

令和 4 年度

## 第 2 種放射線取扱主任者試験

### 問題と解答例

物理学 化学 生物学

解答例は公益社団法人日本アイソトープ協会放射線安全取扱部会が解答の一案として作成したもの

次の問1から問10について、5つの選択肢のうち適切な答えを1つだけ選び、また、問11の文章の□部分について、解答群の選択肢のうち最も適切な答えを1つだけ選び、注意事項に従って解答用紙に記入せよ。

---

問1 光子に関する次の記述のうち、正しいものの組合せはどれか。

- A 質量はゼロである。
- B 運動量はゼロである。
- C エネルギーはゼロである。
- D 電荷はゼロである。

1 AとB 2 AとC 3 AとD 4 BとD 5 CとD

〔解答〕3

〔解説〕

- A: 正 X線、 $\gamma$ 線、光は電磁波であり質量を持たない。
- B: 誤 プランク定数を  $h$ 、光の波長を  $\lambda$  とすると、その運動量  $p$  は  $p = h/\lambda$  である。
- C: 誤  $E = h\nu$  のエネルギーを持つ ( $\nu$ は振動数)。
- D: 正 光子は電荷を持たない。

問2 次の粒子の質量を比べる関係式のうち、正しいものの組合せはどれか。

- A 電子=陽電子
- B 電子>電子ニュートリノ
- C 陽子>中性子
- D  $\alpha$ 粒子=ヘリウム原子

1 AとB 2 AとC 3 AとD 4 BとD 5 CとD

〔解答〕1

〔解説〕

- A: 正 陽電子は電子の反物質であり、電荷だけが反対である。
- B: 正 電子 (511 keV) > 電子ニュートリノ (< 2.5 eV)  
電子ニュートリノと電子は対を成しており、ニュートリノは電荷を持たず、質量は非常に小さいがゼロではない (エネルギーで示しているが、質量に換算できる)。
- C: 誤 陽子 ( $1.0073u/1.6726 \times 10^{-27} \text{ kg}$ ) < 中性子 ( $1.0087u/1.6749 \times 10^{-27} \text{ kg}$ )  
u: 原子質量単位
- D: 誤  $\alpha$ 粒子 (ヘリウム原子核) < ヘリウム原子

問3 ある元素の軌道電子の結合エネルギーが下表に示した値のとき、K殻に空席ができたことに伴い発生する  $KL_2L_3$  オージェ電子のエネルギー[eV]として、最も近い値は次のうちどれか。

表 K殻とL殻の軌道電子の結合エネルギー

電子殻	K	$L_1$	$L_2$	$L_3$
結合エネルギー[eV]	5,990	690	580	570

- 1 4,840    2 5,300    3 5,360    4 5,420    5 5,580

〔解答〕1

〔解説〕問題文のオージェ電子の放出過程は  $KL_2L_3$  オージェ遷移である。K殻の電子軌道に空席ができたとき、 $L_2$ 殻電子がその空席に転移する。その際にK殻の結合エネルギー(5990 [eV])と  $L_2$ 殻の結合エネルギー(580 [eV])のエネルギー差に相当するエネルギーを、特性X線として発生させるか、オージェ電子を発生させるかの選択肢がある。今回は  $L_3$ 殻の電子にエネルギーを与えオージェ電子を放出させるため、オージェ電子のエネルギーは、放出される  $L_3$ 殻電子の束縛を断ち切るためのエネルギー、すなわち当該電子の結合エネルギー(570 [eV])を差し引いたものになる。

$$\begin{aligned}
 & (K\text{殻の結合エネルギー}) - (L_2\text{殻の結合エネルギー}) - (L_3\text{殻の結合エネルギー}) \\
 & = 5990 \text{ [eV]} - 580 \text{ [eV]} - 570 \text{ [eV]} \\
 & = 4840 \text{ [eV]}
 \end{aligned}$$

問4 核種に関する次の記述のうち、正しいものの組合せはどれか。

- A 陽子数が同一で中性子数の異なる核種を同位体という。  
 B 中性子数が同一で陽子数の異なる核種を同中性子体という。  
 C 中性子数から陽子数を引いた値が同一の異なる核種を核異性体という。  
 D 中性子数と陽子数を足した値が同一の異なる核種を同重体という。

- 1 ABCのみ    2 ABDのみ    3 ACDのみ    4 BCDのみ    5 ABCDすべて

〔解答〕2

〔解説〕

- A: 正 例えれば水素だと、 $^1\text{H}$  (水素)、 $^2\text{H}$  (重水素)、 $^3\text{H}$  (三重水素) の同位体が存在する。  
 B: 正 例えれば窒素  $^{15}\text{N}$  (原子番号7) と酸素  $^{16}\text{O}$  (原子番号8) は同中性子体である。  
 C: 誤 核異性体ではなく同余体の説明である。核異性体とは、励起状態が比較的安定でしばらくとどまる状態にある原子核のことである。この準安定状態を表すために質量数のあとに m を添えて記述する。例えれば  $^{99\text{m}}\text{Tc}$  は  $^{99}\text{Tc}$  の核異性体である。  
 D: 正 例えば  $^{14}\text{C}$  (原子番号6) と  $^{14}\text{N}$  (原子番号7) は同重体である。

問5 内部転換に関する次の記述のうち、正しいものの組合せはどれか。

- A 核から放出された  $\gamma$  線の全エネルギーを、同じ原子の軌道電子が吸収して飛び出す現象である。
- B 内部転換電子は連続エネルギー分布をもつ。
- C 特性X線あるいはオージェ電子の放出を伴う。
- D  $\gamma$  線の放出割合が0.5、内部転換電子の放出割合が0.5のとき、内部転換係数は1である。

1 AとB 2 AとC 3 BとC 4 BとD 5 CとD

〔解答〕5

〔解説〕

- A:誤 内部転換は原子核の励起状態が転移するとき、 $\gamma$ 線を放出せずにそのエネルギーを軌道電子に与えて転移することである。この際に放出される軌道電子を内部転換電子という。
- B:誤 内部転換電子のエネルギーは、原子核の励起エネルギーと軌道電子の結合エネルギーの差に相当する単一のエネルギーである。
- C:正 内部転換は内殻軌道ほど起こりやすい。内部転換電子が放出されると、その軌道に空席ができ、すぐに外側の軌道電子が転移するので、特性X線の放出あるいはオージェ電子の放出を伴う。
- D:正 内部転換係数 = (内部転換電子の放出割合) / ( $\gamma$ 線の放出割合)

問6 荷電粒子と物質との相互作用に関する次の記述のうち、正しいものの組合せはどれか。ただし、核反応は起こらない場合を考える。

- A 荷電粒子は、物質中を直進する。
- B 荷電粒子がエネルギーを失う過程で働く力は、クーロン力である。
- C 荷電粒子がエネルギーを失う過程で、光子が放出される場合がある。
- D 電荷と質量が同じ荷電粒子では、一般的にエネルギーが高いほど、飛跡の単位長さ当たりに失うエネルギーは大きい。

1 AとB 2 AとC 3 BとC 4 BとD 5 CとD

〔解答〕3

〔解説〕

- A:誤 高速の電子である $\beta$ 線は質量が小さいため、軌道電子や原子核との電気的な相互作用によって散乱されて、進行方向がしばしば大きく変化する。
- B:正
- C:正  $\beta$ 線が物質中でエネルギーを失うのは、電子との衝突に起因する電離または励起によるものと、制動放射線(光子)の放出の2通りがある。
- D:誤 荷電粒子と物質中の電子とのクーロン相互作用は、荷電粒子の速度の2乗に反比例す

るので、エネルギーが高い（速度が速い）ほど、飛跡の単位長さ当たりの損失エネルギーは小さい。

問7 中性子捕獲( $n, \gamma$ )に関する次の記述のうち、正しいものの組合せはどれか。

- A 高速中性子では起こらない。
- B 質量数が1増える。
- C 原子番号は変わらない。
- D 断面積は中性子のエネルギーに依存する。

1 ABCのみ 2 ABDのみ 3 ACDのみ 4 BCDのみ 5 ABCDすべて

〔解答〕4

〔解説〕中性子捕獲 ( $n, \gamma$ ) とは、主に低速中性子が引き起こす現象で、安定核種が原子核に中性子を捕獲し、中性子過剰の放射性核種となる。その際に放出する  $\gamma$  線を捕獲  $\gamma$  線という。

例えば、 $^{23}\text{Na}$  ( $n, \gamma$ )  $^{24}\text{Na}$  などがある。断面積は中性子のエネルギーに依存する。

A: 誤 高速中性子でも低速中性子ほどの確率ではないが起こる。

B: 正

C: 正

D: 正

問8 次の量と単位の関係のうち、正しいものの組合せはどれか。

- A 放射能 —  $\text{s}^{-1} \cdot \text{kg}^{-1}$
- B 散乱断面積 —  $\text{m}^2$
- C 吸収線量率 —  $\text{Sv} \cdot \text{h}^{-1}$
- D 質量減弱係数 —  $\text{m}^2 \cdot \text{kg}^{-1}$
- E 飛程 —  $\text{m} \cdot \text{kg}^{-1}$

1 AとB 2 AとC 3 BとD 4 CとE 5 DとE

〔解答〕3

〔解説〕

A: 誤 放射能は、1秒当たりの壊変数で表し、単位は Bq ( $\text{s}^{-1}$ ) である。

B: 正 散乱断面積は、入射放射線が物質との相互作用で散乱される確率を表したもので、単位は  $\text{m}^2$  あるいはバーン ( $1 \text{ barn} = 10^{-28} \text{ m}^2$ ) で表す。

C: 誤 吸収線量率は  $\text{Gy} \cdot \text{h}^{-1}$  である。吸収線量とは、物質 1 kg に照射されて 1 J のエネルギーを吸収した時の線量をいい、 $\text{Gy}$  ( $\text{J} \cdot \text{kg}^{-1}$ ) で表す。

D: 正 質量減弱係数は、線減弱係数 ( $\text{m}^{-1}$ ) を密度 ( $\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$ ) で除した値である。単一エネルギーの光子が物質に垂直に入射するとき、光子が物質との相互作用によって除去された数の割合を線減弱係数といい、これをさらに物質の密度で割ったものが質量減弱係数である。

数という。

E : 誤 飛程は、入射放射線が物質中でエネルギーを失って停止するまでの飛跡の長さで、m で表す。

問9 一様な放射線場に置いた電離箱から 16 pA の電流を得た。エネルギー吸収 34 eV 当たりにイオン対が 1 対生成するとき、この電離箱内の気体が 1 秒間に吸収した放射線のエネルギー [pJ・s<sup>-1</sup>] として最も近い値は、次のうちどれか。ただし、生成電荷はすべて電極に収集されたとし、電気素量を  $1.6 \times 10^{-19}$  C、1 eV を  $1.6 \times 10^{-19}$  J とする。

- 1 440    2 540    3 740    4 1,100    5 1,400

〔解答〕2

〔解説〕電離箱に放射線が入射すると電離箱内の気体は放射線のエネルギーを吸収して電離する。

電離した結果、イオン対を生じ、電子を収集して電流となる。

電流は電荷の流れであり、 $[A]=[C/s]$  の関係があるため、電離箱内で生じた電流は、 $[pA]=[pC/s]$  となり、単位時間あたりに生成されたイオン対の数に相当する。よって、単位時間あたりに生成されるイオン対の数は、 $16 [pC/s] / 1.6 \times 10^{-19} [C]$  となる。

吸収した放射線のエネルギーは、イオン対の数に 34 eV を乗じたものであり、 $1 [eV] = 1.6 \times 10^{-19} [J]$  であるから、この [eV] を [J] に変換する。

以上を式で表すと、次のようになる。

$$\begin{aligned} & \{ 16 [pC/s] / (1.6 \times 10^{-19} [C]) \} \times \{ 34 [eV] \times (1.6 \times 10^{-19} [J/eV]) \} \\ & = (16 \times 34) [pJ/s] \\ & = 544 \end{aligned}$$

問10 コリメートされた单一エネルギーの  $\gamma$  線ビームがある。ビーム上のある位置での空気カーマ率は  $480 \mu\text{Gy} \cdot \text{h}^{-1}$  であった。この  $\gamma$  線に対する遮蔽板の半価層は、物質 A では 5.0 mm、物質 B では 10.0 mm である。ビームの上流側に、物質 A の遮蔽板(厚さ 2.5 mm)と物質 B の遮蔽板(厚さ 5.0 mm)を重ねて挿入したとき、同じ位置の空気カーマ率 [ $\mu\text{Gy} \cdot \text{h}^{-1}$ ] として最も近い値は次のうちどれか。ただし、ビルドアップの効果は無視できるものとする。

- 1 60    2 120    3 240    4 360    5 480

〔解答〕3

〔解説〕物質 A と物質 B それぞれ半価層の半分の厚みであるので、遮へい効果はそれぞれ  $(\frac{1}{2})^{\frac{1}{2}}$  になり  $1/\sqrt{2}$  になる。その積で  $1/2$  の  $240 \mu\text{Gy} \cdot \text{h}^{-1}$  である。

半価層の半分の厚みの遮蔽体が 2 組で半価層厚みに相当すると判断することも可能である。

問11 X線や  $\gamma$  線と物質の相互作用に関する次のI、IIの文章の□の部分について、解答群の選択肢のうち最も適切な答えを1つだけ選べ。

I 光子のエネルギー  $E_\gamma$  は、主に光電効果、コンプトン散乱、および電子対生成により物質に与えられる。

光電効果では、光電子の放出に  $E_\gamma$  がすべて費やされ、光子は消失する。このとき、軌道電子の結合エネルギーを  $E_b$  とすると、光電子の運動エネルギー  $E_e$  は  $E_e = \boxed{A}$  である。式の右辺が負ならば、この過程は起こらない。また、しきいエネルギー付近では、この過程の有無により断面積が顕著に変化する。例えば、 $E_b$  がK殻の軌道電子の結合エネルギーのとき、光子エネルギーと断面積との関係を示すグラフの  $E_b$  付近に見られるエッジ状の構造は  $\boxed{B}$  と呼ばれる。

次に、コンプトン散乱では、入射光子と電子の衝突により、 $E_\gamma$  よりも低いエネルギーを持つ散乱光子と、反跳電子を生じる。光子の散乱角を  $\theta$  とすると、反跳電子の運動エネルギー  $E_e(\theta)$  は、

$$E_e(\theta) = \frac{E_\gamma}{1 + \frac{mc^2}{E_\gamma(1 - \cos\theta)}}$$

と表される。ただし、 $m$  は電子の質量( $9.11 \times 10^{-31}$  kg)で、 $c$  は真空中の光速度( $\boxed{\text{ア}}$  m・s<sup>-1</sup>)である。入射光子が  $E_\gamma = 1.00$  MeV のとき、 $E_e(\theta)$  の上限値は  $\boxed{\text{イ}}$  MeV である。 $\gamma$  線スペクトルにおけるこの上限値に相当するチャネルは  $\boxed{\text{C}}$  と呼ばれる。

最後に、電子対生成では、光子が原子核の強い電場中で消失し、電子とその反粒子である陽電子が生み出される。この電子と陽電子の運動エネルギーをそれぞれ  $E_e$  と  $E_p$  とすると、 $E_e + E_p = \boxed{D}$  である。右辺が負ならば、この過程は起こらないので、しきい値は  $E_\gamma = \boxed{\text{ウ}}$  MeV である。

<Aの解答群>

$$1 \quad E_\gamma + E_b \quad 2 \quad E_\gamma - E_b \quad 3 \quad E_b - E_\gamma \quad 4 \quad \frac{E_\gamma + E_b}{2}$$

<B～Dの解答群>

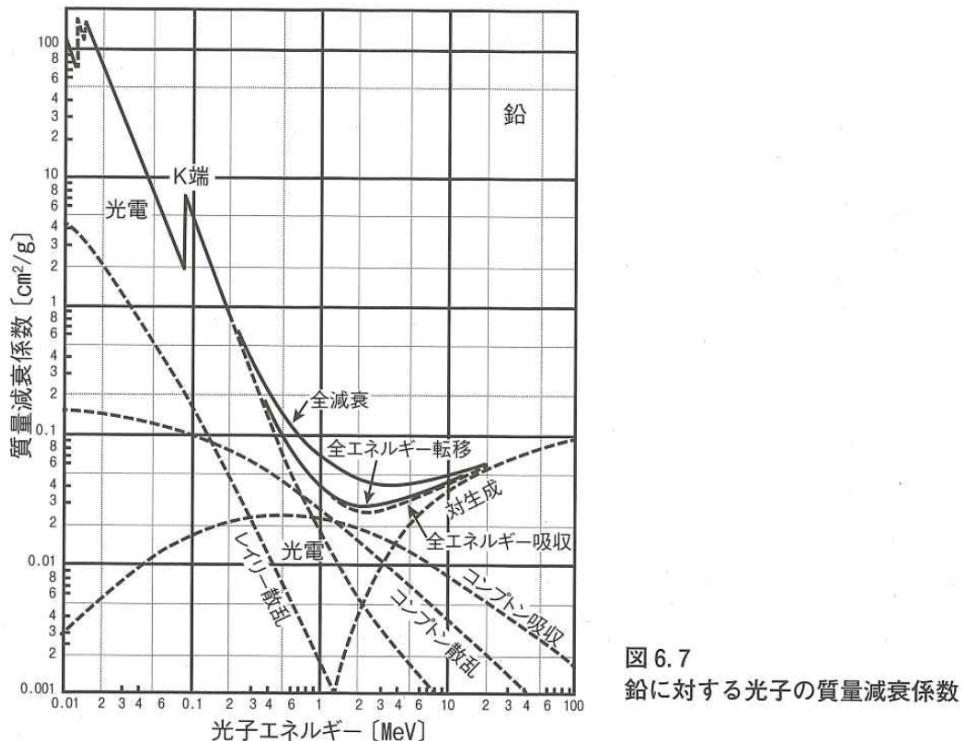
$$1 \quad E_\gamma + mc^2 \quad 2 \quad E_\gamma - mc^2 \quad 3 \quad E_\gamma + 2mc^2 \quad 4 \quad E_\gamma - 2mc^2 \quad 5 \quad E_\gamma + 3mc^2 \\ 6 \quad E_\gamma - 3mc^2 \quad 7 \quad \text{K吸収端} \quad 8 \quad \text{コンプトン端} \quad 9 \quad \text{バンド端} \quad 10 \quad \text{ライマン端}$$

<ア～ウの解答群>

$$1 \quad 0.20 \quad 2 \quad 0.40 \quad 3 \quad 0.51 \quad 4 \quad 0.60 \quad 5 \quad 0.80 \\ 6 \quad 1.02 \quad 7 \quad 2.04 \quad 8 \quad 4.08 \quad 9 \quad 1.00 \times 10^7 \quad 10 \quad 3.00 \times 10^7 \\ 11 \quad 1.00 \times 10^8 \quad 12 \quad 3.00 \times 10^8 \quad 13 \quad 1.00 \times 10^9$$

〔解答〕 I A-2 B-7 ア-12 イ-5 シ-8 ハ-4 ウ-6

〔解説〕

図 6.7  
鉛に対する光子の質量減衰係数

(「9版 放射線取扱の基礎」(日本アイソトープ協会) p.65 から引用)

- A : 光電効果で放出される光電子の運動エネルギーは入射光子のエネルギーから軌道電子の結合エネルギーとの差分であり、光子エネルギー > 軌道電子の結合エネルギーでなければ起こらない。
- B : 光子のエネルギーが各殻の軌道電子放出に必要なエネルギーを上回って減弱係数が急に大きくなるところを吸収端とよぶ。(K殻の場合はK吸収端)。
- ア : 真空中の光速度は  $3 \times 10^8$  m/s (299792458 m/s)
- イ : 散乱光子のエネルギー  $E_{\gamma'}$ 、コンプトン電子のエネルギー  $E_e$  とする。

$$E_{\gamma'} = \frac{E_{\gamma}}{1 + \frac{E_{\gamma}}{mc^2}(1 - \cos\theta)}$$

$$E_e(\theta) = \frac{E_{\gamma}}{1 + \frac{mc^2}{E_{\gamma}}(1 - \cos\theta)}$$

電子の静止エネルギーは、 $E = mc^2$  で表され、電子の電荷  $1.6 \times 10^{-19}$  C から

$$E = \frac{9.11 \times 10^{-31} \times (3.00 \times 10^8)^2}{1.6 \times 10^{-19}} = 511000 \text{ (eV)} = 0.511 \text{ (MeV)}$$

与式より、180度散乱のとき、すなわち  $(1 - \cos\theta)$  が最大で、 $E_e(\theta)$  は最大となり、光電子の最大エネルギーは

$$E_e(\theta)_{\max} = \frac{1}{1 + \frac{0.511}{2}} = 0.7965 \text{ (MeV)}$$

C: これはコンプトン端とよばれる。

D: 前述のように電子の静止エネルギーは、

$$E = \frac{9.11 \times 10^{-31} \times (3.00 \times 10^8)^2}{1.6 \times 10^{-19}} = 511000 \text{ (eV)} = 0.511 \text{ (MeV)}$$

なので、電子対の静止エネルギーは 1.022 MeV であり、電子対生成にはこれ以上のエネルギーを必要とする。

II 次の図は、エネルギー  $E_\gamma$  の光子と原子番号  $Z$  の物質の相互作用において、最も優勢な過程が光電効果、コンプトン散乱、および電子対生成のいずれであるかを、領域として示している。

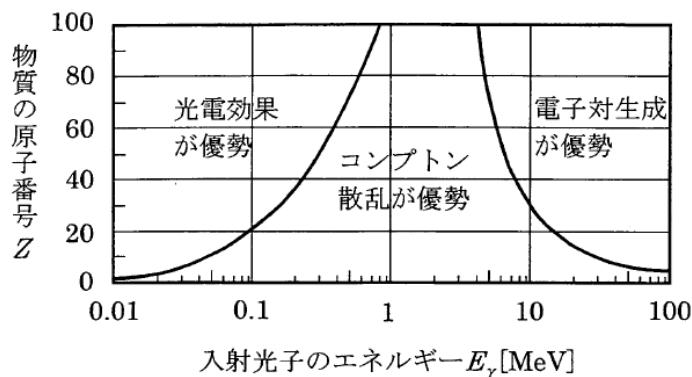


図 光子と物質の最も優勢な相互作用の領域(2つの曲線は各領域の境界を示す)

この図に基づき、 $E_\gamma = 100 \text{ keV}$  のときに光電効果が最も優勢になるのは、物質の原子番号が  $Z \geq \boxed{E}$  のときである。また、 $Z = 60$  のときに電子対生成が最も優勢になるのは、 $E_\gamma \geq \boxed{F}$  MeV のときである。さらに、 $^{60}\text{Co}$  線源から放出される  $\gamma$  線を鉛板で遮蔽するとき、 $\gamma$  線とこの遮蔽材の最も優勢な相互作用は  $\boxed{G}$  である。

<E~G の解答群>

- |            |          |        |         |
|------------|----------|--------|---------|
| 1 0.37     | 2 0.56   | 3 1.5  | 4 3.7   |
| 5 5.6      | 6 8.8    | 7 15   | 8 21    |
| 9 28       | 10 40    | 11 120 | 12 光電効果 |
| 13 コンプトン散乱 | 14 電子対生成 |        |         |

(解答) II E-8 F-5 G-13

〔解説〕

E, F: それぞれ図から  $Z \geq 21$ 、 $E_\gamma \geq 5.6$  となる。

G :  $^{60}\text{Co}$  のおもな  $\gamma$  線は 1.17 MeV と 1.33 MeV であり、鉛の原子番号は 82 なので、図からコンプトン散乱が最も優勢な相互作用となる。

次の問1から問10について、5つの選択肢のうち適切な答えを1つだけ選び、また、問11の文章の□部分について、解答群の選択肢のうち最も適切な答えを1つだけ選び、注意事項に従って解答用紙に記入せよ。

---

問1 土壌試料に含まれる  $^{134}\text{Cs}$  と  $^{137}\text{Cs}$  の放射能が等しい場合、その試料の1年後の放射能の比 ( $^{134}\text{Cs}/^{137}\text{Cs}$ ) として、最も近い値は次のうちどれか。ただし、 $^{134}\text{Cs}$  の半減期は2年、 $^{137}\text{Cs}$  の半減期は30年とする。

- 1 0.1    2 0.2    3 0.4    4 0.7    5 0.9

〔解答〕4

〔解説〕1年後の  $^{134}\text{Cs}$  の放射能は  $1/2$  半減期であり、 $(\frac{1}{2})^{\frac{1}{2}} = 1/\sqrt{2}$  で約 0.7 になる。一方で  $^{137}\text{Cs}$  は  $1/30$  半減期であり減衰はほぼ無視できる (0.977) ので、1年後の  $^{134}\text{Cs}/^{137}\text{Cs}$  の放射能の比は 0.7 である。

問2 放射性核種Aから放射性核種Bが生成する逐次壊変に関する次の記述のうち、正しいものの組合せはどれか。

- A 過渡平衡では核種Aの放射能は核種Bの半減期で減少する。  
B 核種Aの半減期が核種Bより数百倍以上長いとき、両核種は永続平衡になる。  
C 永続平衡では核種Aと核種Bの原子数はほぼ等しい。  
D 放射平衡にある核種Aと核種Bの混合物から核種Bを単離する操作をミルキングという。

- 1 AとB    2 AとC    3 BとC    4 BとD    5 CとD

〔解答〕4

〔解説〕

- A : 誤 過渡平衡は親核種の半減期が娘核種よりも長い。十分な時間が経過すると娘核種は親核種の半減期で減少する。  
B : 正 厳密な定義はないが、例えば、「親核種の半減期が娘核種の半減期に比較して非常に長く（数百倍以上の差）、その減衰がほとんど無視できる場合において親核種と娘核種の放射能は等しくなり、これを永続平衡と呼ぶ。」（「9版 放射線取扱の基礎」（日本アイソトープ協会）p.23）  
C : 誤 永続平衡では親核種と娘核種の放射能が等しい。  
D : 正

問3 次のうち、安定同位体が存在しない元素のみの組合せはどれか。

- 1 Mo Ba Ra  
2 Pm Sm Tl

- 3 Tc Pm Ra  
4 Be Y Tc  
5 Sc Ba Po

〔解答〕3

〔解説〕<sup>94</sup>Mo～<sup>97</sup>Mo は安定同位体、<sup>134</sup>Ba～<sup>138</sup>Ba は安定同位体、<sup>150</sup>Sm, <sup>152</sup>Sm は安定同位体、<sup>203</sup>Tl, <sup>205</sup>Tl は安定同位体、<sup>9</sup>Be は安定同位体、<sup>89</sup>Y は安定同位体、<sup>45</sup>Sc は安定同位体、Ra、Pm、Tc、Po に安定同位体は存在しない。

問4 中性子源に利用されるものとして、正しいものの組合せは次のうちどれか。

- A <sup>85</sup>Kr  
B <sup>99</sup>Mo  
C <sup>137</sup>Cs  
D <sup>241</sup>Am-Be  
E <sup>252</sup>Cf  
1 A と B    2 A と C    3 B と D    4 C と E    5 D と E

〔解答〕5

〔解説〕

- A : 誤 <sup>85</sup>Kr は  $\beta$  線源。<sup>85</sup>Kr は  $\beta$  壊変し <sup>85</sup>Rb になる。<sup>85</sup>Kr は機密性を調べるリーグディテクタ（漏洩検出器）用の検出ガスとして用いられる。
- B : 誤 <sup>99</sup>Mo は  $\beta$  線源。<sup>99</sup>Mo は  $\beta$  壊変し <sup>99m</sup>Tc になる。<sup>99</sup>Mo/<sup>99m</sup>Tc ジェネレータとして <sup>99m</sup>Tc を産出することができ、これを <sup>99m</sup>Tc 標識放射性医薬品に調製することで、核医学で利用されている。
- C : 誤 <sup>137</sup>Cs は  $\gamma$  線源。<sup>137</sup>Cs は、密封小線源に用いられ、これによる  $\gamma$  線照射は、がん治療に利用されている。
- D : 正
- E : 正

問5 次の核種について、半減期が短い順に並んでいるものはどれか。

- 1 <sup>85</sup>Kr < <sup>90</sup>Sr < <sup>63</sup>Ni < <sup>241</sup>Am  
2 <sup>192</sup>Ir < <sup>85</sup>Kr < <sup>241</sup>Am < <sup>90</sup>Sr  
3 <sup>63</sup>Ni < <sup>90</sup>Sr < <sup>85</sup>Kr < <sup>192</sup>Ir  
4 <sup>63</sup>Ni < <sup>85</sup>Kr < <sup>241</sup>Am < <sup>192</sup>Ir  
5 <sup>192</sup>Ir < <sup>63</sup>Ni < <sup>90</sup>Sr < <sup>241</sup>Am

〔解答〕1

〔解説〕半減期順に並べると、

$$^{192}\text{Ir} : 73.83 \text{ d} < ^{85}\text{Kr} : 10.76 \text{ y} < ^{90}\text{Sr} : 28.74 \text{ y} < ^{63}\text{Ni} : 100.1 \text{ y} < ^{241}\text{Am} : 432.2 \text{ y}$$

問6 次の核種のうち、 $\alpha$ 線放出核種の組合せはどれか。

- A  $^{238}\text{U}$
- B  $^{235}\text{U}$
- C  $^{232}\text{Th}$
- D  $^{220}\text{Rn}$

1 ABCのみ 2 ABDのみ 3 ACDのみ 4 BCDのみ 5 ABCDすべて

〔解答〕5

〔解説〕

- A: 正
- B: 正
- C: 正
- D: 正

問7 牛乳 1.0 kg には 1.5 g のカリウムが含まれているとすると、この牛乳 1.0 kg に含まれる  $^{40}\text{K}$  の放射能[Bq]として、最も近い値は次のうちどれか。ただし、カリウムの原子量を 39、 $^{40}\text{K}$  の同位体存在度を 0.012 %、 $^{40}\text{K}$  の半減期を  $4.0 \times 10^{16}$  秒、アボガドロ定数を  $6.0 \times 10^{23} \text{ mol}^{-1}$  とする。

1 12 2 48 3 140 4 550 5 1,200

〔解答〕2

〔解説〕放射能  $A[\text{Bq}]$ 、原子の数  $N$  のとき、

$$A = \lambda N \cdots (1) \quad \lambda : \text{崩壊定数}$$

$\lambda = \ln 2 / T$  より、 $T$  は  $^{40}\text{K}$  の半減期で  $4.0 \times 10^{16}$  秒、 $\ln 2 = 0.693$  となる。

カリウム 1.5 g 中の  $^{40}\text{K}$  の量 =  $1.5 \times 0.00012 = 0.00018 \text{ g}$  となり、

この原子数  $N = 0.00018 / 39 \times (6.0 \times 10^{23})$  個となる。

以上を(1)式に代入すると

$$A = 0.693 / (4.0 \times 10^{16}) \times 0.00018 / 39 \times (6.0 \times 10^{23}) = 48 \text{ Bq}$$

問8 次の壊変形式のうち、壊変により生成した原子核が運動エネルギーを得るものとして、正しいものの組合せはどれか。

- A  $\alpha$  壊変
- B  $\beta^-$  壊変

C  $\beta^+$  壊変

D 自発核分裂

- 1 ACDのみ 2 ABのみ 3 BCのみ 4 Dのみ 5 ABCDすべて

〔解答〕 5

〔解説〕  $\alpha$  壊変によって  $\alpha$  粒子、 $\beta^-$  壊変によって電子・反ニュートリノ、 $\beta^+$  壊変によって陽電子・ニュートリノ、自発核分裂によって2個の原子核（生成原子核）のように質量を持った粒子が放出されるため、運動量保存則により、 $\Sigma$  放出粒子の運動量 = 生成原子核の運動量となる。

また、原子核が壊変するかどうかの必要条件として、壊変前の原子核の質量よりも、壊変後の原子核と放出粒子の総質量が小さくなければならない。質量は静止状態の全エネルギーなのでその差額である  $Q$  値が生じ、放出粒子の運動エネルギー及び残留核の反跳エネルギーに割り振られる。いずれも  $Q > 0$  でないと反応が起きないので、

$$\alpha \text{ 壊変} : Q = (M_X - M_Y - M_\alpha)c^2 > 0$$

$$\beta^- \text{ 壊変} : Q = (M_X - M_Y)c^2 > 0$$

$$\beta^+ \text{ 壊変} : Q = (M_X - M_Y - 2m_e)c^2 > 0$$

$$\text{自発核分裂} : Q = (M_X - (M_{Y1} + M_{Y2}))c^2 > 0$$

$M_X$  : 壊変前の原子核の質量

$M_Y$  : 壊変後の原子核の質量

$M_\alpha$  :  $\alpha$  粒子の質量

$m_e$  : 電子の質量

となり、いずれも壊変前の原子核のエネルギー > 生成原子核のエネルギーなので、運動量・エネルギー保存則により生成原子核に運動エネルギーが与えられる。

問 9 放射性同位元素利用機器について、それぞれに用いられる放射線源及び検出器として、正しいものの組合せは次のうちどれか。

利用機器	線源	検出器
A 透過形厚さ計	$^{147}\text{Pm}$	電離箱
B 密度計	$^{60}\text{Co}$	NaI(Tl)シンチレーション検出器
C 水分計	$^{204}\text{Tl}$	$^3\text{He}$ 比例計数管
D 硫黄計	$^{241}\text{Am}$	ZnS(Ag)シンチレーション検出器

- 1 ACDのみ 2 ABのみ 3 ACのみ 4 BDのみ 5 BCDのみ

〔解答〕 2

〔解説〕

A: 正

B: 正

C: 誤 水分計は、主として中性子源を用いて検出器は比例計数管を用いる。

D: 誤 硫黄計は、 $^{241}\text{Am}$  から放出される 59.5 keV の  $\gamma$  線を Ag のターゲットに照射して 22.2 keV の特性 X 線を発生させるため検出器は電離箱を用いる。

問 10 放射線化学に関する次の記述のうち、正しいものの組合せはどれか。

- A 不対電子を持つ活性種はフリーラジカルと呼ばれる。
- B LET が高いほど隣接するスパー(スプール)間の距離は短くなる。
- C 水和電子は酸化剤として働く。
- D G 値は荷電粒子線に対してのみ定義される。

1 A と B    2 A と C    3 A と D    4 B と D    5 C と D

〔解答〕 1

〔解説〕

A: 正 フリーラジカルとは不対電子を持つ化学種(原子、分子、イオン)である。

B: 正 スパー(スプール)とはイオン、ラジカルの集合体である。放射線が分子性の物質(液体や固体)に入射するとその飛跡にそって断続的にイオン化を起こしてスパーができる。LET が大きければ単位距離あたりに多くのスパーができるので高密度となりスパーは短くなる。(「9版 放射線取扱の基礎」(日本アイソトープ協会) 化学 p.51)

C: 誤 水和電子は還元剤として働く(物質からすれば電子を得る反応;還元である)。

D: 誤 G 値とは物質が放射線のエネルギーを 100 eV 吸収した時に変化を受ける原子数や分子数である。定義では「放射線」であり、「荷電粒子線」のみではない。

問 11 放射性同位体を用いた年代測定法に関する次の文章の    の部分について、解答群の選択肢のうち最も適切な答えを 1 つだけ選べ。

放射性同位体を利用して数値的な絶対年代を調べる代表的な方法の 1 つに放射性炭素( $^{14}\text{C}$ )年代測定法がある。これは、 $^{14}\text{C}$  が A の半減期で壊変することを利用した年代測定法である。自然界には 3 つの炭素同位体が存在するが、その中で同位体存在度が最も大きいものは B であり、 $^{14}\text{C}$  は放射性同位体である。 $^{14}\text{C}$  は大気圏上層で、主に C と大気中の物質の原子核との相互作用によって生じた D と大気中の E の原子核とが核反応して生成される。 $^{14}\text{C}$  は A の半減期で F し、E になる。生成された  $^{14}\text{C}$  は大気中で酸化され、G として地球圏の炭素サイクルに組み込まれる。

植物は光合成によって  $^{14}\text{C}$  を含んだ G を取り込み、動物も食物連鎖によって  $^{14}\text{C}$  を取り込む。それら生物に含まれる炭素の  $^{14}\text{C}/$  B 比は大気中の  $^{14}\text{C}/$  B 比と同じであるが、それら

生物の生命が終わると、生物圏の炭素のやりとりも終了しそれらの個体中の  $^{14}\text{C}$  だけが減衰していく。大気中の  $^{14}\text{C}/\boxed{\text{B}}$  比が時代を遡っても変化しないとすれば、 $^{14}\text{C}$  を測定することでその生物が死んでから現在までの年数を算出することができる。

実際には地球に飛来する宇宙線強度や地球規模の炭素循環の変化に伴って  $^{14}\text{C}/\boxed{\text{B}}$  比は時とともに刻々と変化している。人為的な要因としても、1950年から1960年代年初頭までに実施された  $\boxed{\text{H}}$  による人工で生成された  $^{14}\text{C}$  濃度の大気圏での上昇などによって、大気中の  $^{14}\text{C}/\boxed{\text{B}}$  比の天然レベルが乱されたことがある。そこで、年輪年代等の暦年代がわかる試料を用いて較正するなどの工夫がなされている。

$^{14}\text{C}$  の放射能測定には気体比例計数装置による方法と  $\boxed{\text{I}}$  による方法が代表的であるが、これらの方法には試料の量が多く必要であり貴重な試料の場合は測定できなかった。しかし、近年  $^{14}\text{C}$  の  $\boxed{\text{J}}$  を測定する加速器質量分析法が用いられるようになり、微量な試料でも測定可能となっている。

<A、Bの解答群>

- 1 12.3年 2 100年 3 250年 4 5,700年 5  $^{11}\text{C}$   
6  $^{12}\text{C}$  7  $^{15}\text{C}$  8  $^{16}\text{C}$

<C、Dの解答群>

- 1 一次宇宙線 2 電子 3 非電離放射線 4 ミュー粒子 5 光子  
6 中性子

<E、Fの解答群>

- 1  $^{14}\text{N}$  2  $^{15}\text{N}$  3  $^{16}\text{O}$  4  $^{18}\text{O}$  5  $\alpha$  壊変  
6  $\beta^+$  壊変 7  $\beta^-$  壊変 8 EC 壊変

<Gの解答群>

- 1 CO 2  $\text{CO}_2$  3  $\text{CH}_4$  4  $\text{C}_3\text{O}_2$  5  $\text{C}_5\text{O}_2$

<Hの解答群>

- 1 大気圏内核実験 2 原子力発電所の新設と稼働 3 急激な石油系燃料消費

<I、Jの解答群>

- 1 Ge 半導体検出器 2 プラスチックシンチレーション検出器  
3 Si 表面障壁型検出器 4 液体シンチレーションカウンタ  
5 放射能 6 中性子数  
7 電子数 8 原子数

〔解答〕 A-4 B-6 C-1 D-6 E-1 F-7 G-2 H-1 I-4 J-8

〔解説〕

A :  $^{14}\text{C}$  の半減期は  $5.7 \times 10^3$  年である。

B : 自然界における炭素同位体は、 $^{12}\text{C}$  (同位体存在比 98.93 %)、 $^{13}\text{C}$  (同位体存在比 1.07 %)、 $^{14}\text{C}$  (微量) の 3 つが存在し、 $^{12}\text{C}$  が一番多く存在している。

C, D, E : 自然界における炭素同位体の中で  $^{12}\text{C}$  と  $^{13}\text{C}$  は安定同位体であり、 $^{14}\text{C}$  のみが放射

性同位体である。 $^{14}\text{C}$  は誘導放射性核種の 1 つであり、一次宇宙線によって生成された中性子と大気中の窒素から、 $^{14}\text{N} (\text{n}, \text{p}) ^{14}\text{C}$  の核反応で生成される。

E, F, G :  $^{14}\text{C}$  は  $\beta^-$  放出核種である。 $\beta^-$  壊変は核内で  $\text{n}$  が  $\text{p}$  と変化するため原子核内の陽子数が 1 つ増える。つまり原子番号が 1 つ増え、質量数は変わらない核種になるため、 $^{14}\text{N}$  が生成される。また、生成された  $^{14}\text{C}$  が酸化されて  $^{14}\text{CO}_2$  となり動植物に吸収されて生体の一部となる。

H :  $^{14}\text{C}$  を用いる年代測定では対象期間全体を通して一次宇宙線による  $^{14}\text{C}$  の生成量は変わらないことを前提にしているが、実際には  $^{14}\text{C}$  の大気中の濃度は変化している。特に石炭などの化石燃料の使用および大気中の核実験の影響は無視できない。(「放射線概論 第 12 版」(通商産業研究社) p.263)

I, J :  $^{14}\text{C}$  の  $\beta^-$  線のエネルギーは 0.157 MeV と非常に低いため、放射線の自己吸収、外部吸収が無視でき、計数効率が高い液体シンチレーションカウンタが計測に用いられる。最近では加速器質量分析法を用いて試料に含まれる  $^{14}\text{C}$  の原子数を直接計数することで、微量な試料による測定ができるようになった。

次の問1から問10について、5つの選択肢のうち適切な答えを1つだけ選び、また、問11の文章の□部分について、解答群の選択肢のうち最も適切な答えを1つだけ選び、注意事項に従って解答用紙に記入せよ。

---

問1 急性 $\gamma$ 線被ばくによるヒトの骨髄死に関する次の記述のうち、正しいものの組合せはどれか。

- A 被ばくからおおよそ60日以内に現れる。
- B 30Gy程度の全身被ばくをした際の死亡の主な原因である。
- C 被ばく後の医療処置により回避することはできない。
- D 造血組織の障害が原因となって引き起こされる。

1 AとC 2 AとD 3 BとC 4 BとD 5 CとD

〔解答〕2

〔解説〕

- A: 正 リンパ球の障害で1~2月で血球減少症が起り感染症や出血で死亡する。
- B: 誤 30Gy程度の全身被ばくでは中枢神経障害死  
(骨髄死は1~10Gyで起こるといわれる)
- C: 誤 骨髄移植等の治療が適切に行われると大半が治癒する。
- D: 正

問2 放射線感受性に関する次の記述のうち、正しいものの組合せはどれか。

- A 一般的に、未分化細胞の放射線感受性は低い。
- B 一般的に、細胞分裂頻度の高い細胞を含む組織や臓器の放射線感受性は高い。
- C ベルゴニー・トリボンドーの法則には例外が存在する。
- D 皮膚の基底細胞は放射線感受性が高い。

1 ACDのみ 2 ABのみ 3 ACのみ 4 BDのみ 5 BCDのみ

〔解答〕5

〔解説〕

- A: 誤 未分化な細胞ほど放射線感受性が高い。
- B: 正
- C: 正 たとえばリンパ球は骨髄中で作られる時も末梢血中でも放射線感受性は変わらない。
- D: 正 皮膚の上皮細胞の放射線感受性は低いが、分裂の盛んな基底細胞の感受性は高い。

問3 放射線誘発白内障(視力障害)に関する次の記述のうち、正しいものの組合せはどれか。

- A 水晶体が混濁して引き起こされる。
- B しきい線量は急性被ばくおよび慢性被ばくともに0.5Gyとされている。
- C 6カ月から数十年の潜伏期間で発症する。

D 吸収線量が同じ場合、中性子線よりも  $\gamma$  線の方が誘発しやすい。

- 1 ABCのみ 2 ABDのみ 3 ACDのみ 4 BCDのみ 5 ABCDすべて

〔解答〕1

〔解説〕

A: 正 水晶体の混濁から白内障へ移行する。

B: 正 白内障のしきい値は 0.5 Gy であり、急性被ばくと慢性被ばくにおけるしきい線量の違いはない（「9版 放射線取扱の基礎」（日本アイソトープ協会）p.39）

C: 正 白内障は晩発影響の 1 つであり、潜伏期間が長い。ヒトでは平均 2~3 年であるが、その範囲は 6 か月~35 年にわたるほど異なる。（「9版 放射線取扱の基礎」（日本アイソトープ協会）p.39）

D: 誤 白内障に対する中性子の RBE は非常に高い (RBE=10~20)。（「9版 放射線取扱の基礎」（日本アイソトープ協会）p.39）

問4 放射性物質の生物学的半減期に関する次の記述のうち、正しいものの組合せはどれか。

A 組織・臓器への親和性により異なる。

B 放射性物質が放出する放射線の生物効果比(RBE)に依存する。

C 有効半減期は生物学的半減期に依存する。

D 放射性物質が体内から排出される速さを反映する。

- 1 ACDのみ 2 ABのみ 3 BCのみ 4 Dのみ 5 ABCDすべて

〔解答〕1

〔解説〕

A: 正 体内に取り込まれた放射性核種は組織・臓器への親和性によって体内分布は異なる。骨親和性元素の核種は骨に集積、沈着しやすく、生物学半減期が長いものが多い。

B: 誤 生物学的半減期は生体の代謝・排泄などによる生物学的な減少に依存する。

C: 正 体内に取り込まれた放射性物質からの放射能は、核種の壊変（物理学的）と物質の代謝・排泄（生物学的）により減少する。この体内放射能が半分になるまでに要する時間は有効半減期 ( $T_{eff}$ ) と呼ばれ、以下の式で導くことができ、有効半減期は生物学的半減期にも依存する。

$$\frac{1}{T_{eff}} = \frac{1}{T_p} + \frac{1}{T_b} \quad T_{eff}: \text{有効半減期}, T_p: \text{物理学的半減期}, T_b: \text{生物学的半減期}$$

D: 正 放射性核種が体内から排出されるのが早いほど生物学半減期は短くなる。

問5 DNA 損傷と修復に関する次の記述のうち、正しいものの組合せはどれか。

A 放射線によって生ずる DNA 損傷のうち、最も多い損傷は DNA 二本鎖切断である。

- B DNA二本鎖切断は、主に、非相同末端結合と相同組換え修復によって修復される。  
C 非相同末端結合は切断部分の塩基配列の情報を失い、欠失変異を引き起こすことがある。  
D 相同組換え修復は、DNA損傷修復に関わる遺伝子の塩基配列を鋳型として修復する。

1 AとB 2 AとC 3 BとC 4 BとD 5 CとD

〔解答〕3

〔解説〕

- A:誤 DNA二本鎖切断よりも塩基損傷、DNA一本鎖の方が多い。  
B:正 DNA二本鎖切断の場合は組換え修復と非相同末端結合修復の2つの修復機構がある。  
C:正 非相同末端結合修復は損傷により切断されたDNA末端を再結合する修復機構である。  
DNA切断端の塩基が欠如した場合でもそのまま再結合するため誤った修復が生じやすい。  
D:誤 相同組換え修復は切断された部位と全く同じ塩基配列を鋳型として修復する。

問6 放射線で誘発される染色体異常に関する次の記述のうち、正しいものの組合せはどれか。

- A DNA二本鎖切断の生成は染色体異常の誘発につながる。  
B 環状染色体は安定型の異常である。  
C 逆位は不安定型の異常である。  
D 二動原体染色体頻度は被ばく直後の生物学的線量推定に利用できる。

1 AとB 2 AとC 3 AとD 4 BとC 5 BとD

〔解答〕3

〔解説〕

- A:正 染色体異常の原因は染色体の切断であり、DNA二本鎖切断と誤った再結合で環状染色体や二動原体染色体が誘発される。  
B:誤 環状染色体は不安定型染色体異常である。  
C:誤 逆位は安定型染色体異常である。  
D:正 二動原体染色体の出現頻度は被ばく線量に依存し、識別が比較的容易であるため、急性被ばくの生物学的線量推定に利用される。

問7 哺乳動物細胞への $\gamma$ 線照射による影響に関する次の記述のうち、正しいものの組合せはどれか。

- A 細胞周期のM期では放射線致死感受性が最も高くなる。  
B 一般的に、生存率は線量に対して指數関数的に減少する。  
C 間期死では、照射後数回分裂し、細胞死に至る。  
D 分割照射による生存率の回復効果は、照射間隔に依存する。

1 AとC 2 AとD 3 BとC 4 BとD 5 CとD

〔解答〕2

〔解説〕

- A: 正 細胞周期は、G1期 → S期 → G2期 → M期という順で繰り返される。この内、分裂期 M期の放射線感受性が最も高いとされている。また G1 / S のチェックポイントでの感受性も比較的高い。
- B: 誤 一般に、線量-生存曲線は、普通目盛で示した場合、指数関数型、シグモイド型の曲線になることが多い。
- C: 誤 間期死は細胞が照射を受けた後、次の分裂に入ることなく死に至る現象である。
- D: 正 亜致死損傷からの回復 (SLD回復) による生存率上昇は照射後 12 時間で最大になり、以後は変化しない。SLD回復が起こる場合は、分割照射で生物効果が小さくなる。

問8 急性 $\gamma$ 線全身被ばくによるヒトの胚・胎児への影響に関する次の記述のうち、正しいものの組合せはどれか。

- A 胎内被ばくの影響はすべて遺伝性影響である。
- B 着床前期に被ばくした場合、死亡のしきい線量は 0.1 Gy である。
- C 器官形成期に被ばくした場合、奇形が現れるしきい線量は 0.1 Gy である。
- D 胎児期に被ばくした場合、精神遅滞が現れるしきい線量は 1 Gy である。

1 AとB 2 AとC 3 AとD 4 BとC 5 BとD

〔解答〕4

〔解説〕

- A: 誤 胎児の被ばくは、妊娠という特殊な状況下（胎内）での身体的影響である。
- B: 正 着床前期（受精後～8日）の胚死亡のしきい値は 0.1 Gy であり確定的影響である。
- C: 正 器官形成期（着床～妊娠8週）の奇形（器官形成異常）のしきい値は 0.1 Gy であり確定的影響である。
- D: 誤 胎児期（妊娠8～25週）の精神遅滞が現れるしきい線量は、0.2 Gy である。

問9 遺伝性影響に関する次の記述のうち、正しいものの組合せはどれか。

- A 被ばくした本人に現れた放射線障害のうち、子孫に伝わるもの遺伝性影響という。
- B 放射線が体細胞に突然変異を誘発することによって発生する。
- C ICRP2007年勧告では、主に原爆被爆者のデータに基づき名目リスク係数が決定されている。
- D 子の代では現れずに、孫の代で初めて現れる可能性がある。
- E ICRP2007年勧告では、自然突然変異と等しい頻度で突然変異を誘発する放射線量を 1 Gy と評価している。

1 AとB 2 AとC 3 BとD 4 CとE 5 DとE

〔解答〕5

〔解説〕

- A: 誤 生殖細胞のDNAに突然変異が生じ、次世代に伝わる可能性のあるものを遺伝的影響という。
- B: 誤 体細胞ではなく、生殖細胞DNAに突然変異が生じたことにより発生する。
- C: 誤 名目リスク係数とは、代表的集団における性及び被ばく時の年齢で平均化された障害リスク推定値のことである。リスクの推定は、広島・長崎被爆者を含むアジア人と欧米人の混合集団から計算された。
- D: 正 常染色体劣性遺伝病の場合など、親の代で生殖細胞に生じた遺伝子変異に加えて、子供の代での本人の生殖細胞の同じ遺伝子にさらに遺伝子変異が生じるか、もしくは結婚によって配偶者由来の同じ遺伝子の遺伝子変異が重なって、孫の代において、二箇所の遺伝子変異が必要な表現型が現れる可能性もある。(フェニルケトン尿症、色覚異常、網膜芽腫など)
- E: 正 自然突然変異と同数の誘発突然変異を生じさせるために必要な放射線量を倍加線量といい、放射線の遺伝的影響の指標となる。その値が大きいほど遺伝的影響は生じにくい。マウスのデータから推定された倍加線量を1Gyとし、遺伝的影響のリスクを推定している。(「9版 放射線取扱の基礎」(日本アイソトープ協会) p.52-54)

問10 低LET放射線と比較した場合の高LET(100 keV・ $\mu\text{m}^{-1}$ 程度)放射線の細胞に対する生物効果に関する次の記述のうち、正しいものの組合せはどれか。

- A 線量率効果が小さくなる。
- B 直接作用と比べて間接作用の寄与が大きくなる。
- C 酸素増感比(OER)が小さくなる。
- D 致死作用のRBEが大きくなる。
- 1 ACDのみ 2 ABのみ 3 ACのみ 4 BDのみ 5 BCDのみ

〔解答〕1

〔解説〕

- A: 正 高LET放射線では、線量率効果が小さくなる。細胞周期依存性も小さい。
- B: 誤 高LET放射線では、直接作用が主であり、間接作用の割合が小さい。
- C: 正 高LET放射線では、間接作用の割合が小さいため、結果として酸素効果や低酸素細胞増感剤の効果、防護剤の効果、温熱効果が小さくなる。
- D: 正 高LET放射線では、生物効果比(RBE)高くなり、100~200 keV・ $\mu\text{m}^{-1}$ でピークとなる。それより高くなると低下する傾向となる。

問11 次の文章の    の部分について、解答群の選択肢のうち最も適切な答えを1つだけ選べ。

放射線被ばくによってがんが発生することを放射線発がんと呼ぶ。発がん過程は、一般的には、腫瘍化の初期であるイニシエーション過程に始まり、その後、Aなどを通じて悪性化するまでには、プロモーション過程からプログレッション過程を経る。イニシエーション過程では、被ばく細胞に起こるBの異常ががん化の主な原因と考えられている。なお、プロモーション過程からプログレッション過程を経て悪性化するまでには、放射線を最初に受けた細胞が増殖する過程で生じた細胞に複数のCが生じる必要があるという説が有力である。被ばく後数世代にわたる細胞分裂の後においてもCや染色体異常が続く現象、すなわち、ゲノム不安定性、さらには、細胞と宿主組織が相互作用する組織内微小環境などもがん化に関わる可能性が指摘されている。

Dが白血球になるまでの分化過程で、細胞ががん化して異常増殖した疾患の総称がEである。一方、胃がんや肺がんのようにがん細胞が塊で増殖するがんを総称して固形がんという。放射線で誘発されたがんを、それ以外の原因で誘発されたがんと病理学的に区別することは難しい。したがって、ひとつひとつの発がん事例について放射線との因果関係を明らかにすることが難しいので、被ばくした集団の疫学的な解析が行われてきた。被ばく者集団とその対照集団を設定して、死亡率や臓器別の発がん頻度などの追跡調査を行うFがある。

広島・長崎の原爆被爆生存者を対象にして1950年に開始した追跡調査研究は、代表的なFの1つであり、Life Span Study(LSS)と呼ばれ、被爆者集団およそ9万4千人に対照集団およそ2万7千人を加えた大規模集団を対象としている。この調査によれば、血液系のがんであるEは被ばく後Gに達し、その後減少する。LSSでは、固形がんは被ばく後10年から数十年と潜伏期間が長いのが特徴である。また、放射線発がんのリスクを左右する生物学的因子としては、被ばく時の年齢や性だけでなく遺伝的背景なども関与すると考えられている。例えば、LSSにおいて、甲状腺がんの過剰相対リスクは、被爆者の到達年齢を70歳として被ばく時年齢を4つのグループに分けた場合、Hの年代での被ばくグループが最も高くなると報告されている。

国際放射線防護委員会ICRPの2007年勧告では、疫学研究による各臓器・組織に対するがんの罹患率などのデータから、がんに対する損害で調整された名目リスク係数(代表的集団における性及び被ばく時の年齢で平均化された生涯リスク推定値)は、全集団でア  $\times 10^{-2} \text{ Sv}^{-1}$ と報告されている。なお、低線量域の固形がんリスクの推定にあたっては、高線量の被ばくデータからしきい値なしで線量に比例して減少するとするIに基づき、線量-線量率効果係数も考慮している。

<Aの解答群>

- 1 アポトーシス    2 細胞融合    3 細胞増殖    4 逆転写

<Bの解答群>

- 1 アミノ酸    2 タンパク質    3 ミトコンドリア    4 遺伝子

<C~Eの解答群>

- 1 細胞分裂 2 突然変異 3 DNA の複製  
4 遺伝子の転写 5 血小板 6 末梢血球細胞  
7 造血幹細胞 8 間葉系幹細胞 9 白血病  
10 再生不良性貧血 11 感染症 12 血友病

<Fの解答群>

- 1 臨床研究 2 コホート研究 3 介入研究 4 症例対照研究

<Gの解答群>

- 1 すぐに増加し始め 3~5年でピーク 2 2~3年で増加し始め 6~8年でピーク  
3 5~6年で増加し始め 10~12年でピーク

<Hの解答群>

- 4 0~9歳 2 10~19歳 3 20~39歳 4 40歳以上

<アの解答群>

- 1 1.5 2 3.0 3 5.5 4 8.0

<Iの解答群>

- 1 LNTモデル 2 LQモデル 3 1ヒットモデル 4 2ヒットモデル

〔解答〕 A-3 B-4 C-2 D-7 E-9 F-2 G-2 H-1 ア-3 I-1

〔解説〕

A~E, G: 古典的な山極らのウサギ耳の人工発癌実験が発端となり、その後のマウス皮膚発癌実験に基づき、発がん過程がイニシエーションとプロモーション、そしてプログレッションの三つの段階を経て発がんが起こるとされる。イニシエーションでは、発がん物質（ベンツピレン等）の作用により遺伝子に変異が入ることにより始まり、プロモーターと呼ばれる物質（例えばクロトン油に多く含まれるTPA: ホルボールエステルなど）によってマウス皮膚がん発生が促進され、さらにプログレッションの第3の段階を経て皮膚がんが発生することによる。（「放射線の影響がわかる本（2020改訂版）」（放射線影響協会）p.55-56）

現在では、がん原遺伝子の機能獲得型変異やがん抑制遺伝子に機能喪失型変異が生じ、それがゲノム上の複数箇所に蓄積される（多段階発がん機構）ことにより大腸癌などが生じることが分かって来ている。その他、欠失、転座、染色体の不安定化やエピジェネティックな変化なども発がんに関わる。（「分子細胞生物学 第8版」（東京化学同人）p.1011-1014）

血球成分の大元である造血幹細胞が白血球に分化成熟する過程で、ガン化して異常増殖したものが白血病であり、血液のがんと言われている。白血病の発症には被ばく後2~3年の潜伏期間を経て発生し始め、7~8年で発症のピークを迎える、その後減少する。潜伏期の最も短いがんである。（「9版 放射線取扱の基礎」（日本アイソトープ協会）p.45）

F, G, H: Life Span Study（寿命研究）は、放射線影響研究所によって行われている広島・長崎被爆者生存者を対象にしたコホート研究（特定の要因に曝露した集団としていない集団を一定期間追跡し、研究対象となる疾患の発生率を比較することにより要因と疾病発症の関連を調べるもの）である。

上述のように、白血病の発症には被ばく後 2~3 年の潜伏期間を経て発生し始め、7~8 年で発症のピークを迎える、その後減少する、ということがこのコホート研究で明らかになった。これに対し、白血病以外の固形がんでは、潜伏期は 10 年以上であるとされている。また甲状腺がん発症は、若年層での被ばくグループで高くなっている。

ア, I : ICRP2007 年勧告によれば、がんリスクの名目確率係数は、全集団で  $5.5 \times 10^{-2} \text{ Sv}^{-1}$ 、成人作業者で  $4.1 \times 10^{-2} \text{ Sv}^{-1}$  が提案されている。(「ICRP Publication 103」(国際放射線防護委員会 2007 年勧告) p.21)

発がんの放射線の線量効果に基づくモデルは、直線モデル、LQ モデルが考えられるが、発生率を線量 D の関数とすると、直線モデルでは、 $f(D) = \alpha D$ 、LQ モデルでは  $f(D) = \alpha D + \beta D^2$  となり、白血病は LQ モデルが、他の固形がんは、直線モデルがよくフィットすると言われている。(「9 版 放射線取扱の基礎」(日本アイソトープ協会) p.47) しきい値なしで線量に比例してリスクが減少するのは、直線 LNT モデルである。(「ICRP Publication 103」(国際放射線防護委員会 2007 年勧告) p.17)