

架空送電線用複合がいしの開発（その1）

Development of Composite Insulators for Overhead Lines (Part 1)

小林 哲*
Satoshi Kobayashi

松崎 豊*
Yutaka Matsuzaki

榊屋 博*²
Hiroshi Masuya

新子谷悦宏*³
Yoshihiro Arashitani

木股隆三*
Ryuzo Kimata

概要 近年米国をはじめとする海外で磁器製やガラス製がいしにと替わり軽量で汚損耐電圧特性、耐衝撃特性(バンダリズム対策)に優れた複合がいし(Composite insulator)の使用が拡大している。当社は90年代初めに複合がいしを66/77kV相間スペーサ用として開発し、その後275kV相間スペーサ用がいしや154kV及び77/66kV送電線用がいしへと適用を拡大してきた。このような複合がいしについては、国際規格であるIECにより電氣的及び機械的な性能を試験し信頼性の確認を行っているが、絶縁材に有機材料を用いているため経年劣化の懸念がある。このため汚損の厳しい場所での屋外長期課曝露試験及び環境要素を模擬した室内加速劣化試験を進めている。

1. はじめに

架空送電線は、電力を輸送する設備で、電気の通路となる電線とともに電線を鉄塔から絶縁し支持するがいしが必要となる。がいしの材料としては通常これまで磁器及びガラスが用いられてきた。これらの材料は極めて絶縁特性が良く、耐候性も高いが、質量が重く、耐衝撃性(割れ)が悪い、汚損時の耐電圧特性が大きく低下するなどの欠点があった。このためこれらの欠点を克服するため新しい材料を使った、新しい構造のがいしの開発が望まれてきた。

このようながいしとして無機絶縁材料にかわり、1930年～40年代に初期の有機材を使用したものが現れたが、耐候性に問題があり屋外用としては特性的に満足できなかった。50年代にエポキシ樹脂がいしが開発されたが重く、また紫外線劣化及びトラッキングが生じ実用化されなかった。70年代中期になると新しい絶縁材料の開発がすすみ、エチレンプロピレンゴム(EPR)エチレンプロピレンジエンモノマ(EPDM)ポリテトラフルオロエチレン(PTFE)シリコンゴム(SR)などの材料がいしの外被として適用されるとともに張力を分担する芯材にFRP(Glass fiber reinforce plastics)を使った複合構造が考えられた。

しかし新材料であるため技術的課題も多く、材料間の接着、水分の浸透、荷重を伝達する端末の改良などが必要であった。80年代以降は、シリコンゴムの半永久的ともいえる耐候性と汚損耐電圧を改善できる撥水性が注目され外被として多く使われるようになるとともに、複合がいしの使用が飛躍的に拡大してきた¹⁾。

当社では1980年代に送電線のギャロッピング事故防止を目的とした相間スペーサの実用化を進めていたが、これに必要ながいしとして軽量、柔軟性が要求されたことより複合がいしの開発を行った。91年に、66kV用シリコンゴムを外被とする複合がいしを相間スペーサに初めて使用し、94年には世界最大の7m長のを275kV用まで適用拡大した。このようにして相間スペーサ用の複合がいし使用実績が拡大しその特徴が認識されると、送電線の建設及び保守費用の削減を図るため、輸送コストの低減、工事の簡易化、がいしの経済性をねらい本線用への適用が検討されるようになった。そして、このほど本線用の複合がいしを開発し国内で初めて154kV送電線耐張及びV吊り装置として納入した。その後77kV用耐張及び懸垂装置にも試験的に使われるようになった。このほか鉄道用として在来線用直流1500V用、新幹線用交流30kV用の複合がいしを実用化している。

本報では本線用複合がいしの開発経緯と研究課題となっている寿命予測研究について概要を報告する。

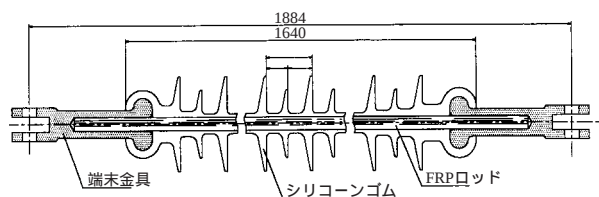


図1 複合がいしの構造
Structure of composite insulator

* 電力事業本部 裸線事業部 開発部

*² 電力事業本部 裸線事業部 部品部 設計課

*³ 研究開発本部 平塚研究所 第2開発室

2. 複合がいし設計

2.1 複合がいしの構成

一般に複合がいしは芯材・端金具・絶縁外被ゴムから構成されている。芯材には、機械的強度（張力）を分担するためFRPが使用されている。FRPを構成する強化繊維としてガラス（E, ECR）、マトリックス材としてエポキシ樹脂が使われる。端金具は、張力を電線、鉄塔に伝達する部分で鍛造鋼、可鍛鋳鉄、アルミ等を使っている。外被ゴムは、電氣的絶縁をするとともにFRPを外環境より保護する。このため、当社では電氣的特性、耐候性にすぐれたシリコンゴムを外被ゴムとして使用している。

複合がいしの構造を図1に示す。

2.2 本線用複合がいしの設計

開発した複合がいしの笠形状は、外被の材質がシリコンゴムであるため極めて自由に設計できることが特徴であるがこれまでの経験を生かし、IEC 60815 汚損状態を考慮したがいし選択のガイド規格に準拠した²⁾。電氣的、機械的的特性はIEC 61109「公称電圧1000V超過の交流架空送電線用複合がいし、定義・試験方法・納入規準 規格での試験により要求性能を満足する設計とした³⁾。

汚損設計は、シリコンの持つ撥水性により従来の磁器がいしよりコンパクトな設計も可能であるといわれているが、十分なデータが得られていないことより、同等以上の表面漏れ距離を取ることを基本としている。設計値としての漏れ距離はIEC 60815により決められた汚損区分に対する単位課電ストレス当たりの漏れ距離を参考にユーザの要求により増減している。

引張り破壊強度は、引張り耐荷重の長期間経年劣化を考慮にいれて安全率を見込んで決められる。

外被のゴムとFRPは機械的に十分接着していることのみならず化学的に結合し境界面に水の浸入を許さない構造でなければならない。また、一般に界面が多いと電氣的な弱点となりうるので、当社の複合がいし設計では笠、胴部分を一体成形することで高い信頼性を得ている。

端末部分の設計は、3つの要素の結合からなり、最も大きくがいしの信頼性に影響を与える。特に、この部分に水分が浸透すると、FRPの脆性破壊を起こす恐れがあり、また、電界も厳しくなる。このため、金具を電界緩和構造とするとともに外被シリコンゴムを金具までかぶせる密封構造（Hermetic Seal）とした。金具と芯材であるFRPは長期間機械特性を維持できる圧縮方法により接続している。

以下に154kV用複合がいしの設計仕様を示す。

総合性能

- (1) 屋外の使用に対して電氣的な特性が良好で、外被の著しい劣化及び亀裂の発生が無いこと
- (2) 屋外で長期間使用時に端末部界面への水分の浸入がないこと
- (3) 長期的な引張り耐荷重を有すること
- (4) コア材にボイド等の欠点が無いこと
- (5) 短時間炎にさらしたときに、着火燃焼しないこと

電氣特性（がいし単体）

- (1) 商用周波注水耐電圧が365kV以上あること
- (2) 雷インパルス耐電圧が830kV以上あること

- (3) 開閉インパルス耐電圧が625kV以上あること
 - (4) 等価塩分付着密度0.03mg/cm²の汚損に対して161kV以上の耐電圧があること
 - (5) 25kA × 0.34秒の短絡電流のアークにさらしても良好な耐アーク特性であること
 - (6) 乾燥時の使用電圧時にコロナが発生しないこと、また、有害な雑音が発生しないこと（がいし装置）
- 機械特性（がいし単体）
- (1) 引張り破壊荷重が120kN以上あること
 - (2) 曲げ破壊応力が294MPa以上あること
 - (3) 曲げモーメント117N・m相当の圧縮荷重を1分間加えた後各部に異常の無いこと
 - (4) 電線が180度捻回したときの捻じり力に対して、がいしに異常の無いこと
 - (5) 電線の動揺による繰返し応力に対して実用上有害な損傷が発生しないこと。

これら仕様を満足するように設計されたがいしの諸元を表1に示す。

表1 複合がいしの諸元
Outline of composite insulator

がいし品番		H154-120-1880CC
全長(mm)		1884
笠枚数(大笠/小笠)(枚)		大26 / 小25
笠径 φ (mm)		大117 / 小83
有効長(mm)		1640
漏れ距離(mm)		5400
質量(kg)		10
電気特性	商用周波耐電圧(kV)	440
	雷インパルス耐電圧(kV)	835
	開閉インパルス耐電圧(kV)	635
機械特性	引張強度(kN)	120
	曲げ破壊強度(MPa)	294



写真1 供試複合がいし
Test composite insulator

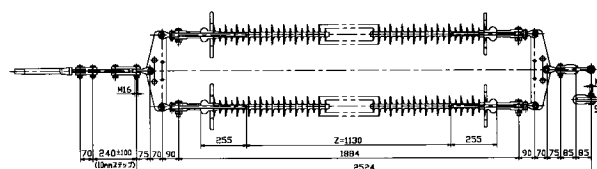


図2 耐張複合がいし装置図
Tension composite insulator set

表2 試験項目(規格番号)
Item of tests (Number of test standards)

1.	総合性能
1.1	紫外線耐久性(ASTM G53)
1.2	オゾン耐久性(JIS K 6301)
1.3	複合がいし耐久性(IEC 61109)(項)
(1)	界面と把持金具接続部の試験(5.1)
(2)	コアの荷重-時間試験(5.2)
(3)	外被のトラッキング及びエロージョン試験(5.3)
(4)	コアの材質試験(5.4)
(5)	燃焼試験(参考IEC 60707) (5.5)
(6)	機械荷重-時間試験及び把持金具と外被ゴムのシール部の密着強さ試験(6.4)
(7)	把持金具と外被シール部の密着強さ試験(7.4)
2.	がいしの電気的性能
2.1	商用周波注水耐電圧(IEC 60383)(6.2)
2.2	雷インパルス耐電圧(IEC 60383)(6.1)
2.3	開閉インパルス耐電圧(IEC 60383)(6.3)
2.4	汚損耐電圧(JEC 170)
2.5	耐アーク特性(IEC SC36B(Secretariat) 116)
2.6	コロナ特性(RIV)(参考IEC 60437)(参考試験)(6.5)
2.7	耐雑音特性(V吊り装置のみ)
3.	がいしの機械的性能
3.1	引張破壊強度(IEC 61109・JIS C 3801)
3.2	引張耐荷重(IEC 61109)
3.3	曲げ特性(JIS C 3801)
3.4	曲げ破壊強度(JIS C 3801)
3.5	断連時強度(参考試験)
3.6	振動疲労特性(参考試験)
(1)	線路方向振動疲労試験(参考試験)
(2)	線路直角方向振動疲労試験(参考試験)
3.7	捻り耐荷重(参考試験)
3.8	繰返し捻り強度(参考試験)
3.9	横振れ特性(V吊り装置のみ)

2.3 性能確認試験

本線の複合がいしをがいし連として使用するため、がいし本体のほか、V吊り懸垂装置、耐張装置として性能確認試験を実施した。これらの試験項目を表2に示す。

供試がいしを写真1に示し、耐張複合がいし連装置図を図2に示す。

2.4 代表的な試験結果

複合がいしの性能を確認するための特徴ある主な試験として表2の1.3複合がいし耐久性(1)の界面と把持金具接続部の試験及び2.5耐アーク特性、3.3曲げ特性、3.6振動疲労特性(1)線路方向振動疲労試験があり、これについて述べる。

2.4.1 界面と把持金具接続部の試験

複合がいしの重要設計部分とされている端末金具付近の外被ゴム及び芯材FRPとの界面接着性について製造妥当性を検証する試験として、IEC 61109の設計試験に規定されている手順を以下に示す。

- (1) 初期商用周波乾燥フラッシュオーバー電圧試験
- (2) 荷重衝撃開放試験(30%SML -20 ~ -25)
- (3) 温度-機械試験(50%SML +50 ~ -35)
- (4) 水浸漬試験(42時間煮沸 NaCl 0.1%)
- (5) 確認試験
 - (a) 外観目視観察(亀裂等の異常有無調査)
 - (b) 急峻波電圧試験(外被パンク及び内部破壊有無調査)

表3 試験結果
Result of flashover voltage test

	初期フラッシュ オーバー電圧	煮沸後	フラッシュオーバー 電圧の変化(%)
試料1	326.4 kV	334.2 kV	+2.38 %
試料2	327.6 kV	335.2 kV	+2.32 %
試料3	332.6 kV	326.4 kV	-1.90 %
平均	328.9 kV	331.9 kV	+0.93 %

(標準大気状態に補正後)

(c) 商用周波電圧試験

- ・フラッシュオーバー試験(初期状態との低下有無調査)
- ・FOV 80% 30分課電(胴部の温度上昇調査)

:SML(Specific Mechanical Load)

試験結果として次の結果を得ている。

(a) 外観目視観察

外被ゴムに亀裂及び剥離等は認められなかった。

(b) 急峻波電圧試験

供試がいしを二つの部分に分け1000kV/μsec正負極電圧を各25回印加したところ、すべて外部フラッシュオーバーし、外被ゴムのパンク及び内部破壊はなかった。

(c) 商用周波電圧試験

5回平均フラッシュオーバー電圧を表3に示すが、いずれの試料も初期フラッシュオーバー電圧の90%以上を保持している。つぎに初期フラッシュオーバー電圧の平均の80%(328.9 kV × 0.8=263 kV)を下側端末に30分間印加し、直後に温度上昇を測定した結果はいずれの試料においても20 K未満の温度上昇で規格を満足した。

2.4.2 耐アーク特性

外被材が有機材であるため、パワーアークによるがいしの損傷具合及び試験後の耐電圧特性を次の方法で確認した。

アーキングホーンを取り付けたがいし両側端末金具間にがいしに沿って銅線ヒューズを取付け、25kA × 0.34秒の短絡電流を流し、外被ゴム状況、アークの移行状態を調査した。その後アークホーンを取り外して注水開閉インパルス耐電圧試験を行った。耐アーク試験のがいし配置図を図3に示すが図中のがいし水平設置角αは6°とした。

試験の結果、アークはホーン間に移行し、アーキングホーン先端部の溶損が認められた。がいし部(外被ゴム)は多少変色したが笠穴け及び破損は無く、端末金具部も溶損の無いことを確認した。アーク試験後の複合がいしの状況を写真2に示す。試験後の残存強度調査としてSMLを1分間加えその後破壊まで荷重を印加し引張り破壊荷重を調べたが低下は認められなかった。

アーク後の開閉インパルス耐電圧値を表4に示すが、初期状態と比べ試験後で低下は見られなかった。

2.4.3 曲げ特性

複合がいしは芯材にFRPを使用していることから、架線後及び施工上許容曲げ荷重以下で取り付けるなど考慮が必要である。このため複合がいしの曲げ特性試験を行った。

試験は、JIS C 3801「がいし試験法」7.2.2項により実施した。供試品の片端を固定し、294MPa(30kgf/mm²)の曲げ応力を1分間加えた。異常が認められなかったので破壊に至るまで曲げモーメントを加えた。破壊時の曲げ応力は539 MPa(55 kgf/mm²)以上であった。

曲げ破壊試験状況の写真3に示す。

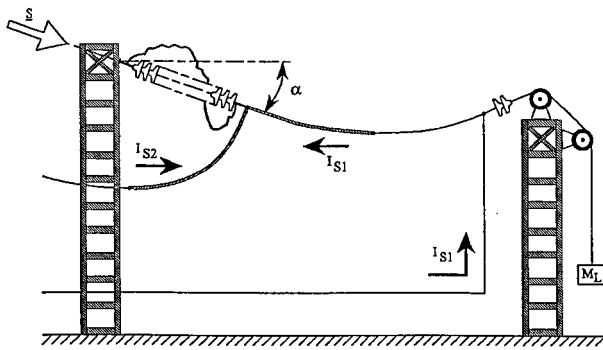


図 3 アーク試験時のがいし配置図
Test arrangement of arc test



写真 2 アーク試験後の複合がいし状況
Composite insulator after exposure to power arc

表 4 開閉インパルス耐電圧値
Result of switching withstand voltage

	初期状態	パワーアーク試験後
耐電圧値(kV)	635	667

2.4.4 線路方向振動疲労試験

送電線本線に適用するにあたり、ギャロッピング振動、スリートジャンプ、微風振動などを考慮し、線路方向振動疲労試験を行った。

試験は横型の引張り試験機を用いて線路方向に $32 \pm 12\text{kN}$ の繰返し張力変動を加えた。

試験結果200万回の繰返し機械荷重を加えても、端末金具の抜けやシリコンゴムと端末金具の剥離などは起こらず、機械的信頼性が十分高いことがわかった。

2.4.5 試験結果のまとめ

ここでは表2に示す試験項目中、いくつかについて試験結果を述べたが、他のすべての試験においても問題となる点はないことが確認された。

写真4には実線路に採用された複合がいし装置を示す。



写真 3 曲げ破壊試験状況
Bending test



写真 4 実線路適用例
Composite insulator applied for actual service line

3. 複合がいしの寿命推定研究

複合がいしの寿命には、電氣的及び機械的側面がある。電氣的劣化は絶縁材が汚損湿潤状態で発生する放電により熱的・化学的な影響を受けエロージョンやトラッキング劣化を起こし損傷を受けることであり、時にはフラッシュオーバー事故に至ることがある。

機械的劣化には、芯材強度及び端末把持力の長期的低下及び芯材の脆性破壊があり、場合により断連事故の可能性もある。芯材強度及び端末把持力の低下は安全率を適切に取り信頼ある圧縮方法をとることにより対処でき、また脆性破壊は、絶縁材と端末金具の境界部近傍で起こることが多くこの部分の処理が適切に行われていれば、発生確率は電氣的劣化よりも少ない。

今回検討が遅れていた電氣的側面からの寿命を推定するために実規模の複合がいしに課電ストレスを加え自然環境下で曝露試験を行うとともに、環境ストレスを模擬する試験室を製作し、国際規格である IEC 61109 Annex C 試験規格による加速試験を行った。更に電氣的劣化を特徴づけられる漏れ電流波形及び積算電荷量を比較することで、複合がいしの寿命評価を

検討している。

また我が国では、台風時の急速汚損によるがいしの絶縁低下が良く知られているので、台風時に得られる漏れ電流の特徴から、急速汚損が複合がいしの電氣的劣化にどのように影響を与えるかを検討している^{4)~7)}。

3.1 沖縄課電曝露試験

我が国は四方を海に囲まれているため海塩による汚損が発生しやすく、汚損湿潤時の表面放電による劣化や絶縁低下を把握することが重要である。このため最も汚損が厳しく、また台風の接近が多い沖縄県に課電曝露試験場を設けた。

本課電曝露試験場は太平洋側の中城湾に位置し、西の方角が海に面して風通しが良く、海岸から約300m離れ海塩汚損の厳しいところである。課電曝露試験場の位置を図4に、状況写真を写真5に示す。供試品としては耐汚損設計要素として最も重要なパラメータである単位課電ストレス(V/mm)の影響を調べるため材質構造が同一で、表面漏れ距離の異なる複合がいし及び基準となる磁器がいしを使用した^{5)~7)}。

本試験場では、がいしの電氣的挙動をつかむために重要な気象様相(気温・湿度・風向・風速・雨量)、常時漏れ電流計測及びがいし等価塩分付着密度測定(定期及び台風通過後)を実施している。試験結果については、集約中であり続報で報告する予定である。

3.2 加速劣化試験

IEC 61109に示される複合がいし外被材の加速劣化試験方法としては、単位ストレスを満足する短尺のサンプルを使った評

価法が規定されているが、今回は、材料の影響のみならずがいし構造の影響をみるため、沖縄ですべての課電曝露試験と同じ供試品及び電圧(交流対地77kV)を使い、これに必要な加速劣化試験室として、W4.4m×D4.4m×H3.3mの大型霧室を作り試験を行った⁷⁾。

本設備はIEC 61109に規定されている温度変化、加湿、降雨、塩霧、紫外線照射のほかに、端末金具と外被ゴムの端末部分の接着性を加速劣化試験と同時に調べることができる様に20kNの定荷重を印加する装置を持っている点が特徴である。

IEC 61109 Annex Cの試験サイクルを表5に示す。

この加速方法は課電ストレス下で気象変化によるストレスを凝縮して短時間で再現し、それを繰り返すことで電氣的劣化を促進させる試験である。加速劣化試験状況を写真6に示す。

試験結果の評価として漏れ電流の連続測定、定期的ながいし表面の撥水性測定及び走査電子顕微鏡観察及びXPS(X-ray photoelectron spectrometer)分析による試験終了後の表面状態分析を実施している。

詳細な試験結果の解析は続報で報告するが、規定である5000時間経過後の撥水性状況は、写真7に示すように、初めに比べごくわずかに低下したものの十分保たれていた。

試験終了後のがいしを目視観察したところ、多少表面が灰色に変色している状況が見られたが、走査電子顕微鏡観察(SEM)では初期状態と比較して違いが見られなかった。またXPSによる結合エネルギーの観察でも、初期状態のゴムの結合と比べ変化が見られず劣化は確認されなかった。

このように複合がいしは、実際の寸法でのIEC 61109 Annex Cに準拠した加速劣化試験においても、大きな漏れ電流は見られず、またがいし表面のトラッキング及びエロージョン劣化もなかった。また、別途行った試験で汚損時の耐電圧特性も良好な



図4 課電曝露試験場の位置
Location of exposure test site



写真5 沖縄課電曝露試験状況
Picture of Okinawa test site

表5 加速劣化試験サイクル
Accelerated aging test cycle

	0	2	4	6	8	10	12	14	16	18	20	22	24
加湿													
加温													
塩霧													
人工降雨													
紫外線照射													
荷重													
課電													

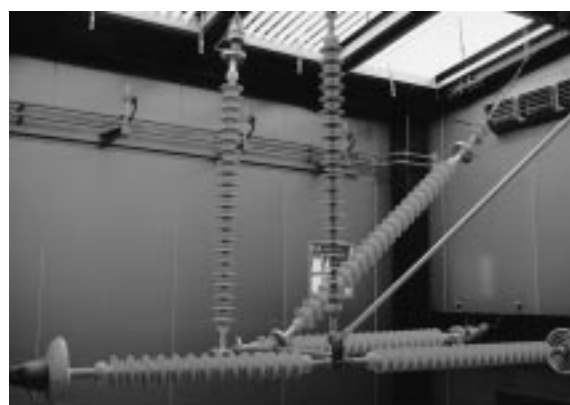


写真6 加速劣化試験状況
Accelerated aging test



写真 7 IEC 61109 試験 5000 時間後のがいし表面
Insulator surface after 5000 hours of IEC 61109
Annex C test

表 6 撤去調査の結果
Results of investigation on removed insulators

	電圧 (kV)	設置 時期	課電 ストレス (mm/kV)	調査結果
A	420	1976	46	15年目に調査するが表面異常なし。 20年目の撤去調査では黒く汚損され ているが撥水性良好、電気特性低 下無し。
B	120	1986	44	5年経過後の目視点検でがいし表面 異常なく、撥水性も良好。
C	66	1993	55	1・3年目に撤去しゴムの化学分析及 びがいしの電気・機械試験を実施し たが、低下及び劣化は観られなかつ た。
D	77	1991	60	2・4・6年経過後に撤去しゴムの化 学分析及びがいしの電気・機械試験 を実施したが、低下及び劣化は観ら れなかった。
E	275	1994	65	2年目に撤去調査するが、ゴムの化 学分析及びがいしの引張破壊試験す るが劣化及び低下は観られない。 汚損が風上風下で違っており、風下 に土埃が目立つ。

A～B: 海外本線用がいし

C～E: 国内相間スパーサ

結果を示した。このことから国内の通常の汚損環境下では十分使用に耐えられると考えられる。

4. 複合がいしの撤去調査

複合がいしの経年劣化の調査として当社の関連会社である FCI 社(Furukawa Composite Insulator:Hungary)が、1976 年に 420kV 送電線に納入した製品について 20 年使用後に撤去して調査した結果、劣化も見られず良好な特性を有していたとの報告がある⁸⁾。一方国内においてもギャロッピング防止相間スパーサ用として実線路に長年使用されている複合がいしの撤去調査を数多く行っている。表 6 には、海外を含めた撤去調査結果を示すがいずれも良好な結果である。

5. おわりに

軽量で汚損耐電圧特性・衝撃性に優れた複合がいしはギャロッピング防止用相間スパーサとして広範囲に利用されるようになってきているものの、本線用がいしとしてはいまだ適用箇所が少ないのが現状である。今回本線用複合がいしを開発し各種性能試験をした結果、実用上問題となることはなく、97年に国内で初めて154kV送電線に耐張及びV吊り懸垂装置として採用された。

絶縁材料に有機材を使用していることによる経年劣化については、屋外課電曝露試験と室内加速劣化試験を継続中であり、今後更なる実験結果の蓄積のもとに特性の改良と製造の合理化をすすめるコストダウンをはかるとともに信頼性の向上をめざすつもりである。

なお、詳細な試験結果は第2報として報告する予定である。

参考文献

- 1) Sri Sundhar, Al Bernstorff, Waymon Goch, Don Linson, Lisa Huntsman: Polymer insulating materials and insulators for high voltage outdoor applications, IEEE International symposium on EI, 1992
- 2) Composite insulators for a.c. overhead lines with a nominal voltage greater than 1000V_ Definitions, test methods and acceptance criteria, IEC61109, 1992-03
- 3) Guide for the selection of insulators in respect of polluted conditions, 1986
- 4) R. Kimata, L. Kalocsai, A. Boggar: Monitoring system for evaluation of leakage current on composite insulators, 4th International Conference on Properties and Applications of Dielectric Materials, No.5125, 1994
- 5) 中内 一志, 大浦 一隆, 小林 哲, 木股 隆三, 西村 清介: シリコンゴムがいしの自然曝露試験及び加速劣化試験, 高電圧研究会, 電気学会, HV-97-41, 1997
- 6) 中内 一志, 小林 哲, 新子谷 悦宏, 木股 隆三, 東盛 良夫, 伊波 善清, 西村 清介: シリコンゴムがいしの汚損に関する検討, 高電圧研究会, 電気学会, HV-98-73, 1998
- 7) 中内 一志, 小林 哲, 木股 隆三, 西村 誠介: シリコンがいしの課電曝露試験及び加速劣化試験の比較, 電力エネルギー部門大会, No. 431, 1997
- 8) A. Boggar, P. Szaplanczay, Pz. Pinter, G. Banhegyi: Investigations on a 20 years old composite insulator, 10th ISH, 1997