

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（19 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、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。

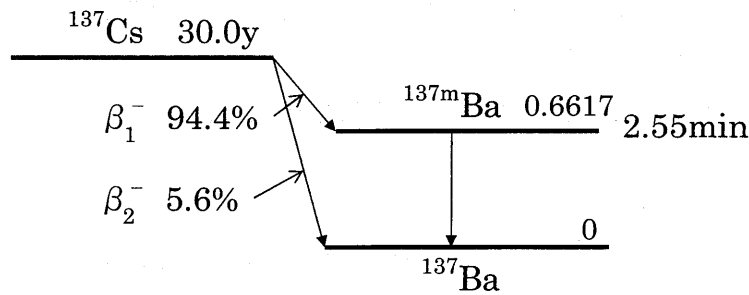
Ⅰ 励起状態にある原子核が γ 線を放出してエネルギーのより低い状態に変わすることを γ 遷移という。励起状態の原子核は、 α 壊変や β 壊変などによって生成するものが多く、励起状態の寿命は一般に短い。例えば、 ^{60}Co は5.27年の半減期で β 壊変し、99.93%が ^{60}Ni の2.506 MeVの励起準位をとるが、その励起準位の寿命は□A□秒のオーダーで、直ちに γ 線を放出して次の□B□ MeVの励起準位になる。この準位の寿命も同程度で γ 線を放出して、 ^{60}Ni の安定状態になる。

励起状態が長い原子核も存在する。例としては□C□の励起状態の半減期は約6時間である。このような状態にある原子核を□D□と呼び、その γ 遷移過程を□E□と呼ぶ。

一方、励起状態の原子核が γ 線を放出せずエネルギーを軌道電子に直接与えて、その軌道電子を放出する現象がある。この現象は□F□とよばれ、放出された電子のエネルギー分布は□G□である。□F□の起こる確率は、原子番号のほぼ□H□乗に比例し、原子核から放出されるエネルギーが□I□ほど大きい。□F□にあずかる電子は□J□電子が約80%である。遷移の際に電子が放出される確率 I_e と γ 線が放出される確率 I_γ の比 $\alpha(=I_e/I_\gamma)$ を□F□係数といい、軌道電子の種類に応じて $\alpha_K, \alpha_L, \dots$ のように表す。全□F□係数を $\alpha_T(=\alpha_K+\alpha_L+\dots)$ 、並びに遷移の確率を $p(=I_e+I_\gamma)$ とすると、 γ 線放出の確率 I_γ は、

$$I_\gamma = \square K \square$$

となる。下図に示す ^{137}Cs の場合では、 $\alpha_T=0.110$ とすると、1壊変当たりの γ 線放出の割合は、□L□となる。



^{137}Cs の壊変図

<Aの解答群>

- | | | | | | | | | | |
|---|--------------------|---|--------------------|---|--------------------|---|---------------------|---|---------------------|
| 1 | 1×10^{-3} | 2 | 1×10^{-6} | 3 | 1×10^{-9} | 4 | 1×10^{-12} | 5 | 1×10^{-15} |
|---|--------------------|---|--------------------|---|--------------------|---|---------------------|---|---------------------|

<Bの解答群>

- | | | | | | | | | | |
|---|-------|---|-------|---|-------|---|-------|---|-------|
| 1 | 0.511 | 2 | 0.662 | 3 | 1.173 | 4 | 1.231 | 5 | 1.275 |
| 6 | 1.333 | 7 | 1.844 | 8 | 1.995 | | | | |

<Cの解答群>

- | | | | | | | | | | |
|---|------------------|---|------------------|---|-------------------|---|------------------|---|-------------------|
| 1 | ^{99}Mo | 2 | ^{99}Tc | 3 | ^{109}Cd | 4 | ^{131}I | 5 | ^{131}Xe |
|---|------------------|---|------------------|---|-------------------|---|------------------|---|-------------------|

<D~Fの解答群>

- | | | | | |
|-----------|--------|--------|----------|---------|
| 1 核異性体 | 2 同重体 | 3 複合核 | 4 内部転換 | 5 電子捕獲 |
| 6 電子放射 | 7 制動放射 | 8 光核反応 | 9 核異性体転移 | 10 蛍光収率 |
| 11 オージェ効果 | | | | |

<Gの解答群>

- | | | | |
|-----------|-----------|-----------|-----------|
| 1 線スペクトル | 2 連続スペクトル | 3 光電スペクトル | 4 多重スペクトル |
| 5 共鳴スペクトル | | | |

<H、Iの解答群>

- | | | | |
|-------|-------|--------|----------|
| 1 小さい | 2 大きい | 3 近接する | 4 離散している |
| 5 2 | 6 3 | 7 4.5 | 8 6 |

<Jの解答群>

- | | | | | |
|-------|-----|---------|-------|-------|
| 1 自由 | 2 光 | 3 コンプトン | 4 K軌道 | 5 L軌道 |
| 6 最外殻 | | | | |

<Kの解答群>

- | | | | |
|---|---|--|--|
| 1 $\frac{p}{\alpha_T}$ | 2 $p \cdot \frac{\alpha_K}{1+\alpha_T}$ | 3 $\frac{p}{1+\alpha_T}$ | 4 $p \cdot \frac{\alpha_T}{1+\alpha_K}$ |
| 5 $\frac{1}{p \cdot (1+\alpha_T)}$ | 6 $\frac{\alpha_T}{p}$ | 7 $p \cdot \frac{\alpha_K}{1-\alpha_T}$ | 8 $\frac{p}{1-\alpha_T}$ |
| 9 $p \cdot \frac{\alpha_T}{1-\alpha_K}$ | 10 $\frac{1}{p \cdot (1-\alpha_T)}$ | 11 $p \cdot \frac{1+\alpha_K}{1+\alpha_T}$ | 12 $p \cdot \frac{1-\alpha_K}{1-\alpha_T}$ |

<Lの解答群>

- | | | | |
|--------|--------|--------|--------|
| 1 0.06 | 2 0.10 | 3 0.22 | 4 0.35 |
| 5 0.59 | 6 0.76 | 7 0.85 | 8 0.96 |

II 静止している質量 M の原子核が、 γ 遷移により E だけ低いエネルギーに遷移するとき、原子核自体は反跳される。遷移のエネルギー E の一部は反跳に費やされ、その分だけ放出 γ 線エネルギーは低下するので、この γ 線を同じ原子核に当てても共鳴吸収は起こらない。

遷移において、放出される γ 線のエネルギーが E_γ であるとき、光の速さを c とすれば、 γ 線の運動量は となる。一方、反跳原子核の運動エネルギー E_R は となる。

運動エネルギー保存則より E_R は E と E_γ の差であるから、 E_R に を代入して E_γ を E を用いて表すと、 $E_\gamma =$ となる。ただし、ここでは $Mc^2 \gg E$ の関係が成り立つとして、 $(1+x)^{1/2} \approx 1+x/2-x^2/8$ ($|x| \ll 1$) の近似式を用いた。これより、質量数 57 の原子核の励起準位のエネルギー差が $E = 14.4$ keV のとき、この差で起こる γ 遷移に対する E_R は eV となる。この値は、励起準位のエネルギーの広がり（自然幅）に比べると大きい。

先に述べた共鳴吸収が起こらない理由は、 γ 線の放出時と同様に吸収時にも原子核の反跳にエネルギーが消費されるためであるが、原子核が強く束縛されている 中では共鳴吸収が起こる例が見いだされている。原子核が強く束縛されているために、実効的に原子核の が大きくなり、 E_R がほとんど 0 となる場合である。これを 効果という。原子核の共鳴エネルギーは、原子の化学状態や磁場の有無などによってごくわずかに変化する。 分光法では、線源となる原子核を運動させ 効果を利用して γ 線エネルギーを増減させ、共鳴エネルギーを測定する。

<ア、イの解答群>

- | | | | | | | | | | |
|----|---------------------------|----|----------------------------|----|------------------------------|---|------------------------|----|-------------------------|
| 1 | $\frac{E_\gamma}{M}$ | 2 | $\frac{E_\gamma}{c}$ | 3 | $\frac{E_\gamma}{Mc}$ | 4 | $\frac{E_\gamma}{2Mc}$ | 5 | $\frac{E_\gamma}{Mc^2}$ |
| 6 | $\frac{E_\gamma}{2Mc^2}$ | 7 | $\frac{E_\gamma}{(2Mc)^2}$ | 8 | $\frac{E_\gamma^2}{M}$ | 9 | $\frac{E_\gamma^2}{c}$ | 10 | $\frac{E_\gamma^2}{Mc}$ |
| 11 | $\frac{E_\gamma^2}{Mc^2}$ | 12 | $\frac{E_\gamma^2}{2Mc^2}$ | 13 | $\frac{E_\gamma^2}{(2Mc)^2}$ | | | | |

<ウの解答群>

- | | | | | | | | |
|---|------------------------|---|-------------------------|---|---------------------------|---|-----------------------|
| 1 | $E - \frac{E}{2Mc}$ | 2 | $E - \frac{E}{Mc^2}$ | 3 | $E - \frac{E}{2Mc^2}$ | 4 | $\frac{E^2}{(2Mc)^2}$ |
| 5 | $E - \frac{E^2}{Mc^2}$ | 6 | $E - \frac{E^2}{2Mc^2}$ | 7 | $E - \frac{E^2}{(2Mc)^2}$ | | |

<エの解答群>

- | | | | | | | | | | |
|----|----------------------|----|----------------------|----|----------------------|----|----------------------|----|----------------------|
| 1 | 1.0×10^{-4} | 2 | 2.0×10^{-4} | 3 | 4.0×10^{-4} | 4 | 6.0×10^{-4} | 5 | 8.0×10^{-4} |
| 6 | 1.0×10^{-3} | 7 | 2.0×10^{-3} | 8 | 4.0×10^{-3} | 9 | 6.0×10^{-3} | 10 | 8.0×10^{-3} |
| 11 | 1.0×10^{-2} | 12 | 2.0×10^{-2} | 13 | 4.0×10^{-2} | 14 | 6.0×10^{-2} | 15 | 8.0×10^{-2} |

<M~Pの解答群>

- | | | | |
|----------|---------|----------|----------|
| 1 気体 | 2 液体 | 3 固体 | 4 ラザフォード |
| 5 ラムザウアー | 6 トンネル | 7 メスバウアー | 8 オージェ |
| 9 ドップラー | 10 ペニング | 11 エネルギー | 12 質量 |
| 13 密度 | 14 遷移幅 | | |

問2 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 放射線に関連する諸量やその単位には様々な概念や種類があり、放射線そのものに関係する知見の取得に着目した radiometric な量（放射線計測量）と被照射物質における放射線による効果や影響の尺度として用いられる dosimetric な量（線量測定量）に大別される。そして両者は互いに物質や線質に依存するパラメータによって関係づけることができる。

まず、間接電離放射線として光子の場合を考える。単色光子の場合の諸量の関係を図 1 に参考として示す。

大円（球の中心を通る平面が球面と交わってできる円）の面積が da である球に入射する光子数が dN のとき $\phi_1 = dN/da$ を A という。また dN と光子エネルギーの積を dR とすると、 $\Psi = dR/da$ を B という。これらの量は、球内の放射線場を表現することから radiometric な量である。

光子は物質との相互作用により物質の電子にエネルギーを与える。質量 dm の物質中で光子との相互作用により電子に与えられた初期エネルギーの総和を dE_{tr} とする。 $K_2 = dE_{tr}/dm$ は C であり、その単位は Gy である。 dE_{tr} の一部は物質中で制動放射により系外へ逃れるが、その割合を g とすると、 $K_1 = g \times K_2$ 、 $K_3 = (1-g) \times K_2$ はそれぞれ放射カーマ及び D と呼ばれる。またその物質のある領域に入射する電子のエネルギーとその領域内で生成された電子が持ち出すエネルギーが等しいとき E が成立するといひ、この場合 dm に付与される平均エネルギー $d\bar{\epsilon}$ は $(1-g) \times dE_{tr}$ に等しいことから D は、 $D_1 = d\bar{\epsilon}/dm$ と定義される F に等しい。なお、物質が乾燥空気である場合、光子の照射により発生した電子が完全に停止するまでに生じたイオン対の正負いずれかの全電荷の絶対値を dq とすると、 $X_1 = dq/dm$ は G と呼ばれ、その単位は H である。これらの量は被照射物質におけるエネルギーの授受に関する量であることから、dosimetric な量である。

なお、図 1 内の各量に関係づけるパラメータ f_1 、 f_2 及び f_3 はそれぞれ I 、 J 及び K である。

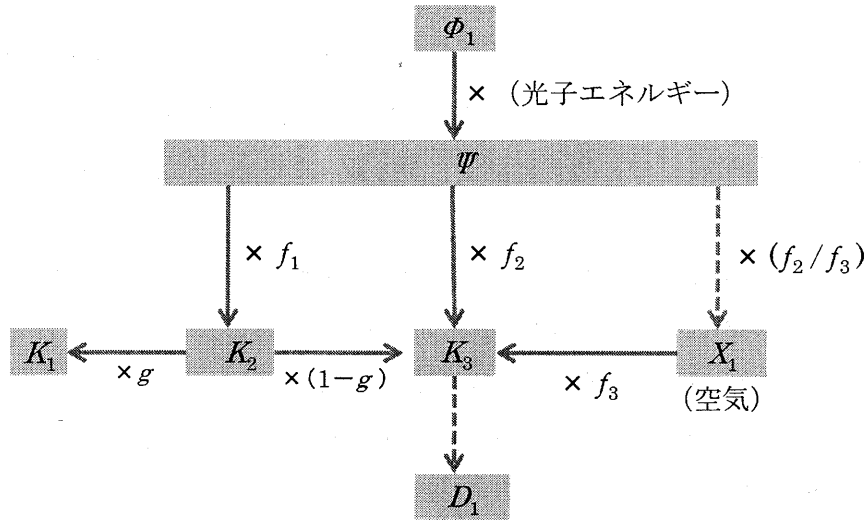


図1 単色光子に係る諸量の関係参考図

<A~Dの解答群>

- | | | |
|--------------|-------------|-----------|
| 1 フラックス | 2 ルミネセンス | 3 フルエンス |
| 4 エネルギーフルエンス | 5 面密度 | 6 カーマ |
| 7 照射線量 | 8 吸収線量 | 9 実効線量 |
| 10 衝突カーマ | 11 線エネルギー付与 | 12 制動放射 |
| 13 電子平衡 | 14 放射平衡 | 15 ビルドアップ |

<E~Gの解答群>

- | | | |
|----------|-------------|--------------|
| 1 シーベルト | 2 フルエンス | 3 エネルギーフルエンス |
| 4 密度 | 5 面密度 | 6 カーマ |
| 7 照射線量 | 8 吸収線量 | 9 実効線量 |
| 10 衝突カーマ | 11 線エネルギー付与 | 12 制動放射 |
| 13 電子平衡 | 14 放射平衡 | 15 ビルドアップ |

<Hの解答群>

- | | | |
|---------------------|----------------|---------------------|
| 1 J | 2 C | 3 $J \cdot kg^{-1}$ |
| 4 $C \cdot kg^{-1}$ | 5 $J \cdot kg$ | 6 $C \cdot kg$ |

<I~Kの解答群>

- | | | |
|----------------|------------|---------------|
| 1 ϵ 値 | 2 G 値 | 3 W 値 |
| 4 阻止能 | 5 質量阻止能 | 6 線減弱係数 |
| 7 質量減弱係数 | 8 線エネルギー付与 | 9 質量エネルギー転移係数 |
| 10 質量エネルギー吸収係数 | 11 後方散乱 | 12 放射平衡 |
| 13 電子平衡 | 14 ビルドアップ | |

II 次に、直接電離放射線として荷電粒子を考える。荷電粒子に対する諸量の関係を図2に参考として示す。

荷電粒子（二次電子を除く）が質量 dm の物質に単位面積当たり平均 ϕ_2 個入射した際、軌道電子との相互作用により失うエネルギーを dE_{el} とすると、 $C_2 = dE_{el}/dm$ をシーマと呼ぶ。このとき $C_2 = f_4 \times \phi_2$ の関係があり、ここで f_4 は L である。また C_2 は M のもとでは D_2 の N にほぼ等しい。

物質中に、荷電粒子の場を乱さないような、ガスで満たされた微小体積を導入した場合を考える。物質中及びガス中の吸収線量の比は、上記によりそれぞれの L の比にほぼ等しくなる。この関係は O と呼ばれ、次のとおり、物質への吸収線量の評価に用いられる。

水槽の深さ 10 cm の位置に、水等価壁を持つ内容積 1 cm^3 の空気電離箱を挿入する。この電離箱はあらかじめ温度 22°C 、圧力 1 気圧の空気を密封してある。200 MeV の陽子線を照射したところ、12 nC の電荷を得たとする。 0°C 、1 気圧での空気の密度は約 $1.3 \text{ kg}\cdot\text{m}^{-3}$ であるため、電離箱中の空気の質量は P kg である。陽子線が 1 イオン対を生成するのに要する平均エネルギーが 34 eV であるとする、空気の吸収線量は Q Gy となる。したがって、測定点における陽子線の空気に対する水の平均 L 比の値を 1.14 であるとする、この点での水の吸収線量は R Gy となる。

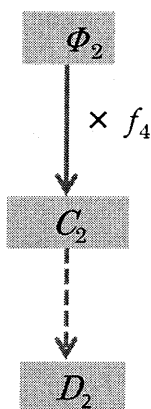


図2 荷電粒子に係る諸量の関係参考図

<L~Oの解答群>

- | | | |
|-------------|----------------|----------------|
| 1 比電離 | 2 標準状態 | 3 電子平衡 |
| 4 放射平衡 | 5 空洞原理 | 6 吸収線量 |
| 7 照射線量 | 8 実効線量 | 9 質量衝突阻止能 |
| 10 線減弱係数 | 11 ブラッグ曲線 | 12 質量減弱係数 |
| 13 線エネルギー付与 | 14 質量エネルギー転移係数 | 15 質量エネルギー吸収係数 |

<P~Rの解答群>

- | | | | | |
|-------------------------|-------------------------|-------------------------|------------------------|-------------------------|
| 1 1.2×10^{-9} | 2 1.4×10^{-9} | 3 4.4×10^{-9} | 4 1.2×10^{-6} | 5 1.4×10^{-6} |
| 6 4.4×10^{-6} | 7 3.4×10^{-4} | 8 4.4×10^{-4} | 9 4.9×10^{-4} | 10 3.4×10^{-1} |
| 11 3.9×10^{-1} | 12 4.4×10^{-1} | 13 4.9×10^{-1} | | |

問3 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。

Ⅰ 原子番号1の水素から原子番号□A□のフッ素までの元素のうち、安定同位体が1種類の単核種元素の数は□B□である。その他の元素は複数の安定同位体を持ち、その中でリチウムでは、市販試薬中に同位体組成が大きく変動したものがある。これは質量数□C□のLiが、□D□反応によるトリチウム製造に用いられることから、大量の同位体濃縮が行われ、残りの原子量の大きいリチウムが高純度化合物試薬として出回っているため、ラベルに記載されたリチウムの原子量の値を用いることが必要である。

炭素には、 ^{12}C と ^{13}C の安定同位体がある。 ^{12}C 原子は、その質量の12分の1が原子質量の基準となっている。 ^{13}C (質量13.00)の同位体存在度は1.07%であり、炭素の原子量は□E□となる。

<A～Cの解答群>

- | | | | | |
|-------|-------|-------|-------|-------|
| 1 1 | 2 2 | 3 3 | 4 4 | 5 5 |
| 6 6 | 7 7 | 8 8 | 9 9 | 10 10 |
| 11 11 | 12 12 | 13 13 | 14 14 | 15 15 |

<Dの解答群>

- | | | | | |
|------------------|----------|----------|------------------|----------|
| 1 (n, γ) | 2 (n, p) | 3 (n, d) | 4 (n, α) | 5 (p, n) |
| 6 (p, α) | 7 (d, n) | 8 (d, p) | | |

<Eの解答群>

- | | | | | |
|---------|---------|---------|---------|---------|
| 1 12.00 | 2 12.01 | 3 12.02 | 4 12.03 | 5 12.05 |
| 6 12.10 | 7 12.20 | | | |

Ⅱ 炭素の安定同位体(^{12}C 、 ^{13}C)より中性子が過剰の ^{14}C は、原子炉で ^{14}N □F□ ^{14}C 反応などにより製造され、半減期5,700年(1.8×10^{11} 秒)で□G□壊変する。 ^{14}C 化合物は放射性トレーサーとして古くから利用され、1950年代の□H□利用による植物の光合成カルビンサイクルの解明が1961年のノーベル化学賞受賞に繋がるなど、大きな成果を上げてきた。近年、イメージングプレートを用いたオートラジオグラフィにも利用される。 ^{14}C から放出される□G□線の最大エネルギーは□ア□MeVであり、 ^{32}P から放出される□G□線の最大エネルギーのおおよそ1/11で、 ^{32}P より画像分解能が良い。

一方、安定同位体より中性子が不足の ^{11}C は、加速器で ^{14}N □I□ ^{11}C 反応により製造され、半減期20分(1.2×10^3 秒)で□J□壊変する。この壊変で放出される陽電子は、周囲の□K□と結合して消滅する。その際に2本の消滅放射線(各エネルギーは□イ□MeV)を 180° 方向に出す。この2本の放射線を一對のシンチレータで検出、同時計数し、コンピュータ処理により陽電子放出核

種の分布を画像化する装置は **L** 装置と呼ばれる。また、1 TBq の ^{11}C の放射能は、10 時間後にはおおよそ **M** Bq に減衰する。

< F の解答群 >

- | | | | | |
|------------------|----------|----------|------------------|----------|
| 1 (n, γ) | 2 (n, p) | 3 (n, d) | 4 (n, α) | 5 (p, n) |
| 6 (p, α) | 7 (d, n) | 8 (d, p) | | |

< G の解答群 >

- | | | | |
|------------|-------------|-------------|------------|
| 1 α | 2 β^- | 3 β^+ | 4 γ |
|------------|-------------|-------------|------------|

< H の解答群 >

- | | | | | |
|--------------------|----------------------|----------------------|---|---|
| 1 ^{14}CO | 2 $^{14}\text{CO}_2$ | 3 $^{14}\text{CH}_4$ | 4 $[^{14}\text{C}]\text{C}_2\text{H}_2$ | 5 $[^{14}\text{C}]\text{C}_6\text{H}_6$ |
|--------------------|----------------------|----------------------|---|---|

< ア、イの解答群 >

- | | | | |
|----------|---------|---------|---------|
| 1 0.0186 | 2 0.157 | 3 0.511 | 4 1.711 |
|----------|---------|---------|---------|

< I の解答群 >

- | | | | | |
|------------------|----------|----------|------------------|----------|
| 1 (n, γ) | 2 (n, p) | 3 (n, d) | 4 (n, α) | 5 (p, n) |
| 6 (p, α) | 7 (d, n) | 8 (d, p) | | |

< J の解答群 >

- | | | | | |
|------------|-------------|-------------|------------|------|
| 1 α | 2 β^- | 3 β^+ | 4 γ | 5 EC |
|------------|-------------|-------------|------------|------|

< K の解答群 >

- | | | |
|------|-------|-------|
| 1 電子 | 2 陽電子 | 3 中性子 |
|------|-------|-------|

< L の解答群 >

- | | | |
|-------------------|------------------------|--------------|
| 1 陽電子放射断層撮影 (PET) | 2 シングルフォトン断層撮影 (SPECT) | |
| 3 非破壊検査 | 4 蛍光 X 線分析 | 5 メスバウアー分光分析 |

< M の解答群 >

- | | | | | |
|----------|----------|--------|--------|----------|
| 1 1 | 2 10 | 3 100 | 4 1 G | 5 1 k |
| 6 1 M | 7 10 G | 8 10 k | 9 10 M | 10 100 G |
| 11 100 k | 12 100 M | | | |

Ⅲ 上空大気中で宇宙線から生じた中性子が空気中窒素の ^{14}N と反応して ^{14}C が生成する。したがって、宇宙線強度が変わらなければ地球大気中の ^{14}C の量は一定となり、炭素 1 g 当たり約 0.23 Bq となる。その炭素同位体の $^{14}\text{C}/(^{12}\text{C}+^{13}\text{C})$ 原子数比の値は である。化学形が となって存在する大気中の ^{14}C が、光合成により植物体内に取り込まれ、食物連鎖により動物体内にも入る。生物が死ぬと ^{14}C の供給が途絶えるので、その生物体中の ^{14}C 比放射能は時間とともに減衰する。したがって、これら生物試料中の ^{14}C を測定すれば、その生物の死後の経過時間が求められる (^{14}C 年代測定)。 ^{14}C は、以前は試料をアセチレンなどの気体にして比例計数管により、あるいはベンゼンなどの有機液体にして により、その放射能が測定されてきた。これらの測定には 1 g 以上の試料が用いられる。しかし、試料が限定され、非常に少量のとき、あるいは数万年前の試料では、含まれる ^{14}C 放射能が mBq 程度となり、その放射能測定は極めて困難あるいは不可能となる。一方、放射能の測定ではなく、 ^{14}C 原子の数を直接高感度に測定して同位体原子数比を求める を用いると、試料量は 1 mg 程度で十分であり、また、数万年前の試料でも、その年代を決定することが可能になってきた。

例えば、1 mg の炭素を含む試料を測定して、 $^{13}\text{C}/(^{12}\text{C}+^{13}\text{C})$ 原子数比の値が 0.0107、 $^{14}\text{C}/^{13}\text{C}$ 原子数比の値が 7.0×10^{-12} であったとすると、この試料の年代として最も近い値は 年前である。

<Nの解答群>

- | | | | | | | | | | |
|---|-----------------------|---|-----------------------|---|-----------------------|---|-----------------------|---|-----------------------|
| 1 | 1.2×10^{-13} | 2 | 6.0×10^{-13} | 3 | 1.2×10^{-12} | 4 | 6.0×10^{-12} | 5 | 1.2×10^{-11} |
| 6 | 6.0×10^{-11} | 7 | 1.2×10^{-10} | 8 | 6.0×10^{-10} | | | | |

<Oの解答群>

- | | | | | | |
|---|------------------|---|--------------------|---|--------------------|
| 1 | ^{14}CO | 2 | $^{14}\text{CO}_2$ | 3 | $^{14}\text{CH}_4$ |
|---|------------------|---|--------------------|---|--------------------|

<P、Qの解答群>

- | | | | |
|---|--------------------|---|----------------|
| 1 | Ge 半導体検出器 | 2 | Si 表面障壁型半導体検出器 |
| 3 | プラスチックシンチレーションカウンタ | 4 | 液体シンチレーションカウンタ |
| 5 | 電子スピン共鳴法 | 6 | 加速器質量分析法 |

<Rの解答群>

- | | | | | | | | | | |
|---|--------|---|--------|---|--------|---|--------|---|--------|
| 1 | 20,000 | 2 | 23,000 | 3 | 26,000 | 4 | 29,000 | 5 | 34,000 |
| 6 | 40,000 | 7 | 60,000 | | | | | | |

問4 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 水溶液から目的物質を固体の沈殿として分離する場合、固体の水への溶解度が分離の効率(収率)を決定する。一般に陽イオンAと陰イオンBからできている水への溶解度が小さい難溶性塩 A_mB_n の沈殿が生成するとき、水溶液中でのイオンと固体は□A□平衡になっている。それぞれのイオンの水溶液中の濃度を[A]、[B]とすると、

$$K_{SP} = \square \text{ア} \quad (1)$$

という関係が成立つ。 K_{SP} は□B□と呼ばれる定数である。Aを含む水溶液とBを含む水溶液を混合したときに、式(1)の右辺が K_{SP} を上回るときには A_mB_n の沈殿が生成してAやBの濃度が下がり、式(1)が成立したところで平衡になる。

難溶性塩である $BaSO_4$ の場合には、 $K_{SP}=1.0 \times 10^{-10} \text{ mol}^2 \cdot \text{L}^{-2}$ である。 ^{140}Ba (半減期12.8日 $=1.1 \times 10^6$ 秒)が70 MBqあると、その物質量はおよそ□イ□molである。これが硝酸塩として溶解している水溶液Xの500 mLと、濃度 $0.02 \text{ mol} \cdot \text{L}^{-1}$ の Na_2SO_4 水溶液Yを500 mL混合しても $[^{140}\text{Ba}^{2+}][\text{SO}_4^{2-}] < K_{SP}$ であって、 $^{140}\text{Ba}^{2+}$ は沈殿しない。もし 0.02 mol の非放射性 $\text{Ba}(\text{NO}_3)_2$ を500 mLのXに担体として溶解しておく、500 mLのYとの混合により $^{140}\text{Ba}^{2+}$ を沈殿させることができるが、この担体量では $^{140}\text{Ba}^{2+}$ のうち□ウ□%が沈殿せずに溶液中に残る。放射性同位体イオンの沈殿分離を行う際には十分な量の担体を加えておくことが必要である。

<A、Bの解答群>

- | | | | | |
|--------|----------|---------|--------|------|
| 1 放射 | 2 固液 | 3 溶解 | 4 気液 | 5 凝縮 |
| 6 溶解度積 | 7 固液平衡定数 | 8 蒸気圧定数 | 9 イオン積 | |

<アの解答群>

- | | | | |
|----------------|----------------|--|--|
| 1 $[A]^n[B]^m$ | 2 $[A]^m[B]^n$ | 3 $[A]^{\frac{1}{n}}[B]^{\frac{1}{m}}$ | 4 $[A]^{\frac{1}{m}}[B]^{\frac{1}{n}}$ |
|----------------|----------------|--|--|

<イ、ウの解答群>

- | | | | | |
|-------------------------|-------------------------|-------------------------|-------------------------|------------------------|
| 1 1.3×10^{-15} | 2 1.9×10^{-14} | 3 1.3×10^{-11} | 4 1.9×10^{-10} | 5 1.3×10^{-9} |
| 6 5.0×10^{-2} | 7 1.0×10^{-1} | 8 5.0×10^{-1} | 9 1.0 | 10 5.0 |

II イオン交換樹脂は、イオン交換基をもつ高分子であり、水溶液中のイオンと樹脂自身に吸着しているイオンを交換する。イオン交換樹脂が水溶液中のイオンを吸着する強さがイオンによって異なり、この性質を利用してイオンを分離することができる。

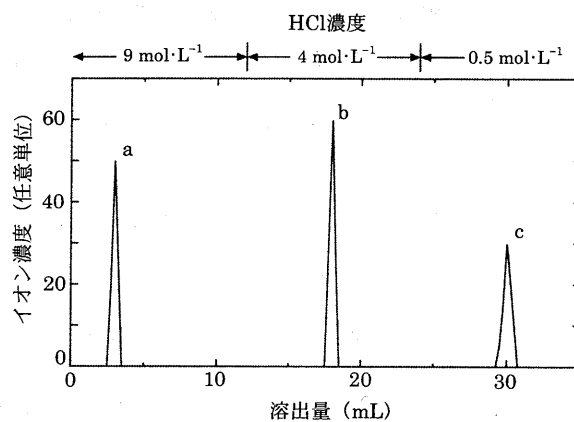
例えばスチレンージビニルベンゼン共重合体を高分子骨格とし、C基をイオン交換部位として持つ強酸性陽イオン交換樹脂では、+1価イオンの樹脂への吸着強度はDであり、水和イオン半径が小さいものほど強い。また、価数が異なるイオンに対しては、一般にEという傾向がある。イオン交換樹脂に吸着しているイオンと水溶液中のイオンは吸着平衡になる。陽イオン交換樹脂に吸着しているA⁺イオンの濃度を[A]_r、水溶液中のA⁺イオンの濃度を[A]_a、B⁺イオンについても同様な記号を使うと、

$$K_r = \frac{[B]_r / [B]_a}{[A]_r / [A]_a} \quad (2)$$

という平衡定数となる。K_r>1のときには、F。

イオン交換樹脂の吸着平衡は、溶液と樹脂吸着のイオンの濃度比を決定し、濃度には依存しないので、無担体の放射性同位体の分離に適している。

一方、強塩基性陰イオン交換樹脂を用いて塩化物イオンとの錯形成能の違いを利用して分離することができる。強塩基性陰イオン交換樹脂カラムに、Fe³⁺、Co²⁺、Ni²⁺を含む9 mol・L⁻¹塩酸溶液を1.0 mL、その後9 mol・L⁻¹、4 mol・L⁻¹、0.5 mol・L⁻¹の濃度の塩酸を順次12 mLずつ流して各イオンを分離すると右図のようになった。塩化物イオンとの錯形成能の強さはGの順であり、a、b、cのピークは左から順に、Hであった。



<Cの解答群>

- 1 -SO₃H 2 -COOH 3 -CH₂N(CH₃)₃OH 4 -CH₂NH(CH₃)₂OH

<Dの選択肢>

- 1 Rb⁺<K⁺<Na⁺<Li⁺ 2 Li⁺<Na⁺<K⁺<Rb⁺ 3 K⁺<Rb⁺<Li⁺<Na⁺ 4 Na⁺<Li⁺<Rb⁺<K⁺

<Eの解答群>

- 1 +1価<+2価<+3価 2 +1価>+2価>+3価 3 +1価≒+2価≒+3価

<Fの解答群>

- 1 A⁺イオンの方がB⁺イオンより強く吸着する 2 B⁺イオンの方がA⁺イオンより強く吸着する
3 A⁺イオンとB⁺イオンはほぼ同様に吸着する

<Gの解答群>

- 1 Fe³⁺>Co²⁺>Ni²⁺ 2 Co²⁺>Ni²⁺>Fe³⁺ 3 Ni²⁺>Co²⁺>Fe³⁺ 4 Fe³⁺>Ni²⁺>Co²⁺

<Hの解答群>

- 1 Fe³⁺、Co²⁺、Ni²⁺ 2 Co²⁺、Ni²⁺、Fe³⁺ 3 Ni²⁺、Co²⁺、Fe³⁺ 4 Fe³⁺、Ni²⁺、Co²⁺

Ⅲ 溶媒抽出法も微量の放射性物質を分離するときしばしば用いられる。溶媒抽出では2種類の互いに溶解しない溶媒に対する溶質の溶解性の違いを利用して分離又は抽出を行う。

実際の分離抽出では、分配比

$$D = C_2 / C_1 \quad (3)$$

が重要である。ここで C_1 は注目する核種の溶媒 1 における濃度、 C_2 は溶媒 2 における濃度である。

平衡状態に達したときの溶媒 2 への抽出率 $E(\%)$ は、使用する溶媒 1、2 の体積をそれぞれ V_1 、 V_2 として、

$$E(\%) = \boxed{\text{I}} \times 100 \quad (4)$$

と表せる。例えば $V_1 = V_2$ で $D = 20$ のとき $E = \boxed{\text{エ}}$ % となる。

一般に目的核種を抽出する場合、使用する溶媒の体積は同じである必要はない。上と同じ抽出を、溶媒 2 を一度に全量使うのではなく、3 回に分けて抽出操作をする場合を考える。つまり溶媒 2 を $V_2/3$ 使って抽出し、溶媒 1、2 を分液ロートで分離する（抽出 1）。次に溶媒 1 に対して新しい $V_2/3$ 量の溶媒 2 を使って再び抽出する（抽出 2）。さらに残りの $V_2/3$ 量の溶媒 2 で抽出をもう一回繰り返す（抽出 3）。この一連の操作での抽出について、抽出 1 での抽出率 E_1 は $\boxed{\text{オ}}$ % である。抽出 3 まで行くと、溶媒 1 に残っている目的核種は $\boxed{\text{カ}}$ % となる。一般に抽出に用いる溶媒を一度に用いるよりも多数回に分けて用いたほうが、操作全体での抽出率は大きくなる。

金属イオンは、有機溶媒にほとんど溶けないが、有機溶媒への溶解性を高める $\boxed{\text{J}}$ と結合させることによって金属イオンの水溶液から有機溶媒への抽出が行われる。一般的にこのような $\boxed{\text{J}}$ は $\boxed{\text{K}}$ であるために、抽出効率は水溶液の $\boxed{\text{L}}$ に大きく依存する。複数のイオンの混合水溶液から特定のイオンを有機溶媒へ抽出する場合には、目的イオン以外のイオンの水溶性を高める $\boxed{\text{M}}$ が用いられる。

< I の解答群 >

$$1 \quad \frac{C_2 V_2}{C_1 V_1 + C_2 V_2} \quad 2 \quad \frac{C_1 V_1}{C_1 V_1 + C_2 V_2} \quad 3 \quad \frac{C_1 V_1}{C_2 V_2} \quad 4 \quad \frac{C_2 V_2}{C_1 V_1}$$

< エ～カの解答群 >

1	2.2×10^{-1}	2	1.3	3	2.2	4	13	5	22
6	80	7	87	8	95	9	99	10	99.5
11	99.8								

< J～M の解答群 >

1	キレート化剤	2	酸化剤	3	マスクング剤	4	沈殿剤	5	還元剤
6	弱酸	7	強酸	8	弱塩基	9	強塩基	10	中性塩
11	pH	12	吸光度	13	酸化還元電位	14	電気伝導度		

問5 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。

I X線やγ線による高線量急性被ばくでは、全身被ばくする場合と局所被ばくする場合で様相が異なる。全身被ばくでは致死が問題となり、局所被ばくでは高線量を被ばくしても致死とはならず、被ばくした組織や臓器の障害が問題となることが多い。組織や臓器の放射線障害では、被ばくした直後から数週間以内に起こる障害を急性（早期）障害と呼び、数ヶ月から数年後以降に起こる障害を晩期障害と呼ぶ。臓器にはそれぞれ特徴的な晩期障害が存在する。脳では□A、脊髄神経では□B、腸管では□Cが晩期障害として重要である。これらの晩期障害は主に□Dが原因であると考えられている。ただし、すべての晩期障害の原因が□Dによるわけではなく、肺の晩期障害として重要である□Eでは肺胞細胞の障害などが原因として考えられている。

皮膚の急性障害としては、紅斑、脱毛などが代表的なもので、脱毛のしきい線量は約□F Gyとされ、被ばくの□G週間後に生じる。皮膚の晩期障害としては、□Hが重要である。皮膚は体表面に位置する組織であるために、照射線量が同一であっても、放射線エネルギーの違いにより、急性障害や晩期障害の程度は異なる点に注意を要する。すなわち、X線やγ線のエネルギーが異なる場合には、□Iによる吸収線量のピークの位置（深さ）が異なり、結果として皮膚の基底細胞の吸収線量は異なることとなる。例えば、コバルト60とイリジウム192の密封線源を比較した場合、コバルト60から放出されるγ線の平均エネルギーは約□J keVであるのに対して、イリジウム192から放出されるγ線の平均エネルギーは約□K keVであるために、照射線量が同一である場合には皮膚の急性障害は□Lの方が重篤となる。皮膚の晩期障害である□Hの原因は主に□Dであるため、基底細胞よりも□Mでの吸収線量が問題となる。

<Aの解答群>

- | | | | |
|-------|---------|-------|-------|
| 1 脳壊死 | 2 硬膜外血腫 | 3 動脈瘤 | 4 水頭症 |
|-------|---------|-------|-------|

<Bの解答群>

- | | | | |
|--------|----------|---------|-----------------------------|
| 1 脊髄出血 | 2 脊髄神経麻痺 | 3 脊髄空洞症 | 4 脊柱管狭窄症 <small>まきく</small> |
|--------|----------|---------|-----------------------------|

<Cの解答群>

- | | | | |
|----------------------------|-------|----------|---------|
| 1 穿孔・狭窄 <small>せんく</small> | 2 憩室症 | 3 潰瘍性大腸炎 | 4 クロウン病 |
|----------------------------|-------|----------|---------|

<Dの解答群>

- | | | | |
|-----------|------------|---------|---------|
| 1 血管透過性亢進 | 2 線維芽細胞の増殖 | 3 神経の脱髄 | 4 血管の閉塞 |
|-----------|------------|---------|---------|

<Eの解答群>

- | | | | |
|---------|-------|-----------|------|
| 1 放射線肺炎 | 2 肺気腫 | 3 放射線肺線維症 | 4 気胸 |
|---------|-------|-----------|------|

<Fの解答群>

- | | | | |
|-------|-----|------|------|
| 1 0.5 | 2 3 | 3 15 | 4 30 |
|-------|-----|------|------|

<Gの解答群>

- | | | | |
|-------|-------|-------|---------|
| 1 2~3 | 2 5~6 | 3 8~9 | 4 11~12 |
|-------|-------|-------|---------|

<Hの解答群>

- | | | | |
|--------|--------------------|---------|------|
| 1 水疱形成 | 2 落屑 ^{せつ} | 3 難治性潰瘍 | 4 紅斑 |
|--------|--------------------|---------|------|

<Iの解答群>

- | | | | |
|--------|----------|----------|---------|
| 1 放射平衡 | 2 オージェ電子 | 3 ビルドアップ | 4 非弾性散乱 |
|--------|----------|----------|---------|

<J、Kの解答群>

- | | | | |
|---------|---------|-------|-------|
| 1 50 | 2 350 | 3 650 | 4 950 |
| 5 1,250 | 6 1,550 | | |

<Lの解答群>

- | | |
|-------------|-----------|
| 1 イリジウム 192 | 2 コバルト 60 |
|-------------|-----------|

<Mの解答群>

- | | |
|------|------|
| 1 深部 | 2 浅部 |
|------|------|

II 全身に一定以上の線量を急性被ばくすると、急性障害により個体は死に至る。集団の50%が死亡する線量を半致死線量と呼ぶ。ヒトの半致死線量は60日以内に50%が死亡する線量(LD_{50/60})で示され、約 Gy である。ヒトが LD_{50/60} 程度以上の線量を全身に均等被ばくしたときに生じる急性放射線症では、骨髄、消化管、中枢神経、肺などの臓器・組織の放射線障害が死に至る病態に関与する。

LD_{50/60} 前後の線量を被ばくした場合には、骨髄幹細胞の放射線障害により感染症と が生じ、それらが死の主な原因となる。この線量域の放射線を被ばくした場合の治療法としては、輸血や抗生剤の投与の他にサイトカインを投与して骨髄幹細胞の増殖を期待する。被ばく線量が LD_{50/60} より高く、事故後骨髄の強い再生不良状態が継続する場合などでは造血幹細胞移植を検討する。造血幹細胞移植としては骨髄移植が最も一般的で、一卵性双生児又は兄弟間ドナーの骨髄が使用できない場合には、非血縁者のヒト白血球型抗原 (Human Leukocyte Antigen; HLA) 適合ドナーからの骨髄移植を行う。しかし、非血縁者からの移植では HLA が適合する骨髄提供者からの骨髄採取などに時間がかかり、事故時に対応できない可能性が高い。近年ではすべての HLA が一致しなくとも移植が可能な が急性放射線症の治療に用いられている。 では、ほとんどの場合で適合する幹細胞が存在し、短期間で移植を行うことが可能であるため事故対応として適している。

消化管に関しては、放射線障害による小腸上皮の喪失を原因とする や感染が主な死因となる。中枢神経の障害による死亡は被ばく線量が 50~100 Gy を超える場合に起こり、 による頭蓋内圧亢進が主な原因のうちの1つと考えられている。

LD_{50/60} 程度以上の線量を全身被ばくした場合には、肺では30日以内に が生じる。特に、肺で が高頻度に生じる点に注意が必要である。

<Nの解答群>

- | | | | |
|-----------|-----------|-----------|-----------|
| 1 1.5~2.5 | 2 3.5~4.5 | 3 5.5~6.5 | 4 7.5~8.5 |
|-----------|-----------|-----------|-----------|

<Oの解答群>

- | | | | |
|--------|--------|--------|-------|
| 1 出血傾向 | 2 凝固亢進 | 3 脂肪塞栓 | 4 石灰化 |
|--------|--------|--------|-------|

<Pの解答群>

- | | | |
|-------------|---------------------------|---------------------------|
| 1 自己造血幹細胞移植 | 2 末梢 ^{しよ} 血幹細胞移植 | 3 臍 ^{さい} 帯血幹細胞移植 |
|-------------|---------------------------|---------------------------|

<Qの解答群>

- | | | | |
|------------------------|-------|-------|--------|
| 1 腸管の狭窄 ^{きやく} | 2 腸閉塞 | 3 腸捻転 | 4 体液漏出 |
|------------------------|-------|-------|--------|

<Rの解答群>

- | | | | |
|---------|-------|-------|-------|
| 1 硬膜外血腫 | 2 脳浮腫 | 3 動脈瘤 | 4 水頭症 |
|---------|-------|-------|-------|

<Sの解答群>

- | | | | |
|------|-----------|-------|---------|
| 1 気胸 | 2 放射線肺線維症 | 3 肺気腫 | 4 放射線肺炎 |
|------|-----------|-------|---------|

<Tの解答群>

- | | | | |
|----------|------|------|------------|
| 1 ウイルス感染 | 2 梗塞 | 3 壊死 | 4 サルコイドーシス |
|----------|------|------|------------|

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。

Ⅰ 放射線の生物作用を理解する上で重要な DNA はデオキシ□**A**とリン酸と塩基から構成される。デオキシ□**A**とリン酸は交互に並んで結合し、主鎖を形成する。この鎖が2本、互いに逆向きに並んで二重らせん構造を形成する。塩基にはアデニン (A)、シトシン (C)、グアニン (G)、チミン (T) の4種類があり、向かい合った鎖の A と T、G と C が互いに□**B**で結合している。A と T の間の□**B**の数は□**C**個であり、G と C の間の□**B**の数は□**D**個である。正常ヒト2倍体細胞1個の DNA では、A と T の対、G と C の対が合計で約□**E**個並んでいる。

<A、Bの解答群>

- | | | | | |
|---------|----------|----------|--------|---------|
| 1 グルコース | 2 ガラクトース | 3 フルクトース | 4 リボース | 5 イオン結合 |
| 6 共有結合 | 7 水素結合 | 8 疎水結合 | 9 配位結合 | |

<C～Eの解答群>

- | | | | | |
|-------------------|-------------------|-------------------|----------------------|-----------------------|
| 1 1 | 2 2 | 3 3 | 4 4 | 5 5 |
| 6 6×10^3 | 7 6×10^6 | 8 6×10^9 | 9 6×10^{12} | 10 6×10^{23} |

Ⅱ 電離放射線によって引き起こされる DNA 損傷には、塩基損傷、塩基遊離、架橋形成、1本鎖切断、2本鎖切断などがある。正常ヒト2倍体細胞に1GyのX線を照射すると、細胞1個当たり、DNA1本鎖切断は約□**F**個、DNA2本鎖切断は約□**G**個生成する。DNA1本鎖切断やDNA2本鎖切断の生成や修復は電気泳動によって調べることができる。これは、DNAの分子量が小さいほど、電場をかけたゲル中を□**H**移動することを利用している。DNAの電気泳動には種々の方法があるが、DNA2本鎖切断の生成や修復を調べるのに適した方法として、パルスフィールドゲル電気泳動法がある。

DNA2本鎖切断が起こると、その近傍において、ヒストンを構成するH2Aの一種であるH2AXが□**I**を受け、□**J**-H2AXが生成する。そのため、放射線照射した細胞を□**J**-H2AXに対する蛍光標識□**K**を用いて染色し、蛍光顕微鏡で観察すると、ドット状に見える。これを□**J**-H2AXのフォーカスという。このフォーカスを数えることにより、DNA2本鎖切断の生成や修復を調べることができる。たとえば、DNA2本鎖切断修復酵素の一つであるDNAリガーゼⅣを欠損する細胞に2GyのX線を照射し、2時間後に残っている□**J**-H2AXのフォーカスを数えると、正常細胞に同様の処置を施したときより□**L**。この方法は生物学的線量評価法としての応用も考えられている。







