

沿面放電型避雷装置の長期信頼性に関する研究

日高 伸亮¹⁾・岡村 健¹⁾・大坪 昌久²⁾・本田 親久²⁾・副 裕宣³⁾

Research on Long-Term Reliability of the Tube-Arrester

Shinsuke HIDAKA, Takeru OKAMURA, Masahisa OTSUBO, Chikahisa HONDA and Hirotaka SOI

Abstract

The development of the tube-arrester has been done in order to reduce the costs of lightning protection measures on 6.6kV power distribution lines. The new type device has no zinc oxide element, and it composes of an insulation tube and electrodes. The tube-arrester demonstrates the lightning protection performance and dynamic current interception performance by creeping discharge in the insulation tube when the lightning overvoltage is generated on a power distribution line. The aim of this study is to obtain data concerning long-term reliability of the tube-arrester.

In this paper, the tube-arrester was operated repetitively by large lightning impulse current, and the durability of the tube-arrester and the change in the electrical characteristics were examined. And also the electrical characteristics were examined when the rainwater was infiltrated in the insulation tube of the tube-arrester. When the rainwater was infiltrated in the tube, the discharge phenomenon was also observed with a high-speed camera. In addition, the operation characteristics of the 22kV distribution system tube-horn were examined.

Key words:

Arrester, Power distribution line, Creeping discharge, Lightning impulse, Discharge phenomenon

1. まえがき

現在、配電線雷害対策のコスト低減を目的として、九州電力(株)では酸化亜鉛素子を用いない沿面放電型避雷装置(以下、チューブアレスタ)の開発が行われている¹⁾。この避雷装置は酸化亜鉛素子のような特性要素がなく、雷過電圧発生時にはチューブ内部の放電によって避雷性能と続流遮断性能が発揮される。

チューブアレスタは、多数回動作を目的としており、長期信頼性の面から多数回動作による耐久性と電気的特性の維持が望まれる。また、6.6kV配電線の引留箇所ではチューブアレスタを用いる場合は、チューブ噴出口が上向きになる可能性もあり、降雨時に絶縁チューブ内部に

雨水が浸入することが予想され、チューブアレスタの動作特性に影響を及ぼすことが懸念される。

そこで、チューブアレスタを雷インパルス大電流で繰り返し動作させ耐久性を確認すると同時に、繰り返し動作による電気的特性の変化について調べ、降雨時に絶縁チューブ内部に雨水が浸入した場合の動作特性について検討した。さらに、現在開発が進められている22kV用沿面放電型避雷装置の動作特性についても調べたので報告する。

2. 6.6kV用沿面放電型避雷装置

図1に、6.6kV用チューブアレスタの構造を示す。チューブアレスタは、酸化亜鉛素子のような特性要素を持たず、絶縁チューブに挿入電極(ステンレス鋼)と円筒形背後電極(ステンレス鋼)を取り付けた簡単な構造である。絶縁チューブは、噴出口内径5mmで3重構造を

1) 宮崎大学 工学研究科 電気電子工学専攻 大学院生

2) 宮崎大学 工学部 電気電子工学科 教授

3) 九州電力株式会社 総合研究所

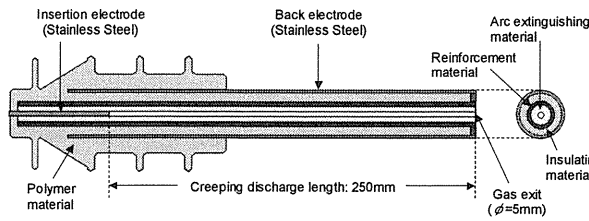


図1 6.6kV用チューブアレスタの構造

しており、その中心部内側から消弧材、耐短絡補強材、絶縁材と構成されている。また、チューブ内沿面放電距離は 250mm である。チューブアレスタは、消弧材にメラミン樹脂、耐短絡補強材に FRP (Fiber Reinforced Plastic)、絶縁材には、高分子(ポリマー)材料である EVA (Ethylene Vinyl Acetate)、シリコンまたは EPDM (Ethylene Propylene Diene Methylene Linkage) を使用している。また、チューブアレスタを配電線に用いる場合は、交流異常電圧から避雷装置を保護するため外部ギャップを 23mm 設けることにしている¹⁾。動作原理は、電力システムに雷などの異常電圧・電流サージが進入したときには、高電圧電極と接地電極間に設置した絶縁チューブ表面の沿面放電によって、両電極間に火花放電が生じ、アークで短絡され雷電圧を低下させるというものである。引き続き、系統電圧による続流がアークとして発生すると、その熱によりチューブ内壁から発生したガスがチューブ下部の噴出口から噴き出すことで、続流遮断が行なわれる。

3. 雷インパルス大電流多数回動作による耐久性と電気的特性の変化

3.1 実験方法

チューブアレスタの多数回動作による耐久性を検証するために、雷インパルス大電流約 8kA (10/30 μ s) で 100 回繰り返し動作させた。この間、動作回数に対する電気的特性の変化を明らかにするため、任意の動作回数において商用周波電圧試験及び雷インパルス電圧試験を行なった。図 2 に、実験装置の概略を示す。商用周波電圧試験は、図 2 の電源部のスイッチを AC 側に接続して行なった。商用周波電圧をチューブアレスタの挿入電極と背後電極との間に印加し、コロナ放電開始電圧を測定した。雷インパルス電圧試験は、図 2 の電源部のスイッチを Impulse 側に接続して行なった。まず、昇降法 (30 回) により 50%フラッシュオーバー電圧を求め、波高値の異なる負極性標準雷インパルス電圧 (1.2/50 μ s) を印加して雷イ

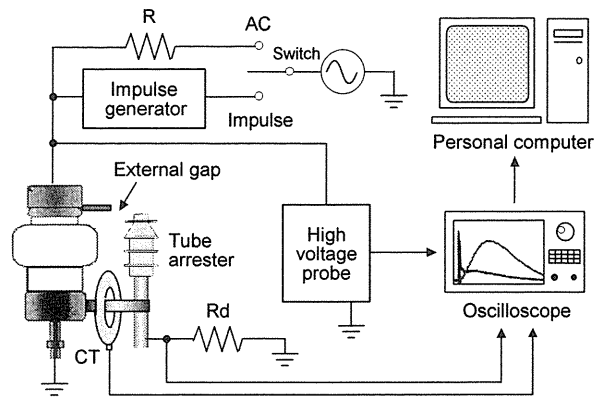


図2 実験装置

ンパルス放電開始電圧時間特性 (以下、V-t 特性) を取得した。ただし、いずれの試験も外部ギャップを 23mm 設けている。さらに、雷インパルス大電流(約 8kA, 10/30 μ s) で 100 回動作後、チューブアレスタを解体して、走査型電子顕微鏡 (以下、SEM) により絶縁チューブ内壁の表面状態を調べた。

3.2 実験結果

チューブアレスタは、雷インパルス大電流で 100 回動作しても、貫通破壊することなく絶縁性を保持しており、優れた機械的強度と耐久性を持っていることがわかった。雷インパルス大電流による動作において、チューブアレスタは放電毎に激しくアブレーションガスが噴き出した。この放電により絶縁チューブ内壁表面のメラミン層が削られ、挿入電極材質の金属粒子が付着・堆積していることが予想されるが、噴出効果²⁾によって、その大部分がチューブ外部に放出されている可能性も考えられる。

次に、任意の動作回数毎に商用周波電圧試験及び雷インパルス電圧試験を行なった。図 3 に、コロナ放電開始電圧及び 50%フラッシュオーバー電圧を示す。コロナ放電開

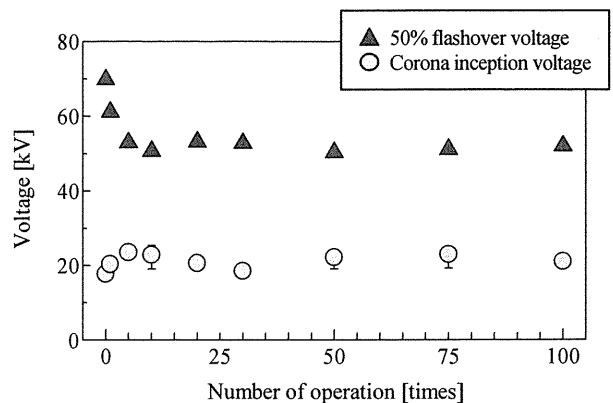


図3 コロナ放電開始電圧及び 50%フラッシュオーバー電圧

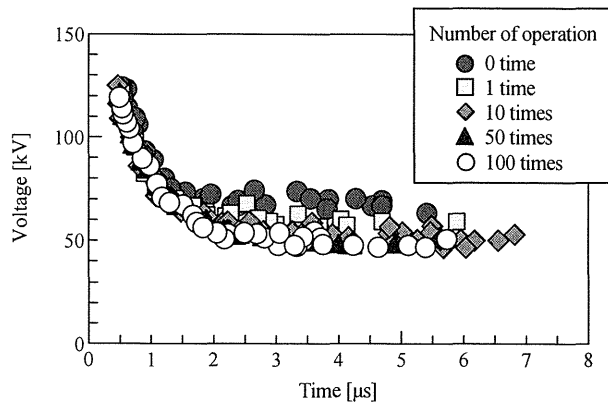


図4 V-t 特性

始電圧は、雷インパルス大電流で繰り返し動作しても 6.6kV 用避雷器規格としての商用周波放電開始電圧下限値の 13.9kV 以上³⁾であり、常時課電に対する絶縁は保持され、避雷器の繰り返し動作が商用周波放電開始電圧及び漏れ電流に与える影響はほとんどないと考えられる。50%フラッシュオーバー電圧は、動作回数 1 回で約 12%程度低下した。その後、動作回数 10 回目まで低下するが、それ以降はほぼ一定になっているのが分かる。

図 4 に、V-t 特性を示す。未使用品に比べ、大電流動作後は放電開始電圧が低下するが、動作回数 10 回目以降の V-t 特性はほとんど変わらない。チューブアレスタは、チューブ内で放電するとその内部には挿入電極材質の金属粒子 (Fe, Cr) が付着・堆積することが確認されている⁴⁾が、この影響で放電開始電圧が低下したものと考えられる。また、雷インパルス大電流約 8kA で 1 回動作しただけでも、50%フラッシュオーバー電圧が大きく低下したが、1 回の大電流による動作で、絶縁チューブ内部は消弧材であるメラミン層が削られ、かなりの金属粒子で汚損されていることが予想される。

図 5 に、雷インパルス大電流で 100 回動作後の絶縁チューブ内壁表面の SEM 像を示す。図 5 より、FRP のガラスファイバが筋状に析出していることが確認されるが、絶縁チューブ内は解体時に目視によりメラミン層が十分

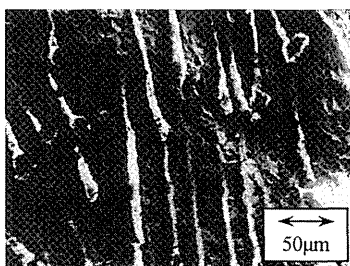


図5 絶縁チューブ内壁表面の SEM 像

残っていることを確認している。絶縁チューブの作製は、心棒に FRP を巻き付けていくと同時にメラミンを流し込んで塗布するので消弧材の層は正確にはメラミン+FRP となっており、一部のメラミンが蒸発、または削られて、FRP のガラスファイバが確認されたものである。これより、消弧材であるメラミンは充分残っているため、消弧性能は十分保持されていると考えられる。

4. 絶縁チューブ内に雨水が浸入したときの沿面放電型避雷装置の動作特性

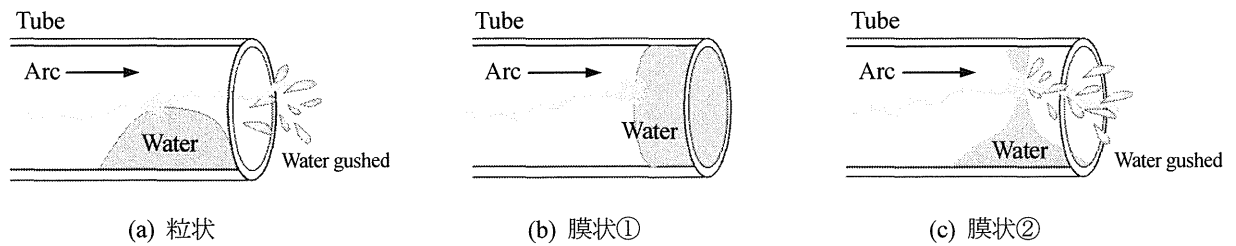
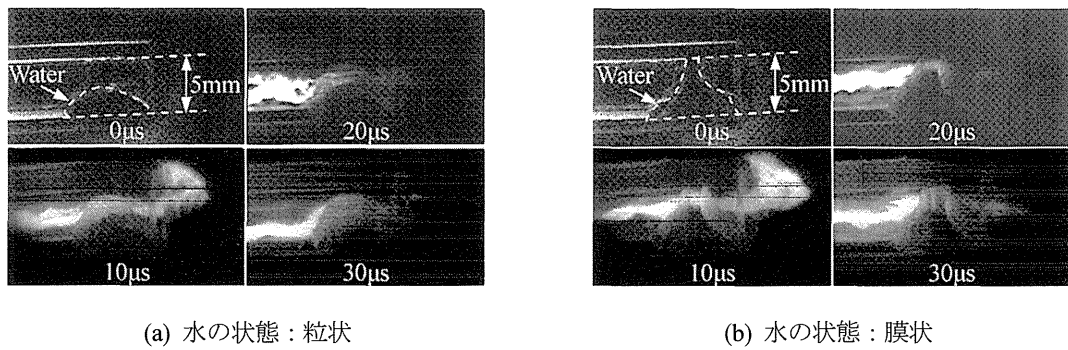
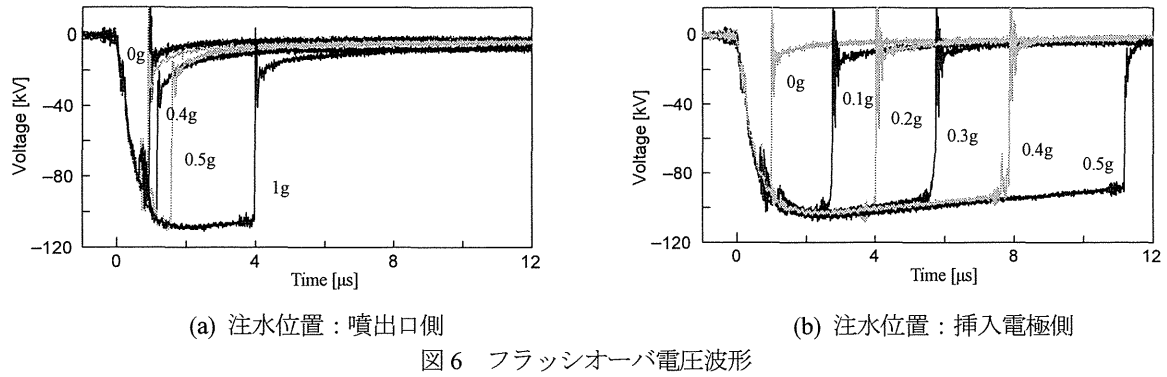
4.1 実験方法

実配電系統で実際にチューブアレスタを引留碍子として用いる場合は、降雨時に絶縁チューブ内部に雨水が浸入することが予想され、チューブアレスタの動作特性に影響を及ぼすことが懸念される。そこで、絶縁チューブ内部に雨水が浸入した場合の動作特性について検討した。また、雨水が浸入した場合のチューブ内放電様相を超高速度カメラ (IMACON468, HADLAND) を用いて観測した。撮影には、内径 5mm のアクリルチューブを用い、負極性雷インパルス電圧 (1/13μs, -470A) 約 100kV を印加して、チューブ内放電様相を観測した。また、撮影は露光時間 500ns で行なった。

4.2 実験結果

図 6 に、外部ギャップ 23mm において、絶縁チューブ内部への注水量を変化した場合のフラッシュオーバー電圧波形を示す。同図(a)が噴出口側、(b)が挿入電極側に雨水を注入した場合で、ともに印加電圧約 100kV である。図 6 から、注水量が多くなるにしたがって、電圧印加からフラッシュオーバーに至るまでの時間が長く、フラッシュオーバー電圧が高い。また、同量の注水量でも、噴出口側よりも挿入電極側に雨水が溜まるとフラッシュオーバーに至るまでの時間が長く、放電しにくいことがわかった。

図 7(a)に、粒状に注水した場合の放電様相を示す。同図より、チューブ内に水が粒状にある場合は、チューブ内壁と水面を沿面放電して、その隙間をストリーマが進展している。図 7(b)は、チューブ内で膜を張った場合の放電様相を示す。同図のように、水膜が著しく薄い状態であるときは、その水膜の薄い部分をストリーマが貫通し、チューブ内で放電する。しかし、水が均一にチューブ内部を覆った場合は、チューブ内で放電せず、チューブの外側で放電、またはアクリルチューブが貫通破壊し



た。本実験において、印加電圧 100kV の場合、水膜の厚さが 1~2mm のときチューブ内で放電し、厚さ約 5mm 以上でチューブの外側で放電した。

図 8 に、チューブ内放電様相スケッチを示す。絶縁チューブ内部に雨水が浸入した場合、図 8(a)に示すように、雨水がチューブ内部に粒状に存在し、噴出口が開放されていれば、その隙間をストリーマが進展し、水を噴出しながら正常にチューブ内で放電する。しかし、図 8(b)のように、雨水がチューブ内を均一に塞いだ状態で存在すれば、チューブ内では放電せず、笠部放電または貫通破壊に至る。ただし、チューブ内が塞がれた状態でも、図 8(c)のように、ごくわずかな水膜であれば、ストリーマが水膜を貫通しチューブ内で放電する。

また、実際に現場に長期設置したチューブアレスタの撤去品の一部から、絶縁チューブ内に蜘蛛の巣らしき異

物が確認されており、異物が侵入した場合の放電様相を雨水浸入のときと同様に超高速カメラを用いて観測した。異物は、蜘蛛の巣を想定して綿（長さ約 10mm）をアクリルチューブ内に挿入した。

チューブ内に異物（綿）がある場合は、チューブ内でフラッシュオーバーした。綿の場合、空気穴が存在するため、その空隙をストリーマが進展してフラッシュオーバーに至った。次に、雨水時を想定して、チューブ内の綿を水（導電率 100μS/cm）で湿らせ、チューブ噴出口を完全に塞いだ状態にした。この場合、チューブ内で放電せず、アクリルチューブの外側で放電した。

さらに、泥蜂などがチューブ内に土を埋めた場合を想定し、チューブ内にわずかに隙間ができるように砥粉（長さ約 10mm）を挿入した。この場合も、その隙間をストリーマが進展し、チューブ内で放電した。しかし、チュ

ープ噴出口を塞ぐように砥粉を入れた場合は、チューブ内で放電せず、チューブの外側で放電、またはアクリルチューブが貫通破壊した。

以上のことから、絶縁チューブ内部に雨水や異物が侵入した場合、チューブ内部にわずかな空隙があると、その隙間をストリーマが進展し、チューブ内で放電する。しかし、チューブ噴出口が完全に塞がれた場合は、チューブ内では放電せず、笠部放電または貫通破壊に至ることがわかった。

チューブアレスタを通り碍子に取り付ける場合は、チューブの噴出口が下向きとなり、雨水の浸入は極めて低いものと思われる。しかし、引留碍子に取り付ける場合は、現場の状況によってはチューブの噴出口が水平方向より上向きになり、少なくともチューブ内部に雨水が浸入する可能性があると思定される。よって、引留碍子へのチューブアレスタの適用は、チューブアレスタの噴出口を下向きにする等の工夫が必要である。

5. 22kV 沿面放電型避雷装置の動作特性

5.1 22kV 用沿面放電型避雷装置

現在、九州電力㈱では 22kV 用沿面放電型避雷装置の開発も検討されている。この避雷装置のイメージは、「続流遮断性能を所持したアーキングホーン」である⁹⁾。

図 9 に、22kV 用沿面放電型避雷装置（以下、チューブホーン）の構造を示す。基本的な材料は、6.6kV 用チューブアレスタと同じであり、挿入電極及び背後電極にステンレス鋼を用い、消弧材にメラミン樹脂、耐短絡補強材に FRP、絶縁材に EPDM を使用している。絶縁チューブは、6.6kV 用チューブアレスタと比較して、噴出口内径 7mm と大きく、チューブ内沿面放電距離は 150mm と短い構造となっている。さらに、背後電極の形状が変更されており、挿入電極先端部と背後電極端部の周辺で貫通破壊が起こりにくい構造になっている。また、実際に配電線に用いる場合の外部ギャップは、6.6kV 用チューブアレスタの 23mm に対して、22kV 用チューブホーンは 40mm 設けることになる。

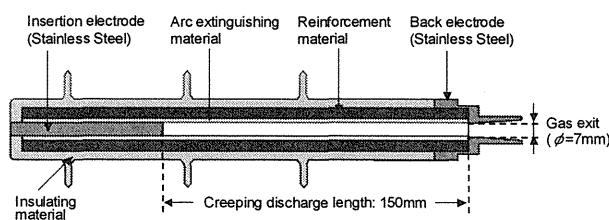


図 9 22kV 用チューブホーンの構造

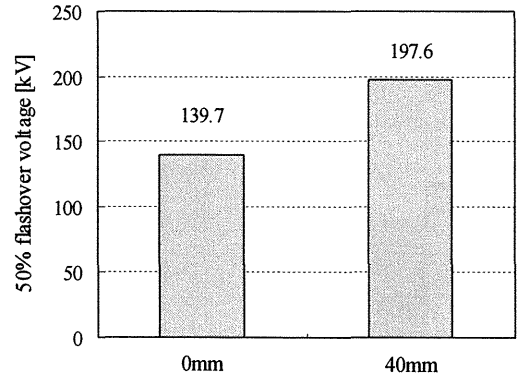


図 10 50%フラッシュオーバー電圧

5.2 22kV 用チューブホーンの動作特性

図 10 に、22kV 用チューブホーンの 50%フラッシュオーバー電圧を示す。22kV 用避雷器の雷インパルス放電開始電圧は 90kV、耐電圧が 150kV と定められている³⁾。しかし、22kV 用チューブホーンの 50%フラッシュオーバー電圧は、外部ギャップ 40mm で 200kV 近くと規格より高い値になっている。常時課電に対する絶縁を保つために設けている外部ギャップを接地しない場合においても、50%フラッシュオーバー電圧は高く、検討が必要である。

また、商用周波放電開始電圧を測定した結果、外部ギャップ無しの場合で約 100kV であり、22kV 用避雷器の商用周波放電開始電圧の下限値 42kV 以上³⁾であった。外部ギャップを設けた場合は、100kV 以上であることから、常時課電に対する絶縁は保持されることになる。

5.3 雷インパルス放電開始電圧低下の検討

22kV 用チューブホーンは、6.6kV 用チューブアレスタと同様に雷インパルス放電開始電圧が高いという問題点がある。6.6kV 用チューブアレスタについては、雷インパルス放電開始電圧の低下及び貫通破壊防止を目的として、絶縁チューブ内に金属スペーサを設置した金属スペーサ付チューブアレスタを試作し、放電開始電圧を低下させることに成功した⁹⁾が、更なる検討が必要である。22kV 用チューブホーンについては、絶縁チューブ内にチューブ状の絶縁物を挿入することで、フラッシュオーバー時のチューブ内消弧ガス圧力、電流容量を変化させ、雷インパルス放電開始電圧の改善を行なった。

試験は、PTFE (Poly Tetra Fluoro Ethylene) チューブ（外径 6mm、内径 4mm、長さ 150mm）にいくつか穴を開け、それをチューブホーンの絶縁チューブ内に挿入して 50%フラッシュオーバー電圧（昇降法 30 回）を求めた。PTFE チューブは、開ける穴の数を 0, 25, 50, 100 個（穴数は概数、穴径はすべて 3mm）と変化させた。

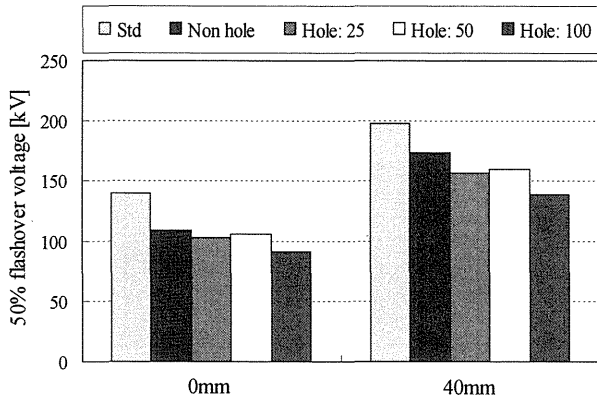


図 11 50%フラッシュオーバー電圧 (PTFE チューブ挿入)

図 11 に、通常品 (Std) と各 PTFE チューブにおける 50%フラッシュオーバー電圧をそれぞれ示す。外部ギャップ 0mm, 40mm とともに PTFE チューブ挿入の方が通常品よりも 50%フラッシュオーバー電圧が約 25%程度低下した。これは、絶縁チューブ内に PTFE チューブを挿入することで、チューブ内径が小さくなり、チューブ内圧力が上昇し、ガスの噴出しを促進させ、それに伴いフラッシュオーバーに至るまでの時間が早くなることで、放電電圧が低下したものであると考えられる。また、PTFE チューブを挿入したサンプルでは外部ギャップの有無に関わらず、最も 50%フラッシュオーバー電圧が高かったのは穴 0 個の場合で、最も低い値を示したのが穴 100 個の場合だった。PTFE の誘電率と穴の有無が電界分布に影響したことも一因と考えられる。穴数が多いほど 50%フラッシュオーバー電圧は低下する傾向があると考えられるが、穴を開けすぎると PTFE チューブを挿入している効果がなくなることが予想されるため、穴数と PTFE のバランスを考慮しなくてはならない。試験後、PTFE チューブを取り出したところ、絶縁チューブ内の放電により表面が黒くなっている程度で、損傷は見られなかった。したがって、PTFE チューブは多数回動作に耐えうる強度を有していると考えられる。また、PTFE は優れた消弧性能を持つ⁷⁾ため、優れた続流遮断性能を持つことが予想される。

次に、さらに避雷性能を向上させるため、50%フラッシュオーバー電圧の最も低かった穴数 100 個の PTFE チューブを挿入した場合について、外部ギャップ長を変化させたときの 50%フラッシュオーバー電圧を調べた。

図 12 に、外部ギャップ長を変化させた場合の 50%フラッシュオーバー電圧を示す。当然のように外部ギャップ長が大きくなるほど放電電圧が上昇している。外部ギャップ 0mm と 23mm では 22kV 用避雷器の雷インパルス放電開始電圧 90kV に近い値になった。

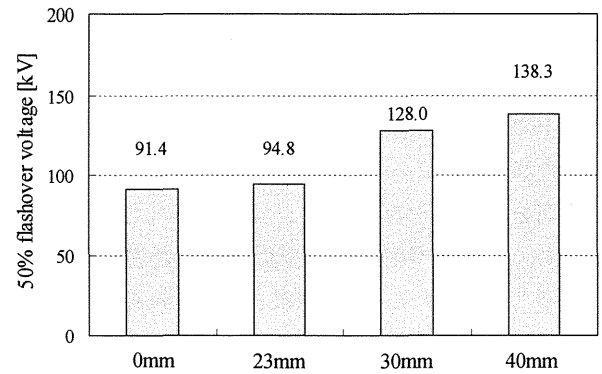


図 12 50%フラッシュオーバー電圧 (外部ギャップ長変化)

しかし、外部ギャップ 0mm の場合は、常に電力系統から課電状態となり、コロナ放電などの電気ストレスによるチューブホーンの劣化やコロナ騒音による周囲からの苦情などが考えられる。そのため、外部ギャップを設ける必要がある。チューブホーンの商用周波放電開始電圧は外部ギャップ無しの場合で 100kV 以上であることから、6.6kV 用チューブアレスタと同じ外部ギャップ 23mm の場合でも常時課電に対する絶縁は十分保持され、外部ギャップ長 23mm で最も効果的に 50%フラッシュオーバー電圧を低下させることが可能であると考えられる。

したがって、22kV 用チューブホーンの絶縁チューブ内に PTFE チューブを挿入して、外部ギャップ長 23mm で使用すれば、優れた絶縁性能及び避雷性能が発揮されると考えられる。

6. まとめ

6.6kV 用沿面放電型避雷装置の長期信頼性に関するデータを得ることを目的として、耐久性や多数回動作による電氣的特性の変化、降雨時の動作特性について検討した。また、現在開発が進められている 22kV 用沿面放電型避雷装置の動作特性を調べた。主な結果を以下に示す。

- 1) チューブアレスタは、雷インパルス大電流約 8kA (10/30 μ s) で 100 回繰り返し動作しても、貫通破壊することなく絶縁性を保持し、優れた機械的強度と耐久性を持っている。
- 2) チューブアレスタの繰り返し動作が商用周波放電開始電圧に与える影響はほとんどないが、雷インパルスフラッシュオーバー電圧は低下する。
- 3) 絶縁チューブ内部に雨水が浸入すると、チューブ内部で沿面フラッシュオーバーしにくい傾向がある。
- 4) 絶縁チューブ内部に雨水が浸入した場合、チューブ

内部にわずかな空隙があると、チューブ内で放電するが、チューブ噴出口が完全に塞がれた場合は、チューブ内では放電せず、笠部放電または貫通破壊に至る。

- 5) 22kV用チューブホーンの絶縁チューブ内にPTFEチューブを挿入すると、50%フラッシュオーバ電圧が低下する。
- 6) 22kV用チューブホーンは、絶縁チューブ内にPTFEチューブを挿入し、外部ギャップ長23mmで使用すれば、優れた絶縁性能及び避雷性能が発揮される。

参考文献

- 1) Y.Morooka, F.Kinoshita, M.Sakae and K.Watanabe: "Development of 6.6 kV Tube-Arresters", International Workshop on High Voltage Engineering (IWHV), Vol.2, No.ED-03-49, SP-03-38, HV-03-38, pp.61-66, Fukuoka, Japan (2003-1)
- 2) 木下, 林, 成, 大坪, 本田: 「沿面放電型避雷装置の消弧メカニズムの解明および消弧性能の評価に関する研究」, 平成15年電気学会電力・エネルギー部門大会, No.234, pp.B137-B138 (2003-8)
- 3) 電気学会電気規格調査会標準規格: 「避雷器, JEC-203-1978」(1978)
- 4) S.Hidaka, S.Yamashita, N.Anami, M.Otsubo, C.Honda and M.Sakae: "Lightning Protection Characteristics and Changes in Insulation Tube Surface of the Tube Type Creeping Discharge Lightning Protection Devices", 2003 IEEE Conference on Electrical Insulation and Dielectric Phenomena, No.5A-12, pp.418-421, Albuquerque, New Mexico, USA (2003-10)
- 5) 諸岡, 木下, 副, 渡部: 「22kVチューブホーンの開発」, 平成16年電気学会電力・エネルギー部門大会, No.335, pp.35-5-35-6 (2004-8)
- 6) 日高, 栢, 大坪, 本田, 副: 「金属スペーサ付沿面放電型避雷装置の電气的特性」, 平成16年電気学会電力・エネルギー部門大会, No.336, pp.35-7-35-8 (2004-8)
- 7) 湯地, 日高, 大坪, 本田, 牧: 「新型限流ヒューズにおける溶断特性の検討(II)」, 平成14年度電気設備学会全国大会, No.G-22, pp.329-330 (2002-9)