# ボイドレスFRPの特性

# Properties of Fiber Reinforced Plastics

Hitachi has succeeded in developing a new type of void-less fiber reinforced plastics (FRP) by using a special mold process. Due to non existence of voids in its structure this FRP features superior electrical properties and low moisture absorption. Also, made of epoxy resin with high thermal stability it shows outstanding weight loss characteristics in the heating process, and is superior in dimensional stability.

This article introduces some examples of its application to electric machines which has brought about an appreciable improvement in machine reliability.

土屋昭夫\* Akio Tsuchiya
門谷建蔵\*\* Kenzô Kadoya
井上利夫\*\*\* Toshio Inoue
藤村克人\* Katsuto Fujimura

#### 11 緒言

FRP(Fiber Reinforced Plastics)は、機械的強度が強く、かつ電気絶縁性、耐食性、耐熱性および非磁性などのすぐれた性質を持っているので、これまでにも金属材料に代わって、構造材料として各種の分野に使用されている(1)-(3)。しかし、FRPにも強度に方向性がある。弾性率が金属に比較して小さい、内部ボイド(空げき)があるため破壊電圧があまり高くない、などの欠点があるため目的によっては、特性上利用できないこともあった。したがって、これらの欠点が一つでも改良されればそれに応じた用途を開発することができる。日立化成工業株式会社で開発したボイドレスFRPは特殊な製法によるもので、これまでのFRPの欠点である内部ボイドがないので、破壊電圧や、コロナ開始電圧が高く、電気機器における高電圧印加部の絶縁部品として利用することができるものである。本報告はボイドレスFRPの特性およびその用途について述べたものである。

## 2 ボイドレスFRPの種類

ボイドレスFRPには基材としてガラス繊維だけでなくテトロン、ビニロンなどの合成繊維、さらにはアスベスト、紙、綿、などの天然繊維も自由に使用することができる。また2種以上の繊維基材を併用できるので、それぞれの特長を生かしたFRPを作ることができる。表1はこれまで製品化したな

かからガラス基材を使用したボイドレスFRPの種類を示した ものである。

## 3 ボイドレスFRPの特性

FRPの製造方法には一般にプレス成形、ハンドレイアップ、スプレイアップ、マッチドダイ、フィラメントワインディングおよび引抜き成形(4)などがあるが、これらの方法で作った製品の内部には必ず多少なりともボイドが存在する。このようなFRPに、電圧が印加されるとボイドの部分で放電が起こり、これが電極間の絶縁破壊につながる原因となる。そのため全体としては、この種のFRPの破壊電圧は高くない。

ボイドレスFRPに対しては、基材や樹脂の前処理を行ない、特殊な方法でモールドして製作しているので、内部にボイドを含まず特性の均一なFRPが得られる。したがって、前記のような現象が起こらないのでボイドレスFRPは破壊電圧が高いという特長を示している。またボイドがないため吸水率が小さい。図1はボイドレスFRPの断面顕微鏡写真を示したもので、内部ボイドを含んでいないことがわかる。これに対し図2に示すこれまでの製法で作ったFRPの断面にはボイドが存在する表2、表3はボイドレスFRPの一般特性を示すものである。

#### 3.1 電気特性

破壊電圧の高い試料の破壊値を測定する場合には電極端部

表 I エポキシボイドレスFRPの種類 ボイドレスFRPの種類を示している。 Table I Group of Epoxy Voidless FRP

No	品 種	特長	形状	基    材	樹脂
1	VL-E 100	電気特性, 強度	板	目抜平織りガラスクロス	配合(I)
2	VL-E 200	強度	"	平織りガラスクロス	".
3	VL-E 300	"	"	ガラスロービングクロス	配合(I)
4	VL-E 323	"	"	ガラスロービングクロス, マット	配合 (II)
5	VL-E 400	強 度	板	ガラスロービングクロス (FW)	配合(I)
6	VL-EIIO	電気特性	筒	目抜平織りガラスクロス	"
7	VL-E 170	電気特性,耐SF <sub>6</sub> 分解ガス性	筒	目抜平織りガラスクロス	配合(I)

<sup>\*</sup>日立化成工業株式会社山崎工場 \*\*日立製作所日立研究所 \*\*\*日立化成工業株式会社研究開発部

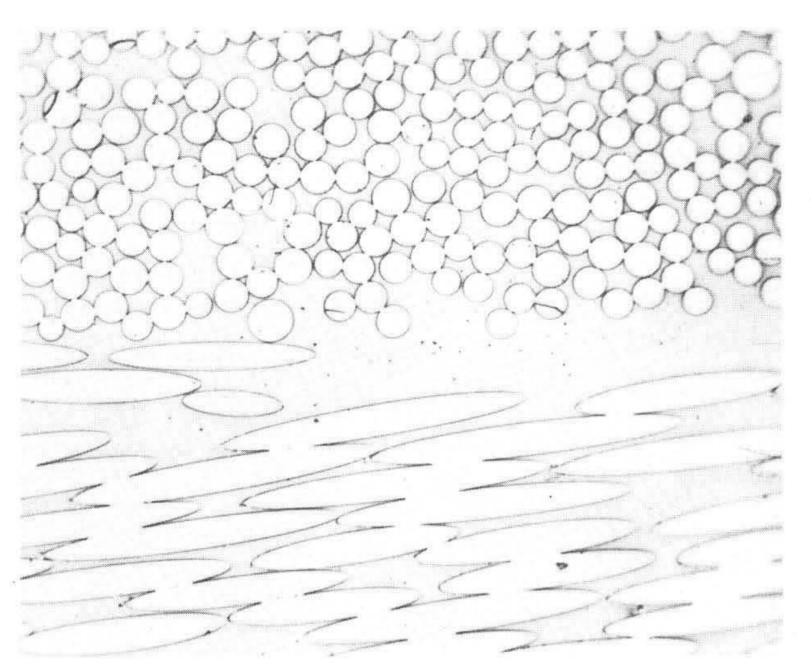


図 I ボイドレスFRPの断面 ボイドレスFRPの断面顕微鏡写真で、FRP内部にボイド(空げき)が見えないことがわかる。(×300)

Fig. I Section of Voidless FRP

のコロナ発生により、本来の試料の持っている破壊値よりも低い値で破壊することがあるので注意が必要である<sup>(5)</sup>。これを防止するには、試料の誘電率の値よりも大きな値をもった媒質を選び電極端部の電界を緩和してコロナ発生を防止させる必要がある。表4はVL-E100を用いて鉱油中(誘電率2.3)と三塩化ジフェニル中(誘電率5.7)で破壊電圧を測定した結果である。誘電率の大きい三塩化ジフェニル中のほうが高いことがわかる(今後三塩化ジフェニルは公害問題で使用が好ましくないが、プロピレングリコールも同等の効果がある)。また、電極の形状により破壊電圧が変わることがある。筆著らは、電極形状についても種々検討した結果図4(a)図4(b)お

表 2 ボイドレスFRP板の一般特性 一般特性の一例で、特に高温の機械強度にすぐれていることを示している。

Table 2 General Properties of Voidless FRP Plates

項目	試験温度	品名	VL-E100	VL-E200	VL-E300	VL-323
比 重			1.90	1.90	2.16	1.80
	RT		28.7	31.5	42.8	34.0
引張り強さ	100°C	kg/mm²	25.3	31.0	35.0	31.4
	150°C		25.0	31.4	32.8	28.5
	RT		42.4	50.2	51.3	41.9
曲げ強さ	100°C	kg/mm²	36.8	44.8	43.2	31.5
	150°C		33.5	37.5	30.5	25.2
	RT		2,000	2,000	2,500	1,550
曲げ弾性率	100°C	kg/mm²	1,750	I-,860	2,000	1,520
	150°C		1,700	1,730	1,700	1,440
	RT		60.6	59.3	71.3	60.5
圧縮強さ	100°C	kg/mm²	47.0	43.8	54.0	44.9
	150°C		43.0	39.1	52.6	36.3
衝撃強さ	RT	kg-mm/mm²	16.6	5.1	18.0	34.3
耐 電 圧	RT	kV/mm	20<	20<	20<	20<
耐アーク性	RT	S	170~200	150~160	150~160	140~150
体積抵抗率	RT	Ω-cm	2.5×10 <sup>14</sup>	1.3×10 <sup>15</sup>	3.1×10 <sup>14</sup>	1.8×10 <sup>14</sup>
吸 水 率	23°C	%	0.04	0.04	0.04	0.03

注:測定はJIS-K69IIによる。

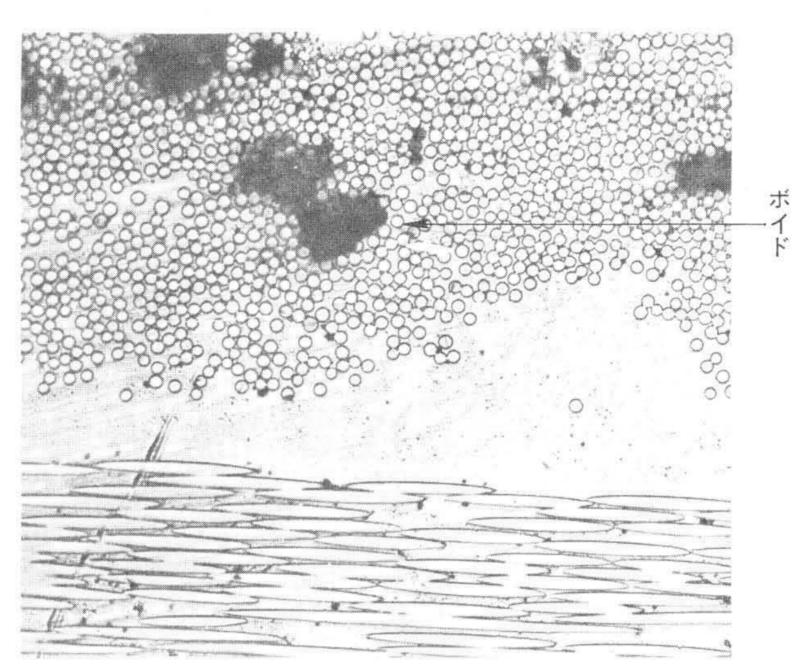


図 2 一般FRPの断面 一般FRPの断面顕微鏡写真で,上部に黒くなっている個所がボイドである。(×75)

Fig. 2 Section of Common FRP

よび図4(c)の電極を使用すればよいことがわかった。

表5は破壊電圧の比較を示したもので、従来法で製作した FRPの破壊電圧は、内部ボイドが存在するためボイドレスFRP の破壊電圧より低いことがわかる。

図5は、電極間距離を長くした場合の破壊電圧を示したものである。一般に破壊電圧は、電極間距離を長くしてもそれに比例せずに飽和する傾向がある。VL-E100は電極間距離が長い場合でも飽和する傾向が少なく、きわめて高い破壊電圧を示している。

図6は耐アーク性の試験結果である。樹脂単独の耐アーク性はばらつきが大きいが、FRPにするとばらつきが小さくな

表 3 ボイドレスFRP筒の一般特性 FRP筒の一般特性の一例を示している。高温強度が高く、また吸水率が小さいことを示している。

Table 3 General Properties of Voidless FRP Cylinders

	***************************************				
項 目	条件	単 位	VT-E400	VT-EIIO	VT-E170
比 重			1.96	1.81	1.85
th 1# 34 4	RT	kg/mm²	48.2	33.2	31.8
曲げ強さ	120°C	Kg/IIIII2	_	31.5	30.0
圧縮強さ	RT	kg/mm²	30.1	29.5	29.0
	120°C		-	23.2	22.0
貫層耐電圧	RT	kV/mm	14.6	15<	15<
沿層耐電圧	RT	kV/mm	-	25<	25<
吸水率	RT	%	0.03	0.05	0.06

注:試験はJIS-K69IIによる。

表 4 破壊電圧の比較 電極周囲の媒質によって同一試料の破壊電圧が 異なることを示している。

Table 4 Comparison of Breakdown Voltages

項目	鉱油中(kV)	三塩化ジフェニル中(kV)	電極
交流貫層破壊電圧	28.4	43.8	図 3(a)
インパルス沿層破壊電圧	68.0	12.3	<b>図3</b> (b)

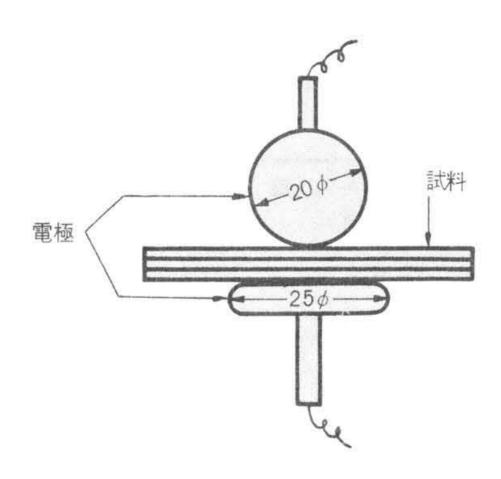


図3(a) 交流貫層破壊電極 JISに規定された電極構成で、鉱油中では破壊電圧の高い試料は電極端部からコロナが発生して、本来の破壊電圧よりも低い値で破壊されやすい。

Fig. 3(a) Electrode for AC Breakdown Voltage Perpendicular to Laminations

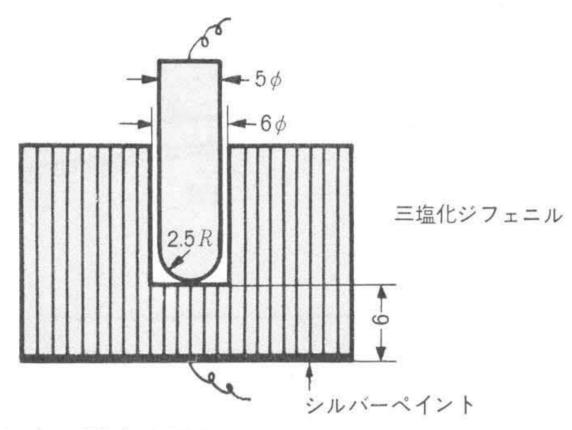


図3(b) 交流沿層破壊電極 JISに規定された電極構成で、媒質を三塩化ジフェニルに変更すると電極端部のコロナ開始電圧を鉱油のときよりも高め、破壊電圧の高い試料の測定に適する。

Fig. 3(b) Electrode for AC Breakdown Voltage Parallel to Laminations

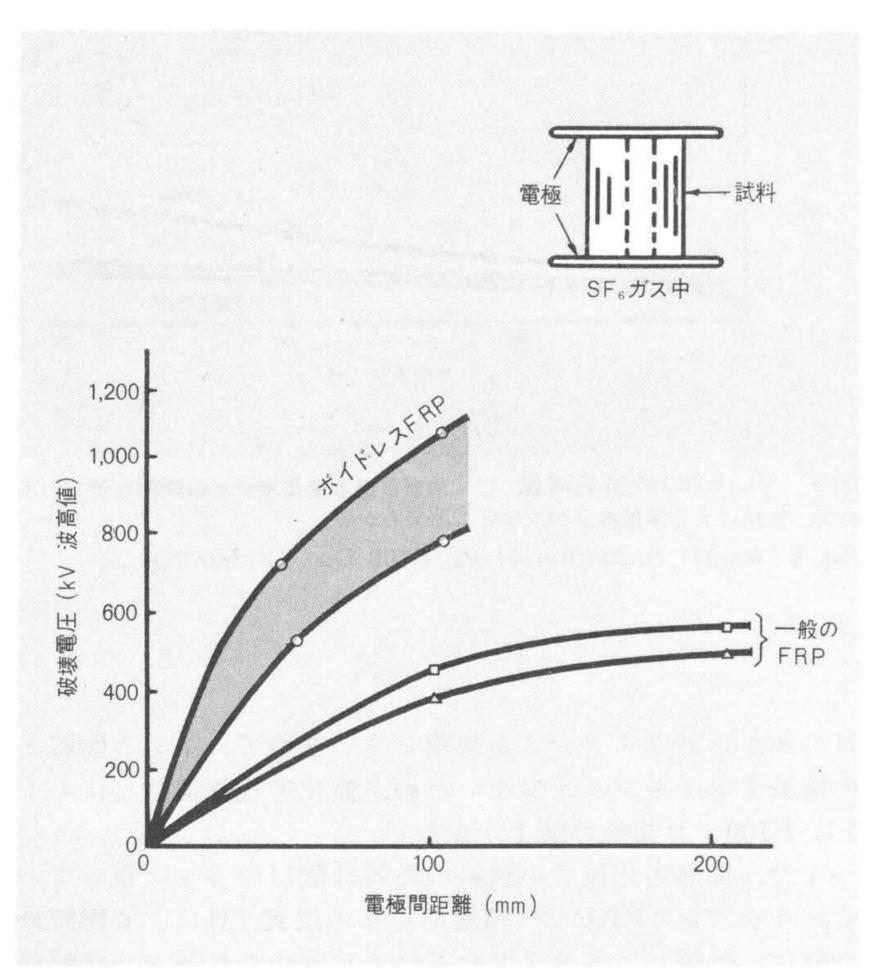


図5 インパルス破壊電圧 一般のFRPは電極間距離を長くしても、あまり破壊電圧は高くならないが、ボイドレスFRPは電極間距離が短くても破壊電圧が高いことを示している。

Fig. 5 Impulse Breakdown Voltage

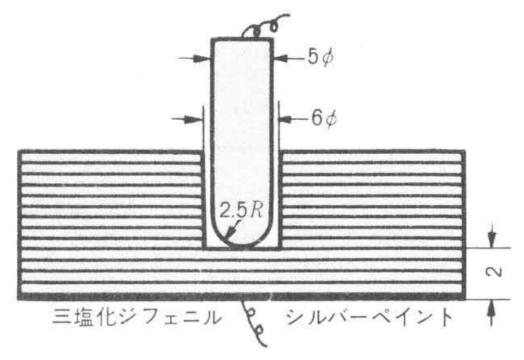


図 4 (a) 交流貫層破壌電極 三塩化ジフェニルを媒質にしてコロナ発生を防止したもの。図 3 (b)と同じ目的。

Fig. 4(a) Electrode for AC Breakdown Voltage Perpendicular Laminations

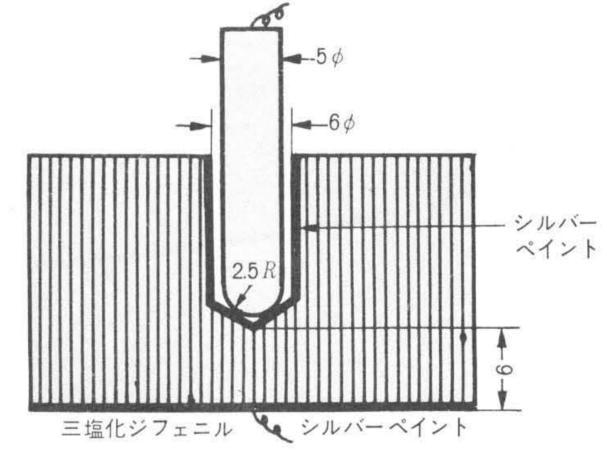


図 4 (b) インパルス沿層破壌電極

図3(b)と同じ目的。

Fig. 4(b) Electrode for Impulse Breakdown Voltage Parallel to Laminations

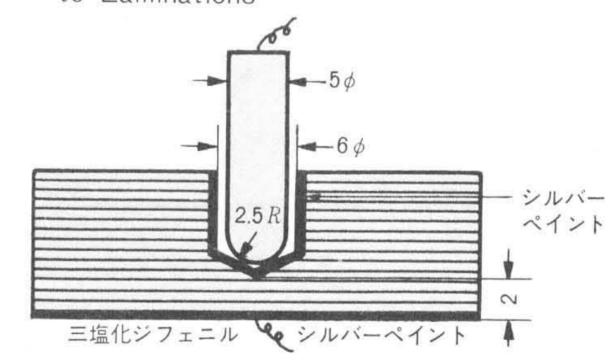


図4(c) インパルス貫層破壌電極

図3(b)と同じ目的

Fig. 4(c) Electrode for Impulse Breakdown Voltage Parallel to Laminations

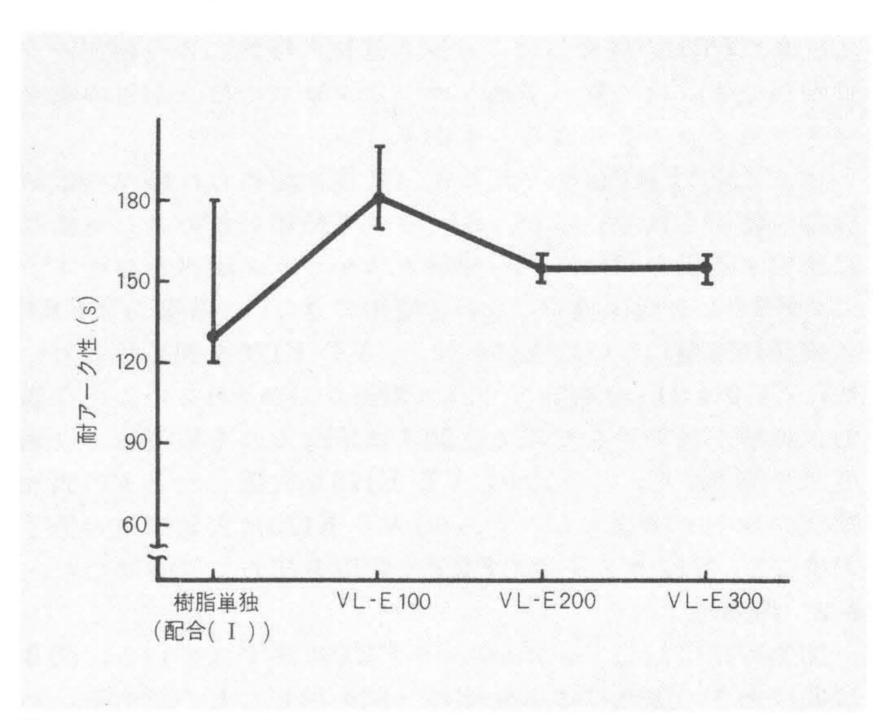


図 6 耐アーク性 FRPの耐アーク性は樹脂が同じでもガラス基材によって異なることを示している。

Fig. 6 Arc Resistance

表 5 ボイドレスFRPの破壊電圧 各種FRPの破壊電圧を比較している。ボイドレスFRPが他のFRPよりもすぐれていることを示している。

Table 5 Breakdown Voltage of Voidless FRP

試料	交 流 沿 層 (kV実効値)	交 流 貫 層 (kV実効値)	インパルス沿層 (kV波高値)	インパルス貫層 (kV波高値)
VL-E100	71.5	55.2	125.	117
VT-E400	50.4	43.2	120	98
ハンドレイFRP板	38.4	41.4	105	93
湿式FWパイプ	28.1	28.4	77	68
電極	図 <b>3</b> (b)	<b>図4</b> (a)	<b>図 4</b> (b)	<b>※ 4</b> (c)

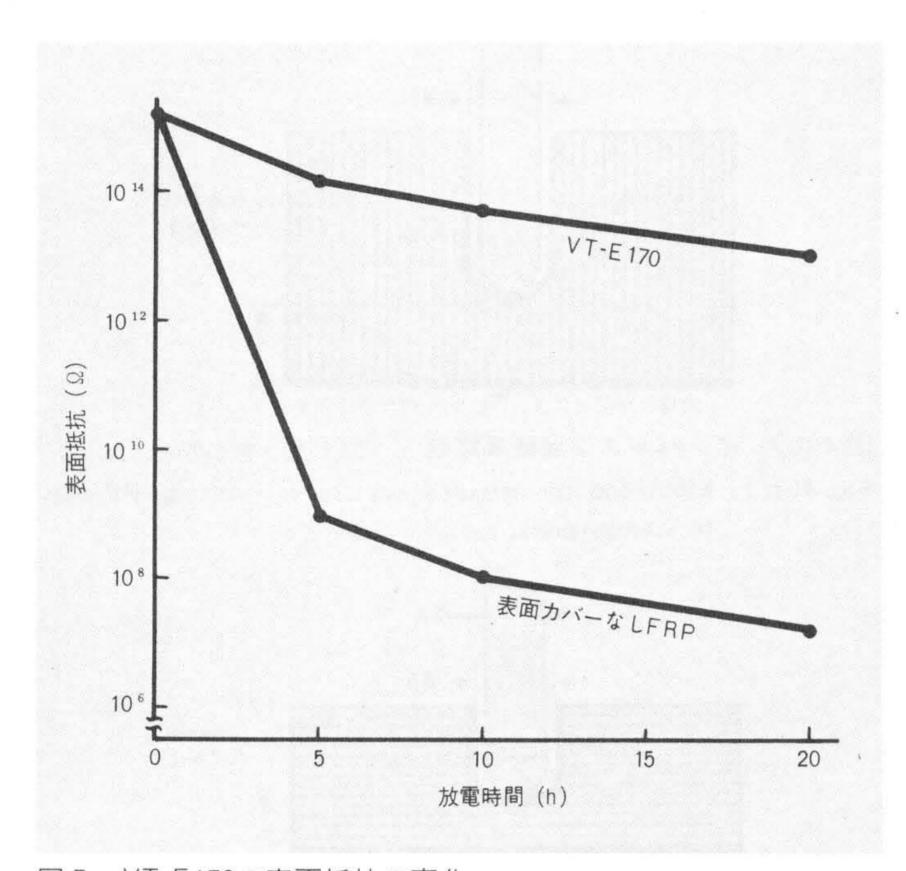


図7 VT-E170の表面抵抗の変化  $SF_6$ 分解ガス中に放置して $\delta$ VT-E170は $SF_6$ 分解ガスにおかされることが少なく、表面抵抗の低下が少ないことを示している。

Fig. 7 Change of Surface Resistance of VT-E170

る。またFRPの場合には、ガラス基材の種類により耐アーク性が異なる。目の荒い平織りガラスクロスのほうが目の細かいガラスクロスよりばらつきが大きい。

ボイドレスFRPはすぐれた電気特性が認められ種々の電気機器に使用されているが、 $SF_6$ ガスを使用したガスしゃ断器に使用する場合には、 $SF_6$ 分解ガスがガラス繊維をおかす $^{(6)}$ のでFRPに表面保護をしないと使用できない。筆著らはFRPの表面保護層について検討を加え、VT-E170を製品化した。VT-E170は $SF_6$ 分解物でガラス繊維がおかされないような表面保護層が付加されている。図7は $SF_6$ ガスを放電により過度に分解させたふんい気中にVT-E170を放置したときの表面抵抗の変化を示したものである。VT-E170は表面抵抗の低下が少なく、 $SF_6$ ガス中でのFRPの使用を初めて可能にした。

# 3.2 耐熱性

加熱劣化に対してもボイドレスFRPはすぐれている。図8 は曲げ強さ、加熱による変化の一例を示したものである。

図9に加熱減量,図10に寸法変化の結果を示した。これらの結果をみればボイドレスFRPは加熱による低下が少なく耐熱性がすぐれていることがわかる。このような劣化特性はガラス基材やエポキシ樹脂の種類により差がある。VL-E200は

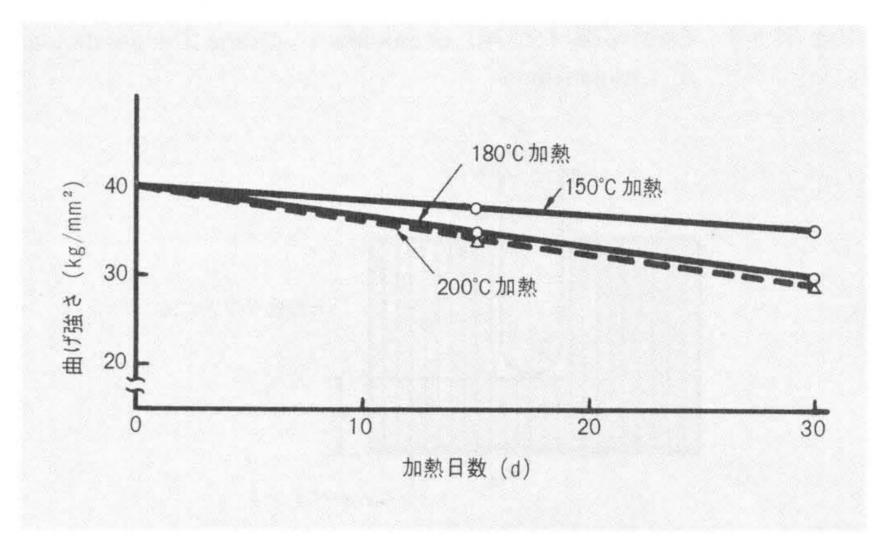


図 8 VL-E200の曲げ強さの劣化特性 加熱劣化後の曲げ強さの低下が少なく、耐熱性にすぐれていることを示している。

Fig. 8 Deterioration Characteristic of Bending Strength of VL-E200

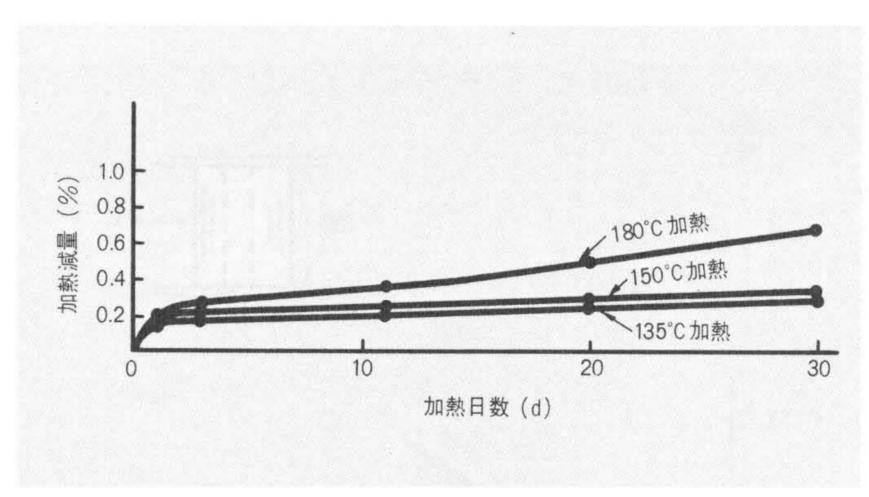


図9 VL-E200の加熱減量 加熱日数と重量減少との開係を示したもので、加熱による重量減少が少ないことがわかる。

Fig. 9 Weight Reduction of VL-E200 Due to Heating

目の細かいガラスクロスを使用しているので、空気と樹脂との接触するチャンスが少ないため、酸化劣化が進行しにくく VL-E100より特性の低下が少ない。

また、加熱劣化後この試料の外観は図11のようになっている。ボイドレスFRPでは積層面からの浸食(熱による樹脂分の酸化、分解)はガラスクロスにより阻止されるが、切断面からの浸食が大きい。これに対し一般のFRPはボイドを含むので、両面から急速かつ不規則に浸食が進むため劣化が大きい。ボイドレスFRPでは切断面に耐熱性樹脂の塗膜をつけると浸食を阻止することができる(7)。

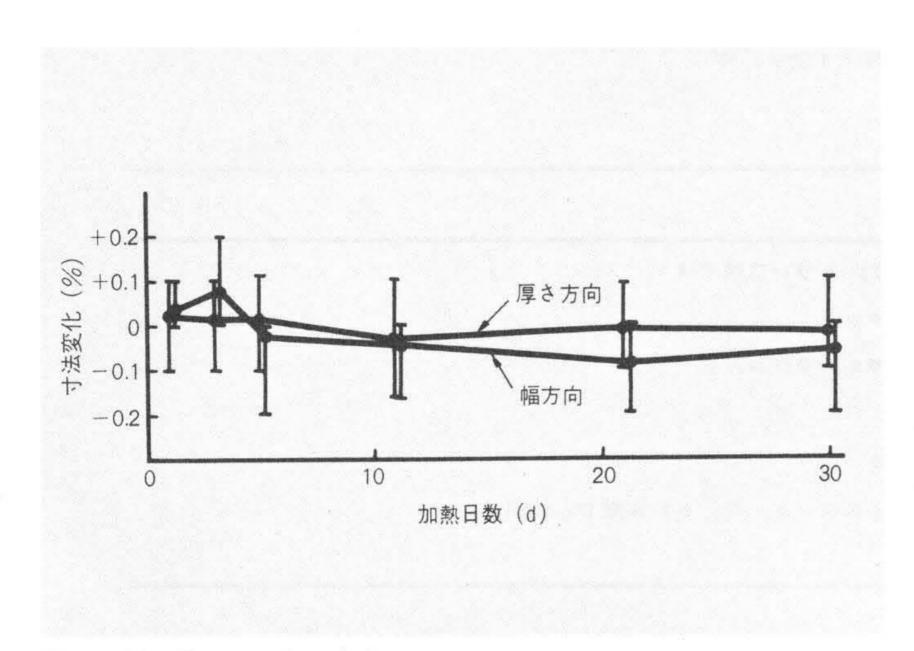


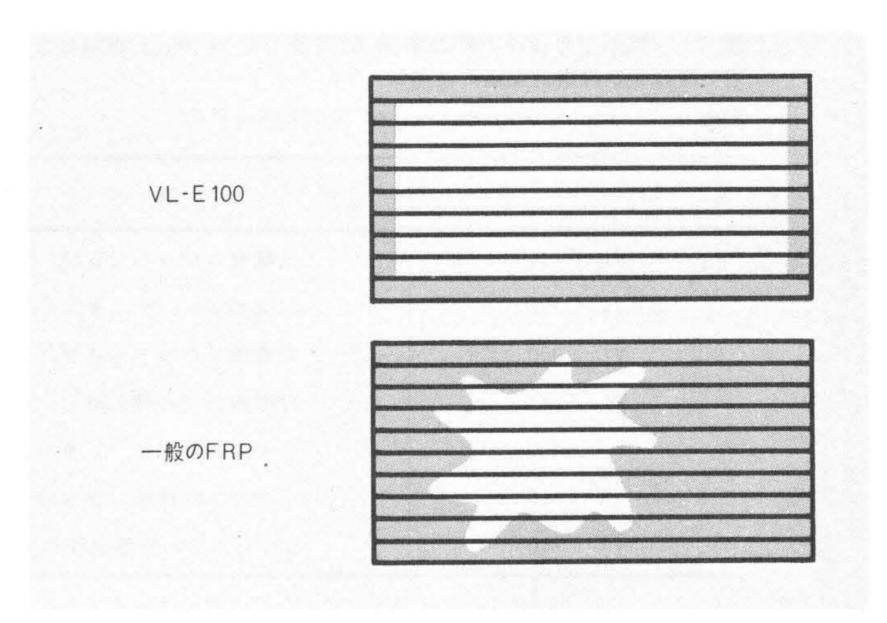
図10 VL-E200の寸法変化 加熱劣化しても厚さおよび幅方向の寸法 変化が少ないことを示している。

Fig. 10 Dimensional Change of VL-E 200

#### 3.3 機械特性

FRPは他のプラスチックと比較して機械強度がすぐれていることはよく知られている。しかし、基材の種類、基材量および樹脂の種類などによって、その機械特性は大きく変わる。ボイドレスFRPに対しては、機械強度も考慮して基材の種類、量および樹脂の種類などを総合的に検討し仕様を決定している。表6はボイドレスFRPの強度の一例を金属材料と比較して示したものである。ボイドレスFRPは、アルミニウム合金よりも比重が小さく、引張強度はアルミニウム合金より高い。VL-E300では軟鋼とほど同じ程度の値である。破断に対する強度メリット(比引張り強度)はアルミニウム合金や軟鋼よりも大きい。

一方、FRPは金属材料に比べて曲げ弾性率の小さいことが欠点である。しかし曲げ剛性では幅を同じにして考えれば、ボイドレスFRPでは厚さを軟鋼の2.2倍にすれば軟鋼と同じ曲げ剛性が得られ、その場合の重量は軟鋼の54%ぐらいにしかならず、軽量化できることになる。ボイドレスFRPは、肉厚の大きい製品を均一な特性で得られる特長もある。電気機器にFRPが使用される場合は機器の温度上昇に対して十分耐えられるようにし、耐熱性および高温強度がすぐれていなければならない。図12に示すようにVL-E100は高温強度にすぐれていることがわかる。



図II FRPの熱劣化による浸食(着色,熱分解)状態 一般のFRPはボイドが存在するため、加熱劣化により樹脂が不規則に酸化劣化を受け、着色や熱分解を起こすが、ボイドレスFRPは表面から均一に酸化劣化していることを示している。

Fig.II Erosion (Coloring and Thermal Decomposition) of FRP

Due to Thermal Deterioration

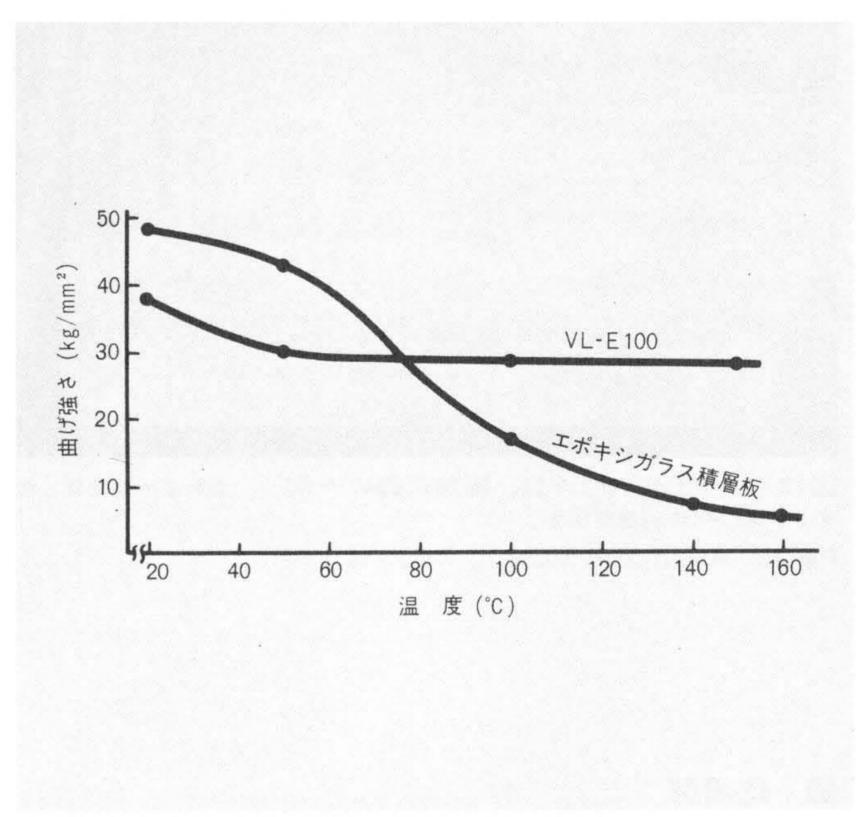


図12 VL-E100曲げ強さの温度特性 VL-E100の高温強度が一般のエポキシガラス積層板よりすぐれていることを示している。

Fig. 12 Temperature Characteristic of Bending Strength of VL-E100

表 6 ボイドレスFRPと金属材料との強度比較 FRPは金属よりも比重が小さく、比強度が高い。 曲げ剛性を金属と同じにしたときにはFRPのほうが軽くなることを示している。

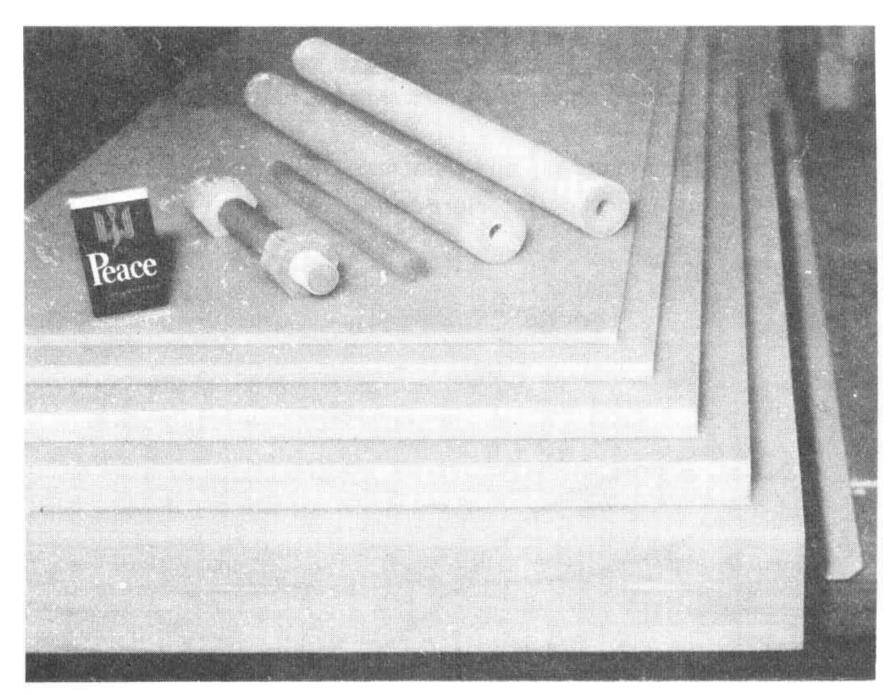
Table 6 Comparison of Strength between Voidless FRP and Metals

項	目	VL-E100	VL-E300	軟 鋼 (SS-4I)	アルミ合金(52S-0)	備考
比 重	(d)	1.90	2.16	7.80	2.70	
引張り強度	$(\sigma_B)$	28.7	42.8	42.0	19.0	
比 強 度	$(\sigma_B/d)$	15.0	19.8	5.4	7.0	破断の強度メリット
曲げ弾性率	( <i>E</i> )	2,000	2,500	21,000	7,000	
$\sqrt[3]{E/d}$		6.3	6.3	3.6	6.8	たわみに対する変形メリット
曲げ剛性	Et³					
t= 1		2,000 (1.91)	2,500 (2.16)	21,000 (7.8)	7,000 (2.90)	t:厚 さ
t= 2		16,000 (3.82)	20,000 (4.32)	_	56,000 (5.40)	( )内はそのときの重量
t=2.2		21,400 (4.20)	26,500 (4.75)	_		4.2/7.8=0.54

表 7 ボルドレスFRPのおもな用途 すぐれた機械強度や電気特性を生かして 電気機器の絶縁構造部品に使用されている。

Table 7 Main Application of Voidless FRP

品 名	用	途
N/I = 100	7V. 7F 100	
VL-E100	発電機スロットくさび、スペーサ、トランス端子板	
VL-E200 VL-E300	絶縁ボルト, ナット, しゃ断器ロッド 発電機スロットくさび, コイル押え, 操作ロッド	
VL-E323	発電機スロットくさび、コイル押え、採1Fロット 発電機コイル押え板	
VT-E400	しゃ断器制弧筒,トランス絶縁筒	
VT-E110	トランス絶縁軸、ブッシュ、ディスタント、コットレル集じん器部品	
VT-E170	SF <sub>6</sub> ガスしゃ断器操作ロッド	



図I3 ボイドレスFRP板、筒加工品の一例 これまでに開発したボイドレスFRPの一例を示す。

Fig. 13 A Cylinder Made of Voidless FRP

# 4 応用例

ボイドレスFRPは、そのすぐれた特性が認められ、電気機器の絶縁構造部品として使用されるようになった。電気機器の小形軽量化の傾向は著しいが、そのため絶縁物にかかる応力および電気的ストレスがしだいに高くなってきている。したがってここに使用される絶縁物には特に信頼性が重要視されている。ボイドレスFRPは品質管理に注意して製造されているので、これを使用した絶縁部品の信頼度は高い。表7は各品種のおもな応用例を、また図13~図15はその製品の外観を示している。今後もその応用範囲は拡大していくものと思われる。

## 5 結 言

ボイドレスFRPは、内部にボイドがなく電気特性および機械特性がすぐれているので、電気機器、特に高電圧機器用FRPとして最適である。さらにその用途を拡大するには、その用途に応じた複雑な形状のFRPを開発する必要があるので今後この方面に検討を加えたい。関係各位のご指導をお願いする次第である。

終わりに臨み終始ご援助,ご指導いただいた日立製作所日

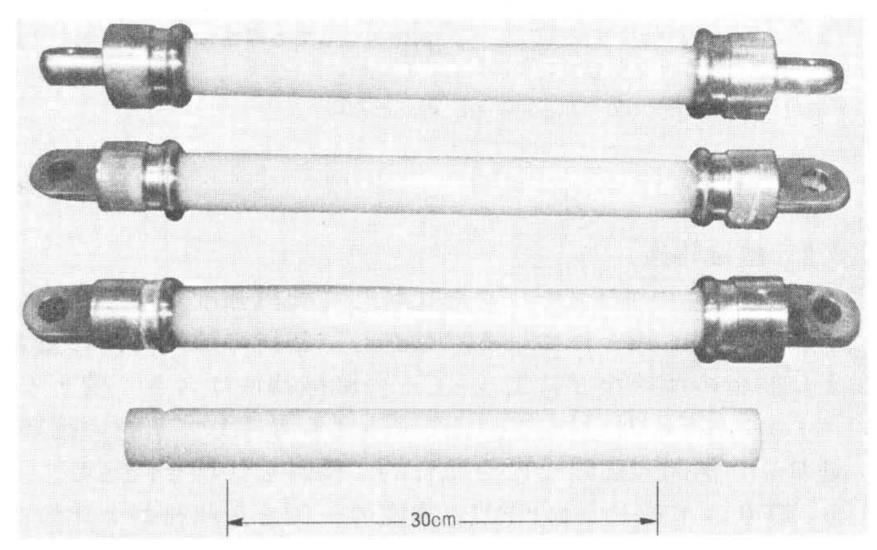


図 14 VT-E 170を使用したガスしゃ断器部品 VT-E 170をガスしゃ 断器絶縁ロッドに使用した例を示す。

Fig. 14 Gas Circuit Breaker Components Made of VT-E170

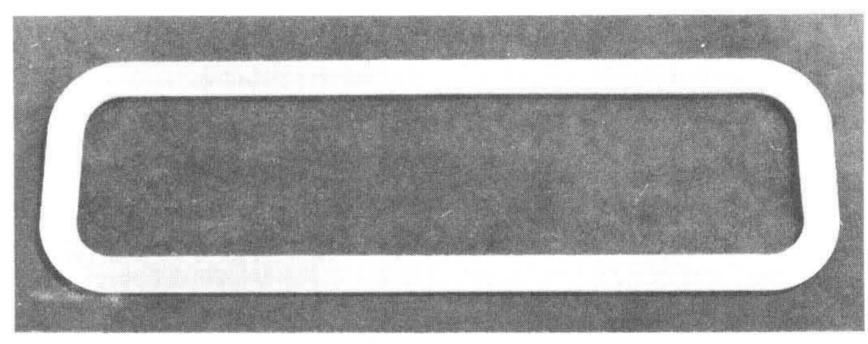


図15 VL-E323を使用した発電機界磁コイル用ボビン絶縁板 (全長 Im ) 高温強度にすぐれたVL-E323を発電機に使用した例。

Fig. 15 Bobbin Insulator Plate (Im long) for Generator Field Coil Made of VL-E323

立研究所,同日立工場および国分工場関係各位に深く謝意を表する次第である。

#### 参考文献

- (1) Insulation, Directory/Encyclopedia Issue, June/July 1971
- (2) 井上:高分子材料データブック 1969
- (3) 加藤ほか:電気学会誌(昭44-5)
- (4) 強化プラスチックハンドブック 日刊工業新聞社
- (5) 門谷, 磯貝:昭44電気学会東京支部大会 86
- (6) 井関:電気学会誌(昭43-7)
- (7) 特許出願中