# 避雷器の技術動向と応用技術

## Technology Trends and Applications of Surge Arresters

電力系統の過電圧保護装置として使用されている避雷器は、昭和50年代前半 に、優れた酸化亜鉛素子を使用した酸化亜鉛避雷器の出現によって、従来の直 列ギャップ付き避雷器から, 直列ギャップなしの避雷器へと大きな変革を成し 遂げた。当初,この酸化亜鉛避雷器も66~77kVクラスでスタートしたが、今や 全電圧系統の基幹変電機器の過電圧保護装置として,機能を発揮している。更 に、最近の半導体機器の普及に伴い、電力の瞬時電圧低下がクローズアップさ れてきており、これを解決する一つの方法として、送電線の雷害事故防止のた め、送電線の鉄塔上に避雷器を設置して、がい子連のフラッシオーバを防止す ることが試みられる時代となった。本稿は、避雷器の技術動向と応用技術につ いて述べる。

白川晋吾\* Shingo Shirakawa 中野幸一\* Kôichi Nakano 小沢 淳\*\* Jun Ozawa 山崎武夫\*\* Takeo Yamazaki

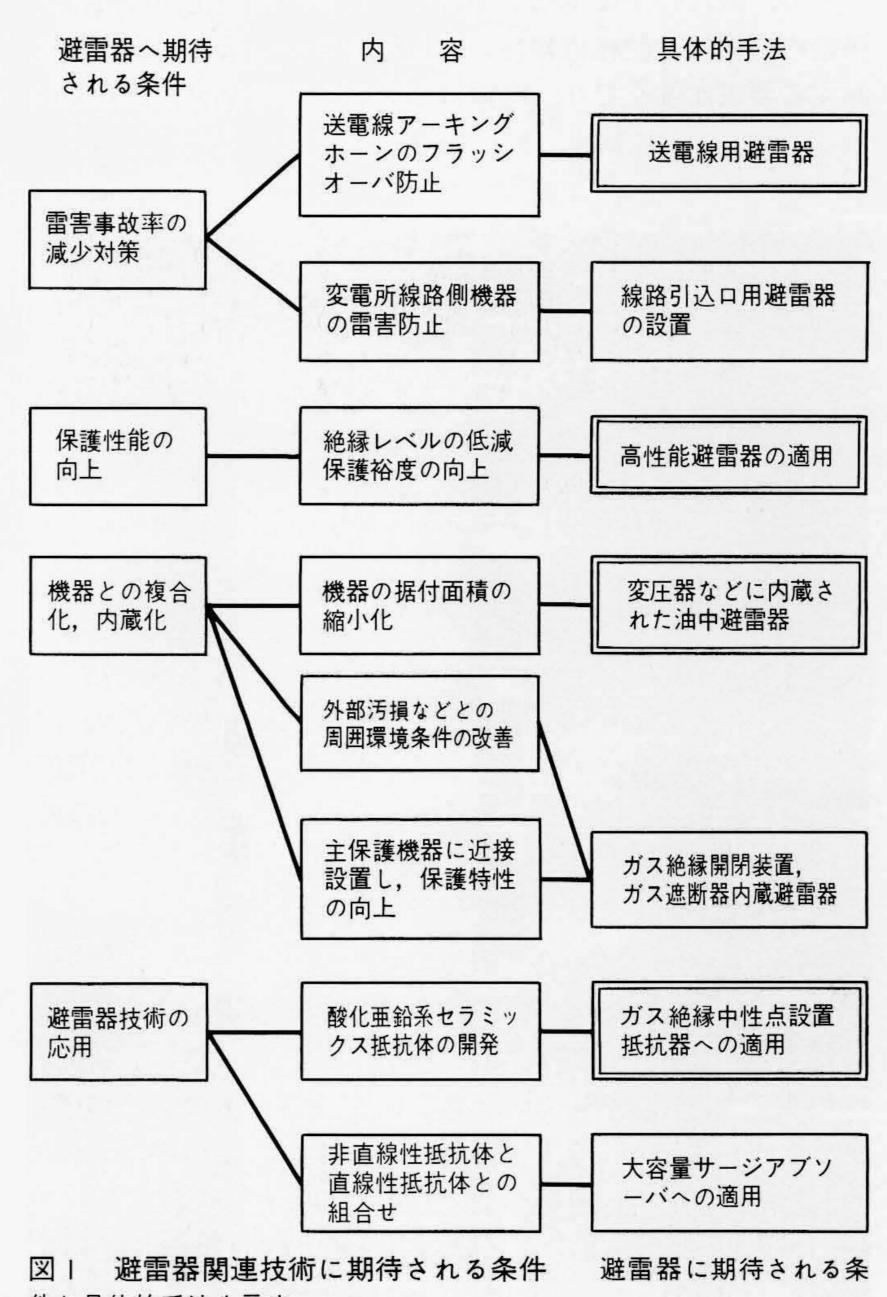
避雷器の技術は歴史的にみると三つの大きな発展段階を経 験している。第1段階は、特性要素に電解液を使用した酸化 アルミニウム製特性要素の使用による続流の抑制, 第2段階 は、特性要素に電解液に代わる焼成体抵抗のSiC(炭化ケイ素) の使用による小形化、第3段階は、非直線電圧-電流特性の優 れた酸化亜鉛素子を用いて、直列ギャップ部分を省略した酸 化亜鉛避雷器適用の3段階を経験している。

一方, 最近の避雷器に期待される条件としては, 避雷器自 身の保護性能の向上, 雷害事故率の減少対策としての避雷器 の適用,機器との複合化,内蔵化,更に,避雷器製作技術の 応用があり、これらを整理して図1に示す。当初は避雷器の 用途も,変圧器の雷サージ保護用が主であり,構造は,がい 子形であったが, ガス絶縁開閉装置の普及に伴う接地タンク 内に封入されるSF<sub>6</sub>ガス絶縁タンク形,更に,油変圧器内に組 み込むものなどの開発が推進された。これらはいずれも発変 電所構内機器に適用されたものであったが、最近は送電線へ の落雷による瞬時電圧低下を防止するため, 送電線の鉄塔上 に避雷器が設置される時代を迎えるようになった。

そこで、避雷器の技術動向として、新しい用途である送電 線用避雷器及び酸化亜鉛避雷器の高性能化技術に加え、避雷 器の予測保全技術について述べ、合わせて避雷器の応用技術 としての,酸化亜鉛系セラミックス抵抗体素子開発によるガ ス絶縁中性点接地抵抗器の実用化について述べる。

### 避雷器の技術動向

電力系統での避雷器の役割は自然現象である雷によるサー ジ,系統条件からくる開閉サージに対して,過電圧を抑制し, 発変電機器を過電圧から保護することにある。また, 過電圧



件と具体的手法を示す。

<sup>\*</sup> 日立製作所国分工場 \*\* 日立製作所日立研究所

の抑制レベルをどの位置に設定するかで機器の建設コストが 左右される。このため、保護特性の優れた避雷器が求められ る。発変電所での被保護機器としては、変圧器、ガス絶縁開 閉装置、線路側遮断器などがあります。

近年,避雷器が技術的にブレークスルー(技術突破)した要因として,次に述べる二つがある。

第一は避雷器の特性要素に非直線電圧-電流特性の優れた酸化亜鉛素子を適用し、直列ギャップを省略して、従来の直列ギャップ付き避雷器の放電開始電圧特性を不要にし、避雷器の基本特性であるサージに対する応答特性を改善し、更に、放電したとき電源から供給される続流をなくして、避雷器の続流遮断性能を改善したことにある<sup>1)</sup>。

第二は酸化亜鉛素子の課電寿命特性を酸化亜鉛素子の境界層部分の酸化ビスマス相を、酸化亜鉛粒子の周囲に適切な熱処理することによって全体的に形成させることで、酸化亜鉛素子の高寿命化を図り<sup>2)</sup>、UHV用避雷器<sup>3)</sup>まで適用できるように酸化亜鉛素子の改善を行ったことにある。この技術が活用されたものとして、図2に示すようなカナダの電力会社HydroQuebec社納め735 kV系統用がい子形酸化亜鉛避雷器があり既に2年以上の運転実績を持っている。

一方,最近の半導体機器の普及,社会の高度化から,電力供給の信頼性,絶縁信頼性の向上の観点から雷サージ保護に対する要求が強くなり,避雷器に対する期待が大きい社会的

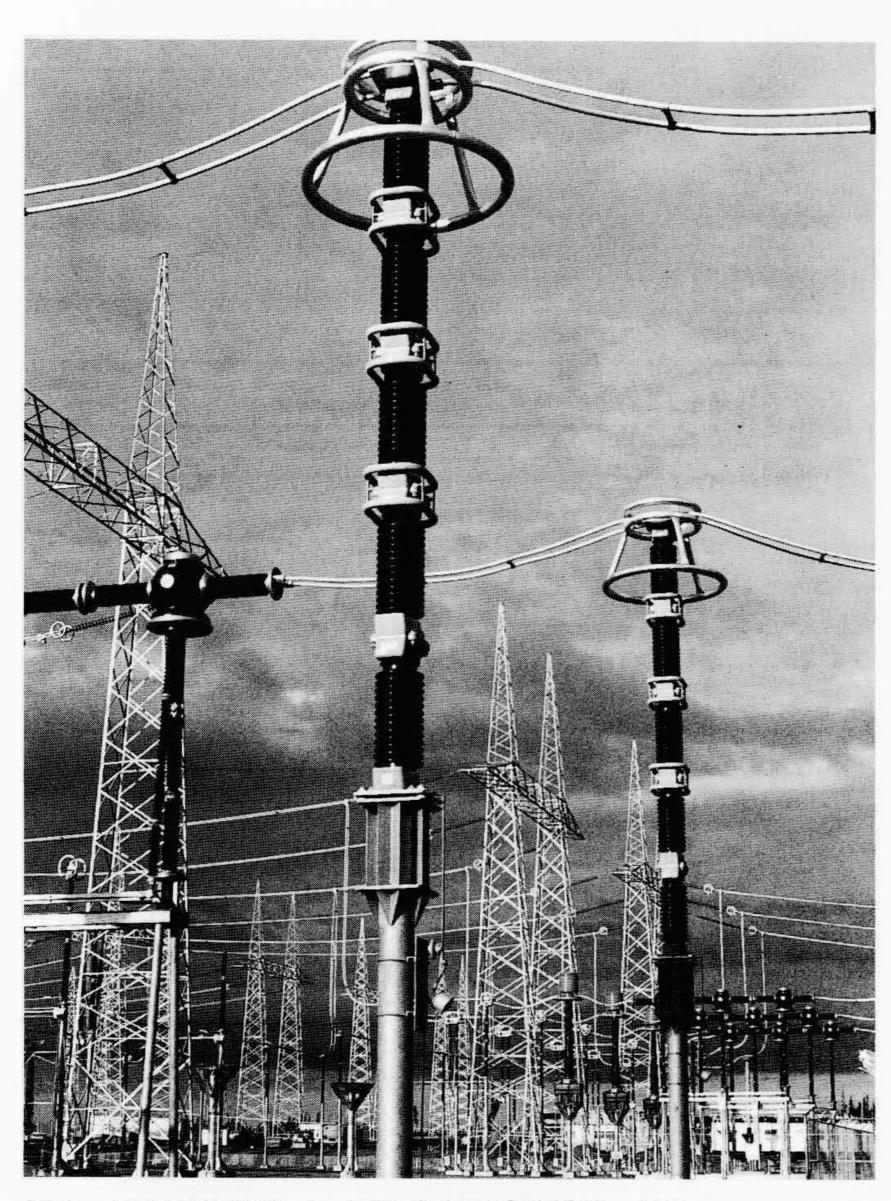


図 2 735 kV系統用がい子形酸化亜鉛避雷器の外観 カナダの電力会社Hydro Quebec社で稼動中の避雷器を示す。

な背景が出てきた。

#### 2.1 送電線用避雷器

送電線の瞬時電圧低下原因として雷によるものが60%,残りが他物接触,その他の要因によるものである。この瞬時電圧低下によって電圧が20~50%低下すると,その継続時間が数ミリ秒~数十ミリ秒であっても,需要家機器の中でコンピュータ,ロボット,マグネットスイッチを使用している電動機,道路などで使用している高圧放電ランプは停止することがある。このような状況から,雷による瞬時電圧低下の防止が切望される時代となってきた。これは送電線に過酷な雷撃を受けると送電線支持の懸垂がい子連の耐圧を上回る電圧が発生し,地絡に至る現象であり,この過電圧を避雷器で抑制することによって,雷による地絡を防止することができる。

送電線用避雷器としての構成は直列ギャップ付きのものと、 ギャップなしのものの2種類が考えられている。ここでは、 雷サージ保護特性が優れ、かつ送電線への避雷器の並列設置 による放電耐量の向上が期待できるギャップなし送電線用避 雷器を開発したので、以下、送電線用避雷器の基礎的検討事 項について述べる。

#### (1) 送電線用避雷器と懸垂がい子連との絶縁協調

送電線への落雷現象としては、架空地線や鉄塔への落雷による逆フラッシオーバによるものと、雷が電力線の側方から侵入する直撃雷によるものの2種類がある。図3に110kV送電線鉄塔で塔頂への雷撃電流100kA、波形2/70μsで試算した計算結果を示す。これらの計算結果を基にして、避雷器の制限電圧と懸垂がい子連のアークホーンのギャップ長を決めた。避雷器の制限電圧は、JEC-217-1984規定値よりも20%高くして、懸垂がい子連との協調を採っている。これは避雷器の不要な動作を少なくし、保護協調を図るためである。

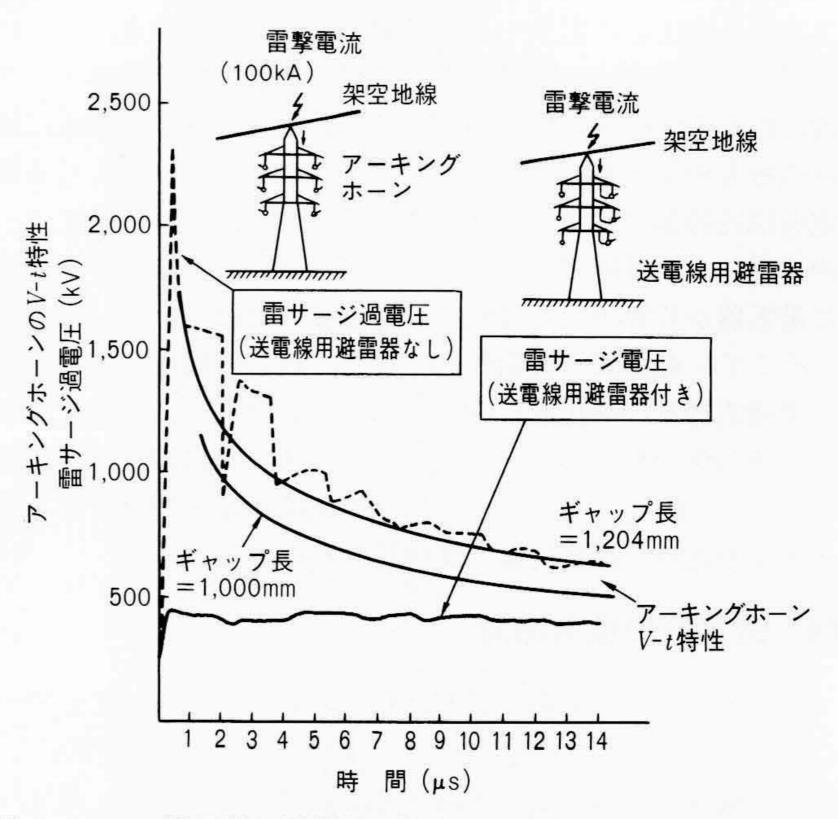


図3 110 kV送電線用避雷器と懸垂がい子連との絶縁協調 鉄塔雷撃100 kAの場合にあっても、送電線用避雷器によって雷サージ過電圧は抑制され、懸垂がい子連(アーキングホーン)部は放電しないで絶縁協調がとれることを示す。

#### (2) 送電線用避雷器の設置条件

送電線避雷器の設置条件として、(1)避雷器には送電線を支持させない。(2)放電ばらつきのないギャップレス酸化亜鉛避雷器とする。(3)耐候性に優れたがい管を使用する。(4)過大な雷サージ吸収時に爆発飛散しない防爆構造とする。(5)万一、過大なサージ吸収時には送電線から切り離し、送電が継続できることなど4)を条件として設計されている。

#### (3) 送電線用避雷器の構成

送電線用避雷器の構成は,図4に示すように送電線用避雷器を鉄塔アームの内側に配置し,避雷器と電力線の接続は電力線用支持がい子との間に切り離し装置を内蔵したリード線を介して接続し実用化した。

#### (4) 送電線用避雷器の構造

送電線用避雷器は発変電所用避雷器に対し、設置条件の制 約から小形化が必要となる。酸化亜鉛素子とがい管との空間 の最適化などにより、発変電所用に比べて、重量で約60%に 軽減させた。送電線用避雷器と発変電所用避雷器の特性比較 を表1に示す。

#### (5) 雷インパルスに対する保護協調

送電線用避雷器と懸垂がい子連での保護協調試験を急しゅ ん雷インパルス電流及び標準雷インパルス電流を対象として

大 NO KV 送電線用避雷器

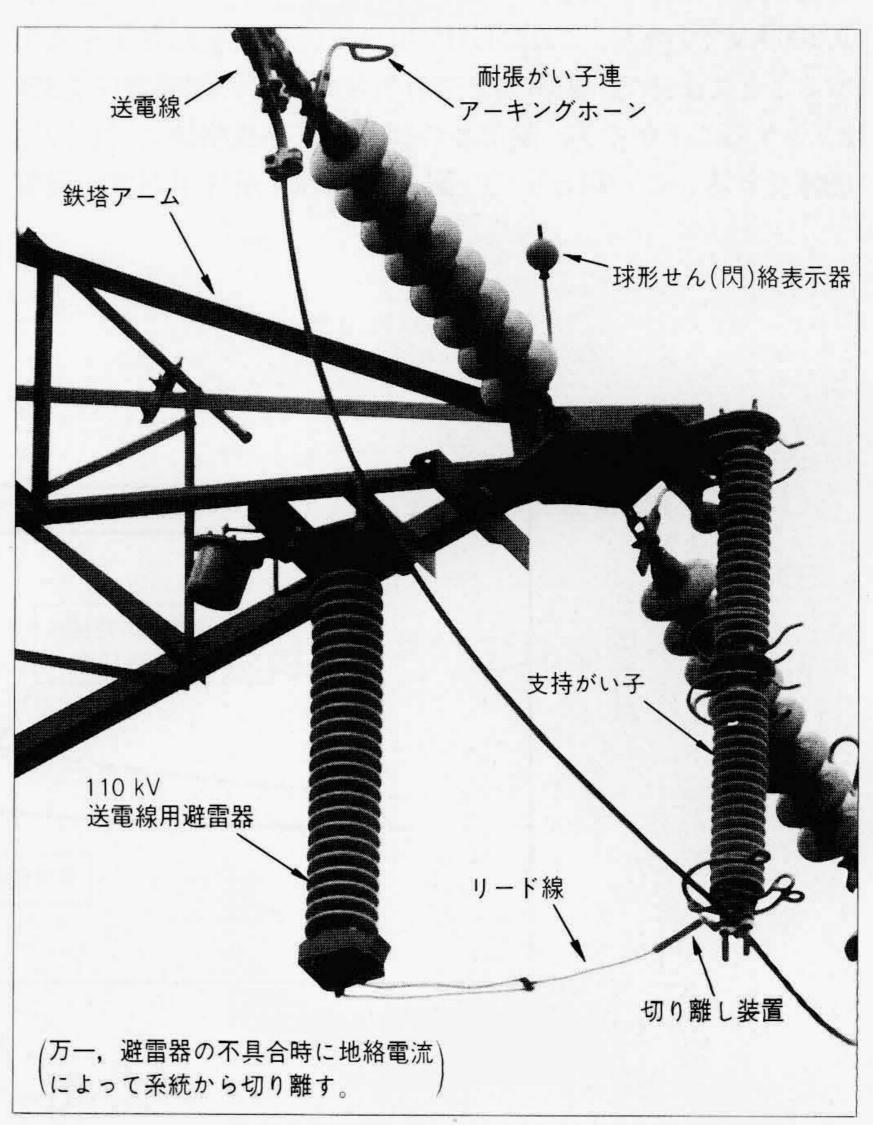
(a) 送電線鉄塔上の避雷器

図4 送電線用避雷器の構成 送電線の鉄塔上に配置された避雷器を示す。

実施した。図5に送電線用避雷器の応答試験(10 kAにおける制限電圧特性)と懸垂がい子連のフラッシオーバ特性を示すように、絶縁協調が取れることが分かる。

表 | 送電線用避雷器と発変電所用避雷器の比較 送電線用避雷器は発変電所用避雷器に対し、小形・軽量化が図られている。

No.	項目	発変電所用避雷器	送電線用避雷器
1	系統電圧(kV)	110	110
2	制限電圧(kV)	448	538
3	課電率	0.47	0.43
4	重量比	100	60
5	寸 法	Ø 260	φ215 1.430



(b) 送電線用避雷器拡大図

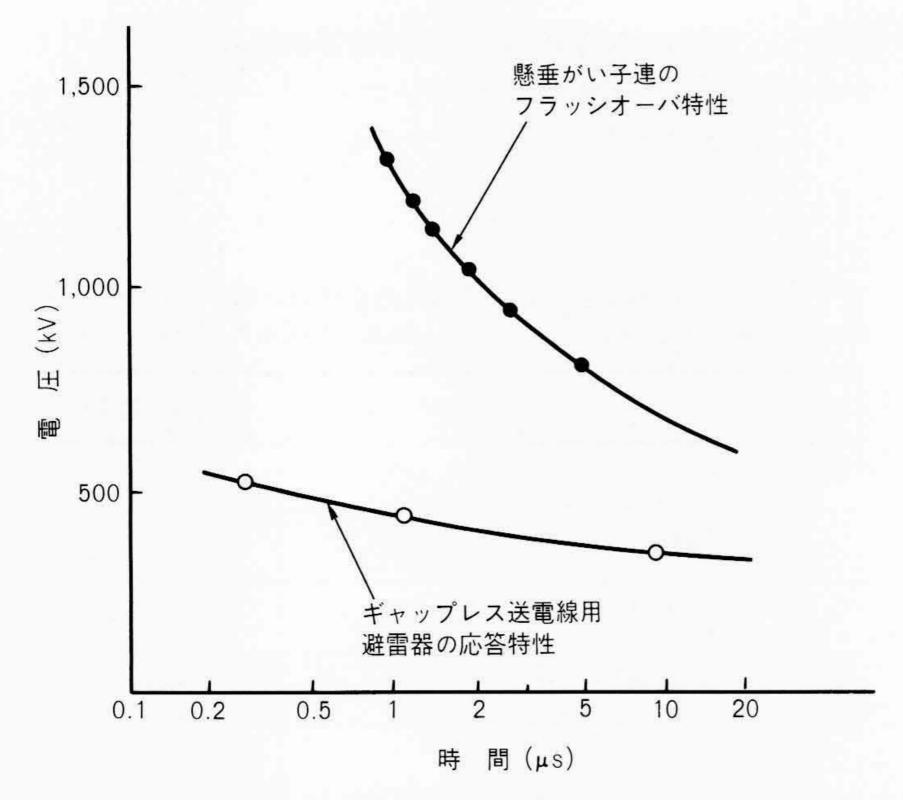


図5 110 kV送電線用避雷器の応答試験と懸垂がい子連のフラッシオーバ特性 送電線用避雷器によって、雷サージ過電圧は懸垂がい子連のフラッシオーバ電圧以下に抑制される。

#### 2.2 避雷器の高性能化による低保護レベルの実現

先に、UHV用酸化亜鉛形避雷器の基本性能が検討され、プロトタイプ避雷器の開発が行われ、この結果、高性能酸化亜鉛素子が開発された。例えば、現行避雷器規格JEC-217-1984では500 kV系統用避雷器の公称放電電流での制限電圧は1,220 kVであるが、これにUHV用高性能酸化亜鉛素子を適用することによって、避雷器の公称放電電流での制限電圧を870kVとすることができ、避雷器の制限電圧を規格値に対し30%低減できる。この例として、図6に500 kV系統用高性能避雷

器の制限電圧-電流特性を示す。この避雷器の実用化により、LIWL(雷インパルス耐電圧レベル)を1,550 kVから1,425 kV へ低減することやGISなどの被保護機器との保護裕度の増大も可能となった。以下、避雷器の高性能化のため、実施した構造及び代表的特性について述べる。

#### (1) 500 kV系統用高性能避雷器の構造

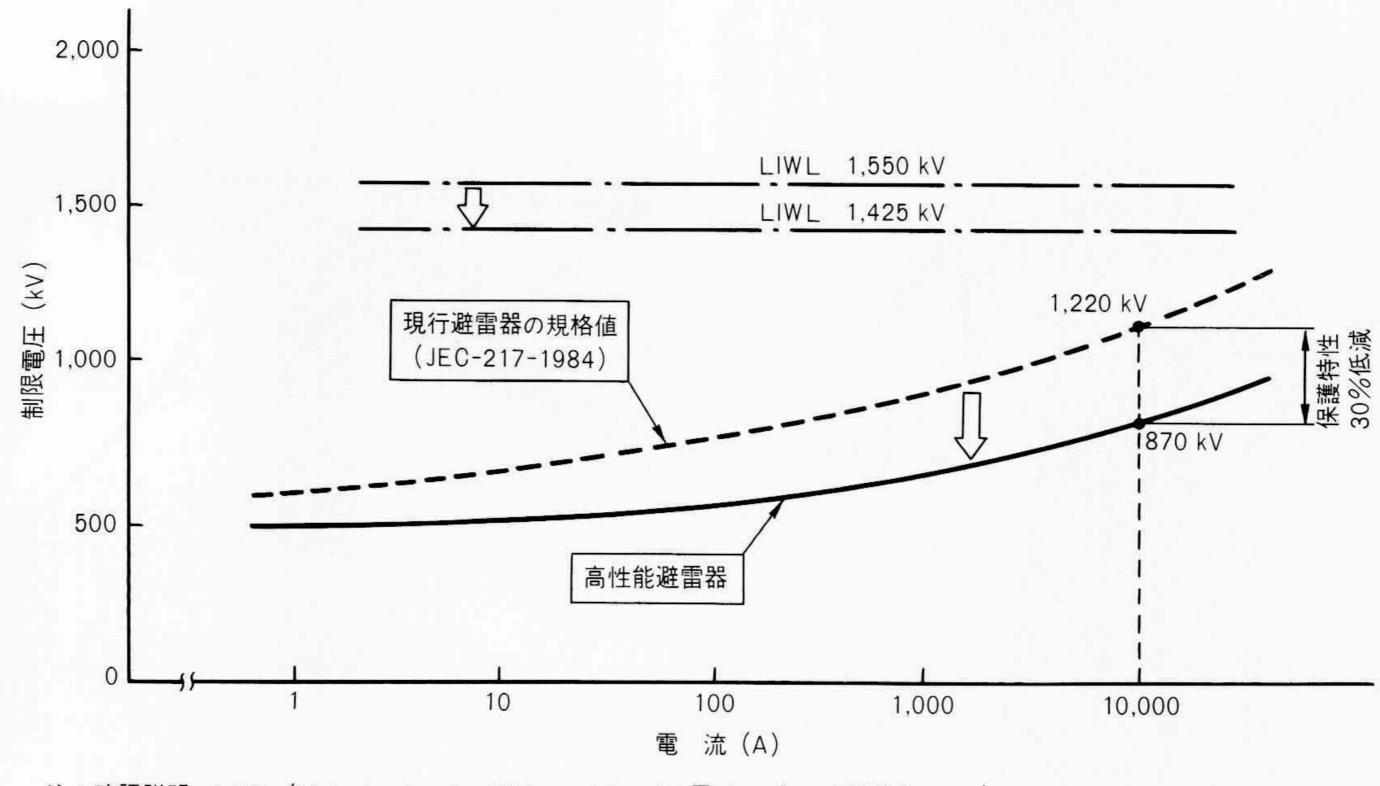
高性能避雷器の構成は図7にガス絶縁開閉装置用500 kV系統用高性能避雷器の内部構造を示すように、タンク内に高性能酸化亜鉛素子を4柱に配置し、これらを直列接続して積み重ねてある。更に、電圧分布補正用同心上金属シールドを頭部に設けて、酸化亜鉛素子間の電位分布の均一化を図った簡素な構造である。

#### (2) 500 kV系統用高性能避雷器の主な特性

従来,避雷器の制限電圧特性については14 kV単位の分割単位避雷器の評価で行ってきた。タンク形高性能避雷器の実用化に際して,14 kV単位の分割単位避雷器の制限電圧測定と500 kV系統用高性能避雷器の実規模器での制限電圧の等価性をも確認して,避雷器の制限電圧特性を求めた。

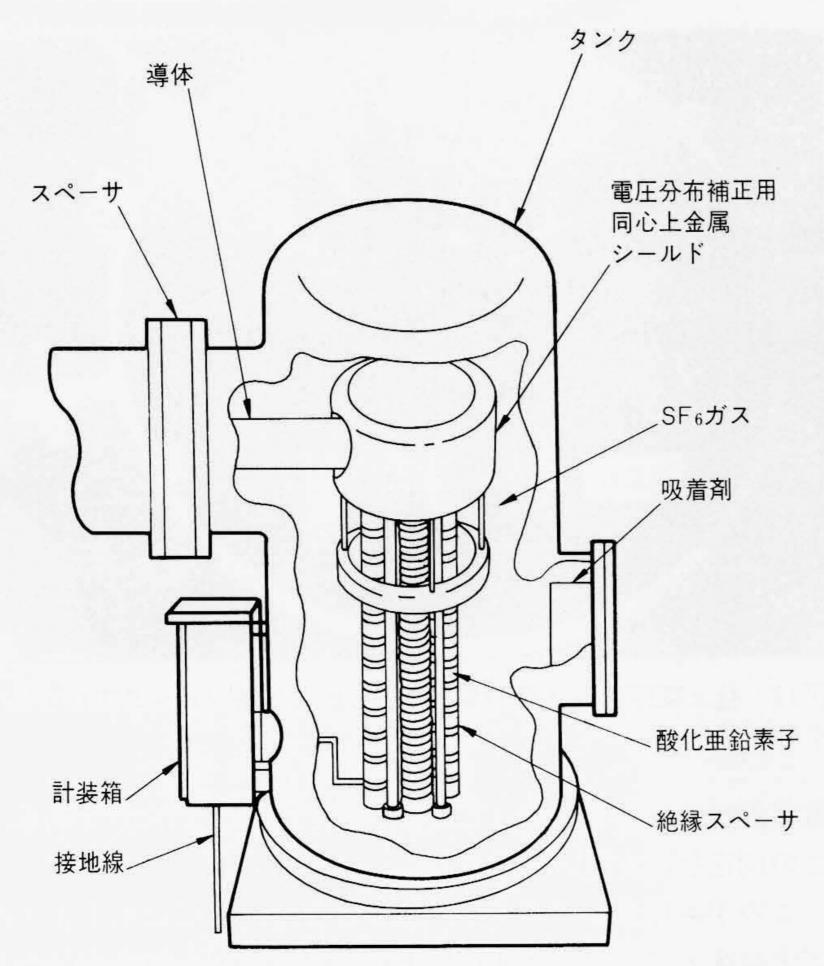
図8に500 kV系統用高性能避雷器の実規模器に、避雷器放電電流10 kAの通電試験を行っている試験状況を示す。図9には500 kV系統用高性能避雷器の制限電圧特性を、14 kV単位の分割単位避雷器と実規模器の測定データの対比で示す。実規模器での測定結果は、14 kV単位の分割単位避雷器の外挿と一致する。

500 kV系統用高性能避雷器の実用化に対しては漏れ電流試験,動作開始電圧試験,雷サージ動作責務試験,開閉サージ動作責務試験,安定性評価試験及び放熱特性試験を実施し,実用性能を確認した。なお,高性能避雷器についての適用上の課題の一つに,商用周波短時間過電圧特性があり,この試験結果を図10に示す。実系統での値は1.5 pu×0.2秒程度を想



注:略語説明 LIWL (Lightning Impulse Withstand Level:雷インパルス耐電圧レベル)

図 6 500 kV系統用高性能避雷器の制限電圧-電流特性 高性能避雷器は従来避雷器に対し,保護特性を規格値に対し30%低減している。



500 kVガス絶縁開閉装置用高性能避雷器の内部構造 高性能避雷器の内部構造を示す。

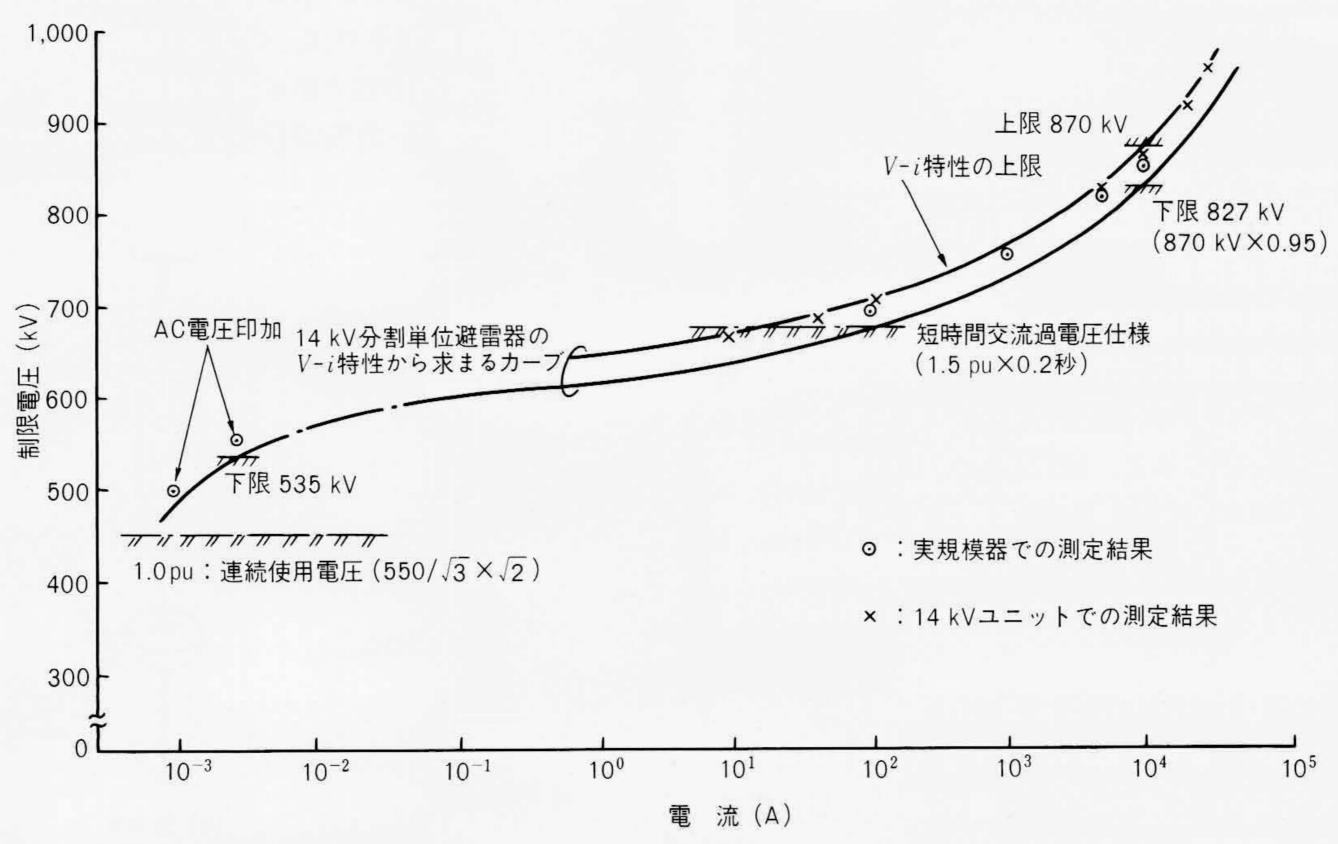
定している。図11には実系統でフィールド試験中の500 kV系 統用高性能避雷器を示している。

#### 2.3 变圧器内蔵避雷器

環境調和や美観上の観点から、避雷器の適用例として、柱 上変圧器や、電力用変圧器の一部に避雷器が油中に配置され て使用されている。変圧器用避雷器では油中高温での酸化亜



避雷器の 図 8 500 kV系統用高性能避雷器の制限電圧試験状況 公称放電電流10 kA通電中の試験状況を示す。



14 kV分割単位避雷器と500 kV完成品で測定し 500 kV系統用高性能避雷器の制限電圧-電流特性 た制限電圧は一致する。

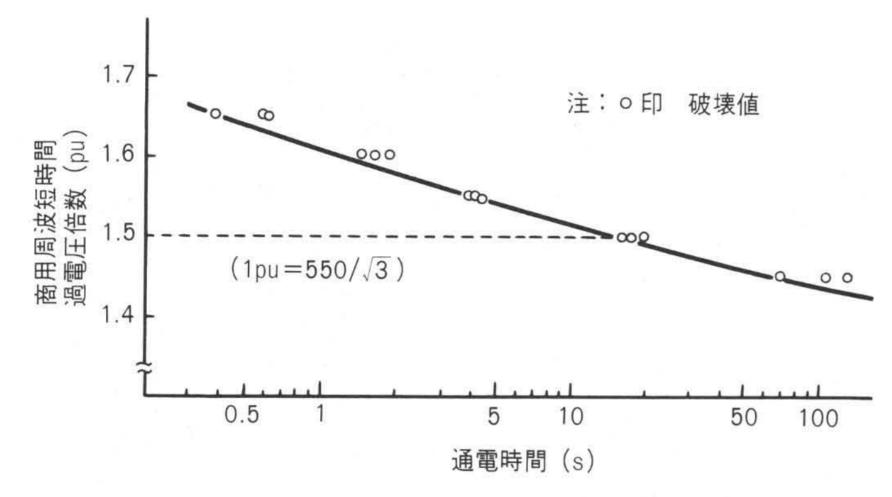
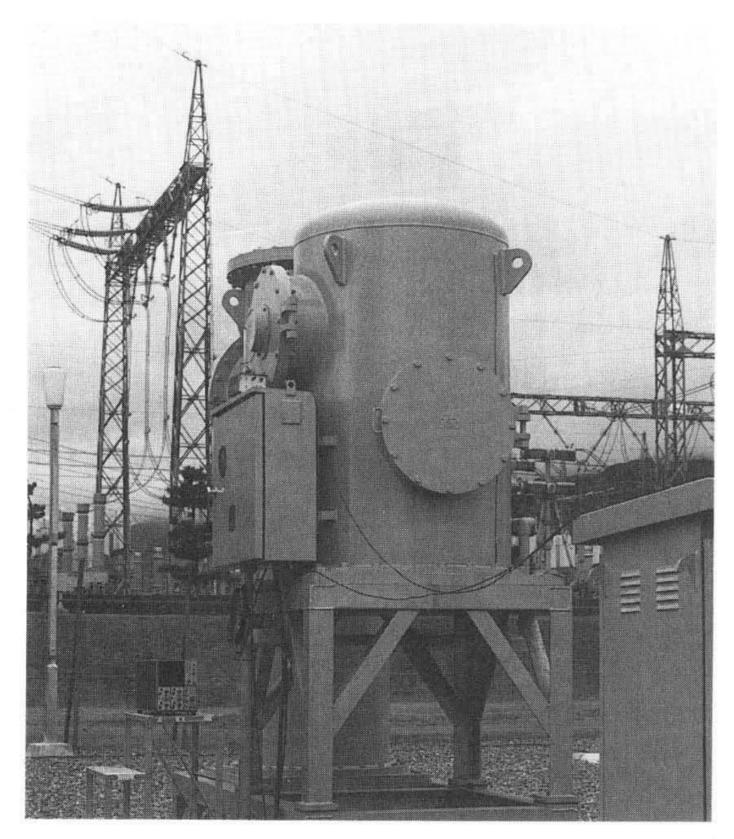


図10 500 kV高性能避雷器の商用周波短時間過電圧特性 商用周波過電圧を印加した場合の耐量特性を示す。



図II 500 kV系統用高性能避雷器の外観 実系統での高性能避雷器を示す。

鉛素子の課電寿命特性について十分な検討が行われている。 柱上変圧器保護用の避雷器の適用例を**図12**に示す。

#### 2.4 避雷器の予測保全技術

避雷器の使命は過電圧保護装置として機能することであるが、避雷器には常規運転電圧が印加されていることから、避雷器の健全性を判定できる予測保全技術が必要となる。

酸化亜鉛避雷器が劣化すると、酸化亜鉛素子の境界層の電 位障壁が低下し、抵抗分電流が著しく増加することが加速試 験結果から知られている。このことから、避雷器の健全性は 避雷器に流れている漏れ電流変化を検出することで判定でき る。

この検出方法について、従来は避雷器の接地線の一部を開放して測定していたが、最近は**図13**に示すように、接地線にクランプ形の変流器を用いて、これに可搬形避雷器漏れ電流測定器を使用して、避雷器の点検を実施している<sup>5)</sup>。この可搬形漏れ電流測定器は、全漏れ電流及び第三高調波を介しての

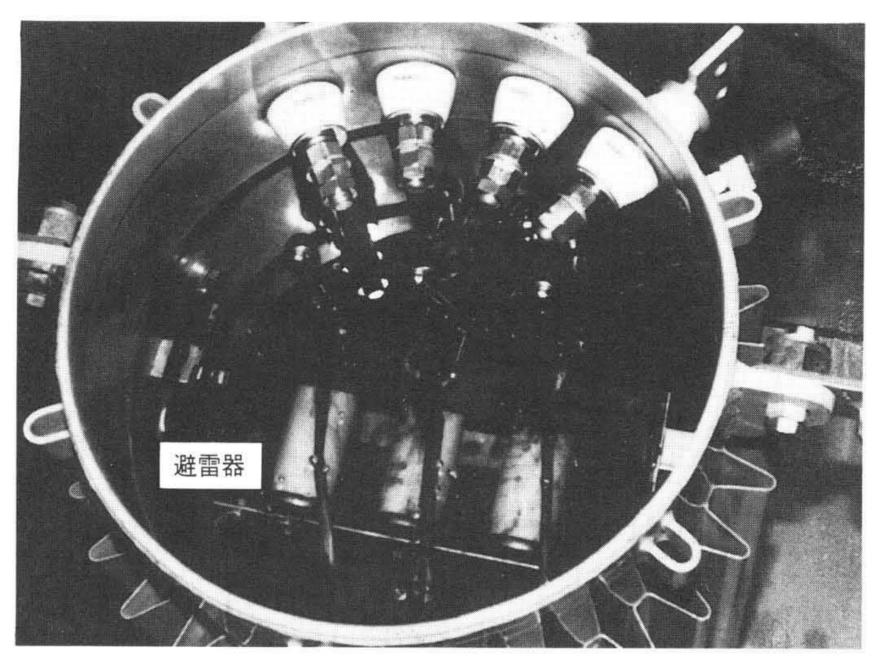


図12 柱上変圧器保護用避雷器 油中に設置された避雷器の例を 示す。

避雷器の抵抗分電流のいずれもが表示できるようにしてある。 この測定状況を**図14**に示す。

この予測保全はオフライン式であるが、図15に示すようにアナログ・ディジタル変換器とコンピュータを組み合わせることによってオンライン化して避雷器漏れ電流の経時変化をブラウン管の画面に表示することができる。避雷器の健全性を一目で判定できる。この状況を図16に示す。

#### 3 酸化亜鉛避雷器の応用技術

上述したように、優れた非直線電圧-電流特性を持つセラミックス非直線性抵抗体の酸化亜鉛素子を電力用避雷器に適用した稼動実績が蓄積されてきた。そこで、これらの技術を更に発展させ、新しい材質として、直線性の電圧-電流特性を持つ酸化亜鉛系セラミックス抵抗体素子を新たに開発した6。

この酸化亜鉛系セラミックス抵抗体素子の微細構造を、避雷器用酸化亜鉛素子と対比して図17に示す。酸化亜鉛系セラミックス抵抗体素子では、避雷器用酸化亜鉛素子が優れた非直線の電圧-電流特性を示す境界層部分をなくして、セラミックス抵抗体の電圧-電流特性に直線性を持たせた。この酸化亜

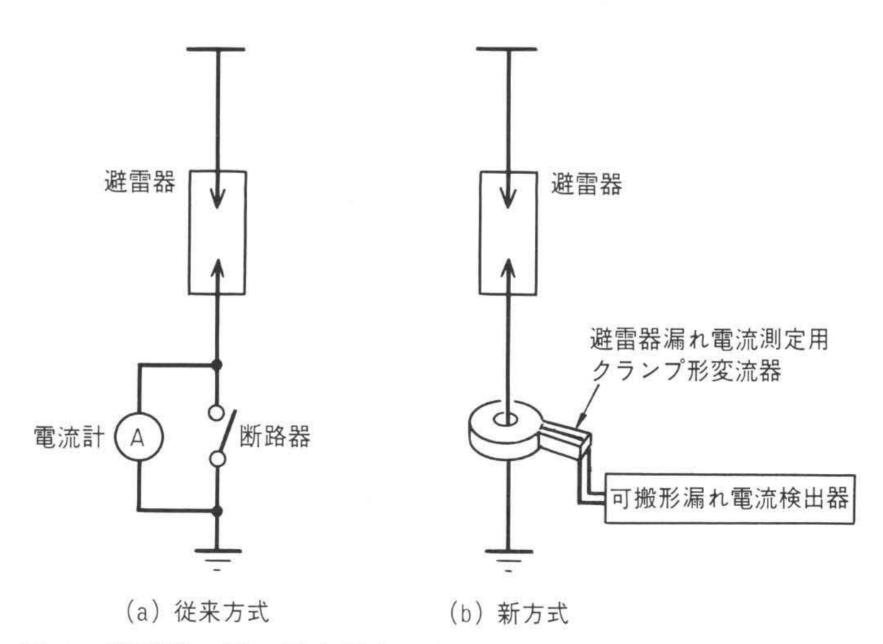


図13 避雷器の漏れ電流測定方法 避雷器漏れ電流の測定方式を 従来方式と対比して示す。



図14 実フィールドにおける避雷器漏れ電流の測定状況 用漏れ電流測定器を使用して, 実フィールドでの測定状況を示す(オフ ライン式)。

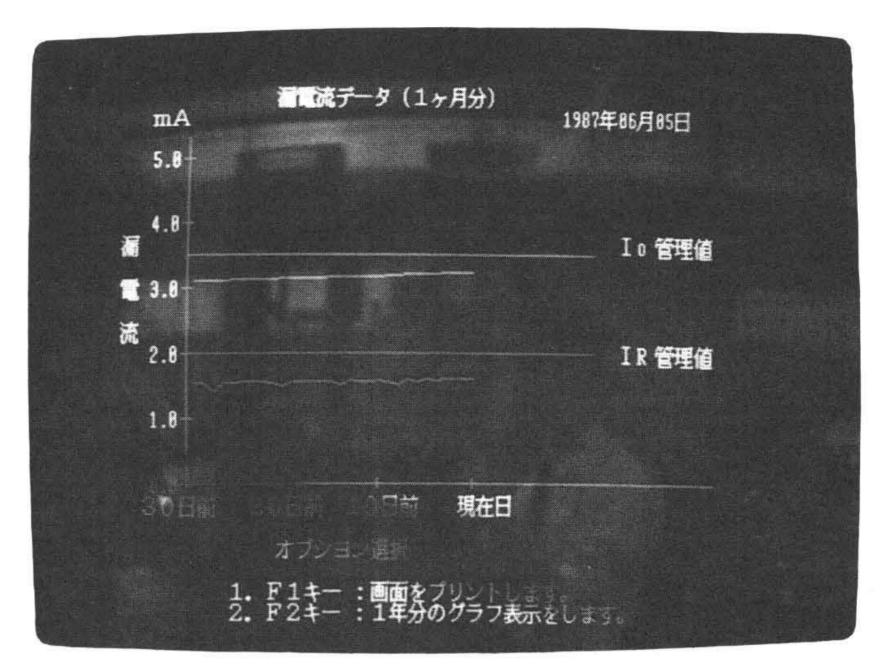
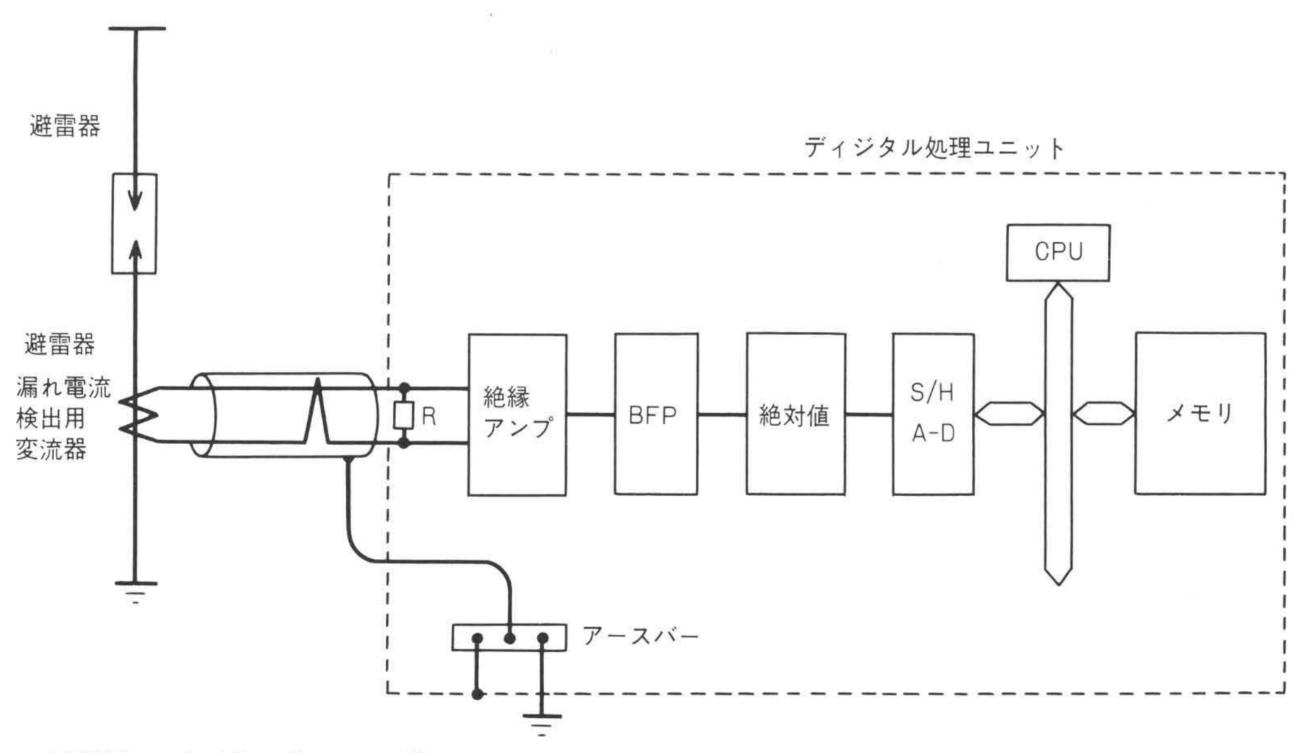


図16 避雷器漏れ電流測定推移のオンライン化 避雷器漏れ電流 の推移をブラウン管の画面表示とし、避雷器の健全性を判定できる。

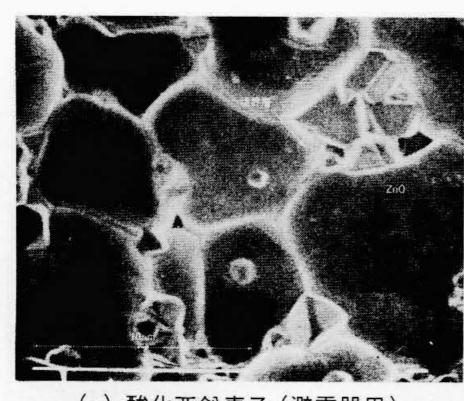
鉛系セラミックス抵抗体素子には,抵抗温度係数に正特性を 持たせ,素子を並列に使用した時に,ひとつの素子への電流 集中を抑制して,電流を分散通電することが容易なように配 慮してある。酸化亜鉛系セラミックス抵抗体素子を使用した SF<sub>6</sub>ガス絶縁66 kV中性点接地抵抗器の外観を、従来の金属性 抵抗器を使用したがい子形ガス絶縁中性点接地抵抗器と対比 して図18に示す。据付面積の縮小、活線洗浄の簡易化、耐雪 構造,抵抗体のさび発生と腐食の防止,及びオイルレス化を 図ることができる。

他方,大容量サージアブソーバの技術も期待されている。 酸化亜鉛素子だけの並列使用では非直線の電圧-電流が優れて



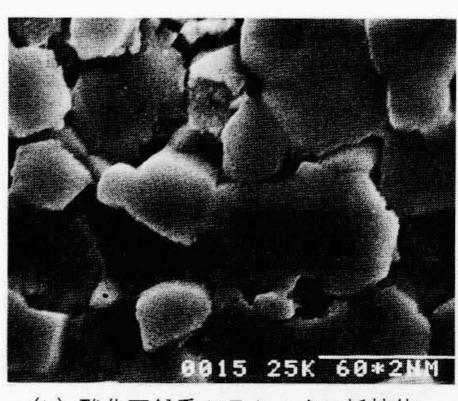
注:略語説明 S/H(サンプルホールダ) BPF [バンドパスフィルタ(第三高調波)] A-D (アナログ-ディジタル変換器) CPU (中央処理装置)

図15 避雷器漏れ電流測定のオンライン化 避雷器の接地線から避雷器漏れ電流を検出し、ディジタル 処理によりブラウン管にディスプレイできるようにしている。



Rb:境界層の非直線抵抗rb:ZnO結晶微粒子の抵抗rb:Rb スロの結晶微粒子の抵抗

Cb: 境界層の容量



Ro: ZnO系粒子の抵抗 境界層なし ZnO ZnO YnO 等価回路

(a) 酸化亜鉛素子(避雷器用)

(b) 酸化亜鉛系セラミックス抵抗体

図17 酸化亜鉛系セラミックス抵抗体素子の微細構造

避雷器用酸化亜鉛素子と酸化亜鉛系セラミックス抵抗体の微細構造比較を示す。

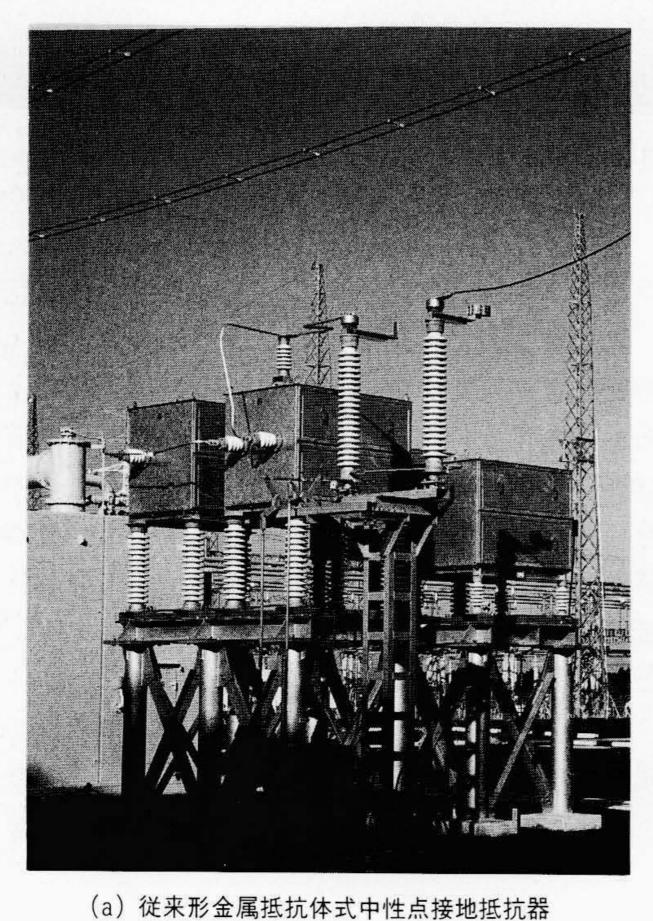
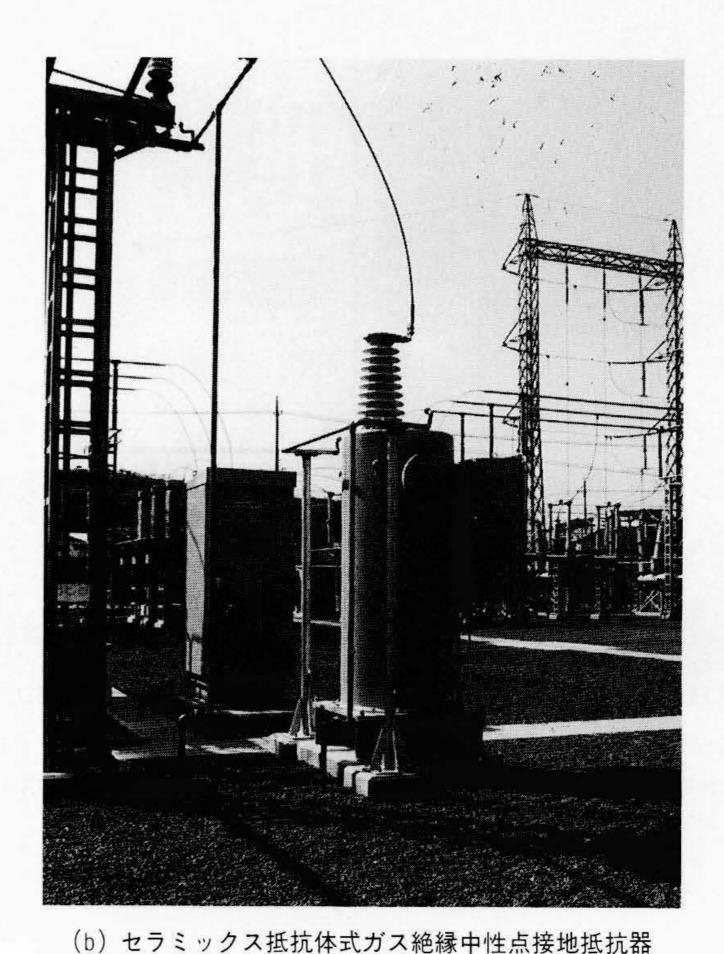


図18 ガス絶縁中性点接地抵抗器の稼動状況 接地抵抗器の外観を比較して示す。



(b) セノミックス抵抗体式ガス絶縁中性点接地抵抗器 従来形金属抵抗体式中性点接地抵抗器とセラミックス抵抗体式ガス絶縁中性点

いることから、多数個の酸化亜鉛素子に均等に電流を流すことが困難な場合が生じる。この対策として、直線性の素子と非直線特性の優れた素子とを組み合わせることによって、大容量サージアブソーバが実用化されている<sup>7</sup>。

以上、避雷器の技術動向と応用技術について述べた。今後も電力系統での過電圧抑制機器として、避雷器は電力供給の質的向上、絶縁信頼性の向上に寄与していくことが期待される。なお、雷害の問題は雷撃電流の大きさ、継続時間など未知な点も多いが、今後、避雷器の分担する処理エネルギーとも兼ね合わせて解明されてゆくものと考えられる。

終わりに、本開発に際して種々御指導いただいた電力会社 及び関係各位に対し謝意を表す次第である。

### 参考文献

- 1) 白川,外:酸化亜鉛避雷器"ZLA",日立評論,**61**,10,733~738(昭54-10)
- 2) 中野,外:最近の酸化亜鉛避雷器と絶縁協調,日立評論,65, 5,327~332(昭58-5)
- 3) 上田,外:酸化亜鉛形避雷器,電気評論,第200号,26~32(昭 58-6)
- 4) 岡本,外:110 kV送電線用避雷器の開発,昭和61年電気学会全 国大会,No.1158(昭61-4)
- 5) S. Shirakawa, et al.: Maintenance of Surge Arrester by a Portable Arrester Leakage Current Detector, IEEE/PES 1987 Summer Meeting No.87SM532-5
- 6) S. Shirakawa, et al.: Application and Development of a Ceramics Resistor for Use as a Neutral Grounding Resistor, IEEE, Vol. PRDW-3, No.1, January 1988
- 7) 林,外:酸化亜鉛形サージアブソーバ,昭和62年電気学会全国 大会,No.1260(昭62-4)