

ゴム、プラスチックケーブルおよび付属品の実負荷試験

Field Test of Rubber and Plastic Insulated Power Cable and Accessories

熊谷 竹男* 佐藤 祈美男* 浜田 義雄**
 Takeo Kumagai Kimio Satô Yoshio Hamada

要 旨

ゴム、プラスチック電力ケーブルは絶縁材料や製造技術の進歩により使用範囲が拡大し、電力ケーブルとして重要な役割を占めるようになってきている。こうした背景からケーブルおよび付属品の開発、実用化にあたっては長期安定性をじゅうぶん確認する必要がある、各種実負荷試験を実施している。

試験は主としてV-t特性を求めることにより、実績のある従来使用品と新しく開発されたものの比較およびそれらのおおよその寿命推定を行なうことができた。これによって各製品の信頼性を確認すると同時に今後の絶縁設計上に有効なデータが得られた。

1. 緒 言

電力需要の増大に対処するため、従来の配電電圧が6.6 kV から22 kV に昇圧されようとしている。現在この級のケーブルとしては油浸紙絶縁ケーブルの実績が多いが、最近のゴム、プラスチック絶縁技術の発展により信頼度が増大し、各方面で採用されるすう勢にある⁽¹⁾⁽²⁾。また、66~110 kV 恒久回路への使用⁽¹⁾や220 kV まで試作⁽³⁾されるなど電力ケーブルとして重要な地位をになうようになってきている。

一方、この種ケーブルが急速な発展を遂げている原因の一つに、ケーブルの接続、端末、そのほかの付属品の簡便さが大きな魅力であることも見のがせない。近年、各所で配電近代化が推進されており、特に配電系統の特徴として分岐個所を多数必要とするので、小形簡略化した付属品の要求が強い。そこで日立電線株式会社では開発の目標を寸法の小形化、作業の簡略化などに置いたそう入式付属品を試作検討し、すでに実用段階に至っている⁽²⁾⁽⁴⁾。さらに、66~77 kV 用としても工事上の制約などで現地作業に適したそう入式のものを開発している⁽⁵⁾。

各種電力ケーブルおよび付属品の初期電気特性については各方面から莫大(ばくだい)な数のデータが発表されている。しかしながら、電力ケーブルのように非常に長期間の使用を目的とし、かつ事故が発生した場合の損害や、社会的影響が非常に大きい製品に関する資料としては必ずしもじゅうぶんなものとはいえない。

最近、各所でこうした問題が重要視されるようになり、実用状態を模擬し、しかも試験条件を過酷にした、いわゆる実負荷試験(長期加速劣化試験、寿命試験)が実施されており^{(3)(6)~(10)}、ケーブルおよび付属品の重要な特性の一つになってきている。

比較的使用実績の少ない、しかも歴史の浅い高電圧のゴム、プラスチックケーブルおよび付属品の開発、実用化にあたってはどうしても長期安定性をじゅうぶん確認する必要がある。日立電線株式会社では、このための試験設備を整え、できるだけ効果的に実負荷試験を行なうように、次の項目を主眼として検討している。

- (1) 開発製品の問題点摘出とその改良
- (2) V-t特性によるおおよその寿命推定
- (3) 非破壊および破壊特性の関連性

以上の観点から、前述のような各種ケーブルおよび付属品の開発とその信頼性向上のために実負荷試験を重要視しているが本論文では試験に対する考え方と、現在まで得られた結果および経過を述べる。

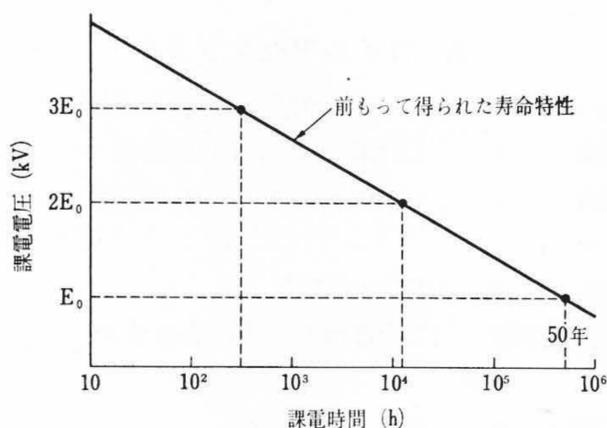


図1 各種試験電圧による寿命推定例

2. 試験に対する考え方

信頼性や寿命を調べる試験法としては、理想的には実用と同一条件で要求寿命年数だけ試験することであるが、現在のような技術進歩の早い時代に適用できない。また、逆に条件が過酷過ぎても実用時に発生し得ないような原因で破壊することもあり、推定が不確定なものになる。寿命推定の方法としては大きく分けて次の三つが考えられる。

- (1) 種々の電界強度で試験してV-t特性をとる。
- (2) すでに実績を有するものと同一条件で比較試験する。
- (3) 非破壊特性(コロナ(部分放電)、誘電正接特性)の経時変化から予想する。

筆者らはこれらのいずれにも着眼しているが最も信頼できるのは(1)であろう。

ゴム、プラスチックケーブルのV-t特性については、J. M. Oudin氏⁽¹¹⁾やF. H. Kreuger氏ら⁽¹²⁾によって検討されている。そのほかケーブルメーカーでは多少の差はあるが同様に実施しているようである。J. M. Oudin氏は、ポリエチレンケーブルに通電サイクルを加えた状態で、種々の電界強度におけるV-t特性を調べた。その結果(図5併記)を式に表わすと次のようになる。

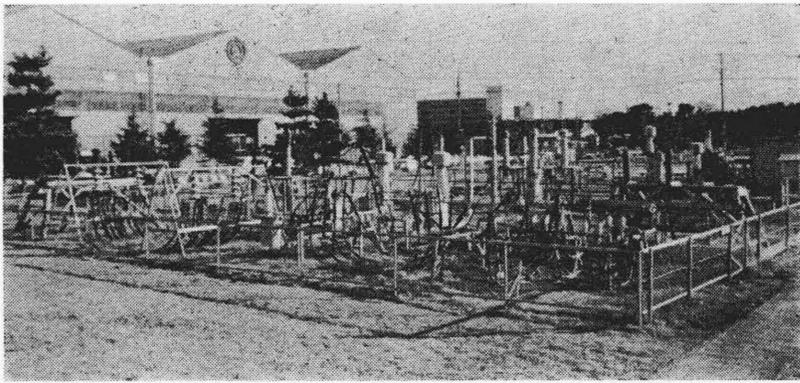
$$G^n \cdot T = \text{constant} \dots \dots \dots (1)$$

ここで、G: 電界強度
 T: 寿命

指数nは材料により異なり図のこう配を示す。したがって同材料のケーブルについてはこの特性を使って、外そう法により比較的短期間の試験で寿命推定が容易にできる。たとえば図1の特性では、電圧E₀で50年の寿命を保証するには、2・E₀の試験電圧では約1,200時間以上、3・E₀では約300時間以上耐えればよいことになる。

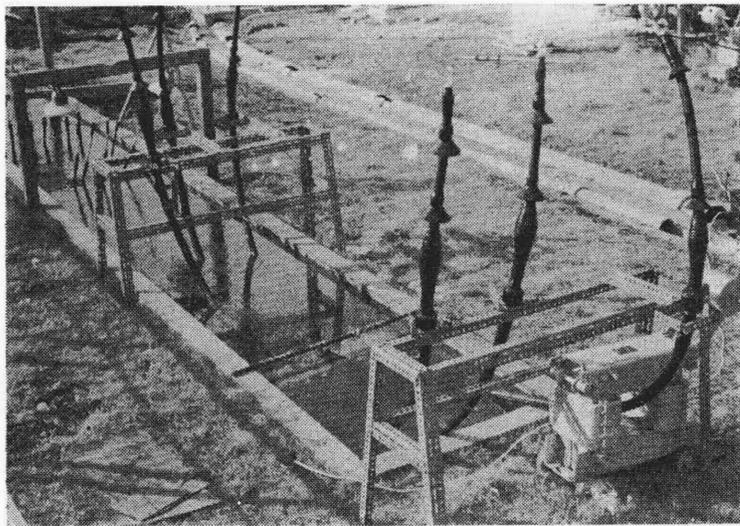
一方、ケーブル付属品についてはこの種の試験結果はほとんどな

* 日立電線株式会社研究所
 ** 日立電線株式会社日高工場



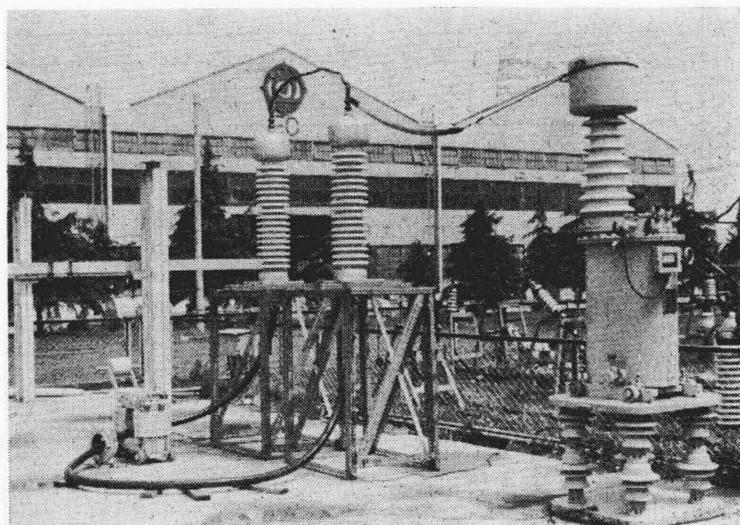
(全景)

図2(a) 試験状況



(浸水試験)

図2(b) 試験状況



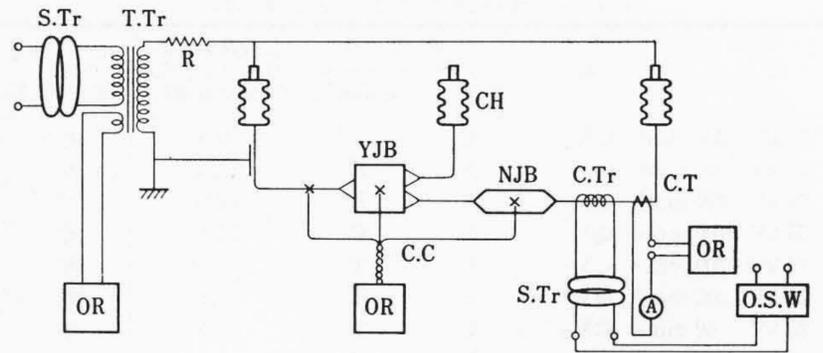
(66 kV 室内入式 CH)

図2(c) 試験状況

く、今のところケーブル本体の考え方に準拠して試験しているのが実状のようである⁽⁹⁾⁽¹³⁾。しかし、絶縁構成が異なる場合もあるので、今後さらに検討すべき課題と考える。

以上のことを念頭に置き、現在次のような試験を実施している。

- (1) おもに新規開発品については比較的短時間で破壊するような課電圧を選定する。
- (2) すでに長年月の実績を有するものも全く同じ条件で試験し対比してみる。
- (3) 比較的使用電圧に近い条件で1~3年程度のより長期の特性もとる。
- (4) 非破壊特性のなかでもゴム、プラスチックケーブルで特に重要視されているコロナ特性と誘電正接の経時変化を調べ寿命との関連性を探索する。
- (5) 前述の $G \cdot T = \text{constant}$ がほぼ成立すると仮定し、ステ



T.Tr:試験用変圧器
S.Tr:スライドトランス
R:保護抵抗
C.Tr:普通形電流変圧器
C.T:計器用変流器
O.R:自動記録計(電圧, 電流温度)
C.C:銅コンスタンタン熱電対
C.H:各種ケーブルヘッド
YJB:Y分岐接続箱
NJB:直線接続箱
O.S.W:自動OH-OFF装置

図3 試験回路の一例

ップアップ方式の長時間破壊値および(1), (3)の結果からおよその寿命推定を試みる。

- (6) 通電は1日1サイクルとし、定格電流通電と導体最高許容温度になる通電の2種類とする。
- (7) 地下孔などでの冠水を考慮し水中浸漬、加水圧試験も一部の試料で行なう。

3. 試験方法

試験はすべて屋外試験場で行ない、実用状態を模擬するため連続課電で1日1サイクル(8時間通電, 16時間シャ断)のヒートサイクルを導体通電方式で行なっている。ケーブルおよび付属品の試験状況は図2に示すとおりである。

試験回路の代表例を図3に示す。電圧、電流、試料表面の温度を自動記録計により常時観測し、異常を検出する。

一方、特性の経時変化については適当な間隔で次のものを測定している。

- (1) コロナ特性
測定器: 低周波コロナ測定器
測定項目: 開始および消滅電圧・開始電圧時の最大放電電荷量
- (2) 誘電正接特性
測定器: シェーリングブリッジ
測定項目: 電圧特性(主として $0.5 \cdot E_0$, $1.0 \cdot E_0$, $1.5 \cdot E_0$, $2.0 \cdot E_0$)

そのほか、絶縁抵抗、静電容量なども測定しているが、ここでは省略する。

4. ケーブルの試験

4.1 供試ケーブル

供試ケーブルは主として架橋ポリエチレン(CV₁)、耐トリイング性を改良した⁽¹⁴⁾添加剤入り架橋ポリエチレン(CV₂)、耐コロナ性熱変形特性を改善した⁽¹⁵⁾充てん剤入り架橋ポリエチレン(QV)およびエチレンプロピレンゴム(EPR)を絶縁体としたもので6.6~77 kVの各種ケーブルについて試験している。試料の代表例は表1に示すとおりである。この中でヒートサイクル条件は、定格電流と導体最高許容温度に達するような電流通電する2種類がある。

4.2 試験結果

4.2.1 非破壊特性の経時変化

これまで数多くの試料のコロナ特性と誘電正接の経時変化を測定しているが、各試料とも、コロナ開始電圧は使用電圧の2倍

表1 各種供試ケーブルと試験条件

試料	半導電層		試験最大電界強度 (kV/mm)	ヒートサイクル有無
	導体上	絶縁体上		
77 kV 200 mm ² CV ₂	E	E	9.4	有
77 kV 100 mm ² QV	E	E	11.4	有
66 kV 100 mm ² CV ₂	E	E	12.0	有
66 kV 100 mm ² QV	E	E	12.0	有
22 kV 200 mm ² CV ₂	E	T	7.5	有
22 kV 200 mm ² QV*	E	T	7.5	有
22 kV 60 mm ² CV ₂	E	T	6.2	有
22 kV 60 mm ² QV	E	T	6.2	有
22 kV 38 mm ² EPR	E	T	5.1	有
6.6 kV 22 mm ² CV ₁	T	T	7.6~18.9	無
6.6 kV 22 mm ² CV ₂	T	T	7.6~22.6	無
6.6 kV 22 mm ² QV	T	T	7.6~22.6	無
6.6 kV 22 mm ² EPR	T	T	6.5~19.5	無

注： E：押出方式，T：テープ巻方式，*：一部浸水課電

(2・E₀) 以上でほとんど変化がみられない。一方、誘電正接は一般に知られているように過酷な条件で浸水させた場合のみ増加がみられる⁽¹⁶⁾。誘電正接の測定例は図4に示すとおりである。

4.2.2 V-t 特性

供試ケーブルの試験電圧における最大電界強度と課電時間の関係を図5に示した。図中に参考まで J.M. Oudin 氏のポリエチレンケーブルの結果および各ケーブルの使用最大電界強度を示してある。

4.3 検討

まず非破壊特性の経時変化はほとんどみられないため、当初の目標の一つである破壊特性との関係を把握(はあく)することは相当困難なものと思われる。しかし、浸水などの特殊な条件に対しては有効な場合もあるかも知れない。

ゴム、プラスチックケーブルのV-t特性は(1)式からもわかるように両対数目盛で図示した場合、直線的に低下することが知られている⁽¹¹⁾⁽¹²⁾。また、このように低下する原因は主としてコロナ放電劣化や⁽¹⁰⁾、トリーイング劣化⁽¹⁴⁾(広義にはコロナ放電劣化を含む)が考えられる。したがって、これらの劣化が起こりにくい構造や材料を選定することにより、寿命特性を改善できることは当然である。

図5からわかるように、筆者らの試験結果によるV-t特性は1962年に報告された J.M. Oudin 氏の報告に比べ、相当改善されている。しかも、この結果の一部には、前述のコロナ放電劣化やトリーイング劣化に対して、好ましくない構造⁽¹⁷⁾といわれる、内、外部ともテープ巻半導電層方式の試料を含んでいる。また、定格電流と導体最高許容温度になる電流によるヒートサイクルの差も、今のところ出ていない。このような特性向上の要因としては、材料特性とケーブル製造技術の向上が考えられる。

一方、さらに現在の使用最大電界強度は少なくとも6.6~22 kVケーブルにおいては、かなり裕度がある結果といえる。66~77 kV用でもさらに高くとれる可能性を暗示している。しかし、機械的な問題や物理、化学的な面からの裕度も考慮しなければならないので、本結果から直ちに絶縁厚を薄くするなどの結論を出すのはむずかしいが、22 kV以下では検討の対象にできる見通しが得られた。

5. 付属品の試験

5.1 供試料

ここでは新しく開発された6.6~22 kV配電近代化用付属品と、66 kVケーブル用そう入式付属品を主体に、直線および分岐接続箱、ケーブルヘッド類がある。供試ケーブルは大部分がCVあるいはQVである。

5.1.1 接続箱

直線接続箱(NJB)とY分岐接続箱(YJB)があるが次の2種

記号	ケーブル	試験ふんい気	測定電圧	コロナ特性
---○---	22kV 60mm ² CV ₂	気中試験	25.4kV	30kV<
---×---	22kV 38mm ² EPR	気中試験	25.4kV	30kV<
—□—	22kV200mm ² QV	気中試験	25.4kV	30kV<
—△—	77kV100mm ² QV	気中試験	88 kV	70kV<
—○—	22kV200mm ² QV	導体内浸水	25.4kV	30kV<
—×—	22kV200mm ² QV	絶縁体外部浸水	25.4kV	30kV<

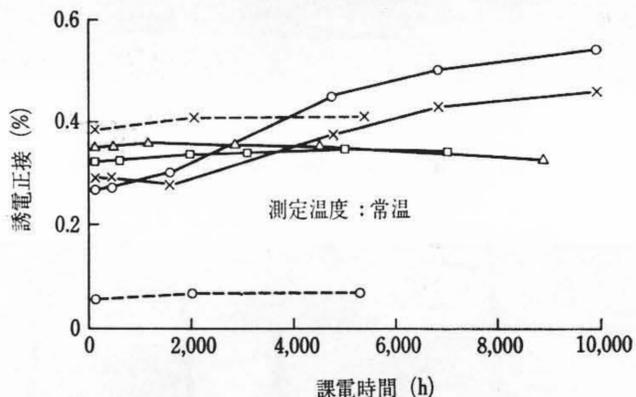


図4 各種ケーブルの誘電正接経時変化

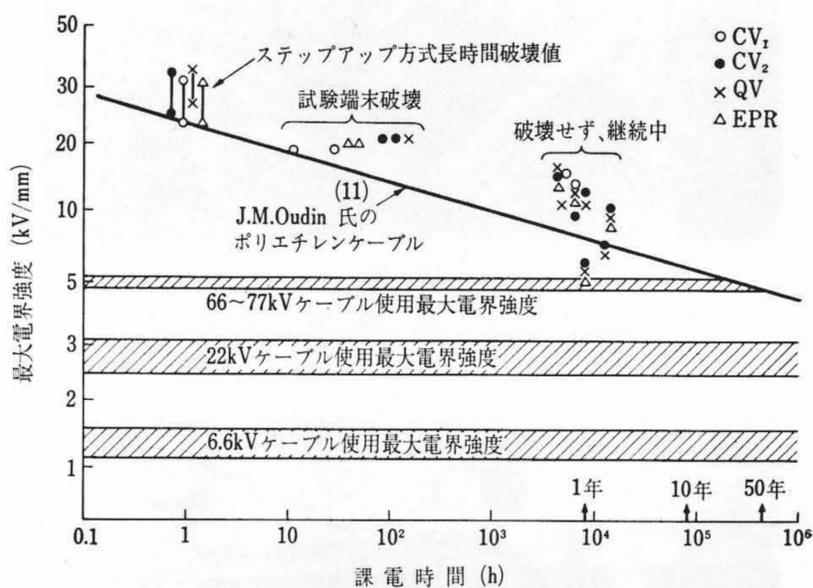


図5 各種ケーブルのV-t特性

類の方式に分けられる。

(1) 自己融着性テープ巻(NJB)

最も古くから使用されているもので、安価なことから現在も22 kV以下で全般に多く使用されている。最近では高電圧用の自己融着性テープが開発され⁽¹⁸⁾77 kVまで使用することを検討している。

(2) そう入式(NJB, YJB)

前述した開発目標に沿って完成したもので、導体接続は着脱可能なテープスリーブをネジ締めし、シールド金具周辺の絶縁には電気特性の良好なエポキシ樹脂を用い、ケーブル遮蔽(しゃへい)端はゴムモールドストレスコーンをそう入し、エポキシ部にスプリングで圧着させる方式のものである。諸部品はNJB, YJB共用である。図6は22 kV CV(QV)用YJBの構造を示したものである。

5.1.2 ケーブルヘッド(CH)

CHにも次の2種類がある。

(1) 自己融着性テープ巻

NJBと同様古くから使用されているもので多くの実績を有するものであり、新製品の特性チェックの目安にもなる。

(2) そう入式

大部分が接続箱と同様にゴムモールドストレスコーンをそう入し、スプリングで圧着するという構造のもので、がい管の内部に

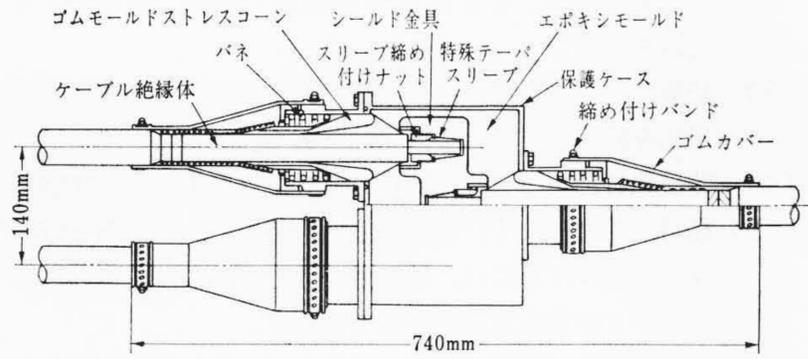


図6 22 kV CV(QV)用そう入式 YJB の構造

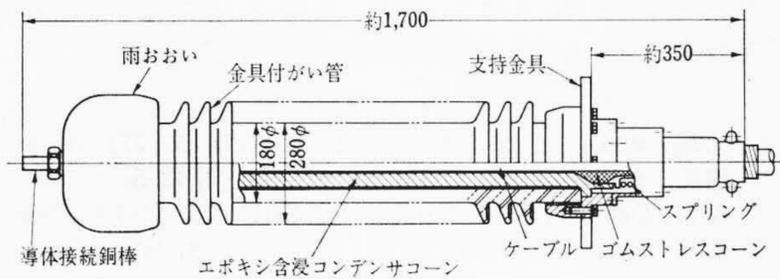


図7 66 kV CV(QV)用コンデンサ形
そう入式 CH の構造

表2 各種供試付属品と試験条件

種類	試料	試験電圧	ヒートサイクル
接	6.6 kV 自己融着性テープ巻 N J B	20 (kV)	(定)
	22 kV 自己融着性テープ巻 N J B	40	(定) (許)
統	66 kV 自己融着性テープ巻 N J B	75, 95	(定)
	6.6 kV そう入式×分岐	20	(定)
部	22 kV そう入式 N J B, Y J B	20, 40	(定) (許)
	6.6 kV 自己融着性テープ巻 CH	20	(定)
端	6.6 kV ゴムモールドそう入式 CH	20	(定)
	6.6 kV がいし形耐塩害用そう入式 CH	20	(定)
末	22 kV 屋内外用そう入式 CH	20, 40	(定)
	66 kV 遮蔽形そう入式 CH	75	(定)
部	66 kV コンデンサ形そう入式 CH	95	(許)
	66 kV コンデンサ形モールド式 CH	75, 95	(定)

注： (定) 定格電流ヒートサイクル
(許) 導体最高許容温度ヒートサイクル

は絶縁コンパウンドを充てんする方式である。供試料として次のものがある。

- (a) 6.6 kV ゴムモールドそう入式 CH⁽⁴⁾
- (b) 6.6 kV がいし形耐塩害用そう入式 CH⁽¹⁹⁾⁽²⁰⁾
- (c) 22 kV 屋内外用そう入式 CH⁽²⁾
- (d) 66 kV 遮蔽形そう入式 CH⁽²¹⁾
- (e) 66 kV コンデンサ形そう入式 CH⁽⁵⁾
- (f) 66 kV コンデンサ形モールド式 CH⁽²²⁾

このうち代表例として 66 kV コンデンサ形そう入式 CH の構造を図7に示す。

以上のように各種試料を多数試験しているが、ここでは 22 kV, 66 kV 用そう入式付属品について記述する。代表的試料の試験条件は表2に示すとおりである。

5.2 試験結果

5.2.1 非破壊特性

ケーブル本体と同様主としてコロナ特性と誘電正接の経時変化を調べているが、破壊特性と結びつけられそうな明確な傾向はつかめていない。図8は 22 kV そう入式 YJB のコロナ特性と誘電

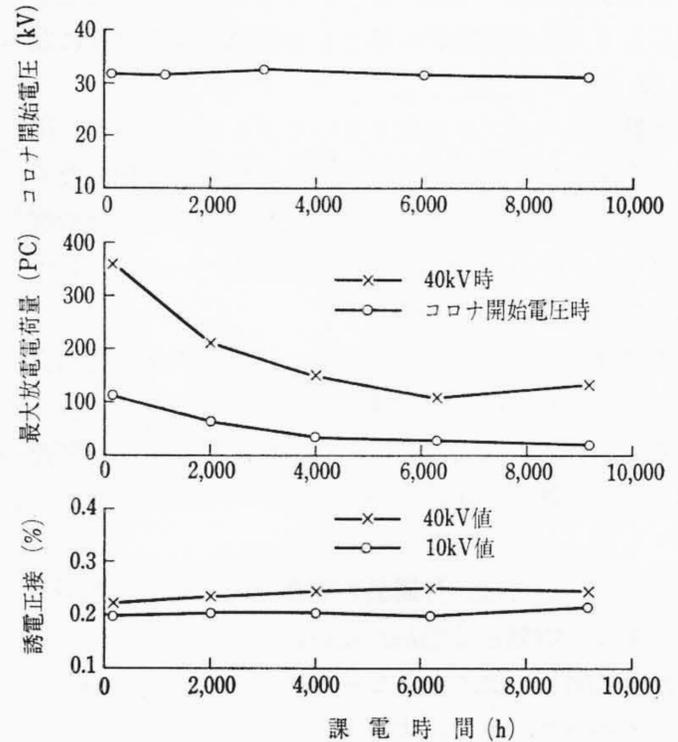


図8 22 kV CV(QV)用そう入式 YJB のコロナ、
誘電正接特性の経時変化

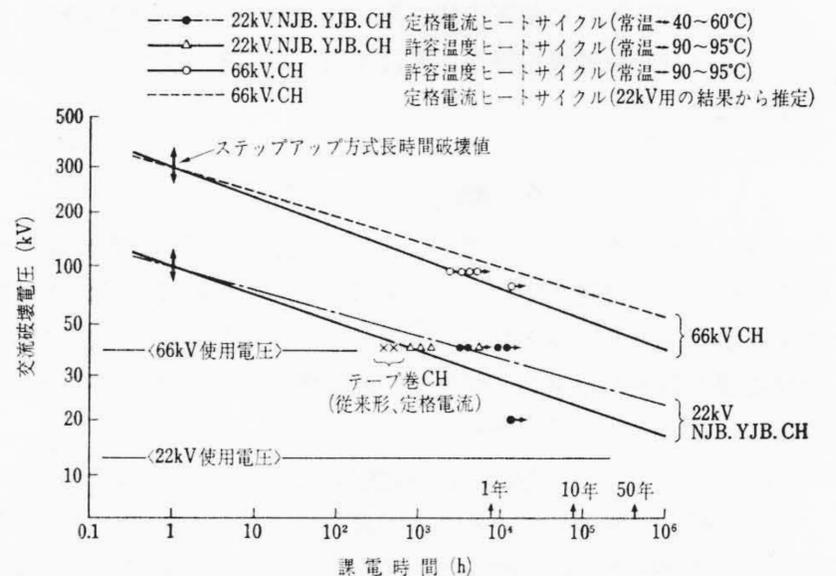


図9 22, 66 kV そう入式付属品の V-t 特性

正接の経時変化の一例を示したものである。ほかのものも、これに類似した傾向であり、コロナ開始電圧はほとんど不変で、最大放電電荷量は徐々に小さくなっていく。誘電正接も同様にほとんど不変である。たまたま破壊した試料についても同様な結果である。

5.2.2 V-t 特性

付属品関係の V-t 特性はケーブル本体と異なり、形状が複雑なため局部的電界が不均一なので、直接電圧で表示されているが電界強度と電圧は比例関係にあるので(1)式は同様に成り立つと考えられる。図9に 22 kV, 66 kV そう入式付属品の V-t 特性を示す。ここで 22 kV 用については定格電流ヒートサイクル(常温↔40~60°C)と導体最高許容温度ヒートサイクル(常温↔90~95°C)の2条件で試験し、その差が明らかにでている。また、比較的使用電圧に近いものとして対地 20 kV でも試験しているが現在のところ破壊事例は皆無である。

66 kV CH では、導体最高許容温度ヒートサイクルのみ行ない、参考までに絶縁構成のほぼ等しい 22 kV 用の結果から、定格電流ヒートサイクルの場合について算出(推定)してみた。一方、22 kV 用で従来、長年月の使用実績のある自己融着性テープ巻 CH, NJB も同条件で試験しているが、NJB はそう入式とほぼ同一特性であるが CH は図9に例示したように早期に破壊している。

ここに示した以外の試料についても同様の寿命推定を行ない、ほぼじゅうぶんな特性であることを確認できるようになった。

5.3 検 討

コロナ特性はケーブル本体よりいくぶん良くないが、現在までの結果から全般的にコロナ開始電圧は大きな経時変化はなく、最大放電電荷量は徐々に小さくなる傾向がみられる。これは放電している部分のギャップや、ボイドの表面抵抗がしだいに低下してくるためと思われる。

試料の破壊はケーブル本体と同様に、劣化が局部的に発生し（たとえばトリイング的に）破壊に至るといふケースが多いのではないかと考えられる。これらコロナ特性と破壊特性を関連づけるには、さらにきめ細かな測定と多くのデータの積み重ねが必要であろう。

誘電正接については、付属品の場合、局部的な問題が多く、劣化検出にはあまり有効とは思われない。

V-t特性に関しては、まずヒートサイクル条件でかなりの差が出ることがわかった。また、大胆な仮定のもので寿命を推定してみると相当のばらつきを考慮しても30~50年程度保証できる見通しを得た。ただし、付属品の寿命推定に、ケーブルと同様に(1)式が成立するかどうか確認する必要がある、現在検討中である。

一方、従来長年月の使用実績のある自己融着性テープ巻CHと比較し、より良好な結果を得たことは実用化を図るうえで大きな目安となった。

6. 結 言

ゴム、プラスチックケーブルおよび付属品の長期実負荷試験について述べたが、現時点では必ずしもじゅうぶん信頼度の高い寿命特性を推定できたとはいえない。しかしながら、開発途上の新製品に対する要求条件を考慮し、できるだけ能率的な試験によって次のような結果を得ることができた。

- (1) ケーブルの特性は、材料特性および製造技術の向上により、相当改善されていることが確認できた。したがって、一部では物理、化学的保護の改良とあいまって使用電界強度の増大も可能と考えられる見通しが得られた。
- (2) 付属品に対するおおよその寿命推定については、相当のば

らつきを考慮しても30~50年程度の寿命は保証できそうである。

- (3) 新製品に対しては、従来実績のあるものと対比するのも実用化を検証するうえで効果的である。
- (4) 非破壊特性(コロナ、誘電正接特性)は長期実負荷試験での経時変化も少なく、良好な値を保持する。これらと破壊特性を関連づけるには、現時点ではむづかしく、さらに多くのデータの積み重ねが必要であろう。

以上のような試験は時間、設備、労力などで非能率的な面もあるが、より信頼できる製品を開発するという見地から重要なものと考ええる。

終わりに、本研究にあたりご指導、ご協力いただいた日立電線株式会社日高工場および研究所関係各位に感謝の意を表わす。

参 考 文 献

- (1) 大堀, 浜田, 加藤, 北村, 佐藤: 日立評論 51, 371 (昭44-4)
- (2) 増岡, 依田, 小林: OHM 55 (6) 30 (昭43-5)
- (3) A. D. Devaux, J. M. Oudin: CIGRE No. 21-10 (1968)
- (4) 浜田, 村木, 井出, 多田, 佐藤: 日立評論 51, 945 (昭44-10)
- (5) 佐藤, 熊谷, 森屋, 加藤: 電学東支大 No. 332 (昭44-10)
- (6) J. L. Williams, A. Zanona, A. R. Lee: IEEE Transaction Paper No. 68 TP 14-PWR (1968)
- (7) T. Lundyren: CIGRE No. 21-03 (1968)
- (8) N. D. Kenney, M. J. Kolopoulos: CIGRE No. 21-07 (1968)
- (9) 依田, 熊谷, 浜田, 井出: 電学東支大 No. 317 (昭43-10)
- (10) 安井, 速水: 住友電気 第97号 44 (昭43-2)
- (11) J. M. Oudin: CIGRE No. 209 (1962)
- (12) F. H. Kreuger: CIGRE No. 21-02 (1968)
- (13) 栗原, 倉, 若林, 辻: 大日本電線時報 第41号 29 (昭44-3)
- (14) 依田, 坂場: 日立評論 51, 366 (昭44-4)
- (15) 小椋, 坂場, 川和田: 電学東支大 No. 100 (昭42-10)
- (16) 須貝, 熊谷: 日立評論 51, 241 (昭44-3)
- (17) Y. Fujisawa, T. Yasui, Y. Kawasaki, H. Matsumura: IEEE Transaction Paper No. 68 TP 13-PWR (1968)
- (18) 高畑, 佐藤, 熊谷, 浜田, 川和田: 電四連大 No. 236 (昭45-4)
- (19) 赤川, 渡辺, 森屋, 熊谷: 電学東支大 No. 326 (昭44-10)
- (20) 漆山, 竹内, 依田, 増岡: 電学東支大 No. 327 (昭44-10)
- (21) 浜田, 石下, 依田, 熊谷, 西村: 電学東支大 No. 310 (昭42-10)
- (22) 依田, 佐藤, 熊谷, 浜田: 日立評論 46, 1171 (昭39-7)