

インド国鉄納 25 kV, 2,400 kW 交流電気機関車

25 kV 2,400 kW A. C. Electric Locomotives for Indian Railways

油井 兄 朝* 田所 富 男* 坂 口 保**
Shigetomo Yui Tomio Tadokoro Tamotsu Sakaguchi
川上 直 衛** 前 川 愛 一***
Naoe Kawakami Aiichi Maekawa

内 容 梗 概

1963年インド国鉄が輸送力増強のため発注した75両の交流機関車のうち45両を日立を中心とする日本連合が受注した。ここに計画された機関車は連続定格2,400 kWの出力を持ち、発電制動付で4軸85.2 tに収める必要上、各所に軽量化および新構想が採り入れられている。粘着特性の向上および軽量化の目的から国鉄EF80形で多くの実績を持つ1台車1電動機式を採用し、1,200 kWの画期的大容量主電動機を搭載している。また、シリコン整流器の採用、高圧タップ切換式小形主変圧器および抑速発電制動用抵抗器など国際舞台へ出すための努力が各所に払われており、これら主要目につき取りまとめて報告する。

1. 緒 言

インド国鉄の第3次交流電化計画の一環として大容量貨物機関車の大量発注が行なわれた。これまでインド国鉄には約200両近い交流機関車が納入されているが、日本からは38両のイグナイトロン機関車が供給されたのみで、その他は大部分欧州連合製であった。今回、日立製作所を中心とする日本連合（日立製作所、三菱電機株式会社、三菱重工業株式会社、東京芝浦電気株式会社）は、これら既納の機関車に比して技術的に上回る仕様を提出し、75両中45両を受注製作することとなった。

欧連製の既納機関車は出力2,100 kWであったが、今回のインド国鉄側の仕様は1,830 t、10‰起動（粘着係数0.35）および均衡速度32 km/h、また3,660 tけん引で0‰、65 km/hの均衡速度を要求されており、これらを満足するには連続2,400 kWを要することとなる。われわれはシリコン整流器式抑速発電制動付の出力2,400 kWの機関車を規定重量内に納めうることを申し出た。このため1台車1電動機式台車および主電動機の組み合わせ、側構え構造による応力外皮形車体、主変圧器、リアクトル、補機類のすべてに軽量化をはかった。

なおインド国鉄側の要望によりパンタグラフ、A.B.B.高圧タップ切替器、空気制動部品、連結器類などはインド国鉄から支給される。

本機受注に際しては、日本国鉄の絶大なるご援助、ご指導を賜っており、また立会検査においても多くのご助力をいただき、関係各位に対し厚くお礼申し上げる次第である。

2. 特長および仕様

2.1 本機の特長

連続定格出力2,400 kW、85.2 tの貨物用交流機関車でありおもな特長は次のとおりである。

- (1) 1台車1電動機式の採用により軽量化および粘着特性の向上を図っている。
- (2) 主電動機は1台1,200 kWの大容量であり無溶剤エポキシ樹脂絶縁、簡易積層ヨークを採用し1 kW当たり重量4.1 kgと超軽量化に成功した。
- (3) 主回路の整流にシリコン整流器を使用した。

- (4) 高圧タップ切替方式の軽量主変圧器および開放形鉄心H種絶縁の平滑リアクトルを採用している。
- (5) 抑速発電制動用に大容量抵抗器が搭載されている。
- (6) 軽量にして車端圧縮試験400 tに耐えるため車体は応力外皮構造が採用されている。
- (7) 極力インド国産品をとり入れることとし以下に示すものが採用されている。

輸入品およびインド国鉄支給品

AM形	パンタグラフ	FAIVELE Y社形	2台/車	インド国鉄支給
DBTF形	空気遮断器	B.B.C社形	1台/車	インド国鉄支給
NO 32形	高圧タップ切 換器	B.B.C社形	1台/車	インド国鉄支給
2EC38B	電動空気圧縮 器	W. H 社形	1台/車	インド国鉄支給
250 REF M	電動真空機	G & C 社形	2台/車	インド国鉄支給一部輸入
	ブレーキ部品	S & F 社形	1式/車	インド国鉄支給一部輸入
	速度記録計装 置	HASLER 社形	1組/車	輸入
	低圧回路サー ジギャップ	SOULE 社形	1個/車	輸入
	サイド・バッ ファ		4個/車	インド国鉄支給
	センタ・バッ ファ・カプラ		2個/車	インド国鉄支給
	キャトル・ガ ード		2個/車	インド国鉄支給

2.2 一般仕様

第1図に機関車外観、第1表に一般仕様を示す。

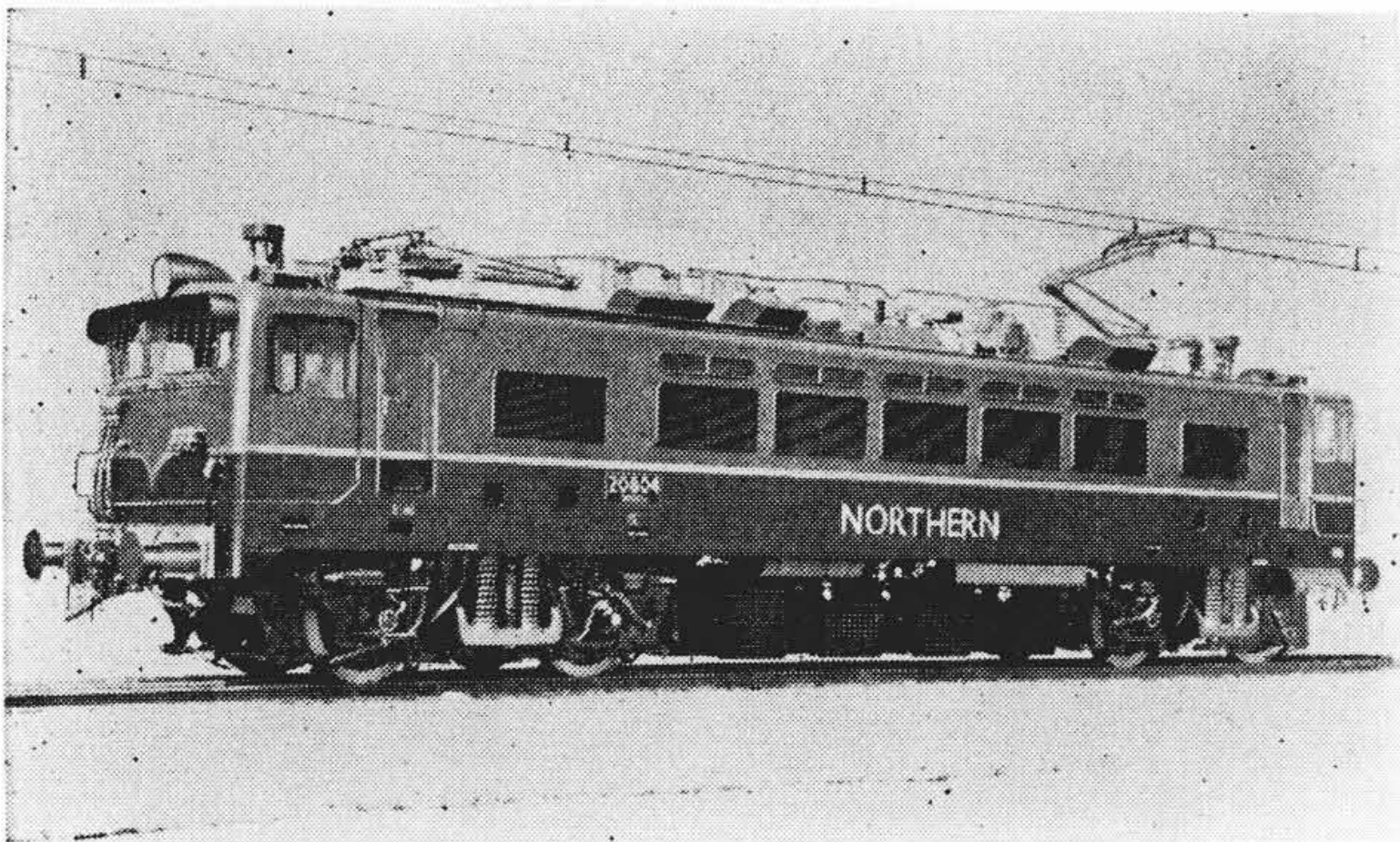
本機関車の仕様決定条件は次のとおりである。

- (1) 起動時（速度0 km/hにおいて）引張棒において28.8 t以上の引張力を出し、1,830 tの貨物列車をけん引して10‰のこう配を起動できること。
- (2) 架線電圧22.5 kV、タイヤが半分摩耗した時の動輪径(1,100 mm)において、次の平衡運転速度が連続定格（IEC温度限度-20℃において）以内で得られること。
 - (イ) 3,660 tけん引、平坦線上で65 km/h以上。
 - (ロ) 1,830 tけん引、10‰上りこう配上で32 km/h以上。
- (3) 1,830 tけん引、10‰下りこう配上で発電ブレーキのみに

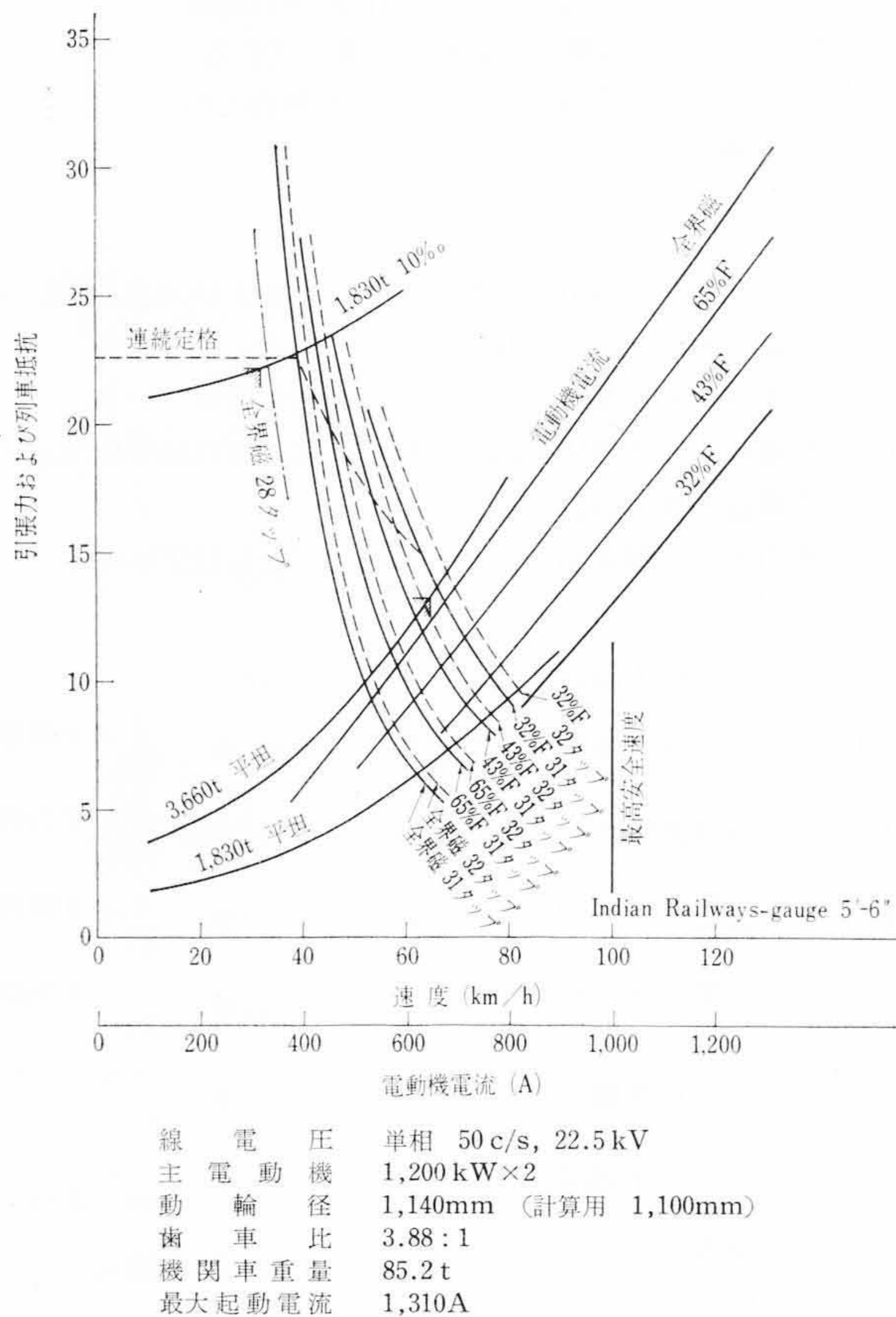
* 日立製作所水戸工場

** 日立製作所日立工場

*** 日立製作所国分工場



第1図 機関車



第2図 WAG 2形貨物用交流電気機関車特性

よって40km/hで連続抑速制動運転ができること。
(2)(ロ)の条件での所要最大出力は2,430kWとなるが、最弱界磁で満足させることにし、全界磁の公称連続定格を2,400kWに選定した。
以上の特性を満たす機関車特性を第2図に示す。

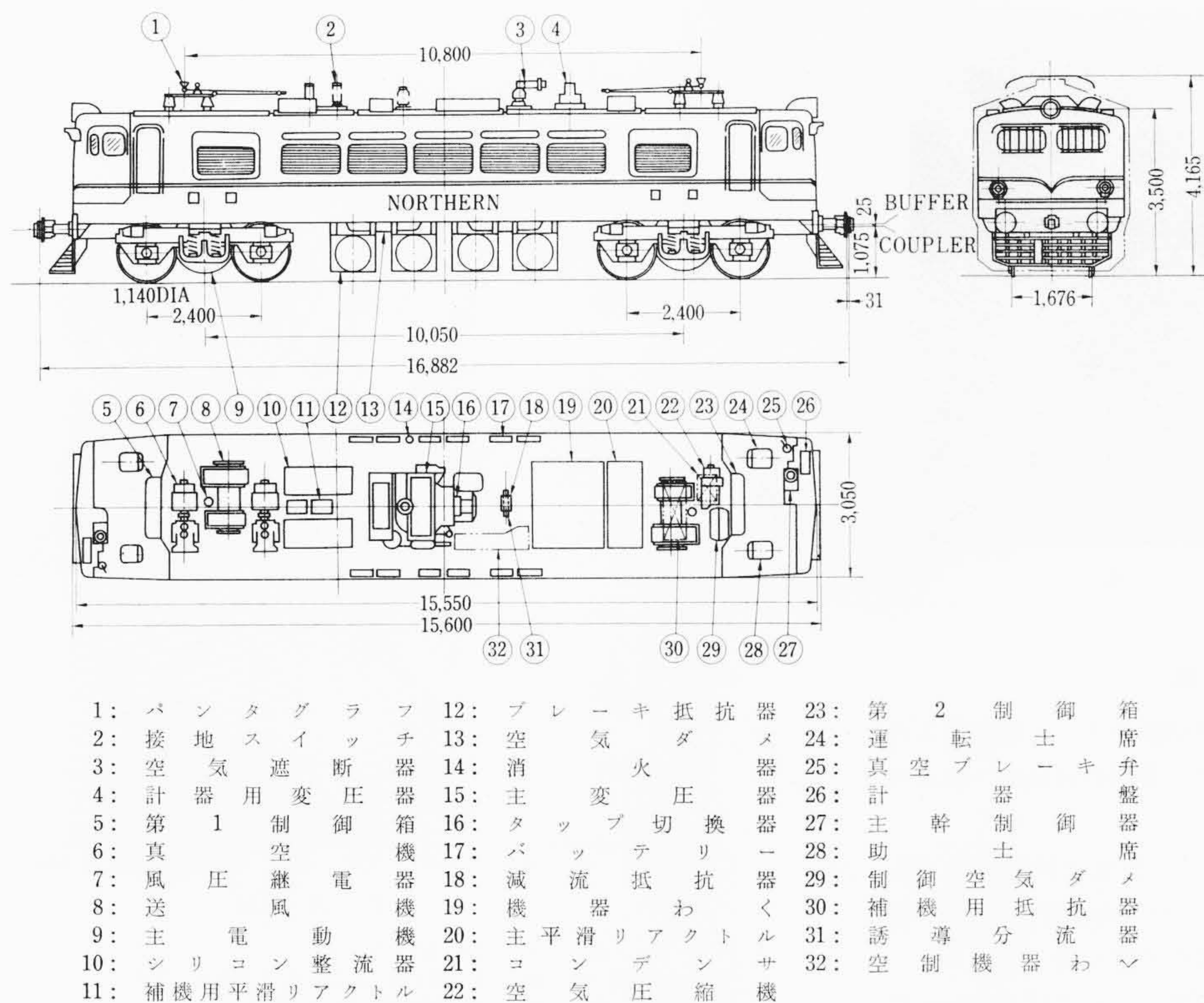
3. 機関車構造

3.1 機器配置およびぎ装

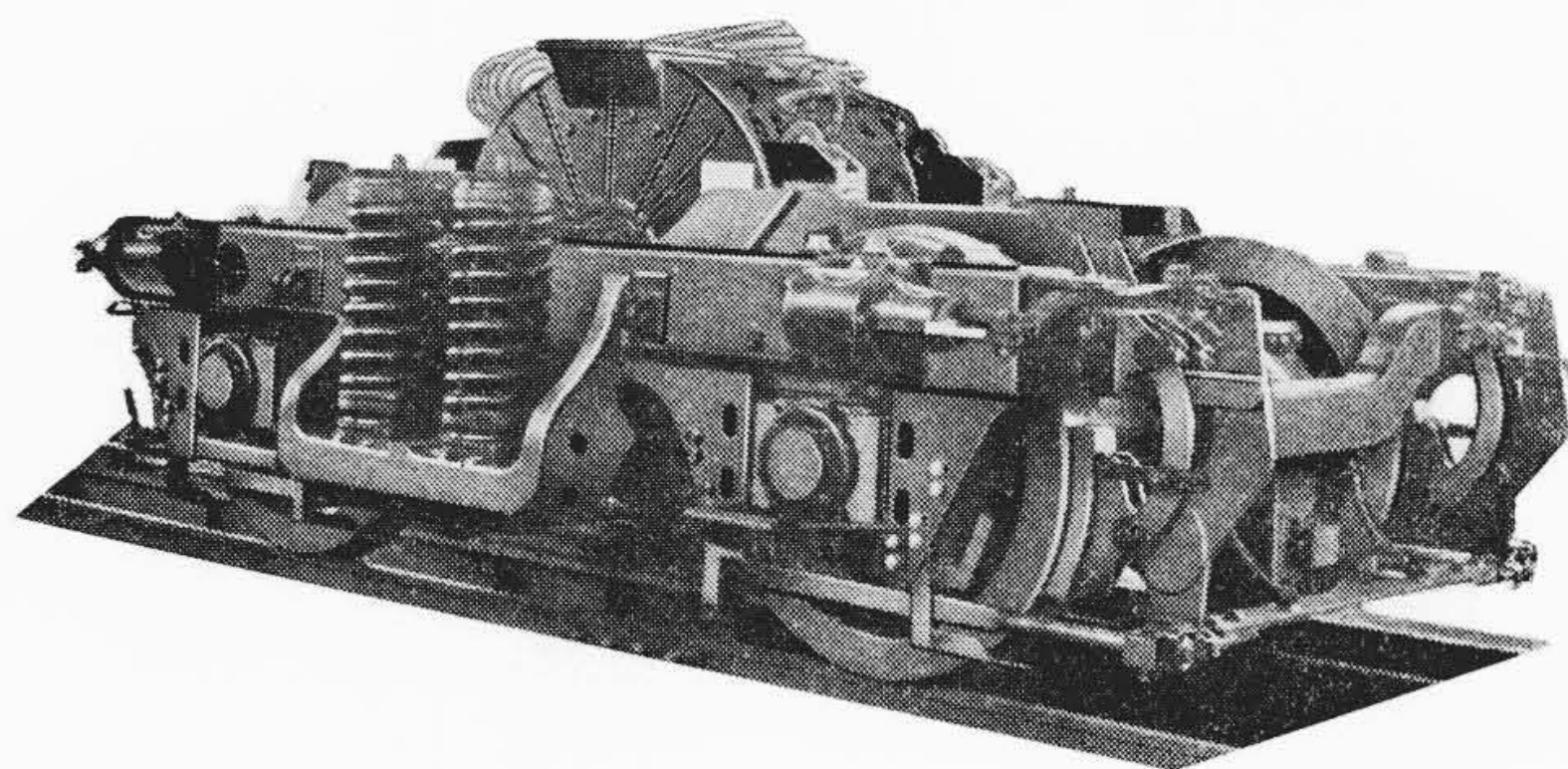
本機関車の機器配置を第3図に示す。
機械室廊下は点検の便を考え両側通路とし、第1端から、第1端補機室、シリコン整流器箱、高圧タップ切換器を含む主変圧器室、高圧機器わく、主電動機用界磁抵抗器および交流フィルタ抵抗器を含む平滑リアクトル箱、第2端補機室の順に機器が配置されている。
床下には台車間に発電制動用抵抗器が4箱に分けて取り付けられている。
主要機器の冷却は送風機2台で主電動機2台、シリコン整流器、

第1表 機関車一般仕様

項目	仕様
用途	貨物用
電気方式	単相交流 50 c/s, 25 kV
電圧変動範囲	27.5~18.75 kV, 非常時 17.5 kV (定格電圧 22.5 kV)
運転整備重量	85.2 t
軌間	1,676 mm
軸配置	B-B
機関車形式	箱形 両運転台
機関車主要寸法	
連結面間長さ×幅×高さ	16,000×3,193×3,500 mm
車体長さ	15,600 mm
台車中心間距離	10,050 mm
固定軸距離	2,400 mm
台車形式	2軸ボギー式
動力伝達方式	1台車1電動機式, 2段減速 ゴムクイル式
動輪径	1,140 mm (計算 1,100 mm)
歯車比	42/22×59/29=3.88:1
モジュール	1段目; 15 2段目; 13
機関車性能	(温度上昇限度; IEC 限度 -20℃)
連続定格出力	2,400 kW
連続定格速度	38 km/h
連続定格引張力	22,600 kg
最高運転速度	80 km/h
最高安全速度	100 km/h
最大引張力	31,500 kg ($\mu=37\%$)
主変圧器	1台
形式	送油風冷式, 呼吸形, 内鉄形 単巻巻線付
連続定格容量	一次 3,700 kVA, 二次 3,560 kVA, 三次 125 kVA, 四次 15 kVA
電圧	一次 22.5 kV, 二次 1,745 V, 三次 240 V (150 V タップ付), 四次 240 V
相数, 周波数	単相 50 c/s
主整流器	1組 (発電ブレーキ用シリコン整流器および補助シリコン整流器内蔵)
形式	風冷シリコン整流器
連続定格	2,550 kW, 1,250 V, 2,040 A
結線方式	単相ブリッジ結線
素子個数	288 (8S×9P×4A) 39 (発電ブレーキ用シリコン整流器および補助シリコン整流器)
主電動機	2台
形式	脈流, 直巻, 補極, 補償巻線付, 他力通風, 台車装架式
連続定格	1,200 kW 1,250 V 1,020 A 710 rpm 8極
最弱界磁	32 % F
絶縁種別	F種 (固定子エポキシ樹脂一体絶縁)
主平滑リアクトル	1組
形式	乾式風冷オープンコア形
回路電圧	1,250 V
連続定格電流	1,020 A
インダクタンス	9 mH×2 (1,020 A において)
制御方式	高圧タップ切換 電圧制御および界磁制御
制御装置	電磁 空気 単位スイッチ式 非自動 重連総括制御 (4両重連まで)
制御回路電圧	直流 110 V
灯回路電圧	直流 110 V
補機回路電圧	直流 200 V, 110 V および単相, 交流 50 c/s 240 V
補助回転機	組
主電動送風機	2 { 電動機...17 kW, DC 200 V, 100 A, 1,500 rpm 4極 送風機...風量 200/170 m ³ /min, 風圧 150/70 mmAq 多翼ファン
発電制動抵抗器用電動送風機	4 { 電動機...5 kW, AC 240 V, 1φ, 50 c/s, 4極 1,420 rpm 送風機...風量 250 m ³ /min 風圧 35 mmAq 軸流ファン
主変圧器用電動送風機	2 { 電動機...1.5 kW, AC 240 V, 1φ, 50 c/s, 4極 1,450 rpm 送風機...風量 75 m ³ /min, 風圧 40 mmAq 軸流ファン
主変圧器用電動油ポンプ	1 { 電動機...2.2 kW, AC 240 V, 1φ, 50 c/s 4極 1,460 rpm 油ポンプ...油量 750 l/min, 揚程 8 m
電動空気圧縮機	1 { 電動機...入力 9/74 kW (冷時/熱時), DC 110 V 1,500 rpm 圧縮機...吐出容量 1,135 l/min 吐出圧力 7 kg/cm ²
電動真空排気機	2 { 電動機...13½/9½ HP DC 110 V 1,500/1,000 rpm 真空排気機...排気量 14,000 l/min
補助電動空気圧縮機	1 { 電動機...500 W DC 110 V, 1,200 rpm 圧縮機...吐出容量 86.8 l/min
ブレーキ方式	機関車; 発電ブレーキ, 空気ブレーキおよび手ブレーキ 列車; 真空ブレーキ



第3図 機関車外形ならびに配置図



第4図 台車

平滑リアクトルを冷却するいわゆる集中冷却方式を採用し軽量化と車体長短縮をはかっている。

機械室はインターロックを備えた安全装置を設け、加圧状態で直接高圧機器に触れないようにし乗務員に対する安全をはかった。

配線はすべてブチルゴム絶縁ポリクロロブレンシース電線を使用し高圧、中圧、低圧に分けて配線し電線の冷却効果を高めるために配線用ダクトは使用していない。

3.2 台車および駆動装置

本機の特長の一つである1台車1電動機式が採用され、軽量化と高粘着性能を期待した設計である。

台車外形は第4図に示すとおりであるが全般的にEF80形交直流機関車の台車構造をほとんどとり入れており、実績の多い安定した形式を適用している。車輪径1,140mm、固定軸距離2,400mmで軸バネおよびまくらバネを持つ2自由度系の台車である。主電動機は台車中央に位置しているため一般の揺れまくら構造は採用できず、台車側よりまくらバネ受座を出してその上に上下にゴム座を敷いたコイルバネを片側2列ずつ並べ、車体重量は側受部より直接これらのコイルバネに乗る形となる。車体の台車に対する左右動および曲線通過時の回転運動はすべてまくらバネの横剛性を利用することになり、左右、回転のバネ剛性はEF80の実績より最適な

値が選定されている。引張装置は車体まくらより中心ピンが取り付けられ台車横より部に設けられた案内の中に突っ込む形をとっており引張着力点高さは連結器高さと同じく1,075mmで機関車としての軸重移動を完全に補償している。軸箱守、中心ピン部などの摩擦しゅう動部には高マンガン鋼を使用しているので高い耐摩耗性が期待できる。

駆動装置もEF80形とほとんど同じ構造であるが、固定軸距離の制限(仕様書指定範囲は2,400~2,600mm)から2段減速を採用している。歯車は1段目2段目とも小歯車にSNCM26 滲炭焼入れが、他の大歯車および中間歯車にはS45Cの高周波焼入れがそれぞれ採用されている。モジュールは1段目が15、2段目が13、歯幅はいずれも160mm、潤滑油は90#ギヤオイルを使用し軸受と共用とするため各歯車箱両端に磁気栓を取り付けている。最終大歯車と車輪との間はゴムクイルを使用

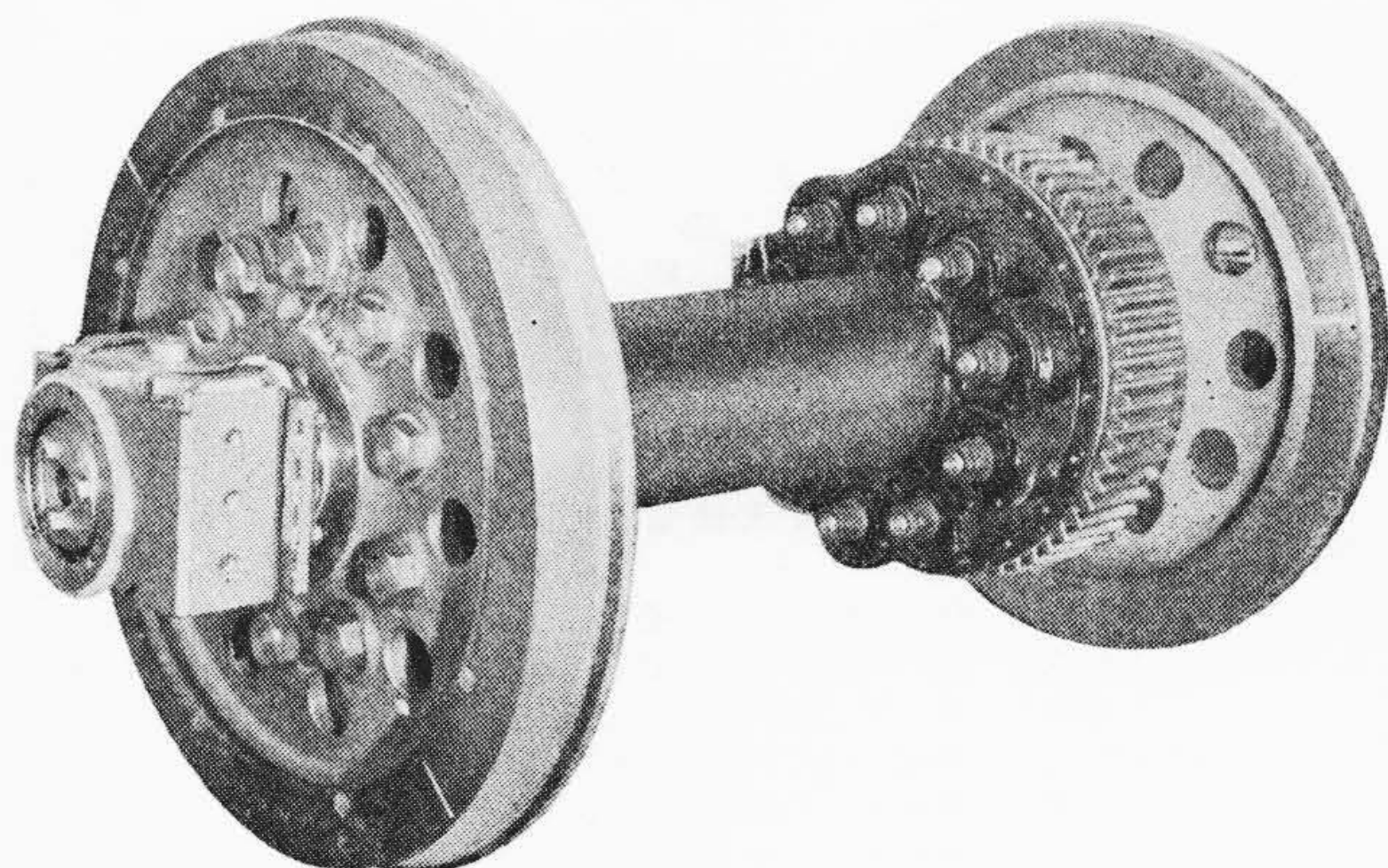
したたわみ継手が用いられ(第5図)、車輪の上下動に対しても十分円滑な動力伝達が行なわれる。

3.3 車体

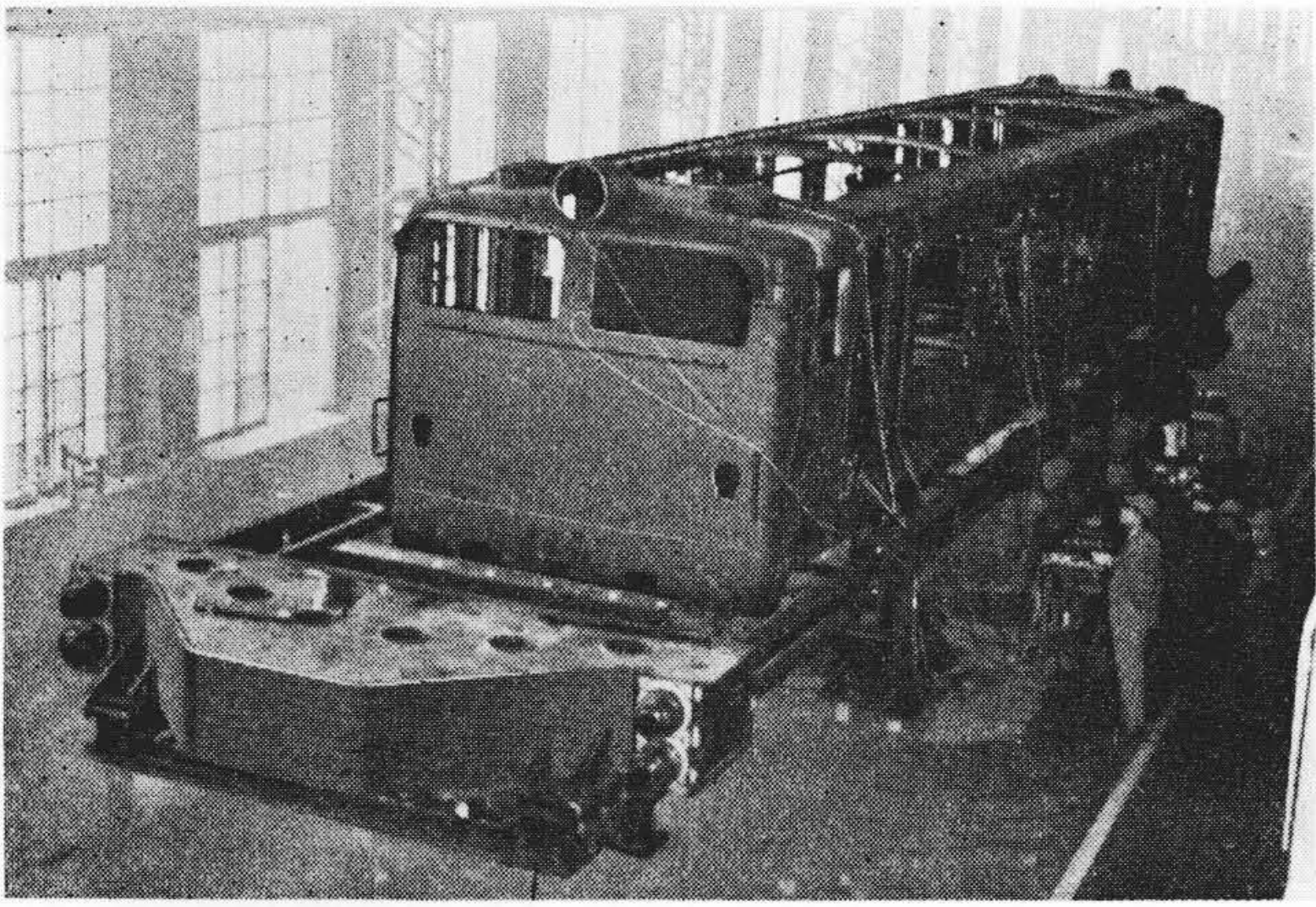
車体は両運転台式箱形車体であり、運転室はPrefabricated typeで、側出入口より前方の部分を取りはずせる構造となっており、衝突破壊時の修繕作業を容易にしている。車体両側面の機械室の部分は、全長にわたって固定窓とエアフィルタ用よろい窓が設けてあり、補機室側面のエアフィルタ取付部は、補機が取り出しできる構造となっている。

本車体は応力外皮構造であり側構えを“Vierendeel Rahmen”とみなす設計法をとっているが、垂直荷重および400t圧縮荷重に耐える構造である。車体台わくは、側はりを形成しているみぞ形鋼(380×100×10.5mm)と、これらと結合されている端はり、まくらはりおよび横はりより成っている。端はりは厚鋼板の溶接構造で、その下部は引張箱となっている。柱構えは、形鋼および鋼板より成る構造で、台わく側はりとともに側構えを形成している。

本車体は完成後、垂直荷重試験、車端圧縮荷重試験およびつり上げ試験を行ない、各部の応力を測定し、十分な強度をもつことが確認された。第6図に400t圧縮荷重試験の状況を示す。



第5図 ゴムクイル継手



第6図 車体鋼体試験

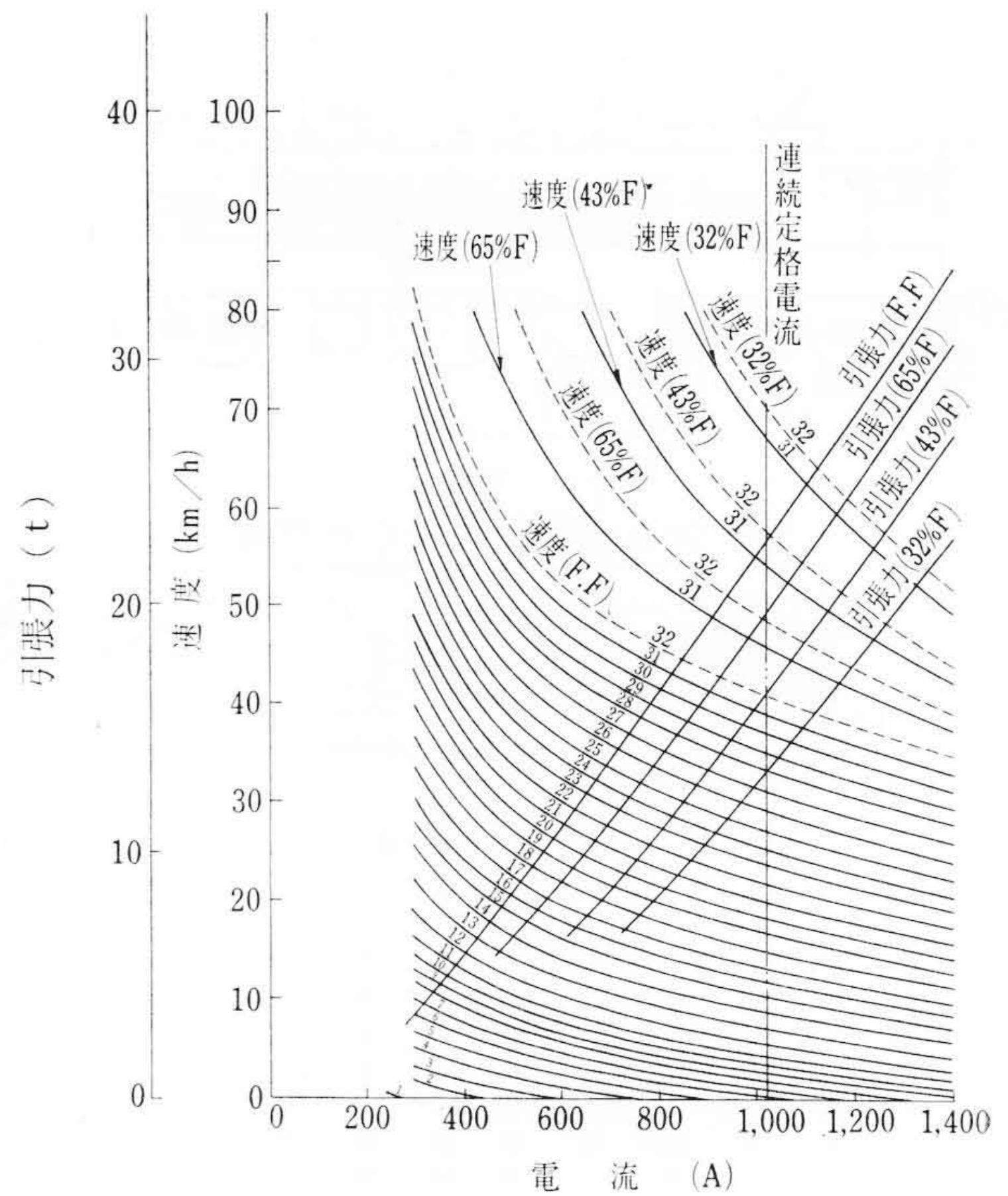
4. 電気機器

主回路は第7図に示すように高圧タップ切換方式、主電動機2台永久並列接続とし、力行および制動における制御の容易性、粘着特性などに対し十分の考慮が払われている。

電気機器に対する共通の問題点は各機器の温度上昇限度が IEC 規格値 -20°C と規定されていることで、このため機関車出力 2,400 kW 公称ではあるが実質は 2,700 kW を越す内容を持っている。

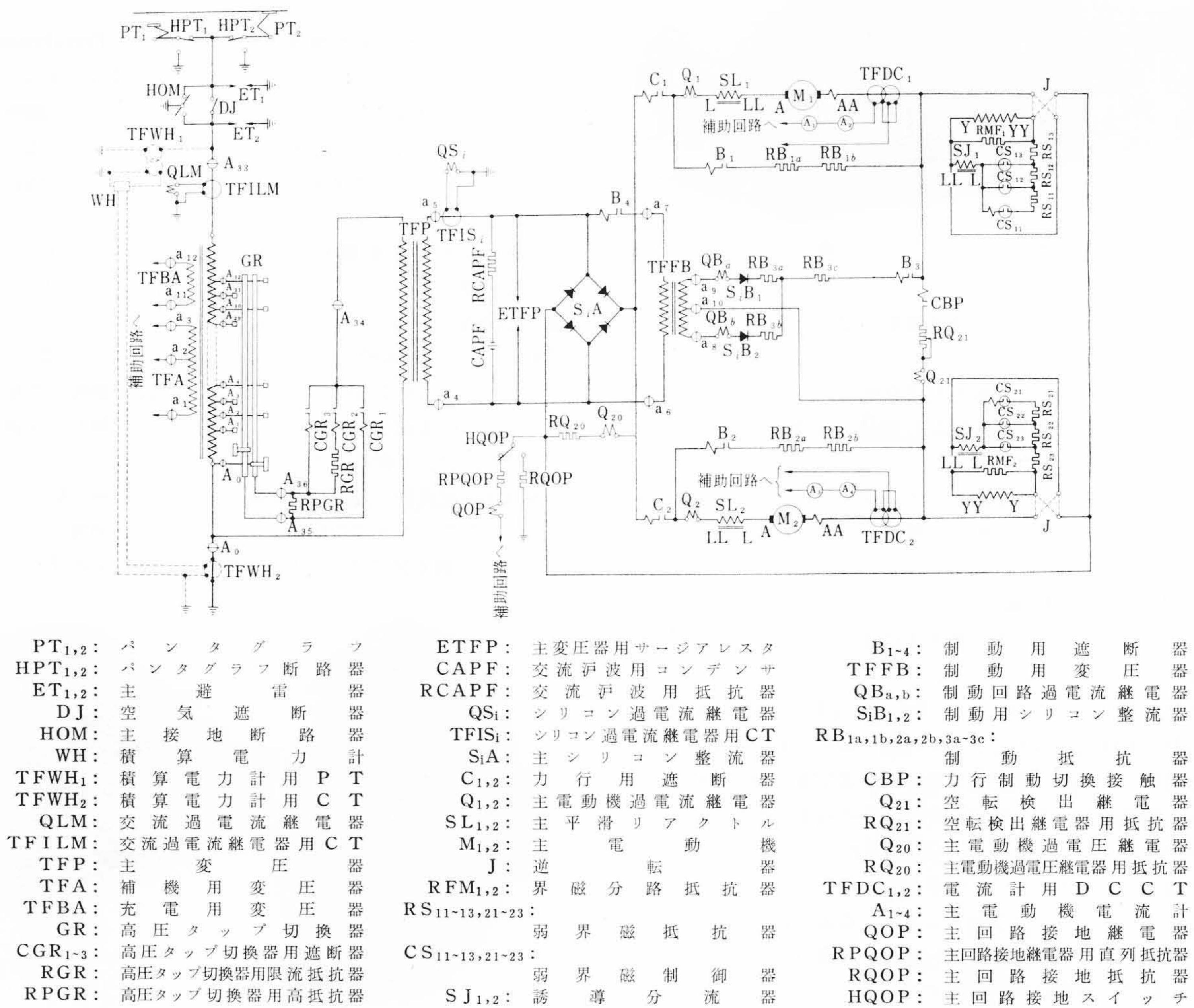
また防湿防じんにも留意し、機関車の高圧室内は約水柱 100 mm の静圧を加えている。

本機の力行時および制動時ノッチ曲線を第8,9図に示す。各機器

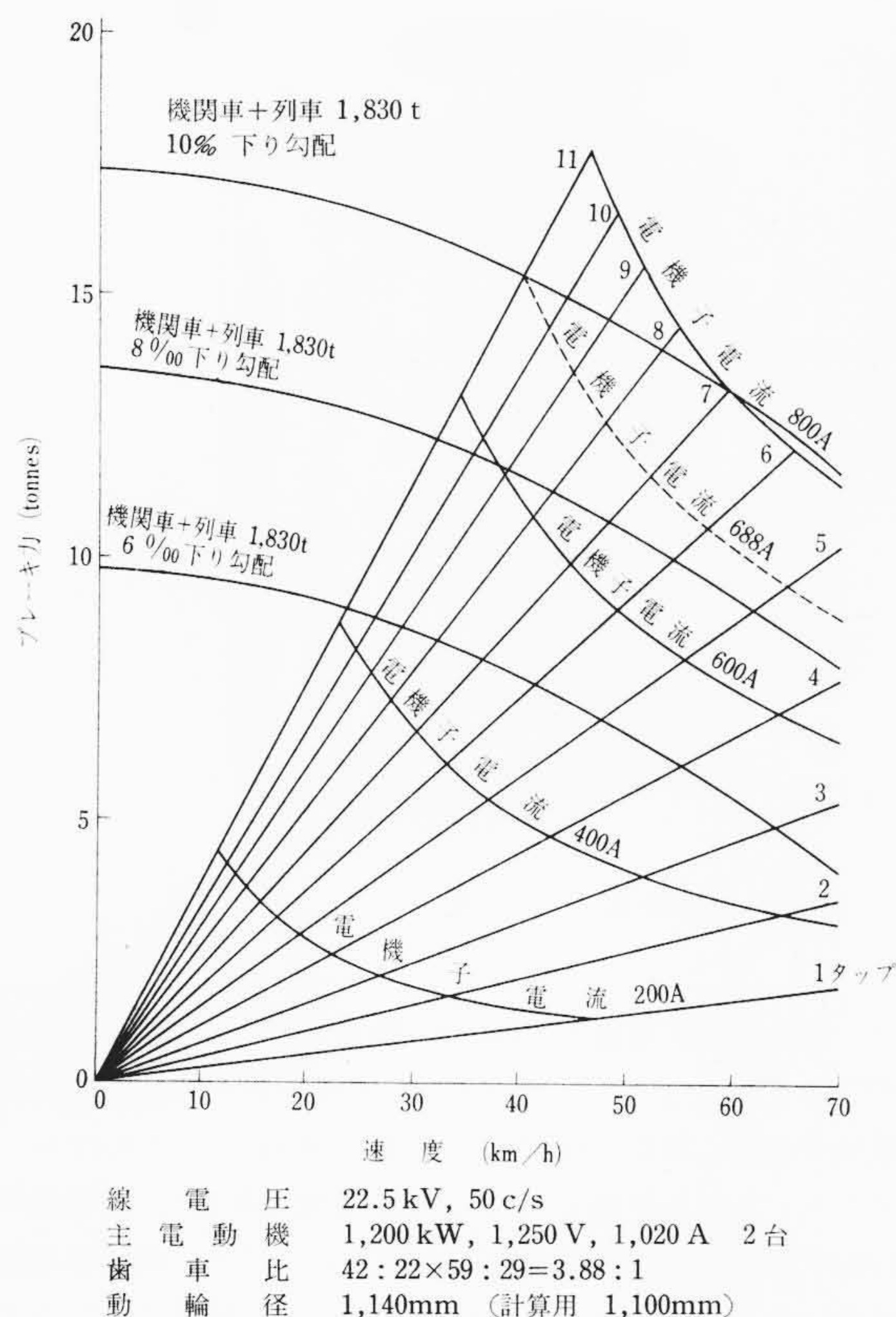


線電圧 22.5 kV, 50 c/s
主電動機 1,200 kW, 1,250 V, 1,020 A 2台
齒車比 42 : 22×59 : 29 = 3.88 : 1
動輪径 1,140 mm (計算用 1,100 mm)

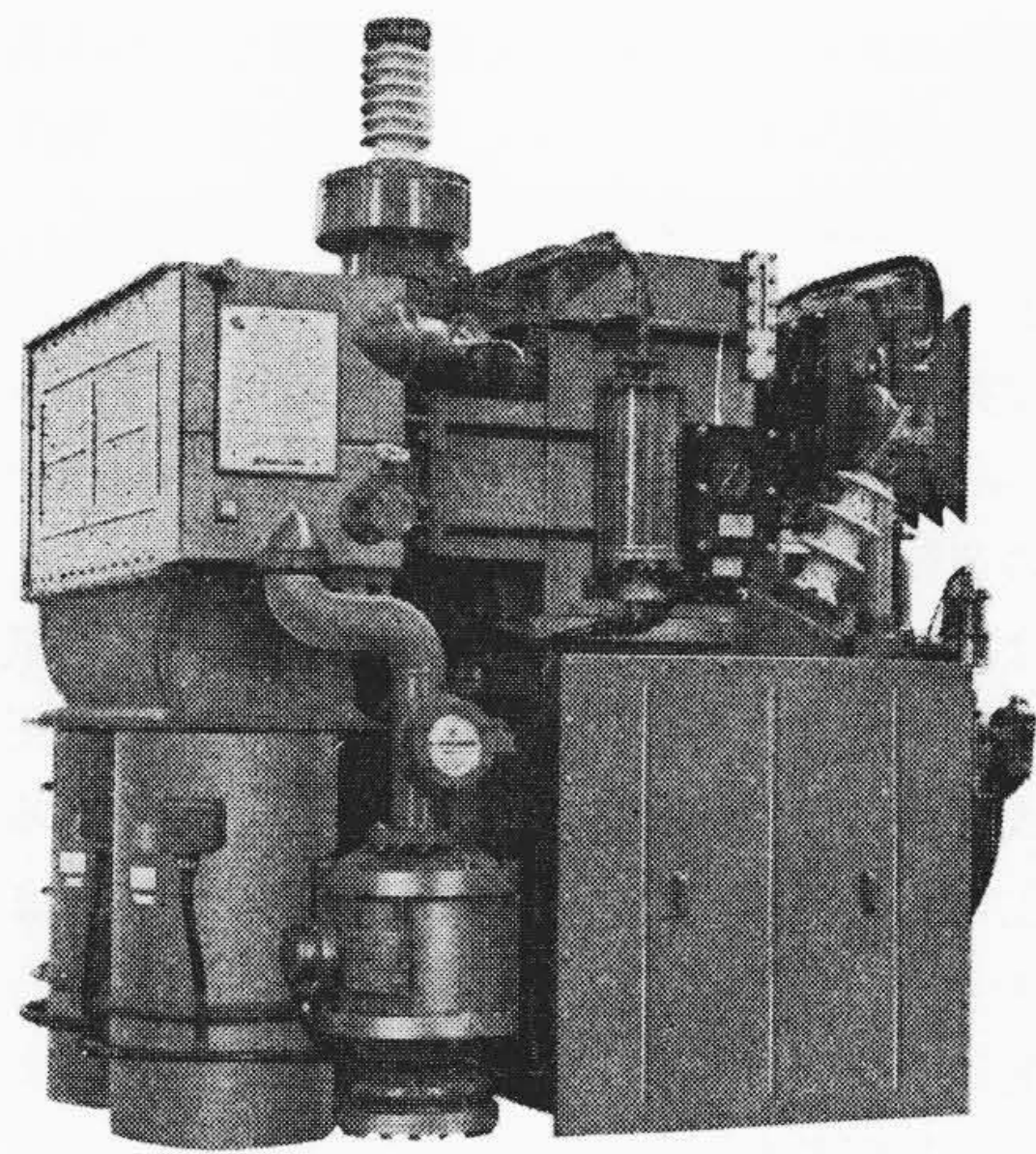
第8図 力行時ノッチ曲線



第7図 主回路ツナギ



第9図 ブレーキ時ノッチ曲線



第10図 3,700 kVA 主変圧器

の特性および制御方式についてはその詳細を下記する。

4.1 主変圧器

主変圧器は、3,560 kVA の走行用電力と 140 kVA の補機、制御用電力を供給するもので、連続定格出力 3,700 kVA であり、その外観は第10図に示すとおりである。

高圧タップ切換式のため、32個のタップ付単巻巻線が変圧器に巻き込まれ、付属のタップ切替器により主変圧器の印加電圧を制御して出力電圧を調整する。またブレーキ用変圧器も内蔵している。

とくに指定された設計条件としては、連続定格電流値を主電動機のそれと等しくすること、定格電圧 (22.5 kV) の 22% 過励磁可能なこと、絶縁階級と温度上昇は、IEC 規格を適用すること、すなわち巻線 (抵抗法) 55°C、油 45°C を限度とすることなどである。鉄心は、方向性ケイ素鋼板を用いた2段形の3脚鉄心で、中央脚の上段に単巻巻線および補機巻線を、下段に一次、二次主巻線を同心状に配置

し、最外周に絶縁筒をかぶせてある。油は筒の下部より巻線内に集中して流れこみ、ジグザクに流れて上昇する。このため巻線の全面が油流に接するので冷却効率が著しく向上した。油槽を変圧器中身の輪郭に沿った形状とし、中身各部の締付けには油槽の内壁を利用する構造を採用して、油量の節減をはかった。冷却には、送油風冷式を採用し、前記構造上の工夫とあいまって顕著な小形軽量化をはかることができ約 20% の重量軽減が得られた。

4.2 リアクトル、その他

主電動機および補機用の平滑リアクトルに、H 種絶縁乾式器を採用し、前者は開放鉄心形、風冷式で、後者は自冷式である。すべて無機質絶縁材料を基材としたシリコン製品を用い、巻線はシリコンワニス処理を施してある。このため耐熱性、撓水性にすぐれている。計器用変圧器は油入形を、変流器はエポキシレジンまたはブチルゴムのモールド形を採用し、耐振、耐湿性に考慮が払われている。

4.3 シリコン整流器

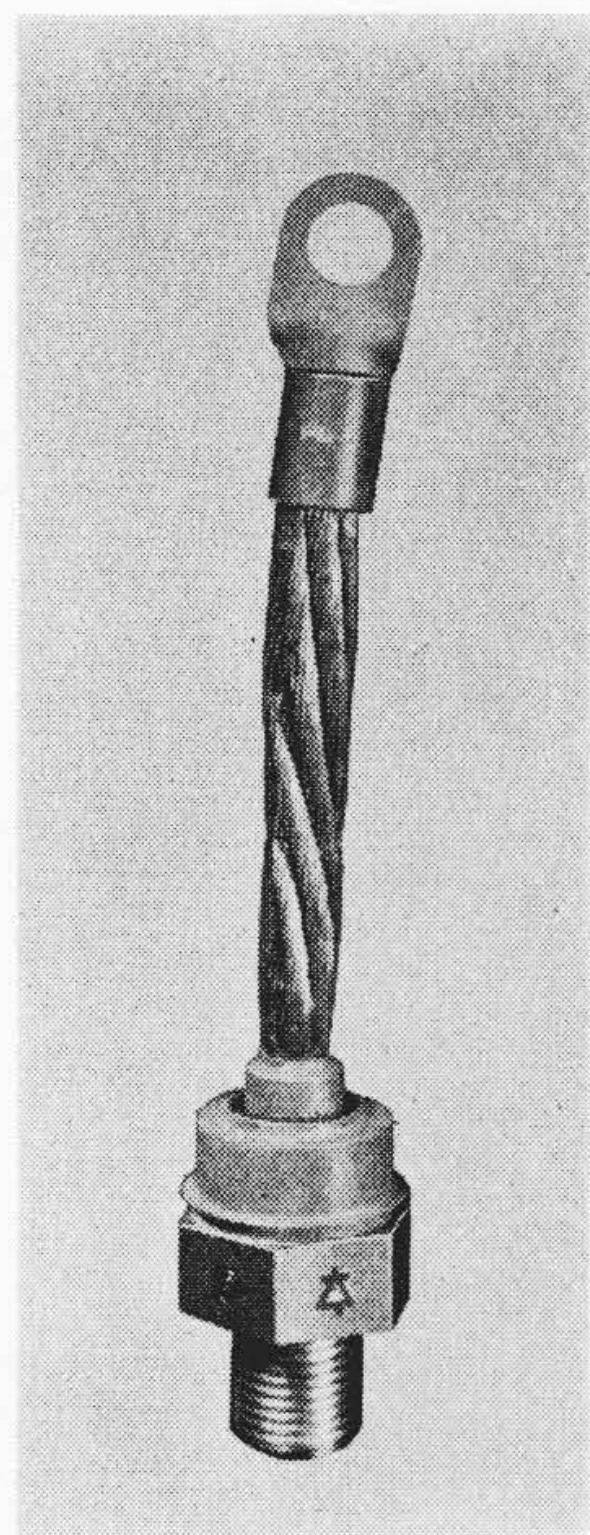
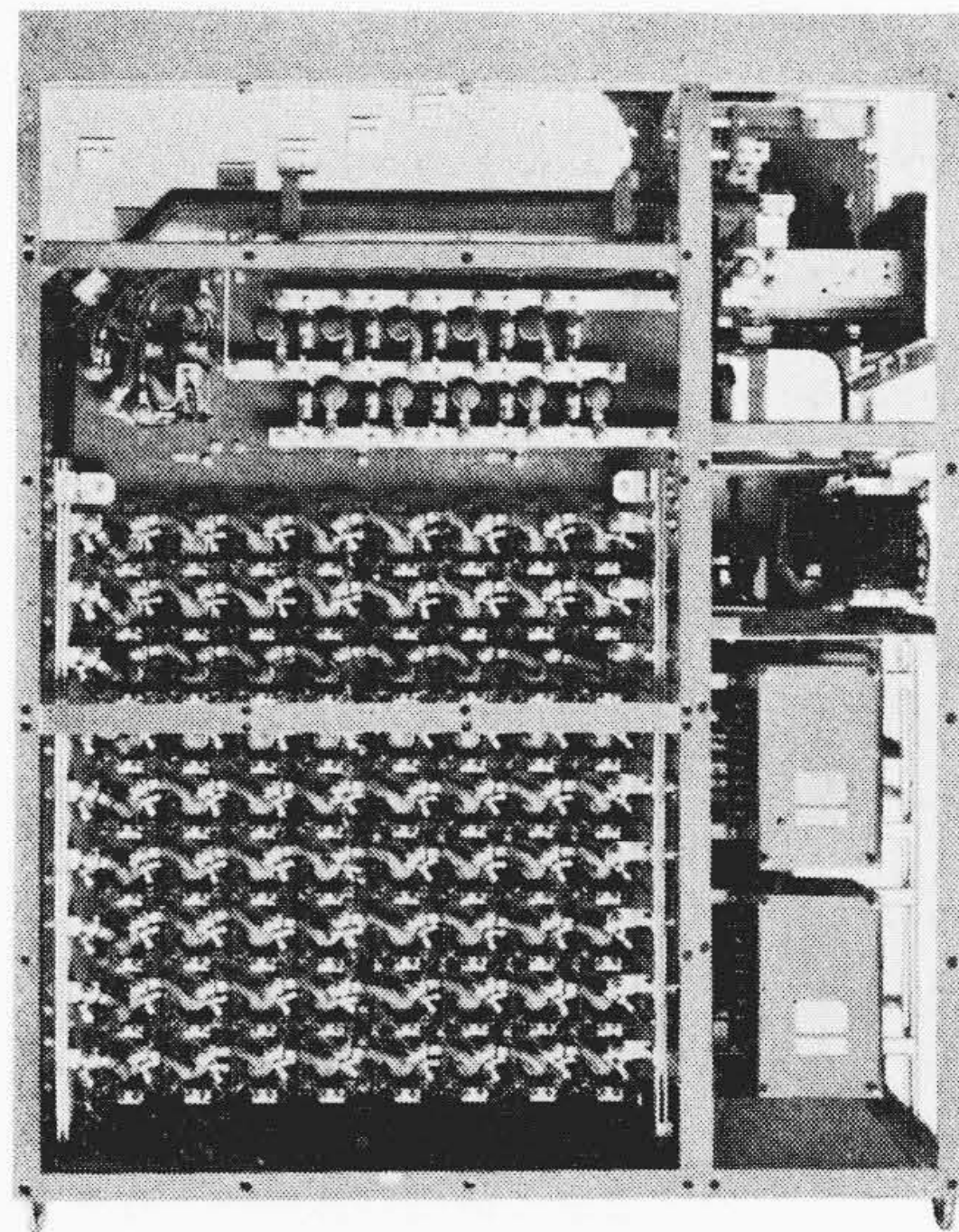
本器は EF80 用シリコン整流器の製作経験をもとに製作されたもので、輸出向車両用シリコン整流器としては最初の量産品であり、容量的にも従来製作されたもののなかでは最も大きい。

このシリコン整流器の特長は次のとおりである。

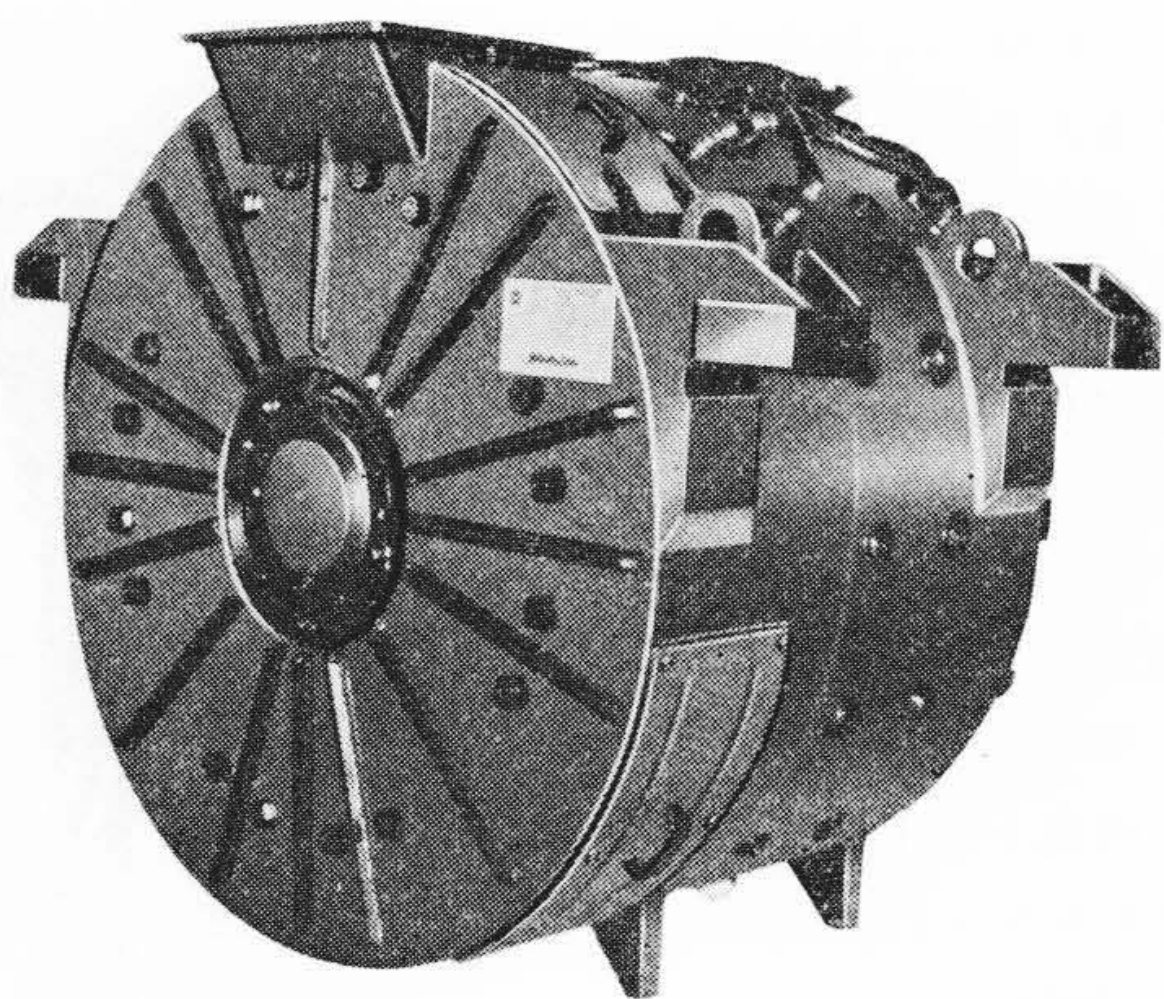
- (1) 素子には国内でもっとも実績の多い DJ 15L 形を使用した。(第11図)
- (2) 相変換機がなく、直流補機が多く用いられているので、その電源用シリコン整流器を内蔵している。

直列素子数は開閉サージ 200% を考慮し、さらに万一1素子劣化したときにも運転可能なるよう 1s 余裕をみて 8s とした。並列素子数は 10%, 1,830 t こう配起動電流を考慮して 9p とした。主電動機 1 回路完全せん絡時の過電流にはこの素子数で耐えることができる。

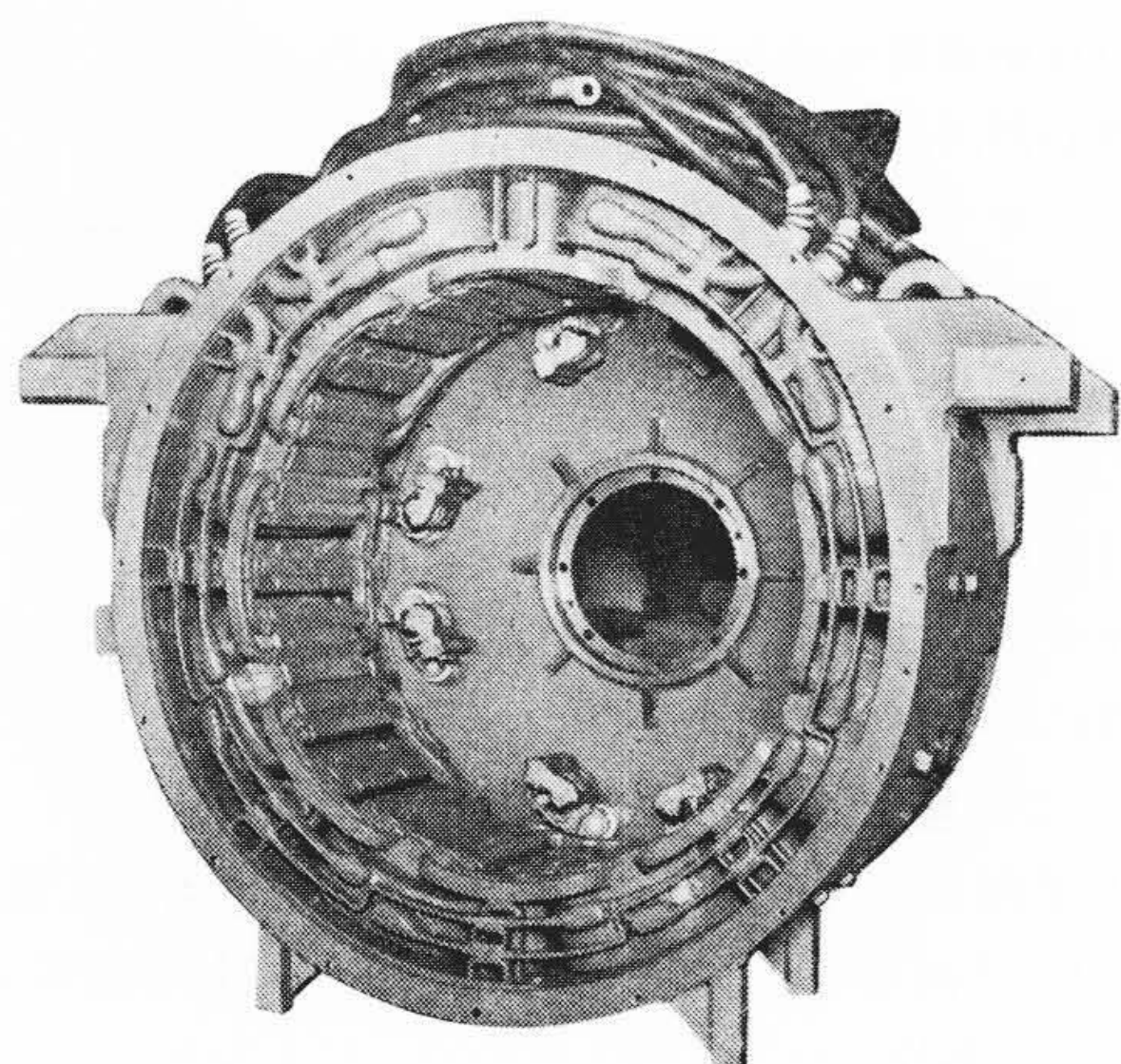
第12図は整流器箱の外形を示したもので、各箱には主整流器 2 ア

第11図 DJ 15L 形
シリコン整流素子

第12図 シリコン整流器



第13図 主電動機



第14図 主電動機固定子

ームのほか、補助シリコン整流器、短絡検出装置、分圧装置、温度継電器を内蔵している。キュービクル下部には風道があり、風ガイドにより各素子にほぼ均等に風を分配している。短絡検出継電器は中点電位のアンバランスを検出する方式で常時点灯、事故時消灯方式である。さらにストリング中点間を環状に接続したランプにより事故ストリングを知ることができる。このほか主変圧器2次端子間に接続されるアレスタを1個内蔵している。これによりシリコンに印加される雷サージを抑制する。

4.4 主電動機

本機の外観を第13図に、固定子を第14図に示す。

本機の1,200 kW (32% 界磁では連続定格 1,290 kW) という連続定格出力は、わが国における従来の記録容量 EF 80 用 600 kW, ED 921 用 700 kW を約2倍に増大させたもので、比重量(連続定格) 4.1 kg/kW 現在インド国鉄にて使用されている同種電動機の 5.7 kg/kW と比べても約72% ときわめて軽量化されている。このように小形軽量化できたのは、整流、温度、機械的強度などに極限設計を行ない、各種の新技术を採用した結果である。以下本機の特長を列挙する。

(1) ヨークの内側一部のみを積層する簡易積層ヨーク、補極軸に平行したみぞをもつ特殊補償巻線の採用、電気磁気装荷の適正配分、理論解析による主極コイルの5% 分流の選定などにより、簡単な構造で最大電圧における平均片間電圧 20 V, リアクタンス電圧 10 V という従来の実績を大幅に上回る整流条件を満足させ、脈流運転においても、電力中断などの過渡時においても安定した整流が得られた。

(2) 固定子に無溶剤エポキシ樹脂一体絶縁を採用して著しく冷却効果をあげるとともに保守の簡易化を図っている。



第15図 主幹制御器

(3) 最大周速が電機子 90 m/s, 整流子 72 m/s という高速機であり、また整流子はピッチ 3.9 mm 整流子片 600 枚を組み立てた記録品で各部に詳細な検討を加え製作された。このほか、軸受にマイカレックス絶縁を行なって軸電流を防ぎ*, 8 極機にもかかわらずブラシ回転装置の不要な構造と、ブラシ保持器絶縁にヒダ付がいしとマイカレックスの複合ロッドを採用する* などインドの特殊な使用条件に適するよう各部に慎重な考慮がはらわれている。

本主電動機の外観に、17 kW 主電動送風機などが搭載されているが、すべて現地の使用条件に合うよう十分注意して製作された。

4.5 制御方式および制御機器

4.5.1 制御方式

力行時は第8図に示すノッチ曲線のように高圧タップ切換器による32ノッチと弱界磁制御器によるノッチを有し、4重連運転が可能でどの運転台からでも制御できる。

制動時は2台の主電動機電機子にそれぞれ固定抵抗器を接続し、界磁巻線を2台直列に接続しステップダウン変圧器で降圧他励する方式を採用し、制御はタップ切替器を利用する。

2台の主電動機の電圧差により空転を検知し、砂まき、タップ切換器のノッチ戻し、運転室ランプ表示が自動的に行なわれる。

発電制動用抵抗器は4箱に分納され専用送風機による強制冷却が行なわれ小形軽量化が図られている。

4.5.2 主幹制御器(第15図)

本器はインド国鉄標準形の主幹制御器で、主、逆転、弱界磁ハンドルを備え、逆転ハンドルには前後進位置のほかに発電制動位置が設けてある。

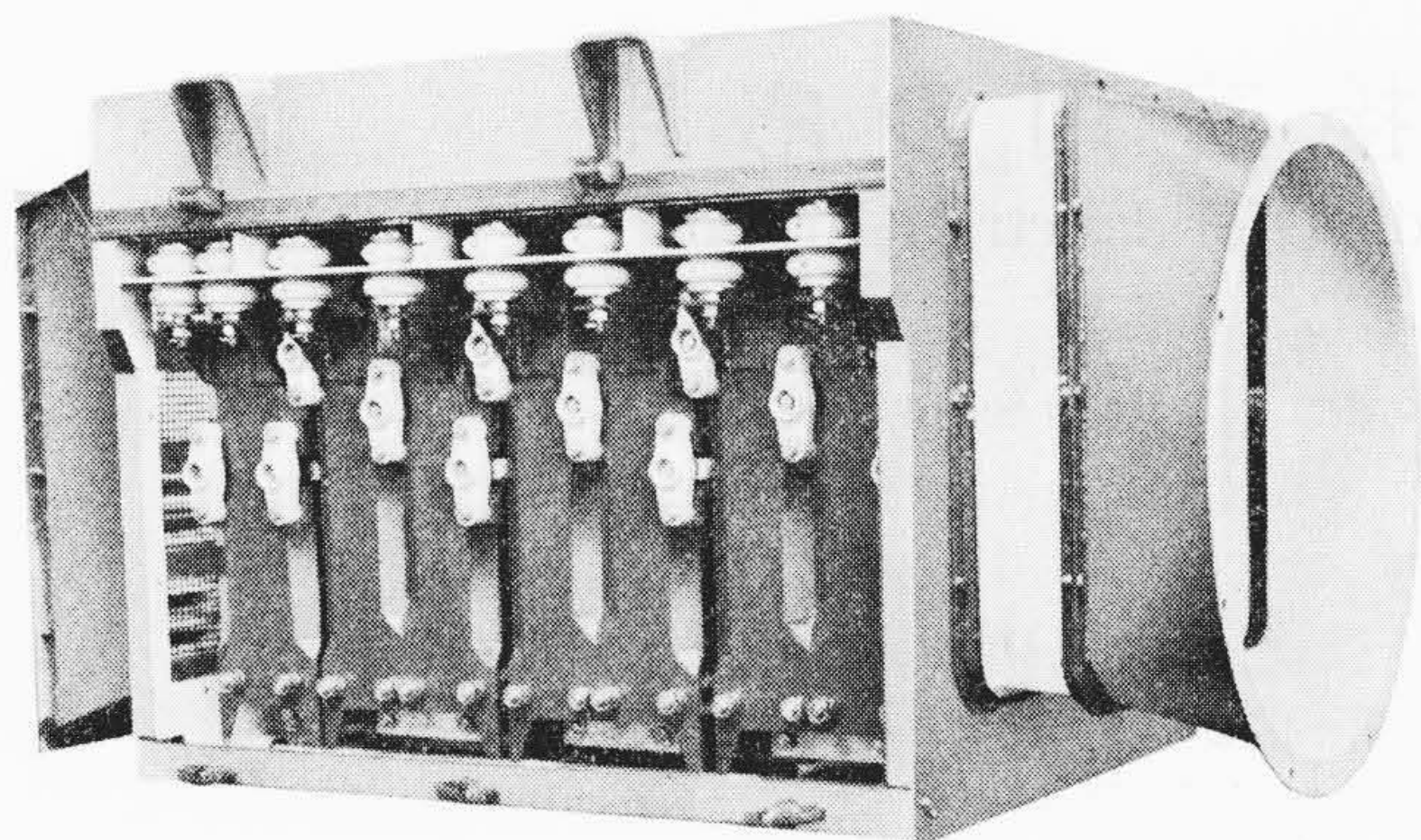
4.5.3 発電制動抵抗器(第16図)

本抵抗器は主電動機の電機子に接続された2群の発電制動用抵抗器と界磁直列安定抵抗器を4箱に分納したもので、1,830 t の列車を10% の下りこう配で40 km/h に抑速する容量をもっている。抵抗体は機械的接触部がなく経年劣化の少ない強制通風に適した構造のベーン形で、箱ごとに取り付けられた専用電動送風機で強制通風冷却され小形軽量形となっている。

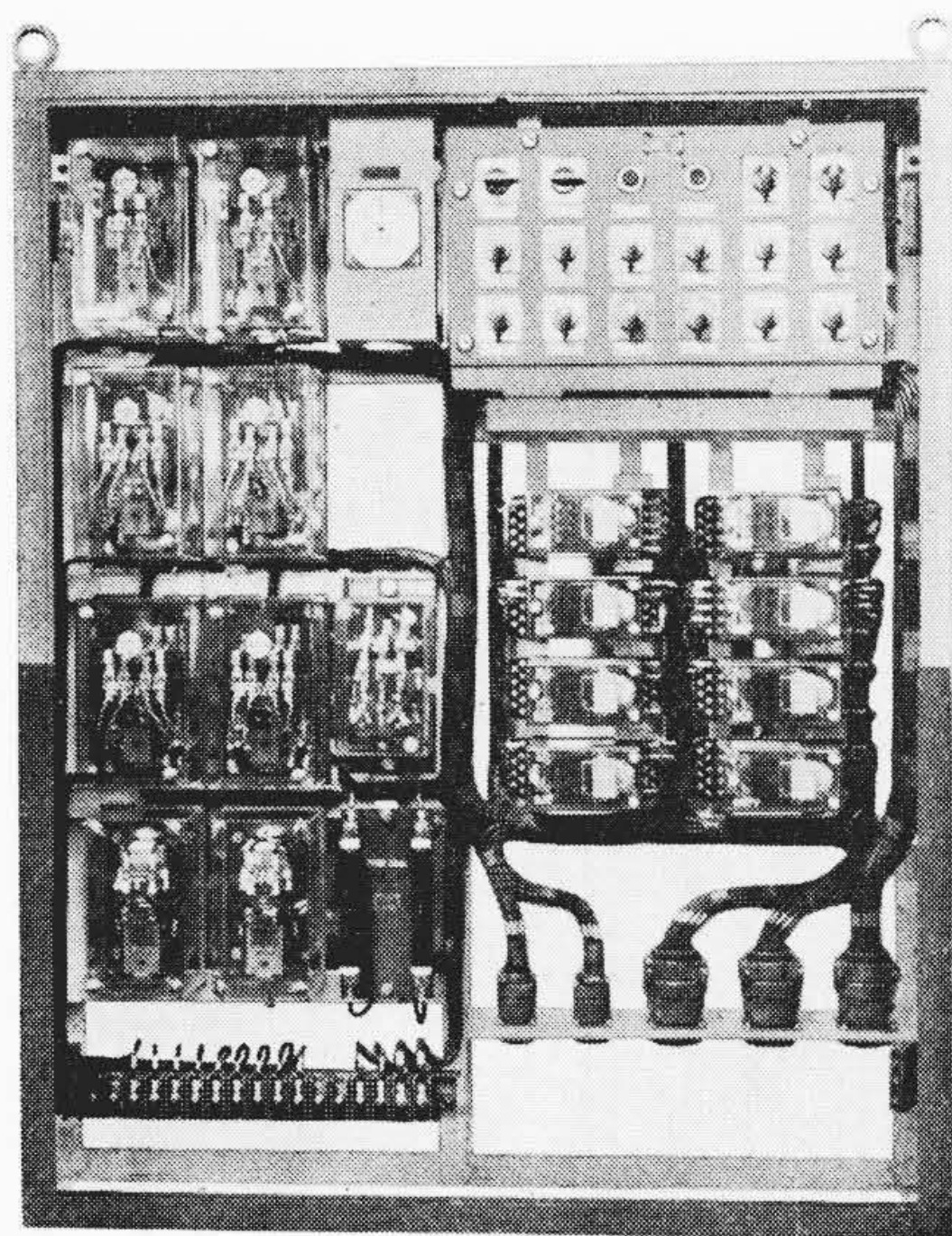
4.5.4 バッテリー充電装置

本装置は磁気増幅器による静止形定電圧装置で、従来の電動発電機に比べ摩耗部分がなく、保守点検も容易であるばかりでなく重量も軽減されている。入力 AC 240 V, 50 c/s でこれを整流し

* 印実用新案申請中



第16図 発電制動抵抗器



第17図 制御箱

て DC 110 V $\pm 5\%$ の定電圧電源を得る。

4.5.5 逆 転 器

逆転器には機関車故障回送時、主電動機回路を開放して発電制動回路が構成されないようにするための中立位置が設けられている。

4.5.6 弱界磁制御器

弱界磁制御器の主接触器は第1段弱め用のみに磁気吹消装置を設け他の遮断条件の楽なものにはこれを省略し機器の簡略化を図っている。

4.5.7 制 御 箱 (第17図)

制御箱は2箱あり第1制御箱にはヒューズフリー遮断器、ナイフスイッチ、充電回路用電流計、電圧計が収納され、第2制御箱には保護継電器、補助継電器、ロータリスイッチ、充電回路用電流計が収納されている。前面とびらにはアクリライト板をはり、計器の指示、保護継電器の動作、ヒューズフリー遮断器の開閉状態が一目でわかる構造となっている。

4.5.8 機 器 わ く

主回路機器は機器わくに収納し、点検用とびらは感電防止のため安全錠がかけられている。単位スイッチ、逆転器、弱界磁制御器のように通電容量の大きな機器は、電線がなるべく短くて済むような機器配置としてある。継電器、電磁接触器、スイッチ類は廊下側にまとめて透明安全ガラスをはり、保守点検を容易にしている。

4.5.9 そ の 他

継電器には防じん用アクリライトカバーが取り付けられている。

5. 結 言

今回の大容量貨物用機関車については最近の国内実績はもとよりわれわれの長期にわたる車両製作経験をもとにして設計製作されたものであり、いまや世界市場において日本の車両技術の真価を問わんとしている。

大容量主電動機、1台車1電動機式台車シリコン整流器をはじめとして全般的に従来インド国鉄で使用中の機関車にまさるとも劣らぬものであり、インド国鉄当局からも十分なご満足をいただけるものと信じている。すでにその一部は現在現地において好評のうちに運転を開始している。終わりにのぞみ本機関車の設計製作に当たり賜ったインド国鉄および日本国鉄のご協力とご指導に対し厚くお礼を申し上げる次第である。