

# 環状脂肪族エポキシレジンの高電圧機器への応用

## Application of Cycloaliphatic Epoxy Resin to High Voltage Apparatus

安 達 宏\* 島 崎 健 次\*\*  
Hiroshi Adachi Kenji Shimazaki

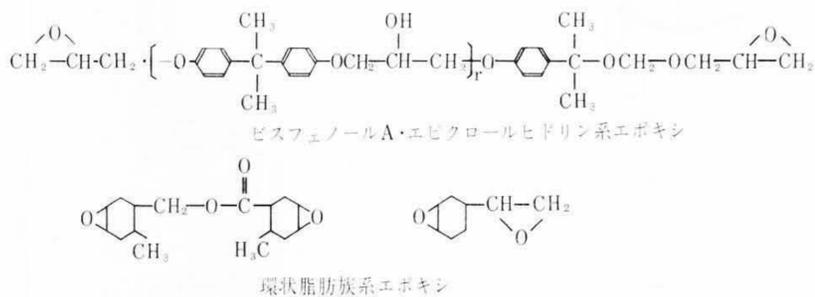
### 要 旨

耐トラッキング性、耐熱性のすぐれた環状脂肪族系エポキシ樹脂を高電圧機器に使用するに当たって、この系の樹脂の欠点であるたわみ性に劣る点、および強度の低い点を改善するため、ビスフェノールA・エピクロールヒドリン系エポキシとの併用、およびシリコンゴム緩衝材の使用を試みた。本文はこれら混合系樹脂硬化物の各特性と耐クラック性に対するシリコンゴムの効果について述べるとともに、この樹脂を実際の機器に使用した応用例を紹介する。

### 1. 結 言

高電圧開閉機器において、従来これら機器絶縁の主体であった磁器製がいしに代わってエポキシ注型品が使用されるようになり、機器の小形軽量化が大幅に進められている。機器の小形化は導体部分に対する絶縁部分のスペースを減少し、絶縁効率の向上を図るものであるが、絶縁効率の向上はエポキシ樹脂のすぐれた作業性と絶縁特性とによって実現されている。今後エポキシ樹脂がその使用分野を広げるためには、さらに各特性の向上が必要である。

従来、高電圧機器絶縁に用いられているエポキシ樹脂は主としてビスフェノールA・エピクロールヒドリン系のものであったが、最近エポキシ注型品の屋外使用への検討が進むにつれて環状脂肪族系樹脂のすぐれた特性が認識され、屋内機器にもこの系の樹脂が使用されつつある。環状脂肪族系エポキシ樹脂の最大の特長は、耐トラッキング性、耐候性にすぐれていることと、耐熱性が高い点である。これはその分子構造にフェノール基を有しないため、アークに触れたり紫外線に照射されてもカーボンの遊離が困難であることと、低分子量で架橋密度が高いためである。一方低分子量で架橋密度が高いことはかたくてもろくたわみ性に劣ることになり、このようなエポキシ硬化物をコンパクトな機器のブスパーユニットなどを使用する場合にクラックの発生が問題となる。



われわれは環状脂肪族系エポキシのすぐれた特性を高電圧機器絶縁に応用するため、その欠点を補う方策としてビスフェノール系エポキシとの併用および内部導体の埋め込みに対しては緩衝材としてシリコンゴムの適用を試みた。

### 2. 硬化樹脂の特性

環状脂肪族系エポキシとして現在市販されているものには CiBA 社の CY 175, CY 180, UCC 社の U221, U206 などがある。ビスフェノール系樹脂としては、環状脂肪族系のもので低粘度で希釈効果

表1 硬化樹脂の一般特性

特 性	単 位	試 験 法	材 質	
			# 802	# 808
比 重	—	JIS K 6911	1.7	1.8
吸 水 率	%	JIS K 6911	<0.05	<0.05
引 張 強 さ	kg/cm <sup>2</sup>	JIS K 6911	800~1,000	800~1,000
曲 げ 強 さ	kg/cm <sup>2</sup>	JIS K 6911	1,500~1,600	1,400~1,600
衝 撃 強 さ	kg-cm/cm <sup>2</sup>	JIS K 6911	3.5~4.5	3.4~4.0
圧 縮 強 さ	kg/cm <sup>2</sup>	JIS K 6911	2,000~2,300	2,000~2,200
曲 げ 弾 性 率	kg/cm <sup>2</sup>	JIS K 6911	7.8×10 <sup>4</sup>	9.4×10 <sup>4</sup>
か た さ	ロックウェル Mスケール	JIS K 6911	90~95	105~110
熱 膨 張 係 数	1/°C	JIS K 6911	40×10 <sup>-6</sup>	40×10 <sup>-6</sup>
耐 熱 性	°C	ASTM-D-647	96	>120
体 積 抵 抗 率	Ω-cm	JEC-148	>1×10 <sup>13</sup>	>1×10 <sup>13</sup>
絶 縁 耐 力	kV/mm	JEC-126	19	>18
誘 電 正 接	1 MHz	JEC-150	0.02	0.02
誘 電 率	1 MHz	JEC-150	3.5	3.4
耐 アーク性	秒	ASTM-496	182	180~190
耐トラッキング性		DIN 53480	A <sub>2</sub>	A <sub>3</sub> C

があるので、常温固形でエポキシ当量約 400 のものを使用した。このビスフェノール系樹脂と環状脂肪族系樹脂の混合系を # 808 材質と命名し、これと比較する従来のビスフェノール系配合を # 802 材質と命名する。これらエポキシ樹脂にいずれも石英粉 200 部を配合し、酸無水物系硬化剤で硬化して各特性を比較した。

#### 2.1 一般特性

試験片による一般特性を表 1 に示す。

#### 2.2 高温特性

ブスパーユニットあるいはブッシングなどでは絶縁材料の耐熱性と同時に熱劣化による機械的強度の低下が問題である。すなわち、一般に樹脂は熱伝導性が悪いので大電流を流す導体を樹脂中に埋め込んだ状態では導体の周囲が相当高温になる。またプラスチックの特性は熱劣化によりまず機械的強度が低下する。したがって耐熱性を検討する場合、高温における初期特性と同時に熱劣化による強度の変化を調べる必要がある。

図 1 は # 808 材質と # 802 材質の各温度における強度を示したものである。

図 1 から明らかなように常温以下の温度では # 808 材質はビスフェノール系樹脂よりやや強度が小さいが高温においては逆に # 808 材質のほうが大きい。すなわち、環状脂肪族エポキシは耐熱性が高いので高温まで強度が持続される。

図 3 は # 808 材質を 180°C に保持した場合、加熱時間と強度の低下および重量減少率との関係を示したものである。

図 4 は # 808 材質について各温度に保持した場合、初期強度の 1/2 まで強度が低下するまでの時間を示したものである。

\* 日立化成工業株式会社桜川工場

\*\* 日立製作所国分工場

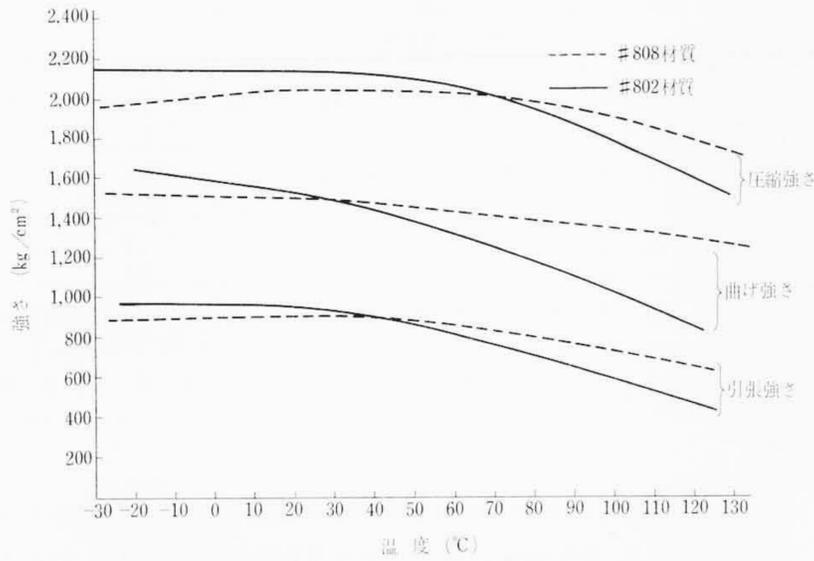


図1 #808材質および#802材質の温度-強度特性

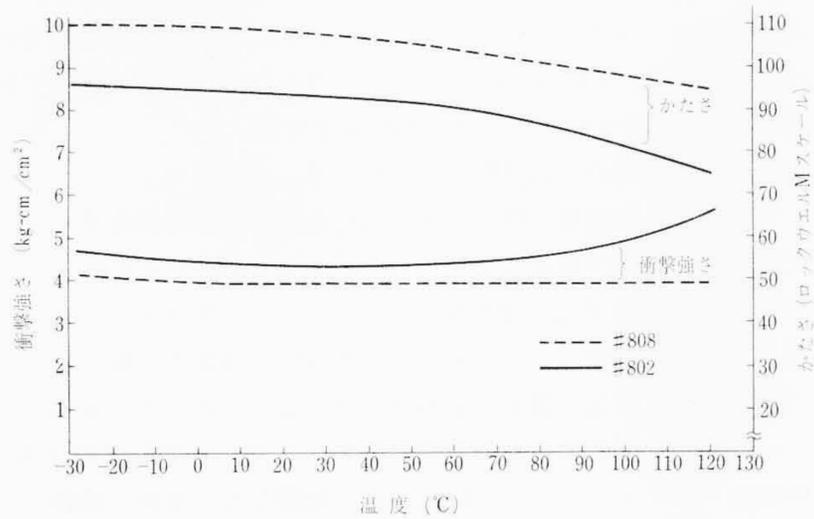


図2 各温度におけるシャルピー衝撃強さおよびかたさ

2.3 耐トラッキング性, 耐候性

環状脂肪族系エポキシの最大の特長は耐候性にすぐれていることである。GE社ではすでに数年前からフィラーに水和アルミナを使用した環状脂肪族系エポキシで送電線用懸垂がいしを実用に供している。ヨーロッパおよびわが国でも屋外用として実用化試験が実施されているがまだ実用化までに至っていない。屋内用としては屋外で使用される場合ほどに耐候性、耐トラッキング性は必要ないが、環境の悪い屋内では準屋外の適用を受けるので機器用絶縁物にとってこの特性はきわめて重要である。

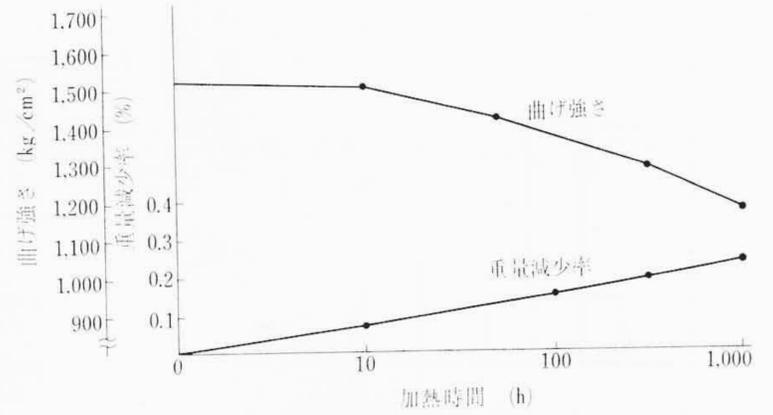
試験片による耐トラッキング性をDIN法により測定した結果は表1に示すとおりである。製品により実際に則した試験法で#808材質と#802材質を比較した。すなわち図5に示す3kV支持がいしについて塩水噴霧による耐トラッキングを比較するとともに、海岸近くの場所に約1年間荷電しながら屋外暴露を行なった。

その結果は表2に示すとおりである。

屋外暴露試験で#802材質は5,300時間後の降雨時にトラッキングにより短絡したがトラッキングマークはそれ以前に発生している。これに対し#808材質は10,000時間後も異常なく使用に耐えている。ただし、日光に当たった側面は表面の光沢がなくなり汚損されやすい状態になっている。

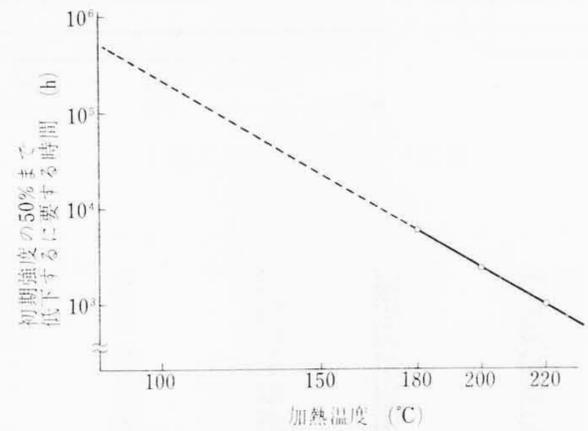
2.4 耐クラック性

ブスパーユニットあるいはブッシングなどで導体を樹脂中に埋め込む場合に、樹脂にたわみ性がないとクラックが発生する。このクラックは最も極端な場合は製造工程中硬化収縮による応力で発生する。また、製造直後は異常なくても経年的収縮、劣化による強度の低下、あるいは使用中のヒートサイクルなどによって発生する。環状脂肪族系樹脂をブッシング類に使用する場合はこの点にじゅうぶん考慮する必要がある。



(180°Cにおける加熱時間と強度および重量減少率)

図3 #808材質の熱劣化特性



(加熱温度と初期強度の50%まで低下に要する時間)

図4 #808材質熱劣化特性

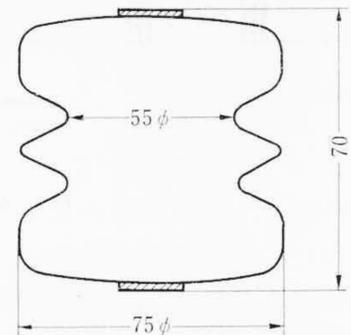


図5 耐トラッキング性および耐候性試験用3kV支持がいし

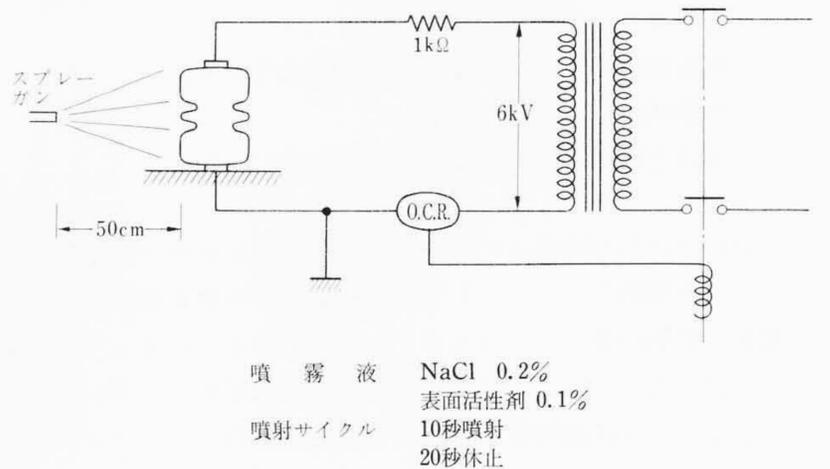


図6 塩水噴霧試験回路

表2 耐トラッキング性および耐候性試験結果

	#802	#808
耐トラッキング性	70回噴霧後トラッキングマーク発生	101回噴霧後異常なし
屋外暴露	5,300hで短絡	10,000h後異常なし ただし、表面の光沢なくなる

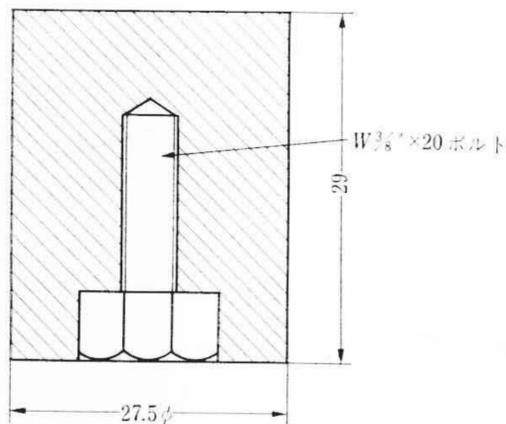


図7 耐クラック性試験試料

表3 ボルト埋め込み試料による耐クラック性試験結果 (クラック発生数)

材質	試料数	ヒートサイクル回数														残
		2	3	4	5	6	7	8	10	11	13	16	20	22	30	
# 802	24	1	0	0	2	0	0	2	1	1	1	2	2	1	0	11
# 808	24	10	3	0	5	3	3	—	—	—	—	—	—	—	—	0
# 808+シリコーンゴム 0.3 mm 処理	24	10	0	3	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	10
# 808+シリコーンゴム 0.6 mm 処理	24	2	0	0	1	1	1	0	0	0	0	0	0	0	0	19

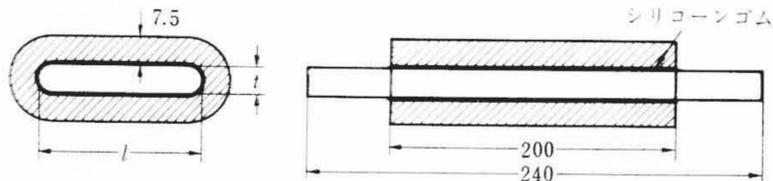


図8 平導体埋め込み試料

なお、比較試料は #802 材質と #808 材質およびボルトにシリコーンゴムを 0.3、0.6 mm の厚さに塗り #808 材質で注型したものについて行なった。

#808 材質は #802 材質に比べてクラック発生率が高い。しかし埋め込みボルトに 0.3 mm のシリコーンゴムのコーティングではほぼ同等となり、0.6 mm のシリコーンゴムコーティング処理すれば #808 材質でも耐クラックは相当向上する。

(2) 平導体埋め込み試料による耐クラック性テスト

コンパクトな機器に対し今後いろいろな形状の導体を埋め込んだブッシング類が重要になってくる。そこでいろいろの断面形状の平導体を埋め込んだ #808 材質についてヒートサイクルによる耐クラック性を検討した。すなわち半導体の厚さ  $t$  と幅  $l$  との比 (形状係数) を変えて図 8 の試料を注型によりつくった。またシリコーンゴム処理効果を見るため導体にシリコーンゴムを厚さ 0.3 mm にコーティングした試料について比較した。なお、導体には SS 鋼を使用し、樹脂の肉厚を 7.5 mm 一定とした。ヒートサイクルはボルト埋め込み試料の場合と同様、 $-30 \sim +90^\circ\text{C}$  の温度で 1 サイクル 3 時間で行なった。

図 9 はテスト結果を示したもので、横軸に導体の形状係数  $l/t$  ととり、各形状係数に対するクラックを発生するまでのヒートサイクル回数を示している。なお、50 サイクル後もクラックを発生しなかった試料は 50 サイクル以上とし、また試料を作成する工程ですでにクラックを生じたものは 0 サイクルとして示してある。

図 9 の結果からまず導体にシリコーンゴム処理をしない場合は、形状係数 9.5 および 12.5 の試料が全数ヒートサイクル前にクラックしている。これらの大部分は離型後の後硬化によりクラックが発生している。これは注型樹脂の硬化収縮が離型時に全収縮の 20~30%、残り 70~80% は後硬化により収縮するためである。形状係数 1.0 の試料、すなわち径 20 mm の丸導体の試料では 50 回以上のヒートサイクルに耐えている。これらの結果から導体の形状がクラック性に対し非常に大きな要因となっていることがわかる。この試験に用いた導体は SS 鋼で膨張係数が  $12 \times 10^{-6}$  で実際の銅導体の場合より小さく、したがって硬化樹脂の膨張との差が大きいのでヒートサイクルに対しては銅の場合よりきびしい条件となっている。次に導体をシリコーンゴムで処理した場合はほとんどの試料が 50 サイクル以上に耐え、わずかに形状係数 9.5 と 12.5 の試料が各 1 本ずつ途中でクラックしているにすぎない。

シリコーンゴムのような緩衝材の効果は硬化樹脂に加わる局部的応力を全体に分散させる緩衝効果と導体-樹脂間のすべりにより応力の集中を緩和させるすべり効果とが働いている。これは導体を埋め込んだ硬化樹脂に偏光を通して応力分布を観察すると明らかになる。

その一例を示したのが図 10 である。

シリコーンゴムで処理しない場合に、応力は樹脂の両端部で導体と接着している付近および導体のエッジ付近で最大となっている。

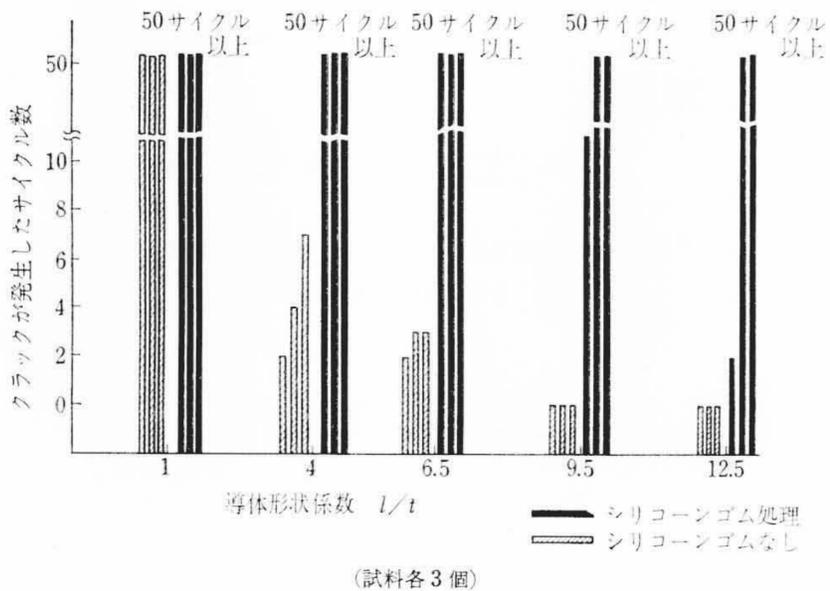


図9 導体形状とヒートサイクルによるクラック発生率

クラック発生の原因はいずれの場合も膨張係数の小さい金属導体を膨張係数の大きい樹脂中に高温で埋め込み固定するため、樹脂の硬化収縮と熱収縮とにより樹脂に引張応力が働くためである。したがってクラックを防止する手段としては

- (i) 低膨張の無機質フィラーの混合により硬化樹脂の膨張係数をできるだけ小さくする。
- (ii) 熱収縮を小さくするため低温で硬化させる。
- (iii) 樹脂にたわみ性を与える。
- (iv) 導体と樹脂との間に緩衝材を入れる。

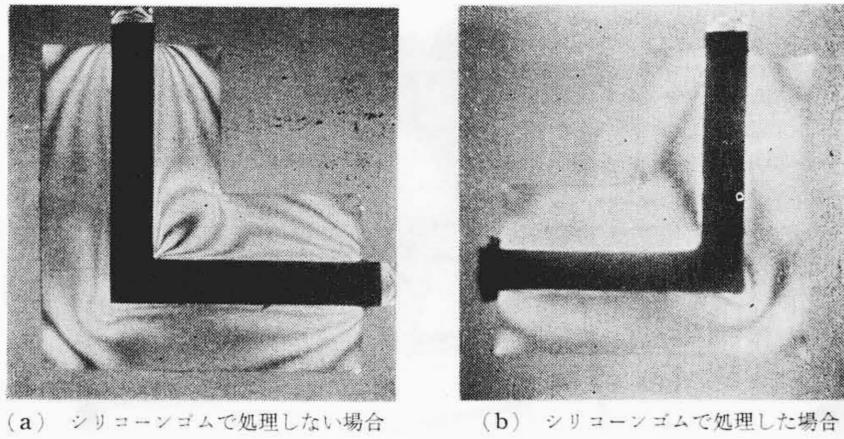
などである。

われわれはほかの特性との関連で環状脂肪族エポキシ樹脂にビスフェノール系樹脂をブレンドしてある程度たわみ性を改善するとともに導体と樹脂の間にシリコーンゴムを用いることによってクラック防止を試みた。このような緩衝材として塩化ビニルを用いる例もあるが塩化ビニルは耐熱性が低いので常温加熱のシリコーンゴムを用いた。

(1) 試験片による耐クラック性の比較

注型樹脂の耐クラック性試験には種々の方法が行なわれているが、われわれは簡単なボルト埋め込み法を用いた。

ヒートサイクルは  $90^\circ\text{C}$  の恒温槽に 90 分保持後、 $-30^\circ\text{C}$  の冷凍室に入れ 90 分保持し、取り出してクラックの有無を調べ、再び恒温槽に入れた。このヒートサイクルを 30 回くりかえした結果を表 3 に示す。



(a) シリコンゴムで処理しない場合 (b) シリコンゴムで処理した場合

図10 平導体を埋め込んだ硬化レジンの応力分布

表4 一次断路部用ブッシング特性表

使用電圧	7.2 kV
商用周波耐電圧	22 kV 1分間
衝撃耐電圧	60 kV
曲げ強度	370 kg
引張強度	1,920 kg
耐トラッキング性	C <sub>3</sub> C
ヒートサイクル	-30℃~100℃ 10 サイクル異常なし
耐熱性	100℃-72h 異常なし
耐寒性	-30℃-72h 異常なし
コロナ開始電圧	16 kV

表5 磁気遮断器用支持がいし特性表

使用電圧	7.2 kV
商用周波耐電圧	22 kV 1分間
衝撃耐電圧	60 kV
曲げ強度	620 kg
引張強度	750 kg
導体加熱引抜強度	1,365 kg
耐トラッキング性	C <sub>3</sub> C
ヒートサイクル	-30℃~90℃ 200 サイクル異常なし
耐熱性	90℃±5 連続 72h 異常なし
耐寒性	-30℃±5 連続 1,000h 異常なし
耐汚損性	汚損量 0.06 mg/cm <sup>2</sup> 13 kV

これに対しシリコンゴムで処理した導体の場合は局部的応力の集中が見られない。

以上によりたわみ性の小さい環状脂肪族系樹脂でもシリコンゴム処理により平導体埋め込みのブッシングあるいはブスパーユニットにじゅうぶん使用できることが確認された。

### 3. 電気機器への応用例

前項までに述べた種々の特性をもつエポキシ樹脂の注型品を高電圧機器の絶縁材料として応用した例について紹介する。

#### 3.1 メタルクラッド配電盤への応用

メタルクラッド配電盤の容積縮小を目的として、遮断器の一次断路部に母線支持を兼ねたブッシングを採用した。図11は7.2 kV, 150 MVA, 1,200 A 用レジンブッシングを、図12配電盤内に取り付けた状態を示したものである。また、表4に一部断路器用ブッシングの特性を示した。ブッシングの形状は中央のフランジを境にして母線支持側はブッシング状、遮断器との接続側は筒状になっている。導体と樹脂との密着面にはシリコンゴム処理を施し一体注型したものである。そのためきびしいヒートサイクルにもじゅうぶん耐えられる。

#### 3.2 磁気遮断器への応用

図13は7.2 kV, 150 MVA 磁気遮断器用 600 A, 1,200 A および 2,000 A の支持がいしを示したものである。図14は磁気遮断器に取り付けた状態である。また表5に磁気遮断器用がいしの特性を示した。このがいしは遮断器の小形軽量化、投入操作力の半減を目的と

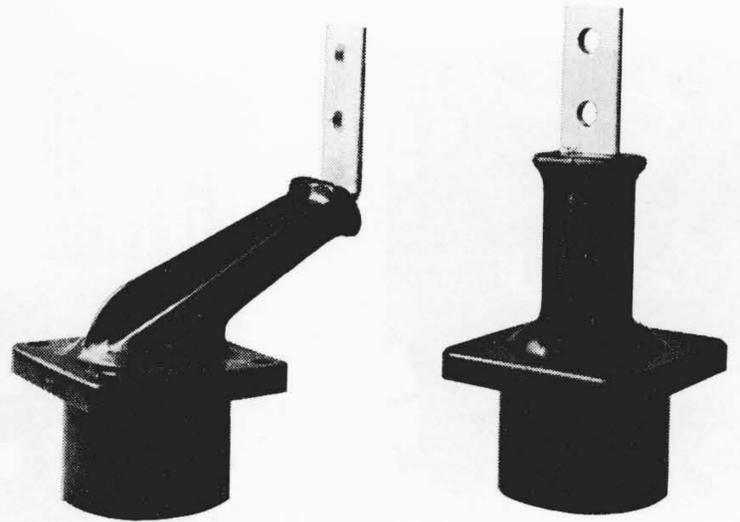


図11 一次断路部用レジンブッシング

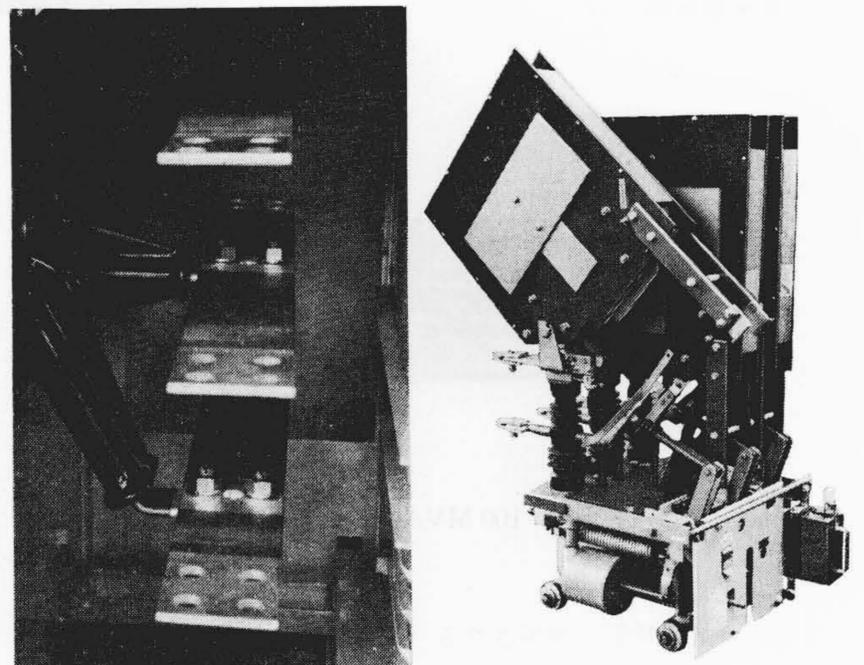
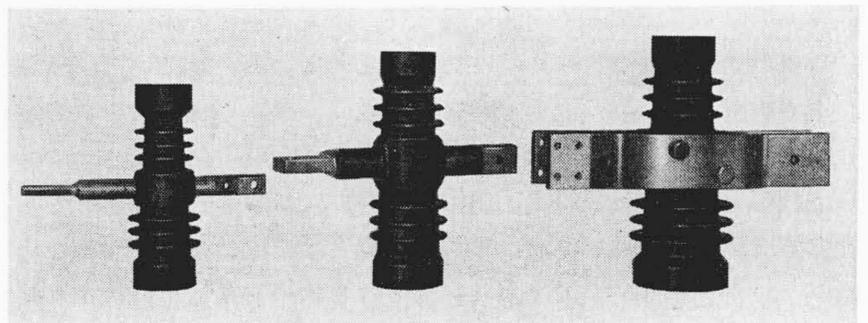


図12 母線をブッシングに付けた状態

図14 7.2 kV, 600 A, 150 MVA 磁気遮断器



(左から 600 A, 1,200 A, 2,000 A 用を示す)

図13 磁気遮断器用支持がいし

して、がいしの中央部に遮断器の下部導体を貫通して埋め込み、上部に上部端子を取り付けた構造となっており、磁器製がいしを用いた従来品に比べ、容積重量とも40%低減することができた。このがいしは特に下部導体が遮断時に電磁力による応力が直接加わるため樹脂と導体との接着強度を改善した製品である。

#### 3.3 真空遮断器への応用

図15は7.2 kV, 600 A, 150 MVA 真空遮断器に、図16は30 kV, 300 A, 100 MVA CB901形車両用真空遮断器に应用した例である。いずれも真空バルブを樹脂筒内で機械的、電気絶縁支持し保護防じんの役目を果たしている。特に車両用の場合は軽量化に大きな効果をあげている。

#### 3.4 空気遮断器への応用

図17は空気遮断器のブッシングとして使用した例を、図18は車両用空気遮断器の遮断室と抵抗保護筒に使用した例を示したものである。

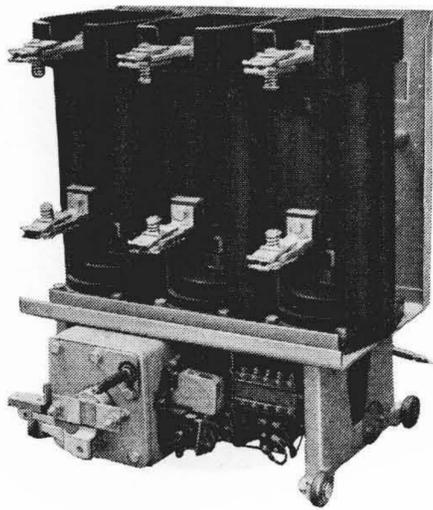


図15 7.2 kV, 600 A, 150 MVA 真空遮断器

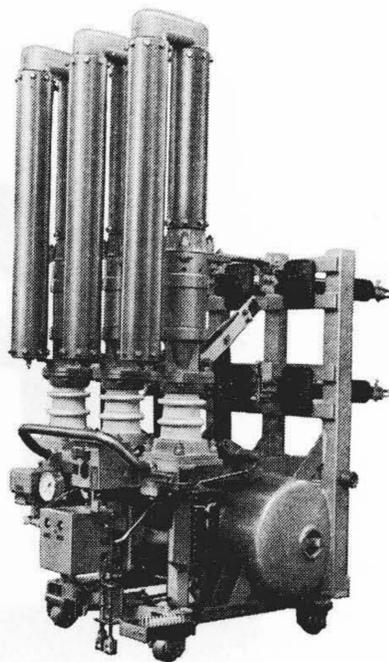


図17 12 kV, 1,200 A, 500 MVA 空気遮断器

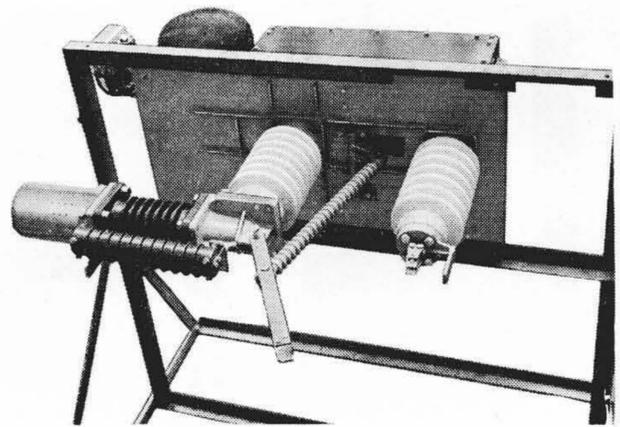


図18 30 kV, 200 A, 100 MVA CB200形 車両用空気遮断器

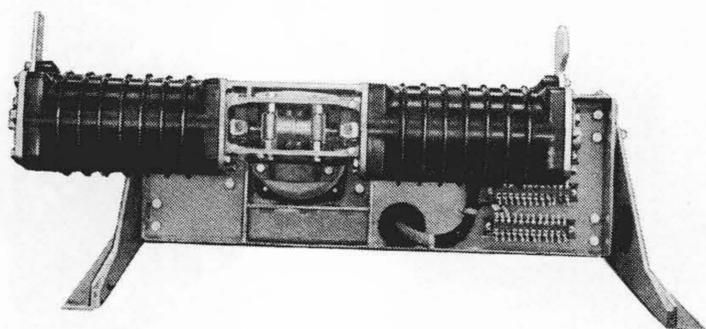
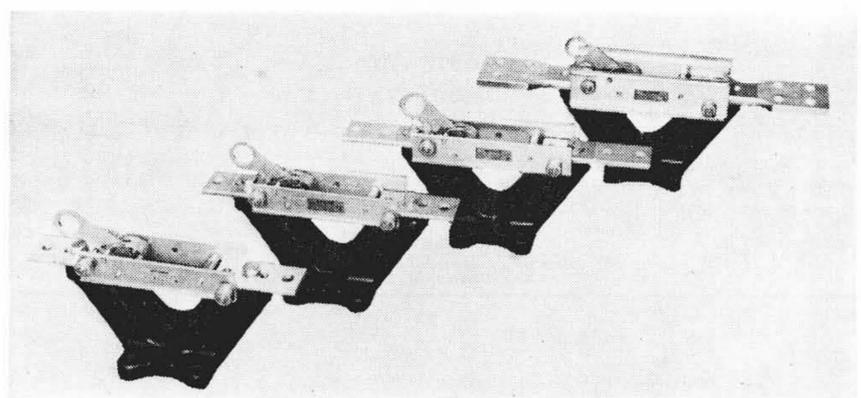


図16 30 kV, 300 A, 100 MVA CB901形車両用真空遮断器



(左から 200A, 400A, 800A, 1,200A を示す)

図19 7.2 kV V形断路器

高電圧空気遮断器に使用されるブッシングは短絡遮断時のきびしい条件に耐えるため特に高温特性, 耐熱劣化性, 耐クラック性にすぐれた材質が要求される。また, 高電圧のためコロナ特性も重要である。#808材質はこれらの要求をじゅうぶん満たしているとともに導体にシリコンゴムおよび導電性コーティングを施すことによって耐クラック性とコロナ特性を向上させている。

車両用空気遮断器の遮断室および保護筒は機器の軽量化を目的として開発されたもので, 遮断室は短絡電流遮断時の高温アークにさらされるとともに圧力  $8 \text{ kg/cm}^2$  で操作されるので耐アーク性と高温強度が特に重要である。車両用の場合は半屋外条件となるため耐トラッキング性が重要である。表6は日本国有鉄道規格により試験した結果を示したものである。なお, 耐トラッキング性については屋外暴露試験を1年以上実施し車両用としてじゅうぶん使用に耐えることを確認している。

### 3.5 断路器への応用

図19は断路器用支持がいしとして応用した例である。従来2個の磁器製がいしで断路部を支持していたのを一体注型したエポキシ製V台で支持する構造としたため, 寸法的には高さおよび長さともに約1/2の小形となり, 重量は約1/8に軽量化した。また構造が単純化されたため大量生産が可能となった。特性的には特に機械的強度と絶縁耐力が重要であるが, 従来品と同等以上の性能を有し, さらに耐トラッキング性に対しては6 kV印加しながら2年以上屋外暴露試験を行なっても異状のないことを確認している。

## 4. 結 言

環状脂肪族系エポキシ樹脂とビスフェノールA・エピクロールヒドリン系エポキシ樹脂の併用による硬化物の特性について検討した。その結果環状脂肪族系樹脂の特長である耐トラッキング性および耐熱性を生かしながらその欠点である低強度, もろさを補って高

表6 車両用空気遮断器用絶縁筒特性表

使用電圧	30 kV
肉厚方向耐電圧	10 kV 2分間
両極間耐電圧	70 kV 1分間
曲げ強度(片持はり式)	1,210 kg
引張強度	5,200 kg
ねじり強度	190 kg-m
振動耐久性	600 cpm, 2 G, 荷重 20 kg にて 上下 24h 左右 12h } 振動テスト後各特性異状なし 前後 12h
ヒートサイクル	100°C ~ -20°C 冷熱 10 回くり返し後各特性異状なし
耐熱性	100°C 72h 保持後各特性異状なし
耐トラッキング性	3 kV 印加 塩水噴霧 101 回後異状なし

表7 V形断路器用支持がいし特性表

使用電圧	7.2 kV
乾燥せん絡電圧	56 kV
50% 衝撃せん絡電圧	89 kV
汚損せん絡電圧	汚損度 $0.01 \text{ mg/cm}^2$ 10.4 kV 汚損度 $0.03 \text{ mg/cm}^2$ 9.5 kV
破壊強度	線間方向 700 kg 開路方向 100 kg 圧縮方向 1,000 kg
耐トラッキング性	6 kV 印加 塩水噴霧 101 回で異状なし

圧機器への適用が可能であることを確かめた。さらに大電流を流すブッシングの耐クラック性向上のため導体と樹脂の間にシリコンゴム緩衝材を用いてその効果をじゅうぶんに発揮した。このようなエポキシ樹脂の特性改善により高圧機器への適用分野を広げることができた。