

アルミニウム製錬用 320V, 112,500A シリコン整流器

320 V 112,500 A Silicon Rectifier for Alminium Manufacturing

近 藤 喜 久 雄* 高 橋 英 一**
Kikuo Kondō Eichi Takahashi

内 容 梗 概

シリコン整流素子製造の技術的進歩と量産方式の完備により、外国の一流品に匹敵する整流素子が多量に生産されるようになった。今回、この量産方式による整流素子を使用して、アルミニウム製錬用 320V, 112,500A シリコン整流器を完成し、昭和電工株式会社喜多方工場へ納入、本年 3 月より運転にはいった。本器は日本における記録品であるばかりでなく、世界でも屈指の大容量器であり、製作にあたっては、設計上の要点であるシリコン整流素子の逆電圧協調、電流、電圧の平衡など、いままでの豊富な経験をいかして十分研究を行い完成した。ここでは本整流設備の概要を紹介する。

1. 緒 言

シリコン整流器の最近の急速な技術的進歩と良好な運転実績により、試用期間を完全に経過して実用期にはいった。シリコン整流器は周知のように、運転、保守などの技術上の特長と設備費、維持費などの経済上の利点により、従来の変流機器に代り、電気化学工業をはじめ電鉄用、動力用電源として各方面に使用されつつある。特に電解工業に使用される大電流直流電源には、シリコン整流器はもっとも適したものといえよう。

日立製作所では、すでに記録的大容量器である 140V, 100,000A ゲルマニウム整流器を完成し、アルミニウム製錬用電源として昭和 33 年 3 月以来連続運転を行い関係者の注目を浴びた。その後の半導体整流器の技術的進歩は非常に早く、ゲルマニウム整流器よりさらにすぐれたシリコン整流器が、日立製作所の総合技術により開発、完成され、実用に供されている。その製作素子総数は 40,000 個に達し、運転時間も第 1 表のように 8,000 時間以上を経過し、破損したものはなく、特性の劣化も皆無というきわめて好調な実績を示し、ほぼ理想的な整流器といえることができる。

今回製作した 36,000kW シリコン整流器は、容量の点で世界屈指であるばかりでなく、アルミニウム製錬用として使用されている点でも記録的である。日立製作所の長年にわたる研究結果により、すぐれたシリコン整流素子を製作するとともに、前回のゲルマニウム整流器の経験を十分活用して設計製作し、昭和 35 年 3 月より連続運転にはいり、無事故の好成績で生産に貢献している。

アルミニウム電解製錬には陽極効果が伴い、このため負荷電流は変動を繰り返す。このためシリコン整流素子の温度は変動し熱ひずみを生ずるので、素子の特性変化の原因となりやすく、食塩の電解槽などの定電流負荷に比べ、アルミニウム製錬用は過酷な負荷といえることができる。

以下、本設備の概要と技術上の要点について述べる。第 1 図は本設備の概観を示す。

2. 設 備 の 概 要

本設備はアルミニウム製錬用シリコン整流器設備として世界屈指の大容量であるとともに、シリコン整流器の製作実績においても有数の設備である。

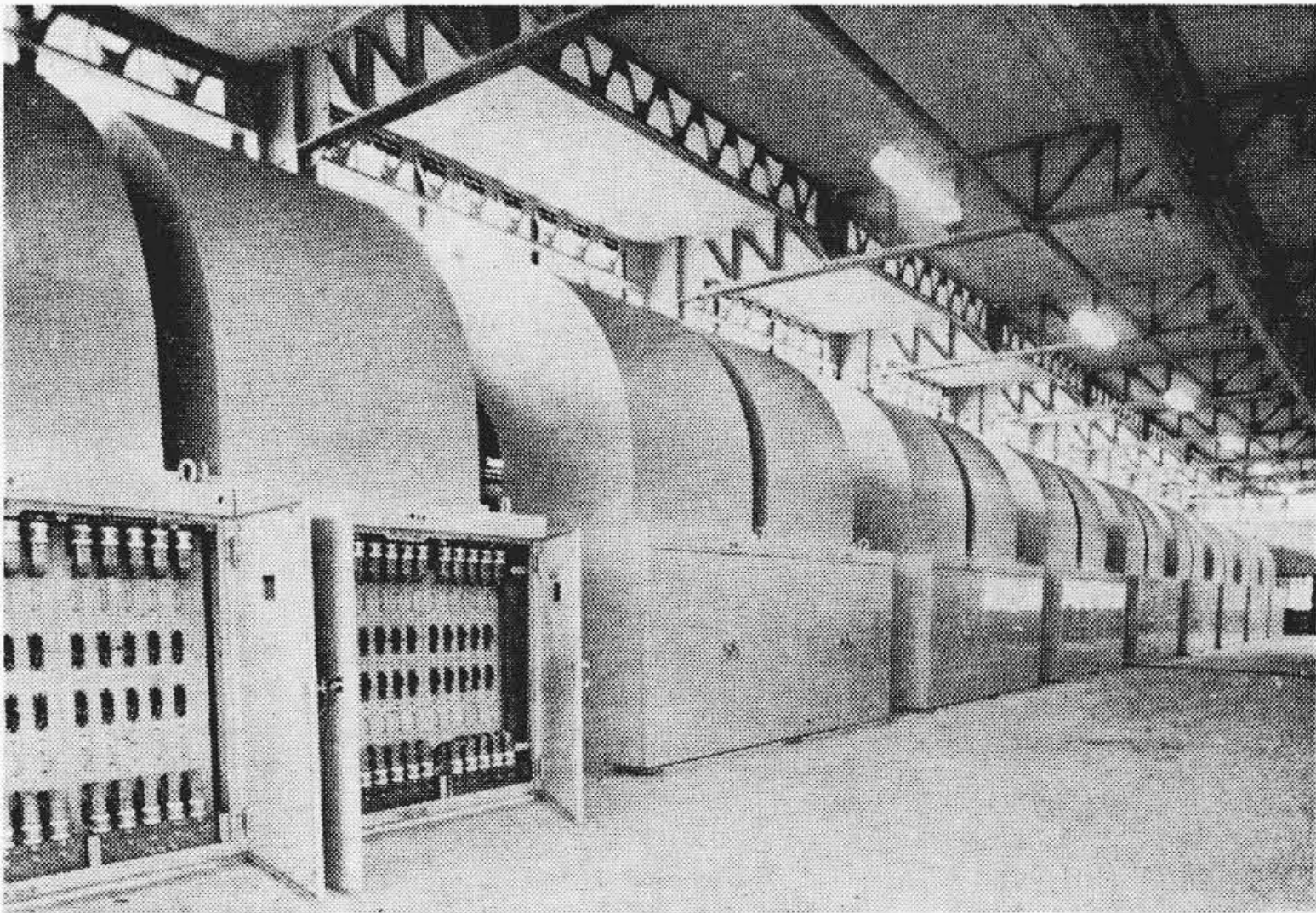
本設備のおもなる仕様は次のとおりである。

- 交流入力 154 kV 三相 50 c/s
- 直流出力 320 V 112,500 A
- 直流相数 12 相

* 日立製作所日立工場
** 日立製作所本社

第 1 表 日立シリコン整流器運転例 (昭和 35 年 7 月 1 日現在)

納 入 先	容量 (kW)	電圧 (V)	電流 (A)	運転開始	運 転 時 間
昭和電工喜多方	875	140	6,250	34- 7	8,088
国鉄交直両用電車	575	1,350	426	34-10	250 (800 km)
昭和電工大町	3,500	50	70,000	34-11	5,352
同和興産岡山	1,071	153	7,000	34-12	4,482
試作交流電気機関車	1,600	650	2,460	34-12	570 (14,000 km)
昭和電工喜多方	36,000	320	112,500	35- 3	2,546
日本鋁業日立	2,160	180	12,000	35- 4	2,208



第 1 図 320V, 112,500A シリコン整流器

電圧調整 25~320V

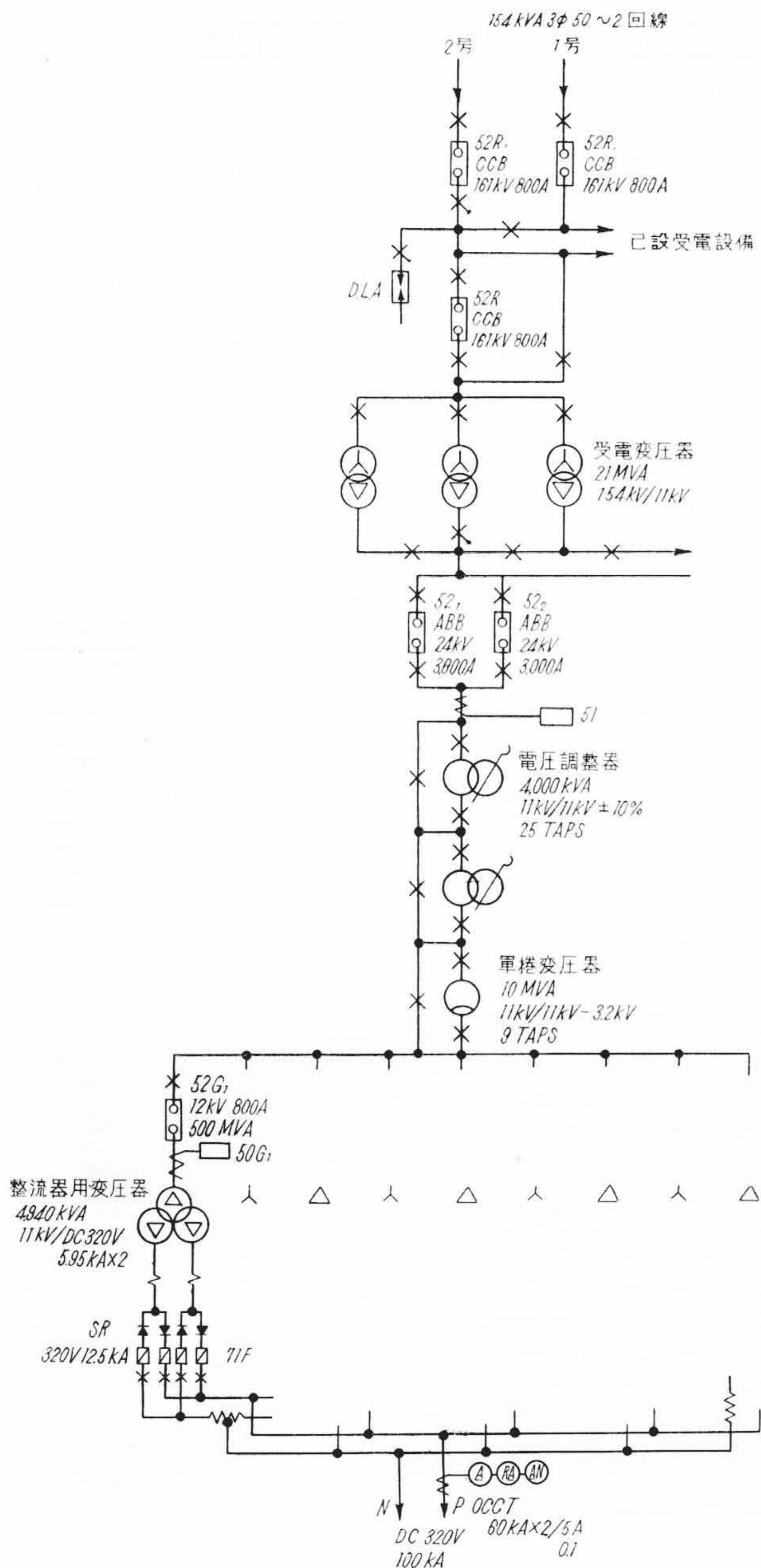
第 2 図は電気設備の単線接続図で、受電、調整、整流の三部より成っている。主要機器の仕様は次のとおりである。

2.1 受 電 設 備

- 受電遮断器 制弧遮断器 BOU-350 B-PAB
161 kV 800 A 遮断容量 3,500 MVA
台数 3
- 受電変圧器 屋外用油入自冷式 SOCR-3 YCP 三相 50 c/s
21,000 kVA 154 kV/11 kV 人/△
台数 3

2.2 調 整 設 備

- 交流遮断器 空気遮断器 PBC-100-PA
24 kV 300 A 遮断容量 1,000 MVA
台数 2
- 負荷時電圧調整器 屋外用油入自冷式 SLOC-3 YCW
三相 50 c/s 4,000 kVA 11 kV/11kV ± 10%
25 タップ 台数 2
- 単巻変圧器 屋外用油入自冷式 SNOCR-3 YAC



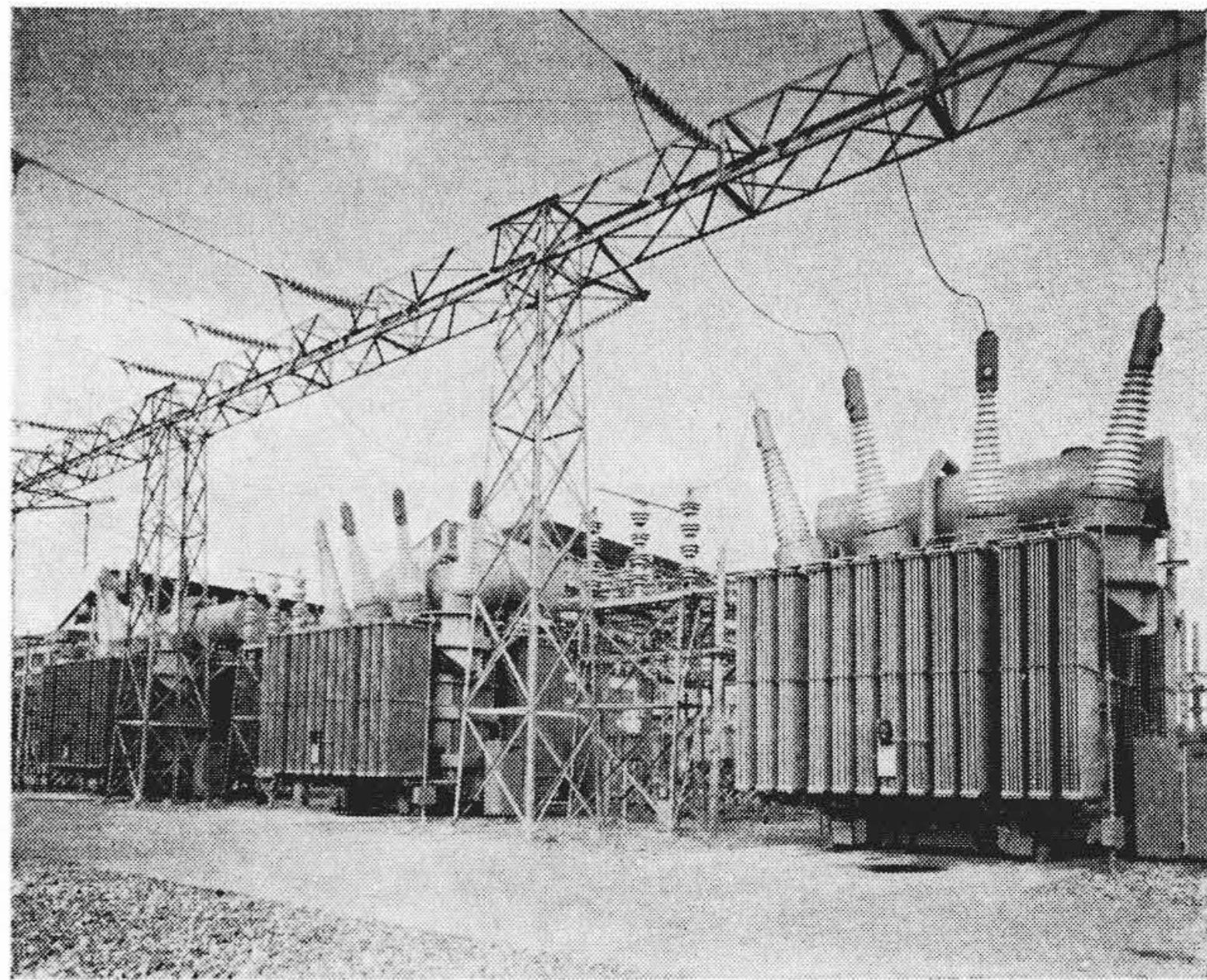
第2図 320V, 112,500A 直流シリコン整流器設備
単線接続図

三相 50 c/s 10,000 kVA 11kV/11~3.2 kV
9タップ 台数 1

2.3 整流器設備

整流器用変圧器	屋内用油入自冷式 SICR-3 MC 三相 50 c/s 4,940 kVA 11 kV/DC 320 V $\Delta/\Delta\Delta$ 台数 5
	屋内用油入自冷式 SICR-3 YC 三相 50 c/s 4,940 kVA 11 kV/DC 320 V $\Delta/\Delta\Delta$ 台数 4
シリコン整流器	強制風冷式 三相ブリッジ F-6B 4,000 kW 320 V 6,250 A $\times 2$ 台数 9

アルミニウム製錬は停電を極度に避けねばならないので、154 kV の受電は2回線として、切替受電ができるようになっている。受電変圧器は3台設けて、常時は2台運転を行い、1台は本設備の予備とするとともに、既設のゲルマニウム整流器設備と水銀整流器設備



第3図 154 kV, 21 MVA $\times 3$ 受電変圧器

への共通予備としても使用できるよう回路構成を行った。第3図に受電変圧器を示す。

本設備の全負荷最高直流電圧は320Vであるが、運転初期には電極焼成と電解炉の運転台数の都合上、低い電圧でスタートせねばならない。また運転中、一部の電解炉を休止する場合もあるため、直流電圧を最低25Vより最高320Vの間任意に調整しうるように製作されている。すなわち第2図に記載された単巻変圧器と負荷時電圧調整器とにより、直流出力側において、上記320~25V間を調整することができる。

なお、負荷時電圧調整器は2台設け、起動時には、最低電圧をうるよう2台を特殊縦続接続し、定常運転時には1台を予備として保守点検の便利をはかった。

設備の力率、交流側の波形を良好にし、誘導障害を防止するよう整流器は三相全波ブリッジ結線とし、整流器用変圧器の一次結線を入、 Δ の組み合わせにより直流側を12相とした。力率をさらに向上するため10,000 kVA進相用コンデンサを設けて力率の改善をはかった。

各機器の設置場所は、受電設備、調整設備は屋外とし、整流設備は屋内配置とした。

3. 設計上の要点

アルミニウム製錬に使用する大容量整流器は、すでに140V, 100,000Aゲルマニウム整流器で経験済であるため、基本的な技術的問題は解決しているが、本設備の設計に当っては、シリコン整流素子のあらゆる特性をはあくし、前回の経験を十分に活用して数段の進歩を遂げた。設計上のおもなる要点をあげると次のとおりである。

3.1 電圧変動率の選定

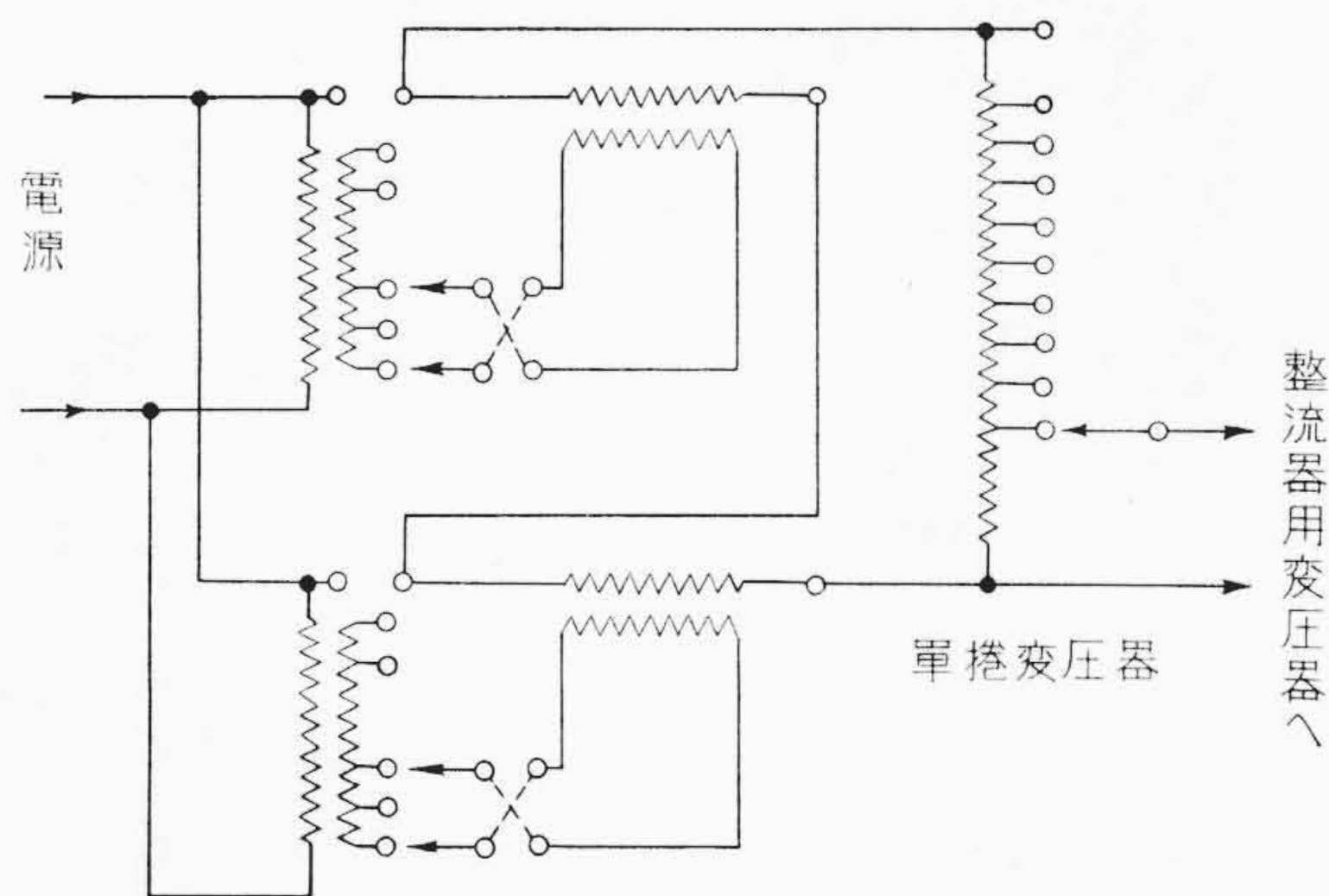
電圧変動率の大小は、陽極効果発生時の電流変動、短絡電流、力率、機器容量に直接影響を及ぼすため、最も適切な電圧変動率とする必要があり、種々検討の結果最適の電圧変動率を選定した。

3.2 起動運転時の最低電圧

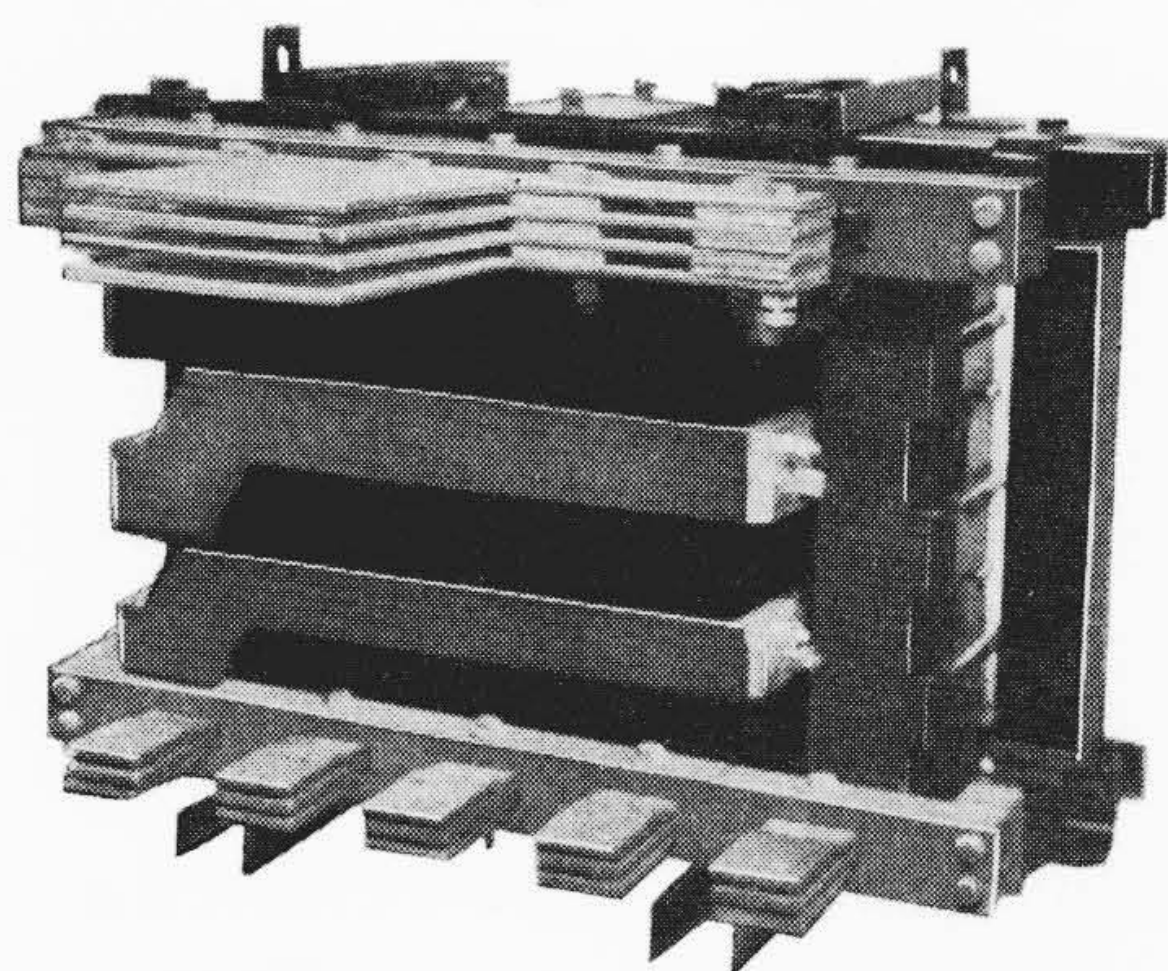
最低電圧25Vをうる方法としては、単巻変圧器の最低タップを25V相当に設定すれば得られるが、これはいたずらに巻線容量が増え、短期間の起動運転用としては不経済である。このため単巻変圧器は11kVより3.2kVを9タップとし巻線容量を小さくするとともに、第4図に示すように2台の負荷時電圧調整器の直列変圧器を、回路電圧から切り離して縦続接続し、25Vをうるようにした。

3.3 電流の平衡

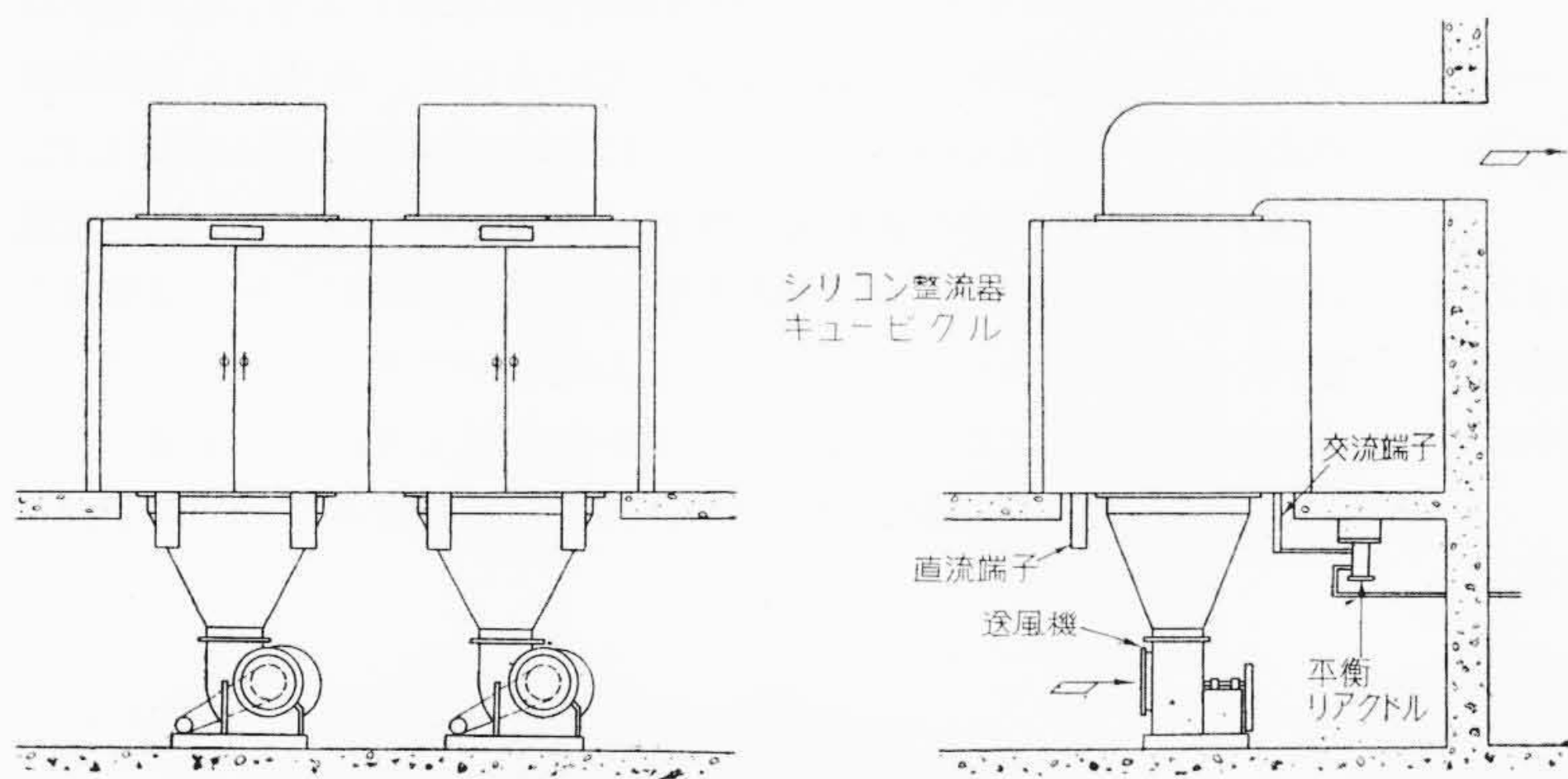
112,500Aの電流は、第2図の単線接続図に示すように、9台の整



第4図 起動運転時における負荷時電圧調整器の接続



第5図 電流平衡リアクトル



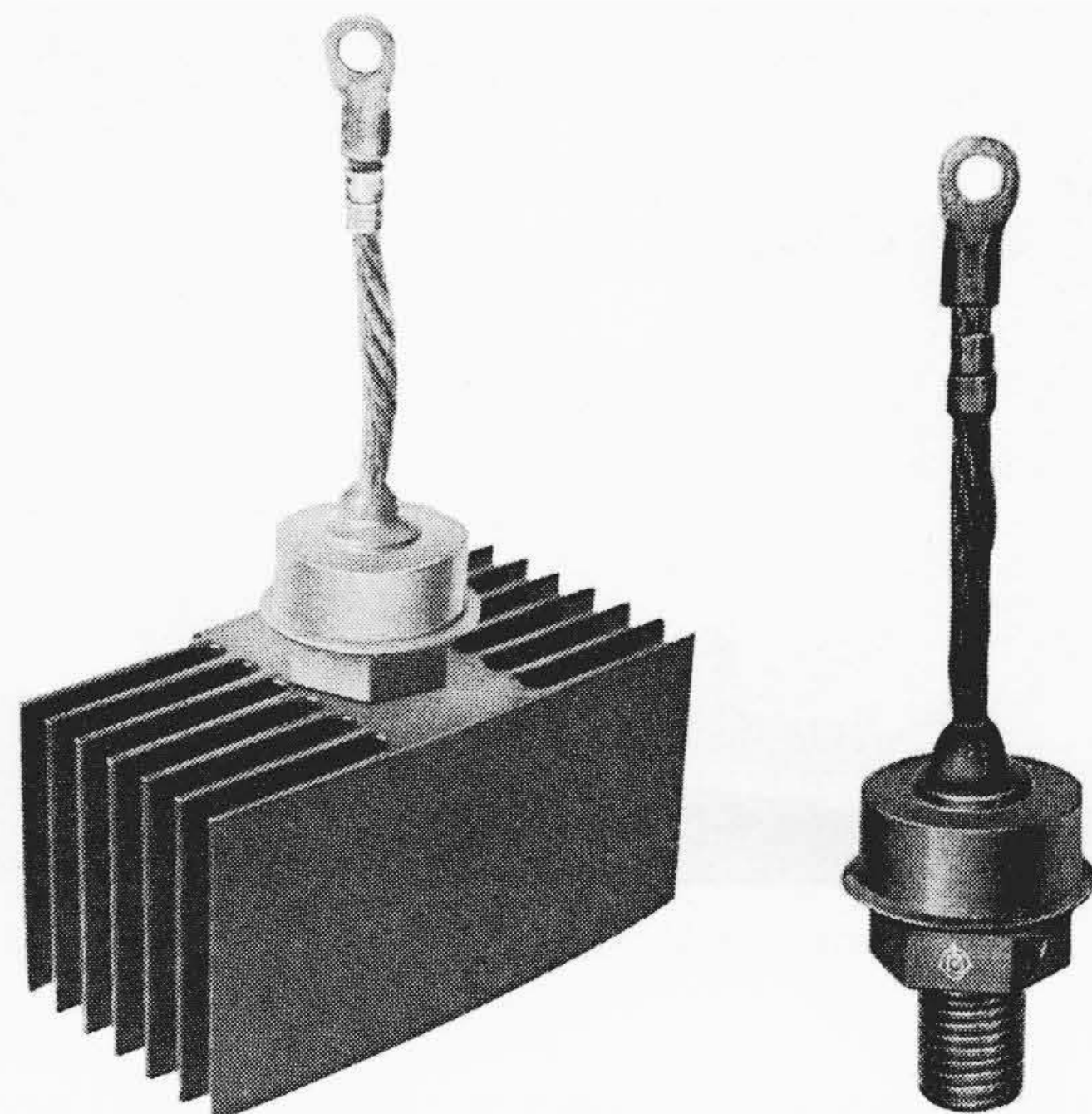
第6図 320V, 12,500A シリコン整流器

流器セットを並列に接続して得られ、各整流器セットは1台の変圧器と2面の整流器キュービクルで構成されるため、各セット間およびキュービクル間に規定値以上の電流不平衡を生じないようにせねばならない。

このために、各整流器および変圧器の電圧変動率をできる限りそろえ、各機器を電氣的に対称に配置して総合の電圧変動率を合わせ、分担電流の平衡をはかった。並列に接続された整流素子は順方向特性のマッチングにより電流平衡をはかり、各並列ブロックには平衡リアクトルを使用して良好なバランスを得た。第5図に平衡リアクトルの外観を示す。

3.4 整流素子の逆耐圧協調

整流素子に加わる逆電圧は定常運転時の逆電圧のほかに、遮断器



第7図 SN形シリコン整流素子と冷却片

の投入、遮断時の開閉サージと襲雷時の雷サージがあり、整流器用変圧器の直流側巻線に移行して整流素子に印加する。したがって、この異常電圧を低減するとともに、整流素子の逆耐電圧と協調をはからねばならない。

なお、直列に接続された素子には、均等に逆電圧が印加するよう分圧方法を講ずる必要がある。

3.5 整流素子の均等冷却

整流器キュービクル内に収納されている整流素子を冷却する場合、最も重要なことは、所要の冷却空気を各素子に一樣に送風することである。このため各素子の通風路が冷却空気に対して等しい通風抵抗をもつように素子の配置と通風路の構造を選ぶ必要がある。

4. シリコン整流器の概要

320V, 112,500A は9セットの整流器により構成され、1セットの整流器は320V, 6,250Aの整流器キュービクル2面とその送風機とから成っている。第6図は整流器1セットの概略を示すものである。

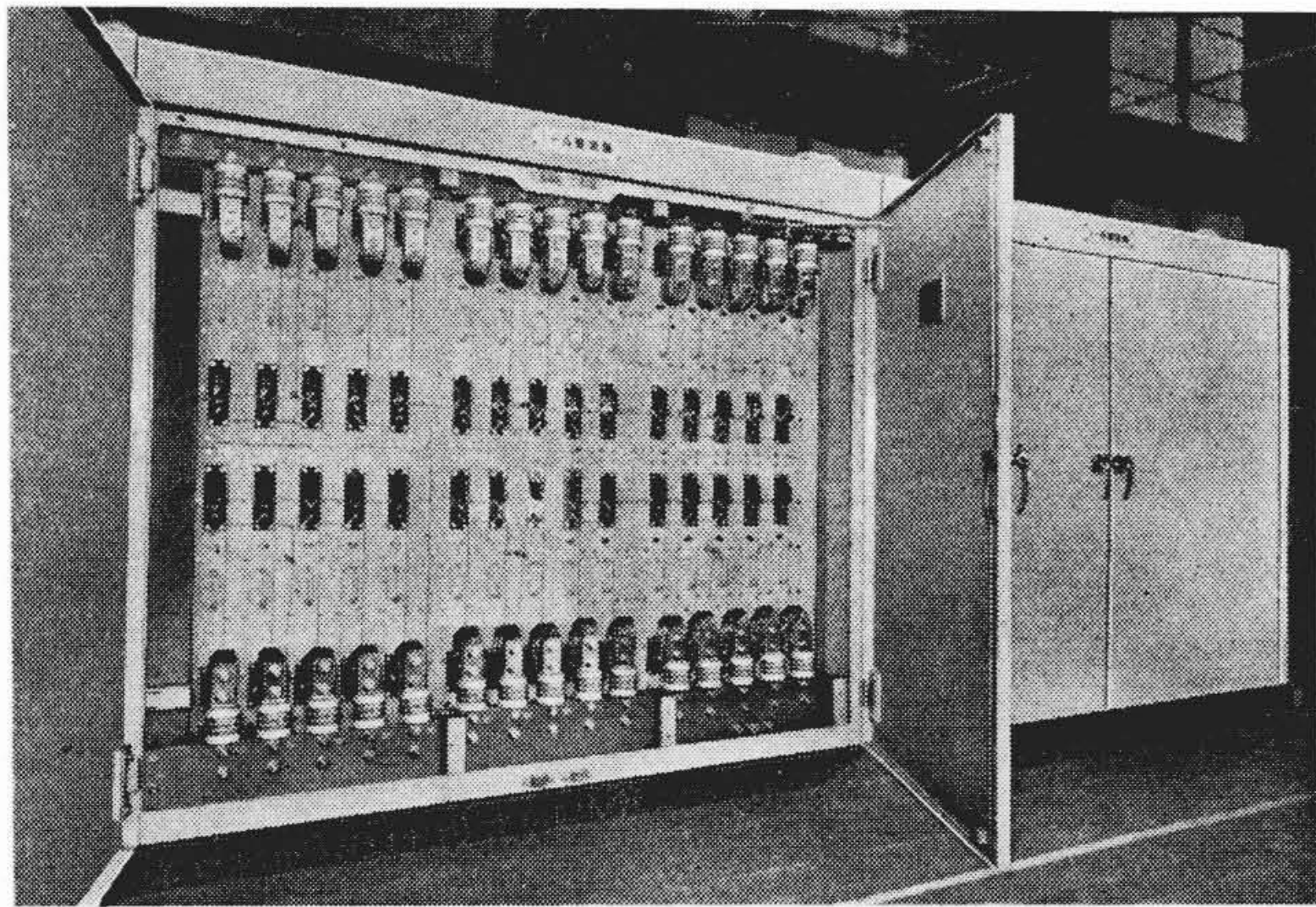
4.1 シリコン整流素子

本整流器に使用した日立電力用シリコン整流素子の仕様は下記のとおりである。

形 式	SN14D
最大許容瞬時逆電圧	350V
定 格 電 流	50A
最 高 動 作 温 度	150°C

おもな特長は次のとおりである。

- (1) 原料であるシリコン単結晶はフローチングゾーン精製による最高級のものを使用している。
- (2) ハーメチックシール（気密封緘）は、がんじょうでしかも気密度のすぐれた特殊構造を採用しているため、整流素子の保存中あるいは運転中における特性の変化はなく、寿命は著しく長い。
- (3) 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堅ろうな構造となっており、すでに車両用整流器として運転されている。
- (4) 製作は完全な品質管理のもとに入念に行われているので、品質の信頼度が高く、試験は全数につき厳密に行っている。
- (5) 絶縁距離が十分あり、じんあいなどの付着による影響が少ない。



第 8 図 320V, 12,500A シリコン整流器の内部

(6) 整流素子の冷却は第 7 図に示すような構造の軽合金を使用しており、軽量でかつ冷却効果がきわめてすぐれている。

4.2 構造

整流器キュービクルは、整流素子を入れた引出状の収納箱（以下トレイという）、トレイを収納する枠組、ハイラップヒューズ（日立高速限流ヒューズ）、警報ヒューズ、温度計より成っている。キュービクルの正面および裏面にはとびらを設けて、組立ての時や、定期点検の時の便宜をはかった。第 8 図に整流器キュービクルの内部を示す。

整流素子は、組立点検が簡単にできるためにトレイに収納する。このトレイを枠組の中へ入れて、トレイの端子を交流および直流導体に接続すれば、ただちに整流回路が構成される。トレイには車輪を付けて、枠組への出し入れが容易に行われる構造としたため、トレイ交換に要する時間はきわめて短時間ですむ。トレイは非磁性材料で製作し、誘導による損失の減少をはかった。

4.3 冷却

本整流器の冷却方式は、第 6 図に示すように直接風冷式で、一階床上に設置された送風機により、整流器を下部より強制通風して素子を冷却し、排気は室外へ出すようダクトを設けた。

周辺の空気中には、アルミ電解に伴って発生する腐食性ガスが含まれており、冷却用空気にも当然含まれるが、整流素子の電氣的機能をつかさどる p n 接合は密封容器内に収納されているため特性に及ぼす影響はほとんどないものと思われる。

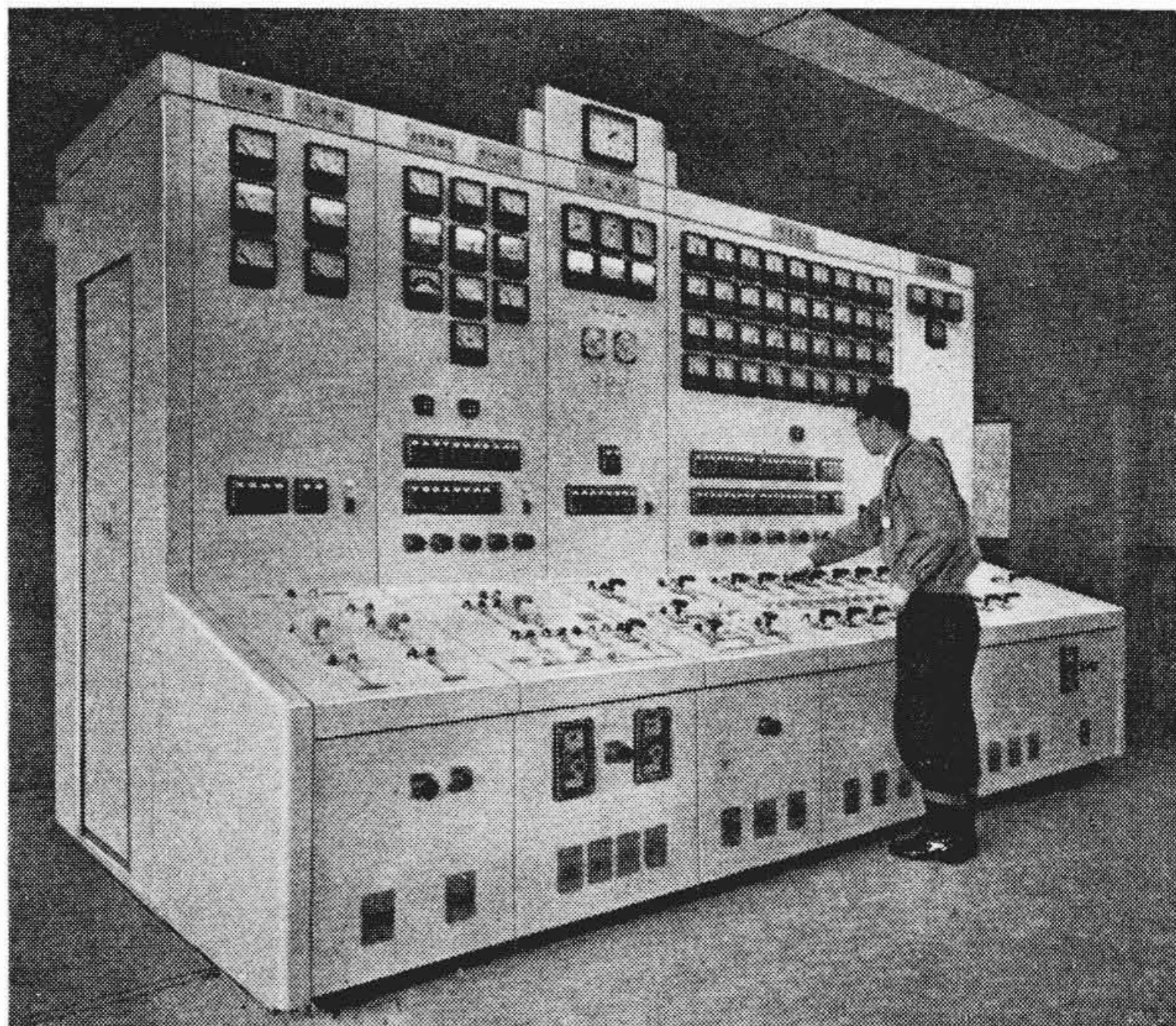
整流素子を一様に冷却するため、通風路抵抗が均一となるよう配置に注意が払われた結果、冷却空気が 165 の通風路に分かれるにもかかわらず、不平衡率は 3% 以内にはいるというきわめて良好なバランスが得られた。

キュービクル内には、温度計を設けて、運転中なんらかの原因で空気温度が上昇した場合には警報を発して管理を行うようにした。

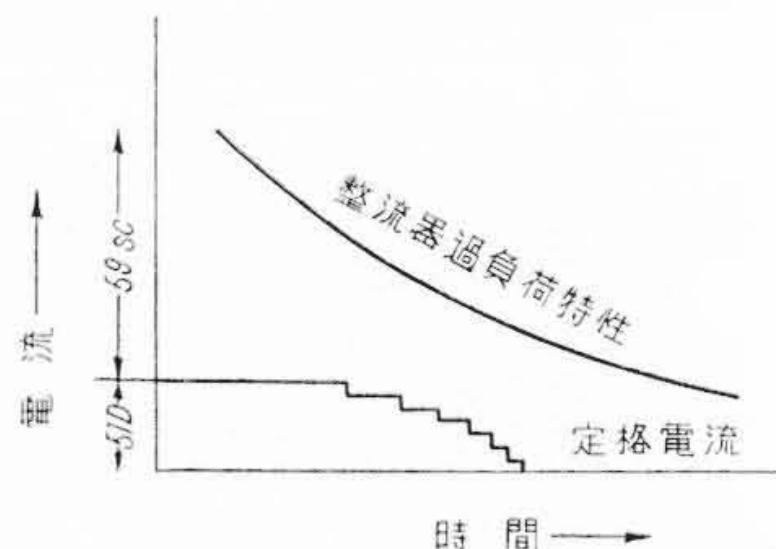
4.4 制御装置

シリコン整流器の運転、制御は電解炉の運転との密接な関連のもとに行わねばならないが、従来の水銀整流器、接触変流機などの整流器設備に比べて、補機が少なく、おもなるものは送風機のみであるため操作は非常に簡単である。単巻変圧器を所定タップ位置に整定し、送風機を運転して交流遮断器を投入すれば運転にはいるが、これらはすべて主配電盤（第 9 図）にて操作される。

一般にアルミニウム製錬用電源の自動調整は、定電流、定電圧、定電力などの方式が採用されている。電解炉の運転上からは一般に定電流方式が望まれるが、本設備のように比較的電解炉数が多く、電圧変動率の高い設備では、陽極効果による電流減少が少ない。この陽極効果を除けば、電解炉の調子による大きな電流変動はきたさ



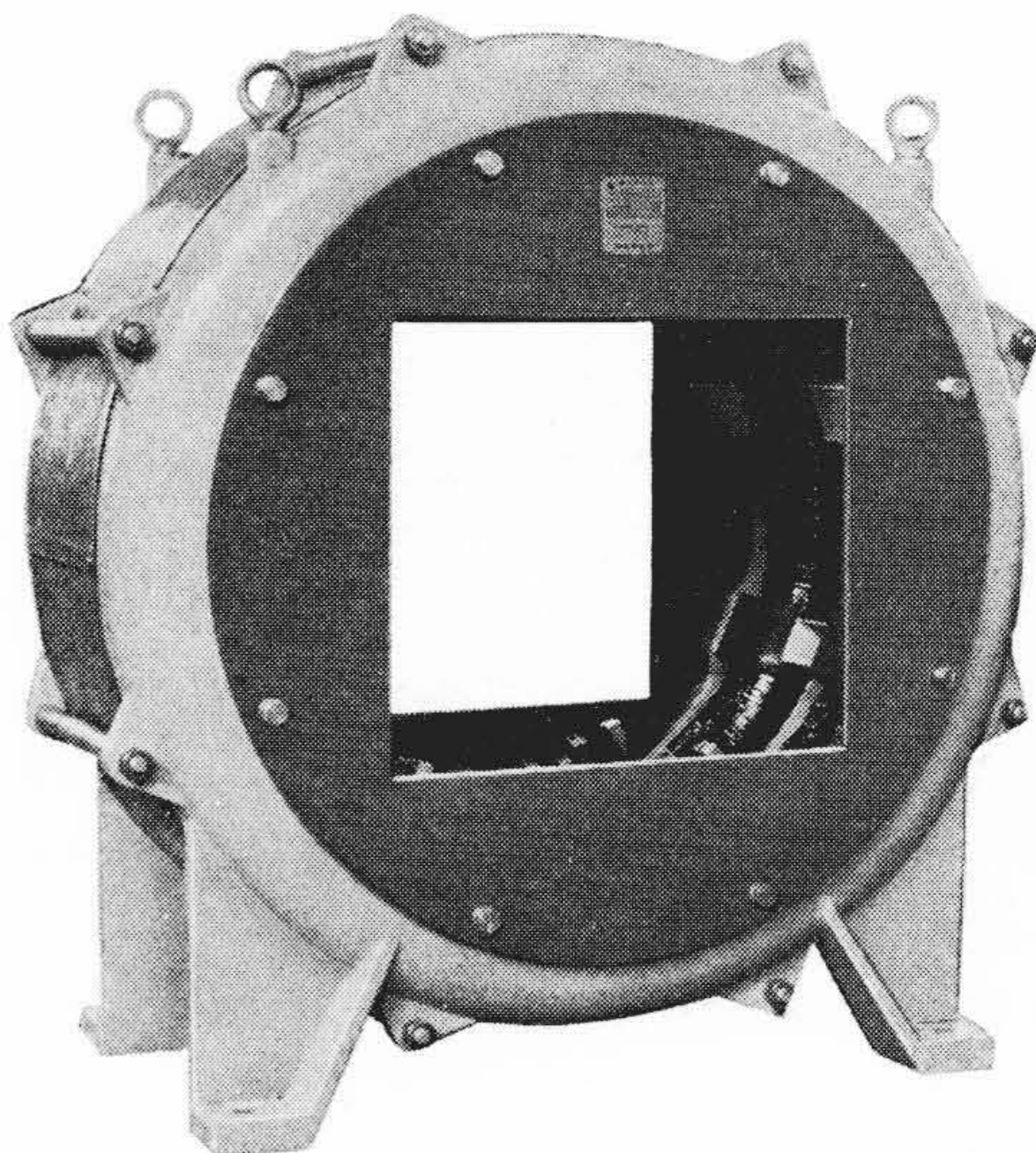
第 9 図 320V, 112,500A シリコン整流器用配電盤



第 10 図 電 流 制 御 曲 線

ないものであるから、電流変動のほとんどは電源電圧の変動に帰因するものである。電源電圧のわずかな変動に対しては、負荷時電圧調整器によって電圧を調整し、運転する電解炉数の変化や季節的な大幅の電源変動には、単巻変圧器のタップ位置を整定する方式とした。これは前回のゲルマニウム整流器の運転実績により、電源電圧は安定しており電解炉の炉調も安定しているため、必ずしも自動調整の必要がないことが判明したので、今回は自動調整装置を省略した。

第 10 図は整流器の過負荷特性と、電源変動に応ずるための電流の制御特性で、過負荷の許容範囲内に過電流を抑制し、かつ調整器の動作ひん度なるべく少なく安定した運転ができるよう、頭打ち制御の整定点を選んだ。すなわちわずかな電源上昇に基づく電流の増加では電流調整継電巻線が動作せず、大幅な電源上昇によって予定値



第 11 図 60kA 直 流 計 器 用 変 流 器

以上の電流に対しては、整流器過負荷特性との協調を考慮してただちに動作せしめ急速に降圧するようにした。電源電圧が安定していれば、負荷電流はほぼ一定であるが、陽極効果による電流の減少の割合および発生のはん度は必ずしも一定ではないので、直流総合電流と直流積算電流を監視して、ある単位時間内の生産量すなわち積算電流量が一定になるように電圧を調整する定電流時間の運転方式とした。

直流出力は生産量の基準であり、電解炉の能率、整流器の効率を算定する上にも重要で、生産原価を決める大きな要素である。このため直流電力の測定に対しては、その精度が当然問題となる。

本設備では、負荷電流の最高が 100,000A のため、120,000A 測定用の直流変流器を製作し、出力電流および積算電流の測定に正確を期した。所内直流母線が 2 系列のため、変流器も各系列にそれぞれ 1 台ずつ設置され、別に総合変流器を設けて 2 系列の電流値を加算して測定するようにしてある。

本変流器は、前回昭和電工株式会社喜多方工場に納入されたものとほぼ同様であるが、現地に設置された場合、直流母線の配置によって受ける影響で誤差が生じないように、磁氣的しゃへいを行って、隣接母線の影響を減殺し精度の確保をはかった。変流器のおもなる仕様は次のとおりである。

定 格 電 圧	D C 320V
定 格 一 次 電 流	D C 60 kA
補助変流器二次電流	A C 5A および 0.1A
変 流 器 単 独 特 性	2 台組合わせ D C 120~80 kA において比誤差 $\pm 0.5\%$ 以内

第 11 図 は本変流器の外観である。

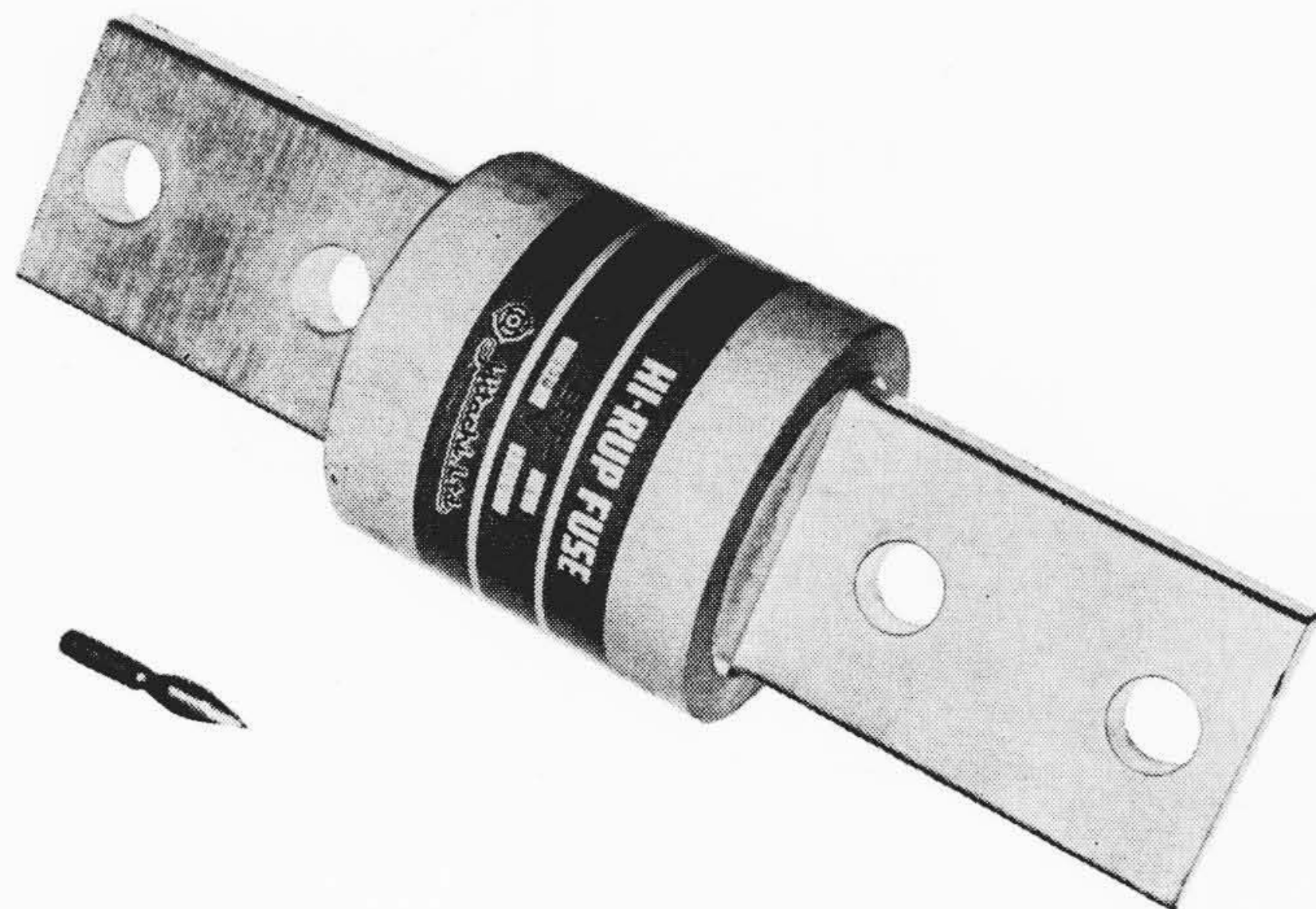
4.5 保 護 装 置

シリコン整流素子はすぐれた特長を有する一方、過電圧に弱く、過負荷耐量が小さいなどの欠点もある。したがって素子の特性を十分検討して適切な保護対策を必要とする。本設備に対しては、既納のアルミニウム電解用ゲルマニウム整流器、直流昇圧用シリコン整流器をはじめ電鉄用シリコン整流器の保護装置について、運転状況を調査しさらに研究の結果最も適切な方式として次の保護方式を採用した。

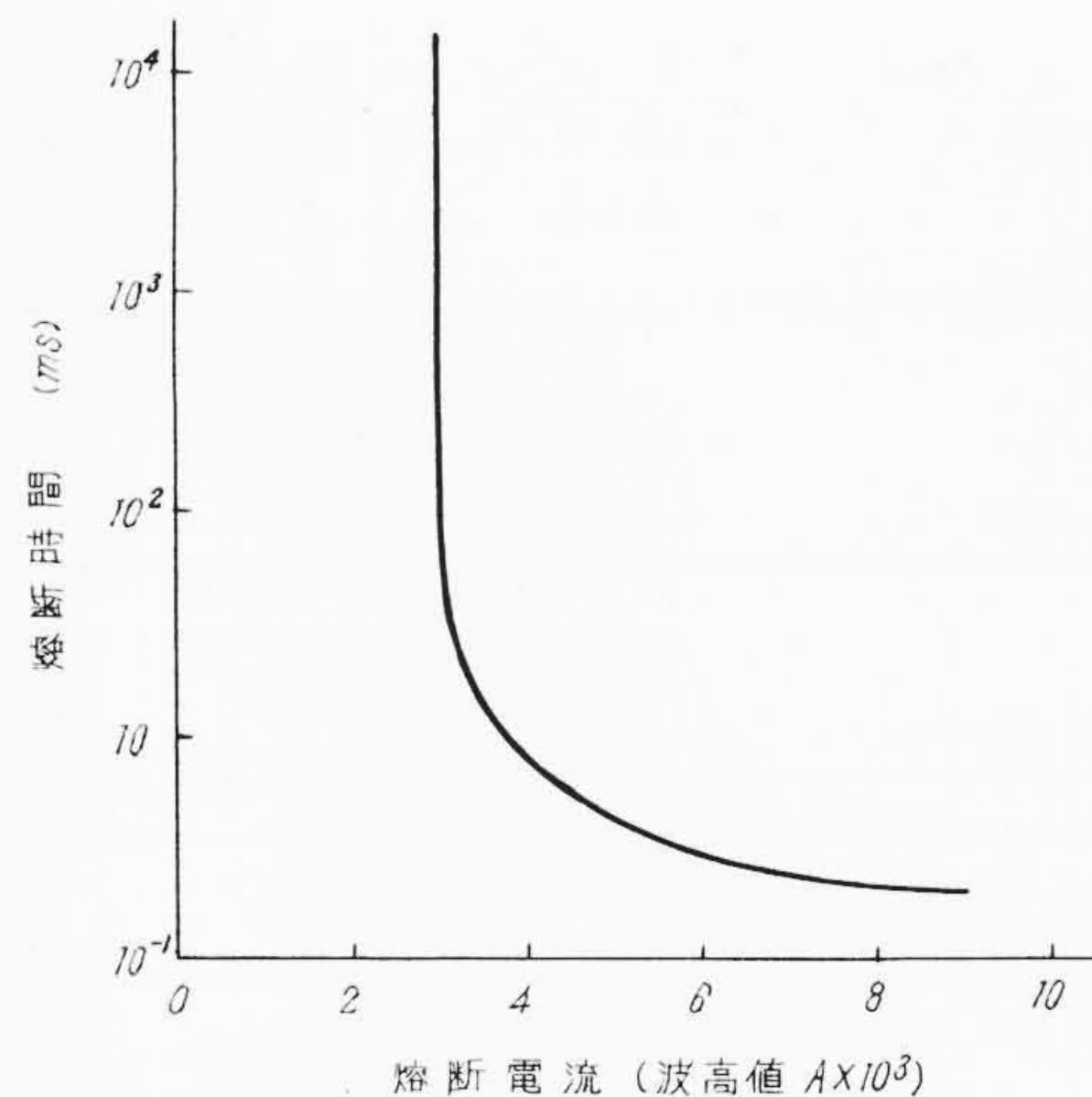
4.5.1 異 常 電 圧

(1) 商用周波電圧

電源電圧が異常上昇したときは過電圧継電器 59 により交流遮断器を遮断する。これにより整流素子に印加される逆電圧の異常上昇を防止すると同時に、電圧上昇に伴う負荷電流の異常増加も防ぐことができる。



第 12 図 ハイラップヒューズ



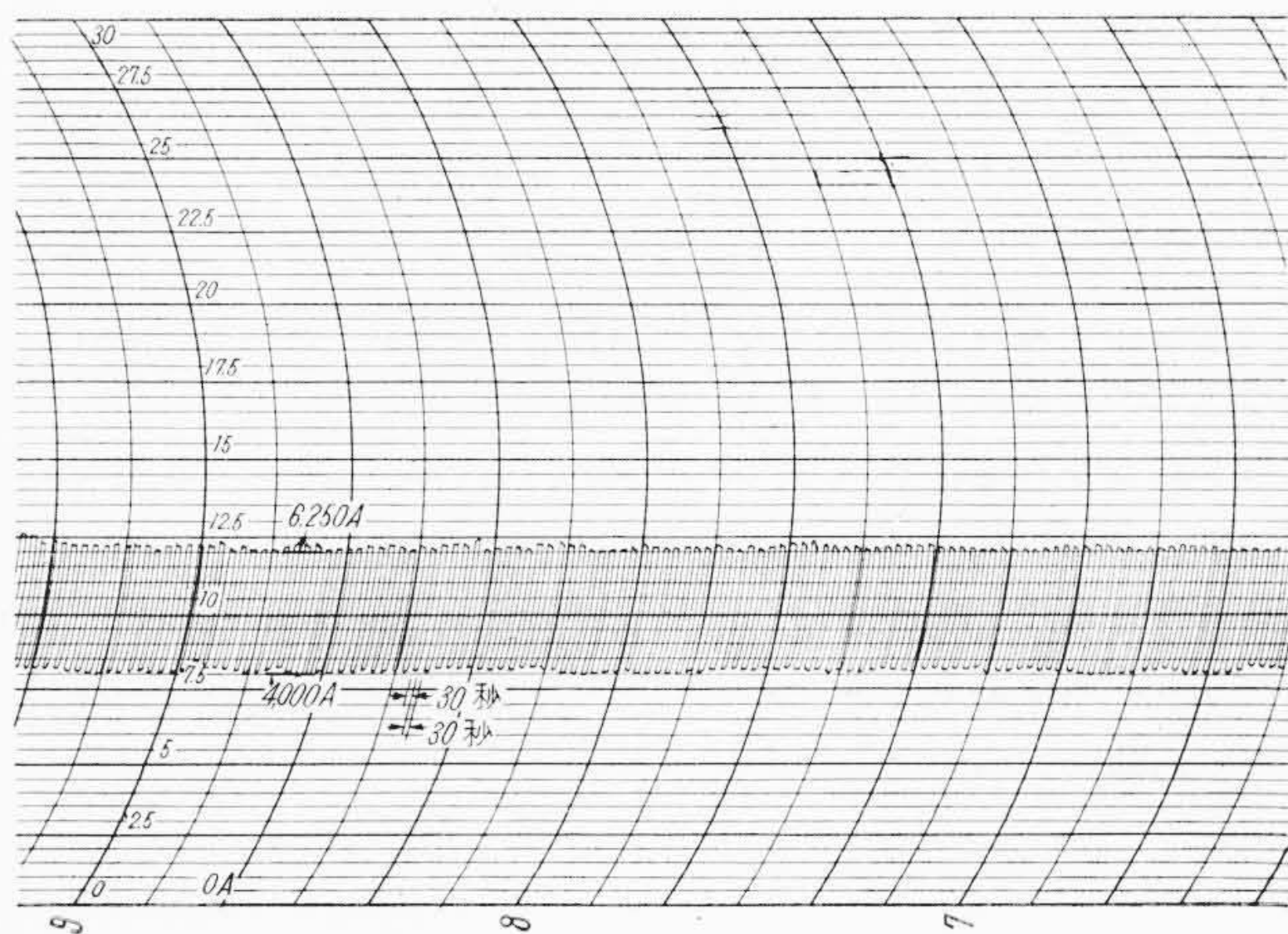
第 13 図 350V, 1,000A ハイラップヒューズ熔断特性

(2) 開閉サージおよび雷サージ

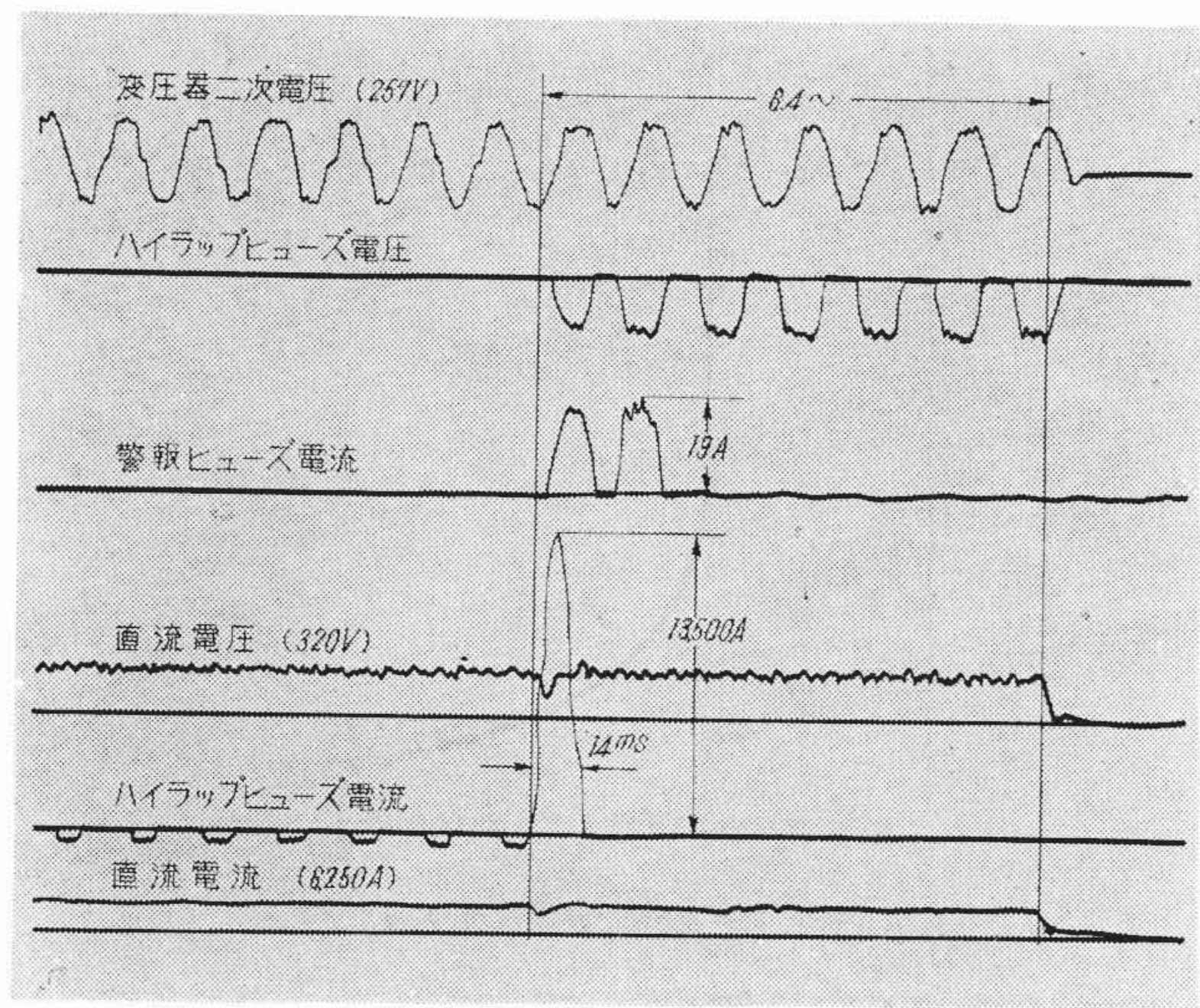
シリコン整流素子は、インパルス比が小さく 1 に近いので、サージ電圧に対しては、常に整流素子の逆耐電圧以下に抑制するように考慮されねばならない。このため、整流器用変圧器一次側に 11kV 用サージアブソーバを、二次側にはコンデンサとセレンアレスタを併用して良好な結果を得た。セレンアレスタは非直線性抵抗を有するとともに一度放電破壊しても、破壊した部分が高抵抗の絶縁物となって残部が非直線性を回復する利点がある。シリコン整流素子の逆耐電圧はセレンアレスタの制限電圧を 2 倍以上も上回っており、一般に予測される 1.5~2.5 倍の開閉サージを超過する異常電圧で初めてセレンが動作するように設計されているので、素子の逆電圧協調は十分余裕をもっとられている。

4.5.2 シリコン整流素子の事故

運転中の直列整流素子群が、万一なんらかの原因で短絡事故を起した場合、整流器用変圧器の二次線間短絡に発展する。したがって他相の健全な整流素子にも過電流が流れて事故が拡大しないよう、すみやかに短絡した整流素子を除外する必要がある。このためハイラップヒューズ（日立高速限流ヒューズ）を使用して短絡事故に備えた。第 13 図にハイラップヒューズの熔断特性を示す。4,000~5,000A（波高値）以下になると急に遮断時間が延びて腰折形となる。これは一定値以上の過電流が流れた場合には、最初の電流波高値に達する前に熔断するいわゆる限流効果の大なることを示している。



第 14 図 実負荷想定等価試験電流記録



第 15 図 直列素子故障試験オシログラム

4.5.3 過電流保護

電源電圧上昇に伴う過電流は、頭打制御用電流調整継電器により過電流を抑制し、直流側短絡および整流器用変圧器の短絡事故に対しては高速度過電流継電器50を設けてハイラップヒューズの後備保護とした。

4.6 試験結果

定格負荷試験、過負荷試験、絶縁試験、衝撃電圧印加試験、ハイラップヒューズ動作保護連動試験を行ったがいずれも良好な結果が得られた。またアルミニウム電解炉特有の変動負荷を想定して第14

図のような負荷で通電試験を行い特性に全然変化のないことを確認した。第15図は整流素子の事故を想定し、ハイラップヒューズが熔断した場合のヒューズ電流、電圧、直流電圧のオシログラムである。図より明らかなように、事故発生後半サイクルでヒューズが熔断するので短絡電流は半サイクルだけ継続し、他相の健全な整流素子の過負荷容量は、この短絡電流を数倍上回っているので十分安全である。効率、JEC-133準用の規約効率で95.1%を確認した。

5. 結 言

電流変動の急激なアルミニウム製錬の電源として記録的大容量のシリコン整流器を完成した。前回のゲルマニウム整流器の経験を基にして、シリコン整流器の特長を発揮するよう設計を行い、着手より8箇月の短時日で運転にはいることができた。本整流器キュービクルの床面積は前回のゲルマニウム整流器に比べると、容量が2.3倍に増しているにもかかわらず87%に縮小されており、kW当りの床面積比で38%に減少した。

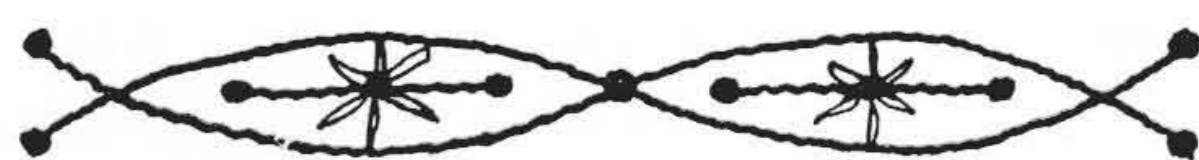
日立電力用シリコン整流素子は特性が非常に安定しており、きわめて好調に連続運転を続けている。外国製素子に對しまったくその色はない。シリコン整流素子の量産が完全に軌道に乗り、特性のすぐれたものが歩留りよく生産されて今回の大容量器を完成したが、整流素子は電圧、電流量が向上しているので、さらに小形化して高電圧、大電流整流器を製作することができる。

以上 320V 112,500A シリコン整流器の概要を紹介して、需要家各位のご参考に供したしだいである。

なお末筆ながら、アルミ製錬用電源に本整流器を採択された昭和電工株式会社の関係各位のご達見とご英断に對し、衷心より敬意を表するとともに、種々ご指導ご協力を賜り厚くお礼を申しあげる。



新 案 の 紹 介



実用新案第502849号

大 西 昇

ば ら 物 の 移 送 装 置

この考案は、機枠1に装備した主コンベヤ2とそのコンベヤ2から送り出されるばら物を受けるシュート3とそのシュートの下部に装備したコンベヤ4とからなる移送装置において、コンベヤ4の駆動用電動機を速度を制御するためのロードセル6を機枠1に支持させ、このロードセルにシュート3をつり下げた構造を特長とするものである。

積込用シュート3内にばら物がほとんどないときには、ロードセル6の働きにより積込用コンベヤ4の速度はおそいが、積込用シュート3内のばら物が一定量に達してロードセル6にかかる荷重がある値に達するとはじめて積込コンベヤは普通速度となり、主コンベヤ2から積込用シュート3に送りこまれるばら物の量と積込用コンベヤ4から送り出されるばら物の量とは平衡し平常運転が行われる積込用シュート3内に送りこまれるばら物の量がさらに多くなれば積込用コンベヤ4の速度は増大され、常に積込用シュート内に一定量のばら物が堆積されていることになる。

荷役作業終了の場合は積込用コンベヤ4のスイッチを操作し、積込用コンベヤ4をロードセル6ときりなし単独運転をさせ残ったばら物の積込みを行う。

この考案の移送装置においては、平常運転中積込用シュート内にある一定量のばら物が堆積さればら物の落下距離が小さくなるので、ばら物は破碎されることが少なく、かつ落下衝撃も小さくなり、主コンベヤ2と積込用コンベヤ4との送り出し量が平衡するので、ばら物が積込用シュートからあふれることなく常に円滑な積込作業を行うことができる。

(富田)

