

令和 3 年 5 月 23 日現在

機関番号：13901

研究種目：基盤研究(B)（一般）

研究期間：2018～2020

課題番号：18H01423

研究課題名（和文）直流ガス絶縁電力機器における導電率傾斜機能材料による革新的電界制御

研究課題名（英文）Innovative electric field control by functionally graded materials of conductivity in dc gas insulated electric apparatus

研究代表者

小島 寛樹 (Kojima, Hiroki)

名古屋大学・工学研究科・准教授

研究者番号：00377772

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 13,700,000円

研究成果の概要（和文）：本研究では直流ガス絶縁開閉装置（DC-GIS）への誘電率/導電率傾斜機能材料（ $\epsilon$ -FGM）の適用による電界制御の効果を明らかにした。SiC導電性フィラー混合によるエポキシコンポジットの導電率変化範囲において構成されたU字型誘電率分布/接地側高導電率分布の $\epsilon$ -FGMをDC-GISのスペーサに適用することにより、直流定常状態、極性反転時、直流電圧投入時、雷インパルス電圧重畳時の全てに対し電界緩和効果を得ることができ、さらに導体温度上昇に対してもロバスト性を持つことを示した。

研究成果の学術的意義や社会的意義

高電圧直流送電技術は、交流系統における連系強化に伴う安定度の問題などに対応するため、特に欧米や中国において需要が高まっている中、さらなる絶縁設計の最適化が求められており、その中で温度分布の影響への対応など、電界制御の重要性が再認識されている。本研究成果は、絶縁・機械的支持という受動的な機能のみであった絶縁スペーサに、電界制御という機能を持たせることが革新的であり、さらに温度分布の影響が大きい直流電気絶縁において高いロバスト性を示すことが明らかになり、直流電気絶縁設計の革新に大きく寄与できると期待できる。

研究成果の概要（英文）：This research has revealed that functionally graded materials (FGM) with graded permittivity ( $\epsilon$ ) and conductivity ( $\sigma$ ) have the effect of electric field relaxation in dc gas insulated switchgears (DC-GIS). The effect of  $\epsilon$ -FGM, which is performed by epoxy composites with SiC fillers, with saddle-shaped permittivity and grading higher conductivity distribution in DC-GIS has been investigated through electric field simulation. The electric field relaxation effects under dc steady state, dc polarity reversal, dc-on, and lightning impulse voltage superimposed on dc steady state condition have been observed. And, we have shown that the electric field relaxation effects of  $\epsilon$ -FGM has the robustness to the change of the temperature of high-voltage conductor in DC-GIS.

研究分野：電力機器工学

キーワード：傾斜機能材料 導電率 直流電気絶縁 ガス絶縁電力機器 電界制御

科研費による研究は、研究者の自覚と責任において実施するものです。そのため、研究の実施や研究成果の公表等については、国の要請等に基づくものではなく、その研究成果に関する見解や責任は、研究者個人に帰属します。

様式 C-19、F-19-1、Z-19（共通）

1. 研究開始当初の背景

電力システムはこれまで交流主体で構成されてきたが、分散電源の大量導入や電力貯蔵技術の導入、系統連系強化にともなう安定度の問題などから直流送電に対する要請が高まってきている。大電力の送電のためには高電圧送電が必須であり、高電圧直流（HVDC）送電の需要の増加により、直流高電圧絶縁技術の重要性が高まっている。

変電所の重要設備としてコンパクトかつ信頼性の高いガス絶縁開閉装置（gas insulated switchgear : GIS）やガス絶縁送電線路（gas insulated transmission line : GIL）の HVDC 送電への適用が検討され、一部実用化まで至っている。これらの装置には高電圧導体を電氣的・機械的に絶縁・支持するスペーサが必要である<sup>(1)</sup>。GIS/GIL のようなガス-固体複合絶縁系における直流電圧下の電界分布は、基本的には漏れ電流が流れるガスと固体絶縁体との導電率比により決定される。しかしながら、従来の直流 GIS/GIL スペーサでは、

- × ガスの実効的な導電率はガス中の電荷挙動の影響を強く受ける<sup>(2)</sup>
- × 固体絶縁物の導電率は温度分布・電界分布の影響を強く受ける
- × 固体絶縁物の沿面電界を絶縁物形状で制御するためスペーサ形状が複雑化する

という問題がある。

一方、本研究実施者らはこれまでに NEDO エネルギー・環境新技術先導プログラムにおいて、交流 GIS のスペーサの誘電率を傾斜させた傾斜機能材料（Functionally Graded Material : FGM, 図 1）によるスペーサ周辺の電界緩和効果および絶縁破壊電圧向上効果を明らかにしてきた。本技術を直流 GIS/GIL において、導電率傾斜機能材料（ $\sigma$ -FGM）として適用すれば、

- ✓  $\sigma$ -FGM により電界分布を制御するため相対的に周囲の影響（温度、電荷挙動）の影響を受けにくくなる
- ✓  $\sigma$ -FGM が電界分布を制御するため、スペーサ形状を単純化・小型化できる
- ✓ 導電率の電界依存性をむしろアクティブに利用して電界分布を制御できる

ことが期待できる。

本技術は、絶縁・機械的支持という受動的な機能のみであった絶縁スペーサに、電界制御という機能を持たせることが革新的であり、さらに温度分布、電荷挙動の影響が大きい直流電気絶縁において特にその機能が発揮され、絶縁設計のロバスト性を向上させると考えられる。

2. 研究の目的

本研究実施者らが先行研究において開発してきた FGM 作製技術は、エポキシ樹脂中に混合した種々の無機粒子に対し、遠心力の付加<sup>(3)</sup>あるいは配合比の連続的な制御により密度分布制御をするものであり、本研究のベースとなる独創的技術である。エポキシと配合無機粒子との誘電率比はせいぜい数倍程度であるのに対し、導電率比はオーダーで変化させることができる。これは、交流における誘電率傾斜（ $\epsilon$ -FGM）よりも直流における導電率傾斜（ $\sigma$ -FGM）のほうが制御の自由度が高いことを示している一方で、その制御精度がより重要となることも同時に示しており、これまでに開発してきた FGM 設計・作製技術の高度化が極めて重要となる。

本研究では、 $\sigma$ -FGM の作製・設計技術を開発し、それぞれ互いに随時成果をフィードバックして、HVDC 送電における GIS/GIL の固体絶縁スペーサに  $\sigma$ -FGM を適用することによる機器内部の革新的な電界制御を学術的に実証することを目的とする。

3. 研究の方法

(1)  $\sigma$ -FGM の設計にあたっては、エポキシ樹脂母材への導電性フィラーの混合による導電率変化およびその電界・温度依存性を把握する必要がある。本研究では、予備検証における実績に基づき導電性フィラーとして SiC を選択し、FGM の電界設計に必要な導電率の電界・温度特性の SiC フィラー充填率に対する依存性を取得した。

(2) 得られた導電率のフィラー充填率・電界・温度依存性を基に、GIS スペーサに導電率/誘電率傾斜を与えた場合の電界を解析し評価する。図 2 に示すような HVDC 送電における GIS の運転状態を考慮して、電界解析は直流定常状態のみならず、極性反転時、直流電圧投入時、雷インパルス電圧重畳時についても評価した。さらにそれぞれ

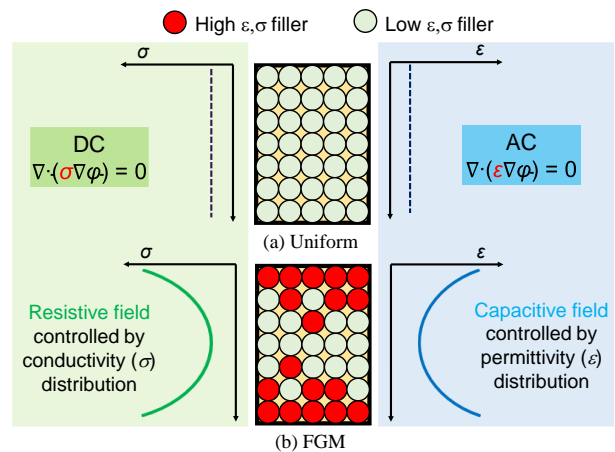


図 1 誘電率/導電率傾斜材料 (FGM) による電界分布制御のコンセプト

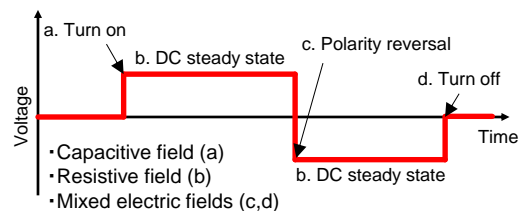


図 2 HVDC 機器の電圧印加パターン例

に対し、GIS の高電圧導体の通電にともなう温度上昇を+70 K まで考慮して、高電圧導体温度の変化にともなう電界分布の変化、すなわち FGM の効果の変化を評価した。

#### 4. 研究成果

##### (1) 導電性フィラー混合エポキシコンポジットの導電率の温度・電界依存性

エポキシ樹脂母材に SiO<sub>2</sub> および導電性の SiC フィラーを混合し、SiC の充填率を変化させた場合の導電率の温度・電界依存性を取得した。用いたフィラーの特性を表 1 に示す。SiO<sub>2</sub> と SiC のフィラー充填率が 50 vol% となるように SiC と SiO<sub>2</sub> のフィラー混合率を変化させエポキシコンポジット試料を作成した。

図 3 に各フィラー充填率に対する導電率の温度・電界依存性およびその近似曲線を示す。近似曲線の導出においては、導電率  $\sigma$  が温度  $T$ 、電界  $E$  に対し

$$\sigma \propto \exp(-W/kT)\exp(\alpha E)$$

の依存性を持つとしている。ここで  $k$  はボルツマン定数であり、 $W$  は活性化エネルギーに相当する。また、誘電率についても同様にフィラー充填率依存性を取得した。

表 1 フィラー材料の特性

Filler material	Specific gravity [g/mL]	Mean diameter [ $\mu$ m]
SiC	3.16	3.71
SiO <sub>2</sub>	2.21	9.98

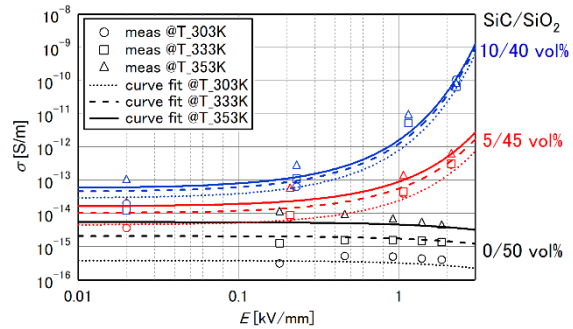


図 3 SiC/SiO<sub>2</sub> エポキシコンポジットの導電率<sup>(4)</sup>

##### (2) HVDC GIS スペーサにおける導電率/誘電率傾斜機能材料適用による電界緩和効果

320 kV DC-GIS<sup>(5)</sup>を想定し、図 4 に示すコーン型 GIS スペーサモデルに対して、導電率/誘電率の分布を与えることを考える。本研究実施者らが開発した FGM スペーサ作成方法である可変配合注型法<sup>(7)</sup>を適用することを考慮し、軸方向 ( $z$  方向) に分布を与えている。分布形状は図 4 に示した一様 (Uniform)、U 型分布、接地側を高導電率とした分布 (GHC) の 3 種類を考えた。高電圧導体と接地タンク (300 K) との温度差  $\Delta T$  をパラメータとして、直流定常状態、極性反転時、直流電圧印加時、雷インパルス電圧重畳時それぞれについて電界分布の評価を行った。なお、スペーサの温度分布は熱伝導解析により導出している。

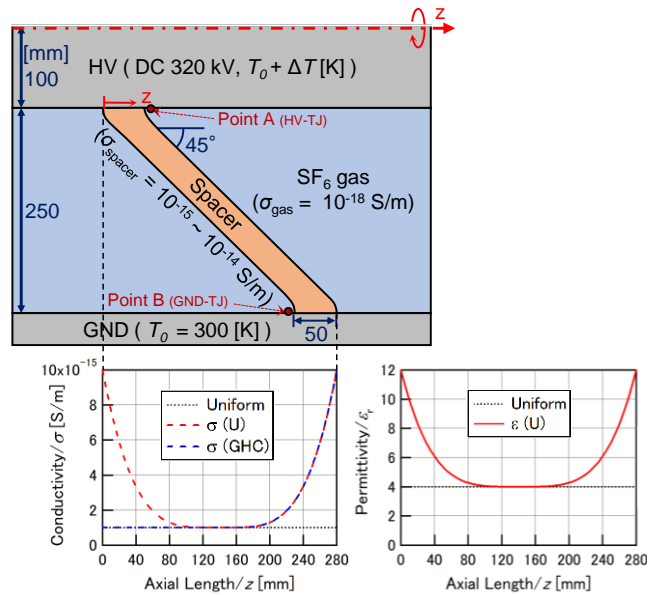


図 4 コーン型 GIS スペーサモデルおよび導電率/誘電率分布<sup>(6)</sup>

##### ① 直流定常状態

図 4 のスペーサモデルにおいて各導電率/誘電率分布の場合に対する最大電界強度の  $\Delta T$  依存性を図 5 に示す。導電率分布を U 型あるいは GHC とすることにより最大電界を緩和でき、 $\Delta T = 70$  K では Uniform に比べ最大電界を 43% 低減できている。Uniform においては、最大電界は導体-ガス-スペーサの電氣的三重重点近傍、すなわち図 4 中の Point A および Point B で現れる。一方、GHC 導電率分布では Point B 近傍、U 型導電率分布では Point A, B 両方において電界を緩和するため、最大電界はスペーサ沿面などの Point A, B 以外の場所に現れるようになる。

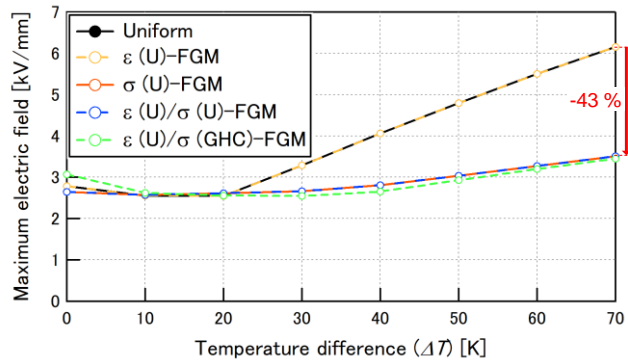


図 5 直流定常状態におけるスペーサ周辺のガス空間における最大電界強度<sup>(6)</sup>

さらに図 5 に示されるように導電率分布による電界緩和効果は  $\Delta T$  の変化範囲全体に現れ、高電圧導体の温度変化にともなう最大電界の変化を抑制できおり絶縁設計におけるロバスト性が向上していると言える。



## ② 直流極性反転時

他励式変換器を用いたHVDC送電における送電方向変更動作を想定し、直流電圧の極性反転時における電界解析を行った。極性反転時の電界  $E_{PR}$  の大きさは、誘電率分布で決まる静電界を  $E_{AC}$ 、導電率分布で決まる電界を  $E_{DC}$  とすると、

$$E_{PR} = |2E_{AC} - E_{DC}|$$

で表される。したがって、導電率分布で  $E_{DC}$  を緩和しても誘電率分布により  $E_{AC}$  を緩和しなければ極性反転時の電界の緩和はできず、図6に示すように、UniformよりもU型導電率分布の方が最大電界は大きくなってしまっている。U型の誘電率分布を与えることにより  $E_{AC}$  は緩和でき、図5および図6に示すように、誘電率分布をU型、導電率分布をGHCとした場合 ( $\epsilon(U)/\sigma(GHC)$ -FGM) に、直流定常状態と極性反転時の両方において  $\Delta T$  の変化範囲全体にわたり電界緩和効果が得られることがわかった。

## ③ 直流電圧投入時およびその後の過渡状態

直流定常状態の電界分布は導電率分布で決まる一方、直流電圧投入直後の電界分布は誘電率分布で決まる。ここまでの解析により、GIS スペーサの導電率分布をGHC、誘電率分布をU型とすることで、それら両方の場合に対して最大電界の緩和効果を得ることができると明らかとなったが、直流電圧投入後から定常状態に至る過渡状態における電界分布も評価することが必要である。

Uniform スペーサと  $\epsilon(U)/\sigma(GHC)$ -FGM スペーサのそれぞれの場合に対して、様々な  $\Delta T$  における直流電圧投入後のガス空間中の最大電界の時間変化を図7に示す。図7より、 $\epsilon(U)/\sigma(GHC)$ -FGM の適用により、直流電圧投入後から定常状態に至るまで最大電界が緩和され、過渡的に大きな電界が発生することはないとわかる。

## ④ 雷インパルス電圧重畳時

正極性直流 320 kV 定常時に正負極性の  $\pm 1175 \text{ kV}_{\text{peak}}$  標準雷インパルス<sup>(6)</sup>が重畳した場合の電界解析を行った。Uniform スペーサと  $\epsilon(U)/\sigma(GHC)$ -FGM スペーサのそれぞれの場合に対して、正負極性標準雷インパルス電圧重畳時のガス空間中最大電界の  $\Delta T$  依存性を図8に示す。 $\epsilon(U)/\sigma(GHC)$ -FGM の適用により、正・負極性のいずれの雷インパルス電圧が重畳した場合においても最大電界緩和効果が得られていることがわかる。なお、正極性雷インパルス電圧重畳時の最大電界は、Uniform、FGM のいずれにおいても  $\Delta T$  の増加とともに約  $11.9 \text{ kV/mm}$  に収束している。この値は無限長同軸円筒電極系における最大電界に相当し、理論的な電界低減の限界である。

SiC 導電性フィラー混合によるエポキシコンポジットの導電率変化範囲において構成された  $\epsilon(U)/\sigma(GHC)$ -FGM を DC-GIS のスペーサに適用することにより、直流定常状態、極性反転時、直流電圧投入時、雷インパルス電圧重畳時の全てに対し電界緩和効果を得ることができ、さらに導体温度上昇に対してもロバスト性を持つことを示した。

<得られた成果の国内外における位置づけとインパクト>

HVDC 送電技術は、交流系統における連系強化に伴う安定度の問題などに対応するため、特に欧米や中国において需要が高まっている。最近では、半導体素子の高電圧化などにより自励式

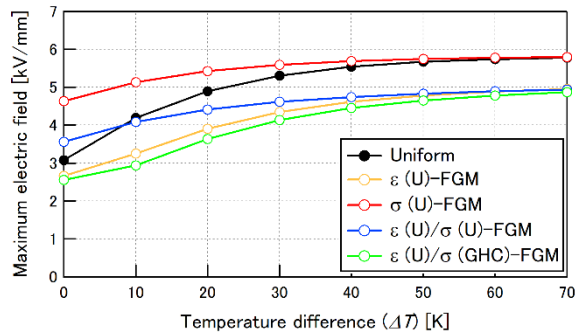
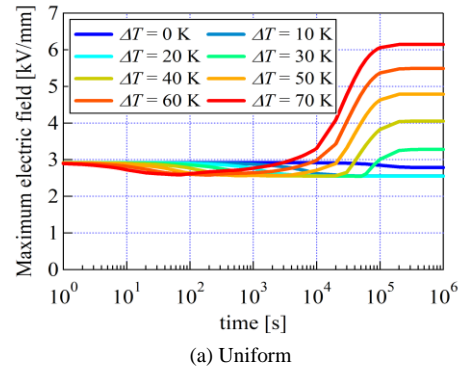
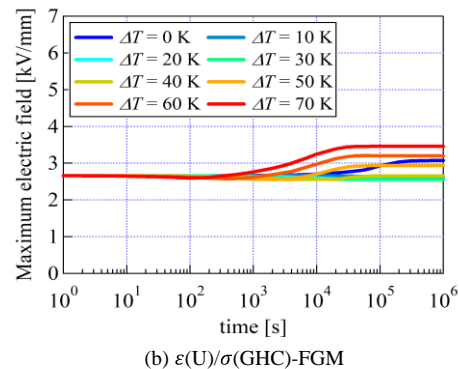


図6 極性反転時における最大電界<sup>(6)</sup>



(a) Uniform



(b)  $\epsilon(U)/\sigma(GHC)$ -FGM

図7 直流電圧投入後の最大電界の時間変化<sup>(6)</sup>

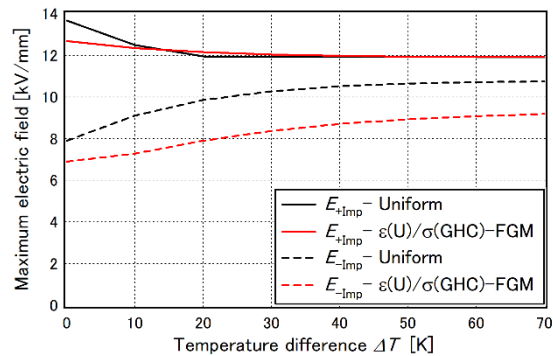


図8 正負極性雷インパルス電圧重畳時の最大電界<sup>(6)</sup>

交直変換設備の高電圧化が可能となり、多端子直流送電系統の実用化が視野に入ってきた。欧州では2014年より Best Paths プロジェクト、国内では2015年より NEDO 次世代洋上直流送電システム開発事業が実施されるなど、多端子直流送電系統に関する技術は国内外で急速に重要視されてきている。直流高電圧機器の需要が高まる中、さらなる絶縁設計の最適化が求められており、その中で温度分布の影響への対応など、電界制御の重要性が再認識されるに至っている<sup>9)</sup>。

本研究の成果により、 $\epsilon/\sigma$ -FGM の DC-GIS への適用が当初の期待通り電界分布を制御できるのみならず、温度変化に対しても高いロバスト性を示すことが明らかになり、直流電気絶縁設計の革新に大きく寄与できると期待できる。

#### <今後の展望>

本研究では DC-GIS への  $\epsilon/\sigma$ -FGM 適用による電界制御の効果を明らかにしたが、実機 GIS スペースでは機械性能、熱的性能などを考慮する必要がある。本研究の過程で導電性フィラーの混合がエポキシ樹脂の機械強度を低下させることを示唆する結果を得ており、電気的設計のみならず機械的・熱的設計を含めた総合的な FGM の設計・製作技術の開発が必要となるであろう。

#### <引用文献>

- (1) N. Zebouchi and M. A. Haddad: "A review on real-size epoxy cast resin insulators for compact high voltage direct current gas insulated switchgears (GIS) and gas insulated transmission lines (GIL)—Current achievements and envisaged research and development", *Energies*, vol. 13, no. 23 (2020) 6416.
- (2) R. Nakane, K. Takabayashi, K. Kato, H. Okubo: "Electric field analysis and electrical insulation performance for gas-solid composite insulation in HVDC-GIS", 20th International Symposium on High Voltage Engineering (2017) PG1:4.
- (3) N. Hayakawa, J. Ishiguro, H. Kojima, K. Kato, H. Okubo: "Fabrication and simulation of permittivity graded materials for electric field grading of gas insulated power apparatus", *IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation*, vol. 23, no. 1 (2016) pp. 547–554.
- (4) Rachmawati, H. Kojima, K. Kato, N. Hayakawa: "Electric field grading by permittivity and conductivity graded material ( $\epsilon/\sigma$ -FGM) at polarity reversal for HVDC GIS", 令和2年度電気・電子・情報関係学会東海支部連合大会 (2020) B6-7
- (5) U. Riechert, U. Straumann, R. Gremaud: "Compact gas-insulated systems for high voltage direct current transmission: Basic design", *IEEE/PES Transmission and Distribution Conference and Exposition (T&D)* (2016).
- (6) Rachmawati, H. Kojima, N. Hayakawa, K. Kato, N. Zebouchi: "Electric field simulation of permittivity and conductivity graded materials ( $\epsilon/\sigma$ -FGM) for HVDC GIS spacers", *IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation*, vol. 28, no. 2 (2021) pp. 736–744.
- (7) N. Hayakawa, Y. Miyaji, H. Kojima, K. Kato: "Simulation on discharge inception voltage improvement of GIS spacer with permittivity graded materials ( $\epsilon$ -FGM) using flexible mixture casting method", *IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation*, vol. 25, no. 4 (2018) pp. 1318–1323.
- (8) H. Koch, D. Imamovic, B. Lutz, K. Juhre, T. Neidhart, R.-D. Rogler: "High power underground transmission for HV DC", *International Council on Large Electric System (CIGRE)*, Paris Session (2016) B3-104.
- (9) M. Hering, K. Juhre, M. Secklehner, V. Hinrichsen: "Requirements on solid insulating materials and gas-solid interfaces in compact HVDC gas-insulated systems", 20th International Symposium on High Voltage Engineering (2017) OG1:3.

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計1件（うち査読付論文 1件 / うち国際共著 1件 / うちオープンアクセス 0件）

1. 著者名 Rachmawati, Hiroki Kojima, Naoki Hayakawa, Katsumi Kato, Nabila Zebouchi	4. 巻 28
2. 論文標題 Electric Field Simulation of Permittivity and Conductivity Graded Materials ( / -FGM) for HVDC GIS Spacers	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation	6. 最初と最後の頁 736 ~ 744
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1109/TDEI.2020.009343	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 該当する

〔学会発表〕 計9件（うち招待講演 0件 / うち国際学会 2件）

1. 発表者名 Rachmawati, Hiroki Kojima, Katsumi Kato, Naoki Hayakawa
2. 発表標題 Electric Field Grading by Permittivity and Conductivity Graded Material ( / -FGM) at Polarity Reversal for HVDC GIS
3. 学会等名 令和2年度電気・電子・情報関係学会東海支部連合大会
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 Rachmawati, Atsuhiko Izu, Ryuichi Nakane, Hiroki Kojima, Katsumi Kato, Nabila Zebouchi, Naoki Hayakawa
2. 発表標題 Electric Field Grading by Permittivity and Conductivity Graded Materials ( / -FGM) for HVDC Gas Insulated Power Apparatus
3. 学会等名 9th International Symposium on Electrical Insulating Materials (国際学会)
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 Rachmawati, Hiroki Kojima, Katsumi Kato, Naoki Hayakawa
2. 発表標題 Electric Field Grading on HVDC GIS Spacer by SiC-filled Permittivity and Conductivity Graded Material ( / -FGM)
3. 学会等名 令和3年電気学会全国大会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 伊豆淳宏, 中根龍一, 小島寛樹, 加藤克巳, 早川直樹
2. 発表標題 直流高電圧印加時における傾斜機能材料の電界緩和の時間依存性
3. 学会等名 令和元年度電気・電子・情報関係学会東海支部連合大会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 伊豆淳宏, 中根龍一, 小島寛樹, 加藤克巳, 早川直樹
2. 発表標題 誘電率/導電率傾斜機能材料を用いた直流ガス絶縁電力機器のインパルス重畳時における電界制御効果
3. 学会等名 第50回電気電子絶縁材料システムシンポジウム
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 伊豆淳宏, Rachmawati, 中根龍一, 小島寛樹, 加藤克巳, 早川直樹
2. 発表標題 導電率の温度・電界依存性を考慮した傾斜機能材料の直流ガス絶縁電力機器への適用効果
3. 学会等名 令和2年電気学会全国大会
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 伊豆淳宏, 大石涼太, 小島寛樹, 加藤克巳, 早川直樹
2. 発表標題 直流ガス絶縁電力機器への傾斜機能材料の適用可能性
3. 学会等名 平成30年電気学会電力・エネルギー部門大会
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 N. Hayakawa, R. Oishi, H. Kojima, K. Kato, N. Zebouchi
2. 発表標題 Electric Field Grading by Functionally Graded Materials (FGM) for HVDC Gas Insulated Power Apparatus
3. 学会等名 IEEE Conference on Electrical Insulation and Dielectric Phenomena (国際学会)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 伊豆淳宏, 小島寛樹, 加藤克巳, 早川直樹
2. 発表標題 直流ガス絶縁電力機器の極性反転時における傾斜機能材料の電界制御効果
3. 学会等名 平成31年電気学会全国大会
4. 発表年 2019年

〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔その他〕

-

6. 研究組織

	氏名 (ローマ字氏名) (研究者番号)	所属研究機関・部局・職 (機関番号)	備考
研究分担者	早川 直樹  (Hayakawa Naoki)  (20228555)	名古屋大学・工学研究科・教授    (13901)	
研究分担者	加藤 克巳  (Kato Katsumi)  (20293665)	新居浜工業高等専門学校・電気情報工学科・准教授    (56301)	

	氏名 (ローマ字氏名) (研究者番号)	所属研究機関・部局・職 (機関番号)	備考
研究協力者	Z e b o u c h i N a b i l a  (Zebouchi Nabila)	カーディフ大学・Advanced High Voltage Engineering Research Centre・Senior Research Fellow	



7. 科研費を使用して開催した国際研究集会

〔国際研究集会〕 計0件

8. 本研究に関連して実施した国際共同研究の実施状況

共同研究相手国	相手方研究機関			
英国	Cardiff University			