U.D.C. 621. 3. 048. 001. 4 : 621. 313. 13-213. 3
620. 193. 472. 2 : 621. 315. 336. 96

密閉形電動機絶縁組織の評価法

Some Evaluation of Hermetic Motor Insulation

徳永隆志* *Takashi Tokunaga*
土井良太* *Ryôta Doi*
黒川 進** *Susumu Kurokawa*

A method for refrigerant resistance test which is aimed at the evaluation of insulation systems of hermetic compressor motors is introduced.

The influence of blisters in magnet wires on machine life, relationship between varnish treatment and overload characteristics, and a new functional test method developed by the authors are discussed in relation to the above.

This kind of test tends to leave some discrepancies between screening test results and field test results. The new functional test has succeeded to eliminate such discrepancies, constituting a consistent evaluation system covering from material selection to insulation life evaluation.

1 緒 言

冷蔵庫，クーラーなどに使用される密閉形圧縮機電動機は，フッ素系冷媒（R-12またはR-22など）と冷凍機油中で運転するので，使用される電動機の絶縁物はこれらのふんい気中で安定な特性を有していることが必要である。

従来，各社では抽出特性，ブリスタ特性などにより耐冷媒性を評価しているが，これらの結果と実機との相関性を正しく把(は)握するのは困難であった。また，最近，小形軽量化の目的からより耐熱度の高い電動機絶縁組織の開発が要求されており，この意味からも，従来の試験法と異なる耐冷媒試験法が必要となってきた。このような情勢にかんがみ，筆者らは，新しい機能評価試験法を開発し，これにより電動機絶縁組織の正しい評価が可能となった。

ここでは，フッ素系冷媒のうち，特に高分子材料に対する化学的作用が強いR-22を選んで，このふんい気中における絶縁材の劣化現象と電動機絶縁組織の評価試験結果について述べる。

2 試 料

2.1 冷媒と冷凍機油

冷媒（JIS K 1519）はR-22を使用した。R-22は，**表1**の化学式からわかるように，水素原子を1個含んでいる。これにより，R-12と比較して，高分子材料に対する溶解作用が強くなり，絶縁物の電気的特性にも大きな影響を与える。

冷凍機油（JIS K 2211特2号）に対する冷媒の溶解度は，R-12があらゆる混合比で溶けあうのに対し，R-22の溶解度は小さい。

2.2 マグネットワイヤとワニス

表2は供試マグネットワイヤの種類を示すものである。また，コイル処理ワニスとしては変性フェノール系のものおよびエポキシ系の2種類を使用した。

表1 R-12およびR-22の物理的性質 化学式からわかるように，R-22は水素原子を1個含んでいるため，溶解性が強くなる。

Table 1 Physical Properties of Fron R-12 and Fron R-22

項目		R-12	R-22
化学式		CCl_2F_2	$CHClF_2$
分子量		120.93	86.48
沸点	(1 atm・°C)	− 29.93	− 40.75
凝固点	(°C)	−158	−160
臨界温度	(°C)	112.0	96.0
臨界圧力	(atm)	40.6	49.12
臨界容積	(cc/mol)	217	165
臨界密度	(g/cc)	0.558	0.525
比重液	(30°C g/cc)	1.293	1.176
誘電率	(液)	2.13	6.11

表2 供試マグネットワイヤの種類(いずれもO種) 各種樹脂組成のものを選んだが，特にブリスタが発生しやすいポリエステル系，エステルイミド系のものに重点を置いた。

Table 2 Test Specimens of Various Magnet Wires (O grade)

マグネットワイヤ	導体径(mm)	本稿での略号	メーカー
変性ホルマール線	1.00	R-PVF	A社
ポリエステル線	〃	PEW	B社
ポリエステルイミド線(A)	〃	EIW-A	C社
〃 (B)	〃	EIW-B	D社
ポリエステルイミド線(C)	〃	EIW-C	A社
変性ホルマール／ポリアミドイミド ダブルコート	〃	RVF-AI	〃
ポリアミドイミド線	1.00	AIW	A社

3 オートクレーブ試験

3.1 試 験 法

試験の手順は，まず，オートクレーブ中に冷凍機油と，あらかじめ加熱処理した試料を真空脱気し，その後冷媒を封入（冷媒と油の重量比が1：1になるように）し，所定条件で浸せき劣化する。劣化試験終了後，オートクレーブを冷却して開封し絶縁材を恒温そう中で所定時間加熱後，各種の試験を行なっている。ここでは特に記述しない場合，オートクレーブ中の浸せきは125°C，7日間，恒温そう中の加熱は130°Cで行なっている。

* 日立製作所日立研究所 ** 日立製作所習志野工場

3.2　試験結果とその検討

前述の各種オートクレーブ試験のうち，ここでは，皮膜硬度，ブリスタ，過負荷特性の3種類の試験結果について述べる。

3.2.1　皮膜硬度特性

直線状の各種マグネットワイヤ試料(長さ100mm)をオートクレーブ中で浸せき劣化し，評価は鉛筆硬度で行なった。**表3**はこの結果を示したものである。これより，PEW（ポリエステル線）とEIW-A（ポリエステルイミド線A）の低下が特に大きく，次に低下が大きいのはEIW-B（ポリエステルイミド線B）で，これ以外の線の低下は小さい。以上の結果は125℃，7日間浸せきの値であるが，これよりさらに，高温，長時間劣化した場合の一例を**図1**に示した。同図は，R-PVF(変性ホルマール線）について調べたものであるが，その結果下記の2点が言える。

(1) 浸せき温度135℃では，200時間あたりで皮膜硬度が一定（2*H*）になり，それ以上浸せきしても特性の変化は見られない。

(2) 浸せき温度が150℃，180℃の高温になると，皮膜硬度は最初の100時間以内に急激に低下し，それ以上の浸せきでは，皮膜硬度は逆に高くなる。これは浸せき温度が高くなると最初は軟化，膨潤によって皮膜硬度は低下していくが，ある時点から熱劣化により皮膜組成の変化が生じ（これは外観の光沢変化からもうかがわれる），皮膜硬度は高くなるためで皮膜硬度試験はあまり高い浸せき温度で行なうと評価を誤るおそれのあることを示している。

表3　各種マグネットワイヤの鉛筆硬度特性　　PEW，EIW-Aのようにブリスタを発生しやすい線は鉛筆硬度も低下している。

Table 3 Softening of Various Magnet Wires

NO.	マグネットワイヤ	鉛筆硬度（試験前――試験後）
1	R-PVF	6*H*――5*H*
2	PEW	3*H*――*HB*
3	EIW-A	5*H*――2*H*
4	EIW-B	5*H*――3*H*
5	EIW-C	5*H*――4*H*
6	RVF-AI	6*H*――5*H*
7	AIW	6*H*――5*H*

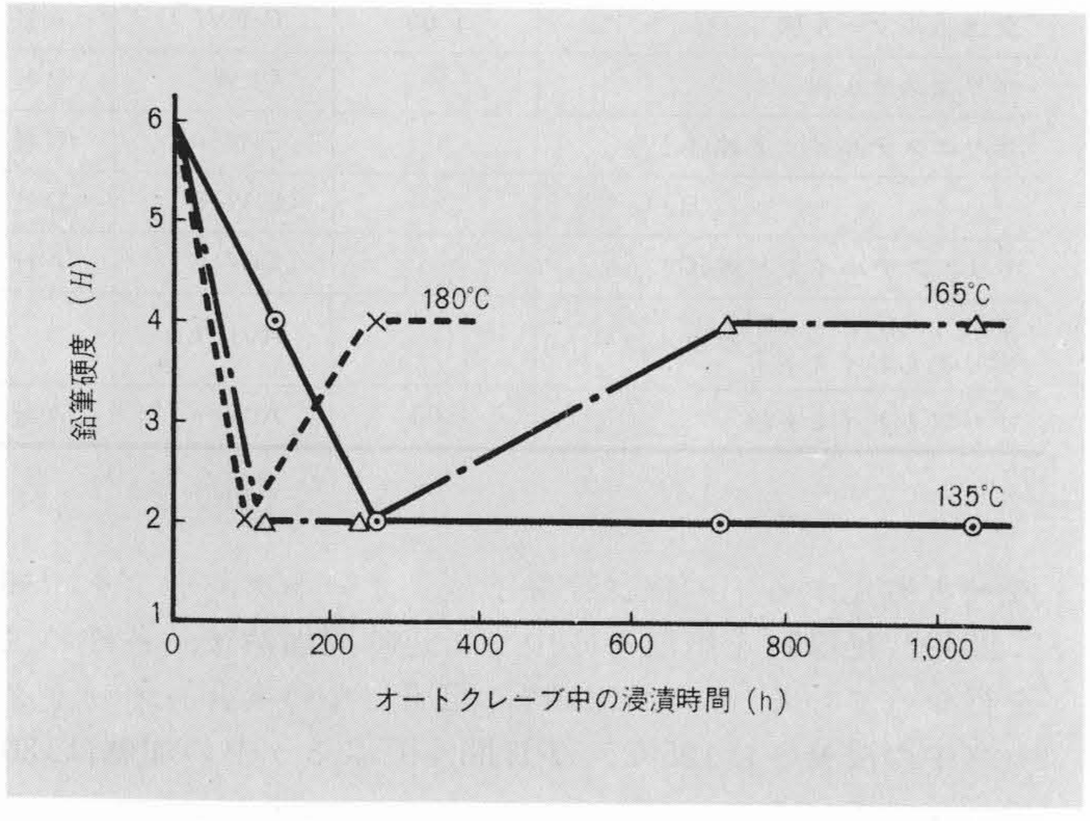


図1　R-PVFの鉛筆硬度特性　　皮膜硬度を調べるために鉛筆硬度法を使用した。

Fig. 1 Softening of R-PVF Wire Treated in the Mixture of Fron R-22 and Oil

3.2.2　ブリスタ特性[1]

ブリスタ試験法はJIS規格により大略定められているが，詳細な試験条件は各社ともまちまちの現状である。しかし，ブリスタ特性は試料の前処理条件や浸せき条件などの各種因子により敏感な影響を受けるので，試験条件を設定する際は慎重を期す必要がある。

すなわち，この因子として特に考えられるものに①オートクレーブ浸せき前の試料の前処理条件，②試料形状，③浸せき条件，④オートクレーブ開封後の加熱条件の四つがあげられる。

いま，これら各因子のレベルを変えた場合，ブリスタ特性はどのような影響を受けるか調べてみた。試料は，ブリスタが最もでやすいEIW-A，EIW-Bの2種類で検討した。

(1)　前処理の効果

対ねん状試料を前処理する際の加熱温度として，125℃，150℃200℃それに無処理の4段階のレベルを設定し，処理時間は4時間一定で検討した。**図2**はこの結果を示すものである。同図でわかるとおり，EIW-Aは125℃の処理温度まで大きなブリスタを発生するが，150℃，200℃の処理ではブリスタがほとんどでなくなる。EIW-Bは，無処理のとき中程度のブリスタが多数発生するが，125℃で処理するとブリスタはほとんどでなくなる。以上の結果から，一般に処理温度を高くするとブリスタはできにくくなることがわかる。この理由として，マグネットワイヤ皮膜の焼付きが不十分な場合，前処理工程中に乾燥が進んで皮膜が収縮し導体との接着が良くなることが考えられる。これを調べるために，EIW-Aについて，処理温度（処理時間4時間一定）とねん回はく離特性との関係を調べた。**図3**はこの結果を示すものである。これより180℃までは加熱処理するとねん回はく離特性が良くなることから，皮膜と導体間の接着はある程度改善されることがわかる。180℃以上の温度で逆に低下していくのは熱劣化によるものと考えられる。これよりEIW-Aは150～180℃の温度で前処理すると耐ブリスタ性は改善されると言える。また，処理時間については1時間程度で十分で，必要以上に長くしても熱劣化の影響がはいってきて逆に悪い結果になる。

(2)　試料形状の効果

直線状試料よりも対ねん状試料のほうが機械的ストレスが余分にかかるのでブリスタの発生ひん度は大きく，また，対ねん状試料でも，ストレス分布が各所で異なるので，ブリスタ状況も当然異なってくることが予想される。これをEIW-A（無処理）で調べた。**図4**は顕微鏡による観察結果を示すものである。同図より，①のより合わせ部で最も大きなブリスタを生じ，②のより合わせ口部では，らせん状の模様と大きなブリスタが同時に発生し，③の先端部では①と類似のブリスタが生じ，④の直線部では，試料作成時にはいったと思われる細いらせん状のストレス模様がはいる。以上より実機の場合では，ストレスが大きくかかるエンドフイル部のブリスタ発生に気をつける必要のあることがわかる。

(3)　浸せき温度の効果

浸せき温度が高過ぎると，前項の皮膜硬度特性と同じく，耐熱度の低いマグネットワイヤでは皮膜が変色してブリスタは生じにくくなるが，き裂がでる。また，浸せき温度が低く冷凍機油を含まないふんい気中で，ある種のマグネットワイヤにクレージング現象を見ることがある。後述のモートレッ

トオートクレーブ試験でも，低温冷媒のふりかかるところで同様の現象を観察した。

(4)　開封後の加熱条件の効果

オートクレーブを開封してから加熱するまでの気中放置時間によってブリスタ状況がどのように変わるかを調べた。**図5**は，恒温そう中で加熱するまでの放置時間を変えて，そのとき発生したブリスタの大きさを顕微鉄で観察したものである。これよりオートクレーブを開封してから24時間経過しても，まだ微小なブリスタを生ずるだけの冷媒が残っていることがわかる。

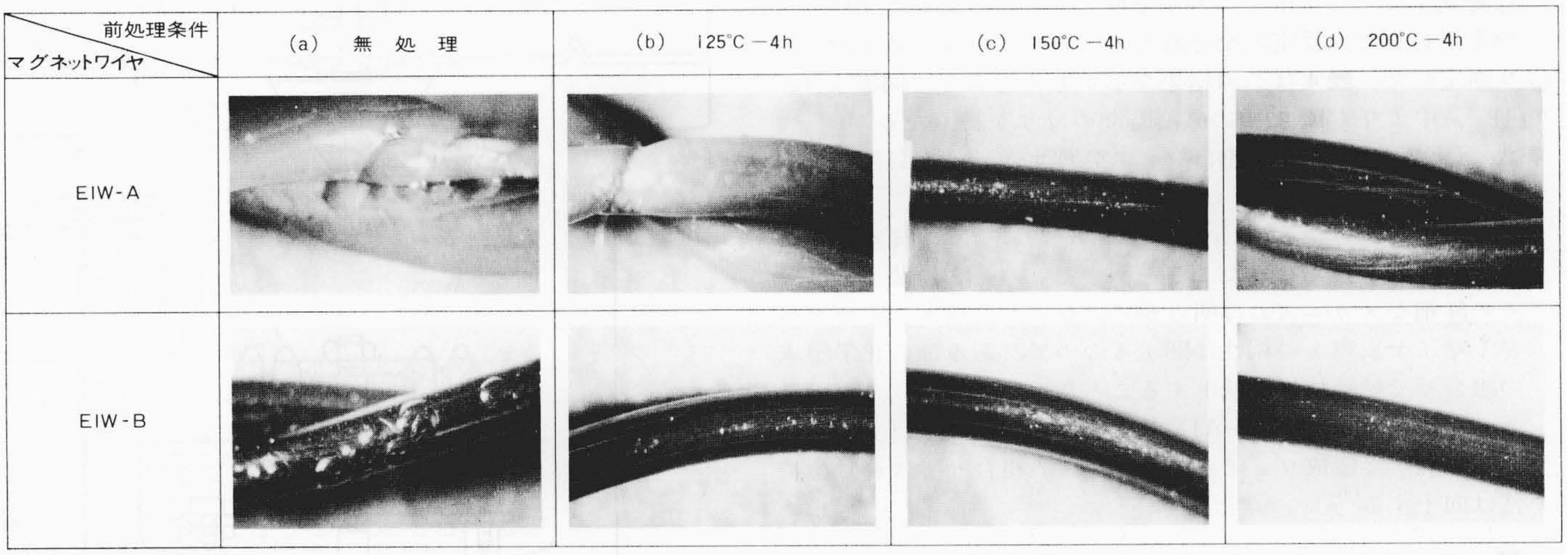


図2　前処理条件によるブリスタ状況(125°C −R-22＋冷凍機油)　前処理とは試料をオートクレーブ中に浸せきする前に加熱処理(Pre- bake)することを言う。

Fig. 2 Relation between Blistering and Pre-bake Conditions (Aging at 125°C in R-22 and Oil)

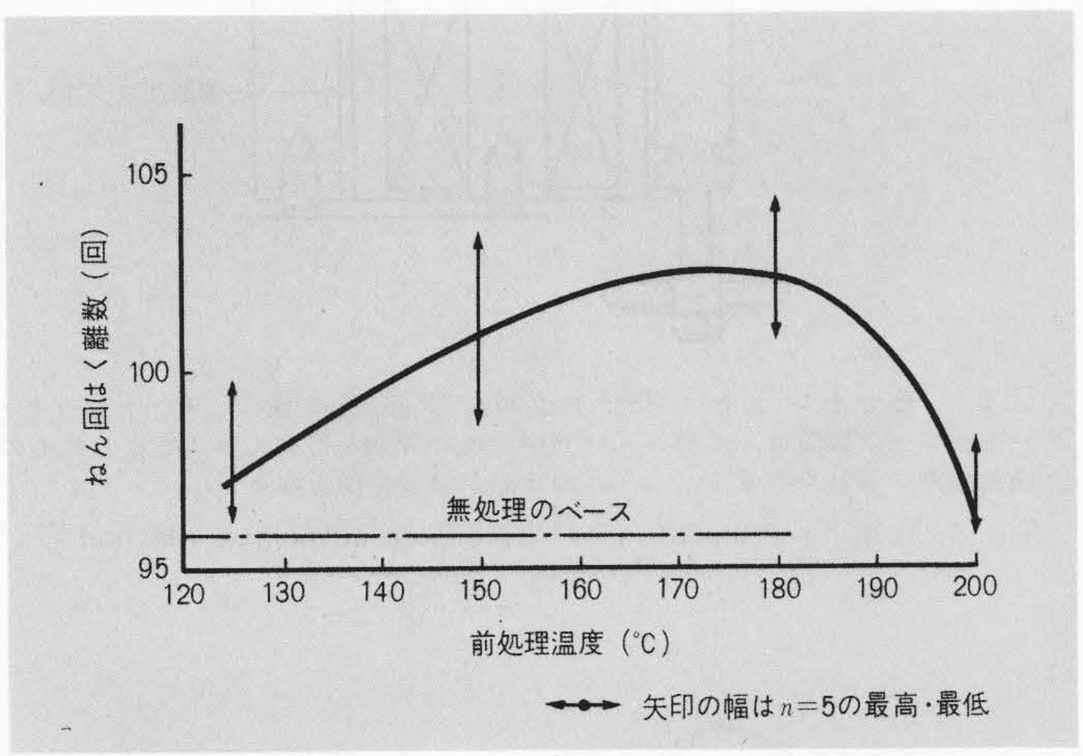


図3　前処理温度とねん回はく離の関係(EIW-A)　ねん回はく離とは，マグネットワイヤをより合わせて皮膜がはく離するまでのより合わせ回数で評価する。

Fig. 3 Results of Twist Test with Various Pre-bake Temperatures (Sample : EIW-A)

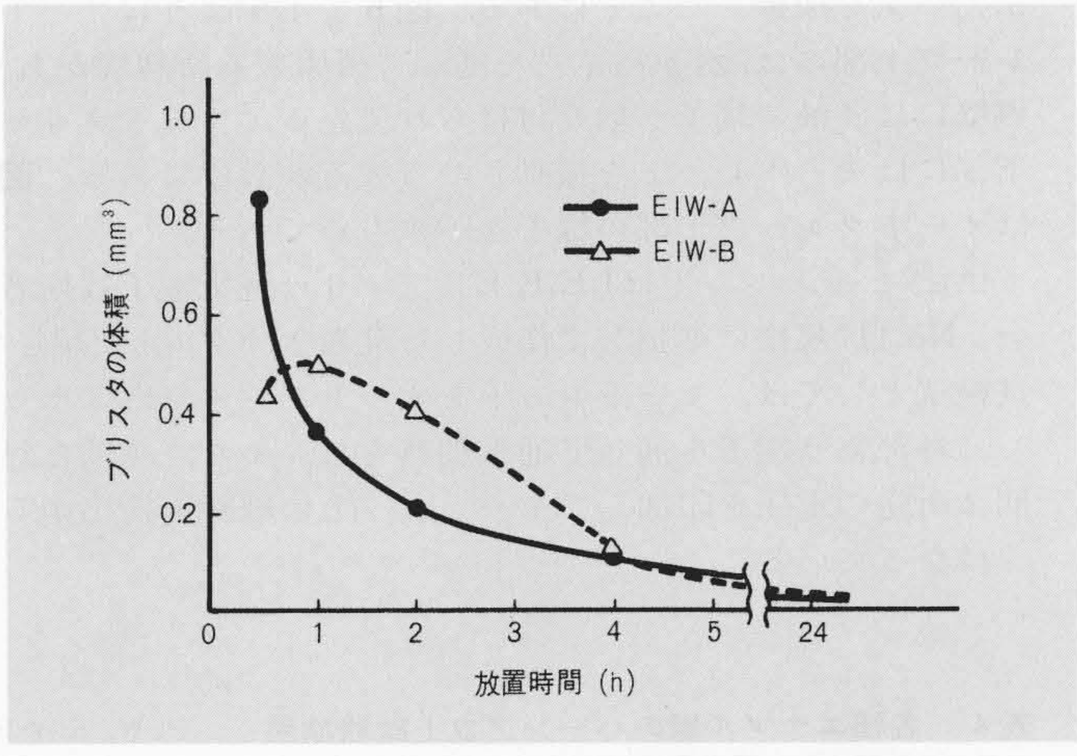


図5　放置時間とブリスタの大きさの関係　放置時間とはオートクレーブを開封してから，浸せき試料を恒温そう中に加熱するまでの時間を示す。また，ブリスタの体積は実測からモデル計算したものである。

Fig. 5 Variation of Blistering with the Time Elapsed at Room Temperature from Release of R-22

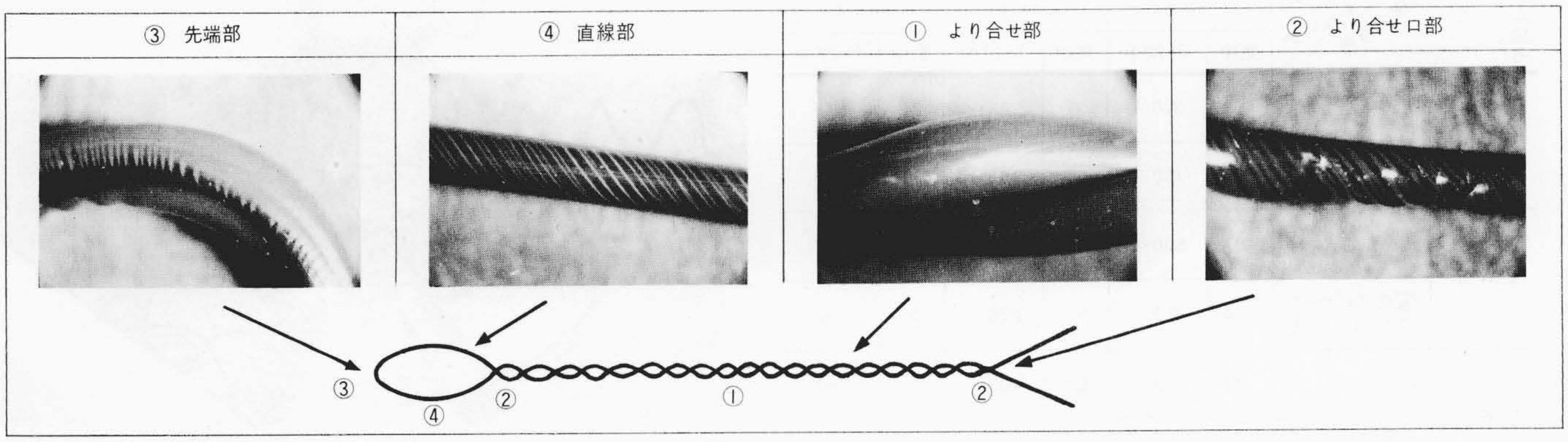


図4　対ねん状試料のストレス分布とブリスタ(EIW-A)　マグネットワイヤをより合わせたとき，各部のストレスが異なり，皮膜と導体との接着状態が異なるため，発泡(ぼう)の度合いも変化してくる。

Fig. 4 Relation between Stress Distribution and Blistering in Twist Sample (Sample : EIW-A)

3.2.3　過負荷特性[2]

バーンアウト試験には対ねん状試料を使用し，大電流を流して，皮膜相互の絶縁の強さを調べた。

過負荷特性は電流値をパラメータとして0.1Aの回路しゃ断器が動作するまでの時間で評価した。供試料として，①PEW，②EIW-B，③EIW-Cの3種類のマグネットワイヤーにおのおの変成フェノール系ワニスで処理したものおよび無処理のものを用意した。設定電流を流した後の平衡温度は熱電対により測定した。**表4**はこの結果を示すものである。同表より，

(1)　気中よりもR-22中の破断時間のほうが長くなる。

(2)　PEWおよびEIW-Bはワニス処理すると，過負荷特性が低下する。

以上のことがわかる。(1)の結果は，R-22による冷却効果のため破断時間が長くなったことを示している。(2)に関しては，その詳細なメカニズムは明らかではないが，ワニスとマグネットワイヤ皮膜との相性に関するもので，ある種の化学組成の組合せで絶縁特性が低下することを示している。ここでは述べなかったが，RVF-AI変性ホルマルポリアミドイミドダブルコートと変成フェノール系ワニスの組合せでは過負荷特性は向上する[3]。

4　モートレット・オートクレーブ試験[4]

4.1　試験法

本試験装置の特徴は，前述のとおり実際の密閉形圧縮機のふんい気を模擬したことにある。**図6**で示すようにオートクレーブ上部には，水がパイプを通して循環する冷却管があり，側壁には各種の端子が取り付けられている。オートクレーブ下部にはモートレットを振動させる装置が設けてある。**図7**はオートクレーブ上部の様子を示すものである。

供試モートレットはI.E.E.E（アメリカ電気電子技術者協会）No.117規格に準拠して作成した乱巻きコイルを使用した。試験法としては，モートレットをオートクレーブ内にセットし，外部より端子を通じて通電加熱をし，また，線間と対地間に所定の電圧を印加してモートレットの破断を検出するようになっている。

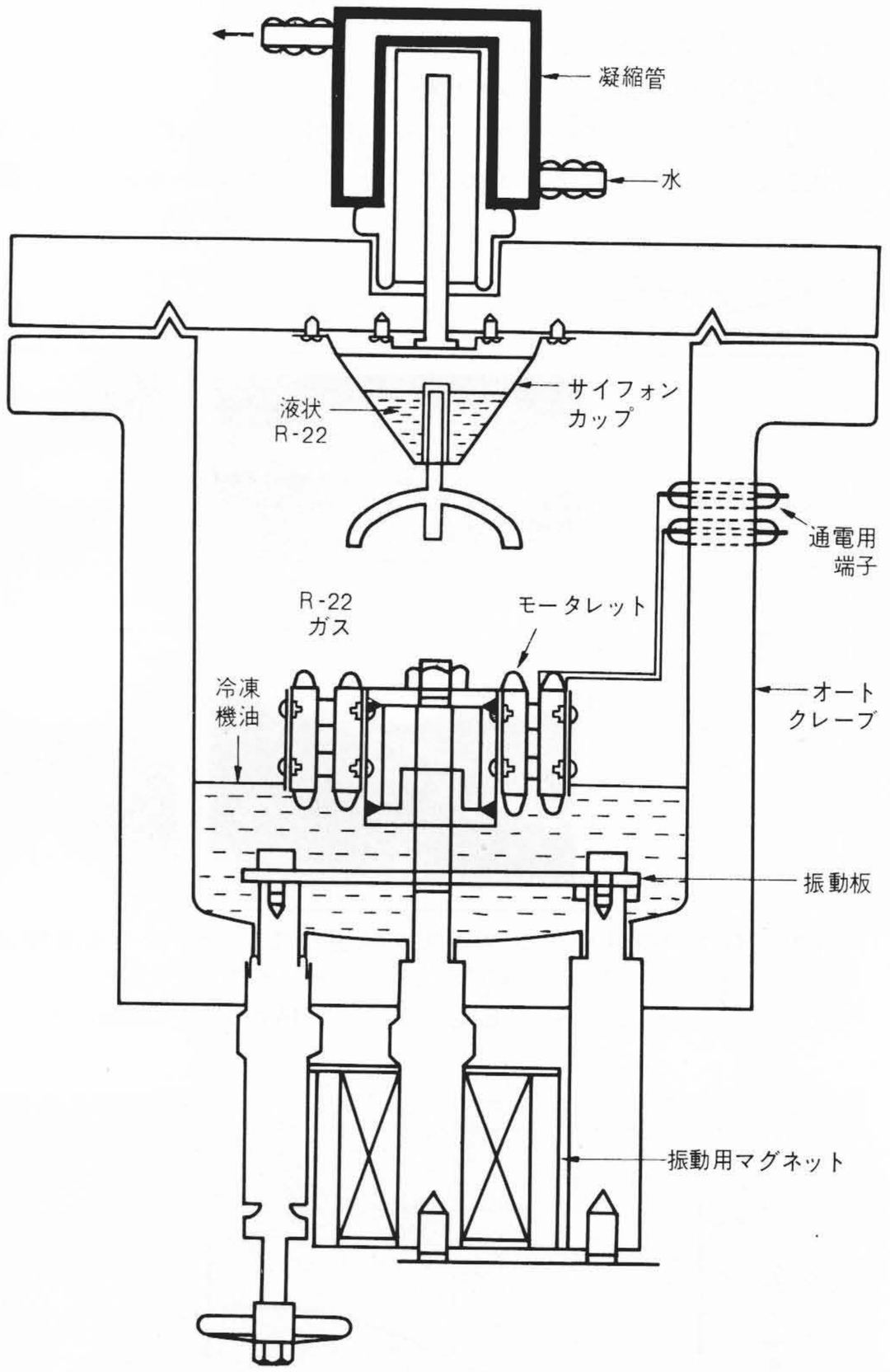


図6　モートレット・オートクレーブ試験装置　モートレット・オートクレーブ装置は，冷媒ふんい気中で機能評価を行なえるようにしたもので，通電加熱，液状冷媒滴下，コイルの振動装置が特徴となる。

Fig. 6　Testing Apparatus of Motorette-autoclave Method

表4　各種エナメル線のバーンアウト試験結果　PEW，EIW-Bではワニス処理すると過負荷特性は低下する。また，R-22中のほうが冷却効果があるので気中より寿命は長くなる。

Table 4　Overload Test Result of Various Enameled Wires

エナメル線名 ＼ 設定電流(A) / 平衡温度(°C) / 平衡電流(A) / ワニス処理の有無 / ふんい気		52		58		64	
		358		400		468	
		40.0		42.1		43.8	
		気中	R-22中	気中	R-22中	気中	R-22中
PEW	無処理	69	320	37	83	24	45
	変成フェノール系ワニス処理	49	150	36	66	29	40
EIW-B	無処理	91	500＜	56	350	34	87
	変成フェノール系ワニス処理	64	450	51	276	40	80
EIW-C	無処理	84	500＜	62	460	47	92
	変成フェノール系ワニス処理	142	500＜	71	500＜	43	180

注：1．表中の数字は破壊時間(s)　2．$n=5$の平均値

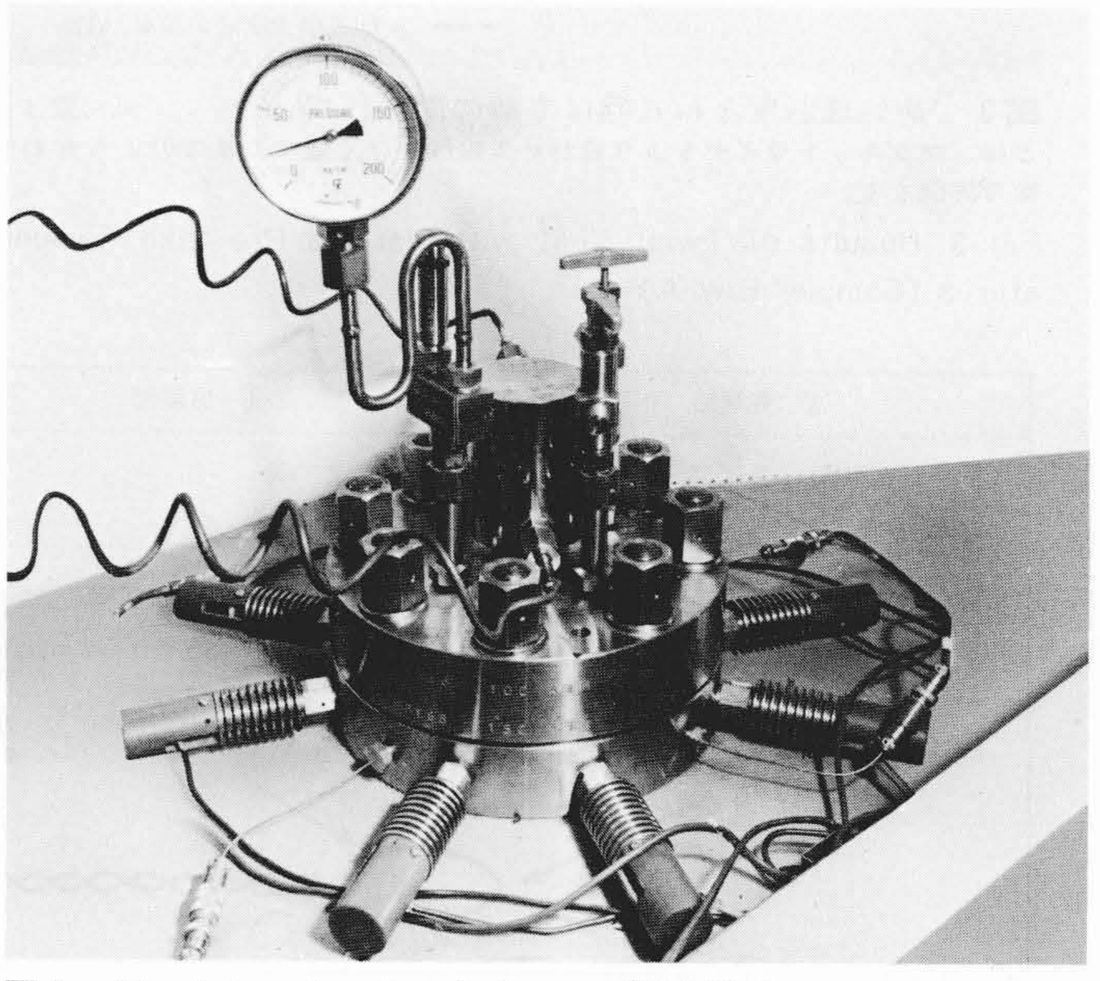


図7　モートレット・オートクレーブ試験装置　水冷による凝縮管部を写真で示したものである。

Fig. 7　Appearance of Motorette-autoclave Testing Vessel

冷却管を水冷すると内部の暖まった冷媒ガスが凝縮され，下のサイフォンカップ内にたまり，一定量になると排出されて下のモートレットにふりかかる。このサイフォンカップの動作間隔は内部圧力，水温により変動するが，本試験では約3～4分に調節した。本試験では通電1時間，放冷0.5時間を1サイクルとして寿命試験を行なったが，このときの巻線温度は**図8**のようになる。同図中に示したように，サイフォンの動作中は巻線が冷却され，設定温度より，最高30～40℃低くなる。

以上述べたほかに本装置の特徴は，モートレットへの通電電流を大きくして一種のバーンアウト試験を行なったり，冷却管の水温，流量を調節してモートレットにふりかかる液状冷媒の効果を調べたり，あるいは，振動の振幅を変えて機械的特性を調べたりすることができる点にある。

4.2　試験結果とその検討

表5はモートレット・オートクレーブ法による寿命試験の結果をオートクレーブ試験の結果と対比して示すものである。これで興味あることは，マグネットワイヤの種類によっては破壊の原因が，両者の試験法で異なることである。すなわち，PEW，EIW-Aは，モートレット・オートクレーブ法で寿命評価を行なった場合，ほとんど，コイルエンドに発生したブリスタが破壊原因となるのに対し，オートクレーブ法では浸せき温度が高いためにブリスタの発生はなく，皮膜の熱的，化学的劣化に起因するものであった。また，R-PVFでは，180℃でモートレット・オートクレーブ試験を行なうと皮膜のプラスチックフローを生じて，通電直後に破断するが，オートクレーブ法ではこのような現象は観察されなかった。

モートレット・オートクレーブ試験で生じた上述の現象は，別の実機試験においても観察され，この機能評価試験の結果が実機の故障原因と十分対応できることが確認されている。

モートレット・オートクレーブ試験における破壊状況の一例は**図9**に示すとおりである。PEW，EIW-Aは同図中で示したように大きなブリスタを発生している。また，EIW-Aは液状冷媒のふりかかるコイルエンド上部に，図示のような，クレージングを発生した。AIW（ポリアミドイミド線）に生じたような微小なブリスタはほとんどモートレットの破壊に結びつかないことがわかった。

ブリスタの形状と発生個所について調べてみると特徴的な関連性があることがわかる。すなわち，線径の½以上の大きなブリスタを発生するのは油中に浸せきした部分のエンドターン部に集中しており，微小ブリスタはエンドターン上部に集中している。大きなブリスタが油中部分に集中するのは，油中に溶解しているR-22量が多いためで，3のオートクレーブ試験で検討したように，ブリスタの生じやすい線，PEWやEIW-Aなどは，皮膜中に大きなブリスタを生ずるだけの冷媒が凝縮するものと考えられる。これに対し，AIWのように，R-22ガスのエンドターン部で微小ブリスタを発生する線は，巻線の加熱速度が油中よりも，R-22ガス中のほうが急であるためと考えられる。すなわち，AIWの皮膜はR-22ガスの拡散がゆるやかなため，凝縮冷媒量がわずかで，急激に気化させねば皮膜を押し上げるだけの力が生じないためと考えられる。

モートレットの対地絶縁材として使用したポリエチレンテレフタレートフィルムは，180℃の高温では，マグネットワイヤに融着した。

次に，R-PVFとPEWの2種類のマグネットワイヤについて，モートレット・オートクレーブ法とオートクレーブ法による寿命直線の結果は**図10**に示すとおりである。これにより計算した活性化エネルギーを気中加熱の結果と対比して示したのが**表6**である。試験温度が高いところでモートレット・オートクレーブ法の寿命が短くなるのは，皮膜の熱軟化やブリスタなどの現象を的確に検知しているためで，オートクレーブ法では皮膜の熱劣化がはなはだしくてもはく離していなけれ

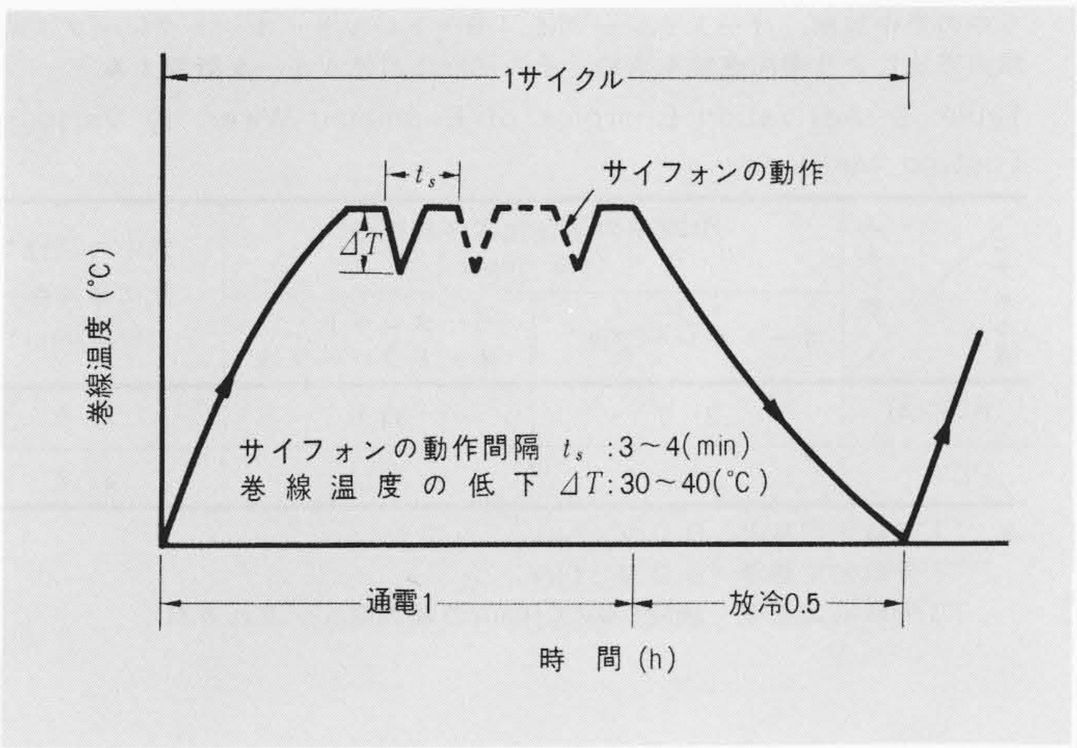


図8　モートレットの加熱サイクル　　モートレットを通電加熱して，周囲ふんい気が一定温度になると，液状冷媒が滴下して，図示のように一定のサイクルで巻線温度が変動する。

Fig. 8 Heat-cycle on Motorettes

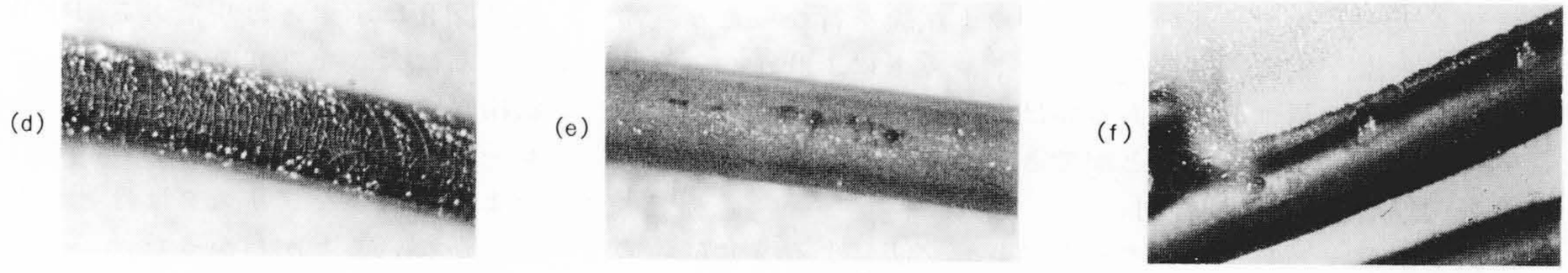
表5　寿命試験の結果　　オートクレーブ法とモートレット・オートクレーブ法によるマグネットワイヤの劣化状況は異なる。たとえば，PEWはモートレット・オートクレブ法ではブリスタによる破断であるが，オートクレーブ法では皮膜の熱的劣化が大きな原因となっている。

Table 5 Results of Evaluation Test

試験温度(℃)	試験法＼供試マグネットワイヤ＼寿命	寿命 {モートレット・オートクレーブ法：コイル破断までのサイクル数 / オートクレーブ法：破壊電圧1kVまで低下する時間(h)} R-PVF	PEW	EIW-A	AIW
160	モートレット・オートクレーブ法	110（皮膜の黒色化）	205（大きなブリスタ）	881（大きなブリスタ）	OK*
	オートクレーブ法	800（皮膜の黒色化）	1,000（皮膜の光沢失う）	OK*	OK*
180	モートレット・オートクレーブ法	<1（皮膜の流出）	21（大きなブリスタ）	60（大きなブリスタ）	OK*
	オートクレーブ法	200（皮膜の黒色化）	300（皮膜のはく脱）	7,000（皮膜の光沢失う）	OK*

注：　*OKはモートレット・オートクレーブ法による寿命1,000 ≦ およびオートクレーブ法による寿命20,000h＜を示す。

マグネットワイヤ	P E W	E I W－A	E I W－B
劣化条件	180℃－21h	160℃－881h	180℃－170h
破断状況	リスタより亀裂発生	エンドコイル下部のブリスタ発生	エンドコイル下部のブリスタ発生



マグネットワイヤ	E I W－A	A I W	ポリエチレンテレフタレートフイルム
劣化条件	180℃－63h	190℃－81h	180℃－81h
破断状況	クレージングと微小ブリスタ発生	エンドコイル上部のブリスタ発生	フィルムが一部流出

図9　各種モートレットの破断状況　　モートレットに使用したマグネットワイヤの種類により，ブリスタの発生状況が異なる。PEW，EIW-A，Bは，いずれもブリスタから破断に至っている。

Fig. 9 Test Result of Various Motorettes

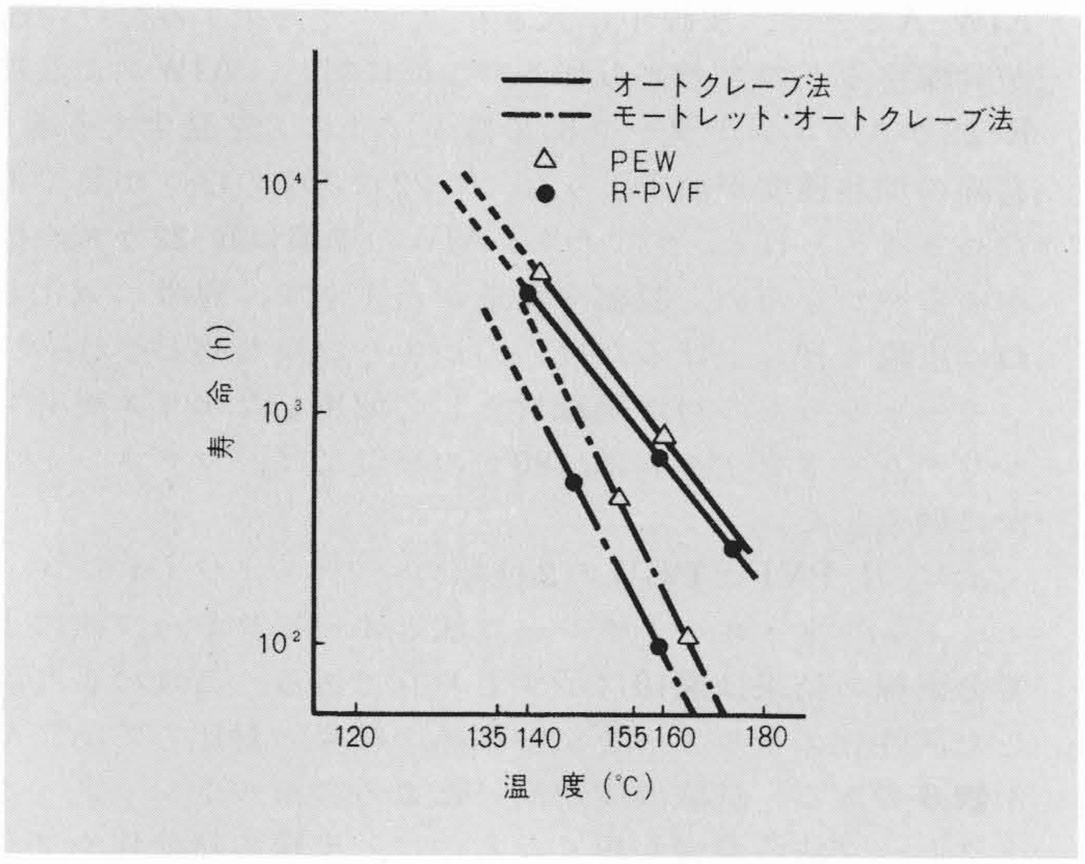


図10　各種マグネットワイヤの寿命直線　　オートクレーブ法，モートレット・オートクレーブ法による寿命の違いについて述べた。試験条件，寿命判定基準により直線こう配に差がでている。

Fig. 10 Life Curves of Magnet Wire in Refrigerant Oil

表6　各種試験法によるエナメル線の活性化エネルギー　　恒温そう中の気中加熱，オートクレーブ法，モートレット・オートクレーブ法の3種類の方法により寿命直線を求め，その活性化エネルギーを計算する。

Table 6 Activation Energies of Enameled Wires by Various Testing Methods

エナメル線 ＼ ふんい気	R-22中の活性化エネルギー (kcal/mol)		気中の活性*2 化エネルギー (kcal/mol)
	オートクレーブ法*1	モータレット・オートクレーブ法*3	
RVF-AI	21.0	33.6	29.9
PEW	25.2	36.2	32.8

注：*1 寿命判定基準　B.D.V　1kV
　　*2 寿命判定基準　B.D.V　1kV
　　*3 寿命判定基準　線間100Vで10mAの漏洩電流が流れる点

5 結　言

今までの耐冷媒試験は，主として絶縁材をただ浸せき劣化させるだけの静的な試験であるため，実機との相関性をつかむことは困難であったが，ここで紹介したモートレット・オートクレーブ法により，実機の故障原因と対応できる結果が得られるようになった。

具体的には，ブリスタの形状とコイル破断との関連性，オートクレーブ法とモートレット・オートクレーブ法による寿命評価の違いなどに重点を置いて述べた。

しかし，本文でも触れたように，過負荷特性とワニス処理の関係など，冷媒中の特性評価に関して，まだ解明されていない問題が多く残されており，今後さらに十分な検討を要するところである。

終わりに臨み，本研究にご協力いただいた日立電線株式会社，日立化成工業株式会社および日立製作所習志野工場，同栃木工場，同清水工場の関係各位に厚く謝意を表する。

参考文献

(1) 徳永，宮下：昭45年電気四学会連合大会　231
(2) Harold L. Emmons：Insulation Nov. Dec.（1967）
(3) 黒川，吉崎：日立評論　**53**，857（昭46-9）
(4) 徳永，宮下：昭45年電気学会東京支部大会　102