

固体絶縁物の縁絶破壊理論

神谷健児 松山英太郎

1. 序 論

固体絶縁物の絶縁破壊には二種類の型がある。第一の型は電氣的破壊とよばれるもので、破壊は電圧を加えてから非常に短い時間、即ち約10秒程度の間起るものであり、それに対して第二の型は電圧を加えて数秒後に破壊が起こり、その時絶縁物の内部でかなりの温度上昇をとまう。第一の型では破壊が短時間に起るため温度上昇など論外である。そこで第二の型を熱的破壊とよぶことにする。さて実験結果によると固体絶縁物の絶縁破壊は、ある臨界温度以上では熱的破壊であり破壊電圧は温度と共に極めて速やかに減ずるが、それ以下になると電氣的破壊となり破壊電圧は温度によらない。このように絶縁破壊の型式は温度によって異なるが、温度に無関係に常に電氣的破壊のみを起すには電氣的破壊が非常に短時間におこることを利用して衝撃電圧によって破壊すればよい。実験結果によると衝撃破壊電圧は試料の厚さに比例する。このことより固体絶縁物に、ある強度以上の電界を加えると電氣的破壊を起すことがわかる。この電界の限界強度を破壊強度とよび記号 E_c であらわすことにする。電氣的破壊電圧が温度によらないことより明らかに E_c は温度に関係しない。(但し非常に低温になると温度上昇とともに増す傾向がある)。実験により明らかにされたところによると電氣的破壊は絶縁物中の電子が電界により加速されて原子を衝突イオン化することにより起る¹⁾。この機構にしたがって計算された破壊強度 E_c の値は実験値とよく一致している²⁾。これに対して熱的破壊の機構はまだ十分に明らかでない。Wagner 等³⁾は熱的破壊は絶縁物中を流れる導電電流により加熱劣化されるためと考えて破壊電圧が温度上昇とともに減少することを理論的に証明した。しかし加熱劣化されて破壊がおこると考えることには疑問がある。熱的破壊の場合には絶縁物中かなりの温度上昇があるために二次的に絶縁物は加熱劣化されるのであって破壊を起す原因は電氣的破壊と同じではなからうか。この点について以下われわれの考えを述べる。

2. 絶縁物中の電界強度分布

たがいに平行な平板電極に挟まれて直流電圧を印加されている平等でかつ非常に広い平板状の固体絶縁物を考えよう。原点が陽極極板上にあり x 軸が極板と垂直に交わるように選んだ座標系に関して座標 (x, y, z) であらわされる絶縁物内の一点で時刻 t における温度を $T(x, y, z, t)$ で、導電率を $\sigma(x, y, z, t)$ であらわそう。絶縁物内の各点における電界はその方向は x -軸に平行であり、その強度を $E(x, y, z, t)$ であらわすと電流の連続性により次の方程式を満足する。

$$\sigma(x, y, z, t) E(x, y, z, t) + (\varepsilon/4\pi) \{ \partial E(x, y, z, t) / \partial t \} = V/AR(t) \quad \dots\dots\dots(2.1)$$

ここで ε は絶縁物の誘電率、 A は電極と絶縁物の接触面積、そして V は印加された直流電圧で $R(t)$ は電極間の抵抗で $t \rightarrow \infty$ で一定の値に近づく時刻 t の関数である。さらに電位差に関して次の式が成立する。

$$\int_L E(x, y, z, t) dx dy dz = VA \quad \dots\dots\dots(2.2)$$

ここで記号 L は絶縁物の電極に挟まれた部分に関する積分を意味する。次に熱伝導に関する方程式をつくってみると

$$\rho C \{ \partial T(x, y, z, t) / \partial t \} = (\epsilon / 8\pi J) \{ \partial E^2(x, y, z, t) / \partial t \} + \sigma(x, y, z, t) E^2(x, y, z, t) / J + K \nabla^2 T(x, y, z, t) \dots (2.3)$$

となる。ここで P, C はそれぞれ絶縁物の密度および比熱。 K は熱伝導率であり、そして J は熱の仕事当量である。他方、固体絶縁物の導電率は温度が上るにつれて指数関数的に増大することはよく知られた事実である。それ故われわれは次のようにおくことができる。

$$\sigma(x, y, z, t) = \sigma_0 \exp\{\alpha T(x, y, z, t)\} \dots (2.4)$$

ここで σ_0 は 0°C における絶縁物の導電率、 α に定数で普通 $0.04 \sim 0.13$ の間にある。かくして (2.4) を (2.1) および (2.3) に代入して適当な初期条件のもとでこれを解いて絶縁物内の電界強度および温度の分布をもとめることができる。しかしこれを実際に遂行することは仲々数学的に困難である。そこでわれわれは特に $t = \infty$ の極限を考えよう。 $t = \infty$ では絶縁物は定常状態に達して

$$\{ \partial T(x, y, z, t) / \partial t \}_{t=\infty} = 0, \quad \{ \partial E(x, y, z, t) / \partial t \}_{t=\infty} = 0$$

となる。又絶縁物内で発生する熱は主として両電極によって導かれるから、絶縁物の中心部が最高温度となり電極に平行な平面は等温面となる。それ故

$$T(x, y, z, \infty) \equiv \theta(x) \dots (2.5)$$

とおくと (2.1), (2.4) から

$$E_0(x) \equiv E(x, y, z, \infty) = (V / \sigma_0 A R_0) \exp\{-\alpha \theta(x)\} \dots (2.6)$$

を得る。ここで $R_0 \equiv R(\infty)$ である。これを (2.2) に代入して

$$R_0 = (A \sigma_0)^{-1} \int_0^{2l} \exp\{-\alpha \theta(x)\} dx \dots (2.7)$$

を得る。 $2l$ は絶縁物の厚さである。かくして

$$E_0(x) = \{ V / D(l) \} \exp\{-\alpha \theta(x)\} \dots (2.8)$$

$$D(l) = \int_0^{2l} \exp\{-\alpha \theta(x)\} dx \dots (2.9)$$

を得る。そこで (2.5), (2.8) を (2.3) に入れて次の方程式を得る。

$$d^2 \theta / dx^2 = -\gamma \exp(-\alpha \theta) \dots (2.10)$$

$$\gamma = V^2 / K J D^2(l) \dots (2.11)$$

この方程式を次の境界条件のもとで解く。

$$(d\theta / dx)_{x=l} = 0, \quad \theta(0) = \theta(2l) = \theta_0 \dots (2.12)$$

ここで θ_0 は電極板上の温度で電圧を印加する前の絶縁物の温度と等しいと考えてよい。

かくして (2.10) の解は次のようになる。

$$\exp\{\alpha(\theta - \theta_0)\} = \cos^2 g(x-l) / \cos^2 gl \dots (2.13)$$

$$g = (\alpha \gamma / 2)^{1/2} \dots (2.14)$$

これを (2.8) および (2.9) に入れて

$$E_0(x) = g \cot gl / 2 \cos^2 g(x-l) \dots (2.15)$$

を得る。 g は (2.9) と (2.11) から $D(l)$ を消去してもとめられる。

$$\sin^2 2gl = (\alpha / 2kJ) V^2 \exp(2\alpha \theta_0) \dots (2.16)$$

3. 熱的破壊の機構

熱的破壊の機構を考えるために、ここでは熱的破壊の極限、即ち電圧を無限時間の間加えた場合の破壊機構について考えてみよう。前節でもとめたように固体絶縁物に無限時間の間電圧を加えると絶縁物内は定常状態になり電界強度の分布の様子は(2.15)であたえられる。この式より直ちにわかるように絶縁物内の電界強度 $E_0(x)$ は $x=0$ および $x=2l$ のところ即ち電極に接するところで最大となる。この最大強度を E_{max} であらわすと(2.15)より(2.16)を用いて

$$E_{max} = (V/2l)(\alpha/2kJ)^{1/2} \exp(\alpha\theta_0) \sin^{-1}[(\alpha/2kJ)^{1/2} V \exp(\alpha\theta_0)] \dots\dots\dots(3.1)$$

となる。今、若し E_{max} が第一節で説明した破壊強度 E_c に等しくなると電極のところで電子による原子の衝突イオン化がおきて絶縁物は絶縁破壊される。即ち

$$E_{max} \geq E_c \dots\dots\dots(3.2)$$

が今の場合の破壊の条件となる。かくして電圧を無限時間間加えた場合の破壊電圧を V_0 とおくと、それは(3.1)において $E_{max} = E_c$ とおいて解いた V の値となる。そして

$$V_0 = (2kJ/\alpha)^{1/2} \exp(-\alpha\theta_0) \sin\{2lE_c(\alpha/2kJ)^{1/2} \exp(\alpha\theta_0)\} \dots\dots\dots(3.3)$$

を得る。この式は熱的破壊電圧が温度が上るとともに急激に減少する実験結果をよく示している。また熱的破壊電圧が絶縁物の厚さに比例しない実験結果とも合っている。

さて変数 a を次のように定義しよう。

$$a = 2lE_c(\alpha/2kJ)^{1/2} \exp(\alpha\theta_0) \dots\dots\dots(3.4)$$

この変数 a を用いると(3.3)は

$$V_0/2lE_c = \sin a/a \dots\dots\dots(3.5)$$

と書きなおせる。これより明かに

$$V_0 < 2lE_c \dots\dots\dots(3.6)$$

を得る。これは破壊電圧 V_0 はその絶縁物を電氣的破壊させるのに必要な電圧 $2lE_c$ より常に小さいことを示している。しかし、もしも $a \neq 0$ であると、 $V_0 \neq 2lE_c$ とみなすことができる。ところで絶縁物内の電界の様式を考えてみると電極に接する部分の強度は時刻 t がますのにしたがって強くなり $t = \infty$ で E_{max} となるのである。それ故、もし数秒という有限の時間内に絶縁破壊を起すためには V_0 より高い電圧を加える必要がある。このことより、ある温度において $V_0 \neq 2lE_c$ であるならばその温度において絶縁破壊をおこすためには $2lE_c$ に殆んど等しい電圧を加える必要がある。この電圧を加えたごく瞬間を考えてみると絶縁物内の電界は一様の強度 E で分布している。 E は次のようにあたえられる

$$E = V/2l \dots\dots\dots(3.7)$$

ここで V は印加された電圧である。ところが実際の固体絶縁物は決して均質でなく部分的に誘電率が異っている。それ故電圧 V を加えたごく瞬間の電界分布を考えると電界強度はその部分の誘電率に逆比例するものであるから誘電率の小なる部分では電界強度が E より大きくなる。一方 $E \neq E_c$ であるから誘電率の小なるところでは電界強度が破壊強度 E_c に達して破壊をおこす可能性がある。このようにして実際の固体絶縁物では $V_0 \neq 2lE_c$ がなりたつ温度の範囲では絶縁破壊は電氣的破壊になってしまう。さて $V_0 \neq 2lE_c$ の条件であるが実際に V_0 と $2lE_c$ のどの程度の差までを含むかということであるがこれは次のように考えられる。固体絶縁物において誘電率が部分的に異っている場合その中の最小の誘電率を ϵ_{mi} 、平均の誘電率を ϵ とおくと

最小の部分で絶縁破壊がおこるためには

$$E_c \leq (\varepsilon/\varepsilon_{min})(V/2l) \dots\dots\dots(3.8)$$

でなくてはならぬ。他方 $V \geq V_0$ であるから (3.6) の条件を考えあわせると破壊が電氣的破壊になるためには

$$(\varepsilon_{min}/\varepsilon) \leq (V_0/2lE_c) < 1 \dots\dots\dots(3.9)$$

がなりたてばよい。変数 a は温度とともに急激に増加するため (3.5) よりわかるように V_0 と $2lE_c$ との差は温度とともに急激に大きくなる。このことより絶縁破壊はある臨界温度 θ_c を境にして電氣的破壊から熱的破壊に移るといふ実験結果が理解される。臨界温度 θ_c は (3.9) より

$$(V_0/2lE_c) = (\varepsilon_{mi}/\varepsilon) \dots\dots\dots(3.10)$$

を解いて定められ。(3.4) と (3.5) を用いるとこの条件式を解いて次の結果を得る。

$$\theta_c = \alpha^{-1} \log \{ (2kJ/\alpha)^{1/2} (a_0/2lE_c) \} \dots\dots\dots(3.11)$$

$$a_0(\varepsilon_{mi}/\varepsilon) = \sin a_0 \dots\dots\dots(3.12)$$

4. 結 論

前節になされた考察より、われわれは次のような結論を得る。固体絶縁物の絶縁破壊は常に内部にある電子が電界によって加速されて原子を衝突イオン化することによって起る。絶縁物が加熱劣化されるのは破壊にともなっておこる現象であって絶縁破壊の原因とは無関係である。ある温度を境にして破壊の型式が変わるのは絶縁物内の不均質が原因である。

参 考 文 献

- 1) A von Hippel: Zeits. f. Physik 75, 145 (1932)
- 2) H. Fröhlich: Proc. Roy. Soc. (A), 160, 230 (1937)
R. J. Seeger, E. Teller: Phys. Rev. 54, 515 (1938)
- 3) 鳥山, 稲田: 高電圧工学, コロナ社