

高耐熱材料を使用した変圧器の絶縁組織と耐熱評価

Insulation System and Thermal Evaluation of Transformers Using High Thermal Resistant Insulating Material

不燃性油が用いられていた変圧器は、公害問題で使用できなくなってからは乾式変圧器、シリコン油入り変圧器がこれに替わるようになった。

H種乾式変圧器は芳香族ポリアミド紙、ガラスマイカ、耐熱FRPなどから構成され、シリコンワニスで処理されたもので、各種のコンポーネント試験やトランスレット試験が行なわれ、H種として使用できることが確認された。

シリコン油入り変圧器は導体回りの絶縁に芳香族ポリアミド紙及びその成形品を使用し、相性試験の結果H種又は特別A種¹⁾として使用できることが確認された。

磯部 昭二*	Isobe Shōji
森戸 廷*	Morito Tadashi
竹内 新平*	Takeuchi Shinpei
山口 元男**	Yamaguchi Motoo
大江 悦男**	Ooe Eisuo
長岡 外美男***	Nagaoka Tomio

1 緒言

建造物中に設けられる変電所の変圧器や地中配電方式の変圧器、車両搭載の変圧器は小形軽量化が望まれ、かつ難燃性が要求される。かつては不燃性油が用いられていたが、公害問題で使用できなくなってからは乾式変圧器、シリコン油入り変圧器がこれに替わるようになった。

これらの変圧器には耐熱性のある絶縁材料、絶縁油が使用され、耐熱区分H種に該当するものがある。本稿はこれらについて材料の選定、耐熱評価法、機器など、その概要を述べる。

2 変圧器用高耐熱材料

変圧器に使用される材料は大別して電線、大地絶縁、層間絶縁、スペーサ、絶縁ワニスなどの絶縁材料、絶縁油などに大別される。これらの材料は使用条件、すなわち乾式か油入りかにより特性上相違があるものがある。油入りで使用されるものは、油含浸が容易で、かつ油との相性のよいことが必要である。一方、乾式の状態で使用されるものは耐吸湿性や処理ワニスとの相性などが必要である。

2.1 電線

(1) H種乾式変圧器の電線は、低圧コイル用はH種二重ガラス巻絶縁線、高圧コイル用はH種多重ガラス巻絶縁線、芳香族ポリアミド紙ガラス巻絶縁線が主として用いられている。これら電線をコイルに巻き上げられてからワニス処理するので、処理ワニスとの組合せ熱劣化試験、すなわち相性試験を行ない選定しなければならない。これらの電線はいずれも処理ワニス、すなわちシリコンワニスには適合する。

(2) シリコン油入り変圧器の電線は高圧品(車両搭載用)には芳香族ポリアミド巻絶縁線、低圧品(配電用変圧器)にはポリイミドエナメル線(IMW)が用いられている。芳香族ポリアミド巻絶縁線は使用電圧に応じて芳香族ポリアミド紙の巻数は変わっている。

図1に各種電線の相性試験の結果を示すが、いずれも相性の良いことが分かる。

2.2 絶縁

(1) H種乾式変圧器の絶縁は図2に示すように、①大地間の支持がい子、②低圧コイル大地間の絶縁筒、③高圧・低圧コ

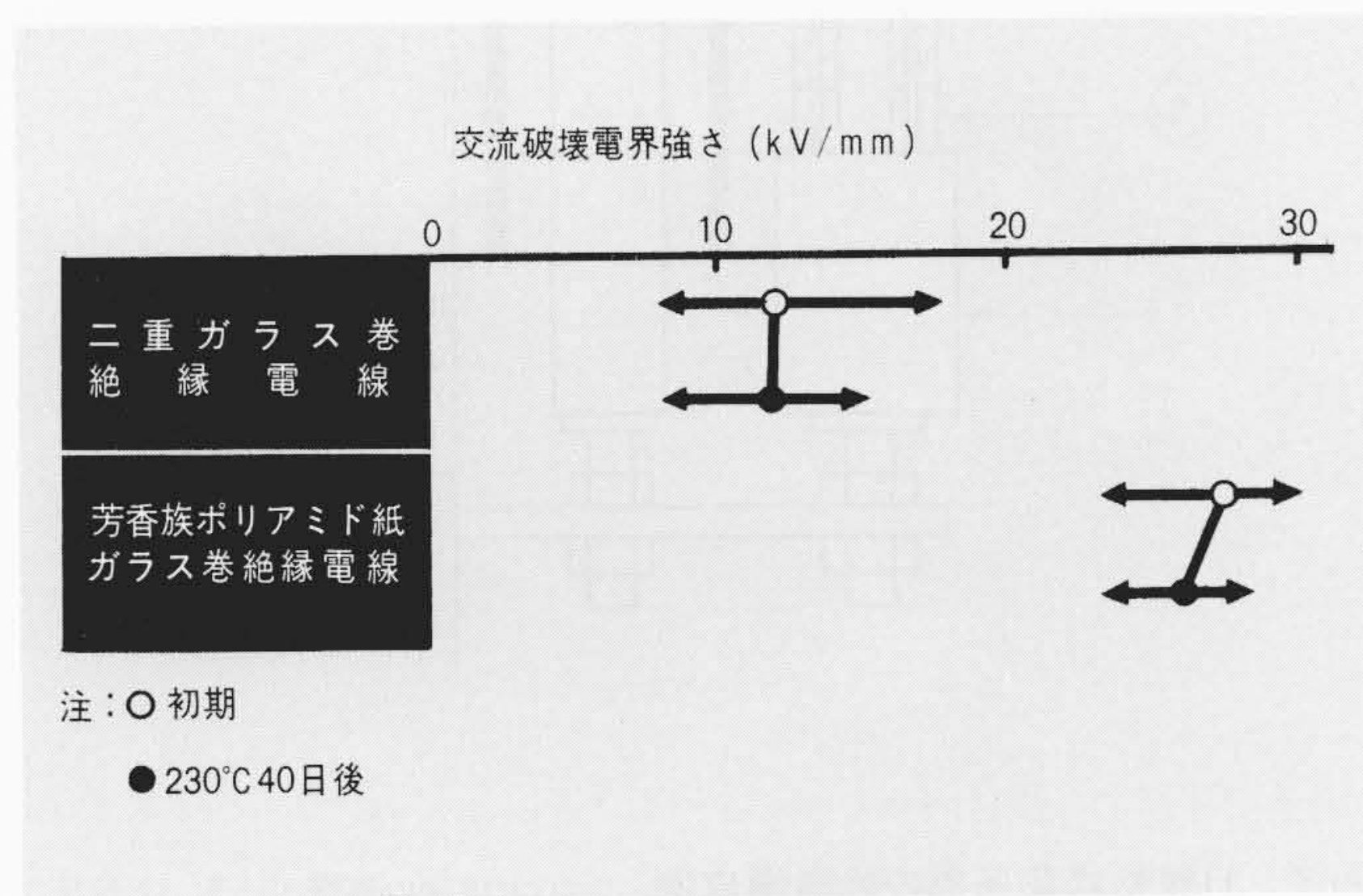


図1 シリコンワニス処理電線の交流破壊特性 各種電線をシリコンワニス処理した後、230°C 40日劣化でも特性の低下が少なく、いずれも相性の良いことが分かる。

イル間の絶縁筒、④層間絶縁、⑤端部絶縁などにより絶縁されている。

耐熱性はもちろんのこと湿気、塵埃によりこれらの絶縁特性の変わらないものの選定が重要である。

図3は各部の絶縁に使用されている材料の耐熱試験の結果をまとめたものである。これらから分かるように、いずれの材料も耐熱性があり230°C 40日劣化試験でも絶縁破壊電圧の低下が少ない。

(2) 車両搭載用特別A種シリコン油入り変圧器の絶縁は図4に示すように、①大地間絶縁、②高圧・低圧コイル間の絶縁が主体である。シリコン油で含浸されるため、乾式変圧器のように直接大気の影響は受けない。

絶縁材料の主体は芳香族ポリアミド紙、あるいはその成形品である。シリコン油と芳香族ポリアミド紙、あるいはその成形品の相性試験はガラス製のアンブルの中にシリコン油と供試品を実機に使用される割合で封入し、高温(240°C)にて加熱して行なわれた。図5はこの試験結果である。すなわ

* 日立製作所国分工場 ** 日立製作所日立研究所 *** 日立製作所中条工場

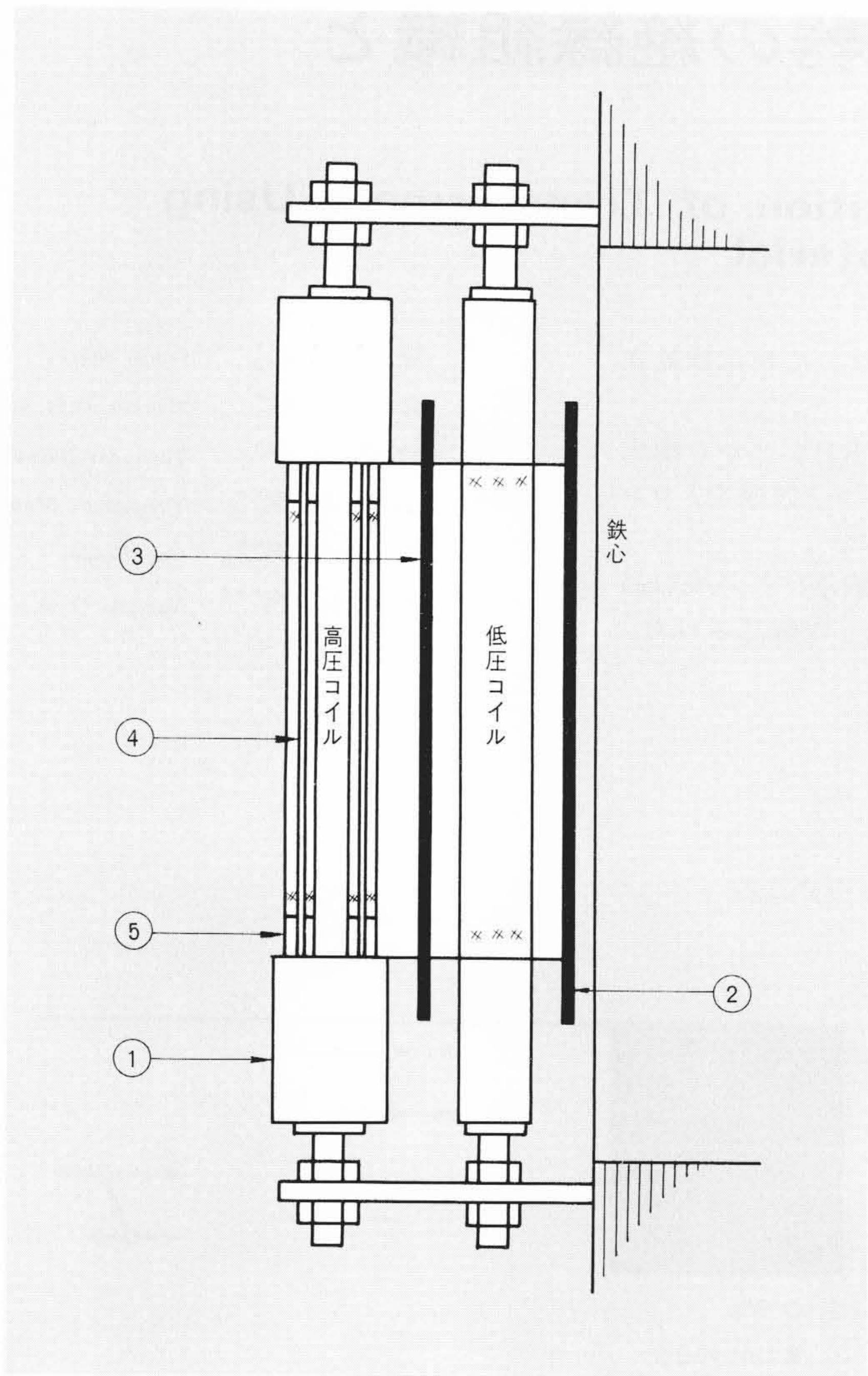


図2 H種乾式変圧器の絶縁構成例 ①大地間の絶縁がい子、②低圧コイル大地間の絶縁筒、③高圧・低圧コイル間の絶縁筒、④層間絶縁、⑤端部絶縁などにより構成されている。

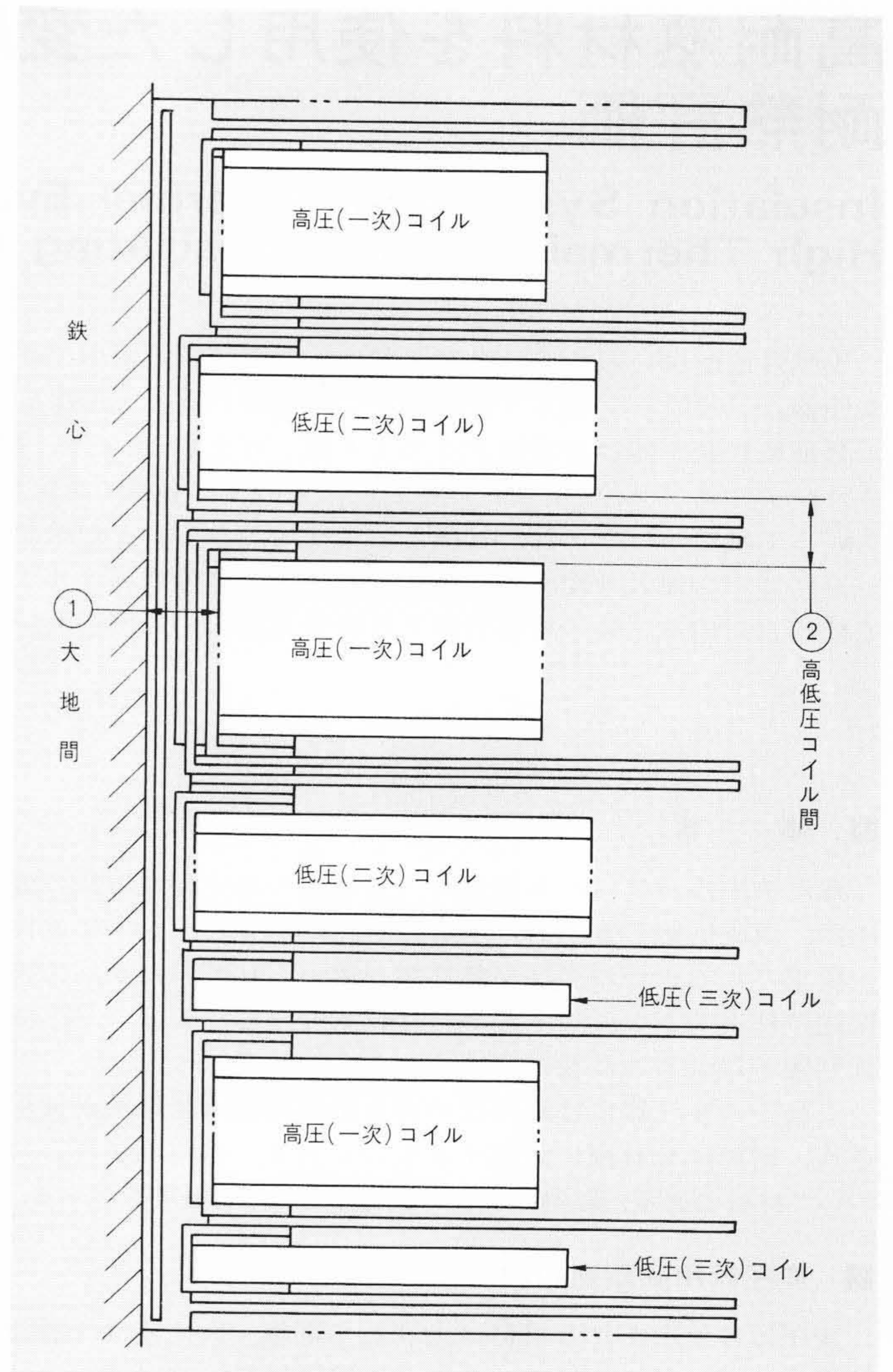


図4 車両用シリコン油入変圧器の絶縁構成例 高圧・低圧コイルは交互に配置され、断面がL形、U形の絶縁物を使用して構成されている。

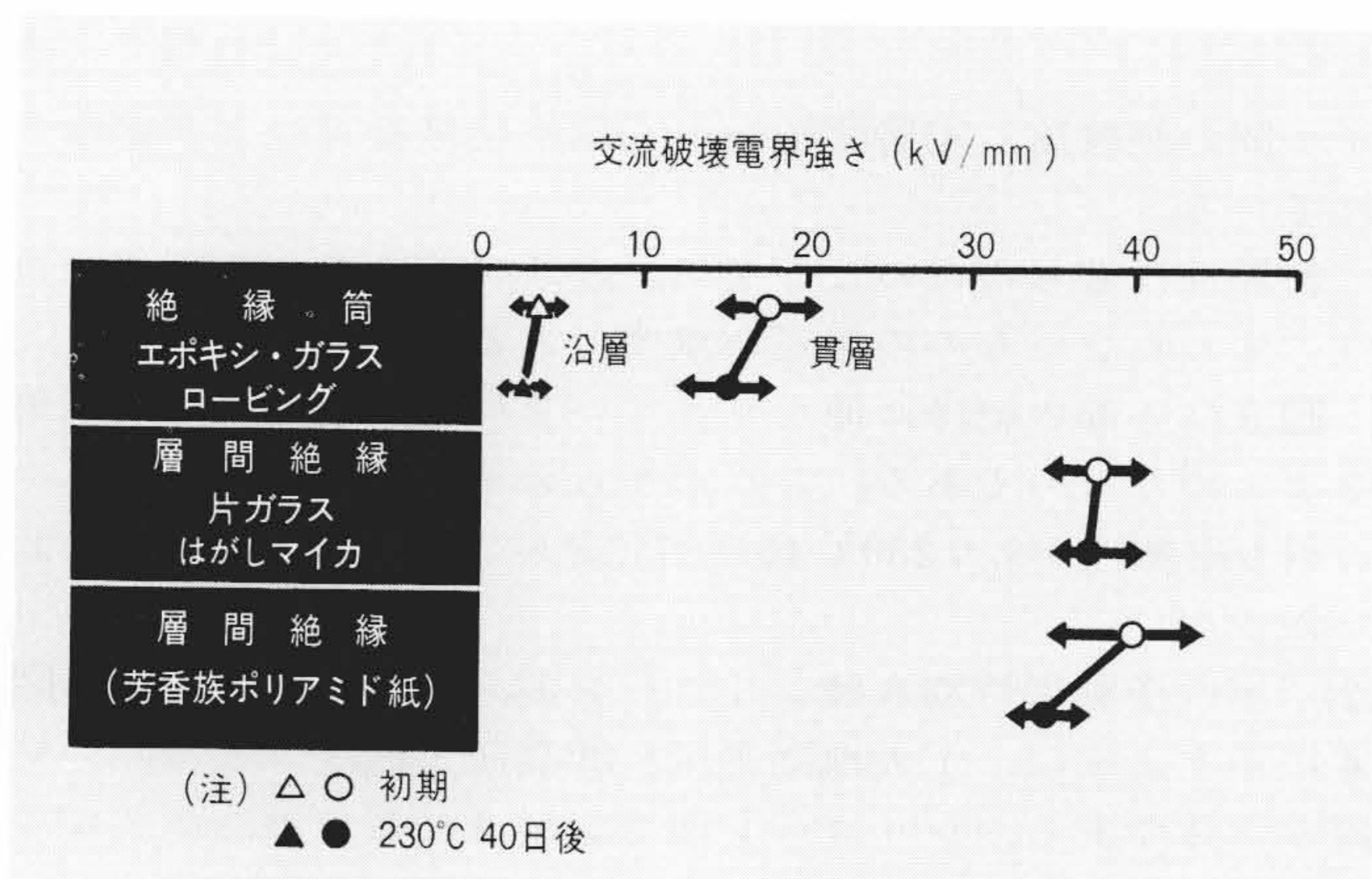


図3 各部絶縁材の交流破壊特性 いずれの材料も耐熱性があり230℃ 40日劣化でも特性の低下が少ない。

ち、初期の芳香族ポリアミド紙中の水分が少なければ、シリコン油も芳香族ポリアミド紙も18日まで影響は少ないが、水分が多いほどその特性（引張強度と伸び）の低下が大きいので、その管理が重要である。

芳香族ポリアミド樹脂成形品に関し、日立製作所ではカレンダー処理されていない芳香族ポリアミド紙を粉砕し、図6に示すような工程で製造する方法を開発した。従来の接着方式により製作したものと比較して著しく品質が安定し、シリコン油の含浸特性に優れている。図7は成形機の外観である。表1はその特性をカレンダー処理されていない芳香族ポリアミド紙と比較して示す。むしろ成形品のほうが優れていることが分かる。

2.3 絶縁油

シリコン油は優れた絶縁特性のほか、耐熱性、難燃性、無公害性の点で他の油に比較し卓越しており、現在車両搭載用変圧器の絶縁油として全面的に採用されている。また地中配電方式の変圧器用に検討されているものもある。表2に鉱油、不燃性油、エステル系合成油、フッ素油などとシリコン油を比較して示した。シリコン油の絶縁特性は鉱油と比較し遜色がなく、かつ難燃性であるエステル系油、フッ素油と比較しても優れ、また価格面ではフッ素油より経済的である。

シリコン油は空気中で高温で加熱するとしだいに酸素と化合し、分子が架橋して粘度が高くなる。これを防ぐには酸素との接触を防止すればよい。この方法としては無圧密封式、

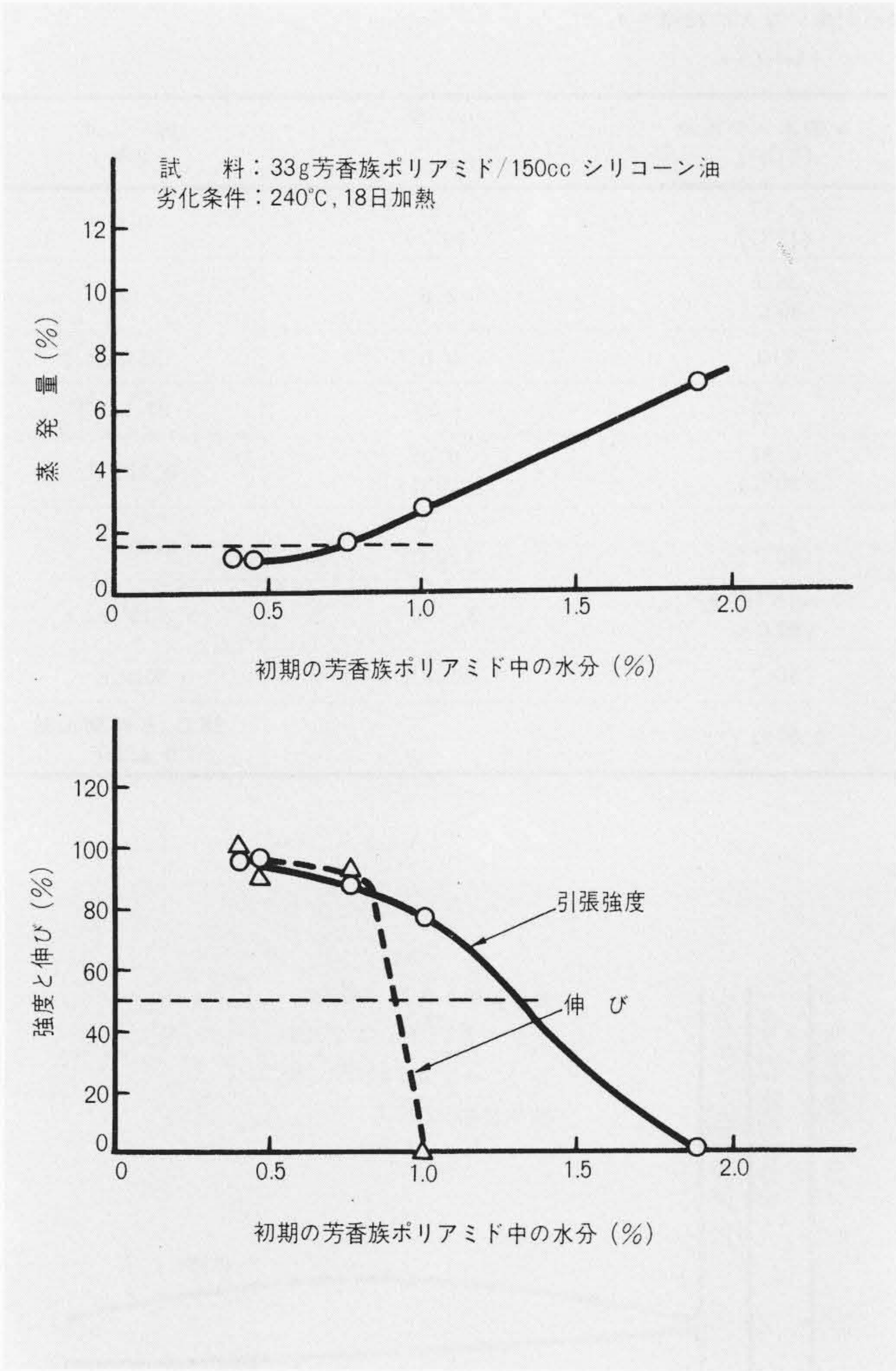


図5 劣化後の油の蒸発量，芳香族ポリアミドの強度，伸びと初期の芳香族ポリアミド中の水分の関係 芳香族ポリアミド中の初期水分を0.7%以下にすれば，240°C 18日加熱後においてもシリコン油の蒸発量は1.5%以下，ポリアミドの引張強度，伸びは初期値の50%以上である。

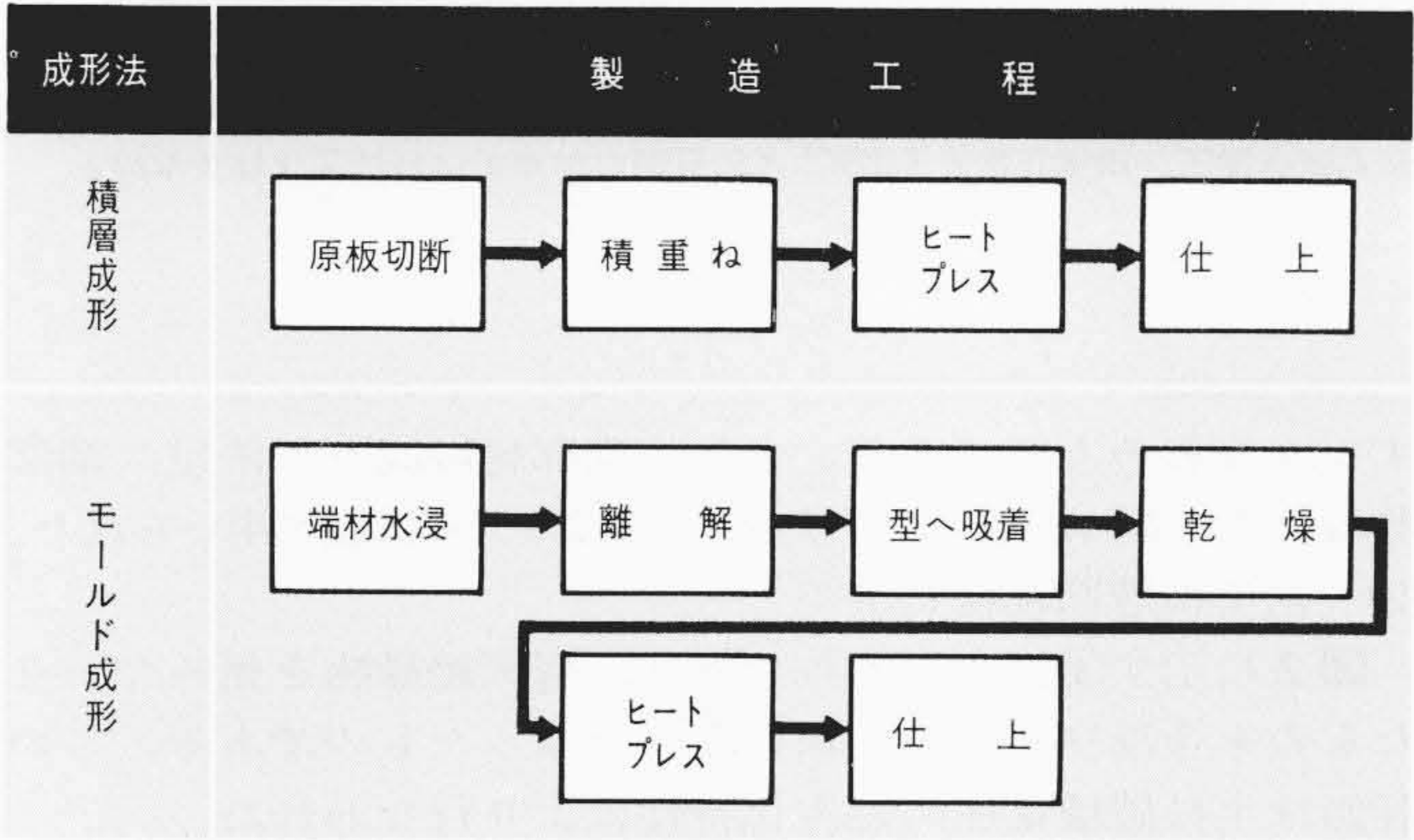


図6 芳香族ポリアミド成形品の製造工程 どちらの方法も接着剤なしで成形できるのが特徴であり，ヒートプレス時の圧力，温度，時間を調整すれば必要な密度の成形品が得られる。

又は不活性ガス密封式がある。また一方，シリコン油はガス溶解量が大きいため，車両搭載用変圧器のように小形軽量化のため，油循環するものではシリコン油中の溶解ガスにより油ポンプを運転した場合気泡の発生があるため無圧密封

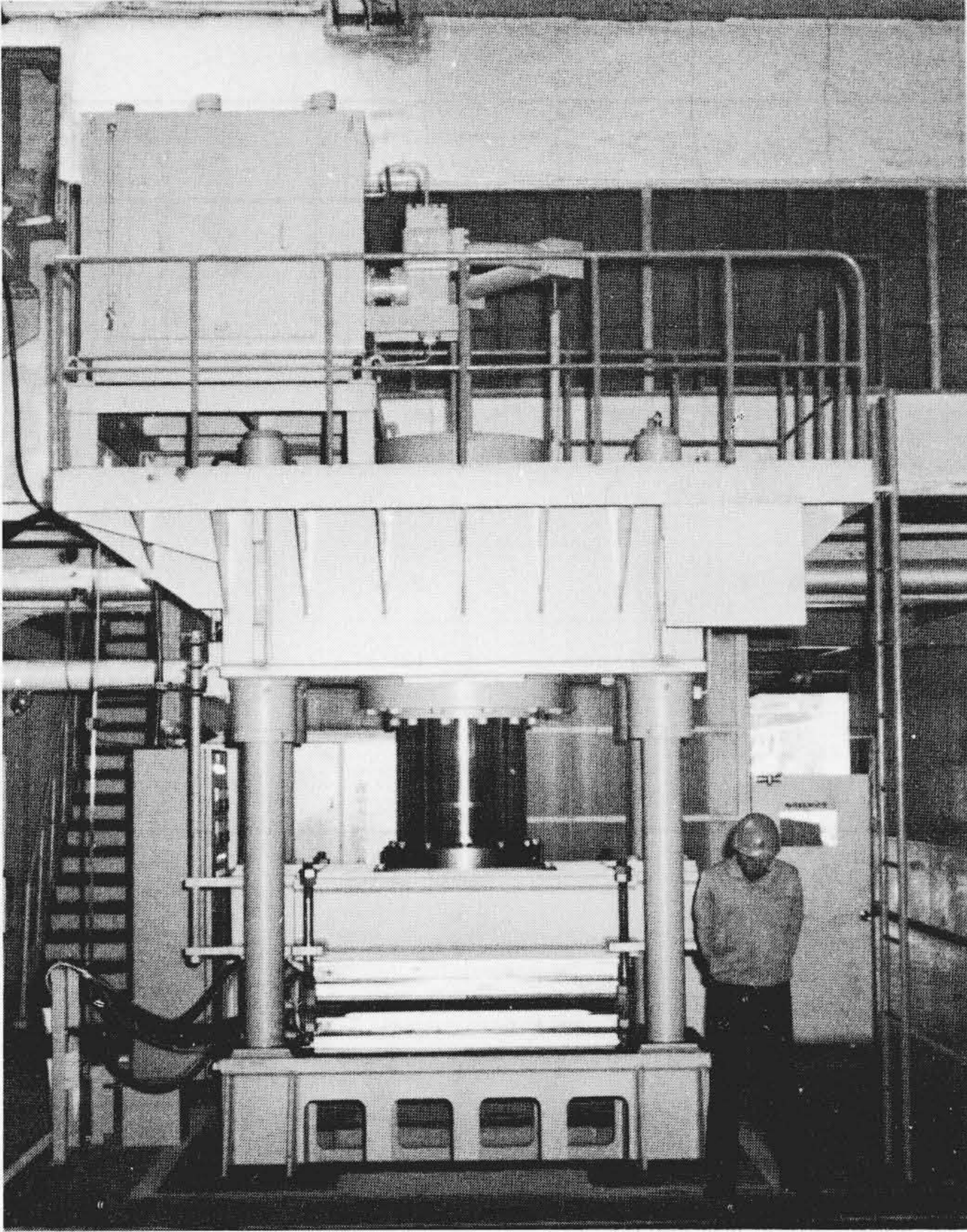


図7 芳香族ポリアミド成形機 プレスの圧力・温度・時間は，芳香族ポリアミドに要求される密度により調整できるようになっている。

表1 芳香族ポリアミド成形品の特性 成形品は密度が調整できるため，シリコン油の含浸速度は従来品の5～6倍となっている。機械的，電氣的にも従来品より優れている。

用途 種類 特性	シリコン油入変圧器		
	芳香族ポリアミド (カレンダなし) (成形前)	芳香族ポリアミド (カレンダなし) (成形品)	芳香族ポリアミド (カレンダあり) (従来品)
厚さ	0.15～0.75mm まで5種類	最大10mmまで 製作可能	0.05～0.75mm まで10種類
密度	0.3	0.8～1.2 成形圧力により 任意に製作可	0.8～1.1 (厚さにより異なる)
曲げ強さ(kg/mm ²)	1～1.5	7～8	7～8
交流絶縁破壊電圧(シリコン油中) (kV/mm)	52	60	58
シリコン油の含浸 速度比	10～12	5～6	1

式が採用される。酸素との接触を妨げたまま，シリコン油を加熱するとそれは低分子化し，蒸発量が増大する。蒸発量が増大すると引火点が低下し，難燃性に悪影響を与える。図8はシリコン油の蒸発量と引火点の関係を示すものであるが，蒸発量は1.5%以下を管理限界としている。図9は密封状態で220°Cの加熱劣化試験を行なった場合の破壊電圧，体積固有抵抗率，tanδなどを示すものであるが特性の低下は少ない。

シリコン油の粘度は，自冷式変圧器用としては熱放散の関係で20cSt程度が有利であるが，車両搭載用変圧器のような

表2 各種絶縁油の物性値 シリコン油は鉱油に比較し引火点が高く、流動点が高いなどの特徴をもっており、難燃性である。

特性項目	シリコン油 (50cSt)	不燃性油 (PCB)	リン酸エステル油 (TCP)	フッ素油 (パーフルオロ トリブチルアミン)	鉱油 (2号)
比重(25℃)	0.96	1.52 (15℃)	1.17 (15℃)	1.87 (20℃)	0.9
粘度(25℃ cSt)	50	10 (30℃)	36.5 (30℃)	2.6	12
引火点(℃)	300以上	—	210	なし	135以上
流動点(℃)	-50以下	-30以下	-30	-50	-27.5以下
誘電正接 (50Hz 50℃ %)	0.01以下	3以下	0.97 (80℃)	0.05 (20℃)	0.2以下
比誘電率 (50Hz 25℃)	2.72	4.6	6.4 (80℃)	1.9 (20℃)	2.2
体積抵抗率(25℃ Ω・cm)	5 × 10 ¹⁴ 以上	1 × 10 ¹² 以上	7 × 10 ¹⁴ 以上 (80℃)	3 × 10 ¹⁴	5 × 10 ¹² 以上
破壊電圧(kV/2.5mm)	45以上	45以上	56.7	30以上	30以上
蒸発量(%)	150℃ 24時間加熱 0.5以下	98℃ 1時間加熱 2以下	0.07以下	—	98℃ 5時間加熱 0.4以下

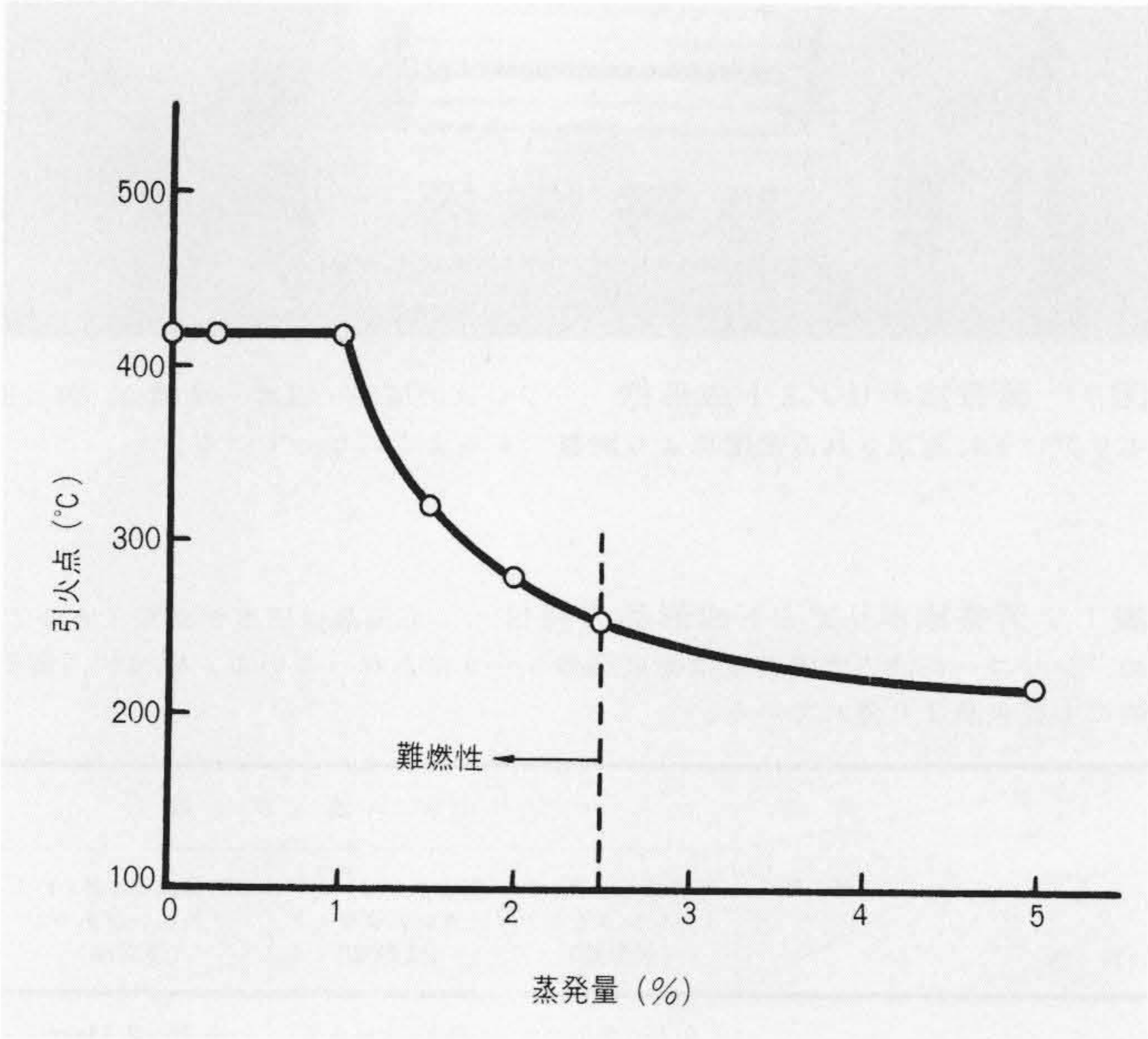


図8 シリコン油の蒸発量と引火点 シリコン油の蒸発量が2.5%以内は難燃性である。

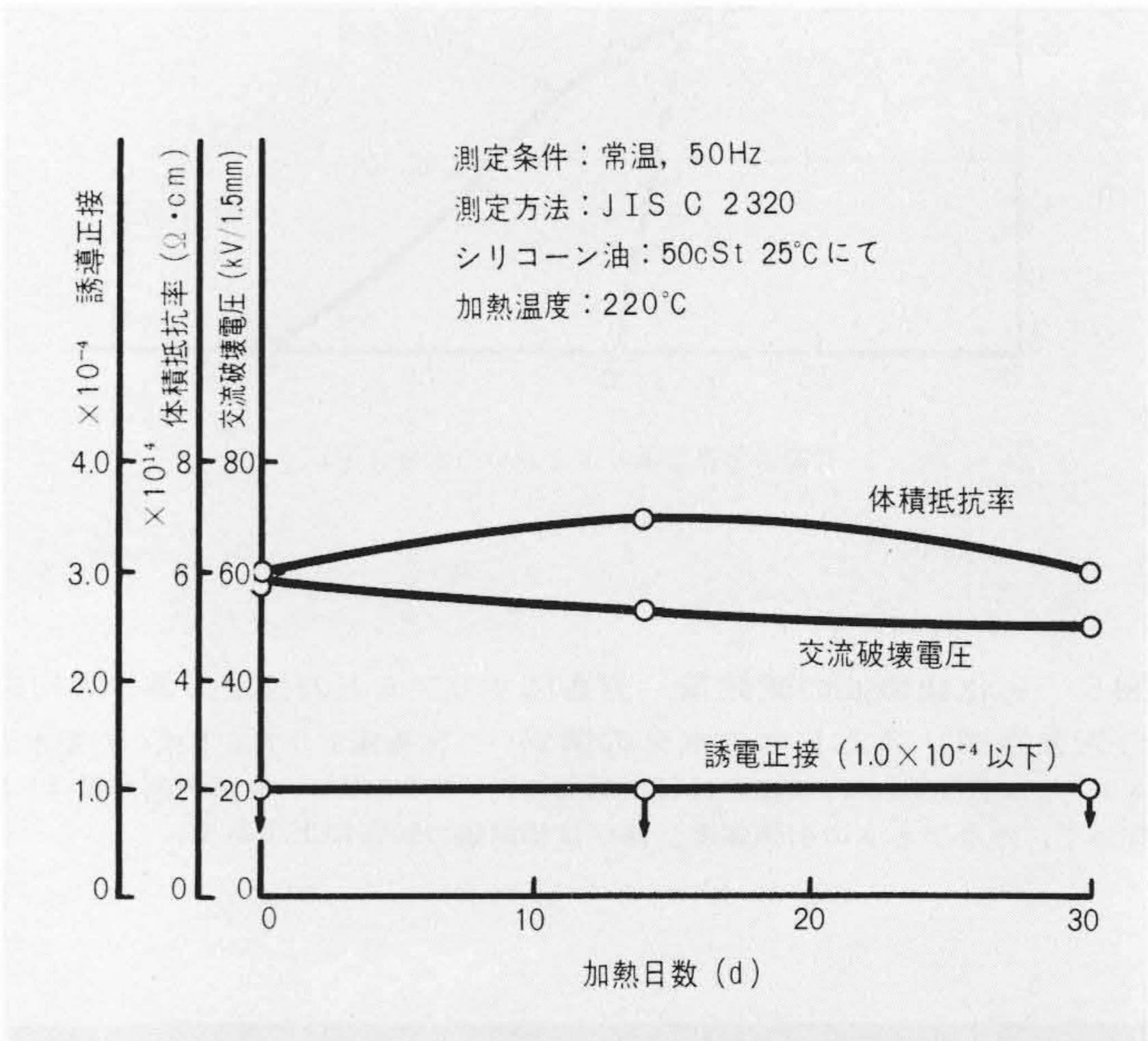


図9 シリコン油の熱劣化による電気的特性変化 体積抵抗率、交流破壊電圧、誘電正接とも220℃×30日間の加熱では特性変化は少ない。

送油風冷式ではポンプ揚程と難燃性の兼ね合いから50cStが選定されている。

3 乾式変圧器

H種乾式変圧器に2.で述べた材料を初めて採用した際、実機への適用に先だちその重要部分のコンポーネントを作り試験を行なった。また、これらの材料を採用した乾式変圧器の絶縁システムとしての寿命評価は、トランスレットと称せられる縮小された実機のモデルで行なっている。次にその代表的なものについて述べる。

3.1 コンポーネント試験

コンポーネント試験のモデルの代表例を2例紹介する。

(1) 端部絶縁モデル

図2に示す⑤部のモデルであり、端部絶縁物、層間絶縁物と電線を組み合わせ含浸ワニスで絶縁処理を行なう図10に示

すような形のものである。これは端部絶縁高さの決定、端部絶縁システムの破壊電圧の熱劣化特性による評価に用いられた。

(2) コイル層間絶縁モデル

図2に示す④部のモデルであり、層間絶縁物を組み合わせたものを含浸ワニスで絶縁処理を行なったものである。この評価は主に破壊電圧の熱劣化特性により行なわれた。

3.2 トランスレット試験

乾式変圧器を実用状態に近い試験条件で試験を行ない、耐熱寿命評価を行なうという、いわゆるトランスレット試験がある。この方法は縮小実機モデルを図11に示すようなテストサイクルを繰り返し、絶縁破壊が起こるまで続ける。この絶縁破壊に至るまでのサイクル数から加熱劣化時間を求め、これと加熱時間との間のアレニウスプロットを行ない、実用温度での寿命推定を行なう。

2.に述べた絶縁材料を使用したH種乾式変圧器の耐熱寿命

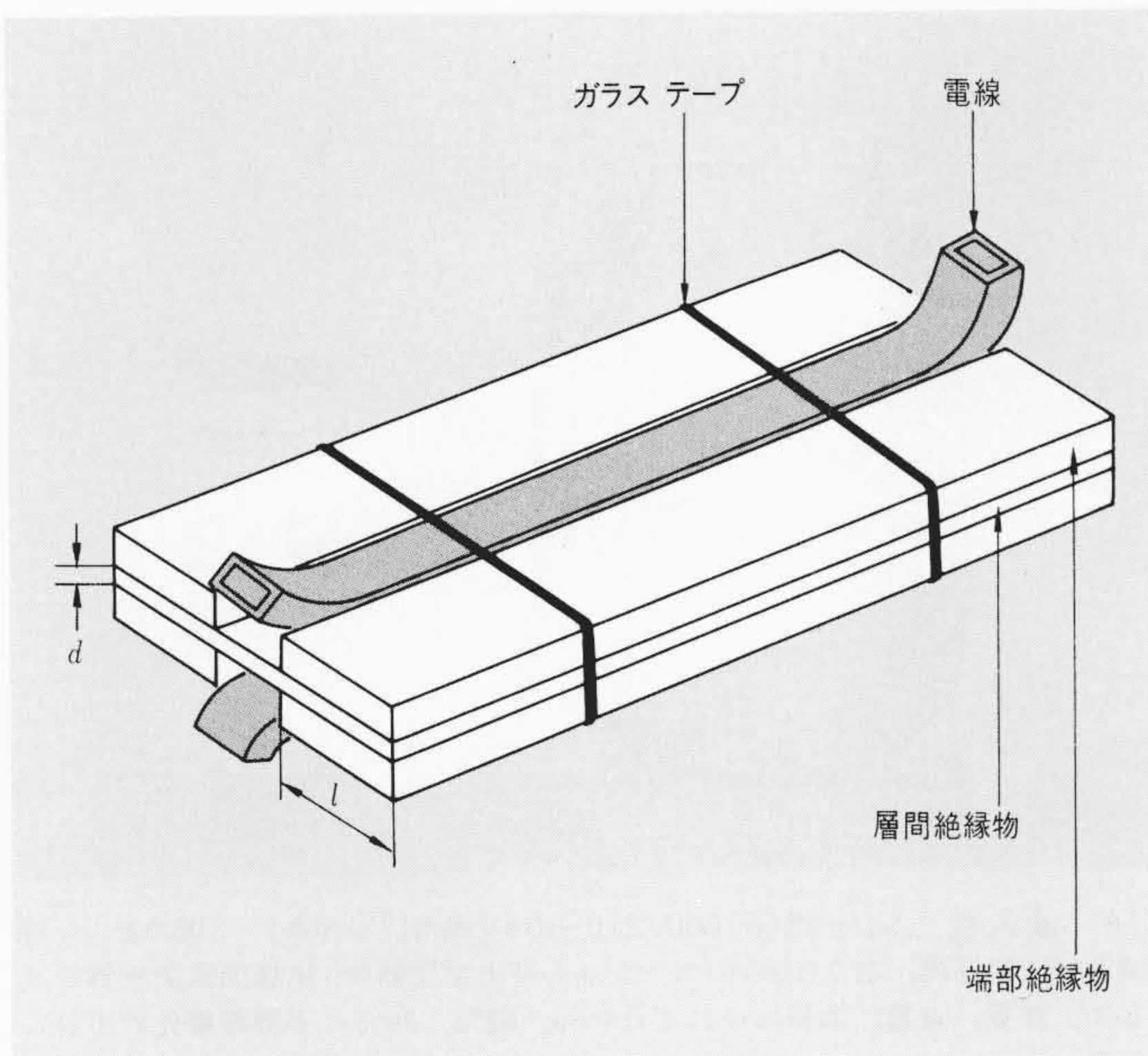


図10 端部モデル 端部絶縁物、層間絶縁物と電線を組み合わせ、含浸ワニスで絶縁処理を行ない、端部絶縁システムの特性評価に用いられた。

について現在試験中であるが、IEEE(米国電気電子学会)のトランスレット試験規格²⁾に示すスケジュール以上の試験をしたが破壊が起こらなかったため、一段と温度を上げた試験を実施中である。320°Cの平均寿命は40日であった。加熱温度が1点しか現在なく、アレニウスプロットができないため、各種絶縁組織の活性化エネルギーはほぼ同一である点に着目し、耐熱寿命の推定を試みることにした。

H種乾式変圧器の絶縁組織の活性化エネルギーは22kcal/mol³⁾であることから、H種の最高許容温度180°Cでの寿命をこのデータをもとにして次式により計算すると約34年となった〔一般には2万時間(2.3年)を越せばよい〕。

$$t_2 = t_1 e^{-\frac{E}{R}(\frac{1}{T_1} - \frac{1}{T_2})} \dots \dots \dots (1)$$

ここに

t_1 : 温度 T_1 °Kにおける寿命(h)

t_2 : 温度 T_2 °Kにおける寿命(h)

T_1, T_2 : 温度(°K)

E : 活性化エネルギー(kcal/mol)

R : ガス常数($1,9863 \times 10^{-3}$ kcal/deg·mol)

このようにH種乾式変圧器の絶縁組織の耐熱寿命は永いと期待されている。

3.3 新形H種乾式変圧器

図12は2.で述べた絶縁材料を使用した新形H種乾式変圧器の外観である。3.1や3.2のような試験を実施し、信頼性の確認を行なったものである。

しかし、乾式変圧器の構造上巻線には空気が直接接触するため、空気中の塵埃や湿気が異常の場合には、その影響を受けるため、保守点検には注意が必要である。

4 シリコン油入り変圧器

シリコン油入り変圧器に2.で述べた材料をはじめとして、各種の材料を採用したときはシリコン油との相性試験を行ない、シリコン油及び材料の特性変化など調査した。また、その重要部分のコンポーネントモデルを作り絶縁試験、温度上昇試験などを実施し、信頼性の確認を行なった。

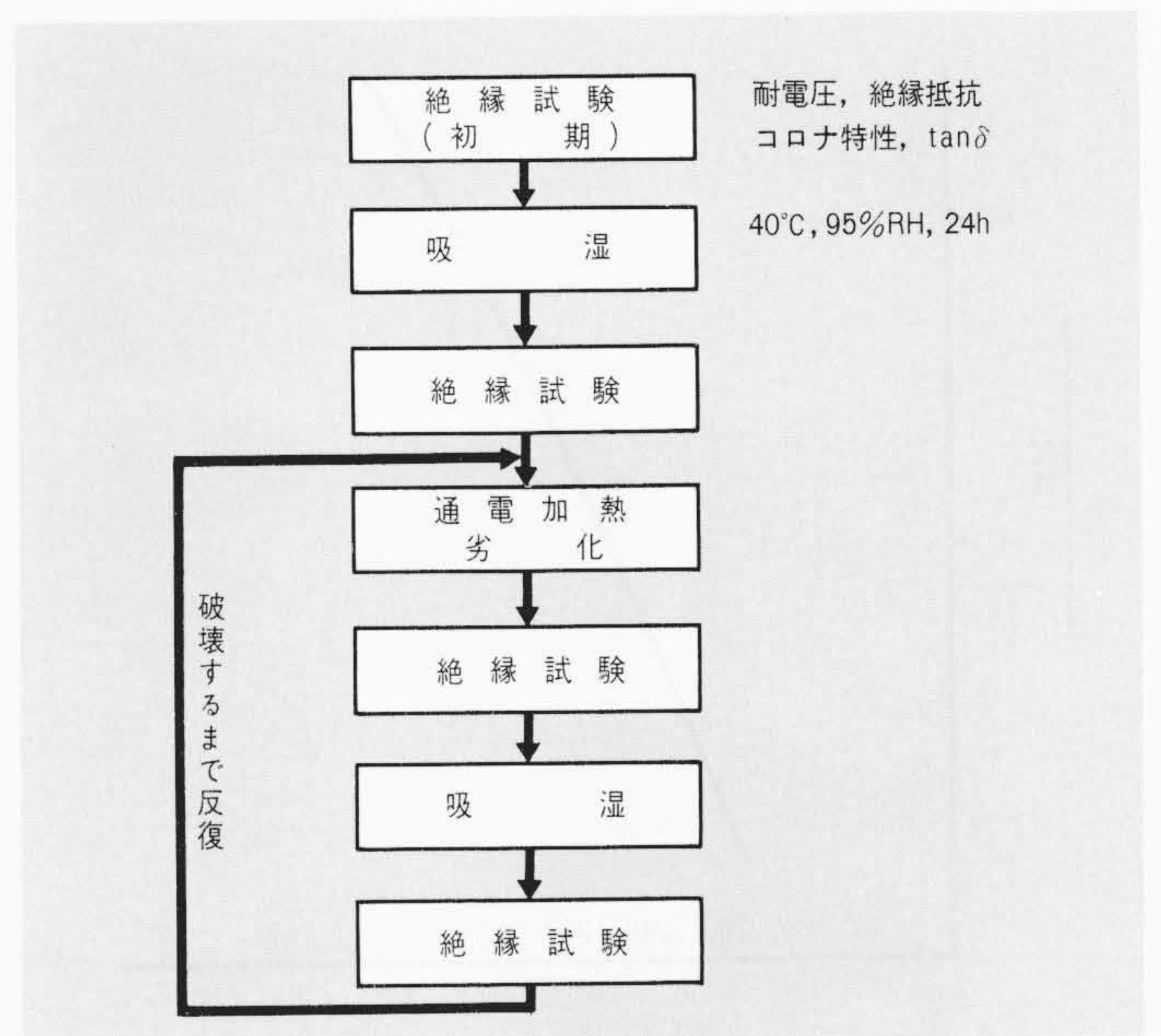


図11 トランスレットテストサイクル 絶縁破壊に至るまでのサイクル数から加熱劣化時間を求め、実用温度での寿命推定を行なう。

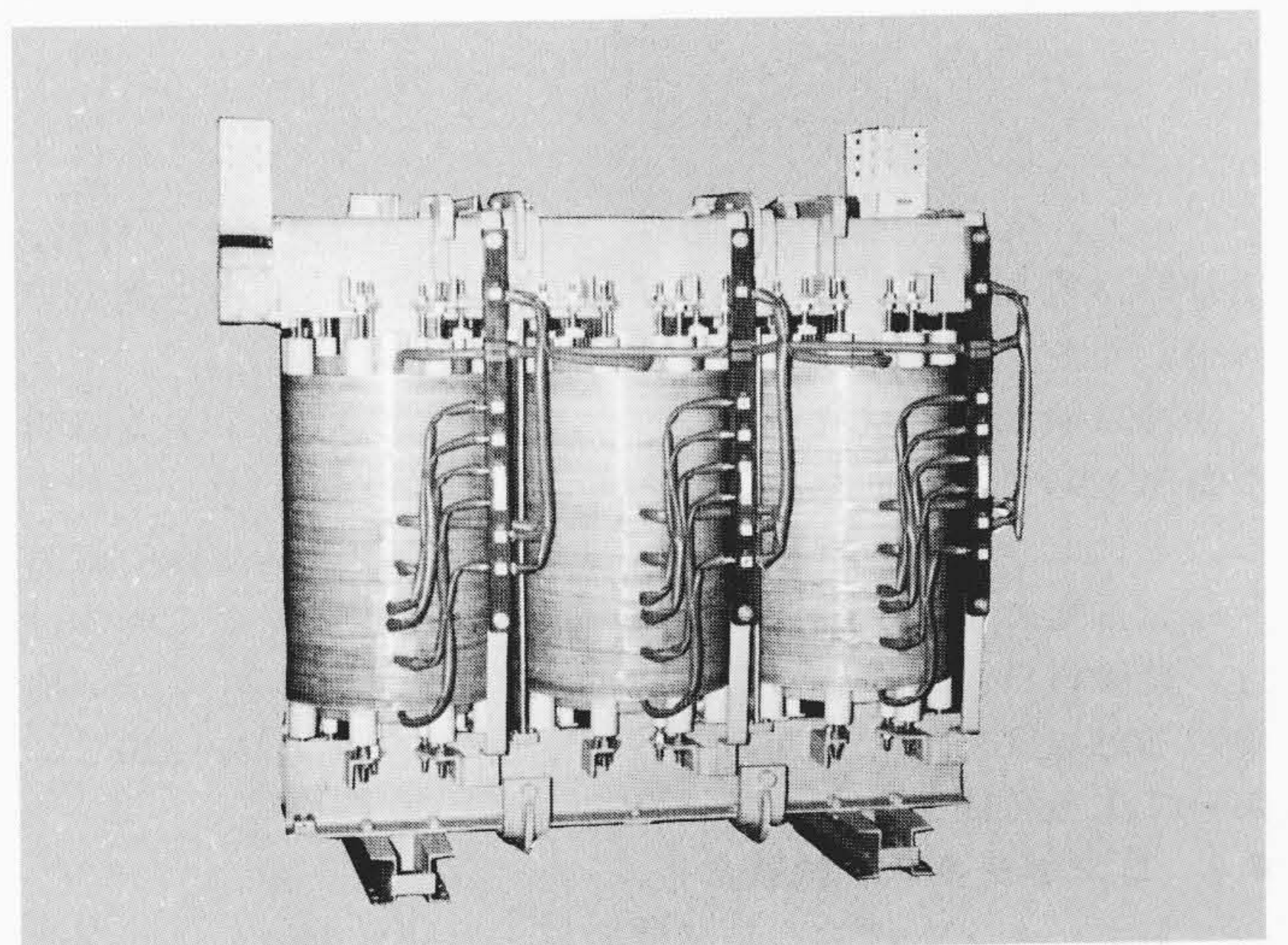


図12 新形H種乾式変圧器(6,600/460V三相2,800kVA) 各種コンポーネント試験、トランスレット試験で確認された絶縁材料を使用して製作された。

4.1 シリコン油との相性試験

液体絶縁物に接触する材料は、液体絶縁物に影響を与えてはならないし、また材料自体が液体絶縁物より影響を受けるものであってはならない。例えば、使用材料が液体絶縁物中に溶解しその絶縁耐力を低下させ得るということも考えられるので、採用に先だち相性試験を実施し、確認することが必要である。

相性試験は2.でも触れたように、ガラスアンプル中に液体絶縁物と供試品を実機に使用される割合で封入し、アンプルを封じ切り、必要な高温で加熱する。その後、所定時間経過したあとアンプルを冷却し、供試材料及び液体絶縁物を取り出して各々の特性の変化を調査し、変化量が規準値を超えた場合、相性が悪いとしてその材料の採用はやめる。

芳香族ポリアミド紙とシリコン油については図5に示すとおりであり、水分の管理がよければ相性には問題がないことを示している。

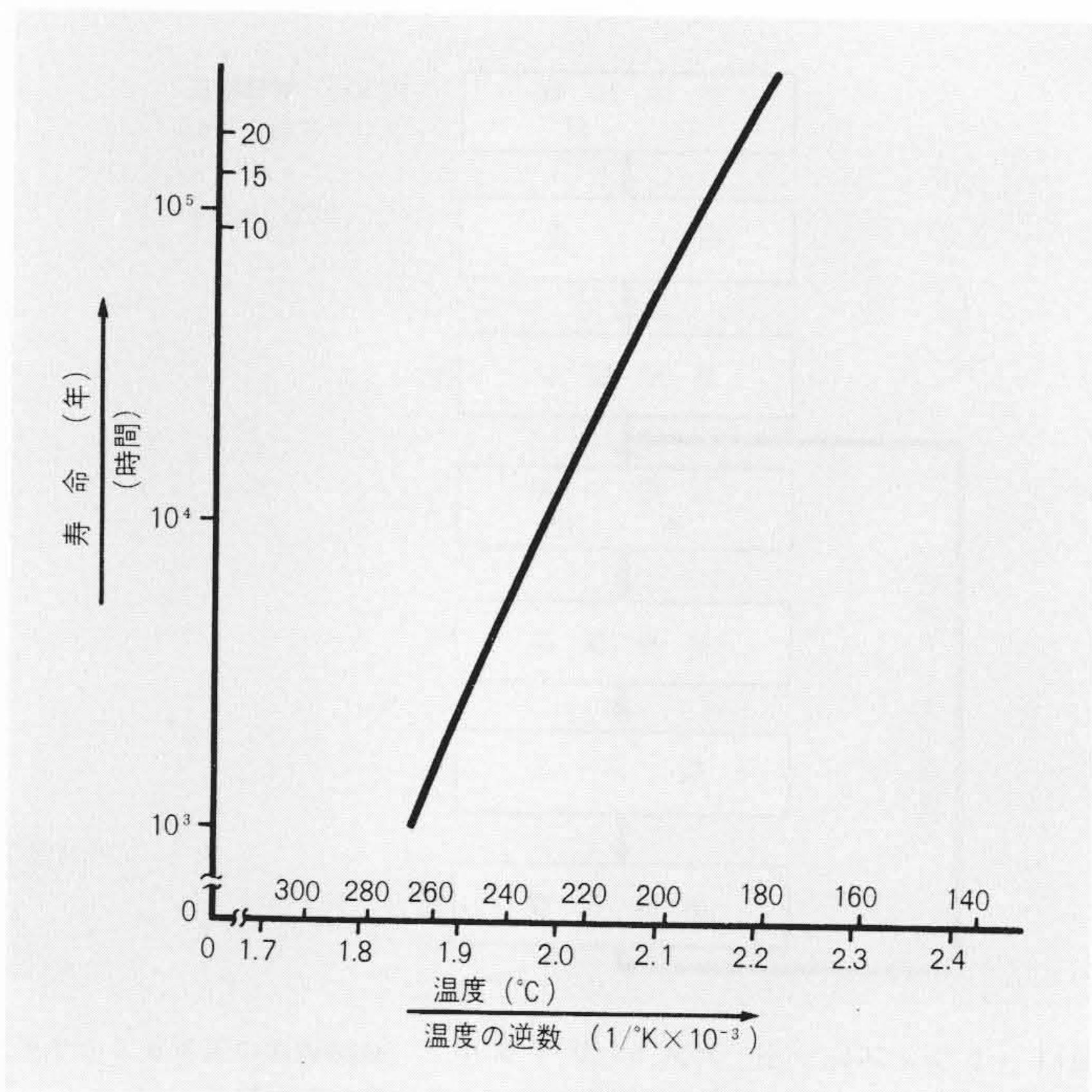


図13 芳香族ポリアミド紙の温度-寿命特性(シリコン油中)

この図からシリコン油中のポリアミドの寿命を推定すると、230°C連続使用で1万時間である。

その他、電線、接着剤、塗料、はんだ、ろう、ポンプ材料、冷却器材料などについて、いずれも問題がないものを選定し採用した。

相性試験で、供試材料の特性が初期の50%に低下する時間を寿命として、各加熱温度での寿命をアレニウスプロットすることにより、その材料を使用した変圧器の絶縁組織の耐熱寿命を推定できる。図13は使用中最も温度が高くなる導体付近の絶縁材料、すなわち芳香族ポリアミド紙のシリコン油中の加熱温度に対する寿命特性を示したものであり、230°Cにおいて1万時間であった。

4.2 コンポーネント試験

コンポーネント試験としては素線、層間、大地、沿面などの絶縁構造コンポーネントモデルによる破壊電圧、コロナ発生電圧測定などの絶縁試験、温度分布モデルによる試験などを実施した。

4.3 シリコン油入変圧器

上述のような材料の選定、コンポーネント試験の結果をもとにして、シリコン油入変圧器は製作された。図14に配電用75kVA H種変圧器の外観を示す。A種鉱油入変圧器と比較し著しく小形である。図15に特別A種3,300kVA全国新幹線用プロトタイプ変圧器を示す。本器の外形寸法はほとんどA種の1,650kVA変圧器と変わらない。

このように、シリコン油と芳香族ポリアミド紙の組合せにより開発された新しい絶縁組織の変圧器は、今後、小形軽量で難燃性が強く要求される用途には広く使われることが期待される。

5 結 言

H種乾式変圧器及びシリコン油と芳香族ポリアミド紙との組合せによる変圧器について、その絶縁組織とそれらの耐熱評価試験の概要を述べたが、紙面の都合で十分意を尽せなかった。

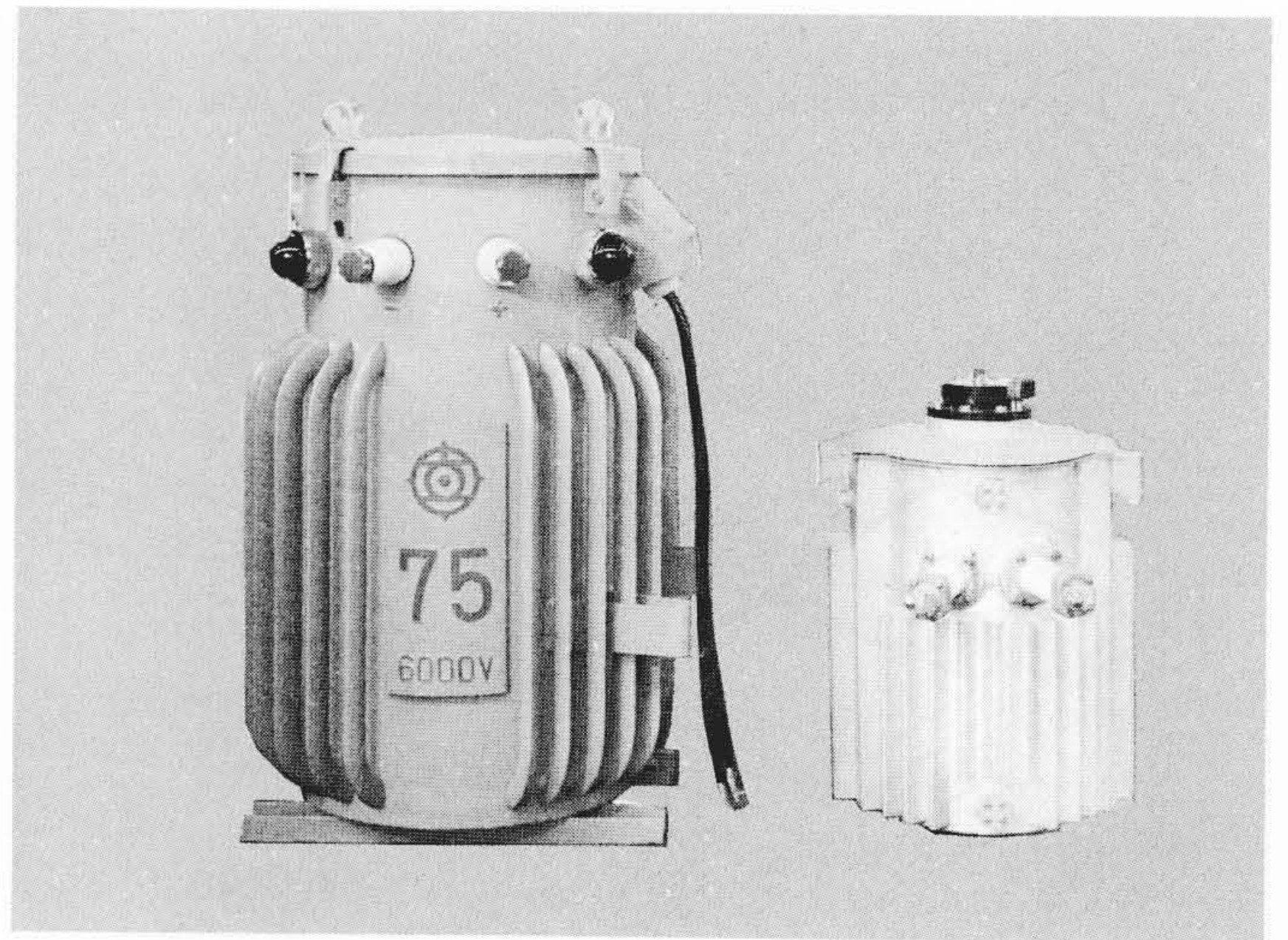


図14 油入柱上変圧器(6,600/210-105V単相75kVA) 図の左：A種鉱油入柱上変圧器、右：H種シリコン油入柱上変圧器で、A種油入変圧器と比較して、容量、重量、油量はそれぞれ55%、68%、26%に小形軽量化が可能になった。

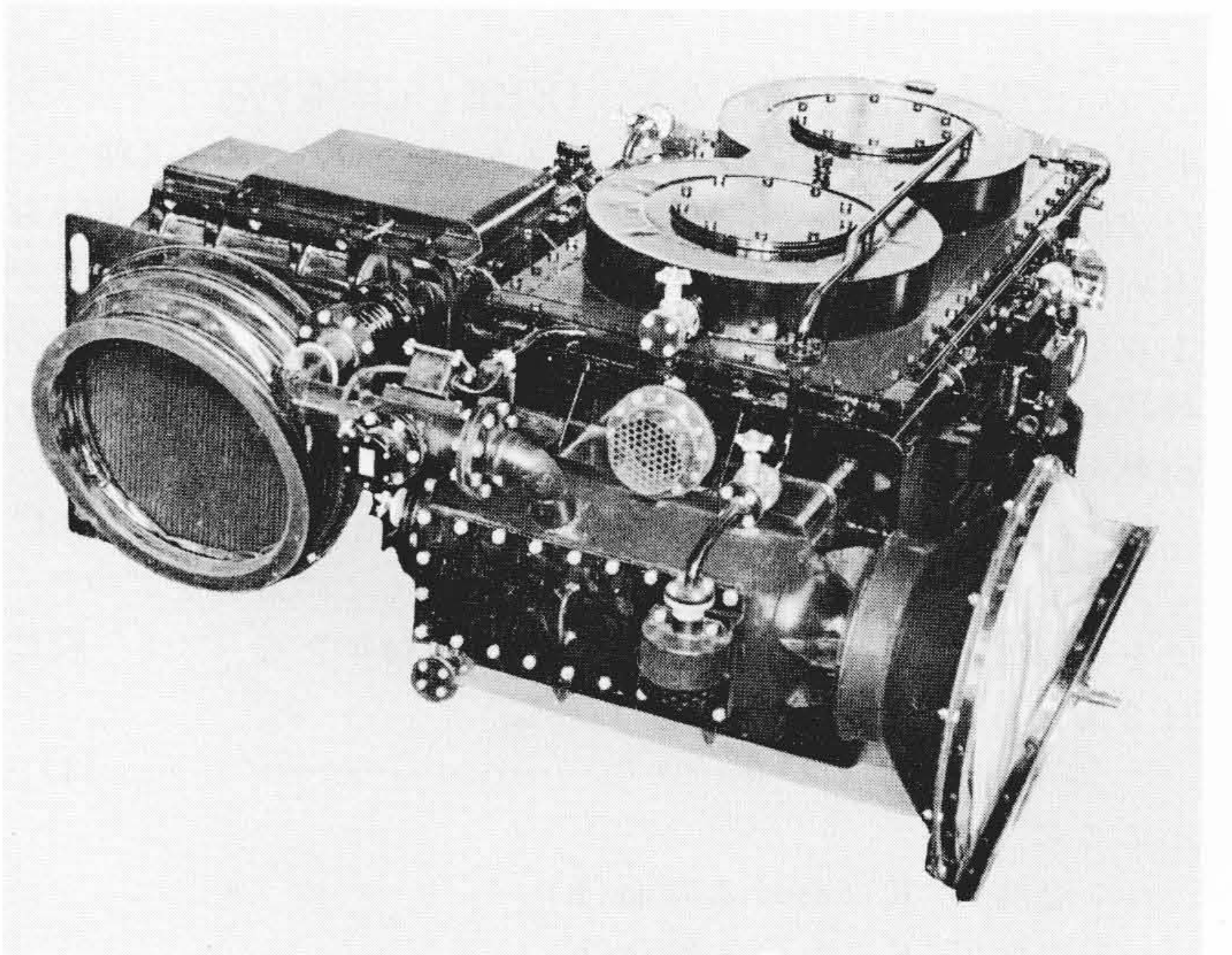


図15 シリコン油入変圧器(全国新幹線向け試作TM920A形)

シリコン油を使用し、コンサベータとして2個の金属ベローズを内蔵し、無圧密封式になっている。また、タンクは巻線、鉄心に合わせて外接した形状としているため、コンパクトにまとめられている。

いずれにしても芳香族ポリアミド紙はその優れた特性のため、乾式変圧器及びシリコン油入変圧器に大幅に採用されており、これらの変圧器の信頼性に貢献している。

なお現在、H種注型用レジンによる大形レジンモールド変圧器が開発されつつある。これについては稿を改めて紹介する予定である。

終わりに、この研究に御指導をいただいた日本国有鉄道設計事務所の方々をはじめ、関係各位に対し深く感謝の意を表わす次第である。

参考文献

- 1) 井上：「電気鉄道車両用機器」電学誌，95，399（昭50-5）
- 2) "Proposed Test Procedure for Evaluation of Ventilated Dry Type Power and Distribution Transformers" IEEE.No.65(1956)
- 3) Zambell：Life Evaluation of Group-2 Dry-Type Power Transformers.Oct.1955 AIEE Trans.