

# 高電圧ゴム、プラスチックケーブルの諸問題

## Some Problems of Rubber and Plastic Insulated Power Cables Used for High Voltage System

大堀 利之\*      浜田 義雄\*      加藤 直義\*  
 Toshiyuki Ohori      Yoshio Hamada      Naoyoshi Katô  
 北村 洋\*      佐藤 祈美男\*\*  
 Hiroshi Kitamura      Kimio Satô

### 要 旨

ゴム、プラスチック絶縁材料の進歩に伴い、高電圧ケーブルへの適用が急速に進展している。高電圧ゴム、プラスチック電力ケーブルはわが国では、日立電線株式会社で製造した110 kVケーブル、アメリカでは138 kVケーブルまで実用化されており、さらに高電圧化の傾向にある。

本報告では、高電圧化に対する配慮と、各種材料のケーブル特性ケーブルおよび付属品の開発状況について述べる。

### 1. 緒 言

電力需要の増加に対処するため、送電システムの超高圧化と大容量化が押し進められている。この傾向はOFケーブルや他の紙絶縁ケーブルばかりでなく、ゴム、プラスチック絶縁ケーブルにも現われている。

ゴム、プラスチック電力ケーブルの66 kV以上の系統への利用は、絶縁材料の特性から、従来変電所内の配線や応急工事用などの移動用ケーブルとして短区間応急設置に使用されてきた。しかし、最近ではこの実績をもとに、保守の容易性、経済性に着眼し、OFケーブルに代わって短区間の恒久用として使用されるに至った。

日立電線株式会社では、ブチルゴム、EPゴム、架橋ポリエチレンにより、66~110 kVまでのケーブルを完成し、移動用のほか、恒久用としても納入実用しているが、さらに、品質の安定したケーブルの検討を行なうとともに、超高圧化に備えて154 kV以上のケーブルの開発にも着手している。

これら、ゴム、プラスチックのソリッド形ケーブルでは、特に、コロナ劣化に注意することが重要であり、次の三点に考慮を払い開発を進めている。

- すなわち、
- (1) 耐コロナ、耐トリリー性の良い絶縁材料の選定
- (2) 劣化の原因となる、ボイド、電極不整を導体上、絶縁体内に形成させないケーブル構造および製造法
- (3) 製造されたケーブルの不良点検出法

本報告ではこれらの問題点を中心に、ケーブル特性の概要を述べ、ケーブル高電圧化に伴い開発された付属品についてもふれ、あわせてケーブル系統の経済比較も行ない、今後、ゴム、プラスチックケーブルの高電圧化を進めるに当たっての参考に供したい。

### 2. ケ ー ブ ル

#### 2.1 絶 縁 材 料

高圧ケーブルの絶縁材料としては、ブチルゴム、架橋ポリエチレン、EPゴムがあげられる。これらのなかでも架橋ポリエチレンは、許容温度が高く、電気特性もすぐれ、しかも、経済的であるため、現在高圧用として最も多く使用されている。しかし、耐コロナ性はほかの材料に比べ劣るという問題点を持っている。架橋ポリエチレン系材料で、耐コロナ性のすぐれたものに、日立電線株式会社がアメリカGE社との技術提携をもとに開発したポリサーモ（充て

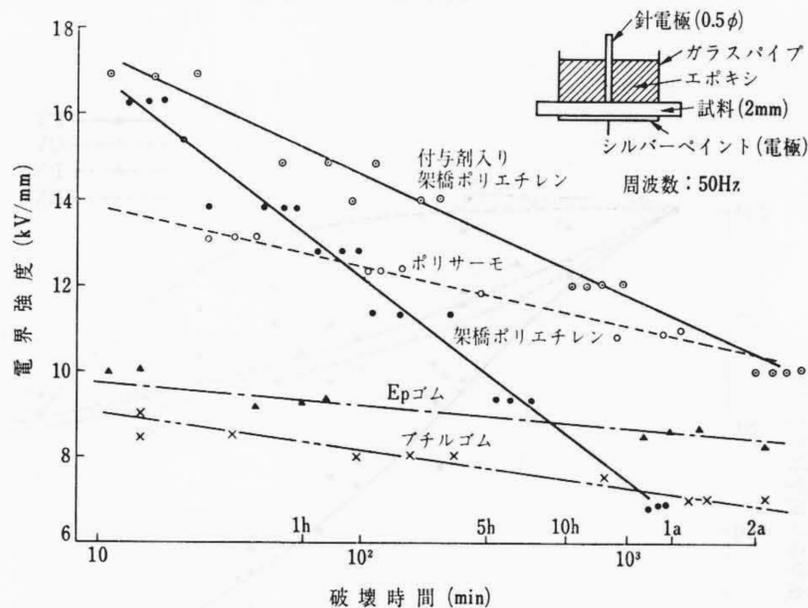


図1 各種絶縁材料の交流寿命特性

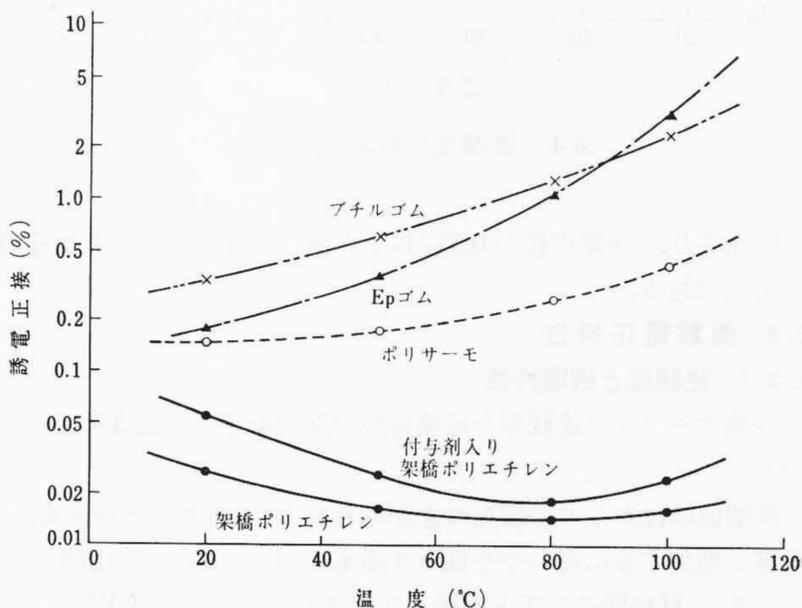


図2 各種絶縁材料の誘電正接温度特性

ん剤入り架橋ポリエチレン)がある。また、一般架橋ポリエチレンにわずかに耐コロナ性物質を添加し、特性を改善したものに、耐コロナ性付与剤入り架橋ポリエチレンがある。このほか、先にあげたEPゴムは本質的に耐コロナ性に対し最も安定した性能を示している。

これら材料の耐トリリー性を端的に表わした特性は図1に示すとおりである。

また、高圧ケーブルで重要となる材料の誘電正接を図2に示す。

\* 日立電線株式会社日高工場  
 \*\* 日立電線株式会社研究所

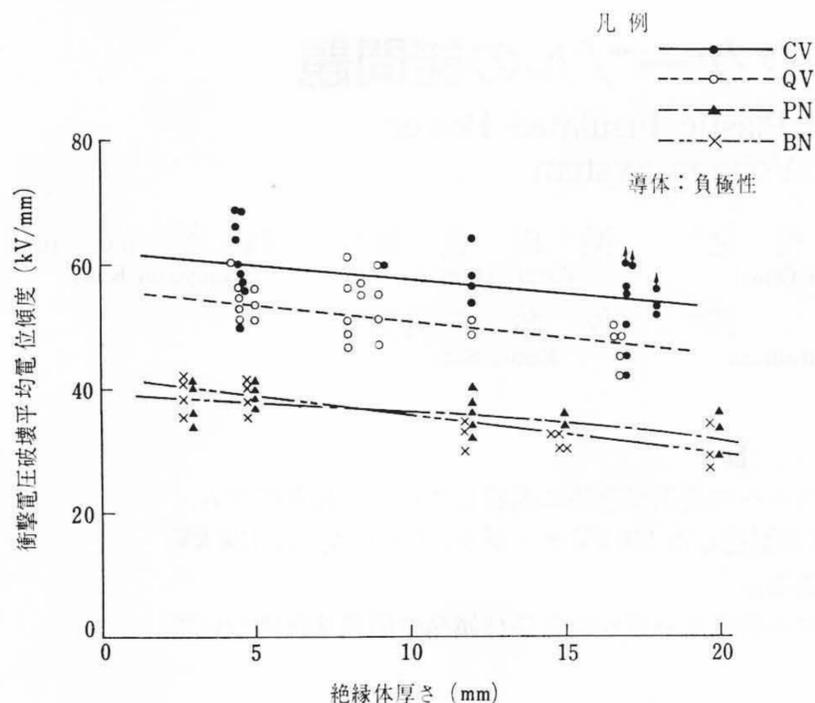


図3 衝撃電圧破壊特性

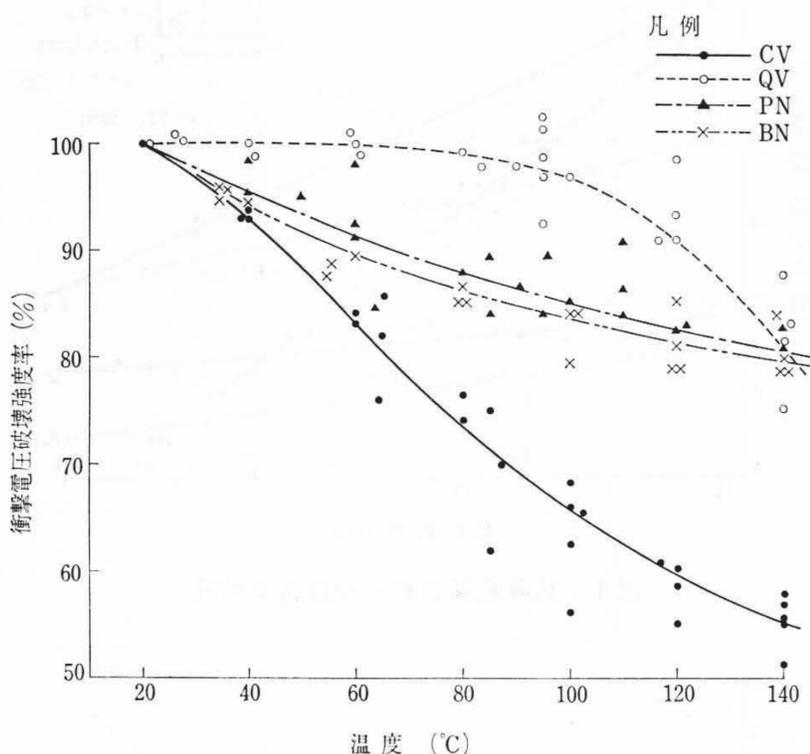


図4 衝撃電圧破壊温度特性

この特性より、誘電正接が0.5%以下の値を示すポリエチレン系材料が有望である。

2.2 衝撃電圧特性

2.2.1 絶縁厚と破壊特性

各種ケーブルの絶縁厚と破壊特性の関係を示すと図3のようになる。

破壊値にはかなりのばらつきがみられるが、各ケーブルとも、絶縁厚が増加するに従いやや低下するものの、ほぼ一定の値を示している。材料別にみると架橋ポリエチレンケーブル(CV)では40~70 kV/mmと最も高く、ポリサーモケーブル(QV)は40~65 kV/mmでついでいる。また、EPゴム(PN)、ブチルゴム(BN)のケーブルはほとんど同じ特性を示し、25~45 kV/mmである。図3は導体負極性の特性であるが、一般に正極性の場合のほうが破壊値が低く、6.6 kVケーブルで測定の結果、CVでは内部半導電層の種類によって10~20%の低下を示している。QVおよびBNでは4~6%で比較的小さい、PNにおいてはほとんど差が認められない。この極性効果の大きい材料ほど、コロナの影響を受けやすいとみられ、この点から、特に架橋ポリエチレンケーブルでは内部半導電層の構造の配慮が重要である。

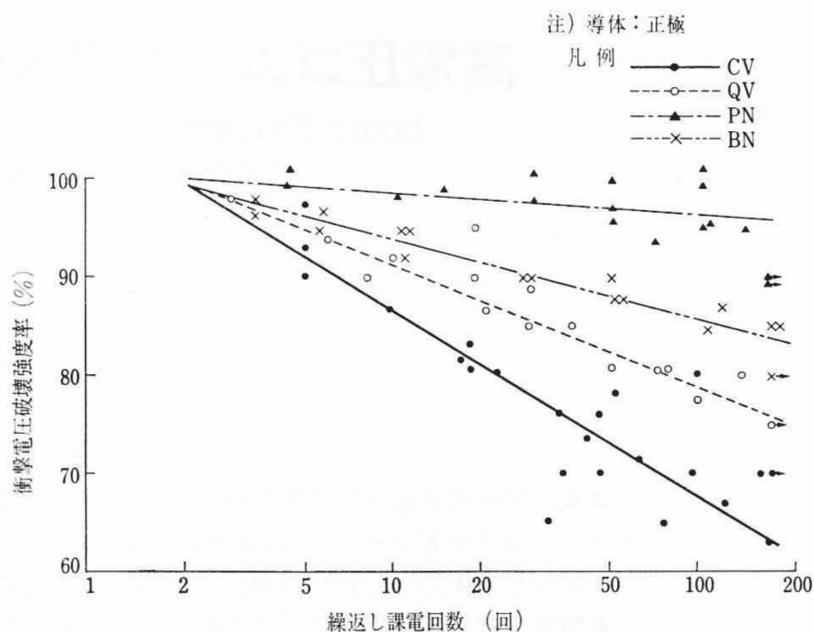


図5 衝撃電圧破壊強度の繰返し課電特性

2.2.2 温度特性

衝撃電圧の常温の破壊値を100%として求めた温度特性は図4に示すとおりである。この特性は22 kVまでのケーブルを用いて得たものであるが、QVは温度上昇による低下が少なく、90~100°Cの使用温度でも、常温の95%以上の値を示している。CVは温度によって変化が大きく、使用温度付近では70%前後に低下する。また、PN、BNはこの特性もほぼ同じ特性で、前述者の中間の値である。高電圧ケーブルでは絶縁厚は衝撃電圧によって決定される場合が多く、温度特性も十分考慮する必要がある。

2.2.3 繰返し課電特性

6.6 kVのケーブルに衝撃電圧を繰返し課電した場合の破壊強度と課電回数(回)の関係を示したのが図5である。本特性は課電3回以内で破壊する値を破壊強度率100%として表わしたものであるが、図よりCVの低下率が最も大きいことがわかる。この特性は初期破壊値より低い電圧でも繰返し課電すれば破壊に至ることを示している。また、結果より充てん剤入り絶縁材料では低下率が小さい、これは充てん剤によってトリーの進展が阻止されることによるものと推定される。

なお、交流破壊値の衝撃電圧課電履歴による低下を求めた結果<sup>(1)</sup>でも低下率はCVが最も大きく、QV、BNの順に低下が少なくなっており、上記と同様な傾向がみられる、PNについては実施中であるが、上述のトリーと考え合わせてみると、最も良い結果を示すものと思われる。ゴム系材料のケーブルは初期破壊値は低いが、繰返し課電に対してはすぐれており、衝撃電圧が繰返される系統には適している。

2.3 交流電圧特性

2.3.1 絶縁破壊特性

各種ケーブルの交流破壊特性を最大電位傾度で整理すると図6のようになり、CVの絶縁厚の小さい部分を除くと各ケーブルとも、絶縁厚によらずほぼ一定である。CVの低絶縁厚部で低い値を示すのは、内部半導電層の差異によるもので、半導電性布テープを使用したものが低く、押出被覆タイプとの差が明瞭に現われている。なお、22 kVまでのケーブルで破壊値の温度特性をとった結果いずれの材質のケーブルも100°C以下では温度による差異が認められなかった。

2.3.2 寿命特性

ケーブルの寿命を短期間に推定するため6.6 kVケーブルを主体に、ストレスの違った課電を行ない、通電によるヒートサイクルを加えて、最大電位傾度と寿命の関係を求めたのが図7である。図で、CVは内部半導電層に布テープを使用したものである。

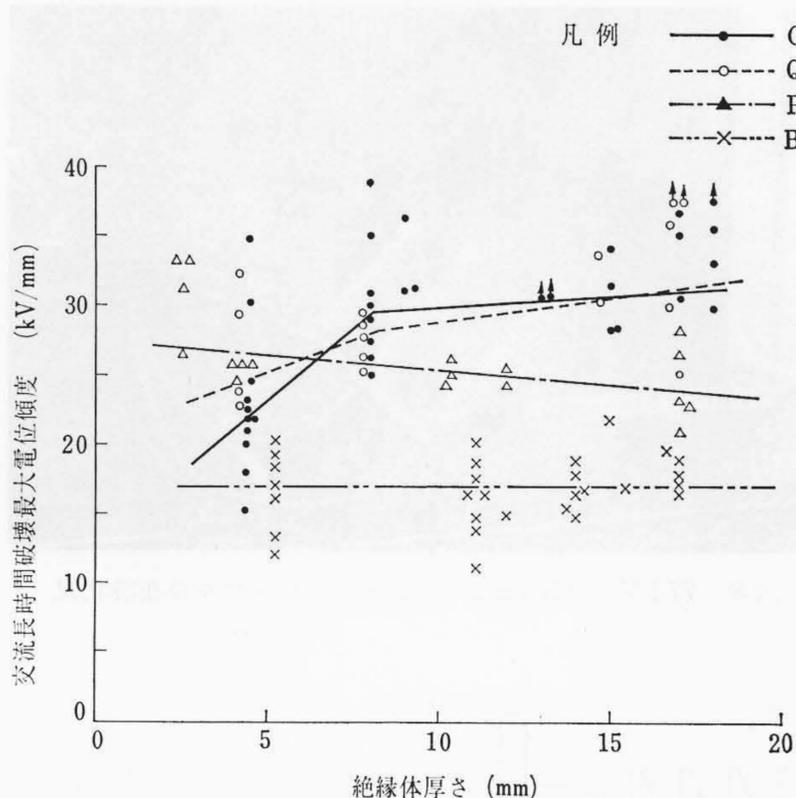


図6 交流長時間破壊特性

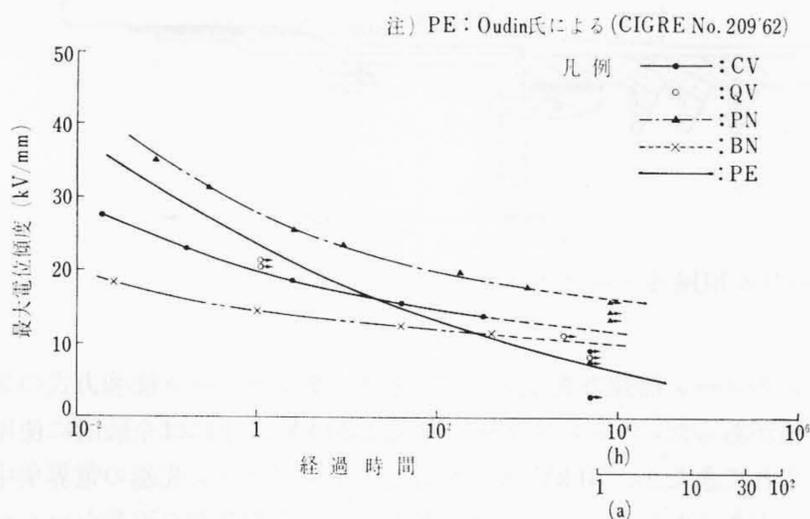


図7 各種ケーブルのV-t特性

が、半導電層を絶縁体と同時押出タイプにすればさらに良好な寿命が得られる。

また、PNは6.6 kVケーブル1種類について得たもので、さらに多くのサンプルによって特性を求める必要がある。QVはまだ、特性を得ているものが少ないが、77 kVケーブルで11.3 kV/mm課電したものでは4,000時間を経過しているが健全で、Oudin氏の示した特性曲線をすでに大幅に上回っている。

ここに示したV-t特性のほか、安定性検討の一端として、ケーブルに模擬ボイドを作り、コロナレベル以上の電圧を10 min 課電-10 min 休止の課電を繰返して耐コロナ性の検討を行なったデータ<sup>(2)</sup>では、20回課電でも全数破壊しない(印加電圧/コロナレベル)はCVで1.25, BNで2.00, QVで5.25で、結果よりみた耐コロナ性はすぐれたほうからQV, BN, CVの順になっている。

### 3. ケーブルの設計および製造

#### 3.1 ケーブルの設計

今まで、ケーブル設計の基本となる電気特性について述べたが、その結果、高圧ケーブルとして配慮すべきことは、耐コロナ性の良い材料を使用することと、コロナの発生源となるボイドを生成しない構造とすることである。前述の特性からケーブルの絶縁設計を行なうことが可能であるが、いま、CVについて考えてみると、絶縁厚がおもに決定される衝撃電圧ではBILに対して、温度特性の補

正1.3, 繰返し課電と極性1.15, その他の安全率1.1, 総合で1.65程度の安全率を見込み、破壊の平均電位傾度を45 kV/mm程度にすれば良いと思われる。

また、交流ではV-t特性より30年後の最大電位傾度の許容値を外そうし、衝撃電圧課電による交流耐圧の低下、その他の安全率を考慮して、総合で1.3~1.5の安全率をみれば良いと考える。CVでは使用時最大電位傾度として6.5 kV/mmを採用して設計可能とみられる。なおこれらの値は技術の進歩とともに当然変化していくものである。

#### 3.2 製造および管理

ケーブルの構造上からコロナ劣化の原因となる最も大きな欠陥は導体直上の半導電層と絶縁体間に生ずる突起やボイドである。この問題を解決するため、固有抵抗、安定性、加工性などの面から半導電性押出材料の検討を行なうとともに半導電層と絶縁体を同一工程中で押出被覆することを検討した。その結果、コモンヘッド方式(2台の押出機のヘッドを連結したタイプ)およびタンデム方式(2台の押出機をやや離して直列に並べたタイプ)による押出技術を確立した。

この被覆構造によって交流破壊特性は図6のように著しく向上しCVでは衝撃電圧の正負極性による差が小さくなり、特性が安定した。

また、本製造方式とともに高圧化に当たっては十分に製造管理を行なう必要があり、特にボイドフリーのケーブルを製作するうえからボイド検出が欠かせない条件となる。われわれも装置面とともに長期寿命保証の点から検出電圧、感度を検討し問題を解決している<sup>(3)</sup>。本製造方式、管理法は昭和40年より22 kV以上のゴム、プラスチックケーブルに適用され好成績を得ている。なお、外部半導電層も同一工程で行なう3層同時押出方式も実用化の段階にはいっており、今後、超高圧ケーブルに大いに採用されることになると思われる。

### 4. ケーブルの具体例

表1は各種ケーブルの実用例を、表2はその電気特性を示したものである。

これらケーブルはいずれも、半導電層と絶縁体の2層同時押出のもので、QV, CVは外部半導電層も押出層としている。

30 kV, PNは東海道新幹線の車両用として、変動負荷、振動を受

表1 ケーブル構造および納入先

公称電圧, 種類	—	30 kV*1 PN	77 kV QV	110 kV CV
納入先	—	日本国有鉄道 新幹線	中部電力株式会社 大間発電所	四国電力株式会社 津賀発電所
線心数	心	1	1	1
導体	公称断面積	mm <sup>2</sup>	60	100
	外径	mm	11.7	13.0
絶縁体	材質	—	EP ゴム	ポリサマーモ
	厚さ*2	mm	16.0	17.0
半導電層	材質	—	特殊導電布テープ	特殊導電押出層+導電布テープ
	厚さ	mm	0.35	2.5
金属 遮へい層	材質	—	錫(すず)メッキ銅編組	軟銅テープ
	厚さ	mm	0.5	0.1×1
シース	材質	—	クロロブレン	ビニル
	厚さ	mm	3.0	3.5
仕上外径(約)	mm	52	60	67
概算重量	kg/km	3,850	4,490	5,140

\*1: 対地間 30 kV, 線間では 51 kV 相当。

\*2: いずれも内部半導電層を含む。

表2 ケーブルの電気特性

試験項目	単位	30 kV PN	77 kV QV	110 kV CV	備考				
ド ラ ム	静電容量 (20°C)	μF/km	0.145	0.142	0.122	*: 150 kV/ 1h の耐圧も良			
	絶縁抵抗 (常温)	MΩ-km	12,000~ 14,000	49,000	∞				
	交流耐電圧	kV/ 10min	70 良	110* 良	130 良				
	コロナレベル	kV	50 以上	70 以上	80 以上		感度 10PC		
サ ン プ ル	交流長時間破	kV	200~220	280~340	310~320				
	衝撃電圧破壊	kV	480~520	700~760	900~950				
	誘電正接 (%)	°C	kV	30	60	44.5	90	63.5	137
			20	0.33	0.41	0.31	0.34	0.017	0.025
			50	0.56	0.73	0.38	0.40	0.027	0.038
80			1.80	2.15	0.42	0.44	0.10	0.16	

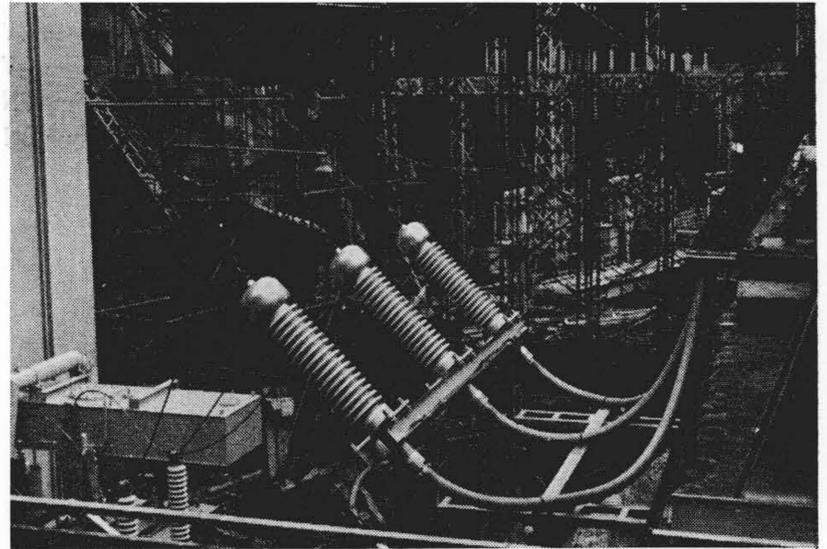


図8 77 kV 1×100 mm<sup>2</sup> ポリサマーケーブルの布設状況

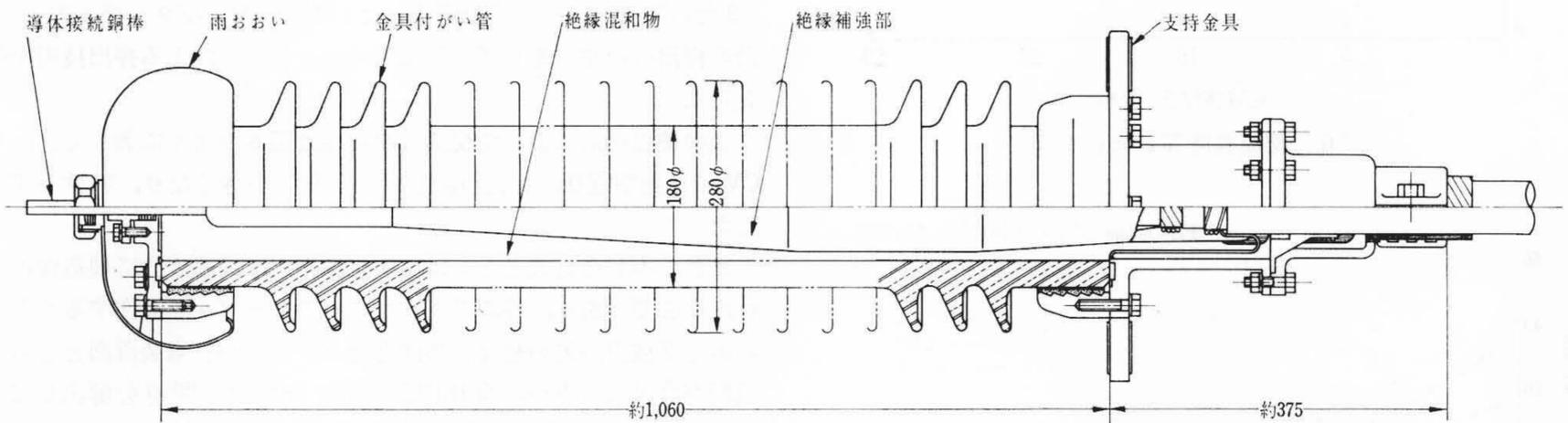


図9 70 kV 級ゴム、プラスチックケーブル用屋外ケーブルヘッド

ける条件下で、また、屈曲布設するため、耐コロナ性、たわみ性の点から EP ゴムの特性を十分に生かした使用方法といえる。なお、PN は 110 kV まで既に試作し、実用可能な態勢になっている。

77 kV, QV は布設最大傾斜 60 度、高低差 10 m 以上のルートに恒久用に布設されたもので、高低差のあるルート、発電所の無人化など、OF ケーブルに代わって使用される方向を示唆している。布設状況を示したのが図 8 である。

110 kV, CV は耐コロナ性付与剤入りの架橋ポリエチレンを絶縁体としたケーブルでゴム、プラスチックケーブルの固定用としてはわが国最高電圧品である。高いストレスの下で使用されているが、交流破壊値は使用電圧の 5 倍以上の値であり、V-t 特性からも長期間安定した使用が可能と推定される。

### 5. 付 属 品

高電圧用ケーブル付属品として最も重要なものは、ケーブル末端処理材としてのケーブルヘッドと、各ケーブルを接続としていくための直線接続部であり、以下これについて述べる。

#### 5.1 基本的仕様

各接続部の方式としては、従来から ① ケーブル遮へい端の電界緩和補強方式、② 高電圧部分の絶縁補強方式、③ 防水、機械的保護用外部補強物、などに種々の異なった種類のものがあるが、そのなかから 66 kV 以上の電圧用として電気的にも機械的にも最も安定したものを採用する必要がある。

#### 5.2 ケーブルヘッド

図 9 は 70 kV 級固定用ケーブルヘッドの一例を示したものである。

##### 5.2.1 絶縁補強方式

ケーブル遮へい端の電界緩和の方法としては従来大別してスト

レスコーン補強方式(遮へい形)とコンデンサコーン補強方式の 2 種があった。ストレスコーン方式は 30 kV 以下には全般的に使用されてきたが、70 kV 級になるとストレスコーン先端の電界集中が大きくなるので、安定性を考慮すると電界分布の平等なコンデンサコーン方式を採用する必要がある。70 kV 級のコンデンサ形ケーブルヘッドは移動用ケーブル用として多数の実用実績を持っている<sup>(4)</sup>が、これはケーブル端末部に工場であらかじめコンデンサ部を成形加工したものである。この方式は性能上最も重要な絶縁補強部を工場で作成後、十分な検査を行なってから出荷できるという利点はあったが、反面あらかじめ工場で作成して行くため布設条長を事前に厳密に決定しておく必要があった。このため、最近では端末施工現場組立が可能なる入形絶縁補強方式<sup>(5)</sup>に切り換えられる見通しである。

##### 5.2.2 外部套管

移動用ケーブルヘッドは持ち運び取扱い性から外部保護としてブチルゴムなどからなる套管(とうかん)を一体成形していたが、長年月使用する場合に耐候性、耐汚損性の点で磁器套管に劣るのは止むを得なかった。

固定用としては数十年の使用に耐えねばならぬこと、高電圧下で使用され、かつ各種汚損条件に耐えるためには、やはり OF ケーブル用ケーブルヘッドなどに使用されている磁器套管を採用することが必要と考える。

##### 5.2.3 絶縁混和物

従来ゴム、プラスチックケーブルヘッド用絶縁混和物としては、アスファルト系の K-51 混和物が使用されていた。しかし 70 kV 級套管の容積が大きくなると K-51 の完全な注入作業が困難となり、新しい絶縁混和物が必要となった。その要求性能としては、電気絶縁性の良いことはもちろんであるが、がい管、ケーブルと

表3 70 kV 級ケーブルヘッドの電気特性

ケーブルヘッドの種類	コロナ開始電圧 (kV)	交流長時間破壊電圧 (kV)	衝撃破壊電圧 (kV)
そう入式 No. 1	70 OK	200 OK	600 OK
そう入式 No. 2	70 OK	200 OK	600 表面閃絡
一体成形方式	70 OK	200 OK	540 表面閃絡

表4 CV ケーブル接続部の電気特性  
(一体成形絶縁方式)

供試ケーブル	コロナ開始電圧 (kV)	$\tan \delta$ (%)	交流長時間破壊電圧 (kV)
20 kV 30 mm <sup>2</sup>	30 OK	0.01 以下	125 以上
20 kV 200 mm <sup>2</sup>	30 OK	—	130 以上
70 kV 100 mm <sup>2</sup>	70 OK	0.02 以下	180 以上

密着性の良いこと、ケーブル絶縁体に影響のないことなどがあり、これを満足するものとしてシリコンオイルが採用されている。その後、ほかの絶縁混和物の検討も進み、合成油ポリブデンをベースとしたブレンドワックス<sup>6)</sup>が開発されており、比較的安価でもあるので今後順次使用されていくと考えられる。

### 5.3 直線接続部

#### 5.3.1 絶縁補強方式

直線接続部の絶縁処理は従来自己融着性テープ巻が一般的な方法であったが70 kV 級になるとこれのみで安定した性能を得ることが困難で、ケーブルと同種材料による成形接続方式が開発された<sup>7)</sup>。この方式は接続部がCV, QV ケーブルの場合は架橋ポリエチレンテープを、BN, EP ゴムケーブルの場合はそれぞれの未加硫テープを巻き所定の押えを行ない、電熱などの熱源で加熱成形する。この成形接続方式は電気特性が著しく向上し接続部の小形化が可能で、絶縁部中央の絶縁厚はケーブルのそれとほぼ同等で十分である。

#### 5.3.2 外部保護物

絶縁補強部の外表面は完全に遮へい体でおおわれているので外部保護ケースは防水、機械的保護の目的で保護鉛管または直埋布設の場合に保護鉄箱が使用される。その内部には防水用としてアスファルト系混和物が充てんされる。

### 5.4 各接続部の特性

工場で行なった性能試験の結果をケーブルヘッドおよび直線接続部について示すと表3, 表4のようになる。いずれも所定の性能を十分満足する値を示している。一方、限界寿命を求めるための実負荷試験を行なったが、その条件は連続課電電圧54 kV, 通電電流

350 A 16時間通電/日であった。その試料は5,000時間の試験に耐えたのち、電気破壊試験が行なわれたが初期値と同等の値を示し、劣化は認められず、実用上問題のないことが確認できた。

## 6. 経済比較

現在、CV を主体に低圧側より紙絶縁ケーブルのプラスチック化が進み、22 kV 級では旬日を待たず、ほぼ完全に切り換えられる傾向にある。77 kV 級でも短区間ルートでOF ケーブルから転換の実績が増加している。ちなみに、77 kV 単心CV (またはQV) と3心OF ケーブルとを平坦地に直埋布設として、ケーブル、付属品および布設工事について経済比較を行なった結果、CV は付属品の占める比率の大きい短区間で、経済性を発揮する。この区間は同一サイズでは平均的には、400 m 前後で小サイズほど長くなる。また、電流容量でみると、OF ケーブルは1条、CV は3条密接布設とした場合、CV はOF ケーブルの10~13% 増の電流容量がとれるため経済分岐点も600 m 以上に達する。このほか、保守の容易化、あるいは高低差の大きいルートへ適用した場合にも経済性が考えられる。

なお、両者に単心ケーブルを使用する範囲では、電流容量、ケーブル価格がほぼ等しくなり、電力損失、付属品などを考え合わせると経済性は同等とみられる。

## 7. 結 言

以上、77 kV 級を主体に高圧ケーブルに対して配慮すべき点、ケーブルおよび付属品の開発の実情、実使用状況について述べた。なお製造法の改善により電気的安定性が大幅に向上したが、耐コロナ性からみて、66~154 kV 級には現状ではポリサーモが最適とみられ、EP ゴムはたわみ性、衝撃電圧履歴特性、コロナ特性などのすぐれた点を生かして、移動用、コットレル用およびレントゲン用などへの適用が考えられる。この種ケーブルは今後66 kV 級に大幅に実用されるのみならず154 kV 以上に使用されるのも遠くないとみられる。今後はいっそう高圧のケーブルを開発するとともに、現地施工の容易な付属品の実用化、布設後の絶縁監視法、事故点検出法につき検討を加える予定である。

終わりに、本開発に多大のご協力をいただいた、日本国有鉄道、中部電力株式会社、四国電力株式会社ほか関係各位に深謝の意を表する。

## 参 考 文 献

- (1) 依田, 関井: 昭42電気学会東京支部大会 361
- (2) 依田, 関井: 昭43電気学会東京支部大会 282
- (3) 北村, 目崎: 日立評論 50, 235 (昭43-3)
- (4) 依田, 佐藤: 日立評論 46, 1169 (昭39-7)
- (5) 浜田, 石下: 昭42電気学会東京支部大会 310
- (6) 小野, 松本: 昭42電気学会東京支部大会 352
- (7) 依田, 浜田: 昭40電気学会連合大会 1204