

# 電子工学 後期期末達成度試験 完全対策資料

対象：電子工学講義受講生

2026 年 2 月

## 概要

本資料は、配布された PDF 資料および「出題範囲（全 6 問）」に基づき作成された試験直前対策ノートである。計算問題・式の導出問題における「手順の理解」を最優先とし、記述問題はキーワードを網羅している。

# 目次

第 1 章	試験攻略の基本戦略	2
第 2 章	【問 1 対策】静磁界中の電子の運動	3
2.1	基本設定 . . . . .	3
2.2	運動方程式の導出プロセス . . . . .	3
第 3 章	【問 2 対策】気体分子の電離現象	5
3.1	電離 (Ionization) . . . . .	5
3.2	主な電離の種類 . . . . .	5
第 4 章	【問 3 対策】タウンゼントの理論と火花条件	6
4.1	設定と定義 . . . . .	6
4.2	導出ステップ . . . . .	6
第 5 章	【問 4 対策】パッシェンの法則	8
5.1	法則の内容 . . . . .	8
5.2	V 字カーブになる理由 (記述重要) . . . . .	8
第 6 章	【問 5・6 対策】放電利用機器	9
6.1	グロー放電とアーク放電の比較 . . . . .	9
6.2	【問 5】グロー放電を利用した機器 . . . . .	9
6.3	【問 6】アーク放電を利用した機器 . . . . .	9

## 第 1 章 試験攻略の基本戦略

### 出題構成（全 6 問）

1. 計算：静磁界中の電子の運動（円運動・螺旋運動）
2. 説明：気体分子の電離現象
3. 導出：タウンゼントの理論と火花放電の条件
4. 説明：パッシェンの法則（放電開始電圧）
5. 説明：グロー放電利用機器
6. 説明：アーク放電利用機器

### 注意事項

- 電卓のみ持ち込み可。
- 基本公式や定数は問題用紙末尾に記載あり。
- 「丸暗記ではなく導出過程」が問われるため、途中式を飛ばさず記述すること。

## 第2章 【問1対策】静磁界中の電子の運動

### 出題ポイント

運動方程式を立て、そこから「加速度 → 速度 → 位置」および「軌道半径・周期」を導く手順をマスターする。

### 2.1 基本設定

- 磁束密度： $\mathbf{B} = (0, 0, B)$  [T] ( $z$  軸方向)
- 電子の電荷： $-e$  [C], 質量： $m$  [kg]
- 初速度： $v_0$

### 2.2 運動方程式の導出プロセス

電子にはローレンツ力が働く。

$$\mathbf{F} = -e(\mathbf{v} \times \mathbf{B})$$

運動方程式  $\mathbf{F} = m\mathbf{a}$  より、

$$m \frac{d\mathbf{v}}{dt} = -e(\mathbf{v} \times \mathbf{B})$$

#### 2.2.1 垂直入射の場合（円運動）

電子が磁界に対して垂直（ $xy$  平面内）に速度  $v$  で入射した場合、力は常に進行方向と垂直に働き、中心方向への向心力となる。

### 円運動の諸量の導出（必須）

運動方程式（向心力＝ローレンツ力）を立てる：

$$m \frac{v^2}{r} = evB$$

これより、軌道半径  $r$  は：

$$r = \frac{mv}{eB} \quad [\text{m}]$$

周期  $T$ （円周  $2\pi r$  を速度  $v$  で回る時間）：

$$T = \frac{2\pi r}{v} = \frac{2\pi}{v} \cdot \frac{mv}{eB} = \frac{2\pi m}{eB} \quad [\text{s}]$$

角周波数（サイクロトロン角周波数） $\omega_c$ ：

$$\omega_c = \frac{2\pi}{T} = \frac{eB}{m} \quad [\text{rad/s}]$$

**重要：**周期  $T$  と角周波数  $\omega_c$  は、電子の速度や半径に依存しない。

### 2.2.2 斜め入射の場合（螺旋運動）

電子が磁界（ $z$  軸）に対して角度  $\theta$  で入射した場合。速度を分解する：

- 磁界に垂直な成分： $v_{\perp} = v \sin \theta \rightarrow$  **円運動**をする。
- 磁界に平行な成分： $v_{\parallel} = v \cos \theta \rightarrow$  **等速直線運動**をする。

**螺旋（らせん）運動のパラメータ：**

- 回転半径： $r = \frac{mv_{\perp}}{eB} = \frac{mv \sin \theta}{eB}$
- 周期： $T = \frac{2\pi m}{eB}$ （垂直時と同じ）
- ピッチ（1回転で進む距離）： $p = v_{\parallel} \times T = v \cos \theta \cdot \frac{2\pi m}{eB}$

## 第3章 【問2対策】気体分子の電離現象

### キーワード記述対策

「何が原因で」「どうなるか」を簡潔に説明できること。

### 3.1 電離 (Ionization)

原子核の拘束力以上のエネルギーが外部から与えられ、軌道電子が原子外へ飛び出す現象。

- 結果：中性原子 → 正イオン + 電子
- 必要なエネルギー：電離エネルギー  $eV_i$ （または電離電圧  $V_i$ ）

### 3.2 主な電離の種類

試験では以下の3つを区別して説明できるようにする。

#### 1. 衝突電離 ( $\alpha$ 作用)

- 電界により加速された電子が気体分子に衝突し、その運動エネルギーで電離させる。
- 電子なだれ（タウンゼント放電）の主原因。

#### 2. 光電離

- 短波長の光（紫外線・X線など）を吸収し、そのエネルギー  $h\nu$  が電離エネルギー  $W$  を超えたとき ( $h\nu \geq W$ ) に電離する。
- 放電開始の「種電子」供給源として重要。

#### 3. 熱電離

- 高温状態で気体分子の熱運動が激しくなり、分子同士の衝突エネルギーによって電離する。
- アーク放電の維持に寄与する。

## 第4章 【問3対策】タウンゼントの理論と火花条件

### 最重要：導出の流れ

等比級数の和の公式を用いて、火花放電（電流無限大）の条件を導く問題。PDF 資料の「電子なだれ」の図をイメージすること。

### 4.1 設定と定義

- $n_0$ ：陰極から単位時間に出る初期電子数
- $\alpha$ ：電子衝突電離係数（電子が 1cm 進む間に作る電子対の数）
- $\gamma$ ：二次電子放出係数（正イオンが陰極に衝突して叩き出す電子の数）
- $d$ （または  $l$ ）：電極間距離

### 4.2 導出ステップ

#### 1. 1 回目の電子なだれ（陰極 → 陽極）

陰極を出た  $n_0$  個の電子は、陽極に到達するまでに  $\alpha$  作用で増幅される。

$$n_1 = n_0 e^{\alpha d}$$

#### 2. 正イオンの生成と二次電子

増えた電子の分だけ正イオンが発生している。

$$\text{発生したイオン数} = n_1 - n_0 = n_0(e^{\alpha d} - 1)$$

このイオンが陰極に戻り、 $\gamma$  作用で二次電子を放出する。

$$2 \text{ 次電子数} = \gamma n_0(e^{\alpha d} - 1)$$

#### 3. 無限サイクルの総和

このプロセスが繰り返されるため、陽極に到達する全電子数  $N$  は無限等比級数となる。

- 初項： $n_0 e^{\alpha d}$
- 公比： $\mu = \gamma(e^{\alpha d} - 1)$

$$N = n_0 e^{\alpha d} \sum_{k=0}^{\infty} \mu^k = n_0 e^{\alpha d} (1 + \mu + \mu^2 + \cdots)$$

#### 4. 級数の和と発散条件

公比  $|\mu| < 1$  のとき収束する：

$$N = \frac{n_0 e^{\alpha d}}{1 - \gamma(e^{\alpha d} - 1)}$$

分母が 0 に近づくと  $N \rightarrow \infty$  となり、絶縁破壊（火花放電）に至る。



5. 火花放電の条件式（タウンゼントの条件）

$$1 - \gamma(e^{\alpha d} - 1) = 0$$

すなわち

$$\gamma(e^{\alpha d} - 1) = 1$$

## 第 5 章 【問 4 対策】パッシェンの法則

### 説明のポイント

グラフの概形（U 字型）を描けるようにし、その物理的理由（左右それぞれの領域での振る舞い）を説明する。

### 5.1 法則の内容

放電開始電圧  $V_s$  は、気圧  $p$  と電極間距離  $d$  の積 ( $pd$ ) の関数となる。

$$V_s = f(pd)$$

この曲線をパッシェン曲線と呼び、ある特定の ( $pd$ ) 値で最小値（パッシェン・ミニマム）を持つ。

### 5.2 V 字カーブになる理由（記述重要）

- 右側 ( $pd$  が大きい＝高気圧または長ギャップ) :  
気体分子の密度が高いため、電子の平均自由行程が短くなる。電界から十分なエネルギーを得る前に衝突してしまい、電離しにくい。→ 電圧上昇が必要。
- 左側 ( $pd$  が小さい＝低気圧または短ギャップ) :  
気体分子の密度が低すぎるため、電子が加速されても衝突する相手（分子）が少ない。衝突回数が不足して電子なだれが成長しない。→ 電圧上昇が必要。

この両者のバランスが取れた点で、最小電圧となる。

## 第 6 章 【問 5・6 対策】放電利用機器

### 6.1 グロー放電とアーク放電の比較

項目	グロー放電 (Glow)	アーク放電 (Arc)
電流	小さい (mA オーダー)	大きい (数 A ~ 数万 A)
電圧	高い (数百 V 以上)	低い (数十 V)
陰極機構	$\gamma$ 作用 (二次電子放出)	熱電子放出・電界放出
ガス温度	低い (数 100 K)	非常に高い (数千 ~ 数万 K)

### 6.2 【問 5】グロー放電を利用した機器

- **ネオン管 (Neon Sign) :**  
低圧の希ガス (Ne, Ar 等) を封入し、グロー放電の「陽光柱」の発光を利用する。鮮やかな色は封入ガスで決まる。
- **蛍光灯 (Fluorescent Lamp) :**  
水銀蒸気中でのグロー放電により発生した紫外線を、管壁の蛍光体に当てて可視光に変える。  
(※点灯定常時はアーク放電に近い挙動をするが、始動や原理説明ではグローが触れられることが多い。試験ではネオン管や定電圧放電管が無難)
- **定電圧放電管 :**  
グロー放電の「放電電圧が電流によらずほぼ一定 (正規グロー領域)」という特性を利用した電圧安定化素子。

### 6.3 【問 6】アーク放電を利用した機器

- **アーク溶接 (Arc Welding) :**  
アークの超高温 (約 5000~6000 °C) を利用して金属を溶融・接合する。
- **アーク炉 :**  
大電流アークの熱で鉄屑などを溶解し、製鋼を行う。
- **照明 (HID ランプ) :**  
水銀灯やメタルハライドランプ。高圧下でのアーク放電を利用し、高輝度・高効率な光源となる。
- **遮断器 (Circuit Breaker) :**  
※「利用」というより「対策」だが、電力用遮断器ではスイッチを切る際に発生するアークをいかに消滅 (消弧) させるかが技術の核心となる。