

東京電力株式会社奥利根総合制御所 水力総合監視制御システムの開発

Computer Based Total Control System for Hydroelectric Power Stations and Dams of The Tokyo Electric Power Co., Inc.

低価格でクリーンエネルギーである水資源の高効率利用を図るため、水力発電所及びダムなどの水系運用は複雑化し高度な技術が必要となっている。また、電力需要に即応できる水力発電所の運転、特に大容量揚水発電所をもつ水系運用は電力安定供給上、重要な使命を負っている。

このような背景のもとに、東京電力株式会社玉原揚水発電所をはじめとする奥利根水系の水力発電所群・ダム群を集中監視制御する水力総合監視制御システムを開発し、奥利根総合制御所に納入された。本システムは、CBSC方式の二重化構成HIDIC 80Eを中核として、高信頼度確保に努め、水系運用計画・ダム挙動解析など電気業務と土木業務の協調運用を図ったことに特長があり、電力安定供給、水力効率運用に寄与できる。

平野隆三* Takazô Hirano
塩永凱夫* Yoshio Shionaga
平井英一** Eiichi Hirai

1 緒 言

近年、電力需要は安定期に入り、電力供給事業は電力の安定供給と電力エネルギーの効率化が、重要な使命となっている。このため、各電力会社は、小水力発電エネルギーの開発とともに、ピーク負荷に対応するために大容量揚水発電所を建設又は計画している。

東京電力株式会社では、奥利根水系に純揚水式玉原発電所と、その上池である玉原ダムを建設している。この建設とあいまって、発電設備運用の省力化と安全確保が要求され、水系管理面では、水資源の有効活用及び災害防止が叫ばれて来た。一方、水力発電・ダム設備は複雑化し、運転・保守業務が増大化しており、安全運転の困難さが懸念されている。

これに対応するため、東京電力株式会社と日立製作所は、最新の計算機制御技術を応用した水力発電所群と、ダム群の監視制御方式及び機能分担の最適化について検討を行ない

- (1) 河川設備の運転保守の効率・省力化と河川運用の安全性向上
- (2) 新鋭大容量揚水発電所及び既設水力発電所群とダム群の同一思想による監視制御
- (3) 水資源の有効利用と設備の効率運用
- (4) 新設ダムの挙動解析自動化と環境整備

を目的とし、玉原発電所と玉原ダムの監視制御を含む奥利根水系の水力総合監視制御システムを開発した。本システムは、東京電力株式会社奥利根総合制御所(図1)に納入され、昭和57年11月運転開始している。

2 システムの概要

奥利根水系は、図2に示すように利根川本流の最上流に位置する。奥利根総合制御所は、奥利根水系流域に点在する玉原発電所をはじめとして、矢木沢、須田貝、藤原、水上の5水力発電所と、檜俣、玉原、小森の各ダム及び水上、小松の取水口を監視・制御する水力制御所として、国内最大の発電出力1,526.2MWを管理統合する水力総合制御所である。また、建設省及び水資源開発公団が管理するダムとの連

系、下流域の運用も考慮するなど、利根川水系の運用上、重要な位置を占める。

2.1 システムの構成

電力系統制御システムは一般に階層構成がとられ、東京電力株式会社の場合、水力総合制御所は給電業務上、重要な水系を監視制御する目的で設置され、上位系とは、中央給電指令所(以下、中給と略す。)と店所給電所(以下、店給と略す。)と情報交換する。奥利根総合制御所システムは、監視制御する各発電所の主要機器状態、主要計測値等の運転状態を中給へ送り、各発電所共通のAFC(Automatic Frequency Control)指令及び玉原・矢木沢両発電所の出力指令などの給電指令情報を中給から受ける。店給へは各発電所の運転状態及び水理情報を伝送する。本システムはCBSC¹⁾(Computer Based Supervisory Control)方式の構成をとり、図3に示すように

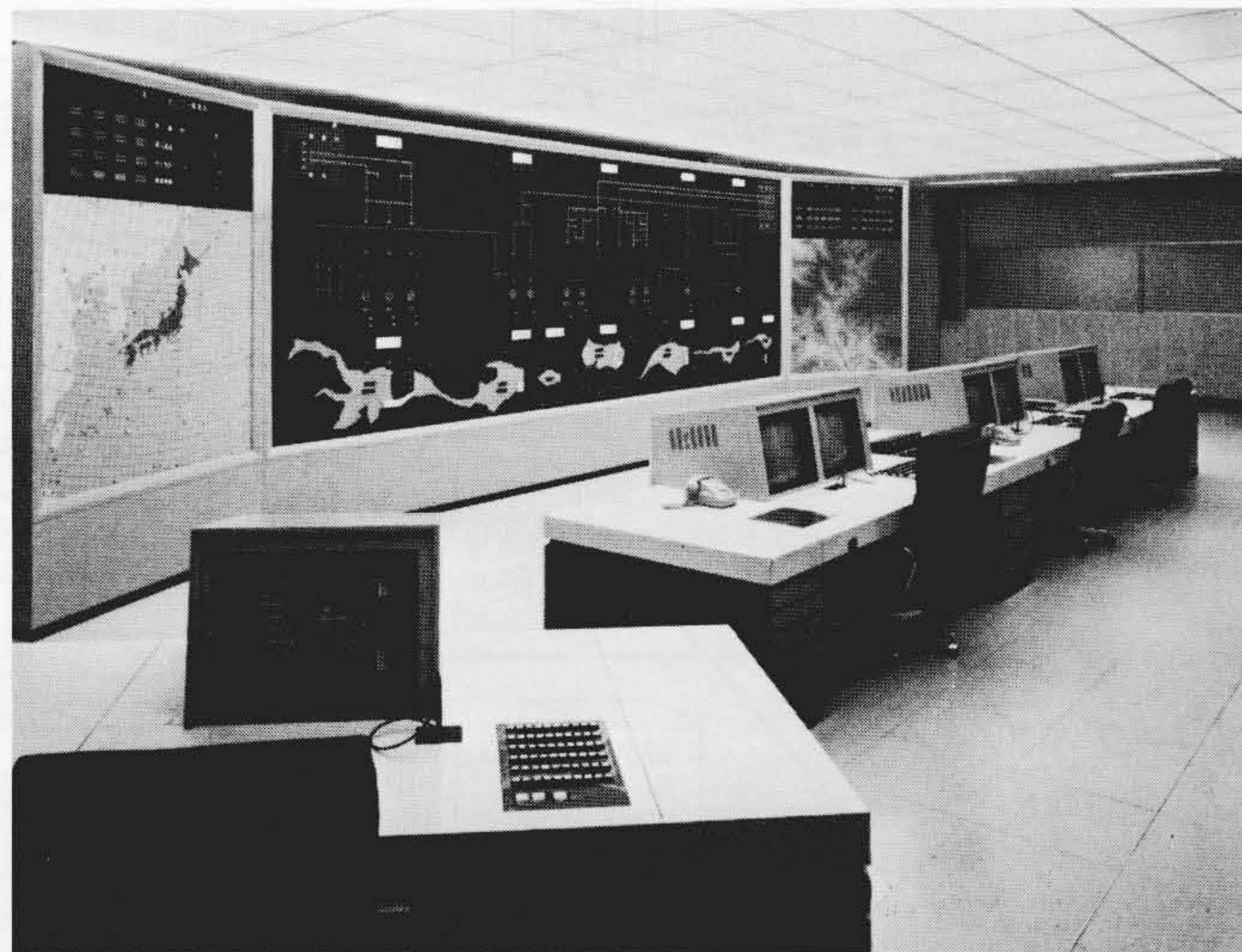


図1 東京電力株式会社奥利根総合制御所の運転制御室 同一機能の監視制御卓が3卓並んでいる。手前は監視卓で、ライトペンで指示を与える方式を採用し、ボタンを極力少なくした。

* 日立製作所大みか工場 ** 日立エンジニアリング株式会社

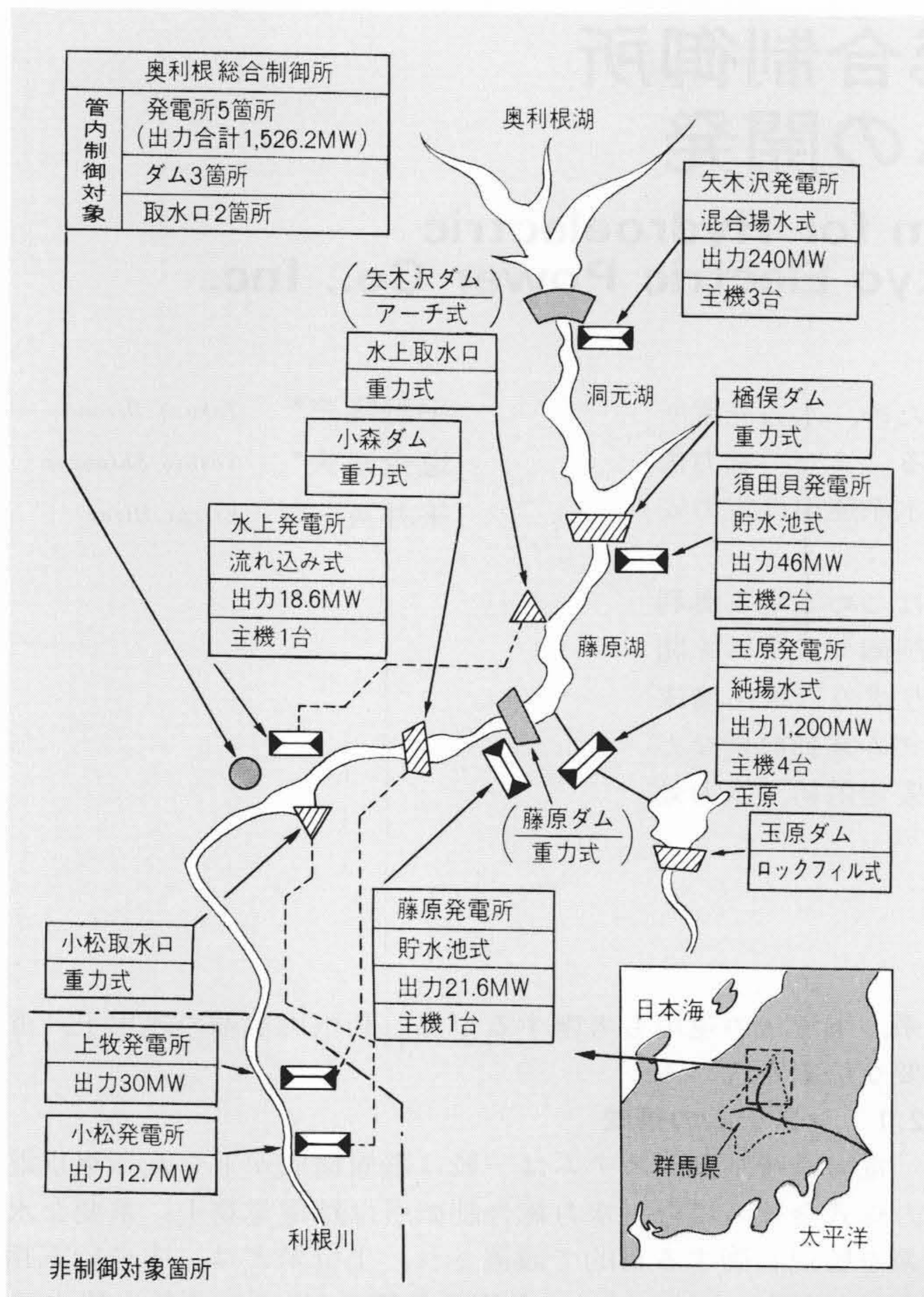


図2 奥利根水系図と制御対象設備 奥利根水系は、最上流に首都圏の水がめである矢木沢ダムをもち、その下流に発電所・ダム・取水口が点在する。この水系で1,526.2MWの発電出力を得る。

マンマシン装置・総合監視盤の表示制御及び被制御所の監視・制御はすべて日立制御用計算機HIDIC 80Eで処理している。情報伝送装置はSUPERROL 5500²⁾を使用し、信頼性の高いサイクリック伝送方式としている。

2.2 自動化項目

水力総合監視制御システムは、水力発電所の運用を中心とした給電業務とダム・取水口の運用を中心とした土木業務の協調と融合を図っており、主な自動化機能を表1に示す。

3 システム信頼度向上策

本システムはCBSC方式の計算機制御システムであり、より信頼性を高くするためのハードウェア面及びソフトウェア面での考慮が必要である。以下、本システムでの信頼度向上策について述べる。

3.1 ハードウェア構成の信頼度向上策

本システムは表1に示す高度な機能を必要とするため、誤動作はもちろんのこと、一装置の故障がシステムダウンにならず容易にシステムから切離しができ、冗長性のある構成にする必要がある。このため、ハードウェア構成上、次の点を考慮した。

- (1) システムの中核には信頼性の高い日立制御用計算機HIDIC 80Eを使用し、主要装置はすべて二重化を図った。
- (2) マンマシンの中心であるCRT(Cathode Ray Tube)付監視制御卓は、同一機能のものを3卓準備し、2系列のいずれの計算機にも切り換え接続できる。記録装置はタイプライタを3台、ラインプリンタを1台備え、4台による相互バックアップをとった。
- (3) 使用装置は静止化を図り、計算機制御で表示する総合監視盤は発光ダイオード表示器及びプラズマ数値表示器を採用した。
- (4) 情報伝送装置はマイクロプロセッサを内蔵した機能単位

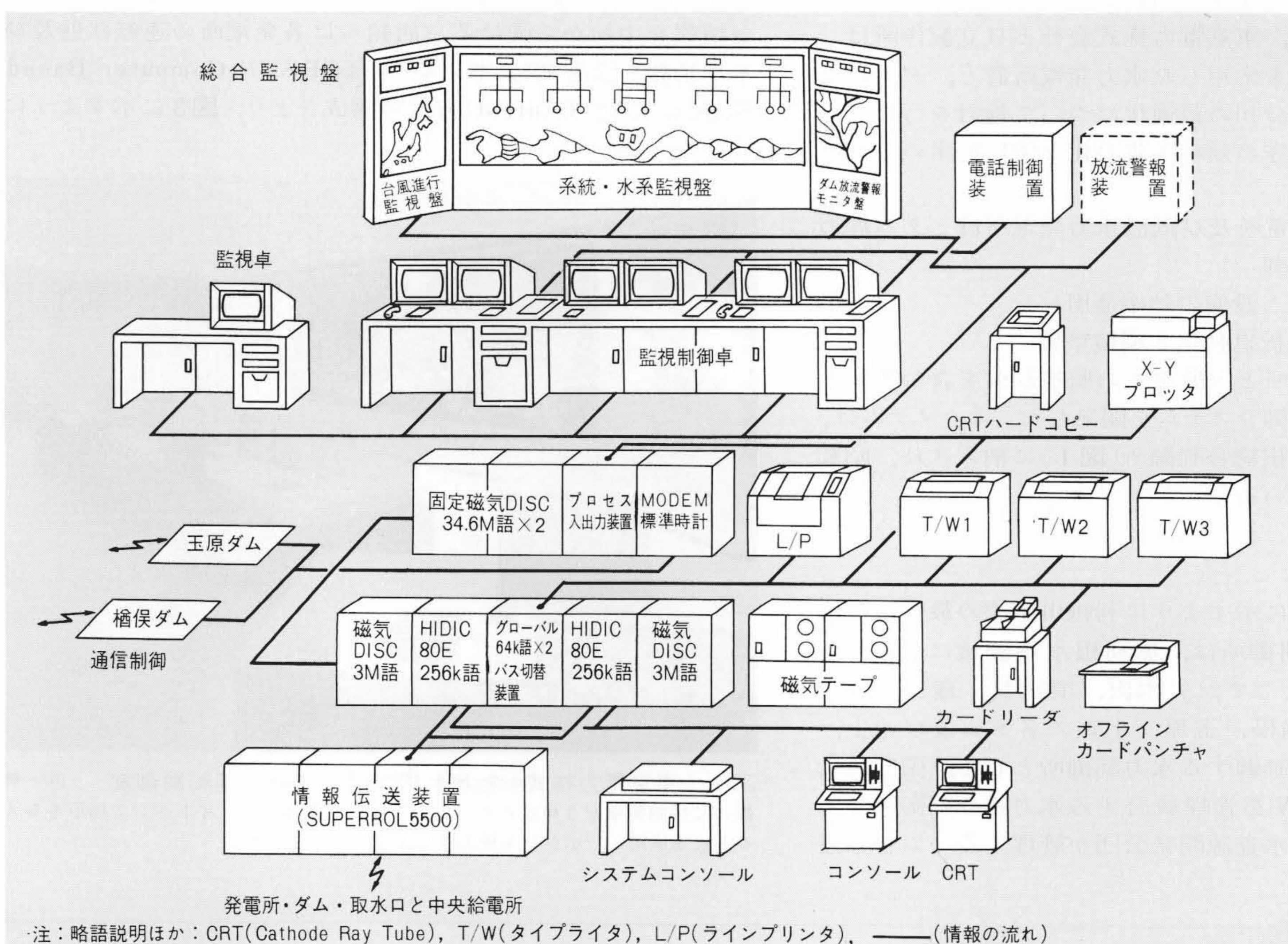


図3 水力総合監視制御システム構成 HIDIC 80E 2台系から構成されるロードシェアデュプレックス方式のマルチ計算機システムである。情報伝送機能を除くあらゆる機能を計算機で処理させる典型的なCBSC(Computer Based Supervisory Control)方式の構成とした。

表 1 計算機の自動処理項目表 本システムの処理項目と、その概要を示す。

No.	機 能	処理項目	処 理 概 要
1	監 視 機 能	状態変化監視	●電気設備、土木設備の状態変化を監視し、変化をタイプライタ、CRT監視制御卓などへ出力する。また、線路の停電監視を行ない充電状態をCRTスケルトン画面に色変更表示する。
		計測値監視	●電力、水位、温度などの計測値は、フィルタリング工学単位変換後、上下限監視、偏差値監視を行ない、異常を検出すればタイプライタ、CRT監視制御卓などへ出力する。
		保守管理	●主機、補機などの動作回数、運転時間監視を行ない、監視値を超えるとタイプライタ、CRT監視制御卓などへ出力する。
2	操作・制御機能	機器操作制御	●発電所、ダム、取水口の各機器選択操作及び負荷調整制御、ゲートバルブ昇降制御などの調整制御のほか、各種設定値制御、放流警報装置操作などをCRT監視制御卓から実行する。 ●中給モード及びローカルモードのAPFC機能による発電機出力調整ができる。
		自動操作と操作手順作成	●操作手順表に従った平常時系統操作、事故時復旧操作を自動及び半自動で実行できる。 ●操作手順表は、CRTを使用した会話形式で作成・変更ができる。
3	記 録 作 表	記 録	●機器の応動・事故発生を解析編集し、発生時刻、機器名、状態事故前潮流などの内容を所名ごとに区分し、CRT表示する。また発生順にタイプライタ記録する。 ●過去の応動・事故発生記録を所名ごとに編集して、タイプライタ出力できる。
		作 表	●運転管理日報、各種月報、原簿及びダム操作記録など、運用に必要な作表をCRT、ラインプリンタなどへ出力する。
4	運 用 計 算	水系運用計画計算	●水系をネットワーク表現し、ネットワーク理論により各発電所、ダムの翌日及び当日の運用計画を立案する。結果は時間別発電電力、貯水池の水位変化としてCRTにグラフ表示され、運用に使用される。
		流量予測計算	●実績時間雨量と予測時間雨量の各データをもとに、ダム流域の予測流入量を算定する。結果はCRTへグラフ表示及びラインプリンタへリスト出力する。
5	シミュレータ機能	系統操作シミュレーション	●実系統状態を模擬的に作成し、実操作と同様の手順で系統操作シミュレーションができる。また、自動操作シミュレーションも実行できる。
		ダム放流シミュレーション	●ダム予測流入量を基に、ダム放流制御のシミュレーションを行なう。結果の放流量、水位はCRT表示及びラインプリンタへ出力する。
6	ダム挙動、監視・解析		●ダムに埋設された各種計測器(水圧、土圧、変化など)のデータを収集し、計測データの監視とダム応力解析計算を行ない、結果をCRT X-Yプロッタへ図形出力する。
7	ソフトウェアメンテナンス		●電力系統設備の変更に伴う設備定義データ及びCRT画面の変更を、CRTとの会話形式でまたカードより実行できる。

注：略語説明 APFC(Automatic Power and Frequency Control)

のモジュール構成とし、モジュール故障が装置故障とならぬよう考慮するとともに、二系列の計算機とは独立のインタフェースとし、高信頼性を図った。

3.2 ソフトウェアの信頼度向上策

ソフトウェアは、その性質上ハードウェアのような冗長性のある構成がとれない。したがって、ソフトウェアの信頼度向上策の一つは、標準プログラムの多用と新規作成プログラムの完全な試験による不良絶滅である。もう一つは、ソフトウェア設計段階でソフトウェア情報の流れを分類・整理し、かつメンテナンス性を考慮し、ソフトウェア構造を単純化することである。本システムは図4に示すように、設備機器とは無関係に不規則に配置されたオンライン情報を、入力処理側でしゃ断器、発電機などの設備単位の情報に再配置し正規化することによって、状態変化解析処理、操作・制御処理などのソフトウェアで設備ごとの特殊条件の考慮が不要となり、単純なソフトウェア構造となった。また、オンライン情報のほかに、計算機内部処理で作り出した情報(例：しゃ断器OFF信号と事故信号を組み合わせ、トリップ信号を作り出す)及びマンマシンから入力される情報もすべてプラントを写像するオンライン情報として扱うことによって、情報は2値状態情報と数値情報に定形化され、処理フローの単純化を図ることができ、ソフトウェア面での信頼性向上に寄与できた。

4 計算機システムの運転モード

4.1 運用の基本的考え方

- 水力総合監視制御システムの運用の基本的考え方は、
- (1) 一系列の計算機システムが故障した場合でも、監視・制御業務は連続性を保つ。
 - (2) 操作・制御は常用系計算機からだけ実行出力する(ここで、操作：制御目標が2値、制御：制御目標が数値と定義する)。
 - (3) オフライン業務及び時間的制約のない処理(計測解析計算など)は、両系正常運転時だけ実行する。
 - (4) 平常運用業務に支障なく、計算機システム増改造及び被

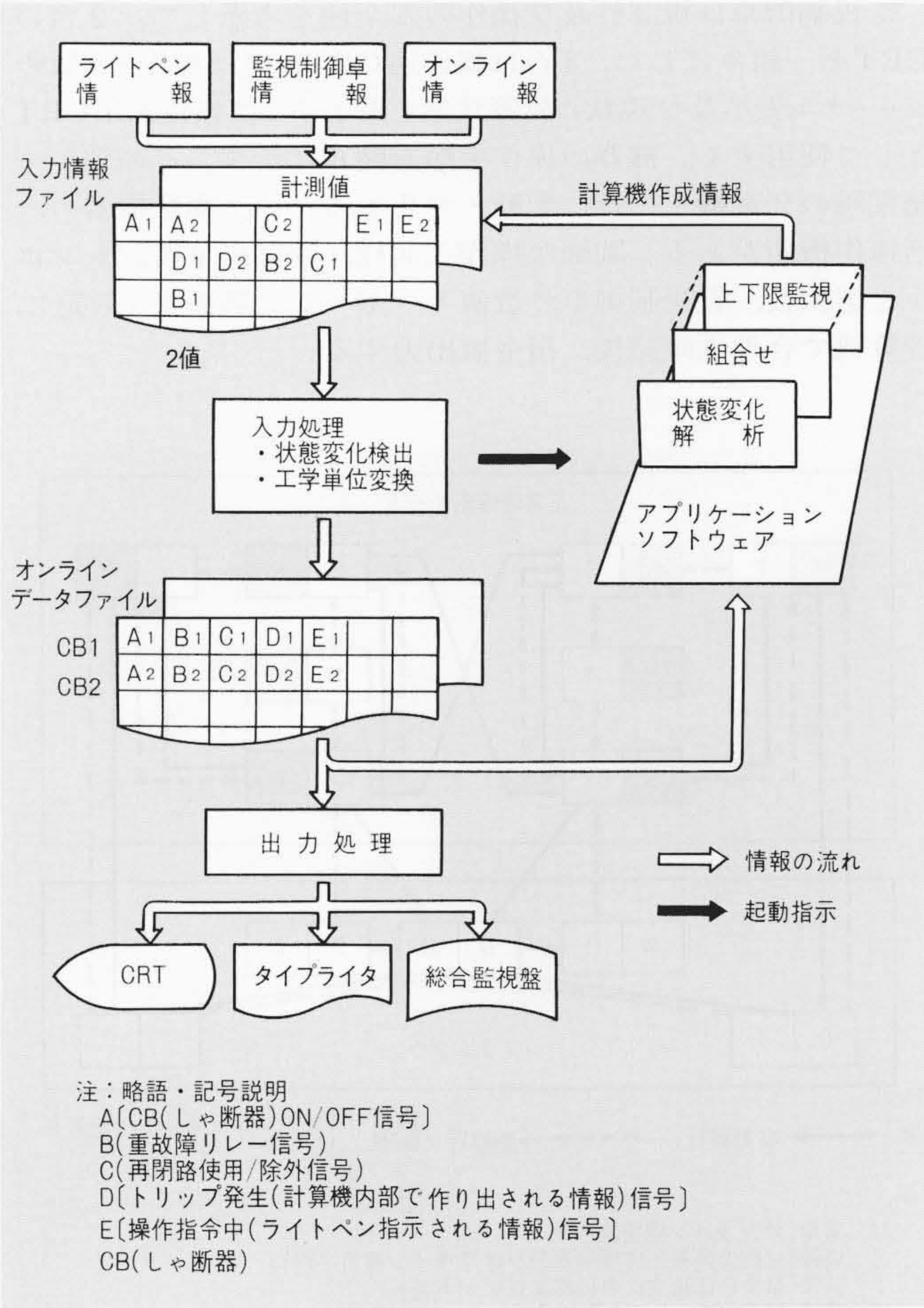


図4 ソフトウェア信頼度向上策の概念図 オンライン情報としてCB1、CB2(しゃ断器)の取込みの場合を示し、不規則に割り付けられたしゃ断器関係の情報は、入力情報ファイルにセットされる。入力処理で、この情報をしゃ断器単位にパターン化する。これにより、出力処理及びアプリケーションソフトウェアは、単純化、信頼性向上が図れ、かつ高速処理ができる。

制御所の対向試験を可能とする。
の四つである。このため、各計算機は情報伝送装置から独立に同一情報を受け、オンラインデータファイルを作成し、いつでも他系の業務引継ぎができる状態にしておく。入出力装置の計算機接続状態、作表データなどシステムで一元管理する情報は、両系の計算機が参照できるグローバルメモリ及び外部補助記憶装置の二重化ファイルで管理する。

4.2 運転モードの移行

上記の運用の基本的考え方に沿って、図5に示す計算機システムの遷移を構成した。計算機システムの運転モードは、基本的に下記3状態をもつ(ここでM:常用系, S:待機系, W:準備, D:停止, T:試験を示す)。

- (1) M-S(両系による通常運転)
- (2) M-W, M-D(片系による通常運転)
- (3) M-T(片系:通常運転, 他系:試験運転)

M-Sの運転では計算機同志が相互監視を行ない、他系の異常検知後、直ちに正常系は異常系をシステムから切り離しをし、M-Dの状態に移行する。正常系は全入出力装置を自系に接続し処理を続行する。この移行時間は5秒以内である。M-T運転時は、相互監視機能はない。図5の運転モード遷移は、異常時の自動移行とシステムコンソールからの手動移行ができる。

5 システムの主な機能と特長

5.1 操作・制御機能

監視制御卓は視認性及び操作の安全性を考慮して、2台のCRTを一組にした。1台は操作用CRT, 他は操作・事故のジャーナル表示及び現状の故障状態を表示する情報提供用CRTとして使用する。機器の操作手順を図6に示す。その他、一発電所の発電機を一斉に起動・停止するため、複数機器の一括操作機能がある。制御は操作と同様、制御対象装置シンボルを選択後、監視制御卓の数値キーボードで制御量を設定し、計算機で合理性確認後、指令値出力する。

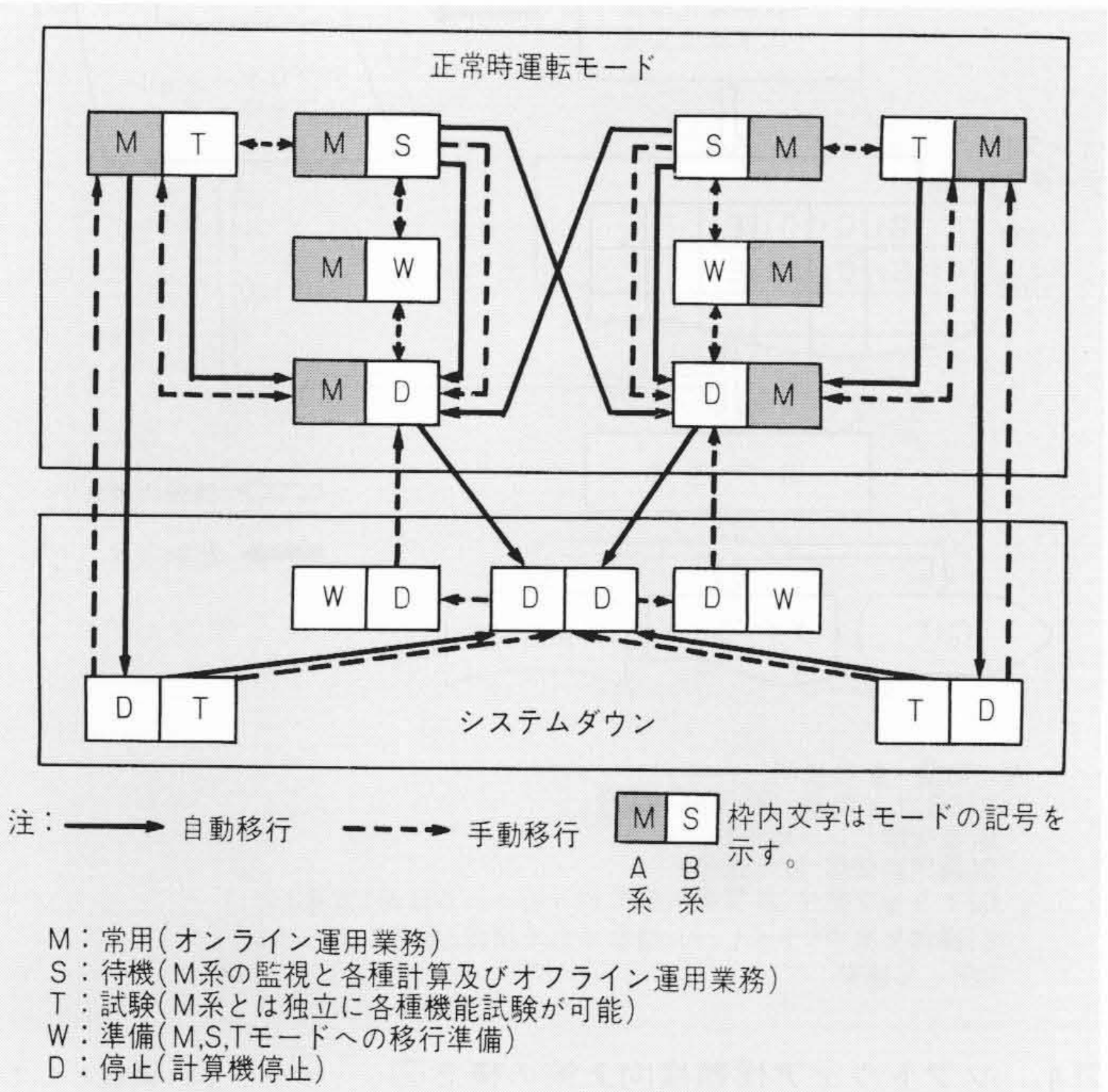


図5 計算機システム運転モード遷移図 2台の計算機が移行できる運転モードを示す。システムコンソールからの手動によるM系のモード変更はできないようにインターロックをとり、誤操作の防止を図っている。

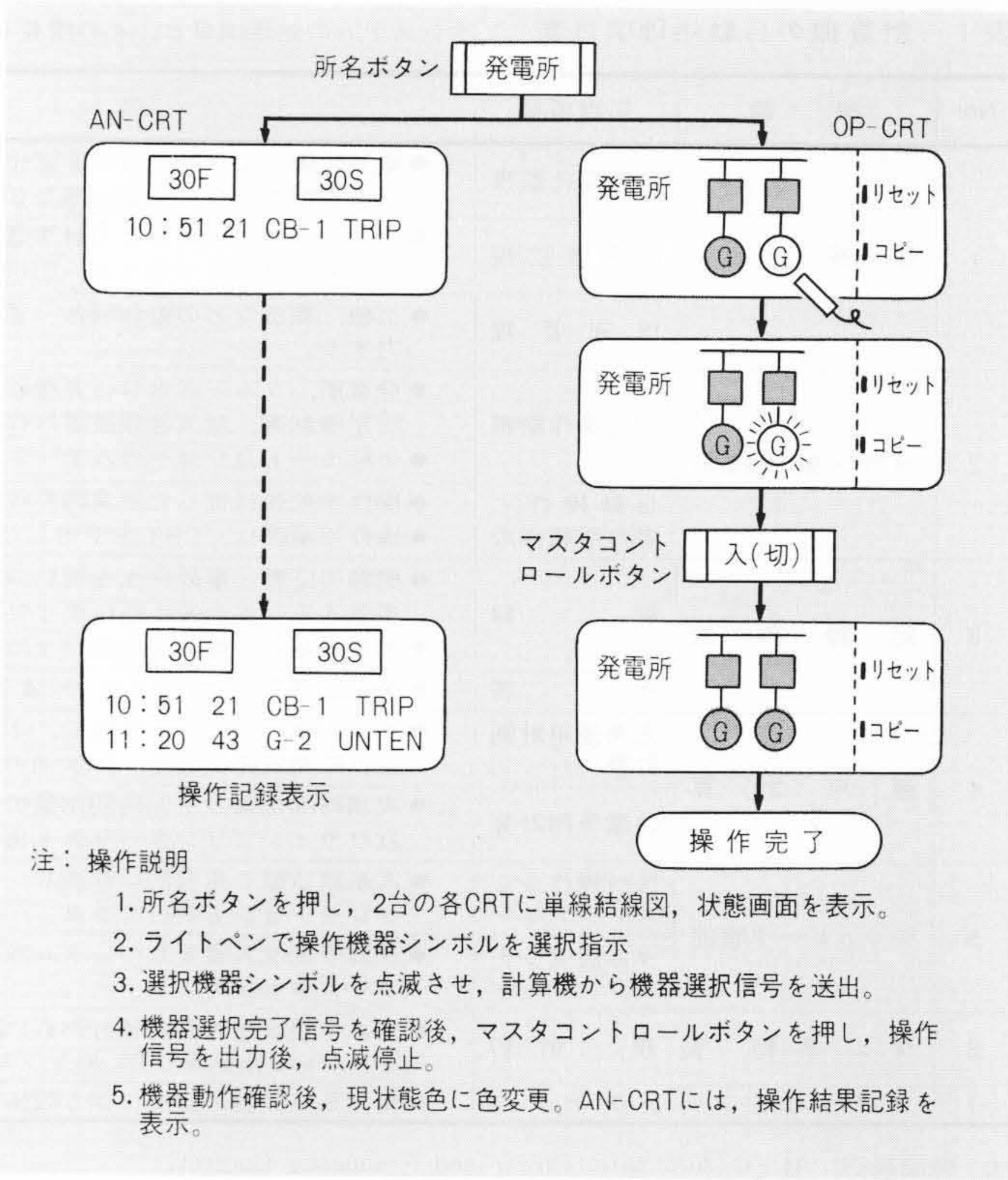


図6 機器操作手順 本システムでは、3台の監視制御卓から独立に機器操作制御ができる。操作・制御は2台のCRTを使用し、AN-CRTには選択箇所の情報だけが編集されて表示され、視認性の良いマンマシンとなっている。

5.2 APFC機能

APFC(Automatic Power and Frequency Control)機能は、従来専用ハードウェアで構成されていたAPFC装置のうち、図7のブロック図に示すように、DPC(Dispatching Power Control)信号とAFC信号の合成及び号機配分などの共通機能を総合制御所計算機で構成し、発電機出力調整を行なうALR(Automatic Load Regulator)機能を発電所側の号機別シーケンサで構成した。AFC信号は、通常中給から受けるが、伝送装置異常及び系統分離が発生した場合は、総合制御所単独でローカル制御を行なう。APFC機能は5秒周期で実行し、AFCの応答を高めている。

5.3 保守管理と計測値監視

機器動作・故障回数などの設備稼動状況を統計・把握するのは、水力発電所及びダム運用管理上、重要な業務である。保守管理機能は、しゃ断器、補機及びバルブ・ゲートの原因別動作回数管理と、運転モード別主機と補機の動作時間管理により、事故予防保全と設備保守時期の管理を行なっている。

計測値監視は、数値上下限監視を行なうほか、発電機主機の各種コイル、スラストメタル、主変圧器油温及びサイリスタ始動装置などの運転温度と温度変化率を監視し、管理基準値を超えたとき、CRT表示及び警報出力を行ない、事故未然防止の強化を図っている。

5.4 水系運用計画計算

電力会社での水系運用計画計算の目的は、水系全体で昼間の需要ピークに対応できる供給電力確保と、下流への責任流量を確保する計画を立てることである。奥利根水系は図2に示すように、ダム・発電所が階段上に接続しており、上述の目的のためには、水系全体と時間的要因を考慮して計画する必要がある。本システムの水系運用計画計算は、上述の目的に対して有効なネットワークフロー理論を用いた計画手法(ネ

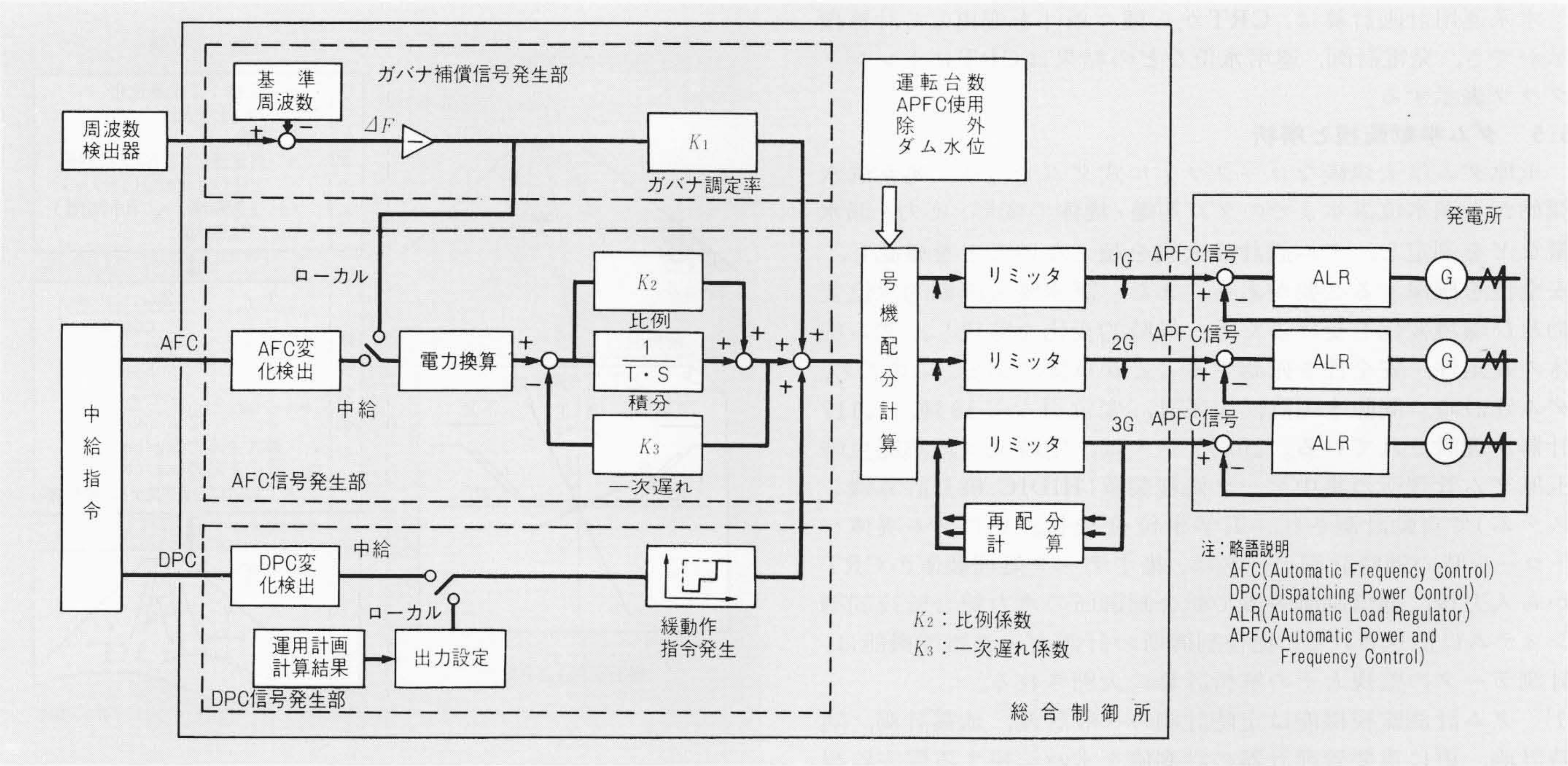


図7 APFC制御ブロック図 総合制御所のAPFC部は、ガバナ補償信号AFC信号、DPC信号の各発生部と号機配分部から構成される。運転モードは、中給モードと総合制御所単独のローカルモードがある。

ットワーク手法)^{3),4)}を適用した。本手法は、水系を次の基本的考え方に沿ってネットワークモデル表現する。

- (1) ダムをノードとし、発電所の発電使用水量、ゲート放流量、ダム貯水量、自流量などをブランチとして、水系をネットワークモデルに変換する。
- (2) 上記モデルの各ブランチにコストを付け、運用計画をネットワークの最小費用流問題として定式化し、ネットワーク解法を用いて解く。

上記の考えに基づき、図2をネットワークモデル表現したのが図8である。また、モデルの各ブランチ容量とコストの考え方を表2に示す。本ネットワークの最適解は、最小費用流求解のためPrimal-Dual法⁴⁾を用いている。Primal-Dual

法の求解手順は、

- (1) 与えられたネットワークの中で、最も低コストのパスを発見する(最短経路の発見)。
- (2) そのパス上に、表2で定義したブランチ容量の最大流量を流す(最大流量の割付け)。
- (3) パスに流した流量に応じて、ネットワークを再構成する。
- (4) ネットワークの総流量が与件を満たせば終了。満たさなければ(1)からの処理を繰り返す。

である。水系運用計画計算は次の2モードがある。

- (1) 翌日計算：翌日24時間の運用計画を立案する。
- (2) 当日計算：計画と実運用に差違が生じたとき、現在時刻から24時までの運用計画を立案する。

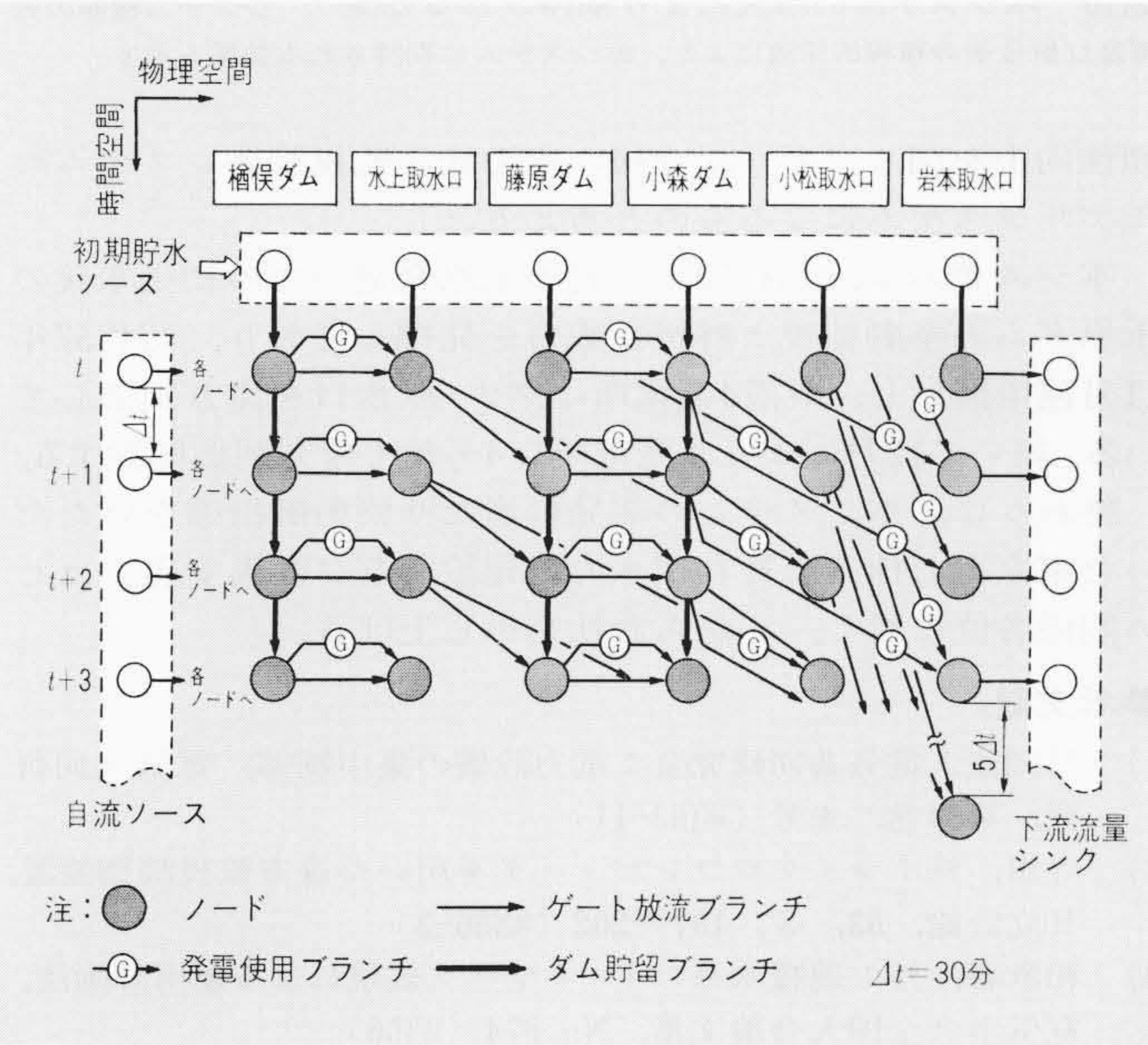


図8 奥根水系ネットワークモデル 図2の奥根水系をネットワークモデル表現したものである。矢木沢発電所及び玉原発電所は中給で運用計画が立てられるため、モデルからは除外してある。

表2 ネットワークモデルにおけるブランチの定義 ブランチの容量とブランチに付けられたコストの定義を示す。

ブランチ	ブランチ容量	コスト関数	モデル表現
1 発電使用水量	最大使用水量	 P : 最大使用水量 V : 発電によるコスト変化率 $W(t) \times \gamma$: 発電優先度 γ : 電水比	1. 使用水量ブランチは負のコスト(利益)を与える。 2. 最大使用水量以上は $+\infty$ のコストを与え、水を流さない。 3. コスト変化率 V は電水比 γ に発電優先度ウエイト $W(t)$ をかけ、日負荷発電出力パターンを得る。
2 ゲート放流量	容量は無限大 (ダムは流量制限のある値まで)	 V : 無効放流によるコスト変化率 放流量 $=\gamma$	ゲート放流量は無効放流量とし、正のコスト(損失)として扱う。
3 貯ダム水貯水量池	最大貯水容量	 P_1 : 運用下限水位 P_2 : 運用上限水位 V : 水位差によるコスト変化率	水位差による発電効率変化をコスト変化率 V で表わし、高水位維持を図る。

水系運用計画計算は、CRTから種々条件を変更して計算指示ができ、発電計画、運用水位などの結果はCRTにトレンドグラフ表示する。

5.5 ダム挙動監視と解析

玉原ダムは大規模なロックフィル式ダムであり、処女湛水開始から満水位湛水までのダム基礎・堤体の変形・応力・漏水量などを測定し、ダム設計最大値を超えないことを確認し、安全性を確保する必要がある。また、湛水後も周期的水位変動及び環境変化を受けるため、経時の変化を監視し、ダム堤体の安定性・安全性を確認することが重要である。このため、ダム建設時に間隙水圧計、土圧計、変位計など18種、1,117計器が埋設されている。計測データは、定時又は地震発生時玉原ダム管理所の集中データ処理装置(HIDIC 08L計算機システム)で自動計測され、工学単位変換後、更にダム堤体パトロール時の随時計測データは、集中データ処理装置のCRTから入力後、通信制御装置で総合制御所の水力総合監視制御システムに伝送される。総合制御所の計測データ処理機能は、計測データの監視とその解析計算に大別される。

- (1) ダム計測監視機能は定時計測の一般計測、地震計測、随時計測、更に重要管理計器の計測値を常時監視する保安監視機能がある。計測データ及び監視結果はCRT、X-Yプロッタに図形出力及びリスト出力できる。
- (2) 計測解析機能は、上述の各種計測で記録保存された経時データを使用してダム挙動解析計算を行ない、表3に示す各種解析分布図及び経時グラフが、ダム縦・横断面上に作成され、CRT、X-Yプロッタに図形出力できる。

図9に土圧分布の計測解析例を示す。

6 システム導入による効果

水力総合監視制御システムの開発目的に沿って、本システムでは、新技術、新方式の採用によりシステムの高信頼性確保とともに機能の充実化を図った。本システムの導入により期待される効果を図10に示す。

7 結 言

以上、今回開発した奥利根総合制御所向け水力総合監視制御システムの構成及び機能を中心に述べた。

本システムは、マンマシンの改善、省力化、効率化及び信

表3 ダム挙動解析項目表 ダム挙動解析計算結果は、各種分布図にしてCRT表示及び作図できる。CRTの表示画面数は900画面、X-Yプロッタ作図枚数は224枚にのぼり、玉原ダムの安定性確認及び安全性確保に寄与している。

No.	解析項目	説 明
1	間隙水圧分布図	ダム堤体内の各間隙、水圧計計測値をダム断面上の計器埋設位置に作図する。
2	等圧コンター図	間隙水圧計計測値を水頭圧変換し、等しい水頭圧群を結んで作図する。
3	土 圧 分 布 図	ダム堤体内の3成分土圧計計測値から主応を計算し、応力方向と大きさをベクトル化して埋設位置に作図する。
4	沈下量分布図	ダム埋体内の沈下計の測定値から沈下量を算出し、初期状態からの沈下曲線に変換し作図する。
5	地中変位分布図	各深度の傾斜計の測定値から水平方向の変位量を計算し、初期状態から曲線を作図する。
6	その他、浸潤線経移図、着岩部せん断変位グラフ、ゾーン間変位グラフ、外部標的変位図、水平・鉛直変位グラフがある。	

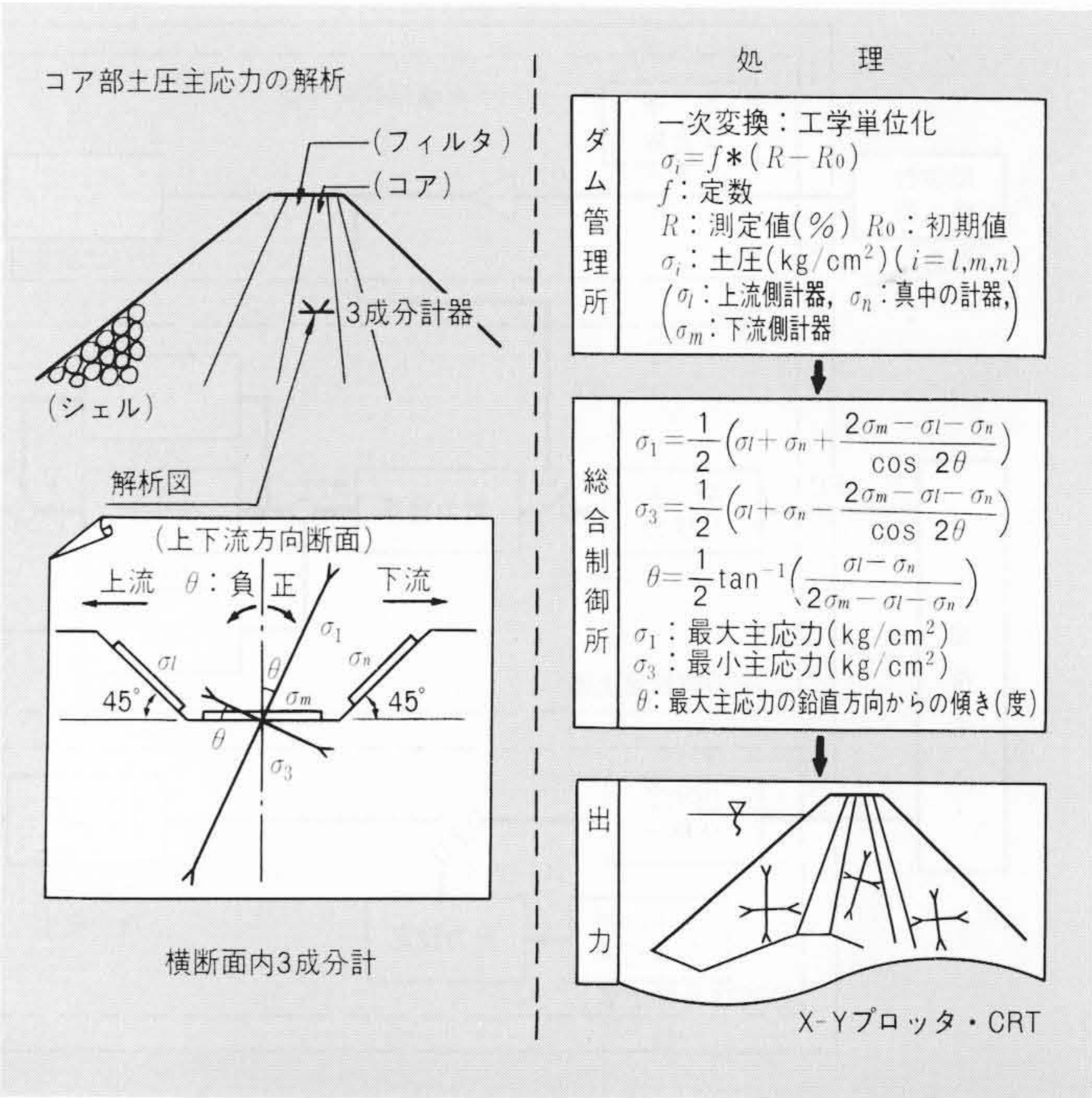


図9 土圧分布のダム挙動解析例 ロックフィル式ダムのコア部土圧、主応力の解析例を示す。玉原ダム管理所で計測データを工学単位に変換し、総合制御所で解析する。結果は概略をCRT、詳細をX-Yプロッタに出力する。

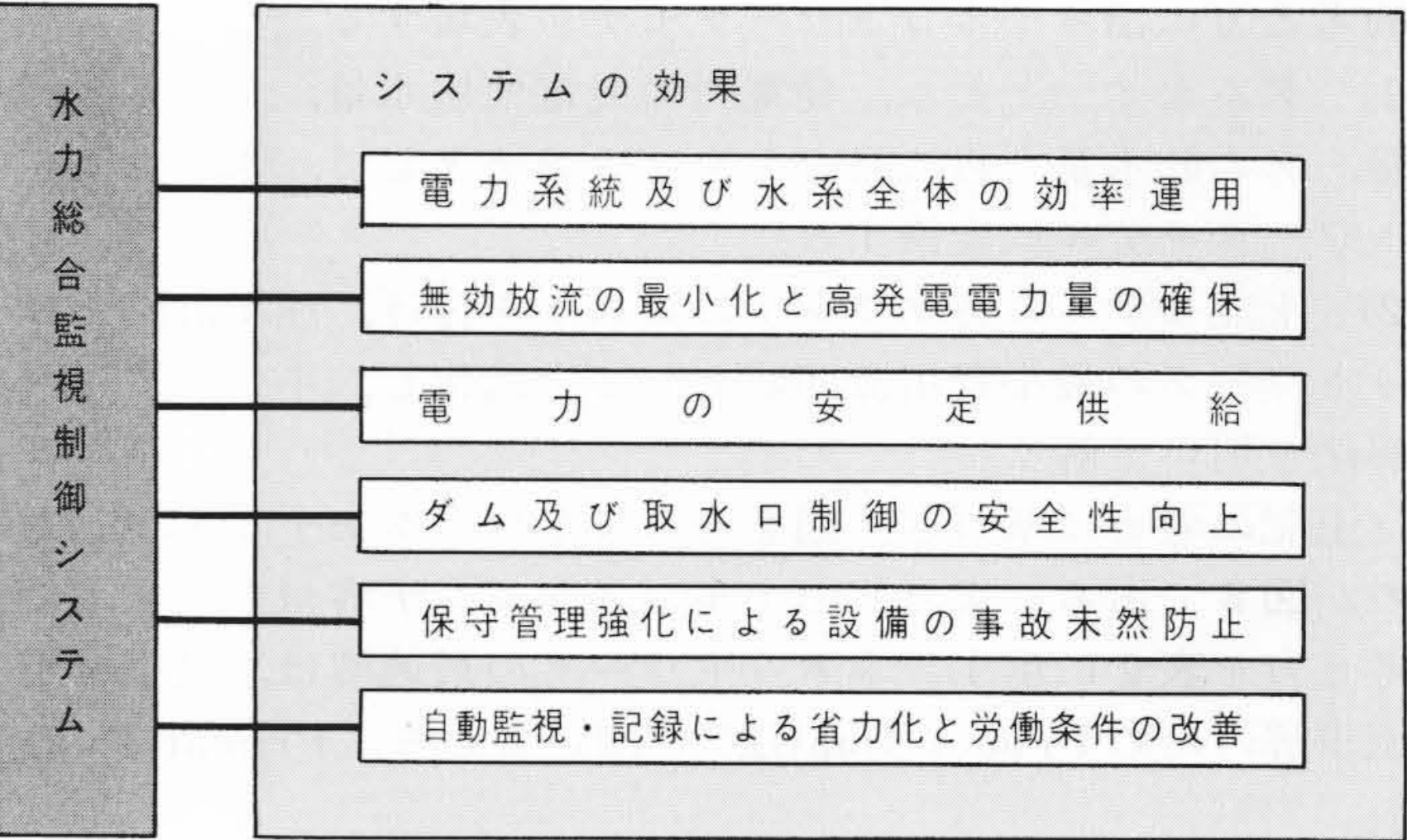


図10 本システムの導入により期待される効果 システム機能の充実及び新技術の積極的採用により、本システムに期待される効果を示す。

頼性向上を図っており、今後の水力総合監視制御システムのモデルシステムになるものと考えてる。

本システムは、昭和57年5月の玉原発電所での初揚水後の玉原ダムの挙動監視と解析に威力を発揮しており、昭和57年11月運用開始し、既設4発電所とダム・取水口を遠方制御している。続いて12月には玉原発電所1,4号機も遠方制御開始する。

終わりに、本システムの開発に当たり終始御指導をいただいた東京電力株式会社利根水力総建設所及び群馬支店をはじめ関係各位に対し、心からお礼を申し上げる。

参考文献

- 1) 社団法人電気共同研究会：電力設備の集中制御，電気共同研究，第34巻，4号（昭53-11）
- 2) 寺田，外：マイクロコンピュータを用いた遠方監視制御装置，日立評論，63，3，197～202（昭56-3）
- 3) 和歌森，外：連接水系のネットワーク表現による運用計画法，電気学会全国大会論文集，No. 874（昭56）
- 4) 社団法人日本オペレーションズ・リサーチ学会：ネットワーク構造を有するオペレーションズ・リサーチ問題の電算機処理に関する基礎研究（報文シリーズ・T-73-1）（昭48-3）