

最近における上下水道の制御装置

Recent Controlling Equipment for Water Supply and Sewerage

森 本 義 郎* 三 木 謙 造*
Yoshirō Morimoto Kenzō Miki
大 音 透** 森 俊 二**
Tōru Ōto Syunji Mori

要 旨

最近の上下水道設備は規模が大きくなり、これを少数の人員で合理的に運転制御するための制御装置の要求が高まっている。制御装置としては全系統の設備を対象とし電子式計器、集中制御装置、テレメータ、データロガーが広く採用されるようになった。また自動制御装置も単一系統のフィードバック制御のみでなく、計算制御システムを導入し、総合制御、最適制御あるいは経済運用化へと大きく飛躍発展する転機にある。本稿はこのような最近の上下水道の制御装置について述べたものである。

1. 緒 言

産業および経済の発展に伴い人口の都市集中化が著しい。これに応じ上下水道および工業用水設備を急速に拡大、整備して良質の水を豊富に供給するとともに、廃水を完全に処理することは重要な問題である。最近の上下水道系統の浄水場あるいは終末処理場は広い構内に多くの設備を設けた大容量のものとなっており、取水、配水、中継ポンプ設備は離れて設備されることが多く、また給・配水管路は複雑なメッシュを形成している。このような系統を少数の人員で能率よく運転制御し良質の水を不断に供給し、完全な廃水処理を行なうため制御装置の役割はますます重要なものとなっている。図1の上水道制御系統の例に示すように従来の比較的局地的な各設備ごとの個別管理制御体系から、全系統の設備を対象とし、統一された

制御装置によって中央から集中管理制御を行なうシステムへと進歩している。このシステムを構成する代表例は次のとおりである。

- (1) 電子式計器の採用による統一信号制御系の構成
- (2) 選択制御装置と遠方制御装置の採用による集中制御系統の構成
- (3) テレメータの採用による遠方情報の伝送
- (4) データロガーの採用による管理、監視、情報処理の集中自動化
- (5) 計算制御の導入による全系統の総合制御、最適制御あるいは経済運用化

このうち(1)～(4)は現在まで全部あるいは部分的に採用されているが、(5)は最新の技術で今後いっそうの進歩が期待される。

以下その概要について述べる。

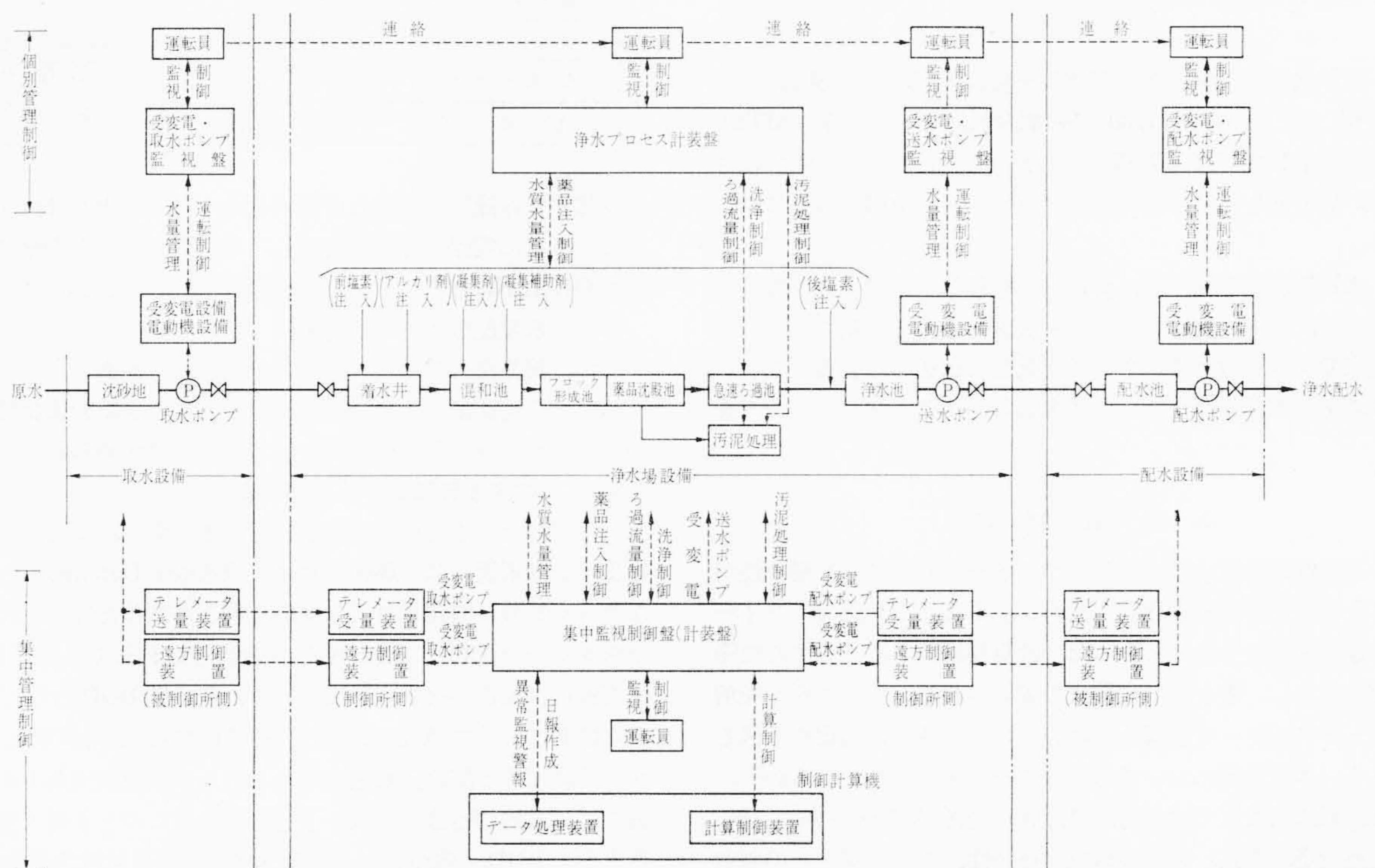


図1 上水道制御系統図

* 大阪府水道部

** 日立製作所国分工場

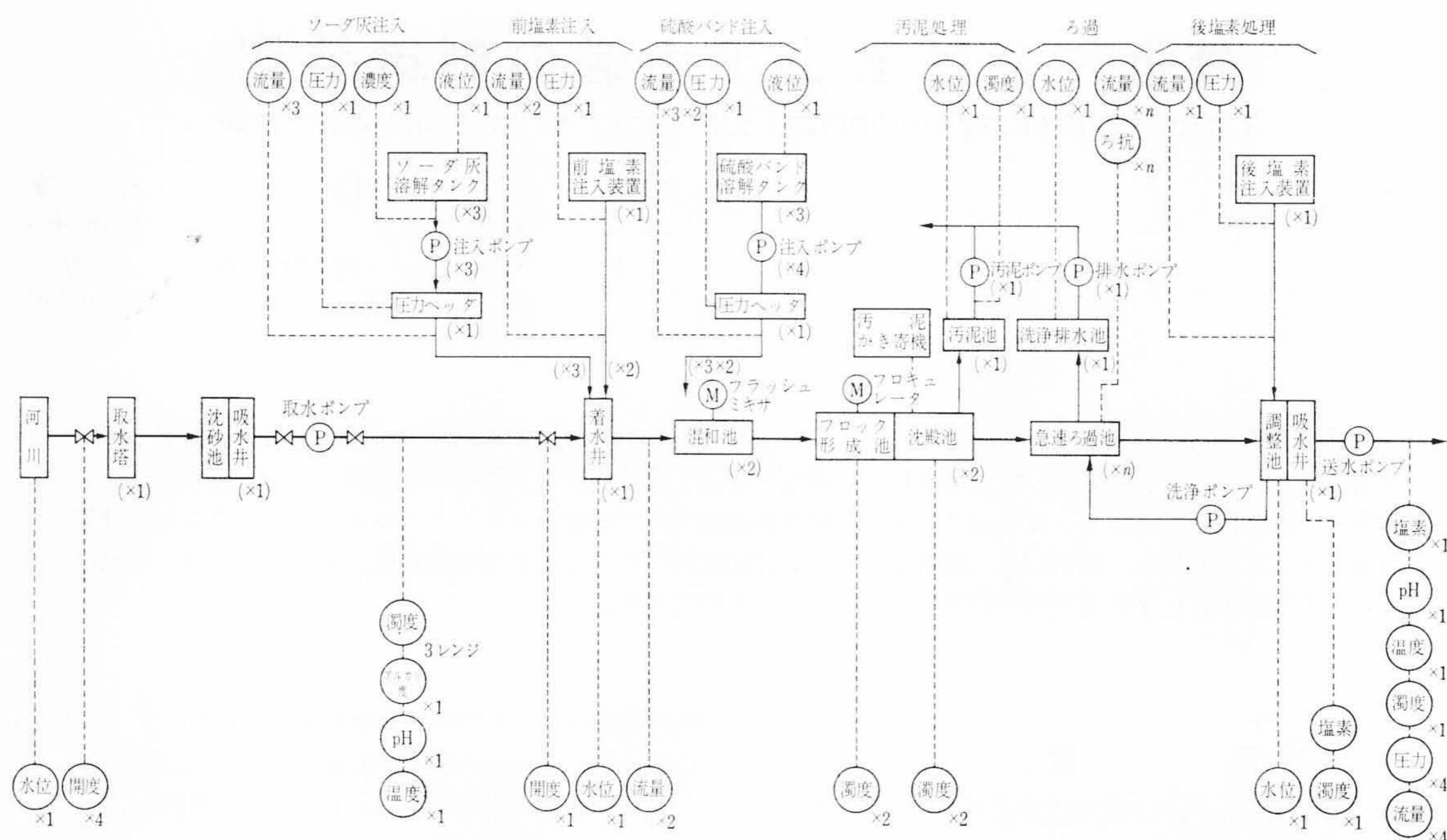


図 2 浄水場 フローシート

2. 電子式工業計器⁽¹⁾

上下水道の計測制御用工業計器としては伝送信号の種類により電子式と空気式がある。従来は空気式が採用されているところもあるが、浄水場または終末処理場の複雑な計装に対しては次のような利点のある電子式に移行しつつある。

(1) 広大な浄水場では伝送距離が 1~2 km に達することが多く、空気式では伝送遅れが問題となる。たとえば伝送距離 30 m、6×4 φ 銅管の伝送系の応答はむだ時間 3 秒、一次遅れ 14.5 秒となる。

(2) 電子式計器の構成部品個々の平均故障率は最悪条件で 0.1 %/1,000h 以下であるから、30~100 個の部品をもつ計器の MTBF (平均無事故時間) は 1.5~5 年となり、通常の使用条件ではさらに高い信頼性となる。またデータロガー、計算機と容易に結合できる。

(3) 水質管理用の濁度計、pH 計、電導度計、アルカリ度計、残留塩素計、漏えい塩素計などは一次変換量が電気量であり、これを電空変換器を設けてわざわざ空気量で伝送する必要がない。

図 2 に電子式計装を行なった代表的な浄水場のフローシートを示す。

3. 計算制御

従来の自動制御装置は単一系統のパラメータ変動に対し動特性が影響されないよう常微分方程式で表わされるような装置で、フィードバック制御を行なうものであった。計算制御はさらにすすんで系統全体を対象とし、主として代数式で表現されるようなモデルを解いてフィードフォワード制御を行ない、定常特性の最適化をも図るものである。水道系統においてもすでに一部実施されているが⁽²⁾、具体的な計画に当たっては目的、種類、適用範囲、基礎データの収集、時期的実施段階、方式、装置の構成、経済性、導入効果とその判定など種々検討すべき項目がある。

3.1 上水道系統における計算制御

上水道系統において計算制御化できるものを表 1 に示す。どの範囲まで計算制御化するかは慎重な検討が必要で、計算機容量および

表 1 上水道における計算制御

制 御 項 目	制 御 内 容
水 量 管 理	シーケンス自動化 ディジタル計算機プログラムによるポンプ電動機の起動停止シーケンスの自動化
	水 位 制 御 弁開度あるいはポンプ回転数制御による配水池、調整池の水位制御
	圧 力 制 御 ポンプ吐出圧、送配水管路末端圧または配管網の圧力制御
	流 量 制 御 ポンプ吐出流量あるいは自然流下流量の制御
	最 適 制 御 需要水量予測による複数浄水場の運転目標値設定と実測値による修正
水 質 管 理	経済配分制御 運転コスト最小化を目的とした複数浄水場運転目標値の設定
	薬品注入制御 浄水水質の維持および薬品使用量の最適化のための注入率、注入量制御
	ろ過流量制御 ろ過方式(定速、減速)選択、ろ過流量、ろ過池数の制御
汚 泥 処 理	ろ過池洗浄制御 多数のろ過池に対する洗浄順序の決定、待合せ制御、洗浄シーケンスの自動化
	再生硫酸バンド回収用濃硫酸注入系統、汚泥脱水乾燥用石灰注入系統の制御

自動化すべき操作端の数など経済性を十分に考慮し計画する必要がある。さらに実際の運用に当たっては基礎データを十分に収集してのち ON-LINE 制御化することが望ましい。現在おもに

(1) 水量配分または最適制御

(2) 薬品注入系統のフィードフォワード制御

(3) ろ過流量およびろ過池洗浄のための判断および待合せ制御がそれぞれ単独、あるいは組合せて開発がすすめられている。

3.2 下水道系統における計算制御

最も有効な下水処理方式は活性汚泥法であり、また下水水質は生物化学的酸素要求量 (Biochemical Oxygen Demand……汚染源となりうる物質が酸化されて無機酸化物とガス体となるために消費する酸素量……ppm) で表わすのが適当といわれている。BOD はいまだ連続測定法が確立されておらず、5 日間 BOD として好気性細菌の培養によって 20℃ における 5 日間の主として炭素化合物の酸化完了に要する酸素消費量を求めているのが現状であるが、近い将来この工業的測定法の完成が予想される。このとき流入生下水と放流水面の BOD、曝気量および返送汚泥量など活性汚泥法の主プロセスにわたり本格的な計算制御が検討されよう。

3.3 水道用計算制御系の構成⁽³⁾

3.3.1 監視制御系および直接制御系⁽⁴⁾

計算制御系を構成する場合、監視制御系 (Supervisory Cont-

表2 制御用計算装置の比較

	容量および性能							ハードウェアコスト (%)
	アナログ入力点数	基本内蔵メモリ	演算速度		演算増幅器台数	線形演算要素台数	非線形演算要素台数	
			加算 (μs)	乗算 (μs)				
アナログ計算制御装置	20	—	—	—	80	50	17	100
コンピューティングロガー	100	2 K	680	5,000	—	—	—	150~200
小形制御用計算機	150	4 K	4	1,200	—	—	—	200~400
大形制御用計算機	500	16K	4.5	22.5	—	—	—	1,000~1,500

rol System) とするか、直接制御系 (Direct Control System デジタル計算機の場合 Direct Digital Control) とするかを比較、検討する必要がある。監視制御系は調節計などのサブループ制御系を有し、この設定値を計算機で与えその制御結果を計算機が監視するものである。直接制御系は計算機が制御ループの中にはいり、計算機の計算結果で直接、操作端を操作する。それぞれ特長を有するが、現状では次の点から監視制御系が適当と考えられる。

- (1) 万一計算機が故障した場合、監視制御系ではサブループ制御系により従来と同様たとえば定値制御でプロセスの運転を継続できる。
- (2) 直接制御系用計算機はすべてをまかなう必要があるため、容量は当然大となり、複雑、高価となり信頼性が低下するおそれがある。
- (3) 電子式調節計、電動機あるいは弁制御装置などサブループ制御系はすでに多くの実績があり精度、信頼性とも上下水道系統に適合したものが開発されている。

ただし直接制御は現在開発中の技術であり、信頼性、経済性が向上すればその飛躍が期待される。

3.3.2 デジタルおよびアナログ計算制御系⁽⁵⁾

制御用計算機としては当面デジタル計算機が監視形として適用され、将来直接形としてON-LINE 制御に適用されるう勢にあるが、特に水道系統用としては次の点からアナログ計算制御系の有効な活用が期待できる。

- (1) アナログ計算技術は従来の自動制御技術と共通の技術であ

り、容易に理解され、運転員の教育も簡単である。

(2) 高精度、高信頼性のトランジスタ式アナログ演算増幅器が開発され、また適宜デジタル技術を取り入れ、簡単なハイブリッド形の構成とすることにより ON-LINE 制御に適用できるようなアナログ計算制御装置が開発されている。

(3) デジタル計算機はアナログ形に比べ高い計算精度が得られるが、検出端の精度は電子式水量管理計器で ±0.5%、水質管理計器では測定の種類により異なるが ±1~2% 程度であり、計算機のみ精度を高くする必要は少ない。アナログ計算制御系では線形演算要素で ±0.2% 以下の精度が容易に得られ、装置の総合精度は影響値を含め ±2.0% 程度となる。

(4) アナログ計算制御系は停電時、プログラム保護などの特殊な考慮を払う必要がなく、電源回復とともに制御は再開される。

(5) 容量にもよるが、価格はアナログ計算制御系が低廉である (表2 参照)。

ただしアナログ計算制御系を採用するときは次の点の考慮が必要である。

- (1) 制御専用で、データ処理は行なわれない。アナログ計算制御装置とデータロガーを考える場合、設備の重複、コストの上昇に注意して計画する必要がある。

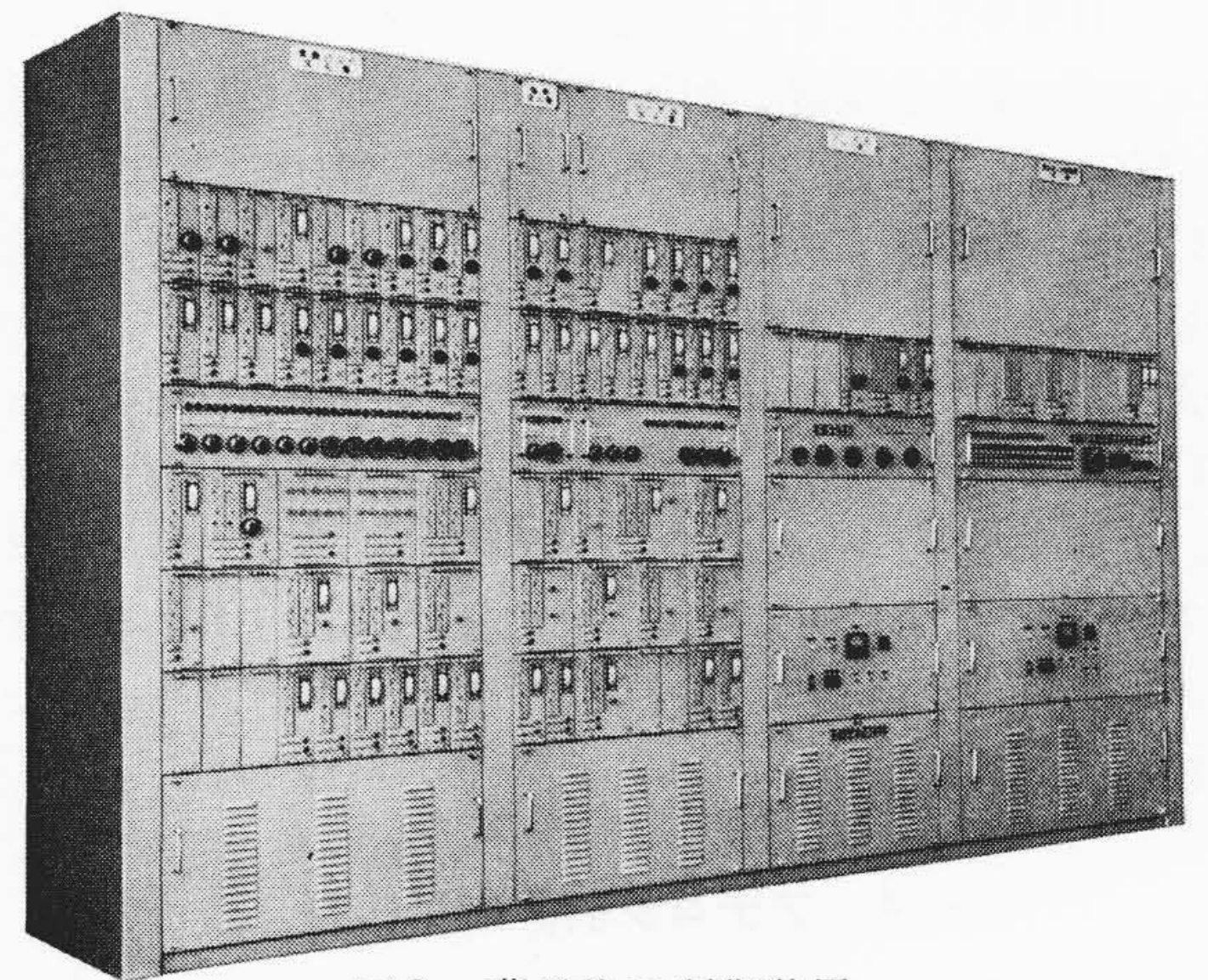


図3 薬品注入制御装置

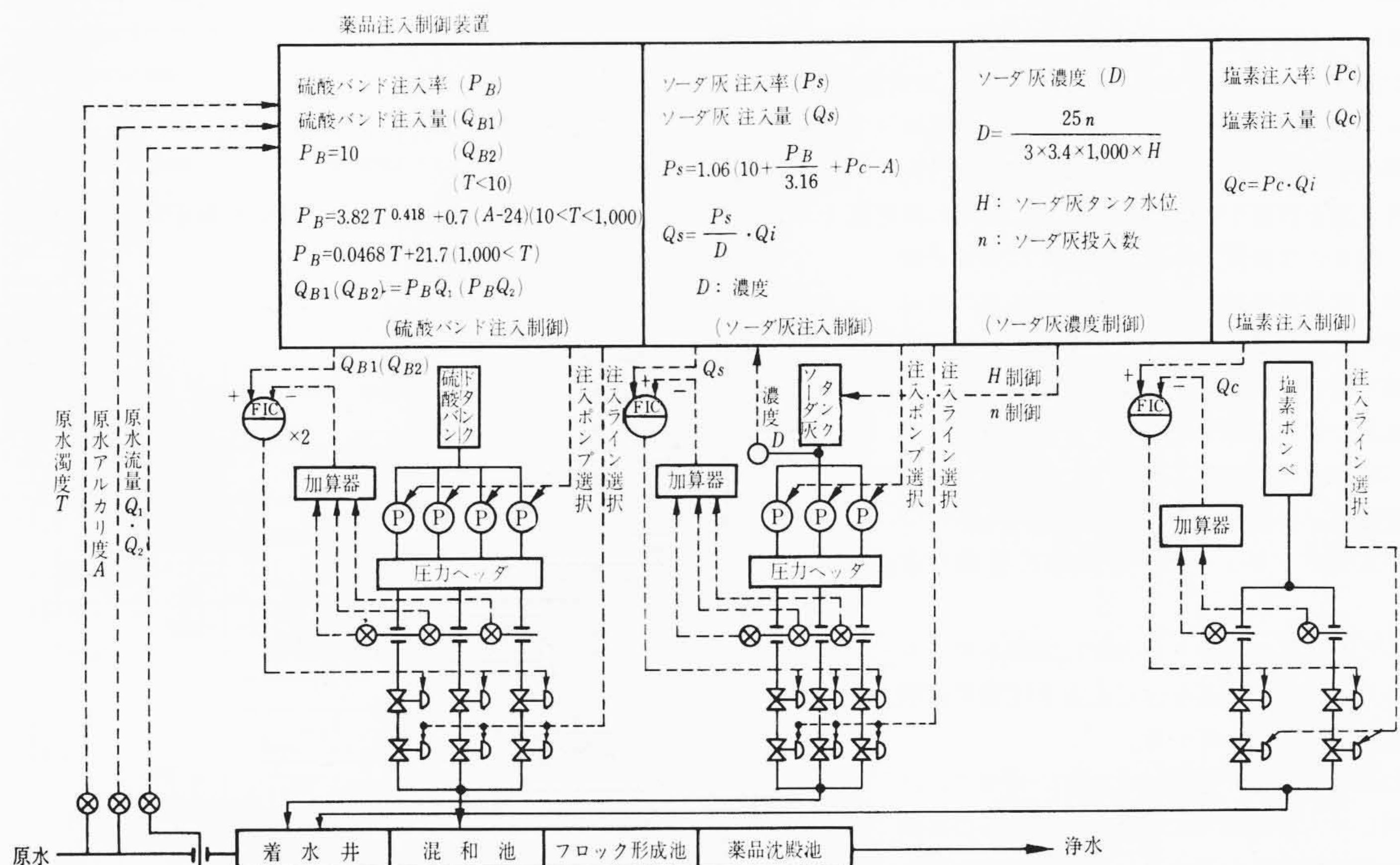


図4 薬品注入制御系統図

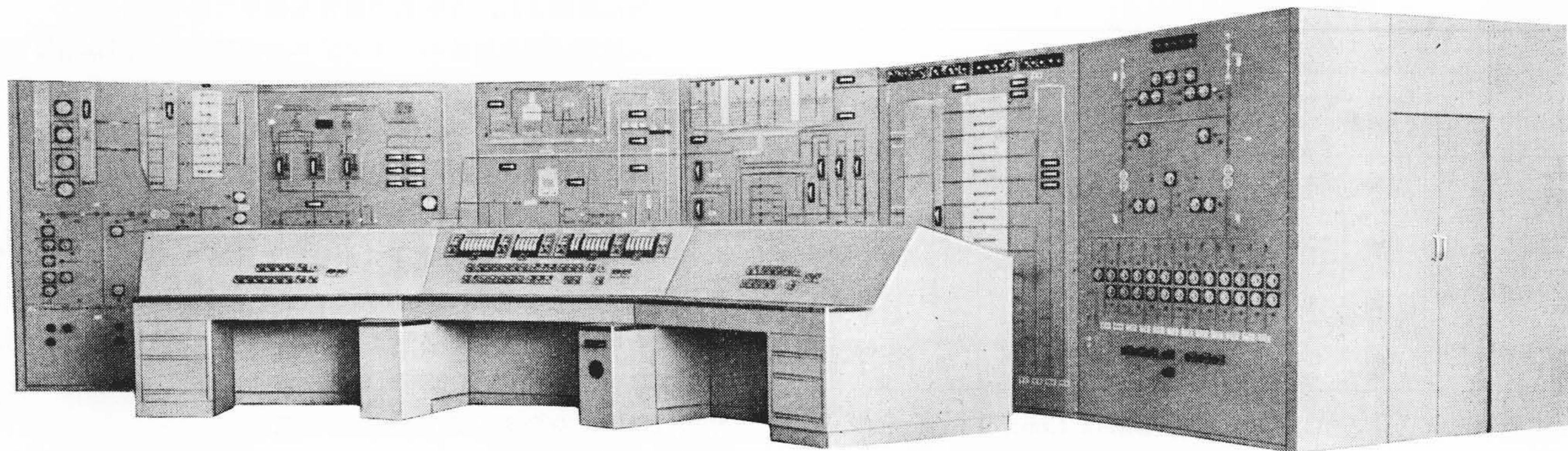


図5 集中監視制御盤

(2) 一般にアナログ計算制御装置は単能計算機であるので多重処理を行なう場合には総合的にデジタル形と比較しながら計画する必要がある。

3.3.3 計算制御系と監視制御盤の協調

計算制御装置を設ける場合次の点を考慮し、監視制御盤との協調をとる必要がある。

- (1) 計算機事故の場合も運転を継続できるよう最小限の監視用指示計器を集中監視盤に設け、継続的な監視を必要とする重要な測定点については別にトレンド記録計を設ける。
- (2) 計算制御装置が正常に動作している場合にも、集中監視盤からこれと平行に、あるいは手動に切り換えて制御を行なう必要のある部分については指示計器および手動制御装置を設ける。
- (3) 計算制御を行なう場合、薬品注入システムなどではシステムの簡単化、調節弁の減少あるいは逆に精度を向上させるため、レンジ切換システムを設けるなど計算制御に適した主系統構成とする。またサブループ制御系を有効に活用して計算機容量の削減を図るなど信頼性の向上、総合的なコストの低減を図る必要がある。

4. アナログ計算制御装置

このような最近の上水道制御装置の例として、大阪府水道部三島浄水場の設備について以下説明する。本浄水場は工業用水 430,000 m³/日进行处理し、大阪府東部および北部の工業地帯に供給するものである。日立製作所は昭和42年11月、本浄水場へ集中監視制御盤、データロガー、薬品注入制御装置を納入した。薬品注入制御装置は薬品注入専用の単能監視形アナログ計算制御装置であり、薬品の注入率および注入量を計算し SET・POINT 調節計に設定値を与えるものである。図3に本装置の外観を、図4に制御系統図を示す。図5は集中監視制御盤の外観である。薬品注入率の数式モデルは図4に示すとおりで大阪府水道部庭窪浄水場で得られた実験式である。硫酸バンド、ソーダ灰、塩素の注入制御のほかソーダ灰溶液濃度制御を行なうが特に次の考慮が払われている。

- (1) 定数変更が必要な場合、装置中央のコンソール部に設けたポテンショメータで容易に整定できる。
- (2) すべての演算ユニット出力を、自動スキニングチェックし、万一異常を生じたときは警報表示し、事故を未然に防止している。
- (3) 入力および出力変化範囲が大きいのでフルスケールに対し小入力範囲では精度が低下するため自動演算レンジ切換回路を設け高レベルで演算を行なうよう考慮している。図6はレンジ切換を行なった

場合の精度を示したものである。

4.1 演算制御方式

制御ブロック図を図7に示す。主要点は次のとおりである。

4.1.1 注入量制御回路

注入量制御回路は注入率および注入量をアナログ演算する回路で、たとえば硫酸バンド注入率 P_B の計算式

$$P_B = 3.82 T^{0.418} + 0.7 (A - 24)$$

ここに、 T ： 原水濁度 (ppm)

A ： 原水アルカリ度 (ppm)

を実行するためトランジスタ演算増幅器で構成した加算器、減算器などの線形要素、掛算器、割算器、 n 乗器などの非線形要素をカスケード接続して演算を行なう。非線形要素の代表的なものは掛算器と n 乗器である。掛算器はたとえ空調設備がなく、周囲温度変化の大きい場合にも高い精度を保ち、かつ容易に調整できるようパルス幅変調形とした。出力パルス波高値が入力1に、パルス幅が入力2に比例するよう制御し、フィルタで平滑化し乗算出力を得るものである。

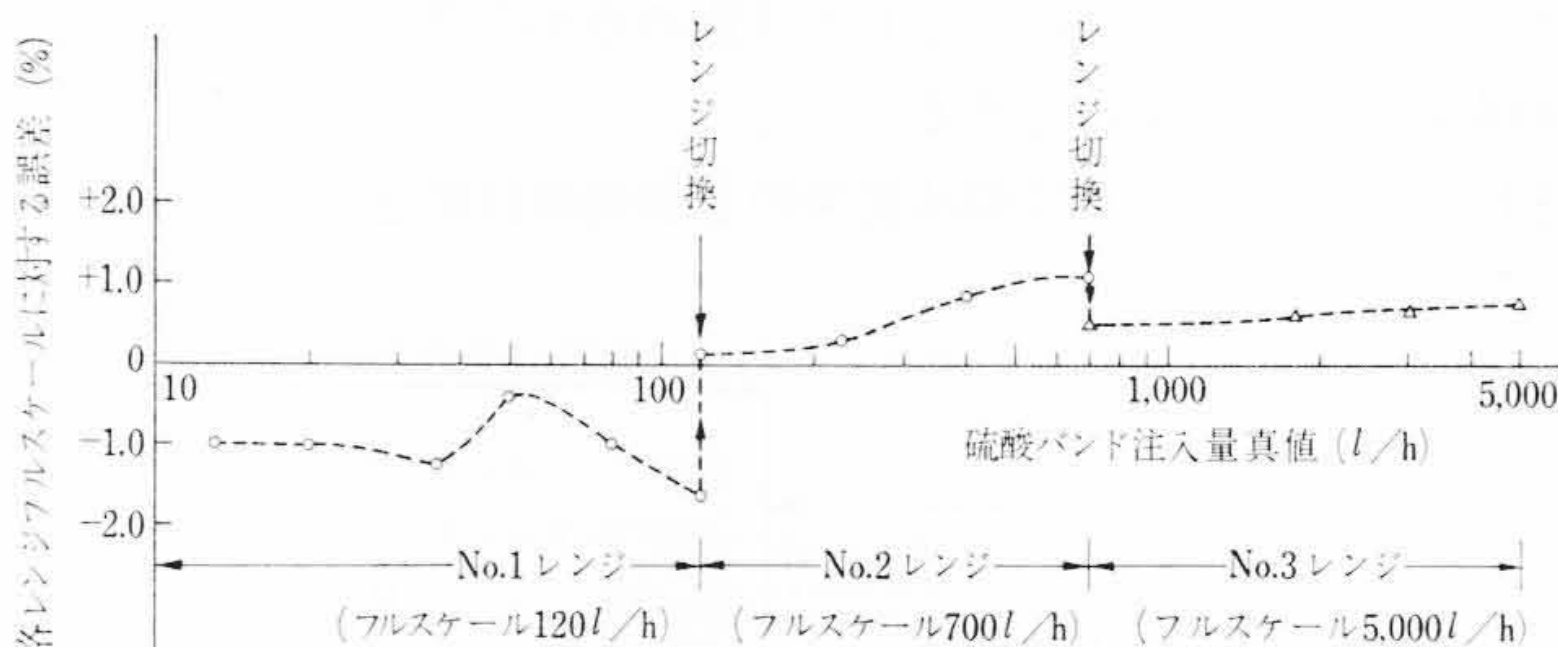


図6 演算レンジを切り換えた場合の精度

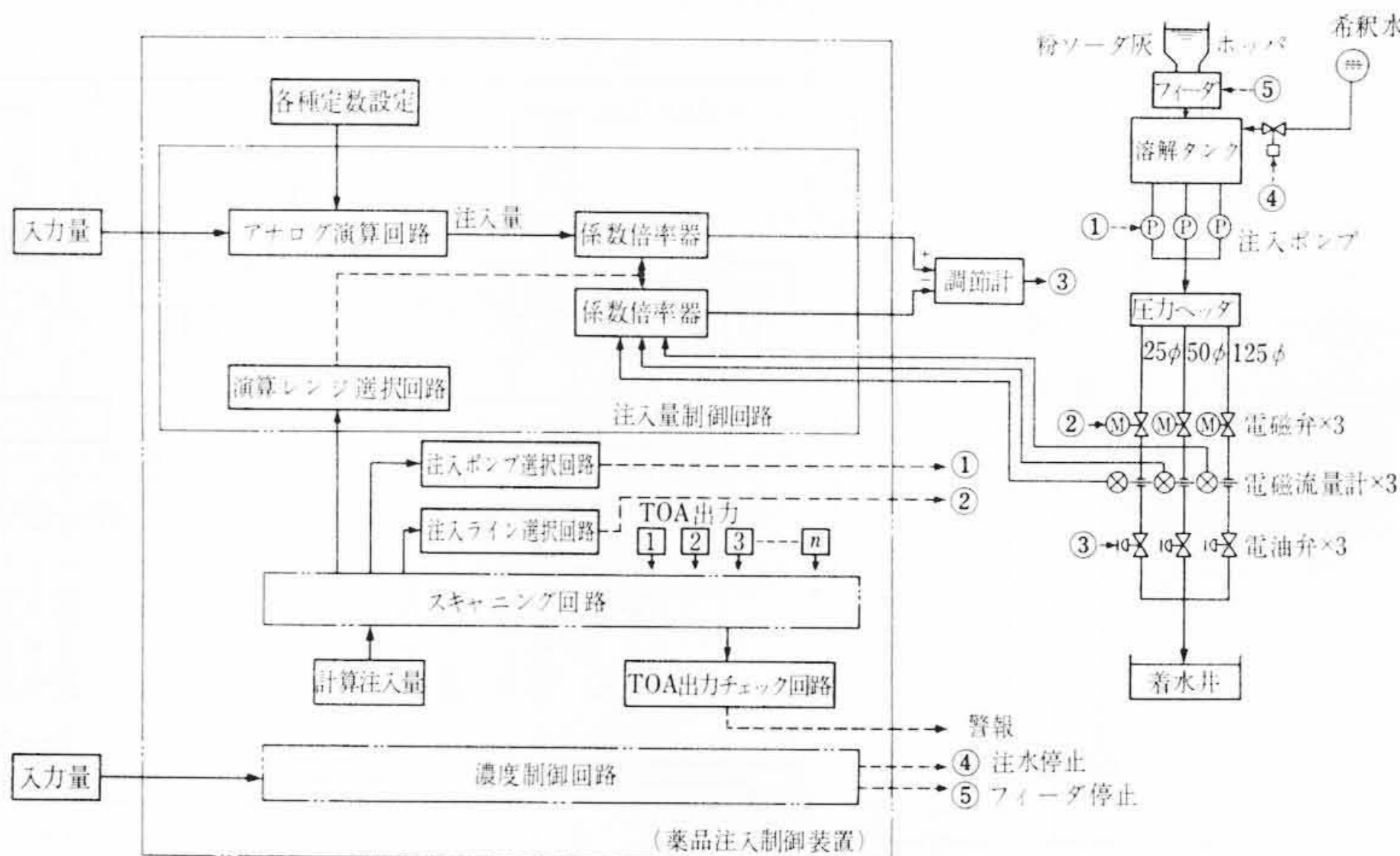


図7 薬品注入制御装置ブロック図

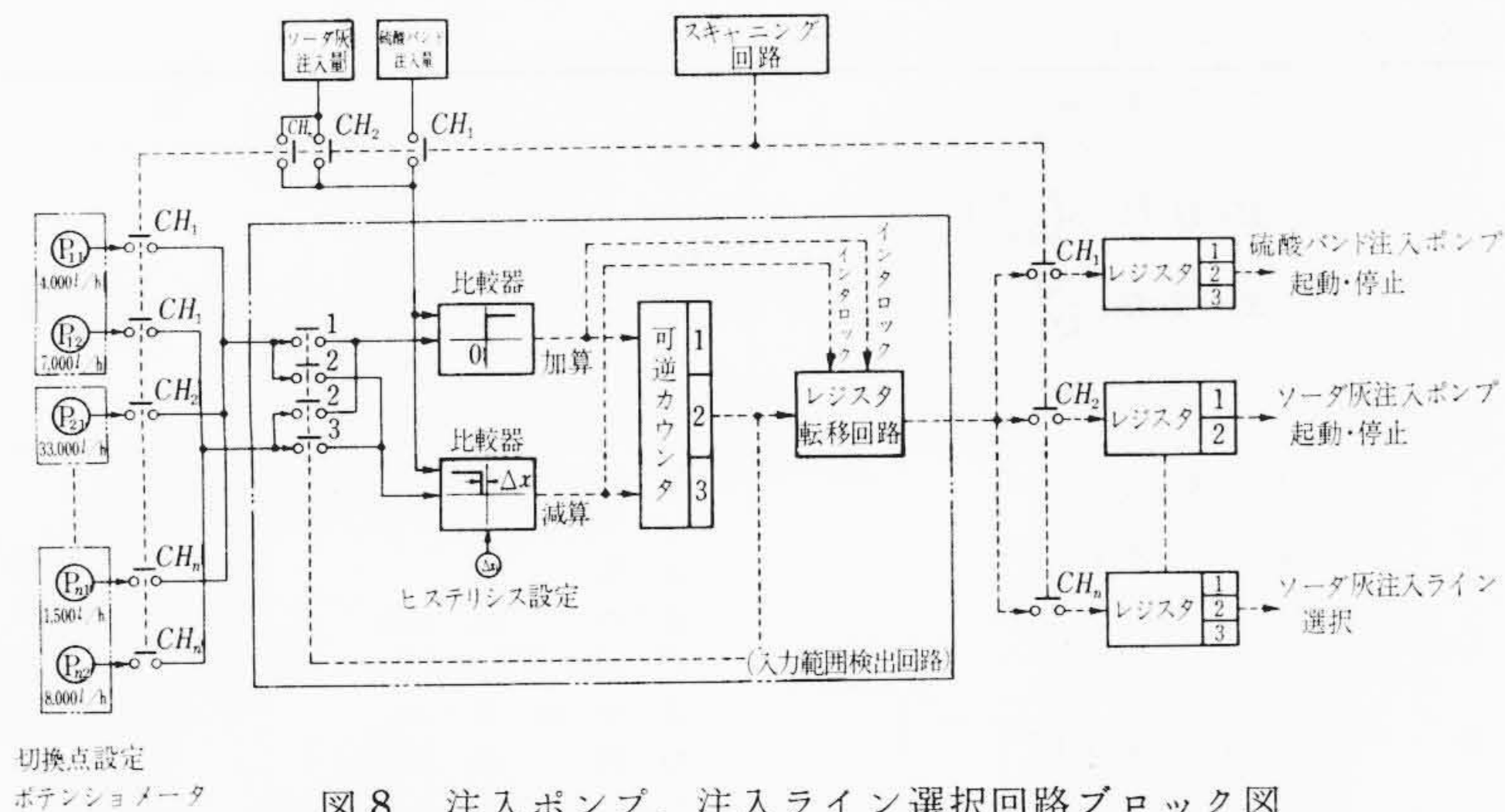


図8 注入ポンプ、注入ライン選択回路ブロック図

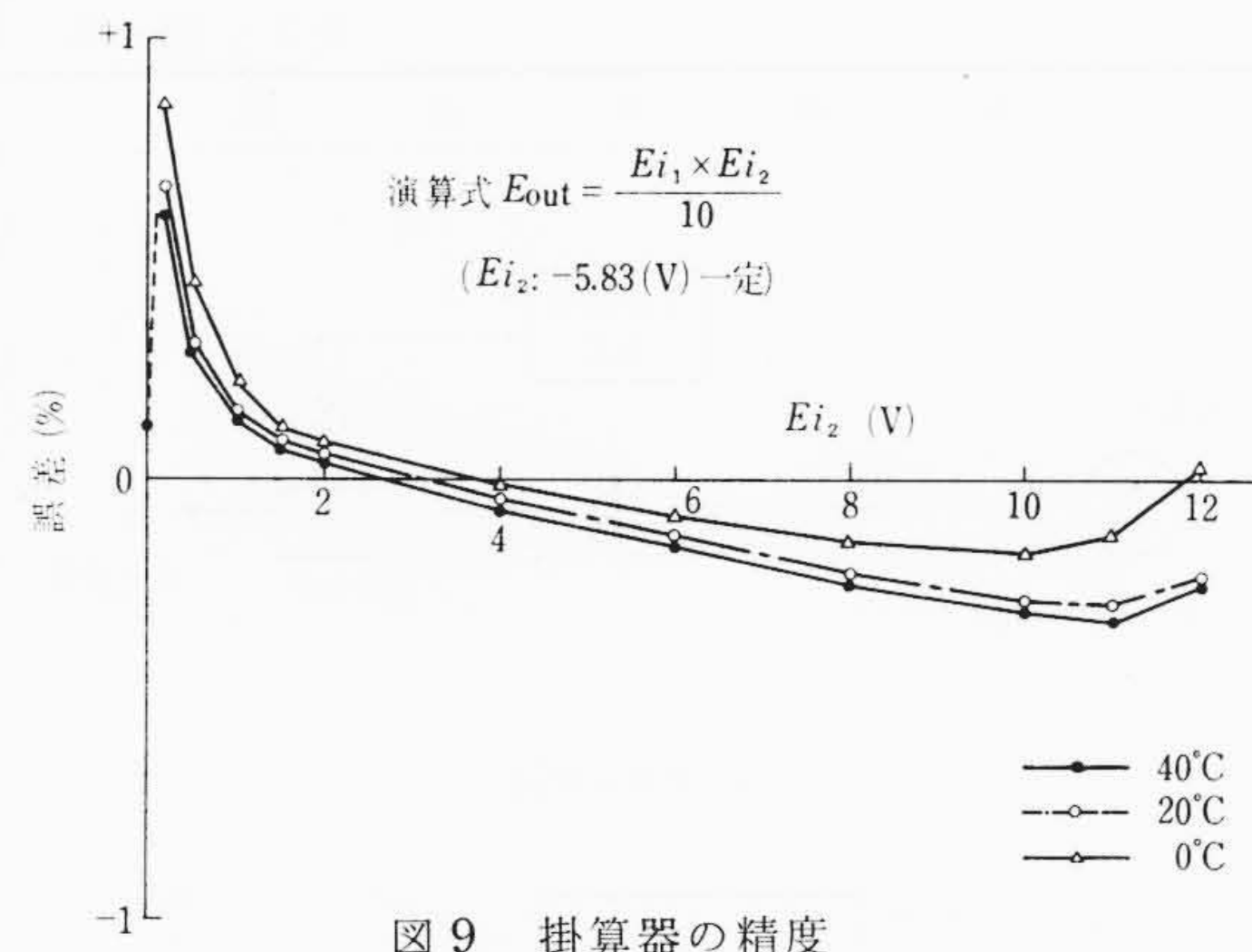


図9 掛算器の精度

n 乗器としては定数の設定および変更を連続的に容易にするため指数関数発生器を採用している。LOG関数発生器を2台用いた、入力 E_i 、出力 E_o としたとき $n \log_{10} E_i = E_o$ となるよう制御し $E_o = E_i^n$ を得るものである。LOG関数発生器は折線近似方式で入力0.1～10Vに対し14分割し、入力の大きい範囲では傾斜がゆるやかなため分割区分を大きくとり、入力の小さなところでは分割区分を小さくとり、精度を高めるよう図った。また周囲温度変化による特性変化の補償回路を内蔵している。

4.1.2 注入ポンプ、注入ライン選択回路

注入量に応じ適正な注入系統を選ぶよう注入ポンプおよび注入ライン自動選択回路を設けている。本回路は測定量の範囲に応じて運転機器台数を選択する装置の基本となるもので、図8のブロック図に示すように入力範囲検出回路を共通に1回路設け、スキャニング回路により測定入力とポテンシオメータで設定した切換値を順次選択し入力がある範囲にあるかを比較検出するのでデジタル技術を応用し多重処理を図っている⁽⁶⁾。

4.2 特性

周囲温度0～40℃において線形演算要素は±0.2%、非線形演算要素は±1.0%の精度がえられた。周囲温度変化に対する掛算器の精度を示したのが図9である。図9からわかるようにパルス幅変調形掛算器は周囲温度変化によるダイオードの特性変化、あるいはバイアス電圧変化などの影響を受けず安定な特性を示している。各種演算ユニットをカスケード接続したときの総合誤差は各ユニットの誤差のrmsで表わされるが、本装置の総合誤差はたとえば硫酸バンド注入量計算でNo.1レンジ±1.64%、No.2レンジ±1.03%、No.3レンジ±0.76%となり良好な結果を得ている。

5. サブループ制御装置

水道系統の計算制御のうち、特に監視制御を発展させるにはサブロープ制御系を充実することが重要である。サブロープ制御装置は外部設定形で、計算機出力により設定できる。設置場所が無人の場合には中央からサブロープ制御装置によるマイナ制御系へ切り換えられ、また万一中央の計算機が故障した場合にはマイナ自動制御系へ自動的に切り換わるようにする。以下大阪府水道部狭山ポンプ場および、郡家ポンプ場における、サブロープ制御装置について説明する。

狭山ポンプ場は280,000 m³/日の浄水を約5 km離れた堺配水池に送水するもので、日立製作所は、昭和43年5月ポンプ自動運転装置、圧力制御装置、狭山調整池水位制御装置などのサブロープ制御装置を納入した。将来村野浄水場に別に設けた中央計算機によりマ

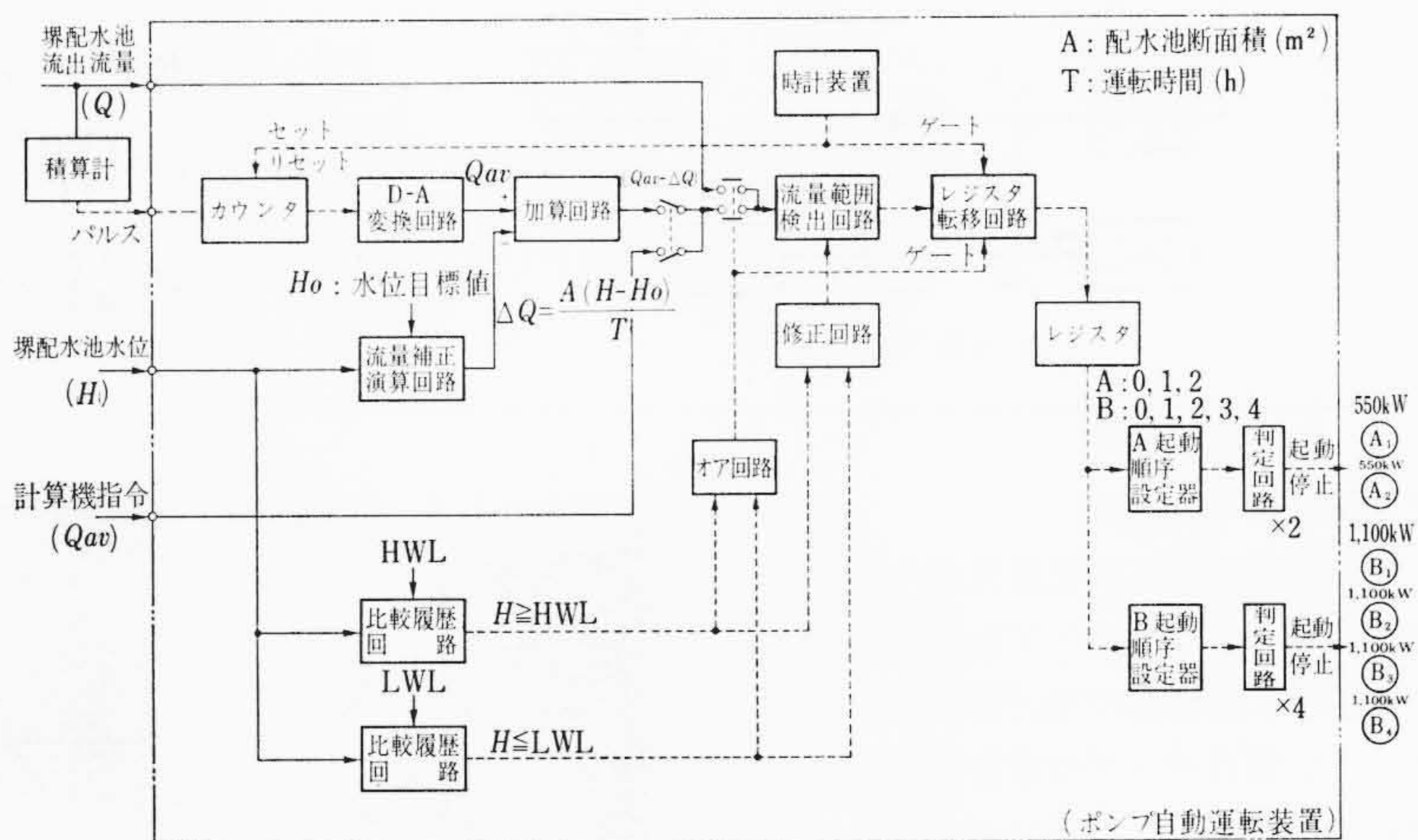


図10 ポンプ自動運転装置ブロック図

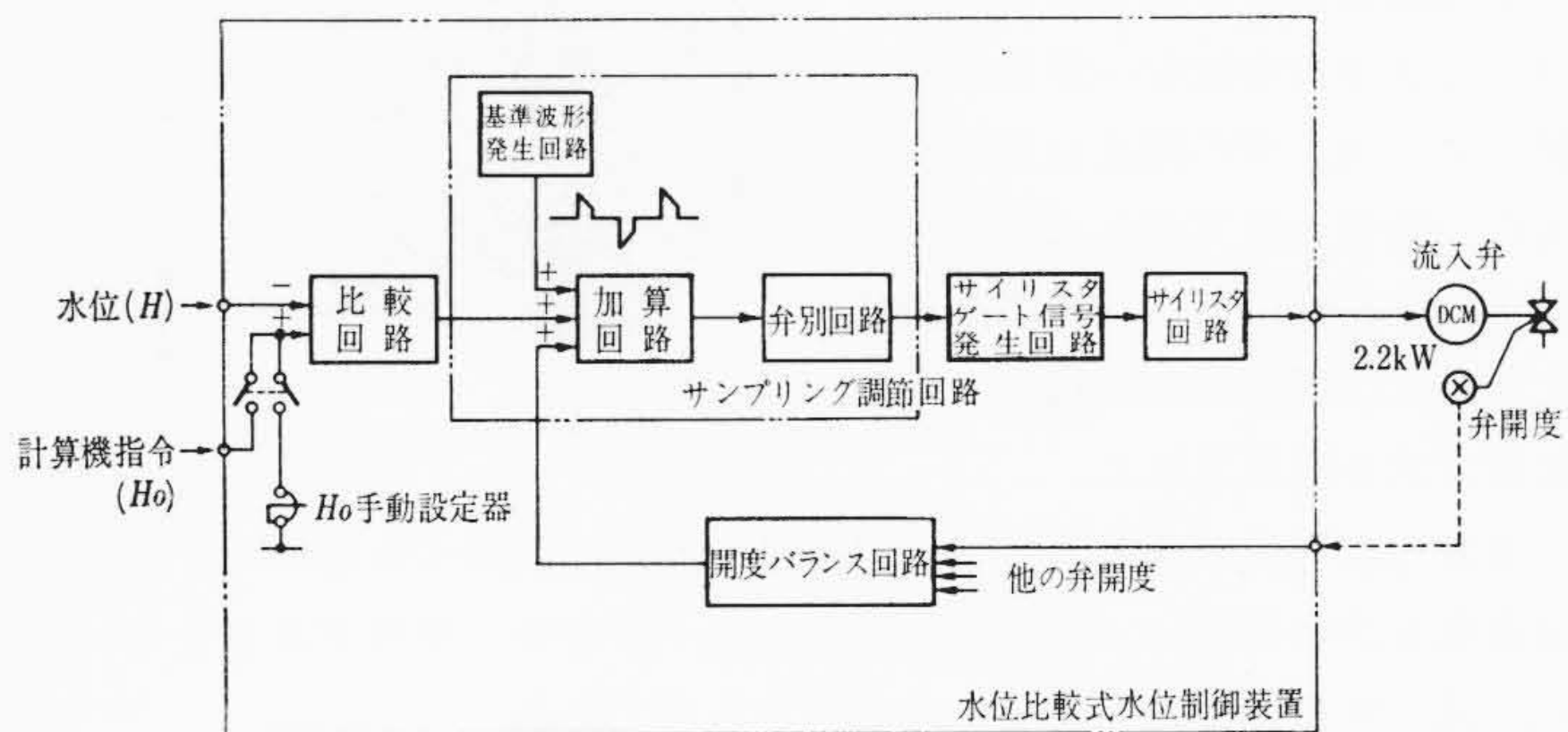


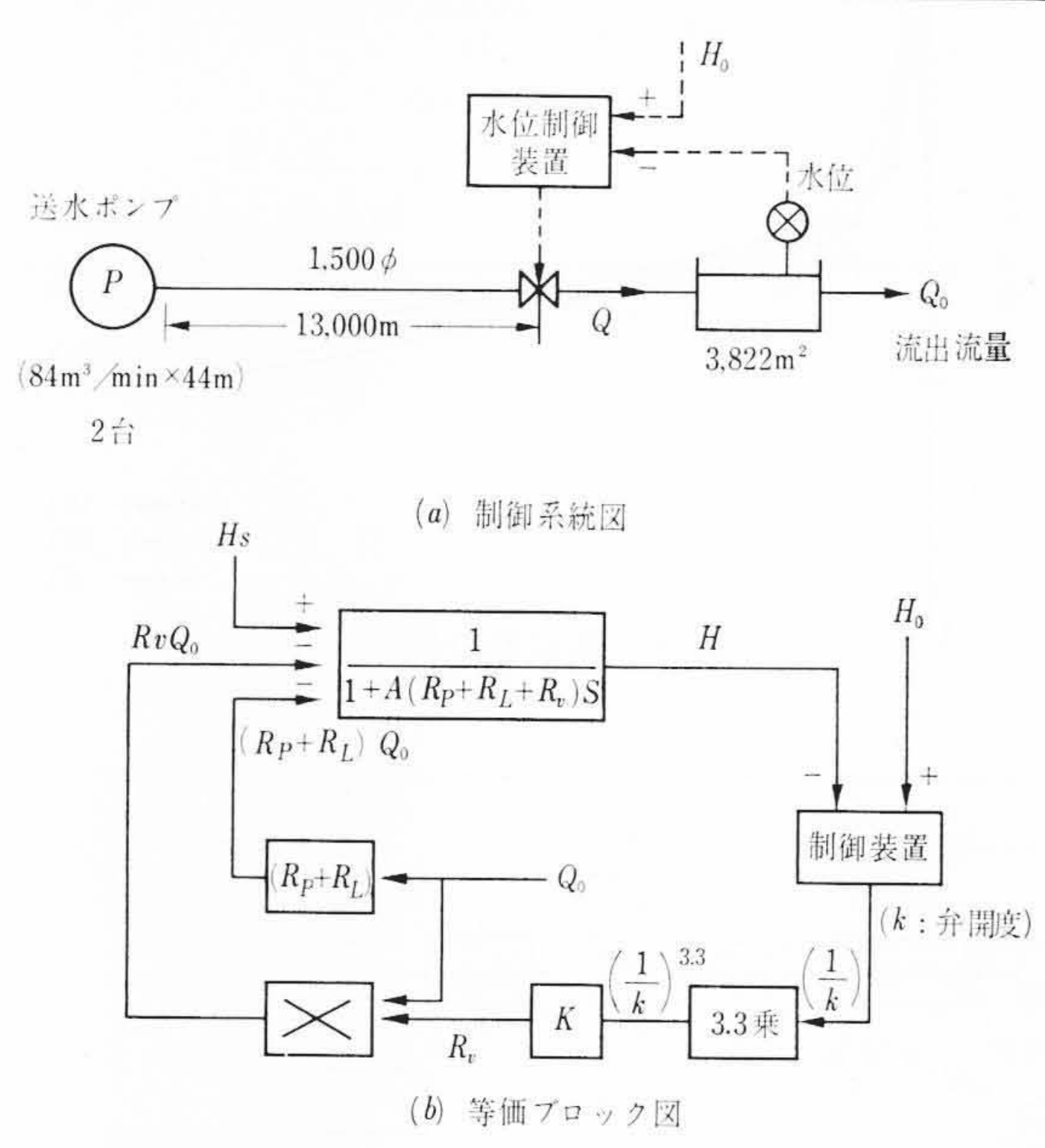
図11 水位制御装置ブロック図

イクロ波回線を介して設定値が与えられ集中制御される。万一中央の計算機に故障が生じた場合も単独自動運転が継続されるよう考慮されている。

5.1 ポンプ自動運転装置、圧力制御装置

ポンプ自動運転装置は需要水量変動に対して堺配水池水位を一定範囲内に保つよう、ポンプ運転台数を増減するものである。図10のブロック図に示すように時計装置でカウンタを動作させ一定時間内の流量を積算し、これをD-A変換して平均需要流量 Q_{av} を算出する。またその時刻の配水池水位により補正流量 ΔQ を演算し ($Q_{av} - \Delta Q$) の流量を目標値としてポンプ運転台数を決定する。水位が上限あるいは下限に達したときは比較履歴回路により検出し水位が目標値にもどるよう修正する。堺配水池水位の変化を許容範囲いっぱいまでみとめ配水池を有効に活用しポンプ起動停止回数をできるだけ少なくするよう図った。計算機による場合は一定時刻ごとに目標

表 3 調整池水位制御系特性近似

制 御 系 統 図	構 成 要 素 関 係 式		備 考
 (a) 制御系統図 (b) 等価ブロック図	ポンプ	$H = H_s \left\{ 1 - \alpha \left(\frac{Q}{Q_f} \right)^2 \right\}$ $R_P = 2\alpha H_s \frac{Q}{Q_f^2}$	R_P : 直線近似内部抵抗 (s/m ²) H : ポンプ吐出圧 (m) H_s : ポンプ締切圧 (m) α : 定 数 Q : 流出流量 (m ³ /s) Q_f : 定格流量 (m ³ /s)
	管	$H_L = K \cdot l \cdot Q^{1.85} \quad *1$ $R_L = 1.85 K \cdot l \cdot Q^{0.85}$ ただし $K = \left(\frac{1}{\frac{\pi}{4} d^2 \cdot 0.849 C \left(\frac{d}{4} \right)^{0.603}} \right)^{1.85}$	R_L : 直線近似内部抵抗 (s/m ²) H_L : 管路圧力損失 (m) K : 定 数 d : 口 径 (m) C : 係数(管路の材質により異なる) l : 管 路 長 (m) Q : 流 量 (m ³ /s) (*1: ヘーゼンウィリアムの公式)
	弁	$H_v = f_v \frac{0.0827}{d^4} Q^2$ $R_v = f_v \frac{0.0827}{d^4} (2Q)$ ただし $f_v = \left(\frac{1}{k} \right)^{3.3} \quad *2$	R_v : 直線近似内部抵抗 (s/m ²) H_v : 圧力損失 (m) d : 口 径 (m) Q : 流 量 (m ³ /s) k : 弁開度 ($k=1$ ……全開 $k=0$ ……全閉) (*2: 近似式で蝶形弁のときのみ成立つ)
	池	$H = \frac{1}{A} \int (Q_i - Q_o) dt$	H : 池 水 位 (m) A : 断 面 積 (m ²) Q_i : 流入流量 (m ³ /s) Q_o : 流出流量 (m ³ /s)

送水量が指令される。

圧力制御装置は本管流出弁の開度を自動調整し、ポンプ吐出圧を一定以上に保つもので、管路抵抗が小さい場合ポンプの定格流量超過に基づくキャビテーション防止のためのものである。

5.2 水位制御装置

水位制御装置は需要水量変動に対して調整池水位を一定範囲内に保つよう流入弁の開度を調整するもので流量比較方式と水位比較方式があり、狭山ポンプ場には流量比較方式、郡家ポンプ場には水位比較方式が採用された。

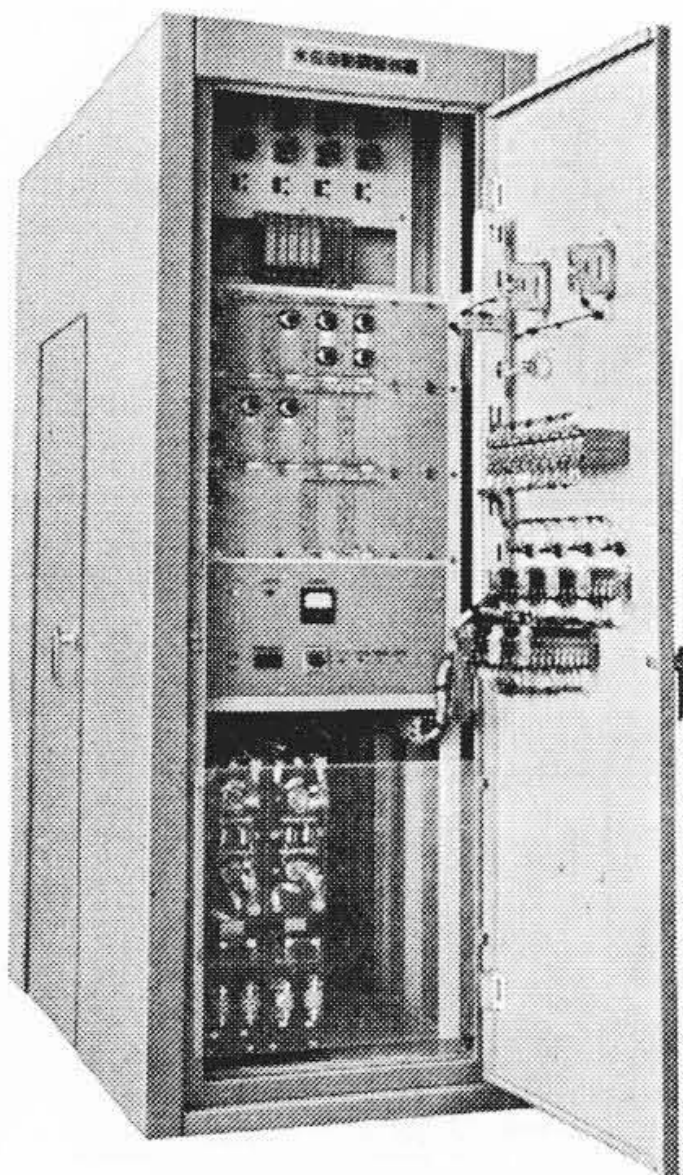


図 12 水位制御装置

流量比較方式は流入流量と流出流量を比較し制御するもので、水位変動を許容範囲いっぱいとし調整池を十分有効に使用するとともに、流入弁の操作ひん度を少なくするものである。

図11にブロック図を示した水位比較方式は調整池水位が設定した目標水位となるよう制御するもので、比較的大きな水位過渡変動が許容されるとき、あるいは調整池の流入、流出両側の流量測定がむづかしい場合採用される。

郡家ポンプ場では、調整池の水位を一定範囲内に保つよう、流入弁(1,000φ蝶形弁)4台の開度制御を行なっている。流入弁は、万一停電した場合、非常閉鎖して調整池から送水端への逆流を防止するよう、蓄電池を電源とする2.2kW 直流電動機駆動とし、これをサイリスタ制御して、弁の開閉ひん度が高いときも高い信頼性を保つようにしてある。数時間から十数時間に達する調整池の非常に大きな時定数による制御系のハンチング、過大オーバーシュートあるいは流入弁の無用にひん繁な開閉動作などを避けるためサンプリング調節回路を設け偏差が大きいときは操作量が大きく、偏差が小さいときは操作量も小さくなるよう間欠、偏差-時間比例制御を行なっている。

4 台の流入弁の開度に大幅な差があると各管路の流量および弁における圧力損失に差を生じ、弁の寿命が平均化されないおそれがあるので開度バランス回路を設け開度をそろえるよう図っている。図

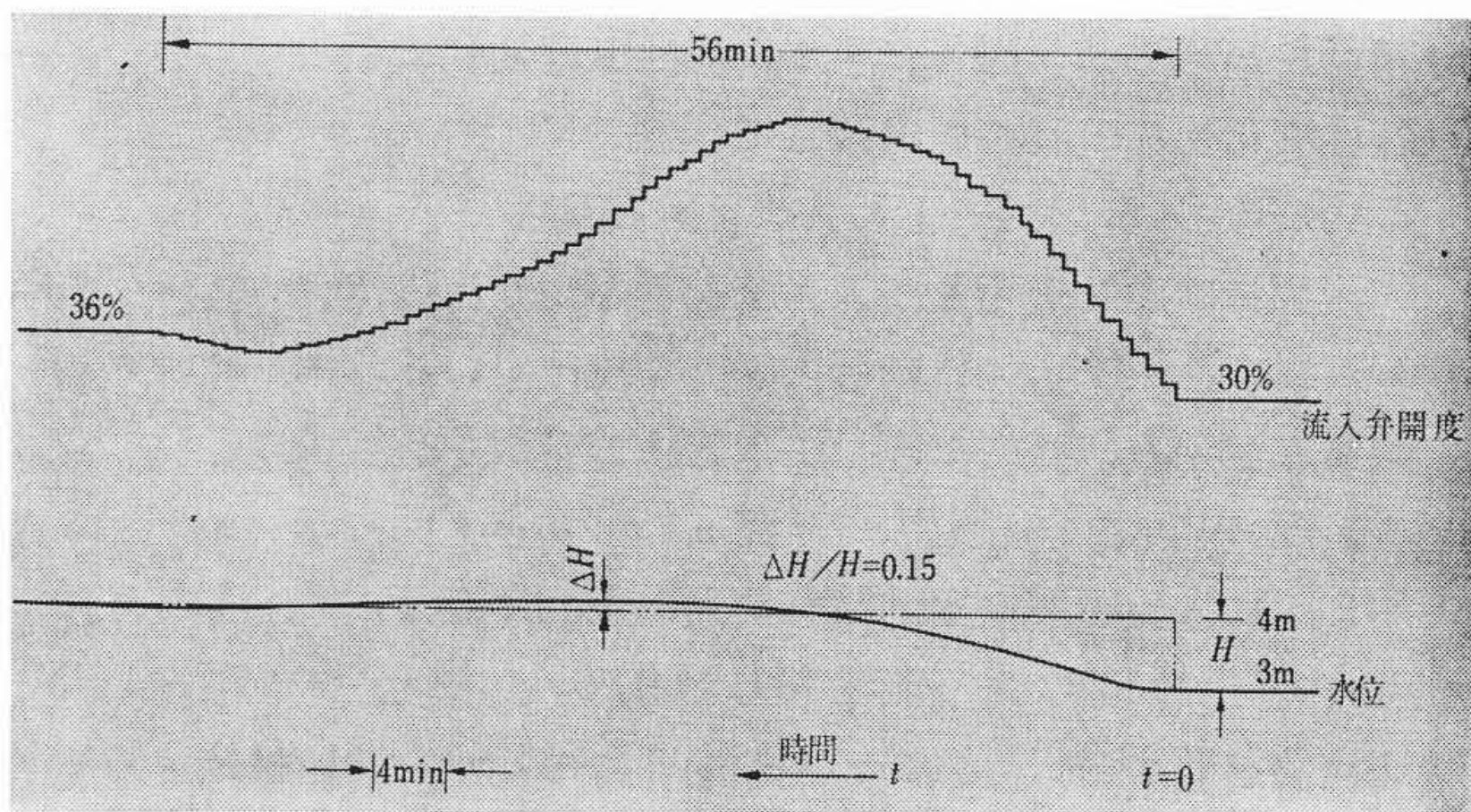


図 13 水位ステップ応答試験結果

12は装置の外観である。

制御系の特性を近似すれば表 3 のとおりである。水位設定を 1 m 変化したときのステップ応答を図 13 に示す。過渡状態においてオーバーシュート 15%、安定時間 56 分で定常状態のオフセットは 5 cm と良好な制御結果を示している。

6. 結 言

上下水道系統の運転管理の合理化を図るため、集中制御化がすすみ、さらに最近計算制御の導入が図られるようになった。計算制御システムには種々検討を要する問題があるが、上下水道系統に適合し、各設備の計画相互の調和が保たれ、経済的で信頼性が高く、取り扱い容易なことが特に重要な条件である。大阪府水道部の設備を中心として計算制御システムの概要を述べたが、計算制御は開発中の技術であり、今後上下水道への応用を推進し運転管理の合理化に力を尽くしたい所存である。

終わりに臨みこのシステムの開発に当たり終始ご指導を賜った大阪府水道部ならびに日立製作所日立研究所の関係各位に深甚な謝意を表する。

参 考 文 献

- (1) 今井ほか：日立評論 48, 985 (昭 41-8)
- (2) 後藤ほか：富士時報 40, 65 (昭 42-10)
- (3) 広吉ほか：日立評論 46, 1369 (昭 39-8)
- (4) A. Evcms: INSTRUMENT PRACTICE 740 (Aug. 1967)
- (5) 三浦：日立評論 46, 1352 (昭 39-8)
- (6) 特許出願中