

論文審査の結果の要旨および担当者

報告番号	※ 甲 第 14234 号
------	---------------

氏 名 RACHMAWATI

論文題目

Electric Field Grading by Functionally Graded Materials (FGM)
for HVDC Gas Insulated Power Apparatus
(直流高電圧ガス絶縁電力装置への傾斜機能材料(FGM)による電
界制御に関する研究)

論文審査担当者

主査	名古屋大学	工学研究科	教授	早川 直樹
委員	名古屋大学	工学研究科	教授	横水 康伸
委員	名古屋大学	工学研究科	准教授	小島 寛樹
委員	名古屋工業大学	工学研究科	教授	水野 幸男

論文審査の結果の要旨

RACHMAWATI君提出の論文「Electric Field Grading by Functionally Graded Materials (FGM) for HVDC Gas Insulated Power Apparatus (直流高電圧ガス絶縁電力機器における傾斜機能材料(FGM)による電界緩和に関する研究)」は、固体絶縁材料内部の誘電率 (ϵ) や導電率 (σ) に空間分布 (傾斜) を持たせた「傾斜機能材料 (FGM)」を直流高電圧 (High Voltage Direct Current: HVDC) 電力機器であるSF6ガス絶縁開閉装置 (Gas Insulated Switchgear:GIS) やSF6ガス絶縁送電線路 (Gas Insulated transmission Line:GIL) の絶縁スペーサに適用し、HVDC-GIS/GILのコンパクト化・省エネルギー化と地球温暖化係数が高いSF6ガス使用量の削減を目指したものである。各章の概要は以下の通りである。

第1章では、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、HVDC送電技術とSF6ガス使用量削減技術の開発が昨今の世界的なキーテクノロジーになっている状況をまとめ、HVDC-GIS/GIL用絶縁スペーサへのFGMの適用によるSF6ガス中電界緩和およびGIS/GILとしての絶縁性能向上の意義を述べている。また、先行研究としての交流GIS用FGMスペーサの開発プロジェクトの概要をまとめ、直流GIS/GIL用FGMスペーサへの展開・開発に関する本研究の技術課題と目的を述べている。

第2章では、FGMスペーサによる直流GIS/GIL内部のガス中電界緩和コンセプトを述べるとともに、直流定常状態の電界分布を支配するFGMスペーサ内部の導電率分布をSiCの体積充填率 (vol%) で空間的に傾斜させる「 σ -FGM」を提案した。絶縁スペーサの主剤であるエポキシ樹脂へのSiC充填率 (0~10vol%)、印加電界 (1~10kV/mm)、温度 (303~353K) をパラメータとして、SiC/エポキシコンポジット材料としての導電率特性を測定し、多重回帰分析によってデータベース化した。

一方、SiC/エポキシコンポジットのみでは、直流定常状態以外の過渡的な運転条件 (直流ON時、極性反転時、雷インパルス電圧重畳時) の電界分布を支配する誘電率分布を有効に制御できないことが判明した。そこで、交流GIS用の「 ϵ -FGM」スペーサに関する先行プロジェクトで使用したSrTiO₃を併用することにより、導電率分布と誘電率分布を独立制御する「 ϵ/σ -FGM」を提案した。

第3章では、320kV HVDC-GIS用コーン型スペーサに ϵ/σ -FGMを適用した場合を想定し、各種の運転条件におけるスペーサ周辺のガス中電界分布を有限要素法によって解析した。 ϵ/σ -FGMの導電率分布として、スペーサの半径方向 (高電圧導体から接地導体へ向かう方向) に極小値を有するU字型および単調増加するGHC (Grading-to-Higher Conductivity) 型、誘電率分布としてU字型を想定し、それぞれ分布を有しない一定型 (Uniform) を含めた計10種類の組み合わせにおいて電界解析を実施した。

その結果、直流定常状態においては、誘電率も導電率も分布を有しない従来のUniformスペーサと比較して、 σ (U)-FGMスペーサおよび ϵ (U)/ σ (GHC)-FGMスペーサがガス中最大電界を43%低減できることを明らかにした。特に、 ϵ (U)/ σ (GHC)-FGMスペーサは、過渡的な運転条件を含めて総合的な最大電界緩和効果が最も高い (直流ON時: 43%, 極性反転時: 30%, 負極性雷インパルス電圧重畳時: 20%, 正極性雷インパルス電圧重畳: 7%) ことを見出した。

第4章では、 ϵ/σ -FGMスペーサのサンプル作製・性能試験に向けて、試作可能な定格電圧・サイズレベルの ϵ/σ -FGMスペーサモデルを対象として電界緩和効果を検証するとともに、雷インパルス電圧印加時の放電開始電圧向上効果をVolume-Time理論を用いて解析した。

その結果、SrTiO₃ (0~26.9vol%) によってスペーサの半径方向に比誘電率が12.7から4.0に単調減少するGLP (Grading-to-Lower Permittivity) 型の誘電率分布、SiC (5~10vol%) によって導電率が10-15S/m~10-7S/mでU字型となる導電率分布を有する ϵ (GLP)/ σ (U)-FGMスペーサが、直流GISの各種の運転条件において総合的な最大電界緩和効果が高い (直流定常状態: 45%, 極性反転時: 48%, 負極性雷インパルス電圧重畳時: 36%, 正極性雷インパルス電圧重畳: 22%) ことを明らかにした。第3章との解析結果の相違は、直流GISモデルの定格電圧・サイズその他、解析に使用した導電率/誘電率特性 (第3章: 文献データ, 第4章: 第2章で測定したデータベース) によるものである。また、正極性雷インパルス電圧印加時における ϵ (GLP)/ σ (U)-FGMスペーサの放電開始電圧は、Uniformスペーサと比較して19~26% (SF6ガス圧力0.1~0.5MPa) 向上することを見出し、これは主として ϵ (GLP)/ σ (U)-FGMスペーサの誘電率分布の寄与によるものであることを解明した。

さらに、導電率傾斜に伴う ϵ/σ -FGMスペーサ内部の発熱・熱伝導により、スペーサの温度上昇、さらには熱暴走に至る可能性があるため、電界分布および電流・温度分布を連成解析した。その結果、SiC充填率: 21vol%以上で温度上昇が始まり、27vol%以上で熱暴走に至り得ることを明らかにした。本研究において総合的な電界緩和効果が高いと評価された ϵ (GLP)/ σ (U)-FGMスペーサのSiC充填率は5~10vol%であり、温度上昇に関する問題がないことを検証した。

以上の電界解析および電流・温度解析結果に基づいて、今後のサンプル作製・性能試験に向けた ϵ/σ -FGMスペーサの具体的な仕様を提案した。

第5章では、本研究で得られた成果をまとめ、本研究の意義と今後の展望について総括している。以上のように、本研究で得られた成果は、電力供給システムの省エネルギー化と地球温暖化抑制を目指す次世代の直流高電圧ガス絶縁電力機器の開発に対して、傾斜機能材料という先進的な材料技術を導入して貢献するものであり、工学の発展に寄与するところが大きいと判断できる。よって、本論文の提出者であるRACHMAWATI君は博士 (工学) の学位を受けるに十分な資格があると判断した。