

# 電 車 用 主 電 動 機 の 進 歩

## Development of Main Motors for Rolling Stock

立川 昭三\*      有井 英俊\*      白土 経雄\*  
 Shōzō Tatekawa      Hidetoshi Arie      Norio Shirato

### 内 容 梗 概

わが国におけるここ十年来の高速主電動機の進歩はめざましいものがあり、豊富な使用実績も得られるようになった。進歩のあとをかえりみる意味で電车用主電動機の軽量化の変せんと、最近の広領域主電動機の特長について述べた。絶縁はF, H種が全面的に採用されるようになったが、モデルコイルの実験によって温度と寿命の関係を明らかにした。機械構造については新しい油潤滑方式およびビニールスポンジフィルタの使用結果について述べ、保守点検の容易な超高速主電動機への方向を示した。

### 1. 緒 言

わが国の高速度電車は1952年頃より直角カルダン、平行カルダンなどのいわゆる分離駆動方式の採用によって著しい進歩発展を続けてきた。高速小形軽量の主電動機を使用することによる大きい利益は今日では電鉄技術者の常識となっている。この間、主電動機の設計、製作について各種の技術的検討により、多くの進歩、改良がなされてきた<sup>(1)</sup>。日立製作所においても電车用高速度電動機の製作台数はすでに1,200台に達し、わが国の高性能電車の発展に貢献してきた。

このように高速度電動機の普及した現在、技術の進歩はさらに新しい段階に入りつつある。その一つは大幅な界磁制御を行う、いわゆる広領域主電動機の出現によって回生制動を効果的に行い、あるいは変電所の過負荷容量を軽減しながら高加速度の得られる経済的な高性能電車の実現を可能ならしめたことである<sup>(2)</sup>。また一方ではめざましい進歩を遂げた新しい絶縁材料の採用、冷却効果の改善などとともに、軸受の潤滑、除じんフィルタなどに新しい材料と改良された方式を適用するなど、機械構造の改良によって保守を容易ならしめ、機械の寿命をより長くする努力がなされつつあることである。以下このような電车用主電動機の最近の進歩と傾向について述べる。

### 2. 軽量化と比出力の増加

一般に電動機の重量は(定格トルク)<sup>2/3</sup>すなわち(定格出力/定格回転数)<sup>2/3</sup>にほぼ比例して増加する傾向にあるが、電车用主電動機では運転される速度範囲が広く、低速では大きい起動引張力が必要であり、一方、十分高い平衡速度が要求されるから、主電動機の評価には最高許容回転数と定格回転数の比が考慮されるべきである<sup>(3)</sup>。

すなわち

$$\frac{\text{最高許容回転数}}{\text{定格回転数}} = \text{速度比 (S. R.)}$$

$$\text{速度比} \times \text{定格出力} = \text{S. R. P. (Speed Ratio Power)}$$

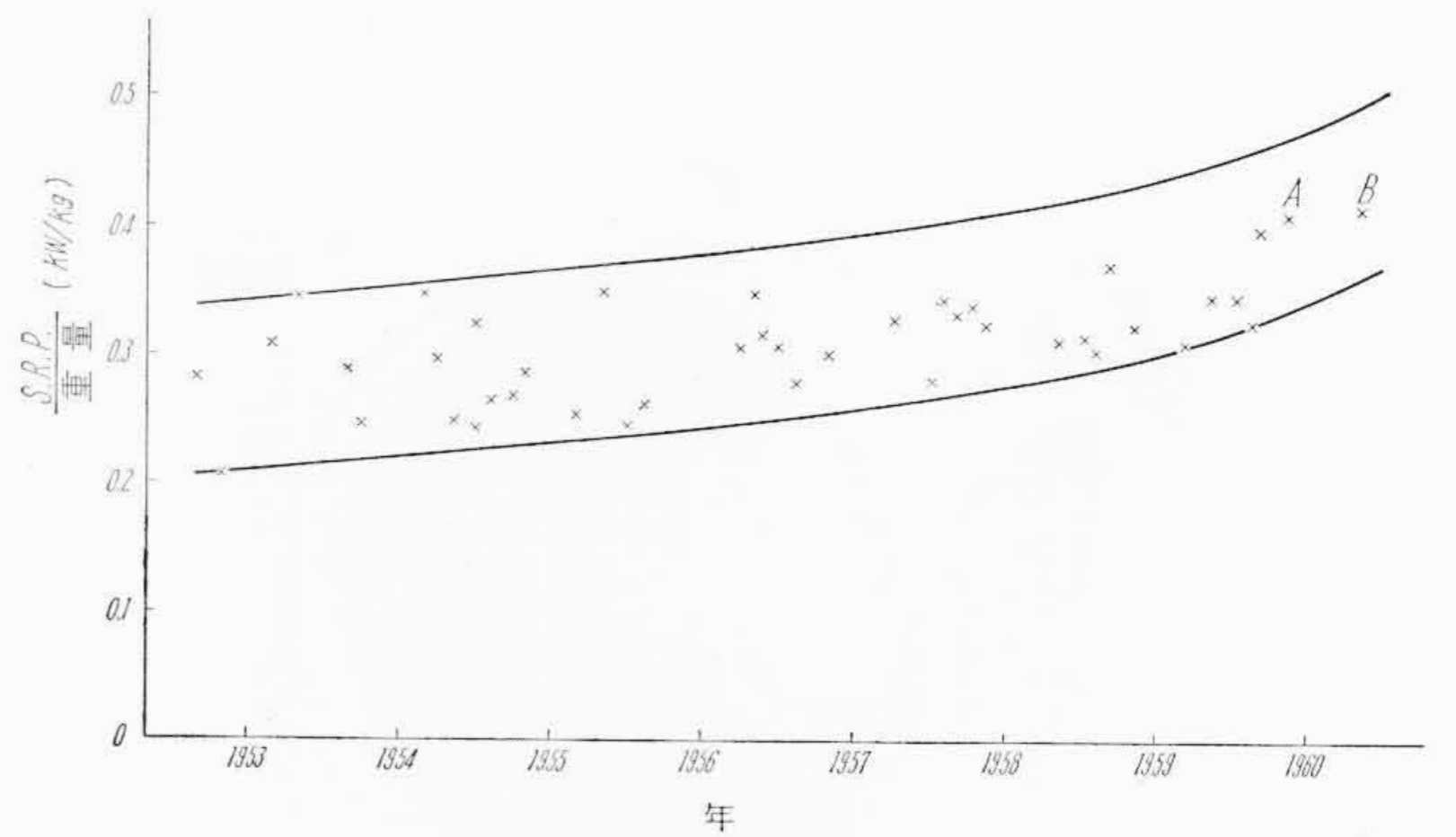
とおけば、電動機が最高許容回転数のとき電車が最高安全速度になるように歯車比を定めると

$$\text{S. R. P.} = \text{最高許容回転数 (rpm)} \times \frac{\text{定格出力 (kW)}}{\text{定格回転数 (rpm)}} \\ \propto (\text{電車の最高安全速度}) \times (\text{定格引張力})$$

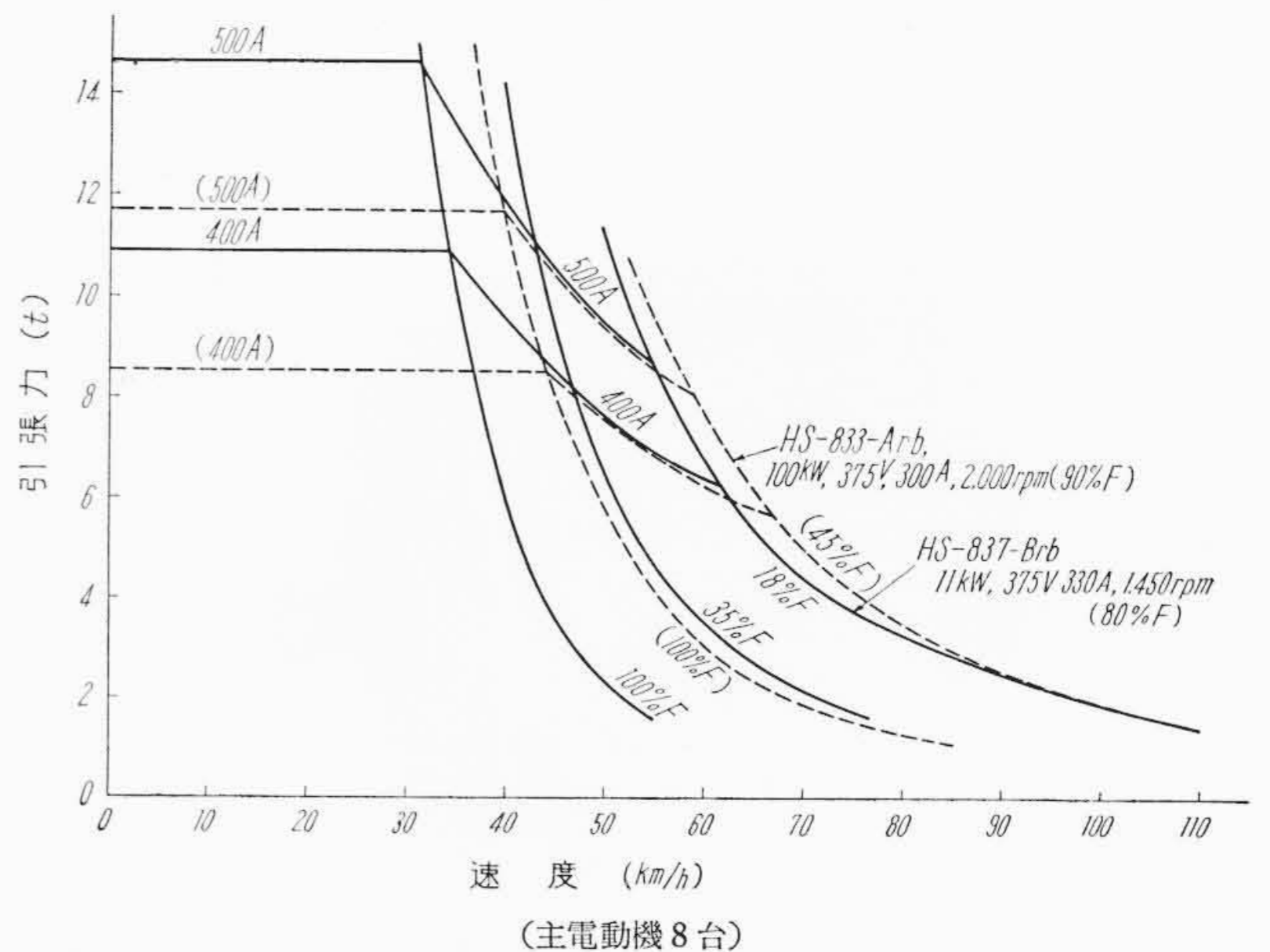
となるから S. R. P は電車の最高安全速度および定格引張力に比例する値となり、主電動機の比較の基準として都合がよい。

1952年以來の S. R. P. (kW)/主電動機重量 (kg) の変せんとを第1図に示す。この比出力の大きいほど主電動機の単位重量あたりの性能

\* 日立製作所日立工場



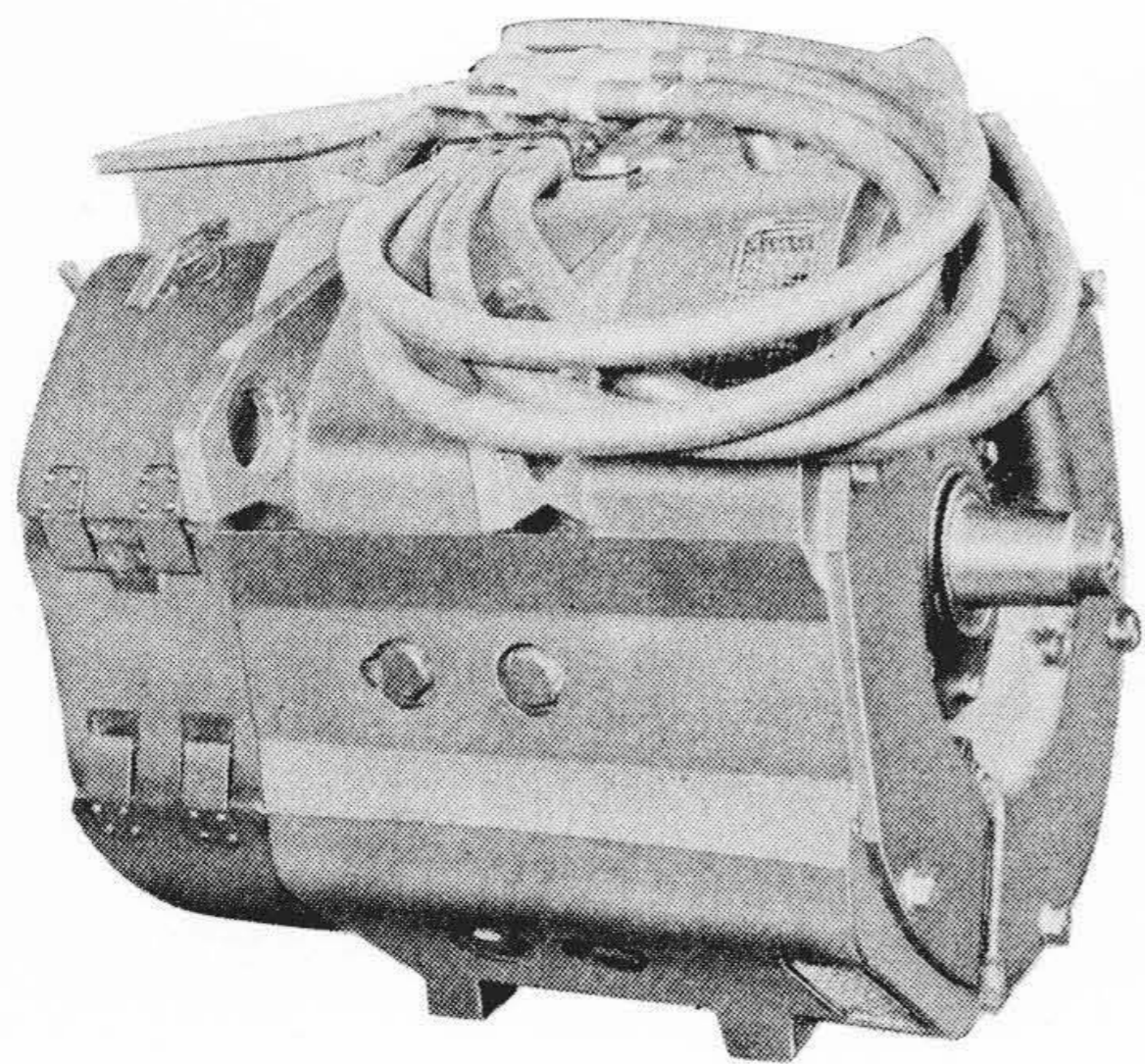
第1図 S.R.P. 重量の変せん



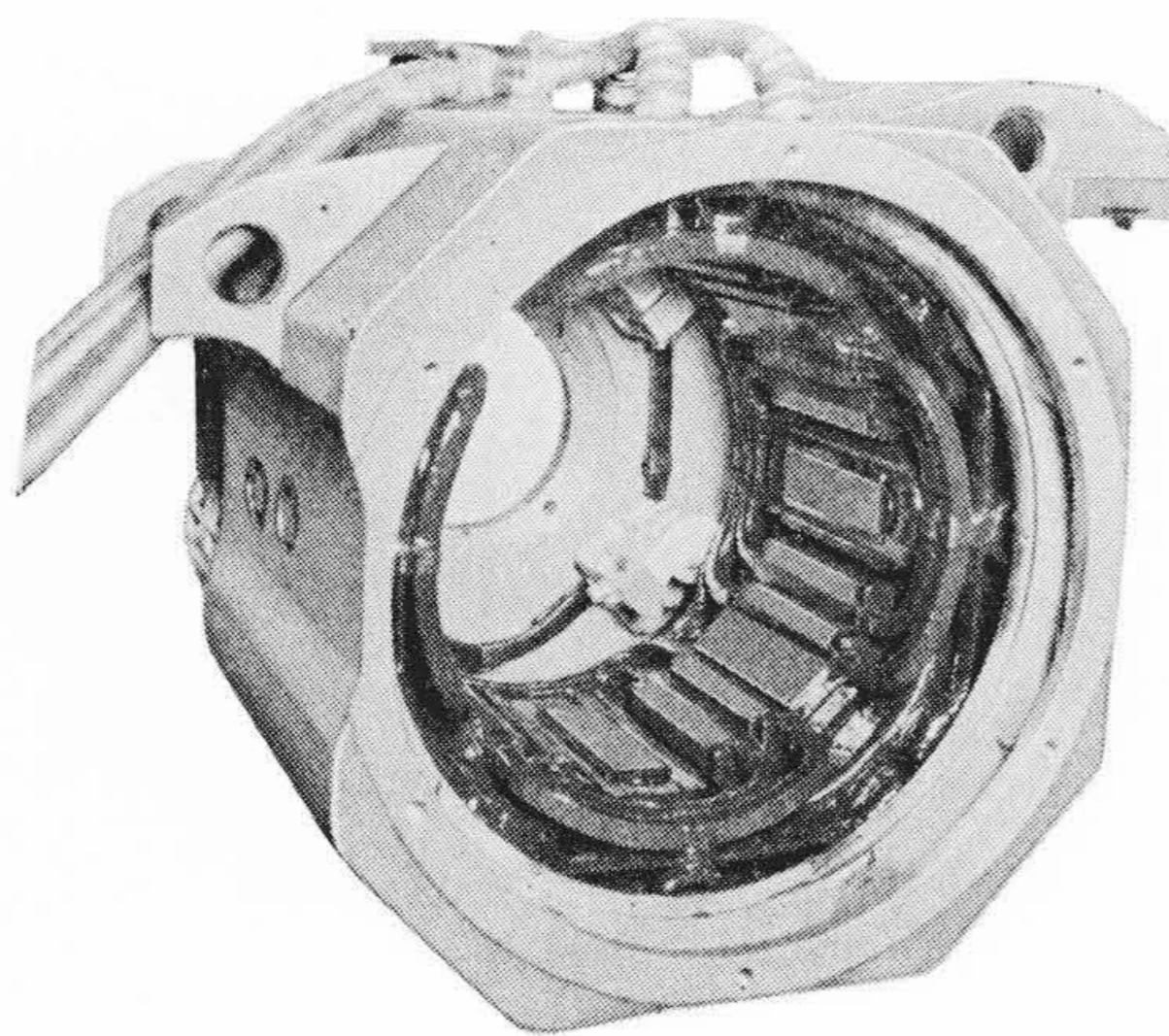
第2図 速度-引張力特性 (主電動機8台)

がすぐれ、軽量化されたことを意味する。主電動機の重量はS. R. P. のほか、定格出力、電圧、電流-速度特性(主極空隙の大きさ、磁束密度の飽和の程度)などに左右されるから比出力だけでは厳密な比較は無理であるが、傾向をはあくするのに役立つと思われる。

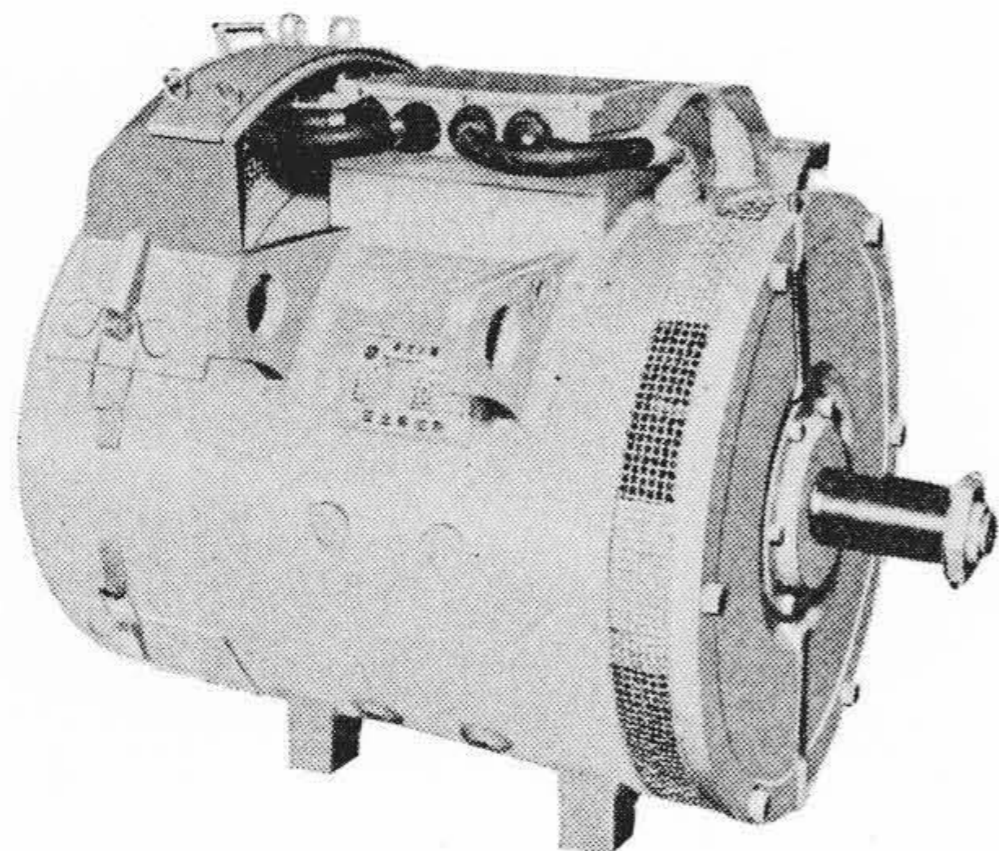
特に注目すべきことは最近の広領域主電動機の開発によって比出力が著しく増加したことである。第1図A点は京王帝都電鉄納110kW, 375V, 1,450rpm (80%F), 最高4,500rpm補償巻線付主電動機であって、その概要はすでに紹介した<sup>(2)</sup>ように、独特の補償巻線の採用によって構造を著しく簡単にし、最弱界磁18%Fというきわめて大幅な界磁制御に対しても安定した整流を確保しており、MTM編成にもかかわらず従来の全電動車編成に匹敵する表定速度、平衡速度をうることができ、また各停用、急行用いずれにも高能率で使用することができる。すなわち第2図の速度-引張力特性か



第3図 110kW 主電動機



第4図 110kW 主電動機の固定子



第5図 85kW 主電動機

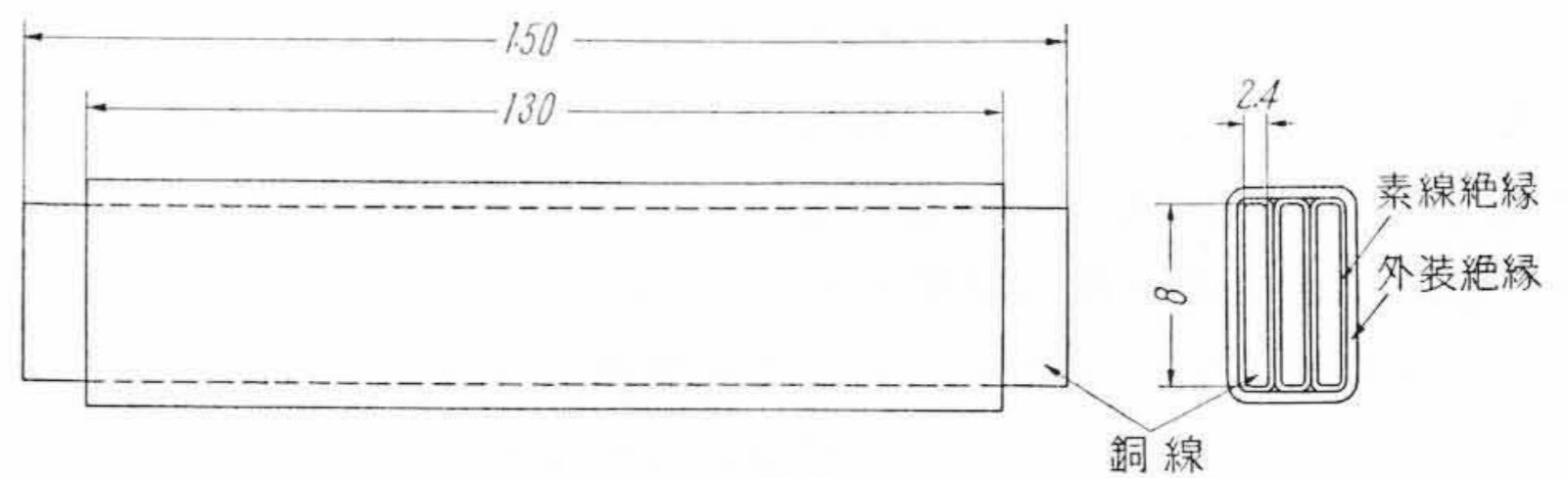
らわかるように急行用としては最弱界磁18%Fまで使用して点線で示した従来の全電動車用100kW主電動機とほぼ同等の高速性能を発揮する。一方各停用としては同一の起動電流で従来の約1.3倍の引張力が得られることになり変電所の過負荷容量を著しく軽減できる効果がある。また本機のように速度制御範囲の大きい主電動機を使用すれば電車の停車用に回生制動を容易に使用することができ、さらに電力消費を低減せしめることもできる。

第3図に本機の外観、第4図に固定子を示す。

第1図B点は東京都地下鉄1号線用85kW、340V、280A、1,500rpm(85%F)、最高5,000rpmの主電動機で、駅間距離の短い地下区間で高い表定速度で走行するとともに、地上区間では郊外電車として平衡速度105km/hが得られるように計画された速度比の高い主電動機である。第5図に本機の外観を示す。A、Bいずれも最新の設計技術を取り入れて比出力を著しく増加せしめ、電機子の最大

第1表 主電動機の温度上昇限度 (IEC No. 9 (案))

絶縁種別	定格種別	機械の部分	測定法	温度上昇限度 (°C)
A種	連続	電機子, 界磁巻線 整流子, 集電環	抵抗法 電気温度計法	85
	1時間			100
E種	連続および1時間	電機子, 巻線 界磁巻線 整流子, 集電環	抵抗法 抵抗法 電気温度計法	105
				115
B種	連続および1時間	電機子巻線 界磁巻線 整流子, 集電環	抵抗法 抵抗法 電気温度計法	120
				130
F種	連続および1時間	電機子巻線 界磁巻線 整流子, 集電環	抵抗法 抵抗法 電気温度計法	140
				155
H種	連続および1時間	電機子巻線 界磁巻線 整流子, 集電環	抵抗法 抵抗法 電気温度計法	160
				180
				105



第6図 モデルコイル

周速は87m/s、整流子は71m/sに達している。また大幅な界磁制御を行うから界磁は弱界磁定格として熱容量の合理化をはかり、さらに発電制動時の許容過電圧をA点では約300%、B点では250%とし、いずれも高速から大きい発電制動力が容易に得られるように設計されている。

### 3. 絶縁材料の進歩

#### 3.1 主電動機の温度上昇限度

最近の合成化学の進歩はめざましく、耐熱性、電気的諸特性の向上とともに処理が簡単で、絶縁作業が容易な各種の材料が豊富に提供され、F種、H種絶縁の小形軽量の主電動機が全面的に普及するようになった。

JEC-122車両用主電動機の規格はまだF、H種の温度上昇限度が示されていないが、最近のIEC No. 9には車両用主電動機の温度上昇限度(案)が第1表のように規定されている。

#### 3.2 温度上昇と寿命

主電動機の温度上昇限度は絶縁材料の寿命を考慮して規定されなければならないのはもちろんであるが、特に車両用主電動機は常に負荷電流が変動し、はげしい温度上昇の変化を繰り返しながら使用され、また車両の走行による振動が加えられ、一般産業用の回転機に比べて非常に苦しい使用条件であることを考慮しておく必要がある。温度上昇と寿命の関係には複雑な要素が多いが、主電動機に使用しているB、F、H種の絶縁材料の温度上昇と寿命の関係を明らかにし、あわせてIECの温度上昇限度の妥当性を検討するためにモデルコイルによる実験および寿命の推定計算を行った結果について紹介する。

##### 3.2.1 モデルコイルによる実験

近年新しい絶縁材料の開発とともに耐熱性評価のための寿命試験がさかんに行われているが<sup>(4)(5)</sup>、本実験は車両用主電動機と同等の絶縁を施したモデルコイルについて耐熱寿命試験を行ったものである。

第2表 絶 縁 仕 様

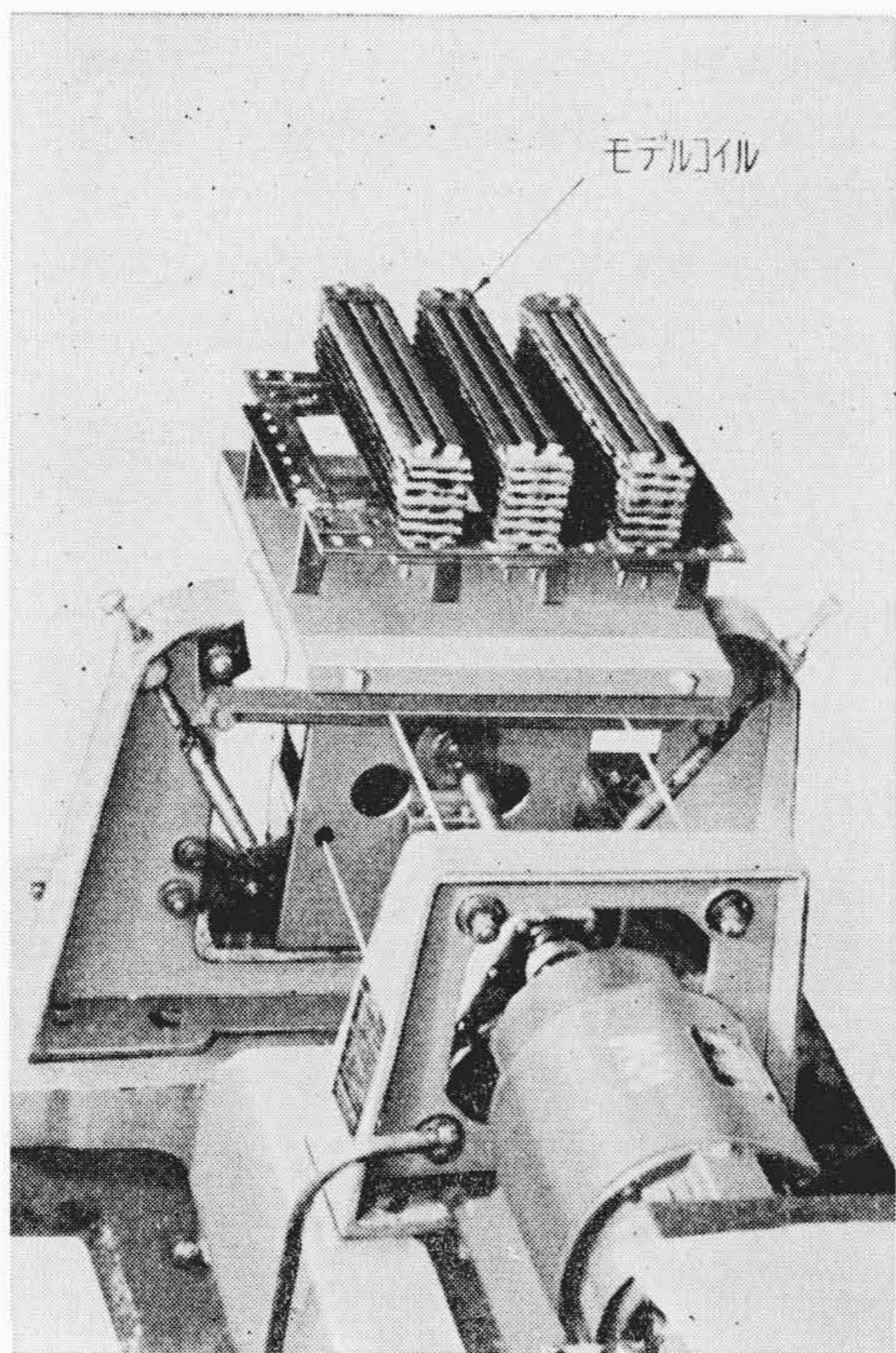
絶縁種別	B 種	F 種	H 種
素線絶縁	0.1 マイカペーパー (B種ワニス)	0.1 ガラスマイカ (F種ワニス)	0.1 ガラスマイカ (H種ワニス)
外装絶縁	0.13 マイカペーパー (B種ワニス)	0.13 ガラスマイカ (F種ワニス)	0.13 ガラスマイカ (H種ワニス)

第3表 加 熱 温 度

絶縁種別	B種	F種	H種
試験温度 (°C)	180	220	250

第4表 振 動 条 件

振 幅	2 mm
振 動 数	2,500 cpm
加 速 度	7 g
時 間	1 h



第7図 振 動 試 験

(1) 実験試料

試験に供したモデルコイルは第6図に示す寸法のものでその絶縁構成を第2表に示す。

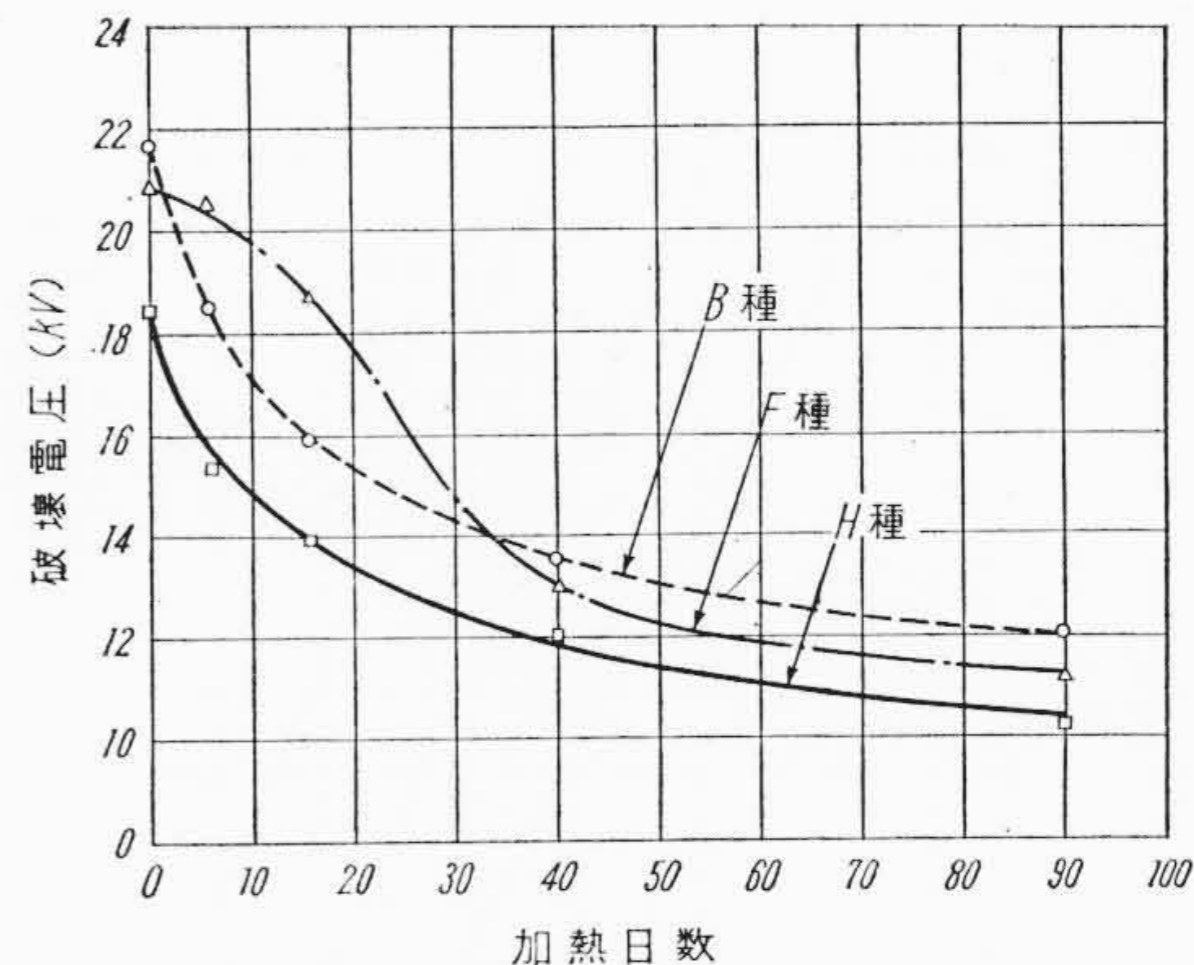
(2) 劣化試験

試料は第3表に示す温度で加熱劣化させた。なお加熱中の試料は1日おきに乾燥器からとり出し、モデルコイルの両端を金具で締めつけて、第4表に示すような機械的振動を加えた。振動試験中の試料には振動による機械的ストレスと冷却による熱衝撃が同時に加わることになる。振動試験の状況を第7図に示す。

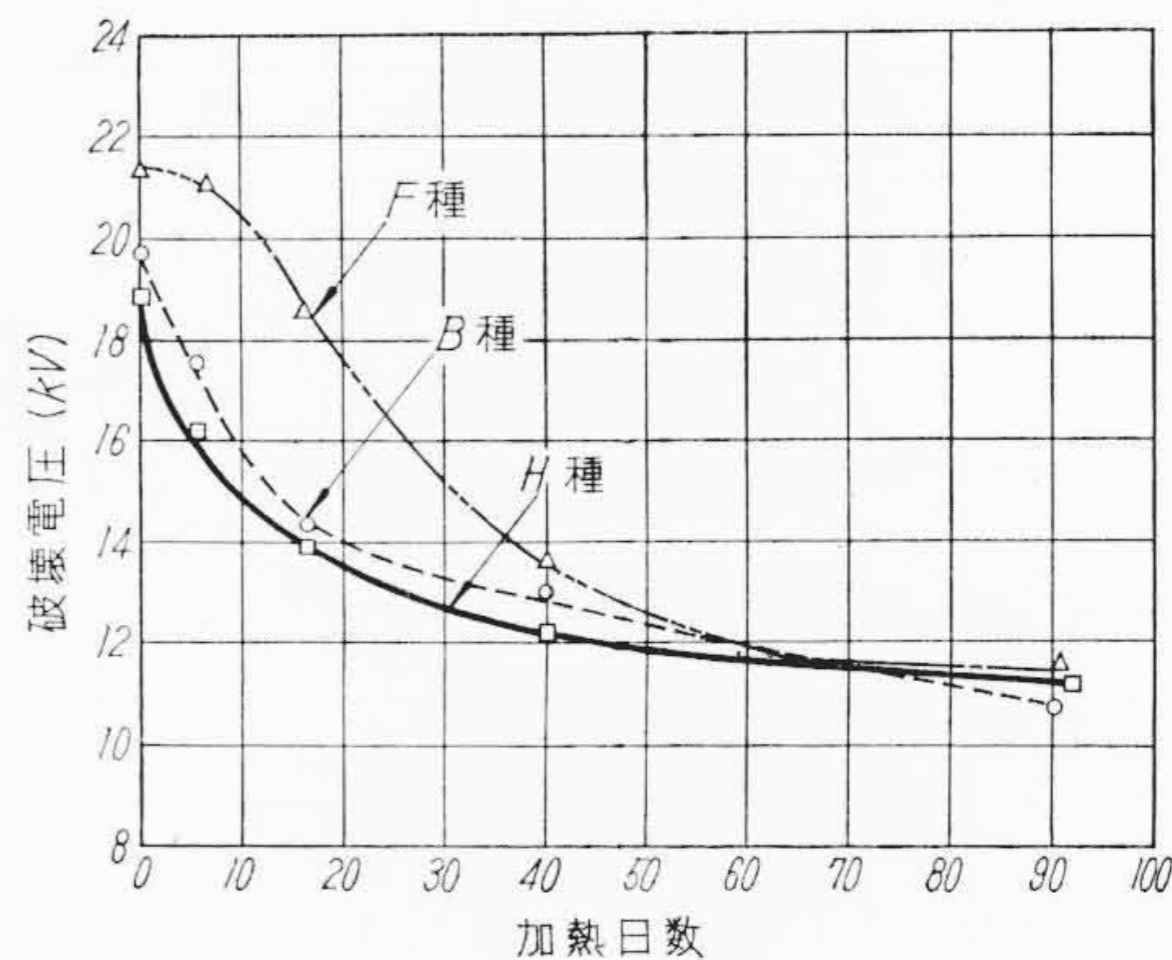
加熱試験前および加熱開始後6, 16, 40, 90日目に試料をとり出し、常態およびRH100%, 40°Cにおいて72時間吸湿後の絶縁破壊電圧を測定した結果を第8, 9図に示す。この結果から明らかのように絶縁破壊電圧は加熱回数の経過につれて低下し、これに基づいてコイルの耐熱寿命を判定することが可能である。このほか吸湿時の誘電特性、絶縁抵抗などについても測定したが、これらはいずれも劣化時間に対して一義的に変化しないことが明らかになった。

第5表 α の 値

ワニスの種別	α
B 種	5.93×10 <sup>8</sup>
F 種	6.39×10 <sup>8</sup>
H 種	6.91×10 <sup>8</sup>



第8図 加熱による破壊電圧の変化 (常態)



(RH 100%, 40°C, 72h吸湿後)

第9図 加熱による破壊電圧の変化

(3) 加熱減量試験

上記の劣化試験は試験期間を短縮するため試験温度を著しく高くして行ったものであるが、これらの結果より次のようにして寿命と温度の関係を求めることができる。

一般に寿命  $t$  と絶対温度  $T$  の間には許容温度範囲内で

$$\log t = -\frac{\alpha}{T} + \beta$$

ここに  $\alpha, \beta$  は定数

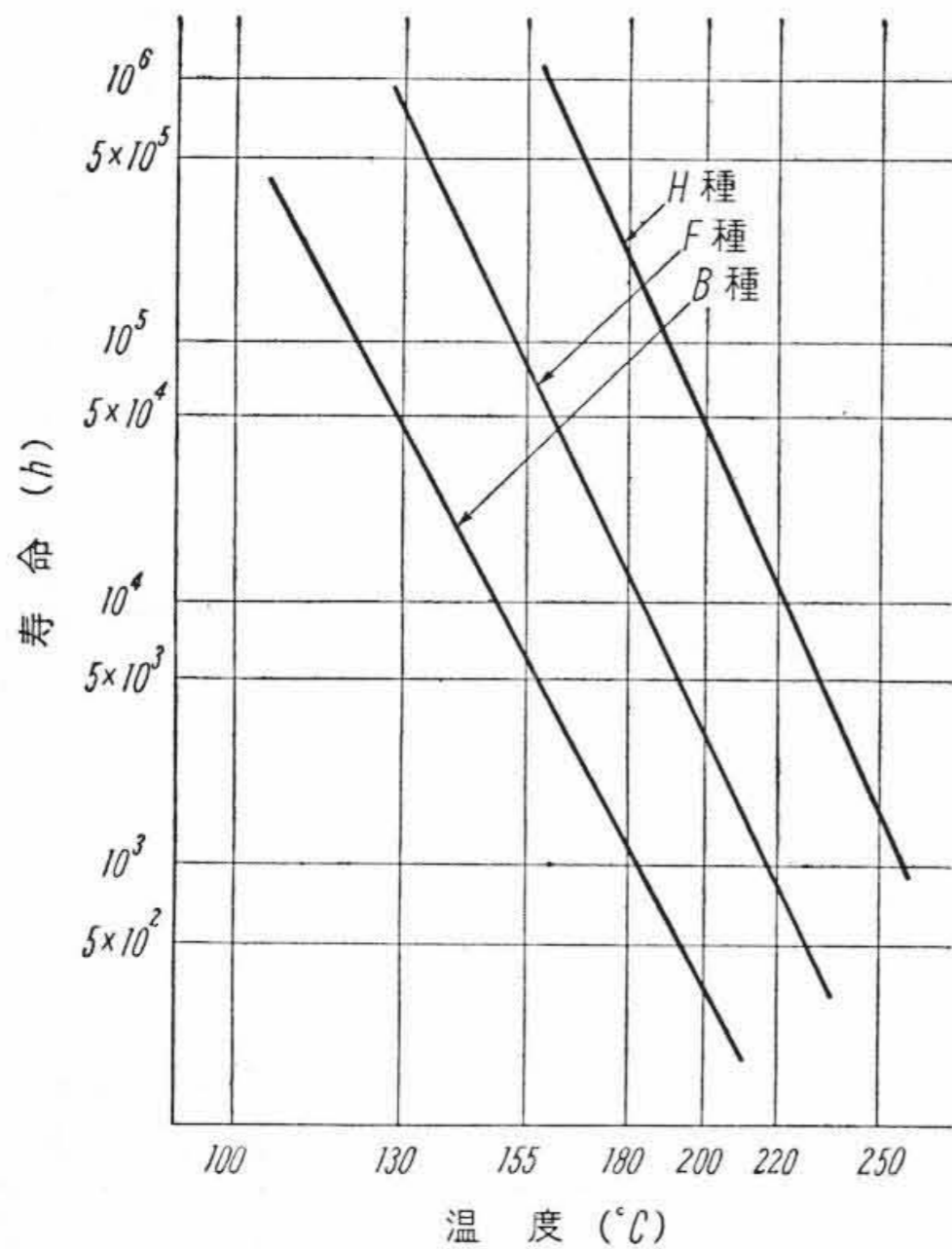
なる関係があるので、 $\alpha$  が定まればある温度の試験結果からほかの温度における寿命を求めることができる。本実験ではモデルコイルの処理に用いたB, F, H種の含浸ワニスの加熱減量を測定し、この結果から $\alpha$ を算定して第5表を得た。すなわちコイルの寿命の減小割合はワニス皮膜の温度上昇に伴う重量減小率によって判定されるものとしている。

3.2.2 寿命の推定

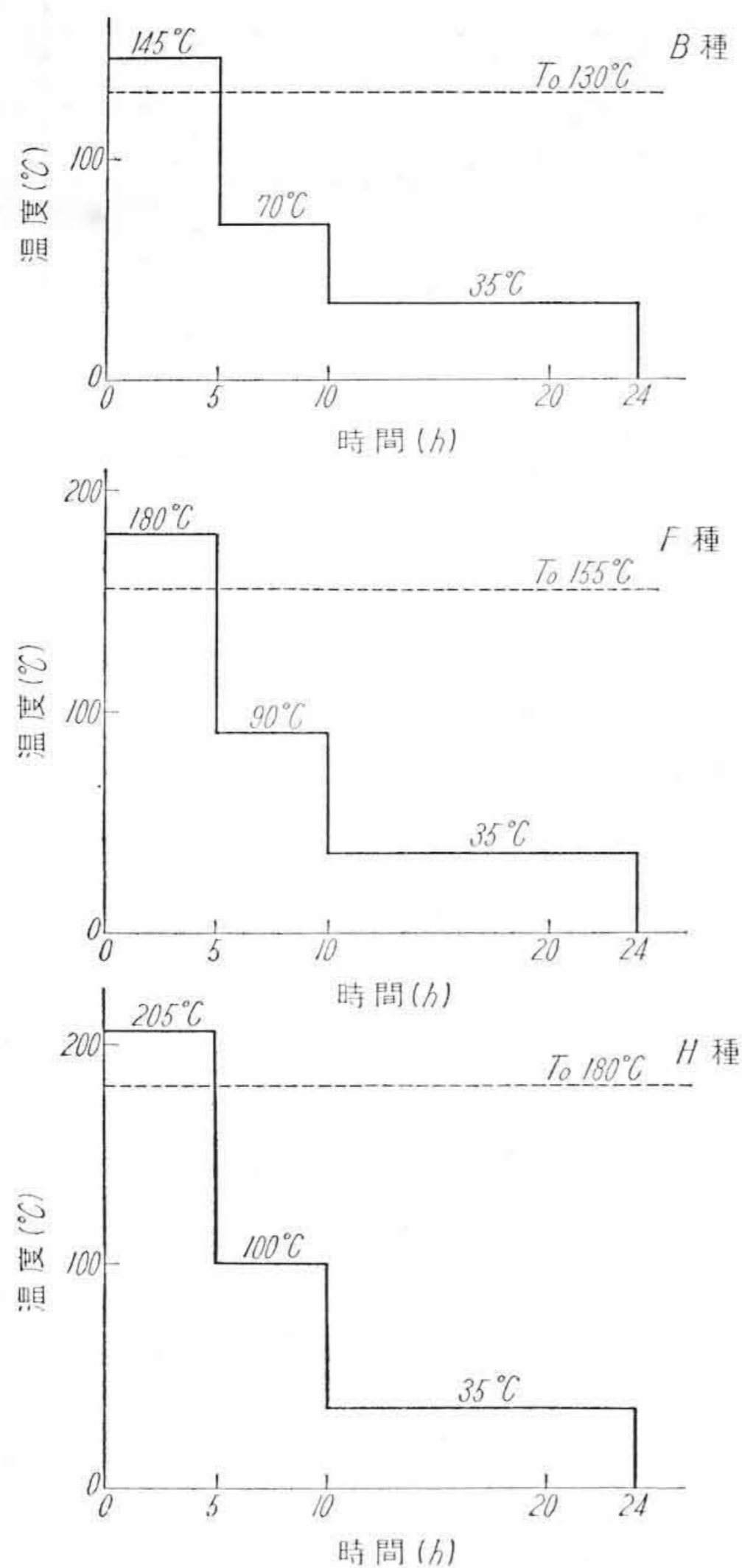
モデルコイルの劣化試験とワニスの加熱減量試験から温度と寿命の関係を求めた。ここでは第9図から各試料のRH 100%, 40°C, 72h吸湿後の絶縁破壊電圧が初期値の60%に低下したときを寿命とみなしてそれぞれの時間を求め、一方ワニス皮膜の加熱減量試験から求めた各寿命直線のこう配 $\alpha$ を使用して第10図に示す温度-寿命直線が得られた。第10図を使用すれば各絶縁種別についてコイルの寿命を推定できることになるが、車両用主電動機では負荷の変動が大きく、運転中温度上昇の変化がはげしいか

第6表 推定寿命

絶縁種別	温度 $T_0$ での連続寿命 (h)	第11図の負荷サイクルでの寿命 (h)
B種	$4.80 \times 10^4$	$6.72 \times 10^4$
F種	$9.10 \times 10^4$	$6.55 \times 10^4$
H種	$2.31 \times 10^5$	$1.75 \times 10^5$



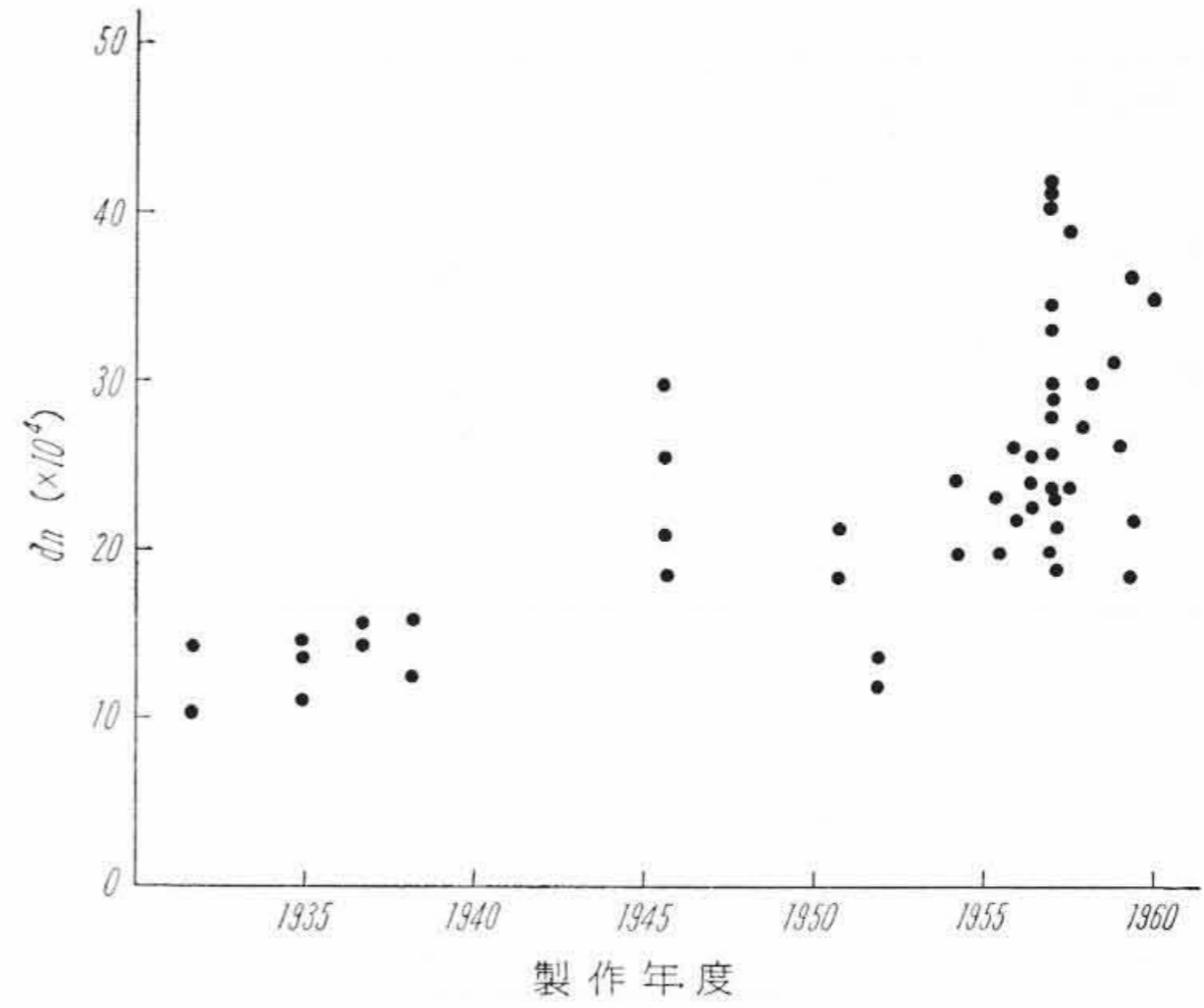
第10図 温度-寿命直線



第11図 負荷サイクル

ら寿命を推定するにあたり温度の変化状態を十分考慮に入れなければならない。最近このような場合の寿命の算定法について新しい考え方が提案されている<sup>(6)</sup>。

ここでは一例として24時間中の負荷サイクルが第11図に示すような簡単な場合を仮定して、第10図を適用し、推定寿命を計算した結果を第6表に示した。比較のために一定温度  $T_0$  で連続



第12図 dn値の変せん

運転した場合の寿命も示してある。この結果によれば第11図に仮定した負荷サイクルにおける推定寿命はB種7~8年、F種7~8年、H種20年程度となり、F種、H種絶縁が従来のA、B種絶縁に比べて高度の信頼性を有していることが理解できよう。また第1表に示したIEC規格で新たに提案されたF種、H種の温度上昇限度は巻線のみについていえばH種はなおかなりの余裕があるといえるが、主電動機としては巻線以外の部分についても考慮しなければならないから、ほぼこの数値は妥当なものといえよう。

#### 4. 機械構造の進歩

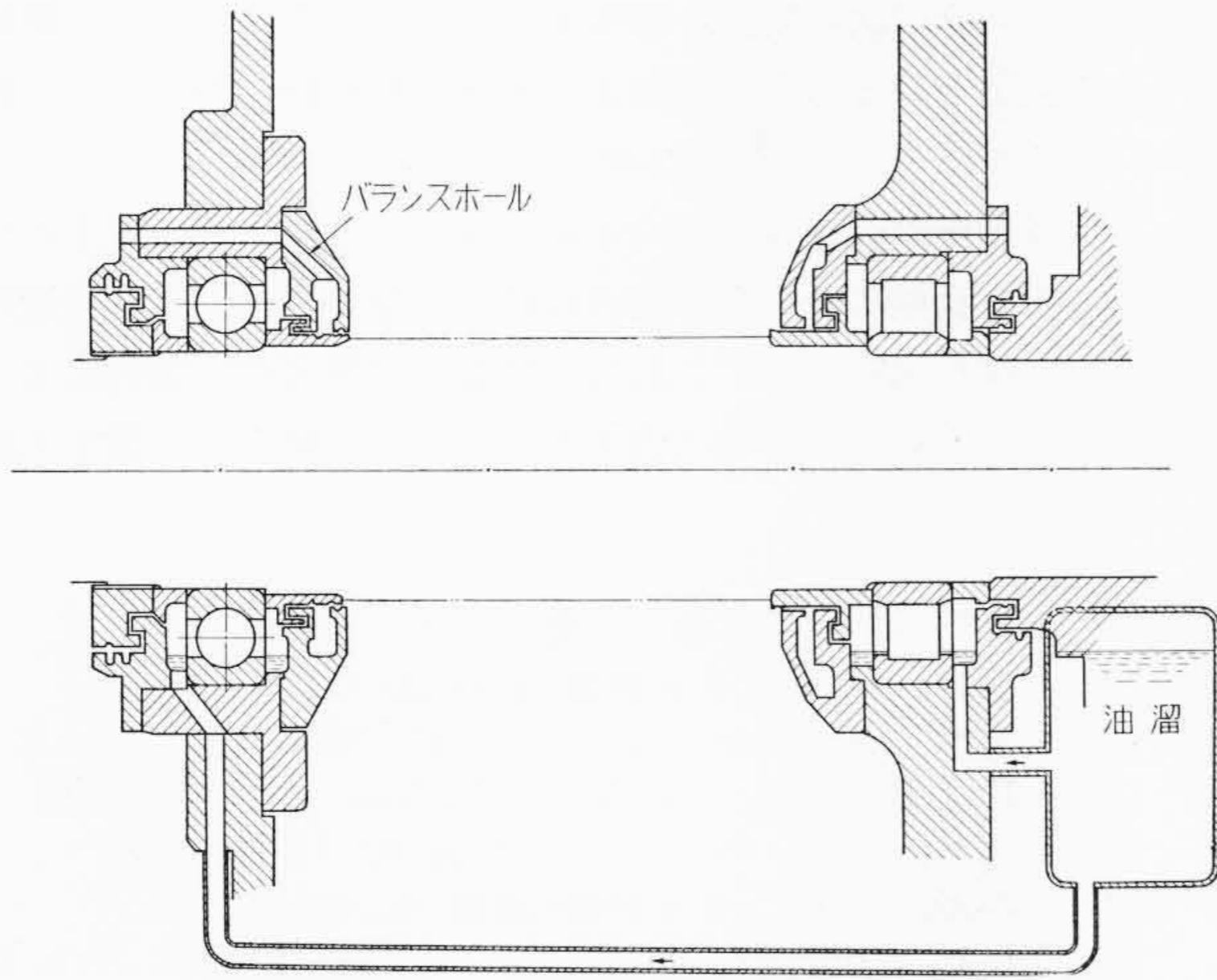
最近の高速度主電動機の発展は整流子やブラシ保持器など、各部の設計、製作技術の進歩に負うところが大きい<sup>(1)</sup>、ここでは新しい潤滑法、フィルタを取りあげて最近の傾向を紹介する。

##### 4.1 潤滑

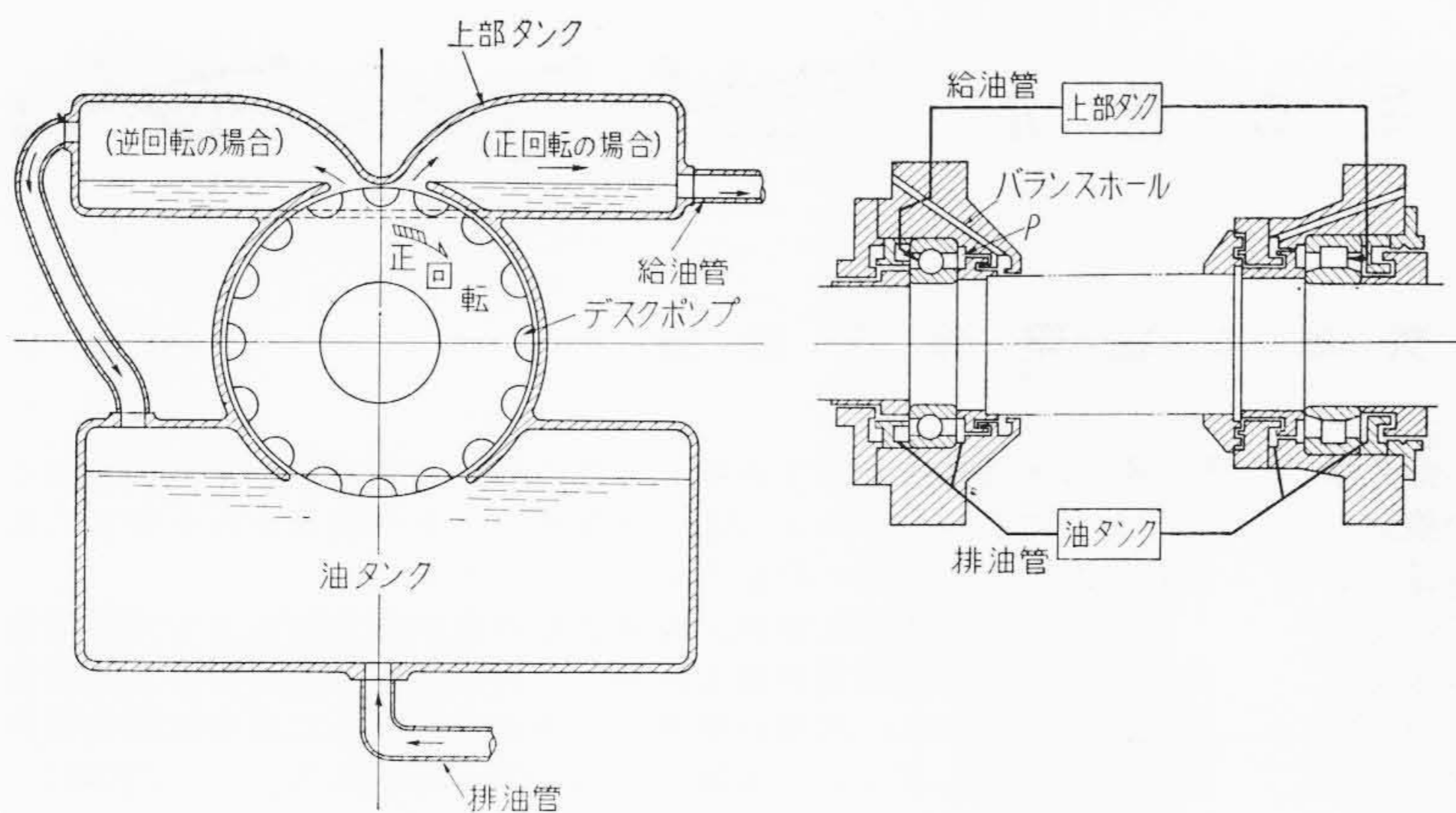
最近の主電動機においては例外なくころがり軸受を使用しており、近時ころがり軸受の精度が飛躍的に向上し、またグリースが進歩してきたことにより dn 値を著しく増大することが可能となったが、今後もますます大きくなっていくものと思われる。第12図は最近の dn 値増加の変せんを示したもので、dn 値は  $40 \times 10^4$  (主電動機の最高回転数における値) をこえ、 $d_{mn}$  値では  $60 \times 10^4$  にも達し、もはやグリース潤滑の限界にきているといえる。ここに d は軸受内径 (mm)、 $d_m$  はコロまたはボールの中心径 (mm)、n は回転数 (rpm) である。主電動機がさらに高速、広領域化してくると、寿命の長期化、保守点検の容易さの点からグリース潤滑では十分な性能がえられなくなる。日立製作所ではグリース潤滑の欠点を除去した新しい油潤滑方式を開発し、すでに一部実用に成功した。以下油潤滑の要点について述べる。

##### 4.1.1 油潤滑

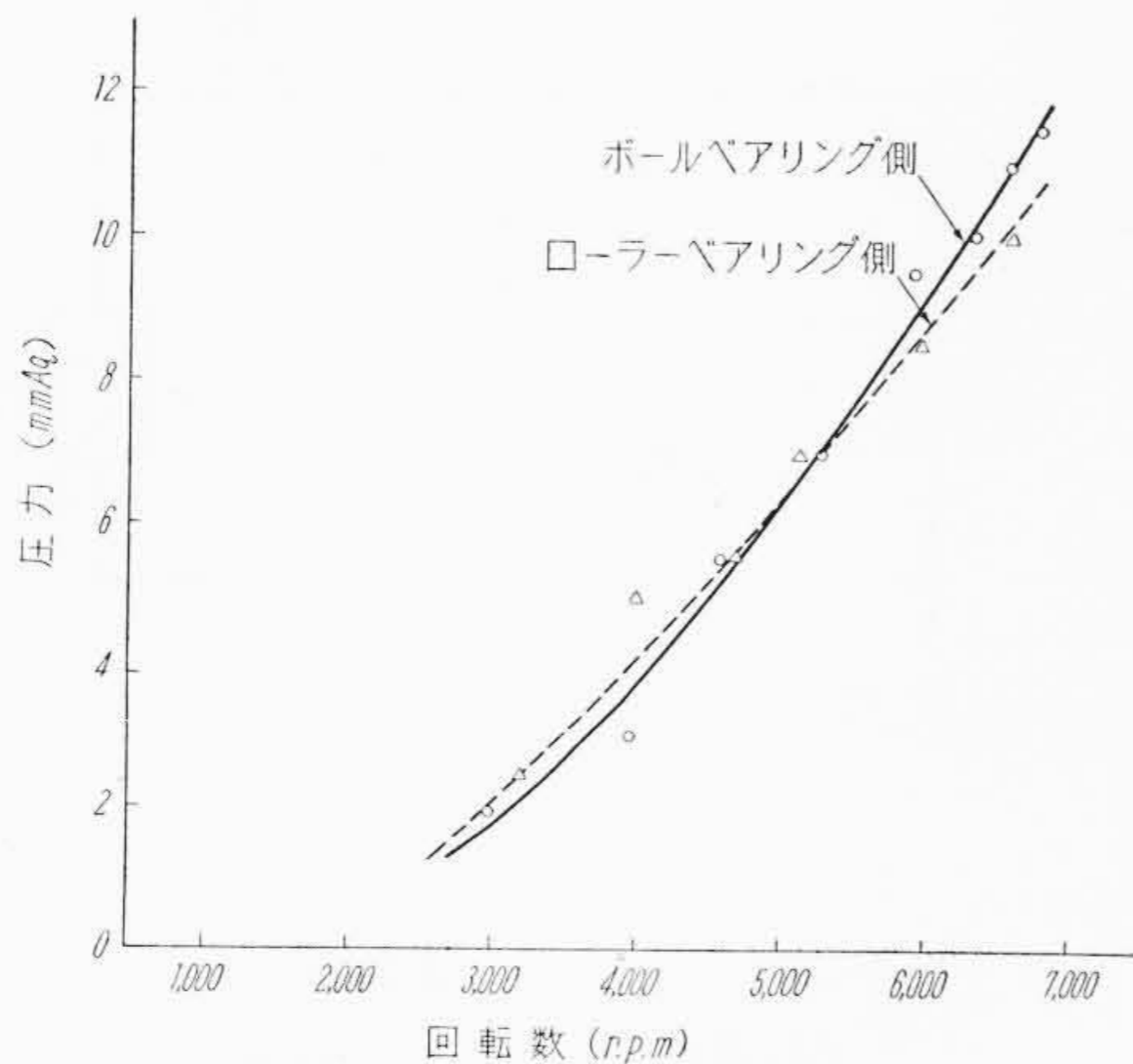
主電動機に適する油潤滑方式としては、油浴式と循環式とが考えられる。油浴式は第13図に示すように軸受下部に油溜を設け、軸受がたえず油中に浸されている構造である。油面の高さは軸受のボールまたはローラが油に浸っていることを条件に、レールのカントおよび車両の動揺を考慮して決定されるが、京王帝都電鉄納100kW主電動機の現車試験によると、油面が軸受の外輪外径程度まで下っても異常なく、ほぼ満足すべき結果がえられた。ただ、油面がつぎに述べる循環式にくらべ高いので密封装置がやや複雑になる。これに対して循環式は第14図に示すように油ポンプによって軸受下部の油タンクから油を汲上げ、上部タンクにため、これを各軸受に流下せしめる方式である。油ポンプにはギヤポンプ、ディスクポンプなどが使用されるが、ポンプならびに油タンクは左右どちらの回転にも使用できる構造である\*。



第13図 油潤滑系統図 (油浴式)



第14図 油潤滑系統図 (循環式)

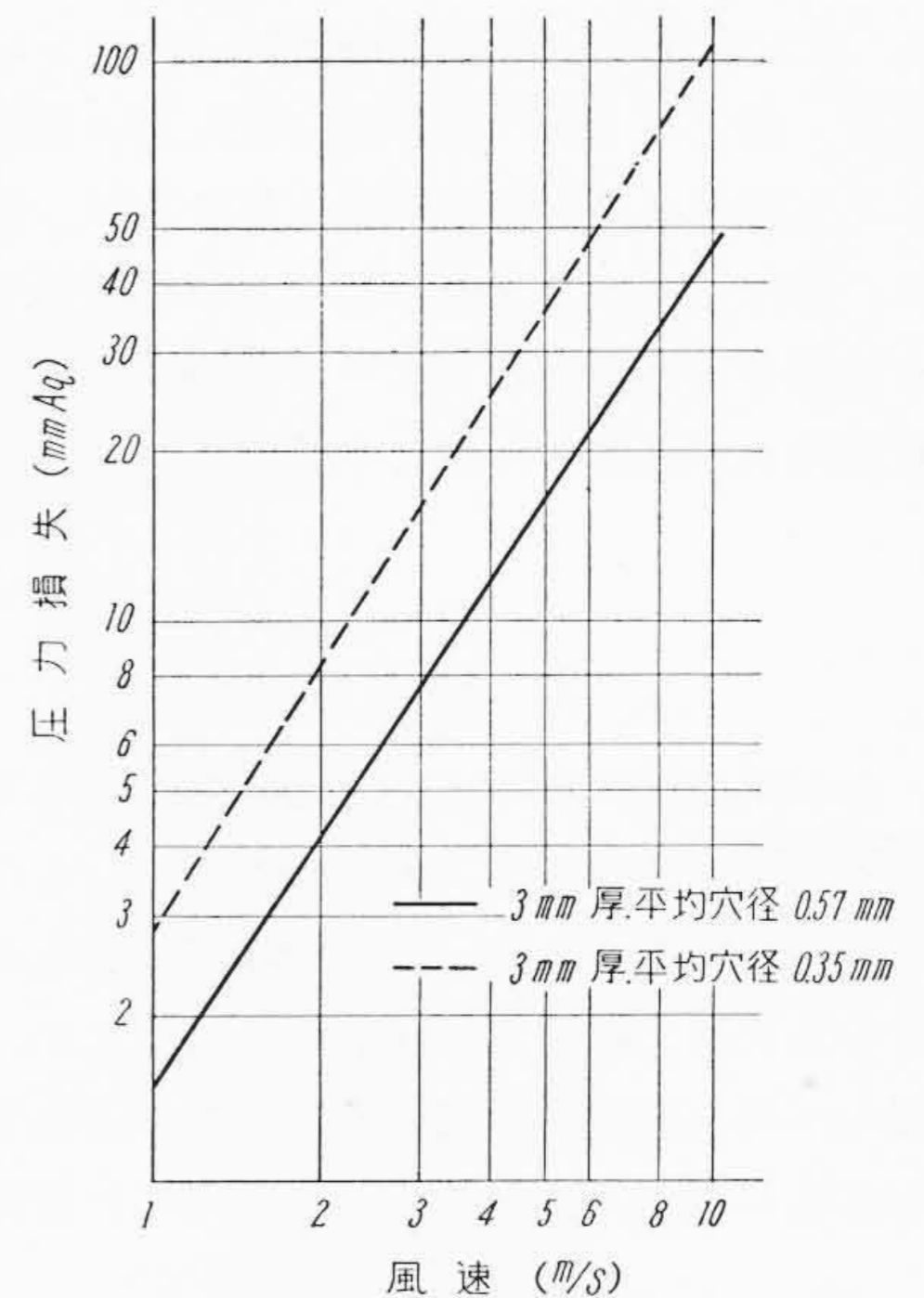


第15図 軸受内圧力の変化

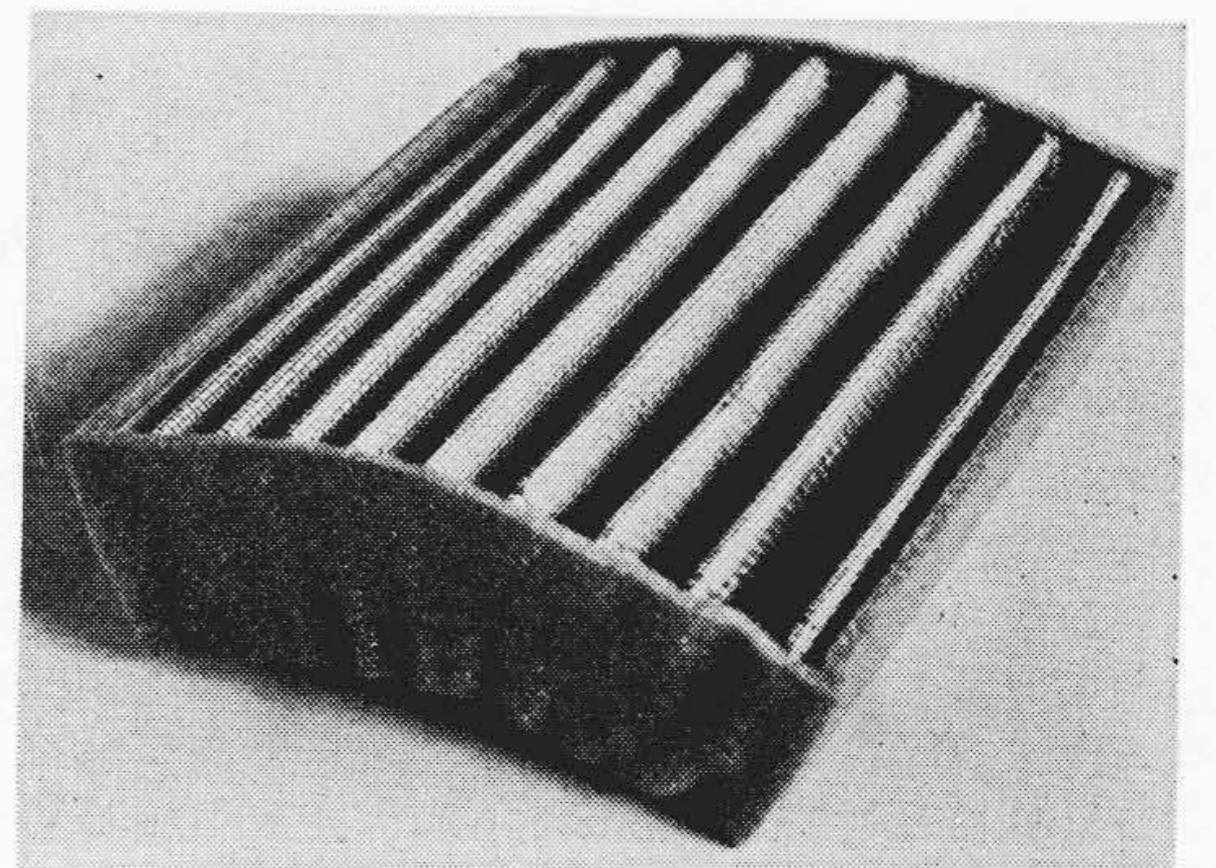
#### 4.1.2 密封装置

油潤滑を採用するにあたって慎重に考慮しなければならない問題の一つに軸受の密封装置がある。一般に主電動機では密封装置に隣接してファン、整流子などの回転体があるので、それらの回転により軸受内の油気を含んだ空気を吸出し油もれを生ずる恐れがある。これを防ぐためには第13図に示すように主電動機外部から密封装置内部にバランスホールを開口し、密封装置内の圧力が大気圧より低くなることを防いでいる。また第15図に回転中の軸受内圧力(第14図P点)の測定結果を示す。軸受内圧力は軸受の保持器、油切によって回転数の増加とともに上昇するので、

\* 特許申請中



第16図 ビニールスポンジの通風抵抗



第17図 ビニールスポンジフィルタ

密封装置の設計にあたっては、その回転速度に応じてラビリンスの段数を決定している。さらに最近では密封装置に関して、その空気力学的な検討により、実際に使用する密封装置を決定して少ないスペースで最大の効果を上げうようになった。

油潤滑の最大の利点は、あらゆる回転速度で潤滑性能がすぐれていることである。今後グリースの性能はまだまだ進歩するであろうが、将来の超高速主電動機用軸受の潤滑方法としては、密封装置の発展によって、保守が簡便で、潤滑性能の優秀な油潤滑が採用されることは容易に予想される。

#### 4.2 フィルタ

車両用フィルタの研究は従来種々行われてきたが、最近の高速主電動機の通風ファンは冷却効果の向上のため、高速回転により非常に強力なものが製作されるようになった。したがってじんあいなどを吸込む量も多く、整流子の荒損やブラシの固着を起しやすいので従来のようなフィルタでは十分な除じん効果が上げられない。そこで現在一般に使用されている鋼毛に代って、ビニールスポンジの使用が考えられるようになってきた。このビニールスポンジはじんあい捕集効果が大きく、また使用条件に従って目のあらし、シートの厚さなどが任意に選択できるので申し分ないが、通風抵抗が大きく、特にじんあい付着による抵抗の増加は避けにくい。第16図にビニールスポンジの通風抵抗の実測例を示す。実際使用にあたっては、ビニールスポンジシートを波形に折曲げ、なるべく通風面積を広くして使用することが望ましい。第17図にその構造例を示す。

横浜市交通局納トローバス用主電動機(一時間定格, 100 kW 回転数 1,600 rpm)について比較試験した結果, 厚さ 3 mm, 平均孔径

0.57 mm, 気穴率 90%, 通風面積 0.32 m<sup>2</sup> のビニールスポンジを使用した場合, 鋼毛にくらべ約 6%, じんあい 200 g 付着した場合にはさらに 7% 程度コイルの温度が上昇するが, 除じん効果は格段に改善され, ほぼ完全に冷却風のじんあいを除去できることが実証された。この場合主電動機はビニールスポンジにじんあいの付着した状態で定格出力が確保されるよう設計されていることはもちろんである。

5. 結 言

戦後, わが国の電気車両は急速な発展を続けてきたが, なかでも高速度主電動機の進歩はまことにめざましいものがあり, 豊富な使用実績も得られるようになった。技術的進歩をかえりみる意味で軽量化すなわち比出力の増大の変せんを示したが, 特に最近の広領域主電動機の出現は経済的な高性能電車への方向を裏づけるものとして重要な意味があり, また油潤滑を採用した超高速広領域主電動機

はさらにその次の段階を意味するものであると考える。絶縁種別による温度上昇と寿命の関係より F 種, H 種絶縁が非常に信頼度の高いものであることを明らかにした。

主電動機の高速度軽量化にともなって, じんあいに対する保護の問題なども真剣に検討されなければならない。ここでは最近の研究結果の一端を示したが, これらの問題は使用者のご批判にまつところが多い。本稿をご参考に供するとともに今後のご支援をお願いする次第である。

参 考 文 献

- (1) 北野, 平楽: 日立評論 別冊 20, 63 (昭 32)
- (2) 川野, 立川ほか: 日立評論 42, 991 (1960)
- (3) H. J. Baldwin: T. A. I. E. E. Vol. 68, 132 (1949)
- (4) 橋谷, 小川, 柴田: 日立評論 40, 1225 (1958)
- (5) 間瀬, 江尻: 日立評論 別冊 35, 66 (1960)
- (6) L. C. Whitman, W. W. Whitman: TAIEE Vol. 78, Part 1, 308 (1959)



新 案 の 紹 介



新案第 512319 号

池 田 正 一 郎

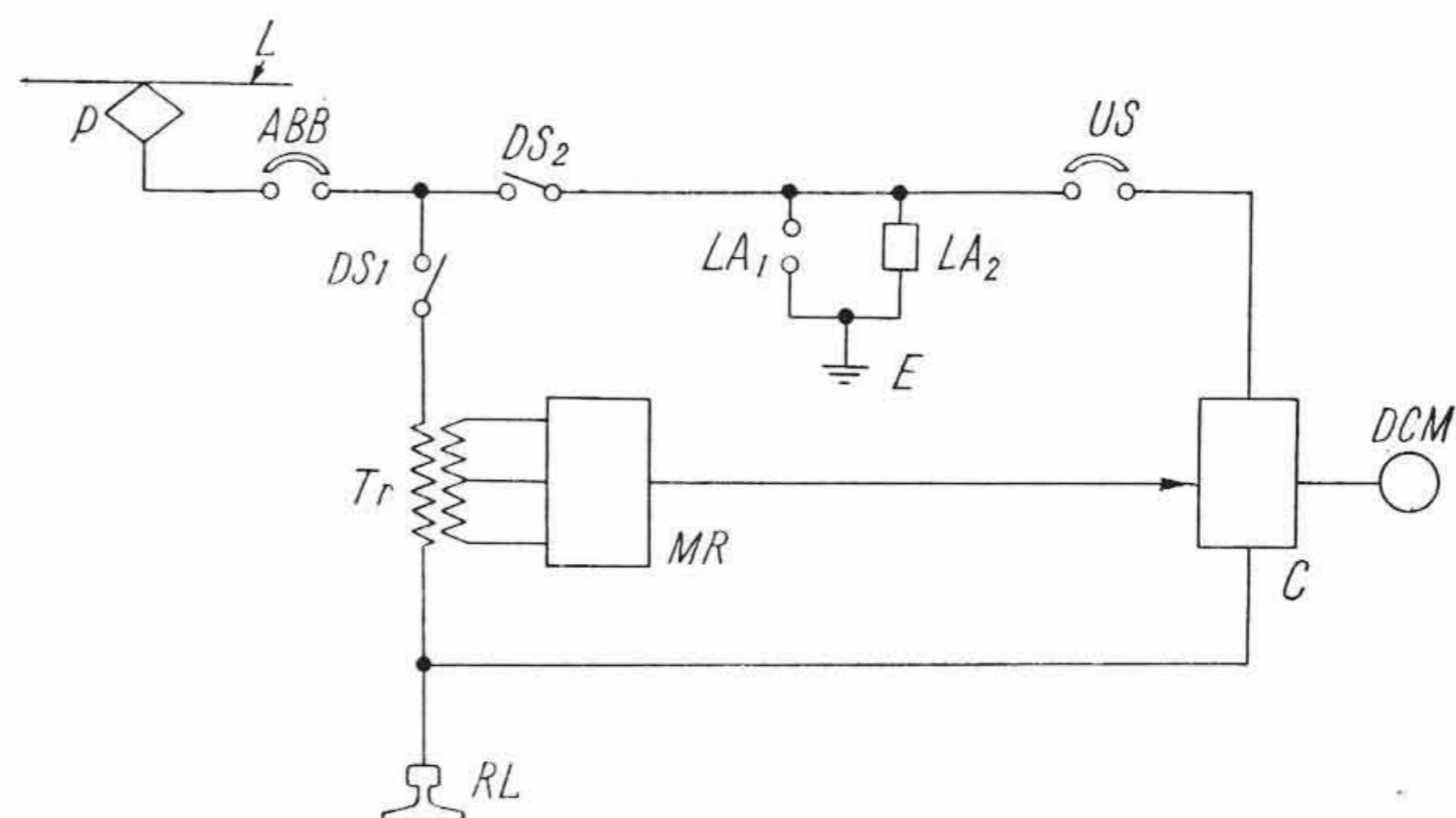
交 直 両 用 電 気 車 の 給 電 保 護 装 置

交流直流両用電気機関車の運転自動保安装置においては, 直流駆動電動機が直流 1,500V 区間から給電されて運転中に, この機関車が交流 20,000 V 区間に誤って乗り込んだとき, またはその逆に場合に共通の一個の交流自動遮断器を働かせてこれによりじん速安全に給電回路を遮断させる。この場合には電気車駆動用直流電動機は直流 1,500V フィーダーから交流自動遮断器および切替用断路器を介して給電運転されるとともに, 交流 20,000V フィーダーから同一の交流自動遮断器およびほかの切替用断路器, 変圧器および整流電気弁を介して給電運転されるように構成される。このように構成し, 直流電動機が直流直接給電で運転しているときに交流フィーダー区間に突入すると直流給電回路に設けられた交流に感応する装置によって遮断器をただちに自動遮断せしめ, また逆に直流電動機が二次側に整流電気弁をもつ変圧器給電回路を介して交流フィーダーから給電されて運転中に直流区間に突入した場合には変圧器回路に設けられた直流に感応する装置によってまず変圧器回路に限流抵抗を挿入し, その後に交流遮断器により直流を有効に自動遮断せしめるものである (特公昭 35-2971 号参照)。

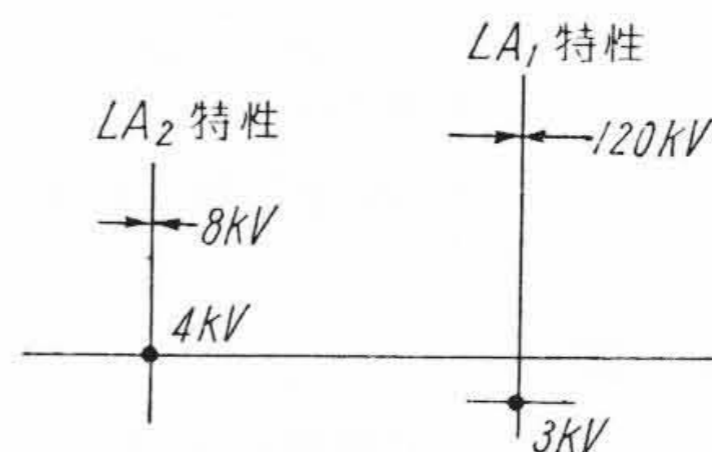
この考案は以上のような構成の交流直流両用電気機関車への給電回路に対する過電圧または異常電圧の保護装置にかかるものである。この考案においては一方の遮断器 DS<sub>1</sub>, 変圧器 Tr を含む回路を駆動用直流電動機 DCM からみて直流間接給電回路と呼び, 断路器 DS<sub>2</sub>, 区分別閉器 US の回路を直流直接給電回路と呼ぶ。LA<sub>1</sub> および LA<sub>2</sub> はそれぞれ保護間隙型および直流アレスタで直接給電回路と大地 E との間に互に並列に接続され, しかもそれは P 側からみて制御器 C, したがって電動機 DCM の手前に設けられる。なお LA<sub>1</sub> は特殊ギャップ型を可とし, LA<sub>2</sub> はたとえばミウライト盤のような負特性高抵抗盤またはアルミニウムセル型などを可とし, 動作特性は第 2 図のしめすとおりで, LA<sub>1</sub> は商用周波交流では 3kV 程度で放電するような間隙で, これはサージに対する放電開始は 120kV 程度になるものである。LA<sub>2</sub> は直流 1,500V 回路用標準アレスタで商用周波交流では 4kV 程度で放電するがサージでは 8kV 程度で放電するというように規格化されたものである。第 3 図は LA<sub>1</sub> を詳細に図示したものである。間隙型アレスタの特性は非直線抵抗体を使用せる直流アレスタに比しサージに対する放電電圧が高いのが普通である。したがって直流 1,500V の給電時のサージに対しては LA<sub>2</sub> が正規に動作をする。また間隙型アレスタは商用周波交流による放電開始電圧は一般に必ずしも安定したものではないので, 交流 20kV が加圧されたときに誤って LA<sub>2</sub> が先に動作開始すると LA<sub>2</sub> は破壊するうれいがある。これをさけるために LA<sub>1</sub> に特に精密調整付の始動ギャップを設け, 商用周波交流に対し LA<sub>2</sub> より確実にさらに動作するようにしたものである。直流運転中誤って交流に侵入したとき電動機 DCM はもちろん危険な訳であるがこのようにすれば LA<sub>1</sub> はわずかに 3kV 程度の電圧で放電して交流フィーダーを

DCM の手前で接地するから, それに対する絶縁のきょういをなくすとともに直流アレスタ AL<sub>2</sub> を保護し, その焼損から生ずる二次的のじょうらんを未然に防止することができる。

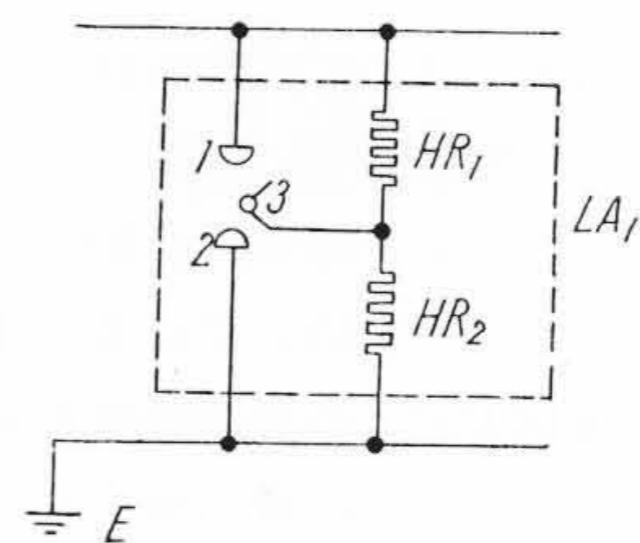
なお, これに関連し交流, 直流運転の選択的動作によって直流直接給電回路と間接給電回路を区別して自動遮断するものとして特公 35-2972 号があり, 同様の構成で直流侵入の場合には変圧器の直列蓄電器で阻止しようとする特公昭 35-2325 号がある。 (宮崎)



第 1 図



第 2 図



第 3 図