

第5章 気体・液体・固体のパルス絶縁

5.1 気体のパルス放電現象

・直流の絶縁破壊: パッシェンの法則

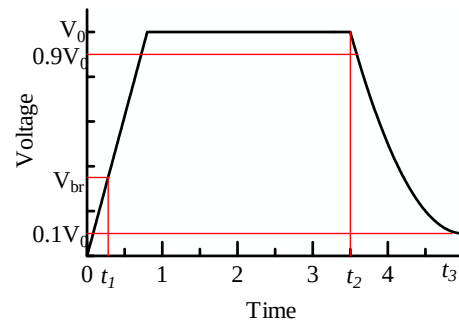
・ α 作用: 電子増殖 $n_e = n_0 e^{\alpha x}$

平均自由行程内に電界から得るエネルギー

・ γ 作用: 二次電子放出 (0.01~0.1 程度)

自己持続放電条件: $\gamma_i (e^{\alpha d} - 1) = 1$

* 放電形成時間以下のパルス印加では不成立



$$V_s = \frac{b p d}{a p d \ln(1 + 1/\gamma_i)} \quad a, b \text{ はガス種毎の定数}$$

放電形成の遅れ時間: $t_d = t_2 - t_1$

・統計的遅れ時間: 初期電子出現までの時間

・形成遅れ時間

・初期電子発生機構

光電子放出 (金属表面, 仕事関数)

正イオン・準安定原子の衝突による電子放出

熱電子放出

電界放出

V_{br} : 直流破壊電圧

$$\text{過電圧率: } K = \frac{V_0 - V_{br}}{V_{br}}$$

K 大ほど形成遅れ時間小

初期電子: 電界放出

熱電子放出

予備電離 (紫外線, X 線)

予備電離と放電形成遅れ時間

予備電離光強度 I の増加と共に t_d 減少

タウンゼント放電: 空間電荷の影響無し

電子雪崩: $e^{\alpha d} < N_{cr}$ (電荷の臨界値) $\sim 10^8$ 個

過電圧率 10%, 大気圧窒素の場合 $\sim 1 \times 10^6$ 個

電子雪崩頭部の荷電粒子による電界強度

$$E_1 = \frac{eN}{4\pi\epsilon_0 r^2} : \text{この値は外部電界の 10\% 程度}$$

ストリーマ放電: 空間電荷の影響有り

・電子雪崩は陽極に向かって進展 $n_e = e^{(\alpha - \eta)x}$

α : 電離係数, η 付着係数

・電子雪崩の広がり半径 $ra = \left(\frac{6D_e x}{v_e} \right)^{1/2}$

D_e : 電子の熱運動による拡散係数

・電子が陽極に到達: 正イオン (一部負イオン) が残る。正イオンの重心を P とする

・放電空間の電界は $E_g = V/d$ と正イオンによる

電界 E_s の和: $E = V/d + E_s$

・光電離で生じた電子はこの電界で電子雪崩を生成 (2 次雪崩)

・正イオンと 2 次雪崩の電子とにより導電性のプラズマチャネル形成: ストリーマ

・ストリーマ形成条件: $E_s = \chi E_g$, $\chi: 0.1 \sim 1$

・ストリーマが陰極に進展して導电路形成

・ストリーマの進展速度 > 電子の移動速度

電子放出機構

- ・熱電子放出:リチャードソン・ダッシュマンの式

$$j_T = \frac{4\pi m_e e k^2 T^2}{h^3} e^{-\frac{e\phi}{kT}} \propto AT^2 e^{-\frac{e\phi}{kT}}$$

融点の低い金属は温度上昇とともに金属の融解が始まる。熱電子放出は高融点金属で見られる:W など。あるいは金属酸化物。

- ・電界放出:ファウラー・ノルドハイムの式

$$j_T = \frac{e^3 E^2}{8\pi h e \phi} \exp\left(-\frac{8\pi(2m_e)^{1/2}}{3h e E} (e\phi)^{3/2}\right)$$

微小突起部, 真空での破壊

SF6 ガスの絶縁特性

- ・電氣的負性気体, 絶縁耐力大
- ・絶縁破壊電圧: 電界強度, ガス圧力, 電極材料, 電極面積, 印加電圧波形に依存

$$E = 89 P_{[\text{atm}]}^n \quad (n = 0.6 \sim 0.8) \quad [\text{kV/cm}]$$

大気圧空気の約 3 倍

化学的に安定, 1800K まで

- ・SF6 ガスの絶縁耐力 > 容器等の沿面耐力

のため, 沿面フラッシュオーバー対策が重要

- ・微小ギャップやひだ付きガイシは絶縁耐力を低下させる

V-t 特性: 1μs を境に, 電圧極性の正負により, 絶縁破壊電圧の大小が逆転

5.2 真空の絶縁特性

$$V = kd^\alpha \quad (\alpha = 0.5 \sim 0.7)$$

V [MV], k 定数, d ギャップ長[cm]

15°C 760Torr N₂ 平均自由行程: $\ell_g = 6.3 \times 10^{-8} \text{ m}$

電子-分子間: $\ell_e = 4\sqrt{2}\ell_g = 5.7\ell_g$

平均自由行程は圧力に反比例, 10^{-3} Torr では

$$\ell_e = 5.7 \times 6.3 \times 10^{-8} \times 760 / 10^{-3} = 27 \text{ cm}$$

通常のギャップ長よりも大: 電子の動きが重要真空の沿面フラッシュオーバー特性

- ・陰極からの電子が固体表面で 2 次電子放出

- ・誘電体傾斜角正の $V_{FO} >$ 負の V_{FO}

V_{FO} : フラッシュオーバー電圧

- ・ギャップ長が短いほど沿面耐圧電界は大

5.3 液体の絶縁特性

絶縁破壊機構

- ・電子的破壊

なだれ破壊, 空間電荷破壊

- ・気泡破壊(蒸発, 残留ガスなど)

- ・混入不純物による破壊

液体粒子の混入(微小水滴など),

固体粒子の混入(比誘電率の違う粒子)

- ・液中コロナを伴う破壊

- ・絶縁破壊電圧と $v-t$ 特性

パルス幅 1μs 以下で, 急上昇する。

- ・体積効果と面積効果

絶縁油体積の増加(油中の微小な浮遊塵埃)

電極面積増加により絶縁破壊電界低下

$$E \cdot t^{1/3} \cdot S^{1/10} = 0.5$$

E : [MV/cm], t : 印加電圧ピーク値の 63%以上が印加される時間[μs], S : 電界強度が最大値の 90%以上となる部分の面積[cm²]

水の絶縁特性

誘電率が大

絶縁の自己回復性が良好

絶縁設計: 導体や電極の端部が重要

5.4 固体の絶縁特性

絶縁破壊機構

- 電子的破壊

真性破壊 (僅かな伝導電子の電界による加速),

なだれ破壊 (1個の電子が増倍)

- 熱的破壊 (電界によるジュール熱)

定常熱破壊 (直流電界),

インパルス熱破壊,

交流熱破壊 (誘電損失)

- 電気機械的破壊 (印加電界による応力)

- 放電を伴う破壊

部分放電 (気泡 (ボイド) 中の放電)

トリーイング (細い溝からなる樹枝状放電路)

トラッキング (絶縁物表面に導電性通路形成)