

上下水道の省エネルギー技術

* 田中 健(たなか けん)・* 若原 邦夫(わかはら くにお)・** 羽田 正行(はねた まさゆき)・*** 星川 寛(ほしかわ ひろし)
*** 西方 聡(にししかた さとし)

1 まえがき

近年、省エネルギーという言葉が定着し、各産業分野で着実にその成果を上げている。

上下水道においても、従来のノウハウに最新のエレクトロニクス技術を加えることにより、省エネルギーの面で大きな成果を得ている。

上下水道プラントを稼動させるエネルギー源は、大半を電気エネルギーに依存している。

このエネルギー消費を節約することと、プラント内で発生する余剰エネルギーを回収し利用することが、省エネルギーを実現するかなめとなる。

エネルギー節約の代表例にポンプの可変速制御技術があるが、本稿では上下水道プラント内で発生する消化ガスエネルギーの回収や、水の位置のエネルギーの回収システムに視点を置いて最近の技術を紹介する。

更に、プラントの高効率運転の例として、配水制御について述べる。

2 エネルギー回収システム

2.1 小水力発電

2.1.1 水力エネルギーとその利用

水の余剰エネルギーは管路系の余剰圧力に対応し、水車発電機の発電可能出力は次式で与えられる。

$$P=9.8Q(H-\Delta H)\eta_r\cdot\eta_g$$

P ：発電出力 (kW)

Q ：流量 (m^3/s)

H ：静落差 (実揚程) (m)

ΔH ：管路などの損失水頭 (m)

η_r, η_g ：水車及び発電機の効率

水車の諸元は流量 Q と有効落差 $(H-\Delta H)$ により決まるが、上下水道においては、流量及び落差が変動しても、高い効率を維持する水車を選定する必要がある。

2.1.2 水車形式

上下水道に適した諸元の水車は次のもので、富士電機の標準水車形式選定図を図1に示す。

- (a) 吐出側が開放……………クロスフロー水車
- (b) 吐出側が圧力管
 - ①低落差…S形チューブラ水車
 - ②高落差…横軸フランシス水車

上記の小水力発電用水車の特徴を下記する。

(1) クロスフロー水車

構造が簡単で、比較的軽負荷において効率が良い。落差

が100m以下で流量変化は大きくても、落差変化の小さな場合に適している。

(2) S形チューブラ水車

ガイドベーン、ランナベーン共に可動で、流量・落差の変動に対して極めて優れた特性を持っている。クロスフロー水車より流量が大きく、落差が小さい場合に適している。

(3) 横軸フランシス水車

構造が簡単で保守も容易な最も一般的な水車で、小水力発電用として最も多く用いられる。

2.1.3 発電機

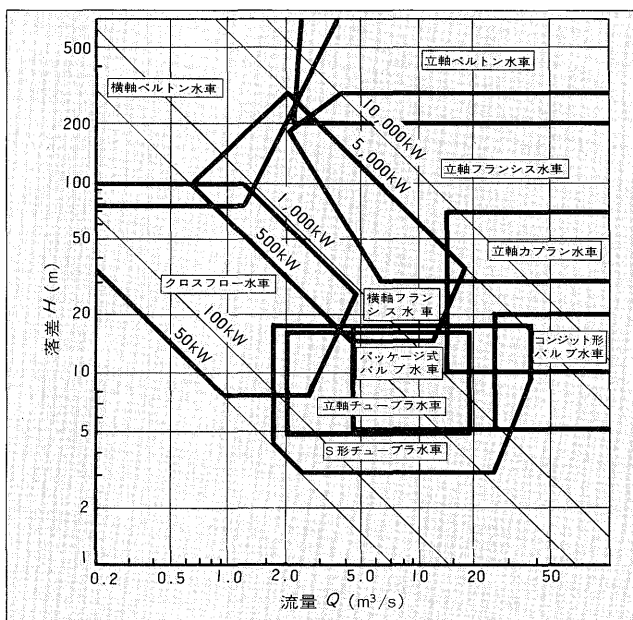
発電機としては、同期発電機と誘導発電機の2種がある。小水力発電の場合には、系統の周波数や電圧を所定値に維持するために、その出力が直接制御されることはほとんどない。特に2,000kW以下の設備については、そのような操作は一般にあり得ないので、電力系統などの事情が許す限り、誘導発電機を用いて建設コストを低減するのが普通である。誘導発電機を使用した設備の単線結線図を図2に示す。

2.2 汚泥消化ガス発電

2.2.1 消化ガスのエネルギーとその利用

消化ガスはメタンを60～70%含み、その熱量は約5,500

図1 富士標準水車形式選定図



kcal/m³である。ガス発生量は種々の要因で変化し、季節変動もあるが、我が国の下水処理場では、おおむね下水1 m³当たり熱量で240 kcal、電力に換算すると0.28kWhである。この数値は、下水1 m³当たりの消費電力が0.2～0.3 kWhであるので同等である。

消化ガスは、消化槽内の汚泥温度を30～35℃に保つための加温用燃料として利用されている。消化ガスをエンジンにより動力エネルギーに変換して利用すると、エネルギー収支は図3のようになる。すなわち、この動力により発電を行い、回収した余熱で消化槽の加温を行うことにより、合計70％が利用可能である。

2.2.2 消化ガス発電システム

消化ガス発電設備を用いた消化ガス利用のトータルシステムとしては多くのものが考えられるが、代表的なシステムを図4に示す。

図4のシステム1は、消化槽の加温に使用した余りである余剰ガスを発電に利用するもので、発電を任意に行える。システム2、3は、回収したエンジン余熱で汚泥の加温を行うので発電は連続して行い、負荷率は必要加温熱量により決定される。

発電設備と商用電源との並列運転は、発電機負荷率を任意に設定できるのでシステム2、3には不可欠である。また、単基運転の発電設備の容量は、大容量負荷の投入時に

おける電圧降下や過負荷量の制限により決定されることも多く、負荷容量よりも大きくなる。しかし、商用電源との並列運転を行えば負荷率100％での連続運転が可能であり、システム1の場合でも経済的に有利である。使用するエンジンに、消化ガスの供給が停止した場合でも瞬断せずに重油燃料で運転できる二重燃料式ガスエンジンを用いれば、契約電力の低減が可能である。

2.2.3 システムの総合効率を向上させるための施策

ガス発電の廃熱回収・高効率化技術は開発が進んでいるが、汚泥処理の高効率技術は改善の余地が大きい。

嫌気性消化槽の加温に使われるエネルギーを少なくすることは、発電に使用される消化ガスを増加することになる

図3 消化ガスエンジンエネルギー収支

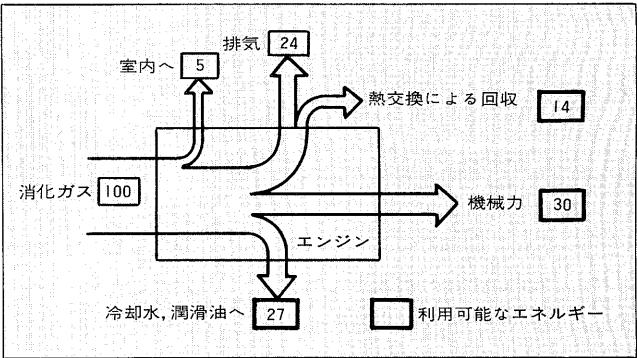
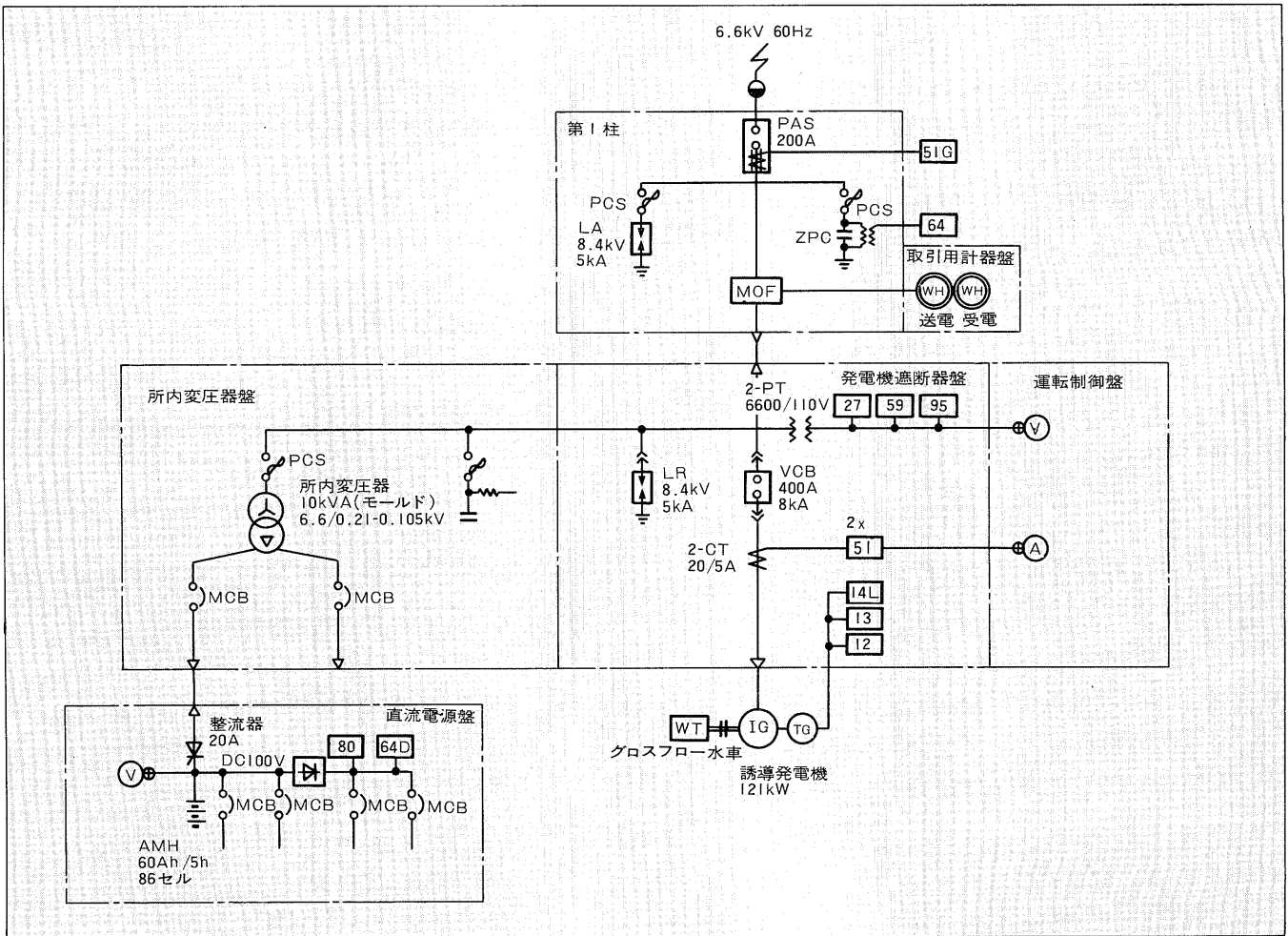


図2 誘導発電機を使用した単線結線図



ので効果的である。これは投入汚泥の濃縮で達成でき、ろ過濃縮や遠心濃縮機が適用される。加温に必要なエネルギーは1/3～1/5に減少できる。

また、寒冷地で冬季にかなりの加温エネルギーが必要になる場合は、消化汚泥の保有するエネルギー回収も効果的で、約20％（対加温熱量）の省エネルギーを可能にするシステムを開発中である。

このほかに、消化槽の安定運転も総合効率化の上から重要であり、負荷変動にもかかわらず最適条件を維持するための制御を開発した。これは、従来の消化状態のモニタに水質分析計を多用するのとは異なり、メンテナンスの容易なガス分析計とガス発生量を指標としてデジタル制御するもので、安定な運転制御を行えるものとなっている。

2.3 下水処理場のソーラーシステム

2.3.1 太陽熱エネルギーと集熱方式

太陽熱を利用するに当たっては、まず日射量の大きさ、それを集熱する集熱器の構造と集熱効率を知る必要がある。地表面が受ける日射には、太陽から直接入射する直達日射と天空で散乱する天空日射とがあって、両者の和を全天日射量と呼ぶ（図5参照）。

地上の水平な面に入射する日射量を水平面日射量といい、これは各地の気象台で観測されている。日射量は天候により変化し、概略値は表1のようになる。ソーラーシステムの設計においては、この水平面のデータを基にして、任意の集熱器取付面への日射量を求める必要があるが、富士電機はこのための計算機プログラムを確立している。

集熱器は日射を適当な吸収体で集熱し、その熱は集熱器内を通る水に伝達されるが、吸収体の温度が上昇すると、伝導、対流、輻射などの自己放熱による損失熱量が増大する。その結果、温度が高温になるほど集熱効率が低下するので、集熱器の断熱構造が重要となる。断熱構造による集熱効率の比較を図6に示す。

2.3.2 汚泥加温への利用

消化槽内の汚泥の加温用燃料として消化ガスが使用されているが、消化ガスの発生量、熱量は処理場により差があり、また年間で変化する。処理場によっては、消化ガスの発生熱量だけでは加温できない期間があり、補助燃料として灯油、重油が使用されている。そこで太陽熱を汚泥加温に利用することが考えられる。

富士電機の真空ガラス管形（選択吸収膜付）集熱器を使用した場合の試算では、条件を下記とした場合、単位集熱量は冬季で1,100～1,400 kcal/m²・d、夏季で1,700～2,000 kcal/m²・d、年平均で約1,600 kcal/m²・dとなる。

集熱器の設置条件

場所；東京、方位；南、傾角；20°

外気条件；東京の標準気象データによる。

集熱器の温度条件

初期水温；52.5℃、昇温到達水温；67℃

消化ガス利用のボイラ効率を65％とした場合、消化ガス1m³によって得られる加温熱量を1日で得るための集熱器

図4 消化ガス利用システム

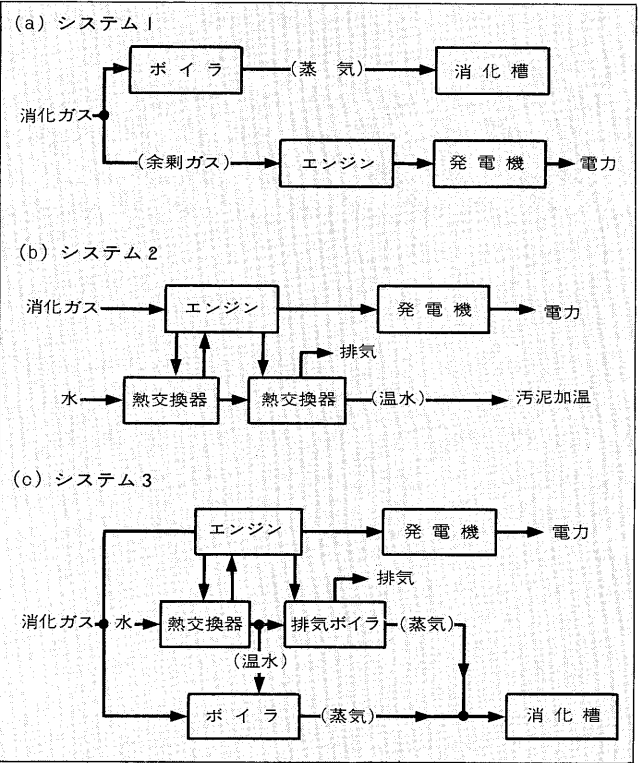


図5 太陽の日射

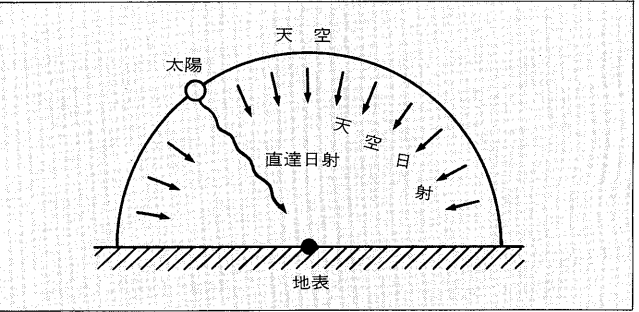
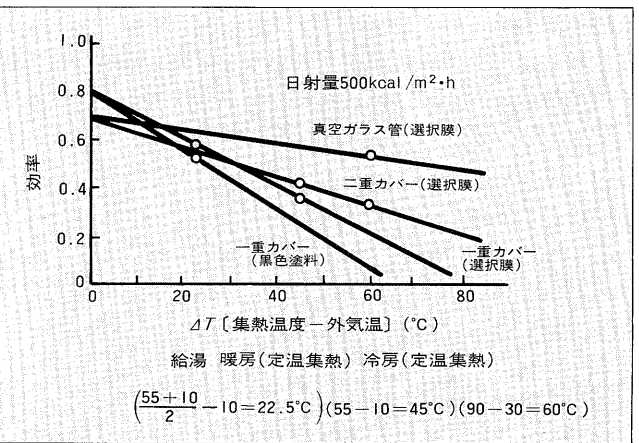


表1 日射量の概略値 単位：kcal/m²h (860 kcal/h = 1 kW)

	快晴-晴	晴-うす曇	曇	雨
直達日射	700	400	0	0
天空日射	100	200	300	100
全天日射	800	600	300	100

図6 コレクタの集熱効率



有効集熱面積は、上記の年平均集熱量から約 2.23m^2 となる。

太陽熱を汚泥加温に利用する場合、消化ガス発電システムと組み合わせるのが効果的である。ソーラーシステムを設置する目的は、加温に使用している重油などの補助燃料を節約するだけでなく、余剰ガス量を増大して発電設備の運用を容易にし、処理場として効果的な発電を行うことである。例えば、処理場の消費電力は夏季が多く、この期間の最大消費電力で契約電力が決定するので、夏季の余剰ガス量を増して発電電力を増加することにより契約電力の低減を行う。

現在の汚泥加温方式は、消化槽への蒸気吹込方式が主流であるが、消化ガス発電システム、ソーラーシステムは温水での熱回収が効率良い。したがって、加温方式は欧米で多く採用されている熱交換器を介して汚泥を加温する温水加温方式が、省エネルギーの面から望まれる。しかし、温水加温式における維持管理、プラントの基本計画などの技術面、及びコスト面で検討すべき点が多い。

③ エネルギー節約システム

上下水道における維持管理費のうち、約40%が動力費、約25%が人件費、以下、薬品費、補修費、その他と続く。この動力費のほとんどが電力であり、污水ポンプ、送・配水ポンプ、フロアなどで消費されている。

上下水道においては、この電力をいかに節約するかが省エネルギー節約システムの第一歩と言っても過言ではない。

以下、エネルギー節約システムの代表的手法として、総合効率化システムと運用例を紹介する。

3.1 総合効率化システム

上下水道を運用するためには、水処理、機械、電気、計測、情報処理の総合技術が必要である。特に、プラントの情報を正確につかむことが総合効率化の第1ステップであり、高性能・高精度の電力監視制御装置、電子式計装機器、水質計などがある。

電力監視制御装置では電力の監視をきめ細かに行き、不必要な電力の削減とともに平滑化を可能とした。また、電子式計装機器、水質計では、水位、流量、圧力、水温、濁度、残留塩素などのプラント情報を高精度に把握し、最適な制御を可能とした。

しかし、それだけでは不十分で、正確につかまえた情報を、的確、かつ迅速に伝送するテレメータ・テレコントロール装置が、またきめ細かな分散制御を行うためにマイクロコントローラが、更に中央に集められた情報は計算機により的確に処理される必要が生じた。

このように総合効率化システムを設計することで、薬品注入制御、活性汚泥制御、配水制御、配水池制御において、エネルギー節約が顕著になった。

3.2 薬品注入制御システム

時々刻々と変化する流量、流入水質の変動に対応して薬

注量を制御する方式で、薬品の無駄使いが防止でき、合わせて設備の合理的な運転が可能である。

3.3 活性汚泥制御

下水処理における電力消費の最も大きなものにエアレーションブローがある。ブローの効率運転は電力消費を抑えるのに有効であるが、これを実現する手法の一つにDO制御がある。エアレーションタンク内のDO値を適正にばっ気風量制御するもので、これによって処理水質の安定を図りつつブローの電力消費を小さくする。また、エアレーションを極力抑える制御も研究している。

3.4 配水制御

水の有効利用、漏水防止、消費電力節約に効果があるものとして配水制御がある。

図7 富士デマンド監視制御装置

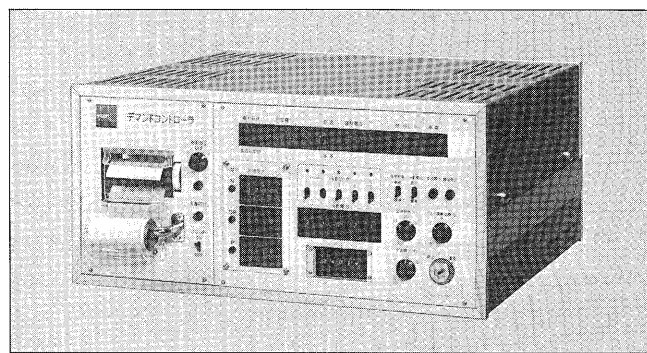


図8 電子式計装システム FCシリーズ

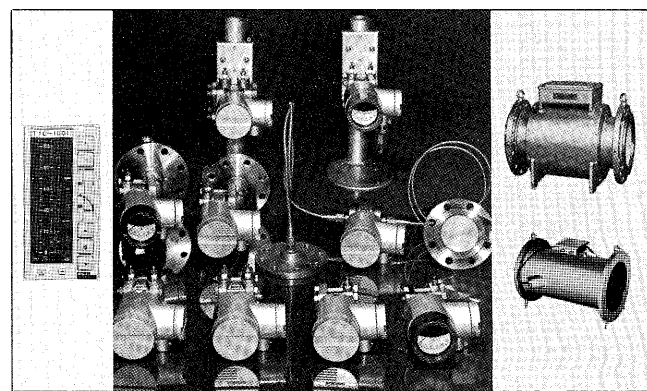
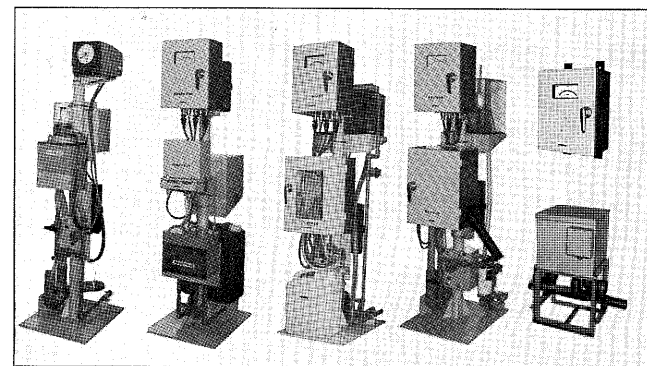


図9 上下水道用水質計



水の需要は、人間の生活のリズムに合わせて、昼多く夜少ないため、夜間の圧力が高くなり、漏水や断水の原因となる。このため、配水地区の適所に圧力監視点（モニタリングポイント）を設け、減圧弁、加圧ポンプなどを設置して、配水区域全体が最適圧力となるように配水制御を行う。これによって、送配水ポンプの運転時間の最適化が図れ、省エネルギーに役立つ。

3.5 配水池制御

配水池の運用は従来バッファとしての見方の方が大きい比重を占めていたが、都市化、水需要の増大に比べ配水池容量が少なくなっている。

このために、配水池水位を動的計画法（DP：ダイナミックプログラミング）を利用して運用することが採り入れら

図 10 テレメータ・テレコントロール装置

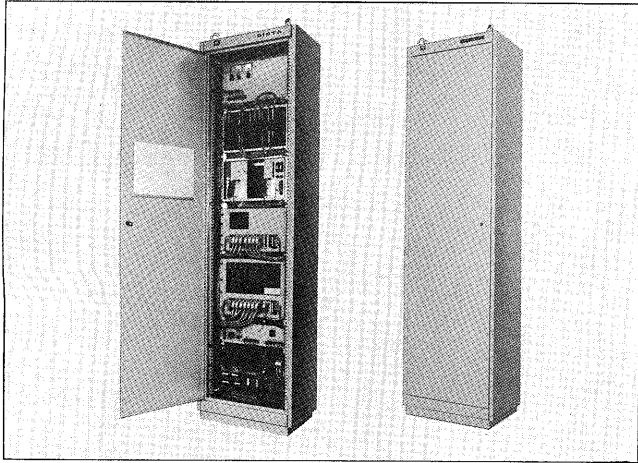


図 11 MICREX-W システム

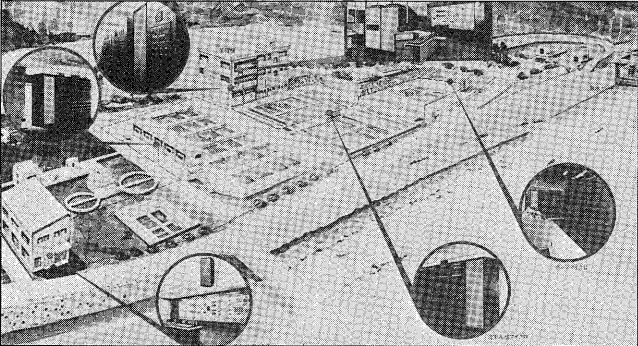
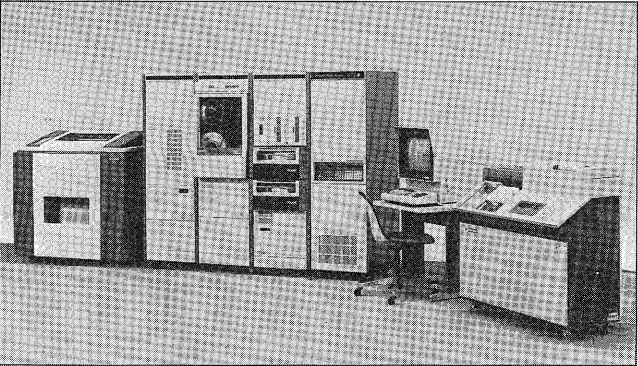


図 12 富士計算機制御システム U シリーズ



れてきている。

DP の演算は、ミニコンピュータを利用して次の手順によって行われる。

- (1) 需要曲線の日量、時間流量をカルマンフィルタなどで予測し、配水量をパターン化する。
- (2) 台数の切換は 1 時間を単位として時間単位に行い、その間切換は行わない。
- (3) 演算は 1 時間ごとの高水位から低水位までの可能な水

図 13 薬注制御

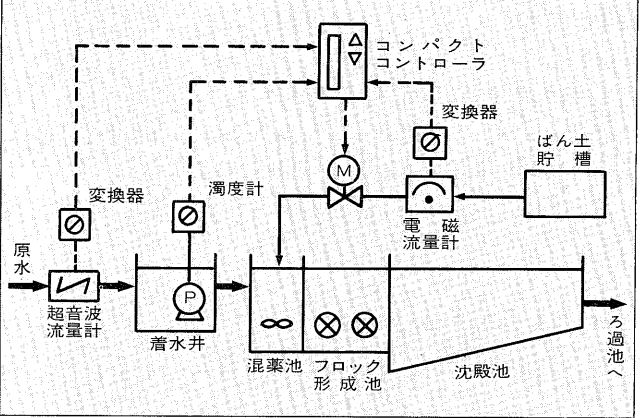


図 14 活性汚泥制御

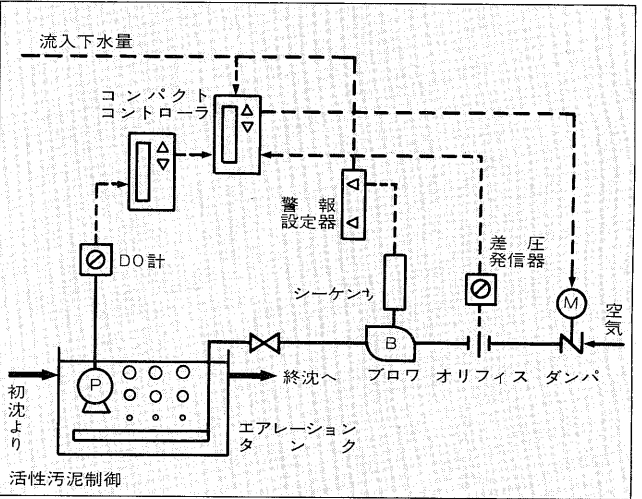
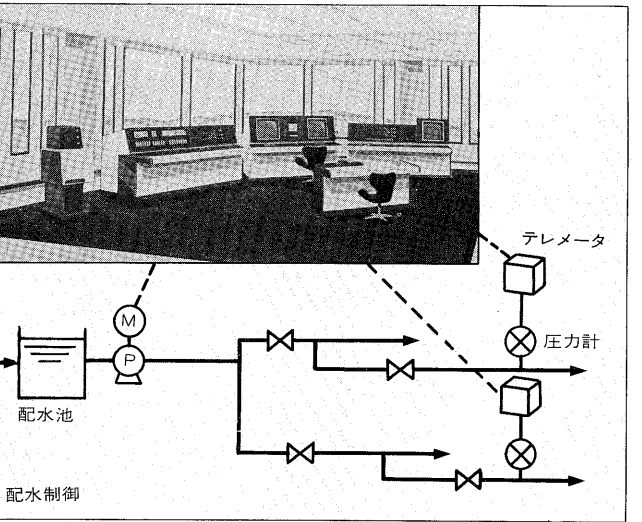


図 15 配水制御



位ごとに、ポンプ切換数最小のルートを見つける。
(4) 管理目標水位を設定し、1日の始めに設定水位になるようにする。演算された結果は、タイプライタなどを通してオペレータに指定される。

DP法による制御の評価の例を図17に示す。4日間の結果であるが、それぞれ小配水パターンがかなり異なっているにもかかわらず、ポンプの切換回数は4日間で12回、1日平均3回というごくわずかの回数ですんでいる。また図18に示した通常の台数制御と比較して明らかなように、DP法での結果は、大半のポンプ運転時間が平均水量に近い2台運転である。

3.6 泉大津市の配水池運用法の例

泉大津市は人口約7万人の大阪近郊の都市であり、1日最大給水量は4.7m³、水源は大阪府水道部から57%、泉北水道企業団から23%、自己水源（井戸、高津川）20%である。

図16 配水池運用計装系統図

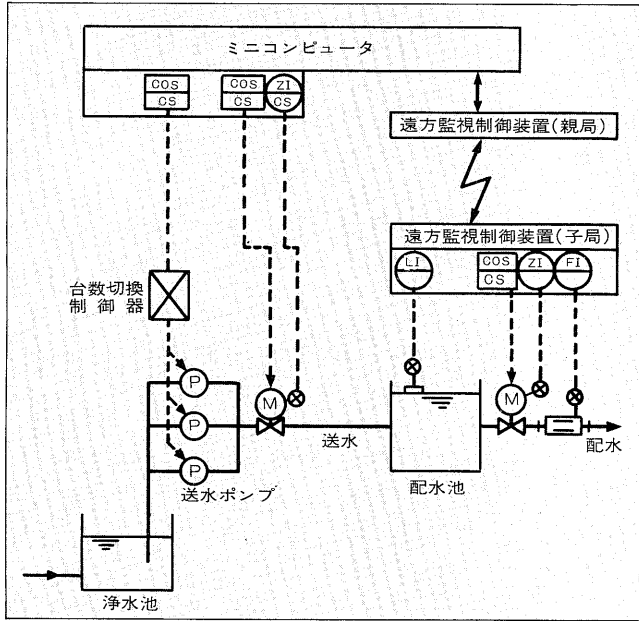
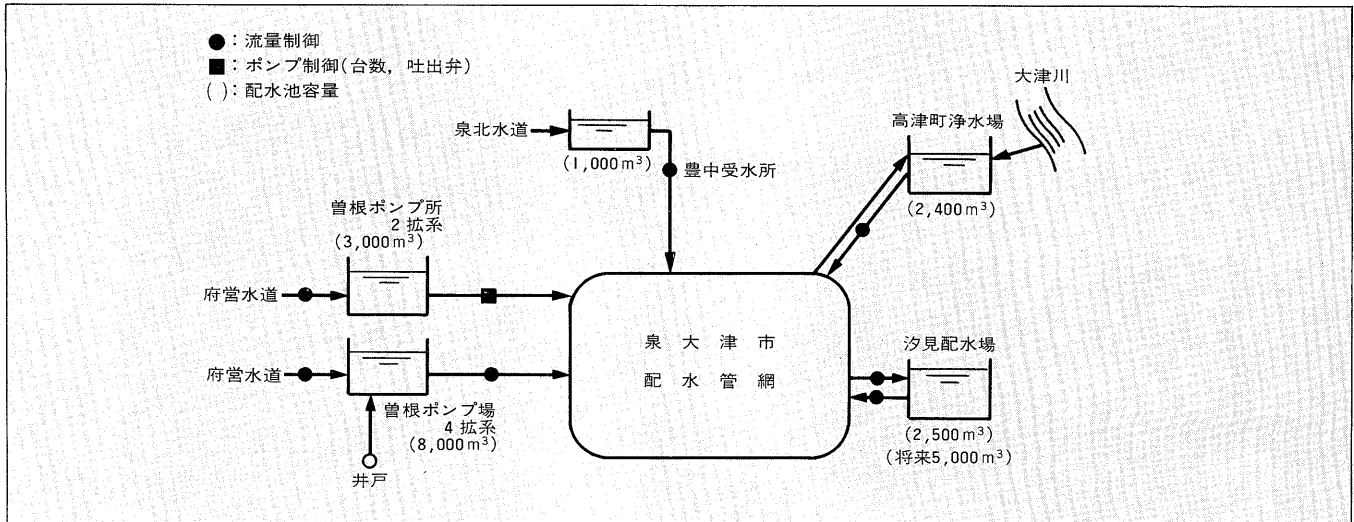


図19 プラント概略図



本プラントでは市内に散在している小容量の既設配水池を有効利用し、需要増大に対処するとともに、省エネルギー合理化及び受水の安定を図るため、次のような手法を用いた。

配水圧力一定制御を曽根ポンプ所、4拡系の配水池で行

図17 DP 応用による配水池運用計画

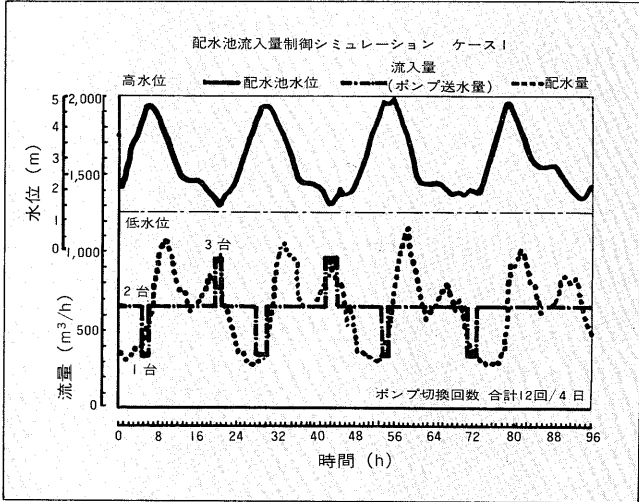
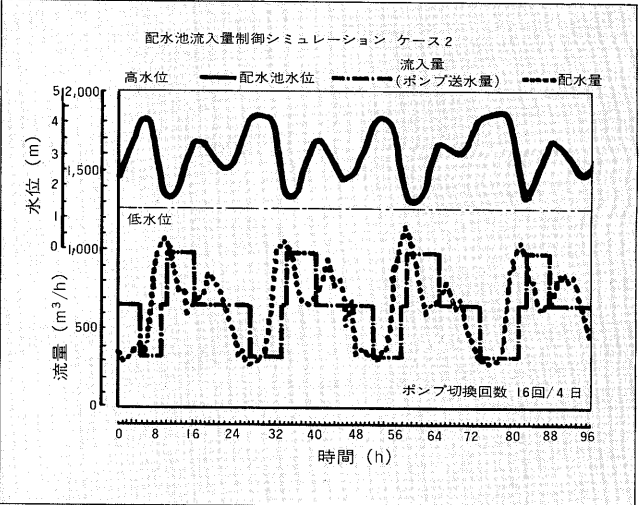


図18 配水池水位による台数切換





＊本誌に記載されている会社名および製品名は，それぞれの会社が所有する
商標または登録商標である場合があります。