

154kV 架橋ポリエチレンケーブルの開発

Development of Cross-linked Polyethylene Insulated Cables for Extra-high Voltage Use

依田 文吉* 村木 浩二** 加藤 直義**
 Bunkichi Yoda Kôji Muraki Naoyoshi Katô
 小 椋 二郎*** 池田 忠 禧***
 Jirô Ogura Chûki Ikeda

要 旨

超高圧系統の電力ケーブル絶縁体として架橋ポリエチレンを適用すべく、電圧安定剤、充填(じゅうてん)剤の検討を行ない、電気特性にすぐれた材料を開発した。これらの材料で実際に154kVケーブルを試作し、その特性を確認した結果、耐トリッキング性、耐コロナ性、破壊特性にすぐれ、実回線への使用可能性を確立した。

また、ゴム・プラスチックケーブルを超高圧へ適用する場合のいくつかの試案を示した。

1. 緒 言

最近の電力ケーブル分野における最も顕著な動向の一つとして、ゴム・プラスチック絶縁ケーブルの高電圧系統への適用があげられる⁽¹⁾。日本においては昭和42年に110kV架橋ポリエチレンケーブル(以下CVケーブルと略す)が初めて布設され⁽²⁾、現在では60~70kVクラスまで広く使用されている。この動向を生み出した要因としては、ソリッド誘電体絶縁ケーブル特有のすぐれた点—たとえば経済性、取扱い性、保守点検性など—とあいまって、高電圧用ゴム・プラスチック絶縁ケーブルとして特に問題となる次の2点、すなわち、

- (1) 絶縁体材料の開発・研究—劣化しにくい材料の探索
- (2) 押出技術の進歩、特に導体しゃへい層・絶縁体・絶縁体しゃへい層の3層同時押し法の確立

が考えられ、これらを研究の結果、ケーブル構造としては電極不整、異物、ポイドを従来のものより少なくすることが可能になり、特性向上に結びついている。しかしOFケーブルなどの紙ケーブルとは異なり、ゴム・プラスチック絶縁ケーブルは、「押し出し」の工程があるためその性質上全く欠陥が存在しない完全なケーブルを製造することは不可能に近い。この観点から「欠陥に強い」ケーブルの開発が不可欠であり、材料的には電圧安定剤入りとか、充填剤入り架橋ポリエチレンがあり、構造的にはたとえば電氣的負性ガスを絶縁体および界面に含浸させたケーブル⁽³⁾とか、段絶縁ケーブルなどが考えられる。後者の構造的改良に関しては別途報告するものとして、ここではケーブル絶縁体の特性、ケーブルの設計およびそれにより試作したケーブル特性を中心に述べることとする。

2. 絶縁体材料の検討と選定

架橋ポリエチレン(またはポリエチレン)は現在ゴム・プラスチック絶縁材料中でケーブル絶縁体として最も多く使用されている。(わが国においては温度特性の面よりポリエチレン絶縁ケーブルはほとんど使用されていない)。しかしこれら材料を高電圧系統へ適用した場合、初期の電気特性が非常にすぐれているにもかかわらず耐コロナ性、耐トリッキング性に劣ることから長期にわた

る寿命の安定性に懸念が持たれることが大きな問題点となる。

筆者らはこの長期寿命の安定性を改善するため架橋ポリエチレンのベースレジン⁽⁴⁾、電圧安定剤の効果⁽⁵⁾、充填剤の効果⁽⁶⁾につき検討を重ね耐コロナ性・耐トリッキング性の向上を図ってきた。

2.1 電圧安定剤入り架橋ポリエチレン

前述のように、ソリッド絶縁体ケーブルの現在の製造法では完全に欠陥のないケーブルを製造することは期待できないことから、われわれは架橋ポリエチレンに効果ある電圧安定剤を添加することに大きな意味があると考えている。ポリエチレンにおいて電圧安定剤の作用が認められて以来⁽⁷⁾、架橋ポリエチレンへも一部電圧安定剤が適用されているが、材料によっては架橋ポリエチレンへの効果が全然ないものもある。

図1は各種電圧安定剤の耐トリッキング性を評価するためニードルテストを行なった結果を示したものであり、種類によってその効果に大きな差があることがわかる。われわれが今回開発した新しい電圧安定剤(図1のグループE-2)は、架橋ポリエチレンにおいてもじゅうぶんその効果をきわめて長期間発揮するものである。この電圧安定剤の特徴としては芳香族性が高く、分子量がかなり大きいにもかかわらず、著しく多くの化合物が混じり合っ

グループ	アルキル化度 (モル比)	電圧安定剤の表面への析出	トリッキング発生が確認されたサンプルの割合 (%)	試験条件	
A	—	—	-----	1. 針電極 半径: 3μm 2. 針対平板 電極間路離: 100mm 3. 試料大きさ: 3×20×25(mm) 4. 周囲媒体: OFケーブル油 5. 針そう入~電圧印加までの時間: 5日 試験条件	
B	0	—	-----		
C	1	なし	-----		
	2	なし	0		
D	1	大	-----		
	2	小	-----		
	3	小	0		
E	1	大	0		
	2	極小	-----		
	3	なし	-----		
	4	なし	0		
	5	なし	-----		
グループ	アルキル化度 (モル比)	電圧安定剤の表面への析出	20 40 60 80 トリッキング発生が確認されたサンプルの割合 (%) ----- 20kV ———— 25kV		試験条件

注: *一般架橋ポリエチレン

図1 各種電圧安定剤入り架橋ポリエチレンのトリッキング試験

* 日立電線株式会社日高工場 工学博士

** 日立電線株式会社日高工場

*** 日立電線株式会社研究所

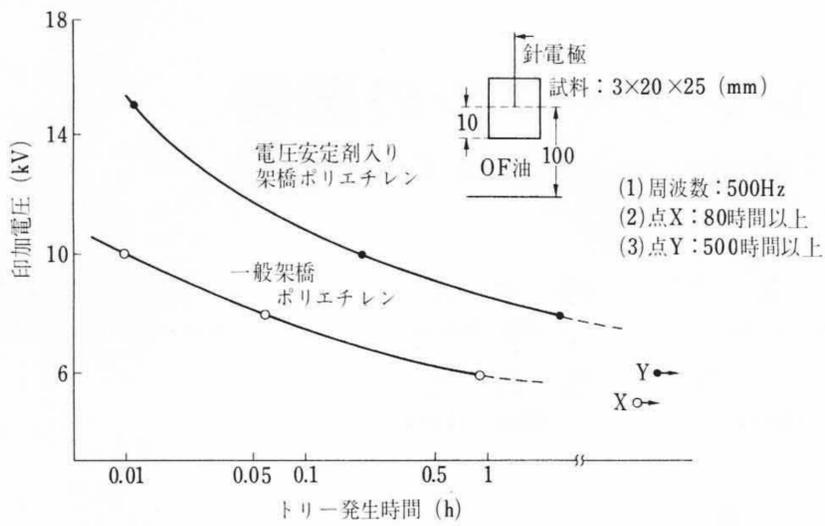


図2 電圧安定剤のトリー発生への効果

いるため、融点降下の現象により常温で液体であるという点にある。またベースレジンのとの相容性にすぐれ、分離析出がほとんどみられない。図2は本材料の針対平板電極におけるトリー発生時間—電圧特性を一般の架橋ポリエチレンと比較して示したものである。使用状態に近い低電界におけるほど電圧安定剤の効果が大きいことに注意すべきである。

2.2 充填剤入り架橋ポリエチレン

架橋ポリエチレンに非カーボン系充填剤を加えることは、単に材料の耐熱性を向上させるだけでなく、電気的にも次のような効果を期待することができる。

- (1) 耐コロナ性の向上
- (2) インパルス課電履歴の影響を受けにくい。
- (3) 高温における破壊強度(特にインパルス)の低下が少ない。

これらの点は充填剤を加えた架橋ポリエチレンは比較的ゴム絶縁体に近い特性を示すようになるためと考えられており⁽⁸⁾、高電圧ケーブル用絶縁体としてきわめて望ましい特性である。今回われわれが超高压用として開発した充填剤は誘電特性をそれほど低下することなしに耐コロナ性、破壊特性を改善したものである。

耐コロナ性を評価する方法については過去種々の方法が提案されているが、まだ標準となるものは確立されていない。図3は現在電気学会絶縁材料コロナ劣化委員会で検討中のもので、実ケーブルにおけるボイド放電劣化を模擬し、しかも測定が比較的容易であるという点ですぐれた方法と考えられ、本方法により各種電圧安定剤、充填剤の耐コロナ性に及ぼす影響を検討している。図3中には充填剤に対する試験結果も併記したが、いずれも一般非充填架橋ポリエチレンよりすぐれている。表1は図3に記した各試料の破壊特性を測定したものであり、耐熱老化性をも考慮に入れて総合的に判断して充填剤は試料Eとした。また前項でも述べた耐トリーイング性に特に効果の認められた電圧安定剤をも添加して最終配合とした。

以上、記した2種の新しい配合および一般非充填架橋ポリエチレンの諸特性を示すと表2のようになる。

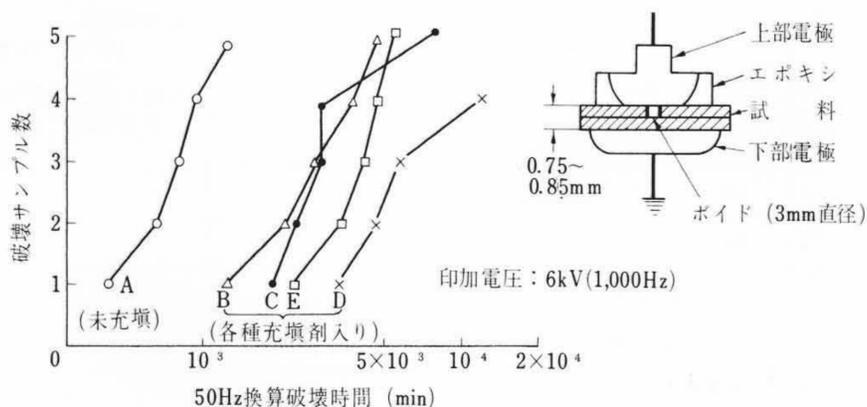


図3 ボイド放電試験結果

表1 充填剤の破壊強度へ及ぼす効果

グループ	A	B	C	D	E
充填剤種類	なし	a	b	c	b+c
交流短時間破壊強度 * (kV/mm)	43.6	37.8	43.6	52.2	51.0
インパルス破壊強度 ** (kV/mm)	303	178	199	189	216

注：* 平板電極、試料厚さ0.6~0.65mm
** 6mm径球対平板電極、電極間0.3~0.4mm

表2 各種架橋ポリエチレン材料の諸特性

項目	単位	材 料		
配 合	—	電圧安定剤入り	充填剤入り	一般架橋PE
耐トリーイング性 (13kV-30分)	図1参照	0/6	0/6	6/6
比誘電率	—	2.38	2.5	2.3
誘電正接(20°C)	%	0.04	0.16	0.04
引張強さ	kg/mm ²	2.75	1.92	2.34
伸 び	%	480	450	460

3. 超高压ケーブル用の絶縁体

われわれは70~110kVクラスの実績から充填剤入り架橋ポリエチレンが最も耐コロナ性にすぐれていることを認めている。したがって誘電特性で問題にならないければ、最適材料である。154kV級のケーブルに充填剤入り架橋ポリエチレンを使用した場合、誘電損失による電流容量減少は2~3%に過ぎずほとんど問題とならない。さらに、将来275kVクラスへの適用を考えた場合、充填剤入り架橋ポリエチレンでは、約10%の電流容量低下が考えられむずかしくなる。図4は各種ケーブルの送電容量を計算した結果を示したものである。このことから今回開発した電圧安定剤入り架橋ポリエチレンは、誘電正接が低く寿命特性にもすぐれていることが期待されるので、275kVクラスにおいても適用が可能であると考えている。

以上により、絶縁体として上記新開発の2種類および一般架橋ポリエチレン合わせて3種類を用いてケーブルを製造した。

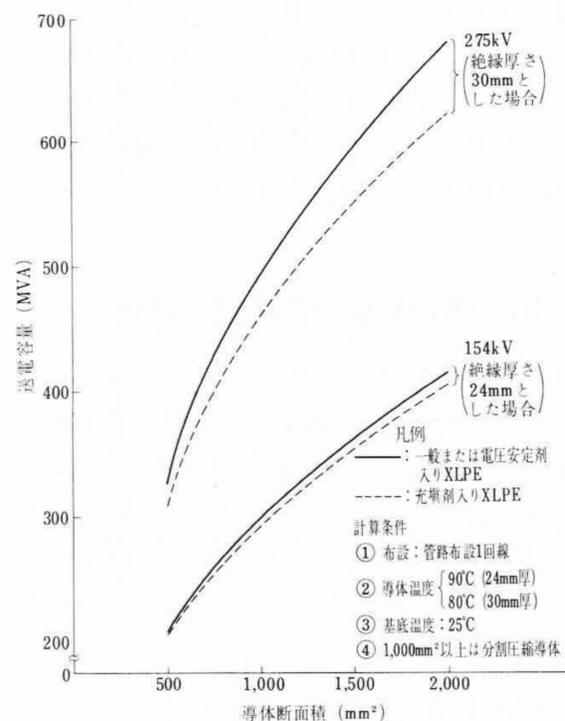


図4 架橋ポリエチレンケーブルの送電容量

4. 154kVケーブルの設計

ケーブル絶縁厚さの決定は劣化係数、温度補正などを考えた初期要求性能を設定し、従来データをもとにした許容ストレスから決定された。

4.1 要求性能

架橋ポリエチレンの実績から最低要求値を考え、あわせて現用OFケーブルの性能をも上回ることを目標とした。

(1) 交流長時間破壊値

ケーブル寿命を30年とし、30年後に使用電圧に耐えることを条件に、使用電圧(154kV/√3)に劣化係数4.5を乗じて400kVを要求性能とした。劣化係数4.5は主として内、外部半導電層としてテープを使用したケーブルの劣化曲線から得られた値にさらに余裕をもたせた値である。V-t曲線のいわゆる「9乗則」が成立するものとする本係数は4.0となる。

(2) 衝撃電圧破壊値

この要求値は基準衝撃絶縁強度(BIL:750kV)に対して、どの程度の安全率をみるかによって決定される。現在、繰返し課電、劣化などを含めて、裕度を20%みるのが一般的である。また使用温度(常時最高許容温度)における破壊値低下に対しての補正は20%とした。これは従来のデータより決めたもので、充填剤入りの場合は10%以下である。この結果要求性能を1,080kVとした。

4.2 交流特性からの設計

(1) 平均電位傾度

図5は最近の22kVケーブルを主体とした、内部半導電層と絶縁体の2層同時押し出し品の破壊平均電位傾度の分布を示したものである。3層同時押し出し品についてはデータがまだ少ないが、破壊電圧が向上し、偏差が小さくなることが期待される。設計許容値として2層同時押し出し品の値をとり、 $\bar{x} - \sigma = 17.12 \text{ kV/mm}$ とし、初期要求特性400kVを満たす絶縁厚さは、内部半導電層込みで23.3mmとなる。なお、3層同時押し出し品における \bar{x} は26kV/mm以上であり、2層同時押し出し品

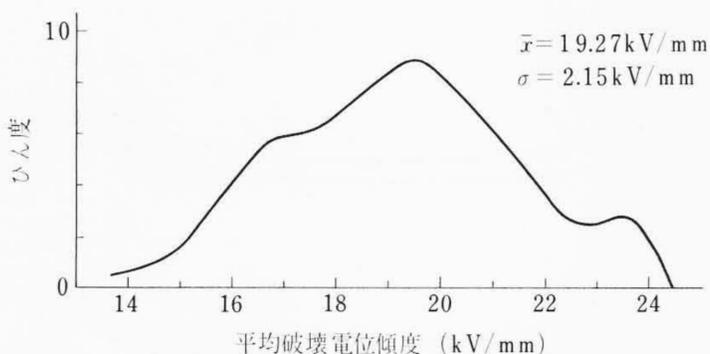


図5 交流破壊ストレスの分布V-t特性

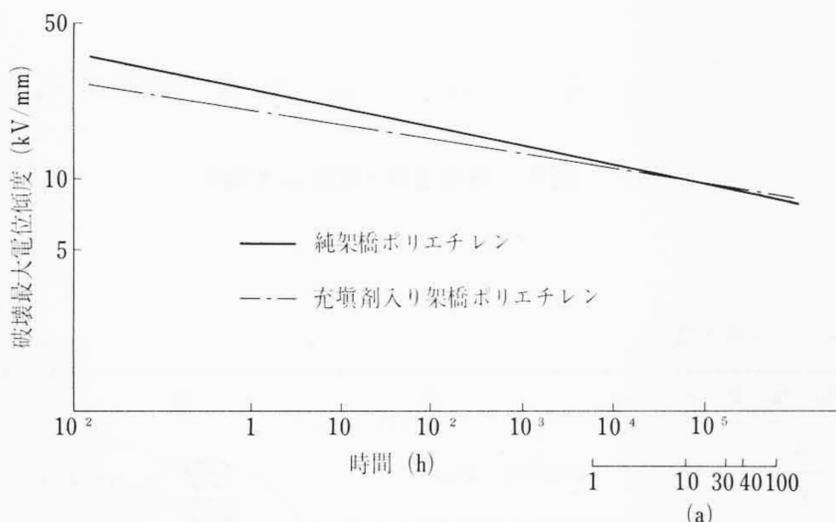


図6 架橋ポリエチレンケーブルの

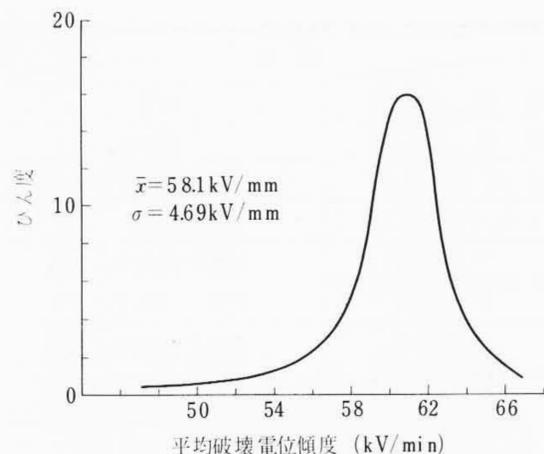


図7 インパルス破壊ストレスの分布

表3 試作ケーブル構造

項 目	単 位	仕 様
公 称 電 圧	(mm ²)	154
導 体	断 面 積	(mm ²)
	外 径	(mm)
絶縁体厚さ(内部半導電層を含む)	(mm)	24.0
しゃへい軟銅テープ	mm×No.	0.1×2
ビニルシース厚さ	(mm)	4.5
ケ ー ブ ル 外 径	(mm)	89
概 略 重 量	(kg/m)	11

と同一の偏差として $\bar{x} - \sigma = 24 \text{ kV/mm}$ ($\bar{x} - 3\sigma$ としても約20kV/mm)となり、上記絶縁厚さでじゅうぶん性能を満たすものと考えられる。

(2) 最大電位傾度

ポリエチレンケーブルの寿命は前述の「9乗則」に代表されるように最大電位傾度(G_{max})と時間(t)との関係は $G_{max}^n \cdot t = \text{一定}$ (n :定数)で表わされると一般にいられている⁽⁹⁾。また現在われわれが実施している実負荷試験のデータを最大電位傾度で整理したV-t特性を図6に示した⁽¹⁰⁾が、同図から30年後の許容値は8kV/mm以上と推定できる。内部半導電層上が8kV/mmとなる正味の絶縁厚さは16.2mmで良いことになる。

4.3 衝撃電圧からの設計

ゴム・プラスチック絶縁ケーブルの衝撃電圧破壊値は平均電位傾度によるものとみられる。図7は2層同時押し出し品での破壊ストレスの分布を示したものである。3層同時押し出し品の場合は破壊平均値(\bar{x})はほぼ同等で、偏差が小さくなる傾向にある。設計値としては2層品の $\bar{x} - \sigma = 53.4 \text{ kV/mm}$ をもとに46kV/mmを採用し、これより絶縁厚さは内部半導電層を含んで24.0mmとなる。

以上検討の結果、絶縁体厚さは正味23.0mm、内部半導電層を含めて24.0mmとした。内部半導電層上の交流最大電位傾度は、6.5kV/mmである。

ケーブル構造は表3に示すとおりである。製造は高さ70mの立形連続架橋塔を用い、3層同時押し出し方式により実施された。

5. ケーブルの特性

5.1 ドラム試験

製造した3種のケーブルのわく長試験結果は表4に示すとおりで、結果は表4にみるように特に問題はない。耐压試験では一般に10分間課電であるが、全長のケーブル安定性をみるため60分間課電を実施し、問題のないことを確認した。コロナレベルは線間電圧以上ときわめてすぐれている。

表4 試験結果

試験項目	条件	材料		
		電圧安定剤入り架橋ポリエチレン	充填剤入り架橋ポリエチレン	一般架橋ポリエチレン
わく試験	絶縁抵抗	20°C	2 × 10 ⁵ MΩ-km以上	2 × 10 ⁵ MΩ-km以上
	静電容量	20°C	0.141 μF/km	0.146 μF/km
	交流耐電圧	240kV-1h	良	良
	コロナレベル	5 pC	160kV以上	160kV以上
サンプル試験	交流長時間破壊	初期: 240kV-1h 昇圧: 10kV-1h	440kV-15min* 450kV-38min	530kV-22min** 520kV-40min**
	インパルス破壊	初期: 750kV $\begin{matrix} -10回 \\ +10回 \end{matrix}$ 昇圧: 50kV $\begin{matrix} -10回 \\ +10回 \end{matrix}$	1,150kV-4回(-) 1,150kV-3回(+)	1,300kV-4回(+) 1,350kV-2回(+)

注: *ケーブルヘッド破壊 **ケーブルヘッドせん絡

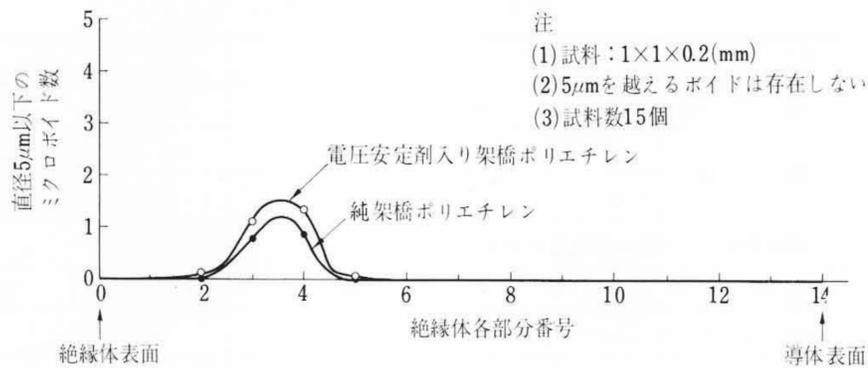


図8 絶縁体中のマイクロボイド分布

5.2 ケーブルの材料特性

ケーブル絶縁体から採取した試料で、マイクロボイドおよび耐トリイーイング性を調べた。

(1) ミクロボイドの観察

目視による観察が可能な一般架橋ポリエチレンおよび電圧安定剤入り架橋ポリエチレンについて絶縁体を外層から内層(導体しゃへい上)まで14の部分に分け、0.2mm厚さの試料を作成し、顕微鏡下でマイクロボイドを観察した。いずれも5μを越える大きいボイドは存在しなかった。その分布を示したのが図8である。いずれも絶縁体表面から4~7mmの部分にボイドが集中している。しかし、10μ程度のボイドのコロナ開始電圧は導体直上に存在したとしても約350kVとみられる⁽¹¹⁾ことから、この程度のボイド分布では実用上なら支障ないと考えられる。

(2) 耐トリイーイング性

耐トリイーイング性の測定はケーブル絶縁体の内層部と外層部から採取した試料について実施された。なお試験では課電法の相違による傾向も調べた。試験結果は表5に示すとおりである。

両測定法とも電圧安定剤の効果は明白である。

5.3 サンプル試験

サンプル試験の結果は表4と図8に示すとおりである。

(1) 交流長時間破壊試験

3種類ケーブルを比較すると、充填剤を配合したものは特にすぐれており、平均電位傾度も21.7kV/mmと設計に採用したストレスより約30%高い。他のものも目標値である400kV

をじゅうぶんに満足している。試験後破壊部付近からうすいスパイラル状にケーブルをカットして観察したが特に異常はみられなかった。

(2) 衝撃電圧破壊試験

今回は破壊レベルを明確にするためIECの方法により、負極性を10回印加後、正極電圧を10回印加し昇圧する方法を採った。この結果破壊特性は非常にばらつきの少ないものが得られた。特性そのものをみると交流の場合と同様、「充填剤」入りのものが最もすぐれており、平均電位傾度も54kV/mm以上である。なお、IEC法と一般の負極性3回昇圧法による破壊値は約10%後者のほうが高い。高温におけるインパルス強度も目標値である900kVを満足しており、低下率としては20%みればじゅうぶんであることを確認した。

(3) 誘電正接

図9に誘電正接の電圧特性、温度特性を示した。電圧による誘電正接の変化は常温、高温とも少なく安定している。一般架橋ポリエチレンと電圧安定剤入りケーブルはともに0.1%以下ときわめて低い値である。一方、充填剤入り架橋ポリエチレンでは充填剤の影響によって一けた大きい値を示してい

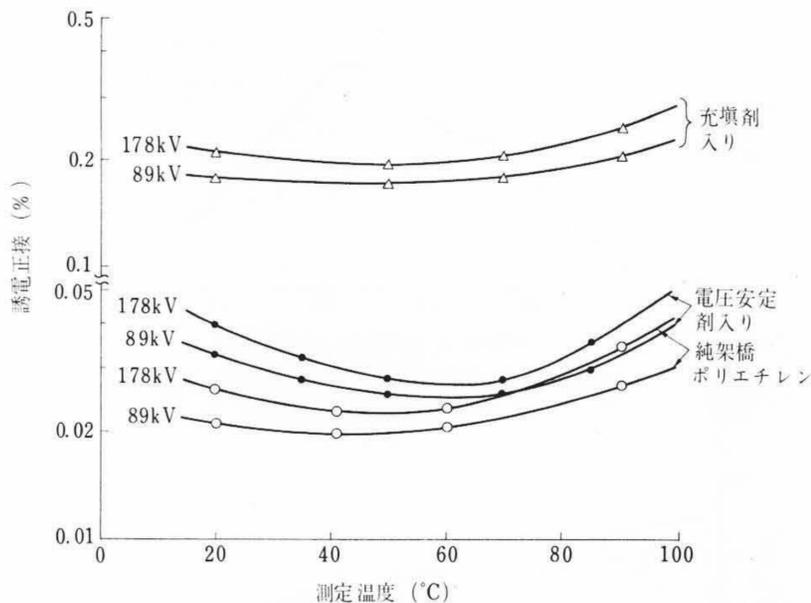


図9 誘電正接-電圧温度特性

表5 絶縁体の50%トリイー発生電圧

(単位: kV)

試験方法	電圧安定剤入り架橋PE			充填剤入り架橋PE			一般架橋PE			条件	
	A	B		14	16		8	8			
定電圧法	18	22								印加時間 30min	
昇圧法	40以上			18~20			9~11				

るが、OFケーブル並みの特性であり、当初設計した電流容量減少割合2~3%内に入り、特に使用上問題にならない。

6. 実負荷試験

製造した3種のケーブルは同時に開発した付属品とともに長期安定性と寿命を確認するため実負荷試験を実施中である。試験は対地電圧の2.25倍(200kV)の電圧を連続印加して、この間導体温度が90°Cになる電流を8時間通電し、16時間しゃ断するヒートサイクルを加えており、5,000時間以上正味課電時間が経過しているが異状は発生していない。

ケーブルおよび付属品の寿命は電圧に依存すると仮定して、前述のように $V^n t = \text{Const}$ で表わされると考えると、 $n=9$ としても、200kV課電で38日異常なければ30年の寿命に相当することにする。しかし、これはあくまで寿命推定の目安であって、これに耐えれば実用上問題ないとはいきれない。実系統では単なる電圧と温度に加えて、各種波形のサージや負荷の変動あるいは機械的応力や環境の変化により劣化が進むこともじゅうぶんに考えられる。これらの劣化については現在個々に検討中であり、実負荷試験の結果とあわせて検討することにより超高压架橋ポリエチレンケーブルおよび付属品の適正な設計ができるものと思っている。

7. 超高压ゴム・プラスチックケーブルへの試案

将来ゴム・プラスチックケーブルを275kV級の超高压系統へ適用して行く場合、現在のケーブル構造(したがって設計基準)をそのまま踏襲するとその絶縁体厚さはきわめて大きいものになってしまう(たとえば275kVで設計してみると約30mmとなる)。われわれは既に導体サイズが1,000mm²で、純架橋ポリエチレン絶縁厚さが30mmのケーブルを試作してみたが、押出し機のほうからもこの程度が問題なく製造できる限度のようである。一方、ケーブル外径もきわめて大きくなり、取扱い上のデメリットもあり、絶縁厚さは究極的にはOFケーブル並みにもって行くことが必要となってくる。したがってケーブル構造自体にも改革を行なう必要が迫られており、このようなことから次の2点を中心に研究を進めている。

- (1) ガス含浸架橋ポリエチレンケーブル
- (2) 段絶縁架橋ポリエチレンケーブル

(1)は架橋ポリエチレン押出し層の界面または絶縁体中に存在するボイドなどの欠陥部をSF₆ガスのような電気的負性ガスを含浸させることによりカバーしようというもので各種ケーブルについて実験の結果、交流破壊強度、高温におけるインパルス破壊強度などが大幅に改善されるという有望な結果を得つつある。

(2)は紙ケーブルでは常識的なことであるが、押出しタイプのケーブルでは絶縁層間の接着性に問題があるため家現がむずかしかった。しかし最初に述べた多層同時押出し技術の進歩により必ずしも不可能でなくなってきた。特に導体と絶縁体しゃへい層に接して誘電率の異なる絶縁層を設けることにより電位傾度を平滑にして、従来電極不整が発生しやすい場所を補強するのでケーブルの特性は絶縁体本来の特性に近づくことが期待される。本件についても一部ケーブル試作を完了した段階である。

8. 結 言

- (1) 超高压ケーブル絶縁材料を検討し、電気特性の良好な電圧安定剤入りおよび充填剤入り架橋ポリエチレンを開発した。
- (2) 上記2種絶縁体と一般架橋ポリエチレンを用い絶縁厚さ24.0mmのケーブルを試作し、OFケーブルに比べても見劣りのない初期の特性を得ることができた。特に充填剤入りのものは破壊特性にもすぐれ、最も有望な絶縁材料である。
- (3) 過酷な長期実負荷試験を実施中であるが、異常なく実系統への使用が可能である。
- (4) 実際に超高压へゴム・プラスチックケーブルを適用するためには、絶縁厚さを低減する必要がある、このためにはガス含浸ケーブル、段絶縁ケーブルが考えられることを示した。本報告ではケーブル関係を主体としたが、各種付属品の開発状況についても別途報告する予定である。

終わりにあたり、これら開発にご助言いただいた各電力会社の関係者各位、種々ご協力いただいた日立電線株式会社関係者に深い謝意を表す。

参 考 文 献

- (1) M.A.Chaory, R.F.Jocteur : IEEE, Tr. Paper No.70TP 556-PWR, July. (1970)
- (2) 加藤, 佐藤, 目崎, 村木 : 電四連 No.1074 (昭43)
- (3) 高橋, 池田 : 電学東支大 No.291 (昭46)
- (4) 小椋, 坂場, 佐藤, 川和田 : 電四連 No.200 (昭45)
- (5) 依田, 坂場 : 日立評論 51, 366 (昭44-4)
- (6) 依田, 関井 : 電学東支大 No.361 (昭42)
- (7) D.W.Kitchin, O.S.Platt : IEEE, Tr. PA & S, No.60, 112, June. (1962)
- (8) 依田, 関井 : 電学東支大 No.282 (昭43)
- (9) F.H.Kreuger : CIGRE, No.21-02, 1968
- (10) 大堀, 浜田, 加藤, 北村, 佐藤 : 日立評論 51, 371 (昭44-4)
- (11) 依田, 関井 : 日立評論 53, 1181 (昭46-12)