

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

$$\frac{dV}{dx} = \frac{2k}{\epsilon_0}x^{1/2} + C_1, \quad V = \frac{4k}{3\epsilon_0}x^{3/2} + C_1x + C_2. \quad (2.5)$$

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 → 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 → タウンゼント放電 → グロー放電 → アーク放電の順に遷移する。

- 暗電流: $10^{-15}\text{--}10^{-10}$ 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: $10^{-10}\text{--}10^{-5}$ A 程度。電圧 V_s で急増。
- グロー放電: $10^{-4}\text{--}10^{-1}$ A 程度。電圧はほぼ一定。
- アーク放電: $10^0\text{--}10^2$ 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）→タウンゼント（立ち上がり）→グロー（定電圧）→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 $2, 4, 8, \dots$ 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。

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

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 $n_1 = n_0 e^{\alpha \ell}$ のように指數的増幅が起きる。 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 パッシエンの法則 (説明)

放電開始電圧 V_c は $p\ell$ の関数であり、ある $p\ell$ で最小値 (パッシエン・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 (パッシエン・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 ($p\ell$ 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 → V_c 上昇。

左側 ($p\ell$ 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 → 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く、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・電気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: 大電流アーケ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（真空や低圧のアーケ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（磁気的引き延ばし、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）、 $\alpha\ell$ 、 V_c 。

参考

講義ノート（手書き PDF）に準拠。健闘を祈ります。