

基礎 V

以下の文章を読んで、問(1)～(4)に答えよ．必要に応じて、下枠内の値を用いよ．

- ・ディラック定数 $\hbar$: $1.054 \times 10^{-34} \text{ m}^2 \text{ kg s}^{-1}$, ・電子の質量 m_e : $9.109 \times 10^{-31} \text{ kg}$,
- ・電気素量 e : $1.602 \times 10^{-19} \text{ C}$, ・真空中での光速 c : $2.998 \times 10^8 \text{ m s}^{-1}$,
- ・円周率 π : 3.142

π 電子は分子中の 結合の形成に関与する．図 1 に示すように、ベンゼン分子は 6 個の炭素原子からなる六員環を分子骨格にもち、6 個の π 電子をもつ．ベンゼン分子中の π 電子は六員環内で しているため、円周上に閉じ込められた自由電子による近似によってベンゼンの光物性を議論することができる．

半径 a の円周上（図 1 中の点線）を運動する電子のシュレーディンガー方程式は m_e , $\hbar$, a , 角度 θ , エネルギー E , 波動関数 $\psi(\theta)$ を用いて(1)式のように表される．

$$-\frac{\hbar^2}{2a^2 m_e} \frac{d^2 \psi(\theta)}{d\theta^2} = E \psi(\theta) \quad (1)$$

$\psi(\theta)$ は実数 k , 定数 C および虚数単位 i を用いて(2)式のように表せる．

$$\psi(\theta) = C \exp(ik\theta) \quad (2)$$

ここで、円周上を運動する電子は周期的境界条件 $\psi(\theta) = \text{$ を満たす必要があるので、これを(2)式に代入すると、(3)式の関係が得られる．

$$\exp(2\pi i k) = 1 \quad (3)$$

したがって、(3)式を満たす k は のように不連続な値をとる．さらに、(1)式と(2)式よりエネルギーは $E = \text{$ と導かれる．

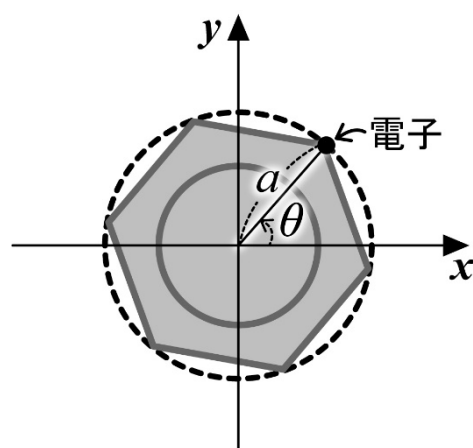


図 1. ベンゼンの分子構造（灰色の箇所）と円周上（黒点線）を運動する電子．

基礎 V (続き)

- (1) 空欄 ～ にあてはまる最も適切なものを下枠内から選んで答えよ。

① 静止, ② 局在化, ③ 非局在化, ④ 励起, ⑤ 拡散, ⑥ 単, ⑦ σ , ⑧ 多重 (二重および三重), ⑨ 分子間, ⑩ イオン, ⑪ $0, 1, 2, 3\cdots$, ⑫ $\pm 1, \pm 2, \pm 3\cdots$, ⑬ $0, \pm 1, \pm 2, \pm 3\cdots$, ⑭ $0, \pm 1/2, \pm 3/2, \pm 5/2\cdots$

- (2) 空欄 および にあてはまる適切な式を答えよ。

- (3) ベンゼン分子を半径 0.140 nm の円と近似して、ベンゼン分子中の π 電子のエネルギー準位と基底状態における電子配置を図示せよ。エネルギー準位と電子配置は、図 2 の例にならって、 π 電子が占有する全てのエネルギー準位とそれらよりも一つエネルギーの高い準位までを記し、各準位間のエネルギー差 $\Delta E[\text{eV}]$ も数値で記せ。なお、図中の $\uparrow$ および $\downarrow$ は、それぞれ上向きおよび下向きスピンをもつ電子を表す。

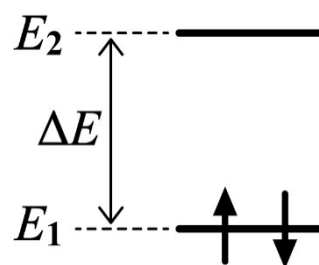


図 2. エネルギー準位と電子配置の記載例。

- (4) ベンゼン分子を半径 0.140 nm の円と近似するモデルを用いて、ベンゼン分子の最大吸収波長 $\lambda_{\text{max}}[\text{nm}]$ を求めよ。また、ベンゼンは常温常圧下で液体である。ベンゼンの液体の色について理由と共に答えよ。

専 門

2025年8月20日

9:00～11:30

(注意事項)

1. この問題冊子には表紙 1 枚，問題用紙 20 枚，下書き用紙 2 枚の計 23 枚が綴じ込んである。
2. 問題は専門Ⅰと専門Ⅱ-1～専門Ⅱ-4 の 5 つの大問から構成されている。
専門Ⅰについては必ず解答せよ。
専門Ⅱ-1～専門Ⅱ-4 についてはそれらから 1 つの大問を選択して解答せよ。
3. 専門Ⅰの解答には，下表に従って 2 枚の答案用紙を使用せよ。

大問	1 枚目	2 枚目
専門Ⅰ	問題 1	問題 2

4. 専門Ⅱの選択した大問の解答には，それぞれ下表に従って答案用紙 1 枚あるいは 3 枚を使用せよ。必要であれば裏面を使用してもよい。

大問	1 枚目	2 枚目	3 枚目
専門Ⅱ-1	問題 1	問題 2	問題 3
専門Ⅱ-2	問題 1	問題 2	問題 3
専門Ⅱ-3	問題 1	問題 2	問題 3, 4
専門Ⅱ-4	問題 1	使用しない	使用しない

5. 各答案用紙には，第一志望専攻，受験番号，解答する大問の番号（Ⅰ，Ⅱ-1，Ⅱ-2，Ⅱ-3，Ⅱ-4 のいずれか）を記入せよ。
6. 余った答案用紙には受験番号を記載せず，大きく斜め線を入れよ。
7. 問題冊子，下書き用紙，答案用紙はすべて回収する。
8. 必要に応じて下書き用紙 2 枚を使用してよい。
9. 試験終了まで退室できない。
10. 携帯電話，タブレット端末などの電子機器は電源を切り鞆に入れること。
11. 問題の解答には，必要に応じて貸与した電卓を使用してもよい。
12. 試験時に机の上に置いて良いものは以下の通りである
受験票（必須），時計（計算・通信機能が無いもの），筆記用具（鉛筆，シャープペンシル，消しゴム，定規），ハンカチ，ティッシュペーパー（入れ物から出したもの）

エネルギー理工学専攻・総合エネルギー工学専攻

問題1 「電源」にはいくつかの種類があるが、「安全性」を前提とした上で、「安定供給」「経済効率性」「環境への適合」のバランスをとりながら、複数の電源を組み合わせて使うことが重要である。資源エネルギー庁では、日本における各電源のコスト面の特徴をあきらかにし、2030 年にむけたエネルギー政策の議論の参考にすべく調査が行われている。以下の問いに答えよ。

- (1) 図 1 は 2020 年の電源別発電コスト試算結果の構成である。コストに含まれるのは、化石燃料の価格や核燃料サイクルの費用などの「①燃料費」、人件費や修繕費などの「②運転維持費」、CO₂ 対策費や事故リスク対応費用などの「③社会的費用」、原子力発電の立地地域への交付金、固定価格買取制度に伴う経費などの「④政策経費」、建設費や固定資産税などの「資本費」である。図中の A～D に当てはまる費用を①～④から選べ。
- (2) 複数の電源を組み合わせる電源構成においては、図 1 で示した電源別の発電コストのみならず、各電源を電力システムに受け入れる際に電力システム全体に与える影響に伴うコスト(統合コストと呼ばれる)を評価する必要がある。図 2 は統合コストの一部を考慮した場合と考慮していない場合の発電コストの試算を示している。この試算では、2030 年のエネルギー需給の見通し(エネルギーミックス)が達成された状態から、さらに E～H の各電源を少し追加した場合に電力システム全体に追加的に生じるコストを統合コストの一部として計算している。具体的には、他の調整電源(火力等)の設備利用率の低下等による発電効率の低下、需要を超えた分の発電量を揚水で蓄電・放電することによる損失や、再生可能エネルギーの出力抑制、追加した電源自身の設備利用率の変化を考慮している。図中の E～H に当てはまる発電方式を次の①～④から選べ。
- ①LNG 火力、②陸上風力、③事業用太陽光、④原子力
- (3) 洋上風力発電は、国内の再生可能エネルギーの主力電源の一つとして導入拡大が期待されているが、その課題および解決策について図 1, 2 も参考にしてできるだけ多様な視点で 400 字程度で論ぜよ。

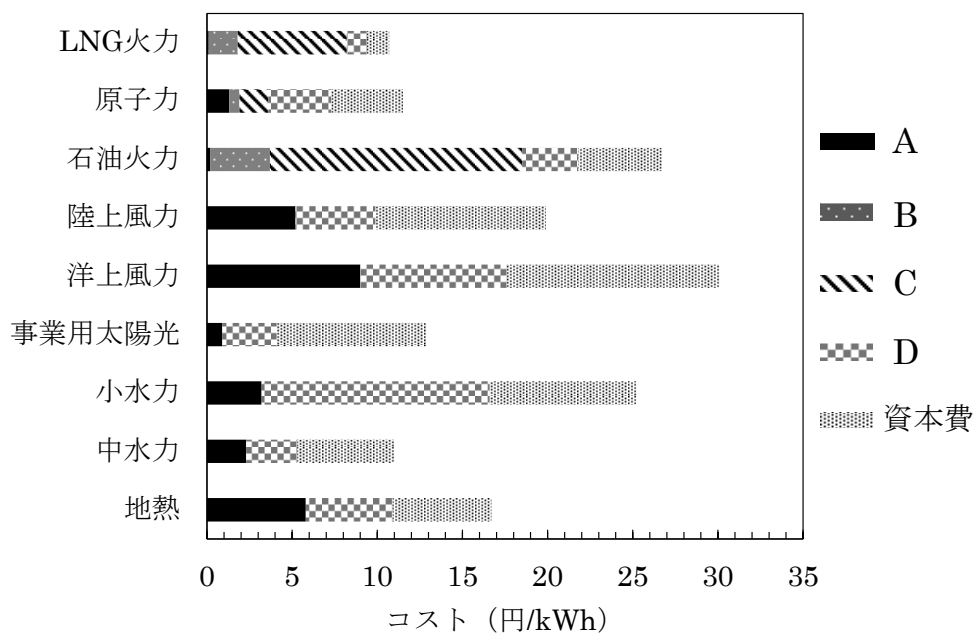


図1 2020年の電源別発電コスト試算結果の構成
(LNG:液化天然ガス)

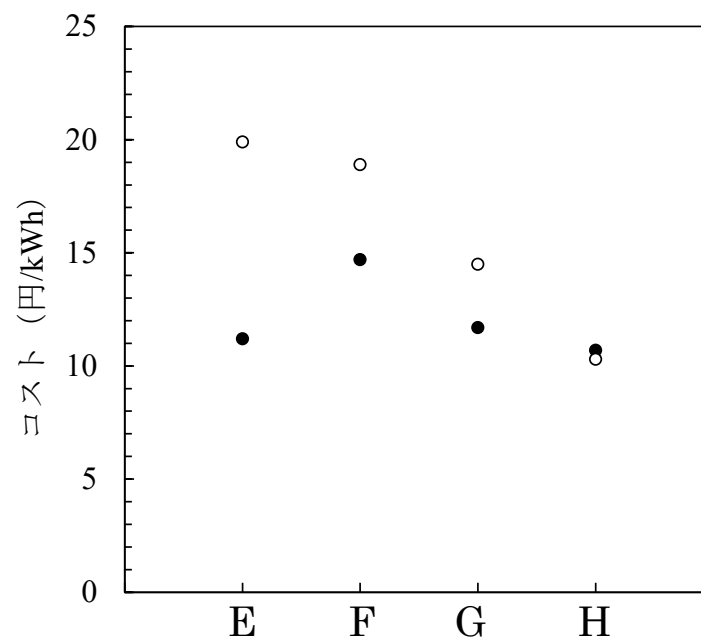


図2 2030年における統合コストの一部を考慮した場合(中抜き丸○で表示)と考慮しない場合(塗りつぶし丸●で表示)の発電コストの試算

参考文献：経済産業省発電コスト検証ワーキンググループ，基本政策分科会に対する発電コスト検証に関する報告，令和3年9月．

専門：I(続き)

問題 2 太陽放射エネルギーについて以下の問いに答えよ. 地球軌道上の宇宙空間での太陽からの放射パワー密度(太陽定数)を 1.366 kW/m^2 とする. 数値は有効数字 2 桁で答えること. 問(1)から(4)については導出過程も示すこと.

- (1) 太陽光が太陽から等方的に放射されるとして, 太陽の全放射パワーを求めよ. 地球軌道半径を $1.496 \times 10^{11} \text{ m}$ とする.
- (2) 太陽内部では, 4 個の軽水素原子核(陽子)が 1 個のヘリウム 4 原子核に変換され 26.65 MeV のエネルギーが放出される核融合反応が起きている. 太陽の全放射パワーがこの核融合反応によるものとして, 太陽内部で1秒間に消費される水素(水素原子核)の質量を求めよ. 水素原子核の質量を $1.673 \times 10^{-27} \text{ kg}$ とする.
- (3) 太陽定数を用いて, 地球表面の赤道上で太陽からの放射パワー密度の 1 日(24 時間)平均値を求めよ. 大気での太陽光の吸収・反射はないものとする. また, 地球の自転軸(地軸)は地球の公転面に垂直と仮定する.
- (4) 日本の第7次エネルギー基本計画(2025 年 2 月閣議決定)の関連資料「2040 年度におけるエネルギー需給の見通し」では, 2040 年度の国内の発電電力量を $1.1 \sim 1.2$ 兆 kWh 程度, そのうちの 23~29%程度を太陽光発電によるものとしている. 発電電力量 1.1 兆 kWh の 23%を太陽光発電で賄うとしたとき, 必要な太陽電池パネル面積の国土面積に対する割合を求めよ. ただし, 日本における太陽からの放射パワー密度の 1 日平均値を 160 W/m^2 , 太陽電池パネルの発電効率を 20%, 1 年を 365 日, 日本の国土面積を $378,000 \text{ km}^2$ とする. 太陽電池パネルの発電電力は損失なく電力系統へ供給されるものと仮定する.
- (5) 発電方式には, 太陽放射エネルギーを起源とするものと起源としないものがある. 下記のそれぞれの発電方式において, 太陽放射エネルギーを起源とするものには T, 起源としないものには F を記せ.
 - (a) 石炭火力, (b) 原子力, (c) 風力, (d) 水力, (e) 地熱

問題 1 自由な粒子(力の働いていない粒子)に対する一次元のシュレーディンガー方程式を次の手順で導出する. ここで, 粒子の質量を m , 運動エネルギーを E , 角振動数を ω , 波数を k , 運動量を p , 時間を t とする. ただし, h はプランク定数, それを 2π で割ったものを $\hbar$ とする.

- (1) 角振動数 ω および波数 k を, それぞれ振動数 f , 波長 λ のどちらかを用いて表せ.
- (2) 光量子に対するアインシュタインの関係式を, 角振動数 ω を用いて記せ.
- (3) 物質粒子に対するド・ブロイの関係式を, 波数 k を用いて記せ.
- (4) 自由な粒子の運動エネルギー E と運動量 p , 質量 m の関係式を記せ.
- (5) 上記(4)で解答した関係式を, $\hbar$, ω , k , m を用いて書きなおせ.
- (6) x 方向に進行する一次元平面波の複素数表現 $\psi(x, t) = \exp[i(kx - \omega t)]$ について, $\frac{\partial \psi}{\partial t}$, $\frac{\partial^2 \psi}{\partial x^2}$ を計算せよ.
- (7) 上記(5)と(6)から, x 方向に運動する自由な粒子に対する一次元のシュレーディンガー方程式を導出せよ.

問題 2 材料に関する以下の問いに答えよ. 数式および図は文字数に考慮しない.

- (1) 結晶における単位構造と格子について, 50 字程度で説明せよ.
- (2) 結晶の対称要素の回転 n と回反 $\bar{n}$ について, 100 字程度で説明せよ.
- (3) 実格子と逆格子の関係について 100 字程度で説明せよ. 必要に応じて, 説明に数式を用いても良い.
- (4) 第一ブリルアンゾーンの定義を 100 字程度で説明せよ.
- (5) 刃状転移とらせん転移の違いを説明せよ. また, それぞれについて, 転移線とバーガースベクトルとの関係を述べよ. 必要に応じて作図してもよい. 説明は全体で 150 字程度とする.
- (6) 液相から固相への冷却過程(圧力一定)を考える. 一成分系では, 液相と固相の二相が共存している間, 温度は一定となる. 一方, 全率固溶型の二成分系では一定でない. 一成分系と全率固溶型の二成分系で冷却過程が異なる理由を 150 字程度で説明せよ.

専門:II-1(続き)

問題 3 格子比熱に関する以下の問いに答えよ. ここで, ボルツマン定数を k_B , 絶対温度を T , 気体定数を R , アボガドロ定数を N_A とする.

- (1) デュロン=プティの法則を 100 字程度で説明せよ.
- (2) 固体中での原子の格子振動をそれぞれ独立な調和振動子として考えることで, 固体の定積モル比熱 C_V の古典的予測値を導出せよ.
- (3) 上記の問(2)で導出した比熱が実験結果と一致しない温度領域と, その理由を述べよ.

専門：II-2

問題1 以下の文章を読み、問(1)、(2)に答えよ。

(1) 図1は、原子核の比結合エネルギー（核子あたりの結合エネルギー）の実験値（折れ線）と、半実験的質量公式（滑らかな細線）を示している。次の問1),2)に答えよ。

1) この図の半実験的質量公式のグラフから ^{235}U が熱中性子を吸収して生成した ^{236}U が質量数90と146の核種に核分裂したときに放出されるエネルギー(MeV)の概算値を、計算過程を示して答えよ。

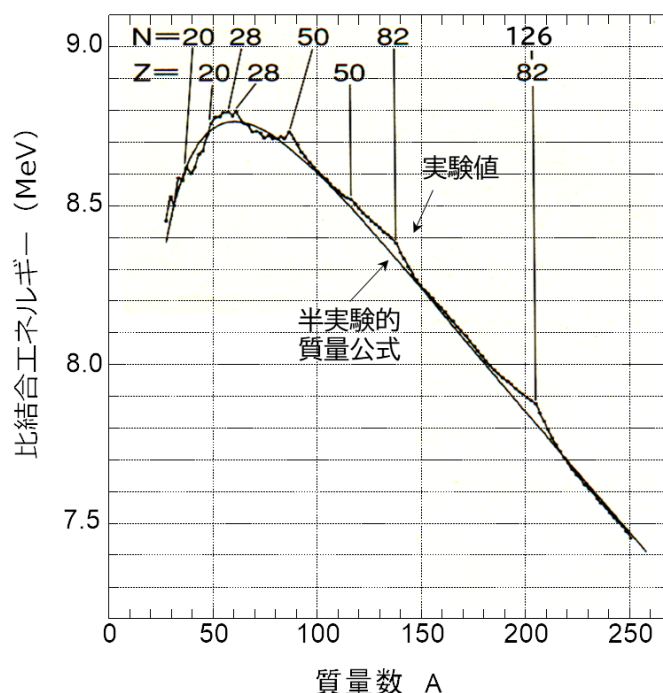


図1 質量数に対する原子核の比結合エネルギーの実験値（折れ線）と半実験的質量公式（滑らかな細線）（素粒子・原子核物理入門 B.ポップ他著、柴田利明訳より引用・改編）

2) 次の ア イ ウ エ に当てはまる適切な語句を答えよ。

図1で、中性子数 $N=20, 28, 50, 82, 126$ 、陽子数 $Z=20, 28, 50, 82$ の数を ア という。比結合エネルギーの質量数に対する依存性は、半実験的質量公式がおおよそよく再現しているが、この質量公式では原子核を イ 模型で考えている。 $N=50, 82, 126$ 、 $Z=50, 82$ 付近の実験値は、わずかではあるが周りに比べて系統的に大きくなっている。このことは、 ア 付近では近傍の核種よりも ウ であることを意味している。この付近では イ 模型よりも原子模型の類推である エ 模型が良く成り立つ。

次ページに続く

専門：II-2（続き）

- (2) 熱中性子による ^{235}U の核分裂における質量数に対する収率の概形を、図 2 を参考にして描け。（縦軸は常用対数スケール）

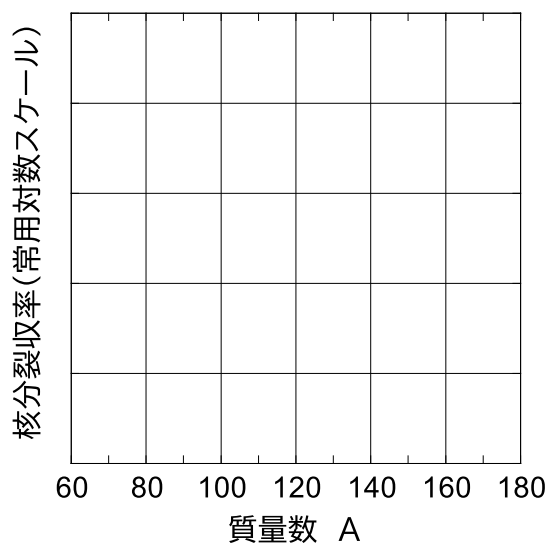


図 2 熱中性子による ^{235}U の核分裂における質量数に対する収率

専門：II-2（続き）

問題 2 以下の文章を読み，問(1)，(2)に答えよ．

- (1) 均質な核燃料を 1 辺の長さ a (m) の立方体の形にした原子炉を考える．直交座標系 (x, y, z) で考えた原子炉の内部 $(-a/2 \leq x \leq a/2, -a/2 \leq y \leq a/2, -a/2 \leq z \leq a/2)$ において，エネルギー 1 群の中性子拡散方程式は以下のように表すことができる．

$$-D \left(\frac{\partial^2 \phi(x, y, z)}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 \phi(x, y, z)}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 \phi(x, y, z)}{\partial z^2} \right) + \Sigma_a \phi(x, y, z) = \frac{1}{k_{\text{eff}}} \nu \Sigma_f \phi(x, y, z)$$

上式における各記号の意味は以下のとおりである．

k_{eff} ：実効増倍率，

D ：拡散係数 (m)，

Σ_a ：巨視的吸収断面積 (m^{-1})，

Σ_f ：巨視的核分裂断面積 (m^{-1})，

ν ：核分裂 1 回あたりに放出される平均中性子数，

$\phi(x, y, z)$ ：位置 x, y, z における中性子束 ($\text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$)．

以上で示す記号を用いて，次の問 1), 2) に答えよ．

- 1) 原子炉内の中性子束の空間分布 $\phi(x, y, z)$ が $\cos(\pi x/a) \cos(\pi y/a) \cos(\pi z/a)$ に比例した形状で表されるとき，実効増倍率 k_{eff} を求めよ．
- 2) この原子炉がちょうど臨界になったとき，1 辺の長さ a を求めよ．

- (2) 原子炉を運転することで，図 1 に示すような燃焼チェーンに従って，安定核種 ^{133}Cs および放射性核種 ^{134}Cs と ^{137}Cs が生成される．ここで， ^{133}Cs , ^{134}Cs , ^{137}Cs の原子数密度 (m^{-3}) をそれぞれ $L(t)$, $M(t)$, $N(t)$ として，次の問 1), 2) に答えよ．

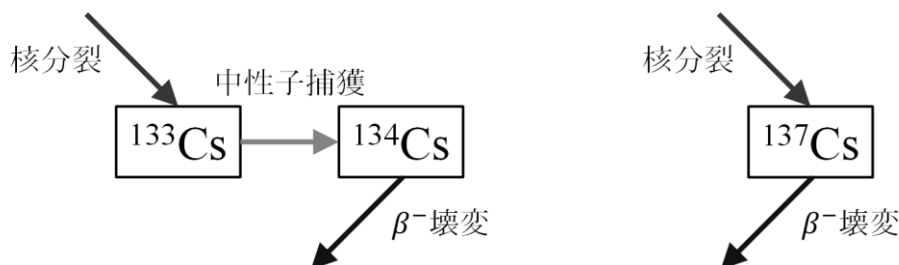


図 1 ^{133}Cs , ^{134}Cs , ^{137}Cs の燃焼チェーン

次ページに続く

- 1) 運転中の原子炉において、 ^{133}Cs 生成率[ア]と比べ ^{133}Cs 消滅率[イ] $\times L(t)$ は十分小さい．また ^{134}Cs と ^{137}Cs の半減期が長いため、 ^{134}Cs の生成率[イ] $\times L(t)$ に比べて ^{134}Cs 消滅率[ウ] は十分小さく、 ^{137}Cs の生成率[エ] に比べて ^{137}Cs の消滅率[オ] も十分小さい．従って、 ^{133}Cs 、 ^{134}Cs 、 ^{137}Cs の燃焼方程式は、それぞれ以下のように近似できる．

$$\frac{dL(t)}{dt} \approx [\text{ア}], \quad \frac{dM(t)}{dt} \approx [\text{イ}] \times L(t), \quad \frac{dN(t)}{dt} \approx [\text{エ}]$$

初期時刻 $t = 0$ s において燃料中に ^{133}Cs 、 ^{134}Cs 、 ^{137}Cs が無いため、運転後の時刻 t における ^{133}Cs 、 ^{134}Cs 、 ^{137}Cs 原子数密度 $L(t)$ 、 $M(t)$ 、 $N(t)$ の近似解は、以下のよう求めることができる．

$$L(t) \approx [\text{ア}] \times t, \quad M(t) \approx \frac{[\text{ア}] \times [\text{イ}]}{2} t^2, \quad N(t) \approx [\text{エ}] \times t$$

[ア]～[オ]に当てはまる数式を、以下で示す記号を用いて表せ．

σ_c : ^{133}Cs の微視的捕獲断面積 (m^2),

Σ_f : 巨視的核分裂断面積 (m^{-1}),

$\bar{\phi}$: 運転時の中性子束の平均値 ($\text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$),

γ_L : 核分裂 1 回あたりに生じる ^{133}Cs 原子数,

γ_N : 核分裂 1 回あたりに生じる ^{137}Cs 原子数,

λ_M : ^{134}Cs の壊変定数 (s^{-1}), λ_N : ^{137}Cs の壊変定数 (s^{-1}).

- 2) 上の問 1) で用いた近似により、 $(^{134}\text{Cs} \text{ 放射能強度}) \div (^{137}\text{Cs} \text{ 放射能強度})$ の比が核燃料の燃焼時間 T に比例して、以下のように増加することが分かる．

$$\frac{\lambda_M M(t)}{\lambda_N N(t)} = \frac{\lambda_M \sigma_c \bar{\phi} \gamma_L}{2 \lambda_N \gamma_N} T$$

東京電力福島第一原子力発電所で発生した事故の場合、環境中に放出された $(^{134}\text{Cs} \text{ 放射能強度}) \div (^{137}\text{Cs} \text{ 放射能強度})$ の比は 1.0 であった．上式に基づいて、損傷した核燃料の燃焼期間 T を、有効数字 2 桁の年単位で求めよ．

ただし、 $\gamma_L = 0.067$, $\gamma_N = 0.062$, $\lambda_M = 1.1 \times 10^{-8} \text{ s}^{-1}$, $\lambda_N = 7.3 \times 10^{-10} \text{ s}^{-1}$, $\sigma_c \bar{\phi} = 3.0 \times 10^{-9} \text{ s}^{-1}$ とする．

専門：II-2（続き）

問題3 以下の文章を読み、問(1)～(3)に答えよ。

- (1) ^{134}Cs と ^{137}Cs から放出される γ 線を放射線検出器で計数して放射能強度を測定する方法についての以下の説明を読んで、問 1)～4)に答えよ。

^{137}Cs は、 β^- 壊変により安定な ^{137}Ba に壊変する放射性核種であり、半減期は約 30 年である。この過程で 661.7 keV の γ 線が放出される。このような γ 線のエネルギーは、アのエネルギー準位を反映している。 ^{134}Cs も同様に β^- 壊変する核種（半減期 約 2.1 年）であり、壊変により安定なイになる。この過程では主に 604.7 keV や 795.9 keV などのエネルギーの複数の γ 線が極めて短い時間に放出される。①エネルギー分解能を有している放射線検出器を用いて、 ^{134}Cs や ^{137}Cs に起因する γ 線の入射に伴う出力パルスとその波高値を区別して計数すると、波高分布スペクトルを得ることができる。波高分布スペクトルにおいて、上記のエネルギーに対応した②全吸収ピークの計数 N を得ることで、③ ^{134}Cs や ^{137}Cs の放射能強度 A を測定することができる。

- 1) 上記の文章の空欄アとイに当てはまる核種を答えよ。
- 2) 下線①に該当する放射線検出器の名称を 1 つ答えよ。
- 3) 下線②について、全吸収ピークとなる事象は、1 つの γ 線（光子）が放射線検出器に入射してどのような相互作用を起した場合であるか、150 字程度で説明せよ。
- 4) 下線③について、全吸収ピークの計数 N から放射能強度 A を求める式を示し、 N 以外にどのような情報が必要か説明せよ。なお、「固有効率 ϵ_{int} 」, 「1 壊変あたりにあるエネルギーの γ 線を放出する割合（放出率） I_γ 」は事前にわかっているものとする。

次ページに続く

専門：II-2（続き）

- (2) 放射線業務従事者が、 ^{134}Cs を $3.0 \times 10^4 \text{ Bq}$ 、 ^{137}Cs を $3.0 \times 10^4 \text{ Bq}$ だけ経口摂取してしまったとする。このとき、表 1 に基づいて、放射線業務従事者が受けた内部被ばく線量 (mSv) を有効数字 2 桁で答えよ。

表 1 内部被ばく線量換算係数

核種	化学形等	吸入摂取した場合の 実効線量係数 (mSv/Bq)	経口摂取した場合の 実効線量係数 (mSv/Bq)
^{134}Cs	全ての化合物	9.6×10^{-6}	1.9×10^{-5}
^{137}Cs	全ての化合物	6.7×10^{-6}	1.3×10^{-5}

- (3) 内部被ばく線量 (Sv) は、「預託線量」と呼ばれる量で評価される。放射線業務従事者(成人)を対象として、「預託線量」の意味について 100 字程度で説明せよ。

問題1 図1に示すように、水平に設置された円管の内部を水が流れている。円管の2断面A, BにU字管（差圧計マノメータ）が取り付けられており、U字管には、比重 $s = 13.6$ の水銀が入っている。図中のA, B, C, D, Eの位置における圧力を P_A , P_B , P_C , P_D , P_E とする。ただし、水の密度を $\rho = 1000 \text{ kg/m}^3$ 、重力加速度を $g = 9.81 \text{ m/s}^2$ として、以下の問いに答えよ。重力は図1に示すように下向きに作用するものとする。

- (1) 円管の流れは、点Aから点Bの方向である。圧力 P_A と P_B はどちらが大きいのかその理由とともに述べよ。
- (2) 比重の定義を述べよ。
- (3) 点Cの圧力 P_C と点Aの圧力 P_A との関係を示せ。
- (4) 点Dの圧力 P_D と点Bの圧力 P_B の関係を示せ。
- (5) 断面AB間の圧力差 $P_A - P_B$ を計算し、単位を付けて数字で答えよ。

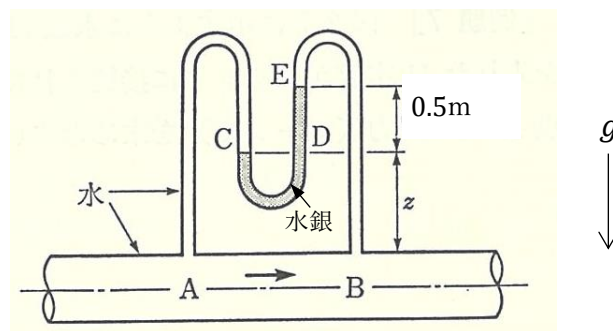


図1

問題2 熱に関する以下の問いに答えよ。

(1) 気体の圧縮過程について考える。シリンダー内に気体 m [kg]が封入されている。この気体をピストンによって圧縮したところ、圧力 P_1 [Pa]、容積 V_1 [m³]、内部エネルギー u_1 [J]の状態1から、圧力 P_2 [Pa]、容積 V_2 [m³]、内部エネルギー u_2 [J]の状態2に変化した。

- 1) 状態1，状態2におけるエンタルピー h_1 ， h_2 を与えられた記号を用いて示せ。
- 2) 気体の質量を $m = 1$ kg とする。状態1，2における圧力と体積を $P_1 = 50$ kPa， $P_2 = 600$ kPa， $V_1 = 0.5$ m³， $V_2 = 0.2$ m³ とする。状態1から状態2へのエンタルピーの増加を求めよ。ただし，内部エネルギーの変化は無視してよい。

(2) 気体の膨張過程について考える。圧力 200 kPa，容積 0.1 m³ の気体が圧力一定の下で膨張し，容積が 0.8 m³ に増加した。この時，気体が外部に対しておこなった仕事を求めよ。また，内部エネルギーの増加を 600 kJ とすると，外部から供給した熱量を求めよ。

(3) 次の語句を説明せよ。

- 1) 熱機関の効率
- 2) エントロピー

専門：II-3（続き）

問題3 図1に示すような等分布荷重 w を受ける突き出しはり ABC について考える。
ただし、 $a < b$ とする。また、自重によるたわみは考えないとする。

- (1) 支点 B および支点 C における反力をそれぞれ R_B 、 R_C として、支点 B および支点 C 周りのモーメントの釣り合いをそれぞれ記述せよ。
- (2) 位置 x におけるせん断応力を $F(x)$ として、 $F(x)$ のグラフを描け。
- (3) 位置 x における曲げモーメントを $M(x)$ として、 $M(x)$ のグラフを描け。また、曲げモーメントの最大値 $M_{\max}$ を求めよ。

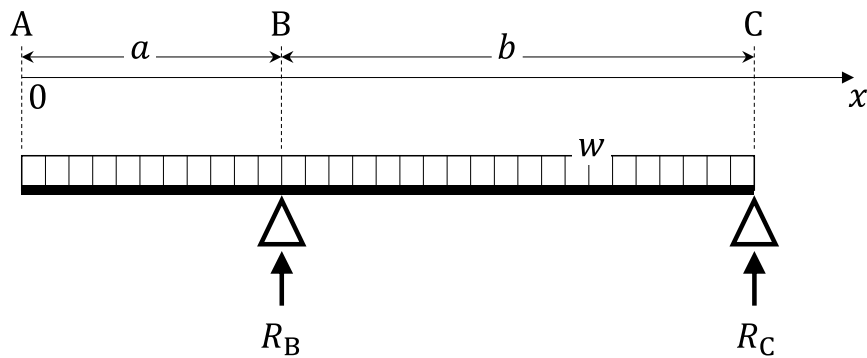


図 1

専門：II-3（続き）

問題4 図1に示すように、厚さ 0.1 m の銅板に特殊塗料を均一に塗布した材料がある。この材料で半分に仕切られた水槽に水を入れ、水槽の片側を 80°C (T_1) に加熱し、もう一方を 5°C (T_6) となるよう冷却し、それぞれ温度を保持している。水槽の大きさは十分に大きく、仕切りは無限平板と仮定することができ、仕切り面に垂直な方向にのみ温度変化があると仮定する。銅板および塗膜の厚さをそれぞれ w_a , w_b とする。銅板と塗膜との間に熱抵抗は無く、水と塗膜との接面では「熱伝達」によって熱が伝わるとする。銅板および塗膜の熱伝導率は温度に依存しないと仮定し、それぞれ k_a , k_b ($k_a > k_b$) とする。また、水と塗膜面の間の熱伝達係数を h とする。位置 $x_2 \sim x_5$ における温度をそれぞれ $T_2 \sim T_5$ とする。

- (1) x 軸方向の温度分布を模式的に解答用紙に図示せよ。
- (2) 仕切りを通した熱流束 q と水の温度差 $\Delta T (= T_1 - T_6)$ との間に成り立つ関係式を q , ΔT , h , k_a , k_b , w_a , w_b を用いて示せ。
- (3) 熱流束の測定結果は 3000 Wm^{-2} であった。銅板の代わりに同じ厚さのコンクリート板を用いた場合、熱流束はいくらになるか計算せよ。ただし、塗料は銅板の場合と同じで、塗膜の厚さも同じとする。また、銅の熱伝導率を $382\text{ Wm}^{-1}\text{K}^{-1}$ 、コンクリートの熱伝導率を $1.0\text{ Wm}^{-1}\text{K}^{-1}$ とする。

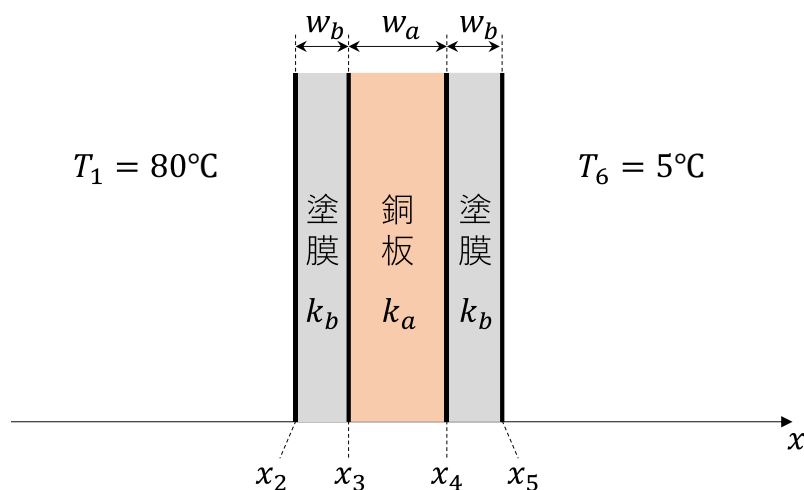


図1

問題 1 時間変化する電流をソレノイドコイルに流して発生する誘導起電力を用いて，トーラス（環状）プラズマに電流を流すことを考える．次の文章を読んで問いに答えよ．

抵抗値 R の抵抗，インダクタンス L のコイル，時間 t の関数である出力 $V(t)$ の交流電圧電源からなる図 1 の回路を考える．接続に用いる導線や電源のインピーダンスは考えないものとする．真空中の誘電率 ϵ_0 と透磁率 μ_0 は必要に応じて用いる．回路に流れる電流を $I(t)$ とすると，抵抗の両端の電位差は〔（ア）〕，コイルに発生する誘導起電力は〔（イ）〕である．角周波数を ω とし，交流電圧が $V(t) = V_0 \sin \omega t$ で与えられるとき，電流は $I(t) = I_0 \sin(\omega t + \delta)$ となる．ここで，電流 $I(t)$ と電圧 $V(t)$ の位相のずれ δ は〔（A）〕である．

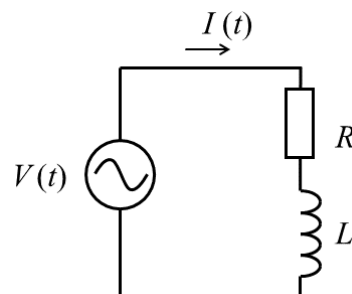


図 1 抵抗 R とコイル L と交流電圧 $V(t)$ からなる回路

このインダクタンス L のコイルが半径 a ，長さ h ，巻き数 N の空芯の十分長いソレノイドであるとき，時間変化する電流 $I(t)$ によりソレノイド内部に磁場 $B(t) = B_0 \sin(\omega t + \delta)$ が生じる．ここで， B_0 は磁場の振幅である．図 2 に断面を示すようにソレノイドの軸を z 軸にとり，ソレノイドの両端の座標を $z = \pm h/2$ とする．ソレノイドの断面で長方形の経路を考える．経路 C_1 で囲まれた面を貫く電流はゼロであり，〔（B）〕がわかる．また経路 C_3 についてソレノイドの外部では近似的に磁場はゼロである．

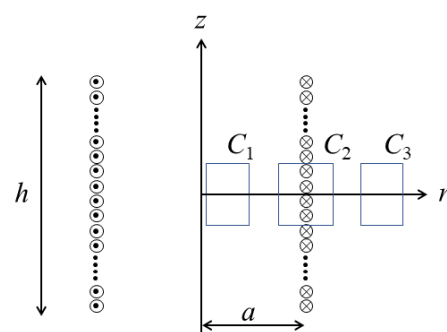


図 2 $I(t) > 0$ におけるソレノイドの断面， $\odot$ と $\otimes$ はそれぞれ紙面に垂直に手前と奥に向かう電流を表す．

さらに，(i)経路 C_2 に沿った磁場の線積分（循環）と C_2 で囲まれた面を貫く電流が比例することから， $B_0 =$ 〔（ウ）〕である．

次に図 3 に示すように，このソレノイドの外側に $z = 0$ 面内で半径 b の円の円周 C_4 に沿って存在するプラズマを考える． C_4 の円周方向（トロイダル方向）にプラズマ領域外のコイル（図 3 には示されていない）により生成された大

専門：II-4(続き)

きさ B_T のトロイダル磁場が印加されている．プラズマ電流 I_p について考える．電子はトロイダル方向に生じた電場 $\mathbf{E}$ による加速と荷電粒子間の衝突による抵抗がつりあい，一定の速さ v_e で周回しているとす．電子の数密度を n_e ，電荷を $-e$ ，プラズマの断面積を S とすると $I_p = [\text{ (エ) }]$ である．プラズマに電流が流れることでポロイダル磁場が生成され，トロイダル磁場と合成してトーラス形状のプラズマを閉じ込めることができる．もし，(ii) ト

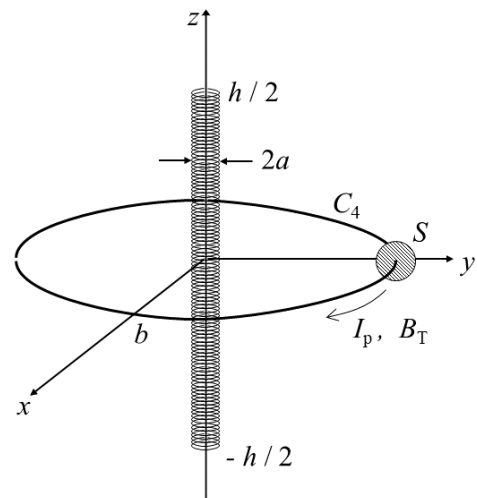


図 3 ソレノイドとプラズマ

ロイダル磁場のみで環状プラズマを閉じ込めようとすると必ず外に逃げてしまう．また，プラズマに電流が流れることで(iii) ジュール熱が発生しプラズマの温度が上昇する．

- (1) 文中の (ア) から (エ) に適切な式を文中の物理量を用いて表せ．
- (2) 文中の (A) に関して，位相のずれ δ を文中の物理量を用いて表せ．
- (3) 図 1 の抵抗とコイルのインピーダンスの大きさを，横軸を角周波数 ω とした一つのグラフに図示せよ．交点や x 切片， y 切片があるならば図に明記せよ．
- (4) ソレノイドのインダクタンス L を導出し， μ_0, a, h, N を用いて表せ．
- (5) 文中の下線部(i)の法則と等価な磁場 $\mathbf{B}$ と電流密度 $\mathbf{j}$ の関係を表す微分形の方程式を書け．

次ページに続く

専門：II-4(続き)

(6) 文中の (B) に当てはまる文章を次の (あ) から (う) の中から選べ.

- (あ) 磁場の軸方向成分がソレノイド内部で半径に反比例すること
- (い) 磁場の軸方向成分がソレノイド内部で半径に依らないこと
- (う) 磁場の軸方向成分がソレノイド内部で半径に比例すること

(7) 円周 C_4 を 1 周するプラズマの電気抵抗を R_p とするときプラズマ電流 I_p を求めよ. ここで $N, L, R, R_p, I_0, \omega, \delta$ の中から必要なものを適宜用いよ. R_p は定数と考えてよい. L は(4)で求めたソレノイドのインダクタンスであり, また, プラズマの自己インダクタンスは考えないものとする.

(8) プラズマに発生するジュール熱の時間平均を求めよ. ここで $N, L, R, R_p, I_0, \omega, \delta$ の中から必要なものを適宜用いよ.

(9) プラズマに電流が流れることで生成された磁場はソレノイド内部にも存在する. この磁場のソレノイド軸上で円 C_4 を含む面との交点における振幅を求めよ. ここで $\mu_0, N, b, h, L, R, R_p, I_0, \omega$ の中から必要なものを適宜用いよ.

次ページに続く

- (10) 下線部(ii)の理由を説明する次の文章の(オ)から(サ)にあてはまる言葉を選択肢から選んで答えよ.

トーラスの主軸(+z方向)の単位ベクトルを $\hat{z}$, 大半径方向の単位ベクトルを $\hat{r}$ と定義して, トロイダル磁場が $B_T(\hat{r} \times \hat{z})$ と与えられるとき, 電子は〔(オ)〕方向へ正イオンは〔(カ)〕方向へ〔(キ)〕ドリフトし, 電荷分離により〔(ク)〕方向の電場を生じる. この電場とトロイダル磁場により, 電子は〔(ケ)〕方向へ正イオンは〔(コ)〕方向へ〔(サ)〕ドリフトする. トロイダル磁場が $-B_T(\hat{r} \times \hat{z})$ と与えられるときも同様に考えると, プラズマはトロイダル磁場のみでは閉じ込められないことが分かる.

選択肢 (同じ言葉を複数回用いてよい)

+z, -z, +r, -r, トロイダル, 磁場勾配, 反磁性, $E \times B$

- (11) 完全電離プラズマではプラズマの抵抗 R_p は定数ではなく温度 T の関数となる. 下線部(iii)において温度が上昇したときのジュール発熱の振舞いを R_p における T の冪(べき)の指数を用いて 50 字以内で説明せよ. ただしソレノイドの電流 $I(t)$ を調整することでプラズマ電流 I_p は, 抵抗 R_p に依らず一定とする.

下書き用紙

下書き用紙