

論 文

部分放電前駆現象としての同心球空気コンデンサの 電荷漏洩速度異常

葛 自 良*, 藤 林 宏 一*

松 井 満*, 村 崎 憲 雄*

(1995年8月9日受理)

Abnormal Electric Charge Leakage from a Concentric Spherical Air Condenser to Act as a Forerunner of Partial Discharge

Ziliang GE,* Koichi FUJIBAYASHI,* Mitsuru MATSUI*

and Norio MURASAKI*

(Received August 9, 1995)

At an electric field, whose intensity is a eighth to a third of the dielectric breakdown strength of the air, the electric charge leakage from a concentric spherical air condenser with a conical solid insulator has been studied. An outer spherical metal shell is earthed and an inner metal sphere is initially charged. Electric charge can leak from two factors, they are an electric current flowing through the insulator, and an electric charge neutralization due to charged particles generated in the condenser air. Authors have separated the current through the insulator and the current through the air. When the inner sphere has the higher initial potential, the more promptly the charge leaks through the insulator, while the charge neutralization due to charged particles generated in the condenser air does not alter. As the initial potential of the inner sphere decreases less than 28 kV, the stoppage of the extraordinary potential decay at the inner sphere has been observed, which suggests that a minute partial discharge at the contact line of the insulator and the inner sphere had occurred. As the conclusion, abnormal electric charge leakage from an isolated conductor is a forerunner of partial discharge.

1. まえがき

最近の超高電圧電力網の発達と薄膜電子部品の進歩は電気絶縁技術の向上に大きな刺激を与えた。材料という面では、合成高分子の電気絶縁材料としての性能は高く評価され、その進歩は目覚ましく、機器絶縁の設計思想に一大変革を与えたといつても過言でない。しかし反面、高電圧下における各種放電劣化現象に関して一つの問題を提起した。

大容量送電においては、送電、配電電圧を高くする必

要があり、架空線路の絶縁支持のための碍子の責務は厳しくなっている。碍子の絶縁破壊の前駆現象としての部分放電は詳しく研究されていて、部分放電を検出して、碍子の材料劣化を予知できる。

帶電内球の近傍の電界が空気の絶縁破壊強度の $1/10 \sim 1/5$ の大きさであるときの同心球空気コンデンサの電荷漏洩を調べると、漏洩の主な原因是、絶縁支持物を経由する漏洩ではなく、コンデンサ内空気に常時発生する荷電粒子が、高電圧孤立導体に引き寄せられ、衝突し、電荷を中和するためであることがわかった¹⁾。孤立導体の電荷漏洩速度が、荷電粒子付着による中和の速度よりも著しく速いならば、孤立導体の支持碍子表面における微小放電が生じていると推察できる。孤立導体の電荷漏洩速度異常は支持碍子表面における微小放電であって、部分放電のいわば前駆現象であり、これを検知すると、部分放電を予知できると考えられる。部分放電を高信頼度で予知できるならば、より信頼度の高い碍子絶縁が可

キーワード：電荷漏洩、漏れ時定数、漏れ電流、三重点効果、微小放電

* 東京農工大学工学部電子情報工学科 (184 小金井市中町 2-24-16)

Department of Electronic and Information Engineering, Faculty of Technology, Tokyo University of Agriculture and Technology, 2-24-16, Nakamachi, Koganei, Tokyo, 184 Japan

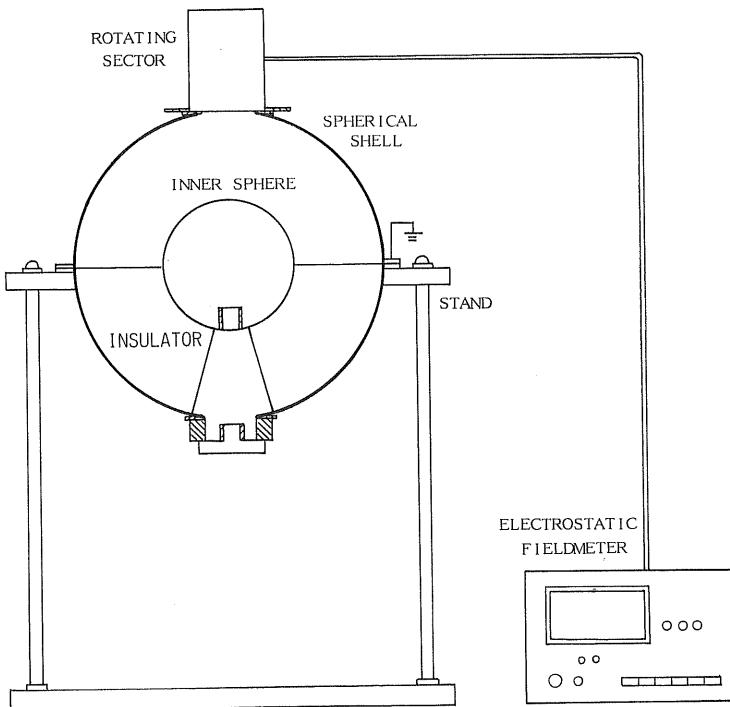


図 1 実験装置

Fig. 1 Experimental apparatus.

能となり、超高電圧送配電に際して、停電の頻度を著しく低め、安定した電力供給を可能とする。

本研究の目的は、円錐形の支持碍子をもつ同心球空気コンデンサをモデルとして、帯電する内球の近傍の電界が空気の絶縁破壊強度の $1/8 \sim 1/3$ の大きさであるとき、その電荷漏洩を調べて、高電圧印加時における支持碍子を経由する漏れ電流と空気を経由する漏れ電流を分離して算定し、帶電内球の電荷漏洩速度異常によって、支持碍子表面における微小放電を判定することにある。

2. 実験方法

実験は温度 $24 \sim 25^\circ\text{C}$ 、湿度 $25 \pm 5\% \text{ RH}$ に保った空調室において、図1のような装置を用いて行った。同心球空気コンデンサは内球と外球を銅で製作した。内球の外側半径は 62.5 mm である。外球の内側半径は 149 mm 、球殻の厚さは 1 mm である。外球は上下二つの分割半球を組み合わせてある。下側半球の開口部には、内球を支持する碍子を設けた。図2に示すようにポリプロピレン丸棒（出光ポリプロ・E100G、関西合樹（株）により丸棒成形）より旋削した円錐形の碍子は上端が凹面で、内球の表面に密着し、接触角が 90° 度で、側面が碍子を挿入しない時の電気力線に沿うように設計した。碍

子の底面の直径を 80 mm 、高さを 111 mm （フランジ厚さを含む）とし、内球を中心位置に設定した。

同心球空気コンデンサの静電容量 C_s は碍子を持たない同心球空気コンデンサの静電容量 $(C=12.0 \text{ pF})$ とポリプロピレンの誘電率 $(\epsilon_s \approx 2.4)$ および立体角 $(\omega/4\pi = 0.0168)$ から計算し、

$$C_s = C(1 - \omega/4\pi) + \epsilon_s C \omega / 4\pi \quad (1)$$

12.28 pF を得た。

上側半球の開口部に円環状のガード電極をとりつけた。ガード電極の円形の開口部の直径は 50 mm で、辺縁を R_5 に丸め、そこに回転セクター型電界強度計（リオン EA-07A）の検出部を置いた。電界計の出力信号を $x-t$ レコーダで記録した。外球と電界計を接地して内球を遮蔽した。

実験に使用した回転セクター型電界計および $x-t$ レコーダの長時間ドリフトは12時間にわたる測定によると、いずれも 0.1% 以下であった。実測によると、電界計の感度は 1 V/cm であった¹⁾。

電界計を一時的に外して、高抵抗 $100 \text{ M}\Omega$ を直列に内蔵した高電圧導線を用いて上側半球の開口部から内球に電荷を与えた。それぞれ正または負極性の 15.0 kV から、 18.0 kV 、 20.0 kV 、 22.0 kV 、 24.0 kV 、 26.0 kV 、

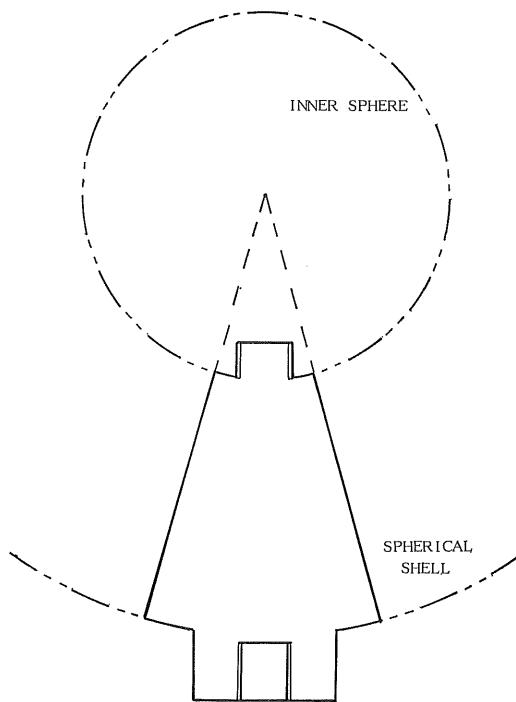


図 2 碼子の形状

Fig. 2 Synthetic resin insulator.

28.0 kV, 30.0 kV までの値に設定した高電圧を内球に瞬時印加する。

高電圧印加した同心球空気コンデンサの中で、空間電荷による電界の歪みが無視できるので、帶電した後の内球の表面初期電界 E_{ao} は下式で表示できる。

$$E_{ao} = bU_0/a(b-a) \quad (2)$$

ここに、 U_0 は内球の初期電位、 a は内球の半径、 b は外球の内側半径。内球に 15.0~30.0 kV の電圧を瞬時印加した。内球の表面電界は $(4.1 \sim 8.4) \times 10^5$ V/m 程度、すなわち、空気の絶縁破壊強度の $1/8 \sim 1/3$ の大きさである。本実験はこのような電界の範囲内に同心球空気コンデンサの電荷漏洩を調べる。

同じ実験装置を 4 組用意して、内球を正帯電、負帯電とする各々 2 組に分けた。四つの内球の電位を電界強度計で同時に測定し、 $x-t$ レコーダに出力させることにより減衰特性を測定した。

内球の表面、外球の内壁、碍子の側面とガード電極にちりが付着すると、電荷減衰が著しいので、ちりの付着を極力減らすよう随时エタノール含浸綿ガーゼで清拭した。また、碍子の表面伝導は碍子の表面状態、周囲の雰囲気、特に湿度によって敏感に変化するので²⁾、清拭した碍子を乾燥して使った。

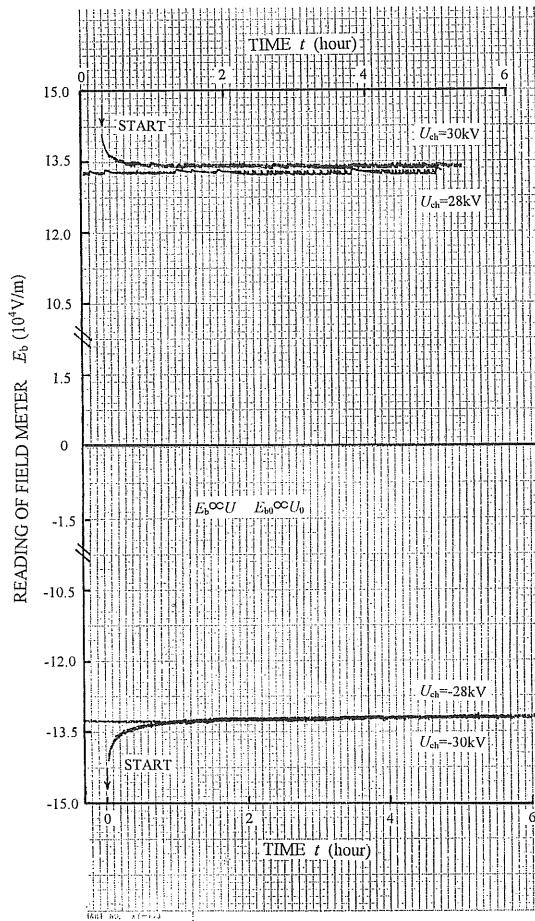


図 3 内球の電位減衰特性

Fig. 3 Decay of the potential of the inner sphere.

3. 実験結果および検討

3.1 支持碍子を経由する漏れ電流

高電圧導線を内球に一時的に接触させ、引き離す際には、内球の初期電位 U_0 が印加電圧 U_{ch} より低下することが判明した¹⁾。内球の初期帯電量 Q_0 と内球の初期電位 U_0 との間には次の関係がある。

$$Q_0 = C_s U_0 \quad (3)$$

電界計で測定された外球位置での電界の初期値 E_{bo} と内球の初期電位 U_0 との関係は下式で表示できる。

$$E_{bo} = C_s U_0 / 4\pi\epsilon b^2 \quad (4)$$

ここに、 ϵ は空気の誘電率。

内球に電荷を与え、内球の電位の経時変化を測定することにより、電荷漏洩がゆっくりであることがわかった。例として、28.0 kV で帶電した後の内球の電位の減衰特性を図 3 に示す。同心球空気コンデンサの電荷漏れ時定数 T_{leak} を次の近似式によって求めて図 4 に示す。

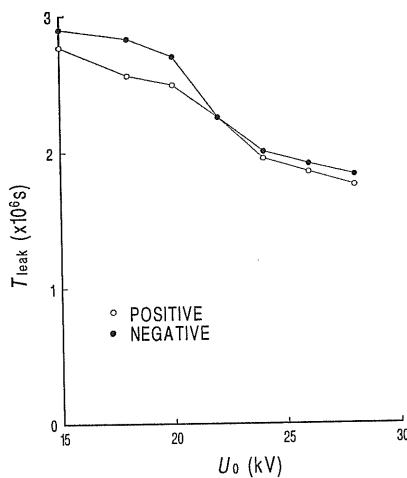


図 4 電荷漏れ時定数と内球の初期電位との関係

Fig. 4 Dependence of the charge-decay time constant on the initial potential of the inner sphere.

$$\begin{aligned} U &= U_0 \exp(-t/T_{\text{leak}}) \\ &\approx U_0(1-t/T_{\text{leak}}) \\ T_{\text{leak}} &\approx U_0 t / (U_0 - U) \end{aligned} \quad (5)$$

ここに、 U は t 秒後の電位測定値。

内球の初期帶電量を Q_0 とすると、 t 秒後の内球帶電量 Q は

$$Q = Q_0 \exp(-t/T_{\text{leak}}) \quad (6)$$

同心球空気コンデンサの漏れ電流 I_{leak} は

$$I_{\text{leak}} = -\frac{dQ}{dt} = \frac{C_s U_0}{T_{\text{leak}}} \exp(-t/T_{\text{leak}}) \quad (7)$$

電荷はきわめて緩慢に漏洩するので、帶電した後の内球電位の減衰曲線はほぼ直線である。かつ、内球電位の経時変化を測定する時間 $t \ll T_{\text{leak}}$ であるので、上式において $t/T_{\text{leak}} \approx 0$ とおくと、同心球空気コンデンサの漏れ電流 I_{leak} を近似して求め得る。計算した I_{leak} は図 5 に示される。

さて、同心球空気コンデンサ中の内球の電荷中和に寄与する荷電粒子は、空気中に宇宙線と自然放射線により常時発生するイオン対（正イオンと電子）と光電効果により負の電極面から放出される 2 次電子との二つの成分からなる。前者が主な役割をはたす。毎秒中和に寄与した荷電粒子数 N' は下式で表示できる。

$$\begin{aligned} \text{内球正帯電: } N'_+ &= \delta V + \beta S_b \\ \text{内球負帯電: } N'_- &= \delta V + \beta S_a \end{aligned} \quad (8)$$

ここに、 δ はイオン対の生成率、 V は同心球空気コンデンサの空気容積、 β は負の電極面からの 2 次電子放出率、 S_b は外球の内表面の面積、 S_a は内球の表面積¹⁾。

文献 1) により、内球に印加される電圧は 10.0 kV か

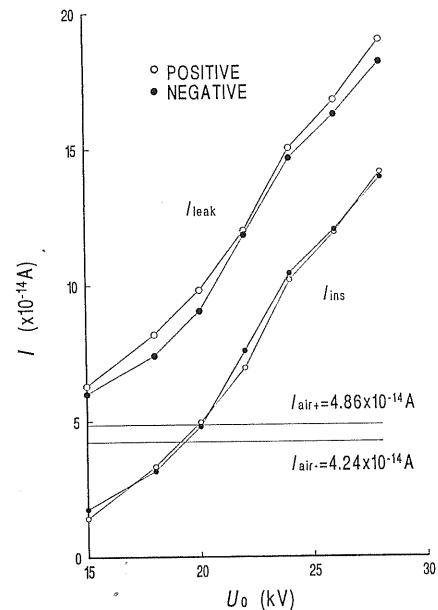


図 5 漏れ電流と内球の初期電位との関係

Fig. 5 Dependence of the leakage currents on the initial potential of the inner sphere.

ら 20.0 kV まで変化しても、 δ と β の値はほとんど変化しない。その結果、空気中部分放電が発生するまでに、内球に印加される高電圧値を変えてても、毎秒中和に寄与した荷電粒子数 N' がほぼ一定となる。

文献 1) に載せたイオン対の生成率 δ と 2 次電子放出率 β の平均値

$$\delta = (2.0 \pm 0.1) \times 10^7 \text{ m}^{-3} \text{ s}^{-1}$$

$$\beta = (1.7 \pm 0.1) \times 10^5 \text{ m}^{-2} \text{ s}^{-1}$$

を用いて、支持碍子による同心球空気コンデンサの空気容積と電極の面積 S_a あるいは S_b が陰極として動作すると考えて、(8)式によって毎秒中和に寄与した荷電粒子数 N' を計算すると、

$$\text{内球正帯電: } N'_+ = (3.04 \pm 0.13) \times 10^5 \text{ 個/s.}$$

$$\text{内球負帯電: } N'_- = (2.65 \pm 0.13) \times 10^5 \text{ 個/s.}$$

空気を経由する漏れ電流 I_{air} は

$$I_{\text{air}} = e N' \quad (9)$$

計算すると、

$$\text{内球正帯電: } I_{\text{air}+} = (4.86 \pm 0.21) \times 10^{-14} \text{ A.}$$

$$\text{内球負帯電: } I_{\text{air}-} = (4.24 \pm 0.21) \times 10^{-14} \text{ A.}$$

この値を図 5 に示す。

同心球空気コンデンサの漏れ電流 I_{leak} は空気を経由する漏れ電流 I_{air} と支持碍子を経由する漏れ電流 I_{ins} からなる。すなわち、

$$I_{\text{leak}} = I_{\text{air}} + I_{\text{ins}} \quad (10)$$

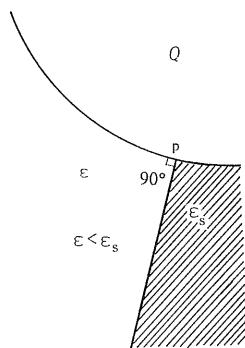


図6 三重点効果

Fig. 6 Triple junction effect.

(10)式によって計算した I_{ins} 値を図5に示す。

図5から次のことがわかった。

- (1) 内球の初期電位を増すことにつながって、碍子を経由する漏れ電流が急激に増大する。
- (2) 内球の初期電位が約 20 kV 以下の場合、 $I_{\text{air}} > I_{\text{ins}}$ すなわち、同心球空気コンデンサ内空気中の荷電粒子による中和が同心球空気コンデンサの電荷漏洩の主な原因と認められる。

内球の初期電位が約 20 kV 以上の場合、 $I_{\text{ins}} > I_{\text{air}}$ すなわち、碍子を経由する漏れ電流が主な役割を果たす。

3.2 三重点効果による微小放電

本実験における円錐形の碍子の場合、内球との接触角は 90 度となって、側面は碍子を挿入しない時の電気力線に沿っているので、同心球空気コンデンサ内の電界分布は碍子のない状態と同様と考えられる。しかし、帯電内球との界面に、内球を支持する碍子および空気は複合誘電体となる。この複合誘電体の境界（碍子の沿面）と内球とが接する点における微小な隙間や凹凸により、その部分の電界が強くなることはあり得る。これは三重点効果と呼ばれる³⁾。

空気のほうが誘電率が小さいので、内球に高電圧を印加するとある電圧以上で、平均電界が空気の絶縁破壊電界強度以下であっても、微小な気体放電がまず三重点から発生する（図6）。これは即座に複合絶縁体を貫通することにはならず、放電により内球の電位がある電位に下がるまでに碍子の沿面に局所的に持続する。

内球に 30.0 kV の高電圧を印加すると、図3に記録されているような測定開始初期の電界計指示は落ち込んだ。この異常な現象は微小な気体放電が測定開始初期に発生したためであると判断できる。

内球に 30.0 kV の高電圧を印加すると、三重点効果による微小放電が発生し、内球の電位が急に下がり、

内球正帯電：(28.2±0.4) kV

内球負帯電：(28.1±0.4) kV

（この時の電界計の指示を(4)式に代入して計算）までに、微小放電が消滅し、内球の電位はきわめて緩慢に減衰はじめ、減衰特性はほぼ直線である。従って、これは微小放電消滅電位 U_i である。放電消滅電位は内球負帯電の場合が低くて、内球の帶電極性依存性を示す。

この時、内球の表面電界 E_{ai} は

$$E_{ai} = C_s U_i / 4\pi \epsilon a^2 \quad (11)$$

計算すると、

内球正帯電： $E_{ai+} = (7.97 \pm 0.01) \times 10^5 \text{ V/m}$

内球負帯電： $E_{ai-} = (7.94 \pm 0.01) \times 10^5 \text{ V/m}$

であって、空気の絶縁破壊電界強度の約 1/4 強の大きさである。

内球に 30.0 kV の高電圧を印加した時の電界計の指示 E_{bo} を(4)式に代入して内球の初期電位 U_0 を計算し、(3)式により、内球の初期帯電量 Q_0 が計算できる。同様に、微小放電が消滅した時内球の帯電量 Q_i も計算できる。見かけの放電電荷量 q_i は

$$q_i = Q_0 - Q_i \quad (12)$$

計算すると、

内球正帯電： $q_{i+} = (1.48 \pm 0.08) \times 10^{-8} \text{ C}$

内球負帯電： $q_{i-} = (1.68 \pm 0.08) \times 10^{-8} \text{ C}$

放電持続時間は直接記録図から読み取って

内球正帯電： $t_{i+} = 750 \pm 30 \text{ 秒}$

内球負帯電： $t_{i-} = 900 \pm 1 \text{ 秒}$

平均放電電流 I_i は

$$I_i = q_i / t_i \quad (13)$$

計算すると、

内球正帯電： $I_{i+} = (1.97 \pm 0.03) \times 10^{-11} \text{ A}$

内球負帯電： $I_{i-} = (1.86 \pm 0.08) \times 10^{-11} \text{ A}$

放電によって失われるエネルギー w は

$$w = C_s (U_0^2 - U_i^2) / 2 \quad (14)$$

計算すると、

内球正帯電： $w_{i+} = (4.61 \pm 0.51) \times 10^{-4} \text{ J}$

内球負帯電： $w_{i-} = (4.82 \pm 0.33) \times 10^{-4} \text{ J}$

以上により、放電持続時間、見かけの放電電荷量は共に、負帯電する内球からの放電の方が大きな値となり、放電消滅電位と同様に帯電極性依存性を示した。これは「正極性帯電より、負極性帯電の方が危険」といわれてきた経験的言説⁴⁾と一致である。

図5よりわかるることは、放電開始の直前に、碍子を経由する漏れ電流 I_{ins} が空気を経由する漏れ電流 I_{air} の約 3 倍である。すなわち、孤立導体の漏洩電流が、空気中に常に発生する荷電粒子付着による中和電流より著しく大きいならば、三重点効果のため、孤立導体の支持碍

子表面における微小放電が生じていることがわかる。孤立導体の電荷漏洩速度異常は部分放電の前駆現象の指標であるという結論を得た。

4. ま と め

帶電球の近傍の電界が $(4 \sim 9) \times 10^5 \text{ V/m}$ 程度、すなわち、空気の絶縁破壊強度の $1/8 \sim 1/3$ の大きさであるときの支持碍子をもつ同心球空気コンデンサの漏洩電流について研究した結果、次のことを明らかにした。

孤立導体球の漏洩電流は支持碍子を経由する成分と空気中の荷電粒子により中和される成分からなる。内球の初期電位を増すことに従って、前者の漏れ電流は急激に増大するが、帶電内球に毎秒中和される荷電粒子数がほぼ一定のため、後者の漏れ電流は一定である。

内球の初期電位が約 20 kV 以下の場合、 $I_{\text{air}} > I_{\text{ins}}$ 、すなわち、空気中の荷電粒子による中和が同心球空気コンデンサの漏洩電流の主な成分と認められる。

内球の初期電位が約 20 kV 以上の場合、 $I_{\text{ins}} > I_{\text{air}}$ 、すなわち、碍子を経由する漏洩電流の成分が主な役割を

果たす。内球の初期電位を増すことに従って、 I_{ins} の値が I_{air} の約 3 倍となると、三重点効果のため、支持碍子表面における微小放電が発生する。この時、内球の表面電界は約空気の絶縁破壊電界強度の $1/4$ 強の大きさである。

微小放電のデータは内球の帶電極性依存性を示す。放電消滅電位は内球負帯電の場合の方が低く、放電持続時間、見かけの放電電荷量も共に内球正帯電の場合に比べて大きな値となる。

以上の研究より、部分放電の前駆現象としての孤立導体の電荷漏洩速度異常は、支持碍子表面における微小放電の指標であるということが判明した。

参 考 文 献

- 1) 葛 自良, 藤林宏一, 松井 満, 村崎憲雄, 山下幸一: 静電気学会誌, 18 (1994) 509
- 2) 電気学会技術報告, 18 (1957) 25
- 3) 宅間 良: 静電気学会誌, 14 (1990) 40
- 4) M. Matsui, N. Murasaki, K. Fujibayashi, Xie Wei: J. Electrostatics, 35 (1995) 73