UDC 546.163.1'226:678.643

富士SF_6ガス機器用材料とモールド品

Materials and Molds for SF_6-Gas Insulated Apparatus

芳賀敬二* 元起巌*
Keiji Haga Iwao Motoki

I. まえがき

SF_6 ガスの最大の特長はといえば，そのすぐれた消弧能力と絶縁耐力にあることはいうまでもない．前者を製品化したものがガスしゃ断器であり，後者の性能を最大限に活用したものがガス絶縁密閉形開閉設備である。

しかしその製品化にいたるまでには，ガス自身の特性の研究はもちろんのこと，その特長を最大限に発揮させるためこれと組合せて用いる材料技術の研究が伴わなければならない。

SF_6 ガスを消弧媒体として用いる場合には，消弧に伴ってごくわずかではあるが生成する分解ガスについてどう対策するかがまず第一に重要なことであり，これを密閉形開閉設備の場合のように絶縁媒体として用いる場合には，ガス自身の絶縁耐力もさることながら高圧部分をガス中で支持したり操作したりするのに必要な固体絶縁部品の開発が先決問題である。

当社では SF_6 ガスの研究をすでに十数年前から開始したが，上述の見地からここ数年間は上記の二点に重点をおいて研究を行ない，その成果を逐次発表してきた(1)～(8)など。

本報はこれらの研究成果を要約して記述したものである．すなわち，前者については消弧に伴うガス分解の機構を詳細に検討し，その知識にもとづいて材料の選択方法とガスの取扱い技術を確立した．その結果は当社のしゃ断器に注意深く適用され，高信頼度の機器を世に送り出している。

後者についてはガス絶縁機器が世に出る以前から当社では高電圧絶縁に適するモールド部品として樹脂がいし，ブッシング類やモールドＰＣＴなどを製品化し，すでに十年近い使用実績を得ている．しかしガス絶縁密閉形開閉設備ではより高い電圧でより高い信頼性が要求されるので，この点にかんがみ，あらためて高圧モールド品の製造にもっとも重要な基礎にまでさかのぼって研究を行なった．その結果，高電圧に用いられる大形モールド品の製造技術ならびにそれに伴う材料の機械的，電気的特性などの基礎事項の検討を行ない，技術的に信頼性のあるモールド品を製作している．本報後半ではこれらモールド品の製造の際留意すべき点，製造過程における樹脂挙動や大形モールド品の応力緩和のための緩衝材，充てん材の効果について述べ，あわせて製作されたモールド品の諸特性を紹介する。

II. SF_6 ガスの安定性

1. SF_6 ガスの安定性

SF_6 は常温ではきわめて安定なガスであり，その不活性の程度はちっ素や稀有ガスにも匹敵するといわれている(1)．しかしながらアークやコロナなどの放電にさらされたり，200℃をこえるような高温中では，わずかながら分解し，化学的に活性で有害な物質を生じる．したがって SF_6 ガス機器中で放電や高温の条件で使用される部分の材料はそれらの条件に耐えうる適当な材料を選択する必要がある。

2. SF_6 ガスの放電による分解

SF_6 ガス機器で実用上問題となる放電はガスしゃ断器消弧時のアーク放電と高電圧機器のコロナ放電がある。

アーク放電による SF_6 ガスの分解機構はつぎのように考えられている。

SF_6 中でアークが発生すると SF_6 の大部分がＳとＦの単原子状態に解離されるが，アークがなくなると再び SF_6 に戻る。

$$SF_6 \leftrightarrow S+6F \qquad \cdots\cdots(1)$$

しかし電極付近にはアークによる金属電極の蒸気が存在するので，これが解離したＦと反応すると低位のふっ化硫黄と金属ふっ化物とを生ずる．たとえば

$$\left.\begin{aligned} &4SF_6+Cu+W \rightarrow 4SF_4+CuF_2+WF_6 \\ &2SF_6+Cu+W \rightarrow 2SF_2+CuF_2+WF_6 \\ &3SF_6+2Al \rightarrow 3SF_4+2AlF_3 \end{aligned}\right\} \cdots\cdots(2)$$

である．発生瞬時の分解ガスは活性の強い化合物で，普通そのままの状態では長時間存在せず，系内に微量の水分や酸素があれば，これらの物質と反応してたとえば

$$\left.\begin{aligned} &SF_4 \xrightarrow{H_2O} SOF_2+2HF \\ &SF_4 \xrightarrow{O_2} SOF_4 \\ &SOF_2 \xrightarrow{F_2} SOF_4 \\ &SOF_2 \xrightarrow{H_2O} SO_2F_2+2HF \\ &SOF_4 \xrightarrow{H_2O} SO_2F_2+2HF \end{aligned}\right\} \cdots\cdots(3)$$

となり，SOF_2, SOF_4, SO_2F_2 やＨＦを生じる．更に水分が多い場合には

* 中央研究所

$$SOF_2+H_2O\rightarrow SO_2+2HF \quad \cdots\cdots(4)$$

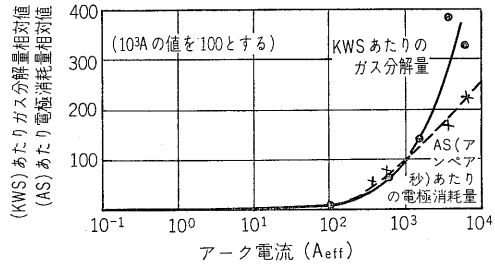
になる。

これらの分解により生成するガスは放電条件，電極材料，反応系内水分量，分解後の測定時間などにより種々複雑に変化する．筆者らの経験によれば，大電流アークやガスしゃ断器のしゃ断後の分解ガスは大部分 SOF_2 であり，また1A以下の小電流による放電では SOF_2 のほかに SO_2F_2 が認められる．これに対し金属と反応して生ずるはずの SF_2，SF_4 などの低位のふっ化硫黄はまったく認められない．これらは上に述べた式(3)の反応により SOF_2, SO_2F_2 とHFになるためであろうと思われる。

アーク放電時に分解ガスと同時に生成する粉末状析出物は主として金属電極材料のふっ化物である．この中でもたとえば CuF_2 は強い吸湿性をもち，絶縁物に粉末が付着した場合は系内に水分が多いと抵抗を低下させることもあるため注意が必要である。

SF_6 ガス分解量は放電エネルギによって変わることはもちろんであるが，エネルギの総量が等しくともアーク電流と電極材質によって大きく左右される。

アーク電流と分解ガス量との関係の測定例[2]を第1図に示す．この例では 5,000Aの時の同一エネルギあたりの分解ガス量は 100A の時に比べて数十倍にも達している．この点から実用的にはしゃ断器のガス分解量を決定するものは短絡しゃ断であることがわかる。



分解容器 500 ml　電極 Cu-W

SF_6 ガス圧 1.1ata　通電電流 50Hz減衰振動波

第1図　アーク電流とガス分解量，電極消費量との関係

Fig. 1. Relation between arc current vs. decomposition of SF_6 and erosion of contacts

電極材料も分解ガス量に大きく影響を及ぼす．第1表は3種類の電極材料についてほぼ同一注入エネルギにおける電極消耗量，ガス分解量，粉末生成量の関係を求めた結果[2]である．この結果では電極消耗量が多いとガス分解量，粉末生成量も増加しているが，これは前に述べた式(2)を考えれば当然のことといえよう．この点からガス分解量をへらすためには消耗量の少ない，いいかえれば金属蒸気発生の少ない電極材料を使用することが必要であり，当社のしゃ断器用接点にはこれらの点を充分吟味

第1表　電極材質と電極消耗量，SF_6 分解ガス量，生成粉末量の関係

Table 1. Erosion of contacts, decomposition of SF_6 and production fluorised metallic powder at different contact materials

電極材質	注入エネルギ [kWs]	電極消耗量 重量 [mg/kWs]	電極消耗量 体積 [cm³/kWs]	SF_6 分解ガス（容量：%） SOF_2	CF_4 SiF_4 など	生成粉末量 [mg]
特殊銅タングステン	2.25	3.82	0.27×10^{-3}	0.337	なし	微量 } (CuF_2, WOF_4)
銅25，タングステン70 ニッケル5	2.1	9.85	0.71×10^{-3}	0.715	0.05	微量 }
アルミニウム	2.7	21.1	7.74×10^{-3}	5.42	0.13	16 (AlF_3)

第2表　分解ガスの組成例（アーク電流と水分の影響）

Table 2. Examples of decomposed gas due to arc discharge (Influence of arc current and moisture content)

アーク電流		交流50Hz，0.2A 連続4時間通電		減衰振動波 50Hz，第1半波 2,000A 最大		
SF_6 ガス中水分 [ppm (Vol)]		148	18,300	350	1,160	22,400
SF_6 分解ガス（ガスクロで測定）	分解量合計 [%, Vol]	5.74	10.62	0.78	1.34	0.71
	CF_4	0.03	0.03	微量	微量	——
	SiF_4	0.05	0.12	——	——	——
	SO_2F_2	2.44	6.66	——	——	——
	SOF_2	3.22	3.81	0.78	1.34	0.71

した材料が使用されている。

ガス中に水分があるとガスの分解が促進されるといわれている．この点について検討した結果[3]を第2表に示す．この結果によれば大電流アークしゃ断時のガス分解量に対する水の影響は実用上はほとんどないといえる．しかし，たとえば1A以下の長時間小電流アークでは SOF_2 に比べ SO_2F_2 がかなり発生し，SO_2F_2 発生量が水分により変動するため，ガス分解量も水分量とともにいくぶん増加する。

つぎにコロナによる SF_6 ガスの分解について述べる．SF_6 ガス絶縁機器は通常の状態ではコロナ放電を起さないように設計されている．したがって長期間コロナにさらされる可能性は少ないはずであるが，もし発生した場合のガス分解はどの程度かを調べるために予備的実験を行なった．その結果は予想に反して分解ガスはまったく検出できなかった．これはコロナ放電の温度が 800～900°K程度の低さであり電極材料の蒸発が起らないと考えると，上述式(2)より考えて当然のことであり，またたとえ分解が起こるとしても放電エネルギあたりの分解量はアーク放電の場合に比べて非常に少なく，従来考えられてきたほど恐れる必要はなさそうである。

3. SF_6 ガスの熱による分解

SF_6 ガスの熱安定性はきわめてすぐれており，ガス自

身はボヘミアガラスの軟化点（500～600℃）まで分解しないといわれている[1]．しかし金属材料や絶縁材料が SF_6 ガス中に存在すると，材料によっては 200℃前後からわずかながら分解し，また共存材料がいくぶん劣化する。

金属材料共存の影響をしらべた実験例[2]では，鉄，銅，アルミニウム，けい素鋼板を SF_6 ガス中で 160℃，5 か月間および 200℃ 20 日間放置した結果，けい素鋼板共存で 160℃，5 カ月間放置した場合のみ微量のガス (SiF_4) 発生とわずかな重量減少があった．しかしその他の金属では変化が認められなかった。

絶縁材料の熱劣化の一例を以下に述べる．ある種の有機フィルム材料を SF_6 および N_2 中で 260～300℃で最高 170 日間放置し，外観および引張り強度の変化をしらべたが，SF_6 中と N_2 中との熱劣化の有意差は認められなかった．またこの際ガス中に水分を混入しその影響をしらべたところ，水分の影響は SF_6 および N_2 中とも非常に大きく，充分乾燥したガス中に比べて水分 3,100 ppm 中での引張り強度の低下は約 2 倍あることがわかった。

熱による SF_6 ガス自身の分解はきわめて遅くまた分解量も少ないので，実用的には吸着剤を封入することで完全に解決できる性質のものである．ただし吸着剤の吸着能力は高温で急に悪くなるので，使用可能な温度は両者のかね合いで決まる。

このようなことから SF_6 ガス機器の経済的で実用可能な最高温度は 200～220℃ 程度であろうと思われる．

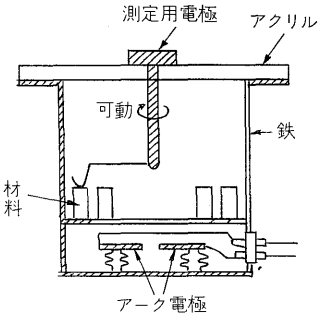
III. SF_6 分解ガスの材料に与える影響

放電や高温の条件にさらされない SF_6 ガス中では，使用材料が劣化される恐れはまったくない．しかし分解ガスにさらされる条件下で使われる材料は分解ガスの影響を検討し，分解ガスに耐える材料を選択して使用する必要がある．以下に絶縁材料や金属材料の耐 SF_6 分解ガス性と吸着剤の性能について述べる。

1. 絶縁材料の耐分解ガス性

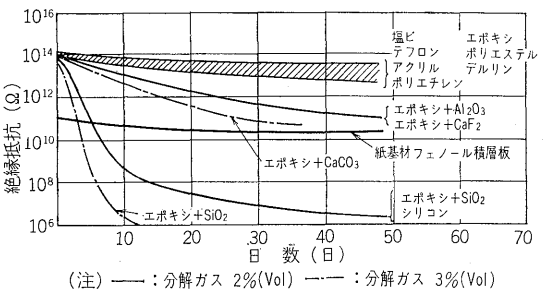
1) 各種絶縁材料の耐分解ガス性

代表的な絶縁材料約 30 種について耐分解ガス性の相互比較実験[4]を行なった．この実験では第 2 図に示すように 50 l 鉄製容器内に高さ 30mm の試料（断面積 10×10mm² 程度）を置き，容器下部にある Cu-W 電極の放電により分解ガスを作りガス中で絶縁抵抗やせん絡電圧を調べた．ガス分解は材料の相互比較を行なうため，実用条件にくらべてひどく厳しい濃度で行なった．その結果の一例として絶縁抵抗の変化を第 3 図に，また絶縁抵抗，せん絡電圧，外観変化などを総合して判定した耐分解ガス性を第 3 表に示す．この結果から無機材料は一般に耐分解ガス性が劣り，なかでも磁器やガラスなど SiO_2 を含むものの劣化が非常に大きいことがわかる．これに比べて高分子材料の大部分は耐分解ガスがすぐれている．なかでもテフロン，ポリエチレン，ポリエステル樹脂，アクリル樹脂，エポキシ樹脂などが良好である．し



第 2 図　絶縁材料の耐分解ガス性試験容器

Fig. 2. Endurance test vessel of insulating materials in decomposed SF_6 gas



(注) ——：分解ガス 2%(Vol) —·—：分解ガス 3%(Vol)

第 3 図　分解ガスによる絶縁抵抗の変化

Fig. 3. Changes of insulation resistance due to decomposed SF_6 gas

第 3 表　各種絶縁材料の耐分解ガス性

Table 3. Endurance of various insulating materials in decomposed SF_6 gas

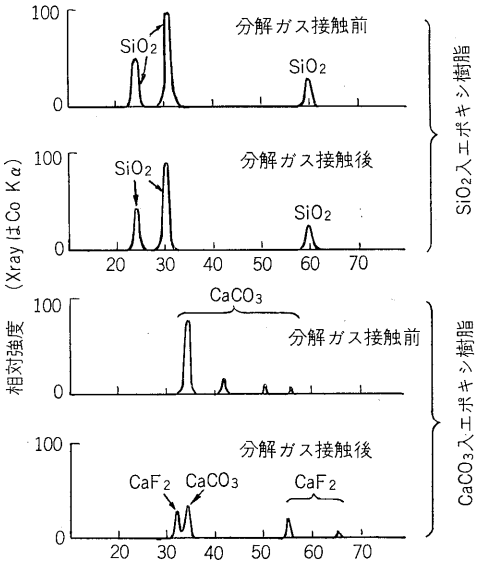
無機材料		有機材料 単体		有機材料 複合体			
磁器	△	ポリエチレン	○	エポキシガラス	×	エポキシ樹脂 (SiO_2 入り)	△
ステアタイト	△	マイラ	○	エポキシガラス（ワニス塗布）	△	エポキシ樹脂 ($CaCO_3$ 入り)	○
ジルコン磁器	△	エポキシ	○		△	エポキシ樹脂 (CaF_2 入り)	○
アルミナ磁器	○	ポリアセタール	○	シリコンガラス	×	エポキシ樹脂 (Al_2O_3 入り)	○
マイカ	○	アクリル	○	シリコンガラス（ワニス塗布）	△		
マイカレックスA	×	テフロン	○	フェノール積層板	△		
マイカレックスB	△	塩化ビニル	○	紙基材フェノールレジン積層管	△		

(注) ○：良　△：やや不良　×：不良

かし高分子材料でも Si を含むシリコン樹脂などの劣化はひどい。

2) エポキシ樹脂充てん材の耐分解ガス性への影響

第3表からエポキシ樹脂製品は充てん材の種類を変えることにより耐分解ガス性が大きく変化することがわかる．この点を更にくわしく検討するため SiO_2 と $CaCO_3$ を充てん材として使用したエポキシ樹脂について試験前後のX線回折スペクトルをしらべた．その結果[5]を第4図に示す．充てん剤 SiO_2 の試料のスペクトルでは試験前後に変化が認められない．これはガラス積層シリコン樹脂板の電子顕微鏡写真[4]や SiO_2 と分解ガスの下記の反応式(5)から考えて，SiO_2 は SiF_4（気体）としてガス中に



第4図 X線回折スペクトル（主なピークを示す）

Fig. 4. Spectra of X ray refraction

揮散し，固体ふっ化物が材料表面に残らないために見かけ上変化がない形になったものと推定される。

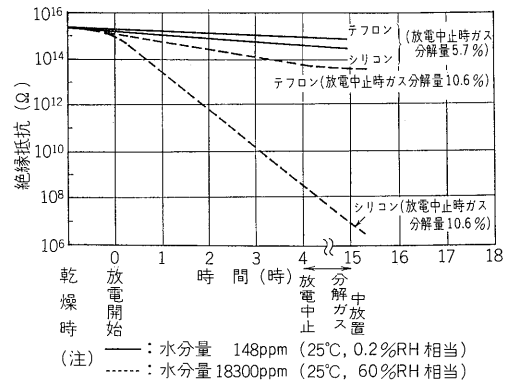
$$\left.\begin{aligned} &SiO_2+SF_4\rightarrow SiF_4+SO_2\\ &SiO_2+2\,SF_4\rightarrow SiF_4+2\,SOF_2\\ &SiO_2+2\,SOF_2\rightarrow SiF_4+2\,SO_2\\ &SiO_2+4\,HF\rightarrow SiF_4+2\,H_2O \end{aligned}\right\}\cdots\cdots\cdots\cdots(5)$$

これに対して $CaCO_3$ を含む試料のスペクトルは分解ガスに触れ一部が CaF_2 に変化したことを示している．CaF_2 は固体で耐分解ガス性のすぐれた材料であるので，このような変質は無害と考えられる．

また材料の耐分解ガス性については後述するように水分の影響が大きい．したがって充てん材として水分を含むものの使用は避けるべきであろう．一方充てん材として石英粉（SiO_2）を用いたものは機械的強度が大きいという利点がある．これらの点と使用条件を充分考慮してエポキシ樹脂充てん材としてなにを用いるかは実用的見地からの判断が必要である。

3) SF_6 ガス中水分の耐分解ガス性に与える影響

分解ガスによる材料の劣化についてガス中水分の与える影響は非常に大きい．第5図は水分の影響をしらべた実験[3]の一例で，試料としてテフロンおよびシリコンゴムを乾燥または水分の多い SF_6 ガス中に放置し，小電流を与えて絶縁抵抗の変化をしらべた結果である．乾燥した SF_6 中ではシリコンゴムでも絶縁抵抗の変化がほとんどないのに対し，水分が多いと抵抗が9桁も下ってくる．また水分の多い SF_6 中でのゴムは膨じゅんしてべとべとになり機械的強度は測定できないほどであった．これらの点から SF_6 ガス機器中では水分の管理が重要な問題であり，吸湿しにくい材料を使うことが耐分解ガス性の向上にも結びつく。

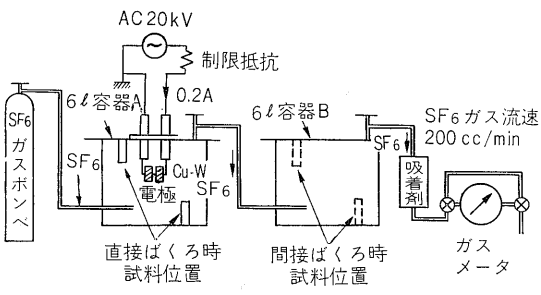


第5図 分解ガスによる絶縁抵抗の低下（水分の影響）

Fig. 5. Changes of insulation resistance due to decomposed SF_6 gas (Influence of moisture content)

4) 材料と分解ガスの接触状態による影響

分解ガスによる材料の劣化状態はガスの活性度や濃度によって大きく異なる．アークにより生成した分解ガスは生成瞬時には SF_4 や SF_2 など活性の強いガスであるが時間の経過とともにまもなく微量の水分と結合し SOF_2 など，より活性の弱いものに移行する．実際の機器内の例でいえば，しゃ断器の消弧室内で消弧ガスに直接吹きつけられる部分とそれからはるかに遠いガス循環系統の部分では劣化のされ方が著しく異なるはずである．これを確かめるためつぎのような実験[2]を行なった．第6図は



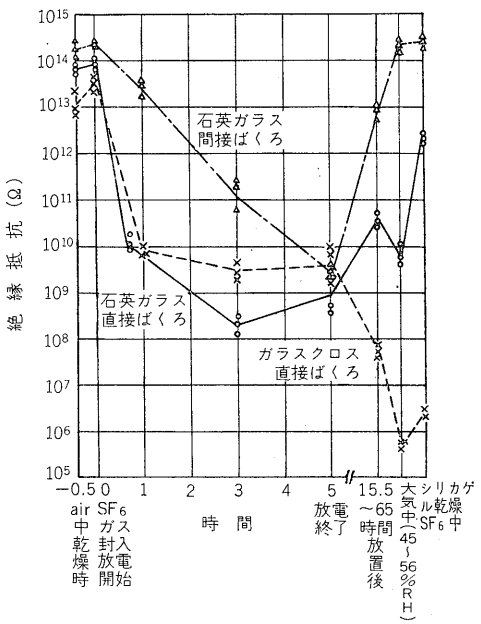
第6図 材料の耐分解ガス性試験配置図

Fig. 6. Arrangement of endurance test of insulating materials in decomposed SF_6 gas

第 4 表　材料の耐分解ガス性試験時の諸特性

Table 4. Results of endurance test of insulating materials in decomposed SF_6 gas

供試材料		石英ガラス	石英ガラス	ガラスクロス
ばくろ方式		直　接	間　接	直　接
外観変化		不透明になり，表面の荒れがひどい	半透明になる	光沢が全然なくなり，褐色がかる．非常にもろくなる
単位表面積あたり重量減少 (mg/cm²)		5.1	0.65	(測定せず)
SF_6 クロで分解ガス測定 (ガス	合解量合計 (%,Vol)	1.00	0.62	0.83
	CF_4	0.08	0.07	0.09
	SiF_4	0.02	trace	0.04
	SO_2F_2	0.60	0.39	0.50
	SOF_2	0.30	0.66	0.20



第 7 図　材料の耐分解ガス性試験(絶縁抵抗の変化)

Fig. 7. Changes of insulation resistance due to decomposed SF_6 gas

その方法の概略で，容器を 2 個直列に接続し SF_6 ガスを流し (200 cc/min. 分解ガスが容器 A から B に移行する時間は 30～60 分)，上流側容器 A 内で 0.2A の連続放電によりガスを分解した．実験は試料 (SiO_2 質のもの) を容器 A に入れた場合 (直接ばくろと呼ぶ) と容器 B に入れた場合 (間接ばくろと呼ぶ) とについて行なった．その結果を第 7 図と第 4 表に示す．これより予想どおり間接ばくろ試料は直接ばくろ試料に比べて劣化が著しく少ないことが確かめられた。

当社製 SF_6 ガス機器用絶縁物は，その使用条件により上記 1)～4) 項の結論を充分に考慮された材料を選択使用されている。

2. 金属材料の耐分解ガス性

SF_6 分解ガス中での金属材料の劣化はそのメカニズムは前述した絶縁材料の劣化と似ているが，実害はずっと少ない．実験結果によると鉄，銅，ステンレス，アルミニウムなどはほとんど変化しない．しかし亜鉛，真ちゅうは腐蝕され真ちゅうでは脱亜鉛現象がみられる．また材料によっては粉末状金属ふっ化物のできるものがあり，吸湿により劣化が促進されることがある．とくにろう付け部分や不適当なめっきやアルマイト処理などでこの現象が起りやすい．しかし吸着剤による分解ガスや水分の除去が行なわれていれば実用上問題は起らない。

3. その他の材料の耐分解ガス性

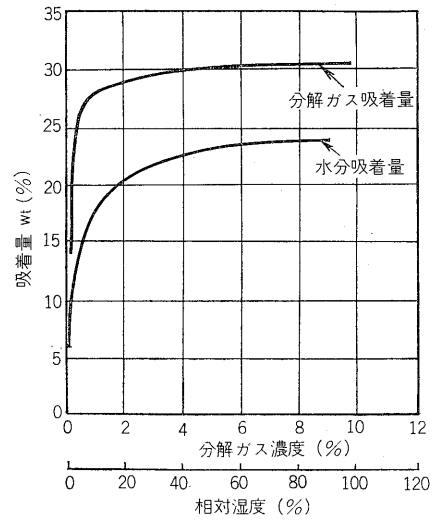
SF_6 分解ガスが発生する個所で使われる材料としては前述の絶縁，金属材料のほかにゴム，塗料や潤滑剤がある．これらの材料についても実験により耐分解ガス性をしらべた結果[6]，O リング用ゴムについては特殊成分の合成ゴムが，塗料についてはエポキシ系塗料がすぐれていることが判明した．また潤滑用グリース，オイルには石英粉ベースのものが多いため，テフロン製無潤滑軸受を使用するのが好ましい．当社製 SF_6 ガス機器にはこれら耐分解ガス性のすぐれた材料が使用されている。

4. 吸着剤について

吸着剤は使用材料に有害な作用を及ぼす分解ガスと水分を除去するために用いられ，SF_6 ガス機器にとっては重要な部品の一つである。

吸着剤として従来は主として活性アルミナ系のものが使用されていたが，現在では吸着特性がすぐれているためにやや高価であるが合成ゼオライト系のものも併用されている。

第 8 図に合成ゼオライトの分解ガスおよび水分の吸着特性の一例を示す．合成ゼオライトは吸着容量が大きいだけでなく分解ガスあるいは水分の濃度が低くても吸着



第 8 図　合成ゼオライトの吸着特性

Fig. 8. Absorptive power of synthetic zeolite

性能が大きいのが特長である。

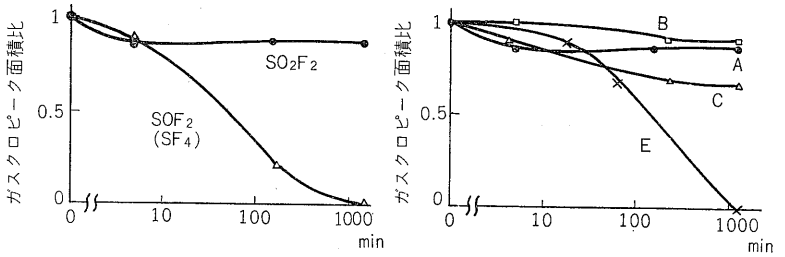
また吸着剤は分解ガス成分によってその吸着能力が異なる．第5表および第9図にその一例[7]を示す．吸着剤の選択の際にはこれらの点を充分考慮すべきである。

吸着剤の使い方としては，二圧式しゃ断器のように吸着剤の中にガスを流すガス循環方式と吸着剤を静置してガスの対流や拡散により吸着する方式とがある．前者の場合はガスが素通りしないように吸着剤の粒度とガス通路の形状に工夫がいる．後者では分解ガスは SF_6 ガスより軽く上方に拡散しやすいため，吸着剤を機器中の上方に置くのを標準としている。

第5表　吸着剤の分解ガス吸着量

Table 5. Absorptive power of absorbents of decomposed SF_6 gas

記号	成　　分	分解ガス吸着量
A	活性アルミナ系	10.9 wt %
B	主成分活性アルミナ	7.1 wt %
C	合成ゼオライト系	26 wt %
D	合成ゼオライト系	20 wt %
E	特殊処理合成ゼオライト	20 wt %以上



(a) 吸着剤Aの吸着　　(b) SO_2F_2 特性の吸着

第9図　吸着剤の吸着速度

Fig. 9. Rate of absorption of absorbents

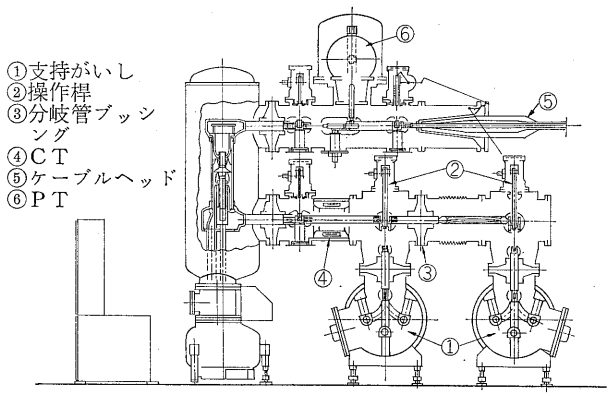
IV. SF_6 ガス機器用モールド絶縁物

1. 密閉形開閉設備の構造とモールド絶縁物

SF_6 ガスのすぐれた絶縁特性を利用した密閉形[8]開閉設備の構造の概要は第10図に示すとおりで，その中には数多くの絶縁構成を必要とする．その主な絶縁部品はエポキシ樹脂モールド品である．すでに前節までに SF_6 ガスふんい気中で使用するのに適した材料について述べているので以下には密閉形開閉設備に用いられる母線支持用の支持がいし，ガス区分用として用いている隔壁用分岐管ブッシング，断路器操作用操作棒，電圧変成器，変流器の製作に必要な技術とその基礎となる事項について述べる。

2. モールド絶縁物に要求される性能

モールド絶縁物は高い絶縁強度，機械強度，寸法精度



第10図　密閉形開閉設備構造図

Fig. 10. Outline of SF_6-gas insulated metalclad switchgear(VMH)

が要求される．特に電気機器においては上述した特性を長期間保持しなければならない．製品として装置に組込まれた場合にはそれぞれが単体としての良さを発揮するのではなく，装置全体として総合的に良好な特性を発揮しなければならない．日本のように地震の多発するような所では装置全体としての耐震構造のみならずモールド絶縁物そのものも突発的に発生する大地震のような衝撃力あるいは外部から伝達される変動応力や外気の温度変化のくり返しに対しても充分に耐え得ることが必要である。

V. 注型品の製造技術

モールド絶縁物を作るにあたり材料，製造技術について総括的に眺めるとつぎに示す事項がその主なるものといえよう。

(1) 注型用材料ならびにその副資材

(2) 製品形状と導体ならびに埋込物の前処理

(3) 注型作業条件

(4) 注型用金型

(5) 注型装置

これらの事項は注型品の製造に関し，有機的な関係をもち信頼性のある注型品を作るために関連担当者がいつも熟知し，管理しなければならないことである。

(1)項については材料の受入検査ならびに保管中における異物混入，水分の混入を管理しなければならない．特に充てん材に関しては粒度分布の管理が必要である．なぜならば粒度分布と粒径大きさによって注型時の樹脂粘

度に影響を与え注型作業を大きく左右する．その結果注型品にボイドを作ったりもする．また埋込物がある場合には埋込物との界面でのぬれに影響を与え，界面はくりの要因ともなり得る。

(2)項は埋込物の形状が複雑であったり，大形化すればするほど硬化時の樹脂の収縮による応力および熱応力は数 100kg という大きな値になる．この場合には応力の低減を図るため緩衝作用を持つ特殊な処理を施す必要がある．一方その必要がなくても埋込物や導体との密着が悪い場合には密着している一部に応力が集中し耐寿命性，電気的にはコロナ発生に結びつく．したがって導体や埋込物の脱脂処理，緩衝層の形成には充分な注意を払う必要がある。

(3)項の注型作業と注型品の硬化スケジュールに関する樹脂材料は化学的に温度と時間の関数で物理的性質，いいかえれば機械的特性が連続して変化する．注型品が機械的にも電気的にも安定であるには残留応力あるいはひずみの少ない製品を作ることである．それには樹脂の反応に伴う物理的な挙動を充分に解析し，硬化時間，温度，金型離型の条件を設定し，製品ひとつひとつに対し，条件を追跡しながら工程の管理を行なうことが必要である。

(4)(5)項に関しては作業工程の慣習でつい慎重さを欠く場合があるが注型品を作る上には必要な事項である．製品そのものは化学反応に支配されているので装置として時間と温度が反応に追従してコントロールできなければならない．また金型に関しては金型のでき具合，管理の仕方で注型樹脂と接する面の離型作用が不完全であると不均一な応力を製品に残したり，離型時に製品を損傷したりもする．種々のモールド品を作るに際し，上記した内容については慎重な取扱いと管理を行なう必要がある。

つぎにこれらの個々の点につき基礎的な事項について述べる。

VI. モールド絶縁材料

1. エポキシ樹脂

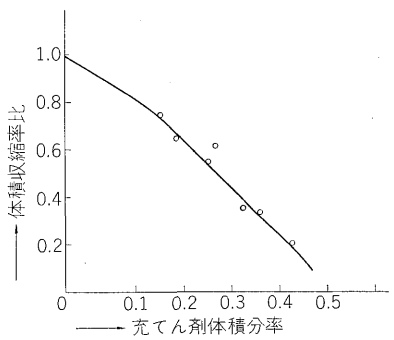
すぐれた絶縁耐力と特殊な性能が要求される絶縁材料としてはエポキシ樹脂注型品が最適であることは良く知られている．エポキシ樹脂にはビスフェノールAタイプの芳香族系エポキシ樹脂と環状脂肪族系エポキシ樹脂がある．種々の実験の結果，樹脂自身についていえば芳香族エポキシ樹脂は耐クラック特性，機械強度，耐薬品性が環状脂肪族系に比べてすぐれているが耐トラッキング性に関してはやや悪い．一般的な用法としては芳香族系エポキシ樹脂は屋内用製品に環状脂肪族系エポキシ樹脂は屋外用製品に多く使われている．エポキシ樹脂注型品は樹脂単独で用いられることは少なく，モールド絶縁物の用途によって充てん材や可とう性付与材が添加される。

2. 充 て ん 材

注型樹脂に充てん材が添加されて用いられるがこの効用はつぎに示す特長によるものである。

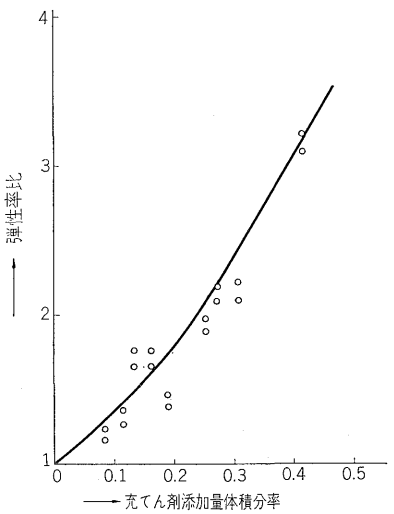
(1) 樹脂と充てん材を機械的に結合させ強度の増大を図る．一般には石英粉が用いられる。

(2) モールド品にはかならずといってよいほど金属類の異種物質が埋込まれる．両者は物理的性質を異にする．樹脂は金属類に比べ熱膨張係数が大きいので温度変化があると両者の間にひずみを生じる．このひずみを少なくするためには樹脂の熱膨係張数をより埋込物である金属類に近づける必要がある．この目的に樹脂に無機質の熱膨張係数の小さい充てん材が添加される．特に SF_6 の分解生成物に対してはより耐分解ガス性のある充てん材がそれぞれの特長を生かした方法で用いられる。



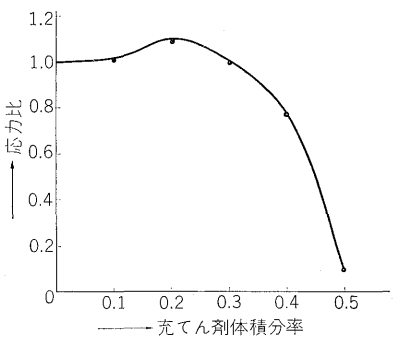
第 11 図　充てん添加剤量による樹脂の収縮率

Fig. 11. The effect of filler on volume shrinkage



第 12 図　充てん剤（石英粉）添加による樹脂弾性率

Fig. 12. The effect of filler on modulus



第 13 図　充てん剤添加量と発生応力

Fig. 13. The relationship between stress ratio and filler consentration for epoxy resin

(3) 樹脂に埋込まれた導体などは通電によって温度上昇する．その熱を外部に放散し，モールド樹脂への蓄熱をさけるため，いいかえれば熱伝導率を良くするためにも添加される。

(4) 注型品内部に発生する応力に対し，充てん材は応力を分散し，応力の集中化を緩和する働きをする。

(5) 樹脂は硬化過程では体積収縮を起す．充てん材の添加によって体積収縮が低減される．

この体積収縮についてエポキシ樹脂に充てん材を添加したときの樹脂の二，三の特性についてつぎに示す。

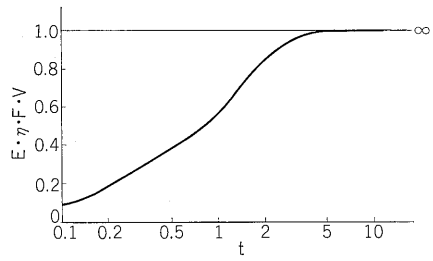
第 11 図は樹脂に充てん材を添加したときの収縮率を示す．充てん材の添加量が増すほど収縮率が小さくなる．一方弾性率は第 12 図に示すように充てん材添加量とともに増大する傾向にある．注型品に発生する応力は収縮率ならびに弾性率を小さくすることにあるが第 12，13図からは収縮率と弾性率との積である応力値は充てん材の添加により必ずしも軽減されるとは限らない．ここでは樹脂層が金属などでその変位が一方向に拘束された場合の関係を図に示すと第 13 図になる．充てん材がある添加量以上にならないと発生応力を低減する効果がない．したがってモールド品には残留応力を小さくするよう最適添加量が採用される。

VII. モールド品と樹脂挙動

1. エポキシ樹脂の硬化過程

絶縁物としてのモールド品はその耐絶縁性が長期間保証されるためには機械的に強度特性が低下するものであってはいけないし樹脂材料としては化学的に組成が変化するものであってはいけない．モールド品が製作される過程からながめるならばモールド樹脂はかならず液状で型に流し込み，所定の形状のものに形ちづくられる．この液状樹脂が化学反応によって次第に固体に変り，剛性ある機械部品となる．電気機器に使用されるモールド品は構造として内部に鉄心，コイル，導体などが埋め込まれるものが大半で，これらの埋込物があると樹脂の硬化過程での樹脂の体積収縮が形状によっては自由に変位することができず，その変位が拘束されることになる．この変位の拘束量に等しい応力がモールド品中に残留する。

まず硬化過程でのエポキシ樹脂の反応による挙動に関していえば幾多の文献にも見られるように化学的な見地からはこの硬化反応は見かけ上一次の反応速度で取扱うことができる．反応にともなって変位する特性のおもなものは弾性率(E)，引張強度(F_t)，曲げ強度(F_b)，粘性係数(η)，収縮率 (V) である．図で示せばその代表的な線図は第 14 図に示すカーブで表わされる．ゲル化と称される現象はカーブの一番変位の大きい所に位置する．反応が終了する時間はゲル化時間の約 10 倍程度にあたる．したがって良い信頼性のあるモールド品を作るには樹脂の硬化過程の挙動を知り，モールド品の形状によっての樹脂の硬化過程での拘束変位，発生応力などをあらかじめ算出し，綿密な硬化スケジュールを組みコントロールすることにつきる。



第 14 図　反応時間と物性

Fig. 14. Master curve for epoxy resin

2. 応力の緩和

注型樹脂の物性，モールド品の形状，電気的特性ならびに設計が総合的に良くても，モールド品中の残留応力と外部から加えられる機械的な変動応力値の和が，モールド形成部の樹脂強度の機械的にくり返し応力が与えられた場合の疲労強度を見越した値を越えることはモールド品の耐久性に関し好ましくない．性質の異なる材料の組合せではそれぞれの材料特性がすぐれていても，一体にした場合は設計上の安全率を越える場合が多い．したがってこの応力値を小さくする必要がある．この応力は異種物質同志の物性の差異によって発生するのであるから，両者の物性差を減少させるような物質を介在させ緩衝作用を持つ物質が必要となることは明らかである．緩衝機能を果すということは緩衝物質の圧縮率が支配因子となる．物体の圧縮率 K は式(6)の関係にある。

$$K=\frac{1}{V}\frac{dK}{dP} \qquad \cdots\cdots(6)$$

式(6)を解くと

$$P=2.303\frac{1}{K}\log\frac{V}{V_0} \qquad \cdots\cdots(7)$$

P：圧縮力，V_0：圧縮前の容積，V：圧縮後容積

第 6 表では材料の圧縮率とその材料の体積を 10% 変化させたとき材料中に発生する応力値を示したものであ

第 6 表　物質の圧縮率とひずみを受けた時の特性

Table 6. Compressibility of material and character for strain

状態	材料	圧縮率	体積10%変化させたとき材料中に発生する応力値
固体	鉄	1.1×10^{-6}	95 t/cm²
液体	水銀	3.9×10^{-6}	27 t/cm²
	水	4.6×10^{-5}	2.3 t/cm²
	エタノール	1.1×10^{-4}	955kg/cm²
	メタノール	1.2×10^{-4}	873kg/cm²
気体	空気	1	1.1kg/cm²

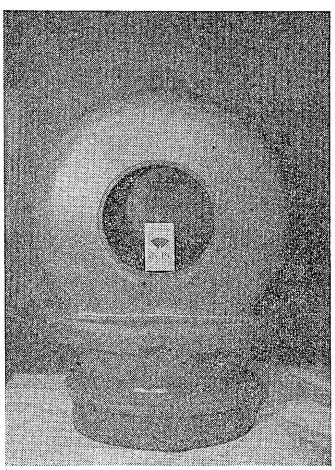
第 7 表　密閉形開閉設備用モールド品の電気特性の例
Table 7. Examples of electrical properties of molds for VMH

モールド品	SF_6 ガス圧 (ata)	商用周波耐電圧 (1分間)(kVeff)	衝撃耐電圧 (kV)	コロナ開始電圧 (kVeff)	静電容量 (PF)	tan δ (%)
支持がいし	3.5	325　良	750　良	230 以上	3	—
分岐管ブッシング	3.5	325　良	750　良	230 以上	33	0.19
PT	2.3	154　良 (120Hz)	全　波 400良 さい断波 460良	108 以上	500	一次～二次，三次，アース間 0.61

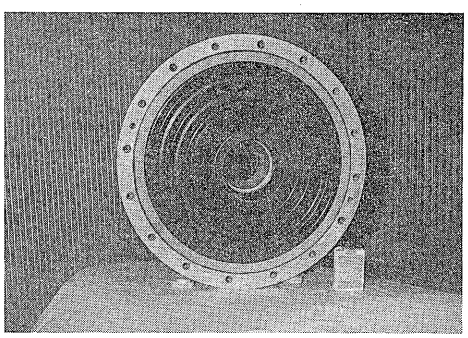
る．第 6 表から固体よりも液体，液体よりも気体になるほど圧縮率が大きく，同一ひずみを受けたとき残留応力が小さくなることが示され，緩衝物質選定の指針を与える。

VIII. 密閉形開閉設備用モールド品とその特性

SF_6 ガス中で用いられるモールド絶縁物について，材料面，製造技術面からその一端を紹介したが，ここに主なモールド絶縁物とその電気特性を示す。

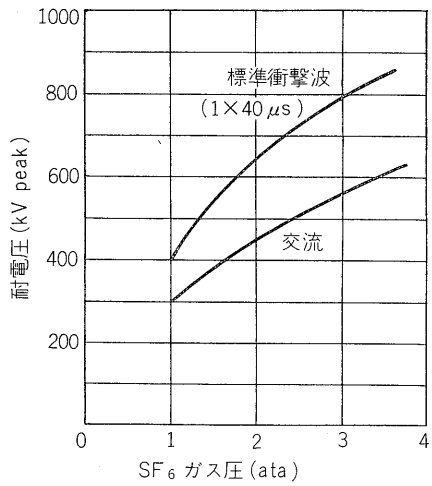


第 15 図　66/77kV PT
Fig. 15.　66/77 kV PT for VMH



第 16 図　66～187kV分岐管ブッシング
Fig. 16.　66～187 kV bushing for VMH

第 15 図は 66kV用ＰＴ，第 16 図は隔壁用分岐管ブッシングでいずれもモールド品として外観形状が大きく，モールド技術上，その硬化過程は樹脂の粘弾性挙動を解析し，また特殊な応力の緩和方法を開発採用し，かつ製造装置ともども，充分な管理のもとに作ったものである．第 7 表はモールド絶縁物の主な電気特性を示した．また第 17 図には分岐管用ブッシングの交流および衝撃電圧のガス依存性を示した。



第 17 図　分岐管ブッシングの耐電圧特性
Fig. 17.　Withstand voltage of bushing for VMH

IX. むすび

SF_6 ガス機器の材料技術に関する問題として，SF_6 ガスを消弧媒体として用いる際に重要な分解ガス対策と，絶縁媒体として用いる際に必要不可欠な固体絶縁物について報告した。

本報の前半ではまず SF_6 ガスの安定性と分解ガスの生成について述べ，アーク電流，電極材質が分解ガス量に大きく影響することを明示した．つづいて種々の実験結果から絶縁材料，金属材料，ゴム，塗料，潤滑剤で耐分解ガス性のすぐれたものを紹介し，絶縁材料については，水分やエポキシ樹脂充てん材，分解ガスの接触状態

が材料の耐分解ガス性への影響が大きいことを示した．さらにガス機器に設置され，機器の信頼性を大きく左右する SF_6 分解ガスおよび水分の吸着剤についてもその特性を紹介し，当社の SF_6 ガス機器にはこれらの点を充分考慮した材料が使われていることを明らかにした。

後半では，SF_6 ガス機器用絶縁物としてはエポキシ樹脂モールド品が要求される性能から現在最適な材料と考えられ，特に密閉形開閉設備のように高電圧下で使用される場合には材料そのものの取扱い方，製造技術についてもきめ細かい管理が必要であることを述べた．特にモールド絶縁物が大形化すればするほど，また形状が複雑化すればするほど製造技術面でモールド絶縁物内に残留する応力値が大きくなりクラック発生の要因ともなる．製品内部に発生する残留応力をいかに小さくするかによってモールド絶縁物の耐寿命性は支配されることは明らかなので充てん材ならびに応力の緩和についてその効用の一端を紹介した．今後高電圧下 SF_6 ガスふんい気で使用される材料，モールド絶縁物の種類も多く，形状も複雑化すればするほどより信頼性のある製品とするために使用される環境条件と材料の長期間の化学的，物理的挙動，製造条件と技術についてより多くの研究と努力を行ない新しい機種の開発をしなければならない。

参考文献

(1) 井関・小原：電気学会誌 **88** 1134 (1968)
(2) 井関・小原・芳賀・鋤柄：昭 45 連大S 2-3 (1970)
(3) 井関：OHM **57** No.10 25 (1970)
(4) 井関・小原：SF_6 ガスの特性と使用上の問題点 富士時報 **42** No.3 (昭 44)
(5) 井関・小原・芳賀・鋤柄：第2回電気絶縁材料シンポジウム（電気学会）E-6 (1969-10-2)
(6) 国保：電気評論 873 (1970-7)
(7) 増田・小原：昭 45 連大 No.768 (1970)
(8) 元起・小原：密閉形開閉設備高電圧用モールド品 富士時報 **43** No.4 (昭 45)

発明の紹介

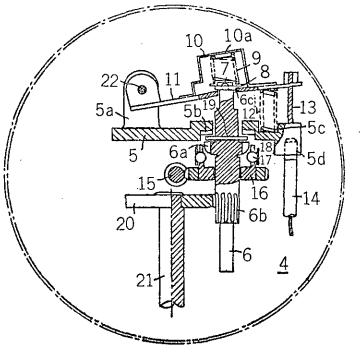
扇風機の首振り切換装置

（登録第 814700 号）

この考案は扇風機の首振り切換操作を素鋼線を介してスタンドパネル上の操作スイッチで行なうようにした機構に関するものである。

扇風機の首振りは電動機軸をクランク軸に連結することによって達成され，このために電動機軸に取付けられたウォーム *15* とこれに係合するピニオン *16* に対してクランク軸 *21* に取付けられた平歯車 *20* とこれに係合する小歯車 *6*b を有するピニオンシャフト *6* が設けられ，ピニオンシャフト *6* とピニオン *16* との間に歯車 *6*a と鋼球 *17* とからなるクラッチが設けられている．このピニオンシャフトを押下げることによりクラッチの係合が行なわれ，扇風機の首振りが行なわれる。

この考案ではピニオンシャフト *6* の昇降のためにレバー *11* を設け，一端をピン *22* で支持し，他端を索鋼線 *13* に連結する．レバー *11* はばね *13* によって上方に押圧され，シャフト *6* を引上げている．シャフト *6*



の上端にはレバー *11* 上の支持板 *10* に一端を取付けられたばね *9* が作用しており，索鋼線 *13* を下方に引いてレバー *11* を引下げると，ばね *9* の押圧力によりシャフト *6* が下降されクラッチの係合が達成される．この構成により切換え操作力が少なくて済み，クラッチの係合も無理なく達成される。

＊本誌に記載されている会社名および製品名は，それぞれの会社が所有する
商標または登録商標である場合があります。