

電子工学 (5E) 後期中間試験 完全攻略ガイド

試験対策委員会

対象：2024・2023 年度過去問分析に基づく

はじめに：試験の傾向と対策

本試験は、過去問（2023 年、2024 年）の傾向が非常に似通っており、以下の 2 大テーマから構成されています。

1. 電子放出（第 2 章）：熱・光・二次・電界放出のメカニズムと計算。
2. 真空中の電子の運動（第 3 章）：ポテンシャル、電界計算、ポアソンの方程式。

特に「単位変換のミス」が命取りになります。必ず [eV] を [J] に直して計算する習慣をつけてください。

1 基礎：エネルギーバンドと用語定義

出題実績：2024 年 問 1・問 2、2023 年 問 2

穴埋め問題や作図問題で確実に得点すべきセクションです。

1.1 重要用語の定義

充満帯 (Filled Band) 電子が隙間なく詰まっているエネルギー帯。

禁制帯 (Forbidden Band) 電子が存在できないエネルギーギャップ。

伝導帯 (Conduction Band) 電子が自由に動けるエネルギー帯。金属では充満帯と重なっている。

フェルミ準位 (E_F)

- $T = 0\text{ K}$ ：電子が存在する**最高**のエネルギー準位。

- $T > 0\text{ K}$ ：電子の存在確率が **1/2 (50%)** になるエネルギー準位。

仕事関数 (ϕ) フェルミ準位にある電子を、表面の外（真空準位）に取り出すのに必要な最小エネルギー。

$$\phi = W - E_F \quad (W: \text{金属の底から真空準位までの全障壁高さ}) \quad (1)$$

2 熱電子放出（最重要計算）

出題実績：2024 年 問 3、2023 年 問 3

2.1 リチャードソン・ダッシュマンの式

電流密度 J [A/m^2] は以下の式で表されます。この式は暗記必須です。

$$J = AT^2 \exp\left(-\frac{e\phi}{kT}\right) \quad (2)$$

- A : リチャードソン定数 (通常 $1.20 \times 10^6 \text{ A}/\text{m}^2\text{K}^2$)
- T : 絶対温度 [K]
- k : ボルツマン定数 ($1.38 \times 10^{-23} \text{ J/K}$)
- $e\phi$: 仕事関数 (エネルギー単位 [J] に換算が必要)

2.2 計算の定石とトラップ

パターン 1: 電流 I を求める (または I から逆算する)

タングステン線などの「円柱形状」の場合、表面積 S の計算を間違えないこと。

$$I = J \times S = J \times (2\pi rL) \quad (r: \text{半径}, L: \text{長さ}) \quad (3)$$

※ 断面積 πr^2 ではありません! 電子は表面 (側面積) から飛び出します。

パターン 2: 指数の計算

指数の中身 $\frac{e\phi}{kT}$ は無次元になります。

$$\text{分子} = \phi[\text{eV}] \times (1.60 \times 10^{-19}) \quad \leftarrow \text{必ずジュールに直す!}$$

3 光電子放出 (光電効果)

出題実績: 2024 年 問 4、2023 年 問 4

3.1 アインシュタインの式

$$h\nu = e\phi + \frac{1}{2}mv_m^2 \quad (4)$$

- $h\nu$: 入射光子のエネルギー (入力)
- $e\phi$: 仕事関数 (税金のようなコスト)
- $\frac{1}{2}mv_m^2$: 電子の最大運動エネルギー (残りカス)

3.2 限界波長 λ_0

電子がギリギリ放出される (運動エネルギーが 0) 条件です。

$$h\frac{c}{\lambda_0} = e\phi \implies \lambda_0 = \frac{hc}{e\phi} \quad (5)$$

便利テクニック:

$$\lambda_0[\text{nm}] \approx \frac{1240}{\phi[\text{eV}]}$$

※記述式の場合は、基本定数 h, c, e を代入して計算過程を示すのが無難です。

4 二次電子放出・光電子増倍管 (PMT)

出題実績：2024 年 問 5・6、2023 年 問 5

4.1 計算のアルゴリズム

光電子増倍管の出力電流 I を求める問題は、以下の 3 ステップで解けます。

1. 光電流 I_0 の計算: 入射光パワー $P[\text{W}]$ と光電感度 $\eta[\text{A/W}]$ を掛けます。

$$I_0 = P \times \eta$$

注意: η が $[\text{mA/W}]$ で与えられた場合、 $\times 10^{-3}$ を忘れないこと。

2. 増倍率 (ゲイン) G の計算: 二次電子放出比 δ 、ダイノード段数 n のとき、

$$G = \delta^n$$

3. 出力電流 I :

$$I = I_0 \times G = P\eta\delta^n$$

4.2 記述対策

- 二次電子放出比特性: 入射エネルギーが高すぎると、電子が深く潜りすぎて脱出できなくなるため、放出比 δ はある電圧でピークを持ち、その後減少する。
- 応用例: 「スーパーカミオカンデ」= ニュートリノ観測。チェレンコフ光を PMT で検出。

5 電界放出・真空中の運動

出題実績：2024 年 問 7・8、2023 年 問 1・6

5.1 ショットキー効果

強い電界 E により、ポテンシャル障壁が変化する現象。

- 変化: 電位障壁の頂点が低くなり、かつ金属側に移動する。
- 結果: 仕事関数が見かけ上減少し、熱電子放出電流が増加する。

5.2 鏡像力（イメージ力）

金属表面から距離 x にある電荷 $-e$ が受ける力 F 。

$$F = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \frac{e^2}{(2x)^2} = \frac{e^2}{16\pi\epsilon_0 x^2} \quad (6)$$

※ 鏡像電荷 $+e$ が、壁の向こう側距離 x （合計距離 $2x$ ）にいと仮定してクーロンの法則を適用する。

5.3 ポアソン・ラプラスの方程式（解法フロー）

空間電荷密度 ρ がある場合の電位 V と電界 E_x の求め方。

1. 方程式を立てる: $\frac{d^2V}{dx^2} = -\frac{\rho}{\epsilon_0}$
2. 1 回積分 (E): $\frac{dV}{dx} = -E_x = -\frac{\rho}{\epsilon_0}x + C_1$
3. もう 1 回積分 (V): $V = -\frac{\rho}{2\epsilon_0}x^2 + C_1x + C_2$
4. 境界条件: 「 $x = 0$ で $V = 0$ 」などを代入して C_1, C_2 を決定する。

6 直前チェックリスト（定数・単位）

試験開始直前に確認してください。

- $1 [\text{eV}] = 1.60 \times 10^{-19} [\text{J}]$
- $1 [\text{nm}] = 10^{-9} [\text{m}]$
- $1 [\text{cm}] = 10^{-2} [\text{m}]$
- μ (マイクロ) $= 10^{-6}$, m (ミリ) $= 10^{-3}$, k (キロ) $= 10^3$, M (メガ) $= 10^6$
- 温度は必ずケルビン (K) を使う。 ($^{\circ}\text{C} + 273.15$)