

**科学研究費助成事業 研究成果報告書**

平成 29 年 6 月 18 日現在

機関番号：33903

研究種目：基盤研究(B) (一般)

研究期間：2014～2016

課題番号：26289081

研究課題名(和文)次世代直流送電用電力機器の電気絶縁技術開発

研究課題名(英文)Development of Electrical Insulation Techniques for Future HVDC Electric Power Equipment

研究代表者

大久保 仁 (Okubo, Hitoshi)

愛知工業大学・工学部・教授

研究者番号：90213660

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 12,500,000円

研究成果の概要(和文)：次世代に期待されている、高電圧直流送電技術の実現のためには、最も重要な変圧器や開閉装置などの電力機器における直流電気絶縁技術の確立が必要である。本研究では高電圧直流特有の電界分布、電荷・帯電現象、直流部分放電現象、絶縁破壊現象などの解明を通して、基本電気絶縁技術の確立を行った。まず新たに直流電界解析技術の確立を行い、さらに直流特有の電荷・帯電現象を解析に組み込むことに成功した。さらには直流極性反転時の電荷・電界の挙動解析技術を確立した。また電荷・電界分布の解析技術と並行して、固体との複合絶縁系において電界分布、部分放電現象、電荷挙動を実験的に解明し、直流電気絶縁技術の基本技術を確立した。

研究成果の概要(英文)：For the future introduction of HVDC power systems, it is important to establish an electrical insulation techniques in power equipment, such as transformers and switchgears. In this research, through the investigation of HVDC electric field distribution, charge dynamics, charging characteristics, DC-partial discharge (PD) and flashover phenomena, their fundamental electrical insulation performances are investigated and established. Firstly, the electric field calculation techniques especially for an application to HVDC system were established, together with those at DC polarity reversal conditions. Next, with the analytical development, the experimental investigations on DC-PD, DC charging on solid insulators and DC flashover characteristics were carried out and the mechanisms were clarified. Finally, by summarizing those techniques, fundamental techniques for HVDC electrical insulation were clarified and established.

研究分野：工学

キーワード：電力システム 電力機器 高電圧直流 放電現象 電気絶縁技術

## 1. 研究開始当初の背景

現代社会は交流主体の電気システム、電力システムとなっている。しかし将来はスマートグリッドをはじめとし、分散エネルギーの大量導入や電力貯蔵技術の導入、一方ではオフィスビルや洋上風力送変電技術などにおいて損失低減技術、信頼性向上技術が要請され、直流変電・配電技術、直流高電圧技術、直流給電技術開発、パワーエレクトロニクス技術などがこれまでになく強く要請されている。すなわちこれからは、大規模交流システム内における局所的直流適用技術、交流と直流の共存連携技術、交直インターフェイス技術の確立が求められ、これまで未解明であった、直流高電圧特有の電界分布、帯電電荷現象・電気絶縁特性などの解明に加えて、直流・交流・雷サージ重畳現象などの究明が急務である。

一方、これまで直流技術、直流電気絶縁技術などは従来より研究されてきたが、直流特有の現象すなわち電荷蓄積現象、帯電現象、極性反転現象、雷サージ重畳条件下などに立脚する電気絶縁、部分放電開始・進展特性などは未解明の状態であり、またこれらの基礎現象や諸特性の基盤となっている直流および帯電時の電界分布の詳細は把握できておらず、直流電界解析技術の研究開発が喫緊の課題となっている。さらには液体/固体複合系に比べて、気体/固体および真空/固体複合系における直流および極性反転現象、ならびに雷サージ・直流重畳特性などは、現象的にほとんど未解明のままであり、次世代実機器開発における技術的限界を呈している。

そこでこれまでの直流技術、直流電気絶縁技術、直流機能開発、液体/固体系における基本形状での直流、交流、直流極性反転時の基本電界分布、また電気絶縁油中における固体絶縁物上に帯電蓄積した電荷により、直流極性反転時における電界増倍により絶縁破壊放電が発生する現象などにに基づき、上記要請されている直流部分放電特性、帯電特性、重畳特性など、電氣的諸現象解明と機能電気絶縁技術の確立を必要がある。

すなわち、このような直流特有の電界分布、帯電電荷現象・電気絶縁特性などの解明に加えて、直流・交流・極性反転現象・雷サージ重畳現象などの究明により、次世代直流電気機器・電力機器の基本電気絶縁性能を確保する技術の提案をすることが要請されている。

## 2. 研究の目的

本研究は、直流高電圧(HVDC)電力機器の複合絶縁構成における直流電界分布特性、帯電特性や極性反転絶縁破壊特性などの電氣的諸特性・電気絶縁特性を明らかにすることを第一の目的とする。次にその研究成果に基づき、スマートグリッドなどの将来の次世代電気システム、電力システムにおける直流機

器の新しい機能を開発し、機器信頼性向上、損失低減に寄与する基本電気絶縁構成を提供することを第二の目的としている。最終的に、直流・交流・雷サージ重畳下における電気絶縁性能のメカニズム解明とともに、直流電気機器、電力機器などが周囲の交流システムと連携して信頼性高く最大限の機能を発揮できるように、総合的に直流電気絶縁技術の確立を目的とする。

## 3. 研究の方法

直流高電圧(HVDC)電気絶縁技術を確立するために、研究・技術開発項目を順次解決し、特に解析・シミュレーション結果と実験的検証結果との比較検討が問題解決の重要なプロセスであると考え、相互技術分担・連携を図った。具体的には以下の通り進めた。

(1) 直流高電圧印加時の機器内部の電界分布解析技術の確立：有限要素法(FEM)を用いて、交流・直流変換器、変換用変圧器、直流開閉装置(DC-GIS)などにおける代表的絶縁構成の直流電界解析技術を確立する。特に解析精度検証を行い、実験結果との比較検証時に定量化できるようにする。また、電界不平等性によって電界分布形成時定数の違いを検出し併せて機器運転条件なども考慮する。

(2) 気体/固体および真空/固体複合系における材料の基本的直流電気特性の同定：上記直流電界分布解析の必須供与条件である材料の導電率・誘電率の精確な同定を行う。特に気体および真空の導電率のあり方の議論と実験的検証、解析との比較を通して、材料・条件ごとに値の定量化を行う。導電率については、温度条件、電界依存性について実験データに基づき議論する。

(3) 種々の固体材料による、固体表面帯電特性の解明・帯電抑制技術：上記の研究結果に基づいて、気体中あるいは真空中直流および雷サージ電圧印加下における固体表面帯電形成メカニズムを明らかにし、その結果に基づいて帯電形成制御技術を検討する。図1に構築する絶縁物表面帯電特性に計測システムを示す。さらには、直流実機器絶縁構成を考慮に入れた帯電抑制技術を提案する。

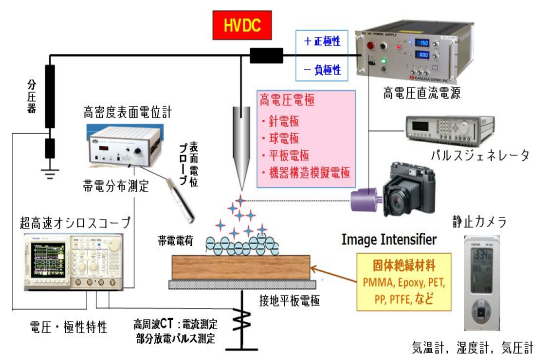


図1 絶縁物表面の帯電特性の計測システム

(4) 雷サージ印加時の帯電特性と直流 / 雷サージ重畳特性：直流電圧印加時の正・負極性帯電特性と雷サージ電圧印加時の正・負極性帯電特性の相違点を明らかにし、同時に雷サージ / 直流重畳時の帯電形成特性を解明する。帯電特性の測定には振動容量型表面電位計を使用する。

(5) 直流極性反転時における絶縁特性検討・解析：電界解析と複合系における部分放電開始実験・部分放電挙動測定実験を通して、直流極性反転時の電気絶縁性能を定量化する。極性反転時の実験的に得られた絶縁破壊特性から、交流、直流、そして雷サージ印加特性との比較検討を行い、機器試験電圧の提案を行う。

(6) 基本絶縁構成における帯電特性,部分放電,絶縁破壊特性の究明：上記の研究結果に基づき、直流電気絶縁における帯電発生・形成、電荷現象の測定、部分放電の開始・進展、さらには沿面フラッシュオーバーに至る一連の現象の定量化とメカニズム解明をはかり直流電気機器電気絶縁技術の確立を行う。具体的には、針・棒・球の3種類の電極系を使用し、裸電極系と固体絶縁物を配置した複合電極系において、部分放電特性、帯電特性、フラッシュオーバー特性の測定を通して、直流部分放電メカニズムを解明し、電界解析を通して正・負極性における空气中複合絶縁破壊電圧を推定するシステムの開発を行う。

(7) 直流機器部分放電診断技術の確立：上記の研究結果、特に直流部分放電特性のメカニズム解明結果に基づき、直流電力機器の外部電気絶縁診断技術の検討を行う。

(8) 直流電力機器における電気絶縁技術の確立：上記の研究の成果を通して、交流直流変換器・変換用変圧器、直流開閉装置などの直流電気絶縁基礎技術の確立と機器運転条件下における特性把握、そして機器試験電圧ならびに絶縁設計の考え方の提案を行う。

#### 4. 研究成果

(1) 高電圧直流電界解析手法および直流極性反転時の電界解析技術の確立と電力用交直変換用変圧器内の電界解析：直流から交流までの広い周波数帯域について、式(1), (2)により複素誘電率を用いて電界解析ができることを確認した。

$$\text{div } \epsilon^* \mathbf{E} = q \quad (1)$$

$$\epsilon^* = \epsilon - j(\sigma / \omega) \quad (2)$$

$$E_{PR} = E_{+DC} + (2 \times E_{AC(-peak)}) \quad (3)$$

また、直流定常状態では材料の導電率比で計算でき、直流極性反転時には式(3)を用いて最大電界が求まることを確認し、電界分布の計算を行った1例を図2に示す。図3には交直変換用変圧器内部の直流極性反転時の電界分布の計算例を示す。

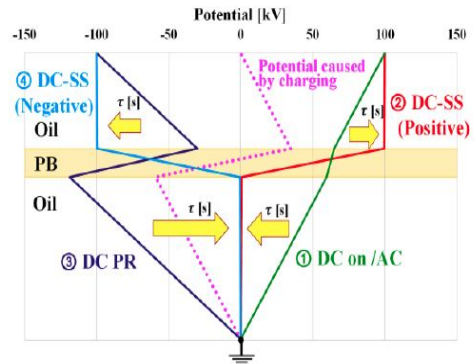


図2 油中プレスボード配置における交流・直流・極性反転時の電位・電界分布の解析結果。

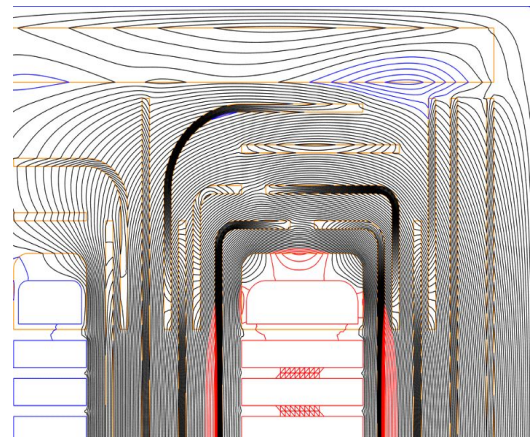


図3 交直変換用変圧器内部の直流極性反転時の電界分布。

(2) 直流開閉装置(DC-GIS)内における電界解析手法の確立と帯電電荷の解析手法確立：図4にDC-GIS内のスペーサ周辺における各試験電圧印加時の電界分布特性を示す。AC, DC, DC-極性反転と、印加電圧の種類によって最大電界発生個所と電界分布が大きく変化することが分かる。

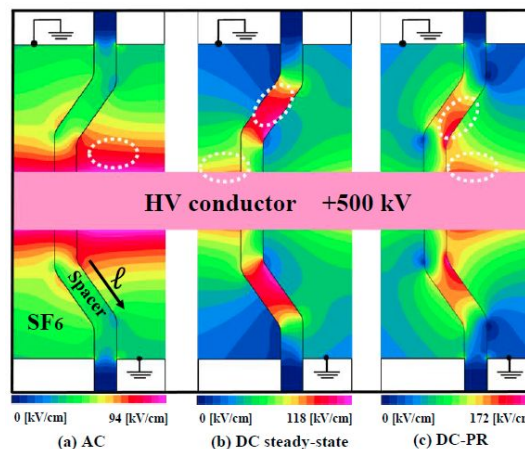


図4 DC-GIS 内スペーサ周辺における各試験電圧印加時の電界分布特性。

(3) 空气中各種電極系における部分放電特性とフラッシュオーバー特性の取得：針・棒・球の3種類の電極系を使用し、裸電極系と固体絶縁物を配置した複合電極系において、直流部分放電特性、帯電特性、フラッシュオーバー特性の測定を通して、直流部分放電メカニズムを解明した。図5に空气中針電極先端の直流負極性部分放電による発光と電界緩和半径の測定と解析結果を示す。

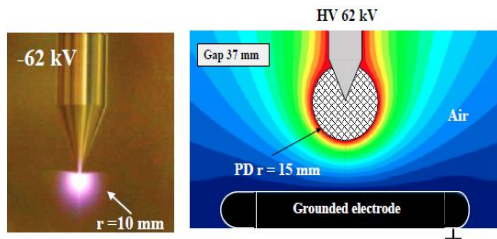


図5 空气中針電極先端の直流負極性部分放電による発光と電界緩和半径の測定と解析結果

(4) 空气中固体複合絶縁系における部分放電特性と絶縁破壊電圧の推定手法の確立：電界解析を通して正・負極性における空气中複合絶縁破壊電圧を推定するシステムの開発を行った。極めて複雑な直流正・負極性部分放電特性と固体絶縁物上の帯電特性の両者を考慮しその緩和特性を求めることにより、直流複合絶縁下におけるフラッシュオーバー特性の推定が可能であることを示した。図6にその推定過程を示す。

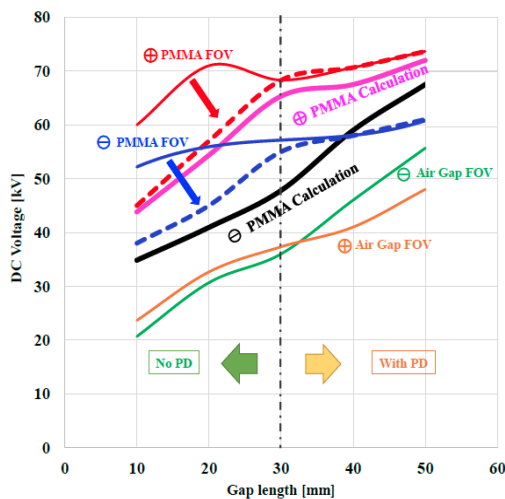


図6 空气中棒電極による固体複合系におけるフラッシュオーバー特性の実験値と推定値。

(5) 高電圧直流ガス絶縁開閉装置(DCV-GIS)における各種試験電圧の提案：これまでの解析と実験による直流部分放電開始、帯電特性およびフラッシュオーバー特性に電界解析結果を併せ検討し、AC, IMP, DCそしてDC極性反転試験電圧の相対的検討を行った。DC-GIS

においては 1.5E 以上の極性反転試験電圧がクリティカルになること示した。

(6) 高電圧交直変換器用変圧器における試験電圧条件の検討と提案：絶縁油・プレスボード(PB)による交直変換用変圧器についても直流試験電圧の検討を行い、高電圧巻線端部の第1油道における電界が、図7に示す通り 1.5E~2.0E において極性反転試験電圧がクリティカルになることを示した。

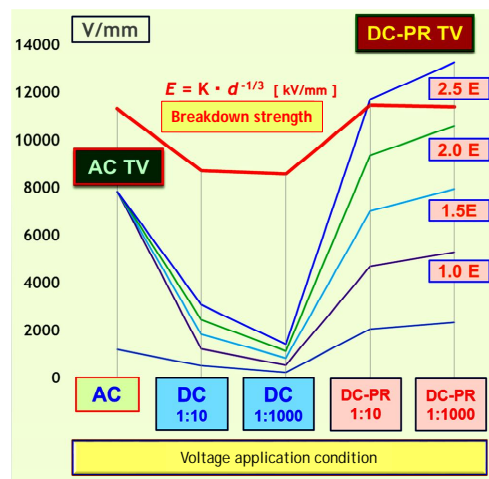


図7 油浸絶縁交直変換用変圧器における直流試験電圧の検討結果。

## 5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕(計5件)

- [1] Toshiaki Rokunohe, Tatsuro Kato, Hiroki Kojima, Naoki Hayakawa, Hitoshi Okubo: "A Calculation Model for Predicting Partial Discharge Inception in a Non-uniform Air Gap while Considering the Effect of Humidity", IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation, Vol.24, pp. 1123-1130 (2017)
- [2] Naoki Hayakawa, Junya Ishiguro, Hiroki Kojima, Katsumi Kato, Hitoshi 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, pp. 547-554 (2016)
- [3] H.Kojima, K.Hotta, T.Kitamura, N.Hayakawa, A.Otake, K.Kobayashi, T.Kato, T.Rokunohe, H.Okubo : "Classification of Impulse Breakdown Mechanisms under Non-uniform Electric Field in Air", IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation, Vol.23, pp.194-202 (2016)
- [4] Y.Nakano, H.Kojima, K.Tsuchiya, N.Hayakawa: "Impulse Surface Flashover Development Associated with Transient

Charging by Explosive Electron Emission in Vacuum”, IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation, Vol.22, pp. 2390-2397 (2015)

[5] 中野祐介, 小島寛樹, 土屋賢治, 早川直樹: 「真空中における突発的電子放出に起因する沿面フラッシュオーバ進展過程の過渡帯電特性」, 電気学会, 基礎・材料・共通論文誌, Vol.34, pp.578-584 (2014)

〔学会発表〕(計7件)

[1] K.Takabayashi, T.Furuyashiki, T.Sakai, H.Okubo: “DC Partial Discharge and Flashover Characteristics and Charging Activity on Solid Insulator in Air”, CEIDP 2016, Oct. 19, Toronto, Canada (2016)

[2] H.Okubo, T.Sakai, T.Furuyashiki, K.Takabayashi, K.Kato: “HVDC Electric Field Control by Pressboard Arrangement in Oil-Pressboard Composite Electrical Insulation Systems”, CEIDP 2016, Oct.17, Toronto, Canada (2016)

[3] K.Kato, H.Okubo: “Dependence of Charge Behavior on Electric Field Distribution around GIS Spacer under HVDC Application and Polarity Reversal”, 19<sup>th</sup> International symposium on High Voltage Engineering (ISH), Aug.26, Pilsen, Czech (2015)

[4] T. Furuyashiki, T. Sakai, N. Hayakawa and H. Okubo: “The Influence of Charging on Solid Insulator Surface on HVDC Partial Discharge Activities and Flashover Characteristics in Air”, 19th International symposium on High Voltage Engineering (ISH), Aug.27, Pilsen, Czech (2015)

[5] T. Sakai, T. Furuyashiki, K. Kato and H. Okubo: “Electric Field Analysis and Electrical Insulation Performance for Solid Insulator in HVDC Gas Insulated Switchgear”, 19th International symposium on High Voltage Engineering (ISH), Aug.24, Pilsen, Czech (2015)

[6] H.Okubo, T.Sakai, T.Furuyashiki, K. Kato: “Electrical Insulation Performance under HVDC and Polarity Reversal Conditions in Oil-Immersed DC Converter Transformers”, 19th International symposium on High Voltage Engineering (ISH), Aug.24, Pilsen, Czech (2015)

[7] H.Okubo, H.Kojima, N.Hayakawa, S.Jaufer, Ch.Krause: “Kerr Electro-Optic Field Measurement and Electrical Insulation Techniques in HVDC Oil-Pressboard Composite Insulation Systems”, 19th International symposium on High Voltage Engineering (ISH), Aug. 26, Pilsen, Czech (2015)

## 6. 研究組織

### (1)研究代表者

大久保 仁 (OKUBO, Hitoshi)

愛知工業大学・工学部・教授

研究者番号: 90213660

### (2)研究分担者

依田 正之 (YODA, Masayuki)

愛知工業大学・工学部・教授

研究者番号: 80103240

村瀬 洋 (MURASE, Hiroshi)

愛知工業大学・工学部・教授

研究者番号: 90350941

箕輪 昌幸 (MINOWA, Masayuki)

愛知工業大学・工学部・教授

研究者番号: 10609316

加藤 克巳 (KATO, Katsumi)

新居浜工業高等専門学校・電気情報工学科・准教授

研究者番号: 20293665

早川 直樹 (HAYAKAWA, Naoki)

名古屋大学・工学研究科・教授

研究者番号: 20228555