

令和6年度

第1種放射線取扱主任者試験

問題と解答例

化学

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。

(令和6年度) 第1種化学

次の問1から問30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31、問32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 ある放射性元素は長半減期の2つの同位体  $U_1$  と  $U_2$  だけでできている。 $U_1$  は半減期が7.0億年で同位体存在度が0.70%、 $U_2$  は半減期が45億年で同位体存在度が99.3%であるとする。時間をさかのぼって21億年前の時点での  $U_1$  の同位体存在度(%)として最も近い値は、次のうちどれか。ただし  $U_1$  と  $U_2$  の放射壊変は独立であるとする。

- 1 1.0            2 1.5            3 2.0            4 4.0            5 8.3

〔解答〕 4

〔解説〕 2つの同位体のみから構成される元素を  $U_0$  とし、 $U_0$  の現在の放射能を  $A_0$  とすると、現在の  $U_1$ 、 $U_2$  の同位体存在比がそれぞれ0.7%と99.3%であるため、 $U_1$ 、 $U_2$  の現在の放射能  $A_1$ 、 $A_2$  は次式の様を示すことができる。

$$A_1 = 0.007A_0 \cdots \text{①}$$

$$A_2 = 0.993A_0 \cdots \text{②}$$

次に、21億年前の  $U_1$  は半減期が7億年であるため21億年前当時からすると3半減期が経過しているため、現在の放射能の8倍存在したことになり、当時の  $U_1$  の放射能は  $8A_1$  と示せる。同様にして21億年前の  $U_2$  の放射能は  $1/2$  半減期ほど経過しているため、現在の放射能は当時の0.7倍程度となり、21億年前の放射能は  $A_2/0.7$  と示せる。

故に、21億年前の  $U_0$  の総放射能は、 $8A_1 + A_2/0.7$  となり、 $U_1$  の存在比は、

$\frac{8A_1}{8A_1 + A_2/0.7}$  で表され、この式に①と②を代入して計算すると、

$$\frac{8A_1}{8A_1 + A_2/0.7} = \frac{8 \times 0.007A_0}{8 \times 0.007A_0 + 0.993A_0/0.7} \doteq 0.038$$

21億年前の  $U_1$  の存在比はおおよそ3.8%であり、4の選択肢が最も近い。

問2 1TBqの $^{18}\text{F}$ が壊変して、 $^{18}\text{F}$ の原子数の期待値が1個となるのに要する時間[h]として最も近い値は次のうちどれか。なお、 $^{18}\text{F}$ の半減期は110分とする。

- 1 12            2 23            3 46            4 74            5 98

〔解答〕 5

〔解説〕  $t=0$ の時の原子数を  $N_0$  とし、その時の放射能を  $A_0$  とする。また時間  $t$  における原子数を  $N(t)$  とすると、

$$N_0 = A_0/\lambda \cdots \text{①}$$

$$N(t) = N_0 e^{-\lambda t} \cdots \text{②}$$

で示すことができる。

$$\lambda = \ln(2) / T = 0.693 / 110 \approx 0.0063$$

$$N_0 = 10^{12} / 0.0063 = 1.6 \times 10^{14}$$

$$N(t) < 1$$

$$1.6 \times 10^{14} e^{-0.0063 t} < 1$$

$$e^{-0.0063 t} < 1 / 1.6 \times 10^{14}$$

$$-0.0063 t < \ln(1 / 1.6 \times 10^{14})$$

$$t > \ln(1.6 \times 10^{14}) / 0.0063$$

$$t > 32.8 / 0.0063$$

$$t > 5206.4 \text{ minutes}$$

時間に換算すると 86.6 時間なので、条件を満たすのは 5 番の選択肢のみである。

問3 化学式が  $X_2Y_3$  である化合物がある。この化合物を X の放射性同位体  $X^*$  (半減期  $T_{X^*}$ ) と、Y の放射性同位体  $Y^*$  (半減期  $T_{Y^*}$ ) で二重標識した。 $X^*$  の放射能が  $A_{X^*}$ 、 $Y^*$  の放射能が  $A_{Y^*}$  のとき、 $X^*$  と  $Y^*$  の核種の個数 (それぞれ  $N_{X^*}$  と  $N_{Y^*}$  とする) の比  $\left[ \frac{N_{X^*}}{N_{Y^*}} \right]$  を表す式として正しいものは、次のうちどれか。

- 1  $\frac{A_{X^*} T_{X^*}}{A_{Y^*} T_{Y^*}}$       2  $\frac{A_{X^*} T_{Y^*}}{A_{Y^*} T_{X^*}}$       3  $\frac{A_{Y^*} T_{X^*}}{A_{X^*} T_{Y^*}}$       4  $\frac{3A_{X^*}}{2A_{Y^*}}$       5  $\frac{2A_{X^*}}{3A_{Y^*}}$

〔解答〕 1

〔解説〕 二重標識した放射性同位体  $X^*$  と  $Y^*$  は互いに独立しているため、それぞれの放射能は次式のよ  
うに示すことができる。

$$X^* : A_{X^*} = \frac{\ln(2)}{T_{X^*}} N_{X^*}$$

$$Y^* : A_{Y^*} = \frac{\ln(2)}{T_{Y^*}} N_{Y^*}$$

が成り立つ。 $N_{X^*}$  と  $N_{Y^*}$  に代入すると

$$\left( \frac{N_{X^*}}{N_{Y^*}} \right) = \frac{T_{X^*}}{\ln(2)} \cdot A_{X^*} \cdot \frac{\ln(2)}{T_{Y^*}} \cdot \frac{1}{A_{Y^*}}$$

$$\left( \frac{N_{X^*}}{N_{Y^*}} \right) = \frac{A_{X^*} T_{X^*}}{A_{Y^*} T_{Y^*}}$$

問4 比放射能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  $^{32}\text{P}$  の比放射能は無担体のとき最大である。
- B 無担体  $^{32}\text{P}$  は時間が経ると比放射能の値が変わる。
- C 比放射能既知の標識化合物の重量は逆希釈法によって求めることができる。
- D 1 MBq の  $^{14}\text{C}$  アニリン 1 mL をベンゼン 100 mL に溶解したときの比放射能は  $0.01 \text{ MBq} \cdot \text{mL}^{-1}$  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

〔解説〕

- A：正 無担体の時が比放射能は最大である。
- B：誤 無担体の時、 $^{32}\text{P}$  を含む物質の質量と放射能は同じ割合で減少していくため、比放射能は変わらない。
- C：正 放射性の標識化合物の中に非放射性化合物を添加して標識化合物を定量する方法を逆希釈法と呼び、比放射能が分かればその化合物の量について知ることができる。
- D：誤 全溶媒の容量は 101 mL 中に 1 MBq なので  $0.0099 \text{ MBq} \cdot \text{mL}^{-1}$

問5  $0.2 \text{ mol} \cdot \text{L}^{-1}$  の非放射性  $\text{KMnO}_4$  水溶液 5 mL と  $^{54}\text{Mn}$  で標識した  $0.02 \text{ mol} \cdot \text{L}^{-1} \text{KMnO}_4$  水溶液 10 mL (比放射能  $960 \text{ kBq} \cdot \text{mol}^{-1}$ ) を混合した。得られた水溶液の  $\text{KMnO}_4$  の比放射能 [ $\text{kBq} \cdot \text{mol}^{-1}$ ] として最も近い値は次のうちどれか。

- 1 80      2 160      3 480      4 720      5 960

〔解答〕 2

〔解説〕

	溶液内のモル数	比放射能	放射能
	mol	kBq/mol	kBq
非放射性 $\text{KMnO}_4$	$0.2 \text{ mol/L} \times 0.005 \text{ L}$ (0.001)	0	0
放射性 $\text{KMnO}_4$	$0.02 \text{ mol/L} \times 0.01 \text{ L}$ (0.0002)	960	$960 \times 0.0002$ (0.192)
得られた水溶液	0.0012	X	0.192

得られた水溶液の比放射能(X) =  $0.192 / 0.0012$   
=  $160 \text{ kBq} \cdot \text{mol}^{-1}$

問6 以下の核種とその壊変により生成する核種の関係として、放射平衡となりうるものの組合せは、次のうちどれか。

- A  $^{68}\text{Ge}$       →       $^{68}\text{Ga}$
- B  $^{85}\text{Sr}$       →       $^{85}\text{Rb}$

(令和6年度) 第1種化学



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

〔解答〕 3

〔解説〕

A：正 半減期は  $^{68}\text{Ge} \rightarrow 271$  日、 $^{68}\text{Ga} \rightarrow 68$  分で放射平衡が成り立つ。

B：誤 半減期は  $^{85}\text{Sr} \rightarrow 65$  日、 $^{85}\text{Rb} \rightarrow 18.6$  日で娘核が親核種の半減期よりもっと短くある必要があり、過渡平衡は成立していない。

C：誤 半減期は  $^{125}\text{I} \rightarrow 60$  日、 $^{125}\text{Te} \rightarrow \text{stable}$  であるため、成り立っていない。

D：正 半減期は  $^{137}\text{Cs} \rightarrow 30.1$  年、 $^{137\text{m}}\text{Ba} \rightarrow 2.6$  分で放射平衡が成り立つ。

E：正 半減期は  $^{140}\text{Ba} \rightarrow 12.7$  日、 $^{140}\text{La} \rightarrow 1.7$  日で、過渡平衡が成立している。

問7 サイクロトロンを利用して  $^{58}\text{Ni}(p, \alpha)^{55}\text{Co}$  反応により  $^{55}\text{Co}$ (半減期 18 時間)を生成し、その壊変を利用して  $^{55}\text{Fe}$ (半減期 2.7 年)を製造した。Ni ターゲットを溶解して化学分離を行い、Co を精製したところ  $^{55}\text{Co}$  の放射能は 100 MBq であった。 $^{55}\text{Co}$  の壊変で得られる  $^{55}\text{Fe}$  の最大の放射能[Bq] として最も近い値は、次のうちどれか。

- 1  $2.0 \times 10^2$     2  $5.6 \times 10^3$     3  $7.6 \times 10^4$     4  $3.7 \times 10^5$     5  $4.4 \times 10^6$

〔解答〕 3

〔解説〕 生成された  $^{55}\text{Co}$  が壊変して  $^{55}\text{Fe}$  が生成するため、最大値となるのは  $^{55}\text{Co}$  と  $^{55}\text{Fe}$  の原子数が同じ数になる時である。原子数  $N$  を放射能  $A$  と半減期  $T$  で次式のように示すことができる。 $^{55}\text{Co}$  と  $^{55}\text{Fe}$  の原子数をそれぞれ示し、最大値となるのは原子数が同数になる時が  $^{55}\text{Fe}$  の最大放射能  $A_{\text{Fe}}$  となる。

$$A = \lambda N \quad \therefore N = A/\lambda = A \cdot \frac{T}{\ln(2)}$$

$$^{55}\text{Co} : N_{\text{Co}} = \frac{18}{\ln(2)} \cdot 10^8$$

$$^{55}\text{Fe} : N_{\text{Fe}} = \frac{2.7 \times 365 \times 24}{\ln(2)} \cdot A_{\text{Fe}}$$

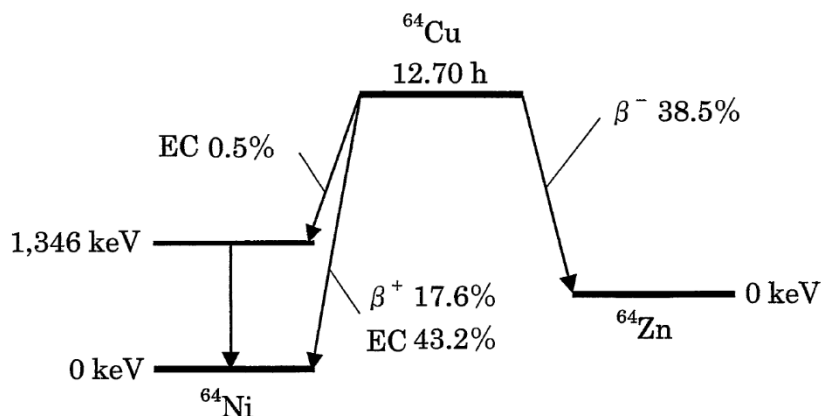
$$18 \times 10^8 = 2.7 \times 365 \times 24 \times A_{\text{Fe}}$$

$$\therefore A_{\text{Fe}} \doteq 7.6 \times 10^4 \text{ Bq}$$

問8 図に示した  $^{64}\text{Cu}$  の壊変に関する以下の記述のうち、正しいものの組合せはどれか。

- A  $\beta^+$ 壊変は 1,346 keV の光子の放出を伴う。  
B EC 壊変に伴って Ni の特性 X 線が放出される。

- C  $\gamma$  線スペクトルに 511 keV のピークが現れる。  
D  $^{64}\text{Zn}$  の生成速度は  $^{64}\text{Ni}$  の生成速度より大きい。



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

〔解答〕 3

〔解説〕

- A : 誤 図より 1,346 keV の光子を放出するのは EC 壊変後に放出される。  
B : 正 EC 壊変により、軌道電子が原子核に取り込まれ、原子番号が 1 つ下がり Ni へと変移する。取り込まれて空席となった電子殻に上の電子殻から電子が落ちて来るため、電子殻の束縛エネルギーの差分が特性 X 線として放出される。  
C : 正  $\beta^+$  壊変があるため、近傍の軌道電子と衝突し、消滅放射線が対角線状に 2 本放出される。消滅放射線 1 本のエネルギーが 511 keV に相当するため  $\gamma$  スペクトルに 511 keV のスペクトルが見られる。  
D : 誤  $^{64}\text{Cu}$  から  $^{64}\text{Zn}$  分岐する割合 38.5%、一方  $^{64}\text{Ni}$  への分岐する割合の合計は 61.3% であるため生成速度は  $^{64}\text{Zn}$  より  $^{64}\text{Ni}$  の方が大きい。

問 9 放射性核種が周期表で同族元素の関係にあるものとして正しいものの組合せは、次のうちどれか。

- A  $^{24}\text{Na}$  と  $^{134}\text{Cs}$   
B  $^{27}\text{Mg}$  と  $^{87}\text{Rb}$   
C  $^{32}\text{P}$  と  $^{76}\text{As}$   
D  $^{35}\text{S}$  と  $^{125}\text{I}$

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

〔解答〕 2

〔解説〕

- A : 正 Na : アルカリ金属元素 Cs : アルカリ金属元素  
B : 誤 Mg : アルカリ土類金属元素 Rb : アルカリ金属元素  
C : 正 P : 窒素族元素 As : 窒素族元素

D : 誤 S : 酸素族元素 I : ハロゲン元素

問10 次の核反応のうちハロゲンの同位体を生成する反応として正しいものの組合せはどれか。

- A  $^{15}\text{N}(\text{d}, \text{p})$
- B  $^{18}\text{O}(\text{p}, \text{n})$
- C  $^{23}\text{Na}(\text{n}, \gamma)$
- D  $^{75}\text{As}(\alpha, 2\text{n})$

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

〔解答〕 4

〔解説〕

A : 誤  $^{15}\text{N} + {}^2_1\text{H} \rightarrow {}^1_1\text{H} + {}^{16}\text{N}$  原子番号は変化せず、質量数が1つ増え $^{16}\text{N}$ が生成される。

B : 正  $^{18}_8\text{O} + \text{p} \rightarrow \text{n} + {}^{19}_9\text{F}$  原子番号が1つ上がり、質量数は変化せず $^{19}\text{F}$ が生成、ハロゲン元素である。

C : 誤  $^{23}_{11}\text{Na} + \text{n} \rightarrow \gamma + {}^{24}_{11}\text{Na}$  原子番号は変化せず、質量数が1つ増え $^{24}_{11}\text{Na}$ が生成される。

D : 正  $^{75}_{33}\text{As} + \alpha \rightarrow 2\text{n} + {}^{77}_{35}\text{Br}$  原子番号が2つ上がり、質量数も2つ増えて $^{77}_{35}\text{Br}$ が生成、Br (臭素) はハロゲン元素である。

問11  $^{235}\text{U}$  の熱中性子による核分裂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 質量非対称核分裂が生じる。
- B 1回の核分裂で2~3個の中性子が発生する。
- C 中性子不足核種が生成する。
- D 反応断面積は、 $^{235}\text{U}$ の方が $^{238}\text{U}$ に比べて大きい。

- 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 熱中性子による $^{235}\text{U}$ の核分裂では、非対称核分裂が生じる。

B : 正  $^{235}\text{U}$ の核分裂1回あたり、平均して2-3個の中性子が放出される。

C : 誤 核分裂生成物は、元の核種よりも中性子過剰の傾向である。

D : 正  $^{235}\text{U}$ の反応断面積は、585バーン、 $^{238}\text{U}$ の反応断面積は、約0.02バーンであり核分裂しにくく、中性子を吸収して $^{239}\text{Pu}$ を生成。

問12 原子炉による中性子照射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 熱中性子束の測定には、Au箔を用いることができる。
- B 試料に照射される熱中性子束は周囲の物質の影響を受けることがある。
- C 熱中性子放射化分析ではNaを分析できない。

(令和6年度) 第1種化学

D Li化合物を有機化合物と混合して照射すると、有機化合物をトリチウムで標識できる。

- 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 Auは熱中性子の放射化検出器として広く用いられている。安定同位体である $^{197}\text{Au}$ は熱中性子を捕獲して放射性同位体 $^{198}\text{Au}$ (半減期2.7日)になる。

B：正 中性子は物質との相互作用によって減速・吸収される。中性子吸収材(例：カドミウム、ホウ素)

C：誤 Naは熱中性子放射化分析で分析可能。安定同位体 $^{23}\text{Na}$ が熱中性子を捕獲して $^{24}\text{Na}$ (半減期約15時間)になる。

D：正  $^6\text{Li}$ は熱中性子を捕獲して $\alpha$ 粒子と $^3\text{H}$ を生成。

問13 次の3つの核種で構成される群のうち、安定核種のみで構成される群の組合せはどれか。

A  $^{15}\text{O}$   $^{16}\text{O}$   $^{18}\text{O}$

B  $^{24}\text{Mg}$   $^{25}\text{Mg}$   $^{26}\text{Mg}$

C  $^{32}\text{S}$   $^{33}\text{S}$   $^{34}\text{S}$

D  $^{56}\text{Fe}$   $^{57}\text{Fe}$   $^{59}\text{Fe}$

E  $^{58}\text{Ni}$   $^{60}\text{Ni}$   $^{62}\text{Ni}$

- 1 ABDのみ 2 ABEのみ 3 ACDのみ 4 BCEのみ 5 CDEのみ

〔解答〕 4

〔解説〕

A：誤  $^{15}\text{O}$ が放射性同位体。半減期約122秒で、陽電子放出( $\beta^+$ 崩壊)

B：正 安定核種のみで構成

C：正 安定核種のみで構成

D：誤  $^{59}\text{Fe}$ 放射性同位体。半減期約44.5日で、ベータ崩壊

E：正 安定核種のみで構成

問14 ベリリウム(Be)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 Beには、複数の安定同位体がある。

B  $^7\text{Be}$ は、100%EC壊変する。

C  $^{10}\text{Be}$ の半減期は、 $^7\text{Be}$ のそれより長い。

D  $^7\text{Be}$ と $^{10}\text{Be}$ は、上層大気中でともに宇宙線による核破碎反応で生成する。

- 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〕

A：誤 Beの安定同位体は ${}^9\text{Be}$ のみ

B：正  ${}^7\text{Be}$ はEC壊変(100%)によって ${}^7\text{Li}$ に崩壊

C：正  ${}^{10}\text{Be}$ の半減期は約 $1.39 \times 10^6$ 年(約139万年)、 ${}^7\text{Be}$ の半減期は約53日

D：正  ${}^7\text{Be}$ と ${}^{10}\text{Be}$ は、宇宙線が大気中の窒素や酸素などの原子核と反応して生成される宇宙生成核種(cosmogenic nuclides)である。

問15  ${}^{252}\text{Cf}$ 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 約5.3年で原子数が半減する。

B 煙感知器の線源として利用される。

C 主に $\alpha$ 壊変をするが、一部は自発核分裂する。

D 核壊変に伴い $\gamma$ 線を放出する。

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  ${}^{252}\text{Cf}$ の半減期は約2.645年。

B：誤  ${}^{241}\text{Am}$ が煙感知器の放射線源として一般的に使用される。 ${}^{252}\text{Cf}$ は強力な中性子線源として利用される。

C：正  ${}^{252}\text{Cf}$ は自発核分裂が3.1%、 $\alpha$ 崩壊が約96.9%である。

D：正  $\alpha$ 崩壊および自発核分裂に伴って $\gamma$ 線が放出される。

問16 ヨウ素の放射性同位体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  ${}^{123}\text{I}$ は、陽電子放射断層撮影法(PET)に用いられる。

B  ${}^{125}\text{I}$ は、ラジオイムノアッセイに用いられる。

C  ${}^{128}\text{I}$ は、シングルフォトン断層撮影法(SPECT)に用いられる。

D  ${}^{129}\text{I}$ は、宇宙線とキセノンの核反応で生成する。

E  ${}^{131}\text{I}$ は、甲状腺疾患の治療に用いられる。

1 ABCのみ

2 ABDのみ

3 ACEのみ

4 BDEのみ

5 CDEのみ

〔解答〕4

〔解説〕

A：誤  ${}^{123}\text{I}$ (ヨウ素-123)は、主に電子捕獲(EC)によって崩壊し、159 keVのガンマ線を放出。陽電子を放出しないため、PETには使用されず、SPECT(単一光子放射断層撮影法)で利用される。

B：正 半減期約60日で、低エネルギーのガンマ線を放出。ラジオイムノアッセイ(RIA)で抗原や抗体の標識に広く利用される。

(令和6年度) 第1種化学

- C: 誤 半減期約 25 分の短寿命核種で、主に  $\beta^-$ 崩壊であり、SPECT には適していません。中性子放射化分析に利用される。
- D: 正 宇宙線生成核種 (cosmogenic nuclide) の一つで半減期約 1570 万年の長寿命核種であり、大気中のキセノン (Xe) が宇宙線と反応して生成される。
- E: 正 甲状腺はヨウ素を集積する性質があるため、ベータ線による局所的な放射線治療として、甲状腺機能亢進症や甲状腺癌の治療に用いられる。

問 17 ラドン(Rn)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 Rn の溶解度は、トルエンに比べて水の方が大きい。
- B  $^{222}\text{Rn}$  の子孫核種は降雨時に地表面に降下する。
- C 水に溶けている Rn は煮沸により除去できる。
- D 室内の Rn 濃度は換気が止まると上昇する。
- 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〕

- A: 誤 ラドン (Rn) は疎水性の希ガスであり、有機溶媒であるトルエンの方が水よりも溶解度が高い
- B: 正  $^{222}\text{Rn}$  が崩壊して固体の子孫核種 (ポロニウム-218、鉛-214、ビスマス-214 など) を生成され、エアロゾル粒子として大気中に存在し、降雨時に地表面に降下する
- C: 正 煮沸は水中の溶存ガスを減少させる一般的な方法であり、ラドン除去にも有効
- D: 正 ラドンは土壌や建材から室内に浸入し、換気が不十分だと室内濃度が上昇する

問 18 次の記述のうち、正しいものの組合せはどれか。

- A 消滅放射線のエネルギーは、消滅直前の陽電子と電子の運動量を反映した広がりを持つ。
- B 陽電子消滅法は高分子材料中の空孔(ボイド)のサイズを知る手法として利用される。
- C ポジトロニウムには、陽電子と電子のスピンが平行のものと反平行のもの 2 種類がある。
- D ポジトロニウムの寿命は約 1 秒である。
- 1 ABC のみ   2 ABD のみ   3 ACD のみ   4 BCD のみ   5 ABCD すべて

〔解答〕 1

〔解説〕

- A: 正 陽電子と電子が消滅するとき、511 keV の消滅放射線 (ガンマ線) を 2 本放出する。
- B: 正 陽電子消滅法は、高分子の自由空孔サイズを調べる方法
- C: 正 スピン配置により、以下の 2 種類の状態がある：
- パラポジトロニウム (p-Ps)：陽電子と電子のスピンが反平行。
  - オルソポジトロニウム (o-Ps)：陽電子と電子のスピンが平行。

D：誤 ポジトロニウムの寿命は非常に短い：

- パラポジトロニウム (p-Ps)：約 125 ピコ秒 ( $1.25 \times 10^{-10}$  秒)。
- オルソポジトロニウム (o-Ps)：約 142 ナノ秒 ( $1.42 \times 10^{-7}$  秒)。

問 19 以下の実験操作で、放射性気体が発生するものの正しい組合せは、次のうちどれか。

- A 金属銅に  $^{35}\text{S}$  で標識した濃硫酸を加えて加熱した。
- B  $^{32}\text{P}$  で標識したリン酸カルシウムに塩酸を加えた。
- C  $^{22}\text{Na}$  で標識した塩化ナトリウム水溶液を硫酸酸性にした。
- D 熱中性子照射した硝酸ウラニルを希硝酸に溶かした。

- 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  $^{35}\text{S}$  で標識した濃硫酸を加熱すると、二酸化硫黄 ( $\text{SO}_2$ ) などの揮発性硫黄化合物が発生。
- B：誤  $^{32}\text{P}$  で標識されたリン酸カルシウム ( $\text{Ca}_3(\text{PO}_4)_2$ ) に塩酸を加えると、主にリン酸 ( $\text{H}_3\text{PO}_4$ ) が生成するが、これにより揮発性の放射性気体が生成されることはない。
- C：誤 塩化ナトリウム ( $\text{NaCl}$ ) 水溶液を酸性にしても、特に反応は起こらない。
- D：正 直後の反応に焦点を当てるなら、「硝酸ウラニルを希硝酸に溶かすだけでは放射性気体は発生しない」。崩壊に伴うラドン気体の生成を考えるなら、「熱中性子照射した硝酸ウラニルは、時間が経過するにつれてラドン気体を発生させる可能性がある」。

問 20 空気中の  $^3\text{H}$  と  $^{14}\text{C}$  の濃度をモニタリングする際の捕集方法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 水蒸気状トリチウムは冷却して捕集する。
- B 水蒸気状トリチウムはシリカゲル乾燥剤で捕集する。
- C 炭酸ガスは酸性溶液で捕集する。
- D  $^3\text{H}$  と  $^{14}\text{C}$  の化合物が混在している場合は、完全燃焼したのちに捕集する。

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

〔解答〕 2

〔解説〕

- A：正 水蒸気状のトリチウム (HTO) は、空気を冷却して水分を凝縮させることで捕集出来る。
- B：正 シリカゲルは水蒸気を吸着する乾燥剤であり、水蒸気状のトリチウムを含む水分を捕集出来る。
- C：誤 炭酸ガス ( $\text{CO}_2$ ) はアルカリ性溶液で捕集する。
- D：正  $^3\text{H}$  (トリチウム) と  $^{14}\text{C}$  (炭素-14) の化合物が混在している場合、これらを完全燃焼させた後に捕集する方法は、両方の放射性物質を効率的に処理・分析するために一般的に使用さ

れる。

問 21 それぞれ担体を含む  $^{47}\text{Ca}$ 、 $^{59}\text{Fe}$ 、 $^{67}\text{Cu}$  および  $^{110\text{m}}\text{Ag}$  の混合溶液を(1)~(3)の手順で化学分離を行った。

- (1)  $2\text{mol} \cdot \text{L}^{-1}$  塩酸を十分に加え、生じた沈殿 A をろ過した。
- (2) (1)のろ液に硫化水素を十分に吹き込み、生じた沈殿 B をろ過した。
- (3) (2)のろ液を煮沸後、一旦硝酸酸性にしたのち、 $6\text{mol} \cdot \text{L}^{-1}$  のアンモニア水溶液を十分に加えて沈殿 C を得た。

沈殿 A、B、C に含まれる核種の組合せとして正しいものは、次のうちどれか。

	沈殿 A	沈殿 B	沈殿 C
1	$^{59}\text{Fe}$	$^{110\text{m}}\text{Ag}$	$^{67}\text{Cu}$
2	$^{110\text{m}}\text{Ag}$	$^{59}\text{Fe}$	$^{47}\text{Ca}$
3	$^{67}\text{Cu}$	$^{110\text{m}}\text{Ag}$	$^{59}\text{Fe}$
4	$^{59}\text{Fe}$	$^{47}\text{Ca}$	$^{110\text{m}}\text{Ag}$
5	$^{110\text{m}}\text{Ag}$	$^{67}\text{Cu}$	$^{59}\text{Fe}$

〔解答〕 5

〔解説〕

- (1) ハロゲン化物沈殿。  $\text{Ag}^+$ 、 $\text{Hg}$ 、 $\text{Pb}^{2+}$  は  $\text{Cl}^-$  で沈殿しやすいものの代表である。
  - (2)  $\text{Cu}^{2+}$ 、 $\text{Cd}^+$ 、 $\text{Hg}^{2+}$ 、 $\text{Pb}^{2+}$  は酸性下で  $\text{H}_2\text{S}$  を加えると硫化物沈殿を生じる。
  - (3) アンモニア水で塩基性とする、 $\text{Al}^{3+}$ 、 $\text{Fe}^{3+}$ 、 $\text{Cr}^{3+}$  は水酸化物沈殿を形成する。ただし、過剰なアンモニア水の添加により強塩基の場合、錯体を形成し溶解する。
- よって、選択肢よりそれぞれの沈殿に含まれる核種は、沈殿 A :  $^{110\text{m}}\text{Ag}$ 、沈殿 B :  $^{67}\text{Cu}$ 、沈殿 C :  $^{59}\text{Fe}$  となる。

注：問題文の「担体」は「担体」の誤字と考えられる。

問 22 水溶液における放射性同位体の化学分離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 共沈分離において目的の放射性同位体を溶液に留めるために加える担体をスカベンジャーという。
- B 放射性同位体の担体として、目的の放射性同位体とは異なる元素を用いることもある。
- C 同位体担体を加える場合は、目的の放射性同位体と化学形を一致させる。
- D 水酸化鉄(III)の沈殿と共に目的としない放射性同位体を共沈させて除去する場合、水酸化鉄(III)を保持担体という。

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

〔解答〕 3

〔解説〕

A: 誤 保持担体に関する記述である。

B: 正

C: 正

D: 誤 目的としない不要な放射性核種を沈殿物として除去する時に加える担体をスカベンジャーという。Fe(OH)<sub>3</sub>の沈殿より不純物の放射性核種を除去する場合、Fe<sup>3+</sup>がスカベンジャーとなる。永続平衡にある<sup>90</sup>Srと<sup>90</sup>Yを共沈法により分離し<sup>90</sup>Yを沈殿物として得る場合を考える。Fe<sup>3+</sup>やY<sup>3+</sup>を含む溶液は、アルカリ性にする事でFe(OH)<sub>3</sub>、Y(OH)<sub>3</sub>の沈殿物を生じる。<sup>90</sup>Sr-<sup>90</sup>Yが共存する溶液に、非放射性のFe<sup>3+</sup>を含む水酸化ナトリウム水溶液を加えると、<sup>90</sup>Y<sup>3+</sup>はFe(OH)<sub>3</sub>沈殿に共沈し<sup>90</sup>Srから分離することができる。このとき、<sup>90</sup>Srを溶液に残しておくために非放射性のSr<sup>2+</sup>を担体として添加しておく。よってSr<sup>2+</sup>が保持担体となる。保持担体を加えないと、<sup>90</sup>SrはラジオコロイドとなりY(OH)<sub>3</sub>と一緒に沈殿しやすくなり分離できない。

問23 [64Cu]CuSO<sub>4</sub>と[65Zn]ZnSO<sub>4</sub>の混合水溶液に、よく磨いた鉄板、銅板、亜鉛板、銀板を入れたときの反応として正しいものの組合せはどれか。

A 鉄板に<sup>64</sup>Cuが析出する。

B 銅板に<sup>65</sup>Znが析出する。

C 亜鉛板に<sup>64</sup>Cuが析出する。

D 銀板に<sup>65</sup>Znが析出する。

1 AとC

2 AとD

3 BとC

4 BとD

5 CとD

〔解答〕1

〔解説〕金属が電子を放出しイオンとなって溶液中に溶けようとする性質、陽イオンへのなりやすさをイオン化傾向という。イオン化傾向の順序は次の通りである。



溶けやすい

析出しやすい

ある金属イオンの水溶液に、その金属イオンよりイオン化傾向が大きい元素の金属を入れると、溶液中に溶けていた金属が金属板に析出し、イオン化傾向が大きい金属が陽イオンとなって溶解する。よって、各金属板挿入後析出する金属は以下の通り。

A 鉄板：表面に<sup>64</sup>Cuが析出。Znはそのまま水溶液中に残る。(イオン化傾向 Fe > Cu)

C 亜鉛板：表面に<sup>64</sup>Cuが析出。(イオン化傾向 Zn > Cu)

問24 <sup>3</sup>Hがカルボキシ基に結合した安息香酸①と、ベンゼン環の水素を1個<sup>3</sup>Hに置換した安息香酸②の特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。

なお、安息香酸の化学式はC<sub>6</sub>H<sub>5</sub>(COOH)である。

A ①と②の分子量は同じである。

(令和6年度) 第1種化学

B 弱アルカリ性水溶液では、①の $^3\text{H}$ と水分子のHとは交換しない。

C ②は水からの再結晶を繰り返すたびに比放射能が低下する。

D ②は安息香酸のトレーサー実験に用いられる。

- 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

B：誤 カルボキシル基 ( $-\text{COOH}$ ) は、pHが高い溶液に対して  $\text{COOH} \rightarrow \text{COO}^- + \text{H}^+$  と解離する。

C：誤  $^3\text{H}$  や  $^{14}\text{C}$  などの標識化合物では、自己分解によりラジカルや励起分子を生成することがあるため、標識化合物の保管に際して遊離基捕捉剤を加える。水溶液の場合、ベンジルアルコールなどを数%加えてベンゼン溶液として保管することで自己分解が低減できる。

D：正

問25 放射性試薬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  $^{60}\text{CoCl}_2$ 水溶液は、塩基性にして保存する。

B 分解し易い標識化合物は、使用前に精製して実験に用いる。

C  $^3\text{H}$  標識化合物の水溶液は  $2^\circ\text{C}$  で保存する。

D  $[\text{U}-^3\text{H}]$ トリプトファンにおいて、Uはトリプトファン分子中の水素がほぼ均一に $^3\text{H}$ 標識されていることを意味する。

- 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〕

A：誤

B：正 標識化合物の分解抑制には担体を添加し比放射能を低くすることも有効である。

C：正 標識化合物は一般には低温保管がよい。

ただし  $^3\text{H}$  標識化合物は凍結すると低エネルギー電子線によりラジカルの反応性が高くなり、また分解が促進されるため、 $2^\circ\text{C}$ 程度の保管が適温である。

D：正 ・均一標識化合物 (U)      表記例)  $[\text{U}-^{14}\text{C}]$  ロイシン

すべての位置にほぼ均一に標識されている。

・特定標識化合物 (S)      表記例)  $[6-^3\text{H}]$  ウラシル

特定の位置に95%以上標識されている。

・名目標識化合物 (N)      表記例)  $[9,10-^3\text{H}(\text{N})]$  オレイン酸

特定の位置の大部分が標識されているが、その他の位置の原子も標識されており、その分布比が不明な化合物。

・全標識化合物 (G)      表記例)  $[^3\text{H}(\text{G})]$  ウリジン

すべての位置に標識されているが、その分布は均一ではなく様々な位置にランダムに標識されている。

問 26 試料中の成分 X を定量するために、60 mg の標識した成分 X(比放射能  $150 \text{ Bq} \cdot \text{mg}^{-1}$ )を試料に添加し、よく混合して均一にした。その後、成分 X の一部を純粋に分離したところ、比放射能は  $40 \text{ Bq} \cdot \text{mg}^{-1}$ であった。試料中の成分 X の量[mg]として最も近い値は、次のうちどれか。

- 1 80            2 110            3 140            4 170            5 200

〔解答〕 4

〔解説〕 同位体希釈法の直接希釈法で求める。定量したい成分 X の重量を  $x \text{ (mg)}$ とし、問題文中の情報を表にまとめると以下の通りになる。

	重量(mg)	比放射能 ( $\text{Bq} \cdot \text{mg}^{-1}$ )	全放射能 (Bq)
定量したい試料	$x$	0	0
添加した標識試料	60	150	$60 \times 150 = 9000$
混合物	$x + 60$	40	$40 (x + 60)$

ここで、混合する前後の試料の全放射能が等しいことより、

$$9000 = 40 (x + 60)$$

$$x = 165 \approx 170$$

問 27 As(V)の化合物 1.0 g を中性子照射したところ、放射能  $1.0 \times 10^7 \text{ Bq}$  の  $^{76}\text{As(III)}$ の化合物 0.50 mg が得られた。 $^{76}\text{As(III)}$ 化合物の比放射能 [ $\text{Bq} \cdot \text{g}^{-1}$ ]として最も近い値は次のうちどれか。

- 1  $1.0 \times 10^7$     2  $1.0 \times 10^9$     3  $2.0 \times 10^{10}$     4  $2.0 \times 10^{11}$     5  $2.0 \times 10^{12}$

〔解答〕 3

〔解説〕 比放射能は、放射性同位元素を含有する物質の単位質量あたりの放射能の強さを表わす。

$$\begin{aligned} \text{比放射能 (Bq/g)} &= 1.0 \times 10^7 \text{ (Bq)} / 0.5 \times 10^{-3} \text{ (g)} \\ &= 2.0 \times 10^{10} \text{ (Bq/g)} \end{aligned}$$

問 28 次の放射性同位体と用いられる分析・計測装置、および利用される放射線の関係として、正しいものは、次のうちどれか。

	放射性同位体	分析・計測装置	放射線
1	$^{35}\text{S}$	レベル計	X線
2	$^{55}\text{Fe}$	メスバウアー分光装置	$\gamma$ 線
3	$^{63}\text{Ni}$	ECD ガスクロマトグラフ	$\beta$ 線
4	$^{137}\text{Cs}$	水分計	中性子線
5	$^{252}\text{Cf}$	蛍光 X線分析装置	$\alpha$ 線

〔解答〕 3

〔解説〕

- 1: 誤 レベル計には主に  $^{137}\text{Cs}$  や  $^{60}\text{Co}$  から  $\gamma$  線が用いられる。
- 2: 誤 メスbauer分光法では  $^{57}\text{Co}$  が 14.4keV の低エネルギー  $\gamma$  線源として利用される。この  $\gamma$  線の無反跳共鳴吸収によって得られたスペクトルより、化合物の電子構造や物性に関する情報を得ることが出来る。
- 3: 正 ECD ガスクロマトグラフは  $^{63}\text{Ni}$  の  $\beta$  線により弱電流をながし、電気陰性度の高いハロゲンなどが含まれる気体を高感度に検出する。
- 4: 誤 水素の原子核による速中性子の減速能が大きいことを利用し、試料に速中性子を照射し熱中性子を測定することにより水素の含有量を求めることができる。中性子源には、 $^{241}\text{Am-Be}$  や  $^{252}\text{Cf}$  が用いられる。
- 5: 誤 蛍光 X 線分析装置には  $^{55}\text{Fe}$ 、 $^{109}\text{Cd}$ 、 $^{241}\text{Am}$  からの X 線や  $\gamma$  線が用いられる。

問 29 イメージングプレート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 トリチウムには感度がない。
- B  $\alpha$  線には感度がない。
- C 時間経過とともにフェーディングが進行する。
- D 画像から放射能を定量するには、放射能既知の同種同形の試料を同時に露光すると良い。

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

〔解答〕 5

〔解説〕

- A: 誤 イメージングプレート (IP) 法によるトリチウムの表面分布測定は可能である。
- B: 誤  $\alpha$  線、電子線、中性子線の画像化にも応用可能である。 $\alpha$  線は他の種類の放射線と比べ、IPにより多くのエネルギーを付与するので、感度は高い。
- C: 正
- D: 正

問 30 放射線を照射した物質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 水和電子では、電子が数個の水分子に緩く束縛されている。
- B スパー(スプール)は放射線の進行方向に対して直角方向に形成される。
- C 金属中では 100 eV の照射あたり 15 個程度のラジカルが生成する。
- D 放射線照射によって重合反応を開始させ、高分子を生成することができる。

- 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

B: 誤 放射線が物質に入射すると、その飛程に沿って断続的にイオン化をおこし、イオン・ラジカル・励起分子などが生じる。その集合体をスプールという。よって、直角方向には形成されない。

C: 誤

D: 正

問 31 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 放射性核種の分離・精製では、イオン交換樹脂を用いた化学分離法がよく用いられる。イオン交換樹脂は、水に難溶性の基本骨格とそれに結合したイオン交換基から成る物質である。イオン交換樹脂の基本骨格には、スチレンージビニルベンゼン共重合体が一般的に用いられている。陽イオン交換樹脂には、 A をイオン交換基としてもつ強酸性イオン交換樹脂と、 B をイオン交換基としてもつ弱酸性イオン交換樹脂がある。強酸性イオン交換樹脂は、広い pH 領域で陽イオンを捕捉する。弱酸性陽イオン交換樹脂において、 B 基は、強酸性溶液では  C しないので、イオン交換性は示さない。

一般的に酸性溶液中の金属イオン  $^{22}\text{Na}^+$ 、 $^{46}\text{Ca}^{2+}$ 、 $^{26}\text{Al}^{3+}$ 、 $^{232}\text{Th}^{4+}$  の強酸性陽イオン交換樹脂への吸着強度は、 ア の順である、また、同じ価数の金属イオンの強酸性陽イオン交換樹脂への吸着強度は  D に依存する。そのため、水溶液に溶解した  $^7\text{Be}^{2+}$ 、 $^{45}\text{Ca}^{2+}$ 、 $^{90}\text{Sr}^{2+}$ 、 $^{133}\text{Ba}^{2+}$  の強酸性陽イオン交換樹脂への吸着強度は、 イ の順になる。

イオン交換クロマトグラフィーでは、細長い管にイオン交換樹脂を詰めたカラムをつくり、多種のイオンからなる試料を樹脂層の上部に吸着させる。その後、溶離液を流すことで各イオンを相互分離する。この他に、試料溶液とイオン交換樹脂とを混合し、振り混ぜることでイオン交換する  E も知られている。

<A、B の解答群>

- |  |                                       |                             |
|--|---------------------------------------|-----------------------------|
| 1 $-\text{COOH}$                       | 2 $-\text{N}(\text{CH}_3)_3\text{OH}$ | 3 $-\text{CH}_2\text{CH}_3$ |
| 4 $-\text{NH}_2(\text{CH}_3)\text{OH}$ | 5 $-\text{SO}_3\text{H}$              |                             |

<C、D の解答群>

- |         |            |             |          |
|---------|------------|-------------|----------|
| 1 マスキング | 2 還元       | 3 イオン化エネルギー | 4 脱水縮合   |
| 5 電子親和力 | 6 水和イオン半径  | 7 酸解離       | 8 イオン化傾向 |
| 9 酸化    | 10 格子エネルギー |             |          |

<E の解答群>

- |           |        |            |
|-----------|--------|------------|
| 1 フォルハルト法 | 2 バッチ法 | 3 ウイルツバッハ法 |
| 4 ファヤンス法  | 5 モール法 |            |

<アの解答群>

- |                      |   |                        |   |                       |   |                       |
|----------------------|---|------------------------|---|-----------------------|---|-----------------------|
| 1 $^{22}\text{Na}^+$ | > | $^{232}\text{Th}^{4+}$ | > | $^{26}\text{Al}^{3+}$ | > | $^{45}\text{Ca}^{2+}$ |
|----------------------|---|------------------------|---|-----------------------|---|-----------------------|

2	$^{22}\text{Na}^+$	>	$^{45}\text{Ca}^{2+}$	>	$^{26}\text{Al}^{3+}$	>	$^{232}\text{Th}^{4+}$
3	$^{26}\text{Al}^{3+}$	>	$^{45}\text{Ca}^{2+}$	>	$^{22}\text{Na}^+$	>	$^{232}\text{Th}^{4+}$
4	$^{45}\text{Ca}^{2+}$	>	$^{22}\text{Na}^+$	>	$^{26}\text{Al}^{3+}$	>	$^{232}\text{Th}^{4+}$
5	$^{232}\text{Th}^{4+}$	>	$^{26}\text{Al}^{3+}$	>	$^{45}\text{Ca}^{2+}$	>	$^{22}\text{Na}^+$
6	$^{45}\text{Ca}^{2+}$	>	$^{232}\text{Th}^{4+}$	>	$^{26}\text{Al}^{3+}$	>	$^{22}\text{Na}^+$
7	$^{232}\text{Th}^{4+}$	>	$^{45}\text{Ca}^{2+}$	>	$^{26}\text{Al}^{3+}$	>	$^{22}\text{Na}^+$

&lt;イの解答群&gt;

1	$^{90}\text{Sr}^{2+}$	>	$^{133}\text{Ba}^{2+}$	>	$^{45}\text{Ca}^{2+}$	>	$^7\text{Be}^{2+}$
2	$^{90}\text{Sr}^{2+}$	>	$^{133}\text{Ba}^{2+}$	>	$^7\text{Be}^{2+}$	>	$^{45}\text{Ca}^{2+}$
3	$^7\text{Be}^{2+}$	>	$^{45}\text{Ca}^{2+}$	>	$^{90}\text{Sr}^{2+}$	>	$^{133}\text{Ba}^{2+}$
4	$^7\text{Be}^{2+}$	>	$^{90}\text{Sr}^{2+}$	>	$^{45}\text{Ca}^{2+}$	>	$^{133}\text{Ba}^{2+}$
5	$^{133}\text{Ba}^{2+}$	>	$^{90}\text{Sr}^{2+}$	>	$^{45}\text{Ca}^{2+}$	>	$^7\text{Be}^{2+}$
6	$^{45}\text{Ca}^{2+}$	>	$^{133}\text{Ba}^{2+}$	>	$^7\text{Be}^{2+}$	>	$^{90}\text{Sr}^{2+}$
7	$^{133}\text{Ba}^{2+}$	>	$^7\text{Be}^{2+}$	>	$^{90}\text{Sr}^{2+}$	>	$^{45}\text{Ca}^{2+}$

〔解答〕 I A-5 B-1 C-7 D-6 E-2 ア-5 イ-5

〔解説〕

A、B、C：陽イオン交換樹脂には、強酸性陽イオン交換樹脂と弱酸性陽イオン交換樹脂がある。強酸性陽イオン交換樹脂は、スルホン基 ( $-\text{SO}_3\text{H}$ ) を有し、水溶液中でその解離により強酸性を示し ( $-\text{SO}_3\text{H} \rightleftharpoons \text{SO}_3^- + \text{H}^+$ )、溶液の pH にそれほど影響を受けない陽イオン交換能を持つ。弱酸性陽イオン交換樹脂は、カルボシキル基 ( $-\text{COOH}$ ) またはフェノール性水酸基を持ち、pH の高い場合のみ解離するため ( $-\text{COOH} \rightleftharpoons \text{COO}^- + \text{H}^+$ )、pH の高い溶液中でのみ陽イオン交換能を示す。

D、ア、イ：強酸性陽イオン交換樹脂の陽イオン交換捕捉の強さは、(ア) 原子価の大きいものほど大きく、(イ) 同じ原子価のイオンでは水和イオン半径の小さいものほど大きい。

E：イオン交換クロマトグラフィーには、樹脂柱に溶液を流下させるカラム法と、溶液と樹脂を振り混ぜるバッチ法があり、カラム法が一般的である。

II 溶媒抽出も放射性核種を分離する代表的な分離法の一つである。溶媒抽出では、多くの場合、ある核種を含む水溶液と、この水溶液に溶解しない有機溶媒とを振り混ぜて平衡にしたとき、ある核種を含む物質を水溶液から有機溶媒へ移動することで分離が行われる。

溶媒抽出平衡に達したときの注目する核種の水相中の全濃度を  $C_{\text{aq}}$ 、有機相中の全濃度を  $C_{\text{org}}$  とすると、分配比  $D$  は  $\boxed{\text{F}}$  で表される。注目する核種がどの程度(何パーセント)抽出されたかを表す抽出率  $E(\%)$  は、水相の体積を  $V_{\text{aq}}$ 、有機相の体積を  $V_{\text{org}}$  とすると、次式で表わされる。

$$E(\%) = \boxed{\text{G}} \times 100$$

$E(\%)$  は分配比  $D$  を用いて表すと、 $\boxed{\text{H}} \times 100$  と表される。

注目する核種(X)の分配比  $D=8$ 、使用する有機相及び水相がともに 100 mL の場合、 $E(\%)$  は

I になる。

一方、使用する水相の量を 100 mL、有機相の量を 50 mL にすると  $E(\%)$  は J になる (抽出 1)。さらに抽出 1 の水相のみを取り出し、新たに 50 mL の有機溶媒を使って抽出した (抽出 2)。抽出 1 と抽出 2 の 2 回の溶媒抽出をすることで、抽出 1 の操作を行う前に水相に存在した X のうち、K % が抽出されたこととなる。

担体を含む  $^{60}\text{Co}^{2+}$ 、 $^{63}\text{Ni}^{2+}$ 、及び  $^{65}\text{Zn}^{2+}$  を塩酸溶液から溶媒抽出する。有機相には、5% のトリイソオクチルアミン ( $\text{C}_8\text{H}_{17}$ ) $_3\text{N}$  を含むキシレン溶液を用いた。塩酸溶液中におけるクロリド錯体 (クロロ錯体) の形成のしやすさを考慮すると、 $1\text{ mol}\cdot\text{L}^{-1}$  の塩酸酸性溶液を用いた場合に  $D > 1$  を示す金属イオンは L である。一方、 $1\sim 12\text{ mol}\cdot\text{L}^{-1}$  の塩酸酸性溶液で  $D < 1$  を示す金属イオンは M である。

<F、G の解答群>

1 $\frac{C_{\text{org}}}{C_{\text{aq}}}$	2 $\frac{C_{\text{org}}}{C_{\text{aq}} + C_{\text{org}}}$	3 $\frac{C_{\text{aq}}}{C_{\text{org}}}$	4 $\frac{C_{\text{aq}}V_{\text{aq}}}{C_{\text{aq}}V_{\text{aq}} + C_{\text{org}}V_{\text{org}}}$
5 $\frac{C_{\text{org}}V_{\text{org}}}{C_{\text{aq}}V_{\text{aq}} + C_{\text{org}}V_{\text{org}}}$	6 $\frac{C_{\text{org}}V_{\text{org}}}{C_{\text{aq}}V_{\text{aq}}}$	7 $\frac{C_{\text{aq}}}{C_{\text{aq}} + C_{\text{org}}}$	8 $\frac{C_{\text{aq}}V_{\text{aq}}}{C_{\text{org}}V_{\text{org}}}$

<H の解答群>

1 $\frac{D-1}{D + \frac{V_{\text{org}}}{V_{\text{aq}}}}$	2 $\frac{D}{D + \frac{V_{\text{org}}}{V_{\text{aq}}}}$	3 $\frac{D}{D + \frac{V_{\text{aq}}}{V_{\text{org}}}}$	4 $\frac{D-1}{D + \frac{V_{\text{aq}}}{V_{\text{org}}}}$
--	--	--	--

<I~K の解答群>

1 12	2 20	3 24	4 40	5 78
6 80	7 82	8 86	9 89	10 94
11 96	12 99	13 100		

<L、M の解答群>

- 1  $^{60}\text{Co}^{2+}$
- 2  $^{63}\text{Ni}^{2+}$
- 3  $^{65}\text{Zn}^{2+}$
- 4  $^{65}\text{Zn}^{2+}$  と  $^{60}\text{Co}^{2+}$
- 5  $^{60}\text{Co}^{2+}$  と  $^{63}\text{Ni}^{2+}$
- 6  $^{65}\text{Zn}^{2+}$  と  $^{63}\text{Ni}^{2+}$
- 7  $^{60}\text{Co}^{2+}$ 、 $^{63}\text{Ni}^{2+}$ 、及び  $^{65}\text{Zn}^{2+}$

〔解答〕 II F-1 G-5 H-3 I-9 J-6 K-11 L-3 M-2

〔解説〕

F、G、H、I、J、K：放射性核種を含む水溶液とこの水溶液に溶解しない有機溶媒を振り混ぜた後、静置して二つの液相に分離すると、放射性核種は水相と有機相に分配される。この条件を整えて、目的核種が有機相に分配される割合を大きくして抽出分離する方法が溶媒抽出法である。

二液間の分配比  $D$  は、水相及び有機相の濃度をそれぞれ  $C_{aq}$ 、 $C_{org}$  としたとき、式(1)で定義される。

$$D = \frac{C_{org}}{C_{aq}} \quad (1)$$

目的核種の有機相への抽出率  $E$  は、水相及び有機相の体積をそれぞれ  $V_{aq}$ 、 $V_{org}$  としたとき、式(2)で表される。

$$E = \frac{C_{org}V_{org}}{C_{aq}V_{aq} + C_{org}V_{org}} \times 100(\%) \quad (2)$$

(2)式に(1)式を代入することで、抽出率  $E$  を分配比  $D$  で式(3)の通り表すことができる。

$$E = \frac{D}{D + \frac{V_{aq}}{V_{org}}} \times 100 \quad (3)$$

式(3)に  $D = 8$ 、 $V_{aq} = V_{org} = 100$  を代入すると、 $E = 88.88\cdots(\%)$  となる。

同様に、式(3)に  $D = 8$ 、 $V_{aq} = 100$ 、 $V_{org} = 50$  を代入すると、 $E = 80(\%)$  となる。

抽出前の存在量を  $X$  としたとき、1回目の溶媒抽出では、前述のとおり  $80\%$  ( $= 0.8X$ ) が有機相に取り込まれた。2回目の抽出において、残りの  $0.2X$  のうち、どれだけの量が有機相に取り込まれたかを考える。取り込まれた量を  $Y$  としたとき、

$$Y = 0.2X \times \frac{8}{8 + \frac{100}{50}} = 0.16X$$

即ち、抽出前の存在量  $X$  の  $16\%$  が取り込まれた。これと1回目の抽出量を加えると2回で合わせて  $96\%$  が抽出されたことになる。

L、M：クロロ錯体を形成する金属イオンは陰イオンとなるため、陰イオン交換樹脂を用いて分離できる。クロロ錯体形成の順位は、 $Ni^{2+} < Mn^{2+} < Co^{2+} < Cu^{2+} < Fe^{3+} < Zn^{2+}$  となる。また、陰イオン交換樹脂に吸着されたクロロ錯体を塩酸溶液で溶出する際には、クロロ錯体の形成が強いものほど、濃度は薄いものを使用しなければならない。

問 32 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 放射性同位体(RI)を得るには種々の方法がある。かつては天然に存在する RI を分離精製していたが、現在では多くの RI は人工的に製造されている。

粒子照射による原子核で生成する RI の放射能  $A$  については、以下の式が成立する。

$$A = N \times f \times \sigma \times g(t)$$

ここで  $N$  は標的核の数、 $f$  は照射粒子フルエンス率、 $\sigma$  は核反応断面積であり、 $g(t)$  は生成放射能  $A$  の照射時間  $t$  への依存性を表す項である。 $\sigma$  は面積の単位を持ち、 $f$  の次元は  A である。

RI 製造では、生成した RI は照射中も半減期にしたがって壊変していくために、生成放射能  $A$  の時間依存性  $g(t)$  は、生成する RI の壊変定数  $\lambda$  を用いて  B と表され、これを  C 係数とよぶ。

半減期 10 分の RI を製造する場合に照射時間  $t$  が 20 分であれば、 $g(t)$  は **D** となる。一方、生成 RI の半減期が照射時間に比べて非常に長い場合には、 $g(t)$  が照射時間に比例すると近似できる。たとえば半減期 2000 分の RI を製造する場合に、照射時間  $t$  が 20 分であれば、 $g(t)$  は **E** である。

<A の解答群>

- |   |   |
|---|---|
| 1 質量 <sup>-1</sup> ・長さ <sup>2</sup> ・時間 <sup>-1</sup> | 2 質量 <sup>-1</sup> ・長さ <sup>2</sup> ・時間 |
| 3 質量 <sup>-1</sup> ・長さ <sup>-2</sup>                  | 4 質量・長さ <sup>2</sup> ・時間 <sup>-1</sup>  |
| 5 長さ <sup>2</sup> ・時間 <sup>-1</sup>                   | 6 長さ <sup>-2</sup> ・時間 <sup>-1</sup>    |
| 7 質量 <sup>-1</sup> ・時間 <sup>-1</sup>                  | 8 長さ・時間 <sup>-1</sup>                   |

<B の解答群>

- |                       |                                  |                                  |                                 |                                  |
|-----------------------|----------------------------------|----------------------------------|---------------------------------|----------------------------------|
| 1 $e^{-\lambda t}$    | 2 $e^{\lambda t}$                | 3 $1 - e^{-\lambda t}$           | 4 $1 + e^{-\lambda t}$          | 5 $1 - e^{\lambda t}$            |
| 6 $1 + e^{\lambda t}$ | 7 $\frac{1}{1 - e^{-\lambda t}}$ | 8 $\frac{1}{1 + e^{-\lambda t}}$ | 9 $\frac{1}{1 - e^{\lambda t}}$ | 10 $\frac{1}{1 + e^{\lambda t}}$ |

<C の解答群>

- |      |      |      |      |
|------|------|------|------|
| 1 活量 | 2 変動 | 3 分配 | 4 減衰 |
| 5 散乱 | 6 衝突 | 7 損失 | 8 飽和 |

<D の解答群>

- |        |        |        |        |        |
|--------|--------|--------|--------|--------|
| 1 0.10 | 2 0.20 | 3 0.25 | 4 0.40 | 5 0.50 |
| 6 0.75 | 7 0.80 | 8 1.0  | 9 1.2  | 10 1.5 |
| 11 2.0 | 12 5.0 | 13 10  | 14 20  | 15 50  |

<E の解答群>

- |                        |                         |                         |                         |
|------------------------|-------------------------|-------------------------|-------------------------|
| 1 $1.0 \times 10^{-3}$ | 2 $1.4 \times 10^{-3}$  | 3 $5.0 \times 10^{-3}$  | 4 $6.9 \times 10^{-3}$  |
| 5 $1.0 \times 10^{-2}$ | 6 $1.4 \times 10^{-2}$  | 7 $5.0 \times 10^{-2}$  | 8 $6.9 \times 10^{-2}$  |
| 9 $1.0 \times 10^{-1}$ | 10 $1.4 \times 10^{-1}$ | 11 $5.0 \times 10^{-1}$ | 12 $6.9 \times 10^{-1}$ |

〔解答〕 I A-6 B-3 C-8 D-6 E-4

〔解説〕

A：照射粒子フルエンス率( $f$ )は、単位時間あたりに単位面積を通過する粒子数を表す。

B、C：生成放射能の時間依存性  $g(t)$  は、 $1 - e^{-\lambda t}$  で表され、飽和係数と呼ばれる。

D： $g(t) = 1 - e^{-\lambda t} = 1 - (1/2)^{t/T} = 1 - (1/2)^{20/10} = 0.75$   $T$ : 半減期

E：半減期が照射時間に比べて非常に長い場合 ( $T \gg t$ )、 $e^{-\lambda t} \doteq 1 - \lambda t$  なので、 $g(t) = 1 - e^{-\lambda t} = \lambda t$  と近似できる。したがって、 $g(t) = \lambda t = 0.693 \cdot t / T = 0.693 \cdot 20 / 2000 = 6.9 \times 10^{-3}$

II 多くの核反応では照射粒子のエネルギーによって核反応断面積  $\sigma$  が異なる。 $\sigma$  の照射粒子エネルギー依存性を **F** 関数とよぶ。照射粒子のエネルギーが核反応の **G** エネルギー以下では反応は起こらず、また荷電粒子照射では **H** 障壁のエネルギーよりも高い照射エネルギーであることも必要である。陽子を照射するときに、核子放出を伴い最も低いエネルギーで起こる反応のひとつは (p, n) 反応であり、例えば  ${}^{63}_{29}\text{Cu}$  が標的核の場合には **I** が生成する反応である。

標的核と照射粒子、照射エネルギーを適切に選択することで、特定の RI を効率よくかつ純度よく作ることができる。例えば $^{209}_{83}\text{Bi}$ から $^{211}_{85}\text{At}$ を作る場合には、28 MeV の照射粒子による **J** 反応が用いられる。

中性子照射による $(n, \gamma)$ 反応には **G** エネルギーが無く、中性子エネルギー( $E_n$ )が1 eV 以下の中性子照射では $\sigma$ が **K** に比例する。一般に $(n, \gamma)$ 反応では生成核の **L** である標的核が共存するため、比放射能の大きな RI の製造には向いていない。一方、中性子照射による RI 製造には核分裂反応も利用されており、ジェネレータとしてさかんに用いられる **M** の製造がその一例である。

光核反応は、10~20 **N** のエネルギーの光子に対して巨大共鳴とよばれる大きな核反応断面積をもち、 $(\gamma, n)$ 反応では原子番号が大きいほど反応断面積が大きいという特徴があり、放射化分析に利用されている。

<F の解答群>

- |      |      |      |      |
|------|------|------|------|
| 1 励起 | 2 相関 | 3 分配 | 4 階段 |
| 5 母  | 6 緩和 | 7 仕事 | 8 伝達 |

<G, H の解答群>

- |        |      |      |        |       |
|--------|------|------|--------|-------|
| 1 イオン化 | 2 位置 | 3 運動 | 4 解離   | 5 活性化 |
| 6 しきい  | 7 軌道 | 8 零点 | 9 クーロン |       |

<I の解答群>

- |                         |                          |                          |                          |
|-------------------------|--------------------------|--------------------------|--------------------------|
| 1 $^{62}_{28}\text{Ni}$ | 2 $^{63}_{28}\text{Ni}$  | 3 $^{64}_{28}\text{Ni}$  | 4 $^{62}_{29}\text{Cu}$  |
| 5 $^{63}_{29}\text{Cu}$ | 6 $^{64}_{29}\text{Cu}$  | 7 $^{62}_{30}\text{Zn}$  | 8 $^{63}_{30}\text{Zn}$  |
| 9 $^{64}_{30}\text{Zn}$ | 10 $^{62}_{31}\text{Ga}$ | 11 $^{63}_{31}\text{Ga}$ | 12 $^{64}_{31}\text{Ga}$ |

<J の解答群>

- |                      |                  |                   |             |
|----------------------|------------------|-------------------|-------------|
| 1 $(\gamma, \alpha)$ | 2 $(n, \alpha)$  | 3 $(n, p)$        | 4 $(d, p)$  |
| 5 $(p, n)$           | 6 $(p, 2n)$      | 7 $(p, \alpha)$   | 8 $(p, pn)$ |
| 9 $(\alpha, n)$      | 10 $(\alpha, p)$ | 11 $(\alpha, 2n)$ |             |

<K の解答群>

- |                             |                          |                   |                     |
|-----------------------------|--------------------------|-------------------|---------------------|
| 1 $E_n^2$                   | 2 $E_n$                  | 3 $\sqrt{E_n}$    | 4 $\sqrt[3]{E_n}$   |
| 5 $\frac{1}{\sqrt[3]{E_n}}$ | 6 $\frac{1}{\sqrt{E_n}}$ | 7 $\frac{1}{E_n}$ | 8 $\frac{1}{E_n^2}$ |

<L の解答群>

- |           |        |       |       |
|-----------|--------|-------|-------|
| 1 スカベンジャー | 2 同位体  | 3 同素体 | 4 同重体 |
| 5 同中性子体   | 6 等電子体 | 7 親核種 | 8 イオン |

<M の解答群>

- |                    |                    |                     |                     |
|--------------------|--------------------|---------------------|---------------------|
| 1 $^{18}\text{F}$  | 2 $^{45}\text{Ca}$ | 3 $^{60}\text{Co}$  | 4 $^{67}\text{Cu}$  |
| 5 $^{99}\text{Mo}$ | 6 $^{125}\text{I}$ | 7 $^{192}\text{Ir}$ | 8 $^{241}\text{Am}$ |

<N の解答群>

(令和6年度) 第1種化学

1 peV	2 neV	3 $\mu\text{eV}$	4 meV
5 eV	6 keV	7 MeV	8 GeV

[解答] II F-1 G-6 H-9 I-8 J-11 K-6 L-2 M-5 N-7

[解説]

F: 核反応断面積の照射粒子エネルギー依存性を示す関数を励起関数という。

G: 核反応が起こる照射粒子の最小エネルギーをしきいエネルギーという。

H: 荷電粒子照射による核反応を起こすためには、標的核と荷電粒子の正電荷同士のクーロン反発ポテンシャルを超えるエネルギーが必要となる。このポテンシャルをクーロン障壁という。

I: Cu (質量数 63、原子番号 29) に (p, n) 反応が起こると、質量数は変化せず、原子番号が1大きくなり、Zn (質量数 63、原子番号 30) が生成する。

J: Bi (質量数 209、原子番号 83) と At (質量数 211、原子番号 85) の質量数及び原子番号を比較すると、Atの方が質量数は2大きく、原子番号は2大きい。この差と照射する放射線と放出される放射線による質量数と原子番号の収支が同じにならない。したがって、反応後に質量数が2大きく、原子番号が2大きくなる ( $\alpha, 2n$ ) 反応が選択できる。

K: 中性子エネルギーが1eV以下の中性子照射では、核反応断面積は中性子速度 ( $v$ ) に反比例する ( $1/v$  則)。したがって、核反応断面積は中性子エネルギーの平方根に反比例する。

L: (n,  $\gamma$ ) 反応が起こると、質量数は1大きくなるが、原子番号は変化しないため、同位体が生成する。

M: ジェネレータは放射平衡にある親核種と娘核種から娘核種のみを分取する装置である。代表的な親核種と娘核種の組み合わせは、 $^{90}\text{Sr}$ - $^{90}\text{Y}$ 、 $^{99}\text{Mo}$ - $^{99\text{m}}\text{Tc}$ 、 $^{113}\text{Sn}$ - $^{113\text{m}}\text{In}$  などがある。

N: 光核反応とは、高エネルギー  $\gamma$  線によって生じる原子核反応をいう。 $\gamma$  線が原子核に当たると、ある確率で吸収され、原子核を励起する。そのエネルギーが原子核内の核子の結合エネルギーを超えると、核子は核外へ飛び出し、( $\gamma, p$ )、( $\gamma, n$ )、( $\gamma, d$ )、( $\gamma, \alpha$ )、( $\gamma, \text{fission}$ ) などの反応が起こる。核反応断面積は、 $\gamma$  線のエネルギーが10~20 MeVで最大となる。