UDC 621.315.619: 621.315.211.2.027.8
621.315.614.6+621.315.616.96

論 文

52-A 53

超高圧および超々高圧電力ケーブル用ポリプロピレンラミネート紙に関する研究

正 員 久 保 博 (住友電工)

非会員 笹 島 洋 一 (住友電工)

正 員 宮 崎 俊 博 (住友電工)

正 員 松 田 藩 司 (巴川製紙所)

非会員 桑 原 秀 光 (巴川製紙所)

非会員 深 町 尚 志 (巴川製紙所)

1. ま え が き

我が国では既に 500 kV ケーブル時代を迎え、更に次期電圧階級として、例えば 1,000 kV 級が検討段階に入っている。最近、このクラスのケーブルの検討がいくつかなされており^{(1)~(5)}、これまでの主絶縁材料である油浸セルローズ紙は強制冷却を併用しない限り、適用が困難であるとされている。また 500 kV 級においても、発電機容量の増大、架空送電線の一部地中化などに伴い、大容量ケーブルが要求された場合、製造設備あるいは輸送上の制約から 1,000 kV 級と同様に、使用電位傾度を高くとれる新絶縁材料が必要になってくる。

このような超高圧（超々高圧）、大容量ケーブルの絶縁材料は、優れた誘電特性および高電気破壊強度、とりわけ高インパルス破壊強度をもつこと、並びにこれらのケーブルが必然的に大サイズになるため、優れた機械的特性をも有していなければならない。

セルローズ紙に代わる新油浸絶縁材料では、1950 年代末から 1960 年代にかけて種々のプラスチックフィルムが検討されたが、結局、実用化には至らなかった。

た^{(6)~(8)}。その理由として、絶縁油の流通性不足、フィルムの耐油性、破壊強度の極性効果と厚さ効果などがあげられよう。これらの欠点を避けるため、その後の研究の主流は当時製法が開発されつつあった合成繊維紙へ移行し、現在に至っている⁽⁹⁾⁽¹⁰⁾。しかし、合成繊維紙もコスト面から実用の見通しは楽観できず、機械的強度面あるいはインパルス破壊強度面などで劣り、改善の努力がなされている⁽¹¹⁾⁽¹²⁾。

このような流れに対し、筆者らは薄いセルローズ紙を接着剤を用いて複数枚接着し一体化した特殊絶縁紙（はり合せ紙）⁽¹³⁾を開発、実用化したほかに、プラスチックフィルムとセルローズ紙を交互に巻く複合絶縁の研究⁽¹⁴⁾も行なった。これらの研究は、前者には絶縁テープのラミネート構成、後者にはフィルムと繊維紙という異なった構造の複合構成といった新しい概念が導入されている。今回、これら両者の概念を更に組合せた複合ラミネート構成として、第 1 表に示すような 3 種類の構造のポリプロピレンラミネート紙（以後 PP ラミネート紙と略称）を開発するに至った。

第 1 表の CPC 構成は（はり合せ紙の 2 枚のセルローズ紙の接着剤に溶融押出 PP を使用したものであるが、この PP 層がフィルムになり、結果的にフィルムと繊維紙との複合ラミネート構成になっている。次に CPF はプラスチックとセルローズ紙の交互巻きの代わりに、あらかじめ両者を複合一体化したもので、やはり複合ラミネート構成であるが、CPC より PP の割合を高めやすい構造である。また、SPS は CPC のセルローズ紙の代わりに合成繊維紙を使い、100% プラスチック化した複合ラミネート構成である。ここでプラスチックとして PP を選択したのは、製造技術、

A Study of Polypropylene Laminated Paper for EHV and UHV Cable. By Hiroshi Kubo, Member, Yoichi Sasajima, Non-member, Toshihiro Miyazaki, Member (Sumitomo Electric Industries, Ltd), Sinji Matsuda, Member, Hidemitsu Kuwabara, Non-member & Takashi Fukumachi, Non-member (Tomoe-gawa Paper Co., Ltd.)

久保 博：正員，住友電気工業株式会社

笹島洋一：非会員，住友電気工業株式会社

宮崎俊博：正員，住友電気工業株式会社

松田藩司：正員，株式会社巴川製紙所

桑原秀光：非会員，株式会社巴川製紙所

深町尚志：非会員，株式会社巴川製紙所

第 1 表 開発された PP ラミネート紙
Table. 1 Developed polypropylene laminated paper.

呼 称	CPC	CPF	SPS
構 成
PP 層の比率 k^{**} (例)	0.4	0.6	1.0
$\varepsilon \times \tan \delta$ (セルロース紙 上の比)	$\frac{1}{2}$ 以下	$\frac{1}{4}$ 以下	$\frac{1}{8}$ 以下
	取扱いが容易、欧 米で類似品が研究 開発中 ⁽¹⁵⁾⁽¹⁶⁾	CPC より PP の 割合を高めやすい	超低誘電損失

*C: セルロース紙

P: 溶融押出ポリプロピレンフィルム (HCP 層)

F: フィルム (二軸延伸ポリプロピレンフィルム: OP 層)

S: 合成繊維紙 (ポリプロピレン合成紙)

**次式で定義する。

$$k = \frac{\text{PP 層の凸凹を平均化した厚さ}}{\text{ラミネート紙の厚さ}}$$

経済性および電力コンデンサにおける油浸絶縁材料としての実績などから、最適と判断したからである。PP はポリエチレンと並び、耐油性の良くない材料であり、電力ケーブル用として注目されていなかったが、複合ラミネート構成により、膨潤させやすいハード形ドデシルベンゼン (DDB) を含浸する場合でもその欠点を補い得る見通しを得た⁽¹⁷⁾。

本論文は、この複合ラミネート構成の概念のもとに開発した PP ラミネート紙の電気特性について述べ、ケーブルに適用する際に重要な耐油性について論及する。なお、新絶縁材料の研究においては、材料そのものの特性、すなわちシート状材料での諸特性を明らかにすると共に、それらがケーブルに適用される場合の条件を加味した諸特性をも究明していく必要があるが、本論文では紙面の制約上、材料固有の特性のみを明らかにすることを目的とし、また SPS についてはまだ試作品の段階であり、別報⁽¹⁸⁾にその耐油性などについて報告しているので、本論文では第 2 表あるいは第 1 図に示した初期特性だけを報告するにとどめる。

2. PP ラミネート紙の電気特性

本章では最も基本となる誘電特性および電気破壊強度の初期的な特性について述べる。それらの経時変化については次章で述べる。本章の実験に用いた絶縁油は、超高圧 OF ケーブル用として使われている DDB である。

〈2・1〉 誘電特性 第 1 表に掲げた代表的な PP ラミネート紙の 20 kV/mm における誘電特性を第 1

第 1 図 代表的な PP ラミネート紙の誘電特性
Fig. 1 Dielectric properties of representative polypropylene laminated paper.

図に示す。SPS の場合、繊維紙層、フィルム層ともに PP という同一材料で構成されており、その特性は各層の構成比率にはほとんど依存しないが、セルロース紙と PP とによって構成される CPC あるいは CPF は、両構成要素単体の誘電特性が大きく異なっており、PP ラミネート紙の特性はその構成比率によって変化する。このことは誘電率段付絶縁⁽¹⁹⁾の適用を容易にし、本材料の長所と言えるが、そのためにも複合体としての PP ラミネート紙の誘電特性と各要素の構成比率との関係を明らかにする必要がある。

最も簡単なモデルとして、ラミネートによっても誘電体損失の発生機構に変化がないと仮定すれば、CPC および CPF の特性はセルロース紙層と PP 層の直列接続として扱うことができ、各要素の構成比率、すなわち、複合体全厚さ中に占める PP 層の厚さ比率によって決定され、誘電正接の値は (1) 式で与えられる。但し、厚さ比率は第 1 表で示した k を用いず、後述するような k' の値を用いた。

$$\tan \delta_T = \frac{\frac{\varepsilon_c}{\varepsilon_p} (1 + \tan^2 \delta_c) \tan \delta_p}{\frac{\varepsilon_c}{\varepsilon_p} (1 + \tan^2 \delta_c)} + \frac{1 - k'}{k'} (1 + \tan^2 \delta_p) \tan \delta_T \dots (1)$$

但し、

$\tan \delta_T$: 複合体としての $\tan \delta$ (油浸)

$\varepsilon_c, \tan \delta_c$: セルロース紙の $\varepsilon, \tan \delta$ (油浸)

$\varepsilon_p, \tan \delta_p$: PP 層の $\varepsilon, \tan \delta$ (油浸)

k' : 複合体全厚さ中に占める PP 層の厚さ比率

通常, $\tan \delta_e = 1.5 \sim 3 \times 10^{-3}$, $\tan \delta_p < 10^{-4}$ なので近似的に $\tan^2 \delta_e \approx 0$, $\tan^2 \delta_p \approx 0$, $\tan \delta_p / \tan \delta_e \approx 0$ が成立し, (1)式は(2)式のように簡略化される。また, 誘電率(ϵ_T)は, 同様に(3)式のように表わされる。

$$\tan \delta_T \approx \frac{(1-k') \tan \delta_e}{(1+\epsilon_c/\epsilon_p-1)k'} \dots\dots\dots (2)$$

$$\epsilon_T \approx \epsilon_c / \{1 + (\epsilon_c/\epsilon_p - 1)k'\} \dots\dots\dots (3)$$

このようなモデルの妥当性を調べるために PP 層の厚さを変えて CPC, CPF を試作し, それらの誘電特性を測定した。第2図, 第3図はその結果を PP 層の比率 k' に対してプロットしたものである。なお, 実際の試料における k' は(4)式のように定義した。

$$k' = \frac{\text{PP ラミネート紙厚さ} \times \text{セルロース紙厚さ}}{\text{PP ラミネート紙厚さ}} \dots\dots\dots (4)$$

第2図 および第3図中の実線は(2)式および(3)式による計算値である。ラミネート紙全体の平均電界強度 E_T が一定であってもその構成要素であるセルロース紙と PP の ϵ が異なるため, セルロース紙部分の電界強度 E_c は(5)式に従って変化する。

$$E_c = E_T / \{1 + (\epsilon_c/\epsilon_p - 1)k'\} \dots\dots\dots (5)$$

第2図 誘電率と PP 比率(k')との関係
Fig. 2 Relation between permittivity and PP content (k').

第3図 $\tan \delta$ と PP 比率(k')との関係
Fig. 3. Relation between $\tan \delta$ and PP content (k').

そのために CPC または CPF を構成するセルロース紙について, 各温度における $\tan \delta_e$ の電界強度依存性を求めておき, その実測値から(5)式で与えられる E_c における $\tan \delta_e$ を求めて(2)式に代入して第3図の計算値を得た。実測値はほぼ計算値にそった変化を示し, (2)式および(3)式によって概略の特性を求めることが可能である。なお実測値と計算値の差は計算値の算出に用いたセルロース紙の ϵ_e , $\tan \delta_e$ が個々の実測値ではなく代表的な値を使っていること, k' の算出に用いたセルロース紙の厚さも同様に代表値を使っていること, および汚損も含めた測定上の誤差などが考えられる。

〈2.2〉電気破壊強度 第2表に代表的な PP ラミネート紙の AC およびインパルス 破壊強度を他の特性と共に示す。比較として各 PP ラミネート紙の原紙および低損失セルロース紙の特性も示した。

破壊強度の測定は, エッジ (半径 2.5 mm) をエポキシ樹脂で補強した有効直径 25 mm の黄銅製平板電極間に油層なし 1 枚の試料をはさんで行なった。試料は 80°C で 5 時間脱気乾燥後, 常温の DDB を含浸し

第4図 AC 破壊強度と PP 比率(k')ないし PP 厚さとの関係

Fig. 4. Relation between AC breakdown strength and PP content (k') or thickness of PP layer.

第5図. インパルス破壊強度と PP 比率(k')ないし PP 厚さとの関係

Fig. 5 Relation between impulse breakdown strength and PP content (k') or thickness PP layer.

第2表 代表的な PP ラミネート紙の特性
Table. 2 Properties of representative polypropylene laminated paper.

特性値	種 別	PP ラミネート紙						セルロース紙 (超高压用)	
		原 紙			PP ラミネート紙			EH 125	EH 150
		C 43	OF 70	PP 繊維紙	CPC ¹⁾	CPF ²⁾	SPS ³⁾		
厚 さ (mm)		0.048	0.070	0.053	0.123	0.175	0.163	0.125	0.150
密 度 (g/cm ³)		0.65	0.75	0.55	0.88	0.87	0.68	0.62	0.62
気密度 (ガーレ秒)		6,500	4,700	4	∞	∞	∞	2,100	1,400
PP 層の比率	k	—	—	—	0.6	1.0	—	—	—
	k'/*	—	—	—	0.3	0.6	1.0	—	—
$\epsilon \log \delta \times 10^{-3}$ (80°C, 20 kV/mm)		5.85	5.36	0.13	2.00	1.05	0.33	5.26	5.43
電気破壊強度 (in DDB kV/mm)	AC	$\bar{X}$	96	90	65	120	145	81	85
		δ	1.8	2.6	4.5	11.0	10.3	9.3	2.2
	Imp. (—)	$\bar{X}$	215	190	102	243	205**	151	158
		δ	10.6	9.5	8.5	17.8	16.2	10.2	8.0

構造 1) C43/HCP/C 43 2) OF 70/HCP/OP 60 3) PP 繊維紙/HCP/PP 繊維紙

* 本文中(4)式参照, ** CPF の場合は高压電極にセルロース紙層を対向させた

た。測定は常温で 10 個行ないその平均値を求めた。AC は零 V から試料が約 10 秒間で破壊するように昇圧した。インパルスは $1 \times 40 \mu\text{s}$ 負極性標準波で、予想破壊値の約 70 % の電圧から、2kV/3 回ステップで昇圧した。破壊後の試料の厚さを測定し、破壊強度を算出した。

CPC, CPF の破壊強度は厚さが 2 倍以上になっているが原紙より上昇し同程度の厚さのセルロース紙に比べ、30~90%の増加が見られる。SPS も PP 繊維紙自体の破壊強度より、30~40%上昇して、基材の種類にかかわらず破壊強度は向上している。

破壊強度と PP 層の比率との間に誘電特性のような明確な関係が存在するかどうかは興味のあるところである。第 4 図、第 5 図は CPC CPF の破壊強度の平均値を PP 層の比率(厚さ)に対して示したものである。なお、データのばらつきは、第 2 表とはほぼ同程度である。CPC においては極大値をもつような特性が得られているが、ばらつきまで考慮すると、この傾向は明確ではない。一方、CPF では少なくとも測定した範囲内では極大傾向は認められない。

3. PP ラミネート紙の経時変化

本章では PP ラミネート紙の誘電特性、破壊強度および機械的特性の絶縁油中での経時変化について述べる。ここでは第 2 表中の CPC ($k'=0.3$) および CPF ($k'=0.6$) を試料として選び、100°C, 5 時間真空乾燥後、常温の DDB を含浸した。その後 100 °C に保持して経時変化を求めた。

〈3・1〉 誘電特性 この

試験は平板電極系に試料を 1 枚そう入し、1 kg/cm²C の油圧を加え、100°C で初期特性を測定後、電圧 4 kV (CPC で 32 kV/mm, CPF で 23 kV/mm) を連続的に印加しながら経時変化を調べた。結果を第 6 図に示す。tan δ は初期に低下してその後安定し、静電容量はほとんど変化しない。tan δ が低下するのは、加熱による PP の質的変化、PP 中の触媒残査や各種添加剤中に含まれる不純物イオン

が拡散する効果⁽²⁰⁾なども考えられるが、PP の tan δ はもともと非常に小さく、これらの効果は小さい。むしろ、この原因はセルロース紙層の繊維間結合が加熱により発達して、紙層中の不純物イオンを束縛した効果⁽²¹⁾によるものと考えられる。特にセルロース紙層の比率が大きい CPC の方が、比率が小さい CPF よりも tan δ の低下が大きいことでも上記の考え方を裏付けている。一方、静電容量が変化しないのはそれに寄与すると考えられる PP 層の厚さ増加が、後述するように比較的早く飽和し、初期特性測定時にすでに一定値に達しているためである。

〈3・2〉 電気破壊強度 第 7 図に示すように破壊強度(常温, 10 点平均値)は初期の段階でかなり向上し、以後安定する。一方、PP をほとんど膨潤溶解させないシリコン油 (KF-96, 50 cst) を用いて同じ実

第 6 図 誘電特性の経時変化
Fig. 6 Dielectric property vs. DDB immersion time.

第7図 電気破壊強度の経時変化

Fig. 7 AC & impulse breakdown strength vs. DDB immersion time.

験を行なったところ、破壊強度の上昇は認められず、従って DDB 中での向上は PP 中に DDB が浸透した効果と考えられる。PP ラミネート紙は若干ボイドなどの欠陥が存在するので、これらの欠陥を完全になくさない限り、DDB のように PP 層をある程度膨潤させる絶縁油との組合せは有効と考えられる。

〈3・3〉機械特性および寸法安定性 常温における引張強度と伸びの試験結果を第8図(a)に示す。但し浸漬日数0は65% RHの値を示す。試験した引張速度50 mm/minでは、CPCはセルロース紙層とPP層(ポリプロピレンホモポリマー層:HCP層)が同時に破断するが、CPFでは最初に伸びの小さいセルロース紙層が破断し、その後、HCP層と二軸延伸PPフィルム層(OP層)を合わせたPP層がクリープを続けて後に破断する。従って、第8図(a)で、CPFについてはセルロース紙層とPP層の破断時の特性を分別して示した。強度はCPC、CPFとも初期で若干低下し、以後安定している。一方、CPCおよびCPFのセルロース紙層の伸びは、乾燥によって伸びが低下するセルロース紙の性質が出ているが、CPFのPP層の伸びはほとんど変化しない。

次に寸法変化を第8図(b)に示す。縦および横方向は2%程度の収縮を示し、セルロース紙と同等である。一方、厚さ方向ではいずれも10%以上の増加を示し、セルロース紙の特性と異なる。従って、PPラミネート紙を電力ケーブルに適用する場合、この厚さ増加という事実に十分留意する必要がある。

4. PP ラミネート紙の溶解特性

PP ラミネート紙を電力ケーブルに適用する場合、特に絶縁油に対する溶解、膨潤に留意する必要がある。本章では現用ケーブル油の中で、溶解性パラメータ(SP 値)⁽²²⁾が最も PP に近い DDB に対する溶解

(a) 強度特性, (b) 寸法安定性

第8図 機械的特性および寸法安定性の経時変化
Fig. 8 Mechanical property & dimensional stability vs. DDB immersion time.

性について述べ、あわせて他の絶縁油に対する溶解性についても述べる。

〈4・1〉DDB に対する溶解性 HCP および OP フィルムを10倍(重量)の DDB 中に浸漬し、100℃に保持し、所定時間後にフィルムを取出してアセトンで脱油後の重量から溶解量を測定した。第9図AはOPの、BはHCPの溶解量を示す。OPの原料はHCPよりも結晶性が高く、しかも二軸延伸によって分子配向が進み、溶解量がHCPよりも小さくなっている。次にケーブルの場合、ヒートサイクルに伴い絶縁油の置換が考えられる。そこで最も苛酷な状態を模擬するためにHCPについて、100℃16時間、常温8時間のヒートサイクルを加え、2週間ごとに新しいDDBと入れ替える操作を行ない溶解特性を測定した。その結果をCに示したが、溶解量はBより大きく、溶解が

第9図 溶解量の経時変化

Fig. 9 Solubility of PP films in DDB at 100°C.

促進されることがわかる。しかし、この場合でも一年後の溶解量は 3.6% 程度では飽和し、この傾向が続くとすれば数十年経過後の溶解量は約 4% に止まると推定される。なお、GPC 法⁽²³⁾によって経時変化前後の分子量の分布を比較し、DDB 中に溶解した成分は低分子量部分であることを確認している。本実験は絶縁油の比率の大きい条件で行っており、OF ケーブルのように固体 1 に対し絶縁油 1 程度の条件下での溶解量は、これらの結果より減少するであろう。

第 10 図は HCP の溶解量 (30 日後) の温度特性を示す。溶解量は 110°C 前後から急増する傾向が見られ、140°C 程度になると数日間でフィルムが部分的に崩壊する現象が観察される。このような高温になると、低分子量の非晶質部分だけでなく結晶領域の一部まで溶解しているものと考えられる。

〈4・2〉 各種絶縁油に対する溶解性 ここではポリブテン (LV-40 E)、鉱油 (JIS 1 号油)、シリコン油 (KF-96, 50 cst) および DDB に対する溶解性を求めた。HCP および OP を 10 倍重量の絶縁油に浸漬し、100°C に保持して溶解量 (30 日後) を求めた。第

第 10 図 溶解量におよぼす温度の影響
Fig. 10 Temperature dependence of solubility of PP films in DDB.

第 11 図 溶解量と絶縁油の SP 値の関係
Fig. 11 Relation between solubility of PP films and SP value of insulating oil.

11 図はその結果を絶縁油の SP 値に対して示したものである。無定形物質に関する溶解の物理化学的な理論では、溶質と溶媒の SP 値が近づくほど溶解しやすくなる。PP の SP 値は約 8.2⁽²⁴⁾ であり、第 11 図から絶縁油の SP 値が 8.2 に近づくほど、PP の溶解量は大きくなり、SP 値との関係が認められる。

5. PP ラミネート紙の膨潤 (厚さ増加) 特性

第 3 章で述べたように、PP ラミネート紙は絶縁油中で PP 層の膨潤に伴う厚さ増加を示す。実際のケーブルでは、この厚さ増加は外径の増加、あるいは内部圧力の増大につながり、紙裂け、耐曲げ性の低下、油流抵抗の増大といった問題を起す可能性がある。ケーブルにおけるこれらの現象は単に厚さ増加量だけによって決定されるわけではなく、ケーブルの設計あるいは製造技術にも深くかかわってくるが、ここでは材料の基礎特性に限定して論じる。なお、本章での実験に用いた試料も第 2 表中に示した CPC ($k'=0.3$) と CPF ($k'=0.6$) である。

〈5・1〉 厚さ増加の温度、圧力依存性 実験に使用した装置はバネ圧によって試料に一定の荷重を加え、その状態で油浸前後の変動を厚さ測定器で直読できるようにになっている⁽¹⁸⁾。実験は試料を厚さ測定器にそう入し、各温度で 24 時間保持した後、その温度の DDB に浸漬した。

温度をパラメータとし、圧力 1 kg/cm^2 における CPC, CPF の DDB 中での厚さ増加率 (油浸前の厚さすなわち各温度で 24 時間保持後の厚さからの増加量を油浸前の厚さで割って % 表示したもの) の経時変化を第 12 図に示す。温度の上昇とともに、飽和時の厚さ増加率は大きくなり、また飽和に達するまでの時間は短くなる。これらの厚さ増加は PP 層の膨潤によってもたらされるから、HCP と OP の膨潤特性に差がなければ厚さ増加率は PP 層の割合に比例し、従って k' の値の違いから明らかなように CPF は CPC の 1.5 倍程度の厚さ増加が予想されるが、実際には両者間にはそれほど差はなく、100°C 以下ではほぼ同程度の厚さ増加率を示す。これは溶解量の場合と同様、OP が HCP より結晶性が高いことに起因しているものと考えられる。

次にこの厚さ増加率は第 13 図に示すように、圧力の上昇とともに減少する。この特性はすでに報告された例があり⁽²⁵⁾、そこでは圧力によって膨潤を抑制するという考えが出されているが、図からも明らかなように膨潤を抑制するためには非常に大きな圧力が必要であり、その場合ケーブル絶縁体の機械的特性が、従

来のセルロース紙を使用したものとかなり異なったものになることに留意する必要がある。

〈5・2〉 各種絶縁油に対する厚さ増加率 前章の

第12図 厚さ増加の温度依存性

Fig. 12 Temperature dependency of thickness increase.

第13図 厚さ増加の圧力依存性

Fig. 13 Pressure dependency of thickness increase.

第14図 厚さ増加と絶縁油の SP 値の関係

Fig. 14 Relation between thickness increase and SP value of insulating oil.

溶解性の場合と同様、膨潤についても絶縁油の SP 値との相関があることが予想される。第14図は 100°C、1 kg/cm² における絶縁油の SP 値と厚さ増加率との関係を示したものである。絶縁油の SP 値が PP の SP 値 8.2 に近付くほど、厚さ増加率は大きくなっており、溶解量の場合と同様の議論が成立する。

〈5・3〉 油流抵抗の温度依存性 PP ラミネート紙の絶縁油流通性は、繊維紙内部および層間の空げき部に依存し、従って PP 層の膨潤はケーブルの油流抵抗を増大させる結果をもたらす。この油流抵抗値は最終的にはケーブルによって判定すべきであるが、ここでは材料そのものについて測定した結果を報告する。

第15図に本実験に使用した層間油流抵抗測定器の構造を示す。試料は所定の条件（湿度、圧力）でセットされ、厚さを固定した後、乾燥、浸油を行ない、加熱、測定に供される。CPC、CPF の温度と層間油流抵抗の関係は第16図に示すように PP 層が膨潤した分だけセルロース紙が圧縮されるため、温度の上昇とともに油流抵抗が増大する。

〈5・4〉 加熱処理による膨潤の抑制 PP 層の膨潤がケーブルに与える影響を軽減するために、CPC および CPF についてはセルロース紙の乾燥による厚さ減少を利用して、PP ラミネート紙全体の厚さ増加を抑制する方法がある⁽²⁶⁾が、ここでは PP そのものの膨潤を抑制する方法の一つとして加熱処理（アニーリング）の効果について検討を加えた。

〈5・1〉 節に述べたが、PP の結晶性を上げることは膨潤の抑制に有効である。HCP の結晶性を上げるために原料樹脂の結晶性を上げると、成形性が悪くなるので、ラミネート後、結晶性を上げることが望ましく、その手段としてアニーリングを行なうことを考えた。すなわち PP の場合、高温度に加熱後徐冷する、いわゆるアニーリングによって結晶性を高め得る⁽²⁷⁾。

第17図は真空中でのアニーリングによる厚さ増加率の変化を示す。すなわち、CPC を真空中で所定温

第15図 層間油流抵抗測定器の構造

Fig. 15 Structure of equipment to measure oil flow resistance along paper surface.

第16図 層間油流抵抗の温度依存性

Fig. 16 Relation between temperature and oil flow resistance along paper surface.

第17図 加熱処理による厚さ増加の低減

Fig. 17 Reduction of thickness increase by heating.

度で所定日数だけ加熱後、室温まで徐冷した。その後、前述の厚さ測定器にそう入し、100°Cで24時間乾燥後、100°CのDDBに浸漬し厚さ増加率を測定した。厚さ増加率は加熱処理温度が高いほど低下しており、アニーリングを行なわなかった場合に比べ、120°Cの処理で2/3、150°Cで1/2に低下しており、それに要する時間も実用的な範囲にあるので、この加熱処理はPPラミネート紙の膨潤特性改善の有力な手段になり得るものである。

6. あとがき

超高圧ないし超々高圧ケーブル用絶縁材料として開発したPPラミネート紙の材料としての諸特性、なかでも電力ケーブルの設計製造上特に重要と考えられる誘電特性ならびに耐油性について明らかにし、ケー

ブルに適用する際に特に問題となる。膨潤を抑制する方法としてアニーリングを試みた結果、厚さ増加率を2/3～1/2に減少させ得ることを見いだした。本研究で明らかにした諸特性を基礎にして、PPラミネート紙の超高圧あるいは超々高圧ケーブルへの適用性を確認するために、275 kV、2,000 mm²、単心アルミ被、DDB含浸OFケーブルを試作し、長期課通電試験を実施中であり、その実用性が確認されつつある⁽²⁸⁾。

最後に本研究実施にあたり、御助言、御協力いただいた住友電気工業株式会社 研究開発本部 小島主幹研究部員、電力事業部 松浦課長、株式会社 巴川製紙所 開発部 武部長、技術研究所 中村所長、影山五郎氏および高浜芳則氏に深謝の意を表する。

(昭和51年4月19日受付、同51年12月27日再受付)

文 献

- (1) U.C. Alnaud, et al.: IEEE 1974 Underground Transmission & Distribution Conf.
- (2) 藤田・伊藤: 絶縁材料研究会, IM-74-36(昭49)
- (3) 菊地・二宮・木下: 第7回絶材シンポジウム, II-1(昭49)
- (4) 久保・深町他: 第7回絶材シンポジウム, II-2(昭49)
- (5) 沼尻・岡・花野: 絶縁材料研究会, EIM-75-29(昭50)
- (6) J.C. deVos, J. Vermeer: CIGRE No. 207(1958)
- (7) L.F. Hickernell, F.D. Eich: Elec. World 115, 60(1961)
- (8) J. Vermeer, W. Boone: Proc. Inst. Elect. Engrs. 114, 981(1967)
- (9) J. Vermeer, et al.: 39th Ann. Conf. on Elec. Insul. & Dielec. Phenomena(1970)
- (10) F.S. Cheng, E.O. Forster: Wire & Wire Products 47, 57(1972)
- (11) 津元・一色他: 昭48電気学会全大.
- (12) 児島・曾田他: 第5回絶材シンポジウム V-2(昭47)
- (13) K. Kojima, et al.: IEEE Trans. Power Apparatus Syst. PAS-87, 12(1968)
- (14) 藤沢・上島: 住友電気 74, 47(昭35)
- (15) D.R. Edwards, D.R.G. McVill: IEEE 1974 Underground Transmission & Distribution Conf. 529(1974)
- (16) EPRI Progress Report: TD-1 RP-7810 & RP-1812 Oct. (1974)
- (17) 松浦・笹島・久保: 第5回絶材シンポジウム V-1(昭47)
- (18) 久保・宮崎・松田・桑原: 絶縁材料研究会 EIM-75-51(昭50)
- (19) Emanueli (馬場重徳訳): 電力ケーブル技術 159(昭21)大日本出版
- (20) W. Eustance, W.O. Solberg: Insulation/Circuits 16, 5, 43(1970)
- (21) 武・鈴木・松下: 工業化学会雑誌 64, 111(昭36)
- (22) 原崎: 加工技術 12, 10, 12(昭46)
- (23) 武内・森: 分析化学入門, 南江堂
- (24) A.S. Michaelis, et al.: J. Appl. Polymer Sci. 12, 1621(1968)
- (25) D.R. Edwards et al.: CIGRE No. 15-05(1972)
- (26) 特許: 特開昭 49-41871
- (27) 高木・佐々木: ポリプロピレン樹脂, 日刊工業新聞社
- (28) 久保・宮崎: 昭50, 電気学会全大 No. 1112