



第1回国際原子力科学オリンピック（フィリピン 2024）

Theoretical Problems 理論試験 5 時間 50 点満点

問1 核融合反応の応用（10 点）

二つの原子核が結合してより重い原子核を形成する核融合反応は、天体力学を理解するだけでなく、地球上でクリーンで持続可能なエネルギー源として制御された核融合を実現するためにも不可欠である。このような目的のために研究されている核反応の中でも、重水素-重水素（D-D）と重水素-トリチウム（D-T）の中性子生成核融合反応は特に重要である。この問題を通じて、この2つの反応について考察する。

パート1 核融合反応によるエネルギー（2.0 点）

次の核粒子を考える：

表1 核融合反応に関与する核粒子

粒子	記号	質量 (u)
重水素 (D)	${}^2_1\text{H}$	2.014102
トリチウム (T)	${}^3_1\text{H}$	3.016049
ヘリウム-3	${}^3_2\text{He}$	3.016029
ヘリウム-4	${}^4_2\text{He}$	4.002603
中性子	${}^1_0\text{n}$	1.008665

問 1.1：

(a) D-D 及び D-T 核融合反応における Q 値（単位は MeV）を計算せよ。(0.2 点)

(b) Q 値、または反応から放出されるエネルギーは、反応生成物の運動エネルギー (E) に分かれる。一般的な反応 (反応物 $\rightarrow X + n$) でこの反応における Q 値がわかっている場合の、反応生成物の質量 (m_n および m_x) に対応する中性子の運動エネルギー (E_n) の式を書け。ただし、初期運動量はゼロと仮定する。(0.6 点)

(c) (b) で得た式から、D-D と D-T 反応から生成される中性子の運動エネルギーを計算せよ。(0.2 点)

核融合反応は、核分裂反応が発見される 17 年前の 1921 年にアーサー・エディントン (Arthur Eddington) により発見されたが、核分裂を基盤とする原子力発電所が 1957 年に商業的に実現可能となって以来、世界の電力の約 10% を供給しているのに対し、核融合炉はまだ実現可能性を実証できていない。しかし、将来の代替クリーンエネルギーを確保するために、核融合技術の研究開発は継続されている。この問題では、核分裂と核融合の核反応から得られるエネルギーを、現在世界の電力の約 36% を供給している石炭から得られるエネルギーと比較する。

問 1.2: 2022 年、世界における一人当たりの平均エネルギー消費量は、3,600 kWh であった。

(a) 効率 35% の核融合炉で反応エネルギーが完全に回収可能であると仮定した場合、3,600 kWh を供給するには D-T 反応物質を何 kg 必要とするか? D-D 反応物質の場合はどうか? (0.5 点)

(b) 核分裂反応 1 回あたりに放出されるエネルギーの平均値は 200 MeV である。このエネルギーがすべて回収可能であり、核分裂炉の効率が 30% であると仮定すると、同じ量のエネルギーを供給するには核分裂反応物質を何 kg 必要とするか? 尚、 ^{235}U の質量は 235.044 u とする。(0.25 点)

(c) 瀝青炭 (いわゆる一般的な石炭のこと) の燃焼により、1g あたり 31 kJ のエネルギーが放出されたとした場合、同じ量のエネルギーを得るために何 kg の石炭が必要か? (0.15 点)

(d) (a) で得た D-T 反応物質の質量と石炭の質量との比は? (0.1 点)

パート2 トリチウム生成 (2.0 点)

D-T 核融合反応は、D-D 核融合反応と比較して反応当たりの相互作用確率と放出エネルギーが高いことから、核融合エネルギー研究により適していると考えられている。さらに、トリチウムは天然には豊富ではないが、リチウムから生成することができる。リチウムは D-D 反応の唯一の材料である重水素よりも容易に入手できる。天然のリチウムは、 ${}^6\text{Li}$ が 4.85%、 ${}^7\text{Li}$ が 95.15% である。トリチウム ${}^3_1\text{H}$ はどちらの同位体からも生成できるが、以下の ${}^7\text{Li}$ 反応は閾値 (しきい値) のある反応であり、高速中性子を必要とする。
(注: パーセントは同位体の存在比)



一方、 ${}^6\text{Li}$ は強い中性子吸収体であり、相互作用断面積 $\sigma = 940$ バーンで、以下の (n, α) 反応によりトリチウムを生成する。



反応 (2) から生成できる ${}^3_1\text{H}$ の総量は、反応速度 R から計算でき、

$$R = \sigma N \phi V \quad (3)$$

ここで、 ϕ は中性子束、 V は試料の体積である。一方、核密度 (N) は以下の通りであり、密度 (ρ)、アボガドロ数 (N_A)、原子質量 ($m_{{}^6\text{Li}} = 6.015122 \text{ u}$) で表される。

$$N = \rho N_A / m \quad (4)$$

問 2.1: ${}^7\text{Li}$ から ${}^3_1\text{H}$ を生成するために必要な最小の中性子エネルギー (単位は MeV) を計算せよ。なお、 $m_{{}^7\text{Li}} = 7.016003 \text{ u}$ である。有効数字 4 桁で答えよ。

問 2.2:

(a) 中性子束 $3.5 \times 10^{14} \text{ n cm}^{-2} \text{ s}^{-1}$ の核分裂炉で 24 時間照射した 1 kg の天然リチウムから生成される ${}^3_1\text{H}$ 核の質量 (g) を計算せよ。尚、照射源は純粋な熱中性子からなるものとする。(1.0 点)

(b) 出力 1,000 MW の D-T 核融合炉では、年間約 150 kg のトリチウム燃料が必要となる。炉内で天然のリチウムを熱中性子で照射できるのが 24 時間に一回とした場合に、

年間運転に必要なトリチウム 150kg を生成するには、どれくらいの ${}^6\text{Li}$ を炉内に投入すればよいか？ (0.2 点)

パート 3 クーロン障壁を乗り越える (2.5 点)

電気のポテンシャルエネルギー（電位エネルギー (U)）とは、電荷の系をある校正に持っていくために行われる仕事の総量である。

問 3.1： (a) D-D 反応では重陽子（deuteron）、(b) D-T 反応では三重陽子（triton）をターゲットとし、重陽子をターゲットに接触させるのに必要なエネルギーを計算せよ。(1.6 点)

原子核は正の電荷を帯びているため、軽い原子核同士の核融合反応は、反応する粒子がクーロン斥力に打ち勝つのに十分なエネルギーを持つ場合にのみ起こる。そのためには、反応物質をプラズマ状態になるまで非常に高い温度まで加熱する必要がある。プラズマ状態における核融合反応物質のエネルギー分布は、プラズマ温度 (T) と粒子の平均エネルギー ($\bar{E}$) の関係式である以下のマックスウェル=ボルツマン分布により示すことができる：

$$\bar{E} = \frac{3k_B T}{2} \quad (5)$$

ここで、ここで、 k_B はボルツマン定数である。粒子は弾性衝突を起こすものとする。D-D 反応および D-T 反応の実際の点火温度は、それぞれ約 4.5×10^8 K および 1.5×10^8 K である。これは、量子トンネル効果と、反応する原子核のエネルギーの幅が広いことによるもので、マックスウェル=ボルツマン分布によって説明される。

問 3.2：

(a) 3.1 で求めた D-D 反応と D-T 反応のエネルギーに対応する温度を求めよ。(0.6 点)

(b) D-D 反応と D-T 反応の実際の着火温度と理論上の着火温度の差異率 (percentage difference) を計算せよ。尚、差異率を求める際には以下の式を用いよ。(0.3 点)

$$\%diff = \frac{|X_1 - X_2|}{\left(\frac{X_1 + X_2}{2}\right)} \times 100\%$$

パート 4 ポータブル中性子発生装置 (3.5 点)

核融合反応に基づく発電用原子炉は、反応粒子に非常に高い温度が必要なため、まだ商業的に利用されていませんが、D-D および D-T 核融合反応は、研究および産業用途の可搬型中性子発生装置 (NG) で利用されています。NG 用途における重要なパラメータは、総中性子収量 S です。

$$S = N_S \sigma \varphi \quad (6)$$

ここで、 N_S は標的 (ターゲット) 中の単位面積当たりの標的となる核の表面密度または数、 σ は反応断面積。 φ は入射粒子率であり、これは重陽子ビーム電流 (I) をアンペア単位で表し、入射粒子電荷 (q) で経験的に表すことができる。

$$\varphi = \frac{I}{q} \cdot a \quad (7)$$

式 7 において、 a はある中性子発生装置の構成により経験的に決定された単位のないパラメータである。100keV のエネルギーを持つ入射重陽子に対して、D-D 反応の断面積は 16.9 ミリバーンであるのに対し、D-T 反応の断面積は 293 倍高い。

ここで、チタンと水素の比率が 1:1.64 になるまで水素化に供与した厚さ 1mm のチタン層の場合を考えてみる。表 2 はチタン水素化物の特性をまとめたものである。

表 2 水素化チタンターゲットの特性

TiH の種類	密度 ρ	分子量
TiD _{1.64}	3.92 g cm ⁻³	51.170127 u
TiT _{1.64}	4.03 g cm ⁻³	52.813320 u

問 4.1 : (a) TiD_{1.64} および (b) TiT_{1.64} の D および T 原子の表面密度 N_S をそれぞれ計算せよ。 N が原子密度、 l が試料の厚さであるとき、 $N_S = N \cdot l$ であることに留意せよ。(1.4 点)

問 4.2： この問題で述べているターゲットを持つある中性子発生装置ユニットの場合、パラメータ値 $a = 6.25 \times 10^{-4}$ だった。この 100 keV 中性子発生装置で、D-D 反応および D-T 反応から中性子収量 $S = 1 \times 10^7 \text{ n s}^{-1}$ を生成するために必要なビーム電流（単位はアンペア）を計算せよ。（1.4 点）

ポータブル中性子発生装置の用途のひとつに中性子ラジオグラフィー（NR）があり、これは中性子ビームを使用して物質の内部構造を可視化するものである。この技術は、原子番号の低い物質に対して特に有効である。中性子発生装置で発生した中性子が通過する開口部を一般的に中性子出口ポートと呼ぶ。等方性の中性子収量（ S ）を持つ中性子発生装置の場合、中性子出口ポートよりよりはるかに大きい距離（ r ）におけるフラックス（中性子束、 ϕ ）は以下の式で近似できる。

$$\phi = \frac{S}{4\pi r^2} \quad (8)$$

この中性子束が撮影対象物に到達するため、NR システムではコリメーターを使用して中性子を撮影対象物に向かって誘導する。コリメーターは通常、円錐形または四角錐の形状をしており、断面は円形、正方形、長方形のいずれかである。コリメーターの出口開口部から放出されるフラックス（ ϕ ）は、以下の関係式で推定できる。

$$\phi = \frac{\phi_0 A}{4\pi L^2} \quad (9)$$

ここで、 ϕ_0 はコリメーター入口開口部からのフラックス、 A はコリメーター入口開口部の面積、 L はコリメーター入口から結像面までの距離である。

問 4.1：

(a) 4.2 で述べたように、コリメーターの入口開口部が中性子発生源から 3cm 離れた位置にある場合、 ϕ の値を計算せよ。尚、中性子出口ポートは 3cm よりもかなり小さいものと仮定する。（0.2 点）

(b) 初期直径が D_1 で、 ϕ_1 の円形コリメーターの場合に、 ϕ_0 を一定に保ったままこのコリメーターの直径を D_2 に調整したと仮定する。 ϕ_1 を用いて、フラックス ϕ_2 の式を書け。（0.5 点）

問2 蚊に対する不妊化虫放飼法 (SIT : Sterile Insect Technique) (10 点)

マラリア、デング熱、西ナイルウイルス、チクングニア熱、黄熱病、ジカ熱などの蚊が媒介する感染症と闘う科学者たちは、不妊虫放飼法 (SIT : Sterile Insect Technique) の開発に取り組んでいる。この技術では、大量に繁殖させた不妊処理を施したオスの蚊を野外に放ち、メスの蚊と交尾させる。交尾によって生まれた子孫は生存できないため、継続的に放つことで次世代の個体数を減らすことができる。SIT では、ガンマ線などの電離放射線を照射することで昆虫を不妊化する。この照射には、放射能を発生させることなく (放射化させることなく) 不妊化処理を行えるコバルト-60 (^{60}Co) を使用する。蚊の寿命や交尾の競争力に大きな影響を与えることなく、効果的にオスの蚊を不妊化する線量を選択することが重要である。

パート1 フリック線量計を用いた吸収線量の測定 (4.5 点)

SIT では、 ^{60}Co ガンマ線による照射線量が重要な役割を果たす。この不妊化プロセスの検証と日常的な管理は、昆虫が受けた放射線量を測定する線量測定に依存する。さまざまな種類の線量計の中でも、硫酸第一鉄線量計としてよく知られている「フリッケ線量計」は、最も汎用性の高い化学線量計のひとつである。この線量計は、電離放射線が第一鉄イオン (Fe^{2+}) を第二鉄イオン (Fe^{3+}) に酸化する過程を追跡することで機能する。放射線照射により増加する第二鉄イオンの濃度を 303nm で分光光度計により測定することができる。フリッケ線量計は、シャーレ内の蚊の蛹の吸収線量を測定するために使用される。

吸収線量の SI 単位はグレイ (Gy) で、「1 キログラムの物質が 1 ジュールのエネルギーを吸収すること」と定義されている。放射性物質の放射能が A で、崩壊のたびにエネルギー E のガンマ線光子が放出されるとする。

問 1.1 : : A が MBq、 E が MeV で表される場合 ($1 \text{ J} = 6.2415 \times 10^{18} \text{ eV}$)、ガンマ線から放出されるパワー (単位時間あたりに放出される総エネルギー) の式を J h^{-1} 単位で書け。(0.5 点)

問 1.2 : 放射線源からの距離 r での単位面積あたりの電力密度を、 $\text{J h}^{-1} \text{ m}^{-2}$ 単位で表す式を書け。なお、ガンマ線は等方的に放出されると仮定する。(1.0 点)

ガンマ線光子は、線源から r メートル離れた位置に置かれたフリッケ線量計に向かって進む間に、空気によって吸収される可能性がある。フリッケ線量計までの単位距離を進む間にガンマ線光子が吸収されることによる減衰は次の式で表される。

$$I = I_0 e^{-\mu_a r} \quad (1)$$

ここで、 I_0 は初期ガンマ線光子強度、 I は距離 r を移動した後のガンマ線光子強度、 μ_a は空気に対する線形減弱係数 (m^{-1}) である。

無次元量 $e^{-\mu_a r}$ は減衰係数 f であり、吸収されることなく距離 r を通過した初期ガンマ線光子の割合を示す。別の式として、物質の密度 ρ で規格化された線減衰係数 μ である質量減衰係数 $\frac{\mu}{\rho}$ がある。任意の物質中を距離 x メートル進んだガンマ線光子に対する減衰係数 f のより一般的な式は以下の通りである。

$$f = e^{-(\frac{\mu}{\rho})\rho x} \quad (2)$$

減弱した光子のエネルギーがすべて物質に吸収されると仮定すると、線源から距離 r の場所における線量率 (DR , 単位は Gy h^{-1}) は次の式で与えられる。

$$DR(\text{Gy h}^{-1}) = \frac{1.442 \times 10^{-4} AE}{\pi r^2} (\rho) \quad (3)$$

ここで、 A の単位は MBq、 E の単位は MeV である。

問 1.3： 放射能 8000 Ci の ^{60}Co 線源から 50 cm 離れた位置に置かれたフリッケ線量計に 10 分間照射後の線量率 (Gy h^{-1}) と線量 (Gy) を計算せよ。尚、 ^{60}Co は平均エネルギー 1.25 MeV のガンマ線を放出し、標準のフリッケ線量計 (ICRU 44) の質量減弱係数は $0.072 \text{ cm}^2\text{g}^{-1}$ である。(1.5 点)

電離放射線は Fe^{2+} を Fe^{3+} に酸化し、放射化学収量 $G(\text{Fe}^{3+})$ は吸収線量に比例することが分かっている。同日に測定した未照射溶液中の濃度と比較した Fe^{3+} 濃度の増加は、 25°C における 303 nm での光学濃度 (OD) の増加から計算できる。電離放射線を照射したフリッケ線量計の吸収線量は、以下の式で与えられる。

$$D = \frac{\Delta OD}{\varepsilon G(\text{Fe}^{3+}) \rho l} \quad (4)$$

ここで、 ΔOD は光学濃度の増加、 ε は 303 nm における Fe^{3+} の吸光係数から Fe^{2+} の吸光係数を差し引いた値、 $G(\text{Fe}^{3+})$ は Fe^{3+} の放射化学収量、 ρ はフリッケ溶液の密度、 l はキュベットの光路長である。

問 1.4： 1.3 で照射したフリッケ線量計を使用して、 $\mu\text{mol J}^{-1}$ 単位で Fe^{3+} の放射化学収率を決定せよ。照射終了後の 303nm における吸光度は 0.1840、照射前は 0.0030 であった。尚、 $\varepsilon = 2174 \text{ L mol}^{-1}\text{cm}^{-1}$ 、 $\rho = 1.024 \text{ g cm}^{-3}$ 、 $l = 1 \text{ cm}$ とする。(0.5 点)

問 1.5： 仮に、各 ^{60}Co ガンマ線光子が 1 回の相互作用につき 1g のフリッケ線量計に 300 keV のエネルギーを付与するとした場合、線量計が 10Gy、20Gy、30Gy、40Gy、50Gy の吸収線量を受けるには、何回の光子相互作用が必要になるか？これらの吸収線量の値は、蚊の SIT で使用されるものである。(1.0 点)

パート 2 SIT における孵化と線量 (3.5 点)

SIT では、孵化率が重要な役割を果たす。孵化率は卵が幼虫へと正常に成長する割合であり、よって蚊の個体数に直接的に影響する。照射線量が多いほど、より低い孵化率を実現することができる。そして不妊処理されたオスの蚊を継続的に放つことで、その後の世代の蚊の数が減少する。図 1 は、孵化率と照射線量の関係を示している。

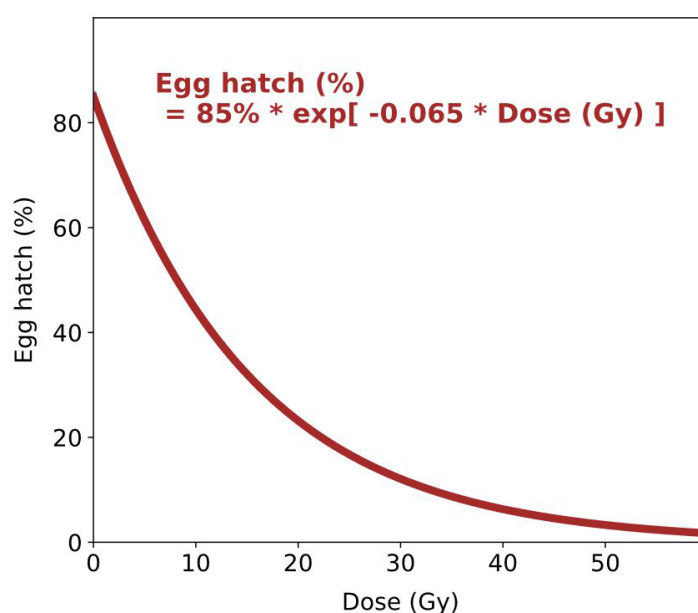


図 1 照射線量と孵化率の関係 (%)

^{60}Co 線源を使用し、オスの蚊の蛹（さなぎ）を入れたペトリ皿に一定量の放射線を照射した。しかし、実験室でのテストでは、彼らの子孫における孵化率は 40%ほどだった。孵化率と照射線量 (Gy) の関係式は、以下の通りだった。

$$\text{Egg hatch}(\%) = 85\% \times \exp(-0.065 \text{ Dose}) \quad (5)$$

問 2.1： 式 5 と観察された卵の孵化率を基に、蚊の蛹に照射された線量を計算せよ。
(0.5 点)

問 2.2： 40%の孵化率をもたらす照射線量で 10 分間にわたり照射した場合、1%の孵化率となる照射時間は？ (1.0 点)

新しい ^{60}Co 線源の導入により線量率が増加し、1 分間固定での照射ができるようになった。この線源の交換により線量が増加したため、孵化率が 0.1%に減少した。しかし、この高線量は不妊処理されたオスの蚊に悪影響を及ぼし、SIT の成功の鍵となる要因の一つである交尾の競争力を損なうこととなった。不妊のオスの交尾能力を確保しながら効果的な個体数の抑制を維持するため、孵化率を 2%に引き上げることを目的とした鉛による遮へいが提案された。孵化率 2%は、0.1%よりは高いが、オスが競争力を維持している限り、効果的な個体数抑制が可能となる。提案されている鉛の遮へい体は、不妊のオスの品質と交尾能力を維持しながら照射線量を微調整する上で重要な役割を果たし得る。そして、遮へいされた後の線量は、以下の式で計算できる。

$$D_i = D_0 \exp(-(\mu/\rho)\rho x) \quad (6)$$

ここで、 D_i は遮へい後の線量 (Gy)、 D_0 は遮蔽されていない場合の線量、 (μ/ρ) は物質の質量減弱係数、 ρ は物質の密度、 x は物質の厚さである。

問 2.3： 提案された鉛の遮へい体によるビルドアップ係数の影響がなく、 ^{60}Co ガンマ線が 1.25 MeV の単色エネルギーであると仮定した場合、孵化率を 0.1%から 2%に増加させるために必要な鉛の厚さ (cm 単位) を計算せよ。尚、鉛 (密度 $\rho = 11.3 \text{ gcm}^{-3}$)

中におけるこのガンマ線の質量減弱係数 $(\mu/\rho)_{pb}$ は $0.058 \text{ cm}^2\text{g}^{-1}$ である。(1.0 点)

照射施設では 1mm 厚のステンレス鋼のシートが入手可能で耐久性も高いことから、あ

あなたのチームは提案された鉛の代替品としてステンレス鋼を検討している。ステンレス鋼の密度は 8.03g cm^{-3} である。表 1 は、ステンレス鋼を構成する各元素の質量減弱係数 $(\mu/\rho)_i$ と重量分率 (w_i) である。

表 1 ステンレス鋼の元素組成、各元素の重量分率 ($Wt\%$) と質量減弱係数 (MAC)

元素	$Wt\%$	MAC
C	0.0008	0.0568
Mn	0.02	0.0521
P	0.00045	0.0551
S	0.0003	0.0568
Si	0.01	0.0567
Cr	0.19	0.0528
Ni	0.095	0.0548
Fe	0.68345	0.0534

問 2.4 :

(a) ステンレス鋼の有効質量減衰係数 $(\mu/\rho)_{ss}$ を、次の式を使って計算せよ。

$$\left(\frac{\mu}{\rho}\right)_{ss} = \sum_i w_i \times \left(\frac{\mu}{\rho}\right)_i \quad (7)$$

ここで、 w_i は重量分率、 $\left(\frac{\mu}{\rho}\right)_i$ は i 番目の元素の質量減衰係数である。(0.5 点)

(b) 卵の孵化率を 2% 近くに保つために必要な遮へい効果を得るために、1mm 厚のステンレス鋼板を何枚必要とするかを計算せよ。シートは 1mm 単位で使用するので、小数点以下の結果は切り上げよ。(0.5 点)

パート 3 SIT における競争と線量 (2.0 点)

蚊が媒介する病気との戦いを続けている中で、科学者たちは興味深い傾向に気づいた。照射線量の増加に伴い、不妊処理を施したオスの蚊の交尾における競争力は、当初は徐々に低下する。尚、競争力とは、野生のメスと交尾するために野生のオスと競争する能力のことと定義される。しかし、ある線量を超えると、この減少はより顕著になり、競争力の

急激な低下につながる。このパターンを図 2 に示すが、蚊の駆除における SIT の最適化において、正確な線量管理が重要な役割を果たすことがわかる。尚、以下の問題では、照射時間を固定したと仮定する。

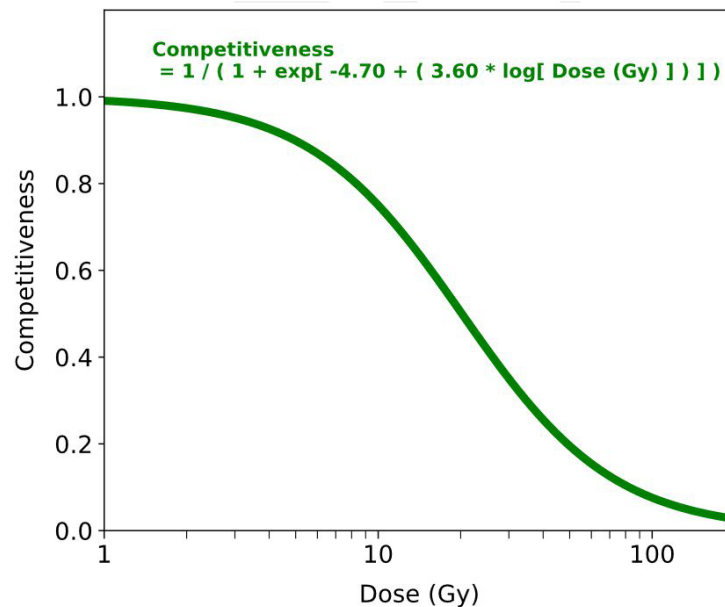


図 2 照射線量と交配競争力の関係

問 3.1： 男性の競争力 (C) を線量関数として表すと、次のようになる。

$$C = \frac{1}{1 + \exp(-4.7 + [3.6 \times \log(Dose)])} \quad (9)$$

照射線量が 40Gy の場合の競争力を計算せよ。(1.0 点)

問 3.2： 逆に、競争力が 0.5 の場合、このレベルを達成するために必要な照射線量を計算せよ。(1.0 点)

問3 がんを破壊する粒子 (10 点)

重要事項：

1. 計算中に数値を四捨五入しないこと。最終的な答えは有効数字 3 桁で四捨五入すること。
2. 最終的な答えは SI 単位で表すこと。
3. 非常に小さい値または非常に大きい値は、科学記法で表すこと。
4. 便利な方程式、定数、および変換係数については、シート G2 ([1-2 General Instructions Theory Official English](#)) を参照すること。

パート1 陽子の阻止能、飛程、線量 (5.0 点)

高エネルギー粒子が物質に入射すると、粒子の種類、エネルギー、電荷、相互作用のメカニズムに応じて、さまざまな程度で物質と相互作用し、エネルギーを損失する。これらの相互作用により、粒子は徐々に減衰し、最終的には停止する。この物質が荷電粒子を停止させる能力のことを、線阻止能 (S) という。

問 1.1： S と線エネルギー付与 LET に関する以下の関係式を踏まえて、 S と LET の根本的な違いは何か？

$$S = -dE/dx \quad (1)$$

$$LET = -dE/dx \quad (2)$$

尚、 E は粒子のエネルギー、 x は粒子の移動距離である。(0.4 点)

光子や荷電粒子の阻止能は、物質との相互作用の違いにより変化する。放射線が物質と相互作用するメカニズムを理解することは、標的となる物質に線量がどのように蓄積されるかを理解するために不可欠であり、これは医療物理学や放射線療法において重要な意味を持つ。

現在のがん治療における外部放射線照射治療の臨床の現場では、光子療法と電子線療法が行われている。しかし、光子療法では、治療部位の近くでも遠い部位でも健康な組織に

まで過剰な線量が照射される。これに対し、電子線治療では治療部位から離れた部分への照射線量は最小限に抑えられるものの、過剰な多重クーロン散乱により、標的表面から6cm 以内の領域での使用に制限されている。陽子線は質量をもつ粒子であるため、光子よりも速く減速し、減速する際に多くのエネルギーを放出する。その結果、ブラッグピークとして知られる線量のピークが形成される。

下のグラフは、物質を透過する際の阻止能に基づく、光子と荷電粒子におけるエネルギー付与の違いを示している。

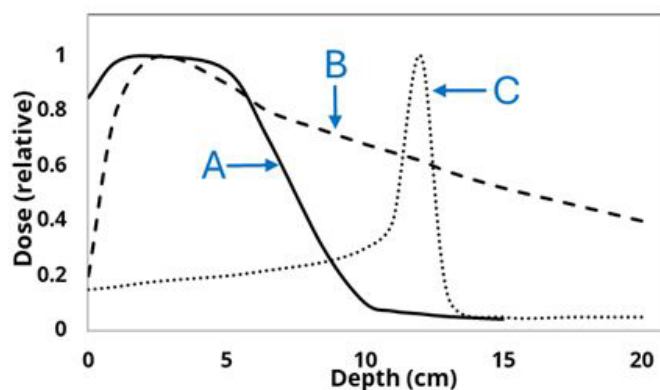


図1 異なる放射線療法における水中での深度線量分布

問 1.2： 図1の曲線のうち、物質（例えば水）中の電子（20MeV）、光子（18 MeV）、陽子（130 MeV）の深度線量分布を表すものはどれか。（0.6 点）

阻止能を理解することは、癌の新しい治療法に関する洞察を生み出す可能性がある。質量阻止能は、線阻止能を材料密度 ρ で割ったもので、 S/ρ （単位は $\text{J} \cdot \text{m}^2 \cdot \text{kg}^{-1}$ ）で表され、任意の材料について測定または計算することができる。陽子線治療では、質量阻止能と陽子の飛程 R の計算が重要な役割を果たす。

ベータ・ブロック（Bethe-Bloch）の公式は、物質を透過する際に荷電粒子（陽子など）が失うエネルギーを説明している。具体的には、荷電粒子に対する物質の質量阻止能を説明する。1-200 MeV のエネルギー範囲における陽子の質量阻止能に関するベータ・ブロックの公式を式 3 に示す。 $1/\beta_v^2$ と対数項の組み合わせがブラッグピークの起源を説明している。

$$\frac{S}{\rho} = -\frac{dE}{\rho dx} = \frac{5.08 \times 10^{31} z^2 n}{\rho \beta_v^2} [F(\beta_v) - \ln(I)] \quad (3)$$

$$F(\beta_v) = \ln \frac{1.02 \times 10^6 \beta_v^2}{1 - \beta_v^2} - \beta_v^2 \quad (4)$$

$$n = \frac{N_A Z \rho}{A} \quad (5)$$

ここで、 β_v は入射粒子の速度 β_v を光速 c に対する相対速度で表したもの、 I は標的物質の励起エネルギー ($I_{water} = 74.6 \text{ eV}$)、 z は入射粒子の電荷 ($z_{proton} = +1$)、 n は単位体積 (m^3) あたりの物質中の電子数であり、アボガドロ数 (N_A)、物質密度 ρ_{water} 、物質の原子番号 ($Z_{water} = 10$)、物質の質量数 ($A_{water} = 18$) で求められる。

問 1.3： 陽子に対する水の質量阻止能 S/ρ について、式 (3) を簡略化せよ。(0.5 点)

問 1.4： 1.3 から導出された式を使用し、陽子が相対論的速度で運動していると仮定し、運動エネルギー E_K が 1、10、100 MeV の場合について、以下の値を計算せよ。

(a) 陽子の速度。(0.75 点)

(b) 水の質量阻止能。(0.75 点)

(c) 水におけるブラッグ・クリーマン (Bragg-Kleeman) 飛程 R (cm) を、入射エネルギー E_K の関数として。尚、 $R = N_R \times E_K^{\beta_e}$ であり、 $N_R = 0.0023 \text{ g cm}^{-2} \text{ MeV}^{-1}$ 、 $\beta_e = 1.75$ とする。(0.75 点)

(d) 陽子のエネルギーと質量阻止能と飛程の間での一般的な関係は？ 得られた値をプロットして図を作成せよ。(0.5 点)

照射場のある点における物理的線量 D は、単位標的質量 m 当たりの平均吸収エネルギー E_{abs} である。線量と質量阻止能の関係を表す式 (6) は、ほとんどの陽子線ビームラインの設計プログラムの出発点となる。陽子フルエンス Φ は単位面積 A 当たりの陽子数 N_p として定義され、以下に示すように線量の計算に使用できる。

$$D = \frac{E_{abs}}{m} = \frac{(dE/dx) \times dx \times N_p}{\rho \times A \times dx} = \Phi \frac{dE}{\rho dx} \quad (6)$$

陽子がマーカー位置を通過するまでの距離が残留飛程 R_{res} である。核反応とクーロン散乱の影響を無視した簡略化近似により、(1)陽子のエネルギー損失と標的物質が吸収するエネルギーとは比例関係があること、(2)連続減速近似 (CSDA) に基づき、陽子が減速するにつれてエネルギー損失率は距離 (飛程) に対して連続的であることが推定される。

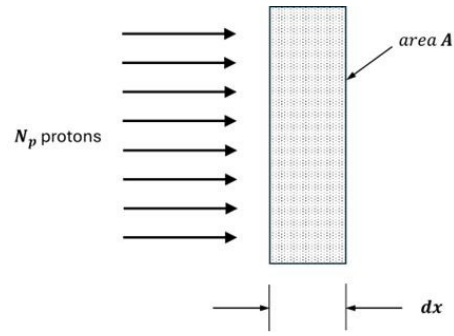


図 2. ターゲットに入射する陽子ビーム

表 1. 陽子の阻止能と飛程（水中、液体）

運動エネルギー (MeV)	S, 総計 (MeV cm ² g ⁻¹)	飛程, CSDA (g cm ⁻²)
5.000E+01	1.245E+01	2.227E+00
5.500E+01	1.154E+01	2.644E+00
6.000E+01	1.078E+01	3.093E+00
6.500E+01	1.013E+01	3.572E+00
7.000E+01	9.559E+00	4.080E+00
7.500E+01	9.063E+00	4.618E+00
8.000E+01	8.625E+00	5.184E+00
8.500E+01	8.236E+00	5.777E+00
9.000E+01	7.888E+00	6.398E+00
9.500E+01	7.573E+00	7.045E+00
1.000E+02	7.289E+00	7.718E+00

問 1.5： 100 MeV、 1×10^9 個・cm⁻²の陽子の用紙ビームが、ビーム方向に厚さ 5.491 cm の水に入射する。核反応を無視すると、水の平均線量 ($\rho_{\text{water}} = 1 \text{ g cm}^{-3}$) はいくらか？尚、水中の 100 MeV 陽子に対する RCSDA は 7.718 g cm^{-2} とする。また、 $R_{\text{res}} = R_{\text{CSDA}} - \text{thickness}$ であり、 R_{CSDA} には対応する陽子の運動エネルギーがあり、表 1 で確認できる。この情報を用いて、陽子の吸収線量を計算せよ。(0.75 点)

パート 2 陽子線治療 (5.0 点)

陽子線はエネルギーを失い、そのほとんどが短い距離（深さ）に集中して照射される。そのパターンは、ビームのエネルギーと標的となる物質によって決まる。エネルギーを調整することで、医師は陽子がエネルギーのほとんどを放出するタイミングと場所を正確に制御することができる。異なるエネルギーの陽子線を組み合わせることで、プラトー状の線量分布を持つ Spread-Out Bragg Peak (SOBP) が形成され、腫瘍の全深さにわたって損傷を与えることができる (図 3)。

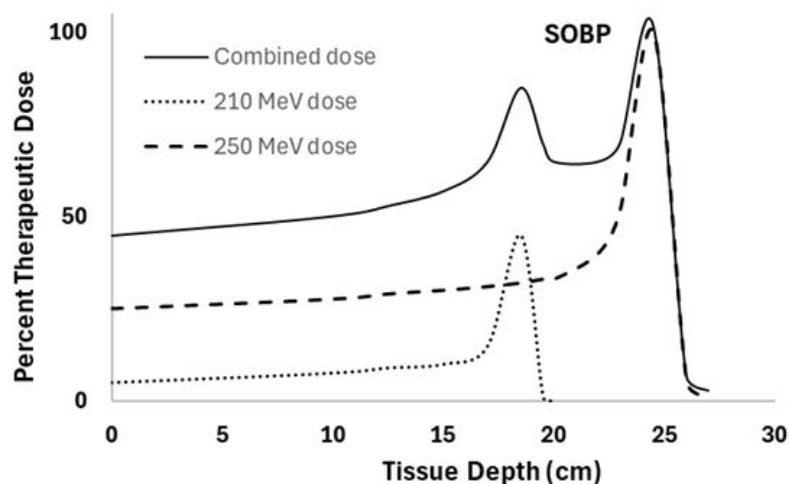


図 3 陽子線の組織に対する治療線量百分率
(Combined Dose は説明用に記したものであり、実際の治療では使用しない)

問 2.1 :

- (a) 矢印を用いて、グラフ(図 3)上で最も高い LET が発生する領域を示せ。(0.3 点)
- (b) (True か False かを回答) 陽子が減速するにつれ、エネルギー損失の割合は粒子の電荷の 2 乗と速度の 2 乗に比例する。(0.3 点)
- (c) (True か False かを回答) 陽子線治療では、光子線治療と比較して射出線量はそれほど考慮されない。(0.3 点)
- (d) 深さ 18cm から 25cm の腫瘍を治療するために、医師が図 3 の SOBP に追加する陽子エネルギーはどれか？ (0.3 点)

A. 260 MeV B. 210 MeV C. 200 MeV D. 235 MeV

生物学的効果を引き起こす放射線（の線量）は、生物学的効果比（RBE）という単位で測定され、通常は 250 keV の X 線または ^{60}Co γ 線で定義される対照放射線（光子）と放射線ビーム（多くの場合、荷電粒子）との間で、同じ生物学的効果を引き起こすのに必要な線量を比較する。同じ放射線量の場合、高 LET 放射線（アルファ粒子、陽子など）は低 LET 放射線（X 線など）よりも大きな損傷を引き起こす。放射線量は、対照条件下で実施された治療の線量が、標的に対して同じ臨床効果をもたらす場合は、isoeffective（等効果）であるとみなす。現在の陽子線治療の臨床ガイドラインでは、陽子線（p）の光子（x）に対する生物学的効果比（RBE）が 1.1 という一定値を使用する。これは、陽子線の生物学的効果比（RBE）が光子（x）よりも高いことを考慮したものである。

RBE を予測するために開発されたモデルの多くは、放射線生物学および物理学の主要なツールである細胞生存の直線-二次曲線（LQ: Linear Quadratic）モデルに基づいている。

$$S(D) = e^{(-\alpha D + \beta D^2)} \quad (7)$$

LQ モデルは、生体外および生体内における電離放射線への反応を分析および予測するために広く使用されてきた。このモデルにおいて、 $S(D)$ は照射線量（ D ）を生き延びた細胞の割合である。このモデルの主なパラメータである α と β は、細胞の種類が放射線損傷に対してどの程度耐性があるかを示す。（ α/β ）が高い（ ~ 10 ）細胞は、1 回当たりの線量が高くても影響を受けにくいことを意味する。

LQ モデル（式 7）においては、陽子吸収線量 D_p と光子線量 D_x が等効果であれば、その関係は次式で表される。

$$\alpha_p D_p + \beta_p D_p^2 = \alpha_x D_x + \beta_x D_x^2 \quad (8)$$

$$\beta_x D_x^2 + \alpha_x D_x - \alpha_p D_p - \beta_p D_p^2 = 0 \quad (9)$$

問 2.2: 式 (9) に基づいて LQ モデルを導き、RBE または $\left(\frac{D_x}{D_p}\right)$ の正の値を求める。適

用可能な項を、以下の式を使用して $\left(\frac{\alpha}{\beta}\right)_x$, RBE_{max} , RBE_{min} を表せ。(1.0 点)

$$RBE_{max} = \frac{\alpha_p}{\alpha_x} \quad \text{and} \quad RBE_{min} = \sqrt{\frac{\beta_p}{\beta_x}}$$

RBE は、粒子の種類、線量平均線形エネルギー付与（ LET_d ）、 $\left(\frac{\alpha}{\beta}\right)_x$ で定義される細胞

または組織の種類、及び分割照射線量 (D_p) に依存する。

表 2 Fit parameters

パラメータ	値
$RBE_{max} = p_0 + \frac{p_1}{(\alpha/\beta)_x} LET_d$	$p_0 = 0.999064$ $p_1 = 0.35605 \text{ Gy (keV } \mu\text{m)}^{-1}$ $p_2 = 1.1012$
$RBE_{min} = p_2 + p_3 \sqrt{\left(\frac{\alpha}{\beta}\right)_x} LET_d$	$p_3 = 0.0038703 \text{ Gy}^{-\frac{1}{2}} (\text{keV } \mu\text{m)}^{-1}$

表 3 細胞株と $(\alpha/\beta)_x$

細胞株	$(\alpha/\beta)_x$
HaCat	15.0
SKMel	3.0

問 2.3 :

(a) 2.2 で導出した LQ モデルと表 2 のパラメータを使用し、陽子線量 ($D_p=2\text{Gy}$) と LET_d ($1.9, 2.5, 4.5 \text{ keV } \mu\text{m}^{-1}$) の関数として、表 3 の 2 つの細胞株における RBE を計算せよ。(1.2 点)

(b) LET_d および細胞の放射線感受性 $(\alpha/\beta)_x$ の観点から、このモデルは陽子線の RBE をどのように予測するのか? (0.4 点)

(c) $D_p=2 \text{ Gy}$ の場合、得られた RBE 値から等効果光子線量 D_x を計算せよ。(1.2 点)

問4 同位体の質量存在量 (10 点)

アインシュタインの特殊相対性理論が示唆する質量とエネルギーの等価性は、原子力科学および技術の分野に多大な影響を与えている。原子核内の核子の結合エネルギーは非常に高い（通常、電子の核への結合エネルギーが eV または keV の範囲であるのに対し、MeV の範囲）ため、核結合エネルギーとして現れるエネルギーは、核質量として現れるエネルギーの相当な割合を占める。したがって、原子核 ${}_Z^AX_N$ の質量は、陽子の質量 m_p と中性子の質量 m_n を足し合わせたもの $(Zm_p + Nm_n)$ に単純に等しくなるわけではない。この事実により、特に質量数が高い核種については、原子質量や核質量の正確な理論計算が不可能となる。そのため、原子質量の正確な測定は実験的手法に依存することになる。核質量とサンプル中の同位体の相対的濃度を測定する際に使用される典型的な実験装置は、質量分析計 (mass spectrograph) または質量分析装置 (mass spectrometer) であり、これらは同じ動作原理に基づいている。図1は質量分析計の主要な構成要素を示す断面図である。

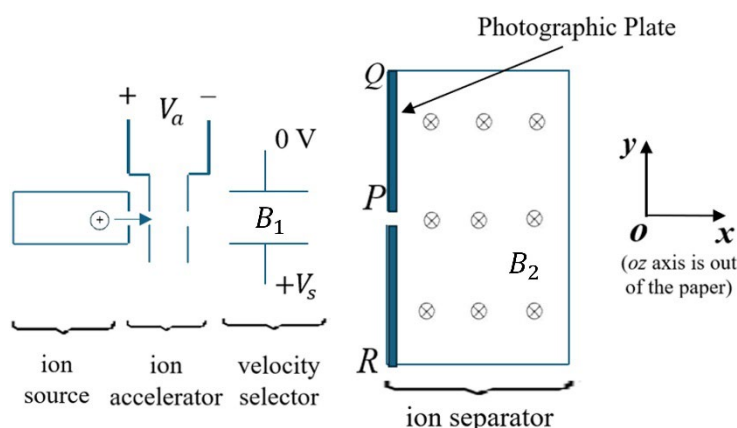


図1 質量分析計の概略図

イオン源 (ion source) で、イオン化された原子のビームが生成される。通常、生成されたイオンは速度の分布が広い状態にある。これらのイオンは、イオン加速器 (ion accelerator) の電位差を通過させることで、より高いエネルギーまで加速される。速度セクタ (velocity selector) の内部では、電界と均一の磁場 (B_1) が適用され、特定の速度を持つイオンだけがイオンセパレータ (ion separator) に入る。イオンはイオンセパレータに入り、そこで2番目の均一磁場 (B_2) の影響下で移動する。イオンが写真乾板 (photographic plate) に衝突すると、入射点に像が形成される。この像の位置を測定することで、イオンの質量を推測することができる。イオンが通過する領域は、高真空状態に維持されている。

パート 1 質量分析計の基礎的な操作 (2.1 点)

質量分析計の校正には、原子質量が正確に 12.000000 u の質量を持つ ^{12}C 同位体のビームが使用される。ここでは、イオン源において単一イオン化された炭素イオンが生成されると仮定する。

問 1.1: $V_a = 1.20\text{ kV}$ のとき、イオン加速器を通過した後のイオンの運動エネルギーの増加分 (ジュール単位) を計算せよ。(0.3 点)

問 1.2: イオン源からほぼゼロの速度で放出されたイオンの、イオン加速器の出口での速度は? ただし、 ^{12}C の原子質量に比べ電子の質量は無視できるものとする。(0.4 点)

速度セクタ内の電場と磁場は、直線に沿って移動し、イオンセパレータに入るイオンの速度が 140.00 km/s になるよう調整されている。

問 1.3:

(a) 磁場 B_1 ($ox, oy, oz, -ox, -oy$ or $-oz$) の方向はどの方向であるべきか? (0.3 点)

(b) $V_s = 400.0\text{ V}$ で、速度セクタのプレートの間の距離が 2.0 cm の場合、 B_1 の磁束密度 (テスラ単位) を計算せよ。(0.7 点)

(c) ^{12}C が二重イオン化された場合の速度セクタを通過した後の速度は? (0.4 点)

パート 2 イオンセパレータ内部でのイオンの挙動 (2.9 点)

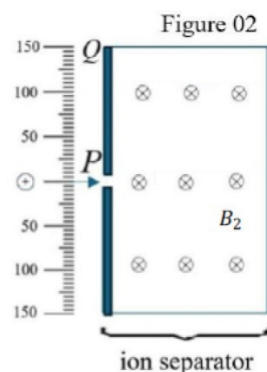
図 1 において、 $PQ = PR = 148\text{ cm}$ であり、 B_2 の磁束密度は 0.030 T である。問 1.3 で与えられたのと同じ速度、すなわち 140.0 km/s で、イオンが P の穴からイオンセパレータに入射すると仮定する。

問 2.1: 単一イオン化された原子について、イオンが点 P から写真乾板に衝突する点までの距離 (cm) を求めよ。(0.7 点)

問 2.2: この質量分析計の距離測定の分解能は 1 mm である。この分光計で測定できる

2つの元素または同位体の最小の原子質量差 $(\Delta m)_{min}$ はいくらか。u単位で答えよ。ただし、電場および磁場に関連する不確かさは無視できるものと仮定する。(1.0点)

問 2.3: イオン源で生成されたイオンビームには、単イオン化および2重イオン化された ^{12}C 原子が含まれていると仮定する。解答用紙の図に、これらのイオンの軌道を描き、それぞれを区別して示せ。各イオンについて、解答用紙に示された縮尺に従って、入射点をできるだけ正確に示すこと。(1.2点)



パート 3 質量分析装置 (1.6 点)

質量分析計で分析できる原子（または核）の質量の範囲は、 B_2 の磁場強度の特定の値に対して、それほど大きくはない。さらに、写真乾板から抽出した情報から、異なる元素や元素の同位体の存在量を定量的に推定することはできない。質量分析計に存在するこれらの欠点は、図2に示すように、イオンセパレータの写真乾板を、装置の焦点面の特定のポイントにある出口スリットに設置された電流測定検出器に置き換えることで解消できる。尚、他のすべての装置部品は、パート1で説明したものと同一であるものとする。このセットアップは、質量分析装置（mass spectrometer）として知られている。

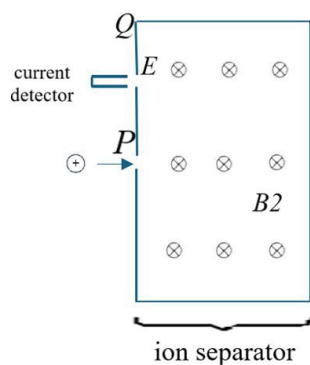


図2 質量分析装置のイオン

質量分析計とは異なり、磁場 B_2 の磁束密度はここでは一定ではない。イオンセパレータに入射するイオンビームは、 B_2 を変化させることで、非常に狭い出口スリット (E) に集束される。入射するイオンビームが異なる同位体の混合物である場合、各同位体を 1 つずつ、スリットに集束することができる。出口スリットの電流は、スリットに設置された電流検出器 (current detector) で計測される。

問 3.1： 質量分析計について、速度セレクトの電界および磁界の設定が問 1.3 (b) で与えられた値と同じである場合を考える。ビーム出口スリット E が P から 80.0cm の距離に位置し、磁束密度 B_2 を 20.0 ~ 320.0 mT の範囲で任意の値に設定できる場合、この分光計で分析できる最小および最大の原子質量 (u 単位) を推定せよ。ただし、すべてのイオンは単一電荷であると仮定する。(1.0 点)

問 3.2： 自然界に存在する天然の炭素から生成されたイオンビームを上述の分光計で分析すると、2 つの安定同位体 ^{12}C と ^{13}C の電流が、それぞれ別々に出口スリットに集光され、それぞれの電流値は 16.5 mA と 185 μA となる。 ^{12}C の存在量と ^{13}C の存在量の比を求めよ。ただし、すべてのイオンが単一電荷であると仮定する。(0.6 点)

パート 4 岩石試料の年代の決定 (3.4 点)

地質学において、地球環境で見つかった岩石試料の年代を特定することは、地球の形成や惑星系の形成に関するさまざまな仮説を理解し、検証する上で不可欠である。サンプルの年代を特定するには、多くの場合、異なる元素や同一元素の異なる同位体の存在量の比率を測定する必要がある。パート 3 で説明したように、これらの比率は質量分析法を使用することで、妥当な精度で求めることができる。

放射性の親各種 P 、 P の崩壊により生成された安定な娘各種 D 、そして D の安定同位体である別の元素 D_s を含む岩石のサンプルの場合を考える。現時点 t_1 において、決定されたこれら各元素の核の数は、それぞれ $N_P(t_1), N_D(t_1), N_{D_s}(t_1)$ である。また、岩石試料が形成された時点 t_0 とし、その時点での対応する核の数は $N_P(t_0), N_D(t_0), N_{D_s}(t_0)$ であるとする。

問 4.1：

(a) $N_P(t_0), N_D(t_0)$ および $N_D(t_1)$ との関係式を書け。(0.4 点)

(b) $P \rightarrow D$ の崩壊定数を λ とし、 $\frac{N_D(t_1)}{N_{D_s}(t_1)}$ の比が $\frac{N_D(t_1)}{N_{D_s}(t_1)} = G \frac{N_P(t_1)}{N_{D_s}(t_1)} + \frac{N_D(t_0)}{N_{D_s}(t_0)}$ と表される場合、

λ, t_0, t_1 を用いて係数 G を求めよ。(0.7 点)

もし多くの岩石試料が同じ起源（例えば、同じガス雲から生じたより小さな粒子の凝縮）から形成されたのであれば、これらの岩石試料すべての $\frac{N_D(t_0)}{N_{D_s}(t_0)}$ 比は同じであったと仮定できる。この条件下では、異なる岩石試料について測定された $\frac{N_P(t_1)}{N_{D_s}(t_1)}$ と $\frac{N_D(t_1)}{N_{D_s}(t_1)}$ の関係は、線形の比例関係になる。

^{87}Rb （半減期 $t_{1/2} = 4.8 \times 10^{10}$ 年）の放射性崩壊により、安定同位体の ^{87}Sr が生成される。パート 3 で説明したものと同様の質量分析装置を使用して、4 つの岩石試料を分析した。 ^{87}Rb 、 ^{87}Sr 、 ^{86}Sr （ ^{87}Sr の安定同位体）の測定値を表 1 に示す。 ^{87}Rb 、 ^{87}Sr 、 ^{86}Sr が、それぞれ元素 P 、 D 、 D_s に相当する。

表 1 岩石資料の測定電流

岩石資料	測定電流 (mA)		
	^{87}Rb	^{87}Sr	^{86}Sr
1	4.8	1.65	1.91
2	0.55	0.81	1.10
3	0.8	0.37	0.46
4	7.4	1.72	1.80

問 4.2 :

(a) 表 1 に示された現在の測定値に基づき、解答用紙の表を完成させよ。答えは有効数字 3 桁で示すこと。(0.8 点)

Table1. Nuclide ratios for the rock samples

Rock Sample	$\frac{N(^{87}\text{Rb})}{N(^{86}\text{Sr})}$	$\frac{N(^{87}\text{Sr})}{N(^{86}\text{Sr})}$
1		
2		
3		
4		

- (b) 問 4.2 (a) のデータを使用して、岩石試料の年代を特定できる適切なグラフを作成せよ。尚、グラフの各軸に選択した変数を明示すること。(0.6 点)
- (c) 問 4.2 (b) で作成したグラフの勾配を求めよ。有効数字 3 桁で答えを示すこと。(0.3 点)
- (d) 岩石試料の年代 (年) を求めよ。(0.6 点)

Q5 原子炉における低濃縮ウラン使用の利点（10 点）

発電用軽水炉（LWRs）では、濃縮度 3～4%（ ^{235}U の重量%）の低濃縮ウラン（LEU）が燃料として使用されているが、実験用・研究用原子炉では、最大で 20% 弱の濃縮ウランが使用される。主に核分裂性の ^{235}U で核分裂反応が誘発され、エネルギーと原子炉を臨界状態（定常状態）に保つ中性子が生成される。 ^{235}U は天然に存在する唯一の核分裂性の核種であり、この物質の核分裂のみでエネルギーをすべて生成しようとする場合、実用的な核分裂燃料の限られた資源はより速く枯渇することになる。ウランの重い同位体である ^{238}U も、高速核分裂と核分裂性核種である ^{239}Pu への転換により、エネルギー生産に貢献している。

この問題では、 ^{238}U の核分裂及び転換が、 ^{235}U や天然ウラン資源をどのようにして節約するのか、また、単位質量当たりの放射能が高い長寿命の放射性廃棄物である ^{236}U の生産をどのようにして削減されるのかを学ぶ。さらに、この問題では、濃縮プロセスにおける核不拡散の側面を最初に扱い、高濃縮ウラン（HEU）の取り扱いにおける重大な安全上の問題について結論付ける。

この問題では、解答は**有効数字 4 桁で答える**こと。また、中間計算では**切り捨てを行わない**こと、すなわち、小問題の結果がその後の部分で使用される場合は、丸めを行わずに計算を進めること。

パート 1 ウラン濃縮（3.5 点）

ウラン濃縮は、天然ウランすなわち天然同位体濃度を有するウラン中の ^{235}U と ^{238}U を分離することによって達成される。典型的な手順では、同位体を分離する装置に六フッ化ウラン（ UF_6 ）を注入する。この装置には、濃縮度 x_F （重量分率）の天然ウランの質量 M_F を注入するフィーダーが備えられている。すると、この装置は質量 M_P 、濃縮度 x_P の濃縮ウランと、質量 M_T 、濃縮度 x_T の劣化ウラン（tails と呼ばれる）を生成する。直観的には、 $x_P > x_F$ $> x_T$ となる。物質の流れを図 1 に示す。



図 1 濃縮プラントにおける材料の流れ

問 1.1 :

(a) 理想的な濃縮プラントを考える。ウランの質量保存の式と ^{235}U の含有率を書け。(0.1 点)

(b) M_F と M_P の関係式を導け。(0.3 点)

生成物中の ^{235}U の量は、次のように計算できる。 $M_{235} = x_P M_P$

問 1.2 : $x_T = 0.002$ 、 ^{235}U の天然存在比を $x_F = 0.72\%$ とすると、以下の濃縮レベルにおける製品中の供給質量 M_F を ^{235}U の質量 (M_{235}) を用いて表せ。

(a) 原子力発電所燃料用として 3% (0.5 点)

(b) TRIGA などの研究炉燃料用として 19.7% (0.5 点)

分離作業量 (SWU: separate work unit) では、濃縮プラントが ^{235}U および ^{238}U 同位体を分離するために行う作業量を測定する。SWU の算出は、濃縮プラントの経済性および核燃料コストを算出する上で極めて重要である。SWU は、以下の式で算出される。

$$SWU = M_P[V(x_P) - V(x_T)] - M_F[V(x_F) - V(x_T)] \quad (1)$$

ここで、関数 $V(x)$ は価値関数として知られており、次式で与えられる。

$$V(x) = (1 - 2x) \ln\left(\frac{1-x}{x}\right) \quad (2)$$

ここで、 x は重量分率の濃縮度である。

問 1.3 :

(a) パート 1.2 で与えられた x_T と x_F は同じ値、および $M_F = 1000 \text{ kg}$ であるとして、ウラン濃縮度 1.0 %、3.0 %、10.0 %、20.0 %、50.0 %、90.0 % の SWU を計算せよ。(1.2 点)

(b) x_P を SWU の関数としてプロットせよ。y 軸の値を示せ。尚、兵器化可能なウランの場合は、90 % 以上の濃縮を必要とする。(0.6 点)

(c) 商業用および民生用原子炉燃料の濃縮限界値を超える場合と比較して、低濃縮ウランを 20 % まで濃縮するために必要な分離作業について、どのようなことが言えるか？

注：濃縮限界値は、核兵器の拡散を防止するための指標である。(0.3 点)

パート 2 ^{235}U および ^{238}U から放出されるエネルギー (4.0 点)

軽水炉 (LWRs) では、核分裂性物質と相互作用する低速中性子が、他の相互作用と比較して相互作用断面積 (σ) が大幅に高いため、放射線捕獲や核分裂が起こりやすくなる。放射捕獲により相互作用する ^{235}U は、放射性 ^{236}U に変換される。放射捕獲断面積 (σ_γ) は、吸収断面積 (σ_a) と放出断面積 (σ_f) から、次の関係式によって求めることができる。

$$\sigma_\gamma = \sigma_a - \sigma_f$$

表 1 核分裂核種の熱中性子断面積データ

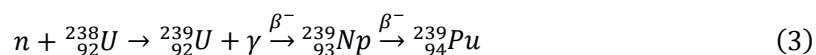
核分裂核	σ_a (barns)	σ_f (barns)
^{233}U	578.8	531.1
^{235}U	680.8	582.2
^{239}Pu	1011.3	742.5
^{241}Pu	1377.0	1009.0

年間 5×10^{10} kWh の電力需要がある国における仮想的な地域を考える。この電力需要を原子力発電所のみで賄い、発電所の効率は 30 % と仮定する。核分裂プロセスで放出される 200 MeV の全エネルギーのうち、5 % はニュートリノによって運び去られ、原子炉内で吸収されることはない。原子核種の質量数を用いて原子質量値を近似すると、 ^{235}U による核分裂のみを考慮し、年間 365 日稼働している場合、以下の値が重要な指標となる。

表 2 仮想地域における年間原子力発電パラメータ (^{235}U のみを燃料とした場合)

^{235}U 中性子吸収時の核分裂確率	0.8552
^{239}Pu 中性子吸収時の核分裂確率	0.7342
総発電量	5708 MW
^{235}U の核分裂生成物	7691 kg
^{235}U の総消費質量	8994 kg
用いられた天然ウランの総質量	1.631×10^6 kg
生成された ^{236}U の総質量	1308 kg

原子炉内の中性子も、 ^{235}U の中性子吸収と同様に、 ^{238}U によって吸収される。熱中性子炉（サーマルリアクタ）では、 ^{238}U によって吸収された中性子のほとんどが、以下の反応により、 ^{239}Pu に変換される。



前述の通り、ほとんどの近代的な原子炉は、主に ^{238}U で構成される低濃縮ウラン燃料を使用している。このため、 ^{238}U から ^{239}Pu への転換は、通常の原子炉運転中に日常的に発生する。典型的な熱中性子炉で軽水炉級ウラン燃料を使用する場合、共鳴吸収により核分裂中性子の 20 %が ^{238}U から ^{239}Pu への転換に使用される。さらに、炉心での燃料の滞留時間中に、全体の核分裂のうち約 35 %がプルトニウムで、5 %が ^{238}U となる。

問 2.1： 1 回の核分裂につき 2.6 個の中性子が発生すると仮定すると、 5×10^{10} kWh の電力を発電するために使用されるすべての原子炉において、1 年間に何キログラムのプルトニウムが生成されるか？（0.6 点）

問 2.2： 原子力発電所では 3.5 wt.%の濃縮ウランを使用し、濃縮プラントは $x_T = 0.002$ 、 $x_F = 0.0072$ で稼働していると仮定する。

(a) 核分裂した ^{235}U の量をキログラム単位で計算せよ。（0.6 点）

(b) 消費された ^{235}U の量をキログラム単位で計算せよ。（0.6 点）

(c) 2.2b で計算した核分裂性物質を製造するために必要となる天然ウランの量（キログラム）を計算せよ。（0.8 点）

(d) 表 2 の値と比較して、 ^{239}Pu の寄与と ^{238}U の高速核分裂により節約された天然ウランの量（キログラム）を示せ。（0.2 点）

問 2.3： すべての原子炉に 1 年後に存在する ^{236}U と ^{240}Pu の質量はいくらか？（1.2 点）

パート 3 臨界事故（2.5 点）

兵器利用可能な物質の拡散を防止するだけでなく、商業用原子炉における低濃縮ウランの利用は、臨界事故の可能性を低減することで設計上の安全性を確保する。臨界事故とは、自己維持または発散的な連鎖反応が偶発的に発生することによるエネルギーの放出を指す。ここでは、高濃縮ウランで発生した臨界事故の例を検証する。

1968 年 4 月 5 日、ウラル山脈南部のエカテリンブルクとチェリャビンスクの間にあるロシア連邦核センター（VNIITF）で臨界事故が発生した。VNIITF では、1957 年より材料の耐放射線性を研究するための原子炉開発の一環として臨界実験が行われてきた。使用された装置の一つに、FKBN 垂直リフト組立機がある。これは、厚い減速材に囲まれた大きな空洞を持つ球形金属シェルをさまざまな臨界条件で組み立てるものである。この構成により、静的およびパルスモードでの動作が可能となり、原子炉システムの運動特性の研究が可能となった。

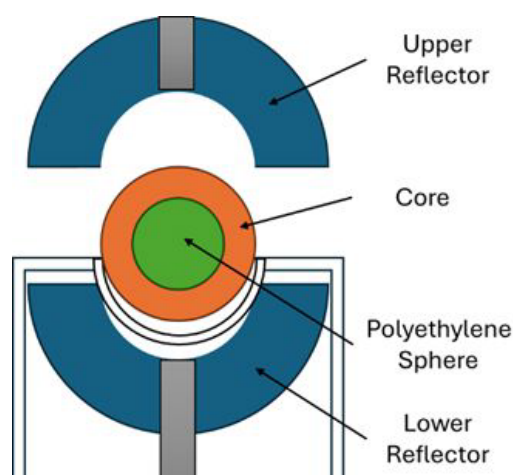


図 2. FKBN アセンブリの事故状況の概略

事故発生時の FKBN アセンブリの構成を図 2 に示す。47.7kg の 90 % 濃縮(重量%) ウラン球状金属シェルコアで構成されており、内部空洞には固体ポリエチレン球が含まれている。周囲の球形反射体は天然ウラン金属製で、内半径 91.5 mm、外半径 200 mm、上下 2 つに分割されている。反射器の上半分を炉心に降ろしている際に事故が発生し、放射線の急増により 2 名の作業員が死亡した。この炉の暴走により、推定 6×10^{16} 回の核分裂が発生した。事故の主な原因は、反射器下部の位置が正しくなかったことであることが判明した。

問 3.1： 事故で放出されたエネルギーは、高爆発性物質換算で何キログラム単位か（1J = 2.390×10^{-7} kg の TNT 火薬）。核分裂 1 回につき 200 MeV 放出されたと仮定する。
(0.5 点)

臨界事故の被害者の一人は、シニアスペシャリスト（ベテランの安全専門家）である。彼は、中性子とガンマ線の推定累積線量が 5～10 Sv の距離の、装置から 1.7m 離れた場所にいた。表 3 に、 $^{235}\text{U}(n, f)$ 反応による外部被ばく線量計算に関連するパラメータを示す。

表3 外部線量計算に関連する $^{235}\text{U}(\text{n}, \text{f})$ 反応のパラメータ

パラメータ	値
平均即発ガンマ線収量/核分裂	8.58
平均ガンマ線エネルギー (MeV)	0.85
光子フルエンス 0.85MeV の線量係数 (pSv · cm ²)	3.92
平均中性子収量/核分裂 (2.0MeV 入射中性子)	2.80
即発中性子平均エネルギー (MeV)	2.0
中性子フルエンス 2.0MeV 線量係数 (pSv · cm ²)	407

点線源に対する減衰のない実効線量 (E) は、以下のように近似できる。

$$E = \frac{C_D S}{4\pi r^2} \quad (4)$$

ここで、 C_D は適切なフルエンス-線量変換係数、 S は線源の強度 (粒子/秒)、 r はソースからの距離である。

問 3.2: シニアスペシャリストに対する光子の実効線量を、点線源近似を用いて、天然ウラン反射体の遮へいおよび散乱効果を無視して Sv 単位で推定せよ。(1.0 点)

問 3.3: 中性子からの実効線量と、点線源近似による総実効線量を推定する。線量に最も寄与した電離放射線はどれか? (1.0 点)