

# 新幹線電车用シリコン整流器および高圧電気品

Silicon Rectifiers and High Voltage Electric Devices for New Tōkaidō Line Electric Cars

川上直衛\* 佐々木威\*  
 Naoe Kawakami Takeshi Sasaki  
 前川愛一\*\* 梅原昭男\*\*  
 Aiichi Maekawa Akio Umehara

## 内 容 梗 概

新幹線用シリコン整流器、主変圧器、平滑リアクトル、空気遮断器は日本国有鉄道のご指導のもとに関係各社と共同設計を行ない、さきに試験した試作車用装置の経験に基づき、その後の技術の進歩も取り入れて最新の設計が施された。シリコン整流素子は300A級、1,300V PIV, 1,600V PIVで、ヒートサイクルに強いことが特長である。1,627kW、1,660Vシリコン整流器はこの素子160個を使用している。主変圧器は1,650kVA、25kVの一次容量で不燃性油入り密封構造である。巻線の絶縁には耐熱性絶縁紙を、タンクには高抗張力鋼板を使用して軽量化を図っている。空気遮断器は車体床下高圧機器箱に収納され、低騒音形である。

## 1. 緒 言

日立製作所は従来車両用として多数のシリコン整流器を国鉄に納入してきた。その総数は約120台、210,000kW、素子数にすれば約23,000個に及んでいる。今回新幹線旅客電车用として180台中96台を受注し、目下、工場において続々完成しており、一部のものはモデル線区で試運転されている。このシリコン整流器の特長は要次のとおりである。

(1) 整流素子は新幹線用として開発されたDJ16形で、従来のものより一段と高耐圧、大電流であり、ヒートサイクルに非常に強い構造となっている。

(2) 試作車の経験を生かし、絶縁構造、冷却方式に改善を加えており、信頼度が著しく向上している。

おもな静止機器としては、主変圧器、限流リアクトルおよび平滑リアクトルである。いずれも試作の成果に基づく、負荷率の検討と設計改良によって合理性をいっそう高め、重量軽減に顕著な効果をあげている。

高圧電気品としては空気遮断器、保護接地スイッチを製作した。空気遮断器は従来のものと異なり床下の高圧機器箱に収納しているのが特長で、小形軽量、低騒音形である。

## 2. シリコン整流器

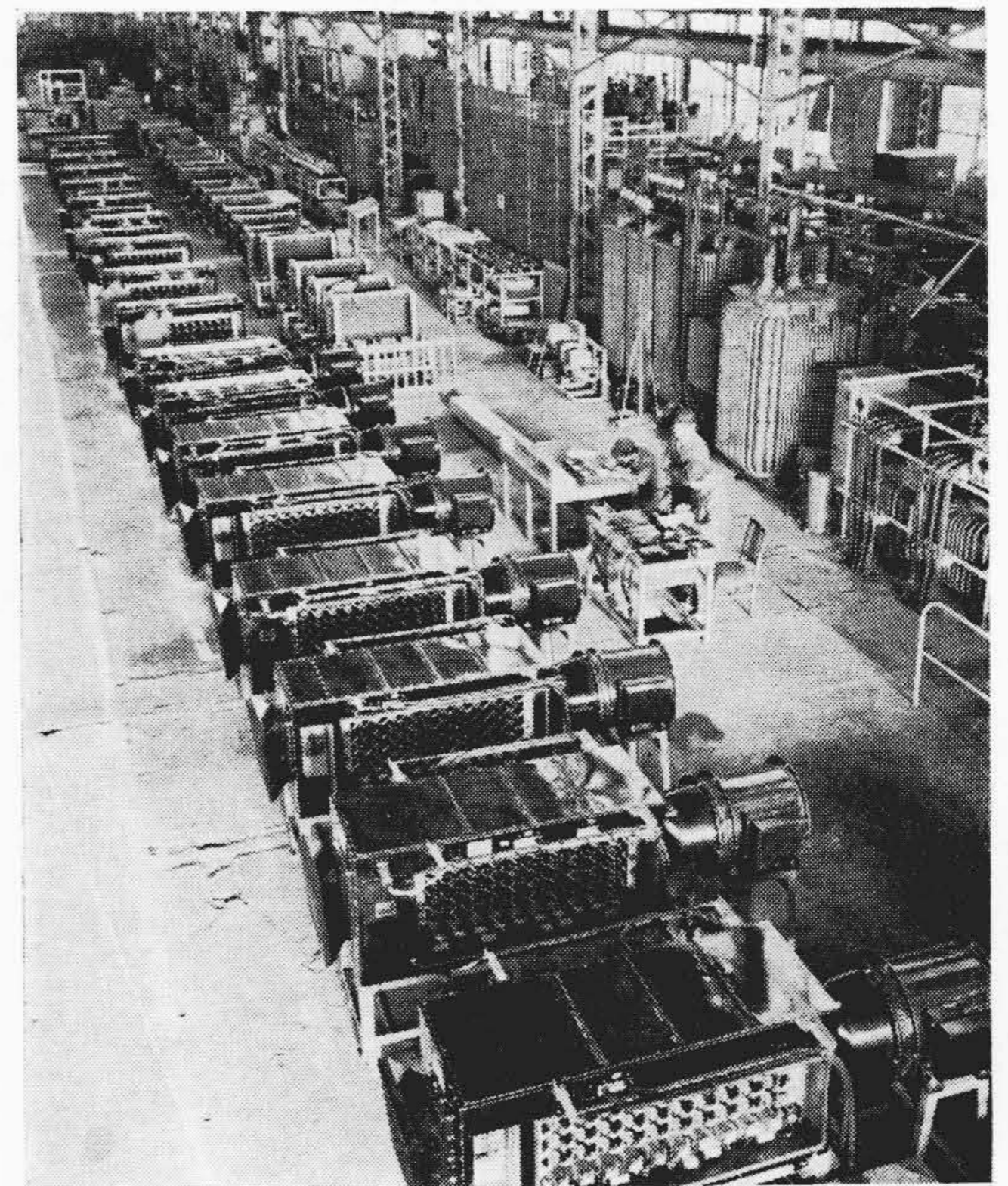
### 2.1 シリコン整流器

整流器の外観を第1図に、内部接続を第2図に示す。仕様は下記のとおりである。

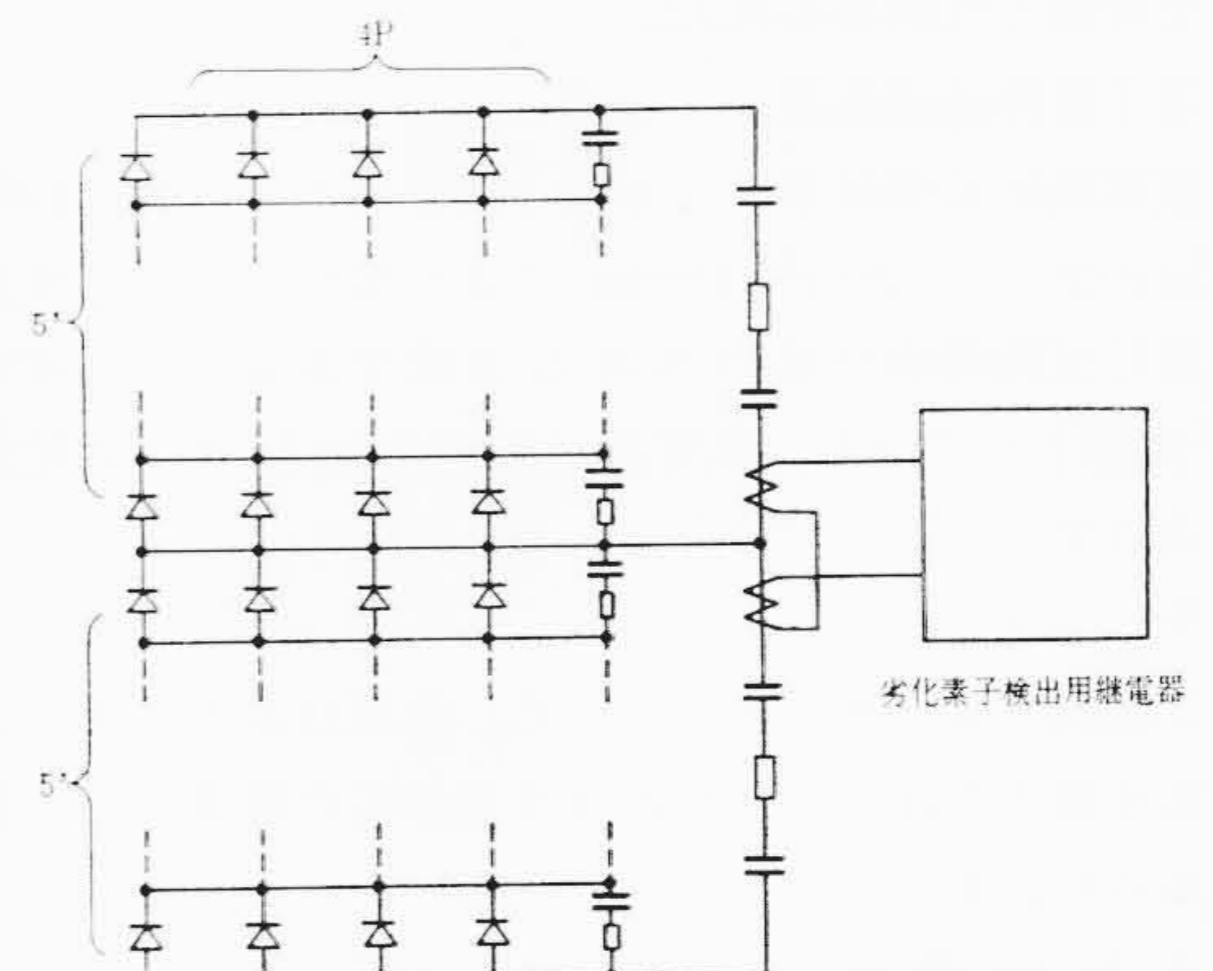
形 式	RS 200 A
容 量	1,627 kW
直 流 電 圧	1,660 V
直 流 電 流	980 A 連続, 1,500 A 8分
周 波 数	60 c/s
冷 却 風 量	45 m <sup>3</sup> /min×2
周 囲 温 度	40°C
素 子 構 成	10 S×4 P×4 A (=160)
結 線	単相ブリッジ結線

#### 2.1.1 素子数の決定

整流素子としては高耐圧でヒートサイクルに強い構造をもつDJ16形素子を使用している(2.2参照)。素子の直列数は主変圧器



第1図 シリコン整流器外観

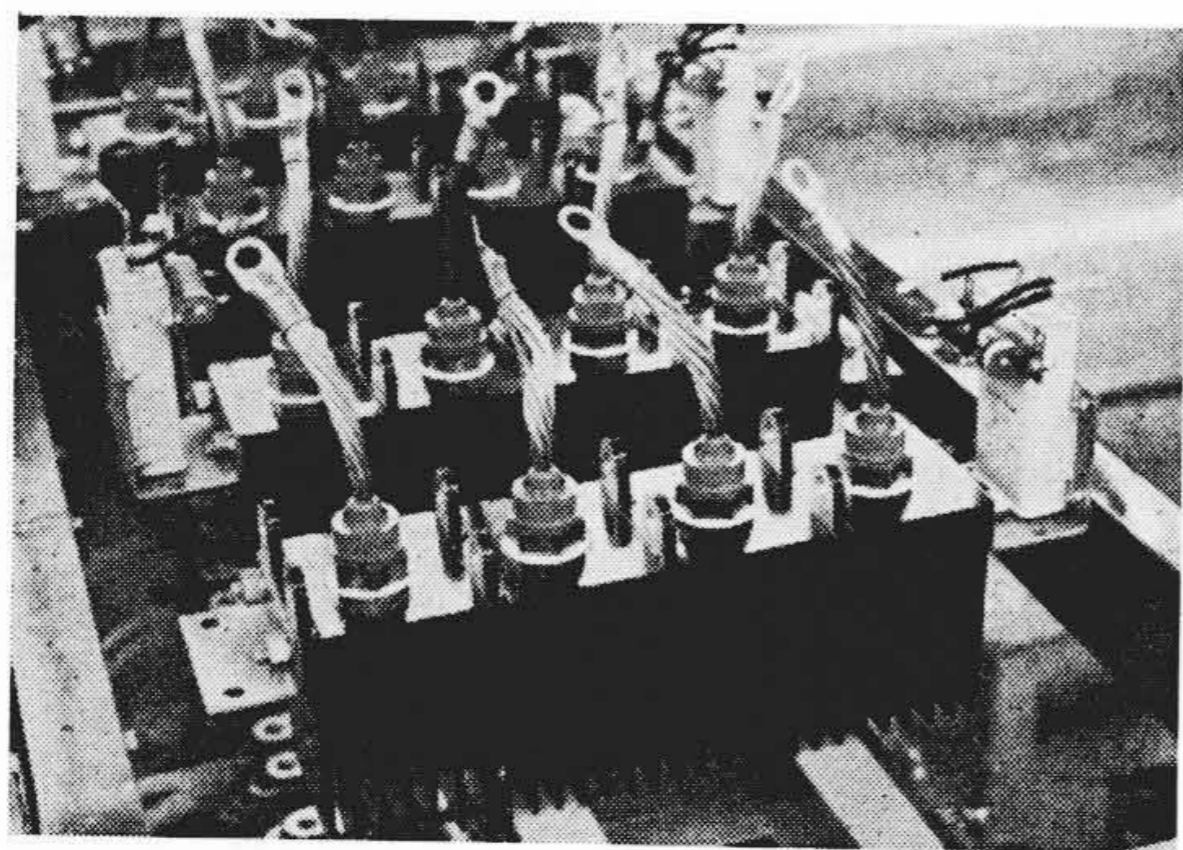


第2図 SRの内部接続図

一次側のアレスタと協調するよう決められた。すなわちアレスタの放電開始電圧または制限電圧で決定されるサージ電圧が主変圧器二次に移行してきても、シリコン整流器がこれに耐えるように素子間の分担電圧のアンバランスを考慮に入れて決めてある。この結果では9Sで十分ということになるが、万一素子がなんらかの原因で1個 Break down しても運転できるようにさらに1S余

\* 日立製作所日立工場

\*\* 日立製作所国分工場



第3図 シリコン整流器用スタック

裕をみて10Sとしてある。素子並列数は関ヶ原付近の20%こう配で起動を行なったときの起動電流1,500A 8分と1回路の主電動機4個が同時に完全せん絡したときの過電流約6,700A 5サイクルとにより4Pと決められた。なお素子の接続方法としては分圧器の数を減少できるメッシュ結線を採用しているため、素子間の電流アンバランスは素子の順方向特性のバラツキを考慮しても±20%以下の見込みである。

### 2.1.2 構造

整流器は2箱にわかれ、それぞれ2アーム分の整流素子および付属品を収納している。付属品としては冷却フィン、分圧器、素子故障検出装置、風速継電器がある。整流器箱は車体床下に進行方向と直角に取り付けられている。ファンは各整流器箱に1個ずつ単独に床下に取り付けられ、整流器箱とは風道を介して接続されている。冷却空気は車側から吸込んで反対側の車側に吐き出される。冷却空気取入口にはエリミネータとフィルタが設けられ、じんあい、雨雪などが侵入するのを防止している。整流素子は並列4個を1体として分圧器を含めてスタック(第3図)を構成し、これを整流器箱に取り付けている。主回路の絶縁方式は車両の床下取り付けという特殊条件を考慮して二重絶縁とした。この絶縁には小形軽量で衝撃に強いエポキシ樹脂が用い子が採用されている。

### 2.1.3 付属装置

#### (1) 分圧器

並列素子4個に対し共通に $4\mu\text{F}+10\Omega$ (直列)を接続してある。定数はサージ電圧の分担、ホール蓄積効果による転流サージの吸収などを考慮して決められた。

#### (2) 素子故障検出装置

素子故障検出装置は各アームに1個ずつ用いられ、直列10Sの中点電位が素子のBreak Downにより変化するのを差動CTにより検出して継電器を動作させる方式である。この継電器にはSCRが使用されている。継電器が動作すれば、車上の配電盤の表示灯が点灯する。

#### (3) ファン

横形2段式プロペラファンである。風圧はエリミネータ、フィルタの風圧損失のほかに車両の高速運転時の境界層の影響をも考慮して決められる。

#### (4) 風速継電器

万一ファンがなんらかの事故により停止しても、素子が過熱により破壊されるのを防止するために設けられている。

## 2.2 整流素子

車両用シリコン整流素子の性能は下記の要求を満足しなければならない。

小形軽量化のために

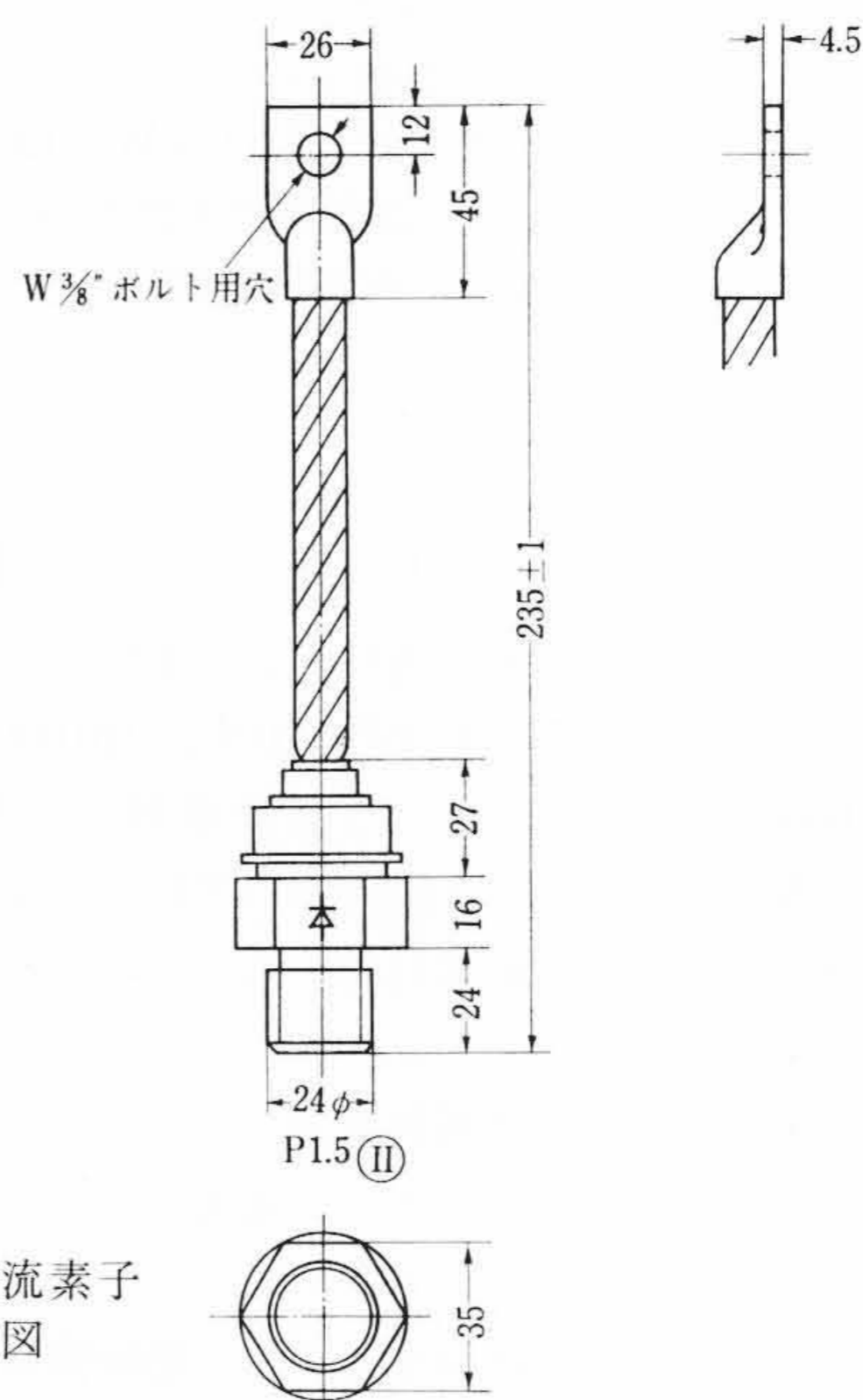
- (1) 逆耐電圧が高いこと。
- (2) 高電流密度における電力損失が小さいこと。

第1表 国鉄標準素子DJ16Mの定格

定格順電流	連続	(A)	280
	40秒	(A)	300
定格サージ電流	15サイクル	(A)	2,800
	5サイクル	(A)	3,600
定格動作逆電圧		(V)	1,300
非くりかえし最大逆電圧	対衝撃波	(V)	1,600
	対中間周波	(V)	1,300
定格素子温度		(°C)	150
最大許容逆電流	150°Cせん頭値	(mA)	20
順電圧降下	AC 900Aせん頭値	(V)	1.19~1.30
熱抵抗		(°C/W)	0.15以下
重量		(kg)	0.4



第4図 DJ16形素子外観



第5図 シリコン整流素子 (DJ16M) の寸法図

- (3) 許容ジャンクション温度が高いこと。
  - (4) ジャンクション、ベース間の熱抵抗が低いこと。
- 急激な電流変化に対して
- (5) 良好な熱疲労性を持つこと。

日立製作所はかかる見地より車両用シリコン整流器の豊富な実績をもとにしてDJ15形シリコン整流素子を種々の角度から検討、改良を加えた。

一方国鉄においては車両用シリコン整流素子として新たに標準素子を設定し、新幹線用整流器にもこれを使用することになった。

改良の結果をすぐこの素子に適用することを検討し鋭意試作を進めた。種々過酷な寿命試験を行なった結果、新標準素子は国鉄の仕様を十分満足する高い性能を有することが確認された。

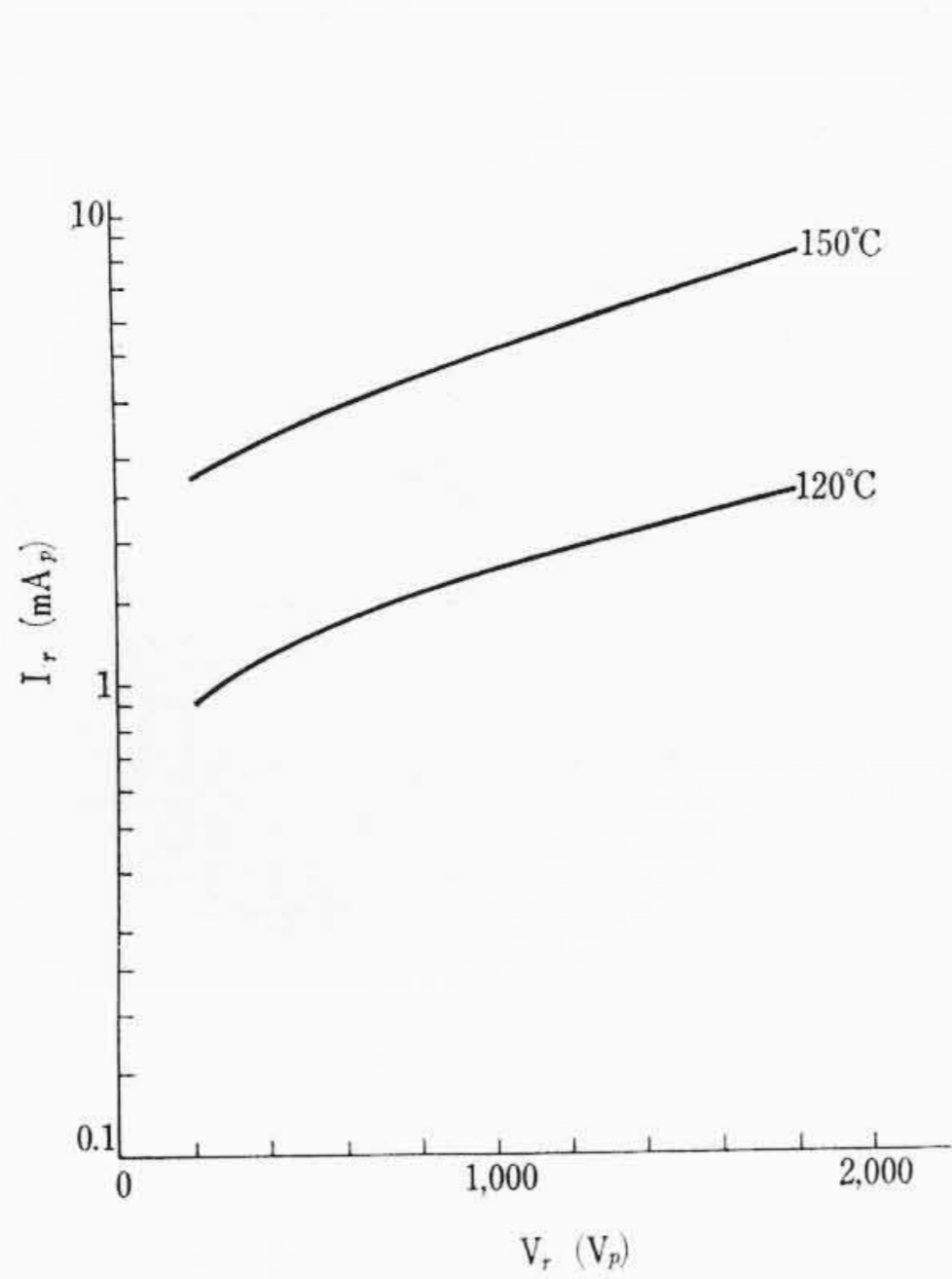
第1表は素子の定格、第4,5図は素子の外観および外形である。

以下改善の要旨と試験について述べる。

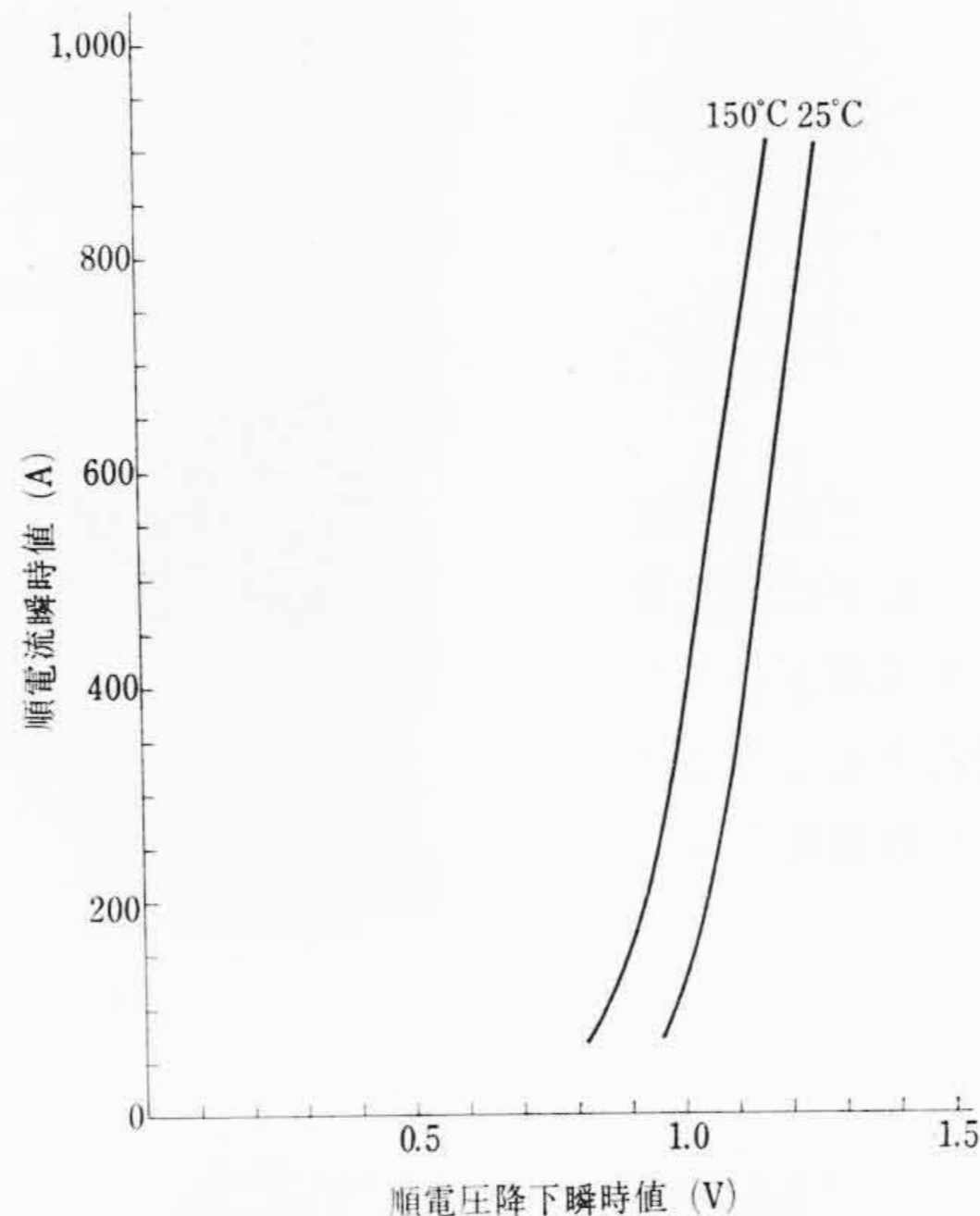
### 2.2.1 素子構造

(1) 熱ひずみの減少 シリコンウエハにかかる熱ひずみを減少するため検討を加え、ベース、内リードの形状、ソルダの形状、材質の改善により熱ひずみを70%、締付ひずみを1/5に減少させた。シリコンウエハへの応力の減少は後述の冷熱サイクル試験の成績により明らかに証明された。

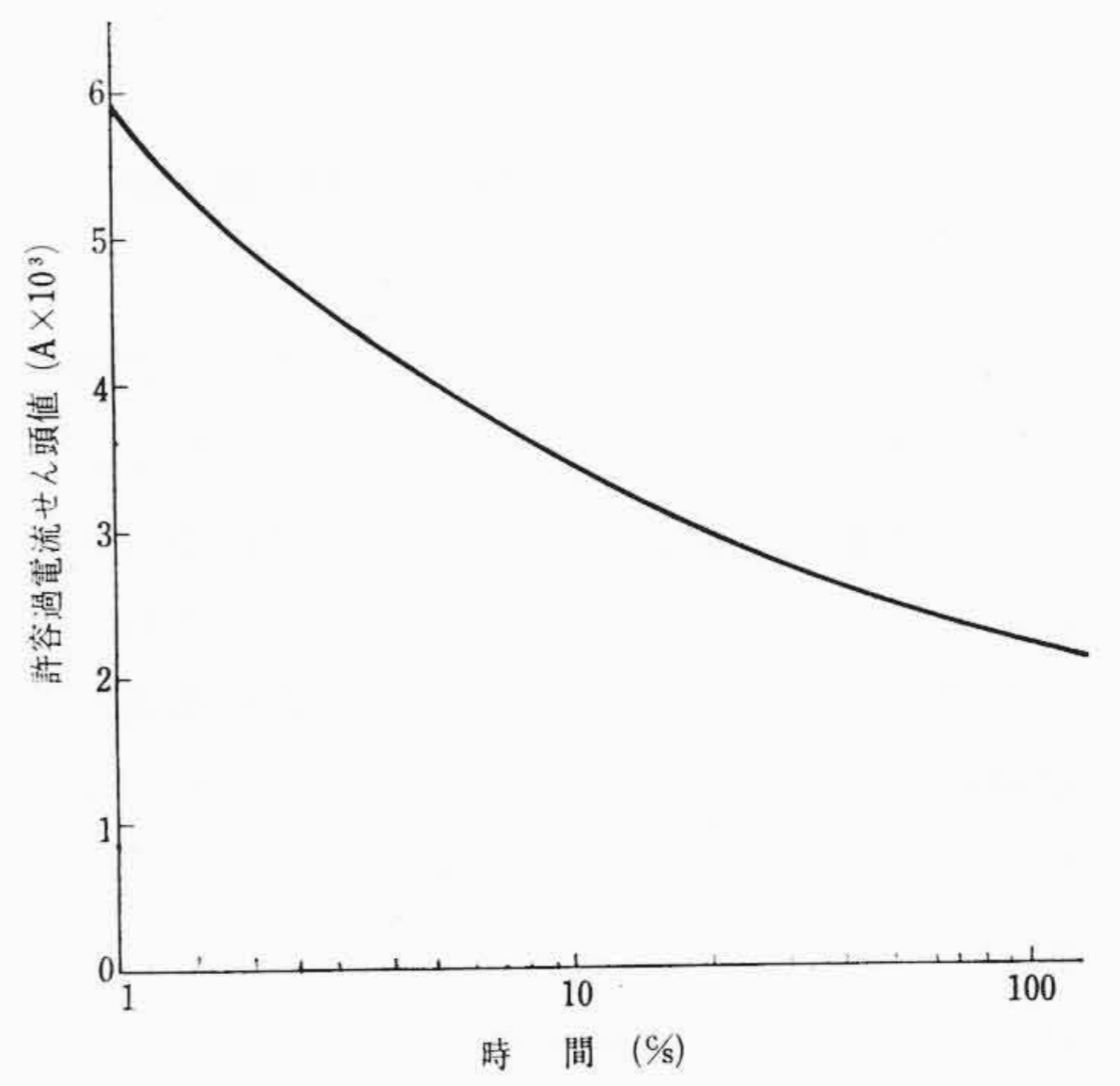
(2) 熱疲労性の向上 熱疲労性の問題はベース、内リード、電極、シリコンのそれぞれの間のソルダによる接着の問題であって、これの向上のために熱疲労性の良好なソルダの開発、ソルダへの熱ひずみの減少、接着の均一性を目指して検討した。接着部の構造を改良して熱ひずみを少なくするとともに、日立製作所日立研究所との密接な協力により熱疲労性のきわめてすぐれたソル



第6図 逆方向 V-I 特性



第7図 順方向 V-I 特性



第8図 過電流特性(非くりかえし)

ダを開発することができた。またモデル試験により接着部分の表面処理を検討し、ソルダのぬれ性がよく熱サイクルで剥離(はくり)することのない強固で安定な表面処理を確立した。

これによって高い生産性により熱抵抗を落すことなくきわめて良好な接着を行なうことができた。熱疲労試験での結果も車両用の激しい電流変化に対し高い信頼性を有することが証明され、電流密度向上、素子の小形化が可能になった。

2.2.2 素子特性

(1) 逆方向特性 逆方向特性の向上、安定化についてはジャンクション表面の処理が、きわめて重要な影響をもち特にこの点に重点をおいて検討した。ジャンクションの端部形状、清浄化処理、表面酸化、樹脂コーティング法、封入ふん囲気に詳細な検討を加え改良を実施した。その結果高温における動作がきわめて安定になり、製作歩留りは著しく向上した。第6図に素子の逆方向 V-I 特性を示す。

(2) 順方向特性 電流密度の向上と順方向電圧降下の低下を目標とした。PIN 接合形成における拡散作業検討により拡散中の小数キャリア寿命の低下をおさえ、これによって順方向電圧降下を増すことなく電流密度を 1.5 倍に増加することができた。第7図に素子の順方向の V-I 特性、第8図に過電流特性を示す。

2.2.3 国鉄標準素子の試験結果

素子に対して下記の試験を行ない試験前後に順方向 V-I 特性、高温の逆方向 V-I 特性、熱抵抗を測定した。いずれも試験前後において特性に異常なく車両用としてすぐれた性能を有することを実証した。

(1) 冷熱サイクル試験

供試素子を 150°C から -40°C の間を 10 回往復させ(第9図)特性の変化を見る。この試験終了後さらに各種の寿命試験を行なったがいずれも合格した。

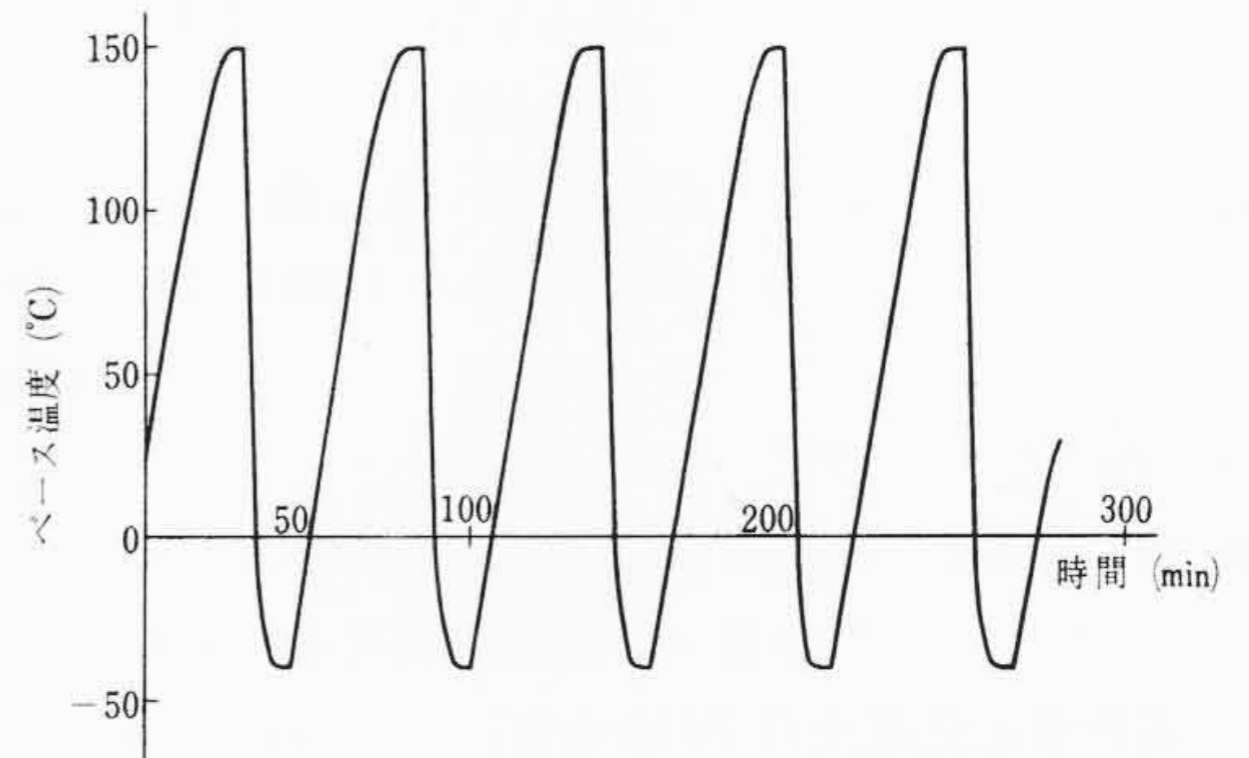
(2) 熱疲労試験

試験条件	3φ 310 A/cell
通電	2.5分
停止	6分
ジャンクション温度	35~165°C
銅ベース温度	35~110°C
逆電圧印加	400V/cell
試験時間	2,000時間

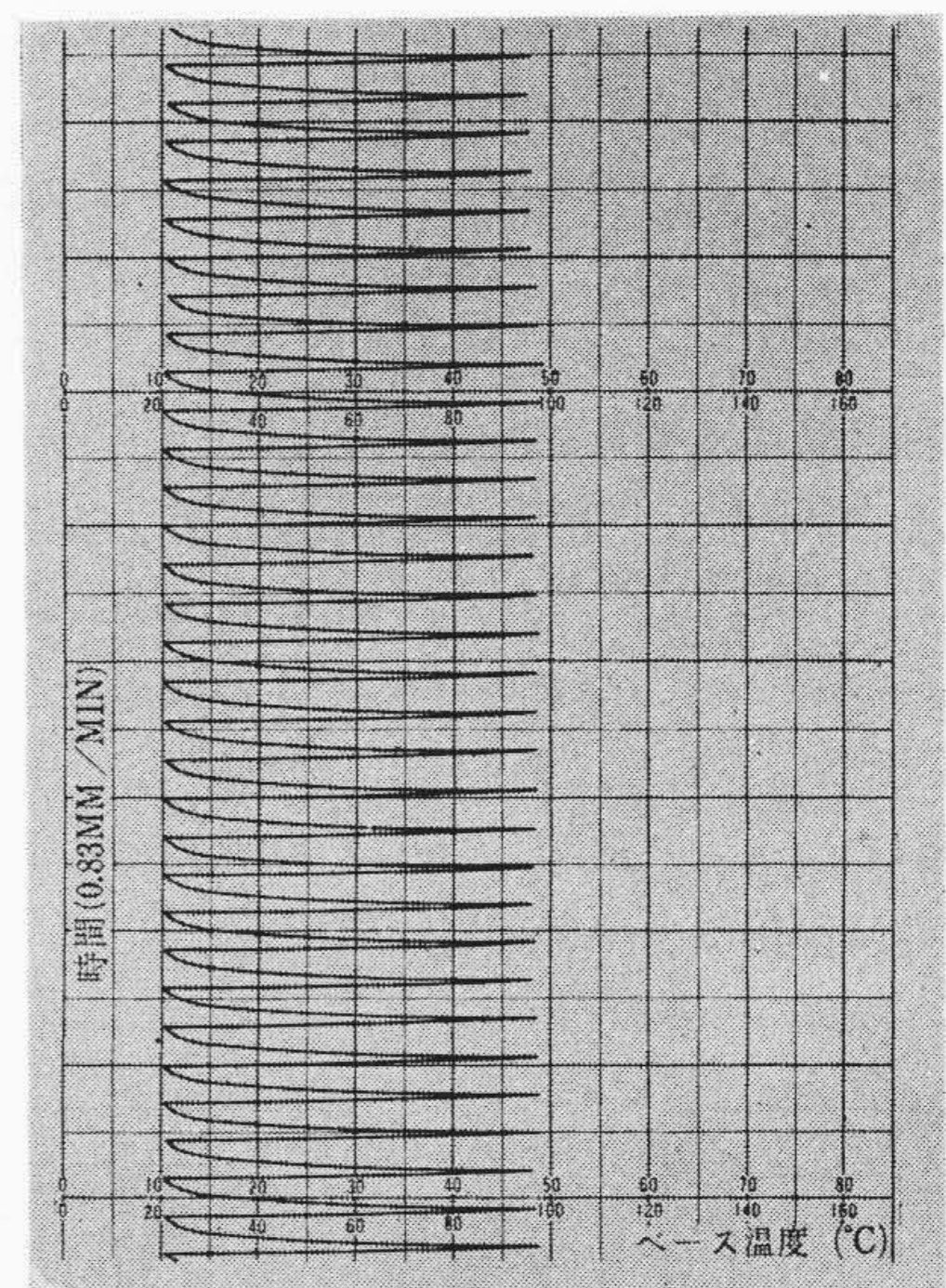
第10図に銅ベース温度変化チャートを示す。

(3) 高温逆耐電圧印加試験

試験条件	周囲温度	150°C
------	------	-------



第9図 冷熱サイクル曲線



第10図 新標準素子熱疲労試験におけるベース温度変化

印加電圧	1,600V
試験時間	1,000時間

(4) 振動試験

XYZ軸3方向にそれぞれ 10G 各8時間

(5) 衝撃試験

NDS. XF 8005 (船舶用機器高衝撃検査方法) による衝撃試験、(H15級、いわゆる 1,000G ショック試験)

(6) 締付試験

標準冷却片にねじ込み締付け力の限界を確認したが、締付トル

ク最高 900 kg-cm まで加えたが異常はなかった。ネジ部と冷却片の熱抵抗は 300 kg-cm 以上であれば十分であり従来品との関連も考慮して 550 kg-cm と定められた。

### 3. 静止誘導器

#### 3.1 主変圧器

架線電圧 25 kV で受電し、電車のすべての電力をそれぞれの用途に適した電圧に降下して供給するものである。車体の床下に設置されるため重量、寸法、耐振性および防火性などの、車両用としての制約と条件を具備しなければならない。これらに適応するよう屋外用、不燃性油入、密封形、送油風冷式を採用して小形軽量化と保守の簡略化を図った。仕様は次に示すとおりである。

形 式	TM 200	
相 数	単相	
周 波 数	60 c/s	
定 格	連続定格容量	定格電圧
	一次 1,650 kVA	25 kV
	二次 1,500 kVA	2,261 V
絶 縁 階 級	三次 150 kVA	
	一次 AC 42 kV 10 分間 インパルス 175 kV (1 × 40 μs) 全波	

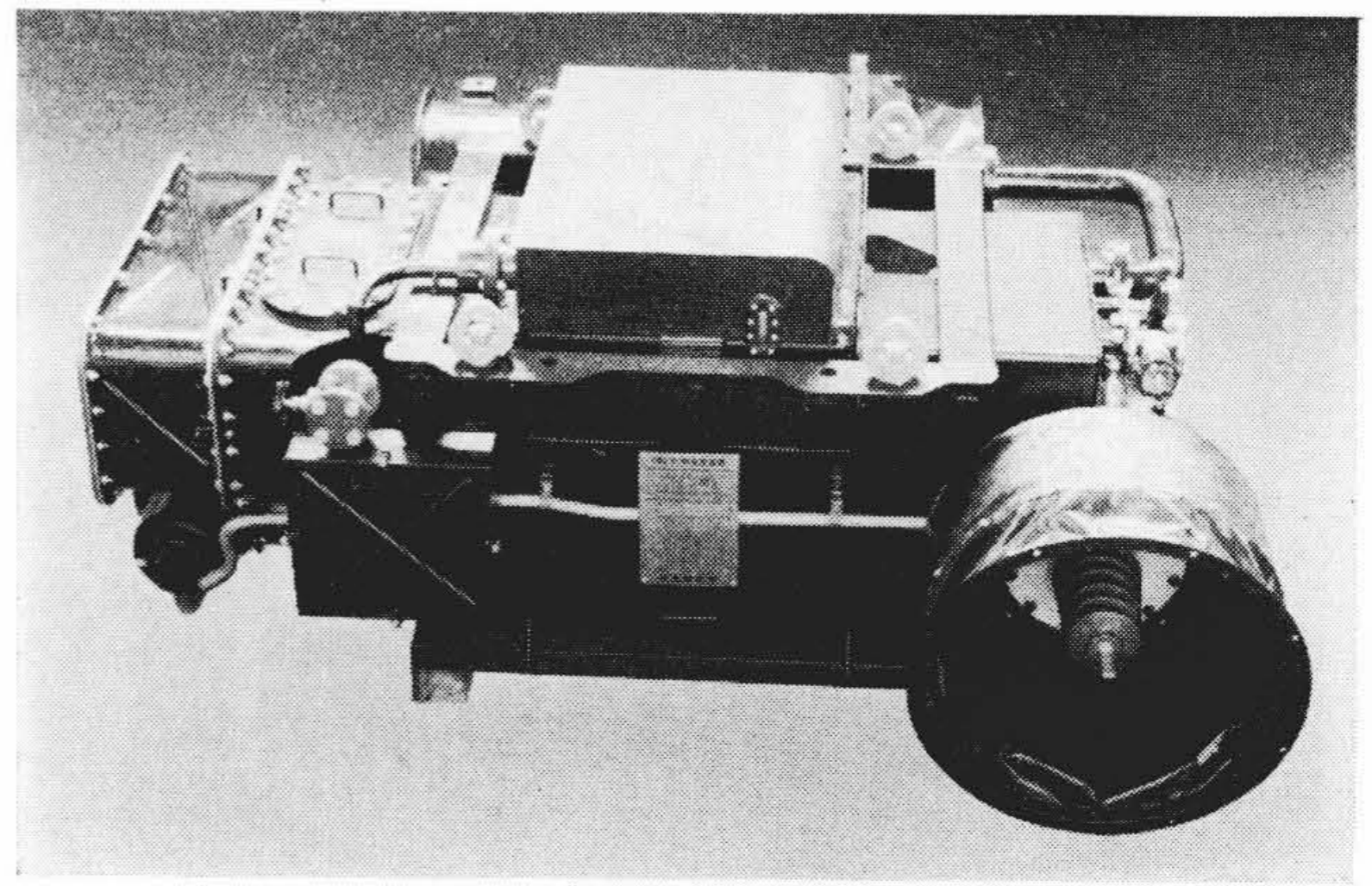
周囲温度 25°C

二次出力は走行用、三次出力は補機、制御および冷暖房用に供される。二次容量は時定数、負荷率を考慮して、主電動機定格電流の 74% を変圧器の連続定格電流とし、二次側の器具および配線の電圧降下を見込んだ電圧によって決定した。電圧制御は二次側のタップ巻線と固定巻線との極性転換およびタップ切換によって行なわれる。

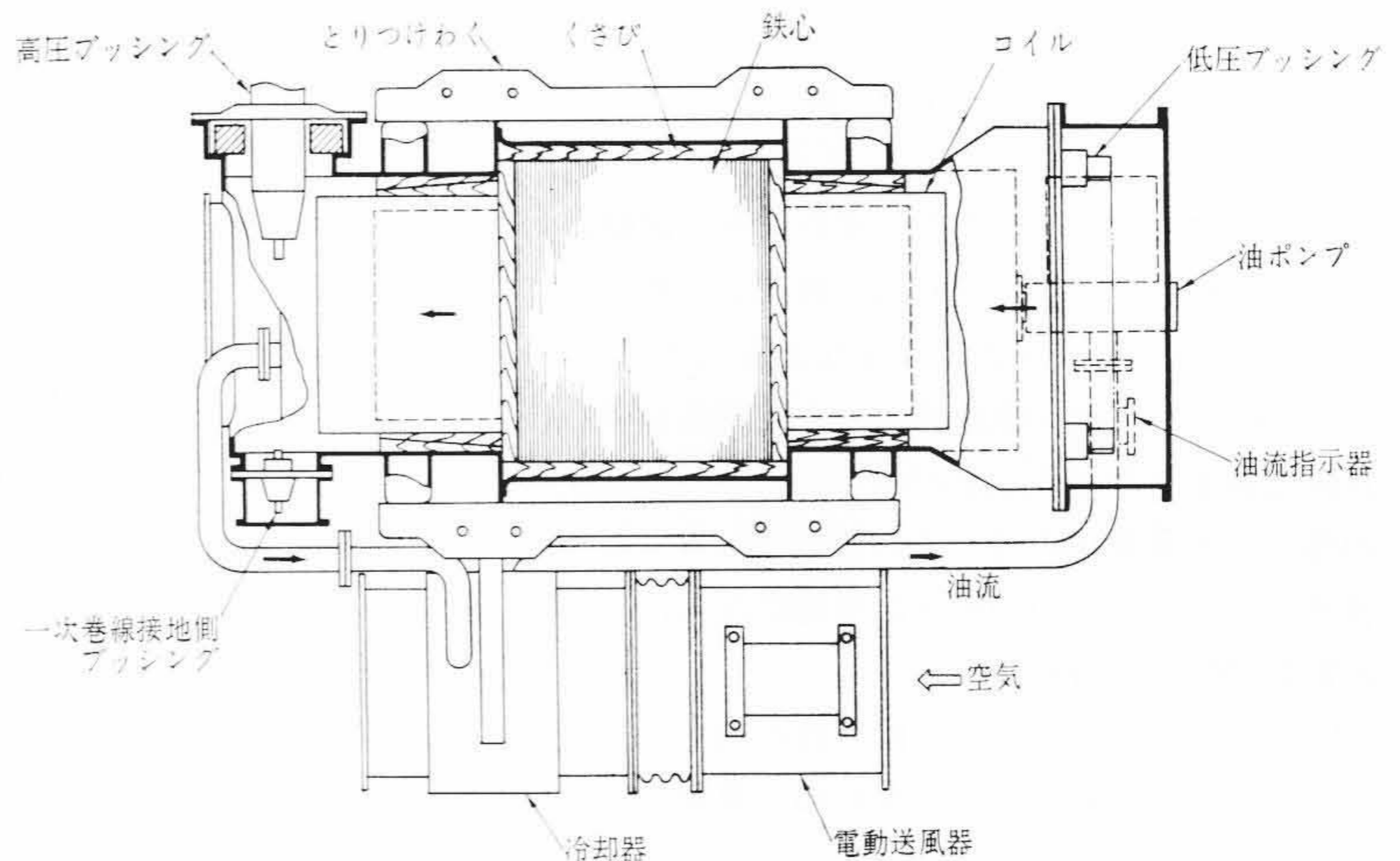
鉄心には方向性ケイ素鋼板を用い、稜隅部の継目は第 11 図のように額縁形とすることにより、低損失、高導磁率の本来の特性が十分に生かされた。

巻線には耐熱性絶縁紙の被覆電線を使用し、従来の温度上昇限度 75°C (抵抗法) を 10°C 高めて小形軽量化を図った。各巻線は第 12 図のように 2 群に分割配置し、巻線間に油げきを設けて絶縁を保つとともに矢印方向に油を流して冷却する。

第 13 図に変圧器の外観を、第 14 図に内部構造を示す。鉄心および巻線のおのおのはタンク内壁によりくさびを介して締付けられている。タンクには高抗張力鋼板を用いて板厚を薄くし、重量の軽減



第 13 図 変圧器の外観図



第 14 図 主変圧器の構造図

と強度の確保を図った。

高圧側ブッシングには、軽量で衝撃に強いエポキシレジンモールドのコンデンサ形ブッシングを採用した。また冷却器にはアルミニウムろう着冷却器を使用し重量軽減に大きな効果をあげている。総重量は 3,440 kg である。

#### 3.2 限流リアクトル

本器は主変圧器のタップ切換時におけるタップ間短絡電流を抑制するために使用される。仕様は次のとおりである。

形 式	IC 201 H 種絶縁乾式、自冷式
連続定格容量	74 kVA
端子電圧	174 V
連続定格電流	425 A

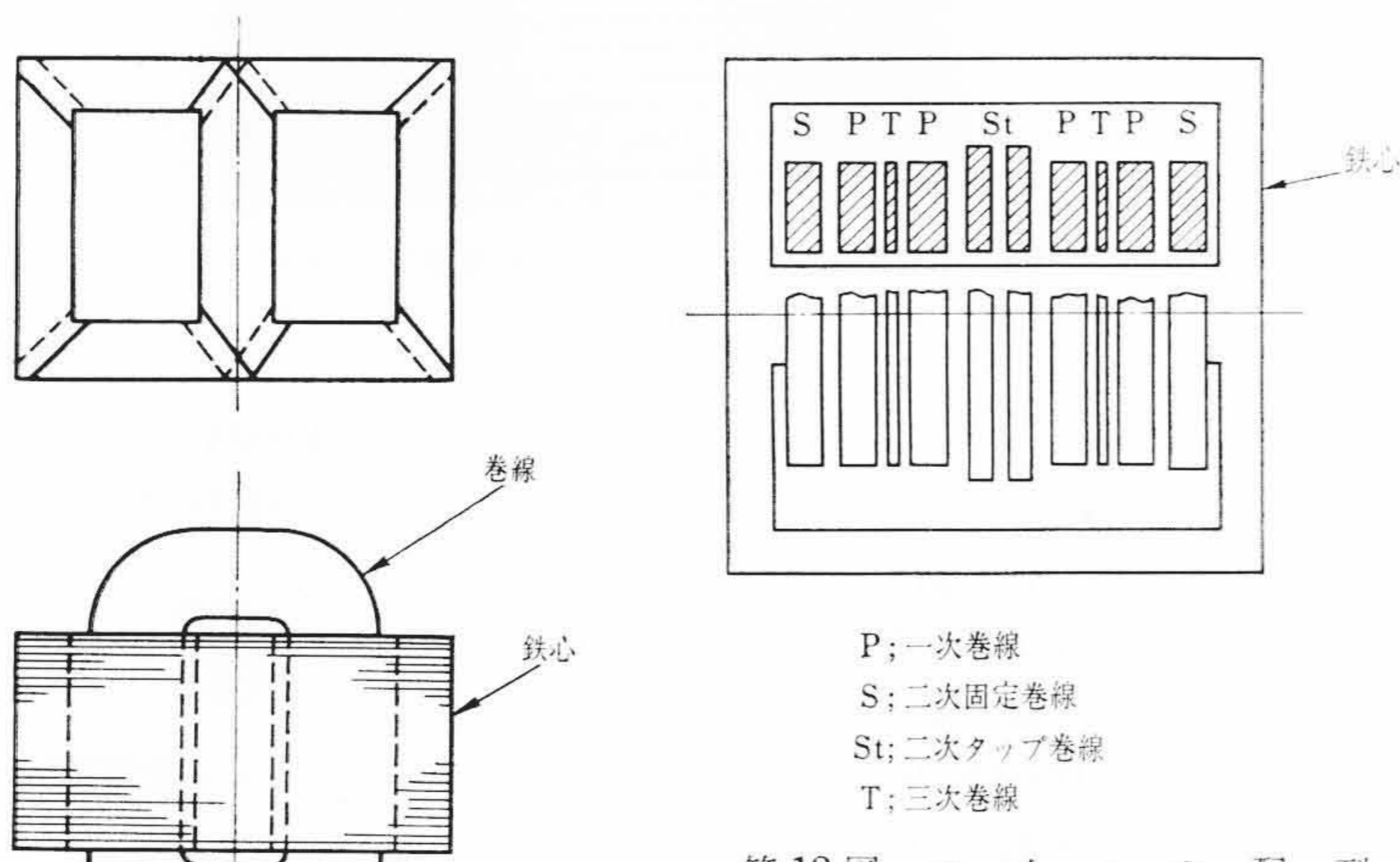
鉄心には方向性ケイ素鋼板を用い、接着剤を注入した間げき付鉄心である。電線の被覆および絶縁構造物には、すべて無機質絶縁材料を基材としたシリコーン製品を使用し、巻線組立後シリコーンワニス処理を施し、十分な耐熱性と絶縁性をもたせてある。このため温度上昇は 180°C まで保証され耐湿性もすぐれている。

#### 3.3 平滑リアクトル

本器は単相全波整流における脈流の平滑用に使用される。仕様は下記のとおりである。

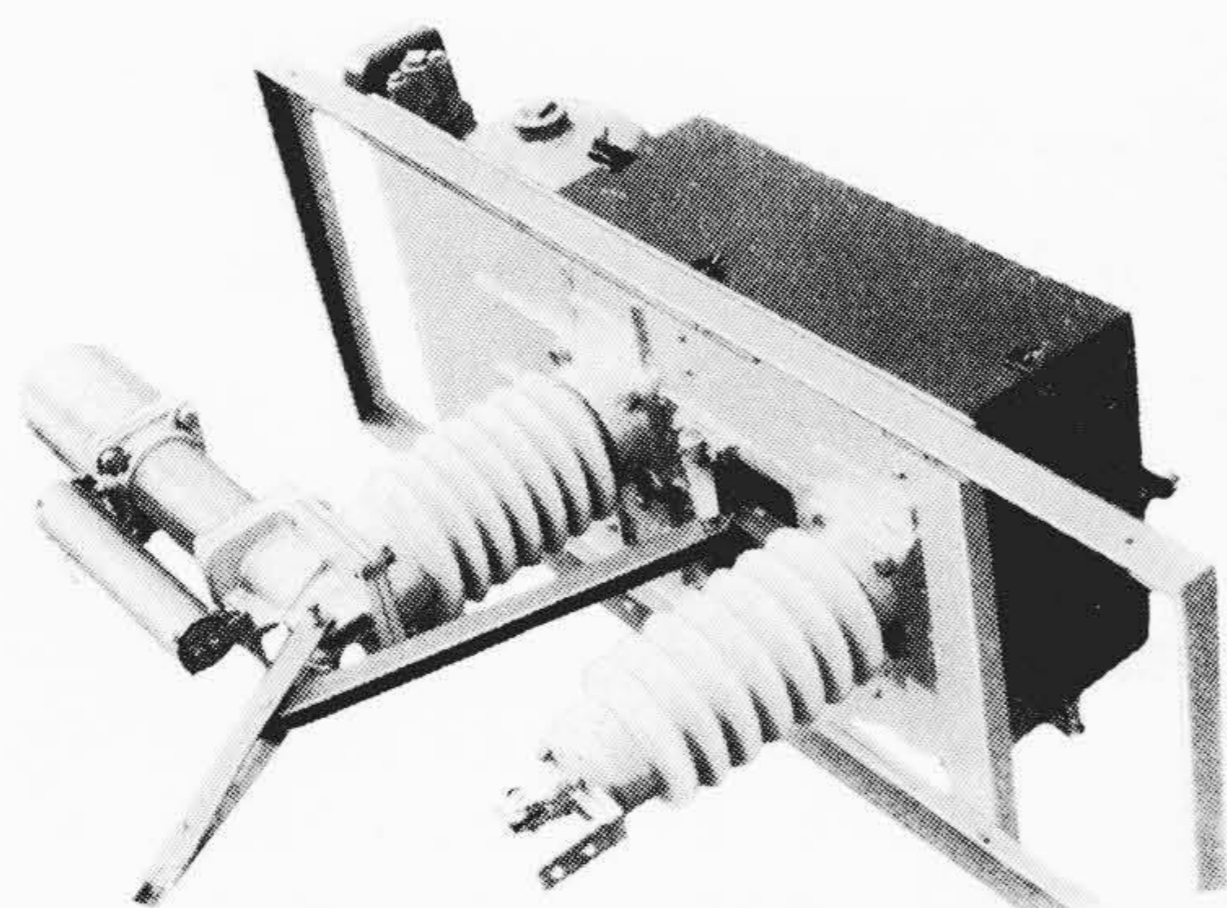
形 式	IC 200 F 種絶縁乾式、自冷式
インダクタンス	6.5 mH (490 A にて)
連続定格電流	345 A

開放形鉄心を採用し、金具類にはアルミニウム合金鋳物を用いて小形軽量化を図った。電線の被覆絶縁および



第 11 図 外鉄形鉄心の構造

第 12 図 コイルの配列



第15図 CB 200形空気遮断器

び絶縁構造物には、すべて無機質絶縁材料を基材としたエポキシ樹脂製品を使用し、巻線には個々にエポキシワニス処理を施してあるので、十分な絶縁性と耐湿性をもっている。

#### 4. 高圧電気品

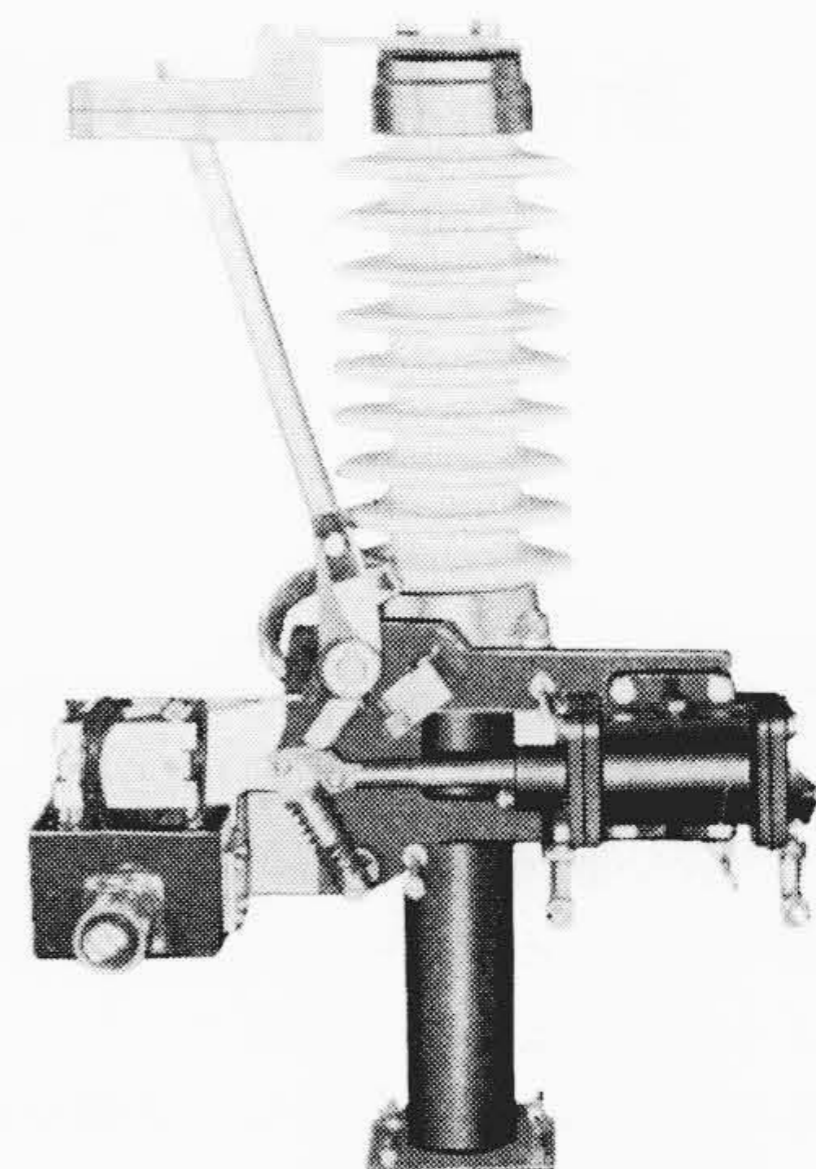
##### 4.1 空気遮断器

第15図はCB 200形空気遮断器である。従来、交流車両用空気遮断器はすべて車両屋根上に取り付けられていたが、新幹線電車では走行抵抗を減少させるため、避雷器とともに高圧機器箱内に納めて車体床下に取り付けられている。CB 200形空気遮断器はこの目的のために製作されたもので、小形軽量かつ低騒音の空気遮断器である。

遮断部および断路部の支持がい子は高圧機器箱の側板を兼ねたベースに水平に取り付けられ、遮断部には適当容量の排気タンクを設けて遮断時の騒音を防止している。遮断部重量を低減するために耐アーク性の強いエポキシ積層管を用いている。またフェノール積層管に納めた非直線抵抗を並列に接続して開閉サージを抑制している。ベースの外部には操作に必要な補助空気タンク、主弁、電磁弁、断路部操作シリンダなどが配置されるが、これらの部分はいずれも防じんカバーで密閉されている。

この遮断器は国鉄規格に基づく形式試験はもちろん、寿命試験、汚損試験、振動試験などの特殊試験や避雷器とともに高圧機器箱に入れた状態における組合せ絶縁耐圧試験も行なわれたがいずれも良好な成績を得ている。仕様は次のとおりである。

定格電圧	30 kV
定格電流	200 A
定格遮断容量	100 MVA
定格遮断電流	3,400 A
定格投入電流	10,000 A
定格短時間電流	4,000 A 2秒
定格開極時間	0.04 秒
定格遮断時間	3 サイクル
無負荷投入時間	0.1 秒以下
定格操作電圧	DC 100 V



第16図 SH 1421形保護接地スイッチ

定格操作気圧	8 kg/cm <sup>2</sup>
標準動作責務	CO-5秒-CO

##### 4.2 保護接地スイッチ

第16図はSH 1421形保護接地スイッチの外観図である。本体はパンタグラフ支持がい子の一柱に取り付けられているが、走行抵抗を減少するため開閉操作機構部分は上下屋根板間に埋設されている。接地スイッチは機器の点検、補修時に接地を行なうばかりでなく、電車進行中に架線切断など突発時事故が発生した際に、架線を接地して変電所の遮断器を遮断させ、電車に急制動をかけることを目的としたものである。仕様は次のとおりである。

形 式	SH 1421
定格電圧	30 kV
定格短時間電流	6,000 A 15 サイクル
最大投入電流	15,000 A
定格操作電圧	DC 100 V
定格操作圧力	8 kg/cm <sup>2</sup>

#### 5. 結 言

新幹線旅客電車の交流側主回路機器、特にシリコン整流器、主変圧器、空気遮断器につき、その概要を述べた。これらの機器を積載した電車はモデル線区において試運転が現に行なわれており、すぐれた運転成績を示すものと期待されている。

終わりにこれらの機器の設計、製作に多大のご指導、ご援助を賜った日本国有鉄道臨時車輛設計事務所、鉄道技術研究所、主変圧器・シリコン整流器の共同設計会社関係者のかたがたに厚くお礼申し上げる。社内にてはいつもご指導を賜る高木副工場長、毛利、村山、小林、落、中戸川、木村各部長および素子故障検出装置の設計を担当された動力盤設計の関係各位に対し厚く謝意を述べる。

#### 参 考 文 献

- (1) 高砂：日立評論 43, 274 (昭36-2)