ガス絶縁開閉装置用材料の開発

Materials for Gas Insulated Switchgear

紫藤延彦* Nobuhiko Shito 暖 貝 時 男*
Tokio Isogai

茂庭喜弘*
Yoshihiro Moniwa

近藤修博**
Michihiro Kondo

丹 野 和 夫*
Kazuo Tanno

w. E

ガス絶縁開閉装置に使用する諸材料に対しては、一般の材料に対する場合とは異なる特殊な性能上の要求がある。ガス絶縁開閉装置用の各種材料を選定する際の基本的な考えを明らかにするとともに、実用材料の選定に関して行なった実験結果の一部を発表する。

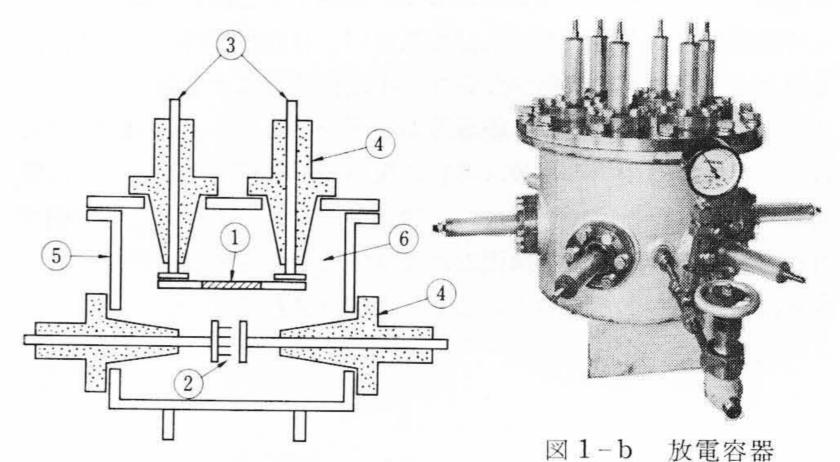
1. 緒 言

従来の変電所にくらべてかずかずの利点をもつコンパクト変電所用ガス絶縁開閉装置の製作に当たっては、多数の新しい技術的な問題を克服しなければならない。ガス絶縁開閉装置に使用する各種の材料、すなわち絶縁材料、金属材料、シール材料、潤滑剤などの選定も重要な課題の一つである。ガス絶縁に使用される SF₆ は化学的にきわめて安定で、通常の状態では他材料を侵すことはないが、高温あるいは放電により、化学的に著しく活性な分解生成物を生ずるので⁽¹⁾で(4)、大電流のアークを発生するしゃ断器では、特に生成物を有効に除去する⁽¹⁾とともに、生成物に侵されがたい材料の選定に留意しなければならない。また水分の存在は材料の劣化を促進するので⁽¹⁾、シール材の選定や材料の乾燥についても特別の配慮が必要である。ガス絶縁開閉装置用の各種材料の選定に関する基本的な考えを述べるとともに、今回のガス絶縁開閉装置の製作に際して基礎資料とした材料関係の研究結果の一端を発表する。

2. 絶 縁 材 料

ガス絶縁開閉装置に使用される主要な絶縁物としては、導体支持用のスペーサそのほかの支持絶縁物、しゃ断器操作ロッドおよび消弧用ノズルがある。これらの絶縁物のうち特にガスしゃ断器内で使用される絶縁物は、 SF_6 ガス中の放電によって生成する活性な分解物に直接ふれる機会がある。日立製作所のガスしゃ断器の設計に当たっては、しゃ断部の構造、材質の検討により、しゃ断時に生成する有害な分解物の量を極力少なくし、さらに強力な吸着剤を用いて、分解物を有効に除去する方法を採用しているので、分解物の濃度は一般にきわめて微量である。しかし、大容量のしゃ断直後には、局部的に分解物濃度の高くなることも考えられるので、長期にわたる運転期間中すぐれた絶縁性を保持するためには、 SF_6 の放電分解生成物中でもほとんど劣化を示さない絶縁材料を選ぶことが必要である。また、 SF_6 ガス中における絶縁物の沿面せん絡電圧は、空気中の数倍の値を示すために、 SF_6 ガス中で使用する絶縁物には貫通破壊電圧が著しく高いことが望まれる。

導体支持用のスペーサ,支持絶縁物に対しては,高い絶縁強度,機械強度,寸法精度が要求されるので,じゅうてん剤を入れたエポキシ樹脂モールド材料が適している。従来,有機材料に対するSF6の放電分解物の影響を調べた例が幾つか公表されている(5)~(11)が,ほとんどは一般の高分子物質に関する断片的な結果を示したもので,実用的なモールド材料に関する検討例は少ない。また実験条件,性能評価の方法もまちまちで,これらの結果から実用的な材料



① 試料 ② 放電電極 ③ 絶縁抵抗,せん絡電圧

④ 絶縁ブッシング 測定端子

⑤ 容器 ⑥ SF₆ ガス

図1-a 放電容器の構造図

の評価を行なうことはむずかしい。一般に、無機物質は有機物質に くらべて、SF₆の放電分解物と反応し、変質しやすいので、実用的 なモールド材料を考える場合に最も問題になるのは、無機質のじゅ うてん剤の選定である。

ここでは、モールド用の各種エポキシ樹脂ならびに各種じゅうてん剤に対する SF_6 の放電分解物の影響を比較した結果を述べる。実験には図1a、bに示すように、針対平板の放電電極および試料測定用の絶縁端子を備えたステンレス鋼製の密閉放電容器を用いた。容器内に SF_6 ガスをじゅうてんし、放電電極に交流電圧を印加して数十時間気中放電を継続し、その間試料を容器内に取り付けたままの状態で、試料の絶縁抵抗の変化および沿面せん絡電圧の変化を測定した。従来、この種の実験では、放電を続けた後、試料を大気中に取り出して、重量、機械強度、絶縁抵抗、絶縁破壊電圧を測定しているが、劣化後の試料を大気中に取り出すことにより、絶縁抵抗、絶縁破壊電圧が著しく変わる場合がある。

代表的な配合の各種エポキシ樹脂ならびに各種酸化物,けい酸塩, 弗化物,窒化物,硫酸塩をじゅうてん剤としたエポキシ樹脂モール ド材料の実験前後の絶縁抵抗の値を表1に示す。じゅうてん剤を含 まないエポキシ樹脂はいずれも絶縁抵抗の低下が少ない。じゅうて ん剤として用いた酸化物の中には著しく絶縁抵抗を低下させるもの とほとんど絶縁抵抗を低下させないものとがある。弗化物,硫酸塩 は比較的すぐれている。一般のモールド材料のじゅうてん剤として 広く使われているシリカ,タルク,ガラス粉などけい素を含む化合 物をじゅうてん剤にしたものは絶縁抵抗の低下が著しい。なお, 表1の各種材料のうちには,前述のように,大気中に取り出した場 合吸湿によりさらに絶縁抵抗が低下する材料もあり,またほとんど 低下しない材料もある。

図2は代表的な材料の絶縁抵抗の時間的変化を示したもので,一

^{*} 日立製作所日立研究所

^{**} 日立製作所国分工場

表 1 放電実験前後のモールド材料の絶縁抵抗および重量変化

試料 No.	樹 脂 種 類	じゅう	絶 縁 抵 抗 (Ω)		重量変化
		てん剤	初 期	劣 化 後	(%)
1	ビスフェノール系エポ キシ樹脂アミン硬化	なし	7×10 ¹⁴	9×10 ¹²	< 0.1
2	ビスフェノール系エポ キシ樹脂無水酸硬化	なし	7×10^{14}	5×10 ¹³	< 0.1
3	脂環系エポキシ樹脂無 水酸硬化	ts l	>1015	9×10^{12}	< 0.1
4	ノボラック系エポキシ 樹脂無水酸硬化	75 L	>1015	5×10 ¹²	< 0.1
5	硬化エポキシ樹脂	Al_2O_3	6×10^{14}	3×10^{13}	< 0.1
6	硬化エポキシ樹脂	SiO ₂	8×10 ¹⁴	2×10^{6}	-0.5
7	硬化エポキシ樹脂	${ m TiO}_2$	$>10^{15}$	7×10^8	-0.2
8	硬化エポキシ樹脂	ZrO_2	3×10^{14}	5×10^{6}	< 0.1
9	硬化エポキシ樹脂	Sb_2O_3	7×10 ¹⁴	2×10^{6}	-1.0
10	硬化エポキシ樹脂	Fe ₂ O ₃	3×10^{13}	8×10^{11}	< 0.1
11	硬化エポキシ樹脂	ガラス粉	3×10^{13}	6×10^7	-1.6
12	硬化エポキシ樹脂	タルク	7×10^{14}	1×10^8	-1.0
13	硬化エポキシ樹脂	NaF	8×10 ¹⁴	3×10^{12}	< 0.1
14	硬化エポキシ樹脂	MgF_2	>1015	2×10^{12}	< 0.1
15	硬化エポキシ樹脂	CaF ₂	8×10 ¹⁴	1×10^{13}	< 0.1
16	硬化エポキシ樹脂	BaF ₂	4×10 ¹⁴	1×10^{12}	< 0.1
17	硬化エポキシ樹脂	AlF ₃	6×10 ¹⁴	2×10^{12}	< 0.1
18	硬化エポキシ樹脂	TiK ₂ F ₆	3×10^{13}	1×10^{12}	-1.1
19	硬化エポキシ樹脂	BN	>1015	4×10^{13}	< 0.1
20	硬化エポキシ樹脂	K ₂ SO ₄	>1015	1×10^9	-0.3
21	硬化エポキシ樹脂	CaSO ₄	5×10 ¹⁴	1×10^{13}	< 0.1
22	硬化エポキシ樹脂	SrSO ₄	1×10 ¹⁴	3×10^{12}	0.3
23	硬化エポキシ樹脂	BaSO ₄	>1015	1×10^{12}	0.2

般に放電初期に絶縁抵抗が低下するが、長時間放電を継続してもその後の変化は比較的に少ない。図3は吸着剤を放電容器内に入れて実験した場合で、シリカをじゅうてん剤とする材料のように劣化をうけやすい材料では吸着剤の効果が認められるが、やはり絶縁抵抗はかなり低下する。また、放電分解物による絶縁抵抗の低下は、図4に示すように微量の不純物により著しい影響をうけるので、材料の厳重な管理が必要である。図5は劣化実験後の各試料の絶縁抵抗と交流の沿面せん絡電圧との関係を示すもので、一般に絶縁抵抗の低下の著しいものほど沿面せん絡電圧のばらつきが大きい。さきの表1には、実験前後の試料の重量変化もあわせて示した。一般に絶縁抵抗の低下の大きなものは重量変化も大きいが、中には絶縁抵抗の低下が少ないにもかかわらず重量変化の大きなものもある。

図6は放電容器にブッシング状に成形したモールド材料を取り付け,前述の気中放電を継続したのち,交流で沿面せん絡試験を行なったブッシングの外観を示したものである。シリカ系じゅうてん剤入りブッシングには深いトラッキング痕跡(こんせき)が見られるが,特殊じゅうてん剤入りブッシングでは全く異常が認められない。

以上は、ガス絶縁機器用のモールド材料として特に問題になる放電分解物中での安定性を比較した結果であるが、実用的なモールド絶縁材料に対しては、さらに多くの重要な性能上の要求がある。ま

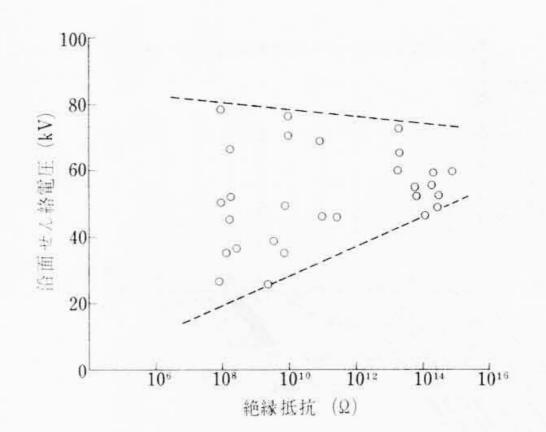
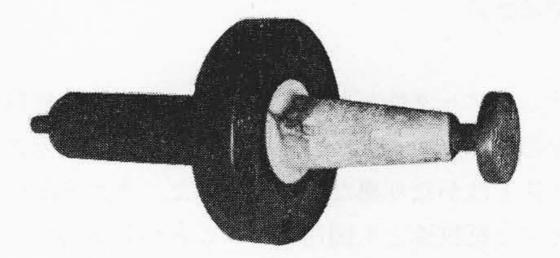
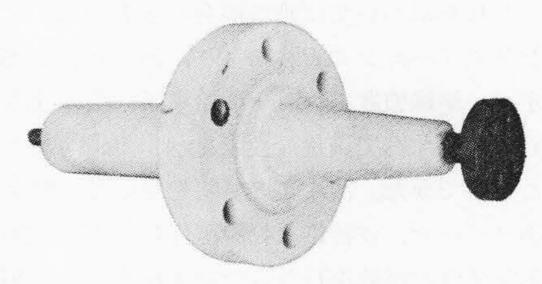


図5 劣化試料の絶縁抵抗と 沿面せん絡電圧との関係



(a) シリカじゅうてん剤入り材料



(b) 特殊じゅうてん剤入り材料

図6 放電実験後沿面せん絡試験を行なった ブッシング

ず第一は、交流およびインパルスの絶縁破壊強度ならびにコロナ開始電圧である。材料中のボイドを極力少なくすることにより高い絶縁破壊強度およびコロナ開始電圧を得ることができるが、そのためには、モールド作業法はもちろん、材料の選定についてもじゅうぶんな吟味が必要である。第二は材料の機械強度である。コンパクトな設計をするためには、モールド材料の絶縁強度のほかに機械強度に対しても高度の要求がある。表1の中で、無水硫酸カルシウム、弗化カルシウム、窒化硼素をじゅうてん剤とする材料は、SF6の放電分解物に対する抵抗性は大きいが、機械強度はシリカをじゅうてん剤とする一般のモールド材料にくらべて著しく低く、じゅうぶんな機械強度を必要とする場所には使用できない。ガス絶縁機器用のモールド材料として考慮しなければならないほかの性質に、SF6ガ

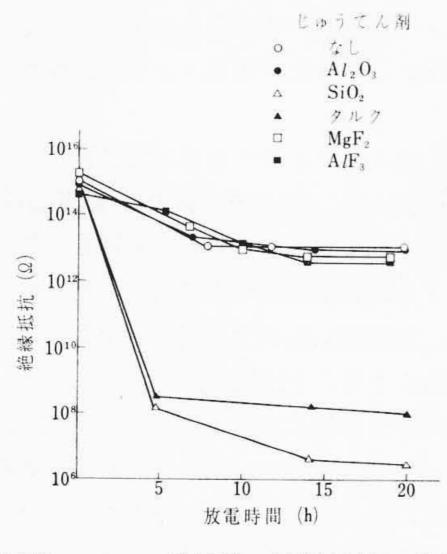


図 2 モールド材料の絶縁抵抗の変化 (その 1) じゅうてん剤の影響

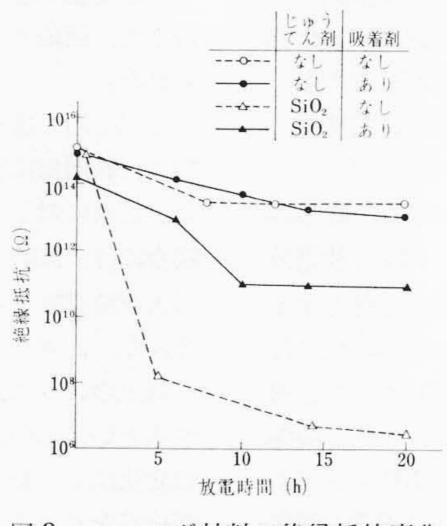


図3 モールド材料の絶縁抵抗変化 (その2) 吸着剤の効果

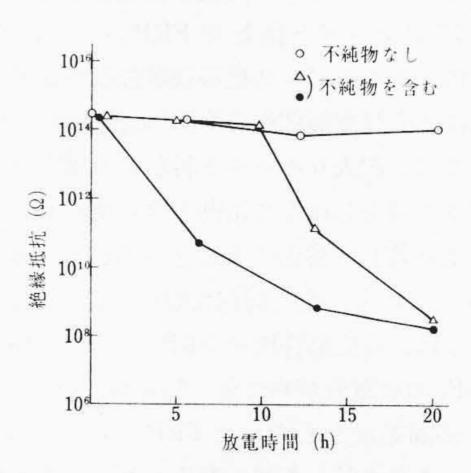


図4 モールド材料の絶縁抵抗変化 (その3) じゅうてん剤中の不純物の影響

日

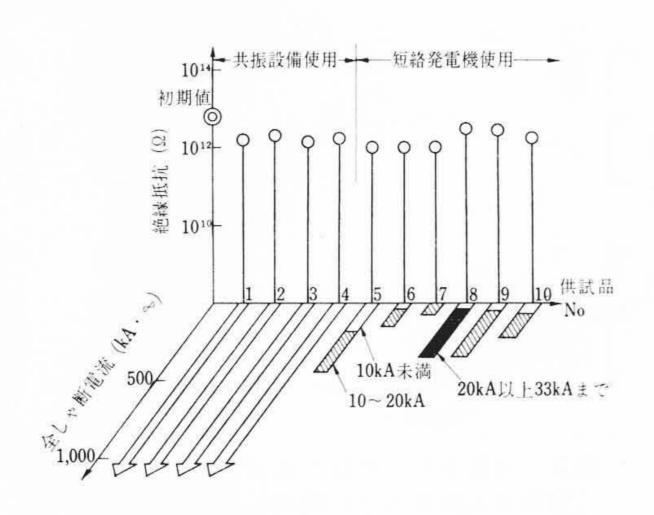


図7 過酷試験後の実物スペーサの 絶縁抵抗

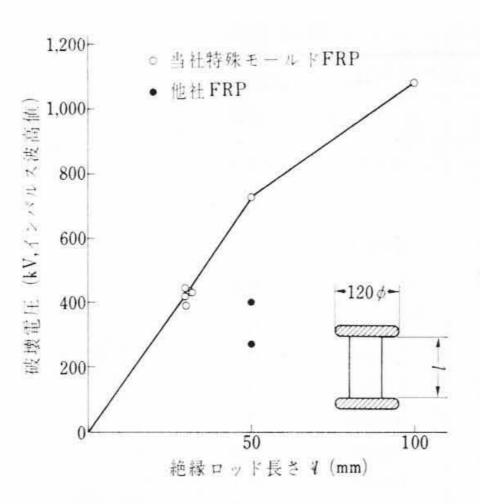


図8 日立特殊モールド FRP ロッドの長さ 方向の貫通絶縁破壊強度 (正インパルス)

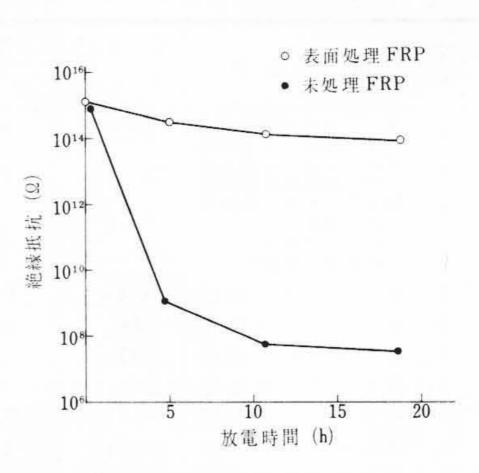


図9 FRP の絶縁抵抗変化に対する 表面処理の効果

ス中における耐アーク性がある。 SF_6 ガス中の絶縁材料の表面でアーク放電を行ない,アークが持続する時間を調べたところ,空気中の耐アーク性とはかなり異なる結果を得た。また上記の SF_6 の放電分解物に対する抵抗性とも関連がないことがわかった。このほか, SF_6 ガス中における耐コロナ性,耐トラッキング性についても検討しているが,これらについては別の機会に発表する。

以上述べたスクリーニング実験により、われわれは SF_6 の放電分解物中で安定で、絶縁強度、コロナ開始電圧、機械強度、耐アーク性、そのほかの点で、すべて満足な性能を示す実用的なモールド絶縁材料を選ぶことができた。次にこの材料を用いて、84~kV ガスしゃ断器用の実物スペーサ、支持絶縁物を製作し、実用状態にくらべてはるかに過酷な条件の試験を行なった結果を述べる。 SF_6 ガス中のスペーサに 84~kV の交流を課電しながら、コンデンサを電源として接触子間に減衰交流アーク(f = 100~Hz,持続時間=7~8 Hz,1 Hz 目のアーク電流 = 4~kA)を約 400 回発生させたのち、スペーサに交流 160~kV を 1~f0間印加する方法と、実際のしゃ断器にスペーサ、支持絶縁物を組み込んで、短絡発電機を電源として数 kA から 30~kA までのしゃ断試験を繰返したのち、70~f0 号の絶縁試験を行なう方法を実施した。いずれの場合にも絶縁物には全く異常は認められなかった。図 71 は上記試験後のスペーサの絶縁抵抗の変化を示したもので、ほとんど低下が認められない。

絶縁操作ロッドはしゃ断器の開閉操作を行なうもので、操作時ロッドにかかる機械力にじゅうぶん耐えることが必要であり、この見地からガラス繊維を強化材とする強化プラスチック(FRP)を使うことが望ましい。既述のように SF_6 ガス中で使用する絶縁物にはきわめて高い貫通絶縁破壊強度が要求されるが、通常の製法によるFRP は絶縁破壊強度が低いために SF_6 ガス中でじゅうぶんな性能を発揮することができない。日立製作所が独自の方法で開発した特殊モールド法によるFRP は、こうしたFRP に関する一般常識をくつがえして、著しく高い貫通絶縁破壊強度を示した。図8は日立製作所のFRP ロッドと他社のFRP ロッドについて、 SF_6 ガス中で長さ方向の正インパルス絶縁破壊強度を比較した結果で、特殊モールド法による日立製作所のFRP の優秀性を示している。

じゅうてん剤入りモールド材料を比較したさきの表1の結果から、ガラス粉をじゅうてん剤とするモールド材料は、 SF_6 の放電分解物により著しく劣化することがわかる。ガラス繊維を基材とするFRP ロッドにも、全く同様な傾向が認められる。この対策として、われわれは、日立製作所のFRP ロッドに特殊な表面処埋法を応用して、 SF_6 の放電分解物に全く侵されない特別なFRP ロッドを製作した。表面処理を行なったFRP ロッドと無処理のFRP ロッドについて、さきのじゅうてん剤入りモールド材料に対する場合と同様な実験を行なった結果は \mathbf{y} 9に示すとおりで、表面処理によって



図 10 特殊 FRP 製ガスしゃ断器用操作ロッド

FRPロッドが完全に保護されることがわかる。図 10 は特殊 FRP 製の実物操作ロッドの外観である。本ロッドを実物しゃ断器に組み込んで、多数の過酷試験を実施したが、全く異常は認められなかった。

しゃ断のたびに高温アークにさらされるノズル材料は、有機材料としてはきわめて過酷な条件で使用される。われわれは予備試験の結果から弗素系の耐熱高分子材料がすぐれていることを確かめ、これを用いて多数の過酷試験を操返し満足すべき結果を得ている。

3. 金属材料

ガス絶縁開閉装置には各種の金属材料が使用される。しゃ断器に使用する金属材料を選定する際には、絶縁材料の場合と同様に、各種金属材料に対する SF_6 の放電分解物の影響をあらかじめ知っておく必要がある。これについても幾つかの検討例 $^{(2)(5)(6)(8)(9)(12)}$ が公表されているが、その結果は必ずしも一致していない。そこで、アーク放電した SF_6 ガス中に各種金属を長期間放置して変化を調べた。

電圧 $40\sim80~kV$, 電流数 kA から 30~kA まで繰返ししゃ断試験した後の SF_6 ガスを, 試験片を入れた容器に封じて, 室温で約 3 個月放置した。その結果, ステンレス鋼, 軟鋼, 鋳鋼, 鋳鉄, アルミニウムおよびアルミニウム鋳物ではほとんど変化がなく, 銅および銅合金 (真ちゅう, りん青銅, 銅鋳物, クロム銅鋳物, 青銅鋳物) ではうすく褐色を呈する部分もあったが, 大部分は干渉色を示す程度であった。また, 銀タングステン合金は青紫の干渉色を呈した。メッキ品については, 硬質クロムメッキおよびカドミウムメッキはほとんど変化がなく, 銀メッキが青紫の干渉色を示す程度であるのに対して, 亜鉛メッキ (溶融メッキおよび電気メッキ) は腐食が認められた。

上記と同じ放電後の SF_6 ガスをフィルタを通して試験片入りの容器に入れ同様に放置した場合には、上とほぼ同様な結果が得られた。これに対して、放電後の SF_6 ガスを吸着剤層を通して導入した場合には、試験片にはほとんど変化が認められなかった。したがって上記の試験片の変化は、放電時に生成する固形析出物によるものではなく、ガス状の分解物によることは明らかである。

以上のように、過酷な条件で放電した後のガスによっても、腐食するといえるのは亜鉛メッキのみであり、銀メッキおよび銅系材料の変化はごくわずかで、また鉄およびアルミニウム材ではほとんど変化がなく、さらにこれらの変化も吸着剤の使用により完全に防止できることを確認した。

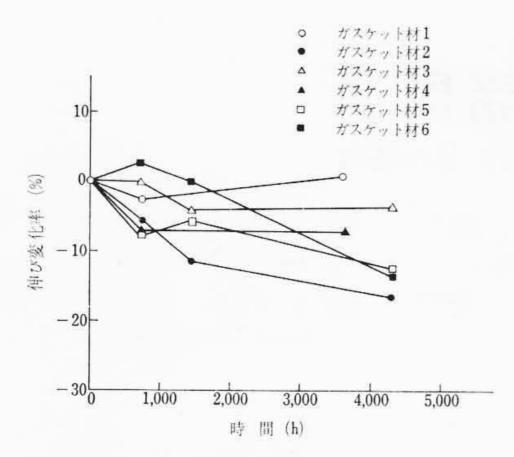


図 11 放電分解ガス中に入れた 各種ガスケット材料の伸びの 経時変化

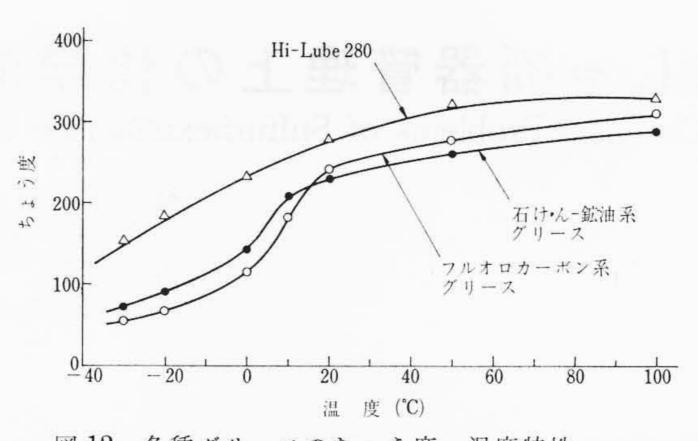


図 12 各種グリースのちょう度―温度特性

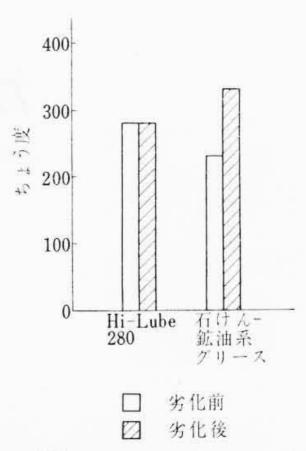


図 13 SF₆ の放電分解ガス中に 保持した前後のグリースの ちょう度

4. シール材

ガス絶縁開閉装置はガスケットそのほかのシール材を用いて、外気から完全にしゃ断されている。封入した SF_6 ガスが漏れて内部の圧力が低下すれば、絶縁低下を招く。また SF_6 ガスをたびたび補給することは不経済である。さらにしゃ断器内部は極度に乾燥されているので、外部から水分が侵入しやすいが、水分の侵入はアーク放電による絶縁材料の劣化を促進する。こうした意味で、シール材はきわめて重要な材料である。しかし、従来、シール材に関して公表されている文献はきわめて少ない $^{(8)}$ 。ガスケット材料に要求される性質は、ガス透過率が小さいこと、長期使用でクリープ、応力緩和が少ないこと、 SF_6 の放電分解物に対して安定であること、熱劣化、酸化劣化をうけにくいこと、温度特性がすぐれていることなどである。

金属材料の場合と同様に、大電流しゃ断試験を繰返した後の SF_6 ガス中に各種ガスケット材料を入れて長期間保持し、引張り試験の際の伸びの変化を調べた結果を図11に示す。材料により、伸びのいくぶん減少するものと実質的にほとんど変わらないものとがあるが、図中に示したガスケット材料では、ほとんど実用的には問題にならない程度である。そのほかの性質についてもほとんど変化は認められなかった。

5. 潤 滑 剤

ガス絶縁開閉装置内のしゅう動部分には、潤滑剤が使用される。これらの潤滑剤は、所要の温度範囲の SF_6 ガス中で適切な潤滑性を有することはもちろん、特にしゃ断器に使われる潤滑剤については、大電流アークによる SF_6 の分解生成物に対して安定であることが望まれる。従来、ガス絶縁機器用の潤滑剤について検討した結果は公表されていない。そこで、各種組成のグリース、グリースの基油に用いられる各種油状物について、高圧の SF_6 ガス中で $100\sim150$ $^{\circ}$ に加熱した場合および大電流しゃ断 試験を繰返した後の SF_6 ガス中に長期間保持した場合の挙動を検討するほか、潤滑性に関する検討などを行なった。

その結果、たとえばある種の石けん一鉱油系グリースは、 SF_6 の放電分解物により容易に石けんが変質され、グリースとしての性質を失うことがわかった。またフルオロカーボン系グリースは、 SF_6 および SF_6 の分解物に対して安定であるが、通常の潤滑油にくらべ蒸気圧が著しく高いので、長期の潤滑を保証できない。また、低温

で硬化し機器の起動性を低下させるものもある。図 12 はグリースのちょう度一温度特性を例示したもので、石けん一鉱油系、フルオロカーボン系ともに 0℃以下でちょう度が低くなる。実用上ちょう度は 150 以上でなければ機器の動作は不良になる。

以上の検討に基づいて、日立製作所ではガスしゃ断器用の特殊グリース Hi-Lube 280 を開発した。 ちょう度一温度特性は図 12 に示すとおりである。図 13 は SF_6 の放電分解物中に Hi-Lube 280 を長期間保持した前後のちょう度を示したもので、全く変化が認められない。比較のために示した石けん一鉱油系のグリースでは、ちょう度の極端な増加が認められる。

6. 結 言

本論文ではガス絶縁開閉装置の材料的な問題点を総括した。従来 材料関係のデータはほとんど公表されていないので、説明に用いた データはすべてわれわれ自身の手によるものである。

ガス絶縁開閉装置はまだ新しい機器なので,今後使用実績を重ね るとともに,また大容量化,高電圧化に進むとともに,種々の新し い問題が生まれ,材料面の研究もいっそう進展すると予想される。

しかし, ガス絶縁開閉装置用材料の選定に関する基本的な考えは, この小論の中にじゅうぶん盛り込んだつもりである。

終わりに臨み、ガス絶縁開閉装置用材料の開発に対しご協力をいただいた日立電線株式会社、日立化成工業株式会社、日本碍子株式会社の関係各位に深謝の意を表する。

参考文献

- (1) 有川,中島,吉岡,柳沢: 日立評論本特集号
- (2) W.C. Schumb, J.G. Trump, G.L. Priest: Ind, Eng. Chem. 41, 1348 (1949)
- (3) G. Camilli, G. S. Gordon, R. E. Plump: Trans. A.I.E.E. 71, Part III, 348 (1952)
- (4) D. Edelson, C. A. Bieling, G. T. Kohman: Ind. Eng. Chem. 45, 2094 (1953)
- (5) P. R. Howard: Proc. I. E. E. 104, A, (14) 123 (1957)
- (6) 斎藤, 小林: 電気学会東京支部大会, No. 136 (昭 34)
- (7) 鳳,河野,宅間,岳田: 電気学会連合大会, No. 332 (昭 41)
- (8) A. A. Hudson: E. R. A. Report No. 5185 (1967)
- (9) 細川, 丸田, 根本, 鳥羽: 電気学会東京支部大会, No. 78 (昭 42)
- (10) 中北, 松田: 電気学会連合大会, No. 229 (昭 43)
- (11) 高島, 徳畑: 電気学会連合大会. No. 257 (昭 44)
- (12) 井関, 小原: 電学誌 88, 1134 (1968)