

サイリスタ式ED93形交流電気機関車

Thyristor System Model ED 93 AC Electric Locomotive for J. N. R.

佐々木 昭 夫* 武 井 謙 二*
Akio Sasaki Kenji Takei
石 塚 猛** 平 野 坦***
Takeshi Ishizuka Tamotsu Hirano

要 旨

このほど完成した ED 93 形交流電気機関車は、地方線区向けの客貨両用機関車であるが、わが国で初めてサイリスタによる主回路の完全な無接点電圧制御方式を採用した画期的なものである。
本機関車にはさらに制御回路の無接点化、軸重可変制御、耐寒構造が採用されており、今後新設計される交流電気車両の母体としてその成果が期待されている。本文はその概要について紹介する。

1. 緒 言

昭和 30 年国鉄仙山線の交流電化開始以後 10 年を経、基礎技術の発展とともに数々の交流電気機関車が製作され、昭和 38 年末には本線用標準形として ED 75 形^①が完成し現在量産中であるが、サイリスタ (SCR, シリコン制御整流素子) の製作および応用技術の著しい進歩に伴う主回路、制御回路の大幅な無接点化、支線区および積雪寒冷地への電化の進展に伴う軸重可変、耐雪耐寒装置の実現が要望された。
今回試作した ED 93 1 号車は中間台車を除き主電動機や両端台車など ED 75 形の標準設計であるが、機械、電気両部門特に速度制御装置には諸種の新技术新方式を取り入れており、今後の新形交流電気車の基礎となるものである。

2. 一般仕様および特長

図 1 に機関車外観、表 1 に一般仕様中おもなものを示す。
本機関車は支線区用ではあるが、主要機器、特に主電動機の標準化と、本線および支線の共通運用の観点から、B-2-B の軸配置を有し、基本的な性能、特性は ED 75 形と同一に設計された。図 2 に速度一引張力特性を、また図 3 にノッチ曲線を示す。本機関車の特長とするおもな点をあげると次のとおりである。

- (1) ED 75 形の磁気増幅器による無電弧低圧タップ切換方式に代わり、初めて全面的にサイリスタによる完全無接点電圧制御方式 (自動定電圧制御併用) を採用し、粘着性能の向上と保守の簡易化を図っている。
- (2) 主サイリスタには大電流高耐圧素子を採用した。
- (3) 主変圧器は主平滑リアクトルを内蔵し、さらに耐寒耐雪機関車とするため従来屋根上に設置されていたパンタグラフ断路器、空気遮断器などの 20 kV 機器を変圧器上面に設置し、屋内形のコンパクトなものとした。
- (4) 制御回路は広範囲にわたり無接点化され、機器の軽量化、保守の簡易化、動作速度および信頼度の向上が図られている。
- (5) 支線用として軸重軽減のため中間台車を設け、空気バネ圧力の変化により動軸重の切換えを可能とした。
- (6) 動軸重の連続可変装置を設け、起動時の粘着性能の向上と高速時軌条に与える衝撃の軽減を図った。
- (7) 寒冷地対策として冬期電気品冷却風の機械室室内循環方式

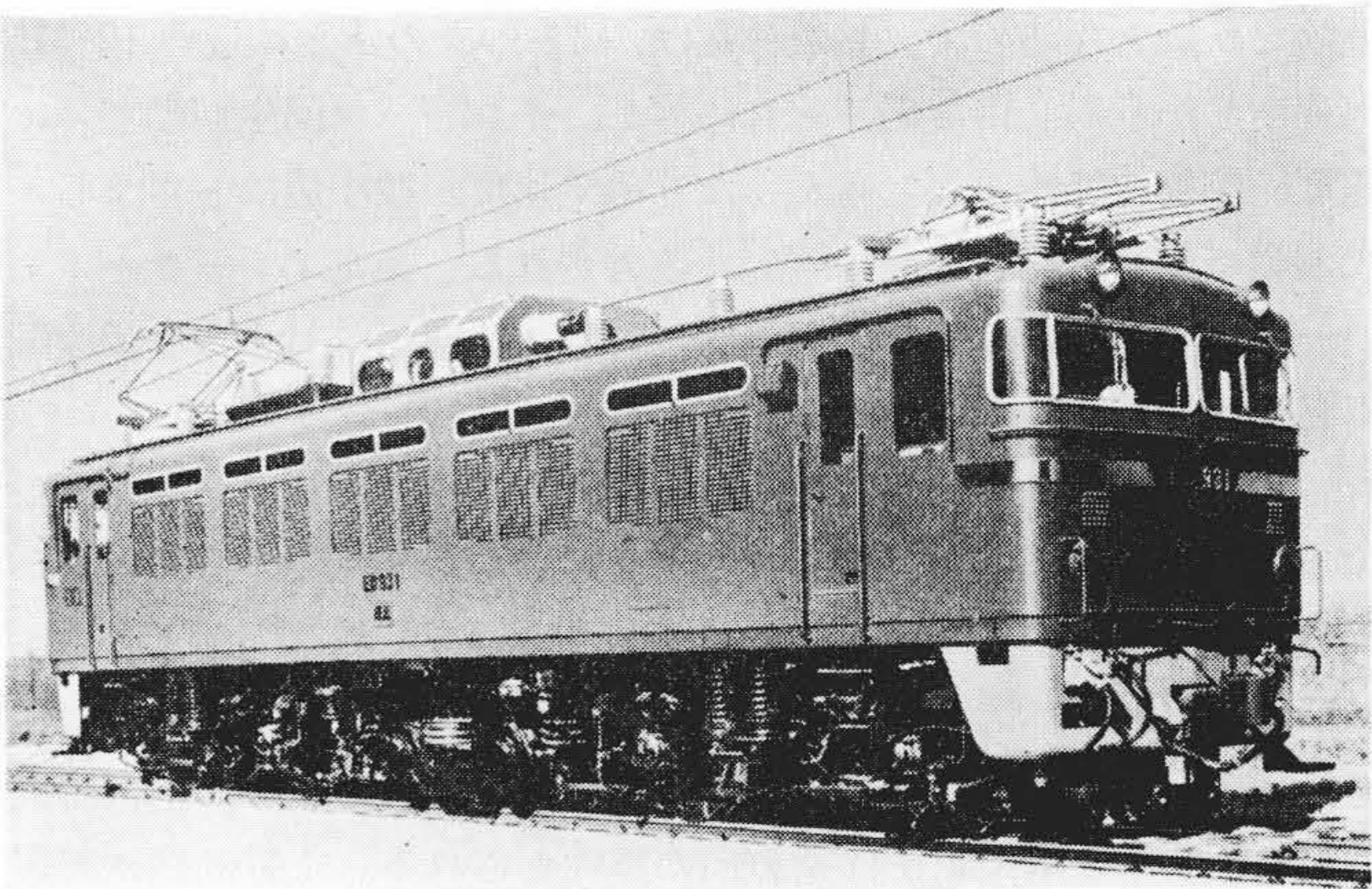


図 1 ED93 形交流電気機関車

表 1 おもな一般仕様

項 目	仕 様
用 電 気 方 途	客 貨 両 用
運 転 整 備 重 量	単 相 交 流 50 ~ 25 kV
車 軸 配 置	75 t
機 関 車 性 能	B ₀ -2-B ₀
1 時 間 定 格 出 力	1,900 kW
1 時 間 定 格 引 張 力	14,100 kg
1 時 間 定 格 速 度	49.1 km/h
最 高 許 容 速 度	100 km/h
主 電 動 機	MT52 4 台
動 力 伝 達 方 式	1 段 減 速 ツ リ カ ケ 式
歯 車 比	16 : 71 = 1 : 4.44
主 変 圧 器	TM916 内 鉄 形 送 油 風 冷
連 続 定 格	2,290 kVA
主 平 滑 リ ア ク ト ル	IC914 4 台 主 変 圧 器 に 内 蔵
シリコン整流器およびシリコン制御整流器	10 mH (540A において) 1,105 V, 440 A
連 続 定 格	RS905
結 線 方 式	2,400 kW, 1,200 V, 2,000 A
素 子 個 数	シリコン制御整流器逆並列結線
制 御 方 式	シリコン整流器単相ブリッジ結線
制 御 装 置	シリコン整流器 160 (1S×12P×4A×4U)
列 車 暖 房 方 式	シリコン制御整流器 96 (1S×12P×2A×4U)
ブ レ ー キ 装 置	2 次 側 分 割, サ イ リ ス タ 連 続 位 相 制 御
ATS (自動列車停止装置)	弱 界 磁, 非 重 連
製 造 初 年	サイリスタ位相制御器, 電磁空気単位スイッチ
	電気式, 単相交流 1,498 V, 380 kVA
	EL14AS 空気ブレーキ (非重連) ネジ手ブレーキ
	ATS-S 形
	昭 和 40 年

を採用し機械室の保温と、車側エアフィルタからの吸込風速を下げ雪の侵入防止を図った。

* 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

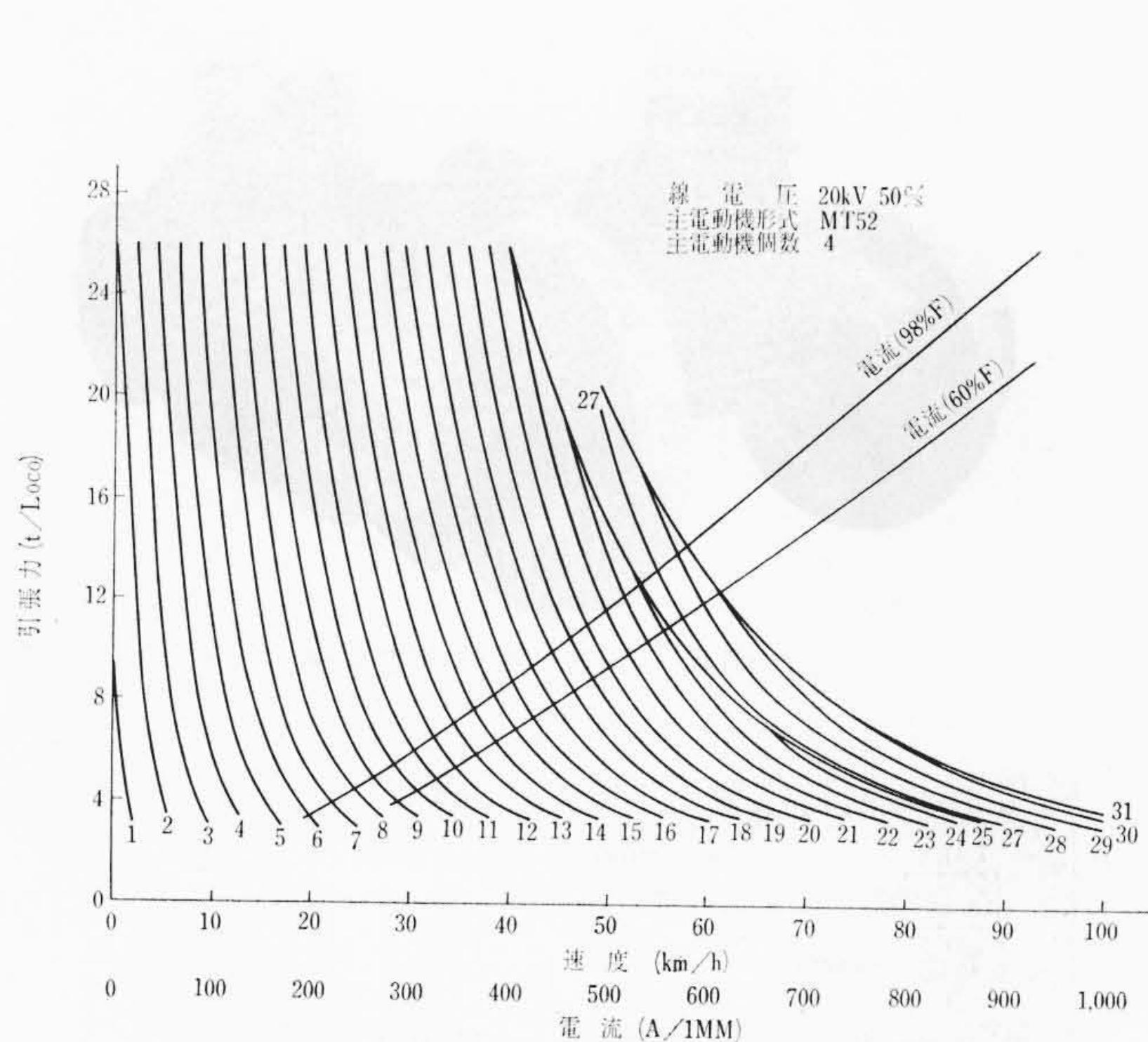


図2 速度—引張力特性

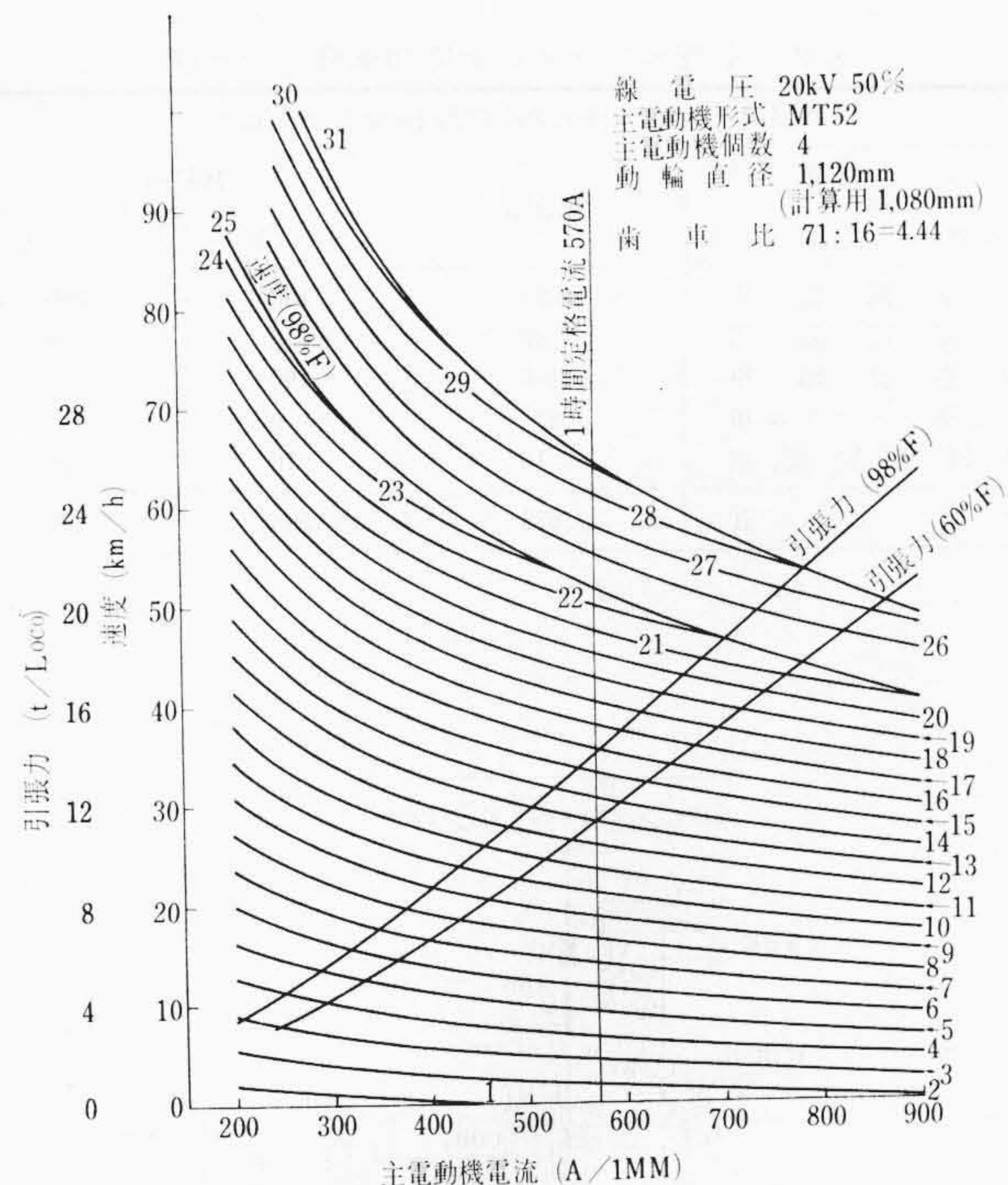


図3 ノッチ曲線

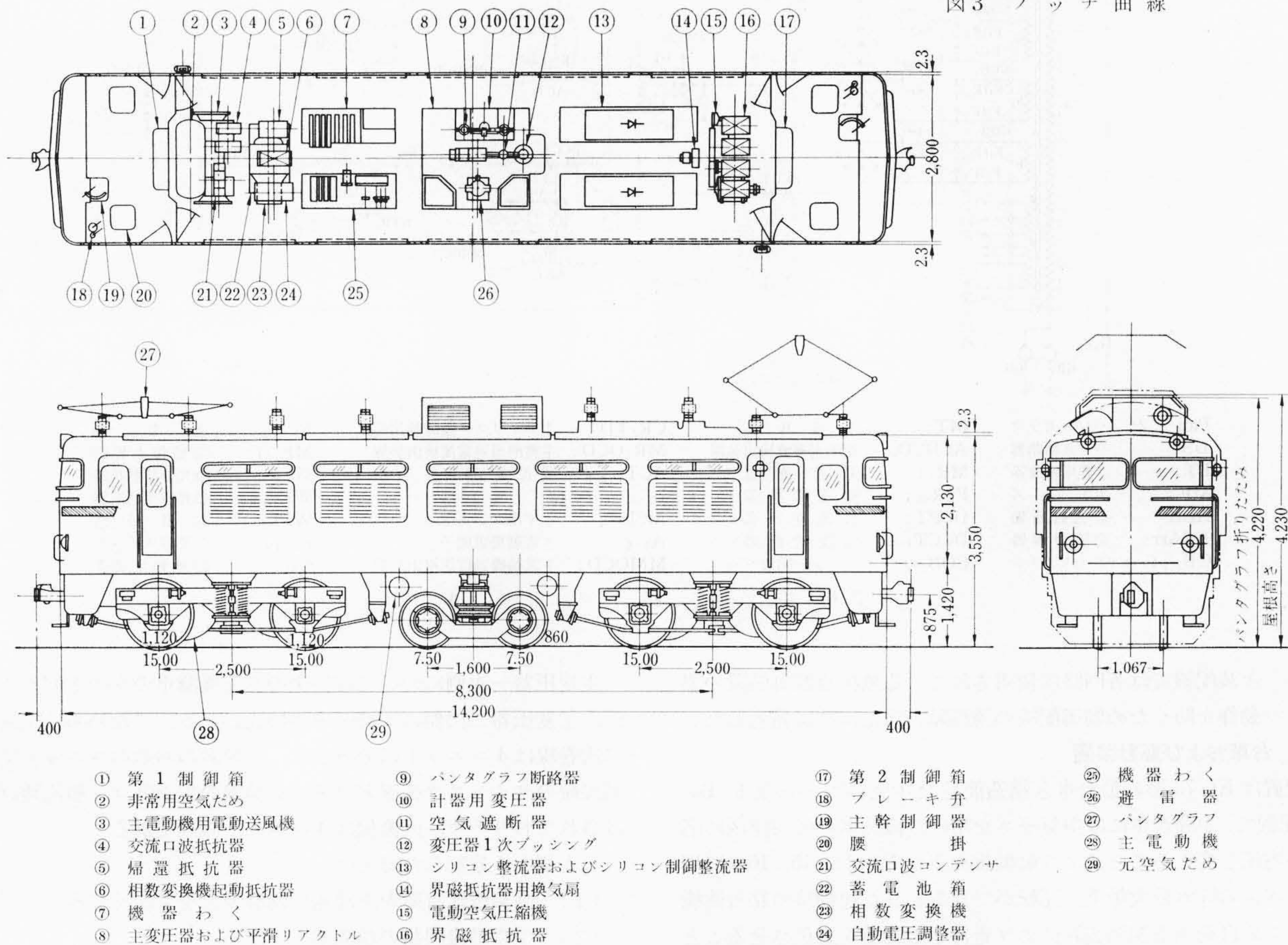


図4 ED93形交流電気機関車機器配置

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図4に示す。

機器配置の計画にあたっては乗務員の取扱いの便を図るため、ED75形と極力同一配置になるよう考慮した。ED75形とのおもな相違点は次のとおりである。

(1) 従来屋根上に設置されていた20kV特高機器類を耐雪耐寒

の目的で室内設置とし主変圧器上部にまとめた。したがって屋根上にはパンタグラフと導体が残るのみである。

(2) 主変圧器および主整流器箱はいずれも室内空気を吸込み屋根上の通風器を経て車外に排気するが、冬期は通風器を閉じ室内循環のできる構造を採用し室内保温と車側エアフィルタからの冷却風吸込み量を減少し、車体内部への雪の侵入を防止した。表2にED75形とED93形の冷却風の吸込量の比較を示す。

表 2 車側エアフィルタ冷却風吸込量比較

車側エアフィルタからの冷却風吸込量 (m ³ /min)			
車 種	ED75	ED93	
送風機		夏 期	冬 期
主 電 動 機 用	280	280	280
主 変 圧 器 用	140	140	0
主 整 流 器 用	160	160	0
主平滑リアクトル用	80	0	0
界 磁 抵 抗 器 用	16	16	16
合 計	676	596	296

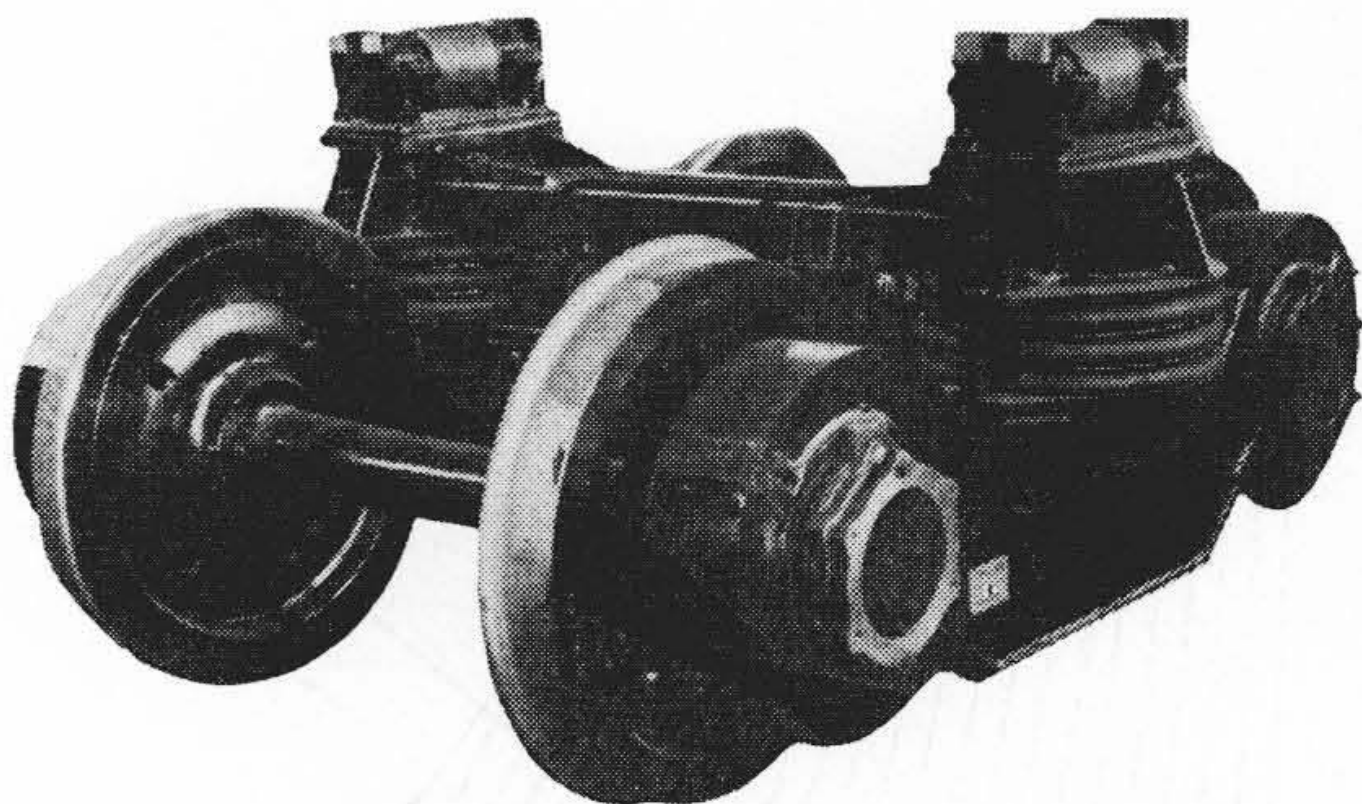


図 5 空気バネ付中間台車

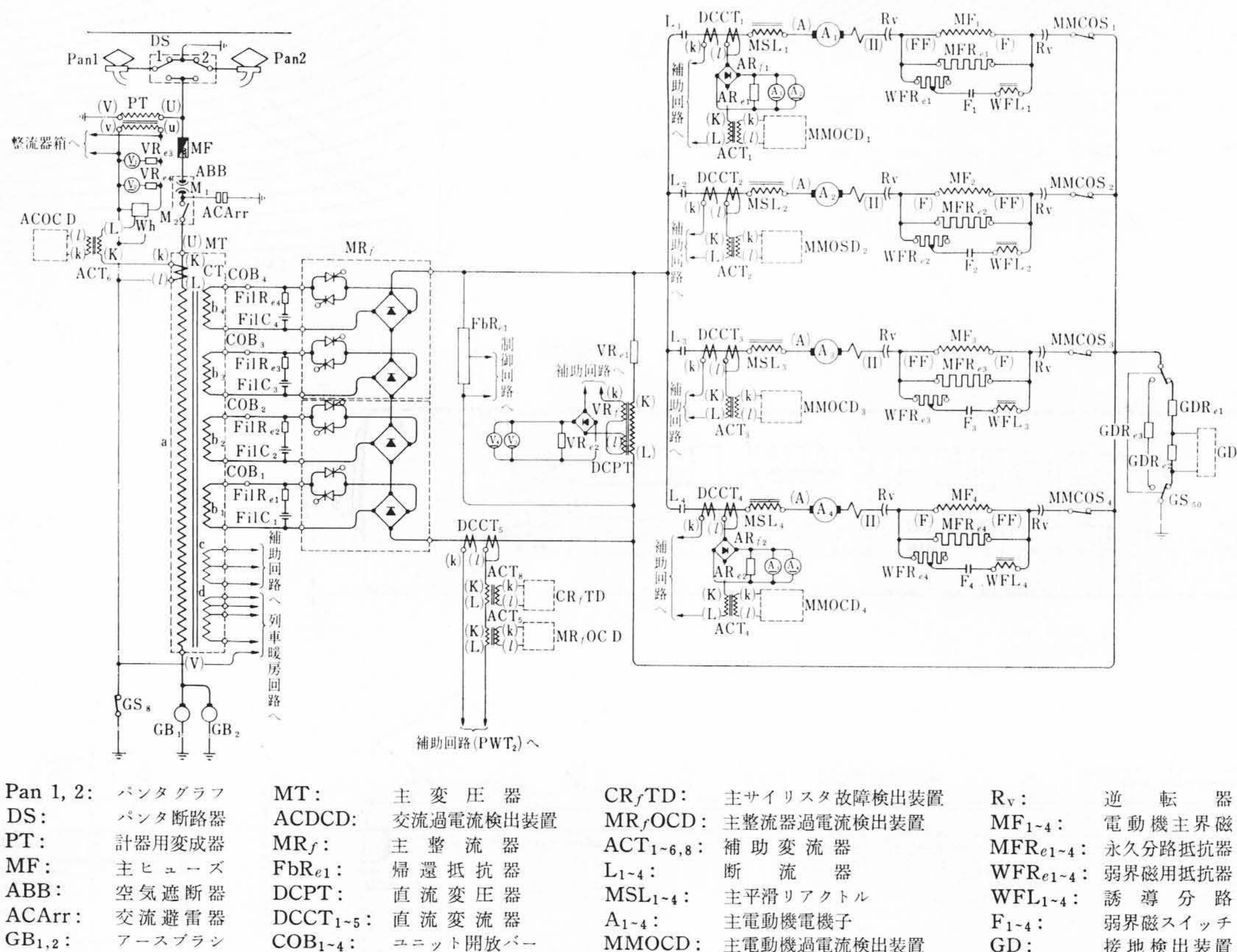


図 6 主回路ツナギ

(3) ギ装束線では各回路に使用されている無接点制御装置の誤動作を防ぐため制御配線の誘導障害防止に特に留意した。

3.2 台車および駆動装置

軸配置は ED 75 形の動台車と構造簡易な中間台車からなる B₀-2-B₀ 配置で、中間台車には空気バネを用い、機関車の使用線区に応じその内圧を変えることにより動軸重をそれぞれ 14, 15, 16 t に切換え各線区の許容最大軸重で運転ができる。また起動時の粘着性能向上のため自動軸重制御装置により走行中の軸重を変化させることができる。図 5 は中間台車である。駆動方式は ED 75 形と同様標準 MT 52 形主電動機の平衡車 1 段減速のツリカケ式である。

3.3 車 体

車体は全長 14,200 mm、幅 2,800 mm、まぐらはり間 8,300 mm であり、車体長さの増大や非重連形のため前面開戸がないことと前述の冷却風室内循環構造以外はほとんど ED 75 形と同一構造である。

4. 主回路および制御方式

4.1 主回路方式

図 6 に本機関車の主回路ツナギを示す。

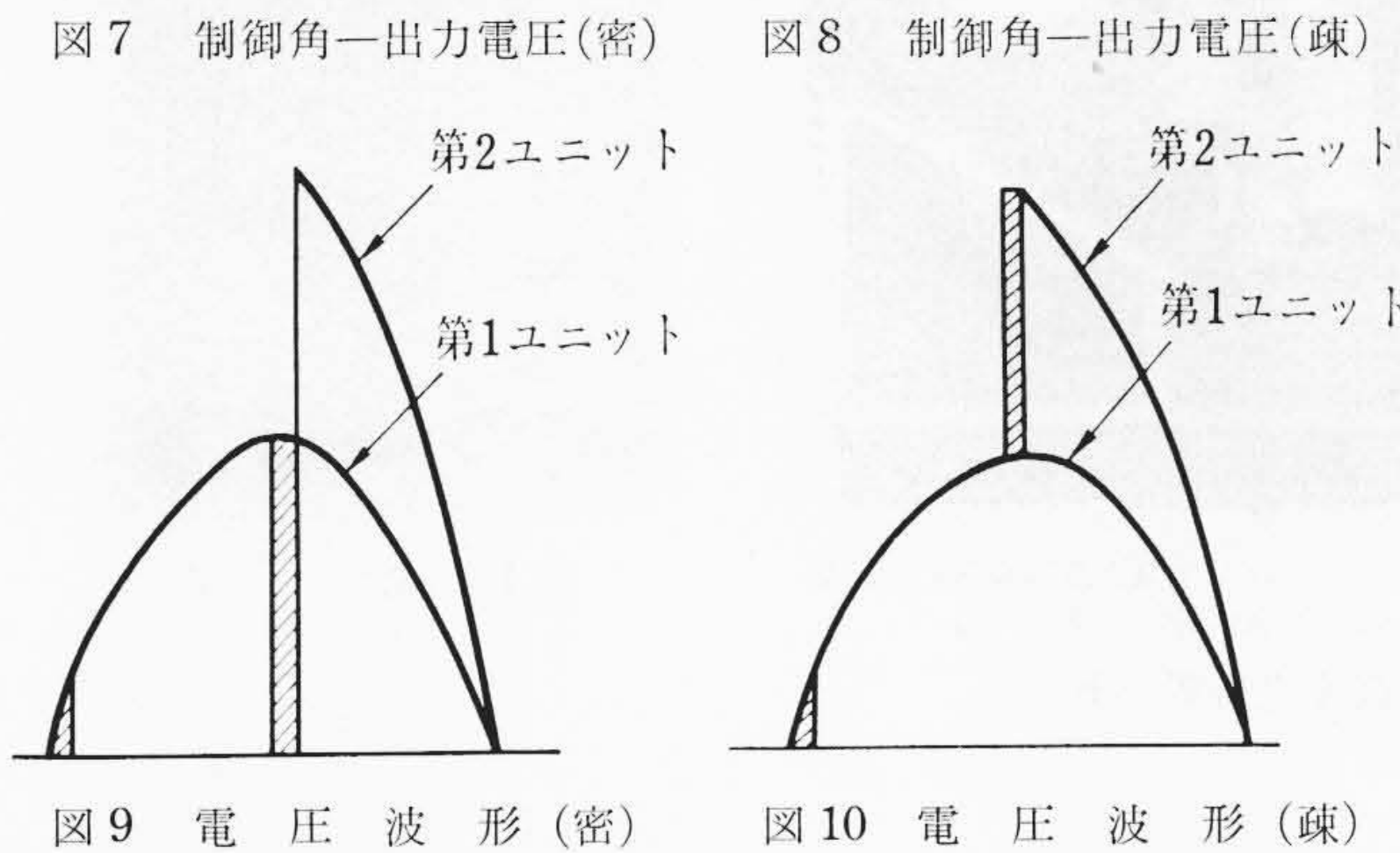
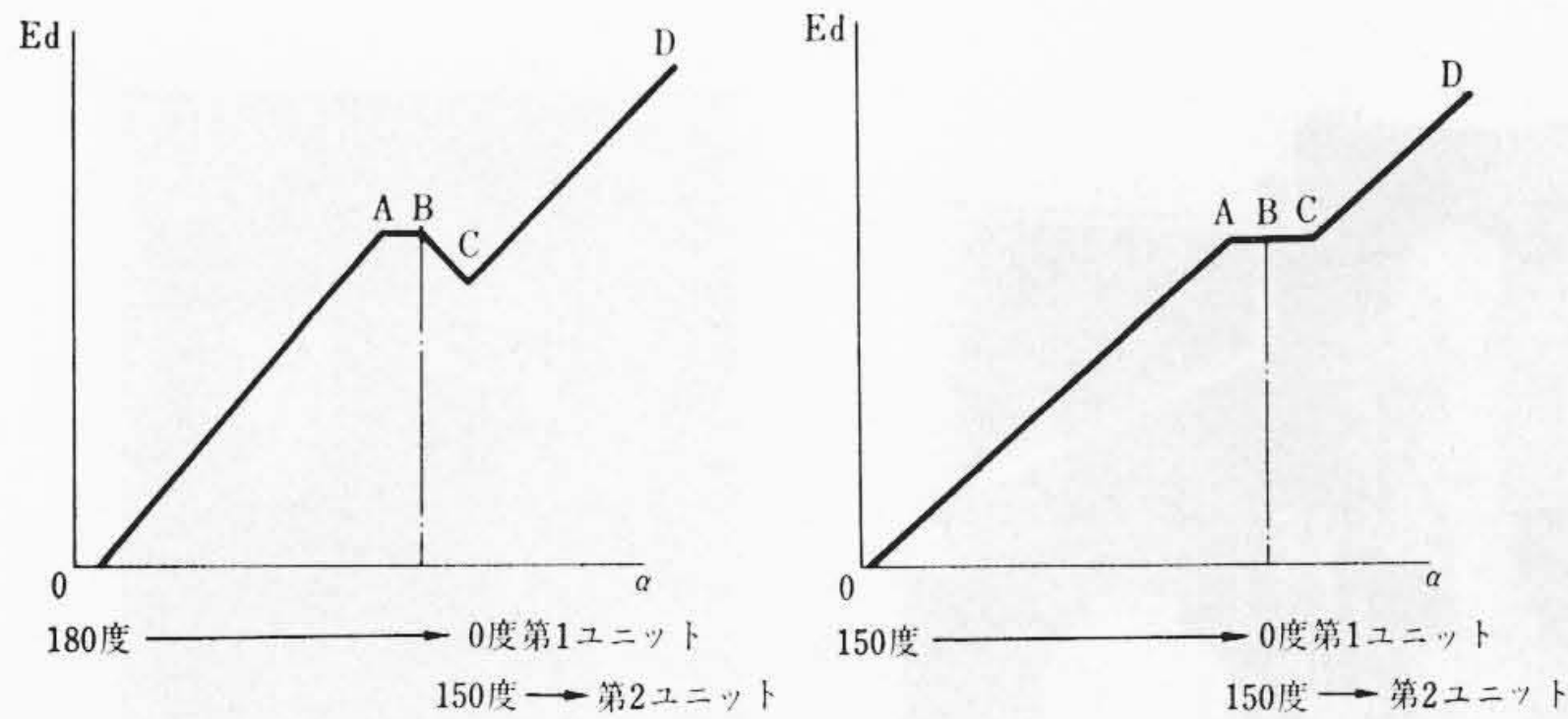
主変圧器一次側については従来の交流機関車のものと同一であるが、主変圧器二次側に本機関車の特長がある。すなわち、主変圧器二次巻線は 4 ユニットに分割され、このおのおののユニットに逆並列接続のサイリスタ装置とブリッジ結線の主シリコン整流装置が接続されており⁽²⁾⁽³⁾、直流側は 4 ユニット直列である。

二次側を 4 分割した理由は、

- (1) 高調波含有率を下げ通信誘導障害を少なくする。
- (2) 主電動機回路の脈流率を下げる。
- (3) 力率の低下を抑える。
- (4) サイリスタの直列個数を 1S とする。

これらの目的のために一応 4 分割を行なっているが、この分割数が通信誘導障害および力率に対して実際の本線上でどのような影響を与えるかを調査するために、4 分割制御のほかに、2 分割、非分割制御が可能なるように計画されている。

主整流器から後の直流回路は従来のものとほぼ同じであるが、弱め界磁率を 60% 1 段のみとした特殊な弱め界磁渡り方式を採用している。なお主整流器出口のところに帰還用抵抗器(FbRe₁)を設け、主回路直流電圧をフィードバックし、主回路直流電圧が一定になる



よう自動電圧制御を行なっている。

また保護継電器類はすべて無接点検出器としたことも特長の一つである。

4.2 電圧制御方式

電圧制御方式はさきに述べた4ユニットのサイリスタユニットを第1ユニットから順に位相制御を行ない連続的に出力電圧を制御する。

(1) 分割多重ブリッジ回路の電圧電流特性

一般に n 分割 r 段目制御中の直流無負荷電圧 E_{d0} は次式で表わされる。

$$E_{d0} = \frac{0.9 E_2}{n} \left\{ (r-1) + \frac{1+\cos \alpha}{2} \right\} \dots\dots\dots (1)$$

ここで、 E_2 : 主変圧器二次全電圧

n : 二次巻線分割数

r : 制御段数

α : ゲート制御角

(1)式で得られる無負荷直流電圧 E_{d0} から転流リアクタンス降下、抵抗降下、整流器電圧降下を差し引けば、負荷時の直流電圧 E_d が得られる。ところが、この電圧降下の大半を占める転流リアクタンス降下は、主変圧器の漏れリアクタンスが一次側と二次側各分割巻線にどのように分布しているかによって、つまり各分割巻線間の磁氣的結合状態によって、ゲート制御角 α と直流出力電圧 E_d 特性が影響を受ける。

(2) 主変圧器二次分割巻線間の磁氣的結合状態と出力電圧特性
磁氣的結合状態と出力電圧特性の関係を完全に密な場合と疎な場合について説明する。

磁氣的結合が密な場合のゲート制御角—出力電圧特性を図7に示す。このように次段の第2ユニットを制御するとABCのように逆に出力電圧が降下することになる。この理由は図9の電圧波形を見ればわかるように、結合が密なるために第2ユニットが転流するとこの転流期間だけ第1ユニットの出力電圧が零になるからである。結合が疎なる場合には図8, 10に示すようにABCの間ゲート制御を進めても出力電圧が増加しない期間が生ずる。

(3) 定電圧制御方式⁽⁴⁾

主変圧器の磁氣的結合状態によってその位相角と直流出力電圧

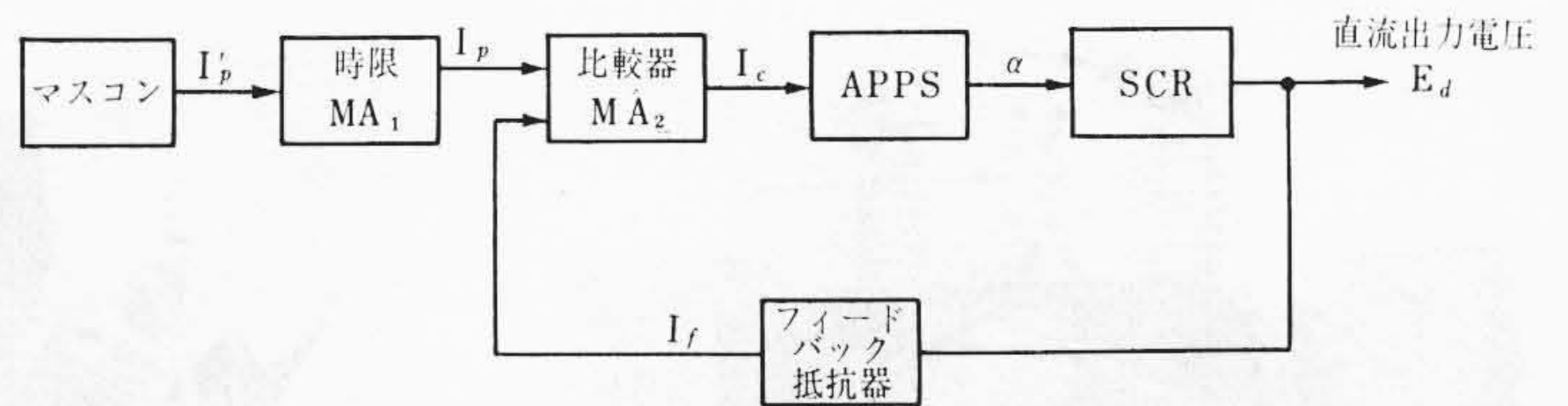


図11 定電圧制御ブロックダイアグラム

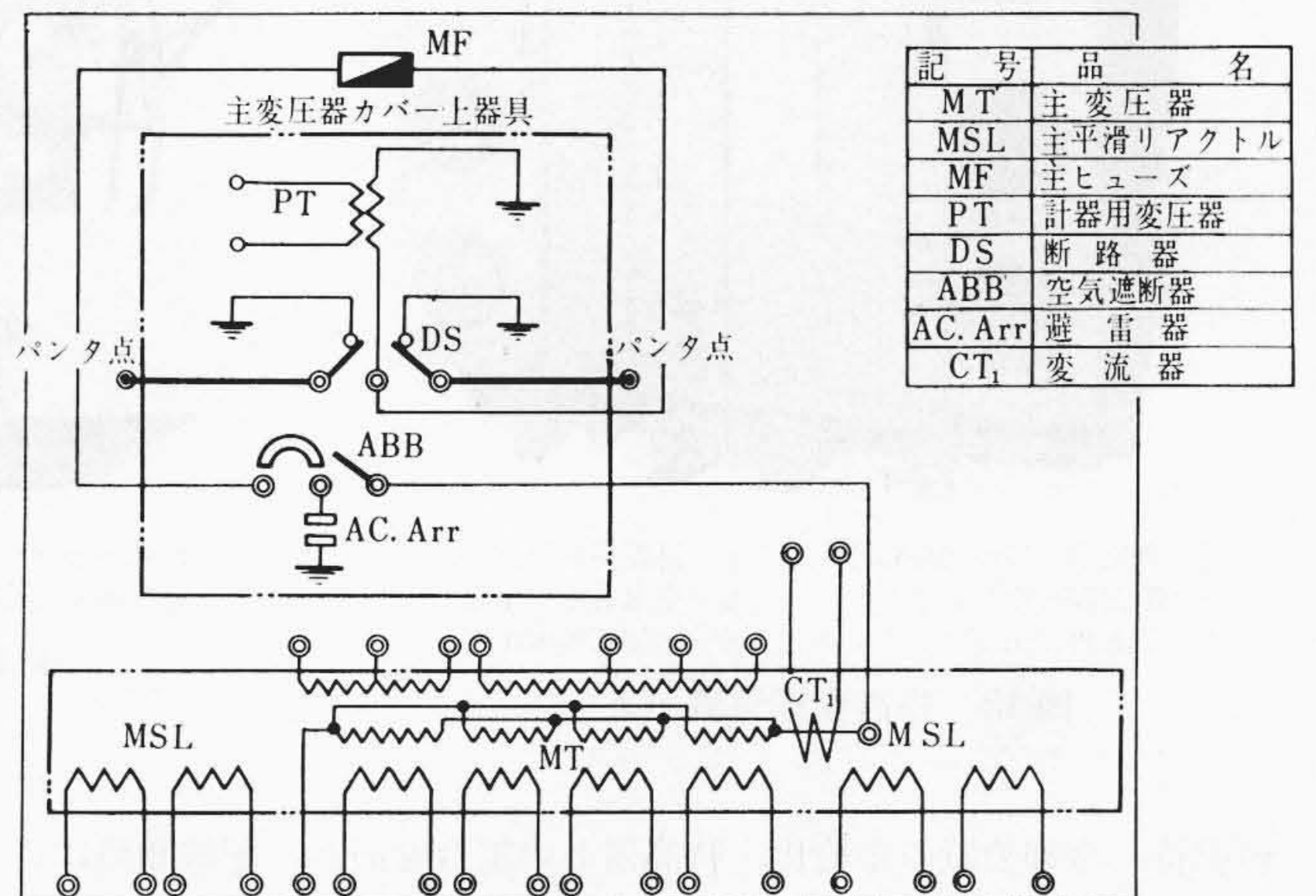


図12 特高変電装置接続図

特性は図7あるいは図8のようになるが、これは機関車速度制御上好ましくない。そこでこの対策として主幹制御器のノッチ指示をゲート制御角でなくて、出力電圧のパターンで与える方式とし、このパターン電圧に比例した値になるように、シリコン整流器の出力電圧を定電圧制御する方法を採用した。

図11に定電圧制御系(以下AVR系と記す)のブロックダイアグラムを示す。

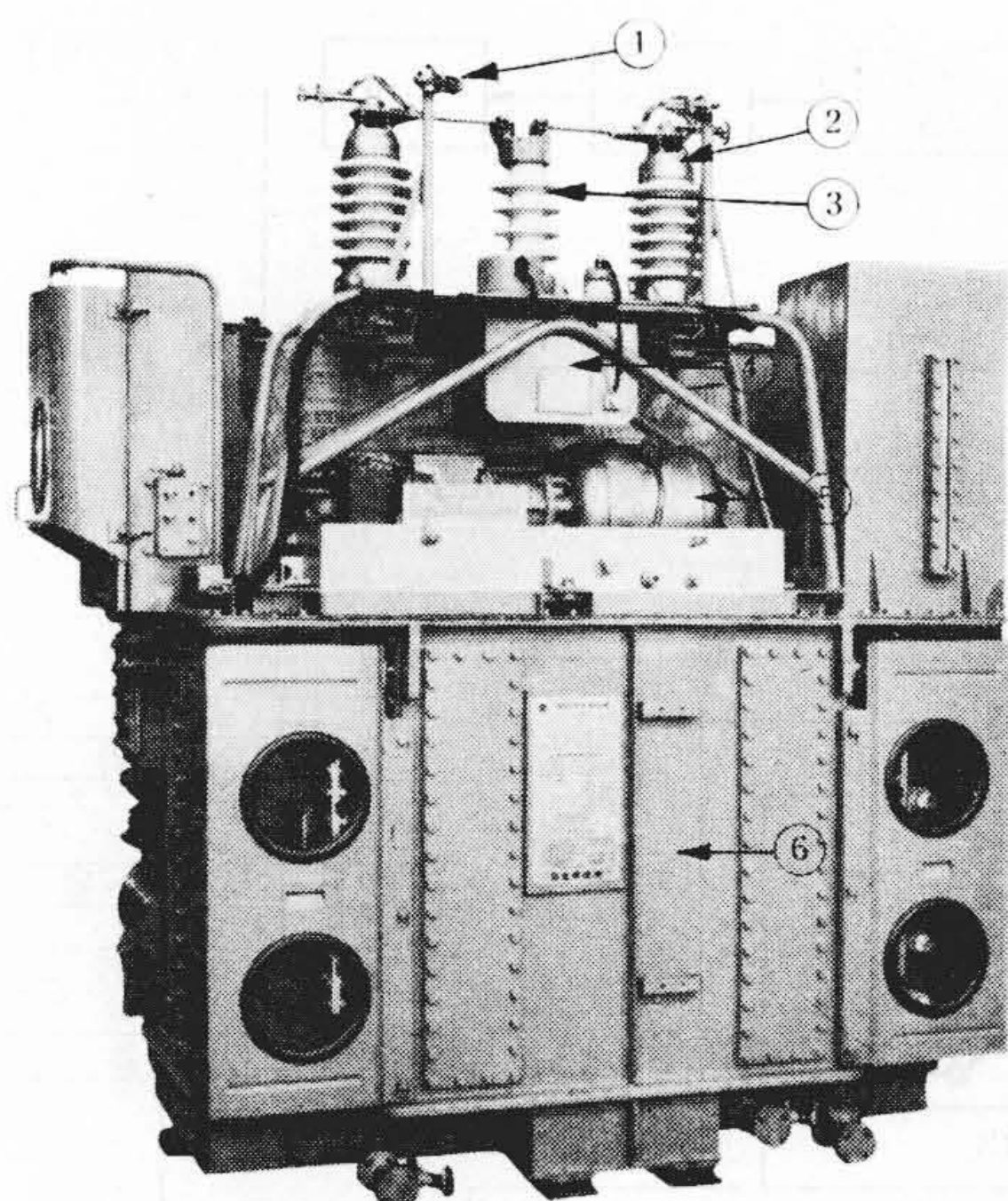
まず制御指令は主幹制御器内に設けてあるパタン発生器により、主幹制御器のハンドル操作角度に対応した基準パタン電圧が出される。この信号 I_p' は時限磁気増幅器(MA₁)によりある時定数を持つ信号 I_p に変換され比較器(MA₂)にはいる。主幹制御器からの信号に時定数をもたせるのは定電圧制御を行なうと電圧変動率特性が良くなるためノッチ進め時にピーク電流が大きくなるのを押えるためである。

比較器(MA₂)から出た信号 I_c はMA₁より出た信号 I_p と主回路直流出力電圧 E_d をフィードバックしてきた信号 I_f の差であり、これが自動パルス移相器(APPS)にはいり主回路サイリスタ(SCR)のゲート制御角 α を指示し、基準パタン電圧に対応する直流出力電圧 E_d を決める。このようにして順次主幹制御器の主ハンドルを進めてゆくと、第1ユニットサイリスタゲート制御が行なわれ、以下順次第3, 第4ユニットのサイリスタが制御され、最後には第1から第4まですべてのユニットのゲートは制御角 α が0度で運転される。

5. 特別高圧変電装置

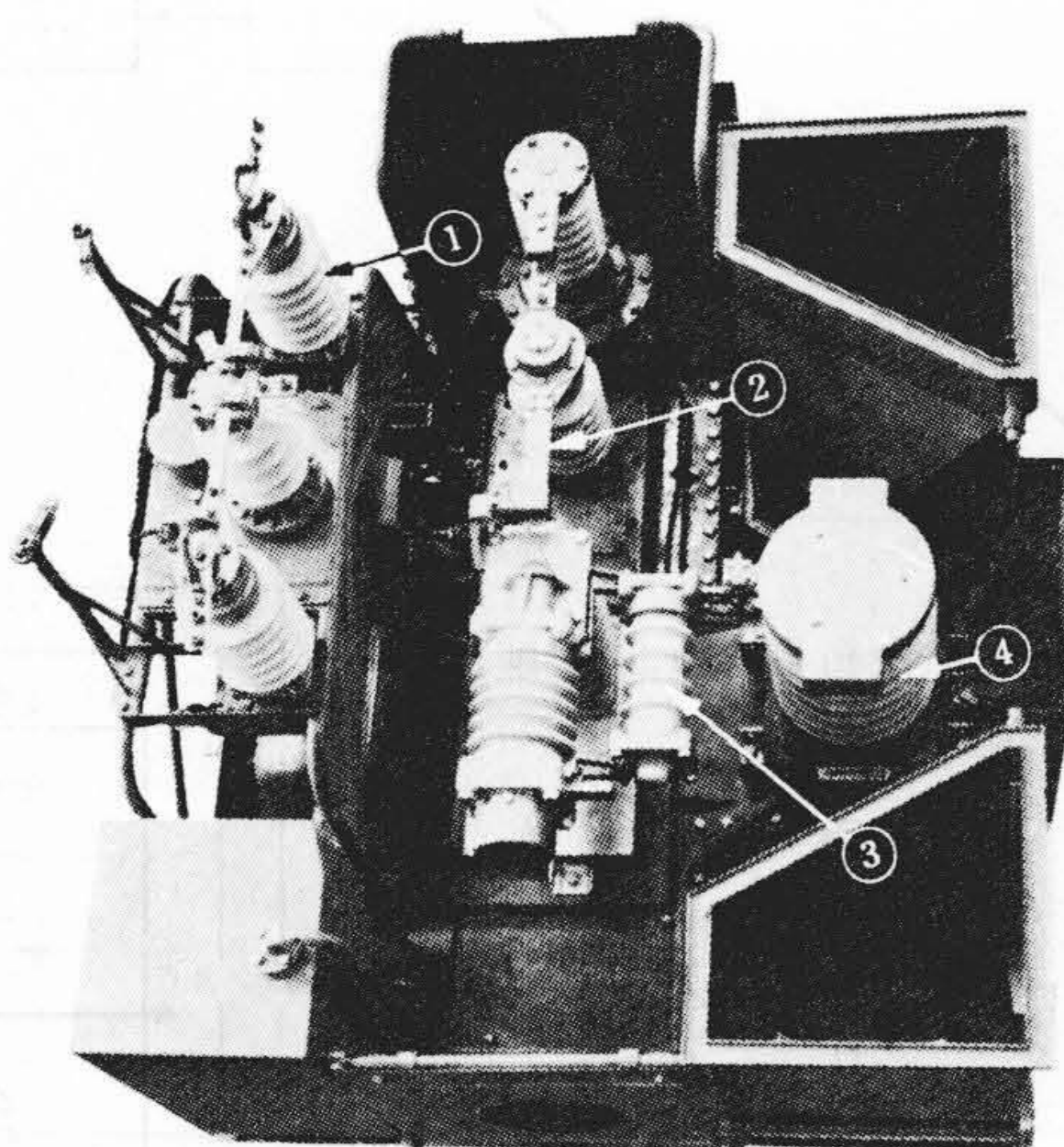
5.1 装置の概要

本装置は本機関車のおもな特長の一つであり、特高機器を主変圧器と組み合わせて車内に収納したことにより、塩害、塵害、雪害および凍結外傷事故が防止され、かつ合理的な機器配置により配線が省略短縮される。また保守点検の簡易化など多くの飛躍的な機能向上がなされた。これらの改良を実現するため、変電器具に対する設計条件はいっそうきびしくなり、特殊巻線による走行特性と短絡強度



① 断路器の接地側接触部 ④ 計器用変圧器本体
② 断路器操作がい子 ⑤ 空気遮断空気槽
③ 計器用変圧器ブッシング ⑥ 主変圧器本体

図13 特高変電装置 (a)



① 断路器操作がい子 ③ 空気遮断器非直線抵抗器
② 空気遮断器路部ブレード ④ 避雷器

図14 特高変電装置 (b)

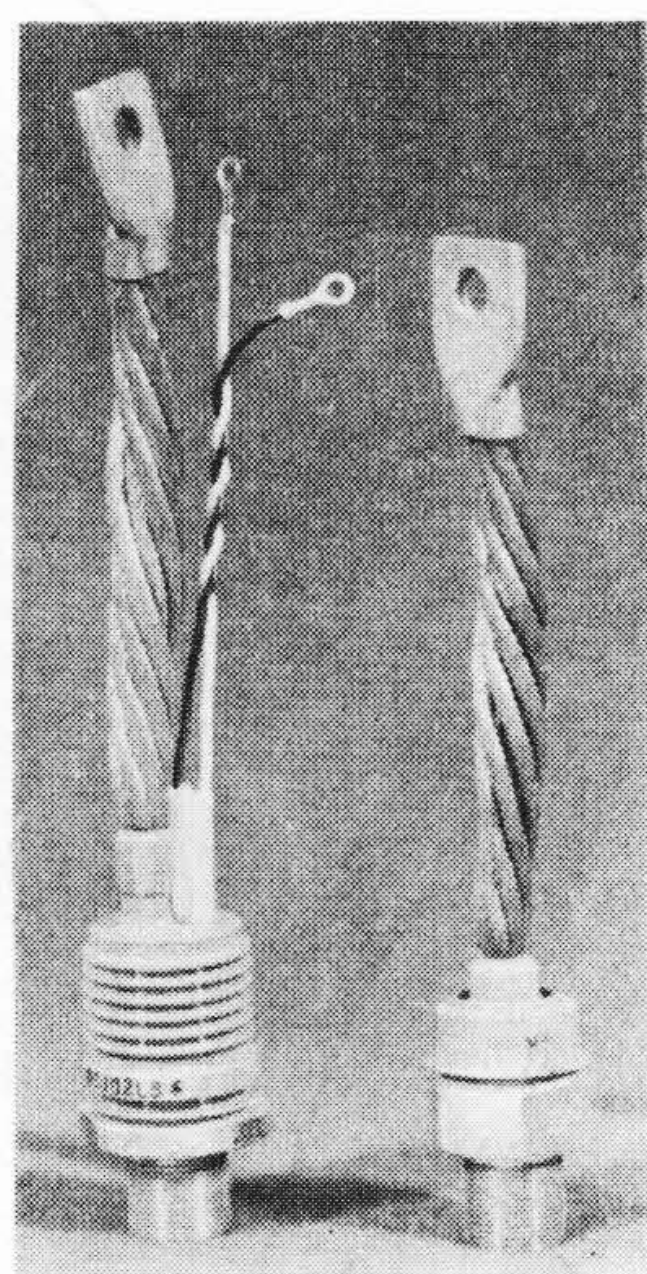


図15 素子

の維持、冷却装置の集約化、特高器具の組合せ設計、配線順路に従う器具配置など多くの苦心が払われた。本方式は、今後の機関車に一指針を与えるものとして意義深いものがある。図12に本装置の接続図を、図13に正面から見た、また図14に上部から見た外観を示す。

5.2 主変圧器および主平滑リアクトル

従来の変圧器に比べ、おもな特色は次のとおりである。

- (1) 2次1巻線の短絡電流をシリコン整流素子の制限電流内に納め、かつ4巻線(定格)使用時の電圧降下を指定値内に押えるために、図12に示すように1次2次巻線とも4分割とする特殊構造とした。
- (2) 特高器具をカバー上に設置するので、主変圧器の高さが非常に低いものとなっている。
- (3) 主平滑リアクトルを主変圧器タンクに内蔵させて絶縁性の向上と冷却装置の集約化を図った。

5.3 パンタグラフ断路器および計器用変圧器

従来この両者は別設置されていたが、計器用変圧器の主がい管上に断路器用接触子2個を取り付けて、支持がい管の兼用を図ったため、寸法が著しく縮小された。計器用変圧器は上述理由で、ブッシングを横出しから垂直出しに変更したほかは、ほとんどED75用と同一である。また断路器下部に本装置の保護カバー用の鎖錠装置を有し、インターロック機構を採用し安全を図っている。

5.4 空気遮断器およびその他の器具

空気遮断器、避雷器および主ヒューズは屋内設置のための小変更以外はED75用と同一である。

6. 主シリコン制御整流器

動作責務はED75用とほとんど同一で、2,200kW/1,100V/2,000A連続、180%10分の定格を有し、おもな特長は次のとおりである。

- (1) シリコン整流素子は、すでに標準化して多く使われているDJ16形280A1,300Vインパルス1,600Vの素子で、1S×10P×4A×4ユニットの構成である。図15は素子の外観である。
- (2) 主シリコン整流素子の1S故障時に流れる交流側短絡電流から、主サイリスタを守るために、主シリコン整流素子にはハイラップヒューズ(高速度限流ヒューズ)をそう入し

表3 サイリスタ定格

項	目	定 格
形 式		CJ02 L
定 格 順 電 流 (A) (平均値 導通角180度)		250
定 格 動 作 逆 電 圧 (V) (波高値)		1,000
定 格 非 線 返 最 大 逆 電 圧 (V) (1×40μs 衝撃波高値)		1,200
定 格 動 作 順 止 電 圧 (V) (波高値)		1,000
定 格 最 大 ゲート 電 圧 (V) (波高値)		順方向 10 逆方向 5
定 格 最 大 ゲート 電 流 (A) (波高値)		1
定 格 最 大 ゲート 電 力 (W)		瞬時値 10 平均値 2
定 格 素 子 接 合 温 度 (℃)		125〜10
過 電 流 耐 量 (A) (波高値非線返)		1サイクル 5,000 5サイクル 3,500
し め 付 ト ル ク (kg/cm)		550±5

ている。定格は350V 800Aで、車両搭載に耐え得るよう改良されており、事故電流を半サイクル以内に遮断するとともに、主電動機の閃絡電流に対しては損傷しない。

- (3) 主サイリスタは、高耐圧大容量拡散合金型素子で⁽⁵⁾、表3に示すような性能を有し、1S×12P×2A×4ユニットの構成である。
- (4) 点弧時の急しゅんな di/dt から素子を守るため、各サイリスタには空心のリアクトルをそう入している。また電流不平衡率は、主シリコン整流器と同様に、±20%以内に押えられている。
- (5) 主サイリスタの短絡、通弧、アーム失弧を検出するために、故障検出装置がある。主回路と並列に模擬回路を設け、ブリッジの交流端子電圧をつき合わせて、主サイリスタ故障時に生ずる不平衡電圧を検出するという原理のものである。
- (6) 装置は二箱からなり、それぞれ、故障検出装置、ゲート回路を内蔵している。図16に装置外観を示す。ゲート回路の誘導には、特に留意され、高インピーダンス回路のシールド化、サージ吸収装置の付加により、信頼度の高いものとなっている。

6.1 無接点制御装置

本電気機関車の制御論理回路(ABB投入、ABB遮断、断流器投入、遮断、弱界磁制御)および保護継電器類(過電流継電器、接地検出装置)をすべて無接点装置とし、車両の振動、ゴミに対する誤

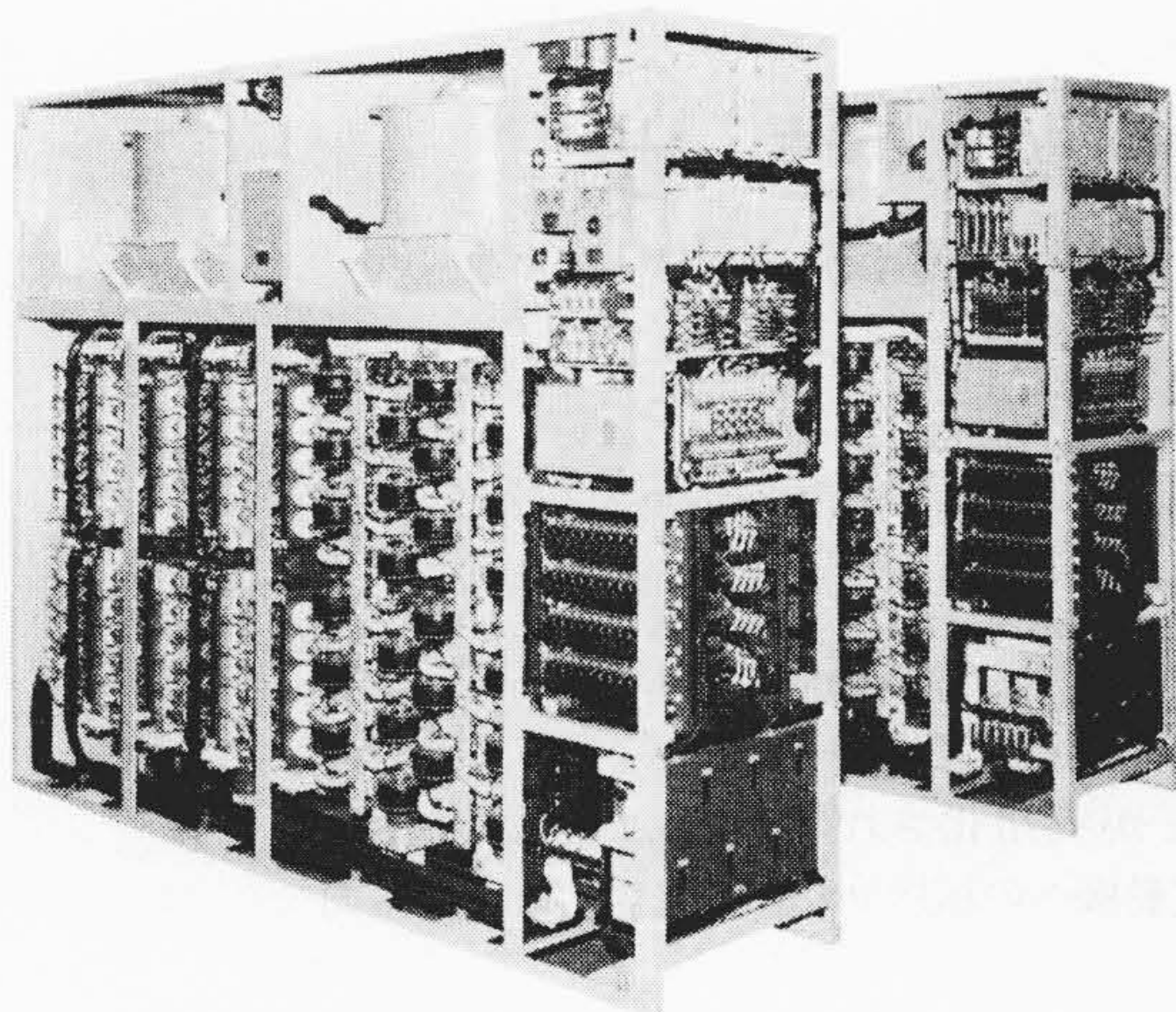


図 16 装置外観

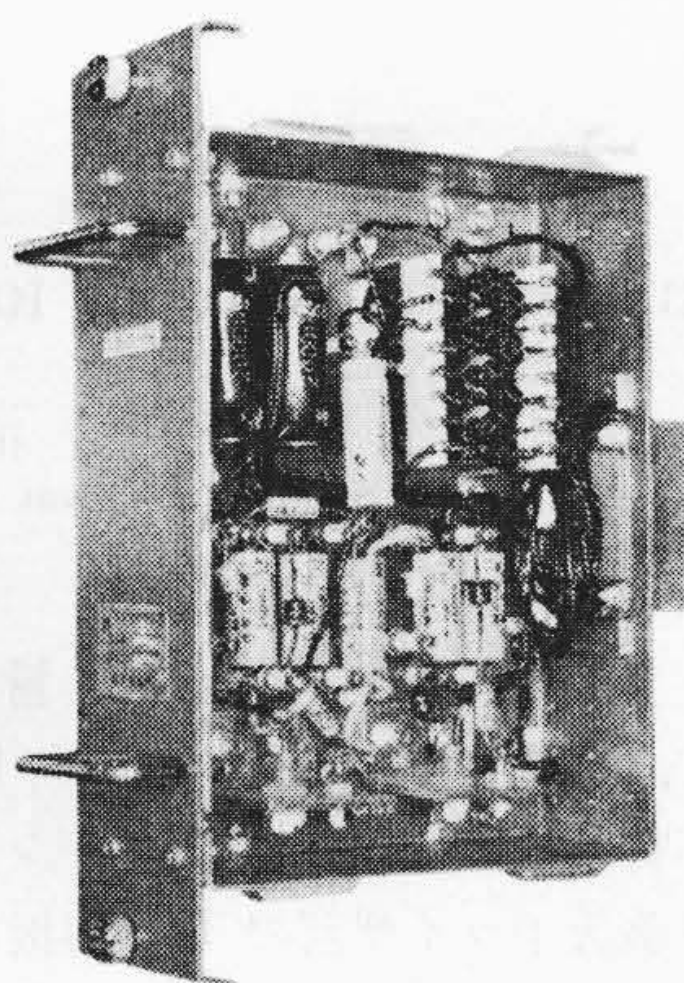
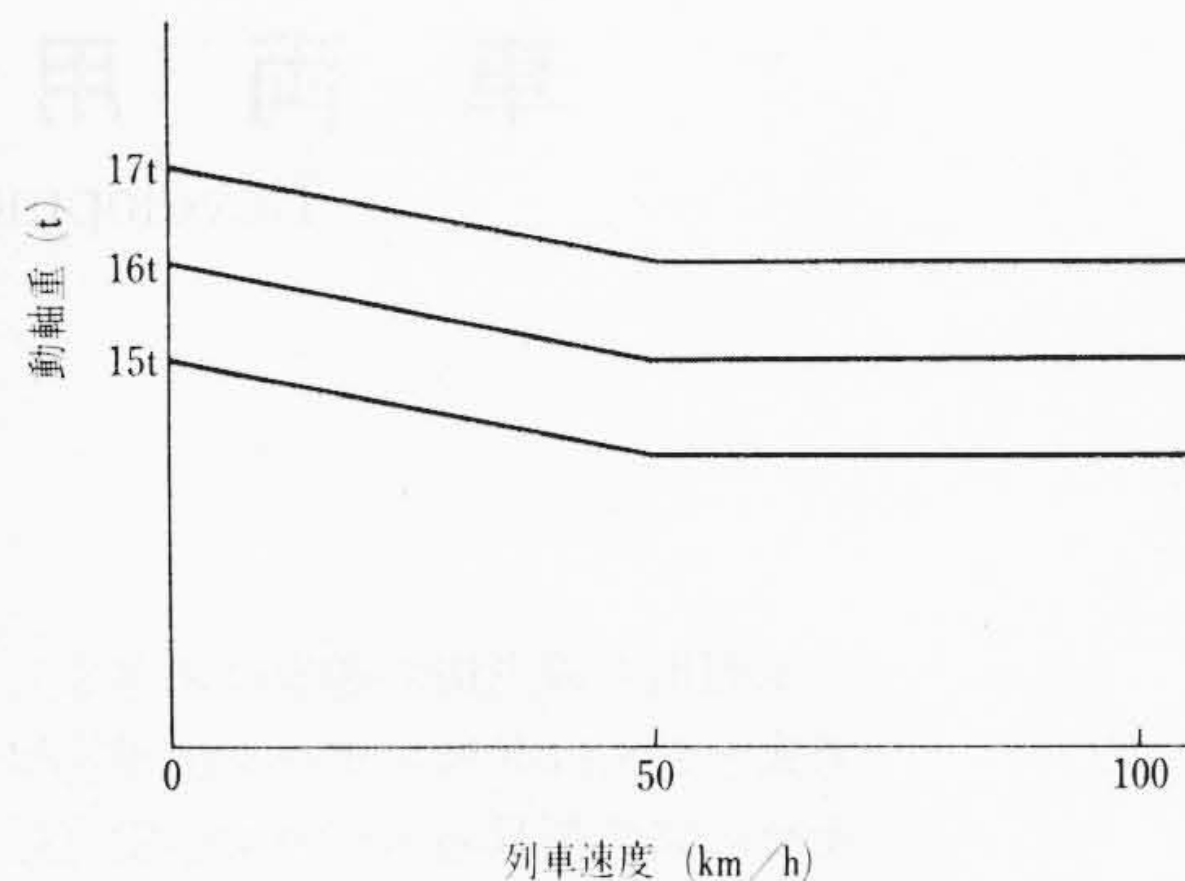
図 17 断流器引きはずし
論理回路

図 20 可変軸重運転

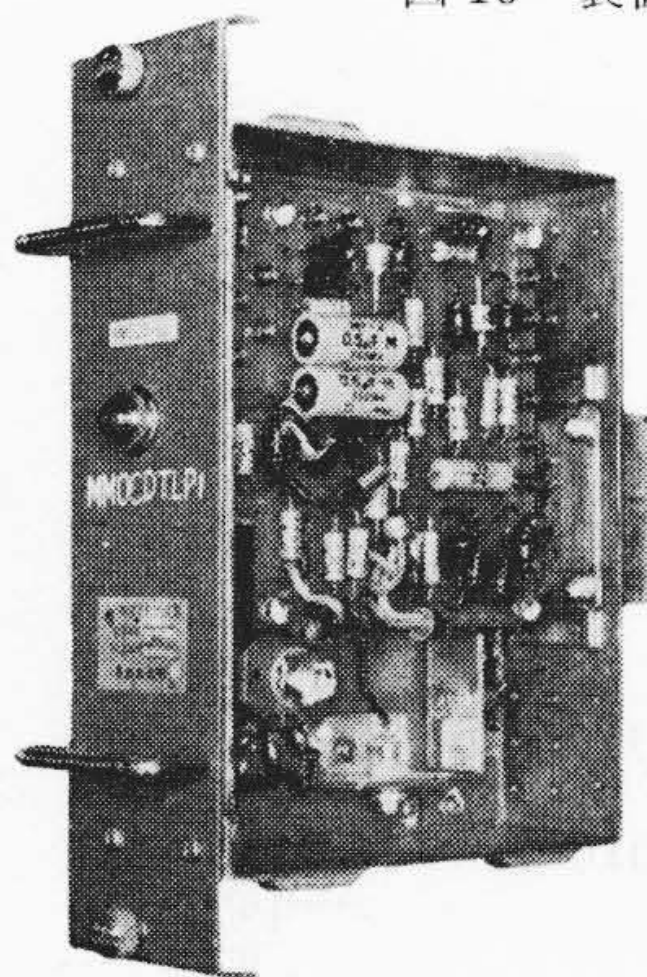


図 18 主電動機過電流検出装置

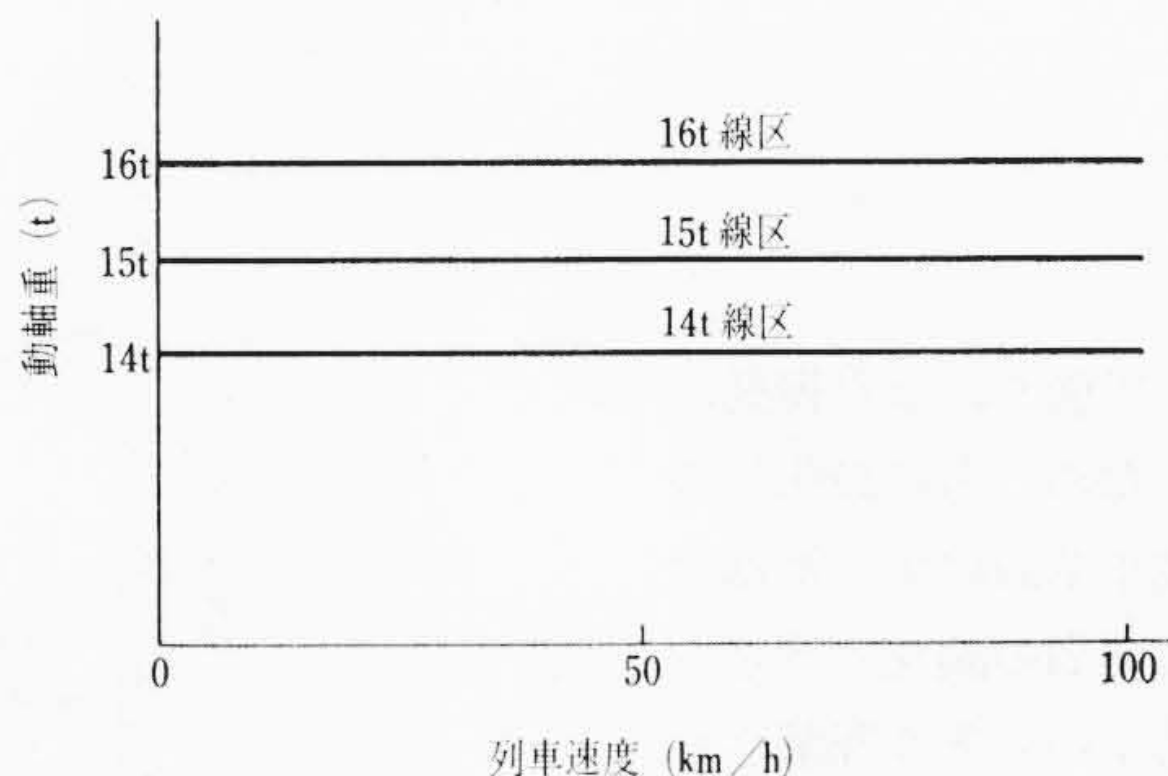


図 19 一定軸重運転

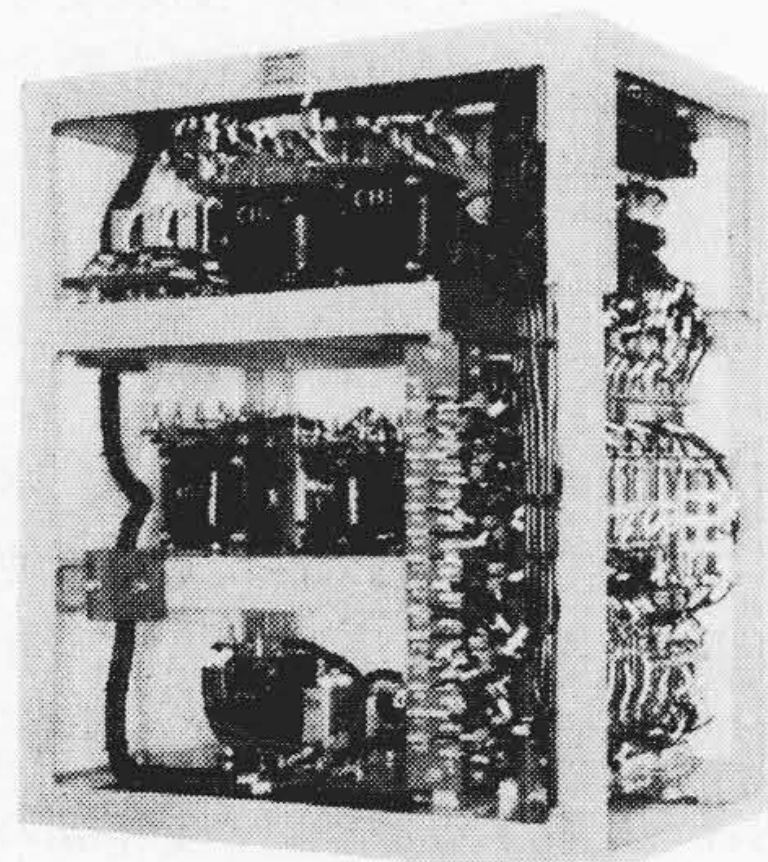


図 21 主回路電圧制御装置

動作をなくし信頼度を高め、保守の低減を図っている。

無接点装置の基本エレメントとしては、高圧回路用に磁気増幅器を用いる以外は制御用サイリスタ、トランジスタを用いており、回路の簡単化と部品点数の少数化を図っているので信頼度が高い。

無接点装置はすべてトレイに収納されているが、このトレイは今後の標準形となるよういろいろな面から検討され、将来ダイキャスト製への移行ができるよう考慮が払われている。寸法は正面の幅が70mmのものと、その2倍の幅のものと2種類に統一標準化されている。

図17に制御論理回路の一例、図18に保護継電器の例を示す。

6.2 軸重可変装置

本装置は中間台車の空気バネ圧力を制御することによって、動軸重を可変する装置であり、使用線区に合わせ14、15、16tの3段階に切り換えることができる。また機関車起動時に動軸重を増加させ、けん引力を増大させて引き出し、列車が加速するにつれてこの動軸重を自動的に下げて規定値に復するような軸重可変運転も可能である。

(1) 一定軸重運転

列車速度に対して一定軸重で運転を行なうもので図19に示すように、3線区への走行が可能である。これは運転室内の軸重切換スイッチを操作することにより空気バネ内圧を所定の値に保つように働かせることによって行なわれる。

(2) 可変軸重運転

可変軸重運転は起動時に所定軸重より1tだけ重い軸重で起動させて引き出し時のけん引力を増し、加速につれて軸重を減らし、ゆくゆくは一定軸重で運転させるものである。この場合の速度—軸重特性は図20に示すように速度50km/hまでは軸重を直線的に下げ、その後は一定軸重で運転させるものである。これは軸重可変制御装置内に所定の速度—圧力特性がプログラムとして組み込まれており、このプログラムの指示する圧力になるよう空気バネ圧を制御することによ

て行なわれるものである。

本制御装置は無接点装置で構成され、圧力検出にも差動変圧器を用いた無接点式圧力検出器によって行なわれる。

6.3 主回路電圧制御装置

本装置は主幹制御器、主回路サイリスタ、ゲート制御装置および帰還抵抗器と組になって定電圧制御系を構成するもので、磁気増幅器を主体とした無接点装置である。

おもな構成部分は次のとおりである。

- (1) 時限用磁気増幅器 (2) 比較用磁気増幅器
- (3) 弱界磁制御部 (4) バイアス電源
- (5) 出力整流部 (6) 平滑回路部

これらは一つのわくに取りまとめ収納されており、図21はその外観を示したものである。

7. 結 言

主回路およびその他の回路の無接点化ならびに耐寒耐雪構造が電気車両の課題として取上げられ、各所で種々研究が進められている。今回完成したED93 1号車は基本的機関車性能としては標準のED75形と変わりはないが、主回路にサイリスタの全面的採用そのほか本文に記したとおり数々の特長を有する画期的なものである。すでに東北線および仙山線において各種の性能試験が終了し好調裏に営業運転にはいっており、今後もすぐれた運転成績を示すものと期待される。

終わりに本機関車の設計、製作ならびに各種試験にあたり終始ご指導を賜った日本国有鉄道の各位に深く謝意を表わす次第である。

参 考 文 献

- (1) 佐々木ほか：日立評論 46, 1804 (昭 39-11)
- (2) E. A. K. Jarvis: Proc. IEE 111, 1305 (July, 1964)
- (3) E. A. K. Jarvis: Proc. IEE 111, 2075 (Dec. 1964)
- (4) 小野田ほか：日立評論 43, 2176 (昭 36-12)
- (5) 守田ほか：日立評論 47, 1807 (昭 40-6)