CV ケーブルの絶縁特性に与える弱点 および水分の影響

正員 勝田 銀造 (東京電力)
 正員 戸谷 敦 (東京電力)
 正員 金岡 護 (日立電線)
 正員 片貝 昭史 (日立電線)
 正員 丸山 義雄 (古河電工)
 正員 武藤 秀二 (古河電工)

Influence of Defects and Moisture on Insulation Characteristics of XLPE Insulated Cable

Ginzo Katsuta, Member, Atsushi Toya, Member (Tokyo Electric Power Co., Inc.), Mamoru Kanaoka, Member, Shoshi Katakai, Member (Hitachi Cable, Ltd.), Yoshio Maruyama, Member, Hideji Muto, Member, (Furukawa Electric Co., Ltd.)

Sample cables including a few types of defects (such as voids, contaminants, and protrusions) with more volume than usual, were prepared intentionally for clarifying how these defects separately affect insulation characteristics, under the presence/non-presence of moisture. In the case of void inclusion, insulation characteristics is even more susceptible to AC voltage than impulse voltage, and the distribution of lifetimes is classified into a worn-out failure type due to discharge deterioration. While protrusions and some other contaminants can greatly deteriorate original dielectric strength, these defects have a relatively slight effect on long-term endurance in the atmosphere. Therefore, the distribution of lifetimes is classified into an early failure type. With reference to influence of moisture, in strong electric field (exceeding 15 kV/mm) and in a region of short-term, there is an increase in harmfulness around defects with water absorbed, thereby inducing electrical trees and resulting in a breakdown. In light electric field (no more than 15 kV/mm) and in a region of a long-term, harmfulness of defects will not deepen to a considerable extent, and growth of water trees is influential very possibly.

キーワード：CV ケーブル，破壊特性， $V-t$ 特性，浸水課電，水分，ボイド，異物，突起，水トリー

1. ま え が き

架橋ポリエチレンを絶縁体とする CV ケーブルは本質的に低損失 (ϵ , $\tan \delta$ が小さい) で絶縁耐力が高く、また油を使用しないなど電力ケーブルとして非常に魅力的なケーブルである。しかし、開発当初の CV ケーブルには、残留水分、ボイド、異物および内外半導電層の突起などの弱点が存在していたため、本来の絶縁

性能が十分に発揮されなかった。

これらの弱点を除去するため、乾式架橋法、三層同時押出法の開発、異物の混入防止対策、更には架橋・冷却工程のコンピュータ解析など、ケーブル製造全般にわたる改善が図られ、その絶縁性能は飛躍的に向上し、既に 500 kV CV ケーブルが実用化され⁽¹⁾、また中間接続部を有する本格的な 275 kV CV ケーブル線路も運転されている⁽²⁾。

一方、前述した CV ケーブルの製造技術に関する数多くの改善は、同時期あるいは継続的に実施されてきたため、残留水分、ボイド、異物、突起が絶縁性能に与える影響についての定量的な解析は必ずしも十分ではなく、今後更に CV ケーブルの絶縁性能の向上（高性能化、高信頼化）を図るためには、これら個々の弱点がケーブル性能に与える影響を明らかにすることが重要となる。

このような観点から、著者らは前報⁽³⁾の CV ケーブルの $V-t$ 特性評価に引き続き、通常管理レベル以上の大きさのボイド、異物、突起を有するケーブルを試作し、これら弱点が CV ケーブルの絶縁性能に与える影響について検討を行うと共に、外部から浸入した水が CV ケーブルの長期性能に与える影響について詳細な検討を行った。

2. 供試ケーブルおよび実験方法

〈2・1〉 供試ケーブル構造 本研究に供試したケーブルは、現用の超高压 CV ケーブルと同一材料、同一製造方式（乾式架橋、三層同時押出）で製造した 22 kV 100 mm² (A ケーブル) および 150 mm² (B ケーブル) の通常 CV ケーブルと、次節で述べる手法により A ケーブルに人為的にボイド、異物、突起を設けた弱点入り CV ケーブルである。表 1 にこれらのケ

表 1 供試ケーブルの構造
Table 1. Construction of tested cables.

項 目	ケーブル A	ケーブル B
電圧階級	22 kV	
導体		
断面積 (mm ²)	100	150
外径 (mmφ)	12.0	14.7
内部半導電層厚さ (mm)	1.0	1.1
絶縁体		
厚さ (mm)	6.0	6.0
外径 (mmφ)	26.0	28.9
外部半導電層厚さ (mm)	1.0	0.5
遮蔽(ワイヤード 直径×本数)	1.2×20	1.2×20
ビニルシース厚さ (mm)	3.0	3.0
ケーブル外径 (mmφ)	38.4	40.1

表 2 弱点入りケーブルの作成条件
Table 2. Preparation of XLPE cables containing defects.

弱 点	ケーブル NO.	弱点の作成法	弱点の最大実測値 ^{*)}
ボイド	A-V 1	架橋時のガス圧を減圧	2.0 mmφ
	A-V 2	ガス圧	1.5 mmφ
	A-V 3	V1 < V2 < V3	1.0 mmφ
	A-V 3	V1 < V2 < V3	1.0 mmφ
異 物 (塵埃、Si、銅粉、Si、 繊維、不純物)	A-C 1	市販グレードレジンをメッシュによりスクリーニング	200 μm
	A-C 2	メッシュの目開き C1 > C2	70 μm
突 起	A-P	内部半導電層ベレットに A1 粉を混練り	280 μm

注) ボイド：観察体積 (70.9 cm³) 中で観察された最大直径
異 物：観察体積 (19.7 cm³) 中で観察された最大の大きさ
突 起：前駆遮断試験で抽出された突起の最大の高さ

ーブル構造を示す。

〈2・2〉 弱点入りケーブルの作成法 CV ケーブルの絶縁特性に及ぼす各種弱点の影響を調査するため、通常管理レベルより大きいボイド（3種）、異物（2種）、突起（内部半導電層突起：1種）を有するケーブルを試作した。表 2 が弱点入りケーブルの作成条件およびそれぞれのケーブルの弱点の最大実測値をまとめたものである。なお、これらのケーブルの製造にあたっては、弱点作成条件以外はすべて現用超高压 CV ケーブルと同一とした。

〈2・3〉 実験条件

(1) 初期性能実験 表 2 に示した 6 種類の弱点入りケーブルおよび同時に製造した通常ケーブルに対し、AC および Imp 破壊試験を実施し、ボイド、異物、突起のそれぞれが CV ケーブルの初期性能に与える影響について調査した。表 3 に各ケーブルの破壊試験方法を示す。試験ケーブル長はすべて 8 m（有効長）とした。

(2) 長期性能試験 表 4 は本研究で実施した長期性能試験の条件である。CV ケーブルの長期性能を議論する場合、単にボイド、異物、突起の影響（実験

表 3 破壊試験方法

Table 3. Testing condition of initial breakdown test.

ケーブル	ケーブル NO.	A C	Imp
通常ケーブル	A	240kV/10分以後 20kV/10分 ステップ昇圧	480kV/3回以後 30kV/3回 ステップ昇圧
ボイド入りケーブル 及び 異物入りケーブル	A-V 1 A-V 2 A-V 3 A-C 1 A-C 2	80kV/10分以後 20kV/10分 ステップ昇圧	300kV/3回以後 30kV/3回 ステップ昇圧
突起入りケーブル	A-P	40kV/10分以後 10kV/10分 ステップ昇圧	240kV/3回以後 30kV/3回 ステップ昇圧

表 4 長期絶縁性能試験一覧
Table 4. Testing condition of long-term aging test.

実験 NO.	布設条件	ケーブル (弱点種類)	ケーブル NO.	試験条件		浸水 ^{*)} 前処理
				電圧 (kV)	電界 (kV/mm)	
1	気 中	ボイド	A-V 3	120	20.0	なし
2		異 物	A-C 1	120	20.0	
3		突 起	A-P	60	10.0	
4				90	15.0	
5	水 中 (外導直接 浸水)	通 常 ケーブル	A-W	75	12.5	あり
6				60	10.0	
7				180	30.0	
8				110	18.3	
9	(ヒートサイクル 有) ^{**)}	B-W		95	15.8	なし
10				80	13.3	
11				60	10.0	
12				60	10.0	

注1) 浸水前処理条件：70℃の温水に30日間浸漬

注2) ヒートサイクル：導体 常温～80℃、8時間on、16時間off

図 1 CV ケーブルの破壊性能に与える弱点の影響 (初期特性)
Fig. 1. Influence of defects on breakdown strength of XLPE cable.

NO.1~3) だけでなく、水分の影響についても検討することが不可欠である。従来より浸水下の $V-t$ 特性に関する研究が盛んに行われてきた⁽⁴⁾が、浸水課電が進行するにつれて

(i) 絶縁体中への水の浸入

(ii) 絶縁体中での水トリーの発生・伸展

などの新しい弱点の形成があるために、定量的にはもちろん定性的にも不明な点が多いのが現状である。そこで水の影響として絶縁体中への水の浸入およびこれに伴う水トリーの発生、伸展を考慮し、これらの関係を明確にするため、通常ケーブルを用いて浸水前処理のある場合 (実験 NO. 7~10) とない場合 (実験 NO. 4~6) について実験を行った。

3. 弱点が絶縁特性に及ぼす影響

〈3・1〉 初期特性に及ぼす影響 図 1 は、通常ケーブルおよび各種弱点入りケーブルの初期破壊試験結果をそれぞれの弱点の大きさに整理したものである。また、図 2 は弱点を起点とした破壊の様子を示したものである。以下、それぞれの弱点の初期破壊性能に及ぼす影響について述べる。

(1) ボイドの影響 図 1 (a) によれば、AC 破壊値はボイドの大きさと共に低下することがわかる。今回のボイド入りケーブルの部分放電開始電圧は 10~20 kV (測定感度: 5 pC) であり、AC 破壊試験時には放電が激しく起こっていたと推定される。従って、この放電劣化により破壊が生じたものと考えられる。一方、Imp 電圧を印加したときは、図 2 (a) に示したようにボイドを起点として破壊が起こるものの破壊値の低下はほとんど認められない。Imp 試験下では一発一発の課電で放電は起こるものの、放電発生

(a) ボイドケーブルの破壊状況 (A-V 2 ケーブル; Imp 780 kV)

(b) 突起からの電気トリー (A-P ケーブル; AC 150 kV)

図 2 弱点からの破壊例
Fig. 2. Breakdown channels from defects in XLPE cable insulation.

頻度は AC 試験に比べると非常に少なく、このため破壊値の低下が小さかったと推定される。

(2) 異物の影響 図 1 (b) より、AC 破壊値は異物の大きさがある値 (本実験の観察結果では最大 $70 \mu\text{m}$) までは変化しないが、それ以上の大きさでは低下の傾向を示す。また、Imp 破壊値は異物の大きさと共に低下することがわかる。Imp 破壊値が異物の大きさと共に低下するのは、本試料の異物の種類がほぼ同一であることを考慮すれば、CV ケーブルの破壊強度が混入異物の大きさに依存することを示している。一方、AC 電圧に対して $70 \mu\text{m}$ 以下で破壊値がほとんど変わらないことは、異物先端の局部高電界領域において空間電荷の形成⁽⁵⁾あるいは架橋剤分解残渣の凝集⁽⁶⁾による電界緩和現象が現れている可能性を示唆している。

(3) 突起の影響 突起入りケーブルの初期破壊強度は図 1 (c) に示すように AC・Imp 破壊値共に著しく低下している。突起が CV ケーブルの破壊性能に与える影響は、比誘電率の違い、界面状態を除けば、基本的には異物の場合と同様に考えられる。図 2 (b) は前駆遮断手法⁽⁷⁾によって抽出した突起からの電気トリーの代表例であるが、本試料における突起の大きさは異物入りケーブルの異物の大きさに比べ大きいいため、破壊値低下が顕著に現れたと推定される。

〈3・2〉 長期特性 (気中課電) に及ぼす影響

表 2 に示した弱点入りケーブル中からそれぞれ代表として 1 種 (A-V₃, A-C₁, A-P) を選定し、気中布設条件下で長期課電試験を実施した。初期破壊強度がケーブルによって異なるため、ボイド入りケーブル (実験 NO. 1)、および異物入りケーブル (実験 NO. 2) に対しては課電電圧を 120 kV (20 kV/mm)、突起入りケーブル (実験 NO. 3) に対しては 60 kV (10 kV/mm) とした。図 3 は、各ケーブルの長期試験で得られた破壊データのワイブルプロット (寿命分布特性)⁽³⁾ である。図中には各データの寿命の分布を表す形状パラメータ a の値と 50% 寿命値も記載した。一方、図 4 は初期試験結果と長期試験結果で得られたデータを V - t 特性 ($\log E$ vs. $\log t$) としてプロットしたものである。ここでは、初期試験での破壊時間として、ステップ昇圧時間、10 分でプロットし、初期性能の 50% 値と寿命の 50% 値を結んだ直線の傾きから求めた寿命指数 n の値も記載した。ただし、 n 値は寿命データのみで議論すべきであるため、ここでは参考値として () 中に記した。なお、図 4 には著者らが行った通常ケーブルの気中課電の V - t 特性⁽³⁾ も併記している。以下これらの実験結果について述べる。

図 3 弱点入りケーブルの気中課電下での寿命分布

Fig. 3. Lifetime distribution of XLPE cables containing artificial defects in free air.

図 4 通常ケーブルおよび弱点入りケーブルの気中課電下での V - t 特性

Fig. 4. V - t characteristics of normal XLPE cable and XLPE cables containing artificial defects installed in free air.

(1) ボイドの影響 図 3 のボイド入りケーブルの寿命分布の形状パラメータ a は $a > 1$ であり、劣化が時間と共に進行する蓄積摩耗型であることを示している。このケーブルの部分放電開始電圧が 18 kV であったのに対し、長期試験での課電電圧 ($V=120$ kV) はかなり高く、破壊は明らかに放電劣化による蓄積摩耗劣化と推定され、形状パラメータ a が $a > 1$ であったことは、これを裏付ける結果である。更に、図 3 の寿命分布において寿命の最低値位置パラメータ t_L の存在が示唆されるが、これは放電によって劣化が蓄積され、破壊に至るまでの潜伏期間があることを予想させるものである。

(2) 異物、突起の影響 異物入りケーブルと突

起入りケーブルの寿命分布および $V-t$ 特性は、絶対値は異なるものの類似の特性をもつ。すなわち、両ケーブルの寿命分布の形状パラメータ a はいずれも $a < 1$ であり、破壊は初期故障型である。また寿命指数 n は異物、突起それぞれ $n=11$, $n=14$ であり、ボイドに比べて大きくなっている。特に突起入りケーブルは初期破壊強度は低いものの、気中課電の n 値は大きい。

(3) 通常ケーブルとの比較 図4から明らかなように、弱点入りケーブルの破壊時間は、通常ケーブルと比べ、課電電界が低いにもかかわらず短くなっている。一方、通常ケーブルの $V-t$ 特性は、一つの直線では表せず、高電界側 ($E=40\sim50$ kV/mm) では $n=9.6$ 、低電界側 ($E=30\sim40$ kV/mm) では $n=22$ と n 値は低電界側で大きくなっており、電界によって異なる傾向を示している。従って、今回の弱点入りケーブルのように、初期破壊値と1種類の課電電界のデータから求めた n 値で議論することは多少無理があるが、異物あるいは突起入りケーブルの n 値が、通常ケーブルの n 値に近く、かつ通常ケーブルの寿命分布も初期故障型あるいは偶発型であったことは⁽³⁾、現行ケーブルの気中課電下での劣化メカニズムが、異物あるいは突起と類似したものであることを示唆するものである。

〈3・3〉 弱点周辺の電荷挙動の検討 弱点周辺には局部的に高電界が発生し、通常部に比べ電荷挙動が活発化することが予想される。そこで、ダストフィガー(粉像)⁽⁸⁾ によって弱点周辺の電荷挙動を検討した。試料は、ボイドおよび突起入りケーブルである。試料に、4種の電圧波形 (AC, DC, 半波整流, インパルス) を所定の時間あるいは回数を印加したのち、試料を切断しカラー複写機用トナー (青色: 正電荷に付着, 赤色: 負電荷に付着) を振りかけ、突起, ボイド周辺の電荷状況を観察した。表5にその結果をまとめると共に得られた代表的な像を図5(a), (b)に示す。(a)図からわかるように、ボイド周辺にはボウタイ状にトナー付着が見られ、それらの極性は対向電極に対しそれぞれ異極性の電荷が観測された。また、突起周辺では、(b)図に示すように半導電層と同極性電荷が観測された。表5に示したように、トナー付着はDCだけでなく半波整流印加時にも観察された。直流印加時に空間電荷が形成されることは、よく知られており、特に突起周辺のトナー付着は、明らかに電界増大による電極からのホモ電荷注入と考えられる。更に、このトナー付着は半波整流下でも観察され、AC電界下でも半サイクル印加中に電荷注入が起こること

表5 弱点周辺のダストフィガーの有無

Table 5. Existence of dust figure pattern around defects.

印加波形	印加電圧/印加時間(回数)	弱 点 の 種 類	
		ボイド	突 起
A C	40kV/10分	無	無
D C	90kV/10分	有	有
半波整流	90kV(peak)/60分	有	有
インパルス	290kV/300回	無	無

↑ 外部半導電層 (極性: 正)

↓ 内部半導電層 (極性: 負)

(a) ボイド
(DC: -90 kV/10 分課電)

内部半導電層 (極性: 正)

青トナー: 正電荷に付着
赤トナー: 負電荷に付着(b) 突起
(半波整流: +90 kV/60 分課電)

図5 弱点近傍のダストフィガー

Fig. 5. Dust figure patterns observed around defects.

を示唆している。一方、ACやインパルス課電下ではトナーの付着は見られなかった。これは、AC課電では半サイクルごとに電荷の注入と引抜きが起こり、見掛け上電荷注入の痕跡を残さなかったものと思われる。またインパルス課電では、課電時間が空間電荷形成に要する時間よりも短いためと考えられる。ボイド周辺のトナー付着は、ボイド放電による電荷の堆積と絶縁体中への拡散、あるいはボイド壁面に析出した架橋分解残渣成分の解離による可能性があるが、放電開始電圧よりはるかに高い電圧を300回印加したインパルス課電試料でも、その痕跡が見られなかったことから、後者の可能性が高いと思われる。本実験結果は、ケーブル絶縁体中の弱点の周辺では、電荷の注入引抜きが盛んに起こっていることを示唆するものである。

4. 水分が絶縁特性に及ぼす影響

〈4・1〉 通常ケーブルの浸水課電特性

(1) 浸水 $V-t$ 特性 CVケーブルの絶縁特性に与える水分の影響を、'水の浸入'と'水トリリーの形成'に分け、それらが $V-t$ 特性にどのような影響を与えるかを調査するために、課電前に絶縁体中へ水を浸入させた試料 ($B-W$: 70°C 温水中に30日間外導側から直接浸漬する。実験 NO. 7~10) と課電開始と同時に外導側から浸水させる試料 [$A-W$ (前処理なし) 実験 NO. 4~6] を用意し、それらの $V-t$ 特性を

図 6 浸水課電下での $V-t$ 特性
Fig. 6. $V-t$ characteristics of XLPE cables installed in water.

比較することにした。なお議論が簡単になるように、供試ケーブルの他弱点（ボイド・異物・突起）レベルは通常製造管理値内のものとした。なお、今回実験した電界はいずれも運転電界に比較してかなり高いレベルであるが、以下の議論においては便宜上、試験範囲内で高いレベル（15 kV/mm 以上）を高電界側、それ以外を低電界側と名付けることにする。

浸水 $V-t$ 特性を図 6 に示す。各電界とも試料数 5~10 本で実験を行っている（図中、横実線はそれらの結果の範囲を、丸点是一个の破壊を示す）。試料 A-W・B-W とも低電界になるほど破壊までの時間が長くなる特性を示し、ケーブル種類の差（製造社・使用材料）を考慮しても、以下の特徴があることがわかった。

(i) $V-t$ 特性を $V^n t = \text{Const.}$ で評価すると n 値が課電電界に応じて変化していることがわかる。今回の実験範囲内（10~30 kV/mm）では（高電界側の n 値） $\leq$ （低電界側の n 値）である。

(ii) $V-t$ 特性の様相は前処理の有無で違いがあり、前処理した試料 B-W で高電界側での破壊時間の低下割合が大きく、破壊時間が短い（実験 NO. 4 と NO. 9 の比較）が、この時間差は前処理時間にほぼ等しい。

(2) 課電ケーブルの材料劣化特性 前処理の有無で浸水課電時の $V-t$ 特性に差異があることがわかったが、この原因を検討するために、供試ケーブルの劣化状態について調査した。浸水課電をすることによって絶縁体中に生じる変化量として、

- (i) 水分量の増大
- (ii) 水トリーの発生・伸展
- (iii) その他の変化：(a) 絶縁体の平均的な酸化、

図 7 課電時間と絶縁体水分量の関係
Fig. 7. Relationship between aging time and water content.

(b) 架橋剤分解残渣の残存量

を考えこれらについて考察した。

(i) 水の浸入 図 7 に絶縁体中層部（破壊孔近傍、カールフィッシャー法で測定）の水分量を示す。また前処理なしの場合、シース内浸水で絶縁体水分量はどう変化していくかを調査するために、ケーブル B を浸水課電と同一実験条件（ただし課電なし）で浸水させた試料の水分量変化も示した（◇印）。

前処理なしの試料では、初期には 30 ppm 程度の水分量しか含んでいない。これに対して、前処理ありの試料では、課電前に既に絶縁体中に約 100 ppm 程度の水分が認められた。また両者共課電時間が長くなると共に水分量が増加する傾向が認められるが、これは浸水下での課電による水分の増加と考えられる。例えば、15.8 kV/mm 課電の前処理実施試料（実験 NO. 9）では、破壊時（約 50~100 時間）に 100~180 ppm の水分を含んでいる。一方、前処理なし試料の場合にその時間領域では、初期水分と同等程度しか水分がないが、時間が経つにつれ水分量は増大し、破壊時間が約 1,200~1,700 時間のサンプル（実験 NO. 4）では外部からの絶縁体への水の浸入が十分進んでおり、その水分量は 180 ppm 前後となっている。すなわち、前処理なしの場合には「絶縁体中への水の浸入現象」が十分進行するのにある程度の時間が必要であるため、 $V-t$ 特性が前処理ありの場合に比較して長時間方向にシフトするのであろう。

(ii) 水トリーの発生分布 すべてのサンプルにおいて、内外半導電層を発生源とする Vented Tree は認められず、発生している水トリーはすべて Bow-Tie Tree（以下、BTT と略記）であった。

図 8 浸水課電後の BTT 累積密度分布 (1)
Fig.8. BTT density distribution after aging (1).

前処理あり試料について発生源別に BTT 分布を示したのが図 8 である。課電電界 15 kV/mm 以上のもの (実験 NO. 7~9) では破壊時間が比較的短い (100 時間未満) ために、BTT は最大でも 150 μm 以下である。つまり $V-t$ 特性が顕著に低下する領域 (30~15 kV/mm) で発生した BTT は小さく、破壊に直接関与していないと考えらる。BTT の伸びが小さいにもかかわらず絶縁破壊電圧の低下が顕著に現れたことは、破壊原因が絶縁体中への水の浸入によることを示唆している。この場合に低電界になるに従い n 値が極端に大きくなるが、これは絶縁体中への水の浸入のみによる $V-t$ 特性の低下にしきい値があること、つまり水の浸入によって破壊値は低下するが、その低下に限度があることを示唆している。水の浸入によりなぜ破壊が促進されるかについては 4.3 節で議論する。

前処理の有無にかかわらず破壊時間が 1,200 時間以上の試料 (実験 NO. 4~6, 10, この実験範囲内では比較的低電界での破壊) の BTT 累積分布を示したのが図 9 である。前処理の有無にかかわらず、どの場合も BTT 最大長は 400 μm 以上であり、破壊までの時間が長いものほど BTT の最大長・発生量共に大きくなる傾向にある。このような大きな BTT は異物を発生源にしたものであった (図 8 参照)。すなわち、比較的低電界・長時間破壊領域品では水の浸入以外に BTT の発生・伸展 (特に異物からのもの) が顕著に認められ、これが新しい弱点として破壊に関与する可

図 9 浸水課電後の BTT 累積密度分布 (2)
Fig.9. BTT density distribution after aging (2).

能性が出てくる。すなわち浸水課電劣化では、水の浸入を受けた既存弱点 (ボイド・異物・突起) と課電によって生じる新しい弱点 (水トリー) の発生が考えられ、破壊はその電界での両者の寄与の大小に関係すると考えられる。

(iii) その他の劣化要因 本研究では、浸水課電時に絶縁体のマクロな変質が発生進行しないかどうかを調査した。13.3 kV/mm で 8,000 時間課電した前処理実施試料をサンプリングし試料とした (実験 NO. 10)。

(a) 絶縁体酸化 赤外吸収分光によるカルボキシル基の状態を観察した。結果を図 10 に示す。課電前の初期ケーブルの値と比較して変化がなく、絶縁体全体のマクロな酸化はないことがわかった。更に、示差走査熱量測定によって測定した酸化開始温度は 250°C 前後であり、課電の有無で差は認められなかった。なお、異物の周辺界面や半導電層界面などのマイクロ領域での酸化程度の増大の有無については更に調査する必要がある。

(b) 架橋剤分解残渣 赤外吸収分光法により、AC 破壊特性に影響を与える代表的な分解残渣⁽⁶⁾であるアセトフェノン量を測定した。結果を図 10 に示す (なお、1 箇月程度の浸漬前処理ではその残存量に大きな変化はなく、初期ケーブルと同程度に含まれている)。8,000 時間浸水課電した試料においては、初期ケ

図 10 課電後の絶縁体酸化およびアセトフェノン程度

Fig. 10. Degree of oxidation and Acetophenone content in aged XLPE cable.

ープルと比較して拡散のため絶縁体中にあまり残存していない。しかし同一電界で課電した気中課電ケーブル (13,000 時間経過しても破壊せずまた残存 AC 破壊値も初期品に比較して低下していない) においても同様にアセトフェノンは拡散している。従って、残渣の拡散は $V-t$ 特性に影響を直接与えていないと考えられる。

＜4・2＞ 弱点入りケーブルの浸水課電特性

(1) 浸水 $V-t$ 特性 通常の製造管理値レベル以上のボイド・異物を設けたケーブルに対してシース内浸水課電実験 (実験 NO. 11~12) を実施した。ボイド入りケーブルではまだ破壊を生じていない (4,500 時間) が、異物入りケーブルでは 8,834 時間で 1 回破壊した。これらの結果は通常レベルの $V-t$ 特性 (実験 NO. 6) とほぼ同じ特性であった。

(2) 水トリーの発生分布 発生した水トリーはすべて BTT であった。破壊点近傍の BTT の発生分布も図 9 に示したように、同一条件で実験に供試した通常ケーブル (実験 NO. 6) での結果とほとんど同じであった。この点が通常ケーブルの $V-t$ 特性とほぼ同じ時間で破壊する事実に関連している可能性があるが、検証は今後の課題である。

また、異物入ケーブルと通常ケーブルの浸水課電下での BTT の発生状況にあまり差がないということは、管理値をはずれた大きな異物が必ずしも大きな BTT を発生させることがないことを示すものであり、BTT の核としての有害性は異物の大小より、むしろ異物の種類によることを示唆している。

＜4・3＞ 浸水劣化ケーブルの短時間領域での破壊メカニズム 通常ケーブルの浸水課電特性において、

図 11 高電界側の破壊起点

Fig. 11. Roots of breakdown of the cable tested under higher electrical field.

比較的高電界側の破壊要因は水の浸入だけの可能性があり、比較的低電界側の破壊要因は水トリーの発生・伸展が関与すると考えられことを示したが、この仮説を検証するために高電界側での一定課電時の前駆遮断試験および残存 AC 破壊試験を実施した。

(1) 前駆遮断試験 浸水前処理を施した高電界領域での破壊起点を明瞭にするために高電界一定課電下での前駆遮断試験を実施した。試料はケーブル B を用い、課電試験前に浸漬前処理 (70°C 温水中に 30 日間、外導側から直接浸漬) を実施し絶縁体に水分を供給した。課電電界は 33, 40 kV/mm の 2 種類である。その結果 33 kV/mm 下では絶縁体内層側に存在した異物から電気トリーが伸展している様子が認められた [図 11(a)]。更に、電界 40 kV/mm での前駆遮断試験では水トリー状のものを誘発している異物から電気トリーが伸展していた [図 11(b)]。これらの異物は絶縁体中層から内層に存在していたが、ここで注目すべきことは、浸漬前ではこれらのケーブルがこの程度の電界・時間では破壊しなかった点である。すなわち、強制的に浸入させた水が既存の弱点 (今回の結果では異物) の電気トリー発生電界を低下させた⁽⁹⁾と考えることができる。

(2) 残存 AC 破壊試験 更に実験 NO. 4 ($E=15$ kV/mm, $t=1,680$ 時間) の残存特性試験時に前駆遮断を試みた。その結果、課電電界 37.5 kV/mm で図 11(c) に示すような絶縁体中層やや内側に存在する異物からの電気トリー発生が認められた。この結果は前述した前駆遮断試験結果と一致しており、浸水課電時または課電後の残存試験時に 30~40 kV/mm の高電界で破壊する場合には絶縁体中の既存弱点に水が関与して電気トリーを誘発する破壊メカニズムが考え

図 12 浸水課電ケーブルの残存 AC 破壊電圧
Fig. 12. Residual AC breakdown strength of aged XLPE cable.

られる。

〈4・4〉 浸水劣化ケーブルの長時間領域での破壊メカニズム 低電界-長時間破壊側のサンプルの残存 AC 破壊試験 (常温下) を実施し、その破壊要因を検討した (実験 NO. 10 の試料について 8,000 時間課電後に実施)。図 12 に初期値 (90°C) と比較した結果を示す。残存破壊値は明らかな低下を示したが、BTT から破壊した例は認められなかった。しかし武藤らは、浸水課電サンプルの残存 AC 破壊試験時の破壊要因を、前駆遮断法を用いて調査し、絶縁体厚さの 10%前後の BTT で電気トリ-発生電界が 20 kV/mm 程度に低下することを報告している⁽⁹⁾。この事実を考え併せると、今回観測された BTT (600 μ m 以上: 絶縁体長の 10%) が破壊の原因となった可能性もあり、このレベル (10~30 kV/mm) の電界下での浸水課電特性は絶縁体中の既存弱点の浸水下での有害性 (大きさ・種類) と水トリ-発生伸展特性の兼合いで決定され则认为られる。

〈4・5〉 BTT 周辺の電荷挙動の検討 〈3・3〉節で CV ケーブルの弱点近傍での空間電荷の蓄積を確認した。そこで BTT を新たに発生した弱点の一種と考え、その BTT 周辺における空間電荷の挙動についても調査した。試料には、浸水劣化させた 6 kV 級 CV ケーブル (導体サイズ: 200 mm², 正味絶縁厚: 4 mm) を用いた。本ケーブルに直流 40 kV (導体負極性) を 10 分間印加した後、試料を切断したカラートナーを振りかけダストフィガーを得た後、同一試料片をメチレンブルーで染色し、ダストフィガーと BTT の位置の対比を行った。また、劣化ケーブルおよび初期ケーブルの熱刺激電流 (TSC) を測定した。

劣化ケーブルのダストフィガーと染色後の BTT の状況を図 13(a), (b) に示す。劣化ケーブルにはボ

(a) ダストフィガー (b) 染色後に観察された BTT
青トナー: 正電荷に付着
赤トナー: 負電荷に付着
図 13 劣化ケーブルに観察されたダストフィガーと BTT (試料: 4.0 mmt 200 mm² CV ケーブル)
Fig. 13. Dust figure pattern and BTT observed in aged cable under wet condition.

図 14 初期および浸水劣化ケーブルの TSC 特性 (試料: 4.0 mmt 200 mm² CV ケーブル)
Fig. 14. TSC of non-aged and aged cables under wet condition.

ウタイ状にトナーの分離が観測され、その極性は導体側が正極性、外導側が負極性であった。この位置は BTT の位置に一致した。ダストフィガーの形状は BTT 自身より大きく、BTT 周辺にも電荷が偏在することを示している。BTT 全体が微小水滴あるいは空隙の集合体と考えることもでき、BTT の発生は絶縁体中に弱点が増大したことを意味する

図 14 に、TSC 測定結果を示す。なお、TSC 測定条件は図中に示した。図から明らかなように、BTT の多発した浸水劣化ケーブルの TSC は、ピーク温度の違いがあるものの初期ケーブルよりもピーク値が大きく、TSC 特性からも劣化ケーブルの電荷蓄積量が増大していることが確認された。

ところで、上記結果は直流課電下での現象であるが、交流課電下においても、弱点の周辺に電荷の注入が生じているとすれば、半波ごとに注入、引抜きが繰返され絶縁体劣化を引起し BTT 発生伸展の原因となると考えられる。

5. む す び

22 kV CV ケーブルを用いて、通常管理レベル以上のボイド・異物および内部半導電層突起ならびに外部から浸入した水が、ケーブル絶縁特性に与える影響について検討を行った。主な結果を要約すると以下のとおりである。

(1) ボイドは Imp 破壊特性よりも AC 破壊特性に影響を与える。放電開始電圧以上の電圧下での寿命分布は蓄積摩耗型であり、破壊が放電劣化によることを示唆する。

(2) 異物、突起は Imp・AC 両破壊特性に影響を与える。一方、長期試験での破壊は初期故障型であり、これは通常ケーブルの劣化特性と類似の傾向である。

(3) 浸水課電下での破壊強度は、水の浸入による既存弱点(ボイド・異物・突起)の有害性の増大と課電による新弱点(水トリリー)の発生により低下するが、両者の破壊への寄与は課電電界、時間によって異なる。

最後に本研究の遂行に当たり御助言、御指導いただいた東京大学工学部 河野照哉教授に感謝の意を表します。

(平成 4 年 3 月 2 日受付、同年 6 月 15 日再受付)

文 献

- (1) K. Ogawa, et al: "The World's First Use of 500 kV XLPE Insulated Aluminium Sheathed Power Cables at the Shimogo and Imaichi Power Stations", IEEE 1989 Summer Meeting, 89 SM 643-8 PWRD
- (2) 八木澤他:「南池上線 275 kV CV ケーブル長距離線路の完成」, 古河電工時報, 84 (平成-7)
- (3) 大島, 他:「CV ケーブルの長期絶縁特性に関する検討」, 電学論 B, 112, 821 (平 4-9)
- (4) 例えば, 電気学会技報 (II 部), No. 404 (平 4)
- (5) 電気協同研究会: 電気協同研究, 34, No. 1 (昭 53-7)
- (6) 速水:「ポリエチレンの交流破壊電圧を向上させる表面効果について」, 電学誌, 91, 1917 (昭 46-10)
- (7) 遠藤:「前駆現象検出による CV ケーブル絶縁破壊原因の解明」, 電学論 B, 108, 451 (昭 63-10)
- (8) N. Ando & F. Numajiri: "Experimental Investigation of Space Charge in XLPE Cable Using Dust Figure", IEEE Trans. Elect. Insulation, 14, 36 (1979)
- (9) 武藤, 他:「水トリリーからの電気トリリー発生伸展現象の検討」, 電気学会誘電絶縁材料研究, DEI-91-119 (平 3)

勝田 銀造 (正員)

昭和 30 年 8 月 30 日生。53 年 3 月東京電機大学電気工学科卒業。同年 4 月東京電力(株)入社。現在、工務部地中線課副長。主として、地中送電線路の設計、建設、保守業務に従事し、現在に至る。

戸谷 敦 (正員)

昭和 34 年 12 月 27 日生。57 年 3 月東京理科大学工学部電気工学科卒業。同年 4 月東京電力(株)入社。現在、東京南支店地中送電グループ勤務。主として、地中送電線路の設計、建設、保守業務に従事、現在に至る。

金岡 護 (正員)

昭和 22 年 3 月 29 日生。49 年 3 月神戸大学大学院修士課程修了。同年 4 月日立電線(株)入社。現在、パワーシステム研究所第 1 部主任研究員。主として、架橋ポリエチレンケーブルの研究開発に従事。

片貝 昭史 (正員)

昭和 32 年 11 月 4 日生。58 年 3 月早稲田大学大学院理工学研究科電気工学専攻博士前期過程修了。同年 4 月日立電線(株)入社。現在、パワーシステム研究所第 1 部勤務。主として、電力ケーブル絶縁材料に関する研究開発に従事。

丸山 義雄 (正員)

昭和 21 年 3 月 8 日生。46 年 3 月東京大学大学院修士課程修了。同年 4 月古河電気工業(株)入社。現在、千葉研究所絶縁システム研究室勤務。主として、プラスチック絶縁ケーブル、高電圧測定の研究開発に従事。

武藤 秀二 (正員)

昭和 33 年 5 月 24 日生。60 年 3 月横浜国立大学大学院工学研究科電気工学専攻卒業。同年 4 月古河電気工業(株)入社。63 年から 1 年半 NRCC 客員研究員。現在、千葉研究所絶縁システム研究室勤務。主として、プラスチック絶縁ケーブルの劣化現象およびその測定の研究開発に従事。