絶縁材料と今後の課題*

門 谷 健 蔵**

展 望

1. はじめに

本報では重電及び弱電の分野で、絶縁性繊維がどのように使われているかを紹介する。電気絶縁において繊維は、ほとんどが薄葉材つまり繊維質基材として用いられ、一部がボードやフェルトのかたちで使われている。いずれにしる繊維質材料は単独で絶縁に使われることは少なく、絶縁油あるいはレジンを含浸した絶縁システムのかたちになっている。

繊維質基材と競合する薄葉材としては、プラスチックフィルム、クラフト紙及び集成マイカがある。なおここではクロス、不織布、合成紙、合成繊維のボード及びフェルトを繊維質材料と考える。もちろん繊維質基材とプラスチックフィルムや集成マイカを貼合せて、それぞれの特長を生かすようにした複合基材もある。又、電気絶縁性ととともに機械的強度が要求される絶縁部材には、繊維強化プラスチック(FRP)が使われるが、ここでは高強度繊維の独壇場である。

まず繊維質基材と競合材料を比較して位置づける。次に重電及び弱電分野における実用例と今後の動向を紹介する。最後に筆者の専門である電気絶縁用FRPについて少し詳しく述べる。

2. 電気絶縁材料としての繊維質基材

電気絶縁材料としては、まず第1に絶縁耐力が優れていなければならない。図1には各種絶縁材料の絶縁破壊の強さの概略を示す。絶縁基材としての合成紙の絶縁破壊の強さは、プラスチックフィルムの約1/10で、クラフト紙や集成マイカと同等である。

図1 各種絶縁材料の絶縁破壊の強さ(AC短時間)

絶縁媒体の絶縁油(鉱油及びシリコン油)と同等である。これよりも密度の小さい不織布やクロスでは、絶縁破壊のバリヤ効果を全く期待できず、空気と同等である。

結局、実用的な絶縁システムはほとんどが複合絶縁であり、繊維質基材と絶縁媒体(絶縁油、ガス)あるいはレジンを組合せている。例えば、

- 1) クラフト紙あるいは合成紙に絶縁油を含浸し、気孔をうめてバリヤ効果を高めた油浸絶縁。
- 2) 集成マイカ(通常ガラスクロス、フィルム、合成紙、不織布で裏打ちしている)にレジンを含浸して、絶縁耐力と機械強度を高めたマイカ絶縁。
- 3) クラフト紙、不織布、フェルトにレジンを含浸したモールド絶縁。
- 4) ガラス繊維基材にレジンを含浸したFRP絶縁のごとくである。これらの実用絶縁における絶縁破壊の強さは25~50 kV/mmである。

*Electrical Insulating Materials-Their Progress and Future Problem

**K. Kadotani, 日立化成株式会社山崎工場 主任研究員

実用上の機器絶縁では短時間絶縁破壊の強さよりも、長時間領域における課電寿命特性（ $V-t$ 特性）が重視されるが、図2にこれを示す。通常、大容量

図2 代表的絶縁システムの課電寿命特性

電力機器（発電機、変圧器）では25～30年の寿命を考え、電動機、配電用変圧器、車両用機器では7～15年の寿命を考えて設計電界をきめている。そこで長時間の $V-t$ 特性が高いほど、高電界設計が可能である。高電圧機器にレジン含浸プラスチックフィルム絶縁が採用されないのは、長時間領域の $V-t$ 特性がマイカ絶縁に比べて劣るからである。実用絶縁では、含浸が容易な繊維質基材に、絶縁油あるいはレジンを含浸し、部分放電を生じない電界の強さで使うか、あるいはある程度のボイドを含み部分放電を生ずるが、無機質のマイカのバリア効果で劣化を長びかせるか、のどちらかをとっている。

絶縁システムには絶縁耐力のほかに、用途によって機械強度、可撓性、耐熱性、耐湿性、加工性などが要求される。又、価格と性能のかねあいも重要である。以下に機器ごとに現状の絶縁と今後の課題について、繊維質基材に焦点を当てて述べる。

3. 回転電気機器

大型発電機は、原動機の種類によってタービン発電機と水車発電機に分類できる。絶縁の耐熱区では、前者はB種（130℃）、後者はB種とF種（155℃）がある。回転子の絶縁はエポキシガラス積層品（FRP）で構成されている。FRPの基材は平織ガラスクロスのほか、一方向織ガラスクロスも使われる。固定子コイルの絶縁は、エポキシ含浸マイカ絶縁である。絶縁方式には、マイカ基材を巻回してからレジンを含浸するVPI方式と、あらかじめレジンを含浸したマイカテープを巻回するプリ

ブレグ方式がある。VPI方式では、和紙あるいは不織布で裏打ちした、はがしマイカあるいは集成マイカのテープが使われ、プリブレグ方式では主としてガラスクロス裏打ち集成マイカテープが使われる。裏打ち材の厚さは0.03～0.05 mmで、テープの引張強さをだすのが目的であり絶縁耐力は期待しない。成形した絶縁層の絶縁耐力も機械強度もマイカが受持っている。プリブレグ方式が主流になりつつある。

高圧誘導電動機と車両用直流電動機の絶縁はほぼ同じである。前者はF種が中心であるが、後者にはF種とH種がある。固定子コイル絶縁はいずれもマイカ絶縁であり、含浸レジンとしてF種はエポキシ、H種ではメーカによりISOX、ポリイミド系、シリコーンなどが使われる。方式はVPI方式であるが、コイルを固定子スロットに入れて結線してから全体にレジンを含浸するので、全含浸あるいは一体注入方式と称される。マイカは集成マイカで、裏打ち材にはアラムド紙やポリイミドフィルムが使われ、少量のシリコーンレジンで貼合せてある。この絶縁基材は集成マイカと裏打ち材の両方に絶縁耐力を期待できるので、発電機絶縁よりも高電界設計している。一般にアラムド紙は0.05 mm、ポリイミドフィルムは0.025 mmのものが使われている。

最近、我国でアラムド紙と集成マイカを熱的に貼合せた複合マイカ紙が開発された¹⁾。これはアラムドのフィブリッドのマイカ捕捉効果が大きいことを利用し、ごく少量（数重量%）のフィブリッドをマイカと混合して湿式抄造した集成マイカとアラムド紙を重ねて熱融着したものである。シリコーン樹脂をバインダとするいままでの貼合せマイカテープは、ISOXやポリイミド系レジンを含浸した絶縁システムにおいて、耐湿性を低下させる原因となるが、この新しいノーバインダの複合マイカテープではその恐れがない。そのため次第にこのテープが普及しつつある。

高圧電動機の固定子スロットライナにはアラムド紙がよく使われているが、この複合マイカシートも使われはじめている。絶縁電線は高圧誘導電動機では発電機と同様のDGC（2重ガラス巻）線が中心で、11 kVあるいは14 kV級ではマイカテープ巻線が使われる。車両用電動機ではDGC線かポリイミドフィルム巻線が使われている。

圧延機用大型直流電動機では、耐湿性を配慮して集成マイカの入らないプラスチックフィルム絶縁が採用される場合もある。これは機器の大きさによって、プリブレグ方式あるいは全含浸方式がとられる。

低圧電動機の固定子絶縁は、エナメル線のスロットライナと相間絶縁に、E種(120℃)ではポリエステルフィルムが使われるが、B種及びF種ではアラミド紙が使われている。

最近液化天然ガス(LNG)のポンプモータとして、極低温環境で使われる高圧誘導電動機がでてきたが、絶縁はエポキシ含浸のアラミド紙裏打ち集成マイカ絶縁で、極低温にも耐えている。一方、低圧誘導電動機あるいは直流電動機で350℃あるいは500℃で運転できるものが試作されている。これはガラスペーパーのスロットライナを用い、セラミック化シリコンや無機塗料を含浸している²⁾。

4. 静止器・ケーブル

大容量変圧器(およそ10 MVA以上)の絶縁は、鉱油含浸クラフト紙及びプレスボードで構成されている。

中容量変圧器にはH種乾式変圧器(およそ10 MVAまで)と、エポキシモールド変圧器(およそ7.5 MVAまで)がある。H種乾式変圧器は³⁾、シリコンレジンを含浸含浸し、空気と共存しておかれる。絶縁電線は低圧コイルはDGC線、高圧コイルはアラミド紙・DGC線が使われる。層間絶縁にはガラスクロス裏打ち集成マイカ、端部絶縁は従来アスベスト紙であったが、耐湿性のよいアラミド紙にとって代られた。ほかに絶縁筒にガラスクロスのFRP、スペーサにガラスローピング引抜きFRPロッドが使われている。

エポキシモールド変圧器は、シリカ粉充填エポキシ樹脂でボイドレスにモールドされる。低圧コイルは一般にアルミシート巻であり、レヤー絶縁にはポリエステル不織布(B種)やアラミド紙(F紙)が使われる。高圧コイルはアルミシート巻のほか、DGC線あるいはアラミド紙・DGC線で構成する方式がある。最近ではシリカ粉充填エポキシモールドの代りに、ガラスクロスプリプレグを巻付けた、プリプレグ絶縁モールドが採用され⁴⁾、小型化と耐クラック性の向上に役立っている。

我国ではエポキシモールド変圧器が主流を占めているが、米国ではアラミド紙を多用したH種乾式変圧器がモールド変圧器を圧倒し、乾式変圧器の95%を占めているとのことである⁵⁾。

車両用変圧器(特別A種)の絶縁は、アラミド紙とシリコン油が主体である。アラミド紙は薄葉シートのほかに、特殊な形状の成形品が使われる⁶⁾。成形法は積層成形とモールド成形がある。前者は原板を切断して重ね、ヒートプレスする。後者は端材

を水浸して離解させ、これを型へ吸着し乾燥したのちにヒートプレスする。どちらの方法も接着剤なしで成形できるのが特徴であり、ヒートプレス時の圧力、温度、時間を調整して、必要な密度の成形品を得る。成形品は厚さ約10 mmまで可能で、同じ密度の薄葉材(厚さ0.75 mmまで)より、シリコン油の含浸が数倍速く、絶縁耐力は同等である⁶⁾。

最近、40 MVA程度までの容量の蒸発冷却式ガス絶縁変圧器が登場した⁷⁾。これはSF₆ガスとフロロカーボン(例えばC₈F₁₆O)を絶縁媒体とし、フロロカーボン(沸点102℃)が、液体あるいは気体で共存して冷却作用をする。耐熱階級はE種である。コイルの素線絶縁には、クラフト紙の代りにポリエステルフィルムが使われる。これは図3のように、SF₆ガス中ではクラフト紙の絶縁耐力が著しく劣るからである⁷⁾。高圧低圧間のバリアー材にはプレスボードが使われている。

図3 絶縁基材のガス及び鉱油中の絶縁耐力

SF₆ガス絶縁開閉装置の絶縁部材は、アルミナ充填エポキシモールド品(スペーサ、絶縁筒)とFRP(操作ロッド、絶縁筒)である。SF₆ガスに微量の水分が共存した状態で、大電流遮断アークに触れると、腐食性の強いHF及びH₂SO₄が生ずる。FRPのガラス繊維はHFにおかされるので、FRPの表面はポリエステルクロスを基材にするか、耐食コーティングを施している。最近ではアラミド繊維、高強度ポリエチレン繊維などが登場しているが、価格的にマッチしないので検討されていない。

電力ケーブルの絶縁は、油浸クラフト紙から次第に、架橋ポリエチレン(CV)絶縁ならびに、アルキルベンゼン含浸プラスチックフィルムクラフト

紙複合絶縁に変わりつつある。液体窒素（ -196°C ）含浸の極低温ケーブルで、ポリエチレンフィルムとともにポリエチレン合成紙が検討されてきたが、実用化に至っていない。原子力発電所の耐放射線性と難燃性が要求される制御ケーブルの絶縁に、シリコンゴムやビニルとガラス編目の構成が使われている。

電力用コンデンサは、鉱油含浸クラフト紙絶縁から、最近では油浸紙の一部又は全部をポリプロピレンフィルムに置換えた紙・フィルム複合、又はオールフィルム構成にアルキルナフタレンなどの芳香族炭化水素油を組合せた絶縁（誘電体）に変わりつつある。

5. 核融合実験装置・超電導コイル

これらの機器では新規な絶縁システムが積極的に採用されている⁹⁾。京都大学のヘリオトンEでは、ひずみに対して強い はがしマイカのエポキシプリプレグが両面を薄いガラスクロスで裏打ちすることで実現されている。又、ガラスクロス層の間に集成マイカシートを挿入したFRPも使われている。

日本原子力研究所のJT-60では、コイルの主絶縁はガラスクロス裏打集成マイカエポキシプリプレグ材、外装絶縁はガラスクロスエポキシプリプレグ材で構成され、外装絶縁とコイル外枠（SUS）の間には、ポリエステルフェルトにレジンを含浸して充填されている。コイル間をしばるのに、ガラスロービングとともにアラミド繊維のトウにレジンが含浸されて用いられている。

トロイダルコイルの導体は、厚さ約16~35 mm、幅270 mmの断面をもつ巨大な銅の帯を、約半周ごとに、ろう付けして巻込んでいく構造である。その層間絶縁は、両側にガラス不織布（約0.25 mm）を貼合せたアラミド紙（0.50 mm）のエポキシプリプレグ材を用いている。ガラス不織布は、接着用レジンの保持と寸法調整を目的としている⁹⁾。

層間絶縁には、電磁力と熱応力が同時に加わり、複雑な応力がかかる。そこで層間絶縁の面に垂直方向の応力と、層間剪断応力が同時に作用する場合の、剥離荷重を測定する必要がある。図4は垂直方向の引張応力が同時に作用する場合の層間剥離強さである¹⁰⁾。アラミド紙では、角度 θ に関係なく層間剥離強さが一定であり、これは繊維のからみ合いが立体的になっているからであろう。集成マイカとフィルムは剥離強さが不足し、ガラスクロスと不織布は導体表面の突起に貫通されやすく、クラフト紙は耐放射線性が劣るので、最終的にアラミド紙が採用され

図4 繊維質基材エポキシ樹脂積層品の層間剥離強さ

ている。なお、アラミド紙はエポキシとの接着性がよく、剥離は紙の内部で起こる。

JT-60に使用した絶縁システムは全て、 1×10^{10} radsのガンマ線照射を行い、電気的機械的特性がほとんど劣化しないことが確認されている¹¹⁾。

超電導コイルは、次期の核融合実験装置のほか、粒子加速器、磁気浮上列車の車載コイル、NMP-CT、超電導発電機などに応用され、今後急速な普及が期待される。その絶縁材料は別にまとめられているが¹²⁾、繊維質基材としては、ガラスクロス、アラミド紙、ポリエステル不織布などが、最終的にはレジンを含浸した複合材として使われる。これらの極低温機器用材料では、極低温（ -269°C で使われるが、材料の強度は -196°C とあまり変わらない）における機械強度が要求される。特に極低温でも引張破断伸びがかなりある、タフな材料が必要である。

表1には繊維質基材の極低温における機械的性質を示す¹³⁾。クラフト紙とレーヨン不織布は破断伸びが小さく、ポリエチレン合成紙は熱収縮率が大きいため不適である。表2には繊維質基材とエポキシ樹脂の複合材の物性を示す¹³⁾。ここで特異なのはガラス繊維基材のFRPで、 20°C よりも -196°C のほうが破断伸びが大きいためである。これはガラス繊維そのものが、極低温で破断伸びが増大するからである¹⁴⁾。他の繊維ではそのようにならない。

ガラス繊維FRPは極低温では、強さが約1.7倍、弾性率が約1.4倍、破断伸びは約1.3倍になる¹³⁾。しかし極低温では破断にかなり先行して、樹脂にクラックが入り、そのひずみは室温の破断ひずみの約50~60%である¹⁵⁾。ともかく極低温用の絶縁構造物はガラス繊維FRPの独壇場である。極低温ではカーボン繊維FRPのほうが熱伝導率が小さいので¹⁶⁾、

表1 繊維質基材の極低温における機械的性質

繊維質基材	引張強さ (kg/mm ²)		破断伸び (kg/mm ²)		熱収縮率 (%)
	20℃	−196℃	20℃	−196℃	20℃→−196℃
クラフト紙	10	15	4	1.2	0.1
レーヨン不織布	2	3	20	1.8	0.3
ポリエステル不織布	2	3	55	30	0.5
ポリエチレン紙	6	12	20	5	1.2
アラミド紙	9	15	20	3	0.2

表2 繊維質基材エポキシ樹脂積層品の極低温物性

繊維質基材 (強化材)	引張強さ (kg/mm ²)		破断伸び (%)		熱収縮率 (%) 20℃→−196℃	
	20℃	−196℃	20℃	−196℃	沿層	貫層
クラフト紙	12.8	13.1	1.4	1.1	0.27	0.60
レーヨン不織布	4.8	9.0	2.3	1.8	0.78	0.83
ポリエステル不織布	7.7	12.7	3.4	2.8	0.77	0.82
ポリエステルクロス	6.7	11.7	3.4	2.9	0.77	0.86
ナイロクロス	9.7	13.1	17.8	4.7	0.82	0.88
ガラスクロス	24	46	4.3	5.2	0.23	0.65
ガラスロービングクロス	37	57	4.8	6.8	0.20	0.67
ガラスマット	13	25	2.4	4.5	0.30	0.68
カーボクロス	48	50	1.2	1.2	0.02	0.87
アラミドクロス	42	46	2.1	2.2	0.00	0.93
クラフト紙(クレープ)	5.2	7.3	2.5	2.2	0.40	0.67

断熱支持体として一部で検討されている。又、宇宙関連機器では、繊維方向の熱収縮率がほとんど0で、かつ比強度が大きいことから、カーボン繊維FRPやアラミド繊維FRPが使われている。前者は破損したときに導電性カーボン繊維が飛散し、電子機器に部分短絡などの故障を起こす恐れがあるので、後者と使い分けられている。

6. 配線板・ワニスクロス・スリーブ

弱電用途では多層印刷配線板、フレキシブル配線板並びにワニスクロスがある。

多層印刷配線板は耐熱軟化温度で分類すると、100～150℃は紙フェノール、紙エポキシ及びガラスエポキシ、150～200℃ではガラス基材の耐熱あるいは変成エポキシ、200℃以上ではガラス基材のポリイミドとビスマレイミドトリアジン (BTレジン) がある。ガラス基材はガラスクロスである。ほかにポリエステルクロスやガラス不織布基材のエポキシが一部ある。

我国では民生用がほとんどで、紙フェノールが約35%、ガラスエポキシが約25%を占め、他はわずか

である。一方、米国ではガラスエポキシが約70%で、紙フェノールは5%以下である。ほかに特色のある不飽和ポリエステルと、ガラスマット、ガラスヴェール又はガラスクロスを組合せた、コンポジットタイプが約20%ある。このコンポジットタイプは経済性にねらいがある。

我国でも、表布にガラスクロス、心材に紙やガラス不織布を用いた、エポキシコンポジットタイプで、優れた電気特性と打抜加工性を有するものが開発され¹⁷⁾、今後コンポジットタイプが伸びる傾向にある。ガラスエポキシでは、厚さ0.1mm程度のガラスクロスが使われるが、クロスの異方性をなくすことにより特性が著しく改良される¹⁸⁾。高密度多層配線板 (VLSI用) では、実装するチップの熱膨張率 (6.4 ppm/℃) に極力近いことが要求される¹⁹⁾。現状のガラスエポキシで16 ppm/℃、ガラスポリイミドでは10 ppm/℃になるが未だ大きい。電気用Eガラスの代りに石英ガラスの繊維クロスにすると約5～7 ppm/℃となるが、未だ値段が高い。アラミドクロスにすると熱膨張率はマッチするが、打抜加工性やスルーホール接続の信頼性に劣る。

フレキシブル配線板は、コンピュータのパッケージ、電話の受話器、リレー、自動車の計装パネル、カメラ、時計、電卓、電子レンジ、ラジオ、テレビ、テープレコーダなどに広く使われている。基材はポリエステルフィルム、ポリイミドフィルムが主流であるが、アラミド紙あるいはガラスエポキシも使われている²⁰⁾。アラミド紙基材はハンダ耐熱性、耐折性、価格の点で優れているが、吸湿性が高いため吸湿時の寸法安定性に難点がある。しかし米国ではカメラの配線用に多く使用されていることから、我国でも期待できる。

ガラスエポキシ基材では、寸法安定性、耐熱性、可撓性、ハンダ耐熱性に優れ、かつ部品搭載が可能という長所を持っている。価格的にはポリエステル基材とポリイミド基材の間である。

ワニスクロス及びテープ類は、繊維質基材に電気絶縁ワニスを塗布したもので、完全硬化した、いわゆるワニスクロス類と、半硬化のプリプレグとがある。いずれも、重電・弱電のあらゆる部分の絶縁に広く使われている。

表3は電気絶縁用ワニスクロスの種類を使用温度上限で示した²¹⁾。一般にワニスクロスは綿クロス基

表3 電気絶縁用ワニスクロスの種類

基 材	含 浸 塗 布 剤	使用温度上限
人絹、ビニロン セルローズアセテート	油性	105℃
ポリエステルクロス ポリエステル不織布 紙、綿クロス、絹クロス ナイロクロス	油性	105℃
ポリエステルクロス ポリエステル不織布	アルキッド樹脂系	120℃
ガラスクロス	アルキッド樹脂系	130℃
紙	イソ又はテレフタル 酸アルキッド樹脂系	105℃
ポリエステルクロス ポリエステル不織布	アルキッド樹脂系 エポキシ樹脂系	120℃
ガラスクロス アラミド紙 アスベスト紙	イソ又はテレフタル 酸アルキッド樹脂系 エポキシ樹脂系	155℃
	シリコン樹脂系 シリコンゴム系	180℃

材のものをいう。ほかにワニスシルククロス、ワニスレーヨックロス、ワニステレフタレート（ポリエステル）クロス、ワニスガラスクロスなどと称している。ワニスガラスクロスは、中容量電動機のスロットライナや層間絶縁のほか、小型変圧器の絶縁に使われる。シリコンワニスガラスクロス及びシリコンゴムガラスクロスはH種絶縁(180℃)の回転機、変圧器、誘導炉、溶接機などのコイル絶縁に使われ

る。

ワニスバイアステープはシームレスバイアスクロスにワニスを塗布・乾燥し、所定幅に切断して作るが、現在では通常のクロスをバイアスに切断し、貼合せて作ることが多い。このバイアステープは、湾曲部のテーピングに適している。

プリプレグテープは、ポリエステル不織布及びクロス、アラミド紙、ポリイミド系など比較的耐熱性の高いレジンを含浸塗布し、半硬化状にしたもので、テーピング作業に適し、加熱硬化後は強固な絶縁となる。

これらの他に、編組の繊維スリーブにワニスを塗布・乾燥した、含浸スリーブがあり、各種電気機器の口出線、配線、接続部や高温個所のカバーに使われている。

7. FRP

最後に筆者が専門とする電気絶縁用FRPについて述べる。電気機器におけるFRPについては、10年前に「20年の歩み」²²⁾を書き、最近また「30年の歩み」²³⁾をまとめた。実用例の写真を掲載したので参照されたい。

最新の成果としては、極低温用FRPがある。これは科学技術振興調整費による「超電導・極低温基盤技術に関する研究」の一環として、日立が国内の代表的なFRPメーカ4社の協力を得て開発した²⁴⁾。簡単に言うと貫層方向の熱収縮率（室温→極低温）が、銅あるいはステンレス鋼（SUS）と同等のガラス基材積層品である。

図5はエポキシ及びポリイミド系レジンマトリックスとして、各種の織り構成のEガラスと組合せた積層品の、沿層方向（ $\alpha_{\parallel}$ ）と貫層方向（ $\alpha_{\perp}$ ）の熱収縮率を示す。図より、 $\alpha_{\perp}$ は $\alpha_{\parallel}$ の約2倍である。また図6は各種の繊維質基材によるエポキシ積層品の熱収縮率を示す。図6より分るように、 $\alpha_{\parallel}$ を小さくするには、熱収縮率の小さいカーボン繊維やアラミド繊維のクロスを使えばよい。しかしこのようにして $\alpha_{\parallel}$ を小さくすると、逆に $\alpha_{\perp}$ が大きくなってしまふ。これはレジンの収縮が沿層方向に抑制されるので、その分貫層方向に余計に収縮するためである。

そこでともかくガラス含有率を可能な限り増して、 $\alpha_{\parallel}$ と $\alpha_{\perp}$ を同時に低減しようと考えた。平織ガラスクロスの代りに、朱子織あるいはロービングクロスを用い、一部無機質粉の添加も試みた。図5において、ガラス含有率約85重量%を達成しているが、これは有沢製作所が1方向織ガラスクロスを用い

図5 ガラスクロス積層品の熱収縮率 (20℃→-196℃)

図6 繊維質基材エポキシ樹脂積層品の熱収縮率 (20℃→-196℃冷却時)

て、プリプレグプレス方式で成形したものである。これは体積にすると約73%であり、極めて高密の充填である。外国でも同様の目的で高密度低熱収縮率FRPを開発しているが、せいぜい82重量%までである。なお、Eガラスのほかに、Sガラス、Rガラス及び石英ガラスも検討され、 $\alpha_{\perp}$ がS及びRガラスでは約0.05%、石英ガラスでは約0.1%とさらに小さいことが分った。

次に極低温下で用いるFRP積層管について述べる。一般に積層管は極低温にすると層割れを生じる傾向がある。積層管の材質によって、層割れを生じない限界の、外径(D_1)と内径(D_0)の比がさまる。

層割れの原因は、積層管では一般に周(沿層)方向の熱収縮率 $\alpha_{\perp}$ よりも径(貫層)方向の熱収縮率 $\alpha_{\parallel}$ のほうが大きいので、冷却すると径方向に引張り応力を生じるからである。この方向には繊維が全く配向していないので、引張強さが小さく、結局層割れが起こることになる。径方向の引張り応力は、 $\alpha_{\perp}/\alpha_{\parallel}$ 及び D_1/D_0 が大きいほど大きい。そこで層割れ発生限界の D_1/D_0 は $\alpha_{\perp}/\alpha_{\parallel}$ と相関がある。

図7は各種繊維質基材のエポキシ積層管において、両者の関係をプロットした。一般に有機繊維基

図7 繊維質基材エポキシ積層管の極低温冷却時 (20℃→-196℃) 層割れ発生限界

材では図6のように $\alpha_{\perp}$ と $\alpha_{\parallel}$ の差が小さく、 D_1/D_0 は大きい。先に開発した極低温用エポキシモールドブッシングでは、ポリエステル不織布を用いた²⁵⁾。クラフト紙ではクレープ(しわ)加工すると異方性が低減され、層割れが生じにくくなる。ガラス繊維基材では D_1/D_0 は1.3までである。3方向織の基材を用い、異方性を低減すると同時に貫層方向の引張強さを向上すれば、層割れ発生限界 D_1/D_0 を大きくできるであろう。

8. 結 び

電気絶縁材料としての各種繊維質基材の位置づけを述べて結びとする。

- 1) アラミド紙はフィルム(絶縁耐力高い)と不織布(レジンと接着良い)の長所を合せ持つ、画期的な絶縁基材である。アラミド繊維の成成品、アラミドマイカ紙も優れた絶縁基材として、有用である。
- 2) ポリエチレン合成紙、ポリプロピレン合成紙、レーヨン不織布、アラミドクロスなどは、絶縁基材

としては不適で、ほとんど使われない。

3) ポリエステル不織布とフェルト、ガラス不織布、アスベスト紙、綿クロス、絹クロスなどは、それぞれの用途に応じて有用である。

4) E ガラスクロスは絶縁基材と強化材の機能を合せ持ち、極めて有用である。今後さらに織り構成の工夫と、表面処理の改良が期待される。S、R及び石英ガラスの基材は、未だそれほど必要とされていない。

5) クラフト紙、フィルム及び両者の貼合せ材が、未だにかなり使われている。これらに代る合成繊維質基材の出現が期待される。

文 献

- 1) 野寄, 西山, 清野, 木村, 三好; 繊維誌, **38**, T348 (1982)
- 2) 曾根, 門谷; 電気学会絶縁材料研究会資料, EIM-83-8 (1983)
- 3) 門谷, 土井, 森戸, 竹内; 日立評論, **57**, 403 (1975)
- 4) 美藤, 林; 工業材料, **31**, 3, 104 (1983)
- 5) 栗田; 第17回電絶展予稿集, 141 (1982)
- 6) 磯部, 森戸, 竹内, 山口, 大江, 長岡; 日立評論, **58**,

881 (1976)

- 7) 春本, 吉田, 桃山, 伊奈, 田村; 三菱電機技報, **56**, 926 (1982)
- 8) 春本, 吉田, 桃山, 菅, 渡辺, 玉置, 博多; 昭58電気学会全国大会, 631
- 9) 安芸, 神谷, 松延, 山浦, 門谷; 日立評論, **63**, 481 (1981)
- 10) K. Kadotani and F. Aki; Composites, **23**, 267 (1983)
- 11) 門谷, 永井, 安芸, 神谷, 安東, 西尾, 川崎; 電気学会絶縁材料研究会資料, EIM-93-127 (1983)
- 12) 門谷; 低温工学, **20**, (1985)
- 13) 門谷, 永井, 安芸; 電気学会絶縁材料研究会資料, EIM-83-104 (1983)
- 14) M. P. Hanson; Cryogenic Properties of Polymers, Marcel Dekker, Inc. (1967)
- 15) K. Kadotani; Composites, **11**, 199 (1980)
- 16) 川手, 堀内, 園井, 多井; 低温工学, **14**, 164 (1979)
- 17) 宮川, 横田; 日立化成テクニカルレポート, **4**, 19 (1985)
- 18) 塚西, 横沢, 信耕; 同上, **1**, 8 (1983)
- 19) 中川; 同上, **1**, 5 (1983)
- 20) 原沢, 大沢; 工業材料, **30**, 3, 27 (1982)
- 21) 電気・電子絶縁材料, 日本電気協会新聞部刊 (1978)
- 22) 門谷, 磯貝; 強化プラスチック, **20**, 529 (1974)
- 23) 門谷; 同上, **30**, 93 (1984)
- 24) 永井, 福士, 鎌田, 門谷; 第19回電絶展予稿集, 83 (1984)
- 25) 永井, 福士, 笠原, 門谷; 昭59電気学会全国大会, 393

< 投稿歓迎!! >

繊維工学編集委員会では、下記のような種類の原稿の投稿を歓迎いたします。学問的、技術的知見、経験などで、公開できるものはできるだけ多く「繊維工学」誌上にご発表いただき、会員の相互啓発、ひいては我国の学界、産業界の発展に寄与していただきたいと思います。

総 説: 提案, 意見, 批評等の論説

展 望: 研究, 技術, 経済などの総合的な記事

技術報告: 工業的に役立ち、技術的に価値を有する実
際的な試験, 研究, 調査等

最近の技術: 繊維工業分野に直接あるいは間接に関係する
最新の内外の技術, 重要トピックス等の
平易な解説記事

研究解説: 研究論文の平易な解説記事

技術解説: 工業技術の解説記事で工夫, 考案, 改良等
を含む

講 義: 系統的でまとまった知識を与える記事

資 料: 調査, 解説等の技術的に価値ある資料で、
他のどの種類にも該当しないもの

製品紹介: 技術的に優れた製品の紹介

見学記: 学校, 研究所, 会社等の見学記録

座談会: 対談, てい談, 座談会の記事

委員会報告:

研究会報告: 委員会, 研究会等に関する報告記事お
委員会だより; よび記録

研究会だより等:

その他「技術相談室」、「会員の声」、「随想」、「書評」、
「サフィックス」、「シグマ」などがある。

◎投稿後の原稿の取扱い

1. 原稿の採否, 分類等については繊維工学編集委員会
で決定します(依頼あるいは投稿された原稿は専門
分野の査読委員が査読し訂正を求めるとか却下
されることがありますので予めご承知おき下さい)。
2. 掲載された原稿については、規定の原稿料をお支
払いします。
3. 校正は原則として初校ゲラにて1回お願いします。
4. 抜刷は30部に限り進呈いたします。
5. 投稿にあたっては本会「投稿規定」をご参照の上、
所定の原稿用紙(希望により送付)をご使用下さい。
6. 著作権は本会に属します。