種の吸入による内部被曝の実効線量より大きい.
- (e) 自然放射線による 1 年当たりの被曝の実効線量の世界平均は約 2.4 mSv である.

3. 天然放射性元素 (安定同位体を持たない元素) 又は天然放射性核種に関する次の記述のうち, 正しいものはどれか. [2016 年化学問 15]

- (a) 最も原子番号の小さい天然放射性元素はウランである.
- (b) 天然放射性核種の半減期は 100 万年以上である.
- (c) 大気圏上層で常に生成している天然放射性核種がある.
- (d) 常温常圧で気体の天然放射性核種が存在する.

4. 環境中の ^{14}C に関する次の記述のうち, 正しいものはどれか. [2016 年化学問 16]

- (a) ^{14}C は主に ^{40}Ar の核破砕反応で生成する.
- (b) 大気中の二酸化炭素に含まれる ^{14}C の濃度は 19 世紀末から上昇を続けている.
- (c) 天然繊維に比べて合成繊維中の ^{14}C は低濃度である.
- (d) ^{14}C の加速器質量分析では半導体検出器により β 線を計数する.
- (e) ^{14}C を含む考古学遺物が埋蔵されてからの年代を求めることが出来る.

[2013年管理測定技術問6]

次の文章の□の部分に入る最も適切な語句又は数値を、それぞれの解答群から1つだけ選べ。

1. 原子力施設や放射線利用施設等において、業務を遂行する上で放射線に被曝することを職業被曝といい、その限度が定められている。また、放射線業務に従事する者（放射線作業員）に対しては、放射線による障害の発生を防止するために、被曝線量を把握するための測定を行うことが法令で義務づけられている。

放射線作業員の被曝形態の大半は□A被曝であり、積算型個人被曝線量計を用いた被曝線量測定が基本となる。現在、我が国で普及している積算型個人被曝線量計には、素子に対して紫外線による刺激を与えることで発生する蛍光を利用して放射線量を読み出す□Bや、可視光による刺激を与えることで発生する蛍光を利用して放射線量を読み出す□Cなどがある。

我が国の放射線作業員数は近年増加傾向を示していて、主に□D分野の放射線作業員数の増加による。□D分野における放射線作業員数は全放射線作業員数の約50%を占めている。

< Aの解答群 >

- 1 内部 2 外部

< B, Cの解答群 >

- 1 フィルムバッチ 2 蛍光ガラス線量計 3 電子式個人被曝線量計
4 光刺激ルミネセンス線量計 5 熱ルミネセンス線量計

< Dの解答群 >

- 1 原子力 2 医療 3 教育研究 4 鉱工業

2. ICRP1990年勧告において、航空機の乗務員の宇宙線による被曝や、一部の高ラドン濃度中での作業など、自然放射線による被曝も職業被曝として扱われるようになった。

国内では、放射線審議会において職務として航空機に頻繁に搭乗する乗務員の被曝に関して、年間5 mSvを管理目標とするガイドラインが策定され、各航空会社はこのガイドラインに沿った対応が求められている。

民間航空機が飛ぶ地上11 km程度の高さにおける乗務員の被曝は主に宇宙から飛来する宇宙線による。宇宙線の源は、太陽から放出される粒子と太陽系以外から飛来する□E宇宙線とに大別される。大気圏内での被曝の大部分は太陽粒子に比べエネルギーの高い□E宇宙線起源のものによる。□E宇宙線の組成は98%が原子核で残り2%のほとんどが□Fである。原子核のうち87%が□G、12%が□H、残りの1%がさらに重いもので構成される。

地球の磁気圏に入ってくる□E宇宙線の粒子数は太陽活動の影響を受ける。約11年の太陽活動周期に合わせ太陽磁気が□I場合には地球大気圏まで到達できる□E宇宙線の粒子数が増加し、地上や航空機内で受ける被曝線量は増加する。また、まれではあるが太陽の黒点付近で突然激しい活動が起こり、高エネルギーのプラズマ粒子が大量に放出されることがある。この現象は□Jと呼ばれ、航空機の乗務員が上空で受ける被曝線量を増加させる原因となり得る。

宇宙線による線量率は高度によって異なり、高々度で高くなる。地上11 km程度の高さでは、宇宙線は地表に比べ約100倍程となる。地表ではミュー粒子の実効線量への寄与が相対的に大きいのにに対し、□Kの寄与は高度とともに急激に増加し、地上11 km程度の高さの被曝では□Kによる被曝が最も大きな割合を占める。また、宇宙線による線量率は□Lの影響を受けるため、同様な高度を飛行し飛行時間が同程度の場合でも、成田ーシドニー便と成田ーサンフランシスコ便を比較すると□Mの方が被曝線量は高くなる。成田ーニューヨーク便の往復により乗務員や乗客は□N mSvの被曝をする。

< Eの解答群 >

- 1 ブラックホール 2 超新星 3 星雲 4 銀河

< F~Hの解答群 >

- 1 中性子 2 陽子（水素原子核） 3 パイ粒子 4 電子
5 光子 6 ヘリウム原子核 7 炭素原子核 8 鉄原子核

< Iの解答群 >

1 強い 2 弱い

< Jの解答群 >

1 ゴースト 2 フレア 3 コロナ

< Kの解答群 >

1 中性子 2 陽子 3 パイ粒子 4 電子 5 光子

< Lの解答群 >

1 湿度 2 気圧 3 地磁気 4 気温

< Mの解答群 >

1 前者 2 後者

< Nの解答群 >

1 0.001~0.002 2 0.01~0.02 3 0.1~0.2 4 1~2 5 10~20

3. ラドンの影響としては，ウラン鉱山などその濃度が非常に高い場所での疫学調査で肺がんの過剰発生が認められている。

被曝による健康被害を考える上で重要なラドンには，天然に存在する放射性壊変系列であるウラン系列の途中にあるラジウム $\boxed{\text{O}}$ が壊変して生成されるラドン $\boxed{\text{P}}$ と，トリウム系列ラジウム $\boxed{\text{Q}}$ が壊変して生成されるラドン $\boxed{\text{R}}$ とがある。通常，ウラン系列のラドン $\boxed{\text{P}}$ をラドンと呼び，トリウム系列のラドン $\boxed{\text{R}}$ をトロンと呼ぶ。

岩石や土壤に含まれるラジウム $\boxed{\text{O}}$ が壊変して希ガスであるラドンとなり空气中に散逸する。ラドン自体の被曝線量に対する寄与は希ガスであるために小さく，ほとんどが子孫核種の吸入による。ラドンの子孫核種は気管や肺胞に付着し，それらから放出される $\boxed{\text{S}}$ が，発がんに関して重要となる。

< O~Rの解答群 >

1 216 2 218 3 220 4 222 5 224 6 226 7 228

< Sの解答群 >

1 α 線 2 β 線 3 γ 線 4 電子線 5 中性子線 6 陽子線 7 X線

[2015年管理測定技術問5]

次の文章の□の部分に入る最も適切な語句又は数値を、それぞれの解答群から1つだけ選べ。

1. 放射線防護の目的は、有害な□A□影響を防止し、□B□影響を容認できるレベルまで制限することである。

□A□影響にはしきい線量がある。しきい線量は、概念として、それ以下の線量の被曝では症状や影響が検出されないというものである。しきい線量を超えて被曝すると線量の増加につれて症状の発生確率が上昇し、重篤度が高くなる。しきい線量は、被曝の形式や器官・組織に依存して様々な値をとる。一般に、分割して被曝した場合、同一線量を1回で被曝した場合と比べてしきい線量は□C□。ICRP2007年勧告では、全身γ線被曝した成人集団の1%に症状が現れる吸収線量としてしきい線量を推定し、一時的脱毛については約□ア□Gy、造血機能低下については約□イ□Gyとしている。

□B□影響にはしきい線量はないと仮定されている。□B□影響には発がん□D□影響の2つがある。□B□影響を評価するための指標の1つとして、1Sv当たりの□B□影響の発生頻度の推定値を与える□E□がある。

< A～E の解答群 >

- 1 確定的 2 確率的 3 身体的 4 遺伝性(的) 5 低い
6 変わらない 7 高い 8 名目リスク係数 9 線量係数 10 倍加線量
11 線量・線量率効果

< ア, イ の解答群 >

- 1 0.1 2 0.5 3 1 4 4 5 6 6 10 7 15

2. 放射線防護のためには被曝線量を知る必要がある。被曝線量の限度は防護量で指定される。防護量には、吸収線量に□F□を乗じた等価線量や、それにさらに□G□を乗じて全身にわたって総和をとった実効線量がある。しかし、一般的な放射線管理で組織・臓器の線量を実測することは実質的には不可能である。そこで、実際の被曝線量の管理においては、防護量と対応づけられた実用量が定められている。外部被曝に関する実用量として、周辺線量等量、方向性線量等量、および個人線量等量がある。実用量の値は防護量の値と比べて□H□ように定められている。

放射線防護の目標が達成されているか否かを判断するために行われる放射線の測定・結果の解釈・評価の一連の行為をモニタリングという。モニタリングは、□I□モニタリングと個人モニタリングに大別できる。

□I□モニタリングにおいて、γ線や中性子線等の強透過性放射線を測定する場合、実用量としては□J□が用いられる。

個人モニタリングにおいて、□K□線量と対応づけられた実用量は□ウ□cm線量等量である。日常のモニタリングで□K□線量を評価する場合で、体幹部が前面からほぼ均等に外部被曝することが予想される場合は、□L□(妊娠可能な女子においては□M□)においては□ウ□cm線量等量を測定・評価する。この□ウ□cm線量等量の基準は、組織等価物質でできたICRU□N□ファントムの入射表面から□ウ□cmの深さの線量から定められる。一方、個人モニタリングにおいて皮膚の防護量として□O□線量を考える場合、防護量と対応づけられた実用量は□エ□μm線量等量である。

< F～J の解答群 >

- 1 放射線減弱係数 2 放射線加重係数 3 放射線吸収係数 4 実効線量係数
5 組織加重係数 6 放射能移行係数 7 下回らない 8 等しくなる
9 上回らない 10 集団 11 環境 12 宇宙
13 周辺線量等量 14 方向性線量等量 15 個人線量等量

< K～O の解答群 >

- 1 等価 2 吸収 3 実効 4 照射 5 胸部 6 腹部
7 頭部 8 背部 9 球 10 楕円体 11 立方体 12 スラブ

< ウ, エ の解答群 >

- 1 1 2 3 3 7 4 10 5 30 6 70 7 100 8 300

4.3 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。

主任者試験問題

[2011年管理測定技術問5]

次の文章の□の部分に入る最も適切な語句又は記号を、それぞれの解答群から1つだけ選べ。

1. 空気中の放射能測定のための試料採取では、放射性物質の化学形、性状、濃度に応じて、様々な捕集方法が適用されている。例えば、□A□のような放射性希ガスの直接捕集では□B□がしばしば用いられる。水蒸気として存在する ^3H の捕集では、直接捕集の他に、□C□による固体捕集、□D□による液体捕集、□E□による冷却凝縮捕集も利用される。また、同様に気体として存在する ^{131}I の固体捕集では□F□がより有効である。これに対して、□G□などのラジオアイソトープ(RI)が浮遊粒子として存在する場合にはダストサンプラを用いて試料を採取することができる。ただし、浮遊粉じんへの吸着により、気体として存在していたRIがろ紙に捕集される場合もある。

このように捕集されたRIを定量した上で、一般に捕集装置への吸引平均流量、□H□効率、及び□I□の値からRIの空气中濃度を算出する。

< A~F の解答群 >

- | | | |
|-----------------|-------------------|---------------------|
| 1 ^4He | 2 ^{40}K | 3 ^{133}Xe |
| 4 ガス捕集用電離箱 | 5 シンチレーションカクテル | 6 活性炭カートリッジ |
| 7 シリカゲル | 8 ろ紙 | 9 水バブラー |
| 10 ベンゼン | 11 リービッヒ冷却管 | 12 コールドトラップ |

< G の解答群 >

- 1 ^{60}Co 2 ^{85}Kr 3 ^{133}Xe

< H, I の解答群 >

- 1 吸入 2 作業 3 捕集 4 捕集時間 5 捕集装置の容積

2. 空気中に放射性物質が存在する場合には、吸入による内部被曝が問題となる。内部被曝の影響を考える場合には、壊変様式や線質などの物理的性質を知っておく必要がある。 ^{133}Xe 、 ^{131}I 、 ^3H 、 ^{60}Co はすべて□J□するが、□K□以外は γ 線も放出する。また、化学的性質も重要である。特に ^{131}I は実験環境中で多様な化学形をとるので、取扱いに注意を要する。□L□は特に揮発しやすい化学形である。飛散を防ぐために、水溶液系では□M□となることを避けるなどの工夫が行われる。なお、壊変によって約1%の ^{131}I は放射性的□N□となるので、これの挙動にも注意を要する場合がある。

< J, K の解答群 >

- 1 α 壊変 2 β^- 壊変 3 β^+ 壊変 4 電子捕獲(EC壊変)
5 ^{131}Xe 6 ^{131}I 7 ^3H 8 ^{60}Co

< L~N の解答群 >

- 1 I^- 2 I_2 3 I_3^- 4 IO_4^- 5 酸性
6 中性 7 アルカリ性 8 ^{129}Sb 9 ^{131m}Xe 10 ^{131}Se

3. 空気中に存在する放射性物質を吸入してそれらによる被曝が問題となる場合には、吸入した放射性物質を除去するための処置を速やかに行うことを考慮する。 ^{131}Xe の体内からの除去には清浄な□O□での□P□が有効である。 ^{131}I を吸入した場合の体内汚染の除去には吸入後速やかに□Q□を投与することが有効である。水蒸気として存在する ^3H を吸入した場合の体内汚染の除去には□R□を行い、□S□を投与することが有効である。粒子として浮遊している ^{60}Co を吸入した場合の体内汚染の除去には□T□を投与することが有効である。

< O~T の解答群 >

- 1 呼吸 2 飲水 3 脱毛 4 運動 5 胃洗浄
6 腸内洗浄 7 ヨウ化カリウム 8 利尿剤 9 血管拡張剤 10 D-ペニシラミン
11 空気 12 窒素

4.4 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まっ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).

主任者試験問題

[2016年管理測定技術問4]

非密封放射性同位元素の ^3H , ^{137}Cs , ^{125}I , ^{131}I を取り扱う施設がある。各使用施設の取扱いに関する次の文章の□の部分に入る最も適切な語句、記号又は数値を、それぞれの解答群から1つだけ選べ。

1. トリチウム水は、蒸発や飛散などにより周囲を汚染しやすいので、トリチウム水を取扱う作業はフードまたはグローブボックス内で行う。空気中の放射性物質の濃度を測定するには、いったん捕集して行う方法がとられる場合が多い。トリチウム水には、□Aまたはモレキュラーシーブを用いた固体捕集法や、ドライアイスなどを用いたコールドトラップによる冷却凝縮法などを利用する。気体トリチウムには、パラジウム触媒を用いてトリチウム水に変換したのち、上記の固体捕集法や冷却凝縮法を適用する。トリチウムの β 線最大エネルギーは□ア keVであり、その放射能測定には□Bが用いられる。また、試料水は、□C濃度の低いガラスバイアル又はポリエチレンバイアル等に入れ、水と□Dを形成する乳化シンチレータと混和して測定する。

< A~Dの解答群 >

- | | | | | |
|------------------|---------|------------|-----------|------------|
| 1 アルミナ | 2 シリカゲル | 3 酸化鉄(III) | 4 酸化銅(II) | 5 GM管式計数装置 |
| 6 液体シンチレーション計数装置 | 7 Ge検出器 | 8 ナトリウム | 9 マグネシウム | |
| 10 カリウム | 11 気泡 | 12 白色沈殿 | 13 エマルジョン | |

<アの解答群 >

- 1 18.6 2 157 3 249 4 257

2. ^{137}Cs は半減期約30年で□イ壊変して、その94%は ^{137m}Ba になり、 ^{137m}Ba は核異性体転移により γ 線(□ウ keV)を放出する。

非密封の ^{137}Cs を使用する際には作業室のフードの中で取り扱い、線源バイアルはピンセットや tong などを使い、直接手では扱わないようにする。 ^{137}Cs (塩化物)の50 MBqが入ったガラスバイアルを鉛の外容器から取り出してバット内に置き、バイアルから50 cmの距離で5時間作業を行った。バイアルの遮蔽効果を無視すると作業者の実効線量は□エ μSv となる。

遮蔽用の衝立には鉛板を用いる。 ^{137}Cs の γ 線に対する鉛の半価層の最も近い値は□オ cmである。また、線源バイアルと作業者の距離を変えずに線量率を10分の1にするために線源の入ったガラスバイアルを鉛板で遮蔽するには、その厚さ1 cmの板が少なくとも□カ枚必要である。

ただし、 ^{137}Cs の実効線量率定数は $0.078 \mu\text{Sv}\cdot\text{h}^{-1}\cdot\text{m}^2\cdot\text{MBq}^{-1}$ 、 γ 線に対する鉛の質量減弱係数は $0.11 \text{cm}^2/\text{g}$ 、鉛の密度を $11.4 \text{g}/\text{cm}^3$ とし、ビルトアップの影響は無視した。

<イの解答群 >

- 1 α 2 β^- 3 β^+ 4 EC

<ウの解答群 >

- 1 159 2 514 3 662 4 835 5 1,369

<エの解答群 >

- 1 16 2 24 3 37 4 78 5 87

<オの解答群 >

- 1 0.1 2 0.6 3 2.8 4 5.6 5 7.3

<カの解答群 >

- 1 1 2 2 3 3 4 4 5 5

3. ヨウ素のトレーサー実験には ^{125}I (半減期 59.4 日) や ^{131}I (半減期 8.02 日) が多く利用される。ヨウ素の化合物には揮発性のものが多い。例えば、ヨウ化カリウム (KI) を含む水溶液を [E] にすると揮発性の [F] が生成する。このため、放射性ヨウ素標識 KI を取扱う作業は、フードやグローブボックス内で行い、[G] を含むマスクを着用する。放射性ヨウ素標識ヨウ化メチルの取扱いの際には、[G] よりも [H] を含むマスクの着用が有効である。

^{125}I は EC 壊変して、[I] の励起準位から γ 線 (35.5 keV) を放出する。また、 γ 線放射と競合する内部転換により、特性 X 線 (27.4 keV 及び 31.1 keV) を放出する。実験テーブルや床面の直接法による表面汚染検査には、低エネルギー光子専用の [J] 式サーベイメータの利用が適している。実験テーブルや床面の除染作業は、ペーパータオルなどに、中性洗剤、あるいは還元性の [K] を浸み込ませて拭き取り、その後、再度サーベイメータで測定して汚染のないことを確認する。

< E~H の解答群 >

- 1 酸性 2 中性 3 アルカリ性 4 IO_3^- 5 I_3^- 6 I^- 7 I_2
 8 無添着活性炭 9 有機アミン添着活性炭 10 シリカゲル添着活性炭
 11 アルミナ添着活性炭

< I の解答群 >

- 1 ^{135}Sn 2 ^{125}Sb 3 ^{125}Te 4 ^{125}Xe

< J, K の解答群 >

- 1 比例計数管 2 ZnS(Ag) シンチレーション
 3 薄型 NaI(Tl) シンチレーション 4 井戸型 NaI(Tl) シンチレーション
 5 希塩酸 6 過酸化水素水
 7 亜硫酸ナトリウム水溶液

4. 実験室からの排水は、一旦、排水設備の貯留槽に溜め置かれる。貯留槽内の排水を排水するには、含まれる放射性同位元素の濃度・化学形、排水中の濃度限度を考慮する必要がある。

貯留槽にトリチウム水 30 kBq/L と無機 ^{131}I 120 Bq/L を含む廃液があり、その水量は 1 m^3 である。これをただちに排水するには、少なくとも [L] m^3 の水で希釈しなければならない。一方、新たな流入がない状態で 24 日間減衰を待つと、それぞれの濃度と排水中の濃度限度との比の和は [M] となり、24 日後に放射能が排水中の濃度限度以下であることを測定により確認した上で排水できる。

ただし、告示別表第 2 第六欄に定める ^3H (水) 及び ^{131}I (ヨウ化メチル以外の化合物) の排水中の濃度限度はそれぞれ $6 \times 10^1\text{ Bq/cm}^3$, $4 \times 10^{-2}\text{ Bq/cm}^3$ である。 ^3H 及び ^{131}I の半減期は、それぞれ 12 年及び 8 日とする。

< L の解答群 >

- 1 1.3 2 2.5 3 3.5 4 5.4 5 6.4

< M の解答群 >

- 1 0.1 2 0.3 3 0.5 4 0.7 5 0.9

4.5 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

§4.5.1 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、次の三原則がいられている。

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。

主任者試験問題

[2012 年管理測定技術問 6]

次の文章の□の部分に入る最も適切な語句，記号又は数値を，それぞれの解答群から1つだけ選べ。

1. 我々は放射性同位元素を取り扱わなくても自然放射線により常に被曝している。自然放射線による被曝には、宇宙線によるものと[A]核種からのものの2つがある。さらに、[A]核種は、地球の誕生時から存在していた[B]核種とその子孫核種，及び宇宙線が大気に当たって生成した[C]核種からなる。

宇宙線は外部被曝の原因となる。また、大地の[A]核種からも外部被曝を受ける。世界平均では、自然放射線による被曝で最も寄与の大きいのはラドン及びその子孫核種の吸入による内部被曝である。

[D]は[B]核種であり、外部被曝をもたらすとともに、食品から摂取され、体の構成要素として内部被曝もたらす。[C]核種からの被曝の大部分は[E]による内部被曝であるが、被曝に占める割合はごくわずかである。

これらすべての自然放射線による被曝は、世界平均では年間[F] mSv 程度になる。

< A～C の解答群 >

- 1 人工放射性 2 天然放射性 3 原始放射性 4 宇宙線生成

< D, E の解答群 >

- 1 ^3H 2 ^{14}C 3 ^{22}Na 4 ^{40}K 5 ^{45}Ca

< F の解答群 >

- 1 0.1 2 0.5 3 1 4 2 5 5 6 10 7 20 8 50

2. 内部被曝の管理においては、摂取した放射能（単位：Bq）に[G]を乗ずることにより[H]を求める。摂取した放射能を被検者の測定から求めるには、体外計測法やバイオアッセイ法などがある。体外計測法は取り込まれた核種から放出される放射線を直接測定する方法で、測定には主に[I]を用い、[J]を放出する放射性核種が対象になる。測定時における体内放射能の評価精度はバイオアッセイ法に比べて[K]。バイオアッセイ法は、被検者の尿、便などの放射能を測定して、その値をもとにして摂取量を推定するものである。すべての核種が測定対象となるが、特に ^{90}Sr のような[L]だけを放出する核種の場合は、バイオアッセイ法が適している。ただし、尿、便のバイオアッセイ法では[M]などのパラメータの個人差による誤差に注意が必要である。

空気中の放射性物質の吸入による摂取量の推定には、空気中放射能濃度から算定する方法もある。この場合も、[N]などのパラメータが必ずしも個人の実際の値と一致しているわけではなく、また空気中放射能濃度と摂取量の関係が一様ではないので、摂取量の評価精度は高くない。

< G, H の解答群 >

- 1 線吸収係数 2 組織加重係数 3 質量吸収係数 4 実効線量係数 5 照射線量
6 吸収線量 7 等価線量 8 預託実効線量

< I～N の解答群 >

- 1 液体シンチレーションカウンタ 2 ホールボディカウンタ 3 エリアモニタ 4 電離箱
5 α 線 6 β 線 7 γ 線 8 高い
9 低い 10 呼吸率 11 突然変異 12 発がん率
13 排泄率

3. 摂取した放射性物質は、体内にとどまっている限り被曝の原因となるので、排泄などによってそれが体外に出るまでの体内動態を知ることが大切である。内部被曝線量の評価には、放射性核種で決まっている物理的半減期と摂取された放射性物質が体外に排出されるまでの時間を反映する生物学的半減期から計算される有効半減期を用いる。 ^{131}I の場合、物理的半減期は であり、生物学的半減期を80日とすると、有効半減期は約 となる。 ^{137}Cs の場合、物理的半減期は であり、生物学的半減期を100日とすると、有効半減期は約 となる。

内部被曝を低減するためには、放射性物質の摂取をなるべく少なくするとともに、万一摂取してしまった場合、体内からすばやく排除するための手段を講じることが重要である。放射性ヨウ素に対しては、薬剤として安定ヨウ素剤を予防的あるいは摂取後すみやかに投与すると効果が認められている。セシウムは、 と化学的性質が類似しており、経口摂取すると消化管から吸収されて全身に分布する。放射性セシウムを摂取した場合には、必要に応じて医師の処方にしたがって を投与する。この薬剤はセシウムと結合して、コロイドとして便に排泄されることにより、消化管からの吸収を阻害する。

< O～R の解答群 >

- 1 1日 2 4日 3 7日 4 8日 5 50日 6 100日
7 160日 8 1年 9 5年 10 10年 11 30年

< S, T の解答群 >

- 1 EDTA 2 DTPA 3 プルシアンブルー 4 アルギン酸ナトリウム
5 カルシウム 6 カリウム 7 アルミニウム 8 亜鉛 9 鉄

付録 A SI単位系

A.1 放射線で使われる SI 単位

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.1: 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	
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	

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わかりやすくする。

表 A.2: SI 接頭語

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

付録B 周期表

B.1 周期表

	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。

B.2 核外電子配置

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

付 録 C 同位体

放射線化学の試験に、安定同位体と放射性同位体の組み合わせを問う問題がある。大抵の本には、安定同位体と放射性同位体が別々の所に出ているので、比較するのが大変である。そこで、一つにまとめた表が欲しいと思って作成した。

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
------	------	------	------	------

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_0n	10.4 m	β^-			
1	Hydrogen	^1_1H	—				99.9885
	Deuterium	^2_1D	—				0.0115
	Tritium	^3_1T	12.32 y	β^-	0.0186	全身	
2	Helium	^3_2He	—				0.0002
		^4_2He	—				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	${}^6\text{Li}$	—				
		${}^7\text{Li}$	—				
4	Beryllium	${}^7\text{Be}$	53.29 d	EC			100
		${}^9\text{Be}$ 単	—				
		${}^{10}\text{Be}$	1.51×10^6 y	β^-			
5	Boron	${}^{10}\text{B}$	—				
		${}^{11}\text{B}$	—				
6	Carbon	${}^{11}\text{C}$	20.39 m	β^+ , EC		PET	98.93 1.07 1.2×10^{-8}
		${}^{12}\text{C}$	—				
		${}^{13}\text{C}$	—				
		${}^{14}\text{C}$	5730 y	β^-	0.156	全身	
7	Nitrogen	${}^{13}\text{N}$	9.965 m	β^+ , EC		PET	
		${}^{14}\text{N}$	—				
		${}^{15}\text{N}$	—				
8	Oxygen	${}^{15}\text{O}$	2.037 m	β^+ , EC		PET	
		${}^{16}\text{O}$	—				
		${}^{17}\text{O}$	—				
		${}^{18}\text{O}$	—				
9	Fluorine	${}^{18}\text{F}$	109.8 m	β^+ , EC		PET-FDG	100
		${}^{19}\text{F}$ 単	—				
10	Neon	${}^{20}\text{Ne}$	—				
		${}^{21}\text{Ne}$	—				
		${}^{22}\text{Ne}$	—				

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	${}^{22}\text{Na}$	2.609 y	β^+ , EC			100
		${}^{23}\text{Na}$ 単	—				
		${}^{24}\text{Na}$	14.96 h	β^-			
12	Magnesium	${}^{24}\text{Mg}$	—				
		${}^{25}\text{Mg}$	—				
		${}^{26}\text{Mg}$	—				
		${}^{27}\text{Mg}$	9.458 m	β^-			
		${}^{28}\text{Mg}$	20.915 h	β^-			
13	Aluminium	${}^{26}\text{Al}$	7.4×10^5 y	β^+ , EC			100
		${}^{27}\text{Al}$ 単	—				
		${}^{28}\text{Al}$	2.241 m	β^-			
14	Silicon	${}^{28}\text{Si}$	—				92
		${}^{29}\text{Si}$	—				5
		${}^{30}\text{Si}$	—				3
		${}^{31}\text{Si}$	2.622 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 %
15	Phosphorus	³⁰ P	2.498 m	β^+ , EC	3.210	骨	100
		³¹ P 単	—				
		³² P	14.26 d	β^-	1.711		
		³³ P	25.34 d	β^-	0.249		
16	Sulfur	³² S	—		0.167		
		³³ S	—				
		³⁴ S	—				
		³⁵ S	87.51 d	β^-			
		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	—				
		³⁷ Ar	35.04 d	EC			
		³⁸ Ar	—				
		⁴⁰ Ar	—				
		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			0.0117
		⁴¹ K	—				6.7302
		⁴² K	12.36 h	β^-			
		⁴³ K	22.3 h	β^-			
20	Calcium	⁴⁰ Ca	—		0.257	骨	
		⁴² Ca	—				
		⁴³ Ca	—				
		⁴⁴ Ca	—				
		⁴⁵ Ca	162.6 d	β^-			
		⁴⁶ Ca	—				
		⁴⁷ Ca	4.536 d	β^-			
⁴⁸ Ca	—						
21	Scandium	^{44^m} Sc	58.61 h	IT, EC			100
		⁴⁴ Sc	3.97 h	β^+ , EC			
		⁴⁵ Sc 単	—				
		⁴⁶ Sc	83.79 d	β^-			
		⁴⁷ Sc	3.3492 d	β^-			
		⁴⁸ Sc	43.67 h	β^-			
		⁴⁹ Sc	57.2 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 %	
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	—	EC				
		⁵¹ Cr	27.70 d					
		⁵² Cr	—					
		⁵³ Cr	—					
		⁵⁴ Cr	—					
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	5.845	
		⁵⁴ Fe	—					
		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^+	0.122	肝臓		
		⁵⁶ Co	77.23 d	EC, β^+				
		⁵⁷ Co	271.7 d	EC				
		^{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

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 %
28	Nickel	⁵⁶ Ni	6.075 d	EC			
		⁵⁷ Ni	35.60 h	EC, β^+			
		⁵⁸ Ni	—				
		⁵⁹ Ni	7.6×10^4 y	EC			
		⁶⁰ Ni	—				
		⁶¹ Ni	—				
		⁶² Ni	—				
		⁶³ Ni	101.2 y	β^-			
		⁶⁴ Ni	—				
		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^-			
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	—				
		^{69^m} 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	—				
		^{77^m} Ge	53.7 s	β^- , IT			
⁷⁷ Ge	11.211 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 %
33	Arsenic	⁷¹ As	65.30 h	β^+ , EC			100
		⁷² As	26.0 h	β^+ , EC			
		⁷³ As	80.30 d	EC			
		⁷⁴ As	17.77 d	EC, β^+ , β^-			
		⁷⁵ As 単	—				
		⁷⁶ As	26.24 h	β^-			
		⁷⁷ As	38.83 h	β^-			
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^-			
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	—						

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^-			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^-			
		^{91m} Y	49.71 m	IT			
		⁹¹ Y	58.51 d	β^-			
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^-			

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 %	
42	Molybdenum	⁹² Mo	—	EC				
		⁹³ Mo	4.0×10^3 y					
		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
^{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^-				
44	Ruthenium	⁹⁶ Ru	—			骨髄		
		⁹⁸ Ru	—					
		⁹⁹ Ru	—					
		¹⁰⁰ Ru	—					
		¹⁰¹ Ru	—					
		¹⁰² Ru	—					
		¹⁰³ Ru	39.26 d					β^-
		¹⁰⁴ Ru	—					
		¹⁰⁵ Ru	4.44 h					β^-
¹⁰⁶ Ru	373.6 d	β^-						
45	Rhodium	⁹⁹ Rh	16.1 d	EC, β^+			100	
		^{103m} Rh	56.114 m	IT				
		¹⁰³ Rh 単	—					
		^{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^-

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 %
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^-					
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	—				
		^{121m}Te	164.2 d	IT, EC			
		^{121}Te	19.17 d	EC			
		^{122}Te	—				
		^{123m}Te	119.25 d				
		^{123}Te 天	9.2×10^{16} y	EC			0.89
		^{124}Te	—				
		^{125m}Te	57.40 d	IT			
		^{125}Te	—				
		^{126}Te	—				
		^{127m}Te	106.1 d	IT, β^-			
		^{127}Te	9.35 h	β^-			
		^{128}Te	—				
		^{129m}Te	33.6 d	IT, β^-			
		^{129}Te	69.6 m	β^-			
		^{130}Te	—				
^{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^+	0.0355, 0.0275	甲状腺	100
		¹²³ I	13.27 h	EC			
		¹²⁴ I	4.1760 h	EC, β^+			
		¹²⁵ I	59.40 d	EC			
		¹²⁶ I	12.93 d	EC, β^+ , β^-			
		¹²⁷ I 単	—				
		¹²⁸ I	24.99 m	β^- , EC, β^+			
		¹²⁹ I	1.57×10^7 y	β^-	0.606		
		¹³⁰ I	12.36 h	β^-			
		¹³¹ I	8.021 d	β^-			
		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^+	0.658 0.269 0.662	全身	100
		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	—				
		^{134m} Cs	2.903 h	IT			
		¹³⁴ Cs	2.065 y	β^- , EC			
		¹³⁵ Cs	2.3×10^6 y	β^-			
		¹³⁷ Cs	30.04 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 %
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			
		^{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^-					
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^-			

²57~71 まではランタノイドである。

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 %
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^-			
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			100
		^{159}Tb 単	—				
		^{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^-			

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 %
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^-			
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			2.599
		^{176}Lu 天	3.76×10^{10} y	β^-			
		^{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^-			

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 %
75	Rhenium	¹⁸³ Re	70.0 d	EC			37.40
		¹⁸⁵ Re	—				
		¹⁸⁶ Re	3.7183 d	β^- , EC			62.60
		¹⁸⁷ Re 天	4.33×10^{10} y	β^-			
		¹⁸⁸ Re	17.0040 h	β^-			
76	Osmium	¹⁸⁴ Os	—				1.59
		¹⁸⁵ Os	93.6 d	EC			
		¹⁸⁶ Os 天	2.0×10^{15} y	α			
		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			100
		^{197m} Au	7.73 s	IT			
		¹⁹⁷ Au 単	—				
		¹⁹⁸ Au	2.695 d	β^-	0.961		
		¹⁹⁹ Au	3.139 d	β^-			
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^-			

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 %	
81	Thallium	²⁰⁰ Tl	26.1 h	EC, β^+			29.52	
		²⁰¹ Tl	3.0421 d	EC				
		²⁰² Tl	12.31 d	EC				
		²⁰³ Tl	—					70.48
		²⁰⁴ Tl	3.783 y	β^- , EC, β^+				
		²⁰⁵ Tl 系 1	—					
		²⁰⁶ Tl	4.202 m	β^-				
		²⁰⁷ Tl	4.77 m	β^-				
		²⁰⁸ Tl	3.053 m	β^-				
		²⁰⁹ Tl	2.162 m	β^-				
		²¹⁰ Tl	1.30 m	β^-				
82	Lead	²⁰⁰ Pb	21.5 h	EC			1.4	
		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			24.1	
		²⁰⁴ Pb	—					
		²⁰⁶ Pb 系 2	—					
		^{207m} Pb	0.806 s	IT			22.1	
		²⁰⁷ Pb 系 3	—					
		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^-						
83	Bismuth ⁴	²⁰⁶ Bi	6.243 d	EC, β^+			100	
		²⁰⁷ Bi	31.55 y	EC, β^+				
		²⁰⁸ Bi	3.68×10^5 y	EC				
		²⁰⁹ Bi	2.01×10^{19} y	α				
		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				
		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				
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		

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 ⁸³Bi 以降の原子核は、すべて放射性である。

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 %
86	Radon	^{220}Rn	55.6 s	α			
		^{222}Rn	3.824 d	α		肺	

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

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			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
		^{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^-					

⁵原子番号 89~103 はアクチニウムである。

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 %
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 ⁻			
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		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			
		²⁴⁶ Cm	1.344 × 10 ⁷ y	SF			
		²⁴⁸ Cm	4.706 × 10 ³ 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					

⁶原子番号 93 の ⁹³Np 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。