

電子工学 — 後期期末達成度試験：完全対策資料

概要

提示された手書き講義資料（PDF）および試験範囲のテキスト情報に基づく、**試験直前の完全対策ノート**。物理的意味と導出プロセスに重点を置き、計算・記述ともに試験で得点しやすい形に整理してある。

第 1 章

基本戦略

1. **計算問題:** 公式を暗記するだけでなく、必ず運動方程式（例: $F = ma$ ）から導出できるようにする。
2. **記述問題:** 因果関係（「なぜそうなるか」）を短く明確に説明できるようにする。
3. **式の導出:** タウンゼント理論などは等比級数の和へ落とし込むことが鍵。過程を書けることを重視。

第 2 章

真空中の電子の運動（電位分布・静電界）

2.1 電位分布と電界の基本

- 電界と電位: $E = -\frac{dV}{dx}$ (1 次元)
- 電束密度: $D = \epsilon_0 E$ (真空中)
- 空間電荷密度: ρ [C/m³]

2.2 ポアソン・ラプラス方程式

- ポアソン方程式: $\nabla^2 V = -\frac{\rho}{\epsilon_0}$
- ラプラス方程式 ($\rho = 0$) : $\nabla^2 V = 0$

2.3 平行平板電極の電位分布

2.3.1 空間電荷なし

y, z 方向の変化を無視すると

$$\frac{\partial^2 V}{\partial x^2} = 0 \quad (2.1)$$

境界条件 $V(0) = 0, V(D) = V_a$ より

$$V = \frac{V_a}{D}x, \quad E_x = -\frac{V_a}{D}. \quad (2.2)$$

2.3.2 空間電荷あり ($\rho \neq 0$ の場合)

ポアソン方程式

$$\frac{d^2 V}{dx^2} = -\frac{\rho}{\epsilon_0} \quad (2.3)$$

を解く必要がある。講義資料の例として $\rho = -kx^{-1/2}$ を仮定すると、

$$\frac{d^2V}{dx^2} = \frac{k}{\epsilon_0} x^{-1/2} \quad (2.4)$$

となり、積分して

$$\frac{dV}{dx} = \frac{2k}{\epsilon_0} x^{1/2} + C_1, \quad V = \frac{4k}{3\epsilon_0} x^{3/2} + C_1 x + C_2. \quad (2.5)$$

境界条件で整理した結果は資料の式に従うが、重要なのは電位分布が直線ではなく下に凸になる点である（空間電荷が電位を押し下げる）。

2.4 静電界中の電子の運動

2.4.1 運動方程式

$$m \frac{d\vec{v}}{dt} = -e\vec{E} \quad (2.6)$$

平行平板 ($E_x = -V_a/D$) で初速度 0 なら

$$\frac{d^2x}{dt^2} = \frac{e}{m} \frac{V_a}{D}, \quad v_x = \frac{e}{m} \frac{V_a}{D} t, \quad x = \frac{1}{2} \frac{e}{m} \frac{V_a}{D} t^2. \quad (2.7)$$

到達時間（走行時間）は

$$\tau = \sqrt{\frac{2m}{eV_a}} D. \quad (2.8)$$

2.4.2 電子ボルトと速度

エネルギー保存より

$$\frac{1}{2}mv^2 = eV, \quad v = \sqrt{\frac{2eV}{m}}. \quad (2.9)$$

2.5 静電偏向（CRT の基本式）

加速電圧 V_0 、偏向板長さ l 、間隔 d 、偏向電圧 V 、スクリーンまでの距離 L のとき、

$$y_1 = \frac{eVlL}{2dV_0}. \quad (2.10)$$

偏向感度は V_0 に反比例する。

第 3 章

静磁界中の電子の運動（計算・導出）

3.1 出題ポイント

運動方程式から加速度・速度・位置・軌跡（円運動・螺旋運動）を導く。

3.2 基礎知識

- 磁束密度: \vec{B} [T]
- 電子の電荷: $-e$ [C]
- 電子の速度: \vec{v} [m/s]
- ローレンツ力: $\vec{F} = -e(\vec{v} \times \vec{B})$ (大きさ $F = evB \sin \theta$)

3.2.1 垂直入射時（円運動）

ローレンツ力を向心力とみなして

$$m \frac{v^2}{r} = evB \quad (3.1)$$

より軌道半径と角周波数は

$$r = \frac{mv}{eB}, \quad T = \frac{2\pi m}{eB}, \quad f = \frac{1}{2\pi} \frac{eB}{m}. \quad (3.2)$$

特に周期・周波数は速度に依存しない（サイクロトロンの原理）。

3.2.2 斜め入射時（螺旋運動）

速度の分解: $v_{\perp} = v \sin \theta$, $v_{\parallel} = v \cos \theta$. v_{\perp} 成分は円運動（半径 $r = \frac{m(v \sin \theta)}{eB}$ ）、 v_{\parallel} は等速直線運動。

3.3 一様磁界中の周期と角周波数

$$T = \frac{2\pi m}{eB}, \quad \omega_c = \frac{eB}{m}. \quad (3.3)$$

3.4 静電磁界中 ($\vec{E} \perp \vec{B}$) の運動

直交電磁界では運動方程式が連立となり、軌跡はサイクロイドになる。代表解は

$$x = \frac{A}{\omega_c^2}(1 - \cos \omega_c t), \quad y = \frac{A}{\omega_c^2}(\omega_c t - \sin \omega_c t), \quad (3.4)$$

ただし $A = \frac{eV_a}{mD}$ 、 $\omega_c = \frac{eB}{m}$ 。

第4章

気体中の放電と電離（説明）

4.1 出題ポイント

3種類の電離を区別して説明できること。

4.2 電離・励起・発光の基本

- 電離: 外部から eV_i 以上のエネルギーを与えると電子が飛び出し、原子は $+$ イオンとなる。
- 基底状態: 軌道電子のエネルギーが最低の状態。
- 電離電圧: 電離エネルギー eV_i に対応する電圧 V_i 。
- 励起: eV_i 未満のエネルギーで軌道が高い準位へ遷移。
- 発光: 励起状態から基底状態へ戻るとき、 $\Delta E = h\nu$ を放射。

4.3 準安定電圧と電離電圧（代表値）

| 気体 | 元素記号 | 準安定電圧 [V] | 電離電圧 [V] |
|------|------|-----------|----------|
| ヘリウム | He | 19.81 | 24.580 |
| ネオン | Ne | 16.62 | 21.559 |
| アルゴン | Ar | 11.53 | 15.755 |
| キセノン | Xe | 8.28 | 12.127 |
| 水銀 | Hg | 4.67 | 10.434 |

| 電離の種類 | 要点 | 備考 |
|-------|----------|----------|
| 電界電離 | 衝突で増幅される | タウンゼント作用 |
| 熱電離 | 熱運動で電離する | アーク放電 |
| 光電離 | 光吸収で電離する | 初期電子供給 |

電界電離（衝突電離）

電界により加速された自由電子が気体分子と衝突し、分子を電離して二次電子を生成する現象。タウンゼント放電の基礎となる。

熱電離（衝突電離）

高温下で分子の熱運動が激しくなり、衝突エネルギーで電離が起きる。アーク放電において顕著である。

光電離

外来光（紫外線など）を吸収して電離が起きる現象。条件は $h\nu \geq W$ で、放電の種火（初期電子）を供給する。

4.4 電離の要因と消滅

- 要因: 自然放射線・宇宙線・核種壊変由来の放射線など。
- 電離プロセス: 気体分子 \rightarrow 電子 + 陽イオン。
- 消滅: 拡散・再結合により電子と陽イオンが消滅。

4.5 放電の電圧-電流特性（低圧気体）

電圧上昇で暗電流 \rightarrow タウンゼント放電 \rightarrow グロー放電 \rightarrow アーク放電の順に遷移する。

- 暗電流: 10^{-15} – 10^{-10} A 程度。外因（光・放射線）が遮断されると停止。
- タウンゼント放電: 10^{-10} – 10^{-5} A 程度。電圧 V_s で急増。
- グロー放電: 10^{-4} – 10^{-1} A 程度。電圧はほぼ一定。
- アーク放電: 10^0 – 10^2 A 以上。電圧が数十 V まで低下。

4.6 重要グラフ（描画対策）

以下のグラフは概形を描けるようにしておくこと。

- 放電の V – I 特性: 横軸 V 、縦軸 $\log I$ 。暗電流（一定） \rightarrow タウンゼント（立ち上がり） \rightarrow グロー（定電圧） \rightarrow アーク（低電圧・大電流）。
- パッシェン曲線: 横軸 $p\ell$ 、縦軸 V_c 。下に凸の U 字型で最小値を持つ。
- 電位分布: 空間電荷なし（直線）と空間電荷あり（下に凸）の比較。

4.7 暗電流と電子なだれ

光電子放出や自然放射線で生じた電子が微弱電流を形成する。電界が強くなると衝突電離が進み、電子数が 2, 4, 8, ... と指数的に増加する（電子なだれ）。

補足：電子とイオンの運動

- 質量比: $m_p/m_e \approx 1836$ 。
- 陽イオンは電子に比べて質量が大きく加速されにくいため、初期の衝突電離（ β 作用）は小さく、 α 作用が支配的となる（ $\alpha \gg \beta$ ）。

4.8 グロー放電の空間構造（名称）

アストン暗部、陰極グロー、陰極暗部、負グロー、ファラデー暗部、陽光柱。発光色は気体に依存。

第 5 章

タウンゼントの理論と火花放電の条件 (導出)

5.1 定義と記号

α : 単位長あたりに作られる電子・正イオン対数 (一次増幅)
 γ : 陰極に衝突した陽イオン 1 つ当たりの二次電子放出数
 ℓ : 電極間距離, n_0 : 陰極から出た初期電子数

5.1.1 導出 (要点)

陰極から出た n_0 個が陽極に到達するまでに一次増幅を受けると

$$n_1 = n_0 e^{\alpha \ell}. \quad (5.1)$$

発生した陽イオン数は $n_0(e^{\alpha \ell} - 1)$ 。これが陰極へ戻り二次電子を出す数は

$$\gamma n_0(e^{\alpha \ell} - 1). \quad (5.2)$$

この過程が無限に繰り返されると、全通過電子数 N は初項 n_1 、公比 $\gamma(e^{\alpha \ell} - 1)$ の無限等比級数となる。

$$N = n_1 + n_1[\gamma(e^{\alpha \ell} - 1)] + n_1[\gamma(e^{\alpha \ell} - 1)]^2 + \cdots = \frac{n_1}{1 - \gamma(e^{\alpha \ell} - 1)}. \quad (5.3)$$

分母がゼロになると発散して火花放電が起きるため、タウンゼントの発火条件は

$$\boxed{\gamma(e^{\alpha \ell} - 1) = 1} \quad (5.4)$$

タウンゼント復習 — 答案に使える要点とテンプレ

以下は試験でそのまま書ける **定義・物理的意味・答案テンプレ**のみを示す (問題文は載せていません)。

即答ワンライナー (そのまま書ける)

- α (定義) : 単位長さあたりに生成される電子対 (α 対) の平均個数。電界で加速された電子が気体分子・原子と衝突して電離する確率の指標。

- γ (定義) : 陰極表面で放出される 二次電子 の平均個数 (γ 個)。陽イオンの陰極衝突による二次過程の強さを表す。

答案テンプレ (短く・確実に点を取る)

1. 定義 (1 文) : 「 α は...」 「 γ は...」。
2. 物理的意味 (1 文) : 「 α が大きいと $n_1 = n_0 e^{\alpha \ell}$ のように指数的増幅が起きる。 γ は陰極で種電子を回復し放電を持続させる。」
3. 一語挿入 (必須) : 指定語句を 1~2 語 入れる (例: 単位長さ, 二次電子, 陰極 (-極))。

短い模範表現 (暗記用)

- α — 「単位長で増える電子対の数 (単位長さ・電界・電離)。」
- γ — 「陰極衝突で出る二次電子の個数 (二次電子・陰極 (-極))。」

チェックリスト (答案を書く前に)

- 定義を一文で書いたか (必須)。
- 物理的理由 (衝突・電界・陰極二次放出) を 1 文で示したか。
- 文字式 ($n_1 = n_0 e^{\alpha \ell}$ 、あるいは $\gamma(e^{\alpha \ell} - 1) = 1$ の意味) を一つ入れたか。

よくある減点ポイント (短く)

長い見出しを本文と同じ行に書いて語句が押し出される / α (一次増幅) と γ (二次放出) を混同する / 「何を数えているか」を書かない。

5.2 パッシェンの法則 (説明)

放電開始電圧 V_c は pl の関数であり、ある pl で最小値 (パッシェン・ミニマム) を持つ。

5.2.1 物理的理由 (記述対策)

V_c が最小値 (パッシェン・ミニマム) を持つ理由は、電子のエネルギー獲得と衝突回数のトレードオフによる。

右側 (pl 大 / 高気圧) 分子密度が高く平均自由行程が短い。電子は加速される前に衝突し、電離に必要なエネルギーを得にくい $\rightarrow V_c$ 上昇。

左側 (pl 小 / 低気圧) 電子は十分加速されるが、分子密度が低すぎて衝突回数が不足する $\rightarrow V_c$ 上昇。

第 6 章

グロー放電を利用した機器

6.1 動作原理（要点）

グロー放電は低～中圧の気体中で、電子・イオンの局所的な衝突電離と再結合により安定な放電輝線（発光）を維持する現象である。電子温度は比較的低温、放電は管壁近傍に集中することが多い。

6.1.1 代表的な機器と用途（名称中心）

- ネオン管（ネオンサイン）：希ガスの発光を利用する低圧封入管。
- 蛍光灯：グロー放電による紫外線を蛍光体で可視光に変換。
- プラズマディスプレイ（PDP）：グロー放電を表示に利用する方式（詳細は講義範囲に合わせる）。
- スパッタリング（薄膜堆積）：低圧放電を用いる薄膜形成法（詳細は講義範囲に合わせる）。

6.1.2 代表的仕様（概数・試験で押さえる点）

- 圧力：低～中圧（数 Pa～数百 Pa の範囲が典型）— 機器により大きく異なる（蛍光灯は非常に低圧、ネオン管はやや高め）。
- 電圧/電流：起電圧は数百 V 程度（ネオン管・蛍光灯の点火は高圧が必要）、運転時は比較的低電流で定電圧領域を持つ。
- ガス組成：ネオン・アルゴン・水銀蒸気などが代表。

6.1.3 利点・欠点・安全上の注意

- 利点：低消費電力で安定発光が得られる、狭い領域での均一放電が可能（PDP 等）。
- 欠点：起動（点火）に高電圧が必要、封入ガスや蛍光体・水銀などの環境配慮が必要。
- 安全：高電圧・紫外線・オゾン生成の危険、破損時のガラス飛散や有害ガスに注意。

6.1.4 試験で問われやすいポイント

- グロー放電とアーク放電の違い（圧力・電流密度・温度の違い）。
- 蛍光灯の発光機構（グロー放電→紫外線→蛍光体→可視光）。
- スパッタリングでの荷電粒子の役割（イオン加速→ターゲット衝突による原子放出）。

第 7 章

アーク放電を利用した機器

7.1 動作原理（要点）

アーク放電は高電流密度・高温度で電流が流れる状態で、電子衝突と熱電子放出が支配的となる。プラズマ温度は非常に高く（数千～万 K）、電極近傍での熱的・電氣的作用が顕著である。

7.1.1 代表的な機器と用途（名称中心）

- アーク溶接: アークで金属を局所的に融解して接合する。
- アーク炉: 大電流アークで高温を作り金属を溶解する。
- 高輝度放電ランプ（HID）: アーク放電を用いた高輝度光源。
- 遮断器のアーク消弧: 開閉時のアークを消弧する技術（詳細は講義範囲に合わせる）。

7.1.2 代表的仕様（概数・試験で押さえる点）

- 圧力: 通常は大気圧下で発生（真空や低圧のアークもあるが区別すること）。
- 電流/電圧: アークは高電流・低電圧領域（溶接: 数十～数百 A、電圧は数十 V）。
- 温度: プラズマ温度は高く、材料の蒸発・イオン化が起き得る。

7.1.3 利点・欠点・安全上の注意

- 利点: 極めて高温を短時間で得られるため溶接・溶解等の高エネルギー処理に適する。
- 欠点: 電極消耗・ノイズ（電磁的）・高温による周辺損傷のリスクがある。
- 安全: 強い紫外線・高温・スパッタ（飛散粒子）、高電流取り扱いのための適切な遮断・接地が必須。

7.1.4 試験で問われやすいポイント

- アーク放電とグロー放電の識別（電流密度・温度・発光の性質）。
- アーク溶接における電流・電圧の役割（加熱量はおおむね電力 $P = VI$ に依存）。

- 遮断器でのアーク消弧方式（磁氣的引き延ばし、ガス置換、真空中での消弧など）とその利点・短所。

第 8 章

試験直前チェックリスト

- 計算: $r = mv/(eB)$ の式変形がスムーズか (速度・周期を求められるか)。
- 導出: N を等比級数の和の形に整理できるか。
- 記述: パッシェンの法則で「衝突しすぎるからダメ (右側)」と「衝突相手がないからダメ (左側)」を明快に書き分けられるか。
- 用語: α (電子なだれ), γ (二次電子放出), αl , V_{co} 。

参考

講義ノート（手書き PDF）に準拠。健闘を祈ります。