

送電用避雷装置

Transmission Line Arresters

近年、高度情報化社会を迎え、半導体や集積回路が大幅に普及し、電力供給信頼度の面から、雷サージに起因する瞬時電圧低下の防止対策が重要な検討課題となっている。このたび、日立製作所は雷に伴う瞬時電圧低下や停電の防止を目的として、66~275 kV送電線用の酸化亜鉛形送電用避雷装置を開発した。これら送電用避雷装置を適用することにより、送電線に雷撃が発生して送電線用支持がいし連の耐電圧を上回る雷サージ過電圧が生じても送電用避雷装置が雷サージを抑制するので、送電線用支持がいし連のフラッシュオーバは防止できるようになる。

白川晋吾* *Shingo Shirakawa*
 寺門修一** *Shūichi Terakado*
 小沢 淳*** *Jun Ozawa*
 大石一哉**** *Kazuya Ôishi*
 広瀬義昭***** *Yoshiaki Hirose*

1 緒 言

近年、送電線への落雷に起因する瞬時電圧低下の防止、送電線の2回線同時せん絡の防止など電力の質的向上を図る観点から、送電線に酸化亜鉛形送電用避雷装置を適用して、送電線用支持がいし連のフラッシュオーバを防止することが急速に普及し始めている。

送電用避雷装置は、単一ギャップと避雷要素部、すなわち優れた非直線電圧-電流特性を持つ酸化亜鉛素子を内蔵した避雷器要素で構成され、鉄塔側に避雷要素部を取り付け、送電線側に単一ギャップを直列設置している。単一の直列ギャップは系統設計の所定の開閉サージでは動作させないで、雷サージ侵入時だけ動作するようにして、送電線用支持がいし連のフラッシュオーバを防止している。以下に、送電線用として開発した66~275 kV送電用避雷装置の構成と適用について述べる。

2 送電用避雷装置の考え方

架空送電線の事故の大半は雷に起因している。昭和55年4月から昭和60年3月までの5年間にわたる国内電力会社の系統電圧と雷によるトリップ事故率の関係¹⁾をもとにして図1に示す。これは落雷による雷撃電流発生頻度と送電線用支持がいし連の絶縁強度の関係から、66~154 kV系統で多く発生している。これら送電線の雷害事故低減対策として、従来、接地抵抗の低減、架空地線の多条化、高絶縁化などの低減対策

が行われていたが、抜本的対策には至っていなかった。雷害事故の積極的低減は、送電用避雷装置を鉄塔に設置することで可能となる。

一方、発・変電所に酸化亜鉛形避雷器を適用して雷サージ

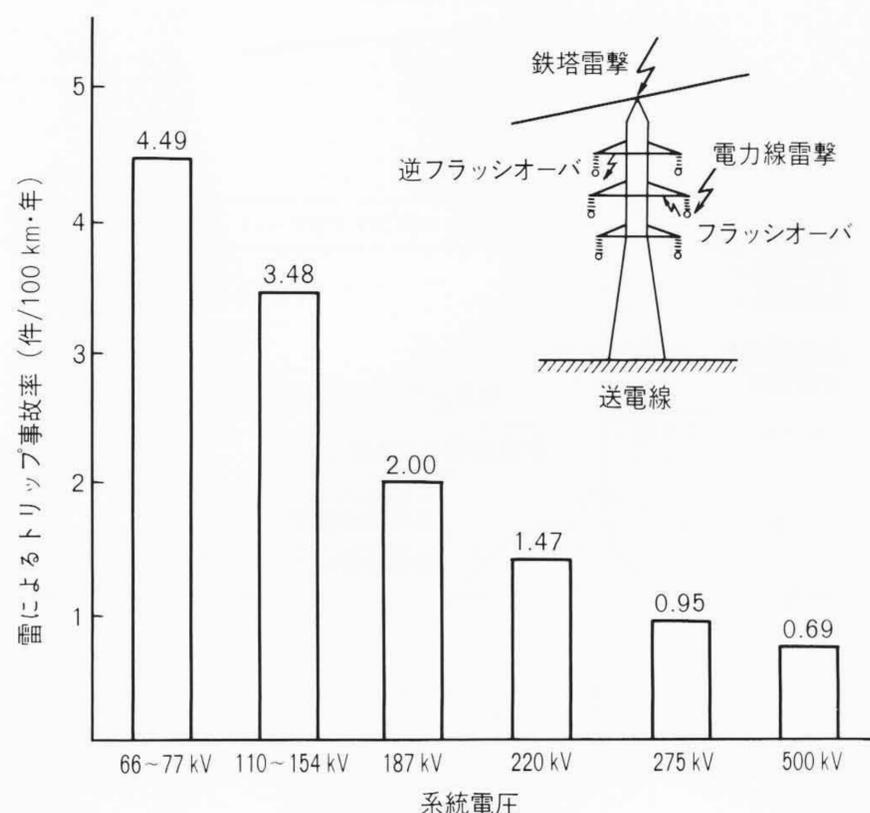


図1 系統電圧と雷によるトリップ事故率の関係 雷による国内電力会社の5年間にわたる送電系統のトリップ回数を示す。

* 日立製作所 国分工場 工学博士 ** 日立製作所 国分工場 *** 日立製作所 日立研究所 工学博士 **** 日立製作所 日立研究所 ***** 日立製作所 電力事業部

を抑制することは、電力用酸化亜鉛素子の開発と適用により、昭和50年代前半から大幅に普及されてきた。今や避雷器と言えば、ギャップレスの酸化亜鉛形避雷器という時代になっている^{2),3)}。一方、送電線の雷害防止目的を考慮すると、被対象機器が送電線用支持がいし連であることから、単一のギャップと避雷器を組み合わせることによって、絶縁協調は達成できる。このことは古くから知られていたが⁴⁾、ハードウェアが未熟であったこと、および高度情報化社会を迎えていなかったことから、普及に至らなかった。しかし、優れた非直線電圧-電流特性を持つ酸化亜鉛素子の開発と実用化、さらに、これを封入する絶縁容器を開発することで実現が可能な時代となってきた。ここでは酸化亜鉛素子を封入した容器の部分を避雷要素部と呼ぶ。

2.1 送電用避雷装置の構成と動作原理

送電用避雷装置の構成を図2(a)に示すように、送電用避雷装置の主要素は、直列ギャップと直列接続する避雷要素部で

あり、送電線用支持がいし連に併設して使用される。常時の運転電圧は直列ギャップ部分で主に分担している。

雷サージ過電圧が侵入時には図2(b)に示すように、避雷装置はアークホーンの放電電圧以下で直列ギャップを放電させ、送電線用支持がいし連のフラッシュオーバを防止する。避雷装置がないときはアークホーンが放電し、地絡電流が流れ、系統電圧は瞬時電圧低下となるが、避雷装置を設置すると避雷装置の直列ギャップが動作し、放電電流として雷サージ電流だけを通流し、系統電圧は地絡状態とならず、瞬時電圧低下を防止できる。

2.1.1 避雷要素部の構造

避雷要素部の構造は図3(a)に示すように、避雷要素内部にはドーナツ形酸化亜鉛素子を用い、外側には絶縁筒(FRP製)を配置した。絶縁筒表面にはシリコン系ゴムポリマーを熱収縮させ、ひだを形成させたポリマー容器を開発した。酸化亜鉛素子の形状は、単位断面積当たりの放電耐量を上げるた

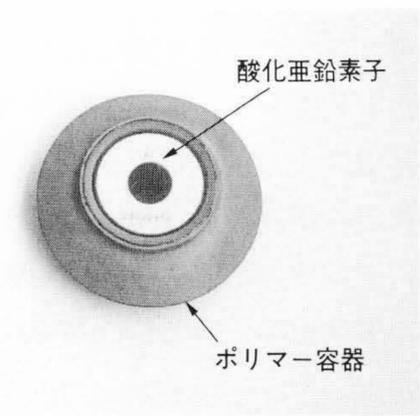
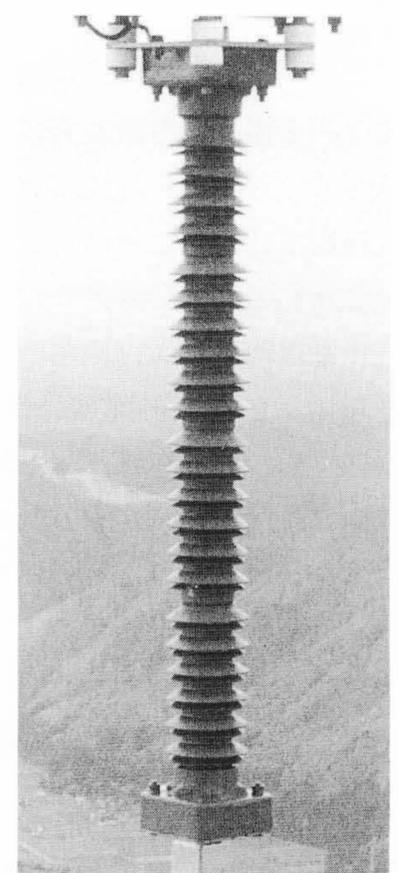
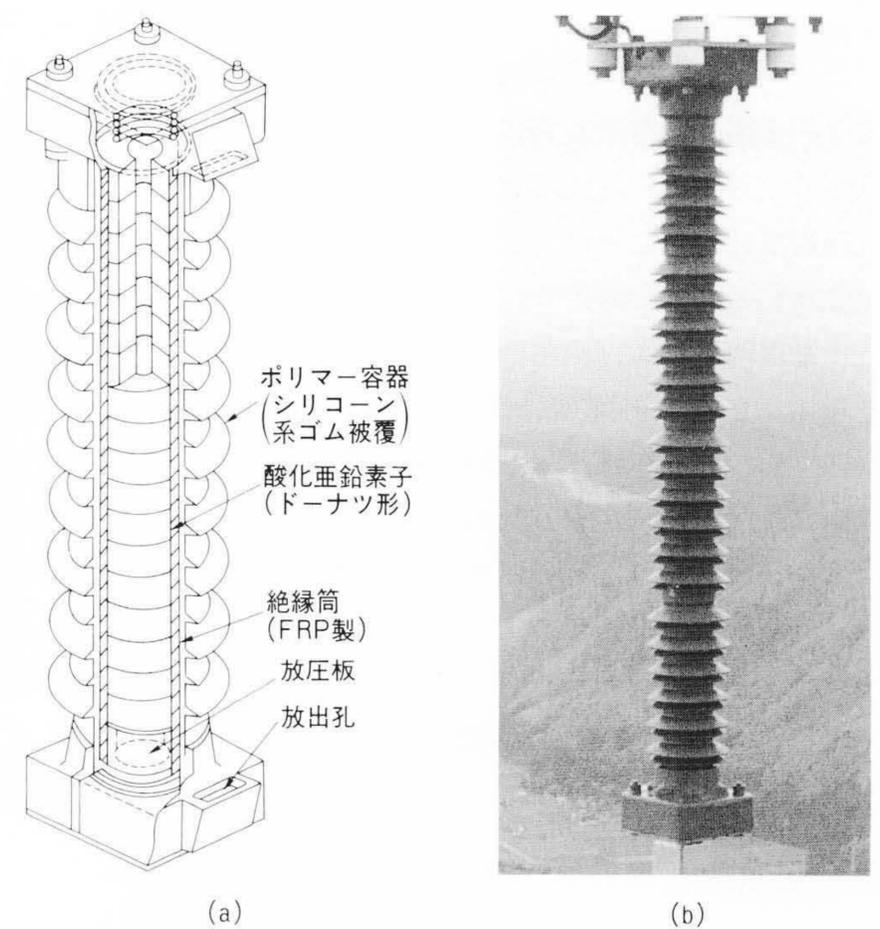
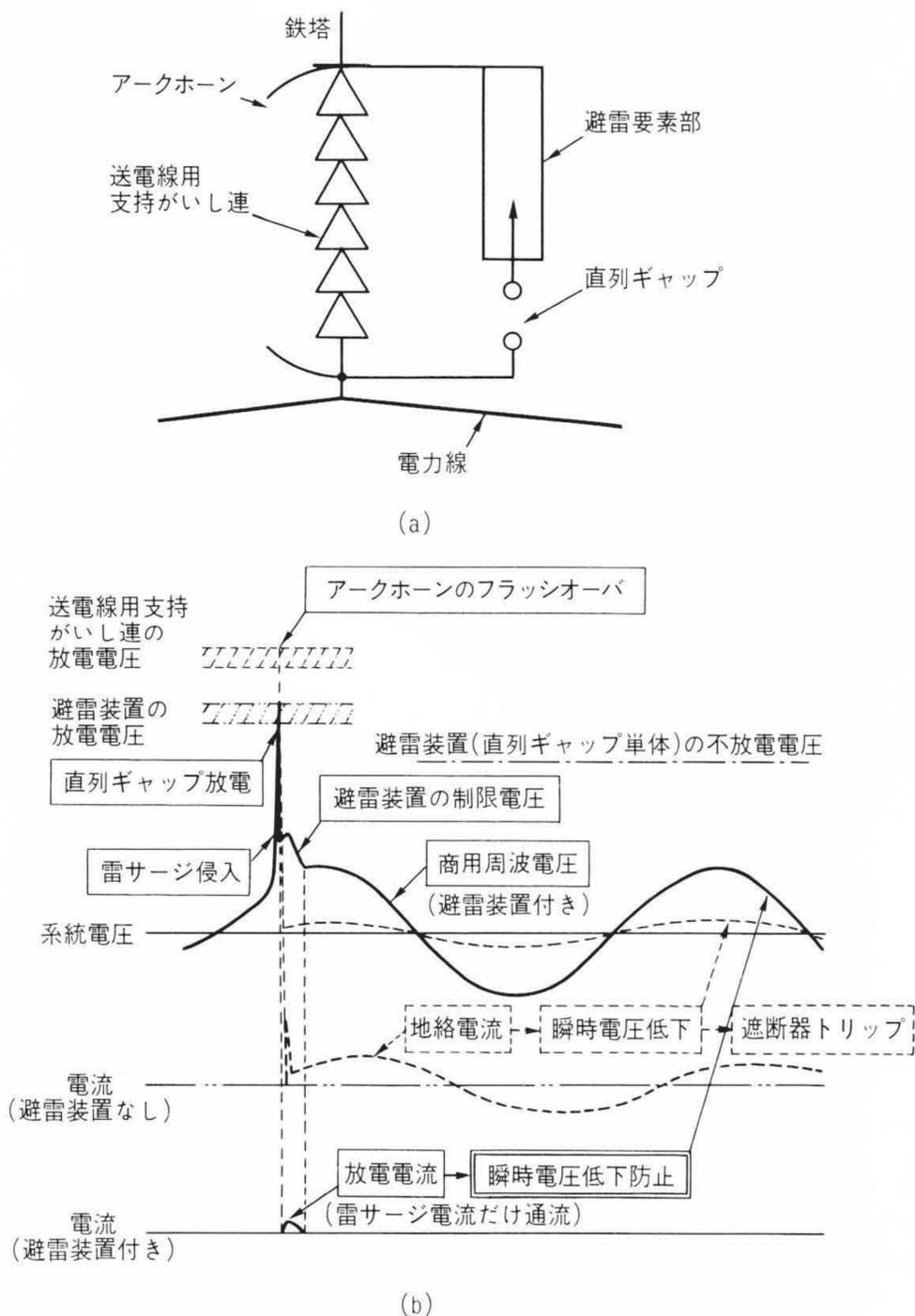


図3 避雷要素部の構造 ドーナツ形酸化亜鉛素子の採用により、構造の簡素化を実現した。

図2 送電用避雷装置の構成と動作原理 送電用避雷装置は、ギャップと避雷要素部を直列接続して、送電線用支持がいし連へ併設する。直列ギャップは、アークホーンの放電電圧-時間特性以下で動作する。

めに絶縁筒内での酸化亜鉛素子の占積率を上げること、さらに、放圧効率を上げるための内部空間が必要であることから、同図(b)の避雷要素部の断面形状に示すように、ドーナツ形酸化亜鉛素子を選定した。絶縁筒(FRP製)には水分などの浸入を考慮して、中間に放圧用の側面放出孔などは設定しない構造とした。避雷要素部(154 kV送電用)の外観を同図(c)に示す。

元来、電力用酸化亜鉛形避雷器の容器には絶縁性能、耐候性、機械的強度、汚損特性などから磁器がい管が使用されているが、送電用避雷装置としては高所への運搬、据付け条件から小形・軽量化、防爆性能の向上が期待された。これらの条件に対応するため、容器の非磁器化が推進され、材料としてエポキシ、エチレンプロピレンゴム、ポリマー容器(シリコーン系ゴムポリマーを熱収縮で被覆)が実用化された⁵⁾。磁器製110 kV送電用避雷器と本開発によるポリマー容器製110 kV避雷装置(避雷要素部)の外観を図4に示す。ポリマー容器の実現により、大幅に小形化、質量低減が可能となった。

また、ギャップ付き送電用避雷装置を実現する際の基本事項として、ギャップと避雷要素部を分離して構成していることから、ギャップ放電時に印加される避雷要素部の容器の耐電圧、特に、汚損耐電圧特性が重要となる。これは避雷要素部の容器表面が汚損条件で表面せん絡すると続流遮断できず、機能を発揮できなくなるからである。しかも、懸垂がいし連に併設することから、懸垂がいし連長よりも短くして、汚損耐電圧特性を持たせる必要がある。汚損耐電圧特性の向上は、原理的には表面漏れ距離を長くすれば達成できる。従来の磁器がい管ではがい管ひだ肉圧を10~20 mm必要としていた。ポリマー材料の採用により、笠ひだ肉圧を約4 mm程度とすることにより、同一有効長で表面漏れ距離は約1.5倍に増大できる。また、シリコーン系ゴムポリマーははっ水性に優れ、同一表面漏れ距離で約1.6倍の霧中耐電圧特性を持っている。理想的にはポリマー容器は磁器がい管に対し、約2.4倍(=1.5×1.6)の霧中耐電圧が期待でき⁶⁾、同一有効長で高い汚損耐電圧を実現できる。

2.1.2 送電用避雷装置の制限電圧特性

避雷装置の特性として、系統電圧と定格電圧との関係および制限電圧特性を表1に示す。避雷装置の定格電圧は、ギャップ付き構成であるから一線地絡時健全相の端子電圧での続流遮断を考慮すればよく、発・変電所用避雷器の定格電圧よりも低く設定してある。放電時に流れる続流は酸化亜鉛素子の優れた非直線電圧-電流特性によって遮断される。放電耐量は想定する雷撃条件によって異なるが、酸化亜鉛素子の耐量評価が容易で実績のある2 ms方形波耐量で表示している。66~187 kVクラスは800 A×2 ms、220~275 kVクラスは、1,000 A×2 msの方形波耐量を持たせている。

表1 送電用避雷装置の保護特性 避雷装置の系統電圧と定格電圧の関係、および保護特性(制限電圧特性)を示す。

系統電圧 (kV)	66	77	110	154	187	220	275
定格電圧 (kV)	72	84	120	161	147	173	216
制限電圧 (kV)	15 kA	190	222	317	440	374	440
	20 kA	210	244	350	484	411	483
	45 kA	224	262	373	520	470	553
放電耐量 (2 ms方形波) (A)	800	800	800	800	800	1,000	1,000

3 送電用避雷装置の主な試験結果

送電用避雷装置としての試験は、使用者と製造者の協議で実施されており、試験方法としては発・変電所用避雷器規格(JEC-217-1984, JEC-203-1978)に準拠している。試験項目として、絶縁協調試験、制限電圧試験、動作責務試験(汚損時続流遮断試験)、動作開始電圧試験、防爆試験、機械的強度試験、横振れ試験、放電耐量試験、容器の耐電圧試験、絶

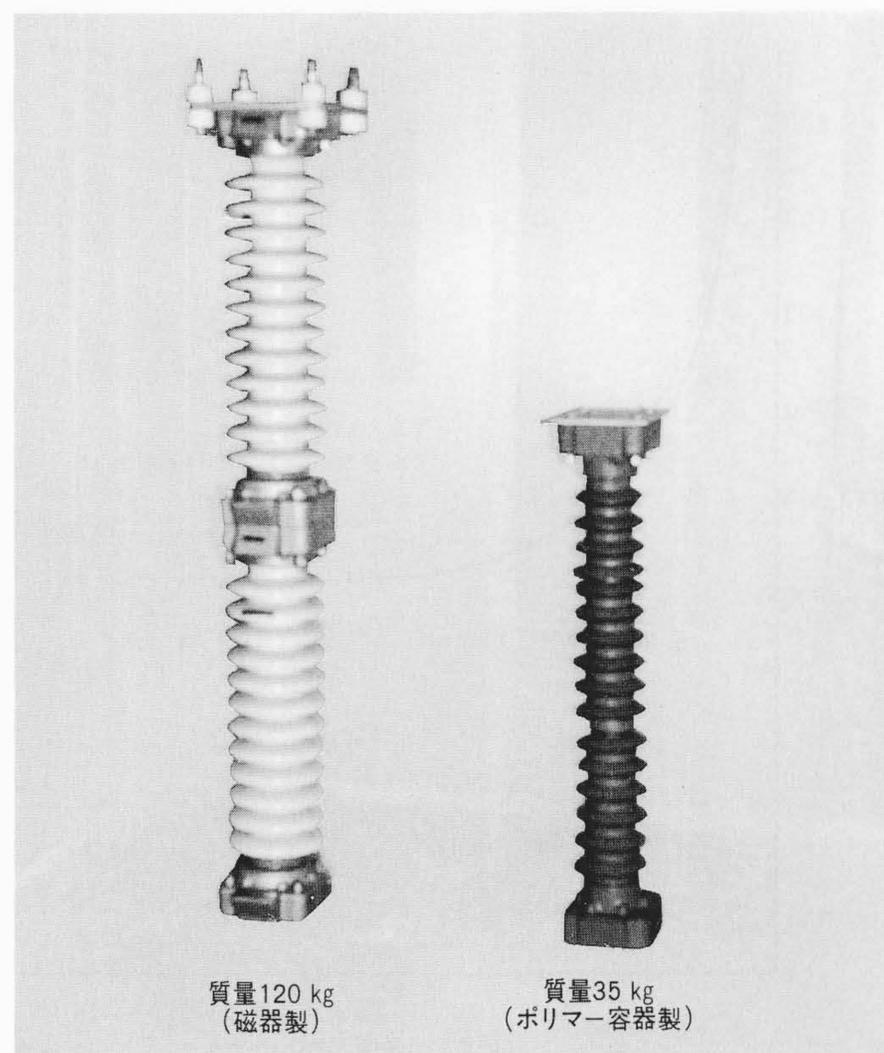


図4 磁器製110 kV送電用避雷器とポリマー容器製110 kV避雷装置(避雷要素部)の外観比較 ポリマー容器により、大幅に質量低減や小形化が図れる。

緑抵抗試験，漏れ電流試験などがある。以下，代表的試験結果について述べる。

3.1 絶縁協調試験(放電特性試験)

避雷装置は所定の装柱状態で，がいし装置(アークホーン)との絶縁協調を確認する必要がある。この場合，避雷装置が健全状態での絶縁協調と避雷装置が故障時(短絡時)での開閉サージ耐電圧(不放电特性)を確認する必要がある。放電特性は直列ギャップの漂遊容量と酸化亜鉛素子の静電容量とで分圧されており，正常時の保護特性は酸化亜鉛素子の静電容量が大きいこと，すなわち素子径が大きいほうが原理的には保護特性がよくなり，同一直列ギャップ長に対してアークホーンのギャップ長を短く設定できる。

送電用避雷装置の特性を把握するために，懸垂がいし10個連に154 kV避雷装置を併設して，避雷装置の絶縁協調試験を実施した⁸⁾。この試験状況と雷インパルス絶縁協調試験の結果を図5に示す。雷インパルス過電圧は確実に避雷装置のギャップ側で放電し，がいし装置のフラッシュオーバは防止できることを確認した。がいし装置のアークホーンには極性差があり，避雷装置の直列ギャップにも極性差を持たせてある。ホーン電極は耐雪条件も考慮して簡素な構造としている。なお，万一の避雷要素部が故障の状態でも，開閉サージ倍数2.8 puで

は直列ギャップが動作しないようにギャップ長を選定した。

次に，避雷装置としての放電電圧は避雷装置部の状態，すなわち乾燥状態にあるか，注水状態にあるかで影響を受ける。そこで，避雷装置が正常時と短絡時のおおの乾燥状態と注水状態における開閉インパルスでの放電特性を求めた。この結果は，50%フラッシュオーバ電圧の比較で図6に示す⁹⁾。避雷装置が注水状態にあると放電電圧は低下するので，逆に避雷装置としての保護特性は上がる。実際の雷撃条件を想定すると，注水条件に近くなると思われる。

3.2 動作責務試験(汚損時続流遮断試験)

動作責務検証方法としては，避雷装置本体を規定の汚損度に汚損した後，定格電圧を印加した状態で定格放電電流相当の雷インパルス電流を重畳して直列ギャップを放電させ，続流遮断性能を検証することが望ましい。設備容量的には66 kV・77 kVクラスでは雷インパルス通電試験が可能であるが，154 kVクラスになると実用条件と等価性を考慮して直列ギャップ部を短絡導線で結び，定格電圧を印加して，無続流遮断の性能を求めた⁷⁾。

154 kV送電用避雷装置の動作責務試験回路を図7(a)に，塩分付着密度0.12 mg/cm²での汚損時続流遮断試験時のオシログラムを同図(b)に示す。無続流で遮断できることが確認できた。

3.3 防爆性能

ポリマー容器が磁器製の避雷器に比較して基本的に良い点は，ヒートショック，すなわち熱破壊に優れていることである。放圧構造はポリマー容器の上下に放圧弁を設け，放圧時に外部短絡するようにした。

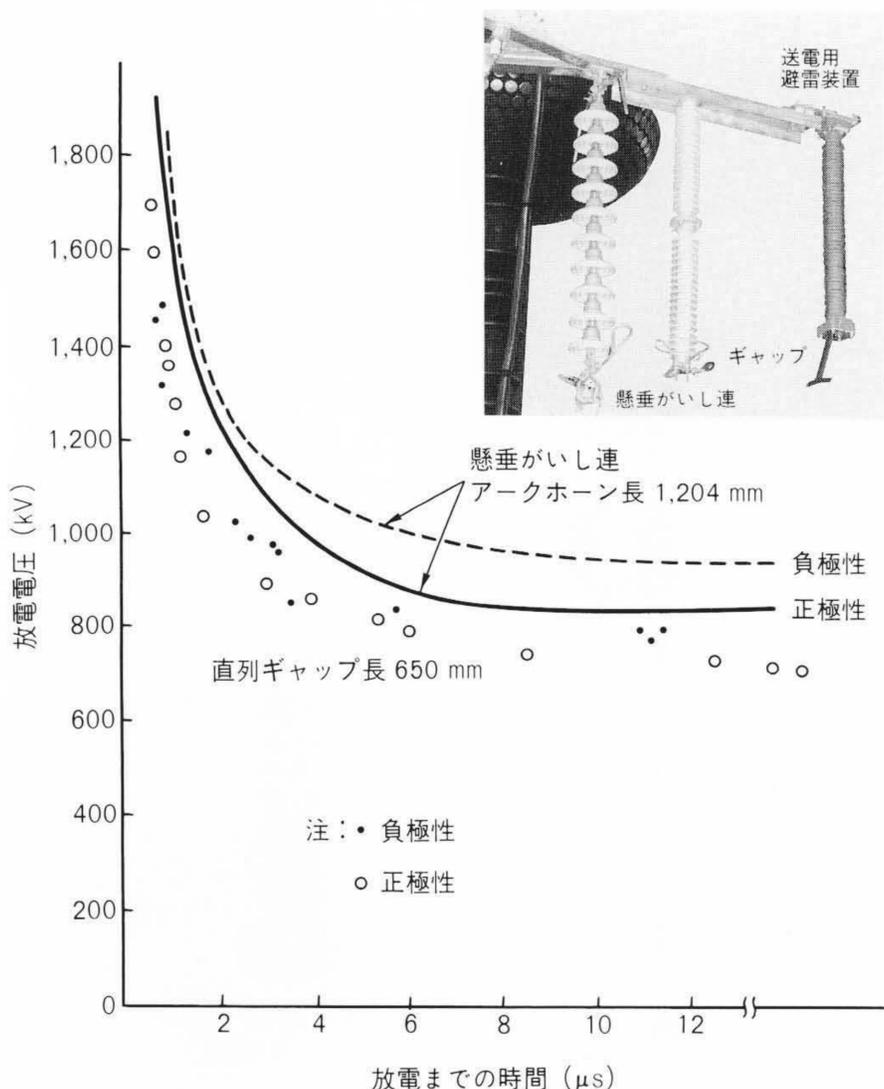


図5 154 kV送電用避雷装置の雷インパルス絶縁協調特性 ギャップはアークホーンの放電電圧-時間特性以下で放電し，絶縁協調がとれることを示す。

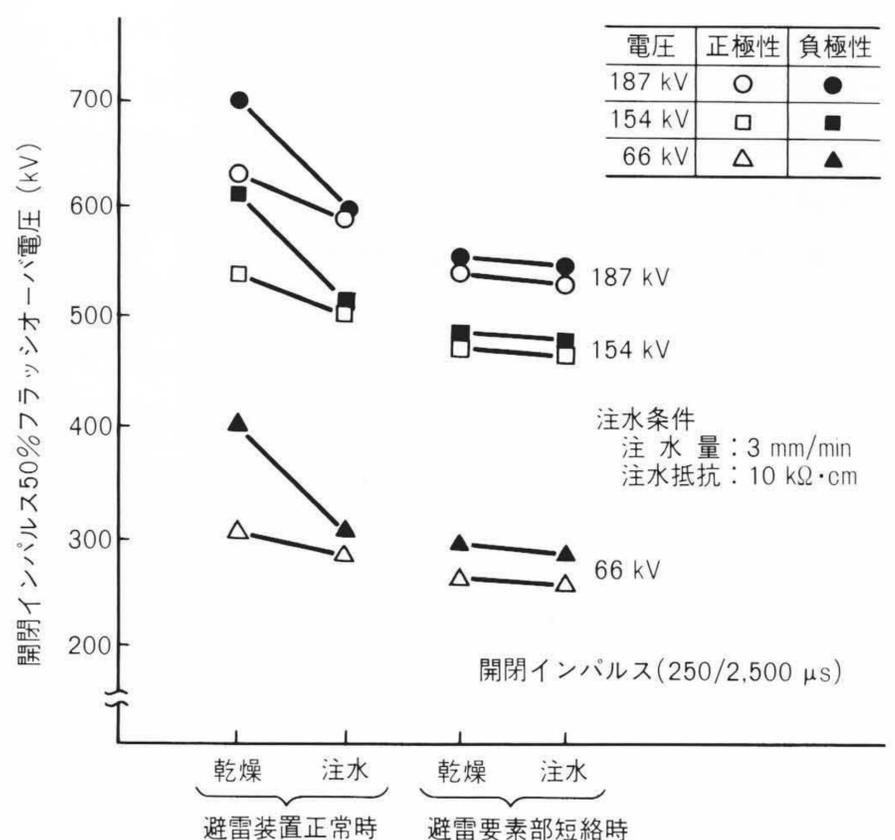
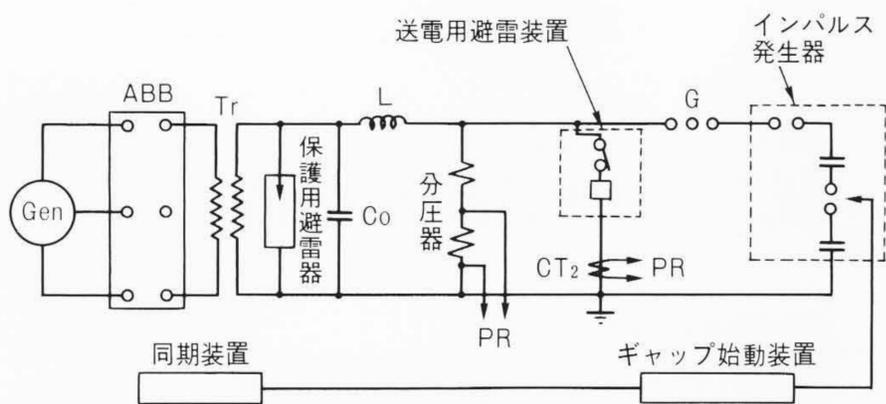


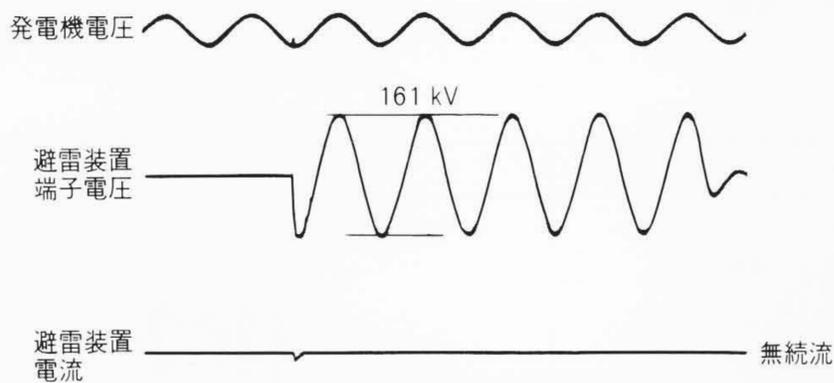
図6 送電用避雷装置の乾燥時と注水時の放電特性 避雷要素部が注水および短絡時には，直列ギャップ単一の放電特性に近づく。



注：略語説明など

Gen (150 MVA発電機), G (分離ギャップ)
 ABB (保護用空気遮断器), PR (電磁オシログラム)
 Tr (13.2 kV/350 kV変圧器), L (リアクトル),
 Co (コンデンサ)

(a) 送電用避雷装置の動作責務試験回路



(b) 154 kV送電用避雷装置の汚損時動作責務試験のオシログラム

図7 送電用避雷装置の動作責務試験回路と試験結果オシログラム
 避雷要素部の容器表面が汚損時でも、送電用避雷装置は無続流で遮断できる。

154 kV送電用避雷装置の防爆試験前後の状況を図8に示す。同図に示すように、避雷装置は破壊することなく耐えた。防爆試験時の通電電流は25 kA×0.2秒である。ポリマー容器は優れた防爆性能を持つことを確認した。

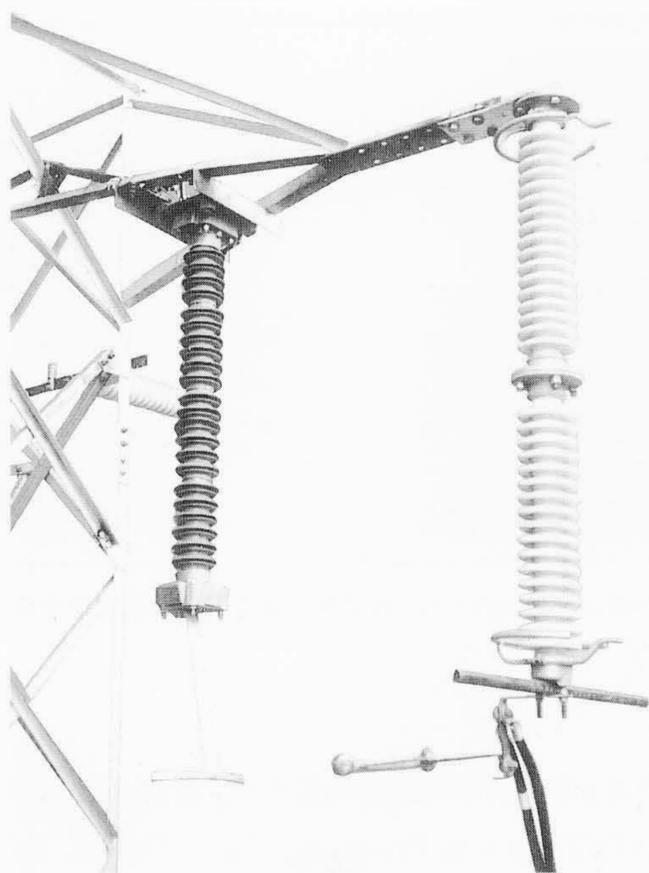
3.4 振動試験

送電用避雷装置は装柱方式により、電力線の微風振動を受けやすい方式と、受けにくい方式がある。ここでは避雷装置を鉄塔から取付金具で固定し、電力線の微風振動を直接受けない方式を対象とした。振動源として、風力に対して電気設備基準第63条「風圧荷重の種別とその適用」のがいし装置に適用される140 kg/m²(風速40 m相当)を考慮した。

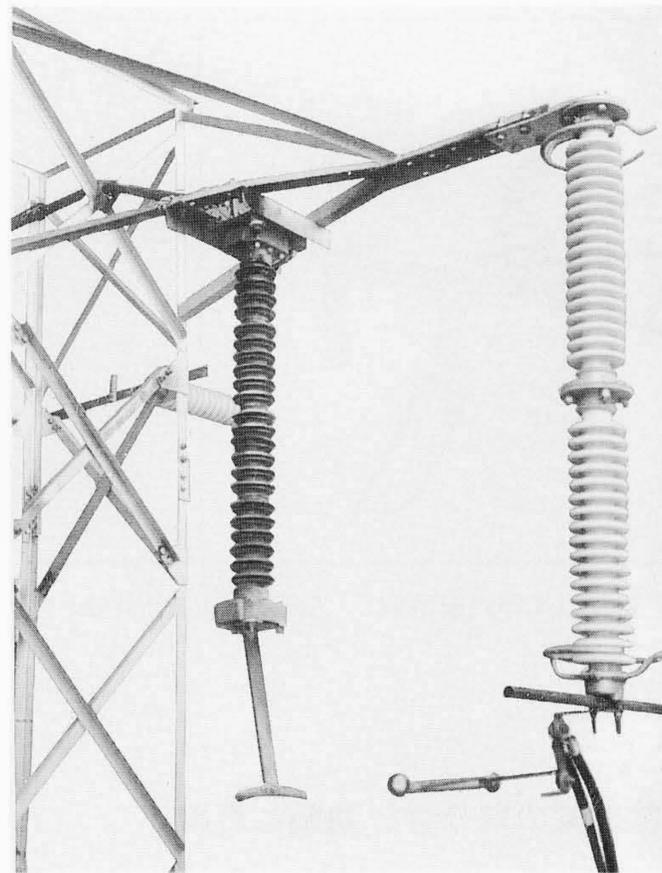
風圧力を避雷要素部の課電側の頭部変位に換算して、加振機で頭部変位を発生させた。加振時間は10分間風速で12回を想定し、2時間の連続加振とした。送電用避雷装置の振動試験状況と加振時のオシログラムを図9に示す。避雷装置は破損することなく耐えた。

4 送電用避雷装置の装柱設計

送電鉄塔には、送電線単純支持用の懸垂鉄塔と、送電線を引張り固定している耐張鉄塔の2種類がある。これらの鉄塔は地形、風、雪などの自然条件から種々の形状をしている。既設の送電線用支持がいし連に、酸化亜鉛形送電用避雷装置を適合させていく装柱設計が重要な要素となる。66 kV・154 kV・187 kV系統での具体的適用例を図10に示す^{8),10),11)}。



(a) 試験前



(b) 試験後

図8 154 kV送電用避雷装置の防爆試験 短絡電流通電時にも、ポリマー容器は一部黒化するだけで熱破損することなく耐えた。

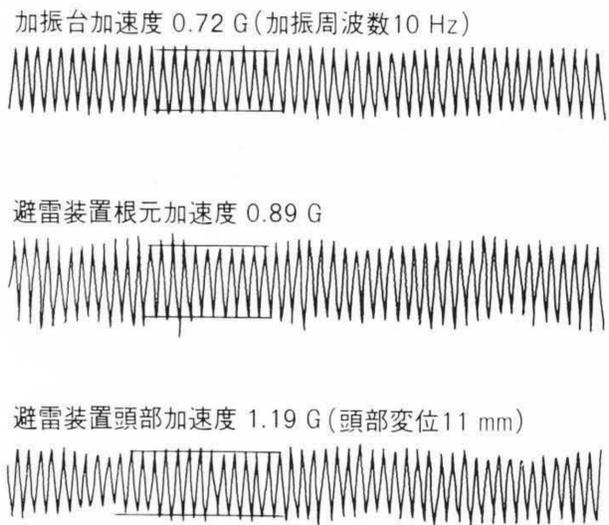
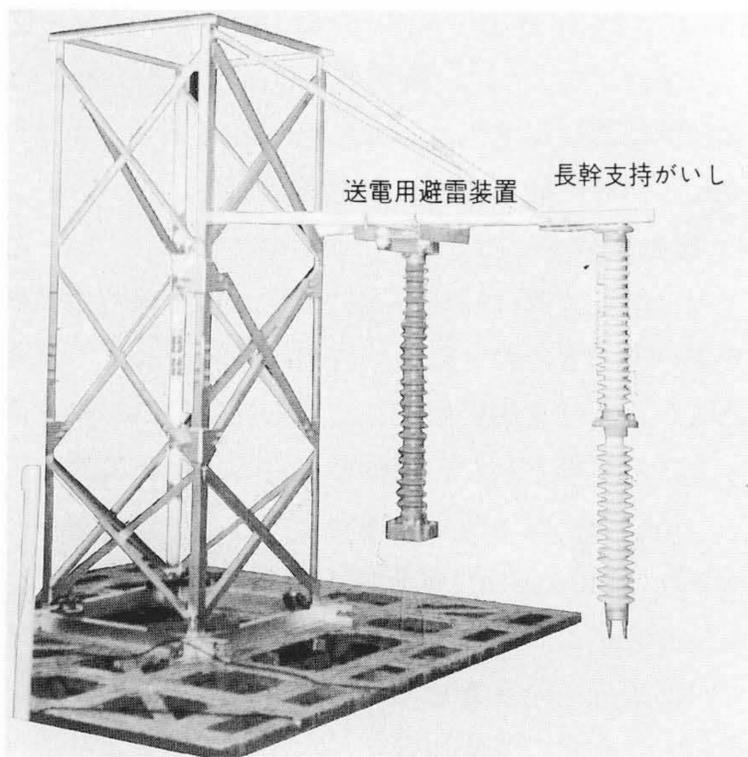


図9 送電用避雷装置の振動試験 避雷装置の風速荷重を頭部変位に換算し、加振機での試験状況と試験時のオシログラムを示す。

系統電圧	66 kV	154 kV	187 kV
懸垂がいし連			
耐張がいし連			

図10 送電用避雷装置の具体的適用例 懸垂がいし連、耐張がいし連への66 kV・154 kV・187 kV送電用避雷装置の適用例を示す。

5 送電用避雷装置の取り付け効果と責務

送電用避雷装置の課題は、送電線にいかに関雷装置の最適配置をして、送電線用支持がいし連のフラッシュオーバを防止できるかにある。ここでは、例として送電線に局部的に避雷

装置を取り付けた場合の雷サージ解析をEMTP (Electro Magnetic Transient Program)によって実施したので、送電用避雷装置の雷サージ抑制効果と動作責務について述べる。

5.1 雷サージ解析条件

雷サージ解析等価回路を図11に示す。避雷装置は鉄塔No.

D, No.Eの二つの鉄塔に局部的に取り付けた。送電線の絶縁は不平衡絶縁方式で、アークホーン長は低絶縁側1,335 mm (懸垂がいし連13個連), 高絶縁側1,927 mmである。雷撃電流波形は2/70 μsのランプ波とした。避雷装置は雷害事故率の低減を主目的として考え、低絶縁側配置で解析した。なお、避雷装置を高絶縁側に配置するか、低絶縁側に配置するかは適用線路の雷サージの保護目的から決められる。高絶縁側片回線を主保護目的として、送電用避雷装置の高絶縁側設置も考慮されている。

5.2 雷サージ解析結果

(1) 鉄塔雷撃の場合

避雷装置がないときは50 kAでフラッシュオーバーするが、避雷装置を付けると図12の雷撃電流とホーン間電圧に示すように125 kAまで協調がとれる。しかし、これ以上の雷撃電流になると隣接鉄塔でフラッシュオーバーが発生するようになる。

(2) 電力線雷撃の場合

避雷装置がないときは5 kAでフラッシュオーバーするが、避雷装置を付けると50 kAまで協調がとれる。しかし、これ以上の雷撃電流になると隣接鉄塔でフラッシュオーバーが発生するようになる。

(3) 避雷装置の責務

図13に示すように、鉄塔雷撃では避雷装置への放電電流、およびエネルギーとも小さく、支障のない値である。電力線雷撃では放電電流が雷撃電流の約85%となり、エネルギーも

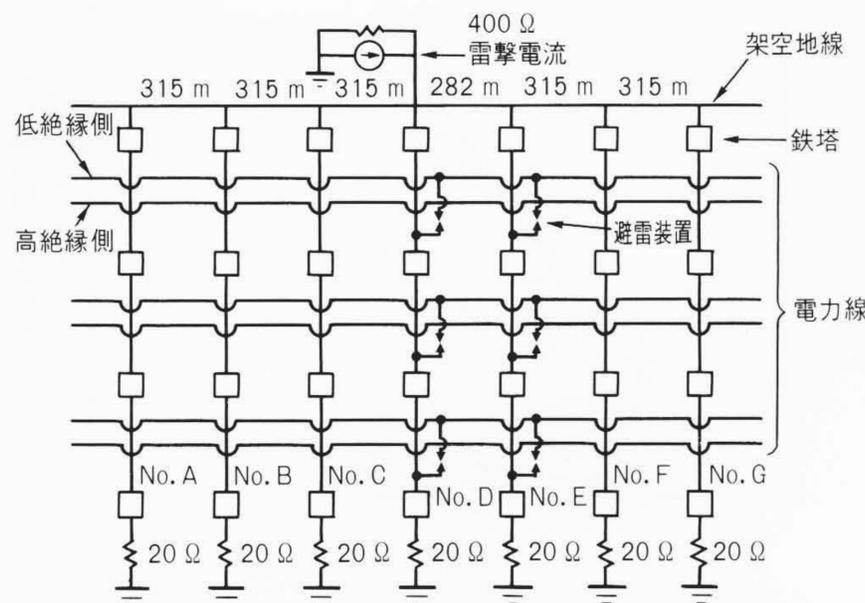


図11 雷サージ解析回路 送電用避雷装置を局部的に配置した雷サージ解析回路を示す。

大きくなる。避雷装置の責務を決定する際には、冬季雷などを考慮すると電力線雷撃が重要な要素となる。

6 275 kV送電用避雷装置の誘雷試験

送電用避雷装置の動作については、文部省科学研究費補助によるロケット誘雷実験グループによる誘雷試験に275 kV送電用避雷装置を供試して、検証試験を実施した。平成元年に北陸電力株式会社奥獅子吼試験線鉄塔No.30の1 L側に設置した275 kV送電用避雷装置を図14に示す。

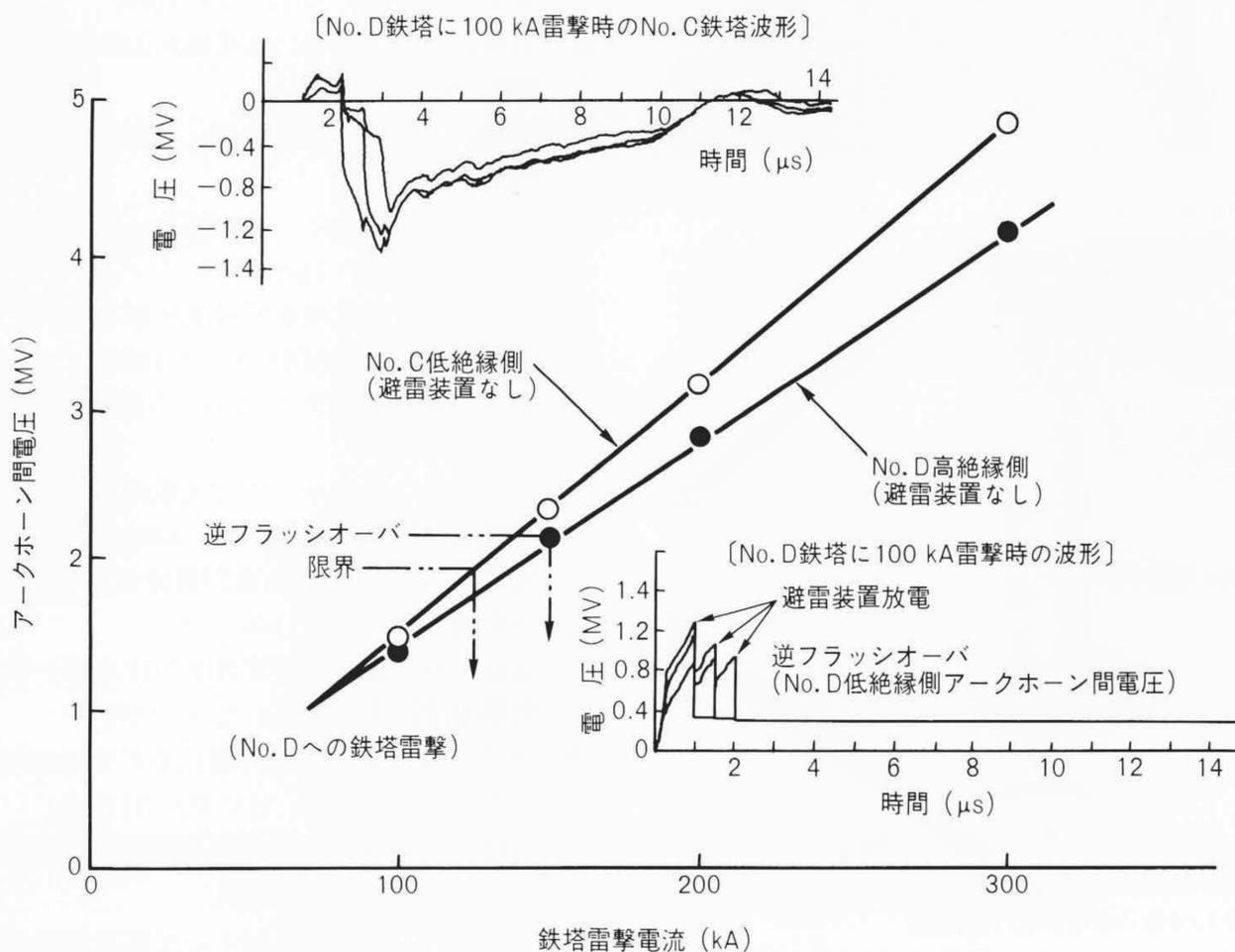


図12 鉄塔雷撃電流とアークホーン間電圧の関係 送電用避雷装置設置側の回線(No.D低絶縁側)では絶縁協調がとれ、125 kA以上になると設置していない隣接鉄塔(No.C低絶縁側)でフラッシュオーバーが発生する。

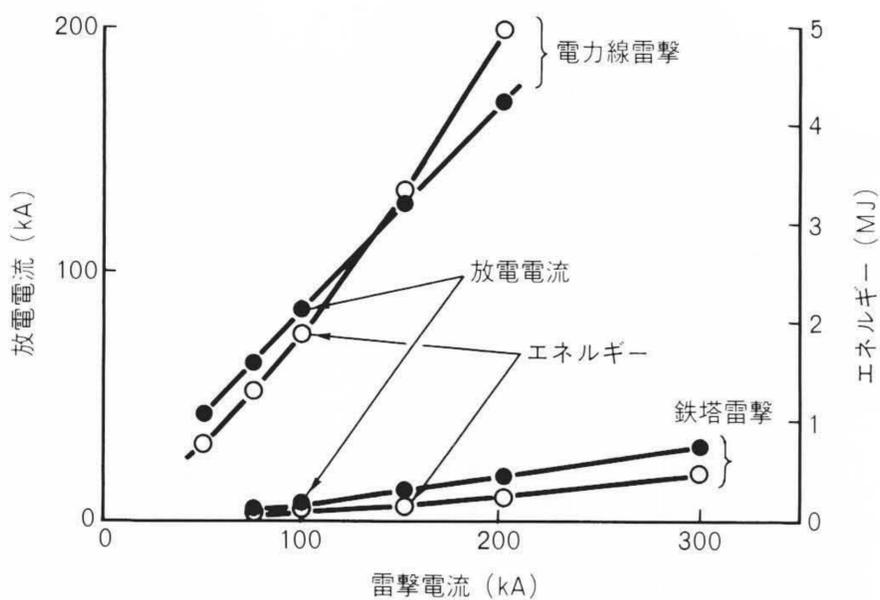


図13 鉄塔雷撃電流と避雷装置の放電電流とエネルギーの関係
鉄塔雷撃では放電電流，エネルギーとも避雷装置は耐える。しかし，電力線雷撃では過酷となる。

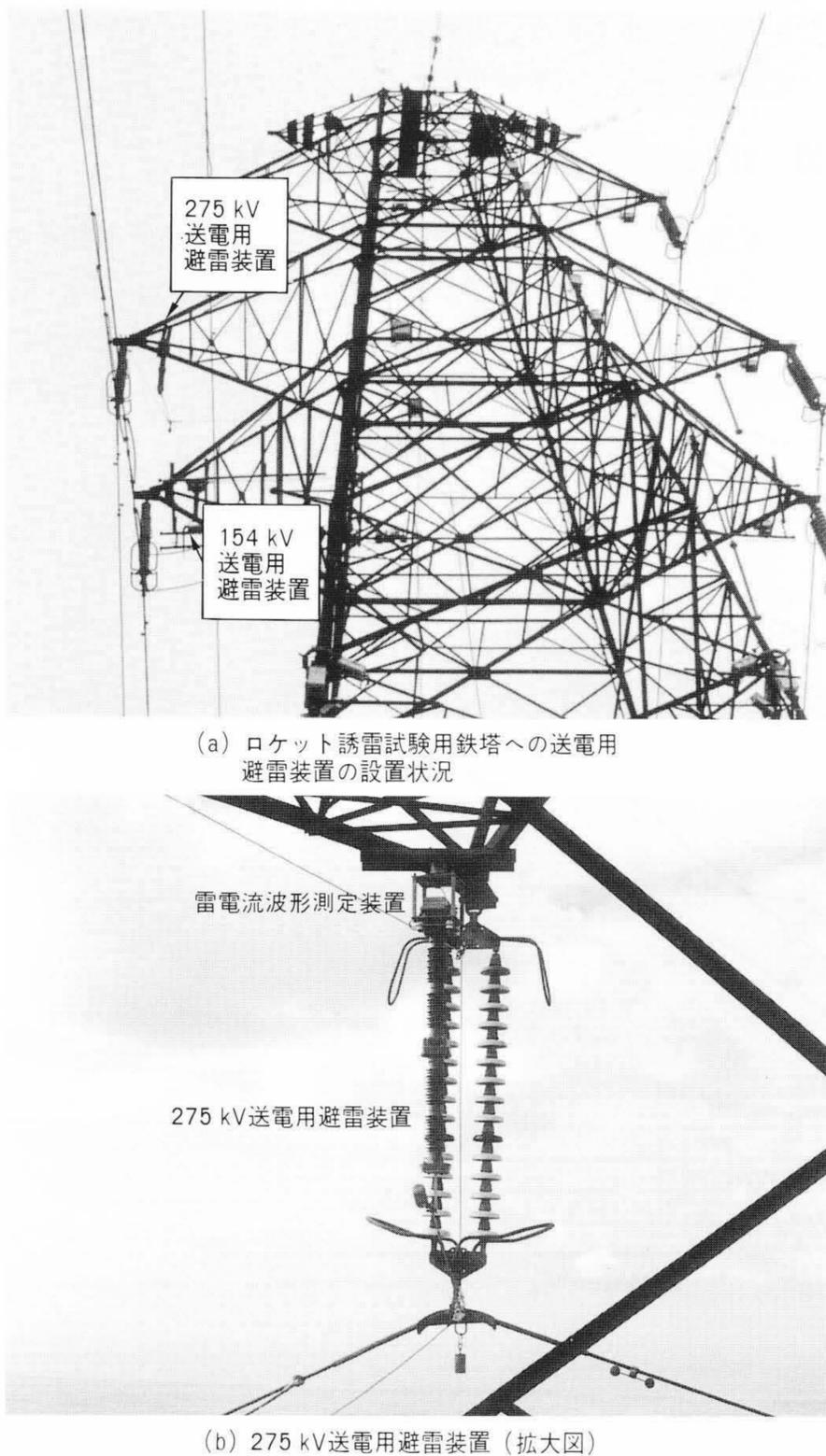


図14 誘雷試験鉄塔での275 kV送電用避雷装置の外観 北陸電力株式会社奥獅子吼試験線鉄塔で，ロケット誘雷試験用に設置した避雷装置を示す。

送電用避雷装置の動作検出は避雷装置の接地リード線からロゴスキーコイルによる雷電流波形の測定(メモリカードの回収)および磁気テープ式避雷器用動作記録器による雷撃電流の判定で行った。この条件でロケット誘雷によって冬季雷を鉄塔に誘雷させた結果7回の雷撃があり，最大54 kA，がいし間電圧は約200 kVであった。77 kVクラスでは鉄塔雷撃での動作(動作電流2.5 kA)が報告¹²⁾されているが，275 kV送電用避雷装置では検出感度以下であった¹³⁾。また，自然雷の冬季雷による鉄塔雷撃でも検出感度以下であった。電圧階級が高くなると，避雷装置の動作頻度が小さくなることが確認できた。これは系統電圧が高くなると雷によるトリップ事故率が小さくなることにも合致している。

7 結 言

高度情報化社会での電力供給の信頼度の面から，落雷による瞬時電圧低下対策の一つとして，送電線の雷害事故防止に適用できる送電用避雷装置の構成，特性，適用保護効果およびロケット誘雷試験結果について述べた。今後，送電用避雷装置は送電線の雷害防止機器として効果を発揮し，普及していくものと予測される。

終わりに，ご指導をいただいた北海道電力株式会社，北陸電力株式会社，中国電力株式会社および大学の関係各位に対し深謝する次第である。

参考文献

- 1) 井上：架空送電線の雷事故実績と対策，電気学会開閉保護装置研究会，No.SPД-90-8(1990)
- 2) 白川，外：避雷器の技術動向と応用技術，日立評論，70，8，855~862(昭63-8)
- 3) 白川，外：酸化物材料，OHM，第76巻，第10号，第964号(1989)
- 4) S. Sporn, et al.: Expulsion Protective Gaps on 132 kV Lines, AIEE, Jan.1935
- 5) 白川，外：送電用避雷装置の装柱設計，電気学会開閉保護装置研究会，No.SPД-90-11(1990)
- 6) 門谷：屋外用ポリマーがいしの現状，OHM，第76巻，第7号，第961号(1989)
- 7) 白川，外：長ギャップ付送電線用避雷器の遮断性能，平成元年電気学会全国大会，No.1396(1989)
- 8) 尾山，外：154 kV送電用避雷装置の実用化，平成2年電気学会全国大会，No.1246(1990)
- 9) 大石，外：送電用避雷装置の注水時の放電特性，平成2年電気学会全国大会，No.1234(1990)
- 10) 白川，外：66~275 kV酸化亜鉛形送電用避雷装置，電気学会高電圧研究会，No.HV-90-13(1990)
- 11) 中村，外：187 kV送電線用避雷器，平成元年電気学会北海道支部大会，No.64(1989)
- 12) 小西，外：冬季雷に対する送電用避雷装置の動作特性測定結果，電気学会高電圧研究会，No.HV-89-89(1989)
- 13) 堀井，外：154/275 kV送電用避雷装置の誘雷試験(その1)，平成2年電気学会全国大会，No.1239(1990)