

# 最近の日立水銀整流器

## The Recent Hitachi Mercury Arc Rectifiers

毛利 銓一\* 浅野 弘\* 金原 和夫\*

### 内容梗概

水銀整流器は過去において型式の変遷がみられたが、「封じ切り風冷型」にその型式が統一されるようになった。日立製作所では昭和29年に「封じ切り風冷エクサイトロン」を開発したが、31年に3,000kW 6陽極型をはじめとする一連の系列を完成した。本論文では単器大容量の記録品たる3,000 kW (CF型)を主として紹介した。

つぎに整流器型式にてしばしば単極、多極比較の問題がとりあげられる。整流器の耐逆弧特性、とくに尖頭負荷時の特性について、蒸気流の消長および格子構造より論じ、試験記録および理論上より単極型が大容量器に有利でかつ尖頭負荷特性の良好なることをのべた。

最後に定格の問題にふれ、現状において工業定格をはじめとする現行の定格につき、筆者らの考えを明らかにした。

### 〔I〕 緒 言

水銀整流器は戦後型式において、幾多の変遷があつた。しかし現在では各社ともに「封じ切り風冷型」に集約され、それぞれ固有の型式に落ち着いた。日立製作所では昭和29年に「封じ切り風冷エクサイトロン整流器」を完成させたが、そののちさらにこれを推進させて3,000 kW 6陽極型をはじめとする一連の系列を完成した。そこで3,000 kW 封じ切り整流器などについてその概要をのべ、さらに型式の問題および定格の問題に触れ、関係各位の御参考の一助に供するしだいである。

### 〔II〕 日立封じ切り風冷エクサイトロン整流器

#### (1) 型式および仕様

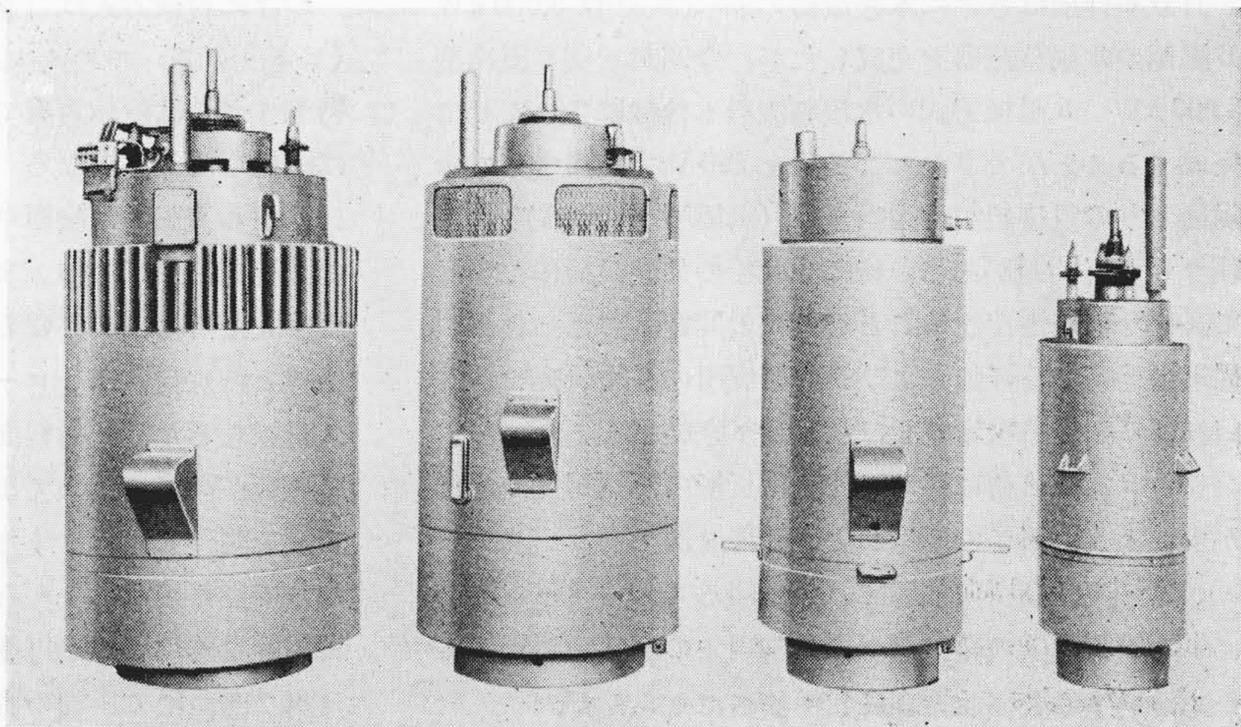
日立製作所では第1表に示すごとく、CF型よりZF型にいたる一連の系統の「封じ切り風冷エクサイトロン整流器」を開発した。CF型は最大電流容量の6槽整流器で、「封じ切り風冷型」としては本邦はもちろん欧米においても記録品である。運転中のものはBF型がもつとも多い。今後電動力応用部門をはじめとして、CF型が数多く運転に入ることが期待される。営業運転成績はいずれもきわめて良好で耐電圧特性がすぐれていることが実証されている。また「封じ切り風冷型」であり、しかも運転温度帯が広いために、当初予想し

第1表 整流タンク仕様一覧表 (封じ切り風冷エクサイトロン型)

Table 1. Specification List of Sealed-Off., Air Cooled Excitron Tank

タンク型式	CF	BF	AF	ZF
容量 (kW)(*)	3000/1500	2000/1000	1500/750	1000/500
電圧 (V)	1500/600	同左	同左	同左
電流 (A)	2000/2500	1333/1666	1000/1250	666/833
定格	重負荷公称	同左	同左	同左
連続最大電流 (A)	3,750	2,500	1,875	1,250
1タンク重量 (kg)	425	370	240	120
高さ (mm)	2,290	2,180	2,020	1,750
奥行 (mm)	1,590	1,450	1,200	1,000
幅 (mm)	2,660	2,450	2,000	1,200
全重量 (**)(kg)	4,000	3,440	2,250	1,150

註) (\*) 容量は6タンク2重星形結線の場合を示す。  
(\*\*) 冷却扇、ベース一式を含む。



CF型 BF型 AF型 ZF型

第1図 整流タンク外観図 (封じ切り風冷エクサイトロン型)  
Fig. 1. Outside View of Tanks (Sealed off Air Cooled Excitron Type)

\* 日立製作所日立工場

ていたように保守の簡易なことが実証された。

第1図に各型式の整流タンクの外觀図を示す。

(2) 最近の傾向

封じ切り整流器の最近のいちぢるしい傾向としてはつぎの二つがある。すなわち単器大容量化と単器寸法の縮小および簡易化がそれである。

単器大容量の必要性は下記のごとき理由によるものと考えられる。

(i) 電動応用方面にたいする整流器の進出はまことに目覚ましいものがある。たとえば熱間圧延設備では電動機出力の大なるものが要求される場合が多く、必然的に占床面積小さく、結線の簡易な単器大容量封じ切り水銀整流器が望まれる。

(ii) 電鉄方面では近來輸送力の増強と高速運転のため、負荷電流の尖頭値が高くなり、単器大容量の整流器が要求される。

この要求に応じた整流器が3,000/1,500 kW, 1,500/600 V 超重負荷公称定格 CF型である。

つぎに単器寸法の縮小簡易化の要求は交流電気機関車用整流器においてきわめて強く要求され、そのため技術上飛躍的な進歩がなされた。すなわちきわめて限られた空間内に大出力の交直変換装置を搭載するためには、従来使用された整流器より格段の寸法縮小化が絶対条件となつた。この要望に答えた整流器がZF型である。1,000 kW ZF型がいかに寸法縮小に努力したかは第1図より明瞭に判断される。

〔III〕 3,000 kW 封じ切り整流器

(1) 構造

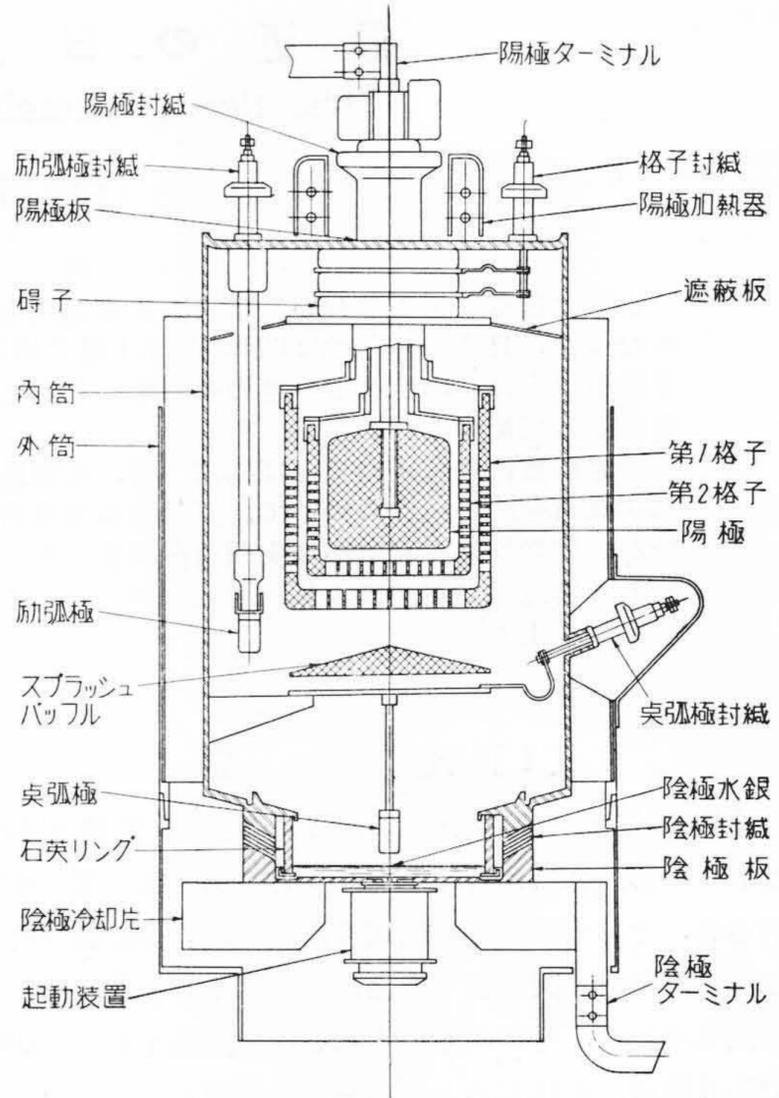
日立製作所はさきに本邦最初の排気風冷型 3,000 kW 6陽極の水銀整流器を完成したが、今回封じ切り風冷型 3,000 kW 6陽極方式の水銀整流器も他社にさきんじて完成することができた。この型を750 Vで使用する場合陽極当りの電流値が相大当きい(陽極当り 625A)ので種々の点に問題がある。特に300%の急峻負荷にたいして良好なる特性をうることが最大の問題と考えられる。従来の豊富なる経験および日立研究所の基礎研究を採りいれて格子構造を考慮し、満足すべき結果をえた。

(i) 尖頭負荷に対して、陽極近傍の蒸気密度の変化が少いように格子の厚みおよび孔径を決めた。

(ii) 尖頭負荷印加時に、いわゆるスターベーションによる異常電圧の発生などの異常現象の発生を防止するため、格子の孔径および孔数を適当にえらんだ。

(iii) 運転中の陽極温度を好ましい温度に保つべく陽極および格子寸法を決定した。

これを満足すべき構造として2重籠形グラファイト格



第2図 CF型整流タンク断面図  
Fig. 2. Sectional View of Rectifier Tank (CF Type)

子とし、格子の厚み、孔の直径、孔数および第1、第2格子の孔の重りを選定した。

このため試験成績では遺憾なくその特長を發揮し、特に尖頭負荷特性に良好なる結果をえた。試験結果については(2)を参照されたい。

つぎに封緘方式は日立製作所で完成したVEシール(ビトリアス、エナメル封緘)方式を全面的に採用した。特筆すべきは陰極封緘である。すなわち単器・大容量では陰極電流が大となる。このためたとえば陰極ロッドを挿入する方式では陰極ロッドの温度上昇過大となり、その具現は困難となる。また陰極寸法は必然的に大となり直径大なる封緘が必要となる。この点VEシールは特殊鉄板と特殊耐熱ホーロー(一種のガラス)を焼成した永久封緘なるため、材料面よりの寸法制限もなく、かつ膨脹係数が両者きわめてよく一致するから容易に大寸法の封緘を製作しうる。すなわちこの封緘方式が確立していたので点弧装置になんら不安のないエクサイトロンとして大容量器の製作が可能となつた。

第2図にはCF型の概略断面図を示す。

(2) 運転特性

整流器にとつてもつとも肝要な特性はもちろん「耐逆弧特性」である。「耐逆弧特性」については、つぎの諸点

を十分満足しなければならぬ。

(i) 平均負荷きわめて低く尖頭負荷が非常に頻りに繰返され、かつ大幅に格子制御を実施した条件下で十分の負荷耐量のあること。これは電動力応用部門に使用される整流器には特に不可欠の特性である。

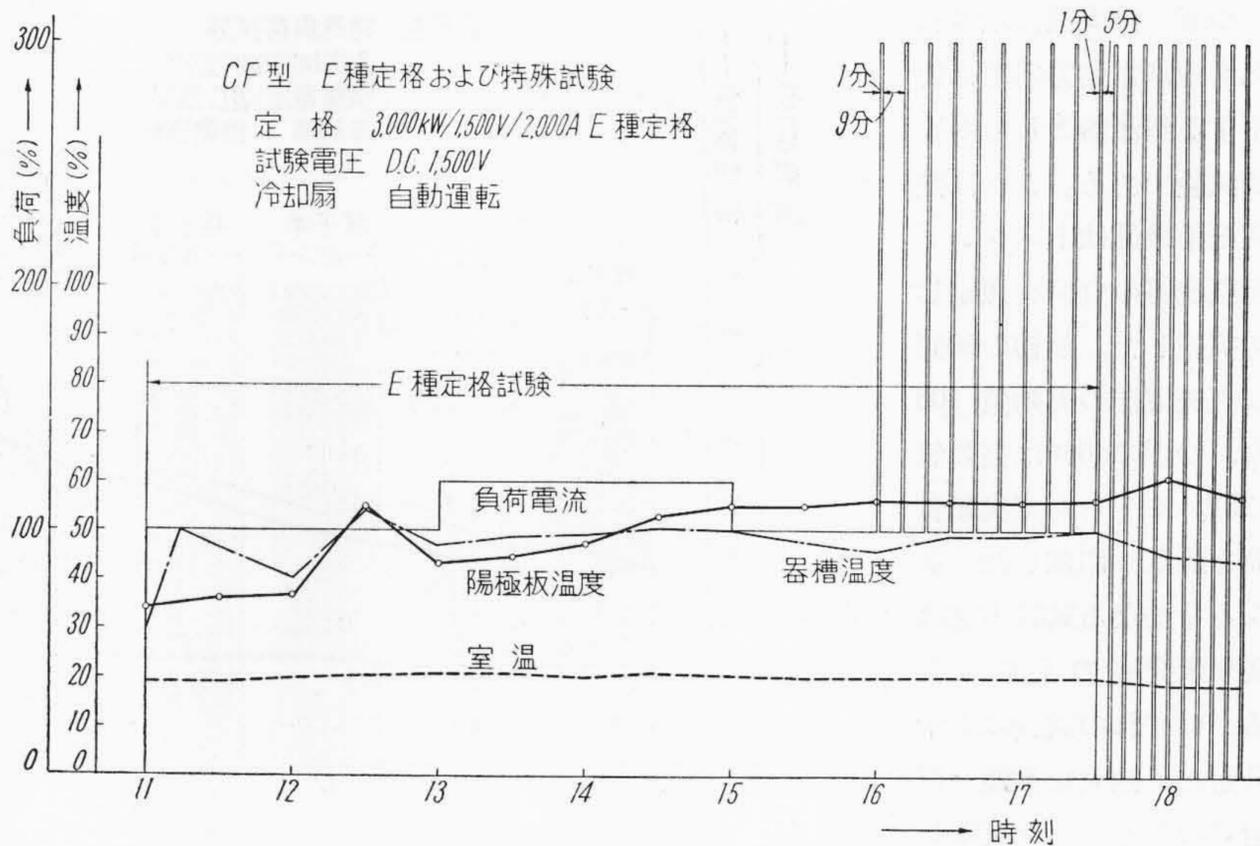
(ii) 平均負荷低く尖頭負荷が繰返される負荷条件に耐逆弧性がすぐれねばならない。これは電鉄負荷より要求される。

(iii) 連続負荷にて耐逆弧特性の高いこと。特に電解負荷に望まれる。

大略上記の要求を満足する特性を有する必要がある。3,000kW (CF型) 整流器は社内試験にてきわめて満足すべき結果をえた。こゝにその試験内容の一部を発表する。第3図は3,000kW/1,500V, E種定格試験, 第4図は1,500kW/600V 超重負荷公称定格試験である。整流器の定格については[VI]で触れることとするが、本試験により電鉄負荷に対する特性を調べた。整流器にとっては連続負荷時の耐逆弧特性は比較的良好であるが、基本負荷が低く、かつ尖頭負荷が繰返される負荷に対してはその運転責務は

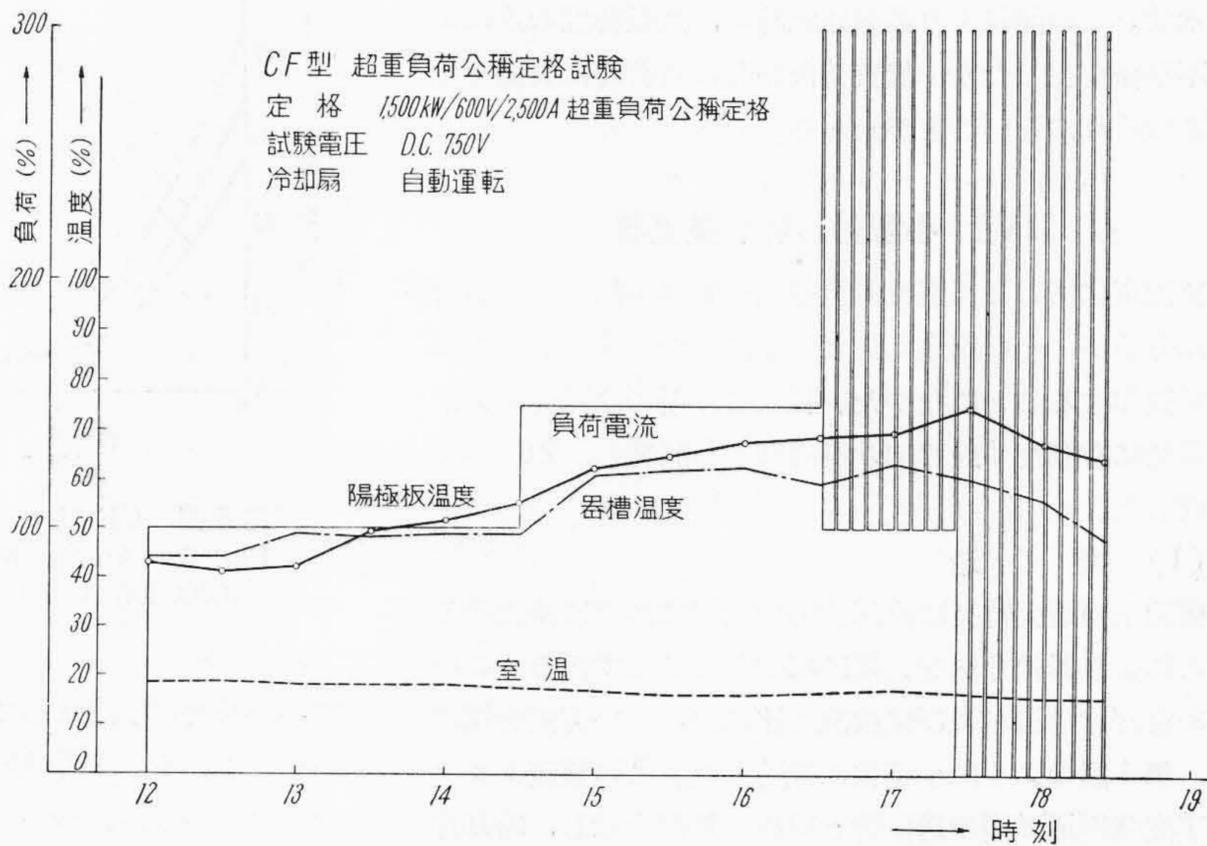
いちぢるしく苛酷なものとなることは、従来よりひろく知られたところである。整流器の耐逆弧性を決定する因子としては、陽極近傍の水銀蒸気密度、格子の消イオン作用および電子温度(電子エネルギー)が考えられる。また水銀蒸気の流動は整流器各部の温度分布および格子構造により決定される。基本負荷少く尖頭負荷が印加さ

れる場合には、水銀蒸気の流動、密度および電子温度を適当に保つことに問題がある。すなわち連続負荷には良好なるも、尖頭負荷には運転特性かならずしも良好でない整流器が報告されているのはこの理由による。筆者らはこの点にもつとも意をそそいだ結果、上記のごとき仕様に対して十分これを満足する結果をえた。



第3図 CF型 E種 定 格 試 験 (3,000 kW/1,500V/2,000A 6陽極)

Fig. 3. Diagram of Load Test (E-Class Rating) for 3,000 kW 6 Anode, Sealed-off Air Cooled Excitron Rectifier



第4図 CF型 超 重 負 荷 公 称 試 験 (1,500 kW/600V 6陽極)

Fig. 4. Diagram of Load Test (Super Heavy Load Nominal Rating) for 1,500 kW 6 Anode, Sealed-off Air Cooled Excitron Rectifier

つぎに第5図に示されたものは電動力応用に使用する整流器としての等価試験である。これは熱間圧延設備仕上スタンド用整流器の負荷を想定して実施した。最初の20回は直流電流の実効値106%、つぎの40回は実効値125%にえらんで尖頭負荷を繰返し印加した。かゝる苛酷なる試験方法は従来未発表のものである。いずれの試験にも十分耐え、強大な尖頭負荷耐量のあることを証明した。

単極型では構造上より点弧特性の良好なること

は自明の理である。第6図にはCF型の点弧特性の一部を示す。この記録より並列運転時に、点弧特性の差により不平衡を生じたり、無負荷ないし軽負荷時に失弧を生ずるおそれがないことがわかる。

〔IV〕 小型封じ切り整流器

交流電化用として整流器型電気機関車が採用される趨勢にあるが、その用途に従来の観念を一掃する小型整流器を製作することになった。日立製作所では保守および重量的に有利な「封じ切り風冷型」を開発し、ZF型を完成した。

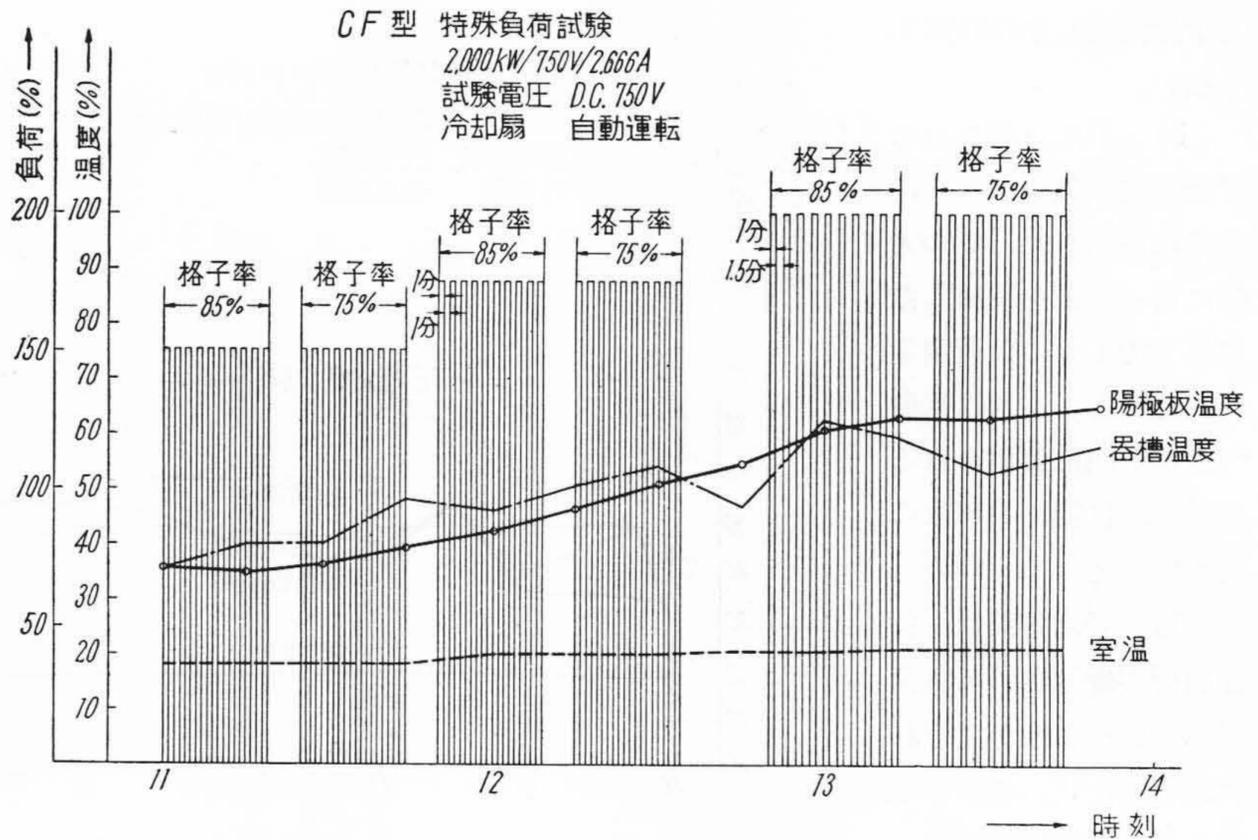
(1) 構造

構造上の最大特長は冷却能力を極度に器槽に持たせることにより器槽寸法を大幅に縮小したことである。このため冷却片構造および溶接施工法には新しい方式を採用し、第1図のように小型化に成功した。この整流タンクは丁度強制通風型の送信管と同様な外観を示し、冷却片の塊りのような感じを抱かせるものである。耐逆弧特性を良好とするために2重籠形格子を採用したので、交流電気機関車用はもちろん地上設備用として直流1,500Vにもそのまま使用することができる。

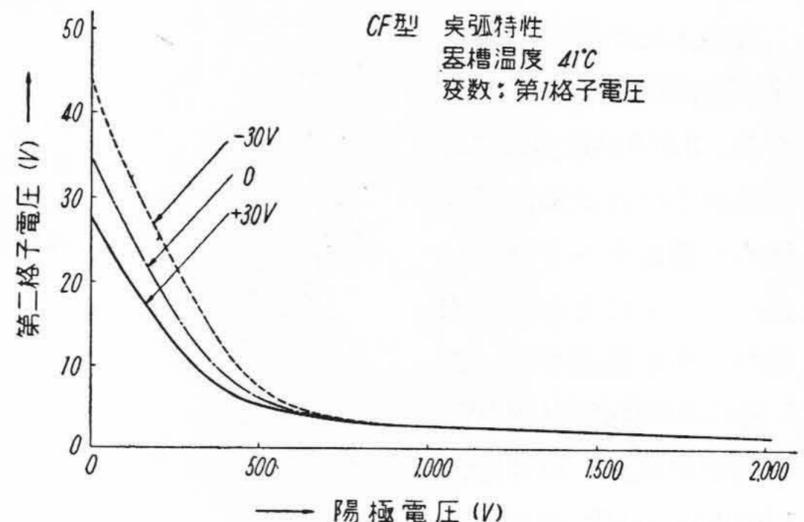
封緘方式はいずれもVEシールであり、その機械的強度はきわめて強大である。

(2) 運転特性

地上設備用整流器としての試験結果を第7図、第8図に示す。いずれも超重負荷公称定格の苛酷な試験である。かゝる定格に十分耐えるので、今後尖頭負荷を吸収



第5図 CF型特殊試験 (電動力応用等価試験)  
Fig. 5. Diagram of Special Load Test (Equivalent Test for Motor Application Service) for CF Type Tanks



第6図 CF型点弧特性  
Fig. 6. Anode Firing Characteristics for 3,000 kW 6 Anode Excitron Rectifier

する簡易変電所用として本整流器が多く使用されることが期待される。本整流器本来の交流電気機関車用としての試験そのほかについては別の機会に発表したい。

〔V〕 単極整流器の特長

従来より水銀整流器には数多くの型式があり、種々の変遷を経てきた。型式としてもつとも問題としてとり上げられがちなものに単極型、多極型の比較がある。いずれもそれぞれ特長を有しているがここでは主として両者の構造上の差から単極型の特長を明かにしよう。

単極型、多極型は構造上多くの差異がある。すなわち凝縮筒の有無、アークガイドの有無、格子構造などがある。

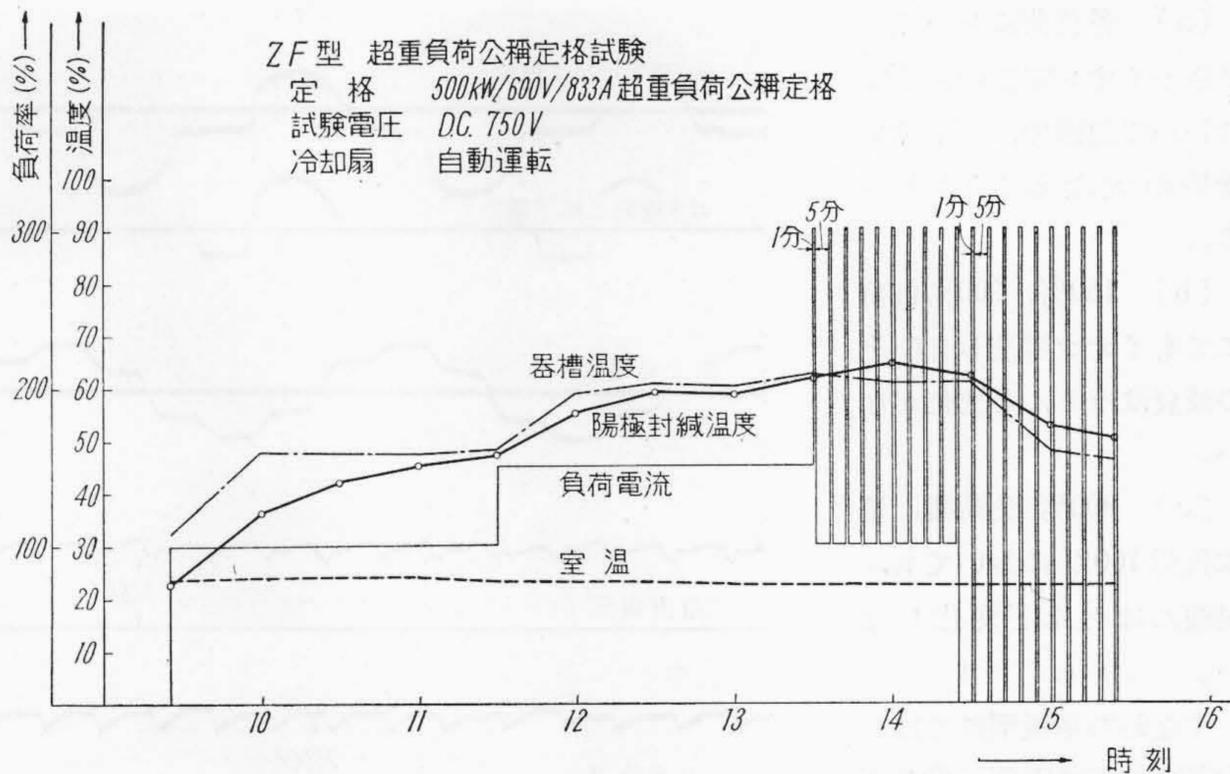
(1) 蒸気流と制御温度

多極型には凝縮筒が存在し、単極型にはこれがない。また多極型ではアークガイドが普通取付けられるが、単極型ではないものが多くかつスプラッシュバブルはかならず設けられている。

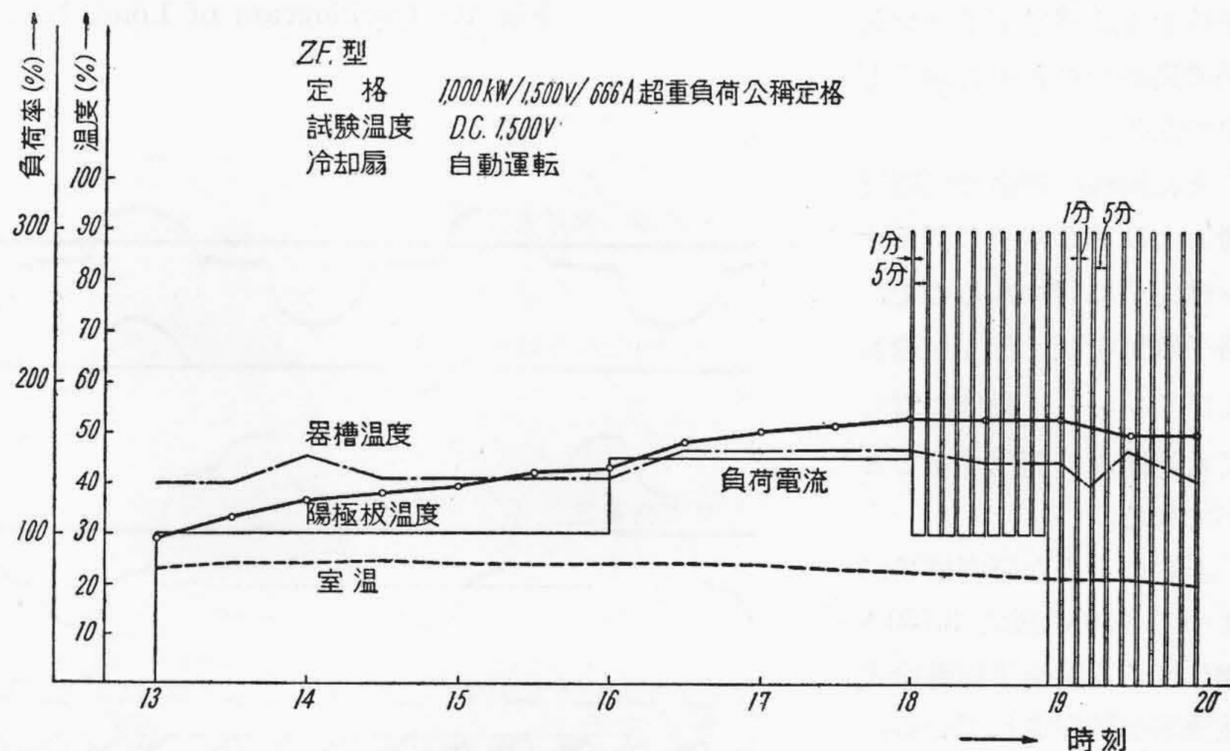
単極型では蒸気流はスプラッシュバブルによつて方向をあたえられ側面の凝結壁に至つて凝結する。大部分の蒸気はスプラッシュバブルと陰極間の冷却面で收容され、残りの部分が格子の外側に面する壁面で凝結する。負荷電流の増加に対しては、格子の外方までの空間は蒸気圧が増大し負荷に応じて十分電流を通じうるような状態に保たれるので、従来の多極型に比して尖頭的大電流における蒸気密度不足による異常電圧発生心配がほとんどない。

一方格子によつて囲まれた陽極と第2格子間の空間は第1格子外方空間の蒸気圧にほとんど無関係に低い蒸気密度に保たれている。すなわち適当に設計された単極整流器は、衝撃的大電流を通すに適するとともに、耐電圧特性もきわめて大で、結局、圧延機負荷のような急峻尖頭負荷電流に対し好適の信頼度を有するものと信じられている。

第9図～第11図のオシログラムは如実にこれを物語っている。第9図は150%負荷、第10図は300%負荷、第11図は尖頭負荷印加3分後100%負荷におけるオシログラムで供試整流器はBF型である。陽極近傍の状態を推定するものは陽極に近い第2格子の電流であり、器槽の蒸気密度を推定するものは器槽に近い第1格子の電流である。格子にはいずれも格子変圧器による矩形波電圧に負偏倚電圧を重畳した電圧が印加される。そこで格子が



第7図 ZF型超重負荷公称定格試験 (1,000 kW/1,500V 6陽極)  
Fig. 7. Diagram of Load Test (Super Heavy Load Nominal Rating) for ZF Type Tanks 1,000 kW 1,500 V



第8図 ZF型超重負荷公称定格試験 (500 kW/600V 6陽極)  
Fig. 8. Diagram of Load Test (Super Heavy Load Nominal Rating) for ZF Type Tanks 500 kW 600 V

陰極に対して電位が正の時は電子流、負の時にはイオン電流が流れる。整流器の運転特性上もつとも問題なのは陽極近傍の、しかも主電流が該陽極よりほかの陽極に転流終了した直後の状態が問題である。(逆弧は転流直後に発生する確率がきわめて高いことは広く知られている。) これは第2格子電流—イオン電流—の消長に明瞭に表わされる。すなわち陽極近傍に蒸気が流入すれば陽イオン化され、第2格子電流のイオン電流は増大し、かつ減衰(すなわち消イオン)が悪くなる。第9図～第11図のオシログラムにて第2格子電流波形より明らかに認められるものはつぎの通りである。

(a) 各負荷において第 2 格子イオン電流の減衰はきわめて急速で、消イオン効果の大なることがわかる。

(b) 150%, 300%負荷にてもイオン電流およびその減衰はほとんど変化がない。

(c) 300% 負荷後, 基本負荷 100% においても, 同様にほとんど変化しない。

すなわち単極型にては, 尖頭負荷時に陽極近傍の蒸気圧の急昇, 陽イオンの過剰はなんら存在せず, 耐電圧性および格子消イオン効果の良好なことを物語るものである。

また同様の理由で陽極近傍および第 2 格子の消イオンは完全に行はれるので, 格子制御を深く行う用途およびインバータ動作に対しても遺憾なく適用することができる。

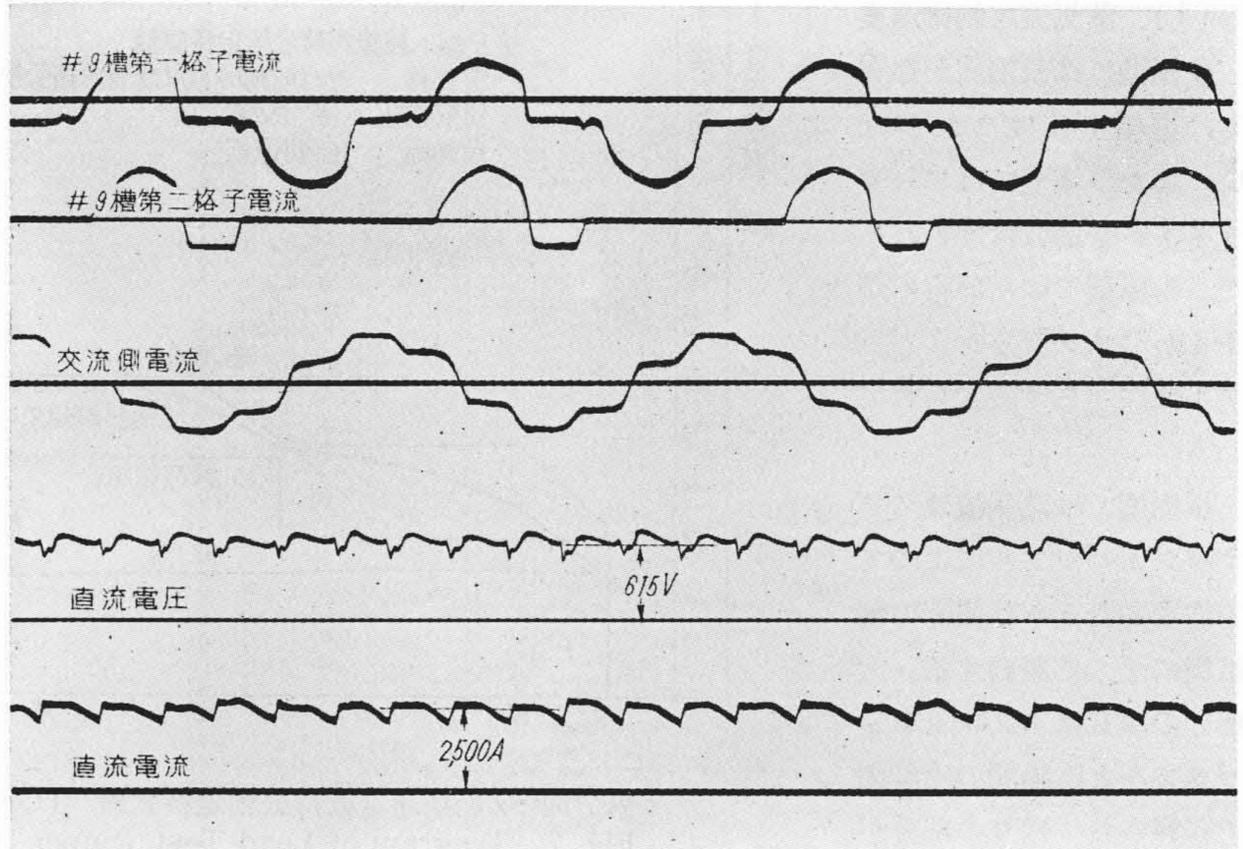
上記のような研究結果によつて 750V 級で 3,750A 流しうる 6 陽極単極風冷式整流器が製作されている。多極型では 6 陽極でかゝる電流容量を有するものは見当らない。

(2) 格子構造

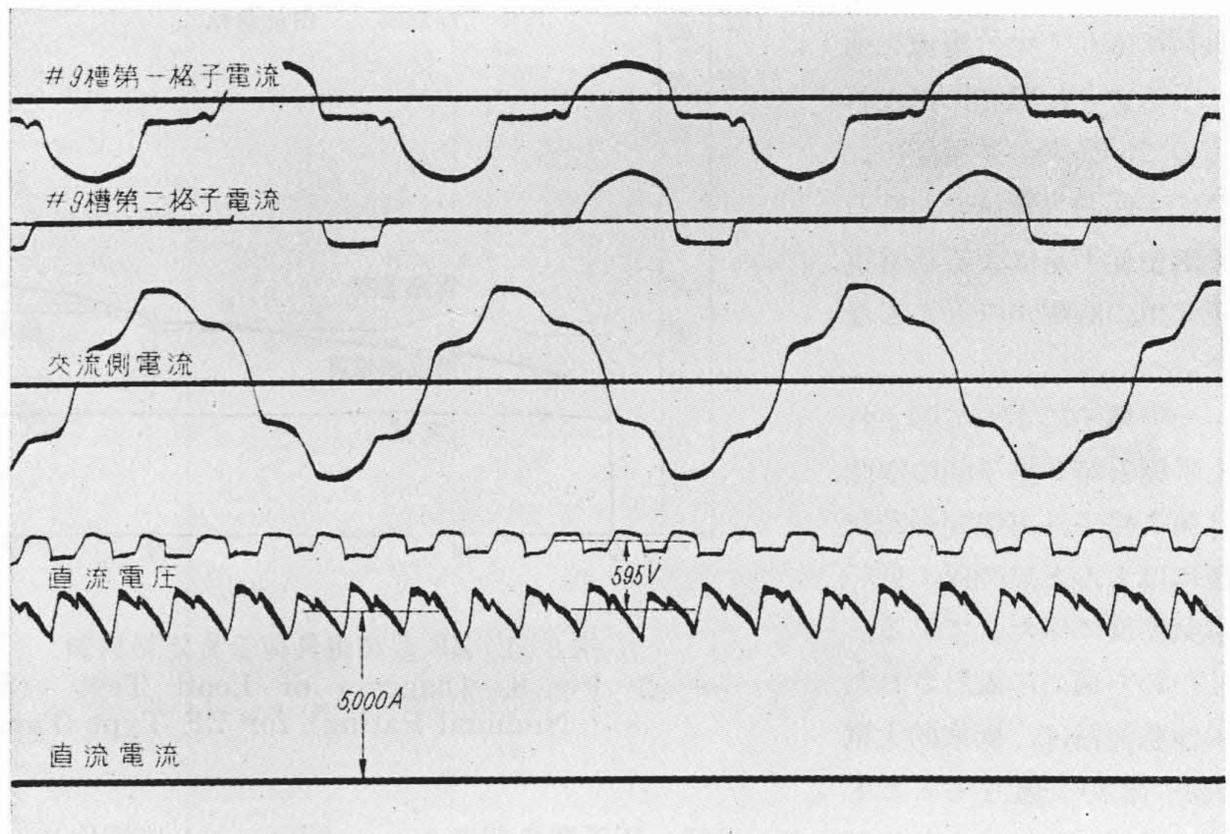
つぎに特性上見逃しえないものに格子構造がある。格子構造によつて左右される特性はつぎのものが考えられる。

- (a) 格子による消イオン作用
- (b) 尖頭負荷時の特性
- (c) 短絡遮断特性

格子構造としては上記 3 条件に適合するものでなければならぬ。しかるにこの 3 者は相反する要素を含む。すなわち消イオン作用および短絡遮断特性については格子が強い (格子孔径小さく, 厚み大なること) ことが望

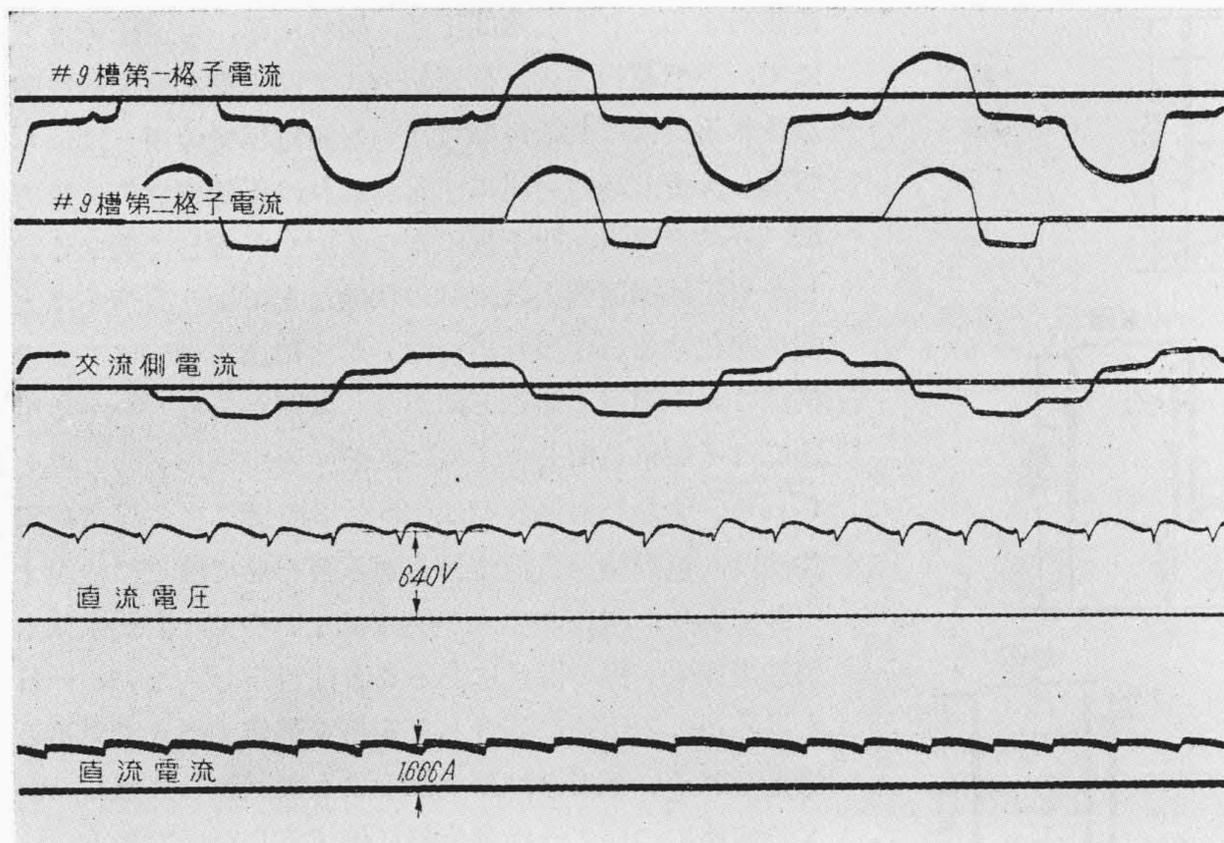


第 9 図 負荷試験オシログラム (負荷 150%)  
Fig. 9. Oscillogram of Load Test (150% Load)



第 10 図 負荷試験オシログラム (負荷 300%)  
Fig. 10. Oscillogram of Load Test (300% Load)

ましいが, 他方尖頭負荷特性および短絡遮断時の大電流に対しては格子が強いと電流密度過大となり, しばしば異常現象を発生し, あるときは異常電圧を招き, ある場合には逆弧, さらには遮断失敗に到る。このため格子構造としてはなるべく格子を通過する電流の電流密度を下げ, かつ消イオン効果を十分持たせる必要がある。単極型では単器寸法が比較的小さくとも大なる寸法の陽極, 格子構造をとりうる。そこで 2 重籠型格子の採用も可能



第11図 負荷試験時オシログラム (300% 負荷より 100% 基本負荷に戻して3分後)

Fig. 11. Oscillogram of Load Test (Oscillogram at 3 minutes after returning to 100% from 300% loading)

となり、CF型のように6タンク 3,750 A の大容量器も製作しうる。しかるに多極型ではその中央に凝縮筒があり、さらに6極あるいは12極のアークガイドを配置せねばならない。ゆえに籠型格子構造を取れば器槽外径はいちぢるしく過大となり、電弧通路は長大となり特性上、製作上不利となる。ゆえに通常バツフル格子は皿状、第2格子は皿状グラファイトを短冊状のものにて吊下げた構造をとる。単極型の籠形格子に比し多極型の皿状格子では電流密度がかなり高くなることは避けられない。

このため多極型では通常短絡遮断特性および消イオン効果の面よりゆるしうる限り格子を弱く(格子孔径大きく、厚み薄いこと)するのが普通である。多極型では陽極数を増さざる限り単器大容量を製作することにかかりの制約を受けることが考えられる。

このように単極型は最大の利点として尖頭負荷電流の繰返し印加される負荷に対してその特長を十分に発揮することができる。

### (3) 運転温度帯

水銀整流器の運転保守上安定に運転できる温度帯は広いことが望ましい。特に急速起動が要求される場合が多くなってきた。この点より単極型は本質上陽極近傍の蒸気密度が過少となることがないのできわめて安定に起動することができる。多極型では急速起動を行うにはつぎの2点を克服しなければならない。すなわち

- (a) 異常電圧を発生しないこと
- (b) 失弧を発生しないこと

このためには勢い運転温度を高く取る必要がある。単

極では単槽重量、寸法小さいために熱時定数短いため外部より加熱する場合も急速に温度上昇させることができる。交流電気機関車用整流器として現在もつばら単極が使用されるのは、運転温度帯が広いことと尖頭負荷特性が良好なることが有力な理由になつていゝと考えられる。

## 〔VI〕 定格の問題

定格の問題は古い問題であるが、また同時に新しい問題でもありうる。すなわち整流器を利用する側より要求される事項は常にかわりつゝある。特に近年その

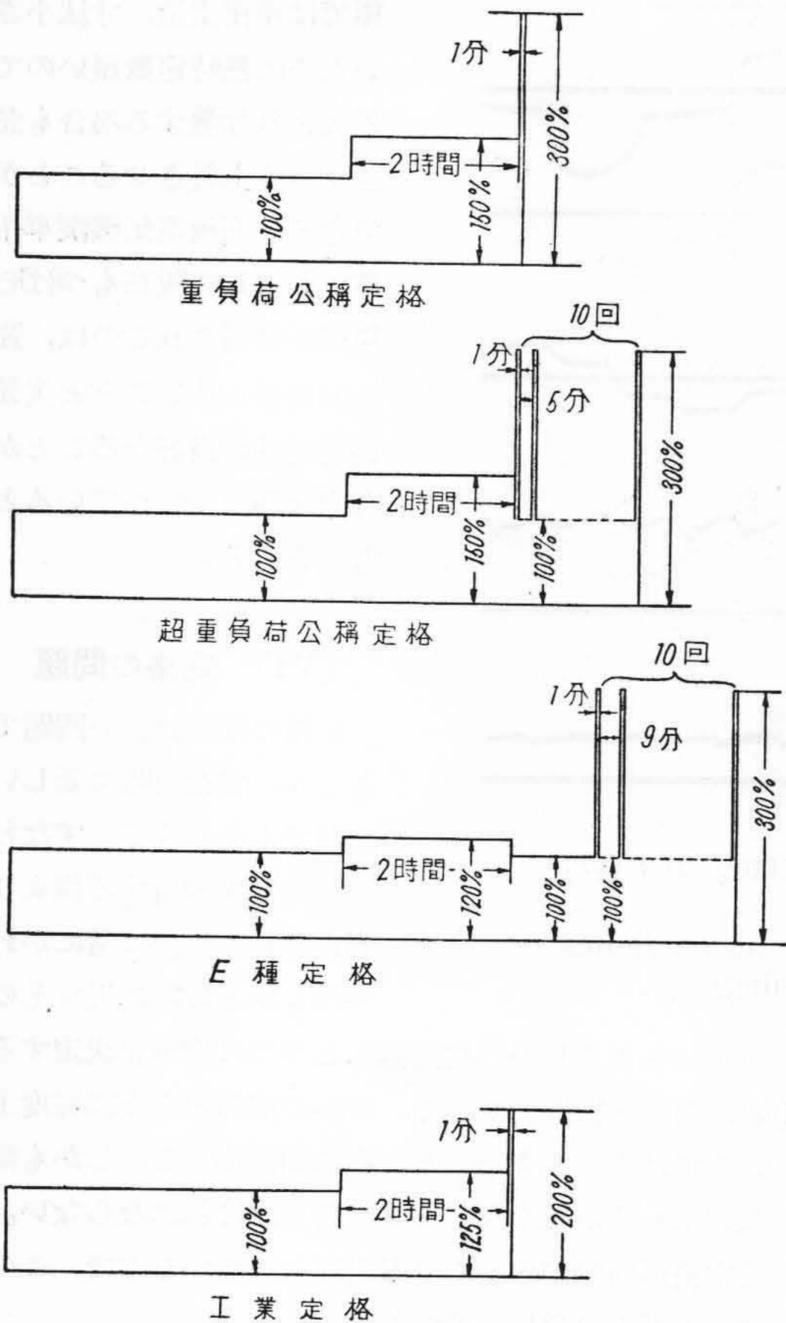
傾向がいちぢるしい。整流器にとっては定格を決定するのは耐逆弧特性であつて、ほかの機器のように温度上昇などでは規定できないところに問題がある。しかも耐逆弧性は一種の確率をもつて判断しなければならない。最近定格の問題がさかんに取上げられているので、この機会に筆者らの意見をのべたい。

### (1) 電鉄負荷

電鉄用負荷は周知のごとく平均負荷低く尖頭負荷率が高く、しかもきわめて不規則に生ずる。列車編成、運転ダイヤによつて大幅の変動が考えられる。最近のごとく列車の高速化がさげばれてきたので、起動電流はいちぢるしく高くなつていゝのが現状である。これに対して従来の重負荷公称定格ではその実勢と少し遊離した感がないでもない。その結果こゝ1~2年急に取上げられた定格に、E種定格と超重負荷公称定格がある。前者は逆弧確率を基にして規定され、後者は実負荷を基準としてきめられたものと考えられる。第12図に各種定格を示す。実負荷を考慮すれば、重負荷公称定格にかわつてE種定格、超重負荷公称定格が採用されることはより正当と考えられる。両方の定格について比較検討する必要があるが、従来の製作経験にちようすれば超重負荷公称定格なかんづく基本負荷0より300%尖頭負荷を繰返し印加することは、整流器運転責務にとつてより苛酷であることは事実である。

### (2) 工業定格

従来電動力応用部門に使用される定格は電動機の NE MA 定格と規を一にした工業定格なるものがある。これ



第12図 各種定格一覧図  
Fig. 12. List of Rating for Mercury Arc Rectifier

は100%連続125%2時間、200%1分間という定格である。この定格については非常に多くの問題を含んでいる。すなわち直流定電圧（主として補機用）電源としてはその平均負荷率を考慮すれば、工業定格はまさにこれ

に該当する。しかし熱間圧延、線材圧延、可逆圧延などにて、各個運転方式、群運転方式では実際に整流器に印加される負荷は共通母線式ないし定電圧電源用とはいちぢるしくその趣きを異にする。これは圧延素材の供給方法、パスタイム、圧下量によつていちぢるしく異なる。しかも圧延機運転上は素材の状態などにより負荷率は大幅に変化する。このため通常かかる用途に対して工業定格はこれを適用することによりかなり問題がある。かかる用途にこそ超重負荷公称定格に匹敵する定格が必要と考えられる。すなわち過負荷は125%2時間にて尖頭負荷印加法は、電動機過負荷定格と睨み合わせて慎重に検討すべきであり、現在この点が明確でないので、需要家側も製造者側も一種の混乱にあることは否定しえない。一日も早くかかる用途に適合した定格を選定すべきであると考えられる。筆者らは第5図のような試験を実施し、かかる定格について一参考資料に供するしだいである。

〔VII〕 結 言

水銀整流器は今や「封じ切り風冷型」にその型式が統一され、型式の開発は一段落を告げる時期に到達したと考えられる。日立製作所ではこの種の整流器の容量別に4種類を完成し、工業的応用をはじめとするすべての用途への準備を完了した。

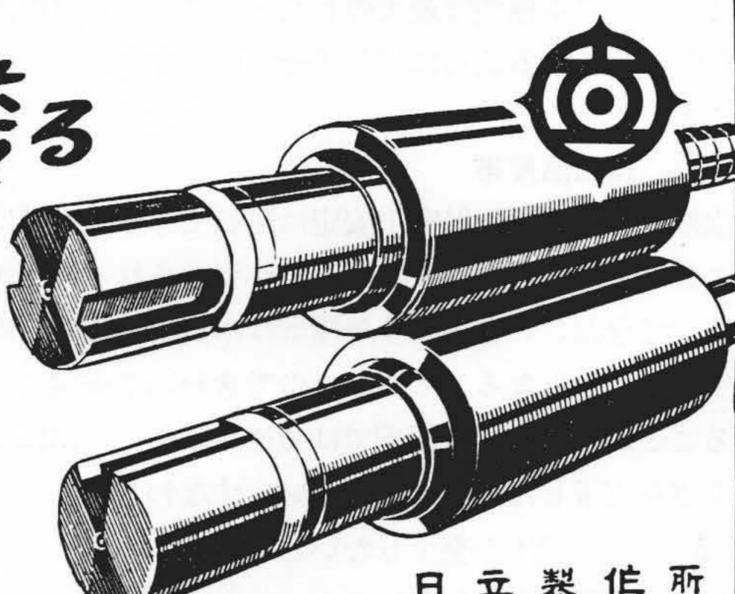
整流器の構造型式としては多極型、単極型があり、また多極型には種々の形式があり、単極型にはエキサイトロンとイグナイトロンとがあるが、われわれが採用したエキサイトロン方式は種々の負荷特性に対して優秀な耐電圧特性、耐衝撃負荷特性、短絡遮断特性および消イオン特性を有することをのべた。実際使用される方面の御参考となれば幸である。

# 耐磨耗・堅牢を誇る

# 日立のロール

チルドロール  
合金チルドロール  
グレンロール  
合金グレンロール  
铸鋼ロール

特殊铸鋼ロール  
アダマイトロール  
鍛鋼ロール  
焼入ロール



日立製作所