

受配電・開閉・制御機器コンポーネントを支える材料技術

Materials Technologies Supporting Electric Distribution, Switching and Control Devices

原 永治 HARA, Eiji

吉澤 利之 YOSHIZAWA, Toshiyuki

小宅 美晃 OYAKE, Yoshiaki

さまざまな地域で使用される受配電・開閉・制御機器コンポーネントは、人体や環境に有害な特定有害物質の使用を制限する RoHS 指令への対応をはじめ、IEC, UL, CCC などの規格に適合することが求められる。富士電機は、特定有害物質の代替化を RoHS 指令の適用時期以前に完了し、2021 年 7 月から新たに使用が制限されるフタル酸エステルの代替材の開発に取り組んでいる。また、新製品には複雑な形状でも破損や剥がれの起きにくい絶縁コーティング材の開発や、生産性に優れた加工方法と材料の組合せなどにより、製品の小型化や省エネルギー化に加えて品質と性能の要求を達成した。

Electric distribution, switching and control devices, used in various regions of the world, are required to conform to the RoHS Directive, which restricts the use of specific hazardous substances that are harmful to the body and the environment, as well as other standards such as IEC, UL and CCC. Fuji Electric completed its substitution of specified hazardous materials before the effective date of the RoHS Directive. We are working to develop an alternative material for phthalic ester, which will have its usage restricted starting in July 2021. Furthermore, we have developed insulating coating materials that are less susceptible to cracking and peeling even when used in the complex shapes and have combined materials with processing methods that improve productivity. This allowed our new products to be compact, save energy, and meet quality and performance requirements.

1 まえがき

受配電・開閉・制御機器コンポーネントは、世界のさまざまな地域で使用されるため、グローバルな要求に対応することが必須となっている。2003 年に発効した RoHS 指令^(注)では、環境や人体に有害な化学物質が自然環境に暴露されないように製造段階で特定有害物質の使用を制限している。富士電機は、受配電・開閉・制御機器コンポーネントが使われる全ての産業分野で、RoHS 指令の適用時期に合わせて計画的な対応を実施している。さらに、IEC, UL, CCC などの各国の規格に適合させるとともに、省エネルギー化や省スペース化に対応する必要がある。

本稿では、近年の各国の規格における環境規制に対応するための材料技術と、製品の小型化に貢献する材料技術について述べる。

2 環境規制対応の材料技術

2.1 環境規制の動向

近年では化学物質の含有濃度を規制し、製品に含まれる有害化学物質を削減することが求められている。その一例として、図 1 に RoHS 指令のタイムスケジュールと富士電機の取組みを示す。

2006 年 7 月に施行された RoHS 指令では、AC1,000 V

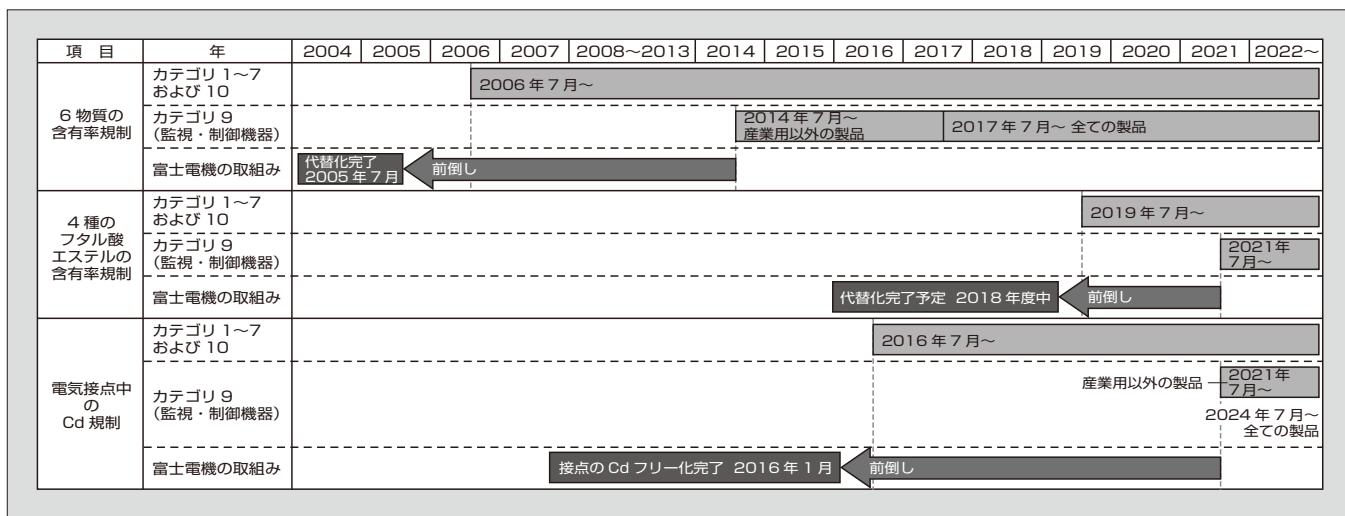


図 1 RoHS 指令のタイムスケジュールと富士電機の取組み

〈注〉 RoHS 指令：電気・電子機器に含まれる特定有害物質の使用制限についての EU（欧州連合）の指令

表1 フタル酸エステルの使用の可能性

フタル酸エステル 4種	電線 (PVC)	ゴム (NBR, CR, CSM)	塗料・接着剤・ 注型樹脂
DEHP	○	○	△
BBP	×	×	×
DBP	×	×	△
DIBP	×	×	×

○：可能性大，△：可能性小，×：可能性なし

および DC1,500 V を超えない範囲の電圧で使用される電気電子機器を 10 種類のカテゴリに分け、6 種類の特定有害物質の含有濃度を極めて低い指定値以下に抑えることが義務化された。6 種類の特定有害物質は、鉛 (Pb)、水銀 (Hg)、カドミウム (Cd)、六価クロム (Cr⁶⁺)、ポリ臭素化ビフェニル (PBB)、ポリ臭素化ジフェニルエーテル (PBDE) である。

受配電・開閉・制御機器コンポーネントが含まれるカテゴリ 9 は、対象から外されていたが、2011 年 7 月の改正 RoHS 指令により、2014 年 7 月から適用対象製品となった。

2015 年 6 月には、生体にホルモン作用を起こしたり、逆にホルモン作用を阻害したりする可能性があるため、全てのカテゴリにおいて、4 種のフタル酸エステルが新たに制限物質に追加された。カテゴリ 1～7 および 10 が 2019 年 7 月から、カテゴリ 9 が 2021 年 7 月から 1,000 ppm 以下に含有濃度を抑えることが義務化される。この制限物質は、フタル酸ビス (2-エチルヘキシル) (DEHP)、フタル酸ブチルベンジル (BBP)、フタル酸ジブチル (DBP)、フタル酸ジイソブチル (DIBP) である。

なお、フタル酸エステルは、電線、ゴム、注型樹脂などに可塑剤として多く使用されている (表 1)。

また、適用除外用途として使用されてきた電気接点中の Cd については、カテゴリ 1～7 および 10 が 2016 年 7 月に、産業用以外のカテゴリ 9 が 2021 年 7 月 (産業用が 2024 年 7 月) に適用除外の有効期限が終了する。このため、接点中の Cd の代替技術開発を進め、2016 年 1 月に Cd フリー接点への切替えを完了した。

2.2 フタル酸エステルの代替材料技術

富士電機は、フタル酸エステルを部材に使用しているかどうかの確認を完了し、規制開始に前倒して 4 種のフタル酸エステルの代替に対応できるように取り組んでいる。フタル酸エステルは、表 2 に示す可塑剤としてゴム (NBR

表2 NBR ゴムのフタル酸エステル配合

種類	配合 (wt %)
原料ゴム	46
補強材 (カーボンブラック)	23
充填剤 (炭酸カルシウム)	23
可塑剤 (フタル酸エステル DEHP)	5
その他 (加硫剤ほか)	3

他) 部品や電線被覆などの塩化ビニル (PVC) に添加することで、ゴム弾性 (可とう性) を付与するという主目的の他に、次に示すように性質を向上させる役割がある。

- (a) 原料素材と相溶性が良い (分離抑制)
- (b) 加工性の向上 (流動性・低融点)
- (c) 環境性能 (耐熱性・耐寒性)
- (d) 電気絶縁特性

切替えに当たっては、可塑剤の変更やゴムの種類を変更した代替材料の選定と、クッション特性、温度特性、耐劣化性などの製品要求性能の定量評価を順次実施し、2018 年度中に対象製品への使用を全廃する予定である。

3 小型化に貢献する材料技術

3.1 電子式漏電遮断器「EX シリーズ」用コーティング材

(1) 背景

「EX シリーズ」では、配線用遮断器と同一外形サイズとすることで、設置面積を従来比で 30% 小型化している。そのため、図 2 に示すように導体形状の複雑化に加えて絶縁被膜の薄肉化 (0.4 mm) が要求される。しかも、端子締付け時に発生する応力に対応するための可とう性や、製品の異常過熱や火災に対する耐性を確保するため、難燃性 (自己消火性) などを持つ絶縁被覆 (コーティング材) が求められた。

複雑な形状の導体を絶縁被覆する上で、表 3 に示す要求値を全て満足する粉体エポキシコーティング材は市販材にはなかった。そこで、カップリング試験における押込み深

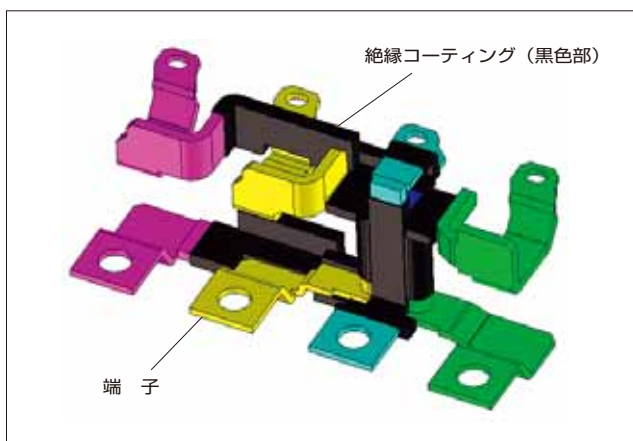


図2 EX250 導体構造および絶縁コーティング箇所

表3 製品要求性能

項目	要求値	市販材
耐電圧 (0.4 mm)	12 kV以上	17.8 kV
耐トラッキング値	175 V以上	200 V
カップリング試験 *	7 mm以上	1 mm
せん断接着強さ	20 MPa以上	13 MPa
難燃性 (自己消火性)	あり	あり
ヒートサイクル性	割れないこと	割れ発生

*カップリング試験における押込み深さ

さやヒートサイクル性などの要求性能を満たす材料を新たに開発した。

(2) 材料の可とう性の向上

図3に示すように、導体端子にねじを締め付けると絶縁コーティング部には大きな応力が発生する。応力により、破損や剥がれなどが懸念されるため、絶縁コーティング材には市販材より優れた可とう性が要求される。

そこで、材料開発においては材料メーカーの協力の下、分子構造の変更や有機添加剤の検討を行い、可とう性の向上を図った。

可とう性の評価指標には伸び率や弾性率、カップリング試験による押し込み深さなどがある。今回は、製品での端子ねじ締め付け破壊トルクの値と相関が見られるカップリング試験(図4)で、改善効果を確認することにした。図5にカップリング試験後のサンプルを示す。市販材では押し込み深さが要求値以下でクラックが発生したが、開発材では可とう性を向上させることで、カップリング試験の目標を達成する

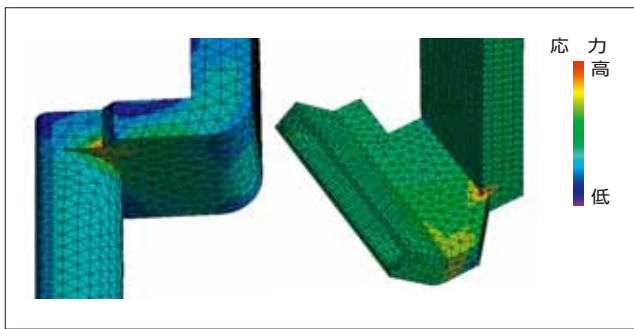


図3 端子締め付け時に発生する応力の解析結果例

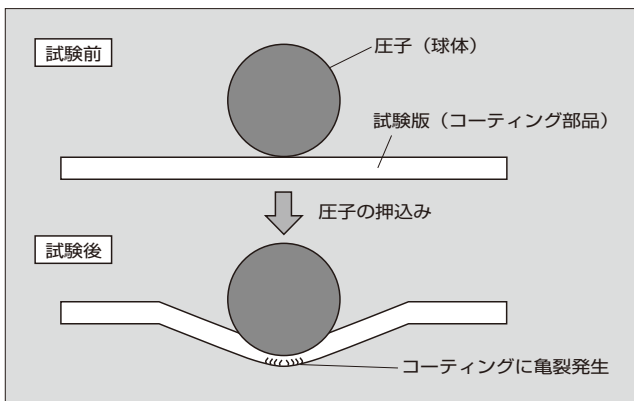


図4 カップリング試験

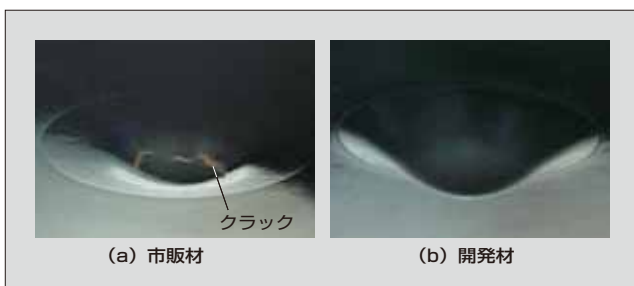


図5 カップリング試験後のサンプル

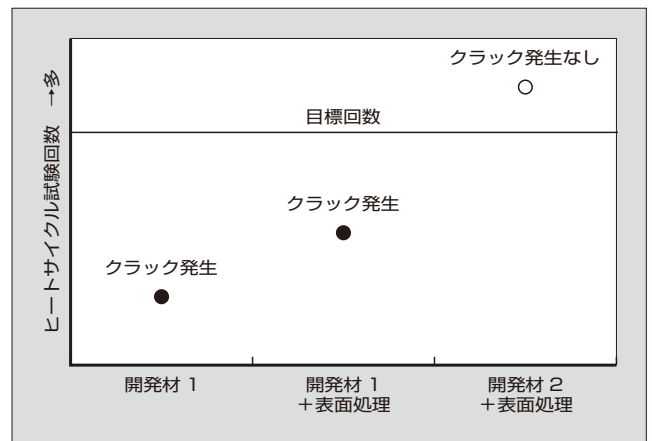


図6 ヒートサイクル試験結果

とともに、製品のねじ締め付け性能を満足することができた。

(3) 長期信頼性の確立

コーティング部の長期信頼性を保証するためには、20年間に相当するヒートサイクルに耐える必要がある。図6に、開発材および表面処理方法の違いによるヒートサイクル試験結果を示す。開発材2は開発材1を基に無機充填(じゅうてん)材の最適化(配合量・粒子)を行い、線膨張係数を市販材よりも約30%小さくし、導体(金属)の線膨張係数に近づけた。また、絶縁被覆部の割れはコーティング材と相手材との接着強度が大きく影響することから、接着力改善のための導体の表面処理方法を数種類検討した。このうち、効果が大きい表面処理と開発材2を組み合わせることにより、絶縁コーティングの長期信頼性を確保することができた。

3.2 12kV・24kV VCBの絶縁材料技術

(1) 背景

高圧真空遮断器(VCB)は、グローバル市場の要求であるIEC規格への対応や、小型化および安全性の向上への対応が必要である。しかし、これまでの高圧機器は絶縁材料として、熱硬化性樹脂のエポキシ真空注型品やBMC(Bulk Molding Compound)成形品を使用した気中絶縁構造を採用している。BMC管体(きょうたい)の絶縁性能を満足させようとすると、所定の空間距離が必要であり、小型化に限界があった。

(2) 極柱の自動加圧ゲルの成形加工

新製品の24kV VCBの開発では、IEC規格への対応の他に小型化が求められているため、主回路断路部をエポキシ樹脂で絶縁被覆する固体絶縁方式を採用した。これにより、従来品よりも容積比で約40%の小型化を実現した。また、従来のエポキシ真空注型では硬化に12時間以上を要し、生産上のボトルネックとなっていた。そこで、エポキシ樹脂の成形方法に生産性の優れる自動加圧ゲル化法を選択し、受注増加にも早急に対応できるようにした(表4)。

エポキシ樹脂は、成形する際に硬化により体積が収縮し、また成形後の冷却時にも収縮するため、線膨張係数の小さい樹脂を選定した(表5)。また、図7に示す真空バルブ

表4 高圧絶縁材料と成形加工方法

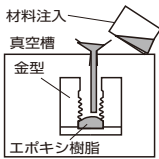
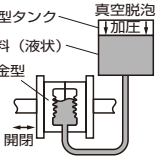
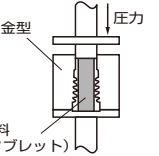
材 料	成形方法	耐電圧性能	生産性
エポキシ樹脂	真空注型 	30 kV以上	1～2個/日
	自動加圧ゲル化法 	20～30 kV	10～15個/日
BMC エポキシ樹脂	圧縮成形 	10～20 kV	30～40個/日



図8 極柱のX線透過写真

表5 固体絶縁用のエポキシ樹脂の要求特性と選定材の特性

特 性	要 求	測定値
曲げ強さ	100 MPa以上	133 MPa
高温強度 (60℃)	80 MPa以上	99 MPa
線膨張係数	10～40 ppm/K	30 ppm/K
耐電圧	15 kV/mm以上	20 kV/mm

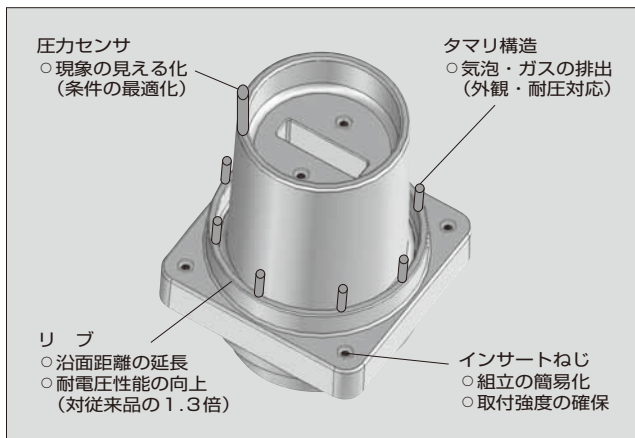


図9 12kV VCB用ブッシングの改善内容

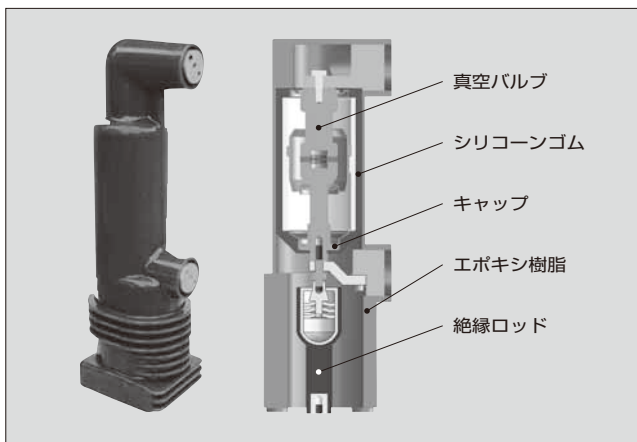


図7 24kV VCBの極柱構造

は、エポキシ樹脂の収縮の影響により、セラミック絶縁筒の破損や樹脂との界面剥離が発生する問題があった。そこで、真空バルブにはシリコンゴムで被覆し、セラミック絶縁筒への応力を緩和した。

(3) 高圧絶縁部品の評価技術

製品開発では、初期段階においては性能評価で品質のつくり込みを行い、最終段階の量産評価では安定したものつくりを推定している。

高圧絶縁部品の評価は、機械的な強度試験や電気的な商用周波耐電圧試験・雷インパルス耐電圧試験を実施している。また、市場環境を想定した高温での特性調査や長期使用後を想定した劣化評価（加熱・加湿・ヒートサイクル試

験）により、性能を検証している。

さらに、部品単品での性能調査のため、絶縁部品内部の観察に、X線透過システムやX線CTを用いて内部欠陥（気泡・亀裂）や機能異常部の非破壊検査を行っている（図8）。

(4) ブッシング部品のBMC成形加工

12kV VCB用ブッシング部品では、これまでエポキシ真空注型を使用していたが、使用材料をBMCに変更し、圧縮成形による生産性の向上に取り組んだ。

高圧絶縁部品の耐電圧性能のばらつきを少なくするためには、構造や金型の最適化が不可欠である。そこで、図9に示す施策を盛り込むとともに、圧力センサを金型内部に設置し、成形時の内部の変化を定量的に捉えることで、発生した外観不良や内部状態の見える化を図り、耐電圧性能の確保と外観品質の安定化を実現した。

4 あとがき

受配電・開閉・制御機器コンポーネントを支える材料技術について述べた。

今後も、環境規制に対応し、かつ、新製品の省エネルギー化と小型化に寄与する新規材料の開発を推進していくことで、お客さまの満足する製品の提供と社会環境の保護に貢献していく所存である。



原 永治

受配電・開閉・制御機器コンポーネントの樹脂材料の研究開発に従事。現在、富士電機機器制御株式会社開発本部技術開発部課長補佐。



小宅 美晃

受配電・開閉・制御機器コンポーネントの樹脂材料の研究開発に従事。現在、富士電機機器制御株式会社開発本部技術開発部。



吉澤 利之

受配電・開閉・制御機器コンポーネントの樹脂材料の研究開発に従事。現在、富士電機機器制御株式会社開発本部技術開発部主任。





*本誌に記載されている会社名および製品名は、それぞれの会社が所有する
商標または登録商標である場合があります。