

154 kV 機器用ダイレクトモールドブッシングの開発

Development of 154 kV Direct-molded Bushing for Transformation Facilities

住本 勉
Tsutomu SUMIMOTO

今西 晋
Shin IMANISHI

足立和久
Kazuhisa ADACHI

荻島みゆき
Miyuki OGISHIMA

桑木亮仙
Akihisa KUWAKI

山岸 明*
Akira YAMAGISHI

田中敏明*
Toshiaki TANAKA

奥田健司*
Kenji OKUDA

ダイレクトモールドブッシングは、主絶縁にエポキシ樹脂を使用してシリコンゴムの外被を被せた完全固体絶縁タイプのブッシングである。今回、酸化亜鉛の電界緩和技術を適用して、従来ブッシングに比較して軽量・コンパクト化した154 kVクラス中汚損用、重汚損用の機器用ブッシングを開発した。気中部の汚損設計は従来の磁器がい管の設計を踏襲した。開発品にて、各種電気試験、機械試験を実施し、JEC-5202規格を満足することを確認した。また、実機での耐震試験を実施し、良好な耐震特性を有することを確認した。

Direct-molded bushing is a completely solid insulator type bushing, which is achieved by the structure composed of epoxy resin as a main insulator and silicone rubber as an outer cover. In this time, we developed light-weight and compact 154kV bushings for middle and heavy pollution levels by application of the electric field relaxation technology using ZnO. The pollution design followed the conventional design of porcelain insulator. We investigate the electrical and mechanical properties of them and the results met JEC-5202 regulation. Furthermore, we demonstrated vibration test of the bushing and the result showed good performance.

1. はじめに

ダイレクトモールドブッシングは、主絶縁にエポキシ樹脂を使用してシリコンゴムの外被を被せた完全固体絶縁タイプのブッシングであり、絶縁油を使用しないことから軽量・コンパクトを実現した製品である。軽量・コンパクトであるためにブッシングの共振周波数が高く耐震性に優れていることから、近年多発している地震対策として脚光を浴びている。我々は既に22/33 kV、66/77 kV、110 kVクラスの製品をラインナップしている¹⁾。今回、154 kVクラスの機器用ブッシングとして、中汚損用²⁾、重汚損用を開発したので、報告する。

2. 開発仕様

変圧器用ブッシングの取り合いは、JEC-5202ブッシング規格で規定されており、今回の154 kVクラスの開発仕様についてもこの規格を基に決定した。表1に主な開発諸元を示す。

表1 開発諸元

項目	仕様	
定格電圧	161 kV	
定格電流	2000 A	
短時間耐電流	50 kA 2秒	
汚損区分 (塩分付着密度)	中汚損 (0.06 mg/cm ²)	重汚損 (0.12 mg/cm ²)

3. 構造・設計

154 kVダイレクトモールドブッシングの構造は、機器と取り合うフランジの寸法はJEC-5202と同等とし、油中側、気中側の構造・寸法はJEC-5202の電気・機械特性を満足し、なおかつ、コンパクト化を考慮して決定した(図1)。

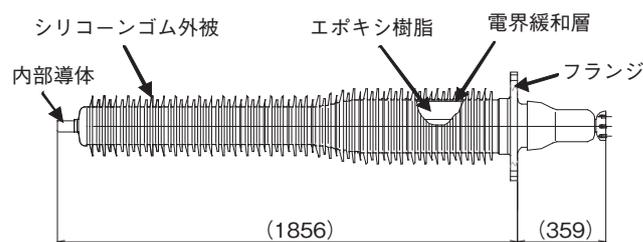


図1 154 kV ブッシング概略図 (重汚損用)

* 株式会社日立製作所

3.1 電界設計

154 kV ダイレクトモールドブッシングにおいて、構造上電界が高くなるのは気中部下部の遮へい金具近傍である。内部導体と遮へい金具の位置・形状、ブッシング外径を最適化することで遮へい金具近傍のブッシング内部の電界を抑えるとともに、シリコンゴム外被表面の電界を下げて運転電圧時にコロナ放電が発生しないよう各部の構造を決定した。

また、気中部下部のエポキシとシリコン外被の間には、非線形材料（酸化亜鉛）を用いた電界緩和層を設けている（図1参照）。電界緩和層の電界-電流特性（図2）の通り、設定電界以上になると電流が流れてその場所の電界を一定に保とうとする特性を持つ。このように電界緩和層は高電界の領域で電界抑制効果を持つ。過電圧時や雷サージ侵入時などの異常時の過大な電圧がブッシングに印加された場合には、気中部下部の高電界となる部分の電界を抑制するため、ブッシングの気中部全長をコンパクト化できる。

電界緩和層の動作電界を超える電圧が印加された場合の等電位線分布を図3に示す。(1)は電界緩和層がない場合で、下部遮へい金具先端近傍の外被表面の等電位線が密になっている。これに対し、電界緩和層がある(2)では電界抑制効果により外被表面の等電位線が疎になっていることがわかる。

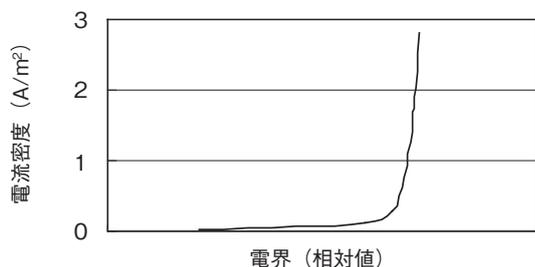


図2 電界緩和層の非線形電圧-電流特性

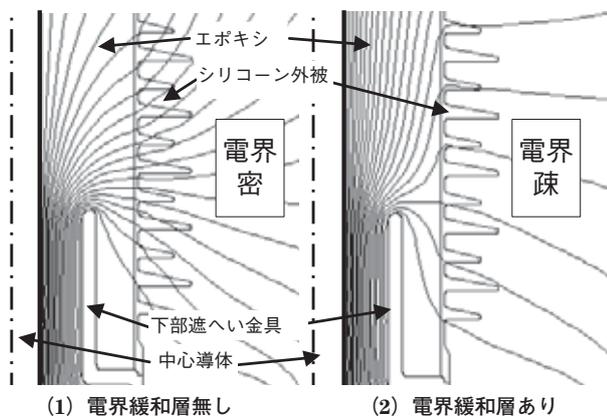


図3 等電位分布図

3.2 汚損設計

外被に使用しているシリコンゴムは、撥水性を有することから一般的に汚損性能に優れるといわれている。しか

しながら、ダイレクトモールドブッシングでは、臨海部など急速汚損の発生する環境で撥水性が有効に作用しない可能性³⁾を考慮して、磁器がいし・がい管の汚損設計を踏襲し、その設計基準曲線⁴⁾から中汚損、重汚損に必要な表面漏洩距離を計算し、気中部高さを決定した。

両クラスの寸法比較を図4に、計算した汚損設計曲線を図5に示す。154 kV クラスの場合、汚損耐電圧目標値は161 kV (JEC-5202) であるが、図4の構造で中汚損、重汚損それぞれの汚損耐電圧値が161 kV 以上を満足していることがわかる。

4. 検証試験

4.1 電気試験

JEC-5202 ブッシング規格に基づいて、絶縁抵抗試験、商用周波乾燥耐電圧試験、雷インパルス乾燥耐電圧試験を実施した。また、固体絶縁としての健全性を確認するために、190 kV までの部分放電試験を実施した。試験の状況を図6に示す。試験結果はいずれも良好であった。試験結果は表2の一覧表にまとめて示す。

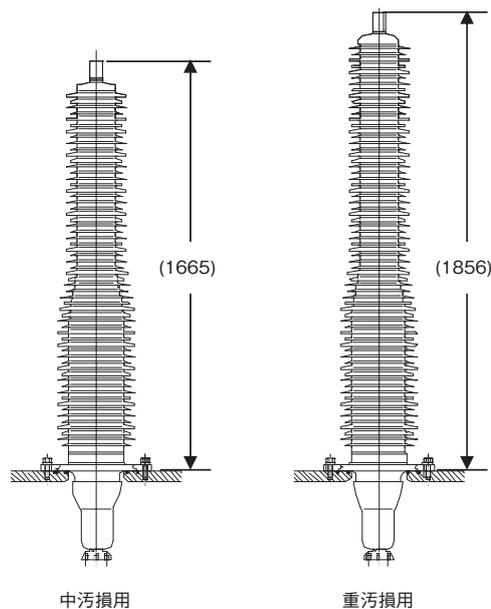


図4 154 kV ダイレクトモールドブッシング寸法比較図

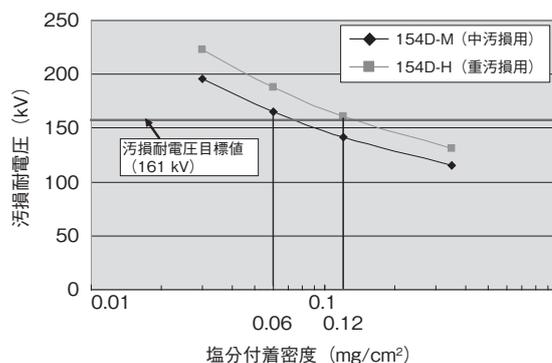


図5 汚損設計曲線

4.2 曲げ耐荷重試験

JEC-5202 ブッシング規格に基づいて、曲げ耐荷重試験を実施した。ブッシング先端に3600 N・1分間の荷重を印加後、外観及び部分放電試験（190 kV・10分）にて異常のないことを確認した。試験の状況を図7に示す。試験結果はいずれも良好であった。試験結果は表2の一覧表にまとめて示す。

4.3 耐震試験

ブッシングを変圧器の標準ポケットに搭載した状態で、共振確認試験、加振試験を実施した^{5) 6)}。試験の概要は下記の通りである。

共振確認試験：正弦波で周波数スイープ（1～33 Hz）し、共振周波数を確認する。

加振試験：各規格に基づき、下記振動波形を入力した後、外観及び部分放電試験（190 kV・10分）にて異常の無いことを確認する。

振動波形：①共振正弦3波 10 Hz（JEAG 5003-2010）⁷⁾
②ランダム波（IEEE 693-2005）⁸⁾

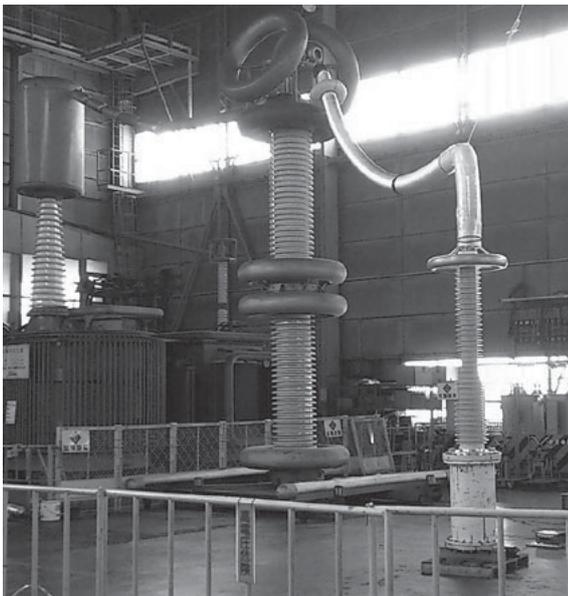


図6 電気試験状況

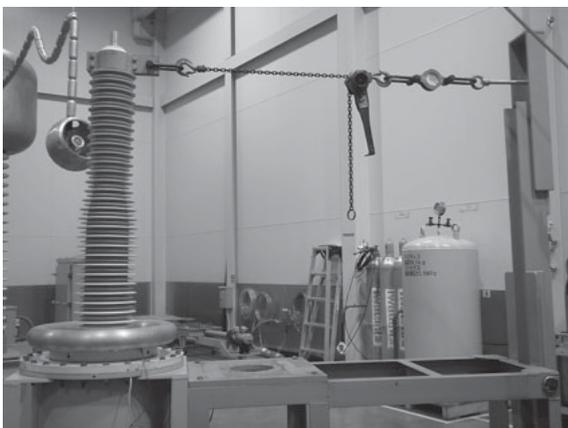


図7 曲げ耐荷重試験状況

共振確認試験の結果、標準ポケット込みの状態

中汚損用：15.3 Hz

重汚損用：13.8 Hz

であり、JEAG 5003-2010「変電所等における電気設備の耐震設計指針」で規定されている地表面での地震力の卓越周波数（0.5～10 Hz）の範囲外であった。

加振試験の結果は、①共振正弦3波、②ランダム波のいずれの波形においてもブッシングに異常は見られなかった。耐震試験の状況を図8に示す。

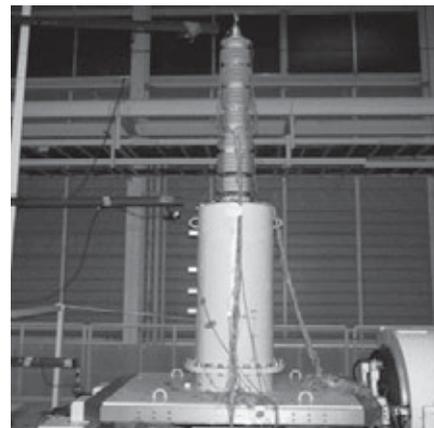


図8 耐震試験状況

4.4 温度上昇試験

JEC-5202 ブッシング規格に基づいて、温度上昇試験を実施した。中汚損用ブッシングの機器側を変圧器油中、気中側を空気中にて実施した温度上昇試験の結果を図9、10に示す。

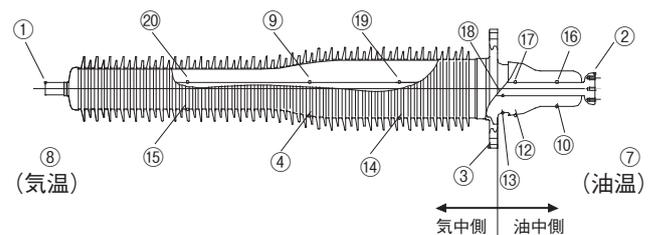


図9 温度測定位置

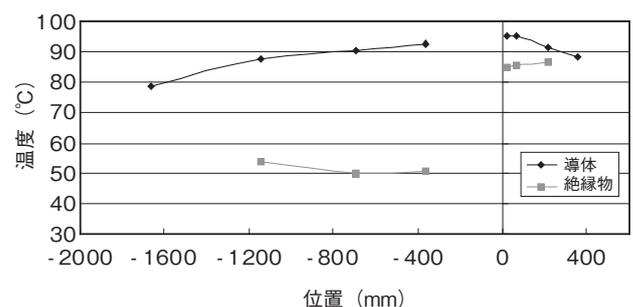


図10 中汚損用ブッシング各部の温度分布（2000 A）

気中部の最高温度が 90.3℃、油中部の最高温度が 88.4℃であり、いずれも 105℃ 以下、周囲温度 29.4℃ からの温度上昇値が 65 K 以下と良好な結果であった。

重汚損用ブッシングについては、中汚損用ブッシングの試験データを基に熱解析を実施した。図 11 に 2000 A 通電時の温度分布解析結果を示す。重汚損用ブッシングについても、規格値を満足していることを確認した。



図 11 重汚損用ブッシング各部の温度分布 (2000 A)

4.5 検証結果まとめ

中汚損用、重汚損用ブッシングで実施した試験結果を表 2 にまとめる。

表 2 試験結果一覧 (中汚損用, 重汚損用)

項目	特性	結果
外観・寸法検査	異常なきこと	良
絶縁抵抗試験	2000 MΩ 以上	良
商用周波乾燥耐電圧試験	325 kV 1 分間	良
雷インパルス乾燥耐電圧試験	±750 kV 各 5 回	良
温度上昇試験	絶縁媒体中にて定格電流 2000 A を通電し温度上昇値が温度上昇限度 (65 K)、許容温度 (105℃) を越えないこと	良
曲げ耐荷重試験	下部金具を固定し、気中側ブッシング先端に対して垂直方向に 3600 N の荷重を 1 分間加え、異常のないこと	良
耐震試験	①共振正弦 3 波 ②ランダム波での加振試験後、外観・部分放電試験で異常なきこと	良
商用周波部分放電試験	190 kV 5 pC 以下	良
気密試験	150 kPa・G 16 時間 蓄積法により漏れがないこと	良

5. ま と め

エポキシ主絶縁とシリコーンゴム外被を用いた完全固体絶縁構造の 154 kV ダイレクトモールドブッシング (中汚損用、重汚損用) を開発し、JEC-5202 (2007) に規定された電気試験、機械試験項目を満足することを確認した。また、試験試料を用いて耐震試験を実施し、良好な耐震特性を有することを確認した。

参考文献

- 1) 足立和久, 他:「110 kV ダイレクトモールドブッシングの開発」, 平成 19 年電気学会全国大会, No.7-129, 第 7 分冊, p.194 (2007)
- 2) 住本勉, 他:「154 kV 機器用ダイレクトモールドブッシングの開発」, 平成 25 年電気学会全国大会, No.5-200, 第 5 分冊, p.327-328 (2013)
- 3) 畔柳, 他:「送電用高分子がいし急速汚損時の塩分付着特性と霧中耐電圧特性」, 電力中央研究所報告, H08018 (1999)

- 4) 「変電設備の耐塩設計」, 電気協同研究, 第 35 巻, 第 3 号 (1979)
- 5) 山岸明, 他:「新素材ブッシング搭載変圧器の耐震性検討」, 電気学会 (B) 静止器研究会資料, No. SA-12-123 (2012)
- 6) 山岸明, 他:「新素材ブッシング搭載変圧器の耐震性検討 (その 2)」, 電気学会 (B) 静止器研究会資料, No. SA-13-098 (2013)
- 7) 日本電気協会: JEAG-5003-2010 「変電所等における電気設備の耐震設計指針」 (2010)
- 8) "Recommended Practices for Seismic Design of Substations", IEEE 693-2005 (2005)

特変電工昭和（山東）電纜附件有限公司

住本 勉（すみもと つとむ）

電力ケーブル接続部の開発・拡販に従事

(2013年12月まで 昭和電線ケーブルシステム株)

エネルギーシステムユニット 電力機器部 技術課所属)

昭和電線ケーブルシステム株

今西 晋（いまにし しん）

エネルギーシステムユニット 電力機器部 技術課 主査

電力ケーブル接続部の開発・拡販に従事

昭和電線ケーブルシステム株

足立 和久（あだち かずひさ）

エネルギーシステムユニット 電力機器部 技術課 主査

電力ケーブル接続部の開発・拡販に従事

昭和電線ケーブルシステム株

荻島 みゆき（おぎしま みゆき）

エネルギーシステムユニット 電力機器部 技術課 主査

電力ケーブル接続部の開発・拡販に従事

昭和電線ケーブルシステム株

桑木 亮仙（くわき あきひさ）

エネルギーシステムユニット 電力機器部 技術課長

電力ケーブル接続部の開発・拡販に従事

株式会社日立製作所

山岸 明（やまぎし あきら）

電力システム社 変圧器設計部

開発・技術グループ

株式会社日立製作所

田中 敏明（たなか としあき）

電力システム社 変圧器設計部

開発・技術グループ

株式会社日立製作所

奥田 健司（おくだ けんじ）

電力システム社 変圧器設計部

大形設計グループ