

電動機巻線処理に対する電流加熱の応用

足 立 義 文* 野 本 栄**

Application of the Electric-Current Heating to the Drying of Motor Winding Insulations

By Yoshifumi Adachi and Sakae Nomoto

Kameido Works, Hitachi, Ltd.

Abstract

For the drying of varnish on windings of small sized motors, there have been many heating methods in use, such as steam heating, hot air heating, electric heater method, etc. These methods are commonly characterized by indirect heating by means of convection of heated air, which takes long drying time and needs relatively large facilities.

In an effort to remedy these short comings, the writers have devised an electric current heating method. In this method, heat is generated inside windings from ohmic loss, so the varnish is dried from inside.

〔Ⅰ〕 緒 言

小型汎用電動機の量産工場に於ける巻線の絶縁ワニス乾燥には、従来蒸気、熱風、電熱等の乾燥方法が採られてきた。然しながらこれ等の方法はすべて空気を媒体とした対流加熱方法による外部からの間接加熱であるので乾燥時間が長くなると共に保温と熱放散の点から乾燥設備が大きくなる。又一方ワニスの乾燥機構がコイルの外部から加熱され乾燥する為、内面からのワニス揮発成分によるピンホールが出来易く、為に耐湿、耐電圧性等をそこなう欠点がある。従つて筆者は前述の欠点を除去し電動機絶縁特性を向上させる為にはコイル自身に直接電流を流し巻線のオーム損による発熱を利用する——電流乾燥法と名付ける——乾燥法の研究に着手し、これが現場実用化に努力した結果次の如き所期の目的を達した。

即ち従来の電熱、或いは電熱熱風乾燥法に比して、更に優秀な耐湿メグ特性を得ると共に乾燥時間は $2/3$ に、消費電力量は $1/4$ に節約出来て設備の簡易化、流れ生産形態との直結等成果は極めて良好である。以下本研究結果に就いて報告する。

〔Ⅱ〕 理 論 的 考 察

（１） 電 熱 乾 燥 法

電熱乾燥法は乾燥器内の空気を媒体として、熱源であるニクロム線の熱を被乾燥物に伝へて乾燥させる方法で

あるため熱源の熱を途中損失なく有効に使用出来る様に設備は完全密閉式が採られている。かかる完全密閉乾燥器にしても器内の温度を均一に保つ事は仲々困難な問題であると共に、戸の開閉による熱の損失を補い、規定の温度に上昇せしめる為に数時間を要する。

一方ワニス乾燥機構は乾燥ワニス中の溶剤である揮発分の蒸発に伴い、ワニス主成分の酸化重合硬化によつて絶縁被膜が出来るのであるが、酸化重合作用は外面から熱を受けるためワニス被膜表面から促進され、内面の揮発分は表面の硬化被膜を透過して乾燥する為にピンホールが出来易く、耐絶縁性、耐電圧性が悪くなる原因になる。以上の如く電熱乾燥法は電力、乾燥時間、並びに設備上大なる損失がある。

（２） 電 流 乾 燥 法

前述せる電熱乾燥法の損失大なる最大原因は空気を媒体とせる乾燥法である処に起因するのであるから、被乾燥物自身が発熱体であれば、この損失は補われる。かかる考え方に基いて応用されたのが高周波乾燥であり、電流乾燥法である。然しながら高周波乾燥は設備費に多額を要し且つ維持費が他の乾燥法に比して大きい。発振調整は専門技術者でなければ現場作業では困難であるという不便がある。これに反して電流乾燥法はコイルを直列又は並列に結線し、その両線端に電源を入れる事に依り線自身のオーム損により発熱し、ワニス被膜の内面から乾燥して行く為にピンホールの問題もなく、且つ媒体による熱損失もなくなる。斯くの如く乾燥効果が理論的

* ** 日立製作所亀戸工場

に他の乾燥法に比して良好である。

〔Ⅲ〕 研 究 の 方 法

以上の特長に基づき先づ現在応用せんとする機種の形状、特性を調べこれについて電流乾燥の基礎条件たる電圧の印加法、加熱条件に応じた電流の決定に就いて検討しこの結果に基づいて従来の方法と比較実験を行ないこの効果を検討した。

(1) 被加熱物の形状

被加熱物の形状を図示すれば第1図の通りである。

第1図に於て(a)は二層重巻線の三相誘導電動機ステーター、(b)は鎖状巻線の反撥起動单相電動機ステーター、(c)は反撥起動单相電動機の回転子巻線である。

(2) 結線方法

従来電流乾燥として絶縁抵抗の回復、修理等に用いられていた方法には一応次の如きものがある。

(a) インピーダンス乾燥 回転子を短絡又は拘束しインピーダンス電圧以下の低電圧を巻線に加える方法

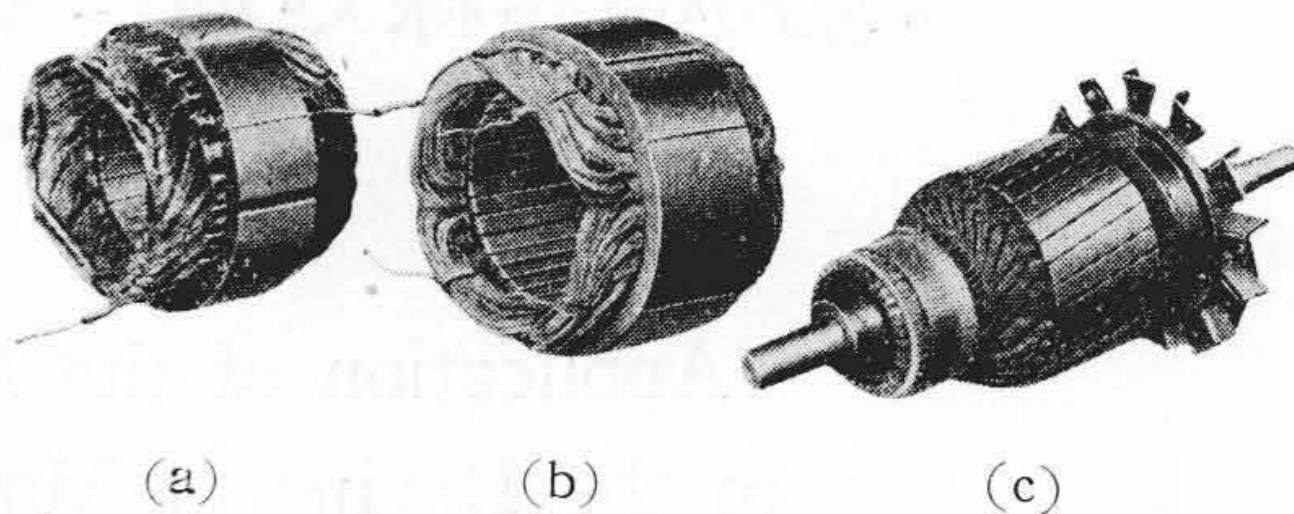
(b) 低電圧無負荷乾燥 端子に定格電圧の $1/2 \sim 1/3$ を加えて運転する方法

(c) 特殊結線による通電乾燥 適当に結線をして直流を流す方法

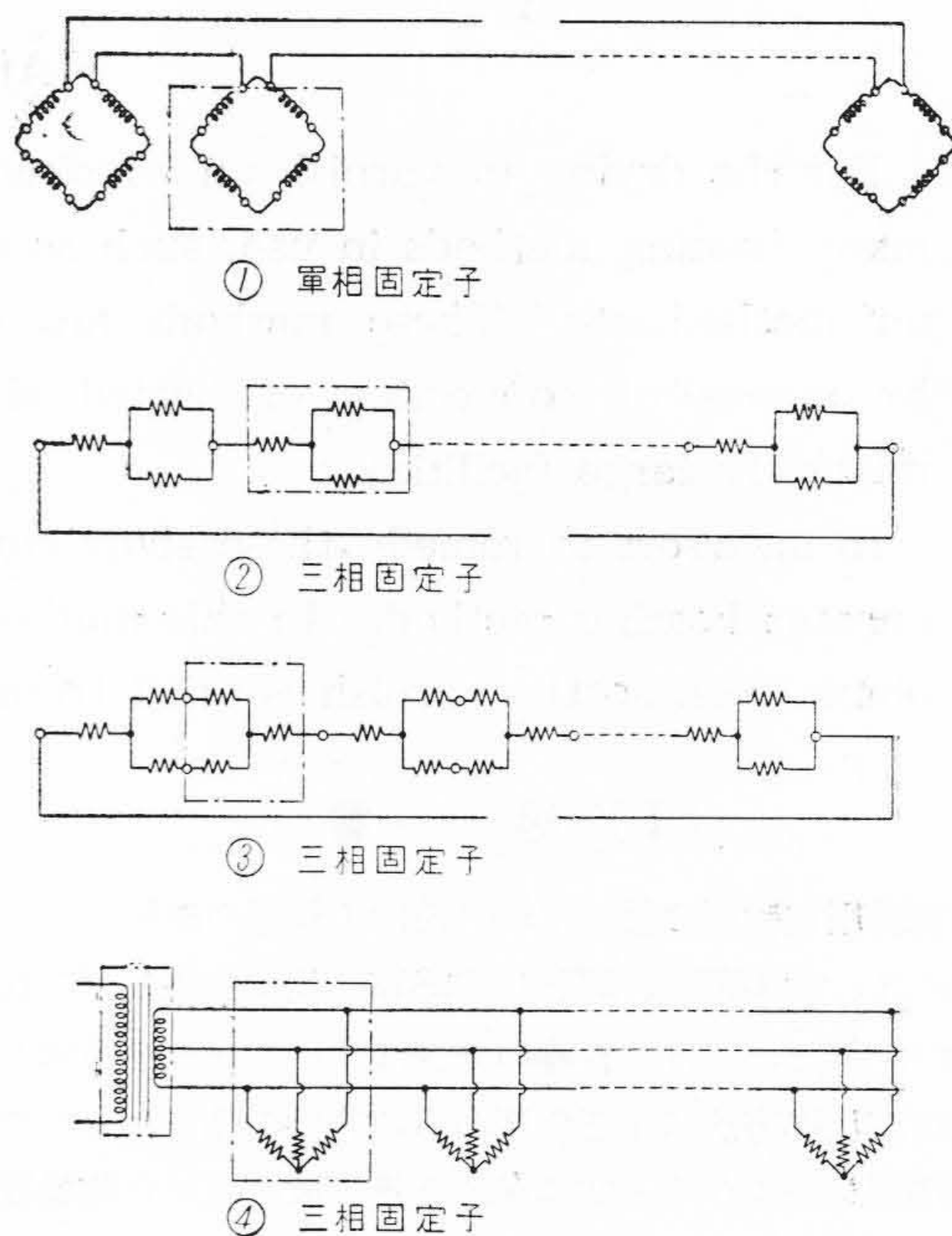
これらの方法は製作途中の固定子の乾燥法としては(a)は回転子を使用すること、(b)は組立てる必要があること、(c)は直流電源が必要なこと等の為適当でない。そこで次の様な結線方法で各機種、各馬力に応じて数台直列に固定子巻線を接続し、両端に 200V 50 $\sim$ の交流を印加するようにし、固定子巻線が丁度 2~3 時間で 110 $^{\circ}$ C に達するような接続台数を決めた。即ち单相反撥電動機の固定子巻線は第2図①の如き結線としたが、三相電動機の大部分は固定子巻線は星型結線となつていたので、その接続方法は第2図②、③、④の如き3種類の方法が考えられる。これらの中、单相固定子は問題ないが三相固定子の場合は上記三方法の中④は低電圧大電流の変圧器が必要であるので、設備の点に於て②、③を採用し、この結線方法に於て各馬力別に直列に接続する箇所を温度上昇速度、及び 110 $^{\circ}$ C の一定保持を考慮して決めたのである。

(3) 電熱熱風乾燥法と電流乾燥法との比較

上述の結線方法によつて電熱熱風乾燥と電流乾燥に就いて絶縁抵抗の上昇と時間との関係、固定子の温度分布耐湿特性、絶縁耐力、消費電力量等に就いて次の様な方法で比較実験を行なつた。



第1図 電機子巻線の形状
Fig. 1. Structures of Motor Winding



第2図 結線図
Fig. 2. Connection Diagram

(a) 絶縁抵抗の上昇と乾燥時間

絶縁ワニスの乾燥過程、並びにその酸化重合が完全であるか否かを機械的に、又物理的に測定する事は困難である。従つて本実験に於いては絶縁抵抗を測定しその上昇の曲線が平衡状態に達した時を以つて一応酸化重合が完了したものと見做した。

先づ6ヶの試料を取り、乾燥器に入れて一定時間毎に 500 V メガーで絶縁抵抗値を測定した。コイルの上昇温度はコイルエンドの部分に水銀寒暖計をパテで完全に貼付け、パテの色は絶縁ワニスと同色にして測定した。

上述の測定方法を図示すれば第3図の通りである。

(b) 固定子の温度分布測定

電流乾燥の場合は直接コイルの温度を測り、電熱熱風乾燥の場合は炉内の温度分布を測定する事にした。これは電流乾燥の場合は(2)の結線方法で述べた如く、三相固定子では並列に接続される部分があるので他の部分に



第3図 巻線温度測定
Fig. 3. Temperature Measurement diagram of Winding

比して温度上昇少く、又電熱熱風乾燥に於いては炉内温度均一度が問題になるからである。而してこの温度差の大小は絶縁度に大いに影響する為極めて重要な問題であるので慎重に測定する事にした。

(c) 耐湿特性の測定

汎用電動機に於いては高温高湿時に於ける絶縁抵抗の低下が製品の良否を決定する重要な要素の一つである。この耐湿性に影響するものとしては使用ワニスの特性、ワニスの濃度、粘度、附着量、乾燥度等がある。此等の中乾燥方法、乾燥時間に依つて影響される乾燥度と内部加熱と外部加熱との差によるワニス皮膜への影響等が耐湿特性に及ぼす度合を見る為絶縁処理を施したものを恒温恒湿槽に入れて温度 40°C, 湿度 90%, 168 時間の条件で比較した。

(d) 絶縁耐压試験

J. E. S の試験規程に基づき、両試料に就いて耐湿試験終了直後、コイル、アース間に試験電圧を印加して耐压試験を行つた。

(e) 消費電力

電流乾燥は第4図、電熱熱風乾燥法は第5図に示す装置で乾燥に要する電力量を測定した。

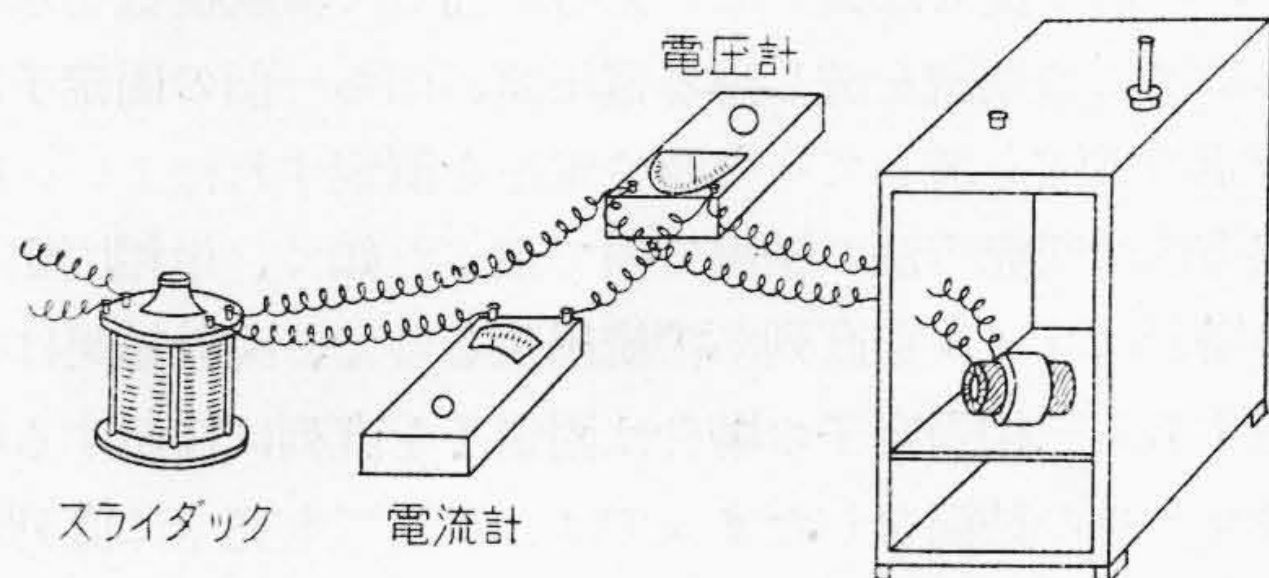
〔IV〕 実験結果及び考察

(1) 各機種種の接続個数と電流値との関係

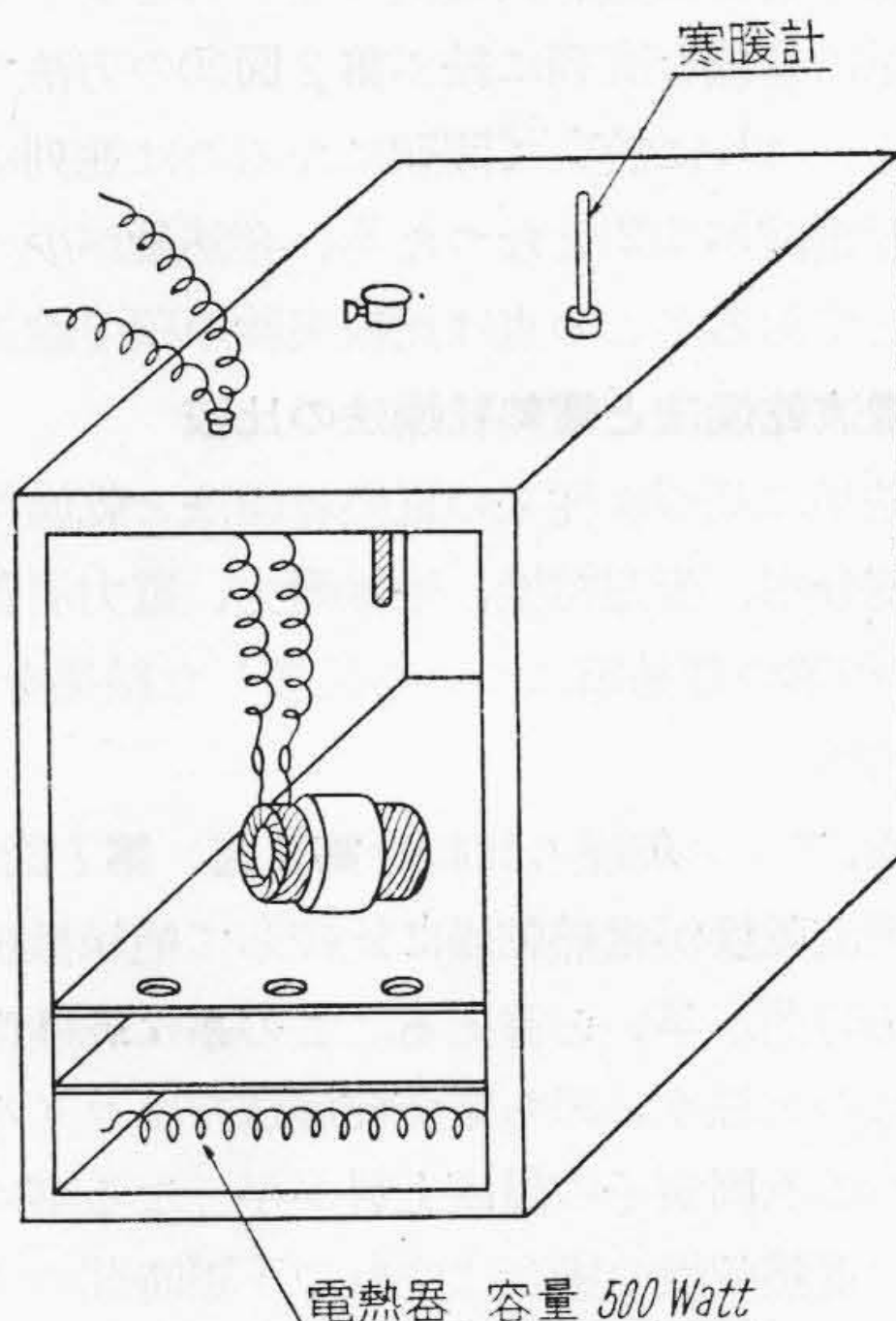
三相汎用電動機 1/2, 1, 2, 3HP の接続個数及び電流値の関係は第1表に示す通りである。

第1表は試料の両端に 200V, 50 $\sim$ の電圧を印加した場合、巻線温度を約2時間で所要温度まで高め且つその温度を維持し得る様な結線台数及びその時の電流値を表はしたものであるが、加熱電流を概略推定し得る為、第2表に全負荷電流との関係を示した。

第3表の値から加熱電流は夫々の全負荷電流の約 1.3



第5図 電流乾燥装置
Fig. 5. Electric Current Heating Apparatus



第5図 電熱乾燥装置
Fig. 5. Electric Heating Apparatus

第1表 電 流 値 表
Table 1. Table of Electric Current Value

	機 種 別			
	1/2 HP	1 HP	2 HP	3 HP
結線台数	4 台	6 台	6 台	7 台
電 流 値	2.5 A	4.5 A	8 A	10 A

註 電流値はコイル温度が 110°C になる時間を 2 時間とした場合である。

第2表 加熱電流計算表
Table 2. Calculation of Heating-Current

項 別	1/2 HP	1 HP	2 HP	3 HP
接 結 法	人	人	人	人
全負荷電流 (A)	1.7 A	3.2 A	6.0 A	8.5 A
加熱電流 (A)	2.5 A	4.5 A	8.0 A	12 A
加熱電流/ 全負荷電流	1.48	1.40	1.33	1.41
力 率 %	0.43	0.48	0.4	0.45

～1.5 倍を流せば良いといえる。而して接続個数を求めるにはこの電流を流し得る電圧値、即ち一個の固定子に所定の電流を流してその時の電圧を測定すればよい。結線方法は研究方法の結線の項で述べた如く、単相固定子の場合コイルを直列に接続出来るので、実験結果は省略する。三相固定子の場合固定子を直列に接続する場合コイルの結線をしたまゝではどうしても完全に直列には出来ないので変圧器で電圧を低くして固定子の三相巻線に並列に電流を供給する方法をも考慮したが、この方法は実用化の場合低電圧大電流の変圧器を要するので一応省略し単に巻線を直列に結ぶ第2図②の方法で実験したのである。こゝに於いて問題になるのは並列になつた部分は通過電流が1/2 となつた為、発熱量が少く温度差が出ることであるがこの点は比較実験の項で論述する。

(2) 電流乾燥法と電熱乾燥法の比較

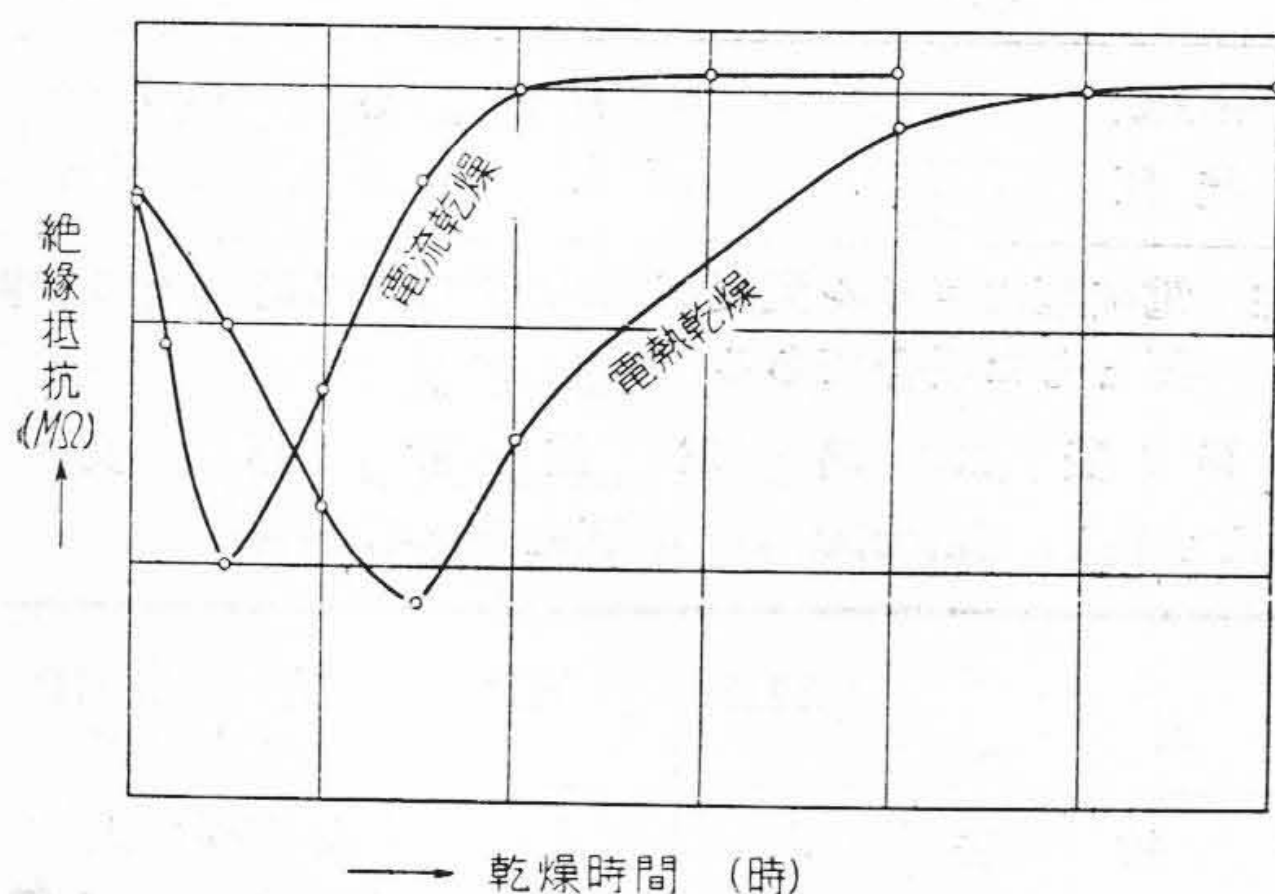
上述の結果に基づき従来の電熱乾燥法と乾燥特性、固定子の温度分布、耐湿特性、絶縁耐力、電力消費量、設備の大小、作業の難易等について比較した結果を述べる。

a) 乾燥特性

予備乾燥、ワニス乾燥の比較を第6図、第7図に示す。上図より電流乾燥が電熱乾燥に比較して絶縁抵抗値の飽和に達する時間が早いと言える。この事は乾燥理論の差異によるものと思う。即ち電流乾燥法ではコイル自身が発熱体である為固定子の温度上昇が早くなる事に依るものであり、電熱乾燥の場合は空気の予熱時間のずれがある為、ワニス膜の加熱が遅れるのである。この結果乾燥時間が短縮される。

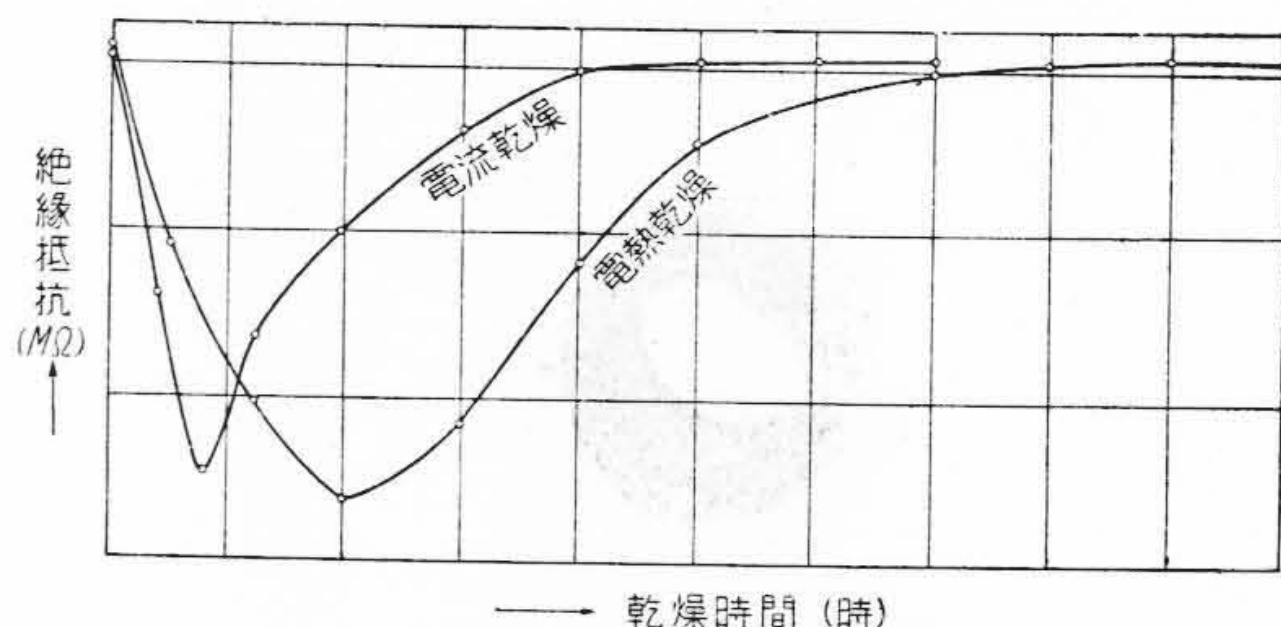
b) 固定子の温度分布

ワニス乾燥に於いて均一な加熱を行う事が理想である。然しながら従来の電熱乾燥に於いては内部の電熱線の配置、炉の構造によつて差はあるが、その試料の位置



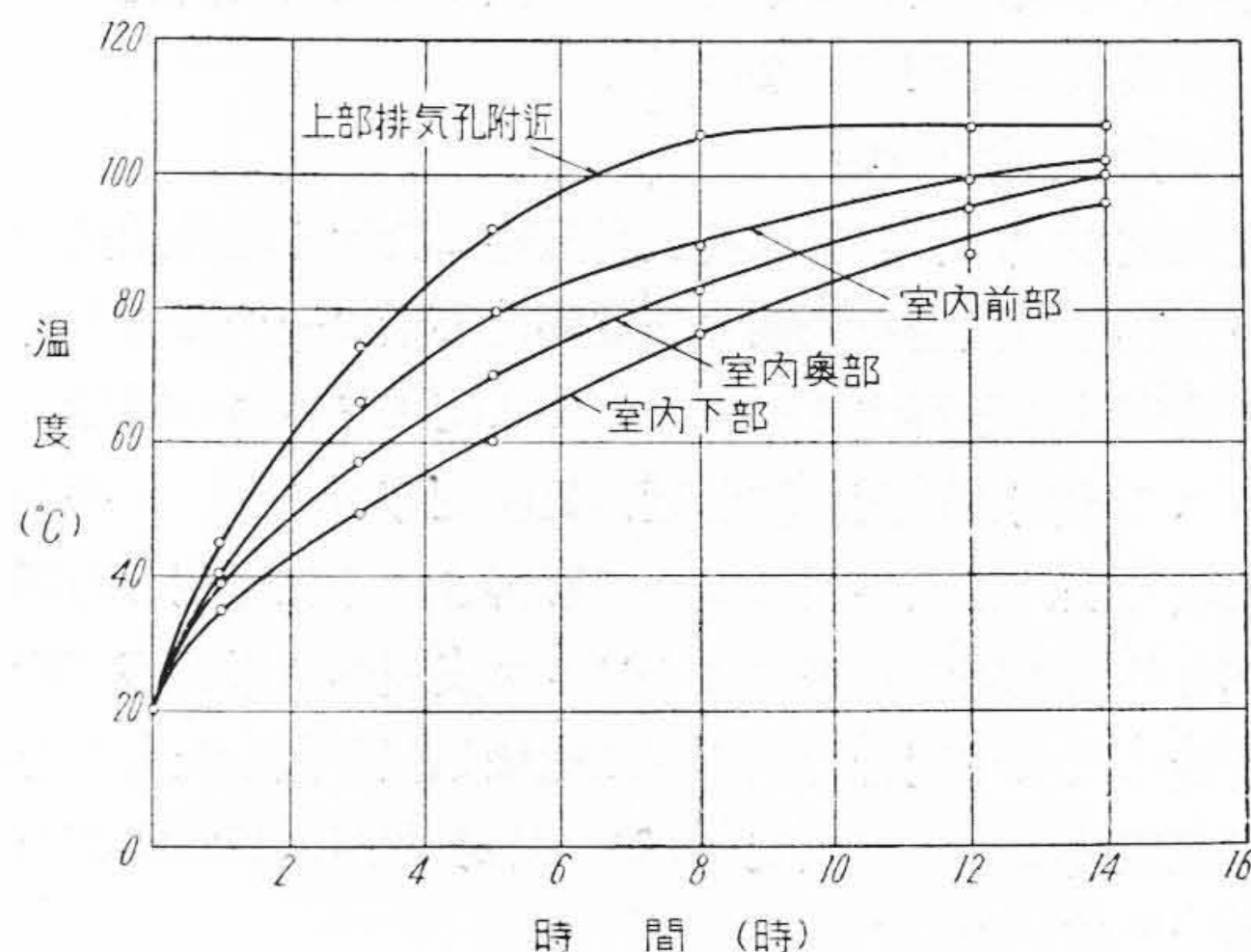
第6図 予備乾燥に於ける乾燥時間と絶縁抵抗の関係
Fig. 6. Relation between the Dry-up Time and Insulation Resistance in the Pre-heating Process

に依り $10^{\circ}\text{C} \sim 20^{\circ}\text{C}$ 近くの温度差がある。この一例を示せば第8図の如くである。第8図に示されている低温部に置かれた固定子を基準として乾燥時間を決定するので

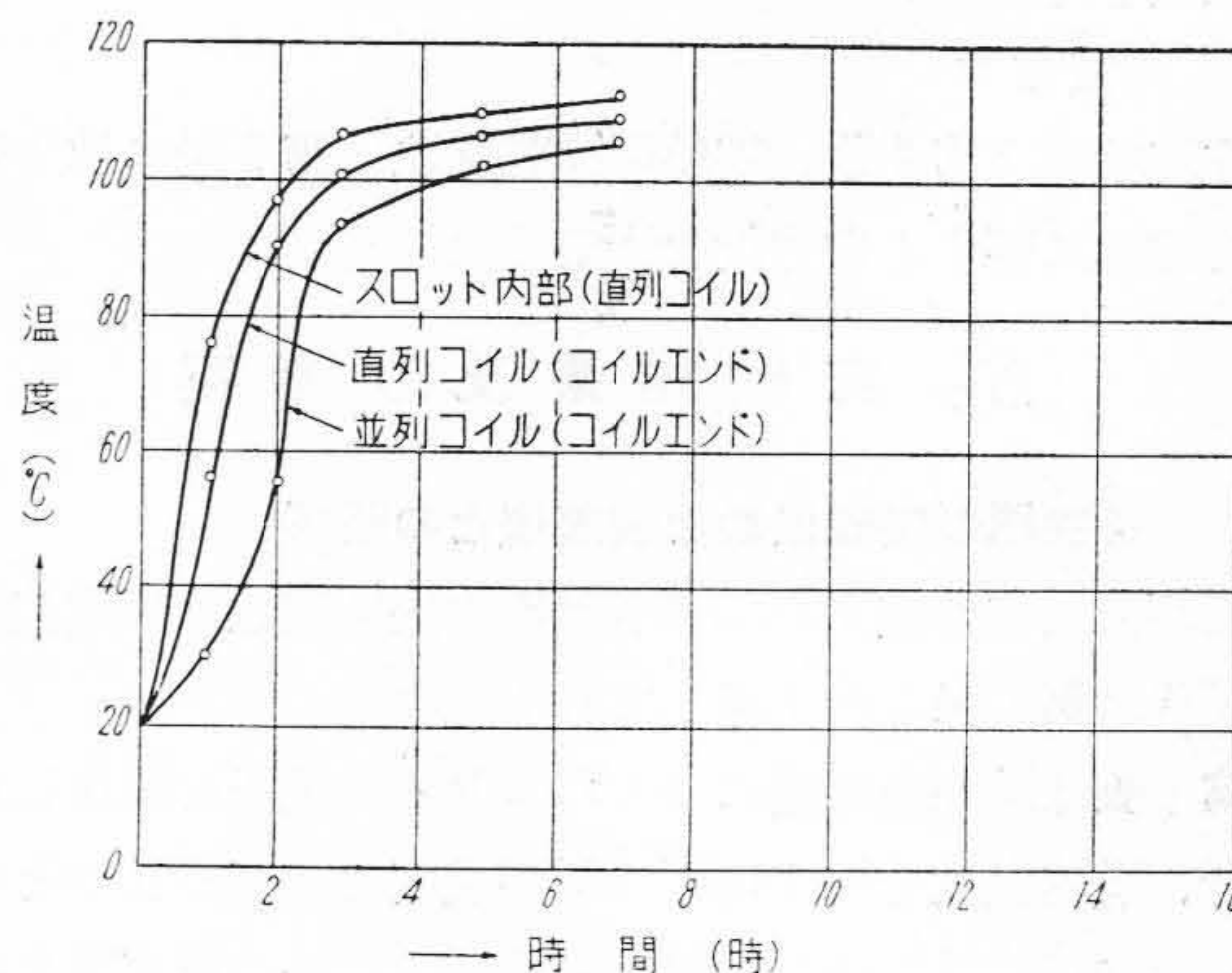


第7図 ワニス乾燥に於ける絶縁抵抗と乾燥時間との関係

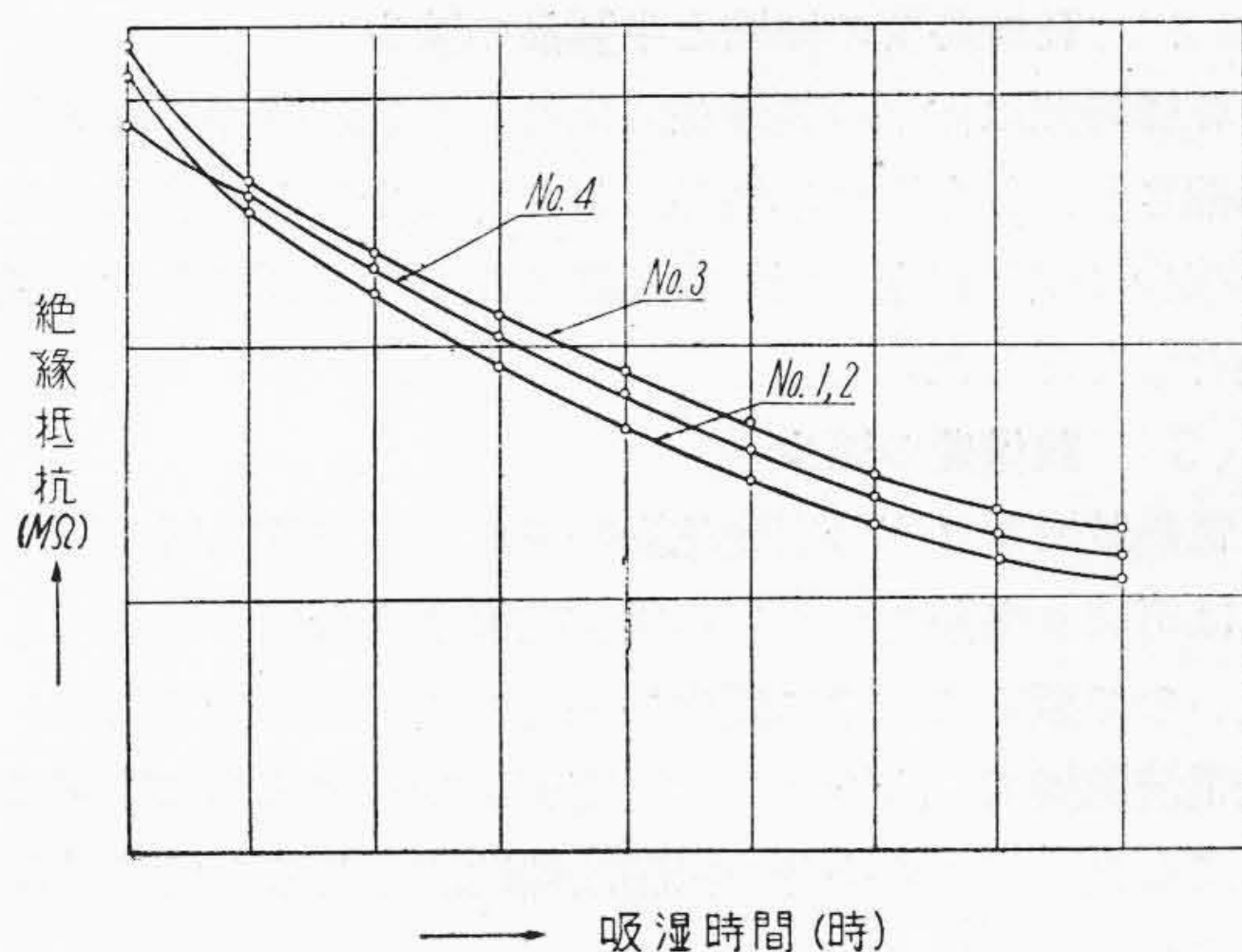
Fig. 7. Relation between the Dry-up Time and Insulation Resistance in the Baking Varnish Process.



第8図 電熱乾燥炉内の温度分布
Fig. 8. Temperature Distribution Inside Electric-heating Furnace



第9図 電流乾燥に於けるコイルの温度分布
Fig. 9. Temperature Distribution of Coil in Electric-Current Heating.



第 10 図 耐 湿 試 験 結 果

(40°C, R. H. 90%)

No. 1, 2 電流乾燥

No. 3, 4 電熱乾燥

Fig. 10. Result of Moisture-Proof Test

(40°C, R. H. 90%)

No. 1, 2, Electric Current Heating Dry-up

No. 3, 4, Electric Heating Dry-up

乾燥時間は自ら長くなる。然しながら電流乾燥に於いては比較的炉内の位置による差は少ないが、一固定子のコイルの温度差が問題となる。即ち三相固定子の場合直列になつているコイルに対して、並列になつているコイルに流れる電流は半分になるので温度上昇が少く或時間内に於いては温度差が出る。然しながらその後時間の経過と共に高温部分よりの熱伝導によつてその温度差は漸次減少し第 9 図の如くその温度差は 8°C~5°C 位になる。

c) 耐湿特性

比較に於いて最も重点を置いたのが耐湿特性比較であり数回試験を行なつたがその結果は第 10 図の如くである。即ち同一処理で乾燥時間を短縮 (2/3) しても、殆んどその耐湿性には差は認められない。この事は電流乾燥の場合の内部加熱の長所が乾燥の促進をなしていると思はれる。耐湿性に関係する因子としてはワニスの肉付、乾燥度、ワニスの特性等が挙げられるが、この事は改めて報告する事にする。

d) 絶縁耐力

耐湿試験直後、耐压試験を行なつた。この試験の加電圧は 1,000V, 1,500V であり、本試験の結果は第 4 表の如くである。

第 3 表に見らるゝ如く絶縁耐力として優秀である。

e) 消費電力

第 4 表は三相 1 HP の固定子 1 ケ当りの乾燥に要する電力量で両者の電力量の比較を行なつた結果である。

第 4 表に於いて 1 ケ当りの電流で約 1/1.3, 消費電力

第 3 表 耐 圧 試 験 結 果

Table 3. Pressure Test Result

試 料		1,000 V.	1,500 V.
		1 分 間	1 分 間
電流乾燥	No. 1	合 格	合 格
	No. 2	//	//
電熱乾燥	No. 3	//	//
	No. 4	//	//

第 4 表 乾 燥 電 力 量

Table 4. Dry-up Electric Power

	容 量	電 力 量
電 流 乾 燥	4.5 A × 33.3 V	4.7 kWh
電 熱 乾 燥	200 W	20 kWh
減 少 比 率	1/1.3	1/4

註 三相 1 HP 1 台に換算せる値

量で 1/4 減少することになる。これは乾燥時間の短縮と力率の低い為である。力率の点で若干問題が残るが、これも工場全体の力率が良い場合は問題はない。又全体の力率に大きく影響する所では、進相用コンデンサーを挿入して力率を挙げればよい。

[V] 電 流 乾 燥 の 実 用 化

上記実験によつて大体電流乾燥法が巻線の乾燥に適用して充分実用出来、更に乾燥時間の短縮、消費電力量の減少に相当の効果のあることが明らかになつたので次に述べる設備を設置し量産工場に於ける最初の実用化を達成したのである。

(1) 乾燥器

配線は三相 200 V, Δ接続となつており乾燥器内に予備試験を終了したものを挿入し、両端子間に直列に所定数の固定子を接続し、扉をしめて回路のスイッチを入れると、コイルに流れる電流によつて固定子は加熱され、乾燥されるのである。

乾燥器は充電部が露出しているので、漏電と火災に重点を置いて設計すると共に乾燥中に滴下するワニスの処理とワニスの酸化を促進する為の空氣の流通を良好ならしめ、且つ作業の安易化の点で特に注意した。

即ち

- 外枠は総て鋼板として内側にアスベストを張つた。
- 固定子を特別の棧で支えワニスが直接固定子につかないようにした。
- 底板及び溝型鋼の棧に穴をあけ空氣の流通を図つた。
- 配線はすべて耐熱性を保たせる為のアスベスト被覆

線を用いた。

(2) 電圧調整装置

日中夜間の別で電圧が 10~15 V の変動があるので、コイル温度が昇り過ぎる恐れがあり電圧の調整を行う必要があるので、コントローラーとタップ付の変圧器を組合せた調整装置を作り電圧調整を行なった。

(3) 自動温度調整装置

電圧調整器により電圧変動を少なくしたが、更に温度の変動をなくすためにバイメタルと電磁開閉器とを組合せた装置を乾燥器に取付けた。

[VI] 実用上の効果

(1) 消費電力

電動機のステーターコイル 1 台当りに要する乾燥費用は第 5 表の如くである。

第 5 表 1 台当りの各種乾燥に要する費用

Table 5. Costs for Dry-up by Different Methods (Per set)

乾燥種別	電力、石炭 1 台当り消費量	燃料費
石炭熱風乾燥	16.4 kg	65 円 60 銭
電熱熱風乾燥	20 kWh	30 円
電熱乾燥	9.0 kWh	13 円 50 銭
電流乾燥	三相 4.7 kWh	7 円 05 銭
	单相 1.9 kWh	2 円 85 銭

第 5 表よりステーターコイル 1 台当りの乾燥費用は電流乾燥が極めて少い。従つて多量生産に於いては一ヶ月の乾燥費用の減少は莫大なものになる。

(2) 乾燥時間の短縮と半製品の減少

乾燥時間は従来の乾燥法に比較して電流乾燥では 3 日短縮された為今迄の半製品が著しく減少した。而して此の減少に依り資金の回転率が高くなり生産面に多大の利益をもたらした。

(3) 設備費の減少

電熱乾燥器は完全密閉乾燥器であるので乾燥器の製作には可成り多額を要するが電流乾燥法は全閉でなくとも良いので極めて簡単に製作出来その費用も僅少である。又電流乾燥でも全開よりは温度差を少なくする為に密閉にしても良いがこの場合の密閉は補助的であるので簡単なものがよい。

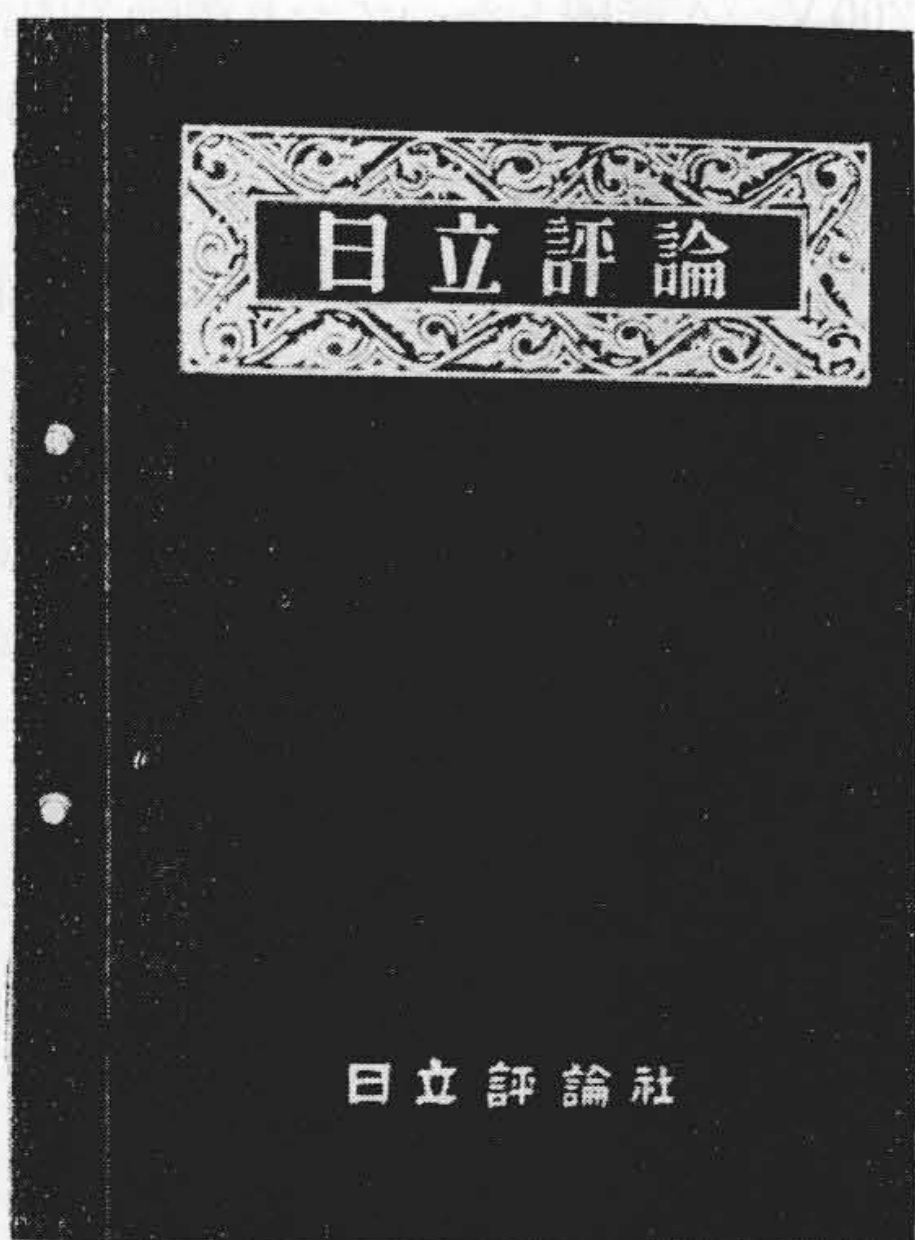
(4) 流れ作業との関連性

乾燥時間の短縮により流れ作業と直結出来流れ作業の一貫として乾燥を考える事が出来る。この事は作業能率運搬距離の縮小、半製品の減少等に於いて従来の方法に優れているためである。

[VII] 結 言

以上電流乾燥法の工場化に成功し着々その実績を収めているが、更に单相汎用電動機のローターコイル乾燥に応用し、電動機コイル全般に適用すると共に電圧、電流の調節により特殊品にも応用出来るようにし度いと思つている。又電流乾燥と電熱、赤外線等による乾燥とを併用した乾燥法も今後に残された問題である。

最後に本研究に種々御指導御鞭撻を賜りました梶原副部長、川村係長並びに御助力を賜わつた各位に対し深謝する次第である。



堅牢で優美な

「日立評論」綴込カバー発売

(特製綴込紐付) 特價 1 組 ￥100. (郵送料共)

「日立評論」の綴込カバーは非常に好評を博し、売切中でしたが、今回写真のようなスマートなものを作成致しまして御希望の向きに御願ひ致すことになりました。

御希望の方は至急日立評論社へ御申込下さい。

発売所 日立評論社 東京都品川区大井坂下町 2717 振替口座 東京 71824 番