

令和4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4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 質量 m の粒子が光速 c の $1/2$ の速度で運動しているときの全エネルギーとして、正しいものは次のうちどれか。

- 1 mc^2 2 $\frac{2}{\sqrt{3}}mc^2$ 3 $2mc^2$ 4 $2\sqrt{3}mc^2$ 5 $4mc^2$

〔解答〕 2

〔解説〕 質量 m 、速さ v で運動する物体の相対論的エネルギーは $E = mc^2/\sqrt{1-v^2/c^2}$ と表される。
 $v=c/2$ のとき、

$$E = \frac{mc^2}{\sqrt{1-\frac{1}{4}}} = \frac{2mc^2}{\sqrt{3}}$$

となる。

問2 X線発生装置の管電圧を120 kVとしたときに発生するX線の最短波長[nm]として、最も近い値は次のうちどれか。ただし、プランク定数は $6.6 \times 10^{-34} \text{ J} \cdot \text{s}$ とする。

- 1 1.0×10^{-3} 2 5.0×10^{-3} 3 1.0×10^{-2} 4 5.0×10^{-2} 5 1.0×10^{-1}

〔解答〕 3

〔解説〕 120 kV で加速された電子のエネルギーは $E = 120 \text{ keV}$ であり、X線の最大エネルギーに対応する。光子の波長とエネルギーは $E = hc/\lambda$ なので、

$$\lambda = \frac{hc}{E} = \frac{6.6 \times 10^{-34} \times 3 \times 10^8}{120 \times 1000 \times 1.6 \times 10^{-19}} = 1.0 \times 10^{-2} \text{ nm}$$

となる。

問3 次の記述のうち、誤っているものはどれか。

- 1 中性子の質量は陽子の質量より大きい。
- 2 中性子のスピンは0である。
- 3 鉄の安定な同位体では原子核内の中性子数は陽子数より多い。
- 4 重陽子の質量は陽子の質量の2倍よりも小さい。
- 5 原子核の半径は質量数の3分の1乗に比例する。

〔解答〕 2

(令和4年度) 第1種物理学

〔解説〕

- 1: 正 中性子の質量は 1.674927×10^{-27} kg で陽子の質量 1.672621×10^{-27} kg より大きい。
2: 誤 中性子のスピンは $1/2$ である。
3: 正 原子核は、陽子と中性子の数が等しいとき ($A/Z=2.0$) 安定になる性質をもつが、陽子の数が多くなると陽子同士のクーロン反発力のため、中性子の数が陽子の数より大きくなる ($A/Z > 2.0$)。
4: 正 中性子の質量は陽子の質量より大きく、陽子と中性子の結合によって質量欠損が生じるため、重陽子の質量は陽子の質量の2倍より小さくなる。
5: 正 原子核の密度は質量数によらず、どんな原子核でもほぼ等しい。このため原子核の半径は質量数(体積)の $1/3$ 乗に概ね比例する。

問4 放射性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 陽子は原子核外で壊変しない。
B 中性子は原子核外で壊変しない。
C 原子核内の中性子は β^+ 壊変して陽子になることがある。
D 原子核内の陽子は電子捕獲して中性子になることがある。
E 原子核内の中性子数は、 α 壊変が起きると2減少する。

- 1 ABEのみ 2 ACDのみ 3 ADEのみ 4 BCDのみ 5 BCEのみ

〔解答〕 3

〔解説〕

- A: 正 陽子は原子核外で安定である。
B: 誤 中性子は原子核外で613.9sの半減期で β^- 壊変する。
C: 誤 中性子過剰核では中性子は β^- 壊変して陽子になることがある。
D: 正 原子核内の陽子は軌道電子を捕獲して中性子になることがある(EC壊変)。
E: 正 α 壊変では α 粒子が中性子を2個持ち出す。

問5 次の記述のうち、正しいものの組合せはどれか。

- A ^{11}C は ^{11}B の鏡映核である。
B ^{43}K は ^{45}Sc の同中性子体である。
C ^{90}Sr は ^{90}Y の核異性体である。
D ^{90}Sr は ^{90}Zr の同重体である。
E ^{144}Ce はセリウムの安定同位体である。

- 1 ABDのみ 2 ABEのみ 3 ACDのみ 4 BCEのみ 5 CDEのみ

〔解答〕 1

〔解説〕

(令和4年度) 第1種物理学

- A : 正 ^{11}C ($Z=6, N=5$) と ^{11}B ($Z=5, N=6$) は鏡映核 (Z と N の組み合わせが逆) である。
B : 正 ^{43}K ($Z=19, N=24$) と ^{45}Sc ($Z=21, N=24$) は同中性子体である。
C : 誤 同重体である。なお、核異性体とは原子番号・質量数が等しいが異なるエネルギー状態にあるものを指す。
D : 正 ^{90}Sr と ^{90}Zr は質量数が等しく、同重体である。
E : 誤 ^{144}Ce は放射性核種 (半減期 284.91 d) である。なお、安定同位体は ^{136}Ce , ^{138}Ce , ^{140}Ce , ^{142}Ce である。

問6 陽電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。

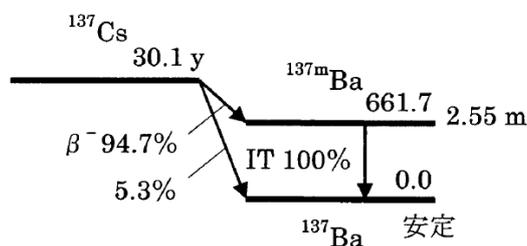
- A 真空中で陽電子は安定である。
B 陽電子と電子でポジトロニウムをつくる。
C 消滅放射線のエネルギーは、ドップラー効果により広がりを持つ。
D 電子対消滅では、3個の消滅放射線を放出することがある。
1 ABCのみ 2 ABDのみ 3 ACDのみ 4 BCDのみ 5 ABCDすべて

〔解答〕 5

〔解説〕

- A : 正 真空中で陽電子は安定である。
B : 正 陽電子と電子は 6.8 eV で結合して水素様原子であるポジトロニウムを作る。
C : 正 対消滅時の重心運動量のためにドップラー効果が生じ、スペクトルは広がりを持つ。
D : 正 3個以上の消滅放射線を生じることもある。

問7 1.0 MBq の ^{137}Cs 線源から放出される 661.7 keV 光子の毎秒の平均個数 [s^{-1}] として、最も近い値は次のうちどれか。ただし、 $^{137\text{m}}\text{Ba}$ の内部転換係数を 0.11 とする。



- 1 1.0×10^6 2 9.5×10^5 3 8.9×10^5 4 8.5×10^5 5 5.3×10^4

〔解答〕 4

〔解説〕 $^{137\text{m}}\text{Ba}$ への壊変は ^{137}Cs の壊変の 94.7% で、核異性体転移 (IT) が 100%、 $^{137\text{m}}\text{Ba}$ の内部転換係数 (= 内部転換電子の放出数 / ガンマ線の放出数) が 0.11 だから、毎秒の平均光子数は $1.0 \times 10^6 \times 0.947 / (1 + 0.11) = 8.5 \times 10^5$ 個である。

問8 次の記述のうち、正しいものの組合せはどれか。

- A 電子捕獲ではニュートリノは放出されない。
- B 電子捕獲を起こす核種は γ 線を放出しない。
- C 電子捕獲に引き続き特性 X 線またはオージェ電子が放出される。
- D β^+ 壊変は電子捕獲と競合して起こる。

- 1 AとB 2 AとC 3 BとC 4 BとD 5 CとD

〔解答〕 5

〔解説〕

- A：誤 電子捕獲では原子番号が一つ減少し、同時にニュートリノが放出される。
- B：誤 電子捕獲後の原子核は励起状態を経て基底状態に至ることがあり、この際 γ 線が放出される。
- C：正 内殻電子が原子核に電子捕獲されることで、特性 X 線やオージェ電子が放出される。
- D：正 β^+ 壊変は常に電子捕獲壊変と常に競合して起こる。

問9 サイクロトロンにおいて、磁束密度 B の磁場のもとで円運動する荷電粒子（電荷 q 、速度 v 、質量 m ）の角速度として正しいものは、次のうちどれか。

- 1 qvB 2 $\frac{2\pi m}{qB}$ 3 $\frac{qB}{m}$ 4 $\frac{mv}{qB}$ 5 $\frac{qB}{2\pi m}$

〔解答〕 3

〔解説〕 磁束密度 B の磁場のもとで円運動する荷電粒子は、ローレンツ力 qvB が向心力として働くので、 $mv^2/r = qvB$ である。角速度は $\omega = v/r = qB/m$ となる。

問10 タンデム方式ファン・デ・グラーフ型加速器において通常は使用されないものの組合せとして、正しいものは次のうちどれか。

- A 荷電交換膜
- B 負イオン源
- C 交流電磁石
- D デイヤー電極
- E 絶縁ベルト(絶縁チェーン)

- 1 AとB 2 AとE 3 BとD 4 CとD 5 CとE

〔解答〕 4

〔解説〕 ファン・デ・グラーフ型加速器では、絶縁ベルトに電荷を乗せて一方の電極に運び込む。タンデム方式では、負イオンを加速して荷電交換膜で電子を剥ぎ取り、正イオンをさらに加速する。

問11 熱中性子による ${}^2\text{H}(n, \gamma){}^3\text{H}$ 反応で放出される γ 線のエネルギー[MeV]として、最も近い値は次のうちどれか。ただし、 n 、 ${}^2\text{H}$ 、及び ${}^3\text{H}$ の質量(原子質量単位)をそれぞれ 1.00866 u、2.01410 u、及び 3.01605 u とする。

- 1 0.511 2 1.02 3 2.20 4 4.30 5 6.25

〔解答〕 5

〔解説〕 γ 線として放出されるエネルギーは、反応前の核種 (n 、 ${}^2\text{H}$) と反応後の核種 (${}^3\text{H}$) の質量差 [u] を、質量 (m) とエネルギー (E) の関係式 $E=mc^2$ からエネルギーに変換し、求めることができる。原子質量単位[u]とエネルギー[MeV]の変換は、 $1 \text{ u} = 932 \text{ MeV}/c^2$ の関係を使う。ただし、 c は光速を示す。

$$\begin{aligned} (\text{反応前後の質量差}) &= 1.00866 + 2.01410 - 3.01605 = 0.00671 \text{ u} \\ (\gamma \text{ 線のエネルギー [MeV]}) &= (\text{反応前後の質量差 [u]}) \times c^2 \times (932 \text{ MeV}/c^2) \\ &= (0.00671 \text{ u}) \times c^2 \times (932 \text{ MeV}/c^2) = 6.25 \text{ MeV} \end{aligned}$$

なお、 $1 \text{ u} = 932 \text{ MeV}/c^2$ の代わりに、(核子質量) $\approx 1 \text{ u} \approx 940 \text{ MeV}/c^2$ を使って、6.3 MeV と概算することもできる。

問12 励起状態にある複合核が2つの原子核 A (質量 M_a) と原子核 B (質量 M_b) に分裂したとき、それぞれの運動エネルギーを E_a 、 E_b とすると、 E_a/E_b と等しいものは、次のうちどれか。ただし、複合核は静止しているものとし、原子核は非相対論的に運動するものとする。

- 1 $\frac{M_a}{M_b}$ 2 $\frac{M_b}{M_a}$ 3 $\sqrt{\frac{M_a}{M_b}}$ 4 $\sqrt{\frac{M_b}{M_a}}$ 5 $\left(\frac{M_a}{M_b}\right)^2$

〔解答〕 2

〔解説〕 分裂後、2つの原子核は180度方向に飛んでいく。それぞれの速さを V_a 、 V_b とすると、運動量保存則から、

$$M_a V_a = M_b V_b$$

運動エネルギーの比は、

$$\frac{E_a}{E_b} = \frac{\frac{1}{2} M_a V_a^2}{\frac{1}{2} M_b V_b^2} = \frac{M_b M_a^2 V_a^2}{M_a M_b^2 V_b^2} = \frac{M_b}{M_a}$$

となる。

問13 加速器施設において最大エネルギー15 MeV の中性子により放射化されたステンレス管からの γ 線スペクトルを Ge 半導体検出器を用いて測定したところ、122 keV、511 keV、811 keV、835 keV 付近に主なピークが見られた。このときに測定により確認されたステンレス管中の放射

性核種として、正しいものの組合せは次のうちどれか。

- A ${}^7\text{Be}$
- B ${}^{54}\text{Mn}$
- C ${}^{57}\text{Co}$
- D ${}^{58}\text{Co}$

- 1 ABCのみ 2 ABのみ 3 ADのみ 4 CDのみ 5 BCDのみ

〔解答〕 5

〔解説〕 選択肢の ${}^7\text{Be}$ 、 ${}^{54}\text{Mn}$ 、 ${}^{57}\text{Co}$ 、 ${}^{58}\text{Co}$ の半減期と壊変に伴い放出される主な γ 線は、それぞれ (53 d, 478 keV)、(312 d, 835 keV)、(271 d, 122 keV)、(71 d, 811 keV) である。また、 ${}^{58}\text{Co}$ は β^+ 壊変も起こすため消滅 γ 線 (511 keV) も検出される。ステンレスの主成分は鉄 (${}^{54}\text{Fe}$ (6%)、 ${}^{56}\text{Fe}$ (91%)、 ${}^{57}\text{Fe}$ 、 ${}^{58}\text{Fe}$)、クロム (${}^{50}\text{Cr}$ 、 ${}^{52}\text{Cr}$ (84%)、 ${}^{53}\text{Cr}$ 、)、ニッケル (${}^{58}\text{Ni}$ (68%)、 ${}^{60}\text{Ni}$ 、 ${}^{61}\text{Ni}$ 、 ${}^{62}\text{Ni}$ 、 ${}^{64}\text{Ni}$) である。 ${}^7\text{Be}$ を生成するには中性子のエネルギーが低すぎ、また γ 線も検出されていない。 ${}^{54}\text{Mn}$ 、 ${}^{57}\text{Co}$ 、 ${}^{58}\text{Co}$ は、それぞれ主な γ 線が検出されており、また中性子のエネルギー 15 MeV と十分高いため ${}^{54}\text{Fe}(n,p){}^{54}\text{Mn}$ 、 ${}^{58}\text{Ni}(n,p){}^{57}\text{Co}$ 、 ${}^{58}\text{Ni}(n,p){}^{58}\text{Co}$ などで生成することができる。

問 14 屈折率が 1.5 のガラス中でチェレンコフ光を発生させる電子の最小エネルギー [MeV] として、最も近い値は次のうちどれか。

- 1 0.10 2 0.14 3 0.18 4 0.22 5 0.26

〔解答〕 3

〔解説〕 チェレンコフ光を発生させる最小エネルギーをもつ電子の速さ (v) は、ガラス中の光の速さ (c/n) と等しい。相対論によると、エネルギー (E) は、

$$E = \frac{m_0 c^2}{\sqrt{1 - \beta^2}}$$

となる。 m_0 は電子の静止質量、 $\beta = v/c$ 。この間でのエネルギーは「運動エネルギー」と考えられるので、 E から電子の静止エネルギー ($m_0 c^2$) を引いた運動エネルギー K は、

$$K = \frac{m_0 c^2}{\sqrt{1 - \beta^2}} - m_0 c^2$$

となる。 $m_0 c^2 = 0.511 \text{ MeV}$ 、 $\beta = 1/n = 1/1.5$ を代入すると、

$$K = 0.511 \left(\frac{1}{\sqrt{1 - 1/1.5^2}} - 1 \right) = 0.511 \left(\frac{3\sqrt{5}}{5} - 1 \right) \approx 0.511 \left(\frac{3 \times 2.24}{5} - 1 \right) \cong 0.175 \text{ MeV}$$

問 15 気体の W 値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 希 (貴) ガスでは、原子番号が大きいほど W 値は大きい。
- B W 値は、気体のイオン化エネルギーより大きい。
- C 入射放射線のエネルギーが 2 倍になると W 値も約 2 倍となる。

(令和4年度) 第1種物理学

D 空気の W 値は、ヘリウムの W 値よりも小さい。

- 1 A と B 2 A と C 3 B と C 4 B と D 5 C と D

〔解答〕 4

〔解説〕 気体が荷電粒子により電離されるとき、荷電粒子が失ったエネルギーを生成したイオンと自由電子の対の数で割った値を W 値という。W 値は 30 eV 程度であり、気体のイオン化エネルギー（ ~ 10 eV）より大きいので、B は正しい。気体のイオン化エネルギーが大きくなると W 値も大きくなる。希ガスでは原子番号が大きくなるに従いイオン化エネルギーが小さくなる。このため W 値は原子番号が大きくなるに従い小さくなるので、A は正しくない。ヘリウムのイオン化エネルギー（24.6 eV）は空気のイオン化エネルギーより大きいので、D は正しい。W 値は電子や陽子では入射エネルギーによらずほとんど一定の値をもつので、C は正しくない。

問 16 光子と物質との相互作用に関する次の記述のうち、正しいものはどれか。

- 1 光電効果は外殻の電子で生じる確率が大きい。
- 2 光電効果は自由電子に対しても起きる。
- 3 コンプトン散乱の断面積は物質の原子番号に比例する。
- 4 電子対生成の断面積は物質の原子番号に比例する。
- 5 1 MeV の光子は鉄との光核反応で中性子を放出する。

〔解答〕 3

〔解説〕 光電効果では、 γ 線が軌道電子に吸収されるが、光子の運動量の一部が原子核に与えられて運動量が保存する。このため、原子核との結合が強い内殻の電子の方が光電効果を起こす確率が大きいので、1 は正しくない。 γ 線が自由電子に吸収され光電効果を起こす場合、運動量とエネルギー保存を同時に満たさないため、光電効果は自由電子に対してはおきかないため、2 は正しくない。コンプトン散乱の原子断面積は原子番号に比例するので、3 は正しい。電子対生成の断面積は、ほぼ原子番号の二乗に比例するので、4 は正しくない。原子核中の核子 1 個あたりの結合エネルギーはおおよそ 8 MeV であり、1 MeV の光子では核子を原子核から取り出せない。つまり、光核反応により中性子を放出させることはできないので、5 は正しくない。

問 17 1.25 MeV の光子における線減弱係数と線エネルギー転移係数とが異なる要因として、正しいものの組合せは次のうちどれか。

- A 電子-陽電子対の生成
- B コンプトン散乱光子の放出
- C 軌道電子の結合エネルギー
- D 二次電子の放射エネルギー損失

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

〔解答〕 1

〔解説〕 微小距離を光子が進んだとき、光子フルエンスとエネルギーフルエンスの減少は、それぞれ光子フルエンスとエネルギーフルエンスに比例し、この時の比例定数をそれぞれ線減弱係数と線エネルギー転移係数という。エネルギー転移では、光子のエネルギーが電子に与えられるが、電子対生成では生成した陽電子の対消滅 γ 線は物質外に放出され、対消滅 γ 線のエネルギーは物質中の電子には転移しないので2つの係数が異なる要員となり、Aは正しい。コンプトン散乱光子も物質外に放出されるので、同様にBも正しい。軌道電子の結合エネルギーはX線として放出され物質外にも放出されるので、同様にCも正しい。二次電子は、光子から軌道電子へエネルギーが転移した後の現象でエネルギー転移には関係ないので、Dは正しくない。

問 18 次の記述のうち、正しいものの組合せはどれか。

- A コンプトン効果は光子の粒子性を示す現象である。
- B コンプトン効果は干渉性散乱である。
- C コンプトン効果に対する質量減弱係数は物質の電子密度に比例する。
- D コンプトン効果は生体組織の吸収線量に寄与しない。

- 1 AとB 2 AとC 3 BとC 4 BとD 5 CとD

〔解答〕 2

〔解説〕 電子の静止エネルギーと同程度のエネルギーをもつ電磁波は、電子との散乱の際に粒子のように振る舞い、電子に運動量を与えコンプトン散乱と呼ばれる非弾性散乱を起こす。コンプトン効果は光子がエネルギーと運動量をもった粒子として電子と散乱する現象であり、Aは正しい。コンプトン散乱では、電子に運動量を与えるため、散乱波は長波長（低エネルギー）にシフトする。このため入射波と散乱波は干渉せず、Bは正しくない。コンプトン散乱の断面積は原子番号（ Z ）に比例し、線減弱係数（ μ_{σ} ）は Z と単位体積あたりの原子数（ N ）、すなわち物質の電子密度に比例する。一方、コンプトン効果に対する質量減弱係数（ $\mu_{m\sigma}$ ）は次のように概算できる。

$$\mu_{m\sigma} = \frac{\mu_{\sigma}}{\rho} \propto \frac{ZN}{\rho} = \frac{Z \frac{\rho}{A} N_A}{\rho} = \frac{Z}{A} N_A$$

ここで、 A は質量数、 N_A はアボガドロ数である。したがってCは正しい。ただし、 Z/A は物質によってあまり変化しない量なので、質量減弱係数は物質にあまり依存しない値となる。いくつかの物質について電子密度依存性を図1に示すと、質量減弱係数は電子密度に対してほぼ一定の値をもち、線減弱係数は電子密度に比例することがわかる。そのため、設問C中の「質量減弱係数」は「線減弱係数」とした方がより適切である。

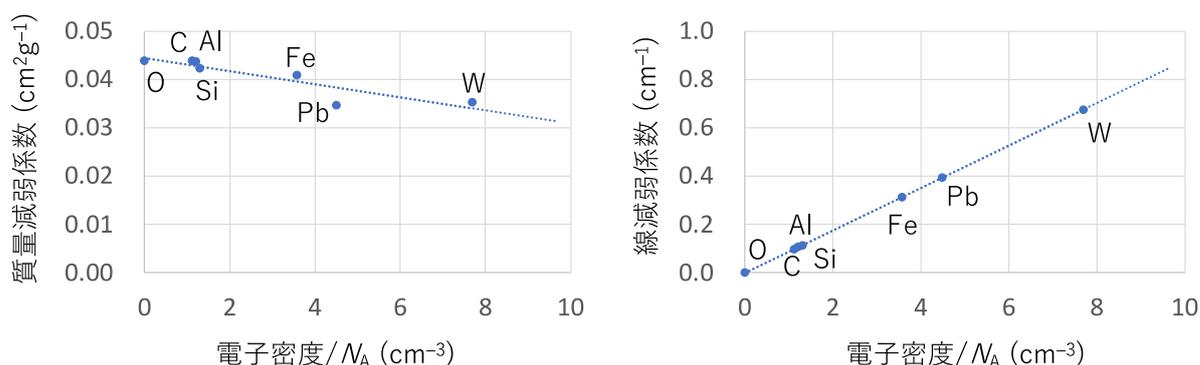


図1 2 MeV の光子に対する質量減弱係数と線減弱係数の電子密度依存性。 N_A はアボガドロ数。アイソトープ手帳 (社団法人日本アイソトープ協会) のデータを使用し作成した。

コンプトン散乱では、電子に運動量を与え吸収線量に寄与するので、D は正しくない。

問19 1.0 MeV の γ 線が検出器に入射し、 90° 方向にコンプトン散乱された後、さらに 180° 方向にコンプトン散乱され、検出器外へ逃げるとする。検出器に付与されるエネルギー [MeV] として、最も近い値は次のうちどれか。

- 1 0.15 2 0.35 3 0.55 4 0.70 5 0.85

〔解答〕 5

〔解説〕 エネルギー (E_γ) の光子により散乱された電子のエネルギー (E_e) は、光子の散乱角度を ϕ 、電子の静止エネルギーを $mc^2 = 0.511 \text{ MeV}$ とすると、

$$E_e = \frac{E_\gamma}{1 + mc^2/E_\gamma(1 - \cos\phi)}$$

で与えられる。光子が 90° 方向にコンプトン散乱されたときの電子のエネルギーは、

$$E_e = \frac{E_\gamma}{1 + mc^2/E_\gamma(1 - \cos 90^\circ)} = \frac{1.0}{1 + 0.511/1.0} = 0.66 \text{ MeV}$$

散乱された光子が 180° 方向にコンプトン散乱されたときの電子のエネルギーは、

$$E_e = \frac{E_\gamma - 0.66}{1 + mc^2/(E_\gamma - 0.66)(1 - \cos 180^\circ)} = \frac{0.34}{1 + 0.511/0.34/2} = 0.19 \text{ MeV}$$

したがって、検出器に付与されるエネルギーは、 $0.66 + 0.19 = 0.85 \text{ MeV}$

問20 熱中性子の検出に用いられる ${}^6\text{Li}$ の (n, α) 反応において、 ${}^6\text{Li}$ と n の質量の合計が 7.02379 u 、生成核の質量の合計が 7.01865 u であるとき、 α 粒子に与えられるエネルギー [MeV] として、最も近い値は次のうちどれか。

- 1 1.8 2 2.1 3 2.4 4 2.7 5 3.0

〔解答〕 2

〔解説〕 (n, α) 反応により ${}^3\text{H}$ が生成する。この反応の Q 値は、 $1\text{ u} = 932\text{ MeV}/c^2$ を使うと

$$Q = (7.02379 - 7.01865) \times 932 = 4.79\text{ MeV}$$

となる。反応前の n は熱中性子で、検出器中の ${}^6\text{Li}$ は静止しているので反応前の運動エネルギーの和は Q 値と比べて無視できる。 α 粒子と ${}^3\text{H}$ は、 Q 値を運動量保存則とエネルギー保存則に従い分け合う。エネルギーの比率は、問12で計算した励起状態にある複合核の場合と同様と見なせるので、問12の答えが使える。つまり、 α 粒子と ${}^3\text{H}$ は Q 値を $M_{\text{H-3}} : M_{\alpha}$ の比で分け合う。 α 粒子に与えられるエネルギー (E_{α}) は、

$$E_{\alpha} = \frac{M_{\text{H-3}}}{M_{\alpha} + M_{\text{H-3}}} Q = \frac{3}{7} \times 4.79 = 2.05\text{ MeV}$$

問21 次の中性子検出器のうち、主に弾性散乱を利用するものの組合せはどれか。

- A BF_3 比例計数管
- B 有機液体シンチレーション検出器
- C 中性子用熱ルミネセンス線量計
- D 高速中性子用固体飛跡検出器

- 1 AとB 2 AとC 3 BとC 4 BとD 5 CとD

〔解答〕 4

〔解説〕 検出の際の反応を問う問題である。弾性散乱を利用する場合は、中性子により反跳される陽子を検出する。そのため、エネルギーの高い中性子に対する検出器が該当する。選択肢の中で高速中性子を検出するための検出器は B. 有機液体シンチレーション検出器および D. 高速中性子用固体飛跡検出器である。そのため選択肢は4が正しい。Aの BF_3 比例計数管は質量数10のホウ素の熱中性子捕獲反応 ${}^{10}\text{B}(n, \alpha)$ を利用する。Cの中性子用熱ルミネセンス線量計は様々な種類があるが、主に熱中性子に対する ${}^6\text{Li}(n, \alpha)$ を利用する。

問22 次の記述のうち、正しいものの組合せはどれか。

- A 10 MeV は $1 \times 10^7\text{ eV}$ である。
- B 100 ps は $1 \times 10^{-10}\text{ s}$ である。
- C 10 TBq は $1 \times 10^{11}\text{ Bq}$ である。
- D 100 nGy は $1 \times 10^{-8}\text{ Gy}$ である。

- 1 AとB 2 AとC 3 BとC 4 BとD 5 CとD

〔解答〕 1

〔解説〕 10の整数乗を表すSI接頭語に関する問題である。主なものは以下の通りである。

p	n	μ	m	k	M	G	T
ピコ	ナノ	マイクロ	ミリ	キロ	メガ	ギガ	テラ
10^{-12}	10^{-9}	10^{-6}	10^{-3}	10^3	10^6	10^9	10^{12}

AとBは正しい。Cの10 TBqは 1×10^{13} Bqであるため誤り。Dの100 nGyは 1×10^{-7} Gyであるため誤り。よって選択肢は1が正しい。

問23 次の記述のうち、正しいものの組合せはどれか。

- A 陽電子に対して、カーマは適用できない。
- B X線に対して、カーマを適用できる。
- C 間接電離放射線に対して、吸収線量は適用できない。
- D 中性子に対して、照射線量を適用できる。

- 1 AとB 2 AとC 3 BとC 4 BとD 5 CとD

〔解答〕1

〔解説〕カーマは非荷電粒子が単位質量あたりに生じさせる荷電粒子の運動エネルギーの初期値の総和を、質量で除したものである。非荷電粒子（光子、中性子）に対して定義されているため、AとBは正しい。吸収線量は電離放射線が単位質量あたりの物質に付与する平均エネルギーである。間接電離放射線も電離放射線に含まれるため、Cは誤り。照射線量は単位質量あたりの空気と光子が相互作用して生成した二次電子が完全に停止するまでに作る正電荷量または負電荷量の絶対値である。光子のみに定義されているので、Dは誤り。よって選択肢は1が正しい。

問24 次の記述のうち、誤っているものはどれか。

- 1 放射化検出器は中性子の検出に用いられる。
- 2 TLDでは紫外線刺激による発光現象を利用する。
- 3 シンチレーション検出器は放射線の蛍光作用を利用する。
- 4 電離箱式の照射線量計では電離箱内の空気につくられたイオンの飽和電流を測る。
- 5 GM計数管は計数ガス中に生じた電子をガス増幅することで大きな出力パルスを生み出す。

〔解答〕2

〔解説〕TLDは熱蛍光線量計（Thermoluminescent Dosimeter）の略称である。加熱したときに放出される蛍光を利用するものであり、選択肢は2が誤りである。

問25 同一の条件で試料Aと試料Bからの放射線をそれぞれ測定した。バックグラウンドを差し引いて得た計数率は、試料Aが $1,200 \pm 36$ cpm、試料Bが 600 ± 24 cpmであった。試料Aと試料Bの計数率の比2.0の値に対する誤差（標準誤差）を示す数値として、最も近い値は次のうちどれか。

- 1 0.05 2 0.07 3 0.08 4 0.10 5 0.15

〔解答〕4

〔解説〕 誤差の伝搬に関する問である。数値 A, B に付いている誤差をそれぞれ a, b とすると、四則演算に関する誤差伝搬は以下の通りである。

$$(A \pm a) \pm (B \pm b) = (A \pm B) \pm \sqrt{a^2 + b^2}$$

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

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

試料 A と試料 B の計数率の比は、

$$\frac{(1200 \pm 36)}{(600 \pm 24)} = \frac{1200}{600} \pm \frac{1200}{600} \sqrt{\left(\frac{36}{1200}\right)^2 + \left(\frac{24}{600}\right)^2}$$

$$= 2 \pm 2 \sqrt{\left(\frac{3}{100}\right)^2 + \left(\frac{4}{100}\right)^2}$$

$$= 2 \pm 0.1$$

となる。よって選択肢 4 が正しい。

問 26 ^{60}Co からの 1,332 keV γ 線に対する Ge 検出器の理論的な半値幅 FWHM[keV]として、最も近い値は次のうちどれか。ただし、ファノ因子 (Fano factor) を 0.1 とし、ゲルマニウムの $W(\varepsilon)$ 値を 2.96 eV とする。

- 1 0.63 2 1.5 3 2.8 4 3.8 5 5.0

〔解答〕 2

〔解説〕 ファノ因子は、実際に測定される分散を統計から予測される分散 (平均値) で除したものであり、実際の検出器の分解能と統計精度のズレを示している。ファノ因子 F は実際に測定される分散を σ^2 , 統計から予測される平均値 (ここでは電子-正孔対数) を N とすると、以下の式で表せる。

$$F = \frac{\sigma^2}{N}$$

エネルギー E_γ の γ 線が Ge 検出器内で生成する電子-正孔対は全てのエネルギーが電子-正孔対生成に使われるとすると平均で $E_\gamma/W(\varepsilon)$ となる。よって、

$$\sigma = \sqrt{\frac{F \cdot E_\gamma}{W(\varepsilon)}} \text{ [電子正孔対]} = \sqrt{F \cdot E_\gamma \cdot W(\varepsilon)} \text{ [eV]}$$

となる。 $FWHM = 2\sqrt{2 \ln 2} \sigma$ の関係より、

$$FWHM = 2\sqrt{2 \ln 2} \sqrt{F \cdot E_\gamma \cdot W(\varepsilon)}$$

$$\sim 2.35 \times \sqrt{0.1 \times 1332000 \times 3}$$

$$= 2.35 \times \sqrt{0.1 \times 3996000}$$

$$\sim 2.35 \times 0.32 \times 2000$$

$$= 1504 \text{ [eV]}$$

よって、選択肢2が正しい。

問27 ある気体が充填されている電離箱に100 kBqのトリチウムガスを注入したとき、3.4 pAの飽和電流が得られた。充填されている気体のW値[eV]として、最も近い値は次のうちどれか。ただし、トリチウムから放出されるβ線の平均エネルギーは5.7 keVであり、すべてが気体中で吸収されるものとする。

- 1 21 2 24 3 27 4 30 5 33

〔解答〕3

〔解説〕飽和電流が3.4 pAであることより、1秒あたりに生成する電子-イオン対は電気素量を

$1.6 \times 10^{-19} \text{ C}$ とすると、 $3.4 \text{ [pA]} = 3.4 \times 10^{-12} \text{ [C/s]} = 2.1 \times 10^7 \text{ [個/s]}$ となる。また、1秒あたり

に気体で吸収されるエネルギーは $1 \times 10^5 \text{ [Bq]} \times 5.7 \times 10^3 \text{ [eV]} = 5.7 \times 10^8 \text{ [eV/s]}$ である。よって、気体のW値は、

$$W = \frac{5.7 \times 10^8}{2.1 \times 10^7} \approx 27.1$$

よって選択肢3が正しい。

問28 大気の温度が27°C、気圧が1,000 hPaの条件下で、大気と平衡にある空気電離箱の照射線量の指示値が $1.0 \text{ C} \cdot \text{kg}^{-1}$ であった。標準状態(0°C、1,013 hPa)における照射線量 $[\text{C} \cdot \text{kg}^{-1}]$ に換算したとき最も近い値は次のうちどれか。

- 1 0.5 2 0.7 3 0.9 4 1.1 5 1.3

〔解答〕4

〔解説〕電離箱の温度・気圧補正に関する問題である。気体の状態方程式より、一定量の気体の体積は圧力に反比例して、絶対温度に比例する。空気電離箱の場合は体積が一定なので、その中の空気量は圧力に比例して、絶対温度に反比例する。照射線量は生成する電荷を空気の質量で除した量なので、その補正を行わなければならない。標準状態の照射線量をDとすると、

$$\begin{aligned} D &= 1.0 \times \frac{273 + 27}{273 + 0} \times \frac{1013}{1000} \\ &= 1.11 \dots \end{aligned}$$

となる。よって、選択肢4が正しい。

問29 次の記述のうち、正しいものの組合せはどれか。

- A Ge半導体検出器は、 ^{134}Cs 線源からのγ線のエネルギー測定に適していない。
- B Si(Li)半導体検出器は、 ^{55}Fe 線源からのX線のエネルギー測定に適している。
- C 表面障壁型Si半導体検出器は、 ^{241}Am 線源からのα線のエネルギー測定に適している。

(令和4年度) 第1種物理学

D Ge 半導体検出器は、 ^{137}Cs 線源からの β 線のエネルギー測定に適している。

- 1 AとB 2 AとC 3 BとC 4 BとD 5 CとD

〔解答〕 3

〔解説〕 半導体検出器に関する問題である。 γ 線のエネルギー測定には、比較的原子番号が大きい Ge 半導体検出器が適している。低エネルギーの γ 線や β 線は Si(Li)半導体検出器が適している。 α 線の測定では表面障壁型の Si 半導体検出器が適している。これらを考慮すると、選択肢としては 3 が正しい。

問 30 放射線測定器で1回の測定で計数値が10,000カウントであったとき、計数の真の値が9,700カウントから10,300カウントの範囲に存在する確率[%]に最も近い値は、次のうちどれか。ただし、放射線測定で得られる計数値の統計的変動はガウス分布に従うものとする。

- 1 50.0 2 68.3 3 90.0 4 95.0 5 99.7

〔解答〕 5

〔解説〕 ガウス分布（正規分布）に関する問題である。統計的変動がガウス分布に従うとすると、1回の測定における標準偏差 σ は計数値の平方根となる。この場合、計数値が10000カウントなので σ は100カウントになる。設問より、計数の真の値が9700カウントから10300カウントの範囲に存在する確率、つまり $\pm 3\sigma$ に存在する確率となる。ガウス分布の場合、 $\pm 1\sigma$ 、 $\pm 2\sigma$ 、 $\pm 3\sigma$ に真の値が存在する確率は、それぞれ68.3%、95.4%、99.7%なので、選択肢は5が正しい。

問31 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。

薄い金箔に α 線を入射させたときに□A□実験結果が得られたことから、ラザフォードは□B□の原子核を電子が周回する図のような原子模型を提案した。

原子核の原子番号を Z とし、電荷 e 、質量 m_e 、接線方向の速度 v の電子が半径 r の円軌道を描いて回っている場合を考える。このとき、真空の誘電率を ϵ_0 とすると、電子は原子核から中心方向に $\frac{Ze^2}{4\pi\epsilon_0 r^2}$ の□C□力を受ける。そして(1)式のように□C□力と正反対の方向に働く見かけの力(遠心力)□ア□が釣り合うことにより、電子が円軌道を描いて回る。

$$\text{ア} = \frac{Ze^2}{4\pi\epsilon_0 r^2} \quad (1)$$

また、電子の運動エネルギー $T = \text{イ}$ と原子核が作る静電場内でのポテンシャルエネルギー $U = -\frac{Ze^2}{4\pi\epsilon_0 r}$ との和で表される電子の全エネルギー E は、

$$E = T + U = \text{イ} - \frac{Ze^2}{4\pi\epsilon_0 r} \quad (2)$$

となる。

ところが、この原子模型では、電子の周回による制動放射で電子がエネルギーを徐々に失うことにより円軌道の半径が減少してゆき、最終的には電子が原子核に落ち込んでしまうことから、安定した原子が存在し得ないという問題が解決できなかった。

ボーアは、□D□を仮定した原子模型を提唱し、これを満足する軌道の上に電子があるときのみ安定であると考えた。□D□は、円軌道の周長が電子のド・ブローイ波の波長□ウ□の自然数倍(n 倍)でなければならないことを意味する次式で表される。ここで、 h はプランク定数である。

$$2\pi r = n \times \text{ウ} \quad (n=1,2,3 \dots) \quad (3)$$

n 番目の円軌道の半径 r_n は、(1)式と(3)式より電子の接線方向の速度 v を消去し、 $F(n)$ を n の□エ□乗とすると、

$$r_n = \text{オ} \times F(n) \quad (4)$$

となる。 $n=1$ の場合の水素原子の半径 r_1 はボーア半径と呼ばれ、その値は□カ□mとなる。ここで、 $m_e = 9.1 \times 10^{-31}$ kg、 $\epsilon_0 = 8.9 \times 10^{-12}$ C²・N⁻¹・m⁻²、 $h = 6.6 \times 10^{-34}$ J・s とする。このとき、 $n=1, 2, 3$ である電子の軌道を、順に□E□と呼ぶ。

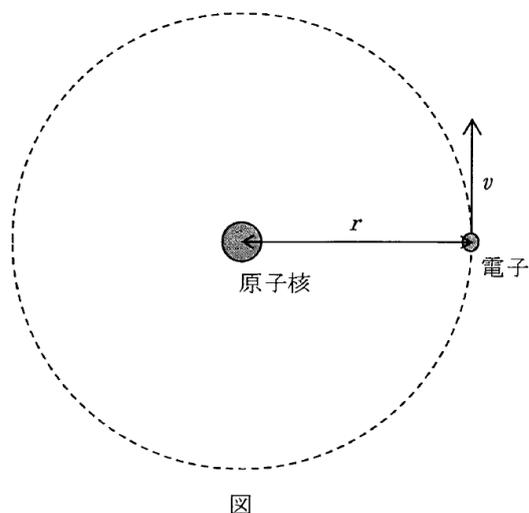
次に n 番目の円軌道の電子の全エネルギー E_n は、(1)式、(2)式及び(3)式より電子の接線方向の速度 v と円軌道の半径 r を消去し、 $G(n)$ を n の□キ□乗とすると、

$$E_n = \text{ク} \times G(n) \quad (5)$$

となる。(4)式と(5)式から、原子核を周回する電子の取りうる軌道とエネルギーは離散的であることから、軌道電子が制動放射により連続的にエネルギーを失うことが許されないことになる。

水素原子の場合、□ク□を精度よく計算すると-13.6 eVになる。水素原子の $n=3$ の軌道にあった電子が $n=1$ の軌道に遷移することを考える。このとき、遷移の前後の軌道に対応する電子の全エネルギー

$-E_n$ の差に等しいエネルギーの **F** が放出され、そのエネルギーは約 **ケ** eV となる。



<Aの解答群>

- | | | |
|-----------------------|-----------------------|-----------------------|
| 1 α 線が前方に散乱される | 2 α 線が後方に散乱される | 3 α 線が吸収される |
| 4 β 線が前方に放出される | 5 β 線が後方に放出される | 6 γ 線が前方に放出される |
| 7 γ 線が後方に放出される | 8 中性子が前方に放出される | 9 中性子が後方に放出される |

<Bの解答群>

- 1 負電荷 2 正電荷 3 無電荷 4 高温 5 低温
6 強磁性 7 弱磁性

<Cの解答群>

- 1 重 2 核 3 ファンデルワールス
4 クーロン 5 表面張 6 ローレンツ
7 復元 8 起電

<ア、イの解答群>

- | | | | | |
|-------------------------|------------------------|---------------------------|--------------------------|------------------------|
| 1 $\frac{1}{2}m_e v$ | 2 $m_e v$ | 3 $2m_e v$ | 4 $\frac{1}{2}m_e v^2$ | 5 $m_e v^2$ |
| 6 $2m_e v^2$ | 7 $\frac{m_e v}{2r}$ | 8 $\frac{m_e v}{r}$ | 9 $\frac{m_e v^2}{2r}$ | 10 $\frac{m_e v^2}{r}$ |
| 11 $\frac{m_e v}{2r^2}$ | 12 $\frac{m_e v}{r^2}$ | 13 $\frac{m_e v^2}{2r^2}$ | 14 $\frac{m_e v^2}{r^2}$ | |

<Dの解答群>

- 1 ドップラー効果 2 ホール効果 3 トンネル効果 4 ディラックの真空
5 ゼーマン効果 6 パウリの排他律 7 量子暗号 8 荷電粒子平衡
9 しきいエネルギー 10 しきい線量 11 量子条件 12 不確定性原理

<ウの解答群>

1 $h\nu$	2 $h\nu^2$	3 $hm_e\nu$	4 $hm_e\nu^2$	5 $\frac{1}{2}hm_e\nu^2$
6 $\frac{m_e\nu}{h}$	7 $\frac{m_e\nu^2}{h}$	8 $\frac{m_e\nu^2}{2h}$	9 $\frac{h}{m_e\nu}$	10 $\frac{h}{m_e\nu^2}$

<エの解答群>

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

<オの解答群>

1 $\frac{\epsilon_0 Ze^2 h}{2\pi m_e}$	2 $\frac{\epsilon_0 Ze^2 h}{\pi m_e}$	3 $\frac{2\epsilon_0 Ze^2 h}{\pi m_e}$	4 $\frac{\epsilon_0 Ze^2 h^2}{2\pi m_e}$	5 $\frac{\epsilon_0 Ze^2 h^2}{\pi m_e}$
6 $\frac{2\epsilon_0 Ze^2 h^2}{\pi m_e}$	7 $\frac{\epsilon_0 h^2}{2\pi m_e Ze^2}$	8 $\frac{\epsilon_0 h^2}{\pi m_e Ze^2}$	9 $\frac{2\epsilon_0 h^2}{\pi m_e Ze^2}$	10 $\frac{Ze^2}{2\epsilon_0 h^2}$
11 $\frac{Ze^2}{\epsilon_0 h^2}$	12 $\frac{2Ze^2}{\epsilon_0 h^2}$	13 $\frac{\epsilon_0 h}{2Ze^2}$	14 $\frac{\epsilon_0 h}{Ze^2}$	15 $\frac{2\epsilon_0 h}{Ze^2}$

<カの解答群>

1 2.2×10^{-18}	2 5.3×10^{-18}	3 7.9×10^{-18}	4 2.2×10^{-15}	5 5.3×10^{-15}
6 7.9×10^{-15}	7 2.2×10^{-11}	8 5.3×10^{-11}	9 7.9×10^{-11}	10 2.2×10^{-7}
11 5.3×10^{-7}	12 7.9×10^{-7}			

<エの解答群>

- | | | |
|----------------|----------------|----------------|
| 1 s軌道、p軌道、d軌道 | 2 s軌道、d軌道、p軌道 | 3 d軌道、s軌道、p軌道 |
| 4 d軌道、p軌道、s軌道 | 5 p軌道、d軌道、s軌道 | 6 p軌道、s軌道、d軌道 |
| 7 A軌道、B軌道、C軌道 | 8 C軌道、B軌道、A軌道 | 9 K軌道、L軌道、M軌道 |
| 10 M軌道、L軌道、K軌道 | 11 X軌道、Y軌道、Z軌道 | 12 Z軌道、Y軌道、X軌道 |

<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 $-\frac{m_e Ze^2}{8\epsilon_0^2 h}$	2 $-\frac{m_e Ze^2}{4\epsilon_0^2 h}$	3 $-\frac{m_e Z^2 e^4}{8\epsilon_0^2 h^2}$	4 $-\frac{m_e Z^2 e^4}{4\epsilon_0^2 h^2}$	5 $-\frac{Ze^2}{8\pi\epsilon_0 h}$
6 $-\frac{Ze^2}{4\pi\epsilon_0 h}$	7 $-\frac{Ze^2}{4\epsilon_0 h}$	8 $-\frac{Ze^2}{2\epsilon_0 h}$	9 $-\frac{\epsilon_0 h}{2Ze^2}$	10 $-\frac{2\epsilon_0 h}{Ze^2}$
11 $-\frac{4\epsilon_0 h}{Ze^2}$				

<Fの解答群>

- 1 光子 2 陽電子 3 陽子 4 中性子
5 ニュートリノ 6 反ニュートリノ 7 μ 粒子 8 α 粒子

<ケの解答群>

- 1 4.0 2 6.0 3 8.0 4 10 5 12
6 14

[解答] A-2 B-2 C-4 ア-10 イ-4 D-11 ウ-9 エ-7 オ-8 カ-8 E-9 キ-3
ク-3 F-1 ケ-5

[解説]

エ、オ：(1)の式より

$$\frac{m_e}{r_n} v^2 = \frac{Ze^2}{4\pi\epsilon_0 r_n^2}$$

ここで(3)の式より

$$2\pi r_n = n \times \frac{h}{m_e v}$$

であるから、

$$v = \frac{nh}{2\pi m_e r_n}$$

したがって

$$\frac{m_e}{r_n} \left(\frac{nh}{2\pi m_e r_n} \right)^2 = \frac{Ze^2}{4\pi\epsilon_0 r_n^2}$$

$$\frac{n^2 h^2}{\pi m_e r_n} = \frac{Ze^2}{\epsilon_0}$$

$$r_n = \frac{\epsilon_0 h^2}{\pi m_e Ze^2} \times n^2$$

カ：(4)の式より

$$r_1 = \frac{(8.9 \times 10^{-12}) \times (6.6 \times 10^{-34})^2}{3.14 \times (9.1 \times 10^{-31}) \times 1^2 \times (1.6 \times 10^{-19})^2} \approx 5.3 \times 10^{-11} \text{ [m]}$$

キ、ク：(2)の式より

$$E_n = \frac{1}{2} m_e v^2 - \frac{Ze^2}{4\pi\epsilon_0 r_n}$$

ここで(3)の式より

$$v = \frac{nh}{2\pi m_e r_n}$$

であるから、

$$\begin{aligned} E_n &= \frac{1}{2} m_e \left(\frac{nh}{2\pi m_e r_n} \right)^2 - \frac{Ze^2}{4\pi\epsilon_0 r_n} \\ &= \frac{n^2 h^2}{8\pi m_e r_n^2} - \frac{Ze^2}{4\pi\epsilon_0 r_n} \end{aligned}$$

ここで(4)の式より

$$r_n = \frac{\epsilon_0 h^2}{\pi m_e Z e^2} \times n^2$$

であるから、

$$\begin{aligned} E_n &= \frac{n^2 h^2}{8\pi m_e \left(\frac{\epsilon_0 h^2 n^2}{\pi m_e Z e^2} \right)^2} - \frac{Ze^2}{4\pi\epsilon_0 \left(\frac{\epsilon_0 h^2 n^2}{\pi m_e Z e^2} \right)} \\ &= \frac{m_e Z^2 e^4}{8\epsilon_0^2 h^2 n^2} - \frac{m_e Z^2 e^4}{4\epsilon_0^2 h^2 n^2} \\ &= -\frac{m_e Z^2 e^4}{8\epsilon_0^2 h^2} \times \frac{1}{n^2} \end{aligned}$$

ケ:(5)の式より

$$E_n = -13.6 \times \frac{1}{n^2} \text{ [eV]}$$

であるから、

$$E_3 - E_1 = -13.6 \times \left(\frac{1}{3^2} - \frac{1}{1^2} \right) \approx 12 \text{ [eV]}$$

問32 次のI～III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。

I 荷電粒子は物質中を通過するとき、電離作用と励起作用により、電子の場合はさらに制動放射によって、連続的にエネルギーを失う。荷電粒子が物質中で厚さ dx 当たりに失うエネルギー dE の割合を阻止能 $S (= -dE/dx)$ といい、電離・励起によるものを衝突阻止能 S_c 、制動放射によるものを A 阻止能 S_R と呼ぶ。ベーテの式によれば、荷電粒子に対する衝突阻止能は標的物質の B に比例して増大する。また、 S_c を標的物質の密度 ρ で除した C 衝突阻止能 S_c/ρ は、物質の D と E の比 (D/E) に比例し、そのため近似的には物質に依存しない。

<A、Bの解答群>

- 1 励起 2 電離
- 3 制動 4 放射
- 5 誘導 6 吸収
- 7 質量 8 質量数
- 9 電子密度 10 平均イオン化ポテンシャル
- 11 平均励起エネルギー

<C～Eの解答群>

- 1 質量 2 体積
- 3 密度 4 原子半径
- 5 原子番号 6 原子量
- 7 平均励起エネルギー 8 平均イオン化ポテンシャル
- 9 電離密度 10 比電離

[解答] I A-4 B-9 C-1 D-5 E-6

[解説]

B: ベーテの式は

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

ここで、 ϵ_0 は真空の誘電率、 z は荷電粒子の原子番号、 m は電子の質量、 v は荷電粒子の速度、 n は標的物質の 1 cm^3 中の原子数、 Z は標的物質の原子番号、 I は原子の平均電離エネルギー、また c を光速として $\beta = v/c$ である。これより、 S_c は標的物質の電子密度 nZ に比例する。

D、E: 標的物質の原子量を A 、標的物質の 1 cm^3 中の原子数を n とすると、 $\rho \propto nA$ である。

したがって、ベーテの式から、

$$\frac{S_c}{\rho} \propto \frac{1}{nA} \times \frac{z^2 e^4}{4\pi\epsilon_0^2 m v^2} n Z \left\{ \ln \frac{2mv^2}{I(1-\beta^2)} - \beta^2 \right\} = \frac{Z}{A} \times \frac{z^2 e^4}{4\pi\epsilon_0^2 m v^2} \left\{ \ln \frac{2mv^2}{I(1-\beta^2)} - \beta^2 \right\}$$

となり、 S_c/ρ は Z/A に比例する。

II ベーテの式によると、電荷数 z 、エネルギー E 、質量 M の非相対論的な粒子に対して、 S_c は **F** に比例し、飛程は **G** に比例する。同一速度の2つの粒子、粒子1 (電荷数 z_1 、エネルギー E_1 、質量 M_1) 及び粒子2 (電荷数 z_2 、エネルギー E_2 、質量 M_2) が、標的物質に入射し同じ S_c を与える場合は、2つの粒子のエネルギーの比 E_1/E_2 は、**H** となる。この比 E_1/E_2 は、粒子2が陽子のとき、粒子1が三重陽子の場合は **ア**、粒子1が α 粒子の場合は **イ** となる。また、粒子1及び粒子2の飛程を R_1 及び R_2 とすると、粒子の速度は等しいので、粒子の飛程の比 R_1/R_2 は **I** で与えられる。これを用いると、4 MeV の α 粒子の飛程 R_α とそれと等速の陽子の飛程 R_p の比 R_α/R_p は **ウ** となる。

<F~Iの解答群>

- | | | | | | | | |
|----|---|----|--|----|---|----|--|
| 1 | $\frac{Mz^2}{E}$ | 2 | $\frac{Mz}{E^2}$ | 3 | $\frac{Mz^2}{E^2}$ | 4 | $\frac{ME^2}{z^2}$ |
| 5 | $\frac{z^2}{EM}$ | 6 | $\frac{z}{E^2M}$ | 7 | $\frac{E^2}{z^2M}$ | 8 | $\frac{M_1}{M_2} \left(\frac{z_1}{z_2} \right)^2$ |
| 9 | $\frac{M_1}{M_2} \cdot \frac{z_1}{z_2}$ | 10 | $\frac{M_1}{M_2} \left(\frac{z_2}{z_1} \right)^2$ | 11 | $\frac{M_1}{M_2} \cdot \frac{z_2}{z_1}$ | 12 | $\frac{M_2}{M_1} \left(\frac{z_1}{z_2} \right)^2$ |
| 13 | $\frac{M_2}{M_1} \cdot \frac{z_1}{z_2}$ | 14 | $\frac{M_2}{M_1} \left(\frac{z_2}{z_1} \right)^2$ | 15 | $\frac{M_2}{M_1} \cdot \frac{z_2}{z_1}$ | | |

<ア~ウの解答群>

- | | | | | | | | | | |
|----|------|----|------|----|------|----|-----|----|-----|
| 1 | 1/32 | 2 | 1/24 | 3 | 1/16 | 4 | 1/8 | 5 | 1/4 |
| 6 | 1/3 | 7 | 1/2 | 8 | 1 | 9 | 2 | 10 | 3 |
| 11 | 4 | 12 | 8 | 13 | 16 | 14 | 24 | 15 | 32 |

[解答] II F-1 G-7 H-8 I-10 ア-10 イ-13 ウ-8

[解説]

F: ベーテの式において、 $\left\{ \ln \frac{2mv^2}{I(1-\beta^2)} - \beta^2 \right\}$ の部分は非相対論的な粒子において変化が少ないので、同一

速度 v の粒子に対して、

$$S_c \propto \frac{z^2}{v^2} \propto \frac{z^2 M}{E}$$

という関係が成り立つ。

G: 非相対論的な粒子において阻止能 $dE/dx = S_c$ であるから、 $S_c \propto \frac{z^2 M}{E}$ の関係を用いると、飛程 R は

$$R \propto \int \frac{dE}{\left(\frac{dE}{dx} \right)} \propto \int \frac{E}{z^2 M} dE \propto \frac{1}{M} \left(\frac{E}{z} \right)^2$$

と表せる。

H: $S_c \propto \frac{z^2 M}{E}$ であるから、粒子1と粒子2が同じ S_c の場合には、

$$\frac{z_1^2 M_1}{E_1} = \frac{z_2^2 M_2}{E_2}$$

したがって、

$$\frac{E_1}{E_2} = \frac{M_1}{M_2} \left(\frac{z_1}{z_2} \right)^2$$

ア：粒子1が三重水素、粒子2が陽子の場合、 $M_1/M_2 = 3$ 、 $z_1/z_2 = 1$ であるから、

$$\frac{E_1}{E_2} = 3 \times 1^2 = 3$$

イ：粒子1が α 粒子、粒子2が陽子の場合、 $M_1/M_2 = 4$ 、 $z_1/z_2 = 2$ であるから、

$$\frac{E_1}{E_2} = 4 \times 2^2 = 16$$

I： $R \propto \frac{E^2}{z^2 M}$ であるから

$$\frac{R_1}{R_2} = \left(\frac{E_1}{E_2} \right)^2 \times \left(\frac{z_2}{z_1} \right)^2 \times \frac{M_2}{M_1}$$

ここで、粒子1と粒子2の速度が等しい場合には、 $E_1/E_2 = M_1/M_2$ となるので、

$$\frac{R_1}{R_2} = \left(\frac{M_1}{M_2} \right)^2 \times \left(\frac{z_2}{z_1} \right)^2 \times \frac{M_2}{M_1} = \frac{M_1}{M_2} \left(\frac{z_2}{z_1} \right)^2$$

ウ：

$$\frac{R_\alpha}{R_p} = \frac{4}{1} \times \left(\frac{1}{2} \right)^2 = 1$$

III エネルギーの高い電子においては、標的物質の原子番号が大きくなると、衝突阻止能 S_c に加えて 阻止能 S_R の割合が大きくなる。エネルギーが 6 MeV の電子における阻止能の比 S_R/S_c は、近似的に、標的物質がアルミニウム (原子番号 13) の場合には である。また、衝突阻止能 S_c と 阻止能 S_R とが等しくなる電子のエネルギーは と呼ばれ、標的物質が鉛 (原子番号 82) の場合約 MeV である。

<エ、オの解答群>

- | | | | | | | | | | |
|----|------|----|------|----|------|----|-----|----|-----|
| 1 | 0.01 | 2 | 0.03 | 3 | 0.06 | 4 | 0.1 | 5 | 0.3 |
| 6 | 0.6 | 7 | 1.0 | 8 | 3.0 | 9 | 6.0 | 10 | 10 |
| 11 | 30 | 12 | 60 | 13 | 100 | 14 | 300 | 15 | 600 |

<Jの解答群>

- | | | | | | | | |
|---|---------|---|---------|---|---------|---|---------|
| 1 | しきい値 | 2 | W値 | 3 | 等価エネルギー | 4 | 臨界エネルギー |
| 5 | 転移エネルギー | 6 | 転換エネルギー | 7 | 飽和エネルギー | | |

[解答] III エ-4 オ-10 J-4

[解説]

(令和4年度) 第1種物理学

エ：エネルギーの高い電子においては、阻止能の比 S_R/S_c はおよそ

$$\frac{S_R}{S_c} \approx \frac{EZ}{800}$$

と表せる。ここで、 $E[\text{MeV}]$ は電子のエネルギー、 Z は標的物質の原子番号である。したがって、電子のエネルギーが6 MeVで、標的物質がアルミニウムの場合には、

$$\frac{S_R}{S_c} \approx \frac{6 \times 13}{800} \approx 0.1$$

オ： $\frac{S_R}{S_c} \approx \frac{EZ}{800}$ であるから、標的物質が鉛の場合に S_R と S_c が等しくなる電子のエネルギー $E[\text{MeV}]$ は

$$E \approx \frac{S_R}{S_c} \times \frac{800}{Z} = 1 \times \frac{800}{82} \approx 10$$