

令和 2 年度

第 1 種放射線取扱主任者試験

問題と解答例

物理学

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2年度) 第1種物理学

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 8.6×10^{14} Bq の ${}^3\text{H}$ を含む廃水中において、この ${}^3\text{H}$ の β 壊変による発熱量[W]として、最も近い値は次のうちどれか。ただし、 β 線による発熱のみを考え、 ${}^3\text{H}$ の β 線の平均エネルギーを 5.7 keV とし、全てのエネルギーが最終的には熱に変換されるものとする。

- 1 0.31 2 0.50 3 0.78 4 3.1 5 5.0

〔解答〕 3

注) ${}^3\text{H}$ の β 壊変による発熱量[W]は、題意より 1 秒間あたりの熱量である。 8.6×10^{14} Bq の ${}^3\text{H}$ は、1 秒間あたり 8.6×10^{14} 個の β 線を放出する。 β 線の平均エネルギーを $5.7 \text{ keV} = 5.7 \times 10^3 \text{ eV}$ とすると、

$$(\text{発熱量[W]}) = 5.7 \times 10^3 \text{ eV} \times 1.6 \times 10^{-19} \text{ J/eV} \times 8.6 \times 10^{14} = 0.784 \text{ W}$$

問2 電子の質量を m 、速度を v 、プランク定数を h とするとき、電子のド・ブロイ波長 λ を示す正しい式は、次のうちどれか。

- 1 $\lambda = \frac{h}{mv}$ 2 $\lambda = \frac{h}{2mv}$ 3 $\lambda = \frac{h}{mv^2}$ 4 $\lambda = \frac{h}{2mv^2}$ 5 $\lambda = \frac{2mv^2}{h}$

〔解答〕 1

注) 電子のド・ブロイ波長は、 $\frac{h}{mv}$ である。なお、 h の単位は[J・s]で mv^2 の単位は[J]なので、このことを考慮すると、選択肢 3、4、5 は棄却できる。

問3 100 keV 光子の波数(波長の逆数) [m^{-1}]として、最も近い値は次のうちどれか。ただし、プランク定数を $6.63 \times 10^{-34} \text{ J} \cdot \text{s}$ とする。

- 1 1.2×10^{10} 2 2.7×10^{10} 3 8.1×10^{10} 4 1.6×10^{11} 5 2.4×10^{11}

〔解答〕 3

注) 光子のエネルギーは、振動数を n [s^{-1}]とすると、 $E = hn$ となる。光速 c [$\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$]を使うと、光子の波数(波長の逆数) k は、 $k = n/c = E/hc = 100 \times 10^3 \text{ eV} \times 1.6 \times 10^{-19} \text{ J} \cdot \text{eV}^{-1} / (6.63 \times 10^{-34} \text{ J} \cdot \text{s}) / (3.0 \times 10^8 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}) = 8.0 \times 10^{10} \text{ m}^{-1}$

問4 次の記述のうち、正しいものの組合せはどれか。ただし、真空中の光速度を $3.0 \times 10^8 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ とし、有効数字を2桁とする。

- A 1 kg の物質は、 $9.0 \times 10^{16} \text{ J}$ に等価である。
B 電子の静止エネルギーは $8.2 \times 10^{-14} \text{ J}$ に相当する。
C 1 MeV の γ 線の波長は $1.2 \times 10^{-12} \text{ m}$ である。
D 17°C で熱平衡にある粒子の運動エネルギーの最頻値は $4.0 \times 10^{-21} \text{ J}$ である。

(令和2年度) 第1種物理学

- 1 ABCのみ 2 ABDのみ 3 ACDのみ 4 BCDのみ 5 ABCDすべて

[解答] 5

注) A : 正 エネルギーと質量の関係 $E = mc^2$ より、

$$1 \text{ kg の物質は、} E = mc^2 = 1 \text{ kg} \times (3.0 \times 10^8 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1})^2 = 9.0 \times 10^{16} \text{ J}$$

B : 正 電子の質量は $9.1 \times 10^{-31} \text{ kg}$ なので、 $E = mc^2 = 9.1 \times 10^{-31} \text{ kg} \times (3.0 \times 10^8 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1})^2 = 8.19 \times 10^{-14} \text{ J}$

$$\text{または、電子の静止エネルギーは } 511 \text{ keV} \text{ なので、} E = 511 \text{ keV} \times 1.6 \times 10^{-19} \text{ J} \cdot \text{eV}^{-1} = 8.18 \times 10^{-14} \text{ J}$$

C : 正 $E = hn$ と $c = \lambda n$ より、 $\lambda = ch/E = 3.0 \times 10^8 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1} \times 6.63 \times 10^{-34} \text{ J} \cdot \text{s} / (1 \text{ MeV} \times 1.6 \times 10^{-19} \text{ J} \cdot \text{eV}^{-1}) = 1.24 \times 10^{-12} \text{ m}$

D : 正 熱平衡にある粒子の運動エネルギーの最頻値は、ボルツマン分布の最大値となる運動

$$\text{量 } p = \sqrt{2mk_B T} \text{ のときの運動エネルギー } \frac{p^2}{2m} = k_B T \text{ である。ボルツマン定数 } k_B =$$

$$1.38 \times 10^{-23} \text{ J} \cdot \text{K}^{-1}, T = 17 + 273 = 290 \text{ K} \text{ より、} k_B T = 1.38 \times 10^{-23} \times 290 = 4.00 \times 10^{-21} \text{ J}$$

$$\text{または、熱中性子の運動エネルギーは } 25 \text{ meV} \text{ なので、} 25 \times 10^{-3} \text{ eV} \times 1.6 \times 10^{-19} \text{ J/eV} = 4.0 \times 10^{-21} \text{ J}$$

問5 次の記述のうち、正しいものはどれか。

- 1 中性子の磁気モーメントはゼロである。
- 2 陽子の磁気モーメントはゼロである。
- 3 核異性体どうしの質量超過は等しい。
- 4 α 粒子の質量は重陽子の質量の2倍より大きい。
- 5 ^{14}C の中性原子の質量は ^{14}O の中性原子の質量より小さい。

[解答] 5

注) 1 : 誤 中性子は、磁気モーメント $9.66 \times 10^{-27} \text{ J} \cdot \text{T}^{-1}$ をもつ。

2 : 誤 陽子は、磁気モーメント $1.41 \times 10^{-26} \text{ J} \cdot \text{T}^{-1}$ をもつ。

3 : 誤 核異性体どうしは構成される核種は同じであるが、結合エネルギーが異なるため、質量超過は異なる。

4 : 誤 1 核子あたりの結合エネルギーは、重陽子が 1.1 MeV 、 α 粒子が 7.7 MeV である。原子核の質量は、構成する陽子と中性子の質量の和から結合エネルギーに相当する分軽くなるため、 α 粒子の質量の方が重陽子の質量の 2 倍より小さい。

5 : 正 ^{14}C と ^{14}O は、それぞれベータマイナス壊変とベータプラス壊変により、ともに ^{14}N に壊変する。 ^{14}C 、 ^{14}N 、 ^{14}O 、電子 e の質量を $m(^{14}\text{C})$ 、 $m(^{14}\text{N})$ 、 $m(^{14}\text{O})$ 、 $m(e)$ とすると、 ^{14}C のベータマイナス壊変の Q 値は、 $Q(^{14}\text{C}) = m(^{14}\text{C})c^2 - m(^{14}\text{N})c^2$ 、 ^{14}O のベータプラス壊変の Q 値は、 $Q(^{14}\text{O}) = m(^{14}\text{O})c^2 - m(^{14}\text{N})c^2 - 2m(e)c^2$ となる。これらの Q 値は正の値であ

(令和2年度) 第1種物理学

り、 ^{14}C のベータマイナス壊変の Q 値は $Q(^{14}\text{C}) = 0.156 \text{ MeV}$ 、 $2m(e)c^2 = 1.022 \text{ MeV}$ なので、 $Q(^{14}\text{O}) = m(^{14}\text{O})c^2 - m(^{14}\text{C})c^2 + 0.156 \text{ MeV} - 1.022 \text{ MeV} = m(^{14}\text{O})c^2 - m(^{14}\text{C})c^2 - 0.866 \text{ MeV} > 0$ より、 $m(^{14}\text{C}) < m(^{14}\text{O})$ となる。

問6 次の記述のうち、正しいものの組合せはどれか。

- A 陽子は単独で存在すると中性子に壊変する。
- B 原子核の質量は、陽子および中性子それぞれの質量にそれぞれの個数をかけた値の和より小さい。
- C 陽子の質量は中性子の質量より大きい。
- D 核力は電磁気力より力の及ぶ距離が短い。

1 AとB 2 AとC 3 BとC 4 BとD 5 CとD

[解答] 4

- 注) A : 誤 陽子は中性子より軽いので、単独で陽子は中性子に壊変できない。なお、大統一理論では陽子は中間子とレプトンに崩壊するとされているが、観測はされていない。
- B : 正 原子核の質量は、核子間の結合エネルギーの分軽くなるため、陽子および中性子それぞれの質量にそれぞれの個数をかけた値の和より小さい。
- C : 誤 陽子の質量は $1.6726 \times 10^{-27} \text{ kg}$ 、中性子の質量は $1.6749 \times 10^{-27} \text{ kg}$ で中性子質量の方が大きい。
- D : 正 核力は核子間で働く力で、核子を原子核として結合させる役割をもち、核力の及ぶ距離は、 10^{-14} m 程度の大きさである。一方、遮るものがなければ電磁気力は減衰するが無限遠方まで届くので、核力は電磁気力より力の及ぶ距離が短い。

問7 原子核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 α 壊変が起きると中性子数が2つ減少する。
- B β^+ 壊変が起きると中性子数が1つ増加する。
- C β^- 壊変が起きると質量数が1つ増加する。
- D 電子捕獲が起きると原子番号が1つ増加する。

1 AとB 2 AとC 3 BとC 4 BとD 5 CとD

[解答] 1

注) 壊変前の核種(親核種)と壊変後の核種(娘核種)の質量数、陽子数(原子番号)、中性子数をそれぞれ、 A_p 、 Z_p 、 N_p 、 A_d 、 Z_d 、 N_d とすると、

- A : 正 α 壊変では He 原子核($A=4$ 、 $Z=2$ 、 $N=2$)が放出される： $(A_d, Z_d, N_d) = (A_p - 4, Z_p - 2, N_p - 2)$
- B : 正 β^+ 壊変では核内の陽子が中性子に変換される： $(A_d, Z_d, N_d) = (A_p, Z_p - 1, N_p + 1)$
- C : 誤 β^- 壊変では核内の中性子が陽子に変換される： $(A_d, Z_d, N_d) = (A_p, Z_p + 1, N_p - 1)$ 質量数是不変。

(令和2年度) 第1種物理学

D : 誤 電子捕獲では核内の陽子が中性子に変換される : $(A_d, Z_d, N_d) = (A_p, Z_p - 1, N_p + 1)$ 原子番号が1つ減少。

問8 α 壊変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 放出される α 線のエネルギー分布は線スペクトルである。
- B ^{241}Am 線源から放出される α 線のエネルギーは 5.486 MeV のみである。
- C ^{210}Po 線源からの γ 線放出率は 0.1% 以下である。
- D トンネル効果は関係しない。

1 AとB 2 AとC 3 AとD 4 BとD 5 CとD

[解答] 2

注) A : 正 原子核のエネルギーは飛び飛びの値をとるため α 壊変のエネルギーは決まった値となる。 α 壊変のエネルギーは α 粒子と娘核種に一定の割合で分配される。したがって、 α 線のエネルギー分布は線スペクトルとなる。

B : 誤 ^{241}Am 線源から放出される α 線のエネルギーは 5.486 MeV (放出率 86.0%) の他に、5.443 MeV (12.5%)、5.389 MeV (1.0%)、5.545 MeV (0.3%) の α 線が放出される。

C : 正 ^{210}Po 線源からの γ 線 (803 keV) 放出率は 0.0012% である。また、このことが ^{210}Po の汚染の検出を困難にしている。

D : 誤 α 壊変のエネルギーと半減期の関係 (ガイガー・ヌッタルの法則) は、トンネル効果により説明できる。

問9 次のうち、正しいものの組合せはどれか。

- A コッククロフト・ワルトン型加速装置では、整流回路に多段の倍電圧回路を利用した直流高電圧で荷電粒子を加速する。
- B 線形加速器では、連続しておかれた加速空洞に高周波電力を供給して、荷電粒子を加速する。
- C シンクロトロンでは、加速粒子を同一の軌道で周回させるために、粒子エネルギーに応じて磁場及び高周波周波数を変化させる。
- D サイクロトロンでは、2つの向き合った D 型電極に高周波電力を供給して加速粒子が電極間を通過する際に電位差を発生させ加速する。

1 ABCのみ 2 ABDのみ 3 ACDのみ 4 BCDのみ 5 ABCDすべて

[解答] 5

注) A~D すべて正しい。

問10 重陽子どうしの核融合反応で生成される粒子の組合せとして、正しいものは次のうちどれか。

- A 中性子
- B ^1H の原子核
- C ^3H の原子核

D ${}^3\text{He}$ の原子核

- 1 ACDのみ 2 ABのみ 3 BCのみ 4 Dのみ 5 ABCDすべて

〔解答〕 5

注) 重陽子 (${}^2\text{H}$ の原子核) どうしの核融合反応では、 ${}^2\text{H} + {}^2\text{H} \rightarrow {}^3\text{He} + \text{n}$ と ${}^2\text{H} + {}^2\text{H} \rightarrow {}^3\text{H} + {}^1\text{H}$ の反応がほぼ同じ確率で起こる。したがって、この核融合反応で中性子、 ${}^1\text{H}$ の原子核、 ${}^3\text{H}$ の原子核、 ${}^3\text{He}$ の原子核が生成するので、A～D すべて正しい。

問 11 次の記述のうち、正しいものの組合せはどれか。

- A 核反応前後の質量の違いをエネルギーとして表した値を Q 値という。
B 核反応断面積の単位は b (バーン) で、 $1\text{ b} = 1 \times 10^{-24} \text{ m}^2$ に相当する。
C 原子核における核子 1 個当たりの結合エネルギーはおおよそ 0.5 MeV である。
D 光核反応は吸熱反応である。

- 1 AとC 2 AとD 3 BとC 4 BとD 5 CとD

〔解答〕 2

注) A : 正 Q 値とは、核反応前の全質量から核反応後の全質量を引いた値をエネルギーに換算したものである。

B : 誤 核反応断面積を表す単位として b (バーン) が用いられ、
 $1\text{ b} = 10^{-24} \text{ cm}^2 = 1 \times 10^{-28} \text{ m}^2$
である。

C : 誤 結合エネルギーを核子数で割ると核子当たりの平均結合エネルギーが得られる。これは核子が原子核とどのくらい強く結びついているかを表す。核子当たりの平均結合エネルギーはおおよそ 7～8 MeV である。

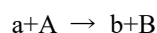
D : 正 光核反応とは、高エネルギーの光子 (γ 線) によって生じる原子核反応をいう。 γ 線が原子核に当たると、ある確率で吸収され、原子核を励起する。そのエネルギーが原子核内の核子の結合エネルギーを超えると、核子は核外へ飛び出すことができ、
(γ , p), (γ , n), (γ , d), (γ , α), (γ , fission) などの反応が起こる。したがって、光核反応は吸熱反応である。光核反応が起こるためには、 ${}^7\text{Li}$ では 7.3 MeV, ${}^{12}\text{C}$ では 18.7 MeV, 重元素では 6.5 MeV 以上のエネルギーが必要である。

問 12 ${}^{238}\text{U}$ 原子核が 4.2 MeV の α 粒子を放出し、基底状態の娘核種に壊変した。その壊変の Q 値 [MeV] として最も近い値は次のうちどれか。

- 1 4.1 2 4.3 3 4.5 4 4.7 5 4.9

〔解答〕 2

注) 入射粒子 a, 標的核 A, 放出される粒子 b, 生成核 B の核反応



において、核反応前後の原子核の質量差に相当するエネルギーを Q 値という。

^{238}U は α 壊変により ^{234}Th に壊変し、娘核種である ^{234}Th が基底状態であるとき、 Q 値は α 粒子と ^{234}Th に運動量を保存するように分配される。

したがって、 α 粒子および ^{234}Th の質量をそれぞれ $M(\alpha)$ および $M(^{234}\text{Th})$ 、 α 粒子および ^{234}Th の速度をそれぞれ $v(\alpha)$ および $v(^{234}\text{Th})$ とすると、 α 壊変で生じた α 粒子と ^{234}Th は、互いに反跳して運動量が保存されることから、

$$M(\alpha) \cdot v(\alpha) + M(^{234}\text{Th}) \cdot v(^{234}\text{Th}) = 0$$

$$v(^{234}\text{Th}) = -\frac{M(\alpha)}{M(^{234}\text{Th})} v(\alpha)$$

また、 α 粒子と ^{234}Th の質量比は、 $M(\alpha):M(^{234}\text{Th}) = 4:234$ であるから、

$$M(^{234}\text{Th}) = \frac{234}{4} M(\alpha)$$

Q 値は、 α 粒子と ^{234}Th の運動エネルギーに変わるので、

$$\begin{aligned} Q &= \frac{1}{2} M(\alpha) \cdot v(\alpha)^2 + \frac{1}{2} M(^{234}\text{Th}) \cdot v(^{234}\text{Th})^2 \\ &= \frac{1}{2} M(\alpha) \cdot v(\alpha)^2 + \frac{1}{2} \cdot \frac{234}{4} M(\alpha) \cdot \left(-\frac{M(\alpha)}{M(^{234}\text{Th})} v(\alpha)\right)^2 \\ &= \frac{1}{2} M(\alpha) \cdot v(\alpha)^2 + \frac{1}{2} \cdot \frac{234}{4} M(\alpha) \cdot \left(\frac{4}{234} v(\alpha)\right)^2 \\ &= \frac{234+4}{234} \cdot \left(\frac{1}{2} M(\alpha) \cdot v(\alpha)^2\right) \end{aligned}$$

α 粒子の運動エネルギー $\frac{1}{2} M(\alpha) \cdot v(\alpha)^2 = 4.2 \text{ [MeV]}$ であるから、

$$Q = \frac{234+4}{234} \cdot 4.2 \text{ [MeV]} = 4.27 \text{ [MeV]}$$

問 13 4°C の水中での最大飛程が 5 mm である β 線が、標準状態の空气中で示す最大飛程として最も近い値は、次のうちどれか。

- 1 4 mm 2 4 cm 3 40 cm 4 4 m 5 40 m

[解答] 4

注) 電子の最大飛程は g/cm^2 の単位で表すと、物質の種類にはあまり依存しない。 4°C の水の密度を $1[\text{g/cm}^3]$ 、標準状態の空気の密度を $0.001293[\text{g/cm}^3]$ ($=1.293 \text{ [kg/m}^3]$) とすると、

$$\begin{aligned} \text{空气中の最大飛程} &= \text{水中の最大飛程} \times \frac{\text{水の密度}}{\text{空気の密度}} \\ &= 5[\text{mm}] \times \frac{1[\text{g/cm}^3]}{0.001293[\text{g/cm}^3]} \\ &= 3867[\text{mm}] \cong 4[\text{m}] \end{aligned}$$

問 14 100 keV の電子が物質に入射したときに起こる現象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 発生する特性 X 線のエネルギーは物質によらず一定である。
- B 制動放射線の発生効率は物質によらず一定である。
- C 制動放射線の最大エネルギーは物質によらず一定である。
- D 電子の飛跡に沿って電離や励起が起こる。

1 AとB 2 AとC 3 BとC 4 BとD 5 CとD

〔解答〕 5

注) A : 誤 特性 X 線は、軌道電子が電離して空席となった場所へ、エネルギーの高い軌道にある電子が転移する過程で放出される光子である。特性 X 線のエネルギーは、転移する電子軌道間のエネルギー差に等しい。特性 X 線のエネルギーは物質の元素に固有な値となり、物質の原子番号が大きいほどエネルギーが高くなる。

B : 誤 電子が物質中で減速されたり、散乱されてその方向を変えたりする時に光子を発生する。発生する光子を制動放射線または制動 X 線という。制動放射線の発生効率は、物質に入射する電子のエネルギーに対する制動放射線の出力で表され、物質の原子番号が大きいほど発生効率は高くなる。

X 線管の場合、発生する X 線の大部分は制動放射線であり、X 線管で発生する X 線の発生効率 η は下式で表される。

$$\eta = \frac{\varphi}{P} = kVZ$$

ここで、 φ は X 線の出力（ほぼ制動放射線の出力）、 P は入射電子の総エネルギー、 k は定数、 V は管電圧、 Z は物質の原子番号である。X 線管のターゲットがタングステンの場合、X 線の発生効率は 1%未満で、99%以上は熱となる。このため融点の高い金属がターゲットに使われる。

C : 正 電子が物質中で減速や散乱されるとき、加速度の大きさは様々であるので、発生する光子のエネルギーも様々で連続スペクトルを示す。発生する制動放射線の最大エネルギーは電子の持つ運動エネルギーに等しく、物質にはよらない。

D : 正 電子や陽子などの荷電粒子が物質中を進むとき、荷電粒子は物質中の電子とクーロン力によりエネルギーのやり取りが起こり物質中の原子を電離したり励起したりする。

問 15 次の記述のうち、正しいものの組合せはどれか。

- A 同一気体の W 値は荷電粒子の種類により異なる値を示す場合がある。
- B W 値は照射線量を求めるために使用されることがある。
- C イオン化ポテンシャルを I とするとき、W 値との比 (W/I) はほぼ 1 となる。
- D He 並びに Xe の気体、C (ダイヤモンド) 並びに Si の固体の 4 つの検出媒体において、W 値が大きい順に並べると、He、Xe、C、Si の順となる。

1 ABCのみ 2 ABDのみ 3 ACDのみ 4 BCDのみ 5 ABCDすべて

〔解答〕 2

注) A : 正 荷電粒子により, 物質中の原子が電離され, イオン対が作られる。エネルギー E の荷電粒子が気体中で止まったとき生じるイオン対の数を N とすると, イオン対 1 個を作る平均のエネルギーは

$$W = E / N$$

で与えられ, この値を W 値という。 W 値は, 入射エネルギーによらずほとんど一定の値をもつ。

W 値は, 入射エネルギーによらずほとんど一定の値をもつが, 再結合などの影響により, 電離の密度の高い α 線の方が β 線よりも若干高い (空気の W 値の場合, $W(\alpha) = 35 \text{ eV}$, $W(\beta) = 34 \text{ eV}$)。

B : 正 照射線量は, X 線または γ 線で単位質量の空気を照射して生じた電荷の量であり, 単位は C/kg で与えられる。

X 線または γ 線のエネルギーが高くない場合 (10 MeV 以下), 照射線量は空気カーマで考慮する電離量に相当する。すなわち, 照射線量 X は, エネルギーフルエンス ψ , 空気の質量エネルギー吸収係数 μ_{en}/ρ , 電子の電荷 e , 空気の W 値 W を用いると,

$$X = \psi \cdot (\mu_{\text{en}}/\rho) \cdot e/W$$

のように表される。空気カーマ K はエネルギーが 10 MeV 以下の X 線または γ 線では, 制動放射等を見捨てるので, 近似的に $K = \psi \cdot (\mu_{\text{en}}/\rho)$ となり, 照射線量 $X = K \cdot e/W$ の関係になる。この関係を用いて照射線量を算定することができる。

C : 誤 W 値は, 電離エネルギー, すなわちイオン化ポテンシャルの 2 倍程度である。

D : 正 W 値は, 液体や半導体などの固体に対しても同様に定義され, 特に固体では ϵ 値と呼ばれる場合がある。気体の W 値は一般に原子番号の大きい気体ほど小さい傾向がある。固体中の ϵ 値は, 気体の W 値 ($20 \text{ eV} \sim 46 \text{ eV}$) よりも小さい (Si や Ge では気体の $1/10$ 程度)。

$$W(\text{He}) : 41 \text{ eV} (> W(\text{空気}) : 34 \text{ eV}) > W(\text{Xe}) : 22 \text{ eV}$$

$$> \epsilon(\text{C (ダイヤモンド)}) : 13 \text{ eV} > \epsilon(\text{Si}) : 3.6 \text{ eV} (> \epsilon(\text{Ge}) : 3.0 \text{ eV})$$

問 16 光子と物質との相互作用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 光電効果は, 光子と自由電子の間で起こる。
- B コンプトン散乱光子のエネルギーが最大となるのは光子散乱角が 180° のときである。
- C 電子対生成は光子のエネルギーが 1.02 MeV より小さいときは起こらない。
- D レイリー散乱後の散乱光子は入射光子と同じエネルギーをもつ。

1 AとB 2 AとC 3 BとC 4 BとD 5 CとD

[解答] 5

注) A : 誤 光電効果は, 光子が軌道電子にエネルギーを与え, 軌道電子が原子から飛び出す現象である。

B : 誤 コンプトン散乱光子のエネルギー E'_γ は, 入射光子のエネルギーを E_γ , 電子の質量

を m ，光の速度を c ，散乱光子の散乱方向の角度を θ とすると，次式で表される。

$$E'_\gamma = \frac{E_\gamma}{1 + \frac{E_\gamma}{mc^2}(1 - \cos\theta)}$$

コンプトン散乱光子の散乱角 $\theta = 180^\circ$ のとき $\cos\theta = -1$ となり，コンプトン散乱光子のエネルギーは最小となる（コンプトン電子のエネルギーが最大となる。）。

C：正 電子対生成は，原子核の強い電場の作用によって光子が電子と陽電子を生み出す反応であり，光子のエネルギーが電子の質量の2倍のエネルギーに相当する 1.022 MeV を超えないと電子対生成は発生しない。

D：正 レイリー散乱は，光子がそのエネルギーを失うことなく散乱する弾性散乱であり，散乱光子は入射光子と同じエネルギーをもつ。

問17 次のうち、物質中での γ 線による吸収線量測定に最も関係の深いものはどれか。

- 1 Bragg曲線
- 2 Bragg反射
- 3 Braggピーク
- 4 Bragg－Grayの原理
- 5 Bragg－Williamsの近似

〔解答〕 4

注) Bragg - Gray (ブラッグ・グレイ) の原理 (選択肢4) は，空洞気体で生じた電離の量と吸収線量の関係を表したものであり，物質中での γ 線による吸収線量測定に最も関係が深い。ブラッグ・グレイの空洞原理ともいう。

Bragg (ブラッグ) 曲線 (選択肢1) とは，荷電粒子の物質中での距離に対する比電離 (単位長さの飛跡当たりに電離されるイオン対の数) を表した曲線であり，飛程の終わりでは速度が非常に小さくなるため比電離が大きくなる様子がわかる。ブラッグ曲線の例を下図に示す。残留飛程の最後のところのピークを Bragg (ブラッグ) ピーク (選択肢3) という。

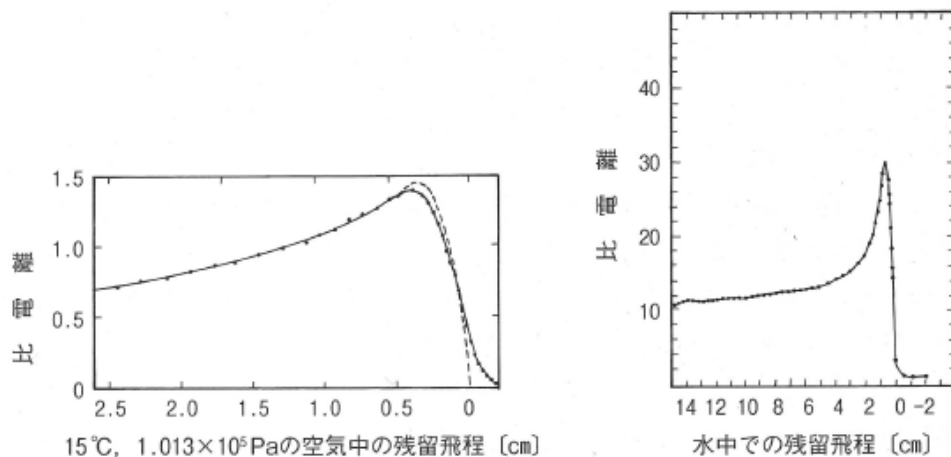


図 6.4 α 線に対するブラッグ曲線

左図は ^{210}Po からの α 線(主に5.3 MeVのエネルギー)の空気中での比電離(単位長さの飛跡あたりに電離されるイオン対の数)、右図は核子当たり225 MeVのエネルギーを持つ α 線の水中での比電離を表す。飛程の最後のところのピークをブラッグピークという。横軸は残留飛程を表す。

左図 『実験物理学講座—放射線』(共立出版), p. 62
右図 第16回放医研シンポジウム「粒子加速器の医学利用」報文集, NIRS-M-56, p. 4

(「9版 放射線取扱の基礎」(日本アイソトープ協会)より)

Bragg(ブラッグ)反射(選択肢2)とは、X線を結晶に入射角 θ で投射した際に、結晶の格子面間隔 d の $2d \sin\theta$ が入射X線の波長 λ の整数倍に等しいときには各格子面からの反射X線の干渉により強い反射X線となるが、そうでないときは反射X線が観察されないような反射という。このときのX線の反射の条件をブラッグの反射条件といい、次のように表される。

$$2d \sin\theta = n\lambda \quad (n = 1, 2, 3, \dots)$$

Bragg-Williams(ブラッグ・ウィリアムズ)の近似(選択肢5)は、統計力学で用いられる近似法の1つである。

ちなみに、重荷電粒子の飛程は物質の密度に反比例し、原子量の平方根に比例するという経験則は、ブラッグ・クレマン則であり、次式で表される。

$$\frac{R}{R_0} = \frac{\rho}{\rho_0} \times \sqrt{\frac{A}{A_0}}$$

ここで、 R, R_0 は2種類の物質中の飛程、 ρ, ρ_0 は密度、 A, A_0 は原子量である。

問18 次の記述のうち、正しいものの組合せはどれか。

- A 衝突カーマは、二次電子が制動放射で失うエネルギーを含む。
- B カーマは、エネルギーフルエンスと質量エネルギー転移係数の積である。
- C 質量エネルギー吸収係数は、質量エネルギー転移係数よりも大きい。
- D 荷電粒子平衡が成立する場合は、吸収線量は衝突カーマと等しくなる。

1 AとB 2 AとC 3 AとD 4 BとC 5 BとD

〔解答〕5

注) A: 誤 衝突カーマは、単位質量の物質に光子や非荷電粒子が照射されて電子等の荷電粒子に与えられた最初のエネルギー(カーマ)のうち、衝突損失により失われたエネルギーの総和である。つまりカーマから制動放射によるエネルギー損失を除いたものが衝突カーマである。

B: 正 光子が物質との相互作用でエネルギーを電子に転移し、光子のエネルギーフルエンス φ が減衰するとき、

$$-\frac{d\varphi}{dx} = \mu_{\text{TR}}\varphi$$

と表され、 μ_{TR} を線エネルギー転移係数という。 μ_{TR} を密度で割った係数 μ_{TR}/ρ を質量エネルギー転移係数という。

カーマ(K)は、単位質量(Δm)の物質に光子や非荷電粒子が照射されて電子等の荷

電粒子に与えられた最初のエネルギーの総和 (ΔE_{TR}) をいう。すなわち、

$$K = \frac{dE_{\text{TR}}}{dm}$$

これからわかるように、カーマは質量エネルギー転移係数 μ_{TR}/ρ とエネルギーフルエンス fE_γ (f は光子束) の積で与えられる。

$$K = \frac{\mu_{\text{TR}}}{\rho} \times fE_\gamma$$

C : 誤 光子は、物質との相互作用でエネルギーを電子に転移するが、その電子が物質中を走るとき物質中で制動放射を発生する。制動放射によりそのエネルギーは物質より逃げるので、これを差し引いたエネルギーが物質に吸収される。

質量エネルギー吸収係数を μ_{en}/ρ , 質量エネルギー転移係数を μ_{TR}/ρ , 制動放射で逃げる割合を G とすると、 $\mu_{\text{en}}/\rho = \mu_{\text{TR}}/\rho \times (1 - G)$ と表せる。したがって、線エネルギー吸収係数が線エネルギー転移係数より大きくなることはない。

なお、光子のエネルギーが低い場合は制動放射で逃げるエネルギーは小さいので、 μ_{en}/ρ と μ_{TR}/ρ はほぼ等しくなる。

D : 正 吸収線量は、ある物質中で単位質量が吸収したエネルギーで与えられる。微小な領域でエネルギー吸収を考えると、領域内で生成した電子が領域外へ出ていき領域外でエネルギーを失う場合が起こる。また、領域外で生成された電子が領域内へ入ってエネルギーを与えることが起こる。均質な媒質で、領域外で生成された荷電粒子による領域内でのエネルギー付与と、領域内で生成された荷電粒子による領域外でのエネルギー付与が等しいとき荷電粒子平衡が成り立つという。荷電粒子平衡が成り立つとき衝突カーマと吸収線量は等しくなる。

問 19 次のうち、特性 X 線またはオージェ電子が発生しないものの組合せはどれか。

- A 光電効果
- B 内部転換
- C レイリー散乱
- D 電子対生成
- E コンプトン散乱

1 AとB 2 AとE 3 BとD 4 CとD 5 CとE

[解答] 4

注) 軌道電子がエネルギーを得て電離が起こるとその場所が空席となり、この場所へは、エネルギーの高い軌道にある電子が転移してその空席を埋める。その際に光子が放出され、このような過程で放出される光子を特性 X 線という。

また、光子として放出される過程のほかに、光子を放出せずに同じあるいは外側の軌道にある電子を放出する過程 (オージェ効果) があり、このときに放出される電子をオージェ電子という。

特性 X 線とオージェ電子は軌道電子の場所が空席になったときに発生し、これらは競合関係にある。

- A : 誤 光電効果は、光子が軌道電子にエネルギーを与え、軌道電子が原子から放出される現象（このとき放出される電子を光電子という。）であり、放出された電子の軌道を埋めるため軌道電子の遷移が起き、その際、特性 X 線またはオージェ電子が放出される。
- B : 誤 内部転換は、励起状態の原子核がエネルギーの低い状態へ転移するとき、光子を放出する代りに軌道電子を放出する現象（このとき放出される電子を内部転換電子という。）であり、放出された電子の軌道を埋めるため軌道電子の遷移が起き、その際特性 X 線またはオージェ電子が放出される。
- C : 正 レイリー散乱は、光子がそのエネルギーを失うことなく散乱する弾性散乱であり、軌道電子が放出される現象ではなく、特性 X 線およびオージェ電子は発生しない。
- D : 正 電子対生成は、光子が原子核近傍の電場により吸収されて電子と陽電子を発生する反応であり、軌道電子が放出される現象ではなく、特性 X 線およびオージェ電子は発生しない。
- E : 誤 コンプトン散乱は、光子が起動電子に衝突した際に、電子にエネルギーの一部を与えて弾き飛ばし、光子自身はその分だけエネルギーを失って（波長が長くなって）別の方向に散乱される現象であり、放出された電子の軌道を埋めるため軌道電子の遷移が起き、その際特性 X 線またはオージェ電子が放出される。

問 20 幅の広い光子ビームが厚さ $d[\text{cm}]$ の無限平板に垂直方向から入射するとき、光子が平板を透過する割合に最も近い値は次のうちどれか。ただし、この平板の線減弱係数を $d^{-1}[\text{cm}^{-1}]$ 、ビルドアップ係数を 1.2、自然対数の底を 2.7 とする。

- 1 0.44 2 0.53 3 0.64 4 0.77 5 0.92

〔解答〕 1

注) 無限平板に入射する γ 線（光子）の強度を I_0 、この平板の厚さ、線減弱係数およびビルドアップ係数をそれぞれ x 、 μ および B とすると、無限平板透過後の γ 線（光子）の強度 I は以下のとおりである。

$$I = I_0 \cdot B \cdot e^{-\mu x}$$

今、線減弱係数 $\mu = d^{-1}[\text{cm}]$ 、無限平板の厚さ $x = d[\text{cm}]$ 、ビルドアップ係数 $B = 1.2$ であることから

$$I = I_0 \times 1.2 e^{-d \cdot d^{-1}} = 1.2 \times 2.7^{-1} \times I_0 = 0.444 I_0$$

（自然対数の底を 2.718 として算出すると、 $I = 0.442 I_0$ ）

問 21 次の記述のうち、正しいものの組合せはどれか。

- A 陽電子消滅に際して放出される光子のエネルギー分布は若干の幅を持つ線スペクトルである。
- B 電子対生成の結果発生する陽電子のエネルギーは単色である。
- C 電子対生成の結果発生する陽電子のエネルギーと陰電子のエネルギーの和は入射光子のエネルギー

ルギーに比例する。

D 真空中では、陽電子は消滅することはない。

1 AとB 2 AとC 3 AとD 4 BとC 5 BとD

[解答] 3

注) A : 正 陽電子は電子の反粒子で、周囲の電子と結合して消滅する。このとき、2本の511 keV光子を反対方向に放出する。この511 keVの光子は陽電子と電子の運動量によるドップラー効果を受けるので、若干の幅をもつ。

B : 誤 光子のエネルギーが1022 keVを超えると原子核近傍の電場との相互作用で電子対生成が起こる。このとき光子のエネルギーが1022 keVを超えた分が電子、陽電子および原子核の運動エネルギーとなる。エネルギーおよび運動量保存則を満たす限り、陽電子の運動エネルギーは様々な値を取り得るためBは誤りである。

C : 誤 (入射光子のエネルギー) = (電子・陽電子の運動エネルギーの和) + 1022 keV + (原子核の運動エネルギー) となる。電子・陽電子のエネルギーは入射光子のエネルギーに比例していないためCは誤りである。

D : 正 電子が真空中で消滅しないように、反粒子である陽電子も真空中で消滅しない。

問22 ^{60}Co γ 線に対するコンクリート(密度 $2.3 \text{ g} \cdot \text{cm}^{-3}$)の半価層は5 cmである。 ^{60}Co γ 線に対する鉛(密度 $11.3 \text{ g} \cdot \text{cm}^{-3}$)の1/10 価層[cm]として、最も近い値は次のうちどれか。ただし、散乱 γ 線の影響は考慮しないものとする。また、 $\ln 2=0.693$ および $\ln 5=1.61$ とする。

1 1.0 2 2.2 3 3.4 4 4.6 5 5.8

[解答] 3

注) 半価層 $L_{1/2}$ は光子束密度 ϕ_0 が1/2になる厚さなので、以下の様に表せる。

$$\frac{1}{2}\phi_0 = \phi_0 e^{-\mu L_{1/2}}$$
$$\therefore L_{1/2} = \frac{\ln 2}{\mu}$$

ここで μ は質量減衰係数である。質量減衰係数の単位は通常 cm^2/g を用いるため、 $L_{1/2}$ の単位は g/cm^2 (密度に長さを乗じたもの)となる。

よって ^{60}Co の γ 線に対するコンクリートの質量減衰係数は以下のようなになる。

$$\mu = \frac{\ln 2}{2.3 \times 5} = \frac{\ln 2}{11.5} \quad (1)$$

^{60}Co の γ 線(1173 keV と 1333 keV)と物質の主な相互作用はコンプトン散乱である(図2・20参照)。質量減衰係数は物質により大きく変わらないので、コンクリートと鉛の質量減衰係数はほぼ同じと近似することができる。

1/10 価層 $L_{1/10}$ は光子束密度 ϕ_0 が1/10になる厚さなので、以下の様に表せる。

$$\frac{1}{10}\phi_0 = \phi_0 e^{-\mu L_{1/10}}$$

$$\therefore L_{1/10} = \frac{\ln 10}{\mu} \quad (2)$$

(2)式に(1)式を代入すると

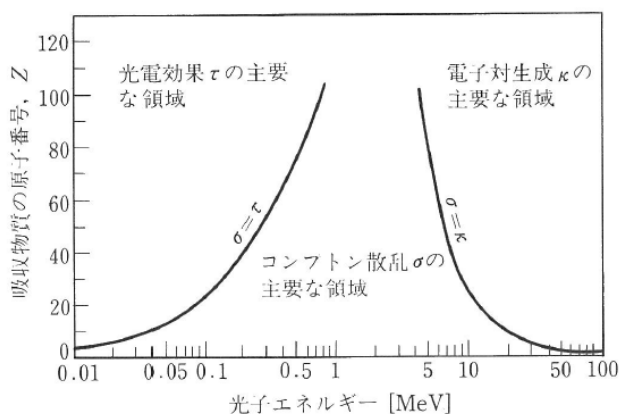
$$L_{1/10} = \ln 10 \times \frac{11.5}{\ln 2} [cm^2/g]$$

$L_{1/10}$ の単位を cm にするために鉛の密度で除すると

$$L_{1/10} = \ln 10 \times \frac{11.5}{\ln 2} \times \frac{1}{11.3} = \frac{(\ln 2 + \ln 5)}{\ln 2} \times \frac{11.5}{11.3} \approx 3.4$$

となり、3 が正しい。

図 2・20 光子と物質との相互作用
(カーブは二つの効果の
等しいラインである.)



(「放射線・アイソトープ 講義と実習」(日本アイソトープ協会) より)

問 23 中性子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 中性子は、核外で約 15 分の寿命で壊変する。
- B 中性子捕獲反応は発熱反応である。
- C 中性子の減速材としては、原子番号が大きい物質が有効である。
- D 弾性散乱における原子核の反跳エネルギーは中性子と原子核の質量の比に比例する。

1 AとB 2 AとC 3 BとC 4 BとD 5 CとD

[解答] 1

注) A : 正 中性子は約 15 分の半減期で陽子、電子および反電子ニュートリノに壊変する。

$$n \rightarrow p + e^- + \bar{\nu}_e$$

B : 正 一般的に中性子捕獲反応は発熱反応である。

C : 誤 中性子の減速は衝突した原子核に、中性子が持っているエネルギーを与えることで起こる。

したがって水素のような軽核が有効であるため、C は誤り。

D : 誤 原子核の受ける反跳エネルギー E は以下の式で表せる。中性子と原子核の質量の比に比例しているわけではないため D は誤り。

$$E = \frac{2mM}{(m+M)^2} (1 - \cos \theta) E_n$$

ここで m と M はそれぞれ中性子と原子核の質量、 θ は重心系での中性子の散乱角、 E_n は中性子の入射エネルギーである。

問 24 単色の速中性子と ^{12}C 原子核が弾性散乱したとき、反跳 ^{12}C のエネルギーの最大値は 4 MeV であった。散乱前の速中性子のエネルギー[MeV]として、最も近い値は次のうちどれか。

- 1 11 2 12 3 13 4 14 5 15

〔解答〕 4

注) 原子核の受ける反跳エネルギー E は以下の式で表せる。

$$E = \frac{2mM}{(m+M)^2} (1 - \cos \theta) E_n$$

ここで m と M はそれぞれ中性子と原子核の質量、 θ は重心系での中性子の散乱角、 E_n は中性子の入射エネルギーである。反跳 ^{12}C のエネルギーが最大になるのは $\theta = 180^\circ$ の時 (原子核が中性子の進行方向に散乱されるとき) なので代入して計算すると、

$$4 = \frac{2 \times 1 \times 12}{(1 + 12)^2} (1 - (-1)) E_n$$

$$\therefore E_n = 14.08 \dots$$

となり、4 が正しい。

問 25 次の記述のうち、正しいものの組合せはどれか。

- A 照射線量は間接電離放射線に対して定義される。
- B 吸収線量はすべての電離放射線に対して適用される。
- C LET は中性子に対しても定義される。
- D カーマは間接電離放射線に限り定義される。
- E 質量エネルギー転移係数は間接電離放射線に限り定義される。

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

〔解答〕 4

注) A : 誤 照射線量は X 線または γ 線で単位質量の空気を照射して生じた電荷の量であり、単位は C/kg で与えられる。間接電離放射線は電荷を持たない中性子線なども含まれるため A は誤り。

B : 正 吸収線量は単位質量あたりの物質に与えられるエネルギーで、単位は $\text{Gy}(=\text{J/kg})$ で与えられる。放射線の種類を問わないため B は正しい。

C : 誤 LET (線エネルギー付与) は荷電粒子が飛跡に沿って物質中に付与する単位長さあたりのエネルギーで、単位は J/m で与えられる。中性子に対しては定義されていないので C は誤り (但し、光子や中性子のような間接電離放射線に対しても、それらの作る二次荷電粒子に着目して拡張して用いられることがある)。

D : 正 カーマは単位質量あたりの物質に、光子や非荷電粒子による電離作用によって、電子

などの荷電粒子に最初に与えられたエネルギーの総和で、単位は Gy(= J/kg)で与えられる。間接電離放射線に限り定義されている量なので D は正しい。

E : 正 質量エネルギー転移係数は、単位長さを通じた光子や非荷電粒子のエネルギーのうち、荷電粒子の運動エネルギーに転移する割合を、密度で除したもので、単位は m^2/kg で与えられる。間接電離放射線に限り定義されている量なので E は正しい。

問 26 線エネルギー付与 (LET) 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 LET は、荷電粒子によって飛跡の近傍に生成した二次電子によるエネルギー損失を含む。
- B LET は、荷電粒子の水中におけるエネルギー損失に限って用いられる。
- C 同じ荷電粒子の場合、運動エネルギーの小さい粒子の方が LET は大きい。
- D 線質係数は、放射線の生体組織中における LET の関数として与えられる。

1 AとB 2 AとC 3 BとC 4 BとD 5 CとD

〔解答〕 2

注) A : 正 LET は荷電粒子によって飛跡近傍に生成した二次電子によるエネルギー損失を含むため A は正しい。

B : 誤 LET の定義では物質を指定していないため、B は誤り。

C : 正 同じ荷電粒子の場合、運動エネルギーの小さい粒子 (速度の遅い粒子) の方が LET は大きくなるため C は正しい。

D : 誤 線質係数は水中における LET の関数として定義された経緯がある。生体組織中ではないため D は誤り。

問 27 試料 A と試料 B の放射能をそれぞれ S_A 、 S_B とする。これらの放射能を同一条件で測定したところ、バックグラウンドを差し引いた後の試料 A の計数率は 480 ± 12 cpm、試料 B の計数率は 300 ± 10 cpm であった。両試料の放射能比 (S_A/S_B) は 1.60 であるが、その誤差として最も近い値は、次のうちどれか。

1 0.021 2 0.037 3 0.051 4 0.067 5 0.081

〔解答〕 4

注) 誤差付きの数値 $A \pm a$ 、 $B \pm b$ の商 A/B の誤差 σ_{ab} は以下の式で表せる。

$$\sigma_{ab} = \frac{A}{B} \sqrt{\left(\frac{a}{A}\right)^2 + \left(\frac{b}{B}\right)^2}$$

放射能を同一条件で測定しているため、計数率の比が放射能比となる。計数率を代入して解くと、

$$\begin{aligned} \sigma_{ab} &= \frac{480}{300} \sqrt{\left(\frac{12}{480}\right)^2 + \left(\frac{10}{300}\right)^2} = 1.6 \times \sqrt{\frac{1}{1600} + \frac{1}{900}} = 1.6 \times \sqrt{\frac{2500}{1440000}} \\ &= 1.6 \times \frac{5}{120} \approx 0.067 \end{aligned}$$

となる。よって4が正しい。

問28 次の核反応のうち、熱中性子の検出に適したものの組合せはどれか。

- A ${}^3\text{He}(n, n){}^3\text{He}$ (弾性散乱)
- B ${}^{238}\text{U}(n, f)$ (核分裂反応)
- C ${}^6\text{Li}(n, \alpha){}^3\text{H}$ (荷電粒子放出反応)
- D ${}^3\text{He}(n, p){}^3\text{H}$ (荷電粒子放出反応)

- 1 AとB 2 AとC 3 BとC 4 BとD 5 CとD

[解答] 5

注) 熱中性子の検出に適した反応は、熱中性子に対して大きな断面積を持ち、検出が容易な荷電粒子を放出する反応である。例として以下のものがある。

${}^3\text{He}(n, p){}^3\text{H}$, ${}^6\text{Li}(n, \alpha){}^3\text{H}$, ${}^{10}\text{B}(n, \alpha){}^7\text{Li}$, ${}^{235}\text{U}(n, f)$ などの核分裂反応

Aの弾性散乱は反跳エネルギーが低い熱中性子の検出には向かない。また、Bの ${}^{238}\text{U}$ は熱中性子誘起核分裂反応の断面積がそれほど高くない。よって選択肢の中で5が正しい。

問29 ア～エすべての特徴を有するシンチレータは次のうちどれか。

- ア 光子に対するエネルギー分解能が優れている。
- イ 原子番号が高いので、高いエネルギーの γ 線に対しても検出効率が高い。
- ウ シンチレータ自体に微量の放射性物質を含むので、低バックグラウンド測定に際して問題となる。
- エ 発光の減衰時間が短いのでタイミング特性が優れている。

- 1 CsI(Tl)
- 2 $\text{Bi}_4\text{Ge}_3\text{O}_{12}$
- 3 NaI(Tl)
- 4 $\text{LaBr}_3(\text{Ce})$
- 5 プラスチックシンチレータ

[解答] 4

注) ア：光子に対するエネルギー分解能が比較的優れているのは CsI(Tl), NaI(Tl), $\text{LaBr}_3(\text{Ce})$ であり、特に $\text{LaBr}_3(\text{Ce})$ は優れている (NaI(Tl)の約2倍)。

イ：プラスチックシンチレータ以外は重元素を含んでいるので高いエネルギーの γ 線についても検出効率が高い。

ウ：シンチレータ自体に微量の放射性物質を含むのは $\text{Bi}_4\text{Ge}_3\text{O}_{12}$ と $\text{LaBr}_3(\text{Ce})$ であるが、特に $\text{LaBr}_3(\text{Ce})$ に含まれる ${}^{138}\text{La}$ (天然存在度 0.09%) や La と化学的性質が似ている Ac およびその系列核種がバックグラウンドに強く寄与する。

エ：発光の減衰時間が短いのはプラスチックシンチレータと $\text{LaBr}_3(\text{Ce})$ であり、この中で最も長いのは CsI(Tl)である。

上記より4が正しい。

問30 次の測定器のうち、速中性子のエネルギースペクトルの測定に適さないものの組合せはどれか。

- A 球形減速材付熱中性子検出器(ボナー球検出器)
- B 金放射化箔検出器
- C 中性子線サーベイメータ(レムカウンタ)
- D 有機液体シンチレーション検出器

1 AとB 2 AとC 3 AとD 4 BとC 5 BとD

[解答] 4

注) 中性子のエネルギースペクトルの測定は減速材を用いた方法と、シンチレータを用いた方法に大別される。Aのボナー球検出器はポリエチレンなどの中性子減速材の中に熱中性子検出器を入れたもので、様々な大きさのボナー球での応答を調べることでエネルギースペクトルを測定する。Dの液体シンチレータでは速中性子の弾性散乱による反跳原子核を検出することでエネルギースペクトルを得る。BとCはそれぞれ中性子を検出することはできるが、エネルギースペクトルを得ることは難しい。よって4が正しい。

問31 粒子線加速器に関する次の文章の□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。

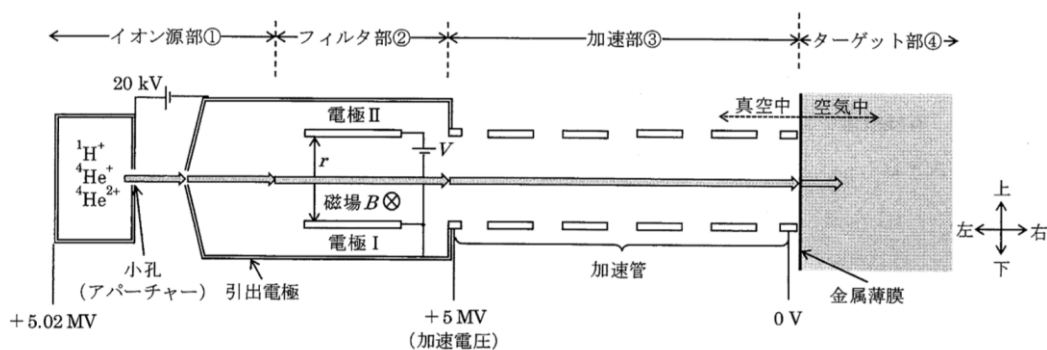
図に示すように、イオン源部①で引き出された ${}^1\text{H}^+$ 、 ${}^4\text{He}^+$ 、 ${}^4\text{He}^{2+}$ からフィルタ部②で ${}^4\text{He}^{2+}$ を選択して加速部③で加速し、ターゲット部④で空気中に取り出すことを考える。

イオン源部①では、引出電極と小孔の間に+20 kVの電圧をかけて ${}^1\text{H}^+$ 、 ${}^4\text{He}^+$ 、 ${}^4\text{He}^{2+}$ を加速する。加速後の ${}^4\text{He}^{2+}$ の速度を v とすると、 ${}^4\text{He}^+$ の速度はほぼ□ア□となる。また、 ${}^1\text{H}^+$ の速度はほぼ□イ□となる。

フィルタ部②の平行平板の電極Ⅰと電極Ⅱの間に紙面に向かって手前から奥向きに均一な磁場Bがかけられている。電気素量を e として、紙面左側から入射した ${}^4\text{He}^{2+}$ は、磁場により□ウ□の□A□力を受け、その向きは□B□である。ここで、電極Ⅰに対する電極Ⅱの電位差を V (正の値)、電極間距離を r とした場合、 ${}^4\text{He}^{2+}$ は電場により□エ□の□C□力を受け、その向きは□D□である。イオンが電極の間を直進できる条件は、これらの力が互いに相殺される場合であることから、加速部③に到達できるイオンは原理的には□オ□の速度を持つものに限られる。これを利用して適切な電圧 V を選択することにより、 ${}^4\text{He}^{2+}$ を選択的に取り出すことができる。

加速部③の加速管左側に+5 MVの加速電圧を加えたとき、 ${}^4\text{He}^{2+}$ は、静電場により約□カ□MeVまで加速される。そして、この ${}^4\text{He}^{2+}$ に対して3.0 MeVのエネルギー損失を引き起こす金属薄膜を介して空気中に引き出す。空気中で、 ${}^4\text{He}^{2+}$ は主に□C□力を介して□E□を起こしながら運動エネルギー

ギーを失い、連続的に減速しながら停止する。イオンが、物質（この場合は空気）中を単位距離進む間に $\boxed{E}$ で失う運動エネルギーの期待値を $\boxed{F}$ と呼ぶ。この様子を表す $\boxed{G}$ 曲線は、停止直前で $\boxed{G}$ ピークと呼ばれる急峻な極大値を持つ。ベーテの式によれば、イオンの $\boxed{F}$ は非相対論的運動領域では速度の $\boxed{キ}$ 乗に比例することから、上述の極大値を持つ形状が定性的に説明できる。例えば標準状態の空気中において、初期エネルギー $E[\text{MeV}]$ の ${}^4\text{He}^{2+}$ の飛程 $R[\text{cm}]$ は、 $R=0.318E^{3/2}$ の式で表せる。この式を利用すると金属薄膜を透過した ${}^4\text{He}^{2+}$ の空気中での飛程は約 $\boxed{ク}$ cmとなる。



図

<ア、イの解答群>

- | | | | | |
|------------------|------------------|------------------|-------------------------|-------------------------|
| 1 $\frac{1}{4}v$ | 2 $\frac{1}{3}v$ | 3 $\frac{1}{2}v$ | 4 $\frac{1}{\sqrt{3}}v$ | 5 $\frac{1}{\sqrt{2}}v$ |
| 6 v | 7 $\sqrt{2}v$ | 8 $\sqrt{3}v$ | 9 $2v$ | 10 $3v$ |

11 $4v$

<ウ～オの解答群>

- | | | | |
|----------------------|--------------------|--------------------|-------------------|
| 1 $\frac{2eB}{v}$ | 2 $\frac{evB}{2}$ | 3 evB | 4 $2evB$ |
| 5 $\frac{2\pi r}{v}$ | 6 $\frac{V}{rB}$ | 7 $\frac{2ev}{B}$ | 8 $\frac{eB}{v}$ |
| 9 $\frac{2V}{rB}$ | 10 $\frac{2er}{V}$ | 11 $\frac{2eV}{r}$ | 12 $\frac{er}{V}$ |
| 13 $\frac{eV}{r}$ | 14 $\frac{2rB}{V}$ | 15 $\frac{rB}{V}$ | |

<A～Dの解答群>

(令和2年度)第1種物理学

- | | | |
|--------------|---------------|---------------|
| 1 左向き (←) | 2 上向き (↑) | 3 右向き (→) |
| 4 下向き (↓) | 5 手前から奥向き (⊗) | 6 奥から手前向き (⊙) |
| 7 コリオリ | 8 核 | 9 ローレンツ |
| 10 ファンデルワールス | 11 重 | 12 クーロン |

<カの解答群>

- | | | | | |
|--------|--------|--------|-------|-------|
| 1 0.10 | 2 0.20 | 3 0.40 | 4 1.0 | 5 2.0 |
| 6 5.0 | 7 10 | 8 20 | | |

<E～Gの解答群>

- | | | |
|-------------|----------|-------------|
| 1 フルエンス | 2 衝突阻止能 | 3 放射阻止能 |
| 4 平均自由行程 | 5 W値 | 6 $1/\nu$ 則 |
| 7 ブラッグ | 8 全吸収 | 9 グロー |
| 10 マクスウェル分布 | 11 光核反応 | 12 コンプトン散乱 |
| 13 光電効果 | 14 電離・励起 | 15 制動放射 |

<キの解答群>

- | | | | | |
|------|------|------|------|-----|
| 1 -4 | 2 -3 | 3 -2 | 4 -1 | 5 0 |
| 6 1 | 7 2 | 8 3 | 9 4 | |

<クの解答群>

- | | | | | |
|---------|---------|--------|-------|-------|
| 1 0.080 | 2 0.318 | 3 0.90 | 4 2.5 | 5 3.6 |
| 6 5.9 | 7 8.6 | 8 10 | | |

[解答]

アー5 イー7 ウー4 エー11 オー6

Aー9 Bー2 Cー12 Dー4 カー7 Eー14 Fー2 Gー7 キー3 クー6

注) ア: ${}^4\text{He}^+$ の速度を v_1 、加速で得られる運動エネルギーを E_1 、 ${}^4\text{He}^{2+}$ の加速で得られる運動エネルギーを E_2 、引き出し電極と小孔の間の電圧を V_{20} 、電気素量を e とする。また、 ${}^4\text{He}^+$ と ${}^4\text{He}^{2+}$ の質量はほぼ等しいため、ともに M とすると、

$$E_1 = eV_{20} = \frac{1}{2}Mv_1^2$$

$$E_2 = 2eV_{20} = \frac{1}{2}Mv^2$$

よって、 $2E_1 = E_2 = 2eV_{20}$ であるから、

$$Mv_1^2 = \frac{1}{2}Mv^2$$

$$v_1 = \frac{1}{\sqrt{2}}v$$

イ: ${}^1\text{H}^+$ の速度を v_3 、加速で得られる運動エネルギーを E_3 、質量を m とすると、アの解説から、

$$E_3 = eV_{20} = \frac{1}{2}mv_3^2$$

とおける。よって、 $2E_3 = E_2 = 2eV_{20}$ であるから、

$$mv_3^2 = \frac{1}{2}Mv^2$$
$$v_3 = \sqrt{\frac{M}{2m}}v$$

ここで、 ${}^4\text{He}^{2+}$ の質量は ${}^1\text{H}^+$ の質量のほぼ4倍であるから、 $M/m = 4$ とすれば、

$$v_3 = \sqrt{\frac{4}{2}}v = \sqrt{2}v$$

ウ： ${}^4\text{He}^{2+}$ の受けるローレンツ力の大きさを F_1 とすると、

$$F_1 = 2evB$$

エ：電極Ⅰと電極Ⅱの間の電場の大きさを E 、この電場から ${}^4\text{He}^{2+}$ の受けるクーロン力の大きさを F_2 とすると、 $E = V/r$ であるから、

$$F_2 = 2eE = \frac{2eV}{r}$$

オ：ウとエの解説に挙げた F_1 と F_2 が互いに相殺される場合であるから、

$$F_1 = F_2$$

よって、

$$2evB = \frac{2eV}{r}$$

$$v = \frac{V}{rB}$$

カ： ${}^4\text{He}^{2+}$ が正電場からの加速により得る運動エネルギーを E_4 、加速電圧の大きさを V_5 とすると、

$$E_4 = 2eV_5$$

今、 $V_5 = 5 [\text{MV}]$ であるから、

$$E_4 = 2 \times 5 = 10 [\text{MeV}]$$

キ：ベーテの式により衝突阻止能 S_{col} は

$$S_{col} = \frac{z^2 e^4}{4\pi\epsilon_0^2 m v^2} n Z \left\{ \ln \frac{2mv^2}{I(1-\beta^2)} - \beta^2 \right\}$$

と与えられる。ここで z と v はイオンの電荷と速度、 e は電気素量、 ϵ_0 は真空の誘電率、 m は電子の質量、 n は物質の原子密度、 Z は物質の原子番号、 I は原子の平均励起エネルギー、 $\beta = v/c$ 、 c は光速である。上式の括弧の中は非相対論的運動領域では変化が少ないので、

$$S_{col} \propto \frac{z^2 e^4}{m v^2} n Z$$

と表される。

ク： ${}^4\text{He}^{2+}$ はカの解説のとおり加速管内で10 MeVまで加速され、その後に金属薄膜で3.0 MeVのエネルギー損失を受けて空気中に7.0 MeVで引き出される。したがって、 $R = 0.318E^{\frac{3}{2}}$ に $E = 7.0$ [MeV]を代入して $R = 5.9$ [cm]が得られる。

問32 次の文章の□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。

β 壊変には、 β^- 壊変、 β^+ 壊変、及び□A□があり、いずれも弱い相互作用によって起こる。 β^- 壊変では電子と反ニュートリノが放出される。壊変エネルギーは、放出粒子の運動エネルギーに分配されるが、その割合は壊変ごとに異なるので、電子のエネルギーは連続分布となる。 β^+ 壊変では陽電子とニュートリノが放出される。陽電子のエネルギーも連続分布であるがその形状は β^- 線とは異なる。親核に関する原子の質量をX、生成核に関する原子の質量をYとすると、 β^+ 壊変における壊変エネルギーは、□B□と表される。ただし、 c は光速、 m は電子の質量である。□A□は、原子核の□C□が軌道電子と結合して□D□を放出する現象である。これにより軌道に空孔が生じ、そこへ外部軌道の電子が遷移した場合には、特性X線または□E□電子が放出される。□A□では最も内殻すなわちK殻にある電子が結合されやすい。これが起こると、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、特性X線(KX線)のエネルギーは□F□、放出される電子のエネルギーは□G□となる。

図に示すように、 ${}^{40}\text{K}$ は□A□により□H□に、あるいは β^- 壊変により□I□へと壊変する。これらの壊変に伴って、天然のカリウム3.91 g中に含まれる ${}^{40}\text{K}$ からは、毎秒□ア□個の γ 線及び毎秒□イ□個の β 線が放出され、 β 線の最大エネルギーは□ウ□MeVである。ただし、カリウムの原子量を39.1、 ${}^{40}\text{K}$ の同位体存在度を0.0117%とし、同位体の質量は表に示した。1 y = 3.2×10^7 sとする。

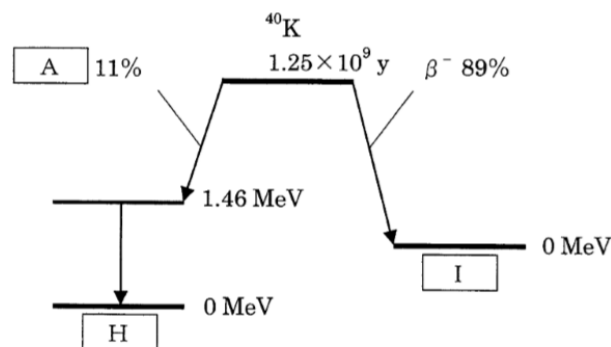


図 ${}^{40}\text{K}$ の壊変図

表 同位体の質量 (単位: u)

同位体	質量	同位体	質量	同位体	質量
^{39}Ar	38.964315	^{39}K	38.963708	^{40}Ca	39.962591
^{40}Ar	39.962383	^{40}K	39.963999	^{41}Ca	40.962278
^{41}Ar	40.964501	^{41}K	40.961825	^{42}Ca	41.958622

β 壊変と同様に電子を放出する過程に **J** があり、励起状態にある原子核がそのエネルギーを軌道電子に与えて放出する事象をいう。この過程は電磁相互作用として起こり、 γ 壊変の競合過程である。 ^{137}Cs が β 壊変して $^{137\text{m}}\text{Ba}$ が生成するとき、その確率を p 、 $^{137\text{m}}\text{Ba}$ の転移における全 γ 線放出光子数に対する **J** による全放出電子数の比を α_{T} 、K 軌道電子に対して起こる場合の比を α_{K} 、KX 線の放出される割合 (K 殻蛍光収率とよばれる) を ω_{K} とするとき、1 壊変あたりに KX 線の放出される確率は **エ** であり、662 keV の γ 線の放出される割合は **オ** となる。

<Aの解答群>

- 1 内部転換 2 核異性体転移 3 軌道電子捕獲 4 オージェ電子放出
5 電子対生成

<Bの解答群>

- 1 $(X-Y)c$ 2 $(X-Y)c^2$ 3 $(X-Y-m)c$
4 $(X-Y-m)c^2$ 5 $(X-Y-2m)c$ 6 $(X-Y-2m)c^2$
7 $(X-Y)mc$ 8 $(X-Y)mc^2$

<C～E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 オージェ 8 内部転換
9 反跳

<F、Gの解答群>

- 1 $E_{\text{L}}-E_{\text{K}}$ 2 E_{L} 3 $E_{\text{L}}-2E_{\text{K}}$ 4 $E_{\text{L}}+2E_{\text{K}}$ 5 $E_{\text{K}}-E_{\text{L}}$
6 $E_{\text{K}}+E_{\text{L}}$ 7 E_{K} 8 $E_{\text{K}}-2E_{\text{L}}$ 9 $E_{\text{K}}+2E_{\text{L}}$

<H、Iの解答群>

- 1 ^{39}Ar 2 ^{40}Ar 3 ^{41}Ar 4 ^{39}K 5 ^{41}K
6 ^{40}Ca 7 ^{41}Ca 8 ^{42}Ca

<ア～ウの解答群>

- 1 1.1 2 1.3 3 1.6 4 1.9 5 2.3
6 1.1×10^1 7 1.3×10^1 8 1.6×10^1 9 1.9×10^1 10 2.3×10^1
11 1.1×10^2 12 1.3×10^2 13 1.6×10^2 14 1.9×10^2 15 2.3×10^2

<Jの解答群>

- 1 内部転換 2 核異性体転移 3 軌道電子捕獲 4 オージェ電子放出
5 コンプトン効果 6 電子対生成

<エ、オの解答群>

$$\begin{array}{llll}
 1 & p \cdot \frac{\alpha_K}{\alpha_T} & 2 & p \cdot \frac{\alpha_K}{1+\alpha_T} & 3 & p \cdot \frac{1}{1+\alpha_T} & 4 & p \cdot \frac{\alpha_T}{1+\alpha_T} \\
 5 & p \cdot \frac{1+\alpha_K}{1+\alpha_T} & 6 & p \cdot \frac{\alpha_K}{\alpha_T} \cdot \omega_K & 7 & p \cdot \frac{\alpha_K}{1+\alpha_T} \cdot \omega_K & 8 & p \cdot \frac{1}{1+\alpha_T} \cdot \omega_K \\
 9 & p \cdot \frac{\alpha_T}{1+\alpha_T} \cdot \omega_K & 10 & p \cdot \frac{1+\alpha_K}{1+\alpha_T} \cdot \omega_K & & & &
 \end{array}$$

〔解答〕

A-3 B-6 C-1 D-5 E-7 F-5 G-8 H-2 I-6

ア-7 イ-11 ウ-2 J-1 エ-7 オ-3

注) B: β 壊変の壊変エネルギーは、壊変前後の全粒子の質量差で決まる。 β^+ 壊変の場合は、親核に関する原子が生成核に関する原子と陽電子とニュートリノになり、生成核の原子番号が親核に対し1だけ減るので軌道電子が1個あまり、壊変後の全粒子の質量は生成核に関する原子、電子2個、ニュートリノの分となる。ただし、ニュートリノの質量は0あるいは無視できるほど小さい。

ア: 天然のカリウム $3.91 \times 10^{-3} \text{ kg}$ 中に含まれる ^{40}K の壊変率を I 、原子数を N 、 ^{40}K の壊変定数を λ 、半減期を $T_{1/2}$ とすると、

$$I = \lambda N, \quad \lambda = \frac{0.693}{T_{1/2}}$$

ここで、問題の図より

$$T_{1/2} = 1.25 \times 10^9 [\text{y}] = (1.25 \times 10^9) \times (3.2 \times 10^7) [\text{s}] = 4.0 \times 10^{16} [\text{s}]$$

また、 ^{40}K の同位体存在度が 0.0117 % であることと、1 原子質量単位は $1 \text{ u} = 1.6605 \times 10^{-27} \text{ kg}$ であることから、問題の表にある ^{40}K の質量の値から、

$$N = 0.0117 \times 10^{-2} \times \frac{3.91 \times 10^{-3}}{39.963999 \times 1.6605 \times 10^{-27}} = 6.89 \times 10^{18}$$

したがって、

$$I = \frac{0.693}{T_{1/2}} N = \frac{0.693}{4.0 \times 10^{16}} \times 6.89 \times 10^{18} [\text{s}^{-1}] = 1.19 \times 10^2 [\text{s}^{-1}]$$

問題の図より、 ^{40}K が β^- 壊変する場合には、 ^{40}Ca の基底状態となるので γ 線を放出しないことがわかる。したがって、 ^{40}K が軌道電子捕獲により ^{40}Ar の励起状態になる場合（その確率は 11 %）にのみ γ 線が放出されるから、 γ 線の放出率は、

$$0.11 \times I = 0.11 \times 1.19 \times 10^2 [\text{s}^{-1}] = 1.3 \times 10^1 [\text{s}^{-1}]$$

イ: 問題の図より、 ^{40}K が β^- 壊変して ^{40}Ca になる場合（その確率は 89 %）にのみ β 線が放出

されることがわかる。 β 線の放出率は、アの解説と同様に考えて、

$$0.89 \times I = 0.89 \times 1.19 \times 10^2 [\text{s}^{-1}] = 1.1 \times 10^2 [\text{s}^{-1}]$$

ウ： β 壊変の壊変エネルギーは壊変前後の全粒子の質量差で決まり、 β^- 壊変の場合は親核に関する原子が生成核に関する原子と電子と反ニュートリノになる。生成核の原子番号は親核に対し1だけ増えるので、 β 線として放出された電子を考えると、壊変後の全粒子の質量は生成核に関する原子と反ニュートリノの分となる。ただし、反ニュートリノの質量は0あるいは無視できるほど小さい。

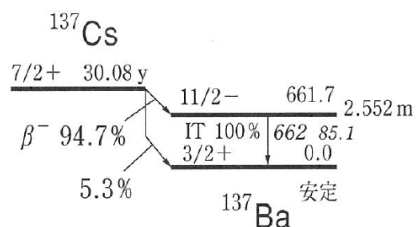
β^- 壊変で放出される β 線の最大エネルギーはこの壊変エネルギーに等しいから、親核および生成核に関する質量をそれぞれ X および Y とすると

$$(X - Y)c^2$$

となる。つまりこの問題の場合には、親核種である ^{40}K と娘核種である ^{40}Ca の質量エネルギー（静止エネルギー）の差に相当する。1原子質量単位（1u）を静止エネルギーに換算すると931.5 MeVであることから、問題の表の質量の値より、 β 線の最大エネルギーは

$$(39.963999 - 39.962591) \times 931.5 [\text{MeV}] = 1.3 [\text{MeV}]$$

エ： $^{137\text{m}}\text{Ba}$ が転移するとき、 γ 線放出と内部転換電子の放出は競合過程であり、どちらかの放出が起こる。



(アイソトープ手帳(12版) 日本アイソトープ協会)

γ 線を放出する割合を I_γ 、内部転換電子を放出する割合を I_e とすると、

$$\alpha_T = \frac{I_e}{I_\gamma}$$

$^{137\text{m}}\text{Ba}$ の転移において内部転換電子が放出される割合は、

$$\frac{I_e}{I_\gamma + I_e} = \left(\frac{I_\gamma + I_e}{I_e} \right)^{-1} = \left(\frac{1}{\alpha_T} + 1 \right)^{-1} = \frac{\alpha_T}{1 + \alpha_T}$$

と表される。よって $^{137\text{m}}\text{Ba}$ の転移において内部転換がK軌道電子に対して起こる割合は、

$$\frac{\alpha_T}{1 + \alpha_T} \times \frac{\alpha_K}{\alpha_T} = \frac{\alpha_K}{1 + \alpha_T}$$

であり、更にその内KX線の放出される割合は

$$\frac{\alpha_K}{1 + \alpha_T} \cdot \omega_K$$

と表される。 ^{137}Cs が壊変して $^{137\text{m}}\text{Ba}$ が生成する確率は p （上図の壊変図式では $p = 94.4\%$ と示されている）であるから、 ^{137}Cs の1壊変当たりにKX線の放出される確率は

$$p \cdot \frac{\alpha_K}{1 + \alpha_T} \cdot \omega_K$$

と表される。

オ：上図の壊変図式に示される通り、662 keV の γ 線の放出は、 $^{137\text{m}}\text{Ba}$ が転移する際の γ 線放出過程で起こる。その放出割合は、エの解説により、

$$\frac{I_\gamma}{I_\gamma + I_e} = \left(\frac{I_\gamma + I_e}{I_\gamma} \right)^{-1} = (1 + \alpha_T)^{-1} = \frac{1}{1 + \alpha_T}$$

と表される。 ^{137}Cs が壊変して $^{137\text{m}}\text{Ba}$ が生成する確率は p (上図の壊変図式では $p = 94.4\%$ と示されている) であるから、 ^{137}Cs の 1 壊変あたりに 662 keV の γ 線の放出される割合は、

$$p \cdot \frac{1}{1 + \alpha_T}$$

と表される。