

火力運転員訓練用シミュレータ

Training Simulator for Thermal Power Plant Operators

最近国内では、火力プラントの大幅自動化によって運転員自ら運転技術を向上することが困難になり、各電力会社とも訓練用シミュレータで運転員の育成を行なっている。一方、輸出プラントでは高い運転技術をもった運転員を十分に確保することは特に困難であり、しかも初めて採用した機械を運転することになるため、訓練用シミュレータの購入を希望する顧客が増えてきた。これらの要求にこたえるため、訓練用シミュレータが製品化された。

日立製作所はシミュレータの基本となるモデル解析技術については20年以上の経験をもち、最近多種プラント形と特定プラント形の2種の製作実績が得られたので、これらで採用した機能、計画上の考慮点及び概略仕様について紹介し、今後のシミュレータ計画の参考に供するものである。

福島弘一郎* *Kôichirô Fukushima*

飯田 宏** *Hiroshi Iida*

佐藤美雄*** *Yoshio Satô*

程塚国男**** *Kunio Hodozuka*

1 緒 言

火力プラントの大容量化、高温・高圧化に伴い高い運転技術が要求されるが、これらは高度の自動化によってカバーされてきた。また、プラント製作技術の向上によってプラントの信頼性も格段の向上が図られてきた。しかし、運転員のほうは自分の手によって実際に起動停止を行なう経験や、プラント異常に対応する経験が少なくなり、高度の判断能力や処理能力を養成することが困難になってきた。これらの事情から各電力会社で運転員訓練用シミュレータの設置が行なわれ、現状では各社1台ずつ保有するまでになってきている。今後は新形発電所ごとに1台ずつとか、共同火力や産業用火力などにも需要が出てくるものと考えられる。

一方、輸出プラントでは、高度の技術をもった運転員の不足はより深刻な問題であり、プラントの建設が完成するまでに運転員の養成を行なわなければ、プラントそのものが運転開始ができなくなるケースも出てきており、運転員訓練用シミュレータの需要が増えてきている。

他方シミュレータを製作する技術のほうも、電子計算機技術の発展とともに日進月歩で進んでいる。シミュレータを実現するためには、高度のプラント解析技術を要するとともに、これらを実現することに適する処理能力の高い電子計算機が必要となる。

日立製作所では、プラント解析技術については長い歴史をもっており、高い電子計算機技術ももっていることから最近運転員訓練用シミュレータの開発を行ない、実運用に入っているので、その技術の概要について紹介する。

2 日立のシミュレーション技術

日立製作所での火力発電に関するシミュレーション技術の発展と、シミュレータの納入実績の関係について図1に示す。シミュレーション技術の発展は、使用する計算機的能力向上に合わせて発展している。昭和30年代後半の初期は、アナログ計算機を使用した線形モデルの解析しかできなかった。したがって、解析対象は負荷制御の範囲に限られていた。このアナログ計算機は実時間で解析ができ、結果を直接目視できるというメリットがあったが、蒸気表などの非線形処理がで

きず、また装置の調整に高度のテクニックを要した。制御用大形デジタル計算機の開発に伴い、アナログ計算機との結合を図り、アナログ計算機の弱点をカバーしたハイブリッド形シミュレータが開発され、ボイラ起動などの多くの非線形要素を含むモデルの解析が可能になった。これを製品化したものとして、昭和45年、電力中央研究所に対し、火力発電所総合全自動化開発用に、アナログ計算機と制御用デジタル計算機HITAC 7250とを結合し、中央操作盤などの制御装置も付設した火力発電所用シミュレータを納入した¹⁾。

ハイブリッド形はアナログ計算機の欠点がある程度カバーできたが、デジタル計算機的能力を増強することにはならず、デジタル計算機的能力向上とともに、すべての処理がデジタル計算機に置き換えられるようになった。デジタル計算機だけによる特性解析は、当初はプラントの一部についての詳細な解析に使用されたが、プラントモデルの開発が進むにつれ、つなぎ合せを行ない模擬範囲の拡大が図られている。

これらのプラント特性解析技術の積み重ねを生かし、火力発電所の自動化への計算機適用技術を活用して訓練用シミュレータを開発し、1号機を北海道電力株式会社から受注し、昭和57年に納入した。続いて2号機をオーストラリア国クイーンズランド州電力局からも受注した。これらの内容の概要について以下に説明する。

3 訓練用シミュレータの機能と特徴

運転員訓練用シミュレータのもつ機能として次の四つがある。

- (1) プラント起動停止操作訓練
- (2) 日常運転操作訓練
- (3) プラント異常時対応処理訓練
- (4) シミュレータ訓練用機能

(1)の起動停止操作は、運転員の基本的操作で最も重要なものである。(2)の日常運転操作とは、通常の負荷運転中に行なう操作を中心としたもので、予備機との切替えや保修のための片系列運転などである。(3)は運転の基本を習得した後の応用操作である。プラントに異常が起きたときの原因追求法や対処方法を学ぶもので、実機ではなかなか経験できないこと

* 日立製作所電力事業部

** 日立製作所大みか工場

*** 日立製作所日立研究所

**** バブコック日立株式会社呉工場

年 代		昭和30年代		昭和 40 年 代		昭和 50 年 代	
項 目		後 半	前 半	後 半	前 半	後 半	
シ ミ ュ レ ー シ ョ ン 解 析 実 績	ア ナ ロ グ 線 形 モ デ ル	ボイラ・タービン負荷制御解析 ● 超臨界圧ボイラ動特性解析 ● 貫流ボイラ制御特性解析 ● ボイラ並列運転時特性解析					
	ハイブリッド 非線形モデル	ボイラ・タービン起動特性解析 ● ボイラ起動DDC特性解析 ● コンバインドプラント制御特性解析 ● D-EHG制御特性解析					
	ディジタル 非線形モデル	ボイラ・タービン詳細解析 ● タービンDDC特性解析 ● タービン・バイパス特性解析 ● タービン熱応力制御解析 ● 変圧運転特性解析 ● ボイラ最適制御解析					
シミュレータ 納 入 実 績		▽ (昭45年) 電力中央研究所納め 火力発電所総合全自動化シミュレータ ▽ (昭46年) 自社研究所納め 特性解析用ディジタルシミュレータ				▽ (昭57年) 北海道電力株式会社研修所納め 訓練用シミュレータ ▽ (昭58年) オーストラリア国クイーンズ ランド電力局納め タロン発電所訓練用シミュレータ	

注：略語説明 DDC(ディジタル直接制御)，D-EHG(ディジタル式電子ガバナ装置)

図 1 日立製作所のシミュレーション技術の発展 日立製作所でのシミュレーション技術の発展経緯とシミュレータ納入実績の関連について示す。

を短期間で習得でき、シミュレータの大きな効果となっている。(4)はシミュレータ装置を使う上で便利な道具となる機能で、使用開始前の初期値の設定、現状の状態保持(フリーズ機能)や、何分か前の状態に戻しやり直しをする機能(ステップバック機能^{※1)}、リシミュレーション機能^{※2)}などがある。これらの実施例を 5 章に記す。

訓練用シミュレータの特徴を明確にするため、解析用シミュレータとの比較を表 1 に示す。訓練用シミュレータの使命は、訓練を受ける運転員に実際と同一の動きをしていると感じさせることである。このため、プラント応答の実時間性が最も重要であり、計算機の演算速度が実時間以上にならないように、解析モデルの中で運転操作上関連が少なく、全体的な特性に影響の少ない部分の省略又は簡素化や、表示出力の高速化などが必要になる。また訓練用シミュレータでは、操作スイッチで動作するすべてのシーケンスロジックや制御ループも模擬する必要がある点が、解析用シミュレータと大きく異なる点である。

4 シミュレータ計画上の考慮点

4.1 対象プラント

シミュレータの設計に大きく影響を与える項目として、訓練対象プラントを多種プラントにするか、特定プラントにするかがある。多種プラント形の場合には切り替えて使用するプラントの全体的調和が必要になり、シミュレータ用プラントの設計や切替プログラムの設計が必要になる。特定プラント形の場合には、実機との相違が目立つのでモデル精度を上

表 1 解析用シミュレータと訓練用シミュレータの比較 解析用は限られた対象を厳密に解析するのに対し、訓練用はプラント全体を実時間で計算する点に特徴がある。

項 目	解析用シミュレータ	訓練用シミュレータ
システムの特徴	多様な解析が可能のようにフレキシブルなシステム	実際のプラントと同一の構成及び動作をするシステム
モ デ ル 対 象	解析目的に関係する範囲に限られる。	制御装置を含めたプラント全体
モ デ ル の 種 類	プラント動特性モデルと関係ある制御ループモデル	プラント動特性モデル +制御ループモデル +シーケンスロジックモデル
試 算 速 度	制限なし	プラント実時間以内計算終了要
計 算 精 度	高精度が必要 微細な過渡特性も必要	運転員が実感を失わない程度の精度
シミュレータ システム構成	計算機、CRT、記録計など、汎用入出力装置	計算機及び中央制御盤

注：略語説明 CRT(Cathode Ray Tube)

げ、実機特性とのマッチングが容易にできるように考慮を払う必要がある。日立製作所は、次節に示すようにいずれの設計も実績がある。

4.2 モデル化手法

プラント特性を模擬するモデル化手法にも、表 2 に示すように大きく分けて統計モデル法と、物理モデル法の 2 種がある。統計モデル法は、実機データさえあれば内容の詳細は不明でも簡単にモデル化できるという特徴があるが、多種の運転状態に対応できるようにする場合には、運転ケースの増加とともにモデルが複雑化してゆき、特性の調整も困難になる。これに対して物理モデル法は、計算式そのものは多少複雑になるが、プラント特性の厳密なモデル化が可能になる。しかし、すべての部分を厳密に物理式で表わそうとすると、実時間性が失われるため、用途に応じて適切な簡略化が必要にな

※1) ステップバック機能とは、過去の一定期間(例えば10分間)の状態値を一定周期(例えば5分ごと)で記憶しておき、リクエストにより現状を中断し、記憶した過去の状態に戻り、記憶した値を初期値として再試行する機能をいう。
※2) リシミュレーション機能とは、上記※1)と類いのものであるが、相違する点は、過去の状態値だけでなく過去に操作した操作項目も記憶しておき、操作事項も含め再試行させる機能をいう。

表2 モデル化手法比較 統計モデル法は簡便な手法であるが、多様な要求に対応できない。これに対し物理モデルは、多様性はあるが数式が複雑になる。

項 目	統計モデル法	物理モデル法
基 本 式	一次遅れ+無駄時間	マスバランス, エネルギー バランス, モーメントムバ ランス
特 性	実験結果から決定	プラント構造から推定
応 答 の 多 様 性	ケースごとに式を追加して 対応	同一式で対応可能
モデルの拡張変更	ブロック全体の追加変更	部分的な拡張・追加可
モ デ ル の 調 整	全体的傾向だけ調整可	部分的な特性の調整可
モデルの汎用性	機器形式に依存しない。	機器構成に合わせ組替えを 要する。

る。これらのモデル法は、使用目的により適切なものを選択すればよいが、日立製作所では、先に述べた背景から物理モデルをシミュレータ用に改造したものが多く使われており、より厳密さが得られ、プラント特性の調整も行ないやすくなっている。

4.3 プログラム作成法

訓練用シミュレータでは、プラント本体と制御装置のすべてをプログラムで作る必要があり膨大なプログラム量になる。また、これらのプログラムは相互に多量のデータ(次節の第一例の場合、アナログ、デジタル合わせて1万5,000点)のやりとりを行なっている。そこで日立製作所では、モデルの一部を汎用計算機で動作チェックしたり、プログラム間のデータリンケージの適合性をチェックしたりするサポート ツールを準備し、能率向上を図っている。また、各プログラムを機能単位でブロック化し標準化プログラムの積み上げも行なっている。

5 実 施 例

日立製作所で製作した訓練用シミュレータ二例を以下に紹介する。第一例は特定プラント形シミュレータの例で、オーストラリア国クィーンズランド州電力局タロン発電所納めのものである。

その全体構成を図2に、操作デスク写真を図3に、主な機能を表3に示す。本シミュレータは実機と同一特性になるように設計されており、特に精度を上げるため多くの物理モデルが採用されている。例えば、火炉モデルではバーナ段ごと

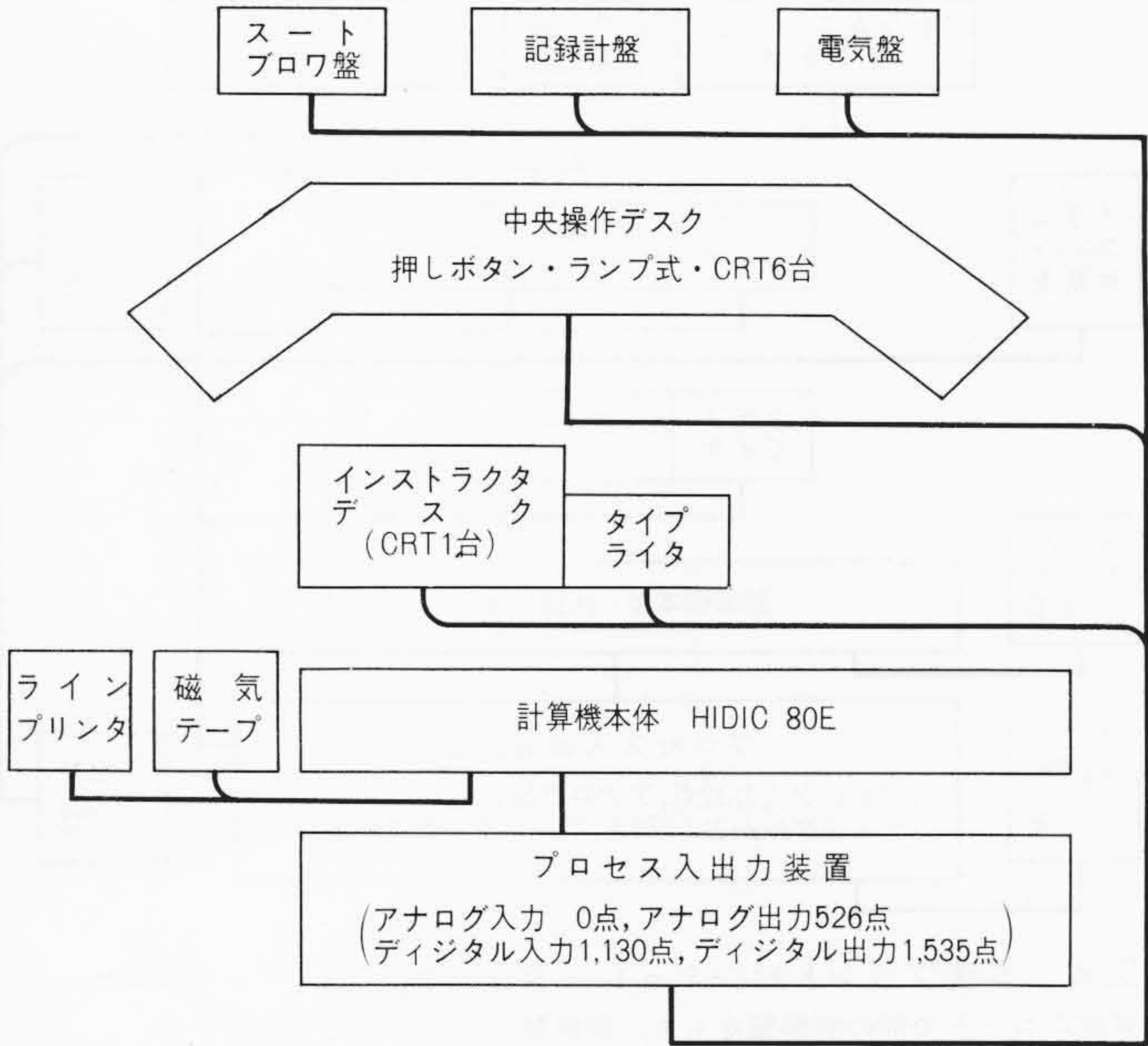


図2 特定プラント形シミュレータ全体構成図 操作デスクは実機と全く同一になっている。

表3 特定プラント形シミュレータの機能 ステップバック、リシミュレーションなどの機能が充実している。

機 能 項 目	内 容
プラント模擬機能	1. ユニット起動停止操作(9モード)
	2. 日常操作(予備機切替, 片系列運転など)
	3. 事故時対応操作(150項目)
訓 練 機 能	1. 初期値設定(固定: 6項目)
	2. スナップショット(100項目)
	3. ステップバック(30分前の状態に戻る。)
	4. リシミュレーション(30分前から再行)
	5. フリーズ(現状状態保持)
	6. 事故条件設定
	7. 各種状態値設定
	8. 不正スイッチ位置表示
	9. 実行時間拡大
	10. 訓練開始許可

の輻射伝熱計算を行ない、バーナ位置による温度特性の相違が表われるようにしてある。機能面では、スナップショット数やリシミュレーションなどの訓練機能が充実している。

第二例は多種プラント形シミュレータの例で、北海道電力株式会社納めのものである。その全体構成図を図4に、訓練室写真を図5に、機能を表4に示す。本シミュレータの特徴

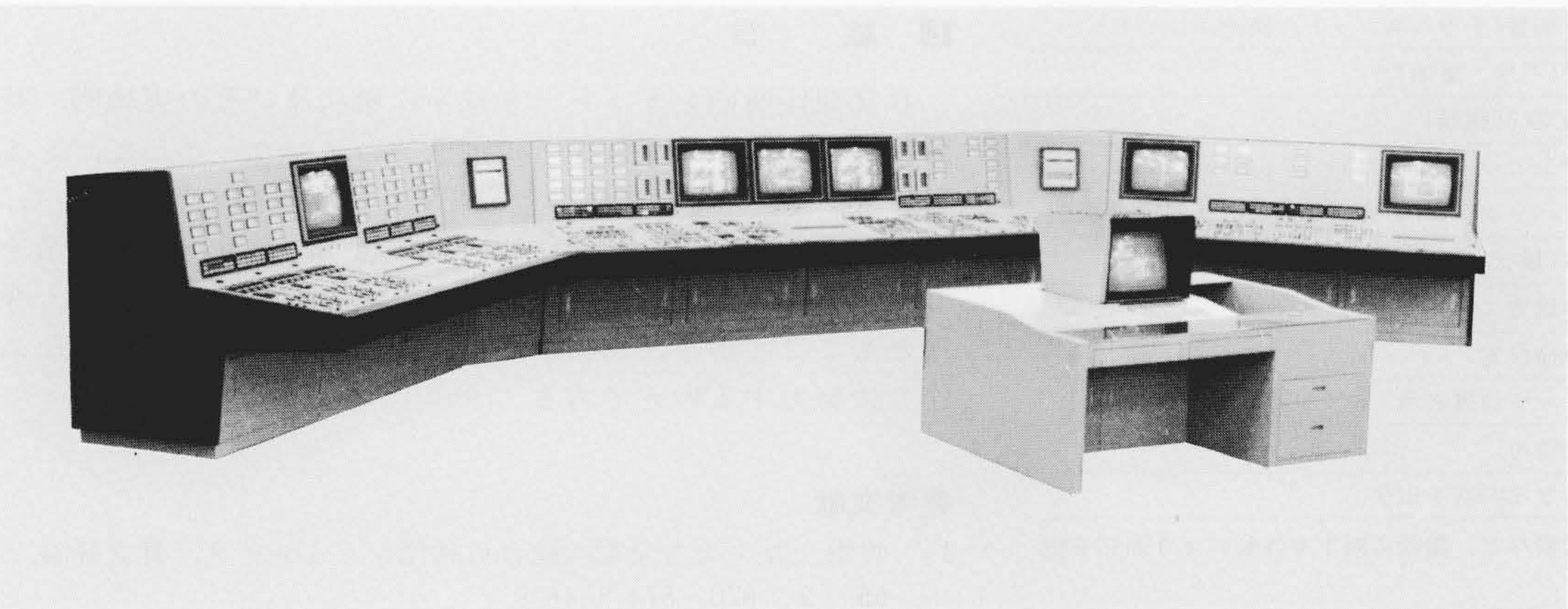


図3 特定プラント形シミュレータ操作デスク 実機と全く同一形状の操作デスクであり、状態表示用に6台のCRTがあり、操作はすべて押しボタンになっている。

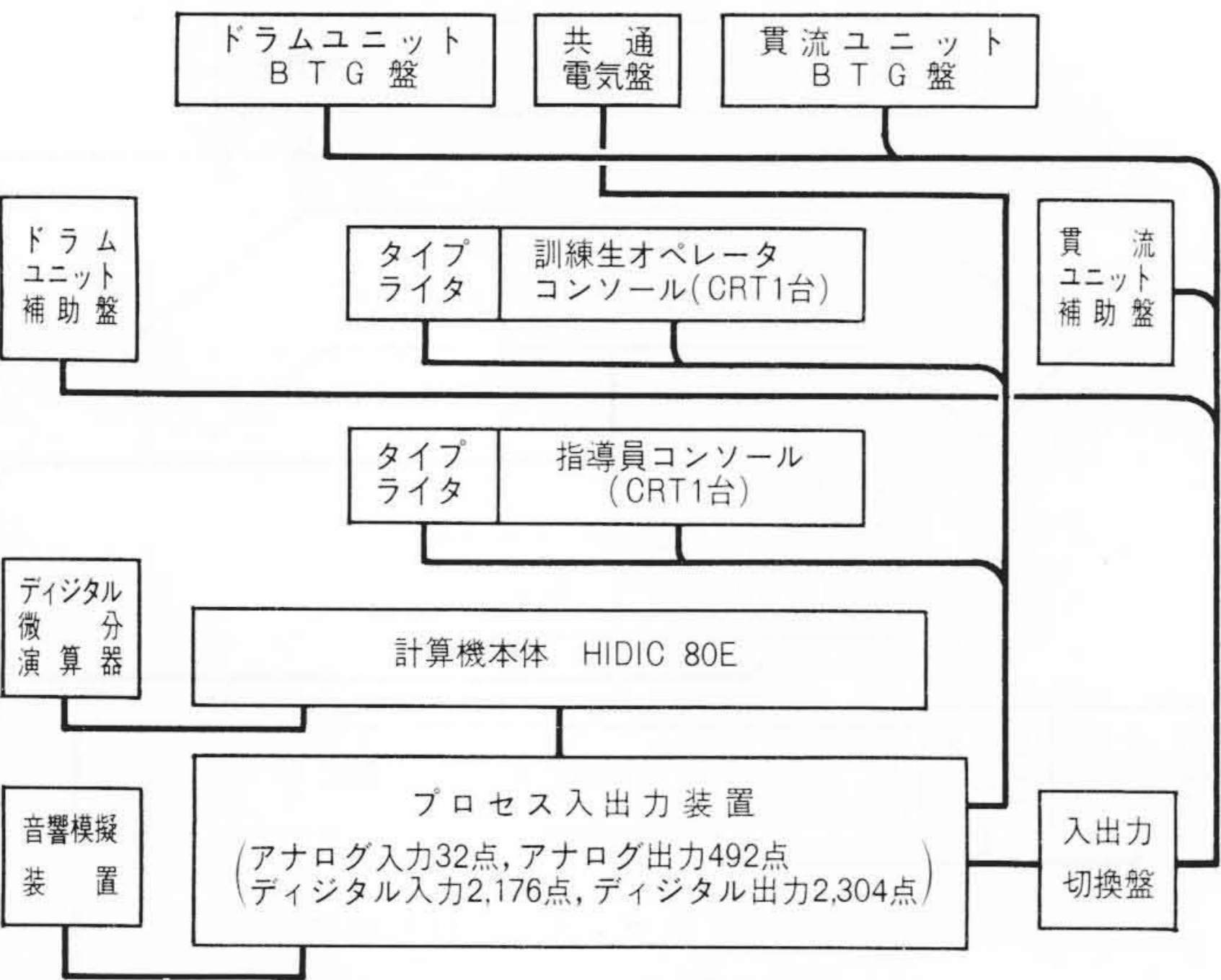


図4 多種プラント形シミュレータ全体構成図 ドラムユニットと貫流ユニットで別の制御盤をもち、訓練開始前切り替えて使用する。

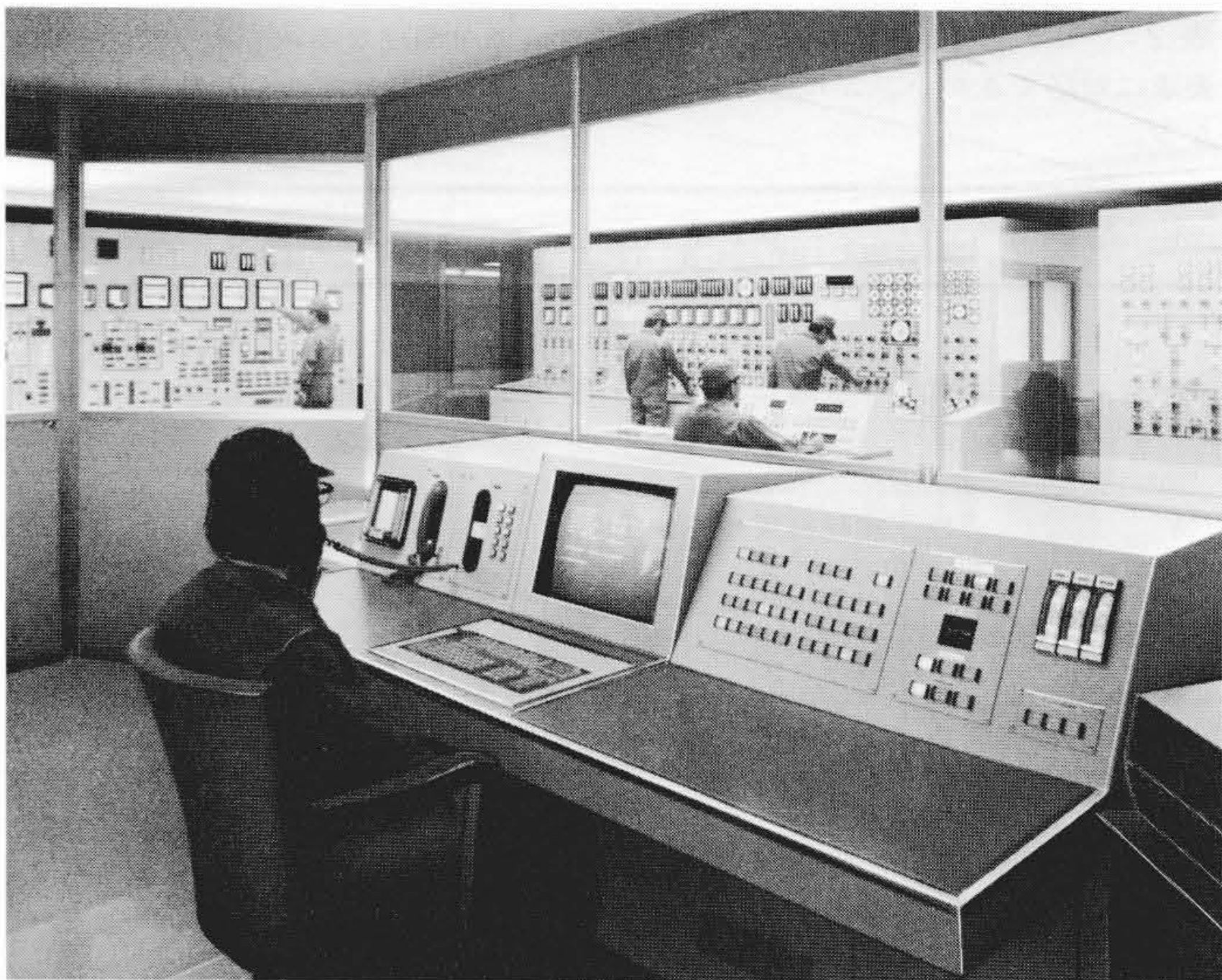


図5 多種プラント形シミュレータ訓練室 多種プラント形シミュレータの顧客での使用状況を、インストラクタ室から撮影したものである。

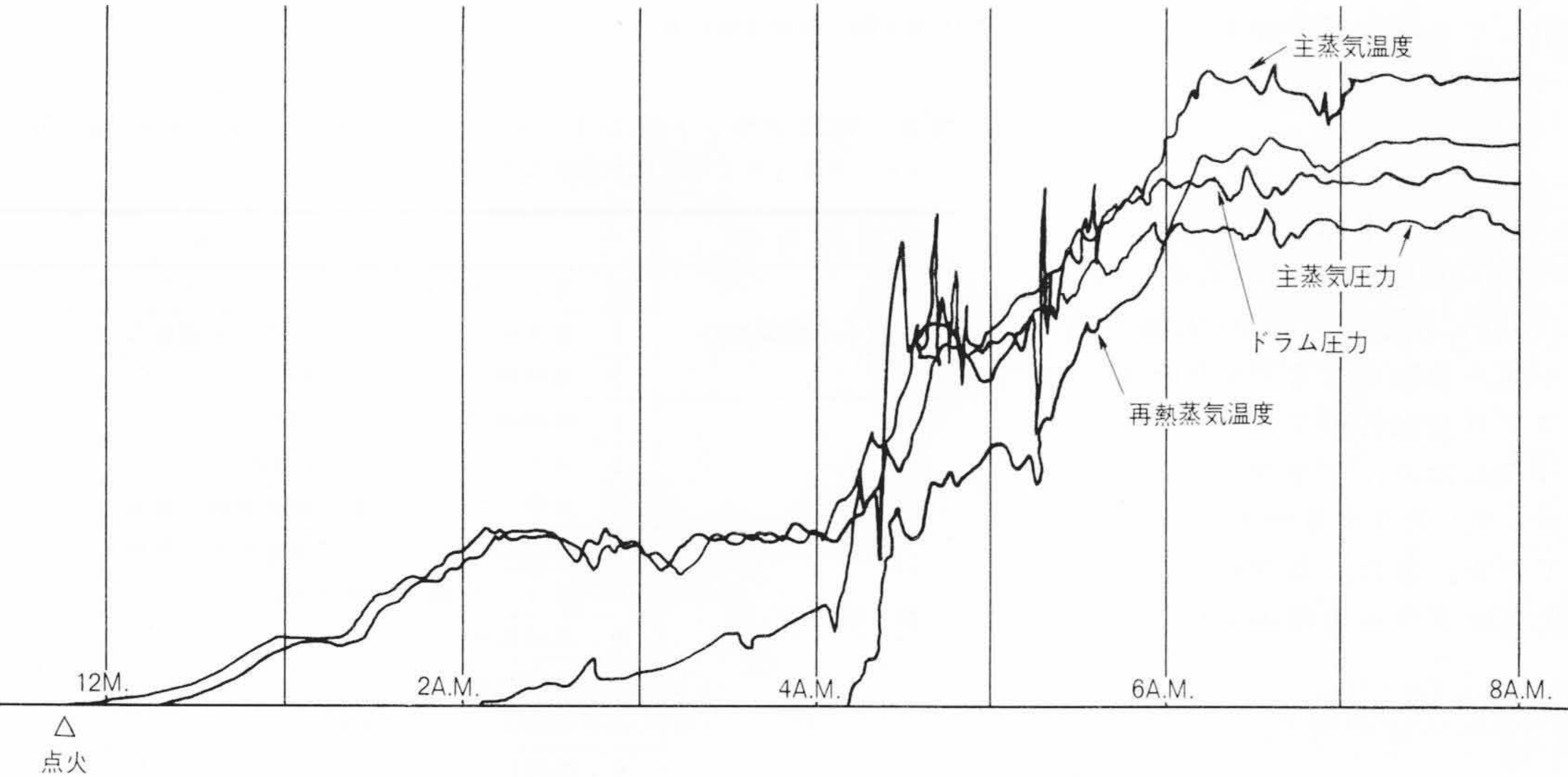


図6 ドラム形プラント起動実績 シミュレータによる昇温昇圧操作で、実機と同様の応答をしていることが分かる。

表4 多種プラント形シミュレータの機能 多種プラント形では、運転モードの切替機能などが増えている。本シミュレータでは、臨場感を出すための機能が完備している。

機能項目	内 容
プラント模擬機能	1. ユニット起動停止操作(9モード)
	2. 日常操作(予備機切替, 片系列運転など)
	3. 事故時対応操作 (ドラムユニット150項目 貫流ユニット 100項目)
訓練機能	1. プラント切替(ドラムユニット, 貫流ユニット)
	2. 燃料切替(石炭, 重油)
	3. 初期値設定(25種類)
	4. スナップショット(1項目)
	5. ステップバック(5分前又は10分前の状態に戻る。)
	6. フリーズ(現状状態保持)
	7. 事故条件設定
	8. 各種状態値設定
	9. 不正スイッチ位置表示
	10. 訓練開始許可
音響模擬機能	安全弁噴出音などの音を出す。
照明模擬機能	大形補機の起動など、電源に対する外乱により照明を暗くする。

は、最新鋭の超臨界圧変圧貫流プラントや石炭燃焼プラントなど、多種のプラント訓練に対応できるようになっていることである。また多機種へ対応するため、初期値設定機能、プラントモデルとモデルデータの分離など幾つかの考慮が払われている。指導員の省力化のため、訓練実績データの収集、出力の機能も備わっている。本シミュレータのドラム形プラントで起動実績の一部を図6に示す。実機による起動と同じ感触の結果が得られている。

6 結 言

日立製作所のシミュレータ技術の現状及びその実施例、特徴を紹介した。日立製作所は電機総合メーカーとして、シミュレーションによるプラント特性解析技術に長い歴史をもち、プラント機器の設計・製作技術を応用し、それぞれの特徴をもった2セットの訓練用シミュレータの製作実績を得た。今後ともここで得られた経験を積み重ね、より優れたシステム作りに努力する考えである。

参考文献

1) 竹内, 外: 火力発電所総合自動化シミュレータ, 日立評論, 55, 9, 870~874(昭48-9)