

単相商用周波交流電気車
Single Phase Commercial Frequency AC Locomotives and Coaches

河井貞治* 浅野弘* 山崎良夫**
Sadaharu Kawai Hiroshi Asano Yoshio Yamazaki
益富文男** 前川愛一***
Humio Masutomi Aiichi Maekawa

内 容 梗 概

商用周波数による交流電気車として、わが国では交流整流子電動機を用いた直接式交流機関車と、水銀整流器を用いた整流器式交流機関車が実用化された。
日立製作所では、前者に対して「ED441」、後者に対して「ED4521」を完成し、起動牽引力の大きいこと、高速における牽引力の大きいこと、速度制御が自由で、架線電圧降下による出力低下がないなどのすぐれた性能を有することが確認された。本文ではこれらの点について述べ、交流電気車で問題となる主電動機の整流、車輛に適した水銀整流器の製作をはじめ、車体、台車、制御装置、変圧器などの問題点を明らかにした。また現在試作中の交流電車についても簡単にふれておいた。

〔I〕 緒 言

戦後、フランスにおいて 50 へによる交流電化に成功し、鉄道電化に飛躍的進展をもたらしたことは世界の注目を集め、わが国においても日本国有鉄道を中心に、総技術を結集して商用周波による交流電化の調査研究が続けられてきた結果、幹線を交流電化することが決定された。

標準的な交流機関車は電力変換の種類により、次の 5 種類に分類される。

- (1) 単相交流機関車

(2) 三相交流機関車

(a) 直接式機関車

(b) 変換形機関車

(i) 整流器式機関車

(ii) 電動発電機式機関車

(iii) 相数変換機式機関車

このうち、三相交流機関車は電車線、高速時の集電、速度制御などが実用的でないため、がい炭消火車牽引用機関車などの特殊用途を除けば歴史的存在となっており、電動発電機式機関車および相数変換機式機関車は、フランスにおいて超重貨物列車用として起動性能および力率の良いことが買われているが、著しく重量大で高価となり、わが国のような狭軌の鉄道では実用性がない。したがって、直接式と整流器式機関車が、それぞれの特色を生かした輸送分野を受けもって発展していくものと思われる。

日立製作所では昭和30年7月、わが国最初の交流電気機関車である直接式機関車「ED 441」(B₀-B₀形 60 t

第1表 交流機関車の仕様

	ED441 (直接式)	ED4521 (整流器式)
機関車重量(運転整備)	60 t	60 t
機関車形状	箱形両運転室(デッキ付)	箱形両運転室(デッキ付)
最大寸法(長さ×幅×高さ)	13,300×2,800×4,100	13,800×2,800×4,085
軸配置	B ₀ -B ₀	B ₀ -B ₀
固定軸距	2,650	2,300
ボギー中心間距	6,300	7,000
動輪径	1,250(計算 1,210)	1,120(計算 1,080)
電気方式	単相交流 20 kV, 50~	単相交流 20kV, 50~ または 60~
機関車性能		
主電動機台数	4	4
連続(1時間)定格出力	1,120 kW (1,200 kW)	1,500 kW (1,640 kW)
連続(1時間)速度	54.9 km/h (49 km/h)	39.8 km/h (38.5 km/h)
連続(1時間)牽引力	7,260 kg (8,720 kg)	13,440 kg (15,200 kg)
最高運転速度	70 km/h	100 km/h
最大牽引力	17,000 kg	21,000 kg
動力伝達装置	平歯車一段減速、釣掛式	バネ入固定中空軸式、台車装架
歯数比	93 : 16 (M=11)	82 : 15 (M=10)
制御方式	低圧タップ切替電圧制御方式	高圧タップ切替電圧制御方式
ノッチ数	16	35
最高ノッチ電圧	533V	1,029V
制御装置	電磁式および電磁空気単位スイッチ式	電磁式、電磁空気式および電動機操作式
制御回路電圧	直流 48V	直流 48V
灯回路電圧	直流 24V	直流 24V
補機電圧	三相交流 200V 50~	三相交流 200/220V, 50/60~
ブレーキ装置	空気ブレーキ、手ブレーキ	空気ブレーキ、手ブレーキ

1,200 kW) を、引き続いてエクサイترون整流器式機関車「ED4521」(B₀-B₀形 60 t 1,500 kW)を製作して日本国有鉄道へ納入し、直流機関車よりはるかにすぐれた性能を有することを実証して、わが国交流電化の発展に輝かしい足跡を残すことができた。日立製作所ではさらに、交流専用車として直接式電車を、交直両用電車としてエクサイترونおよびシリコン整流器式電車を試作研究中である。

〔II〕 交流機関車の性能

直接式機関車「ED441」および整流器式機関車「ED4521」の一般仕様を第1表に、他の機関車との比較を

* 日立製作所日立工場
** 日立製作所水戸工場
*** 日立製作所国分工場

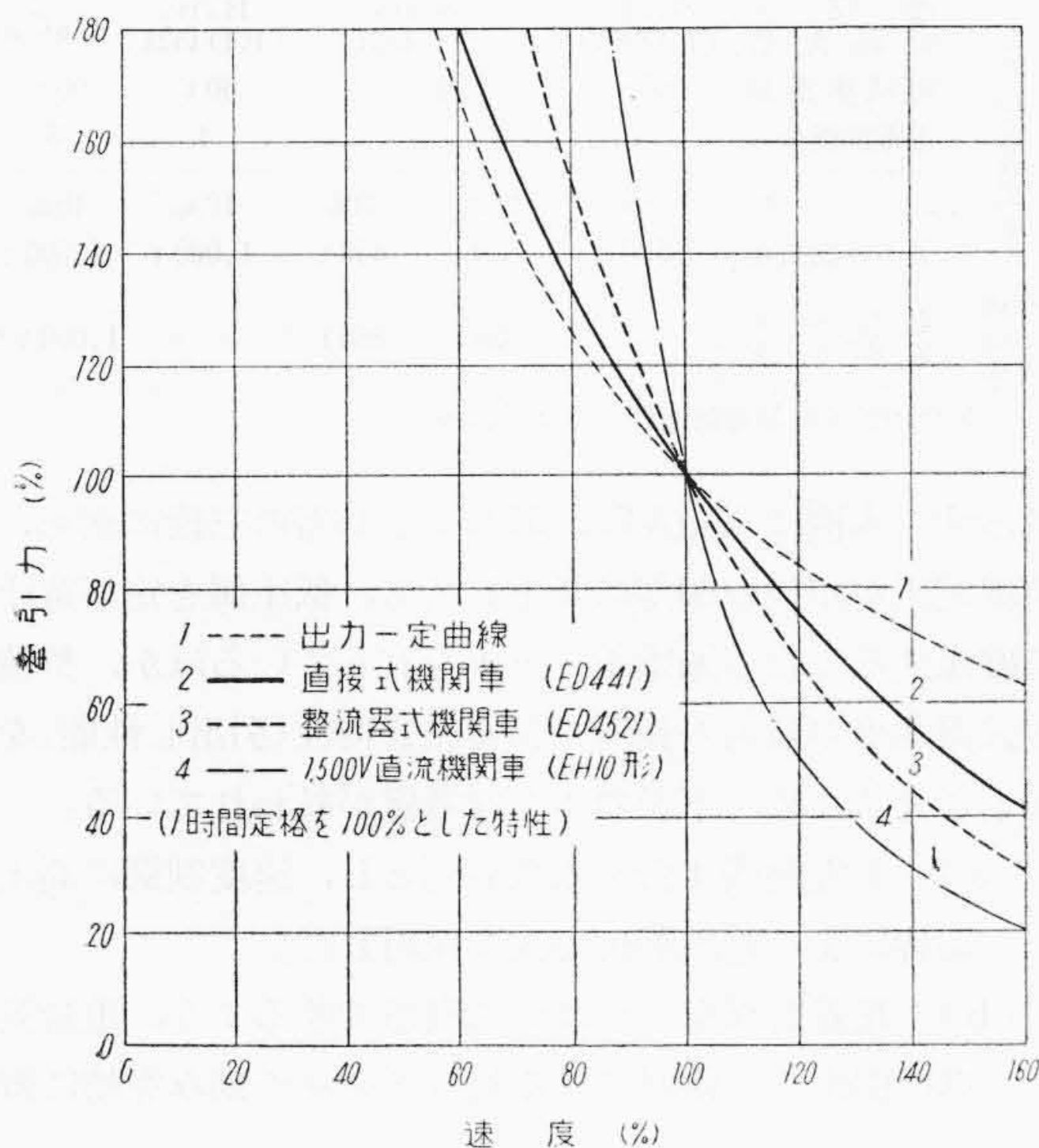
第2表に示した。

(1) 直接式機関車

50～交流直巻整流子電動機は磁気回路の飽和が少ないうえに、回路のリアクタンス電圧降下加わるから、速度-牽引力曲線は第1図に示すように、電気車輛として好ましい出力一定曲線に近く、直接式機関車は高速において直流機関車の2倍以上の牽引力を発揮する。第2図に直接式機関車「ED441」の外観を示す。主電動機は仙山線の使用条件に適合するように定格変圧器起電力を低く設計されており、この機関車の最大粘着牽引力と、主電動機の最大トル

クがつりあっているから、第3図に示すように、主電動機の引張力は機関車の粘着重量を完全に利用して起動しうる。起動後は全ノッチとも連続に使用できるが直流機関車では抵抗制御のため、第4図に示すように連続運転できるのは少数のノッチに限られる。

仙山線における実地試験の結果は、電動機2個による荷重120～180tの牽引試験で所期の加速度(0.3～0.4 km/h/s)の得られることが確認され⁽¹⁾、走行中の電動機の整流もきわめて良好であつた。また25%勾配において荷重210t(貨車180t+機関車死重30t)の繰り返し



第1図 各種機関車特性の比較

第2表 国内交流機関車の比較(順序は製作年月順)

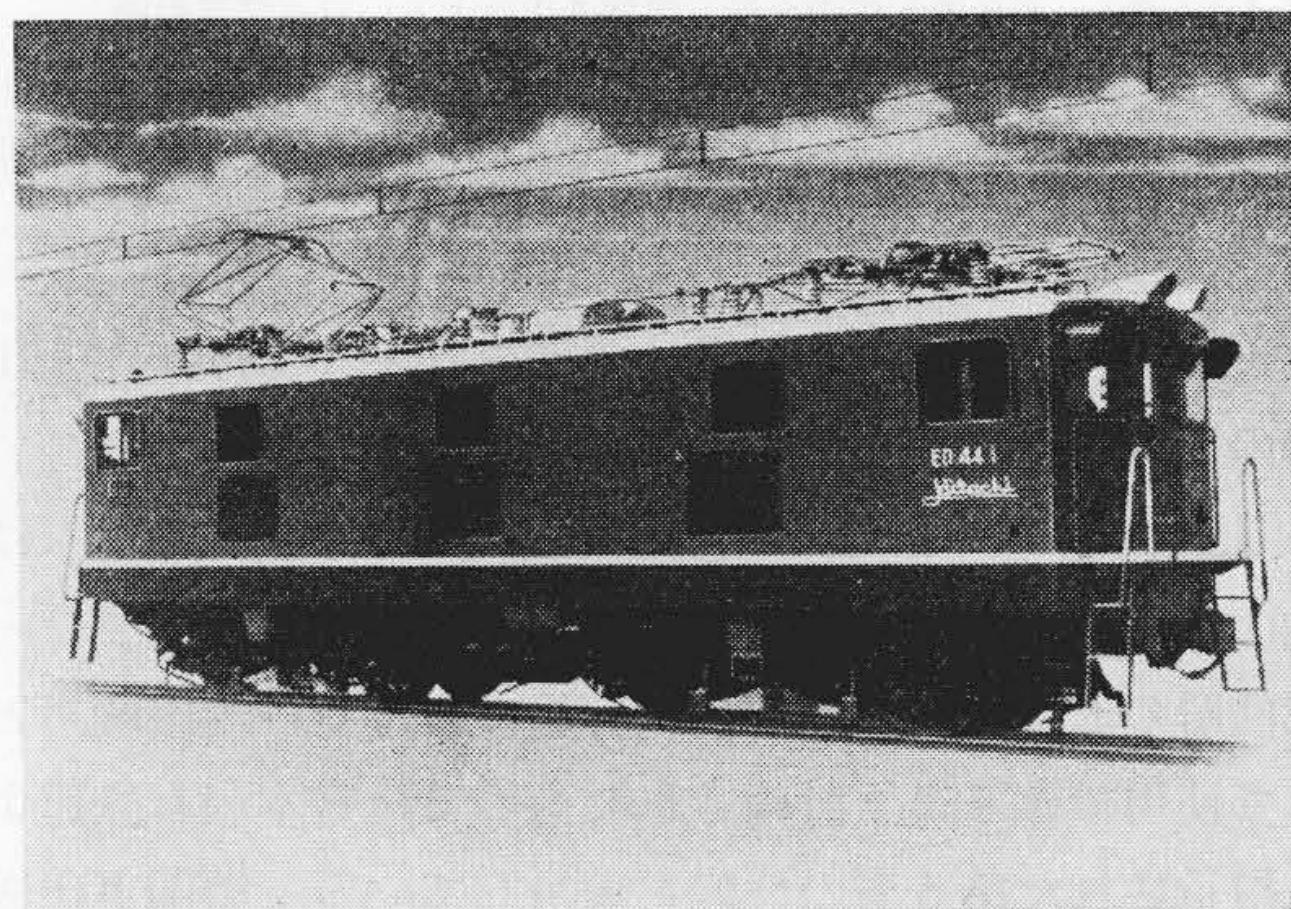
項目	機関車	ED441	ED451	ED4511	ED4521	ED70形	(参考) EH10形×1/2
機 関 車 形 式		直接式	整流器式	整流器式	整流器式	整流器式	直流
製 作 メ ー カ ー		日 立	M 社	T 社	日 立	M 社	各 社
電 気 方 式		単相交流 20kV, 50～	単相交流 20kV, 50～	単相交流 20kV, 50～	単相交流 20kV, 50～ または 60～	単相交流 20kV, 60～	直流 1,500V
用途および軸配置		客貨, B ₀ -B ₀	客貨, B ₀ -B ₀	客貨, B ₀ -B ₀	客貨, B ₀ -B ₀	客貨, B ₀ -B ₀	貨物, B ₀ -B ₀
連続定格出力		1,120 kW	1,000 kW	1,100 kW	1,500 kW	1,500 kW	880 kW
連続定格速度		54.9 km/h	35 km/h	47 km/h	39.8 km/h	36.5 km/h	56.5 km/h
連続定格牽引力		7,260 kg	10,600 kg	8,600 kg	13,440 kg	14,700 kg	5,560 kg
最高運転速度		70 km/h	85 km/h	100 km/h	100 km/h	90 km/h	80 km/h
機 関 車 重 量		60 t	60 t	60 t	60 t	62 t	114 t × 1/2
機 関 車 全 長		13.5 m	14.2 m	13.2 m	13.8 m	14.26 m	22.5 m × 1/2
電 動 機 支 持		釣掛式	台車装架	釣掛式	台車装架	台車装架	釣掛式
制 御 方 式		低圧タップ切替電圧制御	低圧タップ切替電圧制御, 位相制御	低圧タップ切替電圧制御, 抵抗制御	高圧タップ切替電圧制御	低圧タップ切替電圧制御, 位相制御	直並列切替抵抗制御
ノ ッ チ 数		16	35	32	35	34	32
整 流 器		—	液冷式イグナイトロン	風冷式イグナイトロン	風冷式エクサイトロン	液冷式イグナイトロン	—
主 回 路 結 線 方 式		—	ユニット	グループ	グループ	ユニット	—
単位重量あたり連続出力		18.7 kW/t	16.7 kW/t	18.3 kW/t	25.0 kW/t	24.2 kW/t	15.4 kW/t

起動に成功し、電動機1台あたり4.7t(粘着係数31%)の起動牽引力を発揮させる苛酷な試験を行つた後も、整流子および刷子になんら異常が認められなかつた(第5図参照)⁽¹⁾。これを幹線運転に換算すれば、第3表に示すように10%勾配でB₀B₀形は820t(第3図参照), C₀C₀形(機関車重量90t)では1,240tの起動が可能で、直流機関車EF15形(1C+C1形, 100t)より強力である。

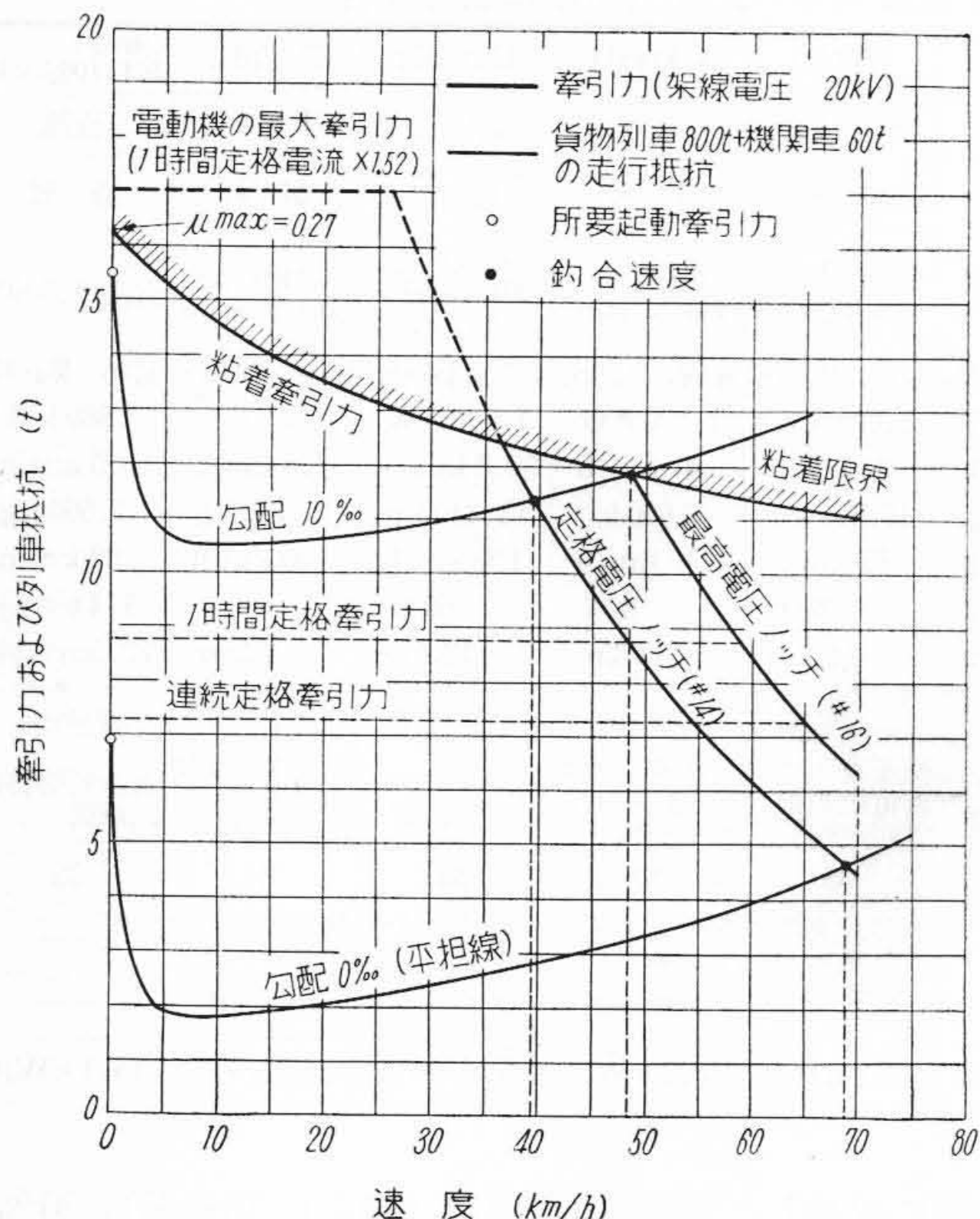
わが国将来の幹線用機関車として、この試験結果から直接式機関車を考えると、第4表に示すように⁽²⁾直流機関車より小さい機関車で直流以上の運転ができることになる。これらの機関車の牽引荷重および機関車熱容量の計算結果の一例を示せば第6, 7図のようになる。

(2) 整流器式機関車

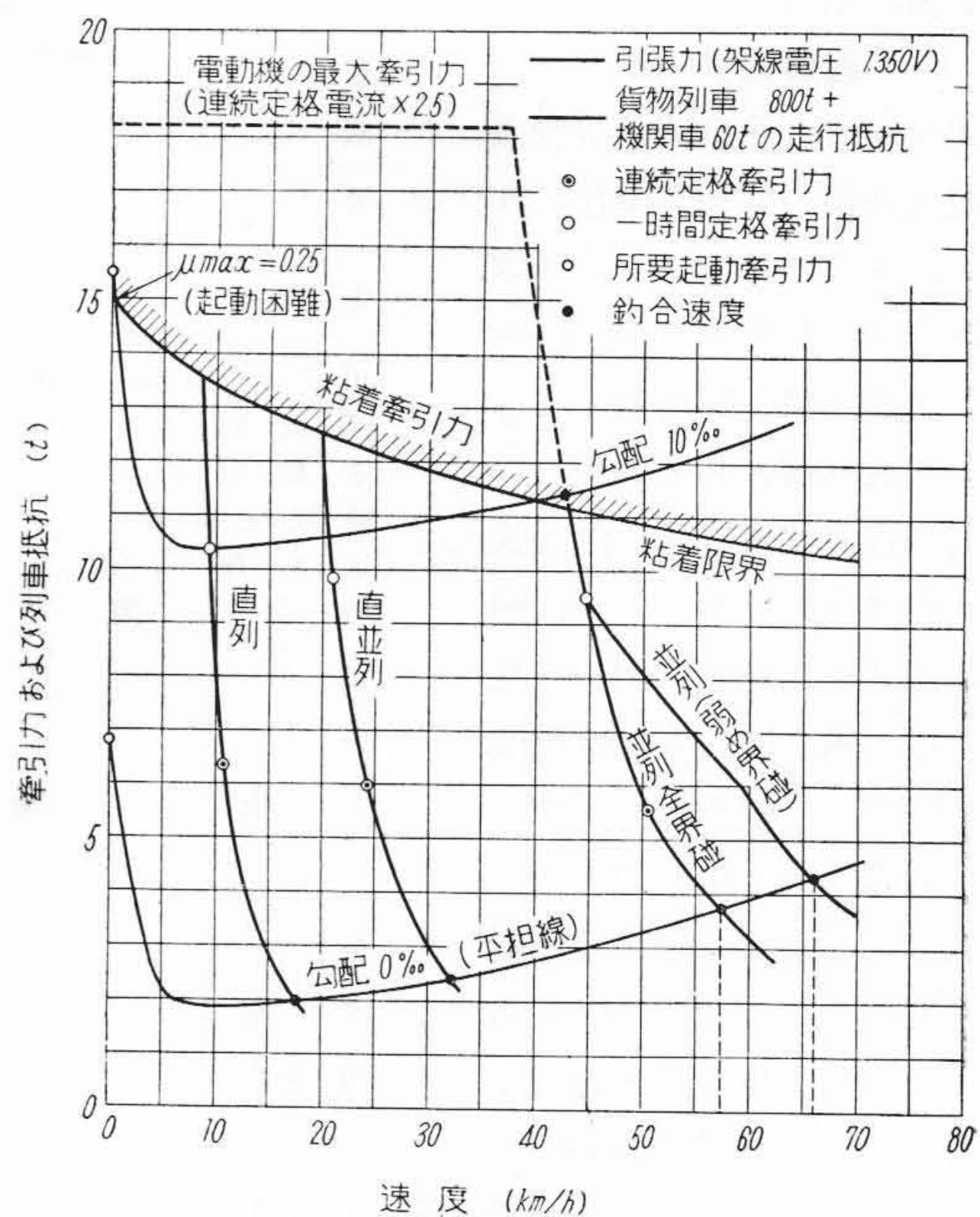
整流器式機関車の速度-牽引力曲線は、直流電動機の直巻特性に電源の電圧変動が加わり、第1図に示すように直流機関車と直接式機関車の中間に入る。高速性能を



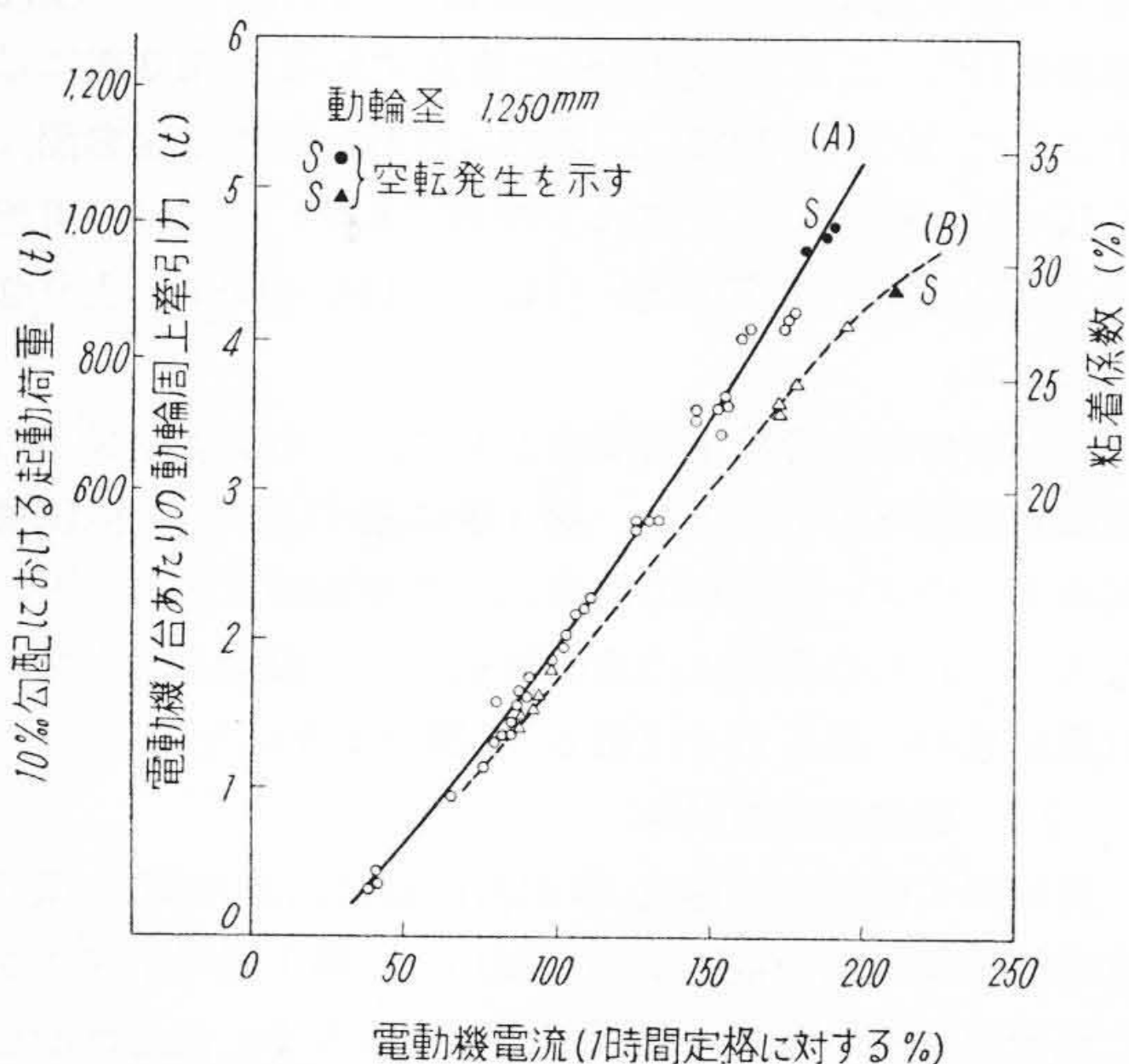
第2図 50～ 直接式交流機関車「ED441」



第3図 50～直接式機関車「ED441」の牽引特性



第4図 1,500V 直流機関車「EH10×1/2」の牽引特性



- (1) $\bullet$ 変圧器起電力が低く界磁ATの大きい日立製電動機
(2) $\triangle$ 変圧器起電力が高く界磁ATの小さい電動機の例。

第5図 直接式機関車「ED441」の起動特性

改善するには主電動機の弱め界磁を使用するほか主変圧器の過電圧タップを利用して運転する。

日立製エクサイロン整流器式機関車「ED4521」は仙山線はもちろん、将来東北本線（50～）にも、また一部機器の取替えにより60～の幹線にも客貨両用機関車として使用できるよう計画されたもので、日本国有鉄道より指示された第5表の性能を満足している。機関車仕様を第1表、他の機関車との比較を第2表、外観を第8図

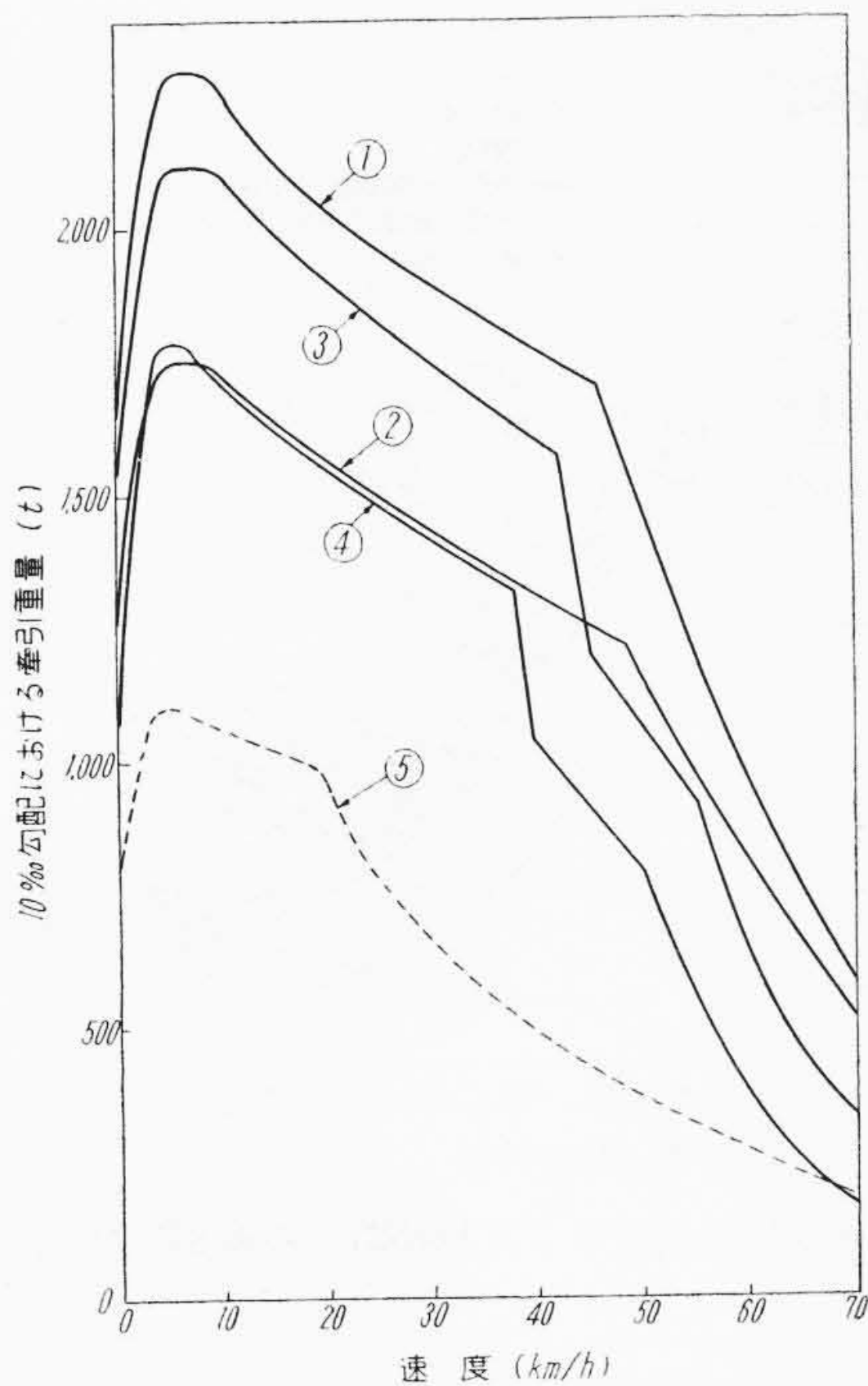
第3表 交流機関車の起動荷重（貨物列車）

		試 験	仙 山 線 (仙台—山形)		幹 線	
			B ₀ B ₀ (ED441)	B ₀ B ₀ (ED441)	C ₀ C ₀ (ED441)	C ₀ C ₀
直接式機関車	機 関 車 動 軸 配 置	(ED441)	B ₀ B ₀ (ED441)	B ₀ B ₀ (ED441)	B ₀ B ₀ (ED441)	C ₀ C ₀
	機 関 車 重 量	60 t × 1/2	60 t	60 t	60 t	90 t
整流器式機関車	主電動機個数	2	4	4	4	6
	勾 配	25%	25%	33%	10%	10%
直機 関流 車	最大起動荷重	210 t	420 t	330 t	820 t	1,240 t
	機 関 車 動 軸 配 置	B ₀ B ₀ (ED4521)	B ₀ B ₀ (ED4521)	B ₀ B ₀ (ED4521)	B ₀ B ₀ (ED4521)	C ₀ C ₀
	機 関 車 重 量	60 t	60 t	60 t	60 t	90 t
	主電動機個数	4	4	4	4	6
	勾 配	25%	25%	33%	10%	10%
	最大起動荷重	500 t	520 t	400 t	1,000 t	1,500 t
	現 行 最 大 牽 引 荷 重	—	320 t	280 t	—	1,000 t*

* EH10形（8個電動機付）では1,200 t

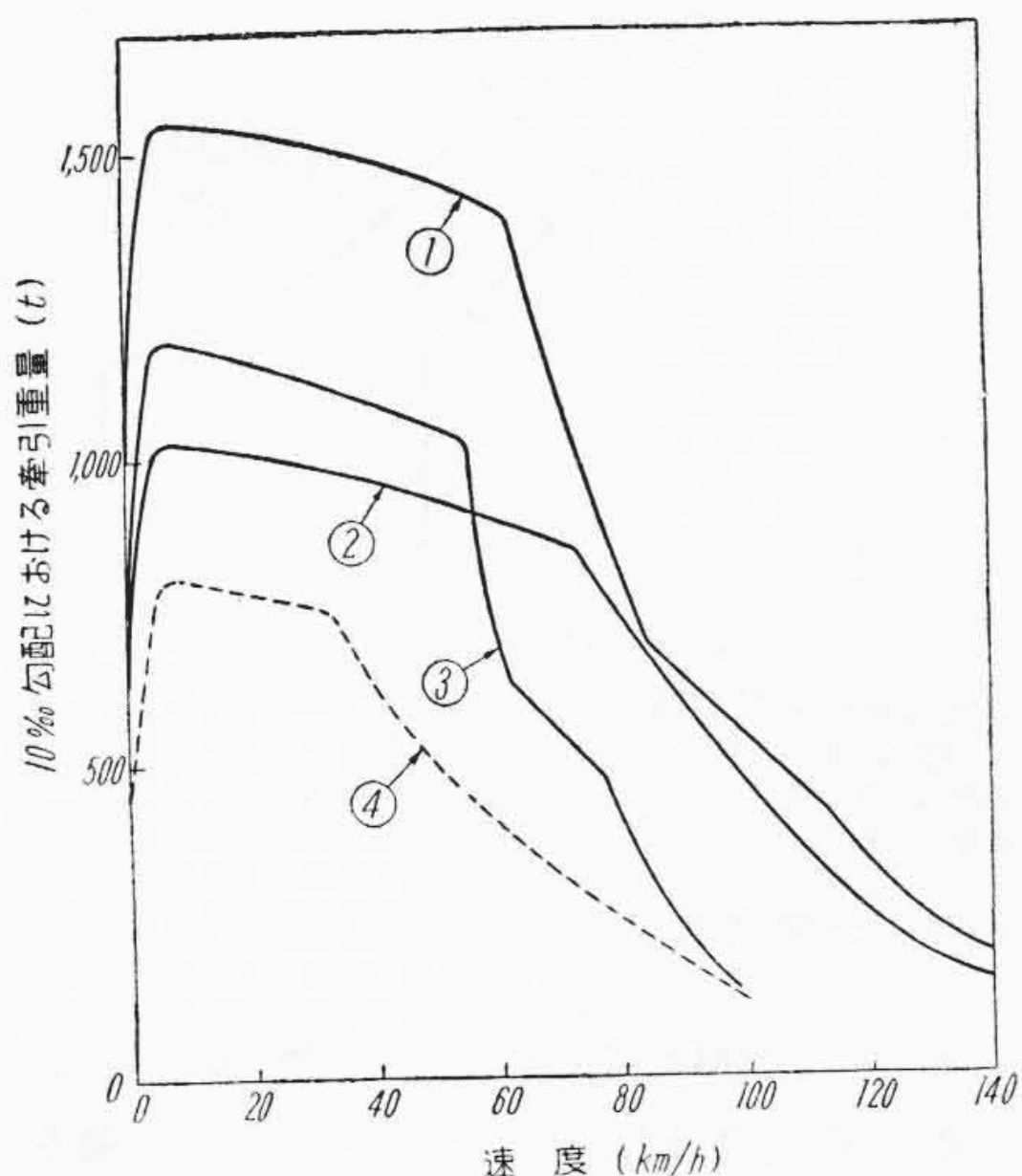
に示す。本機は界磁を72、55および45%の三段に弱め、架線電圧が定格の80%に降下しても、低圧側を定格電圧に確保するにたる過電圧ノッチを有しているほか、整流器式機関車の最大の長所である粘着特性（引出し性能）を向上させるため、下記のような考慮が払われている。

- (a) 主電動機4台を永久並列とし、速度制御に高圧切替による電圧制御方式を採用した。
(b) 粘着限界をいつばいに利用できるよう、重量列車の引出しに使用される附近のノッチ刻みを特に細かくした。
(c) 主幹制御器に界磁ハンドルを設けて、速度—牽



第6図 幹線用機関車の荷重曲線
(a) 貨物列車

- ① C_0C_0 形整流器式機関車 (90 t, ED4521×1.5)
- ② C_0C_0 形直接式機関車 (90 t, ED441×1.5)
- ③ $B_0B_0-B_0B_0$ 形直流機関車 (120 t, EH10 型)
- ④ 1CC1 形直流機関車 (100 t, EF15 型)
- ⑤ 1D1 形蒸気機関車 (124 t, D51 型)



第6図 幹線用機関車の荷重曲線
(b) 旅客列車

- ① C_0C_0 形整流器式機関車 (90 t, ED4521×1.5, 歯数比を $\frac{1}{2}$ にしたもの)
- ② C_0C_0 形直接式機関車 (90 t, ED441×1.5, 歯数比を $\frac{1}{2}$ にしたもの)
- ③ 2CC2 形直流機関車 (115 t, EF58 型)
- ④ 2C2 形蒸気機関車 (137 t, C62 型)

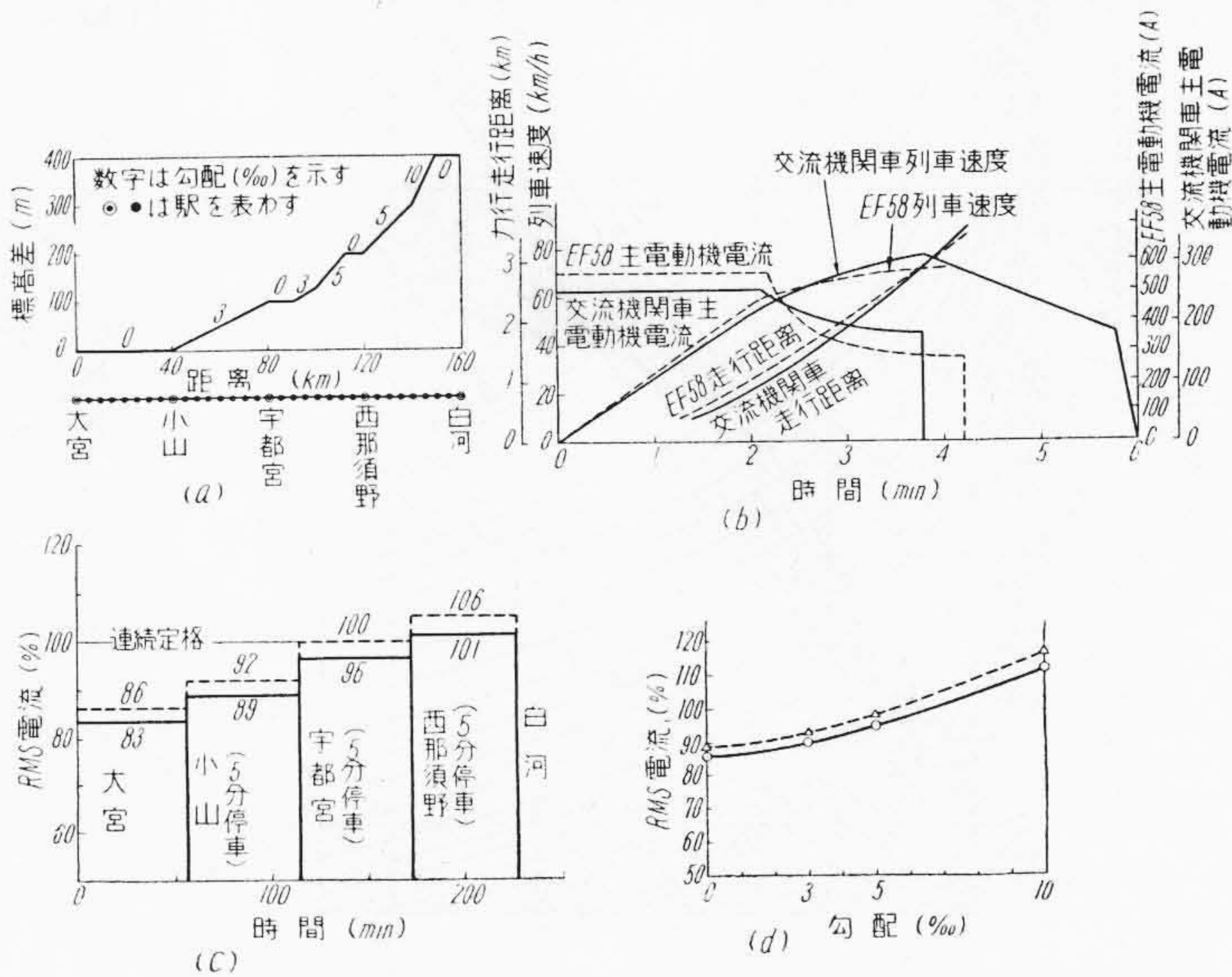
第4表 幹線用機関車の動軸配置⁽²⁾

機 関 車 種 別	旅客用機関車		貨物用機関車	
	A	B	A	B
線 配	10%	10%	10%	10%
最 高 速 度	120 km/h	110 km/h	75 km/h	75 km/h
最 大 牽 引 荷 重	700 t (550 t)	600 t (500 t)	1,200 t	1,000 t
直 流 機 関 車	BB-BB (8 軸) または CC	CC (6 軸)	BB-BB (8 軸)	CC (6 軸)
交 流 機 関 車				
直 接 式	CC (6 軸)	BB (4 軸)	CC (6 軸)	CC (6 軸)
整 流 器 式	CC (6 軸)	BB (4 軸)	CC (6 軸)	BB (4 軸)

- 1. 機関車の動軸重は 15 t とする
- 2. () 内荷重は常用荷重
- 3. 電動機連続定格出力として直接式は「ED441」と同じ 280 kW, 整流器式は「ED4521」と同じ 375 kW, 直流機関車は現行どおり 220 kW とし算出したもの

第5表 ED4521 の試作条件

列 車 種 別	牽引荷重 (t)	勾 配 (%)	平衡速度 (km/h)	起 動 条 件
貨 物	1,000	0 10	75 程度	起動可能のこと
旅 客	500	0 25	95~100	起動可能のこと



- 交流機関車 (直接式機関車「ED441」の歯数比を変更したもの, 電動機個数 4)
- - - 直流機関車 (EF58 形, 電動機個数 6)
- 牽引荷重: 500 t 旅客列車, 各駅 1 分停車

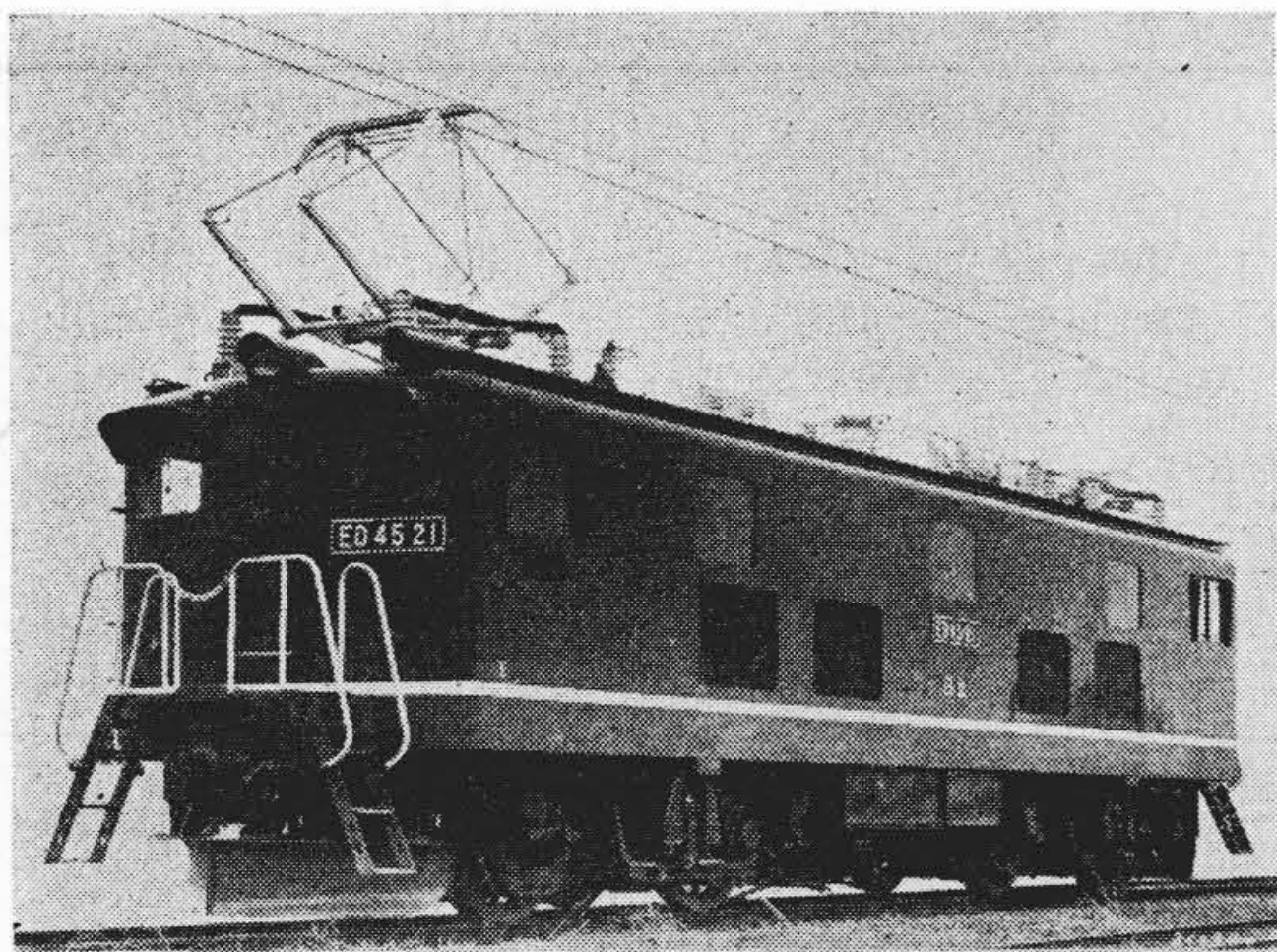
第7図 直接式機関車と直流機関車の熱容量比較

- (a) 仮想線路断面図
- (b) 勾配 5%, 駅間距離 5 km における運転曲線
- (c) 主電動機 RMS 電流 (自乗平均平方根電流) の連続定格電流に対する割合
- (d) 各勾配における RMS 電流

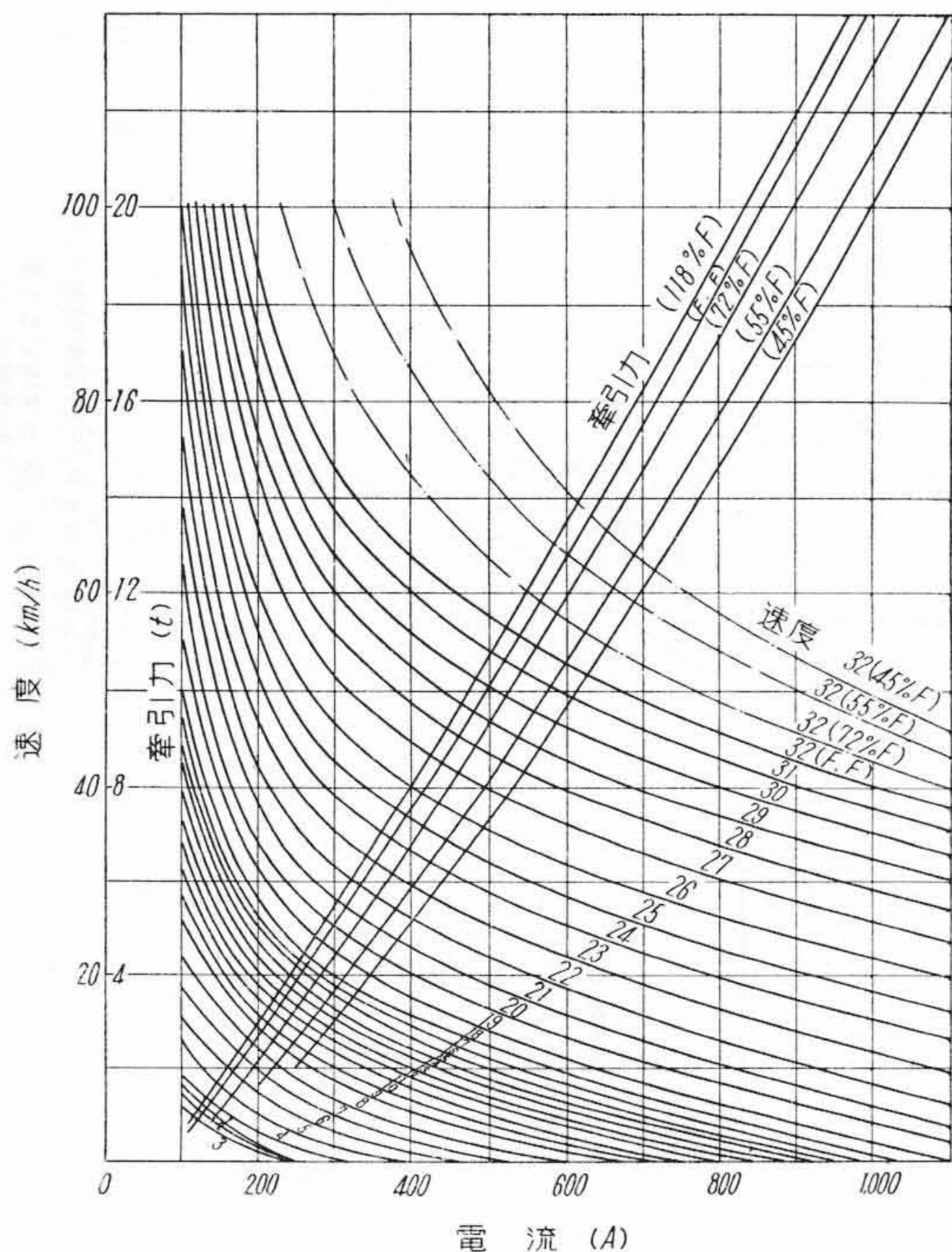
引力曲線の傾斜の急峻な強め界磁起動を可能とした。

(d) 車体-台車間の牽引力伝達高さを低くとり得る側受構造を採用して起動時の軸重移動を減少させた (「ED441」も本方式を採用)。

(e) 駆動装置としてバネ入り固定中空軸式を採用した。



第8図 エクサイترون整流器式機関車
「ED4521」



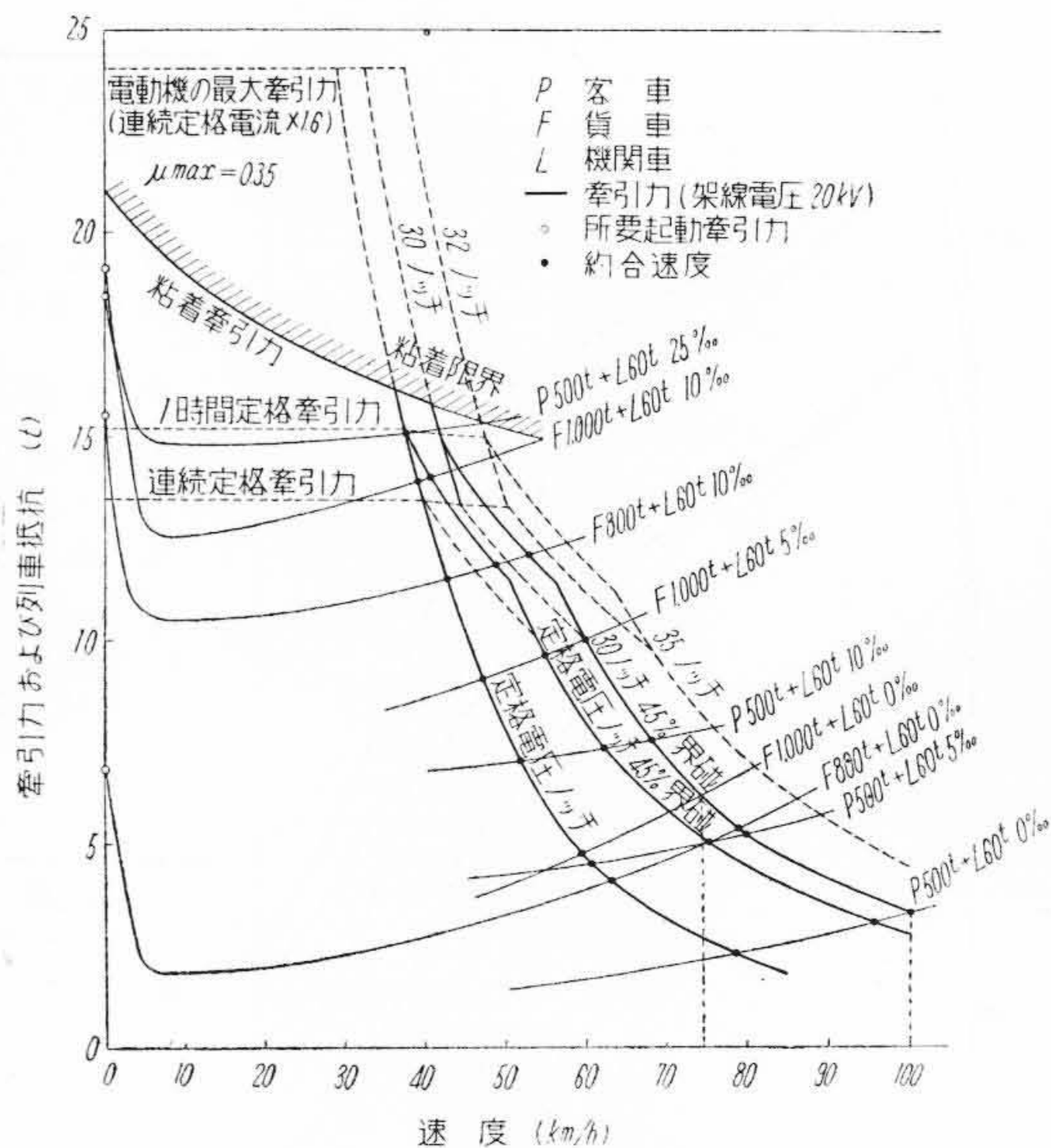
架線電圧 20 kV, 電動機台数 4, 電動機枠番号 HS-1050-Br,
連続定格 375 kW 650 V 615 A 1070 rpm, 動輪径 1080 mm,
歯数比 82 : 15

第9図 「ED4521」ノッチ曲線

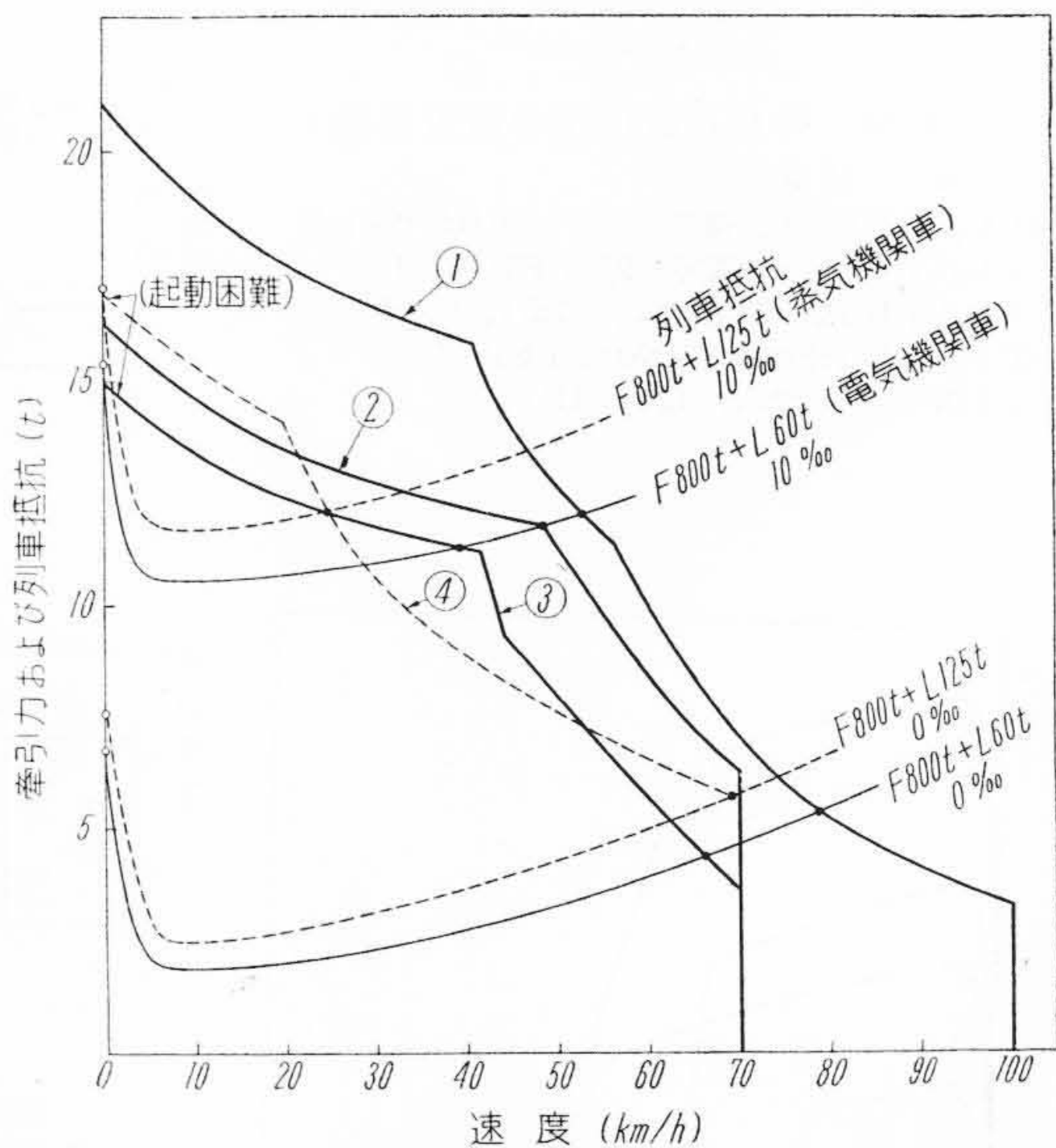
第9図にノッチ曲線第10図に牽引特性を示す。

仙山線における荷重 500 t 牽引の性能試験の結果、
25%勾配の注水した軌条で安全に起動、加速ができ、高
速性能も非常にすぐれていることが確認された。

この結果、将来幹線用として使用する場合、10%勾配
で貨車 1,000 t, 25%勾配で客車 520 t の起動が可能で
あり、C₀C₀形とすれば 10%勾配で 1,500 t の超重貨
物列車の起動ができ、わが国で最も強力な機関車となる
(第3表, 第11図参照)。現行の最大牽引荷重は主電動機



第10図 整流器式機関車「ED4521」の牽引特性



- ① 整流器式機関車 ED4521
- ② 直接式機関車 ED441
- ③ 直流機関車 EH10 形×1/2 (架線電圧 1,350V)
- ④ 蒸気機関車 D51 形

第11図 各種機関車の最高能力比較

8 個の EH 10 形で、1,200 t である。また第10図に示
すように重量列車の連続高速運転が可能であつて、第6
図に示すように、歯数比を変えるのみで将来の貨車ある
いは客車用として、わが国最高の能力を有する機関車を
製作することができる(第6図)。

〔III〕 直接式機関車の問題点

単相交流整流子電動機を用いる直接式機関車は、主電

動機の整流さえ解決されれば、最も簡単で経済的である。高速性能のすぐれている点から特に高速軽量列車の牽引に適している。

(1) 主電動機の整流と起動トルク⁽³⁾

単相交流整流子電動機では、直流機と同様なりアクタンス電圧と、交番磁束によつて生ずる変圧器起電力を補極によつて同時に打ち消さなければならない。変圧器起電力は電流のみによつて定まり、速度に無関係であつて、補極コイルの分流器により整流を完全に補償した調整点から離れた速度では火花電圧が残るが、合理的に設計製作された電動機⁽³⁾では、変圧器起電力による走行中の多少の火花はせん絡や整流子の損傷を起す心配はほとんどない（第12図参照）。しかし起動時には補極の効果がなく、変圧器起電力による短絡電流をおさえるのは刷子の接触抵抗と、刷子で短絡された電機子巻線のインピーダンスのみであるから特に考慮が必要であつて、短絡電流の大きさが主電動機の寿命を左右することになる。また短絡電流による起磁力は主極起磁力を打ち消して起動トルクを減少させる。極端に変圧器起電力が高く、主極巻線の起磁力が電機子起磁力に比して小さい場合には、起動電流を増しても短絡電流が急増してトルクは増さず整流子を過熱焼損することになる（第5図参照）。

直接式機関車「ED441」の日立製電動機は使用条件を考慮して次のような方途が施され製作された（第6表、第13図参照）。

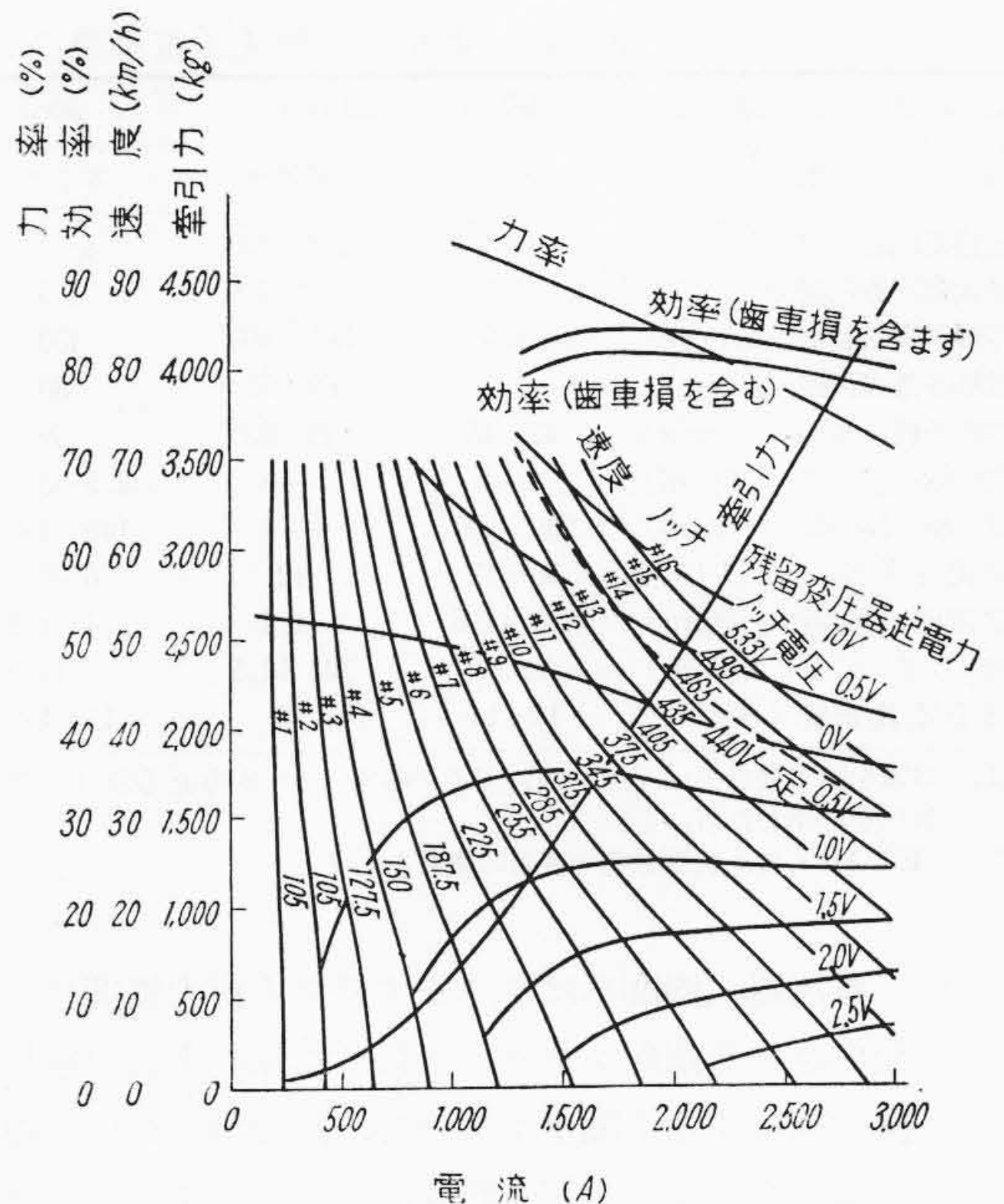
- (a) 定格変圧器起電力を 2.5V 程度とし、起動時の最大変圧器起電力を 3~3.5V 程度におさえる（第12図）。
- (b) 主極起磁力と電機子起磁力の比を 45~50% にあげ、主極空隙を広くして短絡電流による起動トルクの減少を防ぐ（第5図参照）。
- (c) 抵抗が大きく、機械的強度の大きい GH-135 による分割刷子を使用。
- (d) 整流子に高温に耐える銀入り銅を使用。
- (e) 電機子巻線に配列 (3×2) の 6 層巻トレッペン巻線を採用。
- (f) 磁気回路、特に補極磁気回路の飽和を少なくする。

〔IV〕 水銀整流器機関車の問題点

水銀整流器式機関車は水銀整流器のめざましい進歩によつて、一躍商用周波数交流機関車の花形となつた。特に粘着特性がすぐれており、高速性能も良いものが製作できるから、重貨物列車から高速列車にいたるあらゆる運転が可能な万能機関車である。

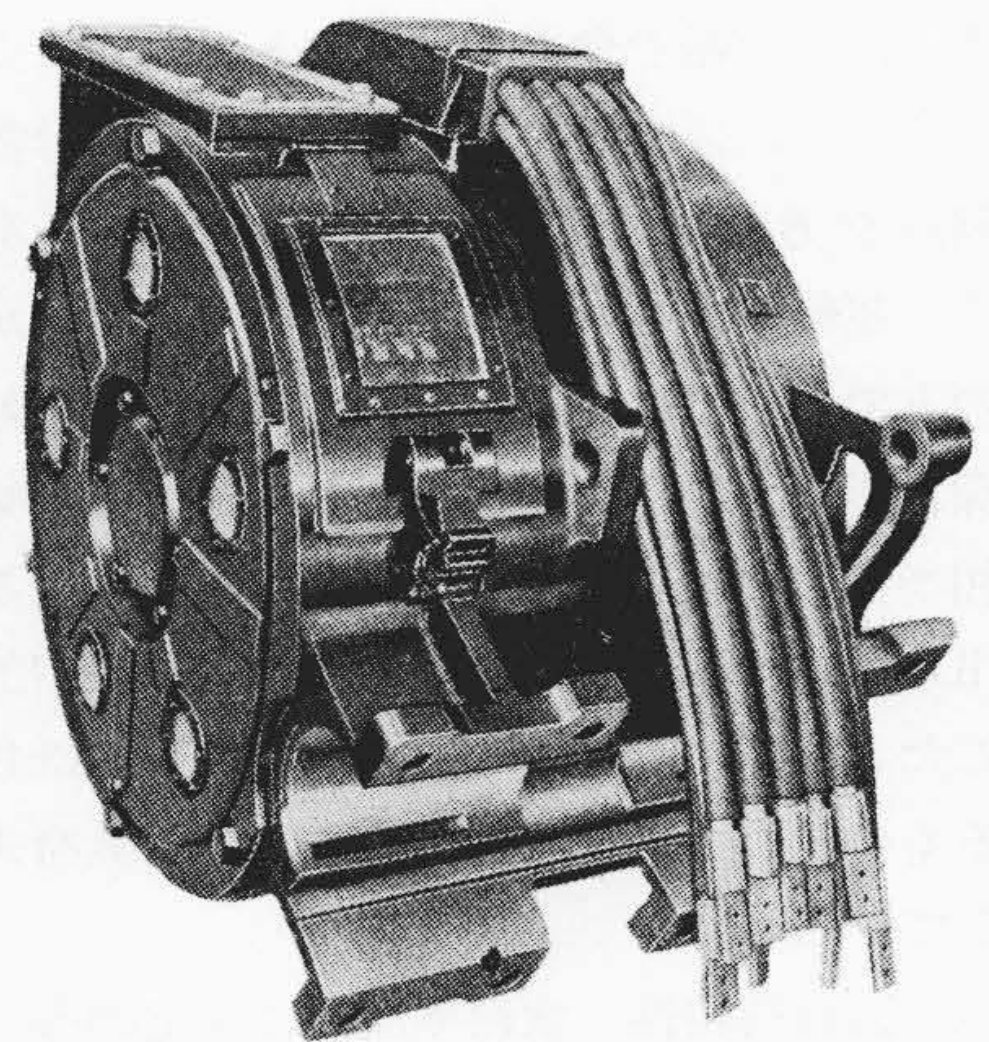
(1) 車輻用水銀整流器

- (a) 水銀整流器の種類 単極封じ切り整流器とし



1 時間定格 300 kW, 220 V, 1,900 A, 1,250 rpm
 連続定格 280 kW, 220 V, 1,700 A, 1,400 rpm
 動 輪 径 1,210 mm, 歯数比 93 : 16

第12図 「ED441」ノッチ曲線および残留変圧器起電力曲線



第13図 「ED441」用単相 50 $\sim$ 交流整流子電動機

て、エキサイトロン型とイグナイトロン型がある。前者はタンク、陰極間を絶縁しなければならないことが多少複雑であるが、点弧極と陰極水銀だめとは空間距離を隔てており、器内に寿命の問題となるものがない。イグナイトロン型では動揺する水銀だめ中に点弧子(イグナイタ)を浸漬する必要があるが、水銀の動揺防止と点弧子の耗止が問題となる。日立製作所では微細な調整が不要で、動揺条件に左右されず、しかも寿命の点でも有利なエキサイトロン型を採用した。

第 6 表 単相交流整流子電動機の設計要目

周 波 数 (軌 間)	16 $\frac{2}{3}$ ~ (1,435mm)		50~ (1,435mm)		50~ (1,067mm)
	スイス	ドイツ	スイス	ドイツ	日本 (ED441)
定格変圧器起電力 (V)	2.5~4.0	2.8~3.0	4~4.5	2.8~3.0	2.5
最大変圧器起電力 (V)	3.3	3.5	4.5	3.6	3
電機子電気装荷 (A/cm)	450	500~600	400	500~600	500
電機子最高周速 (m/s)	70	60~70	80	60~70	71
整流子最高周速 (m/s)	42~45	45~55	50	45~55	63
主 極 空 隙 (mm)	3~4	—	2.5~3	3	4.5~6
磁 極 間 隔 (mm)	200~280	—	145~160	—	150
整 流 子 片 電 圧 (V)	10~12	12	6~8	6~7	7
整 流 子 片 間 隔 (mm)	4.2~4.6	4.2	4~4.2	4.2	4.2
刷 子 幅 (mm)	12.5	10, 12.5	10	10, 12.5	10
刷子電流密度 (A/cm ²)	11~14	12	12~15	12	12.4

1. 日本を除く要目表は「スイス、ドイツのメーカーが与える設計基準」として文献(5)に記載されている数値を引用した。
2. (ED441)日立製電動機の要目の概数を示す。

整流器式機関車はますます軽量大出力機関車に製作される傾向があり、また2動軸を1台の電動機で駆動する機関車もあつて、直流側の電圧が現在より高くなつて行く傾向にある。エキサイترون型は高電圧のものの製作が容易であるから、イグナイトロン型に比べて重量、空間占積率はさらに小さくなると考えられる。

(b) 冷却方式 液冷式と風冷式があり、液冷式では当然タンクの寸法、重量が風冷式より小さくなるが、再冷器を含めて考えると風冷式より相当大きくなり、液冷式の場合に冷却装置を分散できる利点を考慮しても風冷式の方が一般に有利である。運転保守上の問題としては、風冷式が冷却扇のみであるのに対し、液冷式は装置が複雑で、循環水ポンプ、再冷器を必要とし、特に電気車では相当多量の水を使用することが問題となる。地上用水銀整流器が液冷式より風冷式に決定的に移行したことは、風冷式の保守上の優位を雄弁に物語るものといえよう。ED4521では風冷式を採用している。

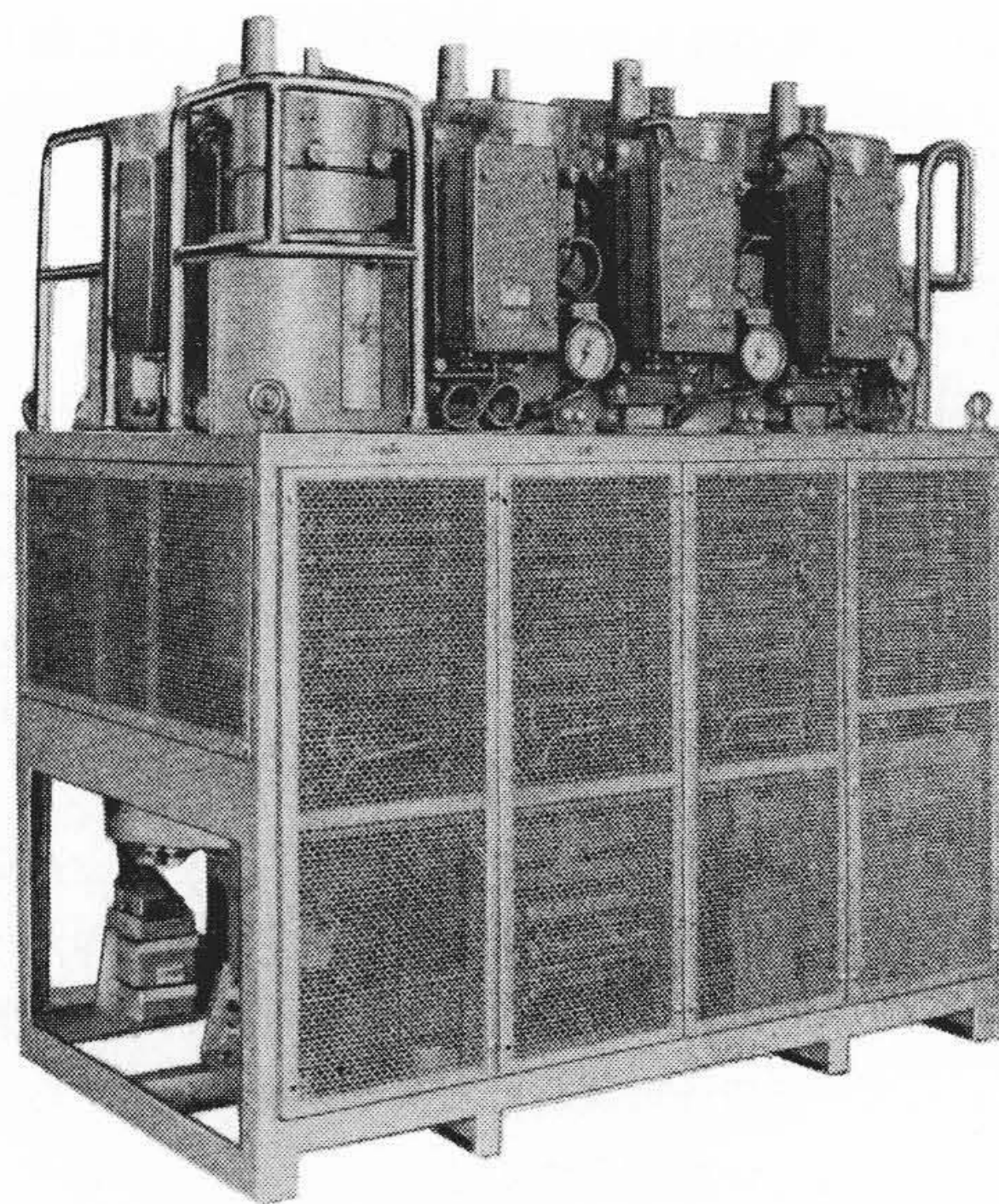
(c) 過負荷特性 水銀整流器は主電動機に比して熱時定数が小さく、また熱時定数の著しく異なる部分が組合せられており、これらの温度限度が逆弧発生によつて定まるものであるから、連続または1時間定格のみでは実際の運転時の容量比較はできず、5~20分程度の過負荷耐量より決定される。

(d) 整流器の構造 「ED4521」交流機関車用として製作した1,600 kW単極風冷封じ切りエキサイترون整流器の外観を第14図に示す。整流器フレームには8個の整流タンクと2個の冷却扇のほか、側面および下部に点励弧用抵抗などの補助機器を収めてその空間利用率を高めている。本器

の重量、寸法を他の方式と比較すれば第7表のようになる。本器は特に、振動、衝撃および過負荷に耐える構造とするため、内部構造、特に各構成要素の支持方法および固有振動数の選定、陰極水銀の動揺防止、永久封じ切り部の強度向上に種々の検討が加えられ、従来の整流器とはかなり異なつた観点より設計製作されている。第8表に示す振動試験台における苛酷な試験に

対してなんら異常のないことが確認された。

(e) 整流器の結線方式 整流器の結線方式には第15図(a)に示すような単相全波整流方式と、第15図(b)に示すようなグレース結線(ブリッジ結線)方式がある。後者は整流器用変圧器の二次巻線容量が前者の $\frac{1}{\sqrt{2}}$ (約70%)となり変圧器を軽量化できる反面、整流器の個数は4の倍数であることが必要で、主電動機を2台直列に接続しなければ整流器の電流容量が2倍となり、また点励弧装置なども著しく複雑、大型となる。しかし第15図(c)に示すように主電動機を2台直列にし、その中間を変圧器の中性点に結ぶ方式では、全並列接続と同じ粘着性能が得られるから⁽⁴⁾、容量が4の倍数個の標準整流器に相当するときには有利



第 14 図 1,600 kW 単極風冷封じ切り
エキサイترون整流器

第7表 機関車用水銀整流器セットの重量、
床面積の比較

形 式 結 線 方 式	(A) 風冷式 グループ	(B) 液冷式 グループ	(C) 液冷式 ユニット
タ ン ク 数	8	8	8
セ ッ ト 容 量	1,600 kW	1,600 kW	1,600 kW
電 圧	650 V	650 V	650 V
セ ッ ト 重 量	2,060 kg	2,710 kg	3,150 kg
占 床 面 積	1.84 m ²	2.75 m ²	2.75 m ²
機 関 車 出 力	1,500 kW	1,500 kW	1,500 kW

(A) (B) (C) とともに、水銀整流器、制御キュービクル、冷却装置1式を含めた数値を示す

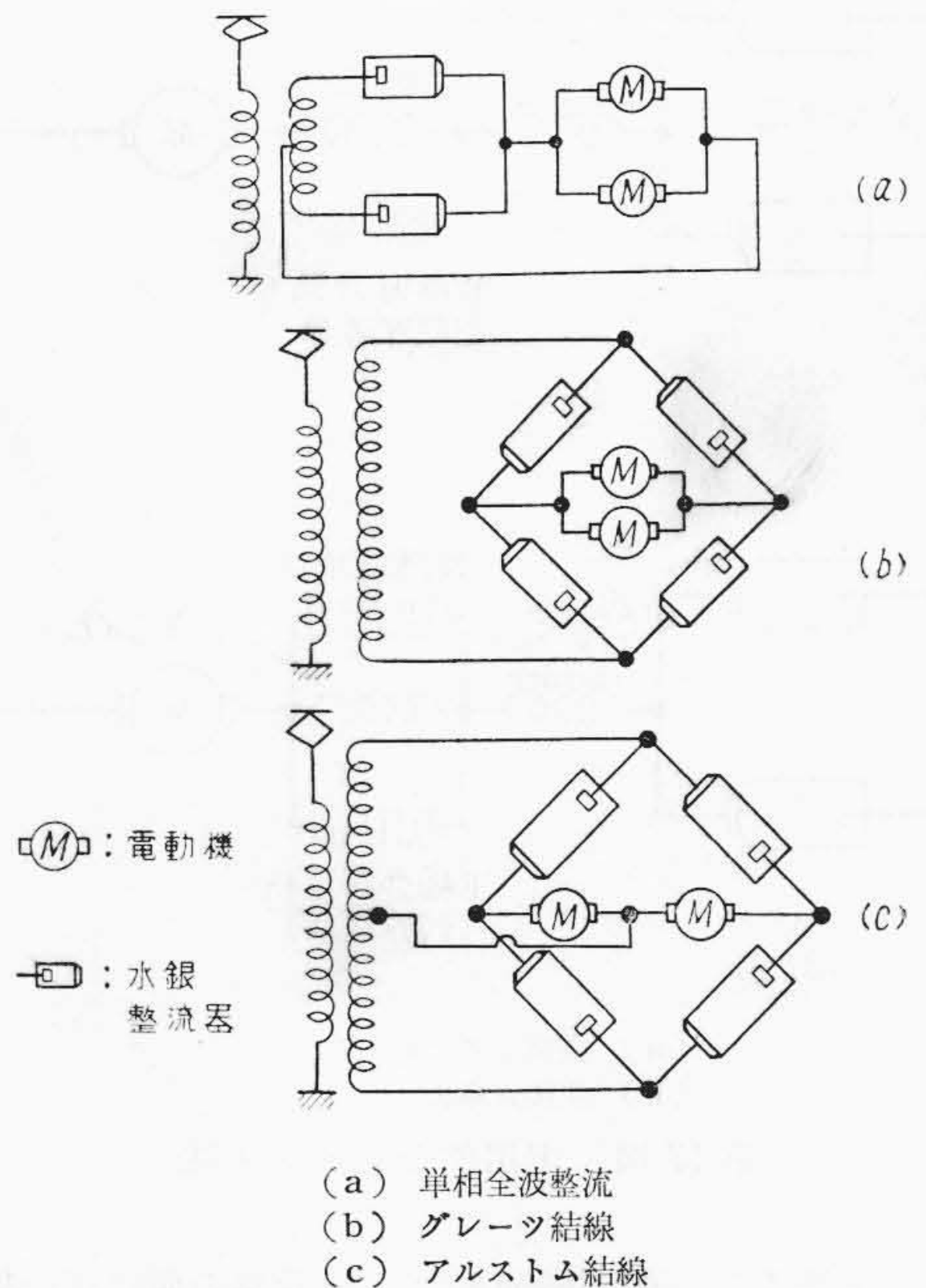
第8表 水銀整流器振動試験の振動系諸常数

	基 本 振 動 系		ビ ビ リ 振 動 系	
	周 波 数	加 速 度	周 波 数	加 速 度
上	2.5~	0.5 g	10.5~	3.5 g
下				
左	1.5~	0.4 g	10.5~	2 g
右				

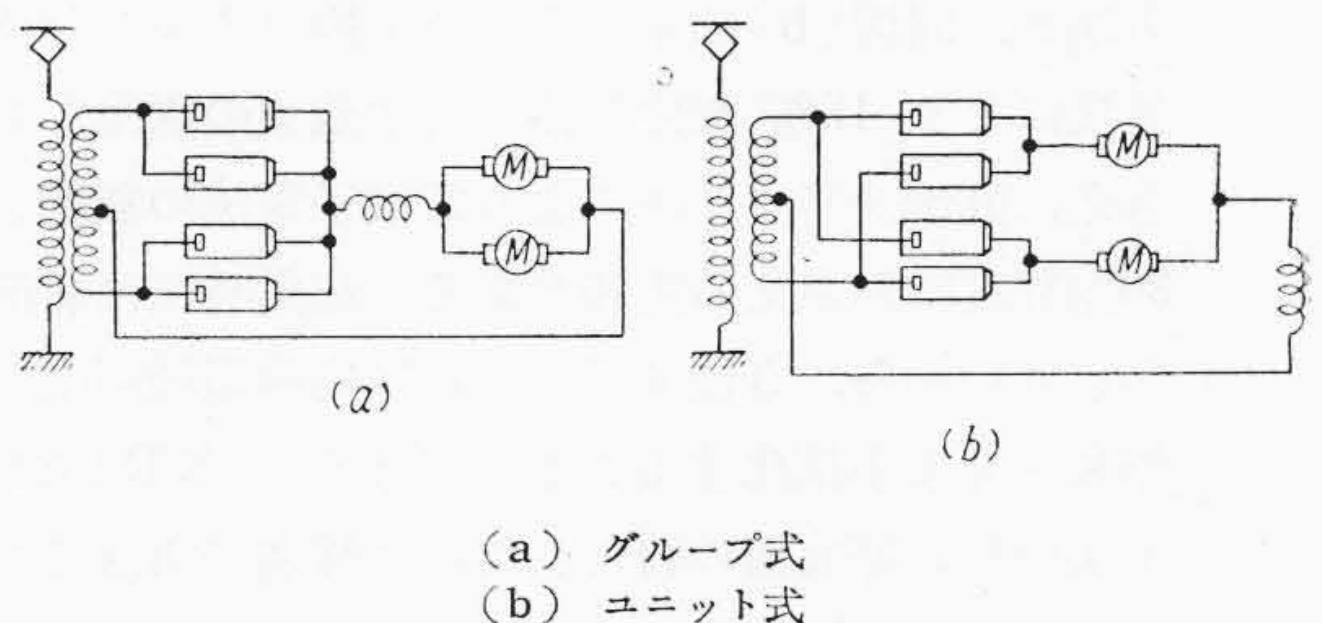
となる場合がある。

整流器と主電動機の接続方法には第16図(a)に示すように整流器を全並列とし、陰極を共通母線で接続する日立製作所で採用した方式(Group System)と第16図(b)に示すように各電動機に専用の整流装置を直列に接続する方式(Unit System)がある。後者は陽極リアクトルを除くことができるが、点励弧装置などの附属装置が著しく複雑大型(電動機4台の場合は前者の約3倍)となり、整流器の数が電動機台数の2倍またはその倍数であることが必要である。また整流器あるいは電動機が故障した場合その回路の健全な電動機あるいは整流器もいつしよに開放しなければならないので機関車出力の低下する場合が多いなどの短所があり、一般に有利でない。これに対しグループ方式は整流器逆弧時の故障電流値が大きくなる欠点があるが次に述べるような保護方式によつて完全に補うことができる。

- (f) 整流器事故時の保護 水銀整流器の逆弧発生時に機器を損傷しないよう、回路定数ならびに保護方式を決定する必要がある。抵抗分路による弱界磁で高速運転中に逆弧が発生すると主電動機は短時間、発電機となつて直流電流が逆流し、電動機にはこの直流過渡電流に交流の大電流が重畳して流れる。欧州では直流側に大型の高速度遮断器を用いたものが多いが、「E D 4521」では高速ノッチで逆弧の発生した場合、主変圧器の二次側を1サイクル以内で動作する小型の高速度短絡スイッチで短絡することにより安全に保護している。実物試験による保護効果はきわめて満足なことが



第15図 水銀整流器の結線方式



第16図 整流器式電気車の主回路結線方式

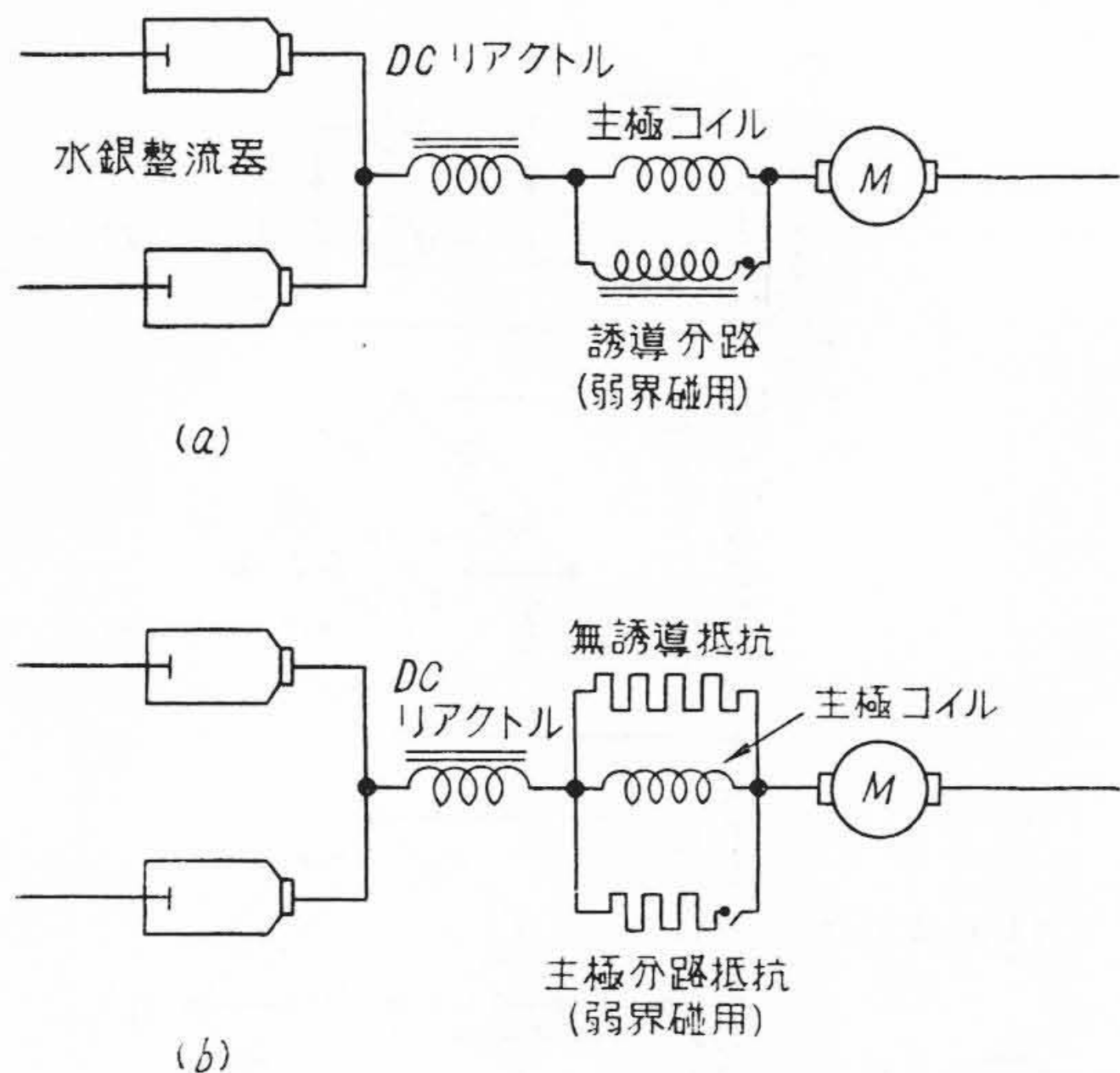
実証されている(特許出願中)。

(2) 脈流電動機(整流器式交流機関車用主電動機)

- (a) 脈流対策 単相全波整流による電流は直流分のほかに電源周波数の偶数次の高調波を含む脈流である。したがつて電機子巻線に発生する変圧器起電力および補極磁束が電機子電流の脈動に追従できないために生ずる残留火花電圧が整流を困難にし、また交流分によつて銅損および鉄損を増大して直流運転の場合より温度上昇が高くなる。

したがつて電流を平滑にするほど主電動機は小さくできるが、他方脈流を制限するための装置が大きくなり、また変圧器一次側の高調波電流が増すので、誘導障害をおさえるためのフィルタが大きくなる。したがつて主電動機、直流リアクトル、界磁分路抵抗器およびフィルタを総合して脈流対策を決定すべきである。

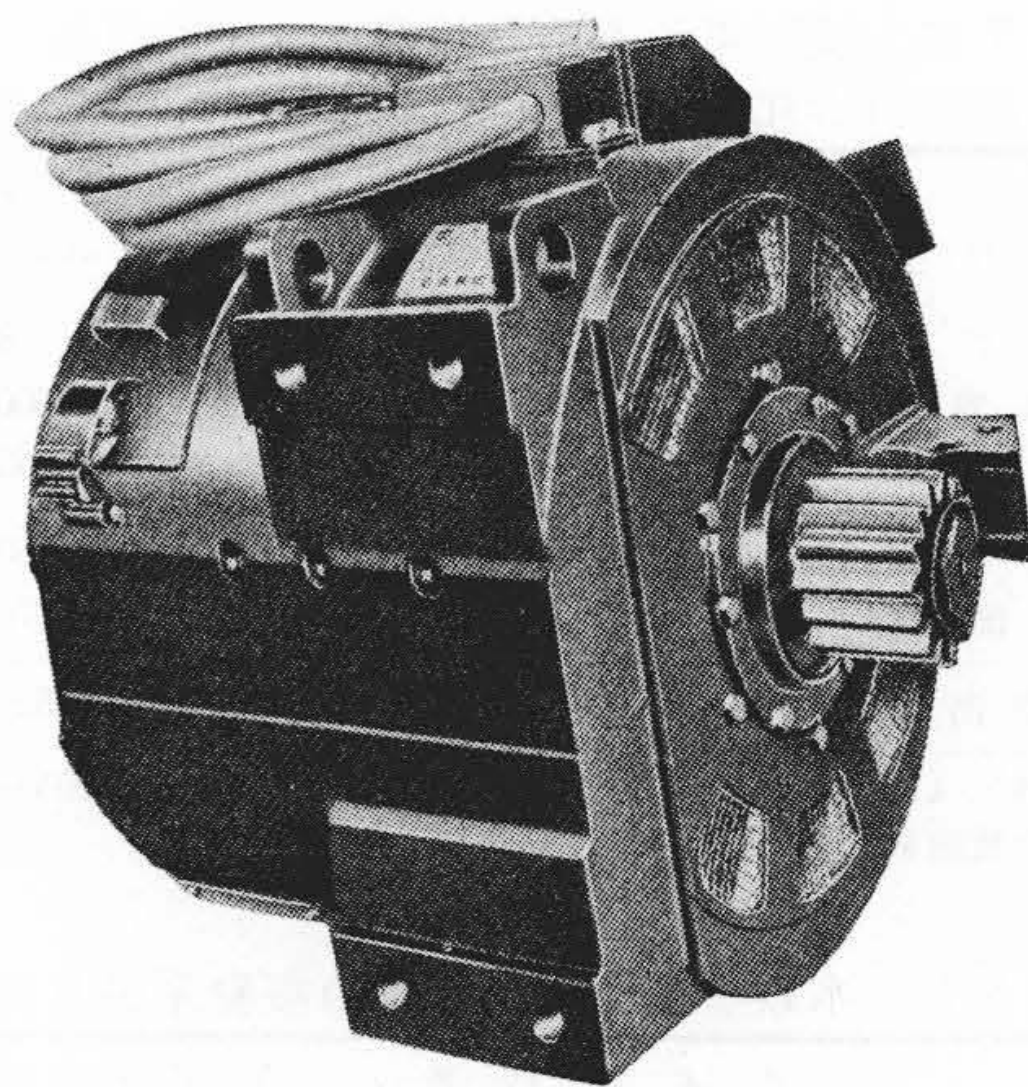
現在、脈流対策として実用的なものには第17図(a)に示すように電機子に直列に直流リアクトル



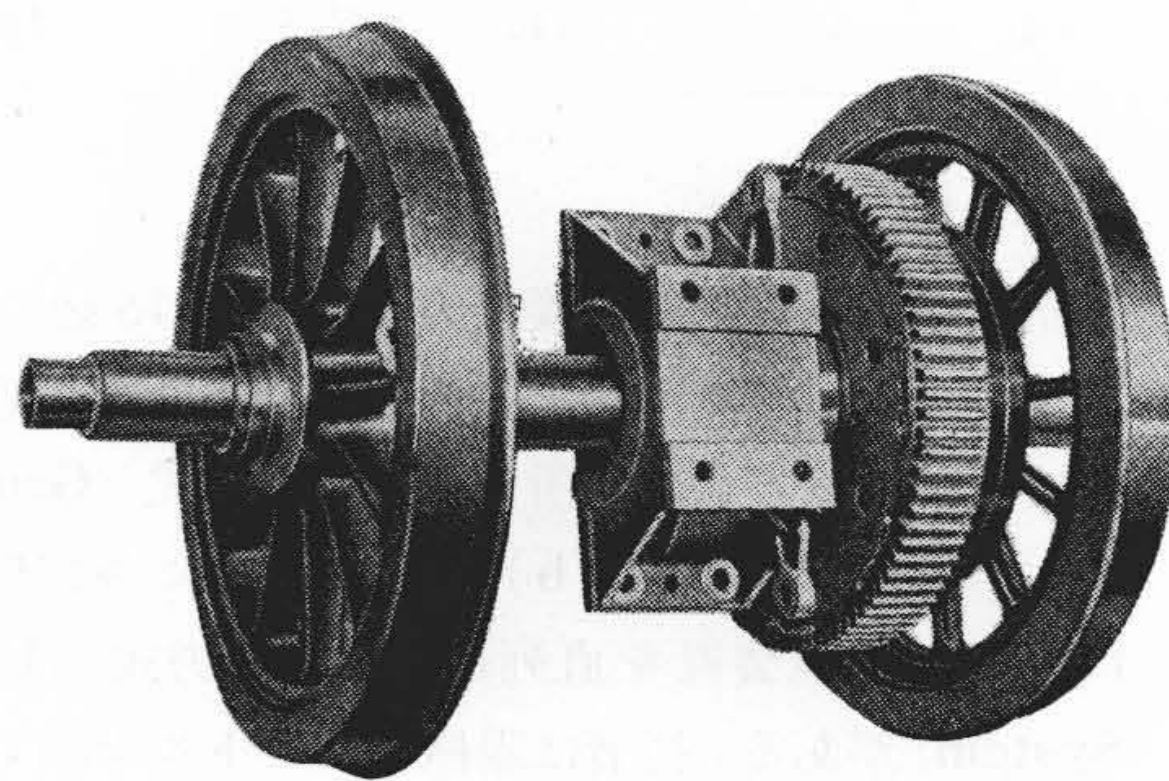
第17図 実用的な脈流防止法

を挿入し、弱界磁運転は主極巻線の値に近い時定数（リアクタンス/抵抗）を有する誘導分路で行う方法と、同図(b)に示すように主極コイルを分路抵抗により15%程度分路して主磁束の脈動をおさえ、直流リアクトルにより電機子電流の脈動を30%程度におさえる方法がある。起動時には脈流が小さいから、直流リアクトルは定格電流以上で飽和させて小型化することができる。「ED4521」で採用し、好成績の得られたのは後者の方法である。

(b) 軽量化と整流改善 第18図に連続定格375 kW主電動機（脈流電動機）の外観を示す。高減速比のとれるバネ入固定中空軸式駆動装置（第19図）を採用し、高速軽量化を図るとともに、電機子に重巻トレッペン巻線を採用し、補極を積層して磁気枠と補極鉄心の間に大きい空隙を設け、また3分割刷子を使用するなど、整流改善に特に考慮



第18図 「ED4521」用375 kW主電動機



第19図 「ED4521」用バネ入り固定中空軸式駆動装置

が払われている（第9表参照）。

(3) 誘導障害

機関車の水銀整流器回路は単相全波整流であり、架空電車線が単相不平衡回路であるため、電車線側に発生する高調波が近接通信線に静電誘導と電磁誘導の二つの作用によつて危険電圧と雑音を誘起する。これを許容値以内におさえるよう主変圧器2次側端子間にコンデンサと抵抗器よりなるフィルタを挿入する必要がある。

〔V〕 交流電車

商用周波の交流整流子電動機は、負荷の変動が少なく、高加速のできる電車用主電動機に適しており、長距離電車の高速運転には最も有利である。電車では機関車以上に出庫の準備時間、誘導障害、運転効率、安全性、電車新製費などが問題となるが、これらの点についても直接式電車は

第9表 機関車用主電動機の重量比較

型番号	MT-43	MB-3026B	HS-1050-Br
連続定格出力	220 kW	250 kW	375 kW
連続定格回転数	910 rpm	1,000 rpm	1,070 rpm
最弱界磁	60%	50%	45%
電動機支持方法	釣掛式	台車装架	台車装架
使用機関車	EH10形 日本国有鉄道標準直流機関車	ED451 イグナイトロン整流器式機関車	ED4521 エクサイترون整流器式機関車
重量 (kg)			
① 電動機	3,540	1,730	1,990
② 駆動装置	676	834	750
③ 計	4,216	2,564	2,740
kg①/m-kW	15	7.1	5.8
kg③/kW	19.2	10.3	7.3

すぐれている。

日立製作所では 150 kW 50/60 単相交流整流子電動機 4 台を備えた発電制動付き直接式電車を試作中である。第 20 図にその力行時の主回路結線図を示す。

(1) 整流器式電車

電車においては粘着重量に十分余裕があるから電動機を 2 台または 4 台直列に接続することができ、整流器の出力電圧を高くとることが容易である。床下に置く水銀整流器として水冷式よりも風冷式が有利となる。水銀整流器式電車では、出庫してから実際走行運転までの時間が交流電気機関車の場合よりも短いので出庫前に整流器を適当な温度に保つことが特に必要である。したがって整流器の予熱は機関車の場合よりも留意する必要がある。また通信障害の問題が課題となる。

近時、シリコン整流器を利用した整流器式電車も考えられるようになり、試作研究されつつある。

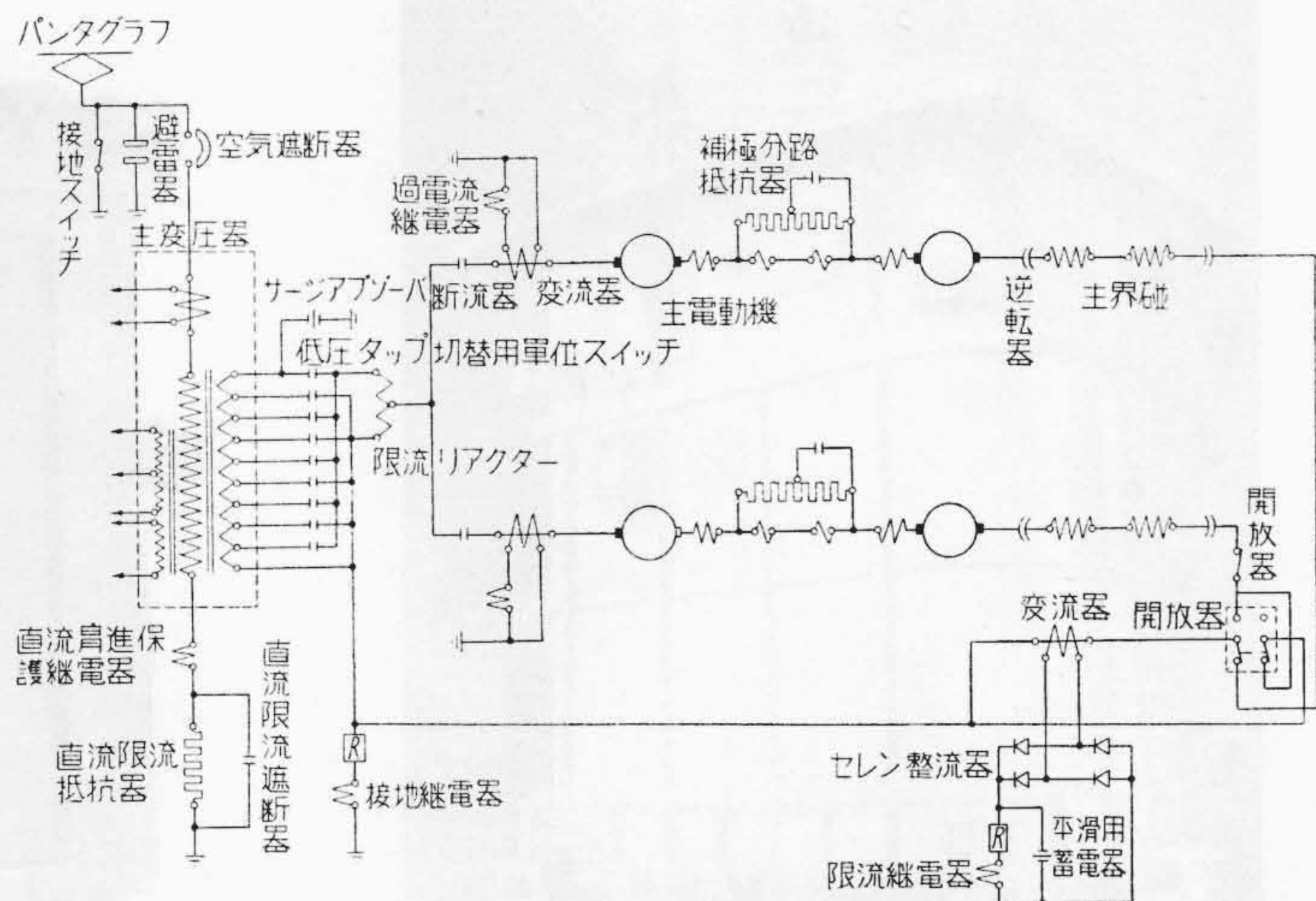
(2) 交直両用電車

交流、直流両区間で同等の性能を有し、相互に乗入れする電車としては、直流電車の附随車に変圧器、エキサイトロン整流器装置一式を塔載しこれを直流電源車とし、交流区間ではこの電源車で得られる直流を直流電動車に供給し、直流区間では普通の直流電動車として架線より直接給電して交直両区間にわたって運転する方式が最も実用的と考えられる。

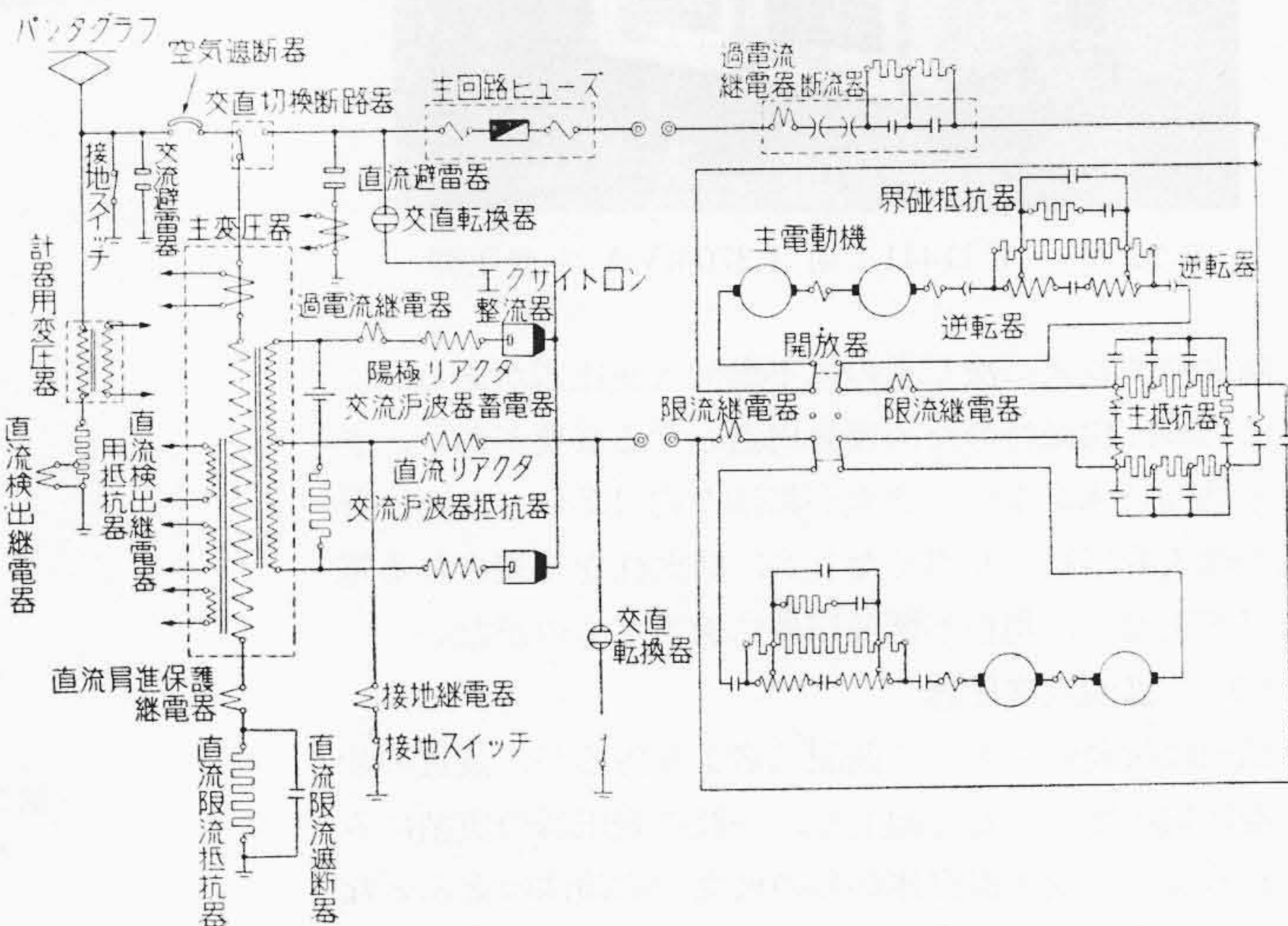
現在日立製作所では、この方式による交直両用電車を製作中であり、近く完成の予定である。第 21 図はその主回路結線図で、交直の切替地点で安全確実にしかも停車することなく交直の切替えができるよう、特に考慮が払われている。

〔VI〕 車輛用主変圧器

交流電気車では主変圧器の占める重量、容積の割合が大きいので、特に小型軽量化が問題になる。また耐振性、防火および保守の簡単なことが要求されることはもちろんであるが、電車の場合には床下に置く必要上高さが極度におさえられるという条件も加わる。小型軽量化のため鉄心材料、絶縁材料に高級な材料が使用され、また冷



第 20 図 直接式電車主回路結線図(力行時)



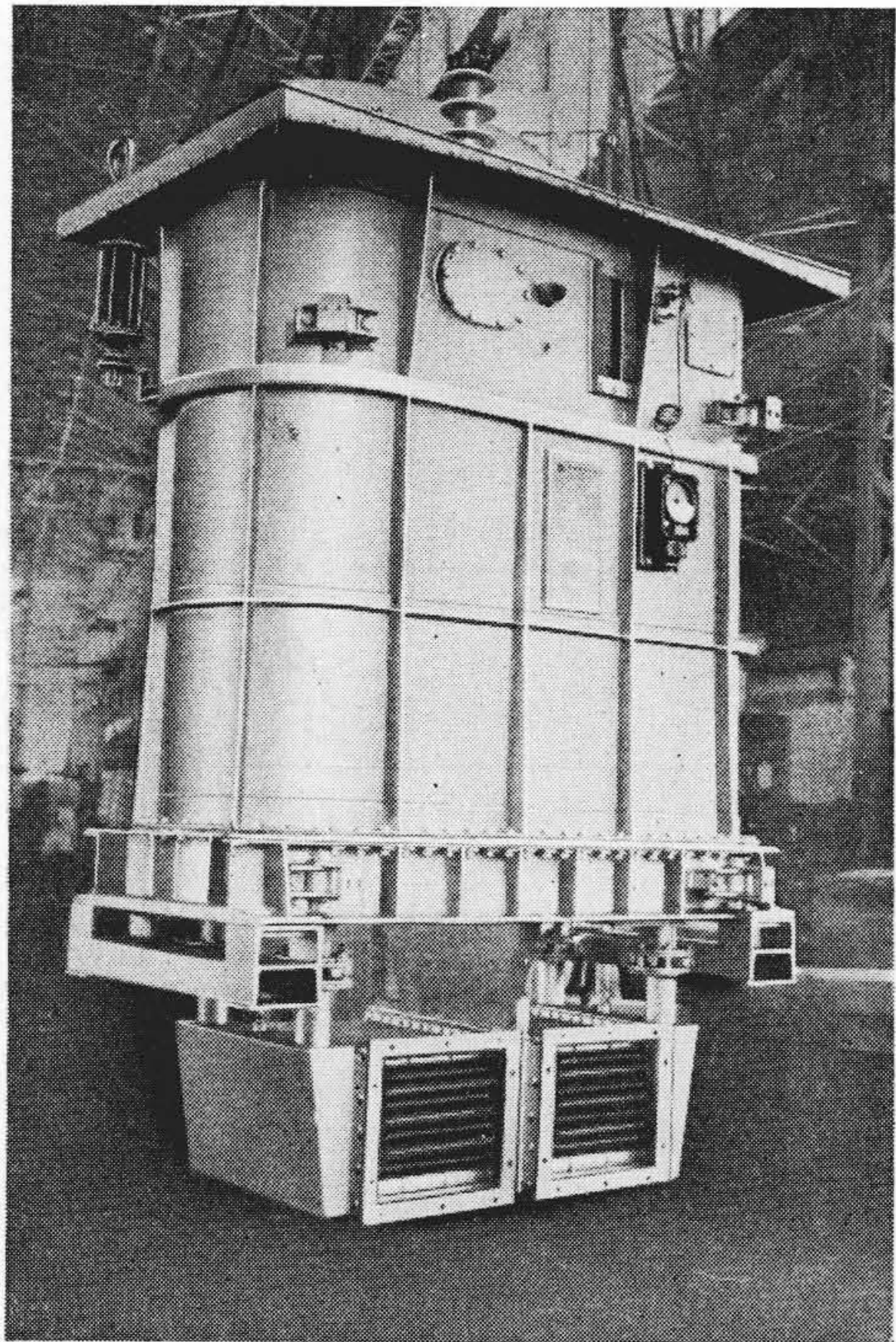
第 21 図 交直両用電車主回路結線図

却法の改良が行われてきた。

(1) 乾式変圧器

乾式変圧器は防火性にすぐれ、保守が容易であるが、車輛に塔載する場合は冷却空気中にブレーキシューやパンタグラフで生ずる導電性微粉塵が含まれ、絶縁上の不安がある。防塵対策としてガス封入や密封型が考えられるが、耐圧容器と間接冷却のため重量容積が増大して乾式の特長を減殺する結果となる。現状では収塵または冷却の方法について今後の開発にまつべきものが多い。欧米においてガス封入式や液体の蒸発潜熱を冷却に利用する方式などが研究されてはいるが、現在使用されている車輛用変圧器は一般に米国では不燃性油、欧州では鉱油を使用した油入式である。

(2) 不燃性油入変圧器



第22図 「ED441」用 1,370 kVA 主変圧器

防火性で乾式に次ぐものに不燃油入変圧器がある。これは油の性状保持のため密封構造とする必要があり、また不燃油自体が重い（比重が鉱油の約 1.7 倍）ため、普通の油入変圧器より重くなるが、防火性を重視される電
車用変圧器には現在不燃油以外に適当なものがない。

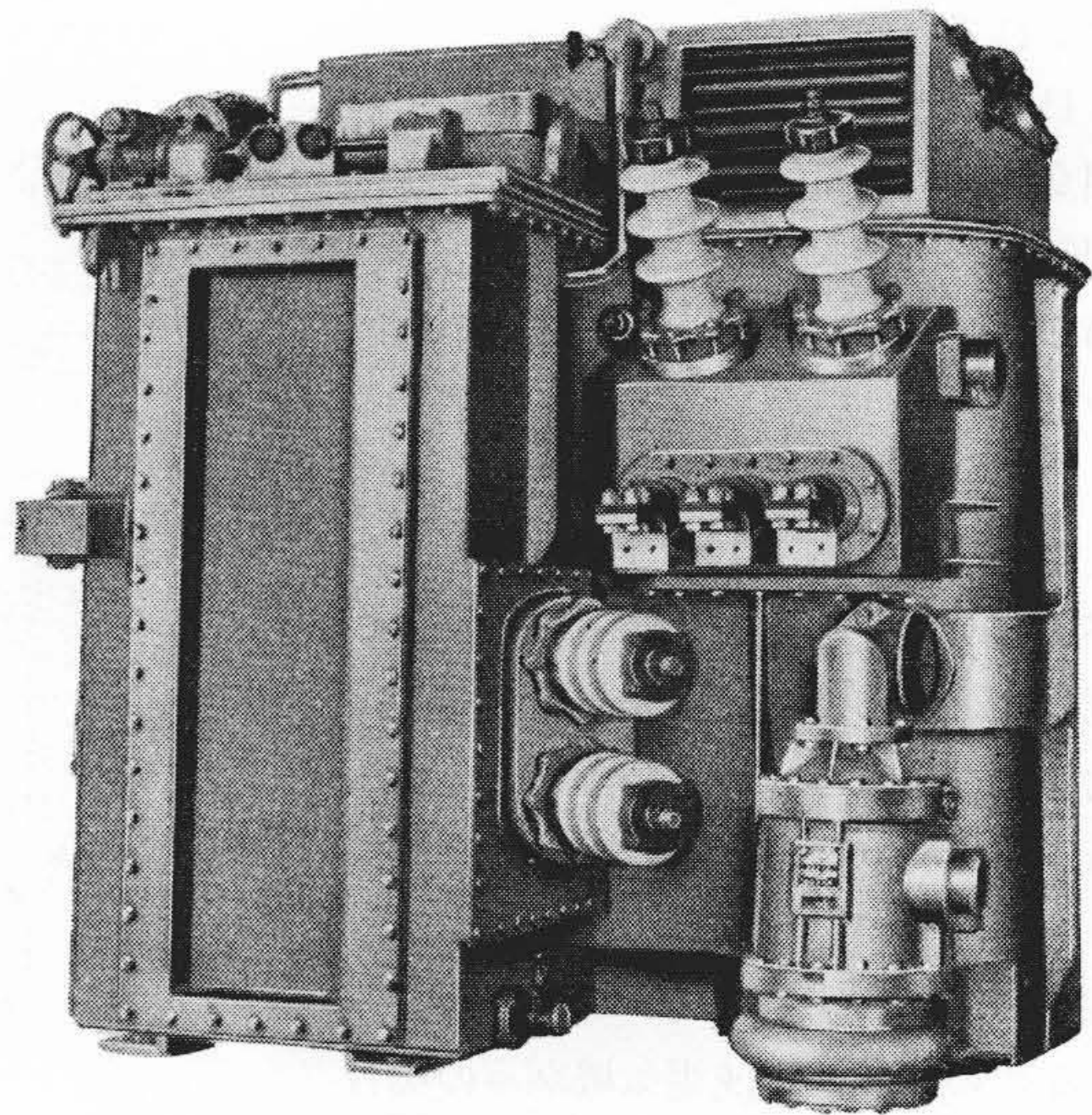
（3） 鉱油入変圧器

鉱油は防火性において前記二者より劣るが、最近の変圧器は信頼度が著しく向上し、一般の変圧器の実績にみられるように変圧器自体からの火災の危険はほとんどなく、また小型軽量となるから、安全装置を十分考慮した
鉱油入変圧器は機関車用として適したものであるといえよう。

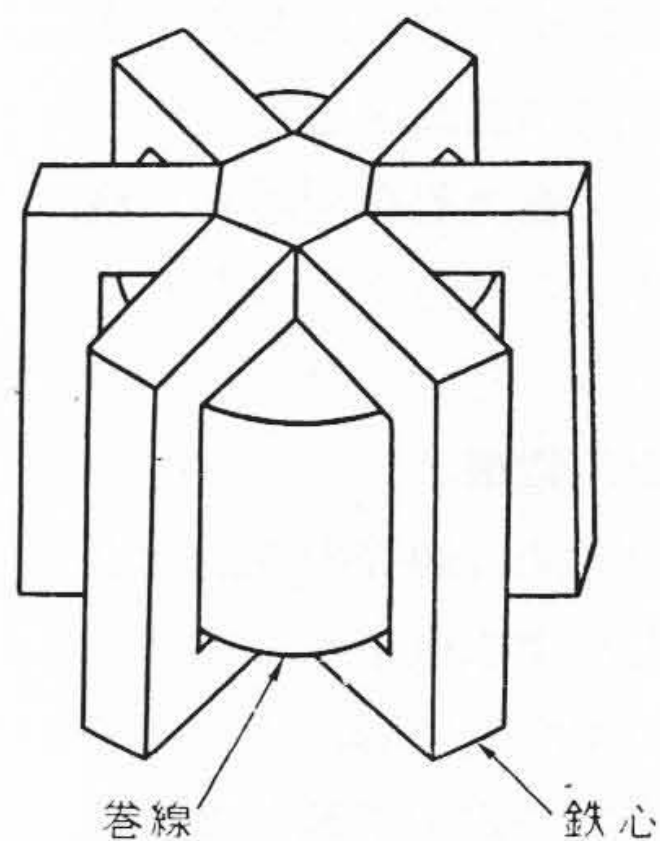
日立製作所では前述の理由により、機関車用主変圧器には鉱油を用い、電車用主変圧器には不燃性油を使用し、いずれも送油風冷式により小型軽量変圧器とした。

直接式機関車「ED441」用は連続定格 1,370 kVA の二次側タップ付き変圧器で、第22図にその外観を示す。整流器式機関車「ED4521」用主変圧器は1時間定格 2307/3177 kVA 単相全波整流式であつて、単巻巻線と整流器巻線を方向性珪素鋼板を使用した3脚鉄心に巻き、単巻線のタップを切替えて電圧調整を行う高圧切替方式である。その外観を第23図に示す。

電車用主変圧器は不燃性油を用い、特殊な通油構造を採用して冷却効果の向上を図り、床下の制限寸法におさめるため直接式電車用は横型とし、整流器式交直両用電



第23図 「ED4521」用 2307/3177 kVA 高圧タップ切替器付き主変圧器

第24図 交直両用電車用主変圧器
星形鉄心説明図

車用は床下占有面積を極度に縮減した6脚星形鉄心（第24図）を採用したものを製作中である。

〔VII〕 交流電気車の制御

（1） 速度制御

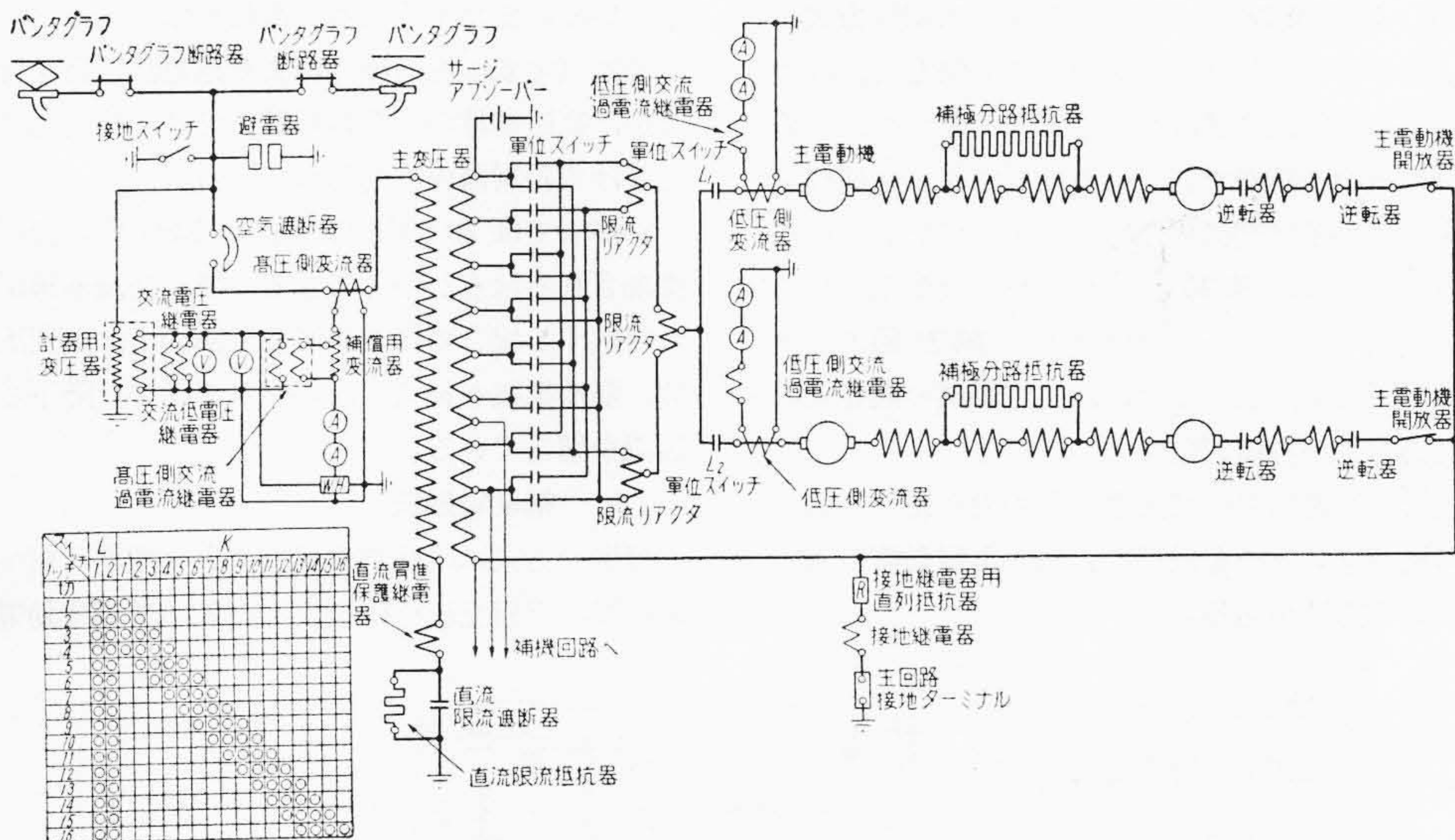
交流電気車の速度制御は主変圧器のタップ切替による電圧制御が採用されるから、直流電気車の抵抗制御のように電力損失がなく、運転効率が良好であるうえにノッチの数だけの自由な連続運転ノッチが得られる。また主変圧器に過電圧タップを設けて高速性能をさらに向上させ、あるいは架線電圧の降下による速度低下を補償することが可能である。運転ノッチが自由なことは、交流電気車のすぐれた特長の一つである。電圧制御の方法としては、主変圧器の2次側でタップ切替を行う低圧切替と、1次側で行う高圧切替の2方式に大別される。

低圧切替は電車のように容量の小さい場合は有利であ

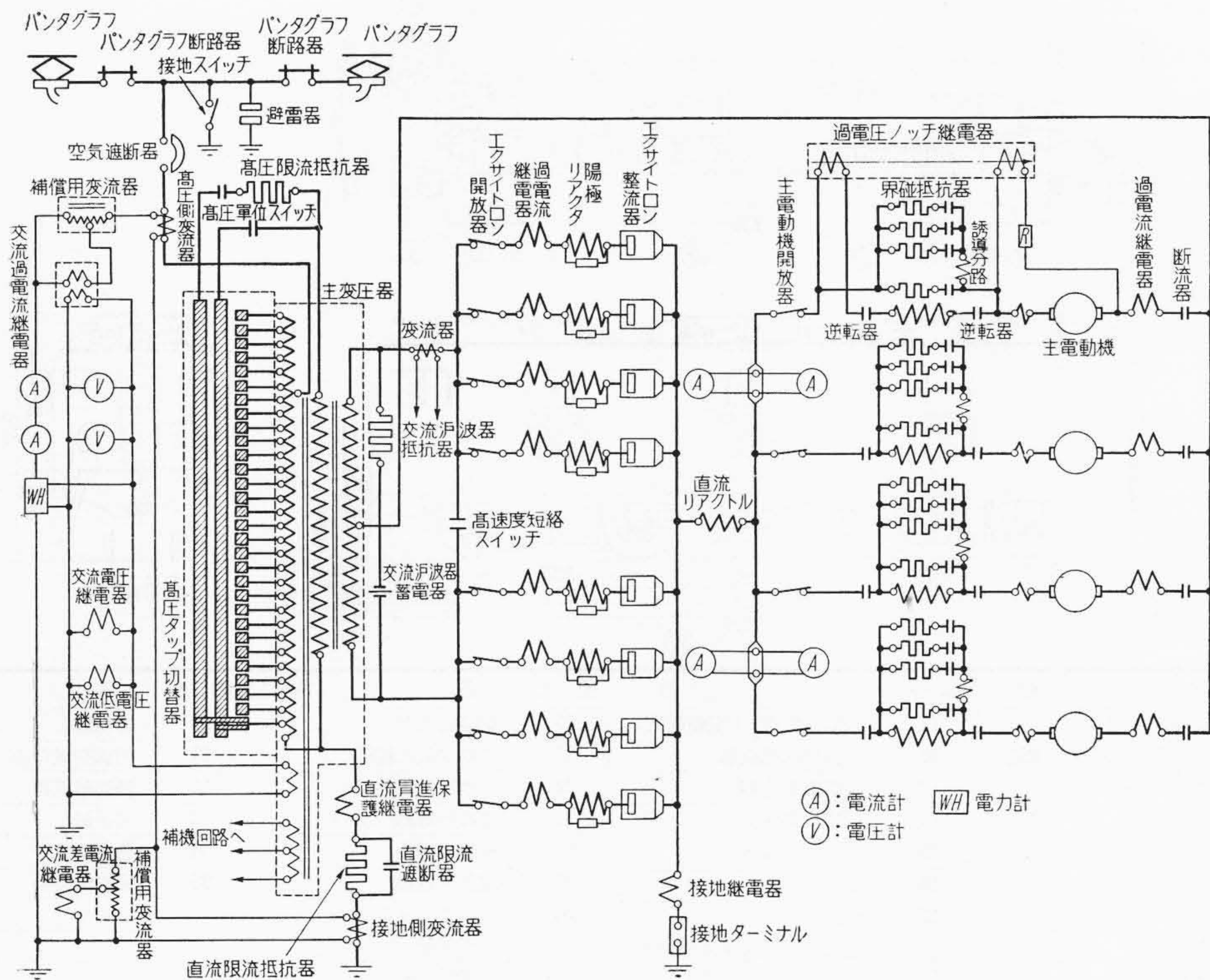
るが、大容量機関車では数千アンペア程度の大電流になり、主変圧器にタップを多数設けることなどから不利になる。整流器式機関車では直接式に比べて多くのノッチを必要とした主変圧器二次巻線の一部極性転換、低ノ

ッチにおける整流器の格子制御、あるいは半サイクルごとに通電する2組の整流器陽極電圧に差をつける跛行全波整流を併用してノッチ数を増す方法などがとられる。

高圧切替方式は高圧側のため遮断電流が少なく、切替



第 25 図 直接式機関車「E D441」主回路結線図



第 26 図 整流器式機関車「E D4521」主回路結線図

装置が簡単でタップ数も多くとれる。両方式の選択基準には種々の見解が発表されているが⁽²⁾⁽⁴⁾⁽⁵⁾、大容量の機関車では高圧側切替が有利である。

日立製作所では直接式機関車（連続1,120 kW）には第25図に示すような低圧切替方式を、整流器式機関車（連続1,500 kW）には第26図に示すような高圧切替方式を採用した。この高圧切替はノッチの渡りに際して、限流抵抗を挿入する30段の多段スライダ式であつて、負荷電流を2個の気中遮断器で交互に遮断してタップ切替を行い、油中の接触子は発弧しない機構としている。現在製作中の直接式電車は第20図に示すような低圧切替による電圧制御であるが、交直両用電車は第21図に示すように直流区間でも運転するため、主電動機の直並列制御、抵抗制御および界磁制御によつている。

整流器式では高速において大きい引張力を得る方法に主変圧器に過電圧ノッチを設ける方法と主電動機の弱界磁制御を用いる方法がある。

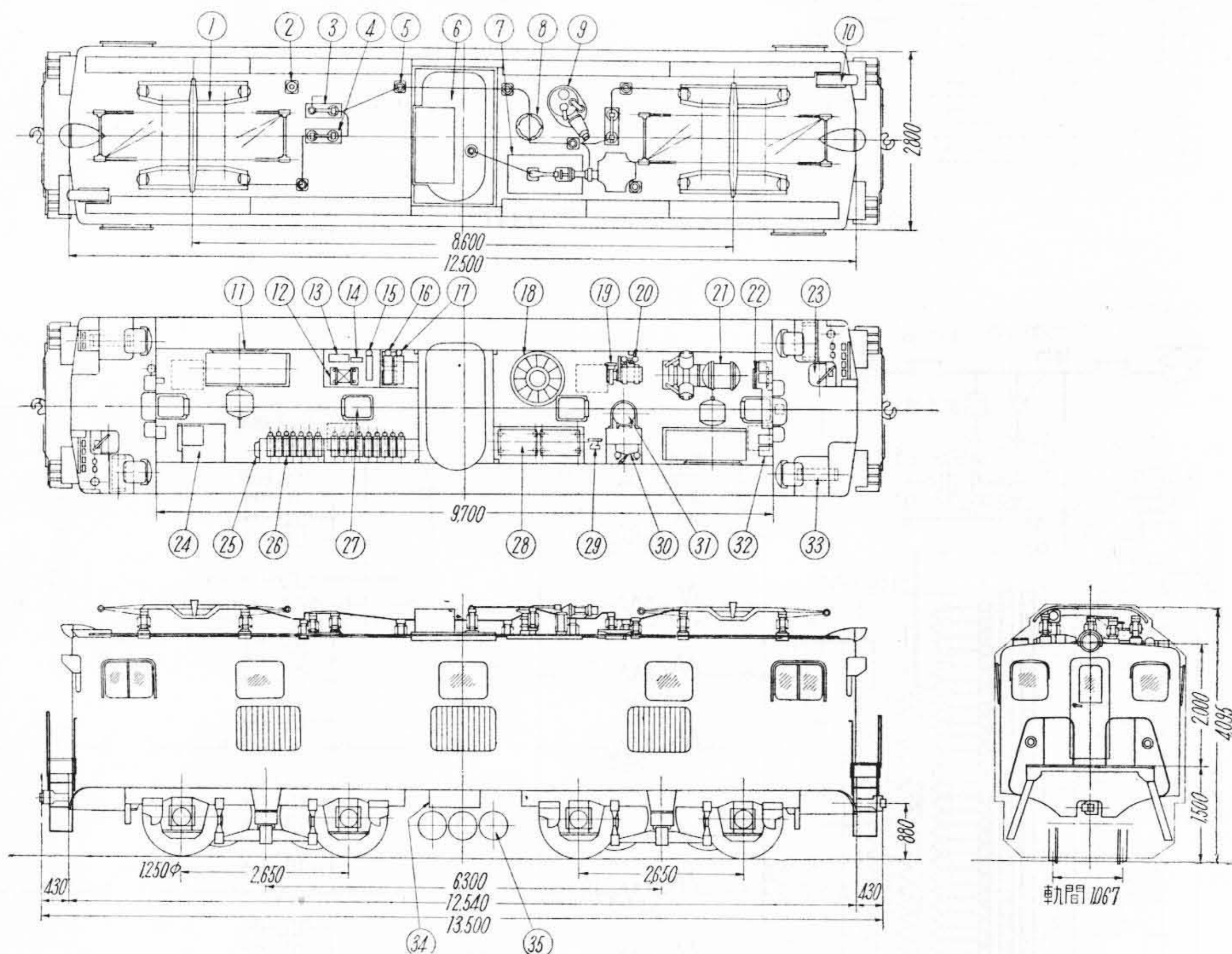
（2）保護方式

日立製作所製交流電気車は第25、26図に示すように、主変圧器一次側に20kVドライバルブ避雷器および5〜遮断の空気吹付遮断器があり、点検および最後の保護手段として電磁バネ動作の接地スイッチを設けて安全を期している。また主変圧器一次側を保護するため、高圧側変流器（主変圧器内蔵）により過電流保護を行つているほか、高圧切替の「ED4521」では、接地側にも変流器を設けて差電流保護を行つている。

わが国では20 kV交流区間が1,500V直流電化区間に接続される地点が多くできるので、交流車輛が直流区間に冒進する場合の保護が必要であつて、主変圧器の接地側に限流抵抗を挿入し、パンタグラフを降下させる保安装置を備えている。

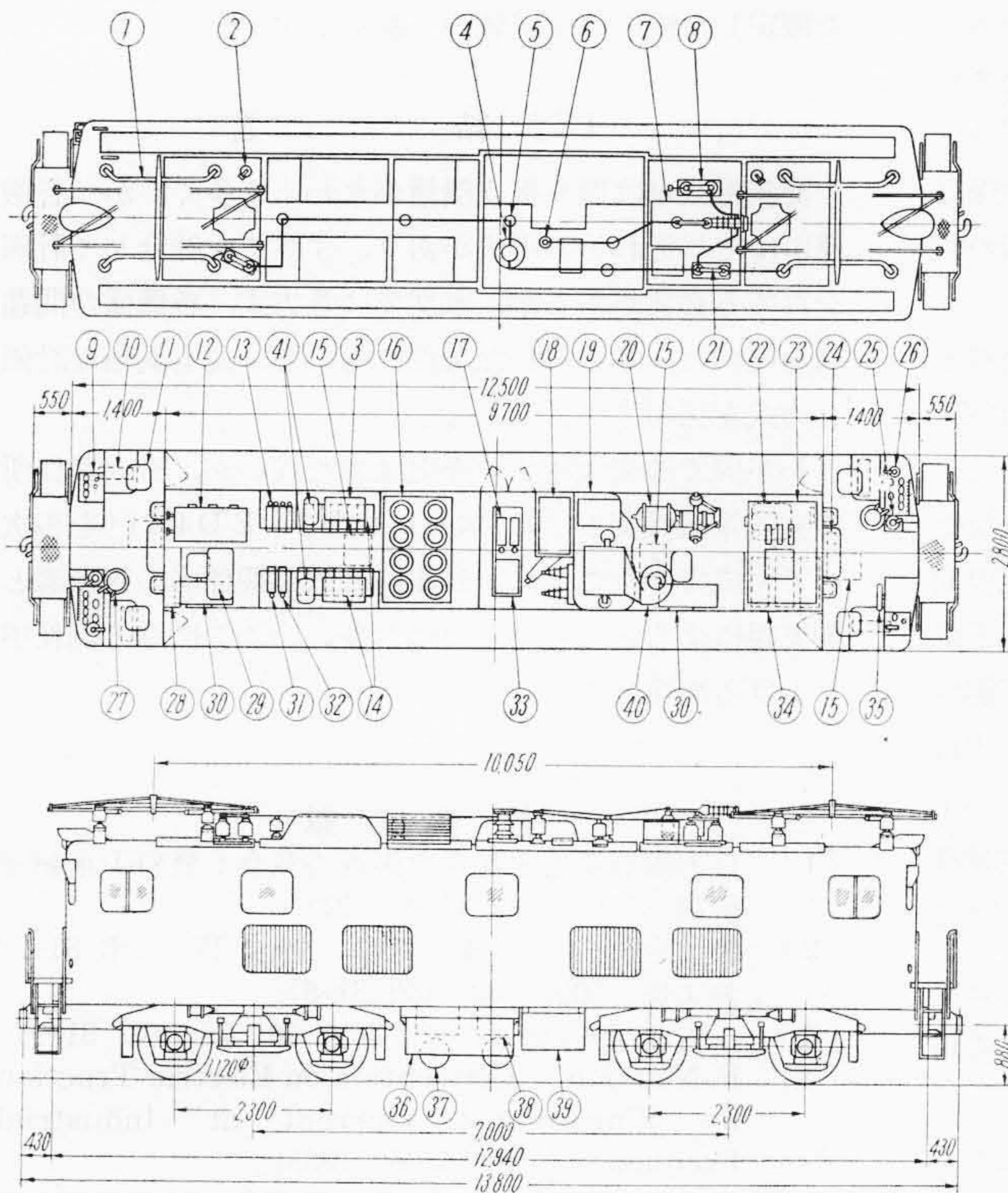
（3）補助電動機

補機の方式には相数変換機により標準三相かご形誘導電動機に三相交流を給電する方式、単相誘動電導機を使



照 号	名 称	照 号	名 称	照 号	名 称	照 号	名 称
1	パンタグラフ	11	電動送風機(主電動機用)	20	積算電力計	30	逆転器
2	空気管屋根つらぬき碍子	12	直流限流抵抗器	21	電動空気圧縮機	31	制御空気だめ
3	接地スイッチ	13	過電流継電器	22	小型空気圧縮機	32	補助継電器
4	断路器	14	低電圧継電器	23	主幹制御器	33	暖房器
5	導体ささえ碍子	15	単位スイッチ	24	相数変換機	34	蓄電池
6	主変圧器	16	断流器	25	電動発電機	35	元空気だめ
7	空気遮断器	17	分流器	26	単位スイッチ		
8	避雷器	18	送風電動機(主変圧器および分路抵抗器用)	27	ツナギ箱		
9	計器用変圧器	19	分配弁	28	分路抵抗器		
10	笛			29	主電動機開放器		

第27図 直接式機関車「ED441」機器配置図



照号	名 称	照号	名 称
1	パンタグラフ	22	相数変換機
2	空気管屋根つらぬき碍子	23	継電器群
3	界磁抵抗器(主電動機用)	24	調圧器
4	避雷器	25	補機制御器
5	導体ささえ碍子	26	ブレーキ弁
6	屋根つらぬき碍子	27	主幹制御器
7	空気遮断器	28	刃形開閉器群
8	接地スイッチ	29	電動発電機
9	計器盤	30	電動送風機
10	暖房器	31	直流遮断用単位スイッチ
11	腰掛	32	短絡スイッチ
12	D.Cリアクトル	33	高圧限流抵抗
13	断流器	34	交流濾波抵抗器
14	界磁接触器(主電動機用)	35	ハンドブレーキ
15	主電動機点検窓	36	蓄電池
16	エクサイترون整流器	37	元空気だめ
17	高圧限流遮断器	38	アノードリアクトル
18	高圧タップ切替器	39	交流濾波蓄電器
19	主変圧器	40	主変圧器用送風機
20	電動空気圧縮機	41	誘導分路
21	パンタグラフ断路器		

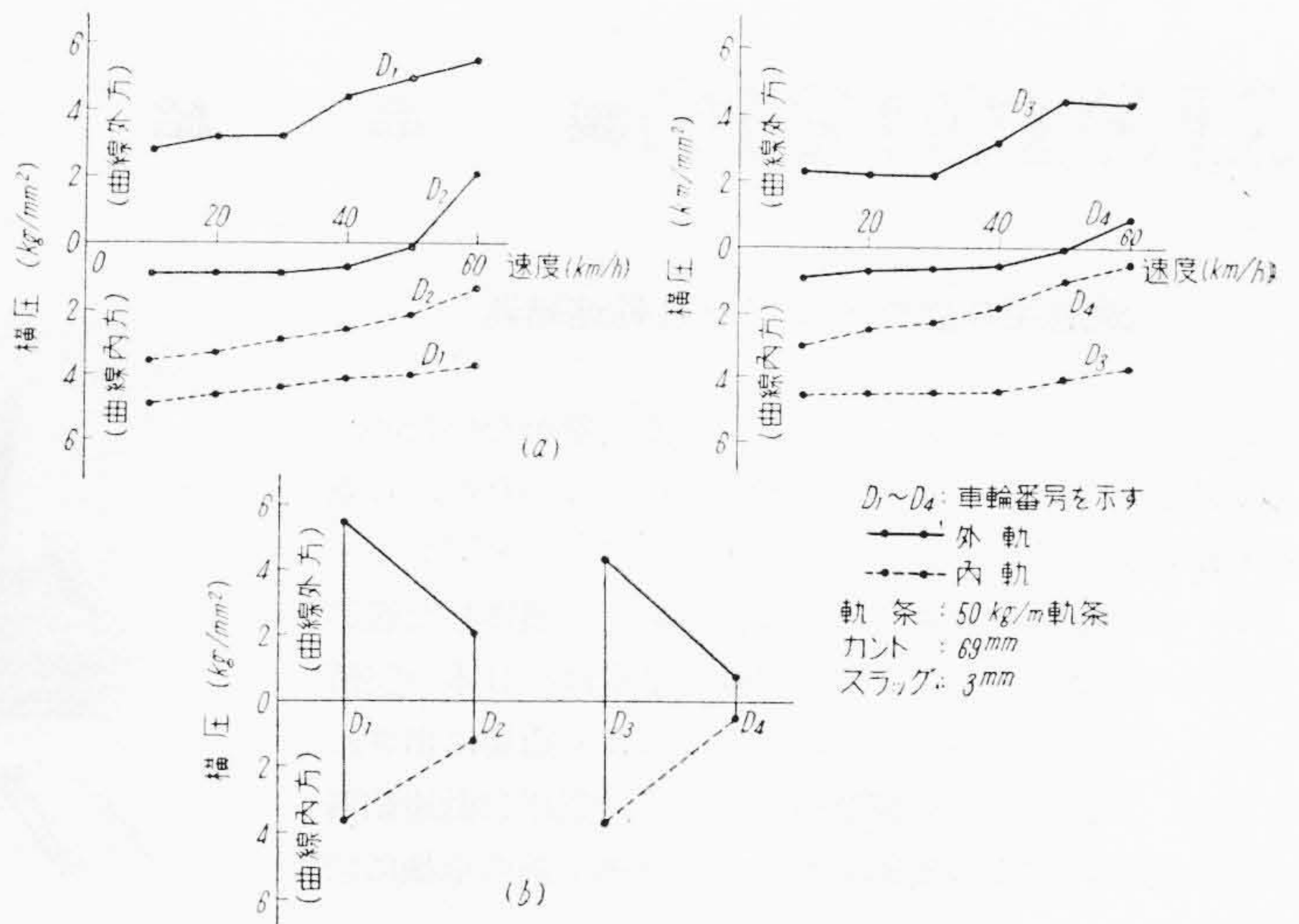
第 28 図 整流器式機関車「E D4521」機器配置

用する方式および多数の三相誘導電動機並の列運転による相変換作用を利用し、三相誘導電動機の並列運転を行わせる方法がある。これらは仕様によつて差があるが、交直両用電車のように補機の数が少ない場合には単相誘導電動機、多い場合には相数変換機より三相を得て三相籠形誘導電動機に給電する方式が適していると考えられる。誘導電動機は直流の補機に比べて軽量、堅牢である。「ED441」,「E D4521」ではいずれも相数変換機を使用しており、三相誘導電動機の並列単相運転に比べて起動および無電圧区間通過後の再起動時間が短く、自動的に行われ、また補機全体として軽量である。

〔VIII〕 機関車重量および 走行振動性能

(1) 機関車重量

交流機関車は軽量機関車で重い列車を牽引することができるから一軸あたりの出力が大きく、直流機関車に比べて小型軽量化に対する要求が厳しくなってくる。特に



(a) 機関車速度と各車輪の横圧との関係
(b) 速度 60 km/h における各車輪の横圧値

第 29 図 「E D4521」の曲線半径 600m における横圧実測値の例 (工場試験)

整流器式では機器の数が多いので、保守点検の便を考慮して軽量機関車にまとめる必要がある。塔載する電気品の小形軽量化を図ることはもちろんであるが、機関車の

小形化、機器配量の合理化、必要に応じて軽合金の使用ならびに機器のブロック化（機器を保守検修に便利なブロックにまとめる）などにより軽量化を図る。機器のブロック化は電気車輛に共通の新しい傾向であり、機器の保守点検はできるだけ長期間行う必要のないよう、機器の信頼度向上に努力が払われている（第 27、28 図参照）。

わが国で製作された交流機関車を直流機関車と比較すると第 2 表のようになり、著しい軽量化の跡がみられる。

（2）走行振動性能

近代的機関車としての交流機関車は軸重移動の少ない構造の台車を採用し粘着性能向上を図る一方乗心地の向上、蛇行動防止ならびに軌条に対する横圧の減少などに画期的な改善が施されている。今日日立製作所にて製作された交流機関車はこれらに対し利点の多い全側受式台車を採用した。「E D 441」は全側受式機関車としてわが国最初のものである。また本機は 50 $\sim$ 交流整流子電動機の耐振試験の目的で釣掛式としてあるが、「E D 4521」では主電動機を台車装架としさらに台車バネはすべてコイルバネとしこれにオイルダンパー並びに防震ゴムを併用した。

また皿バネ緩衝装置付円筒コロ軸受を採用して輪軸を左右に各 7 mm 程度横動できる構造として横圧を著しく軽減することができた。第 29 図に日立製作所の工場構内

で測定した横圧の測定値の一端を示す。

〔IX〕 結 言

交流電気車は取り扱う機種がきわめて多く、かつ各機種にはそれぞれその得失があり、すべてを総合して計画をたてる必要があるが、本文では各方式、各機種の問題点をのべた。与えられた条件に対して、最も適当な計画と方式を採用すべきである。

わが国では交流電化の歴史はまだ浅いが、日立製作所で交流電気機関車「E D 441」および「E D 4521」を相次いで完成できたことは、日本国有鉄道関係者の御指導と御支援によるところがはなはだ多い。ここに厚く御礼申し上げる次第である。

参 考 文 献

- (1) 日本国有鉄道交流電化調査委員会：資料 I 車輛運転篇 (2) 5.2.1 (昭-31)
- (2) 矢山康夫：電気車の科学 99, 17 (昭 31-7) および 100, 30 (昭 31-8)
- (3) 一木，河井ほか：日立評論 38, 75 (昭 31-9)
- (4) F. Nouvion：Convention on Electric Traction by Single-Phase Current at Industrial Frequency. No. 16, 6 (1955)
- (5) 日本国有鉄道交流電化調査委員会：交流電化調査班報告書，200, 209 (昭-30)

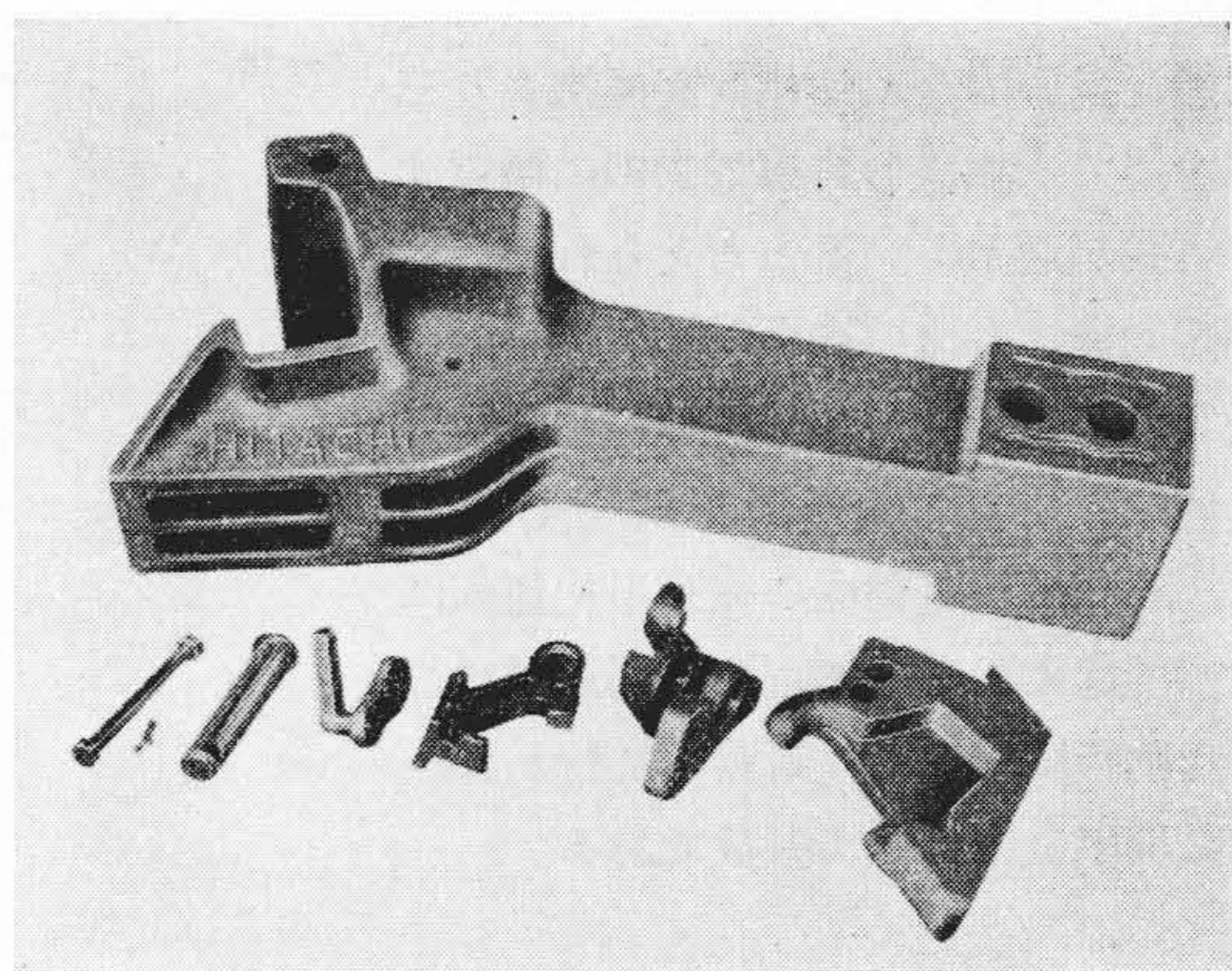
製 品 紹 介

鉄道用日立ウイリソン自動連結器

産業用小型車輛は従来適当な自動連結器がないため、ほとんどがピンリンク式連結器を採用していたが、日立製作所がアメリカのナショナル・マリアブル・アンド・スチールキャスティング会社と技術提携して製作した産業車輛用の $\frac{3}{4}$ サイズウイリソン自動連結器は、日本の実情に適した小型連結器として、すでに数多く市場に出されてるが、最近新たに錠控装置を有する鉄道用自動連結器が製作され、住友金属鉱業および大分鉱業納の車輛に取付けられた。

この連結器は錠控装置を有するので、突放しも簡単にでき、かつ磨耗部品が少いという特長をもっており、将来、大型産業車輛用の自動連結器として、その活躍が期待されるものである。

紹 介



第 1 図 鉄道用ウイリソン自動連結器
(分 解 写 真)