

変電機器のコンパクト化を支える新材料技術

New Material Technologies to Support Substation and Transmission Equipment

伊藤 義康
ITOH Yoshiyasu

市川 以知郎
ICHIKAWA Ichiro

中野 俊之
NAKANO Toshiyuki

特集 II

次世代の変電技術を支える基盤技術として、高度化された新材料技術の耐熱樹脂材料技術、酸化亜鉛(ZnO)素子技術、異種金属接合技術がある。いずれも解析技術に裏付けられ、今後の変電機器の高電圧・大容量化と、コンパクト化には必須(す)であり、21世紀に向けてガス絶縁開閉装置(GIS)の開発をリードする技術である。

開発された新材料技術は、すでに現状GISのコンパクト化、信頼性向上に大きく寄与しており、今後の低コスト化のキー技術でもあるので、解析技術とあわせてさらなる高度化を目指している。

Recent developments in new material technologies, namely, a heat-resistant resin technology, a zinc oxide nonlinear resistor technology, and a technology for joining dissimilar metals, are fundamental technologies supporting next-generation substation and transmission equipment. These new developments are based on analysis technologies, and are necessary in order to realize high voltage, large capacity, and compactness.

The newly developed material technologies will directly contribute to improvements in compactness, reliability, and economy.

1 まえがき

経済性と環境調和の観点から、変電機器の高電圧・大容量化とコンパクト化は必須課題であり、継続的な開発が進められている。これらの開発では、変電機器を構成する材料にとってはきわめて過酷な環境となる。すでに、変電機器に使われる主要な材料は、いずれも単体の材料では適用できず、複合化による機能向上が図られてきている。新材料技術とは、このような材料技術の高度化を意味しており、今後ますますコンパクト化、経済性、高信頼性を要求される変電機器では必要不可欠な基盤技術である。

ここでは、21世紀に向けGISのコンパクト化をリードする新材料技術、すなわち耐熱樹脂材料技術、ZnO素子技術、異種金属接合技術について述べる。

2 GISのコンパクト化と新材料技術

当社は世界に先駆けて550 kV-63 kA大容量1点切りガス遮断器(GCB)を1993年に実用化して以来、着実にその適用実績を積み重ねてきた。また新材料技術の開発を推進し、各コンポーネントのさらなるコンパクト化を盛り込み、GISの開発を行ってきた。図1に一例として550 kV GIS 1回線の従来型GISと新型GISの大きさを示す。新型は従来型に比べて、設置面積、容量、質量ともに、大幅な軽減が可能となった。また、従来の2点切り横型GCBに1点切り縦型GCBを、主母線断路器に高耐熱樹脂材料を、避雷器に高耐圧ZnO素子を適用することにより大幅なコンパクト化を達成した。これらの新材料技術は、後述する異種金属接合技

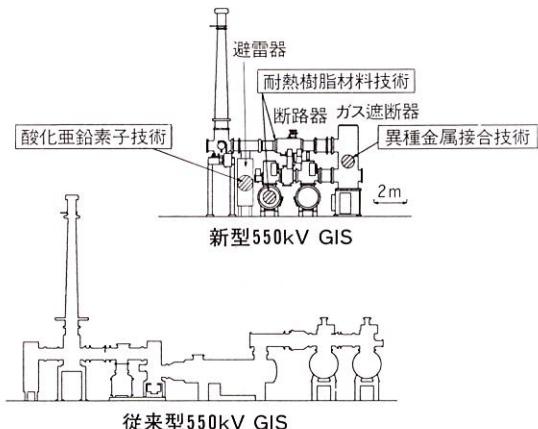


図1. ガス絶縁開閉装置のコンパクト化 新材料技術の開発で、GISの面積、容積、質量の大幅軽減を達成した。
Reduction in size of gas-insulated switchgear (GIS)

術とともに、550 kV以下の下位機種でも適用を進めている。

3 新材料技術とそれを支える解析技術

3.1 耐熱樹脂材料技術

絶縁スペーサーは、GIS内に設置される機器をタンクから電気的に絶縁するとともに機械的に支持するもので、GISのコンパクト化、高信頼性化についてきわめて重要な部品である。すなわち、GIS母線径の縮小は、この絶縁スペーサーの小型化を意味しており、放熱面減少による温度上昇のために高耐熱樹脂材料の開発が必須である。

図2には耐熱温度115°Cと、従来より10°C向上した樹脂

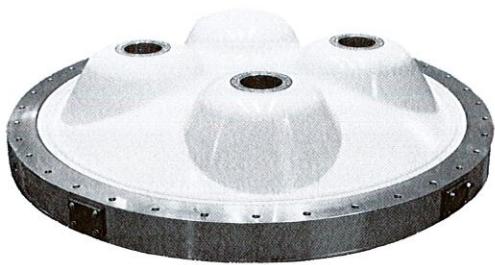


図2. 550 kV-GIS用三相絶縁スペーサー 耐熱温度115°Cの注型樹脂を使用し、母線タンク径を15%縮小化した。

Three-phase insulation spacer for 550 kV GIS

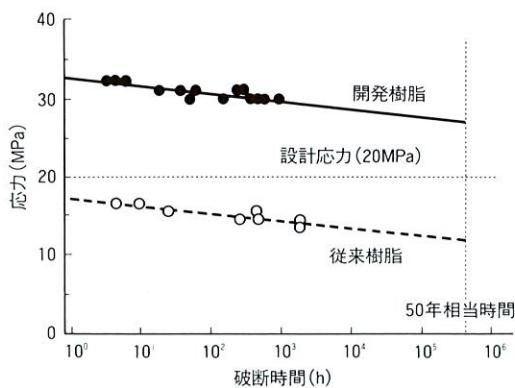


図3. 注型樹脂の115°Cクリープ破断特性 高耐熱化により設計応力20 MPaのもとで、115°Cの期待値以上のクリープ寿命を達成した。

Creep rupture characteristics of casting resin at 115°C

で製造した550 kV GIS用三相絶縁スペーサーの外観を示す。開発した耐熱樹脂はアルミナ粒子を分散したエポキシ樹脂から構成される複合材料で、樹脂の低硬化収縮、低粘度化とアルミナ粒子の高充填(てん)化によって高耐熱性を実現した。図3には115°Cのクリープ破断試験結果を示し、設計応力20 MPa(約2 kg/mm²)の下で設計期待値以上の寿命をもつ。また、導体接続用の埋込み金属電極と樹脂界面の接着性は、絶縁スペーサーの電気的信頼性を左右する重要な要因である。開発樹脂では接着に影響するエステル基濃度を高めるとともに、高耐熱プライマー(界面処理剤)を適用することで、接着強度を室温で20%, 115°Cでも40%の向上を達成した。

一方、三相絶縁スペーサーのように樹脂量200 kgから500 kgの大型エポキシ注型品の製造では、発熱と収縮を伴う硬化反応の制御も重要である。当社では有限要素法^(注1)による硬化プロセス解析を行うことにより、クラックやヒケなどを生じない最適硬化プログラムを構築し、品質の安定化に大きく寄与している。

これらの耐熱樹脂材料技術を基に、次世代GISの主母線タンク径の15%縮小化を達成した。また、現在は耐熱温度125°Cの注型樹脂を開発しており、ガス絶縁管路送電線

(GIL)に適用し母線径の23%縮小化を達成している。

今後は、生産性向上の観点から短時間硬化が可能な高速注型技術を目指し、硬化プロセス解析に基づくプロセス制御に必要なセンサ技術開発を進める。

3.2 ZnO 素子技術

各種変電機器の絶縁協調レベルのかなめである避雷器の保護レベルを低くすることができれば、GIS全体の絶縁合理化、コンパクト化と低コスト化が可能になる。このような観点から、避雷器の高性能化開発、すなわちZnO素子の特性向上を進めてきた。特性向上とは、ZnO素子の動作開始電圧とエネルギー耐量の向上を意味している。

図4にはZnO素子の電流-電圧特性を示す。従来、標準的には動作開始電圧200 V/mm(1.0任意単位)の素子が使われてきたが、素子の製造プロセスで添加物配合比と焼結条件の最適化を図り、2倍の動作開始電圧である400 V/mm(2.0任意単位)をもつ高耐圧ZnO素子を開発した。素子径を変えずに素子1枚当たりの動作開始電圧を2倍にしたため避雷器としての素子体積が1/2になる。素子径を大きくし、体積を増すことも考えられるが、よりコンパクトな素子開発を目指した。すなわち、製造プロセス最適化で組織均質化を図り、電流集中を防止するなどの技術施策を併せて行い、従来比1.5倍の放電耐量向上を達成し、同一素子径で素子枚数を半減化することに成功した。現在、系統電圧が66 kVから550 kVまでのタンク形避雷器に適用し、大幅な小型・軽量化と構造簡素化、部品点数削減を達成した。550 kVタンク形避雷器ではタンク径を17%縮小し、質量50%削減を達成した。

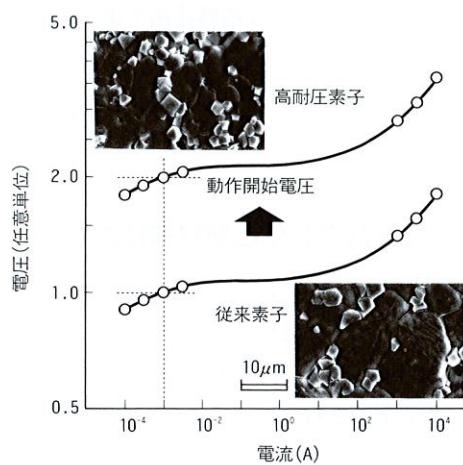


図4. 高耐圧ZnO素子の電圧-電流特性 結晶組織を微細制御することで、従来の2倍の動作開始電圧を達成した。

Nonlinearity of current-voltage characteristics

(注1) 対象を細かな要素に分割して、それぞれの要素ごとに隣り合う要素との関連を含めて計算を行い、詳細な部分まで把握する解析手法。

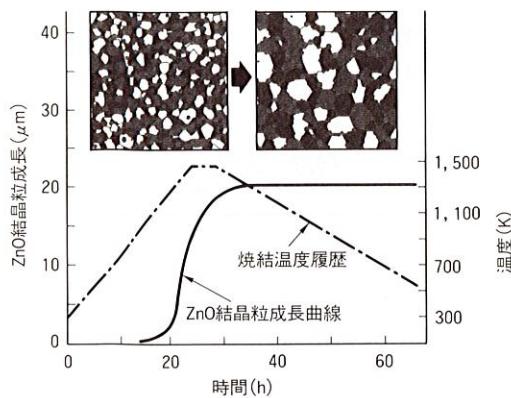


図5. ZnOの結晶粒成長シミュレーション 結晶粒成長挙動解析により、結晶粒成長を抑えた最適焼結条件を決定した。

Computer simulation of ZnO grain growth

ZnO素子の電流一電圧特性はZnO結晶粒径により大きな影響を受ける。これは素子の抵抗が導電通路である結晶粒界層の数に比例するためである。図5に結晶粒成長のシミュレーション結果の一例を示す。図中の焼結温度履歴によるZnO結晶粒の成長挙動を解析した結果である。昇温過程において、すでに相当な粒成長が生じている。当社は、このような解析システムとデータベースの構築で、素子製造プロセスの最適化を図るとともに、次世代素子開発の加速を目指している。

今後は、ZnO結晶粒の成長挙動解析技術の高度化を図り、あわせて熱応力解析技術を駆使することで、さらなる高耐圧、高耐量素子の開発を目指す。

3.3 異種金属接合技術

GCBのコンパクト化を目指して、当社は小型で低駆動力操作を可能としたハイブリッドパッファ消弧室と、デュアルモーション機構を開発し、従来型2点切りGCBに比べて部品点数70%，質量85%の550kV1点切りGCBを開発した。さらなるコンパクト化のためには消弧室自体のコンパクト化が必要である。しかし、鋼やアルミニウム、銅、タンクステンなどの合金で構成される消弧室では、耐アーキ性、耐熱性の向上が必須で、これらの異種金属間の接合技術と継手強度の信頼性向上が、これかららの課題である。図6に直接接合で耐熱性の大幅向上を図ったアーキ接触子の接合断面組織の一例を示す。図中には、引張荷重を受けるタンクステン合金と銅合金の異種金属材料の接合界面近傍の応力状態について、有限要素法により解析した結果を示す。図から明らかのように継手形状が平滑であっても、異種金属接合界面端部には材質の違いによる応力集中を生ずることがわかる。すなわち、異種金属接合には、このような接合界面端部の応力集中を考慮した継手設計が必要である。

今後、界面破壊力学の適用で、より高精度の継手設計技術を構築し、信頼性の向上を目指す。また、このような異

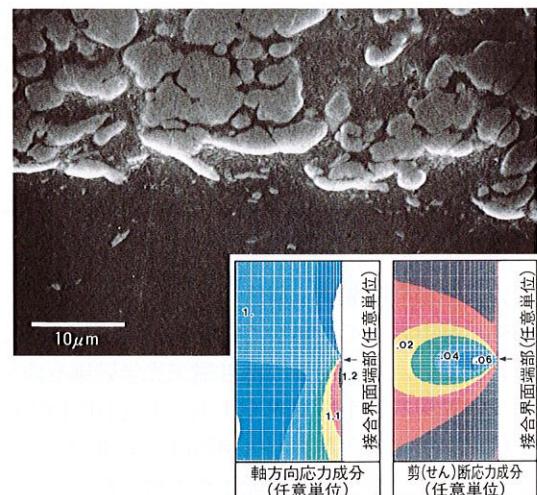


図6. 異種金属接合界面組織と接合界面の応力解析結果 接合界面端部の応力集中を考慮した継手設計により、高い信頼性をもつ異種金属接合技術を確立した。

Microstructure at interface of dissimilar metals and stress distribution near bonding interface

種金属接合技術はGIS全体に適用可能な技術であり、コンパクト化、経済性向上のためのキー技術と考えられるので、幅広い適用展開を進めていく。

4 あとがき

変電機器を支える多くの材料技術から、代表的な新材料技術を選び最近の開発動向を述べた。いずれも技術の高度化を目指し、解析による裏付けを行いながら着実に一步一歩開発を進めてきた技術である。途切れることのない継続が材料開発には重要で、新材料技術が開発されたときの製品への波及効果は大きく長期にわたる。今後も引き続き材料技術の高度化を図り、変電機器の経済性向上、コンパクト化、信頼性向上を材料面からリードする所存である。



伊藤 義康 ITOH Yoshiyasu, D.Eng.

電力・産業システム技術開発センター 金属・セラミックス材料技術担当主幹、工博。変電機器の材料開発に従事。日本機械学会、セラミックス協会、溶接学会会員。
Power and Industrial Systems Research and Development Center



市川 以知郎 ICHIKAWA Ichiro

電力・産業システム技術開発センター 化学・絶縁材料技術担当主査。開閉装置の注型樹脂開発および製造技術開発に従事。電気学会会員。
Power and Industrial Systems Research and Development Center



中野 俊之 NAKANO Toshiyuki

浜川崎工場 注形部品部主査。開閉装置の注型樹脂開発および製造技術開発に従事。高分子学会、電気学会、日本化学会会員。
Hamakawasaki Works