

〈特別研究課題〉 導電率傾斜機能材料による直流ガス絶縁開閉装置の
小型化とSF₆ガス使用量削減
助成研究者 名古屋大学 早川 直樹



導電率傾斜機能材料による直流ガス絶縁開閉装置の 小型化とSF₆ガス使用量削減

早川 直樹
(名古屋大学)

Reduction of Size and SF₆ Gas Volume in HVDC Gas-insulated Switchgears with Conductivity Graded Materials

Naoki Hayakawa
(Nagoya University)

Abstract :

Functionally graded materials (FGM) with graded permittivity (ϵ) and conductivity (σ) are promising as one of the effective techniques for the reduction of size and SF₆ gas volume in high voltage direct current (HVDC) power apparatus such as gas-insulated switchgears (GIS) and transmission lines (GIL). Toward the practical application of FGM to HVDC GIS/GIL spacers, we investigated the electric field reduction effect and the discharge inception voltage enhancement effect of ϵ and σ graded materials (ϵ/σ -FGM). The results show that ϵ/σ -FGM spacer with grading to lower permittivity (GLP) (ϵ_r from 12.7 to 4) containing 0 to 26.9 vol% SrTiO₃-filled epoxy composite and U-shaped graded conductivity containing 5 to 10 vol% SiC-filled epoxy composite is effective for electric field reduction under DC steady state and lightning impulse (LI) voltage. The discharge inception voltage of ϵ/σ -FGM spacer in SF₆ gas at 0.5 MPa-abs under LI voltage is also estimated to be 26% higher than that of conventional spacer without ϵ/σ -grading.

1. はじめに

快適かつ安心な都市の生活環境を維持し、持続可能な社会を創造するためには、社会活動のエネルギーインフラである電力機器・システムの高信頼・高効率化が必要不可欠である。現在の電力機器・システムは発電所と都市を送配電網で結び、電力の流れを拠点変電所の開閉装置(スイッチ)の

開閉・切換で制御している。この開閉装置として、SF₆ガスを封入したガス絶縁開閉装置(Gas Insulated Switchgear: GIS)が主流であるが、SF₆ガスの地球温暖化係数がCO₂ガスの23,900倍と高いことから、その使用量の削減が世界的に喫緊の課題となっている。また、地球温暖化抑制対策としての太陽光発電や風力発電などの自然エネルギー由来の発電技術の普及拡大に伴い、その出力特性や長距離送電の観点から、高電圧直流(High Voltage Direct Current: HVDC)送電技術の開発が、昨今の世界的なキーテクノロジーとなっている。すなわち、高電圧直流ガス絶縁開閉装置(HVDC-GIS)の開発およびその小型化とSF₆ガス使用量削減が求められている。

このような社会的・技術的背景により、本研究では、HVDC-GISの小型化とSF₆ガス使用量削減に向けて、傾斜機能材料(Functionally Graded Materials: FGM)の適用を目指している。FGMは「空間的に一つの機能から他の機能へと連続的または段階的に変化する一体の材料」として定義される。GISのサイズは高電圧導体を電氣的・機械的に支持する絶縁スペーサのサイズに支配されるため、FGMをスペーサに適用することによって小型化が可能となれば、GISとしてのSF₆ガス使用量の削減につながる。FGMのGISスペーサへの適用は筆者らのオリジナル研究であり、従来は主として交流GISスペーサへの適用を対象としてきたが、本研究はFGMの直流GISスペーサへの適用を目指すものである。本報告書では、まずFGMのコンセプトと交流GISスペーサへの適用実績を紹介し、FGMの直流GISスペーサへの適用可能性について、基礎的な円錐台形スペーサへの適用効果、実用的なコーン型スペーサへの適用効果に関する研究成果について述べる。

2. FGMのコンセプトと研究実績

2.1 FGMのコンセプト

GISスペーサは、主剤であるエポキシ樹脂にSiO₂やAl₂O₃などの無機フィラーを混合することにより、スペーサとしての電氣的・熱的・機械的特性を制御している。同軸円筒構造を有するGIS内部では、内円筒導体(高電圧)と外円筒導体(接地)との間にスペーサ(比誘電率 $\epsilon_r=4$)とSF₆ガス($\epsilon_r=1$)があるため、複雑かつガス中の電界が局所的に高くなる不平等電界分布が形成され、スペーサよりも絶縁性能の低いSF₆ガス中の最大電界を低減するような絶縁設計が行われている。

ここで、同軸円筒導体(内半径 a 、外半径 b)の内円筒導体に電位 V_0 を与えた場合、内円筒～外円筒筒間の誘電体(ϵ_r :一定)の電界・電位分布は、ガウスの法則により、図1(a)ようになる。一方、 ϵ_r が半径 r に反比例的に減少(傾斜)する場合の電界・電位分布は図1(b)となり、最大電界が緩和されるとともに、誘電体内部が平等電界となる。このような電界緩和は「理論的には可能であるが、技術的・実用的な解決策はない」⁽¹⁾とされているが、これを技術的・実用的に解決する技術がFGMのコンセプトである⁽²⁾。従来は一定であるスペーサ内部の比誘電率を空間的かつ任意に制御すること

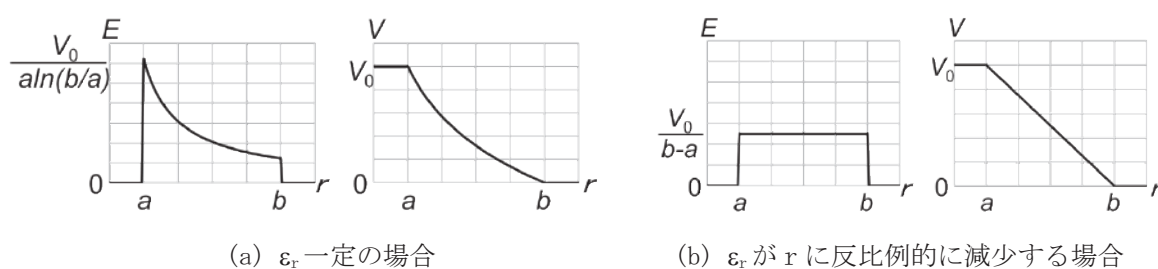


図1 同軸円筒導体の電界・電位分布

ができれば、SF₆ガス中の電界を緩和かつ平等化し、GISとしての絶縁性能を向上するとともに、SF₆ガス使用量を削減することが可能となる。

スペーサ内部の誘電率(ϵ)、導電率(σ)または両方の空間分布を制御するFGMをそれぞれ「 ϵ -FGM」、「 σ -FGM」、「 ϵ/σ -FGM」と呼ぶ。交流GIS内部の電界は主としてスペーサの誘電率に支配されるのに対して、直流GIS内部の電界は主としてスペーサの導電率に支配されるため、直流GISへの適用が期待されるFGMは「 σ -FGM」または「 ϵ/σ -FGM」である。

2.2 FGMの研究実績

筆者らが参画したNEDO戦略的省エネルギー技術革新プログラム「電力機器用革新的機能性絶縁材料の技術開発」プロジェクト(2017~2022, JPNP12004)⁽³⁾⁽⁴⁾では、 ϵ -FGMを適用したGISスペーサが開発されている。同プロジェクトでは、交流245kV級GISスペーサを対象とし、スペーサ直径を30%低減することにより、GIS断面積およびSF₆ガス使用量を50%低減することを目的としている。

NEDOプロジェクトにおいて、可変配合注型法⁽⁵⁾で作製した245kV級コーン型 ϵ -FGMスペーサ(内半径45mm, 外半径120mm)の外観を図2に示す。同図において、中心導体周囲の白色領域が高誘電率層($\epsilon_r=10$)、外周部の黒色に着色した領域が低誘電率層($\epsilon_r=4$)、中間の段階的な灰色領域が誘電率傾斜層($\epsilon_r=4\sim 10$)である。 ϵ -FGMスペーサの負極性標準雷インパルス電圧印加時におけるSF₆ガス中絶縁破壊電圧の実測結果(FOV)および解析結果(TDIV₅₀)を図3に示す。同図には、 ϵ -FGMスペーサと同一形状・サイズで誘電率一定($\epsilon_r=4$)のUniformスペーサの結果も併記している。同図より、 ϵ -FGMスペーサのFOVは各圧力においてUniformスペーサのFOVを上回り、0.6 MPa-absにおいて28%高いことがわかる。本NEDOプロジェクトは2022年2月で終了したが、現在、電力機器メーカーにおいて製品化に向けた検討・開発が行われている。



図2 コーン型FGMスペーサ

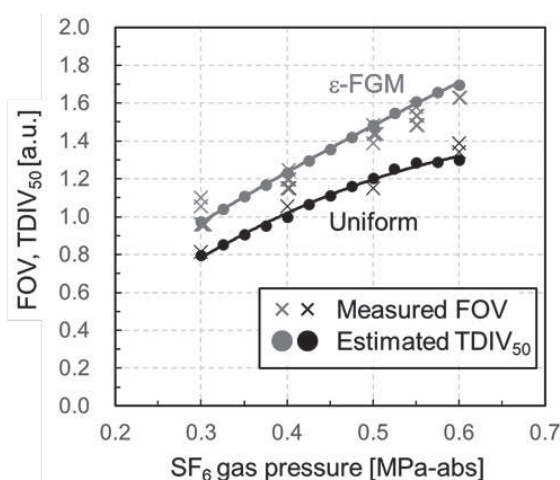


図3 FGMスペーサの絶縁破壊電圧向上効果

本研究は、筆者らのオリジナル研究からNEDOプロジェクトに発展したFGMの交流GISスペーサへの適用研究をベースとして、FGMの直流GISスペーサへの適用研究への展開、すなわち、 ϵ -FGMから σ -FGMあるいは ϵ/σ -FGMへの展開を図るものである。

3. 円錐台形スペーサへの σ -FGM適用効果

3.1 スペーサモデル

SiCとSiO₂をフィラーとして充填したエポキシコンポジットの導電率特性(充填率・電界・温度依存性)を図4⁽⁶⁾に示す。同図より、SiCコンポジットの導電率は、SiC充填率、電界、温度とともに非線形に上昇することがわかる。同図のSiCコンポジットを図5に示す円錐台形スペーサ(SiC充填率: 5~10 vol%, U字型)に適用し、平行平板電極で挟んだ円錐台形 σ -FGMスペーサモデルを想定した。なお、スペーサ内部の比誘電率は一定($\epsilon_r=4$)とした。

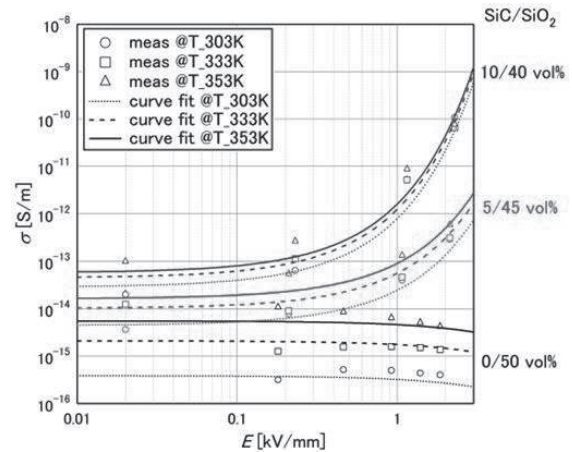


図4 SiCコンポジットの導電率特性

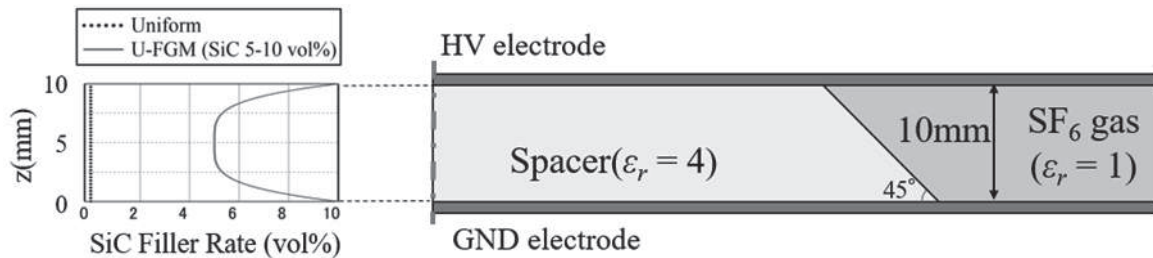
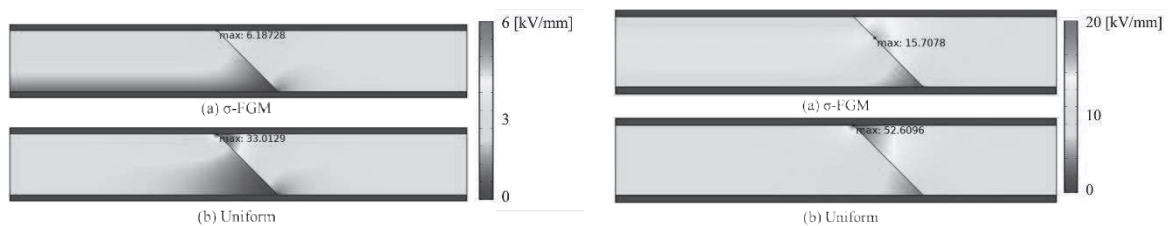


図5 円錐台形 σ -FGMスペーサモデル

3.2 電界緩和効果

図5の円錐台形 σ -FGMスペーサモデルの上部電極に高電圧を印加し、下部電極を接地した場合における(a)直流電圧20kV印加時、(b)標準雷インパルス電圧100kV印加時の電界解析結果を図6に示す。各図には、比較のために、SiCを充填していないUniformスペーサ(導電率一定)の電界解析結果を併記している。各図より、 σ -FGMスペーサの場合、Uniformスペーサの場合と比較して、特に上部電極とスペーサとの接触点(三重点)近傍におけるSF₆ガス中の電界が大きく緩和されていることがわかる。これは、Uniformスペーサの場合には、等電位面が三重点近傍に集中して高電界となるが、 σ -FGMスペーサの場合には、図5のようにスペーサ上部のSiC充填率、すなわち導電率を高くすることによって等電位面をスペーサ中央方向に押し出し、三重点近傍の電界を緩和しているためである。



(a) 直流電圧 20kV 印加時

(b) 標準雷インパルス電圧 100kV 印加時

図6 円錐台形 σ -FGMスペーサの電界分布

3.3 絶縁破壊電圧向上効果

図6の σ -FGMスペーサによる電界緩和効果を標準雷インパルス電圧印加による絶縁破壊試験によって実験的に検証することを試みた。 σ -FGMスペーサおよびUniformスペーサについて、Volume-Time理論⁽⁷⁾を用いて推定した50%確率の放電開始電圧(50% Theoretical Discharge Inception Voltage: TDIV₅₀)のSF₆ガス圧力依存性を図7に示す。同図より、 σ -FGMスペーサのTDIV₅₀は、0.5MPa-absにおいてUniformスペーサのTDIV₅₀よりも30%高いことが予想される。

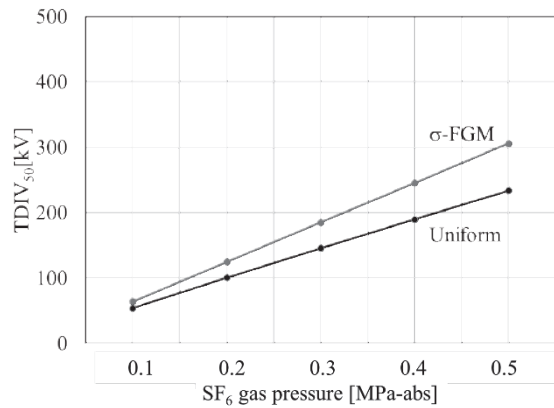


図7 円錐台形 σ -FGMスペーサの放電開始電圧(推定値)

次に、図5の σ -FGMスペーサを可変配合注型法によって作製した。SiC (10vol%) を含むコンポジットAとSiCを含まないコンポジットBをそれぞれ充填した2本のシリンジ(図8)の注入速度を独立制御(図9)し、スタティックミキサを介して金型に充填した(図10)。金型内のコンポジットをオーブンで熱硬化・離型した後、図5のサイズ(厚さ10mm)にカッティングした σ -FGMスペーササンプルを図11に示す。同様のプロセスにより、コンポジットBのみでUniformスペーササンプルを作製した。

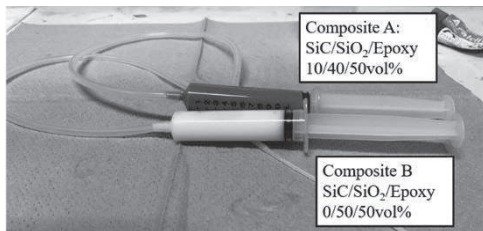


図8 σ -FGMスペーサ作製用シリンジ

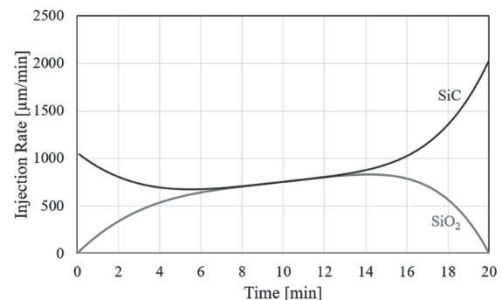


図9 各シリンジの注入速度

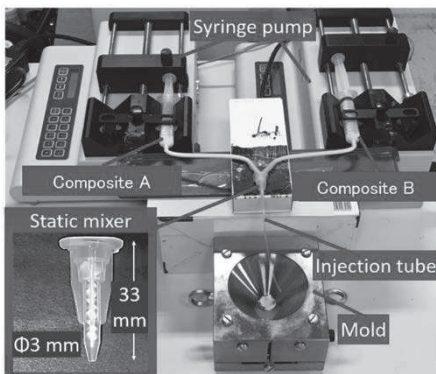


図10 可変配合注型装置

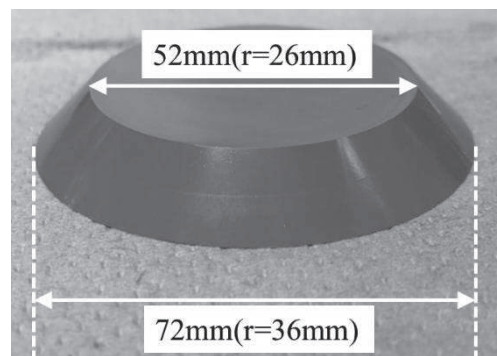
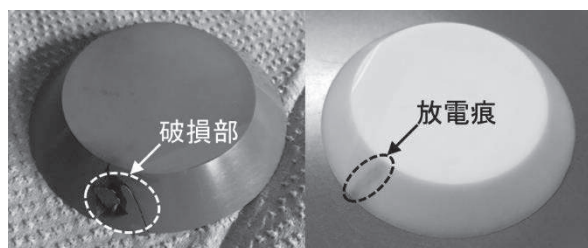


図11 σ -FGMスペーササンプル

σ -FGMスペーササンプルおよびUniformスペーササンプルを0.3MPa-absのSF₆ガス中に配置し、正極性標準雷インパルス電圧を絶縁破壊が発生するまで上昇法にて印加した。その結果、Uniformスペーササンプルは130kVで破壊し、図7の推定値(146kV)の89%であった。一方、 σ -FGMスペー

ササンプルは123kVで破壊し、推定値(185kV)の66%と低く、Uniform スペーササンプルよりも低い値となった。また、図12に示す絶縁破壊試験後の写真より、Uniform スペーササンプルには図6(b)の最大電界である三重点を起点とする沿面放電痕があるのに対して、 σ -FGMスペーササンプルは破損していた。これは



(a) σ -FGM スペーサ (b) Uniform スペーサ

図12 絶縁破壊試験後の放電痕

は、 σ -FGMスペーサの導電率が高いことによってスペーサ内部に大きな電流が流れ、電気的な破壊が発生する前に、熱的・機械的な破壊が発生したためと推察される。この推察に立脚した対策として、電源回路における過電流制御用抵抗を高抵抗化して再試験する予定である。さらに、電界解析による σ -FGMスペーサの電界緩和効果とともに、電流・熱伝導解析による σ -FGMスペーサの熱的な安定性に関する評価・検証も重要であるという技術課題が明らかとなった。

4. コーン型スペーサへの ϵ/σ -FGM適用効果

4.1 スペーサモデル

前章では、円錐台形スペーサモデルを想定し、 σ -FGMスペーサの基礎的な電界緩和効果について検討した。一方、実際のGISスペーサは、同軸円筒構造における内円筒高電圧導体-外円筒接地導体間のガス空間に設置され、電気的・機械的性能の観点からコーン型であることが多い。そこで、本章では、2.2節のNEDOプロジェクトにおけるコーン型245kV級GISスペーサを参考にするとともに、将来的な実験的検証(当研究室所有の高電圧電源の出力制限等)を念頭に置いて、同スペーサと同一形状でサイズを1/4に縮小したモデルとして、図13(a)に示すコーン型スペーサモデル(内半径11.25mm, 外半径30mm)を想定した。電圧レベルは、直流GISスペーサへのFGM適用に関する筆者らの先行研究⁽⁸⁾を対象とした直流GIS(320kV, 内半径100mm, 外半径350mm)内部の電界レベルが同程度となるように、サイズ換算で27kV($\approx 320 \times 30/350$)と設定した。

図13(a)のコーン型スペーサモデルにおいて、 ϵ と σ の両方の空間分布を同時に傾斜させた ϵ/σ -FGMスペーサを想定した。 ϵ 分布の傾斜はSrTiO₃コンポジット(SrTiO₃充填率: 26.9vol%, ϵ が半径方向に低下するGLP(Grading to Lower Permittivity)型, 図13(b)), σ 分布の傾斜はSiCコンポジット(SiC充填率: 5~10 vol%, U字型, 図13(c)(d))でそれぞれ独立に与えた。 ϵ 分布と σ 分布が独立した ϵ/σ -FGMスペーサは、可変配合注型法において、必要な種類・充填率のフィラーを含むコンポジット・シリンジを複数準備することによって作製可能である。

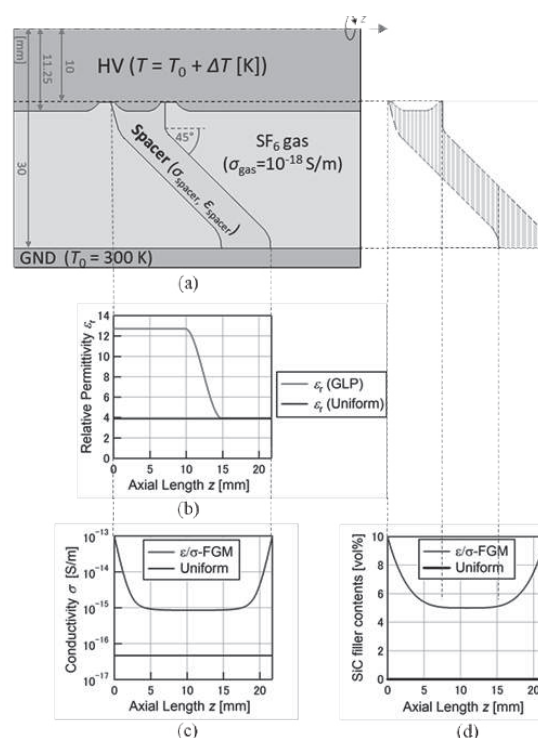


図13 コーン型 ϵ/σ -FGMスペーサモデル

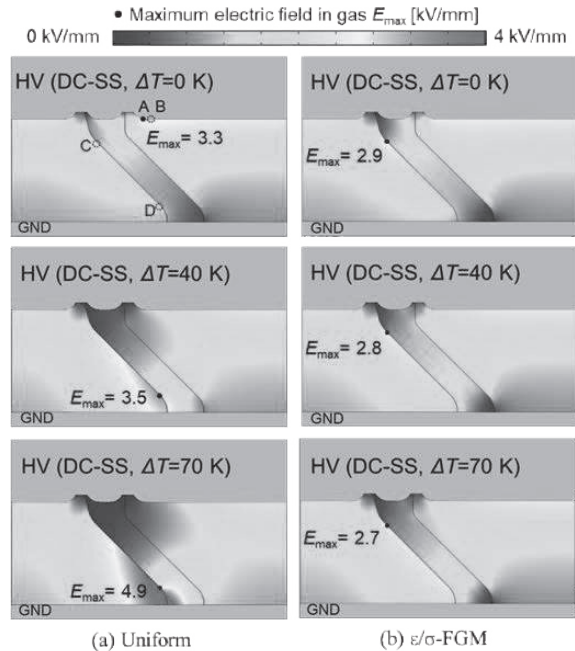
4.2 電界緩和効果

図13のコーン型 ϵ/σ -FGMスペーサモデルの内円筒導体に直流電圧27kVを印加し、外円筒導体を接地した場合における電界解析結果を図14に示す。各図には、比較のために、SrTiO₃およびSiCを充填していないUniformスペーサ(誘電率・導電率一定)の電界解析結果を併記している。また、内円筒導体の温度はGIS運転時の通電電流によって上昇し、スペーサへの熱伝達を経てスペーサの導電率分布、すなわちスペーサ内部およびスペーサ周囲のガス中電界分布を変歪させる。そこで、外円筒導体の温度を $T_0=300\text{K}$ に固定し、内円筒導体の温度を $T=T_0+\Delta T$ とし、 $\Delta T=0\sim 70\text{K}$ をパラメータとして電界解析を行った。

図14(a)より、Uniformスペーサ・ $\Delta T=0\text{K}$ の場合、コーン型スペーサの凹面側・内円筒導体近傍が最大電界となるが、 ΔT の上昇とともに最大電界が凸面側・スペーサ沿面上を経て、凸面側・接地導体近傍に推移することがわかる。これは、Uniformスペーサ(SiC充填率: 0vol%)においても、図4で示した導電率の温度依存性により、高温の内円筒導体近傍におけるスペーサの導電率が上昇し、等電位面をスペーサ中央方向に押し出すことによって内円筒導体近傍の電界が緩和され、スペーサ中央や外円筒導体近傍の電界が強調されるためである。このように、従来型のUniformスペーサにおいては、直流GIS運転時におけるスペーサ周囲のガス中最大電界の大きさや位置が、内円筒導体の温度、すなわち直流GIS運転時の通電電流に大きく依存し、電気絶縁設計・運用上の問題となっている。

一方、図14(b)の ϵ/σ -FGMスペーサの場合、U字型の σ 分布、特にスペーサ外周部の高い導電率によって外円筒導体近傍の電界が緩和される。ガス中最大電界の ΔT 依存性を図15に示す。同図より、 ϵ/σ -FGMスペーサの最大電界の ΔT 依存性は小さく、特に ΔT の大きい領域において、 ϵ/σ -FGMスペーサの最大電界緩和効果が顕著になり、 $\Delta T=70\text{K}$ において45%に達することがわかる。 ϵ/σ -FGMスペーサの最大電界の ΔT 依存性が小さいことは、導電率の電界依存性と温度依存性が、SiC充填率の空間分布、すなわちFGM化することによってバランスよく制御されているためであると考えられる。

次に、コーン型 ϵ/σ -FGMスペーサモデル($\Delta T=0\text{K}$)における標準雷インパルス電圧100kV印加時の電界解析結果を図16に示す。同図より、標準雷インパルス電圧印加時の最大電界の位置は、



(a) Uniform (b) ϵ/σ -FGM
図14 コーン型 ϵ/σ -FGMスペーサの電界分布
(直流電圧27kV印加時)

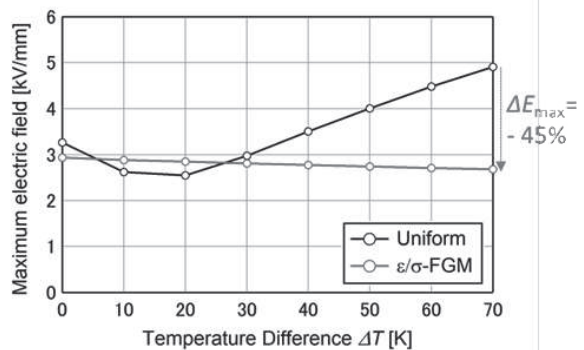


図15 コーン型 ϵ/σ -FGMスペーサの最大電界
(直流電圧27kV印加時)

Uniformスパーサおよび ϵ/σ -FGMスパーサとともに凹面側・内円筒導体近傍にあり、 ϵ/σ -FGMスパーサのガス中最大電界はUniformスパーサよりも25%低減されていることがわかる。また、両スパーサと誘電率分布のみ傾斜させた $\epsilon(\text{GLP})/\sigma(\text{Uniform})$ -FGMスパーサ(ϵ -FGMスパーサと等価)における電界推移を図17に示す。同図より、 ϵ/σ -FGMスパーサと $\epsilon(\text{GLP})/\sigma(\text{Uniform})$ -FGMの電界推移は一致していることがわかる。これは、直流GISにおいても標準雷インパルス電圧印加時のガス中電界は、交流GISと同様に誘電率に支配されることに起因している。さらに、誘電率の温度依存性はないため、標準雷インパルス電圧印加時における ϵ/σ -FGMスパーサの電界緩和効果の ΔT 依存性はない。

以上より、直流GISスパーサにFGMを適用する場合には、直流電圧印加時のような導電率支配の電界のみならず、標準雷インパルス電圧印加時のような誘電率支配の電界も制御・緩和するために、 σ -FGMよりも ϵ/σ -FGMの方が効果的であると言える。

4.3 絶縁破壊電圧向上効果

3.3節と同様に、コーン型 ϵ/σ -FGMスパーサとUniformスパーサについて、標準雷インパルス電圧印加時における TDIV_{50} の SF_6 ガス圧力依存性を推定した結果を図18に示す。同図より、 ϵ/σ -FGMスパーサの TDIV_{50} は、0.5MPa-absにおいてUniformスパーサの TDIV_{50} よりも26%高いことが予想される。この26%の TDIV_{50} 向上効果が単純にスパーサ直径の小型化に寄与するとすると、GIS断面積および SF_6 ガス使用量は55%($= (1 - 0.26)^2$)に低減されることが期待される。

今後、図13の ϵ/σ -FGMスパーサを可変配合注型法によって作製し、標準雷インパルス

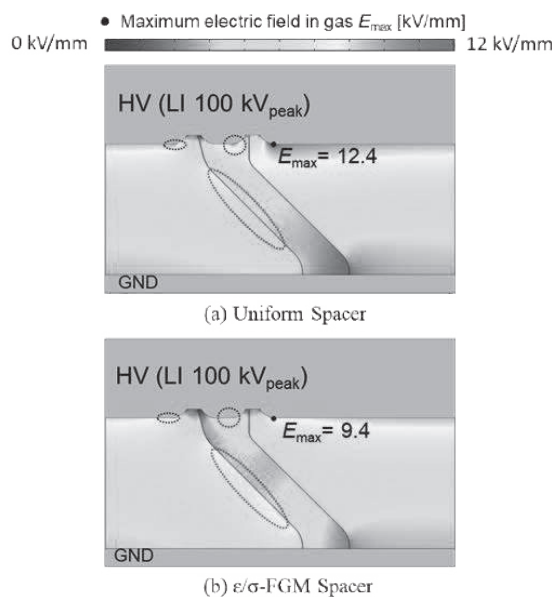


図16 コーン型 ϵ/σ -FGMスパーサの電界分布 (標準雷インパルス電圧100kV印加時)

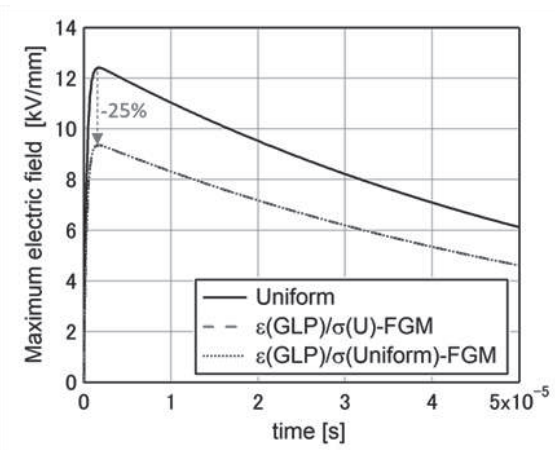


図17 コーン型 ϵ/σ -FGMスパーサの電界推移 (標準雷インパルス電圧100kV印加時)

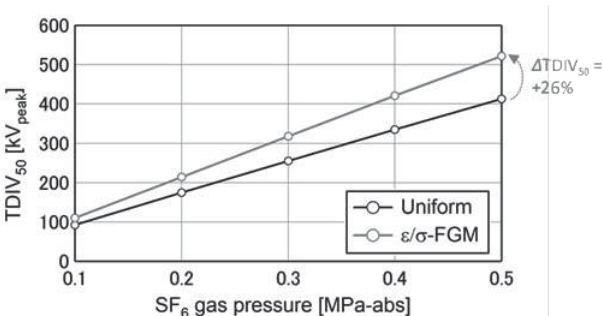


図18 コーン型 ϵ/σ -FGMスパーサの放電開始電圧(推定値)

電圧印加による絶縁破壊試験により、絶縁破壊電圧向上効果を実験的に検証する予定である。

5. まとめ

本研究では、自然エネルギー由来の発電技術の普及拡大とともに送電技術のキーテクノロジーとして期待されている高電圧直流送電について、主要機器である直流ガス絶縁開閉装置(GIS)の小型化および地球温暖化係数の高いSF₆ガス使用量の削減を目的として、GISのサイズを支配するスペーサへの傾斜機能材料(FGM)の適用可能性を検討した。基礎的な円錐台形スペーサモデルおよび実用的なコーン型スペーサモデルについて、スペーサ内部の導電率および誘電率の空間分布を想定し、FGMスペーサ周囲のガス空間の電界緩和効果および絶縁破壊電圧向上効果を評価した。その結果、導電率(σ)と誘電率(ϵ)の空間分布を独立制御した ϵ/σ -FGMスペーサの適用により、コーン型スペーサモデルの最大電界を直流電圧印加時に45%、標準雷インパルス電圧印加時に25%緩和し、標準雷インパルス電圧印加時の絶縁破壊電圧を26%向上し、SF₆ガス使用量を55%に低減し得ることを示唆した。

今後の予定および技術課題として、以下の6項目が挙げられる。

(1) 円錐台形 σ -FGMスペーササンプルの絶縁破壊試験の再試験および熱的安定性評価

3.3節で述べたように、絶縁破壊試験の電源回路における過電流制御用抵抗を高抵抗化し、円錐台形 σ -FGMスペーササンプルを再試験するとともに、電流・熱伝導解析によって σ -FGMスペーサの熱的な安定性を評価・検証する予定である。

(2) コーン型 ϵ/σ -FGMスペーササンプルの作製および絶縁破壊試験

4.3節で述べたように、 ϵ/σ -FGMスペーササンプルを可変配合注型法によって作製し、絶縁破壊電圧向上効果を実験的に検証する予定である。

(3) ϵ/σ 分布の最適化

本研究で想定した ϵ/σ 分布はあくまでも一例であり、より効果的な電界緩和・絶縁破壊電圧向上効果を得るためには、 ϵ/σ 分布の最適化が期待される。これには、最大電界や絶縁破壊電圧の目標値を設定し、それを可能とする ϵ/σ 分布を求解するという逆問題を解く方法がある。NEDOプロジェクトでは、 ϵ 分布(ϵ -FGMスペーサ)を対象とした最適化方法が提案・検証されており⁽⁹⁾、これを ϵ/σ 分布(ϵ/σ -FGMスペーサ)に展開する。

(4) ϵ/σ 分布の作製精度の検証

可変配合注型法によって作製した ϵ/σ -FGMスペーササンプルの ϵ/σ 分布を非破壊で測定し、想定した ϵ/σ 分布との作製精度を検証する必要がある。NEDOプロジェクトでは、 ϵ 分布(ϵ -FGMスペーサ)を対象としてX線CTが適用可能であることが検証されており⁽¹⁰⁾、これを σ 分布(σ -FGMスペーサ)および ϵ/σ 分布(ϵ/σ -FGMスペーサ)に展開する。

(5) スペーサ沿面付着異物の影響評価

GISスペーサにおいては、据付・運転中に発生する微小な金属異物がスペーサ沿面に付着し、絶縁性能を低下させることがある。 σ -FGMスペーサおよび ϵ/σ -FGMスペーサにおいても、スペーサ沿面付着異物の影響を評価する。

(6) GIS以外のガス絶縁電力機器、SF₆ガス以外のガスへのFGMの適用拡大

本研究では、GIS、SF₆ガスを対象としたが、他のガス絶縁電力機器(GIL等)やガス(SF₆/N₂

混合ガス等のSF₆代替ガス)への σ -FGMスペーサおよび ϵ/σ -FGMスペーサの適用効果を評価し、適用拡大の可能性を検討する。

参考文献

- (1) A.Kuechler: “High Voltage Engineering – Fundamentals·Technology·Application”, pp.86-89, Springer (2017)
- (2) 早川: 「コンポジット絶縁材料の実機適用を目指した開発事例(GIS用FGMスペーサ)」, 電気学会全国大会シンポジウム, S2-7 (2022)
- (3) 足立: 「[電力機器用革新的機能性絶縁材料の技術開発]プロジェクト概要」, 電気学会全国大会シンポジウム, S1-2 (2019)
- (4) K.Adachi, et al.: “Development of New Types of Insulators for Electric Power Apparatuses Using Nanocomposites and Functionally Graded Materials”, International Conference on Dielectrics (ICD), pp.317-320 (2020)
- (5) Y.Miyazaki, et al.: “Breakdown Characteristics of Cone-type ϵ -FGM Spacer for Gas Insulated Switchgears”, 電気学会基礎・材料・共通部門誌, 141巻10号, pp.546-551 (2021)
- (6) Rachmawati, et al.: “Application of SiC-filled Permittivity and Conductivity Graded Material (ϵ / σ -FGM) in HVDC GIS Spacer“, International Symposium on High Voltage Engineering (ISH), No.705 (2021)
- (7) N.Hayakawa, et al.: “Simulation on Discharge Inception Voltage Improvement of GIS Spacer with Permittivity Graded Materials (ϵ -FGM) by Flexible Mixture Casting Method”, IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation, Vol.25, No.4, pp. 1318-1323 (2018)
- (8) Rachmawati, et al.: “Electric Field Simulation of Permittivity and Conductivity Graded Material (ϵ / σ -FGM) for HVDC GIS Spacers“, IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation, Vol.28, No.2, pp. 736-744 (2021)
- (9) K. Kato et al, “Inverse analysis of optimum permittivity distribution for FGM spacer in consideration with multiple objective functions in gaseous insulation systems”, International Symposium on High Voltage Engineering (ISH), No.401 (2021)
- (10) 加藤, 他: 「X線CTを用いた誘電率傾斜機能材料(ϵ -FGM)の誘電率分布測定」, 電気・電子・情報関係学会東海支部連合大会, A5-7 (2021)