

超高圧 OF ケーブル用アルキルベンゼン油の諸特性

Properties of Alkylbenzene Oils for EHV Oil Filled Cables

遠 藤 恒* 佐 藤 春 枝*
Takeshi Endô Harue Satô
佐 藤 政 勝* 外 山 泰 久*
Masakatsu Satô Yasuhisa Toyama

要 旨

アルキルベンゼン系合成油について、おもに油浸紙状態での電気特性を検討し、OF ケーブル油としての適応性を調べた。その結果アルキルベンゼン油は絶縁破壊強度が高く、長期の課電劣化に対して安定であるなどすぐれた特性を持ち、超高圧 OF ケーブル用の絶縁油として望ましいものであることを知った。なおソフト形アルキルベンゼン油は微量の塩素化合物を含むため、酸化安定性がいくぶん劣り、現時点ではハード形アルキルベンゼン油のほうが適している。

1. 緒 言

近年の OF ケーブルはますます超高圧化に向かう傾向にある。従来 OF ケーブルの絶縁体には絶縁紙に鉱油を含浸したものが用いられてきたが、誘電特性、絶縁破壊特性、および課電時の長期安定性などをよりいっそう向上させることが必要となった。そこで OF ケーブル油については鉱油に代わるものとして合成された芳香族炭化水素油が検討されはじめ、そのなかでも特に合成洗剤の中間体として工業的に多量に製造されているアルキルベンゼン油が国内外で注目を集めている⁽¹⁾⁽²⁾。

筆者らは数年来この種のアルキルベンゼン油について、現用の鉱油系 OF ケーブル油との比較検討を行なっており、すでに超高圧 OF ケーブル用の絶縁油としてすぐれた特性を持つものであることを明らかにしている⁽³⁾⁽⁴⁾。

以下ここではその後の検討結果を含めて、おもに油浸紙状態で得られた電氣的性質について報告する。

2. 物理化学特性

2.1 一 般 特 性

合成洗剤用のアルキルベンゼン油はデシルベンゼン (C₆H₅・C₁₀H₂₁) からペンタデシルベンゼン (C₆H₅・C₁₅H₃₁) にいたるアルキルベンゼン混合物であるが、市販品にはハード形とソフト形の 2 種がある (以下ハード形 AB 油、ソフト形 AB 油と略す)。ハード形 AB 油はプロピレンテトラマを主体とするプロピレンポリマとベンゼンのアルキル化反応で得られ、アルキル基には分岐が存在する。一方ソフト形 AB 油は普通 *n*-パラフィンからつくられた塩化パラフィンとベンゼンとの反応で合成されている。そしてこれらの AB 油はそれぞれ軽質、中質、重質油に分留されており、重質油には副生物であるジアルキルベンゼン、ジフェニルアルカン類が含まれている。

AB 油の各留分の一般特性を表 1 に示した。比較的高粘度の重質油を除けば軽質、および中質で、これらはいずれも OF ケーブル油に対する要求性能をほぼ満足している。直鎖のアルキル基からなる

表 1 アルキルベンゼン油の一般特性

項 目	試 料	ハード形アルキルベンゼン油			ソフト形アルキルベンゼン油			鉱 油
		軽 質 油	中 質 油	重 質 油	軽 質 油	中 質 油	重 質 油	
密 度 (g/cc)	20℃	0.867	0.868	0.870	0.857	0.859	0.887	0.877
	80℃	0.824	0.825	0.832	0.817	0.819	0.846	0.839
動 粘 度 (c.s)	20℃	12.2	15.2	81.0	7.7	9.3	32.0	14.9
	80℃	2.3	2.6	5.9	1.9	2.1	3.6	2.9
膨 張 係 数 (10 ⁻⁴)		8.7	8.7	7.7	8.2	8.1	8.1	7.5
流 動 点 (℃)		-60	-57.5	-32.5	-70 以下	-70 以下	-50	-45
引 火 点 (P.M法)(℃)		128	132	170	136	140	155	140
平均分子量		243	260	326	240	255	280	255
屈 折 率 n _D ²⁰		1.4878	1.4871	1.4844	1.4830	1.4840	1.4988	1.4820
比 分 散 δ ₂₀		130	128	120	136	129	136	117
アニリン点 (℃)		10.0	16.3	45.0	12.0	20.5	21.5	74.8
全 酸 価 (KOHmg/g)		0.001	0.001	0.003	0.001	0.001	0.001	0.002
イ オ ウ 分 (%)		0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.07
誘 電 率 (60 c/s, 80℃)		2.22	2.22	2.21	2.24	2.22	2.29	2.15
誘 電 正 接 (%)		0.005	0.004	0.013	0.005	0.005	0.015	0.008
体積抵抗率 (80℃)(Ω/cm)		2.7×10 ¹⁶	5.0×10 ¹⁶	5.9×10 ¹⁵	1.9×10 ¹⁶	2.8×10 ¹⁶	5.9×10 ¹⁴	3.0×10 ¹⁵
略 記 号		H-1	H-2* および H-2'*	H-3	S-1	S-2* S-2'* および S-2''*	S-3	M

* 製造メーカーが異なる試料油を示す。

表 2 アルキルベンゼン油の銅板腐食性
および塩素量の分析結果

No.	試 料*	銅板腐食性 (140℃×19h) (変色番号)	塩 素 量 (ppm)
1	ハード形 アルキルベンゼン油	H-2 (1)	1 b
2		H-2 (2)	1 b
3	ソフト形 アルキルベンゼン油	S-2 (1)	1 b
4		S-2 (2)	2 c
5		S-2' (1)	2 c
6		S-2' (2)	2 e
7		S-2''	1 b
8	鉱 油	M	3 a

* () 内の数字は入荷ロット番号を示す。

ソフト形 AB 油は粘度が低く OF ケーブル油の低粘度化をもたらし得ることがわかる。ただ軽質油はいくぶん引火点が低いので、ケーブル用には中質油が適している。以下の検討にはおもにハード形、およびソフト形 AB 油の中質油を対象としている。

なお各試料油については以後表 1 に示した略記号を用いる。

2.2 銅 板 腐 食 性

ASTM D1275 法により 140℃ で 19 時間加熱したときの銅板腐食性を表 2 に示す。AB 油はいずれも石油の低沸点留分 (プロピレ

* 日立電線株式会社日高工場

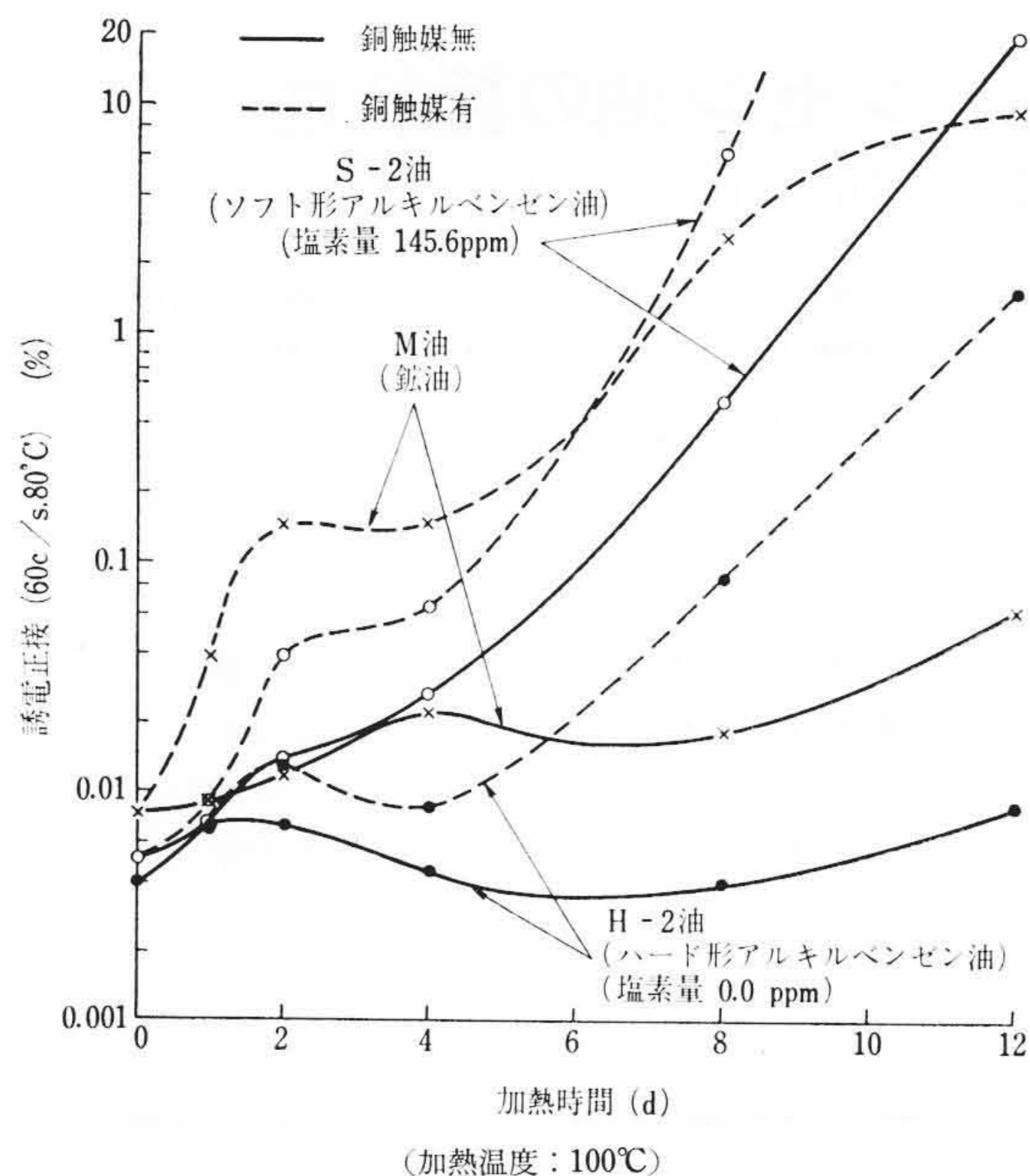


図1 アルキルベンゼン油の加熱劣化による誘電正接の変化

ン、*n*-パラフィン、ベンゼン)を出発原料としているので、鉱油に比較して硫黄化合物ははるかに少ない。したがって銅に対する腐食性はほとんど持たないはずである。ハード形AB油では予測どおりの結果が得られた。しかしソフト形AB油では鉱油と同程度の腐食性を示す場合があった。ソフト形AB油は塩化パラフィンを経て合成されるため、未反応の塩化パラフィンや副生したその他の塩素化合物が残存することが考えられる。実際に表2に示したようにASTM D1317法に準じて金属ナトリウム法で分析した塩素量は150 ppmという高い値を持つ場合もあった。今回の実験では銅板腐食性と塩素量との間に一定の関係を見出すことはできなかったが、ソフト形AB油で銅板腐食性の大きいのは熱分解しやすい塩素化合物の触媒作用によると考えられる。

なおソフト形AB油の塩素量は製造メーカー、および製造ロットによってバラツキがみられ、工業的に塩素化合物を完全に除去することは、いまだ確立されていないと思われる。

2.3 酸化安定性

図1はビーカー試験方法により、100 mlの試料油を100°Cで12日間にわたり空気恒温槽中で加熱したときの誘電正接の変化を示したものである。ハード形AB油は銅触媒の有無にかかわらず誘電正接の変化が最も少なく、酸化安定性にすぐれている。しかしソフト形AB油で塩素化合物が多量に存在するときは、酸化の初期段階では誘電正接の増加は比較的少ないが、酸化が進むに従い急上昇している。銅触媒が共存すればその変化はさらに著しい。まだこれらの反応機構を明らかにし得ないが、塩素化合物の影響と考えられる。

3. 油浸紙の破壊特性

3.1 破壊試験法

絶縁油は油単独で用いられることなく、すべて油浸紙の状態で使用されるので、油浸状態の平板電極によるシート試験と、モデルケーブルによる破壊試験を行なった。

シートによる試験ではOF-125 μ 紙を3枚重ね、外側の1枚に6 ϕ のオイルギャップを設け、ケーブルの1/3ラップ巻きによるバットギャップを模擬した。これらの試料に105°Cで真空乾燥後、脱ガスした供試油を含浸し、常温において破壊試験を行なった。電圧印加法は、交流の場合には15 kV 1分間印加後に500 V 1分の割合で、インパルスの場合には負の標準波を油膜側に50 kV 3回印加後に、3

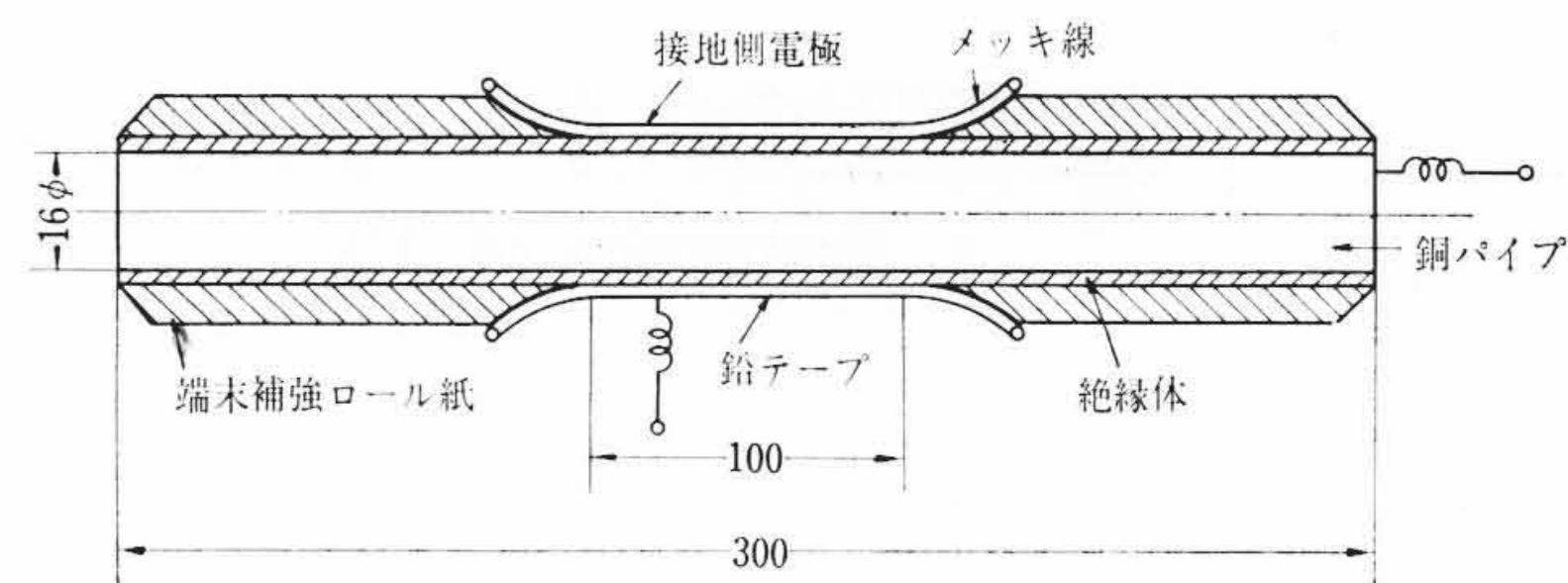


図2 モデルケーブルの構造

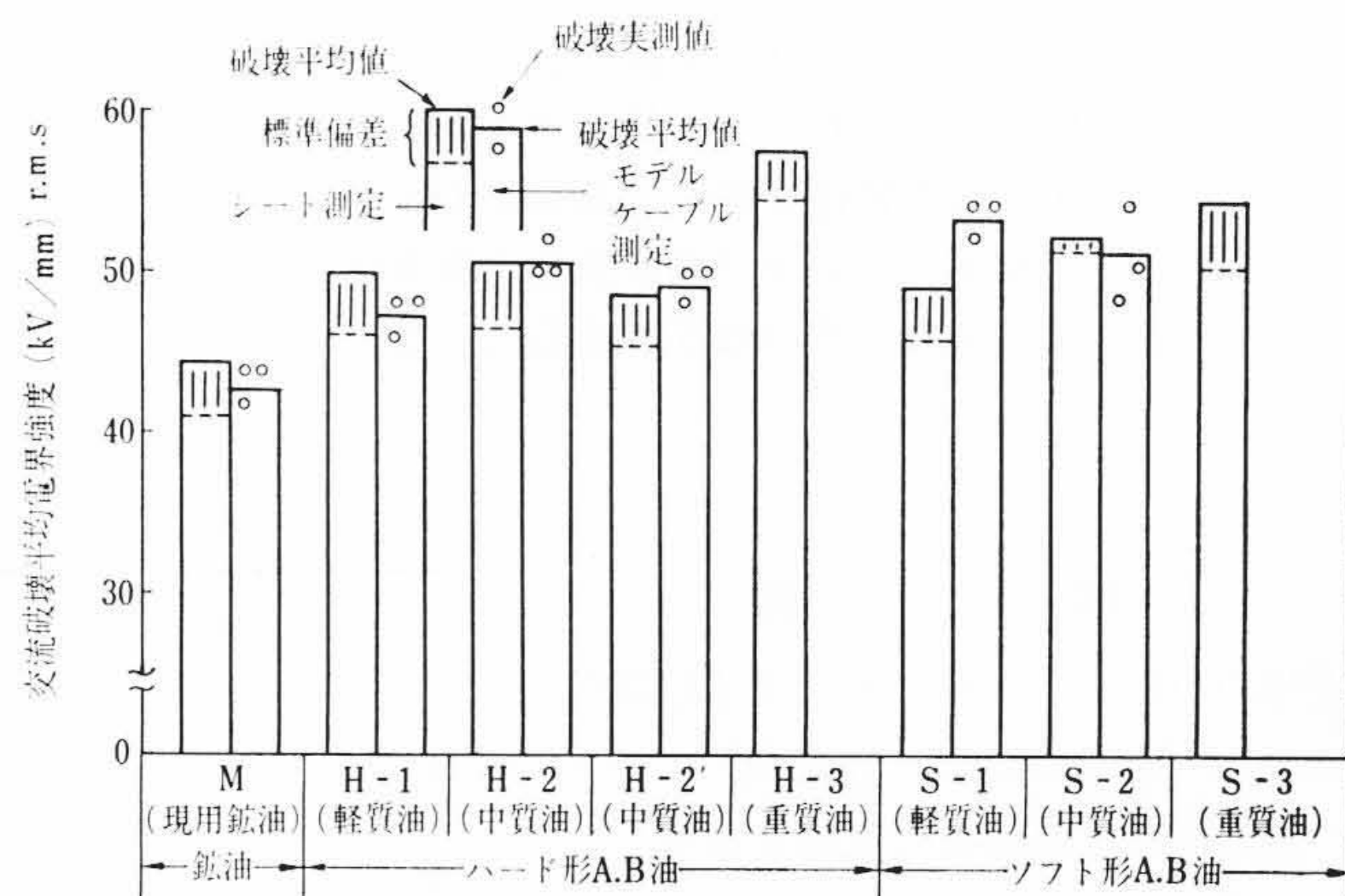


図3 油浸紙による交流破壊試験結果

kV 3回の割合で上昇し破壊させた。なお破壊試験はそれぞれ7回行ない、その平均破壊強度を求めた。

一方モデルケーブルの場合には16 ϕ の銅パイプ上にカーボン紙を2枚、その上にOF-125 μ 紙を9枚、さらにカーボン紙を2枚それぞれ1/3レジストレーションで巻いた。なお有効絶縁厚さは約1 mmである。このモデルケーブルの構造を図2に示した。これらのモデルケーブルには、シートの場合と同様な条件で供試油を含浸した。電圧印加法は交流の場合には破壊予想値の70%値を30分加え、以後2 kV 30分の段階上昇を、インパルスの場合には破壊予想の70%の負のインパルスを導体側に3回加え、以後4 kV 3回の段階上昇を行ない破壊させた。

3.2 試験結果ならびに検討

シートならびにモデルケーブルによる交流破壊試験結果を図3に示す。ただし試料油の少なかったH-3、S-3油に対しては、モデルケーブルによる試験を行なわなかった。

交流破壊強度は短時間破壊の平板の場合と長時間破壊のモデルケーブルの場合とではほぼ一致している。これはモデルケーブルの場合には、カーボン紙の遮へい効果により交流破壊電圧が上昇するためと思われる。図より明らかなように鉱油のM油に比べ、AB油はいずれも破壊強度が高く、最も高いH-3油では30%、次のS-3油では24%上昇している。同様にH-2、S-2油はM油に比べ、前者は14%、後者は16%高く、ソフト形が若干高い傾向にある。

図4はインパルス破壊試験結果である。シートとモデルケーブルとの結果を比較した場合、H-1を除きほぼ同一傾向にある。一般にモデルケーブルの結果はシートに比べ低い、これはシートが0.4 mm厚さ程度に対し、モデルケーブルは1 mmであるから厚さの効果とカーボン紙の効果が少ないことによるものと考えられる。交流の場合と同様AB油はいずれも鉱油より高い値を示している。最も高いH-2油は鉱油より約10%高いが、交流の場合高かったH-3、S-3油は予想外に低かった。

以上の実験結果より明らかにこれらAB油は交流、インパルスともに現用鉱油より高い破壊特性を持っている。

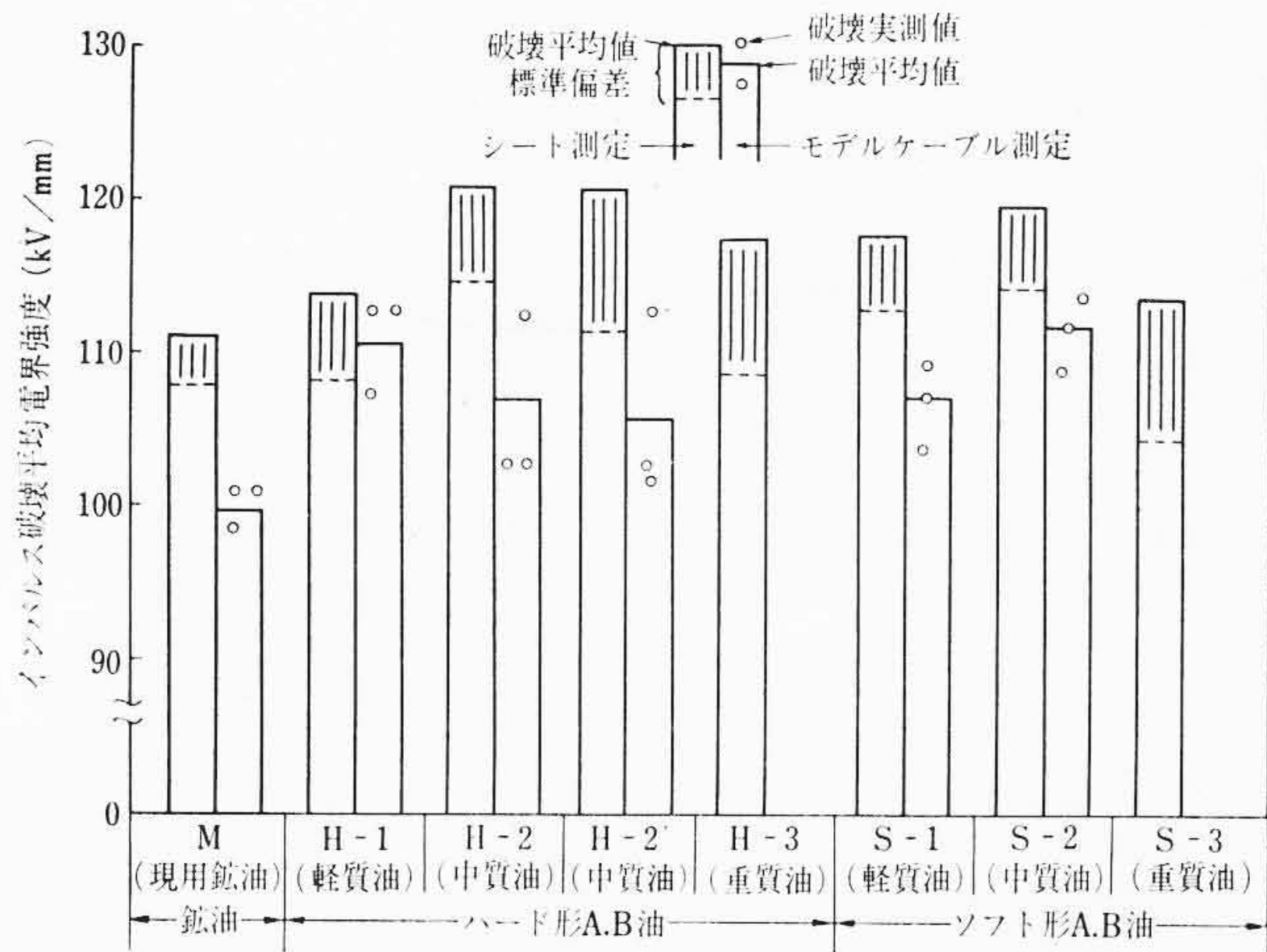


図4 油浸紙によるインパルス破壊試験結果

油浸紙の破壊は一般に油膜部の破壊が発端となり、交流の場合には油膜の破壊電圧によって油浸紙の破壊電圧が決まると考えられる。事実今回の実験でも交流コロナを観察したが、コロナ発生後数十秒でいずれも破壊が起こり、コロナ開始電圧と破壊電圧はほぼ等しかった。

絶縁油の破壊機構については種々考えられているが、T. J. Lewis 氏⁽⁵⁾の炭化水素油に関する絶縁破壊理論によれば次式で示される。

$$E_{BD} = K \cdot N_0 \sum n_i \theta_i \dots\dots\dots (1)$$

この式によれば破壊の順位は

ジフェニルアルカン>ソフト形 AB 油>ハード形 AB 油>鉱油となり、今回の交流破壊ではかなりよく一致している。しかし上述の理論式は純電氣的破壊理論であるが、インパルスについては必ずしも一致しなかった。これは油単独の破壊と油浸紙の破壊の場合では破壊の機構が異なるためと考えられる。特にインパルスの場合、油膜が破壊しても必ずしも全路破壊にはならないため、紙のバリヤ効果がかかなり影響しているものと思われる。

4. 合成油含浸紙の誘電特性

4.1 コンデンサエレメントによる長期劣化特性

超高压ケーブルでは絶縁体の破壊電圧が高いことのほかに誘電特性がすぐれており、かつ、この特性がケーブル運転中の長期間にわたって維持されることが特に必要である。油浸紙の劣化はその含浸油の劣化特性に依存するため、絶縁油自身の熱または課電による劣化の少ないことが望ましい。しかし従来より用いられている鉱油では微量の硫黄、窒素などの化合物を含むため、高温課電中に劣化を受け誘電特性がわるくなる。

一方 AB 油などの合成油ではこれらの不純物をほとんど含まないため（ただしソフト形 AB 油では微量の塩素化合物を含むものもある）、長期の高温における課電劣化安定性には特にすぐれており、AB 油の最も大きな特長になっている。すでにイタリアのピレリ社では OF ケーブル用絶縁油として 1958 年より検討が行なわれ、1963 年以来すべてドデシルベンゼン油に替えたと報告されている⁽¹⁾。ピレリ社では AB 油と鉱油を含浸したモデルケーブルをつくり、120℃、10 kV/mm の高温高電界で長期の劣化試験を行ない、鉱油を含浸したモデルケーブルは約 600 日後に誘電正接が急激に上昇したが、AB 油含浸のほうは変化がなかったと述べている。

これについて筆者らもコンデンサエレメントによる実験を行なった。まず 125μ の低損失絶縁紙を 2 枚重ね、銅ハク電極を用いてガラス心に巻き上げコンデンサエレメントをつくった。これをガラス容器

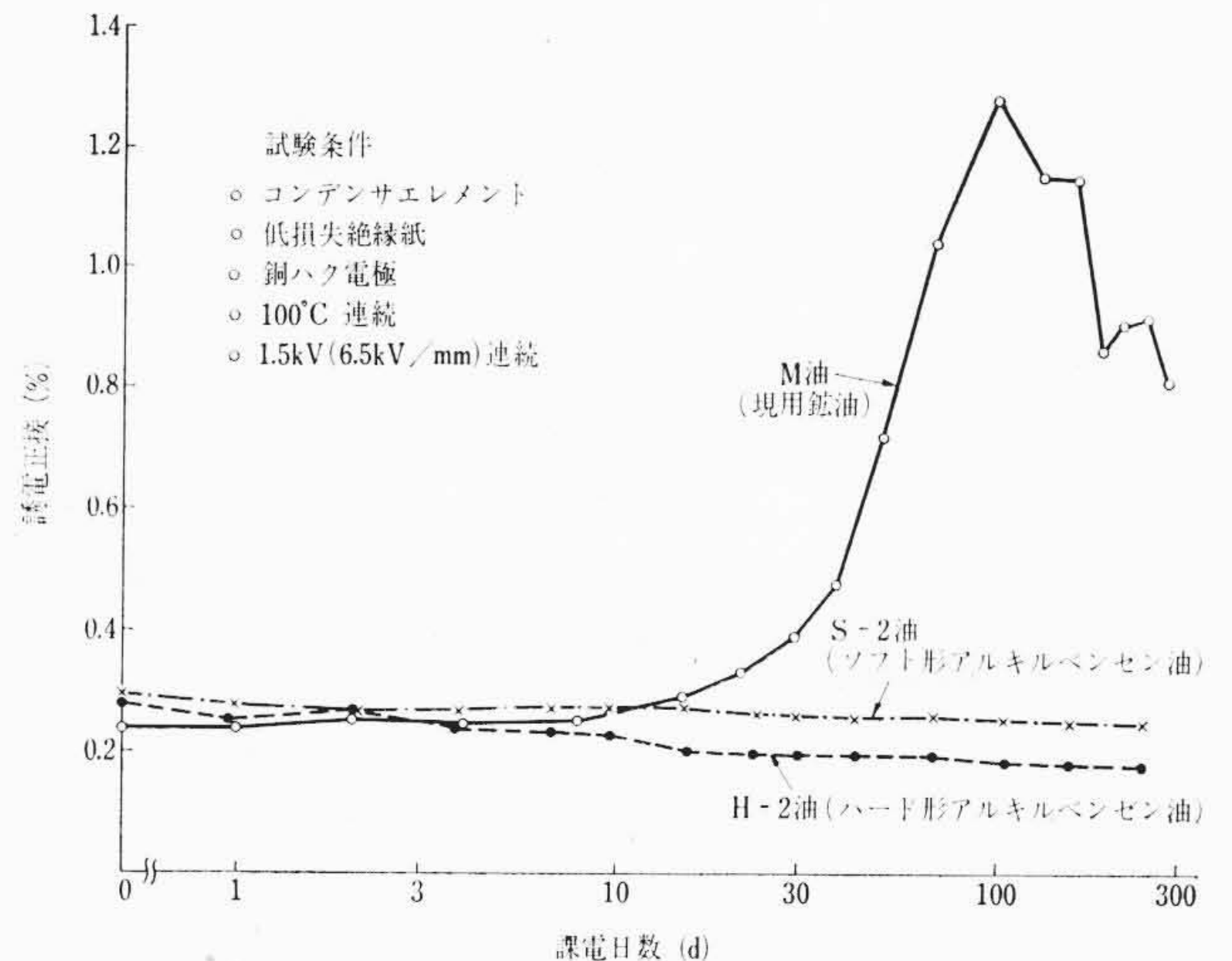
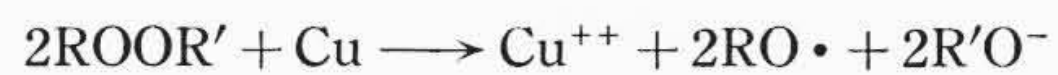


図5 コンデンサエレメントによる劣化試験結果

に入れ 100℃ で真空乾燥後、活性白土処理した供試油を含浸した。含浸後の静電容量は約 0.02 μF である。含浸後の試料入りガラス容器は真空状態で封じ切りにした。

その後 100℃、交流 50Hz、1,500V (約 6.5 kV/mm) の電圧を試料に加え、適当な時間間隔で誘電特性を測定した。図 5 はその結果を示したものである。現在約 250 日経過しているが、鉱油では 10 日後から誘電正接が増加したのに対して、AB 油は 250 日に至ってもほとんど劣化せず非常にすぐれた特性を示している。またハード形とソフト形 AB 油の有意差は現在のところまだ明らかでない。

約 10 日経過後より誘電正接が急激に立上り始めた鉱油含浸試料は、約 100 日経過後に最大値になり再び低下してきている。このような特異な現象は従来あまりみられない傾向であるが、これは次のような現象と考えられる。すなわち油浸紙中には微量の遊離した残留酸素があり、この酸素により油浸紙が酸化され、酸化の初期生成物であるパーオキシドあるいはヒドロパーオキシドが電極の銅と反応して銅イオンを遊離する。すなわち次のような反応があるものと考えられる⁽⁶⁾⁽⁷⁾。



さらに酸化が進むとパーオキシド、ヒドロパーオキシドの分解が始まり、酸化の最終生成物である有機酸、アルコールなどに变化するので誘電正接の増加する割合が減少するとともに、初めにできた銅イオン Cu^{++} がイオン交換、錯イオンの形成などによってトラップされ、誘電正接が減少すると考えられる。今回の実験では酸素の供給量がごくわずかなため、初めに誘導期間が存在し、しかもある程度酸化が進行すればそこで反応が停止し、誘電正接の変化は少なくなってくる。一方 AB 油の場合はハード形、ソフト形ともに劣化の初期生成物であるパーオキシド、ヒドロパーオキシドができにくいために誘電正接は上昇せず安定した特性を示している。また、ソフト形 AB 油に残存する塩素化合物の影響が現われていないのは、酸素量がごく少量に限られているためであろう。

4.2 合成油含浸紙の誘電正接—電圧特性

超高压ケーブルでは、油浸紙の誘電正接が低く、高電界における誘電正接の増加ができる限り少ないことが望ましい。油浸紙の誘電正接—電圧特性は絶縁油の種類によって異なるため⁽⁸⁾、これら AB 油について検討した。

実験には平板電極を用い、低損失絶縁紙 3 枚、さらにカーボン紙を 1 枚重ねてカーボン紙の効果を測定した。この場合カーボン紙に接する絶縁紙 1 枚にピッチ 18 mm、ギャップ幅 1.5 mm のスリット

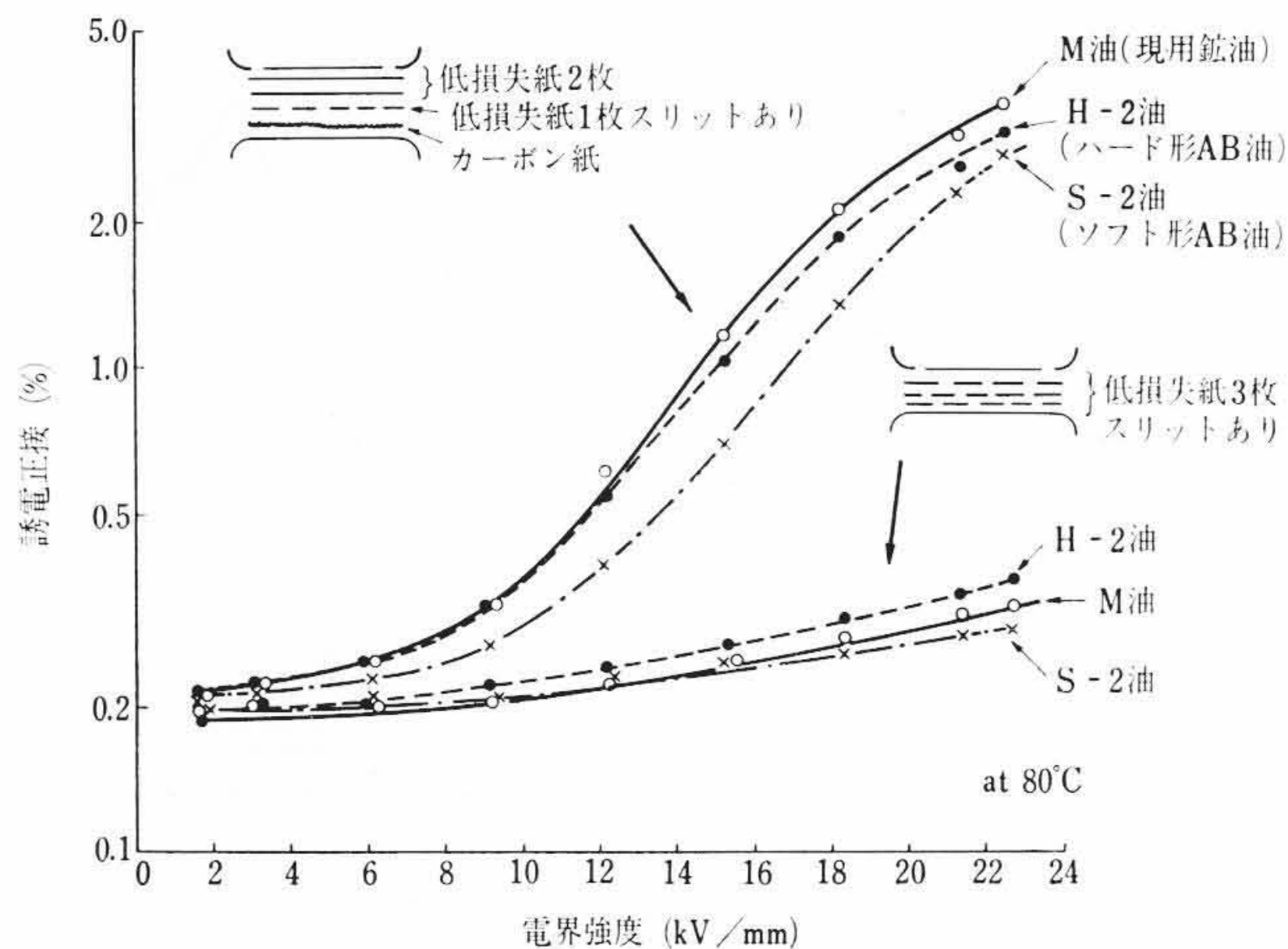


図6 各種絶縁油含浸紙の誘電特性

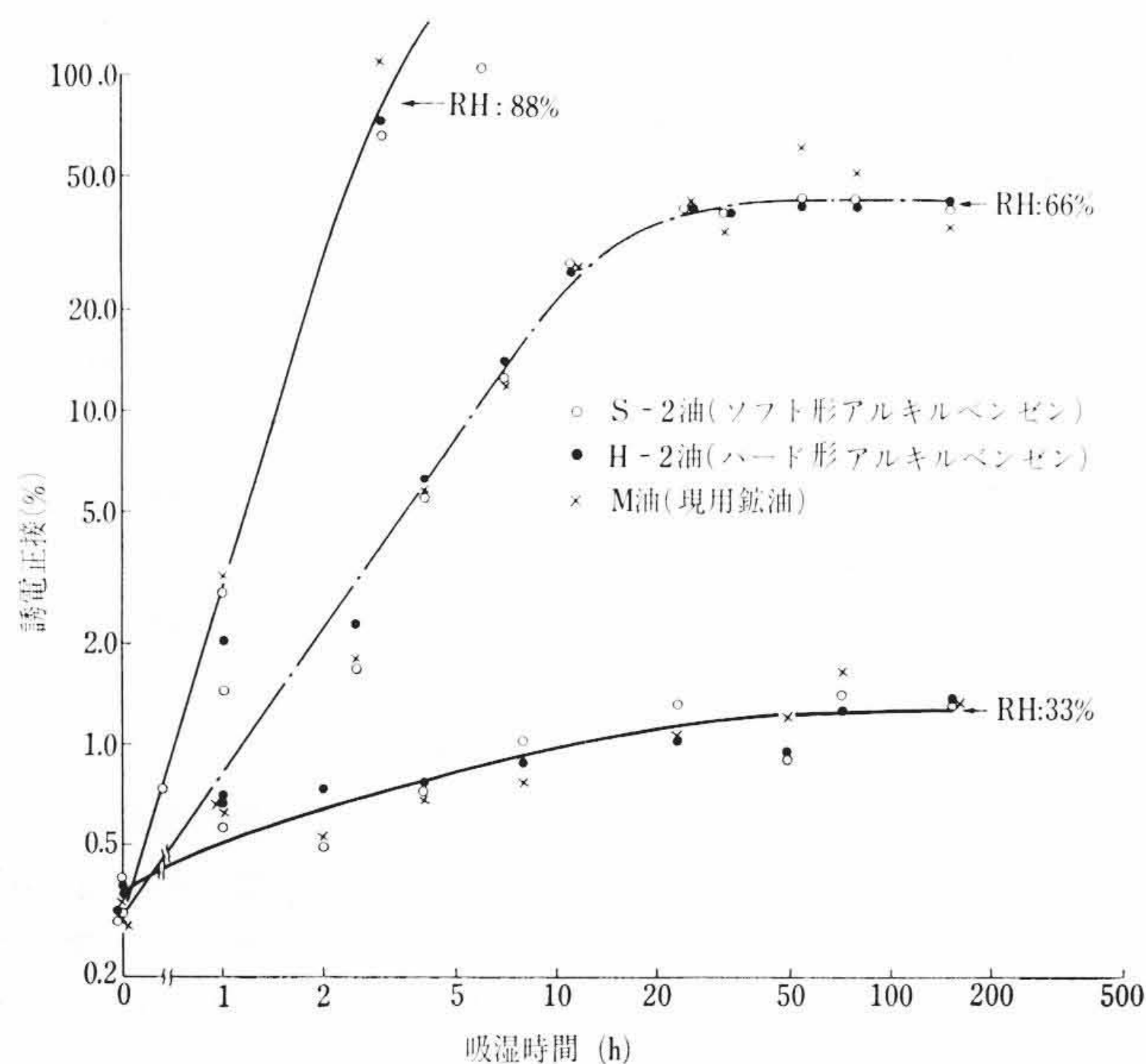


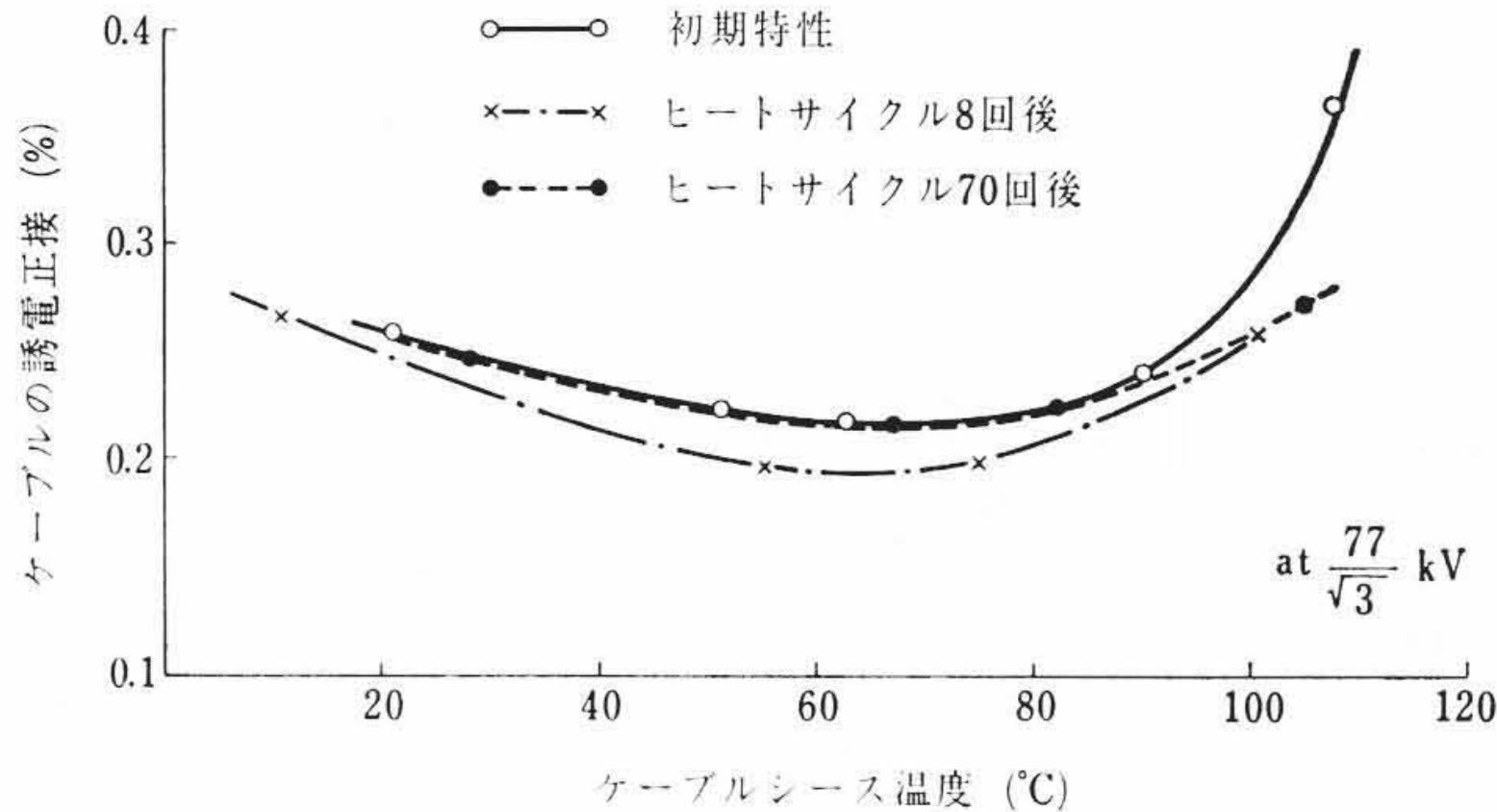
図7 油浸紙の吸湿時間と誘電正接の関係

を設け、ケーブルでのバットギャップを模擬した。また油浸紙自身の効果を調べるために低損失絶縁紙を3枚重ね、各絶縁紙に前記条件のスリットを設けた。含浸油にはすべて活性白土処理した脱気油を用いた。

これらの80℃における測定結果を図6に示す。図より明らかなように、S-2油の誘電正接—電圧特性は若干すぐれている。油浸紙の誘電正接—電圧特性は油浸紙中の不純物に影響されるといわれている⁽⁹⁾。したがってAB油などの合成油は鉱油より不純物が少ないため当然の結果であり、特にソフト形AB油がすぐれているようである。

4.3 AB油含浸紙の吸湿特性

これまで述べてきたようにAB油は劣化特性にすぐれ、破壊強度が高いが、一方吸湿性が大いといわれている⁽¹⁾⁽¹⁰⁾。これらの吸湿特性はケーブルの端末施工時に問題となるので、油浸紙による吸湿特性を測定した。試験はまず幅50mm、長さ150mmの絶縁紙に乾燥後供試絶縁油を含浸し、一定湿度のデシケータに入れ、放置時間と吸湿量、誘電正接、破壊電圧の関係を測定した。その結果これら油浸紙においてはM、H-2そしてS-2油間にはまったく有意差が認められなかった。各湿度における吸湿時間と誘電正接との関係を図7に示した。このように絶縁油による差があらわれないのは、絶縁油の吸湿量は0.01%(100ppm)程度であるのに対し、絶縁紙の吸湿



含浸油：ハード形アルキルベンゼン系中質油
図8 長期課電試験中のケーブルの誘電特性

表3 試作77kV OFケーブルの破壊試験結果

ケーブル種	交 流		インパルス	
	破壊値/時間 (kV/h)	G_{max} (kV/mm)	破壊値/回数 (kV/回)	G_{max} (kV/mm)
現 用 OF 油	270/2.10分	46.3	620/2	106
アルキルベンゼン油	315/1.08分	54.0	660/1	113

量が約10%と非常に差があるので、ほとんど紙の特性によって吸湿量が決まり油の効果はマスクされてしまうためである。したがって油浸状態での吸湿量は、従来の鉱油含浸紙の場合とまったく同じと考えてよい。

5. AB油含浸 OFケーブルの試作

5.1 試作ケーブルの破壊試験

これまでの材料的検討結果をもとに77kV 3×150mm² OFケーブルを試作した。試作したケーブルは15φ圧縮円形導体で、導体上に遮へい用カーボン紙を2枚巻き、絶縁層厚さを9.0mmとし、さらにその上にカーボン紙と黄銅テープを巻き、アルミシースをほどこした。含浸用AB油としては現在入手容易なH-2油と比較のためにM油を用いた。

破壊試験法は、交流の場合は180kV 3時間印加後に15kV/3時間の段階上昇を、インパルスの場合は導体側に400kVの負のインパルス電圧を3回加え、以後20kV/3回の割合で昇圧し破壊させた。破壊試験結果を表3に示す。鉱油を用いたケーブルと比較すると交流では17%、インパルスでは7%の上昇で、材料での検討結果とかなりよく一致している。

5.2 試作ケーブルの長期課電試験

ケーブルの長期安定性を調べるため本試作ケーブルに対して屋外で長期の課電劣化試験を行なっている。ヒートサイクルの条件はケーブル温度80℃8時間、16時間常温で1日1サイクルである。ケーブルの印加電圧は50〜54kV(1.2 E_0)一定である。試験は約3ヶ月を経過したが、現在のところ誘電特性は安定している。図8はこれまでの測定結果を示したものである。ヒートサイクルにより高温における誘電正接は減少してきたが、そのほかには特に変化は認められていない。

6. 結 言

以上アルキルベンゼン系合成油に関し各種特性を測定した結果つぎのようなことが明らかになった。

- (1) アルキルベンゼン系中質油を含浸した油浸紙の破壊強度は鉱油に比べ交流で15%、インパルスで約10%高く、試作ケーブルでもほぼ同程度の上昇率が得られた。

- (2) コンデンサエレメントによる劣化試験を行なった結果、鉱油を含浸した試料は約 10 日後に誘電正接が立上り始めたのに対し、アルキルベンゼン油では 250 日経過後も異常はなく、非常に劣化特性はすぐれている。また 77 kV OF ケーブルで長期課電劣化試験を行なっている。
- (3) アルキルベンゼン油を含浸した油浸紙の誘電正接—電圧特性は鉱油含浸紙に比べすぐれている。
- (4) アルキルベンゼン油の吸湿量は鉱油より大であるが、油浸紙の場合には油の種類による差異は認められない。
- (5) ソフト形アルキルベンゼン油は微量の塩素化合物を含む場合があり、酸化安定性や銅板腐食性に影響を与え、若干問題が残されている。

最後にご指導をいただいた日立電線日高工場研究部山本部長、吉

川主幹研究員ならびに依田主任研究員に感謝の意を表わす。

参 考 文 献

- (1) U. P. Pelagatti: Conference on Electrical Insulation National Academy of Science-National Research Council (1963)
- (2) 松林, 丸山: 電学関西支大 5-6, (昭 39-10)
- (3) 遠藤, 佐藤, 依田: 電四連大 845, (昭 41-4)
- (4) 外山, 常松, 佐藤: 電四連大 300, (昭 41-4)
- (5) T. J. Lewis: J. App Phys 27, 645 (1956)
- (6) 坂本, 藤井: 日新電機技報 6, 57 (Apr.-1961)
- (7) George Feick, ほか 2 名: J. Elect. Chem. Soc. 108, 56 (Jan.-1961)
- (8) 青木, 中川: 大日本電線時報 No. 30, (昭 40-8)
- (9) J. H. Mason, M. A. Simmons: CIGRE 128, (1966)
- (10) 黒田, 児島: 電学東京支大 84, (昭 40-11)



新 案 の 紹 介



登録実用新案 第 772228 号 (実公昭 39-38179 号)

伊地知 幸 夫・河 西 詳太郎

プ ロ ペ ラ フ ァ ン の 腐 食 防 止 装 置

トンネル内あるいは坑内の換気を使用されるプロペラファンは、トンネル内あるいは坑内の湿気の多い悪性ガスによって、主軸および内筒内の機器に損傷を与えることがある。そこで本考案は上記の欠点を防止するため考案したもので、羽根車 5 の回転に伴って、これのリブ 12 に取り付けられた遠心羽根 11 を回転させ、内筒 2 内吐出側部の気体を通気路 13 に排出させて、内筒 2 内吐出側部の圧力を外気の圧力よりも低くする。これによって清浄なる外気を保護筒 6 と、主軸 3 との間および通気筒 7 内を通過して内筒 2 内に送入させて、通気路 13 より内筒 2 内へのガスの侵入を防止させるようにする。取扱ガスの湿気が多く、内筒 2 内への外気の送入手量が少ないときは、弁 10 を開いて内筒 2 より排水管 9 を通って外部にドレンが排出されるか否かを検出し、もしドレンが排出されるときには、調整弁 8 を開いて通気筒 7 より内筒 2 内への外気の送入手量を増加させる。これによって内筒 2 内に所定量の外気を送入させて、内筒 2 内の主軸 3 および軸受 4 などの機器の腐食を防止させるようにしたものである。

(木口)

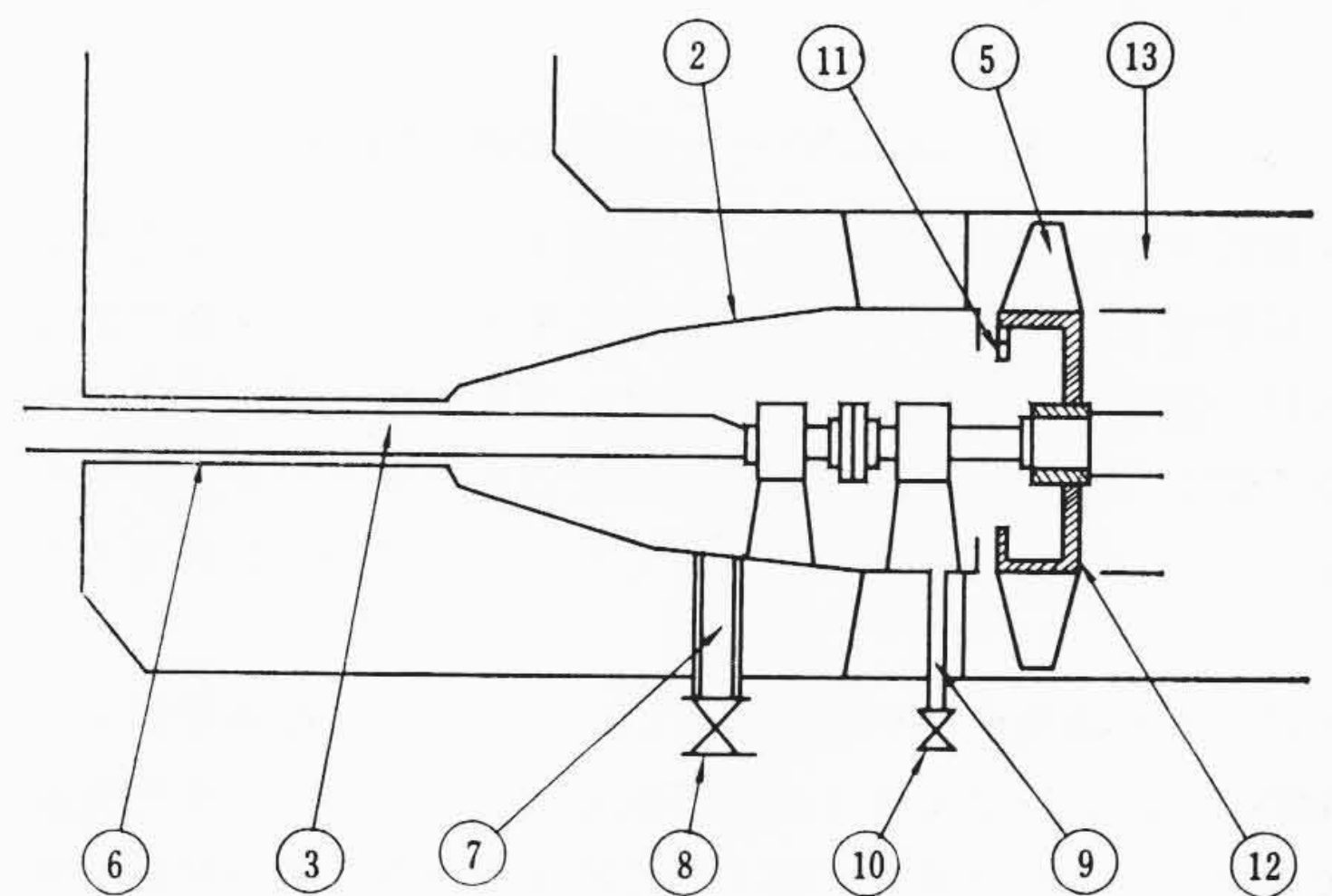


図 1