特高圧C Vケーブル用工場拡張方式・常温収縮型ジョイントの開発

非会員 鈴木 宏明 正員 小林 正三 非会員 小野 努 正員 武藤 大介
非会員 栗原 弘明 正員 田中 悟 (古河電気工業株式会社)

Development of Cold-Shrinkable Joints with Carrier Pipes for HV Cables

Hiroaki Suzuki, Non Member, Shozo Kobayashi, Member, Tsutomu Ono, Non Member, Daisuke Muto, Member
Hiroaki Kurihara, Non Member, Satoru Tanaka, Member (The Furukawa Electric Co., Ltd.)

One piece, pre-molded joints have been used all over the world for high voltage (HV) XLPE cables. For those pre-molded joints, ethylene-propylene rubber has mainly been applied for many years.

We have succeeded to apply a new cold-shrink technology on those pre-molded joints with silicone rubber which has lower elasticity, better mechanical properties, such as lower permanent set. With cold-shrink technology, pre-molded sleeves can be shipped expanded onto the carrier pipes. So the customer needs no tools for assembly on the jointing site and just needs to pull out the carrier pipes.

All the type tests required on IEC standards 60840 were carried out including water immersion and heating cycle tests on our newly developed 110-138kV cold-shrinkable joints (CSJ) and have shown good performance in all the tests, which means we became the first manufacturer all over the world who developed cold-shrinkable joints (CSJ) with silicone rubber for HV XLPE cables.

キーワード： ジョイント、常温収縮型、工場拡張方式、シリコーンゴム、IECタイプテスト

1. まえがき

高圧C Vケーブル用ジョイントとして、ワンピースのゴムブロック型ジョイント (R B J) が開発され、その適用が電圧階級、採用国ともに急速に拡大している。R B Jの大きな特徴は、その優れた施工性・施工管理の簡便性にある。このR B Jに適用される材料の主流は、これまでエチレンプロピレンゴム (E P R) であった。

一方我々は、高耐熱・低モジュラスであり、かつ永久伸び特性に優れたシリコーンゴムの特性に着目した。その高い永久伸び性能 (永久伸びが小さいこと) により初めて可能となる工場拡張方式の、特高圧C Vケーブルへの適用研究に、世界で一早く取り組み、施工性を従来のR B Jよりもさらに著しく改善した110kV工場拡張・常温収縮型ジョイント (C S J : Cold Shrinkable Joint) を開発した。^[1]

[2]

2. 工場拡張方式・常温収縮型ジョイント (C S J)

開発したC S Jの施工性は画期的に簡易になった。ワンピースのゴムユニットは、工場にて拡張され、拡張保持材 (スパイラルコア) により拡張状態に保持されて、ジョイ

図1 C S Jの組立概略図

Fig.1 Outlook of assembly for cold shrinkable joints

ント施工現場に出荷される。現場では熱を使わずに、図 1 に示すように、スパイラルコアを引き抜くだけでゴムユニットの収縮・組立が完了する。ゴムユニットを組み立てる際に、従来の RBJ で必要であった拡径及び収縮用工具をまったく必要としない。

さらに、収縮前の CSJ のゴムユニットは、通常、ケーブルシース外径よりも大きい内径に拡径保持されているため、ケーブルの接続作業時にケーブルシースを剥ぎ取る長さは最小限で済む。

この様な工場拡径方式を採用した常温収縮型ジョイントは、配電用付属品（直線接続部・終端接続部）等に既に適用されている技術であり、弊社でも既に実用化が進んでいるものの、66kV 級以上の電圧階級の実用化は、世界初となる。

3. 材料検討

3.1 機械特性

シリコンゴムは、長い間、引き裂き力が低いという問題から、CV ケーブルの付属品用途への適用が限定されていた。しかし、近年、高い引き裂き力を有するシリコンゴムが開発されるに至り、特高压 CV ケーブルへの適用が広がった。さらにシリコンゴムは、その温度特性、弾性率、永久伸び特性の物性面において、EPR に比較して優れた特性を有する。特に永久伸び特性等は、工場拡径方式の常温収縮技術をワンピース・プレモールド型ジョイントに適用する上で、最も重要な要素のひとつである。さらに、液状シリコンゴム (LSR) は、成形時の流動性の面でも EP ゴムに比較して極めて優れており、ストレスコーンの立ち上がりふもと部分等、従来、困難とされてきた部位の成形にも大きな優位性を示す。

開発した常温収縮型ジョイントに適用したシリコンゴムの物性値を、従来のジョイント用ゴム材料である EP ゴムと比較して、表 1 に示す。

表 1 絶縁性シリコンゴムの物性値

Table 1 Material properties of Silicone rubber

項 目	シリコンゴム	EP ゴム
引張伸び率	790%	750%
破断強度	10MPa	9.3MPa
硬度 (JIS-A)	34	60
引き裂き強さ (JIS-A)	21.5N/mm	11.8N/mm
永久伸び (100℃ 100%伸張)	2.6%	32.4%

3.2 電気的特性

シリコンゴムの電気的特性を調べるため、図 2 に示す構造のリセスシートを用いた破壊試験を実施した^[3]。高電圧部に、端部を円弧状に処理し、周囲をエポキシ樹脂で被覆した棒電極を用いることにより、コロナ・フリーにて試験を実施した。試料絶縁厚や試験雰囲気を表 2 に示す。

表 2 試料絶縁厚・試験雰囲気

Table 2 Outlook of electrical tests for silicone rubber

有効部絶縁厚	150~200 μ m
試料雰囲気	絶縁オイル中

図 2 リセスシートを用いた電気試験概略図

Fig. 2 Scheme of electrical test with recessed specimen

3.2.1 試験条件

シリコンゴムの電気的特性は、以下の試験条件に従って調査した。全試料について破壊点とその近傍の断面を顕微鏡観察し、絶縁部厚みを測り、それぞれの破壊ストレスを算出した。

AC 破壊試験

開始電圧 ; 6kV/10分
ステップ電圧 ; 1kV/10分
試験温度 ; 常温、90℃、105℃
試料数 ; 各温度 n=5 以上

雷インパルス破壊試験

雷インパルス破壊試験は、正極性のみまたは負極性のみで両極性データをとった。

開始電圧 ; +または- 14kV/3回
ステップ電圧 ; +または- 1kV/3回
試験温度 ; 常温、90℃、105℃
試料数 ; 各温度 n=5 以上

3.2.2 試験結果

AC 破壊試験

シリコンゴムの AC 破壊ストレスに、常温から 105℃ の範囲において、温度依存性は見られない (図 3)。AC の温度係数は 1.0 である。

雷インパルス破壊試験

シリコンゴムの雷インパルス破壊ストレスに、極性による違いは見られない (図 4)。しかしながら、AC 破壊ストレスには見られなかった温度依存性が、正負いずれの極性においてもわずかなではあるが確認された。この結果より、雷 Imp の温度係数は 1.1 (常温/105℃) とした。

3.3 寿命検証試験 (V-t 試験)

シリコンゴムの V-t 試験を実施した。試料形状は、AC および雷インパルス破壊試験と同じとした。1 年以上に及ぶ長期試験の結果、シリコンゴムの寿命指数 n は、

17であることが判明した(図5)。

以上のデータから、本シリコンゴムは、高圧CVケーブル付属品用材料として、十分な耐電圧特性・長期特性を有していることが確認された。

図3 シリコンゴムのAC破壊ストレスの温度依存性
Fig.3 Temperature dependence of AC BD stress for SiR

図4 シリコンゴムのImp破壊ストレスの温度依存性
Fig.4 Temperature dependence of Imp BD stress for SiR

図5 シリコンゴムのV-t特性
Fig.5 V-t characteristics of silicone rubber

4. ゴムユニットの設計

4.1 絶縁設計

CSJのゴムユニットの設計寸法は、以下に示す絶縁設計部位(図6)のストレス $\tau_1 \sim \tau_4$ を電界解析にて最適化することにより決定した。

- τ_1 ; 内導層平坦部ストレス
- τ_2 ; 内導層先端部ストレス
- τ_3 ; XLPE/ゴム界面沿層方向ストレス
- τ_4 ; 外導立ち上がり部ストレス

これらのストレスバランスを最適化した形状での電界解析結果を、図7に示す。

図6 ゴムユニットの構造と絶縁設計部位
Fig.6 Electrical design on molded rubber sleeve

図7 ゴムユニットの電界解析結果
Fig.7 Electric potential distribution in molded rubber sleeve

4.2 面圧設計

CSJを含めたプレモールド型ジョイントにおいて、接続界面の絶縁設計は、最も重要なポイントである。ワンピース・プレモールド型のゴムユニットを適用したCSJでは、異種材料により形成される界面は、ゴムユニット内面とケーブル絶縁体表面の1種類だけとなる。

界面モデル試料^[4]

一般に、界面の絶縁特性は界面面圧に大きく影響されることが知られている[5][6][7]。

そこで、図8および図9に示す2つの界面モデル試料を用い、先に示した τ_3 及び τ_4 部における界面面圧と、破壊ストレスの関係を求めることにより、CSJゴムユニットとXLPE界面の設計面圧を最適化した。

界面モデルでは、実機でのストレス分布を模擬した形状を採用している上、シリコンゴムシートとXLPEシートとの界面にかかる面圧を任意の値に設定した状態で、電気試験を実施できる。図8に示す外導立ち上がり部モデル(τ_4 モデル)では、絶縁シートの中央部分に一体成形されている導電ゴムが、ゴムユニットのストレスコーンの立

ち上がり部を模擬した形状となっており、ストレス分布は実機の外導立ち上がり部と同様になる。

一方、図9に示すXLPE/ゴム界面モデル ($\tau 3$ モデル)では、絶縁シートの外周にストレスコーン、中央に内導電極が一体成形されている。このモデルでは、XLPEとゴムの界面沿層方向にかかるストレス分布が、実機と同様になる。

いずれのモデル試料においても、界面に発生する面圧は、ゴムおよびXLPEシートの上にセットされる、エポキシ治具 (高圧電極を内包) の上部からばねによって押さえつけられる荷重により、任意の値に調整される。

また、ゴムとの間に界面を形成するXLPEシートには、鏡面仕上げを模擬したプレス面を有するものとサンドペーパー仕上げをしたペーパー処理面 (#400仕上げ相当; 表面の凹凸レベルは10~20 μm) を有するものの2種類を適用した。さらに、界面に高粘度のフッ素オイル (実機使用グレード) を適用した場合と適用しない場合についても試験を実施した。

界面モデル試験結果

外導立ち上がり部モデル ($\tau 4$ モデル) の試験結果を図10~図13に示す。同モデルでは、AC、雷インパルスいずれの試験においても、界面面圧、界面のオイルの有無、XLPEシートの表面状態によらず、高い破壊ストレスを示している。最も低い場合でも、500kV級CVケーブルの耐電圧値に於ける外導立ち上がり部ストレスの1.5倍以上となっている。

一方、破壊ストレスの界面面圧への依存性は、界面にオイルを適用せず、さらにXLPE表面に凹凸が大きく存在するほど顕著に見られる (図11、図13)。オイルを適用せず、かつペーパー処理したXLPEを用いた試験では、面圧が0.05 MPa以下の時の界面破壊ストレスは、0.2 MPaの場合に比較して、ACおよび雷インパルスいずれの試験でも約1/2程度まで低下している。しかしながら、界面にオイルを適用した場合の破壊ストレスは、上記した0.05 MPa以下になってもほとんど低下しない (図10、図12)。

これは界面に存在する微小な凹凸が影響しているものと考えられる。シリコンゴムは硬度がEPゴムに比較して極めて低い (表1) ため、低面圧でも自身が形状変化し、このような空隙を埋めやすい。そのため、0.05 MPa以下の低面圧においても極めて高い界面破壊ストレスを持つことができる。さらに、このような界面の微小な凹凸はオイルにより埋められるため、オイルを適用した試料の破壊ストレスは、界面面圧が低下してもほとんど低下していない。

一方、ゴム/XLPE界面モデル ($\tau 3$ モデル)では、当該部位以外を起点とした破壊が多く見られるものの、得られている未破壊ストレスおよび破壊ストレスは、 $\tau 4$ モデルの場合と同様、低面圧下でも高いレベルを示した (図14~図16)。

図8 界面特性評価用 $\tau 4$ モデル試料の構造

Fig.8 Sample set up that models the $\tau 4$ part

図9 界面特性評価用 $\tau 3$ モデル試料における電界分布

Fig.9 Electric stress distribution in the $\tau 3$ model

図10 $\tau 4$ モデルのAC試験結果 (オイルあり)

Fig.10 Test results of $\tau 4$ model on AC voltage with oil

図11 $\tau 4$ モデルのAC試験結果 (オイル無し)

Fig.11 Test results of $\tau 4$ model on AC without oil

図 12 $\tau 4$ モデルの雷 Imp 試験結果 (オイルあり)
Fig.12 Test results of $\tau 4$ model on Impulse with oil

図 13 $\tau 4$ モデルの雷 Imp 試験結果 (オイル無し)
Fig.13 Test results of $\tau 4$ model on Impulse without oil

図 14 $\tau 3$ モデルのAC試験結果 (オイル無し)
※ $\bigcirc$ で囲った部分以外はいずれも未破壊確認ストレス
Fig.14 Test results of $\tau 3$ model on AC without oil

図 15 $\tau 3$ モデルによるAC試験結果 (オイルあり)
Fig.15 Test results of $\tau 3$ model on AC with oil

図 16 $\tau 3$ モデルの雷 Imp 試験結果 (オイル無し)
※ $\bigcirc$ で囲った部分以外はいずれも未破壊確認ストレス
Fig.16 Test results of $\tau 3$ model on Impulse without oil

$\tau 3$ モデル試験については、ペーパー処理したXLPEを用いても当該部で破壊するケースが少なかったため、プレス面(鏡面)の試験はほとんど実施しなかった。

実機モデル試験

さらに66kV級の実機サイズレベルでも、モデル試料を用いた検証を実施した。図17に示すモデルでは、外導立ち上がり部の破壊ストレス($\tau 3$)、図18に示すモデルではゴムとXLPE界面の破壊ストレス($\tau 4$)、それぞれの面圧依存性を、絶縁外径の異なるCVケーブルを適用することにより求めた。

結果として、0.18MPaから0.04MPaまで面圧が低下しても、AC、雷インパルス両破壊ストレスはほとんど低下せず、高いレベルを示した。^[8]

界面モデルおよび実機モデルでの検討の結果、シリコーンゴムを適用したCSJは、界面面圧が0.05MPa以上

であれば、特高压 CV ケーブル用途として十分な界面特性を保証できることがわかった。

図 19 では、工場拡張方式を採用した CSJ の界面設計コンセプトとして、必要最低面圧の概念図を示した。工場拡張方式では、ゴムユニットはケーブルシースをかわせる高い倍率に拡張した状態で一定期間保管される。永久伸び特性に優れたシリコンゴムを採用することは、この期間における面圧低下を極めて小さいレベルに抑制することを可能とする。CSJ の界面設計では、拡張期間中の永久伸びによる面圧低下を考慮し、必要最低面圧を 0.05 MPa としている。これにより、CSJ はケーブルシステムとしての実使用期間である 30 年間にわたり、十分な電気的性能を有することができる。

図 17 外導立ち上がり部モデルの構造図

Fig. 17 Model sample to evaluate an effect of surface pressure on break down at the edge of the stress cone

図 18 XLPE/ゴム界面部モデルの構造図

Fig. 18 Model sample to evaluate an effect of surface pressure on break down at the interface between XLPE and SiR

図 19 ゴムユニットの設計(必要最低)面圧の概念図

Fig. 19 Concept on interfacial pressure between XLPE cable and molded rubber sleeve (minimum standard)

5. ゴムユニットの拡張技術

5.1 スパイラル型拡張保持材の設計

CSJ のゴムユニットの拡張保持材は、プラスチック製のひもをかみ合わせた状態でスパイラル状に成形した構造をしている。

この拡張保持材は、ゴムユニットを拡張状態で保管して

いる間に形状を維持し続けているだけでなく、引き抜き工具等を用いることなく、適度な引き抜き力にて勘合面がはずれ、ゴムユニットを常温にて収縮させることを可能とする。これらを実現可能とするため、我々はひも材形状ならびに勘合部形状を工夫し、勘合部分の溶着強度についても最適化を図った。

5.2 拡張装置の開発

工場拡張方式を確立するため、ゴムユニットを拡張し、スパイラル型拡張保持材上に乗せかえる拡張装置を開発した。低摩擦抵抗タイプの本拡張装置を用いることにより、ゴムユニット内面に損傷を与えることなく、容易に拡張することができる。

6. 施工性検証

予め拡張してあるゴムユニットを、ケーブルシース上に仮挿入し、導体を圧縮接続した後、このゴムユニットを組立位置に移動し、スパイラル型拡張保持材を引き抜くことにより、ゴムユニットを常温でケーブル上に収縮した。同作業に要したマンアワーは 2 名で 3 分程度である。工場拡張方式の適用により、従来のゴムブロック型ジョイント(RBJ)に必要とされた、現地における拡張作業を省略することが可能なため、組立は画期的に簡易になった。

図 20 にゴムユニットの収縮現場の写真を、図 21 に 110~138 kV CSJ の保護管を含めた構造図を示す。

図 20 ゴムユニットの収縮現場

Fig. 20 Assembling CSJ on the connected cables

①導体スリーブ ②ゴムユニット ③保護管
④防水コンパウンド ⑤エポキシ絶縁筒

図 21 110~138 kV CSJ の構造図

Fig. 21 Outlook of the 110-138kV CSJ

7. IECタイプテスト

7.1 耐電圧試験

20日間の長期課通電試験を含むIEC60840規格に規定の条件に基づくタイプテストを、第三者機関の立会の下で実施し、開発した110kV CSJの性能を検証した。表3に供試したケーブル構造を、表4に各試験項目の試験条件と試験結果を、図22に試験線路の全景写真を、図23に試験線路の概略図を示す。

表3 供試したケーブル構造
Table 3 Summary of the tested cable

導体サイズ		銅 400mm ²
XLPE絶縁体	厚み	17.5mm
	外径	61mm
金属シース		アルミコルゲート
外部被覆	材料	ポリエチレン
	外径	89mm

表4 試験条件ならびに試験結果
Table 4 Test conditions and results

試験項目	試験条件	結果
部分放電試験	AC 112kV / 10秒間印加後、徐々に電圧を96kVまで降下させ、室温及び高温（導体温度95～100℃）にて部分放電の発生の無きこと。	合格
AC課電 ヒートサイクル 試験	課電電圧；128kV ヒートサイクル温度；室温⇄95～100℃ ヒートサイクル回数；20サイクル終了後、室温と高温で部分放電測定	合格
雷インパルス 耐電圧試験	課電電圧；±550kV/10回 （導体温度95～100℃） 課電後、AC 160kVを15分間印加して破壊しないこと。	合格

図22 長期課通電試験実施状況

Fig. 22 Photo of the test circuit for long term test

図23 長期課通電試験線路概略図

Fig. 23 Test circuit for long term test on IEC type test

7.2 水没・ヒートサイクル試験

水没・ヒートサイクル試験の試験条件を表5に、その残存性能試験の試験条件と試験結果を表6に示す。水没・ヒートサイクル試験を終了した試料について、撤去後直ちに残存性能試験を実施した。残存性能試験はI Jスリット間ならびに対地間の両方について実施した。最後に試料を解体した結果、水の浸入・内部の異常等の現象は全く認められなかった。

表5 水没・ヒートサイクル試験条件

Table 5 Summary of water immersion and heating cycle test

水深	ジョイント上端から水面まで1m以上
ヒートサイクル 温度	低温；室温から10℃以内
	高温；導体最高温度の15～20℃以下 （保持時間；5時間以上）
サイクル数	20サイクル

表6 水没・ヒートサイクル試験後の
残存性能試験条件とその結果

Table 6 Test results after water immersion and heating cycle

試験項目	要求特性	結果
直流耐電圧試験	課電電圧；20kV 課電時間；1分間	合格
雷インパルス 耐電圧試験	スリット間； ±75kV/10回	合格
	対地間； ±37.5kV/10回	合格

8. まとめ

工場拡径方式を採用した特高圧CVケーブル用常温収縮型ジョイント（CSJ）を開発し、IEC60840タイプテストに合格した。

世界初となる特高圧CVケーブル用工場拡径方式・常温収縮型ジョイントは、

- ①施工性の画期的な向上（対現地拡径方式）
- ②長期間にわたる、十分かつ安定した耐電圧性能の確保
- ③ケーブルシース剥ぎ取り長を含めた省スペース・小サイズ化の実現

という長所を有しており、今後の特高圧 CV ケーブル用ジョイントの主力製品になるものと期待される。
(平成 12 年 02 月 25 日受付, 平成 12 年 07 月 13 日再受付)

文 献

- (1) 野沢春樹, 金井信之, 小林正三, 小野努, 田中悟; 作業性の向上を目指した 66kV CV ケーブル用中間接続部の開発, 460, 平成 10 年電気学会電力・エネルギー部門大会, (1998)
- (2) 鈴木宏明ら; 110kV CV ケーブル用工場拡張・常温収縮型中間接続部 (CSJ) の開発, p81-86, 第 104 号, 古河電工時報, (1999)
- (3) 鈴木宏明, 小野努, 小林正三, 武藤大介, 田中悟; CV ケーブル接続部用シリコンゴム材料の基礎特性検証, 7-092, 平成 12 年電気学会全国大会, (2000)
- (4) 小林正三, 武藤大介, 小野努, 鈴木宏明, 田中悟; CV ケーブル接続部用シリコンゴムの界面絶縁特性, 7-091, 平成 12 年電気学会全国大会, (2000)
- (5) Lequeux JM., Paroamo B., Vallauri U.; First field experience and evolution of cold shrinkable MV joints, B.1.6., Jicable'95, (1995), 300
- (6) Parmigiani B., Vallauri U.; Development of a rapid fitting pre-moulded joint for extruded insulation cables up to 275kV, A8.4, Jicable871, (1987)
- (7) C. Dang and D. Fournier; A study of the interfacial breakdown in cable joints, 518-523, CEIDP'94, (1994)
- (8) 小林正三, 栗原弘明, 武藤大介, 小野努, 鈴木宏明, 田中悟; 超高圧用工場拡張・常温収縮型接続部の界面面圧と界面絶縁特性, 452, 平成 12 年電気学会電力・エネルギー部門大会, (2000)

鈴木 宏明

(非会員) 1966 年 8 月 29 日生。1989 年早稲田大学理工学部応用化学科卒業。同年古河電工(株)入社。主として電気絶縁材料、電力ケーブル・ジョイントの研究開発に従事。現在、同社環境・エネルギー研究所 エネルギー伝送研究部。

小林 正三

(正員) 1969 年 3 月 31 日生。1997 年 3 月明治大学大学院博士課程(電気工学)修了。同年古河電工(株)入社。主として電力ケーブル用付属品の研究開発に従事。現在、同社環境・エネルギー研究所 エネルギー伝送研究部。工学博士。

小野 努

(非会員) 1968 年 9 月 1 日生。1991 年 3 月中央大学理工学部電気電子工学科卒業。同年古河電工(株)入社。主として電力ケーブル付属品の研究開発に従事。現在、同社環境・エネルギー研究所 エネルギー伝送研究部。

武藤 大介

(正員) 1972 年 6 月 12 日生。1998 年 3 月名古屋大学大学院電気工学科修了。同年古河電工(株)入社。主として電力ケーブル付属品の研究開発に従事。現在、同社環境・エネルギー研究所 エネルギー伝送研究部。

栗原 弘明

(非会員) 1969 年 11 月 29 日生。1995 年 3 月新潟大学大学院機械システム工学修了。同年古河電工(株)入社。主として電力ケーブル付属品の設計・開発に従事。現在、同社電力事業部 機器製造部

田中 悟

(正員) 1960 年 7 月 18 日生。1987 年 3 月大阪大学工学部電子工学科卒業。同年古河電工(株)入社。主として超高圧ケーブルおよび付属品の研究開発に従事。現在、同社環境・エネルギー研究所 エネルギー伝送研究部。