

清水共同発電株式会社新清水火力発電所納

第1,2号機 75,000kW プラントの運転実績

Operation Results of Nos. 1 and 2 75,000 kW Plants Installed at Shin-Shimizu Thermal Power Station, to the Shimizu Kyodo Power Co., Ltd.

鈴木 喜一* 内 藤 孟**
Kiichi Suzuki Takeshi Naitō
浦 田 星*** 広 吉 秀 高****
Hoshi Urata Hidetaka Hiroyoshi

内 容 梗 概

清水共同発電株式会社新清水火力発電所納1, 2号75,000 kWプラントはわが国最初の大容量ベンソンボイラで計画当初より火力界の注目を集めていたが, 1号機が37年9月, 2号機が同11月にきわめて順調に営業運転にはいった。本プラントはボイラ, タービンなど主要なすべての発電設備を日立製作所が受注し, 全技術を傾注して完成したもので, 本論文ではその貴重な特性試験の結果, スタートアップの実績およびドラム形ボイラに比べて非常に短縮された起動時間について紹介するものである。

1. 緒 言

清水共同発電株式会社新清水火力発電所は1, 2号機ともわが国最初の大容量ベンソンボイラを採用した75,000 kWプラントで, 計画当初よりわが国電力界の注目を集めていたが, 1号機が37年9月, 2号機が同11月とそれぞれきわめて順調に営業運転にはいった。

本プラントは1, 2号機とも主蒸気圧力127 kg/cm²G, 主蒸気, 並びに再熱蒸気温度538°C, 出力75,000 kWで, ボイラ, タービン, 発電機, そのほか主たる設備を日立製作所が一括受注してまとめたものである。第1表はおもな計画仕様を示す。なお本プラントのおもな特長を示すと次のとおりである。

- (1) わが国最初の大容量ベンソンボイラを採用した。
- (2) 主蒸気条件として従来の75,000kWより一段と高い127kg/cm²G, 538/538°Cを採用し, 発電所効率の向上をはかった。
- (3) ボイラ, タービンとも全室外式を採用した。
- (4) 過熱器減圧装置を有したユニークな起動バイパス系統を採用。

第1図はその外観図を, 第2図は全体の概略系統図を示す。なおプラント計画についてはすでに本誌で発表している⁽¹⁾。

本プラントの建設に当たっては日立製作所の有する豊富な研究設備と技術陣を動員して随所で諸特性をチェックし万違算なきを計ったので, 当初の期待どおりきわめて好調に試運転を完了することができた。本論文ではその貴重な特性試験の結果, スタートアップの実績およびきわめて短い起動時間についてその概要を述べることにする。

2. ボイラの各種試験結果

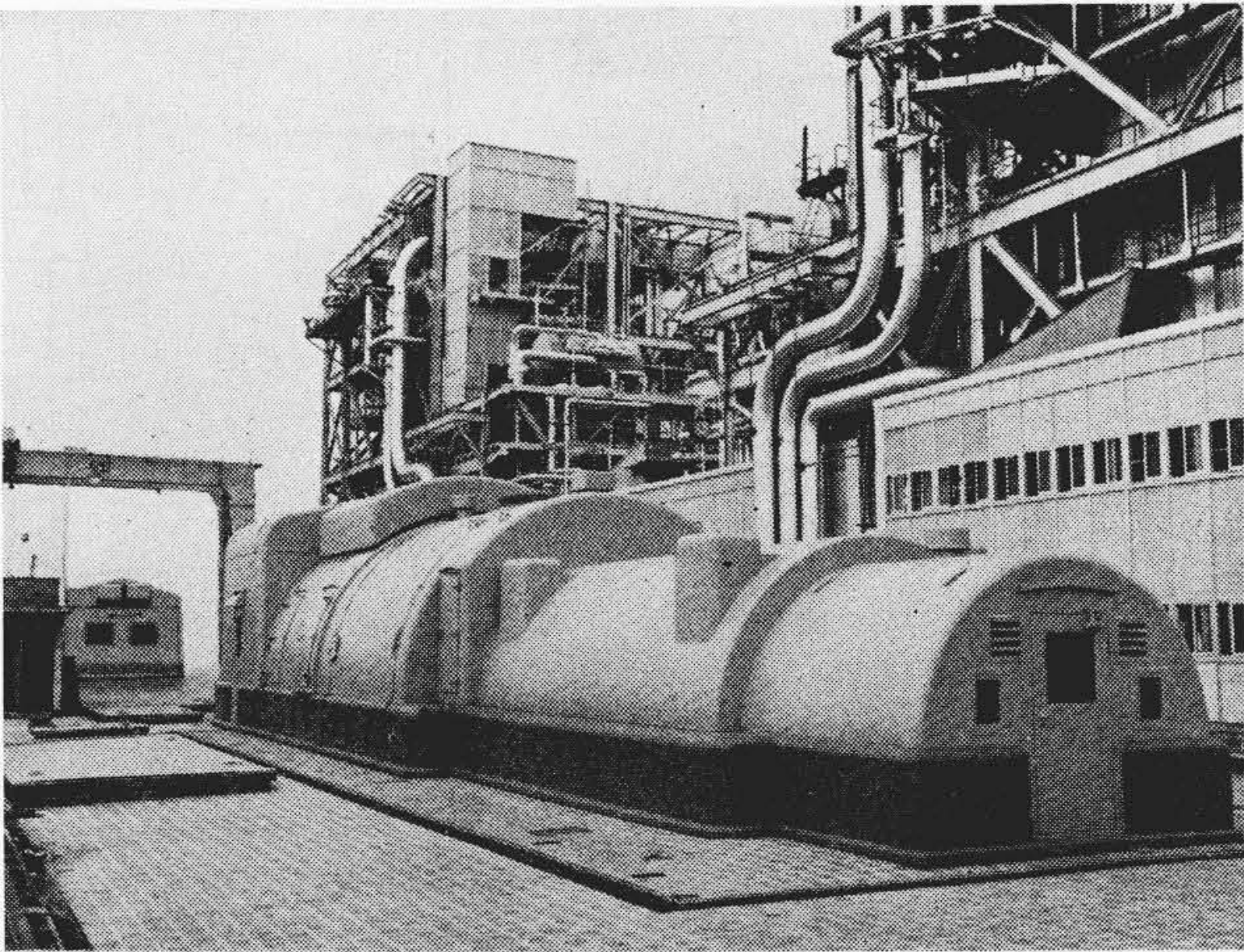
2.1 ボイラ負荷追従試験結果

事業用としてわが国最初の貫流ボイラであるため, 負荷追従特性が実際にどのようになるか, 各方面から非常に注目されていた。

最初ABC調整に当たっては, ボイラの特性を十分数値的につかむ必要があり, 清水共同発電株式会社関係者のご協力を得て第2.2項に述べるようにボイラの動特性試験を行なった。この動特性試験

第1表 プラント計画要目

ボイラ最大定格出力		260 t/h 75,000 kW
蒸気条件	気圧(主塞止弁前)	127 kg/cm ² G
	気温(主塞止弁前)	538°C
	再熱気温(再熱塞止弁前)	538°C
真 空 (75,000 kW 時)		722 mmHg (水温 20°C)
回 転 数		3,600 rpm
抽 気 段 数		5 段



第1図 ベンソンボイラ

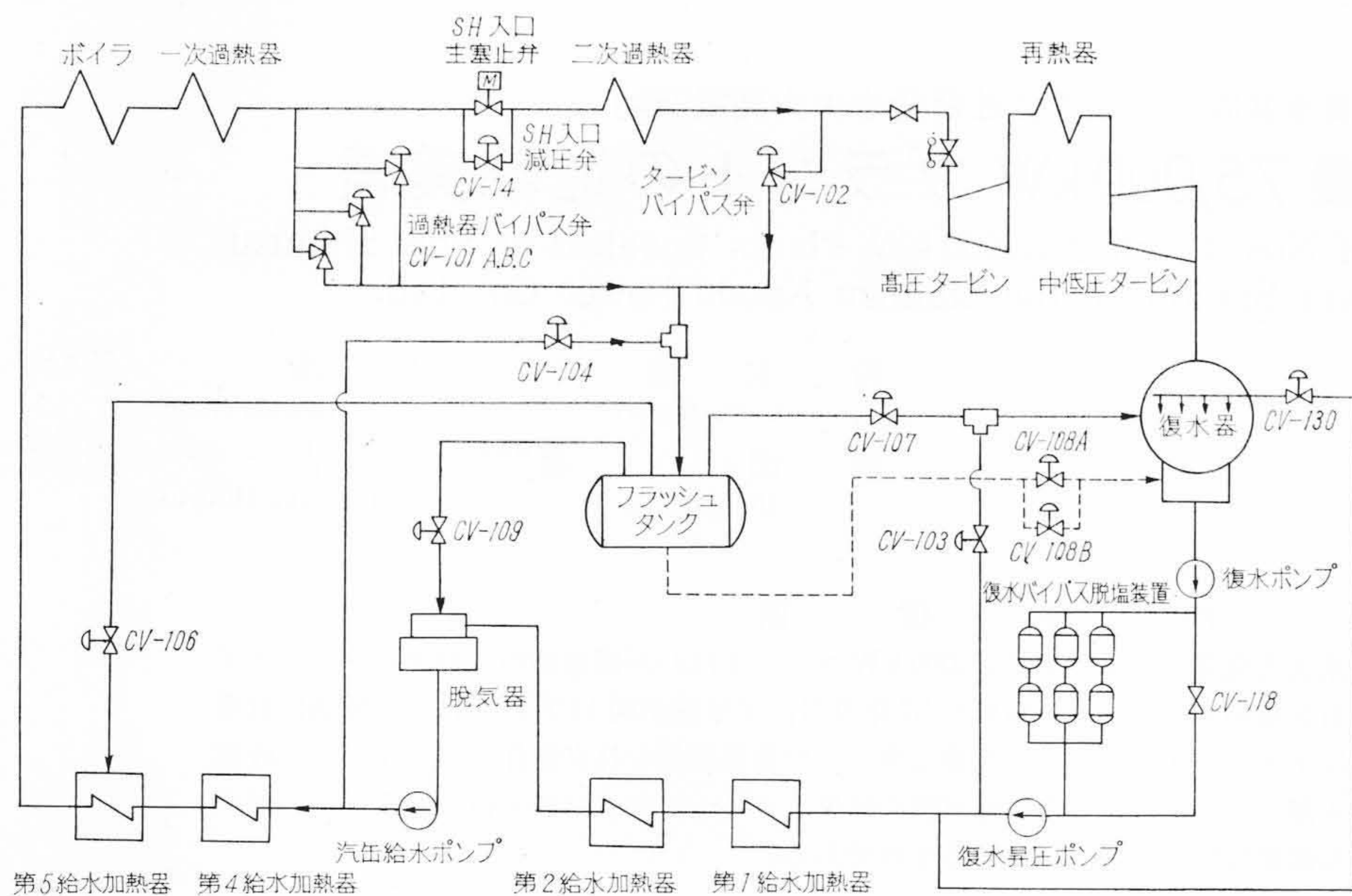
結果によってボイラ特性が数値的に明らかになったので, ボイラ特性をアナコンによって模擬し制御系の解析を行ない最適調整値を求め, 各部の設定値を決定した。

実際の調整に際しては, 制御系統は第3図に示すように主蒸気流量の信号を先行値とし, 主蒸気圧力が設定値になるように重油流量と給水流量を同時に変化させる制御系統を主制御系統として調整を行ない最適設定値を求めたが, これらの値はアナコン解析によってあらかじめ求めた最適設定値と数値的にも一致した結果となり, アナコン解析が十分信頼できることを確認した。

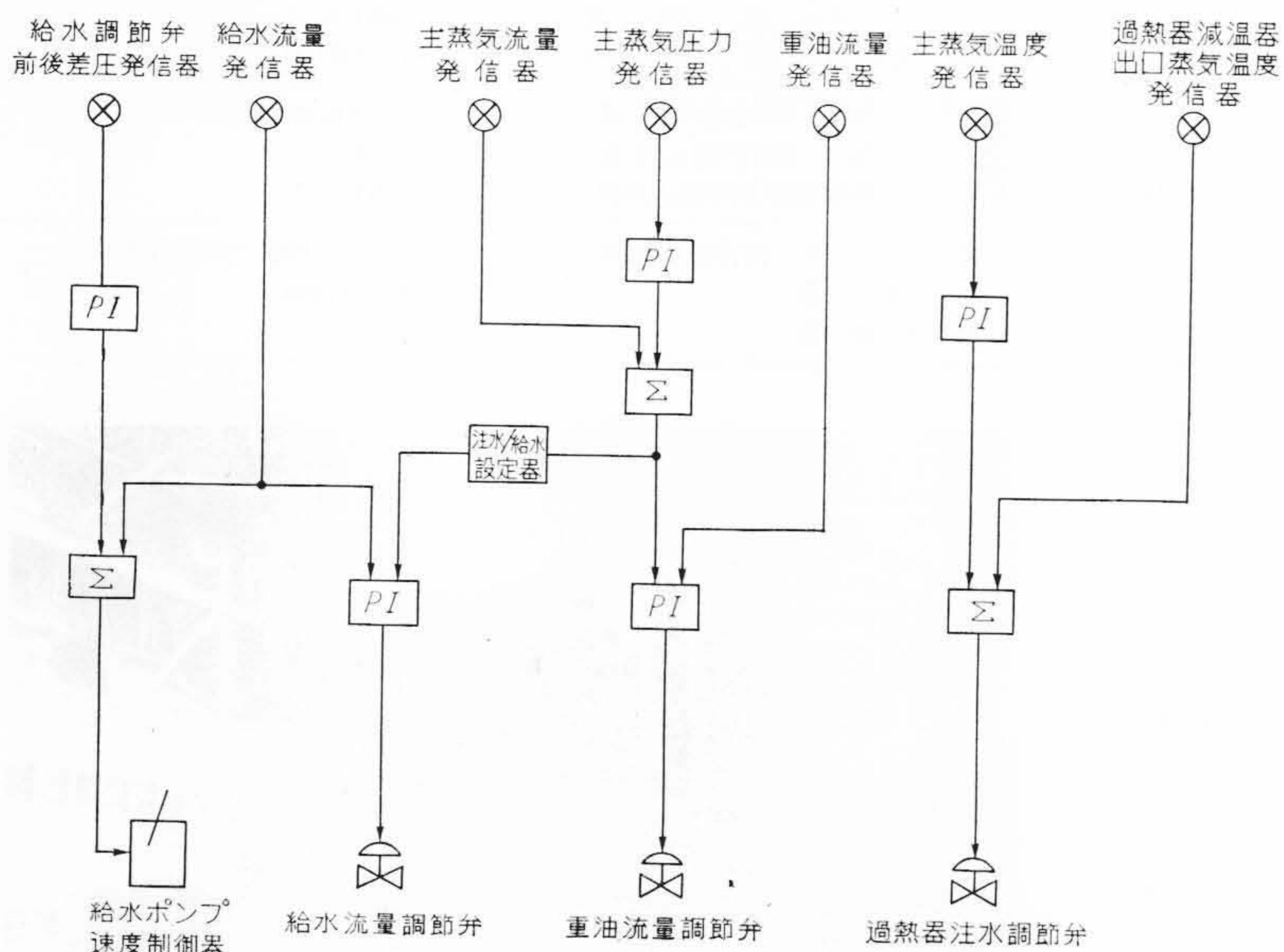
調整後の負荷追従試験結果は第4図に示すように4.8%/minの負荷変化に対して主蒸気温度変化は最大±2.5°Cでオフセットなしの非常に良好な結果である。

ベンソンボイラは負荷変化時, 蒸発完了点が移動するため温度に対しては自己制御性があり自然循環ボイラと比較し, 非常に温度変

* 清水共同発電株式会社新清水火力発電所
** 日立製作所呉工場
*** 日立製作所日立工場
**** 日立製作所国分工場



第 2 図 全 体 系 統 図



第 3 図 制 御 系 統 概 要

化が少ないという特性が、この試験でも証明された。

今回の負荷追従試験ではタービン側の制限などにより 5%/min 程度の变化を行なわせるに止めたが、ペンソンボイラは自然循環ボイラのように水循環に制約される圧力変動の許容限界といった制限値はなく、タービン側の総合許容圧力変動値は最大 $\pm 8\%$ (10 kg/cm^2)、総合許容温度変化値は $\pm 28^\circ\text{C}$ であるから、第 4 図の実績と照合させて、さらに大きな負荷変化をさせることも可能である。

次に自然循環ボイラの負荷変化の限界値と比較すれば、実際に電力会社で発表されている自然循環ボイラの負荷変化の限界値がドラム水位の変動などより制限され最大約 3%/min⁽²⁾ であるから、ペンソンボイラの負荷追従特性が、自然循環ボイラの負荷追従特性よりはるかに良いことが明らかとなった。

2.2 ボイラ動特性の測定

強制貫流ボイラプラントの最も大きな特長の一つは負荷追従性が良いことである。しかしこれらの利点を十分に生かして良好な運転を行なわせるためには、特長あるボイラ動特性を正確には握しこれを基礎として制御系統の設計、調整に進む必要がある。本プラント計画に当たっては動特性についても種々検討が重ねられたが、今回 1

号機の試運転時 6 日間にわたって動特性の実測を行ない多数の貴重なデータを得ることができた。実測は過渡応答法によって、72 MW と 56 MW の場合における燃料量、給水量、注水量、タービン加減弁開度および GRF ダンパー開度の 5 変数のステップ変化に対して行なった。第 5 図は実測結果の一例として、給水量のステップ変化に対する各変数の応答を示したものである。これらの結果はただちに本プラントの ABC 系統の調整に有効に利用されきわめて良好な制御特性を得ている。

強制貫流ボイラの動特性の実測は、従来、試験ボイラまたはごく小容量のボイラについては若干行なわれて来たが、大容量ボイラについてこのようにまとめたデータが得られた例はほとんどなく今回の試験により、豊富な貴重なデータが

得られたことは今後の強制貫流ボイラプラントの計画に対しさらに確固たる基盤を築いたものといえることができる。

2.3 起動時のプロッペン現象

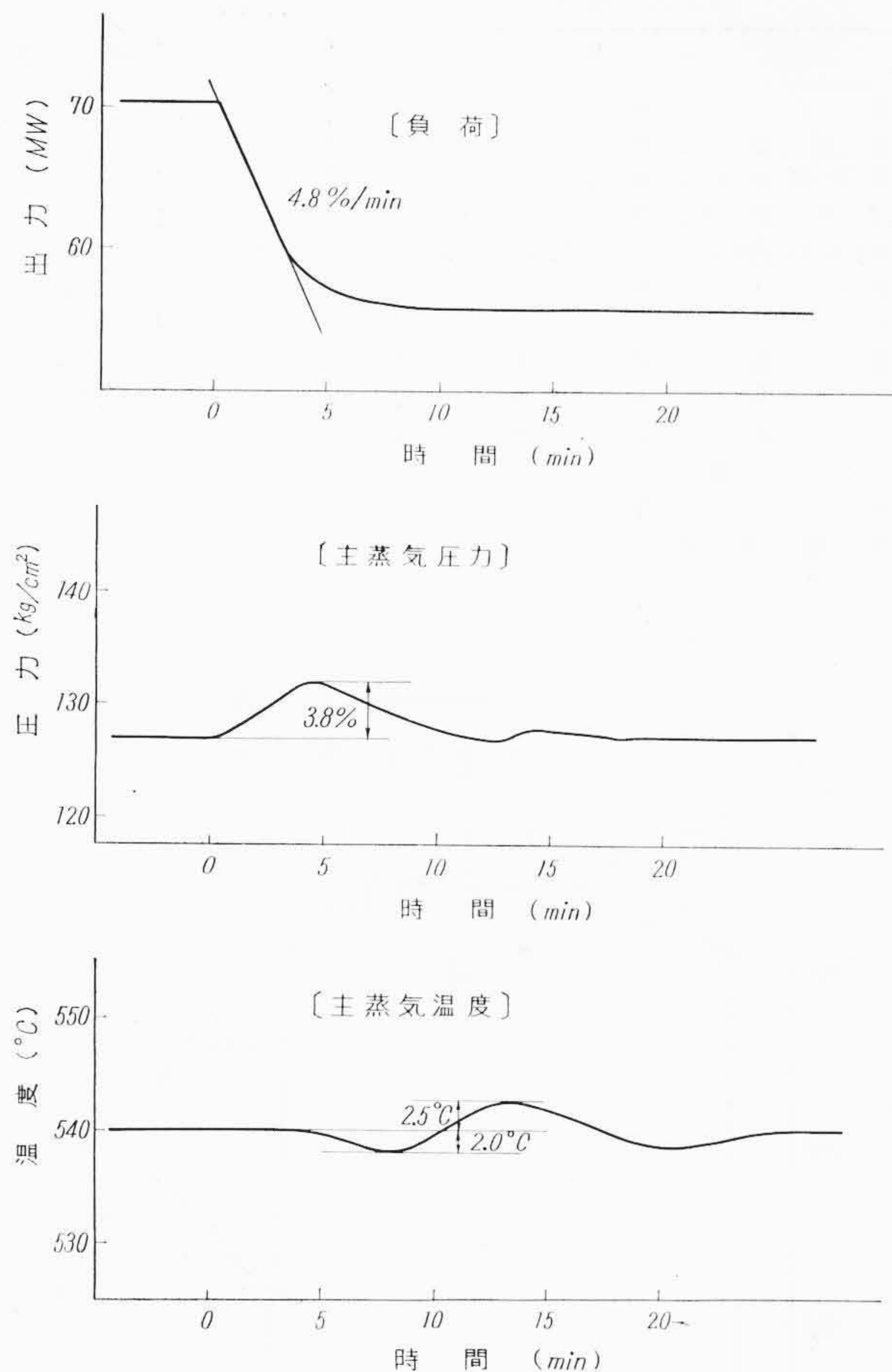
本プラントには従来の欧州ペンソンボイラプラントに見られない過熱器減圧装置と二次過熱器をバイパスする過熱器バイパス回路を採用しており、その系統は第 2 図に示すとおりである。

起動当初は起動用減圧弁を閉じ過熱器バイパス回路により循環を行なう。そして天井過熱器出口で過熱蒸気になると、起動用減圧弁を徐々に開いて二次過熱器に通気する。起動時にはまずボイラ給水ポンプにより給水は高圧加熱器を経て節炭器、水壁、蒸発器、放射過熱器、ケージ、天井過熱器を順次通り、過熱器バイパス弁により減圧され、フラッシュタンク内にフラッシュする。ボイラ内圧力は過熱器バイパス弁により 125 atg 一定に調節する。フラッシュタンク内の蒸気はダンパ弁 CV-107、ドレンはドレン弁 CV-108 を通り復水器にて復水になる。

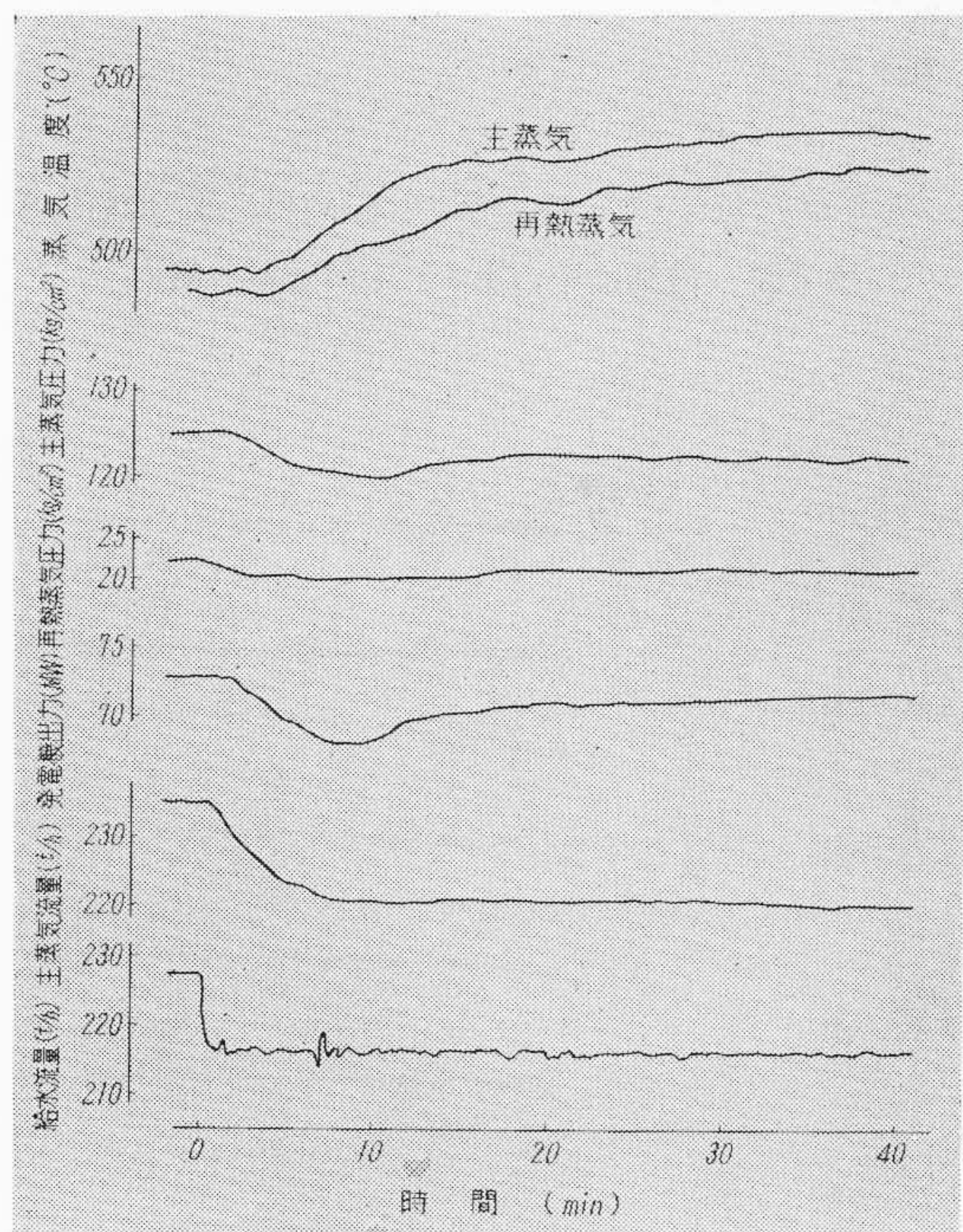
強制貫流ボイラを起動し燃焼率を上げて行くと、罐水の体積膨張によって多量の水が一時的にボイラ外に押し出される。これは強制貫流ボイラに特有な現象で一般にプロッペン (Pfropfen) 現象と呼ばれている。

試運転の際、起動特性試験とともにプロッペン現象に関する実測を行なった。第 6 図は冷罐起動時の実測結果の一部である。測定はボイラ各バンク出入口、フラッシュタンクの圧力および温度、過熱器バイパス弁、ダンパ弁、ドレン弁の各リフトおよび前後圧力、フラッシュタンクのレベル、給水流量、重油流量、ガス温度などの時間的变化をオシログラフと、送り速度を最高にした記録計にて測定した。ボイラ出口の流出量算出に必要な過熱器バイパス弁前の流体の比体積は γ 線ボイドメータにより測定した。

運転条件は起動時間中給水流量を 80 t/h 一定に手動で調節し、ボイラ出口圧力を 125 atg 一定に過熱器バイパス弁開度により調節する。重油量変化は点火後 15 分までに 4 t/h に増加し、その後 4 t/h 一定に保持する。そして過熱器バイパス弁が急激に開き始めた時に 4 t/h から 3.5 t/h に減少し、その後過熱器バイパス弁開度が最大値より減少し始めた時から徐々に増加させた。

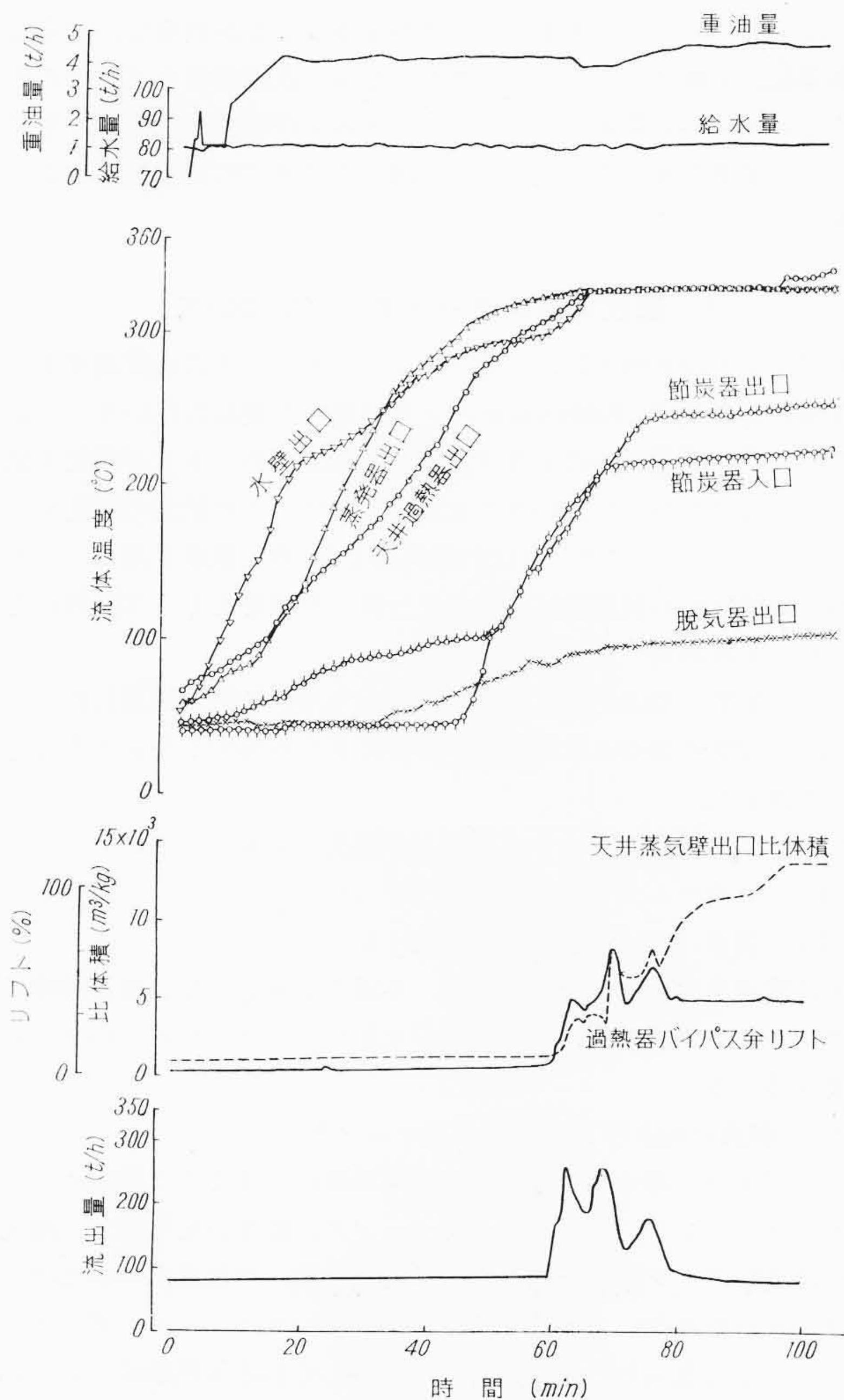


第4図 負荷追従試験結果



第5図 給水量変化に対する応答

重油量変化に対し水壁出口温度は最も大きい上昇率を示し、応答も早い。蒸発器出口温度は水壁出口より約10分遅れて大きい上昇率で上昇する。天井過熱器出口温度は240 $^{\circ}\text{C}/\text{h}$ の温度上昇率でほぼ直線的に上昇する。脱気器出口温度は点火後30分でフラッシュタンクにて発生した蒸気が脱気器にはいるためその頃より徐々に上昇



第6図 冷始動時のプロッペン実測結果

する。節炭器入口温度は点火後46分頃からフラッシュタンクの蒸気によって高圧給水加熱器が作動し、そのため急上昇する。水壁出口温度は点火後約50分で飽和温度に達せずほぼ一定になる傾向を示すが、58分頃には給水温度上昇の影響があらわれふたたび上昇する。点火後96分で天井過熱器出口から過熱蒸気があらわれ、点火後100分以内に二次過熱器に通気できた。

天井過熱器出口からの流出量は過熱器バイパス弁の通過面積、入口比体積および前後圧の実測値から算出した値である。流出量は点火後60分より急激に増加し、その後3個のピークがあらわれている。60分には蒸発器出口が飽和温度となり、蒸発器から蒸発が始まり、そのため天井過熱器出口からの流出量が増加し始めた。61分から重油量を減少させたため蒸発器内の蒸発率が減少し、流出量が減少した。水壁出口および天井過熱器出口は点火後63分でほぼ同時に飽和温度に達している。したがって第1回の流出量ピークは蒸発器内の蒸発による体積急膨張によりボイラ出口の水が押し出されたものと思われる。63分40秒から流出量がふたたび急増し、第2回目のピークがあらわれている。これは給水温度上昇の影響が水壁まで達し、水壁の蒸発区域が大きくなったことと蒸発がますます加速されたために生じたものと思われる。第2回目のピークが終了し始めた時、ふたたび重油量を徐々に増加した。第3回目のピークはこの重油量の再増加によって生じたものである。

第1回目のプロッペン現象時にはボイラ出口から水が押し出されたが、第2回、第3回の場合には汽水混合物が押し出された。

以上の実測の結果から本プラントは従来のベンソンボイラプラン

トに比べてプロッペン現象のピークが小さいことが判明し、安定な起動運転法を確立することができた。なお二次過熱器をバイパスさせるとプロッペン現象が小さくなることおよび燃焼率変化によりプロッペン現象を減少させうることに關してはすでに理論計算によって明らかにされている⁽³⁾。

3. 建設時のスタートアップについて

本プラントの計画当時、丁度アメリカにおいて大容量貫流ボイラを採用した Breed, Eddystone などの発電所が運転にはいりつつあったが、その試運転中のトラブルとして給水中のシリカが当初 4 個月近くもぬけなかったということがあった⁽⁴⁾。この給水の純度を上げる点について、本プラントは計画当初より、特に慎重を期し、工場における製作から試運転に至るまで一貫した思想をもって建設に専念した。すなわち

- (1) 配管そのほかにはシリカのはいらない製法を採用した。
- (2) 現地における材料保管中は特にさびの発生しないような方法を講じた。
- (3) アルカリクリーニングおよび酸洗いを施行した。
- (4) スチームブローイングを行なった。
- (5) 復水バイパス脱塩装置を設けた。

などに重点をおいて行なった結果、外国にも例をみないほど短時日でクリーンアップを完了することができた。以下これについてその概要を述べる。

3.1 酸洗いおよびアルカリクリーニング

プレボイラ、ボイラ本体について第 2 表に示すような範囲について水フラッシング、アルカリクリーニング、酸洗いを実施し、酸洗いには 3% クエン酸を使用した。二次過熱器、再熱器については、酸洗いを行なわないで後述するようにスチームブローイングでクリーニングを行なった。また銅合金を採用してある加熱器については水室側および胴体側とも酸洗いを行なわなかった⁽²⁾。

酸洗い中は 1 時間ごとに Fe イオン濃度、酸濃度、酸液温度、流量、pH 値の動向を側定し、その効果を監視した。その例を第 7 図に示す。また各材質のテストピースを酸洗いの注入側、もどり側に設け、おのおの流速をかえて単位面積当たりの減量を測定して酸洗いの影響を実測したのが第 8 図で、その効果が十分に発揮されていることがわかった。プレボイラの鉄

さびの酸洗いによって排出できた量を Fe イオン濃度並びに保有水量より計算すると 60 kg と推定された。またボイラ本体では 175 kg と推定される。

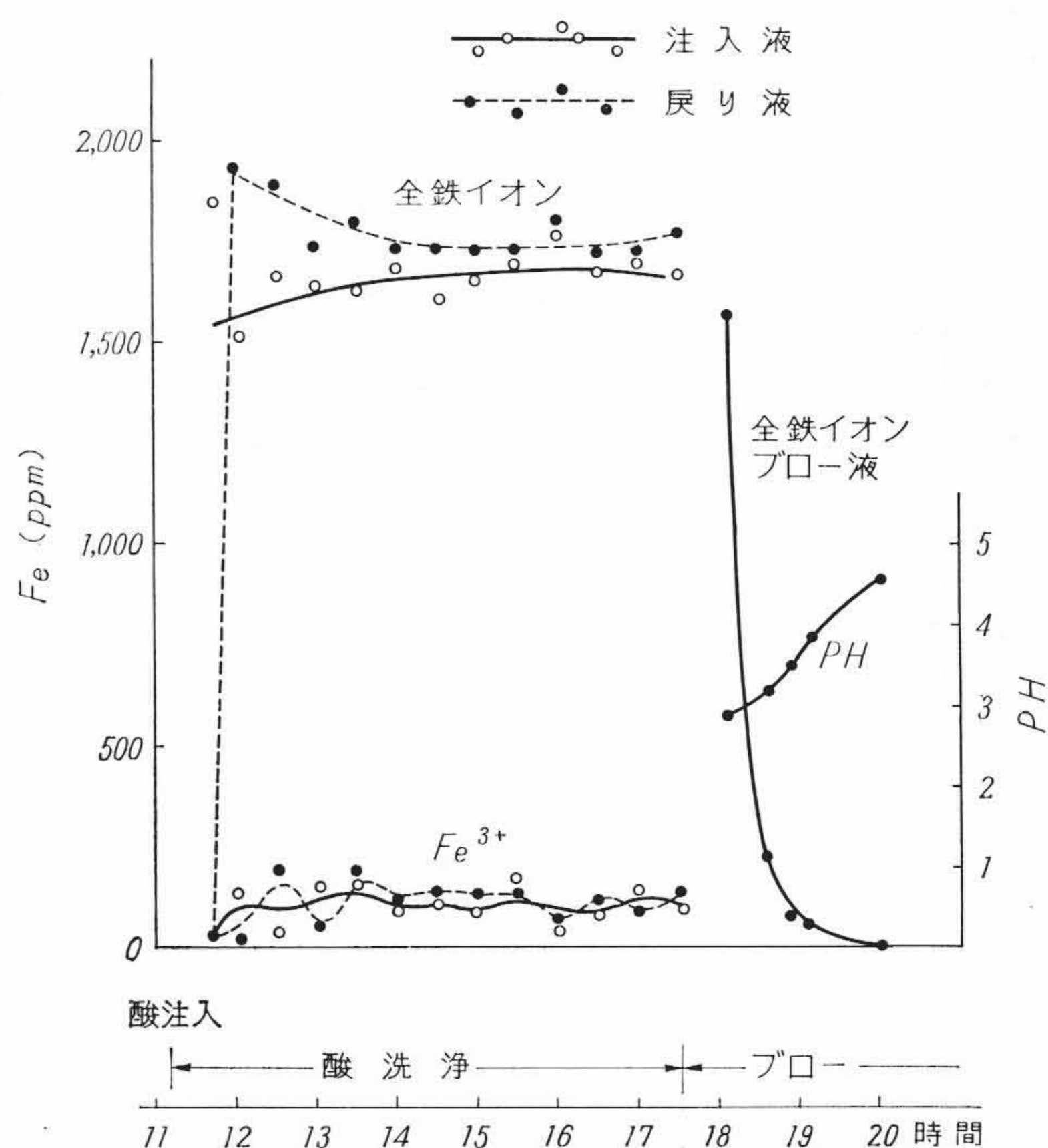
3.2 クリーンアップオペレーション

酸洗いにひきつづいて水循環ブローを行ないある一定限度まで Fe が下がった後、ボイラに点火し加熱循環（これをクリーンアップオペレーションという）を行なったが、この場合のシリカ並びに銅の減少割合を示すのが第 9 図である。鉄も同じように減少しているが、この図で示すように復水バイパス脱塩装置の入口のシリカは

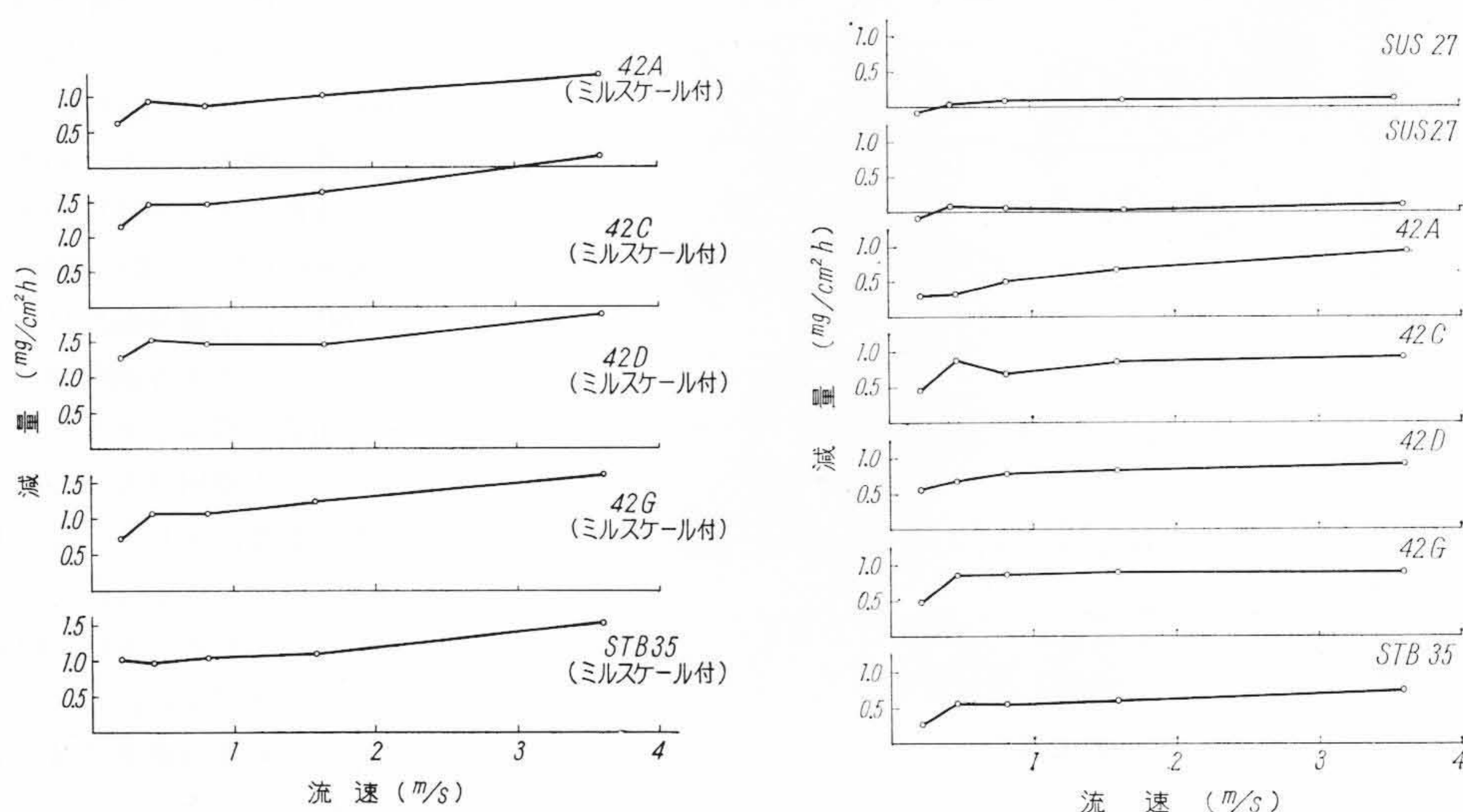
非常に多くても、その出口のシリカは 5 ppb 程度までポリッシュされており、脱塩装置が十分その効果を発揮していることがわかる。この復水バイパス脱塩装置を事業用火力で採用し、しかも運転には

第 2 表 酸洗い、アルカリ洗施行範囲

施 行 場 所	アルカリ洗	酸 洗
復 水 管	○	○
低 圧 第 一、第 二 ヒ ー タ	○	○
脱 気 器 お よ び 脱 気 貯 水 タ ン ク	○	○
高 圧 第 四、第 五 ヒ ー タ	○	○
低 圧 お よ び 高 圧 ヒ ー タ ド レ ン 配 管 お よ び 胴 体	○	○
給 水 管	○	○
水 管 壁	○	○
輻 射 過 熱 器 壁	○	○
天 井 蒸 過 熱 器 壁	○	○
二 次 蒸 過 熱 器 管	○	○
主 再 熱 器 管	○	○
高 低 温 再 熱 蒸 気 管	○	○
フ ラ ッ シ ュ タ ン ク	○	○

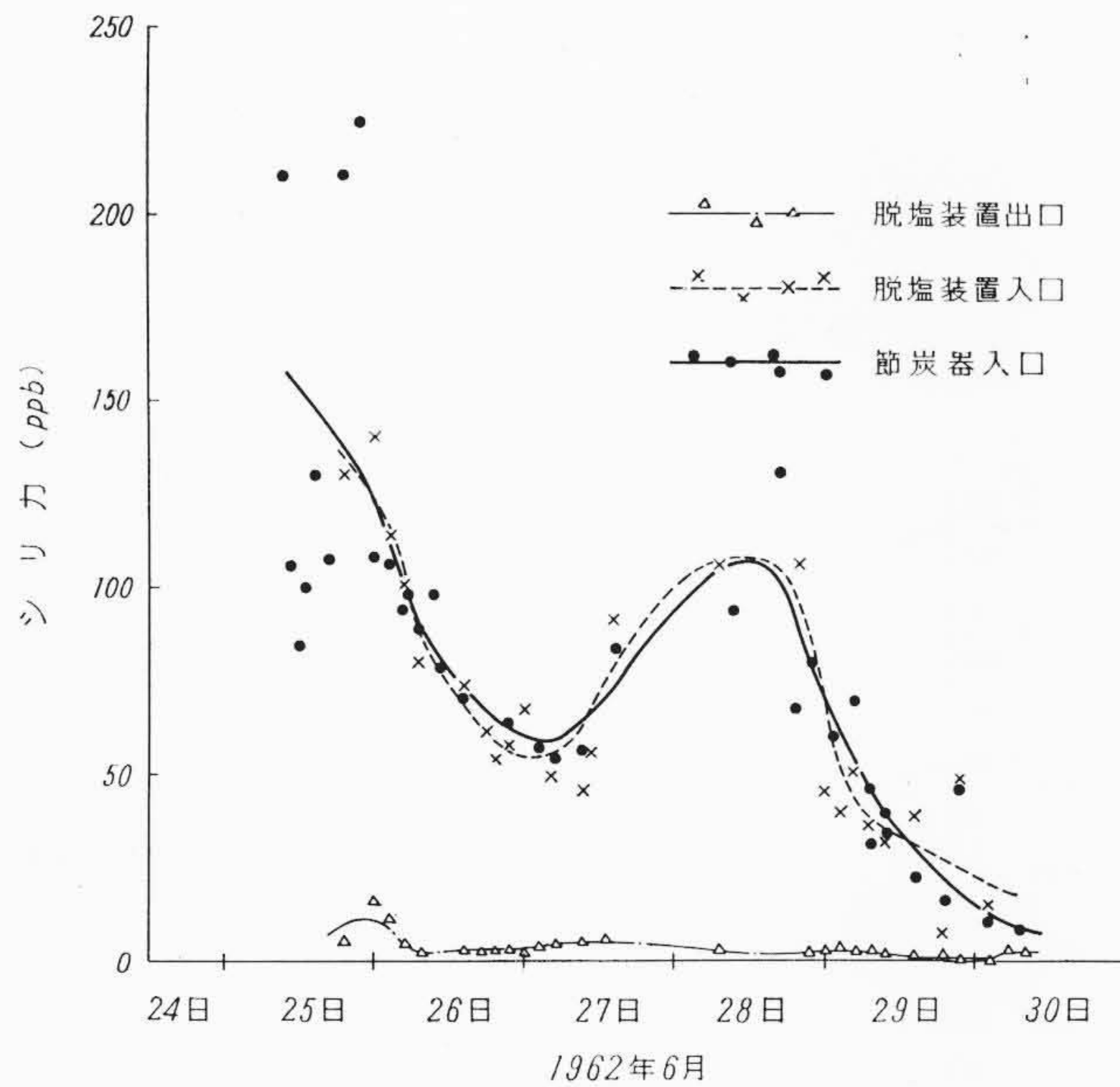
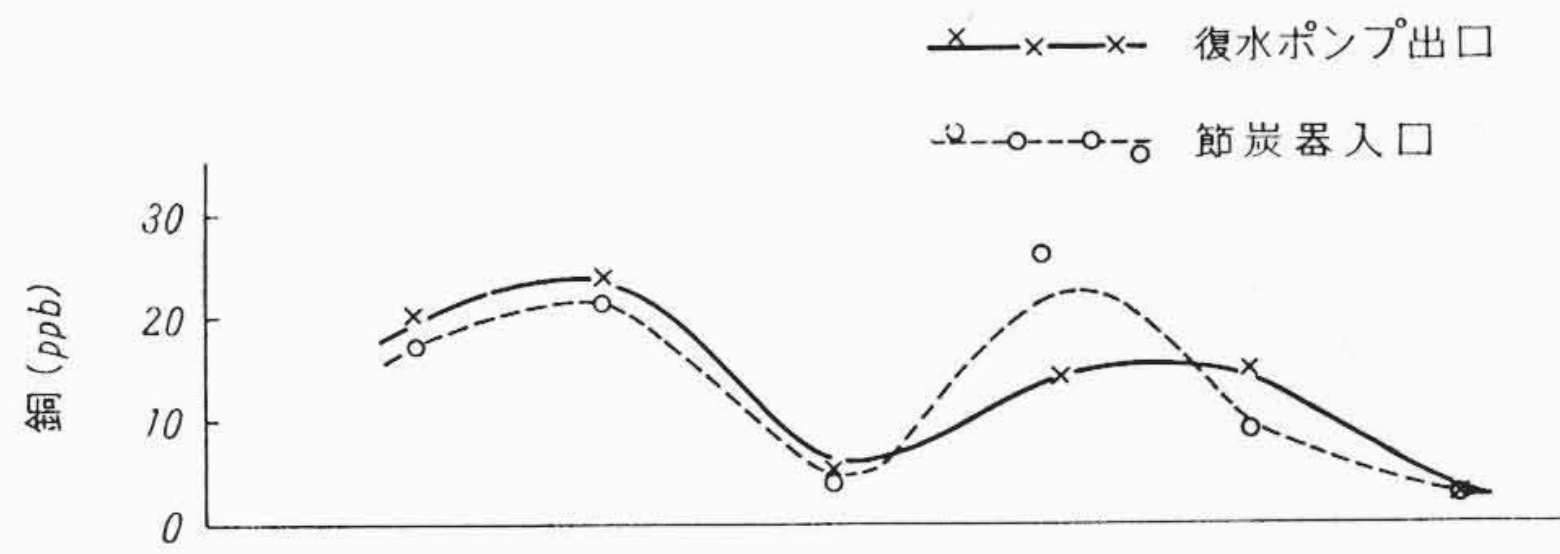


第 7 図 酸洗に中の Fe イオン pH の傾向



第 8 図 テ ス ト ピ ー ス に よ り 酸 洗 ひ 効 果 の 実 測

いったのはこの新清水火力発電所がわが国で最初である。この装置には特に再生薬品がボイラ給水の系統に直接はいらないようにするため、外国でもあまり例のみられない新しい外部再生方式を採用し



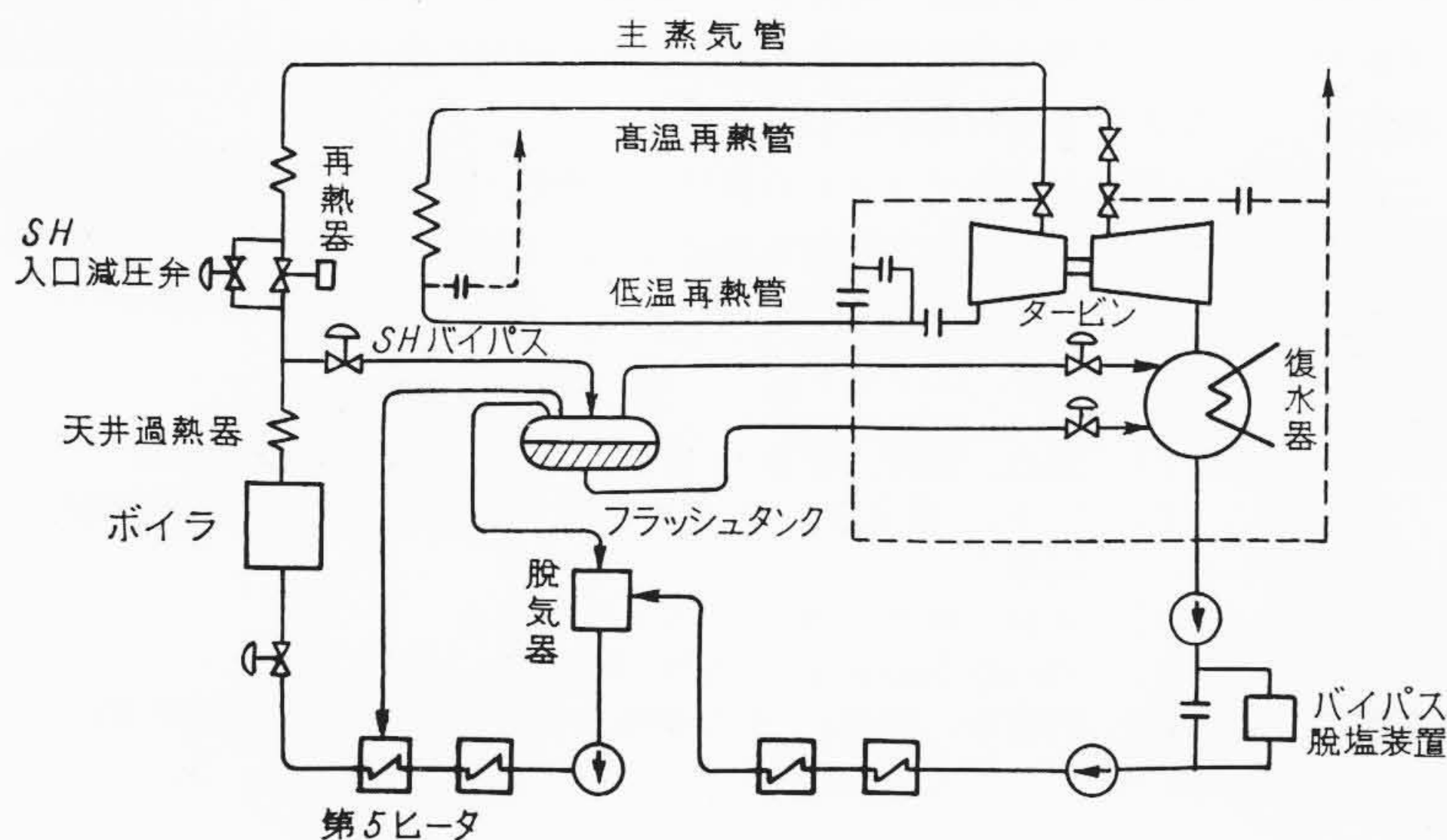
第9図 シリカ、銅のクリーンアップ経過

ており、十分にその効果を発揮し順調に運転中であることをつけ加えておく。

3.3 ブローイングアウト

普通一般の貫流ボイラはドラム形ボイラのように十分なクリーニングフォースの出るようなスチームブローイングを行なうことはできないが、本プラントのベンソンボイラは第2図にも示すように二次過熱器入口に減圧装置を有しているので、これを使用してスチームブローイングが容易にできる。この点がこの減圧装置を有するボイラの特長の一つである。第10図はブローイングアウトの系統図を示す。

このブローイングアウトは前述のクリーンアップオペレーションにひきつづいて、酸洗いを行なわなかった二次過熱器、主蒸気管、再熱器および高温再熱管について実施し、管内面のミルスケール、溶接屑、そのほかの異物を除去したが、この方法はクリーニン



第10図 ブローイングアウト系統図

第3表 1号機給水純度実績(節炭器入口)

月 日	pH	μ V/cm	SiO ₂ *	Fe*	Cu*
11.11	8.6	0.2	7	7	3
12	8.7	0.1	2	7	5
13	8.7	0.1	7	9	5
14	8.8	0.1	2	10	3
15	8.8	0.1	3	7	5
平均制限値	8.5~9.5	—	20	10	5

注：*の単位 ppb

グを工程的にも非常に短縮でき、十分にその効果を上げることができた。次にブローイングアウト時のボイラの運転について述べると従来ドラム形ボイラの場合はブローイング時は消火して行なっているが、本プラントの場合には消火しないで連続運転を行ないながら実施した。すなわち

- (1) 給水流量を $\frac{1}{3}$ MCR 起動バイパス系統を通して循環。
- (2) 天井過熱器出口流体が 120 atg, 350°C の蒸気条件とし、過熱器入口ガス温度が 540°C 以下である燃焼割合とする。
- (3) 復水は全量バイパス脱塩装置を通す。
- (4) 以上の運転条件を保ちながら、過熱器減圧弁を除々に開きブローイングを開始する。
- (5) ブロー中は過熱器出口圧力を 40 atg 以下に調整する。

以上のようにして主蒸気管を 11 回、低温再熱管を 12 回、再熱器、高温再熱管を 12 回、それぞれ第10図に示す系統にしたがってスチームブローを行なった。各系統とも仮配管先端にテストピースを取り付けてブロー効果を判定したがきわめて良好な結果をおさめた。

このようにして酸洗い、クリーンアップオペレーション、スチームブローイングなど一連の試運転を行なったのでタービン通気後、ガバナテスト前後の給水中のシリカ、Fe などはそれほど上昇はみられず、また営業運転にはいってからもずっと規定の給水純度を保って順調に運転を行なっている。営業運転中の給水純度の一例を第3表に示す。

4. 起動時間の短縮について

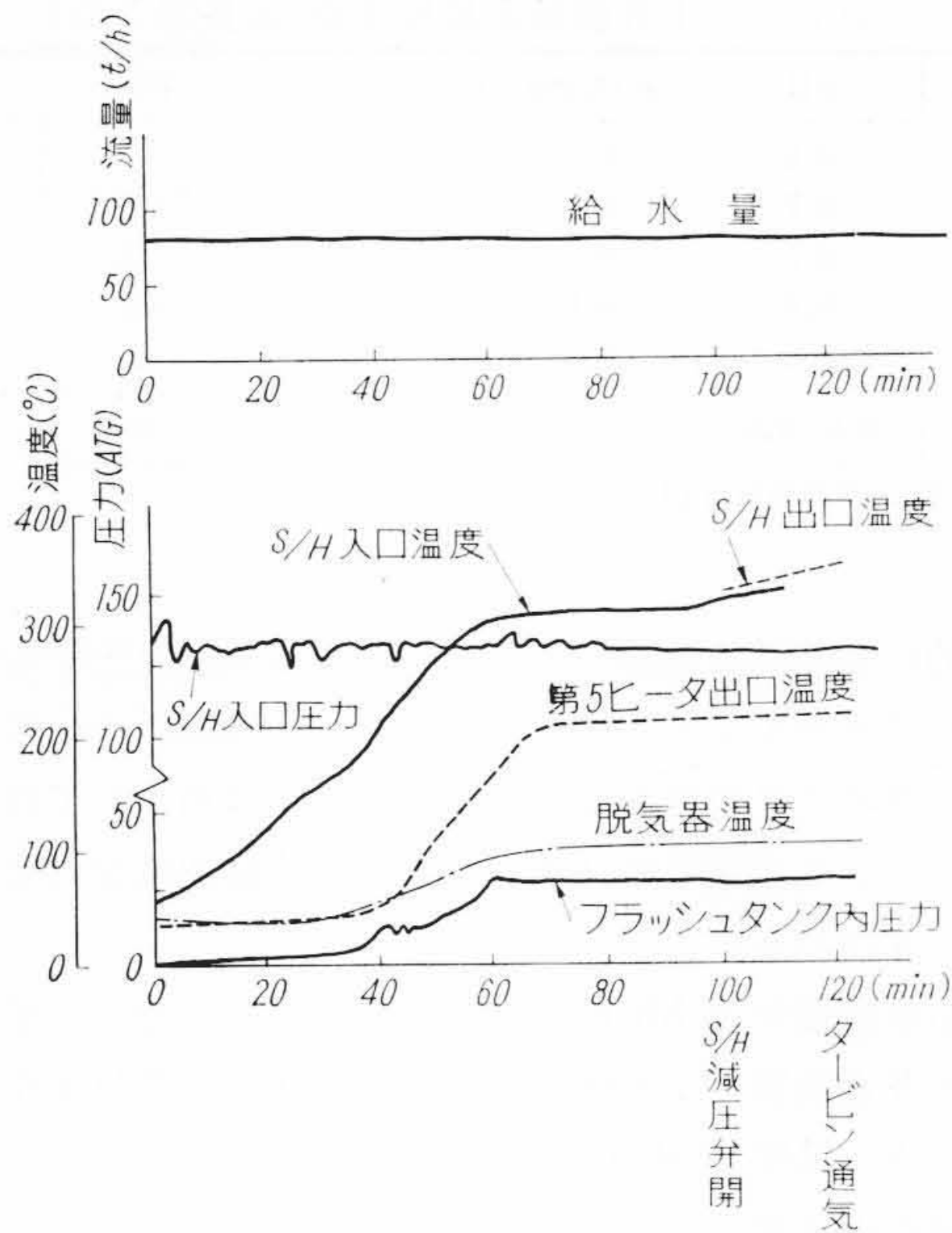
新清水火力にベンソンボイラを採用した最も大きな理由の一つに起動、停止時間が、従来のドラム形ボイラに比べて速いということが上げられている。この種の大容量の貫流ボイラについてはわが国では全く経験がなく、内外の注目を集めていたが、清水共同発電株式会社と日立製作所の協力のもとに予期以上の起動時間の短縮の実績が得られたのでその一、二の実例について述べる。

4.1 冷機起動

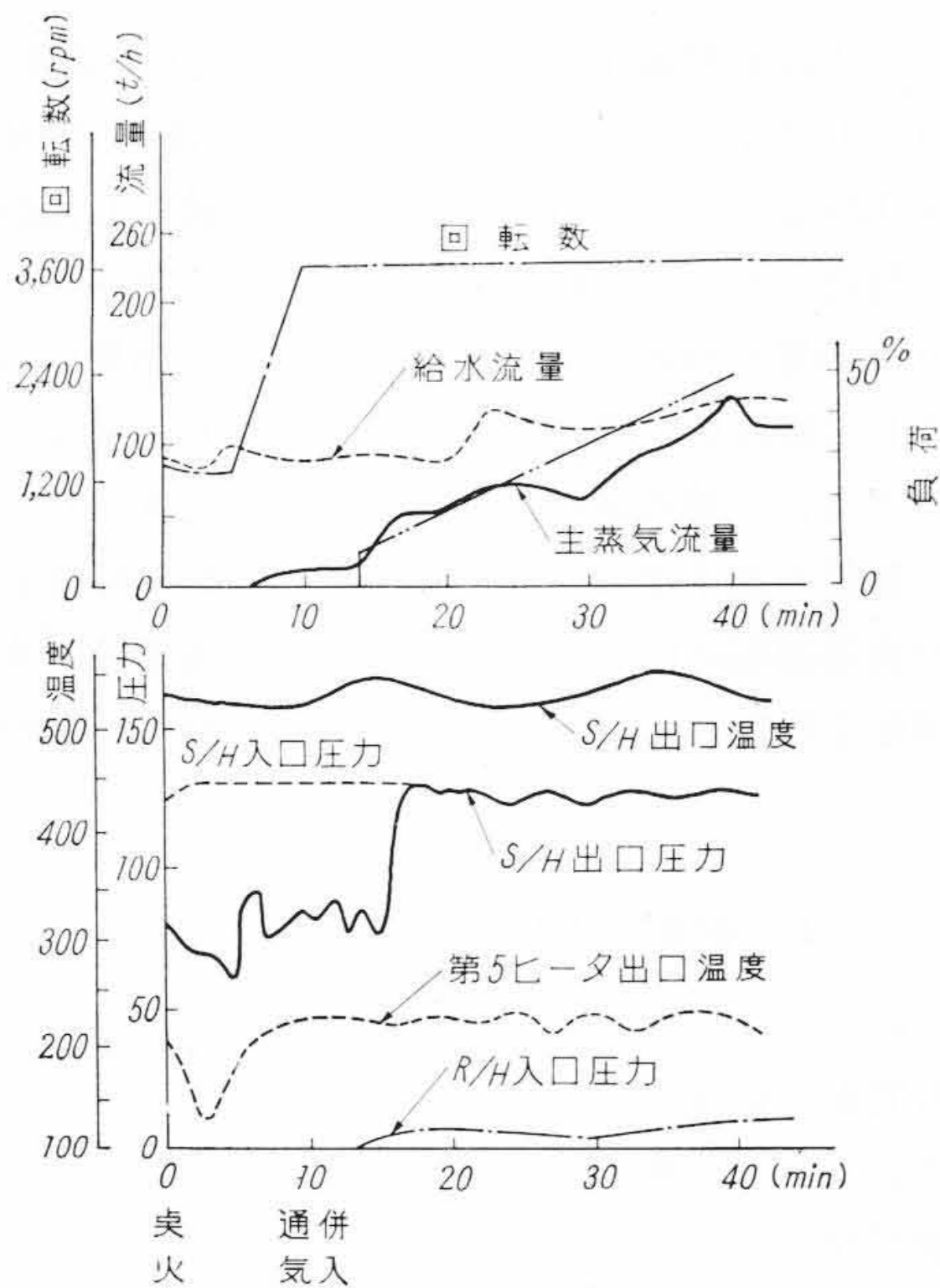
ドラム形ボイラの場合には肉厚なドラムの熱応力を避けて 100°F/h 前後という温度変化率で起動時間が押えられており、点火から通気まで同級のボイラで低圧通気しても約 4 時間程度要していたが、本ボイラではその 5 倍位の温度変化率をとることが可能であり、それだけ起動時間が短縮できたわけである。この冷機起動の一例を第11図に示す。図に示すように点火より過熱器出口でスーパーヒートするまで 100 分以内であり、その後 20 分でタービン通気ができる。この起動時間は計画値とまったく一致している。

4.2 ホットスタート

ホットスタートの場合の一例を第12図に示す。この例は通常運転時よりも運転陣を増してスタートした場合の例であり、ボイラを消火し、タービンも主塞止弁がトリップしている状態においてボイラに点火し、その後 7 分でタービンに通気し、通気後 7 分で併入したものであ



第 11 図 冷 機 起 動 例



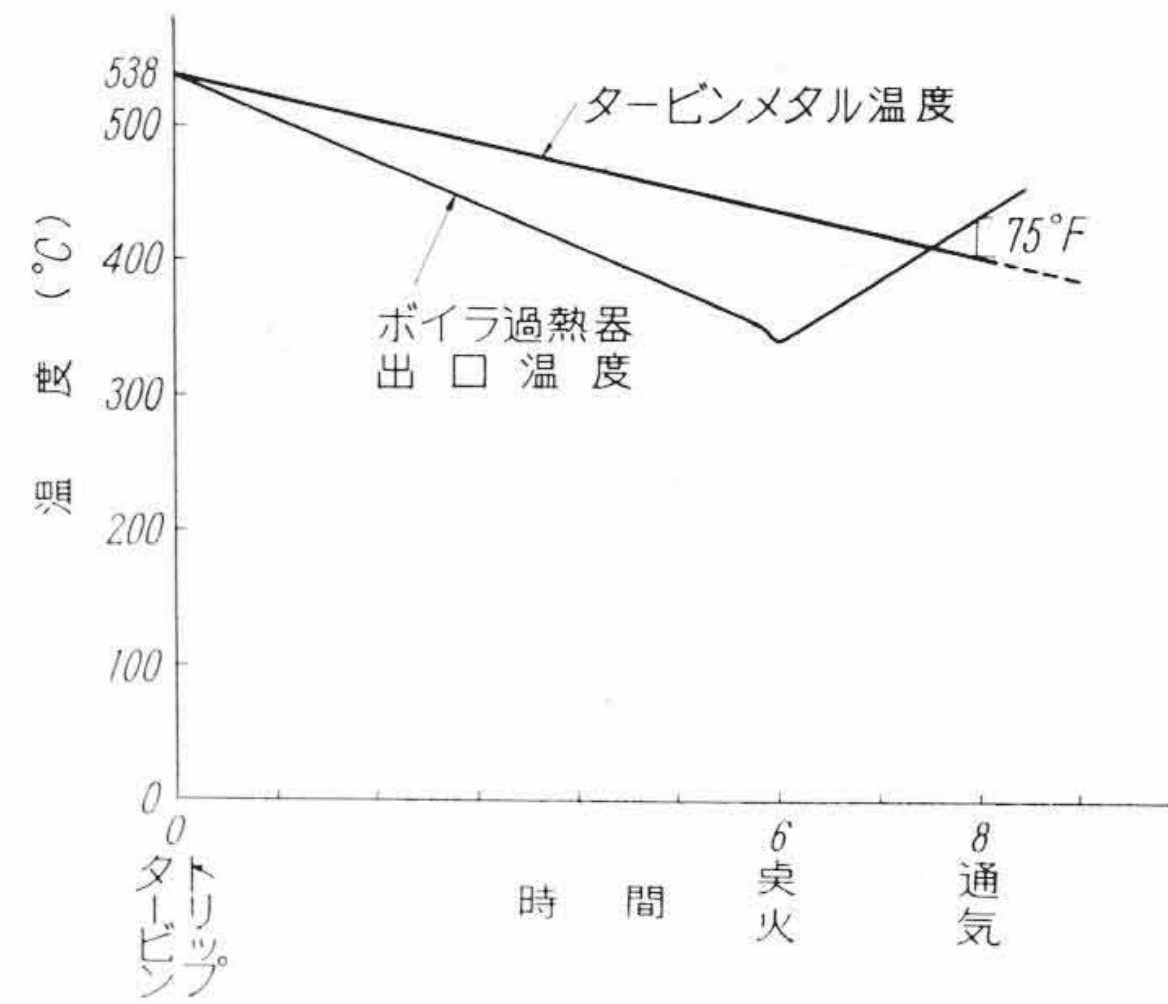
第 12 図 ホ ッ ト ス タ ー ト 例

り非常に短い時間でホットスタートの実施ができた。

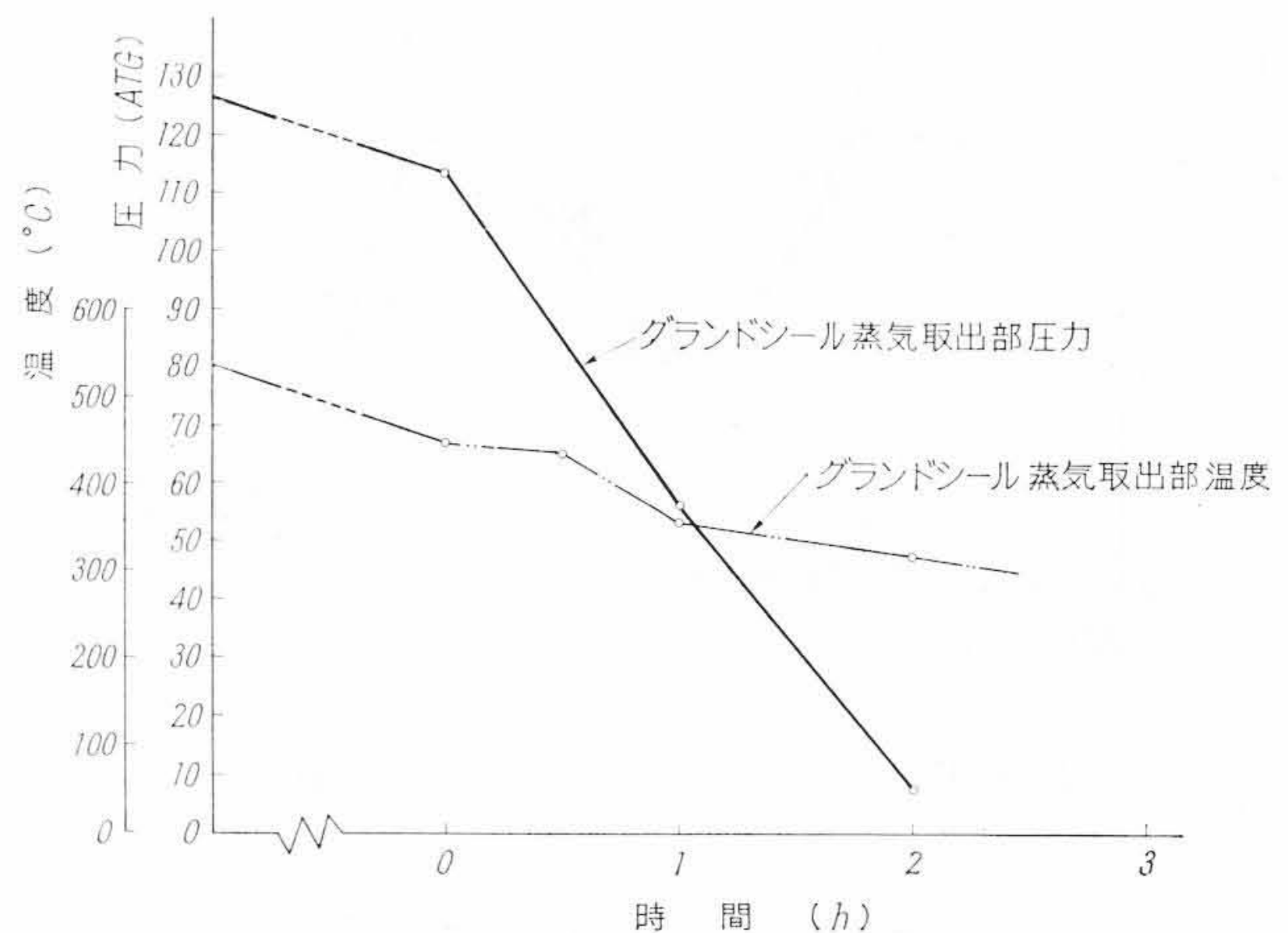
一方ドラム形ボイラの場合には第 13 図に示すようにタービンがホットスタートで止った場合には数時間⁽⁵⁾もメタルマッチングができない場合があり、そのためタービンのケーシングのメタル温度が冷却されるのを待たなければならないという欠点があるが、この新清水火力のベンソンボイラの場合にはタービンバイパス、および過熱器減圧装置があるために容易に高い主蒸気温度が得られ、そのためメタルマッチングすることができ、したがって容易に再起動できる利点がある。

4.3 再起動時の補助蒸気

プラント再起動時のタービンのグランドシールおよびエゼクタの駆動蒸気は当初消火後の貫流ボイラからは取り出すことができないのではないかと考えられていたが、本プラントにおいては第 2 図に



第 13 図 ドラムボイラスタート例



第 14 図 主蒸気圧力、温度降下曲線

示すようにこのボイラの特長である過熱器減圧装置を有しているため、この弁を停止中微開しながら必要な補助蒸気量を高い温度で取り出すことができる。トリップ後タービンのグランドシール蒸気、エゼクタ、蒸気を取り出しながらボイラの圧力、温度の降下割合を実測した結果は第 14 図に示すとおりである。

5. 結 言

以上新清水火力 1, 2 号機 75,000 kW プラントの貴重な諸特性試験の結果、スタートアップ、それにドラム形ボイラと比べて非常に短縮された起動時間について述べたが、大容量ベンソンボイラプラントがわが国で初めて順調に運転に入ったことは日本における火力発電が大容量化、貫流ボイラが数多く採用されんとする今日その果たした役割は非常に大きく火力発電の開発に携さわるわれわれに大きな希望と自信を与えてくれた。

終わりに本プラントの据付、試運転、諸試験について終始ご指導を賜わった清水共同発電株式会社、中部電力株式会社の関係各位に深く謝意を表する。

参 考 文 献

- (1) 堀内, 松村, 安藤: 日立評論 45, 547 (昭 38-3)
- (2) 田中: 電気学会 37 年度関西支部大会 “火力発電所運転上の問題”
- (3) 田村, 坂井, 細川: 日本機械学会
- (4) Philip Spom 他: APC Report., 1961
- (5) 円城寺, 稲生: 火力発電, 第 13 巻第 71 号 (昭 37-8)