技術動向

電気絶縁紙の近況について

一 色 節 也

1. ま え が き

化学工業のめざましい発展で数多く生れた合成高分子は、電気絶縁材料としても輝かしい分野をつくりあげた。しかし、昔から使われていた電気用絶縁紙は、絶縁油や絶縁ワニスなどと併用され現在でも重要な地位を確保している。合成高分子を絶縁紙と同じような目的に使用しようとするれば、フィルム状にして銅線などの上に巻いて使用するわけであるが、絶縁油やワニスの含浸不良を起しやすかったり、耐油、耐溶剤性に不安な点もあり、絶縁紙に劣るところがあった。一方電気絶縁材料としては、耐熱性や電気特性が優れることが要求される。絶縁紙の特性もそのようなことを目的として、抄紙の際に使用する水にイオン交換水を使用したり、マイカを混抄する方法や、セルロースを化学処理した紙などが使用されてきた。しかし、このような改善方法にも限度があって、最近のように、使用機器の電圧や使用温度が著しく高くなると、使用することが出来なくなってきた。このような

用途への解決策として、合成高分子を紙と同じような構造にして、絶縁油やワニスが一に含浸できるようにした、合成絶縁紙が開発されるようになった。特に筆者の専門である電力ケーブルでは、目ざましい開発があったので、それを中心にして電気絶縁紙の近況を述べることとする。

2. 超高压電力ケーブル用合成絶縁紙

現在わが国でも、500 kV 電力ケーブルの実用化のために、野田市において実証試験が行なわれている。将来さらに超高压化するであろう。このような超高压化は、電力の経済輸送のために 1000 kV の超々高压化するものに近い。このように超々高压化すると、絶縁物の極性により消費される電力損失が無視出来なくなり、第1図に示されるように、セルロースで構成されるクラフト絶縁紙では、560 kV 以上の電圧にしても、送電できる電力はむしろ減少し、超々高压化しても無意味になってしまう。これに対し図中に示されるような合成絶縁紙を用いると最大に送電出来る電圧は、1000 kV 以上になり、困難な問題が解決できる。

このような問題を解決することを狙って、1958年 de Vos¹⁾ らがプラスチックフィルムを巻いた Oil Filled Cable (OF ケーブル) を提案し、それ以後フィルムと絶縁紙の組合せ²⁾ や、セルロースと合成高分子との混抄紙³⁾ の開発などが研究された。しかしいづれもまえがきで述べたような理由で成功せず、実用化には至らなかった。

1969 年 GE において Polydiphenyl phenylene oxide (P3O) を紙状にした研究が発表され⁴⁾、昨春秋 GE からその技術を購入したオランダの AKZO がこれを試作し Tenax と云う商品名で試験結果を報告した⁵⁾。これらにつづいて本年春、筆者達がポリカーボネート为主要材料とした合成絶縁紙 PAP⁶⁾ 3M⁷⁾ と大日本電線⁸⁾ がポリプロピレンの繊維紙を発表し、合成紙に関心が急激に高くなった。

昨年从去年にかけて発表された合成絶縁紙の一

第1図 送電々圧と送電容量の関係 (2000 mm², OF ケーブル)

Recent Trends in Electric Insulating Papers
SETSUYA ISSHIKI

藤倉電線株式会社 主任研究員

第1表 クラフト絶縁紙と合成紙の特性

名 称 特 性	Tenax (P 30)	ポリプロピレン紙		PAP	脱イオン 水洗紙
		3M	DN		
厚 さ (μ)	80	127	166	125	125
気密度 (ガーレー)	1.000	300 ~2000	1,920	3,000	1,800
密 度 (g/cm^3)	0.65	0.75	0.76	0.75	0.71
引張強さ (kg/mm^2)	2.0	2.6	3.8	6.9	6.4
伸 び (%)	4	5	15	25	2
引張弾性率 (kg/cm^2)	1.0×10^4	1.1×10^4	1.4×10^4	1.2×10^4	5×10^4
ϵ	2.5	2.2	2.16	2.65	3.4
$\tan \delta$ (%)	0.025	0.03	0.01	0.045	0.22
$\epsilon \times \tan \delta \times 10^{-3}$	0.63	0.66	0.22	1.4	7.5
インパルス破壊強さ (kV/mm)	147	—	160	100	115
含 浸 油	流パラ	ポリブテ ン	ポリブテ ン	DDB*	DDB*

* Dodecylbenzene

第2図 クラフト絶縁紙、合成絶縁紙、フィルムのインパルス破壊電圧と厚さの関係

般特性を第1表に示してあるが、誘電損率 ($\epsilon \times \tan \delta$) はいづれもイオン交換水で洗滌、抄紙された脱イオン水洗紙の1/7以下で著しく改善されている。機械的強度は一般に強く、特に引き裂きに対する抵抗性が大きいのが特徴で、高速度で紙を巻く作業中での切断が少くなると予想される。反面ヤング率が低い欠点があり、ケーブルを曲げた時にしわが入りやすい。これは合成高分子がセルロースよりもヤング率が低いためで解決は困難のようである。

ある。

破壊電圧は第2図に示されるように従来フィルムでは、絶縁厚が厚くなると急激に低下する傾向があり、衝撃破壊電圧の極性により、破壊電圧値にかなりの差があった。合成絶縁紙にすると、このような欠点が改善される。超々高圧電力ケーブルにおいては、この特性は非常に重要であり、この改善効果は注目に値する。改良された原因を筆者達は、油の含浸性の改良のためと推察している。

電気機器は非常に長期間使用される。ケーブルもその使用寿命は50年近くと考えられている。従って最も重要なのは長期安定性、劣化特性である。第3図に合成絶縁紙、クラフト紙およびプラスチックフィルムによるモデルケーブルの荷電加熱劣化試験での経時変化が示してある。PAP, Tenaxのような合成絶縁紙は著しく優れており、クラフト紙が熱分解して $\tan \delta$ の増加が認められるのに、徐々に $\tan \delta$ が小さくなっている。一方ポリスルホンフィルムでは荷電したものでは急激な $\tan \delta$ の上昇が認められている。これはフィルムの crazing により放電が発生し、急激に劣化が進行するためと思われる。合成高分子を使用する場合、長期安定性で最も心配なのは耐油性と crazing や亀裂である。これらの特性は油の種類によって大きく左右される。ポリプロピレンやポリエチレンは比較的膨潤、溶解しやすく、従来から使用されている絶縁油の鉱油や Dodecylbenzene は使用出来ない。そのためシリコンオイルや、ポリブテンの組合せが考えられている。ポリカーボネート、ポリスルホン、PPOは膨潤、溶解の心配はないが、crazing の心配がある。しかしこのような心配も、第2表に見られるように、合成絶縁紙化すると全く無くなるようである。P30はその化学構造から推定すると、最も心配の少ない材料といえるので注目されているが、かなり高価なものである。紙構造により crazing が改良される理由は、気孔のため応力が緩和されるためと考えている。

以上のように、最近各種の合成絶縁紙の開発により、超々高圧送電の可能性も非常に大きくなったと言える。一方大電力輸送のもう一つの方法として、極低温ケーブルが研究されている。この場合液体窒素や液体水素と絶縁紙の組合せを使用する。この目的に使用する絶縁紙は、現在ポリエチレンの不織布 (du Pont 社 Tyvek)

第2表 応力下での耐油試験結果

日数	0	10	20	50	100	200
PAP						
引張強さ(kg/15mm巾)	6.0	6.4	6.6	7.1	7.0	7.0
伸び (%)	50	28	27	23	26	25
耐折強度 (回)	3000<	3000<	3000<	3000<	3000<	3000<
クラフト紙						
引張強さ(kg/15mm巾)	9.7	6.6	7.6	6.5	7.9	6.0
伸び (%)	1.0	—	—	—	—	—
耐折強度 (回)	60~102	9~46	5~49	35~60	1~5	1
PCフィルム						
引張強さ(kg/15mm巾)	18.3	0				
伸び (%)	85	0				
クレーシング	—	2日で破断				

を使用している。第4図に印加電圧と Tyvek に液体ガスを含浸したときの絶縁物の $\tan \delta$ を示している。この測定は圧力 75 psi で A→B が $\tan \delta$ の電圧上昇軌跡であり、Bで電圧印加のまま、一晩おくとCに達する。電圧降下時にはC→Dの軌跡をとる。このような複雑な特性を示す理由はよく判っていないが、極低温下での測定は今まで行なわれていないから、今後の研究で明らかになってくるであろう。

3. 電力用コンデンサー絶縁体

電力用コンデンサーとして最近では2軸延伸ポリプロピレンフィルムとクラフト絶縁紙を重ね合せて、三塩化ジフェールを含浸した複合誘電体が使用されている。この誘電体は従来の三塩化ジフェール含浸紙の 1/2~1/3 と云う低損失で、耐電圧も高く、コンデンサーの大幅な小型化を可能にした。

第3図 各種モデルの長期加熱課電劣化特性

第4図 Tyvek (PE) の液体窒素液体空素、含浸における $\tan \delta$ の電界特性 (75 psi)

第5図 三塩化ジフェール含浸コンデンサーの誘電特性

第6図 三塩化ジフェニル含浸コンデンサーの交流破壊電圧

ポリプロピレンフィルムが選ばれた理由は、誘電損失が小さく、耐電圧が高く、安価であるためである。ポリプロピレンフィルムのみでは絶縁油の含浸が不十分であるが、絶縁紙との併用により解決される。第5図、第6図に $\tan \delta$, ϵ と交流破壊電圧が示されているが、誘電損失はクラフト紙の $1/3$ 、破壊電圧も高い。電力ケーブル用絶縁紙で述べたように、フィルムを使用すると絶縁厚が薄い時は、破壊電圧が高いがコンデンサーでは、電力ケーブルのように厚い絶縁厚を使用することはないから、フィルムと絶縁紙との重ね合わせを使用するのは有効と云える。長期間の安定性はケーブルの時と同じように重要な特性であるが、実験の結果では変化がなく、非常に安定していると考えられている。この絶縁体を用いることにより、従来の不燃性油含浸コンデンサーと比較して約 60% に小形、軽量化され、1 W/kVA 程度の電力量の節約になると云われている。従ってこのようなコンデンサーが広く使われるようになるであろう。

4. 機器用絶縁紙

回転機、変圧器のコイル絶縁などは耐熱性と耐湿性が要求される。このような目的で最近使用される傾向が大きくなったものに du Pont 社の合成絶縁紙“Nomex”がある。この材料は、芳香族ナイロンの繊維とパルプ状物質“Fibrid”を湿式で抄紙して作った合成紙で、耐油性、耐熱性が非常に優れている。市販されている製品は気密

第3表 Nomex の特性

特 性	銘 柄	#410	#411
厚 さ (mm)		0.153	0.212
密 度 (g/cm^3)		0.71	0.34
気 密 度 (ガーレー)		6000<	270
引張り強さ (kg/cm^2)		824	157
伸 び (%)		10.2	2.4
引張弾性率 (kg/cm^2)		3×10^4	1×10^4
摩擦係数		0.48	0.53
油浸紙の誘電特性			
体積抵抗率 (80°C) ($\Omega\text{-cm}$)		1×10^{15}	1×10^{15}
ϵ (80°C)		0.86	0.40
$\tan \delta$ (80°C , %)		0.42	0.16

第4表 マイカ混抄紙、ガラスフレック紙の諸特性

特 性	マイカ混抄紙	ガラスフレック混抄紙
厚 さ (mm)	0.125	0.194
密 度 (g/cm^3)	0.64	0.71
気 密 度 (ガーレー)	1.300	340
引張り強さ ($\text{kg}/15 \text{ mm}$ 幅)	7.4	10.5
伸 び (%)	1.2	1.9
引張弾性率 (kg/cm^2)	5×10^3	5.5×10^4
油浸状態での誘電特性		
ϵ (80°C)	3.23	3.02
$\tan \delta$ (80°C , %)	0.122	0.13
インパルス破壊電圧 (kV/mm)	110	109

度の異なる2種類がある。一般特性を第3表に示してあるが、気密度の大きいものは機器類コイルの絶縁に、気密度の小さいものは、熱硬化性樹脂を含浸したのちプレスして耐熱性絶縁板などに使用されている。また耐コロナ性などをさらに良くする目的で、マイカを混抄したタイプなどもある。この材料はすでに数年前から市販されていたが、最近になってその使用量が急激に増加しているようで、今後さらに多く使用されるであろう。

5. クラフト系特殊絶縁紙

前章まではすべて合成高分子を主体としたものであったが、クラフト絶縁紙を改善することも検討されたり、使用されたりしている。例えば超高压電力ケーブル用として、マイカをクラフトパルプに混抄したマイカ混抄紙⁹⁾や、ガラスフレックを用いたガラスフレック紙¹⁰⁾などがある。これら混抄紙の特性を第4表に示す。電気特性は改善されるが、機械的強度は低下する。このほかに誘電特性を改善する目的で、合成高分子とセルロースの

混抄紙や、両者を共通溶剤で溶解混合して再析出して作った、混合物を抄紙するなどの方法が試みられている。

そのほか、セルロースを化学処理したシアノエチル化紙や、アミン添加紙などがあるが、これはすでに 10 年位前から実用化されている。

6. ま と め

電気絶縁紙の最近の傾向のうち、特に超高压電力ケーブルを中心にとりまとめた。内容が少しかたよっているが、筆者の専門上そのような事をお許し願いたい。最近の研究の中心は、合成高分子で作られた合成絶縁紙である。従来フィルム状絶縁物についての研究が数多く行なわれたが、合成絶縁紙にすることにより興味ある現象や、フィルムでは解釈できなかった問題が解決出来るような、新しい事実も明らかとなって来た。電気特性、耐熱性など高度の要求に対する解決策として、合

成絶縁紙は最も興味あるテーマであり、実用化される日も近いことであろう。

文 献

- 1) J.C. de Vos ; CIGRE No. 207 (1958)
- 2) 加賀谷, 山本 ; 藤倉電線技報 No. 25 (1963)
- 3) 川井, 吉田 ; 昭 37 電気四学会連合大会 No. 365
- 4) C.W. Reed ; Conference on Electrical Insulation and Dielectric Phenomena NAS-NRC (1969)
- 5) J. Vermeer ; ibid. (1970)
- 6) 一色, 中山 ; 昭 46 電気学会全国大会, No. 311, No. 1092, No. 1093
- 7) C. A. Buehler ; Conference on Electrical Insulation and Dielectric Phenomena NAS-NRC (1970)
- 8) 藤田 ; 第 4 回電気絶縁材料シンポジウム (昭 46)
- 9) 山本 ; 藤倉電線技報 No. 35 (昭 42)
- 10) 外山 ; 昭 45 電気四学会連合大会 No. 216

(昭和 46 年 11 月 1 日受理)

第 1 回 プラスチックシンポジウム

—— 耐久性とその試験方法 ——

1. 主 催 : プラスチック標準試験法研究会
(東京都千代田区霞ヶ関 3-2-6 東京倶楽部ビル内 Tel 580-0773)
2. 協 賛 : 繊維学会ほか 14 学協会
3. 期 日 : 昭和 47 年 2 月 17 日 (木) 10.00~17.00
4. 場 所 : 発明会館ホール (地下 2 階)
(東京都港区芝西久保明舟町 17 Tel 502-0593)
5. 定 員 : 350 名 (定員に達し次第メッキリます)
6. 聴 講 料 : 無料
7. テキスト : 当日会場で頒布 (市価 800 円)
8. 申込み先 : 上記プラスチック標準試験法研究会