

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（20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、所定の欄以外の余白には、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 解答用紙の所定の欄に氏名・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、所定の欄に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、IIの文章の□の部分に入る最も適切な語句、数値又は数式を、それぞれの解答群から1つだけ選べ。

I α 壊変は、原子核（親核）が α 粒子を放出してより小さい原子核（娘核）に壊変する現象で、まれな例外を除いて、質量数が200以上の重い原子核で起こる。 α 粒子は□A□により原子核内に束縛されており、放出は□B□効果によって起こる。壊変エネルギー（Q値）は壊変前後の□C□から求められる。 ^{226}Ra を例にとると、 ^{226}Ra は α 粒子を放出して ^{222}Rn に壊変し、 ^{222}Rn は5.5%の確率で0.186 MeVの励起状態か、94.5%の確率で基底状態となる。この壊変エネルギーを計算すると□ア□ MeVとなる。基底状態へ壊変した場合の α 粒子の運動エネルギーは□イ□ MeVとなる。ただし、 ^{226}Ra 、 ^{222}Rn 、 α 粒子の結合エネルギーを、それぞれ1731.60、1708.18、28.29 MeVとした。

β 壊変には、 β^- 壊変、 β^+ 壊変、及び軌道電子捕獲(EC)壊変があり、いずれも弱い相互作用によって起こる。 β^- 壊変に伴い電子と□D□が放出され、娘核の原子番号は1増加するが質量数は変わらない。壊変エネルギーは、娘核、電子及び□D□の運動エネルギーに分配され、その割合は壊変毎に異なるため、電子のエネルギー分布は連続分布となる。 β^+ 壊変では陽電子と□E□が放出される。陽電子のエネルギーも連続分布を示すが、原子核との□F□によって β^- 壊変における分布とは異なる形状となる。 ^{22}Na （中性原子質量21.99444 u）は、90.4%の確率で ^{22}Ne （同21.99139 u）の1.2746 MeVの励起状態へ β^+ 壊変する。このときの β^+ 線の最大エネルギーは、□ウ□ MeVである。ただし、電子の質量を0.00055 uとし、質量は原子質量単位で表した。軌道電子捕獲壊変は、原子核内の□G□が軌道電子と結合して、□E□を放出する現象である。これにより電子軌道に空孔が生じ、そこへ外側の軌道にある電子が遷移した場合には、特性X線または□H□が放出される。

<A~Cの解答群>

- | | | | |
|----------|-----------|----------------|----------|
| 1 ローレンツ力 | 2 クーロン力 | 3 遠心力 | 4 核力 |
| 5 阻止能 | 6 トンネル | 7 メスバウアー | 8 ラムゼウアー |
| 9 ドップラー | 10 チェレンコフ | 11 オージェ | 12 質量超過 |
| 13 質量欠損 | 14 運動量 | 15 ポテンシャルエネルギー | |

<ア、イの解答群>

- | | | | | |
|---------|---------|---------|---------|---------|
| 1 4.72 | 2 4.75 | 3 4.78 | 4 4.81 | 5 4.84 |
| 6 4.87 | 7 4.90 | 8 4.93 | 9 4.96 | 10 4.99 |
| 11 5.02 | 12 5.05 | 13 5.08 | 14 5.11 | |

<D~Hの解答群>

- | | | | |
|------------|---------|--------|-----------|
| 1 ローレンツ力 | 2 クーロン力 | 3 遠心力 | 4 核力 |
| 5 阻止能 | 6 陽子 | 7 中性子 | 8 ニュートリノ |
| 9 反ニュートリノ | 10 光電子 | 11 陽電子 | 12 オージェ電子 |
| 13 ヘリウム原子核 | 14 X線 | | |

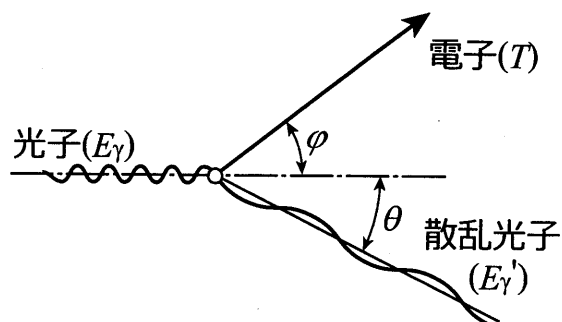
<ウの解答群>

- | | | | | |
|---------|---------|--------|--------|---------|
| 1 0.12 | 2 0.37 | 3 0.55 | 4 0.83 | 5 1.16 |
| 6 1.57 | 7 1.90 | 8 2.23 | 9 2.61 | 10 2.84 |
| 11 3.04 | 12 3.38 | | | |

II α 壊変あるいは β 壊変が起きた後に励起状態にある原子核は、 γ 線を放出してより安定な状態へ移行する。放出 γ 線のスペクトルは線スペクトルで、その原子核特有のものとなる。励起状態がやや安定で、数ミリ秒から数日以上の寿命で γ 線を放出して基底状態になる過程があり、これを I と呼ぶ。また、励起状態の原子核が γ 線を放出せずに、エネルギーを軌道電子に直接与えて、その電子を放出する過程を J という。

γ 線は、 α 線や β 線のように直接物質を電離あるいは励起することなく、主として光電効果、コンプトン効果、及び電子対生成の3つの過程を通してエネルギーを失う。ここで、コンプトン効果によるエネルギー減弱の様子は以下のようなものである。

下図のように、静止している電子（質量 m ）にエネルギー E_γ の光子があたり、光子の入射方向に対して角度 θ の方向に光子が散乱された。このときの散乱光子のエネルギーは E'_γ であった。これと同時に、電子は光子の入射方向に対して角度 ϕ の方向にはね飛ばされた。ただし、角度 θ 及び ϕ は正の値とする。



この過程において、エネルギー保存則は電子の運動エネルギーを T として

$$E_\gamma = E'_\gamma + T \quad \dots \dots \dots (1)$$

である。一方、運動量の保存則は、 c を光速度、 p を電子の運動量とすると、入射方向に対して

$$E_\gamma/c = \text{K} \quad \dots \dots \dots (2)$$

入射と垂直な方向に対しては

$$0 = \boxed{\text{L}} \dots \dots \dots (3)$$

と書くことができる。

相対論を考慮すると、 pc と T の関係は

$$(pc)^2 = \boxed{\text{M}} \dots \dots \dots (4)$$

であるから、以上の式を用い、 ϕ 、 p 及び T を消去して、散乱後の光子エネルギー

$$E'_\gamma = \boxed{\text{N}} \dots \dots \dots (5)$$

を求めることができる。ここで、散乱前後の光子の波長を λ 、 λ' として、 $E_\gamma = h(c/\lambda)$ の関係から、波長変化 $\Delta\lambda$ を求めると

$$\Delta\lambda = \lambda' - \lambda = \boxed{\text{O}} \cdot (1 - \cos\theta) \dots \dots \dots (6)$$

を得る。ただし h はプランク定数 ($6.63 \times 10^{-34} \text{ J}\cdot\text{s}$) である。ここで、 $\boxed{\text{O}}$ はコンプトン波長と呼ばれ 2.43 pm の定数値を取り、波長変化の最大値の $1/2$ である。このことより、コンプトン散乱における波長変化は、入射光子のエネルギーには依存しない。1 MeV のエネルギーを持つ γ 線が角度 $\theta = 60^\circ$ で散乱されるときコンプトン電子の運動エネルギーを計算すると、 $\boxed{\text{エ}}$ MeV となる。

光子が物質中に入ると、先に述べた 3 つの過程により減弱する。物質中での光子の減弱は減弱係数を用いて表されることが多い。1 MeV の入射 γ 線に対するコンプトン散乱断面積を電子あたり 0.20 barn ($1 \text{ barn} = 10^{-24} \text{ cm}^2$) として、アルミニウムのコンプトン散乱による線減弱係数を求めると、 $\boxed{\text{オ}}$ cm^{-1} となる。ただし、アルミニウムの原子番号は 13、質量数 27、密度 $2.7 \text{ g}\cdot\text{cm}^{-3}$ とし、アボガドロ定数を $6.02 \times 10^{23} \text{ mol}^{-1}$ とした。

<I、Jの解答群>

- | | | | |
|----------|----------|--------|----------|
| 1 制動放射 | 2 黒体輻射 | 3 内部転換 | 4 ホットアトム |
| 5 自発核分裂 | 6 核異性体転移 | 7 電子捕獲 | 8 核変換 |
| 9 オージェ放出 | | | |

<K、Lの解答群>

- | | | |
|--|--|--|
| 1 $\left(\frac{E'_\gamma}{c}\right) \sin\phi - p \cdot \sin\theta$ | 2 $\left(\frac{E'_\gamma}{c}\right) \sin\theta - p \cdot \sin\phi$ | 3 $\left(\frac{E'_\gamma}{c}\right) \cos\phi - p \cdot \sin\theta$ |
| 4 $\left(\frac{E'_\gamma}{c}\right) \cos\theta - p \cdot \sin\phi$ | 5 $\left(\frac{E'_\gamma}{c}\right) \sin\theta + p \cdot \cos\phi$ | 6 $\left(\frac{E'_\gamma}{c}\right) \sin\phi + p \cdot \cos\theta$ |
| 7 $\left(\frac{E'_\gamma}{c}\right) \cos\theta + p \cdot \cos\phi$ | 8 $\left(\frac{E'_\gamma}{c}\right) \cos\phi + p \cdot \cos\theta$ | |

<Mの解答群>

- | | | |
|-----------------------------|-----------------------------|-------------------------|
| 1 $T + mc$ | 2 $T - mc^2$ | 3 $T^2 + mc$ |
| 4 $T^2 - mc^2$ | 5 $(T + mc)^2 - (mc)^2$ | 6 $(T - mc)^2 - (mc)^2$ |
| 7 $(T + mc^2)^2 - (mc^2)^2$ | 8 $(T - mc^2)^2 - (mc^2)^2$ | |

<Nの解答群>

$$1 \quad \frac{1}{1 + \left(\frac{E_\gamma}{mc^2}\right)(1 - \cos\theta)}$$

$$2 \quad \frac{1}{1 - \left(\frac{E_\gamma}{mc^2}\right)(1 - \cos\theta)}$$

$$3 \quad \frac{E_\gamma}{1 + \left(\frac{1}{mc^2}\right)(1 - \cos\theta)}$$

$$4 \quad \frac{E_\gamma}{1 - \left(\frac{1}{mc^2}\right)(1 - \cos\theta)}$$

$$5 \quad \frac{E_\gamma}{1 + \left(\frac{E_\gamma}{mc^2}\right)(1 - \cos\theta)}$$

$$6 \quad \frac{E_\gamma}{1 - \left(\frac{E_\gamma}{mc^2}\right)(1 - \cos\theta)}$$

<Oの解答群>

$$1 \quad \frac{h}{m}$$

$$2 \quad \frac{hc}{m}$$

$$3 \quad \frac{h}{mc}$$

$$4 \quad \frac{h}{mc^2}$$

$$5 \quad \frac{hc^2}{m}$$

$$6 \quad \frac{h}{(mc)^2}$$

$$7 \quad \frac{1}{mc}$$

$$8 \quad \frac{1}{mc^2}$$

$$9 \quad \frac{c^2}{m}$$

$$10 \quad \frac{1}{(mc)^2}$$

<工、才の解答群>

1 0.06

2 0.11

3 0.16

4 0.23

5 0.29

6 0.33

7 0.39

8 0.44

9 0.49

10 0.55

11 0.61

12 0.67

13 0.73

14 0.84

15 0.90

問2 次のⅠ、Ⅱの文章の□の部分に入る最も適切な語句、数値又は数式を、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 電離放射線を大別すると、自身が□Aを持つ直接電離性放射線と、自身は□Aを持たず、物質との相互作用の結果、二次的に発生した直接電離性放射線が電離を引き起こす間接電離性放射線の二種類に分けられる。

直接電離性放射線の一つであるα線は、物質中で□Bを受けながら連続的に減速し、やがて停止する。例えば標準状態の空気中においてその飛程R[cm]は、α線の初期エネルギーがE[MeV]のとき、

$$R = 0.318E^{\frac{3}{2}} \dots \dots \dots (1)$$

と表せる。したがって4 MeVのα線の空気中の飛程は(1)式により約□ア cmと計算できる。また、このときの空気の密度を1.3 mg·cm⁻³とすると、水中の飛程は□イ μmほどしかないことがわかる。

一方、間接電離性放射線の一つであるγ線は、物質中で吸収・散乱されることもあれば、全く相互作用を起こさず透過することもある。γ線が物質中で相互作用するかどうかは確率の問題であり、α線のように飛程を定義することはできない。N₀個の細い線束の単色γ線が、線束と垂直に置かれた厚さdxの薄い板に入射し、これを透過するγ線の数がNであるとする。このときdN個のγ線が吸収・散乱によって失われたとすると、次の関係がある。

$$\frac{dN}{dx} = \square C \dots \dots \dots (2)$$

これを積分し、初期条件を考慮すると

$$N = \square D \dots \dots \dots (3)$$

と表される。ここで、μは線減弱係数と呼ばれ、吸収・散乱の□Eの総和と単位□Fあたりの□G数の積である。4 MeVのγ線の水に対するμの値は約0.034 cm⁻¹なので、N₀から半減する水の厚さは約□ウ cmとなる。このようにエネルギーが同じであっても放射線の種類や物質との相互作用の違いにより、その取扱いは大きく異なることに注意が必要である。

<A、Bの解答群>

- | | | | |
|---------|-----------|-------|----------|
| 1 質量 | 2 磁気モーメント | 3 電荷 | 4 スピン |
| 5 反粒子 | 6 制動放射 | 7 核反応 | 8 ローレンツ力 |
| 9 クーロン力 | 10 振動 | | |

<ア～ウの解答群>

- | | | | | |
|--------|-------|-------|-------|-------|
| 1 0.51 | 2 1.5 | 3 2.5 | 4 5.0 | 5 12 |
| 6 15 | 7 20 | 8 24 | 9 33 | 10 48 |

<C、Dの解答群>

- | | | | | | | | | | |
|---|----------------|---|--------------|---|-------------|---|------------------|----|-----------------|
| 1 | $-\mu x$ | 2 | μx | 3 | $-\mu N$ | 4 | μN | 5 | $\frac{1}{x}$ |
| 6 | $-\frac{1}{x}$ | 7 | $e^{-\mu x}$ | 8 | $e^{\mu x}$ | 9 | $N_0 e^{-\mu x}$ | 10 | $N_0 e^{\mu x}$ |

<E~Gの解答群>

- | | | | | | |
|----|--------|---|-------------|---|-----|
| 1 | 質量減弱係数 | 2 | 質量エネルギー吸収係数 | 3 | 阻止能 |
| 4 | 半価層 | 5 | 原子断面積 | 6 | 面積 |
| 7 | 体積 | 8 | 質量 | 9 | 原子 |
| 10 | 電子 | | | | |

II 直接電離性放射線と間接電離性放射線における水の吸収線量評価法は以下のとおりである。

前者の一つである200 MeVの陽子線を水に照射したとき、水中のある深さにおける吸収線量は、そこでの陽子線の $\square H$ と水の $\square I$ の積で与えられる。また、そこに空気の空洞を導入し、空洞のサイズが陽子線の場合を乱さないほど十分小さい場合、 $\square J$ によって水と空気の吸収線量の比はそれらの $\square I$ の比で与えられる。このことを利用し、空気の空洞電離箱は物質中での吸収線量の評価に用いられる。例えば、陽子線を水中に設置された水等価壁を有する容積 0.5 cm^3 の空気の空洞電離箱に照射した際に、 13 nC の電離電荷が得られたとする。このときの空気の密度を $1.3 \text{ mg} \cdot \text{cm}^{-3}$ としW値を 34 eV とすると、空気の吸収線量は $\square E$ Gyとなる。ここで、空気の $\square I$ が $4.82 \text{ MeV} \cdot \text{g}^{-1} \cdot \text{cm}^2$ 、水の $\square I$ が $5.44 \text{ MeV} \cdot \text{g}^{-1} \cdot \text{cm}^2$ であるとすると、そこでの水の吸収線量は $\square O$ Gyとなる。

間接電離性放射線の一つである光子を照射したときの水の吸収線量は、空気の空洞電離箱により次のように評価される。

1) 水中に空洞電離箱を挿入する場合

空洞のサイズが二次電子の $\square K$ に比べ十分小さいときには、水中で発生した二次電子のフルエンスは空洞中で変化せず一様であり、また、空洞中での光子の相互作用は無視でき、光子束は変化しない。よってこうした条件下では、 $\square J$ に基づき、水の吸収線量は、水の空気に対する二次電子の平均の $\square L$ の比を空気の吸収線量に乗ずることにより得ることができる。

2) 空気中に空洞電離箱を置き、その吸収線量から水の吸収線量に換算する場合

空洞空気の吸収線量は、光子が空気との相互作用によって生じた二次電子により主としてもたらされるため、 $\square M$ の条件下において光子の $\square N$ とその光子に対する空気の $\square O$ の積で表すことができる。この空洞を、同じ場所で、半径が二次電子の $\square K$ 程度の球形の水に置換する場合、光子の $\square N$ を大きく乱さないと仮定すると、水の吸収線量は、水の空気に対する $\square O$ の比を空気の吸収線量に乗ずることにより得ることができる。

<H~Oの解答群>

- | | | |
|--------------|---------------|---------------|
| 1 線減弱係数 | 2 質量エネルギー吸収係数 | 3 フルエンス |
| 4 エネルギーフルエンス | 5 空洞理論 | 6 ブラッグ・クレーマン則 |
| 7 質量阻止能 | 8 線阻止能 | 9 LET |
| 10 W値 | 11 密度 | 12 荷電粒子平衡 |
| 13 ビルドアップ | 14 飛程 | 15 散乱 |

<E, Oの解答群>

- | | | | | |
|--------|--------|--------|--------|---------|
| 1 0.60 | 2 0.68 | 3 0.77 | 4 0.86 | 5 0.98 |
| 6 1.20 | 7 1.36 | 8 1.53 | 9 1.76 | 10 1.92 |

問3 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。

I 放射化学分離は、一般の化学分離と比較して、幾つかの特徴がある。まず、取り扱う放射性核種の量が極めて微量な点である。例えば、半減期14.26日の ^{32}P の1.0 MBqの質量は□A□gであり、その物質質量(モル)は□A□gを□B□で除することで求められる。

短半減期の放射性核種分離では操作時間の短縮が求められる場合がある。例えば、半減期25分の ^{128}I の分離について考える。分離法1では化学収率が80%で50分を要する。これに対して分離法2の化学収率が40%とする。分離法2の所要時間が□C□分だとすると、化学分離後の放射能は分離法1と等しくなる。

放射化学分離では、放射性核種の化学的状態を変化させて別の相とし、相分離で目的成分を得ることがしばしば行われる。沈殿分離法はその典型である。この場合、目的核種と沈殿を形成する試薬を添加することで水に難溶性の固体沈殿を形成し、これをろ過や□D□などで固体と溶液に分離して放射性核種を回収する。沈殿剤としては、 $^{111}\text{Ag}^+$ や $^{210}\text{Pb}^{2+}$ に対する□E□、 $^{45}\text{Ca}^{2+}$ や $^{133}\text{Ba}^{2+}$ に対する□F□などが知られている。また、溶液に気体を通じて沈殿を生成する例として、弱酸性水溶液中の $^{64}\text{Cu}^{2+}$ や $^{111\text{m}}\text{Cd}^{2+}$ に対する□G□が知られている。

沈殿分離法と類似した方法に共沈分離法がある。沈殿生成に伴って溶液中の放射性核種を沈殿に取り込み、水溶液から分離する。鉛、スズ及びアンチモンの放射性核種を塩酸酸性溶液から同時に共沈する□H□がある。また、 $^{32}\text{PO}_4^{3-}$ と $^{35}\text{SO}_4^{2-}$ の共存する水溶液から $^{32}\text{PO}_4^{3-}$ のみが共沈する□I□も知られている。

<A、Bの解答群>

- | | | | |
|-------------------------|-------------------------|-------------------------|------------------------|
| 1 9.5×10^{-11} | 2 4.7×10^{-10} | 3 9.5×10^{-10} | 4 4.7×10^{-9} |
| 5 15 | 6 17 | 7 32 | 8 64 |

<C、Dの解答群>

- | | | | | |
|--------|------|--------|------|------|
| 1 12.5 | 2 25 | 3 37.5 | 4 50 | 5 蒸留 |
| 6 抽出 | 7 沸騰 | 8 遠心分離 | | |

<Eの解答群>

- | | | | |
|--------------------|-------------------|-----------------|--------------------|
| 1 ClO_4^- | 2 NO_3^- | 3 Cl^- | 4 ClO_3^- |
|--------------------|-------------------|-----------------|--------------------|

<Fの解答群>

- | | | | |
|----------------------|----------------------|-------------------|-------------------|
| 1 SO_4^{2-} | 2 SO_3^{2-} | 3 NO_3^- | 4 NO_2^- |
|----------------------|----------------------|-------------------|-------------------|

<Gの解答群>

- | | | | |
|------------------------|----------------|-----------------|------|
| 1 H_2S | 2 O_2 | 3 Cl_2 | 4 Ar |
|------------------------|----------------|-----------------|------|

<H、Iの解答群>

- | | | | | |
|-------|-------------------|--------|-------|----------------------------|
| 1 CuS | 2 SrCO_3 | 3 AgBr | 4 NaI | 5 $\text{Fe}(\text{OH})_3$ |
|-------|-------------------|--------|-------|----------------------------|

II 液体-液体間の放射性核種の分配平衡を利用した分離法として溶媒抽出法がある。水溶液中に電気的に中性の分子を形成させ、これが有機溶媒中に移動することで抽出が進行する。キレート抽出とイオン会合体抽出に大別される。キレート抽出試薬には [J] や β -ジケトンのトリフルオロアセチルアセトンなどがある。特定の金属イオンと錯イオンを形成しやすい [K] や CN^- などを [L] として添加することにより、水相に特定の成分を保持することもしばしば行われる。イオン会合体抽出の例としては、濃塩酸溶液からの Fe^{3+} の [M] による抽出が知られている。

イオン交換法も放射化学分離法としてしばしば利用される。イオン交換樹脂を用いる方法が一般的である。この場合、固体-溶液間のイオン性化学種の分配平衡を利用している。陽イオン交換樹脂ではスルホン酸基を持つ強酸性イオン交換樹脂と [N] を持つ弱酸性イオン交換樹脂がある。陰イオン交換樹脂では [O] を持つ強塩基性イオン交換樹脂と、弱塩基性イオン交換樹脂がある。対象とする放射性核種の溶存状態や pH などから適切なイオン交換樹脂を選んで使用する。

以上は、相間での化学種の分配を利用した分離手法であり、非放射性の物質の分離にも用いられている。これに対して、放射性核種の分離に特異的に利用される方法もある。

^{90}Sr の塩酸溶液をアンモニア水で中和してろ過すると、見かけ上沈殿が生じていなくても娘核種の ^{90}Y がろ紙に捕集される。この現象は [P] の生成によるものと考えられ、無担体 RI の分離に利用される。

硝酸トリウムを入れた容器内に金属板を吊るしておく、表面に [Q] の壊変生成物が沈着する。この壊変生成物は主に ^{212}Pb であるが、その娘核種 [R] の α 壊変による反跳を利用することで [S] を単離できる。すなわち、 ^{212}Pb が沈着した金属板を別の容器に移し、新しい金属板を 1 mm 程度の間隔に置いて 15 分ほど真空に保つと、新しい金属板上に [S] が単離される。放射壊変を利用した特徴ある放射性核種の分離法である。

<J~Mの解答群>

- | | | |
|----------------|------------|-----------|
| 1 エタノール | 2 アセトアルデヒド | 3 ジチゾン |
| 4 グリセリン | 5 EDTA | 6 アセトン |
| 7 n-ヘキサン | 8 ベンゼン | 9 中和剤 |
| 10 酸化剤 | 11 還元剤 | 12 マスキング剤 |
| 13 ジイソプロピルエーテル | 14 メタノール | 15 クロロホルム |

<N、Oの解答群>

- | | | |
|-----------|--------|--------------|
| 1 カルボキシル基 | 2 アミド基 | 3 第4級アンモニウム基 |
| 4 アミノ基 | | |

<Pの解答群>

- | | | | |
|-----------|-------|----------|--------|
| 1 ラジオコロイド | 2 反跳核 | 3 OHラジカル | 4 水素ガス |
| 5 キレート | | | |

<Q~Sの解答群>

- | | | | | |
|---------------------|---------------------|---------------------|---------------------|---------------------|
| 1 ^{222}Rn | 2 ^{220}Rn | 3 ^{212}Bi | 4 ^{208}Tl | 5 ^{208}Pb |
|---------------------|---------------------|---------------------|---------------------|---------------------|

問4 放射線や放射能を利用した、物質の元素組成分析法に関する次のI～IVの文章の□の部分に入る最も適切な語句、記号、数値又は数式を、それぞれの解答群から1つだけ選べ。

I 物質中の原子を励起して、その原子が放出する光子を元素分析法に用いることができる。例えば、X線発生装置からのX線や、数十□Aに加速した電子線を試料に照射すると、励起原子から□Bスペクトルとして元素に固有な特性X線が放出される。これを測定する□C分析法は、試料中の多種類の元素を非破壊的に同時に定量することができる。特性X線はK_α線やL_α線などと呼ばれるが、このKやLは、励起原子の□D電子の軌道を表している。また、□C分析法では電子線の代わりに放射性核種からのX線やγ線を利用することもできる。さらに放射光施設では、シンクロトロンで加速した電子を利用して□Eのビームを発生させ、そのビームを用いて微小部分の分析が行われる。これらいずれの場合でも試料は放射化されない。

<A、Bの解答群>

- | | | | | |
|------|-------|-------|------|-------|
| 1 eV | 2 keV | 3 MeV | 4 J | 5 kJ |
| 6 MJ | 7 ラマン | 8 連続 | 9 反射 | 10 励起 |
| 11 線 | | | | |

<Cの解答群>

- | | | | |
|--------|---------|-----------|--------|
| 1 蛍光X線 | 2 高速電子線 | 3 コンプトン散乱 | 4 X線吸収 |
| 5 PIXE | 6 低速電子線 | | |

<Dの解答群>

- | | | |
|------------|----------|------------|
| 1 内殻空孔に落ちる | 2 結合を生じた | 3 内殻空孔を生じた |
| 4 最外殻の | 5 結合が切れた | |

<Eの解答群>

- | | | | |
|-----------|--------|---------|----------|
| 1 後方散乱 | 2 特性X線 | 3 制動放射線 | 4 ストークス線 |
| 5 反ストークス線 | | | |

II 一方、試料中の原子核を反応させ、生成する原子核からの放射線を測定する方法が放射化分析法である。試料に中性子や荷電粒子、高エネルギー光子などを照射して放射化する。照射する粒子の□Fを*f*、標的核種の核反応断面積をσ、標的核種の数*n*とし、生成核の数を*N*、その壊変定数をλとすると、生成核の生成速度、 dN/dt は以下の式で表される。

$$\frac{dN}{dt} = \square G \dots \dots \dots (1)$$

この式から、照射時間を*T*₁とすると、照射終了直後の生成核の放射能*A*は

$$A = \lambda N = nf\sigma \cdot (\square H) \dots \dots \dots (2)$$

となる。式(2)の括弧内を I と呼び、照射時間が長くなるとともに1に近づく。例えば、照射時間が生成核の半減期の2倍の時には I は J となる。半減期に比べて照射時間が非常に短いときには、 I は K で近似することができ、生成核の放射能は照射時間に比例するとしてよい。実際の放射化分析では、照射終了後 T_2 経過した後、放射能測定を開始する。 T_2 を L 時間と言う。生成核が多種類あるときには、それらの半減期を考慮して、目的とする核種の測定のための最適な L 時間や測定時間を設定する。生成核の放射能から目的核の数を求めることができる。

<Fの解答群>

- | | | | |
|---------|----------|---------|-----------|
| 1 フルエンス | 2 フルエンス率 | 3 エネルギー | 4 エネルギー密度 |
| 5 カーマ | 6 LET | | |

<Gの解答群>

- | | | | |
|-------------------------------|----------------------|-------------------------|-------------------------|
| 1 $\lambda N - n\sigma$ | 2 $n\sigma\lambda N$ | 3 $n\sigma + \lambda N$ | 4 $n\sigma - \lambda N$ |
| 5 $\frac{n\sigma}{\lambda N}$ | | | |

<Hの解答群>

- | | | | |
|--|--------------------------|-------------------------|--|
| 1 $1 - e^{-\lambda T_1}$ | 2 $1 + e^{-\lambda T_1}$ | 3 $1 - e^{\lambda T_1}$ | 4 $1 - \left(\frac{1}{2}\right)^{\frac{T_1}{\lambda}}$ |
| 5 $1 - \left(\frac{1}{2}\right)^{\frac{\lambda}{T_1}}$ | | | |

<Iの解答群>

- | | | | | |
|--------|-------|---------|------|--------|
| 1 吸収係数 | 2 生成率 | 3 ファノ係数 | 4 収率 | 5 飽和係数 |
|--------|-------|---------|------|--------|

<J、Kの解答群>

- | | | | | |
|------------------------------------|-----------------|-------------------------|-----------------------------------|--------------------------|
| 1 $\frac{1}{4}$ | 2 $\frac{1}{2}$ | 3 $\frac{1}{\sqrt{3}}$ | 4 $\frac{1}{\sqrt{2}}$ | 5 $\frac{3}{4}$ |
| 6 $\frac{7}{8}$ | 7 λT_1 | 8 $\sqrt{2}\lambda T_1$ | 9 $\frac{1}{\sqrt{2}}\lambda T_1$ | 10 $\frac{T_1}{\lambda}$ |
| 11 $\frac{1}{\sqrt{2}\lambda} T_1$ | | | | |

<Lの解答群>

- | | | | | |
|------|------|------|------|------|
| 1 冷却 | 2 不感 | 3 緩和 | 4 保持 | 5 分解 |
| 6 誘導 | | | | |

Ⅲ 中性子放射化分析では、生成核種からの γ 線を 検出器を用いて測定することにより、非破壊的に多元素を同時分析することができる。平均エネルギーが eVの熱中性子を用いる場合と、さらにエネルギーが高い熱外中性子の共鳴核反応を用いる場合がある。熱外中性子の反応だけを選択的に利用する時には、試料を 箔で包む。

原子炉から中性子を引き出して中性子ビームとし、中性子を照射しながら測定する 分析法もある。この方法では、生成核が安定同位体であっても、その短寿命の励起状態からの放射線を測定して元素分析を行うことができる。

<Mの解答群>

- | | |
|------------------|----------|
| 1 プラスチックシンチレーション | 2 GM 管式 |
| 3 Si 表面障壁型 | 4 Ge 半導体 |
| 5 液体シンチレーション | 6 電離箱式 |
| 7 比例計数管式 | |

<Nの解答群>

- | | | | |
|------------------------|------------------------|------------------------|-------|
| 1 2.5×10^{-6} | 2 2.5×10^{-4} | 3 2.5×10^{-2} | 4 2.5 |
| 5 2.5×10^2 | 6 2.5×10^4 | | |

<Oの解答群>

- | | | | |
|----------|-----|-----|-----|
| 1 アルミニウム | 2 鉄 | 3 銅 | 4 銀 |
| 5 カドミウム | 6 金 | | |

<Pの解答群>

- | | | |
|-----------|------------|-----------------|
| 1 即発中性子 | 2 遅発中性子 | 3 即発 γ 線 |
| 4 弾性散乱中性子 | 5 非弾性散乱中性子 | 6 中性子小角散乱 |

IV 加速器からの荷電粒子を照射する放射化分析は、標的核と異なる原子番号の放射性核種が生成することを利用する。生成した放射性核種を化学分離して低バックグラウンドの放射線測定を行うことにより、高純度物質中の極微量の軽元素の分析ができる。例えば、高純度シリコン中の超微量不純物窒素の放射化分析では、陽子を照射して窒素から生成する ^{13}N を用いる。照射終了後、試料に ^{14}N を加えてシリコンや他の放射性核種から ^{13}N を化学分離して精製する。陽電子が電子と対消滅するときに出る2本の放射線を ^{13}N 計数することによって高感度の分析を行う。

荷電粒子放射化分析では、照射粒子が試料中で停止して、試料が発熱するため、試料の冷却が必要となることが多い。例えば、10 MeVの陽子ビームを5 μA で試料に照射すると、その発熱量は 1.5×10^3 Wとなる。

<Qの解答群>

- | | | | | |
|-------------------|-------------------|-------------------|-------------------|-------------------|
| 1 ^{11}C | 2 ^{14}C | 3 ^{13}N | 4 ^{14}N | 5 ^{15}O |
| 6 ^{16}O | 7 ^{18}F | 8 ^{19}F | | |

<R、Sの解答群>

- | | | | |
|-----------|----------|-----------|----------|
| 1 ラジオコロイド | 2 キレート化剤 | 3 イオン交換樹脂 | 4 マスキング剤 |
| 5 担体 | 6 反同時 | 7 同時 | 8 波高分別 |
| 9 波形分別 | | | |

<Tの解答群>

- | | | | | |
|-----|------|------|---------------------|---------------------|
| 1 5 | 2 25 | 3 50 | 4 2.5×10^3 | 5 5.0×10^3 |
|-----|------|------|---------------------|---------------------|

問5 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。

放射線が生体に及ぼす影響は、放射線の強度や線質だけでなく、被ばくする生体側の様々な要因によって変化する。ここでは、培養細胞を⁶⁰Coからのγ線で照射する場合を考えてみよう。

Ⅰ 細胞の構成成分の中で水の割合が最も大きい。したがって、細胞へのγ線的作用で重要なのは、γ線が水に作用した時に起こる現象である。γ線が水に作用すると、マイクロ秒以下の非常に速い物理的・化学的過程を経て、数種類のラジカルが生じる。例えば、γ線のエネルギーを吸収して水が励起されると、その結果として□Aと□Bが生じる。一方、水が電離されると、電子と非常に不安定なH₂O⁺ラジカルを生じ、前者は水分子が配位することにより□Cを生じ、後者は分解すると、水素イオンと□Bを生じる。□Cは強い□Dであり、溶存酸素と反応すると□Eを生じ、水分子や水素イオンと反応すると□Aを生じる。このようにして生じた短寿命のラジカルは、DNA、タンパク質、脂質といった細胞構成成分と反応し、様々な影響を与える。このように、放射線が水分子に作用して、その結果生じたラジカルが生体成分に作用することを間接作用と呼び、ここで仮定した条件では間接作用の寄与は□F%と考えられている。

上記のように間接作用の過程で□Eが生じるが、その量は酸素濃度に依存する。□Eは活性酸素種の一つであり、生体に毒性を示す。生体内で生じた□Eを消去する酵素として最も重要なものは□Gである。一方、□Bなどによる水素引き抜き反応で生じた有機ラジカルと酸素分子が反応すると、有毒な過酸化物を生じる。このように、間接作用は酸素濃度の影響を受け、酸素濃度が高いと放射線の生体有害作用が強くなる。これを酸素効果と呼ぶ。酸素効果の指標として□Hがあり、次式のように定義される。

$$\square H = (\text{酸素が}\square I\text{条件で、ある生物効果を生じるのに要する吸収線量}) \div (\text{酸素が}\square J\text{条件で、同じ生物効果を生じるのに要する吸収線量})$$

数Gyのγ線による細胞致死の□Hは□Kの値をとる。

<A～Eの解答群>

- | | | |
|----------------|----------|--------------|
| 1 水素ラジカル | 2 窒素ラジカル | 3 ヒドロキシルラジカル |
| 4 スーパーオキシドラジカル | 5 水素イオン | 6 窒素イオン |
| 7 水酸化物イオン | 8 水和電子 | 9 還元剤 |
| 10 酸化剤 | 11 中和剤 | |

<Fの解答群>

- | | | | |
|--------|---------|---------|----------|
| 1 0～20 | 2 20～50 | 3 50～80 | 4 80～100 |
|--------|---------|---------|----------|

<G、Hの解答群>

- | | | | | | | | |
|----|----------------|----|----------------|----|-----|----|-----|
| 1 | カタラーゼ | 2 | スーパーオキシドジスムターゼ | | | | |
| 3 | グルタチオンペルオキシダーゼ | 4 | ホスホリパーゼ | | | | |
| 5 | プロテアーゼ | 6 | ATPアーゼ | | | | |
| 7 | チロシンヒドロキシラーゼ | 8 | DNAポリメラーゼ | | | | |
| 9 | LET | 10 | PCR | 11 | CSF | 12 | OER |
| 13 | RBE | 14 | DRF | 15 | PLD | | |

<I、Jの解答群>

- | | | | |
|---|----|---|----|
| 1 | 無い | 2 | 有る |
|---|----|---|----|

<Kの解答群>

- | | | | | | | | |
|---|-------|---|-------|---|-------|---|-------|
| 1 | 0.5~1 | 2 | 1.5~2 | 3 | 2.5~3 | 4 | 3.5~4 |
| 5 | 4.5~5 | | | | | | |

II 培養細胞は細胞分裂を繰り返して増殖する。分裂から次の分裂までの1周期を細胞周期と呼び、4つの時期が区別できる。DNA複製を行う 期と細胞が分裂する 期の間には、 G_1 期と G_2 期がある。分裂を一時的にやめた細胞や分裂を終えた細胞は 期のある時期に止まっていると考えられる。これを G_0 期と呼ぶことがある。細胞がどの時期で放射線を被ばくするかによって細胞の放射線感受性が異なる。増殖している細胞は、 期の後半から G_2 期前半にかけて放射線抵抗性になる。また、ある種の細胞では 期の前半で放射線抵抗性になる場合がある。

<L~Pの解答群>

- 1 G_1 2 G_2 3 M 4 S

III 培養細胞を γ 線で照射すると、吸収線量に応じて細胞は死ぬ。大線量を浴びた場合は、細胞の機能が失われ、細胞が壊れてそのまま死に至る。このような細胞死を と呼び、細胞および核の膨潤や膜の損傷による内容物の漏出などが観察される。一方、細胞が生理的な死のシグナルに反応して死に至る細胞死を と呼び、DNAの断片化、クロマチンの凝縮、細胞の分断化などが観察される。

数 Gy の γ 線を被ばくした培養細胞は、数回の分裂を経てから死に至る。このような細胞死を と呼ぶ。骨髄幹細胞や腫瘍細胞など、培養細胞以外でも γ 線被ばくによる が起こる。 を定量するために、通常、コロニー形成法が用いられる。この方法で得られた細胞生存率の対数を縦軸に、吸収線量を横軸にとってグラフを描くと、低線量の部分に肩を持つ右下がりの曲線が得られる。これを生存率曲線と呼ぶ。一般に、細胞を放射線防護剤で処理してから γ 線照射すると、この生存率曲線の傾きは 。

<Q~Sの解答群>

- 1 ネクローシス 2 アポトーシス 3 オートファジー 4 間期死
5 増殖死

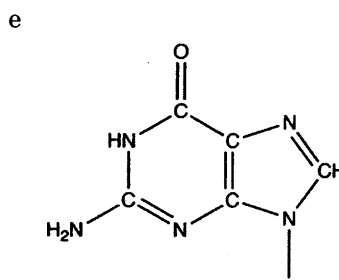
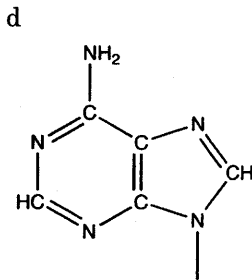
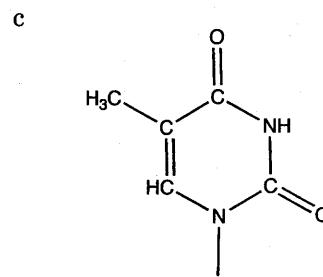
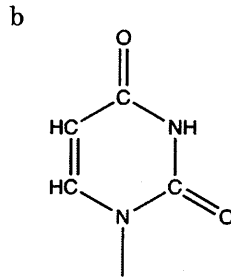
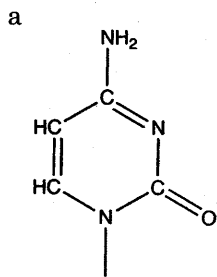
<Tの解答群>

- 1 急になる 2 変わらない 3 緩やかになる

問6 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。

I 放射線の生物作用を理解する上で、遺伝情報を担うDNAの構造を理解することが重要である。

DNAはデオキシリボース、リン酸、塩基から構成され、塩基にはアデニン、グアニン、シトシン、チミンの4種類がある。このうち、アデニンの構造式は下の図の□アである。アデニンは向かい合った鎖の□Aと対をなし、□Aの構造式は下の図の□イである。アデニンと□Aは□B個の□C結合で結ばれている。



<ア、イの解答群>

- 1 a 2 b 3 c 4 d 5 e

<Aの解答群>

- 1 シトシン 2 グアニン 3 チミン

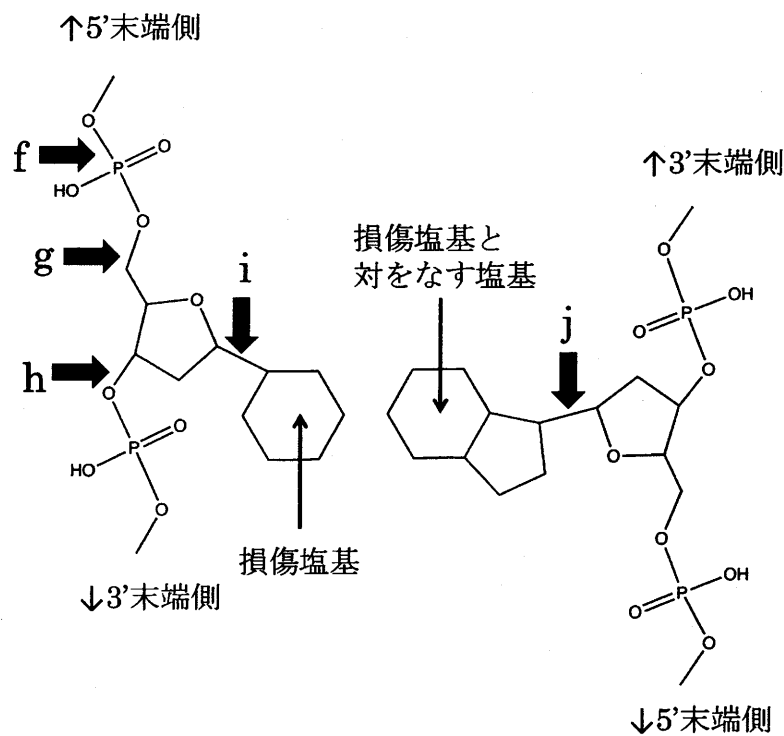
<Bの解答群>

- 1 1 2 2 3 3 4 4 5 5

<Cの解答群>

- 1 アミド 2 グリコシル 3 高エネルギーリン酸
4 水素 5 疎水 6 リン酸ジエステル

II 放射線、紫外線、活性酸素などの影響やDNA複製過程でのエラーによって、異常な塩基や塩基対が形成される。細胞にはこのような異常な塩基や塩基対を修復する機構が備わっている。たとえば、シトシンが脱アミノ化されると **D** が生じる。**D** はRNAには含まれるものの、本来DNAに含まれない塩基であるため、細胞はこれを異常と察知し、修復を行う。この場合の修復は **E** によって行われる。**E** においては、まず、DNAグリコシラーゼによって下図の **F** の位置で切断が起こり、塩基のない部位 (AP 部位) が生じる。次に、APエンドヌクレアーゼによって下図の **G** の位置で切断が起こる。さらにホスホジエステラーゼによってもう一方のリン酸ジエステル結合が切断され、損傷塩基が取り除かれると、DNAの2本の鎖のうち、一方の鎖が切れた構造が残ることになる。この構造はDNA1本鎖切断の修復機構を使って修復することが可能である。



<Dの解答群>

- 1 アラニン 2 イノシン 3 ウラシル 4 グリシン

<Eの解答群>

- 1 塩基除去修復 2 相同組換え 3 ヌクレオチド除去修復
4 光回復 5 非相同末端結合 6 ミスマッチ修復

<F、Gの解答群>

- 1 f 2 g 3 h 4 i 5 j

Ⅲ 放射線によって生じる DNA 損傷には、塩基損傷や架橋に加え、鎖切断がある。鎖切断には大きく分けて 1 本鎖切断と 2 本鎖切断がある。正常ヒト 2 倍体細胞に 1 Gy の γ 線を照射した場合、細胞 1 個あたり、1 本鎖切断は約 個、2 本鎖切断は約 個生成する。1 本鎖切断と 2 本鎖切断は最終的に によって結合されるが、結合の際には、5'末端に 基、3'末端に水酸基が必要である。末端の形状がこれと異なる場合には、ポリヌクレオチドキナーゼ/ホスファターゼなどによる整形を必要とする。

<Hの解答群>

- 1 10 2 100 3 1,000 4 10,000

<Iの解答群>

- 1 4 2 40 3 400 4 4,000

<Jの解答群>

- 1 DNA トポイソメラーゼ 2 DNA ヘリカーゼ 3 DNA ポリメラーゼ
4 DNA リガーゼ

<Kの解答群>

- 1 アミノ 2 カルボキシル 3 メチル 4 水酸
5 リン酸

IV ヒトやマウスの体細胞において、DNA2本鎖切断は主として、**L**と**M**の二つの機構で修復される。**L**は鋳型として**N**を必要とするため、細胞周期の**O**期の後半から**P**期に限定される。

Mに関わるDNA依存性プロテインキナーゼ触媒サブユニット (DNA-PKcs) 遺伝子に変異を有する scid (スキッド) マウスは放射線致死高感受性に加え、**Q**機能の異常を呈する。また、近年ヒトでも DNA-PKcs の遺伝子に変異を有する患者が報告され、**Q**機能の異常が認められている。これは、V(D)J 組換えと呼ばれる**R**遺伝子の再編成過程において**M**が関わるためである。

<L、Mの解答群>

- | | | |
|----------|-----------|--------------|
| 1 塩基除去修復 | 2 相同組換え | 3 ヌクレオチド除去修復 |
| 4 光回復 | 5 非相同末端結合 | 6 ミスマッチ修復 |

<Nの解答群>

- | | | | |
|--------|--------|----------|---------|
| 1 cDNA | 2 mRNA | 3 姉妹染色分体 | 4 相同染色体 |
|--------|--------|----------|---------|

<O、Pの解答群>

- | | | | | |
|------------------|------------------|------------------|-----|-----|
| 1 G ₀ | 2 G ₁ | 3 G ₂ | 4 M | 5 S |
|------------------|------------------|------------------|-----|-----|

<Qの解答群>

- | | | | | |
|------|-----|-----|------|-----|
| 1 肝 | 2 心 | 3 腎 | 4 生殖 | 5 肺 |
| 6 免疫 | | | | |

<Rの解答群>

- | | | |
|----------------|----------|-------------|
| 1 抗体 | 2 サイトカイン | 3 神経伝達物質受容体 |
| 4 ステロイドホルモン受容体 | 5 増殖因子 | 6 ヒストン |

