

懸垂碍子の高耐圧化への設計指針

— 交流電圧による碍子の閃絡破壊基礎実験 II —

武田 栄一, 北村 岩雄, 池田 長康

*土田 芳則, *小杉 友男

1. 序 論

近年の電力需要の飛躍的な伸びに対応して、大容量の発電所が建設されつつある。これら発電所の立地には厳しい条件が伴い、消費地より離れた所に建設される傾向にあるため、大容量長距離送電が必要になっている。しかも、この送電線路において送電電力の損失の低減のために、送電電圧の格上げが行われてきた。また、コロナ放電などによるコロナ障害の防止と送電容量の増加のために、多導体方式が採用されている。従って、これらの送電線路を支持する碍子には良好な絶縁はもとより、機械的強度と長期間自然下において性能を維持するだけの耐候性も要求され、高耐圧・高張力化の高性能碍子が不可欠になる。しかし、現在の懸垂碍子はこれらの性能を満たしているが、あまりにも長く、大型化しているように思える。本報告では、短小化、軽量化を目標に高耐圧は懸垂碍子の設計指針を模索すると同時に、平等電界の $1/2$ の耐電圧、すなわち、電極間隔 30cm で 450kV 以上の耐電圧のある碍子形状を目標に基礎的実験を行い検討した。

2. 絶縁破壊防止に関する考え方

絶縁破壊を防止する一般的な考え方、汎用性のある設計指針というものは現在まだ確立されていない。従って、絶縁距離を経験的に決め、相似形状の実験結果を考慮して、十分な安全係数を掛けて決定しているのが実情であると考えられる。そこで、我々は絶縁破壊の進展は電界とその軌跡である電気力線が主要な関係因子であると考えた。

これより絶縁破壊を考えると、

- 1) 絶縁破壊の初期段階では、電気力線に沿ったある幅をもって進展する。
- 2) 先駆放電は、電子なだれによる。
- 3) グロー放電の導電域の進展による。

となるであろう。一方、絶縁破壊を防止する方法は上述の個々の放電過程に対応した進展防止方法を取れば、汎用性のある設計指針が得られるであろう。

このような考えで得られた絶縁設計指針は、

- 1) 電気力線を可能な限り耐圧の高い材料で分断する
- 2) グロー放電による導電域の進展を制限する
- 3) 電気力線を耐圧の高い領域へ導くよう制御する

である。これら指針で示す対応が正当であるか、対応策個々およびこれら組み合わせ対応について模

*電源開発株式会社

擬碍子を用いて検討した。

3. 模擬碍子

絶縁破壊防止の設計指針にしたがって、図1. 1) および2) に示すような模擬碍子を構成する円板と電極を製作した。電圧を印加する電極および、指針3) に対応した実験で用いる中間電極の材料は真鍮である。模擬碍子の円板は、指針1), 2) の実験にそれぞれ対応して、a), b) の2つのものを製作した。円板および円板の端に接着された外壁には0.5mm厚のエポキシ・ガラスウールFRPをエポキシで耐圧強化したものを、心材にはエポキシ・ガラスウールFRP棒を用いた。

絶縁破壊を防止する設計指針1) に対応する実験では図1. 1). a) の枚数を、指針2) に対応する実験ではb) の外壁の高さを、指針3) に対応する実験では2) の中間電極の個数をそれぞれ変化させた。

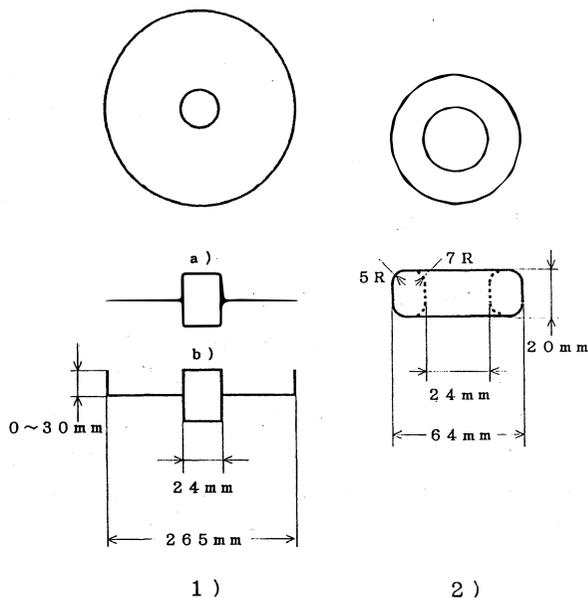


図1 模擬碍子と電極形状

4. 実験システム

交流高電圧発生には500kV（実効値）用の試験変圧器を使用している。高電圧の測定には、高電圧用セラミック抵抗器100MΩ 4本を直列に繋ぎ、これと10kΩの抵抗器で分圧し、さらに静電電圧計で校正して電圧を求め、測定を行った（文献1）を参照）。この実験では12回の測定を行い最大値、最小値を除いた10回の測定の平均値を波高値であらわし、閃絡破壊電圧としている。

5. 実験結果

5.1 設計指針個々の実験

5.1.1 電気力線分断化実験

この実験では電圧が印加される電極の距離は30cm一定とし、電気力線を分断する指針1) の条件を確認するために行った。この実験では図2. a) に示すように模擬碍子の枚数を増やし分断の効果調べた。この時、電極と円板・円板と円板がそれぞれ等間隔となるようにした。この閃絡破壊の実験の結果を図3. a) に示す。図中の上の破線は30cm間隔の平等電界での破壊電圧値900kVの1/2である450kVを、下の破線は電極間になにも無い状態での破壊電圧をそれぞれ示している。ここでは

円板の枚数，つまり，電気力線の分断数に応じて破壊電圧が上昇していることがわかる。

5.1.2 電気力線トラップ実験

グロー放電の導電域の進展が，円板に取り付けた外壁の高さによってどれだけ押さえられるか調べるため，図2．b)のような円板に外壁を取り付けた形態での実験を行った。外壁付きの円板2個を背中合わせにし，外壁の高さを0～30mmの範囲で変化させた。なお，電極と円板の間隔は5cm，円板と円板の間隔は20cmに固定してある。この閃絡破壊実験の結果を図3．b)に示す。この図からわかるように耐電圧の外壁高さへの依存性は無いが，2個の外壁付き円板だけで，電気力線分断化実験における円板数が5枚のときよりも高い破壊電圧値を示している。

5.1.3 電気力線集中化実験

ここでは，図2．c)に示すような形態で電気力線集中化による実験を行った。この実験では，電極と中間電極の距離がそれぞれ等しくなるようにし，電極の個数を増やして行った。また，電圧が印加される電極間から中間電極の厚みを差し引いて30cm一定としてある。この閃絡破壊実験の結果を図3．c)に示す。中間電極の個数によって耐電圧の上昇が見られるが，これは電気力線の集中化の効果の現れというよりは中間電極が挿入されたことにより，電圧印加電極間の電界が少し平等電界に近付いたためであると考えられる。

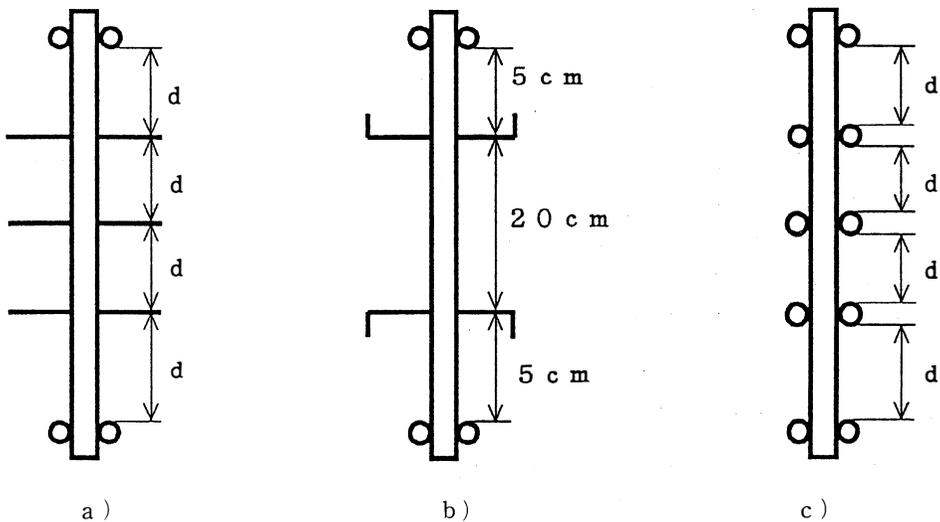


図2 供試模擬碍子形状

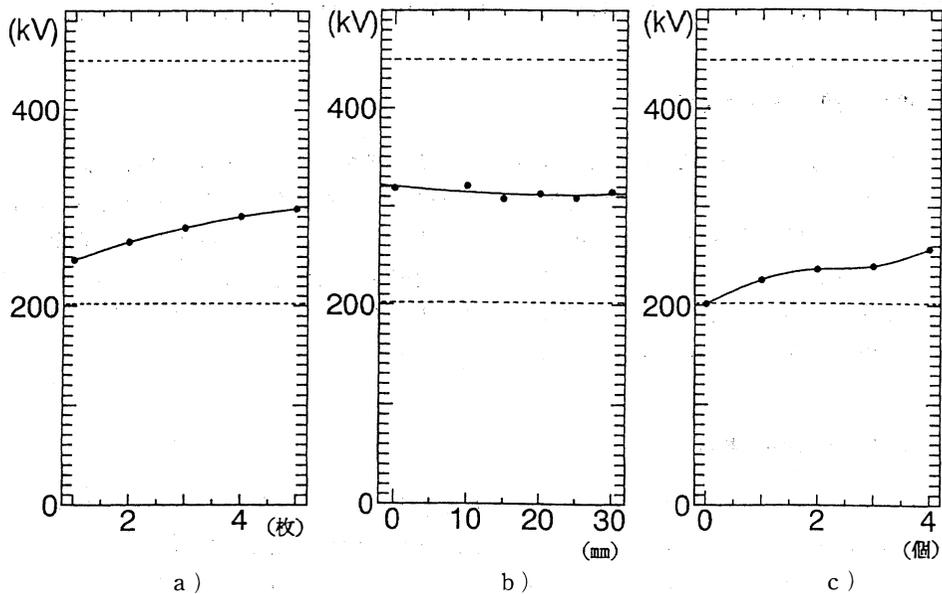


図3 設計指針個々の効果

5.2 設計指針2つの組み合わせによる実験

5.2.1 電気力線分断化・トラップ実験

ここでは、絶縁破壊を防止する設計指針1), 2)を組み合わせることによって、どのような効果が現れるかを調べた。図4. a)に示すように円板の端に外壁の付いたものを背中合わせにして一組とし、その組数を次第に増やして実験を行った。この時、電極と円板、円板と円板の距離は等間隔としてある。また、外壁の高さが10, 20mmの二つを用意し比較した。実験結果を図5. a)に示す。予想できたことではあるが外壁の高さが20mmの方が高い電圧値で推移していることがわかる。しかし、二枚のとき、つまり、電極と円板の間隔が大きい時、値にほとんど差がないことから、円板の外壁の影響は電極から離れるほど小さくなると思われる。さらに、組数を増やしていくと耐電圧は上昇するがある点で最大になり、少し値が落ちる。この時、放電は円板の外壁を伝って包絡線で生じているため、中間部分の外壁の効果が無くなるためであると思われる。

5.2.2 トラップ・集中化実験

絶縁破壊を防止する設計指針2), 3)を組み合わせ、電気力線を絞り込むことにより耐電圧の外壁への依存性を調べた。実験の形態は図4. b)に示す通りで、円板間での無電極放電を防止するため外壁付きの円板の背後に円板を一枚ずつ挿入してある。電極と円板、外壁付き円板と円板、円板と円板の間隔はそれぞれ2cm, 3cm, 20cmとしてある。比較のため、中間電極を電極の中央に入れた場合と入れてない場合の二通りの実験を行った。この実験の結果を図5. b)に示す。まず、中間電極を入れた方は破壊電圧値が高めに推移するとともに、外壁高さにほぼ比例して向上している。従って、中間電極を挿入し電気力線を絞り込むことによって、破壊電圧の外壁高さへの依存性、有効性が現れると考えられる。

5.2.3 電気力線集中化・分断化実験

ここでは縁破壊を防止する設計指針1), 3)を組み合わせた図4. c)に示すような実験を行った。円板の枚数を5枚に固定し、電極と円板、円板と円板の間隔を5cmとして、図4. c)に示すような順で中間電極を挿入し、個数を増やしていった。この実験の結果を図5. c)に示す。電気力線集中化実験のときより耐電圧の向上の割合は小さいが、高めに推移していると共に明らかに耐電圧の上昇が見られる。

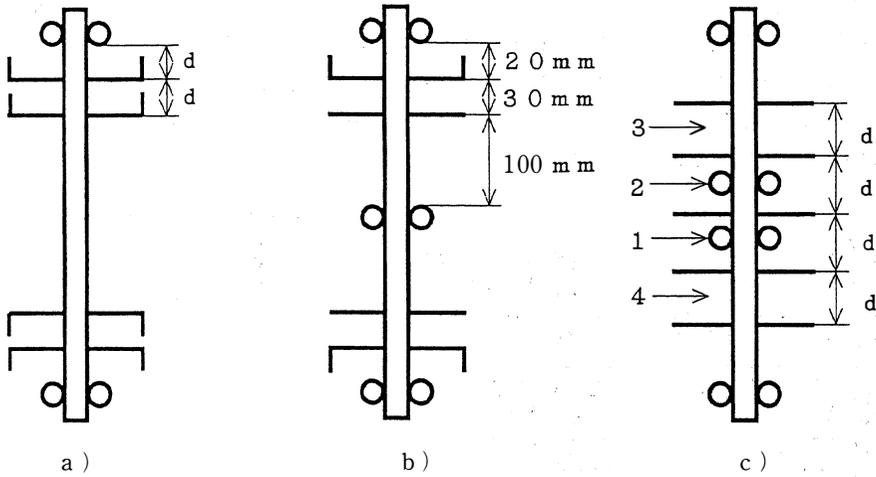


図4 供試模擬碍子形上

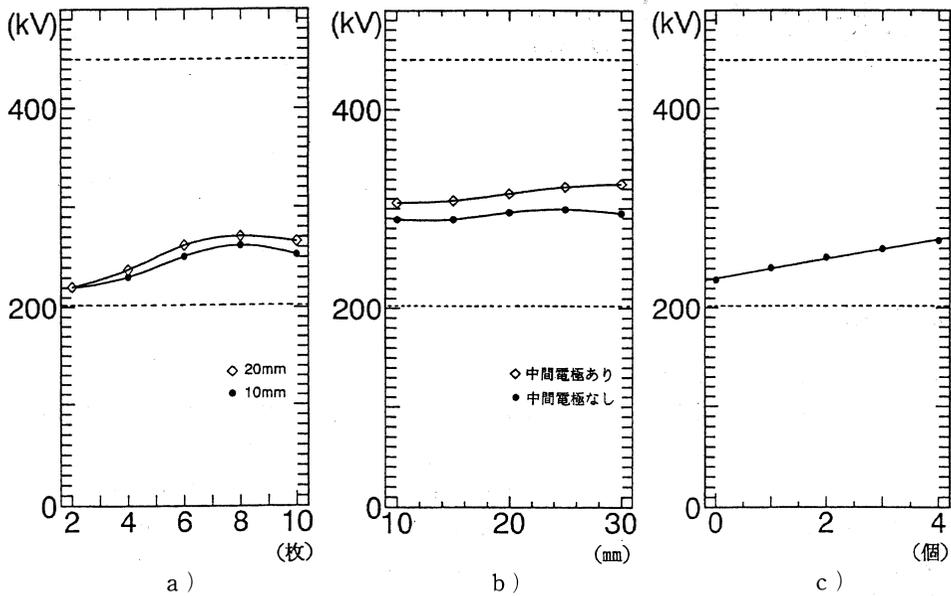


図5 設計指針2つの組み合わせによる効果

5.3 総合効果実験（電気力線分断化・集中化・トラップ実験）

この実験は、図6. a) に示すように2で述べた絶縁破壊を防止する設計指針の3つすべてを組み合わせを行った。中間電極の個数は4個、外壁付き円板を上下に2枚、円板を11枚用いて外壁の高さを変化させた。電極と外壁付き円板、外壁付き円板と円板、そして中間電極を挟んで円板と円板（電極の厚さを差し引いた数値）、円板と円板のそれぞれの間隔は、20mm, 30mm, 40(20)mm, 20mmとなっている。この実験結果を図7に示す。外壁の高さが最も低い10mmの時でも、破壊電圧は400kV近くを示し、その後外壁の高さに比例して耐電圧の向上が見られる。

次に、30cm 間隔の平等電界における破壊電圧値900kVの1/2である450kVを目標に図6. b) に示すような実験を行った。電極と円板、円板と円板との間隔には変更は無く、電界が集中すると思われる電極付近を直径12cm、外壁高さ8cmの外壁付き円板で包み込むようにし、また上下の端から2枚目のところの円板を30mmの外壁付き円板と交換した。この実験では、450~500kVの電圧を6回印加しても閃絡破壊しなかった。従って、我々が当面の目標としていた30cmで450kV以上の耐圧をもつ懸垂碍子の形状を得る目標は達成された。

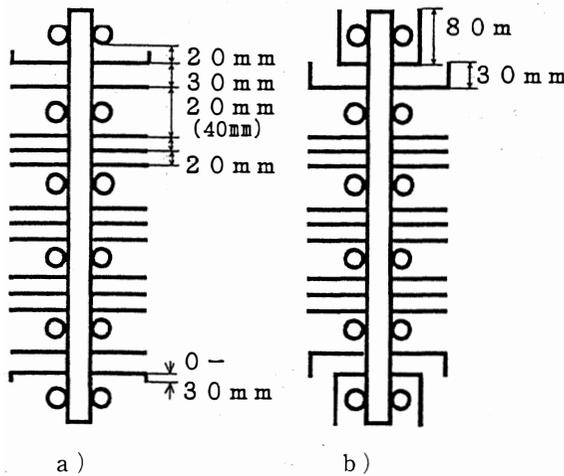


図6 供試模擬碍子形状

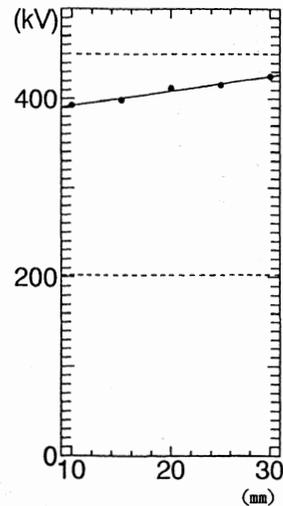


図7 設計指針3つによる総合効果

5.4 実験結果の検討

絶縁破壊を防止する設計方針に従って実験を行ってきた。実験から、方針1), 2), 3) それぞれ単独,あるいは、それらの組み合わせによる結果を得たのでそれらのまとめをここに示す。

	耐圧向上過程 (kV)	耐圧上昇比 (%)
電気力線分断化	247~298	20.6
電気力線トラップ	308~321	4.2
電気力線集中化	202~257	27.2
電気力分断・トラップ	221~266	20.4

電気力線トラップ・集中化	306～325	6.2
電気力線集中・分断化	229～268	17.0
電気力線分断・トラップ・集中化(a)	393～425	8.0
” (b)	450～	

6. 結 論

- 1) 絶縁破壊防止に関する3つの設計指針を示し、それら個々の単独の破壊実験を行い、次の結果を得た。
 - ・電極間の電気力線を分断することにより、20.6%の耐圧が向上した。
 - ・グロー放電による導電域の進展を制限する外壁の高さは、10mm程度でも有効であり、4.2%の耐圧が向上した。しかし、耐圧の外壁高さへの依存性は無いものと思われる。
 - ・電気力線を集中するために挿入した中間電極の個数の増加とともに27.2%の耐圧が上昇した。
- 2) 3つの指針のうち2つの指針を組み合わせた破壊実験を行い、次の結果を得た。
 - ・外壁付き円板により電気力線を分断することで20.4%の耐圧向上が見られた。しかし、分断数を増やしていくと、放電が外壁を伝い包絡線上で生じるため、耐圧の上昇が止まる。
 - ・グロー放電による導電域の進展を制限する外壁の効果は、中間電極を挿入することで認められた。この時の耐電圧の向上は6.2%である。
 - ・電気力線の分断数が一定であっても、中間電極を挿入し電気力線を絞りこむことで17.0%の耐圧が向上した。
- 3) 3つの指針すべてを考慮した破壊実験を行い、次の結果を得た。
 - ・電極間距離30cmで400～450kV以上の耐圧を得た。これは30cm間隔での平等電界における破壊電圧値900kVの1/2に相当するものである。
- 4) 以上の実験結果から、電気力線を基本とした絶縁破壊防止に関する考え方、設計指針である
 - ・電気力線を可能な限り耐圧の高い材料で分断する
 - ・グロー放電による導電域の進展を制限する
 - ・電気力線を耐圧の高い領域へ導くよう制御する
 という設計指針は十分信頼できると考えられる。

参 考 文 献

- 1) 富山大学紀要 第43巻, P 1, 1992

Guiding principle on higher-voltage sustaining of insulater

Eiichi Takeda, Iwao Kitamura, Nagayasu Ikeda,
*Yoshinori Tsuchida, *Tomoo Kosugi
(*Electric Power Development Co.)

The present porcelain insulators seem to be too long and too heavy, although they satisfy the demands for high voltage AC transmission lines. The guiding principle for design of insulators is proposed for small and light-weight insulators and for more high-voltage sustaining. The principle consists of the following three items:

- 1) to divide the electric line of force with high-voltage sustaining materials into small intervals as possible.
- 2) to restrain expansion of the conductive region due to glow-discharge.
- 3) to control the shape of electric line of force to concentrate within high insulation materials.

Several mock-up test with the insulators carried out for the confirmation of the proposed principle. The insulators consist of several insulator disks with and without outer wall at the periphery and middle electrode inserted between electrode. The mock-up insulater with their suitable combinations did not flashover in spite of applying the voltage of over 450 kV at 30 cm in length between the electrode. It is found that the guiding principle we proposed is confirmed to fit for the design of high voltage apparatus from the experiments and the sustainment of insulation for very high voltage with the new designed composite rod insulator is attained.

[英文和訳]

懸垂碍子の高耐圧化への設計指針

武田 栄一, 北村 岩雄, 池田 長康,
*土田 芳則, *小杉 友男

近年の碍子は高圧送電線における要求を満たしているが、それらは長く、重すぎるように思われる。我々は懸垂碍子を短小化、軽量化さらには高耐圧化できるような設計指針を考えた。この設計指針は、次の3項目からなっている。

- 1) 電気力線を可能な限り耐圧の高い材料で分断する。
- 2) グロー放電による導電域の進展を制限する。
- 3) 電気力線を耐圧の高い領域へ導くように制御する。

模擬碍子を用い、設計指針の確証のための実験を行った。模擬碍子は円板・外壁付き円板そして、中間電極からなる。それらを適切に組合わせた模擬碍子において電極間 30 cm で 450 kV 以上の耐圧を得た。我々が考えた設計指針は、実験結果から高電圧装置の設計に適していることと、新設計の絶縁物により高電圧の絶縁維持ができるということが分かった。