

令和4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4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 核種Aは、半減期300日で $\beta$ 壊変して安定核種Bとなる。核種Aと核種Bの原子数をそれぞれ $N_A$ 、 $N_B$ とする。はじめに核種Aのみが100 MBqあったとき、600日後の原子数比( $N_A/N_B$ )として、最も近い値は次のうちどれか。

- 1 0.33    2 0.50    3 1.0    4 2.0    5 3.0

〔解答〕 1

〔解説〕 はじめは核種Aのみであるため、この時の核種Aの原子数を $n$ 個とすると、600日後の核種Aの原子数 $N_A$ は2半減期後であり、 $N_B$ は核種Aが壊変したものが核種Bの原子数となることから次の様に示すことができる。

$$N_A = n \times \left(\frac{1}{2}\right)^2 \text{ 個}$$

$$N_B = n - N_A \text{ 個}$$

$$\therefore (N_A/N_B) = \frac{1}{4} n / \frac{3}{4} n = 0.33$$

問2 次の核種の組合せのうち、2核種がともに $\gamma$ 線を放出する $\beta^-$ 壊変核種であるものはどれか。

- 1  $^{28}\text{Al}$      $^{10}\text{B}$   
2  $^{76}\text{As}$      $^7\text{Be}$   
3  $^{198}\text{Au}$      $^{82}\text{Br}$   
4  $^{211}\text{At}$      $^{214}\text{Bi}$   
5  $^{241}\text{Am}$      $^{133}\text{Ba}$

〔解答〕 3

〔解説〕

- 1：誤  $^{28}\text{Al}$ は $\gamma$ 線を放出する $\beta^-$ 壊変核種であるが、 $^{10}\text{B}$ は安定同位体であるが熱中性子を照射すると $\alpha$ 線と $^7\text{Li}$ に分裂するため、中性子捕獲療法に使用されている核種である。
- 2：誤  $^{76}\text{As}$ は $\gamma$ 線を放出する $\beta^-$ 壊変核種であるが、 $^7\text{Be}$ はEC壊変する核種である。
- 3：正  $^{198}\text{Au}$ 、 $^{82}\text{Br}$ の両核種とも $\gamma$ 線を放出する $\beta^-$ 壊変核種である。
- 4：誤  $^{211}\text{At}$ 、 $^{214}\text{Bi}$ は $\alpha$ 核種である。 $^{211}\text{At}$ はヨウ素と同じ族で抗体などへの標識が容易であり、内用療法で注目されている核種である。 $^{214}\text{Bi}$ はウラン系列に属する天然放射性核種である。
- 5：誤  $^{241}\text{Am}$ は $\alpha$ 線核種で、煙感知器に使用されていた核種である。 $^{133}\text{Ba}$ はEC壊変する核種である。

問3 次の記述のうち、正しいものの組合せはどれか。

- A  ${}^7\text{Be}$  原子の最外殻電子は  $2s$  軌道にある。  
B  ${}^{22}\text{Na}$  原子の最外殻電子は M 殻にある。  
C  ${}^{22}\text{Na}$  が壊変して生成した中性原子の基底状態の電子配置は、 $(1s)^2(2s)^2(2p)^6$  である。  
D  ${}^{32}\text{P}$  が壊変して生成した中性原子の基底状態の電子配置は、 $(1s)^2(2s)^2(2p)^6(3s)^2(3p)^4$  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 : 正  $\text{Be}$  の基底状態の電子配置は、 $(1s)^2(2s)^2$  であり、最外殻は  $2s$  軌道である。  
B : 正  $\text{Na}$  の基底状態の電子配置は、 $(1s)^2(2s)^2(2p)^6(3s)^1$  であり、最外殻は M 殻である。  
C : 正  ${}^{22}\text{Na}$  は  $\beta^+$ 壊変と EC 壊変により、 ${}^{22}\text{Ne}$  が生成される。 $\text{Ne}$  の基底状態の電子配置は、 $(1s)^2(2s)^2(2p)^6$  である。  
D : 正  ${}^{32}\text{P}$  は  $\beta^-$ 壊変により、 ${}^{32}\text{S}$  が生成される。 $\text{S}$  の基底状態の電子配置は、 $(1s)^2(2s)^2(2p)^6(3s)^2(3p)^4$  である。

問4 白米 100 g 中のカリウム含有量が 90 mg であるとき、この白米中の  ${}^{40}\text{K}$  の放射能濃度 [ $\text{Bq} \cdot \text{g}^{-1}$ ] として、最も近い値は次のうちどれか。ただし、 ${}^{40}\text{K}$  の同位体存在度は 0.0117%、半減期は  $1.248 \times 10^9$  年、壊変定数は  $1.760 \times 10^{-17} \text{ s}^{-1}$  とする。

- 1  $1 \times 10^{-2}$     2  $3 \times 10^{-2}$     3  $5 \times 10^{-2}$     4  $7 \times 10^{-2}$     5  $9 \times 10^{-2}$

〔解答〕 2

〔解説〕 カリウム 40 の含有量は  ${}^{40}\text{K} = 0.09 \times 0.000117 = 1.053 \times 10^{-5} \text{ g}$

${}^{40}\text{K}$  の原子数が  $6 \times 10^{23}$  個で 40 g なので、この試料中の  ${}^{40}\text{K}$  の原子数を  $N({}^{40}\text{K})$  とすると  
 $N({}^{40}\text{K}) = (6 \times 10^{23} / 40) \times 1.053 \times 10^{-5} \doteq 1.580 \times 10^{17}$  個

${}^{40}\text{K}$  の放射能 (A) =  $\lambda N$   
 $= 1.76 \times 10^{-17} \times 1.58 \times 10^{17} \doteq 2.781 \text{ (Bq)}$

故に、白米 100 g 中に 2.781 Bq なので、 $2.781 \times 10^{-2} \text{ Bq} \cdot \text{g}^{-1}$  となる。

問5 精製した  ${}^{140}\text{Ba}$  (半減期 12.75 日) から  ${}^{140}\text{La}$  (半減期 1.68 日) が生成し、 ${}^{140}\text{Ba}$  と  ${}^{140}\text{La}$  が過渡平衡となっているとき、次の記述のうち、正しいものの組合せはどれか。

- A  ${}^{140}\text{La}$  の放射能は  ${}^{140}\text{Ba}$  の放射能より大きい。  
B  ${}^{140}\text{La}$  の比放射能は、時間とともに減少する。  
C 原子数の比 ( ${}^{140}\text{La}/{}^{140}\text{Ba}$ ) は約 7.6 である。  
D 水酸化鉄(III)共沈法で、水溶液中の  ${}^{140}\text{La}$  を  ${}^{140}\text{Ba}$  から分離することができる。
- 1 A と B    2 A と C    3 A と D    4 B と D    5 C と D

〔解答〕 3

〔解説〕

A：正 過渡平衡の場合、十分な時間が経過したときの親核種と娘核種の放射能を  $A_1$ 、 $A_2$ 、それぞれの原子数を  $N_1$ 、 $N_2$  とすると、

$$A_2/A_1 = 1 + \frac{\lambda_1}{\lambda_2} > 1 \text{ で示すことができる。}$$

よって、娘核種の放射能 ( $^{140}\text{La}$ ) は親核種の放射能 ( $^{140}\text{Ba}$ ) より常に大きくなる。

B：誤 娘核種は平衡状態に達するまでの間は放射能が増えていくので、常に時間とともに放射能が減少するわけではない。

C：誤 過渡平衡における原子数の比は、 $N_2/N_1 = \frac{\lambda_1}{\lambda_2 - \lambda_1} \approx 0.158$

D：正  $^{140}\text{Ba}$ - $^{140}\text{La}$  の薄い塩酸溶液に  $\text{Ba}^{2+}$  と  $\text{Fe}^{3+}$  を担体として加え、 $\text{CO}_2$  を含まないアンモニア水を加えて加温して水酸化鉄(III)の沈殿を作ると、 $^{140}\text{La}^{3+}$  は水酸化鉄(III)の沈殿とともに共沈する。沈殿した  $^{140}\text{La}^{3+}$  を含む水酸化鉄(III)から溶媒抽出により  $\text{Fe}^{3+}$  を除去できるため、無担体  $^{140}\text{La}$  を得ることができる。

問6 半減期10分の放射性核種をサイクロトロンにより製造したところ、 $1\ \mu\text{A}$  の陽子線で10分間照射した直後の放射能が  $a\ \text{MBq}$  であった。 $4\ \mu\text{A}$  で20分間照射し、照射後、20分経過した時点での放射能は、 $a\ \text{MBq}$  の何倍か。最も近い値は次のうちどれか。ただし、照射条件として、照射電流、照射時間以外は変えないものとする。

- 1 0.75    2 1.0    3 1.25    4 1.5    5 2.0

〔解答〕 4

〔解説〕 陽子線の強度を4倍にすると生成される放射能は4倍になる。一方、照射する時間を変えると、生成される放射能の増加量は飽和係数  $(1 - e^{-\lambda t})$  の影響を受ける。このため、照射時間20分だと10分の時の1.5倍の生成量になる。よって、照射直後は  $6a\ \text{MBq}$  生成され、2半減期後の放射能は  $1.5a\ \text{MBq}$  となる。

問7 次の核反応のうち、 $^{18}\text{F}$  が生成するものの組合せはどれか。

- A  $^{14}\text{N}(\alpha, n)$   
B  $^{16}\text{O}(^3\text{He}, p)$   
C  $^{18}\text{O}(p, n)$   
D  $^{19}\text{F}(d, t)$   
E  $^{22}\text{Ne}(\gamma, \alpha)$

- 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〕

A：誤  $(\alpha, n)$  反応では、 $\alpha$ 線により、原子番号が2増加し質量数が4増加、衝突後に中性子

(令和4年度) 第1種化学

nが出るので、質量数が1減る。よって反応前より、原子番号が2増加し、質量数が3増える。 ${}^{14}_7\text{N}(\alpha, n){}^{17}_8\text{F}$ となる。

B: 正 ( ${}^3\text{He}, p$ ) 反応では、 ${}^3\text{He}$ により、原子番号が2増加し質量数が3増加、衝突後に陽子pが出るので、原子番号が1減少し質量数が1減る。よって反応前より、原子番号が1増加し、質量数が2増える。 ${}^{16}_8\text{O}({}^3\text{He}, p){}^{18}_9\text{F}$ となる。

C: 正 ( $p, n$ ) 反応では、pにより、原子番号が1増加し質量数が1増加、衝突後に中性子nが出るので、質量数が1減る。よって反応前より、原子番号が1増加し、質量数は変わらない。 ${}^{18}_8\text{O}(p, n){}^{18}_9\text{F}$ となる。

D: 正 ( $d, t$ ) 反応では、d(二重水素)により、原子番号が1増加し質量数が2増加、衝突後にt(三重水素)が出るので、原子番号が1減少し質量数が3減少する。よって反応前より、原子番号は変わらず、質量数が1減少する。 ${}^{19}_9\text{F}(d, t){}^{18}_9\text{F}$ となる。

E: 誤 ( $\gamma, \alpha$ ) 反応では、光子により、原子番号、質量数ともに変わらず、衝突後に $\alpha$ 線が出るので、原子番号が2減少し質量数が4減少する。よって反応前より、原子番号が2減少し、質量数が4減少する。 ${}^{22}_{10}\text{Ne}(\gamma, \alpha){}^{18}_8\text{O}$ となる。

問8 熱中性子による ${}^{235}\text{U}$ の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 核分裂の際、平均して2.5個の中性子が放出される。
- B 放出される中性子の平均運動エネルギーは約2 MeVである。
- C ほぼ同じ質量数の2つの原子核に分裂する。
- D 生成する核種は中性子不足核である。

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

[解答] 1

[解説]

A: 正 核分裂の際に放出される中性子は2, 3個である。

B: 正 放出される中性子の平均エネルギーは2MeV程度である。

C: 誤 核分裂によって作り出される核分裂生成物は質量95と138付近に核分裂収率の極大があり、極小が質量数118付近となるように分布する。よって生成される核分裂片はほぼ同じ質量数の原子核に分裂するわけではない。

D: 誤 原子番号が大きな核種は陽子数より中性子数の割合が高い、中性子過剰核である。

問9 熱中性子照射による放射性核種の生成に関する次の記述のうち、正しいものの組合せはどれか。

照射対象	生成核種
A 空気	${}^{41}\text{Ar}$
B 海水	${}^{38}\text{Cl}$
C ステンレス	${}^{51}\text{Cr}$
D コンクリート	${}^{45}\text{Ca}$

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 空気中のアルゴン  $^{40}\text{Ar}$  と反応し、 $^{40}\text{Ar}(\text{n}, \gamma)^{41}\text{Ar}$  が生成する。  
B：正 海水中の塩素  $^{37}\text{Cl}$  と反応し、 $^{37}\text{Cl}(\text{n}, \gamma)^{38}\text{Cl}$  が生成する。  
C：正 ステンレスは鉄にクロム  $^{50}\text{Cr}$  を混ぜた合金であり、そのクロムと反応して  
 $^{50}\text{Cr}(\text{n}, \gamma)^{51}\text{Cr}$  が生成する。  
D：正 コンクリートに主成分として含まれているカルシウム  $^{44}\text{Ca}$  と反応して  
 $^{44}\text{Ca}(\text{n}, \gamma)^{45}\text{Ca}$  が生成する。

問10 コバルト (Co) 箔 (不純物は含まれていないとする) に対する次の記述のうち、正しいものの組合せはどれか。

- A 59 keV の光子を照射すると、Co の特性 X 線が発生する。  
B 5 MeV の陽子を照射すると、Ni の特性 X 線が発生する。  
C 14 MeV の中性子を照射すると、 $^{59}\text{Fe}$  と  $^{58}\text{Co}$  が生成する。  
D 20 MeV の光子を照射すると、 $^{58}\text{Co}$  が生成する。  
1 ABC のみ    2 ABD のみ    3 ACD のみ    4 BCD のみ    5 ABCD すべて

〔解答〕 3

〔解説〕

- A：正 光子が軌道電子を励起することで Co の特性 X 線が発生する。  
B：誤 陽子は電子とは大きく質量が異なるため、軌道電子には作用せず、Ni の特性 X 線は発生しない。ちなみに、陽子のエネルギーが 5 MeV と低いため、核反応も起こらない。核子の結合エネルギーはおよそ 8 MeV なので 1 個の核子を放出するためには、10 MeV 程度のエネルギーが必要となる。  
C：正  $^{59}\text{Co}$  に中性子を照射すると、 $^{59}\text{Co}(\text{n}, \text{p})^{59}\text{Fe}$ 、 $^{59}\text{Co}(\text{n}, 2\text{n})^{58}\text{Co}$  となる。  
D：正 20 MeV の光子を照射すると、光核反応により  $^{59}\text{Co}(\gamma, \text{n})^{58}\text{Co}$  が生成する。

問11 ガリウム Ga 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 周期表で Al と同じ 13 族に属する。  
B 50°C では液体である。  
C  $^{67}\text{Ga}$  は、EC 壊変して  $\gamma$  線を放出する。  
D  $^{68}\text{Ga}$  は、 $^{68}\text{Ge}$  を親核種とするミルキングで得られる。  
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〕 Ga の融点は 29.8°C、沸点は 2403°C である。

$^{68}\text{Ge}$  と  $^{68}\text{Ga}$  の半減期はそれぞれ 270 日と 68 分であり、放射平衡 (永続平衡) にあるため、 $^{68}\text{Ge}$

からの  $^{68}\text{Ga}$  のミルキングが可能である。

問12 放射性元素の化学的性質に関する次の記述のうち、正しいものはどれか。

- 1 7価のテクネチウム (Tc) は水酸化物として水溶液から沈澱する。
- 2 ポロニウム (Po) の単体は非金属としての性質を示す。
- 3 アスタチン (At) は貴ガスと同様に単原子分子の状態が安定である。
- 4 2価のラジウム (Ra) は硫酸イオンと反応して水溶液から沈澱する。
- 5 アクチニウム (Ac) は化合物中で4価の状態をとる。

〔解答〕 4

〔解説〕

- 1: 7価のテクネチウムは酸化物(酸化テクネチウム(VII),  $\text{Tc}_2\text{O}_7$ )として沈殿する。
- 2: ポロニウムは金属である。
- 3: アスタチンには約30の同位体が存在するが、安定同位体は存在せず、半減期も短い。
- 4: 水中のラジウムの捕集には、硫酸バリウム共沈法がよく用いられる。
- 5: アクチニウムは化合物中では、唯一3価が安定である。

問13 最初に核種A(半減期6h)の原子数が核種B(半減期18h)の原子数の4倍あるとき、核種Aの原子数と核種Bの原子数が等しくなるまでの時間[h]として、最も近い値は次のうちどれか。

- 1 12
- 2 18
- 3 24
- 4 36
- 5 48

〔解答〕 2

〔解説〕 核種AおよびBの最初の原子数をそれぞれ  $A_0$ 、 $B_0$  とし、 $t$  時間後に核種Aの原子数と核種Bの原子数が等しくなるとすると、

$$A_0 \times 2^{-t/6} = B_0 \times 2^{-t/18}$$

$$A_0 = 4B_0 \text{ なので、} 4B_0 \times 2^{-t/6} = B_0 \times 2^{-t/18}$$

$$B_0 \text{ を消去し、} 2^{(2-t/6)} = 2^{-t/18}$$

$$\text{すなわち、} 2-t/6 = -t/18 \text{ よって、} t = 18$$

問14 次の核種の組合せのうち、安定核種のみ組合せはどれか。

- |   |                  |                  |                  |
|---|------------------|------------------|------------------|
| A | $^{16}\text{O}$  | $^{17}\text{O}$  | $^{18}\text{O}$  |
| B | $^{40}\text{Ca}$ | $^{42}\text{Ca}$ | $^{44}\text{Ca}$ |
| C | $^{45}\text{Ti}$ | $^{48}\text{Ti}$ | $^{50}\text{Ti}$ |
| D | $^{54}\text{Fe}$ | $^{56}\text{Fe}$ | $^{59}\text{Fe}$ |
| E | $^{74}\text{As}$ | $^{75}\text{As}$ | $^{76}\text{As}$ |

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

〔解答〕 1

〔解説〕 酸素には3種類の安定同位体 ( $^{16}\text{O}$ ,  $^{17}\text{O}$ ,  $^{18}\text{O}$ ) と14種類の放射性同位体がある。

カルシウムには天然に存在するものとしては、4種類の安定同位体 ( $^{40}\text{Ca}$ ,  $^{42}\text{Ca}$ ,  $^{43}\text{Ca}$ ,  $^{44}\text{Ca}$ ) と3種類の放射性同位体がある。

$^{45}\text{Ti}$ ,  $^{59}\text{Fe}$ ,  $^{74}\text{As}$ ,  $^{76}\text{As}$  は放射性である。

問 15 天然放射性核種に関する次の記述のうち、正しいものの組合せはどれか。

A 太陽系ができたときから存在している天然放射性核種がある。

B 地中で常に生成されている天然放射性核種がある。

C 最も短い天然放射性核種の半減期は20分である。

D 常温常圧で気体の天然放射性核種が存在する。

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〕 太陽系誕生は46億年= $4.6 \times 10^9$ 年前。例えば $^{232}\text{Th}$ は半減期が $1.405 \times 10^{10}$ 年であるため、太陽系誕生以前から存在する。

例えばトリウム系列やウラン系列の核種は、地中で常に生成されている。

半減期が20分より短い天然放射性核種は多数存在する。

常温常圧で気体の天然放射性核種の例としては、ラドン222がある。

問 16 試料中の核種の原子数比が、数億年の地質年代を測定するために利用できるものの組合せは次のうちどれか。

A  $^3\text{H}/^3\text{He}$

B  $^{14}\text{C}/^{12}\text{C}$

C  $^{40}\text{K}/^{40}\text{Ar}$

D  $^{87}\text{Rb}/^{87}\text{Sr}$

E  $^{235}\text{U}/^{207}\text{Pb}$

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

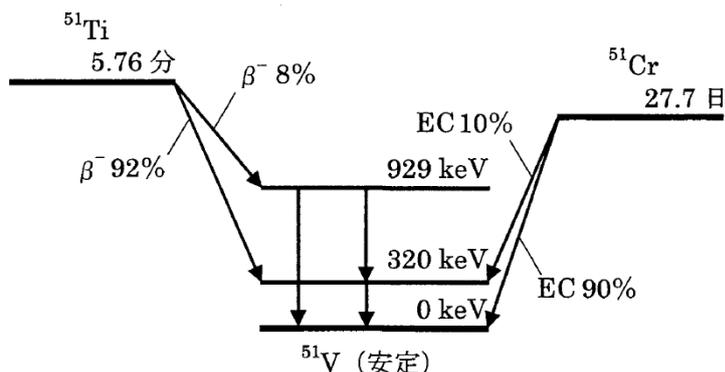
〔解答〕 5

〔解説〕 放射性同位元素を用いた地質年代測定は、調べたい年代の地質にある動植物の遺骸に含まれる放射性同位元素の放射能と安定同位体の放射能の比を、現代のそれと比較することにより行う。数億年の地質年代を測定するためには、半減期が数億年以上の放射性同位元素、例えば $^{40}\text{K}$  (12.5億年)、 $^{87}\text{Rb}$  (49.2億年)、 $^{235}\text{U}$  (7億年) などを使う必要がある。

問 17 質量数が51の3つの核種に関する次の記述のうち、正しいものの組合せはどれか。壊変図式

を参考にせよ。

- A  $^{51}\text{Cr}$  線源は V の特性 X 線を放出する。
- B  $^{51}\text{Ti}$  の  $\beta$  壊変は必ず  $^{51}\text{V}$  の励起状態を生成する。
- C  $^{51}\text{Cr}$  は最大エネルギーが異なる 2 本の  $\beta$  線を放出する。
- D  $^{51}\text{Cr}$  線源は 609 keV の  $\gamma$  線を放出する。
- E 1 個の  $^{51}\text{Ti}$  原子核が壊変すると、2 本の  $\gamma$  線が放出されることがある。



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

〔解答〕 2

〔解説〕  $^{51}\text{Cr}$  は  $\beta$  線を放出せず、放出する  $\gamma$  線は 320 keV である。

問 18 次の放射性核種を含む試料 I ~ IV とその放射線を測定する検出器ア ~ エとの組合せのうち最も適切なものはどれか。

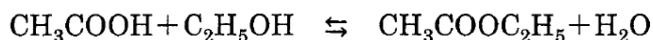
試料	検出器
I $^{99\text{m}}\text{Tc}$ で標識された化合物を含む溶液	ア 端窓型 GM 検出器
II $^{32}\text{P}$ を捕集したろ紙	イ Ge 検出器
III 多元素同時定量のために中性子放射化した岩石試料	ウ 井戸型 NaI(Tl) 検出器
IV $\alpha$ 線放出核種を電着したアルミニウム板	エ 表面障壁型 Si 検出器

- 1 I - ア、II - イ、III - エ、IV - ウ
- 2 I - イ、II - ア、III - エ、IV - ウ
- 3 I - ア、II - エ、III - ウ、IV - イ
- 4 I - ウ、II - ア、III - イ、IV - エ
- 5 I - エ、II - ウ、III - イ、IV - ア

〔解答〕 4

〔解説〕  $^{99\text{m}}\text{Tc}$  は  $\gamma$  線放出核種なので井戸型 NaI(Tl) 検出器、 $^{32}\text{P}$  は  $\beta$  線放出核種なので端窓型 GM 検出器、多元素同時定量には Ge 検出器、 $\alpha$  線放出核種には表面障壁型 Si 検出器が適している。

問19 酢酸とエタノールから酢酸エチルが生成する反応は、以下の反応式で表される平衡反応である。



$^{14}\text{C}$ で標識した酢酸をエタノールと混合し、平衡に達したとき、放射能を持つ化合物として正しいものは次のうちどれか。

- 1 酢酸とエタノールと酢酸エチルのみ
- 2 酢酸のみ
- 3 エタノールと酢酸エチルのみ
- 4 酢酸と酢酸エチルのみ
- 5 酢酸とエタノールのみ

〔解答〕 4

〔解説〕 酢酸エチルと水から酢酸とエタノールが生成する反応(左向きの平衡反応)では、酢酸エチル内の酢酸由来の $^{14}\text{C}$ はエタノール生成には使われない。

問20 次の操作のうち、放射性気体が発生するものの組合せはどれか。

- A  $^{14}\text{C}$ で標識した炭酸カルシウムに塩酸を加える。
- B  $^{32}\text{P}$ で標識したリン酸カルシウムに硫酸を加える。
- C  $^{35}\text{S}$ で標識した硫化鉄に塩酸を加える。
- D  $^{36}\text{Cl}$ で標識した塩化銅(II)にアンモニア水を加える。

- 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〕  $^{14}\text{C}$ で標識された炭酸カルシウムに塩酸を加えると、 $^{14}\text{C}$ を含む二酸化炭素( $\text{CO}_2$ )が発生する。 $^{35}\text{S}$ で標識された硫化鉄に塩酸を加えると、 $^{35}\text{S}$ を含む硫化水素( $\text{H}_2\text{S}$ )が発生する。

問21 次の記述のうち、放射性核種が沈殿するものの組合せはどれか。

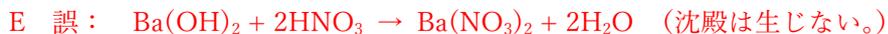
- A  $^{14}\text{C}$ で標識した炭酸ナトリウムに塩化カルシウム水溶液を加える。
- B  $^{110\text{m}}\text{Ag}^+$ を含む硝酸酸性溶液に硫化水素を通じる。
- C  $^{76}\text{As}^{3+}$ を含む硝酸酸性溶液に塩酸を加える。
- D  $^{86}\text{Rb}^+$ を含むアルカリ性アンモニア水溶液に炭酸アンモニウム水溶液を加える。
- E  $^{140}\text{Ba}^{2+}$ を含む水溶液に硝酸を加える。

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

〔解答〕 1

〔解説〕





問22 1 mL の  $5 \text{ mol} \cdot \text{L}^{-1}$  塩酸溶液にそれぞれ 10 kBq 含まれる  $^{59}\text{Fe}(\text{III})$  と  $^{140}\text{La}(\text{III})$  を分離できる方法は次のうちどれか。ただし、塩酸溶液には  $^{59}\text{Fe}(\text{III})$  と  $^{140}\text{La}(\text{III})$  の各担体 0.1 mg がそれぞれ含まれるものとする。

- 1 陰イオン交換樹脂カラムに通す。
- 2 9 mL の水で希釈した後、陰イオン交換樹脂カラムに通す。
- 3 アンモニア水を添加してアルカリ性にした後、ろ過する。
- 4 還元剤を十分添加した後、ジイソプロピルエーテルで溶媒抽出を行う。
- 5 蒸留を行う。

〔解答〕 1

〔解説〕

- 1: 正  $\text{Fe}(\text{III})$  は濃い塩酸溶液中 (9 mol/L) で  $\text{Fe}^{3+} + 4\text{Cl}^- \rightarrow \text{FeCl}_4^-$  のクロロ錯体を形成し、陰イオン交換樹脂に吸着される。ランタノイド元素、アルカリ金属、アルカリ土金属などは、強塩基性イオン交換樹脂にはほとんど (又は全く) 吸着しない。
- 2: 誤 10 倍希釈すると 0.5 mol/L となる。吸着された水酸化鉄 (III) を陰イオン交換樹脂から溶出させる際には、0.5 mol/L 濃度の薄い塩酸溶液を流す。
- 3: 誤 アンモニア水により水酸化鉄 (III) の沈殿を作ると、 $\text{La}^{3+}$  は水酸化鉄 (III) の沈殿とともに共沈するので、分離できない。
- 4: 誤 還元反応を行うことが不適切。Fe (III) はエーテル層に抽出するが、Fe (II)、La は抽出しない。
- 5: 誤 共にコロイドを形成するため、ろ過、沈殿等では分離できない。

問23 担体を加えた 140 kBq の  $^{64}\text{Cu}$  (半減期 760 分) を含む水溶液に、チオアセトアミド水溶液を加えて加熱し、 $^{64}\text{Cu}$  を硫化銅として沈殿分離した。この分離操作には 380 分かかった。得られた沈殿 4.0 g のうち、0.10 g 中の  $^{64}\text{Cu}$  の分離操作終了時の放射能は 2.4 kBq だった。この沈殿分離操作での  $^{64}\text{Cu}$  の収率 [%] として、最も近い値は次のうちどれか。

- 1 45
- 2 57
- 3 69
- 4 81
- 5 97

〔解答〕 5

〔解説〕 140 kBq の 380 分後の放射能は、 $140 \times (1/2)^{(380/760)} \doteq 99 \text{ (kBq)}$  (A)

得られた沈殿 0.1 g 中の  $^{64}\text{Cu}$  の放射能は 2.4 kBq なので、4.0 g 中の放射能は 96 kBq (B)

したがって、 $^{64}\text{Cu}$  の収率 (%) は  $(\text{B}/\text{A}) \times 100 \doteq 98$

問24 イオン交換樹脂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 H型の陽イオン交換樹脂カラムに $^{22}\text{Na}^+$ を含む水溶液を流すと、 $^{22}\text{Na}^+$ は樹脂に吸着しない。
- B 強酸性陽イオン交換樹脂カラムでは、 $^{45}\text{Ca}^{2+}$ が $^{42}\text{K}^+$ より先に溶離する。
- C 強酸性陽イオン交換樹脂カラムを使用して $^{137}\text{Cs}^+$ と $^{86}\text{Rb}^+$ が分離できる。
- D 強塩基性陰イオン交換樹脂カラムでは、 $^{36}\text{Cl}^-$ が $^{32}\text{PO}_4^{3-}$ より先に溶離する。
- E OH型の陰イオン交換樹脂カラムに $^{57}\text{Ni}^{2+}$ を含む $9\text{ mol}\cdot\text{L}^{-1}$ 塩酸性溶液を流すと、 $^{57}\text{Ni}^{2+}$ は樹脂に吸着しない。

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

〔解答〕5

〔解説〕

- A：誤 Naの方がHより選択性は高い(吸着されやすい)ので樹脂に吸着する。陽イオン交換樹脂のイオンの選択性は、 $\text{Li}^+ (<\text{H}^+) < \text{Na}^+ < \text{Rb}^+ < \text{K}^+ < \text{Mg}^{2+} < \text{Ca}^{2+} < \text{Sr}^{2+} < \text{Ba}^{2+}$ となる。
- B：誤 KはCaより選択性が低いので、陽イオン交換樹脂から離れやすいため、先に溶離する。
- C：正 Csは、5%クエン酸アンモニウム溶液で強酸性陽イオン交換樹脂から溶離する。
- D：正 イオン交換樹脂は、一般的にイオンの価数が小さいものほど、また原子・分子のサイズが小さい物ほど溶離しやすい。
- E：正 Niは濃塩酸中でも陰イオン錯体をつくらないので、陰イオン交換樹脂には吸着しない。

問25 ある放射性標識化合物は、水から有機溶媒への分配比(有機溶媒中濃度/水中濃度)が10である。その放射性標識化合物100 MBqを含む水から同じ体積の有機溶媒に抽出したのち、有機溶媒を分けた。再度、残った水に同じ体積の有機溶媒を加えて抽出すると、抽出されなかった放射性標識化合物の放射能[MBq]として、最も近い値は次のうちどれか。

- 1 0.8    2 9    3 20    4 50    5 90

〔解答〕1

〔解説〕分配比10より、有機溶媒中濃度：水中濃度=10：1

このため、抽出されない割合は $1 \div (1+10) \doteq 0.091$  ①

1回目で水層に残った量は $100(\text{MBq}) \times 0.091$ で9.1MBq ②

したがって、2回目の抽出で水層に残る量は、②×① $\doteq 0.83\text{MBq}$

問26 次の標識化合物に関する記述のうち、正しいものの組合せはどれか。

- A 酢酸のメチル基に標識されたトリチウムは水分子の水素と容易に同位体交換する。
- B 保存するときにはできるだけ放射能濃度の高い状態とする。
- C 放射化学的純度は非放射性不純物の量とは無関係である。
- D 化学純度を上げるために精製を繰り返すと比放射能は一定となる。

(令和4年度) 第1種化学

E 有機化合物中の特定位置にトリチウムを標識するにはウイultzバツハ法を用いる。

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

〔解答〕 4

〔解説〕

A：誤 常温下や触媒がない状況では、水分子の水素と容易に同位体交換は起きない。

B：誤 高い → 低い

C：正 放射化学的純度とは、特定の化学形放射能が、全放射能に対して占める割合であり、非放射性不純物の量とは関係がない。

D：正 化学純度が上がると最大比放射能（放射能の理論的的最大値）に近づくため、比放射能は一定となる。

E：誤 ウイultzバツハ法とは、 $^3\text{H}$  ガスと有機化合物とを密封して、同位体交換反応により標識する方法。標識の位置が一定しない。

問 27 全放射能 2.0 MBq の $^{14}\text{C}$ アニリン ( $\text{C}_6\text{H}_5\text{NH}_2$ ) 10 mg を検定したところ、化学純度が 90%、放射性核種純度が 90%、放射化学的純度が 80%であった。この $^{14}\text{C}$ アニリンの比放射能 $[\text{kBq} \cdot \text{mg}^{-1}]$ として、最も近い値は次のうちどれか。

- 1 95    2 120    3 130    4 140    5 160

〔解答〕 5

〔解説〕

①化学(的)純度：着目する化合物量 (RI 標識+非標識) / 全体の化合物量

②放射核種的純度：着目する RI の放射能/全放射能

③放射化学的純度：着目する化合物の放射能/全放射能

したがって、 $^{14}\text{C}$ アニリンの比放射能 $[\text{kBq} \cdot \text{mg}^{-1}]$ は、 $2000(\text{kBq}) \div 10(\text{mg}) \div ① \times ② \times ③ \doteq 160$

問 28  $^{65}\text{Zn}^{2+}$ を含む溶液試料 100 mL がある。この溶液試料を 40 mL ずつ分取して試料 A、B とした。試料 A に、非放射性的の  $\text{Zn}^{2+}$  を  $7.0 \text{ mg} \cdot \text{mL}^{-1}$  で含む水溶液 1.0 mL を加えて十分に混合した後の  $^{65}\text{Zn}$  の比放射能は  $700 \text{ kBq} \cdot \text{mg}^{-1}$  であった。試料 B には、同じ非放射性的  $\text{Zn}^{2+}$  水溶液 3.0 mL を加えて同様の処理をしたところ、 $^{65}\text{Zn}$  の比放射能は  $500 \text{ kBq} \cdot \text{mg}^{-1}$  であった。元の溶液試料 100 mL 中に含まれる  $\text{Zn}^{2+}$  の質量 $[\text{mg}]$ として、最も近い値は次のうちどれか。

- 1 28    2 35    3 56    4 70    5 110

〔解答〕 4

〔解説〕 ここでは、比放射能は Zn の単位質量あたりの放射能の値を示す。

分注した各 40ml に含まれる  $^{65}\text{Zn}$  の質量を X(mg) とする。

試料 A に含まれる全放射能は  $700(\text{kBq} \cdot \text{mg}^{-1}) \times (7(\text{mg} \cdot \text{mL}^{-1}) \times 1(\text{ml}) + X(\text{mg}))$

(令和4年度) 第1種化学

試料 B に含まれる全放射能は  $500(\text{kBq} \cdot \text{mg}^{-1}) \times (7(\text{mg} \cdot \text{mL}^{-1}) \times 3(\text{ml}) + X(\text{mg}))$

ここで、試料 A と B に含まれる放射エネルギーは等しいので、これを = で結び、X について解くと  $X = 28(\text{mg})$  となる。

したがって、元の溶液試料 100ml 中に含まれる  $^{65}\text{Zn}$  の質量は、 $28(\text{mg}) \times (100(\text{ml}) \div 40(\text{ml})) = 70(\text{mg})$  となる。

問 29 放射線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 照射により単位長さあたりに生成するスパー（スプール）の数は LET に依存しない。
- B 水に照射すると  $10^{-8}$  秒以上経過してからイオン化が起こる。
- C 水への照射での二次過程で過酸化水素が生成する。
- D  $\text{Fe}^{2+}$  水溶液への  $\gamma$  線照射により  $\text{Fe}^{2+}$  は酸化される。

- 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 LET（放射線が単位長さあたりに平均して失うエネルギー）が大きくなれば、生成するスパー（イオン・ラジカルなどの集合体）の数は大きくなる。

B：誤 水の放射線分解の結果、水和電子( $e_{\text{aq}}^-$ )、 $\text{H}_3\text{O}^+$ 、 $\text{OH}^-$  等のイオン・ラジカルが生成され、これらの反応は  $10^{-12}$  秒以内で終了する。

C：正 一次過程でイオン・ラジカル、励起分子などの活性化学種の集団が形成され、これらの化学種間や化学種と周囲の分子間で化学反応が起こる過程を二次過程という。過酸化水素は  $e_{\text{aq}}^- + \text{H}_3\text{O}^+ + \text{OH}^- \rightarrow \text{H}_2\text{O}_2 + \text{H}_2$  などの二次過程での反応により生成する。

D：正 フリッケ線量計はこの酸化反応を利用している。

問 30 放射線と物質との相互作用の利用に関する次の記述のうち、正しいものはどれか。

- 1 セリウム線量計では、 $\text{Ce}^{3+}$  が  $\text{Ce}^{4+}$  に酸化されることを利用する。
- 2 グラフト共重合では、線エネルギー付与の大きい  $\alpha$  線が主に利用される。
- 3 熱ルミネセンス法による吸収線量測定では、熱ルミネセンスの強度が吸収線量に比例することを利用する。
- 4 ESR（電子スピン共鳴）法による文化財の年代測定では、放射線の電離作用によるイオン対を検出する。
- 5 フィッシュントラック法によるウランの定量では、 $^{238}\text{U}$  の核分裂片の飛跡を霧箱で検出する。

〔解答〕 3

〔解説〕

1：誤  $\text{Ce}^{4+}$  が  $\text{Ce}^{3+}$  に還元されることを利用している。

2：誤  $\gamma$  線や  $\beta$  線を利用している。 $\alpha$  線では飛程が短い。

(令和4年度) 第1種化学

- 3: 正 加熱時に放出される光度が吸収線量に比例することを利用している。
- 4: 誤 自然放射線により生じた不対電子を ESR により測定する。古いほど捕獲している不対電子の量が多くなる。
- 5: 誤 鉱物中の飛跡を顕微鏡下で観察する。

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  $^{127}\text{I}$  の熱中性子捕獲反応で生成する  $^{128}\text{I}$  の化学効果について考える。ヨウ化エチル ( $\text{C}_2\text{H}_5\text{I}$ ; 水に不溶) を熱中性子照射し、その後還元剤を含む水と振とうすると、生成した  $^{128}\text{I}$  の約50%が水相に□Aの化学形で抽出された。 $^{127}\text{I}$  の中性子捕獲反応で生成する高励起状態の  $^{128}\text{I}$  原子核から放出される□Bにより  $^{128}\text{I}$  が□アする。この放出される□Bの最大エネルギー  $E[\text{MeV}]$  は、捕獲反応の  $Q$  値 (6.8 MeV) に等しくなる。 $^{128}\text{I}$  原子の質量 (原子質量単位) を  $M$  で表すと、最大□アエネルギー  $E_R[\text{eV}]$  は、 $537E^2/M$  で与えられる。したがって、その値は□C eV となる。一方、ヨウ化エチル分子の C-I の□イエネルギーは数 eV であり、これに比べて□アエネルギーの方が大きいことから、C-I の結合が切断され  $^{128}\text{I}$  のみが水相に移行した。これは、1934年に Szilard と Chalmers により行われた実験である。一般に  $(n, \gamma)$  反応で生成する核種の□Dは標的核種と同じであるため、□Eの状態を得ることは難しい。しかし、水相から  $^{128}\text{I}$  を得るこの実験は  $(n, \gamma)$  反応による□E RI 製造の礎となっている。

<Aの解答群>

- 1  $\text{I}^-$    2  $\text{I}_2$    3  $\text{I}^+$    4  $\text{IO}_3^-$    5  $\text{IO}_4^-$

<Bの解答群>

- 1  $\alpha$  線   2  $\beta$  線   3  $\gamma$  線   4  $\delta$  線   5 X線

<ア、イの解答群>

- 1 反跳   2 活性化   3 結合   4 イオン化   5 振動  
6 回転

<Cの解答群>

- 1 84   2 194   3 288   4 342   5 540

<D、Eの解答群>

- 1 質量数   2 中性子数   3 原子番号   4 同位体   5 非同位体担体  
6 無担体   7 保持担体

[解答] I   A-1   B-3   ア-1   イ-3   C-2   D-3   E-6

[解説]

ジラード・チャルマー法

一定容積のヨウ化エチル  $\text{C}_2\text{H}_5\text{I}$  に熱中性子照射すると、 $^{127}\text{I}(n, \gamma)^{128}\text{I}$  反応により  $^{128}\text{I}$  が生成する。このときに放出される  $\gamma$  線による反跳を受け、C-I の結合が切れて  $^{128}\text{I}$  が遊離する。通常、原子核の崩壊や核反応によって生成する原子は、反跳によって化学的に極めて高く励起された状態になっており、反跳原子に与えられるエネルギーは化学結合のエネルギーに比較して非常に大きいため化学結合が切れる。ジラード・チャルマー法は、無担体の比放射能が大きい RI 分離濃縮法として広く用いられている。

A: 遊離したヨウ素は水溶液中で還元剤により  $I^-$  の化学形になる。

B、ア:  $^{127}I$  に熱中性子を照射すると  $(n, \gamma)$  反応により  $^{128}I$  が生成されるが、原子核は高励起状態であるため、 $\gamma$  線を放出するとともに反跳する。

イ: ヨウ化エチルではヨウ素と炭素が化学結合により結合しており、遊離するには結合エネルギー以上のエネルギーが必要となる。ヨウ化エチルのヨウ素と炭素の化学結合エネルギーは数 eV であり、これと比べて反跳エネルギーは数百 eV で極めて大きい。

C: 捕獲反応の Q 値は反跳する原子核と  $\gamma$  線に分割されるため、一方に全てのエネルギーが与えられる時が最大エネルギーとなる。

Q 値 = 6.8 MeV、 $^{128}I$  原子の質量数  $M = 128$ 、最大反跳エネルギー  $E_R = 537 E^2 / M$  によって、 $E_R = 194$  eV。

D:  $(n, \gamma)$  反応では、標的核種と原子番号が同じ RI が生成される。

E:  $(n, \gamma)$  反応では、反応前後で元素が同じであり、反応前の核種が担体となるため無担体の状態で反応後の核種を得ることは難しい。

II ヨウ素の放射性核種のうち医療の分野で利用されている  $^{123}I$ 、 $^{125}I$ 、 $^{131}I$  の半減期、製造法、壊変様式、適用例などについて以下に示す。

放射性核種を被験者に投与して体外から画像診断を行うインビボ (*in vivo*) 検査には、比較的低エネルギーの  $\gamma$  線を放出し、 $\alpha$  線や  $\beta$  線の放出がなく体内被ばくの少ない短半減期の核種が適している。 $^{123}I$  は半減期 13.2 時間で EC 壊変し、 $\boxed{F}$  keV の  $\gamma$  線を放出する核種であり、 $\boxed{ウ}$  や SPECT で甲状腺機能の診断に用いられる。 $^{123}I$  の製造には、 $^{124}Te \xrightarrow{G} ^{123}I$  反応や  $^{124}Xe(p, 2n)^{123}Cs$  反応などが利用される。なお、後者の反応で生成する  $^{123}Cs$  は、2 回の EC 壊変を経て  $^{123}I$  になる。

血液や尿中に含まれるホルモンやビタミンなどの生理活性物質を測定するインビトロ (*in vitro*) 検査である  $\boxed{エ}$  には半減期が比較的長い  $\gamma$  線放出核種が利用される。 $^{125}I$  は半減期  $\boxed{オ}$  日で EC 壊変して、35.5 keV の  $\gamma$  線を放出する。また壊変に伴い、 $\boxed{H}$  の特性 X 線が放出される。 $^{125}I$  は原子炉を使い  $^{124}Xe(n, \gamma)^{125}Xe$  反応により生成する  $^{125}Xe$  (半減期 16.9 時間) の EC、 $\beta^+$  壊変により得られる。

$^{131}I$  は  $\beta^-$  線を放出する核種で、甲状腺疾患の治療などに利用される。 $^{131}I$  は半減期  $\boxed{カ}$  日で  $\beta^-$  壊変 ( $E_{\beta_{max}} = 606$  keV (89.5%)) して、 $^{131}Xe$  の励起準位から  $\gamma$  線 (主に 365 keV) を放出する。 $^{131}I$  は原子炉で  $\boxed{I}$  の熱中性子による核分裂、あるいは  $^{130}Te(n, \gamma)$  反応で生成する  $^{131}Te$  (半減期 25 分) の  $\beta^-$  壊変により得られる。

<F の解答群>

- 1 122    2 141    3 159    4 320    5 514  
6 744

<ウ、エの解答群>

- 1 陽電子放射断層撮影(PET)    2 シンチグラフィ  
3 ラジオイムノアッセイ    4 エンザイムイムノアッセイ  
5 蛍光イムノアッセイ    6 ミクロオートラジオグラフィ

<Gの解答群>

1 ( $\alpha, n$ )    2 ( $\alpha, p$ )    3 ( $p, n$ )    4 ( $p, 2n$ )    5 ( $d, 2n$ )

<オ、カの解答群>

1 3.26    2 8.03    3 14.3    4 27.7    5 59.4  
6 77.2    7 272

<Hの解答群>

1 Sb    2 Te    3 I    4 Xe    5 Cs

<Iの解答群>

1  $^{226}\text{Ra}$     2  $^{231}\text{Pa}$     3  $^{232}\text{Th}$     4  $^{235}\text{U}$     5  $^{238}\text{U}$

[解答] II    F-3    ウ-2    エ-3    G-4    オ-5    カ-2    H-2    I-4

[解説]

F、ウ： $^{123}\text{I}$ は半減期13.2時間 軌道電子捕獲(EC)により $\gamma$ 線159 keVを放出する。 $\beta$ 線を放出せず半減期が短いため、体内投与した際の被ばく線量が少なくインビボ検査に適する。画像解像度が高く、シンチカメラ、SPECTに利用される。(エは後述参照)

G： $^{124}\text{Te}$ と $^{123}\text{I}$ の質量数及び原子番号を比較すると、 $^{123}\text{I}$ の方が質量数は1小さく、原子番号は1高い。この差と核反応で入射する放射線と放出する放射線による質量数と陽子数(原子番号)の収支も同じにならない。したがって、反応後に質量数が1小さく、原子番号が1大きくなる( $p, 2n$ )反応が選択できる。

エ、オ： $^{125}\text{I}$ は半減期59.4日 軌道電子捕獲(EC)により $\gamma$ 線35.5 keVを放出する。ラジオイムノアッセイ(RIA)、イムノラジオメトリックアッセイ(IRMA)などインビトロ検査に利用される。また、密封線源として前立腺癌の治療にも用いられる。

H：軌道電子捕獲(EC)は原子核が軌道電子を捕獲し、原子核内の陽子が中性子に変化する反応である。したがって、軌道電子捕獲によって原子番号は1減ることとなるため、ヨウ素で軌道電子捕獲が発生するとテルル(Te)が生じる。

カ： $^{131}\text{I}$ は半減期8.03日  $\beta$ -壊変により $\beta$ 線606 keV, 334 keVを放出して $^{131}\text{Xe}$ を生成する。

$^{131}\text{Xe}$ は励起準位から $\gamma$ 線を放出する。甲状腺疾患の内用療法に用いられる。

I： $^{131}\text{I}$ は核燃料として用いられている $^{235}\text{U}$ の主な核分裂生成物の一つである。

問 32 放射線の性質を利用した様々な分析化学的手法が開発されてきた。これに関する次の 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  $\gamma$ 線スペクトロメトリの□ A □の向上は、核種の同定を大幅に容易なものとした。例えば、中性子放射化分析は、□ A □に優れる□ B □の普及により、非破壊多元素同時分析を可能とする機器分析の手法として広く知られるに至った。□ B □の普及以前の中性子放射化分析では□ C □が $\gamma$ 線スペクトルの測定に利用されてきたが、微量元素の分析に際しては化学分離をしばしば併用する必要があった。現在でも、分析検体の量や分析対象の元素の含有量によっては、分析感度の向上などのために化学分離が併用される。この場合、分析対象核種以外の生成核によるバックグラウンド $\gamma$ 線の低減もしくは対象元素自体の単離が求められる。前者の例としては中性子放射化で生成しやすい□ D □を選択的に除去する HAP (水和五酸化アンチモン)、後者の例としては  $^{152}\text{Eu}$  などのランタノイドの沈殿剤である□ E □などが知られている。

<A の解答群>

- 1 エネルギー分解能    2 S/N 比    3 不感時間  
4 繰り返し再現性    5 バックグラウンド強度

<B、C の解答群>

- 1 GM 計数管    2 Si(Li)検出器    3 Ge 検出器    4 NaI(Tl)検出器  
5 BGO 検出器

<D の解答群>

- 1  $^{14}\text{C}$     2  $^{18}\text{F}$     3  $^{24}\text{Na}$     4  $^{32}\text{P}$     5  $^{55}\text{Fe}$

<E の解答群>

- 1 EDTA    2 シュウ酸アンモニウム    3 過塩素酸ナトリウム  
4 塩化カルシウム    5 硫化水素

[解答] I    A-1    B-3    C-4    D-3    E-2

[解説] 核種の同定を容易なものとした要因は、スペクトル線幅が狭くなった、即ちエネルギー分解能が向上したことである。このことにより、エネルギーの接近している多数のガンマ線を分離できるようになった。半導体検出器のエネルギー分解能は、NaI(Tl)検出器よりはるかに優れる。半導体検出器には Si(Li)検出器、高純度 Ge 検出器等が存在し、Si よりガンマ線の吸収係数が大きい Ge 半導体検出器が広く用いられている。

1968 年、Girardi らは、水和五酸化アンチモン (HAP) が濃塩酸溶液でナトリウムイオンとタンタルイオンのみを選択的に吸着することを見出し、放射性  $^{24}\text{Na}$  を目的試料から除去する方法として HAP を採用した。

希土類の回収には、シュウ酸溶液を用いて希土類シュウ酸塩として沈殿分離する方法が広く用いられる。

II 低エネルギー $\gamma$ 線や X 線を放出する核種には放射線の性質を利用した様々な応用が知られている。

**F** は蛍光 X 線分析の線源として利用されているが、これは  $\gamma$  線照射に伴う **G** を利用した多元素同時分析法である。

メスバウアー分光法では、例えば **H** が 14.4 keV の低エネルギー  $\gamma$  線の線源として利用されている。この  $\gamma$  線はメスバウアー効果として知られている無反跳条件下での  $\gamma$  線共鳴吸収現象を利用して、鉄を含む化合物の電子構造や材料の物性に関する情報を得るために用いられている。

放射性核種からの低エネルギー  $\gamma$  線や X 線に替えてシンクロトロン放射光もよく利用される。この方法では、加速器中で加速された電子の **I** により放出される光子を利用する。X 線吸収端付近での X 線吸収スペクトルに基づくキャラクタリゼーションの手法である **J** などで活発な応用研究が展開されている。

<F の解答群>

1  $^{33}\text{P}$     2  $^{55}\text{Fe}$     3  $^{147}\text{Pm}$     4  $^{210}\text{Po}$     5  $^{241}\text{Am}$

<G の解答群>

1 一電子還元    2 二電子還元    3 核異性体転移    4 内部転換    5 内殻電離

<H の解答群>

1  $^{55}\text{Fe}$     2  $^{56}\text{Fe}$     3  $^{57}\text{Fe}$     4  $^{57}\text{Co}$     5  $^{60}\text{Co}$

<I の解答群>

1 スプール形成    2 反跳    3 核破砕    4 コンプトン効果  
5 制動放射

<J の解答群>

1 XAFS    2 PIXE    3 XPS    4 XRD    5 XRF

[解答] II    F-5    G-5    H-4    I-5    J-1

[解説] 蛍光 X 線分析とは、線源から放出される X 線が試料中の内殻電子を弾き飛ばして(内殻電離)、生じた電子空孔に外殻電子が遷移する際に放出する特性 X 線(蛍光 X 線)を観測する手法である。原子ごとに固有な特性 X 線のエネルギーから試料中の元素を同定、特性 X 線の強度から元素の量を定量する。線源には、X 線管球を用いる方法の他、対象元素に応じて  $^{241}\text{Am}$  等の放射性物質から放出されるガンマ線が用いられる。

メスバウアー分光法で最もポピュラーな手法は、 $^{57}\text{Fe}$  ガンマ線メスバウアー分光法である。線源の  $^{57}\text{Co}$  から壊変してできる励起状態の  $^{57}\text{Fe}$  が、基底状態に落ちるときに発生する 14.4keV の低エネルギーガンマ線を利用する。測定対象には、鉄が含まれている必要がある。試料中の鉄のうち、天然存在比 2.2%の  $^{57}\text{Fe}$  が、線源から放出されるガンマ線を共鳴吸収し、鉄化合物の電子状態、材料物性を評価する。

シンクロトロン放射光の利用として XAFS (X-ray Absorption Fine Structure) がある。放射光では、シンクロトロンで電子を加速した際放出される制動放射を積極的に利用する。XAFS は、X 線のエネルギーを変えながら、X 線を照射された物質の X 線吸収スペクトルを観測する手法である。なお、J の解答群の測定法は、以下のとおり。

PIXE (Particle Induced X-ray Emission) 粒子線励起 X 線分析

XPS (X-ray Photoelectron Spectroscopy) X線光電子分光測定

XRD (X-ray Diffraction measurement) X線回折測定

XRF (X-ray Fluorescence) 蛍光X線分析

III 消滅放射線の応用では、陽電子放射断層撮影 (PET)での標識医薬品の使用がよく知られている。標識に用いられる核種の中には  $\boxed{\text{K}}$  があり、標識にはグルコースの水酸基を  $\boxed{\text{K}}$  で置換できることが利用されている。

$\boxed{\text{L}}$  などの比較的半減期の長い放射性核種から放出される陽電子を試料に照射し、 $\boxed{\text{M}}$  の寿命測定などから材料物性に関する情報を得る分析手法も活発に利用されている。

天然放射性核種からの放射線として 2 MeV 以上の  $\gamma$  線を放出する核種は  $\boxed{\text{N}}$  などに限られる。しかし、中性子や荷電粒子の照射により励起された核の脱励起で生成する光子を照射中に計測する  $\boxed{\text{O}}$  では、このような高エネルギー領域の光子を元素分析などにしばしば利用している。

<Kの解答群>

1  $^{11}\text{C}$    2  $^{13}\text{N}$    3  $^{15}\text{O}$    4  $^{18}\text{F}$    5  $^{68}\text{Ga}$

<Lの解答群>

1  $^{22}\text{Na}$    2  $^{24}\text{Na}$    3  $^{28}\text{Al}$    4  $^{45}\text{Ca}$    5  $^{57}\text{Co}$

<Mの解答群>

1 電子   2 陽電子   3 ニュートリノ   4 反ニュートリノ  
5 陽子

<Nの解答群>

1  $^{60}\text{Co}$    2  $^{128}\text{I}$    3  $^{134}\text{Cs}$    4  $^{137}\text{Cs}$    5  $^{208}\text{Tl}$

<Oの解答群>

1 ラザフォード散乱   2 放射化分析   3 即発  $\gamma$  線分析  
4 粒子励起X線分析   5 アクチバブルトレーサー

[解答] III   K-4   L-1   M-2   N-5   O-3

[解説] PET 医薬品として、フルデオキシグルコース( $^{18}\text{F}$ )が用いられる。 $^{18}\text{F}$ -FDG として有名な放射性薬品であり、D-グルコースの 2 位の水酸基を陽電子放射同位体であるフッ素 18 に置換したものである。

陽電子消滅分光法の線源として、 $^{22}\text{Na}$  が用いられる。陽電子放出時に生じる 1,275keV のガンマ線と、対象試料内部で消滅する時に生じる 511keV のガンマ線の検出時間差(ピコ秒のオーダー)から、陽電子寿命を計測する。金属材料等の空孔、格子欠陥において陽電子は長く存在することが知られており、格子欠陥等の研究に非常に有効な手法である。

2MeV を超えるガンマ線を放出する天然放射性核種として、トリウム系列の  $^{208}\text{Tl}$  (2.615 MeV)、ウラン系列の  $^{214}\text{Bi}$  等がある。中性子による核反応で原子核を励起状態にし、その際 10-14s 程度の瞬時に生じる誘起ガンマ線を Ge 検出器等でスペクトル分析することで、核種または元素を分析する手法を即発ガンマ線分析と呼ぶ。即発ガンマ線に用いられる代表的な中性子捕獲ガンマ線

のエネルギーは、5~9MeV 程度である。