

## 物 化 生

物理学、化学及び生物学のうち放射線に関する課目

試験が始まる前に、このページの記載事項をよく読んでください。裏面以降の試験問題は、指示があるまで見てはいけません。

1 試験時間：10:00～11:45（1 時間 45 分）

2 問題数：6 題（14 ページ）

3 注意事項：

- ① 机の上に出してよいものは、受験票、鉛筆又はシャープペンシル（HB 又は B）、鉛筆削り、消しゴム、時計（計算機能・通信機能・辞書機能等の付いた時計は不可）に限ります。
- ② 計算機（電卓）、定規及び下敷きの使用は認めません。
- ③ 不正行為等を防止するため、携帯電話等の通信機器は、必ず、電源を切ってカバン等の中にしまってください。
- ④ 問題用紙の印刷不鮮明、ページの落丁・乱丁又は解答用紙の汚れなどに気付いた場合は、手を挙げて試験監督員に知らせてください。なお、試験問題の内容に関する質問にはお答えできません。
- ⑤ 試験終了の合図があったら、ただちに筆記用具を置いてください。  
なお、試験監督員が解答用紙を集め終わるまで、席を離れてはいけません。
- ⑥ 問題用紙は持ち帰っていただいて結構です。
- ⑦ 不正行為を行った者は、受験を中止させ、退場を命じます。

4 解答用紙（マークシート）の取扱いについて：

- ① 解答用紙を折り曲げたり汚したりしないでください。また、記入欄以外の余白及び裏面には、何も記入しないでください。
- ② 筆記用具は、鉛筆又はシャープペンシル（HB 又は B）を使用してください。また、記入を訂正する場合は、消しゴムできれいに消してください。
- ③ 解答用紙の所定欄に氏名・受験地・受験番号を忘れずに記入してください。特に、受験番号は受験票と照合して間違えないよう記入してください。
- ④ 解答は、1 つの問いに対して、1 つだけ選択（マーク）してください。2 つ以上選択している場合は、採点されません。

問1 次のⅠ～Ⅲの文章の□の部分に入る最も適切な語句、記号又は数値を、それぞれの解答群から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 ある物質の荷電粒子に対する質量衝突阻止能は、入射粒子の速度の□A乗に□Bし、その有効電荷の□C乗に□Dするが、入射粒子の質量には依存しない。また、その物質の□Eに比例し、質量数に逆比例する。この比は元素によらずほぼ一定であるので、質量衝突阻止能はあまり物質によらない値となる。

< A～Eの解答群 >

- |        |        |        |         |        |
|--------|--------|--------|---------|--------|
| 1 1/2  | 2 1    | 3 2    | 4 3     | 5 5    |
| 6 原子番号 | 7 核子数  | 8 中性子数 | 9 エネルギー | 10 運動量 |
| 11 比例  | 12 逆比例 |        |         |        |

Ⅱ 熱中性子が原子番号5の□F原子核に吸収されると、α線が放出される場合がある。この現象は荷電粒子生成反応と呼ばれ、□ア反応であり、α線と□G原子核が生成される。この反応の断面積は約□H b(バーン)と大きい。ここで、1 b = □イ cm<sup>2</sup>である。反応後の生成核は93%の確率で励起状態をとり、Q値の絶対値は2.3 MeVである。放出されるα線のエネルギーは□I MeVである。この反応は中性子の検出によく利用され、中・高速中性子に対して感度を高くするために中性子モデレータ(減速材)が用いられる。モデレータとしては□ウを多く含む材料が適切である。

< F～Iの解答群 >

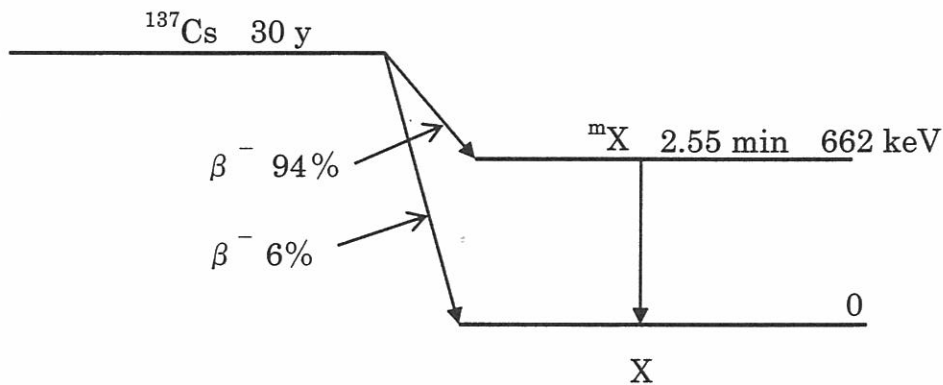
- |                   |                   |                   |                   |                   |
|-------------------|-------------------|-------------------|-------------------|-------------------|
| 1 <sup>6</sup> Li | 2 <sup>7</sup> Li | 3 <sup>7</sup> Be | 4 <sup>9</sup> Be | 5 <sup>10</sup> B |
| 6 <sup>11</sup> B | 7 0.8             | 8 1.5             | 9 1.8             | 10 2.3            |
| 11 3.8            | 12 38             | 13 380            | 14 3800           | 15 38000          |

< ア～ウの解答群 >

- |          |                      |                      |                      |                      |
|----------|----------------------|----------------------|----------------------|----------------------|
| 1 共鳴     | 2 核融合                | 3 光核                 | 4 発熱                 | 5 吸熱                 |
| 6 化学     | 7 水素                 | 8 炭素                 | 9 ホウ素                | 10 鉛                 |
| 11 カドミウム | 12 10 <sup>-17</sup> | 13 10 <sup>-19</sup> | 14 10 <sup>-22</sup> | 15 10 <sup>-24</sup> |

III 図に  $^{137}\text{Cs}$  の壊変図を示す。図における核種 X は [エ] である。核種  $^m\text{X}$  は X の [オ] 状態であり、[カ] により X となる。このとき、 $^m\text{X}$  から光子が放出される代わりに、そのエネルギーを軌道電子に与え電子を放出する場合があります、この現象を [キ] という。光子放出と電子放出は競合過程であり、光子の放出に対する軌道電子の放出割合  $\alpha$  を [ク] という。

$^{137}\text{Cs}$  の放射能を 10 GBq とするとき、この線源から放出される 662 keV の光子の数は、すべての軌道電子に対する  $\alpha$  を 0.11 とすると、[J]  $\times 10^9 \text{ s}^{-1}$  となる。このとき、線源から 1 m 離れた位置 P における光子のフルエンス率は [K]  $\times 10^4 \text{ cm}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$  であり、空気の密度を  $0.0013 \text{ g} \cdot \text{cm}^{-3}$ 、線エネルギー吸収係数を  $3.8 \times 10^{-5} \text{ cm}^{-1}$  とすると、位置 P における空気の吸収線量率は [L]  $\times 10^{-4} \text{ Gy} \cdot \text{h}^{-1}$  である。ただし、線源から位置 P までの光子の減弱は無視するものとする。



<エ～キの解答群>

- |                     |                     |                     |                     |                     |
|---------------------|---------------------|---------------------|---------------------|---------------------|
| 1 $^{136}\text{Xe}$ | 2 $^{137}\text{Xe}$ | 3 $^{136}\text{Ba}$ | 4 $^{137}\text{Ba}$ | 5 $^{138}\text{Ba}$ |
| 6 束縛                | 7 基底                | 8 準安定               | 9 超励起               | 10 内部転換             |
| 11 核異性体転移           | 12 オージェ効果           | 13 電子捕獲             |                     |                     |

<クの解答群>

- |          |        |          |             |
|----------|--------|----------|-------------|
| 1 光電変換効率 | 2 蛍光効率 | 3 内部転換係数 | 4 エネルギー転移係数 |
| 5 電離効率   |        |          |             |

<J～Lの解答群>

- |        |        |        |        |        |
|--------|--------|--------|--------|--------|
| 1 1.2  | 2 2.4  | 3 3.7  | 4 4.8  | 5 5.1  |
| 6 5.9  | 7 6.2  | 8 6.7  | 9 7.1  | 10 7.5 |
| 11 8.0 | 12 8.5 | 13 9.1 | 14 9.9 |        |

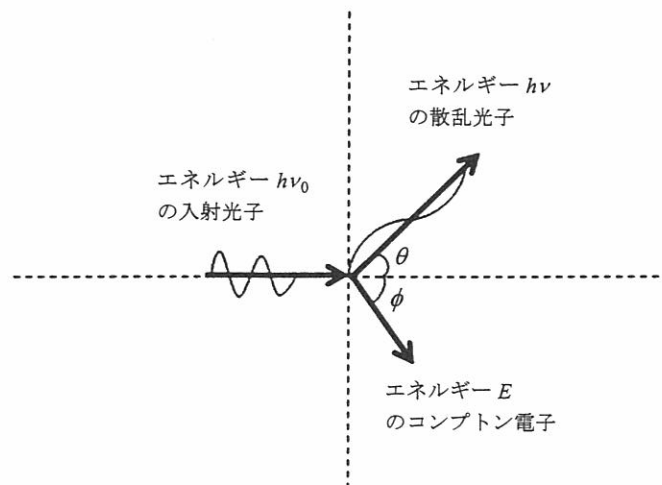
問2 次のⅠ～Ⅲの文章の□の部分に入る最も適切な語句、記号又は数値を、それぞれの解答群から1つだけ選べ。なお、解答群の選択肢は必要に応じて2回以上使ってもよい。  
光子と物質の相互作用について考える。

Ⅰ 光子のエネルギーが軌道電子にすべて与えられる現象を光電効果と呼ぶ。このとき放出される電子の運動エネルギーは、光子のエネルギーと軌道電子の□A□の差に相当する。放出された電子の占めていた軌道を外側の軌道電子がうめると、両者の□B□の差に相当する□C□エネルギーの光子が放出される。この光子を□D□と呼ぶ。あるいはそのエネルギーが別の軌道電子に与えられた場合、□E□が放出される。光電効果が起きる確率は、光子のエネルギーが特定の軌道電子の□A□を少し超えたときに急激に□F□する。この不連続的に変化する箇所を□G□と呼ぶ。

< A～Gの解答群 >

- |           |           |           |           |
|-----------|-----------|-----------|-----------|
| 1 光電子     | 2 オージェ電子  | 3 運動エネルギー | 4 静止エネルギー |
| 5 結合エネルギー | 6 輻射エネルギー | 7 吸収端     | 8 特性X線    |
| 9 制動X線    | 10 反射光    | 11 単色の    | 12 連続した   |
| 13 減少     | 14 増加     |           |           |

Ⅱ 光子が軌道電子と衝突し散乱される現象をコンプトン効果と呼ぶ。下図の通り、入射光子のエネルギーを  $h\nu_0$ 、散乱光子のエネルギー及び散乱角をそれぞれ  $h\nu$  及び  $\theta$  とする。また、コンプトン電子の運動エネルギー及び放出角をそれぞれ  $E$  及び  $\phi$  とする。



コンプトン効果では、光子のエネルギーが大きく軌道電子は静止した自由電子と見なせるので、コンプトン電子の運動量を  $p$ 、光速を  $c$  とすると、運動量及びエネルギーの保存則より次の関係が成り立つ。

$$\begin{aligned} \boxed{H} &= \boxed{I} \cos \theta + p \cos \phi \\ \boxed{J} &= \boxed{I} \sin \theta - p \sin \phi \\ h\nu_0 &= \boxed{K} + E \end{aligned}$$

ここで電子の質量を  $m_0$  とし  $(pc)^2 = E(E + 2m_0c^2)$  なる関係から次式が得られる。

$$h\nu = \frac{h\nu_0}{1 + \left(\frac{h\nu_0}{m_0c^2}\right) \boxed{L}}$$

したがって、散乱光子のエネルギーは  $\theta = \boxed{M}$  のとき最大となる。また、 $\theta = \boxed{N}$  のとき最小となり、コンプトン電子のエネルギーは最大となる。このときのコンプトン電子の放出角は  $\phi = \boxed{O}$  となり、このコンプトン電子の最大エネルギーを  $\boxed{P}$  と呼ぶ。

<H~Pの解答群>

- |    |                    |    |                    |    |                       |    |                       |    |                  |
|----|--------------------|----|--------------------|----|-----------------------|----|-----------------------|----|------------------|
| 1  | $E$                | 2  | $h\nu_0$           | 3  | $h\nu$                | 4  | $\frac{h\nu_0}{c}$    | 5  | $\frac{h\nu}{c}$ |
| 6  | $(1 - \sin\theta)$ | 7  | $(1 - \cos\theta)$ | 8  | $(h\nu_0 \sin\phi)^2$ | 9  | $(h\nu_0 \cos\phi)^2$ | 10 | $\pi$            |
| 11 | $\frac{\pi}{2}$    | 12 | 0                  | 13 | コンプトン端                | 14 | 吸収端                   |    |                  |

III 原子核周辺の  $\boxed{Q}$  の中で光子が消滅し、一对の電子と陽電子が生成される現象を電子対生成と呼ぶ。電子と陽電子は質量を有することから、この現象は光子のエネルギーが電子の静止質量エネルギーの2倍以上でないと起こらない。生成した陽電子は電子の  $\boxed{R}$  であり、電子と結合すると  $\boxed{S}$  MeV の2個の  $\boxed{T}$  を互いに反対方向に放出する。

<Q~Tの解答群>

- |   |       |    |       |    |     |    |       |
|---|-------|----|-------|----|-----|----|-------|
| 1 | 異性体   | 2  | 同位体   | 3  | 反粒子 | 4  | 0.511 |
| 5 | 1.02  | 6  | 1.25  | 7  | 陽電子 | 8  | 消滅放射線 |
| 9 | 制動放射線 | 10 | クーロン場 | 11 | 磁場  | 12 | 重力場   |

問3 放射壊変に伴って生成するヘリウム、アルゴン、ラドンに関する次のI～IIIの文章の□の部分に入る最も適切な語句、記号又は数値を、それぞれの解答群から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。アボガドロ定数は  $6.0 \times 10^{23} \text{ mol}^{-1}$  とする。

I 水素の放射性同位体であるトリチウム( $^3\text{H}$ )は、 $^6\text{Li}(\text{n}, \square \text{A}) ^3\text{H}$  反応で製造され、半減期12.3年で□B壊変して□アになる。したがって、精製した $^3\text{H}_2$ ガス1.0 gを密閉容器に入れて24.6年間保管すると、その中に□アが□C g生成する。

一方、大気中のヘリウムは大部分が□イであり、これは地殻中にあるウランやトリウム及びそれらの娘核種が放射壊変するときに放出される□D線が起源である。

<A～Dの解答群>

- |            |             |             |            |
|------------|-------------|-------------|------------|
| 1 $\alpha$ | 2 $\beta^-$ | 3 $\beta^+$ | 4 $\gamma$ |
| 5 EC       | 6 n         | 7 p         | 8 d        |
| 9 0.10     | 10 0.25     | 11 0.40     | 12 0.50    |
| 13 0.60    | 14 0.75     | 15 0.90     |            |

<ア、イの解答群>

- |                 |                 |                 |                 |
|-----------------|-----------------|-----------------|-----------------|
| 1 $^2\text{He}$ | 2 $^3\text{He}$ | 3 $^4\text{He}$ | 4 $^5\text{He}$ |
| 5 $^6\text{He}$ |                 |                 |                 |

II 地殻中のカリウムの中には同位体存在度 0.0117 %で放射性核種  $^{40}\text{K}$  が存在する。 $^{40}\text{K}$  は分岐壊変し、部分半減期  $1.43 \times 10^9$  年で  $\boxed{\text{E}}$  壊変して  $\boxed{\text{ウ}}$  になり、あるいは部分半減期  $1.22 \times 10^{10}$  年で  $\boxed{\text{F}}$  壊変して  $^{40}\text{Ar}$  になる。したがって、これらを合わせて  $^{40}\text{K}$  の半減期は  $\boxed{\text{エ}}$  年となり、また  $\boxed{\text{E}}$  壊変と  $\boxed{\text{F}}$  壊変の分岐比はおよそ  $\boxed{\text{オ}}$  となる。大気中に 1 %存在するアルゴンのほとんどは、 $^{40}\text{K}$  から  $\boxed{\text{F}}$  壊変して生成した  $^{40}\text{Ar}$  である。

塩化カリウム (KCl : 式量 74.6) の 746 g を容器内に密封し 12.2 年間放置した場合、この容器中でカリウムから新たに生成するアルゴンは  $\boxed{\text{カ}}$  mol である。

< E、F の解答群 >

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

< ウの解答群 >

- |                    |                    |                    |                    |
|--------------------|--------------------|--------------------|--------------------|
| 1 $^{39}\text{Ar}$ | 2 $^{40}\text{Ar}$ | 3 $^{41}\text{Ar}$ | 4 $^{39}\text{K}$  |
| 5 $^{41}\text{K}$  | 6 $^{39}\text{Ca}$ | 7 $^{40}\text{Ca}$ | 8 $^{41}\text{Ca}$ |

< エの解答群 >

- |                         |                         |                      |                         |
|-------------------------|-------------------------|----------------------|-------------------------|
| 1 $1.22 \times 10^9$    | 2 $1.28 \times 10^9$    | 3 $1.43 \times 10^9$ | 4 $1.22 \times 10^{10}$ |
| 5 $1.28 \times 10^{10}$ | 6 $1.43 \times 10^{10}$ |                      |                         |

< オの解答群 >

- |         |         |         |         |
|---------|---------|---------|---------|
| 1 1 : 9 | 2 3 : 7 | 3 4 : 6 | 4 5 : 5 |
| 5 7 : 3 | 6 9 : 1 |         |         |

< カの解答群 >

- |                         |                         |                         |                         |
|-------------------------|-------------------------|-------------------------|-------------------------|
| 1 $1.2 \times 10^{-14}$ | 2 $8.1 \times 10^{-14}$ | 3 $8.1 \times 10^{-13}$ | 4 $6.9 \times 10^{-10}$ |
| 5 $6.9 \times 10^{-9}$  | 6 $1.2 \times 10^{-5}$  |                         |                         |

Ⅲ 大気中に存在するラドンには、系列に属し半減期 3.8 日 ( $3.3 \times 10^5$  秒) で 壊変する  $^{222}\text{Rn}$  と、系列に属し半減期 56 秒で 壊変する がある。これらのラドン及びラドン娘核種からの放射線の寄与が、人が自然から受ける放射線被ばく量の中でもっとも大きい。

$^{222}\text{Rn}$  は  $^{226}\text{Ra}$  (半減期  $1.6 \times 10^3$  年 :  $5.0 \times 10^{10}$  秒) の  $\alpha$  壊変で生成するので、密封容器に封入した  $^{226}\text{Ra}$  の 226 mg と永続平衡にある  $^{222}\text{Rn}$  の量は  mol である。

この容器内のラドンをいったん除去すると、それから 3.8 日後における  $^{222}\text{Rn}$  の量は  mol となり、その放射能は  Bq である。

< G ~ K の選択肢 >

- |                      |                      |                      |                      |
|----------------------|----------------------|----------------------|----------------------|
| 1 $\alpha$           | 2 $\beta^-$          | 3 $\beta^+$          | 4 $\gamma$           |
| 5 EC                 | 6 トリウム               | 7 ウラン                | 8 アクチニウム             |
| 9 ネプツニウム             | 10 $^{220}\text{Rn}$ | 11 $^{221}\text{Rn}$ | 12 $^{222}\text{Rn}$ |
| 13 $^{223}\text{Rn}$ | 14 $^{224}\text{Rn}$ | 15 $^{226}\text{Rn}$ |                      |

< キ、ク の選択肢 >

- |                        |                        |                        |                        |
|------------------------|------------------------|------------------------|------------------------|
| 1 $3.3 \times 10^{-9}$ | 2 $5.0 \times 10^{-9}$ | 3 $6.6 \times 10^{-9}$ | 4 $9.9 \times 10^{-9}$ |
| 5 $9.9 \times 10^{-7}$ |                        |                        |                        |

< ケ の選択肢 >

- |                        |                     |                        |                        |
|------------------------|---------------------|------------------------|------------------------|
| 1 $2.7 \times 10^4$    | 2 $4.2 \times 10^9$ | 3 $1.8 \times 10^{10}$ | 4 $4.2 \times 10^{10}$ |
| 5 $1.8 \times 10^{11}$ |                     |                        |                        |



問4 次のI～IVの文章の□の部分に入る最も適切な語句、記号又は数値を、それぞれの解答群から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。

図は陽子数が24～28、中性子数が26～36の核種を表している。太枠で囲まれているものは安定同位体で同位体存在度(%)が併記されている。そのほかのものは放射性同位体(RI)である。

RIは安定同位体から核反応によって作られることが多い。

陽 子 数	28	$^{54}\text{Ni}$	$^{55}\text{Ni}$	$^{56}\text{Ni}$	$^{57}\text{Ni}$	$^{58}\text{Ni}$ 68.1	$^{59}\text{Ni}$	$^{60}\text{Ni}$ 26.2	$^{61}\text{Ni}$ 1.1	$^{62}\text{Ni}$ 3.6	$^{63}\text{Ni}$	$^{64}\text{Ni}$ 0.9
	27	$^{53}\text{Co}$	$^{54}\text{Co}$	$^{55}\text{Co}$	$^{56}\text{Co}$	$^{57}\text{Co}$	$^{58}\text{Co}$	$^{59}\text{Co}$ 100	$^{60}\text{Co}$	$^{61}\text{Co}$	$^{62}\text{Co}$	$^{63}\text{Co}$
	26	$^{52}\text{Fe}$	$^{53}\text{Fe}$	$^{54}\text{Fe}$ 5.8	$^{55}\text{Fe}$	$^{56}\text{Fe}$ 91.8	$^{57}\text{Fe}$ 2.1	$^{58}\text{Fe}$ 0.3	$^{59}\text{Fe}$	$^{60}\text{Fe}$	$^{61}\text{Fe}$	$^{62}\text{Fe}$
	25	$^{51}\text{Mn}$	$^{52}\text{Mn}$	$^{53}\text{Mn}$	$^{54}\text{Mn}$	$^{55}\text{Mn}$ 100	$^{56}\text{Mn}$	$^{57}\text{Mn}$	$^{58}\text{Mn}$	$^{59}\text{Mn}$	$^{60}\text{Mn}$	$^{61}\text{Mn}$
	24	$^{50}\text{Cr}$ 4.3	$^{51}\text{Cr}$	$^{52}\text{Cr}$ 83.8	$^{53}\text{Cr}$ 9.5	$^{54}\text{Cr}$ 2.4	$^{55}\text{Cr}$	$^{56}\text{Cr}$	$^{57}\text{Cr}$	$^{58}\text{Cr}$	$^{59}\text{Cr}$	$^{60}\text{Cr}$
		26	27	28	29	30	31	32	33	34	35	36
		中 性 子 数										

図 陽子数24～28、中性子数26～36の核図表

I この核図表では同位体が横に並び、縦には同中性子体が並んでいる。放射壊変において、 $^{60}\text{Co}$ は□ア壊変して□Aとなり、 $^{57}\text{Co}$ はEC壊変して□Bになる。

中性子捕獲反応によって生成するRIの種類は、照射する元素における安定同位体の分布に依存する。例えば単核種元素のMnをターゲットとする(n,  $\gamma$ )反応ではRIとして□Cのみが生成するが、Crをターゲットとすると複数のRIが同時に生成することがわかる。

(n,  $\gamma$ )反応では原子番号が変わらないため、生成するRIには大量の担体が含まれる。そこで比放射能の大きなRIの製造には原子番号が変わる核反応を選択する。 $^{57}\text{Co}$ は、( $\alpha$ , p)反応で□Dから製造することもできるし、 $^{60}\text{Ni}$  □イ  $^{57}\text{Co}$ 反応や $^{55}\text{Mn}$  □ウ  $^{57}\text{Co}$ 反応を用いることもできる。これらの反応では、反応後にCoをターゲットから化学分離すると無担体の $^{57}\text{Co}$ を製造することができる。

<A～Dの解答群>

- |                     |                     |                     |                     |                     |
|---------------------|---------------------|---------------------|---------------------|---------------------|
| 1 $^{56}\text{Co}$  | 2 $^{54}\text{Mn}$  | 3 $^{55}\text{Mn}$  | 4 $^{56}\text{Mn}$  | 5 $^{54}\text{Fe}$  |
| 6 $^{56}\text{Fe}$  | 7 $^{57}\text{Fe}$  | 8 $^{59}\text{Fe}$  | 9 $^{60}\text{Fe}$  | 10 $^{56}\text{Co}$ |
| 11 $^{58}\text{Co}$ | 12 $^{59}\text{Co}$ | 13 $^{57}\text{Ni}$ | 14 $^{58}\text{Ni}$ | 15 $^{60}\text{Ni}$ |

<ア～ウの解答群>

- |                  |                  |                    |                    |                   |
|------------------|------------------|--------------------|--------------------|-------------------|
| 1 EC             | 2 $\beta^+$      | 3 $\beta^-$        | 4 IT               | 5 ( $\alpha$ , p) |
| 6 (p, $\alpha$ ) | 7 (n, $\alpha$ ) | 8 ( $\alpha$ , 2n) | 9 ( $\alpha$ , 2p) |                   |

II 中性子や荷電粒子の照射によって生成する RI の放射能は  $nf\sigma(1-e^{-\lambda t})$  と表される。ここで  $n$  はターゲット核の数、 $f$  は照射粒子フルエンス率、 $\sigma$  は反応断面積 (b)、 $\lambda$  は生成核の壊変定数、 $t$  は照射時間である。この  $(1-e^{-\lambda t})$  を飽和係数といい、例えば照射時間  $t$  が半減期と等しいときには  となる。

Fe を熱中性子照射すると、 $(n, \gamma)$  反応により  $^{55}\text{Fe}$  と  $^{59}\text{Fe}$  が同時に生成する。半減期に対して照射時間が短い場合には飽和係数が  と近似できることから、熱中性子をフルエンス率  $1.0 \times 10^{12} \text{ cm}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$  で 1 日照射した直後の Fe 中の  $^{55}\text{Fe}$  と  $^{59}\text{Fe}$  の放射能 ( $A$ ) の比  $[A(^{55}\text{Fe})/A(^{59}\text{Fe})]$  を見積もると、約  となる。なお  $(n, \gamma)$  反応断面積と生成核の半減期を表に示す。

ターゲット核	反応断面積 $\sigma$ (b)	生成核	半減期 (日)
$^{54}\text{Fe}$	2.2	$^{55}\text{Fe}$	1000
$^{58}\text{Fe}$	1.3	$^{59}\text{Fe}$	45

< E ~ G の解答群 >

- |                |                |                  |                  |        |
|----------------|----------------|------------------|------------------|--------|
| 1 0.03         | 2 0.5          | 3 0.6            | 4 0.75           | 5 1.0  |
| 6 1.5          | 7 2.0          | 8 6              | 9 60             | 10 600 |
| 11 $\lambda/t$ | 12 $\lambda t$ | 13 $1-\lambda t$ | 14 $1-\lambda/t$ |        |

III 速中性子照射では  $(n, p)$  反応が利用できるため高比放射能の RI トレーサーを製造することができる。例えば Co からは  $^{59}\text{Fe}$  が得られる。速中性子照射後の Co ターゲットから  $^{59}\text{Fe}$  を化学的に分離する方法がいくつかある。まず照射後の Co ターゲットを希硝酸に溶解すると Co は +2 価、 $^{59}\text{Fe}$  は +3 価となる。

充填カラムを使う方法では、 $0.2 \text{ mol} \cdot \text{L}^{-1}$  硝酸中では、 $\text{Fe}^{3+}$  の方が  $\text{Co}^{2+}$  より樹脂に吸着しやすいことを利用して、カラムに  $^{59}\text{Fe}^{3+}$  を吸着させ Co と分離する。 を用いて分離する方法では、 $0.5 \text{ mol} \cdot \text{L}^{-1}$  塩酸溶液中で  $\text{Fe}^{3+}$  のみが  を形成する性質を利用して分離を行う。また  $8 \text{ mol} \cdot \text{L}^{-1}$  の塩酸溶液からの溶媒抽出では、 だけを選択的に  に抽出することができる。

< H ~ J の解答群 >

- |            |            |            |
|------------|------------|------------|
| 1 陽イオン交換樹脂 | 2 陰イオン交換樹脂 | 3 ポリエチレン樹脂 |
| 4 クロロ錯イオン  | 5 オキソ酸イオン  | 6 塩化物イオン   |

< K、L の解答群 >

- |          |         |               |
|----------|---------|---------------|
| 1 Fe     | 2 Co    | 3 ジイソプロピルエーテル |
| 4 クロロホルム | 5 エタノール |               |

IV  $^{59}\text{Fe}$  の比放射能が  $1.0 \text{ MBq/mg Fe}$  の希塩酸溶液がある。これから  $10 \text{ kBq}$  を Fe 濃度が未知の水溶液  $1.0 \text{ L}$  に加えてよく攪拌して混合した。アンモニア水を加えて水酸化鉄を沈殿させ、その沈殿から酸化鉄を得た。この酸化鉄中の  $^{59}\text{Fe}$  の比放射能は  $100 \text{ Bq/mg Fe}$  であった。この実験から濃度未知の水溶液中の鉄の濃度は  $\boxed{M}$   $\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$  と見積もられる。

<Mの解答群>

1 0.01

2 0.1

3 1.0

4 100

問5 次のI～IIの文章の□の部分に入る最も適切な語句、記号又は数値を、それぞれの解答群から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 放射線による生物作用の出発点は、水の□Aや□Bを経た各種ラジカルの生成である。□Aした水は解離して□Cと水素ラジカルが生じる。また、水が□Bすると $\text{H}_2\text{O}^+$ と $\text{e}^-$ が生じる。 $\text{H}_2\text{O}^+$ は非常に不安定であり、分解して□Cを生じる。一方、 $\text{e}^-$ はその周りに水分子が配列して□Dとなる。このような、水と放射線の相互作用で生じた反応性が高いラジカルが標的分子に作用して生物作用が生じることを□Eと呼んでいる。X線や□Fのような電磁波の放射線による生物作用では□Eの割合が6割以上を占める。

□Eによる生物効果は□Gや□Hの存在により影響を受ける。酸素は一種の□Gとして働き、酸素効果を示す。酸素効果の程度は□Iで表すことができる。□Iは、「酸素が無い条件下である効果を生じるのに要する線量」を「酸素が存在する条件で同じ効果を生じるのに要する線量」で割った値で定義される。

□Hの1つとして、□Eの原因となるラジカルを取り除くラジカルスカベンジャーがある。□Jやグリセリンなどは□Cと反応してその効果を減ずる。放射線治療では、□Kの障害を防ぐことも重要であり、そのための□Hの開発が行われている。□Hの開発においては、□Hの効果が□Lに比べ□Kでは大きくなることが重要である。

< A～Dの解答群 >

- |  |                                   |        |      |
|--|-----------------------------------|--------|------|
| 1 相転移                                  | 2 凝固                              | 3 励起   | 4 電離 |
| 5 一酸化窒素ラジカル ( $\cdot\text{NO}$ )       | 6 ヒドロキシルラジカル ( $\cdot\text{OH}$ ) |        |      |
| 7 スーパーオキシドラジカル ( $\cdot\text{O}_2^-$ ) | 8 二次電子                            | 9 水和電子 |      |
| 10 反跳電子                                |                                   |        |      |

< E～Hの解答群 >

- |             |              |        |              |
|-------------|--------------|--------|--------------|
| 1 直接作用      | 2 修飾作用       | 3 間接作用 | 4 $\alpha$ 線 |
| 5 $\beta$ 線 | 6 $\gamma$ 線 | 7 防護剤  | 8 増感剤        |
| 9 変性剤       | 10 界面活性剤     |        |              |

< I、Jの解答群 >

- |          |       |        |         |
|----------|-------|--------|---------|
| 1 LET    | 2 NMR | 3 OER  | 4 PET   |
| 5 RBE    | 6 TLD | 7 窒素ガス | 8 アルコール |
| 9 塩化カリウム |       |        |         |

< K、Lの解答群 >

- |        |        |        |
|--------|--------|--------|
| 1 腫瘍組織 | 2 正常組織 | 3 結合組織 |
|--------|--------|--------|

II 放射線の飛跡の単位長さ当たりのエネルギー損失を **M** という。高い **M** を持つ放射線として、**N**、重イオン線などがある。これらの放射線では生物学的効果比が高い。また、低い **M** の放射線と比べて **O** の割合が高いと考えられる。

近年、**P** や重イオン線を用いたがん治療が盛んになってきた。これらの放射線では、現在放射線治療における外部照射で一般的に使用されている放射線と比べて、生体に照射されたときの線量分布が特徴的である。すなわち、入射部位の皮膚では線量が低く、深さが増すにつれて高くなり、飛程の終端近くで最大になるような線量分布になる。この飛程終端近くでの最大部分を **Q** という。生体の深部にある腫瘍の治療を考えた場合、腫瘍部分に **Q** を合わせることで腫瘍に線量を集中することができる。一般に固形腫瘍の内部には酸素分圧が低い領域が存在し、その部位の腫瘍細胞は **R** になる。これは放射線治療の効果を **S** させる重要な要素であると考えられる。重イオン線では酸素効果が小さいため、がん細胞で細胞致死効果が高いと期待される。

<M～Oの解答群>

- |              |       |              |             |
|--------------|-------|--------------|-------------|
| 1 LET        | 2 NMR | 3 OER        | 4 PET       |
| 5 RBE        | 6 TLD | 7 $\alpha$ 線 | 8 $\beta$ 線 |
| 9 $\gamma$ 線 | 10 X線 | 11 直接作用      | 12 修飾作用     |
| 13 間接作用      |       |              |             |

<P～Sの解答群>

- |              |           |        |          |
|--------------|-----------|--------|----------|
| 1 $\gamma$ 線 | 2 X線      | 3 陽子線  | 4 相対リスク  |
| 5 弾性散乱       | 6 ブラッグピーク | 7 後方散乱 | 8 ビルドアップ |
| 9 放射線感受性     | 10 放射線抵抗性 | 11 増強  | 12 維持    |
| 13 減弱        |           |        |          |

問6 次のⅠ～Ⅲの文章の□の部分に入る最も適切な語句、記号又は数値を、それぞれの解答群から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 放射線による細胞死には様々な様式が存在する。主なものとしては、細胞が大きくなり細胞内容が流出することが特徴的な細胞死である□Aと、細胞が小さくなり核が凝縮する□Bが挙げられる。これらの細胞死では細胞死に伴いDNAは断片化されるが、断片化の形式は細胞死により異なる。□Aでは断片化されたDNAは電気泳動により観察すると□Cとなるが、□Bでは□Dとなる。放射線生物学においては放射線照射後の細胞生存率を定量する場合に、上に述べたような一般的な細胞死の他に□Eの喪失を“細胞死”として取り扱う。この様式の“細胞死”としては、代謝を保ちながら細胞の分裂が不可逆的に停止し□Fを形成する□Gが挙げられる。

<A～Gの解答群>

- |               |              |               |
|---------------|--------------|---------------|
| 1 老化 (セネッセンス) | 2 アポトーシス     | 3 壊死 (ネクローシス) |
| 4 斑点状         | 5 梯子状 (ラダー状) | 6 スメア状        |
| 7 分化能         | 8 脱分化能       | 9 細胞増殖能       |
| 10 細胞周期停止能    | 11 ランゲルハンス細胞 | 12 微小細胞       |
| 13 巨細胞        | 14 樹状細胞      |               |

Ⅱ Ⅰで述べた放射線生物学における細胞死の概念を踏まえ、放射線照射後の細胞生存率を定量する手法として□Hが一般に用いられる。□Hでは、細胞を単一細胞に分離して細胞培養皿に播種し、一定期間培養した後に生じる□Iを計数する。通常、細胞を播種した後7～21日程度してから□J個以上の細胞からなる□Iを計数する。計数した□Iを播種した細胞数で除した値を□Kという。放射線照射後の細胞生存率は、放射線を照射した細胞の□Lを、照射していない細胞の□Mで除した割合で表す。□Hにより得られた細胞生存率から細胞生存率曲線を描くが、通常、細胞生存率曲線は縦軸に生存率を□Nで示し、横軸に吸収線量を□Oで示す。

<H～Oの解答群>

- |            |           |           |
|------------|-----------|-----------|
| 1 フォーカス数   | 2 クローン数   | 3 コロニー数   |
| 4 フォーカス形成法 | 5 クローン形成法 | 6 コロニー形成法 |
| 7 フォーカス形成率 | 8 クローン形成率 | 9 コロニー形成率 |
| 10 線形目盛    | 11 対数目盛   | 12 2      |
| 13 5       | 14 50     | 15 500    |

Ⅲ 放射線照射後の細胞生存率は、照射条件あるいは培養条件によって変化する。培養細胞に  を照射した場合、総吸収線量が同一であるならば1回で照射したときと比較して、2回に分けて時間間隔をおいて照射したときに細胞生存率は  くなる。この現象は  によると考えられている。

では、特別な場合を除けば吸収線量が同じであれば線量率が  になると生物効果は小さくなる。また、培養細胞に  を照射した後の培養条件によって細胞の生存率の上昇が見られることがある。これは  によると考えられている。

< P～Tの解答群 >

- |             |              |             |
|-------------|--------------|-------------|
| 1 高 LET 放射線 | 2 低 LET 放射線  | 3 潜在的致死損傷回復 |
| 4 塩基除去修復    | 5 ヌクレオチド除去修復 | 6 亜致死損傷回復   |
| 7 光回復       | 8 高          | 9 低         |