

令和 2 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です。

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()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 α 粒子 (${}^4\text{He}$ 原子核) の核子当たりの結合エネルギー[MeV]として、最も近い値は次のうちどれか。ただし、 ${}^4\text{He}$ 原子、陽子、中性子および電子の質量を、それぞれ 4.00260 u、1.00728 u、1.00867 u、0.00055 u とする。また、1 u=932 MeV とする。

- 1 3.8 2 7.1 3 10.5 4 16.4 5 28.3

〔解答〕2

注) ある原子の質量と、それを構成する核子及び電子の質量の合計の差を、質量欠損という。

中性原子の質量数を M 、原子番号 (=陽子数=軌道電子数) を Z 、中性子の数を N とすると、質量欠損 ΔM は、

$$\Delta M = (1.00728 + 0.00055) Z + 1.00867 N - M$$

で表せる。

原子核の結合エネルギーは、核子の結合の強さを表し、核子ごとの結合エネルギーの値 E は

$$E = \frac{932}{A} \cdot \Delta M$$

と表せる。

ここで α 粒子は、陽子2個、中性子2個からなる粒子であり、中性の ${}^4\text{He}$ 原子は、さらに電子2個が加わるので、 ${}^4\text{He}$ に対する質量欠損 ΔM_{He} は

$$\Delta M_{\text{He}} = (1.00728 \times 2 + 0.00055 \times 2 + 1.00867 \times 2) - 4.00260 = 0.0304(\text{u})$$

よって、核子あたりの結合エネルギー E_{He} は、

$$E_{\text{He}} = 932/4 \times 0.0304 = 7.0832 \approx 7.1 (\text{MeV})$$

となる。

問2 次の記述のうち、正しいものの組合せはどれか。

- A 内部転換に伴い、 γ 線が放出される。
B EC 壊変に伴い、特性 X 線あるいはオージェ電子が放出される。
C 核分裂に伴い放出される中性子のエネルギーは連続スペクトルを示す。
D β^- 壊変に伴い、質量数が1だけ増加する。

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

〔解答〕3

注) A：誤 内部転換は、原子核内の余剰エネルギーが γ 線として放出する代わりに軌道電子に移行し、電子線の形態で原子外へエネルギー放出するものである。この際の放出エネルギー源は原子核の準位間エネルギーによるものであるため、放出されるエネルギーは

離散的である。任意の軌道電子の原子核による束縛エネルギーは決まっているため、放出される電子の運動エネルギーは離散的となる。ただし、電子放出元の軌道の違いにより放出電子の運動エネルギーは異なるため、通常は複数のピークが観測される。

B : 正 EC (Electron Capture、電子捕獲) 壊変は、陽子数が過剰で不安定な原子核で起こりやすく、軌道電子が原子核内に捕獲されることで、ニュートリノを放出するとともに、核内の陽子が中性子に変化するものである。軌道電子内で核内に捕獲される確率は K 軌道の電子が最も多いが、L 軌道や M 軌道にある電子が捕獲される場合もある。電子が捕獲された電子軌道の孔にはその外側の電子軌道から電子が遷移して、軌道のエネルギー差に相当する波長の X 線(特性 X 線)が放出するあるいはそのエネルギーを受け取った軌道電子が自己電離して放出(オージェ電子放出)が生じる。

C : 正 核分裂は、ウランやプルトニウムなどの重い原子核がほぼ同等の質量を持つ 2 つの原子核(核分裂片)に分裂する現象をいい、中性子、陽子、 γ 線等の吸収によって誘起される誘起核分裂と自然に起きる自発核分裂とがある。核分裂をするときに新たに 2~3 個の中性子の放出を伴い、そのエネルギー分布は連続スペクトルとなる。なお、放出される中性子の平均エネルギーは約 2MeV である。

D : 誤 β^- 壊変は、中性子数が過剰で不安定な原子核で起こりやすく、原子核内の中性子が陽子、電子、及び反ニュートリノに転換、陽子は核内にとどまり電子と反ニュートリノが原子核外に放出される現象である。核外に放出された電子を β 線という。このとき、壊変後における娘核種の質量数は変化せず、原子番号が 1 増加する。

問3 光電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 γ 線と自由電子との衝突では起きない。
- B 光電子の運動エネルギーは、入射 γ 線のエネルギーよりも、常に低い。
- C 光電効果の原子断面積は、原子番号が大きくなるに従い小さくなる。
- D 光電効果の原子断面積は、入射 γ 線のエネルギーが高くなるに従い大きくなる。

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

〔解答〕 1

注) 光電効果は、光子 (X 線や γ 線) が軌道電子にエネルギーを与え、エネルギーを与えられた軌道電子が原子から飛び出す現象のことである。 γ 線によって起こる光電効果は、原子核との結びつきが強い電子、すなわち原子核に近い電子ほど起こりやすい。

A : 正 γ 線が自由電子に衝突し、 γ 線が電子に吸収される現象は、運動量とエネルギー保存則を同時に満たさないので起こりえない。

(補足) プランク定数を h 、 γ 線の振動数を ν 、光速度を c 、自由電子の質量を m 、速度を v とすると、

$$\text{エネルギー保存則が成り立つと仮定して } h\nu = \frac{1}{2}mv^2 \quad (1)$$

$$\text{運動量保存則が成り立つと仮定して } \frac{h\nu}{c} = mv \quad (2)$$

式(2)を(1)に代入すると、 $v = 2c$ となる。

粒子の速度が光速を超えることはあり得ないため、エネルギー保存則と運動量保存則は同時に成り立たない。

B : 正 入射する光子のエネルギーは、一部軌道電子を原子から引き離すエネルギーおよび物体表面から電子を飛び出させる仕事のために消費され、残りのエネルギーが光電子の運動エネルギーとなる。従って、飛び出る光電子のエネルギーは入射 γ 線のエネルギーより常に低い。

C : 誤 光電効果の原子断面積 τ すなわち光電効果の起こりやすさは原子番号 Z と入射 γ 線のエネルギー E_γ に依存し、

$$\tau \propto Z^5 E_\gamma^{-3.5}$$

の関係を持つ。

従って、光電効果の原子断面積は、原子番号が大きくなるに従い大きくなる。

D : 誤 前述 C より、光電効果の原子断面積は、入射 γ 線のエネルギーが高くなるに従い小さくなる。

問4 122.1 keV の光子が K 軌道電子との光電効果で吸収された。光電子が放出され、引き続き特性 X 線 (K_α 線) が発生した。このとき、光電子の運動エネルギー [keV] として、最も近い値は次のうちどれか。ただし、K 軌道電子の結合エネルギーを 69.5 keV とする。

- 1 10.9 2 52.6 3 69.5 4 122.1 5 191.6

〔解答〕 2

注) 軌道電子の結合エネルギーを E_b 、光子のエネルギーを E_γ とすると、光電子のエネルギー E_e は

$$E_e = E_\gamma - E_b$$

で与えられる。よって、本問のケースでは光電子のエネルギー E_e は

$$E_e = 122.1 - 69.5 = 52.6 \text{ (keV)}$$

となる。

問5 コンプトン散乱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 コンプトン散乱は光子が物質中の電子によって散乱される現象である。
B コンプトン電子の運動エネルギーの最大値は入射光子のエネルギーである。
C スペクトルに現れるコンプトンエッジの位置 (エネルギー) は検出器の素材により異なる。
D コンプトン散乱の原子断面積は、物質の原子番号にほぼ比例する。

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

〔解答〕 3

注) A : 正 コンプトン散乱は、光子が保有するエネルギーの一部を吸収物質中の電子に移行し、進行方向を変える (散乱する) 現象であるため、光子の粒子性を示す現象とも言える。

B : 誤 コンプトン散乱時における散乱光子のエネルギー $h\nu'$ は、入射光子のエネルギー $h\nu$ と散乱角 θ によって以下の様に記述される。

$$hv' = \frac{hv}{1 + \frac{hv}{m_0c^2} \cdot (1 - \cos\theta)}$$

また、反跳電子のエネルギー E_e は、

$$E_e = hv - hv' = \frac{hv}{1 + \frac{m_0c^2}{hv(1 - \cos\theta)}}$$

この時、 E_e は $\theta=180^\circ$ の時に最大値を取る。

そして $\theta=180^\circ$ すなわち $\cos\pi=-1$ の時の反跳電子のエネルギーは、

$$E_e = \frac{hv}{1 + \frac{m_0c^2}{2hv}}$$

ここで、 $1 + \frac{m_0c^2}{2hv} > 1$ であるので、反跳電子のエネルギーは入射光子のエネルギーより常に小さい。

C : 誤 コンプトンエッジとは、反跳電子の散乱角が 180° 、すなわち入射光子が電子に最もエネルギーを与えたときの電子のエネルギーを示している。反跳電子の最大エネルギーは入射光子のエネルギーに依存し、検出器の素材には依存しない。

D : 正 コンプトン散乱は光子と電子との相互作用であり、また、物質中の全ての電子に対して同じ確率で起こりうる。よって、原子断面積は吸収する物質の軌道電子数、すなわち原子番号に比例する。

問6 ある単一エネルギーの細い光子束に対する遮蔽板の半価層が 1.3 cm であった。線減弱係数 $[\text{cm}^{-1}]$ として、最も近い値は次のうちどれか。ただし、 $\ln 2=0.693$ とする。

- 1 0.25 2 0.33 3 0.40 4 0.48 5 0.53

〔解答〕 5

注) 半価層 $x_{1/2} = \ln 2 / \mu$ で表されるので、 $\mu = \ln 2 / x_{1/2}$ なので値を代入すると、 $\mu [\text{cm}^{-1}] = 0.693 / 1.3 = 0.533$ (よって 0.53 が一番近い値となる)

問7 中性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 核外にある中性子には寿命がある。
B 高速中性子が陽子と衝突すると、運動エネルギーは平均で約 1/2 になる。
C 熱中性子が原子核に捕獲されると、 γ 線が放出されることがある。
D 中性子の捕獲断面積は、物質の原子番号のみに依存する。

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

〔解答〕 1

注) A : 正 原子核内部にある中性子は安定であるが、ひとたび核外に取り出されると、寿命約 15 分で陽子、電子、反ニュートリノに崩壊する。

B : 正 中性子と陽子の質量をそれぞれ m 、 M 、衝突前の中性子のエネルギーを E_n 、重心系での中性子の散乱角を θ とすると、衝突後の陽子の運動エネルギー E は次式で表され

る。

$$E = \frac{2mM}{(m+M)^2} (1 - \cos \theta) E_n$$

m と M がほぼ同じ値であることから、

$$E = \frac{1}{2} (1 - \cos \theta) E_n$$

$\cos \theta$ の平均値がゼロなので、 E の平均値は E_n の約 $1/2$ である。

C : 正 ガンマ線を放出する捕獲反応の例として、 $^{23}\text{Na}(n, \gamma)^{24}\text{Na}$ 、 $^{59}\text{Co}(n, \gamma)^{60}\text{Co}$ がある。

D : 誤 中性子の捕獲断面積は、原子番号には依存せず核種によって異なる。同じ物質でも中性子のエネルギーによって異なる。

なお、X線の場合の断面積は、物質の原子番号に大きく依存する。

問8 荷電粒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 α 粒子は原子核の近傍を通過するとき大きく散乱されることがある。
B 質量衝突阻止能は、物質の原子番号が高いほど大きい。
C 荷電粒子が物質中を通過するとき、単位距離を進むごとに失う平均のエネルギーを線阻止能という。
D β 線の空気に対する W 値は、約 34 eV である。

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

〔解答〕 1

注) A : 正 α 粒子や陽子は原子核近傍でクーロン力により稀に散乱する。歴史的には有核原子模型の提唱につながった Rutherford 散乱が有名である。

B : 誤 質量衝突阻止能は線衝突阻止能を密度で除したもの。相互作用する物質の原子番号に比例し、質量数に逆比例するが、その比 $\left(\frac{Z}{A}\right)$ は物質によらずほぼ一定 (≈ 0.5) である。

$$S_{col}/\rho \propto \frac{1}{mv^2} \times \frac{Z}{A}$$

S_{col} : 線衝突阻止能、 ρ : 密度、 m : 荷電粒子の質量、

v : 荷電粒子の速度、 Z : 原子番号、 A : 物質の質量

C : 正 $S_{col} = -\frac{dE}{dx} \propto \frac{N \times Z}{mv^2} = \frac{\rho \times Z}{mv^2 \times A}$

D : 正 W 値は、気体分子を電離するエネルギー (イオン化エネルギー) の約 2 倍の値となる。電離される気体の組成に依存し、入射粒子の種類やエネルギーにはほとんど依存しない。

問9 放射線の遮蔽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 α 線に対する防護では、外部被ばくを考慮する必要がない。
B β^+ 線の遮蔽では、消滅放射線を考慮する必要がある。

C γ 線の遮蔽では、散乱によるビルドアップを考慮する必要がある。

D 中性子線の遮蔽には、水が有効である。

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

〔解答〕5

注) A : 正 α 線は質量が大きく、正電荷を帯びており、飛程が短いため、体内に摂取された場合(内部被ばく)のみ考慮する必要がある。

B : 正 β^+ 線は陽電子を放出し、陽電子は周囲に存在する陰電子と結合する。その際、両者の持っていたエネルギーは消滅放射線として、511keV の γ 線が 180 度逆の方向に 2 本発生する。

C : 正 γ 線が物質に衝突するときに、1 次線より 2 次散乱線の増加が多く、徐々に線量が増えていく。これをビルドアップ効果という。

D : 正 中性子は電荷を持たない粒子線であり、物質を透過する能力が非常に高い。高速中性子は原子量の小さな物質(軽水、重水等)内での散乱によりエネルギーを減少させて熱中性子とし、次に熱中性子に対する吸収断面積の大きな物質(ホウ素、カドミウム等)を利用して吸収させる。

問 10 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 LET — $\text{J} \cdot \text{m}^{-1}$

C 質量減弱係数 — $\text{m}^2 \cdot \text{kg}^{-1}$

D 吸収線量 — $\text{J} \cdot \text{kg}^{-1}$

E 粒子フルエンス — $\text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$

1 ABE のみ 2 ACD のみ 3 ADE のみ 4 BCD のみ 5 BCE のみ

〔解答〕4

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

B : 正 LET は、linear energy transfer の略で、線エネルギー付与と直訳される。荷電粒子の通過した飛程に沿って、物質にどれだけエネルギーを与えたかを表現している。通常は $[\text{keV}/\mu\text{m}]$ がよく使われるが、 $\text{J} \cdot \text{m}^{-1}$ で正しい。

C : 正 単一エネルギーの光子の狭い平行束が物質に垂直に入射する時、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という。単位は $\text{m}^2 \cdot \text{kg}^{-1}$ である。

D : 正 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。

E : 誤 粒子フルエンスとは、単位面積の大円を持つ球を通過する粒子の総数をいい、単位は $[\text{m}^{-2}]$ で表す。1 秒あたりの粒子フルエンスは、粒子フルエンス率 $[\text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}]$ という。

問 11 放射線のエネルギーに関する次の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。なお、選択肢は必要に応じて2回以上使ってもよい。

Ⅰ ニュートン力学において、質量 m 、速度 v の粒子の運動量 p_0 と運動エネルギー T_0 はそれぞれ、

$$p_0 = \boxed{\text{A}} \quad (1)$$

$$T_0 = \boxed{\text{B}} \quad (2)$$

である。

一方(ア)では、速度が光速 c に近いときには、運動量 p と全エネルギー E は、 $\beta = \frac{v}{c}$ とすると、それぞれ、

$$p = \frac{mv}{\boxed{\text{C}}} \quad (3)$$

$$E = T + mc^2 = \sqrt{p^2 c^2 + m^2 c^4} = \frac{mc^2}{\boxed{\text{C}}} \quad (4)$$

である。(4)式で、 T は運動エネルギー、 mc^2 は(イ)エネルギーである。なお、(C)を β^2 の多項式で近似すると、

$$E \approx mc^2 \left(1 + \frac{1}{2} \beta^2 + \frac{3}{8} \beta^4 \right) = mc^2 + \boxed{\text{D}} + \frac{3}{8} mv^2 \beta^2 \quad (5)$$

となる。(5)式で $\beta \ll 1$ ならば、第三項は無視でき、 T がニュートン力学における T_0 と一致する。また、(4)式を質量のない光子に適用すると、光子のエネルギー E_γ と運動量 p の関係式、

$$E_\gamma = \boxed{\text{ウ}} \quad (6)$$

を得る。

<A～Dの解答群>

- | | | | | |
|-----------------------|-----------------------|---------------------|---------------------|---------------------|
| 1 $\frac{1}{2}mv$ | 2 $\frac{1}{2}mc$ | 3 $\frac{1}{2}mv^2$ | 4 $\frac{1}{2}mc^2$ | 5 mv |
| 6 mc | 7 mv^2 | 8 mc^2 | 9 $\sqrt{1+\beta}$ | 10 $\sqrt{1-\beta}$ |
| 11 $\sqrt{1+\beta^2}$ | 12 $\sqrt{1-\beta^2}$ | | | |

<ア～ウの解答群>

- | | | | | |
|----------|----------|--------|--------|-----------------|
| 1 相対論 | 2 量子論 | 3 解析力学 | 4 電磁気学 | 5 熱 |
| 6 重力 | 7 静止 | 8 クーロン | 9 pc | 10 $\sqrt{2}pc$ |
| 11 $2pc$ | 12 $4pc$ | | | |

II ^{252}Cf の自発核分裂で生じた $T=4.7 \text{ MeV}$ の (エ) について、その速度 $v[\text{m} \cdot \text{s}^{-1}]$ を概算する。ただし、この粒子の (イ) エネルギーを 940 MeV とし、 $\beta^2 \ll 1$ を仮定できるものとする。まず、この粒子の質量を m とすると、

$$mc^2 = 940 \text{ MeV} \quad (7)$$

である。次に、求める速度 v について、

$$\frac{1}{2}mv^2 = 4.7 \text{ MeV} \quad (8)$$

である。ここで、

$$\frac{(8) \text{ 式の左辺}}{(7) \text{ 式の左辺}} = \frac{(8) \text{ 式の右辺}}{(7) \text{ 式の右辺}}$$

を計算して m を消去すると、

$$\left(\frac{v}{c}\right)^2 = \frac{1}{\boxed{\text{E}}} \quad (9)$$

より、

$$v = \frac{c}{\sqrt{\boxed{\text{E}}}} = \boxed{\text{F}} \text{ m} \cdot \text{s}^{-1} \quad (10)$$

と求まる。ただし、光速 c は $3.0 \times 10^8 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ とする。

<エの解答群>

- 1 ニュートリノ 2 中性子 3 α 粒子 4 陽電子

<E、Fの解答群>

- 1 50 2 100 3 200 4 400 5 800
6 1×10^6 7 3×10^6 8 1×10^7 9 3×10^7 10 1×10^8

[解答]

I A-5 B-3 C-12 D-3 ア-1 イ-7 ウ-9

注) A、B: ニュートン力学による質量 m 、速度 v の粒子の運動量と運動エネルギーはそれぞれ mv 、 $\frac{1}{2}mv^2$ である。

C、ア、イ: 相対論では、物質の速度が光速 c に近いときは、速度 v で移動する物質の質量 m' は

$$m' = \frac{m}{\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}} = \frac{m}{\sqrt{1 - \beta^2}} \quad \left(\beta = \frac{v}{c}\right)$$

であることから、運動量 p は

$$p = m'v = \frac{mv}{\sqrt{1-\beta^2}}$$

である。

全エネルギーEは運動エネルギーTと物質自体のエネルギー mc^2 の和になるので、

$$E = T + mc^2$$

また、Eは

$$E = \sqrt{p^2 c^2 + m^2 c^4}$$

とも表せるので、ここに式

$$p = \frac{mv}{\sqrt{1-\beta^2}}$$

を代入し変形すると、

$$E = \frac{mc^2}{\sqrt{1-\left(\frac{v}{c}\right)^2}} = \frac{mc^2}{\sqrt{1-\beta^2}}$$

となる。

D: $\sqrt{1-\beta^2}$ の多項式近似については、和のマクローリン展開

$$(1+x)^n = 1 + \frac{nx}{1!} + \frac{n(n-1)x^2}{2!} + \dots$$

より、

$$\frac{1}{\sqrt{1-\beta^2}} = \{1 + (-\beta^2)\}^{-\frac{1}{2}} = 1 + \frac{-\frac{1}{2}(-\beta^2)}{1!} + \frac{-\frac{1}{2}\left\{\left(-\frac{1}{2}\right) - 1\right\}(-\beta^2)^2}{2!} + \dots$$

であるので、

$$E = mc^2 \left(1 + \frac{1}{2}\beta^2 + \frac{3}{8}\beta^4\right) = mc^2 + \frac{1}{2}mv^2 + \frac{3}{8}mv^2\beta^2 + \dots$$

となる。ここで、 $\beta \ll 1$ 、すなわち $v \ll c$ の時は、第三項以降は無視しうるので、

$$T = \frac{1}{2}mv^2 = T_0$$

となる。

(補足) 全エネルギー $E = \sqrt{p^2 c^2 + m^2 c^4}$ について
移動中の質量 m' を表す式

$$m' = \frac{m}{\sqrt{1-\frac{v^2}{c^2}}}$$

及び、運動量を表す式

$$p = m'v$$

より、

$$m'c^2 = \sqrt{p^2 c^2 + m^2 c^4}$$

が得られる。

ここで、移動中の E については質量とエネルギーの関係を示す式

$$E = m'c^2$$

とも表せるので、

$$E = \sqrt{p^2c^2 + m^2c^4}$$

が成り立つ。

ウ：光子の質量 $m=0$ であるので、 $E = \sqrt{p^2c^2 + m^2c^4}$ から、

$$E_\gamma = \sqrt{p^2c^2} = pc$$

となる。

II エー2 Eー2 Fー9

注) エ：自発核分裂とは、外部からの誘導中性子やエネルギー付与がなくても、トンネル効果により原子核が核分裂を起こす核分裂である。 ^{252}Cf は、全壊変の3%の割合で自発核分裂（自発核分裂半減期 86y）を行い、平均約 2MeV の中性子を 核分裂 1 回につき 3.76 個、 $1\text{mg} \cdot 1\text{秒}$ あたり 2.3×10^9 個放出する。

E、F：本問では、 $\beta \ll 1$ すなわち v が光速に比べて極めて小さいため、ニュートン力学によって速度を求めることが可能である。

(7)、(8)の両式より、

$$\frac{\frac{1}{2}mv^2}{mc^2} = \frac{4.7}{940}$$

よって、

$$\left(\frac{v}{c}\right)^2 = \frac{1}{100}$$

光速 $c=3.0 \times 10^8 \text{m} \cdot \text{s}^{-1}$ であるので、求める速度 v は

$$v = \frac{c}{\sqrt{100}} = \frac{3.0 \times 10^8}{10} = 3.0 \times 10^7 [\text{m} \cdot \text{s}^{-1}]$$

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()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 ある線源の放射能は、製造から20日間経過時に800 kBq、60日間経過時に200 kBqであった。

100日間経過時の放射能[kBq]として、最も近い値は次のうちどれか。

- 1 25 2 50 3 75 4 100 5 125

〔解答〕2

注) この線源のある時点での放射能を A_0 [kBq]、ある時点から t 日経過後の放射能を A [kBq]、半減期を T [日]とすると、

$$A = A_0 \times \left(\frac{1}{2}\right)^{\frac{t}{T}} \quad \text{より} \quad \text{変形して} \quad \frac{A}{A_0} = \left(\frac{1}{2}\right)^{\frac{t}{T}} \quad \text{の関係が成り立つ}$$

20日間経過時 放射能 800 k Bq …………… ①

60日間経過時 放射能 200 k Bq …………… ②

100日間経過時 放射能 X k Bq …………… ③

①②より、経過日数40日間で、放射能は①の時点の1/4となっている。

$$\frac{A}{A_0} = \frac{200 \text{ [kBq]}}{800 \text{ [kBq]}} = \frac{1}{4}$$

②③においても、経過日数は同じく40日間であるため、 $\left(\frac{1}{2}\right)^{\frac{t}{T}}$ の値は変わらず、放射能 X は

②の時点の1/4となり、

$$\frac{A}{A_0} = \frac{1}{4} = \frac{X \text{ [kBq]}}{200 \text{ [kBq]}}$$

$X=50$ [kBq] となる。

問2 炭酸カリウム (K_2CO_3) が28 g あるとき、その放射能[MBq]に最も近い値は、次のうちどれか。

ただし、カリウム (K) は質量数40とし、 ^{40}K の半減期を 4.0×10^{16} s、アボガドロ定数を $6.0 \times 10^{23} \text{ mol}^{-1}$ とする。また、 K_2CO_3 の式量を140とし、 $\ln 2 = 0.693$ とする。

- 1 0.5 2 1 3 2 4 4 5 8

〔解答〕4

注) 放射能 X は壊変定数 (λ) と原子数 (N) の積で得られる。

$$X = -\frac{dN}{dt} = \lambda N$$

$$\lambda = \frac{\ln 2}{T[s]} = \frac{0.693}{4.0 \times 10^{16} [s]} = 1.73 \times 10^{-17} [s] \cdots \cdots \textcircled{1}$$

T : 半減期[s]

カリウムの原子は炭酸カリウムの分子の中に2個あるので、カリウムの原子数(N)は、

$$N = \frac{28[\text{g}]}{140[\text{g/mol}]} \times 2 \times 6.0 \times 10^{23} [\text{mol}^{-1}] = 2.4 \times 10^{23} \cdots \textcircled{2}$$

したがって、 $\textcircled{1} \times \textcircled{2} \cong 4.2 \times 10^6 [\text{Bq}] = 4.2 [\text{MBq}]$

放射能の単位と半減期の時間の単位は一致させる必要があるので注意すること。

天然に存在するカリウムは、安定同位体の ^{39}K 、 ^{41}K と放射性の ^{40}K が存在する。 ^{40}K の存在比は約0.012% (出典：アイソトープ手帳第11版)である。ただし、この問題ではカリウムの質量数は40と明記しており、すべてが放射性カリウム ^{40}K として放射能を算出する。

問3 元素の周期表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 一番上の行(第1周期)の元素では、L殻が最外殻である。
- B 下の行ほど(周期が増えるに従って)、電子の占める電子殻の数は増える。
- C 一番左の列(第1族)の元素では、最外殻の電子数は1である。
- D 性質の類似した元素が同じ列(族)に並んでいる。

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

〔解答〕4

注) A: 誤 最外殻はK殻である。

B: 正

C: 正

D: 正

問4 水中で放射線によって生成する活性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 $\cdot\text{H}$ が水分子の解離によって生成する。
- B $\cdot\text{OH}$ は還元剤として働く。
- C 水和電子は還元剤として働く。
- D 活性種の収率はpHに依存しない。
- E 活性種の収率はLETに依存する。

1 ABCのみ 2 ABDのみ 3 ACEのみ 4 BDEのみ 5 CDEのみ

〔解答〕3

注) A: 正 水に放射線が照射されると、水の電離により正イオンラジカル(H_2O^+)と電子が生成される。正イオンラジカルは非常に不安定なため、水と反応して直ちにOHラジカル(ヒドロキシルラジカル, $\cdot\text{OH}$)を生成、電子の方はHラジカル(水素ラジカル, $\cdot\text{H}$)を生成する。また、水分子からたたき出された電子は、周囲の水分子と衝突しながらその運動エネルギーを次第に消失するが、そのエネルギーが熱エネルギーと同程度になると周囲に水分子の双極子を配向させて比較的安定な水和イオン(hydrated electron, e_{aq}^-)となる。この水和イオンも水や水素イオンと反応し、HラジカルやOH

ラジカルを発生させる。

B : 誤 水と電子は強い還元剤、OH ラジカルは強い酸化剤。

C : 正

D : 誤 水の活性種の発生は、 H^+ や OH^- の存在量に依存する。

E : 正 LET が高くなると、スパー（活性種が発生している径数 nm の励起やイオンが蓄積した微小領域）が重なり、ラジカルどうしの反応が促進される。

問5 中性子線源 $^{241}\text{Am-Be}$ で利用されている主な核反応として正しいものは、次のうちどれか。

1 $^9\text{Be}(\gamma, 2n)^7\text{Be}$

2 $^9\text{Be}(\gamma, n)^8\text{Be}$

3 $^9\text{Be}(\alpha, 2n)^{12}\text{C}$

4 $^9\text{Be}(\alpha, n)^{12}\text{B}$

5 $^9\text{Be}(\alpha, n)^{12}\text{C}$

〔解答〕 5

注) ^{226}Ra 由来の α 線を Be に衝突させて起こる核反応は、 $^9\text{Be}(\alpha, n)^{12}\text{C}$ 。 ^{226}Ra を Be の粉末に混合し白金管中に封入したものが中性子線を放出する密封線源として市販されている。線源より発生する中性子のエネルギーは平均 4.4MeV、最大 12MeV。中性子用の線源としては他に、自発核分裂により中性子が放出される ^{252}Cf も現在よく使用されている。

問6 放射性同位元素装備機器に利用される核種について、放出される β 線の最大エネルギーが低い方から順に並べられたものは、次のうちどれか。

1 $^{63}\text{Ni} < ^{147}\text{Pm} < ^{90}\text{Y}$

2 $^{85}\text{Kr} < ^{90}\text{Sr} < ^{63}\text{Ni}$

3 $^{90}\text{Y} < ^{85}\text{Kr} < ^{90}\text{Sr}$

4 $^{147}\text{Pm} < ^{63}\text{Ni} < ^{85}\text{Kr}$

5 $^{90}\text{Sr} < ^{90}\text{Y} < ^{147}\text{Pm}$

〔解答〕 1

注) β 線の最大エネルギー：

^{63}Ni 0.0669 MeV

^{147}Pm 0.224 MeV

^{90}Y 2.280 MeV

^{85}Kr 0.687 MeV

^{90}Sr 0.546 MeV

$^{63}\text{Ni} \ll ^{147}\text{Pm} < ^{90}\text{Sr} < ^{85}\text{Kr} \ll ^{90}\text{Y}$

問7 β 線と γ 線の両方を放出する線源として正しいものの組合せは次のうちどれか。

A ^{60}Co

B ^{90}Sr C ^{131}I D ^{192}Ir

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

〔解答〕 3

注) A: 正 ^{60}Co は β 崩壊により ^{60}Ni になり、崩壊生成物の ^{60}Ni が γ 崩壊して2本の γ 線を放出する。

B: 誤 ^{90}Sr は中性子過剰であるため、 β 崩壊により ^{90}Y を生成し、さらに β 崩壊して安定な ^{90}Zr となる。

C: 正 ^{131}I は β 崩壊および γ 崩壊により準安定状態の $^{131\text{m}}\text{Xe}$ に変化し、直ちに γ 崩壊を起こして安定な ^{131}Xe となる。

D: 正 ^{192}Ir は β 崩壊もしくは軌道電子捕獲により、 β 線及び γ 線を放出する。

問8 ウラン系列に関する次の記述のうち、正しいものの組合せはどれか。

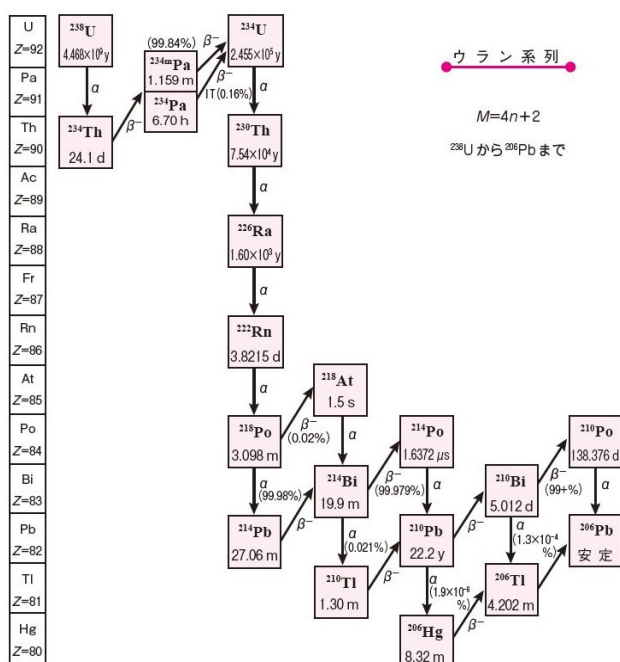
A ^{234}U から始まる。B ^{226}Ra を含む。C ^{210}Po を含む。D ^{208}Pb で終わる。

1 AとB 2 AとC 3 AとD 4 BとC 5 BとD

〔解答〕 4

注) ウラン系列は ^{238}U から始まり、8回の α 壊変と、6回の β 壊変を経て、安定同位元素の ^{206}Pb で終わる。

以下、壊変系列図を示す。



(9版 放射線取扱の基礎—第1種放射線取扱主任者試験の要点 (日本アイソトープ協会) より)

問9 放射性物質に対して用いられる次の除染剤の化学的性質に関する記述のうち、正しいものの組合せはどれか。

- A 水は極性溶媒である。
- B 除染剤を用いるときは化学的活性度の高い薬剤から順に試す。
- C 中性洗剤は界面活性剤を含む。
- D EDTA-2ナトリウム水溶液はキレート形成を利用した除染剤である。

1 ACDのみ 2 ABのみ 3 ACのみ 4 BDのみ 5 BCDのみ

〔解答〕1

注) A：正 誘電率の大きい液体が溶媒として働くとき、これを極性溶媒という。水は常温で誘電率が約 80 という大きな値を示し、イオン化合物をよく溶かす代表的な極性溶媒である。

B：誤 除染剤はなるべく化学的活性度の低い除染剤から使用する。活性度の高い除染剤を使用すれば、その時の除染効果は高いが表面が腐食され、次に汚染されたときに除染が困難になる恐れがある。

C：正 界面活性剤とは分子内に水になじみやすい部分（親水基）と油になじみやすい部分（親油基・疎水基）を持つ総称である。洗浄剤や乳化剤などの主成分は界面活性剤である。

D：正 金属イオンの状態で溶媒に溶けている放射性核種を抽出する際には、キレート剤を用いることが多い。EDTA（エチレンジアミン四酢酸）はアルカリ金属をのぞく多くの金属イオンと安定な錯塩を形成するキレート剤である。

問10 内部被ばくによる被ばく線量を低減化するために有効な薬剤として、適切なものの組合せは次のうちどれか。

- A ヨウ化カリウム
- B フェロシアン化第二鉄（プルシアンブルー）
- C アセチルサリチル酸（アスピリン）
- D ミソニダゾール

1 AとB 2 AとC 3 BとC 4 BとD 5 CとD

〔解答〕1

注) A：正 原発事故等で放出された ^{131}I 、 ^{135}I 等の内部被ばくを低減するために放射性ではないヨウ化カリウムを摂取することにより甲状腺への集積を抑え、体外排出を促進する作用がある。

B：正 フェロシアン化第二鉄は毒性が低く、経口投与することが出来る。1価の陽イオンに結合し消化管に吸収されないコロイドとして糞便に排泄されることにより、放射性セシウムなどの体外排泄を促進させる。

C : 誤 プロスタグランジン合成の初発酵素シクロオキシゲナーゼの阻害薬であるため、炎症反応を起こすプロスタグランジン合成を抑制し抗炎症効果を発揮する。

D : 誤 低酸素領域のガンに対して、放射線感受性を高めるために用いる放射線増感剤である。

問 11 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 すべての物質は原子により構成されている。原子の大きさは(ア) m 程度であり、原子の中心には、さらにその数万分の1の大きさの正の電荷をもった原子核があり、その周りに(A)が分布している。原子核を構成する陽子と中性子の質量はほぼ等しく、(A)の質量の約1,840倍であり、原子核内の陽子と中性子の数の和を(B)という。1モルの原子の質量は、原子核内の陽子と中性子の数の和である(B)にグラムをつけた値に近く、(A)の質量はほとんど無視できる。原子は(A)を出しあって形成する共有結合などによって、分子をつくる。このようにしてつくられた分子がどのような化学的性質を持つかは、(A)の分子内分布で決まるともいえる。

同一の(C)を持つ原子は共通の化学的性質を持ち、それぞれの元素を構成する。(A)の数は、中性原子では陽子の数に等しく、陽子の数が元素を決め、各元素に対応する(C)になっている。同じ元素、すなわち、同じ(C)でありながら、中性子の数が異なる、すなわち、(B)が異なる原子は互いに(D)と呼ばれる。元素の原子量とは、元素の原子の質量を一定の基準で定めたものであり、現在、用いられている基準は、(B)12の炭素原子の質量を12としている。

なお、複数の(D)からなる元素の原子量は、存在度の重みを付けて平均をとることで得られる。

<アの解答群>

- | | | | | |
|--------------|--------------|--------------|--------------|--------------|
| 1 10^{-6} | 2 10^{-8} | 3 10^{-10} | 4 10^{-12} | 5 10^{-14} |
| 6 10^{-16} | 7 10^{-18} | 8 10^{-20} | | |

<Aの解答群>

- | | | | |
|----------|-------|------|-------|
| 1 ニュートリノ | 2 中間子 | 3 電子 | 4 陽電子 |
|----------|-------|------|-------|

<Bの解答群>

- | | | | |
|-------|-------|-------|-------|
| 1 分子量 | 2 分子数 | 3 電子数 | 4 質量数 |
|-------|-------|-------|-------|

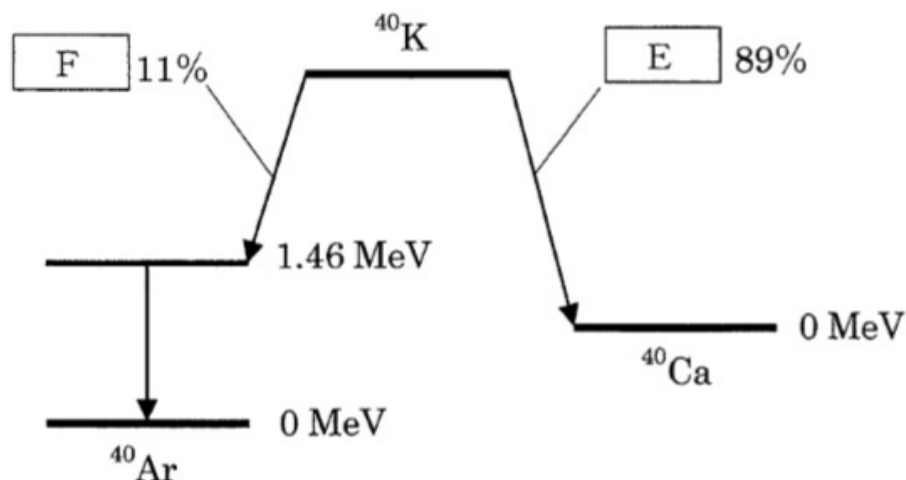
<Cの解答群>

- | | | | |
|--------|-----------|-------|--------|
| 1 原子番号 | 2 原子スペクトル | 3 電荷数 | 4 電子密度 |
|--------|-----------|-------|--------|

<Dの解答群>

- | | | | |
|--------|-------|---------|-------|
| 1 核異性体 | 2 同位体 | 3 同中性子体 | 4 同重体 |
|--------|-------|---------|-------|

Ⅱ 地殻中に存在し、動植物にとって必須元素であるカリウムは、天然同位体存在度が ^{39}K : 93.26%、 ^{40}K : 0.0117%、 ^{41}K : 6.73%であり、カリウムの原子量は39.10となる。このうち、 ^{40}K は半減期12.5億年の放射性核種であり、46億年前に地球が誕生したとすると誕生時における ^{40}K の存在量は現在の(イ)倍に近い値であったと推定される。



上図に示したように、 ^{40}K の放射壊変において、89%が (E) して ^{40}Ca になり、11%が (F) を起こし 1.46 MeV の光子を放出して ^{40}Ar になる。

地球大気中に約 1%含まれている気体アルゴンの 99.6%は ^{40}Ar であり、これは主に ^{40}K から生成したと考えられる。他に ^{36}Ar が 0.34%、 ^{38}Ar が 0.06%存在し、アルゴンの原子量は 39.95 となる。その結果、アルゴンとカリウムでは原子番号順で原子量の逆転が起きている。

カリウムは、(G) などとともにアルカリ金属と呼ばれ、1 価の陽イオンになりやすい。カルシウムは、(H) などとともにアルカリ土類金属と呼ばれ、2 価の陽イオンになりやすい。一方、アルゴンは希ガス (貴ガス) の一種で、化学的に安定で反応しない。

<I の解答群>

1 4 2 8 3 13 4 17

<E、F の解答群>

1 α 壊変 2 β^- 壊変 3 β^+ 壊変 4 EC 壊変
5 核異性体転移 6 内部転換 7 自発核分裂

<G、H の解答群>

1 C 2 Cd 3 Co 4 Cr 5 Cs
6 Cu 7 S 8 Sb 9 Si 10 Sr

[解答]

I アー3 Aー3 Bー4 Cー1 Dー2

注) ア：原子の大きさは、どの原子でも $\sim 10^{-10}\text{m}$ の大きさである。

A：原子核の周りを回っているのはマイナス電荷の電子である。

B：陽子+中性子の質量の合計は、質量数と呼ばれる。

C：陽子の数すなわち原子番号が同じであれば、その元素の化学的性質は同じである。

D：同じ陽子数を持ち、中性子の数が異なるものを同位体という。放射性を持つもの、持たないものがある。

II イー3 Eー2 Fー4 Gー5 Hー10

注) イ：地球誕生の ^{40}K 放射能を A_0 , 46 億年後の放射能を A とすると、 $A = A_0 X (1/2)^{t/T}$ を変形して、
 $A_0/A = 1/(1/2)^{t/T}$ 。 $t = 46 \times 10^8$, $T = 12.5 \times 10^8$ を代入すると、 $A_0/A = 1/(0.5)^{3.68} = 12.8$ よって 13 倍

E：陽子が一つ増える壊変なので、 β^- 壊変

F：EC 壊変を行い、1.46MeV の特性 X 線を放出する。

G：アルカリ金属であるのは、Cs

H：アルカリ土類金属であるのは、Sr

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()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 次の文章の(A)～(C)に入る語句として、最も適切なものの組合せはどれか。

細胞内の染色体(A)のもっている遺伝情報が(B)に伝えられ、その情報を基に(C)がつくられるという流れが生命維持の基本になっている。したがって、(A)の放射線損傷は、照射効果を推定するうえで重要である。

	(A)	(B)	(C)
1	DNA	RNA	タンパク質
2	DNA	タンパク質	RNA
3	RNA	DNA	タンパク質
4	RNA	タンパク質	DNA
5	タンパク質	RNA	DNA

〔解答〕1

注) 遺伝子発現は、DNA → mRNA → タンパク質の順に起こり、DNA→RNA (mRNA) の段階は転写、RNA (mRNA)→タンパク質の段階は翻訳と呼ばれる。これらの過程をセントラルドグマ(中心命題)と言い、分子生物学の基本となっている。

問2 疫学調査で放射線被ばくと発がんとの関連性が示されているものとして正しいものの組合せは次のうちどれか。

- | | |
|---------------|------------|
| A ウラン鉱山鉱夫 | ー 肺がん |
| B 時計文字盤塗装工 | ー 膵臓がん |
| C チェルノブイリ原発事故 | ー 小児の甲状腺がん |
| D トロトラスト投与患者 | ー 肝臓がん |

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

〔解答〕3

注) 放射線被ばくと発がんとの関連性が報告されているものとしては A, C, D があるが、その各々について発生機序は以下のように考えられている。

A : 正 ウラン系列が壊変し、生じた ^{226}Ra が α 崩壊して ^{222}Rn となる。ラドンは気体であるから、吸入されると肺に到達し、すぐ排出されるから人体に傷害をほとんどあたえない。しかし、ラドン子孫 (^{218}Po から ^{210}Pb) は固体であるから、エアゾールに吸着して、放射性エアゾールとなり、気管支壁の細胞に吸着して α 線、 β 線、 γ 線を放出して組織に傷害を与える。この中で α 線が主要な傷害要因である。 α 線を被ばくした気管支壁の基底細胞では、そのDNAが傷害をうけてラドンの健康障害(肺がん)の原因になる。

B : 誤 時計をはじめ計器の文字盤、夜間の指示標識などに用いられている夜光塗料は、現在化学蓄光顔料が主流になりつつあるが、以前は蛍光塗料にラジウム (^{226}Ra 、 ^{228}Ra) 等の放

放射性物質を加えたものが利用されていた。ラジウムはカルシウムと同じアルカリ土類元素で化学的性質が似ている。そのため、カルシウムが多い骨に沈着し、骨の放射線障害を起こしたのである。膀胱がんとの関連性は誤り

C：正 放射性ヨウ素は高い割合で、急速にミルクに吸収され、ミルクを消費する人々、特にベラルーシ、ロシア、ウクライナの子供達の甲状腺に集積し、重大な甲状腺線量を付与した。

D：正 二酸化トリウムコロイドを主剤とする X 線造影剤トロトラストは肝臓や骨髄などに沈着し、 α 線を長年月にわたって放出する。数十年経過後、肝がん、肝硬変や白血病を発症し、死亡率も高いことが明らかにされている。

問3 次の放射線障害のうち、晩発性障害として正しいものの組合せはどれか。

- A 脱毛
- B 白内障
- C 不妊
- D 白血病
- E 固形がん

1 ABCのみ 2 ABDのみ 3 ACEのみ 4 BDEのみ 5 CDEのみ

〔解答〕4

注) 放射線影響には潜伏期間、即ち、放射線被ばくから臨床症状としての影響が出現するまでにある期間が存在する。この潜伏期間が数週間以内の影響を急性影響、数ヶ月以上のものを晩発性影響と呼ぶ。晩発性影響は、被ばく後生き残った細胞内に修復不可能な突然変異が残ることによって起こる。晩発性影響の代表的なものとして、がんの誘発、白内障、寿命の短縮等が上げられる。

- A：誤 急性影響である
- B：正 晩発性影響である
- C：誤 急性影響である
- D：正 晩発性影響である
- E：正 晩発性影響である

問4 次のA～Dの全身 γ 線被ばくによる確定的影響について、罹病の1%発生率におけるしきい線量(ICRP2007年勧告)が低い方から順に並んでいるものは、次のうちどれか。

- A 骨髄の造血機能低下
- B 卵巣被ばくによる永久不妊
- C 皮膚の放射線火傷
- D 睪丸被ばくによる一時的な不妊

1 A < B < D < C

2 A < D < B < C

3 A < C < D < B

4 D < A < B < C

5 D < B < C < A

〔解答〕4

注) 全身 γ 線被ばくによる確定的影響について、罹患の1%発生率におけるしきい線量(ICRP2007年勧告)は以下の通りである。

A: 骨髄の造血機能低下: 0.5Gy

B: 卵巣被ばくによる永久不妊: 3Gy

C: 皮膚の放射線火傷: 5~10Gy

D: 睪丸被ばくによる一時的な不妊: 0.1Gy

(国際放射線防護委員会の2007年勧告(日本アイソトープ協会)より)

問5 環境放射線による被ばくに関する次の記述のうち、適切なものの組合せはどれか。

A 公衆の自然放射線被ばくは、世界平均で1年におおよそ2.4 mSvと報告されている。

B 食物の摂取による被ばくには、土壌由来の天然放射性核種が寄与する。

C 天然放射性核種の吸入による被ばくには、ラドンとその子孫核種が寄与する。

D 環境中に存在する ^{137}Cs は、人工的に生成されたものがほとんどである。

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

〔解答〕5

注) A: 正 自然放射線とは宇宙や大地から受ける外部被ばくや、食物や空気中の自然由来の放射性物質から受ける内部被ばくをいう。その量は世界平均で一人当たり2.4mSv/年とされている。

(よくわかる放射線・アイソトープの安全取扱い(日本アイソトープ協会)より)

B: 正 食物の摂取による被ばくにおける天然放射性物質の代表的なものとして ^{40}K や ^{14}C がある。

C: 正

D: 正 ^{137}Cs はほぼ全て人工的に生成された核種であり、自然には極めて低い確率で起こる天然ウランの自発核分裂でわずかに生成する程度である。

問6 放射線によって細胞内で生成したDNA二本鎖切断に対する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 相同組換え修復は細胞の照射後1時間以内に完了する。

B 非相同末端結合による修復は相同組換え修復よりも誤りが多い。

C 非相同末端結合による修復は細胞周期のどの時期でも行われる。

D 相同組換え修復は細胞周期のM期において行われる。

1 AとC 2 AとD 3 BとC 4 BとD 5 CとD

〔解答〕3

注) A : 誤 相同組換え修復とは自己の細胞で複製された姉妹染色分体を利用して正確な修復を行い、数時間～数日は時間がかかる。

B : 正 非相同末端結合による修復は損傷により生じた2つの末端をつなぐ修復方法だが、再連結に伴ってヌクレオチド数の増減を伴うことがあるため、修復が変異の原因となることがある。

C : 正

D : 誤 相同組換え修復は細胞周期において DNA 複製中 (S 期) か、または複製終了後の間 (G2 期) に主に行われる。

問7 5 Gy の γ 線急性全身被ばくによる血液細胞への影響に関する次の記述のうち、正しいものはどれか。

- 1 好中球は被ばく直後に一過性に増加することがある。
- 2 リンパ球の減少は観察されない。
- 3 血小板の減少は観察されない。
- 4 好中球の減少は胸腺が被ばくしたことにより起こる。
- 5 赤血球の減少は観察されない。

[解答] 1

注) 赤色骨髄が 0.5Gy を超えて被ばくすると造血機能の低下が起こり血球の供給が止まる。血球細胞それぞれの寿命は長短あるので、減少の時期は異なる。白血球のうちの好中球などの顆粒球は、被ばく直後に一過性の増加が見られることがある。これは初期白血球増加と呼ばれ、脾臓などの貯蔵プールからの放出によるものと考えられている。

問8 細胞の放射線感受性と細胞周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 M 期は放射線抵抗性である。
B 細胞周期の進行を遅らせて生存率を高める機構がある。
C 高 LET 放射線では、X 線に比べて、致死感受性の細胞周期依存性が大きい。
D 放射線による間期死では次の M 期に入らずに細胞死が起きる。

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

[解答] 5

注) A : 誤 M 期 (分裂期) は放射線感受性が高い。

B : 正 染色体の複製を正確に行うために、細胞周期の進行状況や DNA 損傷の有無をチェックするための機構が備わっている。異常が発見されると DNA 修復のために、細胞分裂を一時的に停止したり、遅延したりする。

C : 誤 高 LET 放射線による DNA 損傷は重篤なので、細胞周期に依らず致死性が高い。

D : 正 間期死とは、間期にある細胞が放射線照射を受けた後に分裂することなく死に至るものである。

問9 次の胎内被ばくに関する記述のうち、正しいものの組合せはどれか。

- A 着床前期(受精後8日目まで)の被ばくでは胚(受精卵)の死亡が起こる。
- B 器官形成期の被ばくでは精神発達遅滞の発生が最も高くなる。
- C 胎児期の被ばくでは奇形の発生率が高くなる。
- D 全期間を通して将来における発がんのリスクが高まる。

1 AとB 2 AとC 3 AとD 4 BとC 5 BとD

[解答] 3

注) A: 正

B: 誤 器官形成期の被ばくでは、奇形の発生率が高くなる。

C: 誤 胎児期の被ばくでは発育遅延が、胎児期のうちで受精15週目までの被ばくでは精神発達遅滞が、それぞれのしきい線量を超えたときに引き起こされる。

D: 正

問10 細胞致死作用を指標としたRBE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 LETによって異なる。
- B 照射時の酸素分圧によらず一定である。
- C 線量率によって異なる。
- D 線質係数と同じものである。

1 AとB 2 AとC 3 AとD 4 BとC 5 BとD

[解答] 2

注) A: 正 生物学的効果比(Relative Biological Effectiveness)はLETが100~200 keV/ μ m付近のときに最大となる。

B: 誤

C: 正 照射時の酸素分圧だけでなく、影響評価の指標を何にするのか(本問の場合は細胞致死作用)、線量、線量率、温度などによってもRBEは変動する。

D: 誤 かつて、吸収線量にRBEを乗ずることで線種の違いを平準化する試みがなされた時代がある。しかし、さまざまな条件により値が変動するRBEはデータを十分に得にくい。ため、ICRP1977年勧告ではRBEのかわりにLETを使った補正係数「線質係数(QF, quality factor)」を用い、線量当量(=空間のある一点における吸収線量 $\times$ QF)が定義された。しかし防護上重要となるのは空間の一点ではなく、特定の組織・臓器における吸収線量であることから、1990年勧告以降、臓器の全体が受けた線量の平均臓器吸収線量の係数として放射線加重係数(radiation weighting factor)が定義されている。

問11 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 ヒトの消化管は、口腔から肛門までを食道一胃一小腸一大腸の順に結ぶ一本の管腔臓器で、摂取された食物を消化し、蠕動運動により肛門側に向かって送り出している。消化管の大半を占める腸

は食物の分解や吸収において重要な役割を担っている。

腸の内腔を覆う(A)には無数の絨毛があり、その表面は単層円柱状の上皮細胞で覆われ、栄養素や水分の吸収機能を担うとともに、共生する腸内細菌等の侵入を防ぐバリアとなっている。絨毛間には、(B)と呼ばれる窪みがあり、ここにある腸管上皮の(C)は分裂し、分化・成熟する。成熟した腸管上皮細胞は、絨毛先端部に向かって押し上げられて移動し、最後は寿命が尽きて先端部で腸の内腔に脱落して行く。この細胞分裂から絨毛先端部での脱落までの期間は(ア)日程度で、分裂と脱落の平衡が保たれて腸の機能が維持されている。

<A の解答群>

- 1 漿膜 2 粘膜 3 被膜 4 外膜

<B、C の解答群>

- 1 プラーク 2 シスト 3 クリプト 4 ニッチ 5 原始胚細胞
6 幹細胞 7 子孫細胞 8 娘細胞

<アの解答群>

- 1 3～5 2 12～15 3 20～30

II 高線量被ばくによるヒトの消化管の放射線感受性は、小腸、とくに十二指腸で高く、(D)の順に低くなる。

放射線に被ばく後、小腸では(B)にある腸管上皮の(C)は分裂を停止し、絨毛先端部への成熟上皮細胞の供給が断たれるため、絨毛の長さ(丈)は短くなり、上皮の萎縮・剥離が起き、重度になると(E)が生じる。その結果、絨毛上皮のバリア機能が喪失し、腸内細菌等の絨毛内への侵入を招く。

急性被ばくを受けると、嘔吐、下痢、下血等の前駆症状に続いて、脱水や電解質の喪失が起こり、侵入した腸内細菌等による感染を併発する。これらが原因で5 Gy から15 Gy 被ばく後、治療を施さない場合、腸死により(F)で死亡する。一般に、腸死の起こる線量域は骨髓死(G)とされている。

一方、消化管の放射線発がんについては原爆被爆生存者の疫学調査があり、胃や結腸等におけるがんのリスクの増加が報告されている。個々の臓器・組織における放射線発がん及び生殖腺における遺伝性(的)影響の起こりやすさを考慮に入れた(H)は、ICRP2007 年勧告で胃及び結腸に対してそれぞれ(イ)が与えられている。

<D の解答群>

- 1 食道一胃一大腸 2 胃一大腸一食道 3 大腸一胃一食道 4 大腸一食道一胃

<E の解答群>

- 1 潰瘍 2 膿疱 3 落屑 4 紅斑

<F の解答群>

- 1 1～3 時間 2 7～20 日 3 1～2 月 4 3～6 月

<G の解答群>

- 1 とほぼ同じ 2 よりも高い 3 よりも低い

<Hの解答群>

- 1 放射線加重係数 2 線量・線量率効果係数 3 組織加重係数
4 線質係数

<Iの解答群>

- 1 0.12 2 0.20 3 0.30 4 0.72

[解答]

I A-2 B-3 C-6 ア-1

注) A: 腸管の上皮細胞は粘膜で覆われている。この粘膜は腸内細菌などから腸管の組織をまもるためのバリアとなっている。

C: 次図の突起部分が一本の絨毛。クリプト(腺窩)の部分に絨毛へ上皮細胞を供給する幹細胞が存在し、幹細胞は常に分裂している。新しく分裂した細胞は先端に向かって移動し、絨毛先端部に至るころには順次死滅し腸管内に脱落する。

ア: 腸上皮細胞の寿命(幹細胞が分裂してから脱落するまでの期間)は3~5日。

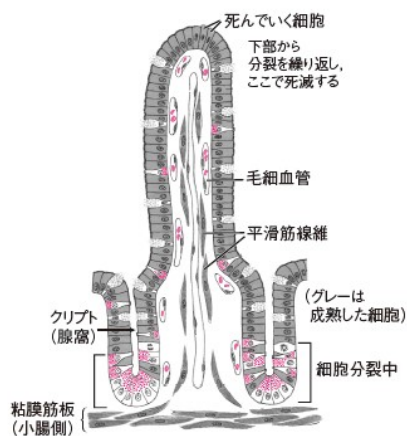


図 5.5 小腸の絨毛とクリプト(腺窩または陰窩)の構成

(8版増補 2020 放射線取扱の基礎 (日本アイソトープ協会) より)

II D-3 E-1 F-2 G-2 H-3 イ-1

注) D: 臨床における正常組織の耐容線量(1回 2Gy 前後の分割照射治療において5年間で5%に副作用を生ずる線量)の参考値は、食道 55 Gy、胃 50 Gy、小腸 40 Gy、大腸 45 Gy(数値は公益社団法人日本放射線腫瘍学会編「放射線治療計画ガイドライン 2016年版」付表1より引用)。

E: 腸粘膜の上皮組織が欠損し、その欠損が下層の組織にまで至った状態が潰瘍である。膿疱(水泡の中に膿が溜まった皮疹)、落屑(角質層の脱落)、紅斑は主として皮膚でみられる症状。

F: 腸死(消化管死)の平均生存期間は、マウスでは3.5日(3.5日効果)、人では10日。

G: 骨髄死は3~10Gyで起こる。

イ：ICRP2007 年勧告における組織加重係数 (W_T) は、

骨髄 (赤色)、結腸、肺、胃、乳房： 0.12

生殖腺： 0.08

膀胱、肝臓、食道、甲状腺： 0.04

皮膚、骨表面、脳、唾液腺： 0.01

残りの組織・臓器： 0.12

(合計 1.00)