

# 電源開発佐久間周波数変換所 純水冷却設備

塚本 昭三\*・矢野 昌雄\*・鈴木 一男\*・相山 英生\*

## Pure Water Cooling System in Sakuma Converter Station of the Electric Power Development Co.

Itami Works    Shōzō TSUKAMOTO・Masao YANO・Kazuo SUZUKI・Teruo AIYAMA

Temperature control is an important problem of a mercury rectifier because its dynamic characteristics are influenced by the temperature of the tank. Especially a high voltage high power converter requires an extremely narrow limitation on the optimum temperature of the cooling water, which is  $\pm 1^{\circ}\text{C}$  in the case of Sakuma Converter Station. Moreover, for a high voltage converter, insulation with cooling water poses another problem. To reduce the length of the water insulating pipe and to prevent the contamination of it, cooling water of high purity is a vital requisite. This article reports on the pure water cooling system for a high voltage static frequency changer, briefing the system meeting the demands.

### 1. ま え が き

この水系は電源開発株式会社佐久間周波数変換所に設置された A. S. E. A. 社製水銀整流器の純水冷却系である。変換容量 250kV, 300 MW というわが国最初の高圧大容量の静止形変換装置が対象である。当社は三菱鉱業高島における直流送電をはじめ電鉄用、工業用など多くの液冷式水銀整流器の実績を有し、これまで蓄積されてきた技術が今回の水系に十分発揮されているといえる。

本来水銀整流器は運転温度として限られた範囲をもっている。冷却装置が温度調整装置と呼ばれるゆえんである。高圧大容量となるほどこの温度範囲は狭くなる。このことは当社も高島の直流送電で経験したことである。今回の水系ではこの範囲は  $\pm 1^{\circ}\text{C}$  である。この点で水系要素の設計、温度検出を含めた制御装置に十分の検討が加えられた。さらに高圧変換装置用水系としては絶縁の問題を解決しなければならない。このため冷却水として高純度の純水が要求され、この点でも水系要素の設計、処理や純水水系についてもいろいろ検討が加えられた。

以下はいろいろの問題を解決した純水冷却系について、その構成、制御運転結果などについて報告する。

### 2. 水系の仕様

水系は変換装置として運転中のメインバルブおよびバイパスバルブを冷却する主水系と組立後のバルブを化成するとき、あるいはスタンバイの状態にあるバルブを冷却する化成水系および主水系と化成水系に水を補給する補給水系に分類される。主水系はさらに 50 サイクル系と 60 サイクル系の変換装置を対とする 2 群の変換装置に対応して第 1 極主水系と第 2 極主水系に分れている。各主水系はそれぞれメインバルブ 12 タンクとバイパスバルブ 1 タンクの冷却水を供給する。また冷却水として高純度の純水が要求されるため補給水系は原水処理装置をもっている。

各水系に与えられた仕様は次のとおりである。

#### (1) 主水系

|               |                                            |
|---------------|--------------------------------------------|
| バルブ 冷却水量      | 30 l/min                                   |
| メインバルブ 冷却水温度  | $32^{\circ}\text{C} \pm 1^{\circ}\text{C}$ |
| バイパスバルブ 冷却水温度 | $40^{\circ}\text{C} \pm 2^{\circ}\text{C}$ |

#### (2) 化成水系

|              |                                                    |
|--------------|----------------------------------------------------|
| 化成 バルブ 冷却水量  | 20 l/min                                           |
| 化成 バルブ 冷却水温度 | $32 \sim 80^{\circ}\text{C} \pm 3^{\circ}\text{C}$ |

#### (3) 冷却水質

|     |                                  |
|-----|----------------------------------|
| 比抵抗 | $10^6 \Omega \cdot \text{cm}$ 以上 |
| 不純物 | 0.1 ppm 以下                       |
| pH  | 約 7                              |

### 3. 水系の構成

主水系の概略は図 3.1 に示されている。すなわちポンプ水そう、循環水ポンプ、水冷式再冷却器、電動式 3 方向調整弁、主水系水加熱器、バイパスバルブ水加熱器、イオン交換器からなっている。循環水ポンプを出た水は水冷再冷却器に入るが、変換装置の発生熱量すなわち水温に応じて一部はバイパスされる。さらに水温の低いときは主水系水加熱器で仕様温度に加熱される。バイパスバルブ系に分流する水はさらにバイパスバルブ水加熱器で加熱される。各バルブを出た水は一括してポンプ水そうに帰る。循環中の冷却水の純度を保つため冷却水の一部は三方弁を出た後より分れ、つねにイオン交換器をもつ純化系を通してポンプ水そうに帰る。

ポンプ水そうは水系の最高所にあり膨張タンクを兼ね密閉構造で

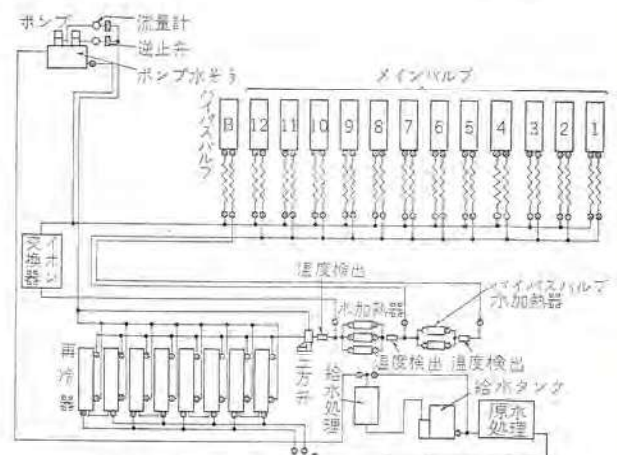


図 3.1 主水系系統図  
Fig. 3.1 Schematic of main cooling system.

循環水が空気中のガスを吸収するのを抑制している。循環水量に対し十分な容積をもち水温の急激な変化を緩和している。水系への水の補給はこの水そうから行なわれる。

循環水ポンプは上のポンプ水そうに設けられ、立形で軸は垂直に水面上に導かれ、これにより軸に沿っての漏水を防ぎ、消耗品的な軸封レールは使っていない。ポンプ用電動機は密閉気中、高温気中での運転を考慮してH種絶縁密閉形を採用している。この循環水ポンプは水系に2台設けられ、内1台は常設予備であり、故障時自動的に切り換えられ、循環水の中断が防止されている。

ポンプ水そうにはこのほか水補給制御用に水位計が取り付けられている。この水位計は水そう内の水圧を電気量に変換するもので、水面の上下の差圧を検出し、密閉構造のため水面の上下により変化する水面上気圧に基づく誤差を防いでいる。水そう内水位は冷却水室の制御盤の計器で表示され、上限、下限で警報される。

再冷器は水-水の熱交換器で各水系ともそれぞれ常用予備をもっている。多管式再冷器で冷却水は冷却管内で再冷器内を往復し、循環水は冷却管外を直交式に流れる。再冷器内部は引き出して洗浄が可能である。今回の再冷器は制御上整流器全発生熱量以上の冷却能力をもっており、したがって整流器が全負荷運転中も循環水はバイパス系に分流することになる。

電動式三方向調整弁(三方弁)は再冷器を通して冷却された冷水と、再冷器をバイパスした温水を混合する混合形で、直流サーボモータで駆動される。この直流サーボモータは後述のようにサイリスタ(シリコン制御整流器)で制御される。サーボモータは軸直結のピロット発電機をもち、サーボモータの動作速度が制御系にフィードバックされている。三方弁も1台の常用予備が設けられている。

水加熱器はサーキュレーションヒータで2.5kWのステンレスパイプヒータをユニットとしている。変換装置が無負荷のときも循環水温を規定値に保ち、あるいはバイパスバルブ用水温に上昇させるだけの容量にさらに1ユニットの常用予備をもっている。温度制御上ヒータ内流速に制限があり、ヒータケースの断面は制限されている。

常温に近い循環水温の検出にはサーミスタが採用されている。構造上の検討が加えられ、応答速度5秒、検出精度 $\pm 0.5\%$ の仕様が満足されている。検出された水温はトランジスタ式自動平衡形変換器で電圧に変換され制御装置に送られる。85~130%の電源電圧変動に影響されないように直流および交流の定電圧電源を設けている。

循環水温度は30~50°C目盛の水銀温度計でチェックされる。この温度計も構造上の検討を加え、精度、応答速度の向上がはかられている。

イオン交換器はイオン交換樹脂を用いた純水製造装置で、陽イオンと陰イオンの混在したミックス塔が各水系の純化系に設けられている。常設予備が設けられている。樹脂は一定期間で再生される。純化系イオン交換器の出口における水質は $10^7\Omega\cdot\text{cm}$ 以上の比抵抗をもつものである。純化系の分流量は約1%である。水系循環水の水質は制御盤に表示されている。

水系にはさらにリーフバルブが設けられ、いかなるときにも水銀整流器に高い水圧がかからぬよう保護されている。このリーフバルブの動作はフロースイッチで検出される。

以上の構成要素の接水部材料はステンレス鋼であり、また配管材料はステンレスパイプおよび塩化ビニールパイプが採用されている。これは循環水の水質維持を容易にするためである。

化成水系も主水系と同じ構成であるが化成中の高い循環水温を

得るために各化成バルブごとにそれぞれ小循環回路が設けられ、それぞれ単独に手で温度調整されるようになっている。

図3.1に示される原水処理装置は原水を $10^6\Omega\cdot\text{cm}$ 以上の純水にする装置でろ過器とイオン交換器からなる。原水処理装置で処理された水は充水補給装置で $10^7\Omega\cdot\text{cm}$ に精製され各水系に送られる。

#### 4. 水系の制御

水系の運転は循環水ポンプの手動投入のみである。このポンプも故障時は自動的に予備側ポンプに切り換わる。すなわち流量低下、電源トリップにより自動的に切り換わる。運転中のポンプと予備のポンプはそれぞれ独立の流量計をもち、チェックバルブで区分されている。2台のポンプがともに運転不能となったときは整流器側に水系異常の信号が送られ異常に対する処置がとられる。また循環水温が仕様範囲をこえたときも整流器側に水系異常の信号が送られる。各バルブへの冷却水量は水系中の圧力計で規定される。配管抵抗の分布からしてバルブごとに調整しなくても各バルブ冷却水量はだいたい等しく分流している。

#### 5. 温度制御

循環水温はサーミスタで検出され、電圧に変換された後規準値と比較され、その差分に応じて三方弁により再冷器を流れる循環水量が制御され、さらに水加熱器が制御される。これらの制御はともにサイリスタで行なわれる。水温制御に対する外乱は気温の変化と水銀整流器が負荷電流によって発生する熱量の変化で与えられ、後者のほうがはるかに影響は大きい。整流器の発生熱量の変化は整流器の出口における循環水温の変化となって現われるが、前述のようにこの変化はポンプ水そうで大幅に緩和される。

一般に水系の温度制御を考えると水量、流速、熱容量、熱伝達率、変化速度、むだ時間などが問題となる。

メインバルブの温度制御の点からみた水系は図5.1のとおりである。図中の数字は各区間の通過時間である。三方弁出口の温度検出器 $D_3$ からの信号で三方弁が制御され、水加熱器後の温度検出器 $D_1$ の信号で水加熱器が制御される。整流器の負荷変化による急な水温変化に対しては三方弁の制御で応答し、室温変化など緩慢な外乱に対しては水加熱器の制御で応じている。水加熱器を制御する温度検出器 $D_1$ の系では温度設定にある不感帯が設けられ、三方弁と水加熱器の同時制御が避けられている。すなわち設定値より不感帯だけ水温が低下したときに水加熱器は付勢されはじめる。この不感帯はもちろん水温の仕様精度以下でなければならず、今回は $0.3^\circ\text{C}$ に設定されている。

図5.1の水系に対するブロック線図は図5.2のようになる。三方弁および加熱器の制御回路はサイリスタを使用し、ゲインおよび

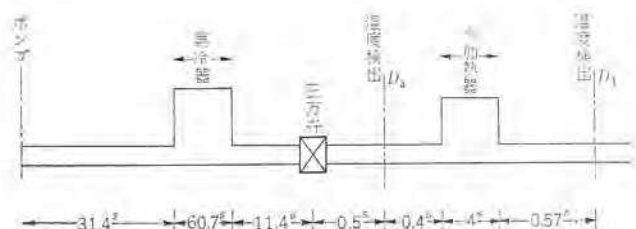


図5.1 制御上からみた水系図  
Fig. 5.1 Diagram of cooling system for temperature control.

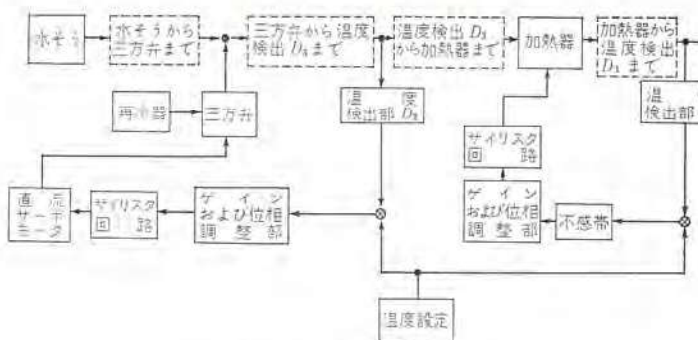


図 5.2 制御系ブロック線図  
Fig. 5.2 Block diagram of control system.

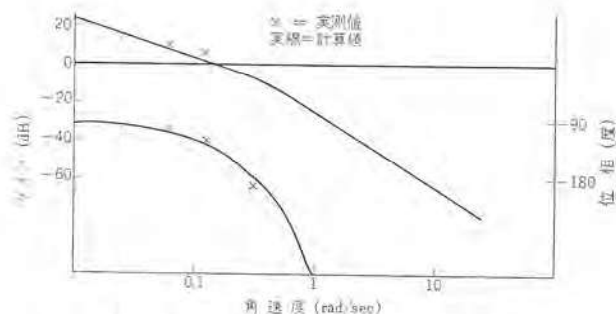


図 5.4 三方弁制御系開路周波数特性  
Fig. 5.4 Open loop attenuation characteristics of three way valve control system.

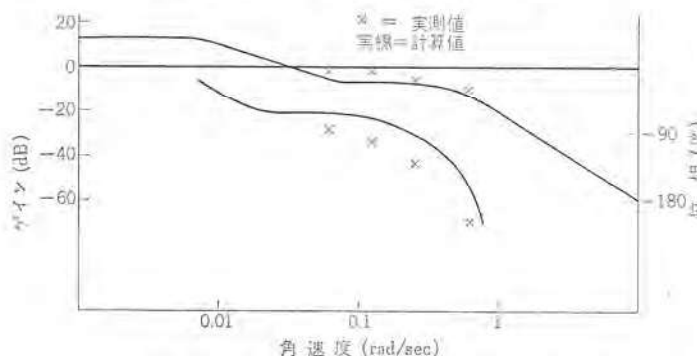


図 5.6 加熱器制御系開路周波数特性  
Fig. 5.6 Open loop attenuation characteristics of heater control system.

び位相調整部は トランジスタアンプを採用している。温度検出器  $D_3$  により三方弁出口水温に応じて三方弁の開度が制御されるが、この系では三方弁の直流サーボモータに直結されたパイロット発電機を用いた速度制御のマイナルーが設けられており温度偏差に応じた速度で三方弁は駆動される。この速度系のマイナルーを設けることにより温度制御系は一次の積分系となり、安定な制御系となり、オフセットもゼロとすることができる。

三方弁駆動回路はサイリスタを逆並列に接続した単相全波整流回路である。検出温度と設定温度は第1段のトランジスタアンプでつき合わされ、偏差は増幅される。増幅された偏差は第2段のトランジスタアンプで三方弁のパイロット発電機の出力電圧とつき合わされてサイリスタのゲート回路の制御信号となる。この偏差の極性により三方弁は開方向または閉方向に駆動される。三方弁制御系のブロック線図は図 5.3 に示され、各常数は表 5.1 に示される。温度制御の周波数領域では速度制御ルーラのゲインは十分大きいのでサーボモータの伝達関数は単に速度フィードバック  $H$  の逆数を考

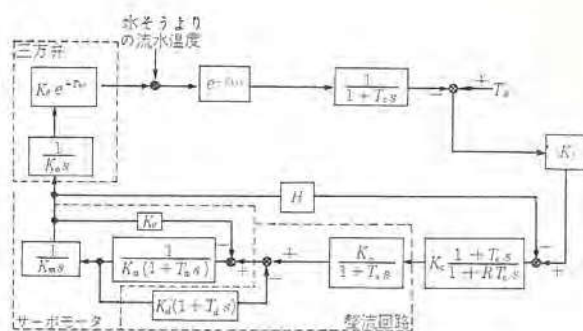


図 5.3 三方弁制御系ブロック線図  
Fig. 5.3 Block diagram of three-way-valve control system.

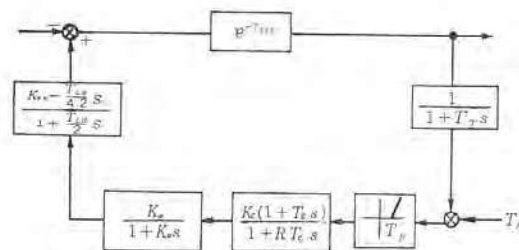


図 5.5 加熱器制御系ブロック線図  
Fig. 5.5 Block diagram of water heater control system.

表 5.1 図 5.3 の記号説明

|           |                   |           |                         |
|-----------|-------------------|-----------|-------------------------|
| $K\alpha$ | 移相回路ゲイン           | $K\theta$ | 三方弁・開閉による温度差            |
| $T\alpha$ | 移相回路時定数           | $T\theta$ | 三方弁・遊び時間                |
| $K_d$     | 整流回路レギュレーション      | $T_{L3}$  | 三方弁から温度検出 $D_3$ までの通過時間 |
| $T_d$     | 整流回路時定数           | $T_R$     | サーミスタ時定数                |
| $K_a$     | サーボモータ・レギュレーション   | $K_I$     | 温度制御系ゲイン調整              |
| $T_a$     | サーボモータ・時定数        | $K_C$     | 速度制御系ゲイン調整              |
| $K_m$     | サーボモータ・単位化慣性      | $T_C$     | 速度系位相調整時定数              |
| $H$       | サーボモータ・速度計フィードバック | $k$       | 定数                      |
| $K_v$     | 三方弁・開閉に要する時間      |           |                         |

表 5.2 図 5.5 の記号説明

|           |           |          |                         |
|-----------|-----------|----------|-------------------------|
| $K\alpha$ | 移相回路ゲイン   | $T_C$    | 時定数                     |
| $T\alpha$ | 移相回路時定数   | $k$      | 定数                      |
| $T_{LH}$  | 加熱器内水通過時間 | $T_d$    | 不感帯                     |
| $K_r$     | 温度上昇      | $T_R$    | サーミスタ時定数                |
| $K_C$     | ゲイン       | $T_{L1}$ | 加熱器から温度検出 $D_1$ までの通過時間 |

えればよい。三方弁は 40 秒で全開と全閉間の全ストロークを動くが、弁の開閉には遊びがある。三方弁より温度検出器  $D_3$  までの水の通過時間は 0.5 秒でこれはむだ時間となる。サーミスタ検出器は 2.2 秒の一次遅れをもっている。速度制御系のマイナルーもアンプでゲインおよび位相の調整が行なわれ、クロスオーバー周波数 0.8c/s、 $-20$  dB/decade の傾斜となっている。三方弁制御系の周波数特性は図 5.4 のようになる。ゲイン余裕は約 8 dB、位相余裕約 50 度である。系のゲインは 0.14/sec。最大の外乱に対しても 0.09°C の偏差で追従することができる。

加熱器制御回路はサイリスタとダイオードを逆並列接続して各相にそう入した三相交流制御で、比例制御であるがゲインをあげるため位相遅れ回路を付加している。ブロック線図は図 5.5 に示すとおりである。定数は表 5.2 に示されている。このとき加熱量に対する水温変化の伝達関数は、水の加熱器内通過時間を  $T_{LH}$  発熱量に対する水の温度上昇の割合を  $K_r$  とすると次式で与えられる。

$$\frac{K_r}{1 + \frac{1}{2} T_{LH} s} e^{-\frac{T_{LH} s}{4.2}}$$

整流回路は単なるむだ時間ではなく、サンプリングホールディング系と考えられ 0.008 s の遅れ回路とみなすことができる。この制御系の開路周波数特性は図 5.6 に示される。計算値と実測値に約 30 度の位相差がみられるが、これは加熱器の伝達関数の計算値と実際値の差によるものと思われる。ゲイン余裕 約 12 dB、位相余裕は約 10 度であるが、加熱器は気温変化など緩慢な外乱を補償すればよいからこの程度で十分と考える。このことは現地運転で確認されている。

## 6. 運転結果

昭和 39 年 8 月、工場において総合組合試験を行ない、9 月いっぱい現地据え付けを実施、引き続き パルプ の化成に入り、本年 4 月以降行なわれていた変換装置の運転試験も終了、9 月に水系の最終整備が行なわれ、以後本格的運転に入っている。図 6.1 は工場試験の状況である。

工場試験あるいは現地試験での最大の試験項目は循環水の純度維持と、温度制御であった。

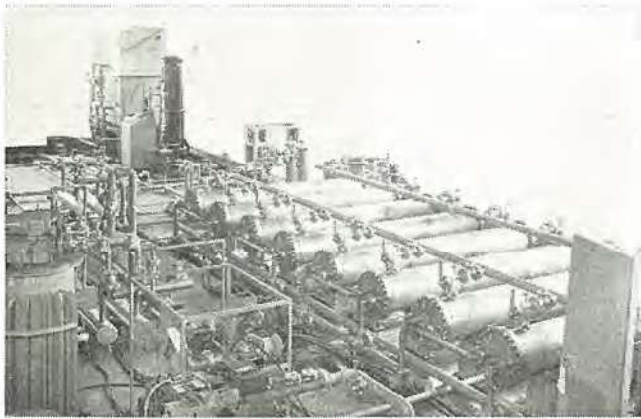


図 6.1 工場試験状況  
Fig. 6.1 View of testing plant in factory.

### 6.1 循環水純度

高圧整流器を大地から絶縁するため循環水は  $10^6 \Omega\text{-cm}$  以上の比抵抗をもつことが要求され、また絶縁水管の汚損を防止するためにも高度の純水であることが必要である。このため水系にはイオン交換器をもつ純化系が設けられているが、イオン交換器の容量、寿命は水系、構成要素の設計、処理により支配される。このため接水部には耐食性の強いステンレス鋼および塩化ビニールパイプが使用され、水系の洗浄に十分な注意が払われた。すなわち各ステンレス鋼製部品は工場で十分な処理、洗浄が行なわれ、現地据え付け、配管に際しても大容量の水処理装置を仮設してユニットごとに十分な洗浄を行なった。このため全水系完成後充水時全水系の最終総合洗浄を行なったが図 6.2 に示すとおり短時間に高純度に達することができた。その後の運転中も循環水比抵抗は余裕をもって  $5 \times 10^6 \Omega\text{-cm}$  以上に維持されており、イオン交換器の出口水比抵抗は 3 か月以上にわたり  $10^7 \Omega\text{-cm}$  が得られている。

### 6.2 温度制御

現地水系完成後いろいろの試験が行なわれた。図 6.3、6.4 は設定のステップ変化に対する応答を示している。図 6.3 は三方弁制御系で設定をステップ状に変化したときの水温、アンパ出力、三方弁の動作を示している。図 6.4 は加熱器制御系の特性を示している。その後いろいろの負荷での変換装置の試験が行なわれてい

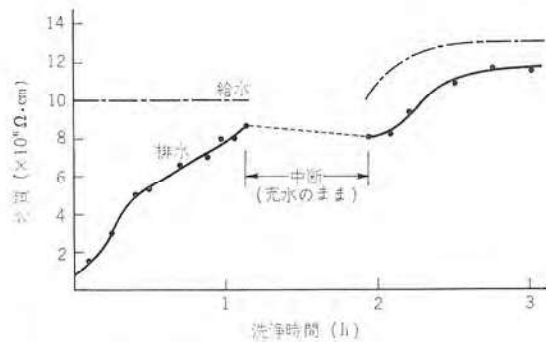


図 6.2 洗浄結果  
Fig. 6.2 Washing-performance of cooling system.

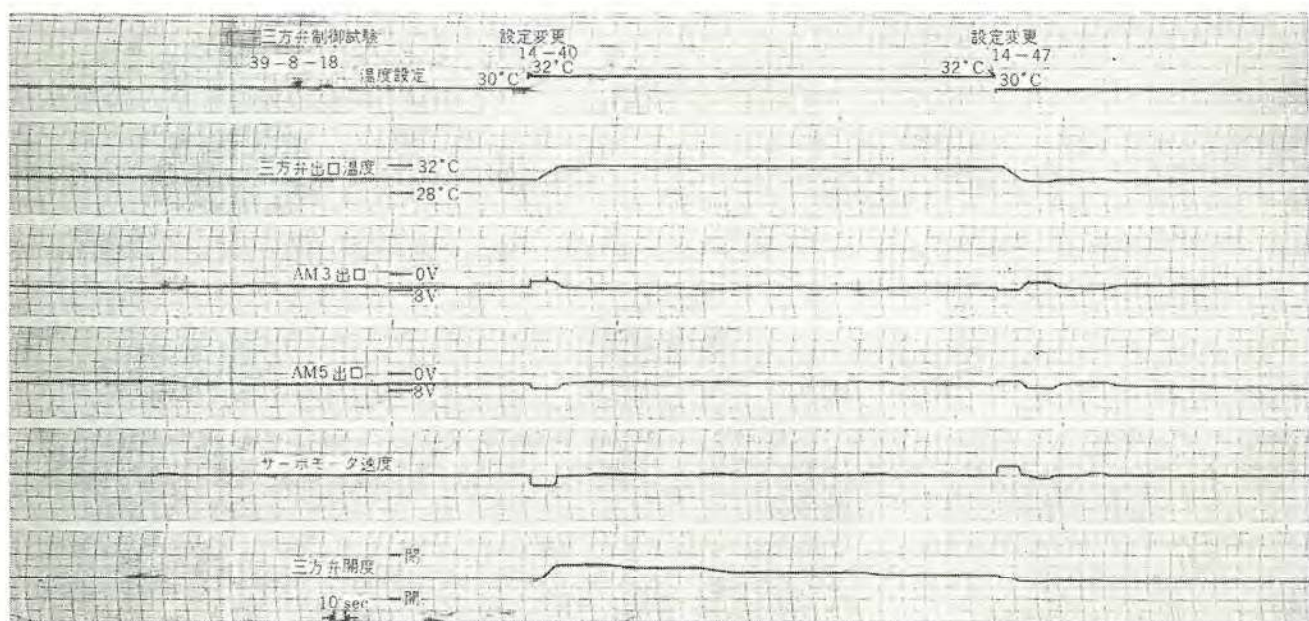


図 6.3 三方弁制御系試験結果  
Fig. 6.3 Test results of three-way-valve control system.

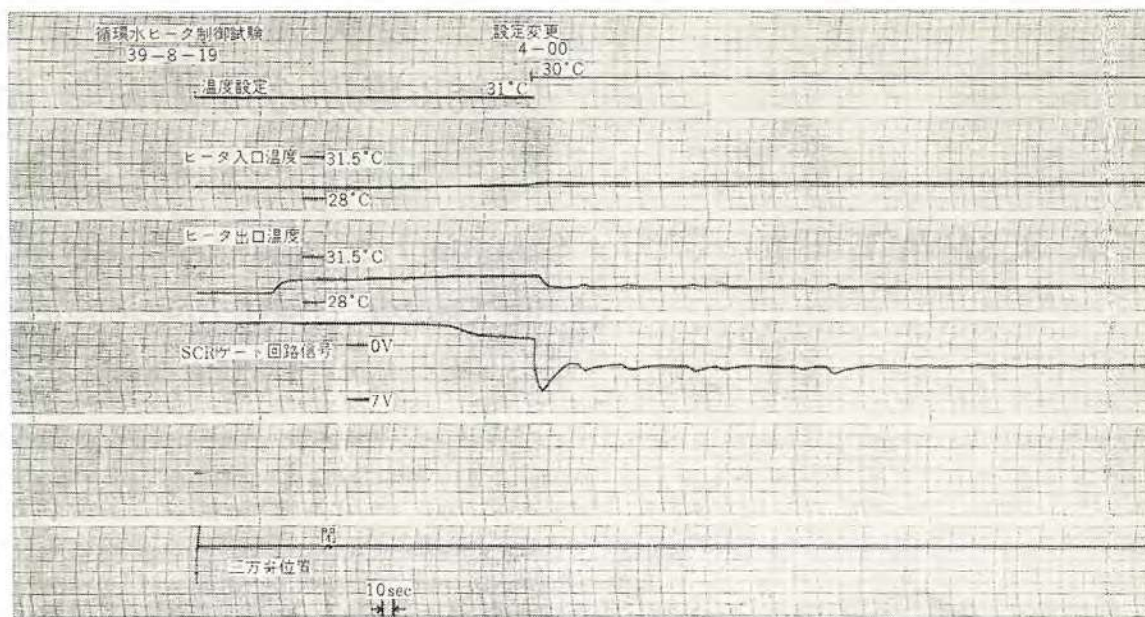


図 6.4 加熱器制御系試験結果 Fig. 6.4 Test results of heater control system.

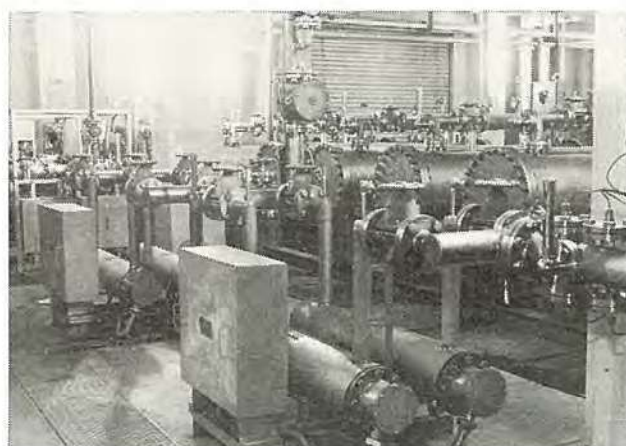


図 6.5 冷却水室の状況 Fig. 6.5 Partial view of pure-water cooling equipment room.

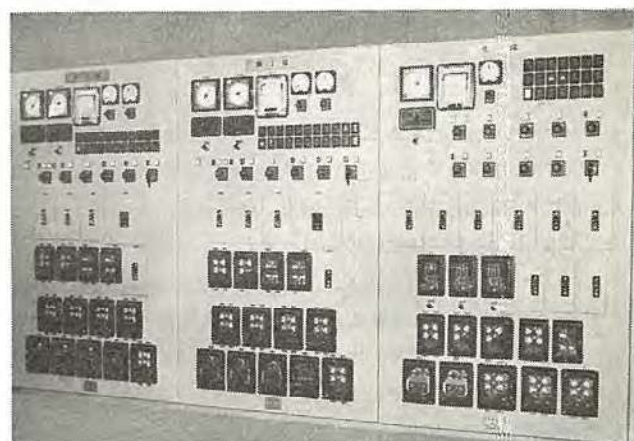


図 6.6 制御盤 Fig. 6.6 Control cubicles.

たが水系は十分仕様を満足している。図 6.5 は現地状況、図 6.6 は制御盤外観である。

## 7. む す び

以上佐久間周波数変換所の純水冷却系の構成、制御について簡単に報告した。わが国としては画期的な高圧大容量静止形周波数変換装置の純水冷却系を担当し貴重な経験であった。従来から製

作していた工業用あるいは電鉄用水銀整流器用冷却水系よりさらに高度の仕様で、設計、試験、調整の段階でいろいろの問題を生じたが各方面のご指導、ご協力で所期の目的を達成したものと考えている。終始ご指導いただいた電源開発株式会社の関係各位に厚くお礼申し上げる。終わりにこの水系の部品の製作に絶大な協力をいただいた各外注製作会社にこの稿をかりてお礼申し上げる。