

秋季募集（令和6年度実施）

東北大学大学院工学研究科
量子エネルギー工学専攻入学試験試験問題冊子
【専門科目】

流体力学	FLUID DYNAMICS	p. 1
電磁気学	ELECTROMAGNETICS	p. 2
量子力学	QUANTUM MECHANICS	p. 3
材料力学	STRENGTH OF MATERIALS	p. 4
機械材料学	MECHANICAL MATERIALS	p. 5
化学基礎	CHEMISTRY BASICS	p. 6
放射化学	RADIOCHEMISTRY	p. 7
放射線工学	RADIATION ENGINEERING	p. 8
原子炉物理学	REACTOR PHYSICS	p. 9

令和6年8月28日(水) 10:00 ~ 11:30

注意

1. 本試験問題冊子は、試験監督の指示があるまで開かないこと。
2. 試験問題冊子、答案用紙、草案用紙および選択票2枚が配付されるので、答案用紙、草案用紙および選択票に受験番号を記入すること。
3. 選択した科目を選択票および答案用紙に記入すること。1科目につき2枚の答案用紙を使用すること。
4. 試験終了後、提出にあたっては受験番号、問題番号などの記入を再確認すること。答案用紙を番号順に他の用紙の上に重ねて問題冊子の横に置き、試験監督の回収を待つこと。試験監督の指示があるまでは退席しないこと。

流体力学 FLUID DYNAMICS

2つの複素速度ポテンシャル $W_1(z)$, $W_2(z)$ が次式で与えられている.

$$W_1(z) = -\frac{\Gamma}{2\pi i} \log_e(z-a), \quad W_2(z) = \frac{\Gamma}{2\pi i} \log_e(z+a)$$

ここで, z は複素変数で $z = re^{i\theta}$ の極形式で表され, r , θ および i はそれぞれ半径方向, 周方向の極座標および虚数単位である. Γ を正の定数, a を実数定数とする.

- (1) $W(z) = W_1$, $a = 0$ で与えられる流れについて, 以下の問いに答えよ.
 - a) 速度ポテンシャル $\phi(r, \theta)$ と流れ関数 $\psi(r, \theta)$ を求めよ.
 - b) 半径方向速度成分 V_r と周方向速度成分 V_θ を求めよ.
 - c) 原点以外で渦無し流れとなっていることを示せ.
 - d) 原点から距離 r における圧力 $p(r)$ を求めよ. ただし, 原点から十分遠方における圧力を p_∞ , 流体の密度を ρ とし, 重力は無視する.
- (2) $W(z) = W_1 + W_2$, $a \neq 0$ で与えられる流れについて, 以下の問いに答えよ.
 - a) 共役複素速度を求めよ.
 - b) 実軸上および虚軸上において, 速度の実軸方向成分および虚軸方向成分を求めよ.

電磁気学 ELECTROMAGNETICS

図1に示すように、 $(0, 0, d/2)$ に置かれた電荷 $+q$ の点電荷と $(0, 0, -d/2)$ に置かれた電荷 $-q$ の点電荷からなる電気双極子を考える。点Pは原点からの距離が r 、その位置ベクトルと z 軸とのなす角度が θ の点であり、電荷 $\pm q$ の点電荷から点Pまでの距離をそれぞれ r_1, r_2 とする。以下の問いに答えよ。ただし、真空中の誘電率を ϵ_0 とする。

- (1) 電気双極子が z 軸を含む平面内に作る電気力線の概形を図示せよ。それぞれの電気力線には電場の方向を示すこと。
- (2) 点Pを中心として半径 r_0 の球面を S とする。 $r_2 > r_1$ のとき、電気双極子が作る静電場 E の S に垂直な成分(ただし球の内側から外側に向かう向きを正とする)を S 上にわたって積分した値を求めよ。
- (3) 点Pにおける静電ポテンシャル V を r と θ の関数として求めよ。ただし V は無限遠で0とする。
- (4) 問(3)において r が d に比べて十分大きい($r \gg d$)とき、 d/r の2次以上の項を無視した静電ポテンシャル V の近似式 $V_{approx}(r, \theta)$ を求めよ。

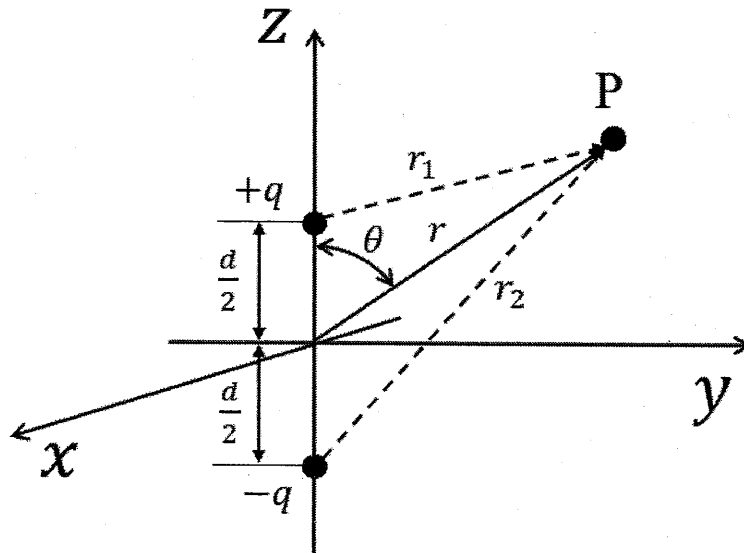


図1

量子力学 QUANTUM MECHANICS

質量 m の粒子が以下の一次元ポテンシャル

$$V(x) = \begin{cases} \infty & (x < 0) \\ 0 & (0 \leq x \leq d) \\ \infty & (d < x) \end{cases}$$

に束縛されているとき、粒子の波動関数は $\psi(x, t) = u(x)T(t)$ で表される。ここで、 t は時間、 $d (> 0)$ は定数である。プランク定数は h であり、 $\hbar = h/(2\pi)$ とする。粒子の運動における相対論的効果を見捨てる、以下の問いに答えよ。

- (1) 粒子に対する時間に依存するシュレーディンガー方程式を書け。
- (2) 領域 $0 \leq x \leq d$ において $u(x)$, $T(t)$ および粒子のエネルギー E を求めよ。
- (3) $\partial|\psi(x, t)|^2/\partial t = 0$ を示せ。
- (4) 粒子の波動関数に対して $\partial^2/\partial x^2$ がエルミート演算子であることを示せ。
- (5) 問(2)における基底状態のエネルギーを位置と運動量の不確定性関係に基づいて考える。そのときの基底状態における粒子の位置の不確定さを求めよ。なお、不確定性関係は $\Delta x \Delta p \geq \hbar/2$ であり、 Δx と Δp はそれぞれ位置と運動量の不確定さである。

材料力学 STRENGTH OF MATERIALS

図1に示すように、長さ L 、直径 d の中実丸棒がある。両端を壁に固定し、左側の端から距離 x の位置にねじりモーメント M_t を加える。丸棒の材料の横弾性係数は G である。以下の問いに答えよ。

- (1) $x=0.3L$ のとき、この丸棒の各部位に作用するねじりモーメントを求め、図2の形式のグラフとして作図せよ。
- (2) ねじりモーメント M_t を加える位置が $0.1L \leq x \leq 0.9L$ の範囲で変化するとき、ねじりモーメント M_t の負荷点のねじれ角を x の関数として示せ。
- (3) ねじりモーメント M_t を加える位置が $0.1L \leq x \leq 0.9L$ の範囲で変化するとき、この丸棒に加えることが許されるねじりモーメントの最大値を x の関数として示せ。ただし、丸棒の材料の許容せん断応力を τ_a とする。

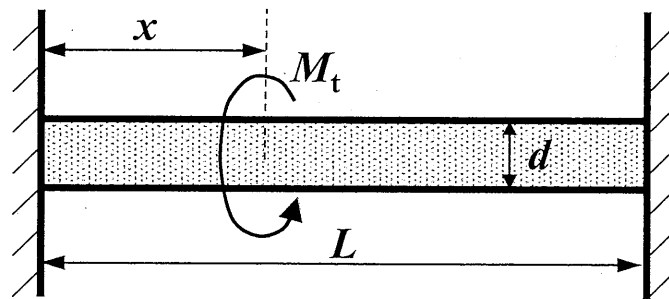


図1

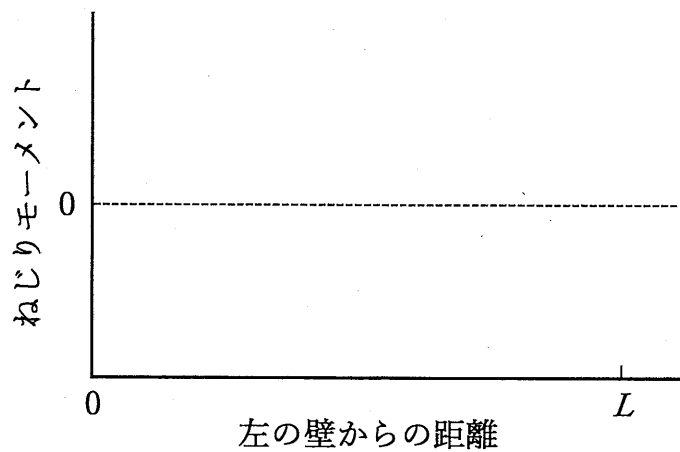


図2

以下の問いに答えよ。

- (1) 元素 A および元素 B からなる体心立方格子を考える。A は単位格子の頂点, B は体心の位置を占める。この格子をもつ物質中の A と B のモル比を求めよ。
- (2) 完全固溶体（全率固溶体）を形成する Ni-Cu 合金の平衡状態図を図 1 に示す。35mass%Ni-65mass%Cu の組成の合金を 1350°C から非常にゆっくりと冷却した場合の図中 a, b, c 点での材料組織について、形成する相の組成とともに模式的に示せ。

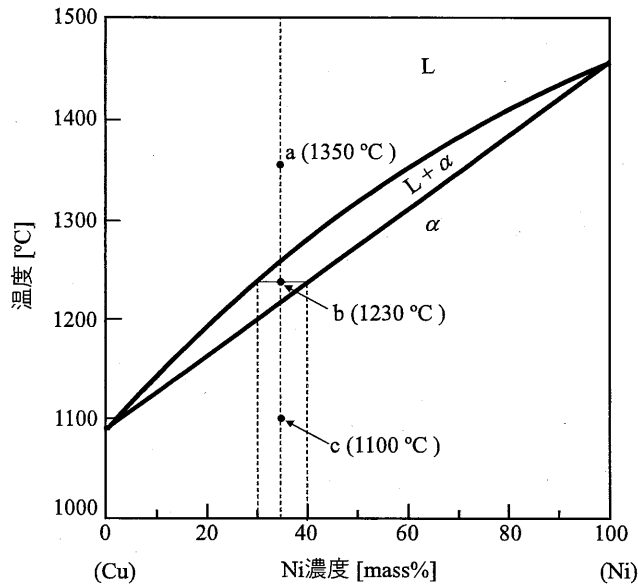


図 1

- (3) 金属材料のクリープ変形について説明せよ。
- (4) 鉄中の炭素の拡散の活性化エネルギーは $8.0 \times 10^4 \text{ J mol}^{-1}$ であった。鉄中の炭素の拡散係数が 700°C の場合の 1/2 となる温度を求めよ。必要であれば、気体定数 $R = 8.3 \text{ J mol}^{-1} \text{ K}^{-1}$, $\ln 2 = 0.7$ を用いよ。
- (5) 図 2 は共析鋼の恒温変態図である。以下の問いに答えよ。
 - a) 図 2 に鼻温度が現れる理由を述べよ。
 - b) 図 2 中の①と②の温度履歴で形成される組織の違いについて述べよ。

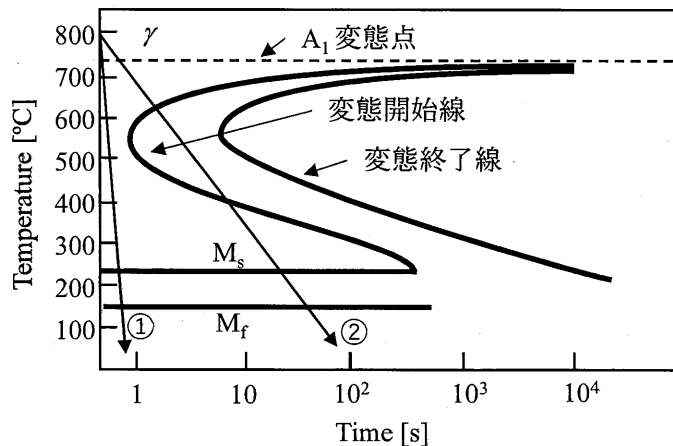


図 2

化学基礎 CHEMISTRY BASICS

1. 図1に示すBaO結晶のBorn-Haberサイクルに関して、以下の問いに答えよ。ここで ΔH は反応エンタルピーである。

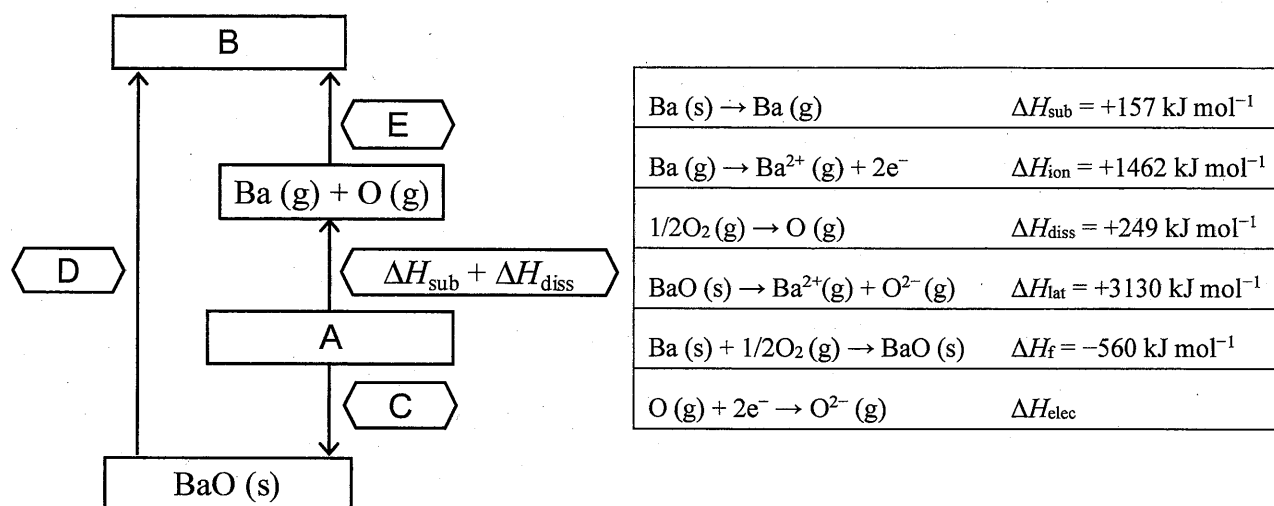


図1

- (1) 図1のA, Bに当てはまる化学式と, C, D, Eに当てはまるエンタルピー変化を書け。
 - (2) $\text{O (g)} + 2\text{e}^{-} \rightarrow \text{O}^{2-} \text{ (g)}$ に対する ΔH_{elec} を求めよ。
2. 以下の文章について、下線部の記述が正しい場合には「正」と書き、誤っている場合は「誤」と書くとともに下線部を修正して書け。
- (1) 電子親和力は、自由原子に電子1個を加えるときに発生するエネルギーである。
 - (2) 半反応 $\text{Cu}^{2+} \text{ (aq)} + 2\text{e}^{-} \rightarrow \text{Cu (s)}$ および $\text{Zn}^{2+} \text{ (aq)} + 2\text{e}^{-} \rightarrow \text{Zn (s)}$ の標準電極電位が 298 K においてそれぞれ +0.34 V, -0.76 V のとき、電池 $\text{Zn (s)} | \text{Zn}^{2+} \text{ (aq)} || \text{Cu}^{2+} \text{ (aq)} | \text{Cu (s)}$ の標準起電力は +0.42 V である。
 - (3) 硬い酸および硬い塩基の多くは、いずれも共有結合を作りやすい。
 - (4) H_2O , $\text{Fe}(\text{H}_2\text{O})_6^{3+}$, $\text{Fe}(\text{H}_2\text{O})_6^{2+}$ の中で、最も強いプロトン酸は $\text{Fe}(\text{H}_2\text{O})_6^{2+}$ である。
 - (5) 原子の電気陰性度はイオン化エネルギーと電子親和力に依存する。このとき、電気陰性度は イオン化エネルギーよりも電子親和力の方により大きく依存する。
 - (6) メタンの C-H 結合間の角度は水の O-H 結合間の角度 より大きい。

放射化学 RADIOCHEMISTRY

次の問いに答えよ。なお、 $\log_e 2 = 0.70$ 、アボガドロ定数 $= 6.0 \times 10^{23} \text{ mol}^{-1}$ として計算せよ。有効数字は2桁とする。

(1) ネプツニウムに関する以下の問いに答えよ。

- a) ^{237}Np (半減期 6.3×10^{13} 秒 $\approx 2.0 \times 10^6$ 年) を 0.70 MBq, ^{239}Np (半減期 2.1×10^5 秒 ≈ 2.4 日) を 6.0 MBq 含む試料がある。この試料中の全 Np の物質質量[mol]を示せ。
- b) ^{239}Np は β^- 壊変する核種である。 ^{239}Np の壊変により生成する核種を答えよ。
- c) ^{237}Np が原子炉内で生成する過程を以下から選び、記号で答えよ。
- A. ^{235}U の核分裂 B. ^{239}Pu の核分裂
C. ^{235}U の二重中性子捕獲生成物の β^- 壊変 D. ^{243}Am の α 壊変

(2) あるトリウム鉱石中の ^{232}Th と ^{224}Ra の原子数比は $N(^{232}\text{Th}) : N(^{224}\text{Ra}) = 1.4 \times 10^{12} : 1.0$ であった。 ^{224}Ra の半減期を求めよ。ただし、 ^{232}Th の半減期は 1.4×10^{10} 年とし、この鉱石内では逐次壊変の放射平衡が成立しているとする。

(3) ^{134}Cs で標識した塩化セシウムと、 ^{90}Sr と ^{14}C で標識した炭酸ストロンチウムの混合塩がある。これを用いて a), b), c) の順に実験を行った。

- a) この混合塩に希塩酸を加えて完全に溶解させたところ、放射性の気体が発生した。気体に含まれる放射性核種を答えよ。また、この気体発生の化学反応式を示せ。
- b) 次に、気体発生後の混合塩溶液に硫酸ナトリウム溶液を加えたところ、白色沈殿が生じた。この沈殿反応を化学反応式で示せ。
- c) 白色沈殿を回収し14日間静置し、その後に分析を行なった。白色沈殿中に確認された2種類の放射性核種を示せ。

放射線工学

RADIATION ENGINEERING

1. 真空の容器内に単色のアルファ線源と電離箱を配置し、線源から発生するアルファ線のエネルギースペクトルを測定した。その結果、5 MeV のピークが観測され、半値幅は 0.3 MeV、計数率は 100 カウント/秒であった。このとき、線源と電離箱の入射窓との距離は 5 cm であり、アルファ線は入射窓に垂直に入射しているとする。また、電離箱の電荷収集率は常に一定とし、入射窓は非常に薄いものとする。以下の問いのそれぞれの場合について答えよ。
 - (1) 電離箱内のガスを徐々に抜く場合、はじめのうちはエネルギースペクトルに変化は見られないが、ある時から、ピーク位置が低エネルギー側に移動する。この理由を述べよ。
 - (2) 真空の容器に空気を徐々に導入する場合、エネルギースペクトルに変化が見られる。このときのピーク位置、半値幅、ピークの計数率の変化について理由とともに述べよ。
 - (3) アルファ線のエネルギーが仮想的に高くなっていく場合、エネルギースペクトルのピーク位置とピークの計数率の変化について理由とともに述べよ。
 - (4) 電離箱をシリコン半導体検出器に交換する場合、エネルギースペクトルのピークの半値幅が減少する。この理由について述べよ。

2. 放射線の生物影響に関して、以下の問いに答えよ。
 - (1) 放射線の DNA への直接作用および間接作用をそれぞれ説明せよ。
 - (2) 空気中でアルファ線を哺乳類動物培養細胞に照射した場合、細胞生存率が 0.01 となる生物学的効果比 (RBE 値) が 3.0 であった。RBE 値が 1.0 より高い理由を述べよ。
 - (3) X 線を無酸素状態と酸素存在状態の哺乳類動物培養細胞に照射した。それぞれの状態における細胞生存率を比較し、その違いを説明せよ。
 - (4) 放射線防護剤が持つ保護効果を説明せよ。

1. 無限に大きい熱中性子炉がある。この熱中性子炉は燃料と減速材が均質に混合された均質炉であり、また燃料は ^{238}U と ^{235}U からなるものとする。 ^{238}U の原子数密度と微視的熱中性子吸収断面積は、それぞれ N_{238} , $\sigma_{a,238}$, ^{235}U の原子数密度と微視的熱中性子吸収断面積は、それぞれ N_{235} , $\sigma_{a,235}$ であり、減速材の巨視的熱中性子吸収断面積は $\Sigma_{a,M}$ である。また、燃料に熱中性子が1つ吸収されたときに生ずる中性子の平均個数は η , 高速核分裂係数は ϵ , 共鳴逃れ確率は p とする。以下の問いに答えよ。ただし、燃焼による燃料と減速材の組成の変化は無視せよ。
 - (1) 燃料の巨視的熱中性子吸収断面積を求めよ。
 - (2) 燃料に吸収される熱中性子と減速材に吸収される熱中性子の比率を求めよ。
 - (3) この熱中性子炉が未臨界、臨界、超臨界（臨界超過）となる条件をそれぞれ示せ。

2. 図1は、出力が P_0 の状態の原子炉にある反応度を加えた場合の出力変化を示したものである。原子炉に $\Delta k/k = 0.5\%$ の反応度を加えたところ、出力が徐々に増加し出力 P_1 となった。一方、 $\Delta k/k = 0.7\%$ の反応度を加えたところ、出力は急激に上昇した後に急激に低下し、出力 P_2 となった。原子炉の燃料は低濃縮ウラン、冷却材と減速材は軽水とする。以下の問いに答えよ。
 - (1) 加える反応度が 0.5% の場合と 0.7% の場合で炉の出力変化の様子が大きく異なるのは何故かを説明せよ。
 - (2) 0.7% の反応度を加えた場合に、出力が上昇を続けず途中から減少するのは何故かを説明せよ。
 - (3) 0.7% よりもさらに大きな反応度を加えた場合のこの原子炉の挙動を定性的に説明せよ。

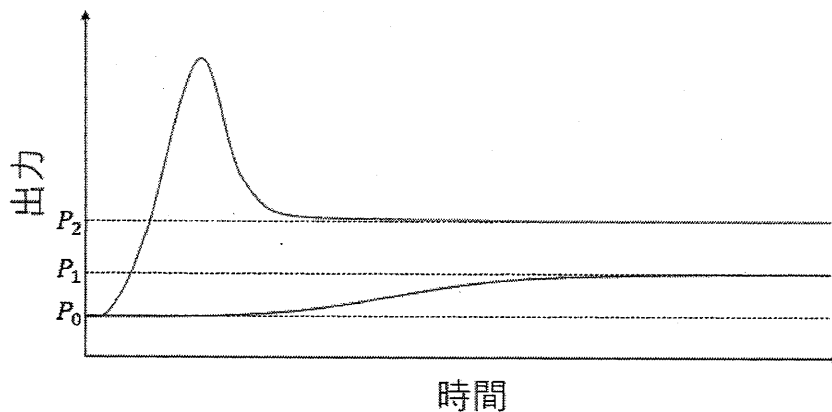


図 1