

令和 7 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ストッ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。

・正誤票の板書事項（問 31 の I の (5) 式）は修正済みです。

※問 31 の I の (5) 式に出題ミスがあり、設問 F の解答が影響を受けています。

詳細は原子力安全技術センターの発表（[https://www.nustec.or.jp/pdf/20250926\\_ri.pdf](https://www.nustec.or.jp/pdf/20250926_ri.pdf)）にてご確認ください。

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□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1 100 kBq の  $^{133}\text{Ba}$  を含む  $0.1\text{ mol} \cdot \text{L}^{-1}$  塩化バリウム  $\text{BaCl}_2$  水溶液 100 mL に硫酸ナトリウム  $\text{Na}_2\text{SO}_4$  水溶液を加えて硫酸バリウム  $\text{BaSO}_4$  を沈殿させた。沈殿をろ過、乾燥させて得られる  $[\text{Ba}]_{\text{BaSO}_4}$  の比放射能( $\text{kBq} \cdot \text{g}^{-1}$ )として最も近い値は次のうちどれか。ただし、 $\text{BaSO}_4$  の式量を233とする。

- 1 4.3      2 23      3 43      4 230      5 430

〔解答〕 3

〔解説〕

$$\text{Ba}^{2+}: 0.1 \text{ mol/L} \times 0.100 \text{ L} = 0.010 \text{ mol}$$

$\text{BaSO}_4$  は  $\text{Ba}^{2+} : \text{SO}_4^{2-} = 1:1$  なので全て沈殿した場合、モル数  $n$  及び質量  $m$  は

$$n(\text{BaSO}_4) = 0.010 \text{ mol}$$

$$m(\text{BaSO}_4) = 0.010 \text{ mol} \times 233 \text{ g/mol} = 2.33 \text{ g}$$

放射性同位体  $^{133}\text{Ba}$  の全放射能は 100 kBq なので、比放射能  $A$  としたとき、

$$A = \frac{100 \text{ kBq}}{2.33 \text{ g}} = 42.9 \text{ kBq/g}$$

問2 10 MBq の  $^{14}\text{C}$  で標識されたエタノール(0.1 mol)を酸化して、酢酸を合成した。その収率は25% であった。酢酸とエタノールの1モル当たりの放射能[ $\text{MBq} \cdot \text{mol}^{-1}$ ]をそれぞれXとYとした時、XとYの比(X/Y)として最も近い値は次のうちどれか。エタノールと酢酸の示性式はそれぞれ、 $\text{CH}_3\text{CH}_2\text{OH}$  と  $\text{CH}_3\text{COOH}$  であり、エタノールと酢酸の分子量はそれぞれ、46と60とする。

- 1 0.25      2 0.77      3 1.0      4 1.3      5 4.0

〔解答〕 3

〔解説〕 エタノール側の1モル当たりの放射能Yは、

$$Y = \frac{10 \text{ MBq}}{0.1 \text{ mol}} = 100 \text{ MBq/mol}$$

一方、酢酸側のモル数は、 $0.1 \text{ mol} \times 25\% = 0.025 \text{ mol}$

エタノールの炭素はそのまま酢酸へ移る ( $\text{CO}_2$ にはならない) ので、生成酢酸に移った放射能は

$$10 \text{ MBq} \times 25\% = 2.5 \text{ MBq}$$

よって、酢酸側の1モル当たりの放射能Xは、

$$X = \frac{2.5 \text{ MBq}}{0.025 \text{ mol}} = 100 \text{ MBq/mol}$$

比は  $X:Y = 100:100 = 1:1$

問3 10  $\mu\text{g/g}$  のウランを含む岩石が4500万年前に生成したとする時、その岩石100 gから生成し得るヘリウムの原子数として最も近い値は次のうちどれか。ただし、 $^{238}\text{U}$ の半減期は $4.5 \times 10^9$ 年とし、 $^{235}\text{U}$ や $^{232}\text{Th}$ の寄与は無視し得るものとする。

- 1  $2.2 \times 10^{15}$     2  $1.7 \times 10^{16}$     3  $1.4 \times 10^{17}$     4  $2.2 \times 10^{18}$     5  $1.7 \times 10^{19}$

〔解答〕3

〔解説〕岩石100 gに含まれるU量： $10 \mu\text{g/g} \times 100 \text{ g} = 1.0 \text{ mg}$

ウランの原子数 $N_0$ は、

$$N_0 = \frac{1.0 \times 10^{-3} \text{ g}}{238 \text{ g/mol}} \times 6.02 \times 10^{23} = 2.53 \times 10^{18}$$

経過時間 $t = 4.5 \times 10^7$ 年、半減期 $T = 4.5 \times 10^9$ 年のときの崩壊割合 $f$ は、

$$f = 1 - 2^{-\frac{t}{T}} = 1 - 2^{-0.01} = 0.00693$$

なお、 $1 - 2^{-0.01} \approx (\ln 2) \times 0.01 \approx 0.00693$ とする。よって崩壊数 $N$ は

$$N = 2.53 \times 10^{18} \times 0.00693 = 1.7 \times 10^{16}$$

$^{238}\text{U}$ から $^{206}\text{Pb}$ の壊変系列で $\alpha$ は8個 $\rightarrow$ He原子8個/壊変するので、

$$N_{\text{He}} = 8N = 1.4 \times 10^{17}$$

よって、生成ヘリウム原子数は $1.4 \times 10^{17}$

問4  $^{64}\text{Ni}(\text{p}, \text{n})$ 反応により $^{64}\text{Cu}$ （半減期12.7時間）を以下の照射条件で製造する。照射終了時の生成放射能(kBq)として最も近い値は次のうちどれか。ただし、 $^{64}\text{Ni}$ のモル質量は $64 \text{ g} \cdot \text{mol}^{-1}$ とし、照射標的の中で陽子のエネルギーは減衰しないものとする。

照射条件

- ・照射標的： $^{64}\text{Ni}$ 金属の厚さ $6.4 \text{ mg} \cdot \text{cm}^{-2}$ 、密度 $9.0 \text{ g} \cdot \text{cm}^{-3}$
- ・標的に照射される陽子：エネルギー $10 \text{ MeV}$ 、単位時間あたりの入射数 $10^{11} \text{ s}^{-1}$
- ・反応断面積：陽子 $10 \text{ MeV}$ のとき $0.7 \text{ b}$ （バーン）
- ・照射時間：12.7時間

- 1 2.3    2  $2.3 \times 10^1$     3  $1.9 \times 10^2$     4  $2.1 \times 10^3$     5  $2.3 \times 10^4$

〔解答〕4

〔解説〕照射体中の単位面積当たりのNi原子数 $N$ は、

$$m = 6.4 \times 10^{-3} \text{ g/cm}^2$$

$$N = \frac{m}{M} N_A = \frac{6.4 \times 10^{-3}}{64} \times 6.02 \times 10^{23} = 6.02 \times 10^{19} \text{ atom/cm}^2$$

陽子エネルギー $10 \text{ MeV}$ のときの反応断面積が $0.7 \text{ b}$ なので、陽子1個の反応確率 $P$ は

$$P = 0.7 \times 10^{-24} \times 6.02 \times 10^{19} \approx 4.21 \times 10^{-5}$$

よって生成速度 $R$ は、

$$R = (1 \times 10^{11}) \times (4.21 \times 10^{-5}) = 4.21 \times 10^6 \text{ s}^{-1}$$

放射能生成式：

$$A = R(1 - e^{-\lambda t})$$

ここで生成核種の崩壊定数 $\lambda$ は、半減期を $T$ としたとき、

$$\lambda = \frac{\ln 2}{T}$$

ここで、経過時間 $t = T$ なので

$$1 - e^{-\lambda t} = 1 - e^{-\ln 2} = 0.50$$

$$A = R(1 - e^{-\lambda t}) = 2.1 \times 10^6 \text{ Bq} = 2.1 \times 10^3 \text{ kBq}$$

問5 次の核反応のうち、正しいものの組合せはどれか。

A  ${}^{24}\text{Mg}(\text{d}, \alpha) {}^{22}\text{Na}$

B  ${}^{24}\text{Mg}(\alpha, \text{n}) {}^{27}\text{Al}$

C  ${}^{40}\text{Ca}(\text{n}, \alpha) {}^{36}\text{Cl}$

D  ${}^{56}\text{Fe}(\text{n}, \text{p}) {}^{56}\text{Mn}$

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 質量数 $A: 24 + 2 - 4 = 22$ 、原子番号 $Z: 12 + 1 - 2 = 11 \rightarrow {}^{22}\text{Na}$  ( $Z=11$ ) で一致である。

B：誤  $A: 24 + 4 - 1 = 27$  は正しいが、 $Z: 12 + 2 - 0 = 14$  となり、生成核は  $Z=14$  (Si) になる。

C：誤  $A: 40 + 1 - 4 = 37$  で 36 にならない。かつ、 $Z$  も  $20+0-2=18$  で Ar になる。

D：正  $A: 56 + 1 - 1 = 56$ 、 $Z: 26 + 0 - 1 = 25$  で  ${}^{56}\text{Mn}$  ( $Z=25$ ) で一致である。

問6 ある標的核種から目的核種 A、B、C を製造するための核反応として正しい組合せは次のうちどれか。

$Z+1$		A	
$Z$	B	標的核種	
$Z-1$			C

$N-1$        $N$        $N+1$

中性子数

	A	B	C
1	(p, n)	(n, 2n)	(n, $\gamma$ )
2	(d, n)	( $\gamma$ , n)	(n, p)
3	( $\alpha$ , p)	(d, n)	( $\gamma$ , p)
4	(d, n)	(n, p)	( $\alpha$ , d)
5	(p, $\gamma$ )	(p, d)	(n, $\alpha$ )

〔解答〕2

〔解説〕図の座標は中央が標的核種  $(Z, N)$ 。A は上中央  $\rightarrow (Z + 1, N)$ B は中央左  $\rightarrow (Z, N - 1)$ C は右下  $\rightarrow (Z - 1, N + 1)$ 各反応の  $(\Delta Z, \Delta N)$  :A : (d,n) : d は  $p + n$  取り込みで  $(+1, +1)$ 、n 放出で  $(0, -1) \rightarrow$  合計  $(+1, 0)$ B : ( $\gamma$ , n) :  $(0, -1)$ C : (n,p) : 取り込みで  $(0, +1)$ 、p 放出で  $(-1, 0) \rightarrow$  合計  $(-1, +1)$ 

問7 次の記述のうち、正しいものの組合せはどれか。

A 自発核分裂は、量子力学的トンネル効果で起こる。

B  $^{235}\text{U}$  は熱中性子照射により核分裂を起こす。C  $^{235}\text{U}$  の1回の核分裂によって発生するエネルギーは、化学結合1つの結合エネルギーに比べて  $10^7 \sim 10^8$  倍大きい。D  $^{238}\text{U}$  は速中性子照射により核分裂を起こす。

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

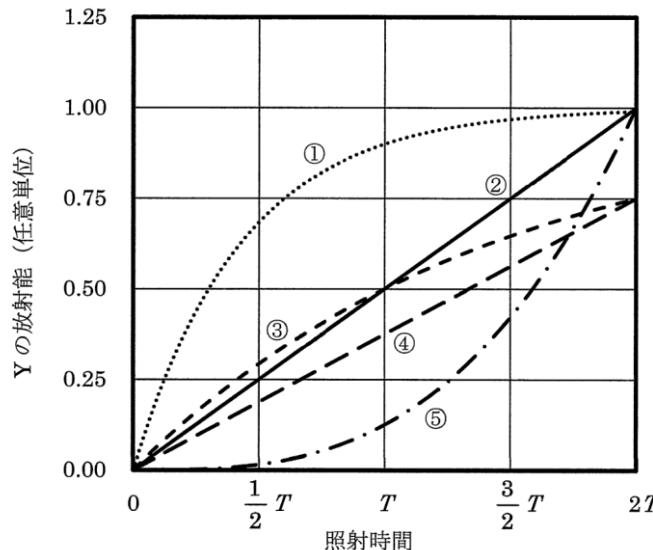
〔解答〕5

〔解説〕

A : 正 自発核分裂とは、外部からの励起なしに、原子核が核内のクーロン斥力を量子力学的トンネル効果によって乗り越え、自ら分裂する現象である。

代表的な核種 :  $^{252}\text{Cf}$ 、 $^{240}\text{Pu}$ 、 $^{256}\text{Fm}$ B : 正  $^{235}\text{U}$  は、熱中性子核分裂性核種であり、低エネルギー（約 0.025 eV）の中性子（熱中性子）を吸収すると容易に核分裂を起こす。 $^{235}\text{U}$  は原子炉燃料として最も代表的な核種である。C : 正  $^{235}\text{U}$  の1回の核分裂により放出されるエネルギーは約 200 MeV（約  $3.2 \times 10^{-11}$  J）である。一方、化学結合1本あたりの結合エネルギーは数 eV（約  $10^{-19}$ ）程度である。したがって、核分裂によるエネルギーは化学結合エネルギーのおよそ  $10^8$  倍以上大きい。D : 正  $^{238}\text{U}$  は熱中性子では分裂しないが、約 1 MeV 以上の速中性子で誘導核分裂を起こす。

問8 一定のフルエンス率で核種Xに陽子を照射し、半減期がTの核種Yを製造した。下図でYの放射能の時間変化を表すものとして正しいものは次のうちどれか。



1 ①

2 ②

3 ③

4 ④

5 ⑤

〔解答〕3

〔解説〕  $\lambda$ ：崩壊定数 (decay constant)、 $R$ ：放射能の生成率 (production rate)としたとき、放射能の時間変化は、

$$A(t) = R(1 - e^{-\lambda t}),$$

$$\lambda = \frac{\ln 2}{T}$$

半分の時間  $t = 0.5 T$  のとき：

$$A(0.5T) = R(1 - e^{-\ln 2/2}) = R(1 - 2^{-1/2}) = R(1 - 0.7071) = 0.293R$$

半減期  $T$  のとき：

$$A(T) = R(1 - e^{-\ln 2}) = 0.5R$$

$t = 1.5 T$  のとき

$$A(1.5T) = R(1 - e^{-(\ln 2) \cdot 1.5}) = R(1 - 2^{-1.5}) = R(1 - \frac{1}{2\sqrt{2}}) \approx R(1 - 0.353553) = 0.646 R$$

$t = 2 T$  のとき

$$A(2T) = R(1 - e^{-(\ln 2) \times 2}) = R(1 - 2^{-2}) = R(1 - \frac{1}{4}) = 0.75R$$

問9 次の元素群のうち、単核種元素のみからなる組合せはどれか。

A Na Al Au

B P Ti Ni

C F Mn I

- |       |       |       |       |       |
|-------|-------|-------|-------|-------|
| D     | Si    | Cl    | Sc    |       |
| 1 AとB | 2 AとC | 3 BとC | 4 BとD | 5 CとD |

## 〔解答〕2

〔解説〕 単核種元素とは、天然に存在する同位体が1種類だけの元素である。

A: 正 Na (<sup>23</sup>Na)、Al (<sup>27</sup>Al)、Au (<sup>197</sup>Au) → 全て1種 → 単核種。

B: 誤 多種類の天然同位体を持つ元素が含まれている。

C: 正 F (<sup>19</sup>F)、Mn (<sup>55</sup>Mn)、I (<sup>127</sup>I) → 全て1種 → 単核種。

D: 誤 多種類の天然同位体を持つ元素が含まれている。

問10 次の放射性核種の組合せのうち、元素として同族の関係にあるものはどれか。

- |   |                  |                   |                   |  |
|---|------------------|-------------------|-------------------|--|
| 1 | <sup>90</sup> Y  | <sup>147</sup> Pm | <sup>237</sup> Np |  |
| 2 | <sup>40</sup> K  | <sup>45</sup> Ca  | <sup>226</sup> Ra |  |
| 3 | <sup>3</sup> H   | <sup>85</sup> Kr  | <sup>134</sup> Cs |  |
| 4 | <sup>51</sup> Cr | <sup>56</sup> Mn  | <sup>59</sup> Fe  |  |
| 5 | <sup>13</sup> N  | <sup>35</sup> S   | <sup>209</sup> Bi |  |

## 〔解答〕1

〔解説〕

1: 正 Y、Pm (ランタノイド)、Np (アクチノイド) は、いずれも3族に属する元素であり同族関係にある。

2: 誤 K: 1族、Ca・Ra: 2族 → 混在

3: 誤 H: 1族、Kr: 18族、Cs: 1族 → 混在

4: 誤 Cr: 6族、Mn: 7族、Fe: 8族 → 全て異なる

5: 誤 N・Bi: 15族、S: 16族 → 混在

問11 同位体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 | 1気圧における H <sub>2</sub> O の融点は D <sub>2</sub> O の融点よりも高い。   |  |
| B | 光合成に使われる二酸化炭素の <sup>14</sup> C/ <sup>12</sup> C 比と生成する有機物の <sup>14</sup> C/ <sup>12</sup> C 比に差が生じる。 |  |
| C | 同位体効果は分子間の化学反応の速さや化学平衡にも影響を及ぼす。  |  |
| D | ウランの <sup>235</sup> U/ <sup>238</sup> U 比はガス拡散法や遠心分離法で変化させることができる。                                   |  |

- |          |         |         |         |          |
|----------|---------|---------|---------|----------|
| 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 化合物の構成原子を異なる同位体へ置換することで生じる化合物の化学的・物理的性質の変化を同位体効果という。重水素 (D) は通常の水素 (H) と比べ中性子を1つ多く持つため

約2倍の重さがあり、この質量の違いから同位体効果は大きく発現する。

1気圧における融点と沸点は次の通り。

$\text{H}_2\text{O}$  (沸点 99.97°C、融点 0.00°C)       $\text{D}_2\text{O}$  (沸点 101.4°C、融点 3.82°C)

- B: 正 植物が光合成で二酸化炭素と水から有機物（最終的にはグルコース）と酸素を作るときの化学反応に関わる酵素(RuBisCO)が同位体効果を発生させるため、結果的に  $^{14}\text{C}/^{12}\text{C}$  比に差が生じる。
- C: 正 Aの通り、化合物内の原子を異なる質量の同位体へ置き換えることで、化合物の物理的性質や反応速度の変化が生じる。
- D: 正 ガス拡散法、遠心分離法はともにウラン濃縮に用いられる方法の一種であり、 $^{235}\text{U}$  の濃縮度を高める。

問12 核医学の分野で利用されている  $^{201}\text{Tl}$  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 鉛を原子炉で中性子照射して製造される。  
B 半減期は3日程度であるため、診断用として適している。  
C 放射される $\gamma$ 線のエネルギーが低く、シンチカメラで測定するのに適している。  
D  $^{201}\text{Tl}^+$ を体内に投与すると、 $\text{K}^+$ に似た生体挙動をとる。

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

〔解答〕3

〔解説〕 $^{201}\text{Tl}$  は  $^{201}\text{Pb}$  の EC 壊変によって得られ、サイクロトロンで製造される。半減期は 3.0442d。主な光子エネルギーは 70.3 keV(73.7 %Hg-X)、135 keV(2.6 %)、167 keV(10.0 %)。カリウムと似た生体挙動を示すことにより心筋細胞に取り込まれる。その性質を利用し、心筋シンチグラフィにより心筋梗塞や狭心症の診断に用いられる。

問13 次の核種の並びのうち、 $\beta^-$  壊変核種を含むものの組合せはどれか。

- A  $^{16}\text{O}$        $^{17}\text{O}$        $^{18}\text{O}$   
B  $^{25}\text{Mg}$        $^{26}\text{Mg}$        $^{27}\text{Mg}$   
C  $^{26}\text{Al}$        $^{27}\text{Al}$        $^{28}\text{Al}$   
D  $^{30}\text{P}$        $^{31}\text{P}$        $^{32}\text{P}$

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  $^{16}\text{O}$ ・ $^{17}\text{O}$ ・ $^{18}\text{O}$  (すべて安定同位体)  
B: 正  $^{25}\text{Mg}$ ・ $^{26}\text{Mg}$  (安定同位体),  $^{27}\text{Mg}$  ( $\beta^-$  壊変)  
C: 正  $^{26}\text{Al}$  ( $\beta^+$ , EC 壊変),  $^{27}\text{Al}$  (安定同位体),  $^{28}\text{Al}$  ( $\beta^-$  壊変)  
D: 正  $^{30}\text{P}$  ( $\beta^+$ , EC 壊変),  $^{31}\text{P}$  (安定同位体),  $^{32}\text{P}$  ( $\beta^-$  壊変)

問14 天然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 食品に含まれる  $^{14}\text{C}$  は空気中の二酸化炭素に由来する。
- B ウラン鉱物では  $^{238}\text{U}/^{234}\text{U}$  (原子数比)は 1 である。
- C 人体中の  $^{40}\text{K}$  は地球生成時に由来する。
- D 宇宙線による核破碎反応で  $^{32}\text{P}$  が大気中に生成する。

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 大気中の二酸化炭素に含まれる  $^{14}\text{C}$  は光合成や食物連鎖を通して体内に取り込まれる。
- B : 誤 自然界の存在比は  $^{238}\text{U}$  99.275%,  $^{235}\text{U}$  0.72%,  $^{234}\text{U}$  0.0055% であり  $^{238}\text{U}/^{234}\text{U}$  は 1 ではない。
- C : 正  $^{40}\text{K}$  は太陽系が形成されたときから存在していた天然一次放射性核種であり、60 kg の人に は約 4000 Bq の  $^{40}\text{K}$  が含まれる。
- D : 正 高エネルギー宇宙線による大気中の Ar の破碎反応によって生成する。

問15 次の放射性核種と壊変系列の関係のうち、正しいものの組合せはどれか。

放射性核種	壊変系列
A $^{214}\text{Po}$	トリウム系列
B $^{224}\text{Ra}$	ウラン系列
C $^{208}\text{Tl}$	トリウム系列
D $^{234}\text{U}$	ウラン系列
E $^{235}\text{U}$	アクチニウム系列

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

〔解答〕 5

〔解説〕 放射性壊変系列の特徴を示す。

	質量数	親核種	$\alpha$ 壊変数	$\beta^-$ 壊変数	最終安定核種
トリウム系列	4n	$^{232}\text{Th}$	6	4	$^{208}\text{Pb}$
ウラン系列	4n+2	$^{238}\text{U}$	8	6	$^{206}\text{Pb}$
アクチニウム系列	4n+3	$^{235}\text{U}$	7	4	$^{207}\text{Pb}$
ネプツニウム系列	4n+1	$^{237}\text{Np}$	8	4	$^{205}\text{Tl}$

A : 誤  $^{214}\text{Po}$  質量数 214 (4・53+2) ウラン系列

B : 誤  $^{224}\text{Ra}$  質量数 224 (4・56) トリウム系列

問16 放射壊変に伴い発生する特性 X 線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  $^{18}\text{F}$  から O の特性 X 線は発生しない。

- B  $^{40}\text{K}$  から Ar の特性 X 線が発生する。  
 C  $^{57}\text{Co}$  から Ni の特性 X 線が発生する。  
 D  $^{99\text{m}}\text{Tc}$  から Mo の特性 X 線が発生する。  
 E  $^{241}\text{Am}$  から Np の特性 X 線が発生する。

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

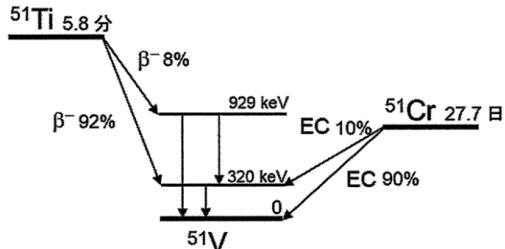
〔解答〕 4

〔解説〕

- A : 誤  $^{18}\text{F}$  は EC 壊変を起こし内殻の軌道電子が原子核に取り込まれるため、O の特性 X 線が発生する。  
 B : 正  $^{40}\text{K}$  は EC 壊変を起こし Ar の特性 X 線が発生する。  
 C : 誤  $^{57}\text{Co}$  からは Ni ではなく Fe の特性 X 線が発生する。  
 D : 誤  $^{99\text{m}}\text{Tc}$  は  $\gamma$  線放出および内部転換によって崩壊する。それに伴い Tc の特性 X 線が生じる。  
 E : 正

問 17 図に示す  $^{51}\text{Ti}$ 、 $^{51}\text{V}$ 、 $^{51}\text{Cr}$  の壊変図式についての以下の記述のうち、正しいものの組合せは次のうちどれか。

- A  $^{51}\text{Ti}$  線源は、320 keV の  $\gamma$  線を放出する。  
 B  $^{51}\text{Cr}$  線源は、320 keV の  $\gamma$  線を放出する。  
 C  $^{51}\text{Ti}$  線源は、609 keV の  $\gamma$  線を放出する。  
 D  $^{51}\text{Cr}$  線源は、609 keV の  $\gamma$  線を放出する。



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

〔解答〕 1

〔解説〕  $^{51}\text{Cr}$  線源から放出する  $\gamma$  線は 320 keV のみで 609 keV は放出されない。

問 18 トリチウム水を含む希硫酸に、次の金属板を浸した。放射性気体が発生するものの正しい組み合せはどれか。

- A 銅板  
 B スズ板  
 C 亜鉛板  
 D 鉄板  
 E 銀板

1 ABC のみ      2 ACE のみ      3 ADE のみ      4 BCD のみ      5 BDE のみ

〔解答〕 4

〔解説〕 金属板を希硫酸へ浸した場合の反応は、イオン化傾向の違いにより異なる。

- ・イオン化傾向が水素より大きい金属の場合（例：Zn, Fe, Snなど）

希硫酸中の水素イオン  $H^+$  を還元して水素ガスを発生させ、金属イオンとして溶け出す。

- ・イオン化傾向が水素より小さい金属の場合（例：Cu, Ag, Auなど）

気体の発生、金属が溶け出すことはない。

問19  $^{26}Al$  を含む  $Al(OH)_3$  の沈殿についての次の記述のうち、正しいものの組合せはどれか。

A この沈殿は  $^{26}Al^{3+}$  を含む水溶液に薄いアンモニア水を加えると生成する。

B この沈殿は過剰量の水酸化ナトリウム水溶液を加えると溶解する。

C この沈殿は過剰量の塩酸を加えると溶解する。

D この沈殿を取り出し加熱すると放射性の気体が発生する。

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

〔解答〕 1

〔解説〕

A : 正  $Al$  は強塩基を加えると錯体を形成し溶け出し、弱塩基を加えると沈殿を生成する。

B : 正  $Al(OH)_3$  は両性水酸化物であるため、過剰量の酸や強塩基を加えると錯体イオンに変化し再び溶解する。

C : 正 B の説明通り

D : 誤  $Al(OH)_3$  を加熱すると  $Al_2O_3$  (アルミナ) が生成される。

問20 水溶液中の次のイオンのうち、水酸化鉄と共に沈するものの正しい組合せはどれか。

A  $^{22}Na^+$

B  $^{32}PO_4^{3-}$

C  $^{90}Y^{3+}$

D  $^{140}La^{3+}$

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

〔解答〕 4

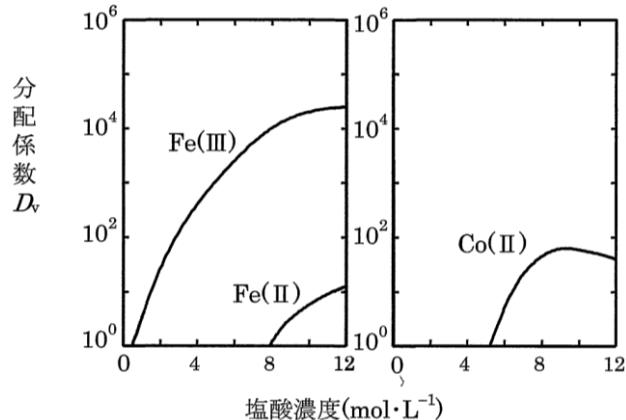
〔解説〕

A : 誤 アルカリ金属は水溶性が高いため沈殿を形成しにくい。

B : 正  $PO_4^{3-}$  や  $SO_4^{2-}$  が共存する溶液に  $Fe^{3+}$  を加えアンモニア水を添加すると、 $Fe(OH)_3$  の沈殿と共に  $PO_4^{3-}$  は沈殿するが  $SO_4^{2-}$  は沈殿しない。

C, D : 正  $Fe(OH)_3$  の沈殿はコロイド状の微細な粒子として生成され、他元素の水酸化物微粒子を巻き込んで沈殿する。また、希土類元素と高い親和性を示す。

問21 図は  $\text{Fe(III)}$ 、 $\text{Fe(II)}$ 、 $\text{Co(II)}$  の塩酸溶液からの陰イオン交換樹脂への分配係数  $D_v$  を示している。 $^{59}\text{Fe(III)}$ 、 $^{59}\text{Fe(II)}$ 、 $^{60}\text{Co(II)}$  を含む塩酸溶液について次の表に示した操作 A~D をそれぞれ行った。 $^{59}\text{Fe(III)}$ 、 $^{59}\text{Fe(II)}$ 、 $^{60}\text{Co(II)}$  の陰イオン交換樹脂との吸着挙動のうち、正しいものの組合せはどれか。



1 ABC のみ    2 AB のみ    3 AD のみ    4 CD のみ    5 BCD のみ

〔解答〕 3

〔解説〕

- A: 正 4 mol/L 塩酸溶液を陰イオン交換樹脂カラムに流すと、図より  $\text{Fe(III)}$  は移動相内から固定相へと吸着し、 $\text{Fe(II)}$  と  $\text{Co(II)}$  は固定相へは吸着しない。
- B: 誤 10 mol/L 塩酸溶液を陰イオン交換樹脂カラムに流すと、3種類すべてが移動相内から固定相へと吸着する。
- C: 誤 12 mol/L 塩酸溶液を陰イオン交換樹脂カラムに流すと、 $\text{Fe(III)}$  と  $\text{Fe(II)}$  では移動相内から固定相へと吸着し、8 mol/L 塩酸を流すと分配率が低下しているため、固定相から移動相へと溶け出し  $\text{Fe(III)}$  では一部が溶出するが、大部分は固定相へ吸着している。 $\text{Fe(II)}$  では固定相に吸着した物が移動相へとすべて溶出することになる。 $\text{Co(II)}$  は 8 mol/L 塩酸を流すと分配率はほぼ変わらないため、固定相へ吸着したままとなる。最終的に固定相へ吸着しているのは  $\text{Fe(III)}$  と  $\text{Co(II)}$  である。
- D: 正 12 mol/L 塩酸溶液を陰イオン交換樹脂カラムに流すと、3種類すべてが移動相内から固定

相へ吸着し、3 mol/L 塩酸を流すと、Fe(III)では一部が溶出し、Fe(II)とCo(II)では固定相に吸着した物が移動相へとすべて溶出することになる。最終的に固定相へ吸着しているのはFe(III)だけである。

問22 ラジオコロイド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 一般的なコロイド粒子の粒径は1 nmから数百 nm程度である。
- B 無担体の<sup>90</sup>Yはラジオコロイドを形成しやすい。
- C ラジオコロイドの性質は溶液のpHにほとんど依存しない。
- D ラジオコロイドの生成は溶液の塩濃度には依存しない。

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 一般的なコロイド粒子の粒径は1 nmから数百 nm程度と定義されている。
- B: 正 <sup>90</sup>Yは無担体でもラジオコロイドを形成しやすい。
- C: 誤 ラジオコロイドの性質はpHに大きく影響する。
- D: 誤 ラジオコロイドの生成は溶液の塩濃度が影響する。

問23 3.0 MBqの<sup>59</sup>Fe(半減期44.5日、壊変定数 $1.80 \times 10^{-7} \text{ s}^{-1}$ )を含む水溶液が30 mLある。この水溶液中の鉄の濃度が $1.0 \times 10^{-1} \text{ mol} \cdot \text{L}^{-1}$ であるとき、この水溶液中における<sup>59</sup>Fe原子数の全鉄原子数の比(<sup>59</sup>Fe/Fe)として最も近い値は次のうちどれか。

1  $9.2 \times 10^{-5}$  2  $3.1 \times 10^{-6}$  3  $9.2 \times 10^{-7}$  4  $3.1 \times 10^{-8}$  5  $9.2 \times 10^{-9}$

〔解答〕5

〔解説〕放射能:  $3.0 \text{ MBq} = 3.0 \times 10^6 \text{ Bq}$  壊変定数:  $1.80 \times 10^{-7} \text{ s}^{-1}$  から、<sup>59</sup>Feの原子数は  $N = A/\lambda$  より、

$$N = 3.0 \times 10^6 / 1.80 \times 10^{-7} \doteq 1.67 \times 10^{13} \text{ 個}$$

Feの原子数はモル濃度が $1.0 \times 10^{-1} \text{ mol/L}$ であり、水溶液が30 mL = 0.03 Lで1 mol中に含まれる原子数が $6 \times 10^{23}$ 個なので、Feの原子数 =  $6 \times 10^{23} \times 1.0 \times 10^{-1} \times 0.03 = 1.8 \times 10^{21}$ 個

$$\text{<sup>59</sup>Fe/Fe} = 1.67 \times 10^{13} / 1.8 \times 10^{21} \doteq 9 \times 10^{-9}$$

問24 次の記述のうち、正しいものの組合せはどれか。

- A 特定標識化合物とは、特定の位置の原子だけが放射性同位体で標識された化合物である。
- B 名目標識化合物とは、特定の位置の大部分の原子が放射性同位体で標識されているが、その他の位置の原子も標識されており、その分布比が明確でない化合物である。
- C 均一標識化合物とは、すべての位置の原子が均一に放射性同位体で標識された化合物である。
- D 全般標識化合物とは、すべての位置の原子が全般的に放射性同位体で標識されているが、分布

は均一ではなく、その分布比が明確でない化合物である。

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

〔解答〕 5

〔解説〕

A、B、C、D：正 問題文に記載のとおり。

問25 ホットアトム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 ヨウ化エチルの中性子照射で生成した  $^{128}\text{I}$  は水に抽出される。  
B クロム(VI)酸カリウムに中性子を照射すると3価の  $^{51}\text{Cr}$  も生成する。  
C  $^3\text{HBr}$  への紫外線照射でも数 MeV 程度のエネルギーを持つ  $^3\text{H}$  原子が生成する。  
D  $^6\text{Li}$  と有機物を混合して中性子照射することで有機物に  $^3\text{H}$  を標識できる。

- 1 ABDのみ 2 ABのみ 3 ACのみ 4 CDのみ 5 BCDのみ

〔解答〕 1

〔解説〕

- A：正 ヨウ化エチル ( $\text{C}_2\text{H}_5\text{I}$ ) に中性子を照射すると、 $^{127}\text{I}(\text{n}, \gamma) ^{128}\text{I}$  になり、 $\gamma$  線の反跳により化学結合が切断されるため、水で抽出できる。  
B：正 中性子照射によって  $^{50}\text{Cr}(\text{n}, \gamma) ^{51}\text{Cr}$  反応により生成した  $^{51}\text{Cr}$  は反跳して結晶から外れ、 $\text{K}_2\text{CrO}_4$  中では六価クロム  $\text{Cr}(\text{VI})$  として存在しているが、結晶から外れたものは  $\text{Cr}(\text{III})$  の陽イオンとして存在する。  
C：誤 紫外線では核反応が起こらないため、ホットアトムは生成されない。  
D：正  $^6\text{Li}$  と有機物を混合して中性子照射すると  $^6\text{Li}(\text{n}, \alpha) ^3\text{H}$  反応により有機物が  $^3\text{H}$  で標識される。

問26 次の放射性同位体とその性質を利用した計測装置、および使用する放射線の関係のうち、正しいものの組合せはどれか。

- | 放射性同位体              | 計測装置       | 放射線        |
|---------------------|------------|------------|
| A $^{60}\text{Co}$  | レベル計       | $\gamma$ 線 |
| B $^{63}\text{Ni}$  | 硫黄計        | $\beta$ 線  |
| C $^{137}\text{Cs}$ | 透過型厚さ計     | $\gamma$ 線 |
| D $^{241}\text{Am}$ | 蛍光 X 線分析装置 | $\alpha$ 線 |
- 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 レベル計では  $^{60}\text{Co}$  などの  $\gamma$  線が使用される。

- B: 誤 硫黄計には低エネルギーの  $\gamma$  線や X 線が使用され、硫黄の濃度が高いほどエネルギーが吸収される性質を利用している。
- C: 正 透過型の厚さ計で使用されるのは  $\gamma$  線で  $^{137}\text{Cs}$  などが使われている。
- D: 誤 蛍光 X 線解析装置は  $^{241}\text{Am}$  線源を使用するものがあるが、利用する放射線は  $^{241}\text{Am}$  線源から出る X 線を利用している。

問 27 放射線の利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。

- A 電子線照射が滅菌処理に利用されている。
- B  $^{60}\text{Co}$  による  $\gamma$  線が悪性腫瘍の治療に利用されている。
- C  $^{192}\text{Ir}$  による  $\beta$  線が内用療法に利用されている。
- D イオンビーム照射が植物の突然変異の誘発に利用されている。

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

〔解答〕 2

〔解説〕

- A: 正 医療器具等の滅菌処理に電子線照射や  $\gamma$  線照射が使用されている。
- B: 正  $^{60}\text{Co}$  による  $\gamma$  線は悪性腫瘍の治療に利用されている。
- C: 誤  $^{192}\text{Ir}$  による  $\gamma$  線が密封小線源治療として利用されている。
- D: 正 イオンビーム照射は植物の突然変異の誘発に利用され新品種の開発を行っている。

問 28 化学線量計とその測定量の関係として、正しいものの組合せは次のうちどれか。

- | 線量計        | 測定量         |
|------------|-------------|
| A フリッケ線量計  | 吸光度         |
| B PMMA 線量計 | 電気伝導率       |
| C アラニン線量計  | 電子スピン共鳴信号強度 |
| D セリウム線量計  | pH          |

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

〔解答〕 2

〔解説〕

- A: 正  $\text{Fe}^{2+}$  が放射線で酸化されて生成する  $\text{Fe}^{3+}$  の吸光度を測定している。
- B: 誤 放射線による高分子 (PMMA) の吸光度を測定している。
- C: 正 放射線で生成したフリーラジカルに生じた不対電子は、電子スピン共鳴 (ESR) によって測定される。
- D: 誤  $\text{Ce}^{4+}$  が放射線で還元されて生成する  $\text{Ce}^{3+}$  の吸光度を測定している。

問29 次の放射線化学に関する記述のうち、正しいものの組合せはどれか。

- A LETが大きいほどスパー（スプール）の間隔は大きくなる。
- B スパー（スプール）中にはイオンや励起分子が含まれる。
- C 水和電子は酸化力を示す。
- D ラジカルは不対電子を持つ。

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 LETが大きいほど単位長さ当たりに与えるエネルギーが大きいため、スパー（スプール）の間隔は小さくなる。
- B:正 スパー（スプール）中にはイオンや励起分子、水和電子、ラジカルが含まれる。
- C:誤 水和電子は強い還元剤である。
- D:正 ラジカルは不対電子を持つ原子や分子のことをいう。

問30 放射線と高分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 高分子鎖に放射線を照射したときにおこる架橋反応生成物と分解反応生成物の生成比は、温度によらず一定である。
- B PTFE（ポリテトラフルオロエチレン）は化学的に安定であり、放射線照射により強度などの力学的特性は変わらない。
- C 高分子基材に発生させたラジカルを開始点として別の高分子鎖を結合させる方法をグラフト共重合という。
- D 放射線重合は触媒が不要であり、常温・常圧の条件で行うことができる。

1 AとB 2 AとC 3 BとC 4 BとD 5 CとD

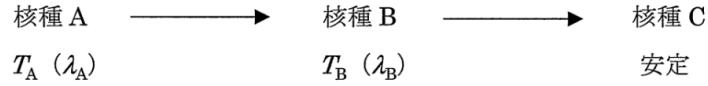
〔解答〕5

〔解説〕

- A:誤 架橋反応や分解反応の生成比は照射温度に強く依存する。
- B:誤 PTFEは耐放射線性が低く、照射で分解（鎖切断）が起こり易いため引張強度や伸びが低下する。
- C:正 放射線によって高分子基材にラジカルを生じさせモノマーを接ぎ木するように別の種類の高分子化合物を結合させることをグラフト共重合という。
- D:正 放射線は触媒なしでラジカルを直接生成できる。

問31 次の放射平衡に関する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、解答群の選択肢は必要に応じて2回以上使ってもよい。

I 放射性核種（半減期  $T_A$ 、壊変定数  $\lambda_A$ ）が壊変して放射性核種Bを生成し、さらにBが半減期  $T_B$ （壊変定数  $\lambda_B$ ）で壊変して安定核種Cとなるとき、



核種A、Bの原子数を  $N_A$ 、 $N_B$  とすると、核種A、Bの壊変定数  $\lambda_A$ 、 $\lambda_B$  を用いて次の(1)、(2)式が成り立つ。

$$\frac{dN_A}{dt} = \boxed{A} \quad \dots (1)$$

$$\frac{dN_B}{dt} = \boxed{B} \quad \dots (2)$$

最初の時刻 ( $t=0$ )における核種A、Bの原子数をそれぞれ  $N_A^0$ 、 $N_B^0$  とすると、時間  $t$  経過後の各原子数は、

$$N_A = N_A^0 \cdot e^{-\lambda_A t} \quad \dots (3)$$

$$N_B = N_A^0 \cdot \boxed{C} \cdot (e^{-\lambda_A t} - e^{-\lambda_B t}) + N_B^0 \cdot \boxed{D} \quad \dots (4)$$

であらわされる。(4)式の第2項は  $t=0$  で存在する核種Bの減衰を示すので、最初に核種Aのみが存在して核種Bが生成していない場合は、この項は無視できる。

$t=0$  で核種Bが存在していない場合、核種Aと核種Bの放射能  $A_A$ 、 $A_B$  は、 $\lambda_A N_A^0 = A_A^0$  とすれば、

$$A_A = A_A^0 \cdot e^{-\lambda_A t} \quad \dots (5)$$

$$A_B = A_A^0 \cdot \boxed{E} \cdot (e^{-\lambda_A t} - e^{-\lambda_B t}) \quad \dots (6)$$

で示されるので、核種Bと核種Aの放射能の比  $\frac{A_B}{A_A}$  は

$$\frac{A_B}{A_A} = \boxed{F} \cdot (1 - e^{-\lambda_A t - \lambda_B t}) \quad \dots (7)$$

となる。

核種Aの半減期  $T_A$  が核種Bの半減期  $T_B$  に対して長く、十分に時間が経過した後の核種Bの原子数は、

$$N_B = \boxed{G} \cdot N_A \quad \dots (8)$$

となる。核種Aの原子数  $N_A$  に対する核種Bの原子数  $N_B$  の比  $\frac{N_B}{N_A}$  は、一定の値を示すこととなり、

核種 A と核種 B の放射能の比  $\frac{A_B}{A_A}$  は、

$$\frac{A_B}{A_A} = 1 + \boxed{H} \quad \dots \quad (9)$$

となる。このような関係が成り立つ放射平衡状態を過渡平衡という。過渡平衡において、核種 B の放射能  $A_B$  が最大になるまでの時間  $t_{\max}$  は、(6) 式で  $\frac{dA_B}{dt} = 0$  から求められる。時間  $t_{\max}$  は、壊変定数  $\lambda_A$ 、 $\lambda_B$  を用いてあらわすと

$$t_{\max} = \boxed{I} \cdot \ln \frac{\lambda_B}{\lambda_A} \quad \dots \quad (10)$$

となり、半減期  $T_A$ 、 $T_B$  を用いると

$$t_{\max} = \boxed{J} \cdot \ln \frac{T_A}{T_B} \quad \dots \quad (11)$$

となる。

<A、B の解答群>

1	$-\lambda_A N_A$	2	$\lambda_A N_A$	3	$-\lambda_B N_A$	4	$\lambda_B N_A$
5	$-\frac{N_A}{\lambda_A}$	6	$\frac{N_A}{\lambda_A}$	7	$-(\lambda_A + \lambda_B) N_A$	8	$-\lambda_A N_A - \lambda_B N_B$
9	$-\lambda_A N_A + \lambda_B N_B$	10	$\lambda_A N_A - \lambda_B N_B$	11	$\lambda_A N_A + \lambda_B N_B$	12	$-\frac{N_A}{\lambda_A} + \frac{N_B}{\lambda_B}$
13	$\frac{N_A}{\lambda_A} - \frac{N_B}{\lambda_B}$	14	$-\frac{N_A}{\lambda_A} - \frac{N_B}{\lambda_B}$				

<C、E、F の解答群>

1	$\frac{\lambda_A}{\lambda_A + \lambda_B}$	2	$\frac{\lambda_B}{\lambda_A + \lambda_B}$	3	$\frac{\lambda_A}{\lambda_A - \lambda_B}$	4	$\frac{\lambda_B}{\lambda_A - \lambda_B}$	5	$\frac{\lambda_A \lambda_B}{\lambda_A + \lambda_B}$
6	$\frac{\lambda_A \lambda_B}{\lambda_A - \lambda_B}$	7	$\frac{\lambda_A}{\lambda_B - \lambda_A}$	8	$\frac{\lambda_B}{\lambda_B - \lambda_A}$	9	$\frac{1}{\lambda_A + \lambda_B}$	10	$\frac{1}{\lambda_A - \lambda_B}$
11	$\frac{1}{\lambda_B - \lambda_A}$	12	$\frac{\lambda_A - \lambda_B}{\lambda_A + \lambda_B}$	13	$\frac{\lambda_A + \lambda_B}{\lambda_A - \lambda_B}$	14	$\frac{\lambda_A + \lambda_B}{\lambda_B - \lambda_A}$		

<D の解答群>

1  $e^{-\frac{\lambda_B t}{t}}$

2  $e^{\frac{\lambda_B t}{t}}$

3  $e^{-\lambda_B t}$

4  $e^{\lambda_B t}$

5  $e^{-\frac{t}{\lambda_B}}$

6  $e^{\frac{t}{\lambda_B}}$

7  $e^{-\frac{\lambda_B t}{T_B}}$

8  $e^{\frac{\lambda_B t}{T_B}}$

9  $(1-e^{-\frac{\lambda_B t}{T_B}})$

10  $(1-e^{\frac{\lambda_B t}{T_B}})$

&lt;G、Iの解答群&gt;

1  $\frac{\lambda_A}{\lambda_A + \lambda_B}$

2  $\frac{\lambda_B}{\lambda_A + \lambda_B}$

3  $\frac{\lambda_A}{\lambda_A - \lambda_B}$

4  $\frac{\lambda_B}{\lambda_A - \lambda_B}$

5  $\frac{\lambda_A \lambda_B}{\lambda_A + \lambda_B}$

6  $\frac{\lambda_A \lambda_B}{\lambda_A - \lambda_B}$

7  $\frac{\lambda_A}{\lambda_B - \lambda_A}$

8  $\frac{\lambda_B}{\lambda_B - \lambda_A}$

9  $\frac{1}{\lambda_A + \lambda_B}$

10  $\frac{1}{\lambda_A - \lambda_B}$

11  $\frac{1}{\lambda_B - \lambda_A}$

12  $\frac{\lambda_A - \lambda_B}{\lambda_A + \lambda_B}$

13  $\frac{\lambda_A + \lambda_B}{\lambda_A - \lambda_B}$

14  $\frac{\lambda_A + \lambda_B}{\lambda_B - \lambda_A}$

&lt;Hの解答群&gt;

1  $\frac{N_A}{N_A + N_B}$

2  $\frac{N_B}{N_A + N_B}$

3  $\frac{N_A}{N_A - N_B}$

4  $\frac{N_B}{N_A - N_B}$

5  $\frac{N_A}{N_B - N_A}$

6  $\frac{N_B}{N_B - N_A}$

7  $\frac{N_A}{N_B}$

8  $\frac{N_B}{N_A}$

9  $\frac{1}{N_A + N_B}$

10  $\frac{1}{N_A - N_B}$

11  $\frac{1}{N_B - N_A}$

12  $\frac{N_A N_B}{N_A + N_B}$

13  $\frac{N_A N_B}{N_A - N_B}$

14  $\frac{N_A N_B}{N_B - N_A}$

&lt;Jの解答群&gt;

1  $\frac{T_B}{T_A}$

2  $\frac{T_A}{T_B}$

3  $\frac{T_A}{T_A + T_B}$

4  $\frac{T_B}{T_A + T_B}$

5  $\frac{T_A}{T_A - T_B}$

6  $\frac{T_B}{T_A - T_B}$

7  $\frac{T_A T_B}{T_A + T_B}$

8  $\frac{T_A T_B}{T_A - T_B}$

9  $\frac{1}{\ln 2} \cdot \frac{T_A T_B}{T_A + T_B}$

10  $\frac{1}{\ln 2} \cdot \frac{T_A T_B}{T_A - T_B}$

11  $\ln 2 \cdot \frac{T_A T_B}{T_A + T_B}$

12  $\ln 2 \cdot \frac{T_A T_B}{T_A - T_B}$

〔解答〕 I : A-1 B-10 C-7 D-3 E-8 F-(出題ミス) G-7 H-8 I-11 J-10

〔解説〕

A、B : 核種Aの減少は放射壊変による減少のみであり、壊変定数 $\lambda_A$ を用いて

$$\frac{dN_A}{dt} = -\lambda_A N_A$$

と表される。一方、核種BはAの壊変によって生成し、同時に自身も壊変するため、

$$\frac{dN_B}{dt} = \lambda_A N_A - \lambda_B N_B$$

となる。

C、D : 核種Aが壊変して核種Bを生成する過程は、 $\frac{dN_B}{dt} = \lambda_A N_A - \lambda_B N_B$ で表される。ここで問

題文(3)式を代入して整理すると、次の式で表される。

$$\frac{dN_B}{dt} + \lambda_B N_B = \lambda_A N_A^0 e^{-\lambda_A t}$$

この両辺に $e^{\lambda_B t}$ をかけると次のように書ける。

$$e^{\lambda_B t} \frac{dN_B}{dt} + \lambda_B e^{\lambda_B t} N_B = \lambda_A N_A^0 e^{(\lambda_B - \lambda_A)t}$$

ここで微分の積の公式 $(f(x)g(x))' = f'(x)g(x) + f(x)g'(x)$ より、左辺は次のように変換される。

$$\frac{d}{dt}(N_B e^{\lambda_B t}) = e^{\lambda_B t} \frac{dN_B}{dt} + \lambda_B e^{\lambda_B t} N_B$$

$$\therefore \frac{d}{dt}(N_B e^{\lambda_B t}) = \lambda_A N_A^0 e^{(\lambda_B - \lambda_A)t}$$

これを時間0からtまで積分すると

$$N_B e^{\lambda_B t} - N_B^0 = \lambda_A N_A^0 \int_0^t e^{(\lambda_B - \lambda_A)t'} dt' = \lambda_A N_A^0 \frac{e^{(\lambda_B - \lambda_A)t} - 1}{\lambda_B - \lambda_A}$$

したがって、これを $N_B$ について解くと、

$$N_B = N_A^0 \frac{\lambda_A}{\lambda_B - \lambda_A} (e^{-\lambda_A t} - e^{-\lambda_B t}) + N_B^0 e^{-\lambda_B t}$$

E、F : 核種Bの放射能 $A_B$ は、壊変定数 $\lambda_B$ と(4)式で示される $N_B$ との積なので

$$A_B = A_A^0 \frac{\lambda_B}{\lambda_B - \lambda_A} (e^{-\lambda_A t} - e^{-\lambda_B t})$$

なお、Fについて問題文の印字ミスにより設問不成立のため、全員正解扱い。

G、H : 十分に時間が経過した後、 $T_A \gg T_B$ では $e^{-\lambda_B t} \approx 0$ であるため、(2)および(3)式より

$$N_B = \frac{\lambda_A}{\lambda_B - \lambda_A} N_A$$

このとき、放射能 $A_A$ 及び $A_B$ の関係は、(6)式より

$$A_B = A_A^0 \frac{\lambda_B}{\lambda_B - \lambda_A} e^{-\lambda_A t} = \frac{\lambda_B}{\lambda_B - \lambda_A} A_A$$

この式に(8)式を代入して、

$$\frac{A_B}{A_A} = 1 + \frac{N_B}{N_A}$$

I, J: 放射能  $A_B$  が最大となるのは、 $A_B$  の時間変化  $\frac{dA_B}{dt} = 0$  となるときであるので、(6)式を微分して、

$$\frac{dA_B}{dt} = A_A^0 \frac{\lambda_B}{\lambda_B - \lambda_A} (-\lambda_A e^{-\lambda_A t} + \lambda_B e^{-\lambda_B t})$$

$\frac{dA_B}{dt} = 0$  となるのは、括弧内が 0 になるときに限られるため、

$$-\lambda_A e^{-\lambda_A t} + \lambda_B e^{-\lambda_B t} = 0$$

すなわち、最大となる時間  $t_{\max}$  は

$$\lambda_A e^{-\lambda_A t_{\max}} = \lambda_B e^{-\lambda_B t_{\max}}$$

$$\frac{\lambda_A}{\lambda_B} = e^{-(\lambda_B - \lambda_A)t_{\max}}$$

両辺の自然対数を取ると、

$$\ln\left(\frac{\lambda_A}{\lambda_B}\right) = -(\lambda_B - \lambda_A)t_{\max}$$

よって、

$$t_{\max} = -\frac{1}{(\lambda_B - \lambda_A)} \ln\left(\frac{\lambda_A}{\lambda_B}\right)$$

また、壊変定数と半減期の関係は次の式で示される。

$$\lambda = \frac{\ln 2}{T}$$

この式を(10)式に代入すると、

$$t_{\max} = -\frac{1}{\ln 2} \frac{T_A T_B}{(T_A - T_B)} \ln\left(\frac{T_B}{T_A}\right)$$

II 放射性核種 ア (半減期 271 日) は、イ 壊変して  $^{68}\text{Ga}$  (半減期 68 分) になる。ア の半減期は  $^{68}\text{Ga}$  の半減期に比べて極めて長いので、二つの核種は放射平衡状態に達する。無機酸化物イオン交換体のカラムにア を吸着させた後、酸性の溶離液を流すと  $^{68}\text{Ga}$  だけを繰り返し溶出することができる。このように放射平衡にある親核種と娘核種の混合物から娘核種を化学的に単離する操作をウ という。

最初にカラムに保持されているア の放射能が 800 MBq であるとき、カラムに含まれる  $^{68}\text{Ga}$  を溶離した後 14 時間 (840 分) 経過するとカラム中の  $^{68}\text{Ga}$  の放射能はおよそK MBq となる。

$^{68}\text{Ga}$  は  $\beta^+$  壊変する核種で、エによる前立腺がんの核医学診断用の薬剤開発が進んでいる。

<アの解答群>

- |                    |                    |                    |                    |
|--------------------|--------------------|--------------------|--------------------|
| 1 $^{69}\text{Zn}$ | 2 $^{67}\text{Ga}$ | 3 $^{68}\text{Ga}$ | 4 $^{67}\text{Ge}$ |
| 5 $^{68}\text{Ge}$ | 6 $^{69}\text{Ge}$ | 7 $^{68}\text{As}$ | 8 $^{69}\text{As}$ |

<イの解答群>

- |            |             |             |      |
|------------|-------------|-------------|------|
| 1 $\alpha$ | 2 $\beta^-$ | 3 $\beta^+$ | 4 EC |
| 5 $\gamma$ | 6 IT        |             |      |

<ウの解答群>

- |          |          |           |
|----------|----------|-----------|
| 1 アニーリング | 2 クエンチング | 3 ストラグリング |
| 4 ドーピング  | 5 ミルкиング |           |

<Kの解答群>

- |        |         |       |       |
|--------|---------|-------|-------|
| 1 8    | 2 40    | 3 80  | 4 120 |
| 5 200  | 6 400   | 7 600 | 8 800 |
| 9 1200 | 10 1600 |       |       |

<エの解答群>

- |                  |              |             |
|------------------|--------------|-------------|
| 1 ラジオフォトルミネセンス   | 2 ラジオイムノアッセイ | 3 DNA シーケンス |
| 4 陽電子放射断層撮影(PET) | 5 SPECT      |             |

〔解答〕 II ア-5 イ-4 ウ-5 K-8 エ-4

〔解説〕

ア～エ： $^{68}\text{Ge}$ （半減期 271 日）は、EC 壊変して  $^{68}\text{Ga}$ （半減期 68 分）になる。 $^{68}\text{Ge}$  から  $^{68}\text{Ga}$  を化学的に繰り返し分離する操作は、ミルキングと呼ばれる。 $^{68}\text{Ga}$  は  $\beta^+$  崩壊核種であり、陽電子放出を利用する診断法は、PET（陽電子放射断層撮影）である。

K：設問 I (G, H) で解説したとおり、親核種 A と子孫核種 B の放射能の関係は、

$$A_B = \frac{\lambda_B}{\lambda_B - \lambda_A} A_A$$

ここで、 $\lambda_B \gg \lambda_A$  なので、

$$\frac{\lambda_B}{\lambda_B - \lambda_A} \approx 1$$

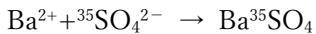
よって、14 時間後、半減期 68 分の  $^{68}\text{Ga}$  の放射能はほぼ平衡に達しており、かつ  $^{68}\text{Ge}$  の放射能はほぼ 800 MBq のままなので、 $^{68}\text{Ga}$  の放射能もおよそ 800 MBq である。

問 32 次の I～III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 放射性同位体や放射線の性質を利用した様々な核的手法が多岐に渡る学術分野、産業分野で利用されている。

放射滴定は放射性同位体を指示薬あるいは試薬として用い、非放射性の元素や化合物を分析する

放射分析の手法である。例えば、



の沈殿反応を利用する放射滴定では、 $\text{Ba}^{2+}$ 水溶液に  $\text{H}_2{}^{35}\text{SO}_4$  を滴下すると沈殿が生成する。溶液中の  ${}^{35}\text{S}$  濃度を  $\text{H}_2{}^{35}\text{SO}_4$  の滴下量に対して図示すると、A のようになる。プロットが折れ曲がった箇所が滴定の終点(当量点)であり、 $\text{Ba}^{2+}$ あるいは  $\text{SO}_4^{2-}$ を定量することが出来る。

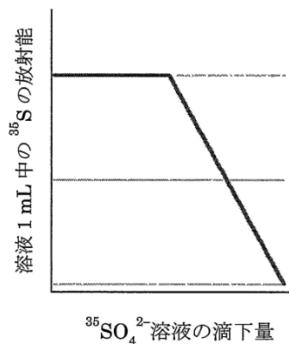


図 1

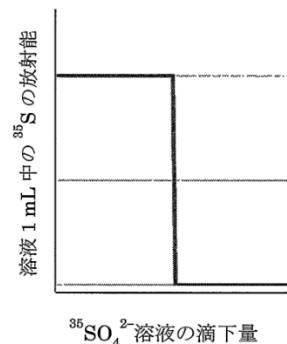


図 2

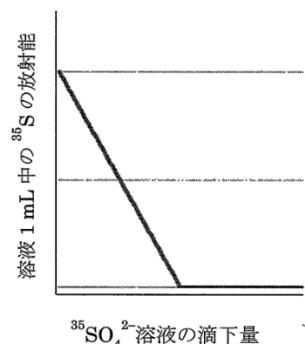


図 3

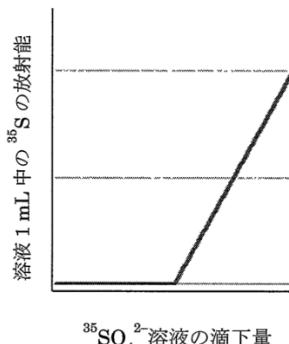


図 4

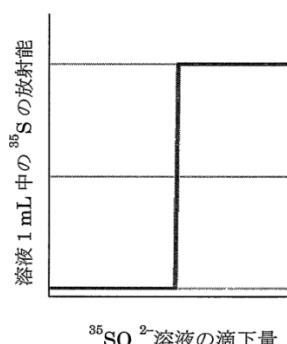


図 5

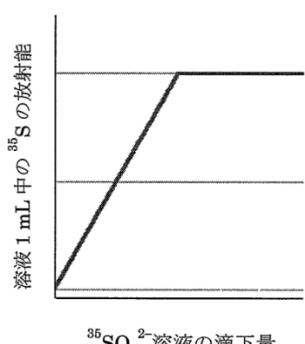


図 6

放射分析に対して放射化学分析では放射性の元素や化合物が分析の対象となる。例えば、海水中の  ${}^{137}\text{Cs}$  の放射化学分析では B による  $\gamma$  線スペクトロメトリが用いられる。 $\gamma$  線を放出する天然放射性核種 C は海水中では原子数として最大の天然放射性核種である。B で  ${}^{137}\text{Cs}$  と C の  $\gamma$  線ピークの信号分離が可能なため、 ${}^{137}\text{Cs}$  の放射化学分離は必須ではない。 ${}^{137}\text{Cs}$  の放射能が著しく低い場合には、濃縮が必要となり、その方法の一例としてリンモリブデン酸塩への共沈が知られている。このような沈殿物試料の放射能測定の定量性を確保するために標準線源が用いられる。沈殿物試料は標準線源と D が等しくなるようにする。

化学的性質が類似した混合物中の特定成分の定量に向けた方法に同位体希釈法がある。非放射性核種やその化合物の定量では直接希釈法が用いられる。この場合、試料の一定量を溶解し、これに定量する化合物(または元素あるいは化学種)A と同一の標識化合物(または元素あるいは化学種)A\*を一定量(重量  $W_1$ 、比放射能  $S_1$ )加えて混合する。この混合溶液から(A+A\*)の一部を分離して放射能と重量を測定することで、比放射能  $S_2$ を得る。以上を表にまとめると、表 1 の通りとなる。表中の空欄を順次算出で行くことで、求める  $W_x = \boxed{E}$  が得られる。

表1

	重量	比放射能	全放射能
定量対象の物質A	$W_x$	0	
添加した標識物質A <sup>*</sup>	$W_1$	$S_1$	
定量物質と添加標識物質の混合物(A+A <sup>*</sup> )		$S_2$	

&lt;Aの解答群&gt;

1 図1 2 図2 3 図3 4 図4 5 図5 6 図6

&lt;Bの解答群&gt;

- |                      |             |
|----------------------|-------------|
| 1 GM 検出器             | 2 電離箱       |
| 3 Ge 検出器             | 4 液体シンチレータ  |
| 5 ZnS(Ag)シンチレーション検出器 | 6 Si(Li)検出器 |

&lt;C、Dの解答群&gt;

- |                     |                   |                    |                   |
|---------------------|-------------------|--------------------|-------------------|
| 1 $^3\text{H}$      | 2 $^{14}\text{C}$ | 3 $^{24}\text{Na}$ | 4 $^{40}\text{K}$ |
| 5 $^{210}\text{Po}$ | 6 粒径              | 7 幾何学的形状           | 8 質量              |
| 9 溶解度               |                   |                    |                   |

&lt;Eの解答群&gt;

- |   |   |   |
|---|---|---|
| 1 $\left(\frac{S_2}{S_1} - 1\right)W_1$ | 2 $\left(\frac{S_1}{S_2} - 1\right)W_1$               | 3 $\left(1 - \frac{S_1}{S_2}\right)W_1$ |
| 4 $\left(1 - \frac{S_2}{S_1}\right)W_1$ | 5 $\left(\frac{S_2}{S_1} - \frac{S_1}{S_2}\right)W_1$ |   |

〔解答〕 I A-4 B-3 C-4 D-7 E-2

〔解説〕

A: 放射滴定では、放射性同位体を含む指示薬を滴下すると、試料と反応して放射性化合物が沈殿するため、終点（当量点）までは溶液中の放射能にほとんど変化しない。終点を過ぎると、過剰の指示薬が反応せずに溶液中に残るため、溶液中の放射能が直線的に増加する。

B:  $^{137}\text{Cs}$  は 662 keV の  $\gamma$  線を放出するため、優れたエネルギー分解能で  $\gamma$  線ピークを分離できる Ge 検出器が用いられる。

C: 海水中に最も多く存在する天然放射性核種は  $^{40}\text{K}$  である。 $^{40}\text{K}$  は 1460 keV の  $\gamma$  線を出し、 $^{137}\text{Cs}$  の 662 keV の  $\gamma$  線とは十分に離れているため、Ge 検出器で容易に分離可能である。

D: Ge 検出器で測定を行う際には、沈殿物試料と標準線源の幾何学的形状(容器の形状・配置・距離・体積など)を同一にする必要がある。これらの条件が一致していないと検出効率に差が生じ、正確な定量ができなくなる。

E: 問題文中の表1の空欄を埋めると以下のようになる。

	重量	比放射能	全放射能
定量対象の物質 A	$W_x$	0	0

添加した標準物質 A*	$W_1$	$S_1$	$S_1 W_1$
定量物質と添加標準物質の混合物 (A+A*)	$W_x + W_1$	$S_2$	$S_2(W_x + W_1)$

添加した標準物質の全放射能  $S_1 W_1$  と混合物の全放射能  $S_2(W_x + W_1)$  は等しくなるため、以下の式で  $W_x$  を求めることができる。

$$S_1 W_1 = S_2(W_x + W_1) \quad \rightarrow \quad W_x = \left( \frac{S_1}{S_2} - 1 \right) W_1$$

II 放射線を励起源あるいは検出対象とすることで、物質の化学組成や化学状態を分析する手法が知られている。

放射化分析では核反応として熱中性子照射による  $F$  反応が多用されている。測定する放射線は生成した放射性同位体から放出されるので、照射終了後に  $\gamma$  線を測定する。また、照射試料を  $G$  箔で包んで熱中性子を吸収させることにより、熱外中性子による放射化分析の感度を相対的に上げることも可能である。

放射化分析に対して、中性子照射に伴い発生する即発  $\gamma$  線を分析に用いる PGA(即発  $\gamma$  線分析)は非破壊多元素同時分析法の一つである。 $(n, \alpha)$  反応を利用する  $H$  の高感度分析の手法としても知られている。

$\gamma$  線による原子核の共鳴吸収を利用して固体中の対象核の存在状態を知る手法がメスバウアーフィルタ法である。大部分の応用は鉄の安定同位体の共鳴吸収に依る。このため、放射壊変で鉄の同位体の励起状態に至る放射性同位体  $I$  を  $\gamma$  線源として利用する。メスバウアーフィルタ法の測定には  $\gamma$  線や  $J$  を計測する。

$K$  などから放出された  $\beta^+$  線が物質に入射すると、 $L$  が起こる。高分子材料中の空隙の密度などの材料物性に関わる情報を得る手法として利用されている。

<F～H の解答群>

- |             |            |                 |                 |            |
|-------------|------------|-----------------|-----------------|------------|
| 1 $(n, n')$ | 2 $(n, p)$ | 3 $(n, \gamma)$ | 4 $(n, \alpha)$ | 5 $(n, f)$ |
| 6 Al        | 7 Fe       | 8 Cu            | 9 Cd            | 10 Sn      |
| 11 H        | 12 He      | 13 Be           | 14 B            | 15 C       |

<I, J の解答群>

- |                    |                    |                             |                    |                    |
|--------------------|--------------------|-----------------------------|--------------------|--------------------|
| 1 $^{55}\text{Fe}$ | 2 $^{56}\text{Fe}$ | 3 $^{57}\text{Fe}$          | 4 $^{57}\text{Co}$ | 5 $^{60}\text{Co}$ |
| 6 $\beta^-$ 線      | 7 $\beta^+$ 線      | 8 X 線( $\text{CoK}\alpha$ ) | 9 内部転換電子           | 10 $\delta$ 線      |

<K, L の解答群>

- |                    |                    |                    |                    |
|--------------------|--------------------|--------------------|--------------------|
| 1 $^{22}\text{Na}$ | 2 $^{24}\text{Na}$ | 3 $^{51}\text{Cr}$ | 4 $^{56}\text{Mn}$ |
| 5 $^{59}\text{Fe}$ | 6 光電効果             | 7 コンプトン散乱          | 8 対消滅              |
| 9 内部転換             | 10 電子対生成           |                    |                    |

[解答] II F-3 G-9 H-14 I-4 J-9 K-1 L-8

[解説]

F: 放射化分析で最も一般的に用いられる核反応は、 $(n, \gamma)$  反応である。この反応では、原子核が

熱中性子を捕獲し、励起状態となった後、 $\gamma$ 線を放出して安定または放射性の核種へと変化する。

G: カドミウム (Cd) は熱中性子に対して非常に大きな中性子捕獲断面積を持つため、試料を Cd 箔で包むことで、熱中性子を遮蔽し、熱外中性子（エピサーマル中性子や高速中性子）による反応のみを相対的に強調することができる。

H: (n,  $\alpha$ )反応を利用する元素としてホウ素 ( $^{10}\text{B}$ ) が挙げられる。熱中性子が  $^{10}\text{B}$  に吸収されると、 $^7\text{Li}$  と  $\alpha$  線が放出される。このとき、高確率で励起状態の  $^7\text{Li}$  が即発ガンマ線を放出する。



I :  $^{57}\text{Co}$  は EC 壊変して  $^{57}\text{Fe}$  となり、14.4 keV の  $\gamma$  線を放出する。この  $\gamma$  線が利用される。

J : メスバウアーフィルタ法では、 $\gamma$  線の共鳴吸収を、 $\gamma$  線の透過量を計測する方法と共に吸収後に励起状態の原子核から放出される内部転換電子を計測する方法の 2通りで測定する。

K, L : 陽電子消滅法についての文章である。解答群の中で  $\beta^+$ 線（陽電子）を放出するのは、 $^{22}\text{Na}$  である。放出された  $\beta^+$ 線が物質に入射すると電子と対消滅して、511 keV 消滅  $\gamma$  線を  $180^\circ$  方向に 2本放出する。この  $\gamma$  線を検出することで、物質中の電子密度や空孔の情報を得ることができる。

III トレーサーとしての放射性同位体はその元素や化合物の動態を知る目的で様々な分野で利用されている。

一般的なトレーサー利用とは異なり、アクチバブルトレーサーは天然存在度が小さい元素または安定同位体をトレーサーとして用い、その検出に中性子放射化分析を利用する。放射性トレーサーの適用が困難な環境での物質の動態解析に利用されてきた。例えば、M はアクチバブルトレーサーとして利用し易い元素の一つである。

安定同位体や長半減期の天然放射性同位体、例えば  $^{14}\text{C}$  については、地球環境規模での C の動態を知るために、天然の放射性トレーサーとして詳しく調べられてきた。そこから発展したのが、 $^{14}\text{C}$  の放射能分析(または質量分析)に基づく放射性炭素年代法( $^{14}\text{C}$  法)である。考古遺物の年代の推定などに盛んに利用されている。

例えば、1 mg の炭素を含む木質の考古遺物試料を加速器質量分析で炭素の同位体比を測定して、 $^{13}\text{C}/^{12}\text{C}=0.0108$ (原子数比)、 $^{14}\text{C}/^{13}\text{C}=1.87 \times 10^{-11}$ (原子数比)の分析値を得たとする。大気中の  $^{14}\text{C}$  同位体存在度(原子数比)が  $1.2 \times 10^{-12}$  で過去も現在も一定であったとする。 $^{14}\text{C}$  の半減期を 5700 年とすると、この試料の年代は N 年となる。ただし、 $\ln 2 = 0.693$ 、 $\ln 3 = 1.099$ 、 $\ln 5 = 1.609$  とする。

<M, N の解答群>

1 H	2 P	3 K	4 Al	5 Eu
6 $1.0 \times 10^3$	7 $2.0 \times 10^3$	8 $5.0 \times 10^3$	9 $1.0 \times 10^4$	10 $1.5 \times 10^4$
11 $2.0 \times 10^4$	12 $2.5 \times 10^4$	13 $3.0 \times 10^4$	14 $4.0 \times 10^4$	15 $5.0 \times 10^4$

〔解答〕 III M—5 N—10

〔解説〕

M: アクチバブルトレーサー法においては、リンやカリウムと類似した挙動を示す Eu が用いられる。

特に  $^{151}\text{Eu}$  は放射化断面積が大きく、中性子照射によって生成される  $^{152}\text{Eu}$  は半減期が長く、放出される  $\gamma$  線のエネルギーが高いため、測定が容易であることも理由の一つである。

N: 試料の  $^{14}\text{C}$  同位体存在度 ( $^{14}\text{C}/^{12}\text{C}$ ) は、

$$\frac{^{14}\text{C}}{^{12}\text{C}} = \frac{^{14}\text{C}}{^{13}\text{C}} \times \frac{^{13}\text{C}}{^{12}\text{C}} = 1.87 \times 10^{-11} \times 0.0108 \doteq 2.0 \times 10^{-13}$$

大気中の  $^{14}\text{C}$  同位体存在度 ( $^{14}\text{C}/^{12}\text{C}$ ) は  $1.2 \times 10^{-12}$  なので、

$$2.0 \times 10^{-13} = 1.2 \times 10^{-12} \times \left(\frac{1}{2}\right)^{\frac{t}{5700}} \rightarrow \left(\frac{1}{2}\right)^{\frac{t}{5700}} \doteq 0.17$$

両辺の自然対数をとると、

$$-\frac{t}{5700} \times 0.693 = \ln 0.17$$

$$t = \frac{5700}{0.693} \ln \left( \frac{1}{0.17} \right)$$

$$\ln \left( \frac{1}{0.17} \right) \doteq \ln 6 = \ln 2 + \ln 3 = 1.792 \text{ であるので、} t = \frac{5700}{0.693} \times 1.792 \doteq 1.5 \times 10^4 \text{ 年}$$