

水銀整流器の逆電流

木村 鐘 治*

Inverse Current of Mercury Arc Rectifier

By Shoji Kimura

Hitachi Research Laboratory, Hitachi, Ltd.

Abstract

The inverse current or the grid current of a mercury arc rectifier depends on the diffusion current due to the space ions or the ion current flowing into the grid from the arc column. The characteristics of such ion currents have been researched employing a special apparatus, and from these results obtained it is ascertained that generally the ion current increases with the lapse of time after an arc starts and amounts to a maximum value, and then decreases to a steady state gradually. These characteristics have been investigated through many experiments changing the mercury vapour density in the discharge space by controlling the cooling condition and the anode temperature. The results herein disclosed will be of some value as the reference for the study of the complex phenomena of a mercury arc rectifier.

[I] 緒 言

水銀整流器の逆弧に関連して、逆電流の量が問題になる場合が多い。実際逆弧を研究するにあたり逆電流の多いほど逆弧頻度が高いことはしばしば経験するところである。しかし必ずしもそうではない場合もある。したがって逆電流そのものの性質をよく把握する必要がある。同じ逆電流値でも運転或は構造上如何なる意味を持つているかを知らねばならない。逆電流に関しては今まで種々研究されて来たが^{(1)~(8)}、なお逆弧の機構を明らかにするには十分でない。筆者の経験によると逆弧を誘起する間接的諸原因の進展にともなつて逆電流もまた逆弧の確率を高める方向に変化する場合が多い。筆者はこの点に着目してまず逆電流と蒸気密度の関係について理論的考察を行い、次いで、冷却管及びバッフルの挿入或は電極の予備加熱等種々異つた条件の下でイオン電流の大きさ並びに波形の観測を行い逆電流の性質を究めることによつて逆弧機構の研究の有力な手がかりを得ようと試みた。

工業用水銀整流器は構造並びに動作中の内部事情が複

* 日立製作所日立研究所

雑であり、かつ外部からその動作状態を観察することが困難であつて逆電流測定結果の判定或は逆弧原因の探究に少からぬ困難をとまなう。著者はここに簡単化した模型実験により現象を把握し、漸次動的な水銀整流器の現象に考えを進める目的で、本報ではその逆電流或は格子電流に関係するイオン電流の性質を究明した。したがつて本報のイオン電流は実際の水銀整流器の逆電流とは相当異なるがイオン電流そのものの性質を知るに都合のよい資料であると思う。

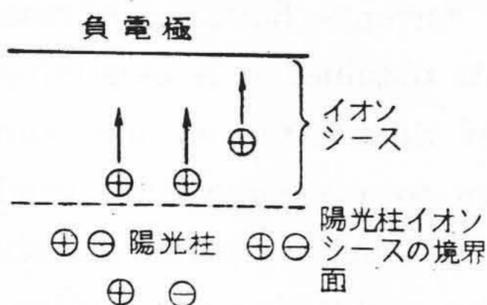
本報ではまず現象究明に必要な実験事実を羅列し、考察の章においてこれら実験事実を基にして逆電流の性質を明らかにした。

[II] イオン電流の概念

電弧放電の空間は正負両電荷を略等量に有するいわゆる陽光柱であり、この中に空間の電位に対し、負電位にある電極を挿入するとその電極には正の電荷のみが主として吸収されて、しかもその負電極を取巻き正電荷の多いいわゆるイオンシースが形成される。此の場合は正電荷としては水銀分子の陽イオンである。この陽光柱とイオンシースの境界面を通りイオンシース内に流入するイ

オン数を考える。これが本報における逆電流に相当する。陽光柱内においては種々の電界が存在し、イオンは完全に自動運動をしてはいないが、今の場合には気体論的自由運動を考えることにする。陽光柱内のある平面を考えるならば自由運動によつてここに入るイオン数と出るイオン数とは等しい。しかし陽光柱とイオンシースの境界面においてはイオンシース内に入り込んだイオンは電界の作用を受け再び陽光柱内にもどることは少く単一方向にのみイオン流が存在することになる。即ち自由運動をしてイオンシースと陽光柱の境界を負電極側に通過したイオンはもし何か他の力が作用せねばすべて負電極に吸収される。この量はイオン密度及び温度によつて定まる量である。

今第 1 図のように自由運動によつて陽光柱とイオンシースの境界を負電極側に通過するイオン電流を i_1 とす



第 1 図 イオンシース
Fig. 1. Ion Sheath

る。このイオン電流は何の力も作用せねばイオンシースの電界によつて負電極に吸収されるが、実は今の場合には多数の中性水銀分子が存在し、これらの分子との衝突によつて再びはね返されるものがある。又イオン同志の衝突によつてもはね返されるものもあるが、これは僅かであるから無視される。

前者のはね返されるイオンの量を i_2 で表わせばイオン電流として負電極に吸収される電流 i_z は

$$i_z = i_1 - i_2 \dots\dots\dots (1)$$

で表わされる。このはね返されるイオン量はイオンシース内における中性水銀分子の密度 ρ_1 に関係することが容易に察せられる。

今 ρ_1 が $d\rho_1$ だけ変化した時の i_z の変化が $-di_z$ であつたとすると di_z は $-d\rho_1$ に比例する。 i_z は一個のイオンの電荷、イオン密度、イオン速度の積で与えられるが今は密度に比例する抵抗力を受けることを意味する。又現在流れている電流 i_z にも比例するから

$$di_z = -ki_z d\rho_1 \dots\dots\dots (2)$$

なる式が成立する。 k は厳密にいえばイオン密度、イオン速度、シースの幅、電界等に関係するが大略の考えとしてここでは装置の構造及び周囲条件に関する常数として考える。(2) 式を積分すれば

$$i_z = \text{Const. } e^{-k\rho_1} \dots\dots\dots (3)$$

が得られる。ここで $\rho_1 = 0$ なる場合の i_z はいわゆる中性分子との衝突を行うことなくすべてシース内に吸収される電流であり、いかえれば(1)式における i_1 に相当する。

故に $\rho_1 = 0$ $i_z = i_1 \dots\dots\dots (4)$

とすれば

$$i_z = i_1 e^{-k\rho_1} \dots\dots\dots (5)$$

が得られる。この式で $\rho_1 \rightarrow \infty$ ならば $i_z \rightarrow 0$ で(1)式では $i_1 = i_2$ になり、すべてのイオンがはね返えされてイオン電流は流れないことになる。このような場合は実際には生じないが理論上何等矛盾しない。

さて水銀整流器において側面の温度を大にすればイオンシース外の内部の蒸気密度 ρ_2 が大になり、それにつれて内部のイオン密度も大になる。一面又 i_1 はイオン密度及び(イオン温度)^{1/2} に比例するが、イオン温度が余り大きい変化がないとすれば結局イオン密度に比例することになる。このイオン密度はある範囲内では大略蒸気密度 ρ_2 に比例すると考えられるから今試みに(5)式を

$$i_z = \text{Const } \rho_2 e^{-k\rho_1} \dots\dots\dots (6)$$

とおけば i_z は蒸気密度の変化に対して始め大になり、ある最高値に達して、後また減少する過程をとることが推察される。後節のイオン電流に関する諸現象は(5)式、(6)式によつてよく説明される。

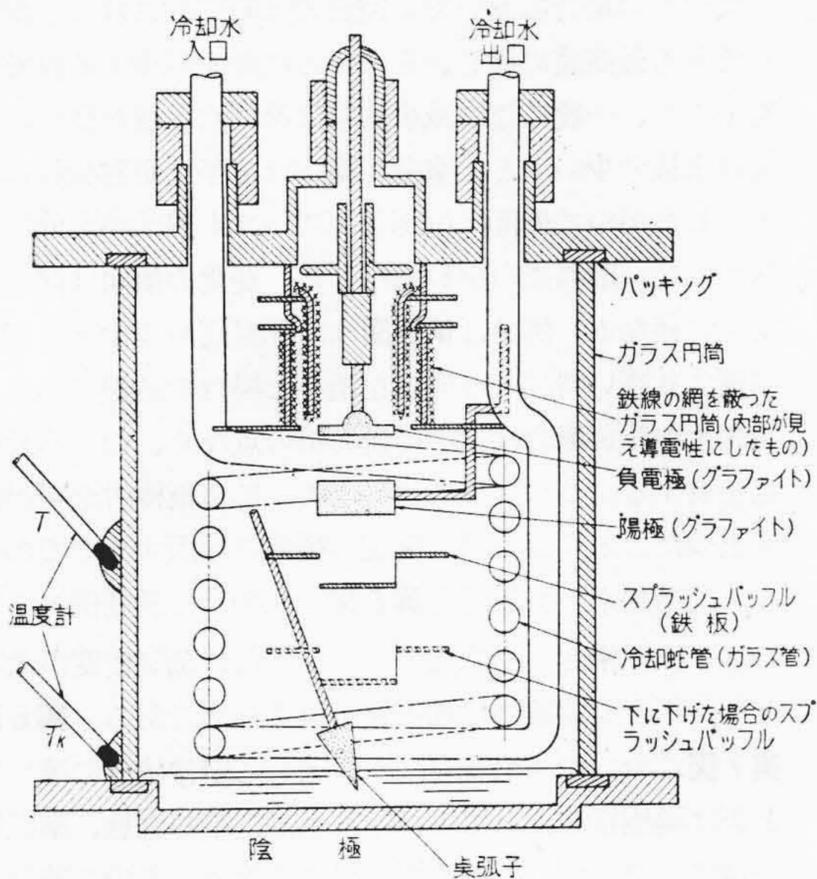
[III] 実験装置及び方法

逆電流の性質探究上冷却効果の異なる二つの型について研究することにした。実験には第 2 図及び第 3 図のようにガラス円壺の両端にパッキングを施した装置中に陽極、陰極、負電極、スプラッシュバップル、点弧子及び冷却蛇管を設けた装置を使用した。

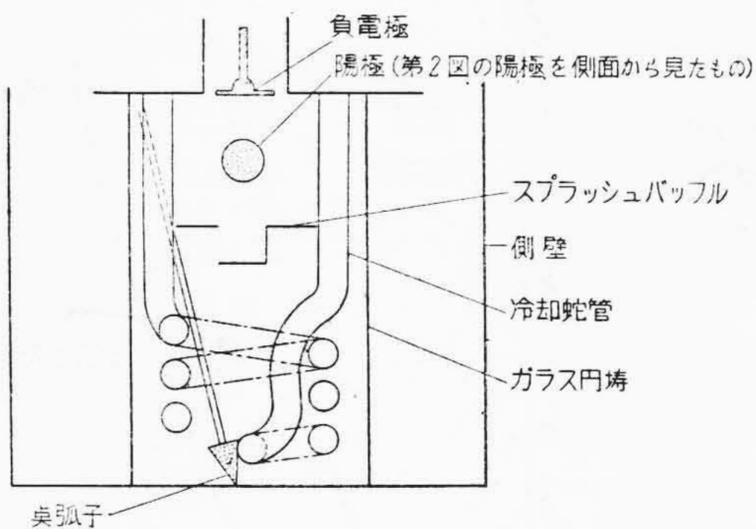
構造上の主な違いは第 2 図に示す如く (I) 型は大きい冷却面を持つているが一面陰極輝点の位置からは冷却面は相当離れている。第 3 図の (II) 型は冷却面は小でかつ全体が更にガラス円壺で囲われているが、陰極輝点の位置は冷却面に近い。又スプラッシュバップルには第 2 図に示す構造のものをを用いその位置は第 2 図の実線の位置(上)と点線の位置(下)との二種類である。

放電回路及び測定回路を第 4 図に示す。陰極輝点を固定する意味から点弧子を使用し、毎サイクル陽極電圧の最大値に相当する位相において点弧するようにした。したがつて陽極電流は毎サイクル 1/4 サイクルの間流れる。

負電極には絶えず陰極に対し負電圧を抵抗を通して与える。逆弧電流はこの抵抗と並列に設けたコンデンサーを通して流れ、逆電流は抵抗と直列に設けた検流計によ



第2図 実験装置 (I) 型
Fig. 2. Experimental Apparatus (Type I)

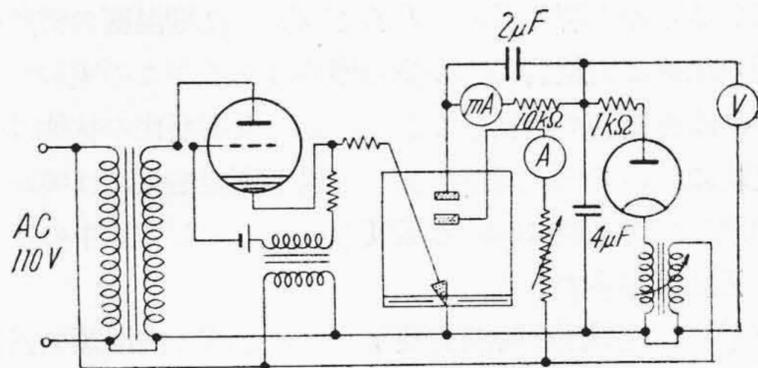


第3図 実験装置 ((II) 型)
Fig. 3. Experimental Apparatus (Type II)

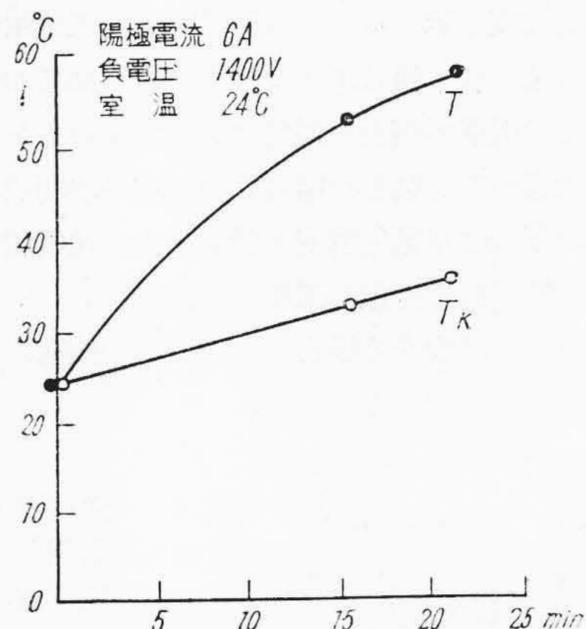
つてその値が測定される。したがって逆弧の発生によつて検流計を破損することなく実験が継続される。この場合並列コンデンサの存在が検流計の指示平均値に及ぼす影響は実質的に認められない。但し電流波形即ち第4図 $10\text{ k}\Omega$ の両端の電圧波形はコンデンサー $2\mu\text{F}$ がない場合は相当の振動を含むが、コンデンサーを入れるとこれが微弱になる。

この装置においては逆弧が起れば勿論負電極に輝点ができるが、検流計によつてもその指示の急増から認定される。コンデンサーがなければ十分な逆弧に発展しない。検流計は脈流性逆電流の平均値を指示する理であるが、本報の逆電流曲線はすべてこの平均値で示される。

整流器の壁温は第2図に示すように陰極附近 (T_k) 及びスプラッシュバップル附近 (T) の器壁に取付けた水



第4図 実験回路
Fig. 4. Experimental Circuit



第5図 経過時間と器壁温度との関係
Fig. 5. Relation between Time and Wall Temperature

銀温度計の指示によつて表わされる。電弧放電中の器内における極めて広範な蒸気密度分布を推定する代表的な器壁温度を求めることは困難であるが、ここでは密度の大体の変化の様子を知ればよいのであるから一応上記の温度 T 及び T_k を測定して器内蒸気密度の目安とする。又冷却水量は大体 2 l/min で冷却面積は (I) 型では約 420 cm^2 , (II) 型では約 120 cm^2 である。又水温はすべて出口で測定した値を示す。

[IV] 逆電流の諸性質に関する実験結果

現象に対する説明は考察の章に譲ることにしてまず主な結果を挙げることにする。

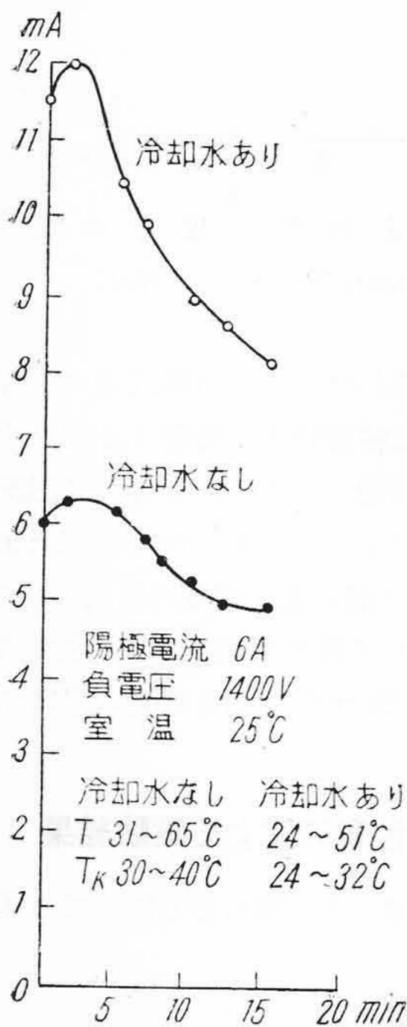
[1] (I) 型の場合 (第2図)

(A) 時間経過と温度 水銀整流器内部の現象を考察するには内部の蒸気密度に対する大体の見当を付けねばならない。その尺度として器壁温度を使用した。この器壁温度は内部の蒸気密度と定量的に関連づけることは困難であるが、定性的にその変化を示す尺度として用いられる。第5図は時間経過と器壁温度との関係の一例を示す。時間経過にともなう器壁温度の上昇は内部温度の変化、いかえれば水銀蒸気密度の変化の様子を表わし

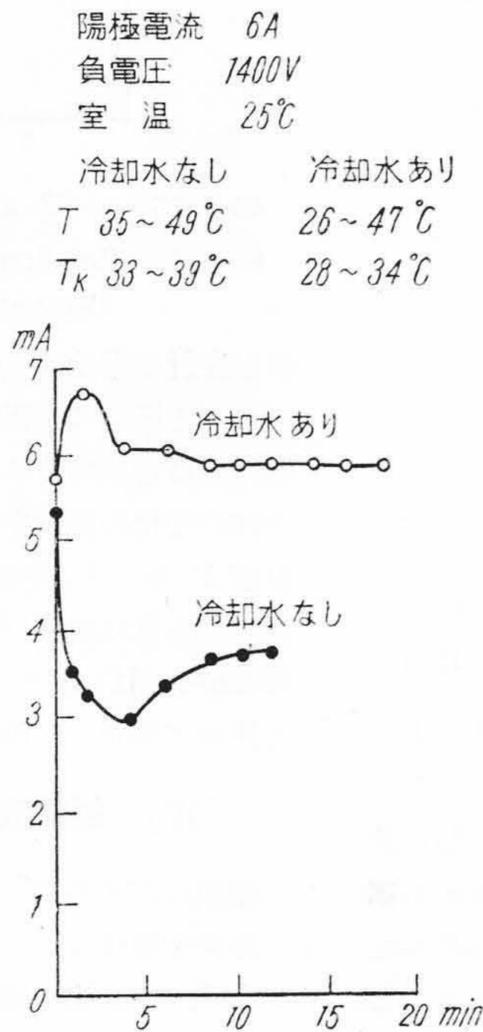
ているものと解される。 T 及び T_k の初期温度の実験範囲の差異は定量的には多少の影響はあるがこの実験の目的には実質的に無視してよい。この温度変化の状態は各実験においてほぼ同様であつて以下測定結果には実験の初期及び終末期における温度のみを附記して途中の変化の記録は省略する。

(B) 逆電流の時間的变化 逆電流と内部蒸気密度との関係を定常な状態において研究することは困難であるため、時間経過にともなう逆電流の変化を以て蒸気密度と逆電流の関係を考察することにする。本項は逆電流の基礎的性質を示すもので重要である。工業用整流器においても又これと同じような結果が得られており⁽⁷⁾、本研究はその機構考察上の裏付けをなすものである。第 6 図は冷状態から起動した場合の逆電流の時間的变化であつて、冷却により蒸気密度が低下すると逆電流が増大することが知られる。但し工業用整流器においては冷却すると逆電流が減少する場合もあるがその機構は後の考察の章において説明する。

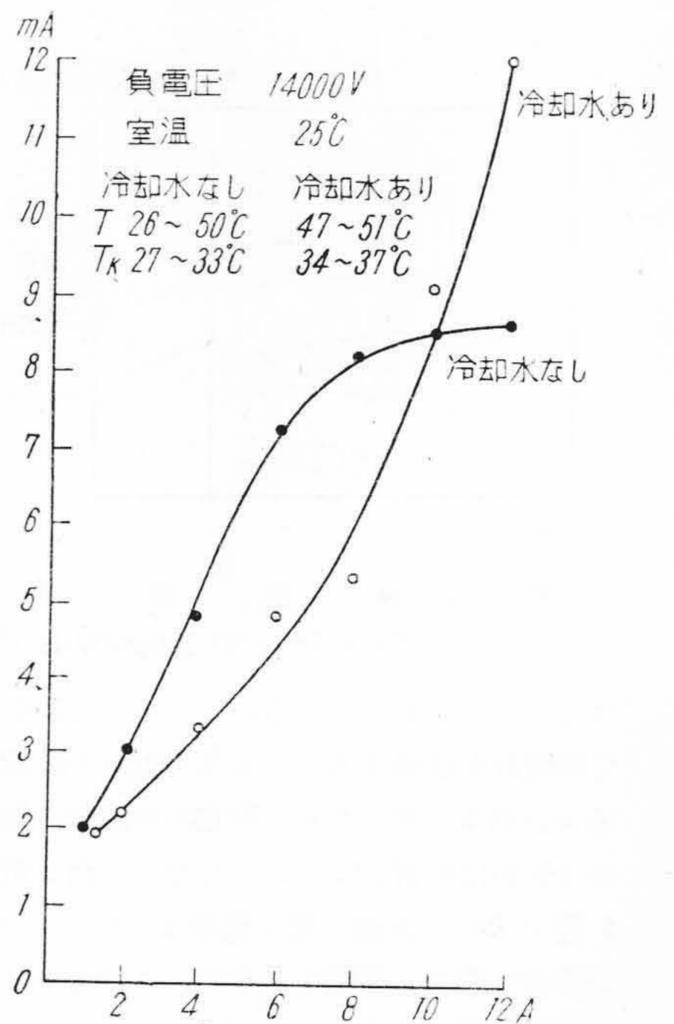
又何れの場合においても逆電流は時間的にはまず漸増してある最高値に達し、それから漸次減少する性質を有するが、一般にこの減少過程は冷却水温度が高いほど冷却水量の少いほど、室温が高いほど早く定常状態になる。したがつて外部は冷却されていても内部が十分に冷却されない前にこの実験を行うと、変化の傾向は同じでも値は異なる。例えば第 7 図は内部温度が多少まだ室内温度より高い時期から測定を始めた場合の曲線であり、冷却水のない場合は途中で最大値の点なく、むしろ最低点を有する。これは後に述べるように負電極附近の温度が上つたことによる蒸気密度の稀薄に起因するのであろう。又冷却水のある場合第 6 図に比較して最高値が下るのはイオン密度が十分大にならない前に蒸気密度が大になつてイオン電流の増加を停止するためである。第 6 図第 7 図において相当長時間を経過して定常状態に達したときは陽極電流、負電圧、冷却水温、冷却水量、室温等を常に一定に保つことが困難であるため、多少の差異はあるが、条件が同一なればほぼ一定のイオン電流値に落



第 6 図 冷状態から変化した場合の経過時間と逆電流の関係 ((I) 型)
Fig. 6. Relation between Time and Inverse Current in Case of Starting from Room Temperature (Type (II))



第 7 図 内部のやゝ温つた状態から変化した場合の経過時間と逆電流の関係 ((I) 型)
Fig. 7. Relation between Time and Inverse Current in Case of Starting from a Little Warm State (Type (I))



第 8 図 陽極電流と逆電流の関係 ((I) 型)
Fig. 8. Relation between Anode Current and Inverse Current (Type (I))

着いてくる。第6図及び第7図の結果を総合すると次のことがいえる。即ち逆電流は一般に時間の経過にしたがつて最高点、最低点を経て定常に達する。但し周囲条件によつては変化の途中で最高点のない場合或は最低点のない場合もある。したがつて工業用整流器においては冷却、電流、陽極附近の熱容量即ち負荷の変化に対する熱的履歴が複雑に相関連して種々な性質を示すものであるから、負荷或は時間経過に対する逆電流の変化を調べて(上記性質を基にして)内部状態の判断をしなければならない。

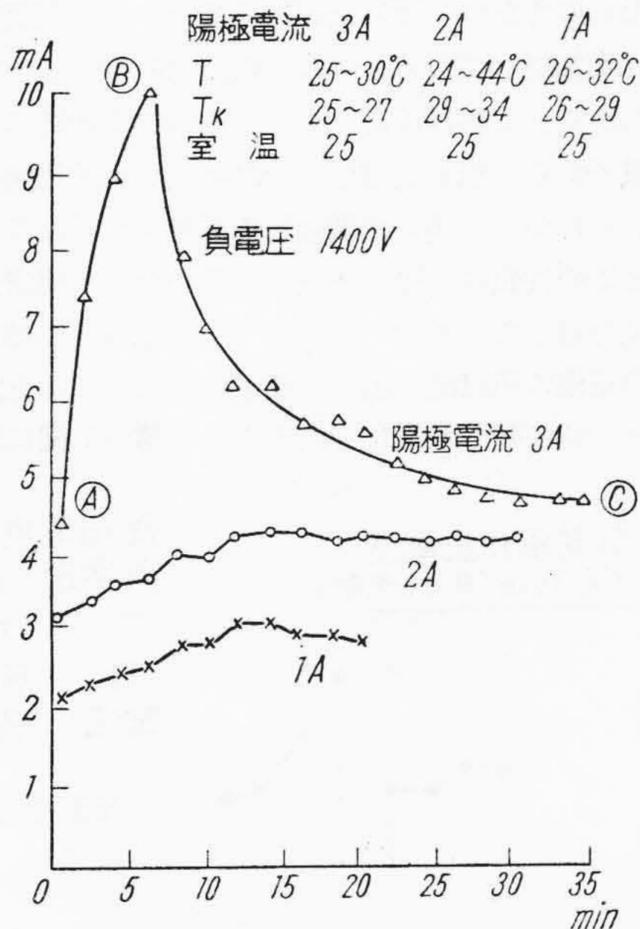
(C) 陽極電流と逆電流 我々が水銀整流器を運転する際に必要なのは陽極電流と逆電流の関係である。陽極電流の増加は電子或はイオン密度の増加とともに蒸気密度の増加を来し、かつ陽極附近の加熱も起きて現象は頗る複雑であるが、なるべく蒸気密度の上昇を来たさないように速かに陽極電流と逆電流の関係を調べた。それでもなおかつ温度の上昇が起るものであるが実験の性質上止むを得ない。これらのことも考慮に入れて後章に考察することにする。第8図は時間の経過を待つことなく速かに電流を増加して測定した逆電流である。この場合逆電流は蒸気密度の小さいときには陽極電流の増加とともに著しく増加するが蒸気密度の大きいときには飽和

の傾向をたどる。逆電流は陽極電流の増加速度したがつて蒸気密度の変化速度とともに増加状況が異つてくるものであるから蒸気密度の変化と内部の電荷密度の変化を合せ考えて判断を下さねばならない。第8図は器内における蒸気密度と電荷密度の追従の仕方を示す一例であり逆電流考察の参考となる。

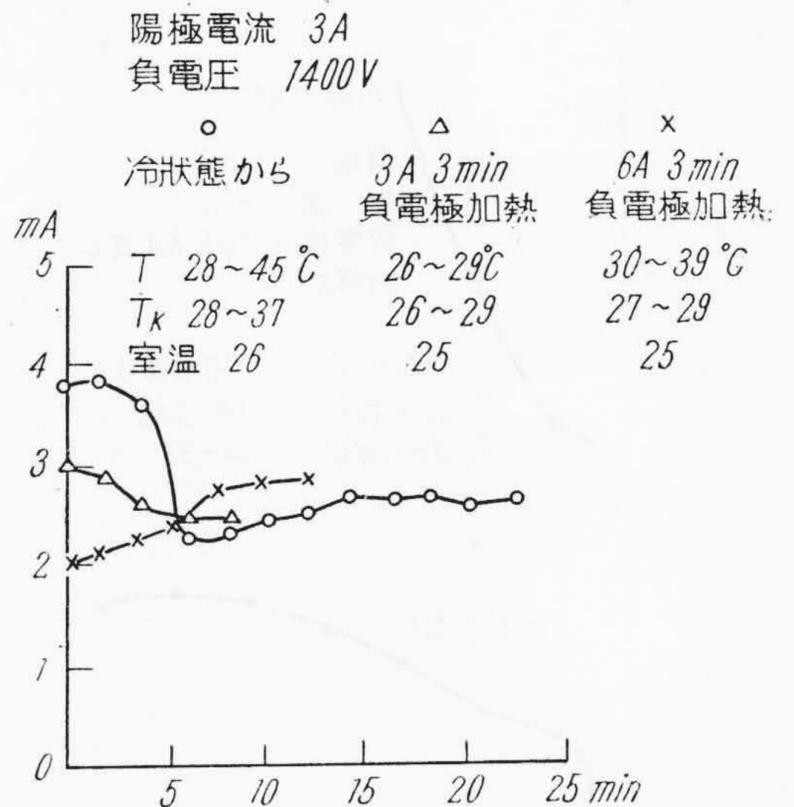
[2] (II) 型の場合 (第3図)

(I) 型、(II) 型においては冷却の程度が異なるから逆電流にも差異を生ずるものであり、その性質探究上まず(I) 型と同様な実験の結果を述べて比較検討する。

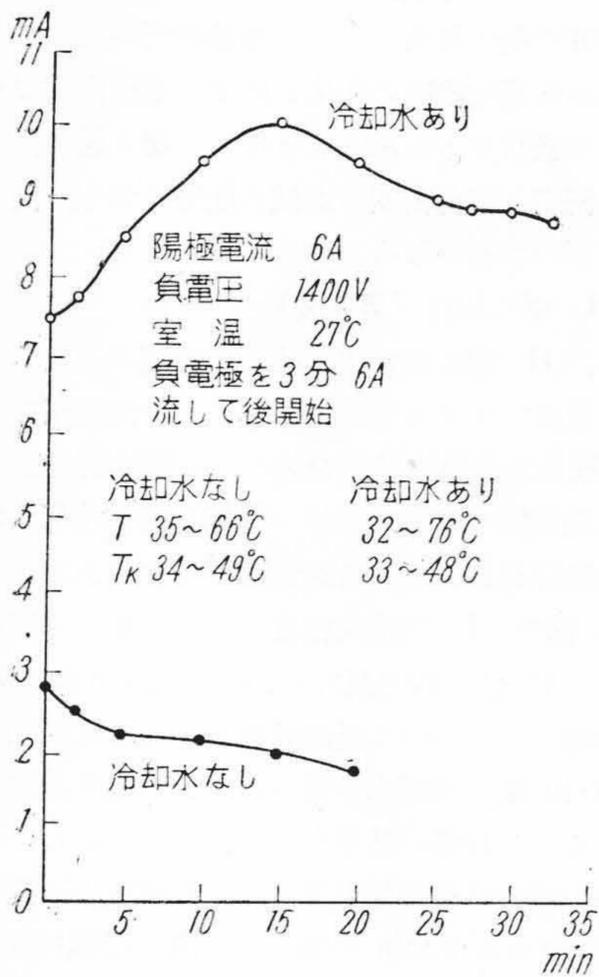
(A) 逆電流の時間的变化 第9図は冷却水を流した場合の時間経過に対する逆電流の変化である。この変化は第6図の(I) 型蒸気密度の分布の場合と同様な傾向を有するが、値は相当異なり、陽極電流 3 A の場合は時間の経過にしたがつて最高値を有することが明瞭にわかる。第10図は冷却水を流さぬ場合の逆電流の時間的变化である。これ等の結果からは次のことがわかる。冷却水のない場合は負電極温度がある程度以上に高いとき(負電極加熱 6 A, 3 min の場合)を除き起動初期の逆電流上昇過程がない。冷却水のある場合とない場合とを比較すると前者即ち蒸気密度の小さい方が逆電流が大であり、第6図の結果と一致する。これは考察の章に述べるように冷却による蒸気密度の差異によるものである。第11図は陽極電流 6 A の場合の逆電流であり、同一陽極電流なる第6図と比較して相当時間が経過した後、即ち



第9図 冷却水を流した場合の経過時間と逆電流の関係 ((II) 型)
Fig. 9. Relation between Time and Inverse Current in Case of Cooling Water Feeding (Type (II))

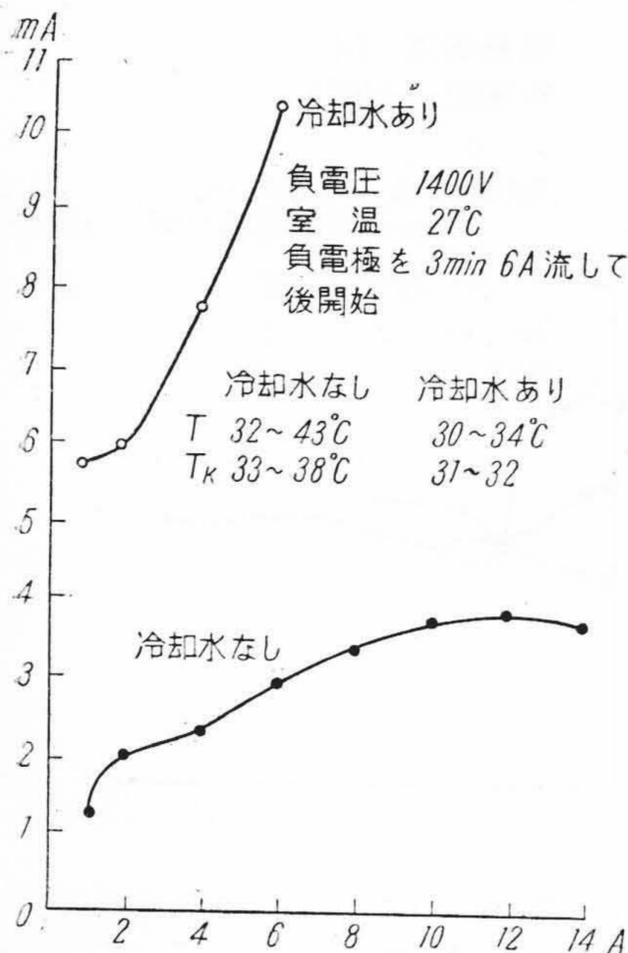


第10図 冷却給水しない場合の経過時間と逆電流の関係 ((II) 型)
Fig. 10. Relation between Time and Inverse Current without Cooling Water Feeding (Type (II))



第 11 図 経過時間と逆電流の関係 ((II) 型、陽極電流 6A)

Fig. 11. Relation between Time and Inverse Current (Type (II), Anode Current 6 A)

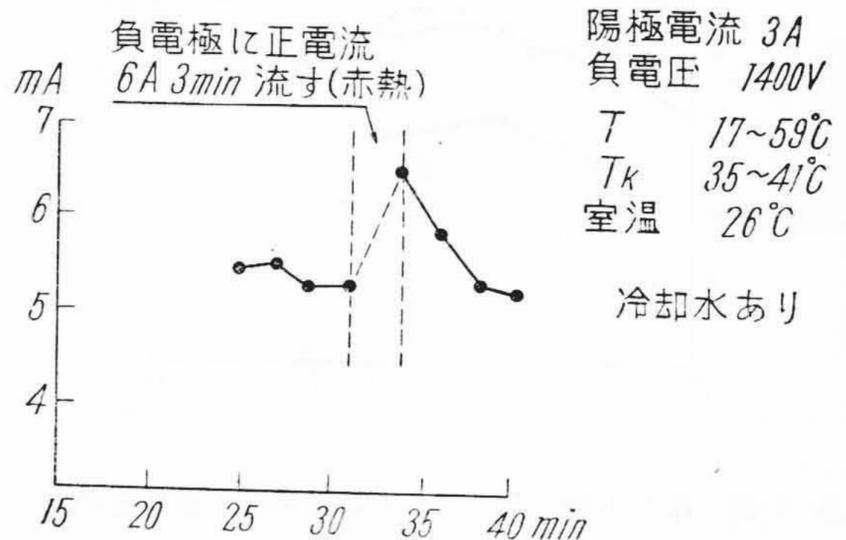


第 12 図 陽極電流と逆電流の関係 ((II) 型)
Fig. 12. Relation between Anode Current and Inverse Current (Type (II))

ほぼ定常状態における逆電流の値は蒸気密度の小さいときの方が大であることがわかる。工業用整流器の場合にはその使用状態が時間経過にともなう逆電流の変化のどの部分に相当するかを判定して逆電流と蒸気密度の関係を論じなければならない。

(B) 陽極電流と逆電流 時間経過をまつことなく電流を上げて行つた場合の陽極電流と逆電流の関係が第 12 図である。同図及び第 8 図から次の点が判る。(I) 型の場合は電流の小さな時は冷却水のない場合がある場合より逆電流が大きい。しかし電流が大になればこの逆になる。又 (II) 型の場合は電流の大小にかかわらず常に冷却水のある場合の方が逆電流が大きい。これは後に考察の部に述べるように陽極電流の増大にともなうイオン密度の増大と蒸気密度の増大にともなうイオン密度の増大及びイオン速度の減少が微妙に相間連してくる結果と考えられる。

(C) 負電流の温度の影響 工業用水銀整流器の運転中においては、内部の蒸気密度の状態、ひいてはイオン密度に陽極温度が相当の影響を持っている場合が多い。このため負電極を予め熱した場合のイオン電流の変化を調べて見ることにした。逆電流を測定する前に予め負電極に正電流を流して負電極を熱しておくこと逆電流の時間的変化の様子は異なってくる。第 10 図はこの影響を見たものであつて予め負電極に種々の値の電流を流してこれを加熱しておくこと初期逆電流は減少するということがわかる。これは冷却水のある場合でも同様に見られる性質である。但し負電極の予熱時間が長く周囲の温度上昇、したがつて蒸気密度騒乱の影響をともなうようになることこの性質は明瞭に観測され難くなる。相当長時間逆電流を通じている間、途中で一たん逆電流を切り、3 分間負電極に正電流を流して加熱した後再び逆電流を流してその値の時間的変化を測定すると第 13 図に示すよ



第 13 図 負電極を予備加熱した影響 ((II) 型)
Fig. 13. Effect of Preheating the Negative Electrode (Type (II))

うに負電極を加熱したことによつて逆電流が増加する。これらの実験結果を総合すると次のようにいえる。即ち起動初期の逆電流の上昇過程において予め負電極に正電流を流してこれを加熱すると逆電流は減少し、逆電流減少過程においては負電極を加熱することによつて逆電流は上昇する。これは考察の章において述べるように負電極が熱せられたことにより負電極附近の蒸気密度が稀薄になつたことに起因する。

[3] スプラッシュバツフルと逆電流

スプラッシュバツフルによつて蒸気流及び電弧路が制限を受け逆電流も自ら変化を受ける。したがつてこの問題は水銀整流器の構造決定上必要であるからここにその一例を示して逆電流の傾向を述べる。スプラッシュバツフルの有無及び位置の逆電流に及ぼす影響を比較すると第1表のようになる。即ち冷却水のある場合の逆電流はスプラッシュバツフルの位置が高い方が大である。これは第1表から知られるように逆電流が大きいほど蒸気密度は小になる範囲即ち逆電流一時間経過曲線の減少過程に属しておるからスプラッシュバツフルの高い方が冷却効果の多いことを意味する。冷却水のない場合の逆電流はスプラッシュバツフルの位置が高い方が実験の初期は少いが時間の経過にしたがい大になる。この際バツフルの低い方は時間経過にともなう逆電流の減少過程に属して蒸気密度が高い。しかしバツフルが高いと時間経過にともなう逆電流の増大過程に属して蒸気密度が低い。ここからもバツフルが高い方が冷却効果が大きいことを示

第1表 スプラッシュバツフルの有無と逆電流
Table 1. Inverse Current Variation Due to Splash Baffle and Its Position

実験条件：負電極に正電流 6A, 3min 流し、切りかえて逆電流測定、陽極電流 6A, 負電圧 1,400V, T 34~43°C, Tk 34~40°C, 室温 28.5°C, 水温 26°C

冷却水のある場合 (大蛇管)

経過時間	バツフル下	バツフル上		バツフルなし	
		1回目	2回目	1回目	2回目
0 min	5.8 mA	9 mA	9.2 mA	5.0 mA	5.3 mA
2	5.8	9.5	9.0	6.0	6.6
5	5.0	9.0	8.7	5.0	7.0
10	5.2	8.7	8.0	4.5	6.5

冷却水のない場合 (大蛇管)

経過時間	バツフル下	バツフル上	バツフルなし
0 min	2.6 mA	1.3 mA	4.2 mA
2	2.4	2.0	3.8
5	2.3	2.6	3.1
10	2.0	2.6	2.2

陽極電流 4A, 負電圧 400V, 室温 150°C, 水温 17°C
T 15~25°C Tk 15~20°C 冷却水あり

時間	波形 (1/4 サイクル)	摘要
1 min 後		振巾 2.8 mA (ピークも含む)
2	"	"
3	"	"
4		A が時々出る
5	"	A の出る数が次第に小になる
6		B, C, A が混じて出る
7	"	"
8	"	"
9		D の巾が次第に大になる D の巾内で種々の波形が出る
10		A の出方が少くなる。波形の一部が B のように時折下る
11	"	"
12	"	"
13	"	"

第14図 時間経過にしたがう逆電流波形の変化 (Type (II))

Fig. 14. Transition of the Wave Form of Inverse Current with Time Passing (Type (II))

している。したがつて冷却効果を大にするか否かはバツフルの位置に関するものである。

[V] 逆電流の波形

逆電流の時間経過に対する変化の他に逆電流の波形も水銀整流器内の動的現象考察上必要である。

[1] 起動から時間経過にともなう逆電流波形の変化

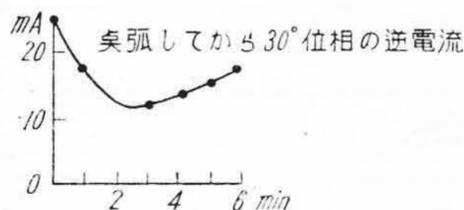
波形はすべてブラウン管によつて観察した。第14図は冷却水を通じつつある (II) 型において起動からの時間経過にともなう逆電流波形の変化を示すもので摘要のような特徴が見られる。これは時間経過にともなう蒸気密度の変化並びに動的には点弧してからの蒸気密度増大の遅れに起因するものである。

[2] 冷却を急停止した場合の逆電流波形

負荷の変動、冷却水量の急変によつても逆電流は相当の影響を受ける。これは整流器運転上必要なることであるからここに述べることにする。[I] の実験に続いて冷却給水を停止して管内の水を抜きとると第15図のよう

陽極電流 4A, 負電圧 400V, 室温 15°C, 水温 17°C
 T 25~35°C T_K 20~30°C

時間	波形 (1/4 サイクル)	摘 要
0 min		A のピークが時々出る。B のように波形のベースが時々変化する
		冷却水を止め水を抜く
1		振動振巾が小になる。C のように突弧時にピークが出る。
3		振動振巾はほとんどなし。ベースが相当下る
4	"	
5		D の山が時折出る。波形のベースも時々変る
6		D の山が小になる



第 15 図 冷却水を止め水を抜きとつてからの逆電流の変化 ((II) 型)

Fig. 15. Transition of Inverse Current Wave Form after the Cooling Water Stopped and Taken Out (Type (II))

な逆電流波形の変化を示すもので摘要のような特徴が現われる。

すなわち僅かな時間にも冷却の有無によつて逆電流が相当の影響を受けることを示している。

[3] 陽極電流による逆電流波形の変化

工業用水銀整流器においては種々な負荷の下で使用される場合が多いのでその現象を調べるべく陽極電流による逆電流波形の変化を調べることにした。第 16 図は時間の経過をまつことなく即ち初期条件に近似な条件下で陽極電流を増しながら観察した逆電流波形の推移である。この結果に見る逆電流は陽極電流が大になるにしたがつてその値が増大するばかりでなくこれにともなう振動並びにピークも著しくなる。これからも陽極電流の急増することは望ましいことではない。

[4] 冷却管に空気を流通させた場合

僅か冷却しても逆電流波形が変動することを示すため冷却管に空気を流通させた場合を述べよう。冷却給水を行わない状態で起動して 3 分ほど経過すれば逆電流波形は第 15 図の 3 分後のような波形になる。この時冷却管に空気を送入すると逆電流の波形は第 17 図に示すように急激な変化を示すが、空気の流通を止めるとしばらくして又もとの状態にもどる。即ち逆電流は冷却条件によつて鋭敏に影響されることがわかる。

負電圧 400V, 室温 15°C, 水温 17°C
 T 15~25°C T_K 15~20°C 冷却水あり

陽極電流	波形 (1/4 サイクル)	摘 要
0.5A		
1		
2		A のようにベース波形が時々ことなる
3		A のようにベース波形が時々下る
4		B のピークが時々出る
5.3		B の出方が激しくなる
8		B のピークが出ると、もにこのようにベース波形が時々異なる

第 16 図 陽極電流と逆電流波形の関係 ((II) 型)
 Fig. 16. Relation between Anode Current Wave Form and Inverse Current Wave Form (Type (III))

陽極電流 4A, 負電圧 400V, 室温 15°C 水温 17°C
 T 35°C T_K 30°C

時間	波形 (1/4 サイクル)	摘 要
0 min		振動を含まず
1		A の波形が時々出る
2		B のピークが時々出る

第 17 図 冷却管に空気を流通させた場合の逆電流波形 ((II) 型)

Fig. 17. Transition of Inverse Current Wave Form in Case of Cooling Air Feeding (Type (II))

負電圧 400V, 室温 15°C, 水温 17°C
 T 180°C T_K 16°C

時間	波形 (1/4 サイクル)	摘 要
0 sec		陽極電流 1A C が時々出る
0		この間陽極電流 8A 1 分間通じた
60		
60		再び陽極電流 1A にする D が時々出る
75		
120	0 sec の波形と同じ	陽極電流 1A

第 18 図 負荷の変動による逆電流波形の変化 ((II) 型)

Fig. 18. Transition of Inverse Current Wave Form with Load Current (Type (II))

[5] 負荷の変動と逆電流

工業用水銀整流器運転の場合には負荷が絶えず急変する場合が多いので、負荷変動の状態を調べることにした。冷却水のある場合において陽極電流を 1A 流しているとき急に 1 分間だけ陽極電流を 8A に増加し、又もとの 1A にもどして逆電流の波形を見ると第 18 図のようになり、電流が小さい時、時々逆電流の減少(第 18 図 C)が起るが電流を増大して後再びもとの電流にした時には逆に時々逆電流の増加(第 18 図 D)が起る。しかも電流を減じて 1 分も過ぎれば初期状態に復帰する。この C 或は D が出ることは水銀滴等の作用と考えられ重要な意味をもつものと思われる。

[VI] 実験結果に対する考察

前章に述べた種々な実験事実を基にして (5) 式、(6) 式の使用して考察を行い複雑な器内現象判断の参考とする。

[1] 逆電流の時間的経過

始動後の時間的経過にもなう逆電流波形の変化は [II] 章に述べたところから蒸気密度の変動によるものと解釈されるが故に第 9 図以下種々な条件下における逆電流に関する一連の実験結果に見られる諸特性はすべて (6) 式によつて説明される。即ち始動時は蒸気密度の増大にともないイオン密度が増加して逆電流が増すが、ある時間経過すると蒸気密度の増大はむしろイオン速度を遅らせる効果を有して逆電流は減少する。(6) 式についていえば前者は ρ_1 の増大に起因し、後者は $e^{-k\rho_1}$ の減少に起因する。即ち逆電流の最高点の存在が説明される。これらの実験結果の中で時間が経過すると再び逆電流が増加する(例えば第 10 図)(°)印曲線)のは負電極附近の温度上昇にともない附近の蒸気密度が減少することによると考えられる。即ち第 10 図における最低点の存在を意味するに外ならない。

[2] 負電極に予め正電流を流した影響

陽極温度が逆電流に対してもつ関係は負電極を予備加熱した実験においてその様相を知ることができる。負電極に予め正電流を流してこれを予熱すると負電極附近の温度が上昇してその附近の ρ_1 は小になる。したがつて逆電流増加期例えば第 9 図 A, B 過程でこれを行えば、 ρ_1 の減少により逆電流は減少し、逆電流減少期例えば同図 B, C 過程でこれを行うと ρ_1 の減少により逆電流は増加する。第 10 図は前者の場合、第 13 図は後者の場合に属する実験例であるが、整流器内温度分布に及ぼす予備加熱の影響の外に陽極加熱についてもこの傾向が明らかに観察される。

[3] 冷却水の有無

冷却と逆電流の関係は種々な様相を示すものである。例えば水銀整流器内の状態が逆電流一時間経過曲線の上昇過程にある場合には冷却すればするほど逆電流は減少する。これに反し逆電流一時間経過曲線の下降過程にあれば冷却することにより逆電流は増大する。なお陽極附近の蒸気密度が低いと陽極降下を増大し、これが陽極温度上昇の原因ともなり逆電流はそれによつても又変化する。要するに直接、間接に種々な要素が相関連して複雑な変化をなすからその使用条件が如何になつていくについてはよく考慮して判断を下さねばならない。さて冷却水の存在に対して起る器内現象に考察を進める。冷却水のある時に起る現象としては次の二つの事項が考えられる。

第一：冷却水があれば (5) 式で ρ_1 が大にならず $e^{-k\rho_1}$ の項が変化しない。

第二：冷却水があれば陰極附近と陽極附近とでは蒸気密度に相当の差ができる。陰極附近では ρ_2 も大でイオン密度も大である。電荷は電界によつて陽極に吸収されるが、中性分子は点弧子、スプラッシュバップル等の遮蔽物にはばまれて陽極附近にあまりこない。故に (5) 式で i_1 は大なるも ρ_1 は小さいという状況を呈する。故に冷却水があれば逆電流が大になる。但しこれは ρ_1 の変化に対する i_1 の変化の程度によつて異なるため、構造によつて相当の差異がある。実際の整流器では蒸気密度の増大によつて逆電流の増加する場合が多い。これはタンクも大きくて第二の事項がきかず蒸気密度の変化にしたがい i_1 の変化があることがきいてくるからである。上記事実を合せ考えると工業用水銀整流器における逆電流を支配するものが内部の蒸気密度であることは確かであるが、その他に蒸気密度の分布状態が関係することが推察される。第 6 図、第 11 図の比較から (I) 型の方が冷却水を流さない場合逆電流が大きいのは勿論 (I) 型の方が冷却面も大きくて冷却効果が大きいことを意味するに外ならない。冷却水を流した場合逆電流に大差がないのは (II) 型のような構造では冷却管が陰極輝点に近く (I) 型と同等の効果を持つているものと推察される。したがつて内部の蒸気密度を支配する全体の冷却面積を大にすることのみが必要でなく他の面も考慮して種々な冷却効果を考慮せねばならない。

[4] 陽極電流と逆電流

時間の経過をまつことなく電流を増して行つた場合は内部の蒸気密度の増大に多少の時間的遅れがある。(I) 型冷却の場合は (5) 式において主として i_1 が大になることがきいてくるので陽極電流の小なる範囲ではむしろ冷却水のない場合の方が逆電流が大きく、陽極電流が大になれば [3] 節の第二の事項がきいて冷却水のある場

合の方が逆電流が大きくなる(第 8 図)。(II)型冷却の場合は空間も小さく始めから [3] 節の第二の事項がきいて冷却水を流した方が逆電流が大きい(第 12 図)。冷却水のない場合陽極電流を増加しても逆電流がその割に増加しないのは ρ_1 の増加によつて (5) 式の $e^{-k\rho_1}$ がきいてくるからである。

要するに陽極電流が急に増加した場合には ρ_1 の増加が i_1 の増加に遅れ一般には逆電流は急に増加して後次第に減少するであろうし、逆に陽極電流が急に減少した場合は ρ_1 の減少が遅れるから急に逆電流が減少しその後次第に大になることが予想される。但しこれは逆電流一時間経過曲線の減少過程にある場合であつて増大過程にあれば上記予想と反対になる。即ち陽極電流が急に増加した場合にはまず逆電流が急に増加して後又次第に増加し、陽極電流が急に減少した場合にはまず逆電流が急に減少して後次第に減少する。工業用水銀整流器の運転に際してはこれらの現象が絶えず複雑に変化している。

[5] スプラッシュバップルと逆電流

スプラッシュバップルを上位にすると [3] 節の第二の事項並びに負電極附近が熱せられて ρ_1 が小になること及び陰極からの直接の蒸気流が何等妨げられることなく冷却管に衝突すること等を考え合せて [III] 章 [3] 節の現象がよく説明される。要はスプラッシュバップル上位の方が冷却効果が大きいことを示す。又スプラッシュバップルの位置は陰極からの水銀飛沫にも関係し間接的にやはり蒸気密度の制御に相当の意味を持つている。

[6] 逆電流波形の振動(第 14 図)

工業的水銀整流器の逆電流波形は本実験と異なり、振動をほとんど含まないが、格子あるいは励弧極等を探極として使用した場合のイオン電流には度々振動の含まれることを経験する。この振動の状態は内部の状態を判断するのに一つの手がかりを与えるからここに述べる。逆電流に含まれる振幅の中で大きい振幅の変動は蒸気密度の変化、例えば陰極輝点の位置の移動や水銀粒が介入する等による陽極降下の変化であろう。小さい振動は蒸気密度の擾乱に起因するものもあろうが、高調波的振動は水銀電弧特有の性質によるものと考えられる⁽⁹⁾⁽¹⁰⁾。時間が経過すると振動がなくなるのは陽極降下の減少を意味する。

[7] 負荷の変動と逆電流波形(第 18 図)

負荷の変動と逆電流波形の関係を観察した際時折瞬間的に逆電流波形が変化するとゆう事実は負電極表面における瞬間的蒸気密度の変化を意味し逆弧現象とも関連して興味ある事実である。小さい陽極電流を流している場合の逆電流の波形で時折その値が小になるのは第 9 図の逆電流下降過程で、例えば水銀粒が飛んでくると ρ_1 が

大になるため逆電流は小になることを意味する。短期間負電極に大電流を流して後は負電極附近が熱せられて ρ_1 が小になつて逆電流上昇過程になつているため水銀粒が飛んできたことにより ρ_1 が大になつて逆電流が大になる。この事実は水銀粒が飛んで来たと考えられるがもつとも妥当であり逆弧には重要な意味を持つている。

[VII] 結 言

種々な条件の下において逆電流の測定を行い、これらの結果がよく著者の逆電流について考え方を支持している事実について述べた。その主なる結論をあげれば次のようである。

(i) 一般に逆電流は蒸気密度が大になるにしたがい始動初期には漸増するが、ある値で最高値に達し、それから漸次減少する。この変化の様子は整流器の構造、冷却の有無、方法等すべて器内蒸気密度分布に関する条件或は状態によつて異なり、蒸気密度の変化にとまなうイオン密度とイオン速度とが複雑な変化をして逆電流を形成する。

(ii) 負電極温度の上昇はその附近の蒸気密度の減少を来たし、これは顕著に逆電流に影響する。

(iii) 陰極輝点附近を強く冷却することは広い側壁にて冷却するより効果が大きい。

(iv) スプラッシュバップルは高い方が冷却効果が大きい。

(v) 負荷の変動に対する逆電流波形の観察より負電極附近に水銀粒がとんでくると考えられる。

終りに臨み絶えず御指導、御鞭撻を賜つた日立研究所副所長三浦博士、橋本主任研究員及び茂原工場副工場長久保博士並びに有益なる御示唆、御激励を頂いた日立工場水銀整流器委員会の毛利課長を始めとする各位の御厚意に対し深甚なる謝意を表する。

参 考 文 献

- (1) 秦、久保：日立評論 20 453, 513 (昭 12)
- (2) 中村： " 24 318 (昭 16)
- (3) 今野、桑島：電気三学会連合大会予稿 (昭 25)
- (4) Schottky, Issendorff: Z. f. Physik 31 163 (1925)
- (5) 永井：東芝レビュー 5 117 (昭 25)
- (6) 青木、若林：芝浦レビュー 18 255 (昭 14)
- (7) 浜田時夫、浜田賢：水銀整流器講習録 57 (昭 18)
- (8) 山田、中村：電気学会第 13 回聯合大会 74 (昭 13)
- (9) Parzen, Goldstein: Phy. Rev. 82 724 (1951)
- (10) 木村：日立評論論文集 10 229 (1949)