

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（17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、数値又は数式を、それぞれの解答群から1つだけ選べ。

I 物質中に入射した光子束は、光子エネルギーが高い場合に起こる光核反応を除くと、主として□A、□B、□Cの3つの過程により減衰する。ここで、□Aの原子断面積 σ_a は物質の原子番号 Z と光子エネルギー E_γ に依存し、おおよそ $\sigma_a \propto \square D \cdot E_\gamma^{-3.5}$ である。したがって、□Aはエネルギーの低い光子が原子番号の大きい物質に入射したときに寄与が大きくなる。一方、□Bは電子との散乱過程であるので、その原子断面積 σ_b は1原子当たりの電子数に比例する。また、□Cの原子断面積 σ_c は□Eに比例し、しきい値以上では光子エネルギーが高くなるほど大きくなる。

<A～Cの解答群>

- | | | | |
|------------|-----------|----------|-----------|
| 1 ラザフォード散乱 | 2 レイリー散乱 | 3 トムソン散乱 | 4 光電効果 |
| 5 チェレンコフ効果 | 6 コンプトン効果 | 7 オージェ効果 | 8 核破碎反応 |
| 9 電離 | 10 励起 | 11 電子対生成 | 12 イオン対生成 |

<D、Eの解答群>

- | | | | | |
|------------|------------|--------------|-------------|----------|
| 1 Z^{-2} | 2 Z^{-1} | 3 $Z^{-1/2}$ | 4 $Z^{1/2}$ | 5 Z |
| 6 Z^2 | 7 Z^3 | 8 Z^5 | 9 Z^7 | 10 Z^9 |

II よくコリメートされた細い光子束が物質に入射したとき、光子フルエンス Φ の物質内の厚さ dx での減衰 $d\Phi$ は、 μ を定数として

$$-\frac{d\Phi}{dx} = \mu\Phi$$

で表される。物質の厚さを x とし、入射光子フルエンスを Φ_0 とすると

$$\Phi = \Phi_0 e^{-\mu x}$$

となる。この式において μ を□Fと呼ぶ。ある物質の光子との相互作用に関する□Fは、その相互作用に対する原子断面積に物質の単位□G当たりの原子数 N を乗じたものである。□Fの逆数を□Hと呼ぶ。□Fを物質の密度 ρ で割った値 μ/ρ が□Iであり、物質の状態によらず物質固有の値として扱える。また、□Bに対する□Iは、物質の原子番号 Z と質量数 A を用いて表すとき□アに比例する量となり、水素を除き□Jにあまり依存しないことが示される。

<F～Hの解答群>

- | | | |
|-------------|------------|-------------|
| 1 内部転換係数 | 2 線減弱係数 | 3 エネルギー転移係数 |
| 4 エネルギー吸収係数 | 5 ビルドアップ係数 | 6 平均自由行程 |
| 7 平均飛程 | 8 最大飛程 | 9 外挿飛程 |
| 10 長さ | 11 面積 | 12 体積 |
| 13 質量 | 14 半価層 | 15 コンプトン長 |

< I、Jの解答群 >

- | | | |
|---------------|------------|---------------|
| 1 質量阻止能 | 2 質量減弱係数 | 3 線減弱係数 |
| 4 質量エネルギー転移係数 | 5 線エネルギー付与 | 6 質量エネルギー吸収係数 |
| 7 質量 | 8 物質 | 9 光子エネルギー |
| 10 光子フルエンス | | |

< アの解答群 >

- | | | | |
|--|-----------------|-----------------|--------------------------------|
| 1 $\left(\frac{Z}{A}\right)^{\frac{1}{2}}$ | 2 $\frac{Z}{A}$ | 3 $\frac{A}{Z}$ | 4 $\left(\frac{Z}{A}\right)^2$ |
| 5 $\left(\frac{A}{Z}\right)^2$ | 6 ZA | | |

III IIで述べた **F** あるいは **I** は、光子の物質中での減衰を扱う場合に重要であるが、光子による物質へのエネルギー付与やその結果生じる効果など、エネルギー伝達を扱う場合には、**K** や **L** で考える。

ここで、特性 X 線として持ち去られる平均エネルギーを δ 、**B** において放出される二次電子の平均エネルギーを \bar{E} 、電子の静止質量を m_0c^2 とすると、**K** μ_1 は、I で述べた 3 つの過程の断面積を用いて、

$$\mu_1 = \{ \text{イ} \sigma_a + \text{ウ} \sigma_b + \text{エ} \sigma_c \} N$$

と表すことができ、全入射光子エネルギーのうち、どの位のエネルギーが相互作用により生成された二次電子の運動エネルギーに変換されるかの割合を示すパラメータとなる。**L** μ_2 は、二次電子の運動エネルギーのうち制動放射線として失われるエネルギーの割合を g とするとき、

$$\mu_2 = \mu_1 \text{オ}$$

で表される。光子エネルギーが低く、空気や軟組織などの低原子番号物質では、ほぼ $\mu_2 = \mu_1$ の関係が成立する。

これらのパラメータを用いて、0.5 MeV 光子が軟組織に入射する場合の軟組織に付与されるエネルギーについて考える。まず、0.5 MeV 光子と軟組織の相互作用の大部分は、**M** であり、相互作用の結果発生する二次電子が軟組織にエネルギーを付与する。軟組織中のある場所での光子フルエンスが $1.0 \times 10^{15} \text{ m}^{-2}$ であるとき、その場所における単位質量当たり付与されるエネルギーは、軟組織の **L** をその密度で割った値 μ_2/ρ を $0.003 \text{ m}^2 \cdot \text{kg}^{-1}$ として、**カ** $\text{J} \cdot \text{kg}^{-1}$ と求まる。

<K~Mの解答群>

- | | | |
|-------------|---------------|-------------|
| 1 内部転換係数 | 2 線減弱係数 | 3 エネルギー転移係数 |
| 4 エネルギー吸収係数 | 5 放射線加重(荷重)係数 | 6 ラザフォード散乱 |
| 7 レイリー散乱 | 8 トムソン散乱 | 9 光電効果 |
| 10 チェレンコフ効果 | 11 コンプトン効果 | 12 オージェ効果 |
| 13 光核反応 | | |

<イ~エの解答群>

- | | | | |
|--|---|--|---|
| 1 $\frac{\bar{E}}{E_\gamma}$ | 2 $\frac{\delta}{E_\gamma}$ | 3 $\frac{m_0c^2}{E_\gamma}$ | 4 $\left(1 - \frac{\bar{E}}{E_\gamma}\right)$ |
| 5 $\left(1 - \frac{\delta}{E_\gamma}\right)$ | 6 $\left(1 - \frac{2\delta}{E_\gamma}\right)$ | 7 $\left(1 - \frac{m_0c^2}{E_\gamma}\right)$ | 8 $\left(1 - \frac{2m_0c^2}{E_\gamma}\right)$ |

<オの解答群>

- | | | | | |
|-------------------|-------------------|----------------------------------|-------------------|-----------------------------------|
| 1 g | 2 $\frac{1}{g}$ | 3 $(1+g)$ | 4 $\frac{1}{1+g}$ | 5 $(1-g)$ |
| 6 $\frac{1}{1-g}$ | 7 $\frac{g}{1+g}$ | 8 $\left(\frac{1}{g} + 1\right)$ | 9 $\frac{g}{1-g}$ | 10 $\left(\frac{1}{g} - 1\right)$ |

<カの解答群>

1 1.5×10^{-2}

2 2.4×10^{-2}

3 5.0×10^{-2}

4 7.2×10^{-2}

5 1.5×10^{-1}

6 2.4×10^{-1}

7 5.0×10^{-1}

8 7.2×10^{-1}

9 1.5

10 2.4

11 5.0

12 7.2

問2 次のⅠ～Ⅲ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、原子核がα粒子すなわち□A□を放出してより小さい原子核に壊変する現象であり、若干の例外を除いて質量数が200以上の重い原子核で起こる。α壊変に伴い放出されるエネルギー、すなわち壊変エネルギーは□B□と呼ばれ、親核、生成核並びにα粒子の□C□から求められる。このエネルギーが生成核及びα粒子に運動量を保存するように分配されるために、α粒子のエネルギーは□D□を示す。 ^{226}Ra がα粒子を放出して ^{222}Rn に壊変する例を考えると、この壊変の□B□は□ア□ MeVとなる。また、α粒子のエネルギーは□イ□ MeVとなる。ただし、 ^{226}Ra 、α粒子並びに ^{222}Rn の結合エネルギーを、それぞれ1731.6 MeV、28.3 MeV並びに1708.2 MeVとする。

<A、Bの解答群>

- | | | | |
|-----------|-----------|------|-------|
| 1 電子 | 2 中性子 | 3 陽子 | 4 重陽子 |
| 5 ヘリウム原子核 | 6 リチウム原子核 | 7 G値 | 8 Q値 |
| 9 W値 | 10 e値 | | |

<C、Dの解答群>

- | | | |
|-------------|------------|---------------|
| 1 波高欠損 | 2 質量欠損 | 3 ポテンシャルエネルギー |
| 4 内部転換エネルギー | 5 エネルギー損失 | 6 連続スペクトル |
| 7 線スペクトル | 8 マクスウェル分布 | |

<ア、イの解答群>

- | | | | |
|--------|--------|--------|--------|
| 1 4.0 | 2 4.1 | 3 4.2 | 4 4.3 |
| 5 4.4 | 6 4.5 | 7 4.6 | 8 4.7 |
| 9 4.8 | 10 4.9 | 11 5.0 | 12 5.1 |
| 13 5.2 | 14 5.3 | | |

II β 壊変には、 β^- 壊変、 β^+ 壊変及び $\boxed{\text{E}}$ があり、いずれも弱い相互作用によって起こる。

β^- 壊変では原子核内の $\boxed{\text{F}}$ が $\boxed{\text{G}}$ に変わり、電子と反ニュートリノが放出される。壊変エネルギーは、生成核、電子 (β^- 線) 及び反ニュートリノの運動エネルギーに分配され、 β^- 線のエネルギーは連続分布となる。一般に、 β 線のエネルギーは、電子が持ち出す最大のエネルギーで表されることが多く、これは壊変エネルギーに対応する。

β^+ 壊変では $\boxed{\text{H}}$ とニュートリノが放出される。その結果、生成核の原子番号は $\boxed{\text{I}}$ 。また、その質量数は $\boxed{\text{J}}$ 。 $\boxed{\text{H}}$ のエネルギー分布も連続分布で、その分布の形状は β^- 線のエネルギー分布と $\boxed{\text{K}}$ 。 β^+ 壊変における親核の質量を X 、生成核の質量を Y とすると、壊変エネルギーは、 $\boxed{\text{L}}$ と表すことができる。ただし、 c を光速、 m_0 を電子の静止質量とする。

$\boxed{\text{E}}$ は、原子核の $\boxed{\text{M}}$ が軌道電子と結合して $\boxed{\text{F}}$ になり、ニュートリノ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、そこへ外側の軌道の電子が遷移した場合には、 $\boxed{\text{N}}$ 又はオージェ電子が放出される。 $\boxed{\text{E}}$ はもともと内殻、すなわち K 殻にある電子で起こりやすく、これが起こった場合、K 軌道及び L 軌道における電子の結合エネルギーを E_K 及び E_L とすると、 $\boxed{\text{N}}$ と競合して放出される電子のエネルギーは $\boxed{\text{O}}$ となる。

< E の解答群 >

- | | | |
|--------|----------|---------|
| 1 内部転換 | 2 核異性体転移 | 3 電子捕獲 |
| 4 制動放射 | 5 自発核分裂 | 6 中性子捕獲 |

< F ~ J の解答群 >

- | | | | |
|----------|-----------|-------|----------|
| 1 陽子 | 2 中性子 | 3 電子 | 4 陽電子 |
| 5 ニュートリノ | 6 反ニュートリノ | 7 中間子 | 8 1つ減少する |
| 9 変わらない | 10 1つ増加する | | |

< K, L の解答群 >

- | | | | |
|-----------------------|--------------------|----------------------|---------------------|
| 1 一致する | 2 異なる | 3 相似である | 4 $(X - Y + m_0)c$ |
| 5 $(X - Y + m_0)c^2$ | 6 $(X - Y - m_0)c$ | 7 $(X - Y - m_0)c^2$ | 8 $(X - Y - 2m_0)c$ |
| 9 $(X - Y - 2m_0)c^2$ | | | |

< M ~ O の解答群 >

- | | | | |
|-----------------|-----------------|----------------|----------|
| 1 陽子 | 2 中性子 | 3 電子 | 4 陽電子 |
| 5 中間子 | 6 γ 線 | 7 制動 X 線 | 8 特性 X 線 |
| 9 消滅放射線 | 10 $E_K - E_L$ | 11 $E_K + E_L$ | 12 E_K |
| 13 $E_K - 2E_L$ | 14 $E_K + 2E_L$ | | |

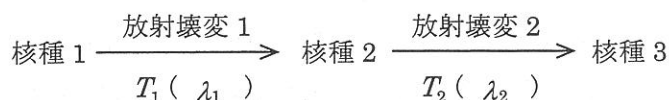
III α 壊変や β 壊変後の生成核は励起状態にある場合が多い。 γ 放射は、このような励起状態の核種がより安定になるため γ 線を放出してエネルギーのより低い状態へ変化する現象をいう。 γ 放射において、核子の構成に変化はない。また、励起状態からの移行は一般に瞬時に起こるが、その励起状態の寿命が測定できるほど長い場合を $\boxed{\text{P}}$ という。 γ 線を放出する代わりに、軌道電子を放出する過程を $\boxed{\text{Q}}$ といい、放出される電子のエネルギーは $\boxed{\text{R}}$ を示す。

< P ~ R の解答群 >

- | | | | |
|------------|----------|-----------|----------|
| 1 内部転換 | 2 核異性体転移 | 3 電子捕獲 | 4 制動放射 |
| 5 自発核分裂 | 6 光核反応 | 7 連続スペクトル | 8 線スペクトル |
| 9 マクスウェル分布 | | | |

問3 次の放射平衡に関する I、II 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。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 半減期 T_1 (壊変定数 λ_1) の核種 1 が放射壊変して生成する核種 2 が放射性で、さらに半減期 T_2 (壊変定数 λ_2) で壊変して核種 3 となるときの、



核種 1 から核種 2 を分離除去してからの時間 t により、核種 1 の原子数 N_1 と核種 2 の原子数 N_2 は、それぞれ以下のように変化する。

$$\frac{dN_1}{dt} = -\lambda_1 N_1 \quad \dots\dots \text{①}$$

$$\frac{dN_2}{dt} = \text{A} - \lambda_2 N_2 \quad \dots\dots \text{②}$$

分離時 $t = 0$ において $N_1 = N_1^0$ 、 $N_2 = 0$ とすると、その後の各原子数は、

$$N_1 = N_1^0 \exp(-\lambda_1 t) \quad \dots\dots \text{③}$$

$$N_2 = \text{B} N_1^0 \{ \exp(-\lambda_1 t) - \exp(-\lambda_2 t) \} \quad \dots\dots \text{④}$$

となり、それぞれの放射能 A_1 と A_2 は、 $\lambda_1 N_1^0 = A_1^0$ として

$$A_1 = A_1^0 \exp(-\text{C}) \quad \dots\dots \text{⑤}$$

$$A_2 = \text{D} A_1^0 \{ \exp(-\lambda_1 t) - \exp(-\lambda_2 t) \} \quad \dots\dots \text{⑥}$$

と示される。

< A ~ D の解答群 >

1 $\lambda_1 N_1$

2 $-\lambda_1 N_1$

3 $\lambda_2 N_2$

4 $-\lambda_2 N_2$

5 $\lambda_1 t$

6 $\lambda_2 t$

7 $\frac{1}{\lambda_1 - \lambda_2}$

8 $\frac{1}{\lambda_2 - \lambda_1}$

9 $\frac{\lambda_1}{\lambda_1 - \lambda_2}$

10 $\frac{\lambda_1}{\lambda_2 - \lambda_1}$

11 $\frac{\lambda_2}{\lambda_1 - \lambda_2}$

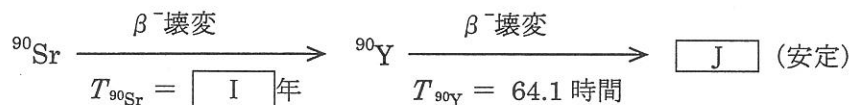
12 $\frac{\lambda_2}{\lambda_2 - \lambda_1}$

II Iにおいて、 $T_1 \gg T_2$ (すなわち $\lambda_1 \ll \lambda_2$) の場合を考える。核種 2 の放射能 A_2 は、⑥式において λ_1 が非常に小さいことから、

$$A_2 \doteq A_1^0 \{1 - \exp(-\lambda_2 t)\} = A_1^0 \left\{ 1 - \left(\frac{1}{2}\right)^{\frac{t}{T_2}} \right\} \quad \dots\dots \textcircled{7}$$

と近似される。この⑦式で経時変化を示す項 $\{1 - \exp(-\lambda_2 t)\}$ は、放射化や RI 製造時における飽和係数と同じ形になっている。すなわち、核種 2 の分離除去後の時間 t において核種 1 から生成する核種 2 の放射能 A_2 は、分離直後は $A_2 \doteq \text{F} A_1^0$ のように時間とともに直線的に増加するが、次第に、 $t = T_2$ で $A_2 \doteq \text{G} A_1^0$ 、 $t = 2T_2$ で $A_2 \doteq \text{H} A_1^0$ 、 $t = 7T_2$ で $A_2 \doteq 0.99 A_1^0$ と、飽和に近づく。 $t = 10T_2$ では $A_2 \doteq 0.999 A_1^0$ となり、以降、 A_2 は A_1^0 に等しいと見なせる。このような放射平衡状態を永続平衡という。

例えば、半減期が I 年の ^{90}Sr は次のように 2 回の β^- 壊変を経て J になる。



環境試料中の ^{90}Sr の分析定量は、 ^{90}Sr の β 線エネルギーが 0.55 MeV と低く容易ではない。その測定には、娘核種 ^{90}Y の β 線エネルギーが 2.28 MeV と非常に高いことから、これを利用する。試料からストロンチウムを分離回収して精製した後、2 週間以上待つ。その塩酸溶液に K の捕集剤として Fe^{3+} を、 L の保持担体として Sr^{2+} を、それぞれ塩化物の形で加えた後、加熱しながらアンモニア水を加えて水酸化鉄(III)の沈殿をつくり、この沈殿中に娘核種 ^{90}Y を共沈させて親核種 ^{90}Sr から分離する。沈殿中の ^{90}Y の放射能測定により、まず半減期の測定から M が含まれていないことを確認し、次いで共沈させた時刻における ^{90}Y の放射能を算出し、⑦式により ^{90}Sr の放射能を求めることができる。

一方、 ^{90}Y は、平均寿命が ア 日で、水中の最大飛程が約 イ mm の β 線を放出することから、近年、がん細胞に対する抗体に ^{90}Y を結合させて注射し、これを選択的ながん組織に集めて β 線を照射する RI 内用療法に利用されている。 ^{90}Y の製造法として、 N (n, γ) ^{90}Y 反応も利用できるが、この場合、製造される ^{90}Y は非放射性的の ウ を含み、比放射能が低くなる。一方、 ^{235}U の熱中性子核分裂反応により ^{90}Sr が高収率で生成するので、核分裂生成物から エ を分離精製して置くと、そこに無担体の ^{90}Y が生成してくる。この ^{90}Y を取り出しても、 ^{90}Sr から引き続き新たな ^{90}Y が生成してくるので、繰り返して ^{90}Y を取り出し利用することができる。この操作を オ という。この場合、 ^{90}Y を取り出した後 カ 日間経過すると永続平衡時の 1/2 量の ^{90}Y が得られる。

<E、Fの解答群>

1 $\lambda_1 t$	2 $\lambda_2 t$	3 $\frac{t}{T_1}$	4 $\frac{t}{T_2}$
-----------------	-----------------	-------------------	-------------------

5 $\frac{\lambda_2}{\lambda_1}$	6 $\frac{T_1}{T_2}$
---------------------------------	---------------------

<G、Hの解答群>

1 0.10	2 0.13	3 0.25	4 0.50
5 0.75	6 0.83	7 0.90	8 0.95

<Iの解答群>

1 5.3	2 12.3	3 28.8	4 1,600
5 5,700			

<J~Nの解答群>

1 ^{89}Rb	2 ^{89}Sr	3 ^{90}Sr	4 ^{89}Y
5 ^{90}Y	6 ^{89}Zr	7 ^{90}Zr	8 ^{89}Nb
9 ^{90}Nb			

<アの解答群>

1 1.9	2 2.7	3 3.9	4 5.4
5 28.7	6 44.4	7 57.4	8 64.1
9 92.5	10 128	11 256	

<イの解答群>

1 2	2 5	3 11	4 22
5 33			

<ウ、エの解答群>

1 イットリウム	2 ジルコニウム	3 セシウム	4 ストロンチウム
5 ルビジウム			

<オの解答群>

1 ミキシング	2 ミルキング	3 ストリッピング	4 トラッピング
---------	---------	-----------	----------

<カの解答群>

1 1.9	2 2.7	3 3.9	4 5.4
5 28.7	6 44.4	7 57.4	8 64.1
9 92.5	10 128	11 256	

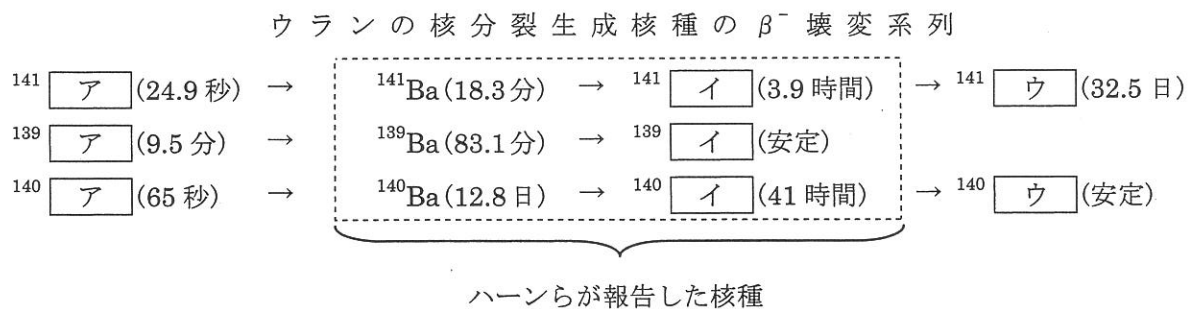
II ハーンらは、I で述べた生成核種を確認しようとして、マイトナーらと詳細な化学実験を行った。照射したウランを溶解後、前処理をしてから、ラジウムの $\boxed{\text{I}}$ であるバリウムを $\boxed{\text{J}}$ として添加し、高濃度の塩酸溶液系から塩化バリウムを沈殿させた。この沈殿には、ウラン、プロトアクチニウム、トリウム、アクチニウムが含まれていないことを確認した。次に、照射時間と照射後の冷却時間を変えて β 線を測定し、放射能の $\boxed{\text{K}}$ 曲線から、3 つの親核種 (Ra-II、Ra-III、Ra-IV と表記) 及び、それらからそれぞれ生成する娘核種 (Ac-II、Ac-III、Ac-IV と表記) の半減期を決定した。

ハーンらはさらに、これらの親核種と娘核種がそれぞれラジウム及びアクチニウムの同位体であると考え、その確認を試みた。しかし、Ra-II、Ra-III、Ra-IV、あるいは当時知られていたラジウムのトレーサー (^{228}Ra) を含む塩化バリウム系で繰り返し分別結晶操作を行った結果、Ra-II、Ra-III、Ra-IV の化学的特性はいずれもラジウムとは異なり、むしろバリウムとしての挙動を示した。一方、Ac-II、Ac-III、Ac-IV あるいは当時知られていたアクチニウムのトレーサー (^{228}Ac) を含むシュウ酸ランタン系で繰り返し分別結晶操作を行った結果、Ac-II、Ac-III、Ac-IV の化学的特性はいずれもアクチニウムとは異なり、むしろランタンとしての挙動を示した。

それぞれの核種の親-娘の関係を考慮すると、塩化バリウムに捕捉された 3 種の親核種 Ra-II、Ra-III、Ra-IV は、いずれも放射性の $\boxed{\text{L}}$ 同位体であり、それらから生成した娘核種 Ac-II、Ac-III、Ac-IV は、いずれも $\boxed{\text{M}}$ の同位体と考えられた。

以上の化学的事実から、ハーンらは、原子番号 92 のウランに熱中性子を照射すると、原子番号 56 の $\boxed{\text{N}}$ が生成したと発表した。この報告に基づいて、マイトナーらと O. フリッシュはウランが核分裂することを提案した。

ウランが核分裂したときに生成する核種で、ハーンらが分離したと推定される核種を含む壊変系列について、現在明らかになっているデータを下図に示す。 $\boxed{\text{ア}}$ ~ $\boxed{\text{ウ}}$ の元素は何か。



< I ~ K の解答群 >

- | | | | |
|---------|-------|--------|--------|
| 1 同位元素 | 2 同素体 | 3 同重体 | 4 同族元素 |
| 5 トレーサー | 6 担体 | 7 原子価 | 8 消滅 |
| 9 生成・減衰 | 10 吸収 | 11 半減期 | 12 溶解度 |
| 13 質量数 | 14 密度 | | |

<L～Nの解答群>

- | | | | |
|--------|--------|----------|--------|
| 1 ラジウム | 2 ウラン | 3 アクチニウム | 4 バリウム |
| 5 ランタン | 6 トリウム | | |

<ア～ウの解答群>

- | | | | |
|------|------|------|------|
| 1 Ba | 2 Ce | 3 Cs | 4 La |
| 5 Nd | 6 Pr | 7 Ra | |

問5 次のI～IIIの文章の□の部分に入る最も適切な語句又は数値を、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 高線量放射線を一度に全身被ばくしたような場合、数週間以内に現れる障害を急性障害という。線量によって症状は異なるが、典型的な経過は以下の4つの病期に分けられる。被ばく直後から数時間以内に悪心、嘔吐、発熱など非特異的な症状が現れる□A期、これらの症状が一時的に消失する□B期、骨髄や消化管障害、脱水など多彩な症状が現れる発症期、その後の回復期あるいは死亡の4期である。

障害の現れ方やその時期は、線量及び臓器・組織によって異なる。例えば、ヒトが高線量のγ線を全身被ばくしても医療処置がなされないと、3～10 Gyでは3～4週間程度で□Cの障害により、10～20 Gyでは1～2週間程度で□Dの障害により死亡する危険性が高い。

<A～Dの解答群>

- | | | | |
|------|-------|--------|-------|
| 1 潜伏 | 2 移行 | 3 前駆 | 4 感染 |
| 5 遷延 | 6 不顕性 | 7 中枢神経 | 8 腸管 |
| 9 腎臓 | 10 肺 | 11 心臓 | 12 骨髄 |

II 臓器や組織の急性障害は、主に臓器・組織の実質細胞の□Eによって起こると考えられる。臓器や組織によって実質細胞の放射線感受性が違うために、障害を認めるようになる□Fも臓器や組織によって異なる。一般に、現れる障害の重篤度は、被ばくした線量が大きいと□G。1回のγ線による被ばくでは、末梢血中のリンパ球数の減少は□H Gy以上の被ばくによって起こる。女性の永久不妊は6 Gy以上の生殖腺被ばくによって起こり、男性の永久不妊は□I Gy以上の生殖腺被ばくによって起こる。また、男性の一時的不妊の□Fは□J Gyで、女性の一時的不妊が起こる線量は男性に比べて□K。

<E～Kの解答群>

- | | | | |
|--------|----------|---------|--------|
| 1 分化 | 2 老化 | 3 死 | 4 増殖 |
| 5 実効線量 | 6 しきい線量 | 7 集団線量 | 8 高い |
| 9 低い | 10 変わらない | 11 0.15 | 12 0.5 |
| 13 1 | 14 6 | 15 10 | |

Ⅲ 晩発影響としては、発がん、白内障、遺伝的影響などが挙げられる。発がんは、と考えられている。一般に、被ばくしてから発がんまでの期間は固形がんでは白血病に比べて。白内障はに分類され、の混濁による。遺伝的影響は放射線に被ばくしたに遺伝子の突然変異や染色体異常が起こることによる。遺伝的影響のリスクの推定には倍加線量法と、線量効果関係を動物実験によって求め、これをヒトに適用して行う法とがある。遺伝的影響のリスクは、倍加線量が大きいほどく、一般的に線量率が低いほどい。UNSCEAR(原子放射線の影響に関する国連科学委員会)2001年報告では倍加線量を Gyと見積もっている。

< L～Oの解答群 >

- | | | | |
|---------|---------|------|---------|
| 1 確率的影響 | 2 確定的影響 | 3 短い | 4 変わらない |
| 5 長い | 6 硝子体 | 7 角膜 | 8 水晶体 |
| 9 結膜 | | | |

< P～Tの解答群 >

- | | | | |
|--------|--------|-------|--------|
| 1 体細胞 | 2 生殖細胞 | 3 直接 | 4 間接 |
| 5 遺伝有意 | 6 高 | 7 低 | 8 0.05 |
| 9 0.2 | 1 0 1 | 1 1 5 | |

問6 放射線の生物作用に関する次のI、IIの文章の□の部分に入る最も適切な語句又は数値を、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 放射線のエネルギーが細胞・組織に与えられることにより生物作用が生じる。ここで、致死作用をエネルギーの観点から考えてみよう。γ線による急性全身被ばくの場合、ヒトの半致死線量(LD_{50/60})は□A Gy程度とされているが、この線量は体重50 kgのヒトを考えると約□B Jのエネルギー吸収に過ぎない。このエネルギーがすべて体温の上昇に使われ、人体の比熱が水と等しいと仮定すると、体温上昇は□C °C程度になる。すなわち、小さなエネルギーが大きな生物作用をもたらしていることになる。

放射線の生物作用は、最初のエネルギー付与を出発点として、時間的に次々に起こる反応の結果である。この連鎖的な過程は、各過程が起こる時期の早い方から、□D過程、□E過程、□F過程、□G過程と言い表される。水の励起・電離は□H過程に含まれ、□I秒程度で起こる。ラジカルの生成・拡散は□J過程に含まれ、□K秒程度の時間スケールである。

<A～Cの解答群>

- | | | | |
|----------|----------|----------|--------|
| 1 0.001 | 2 0.01 | 3 0.1 | 4 0.4 |
| 5 1 | 6 4 | 7 12 | 8 20 |
| 9 50 | 10 100 | 11 200 | 12 600 |
| 13 1,000 | 14 2,500 | 15 5,000 | |

<D～Hの解答群>

- | | | | |
|-------|-------|--------|-------|
| 1 化学的 | 2 生物的 | 3 生化学的 | 4 物理的 |
|-------|-------|--------|-------|

<Iの解答群>

- | | | | |
|--------------|-------------|-------------|----------|
| 1 10^{-16} | 2 10^{-8} | 3 10^{-2} | 4 10^2 |
| 5 10^6 | | | |

<Jの解答群>

- | | | | |
|-------|-------|--------|-------|
| 1 化学的 | 2 生物的 | 3 生化学的 | 4 物理的 |
|-------|-------|--------|-------|

<Kの解答群>

- | | | | |
|----------------------------|---------------------------|-----------------------|----------------|
| 1 10^{-19} から 10^{-13} | 2 10^{-12} から 10^{-4} | 3 10^{-3} から 10^2 | 4 10 から 10^6 |
| 5 10^5 から 10^{10} | | | |

II 放射線の生物作用の主要な標的は DNA であり、放射線が直接 DNA 分子に損傷を与える場合を直接作用という。一方、放射線が細胞中の [L] 分子に作用してラジカルを生成し、それが DNA 分子に作用する場合を間接作用という。間接作用による DNA 損傷では、ラジカルの中でも [M] の寄与が最も大きい。希釈効果や [N] は主に [O] 作用で観察される。DNA 損傷のような生物作用においては、X 線のような [P] LET 放射線の場合は [Q] 作用の寄与が大きく、重粒子線のような [R] LET 放射線の場合は X 線の場合と比べて [S] 作用の寄与が大きくなる。ラジカルスカベンジャーの効果は [T] LET 放射線の方が顕著に見られる。

< L、M の解答群 >

- | | | | |
|----------------|------|--------------|-----|
| 1 タンパク質 | 2 脂質 | 3 水 | 4 糖 |
| 5 スーパーオキシドラジカル | | 6 ヒドロキシルラジカル | |
| 7 一酸化窒素ラジカル | | 8 炭酸ラジカル | |

< N～T の解答群 >

- | | | | |
|--------|------|--------|--------|
| 1 高 | 2 低 | 3 圧力効果 | 4 磁場効果 |
| 5 酸素効果 | 6 間接 | 7 直接 | |

