

名古屋市交通局地下鉄3号線納め

チョッパ制御装置付新形電車

Chopper Controlled Car Supplied to Route 3 of Nagoya Municipal Transportation Bureau

名古屋市では朝夕の通勤ラッシュの緩和と、将来名古屋鉄道株式会社との相互乗入れに備えて新たに3000形電車が企画され、日立製作所ではその要請に応じたチョッパ制御装置付新形電車を製作し納入した。この電車はセミ・ステンレス車体であり、保守の省力化を図るとともに、地下鉄電車として初めての冷房装置の搭載や、踏切警報装置に対する誘導障害低減策など、種々の施策が試みられている。更に、相互乗入れのため従来車に比べ自重制限が厳しく、車体の軽量化設計を行なうとともに、チョッパ制御装置としても補助サイリスタの並列数の低減、新形高速度しゃ断器の採用により限流リアクトルの小形化が可能となり、これらの結果、在来と同形式車両に比べ約5%軽量化された新形電車を開発することができた。

服部 守成* Hattori Morishige
木村 貴一** Kimura Kiichi
名古屋憲義* Nagoya Noriyoshi
佐伯多喜夫* Saeki Takio

1 緒言

名古屋市では、現在、地下鉄1号線、2号線及び4号線の営業運転が行なわれているが、朝夕のラッシュ時の緩和と将来の名古屋鉄道株式会社の犬山線及び豊田新線との相互乗入れにより乗客の便利を図るため、3号線を開業することとなり、今回3000形電車が企画された。

日立製作所ではこの電車の設計製作に参画し、このたび1編成4両〔Mc1(制御電動車)-M2(中間電動車)-M1(中間電動車)-Mc2(制御電動車)〕より成る電車3編成、合計12両を完成し納入した。この電車は名古屋鉄道株式会社との相互乗入れのために、主要寸法及び運転操作仕様を統一するとともに、乗客サービスの向上、省エネルギー化及び保守省力化について十分に配慮した新形電車である。

以下、これらの新しい施策がなされた車体構造とチョッパ制御装置を中心に述べる。

2 電車の概要と車体構造

今回製作した3000形電車の概略仕様を表1に、電車の外観を図1に示す。この電車は、乗客サービス向上のうち乗心地の向上のためにチョッパ制御装置と空気ばね台車を、またアコモデーションの改善のために冷房装置を設けた。更に、省エネルギー化として電力消費を節減するために軽量化を推進し、電力回生ブレーキを採用した。なお保守省力化のうち無塗装化のためにセミ・ステンレス構体を、また無接点化のためにチョッパ制御装置を採用することとした。

2.1 構体構造

台わくは従来車と同様SS41製であるが、枕はり及び中はりはSS55を採用し、薄肉化した軽量台わくとなっている。また、横はりや側構体部材は機器に合わせて配置し、取付金を兼用させることにして極力取付金を省略し、軽量化を図っている。側構体は外部に露出している部材と外板をSUS304とし、他をSS41としたセミ・ステンレス構造であり、腰板と幕板はSUS304、厚さ1mmのコルゲート板とし戸袋部と吹寄部は厚さ1.5mmの平板である。従来は戸袋部と平板部を溶

表1 3000形チョッパ制御電車の概略仕様 冷房装置付のセミ・ステンレス車で、目標自重を達成するために厳格な質量管理を行なった。

項目 \ 車種	Mc1	M2	M1	Mc2
車両形式	3100形	3200形	3700形	3800形
軌間(mm)	1,067			
自重(kg)	39,100	36,400	37,900	38,000
定員(名)	130 (座席48)	140 (座席54)	140 (座席54)	130 (座席48)
車体長さ(連結面間)(mm)	20,000			
車体長さ(妻間)(mm)	19,300			
車体幅(mm)	2,740(コルゲート外板20mmを含む)			
車体高さ(mm) (レール面より屋根上面まで)	3,640			
床面高さ(mm)	1,150			
連結器高さ(mm)	880			
心ざら間距離(mm)	13,600			
台車	S形ミンデン式空気ばね台車			
電気方式	架線電圧：DC1,500V 主電動機：直流直巻補極巻線付、分割界磁制御式、135kW(375V、395A) 制御装置：自動可変界磁式チョッパ制御、回生ブレーキ付、応荷重装置付			
ブレーキ方式	電気指令式デジタル制御形、電空演算装置付、空気ブレーキ装置			
最高運転速度(km/h)	75(地下)、100(地上)			
平均加速度(km/(h・s))	3.0(停止から30km/hまで) (200%定員まで一定)			
減速度(km/(h・s))	常用最大3.5(250%定員まで一定) 非常4.0(250%定員まで一定)			

* 日立製作所笠戸工場 ** 日立製作所水戸工場



図1 3000形チョッパ制御電車 先頭よりMc1-M2-M1-Mc2車の4両編成となっている。

接継ぎにしていたが、今回は特尺板を使用して溶接継ぎをなくし、ひずみを減少させるようにした。表2に、3000形チョッパ制御電車と最近のセミ・ステンレス電車との構体質量の比較を示す。在来の同形式電車に比較して十数パーセント軽量化されている。

2.2 構体強度

構体の設計強度目標値は、所定の垂直及び水平荷重に耐え、構体相当曲げ剛性を $1.67\text{GN}\cdot\text{m}^2\{1.70\times 10^{14}\text{kgf}\cdot\text{mm}^2\}$ とした。これらの確認のために静的荷重試験を実施した。試験の結果得られた構体特性値は、おおむね設計目標どおりで相当曲げ剛性 $1.53\text{GN}\cdot\text{m}^2\{1.56\times 10^{14}\text{kgf}\cdot\text{mm}^2\}$ となり、各部材は十分使用に耐え得る強度があることが確認できた。構体の垂直たわみ曲線及び圧縮たわみ曲線を図2に示す。

2.3 冷房装置及び換気装置

この電車はチョッパ制御車であるためパンタグラフの離線率を低減する必要があり、Mc1、M1車の屋根上両端にパンタグラフを設けている。このため4台の分散式冷房装置を中央部に集中して設け、通風ダクトとダクトに設けた整風板により冷風を吐出し、室内を均一に冷却するようにしている。更に、車内温度の均等化と冷房能力補足のため、天井面にラインデリアを設置している。また側窓は冷房効果と防音効果の向上のため固定窓としたが、このため強制換気が必要となり、4台の排気扇を設けている。図3に、冷房装置運転中の室内温度分布(定置試験)の実測値を示す。

表2 セミ・ステンレス電車構体の質量比較 3000形チョッパ制御電車の構体質量は、最近のセミ・ステンレス車両よりも軽くなっている。

車 種	構体質量(kg)	車体長さ(mm)	1m当たり質量(kg)
名古屋市交通局3000形	8,493	19,300	440
T 鉄道 (昭46年)	9,290	19,500	476.4
O 鉄道 (昭49年)	9,550	19,500	489.7
T 鉄道 (昭51年)	8,950	17,500	511.4
K 鉄道 (昭48年)	7,790	17,500	445.1

3 ギ装構造と誘導障害対策

チョッパ制御車は従来の抵抗制御車に比べ、地上側の通信・信号機器に対する誘導障害が大きくなる要素を含んでいる。これらの誘導障害のうち、ギ装されたチョッパ制御装置や配線から直接形成される電磁界が、地上側の機器に障害を与える、いわゆる直達ノイズについてこれを低減するためには、チョッパ制御装置自体と車体ギ装両面から検討を進めることが必要であると考えられている。

今回の車両のギ装設計では、ギ装構造に先に日立製作所で行なった模擬試験装置による試験結果¹⁾から、直達ノイズ低減に効果があると考えられる方法を採用した。

3.1 床下機器配置

模擬試験装置による試験結果から、直達ノイズの特に大きな発生源はサイリスタの転流電流とダイオードのリカバリ電流の流れる回路、及びチョッパ周期のリップルを含む主電動機電流の流れる主平滑リアクトルであることが分かっている。転流電流とリカバリ電流の流れる回路は、チョッパ制御装置とコンデンサ箱、及びそれらの間を結ぶ電線から成り立っているが、ギ装設計上はこれらの電線を最短とし、ノイズの放

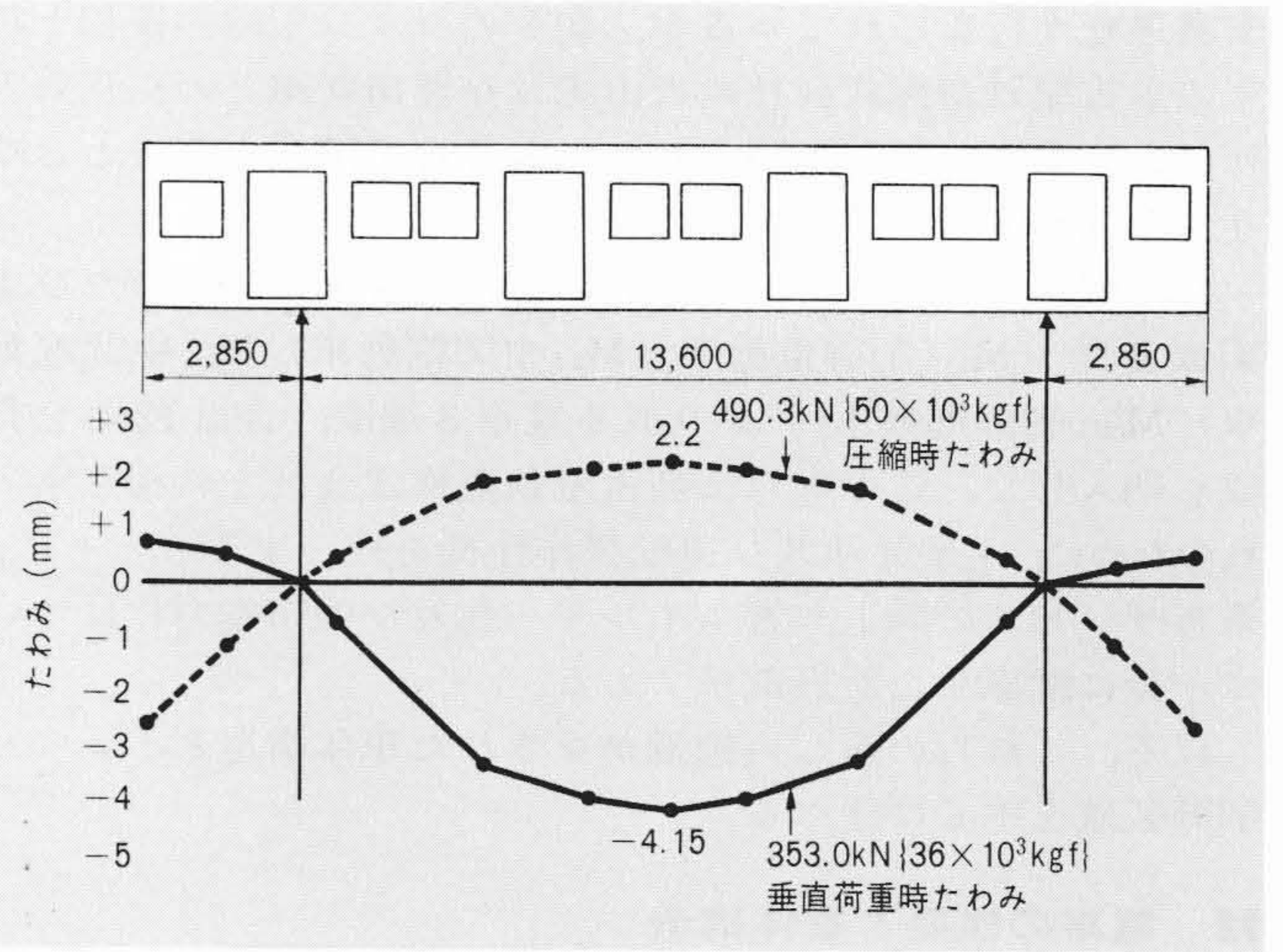


図2 垂直荷重及び車端圧縮試験たわみ線図 計画値とほぼ同等のたわみとなった。

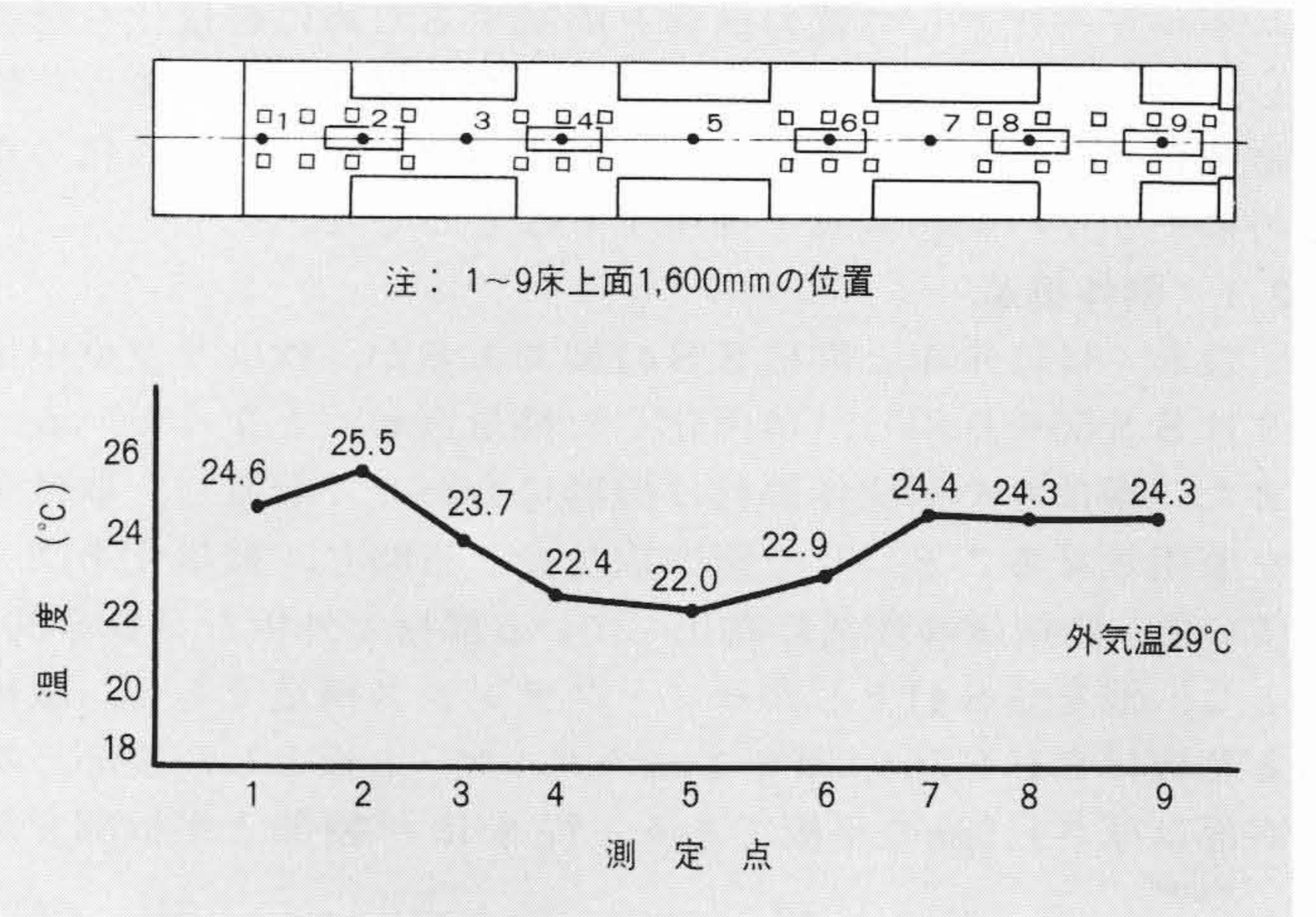


図3 冷房中の車内温度分布 空車で側出入口ドアを閉めた状態で測定した値である。

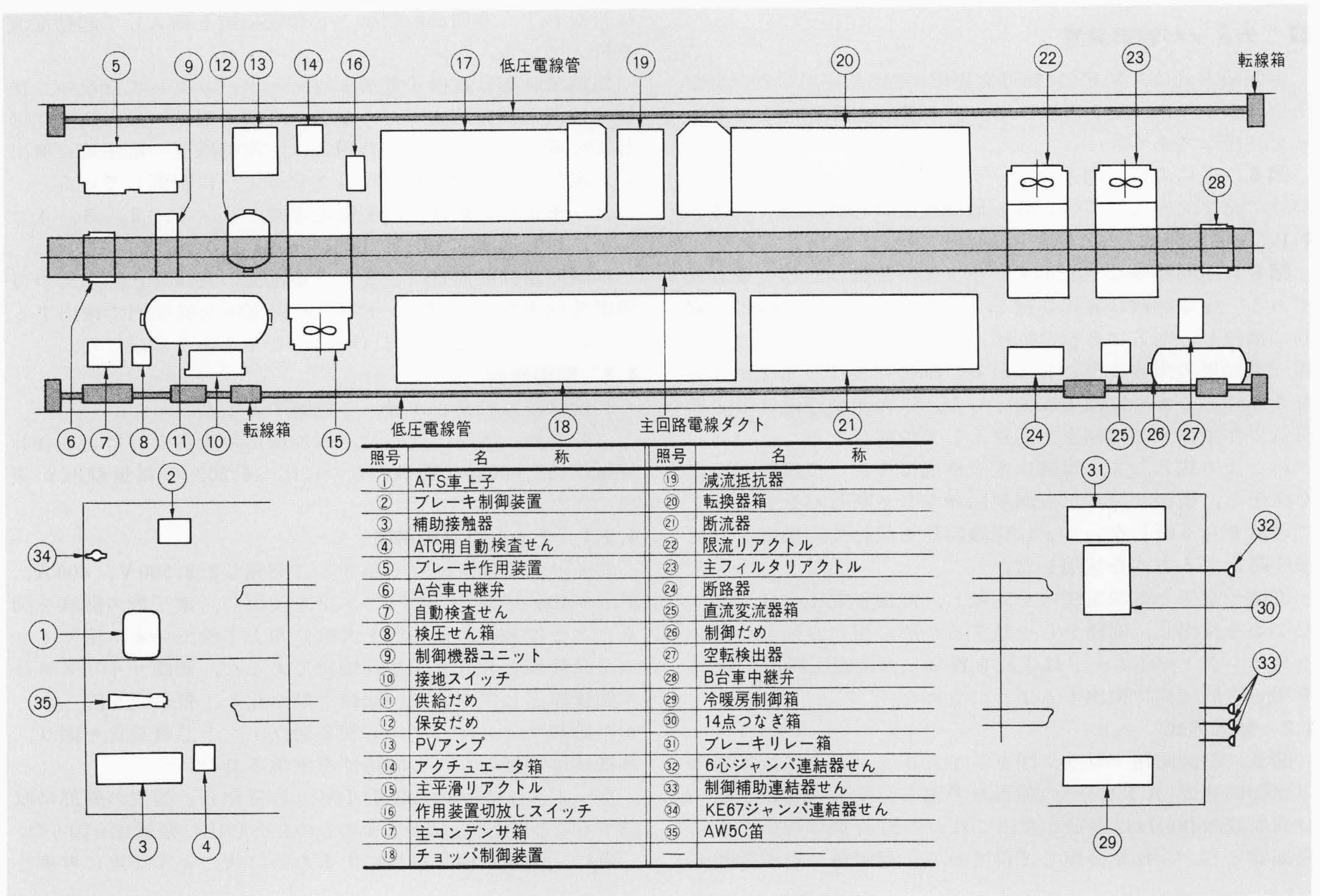


図4 床下機器配置と電線ダクト チョッパ制御装置と主コンデンサ箱を近接配置し、リアクトル中心を車体中心に合わせ取り付けしている。

射効果を低減するように機器を配置すべきである。この点を考慮し、図4に示すようにチョッパ制御装置とコンデンサ箱を向かい合わせに近接して配置した。次に主平滑リアクトルは、巻数の効果により他の機器よりも磁束の集中度が高く、より強いノイズを生ずる。このような強い磁束集中を強制的に低減することは困難であるため、地上側のループコイルとの磁束鎖交量を低減するようにリアクトルの磁気中心を車体中心に合わせ、磁気主軸を進行方向と直角になるように配置した。このような配置を行なった場合、リアクトルの送風機の保守スペースを確保する必要もあり、他の床下機器の取付スペースが減少するためチョッパ制御装置全体の小形化が前提条件となる。

3.2 配線方式

配線方式としては、主回路配線を車体中心に設けたアルミ合金製の電線ダクト方式とし、低圧回路配線は大径の鋼管と転線箱による方式を採用した。

主回路配線のうち、転流電流とリカバリ電流及び主電動機電流の流れる電線は、その往復回路を沿わせる、いわゆるペア配線とし、電線から発生する磁束を相殺しノイズの低減を図った。そのために、各機器の口出線配置も往復電線を隣接するようにした。また機器と主回路ダクト間の露出電線を最短とするため、機器側の口出線クリート受金の下部を取り外しできる構造とした。更に、これら露出口出線よりのノイズ放射を低減するために、機器と主回路ダクト間の露出電線の下側にアルミ合金製のしゃへい板を設けた。図5に主回路ダ

クト配線の状態を示す。

低圧回路配線は、主回路配線による誘導障害を低減するために鋼管に収容することにし、主回路配線とはできるだけ直交するように配管した。また転線箱は容易にふたの取外しができるようにし、電線引替に対する配慮をしている。

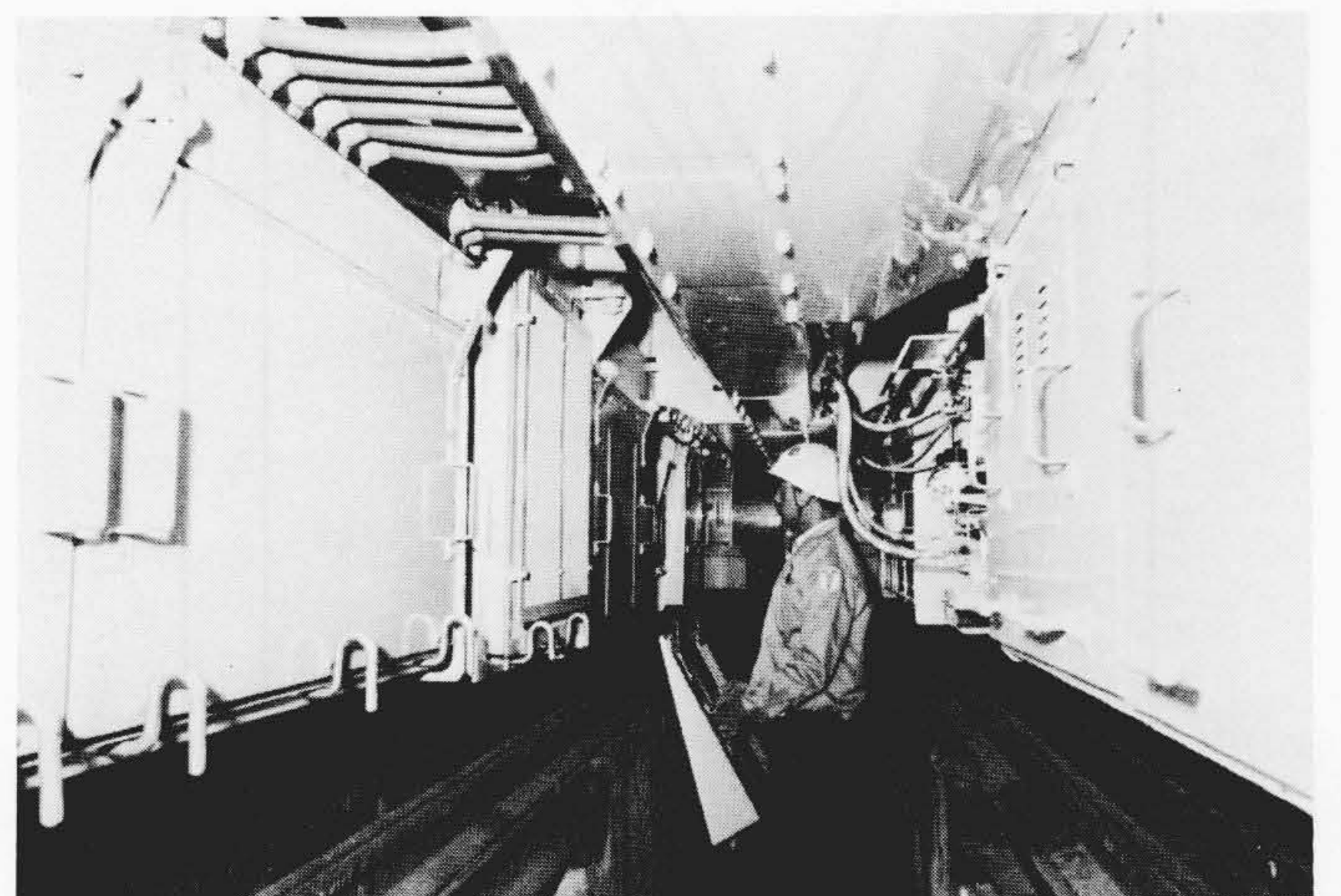


図5 主回路ダクト配線の状態 ダクト下面と機器口出線クリート下面との間にしゃへい板を取り付けている。

4 チョップパ制御装置

主回路方式はA V F(自動可変界磁)方式を採用した。主な仕様は表1に示すとおりであるが、将来6M2T編成となることを考慮してある。

図6, 7に力行, 回生のノッチ曲線を示す。回生ブレーキだけで全ブレーキ力の得られる最高速度は約65km/hである。

4.1 主回路方式

図8に主回路つなぎを示す。チョップパ制御は二相二重方式である。主電動機は界磁巻線を2分割し、一方を電機子に直列に接続し、他方は8個直列接続して二相分の電流を流し二相二重効果の出るようにしている。制動転換は、界磁が2分割されているため電機子転換とした。また予備励磁は可変界磁側に作用させて回路を1回路として簡略化した。

新たな方式として、母線に電流検出器を設けて母線の横流を検出し、横流が流れたら回生回路をしゃ断しパンタグラフで電流をしゃ断しないように保護回路を設けて、集電面の荒損を防止する方式を採用した。

電機子電圧と電源電圧とを比較し、電機子電圧が高くなったことを検出し、回路をしゃ断するために用いられていたクランピング・ダイオードはこれを省略し直流変圧器(DCPT)を用いて低圧側で検出するように改めた。

4.2 制御方式

図9に制御回路ブロック図を示す。チョップパ周波数は列車自動制御装置(ATC)への障害を考慮して素周波数243Hz、合成周波数486Hzに選定した。これらの周波数は源信を水晶発振器とし、これを分周して得ている。起動時は周波数制御

は行わず一定周波数制御とし起動抵抗を挿入して起動電流を抑えている。

定電流制御は電機子電流をフィードバックして行ない、空転又は滑走誘発防止のため2群の電機子電流の最大値で制御している。空転が起こった場合は主電動機群の電圧差を検出し、電機子電流を絞り再粘着させるように制御している。

ノッチ止め方式は通流率固定方式とし、1, 2, 3, 4ノッチに対し通流率を0.1, 0.54, 0.9, 1.0としている。

保護回路は前述したように、集電面の荒損防止のための母線電流検出器(BCD)、主電動機過電圧を低圧側で検出するようにした電流検出器(OFD)などを新たに設けた。

4.3 制御機器

制御機器は軽量化が最大の課題であった。

このため、回路の簡略化、機器構造の改良などにより合計質量は約3,600kgで従来のものに比べ約20%の質量軽減が実現できた。

4.3.1 チョップパ制御装置

サイリスタはチョップパ用として開発した2,500V, 400A, $T_{off}=40\mu s$ の逆導通サイリスタを使用し、素子数の低減を図るとともに装置の信頼性を大幅に向上させている。主サイリスタは従来どおり2個並列接続であるが、補助サイリスタは1個接続としてチョップパ回路を簡略化し、軽量化を図った。また冷却フィン、アルミ製多層フィンとし軽量化を図り、熱抵抗は銅製のものと同等特性を実現させた。

ゲート・トランスも極力小形、軽量化し、装置の底部に収納することにより、箱わくそのものを小形化し軽量化を図った。

更に、保守点検を容易にするために次のような点に考慮を

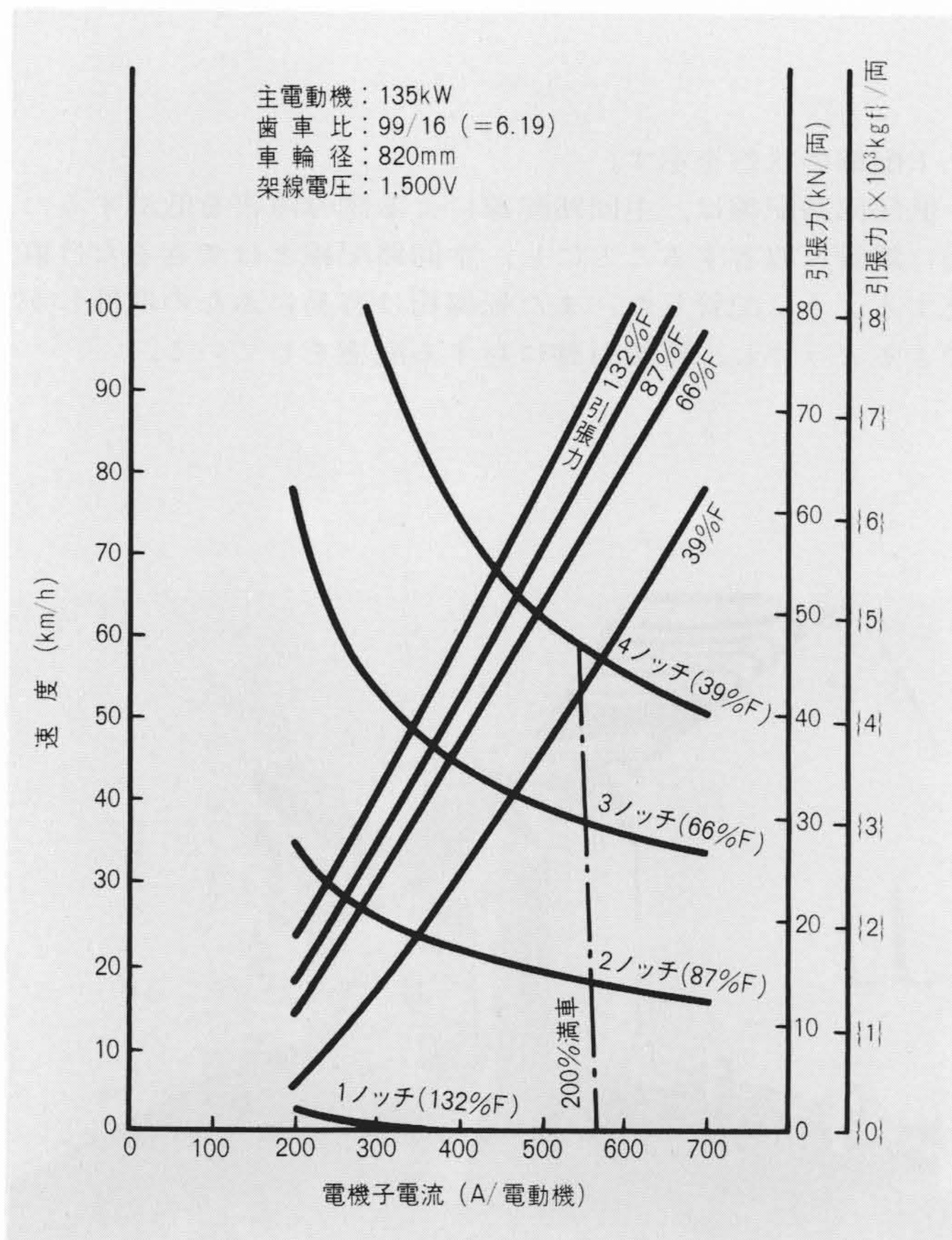


図6 力行ノッチ曲線 力行ノッチ数は4とし、界磁は39%Fまで自動的に弱められる。

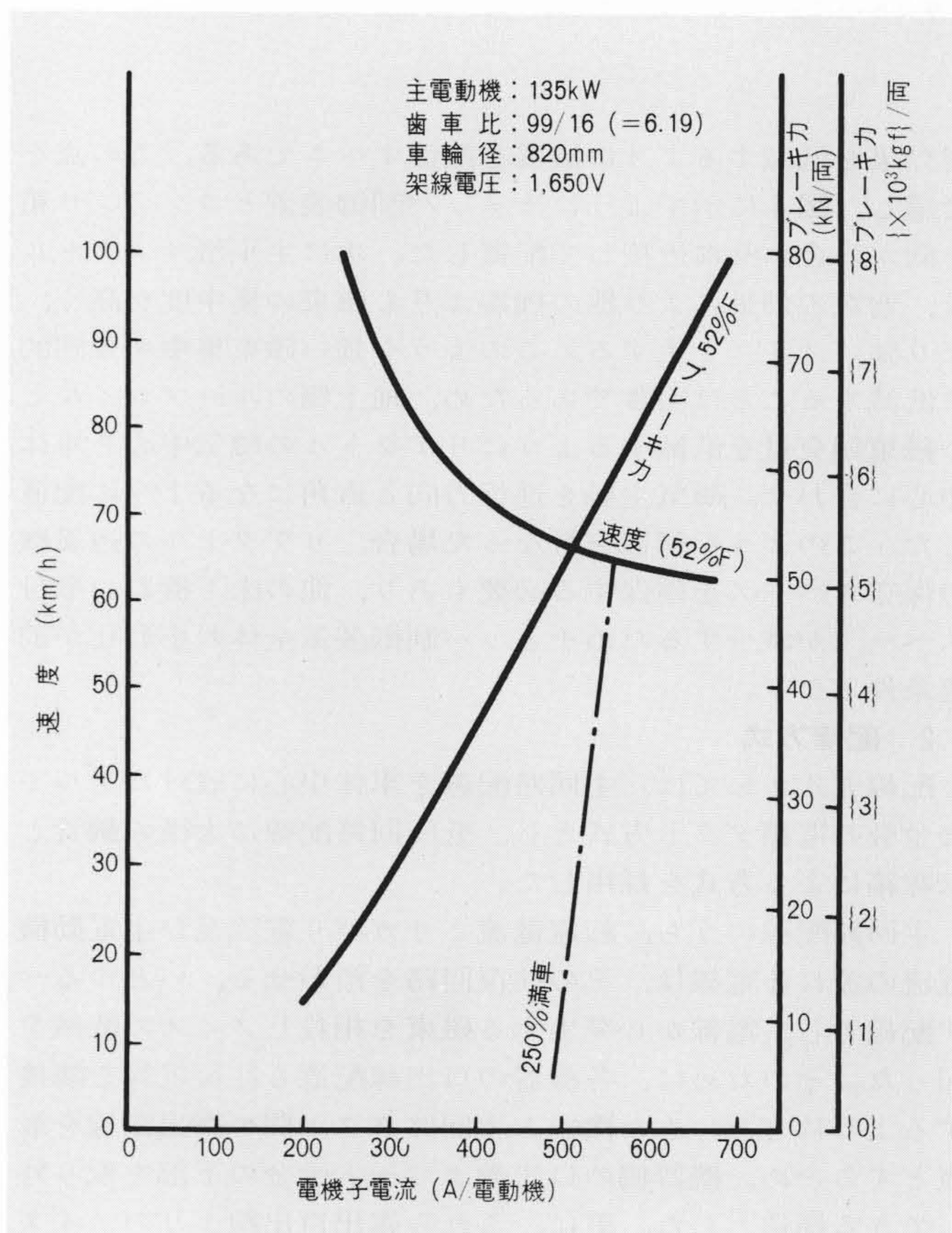


図7 回生ブレーキノッチ曲線 250%満車で、約65km/hからフルブレーキが回生ブレーキだけで可能である。

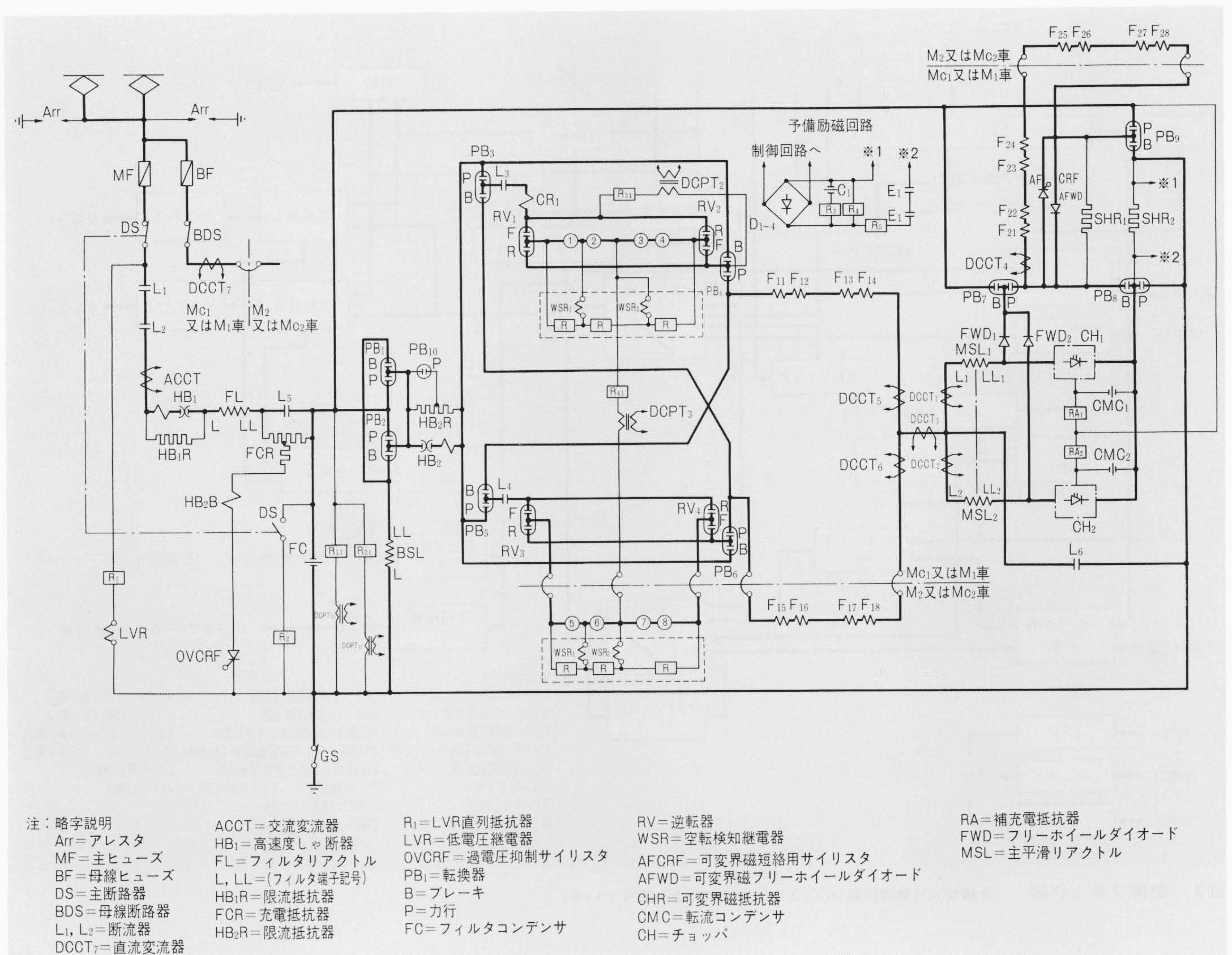


図8 主回路つなぎ チョッパの転流失敗を検出して、AVF界磁を短絡することにより主電動機を保護している。

払った。

- (1) エア・フィルタのエレメントはガラス繊維製で使い捨てとし、交換は容易にできる構造とした。
- (2) サイリスタ及びダイオードのサージ吸収用コンデンサ、分圧抵抗器などは同一部品を使用して部品の種類を減らすとともに、取付板の前面に配置し点検を容易にした。
- (3) サイリスタ及びダイオード盤は、清掃、気吹きを行なうとき、取外しが容易になるように回転構造とした。

図10にチョッパ制御装置の外観を示す。

4.3.2 高速度しゃ断器

回生時、チョッパが導通故障を起こすと主電動機の直巻特性により電機子電流は発散し、フラッシュオーバを招くことがある。ことに、高速からの故障時にはその確率も高いので、この保護のために高速度しゃ断器を設け、事故電流を速やかに検出し、しゃ断することが行なわれている。

今回採用した高速度しゃ断器は、従来のトリップ機構とは別に補助トリップ機構を設け、別に設けられたチョッパの導通故障検出器の出力によりこれを駆動し、より速やかにしゃ断するようにしたもので、従来に比べ動作時間は半減された。

これにより、従来から電流制限用として回路に挿入していた限流リアクトルも小形化が可能となった。

4.4 試験結果

定常運転は力行、回生ともに円滑な制御が行なわれた。特殊試験として行なった回生時のチョッパ強制導通試験(強制転流失敗試験)について次に述べる。

回生時チョッパがなんらかの原因により導通故障を起こすと、直巻電動機の自励作用により電機子電流は発散し過大電流となる。特に、今回のように主電動機の変界磁にチョッパの二相分の電流が流れる場合には、導通故障の前後で界磁が強められるためにこの傾向が強い。このために可変界磁に並列にサイリスタ(図8のAFCRF)を設けて導通故障検出器(CFD)の出力により、このサイリスタを点弧し界磁を短絡する方式を採用した。すなわち、導通故障により高速度しゃ断器をトリップさせるとともに、界磁を短絡して電圧の上昇を抑えるようにしたものである。この方式により保護範囲を広げることができた。図11に約100km/hからチョッパを強制的に導通させたときのオシログラムを示す。試験は限流リアクトルを使用しないで行なったが、主電動機電流は十分に抑えられている。また、今回の車両は直達ノイズの低減を考慮して製作されたが、特に踏切警報装置の一つである可聴周波軌道回路方式について試験を行なった結果、直達ノイズが低減したことが確認された。

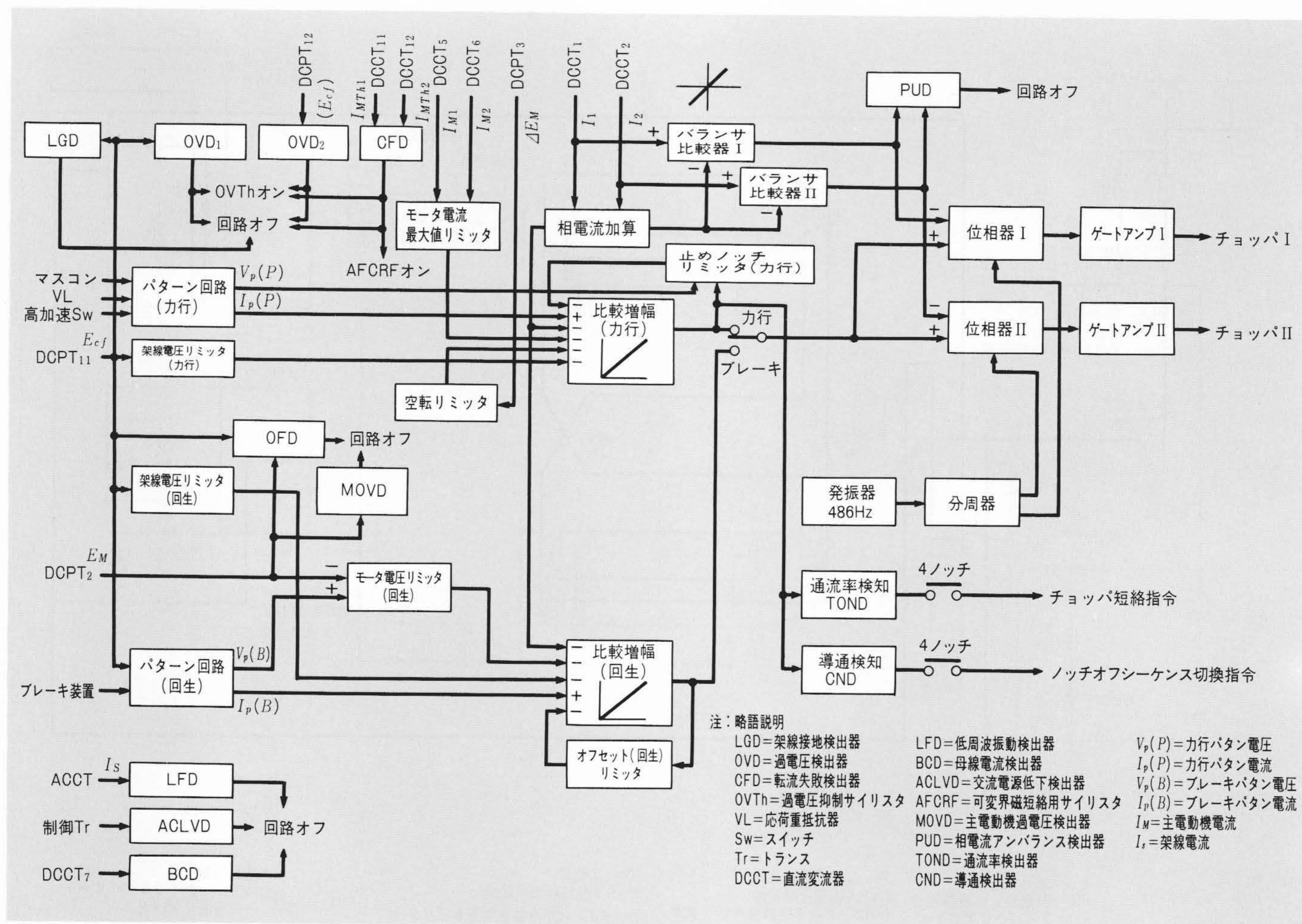


図9 制御ブロック図 大幅なIC(集積回路)化により信頼性の向上を図っている。

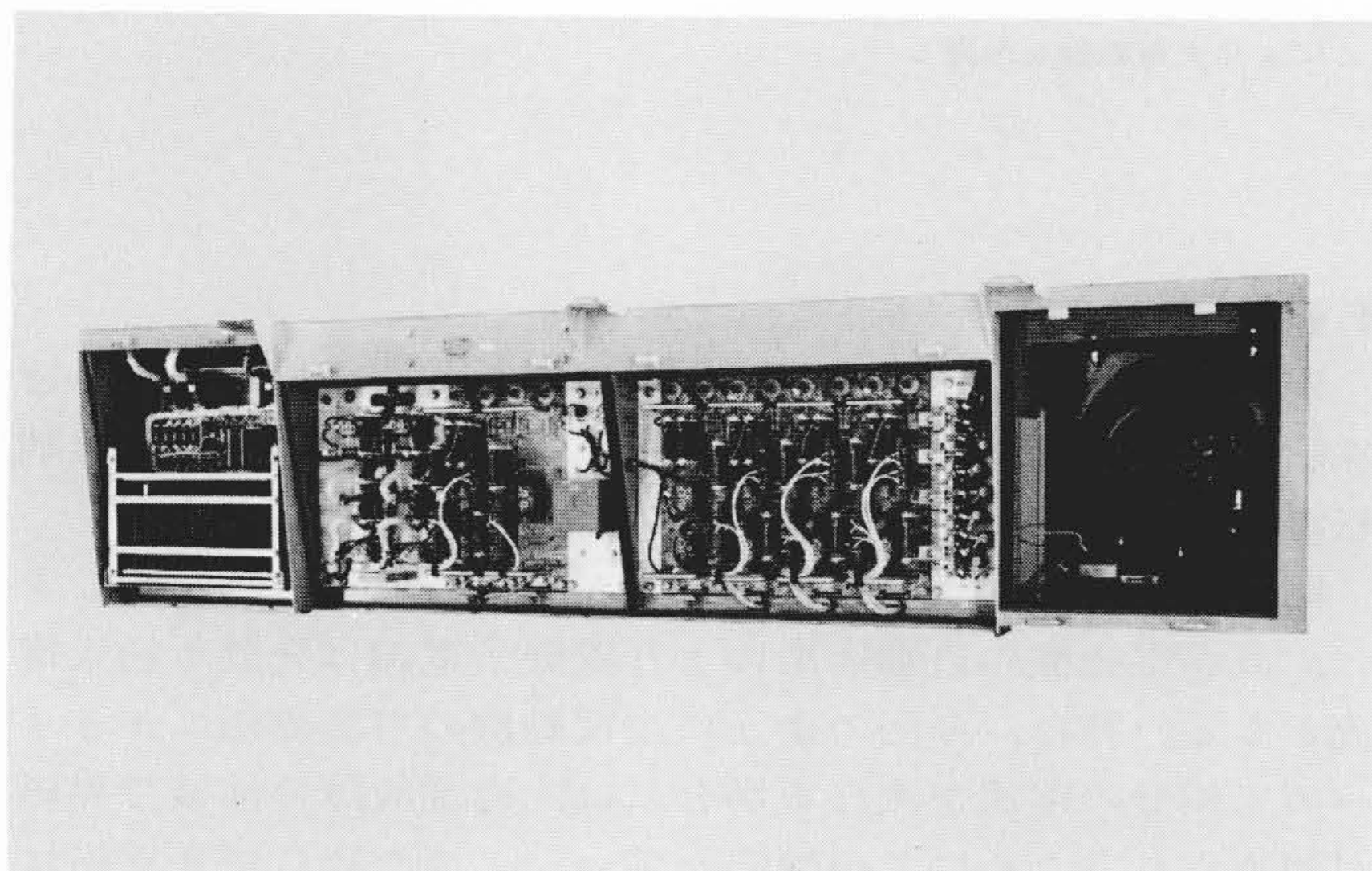


図10 チョップパ制御装置 25%の軽量化が実現した。

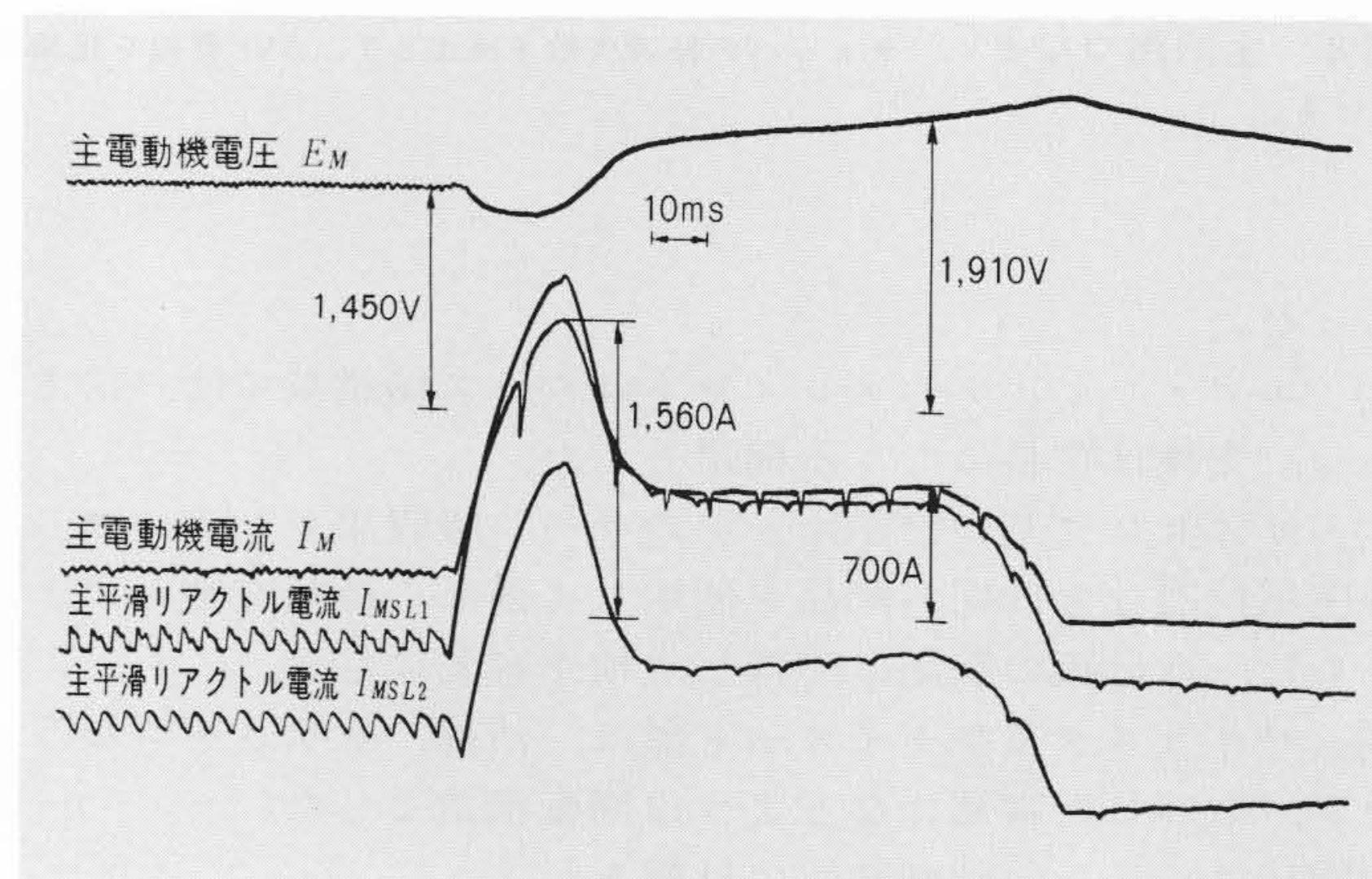


図11 社内試験オシログラム 約100km/hから強制導通させても可変界磁を短絡することにより電流を抑えられる。

5 結 言

3000形電車は日立製作所でチョップパ制御装置と車体とを共に製作したチョップパ制御電車であり、乗客サービスの向上、省エネルギー化及び保守省力化の各施策を実施し、更に踏切警報装置に対する直達ノイズ低減策を実施して、目標自重以下の電車を実現することができた。またチョップパ制御装置も計画された性能を満足していることも確認できた。現在、こ

の電車は現地試運転を経て営業運転が順調に行なわれている。

終わりに、このチョップパ制御電車の設計、製作に終始懇切な御指導をいただいた名古屋市交通局の関係各位に対し深謝の意を表わす次第である。

参考文献

- 1) 山田, 田代: チョップパ車と電磁誘導, 電気鉄道, 29, 9, 8 (昭50-9)