

# 仙山線交流電気機関車用シリコン整流器

Silicon Rectifier for A. C. Locomotive for Senzan Line Service

曾 根 田 瑞 夫\* 川 上 直 衛\*

Mizuo Soneda

Naoe Kawakami

## 内 容 梗 概

わが国最初の交流電気機関車用シリコン整流器が完成した。これは仙山線交流電気機関車 ED 4521 の水銀整流器を取はずし、そのあとに取付けて使用される。全出力電気機関車用シリコン整流器の製作に際しては、寸法、重量の極端な制限、こう配起動時の長時間の過負荷、主電動機永久並列に伴う直流側短絡ひん度の増大など種々の問題があったが、今回日立製作所は大容量整流素子の製作に成功し、車両用水銀整流器、シリコン整流器製作の豊富な経験を生かしてこれらの要求を満たすシリコン整流器を製作した。このシリコン整流器を搭載した ED 4521 は 500 t けん引して 25% のこう配起動が可能であり、現在仙山線において好調な運転成績を示している。

## 1. 緒 言

最近のシリコン整流器の発展はまことにめざましいものがある。整流素子の製造技術の進歩に伴い、信頼度が増大し、大容量素子が量産されるようになった。この結果シリコン整流器の用途は低電圧電解用のみならず、車両用、電鉄用などにも拡大されてきた。

特に取扱いが簡単で、起動時間が短かく、寸法、重量の極端な切詰めが要求され、かつピーク負荷も電鉄用ほど大きくない車両搭載用整流器は今後シリコン整流器の有望な分野と考えられており、早くから各国で試作、試運転が行われ、問題点の究明への努力が続けられている。

諸外国の例としてはすでに 1955 年以来イギリス国鉄において水銀整流器式交流電車の水銀整流器をゲルマニウム整流器、続いてシリコン整流器に置換えて試運転が続けられている。この運転結果はすぐれた成績を示し、半導体整流器は車両用として本質的問題のないことが明らかにされたと報じられている<sup>(1)</sup>。またドイツにおいてもシリコン整流器を搭載した交流電気機関車の試験が行われている<sup>(2)</sup>。

一方わが国においては一昨年始めて仙山線において交直両用電車用シリコン整流器の試験が行われ、好成績を示した<sup>(3)</sup>。続いて昨年は初の国産整流素子を使用した同一容量のシリコン整流器を製作し<sup>(4)</sup>、現在仙山線において長期試運転が続けられているが、整流素子の事故はまったくなく優秀な運転成績を示している。

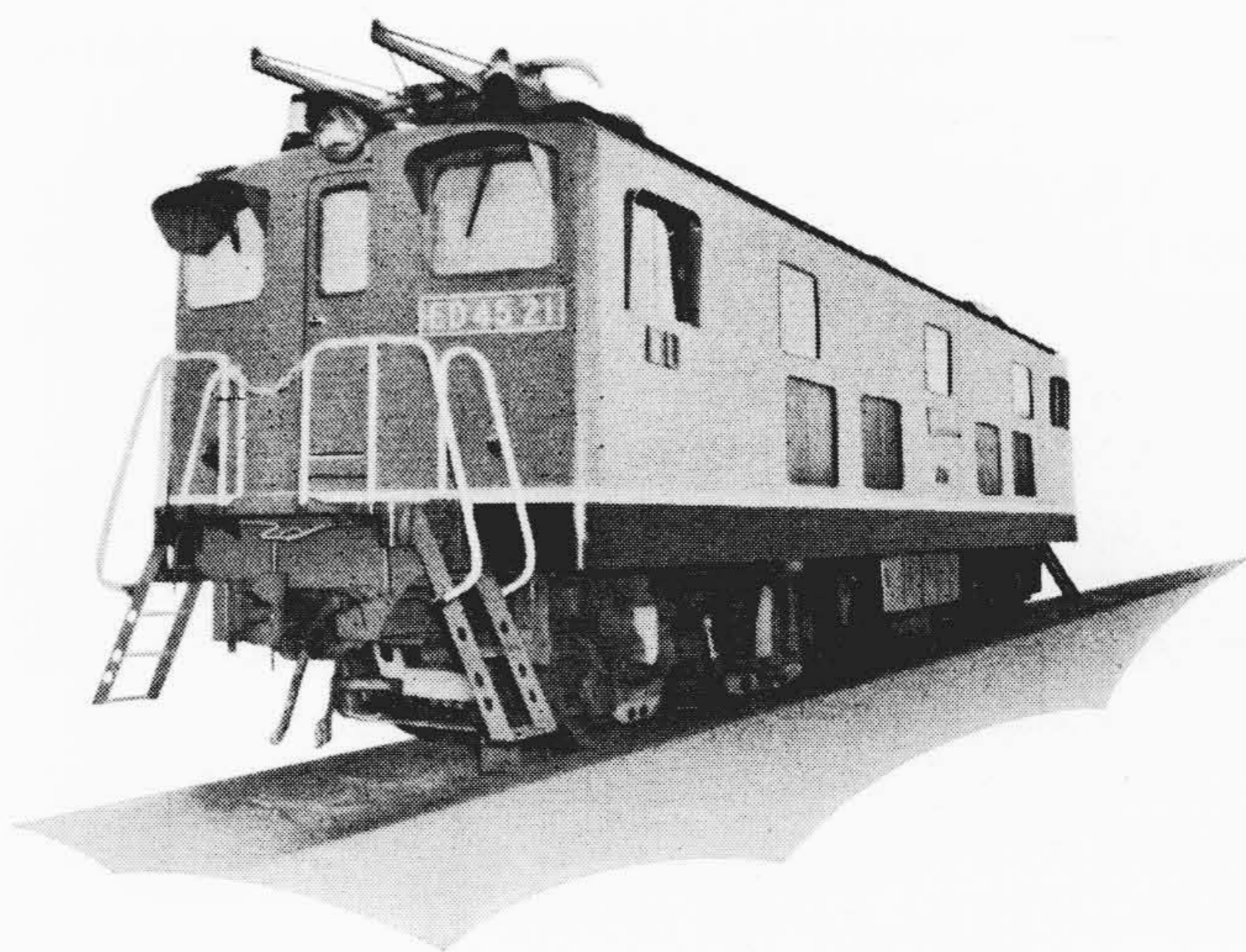
今回日立製作所はこれらの経験を基にして、本格的な交流電気機関車用シリコン整流器の試験を行うため、仙山線交流電気機関車 ED 4521 用シリコン整流器を製作した。これは既納水銀整流器を取はずしたあとに取付けて使用される。このシリコン整流器は、わが国最初の交流電気機関車用シリコン整流器であるばかりでなく容量においては世界的記録品であり、この試運転は昭和 35 年春より約 1 箇年にわたって行われる見込みである。第 1 図に機関車外観を、第 2 図にシリコン整流器外観を示す。

## 2. 水銀整流器との比較

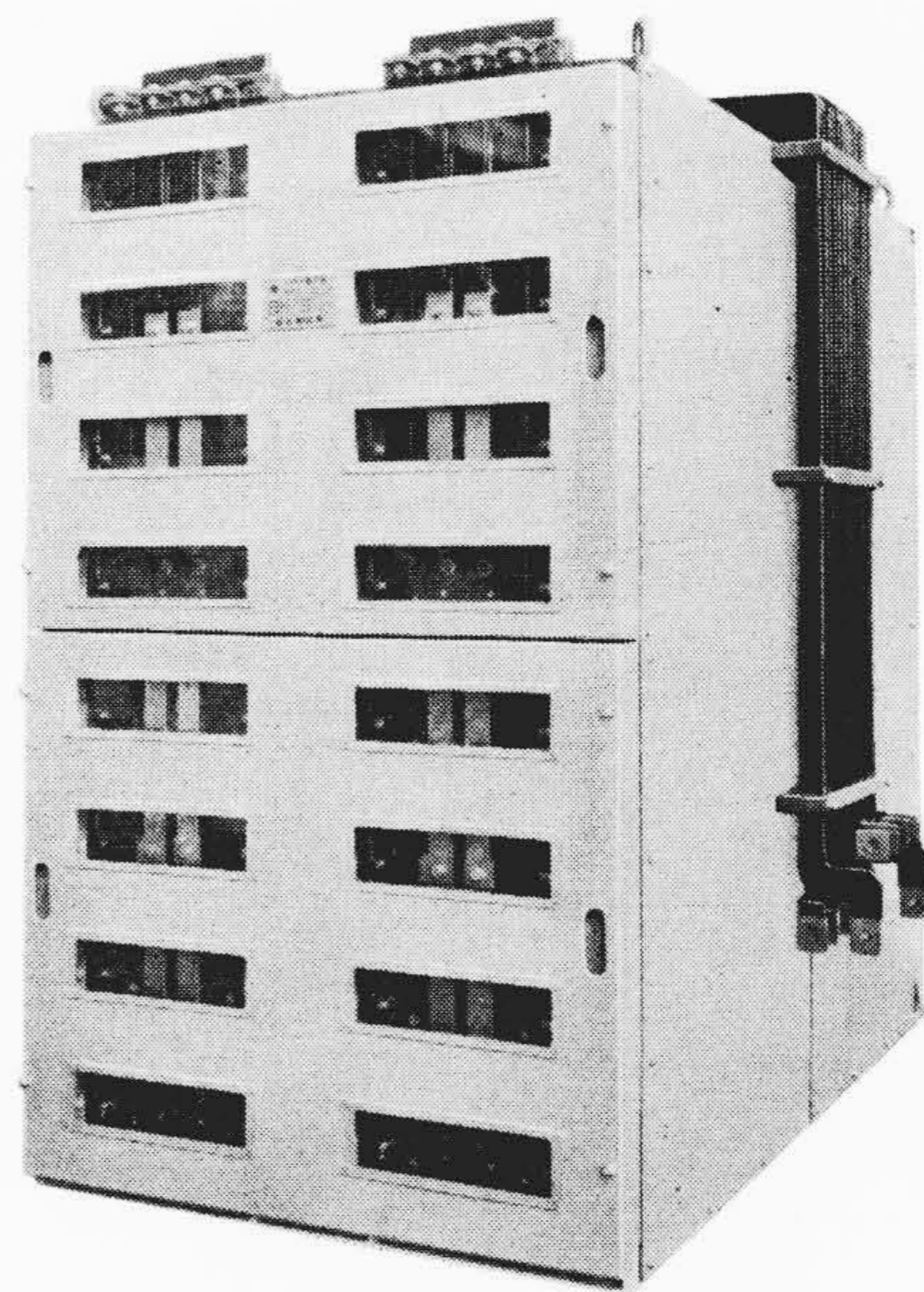
従来整流器式機関車にはすべて水銀整流器が使用されてきた。交流電気機関車用としてシリコン整流器を考えた場合、その特長を水銀整流器と比較すると次のようになる。

- (1) 構造簡単で取扱が容易である。
- (2) 予熱装置を必要とせず、起動時間が短縮される。
- (3) 付属装置が少なく保守が容易である。

\* 日立製作所日立工場



第 1 図 交流電気機関車 ED 4521 外観



第 2 図 交流電気機関車 ED 4521 用シリコン整流器外観

車両用整流器は安全運転の確保という使命上特に構造が簡単かつ強固で取扱いの容易なことが要求される。この点シリコン整流器は整流素子が本質的に堅固な構造をしているばかりでなく、点励弧制御装置、温度制御装置などを必要としないのできわめて有利である。



(4) 配置の自由度が大きい。

整流器式機関車は粘着性能がすぐれているため重量が小さくてすみ、したがって積載機器は極端な寸法、重量の切つめが要求される。シリコン整流器は素子の単位寸法が小さく、したがって配置の自由度が大きく、また温度分布を問題としないので冷却方式を自由に選択できるので、許容空間を十分に生かし、重量を軽減した設計が可能である。

(5) 直列数が多いので、アームの短絡は実際上問題とならない。

水銀整流器においては逆弧は本質上さけられぬものであり、逆弧発生時の保護は重要な問題である。しかしシリコン整流器においては単位容量が小さいので直列数が多く、直列全整流素子の Break down 以前に素子の事故検出が可能であり、アームの短絡は実際上問題とならない。これは他アームの整流器のみならず、主電動機の負担を大いに減ずることになる。

(6) 整流素子の過電圧耐量、過負荷耐量が小さいので、連続定格の大きな整流器を必要とする。

一方シリコン整流素子はインパルス比が小さく短時間過電流容量が小さい。これは整流素子の本質上やむをえぬ問題で、保護上においても種々の考慮を必要とする。しかし問題は使用条件を考慮して設計した結果が経済的に引合うか、重量寸法が制限内に納められるかということである。交流電気機関車用は機関車の粘着限界上過負荷が比較的小さく、また現在のシリコン整流器は素子の特性が著しく改善されたので十分経済性を有するものとなった。

(7) 格子制御の応用による機関車特性の改善が不可能である。

水銀整流器式交流電気機関車においては定電圧制御による機関車粘着性能の改善に格子制御が利用されている。これは特に貨物用機関車の場合問題となる。現在のシリコン整流器ではそれ自体制御は不可能であるが、これに対しては制御極付シリコン整流器の開発、可飽和リアクトルによる自動制御の研究などが問題となっており、将来はこのようなことも可能となろう。

### 3. 計画の概要

ED 4521 は昭和32年に日立製作所が製作した当時わが国最大の

交流エクサイترون機関車であり<sup>(5)</sup>、仙山線において好成績をおさめた。特に水銀整流器は2年間無逆弧という優秀な運転実績をあげた。今回試作したシリコン整流器はこの水銀整流器と交換に取付けて試験するよう計画され、容量はもちろん水銀整流器と同一である。改造項目を必要最小限度に抑えるため主変圧器そのほか主要機器はそのまま使用し、交換したのは水銀整流器および付属装置一式のみである。

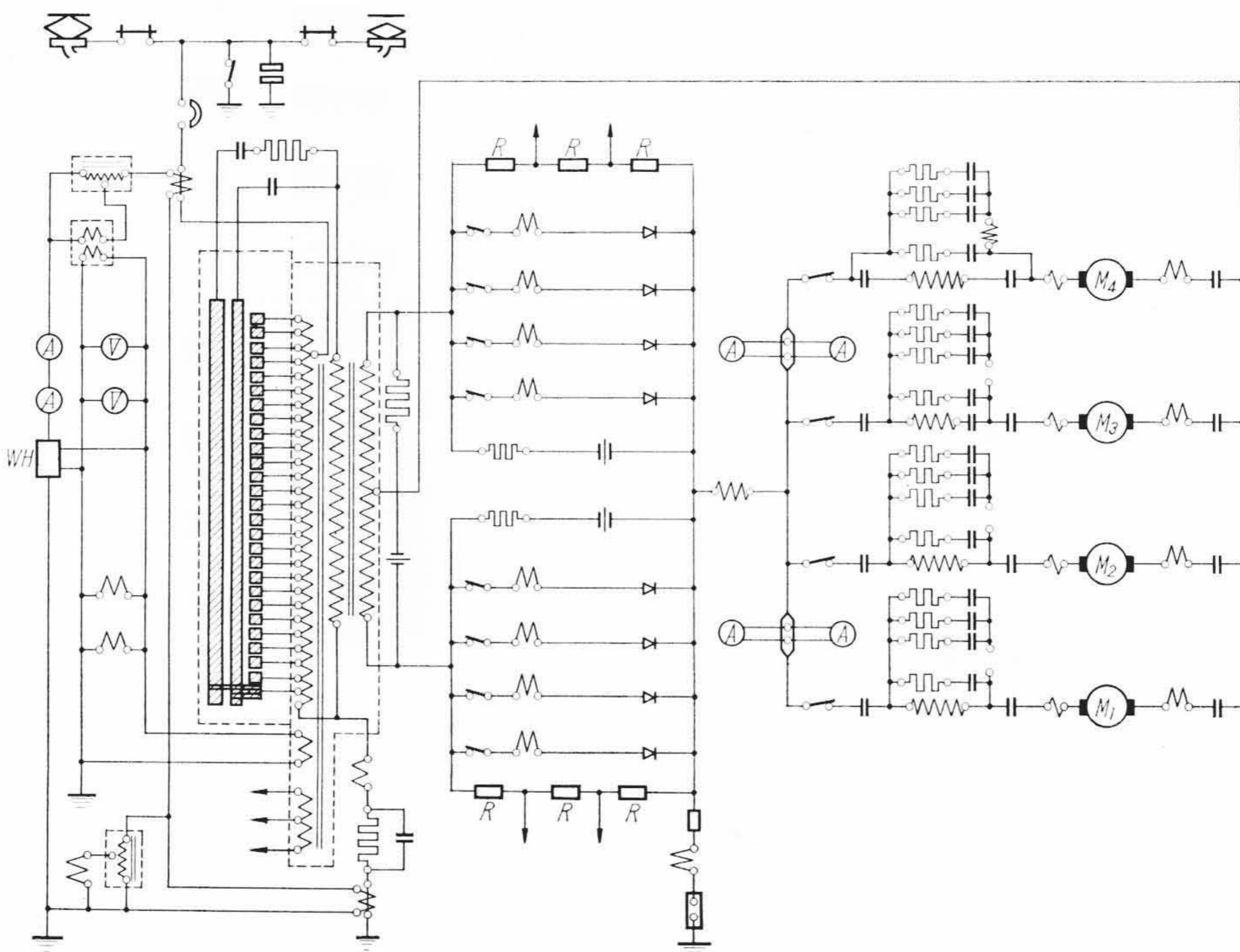
シリコン整流器の仕様は下記のとおりである。

|    |            |
|----|------------|
| 容量 | 1,600 kW   |
| 電圧 | 650 V      |
| 電流 | 2,460 A 連続 |

第1表は機関車仕様、第3図は主回路結線図を示す。

第1表 交流電気機関車 ED 4521 仕様一覧

| 項目             | 仕様                             |
|----------------|--------------------------------|
| 機関車重量 (運転整備)   | 60 t                           |
| 機関車形状          | 箱形両運転室 (デッキ付)                  |
| 最大寸法 (長さ×幅×高さ) | 13,800×2,800×4,085mm           |
| 軸配置            | B <sub>0</sub> -B <sub>0</sub> |
| 固定轴距           | 2,300mm                        |
| ボギー中心間距        | 7,000mm                        |
| 動輪径            | 1,120 (計算 1,080) mm            |
| 電気方式           | 単相交流 20kV, 50~                 |
| 機関車性能          |                                |
| 主電動機台数         | 4                              |
| 連続定格出力         | 1,500 kW                       |
| 連続速度           | 39.8 km/h                      |
| 連続けん引力         | 13,440 kg                      |
| 最高運転速度         | 100 km/h                       |
| 最大けん引力         | 21,000 kg                      |
| 動力伝達装置         | 一段減速パネ入り中空軸式、台車装架              |
| 歯数比            | 82 : 15 (M=10)                 |
| 制御方式           | 高圧タップ切替電圧制御方式                  |
| ノッチ数           | 26                             |
| 最高ノッチ電圧        | 913V                           |
| 制御装置           | 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                         |
| 灯回路電圧          | 直流 24V                         |
| 補機電圧           | 三相交流 200V 50~                  |
| ブレーキ装置         | 空気ブレーキ、手ブレーキ                   |



第3図 ED 4521 主回路結線図



過負荷 4,000 A 2分  
 整流素子  
 形式 SMS 12 D  
 許容尖頭逆電圧 300V  
 インパルス耐圧 400V  
 電流 150A  
 構成 16s×16p×2A  
 冷却方式 強制通風

3.1 整流素子並列数

シリコン整流器整流素子並列数は500tけん引して25%こう配起動時の過負荷に耐えるよう選ばれた。グループ結線を採用しているのでこの場合直流側短絡電流には十分耐えることができる。

3.2 整流素子直列数

整流素子直列数は空気遮断器、断流器などの開閉サージおよび雷サージの移行率などを考慮して決定された。なお異常電圧の大きさを低減するため各アームに並列にサージアブソーバが接続されている。

3.3 保護方式

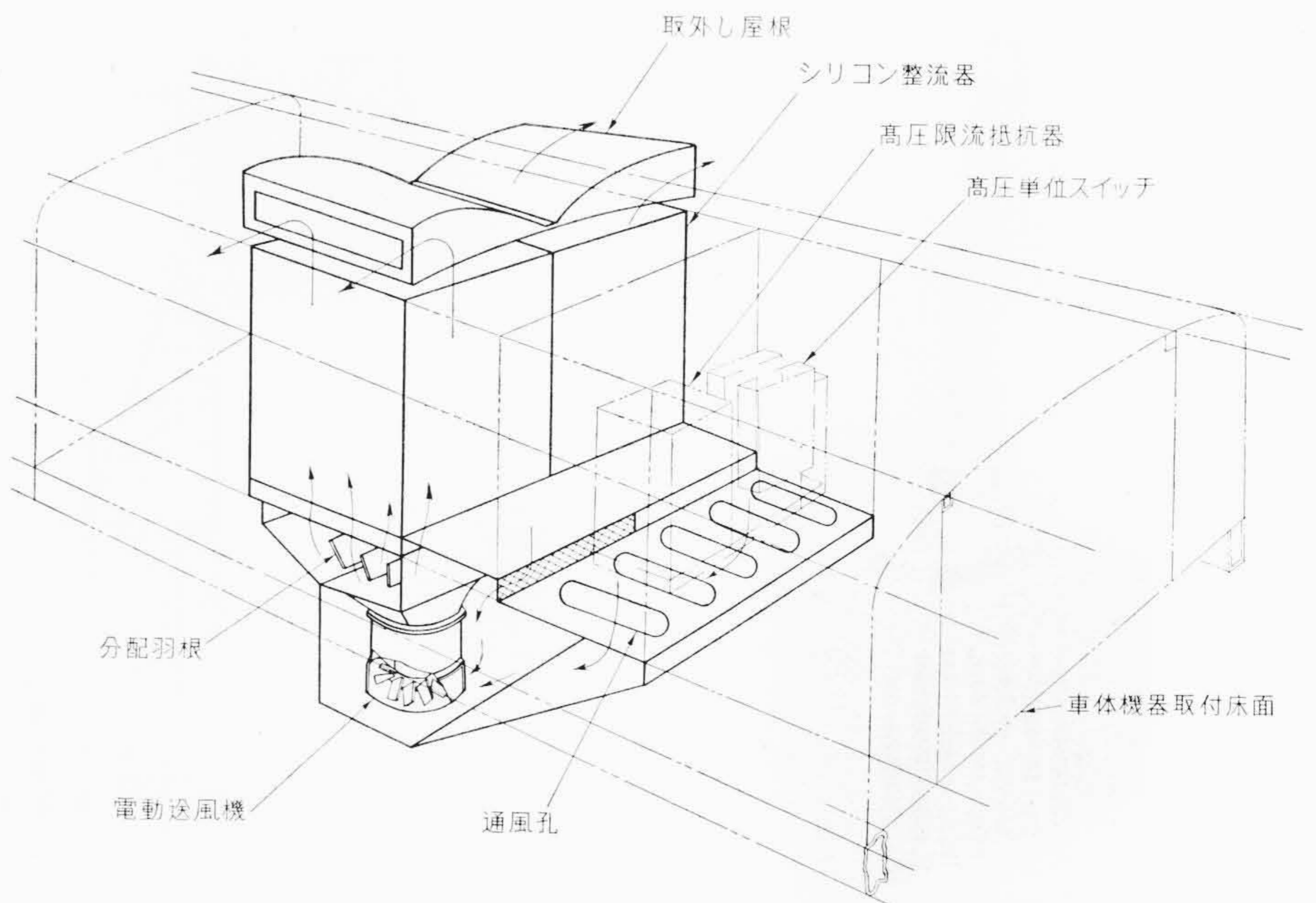
車両用整流器は取扱の簡便なことが強く望まれ、したがって保護装置もできるだけ簡易化される必要がある。すでに述べたようにこの整流器においては結線方式および並列数の関係から直流側短絡に対しては通常の高速度継電器および空気遮断器で十分保護することができ、また直列数が多いから素子の劣化さえ早期に検出すればアームの短絡に対する保護装置は特に必要としない。一般にはアームの短絡保護用として高速度ヒューズが用いられるが、これは車両用としては保守上好ましくない。以上の理由により保護機器は高速度過電流継電器および素子の故障検出装置のみとして簡明化をはかった。故障検出装置は交直両用電車整流器用として実績を出したものと同様で素子の分担電圧の低下を検出してランプ表示を行う。

4. シリコン整流器

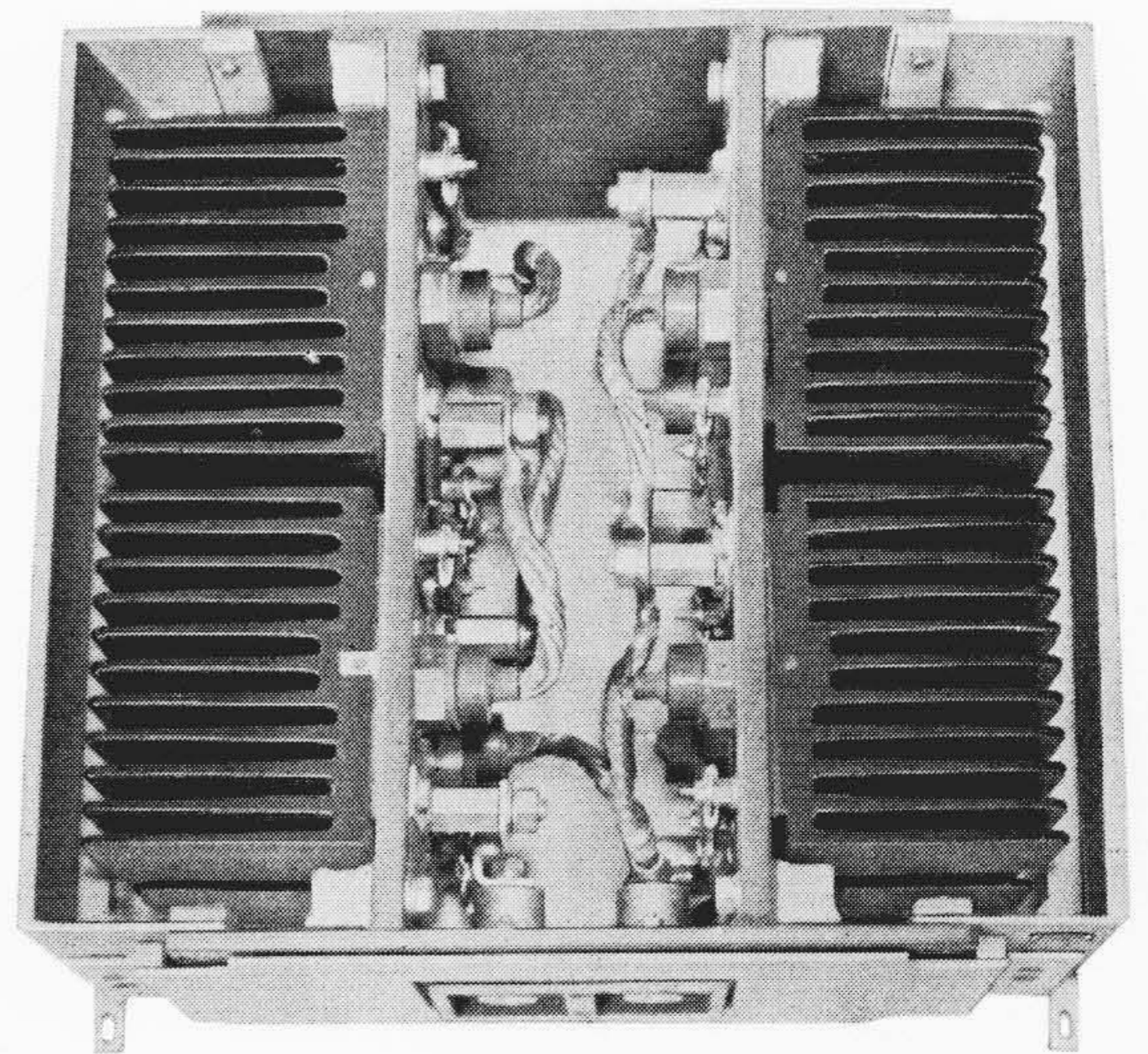
4.1 構造

シリコン整流器は水銀整流器と交換して取付けられるため本体は床上配置とし、冷却扇は床下取付けとした。冷却空気は車内より高圧機器室床穴を経て風道より吸込まれ、整流素子を冷却後、屋根より吐出される(第4図参照)。整流素子の取付けには点検の便をはかるためトレイ式を採用した。トレイには整流素子、冷却片、分圧抵抗などを収納している。トレイは車内で引出し交換可能なるよう、前後2段式とした。この両トレイで直列素子列を構成し、前トレイの正面で並列に接続される。また前トレイの正面には素子の故障表示ランプが取付けられてあるほか点検端子が設けられており、点検の便をはかってある。第5図にトレイ、第6図にトレイ正面を示す。

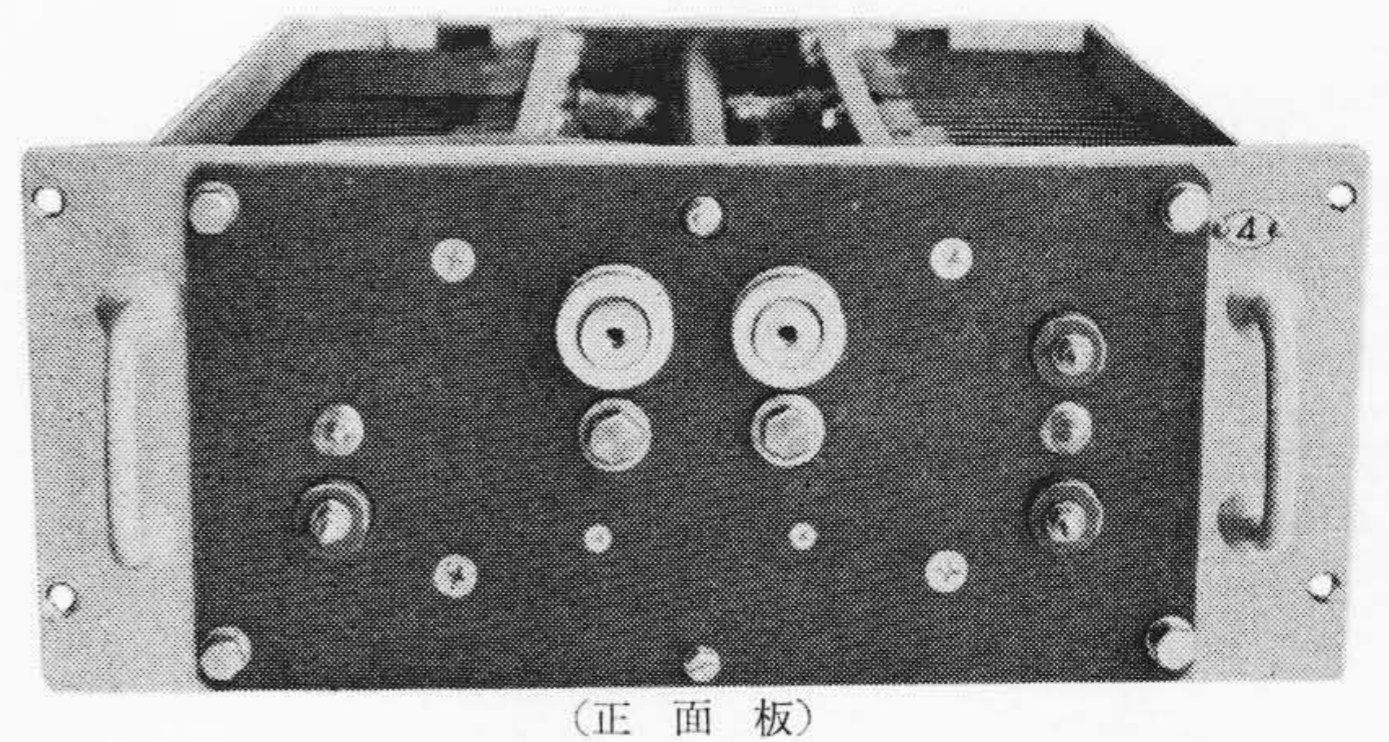
冷却上問題となるのはほこりの付着および冷却のアンバランスである。ほこりには鉄粉を多量に含んでおり、絶縁をおびやかす。このため絶縁距離が小さく、かつあまり冷却空気を必要としない整流素子はその取付部分を仕切って Air Filter を通した空気で冷却し、一方冷却片部には十分な空気を通す構造とした(第5図参照)。または冷却扇が取付け上偏心した位置にあるので(第4図参照)、中間風道にガイドを設け、これを調整して風量のバランスをはかった。この結果十分バランスした良好な冷却効果をうることができた。



第4図 シリコン整流器通風説明図



第5図 シリコン整流器トレイ

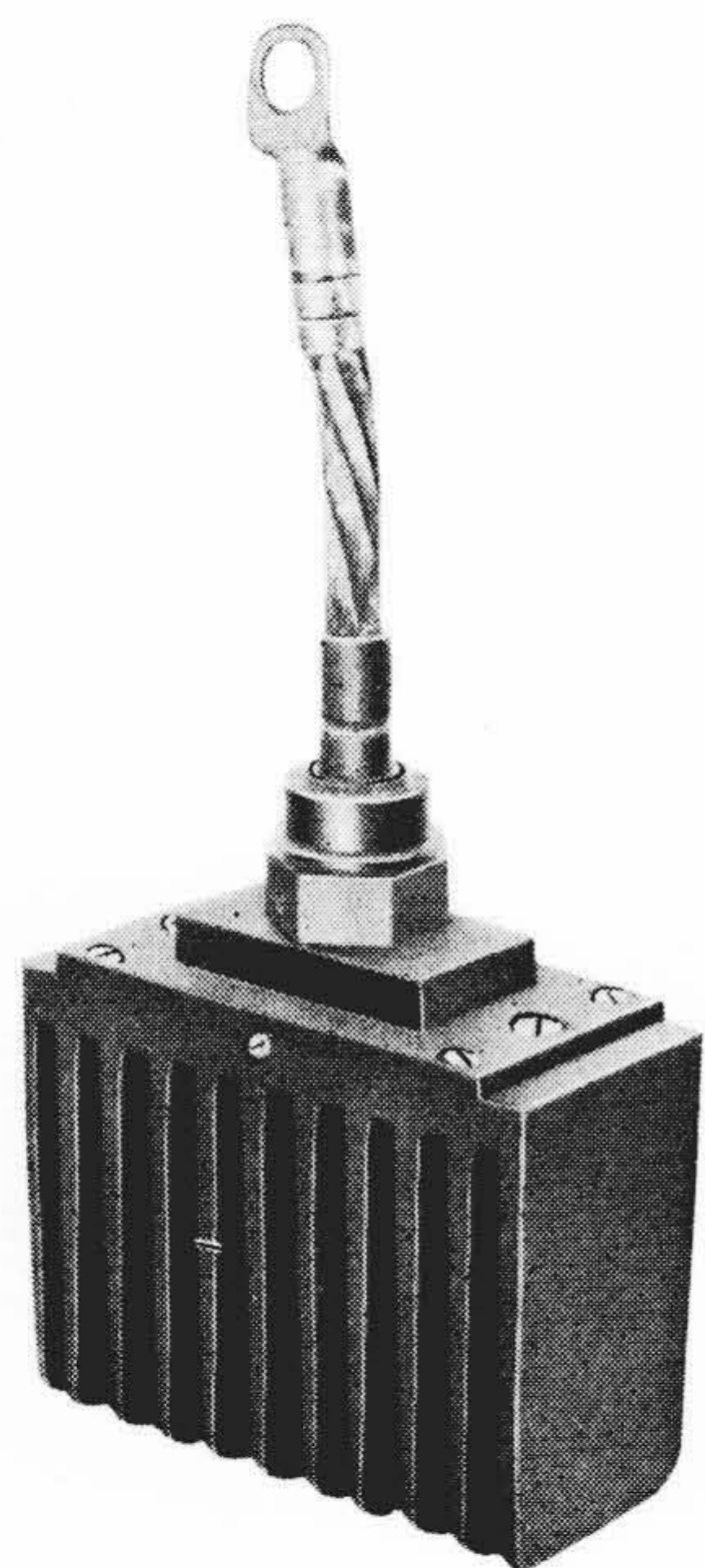


(正面板)  
第6図 シリコン整流器トレイ

4.2 シリコン整流素子

日立製作所は、いち早くシリコン整流素子の国産化に着手し、昨年5月300V 50A素子を使用した電車用シリコン整流器を完成した。その後引き続き試作研究を重ねて整流素子の大容量化、逆耐電圧の向上に努め、150A、200A、300A素子を次々と完成した(第7、8図参照)。その標準仕様を第2表に示す。これらシリコン整流素子の特性はきわめて優秀なものであり、欧米諸国の製品に比しまると





第7図 PIV 300V 150A シリコン整流素子および冷却体



左より 50 A, 200 A, 300 A 整流素子  
第8図 日立標準シリコン整流素子

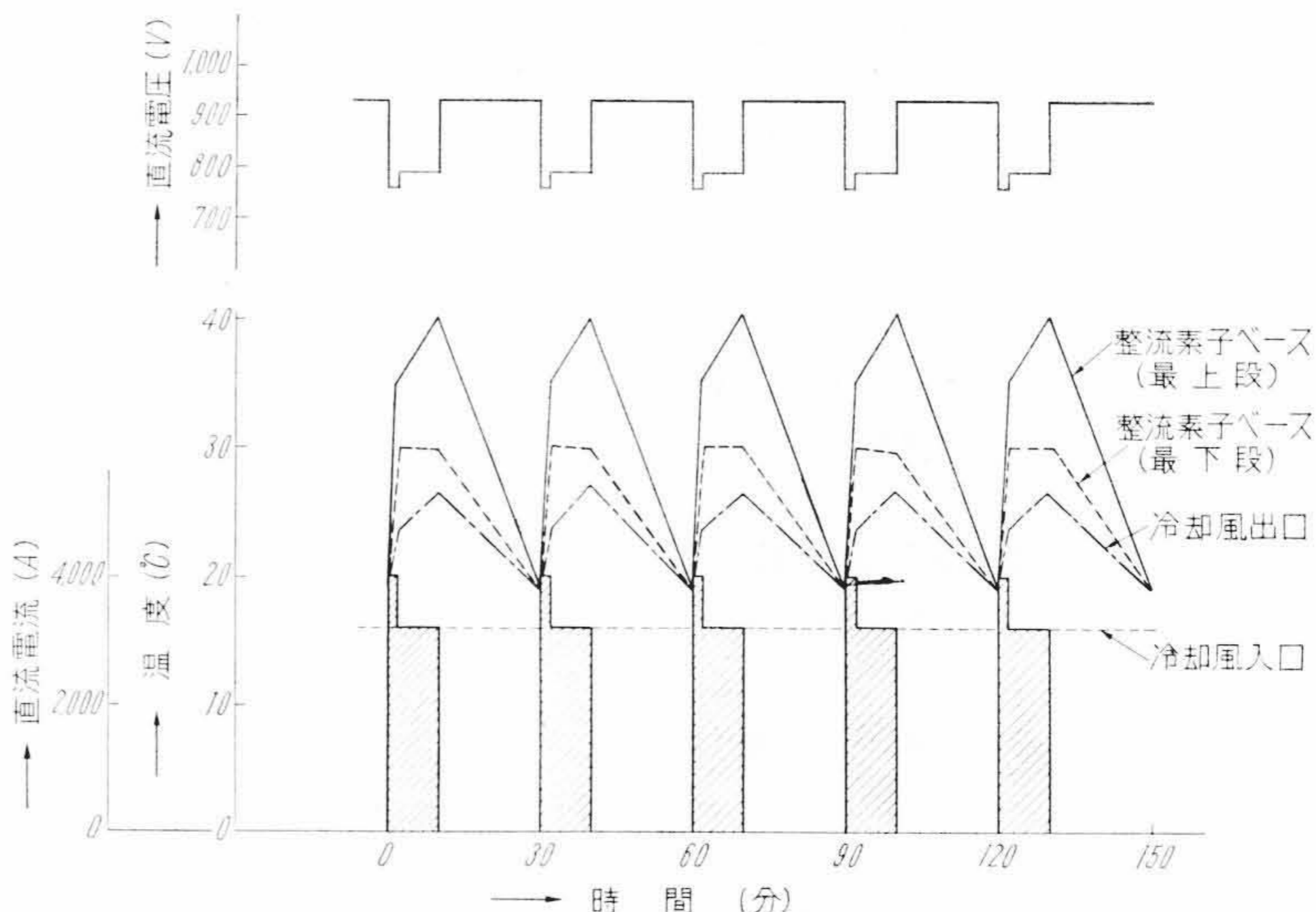
第2表 日立シリコン整流素子標準仕様

| 形 式                     | SN 14 F | DJ 11 L | DH 11 L |
|-------------------------|---------|---------|---------|
| 最大許容ピーク逆電圧 (PIV)        | 500V    | 1,000V  | 1,000V  |
| 最大許容瞬時逆電圧               | 600V    | 1,200V  | 1,200V  |
| 定 格 電 流                 | 50A     | 200A    | 300A    |
| 順 方 向 電 圧 降 下           | 1.1V    | 1.1V    | 1.1V    |
| 1~ 許 容 過 電 流 (交流半波ピーク値) | 860A    | 4,400A  | 6,000A  |
| 最 高 動 作 温 度             | 150°C   | 150°C   | 150°C   |

も劣らぬものである。これらの整流素子の納入運転数はすでに数万個に達しており、しかも現在までに劣化あるいは破壊したものは皆無であり、日立製シリコン整流素子の信頼度がきわめて高いものであることを示している。

日立製シリコン整流素子の特長としては特に次のことがあげられる。

- (1) ジャンクションの逆耐電圧が高く、定格電圧は十分の余裕を有している。
- (2) 封かん部の沿面絶縁距離が大きく、ほこりの付着などによる沿面せん絡の心配がない。



第9図 こう配起動想定負荷試験結果

- (3) 気密封かんは最新の技術によるもので、きわめてじょうぶであり、寿命が長い。
- (4) 電流に対しても十分な容量を有している。
- (5) 特殊構造の採用により、外部から加えられる機械的衝撃に対しきわめてじょうぶな構造となっているので、電鉄用そのほか過酷な使用条件に十分耐える。
- (6) ジャンクションの熱ひずみを吸収する構造となっており、電鉄用のように急激な間欠的ピーク負荷に対しても十分な信頼度を有している。

本器に使用されたシリコン整流素子は、最大許容ピーク逆電圧300V、最大許容瞬時逆電圧400V、定格電流150Aである。この整流素子は車両に使用するため約4g、10~の連続振動試験および1,000gの衝撃試験を行ったが、いずれの試験にも完全に耐えることが明らかとなり、機械的になんら問題のないことが立証された。また本器と同種の整流素子を使用したシリコン整流器は35年1月末ですでに2,000時間以上の実績を有しており、劣化は全くなく、高い信頼度を示している。

なお現在量産中の1,000V、300A整流素子が使用されれば、本器はさらに小形化される。

### 5. 試験結果

シリコン整流器にとって過度の温度上昇、事故電流、異常電圧は最も警戒を要するものであり、この点を明確にするため慎重な試験を行った。

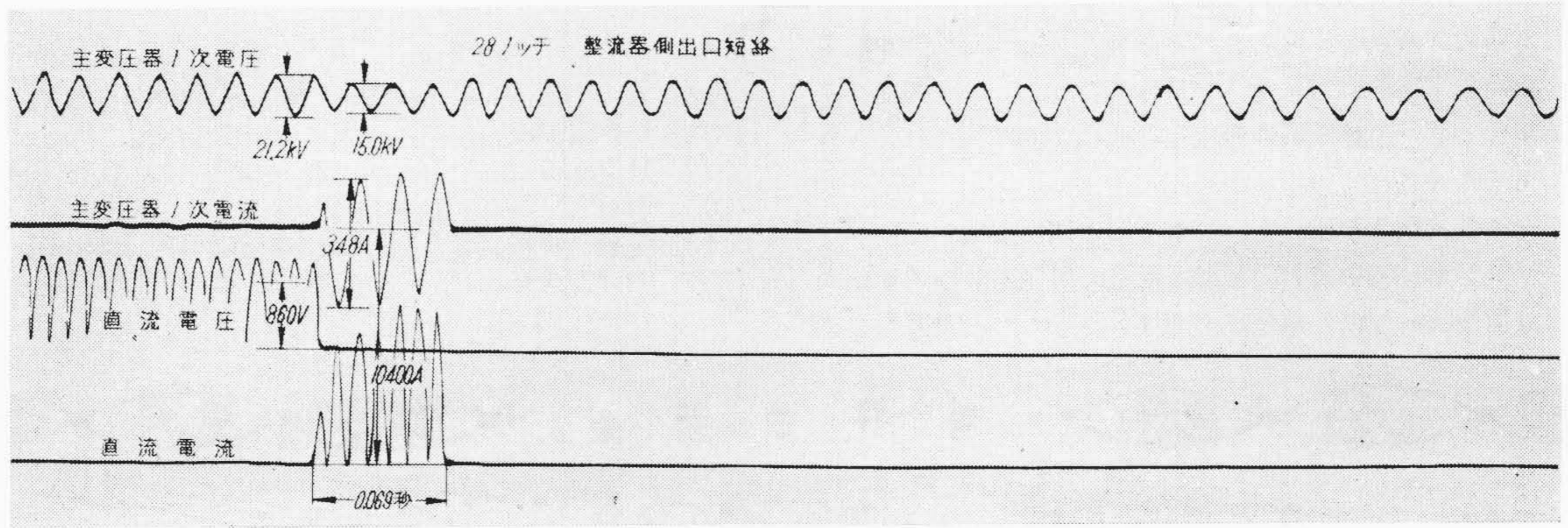
#### 5.1 温度上昇

温度上昇を適当値に抑えるためには負荷電流および冷却空気のパランスが必要であるが、測定の結果いずれも許容範囲内にばらつきが納められていることが確認された。第9図に負荷試験の結果を示す。これは25%こう配起動時を想定して行ったものであり、温度上昇に十分余裕のあることがわかる。

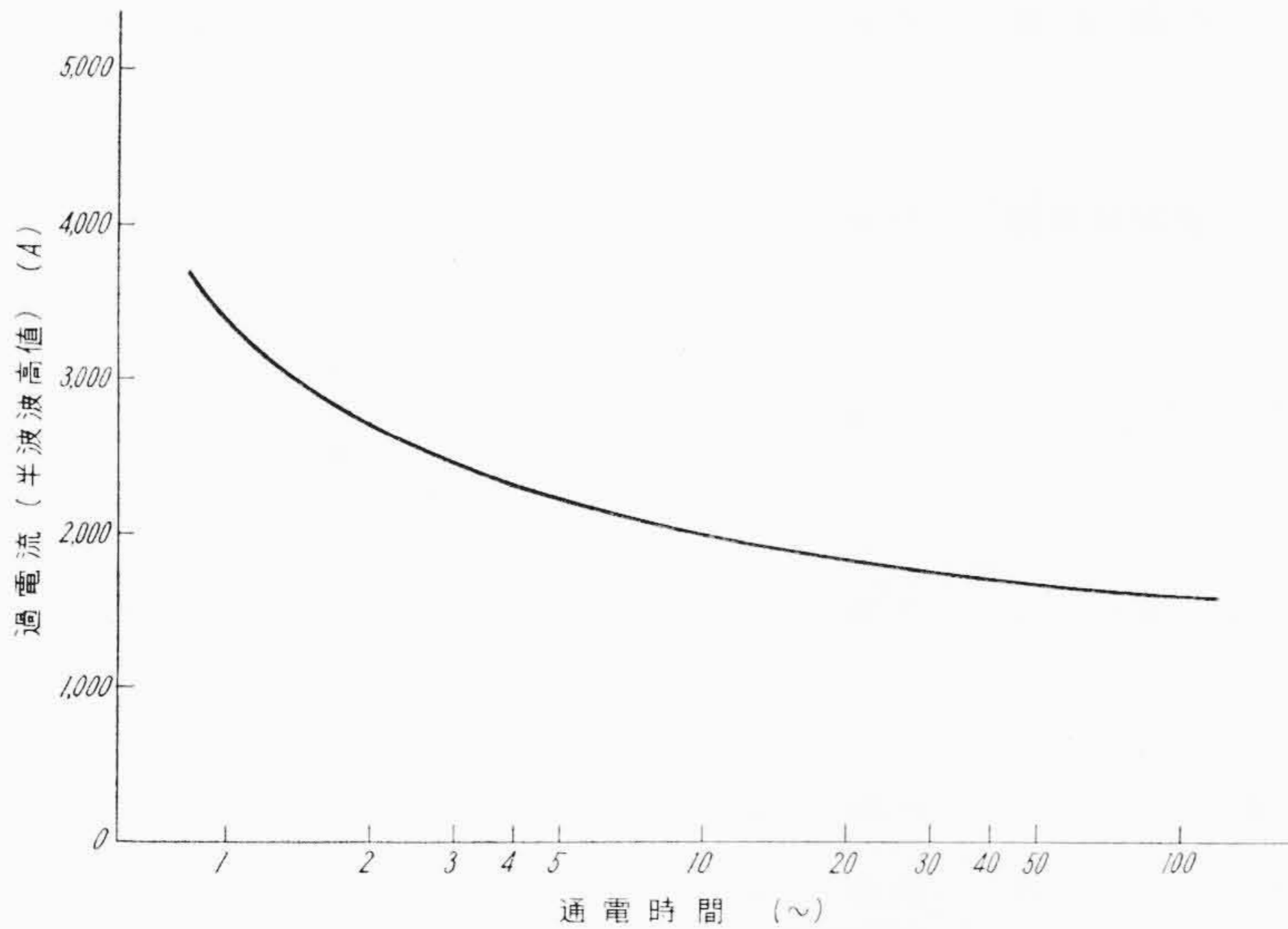
#### 5.2 事故電流

次にシリコン整流器の直流側短絡に対し、保護協調がとれていることを確認するために行った試験結果を示す。第10図はED4521機関車の直流側短絡試験結果のオンログラムであり、また第11図は本器に使用した整流素子の短時間過負荷特性を示す。これらの試験結果および整流素子並列数から考えて、本シリコン整流器は十分直流側短絡電流に耐えることが明らかである。

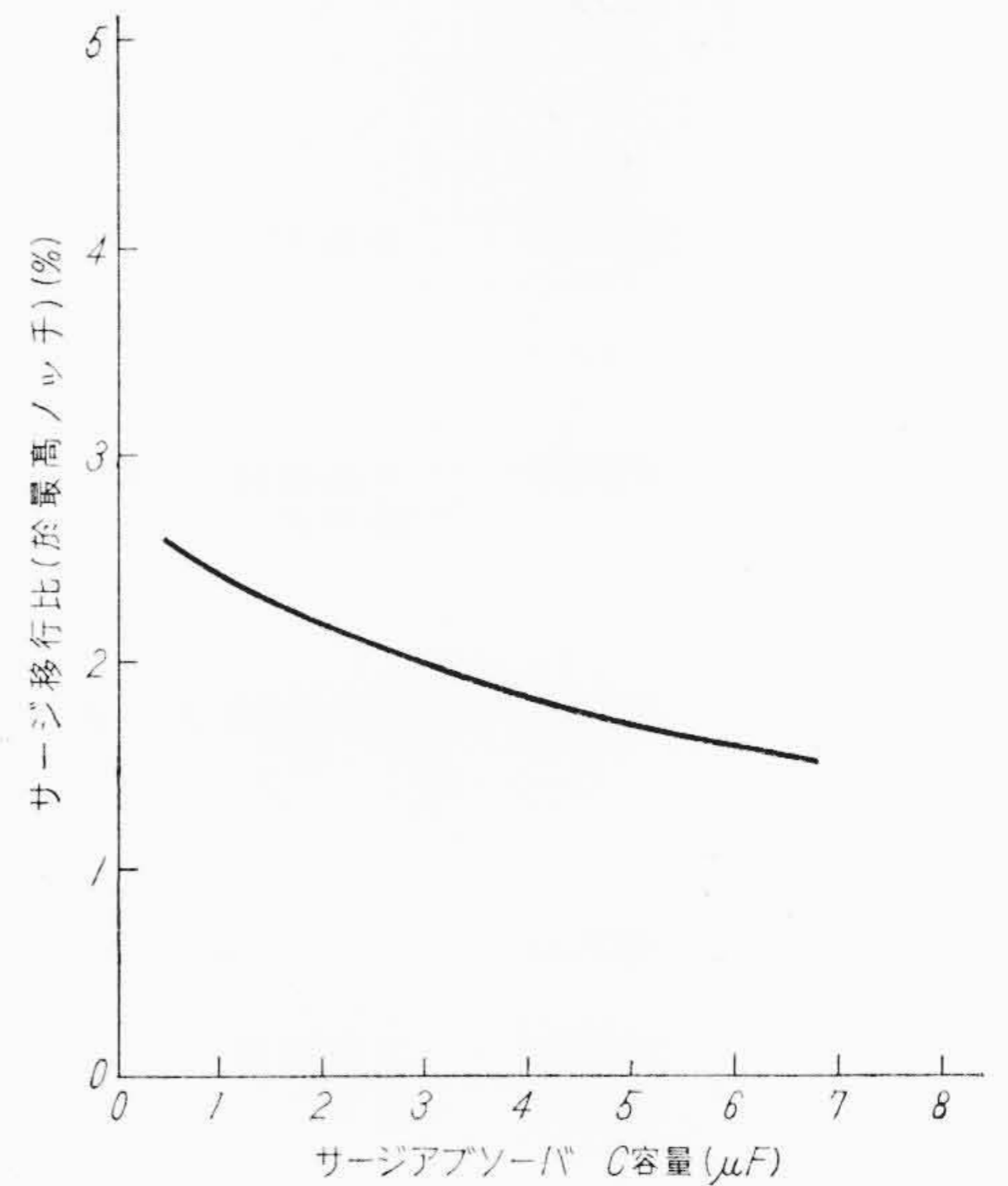




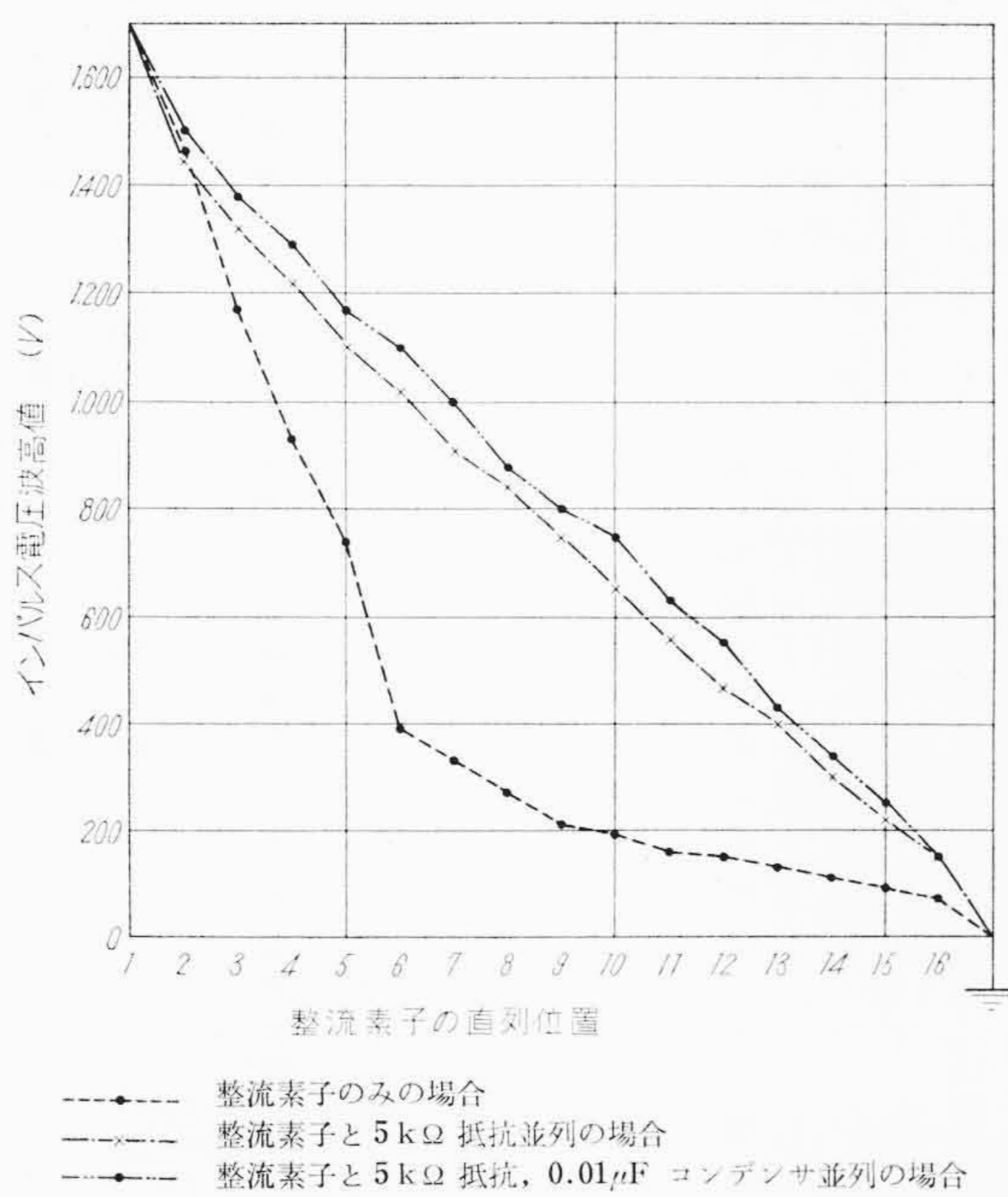
第10図 直流短絡試験オシログラム



第11図 150Aシリコン整流素子短時間過負荷特性



第13図 サージアブソーバのコンデンサ容量とインパルス移行比の関係



第12図 直列シリコン整流素子インパルス電圧分布

### 5.3 異常電圧

すでに述べたように、シリコン整流器は過電圧に対し敏感であり、またインパルス比が小さい。このため整流素子の電圧分担、雷サージの移行比、開閉サージの大きさなどは慎重に調べなければなら

い。電圧分担の平衡をはかるため無誘導形並列抵抗を使用し、電圧分担のばらつきを10%以内に抑えているが、過渡時の電圧分担もこれで平衡させることが実験的に確かめられている(第12図)。雷サージの移行比を小さくするためサージアブソーバを使用しているが、コンデンサ容量と移行比との関係を第13図に示す。この移行比および一次避雷器の制限電圧から雷サージに対しては十分安全であることが確認された。また開閉サージは車両空気遮断器により生ずるものと、直流側断流器から生ずるものがあるが、試験の結果、両者とも問題ないことが確認された。実際にはさらに変電所の開閉サージが大きな問題であるが、これは現地測定結果にまたねばならぬので、現車にクリドグラフを積載し、異常電圧の測定を行うことになっている。

### 6. 結 言

交流電気機関車用整流器として、シリコン整流器が信頼性を有し、将来有望であることが確認された。本シリコン整流器はわが国最初の交流電気機関車用シリコン整流器であり、容量においては世界的記録品であるが、シリコン整流器の特長を生かし、技術的諸問題を克服して完成された。目下仙山線において営業運転に使用され、好調な運転成績を示しており、今後の交流電化の進歩に貢献するところ大なるものがある。今後は単位整流素子の大容量化に伴い、整流



素子数は減少し、寸法、重量はさらに縮減されるであろう。その場合は保護装置も新しい観点から検討される必要がある。機関車粘着性能の改善のため電圧制御をシリコン自体で行うことは不可能であるが、制御極付シリコン整流器の発達その他により解決されるべき問題として将来に残されている。

以上試作交流電気機関車用シリコン整流器の概要を述べた。

なお本シリコン整流器の設計、製作にあたっては国鉄臨時車両設計事務所、鉄道技術研究所、運転局の関係各位よりご指導をたまわ

り厚くお礼申しあげる。

参 考 文 献

- (1) J. A. Bronghall and J. C. Read: The BEAMA Journal 151 (1958)
- (2) H. Zenneck: Siemens Zeitschrift 32, 172 (1958)
- (3) 曾根田, 金原, 森田: 日立評論 41, 353 (昭34-3)
- (4) 毛利, 曾根田: 日立評論別冊 32, 41 (1959)
- (5) 河井, 浅野他: 日立評論別冊 20, 4 (1957)



特 許 と 新 案

最近登録された日立製作所の特許および実用新案

(その5)

(第38頁より続く)

| 種 別     | 登録番号   | 名 称                      | 工 場 別 | 氏 名  | 登録年月日     |
|---------|--------|--------------------------|-------|--|-----------|
| 特 許     | 259563 | ダイヤルパルス桁切換回路装置           | 戸塚工場  | 高安井立 田昇平 田文義 藤足順 田昇平 田文義 藤足順 田昇平 田文義 藤足順 田昇平 田文義 藤足順 | 35. 2. 20 |
| "       | 259564 | 多数対多数のコンネクタ用空選択回路装置      | 戸塚工場  | 高安井立 田昇平 田文義 藤足順 田昇平 田文義 藤足順 田昇平 田文義 藤足順 田昇平 田文義 藤足順 | "         |
| "       | 259565 | 共通制御式自動交換番号群回路の空番号話中試験方式 | 戸塚工場  | 高安井立 田昇平 田文義 藤足順 田昇平 田文義 藤足順 田昇平 田文義 藤足順 田昇平 田文義 藤足順 | "         |
| "       | 259566 | 共通制御式自動交換番号群回路の接続方式      | 戸塚工場  | 高安井立 田昇平 田文義 藤足順 田昇平 田文義 藤足順 田昇平 田文義 藤足順 田昇平 田文義 藤足順 | "         |
| "       | 259570 | パルス通信における送信雑音消去方法        | 戸塚工場  | 真竹利内 浦野武正 藤万正 藤万正 藤万正 藤万正 藤万正                        | 35. 2. 24 |
| "       | 259571 | 2価関数の二つの価の代数的差の指示装置      | 戸塚工場  | 三伴江佐 北川公義  | "         |
| "       | 259569 | 蛍光体                      | 中央研究所 | 野本藤正 野本藤正 野本藤正 野本藤正 野本藤正 野本藤正                        | "         |
| "       | 259683 | 腐食度測定方法                  | 中央研究所 | 北川公義   | 35. 2. 27 |
| "       | 259559 | 空気遮断器                    | 日立研究所 | 高砂常栄   | 35. 2. 20 |
| "       | 259567 | 交流式光電流検出装置               | 日立研究所 | 小前林川 小野邦明  | 35. 2. 24 |
| "       | 259572 | 積算量遠方指示計測装置              | 日立研究所 | 小野邦明   | "         |
| "       | 259573 | 水銀蒸気放電弁の格子制御電圧発生装置       | 日立研究所 | 小野田芳光  | "         |
| 特 許     | 259560 | 蓄電器                      | 本 社   | 市川清司   | 35. 2. 20 |
| 実 用 新 案 | 507057 | 軸受漏油防止装置                 | 日立工場  | 菊地部 弥十郎  | 35. 2. 26 |
| "       | 507088 | 電磁式限時継電器                 | 日立工場  | 高竹品内 礼博  | "         |
| "       | 507090 | 交流発電機の電圧調整装置             | 日立工場  | 高尾井 真治   | "         |
| "       | 507070 | エスカレータの照明装置              | 国分工場  | 酒井 真平  | "         |
| "       | 507071 | エレベーター運転方向選択装置           | 国分工場  | 大塚 喜久雄   | 35. 2. 26 |
| "       | 507086 | 断路器接地安全装置                | 国分工場  | 羽藤 昭一郎   | 35. 2. 26 |
| "       | 507104 | エスカレータ保安装置               | 国分工場  | 神 峯次郎  | "         |
| "       | 507105 | エスカレータ保安装置               | 国分工場  | 神 峯次郎  | "         |
| "       | 507106 | 昇降連動形エスカレータ              | 国分工場  | 原 威  | "         |
| "       | 507073 | 内燃機関を原動機とする鉄道車両の砂撒装置     | 笠戸工場  | 山 大田 道輝 郎雄   | "         |
| "       | 507074 | 内燃機関を原動機とする鉄道車両用動力車の砂箱部  | 笠戸工場  | 山 大田 道輝 郎雄   | "         |
| "       | 507080 | 両側開運搬車の開扉表示装置            | 笠戸工場  | 藤井 健一郎   | "         |
| "       | 507081 | 大荷重運搬車用台車                | 笠戸工場  | 藤 斎田 信之  | "         |
| "       | 507089 | 鎧引                       | 笠戸工場  | 斎藤 辰治  | "         |
| "       | 507091 | 鎧引戸板受機                   | 笠戸工場  | 斎藤 辰治  | "         |
| "       | 507085 | かくはん機                    | 亀有工場  | 寺田 久進  | "         |
| 実 用 新 案 | 507107 | 石炭水力輸送装置の給炭器             | 亀有工場  | 寺田 久進  | 35. 2. 26 |

(第58頁へ続く)