

電力用酸化亜鉛形 ギャップレス避雷器 (MOSA) の歩み

概要

当社は1975年、世界に先駆けて酸化亜鉛形ギャップレス避雷器 (MOSA: Metal Oxide Surge Arrester) を開発・実用化した。酸化亜鉛形避雷器は特性要素に酸化亜鉛素子 (ZnO素子) を用いた避雷器であるが、それまで主流だった炭化ケイ素素子 (SiC素子) と直列ギャップを用いた避雷器に比べて非常に優れた電圧-電流非直線特性を有しており、画期的な技術革新となった。その実績と信頼性は高く評価され、2009年に「でんきの礎」(電気学会)、2014年には25年以上にわたって地域社会や産業の発展に貢献してきた製品に授与される「IEEEマイルストーン」(米国電気電子学会) の認定を受けるに至った。

1 まえがき

避雷器は、落雷などで発生する過電圧から送電線及び変圧器などの電力機器を守り、電力供給に支障をきたさないようにするための保護機器で、約100年前から用いられ、当社もその当時から発電機・電動機・変圧器などの電気機器とともに避雷器を製作・販売していた。本稿では、酸化亜鉛形避雷器の誕生から現在当社が取り組んでいる避雷器の開発状況について紹介する。

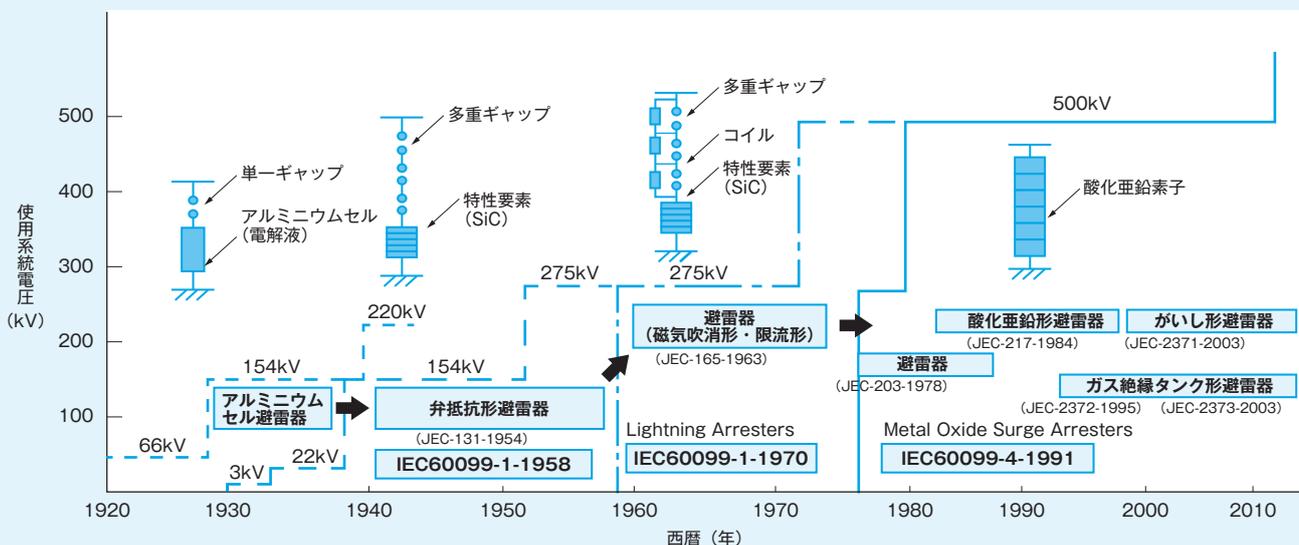
2 避雷器の変遷

第1図に避雷器の変遷を示す。1900年代初頭の火花ギャップ抵抗形避雷器に始まり、アルミニウムセル避雷器・オキシドフィルム避雷器などの弁抵抗形避雷器が製作された。その後1930年頃から、SiC素子を特性

要素に用いた避雷器の時代となった。SiC素子は多数回の大電流印加に対する安定性はあったが、非直線性能が不十分であったため直列ギャップを必要とし、避雷器動作後の続流遮断性能に大きな課題があった。そのため当時は、直列ギャップの続流遮断性能向上が避雷器技術開発の主流となっていた。

3 酸化亜鉛形避雷器の誕生

1960年代に開発されたSiC素子を用いた磁気吹消形避雷器は、究極の避雷器と考えられていたが、汚損や多重雷に対する絶縁低下による地絡事故、開閉サージエネルギー吸収能力の限界、更には直列ギャップを有する避雷器の構造から、コンパクト化や機器内蔵への対応ができないなどの課題があった。



第1図 避雷器の変遷

1967年、松下電器産業(株) (現：パナソニック(株)) は酸化亜鉛を主成分とするセラミックス半導体素子（バリスタ）を発明した。バリスタは、主成分の酸化亜鉛に種々の微量添加物を混合して焼結したセラミックスであり非直線性を示す電圧-電流特性を有していた。このバリスタは通信機器用の低圧サージアブソーバに使用される素子であり、バリスタを電力用ギャップレス避雷器に適用するために、以下の課題を考慮し、改善を図った。

(1) 電圧-電流非直線特性の改善

ZnO素子の非直線特性の改善には、原料配合の調整が不可欠であった。様々な添加物の効果及び複数元素の相互作用を調査する試作と電気的評価試験を繰り返し行い、非直線特性を改善した。第2図にZnO素子の電圧-電流非直線特性を示す。

(2) 放電耐量の向上

避雷器には優れた放電耐量特性が必要であり、ZnO素子の側面絶縁強化は必須であった。焼成後の絶縁材コーティングが最も簡便な手法であったが、性能的に不十分であったため、ZnO素子内部から表面へ徐々に絶縁層へと変化する界面のない側面絶縁層を形成する

技術を完成させた。その結果、放電耐量特性が大幅に向上した。

(3) 素子の大型化及び量産化

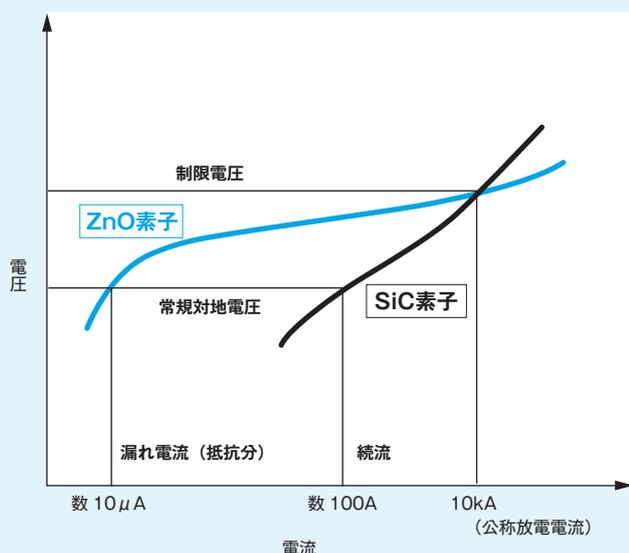
避雷器用ZnO素子の目標とする直径は約φ60mmで、バリスタ素子に比べて15倍以上の体積が必要だった。大形のZnO素子では、均一な焼結反応をさせることが課題であり、焼成条件の最適化を図った。また、大型化に対応した焼成炉をはじめとする量産設備を導入した。

(4) 課電寿命推定

酸化亜鉛形避雷器には直列ギャップがなく常時系統電圧が印加されるため、課電寿命評価が大きな課題であった。様々な温度での加速劣化試験を実施し、アレニウス則から30年以上の寿命があると推定した。

以上の研究開発を進めた結果、1973年に発電用φ56mm素子を完成させ、電気学会全国大会で世界初の酸化亜鉛形避雷器の論文を松下電器産業(株)との連名で発表した。

1975年には世界で初めて66kV酸化亜鉛形ギャップレス避雷器を九州電力(株)隼人変電所に納入した(第3図)。酸化亜鉛形避雷器の出現によって、直列ギャップ付きSiC避雷器の課題は解消され、停電事故が大幅に減



第2図 ZnO素子とSiC素子の電圧-電流特性



第3図 世界初の酸化亜鉛形避雷器 (66kV変電所)

少した。また、避雷器の保護性能向上により変電機器の小形化が可能となり、大きな経済的効果をもたらした。この画期的な国産技術は、日本発で国際規格にも採用されており、現在世界の電力用避雷器の主流になっている。また実用化から40年以上が経過しているが、これに替わる高性能な避雷器はいまだに出現していないことから、その技術的価値並びに社会的価値は非常に高く評価されている。

4 酸化亜鉛形避雷器の適用拡大

1975年以降、各電力会社の関心が高まり、1976年に3.3~275kVを対象に合同形式試験を実施した。1978年には改良形ZnO素子を使用して500kV系統用まで製品系列を拡大した。第1表にその納入品の代表例を示す。

5 避雷器の小形・軽量化開発

当社は、1975年の世界に先駆けて実現した酸化亜鉛形避雷器の開発から、今日まで継続して避雷器の小形・軽量化開発に取り組んでいる。避雷器の小形・軽量化のためにZnO素子の高性能化・高抵抗化などの材料技術開発を推し進めてきた。また大幅な小形・軽量化

が期待できる避雷器容器にポリマー材を使用したポリマー形避雷器の開発にも積極的に取り組んでいる。以下にZnO素子の技術開発並びにポリマー形避雷器開発について紹介する。

5.1 ZnO素子の技術開発

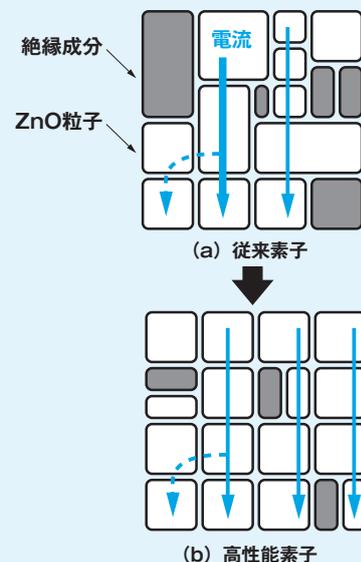
避雷器を小形化するには、より小さなZnO素子を実現することが効果的である。ZnO素子の小形化には素子径を小さくする方法と、素子厚みを薄くする方法があるが、それぞれ必要となる技術は異なっている。素子径を小さくするには電圧-電流非直線特性を向上させる高性能化開発が必要であり、厚みを薄くするには素子の動作開始電圧を高める高抵抗化開発が必要となる。いずれの開発にもサージ吸収能力を向上させることが必須である。これまでにZnO素子のこれらの性能を改良し小形化することで、素子を組み込む避雷器の小形・軽量化を実現してきた。

5.1.1 ZnO素子の高性能化開発

ZnO素子は酸化亜鉛 (ZnO) を主成分とし、酸化ビスマス、酸化アンチモンなどの複数の添加物を混合し焼結することで得られる。ZnO素子内部は第4図に示

第1表 納入品の代表例

年数	記録品
1975年	世界初66kV用酸化亜鉛形避雷器
1976年	66kVスーパークラッド用油タンク形避雷器
1978年	154kV活線洗浄形避雷器
1979年	世界初500kV用酸化亜鉛形避雷器
1979年	500kV GISタンク用避雷器
1979年	250kV 直流用避雷器 (北海道-本州直流連係ケーブル保護用)
1979年	500kV 変圧器鉄共振保護用重責務形避雷器 (マニトパハイドロ納入交直変換所)
1980年	154kV 内蔵油浸用避雷器
1981年	500kV 放圧電流100kA用避雷器 (オンタリオハイドロ納入)
1984年	270kV 直流用避雷器 (英仏直流連系 サイリスタバルブ保護用)
1991年	国内初275kVがいし形高性能避雷器
1996年	350kV 直流用避雷器 (レイテールソン島直流連系 ケーブル保護用)
1998年	国内初66kVポリマー形避雷器
1998年	250kV 直流用避雷器 (紀伊水道直流連系)
2002年	国内初154kVポリマー形避雷器
2004年	国内初275kVポリマー形避雷器



第4図 従来素子と高性能素子の微細構造の模式図

すようなZnO粒子と絶縁成分から構成されており、吸収したサージ電流は第4図に示すように導電性のあるZnO粒子を選択的に流れる。高性能化開発ではサージ吸収時の素子抵抗を極力低く抑えることがポイントとなる。以下の内容を実現するため、配合及び焼成条件を改良することで高性能化を実現した。

- (1) ZnO粒子の導電性の向上
- (2) 素子内を流れるサージ電流経路を増加
- (3) 電流集中が起こらないように経路を均一化 (微細構造の最適化)

高性能化開発の結果、素子体積で約40%低減しているにもかかわらず従来と同等の保護性能・サージ吸収能力が得られている。

5.1.2 ZnO素子の高抵抗化開発

ZnO素子の動作開始電圧は、ZnO粒子界面に存在する抵抗層の数と比例すると言われている。つまり動作開始電圧を高める（高抵抗化）ためには、界面の数を増やす必要がある。そのためにはZnO粒子径を小さく制御する微細化技術開発が重要となってくる。

素子の高抵抗化では、ZnO粒子の微細化と高抵抗物質の制御をポイントとして開発を進めている。配合や

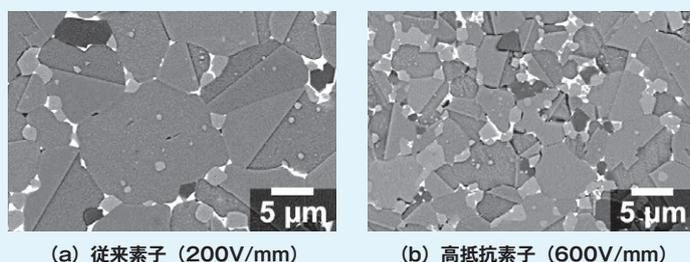
焼成パターンの最適化及び側面絶縁材料の改良を行い、現在600V/mmの高抵抗化を実現した。第5図に従来の200V/mm素子と600V/mm高抵抗素子の微細構造の比較を示す。ZnO粒子径が従来素子で平均12 μ mに対して高抵抗素子で平均5 μ mと微細化していることが分かる。今後、電気特性の安定化及び量産体制の整備を進める。

5.2 ポリマー形避雷器の開発状況

5.2.1 ポリマー形避雷器の特長

ポリマー形避雷器は、容器にポリマー材料が使われるため、磁器がいし形避雷器に比べて非常に軽量である。一般的に使用されているポリマー材料はシリコンゴムで撥水性を有しており、一旦撥水性が失われても回復する特長を持つため、耐汚損性能に優れている。また磁器がいし管のように破片が飛び散ることがないため、耐震性能や放圧時の安全性が高いことも特長である。

第2表に当社の定格電圧98kVの磁器がいし形避雷器とポリマー形避雷器の比較を示す。ポリマー形避雷器の質量は磁器がいし形避雷器の質量の1/3で非常に軽量である。このため鉄塔上や断路器の既設架台などの質量制限がある場所に設置でき、また内部部品をシリコーン



第5図 従来素子と高抵抗素子の微細構造

第2表 磁器がいし形避雷器とポリマー形避雷器の比較 (定格98kV)

項目	磁器がいし形 避雷器	ポリマー形避雷器 (ダイレクトモールド形)
がいし材質	磁器	シリコンゴム
質量 (kg)	75	25
高さ (m)	1.6	1.1
撥水性	—	持続性があり
内部構造	空間有り	空間無し



(a) 66kV系統
小形・軽量化のため狭い場所でも設置できる。

第6図 ポリマー形避雷器の設置例

ンゴムで直接モールドしているため、水平設置や角度をつけた設置もできる。このように設置の自由度が大幅に向上することも特長の一つである。第6図にポリマー形避雷器の設置例を示す。

5.2.2 ポリマー形避雷器の耐震性能

当社は2007年にダイレクトモールドタイプのポリマー形避雷器（ZS-Fシリーズ）を開発・製品化し、2000相以上納入している。ZS-Fシリーズの耐震性能は 3m/s^2 共振正弦3波に対し、2.0以上の安全率を有している。2011年3月11日に発生した東北地方太平洋沖地震では、ポリマー形避雷器単独の折損被害は無かった。この実績でポリマー形避雷器の耐震性能が裏付けられたため、今後ポリマー形避雷器の本格適用の契機になると考える。

5.2.3 新ポリマー形避雷器の製品化

当社は2014年に、耐震性能などを更に向上させた新ポリマー形避雷器（ZS-Gシリーズ）を開発した。ZS-Gシリーズは、支持構造の改良やポリマー材の軽量化を行い、ZS-Fシリーズに比べ小形・軽量化し曲げ強度も20%向上した。また笠形状の最適設計を行うことで有効接地系でも超重汚損地区に対応できる避雷器をシリーズ化した。第3表にZS-Gシリーズの主要定格を示す。

5.2.4 発電電用以外のポリマー形避雷器

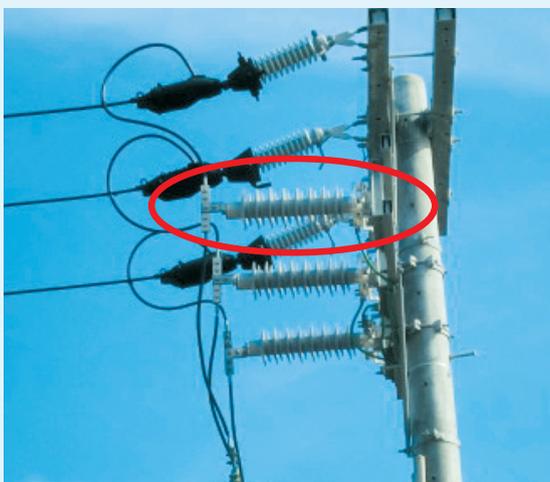
当社は発電電用以外にも、22/33kV系統用の配電用ポリマー形避雷器や66～154kV系統用のコンパクト形送電用避雷装置などのポリマー製品を製作している。今後、車載用やキュービクル用の製品でも、ポリマー形のメリットを生かせる製品の開発に取り組んでいく。

6 むすび

当社は、1975年、酸化亜鉛形避雷器の実用化以降、これまで世界70か国以上のお客様に、500万相以上の避雷器と2000万個以上の酸化亜鉛素子（ZnO素子）を納入してきた。その間、避雷器の性能を改良し、長寿命化や軽量小形化を図ってきた。この40年間の実績と信頼を基に、更に社会貢献できる製品開発に努めていく所存である。

避雷器の歴史を振り返ると、40年が経過した今もなお酸化亜鉛形避雷器が継続して使われていることに改めて偉大な発明であったと驚嘆させられる。現在このような製品に携わることができる我々技術者は大変光栄であり、当時開発に携わった関係者各位に対し謝意を表す次第である。

[ソレスター工場：小掠・戸田・高田]



(b) 22kV系統
ダイレクトモールドタイプのため水平に取り付けできる。

第3表 ZS-Gシリーズの主要定格

形式	標準形	ZS-G1PH	ZS-G1PK	ZS-G2PK	
	耐汚損形	ZS-G1PHX	ZS-G1PKX	ZS-G2PKX	
避雷針の種類	標準特性	高性能	高性能	高性能	高性能
定格電圧 (kV)	28～42	70～196	84～196	182～280	
公称放電電流 (kV)	10				
開閉サージ放電耐量クラス	D	C	BB	B	
定格放圧電流 (kV)	65				
放電耐量 (雷インパルス)	65kV 2回 (4/10 μ s波)				
耐汚損区分 (等価塩分附着密度 mg/cm ²)	標準形	0.01	0.01	0.01	0.01
	耐汚損形	0.35	0.35	0.35	0.25