

世界最高耐圧を達成した避雷器用超高耐圧 ZnO 素子

ZnO Nonlinear Resistors for Lightning Arrestor with World's Highest Operating Voltage

安藤 秀泰

ANDOH Hideyasu

宇田川 剛

UDAGAWA Takeshi

深野 孝人

FUKANO Takato

送電系統に発生する雷などの異常電圧(サージ)を吸収して、変圧器や開閉装置を保護する避雷器においては、機器のコンパクト化が継続的に進められている。避雷器には電圧非直線抵抗体(ZnO素子)が積層されており、そのZnO素子の動作電圧を向上して高耐圧化することにより、ZnO素子の積層枚数を低減して、避雷器を大幅にコンパクト化できる。

当社では、既に400V/mmの動作電圧を持つ高耐圧ZnO素子を1997年に開発し、コンパクト型避雷器をシリーズ化している。今回は更にZnO素子の動作電圧の向上を図り、世界最高耐圧となる600V/mmの超高耐圧素子を開発した。この超高耐圧素子の適用により、輸出用800kV系統用避雷器の容積40%縮小化を達成し、製品化した。

Development work for the miniaturization of lightning arrestors has been continuously progressing. If the operating voltage (gradient voltage) of the zinc oxide (ZnO) elements for lightning arrestors is increased, significant miniaturization of lightning arrestors can be attained by reduction of the number of ZnO elements.

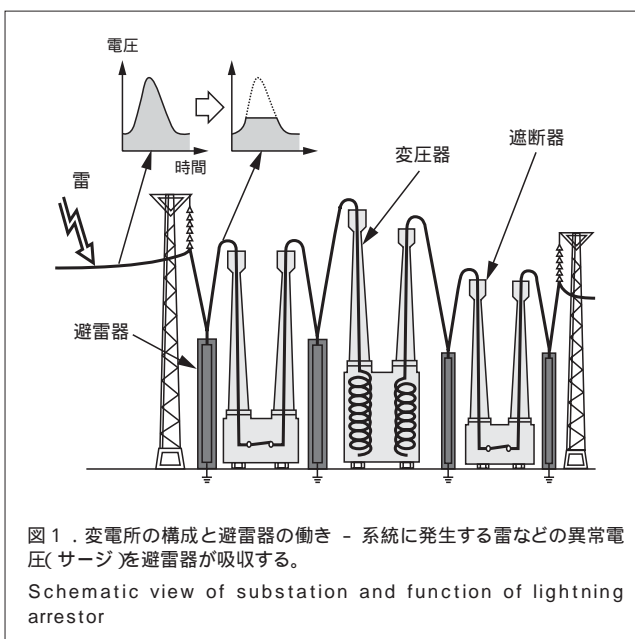
Toshiba already developed high-gradient ZnO elements with an operating voltage of 400 V/mm in 1997, and has now developed ultrahigh-gradient ZnO elements that have an operating voltage of 600 V/mm. These ultrahigh-gradient elements were applied to a gas-insulated switchgear (GIS) lightning arrestor for 800 kV systems, and attained a 40% reduction in the volume of the lightning arrestor.

1 まえがき

電力の安定供給が必須である情報化社会においては、電力流通が重要な役割を果たしており、経済性と環境調和の観点から機器のコンパクト化が求められている。特に、都市部では、変電所などの電力流通設備の用地が限られていることから、大型ビルなどの地下空間などを活用して変電所が建設されるため、コンパクト化の要求が高い。このため、縮小型の変電機器開発が継続的に進められている。この中で変電機器の用いられる材料の使用環境はますます厳しくなっており、材料に関する種々の開発が実施されている⁽¹⁾。

変電機器ではその絶縁協調のため、避雷器が重要な役割を担っている。変電所の構成とともに避雷器の働きを図1に示す。避雷器は遮断器や変圧器の前後に多数設けられ、送電系統に発生する種々の異常電圧(サージ)を吸収して、遮断器や変圧器を保護する役割を果たしている。ここで、避雷器が吸収しなければならないサージとしては、落雷時に発生する雷サージ、遮断器の動作時に発生する開閉サージ、送電系統の地絡事故時に発生する短時間過電圧などがある。

これまでの当社の避雷器開発においては、保護特性を向上し変電機器のコンパクト化を達成できる高性能化⁽²⁾と、避雷器自体のコンパクト化開発⁽³⁾⁽⁴⁾が継続的に進められてきている。近年、変電所の縮小を実現するため、絶縁性に優



れた六フッ化硫黄(SF₆)ガスを用いたガス絶縁開閉装置(GIS: Gas Insulated Switchgear)が多用されている。GISは遮断器、断路器、避雷器などが収められている複合的な開閉装置であり、避雷器のコンパクト化は、このGIS用において、特に要求が高い。

今回は、避雷器の更なるコンパクト化を実現するため、動

作電圧を世界最高の600 V/mmにまで高めた超高耐圧ZnO素子の開発について述べる。

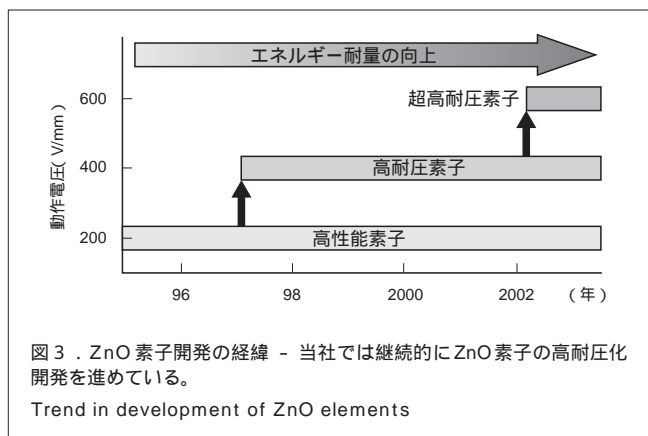
2 避雷器用 ZnO 素子の開発経緯

避雷器には図2に示すZnO素子が積層され、多数個使用されている。ZnO素子は優れた非直線抵抗特性を持っているため、定常電圧では微小な漏れ電流しか流れないが、異常電圧が印加されると電気抵抗が大きく低下し、サージエネルギーを吸収できる。



避雷器の大きさはZnO素子の積層枚数により決定され、避雷器のコンパクト化には素子の単位厚さ当たりの動作電圧を増加(高耐圧化)し、積層枚数を低減することがもっとも有効な手段である。また、ZnO素子の動作電圧を向上すると、素子単位体積当たりのエネルギー吸収責務が大きくなるため、ZnO素子が吸収できる限界エネルギー量(エネルギー耐量)を向上させることも重要である。ZnO素子は異なるサージを吸収する必要があり、破壊モードが異なるため、それぞれにエネルギー耐量向上の技術開発が必要である。

当社では、図3に示す開発経緯でZnO素子の開発を進めてきており、ZnO素子の動作電圧を向上させる高耐圧化と



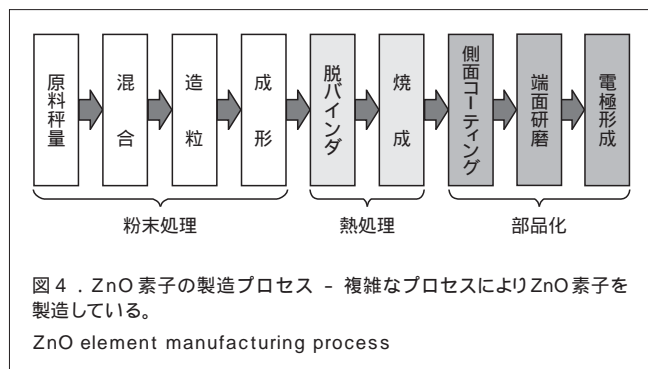
エネルギー耐量の向上を継続的に並行して行っている。高耐圧化開発では、既に97年に、400 V/mmの動作電圧を持つ高耐圧素子を用いたコンパクト型避雷器をシリーズ化した。ZnO素子の高耐圧化開発は国内において盛んであり、国内他メーカーの多くは、近年、400 V/mm素子を開発しているが、海外他メーカーでは現状でも200 V/mm素子のみが製造されている。このようなZnO素子開発の中で、今回は高耐圧化とエネルギー耐量の向上を達成することにより、世界最高耐圧となる600 V/mmの動作電圧を持つ超高耐圧素子を開発した。

3 超高耐圧素子の開発

3.1 ZnO素子の製造プロセス

ZnO素子の製造プロセスを図4に示す。ZnO素子は、粉末処理、熱処理、部品化に分けられる複雑な工程により製造している。粉末処理では、主成分である酸化亜鉛(ZnO)に酸化アンチモン、酸化マンガンなどの添加物やバインダーを加え、均一に混合した後、造粒して、所定形状にプレス成形する。成形体は、400~500℃でバインダーを蒸発させた後、1,000~1,200℃の焼成工程を経て、緻密(ちみつ)な焼結体になる。焼結体は部品化工程において、円周に絶縁コーティングを施し、両端面に溶射プロセスによるアルミニウム(Al)電極を形成して、ZnO素子が完成する。

超高耐圧素子の開発において、動作電圧の向上は、動作電圧が600 V/mmとなる新組成(原料粉末の配合比)の開発により実現し、エネルギー耐量は熱処理や部品化の工程の改善により実現した。



3.2 600 V/mm 組成の開発

高耐圧素子と超高耐圧素子の電流 - 電圧特性と結晶組織を図5に示す。超高耐圧素子は結晶組織を微細化できる新組成を開発することにより、動作電圧を600 V/mmまで高めたものである。ここで動作電圧とは、1 mAの電流が素子に流れたときの単位厚さ当たりの電圧である。また、避雷器の保護レベルに直接的に影響する電流 - 電圧特性の非直線性

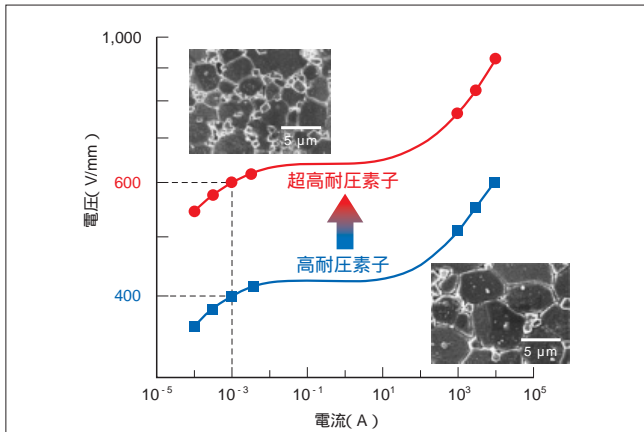


図5．ZnO素子の電流 - 電圧特性と結晶組織 - 結晶粒径の低減により超高耐圧を達成した。

Current-voltage curves and microstructures of ZnO elements

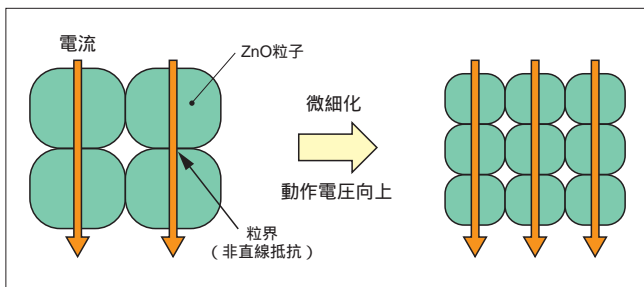


図6．微細構造における動作電圧向上モデル - ZnO結晶粒径の低減により粒界数が増加し、動作電圧が向上する。

Model of operating voltage increase in microstructure

については、超高耐圧素子は高耐圧素子と同等である。

結晶組織の微細化による動作電圧の向上のモデルを図6に示す。図からわかるように、微細構造を形成するZnO粒子径を低減することにより、非直線な抵抗特性を持つZnO粒界が電流パスにおいて増加するため、結晶微細化により動作電圧を向上させることができる。高耐圧素子のZnO結晶の平均粒径は7.2 μmであり、超高耐圧素子では5.2 μmまで微細化している。

600 V/mm組成開発では、従来からの添加物である酸化アンチモン、酸化マンガンなどの添加物量を増加させるとともに、ZnO結晶の粒成長を抑制できる新たな添加物を加えた組成を開発し、結晶組織を微細化した。

3.3 エネルギー耐量の向上

3.3.1 短時間過電圧耐量の向上 素子が過剰な短時間過電圧を吸収すると素子端部から亀裂が発生し絶縁破壊に至る。この亀裂はZnO素子が完全な均質体でないために起こる不均一な発熱による熱応力が原因である。従来のZnO素子がエネルギーを吸収したときの素子表面の発熱温度分布を赤外線カメラで観察した結果を図7(a)に示す。温度分布は完全に均一ではなくリング形状の分布を示しており、非常に大きな熱応力が発生する発熱形態であった。

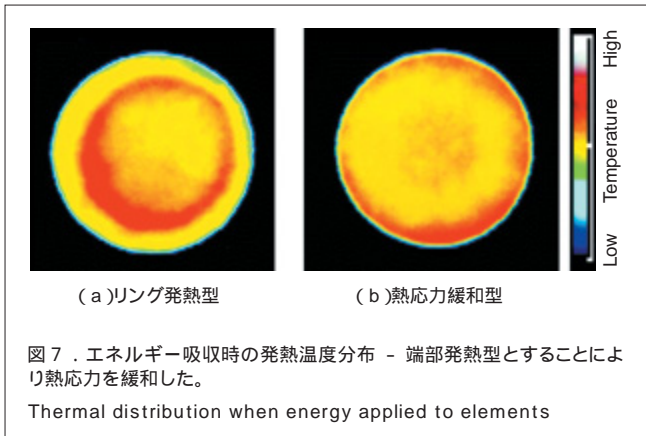


図7．エネルギー吸収時の発熱温度分布 - 端部発熱型とすることにより熱応力を緩和した。

Thermal distribution when energy applied to elements

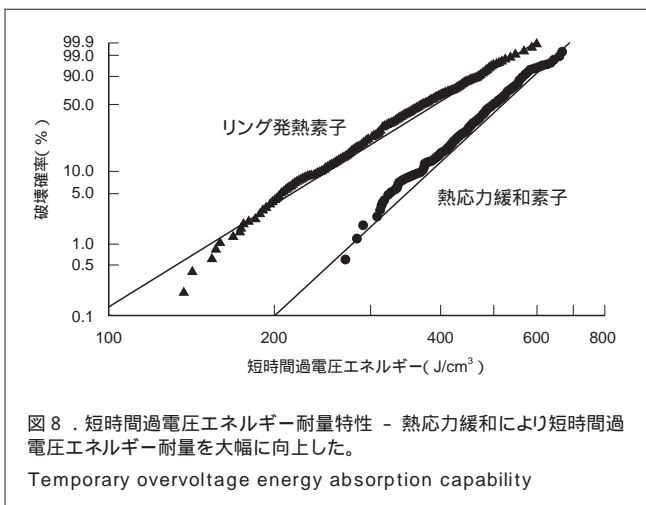


図8．短時間過電圧エネルギー耐量特性 - 熱応力緩和により短時間過電圧エネルギー耐量を大幅に向上した。

Temporary overvoltage energy absorption capability

ZnO素子の発熱形態が熱応力に及ぼす影響を検討した解析結果に基づき、ZnO素子の発熱温度分布を制御することにより短時間過電圧の耐量向上を図った。発熱温度分布は素子内の抵抗値、すなわちZnO結晶粒径の分布であるため、ZnO結晶粒成長の分布を制御するため、熱処理工程の改善を行い、図7(b)に発熱温度分布を示す素子端部で発熱温度が高くなる熱応力緩和型素子を開発した⁽⁵⁾。

リング発熱型素子と熱応力緩和型素子の短時間過電圧試験における破壊確率のワイブルプロットを図8に示す。図から明らかなように、リング発熱型素子に比べ、熱応力緩和型素子はエネルギー耐量が約50%向上し、併せて耐量値のバラツキも大幅に低減できた。

3.3.2 開閉サージ耐量の向上 ZnO素子が過剰な開閉サージを吸収すると、素子端面に形成された電極の端部において貫通孔が生じ、絶縁破壊に至る。ZnO素子が開閉サージを吸収したときの貫通破壊の現象を解明するため、有限要素法による過渡的な電流・温度連成解析を実施した。

解析結果である開閉サージ吸収時の素子端面断面の等温線図を図9に示しており、Al電極端部近傍に局所的な高温部がある。ZnO素子のAl電極は素子沿面の耐電圧向上の

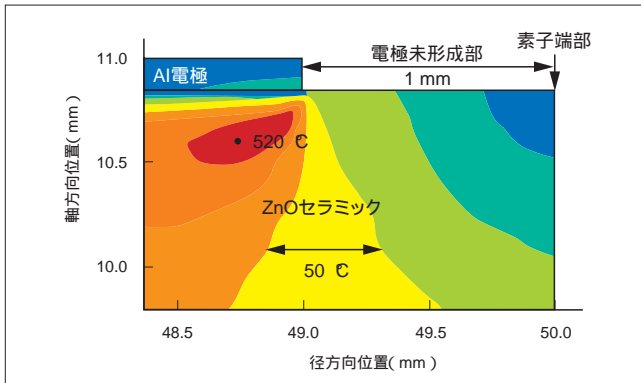


図9. 素子端面断面の等温線図 - 電流 - 温度連成解析により, 電極端部での電流集中による局部発熱現象を明らかにした。
Equithermal plot at element edge section

ため, 素子端面には1mm幅の電極未形成部分がある。このため, 電流が電極未形成部分内に広がり, 電極端部にて電流集中が起きることにより電極端部の近傍に局所的な高温部が発生し, 貫通破壊の起点となることを明らかにした。

更に, 種々の条件で解析を実施した結果, ZnO素子の電極端部の電流集中は, 電極未形成部の幅を狭める, つまり, 電極形成時に電極端部形状を制御することにより, 電流集中を緩和できることが明らかになった。これにより, 電極形状の制御性を高め, 電極未形成部を縮小できる新しい溶射方法を用いた電極形成プロセスを開発した。この電極形状の最適化により, ZnO素子の閉閉サージエネルギー耐量は 200 J/cm^3 から 300 J/cm^3 へ50%向上させることができた⁽⁶⁾。

4 避雷器のコンパクト化

開発した超高耐圧素子は, 世界最高である 600 V/mm の

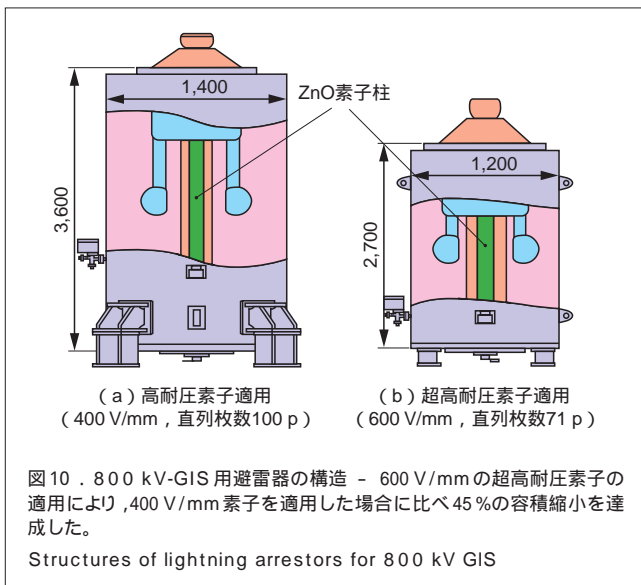


図10. 800 kV-GIS用避雷器の構造 - 600 V/mm の超高耐圧素子の適用により, 400 V/mm 素子を適用した場合に比べ45%の容積縮小を達成した。
Structures of lightning arrestors for 800 kV GIS

動作電圧と高いエネルギー耐量を持つだけでなく, 避雷器の保護レベルを決定する非直線抵抗特性, 長期課電に耐える寿命特性も良好であり, 既に製品製造を開始している。

超高耐圧素子の初適用製品は, 韓国向け 800 kV 系統GIS用避雷器であり, この避雷器の構造を 400 V/mm の高耐圧素子を適用した場合と比較して図10に示す。開発した超高耐圧素子適用避雷器は, ZnO素子直列枚数が2/3に低減され, 避雷器のタンク長, タンク径が縮小され, 容積として45%縮小した世界最小の 800 kV 避雷器である。この避雷器は既に34相の受注が決定しており, 2003年初めに初製品の出荷を開始し, その後, 国内外の各種電圧クラスのシリーズ化を進める計画である。

5 あとがき

避雷器事業においては, 需要の拡大が予測されるアジア市場での受注拡大が当面の課題である。この中でZnO素子の特性向上による避雷器の競争力強化は, 継続的に実施しなければならない。一方では, 当社のZnO素子はその優れた特性により, 欧米の変電機器メーカーへの素子単品の販売も開始している。世界市場におけるZnO素子の供給源となるため, 更なるZnO素子の特性向上開発を進める計画である。

文献

- (1) 伊藤義康, ほか. 変電機器のコンパクト化を支える新材料技術. 東芝レビュー. 53, 6, 1998, p.53 - 55.
- (2) 菅 雅弘, ほか. 避雷器の高性能化. 東芝レビュー. 43, 6, 1988, p.18 - 20.
- (3) Andoh, H., et al. Failure Mechanisms and Recent Improvement in ZnO Arrester Elements. IEEE EI Magazine. 16, 1, 2000, p.25 - 31.
- (4) Imai, T., et al. Development of High Gradient ZnO Nonlinear Resistors and Their Application to Surge Arresters. IEEE Trans. PD. 13, 4, 1997, p.1182-1187.
- (5) 安藤秀泰, ほか. 高エネルギー吸収特性を有する傾斜組成ZnO素子の開発. セラミックス. 34, 3, 1999, p.156.
- (6) 安藤秀泰, ほか. 避雷器用ZnO素子におけるエネルギー耐量の向上. 電気学会論文誌. 120-A, 10, 2000, p.924 - 929.



安藤 秀泰 ANDOH Hideyasu

電力システム社 電力・産業システム技術開発センター 金属・セラミックス材料開発部主務。機能性セラミックス材料の研究・開発に従事。日本セラミックス協会, 溶接学会会員。
Power and Industrial Systems Research and Development Center



宇田川 剛 UDAGAWA Takeshi

電力システム社 浜川崎工場 避雷器部。
避雷器用ZnO素子の開発に従事。
Hamakawasaki Operations



深野 孝人 FUKANO Takato

電力システム社 浜川崎工場 避雷器部。
避雷器の開発・設計に従事。電気学会会員。
Hamakawasaki Operations