

令和 2 年度

第 1 種放射線取扱主任者試験

問題と解答例

実務

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。

問1 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。

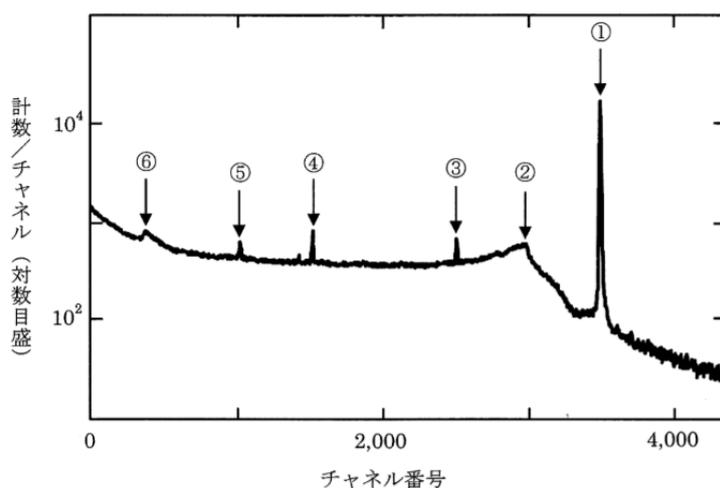
Ge半導体検出器を用いて放射性同位元素が放出する光子の波高分布を測定する場合を考える。

図に ^{28}Al 線源を用いて測定した場合に得られる波高分布の一例を示す。ただし、 ^{28}Al は半減期2.241分で β -壊変し、最大エネルギー2.863 MeVの β -線および1.779 MeVの γ -線を放出する。それぞれの分岐比は100%である。

矢印①の波高分布は、入射光子の□A□を示し、入射光子が直接□B□を起こすか、あるいは、何回かの□C□でエネルギーの一部を失った後、□B□で全エネルギーを失う場合に対応する。矢印②は反跳電子の□D□を示し、そのエネルギーは□ア□MeVに相当する。この反跳電子と同時に散乱された光子のエネルギーは、図中の2つの矢印□イ□のチャンネルの差分に相当する。

矢印③及び④の波高分布は、相互作用の□E□に起因しており、矢印④の波高分布は□F□を示す。また、矢印①よりも大きいチャンネルの波高は、主にパルス信号の□G□によるものである。

放射性核種 ^{28}Al は、熱中性子照射による $^{27}\text{Al}(n, \gamma)^{28}\text{Al}$ 反応により生成される。生成後に20分間の測定で□A□の正味の全計数が40,000である場合、測定開始時における ^{28}Al 線源の放射能は□ウ□MBqとなる。ただし、数え落としは無視できるものとし、このときの計数効率を0.001とする。



図

<A~Gの解答群>

- | | | |
|----------------|-------------|----------------|
| 1 レイリー散乱 | 2 光電効果 | 3 コンプトン散乱 |
| 4 コンプトン端 | 5 電子対生成 | 6 ラザフォード散乱 |
| 7 パイルアップ | 8 全吸収ピーク | 9 シングルエスケープピーク |
| 10 ダブルエスケープピーク | 11 消滅放射線ピーク | 12 後方散乱ピーク |

<アの解答群>

- | | | | | |
|---------|---------|---------|---------|----------|
| 1 0.206 | 2 0.223 | 3 0.255 | 4 0.511 | 5 0.757 |
| 6 1.022 | 7 1.268 | 8 1.500 | 9 1.556 | 10 1.779 |

<イの解答群>

(令和2年度) 第1種実務

1 ①と②	2 ②と③	3 ③と④	4 ④と⑤	5 ⑤と⑥
<ウの解答群>				
1 0.206	2 0.223	3 0.255	4 0.511	5 0.757
6 1.022	7 1.268	8 1.500	9 1.556	10 1.779

[解答]

A-8 B-2 C-3 D-4 E-5 F-10 G-7 ア-9 イ-1 ウ-1

注) A-G, イ: 光子の波高分布は、検出器との相互作用の過程において電子にエネルギーが与えられることで形成される。相互作用の種類には光電効果及びコンプトン散乱のほか、光子のエネルギーが 1.022 MeV 以上の場合には電子対生成がある。①は全吸収ピークといい、入射光子のエネルギーが全て電子に与えられることによって生じることから、入射光子のエネルギーに相当するチャンネル番号に生じる。その形成には、主に光電効果が寄与する。②はコンプトン端とよばれ、コンプトン散乱において入射光子のエネルギーが反跳電子に最も多く与えられる位置に生じる。コンプトン端は、散乱光子が持つエネルギーに相当する分だけ、全吸収ピークよりも低いチャンネル番号に観察される。また、電子対生成では電子と陽電子が生成されるが、陽電子が別の電子と反応して発生する 2 本の消滅放射線も波高分布の形成に寄与する。2 本の消滅放射線が検出器内で相互作用を起こした場合には、①の全吸収ピークが形成される。1 本の消滅放射線のみが相互作用を起こした場合には③のシングルエスケープピークが形成される。2 本の消滅放射線とも相互作用を起こさなかった場合には④のダブルエスケープピークが形成される。これらを検出する際に検出器の電気回路で複数のパルス信号が重なることによって本来の信号よりも高い信号として検出されることがあり、これをパイルアップという。

ア: 反跳電子のエネルギー E_e は次式で与えられる。

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

E_γ : 入射光子のエネルギー, $E_{\gamma'}$: 散乱光子のエネルギー, m : 電子の質量, c : 光速, θ : 散乱角
コンプトン端が生じるのは $\theta = 180^\circ$ のときである。

$$\begin{aligned} \therefore E_e &= E_0 - \frac{E_0}{\frac{E_0}{mc^2}(1 - \cos 180^\circ) + 1} = E_0 - \frac{E_0 mc^2}{2E_0 + mc^2} = 1.779 - \frac{1.779 \times 0.511}{2 \times 1.779 + 0.511} \\ &\approx 1.556 \text{ (MeV)} \end{aligned}$$

※ mc^2 は電子の静止質量であり、0.511 MeVである。

ウ: 測定開始時の放射能を a_0 , t 秒経過後の放射能を a_t とすると

$$a_t = a_0 e^{-\lambda t}$$

ここで ^{28}Al の半減期 $T = 2.241$ (分) ≈ 134.5 (秒) であるから、壊変定数 λ は

$$\lambda = \frac{\ln 2}{T} = \frac{0.693}{134.5} \approx 5.15 \times 10^{-3}$$

測定中の減衰を考慮する必要があることから、20分(1,200秒)間の総壊変数 N は

$$N = \int_0^{1,200} a_0 e^{-\lambda t} dt = \frac{a_0}{\lambda} (1 - e^{-1,200\lambda})$$

この間の総計数が 40,000 であるから

$$N \times 0.001 = 40,000$$

$$\therefore a_0 = \frac{40,000}{0.001} \times \frac{\lambda}{1 - e^{-1,200\lambda}} \approx \frac{40,000}{0.001} \times \lambda = 20600 \text{ (Bq)} = 0.206 \text{ (MBq)}$$

問2 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。

放射性壊変は偶発的な過程であり、こうした壊変に際して放出された放射線の測定値は統計的揺動の影響を避けることはできない。したがって、同じ条件で複数回の計数測定を繰り返しても、測定値は、必ずしもその都度同じとはならず、個々の測定値の頻度分布の性質について知識を深めておくことが測定値の評価や計数時間の適正化にとって重要である。これらの測定値は、半減期が計数時間に比べて十分長く、全壊変に対する個々の計数値の割合が十分小さいという条件の下では、 から導かれる に従う。さらに、計数の頻度分布の平均値が極端に小さくなければ、より取り扱いが便利なガウス分布により計数値のばらつきを評価する。ちなみに、 と は、整数のみの非連続変数に対して適用され、分布の形は左右非対称であるのに対して、ガウス分布は取りうる変数として任意の実数が適用可能で、左右対称である。なお、ガウス分布は とも呼ばれ、計数値 n に対するガウス分布関数 $G(n)$ は、次式により与えられる。

$$G(n) = \frac{1}{\sigma\sqrt{2\pi}} \exp\left\{-\frac{(n-m)^2}{2\sigma^2}\right\} \quad (1)$$

ここで、 m は平均値で、 σ は標準偏差である。 σ^2 のことを という。

このような統計的揺動に起因する不確実性は、同一条件で多数回の測定を繰り返すことによってその概要を評価できるが、多数回の測定を繰り返すことは、必ずしも現実的ではない。そのため、壊変の偶発性から導かれた上記の統計理論モデルを活用して、その統計的不確かさを推定する。計数の統計的揺動がガウス分布に従うとした場合、時間 t の間に計数 n を得たとすれば、その標準偏差 σ は、 $\sigma = \sqrt{m} \approx \sqrt{n}$ として求められる。通常は、統計的不確かさを考慮し、計数値を $n \pm \sigma$ と表記することが多い。これは統計的揺動の影響を受けないと仮定した場合の真の計数が、 $m - \sigma$ と $m + \sigma$ の間（これを という。）に入る確率（信頼度）が 68% であることを意味する。特別に記述しない限り、こうした統計的不確かさの指標として、標準偏差で記述することが多いが、信頼の水準を高めるため、標準偏差 σ に替えて （信頼度係数ともいう。） k を乗じた数、 $\pm k\sigma$ で統計的不確かさを表記することもある。この場合、真の計数が、 $m - k\sigma$ から $m + k\sigma$ の間の に入る確率

は、 $W(k\sigma) = \int_{m-k\sigma}^{m+k\sigma} G(n) dn$ となる。任意の k に対して $W(k\sigma)$ の値を計算することは必ずしも容易ではないが、種々の k に対する数値表は多くの統計学の本に記載されていて、通常は次の数値を記憶しておくのがよい。

$$W(1\sigma) \approx 0.68, W(1.65\sigma) \approx 0.90, W(2\sigma) \approx 0.95, W(3\sigma) \approx 0.997$$

なお、統計的不確かさの指標として、標準偏差 ($k=1$) 以外を用いた場合には、 $\boxed{F}k$ 、あるいは信頼度 $W(k\sigma) \times 100[\%]$ を明記しておく必要がある。

測定時間 t の間に計数值 n カウントを得たとすれば、これらの値から得た計数率 $r=n/t$ の標準偏差 σ_r は $\boxed{ア}$ 、相対標準偏差 σ_r/r は $\boxed{イ}$ となる。したがって、計数率測定 of 統計精度を改善するためには、測定時間を長くとり、計数值を大きくする。

計数時間が T の場合 of 計数率測定において、信頼度 68% (標準偏差) で評価した相対不確かさが 3.2% の結果が得られた。この場合、信頼度 95% (2σ) で評価した相対不確かさが 3.2% の結果を得ようとすると、計数時間を $\boxed{ウ}$ にする必要があり、このときの総計数值は約 $\boxed{エ}$ と推定される。

<A～C の解答群>

- | | | |
|-------------------|-----------|------------|
| 1 信頼度分布 | 2 ボルツマン分布 | 3 正規分布 |
| 4 ポアソン分布 | 5 二項分布 | 6 マクスウェル分布 |
| 7 カイ二乗(x^2)分布 | | |

<D～F の解答群>

- | | | | | |
|-------|--------|-------|--------|------|
| 1 信頼度 | 2 包含係数 | 3 分散 | 4 不確かさ | 5 変動 |
| 6 統計 | 7 自由度 | 8 危険度 | 9 信頼区間 | |

<ア、イの解答群>

- | | | | | |
|------------------------|------------------------|-------------------------|-------------------------|-------------------------|
| 1 $\frac{1}{\sqrt{r}}$ | 2 $\frac{\sqrt{r}}{t}$ | 3 $\frac{1}{t\sqrt{n}}$ | 4 $\frac{1}{\sqrt{rt}}$ | 5 $\frac{1}{\sqrt{nt}}$ |
| 6 $\sqrt{\frac{r}{t}}$ | | | | |

<ウの解答群>

- | | | | | |
|--------|------|------|------|------|
| 1 0.5T | 2 2T | 3 3T | 4 4T | 5 5T |
| 6 10T | | | | |

<エの解答群>

- | | | | | |
|---------|---------|---------|---------|---------|
| 1 1,000 | 2 1,900 | 3 3,900 | 4 5,800 | 5 9,900 |
|---------|---------|---------|---------|---------|

[解答]

A-5 B-4 C-3 D-3 E-9 F-2 ア-6 イ-4 ウ-4 エ-3

注) A: 放射性壊変は確率的な現象である。したがって、壊変により放出される放射線の観測に基づく測定では統計的変動の影響を受ける。放射線計測では、得られた量の予想精度を評価するために統計モデルを用いる。一般的な統計モデルとして以下の二項分布が挙げられる。 p : 一定の当たりの確率 (放射性壊変が起こる確率), n : 試行の回数 (試料中の放射性核種の原子数), x : 当たりの回数 (放射性壊変が起こる回数)

$$P(x) = \frac{n!}{(n-x)!x!} p^x (1-p)^{n-x}$$

B: 壊変定数 λ 、時間 t とすると、放射性壊変における当たりの確率は、 $(1-e^{-\lambda t})$ である。計数

(令和2年度) 第1種実務

時間に対して半減期が十分に長い場合、 $p \ll 1$ となり二項分布は以下の様に簡略化できる。
この式をポアソン分布と呼ぶ。 \bar{x} : 平均値

$$P(x) = \frac{(\bar{x})^x e^{-\bar{x}}}{x!}$$

- C : ガウス分布は正規分布とも呼ばれる。当たりの回数の平均値が十分に大きい場合に用いられる。分布の平均が 20 以上である時、整数値に対してのみ定義される。
- D : 分析操作において、測定値の散らばり具合を表現する方法として、偏差（平均との差）の二乗平均である分散があり、その平方根を標準偏差という。
- E, F : ある測定における平均が m である場合、ある真値が出現する確率は正規分布に従う。そして、真値が存在しうる範囲を信頼区間という。平均値 m , 標準偏差 σ とする正規分布では、平均値 m から離れるほどにその値が出現する確率が小さくなる。 $m \pm \sigma$ の間には 68.3%、 $m \pm 1.96\sigma$ の間には 95%、 $m \pm 2\sigma$ の間には 95.4%、 $m \pm 3\sigma$ の間に 99.7% の確率で真値が現れる。
- ア : 標準偏差は以下の式で求められる。 t : 計測時間, n : 計数值, r : 計数率

$$\sigma = \frac{\sqrt{n}}{t}$$

上記計算式は、以下の式変形が可能である。

$$\frac{\sqrt{n}}{t} = \sqrt{\frac{n}{t^2}} = \sqrt{\frac{r}{t}}$$

イ : 相対標準偏差 σ/r に上記の計算結果を代入する。 σ : 標準偏差, r : 計数率

$$\frac{\sigma}{r} = \frac{1}{r} \times \sqrt{\frac{r}{t}} = \frac{1}{\sqrt{rt}}$$

ウ : 計数時間 T における相対不確かさが 3.2% である時、

$$\frac{\sigma}{|r|} = \frac{\sqrt{r}}{r} = \frac{1}{\sqrt{r \cdot T}} = 0.032$$

2σ の時の計数時間を t とすると、以下の式が得られる。

$$\frac{2\sigma}{|r|} = \sqrt{\frac{4}{r \cdot t}} = 0.032$$

したがって、

$$\frac{1}{\sqrt{r \cdot T}} = \sqrt{\frac{4}{r \cdot t}}$$

これを t について解いて、 $t = 4T$ となる。

エ : 計数時間 $4T$ 、計数值 n とするとき、

$$\sqrt{\frac{4}{r \cdot 4T}} = \frac{2}{\sqrt{n}} = 0.032$$

したがって、 $n = 3906$ となる。

問3 非密封の ^{64}Cu を使用する事業所がある。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 半減期12.7時間の ^{64}Cu は、陽電子($E_{\max}=0.653\text{ MeV}$)の他に β^- 線($E_{\max}=0.579\text{ MeV}$)や γ 線(1.346 MeV)を放出する。PETイメージングのみならず、治療薬剤としての応用が期待されている放射性核種である。 ^{64}Cu の製造には、荷電粒子や中性子を用いた核反応が使われる。中性子を利用した製造では、安定同位体 ^{64}Zn に速中性子を照射して□A反応が、無担体の ^{64}Cu を作るのに適している。

速中性子照射で生成する放射性核種の放射能は、 $\eta f \sigma \times$ □Bで求めることができる。ここで、 n は標的核の数、 f は速中性子フルエンス率、 σ は中性子核反応断面積、 λ は生成核の壊変定数、 t は照射時間である。□Bを飽和係数といい、照射時間 t が生成核の半減期と等しいときは0.5となり、半減期に対して十分に短い場合には□Cと近似できる。

天然同位体存在度の金属亜鉛の箔(原子量65.4)654 mgを速中性子フルエンス率 $5.0 \times 10^{13}\text{ cm}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$ で76分間照射した直後の ^{64}Cu の生成放射能A(^{64}Cu)は、おおよそ□D Bqである。この計算に必要なパラメータを下表に示す。

標的核	天然同位体存在度[%]	中性子核反応断面積 σ [mb]	生成核	半減期
^{64}Zn	49	36	^{64}Cu	12.7時間 (762分)

<Aの解答群>

- 1 (n, α) 2 (n, γ) 3 (n, p) 4 (n, 2n) 5 (n, pn)

<B、Cの解答群>

- 1 $(1 - e^{-\lambda t})$ 2 $(1 - e^{-\frac{1}{\lambda t}})$ 3 $(1 - e^{-\frac{\lambda}{t}})$ 4 $(1 - e^{-\frac{1}{\lambda t}})$
- 5 $(1 - e^{-\lambda t})$ 6 $(1 - e^{-\frac{\lambda}{t}})$ 7 $-\frac{\lambda}{t}$ 8 $\frac{\lambda}{t}$
- 9 λt 10 $-\lambda t$ 11 $\frac{1}{\lambda t}$ 12 $-\frac{1}{\lambda t}$

<Dの解答群>

- 1 5.2×10^6 2 7.5×10^7 3 1.2×10^8 4 3.7×10^8 5 2.3×10^9

II 照射したZnターゲットから ^{64}Cu を無担体で化学分離する操作を行う。非密封の放射性同位体を使った化学操作になるので、あらかじめ器具の扱いや操作手順を習得するためのコールドランを行

(令和2年度) 第1種実務

うことは必須である。ポリエチレンろ紙を内壁に貼ったフード内で、照射カプセルを開けてピンセットまたはトングを使って Zn ターゲットを取り出す。Zn ターゲットには、 ^{64}Cu と同時に生成した ^{63}Zn (半減期 38 分) や ^{65}Zn (半減期 244 日) など含まれている。照射後の放射線強度の高いターゲットを扱う作業は、外部被ばくによる事故を防ぐために遮蔽材で遮蔽をして、十分な距離を保ち迅速に行う必要がある。β線を遮蔽しつつ、視認性を確保するために厚さ約 10 mm の [E] ついたてを置く。さらに [E] ついたてと作業者の間に鉛ブロックを置いて、γ線や制動放射線を遮蔽する。作業中は空間線量率を [F] サーベイメータで測定する必要がある。

取り出した Zn ターゲットをビーカーに入れて、 $6\text{ mol} \cdot \text{L}^{-1}$ 塩酸を滴下しながら完全に溶解すると、Zn(II)イオンと Cu(II)イオンは [G] を形成する。これをあらかじめ $6\text{ mol} \cdot \text{L}^{-1}$ 塩酸で前処理した [H] カラムに流すと、両者はいったんカラムに吸着する。Cu(II)イオンと Zn(II)イオンは、溶解液の酸濃度を薄くすることで Cu(II)イオンが Zn(II)イオンよりも先に溶出するので無担体で分離できる。

分離した ^{64}Cu 溶液を別のフードに移して、 ^{64}Cu の標識化の作業を引き続き行う。 $4.0 \times 10^8\text{ Bq}$ の ^{64}Cu 溶液を扱う化学実験での外部被ばくを考える。 ^{64}Cu 溶液と作業従事者の間に一切の遮蔽材がない場合、 ^{64}Cu 溶液からの距離 0.5 m、作業時間 2 時間、 ^{64}Cu の実効線量率定数 $0.026\text{ }\mu\text{Sv} \cdot \text{m}^2 \cdot \text{MBq}^{-1} \cdot \text{h}^{-1}$ とすると、外部被ばくの実効線量は [I] μSv となる。実験作業中は、

先の化学分離と同様に [E] ついたてや鉛ブロックで遮蔽をする。実験終了後には、フード内や床、使用したゴム手袋などに汚染があるかどうかを [F] サーベイメータで測定する。

<E の解答群>

- | | | |
|----------|-----------|------|
| 1 パラフィン製 | 2 アクリル板 | 3 鉄板 |
| 4 銅板 | 5 コンクリート製 | |

<F の解答群>

- | | | |
|--------------------|--------|------------------------|
| 1 GM 管式 | 2 電離箱式 | 3 BF_3 比例計数管式 |
| 4 ZnS(Ag)シンチレーション式 | | 5 ^3He 比例計数管式 |

<G の解答群>

- | | | |
|-------------|------------|-----------|
| 1 ヒドロキシ錯イオン | 2 アンミン錯イオン | 3 シアノ錯イオン |
| 4 クロロ錯イオン | 5 アコ錯イオン | |

<H の解答群>

- | | | |
|---------------|----------------|---------|
| 1 アルミナ | 2 強塩基性陰イオン交換樹脂 | 3 シリカゲル |
| 4 強酸性陽イオン交換樹脂 | 5 ポリアミド樹脂 | |

<I の解答群>

- | | | | | |
|------|------|------|-------|-------|
| 1 42 | 2 68 | 3 83 | 4 120 | 5 148 |
|------|------|------|-------|-------|

[解答]

I A-3 B-5 C-9 D-4

注) A : 入射粒子を n として $^{64}\text{Zn}(Z=30)$ から $^{64}\text{Cu}(Z=29)$ を生成する核反応なので、解答群の中では (n,p) 反応が適していることになる。

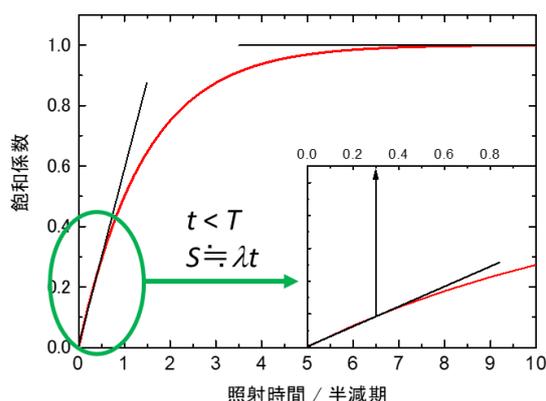
B : RI 製造を行う際、生成する放射能 A は、 n を標的核の数、 f を入射粒子フルエンス率、 σ

を核反応断面積、 λ を生成核の壊変定数、 t を照射時間としたとき、次式で表わされる。

$$A = n\sigma f(1 - e^{-\lambda t})$$

この問題は中性子捕獲核反応による RI 製造なので f を速中性子フルエンス率、 σ を中性子核反応断面積としており、 $(1 - e^{-\lambda t})$ は飽和係数と呼ばれる。

C : 照射時間 t が生成核の半減期 T に対して十分に短い場合(概ね半減期の 30%以下)では、飽和係数は $t=0$ 時の飽和係数の接線(λt)に近似できる。(図参照)



D : ^{64}Zn から ^{64}Cu を製造する際の放射能計算である。これまで出て来た式を使って計算する。

$$\text{標的核の数: } n = \frac{654 \times 10^{-3}}{65.4} \times 6.02 \times 10^{23} \times 0.49 = 3.01 \times 10^{21}$$

照射時間 t は ^{64}Cu の半減期の 10%程度なので、飽和係数 S を λt と近似でき、

$$S = \lambda t = \frac{0.693}{762} \times 76 = 0.0691$$

これらを用いて、放射能 A は

$$A = 3.01 \times 10^{21} \times 5.0 \times 10^{13} \times 36 \times 10^{-3} \times 10^{-24} \times 0.0691 = 3.66 \times 10^8 \cong 3.7 \times 10^8$$

となる。

より荒い近似値を用いて $n = 3 \times 10^{21}$ 、 $\ln(2)$ を 0.7 として $S=0.07$ としたとしても、 $A \cong 3.8 \times 10^8$ であるので、選択肢からは 4 を選ぶことになる。

II E-2 F-1 G-4 H-2 I-3

注) E : β^- の遮蔽が可能で視認性の高い材料を選択肢の中から選ぶのであれば、アクリル板が適切である。

F : 題意から作業者がモニタするべきは β 線と γ 線である。BF₃ 比例計数管式サーベイメータは熱中性子、ZnS(Ag)シンチレーション式は α 線、³He 比例計数管式サーベイメータは中性子の検出を行う。空間線量率を測定するサーベイメータとしては電離箱式(または GM 管式)が適切と考えられるが、後に同じサーベイメータで表面汚染のサーベイを行っている

(令和2年度) 第1種実務

ので、 β 線、 γ 線の測定が行える「GM管式」が適切となる。

G: 6 Mの塩酸にZnターゲットを溶解するとZnやCuは陰イオン性のクロロ錯体を生成する。クロロ錯体生成のしやすさは $Zn^{2+} > Fe^{3+} > Cu^{2+} > Co^{2+} > Mn^{2+} > Ni^{2+}$ の順。

「あてどなく駒に狂う(あ(Zn)て(Fe)ど(Cu)なくこ(Co)ま(Mn)にくるう(Ni)」と語呂合わせで覚える。

H: Gの解答から陰イオン錯体の分離を行えるカラム充填剤である必要があるので、「強塩基性陰イオン交換樹脂」が適切である。塩酸濃度を薄くすると錯形成のしにくいものから溶出する。

I: ^{64}Cu の実効線量率定数が $0.026 \mu Sv m^2/MBq h$ と与えられているので、放射能が $4.0 \times 10^8 Bq = 400 MBq$ 、線源からの距離が $0.5 m$ 、作業時間が2時間であるので

$$\frac{0.026 \times 400 \times 2}{0.5 \times 0.5} = 83.2$$

となり、解答群から3が解答となる。

問4 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。

標識された化合物を取り扱う際には、その化学的・物理的性質を十分理解し、安全取扱について心懸けるとともに、異常事態等が発生した場合の対処方法をあらかじめ検討しておくことが望ましい。ここでは、排気、排水にかかわる事例を検討する。計算には、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に定められた値を参照することにし、その抜粋を文末に示した。本来、空气中濃度限度は放射線業務従事者が立ち入る場所における□Aの平均濃度について、排気中濃度限度は排気口における□Bの平均濃度について定められているが、以下の想定事例では、異常事態を想定して求めた濃度を告示で示された濃度限度と比較することにした。

(1) 室内空气中濃度

100 MBqの ^{14}C で標識された炭酸水素ナトリウム粉末を溶解する際に誤って□Cを加えたところ、放射性の二酸化炭素が発生した。その際、排気設備が故障して換気が行われていなかったものとして、 ^{14}C の全量100 MBqが二酸化炭素として室内に拡散したという想定事例について検討してみる。

作業室の容積が $50 m^3$ であるとき、放射性の二酸化炭素がこの作業室に均一に拡散したとすると ^{14}C の空气中濃度は空气中濃度限度の□D倍となる。その状態で、実験者の室内滞在時間が15分間だとすると、吸入摂取量は最大で□E MBqとなると見積もられ、預託実効線量は□F μSv となる。ただし、その実験者の呼吸量を毎分20リットルとする。

実験者には、実験に当たって、放射性気体の発生の可能性を理解させ、実験開始前に排気設備の稼働状況を確認させることが必要である。

また、室内の放射性の二酸化炭素濃度を測定するには、エアサンプラーで実験室内の空気を□Gに通して二酸化炭素を捕集することになるのでサンプリングの機材を準備し、サンプリング

した試料の測定は **H** で行うこととした。

(2) 排気中濃度

換気中のフード内で 0.4 GBq のトリチウムで標識されたメタン全量が飛散するという事例について検討する。トリチウムの飛散を生じた時点を含む 8 時間平均のトリチウムの排気中濃度は排気中濃度限度の約 **I** 倍となる。作業室の容積が 50 m³、換気回数は 1 時間当たり 5 回とする。

実験者にはトリチウムの取扱方法に注意するとともに、トリチウムの捕集装置を備えたグローブボックスを使用することにした。

(3) 排水中濃度

³²P で標識されたリン酸ナトリウムを誤って流しに流した事例を検討する。まず、貯留槽中の放射能を定量する。トリチウム (HTO)、および ³²P (リン酸イオン) が、それぞれ 6 および 0.6 Bq/cm³ であったとき、排水中濃度限度との比の和は **J** となる。排水中濃度限度との比の和が 1 を超える場合には、希釈するかまたは減衰後に排水するかの判断をする必要がある。なお、() 内は使用記録から推定される化学形である。

これまで、実験廃液は、核種や溶液の化学的性質を考慮して、保管に適した廃液保管容器を準備するとともに、器具の洗浄は少量で数回繰り返し、洗浄液も廃液保管容器に回収することを周知してきたが、さらに廃液の管理を徹底するように注意した。

別表第2 放射性同位元素の種類が明らかで、かつ、一種類である場合の空气中濃度限度等 (抜粋)

第1欄		第2欄	第3欄	第4欄	第5欄	第6欄
放射性同位元素の種類		吸入摂取した場合の実効線量係数 (mSv/Bq)	経口摂取した場合の実効線量係数 (mSv/Bq)	空气中濃度限度 (Bq/cm ³)	排気中又は空气中の濃度限度 (Bq/cm ³)	排液中又は排水中の濃度限度 (Bq/cm ³)
核種	化学形等					
³ H	元素状水素	1.8×10 ⁻¹²		1×10 ⁴	7×10 ¹	
³ H	メタン	1.8×10 ⁻¹⁰		1×10 ²	7×10 ⁻¹	
³ H	水	1.8×10 ⁻⁸	1.8×10 ⁻⁸	8×10 ⁻¹	5×10 ⁻³	6×10 ¹
³ H	有機物 (メタンを除く)	4.1×10 ⁻⁸	4.2×10 ⁻⁸	5×10 ⁻¹	3×10 ⁻³	2×10 ¹
³ H	上記を除く化合物	2.8×10 ⁻⁸	1.9×10 ⁻⁸	7×10 ⁻¹	3×10 ⁻³	4×10 ¹
¹⁴ C	蒸気	5.8×10 ⁻⁷		4×10 ⁻²	2×10 ⁻⁴	
¹⁴ C	有機物 (経口摂取)		5.8×10 ⁻⁷			2×10 ⁰
¹⁴ C	一酸化物	8.0×10 ⁻¹⁰		3×10 ¹	1×10 ⁻¹	
¹⁴ C	二酸化物	6.5×10 ⁻⁹		3×10 ⁰	2×10 ⁻²	
¹⁴ C	メタン	2.9×10 ⁻⁹		7×10 ⁰	5×10 ⁻²	
³² P	Sn のリン酸塩以外の化合物	1.1×10 ⁻⁶	2.4×10 ⁻⁶	2×10 ⁻²	1×10 ⁻⁴	3×10 ⁻¹
³² P	Sn のリン酸塩	2.9×10 ⁻⁶	2.4×10 ⁻⁶	7×10 ⁻³	4×10 ⁻⁵	3×10 ⁻¹

(令和2年度) 第1種実務

<A、Bの解答群>

- 1 1日間 2 1週間 3 1月間 4 3月間 5 6月間
6 1年間

<Cの解答群>

- 1 エタノール含有水 2 水酸化ナトリウム水溶液 3 塩酸
4 アンモニア水 5 炭酸バリウム水溶液

<Dの解答群>

- 1 0.15 2 0.33 3 0.67 4 1.3 5 2.0
6 4.5 7 6.7 8 20

<Eの解答群>

- 1 0.1 2 0.2 3 0.4 4 0.6 5 1
6 3 7 4 8 6

<Fの解答群>

- 1 0.2 2 0.4 3 2 4 4 5 10
6 20 7 40 8 100

<Gの解答群>

- 1 モノエタノールアミン水溶液 2 メンブレンフィルター
3 希塩酸 4 活性炭フィルター
5 シリカゲル 6 モレキュラーシーブ

<Hの解答群>

- 1 NaI(Tl)シンチレーションカウンタ 2 液体シンチレーションカウンタ
3 GMカウンタ 4 Ge検出器
5 Si(Li)検出器 6 ZnS(Ag)検出器

<Iの解答群>

- 1 0.1 2 0.2 3 0.3 4 0.6 5 1.0
6 3.0 7 4.0 8 6.0

<Jの解答群>

- 1 0.1 2 0.2 3 0.6 4 1.2 5 2.1
6 3.0 7 5.0 8 6.0

[解答]

A-2 B-4 C-3 D-3 E-4 F-4 G-1 H-2 I-3 J-5

注) A, B: 告示(放射線を放出する同位元素の数量を定める件)第7条に基づき, 空气中濃度限度は, 1週間についての平均濃度とされている。排気中濃度限度は, 同告示第14条に基づき, 3月間についての平均濃度とされている。

C: 炭酸水素ナトリウムに塩酸を加えると二酸化炭素が発生し, 塩化ナトリウムと水ができる。
 $\text{NaHCO}_3 + \text{HCl} \rightarrow \text{NaCl} + \text{CO}_2 + \text{H}_2\text{O}$

D: 作業室の空气中濃度は, $100 \times 10^6 [\text{Bq}] \div (50 \times 10^6) [\text{cm}^3] = 2 [\text{Bq}/\text{cm}^3]$

(令和2年度) 第1種実務

別表第2より、二酸化物の空气中濃度限度 3×10^0 を用いて

$$2 \text{ [Bq/cm}^3\text{]} \div (3 \times 10^0) \text{ [Bq/cm}^3\text{]} \doteq 0.67$$

E: 吸入摂取量 = 作業室の空气中濃度 \times 滞在時間 \times 呼吸量

$$= 2 \times 10^{-6} \text{ [MBq/cm}^3\text{]} \times 15 \text{ [分]} \times 20 \times 10^3 \text{ [cm}^3\text{/分]} = 0.6 \text{ [MBq]}$$

F: 預託実効線量 = 吸入摂取量 \times 実効線量係数

別表第2より、二酸化物の吸入摂取した場合の実効線量係数 6.5×10^{-9} [mSv/Bq] を用いて

$$0.6 \times 10^6 \text{ [Bq]} \times 6.5 \times 10^{-9} \times 10^3 \text{ [\mu Sv/Bq]} = 3.9 \text{ [\mu Sv]}$$

よって、解答群より4となる。

G: 二酸化炭素の吸収液として、モノエタノールアミン水溶液が広く用いられている。

H: ^{14}C は、最大エネルギー157keVの低エネルギーの β 線を放出する。解答群の中で β 線用の測定器は、液体シンチレーションカウンタとGMカウンタである。GMカウンタは、低エネルギーの β 線に対して検出効率が低いため、液体シンチレーションカウンタが最も適切である。

I: 作業室の8時間の換気量は、 $50 \text{ [m}^3\text{]} \times 8 \text{ [時間]} \times 5 \text{ [回/時間]} = 2000 \text{ [m}^3\text{]}$

別表第2より、トリチウム標識のメタンの排気中濃度限度 7×10^{-1} を用いて

$$0.4 \times 10^9 \text{ [Bq]} \div (2000 \times 10^6) \text{ [cm}^3\text{]} \div 7 \times 10^{-1} \text{ [Bq/cm}^3\text{]} = 0.285 \dots$$

よって、解答群より0.3となる。

J: トリチウムの排水中の濃度比は、別表第2より、トリチウム標識の水の排水中の濃度限度 6×10^1 を用いて $6 \text{ [Bq/cm}^3\text{]} \div 6 \times 10^1 \text{ [Bq/cm}^3\text{]} = 0.1$

^{32}P の排水中の濃度比は、別表第2より、 ^{32}P 標識の排水中の濃度限度 3×10^{-1} を用いて $0.6 \text{ [Bq/cm}^3\text{]} \div 3 \times 10^{-1} \text{ [Bq/cm}^3\text{]} = 2$

トリチウム及び ^{32}P の濃度比の合計は、 $0.1 + 2 = 2.1$

問5 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 内部被ばくは、体内に取り込まれた放射性物質からの放射線による被ばくである。取り込まれた放射性核種は、その物理的半減期 (T_p) で減少するが、核種や化学形によって異なる体内分布をとり、排泄などで体内から排出されるまでその組織または臓器を照射する。さらなる取り込みがないときに、生体が代謝や排泄などにより取り込んだ物質の半分を取り除くために要する時間を生物学的半減期 (T_b) と呼ぶ。体内における放射性核種は、物理的半減期と生物学的半減期の双方を考慮した有効半減期 (T_e) に従って減少する。有効半減期 (T_e) は、以下の式 $T_e = \square \text{ A}$ により求められる。

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で定められている実効線量係数の算出に用いられた成人におけるトリチウム水の生物学的半減期は、摂取量の97%については10日、残りの部分については□Bである。近似的に、摂取量の100%について生物学的半減期が10

(令和2年度) 第1種実務

日であるとみなすと、トリチウムの物理的半減期が約 \boxed{C} であることから、上記の式に従うと、成人におけるトリチウム水の有効半減期は約 \boxed{D} と算出される。なお、生物学的半減期は化学形により異なる。有機結合型トリチウムに対して用いられた成人における生物学的半減期は、摂取量の \boxed{E} については10日で、残りの部分については \boxed{B} である。

しかし、最近の研究から、体内に取り込まれたトリチウムは、その一部が生体内で代謝されてより長期間残存することが明らかになってきており、その長期間残存する部分の生物学的半減期は成人で1年程度と考えられている。

<Aの解答群>

- | | | | | |
|--------------------------------|-----------------|-------------------------|--------------------|-------------------------------|
| 1 $T_b + T_p$ | 2 $ T_b - T_p $ | 3 $\frac{T_b + T_p}{2}$ | 4 $\sqrt{T_b T_p}$ | 5 $\frac{T_b T_p}{T_b + T_p}$ |
| 6 $\frac{2T_b T_p}{T_b + T_p}$ | | | | |

<Bの解答群>

- | | | | | |
|------|-------|-------|--------|------|
| 1 5日 | 2 10日 | 3 40日 | 4 100日 | 5 1年 |
| 6 5年 | 7 10年 | 8 12年 | | |

<Cの解答群>

- | | | | | |
|-------|----------|-------|------|-------|
| 1 8日 | 2 14日 | 3 88日 | 4 5年 | 5 12年 |
| 6 30年 | 7 5,730年 | | | |

<Dの解答群>

- | | | | | |
|--------|--------|--------|--------|-------|
| 1 5日 | 2 7日 | 3 10日 | 4 12日 | 5 30日 |
| 6 135日 | 7 200日 | 8 210日 | 9 330日 | 10 5年 |
| 11 12年 | 12 30年 | 13 50年 | | |

<Eの解答群>

- | | | | | |
|-------|-------|-------|-------|-------|
| 1 1% | 2 3% | 3 10% | 4 50% | 5 90% |
| 6 97% | 7 99% | | | |

II 放射性核種による被ばくと長期間にわたる放射線量の集積を規制するために、預託線量という概念が導入された。これは、取り込まれた放射性核種から、特定の期間内に与えられると予測される総線量であり、放射線管理の上では、その放射性核種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。成人に対しては摂取時から \boxed{F} の総線量を評価し、幼児や小児に対しては摂取時から \boxed{G} の総線量を評価する。

職業被ばくについて、国際放射線防護委員会 (ICRP) は、1990年及び2007年の基本勧告で、定められた5年間の平均が1年当たり20 mSvで、いかなる1年間についても50 mSvを超えるべきではないという実効線量限度を勧告している。実際に内部被ばくが生じたときの線量評価については、様々な測定により取り込まれた放射性核種の体内摂取量を推定し、その核種に対して告示(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(抜粋を下表に示す)で定められている実効線量係数を用いた計算により預託実効線量を評価する。例えばトリチウムを、トリチウム水とし

(令和2年度) 第1種実務

て5.5 kBq、メタン以外の有機物として0.5 kBqを経口摂取した場合の預託実効線量は **H** μSv と評価できる。

我が国における排液中又は排水中の濃度限度は、公衆の被ばくを考慮して、この濃度の水を **I** 飲み続けたとき、経口摂取による内部被ばくの平均実効線量が1年当たり1 mSvとなるものとして定められている。この計算においては、各年齢層に対する実効線量係数及び年間摂水量が考慮されている。年齢別の実効線量係数は、ICRPのPublication 72で3か月、1歳、5歳、10歳、15歳、成人に対して計算が行われており、例えば ^3H を経口摂取した場合の実効線量係数は、年齢の増加に伴って **J** する。

別表第2 放射性同位元素の種類が明らかで、かつ、一種類である場合の空气中濃度限度等(抜粋)

第1欄		第2欄	第3欄	第4欄	第5欄	第6欄
放射性同位元素の種類		吸入摂取した場合の実効線量係数 (mSv/Bq)	経口摂取した場合の実効線量係数 (mSv/Bq)	空气中濃度限度 (Bq/cm ³)	排気中又は空气中の濃度限度 (Bq/cm ³)	排液中又は排水中の濃度限度 (Bq/cm ³)
核種	化学形等					
^3H	水	1.8×10^{-8}	1.8×10^{-8}	8×10^{-1}	5×10^{-3}	6×10^1
^3H	有機物(メタンを除く)	4.1×10^{-8}	4.2×10^{-8}	5×10^{-1}	3×10^{-3}	2×10^1

<F、Gの解答群>

- 1 10年間 2 30年間 3 50年間 4 70年間 5 100年間
6 20歳まで 7 30歳まで 8 50歳まで 9 70歳まで 10 100歳まで

<Hの解答群>

- 1 9.0×10^{-6} 2 2.1×10^{-5} 3 9.9×10^{-5} 4 1.2×10^{-4} 5 2.3×10^{-4}
6 2.4×10^{-4} 7 9.0×10^{-3} 8 2.1×10^{-2} 9 9.9×10^{-2} 10 1.2×10^{-1}
11 2.3×10^{-1} 12 2.4×10^{-1}

<Iの解答群>

- 1 20年間 2 30年間 3 50年間
4 100年間 5 生まれてから20歳まで 6 生まれてから30歳まで
7 生まれてから50歳まで 8 生まれてから70歳まで 9 生まれてから100歳まで

<Jの解答群>

- 1 増加 2 減少

[解答]

I A-5 B-3 C-5 D-3 E-4

注) A: T_p 、 T_b 、 T_e 間では、 $1/T_e = 1/T_p + 1/T_b$ の式が成り立つ。これを T_e について解くと $T_e = T_b T_p / (T_b + T_p)$ となる。

B: トリチウム水が体に取り込まれると、その一部は有機結合型トリチウムに変わる。その生物学的半減期は40日程度である。

C: トリチウムは物理学的半減期12.32年の β^- 線放出核種である。

D: トリチウム水の有効半減期を、設問 A の式を用いて求めると次のようになる。

$$\text{トリチウム水の有効半減期 } T_e = 10 \times 12 \times 365 / (10 + 12 \times 365) \approx 10 \text{ (日)}$$

物理学的半減期と生物学的半減期とが大幅に異なる場合には、有効半減期は短い方の半減期に近い値になることがわかる。

E: 有機結合型トリチウムが体に取り込まれると、その約 50%は代謝により生物学的半減期 10 日のトリチウム水となる。残りの約 50%は生物学的半減期 40 日の有機結合型トリチウムのまま存在するが、その一部は生体内で代謝により長期間残存する。

II F-3 G-9 H-10 I-8 J-2

注) F、G: 預託線量は、放射性核種から受ける線量率を摂取後の期間積算することによって求める。積算期間が特定されていないときは、成人に対しては 50 年、子供に対しては摂取時から 70 歳までとする。

H: 内部被ばくによる実効線量(預託実効線量) E (mSv) は実効線量係数 e (mSv/Bq) と摂取量 I (Bq) の積、 $E = e \times I$ で求められる。経口摂取した場合は別表第 2 の第 3 欄の係数を計算に用いる。

$$\begin{aligned} \text{預託実効線量 } E &= 1.8 \times 10^{-8} \text{ (mSv/Bq)} \times 5.5 \times 10^3 \text{ (Bq)} + 4.2 \times 10^{-8} \text{ (mSv/Bq)} \times 0.5 \times 10^3 \text{ (Bq)} \\ &= 12 \times 10^{-5} \text{ (mSv)} = 1.2 \times 10^{-1} \text{ (}\mu\text{Sv)} \end{aligned}$$

I: 排液中又は排水中の濃度限度及び排気中又は空気中の濃度限度はいずれも、生まれてから 70 歳まで摂取したと仮定して設定されている。

J: 濃度限度は、公衆に対する実効線量限度である 1 年あたり 1mSv に基づいて定められている。この値が公衆の年齢に関わらず一定であるのに対し、公衆の年間摂水量は幼児から成人まで成長につれて増加する。そのため年齢別の実効線量係数は、年齢の増加に伴って減少する。

問 6 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 放射性壊変の過程で γ 線に加えて、飛程の短い α 線や β 線を放出する核種は、がんの診断と治療を同時に行うことができる核種として注目されている。このような核種の 1 つである ^{131}I を標識した化合物(液体状)を使った動物実験において、組織 X におけるこの ^{131}I 標識化合物からの β 線による吸収線量が 0.5 Gy 程度となるのに必要な放射能について考えてみよう。ただし、組織 X に集積していない ^{131}I 標識化合物からの影響は考慮しないこととする。

はじめに、 ^{131}I の物理的半減期は A であり、1 壊変当たりの β 線の平均エネルギー (180 keV \cdot Bq $^{-1} \cdot$ s $^{-1}$) がすべてこの組織 X に吸収されると仮定する。また、集積後のこの組織 X からの排出は起こらず、新たな集積はなく、組織 X の重量の変化もないと仮定する。組織 X における、十分長い時間にわたる総壊変数(累積放射能) \tilde{A} [Bq \cdot s] は、時刻 t [s] における放射能 A_t [Bq] を

(令和2年度) 第1種実務

集積後(時刻 $t=0$) から十分長い時間(時刻 $t=\infty$) まで積分したときの関係式

$$\bar{A} = \boxed{B}$$

により計算することができる。上式において、 $A_0[\text{Bq}]$ は、組織 X に集積する放射能の初期値、 $T_{1/2}[\text{s}]$ は、 ^{131}I の物理的半減期である。ここで、組織 X の重量は 24 g で、この ^{131}I 標識化合物を静脈投与直後に投与放射能の 30% が組織 X に集積すると仮定する。

以上の仮定及び計算式を用いることにより、動物 1 匹当たりに必要な投与する放射能は \boxed{C} MBq と概算できる。また、使用予定の放射能は、使用場所での 3 月間使用数量、及び \boxed{D} を超えないことが必要であるが、特に、複数匹を使用する動物実験においては、より一層の注意を払ってこの点の確認を行うようにする。

<A の解答群>

- | | | | | |
|---------|--------|--------|---------|---------|
| 1 2.0 分 | 2 10 分 | 3 20 分 | 4 110 分 | 5 13 時間 |
| 6 8.0 日 | 7 60 日 | 8 30 年 | | |

<B の解答群>

- | | | | |
|-----------------------------------|---------------------------------|-----------------------------------|-----------------------------------|
| 1 $A_0 \times T_{1/2}$ | 2 $A_0 \div T_{1/2}$ | 3 $A_0 \times T_{1/2} \times 0.5$ | 4 $A_0 \div T_{1/2} \times 0.5$ |
| 5 $A_0 \times T_{1/2} \times 3.7$ | 6 $A_0 \div T_{1/2} \times 3.7$ | 7 $A_0 \times T_{1/2} \div \ln 2$ | 8 $A_0 \div T_{1/2} \times \ln 2$ |

<C の解答群>

- | | | | | |
|--------|---------|---------|-------|------|
| 1 0.42 | 2 0.60 | 3 1.4 | 4 2.0 | 5 17 |
| 6 58 | 7 1,400 | 8 5,000 | | |

<D の解答群>

- | | | |
|------------|------------|-------------|
| 1 1 月間使用数量 | 2 1 週間使用数量 | 3 1 日最大使用数量 |
|------------|------------|-------------|

II 非密封放射性同位元素を取り扱う場合には、外部被ばくに対する管理の他に、吸入摂取などによる内部被ばくの管理が必要である。放射性ヨウ素 ^{131}I は、壊変の過程で主に \boxed{E} eV の γ 線を放出するため、鉛ブロック等による線源の遮蔽による外部被ばくの防止に努める。また、 ^{131}I の吸入摂取を防ぐためには、作業時の活性炭マスク着用や、作業をフードやグローブボックス内で行うことが重要である。

内部被ばくでは、放射性同位元素の種類や存在形態などにより、特定の臓器に集積するものがあるため注意が必要である。 ^{90}Sr や ^{226}Ra は、 \boxed{F} と似た化学的性質を有するため \boxed{G} に集積する。また、ヨウ素が \boxed{H} ホルモン材料であることから、 ^{131}I は \boxed{H} に取り込まれる。一方、放射性セシウムは、 \boxed{I} 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。

放射性物質を万一大量に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、摂取後すみやかに薬剤として安定ヨウ素剤を投与する。放射性セシウムを摂取した場合には、 \boxed{J} を投与する。セシウムイオンがこの薬剤に吸着されることにより、消化管からの吸収を阻害する。

<E の解答群>

- | | | | | |
|-------------------------|-------------------------|-------------------------|-------------------------|-------------------------|
| 1 1.31×10^{-8} | 2 1.31×10^{-5} | 3 1.86×10^{-5} | 4 1.86×10^{-2} | 5 3.65×10^{-1} |
|-------------------------|-------------------------|-------------------------|-------------------------|-------------------------|

(令和2年度) 第1種実務

- | | | | | | | | | | |
|----|--------------------|----|--------------------|----|--------------------|----|--------------------|----|--------------------|
| 6 | 1.86 | 7 | 3.65 | 8 | 1.57×10^1 | 9 | 1.86×10^1 | 10 | 1.86×10^2 |
| 11 | 3.65×10^2 | 12 | 1.31×10^5 | 13 | 3.65×10^5 | 14 | 1.86×10^6 | 15 | 3.65×10^6 |

<F~Iの解答群>

- | | | | | | | | | | |
|----|--------|----|------|----|------|----|-------|----|------|
| 1 | 亜鉛 | 2 | 鉄 | 3 | 銅 | 4 | カルシウム | 5 | カリウム |
| 6 | アルミニウム | 7 | 筋肉 | 8 | 肺 | 9 | 脳 | 10 | 骨 |
| 11 | 甲状腺 | 12 | 脳下垂体 | 13 | 副腎皮質 | 14 | 膵島 | | |

<J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 | 生理食塩水 | | |

[解答]

I A-6 B-7 C-3 D-3

注) A: ^{131}I の物理的半減期は 8.02 日

B: 時刻 t までの壊変数は

$$\int_0^t A_t dt = \int_0^t A_0 e^{-\lambda t} dt = A_0 \times \frac{1}{\lambda} (1 - e^{-\lambda t})$$

壊変法則 $A_0 e^{-\lambda t} = A_0 \left(\frac{1}{2}\right)^{t/T_{1/2}}$ より $\lambda = 1/T_{1/2} \times \ln 2$ であるから、総壊変数は

$$\tilde{A} = \int_0^{\infty} A_t dt = \int_0^{\infty} A_0 e^{-\lambda t} dt = A_0 \times \frac{1}{\lambda} = A_0 \times T_{1/2} \div \ln 2$$

と整理できる。核種の半減期に比べて十分長い時間までの全ての壊変数は、原子数に等しいことを意味する。

C: 組織 X の吸収線量 $D[\text{Gy}=\text{J/kg}]$ は、上で求めた総壊変数 \tilde{A} と、1壊変当たりの β 線の平均エネルギー $E_\beta[\text{keV}]$ 、組織への集積率 u 、組織 X の質量 $m[\text{kg}]$ を用いて計算できる。

$$D = \tilde{A} \times E_\beta \times u / m = (A_0 \times T_{1/2} / \ln 2) \times E_\beta \times u / m$$

目標の吸収線量を得るために投与が必要な放射能 $A_0 [\text{Bq}]$ は

$$A_0 = D \times m \times \ln 2 / (E_\beta \times u \times T_{1/2})$$

$$A_0 = 0.5 \times 24 \times 10^{-3} \times 0.693 / ((180 \times 10^3 \times 1.602 \times 10^{-19}) \times 0.30 \times (8.0 \times 24 \times 3600)) \\ = 1.39 \times 10^6 [\text{Bq}]$$

D: 密封されていない放射性同位元素は、施設・設備の能力を踏まえて、年間使用数量、3月間使用数量、1日最大使用数量を設定して使用許可を得る。1日最大使用数量は、人が常時立ち入る場所における線量や1週間平均濃度や人が常時立ち入る場所の空气中濃度(1週間平均濃度)の算出に用いられる。

II E-13 F-4 G-10 H-11 I-5 J-3

注) E: 放射性ヨウ素 ^{131}I は β^- 崩壊により ^{131m}Xe に壊変する。放出される β 粒子の 89.5% は最大エネルギー 0.606 MeV であり、引き続き ^{131m}Xe の過剰エネルギーを γ 線の形で放出する。この時の γ 線ではエネルギー 0.365 MeV の光子が 81.7% と最も多い。

(令和2年度) 第1種実務

- F, G : Sr, Ra は周期表では2族に属する。同族のCaと化学的性質が似ていることから骨に多く集積し、生物学的半減期も長い傾向がある。
- H : 甲状腺ではヨウ素を取込み、有機化された形で蓄積、これを材料に甲状腺ホルモン（トリヨードサイロニンとサイロキシン）を産生、分泌する。ヨウ素が十分に蓄積されている場合、過剰なヨウ素は吸収されずに血中から尿中に排泄される。
- I : Cs は周期表では1族に属する。同族のKと化学的性質が似ており、可溶性化合物として経口摂取されたセシウムは消化管で良く吸収され、体液として人体全身にほぼ均等に分布し沈着する。その生物学的半減期は約110日である。
- J : プルシアンブルーは一般的にはフェロシアン化鉄とよばれる人工顔料であり、カリウムやナトリウムなどの他のアルカリイオンの存在下でもセシウムイオンを選択的に吸着する特徴がある。金属錯体（構造式 $\text{Fe}_4[\text{Fe}(\text{CN})_6]_3$ ）内部にある空隙にセシウムを選択的に取り込むと考えられている。