

これらの式に, $r = 0.1 \text{ nm}$, $v_t = 511 \text{ m/s}$, $n = 2.69 \times 10^{25} \text{ m}^{-3}$ を代入することにより,

$$\begin{aligned}\nu &= 1 \times 10^{10} [1/\text{s}] \\ \lambda &= 5 \times 10^{-8} [\text{m}] = 50 [\text{nm}]\end{aligned}\tag{2.16}$$

と算出される.

以上のことから, 1つの空気分子は音速の1.5倍の速度で動き回りながら毎秒100億回も他の分子と衝突し, 衝突と衝突の間に50nm進むことになる. 長さスケールを 10^9 倍にしたモデルを思い出してみると, バasketボール大の空気分子は, ある6畳間で衝突した後, 15の部屋を通りすぎた頃にまた他のBasketボールに衝突するというイメージになる.

2.4 電子と粒子の衝突

放電現象を考えると, 電子とその周りに存在する電氣的に中性な原子・分子との**衝突**が重要になってくる. その理由は, 電子の速度は原子・分子の速度に比べて100倍程度大きく, さらに電界という加速要因が加わるとその比は1000倍程度になる. 具体的に電子の衝突数 ν_e を計算してみる. 電子と原子・分子との衝突断面積 σ_e は, 電子の大きさが原子・分子に比べて極めて小さいことから, 原子・分子1個分の大きさ πr^2 で近似できる. また, 前述のように電子の速度は原子・分子の速度より十分大きいので, その相対速度は電子の熱速度 v_{te} と等しいと考えてよい. したがって, 電子の衝突数 ν_e は(2.11)式を用いて次式で示される.

$$\nu_e = \pi r^2 v_{te} n\tag{2.17}$$

ここで, n は原子・分子の密度である. この式を(2.14)式と比べてみるとわかるように, $(\nu_e/\nu) \approx (v_{te}/v_t)$ の関係があることから, 電子と原子・分子との衝突数は, 原子・分子同士の衝突数に比べて100~1000倍と極めて大きい. つまり衝突現象の中でも電子が関係する衝突の役割は大きいといえる.

と呼ばれる極小値を持つ点である。空気では、 $(pd)_{\min} = 5.5[\text{mmHg} \cdot \text{mm}]$ で $V_{\min} = 340[\text{V}]$ となる。例えば、大気圧空气中で平等電界を構成し、ギャップ長を減少させると、ほぼギャップ長に比例して火花電圧も減少する。しかし、ギャップ長が $7.2 \mu\text{m}$ に達し、火花電圧が 340 V となった後、さらにギャップ長を減少させても火花電圧は 340 V 以下にはならず、逆に火花電圧は上昇してしまうという通常の感覚とは異なる特性となっている。

パッシェン曲線は、火花放電の条件式と衝突電離係数の実験式を用いて定式化できる。ここではタウンゼント理論で考えてみる。

$$\text{タウンゼント理論による火花放電の条件式: } \gamma(e^{\alpha d} - 1) = 1 \quad (3.23)$$

$$\text{衝突電離係数の実験式: } \alpha/p = A \exp(-Bp/E) \quad (3.24)$$

$$\text{火花放電時の電界: } E = V_s/d \quad (3.25)$$

上の3つの式から α , E を消去して、整理すると次式が得られる。

$$V_s = \frac{Bpd}{\log(pd) + C} \quad (3.26)$$

$$C = \log A - \log \log \left(1 + \frac{1}{\gamma} \right) \quad (3.27)$$

V_s は pd 積の関数となっている。また、 $pd = x$ において x で微分を行い、

$$\frac{dV_s}{dx} = 0 \quad (3.28)$$

と置くことにより、 V_s の極値 (この場合は最小値) が次式で求められる。

$$V_{\min} = \frac{Be}{A} \log \left(1 + \frac{1}{\gamma} \right) \quad (3.29)$$

ここまでは、気体の温度 (絶対温度 T で表す) が一定であることを暗黙のうちに仮定していた。もし、気体の温度 T が変化する場合には、気圧 p の代わりに気体の相対密度 δ ($= ap/T$, a : 定数) を用いて、(3.22) 式を次式のように書き換えることができる。なお、 δ の具体的な定義は後に (3.32) 式として示される。

$$V_s = f(\delta d) \quad \text{これと同じに} \quad (3.30)$$

この式は、気体の液化が始まる直前までの極低温から 1000 K 程度の高温まで成立することから、室温で火花電圧特性を求めておくと、低温から高温まで温度が大きく異なる条件下での火花電圧を簡単に推定するのに利用でき便利である。

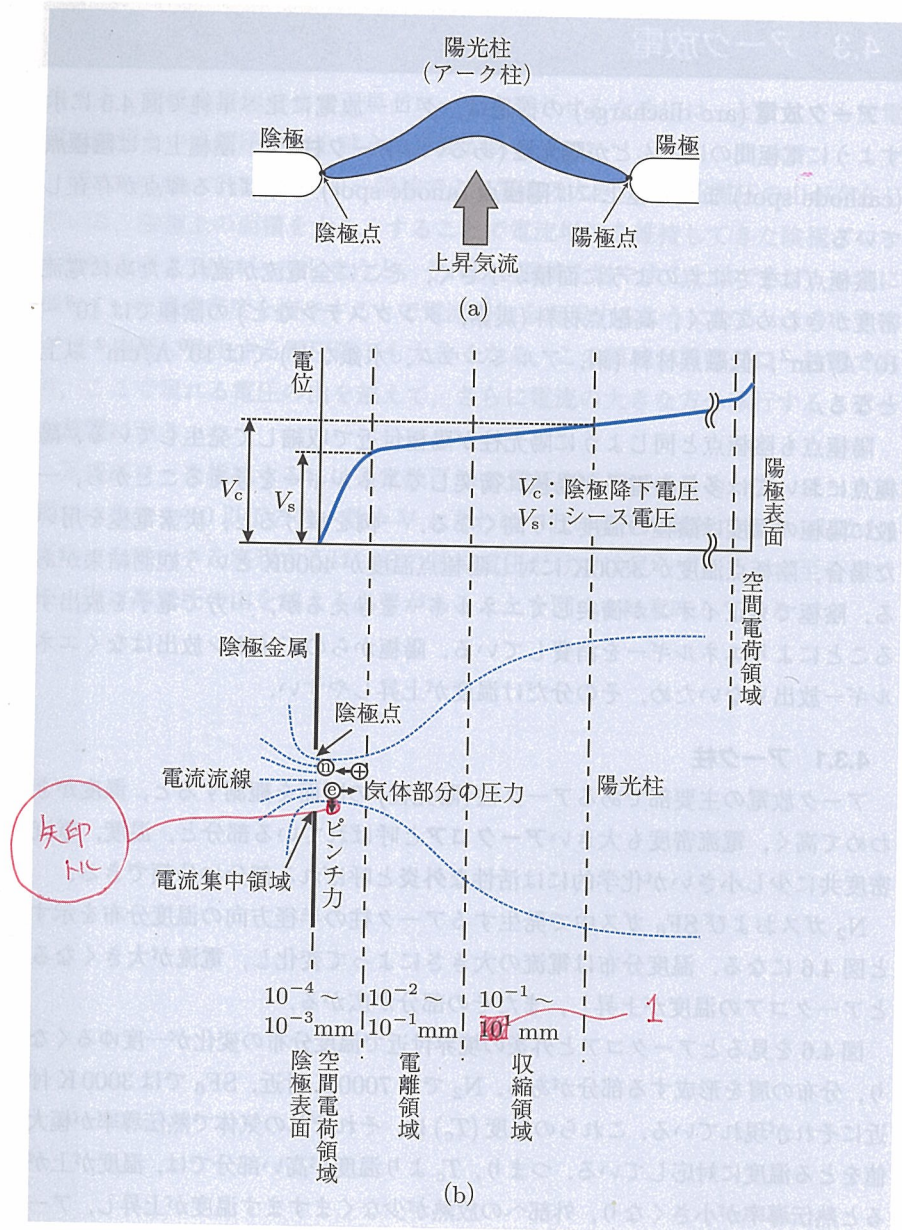


図 4.5 アーク放電の構造. (a) 全体の構造, (b) 陰極点付近の構造

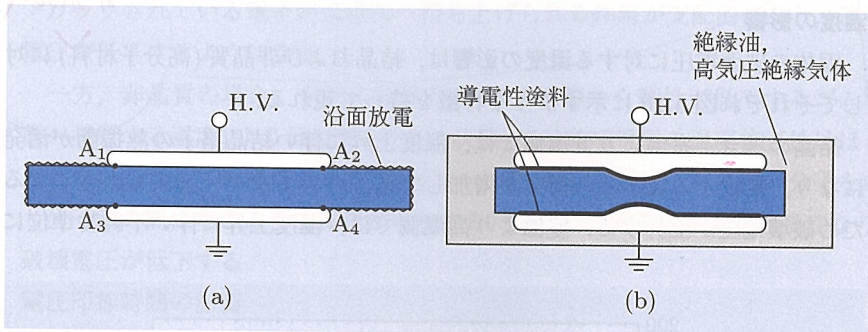


図 5.9 電極周囲の媒質の影響

こで、液体と同様に破壊電圧を支配する要因を押さえておく。

媒質の影響

ある固体の絶縁破壊電圧を求める場合、すぐに思いつく電極配置は図 5.9(a)の構成であろう。しかし、この配置で電圧を印加すると、多くの場合、次章で詳しく説明する沿面放電が電極端部のすき間 (図 5.9(a) の $A_1 \sim A_4$ の部分) で始まり、固体を回り込む形の絶縁破壊が先に起こってしまう。そこで、図 5.9(b)のように周囲を空気より絶縁耐力が大きい高気圧のガスや絶縁油で満たすことを行う。さらに固体中の貫通破壊を確実に行うために、破壊を起こす部分を他より薄くすることなども行う。以上のことを行ったとしても、電極端部のすき間や電極と固体の間にできるわずかなすき間で起こる部分放電が破壊電圧に影響を及ぼすことが知られている。これらを**媒質効果**という。

こうした媒質効果を抑えて固体固有の破壊電圧を求めるためには、電極と固体とのすき間を埋めるため導電性の塗料を電極に塗る、回りの媒質が絶縁油の場合には圧力を加える、ガスの場合はさらに圧力を高くすることなどが考えられる。

厚みの効果

固体の破壊電圧 V_B は、液体と同様に電界が加わる部分の大きさ (固体の場合は厚さ) d に対して比例せず、次の関係がある。

$$V_B \propto d^a, \quad a = 0.5 \sim 0.7 \quad (5.4)$$

□ 固体の絶縁破壊電圧は、種々の要因で大きく変化することが知られている。そ

8.1 高電圧測定の留意点

高電圧を対象とした測定では、通常の電圧測定と異なり、(1) 電圧、電流の絶対値が大きい、(2) 種々の周波数成分を含むことが多い、(3) 絶縁や熱容量の点から機器が大型化し、その結果、浮遊容量や残留インダクタンスが大きい、(4) 周囲に誘導雑音源が存在することが多い、など配慮すべき点がいくつかある。

もし、周りにある適当な電圧計を思いつきで接続し測定すると、得られた数値が正確でないばかりか、機器を破損したり感電の原因になったりする。したがって、上記の留意点を念頭に置きつつ、高電圧測定の原理を理解して適切な測定法を選択する必要がある。

8.2 電圧を直接測定する方法

8.2.1 静電電圧計

図 8.1 に示すように電極を対向して配置し電圧 V を印加すると、マクスウェルの応力により V^2 に比例した引力が電極間に働く。接地側の電極の一部を可動式にしてバネで制動できるようにすると、図中の指針は釣り合い位置で静止

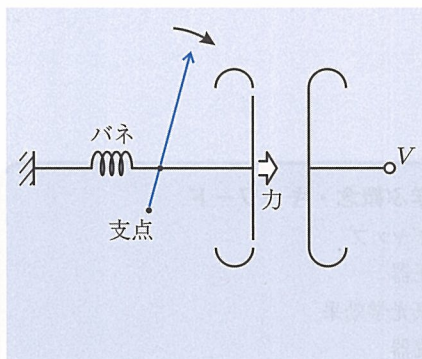


図 8.1 静電電圧計の原理

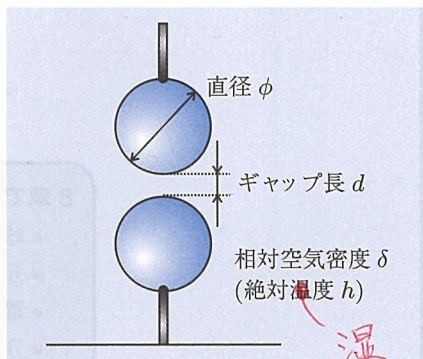


図 8.2 球ギャップ

する。指針の静止位置は V^2 で決まり、指針は秒オーダの変化にしか応答しないことから、 V^2 の時間平均値を指針で表示できる。つまり、直流電圧および交流電圧実効値を求めることができる。

5kV 程度まで測定できる**静電電圧計**は、卓上に置かれる通常のアナログ計器(メータ)と同じような形をしており、それより高い電圧になるとがいしの上に電極を配置するタイプのもので、50kV 程度までのものが市販されている。

8.2.2 球ギャップ

図 8.2 に示すような指針も表示部もない**球ギャップ**で、なぜ電圧が測定できるか疑問に思う人も多いかもしれない。球ギャップの火花電圧 V_s は、球電極直径 ϕ 、ギャップ長 d 、相対空気密度 δ を一定にすると、 $\pm 3\%$ の変動範囲でほぼ一定となる。この性質を利用して、高電圧発生装置の目盛り付け(校正)を行うことができる。

高電圧発生装置に供試物が接続されている場合は、その状態で球ギャップを接続する。高電圧出力と一対一に対応する入力側電圧(試験用変圧器では 1 次側電圧ないし 3 次巻線がある場合にはその電圧、また、多段式インパルス電圧発生器ではコンデンサ 1 個の充電電圧など)を選び、その値と高電圧出力との間に成立する関係式(通常は一次式)を一度求めると、以降は入力側電圧の値から高電圧出力を定めることができる。

球ギャップの火花電圧は、各種条件ごとに表の形で国際電気標準規格(IEC)によって与えられている。その表を巻末の付録 B に記載する。表に示されている火花電圧 V_n は、**相対空気密度** δ が標準状態(1013 hPa, 20 °C)、絶対湿度が 5~12 g/m³ の値である。

そこで、測定時の火花電圧 V_s を求めるには、まず δ を気圧 p 、温度 t から

$$\delta = \frac{0.386 p[\text{mmHg}]}{273 + t[^\circ\text{C}]} = \frac{0.289 p[\text{hPa}]}{273 + t[^\circ\text{C}]} \quad (8.1)$$

で求め、次に湿度補正係数 k を δ と絶対湿度 h から

$$k = 1 + 0.002 \left(\frac{h[\text{g/m}^3]}{\delta} - 8.5 \right) \quad \text{湿} \quad (8.2)$$

で求め、最終的に次式で計算する。

$$V_s = V_n \cdot \delta \cdot k \quad (8.3)$$

$$k = 1 + 0.002 \left(\frac{h[\text{g/m}^3]}{\delta} - 8.5 \right) \quad (8.2)$$

付録Bの表でいくつか注意をしておきたいことがある。表の注記に書かれているが、球直径の数値の下に表れる“+”、“-”の記号は電圧の極性と直接対応しているのではなく、“+”の下に示された火花電圧値は、正極性インパルスに対して、また、“-”の下値は交流、正極性および負極性の直流、負極性のインパルスに対して、それぞれ適用できることを示している。

また火花電圧の値は、直流以外では $\pm 3\%$ 以内の不確かさを十分期待できるが、直流の場合には $\pm 5\%$ 程度と不確かさが増大してしまう。

なお電極表面に存在する微小な突起、水分、ちりなどを取り去って、安定な火花電圧を保証するために、予備火花放電を最初に何回か行う必要がある。

例題 8.1

試験用変圧器の出力電圧を球ギャップで校正することを考える。直径50 cmの標準球ギャップを用いて、使用したギャップ長と火花放電時の一次側入力電圧の読みを対応させると、以下のような結果を得た。この結果から、出力電圧 $V_{\text{out}}[\text{kV}]$ と入力電圧の読み $V_{\text{in}}[\text{V}]$ の関係式(校正曲線)を求めよ。なお、実験時の気象条件は、気圧 1030 hPa, 気温 30°C , 絶対湿度 9 g/m^3 であった。

ギャップ長 [cm]	5	10	15	20	26
入力電圧の読み [V]	21.2	40.5	57.4	70.8	83.1

【解答】 まず相対空気密度 δ と湿度補正係数 k を求めると、

$$\delta = \frac{0.289 \times 1030}{273 + 30} = 0.983, \quad k = 1 + 0.002 \left(\frac{9}{0.983} - 8.5 \right) = 1.00$$

となる。次に付録Bの表を参照して“-”の表記のある欄から、各ギャップ長に対する火花電圧(標準状態)を抜き出し、(8.3)式に従いその値に δ と k を乗ずることによって実際の火花電圧を求める。これらの作業結果を表にまとめると以下のようになる。

ギャップ長 [cm]	5	10	15	20	26
火花電圧(標準状態) [kV]	138	263	373	460	540
火花電圧(気象補正後) $V_{\text{out}}[\text{kV}]$	135.7	258.5	366.7	452.2	530.8
入力電圧の読み $V_{\text{in}}[\text{V}]$	21.2	40.5	57.4	70.8	83.1

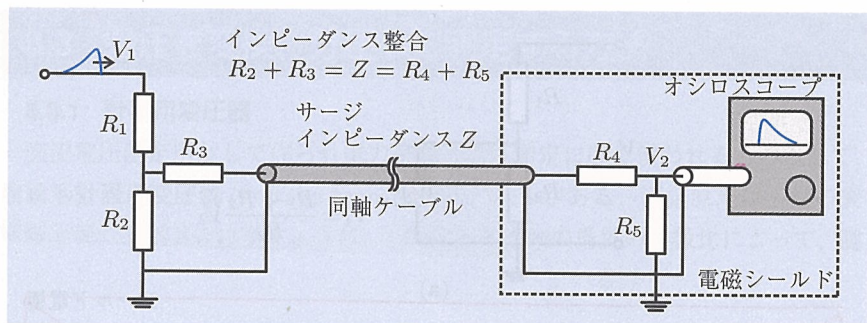


図 8.6 抵抗分圧器を用いた測定回路

放電の発生を抑制するために用いられる。さらにこの場合は、電界緩和と同時に、シールド電極と抵抗体との間に作られる浮遊容量 C_s' に流れる電流を利用して、 C_s を通じて大地へ流れる電流を補償しようとするものである。

2つ目の留意点は、分圧後の電圧測定回路に関してである。オシロスコープを用いて波形観測を行うときの一般的な測定回路は図 8.6 の通りである。信号の伝送に高周波同軸ケーブルを用いる。このケーブルの両端で反射が起こらず、波形がひずまないようにするためには、ケーブルのサージインピーダンス (特性インピーダンス) Z と同じ値の抵抗で両端を接地する必要がある。すなわち、図 8.6(b) の回路で、 $R_2 + R_3 = Z = R_4 + R_5$ というインピーダンスの整合 (matching) をとる。整合をとった場合の分圧比はケーブルを無視して計算でき、被測定電圧 V_1 とオシロスコープで測定される電圧 V_2 の関係は次式で与えられる。

$$V_1 = \frac{(R_1 + R_2)(R_3 + R_4 + R_5) + R_1 R_2}{R_2 R_5} V_2 \quad (8.6)$$

オシロスコープの記述ができたので、覚えておくに役に立つ情報を2つ紹介しておく。1つはオシロスコープの仕様で示されている周波数帯域 f_B と記録できる波形の立ち上がり時間 t_r (これ以上速く変化する波形には追従できない) の関係で、これは次式で与えられる。

$$f_B [\text{MHz}] \cdot t_r [\mu\text{s}] = 0.35 \quad (8.7)$$

もう1つは、デジタルオシロスコープの垂直分解能 N_r である。 N_r は bit 単位で示され、8 bit (256) ~ 12 bit (4096) が一般的である。この分解能は表示部の

最大範囲に対しての値であり，測定レンジの選択が不適切で最大範囲の 1/10 しか変化しない場合は，分解能もかなり劣化する．例えば，8 bit 分解能の場合は，1/25 程度の分解能しかなく，4% の誤差が見込まれる．デジタルオシロスコープでは離散化した測定データのスムージングを行うため，滑らかな波形や何桁も数字が並ぶデータとして出力され，その中に含まれる誤差の大きさを見落としてしまいがちである．時間軸についても同様で，100 M サンプリング/秒のオシロスコープ上の表示波形が滑らかに変化していても，実際には 10 ns 以下の急激な変化やパルスが含まれている可能性がある．

8.3.3 容量分圧器

容量分圧器の測定原理は，図 8.7 に示す通りシンプルである．ただし，抵抗分圧器と同様に，使いこなすためにはいくつかの留意点がある．

容量分圧器は交流電圧測定時に幅広く用いられる．図 8.7(a) において低電圧側コンデンサ C_2 に接続する測定器のインピーダンス Z が $1/(\omega C_2)$ に比べて十分大きいときには，

$$V_1 = \frac{C_1 + C_2}{C_1} V_2 \quad (8.8)$$

という容量分圧の基本関係式が成立する．そうした理想状態を維持することは

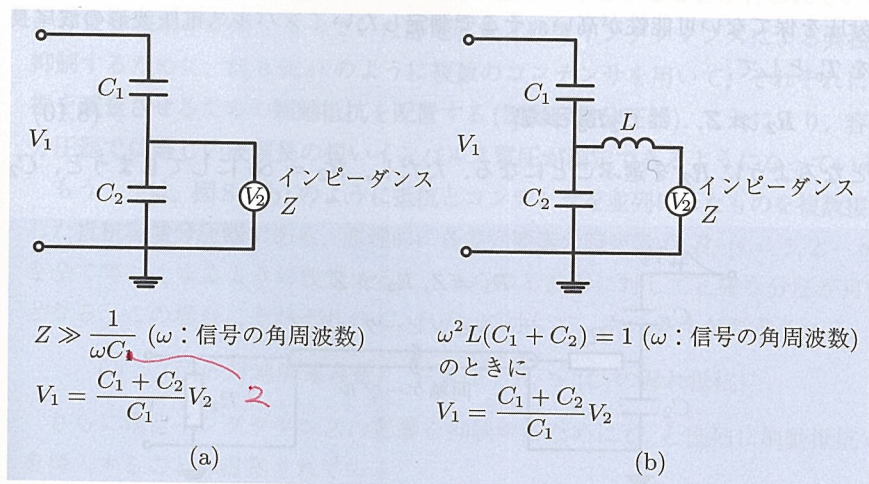


図 8.7 容量分圧器. (a) 基本回路, (b) コンデンサ型計器用変圧器

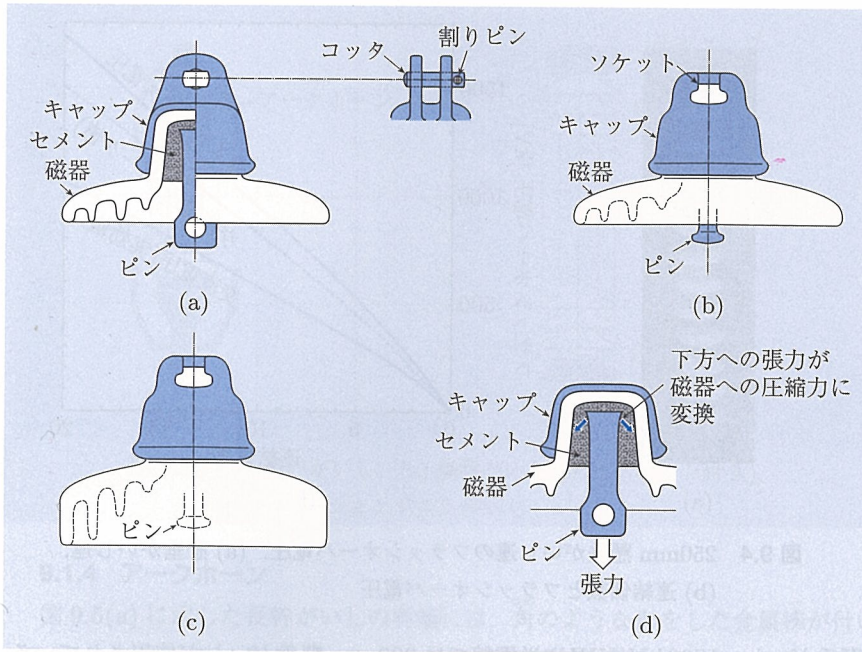


図 9.3 懸垂がいし。(a) クレビス形, (b) ボールソケット形, (c) 耐塩用懸垂がいし, (d) ピンによる張力の分散

レビス形では図 9.3(a) のように ~~キ~~ キャップ上部のクレビス (すき間の意味) にピンを差し込み, さらにそれぞれの穴にコッタ (連結用のボルト) を通して連結を行う。ボールソケット形では, ボール状になっているピンの先端を ~~キ~~ キャップ上部のソケットにはめ込み連結を行う。

連結時にはピンに下向きの大きな張力が加わる。図 9.3(d) に示すように, ピンの上部はくさび形に開いており, ピンに下向きの力が加わると磁器にはセメント部を通して圧力が加わる工夫がなされている。磁器は圧力に対して強い性質があることから, ピンに加わる張力を磁器への圧力に分担させ, 10t 以上の荷重に対しピンが下に抜け落ちないようにになっている。

懸垂がいしの大きさは標準化されており, 直径 10 インチのもの (250 mm 懸垂がいしと呼んでいる) が 275 kV まで送電線では広く用いられている。図 9.4 に 250 mm 懸垂がいし連のフラッシュオーバー電圧を示す。500 kV 送電線では 320 mm

サが直列に接続されているのと等価であるで、これを容量分圧器として利用し、内部の金属箔電極に接続された試験用端子を電圧測定に用いることができる。

9.2.3 ガスブッシング

ガス絶縁が行われている電力機器では、ガスを内部絶縁に用いた**ガスブッシング** (gas filled bushing) が使用されることも多い。図 9.9 にその構造を示す。FRP とシリコンゴムで作られたポリマーがい管が採用され、軽量で機械的強度も高いブッシングになっている。

コンデンサブッシングのように内部に複雑なコンデンサ構造を持たすことができないので、外部にシールド電極を設置して半径方向と軸方向 (沿面方向) の電界が最適に近づくようにしている。コンデンサブッシングより径が大きくなってしまうが、構造が簡単であるという特徴を持っている。

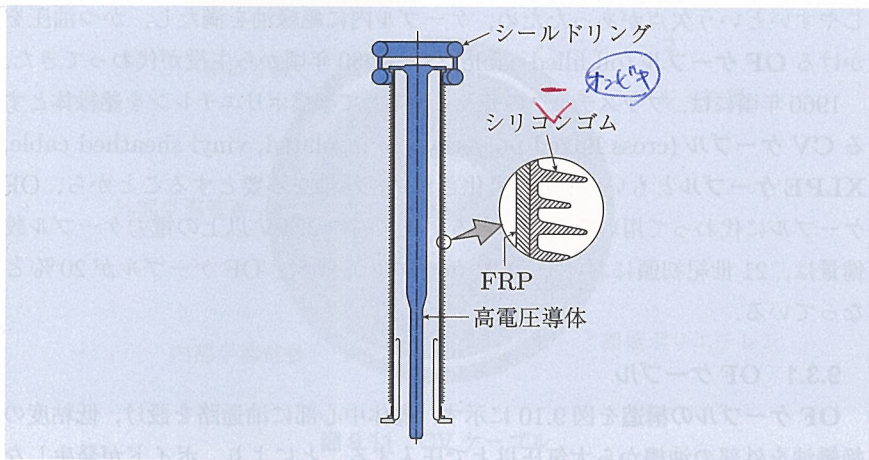


図 9.9 ガスブッシング ((株) 東芝, 東京電力 (株) 提供)

付録 B

標準球ギャップの火花電圧

表 B.1 は標準球ギャップの火花電圧（一球接地，高圧側正極性および負極性の場合，球直径 2～25 cm，大気状態：温度 t_n 20 °C，気圧 b_n 1013 hPa (1013 mbar)）である。

表 B.2 は標準球ギャップの火花電圧（一球接地，高圧側正極性および負極性の場合，球直径 50～200 cm，大気状態：温度 t_n 20 °C，気圧 b_n 1013 hPa (1013 mbar)）である。
共通する留意事項

- (1) 適用範囲：+ は正極性インパルス波，- は交流電圧，負極性インパルス波，直流電圧（正，負），表の数値は IEC60052 Ed. 3.0 (2002) による。
- (2) 網掛け内の数字はインパルス電圧に対して照射の必要のあることを示す。
- (3) かつこで囲まれた数字はギャップ長が球直径の 1/2 以上の場合で不確かさが増加することを示している。

火花電圧の気象補正

任意の気温 (t)，気圧 (b)，絶対温度 (h) における火花電圧の値 (V_s) は，表 B.1 ないし表 B.2 の電圧値 (V_n) に，空気密度補正係数 (δ) と湿度補正係数 (k) を乗ずることによって求められる。

$$V_s = V_n \cdot \delta \cdot k \quad (\text{B.1})$$

$$\delta = \frac{b}{b_n} \cdot \frac{273 + t_n}{273 + t} = \frac{293}{1013} \cdot \frac{b}{273 + t} = \frac{0.289b}{273 + t} \quad (\text{B.2})$$

$$k = 1 + 0.002 \left(\frac{h}{\delta} - 8.5 \right) \quad (\text{B.3})$$

ここで， b と b_n は hPa で表された気圧， t と t_n は摂氏 [°C] で表示された気温， h は g/m^3 で表された絶対湿度である。

湿

問題の解答

第2章

- 1 (1) 1 mol の気体が 0 °C, 1 気圧で占める体積 $V_0 (= 22.4\text{l})$, 20 °C, 1 気圧の場合の体積を V_{20} とすると $V_{20} = V_0 \times (293/273)$ となる. 求める密度 n は, $n = 6.02 \times 10^{23}/V_{20} = 2.50 \times 10^{25} [\text{個}/\text{m}^3]$ となる.

- (2) 熱速度 v_t は, (2.4) 式に電子の質量 m を代入することにより求まる.

$$v_t = \sqrt{\frac{3kT}{m}} = \sqrt{\frac{3 \times 1.38 \times 10^{-23} \times 293}{9.11 \times 10^{-31}}} = 1.15 \times 10^5 [\text{m/s}] \quad (1)$$

- (3) 電子の半径は窒素の半径 r に比べ小さく無視でき, 衝突断面積 σ は πr^2 となる.

$$\sigma = 3.14 \times (1.9 \times 10^{-10})^2 = 1.13 \times 10^{-19} [\text{m}^2] \quad (2)$$

- (4) 電子の熱速度 v_t は窒素分子の熱速度に比べて十分大きいことから, 相対熱速度は v_t で近似でき, (2.11) 式と (2.12) 式を用いて, 衝突周波数 ν は $\nu = \sigma v_t n$, 平均自由行程 λ は $\lambda = 1/(\sigma n)$ で表される.

$$\nu = 1.13 \times 10^{-19} \times 1.15 \times 10^5 \times 2.50 \times 10^{25} = 3.25 \times 10^{11} [\text{回}/\text{s}] \quad (3)$$

$$\lambda = 1/(1.13 \times 10^{-19} \times 2.50 \times 10^{25}) = 3.54 \times 10^{-7} [\text{m}] \quad (4)$$

- (5) 衝突確率 P は, $P = 1/\lambda = 1/3.54 \times 10^{-7} = 2.82 \times 10^6 [\text{回}/\text{m}]$

- (6) 電子は相次ぐ 2 つの衝突の間にその運動エネルギーが窒素の電離エネルギー (15.6 eV) 以上になる, つまり $mv^2/2 \geq 15.6e$ (v : 電子の速度, e : 電気素量) となる必要がある. 一方, 電子が電界 E で加速されるときの運動方程式は $m\alpha = eE$ (α : 加速度), また電子の速度は $v = \alpha t$ ($t = 1/\nu$: 衝突周期) で与えられることから, $v = eE/(m\nu)$ となる. 以上の関係より,

$$E \geq \nu \sqrt{\frac{2 \times 15.6m}{e}} = 4.33 \times 10^6 [\text{V}/\text{m}] = 43.3 [\text{kV}/\text{cm}] \quad (5)$$

電子にも分子と同様に速度分布があり, 低い電界で加速された場合でも, 43.3 kV/cm の電界で加速されたのに匹敵する高速の電子がある割合で存在し, 電離が開始する.

- (7) (2.20) 式の関係より, 光の波長 $\lambda_{ph} \leq \frac{1240}{15.6} = 79.5 [\text{nm}]$ となる.

紫外光 (波長 10 ~ 400 nm) のなかでも波長の短い真空紫外光 (10 ~ 200 nm) の発生装置が必要となる. なお, 真空紫外光という呼び名は, 大気中では窒素や酸素分子に吸収されほとんど透過できず, 真空状態で伝搬できることによる.

- (8) (2.21) 式の関係より, 温度 $T \leq \frac{15.6 \times 1.6 \times 10^{-19} \times 2}{1.38 \times 10^{-23} \times 3} = 1.2 \times 10^5 [\text{K}]$ となる.

12 万度と通常の燃焼反応では実現できない温度で, これを実現するには核融合プラズマ発生装置が必要となる.

$\geq$

電圧 V に対して最も放電しにくい形状となっている。

$r_0 = 0.368 \text{ m}$ の時, E_m が放電開始電界に達する印加電圧を求めると

$$V = r_0 E_m = 0.368 [\text{m}] \times 89 \times 10^5 [\text{V/m}] = 3.28 [\text{MV}] \quad (12)$$

となる。内部導体半径 r_c を 0.368 m とすると最大で 3.28 MV まで電圧を印加できる。

- 4 (1) 同軸円筒電極間の電界 E は中心からの距離 r の関数として,

$$E = \frac{V}{r \ln(r_2/r_1)} \quad (13)$$

となる。ここで V は電極間の電圧, r_1 は内部円筒の半径, r_2 は外部円筒の半径である。ギャップ中で電界が最大になるのは内部円筒表面であることから, $r = r_1$ の所から電離が開始する。

電離開始時の内部円筒表面電界 E_{s0} は,

$$E_{s0} = \frac{V}{r_1 \ln(r_2/r_1)} \quad (14)$$

で示される。電離開始条件は (3.36) 式に $\alpha = 0$ を代入して求められる。その時の電界 E_{s0} を求めると, $E_{s0} = 24.0 [\text{kV/cm}]$ となる。内円筒表面の電界が E_0 になる時の電圧 V_0 は, (14) 式を用いて

$$V_0 = E_0 r_1 \ln(r_2/r_1) = 35.9 [\text{kV}] \quad (15)$$

となる。これが, 電離が開始する電圧である。

- (2) (14) 式で V と r_2 を固定して, r_1 が変化することを考える。(14) 式を r_1 で微分し $dE_{s0}/dr_1 = 0$ を求めると, 前問の解答 (11) 式と同様の式が得られ, $r_2/r_1 = e$ の時に E_{s0} が最小となることがわかる。つまり, コロナ放電の先端に相当する r_1 が $r_1 = r_2/e$ になるまで成長したと仮定すると, 後はコロナ放電先端の電界が常に上昇し, 電離領域すなわちコロナ放電領域が自然に成長することになる。従って, $r_1 = r_2/e$ の所まで電離が進展する条件で求めれば, それが火花電圧の最低値に相当する。 $r_1 = r_2/e$ で電界が E_{s0} となる印加電圧 V を求めればよく, 最終的に次式が得られる。

$$V = E_{s0} r_2 / e = 88.3 [\text{kV}] \quad (16)$$

- 5 まずタウンゼント理論では,

$$\text{火花条件: } \gamma(e^{\alpha d} - 1) = 1 \quad (d: \text{ギャップ長}) \quad \textcircled{1}$$

$$\alpha \text{ の実験式: } \alpha/P = A(E/P - B)^2 - C \quad \textcircled{2}$$

$$\text{電圧 } V \text{ と電界 } E \text{ の関係: } E = V/d \quad \textcircled{3}$$

上記の 3 式より,

$$V = pd \left(\sqrt{\frac{\ln(1 + 1/\gamma) + Cpd}{Apd}} + B \right) \quad (17)$$

が得られ, 数値を代入することにより $V = 57.9 [\text{kV}]$ となる。

次にストリーマ理論では, ① 式の代わりにストリーマ転換条件式 $\alpha d = K$ を用いること