

22 kV アルミ遮水CVTケーブル・接続体の開発

Development of 22-kV XLPE Cable and Joint Having Water Impervious Aluminum Layer

村田孝一*
Kouichi Murata

河原秀夫*2
Hideo Kawahara

前田義弘*2
Yoshihiro Maeda

藤井茂*2
Shigeru Fujii

鈴木智行*3
Tomoyuki Suzuki

武藤大介*3
Daisuke Mutou

富永康博*2
Yasuhiro Tominaga

概要 電力料金の抑制要求に伴う設備効率化方策として、22 kV系統による供給信頼度の維持とコスト抑制を図るために、ケーブルの絶縁厚さを低減し、アルミラミネートテープを用いた遮水ケーブルと、これに対応した接続体を開発した。絶縁厚さは、過去の破壊データから設計電界を見直し低減を図った。遮水層には、環境に対して負荷が少なく経済的に有利なアルミラミネートを採用し、実線路での必要特性を評価し使用上問題のないことを確認した。

1. はじめに

電力料金の抑制要求が厳しい昨今において、設備効率化によるコスト低減を図るために22 kV系統による供給拡大が進んでいる。このため、22 kV系統において供給信頼度の維持とコスト抑制を図ったケーブル、接続体の開発が必要となっている。

これらの要求に対して検討した結果、絶縁厚さを1 mm低減し、遮水層にはアルミニウムラミネートテープを用いたケーブル・接続体を開発した。開発に際して、電気特性、遮水特性、熱・機械特性、作業性の評価・確認を行ったので、本稿にて報告する。

2. アルミ遮水CVTケーブルの設計

2.1 目標特性及び構造

目標特性は表1に示すように、現行22-kV CVケーブル (JEC-208¹⁾ 準拠、N=9) と同等であるが、LIWV=95 kV対応のため雷インパルス特性が - 145kVとなっている。

遮水性能は現行の66 kVケーブルにおいて実績のある鉛ラミネートテープと同等を目標とするが、当面はCVTタイプのみ適用であるため、単心ケーブルに見られる通電時の熱伸縮に起因するオフセット部等の遮水層疲労は考慮しないこととした。

開発したアルミ遮水CVTケーブルを図1に示す。

2.2 詳細設計

2.2.1 絶縁厚さの検討

CVケーブルの絶縁厚は基本的にはケーブルの所要耐電圧を設計電界にて除することにより求められる。

表1 目標特性
Target characteristics

| 項目 | 目標特性 | | | |
|-----------------|---|----|----|----|
| | ステップ | 第1 | 第2 | 第3 |
| 商用周波耐電圧 部分放電 | 試験電圧 (kV) | 17 | 33 | 17 |
| | 放電荷電量 (pC) | 10 | 30 | 10 |
| 商用周波耐電圧 | 65 kV 1時間 | | | |
| 雷インパルス耐電圧 | - 145 kV | | | |
| 長期課通電 | 商用周波27 kV 30日課電 導体温度が90 となる電流を 8時間ON 16時間OFF | | | |
| 遮水性能 | 平均透湿度 1×10^{-7} [g · (cm/cm ²) · day · mmHg] 以下 | | | |

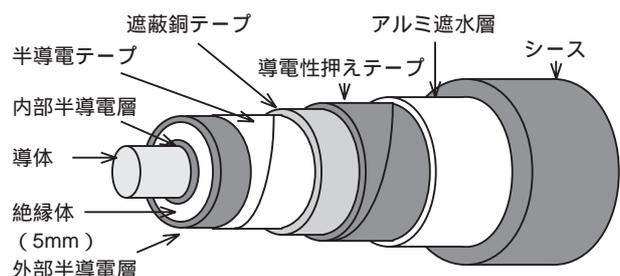


図1 22 kV アルミ遮水付 CVT ケーブル
22-kV XLPE cable having water impervious aluminum layer

* 東京電力株式会社 配電部

*2 機器・配電事業本部 配電技術部

*3 研究開発本部 千葉研究所

(1) ケーブルから検討した絶縁厚さ

ケーブルから絶縁厚さを検討した場合、商用周波所要耐電圧及び雷インパルス耐電圧に対する絶縁厚さは下記の式により求められる。

$$t_{ac} = (V_m / 3) \times k_1 \times k_2 \times k_3 / E_{Lac} + \text{内導}$$

t_{ac} : 商用周波所要耐電圧から決まる絶縁厚 (mm)
 V_m : 最高電圧 (23 kV) $V_m = 22 \text{ kV} \times 1.15 / 1.1$
 k_1 : 温度係数 (1.1)
 k_2 : 劣化係数 (4.0) $k_2 = (30 \text{年} / 1 \text{時間})^{1/9}$
 k_3 : 裕度 (1.1)
 内導: 内導厚さ (1 mm)
 E_{Lac} : 商用周波設計電界

$$t_{imp} = LIWV \times k_1 \times k_2 \times k_3 / E_{Limp} + \text{内導}$$

t_{imp} : インパルス所要耐電圧から決まる絶縁厚 (mm)
 $LIWV$: 雷インパルス耐電圧 (95 kV)
 k_1 : 温度係数 (1.25)
 k_2 : 裕度 (1.1)
 k_3 : 繰り返しに課電による劣化係数 (1.1)
 内導: 内導厚さ (1 mm)
 E_{Limp} : インパルス設計電界

ここで設計電界を決めるために、近年電力会社殿と共同で調査してきた絶縁性能(破壊特性)に関し、統計処理を行いワイプル分布により最低電界強度を求めたところ、交流設計電界 E_{Lac} は 30 kV/mm、雷インパルス設計電界 E_{Limp} は 60 kV/mm の電界強度が期待できる結果が得られた。

その結果からケーブル絶縁厚を計算すると、 t_{ac} は 3.14 mm、 t_{imp} は 3.39 mm、ケーブルだけで絶縁厚さを設計すると絶縁厚さ 4.0 mm (内導含む、小数点切り上げ) の結果が得られた。

(2) 接続体から検討した絶縁厚さ

接続体の破壊点は、外導処理部(ストレスコーン立ち上がり部)近傍であることが多く、この部分の電界を考慮する必要がある。この部分の電界 (E_{min}) は次式で表される。

$$E_{min} = \frac{V}{D / 2 \times \ln(D / d)} \text{ (kV/mm)}$$

V : 所要耐電圧 (kV)
 D : ケーブル絶縁体外径 (mm)
 d : ケーブル内部半導電層外径 (mm)

接続体の E_{min} の評価は、接続体の種類が多いこと、更に破壊経路が複雑で多岐にわたることなどから統計処理に十分なデー

表2 22-kV CVケーブルの必要絶縁厚さ
Required insulation thickness of 22-kV XLPE cable

| | 商用周波 | インパルス |
|-----------------------|-----------------|-----------------------|
| 所要耐電圧値 (kV) | 65 × 1.1 = 71.5 | - 145 × 1.1 = - 159.5 |
| 必要絶縁厚 (mm) (内導含まず) | 4.6 | 3.0 |
| 内導厚さ (mm) | 1.0 | 1.0 |
| 必要絶縁厚 (mm) | 5.6 | 4.0 |

*ここで65 kVは、規格値57 kV・3時間をN=9乗則により²⁾、1時間耐圧値に換算した値、また1.1は裕度。

タをそろえることは困難であり、ケーブルのようにワイプル分布を利用した最低破壊電界 (E_L) の算出はされていない。

そのため、過去の接続体の破壊データ調査結果から外導処理部最低破壊電界を、(平均値) - 3 × (標準偏差) で求めた。その結果を基に絶縁厚さを計算した結果を表2に示す。接続体における絶縁厚は商用周波における必要厚さから6.0 mm (内導含む、小数点切り上げ) となる。

したがって、ケーブル性能・接続体性能の双方を考慮すると、ケーブル絶縁厚は6.0 mm (内導含む) となる。

2.2.2 アルミ遮水層

遮水の基本構造は、図2に示すように66 kV級ケーブル等で多くの実績を持つ金属ラミネートテープをシース下に縦添えするものとした。この構造により水の浸入はほぼ阻止され、わずかにラップ部を通して浸透する可能性が残るのみとなる³⁾。

金属箔は、機械的強度と適度な柔軟性・耐腐食性を持ち、経済的に優れていることが望ましい。これらの条件を満たすものとして現時点では、鉛、アルミニウム、銅の3種類が挙げられる。これらの金属箔について比較した結果を表3に示す。アルミ遮水層は、ヨーロッパでの実績が多く、日本でも関西電力(株)殿が154 kVをターゲットに開発している^{4), 5)}。また、環境に対する負荷が軽く経済的に有利と考えられる。これらを考慮してアルミ遮水層を採用した。

3. ケーブルの評価

3.1 初期特性及び長期性能

表4にケーブル絶縁厚の低減により最も影響を受ける電気試験の結果を示す。表4から開発品の初期特性はすべて目標性能を満足することが分かる。長期性能は、30日間の長期課通電試験を行い、特に問題の発生しないことを確認し、その後、限

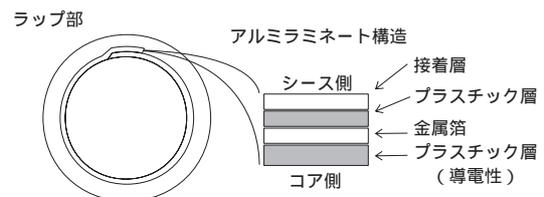


図2 遮水層断面図
Cross-section of water impervious laminated layer

表3 各種金属ラミネートテープの比較
Comparison of various metal-laminated sheets

| | 鉛 | アルミニウム | 銅 |
|------|---|--------|---|
| 強度 | | | |
| 柔軟性 | | | |
| 耐屈曲性 | | | |
| 耐腐食性 | | | |
| 環境面 | | | |
| 経済性 | | | |
| 使用実績 | | | |
| 流通性 | | | |
| 総合評価 | | | |

界性能把握のために破壊試験を接続体と組み合わせて行った。結果は、後述する「5. 接続体の評価」に記載する。

3.2 アルミ遮水層

開発したアルミ遮水ケーブルについて、以下の遮水性能と熱・機械特性に関する試験を実施し、実使用上問題ないことを確認した。

3.2.1 遮水特性の評価

開発したアルミ遮水ケーブルに対して、透水量試験を実施し、実績のある鉛遮水や遮水層無しのケーブルと比較した結果を図3に示す。また、表5は透水量を透湿度に変換し平均化した結果である。遮水性能試験は、66 kV以上の遮水層付きCVケーブルに確認試験として定められている方法に準拠し、60の温水中に10, 20, 30日間浸漬し透水量を測定する方法とした。

図3、表5から、遮水層の有無により透水量に約100倍の差があり、遮水層により大きな効果が得られることが分かる。また、アルミ遮水と鉛遮水には、差が認められなかった。

表4 電気試験結果
Results of electric characteristics

| 仕様 | 開発品* | 従来品* |
|--------------|------------------|---------------|
| | 絶縁厚 6 mm + アルミ遮水 | 絶縁厚 7 mm |
| 商用周波部分放電 | 発生なし | 発生なし |
| インパルス耐電圧 | - 145 kV/3回 良 | - 210 kV/3回 良 |
| インパルス破壊試験 | - 930 kV/1回 | - 810 kV/1回 |
| 商用周波長時間耐電圧試験 | 65 kV・1時間 良 | 65 kV・1時間 良 |
| 商用周波破壊試験 | 275 kV/14分 | 315 kV/10分 |

*ケーブルサイズ: 22 kV CVT 3 × 325 mm²

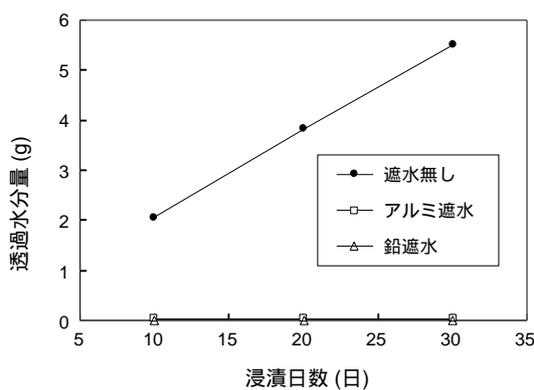


図3 遮水性能試験結果
Results of water imperviousness test

表5 透湿度の結果
Water vapor permeation

| | 遮水なし | アルミ遮水 | 鉛遮水 |
|--------|-----------------------|-----------------------|-----------------------|
| 平均透湿度* | 1.32×10^{-6} | 7.34×10^{-9} | 1.93×10^{-9} |

*平均透湿度は、10, 20, 30日における透湿度の平均値
単位 [g・(cm/cm²)・day・mmHg]

3.2.2 熱・機械特性の評価

ケーブルのコアは通電の熱により膨張・収縮を繰り返す。これにより遮水層に亀裂が入ると遮水性能へ影響を与える。そこで、遮水層に屈曲により歪みを与え、S-N特性を取り、コアの膨張・収縮により遮水層の破断が生じるか検証を行った。CVTケーブルの場合、軸方向の熱収縮のほとんどが線心のわらいにより吸収されるため、径方向の熱伸縮による影響のみ検証を行えばよい。30年相当の径方向への歪みを推定により求めた結果を表6に示す。

S-N特性の試験概略図を図4に、実測結果を図5に示す。シートサンプルは、アルミラミネートテープとPVCとを貼り合わせた構造とした。シートサンプルのS-N特性は、表6で推定したいずれの歪みと疲労回数に対しても上回っており、遮水金属層の亀裂が発生する可能性は極めて低いことが分かった。

3.2.3 ケーブル曲げ試験

ケーブル布設時の屈曲により、遮水層に亀裂が生じないか試験ケーブル外径の10倍以下の直径の円周に沿って180度曲げ、つぎに反対側に180度曲げる試験を5回繰り返し、その後、遮水層等における異常の有無を調査した。

試験の結果、特に遮水層にはがれ・ひび割れ等は発生しなかった。

表6 歪みの推定値
Extrapolated values of strain

| 項目 | 温度変化幅 | 経年疲労回数 | 歪み量 |
|-----------------|-------|---------|--------|
| 日間温度変化 (1回/1日) | 25 | 10,950回 | 0.32 % |
| 短時間温度変化 (1回/1年) | 40 | 30回 | 0.52 % |
| 年間温度変化 (1回/1年) | 65 | 30回 | 0.96 % |

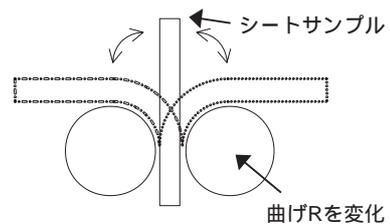


図4 S-N特性試験概略図
Schematic diagram of S-N characteristics test

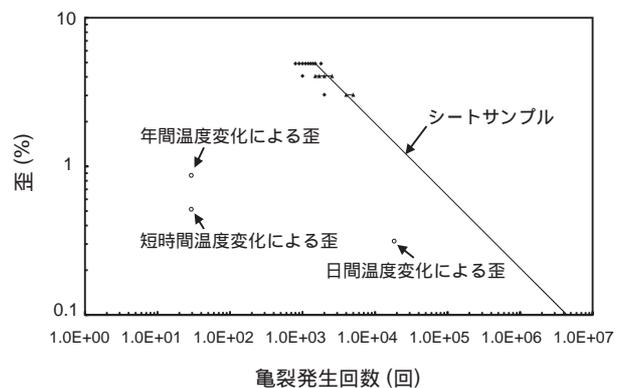


図5 S-N特性試験結果
Results of S-N characteristics test

4. アルミ遮水CVTケーブル用接続体の設計

4.1 目標特性及び構造

開発対象は、水没状態での使用があり得る差込み式直線接続体（以下差込みNJ）、プレハブ接続体（以下代表としてYJ）であり、目標特性を表7に示す。電気性能は、現行の22-kV CVケーブル用差込みNJ、YJと同等であるが、雷インパルス特性は、LIWV=95 kV対応のため - 145 kVとなっている。

遮水性能の目標としては、66 kV以上において金属ケース端部遮水処理方法として実績のある鉛遮水熱収縮チューブと同等を目標とした。

開発した接続体構造（差込みNJ）を図6に示す。

4.2 詳細設計

現行66 kV以上の接続体遮水構造としては、金属ケース端部遮水処理に鉛遮水熱収縮チューブが使用され数多くの実績がある。しかし、鉛による環境汚染等の問題点を考慮すると、将来に渡り鉛を使用することは好ましくなく、入手が容易で環境汚染対策並びにコスト的にも有利なアルミを使用した遮水収縮チューブ方式を検討した。

現行の鉛遮水熱収縮チューブの特性を表8に示す。

アルミは鉛に比べ“こし”があり収縮しにくいことが予想されるため、アルミ箔厚さを数種類変えたアルミ遮水熱収縮チューブを試作し、鉛と同様の収縮状況が得られるアルミ箔厚さを検討した。結果を表9に示す。

以上の検討結果より、アルミ箔厚さを鉛と同等の収縮状況の

表7 目標特性
Target characteristics

| 項目 | 目標特性 |
|-------------|--|
| 商用周波耐電圧部分放電 | 17 kVで10 pC以下 |
| 商用周波耐電圧 | 57 kV・3時間 |
| 雷インパルス耐電圧 | - 145 kV・3回 (LIWV=95 kV) |
| 直流耐電圧 | 初期 - 64 kV・60分 長期後 - 58 kV・10分 |
| 長期課通電 | 27 kV・30日課電 導体温度90 となる電流を 8時間ON, 16時間OFF |
| 気密性 | 外圧98 kPa・1時間で 内部に水の浸透がないこと |
| 遮水性能 | 鉛遮水熱収縮チューブと同等 |

得られる20 μmと決定した。アルミ遮水熱収縮チューブの断面構造を図7に、収縮状況を写真1に示す。

なお、差込みNJにアルミ遮水熱収縮チューブを適用するに当たり、遮水層がない場合に比べ収縮率が低下するため、絶縁筒端部には小サイズを絶縁筒中央部には大サイズのチューブを組み合わせる3ピース構造を採用した。

またYJへの適用については、ケーブル保護金具上にかぶせる端部遮水構造とした。

5. 接続体の評価

5.1 初期特性

開発品の初期特性はすべて目標性能を満足することを確認した。初期試験並びに限界性能の把握のために行った破壊試験の結果を表10に示す。

ちなみに開発品は、アルミ遮水層付きCVケーブル絶縁厚が現行22 kVの7 mm（内導込み）から6 mm（内導込み）に低減されていることに合わせ、差込みNJの場合スペーサ内径を、YJの場合プレモールド絶縁体内径を2 mm細くすることで対応している。

表8 鉛遮水熱収縮チューブの特性
Characteristics of water-impervious shrinkable tube of lead-polyethylene lamination

| 項目 | 特性 |
|-------|-----------|
| 鉛箔厚さ | 50 μm |
| 接着層 | 接着性導電PE |
| 完全収縮率 | 約71 % |
| 収縮状況 | 縦シワ（均一収縮） |

表9 アルミ遮水熱収縮チューブ
Water-impervious shrinkable tube of aluminum-polyethylene lamination

| アルミ箔厚さ (μm) | 完全収縮率 | 50 %収縮状況 |
|-------------|-------|------------------------|
| 15 | 約70 % | 縦シワ（均一収縮） 鉛よりも細かいシワ |
| 20 | 約70 % | 縦シワ（均一収縮） 鉛と同等のシワ |
| 30 | 約70 % | 均一な縦シワだが 多少凹凸あり |
| 50 | 約65 % | 突起状収縮 |

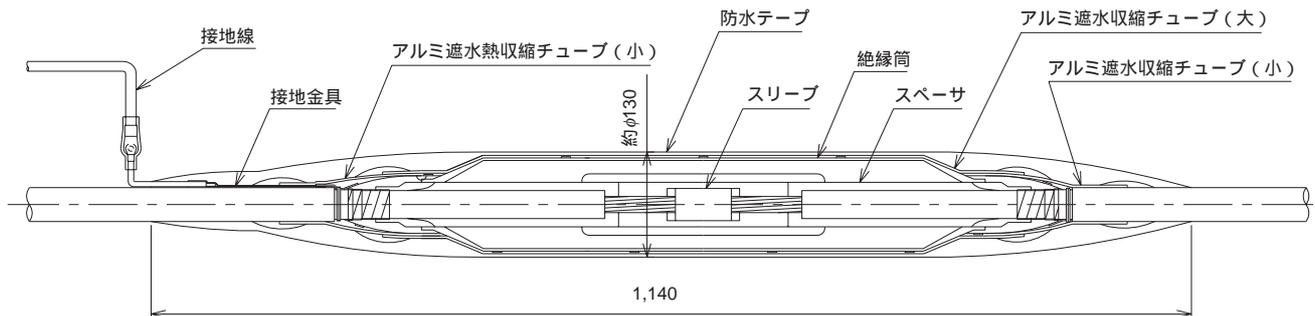


図6 22 kV アルミ遮水層付き CVケーブル用差込式直線接続体
Water-impervious straight joint for 22-kV water-impervious XLPE cable (Slip-on type)

5.2 長期特性

開発品の長期性能を確認するために、30日間の長期課通電試験を行った。本試験の期間中、絶縁破壊などの異常は認められなかった。また本試験後に行った残存性能を調べる商用周波破壊試験、雷インパルス破壊試験も表11に示すように目標特性を十分上回るものであることが確認できた。なお、破壊試験はケーブルと接続体を組み合わせて実施し、接続体で破壊した。

5.3 遮水性能

開発品に適用した遮水構造の性能評価として、以下の試験を行い、アルミ遮水熱収縮チューブの性能は実績のある鉛遮水熱収縮チューブと同等であることを確認した。

5.3.1 内部気密試験

開発品に適用した遮水構造が、接続体内部の気圧上昇に十分耐えるかどうかを調べる試験であり、表12に示すとおり十分な気密性を有していることを確認した。

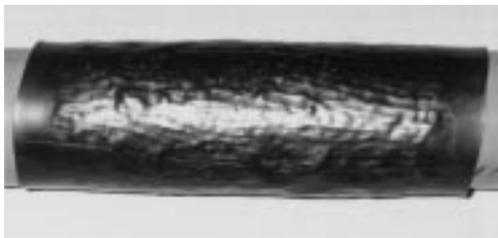


写真1 アルミ遮水熱収縮チューブ収縮状況
View of water-impervious shrinkable tube using aluminum-polyethylene laminated sheet (after shrinking)

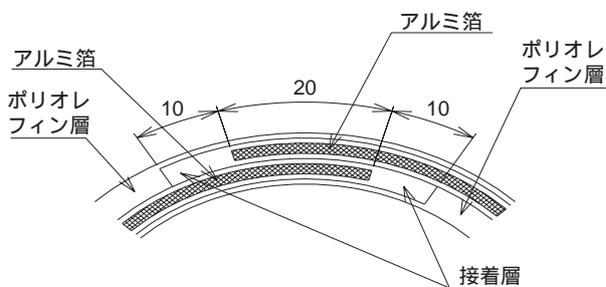


図7 アルミ遮水熱収縮チューブ断面
Cross section of water-impervious shrinkable tube using aluminum-polyethylene laminated sheet

表10 初期試験および破壊試験結果
Results of initial test and breakdown test

| 項目 | 評価結果 |
|----------------------------|-------------|
| 商用周波耐電圧部分放電 | 発生せず |
| 商用周波耐電圧 | 良 |
| 耐電圧試験後 10 kV・1時間ステップアップ | 207 kV・7分 |
| 雷インパルス耐電圧 | 良 |
| 耐電圧試験後 10 kV・3回ステップアップ | - 510 kV・1回 |
| 直流耐電圧 | 良 |
| 気密性 | 良 |

*ケーブルサイズ: 22 kV CVT 3 × 325mm²

5.3.2 透水量測定試験

開発したアルミ遮水熱収縮チューブの透水量を測定し、実績のある鉛遮水熱収縮チューブと比較を行った結果、同等の性能であることを確認した。また、遮水層がない場合に比べ透水量は約1/40に抑えられることを確認した。

透水量測定試験は、ケーブルの評価と同様に66 kV以上のCVケーブル遮水層の確認試験方法に準拠して試験を行った。

ケーブルの場合は、遮水層ラップ部分からのケーブル周方向の透水のみを考慮すればよいので、試験試料の両端を温水の外に出し、ケーブル軸方向の透水の影響がない形態で試験を行っている。一方、ジョイントの場合は周方向のみでなく、遮水層とケーブルシース間の透水、すなわち、ケーブル軸方向の透水も考慮する必要があるため、実際のNJ構成を模擬した形態で試験を行った。ケーブルや絶縁筒には既に水分が含まれているので、正確な透水量を測定するには、遮水材料以外は金属で構成する必要があるため、金属製の模擬ジョイントを使用した。

透水量測定結果を図8に示す。吸湿材としてはシリカゲルを使用した。参考のためあらかじめ遮水層にピンホールを開けた場合でも評価を行ったが、数ヶ所程度のピンホールでは透水性能への影響は小さいことが確認できた。

5.3.3 熱・機械特性試験

ケーブル接続体は、温度変化による膨張収縮を受けるため、遮水層には繰り返し疲労が加わり、その寿命評価を行う必要がある。ただし、CVTケーブルの場合、軸方向の熱伸縮のほとんどは線心のわらいにより吸収されるため、径方向の熱伸縮による影響のみ検証を行えばよい。そこでケーブルと同様に表6に示す温度変化で受ける歪み量を推定し、それと等価な歪み量を遮水層に加え、異常の有無を調べた結果、表13に示すように30年相当の繰り返し歪みに対し十分な性能であることが確認できた。

なお、試験方法は、穴を開けた金属パイプに遮水熱収縮チューブを収縮させ、内部にエアーを注入・排出することにより、ヒートサイクルにより受ける歪みと等価の歪みを模擬して行った。

表11 長期試験結果
Results of cyclic aging test

| 項目 | | 評価結果 |
|-------------|------------|-------------|
| 長期課通電試験 | | 異常なし |
| 長期課通電試験後の特性 | 商用周波電圧破壊試験 | 227 kV・1分 |
| | 雷インパルス破壊試験 | - 485 kV・1回 |

*ケーブルサイズ: 22 kV CVT 3 × 325mm²

表12 内部気密試験結果
Results of inner airtightness test

| 試験条件 | | 判定基準 | 評価結果 |
|------------------------------|---------------|---------------|----------------------|
| 環境 | 60 温水中 | 気密漏れの ないこと | 異常なし |
| 加圧圧力 | 49 kPa × 24時間 | | |
| 気密試験後49 kPa × 30分 ステップアップ | | | 196 kPa・10分後 気密漏れ |

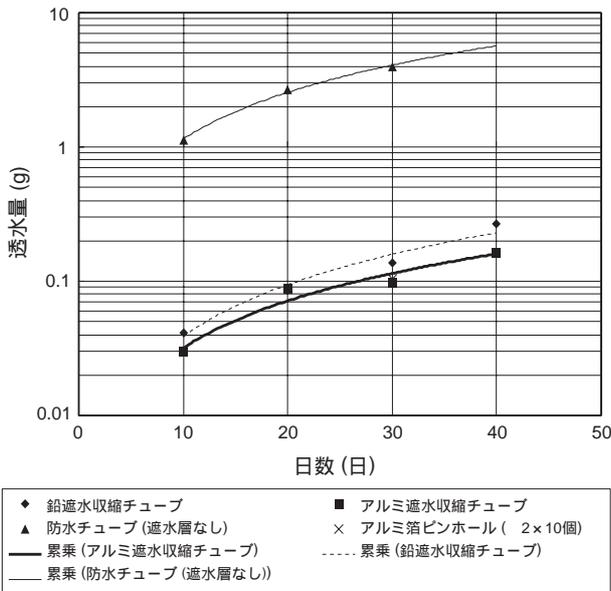


図8 透水量測定結果
Results of water permeation measurement

表13 熱・機械特性試験結果
Results of thermal and mechanical characteristics test

| 試験品 | 歪み | 遮水層亀裂 |
|---------|----|-------|
| アルミ遮水 | なし | なし |
| 熱収縮チューブ | あり | なし |
| 鉛遮水 | なし | なし |
| 熱収縮チューブ | あり | なし |

5.4 作業性検証

開発品の作業性検証を行い、現行の差込みNJ, YJと何ら作業性が変わらぬことを確認した。

写真2に開発した差込みNJの施工状態（作業性検証時のアルミ遮水熱収縮チューブ収縮直後の状態）を、写真3に開発したYJの実現場布設状態を示す。

6. おわりに

今回、22 kV用として初めて絶縁厚低減によるコストダウン及び信頼度の維持、環境対策を目的としたアルミ遮水層付きCVTケーブル及びその接続体の開発に成功した。

本開発品は、新たに22 kV/400 V配電方式を採用した東京電力（株）殿 八王子みなみ野シティに納入済みであり、平成11年5月より実運用を開始している。



写真2 開発品施工状態（差込みNJ）
View of the newly developed straight joint



写真3 開発品現場布設状態（YJ）
View of the newly developed Y-branch joint

参考文献

- 1) JEC-208 「特別高圧（11～77kV）架橋ポリエチレンケーブルの高電圧試験方法」（1980）
- 2) JEC-209 「特別高圧（11～77kV）架橋ポリエチレンケーブル用接続部の高電圧試験方法」（1980）
- 3) 福田, 石原他:古河電工時報, 第72号（1981）
- 4) 松村, 芳本他「アルミ遮水CVケーブルの開発（その1）」平成11年電気学会全大No.1782
- 5) 松村, 芳本他「アルミ遮水CVケーブルの開発（その2）」平成11年電気学会B部門大No.369
- 6) Y.Hane, H.Suzuki, F.Enokubo, H.Furusawa: WATER IMPERVIOUS SPLICES FOR 6.6kV XLPE CABLES, IEEE Transaction on Power Apparatus and Systems, Vol. PAS-103, No.11, November 1984