

ZnO 素子の動作電圧向上による避雷器の小型化

Downsizing of Surge Arresters by Operating Voltage Improvement of ZnO Elements

安藤 秀泰 小松 克朗 山本 浩義

■ ANDOH Hideyasu ■ KOMATSU Katsuaki ■ YAMAMOTO Hiroyoshi

避雷器は、雷などにより送電系統に発生する異常電圧（サージ）から変圧器や開閉装置など変電機器を保護する絶縁協調の要である。避雷器には特異な非直線抵抗特性を持つ抵抗体（ZnO 素子）が積層されており、ZnO 素子の動作電圧を向上させることにより、この積層枚数を低減し、避雷器の小型化を達成することができる。

東芝は、この動作電圧を向上した ZnO 素子を配電・送変電用避雷器に適用し、特に高電圧の開閉設備に使用されるガス絶縁開閉装置（GIS：Gas Insulated Switchgear）用避雷器の大幅な小型化を達成した。

Continuous efforts have been made to downsize surge arresters. Engineers have been endeavoring to increase the operating voltage of the ZnO elements of surge arresters, in order to make the surge arresters more compact by reducing the number of ZnO elements.

Toshiba has succeeded in developing new ZnO elements that have a higher operating voltage. As a result, surge arresters for distribution-class equipment, transmission lines, and gas-insulated switchgears (GIS) can be significantly downsized.

1 まえがき

落雷、開閉器操作などによって送配電回路に発生する過渡発生電圧（サージ）から電力機器を保護する避雷器は電力設備の信頼性向上と小型化に大きく寄与してきた。避雷器の発展は1900年初頭に実用化されたアルミニウムオキシサイド避雷器に始まり、1930年代の炭化ケイ素（SiC）を用いた弁抵抗避雷器を経て、1980年代から現在の酸化亜鉛（ZnO）形避雷器に至っている。

ZnO 素子は非直線抵抗特性に優れており、放電ギャップを必要とせず、保護性能と信頼性は飛躍的に向上した。その後の超高压送電に向けた研究のなかで、保護特性が30%程度向上した高性能避雷器が実用化されており⁽¹⁾、更に単位長さ当たりの動作電圧を高めた高耐圧素子が実用化され、ガス絶縁開閉装置（GIS：Gas Insulated Switchgear）用避雷器の小型化に貢献している。

東芝はわが国の避雷器の黎明（れいめい）期からその発展とともに歩み、常に時代の最先端の技術を導入しつつ信頼性の高い避雷器を供給してきた。特に昨今の ZnO 素子の高耐圧化技術においては、いち早く超高耐圧級の素子開発を成し遂げ、実用化している。

ここでは最新の ZnO 素子技術と、その新たな応用として実用化した避雷器について述べる。併せて、昨今セラミックがいしに変わる新材料として脚光を浴びつつあるシリコンゴムを外皮に用いた、小型・軽量性に優れたシリコンゴムダイレクトモールド技術を適用した製品についても述べる。

2 ZnO 素子の動作電圧向上技術の開発

2.1 結晶組織微細化による動作電圧向上

避雷器用 ZnO 素子の電流-電圧特性を図1に示す。ZnO 素子は非直線な電流-電圧特性を持っているため、電力系統の運転電圧下ではほとんど電流が流れず絶縁体に近い働きをするが、系統に雷などのサージが発生すると大きな電流を流し、サージを吸収することができる。また、図1に示すように従来型の ZnO 素子は単位長さ当たりの動作電圧（電流1 mA 時の電圧）が200 V/mm 程度であったが、400 V/mm の高耐圧素子⁽²⁾、600 V/mm の超高耐圧素子⁽³⁾を開発してきた。超

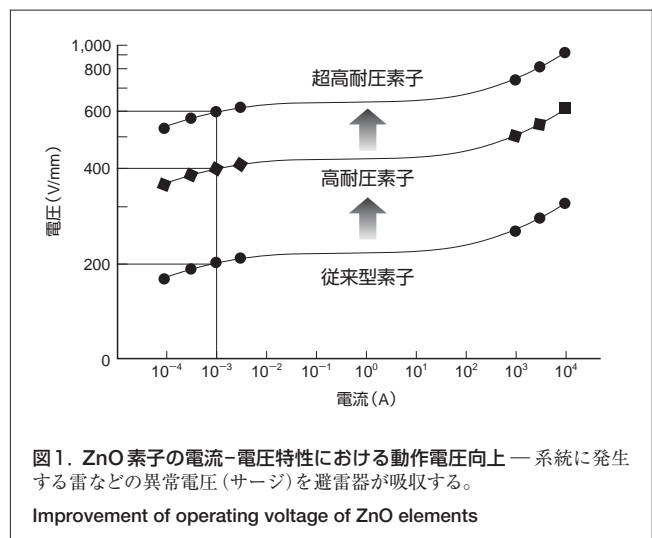


図1. ZnO 素子の電流-電圧特性における動作電圧向上 — 系統に発生する雷などの異常電圧（サージ）を避雷器が吸収する。
Improvement of operating voltage of ZnO elements

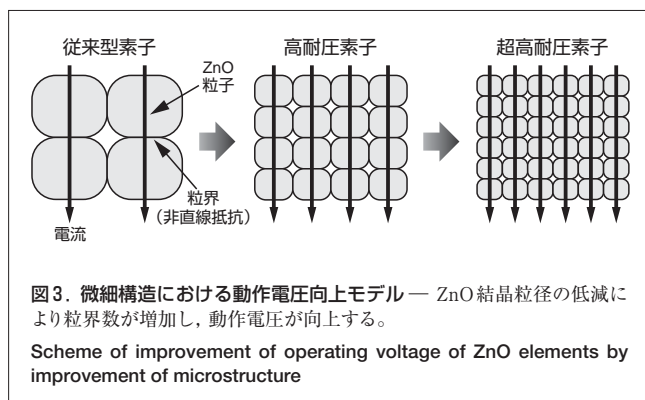
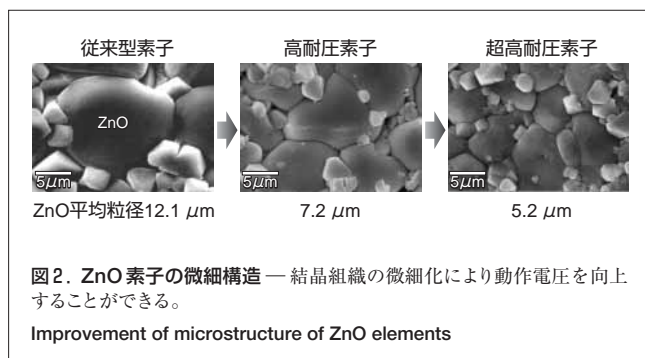
高耐圧素子の600 V/mmは、世界最高^(注1)の動作電圧を達成した。また、ZnO素子の動作電圧の向上においては、避雷器の保護レベルに直接的に影響する電流-電圧特性の非直線性も向上することができている。

ZnO粒子とその他の微小な絶縁性粒子から構成されるZnO素子の微細構造を図2に示す。動作電圧の向上に伴い、結晶組織が微細化していることがわかる。具体的には、従来型素子のZnO平均結晶粒径が12.1 μmであるのに対し、高耐圧素子では7.2 μm、超高耐圧素子では5.2 μmとなっている。図3は結晶構造の微細化による動作電圧の向上のモデルであり、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、結晶組織の微細化により単位厚さ当たりの動作電圧を高くすることができる。

ZnO素子は、主成分であるZnOに酸化アンチモン(Sb₂O₃)や酸化ビスマス(Bi₂O₃)など数種類の副成分を添加し、焼結した円盤形状セラミックの外周部に絶縁層、両端面に電極を形成したものであり、動作電圧の向上は、添加成分の改善により実現した。すなわち、副成分の添加量を変化させることや、新たな成分を添加するなどの改善により、結晶組織の微細化を実現した。

2.2 エネルギー耐量と熱安定性の向上

ZnO素子の単位厚さ当たりの動作電圧を高くすると、サージ

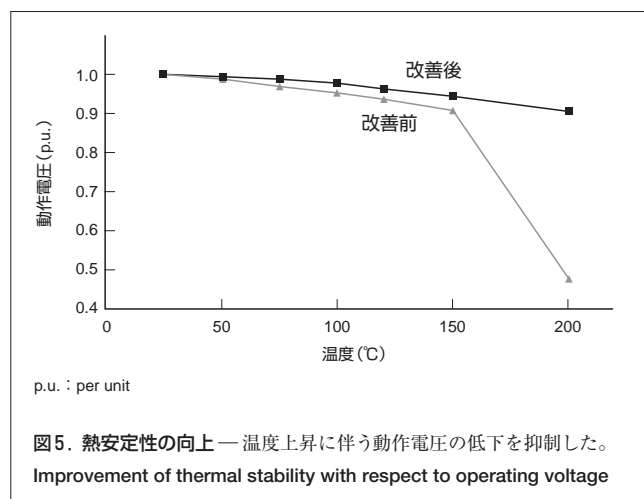
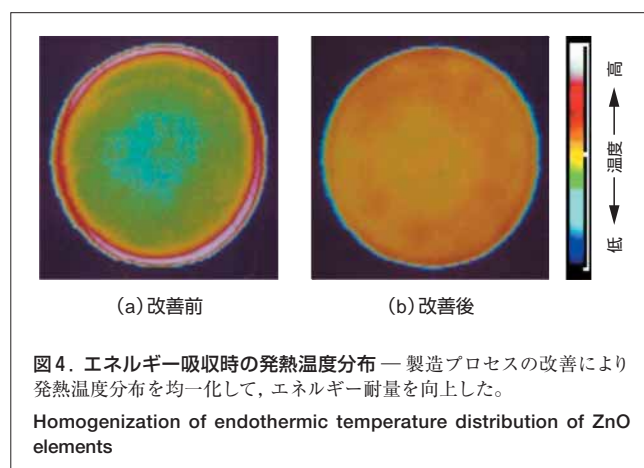


(注1), (注2), (注3) 2006年4月現在, 当社調べ。

エネルギーを吸収したときのエネルギー密度が増加するため、エネルギー耐量や熱安定性を向上する必要がある。ここで、エネルギー耐量とは、素子に過剰なサージエネルギーが印加されたとき、破壊するまでに素子が吸収できるエネルギー量である。また、エネルギー密度が増加すると、サージエネルギー吸収時の素子の自己発熱が増加するため、抵抗値の低下が大きくなる。熱安定性の向上とは、この抵抗値の低下を抑制することである。

素子がサージエネルギーを吸収したときに発熱の不均一性が大きいと、高温部での電流集中や素子内での温度差による熱応力により、素子のエネルギー耐量が低下する。図4は、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であり、素子の製造工程における熱処理条件などの改善により発熱分布の均一化を図り、エネルギー耐量を向上することができた⁽⁴⁾。

ZnO素子の熱安定性向上を図5に示す。この図は高耐圧素子の動作電圧の温度依存性を示しており、添加成分を改善することにより、温度上昇に伴う動作電圧の低下を抑制したものであり、大幅に熱安定性が向上できている。



3 避雷器の小型化

3.1 高耐圧素子を適用した耐雷素子の開発

現在の配電用避雷器は1980年代にSiC素子からZnO素子に切り替わり、その優れた特性により配電系統の事故率を低減してきた。更に、ZnO素子を適用した耐雷素子の配電機器への内蔵化により雷害防止に効果を上げている。

当社は、GIS用避雷器にて十分な実績を持つ高耐圧素子を適用した国内でもっとも小型で^(注2)、保護特性及び放電耐量特性に優れた柱上変圧器用耐雷素子を開発し、製品化した。主な仕様を表1に、外形図を図6に示す。今回開発した柱上変圧器用耐雷素子の主な特長は以下のとおりである。

- (1) 構造 高耐圧素子適用の効果により、従来形耐雷素子より全高寸法を約30%低減した。
- (2) 制限特性 制限電圧(2.5kA, 8/20 μ s時)の実力は従来形耐雷素子より約3%改善しており、保護特性が良好であることを確認した。

表1. 柱上変圧器用耐雷素子の仕様

Specifications of lightning arrester for pole transformers

項目	仕様	
定格電圧 (kV)	8.4	
公称放電電流 (kA)	2.5 (8/20 μ s)	
連続使用電圧 (kV)	6.9	
動作開始電圧 (kV)	17 以上 (120 $^{\circ}$ C)	
制限電圧 (kV)	33 以下 (2.5 kA, 8/20 μ s時)	
雷インパルス放電耐量 (kA)	30 (4/10 μ s) \times 2回	
構造・寸法	全高寸法 (mm)	101
	質量 (kg)	0.6

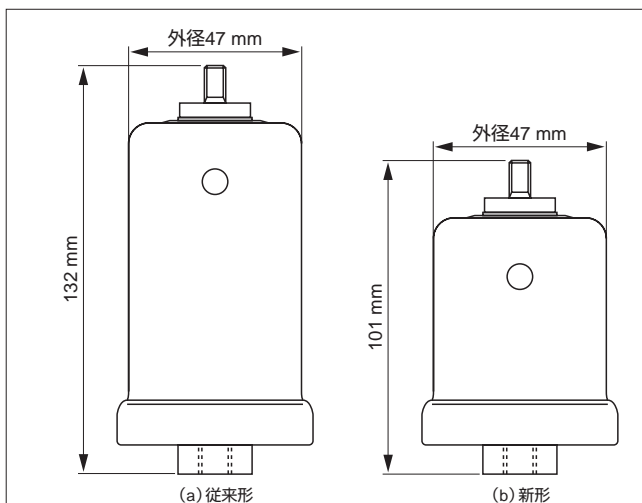


図6. 柱上変圧器用耐雷素子 — 高耐圧素子適用により小型化を達成した。

Dowsized lightning arrester for pole transformers

- (3) 放電耐量 雷インパルス放電耐量の過酷試験として、常温油中条件において雷インパルス電流30kA(4/10 μ s)を5分間隔で連続30回通電し、問題なく耐えることを確認した。また試験前後の動作開始電圧の変化がほとんどないことを確認した。

3.2 ホーン形避雷装置の開発

架空送電線の雷事故防止対策として、送電用避雷装置の適用が拡大している。送電用避雷装置は、発電機用避雷器とは異なり送電鉄塔上に設置されるため、小型・軽量化が指向されている。また、万一処理能力を上回るサージにより避雷装置本体が破壊した後でも再送電するため、避雷装置本体と直列に気中ギャップ(直列ギャップ)を備えている点が大きな特長である。

当社は高耐圧素子の適用により、小型な送電用避雷装置(ホーン形避雷装置)を製品化した。今回開発したホーン形避雷装置の主な仕様を表2に、据付状況を図7に示す。この避雷装置の主な特長は以下のとおりである。

- (1) 構造 高耐圧素子の適用の効果により、避雷器全長の短縮化(従来より約50%減)と軽量化(従来より質量で約25%減)を実現した。また、ZnO素子に直接シリコン

表2. ホーン形避雷装置の仕様

Specifications of transmission line arresters

項目	仕様			
系統電圧 (kV)	66	77	110	154
定格電圧 (kV)	69	80.5	115	161
最大放電電流 (kA)	25 (2/20 μ s)			
汚損度 (mg/cm ²)	0.35 (定格電圧印加時)			
放電性能 (kA)	50 (0.2秒間)			
曲げ強度 (kg)	100			
質量 (kg)	3.5	7		

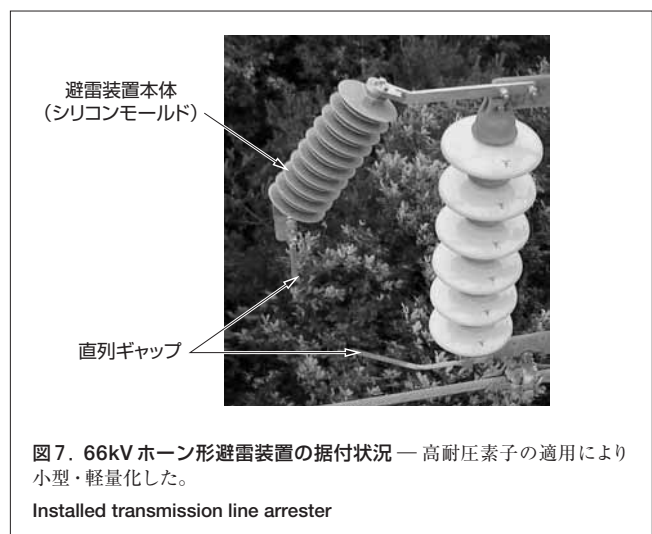


図7. 66kVホーン形避雷装置の据付状況 — 高耐圧素子の適用により小型・軽量化した。

Installed transmission line arrester

ゴムをモールドしたことにより、放圧性能として短絡電流50kAを確保できることを確認した。

- (2) 放電耐量 サージエネルギーが過大な冬季雷仕様を満たすため、最大放電電流を25kA(2/20 μs)とした。
- (3) 性能検証 送電用避雷装置固有の試験として、アークホーンとの絶縁協調試験、汚損させた避雷装置に雷インパルスを加える続流遮断試験、及び直列ギャップの耐電圧試験などを実施し、良好な性能が得られることを確認した。

3.3 超高耐圧素子を適用した800kV GIS避雷器の開発

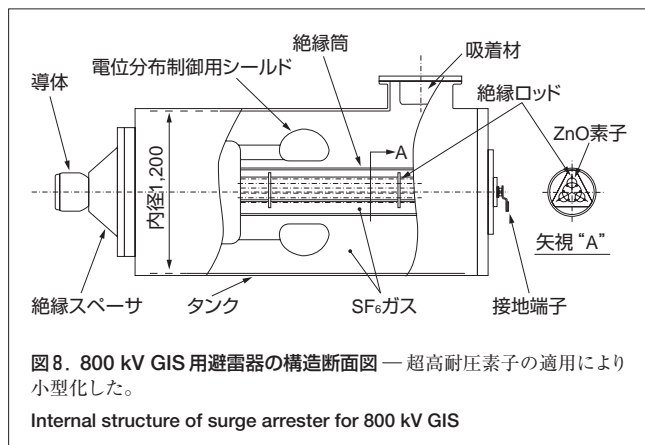
発電所に適用されるGIS避雷器は、GIS自体の小型化だけでなくGISレイアウトのフレキシビリティ向上を目的として、より小型な避雷器が要求されている。当社では600V/mm級の超高耐圧素子を適用した世界最小、最軽量^(注3)の800kV GIS用避雷器を開発し、2003年に実系統への適用を開始した⁽⁵⁾。この避雷器は、各種性能検証試験を行うとともに、国際規格IEC60099-4に従った完成品試験及び避雷器素子試験などを実施し、優れた実用性能を確認している。

今回開発した800kV GIS避雷器の主な仕様を表3に、構造断面図を図8に示す。この避雷器の主な特長は以下のとおりである。

表3. 800kV GIS用避雷器の仕様

Specifications of surge arrester for 800 kV GIS

項目	仕様	
最高系統電圧 (kV)	800	
定格電圧 (kV)	588	
最高連続使用電圧 (kV)	462	
公称放電電流 (kA)	20	
ラインディスチャージクラス	クラス4	
制限電圧 (kV)	1,400以下(20kA, 8/20 μs時)	
耐電圧	商用周波 (kV)	830
	雷インパルス (kV)	2,250
	開閉インパルス (kV)	1,425



- (1) 構造 超高耐圧素子の適用により構造の簡素化、小型化(高耐圧素子適用時より容積で45%減)、及び軽量化(同じく質量で17%減)が実現できた。
- (2) 課電率 3次元電界解析を用いた電圧分担率制御用シールドの最適設計により、素子の課電率が85%以下に制御可能となった。また、超高耐圧素子の長期安定性を評価する課電寿命試験(1,000時間)においても漏れ電流の増加は認められず、十分な寿命性能を持つことを確認した。
- (3) エネルギー耐量 仕様値の5MJに対して6.6MJのエネルギーを注入しても、その後の定格電圧及び連続使用電圧印加時に漏れ電流が増加することなく熱的安定性を保ち、十分な裕度を持つことを確認した。

4 あとがき

避雷器の技術動向としては、ZnO素子の高耐圧化技術により避雷器の小型・軽量化が進み、据付作業の向上や据付面積の省スペース化が実現されている。今後、更なる避雷器の小型・軽量化を進めるとともに、ZnO素子の特性向上を目指した開発を進める計画である。

文献

- (1) 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.
- (2) 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.
- (3) 安藤秀泰, ほか. 世界最高耐圧を達成した避雷器用超高耐圧ZnO素子. 東芝レビュー. 57, 10, 2002, p.58-61.
- (4) 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.
- (5) 深野孝人, ほか. "800kV GIS 避雷器の開発". 平成15年電気学会全国大会. 仙台, 2003-03, 6-249.



安藤 秀泰 ANDOH Hideyasu

電力システム社 浜川崎工場 避雷器部主務。避雷器用セラミック素子の研究・開発に従事。日本セラミックス協会会員。Hamakawasaki Operations



小松 克朗 KOMATSU Katsuki

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



山本 浩義 YAMAMOTO Hiroyoshi, D.Sc

電力システム社 浜川崎工場 避雷器部グループ長, 理博。避雷器の設計・開発に従事。電気学会会員。Hamakawasaki Operations