

# 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：エネルギー帯と用語定義

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

充满帯 (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。金属では充满帯と重なっている。

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 ( $\phi$ ) 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<sup>2</sup>] 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  $1.20 \times 10^6$  A/m<sup>2</sup>K<sup>2</sup>)
- $T$ : 絶対温度 [K]
- $k$ : ボルツマン定数 ( $1.38 \times 10^{-23}$  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）**

タンクステン線などの「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  $\pi r^2$  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 $\lambda_0$

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  $\eta[\text{A}/\text{W}]$  を掛けます。

$$I_0 = P \times \eta$$

注意:  $\eta$  が  $[\text{mA}/\text{W}]$  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  $\delta$ 、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  $\delta$  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。チエレンコフ光を 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。

- 变化: 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  $F$ 。

$$F = \frac{1}{4\pi\varepsilon_0} \frac{e^2}{(2x)^2} = \frac{e^2}{16\pi\varepsilon_0 x^2} \quad (6)$$

※ 鏡像電荷  $+e$  が、壁の向こう側距離  $x$ （合計距離  $2x$ ）にいる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  $\rho$  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:  $\frac{d^2V}{dx^2} = -\frac{\rho}{\varepsilon_0}$
2. 1回積分 ( $E$ ):  $\frac{dV}{dx} = -E_x = -\frac{\rho}{\varepsilon_0}x + C_1$
3. もう1回積分 ( $V$ ):  $V = -\frac{\rho}{2\varepsilon_0}x^2 + C_1x + C_2$
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。

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