

真空中における沿面放電耐力向上に関する研究

Study on Surface Flashover Voltage and Its Improvement in Vacuum

技術本部 川田 則幸*¹ 鶴崎 一也*²
 原田 朋広*³
 埼玉大学 小林 信一*⁴

真空中で高電圧印加部の絶縁に固体絶縁物を用いる場合、その絶縁性能は、通常絶縁物の沿面放電に制約を受ける。電子・イオン等の荷電粒子の加速装置、イオン源等の実用的な装置は、高真空中で使用されることがある。したがって、これらの装置の絶縁設計には、使用圧力領域での沿面放電電圧の評価が重要となる。そのため本研究では、よく利用される圧力領域ではあるが従来データの少ない $1 \times 10^{-3} \sim 1.33 \times 10^{-1}$ Pa の高真空中での沿面放電電圧を測定し、沿面放電発生時の電界強度が、6~15 kV/mmであることを把握した。また、沿面放電耐力向上のための試みについてその有用性を確認した。

When dielectrics are used for electrical insulation in a vacuum, their ability to sustain voltage is usually limited by flashover on the surface of the dielectrics. For actual industrial equipment such as particle accelerators, ion sources, the pressure in the equipment is sometimes comparatively high. Therefore, in designing such industrial equipment, it is necessary to measure the surface flashover voltages of the dielectrics under the gas pressure mentioned above. Surface flashover voltages were measured under the pressure of 0.001 to 0.133 Pa. When the electric field strength was about 6 to 15 kV/mm, the flashover occurred. Improvements in surface flashover voltage were confirmed when a depression was made on the cathode, the flashover voltage becoming 1.6 times higher than that obtained for the ordinary cathode. Also, the flashover voltage became 2.6 times higher, when the dielectrics were employed with a slope angle of 10 degrees.

1. ま え が き

真空中で絶縁物で支持された高電圧印加部における絶縁破壊が絶縁物の沿面放電から始まることが知られている⁽¹⁾⁻⁽³⁾。従来、真空中の絶縁物の沿面放電に関する研究は 10^{-8} Pa 程度の超高真空領域を中心に行われ、また研究例も少なかった。一方、電子・イオン等の荷電粒子加速、真空中での誘導加熱等の工業分野における装置では、 10^{-3} Pa 程度の比較的高い圧力の高真空で使用するケースが多々ある。しかし、この圧力領域における沿面放電に関する研究は数例にとどまっている。したがって、これらの装置の電気絶縁設計においては、使用する圧力領域での沿面放電耐力の評価が重要な要素となる。

また、従来の沿面放電に関する研究では、絶縁物として、ガラス、セラミックスなど、実用上、加工に困難なものが主として用いられてきた。

ここでは、従来データの少ない $1 \times 10^{-3} \sim 1.33 \times 10^{-1}$ Pa 圧力下における沿面放電耐力の、絶縁物形状・寸法、並びに圧力への依存性を把握するとともに、沿面放電耐力向上のための試みについて、その有用性を確認したので結果を述べる。

なお、供試絶縁物には、加工が容易なことから実用上の装置に使われはじめている市販の結晶化ガラスを用いた。

2. 真空中の絶縁物沿面放電

ごく圧力の低い気体中では電離に基づいた絶縁破壊が生じにくい。一般に真空は優れた絶縁媒体となる。しかし、工業的に用いられる真空領域 ($10^{-8} \sim 10^{-1}$ Pa 程度) で、電極間に高電圧を印加すると、残存するガス分子の電離作用で絶縁破壊が発生する。電極間の気体分子の電離に伴う絶縁破壊は通常、ギャップ放電と呼ばれ、その発生機構については、従来から多数の研究が行われてきた。

真空中で高電圧を利用する実用装置では、高電圧を印加する部位の絶縁のため、固体絶縁物の使用が不可欠となる。例えば、電子・イオン等の荷電粒子の加速装置ではその加速電極を、また真空中の誘導加熱装置では誘導加熱コイルを、それぞれ接地電位部から固体絶縁物で支持、絶縁する必要がある。高電圧印加部と接地電位間への絶縁物挿入は、この間の電界をひずませ電界強度の高い部分を生じさせることとなる。また、真空中では、清浄な絶縁物といえども何らかの気体分子の供給源となるため、絶縁物の沿面近くに圧力の高い部分を生じさせる。このようなことから、真空中の絶縁物沿面では、前述のギャップ間に比べ絶縁破壊が発生しやすい状態になっていると言える。実用上の装置の小形化、信頼性向上を図る場合、この沿面放電の防止が重要な装置設計上の課題となる。

真空中の絶縁物沿面放電には、その表面状態や吸着ガス等、多数の要素がかかわってくるため、そのメカニズムは未だ十分解明されていないが、おおよそ以下の過程で放電にいたると考えられている⁽⁴⁾。

- (1) 陰極-絶縁物沿面-真空領域の三要素の接触部 (トリプルジャンクションと呼ばれる⁽¹⁾) では、電界のひずみが最も大きくなり、この点から電界放出により電子が放出される。
- (2) トリプルジャンクションから放出された電子は、絶縁物沿面に衝突し、二次電子を放出させる。これらの二次電子の一部は、さらに絶縁物沿面に衝突し、三次の電子を放出させる。
- (3) このプロセスの連続により、絶縁物沿面は二次電子放出なだれ (SEEA: Secondary Electron Emission Avalanche) を生じ、絶縁破壊に至る。

また、絶縁物沿面からの電子放出によって生じる沿面の電荷及びその分布も沿面放電に影響していると考えられる。高電圧印加時の絶縁物沿面の電荷分布が陰極領域に局在し、これが電界を部分的に大きくすることも分かりつつある⁽⁴⁾。

*¹ 広島研究所色彩・画像研究室長

*³ 広島研究所実験課

*² 広島研究所応物・振動研究室

*⁴ 工学部電気電子システム工学科教授 工博

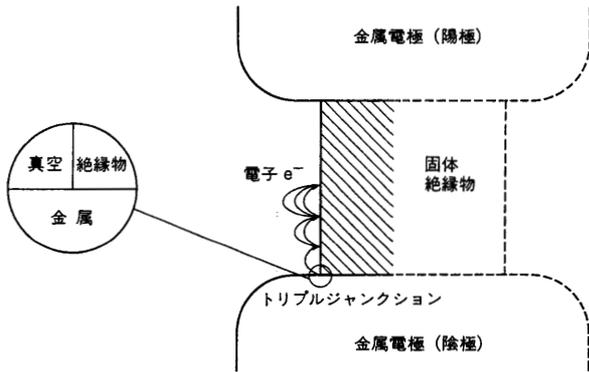


図1 真空中の沿面放電メカニズム トリプルジャンクションからの放出電子が絶縁物沿面を衝撃し電子をだれを引き起こすことを示す。
Electron hopping mechanism

図1に、前記絶縁物沿面放電メカニズムの模式図を示す。ただし、二次電子放出を生じる要因は、前述したように、種々の要素が複雑に絡み合うため、モデル化が難しく解析的なアプローチはほとんど行われていないのが現状である。

3. 沿面放電耐力評価法とテスト装置

沿面放電耐力の評価は、真空チャンバ内に設けた絶縁物両面の電極（高電圧電極と接地電極）間における放電電圧を測定することにより行った。真空チャンバ内の圧力は、油回転ポンプとターボ分子ポンプによる真空排気とガス（ArあるいはN₂）導入により一定値に保持した。高電圧電極と接地電極間に印加した電圧は正極性の直流電圧で、電圧印加は、ゼロから10 kV/sの一定速度で昇圧した。測定条件を整えるため、雰囲気ガスの充てん、電極のベーキング等、表1に示す手順で測定を行った。

測定に用いた絶縁物は、ガラス中にマイカ結晶を析出させた結晶化ガラスを用い、その成分構成を表2に示す。測定に用いた絶縁物の形状・寸法を図2に示す。絶縁物A1からA3は、直径20 mm、高さ2~10 mmの円柱状絶縁物である。絶縁物B1、B2は、側面に凹凸を設けた高さ10 mmの円柱状絶縁物で、凹凸面

表1 測定の手順
Experimental procedures

No.	内容	備考
1	供試絶縁物を電極間にセッティング	絶縁物表面は、あらかじめアセトンで洗浄
2	真空チャンバ内を約100 Paまで排気	
3	真空チャンバ内に試験用雰囲気ガスを標準気圧を若干超える圧力まで充てん	ArあるいはN ₂
4	1h 放置	
5	ベーキングを行いながら真空排気	電極部で90℃, 4h
6	真空チャンバ内真空圧力を試験圧力に保持しながら沿面放電電圧測定	測定回数20回
7	真空チャンバ内に試験用雰囲気ガスを標準気圧を若干超える圧力まで充てん	

表2 供試絶縁物の成分構成
Concentration ratio of dielectrics

組成	含有率	組成	含有率
SiO ₂	46%	K ₂ O	10%
MgO	17%	B ₂ O ₃	7%
Al ₂ O ₃	16%	F	4%

の直径は、それぞれ10 mm、20 mmである。絶縁物C1からC3は、沿面が上下面に対してそれぞれ11°~45°の角度を有する、高さ5 mmの円すい状絶縁物である。

二組の高電圧印加電極の構造・寸法を図3に示す。一組は、絶縁物に接する面が平坦な電極対で、他の組は、接地側電極の絶縁物接触部に直径20mm+2X (X=0.2mm, あるいはX=0.4 mm)、深さh (h=0.2~1.0 mm)のくぼみを設けたものである。

4. 真空中の絶縁物沿面放電耐力における影響因子とその特性

真空中の絶縁物沿面放電耐力に影響を及ぼすと考えられる、以下のパラメータに対する沿面放電電圧の変化を測定した。

(1) 圧力 (1×10⁻³~1.33×10⁻¹Pa)

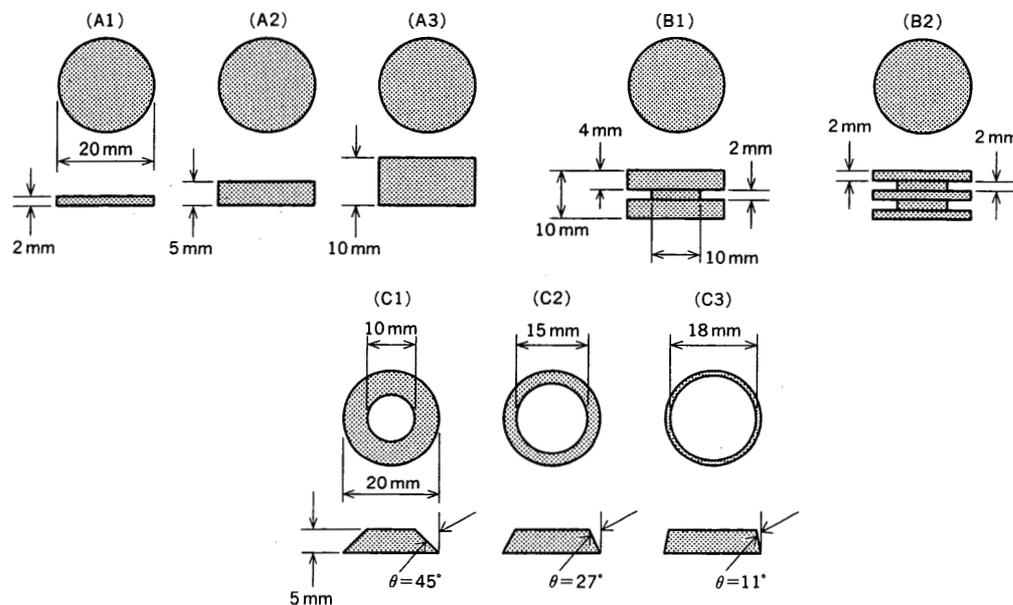


図2 供試絶縁物の形状・寸法 沿面放電電圧測定に用いた供試絶縁物の形状、寸法を示す。
Geometries and dimensions of dielectric specimens

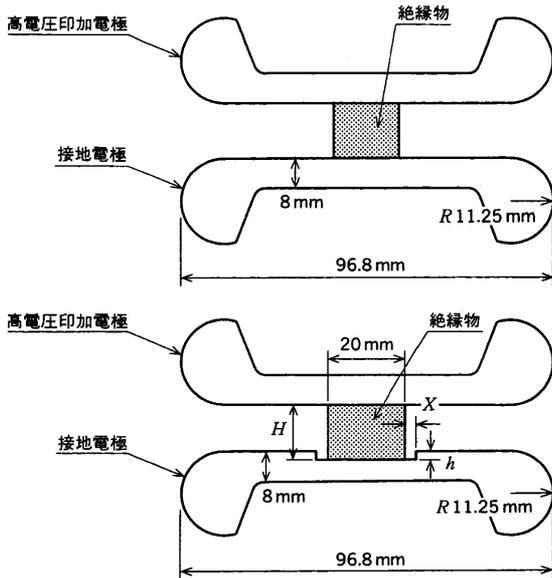


図3 電極形状・寸法 沿面放電電圧測定に用いた二組の電極対の形状、寸法を示す。
Electrode configuration

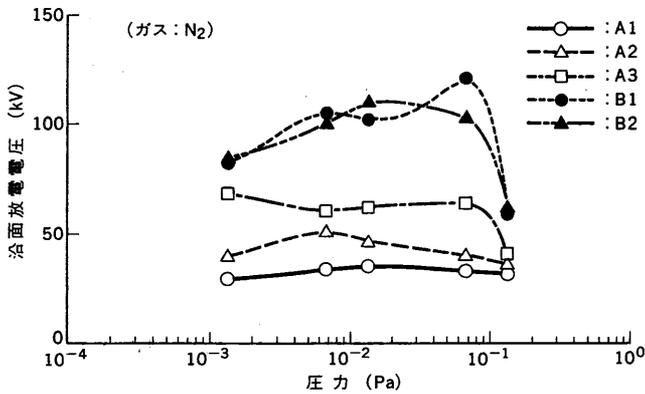


図4 各絶縁物における圧力と沿面放電電圧 各絶縁物ごとにガス圧力と測定沿面放電電圧の関係を示す。
Dependence of surface flashover voltages on gas pressure

- (2) 雰囲気ガス種別 (Ar あるいは N₂)
- (3) 絶縁物形状・寸法

テストの結果、雰囲気ガスとして Ar と N₂ の二種類における沿面放電電圧の差はほとんど確認できなかった。また、放電回数が増すにつれ、徐々に放電電圧が上昇し、ある値で飽和するというコンディショニング効果も、測定の圧力範囲で確認された。

コンディショニング効果による沿面放電電圧の上昇率は、約 60% であった。

図4に雰囲気ガス N₂ での、絶縁物 A1~A3, B1, B2 におけるガス圧力と沿面放電電圧との関係を示す。図4から明らかにように円柱状絶縁物 A1~A3 においては、絶縁物高さが高くなるほど沿面放電電圧が高くなり、沿面放電発生時の平均電界強度は 6 kV/mm (A3 で 60 kV) から 15 kV/mm (A1 で 30 kV) であった。この値は、電極間距離 2~10 mm における真空中ギャップ放電の平均電界強度が約 20~60 kV/mm であることを考慮すると妥当な数値である。同じ 10 mm の高さでも沿面に凹凸を設けた絶縁物 B1, B2 の沿面放電電圧は円柱状絶縁物 A3 の約 2 倍であった。一方、絶縁物 B1 と B2 の間では沿面放電電圧に大きな差は見られなかった。比較的高さの低い絶縁物 A1 (高さ 2 mm) を除くと、ガス圧力が 1×10^{-1} Pa 以上で沿面放電電圧が

低下しており、これは電極間のギャップ放電の傾向と良く似た結果となっている。

以上の結果から、測定の圧力範囲における絶縁設計では、絶縁物の高さに応じて、平均電界強度を、6~15 kV/mm より十分小さくする必要がある。

5. 沿面放電耐力向上策とその検証

5.1 トリプルジャンクションの遮へい

固体である陰極と絶縁物沿面、及び気体であるガス雰囲気場の三要素が接触する点は、電界のひずみが最も大きく、この点はトリプルジャンクションと呼ばれ、沿面放電の起点と考えられているのは前述のとおりである。したがって、トリプルジャンクションの電界遮へいによる、電界強度の緩和は、沿面放電耐力向上の有効策の一つとなる。テストでは、図3に示すように、接地側電極にくぼみを設けることにより、トリプルジャンクション周囲を接地電位として、この点の電界ひずみ、すなわち電界強度の緩和を図った。図5に接地側電極のくぼみの深さ h と、沿面放電電圧の関係を示す。絶縁物 A1 では顕著な差が見られないが、絶縁物 A2 では、くぼみの深さ h の増加とともに、沿面放電電圧が増大している。同様に、絶縁物 A2 では、 h が一定でもくぼみと絶縁物とのすきま X が小さくなると沿面放電電圧が増加する傾向にある。

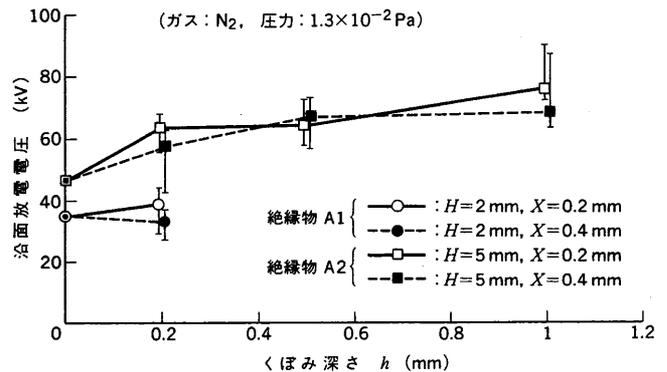


図5 トリプルジャンクション遮へいと沿面放電電圧 トリプルジャンクション遮へいのためのくぼみ深さ h と測定沿面放電電圧の関係を示す。
Effect of shading triple junction on flashover voltage

以上から、トリプルジャンクションの遮へいは、くぼみの深さ h が大きく、絶縁物とのすきま X が小さいほど効果があることが分かる。絶縁物 A1 においてトリプルジャンクション遮へいの効果が顕著でないのは、絶縁物 A1 が極めて薄いため、ギャップ放電と沿面放電が同時に発生していることが考えられる。

トリプルジャンクション遮へいによる電界緩和と沿面放電耐力向上の相関を見るため、有限要素法 (軸対称二次元) による電界計算を行った。計算は、トリプルジャンクション遮へいテストと同じ電極、絶縁物形状寸法で、高電圧印加電極に直流 +50 kV、接地電極に 0 V を印加したときの各部、特にトリプルジャンクションの電界強度を求めた。

図6に、絶縁物 A2, $X=0.2$ mm における電界計算結果と測定沿面放電電圧の相関を示す。図6において、横軸は電界計算における電極間の平均電界強度とトリプルジャンクションの電界強度の比を示す。例えば、高さ 5 mm の絶縁物 A2 で 50 kV 印加時の平均電界強度 $50/5=10$ kV/mm に対し、トリプルジャンク

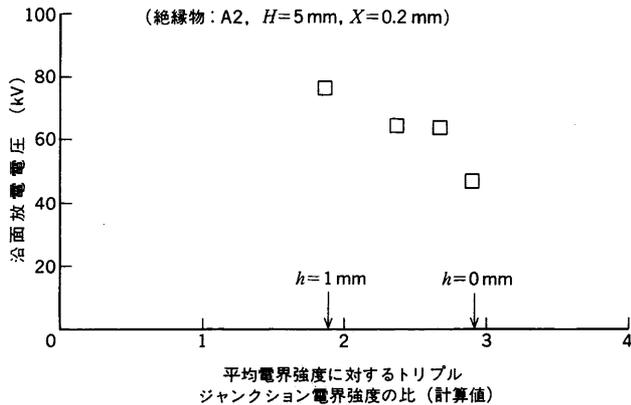


図6 電界強度計算結果と測定値 トリプルジャンクション遮へい時の電界計算結果と沿面放電電圧の関係を示す。
Relationship of measured flashover voltages to calculated field at triple junction

ジャンクションの電界強度計算値が 30 kV/mm の場合、横軸は3をとる。また、縦軸は絶縁物 A2, $X=0.2 \text{ mm}$ における沿面放電電圧測定値を示す。図6において、トリプルジャンクションの相対的電界強度が小さくなるほど測定沿面放電電圧は高くなっている。これから、遮へいによりトリプルジャンクションの電界強度を小さくすることで、この点からの電界放出電子を減少させ、沿面放電耐力を向上できることが分かる。したがって、絶縁物の寸法に応じて、電界計算により、トリプルジャンクションの電界強度が最も小さくなるくぼみの寸法を求めることが絶縁設計の有効な手段となる。

テストでは、絶縁物 A2 において、対策なし ($h=0 \text{ mm}$) の 47 kV に対し、トリプルジャンクションの遮へいにより ($h=1 \text{ mm}$, $X=0.2 \text{ mm}$) 75 kV と、約 1.6 倍の沿面放電電圧、すなわち沿面放電耐力の向上が確認された。また、電極にくぼみを設けることでトリプルジャンクションを遮へいできる本方法は、加工も容易で実用的な沿面放電耐力向上策と言える。

5.2 絶縁物沿面の傾斜

絶縁物沿面の傾斜角と沿面放電電圧の関係を図7に示す。図7において、絶縁物の接地電極すなわち陰極に接する面の外径が高電圧印加電極に接する面の外径より大きい場合を正の傾斜角 θ としている。沿面放電電圧の測定は以下の条件にて行った。

雰囲気ガス: N_2

圧力: $7 \times 10^{-3} \text{ Pa}$

絶縁物: C1~C3, 及び A2

図7において、沿面放電電圧は、傾斜角が負よりも正の方が大きい値であった。また、正の傾斜角を設けることで、傾斜のない場合に比べ沿面放電電圧が増加しているが、その角度が約 10° 以上では飽和の傾向にある。

絶縁物の沿面傾斜による沿面放電耐力の向上は以下によるものと考えられる。

傾斜角が正、すなわち絶縁物の陰極に接する面が陽極に接する面より広い場合は、絶縁物沿面はトリプルジャンクションから電界放出により放出された電子による衝撃を受けにくく、二次電子なだれを発生しにくい。したがって、傾斜角が正では、沿面距離の増大とあいまって、沿面放電耐力が大幅に向上する。一方、傾斜角が負の場合は、角度の増加とともに沿面距離も大きくなる反

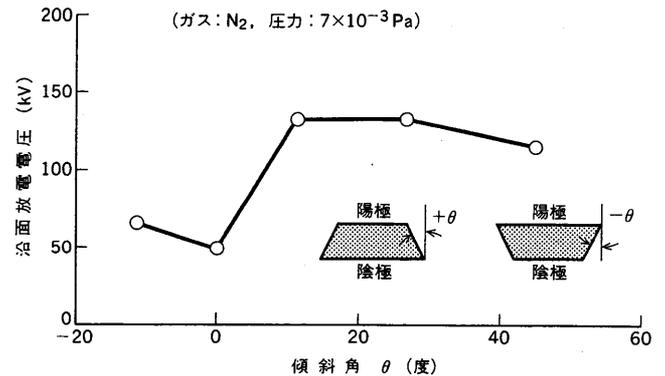


図7 絶縁物沿面傾斜角と沿面放電電圧 陰極側が広いときを正の角度として、絶縁物沿面に傾斜を設けたときの傾斜角と測定沿面放電電圧の関係を示す。
Dependence of flashover voltages on slope angle of side wall

面、絶縁物沿面がトリプルジャンクションから放出された電子の衝撃を受けやすくなるため、沿面放電耐力はあまり向上しない。

沿面の傾斜角が $+11^\circ$ 、及び $+26^\circ$ のときの沿面放電電圧は約 130 kV であり、傾斜のないときの約 50 kV に比べ 2.6 倍の沿面放電耐力向上が確認された。

実用上の装置設計においても、約 $+11^\circ$ の傾斜を設けることで、1/2 以上のコンパクト化が図れることとなる。

6. む す び

従来データがほとんどなかった $1 \times 10^{-3} \sim 1.33 \times 10^{-1} \text{ Pa}$ の真空中での絶縁物沿面放電耐力の評価を行った。また、同様の圧力における沿面放電耐力の向上策について、有用な結果を得た。

- (1) 測定に用いた円柱状絶縁物寸法での沿面放電発生時の平均電界強度は約 $6 \sim 15 \text{ kV/mm}$ である。
- (2) ガス圧力が $1 \times 10^{-1} \text{ Pa}$ 以上になると沿面放電電圧は低下する傾向にある。
- (3) 陰極にくぼみを設けてトリプルジャンクションを遮へいする方法は、電界強度の緩和に有効で、テストの圧力、絶縁物寸法等の条件において、最大 1.6 倍の沿面放電耐力向上が得られた。また、その傾向は電界強度計算結果と良く一致した。
- (4) テストの圧力、絶縁物寸法等の条件において、絶縁物沿面に約 10° の傾斜を設けることで、傾斜がないときに比べ沿面放電耐力を約 2.6 倍に向上できた。

参 考 文 献

- (1) Rod Latham, et al., High Voltage Vacuum Insulation, Academic Press (1981) p.300
- (2) Anderson R. A., Surface Flashover: Three Decades of Controversy, XIVth International Symposium on Discharges and Electrical Insulation in Vacuum, p.286 Sep. 1990
- (3) Gleichuf P. H., Electrical Breakdown over Insulators in Vacuum, Journal of Applied Physics Vol.22 No.6 p.766 June 1972
- (4) Kobayashi S. et al., Surface Charge Distribution Characteristics of Alumina (YSA 998, UHA 99, HA 997) and Sapphire Insulator Surfaces After Impulse Voltage Application in Vacuum, 9th Int. Symp. on High Voltage Engineering p.2298-1 Sep. 1995