

様 式 C - 1 9、F - 1 9 - 1、Z - 1 9 （共通）

## 科学研究費助成事業 研究成果報告書



令和 6 年 6 月 7 日現在

機関番号：8 2 1 1 0

研究種目：基盤研究(C)（一般）

研究期間：2021～2023

課題番号：2 1 K 0 4 0 1 4

研究課題名（和文）高電圧印加時のコロナフリーを実現する新しい絶縁筒の開発

研究課題名（英文）Development of a new insulating cylinder to achieve corona-free operation when high voltage is applied

研究代表者

高柳 智弘（Takayanagi, Tomohiro）

国立研究開発法人日本原子力研究開発機構・原子力科学研究部門 J - P A R C センター・研究主幹

研究者番号：1 0 3 5 4 7 5 5

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 3,200,000 円

研究成果の概要（和文）：本研究では、高電圧半導体スイッチを実用化するため、高電圧印加時のコロナフリーを実現し、信頼性と寿命に優れる新しい絶縁筒の開発を行った。開発した絶縁筒は、内外両面をメタライズし、金属と絶縁筒を密着させてコロナ放電が発生する空気層を無くした。また、電力伝送導体と接触子による電位固定と、強電界部を絶縁体内に形成する曲面形状を絶縁筒で実現させ、空気絶縁、絶縁油、絶縁ガスに頼らず三重点の強電界を緩和する高絶縁構造を確立した。半導体スイッチを用いた通電試験を行い、出力波形に有意な乱れが発生しないことを確認し、強電界を緩和しコロナフリーを実現する構造を解析と試験で確認した。

研究成果の学術的意義や社会的意義

技術開発が進む次世代パワー半導体の利用を促進させ、半導体スイッチの更なる高度化を実現する。また、絶縁油や絶縁ガスを使用しないため、産業廃棄物や温室効果ガスの削減を可能とする環境に優しい高機能な半導体スイッチを産業技術の多様化として提供することができる。

研究成果の概要（英文）：An insulating cylinder that does not generate corona discharges when high voltage is applied and has excellent reliability and service life has been developed for the practical application of high-voltage semiconductor switches. The insulating cylinder developed eliminates the air layer that causes corona discharges by metalizing the inner and outer surfaces to the insulating cylinder. In addition, by fixing the potential at the transmission conductor and surface of the cylinder, and by realizing a curved shape of the insulating cylinder was established that mitigates the strong electric field without relying on air insulation, insulating oil or insulating gas. Current-carrying tests were conducted using a semiconductor switch, and it was confirmed that analysis and testing confirmed a structure that mitigates the strong electric field and achieves corona-free operation.

研究分野：電力工学

キーワード：高電圧 半導体スイッチ コロナ放電 環境

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。

## 1. 研究開始当初の背景

次世代パワー半導体の技術開発が進み、放電スイッチに代わる半導体スイッチが積極的に開発されている。研究担当者は、科研費(JP17K06334)の助成を受け、パルス特性に優位な対称性と等長性を有した放射対称構造のモジュール型半導体スイッチを開発した(図1参照)。そして、本構造の電極導体に特性インピーダンスの算出が容易な同軸構造を採用した新しい20kV半導体スイッチ電源(図2参照)を開発し、研究成果を発表している。この成果を活かし、より高い40kV超の高電圧放電スイッチを代替する半導体スイッチの開発を始めた。

しかし、実用化の検証過程において、高電圧化とともに「導体-絶縁体-気体」が重なる三重点の強電界部で発生するコロナ放電の抑制が非常に困難であることが分かった。コロナ放電による漏洩電流値は非常に小さく、装置の故障を瞬時に引き起こすことは無い。しかし、コロナ放電はオゾンが発生させる。そのため、コロナ放電が多発し長時間に亘りオゾンの暴露を繰り返すと、絶縁体に腐食劣化が生じ、構造破壊によって火災事故の要因となる過電流や放電を引き起こす恐れがある。コロナ放電の一般的な対策方法は、絶縁油や絶縁ガスを使用することであるが、産業廃棄物や温室効果ガスとして使用が制限されている。

そこで、研究担当者は、高電圧パルス電磁石の設計で得た知見から、電界緩和によるコロナ放電対策を検討した。そして、絶縁体の表裏両面をメタライズし、その金属面を導体電位に固定することで高い絶縁耐力を得る方法を着想した。メタライズは、金属材と絶縁体が密着するため、コロナ放電が発生する空気層が存在しない。また、強電界部を絶縁体内部に形成させる形状を電極導体用絶縁筒で実現できれば、三重点の強電界を緩和することができる。その結果、絶縁油や絶縁ガス、さらには、電極間の距離を広げる空気絶縁に頼らずに高絶縁耐力の構造を確立できる。本方式は、環境に優しく、且つ、小型軽量とすることで、半導体スイッチの更なる高度化と産業技術の多様化を提供することができる。

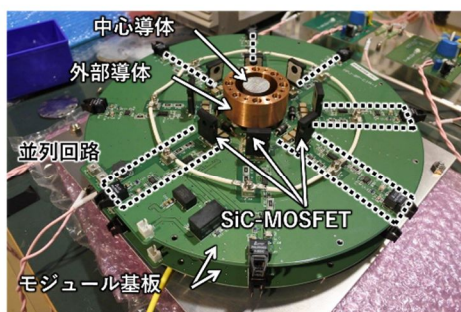


図1. 放射対称型モジュール基板 (2段積み)

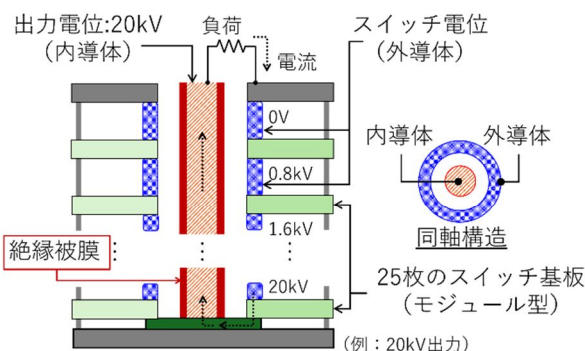


図2. 絶縁筒とモジュール基板の構造図 (断層面)

## 2. 研究の目的

高電圧半導体スイッチを実用化するため、高電圧印加時のコロナフリーを実現し、信頼性と寿命に優れる新しい同軸型電力伝送導体用絶縁筒の開発を目的とする。本研究では、絶縁筒の内外両面のメタライズと電位の固定、及び絶縁体形状の最適化による強電界緩和方法を確立する。金属と絶縁体が密着して空気層が無くなり、さらに、強電界部を絶縁体内に形成する曲面形状を絶縁筒で実現できれば、空気絶縁、絶縁油、絶縁ガスに頼らず三重点の強電界を緩和する高絶縁構造を確立できる。環境に優しく、故障が少ない安定した半導体スイッチが期待できる。

## 3. 研究の方法

三重点の強電界を、絶縁体のメタライズと形状により緩和する方法、及びその構造を確立する。そのために、以下の研究を進めていく。

- ◆ 絶縁筒の内外両面をメタライズし、その加工範囲と電位の固定方法を最適化する。
- ◆ 強電界部を、三重点ではなく絶縁体内部に形成する曲面形状を実現する。
- ◆ メタライズと曲面形状を組み合わせた三重点の強電界緩和方法を構築する。
- ◆ 絶縁耐力が高く、且つコロナフリーの絶縁構造を確立する。

具体的には、既存の放射対称型半導体スイッチ電源の同軸伝導体のサイズに合わせた絶縁筒を製作する。絶縁筒の内外表面のメタライズ範囲と絶縁体の形状により強電界を緩和する最適

構造解を電磁場解析により算出する。図3と4にメタライズと絶縁体の形状案を示す。

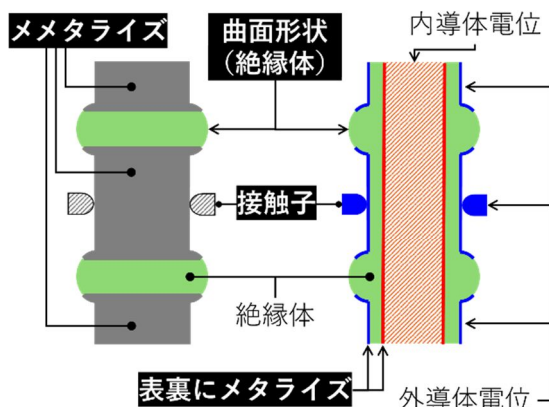


図3. 絶縁筒の拡大図 (左: 表面、右: 断層)

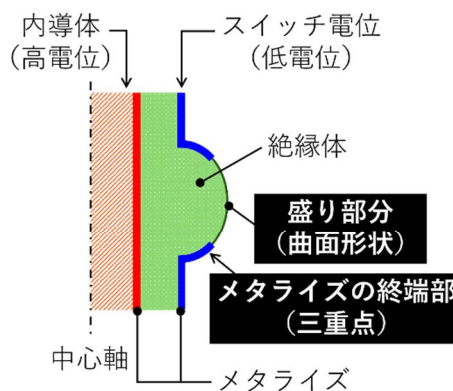


図4. 断層図 (メタライズ処理部拡大)

試験では、出力通電試験にてパルス波形を測定し波形形状を確認する。コロナフリーを実現する絶縁筒は、電界緩和によるコロナ放電の抑制を目的としているため、理論的には絶縁筒が波形の形状に影響を与えることは無い。そこで、絶縁筒が有る場合と無い場合の波形を比較し、絶縁筒が波形に与える影響の有無を評価する。

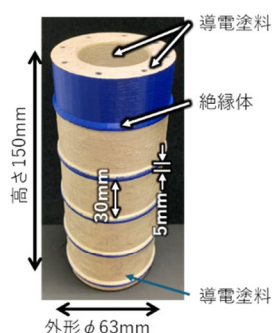
#### 4. 研究成果

絶縁筒の構造体は、PLA(ポリ乳酸樹脂)材を用いた3次元プリンターで製作した。絶縁筒の大きさは、通電試験に使う3枚の半導体スイッチ電源の主回路基板に対応できる最大直径63mm、高さ220mmとし、内側には直径25mmの内導体を通す直径35mmの開口部がある円筒形状をしている。メタライズは導電塗料(ドータイトD-550)で絶縁筒の内外側両面を処理した。絶縁筒のメタライズ処理面は、接触子を用いて出力基板に備える金属外導体面と電位固定を行う。

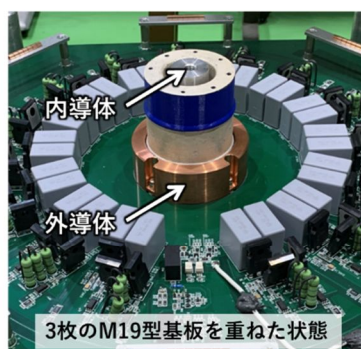
絶縁筒と銅リングは、それぞれ同軸二重円筒型の内側円筒と外部円筒を構成する。絶縁筒の金属面と半導体スイッチ基板に設けた銅リングの間で電位を確実に固定するため、湾曲した板バネ形状の接触子を採用した新構造を設計した。これにより、板バネの湾曲部分が絶縁筒上の金属面に押し当たり、銅リングと確実に同電位にすることができる。

既存の4枚の半導体スイッチ基板を直列に接続し、3kV/2kAの出力で試験を行った。絶縁筒が有る場合と無い場合の比較試験を行い、絶縁筒の装着により出力波形に有意な乱れが発生しないことを確認した。これは、出力性能に影響を与えずにコロナフリーの運転ができることを示している。絶縁筒、試験時の様子、測定結果を図5にまとめて示す。

三年間の研究期間を通じて、絶縁筒と銅リングの最適な構造の確立を目的に試験を進めてきた。そして、最適な接触子構造を設計し、接触子を用いた電位固定方法の優位性を確認することができた。強電界を緩和しコロナフリーを実現する構造を確立することができた。

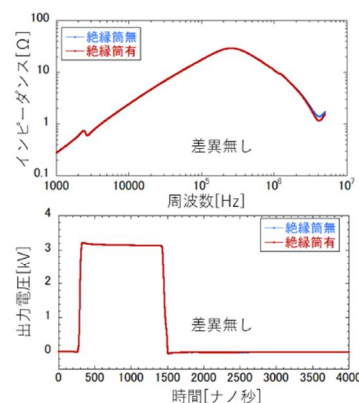


【絶縁筒】



#### ■ 試験条件

出力: 0.8kV充電×4枚 (M19型)  
負荷: 20Ω抵抗 (100Ω×5並列)



【波形の測定結果】  
試験基板4枚を使用

図5. 絶縁筒、試験時の様子、測定結果

5. 主な発表論文等

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

1. 著者名 高柳智弘	4. 巻 PASJ2022
2. 論文標題 J-PARC における加速器用パルス電源の半導体化	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 Proceedings of the 19th Annual Meeting of Particle Accelerator Society of Japan	6. 最初と最後の頁 242,246
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） なし	査読の有無 無
オープンアクセス オープンアクセスとしている（また、その予定である）	国際共著 -

〔学会発表〕 計1件（うち招待講演 0件 / うち国際学会 0件）

1. 発表者名 高柳智弘
2. 発表標題 J-PARC における加速器用パルス電源の半導体化
3. 学会等名 第19回日本加速器学会年会
4. 発表年 2022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
---------------------------	-----------------------	----

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
---------	---------