

# 貫流形石炭火力運転訓練シミュレータ

## The Training Simulator for One-through Type Coal Fired Thermal Power Plants

近年、火力プラントの自動化は著しいものがあるが、それに伴って運転訓練用シミュレータのニーズも高まっており、機能的にも高機能化の方向にある。

電源開発株式会社では次の特長を持つ貫流形石炭火力運転訓練シミュレータを構築し、現在、若松火力技術研修所で研修に使用中である。

- (1) コンパクトな設備で実機操作感覚で操作でき、かつ訓練効果をあげるため、3プラント切替方式とした。
- (2) マルフアンクション、誤操作をどの時点で発生させても実機同等の動作をさせるため、モデルは物理式で対応した。
- (3) 訓練範囲を広げるため、現場操作盤を設けた。
- (4) そのほか、自動起動・停止機能、保守訓練機能、特殊操作、運転条件変更機能を持たせ、臨場感あふれる装置を構築した。

高尾萬喜雄*	Makio Takao
浴 百合雄**	Yurio Eki
小川正之**	Masayuki Ogawa
村松 勝**	Masaru Muramatsu
大津 巧***	Takumi Ôtsu

## 1 緒 言

火力プラントの大容量化、複雑化とともに運転自動化も急速に進んでおり、特に最近では計算機による自動起動・停止がほとんどのプラントで行われている。したがって、運転員自身による起動・停止の機会も少なく、またプラントの信頼性も向上し、トラブルを実際に体験する機会も少なくなっており、プラントに異常が発生した場合の対応能力の維持が重要な課題となってきている。このため、最近では運転支援システムのニーズが強く叫ばれるようになってきているが、これも機械(計算機)に頼ることであり、運転員としては基本的にプラントの特性、制御機能をよく理解し、どのような事態が発生しても的確な運転操作ができることが重要である。

運転訓練シミュレータは、運転員に運転操作を習熟させるのに最も適している装置と考えられ、現在では各電力会社に導入され、運転員の訓練が行われている。

特に近年、火力発電では石油から石炭、ガスへと比重が移っており、本稿では今後の火力発電の主流と考えられる貫流形石炭火力の運転訓練シミュレータについて述べる。

## 2 基本仕様

シミュレータの仕様決定にあたっての基本的考え方は以下のとおりである。

### 2.1 対象プラントと構成

貫流形石炭火力発電プラントを対象とし、スペース効率向

上を図るため、ハードウェアの共用化を図った3プラント切替方式とした〔対象発電所：電源開発株式会社竹原火力発電所3号機、松島火力発電所1号機、石川石炭火力発電所1号機(以下、竹原3号機、松島1号機、石川1号機)と言う。〕

### 2.2 運転訓練機能

シミュレータを有効に利用するため、次の訓練が行えるものとした。

- (1) 手動(シーケンサ機能を含む。)によるプラント起動・停止
- (2) APS(Automatic Plant Start-up system)によるプラント起動・停止、通常運転
- (3) 異常発生(以下、マルファンクションと記す。)監視とその対応操作。マルファンクション項目は、各プラント約160項目設けた。
- (4) 給水加熱器バイパス・復旧など特殊操作
- (5) 外気温度、海水温度の変化、石炭性状(水分、硫黄分、窒素分など)の変更など、運転条件変更時の対応操作
- (6) 温度スイッチ、圧力スイッチの故障など、機器故障時の対応操作。各プラント約30項目設けた。

### 2.3 保守訓練機能

APC(Automatic Plant Control system)のハード故障、パラメータ調整など保守訓練を行うため、ハードウェアAPCを設けた。

\* 電源開発株式会社 火力部 \*\* 日立製作所 大みか工場 \*\*\* 日立エンジニアリング株式会社

## 2.4 インストラクタ機能

訓練を効率よく行うため、次のインストラクタ機能を設けた。

- (1) 初期値設定機能……反復練習のための初期値設定機能で任意の時点のプラント状態値を記憶し、いつでも取り出すことができる。
- (2) フリーズ機能……インストラクタから訓練員への説明、訓練員の考える余裕を与えるため、シミュレーションを一時中断できる。
- (3) ステップバック機能……ある状態に戻し、その時点から再度シミュレーションが行える。
- (4) リプレイ機能……ある状態に戻し、その時点から訓練員の操作を含め、シミュレーションを再現できる。
- (5) 倍速シミュレーション……昇温などのように、その間特に運転員の操作が必要でなく、また長時間を要する動作を早送りできる。
- (6) 事故、異常の注入機能……発生時刻、異常パターンなどの設定を行うことができる。

## 2.5 臨場感向上

音、光、画像など実際の操作時に伴う現象は臨場感を上げるため重要なものであり、次の装置を設けた。

- (1) 音響模擬装置……現場操作時での機器の動作音、安全弁吹出音などの音響模擬を行った。
- (2) 照明模擬装置……大形補機起動時の減光、所内全停時の非常灯点灯など照明模擬を行った。
- (3) 炉内、排煙監視テレビジョン……点火トーチ、重・軽油、石炭の燃焼状態、および煙突の状況を常時監視できるようにした。

## 3 プラント切替方式とコンパクト化

実機に対応したレプリカタイプという性格上、訓練効率を上げるには複数のプラントのシミュレーションができるのが望ましい。これを実現するにあたり、全体をコンパクトにし、かつコスト低減を図るためにハードウェアの共用化を図った。シミュレータの外観を図1に示す。

### 3.1 対象プラント

貫流形石炭火力発電所を対象として、3プラントのシミュレーションができるものとし、その対象プラントの概略仕様を表1に示す。

### 3.2 切替方式と全体構成

- (1) ハードウェアのコンパクト化

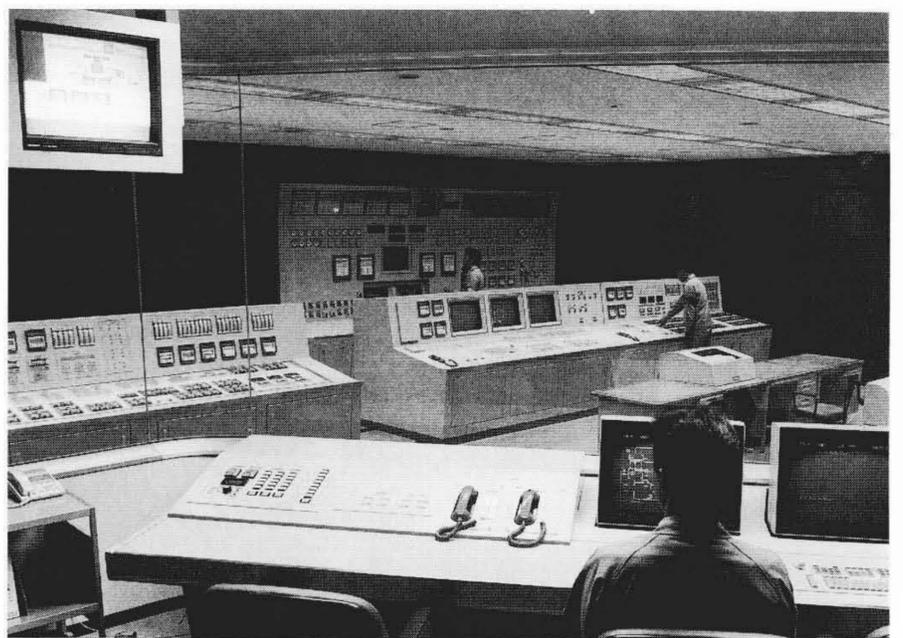
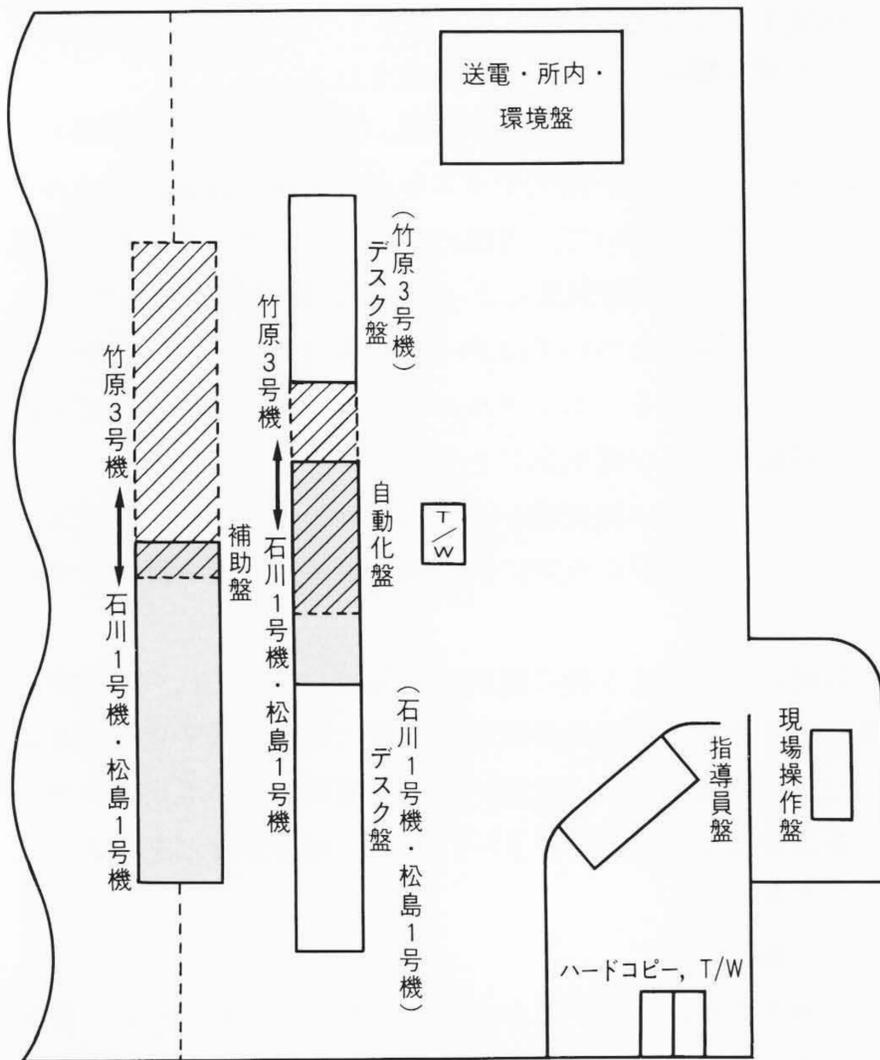


図1 シミュレータの外観 指導員室から訓練室を見たものである。

表1 対象プラントの概略仕様 対象プラントは電源開発株式会社松島1号機、竹原3号機および石川1号機である。

項 目		松島1号機	竹原3号機	石川1号機
ボイラ	形 式	定圧超臨界圧貫流	定圧超臨界圧貫流	変圧亜臨界圧貫流
	蒸 発 量	1,640 t/h	2,300 t/h	490 t/h
	蒸気条件	25,007 kPa{255 kg/cm <sup>2</sup> g} 543 °C/541 °C	25,007 kPa{255 kg/cm <sup>2</sup> g} 543 °C/541 °C	20,104 kPa{205 kg/cm <sup>2</sup> g} 566 °C/566 °C
	燃 料	石炭専焼 (重油50%混焼可)	石炭専焼 (重油50%混焼可)	石炭専焼 (重油50%混焼可)
タービン	形 式	くし形3車室4流排気 再熱復水式	並列形4車室4分流 再熱復水式	くし形3車室2流排気 再熱復水式
	定格出力	500 MW	700 MW	156 MW
	蒸気条件	24,124 kPa{246 kg/cm <sup>2</sup> g} 538 °C/538 °C	24,124 kPa{246 kg/cm <sup>2</sup> g} 538 °C/538 °C	18,633 kPa{190 kg/cm <sup>2</sup> g} 566 °C/566 °C
発 電 機	形 式	横軸円筒回転界磁形	横軸円筒回転界磁形	横軸円筒回転界磁形
	定格出力	566 MVA	P : 494 MVA S : 306 MVA	184 MVA

注：松島1号機(電源開発株式会社松島火力発電所1号機)、竹原3号機(電源開発株式会社竹原火力発電所3号機)、石川1号機(電源開発株式会社石川石炭火力発電所1号機)  
略語説明 P(Primary), S(Secondary)



注：略語説明 APC (Automatic Plant Control system)  
T/W (Typewriter)

図2 全体構成 自動化盤、補助盤は移動機構を持ち、石川・松島各1号機の訓練時は左に、竹原3号機の訓練時は右に移動(斜線部)する。

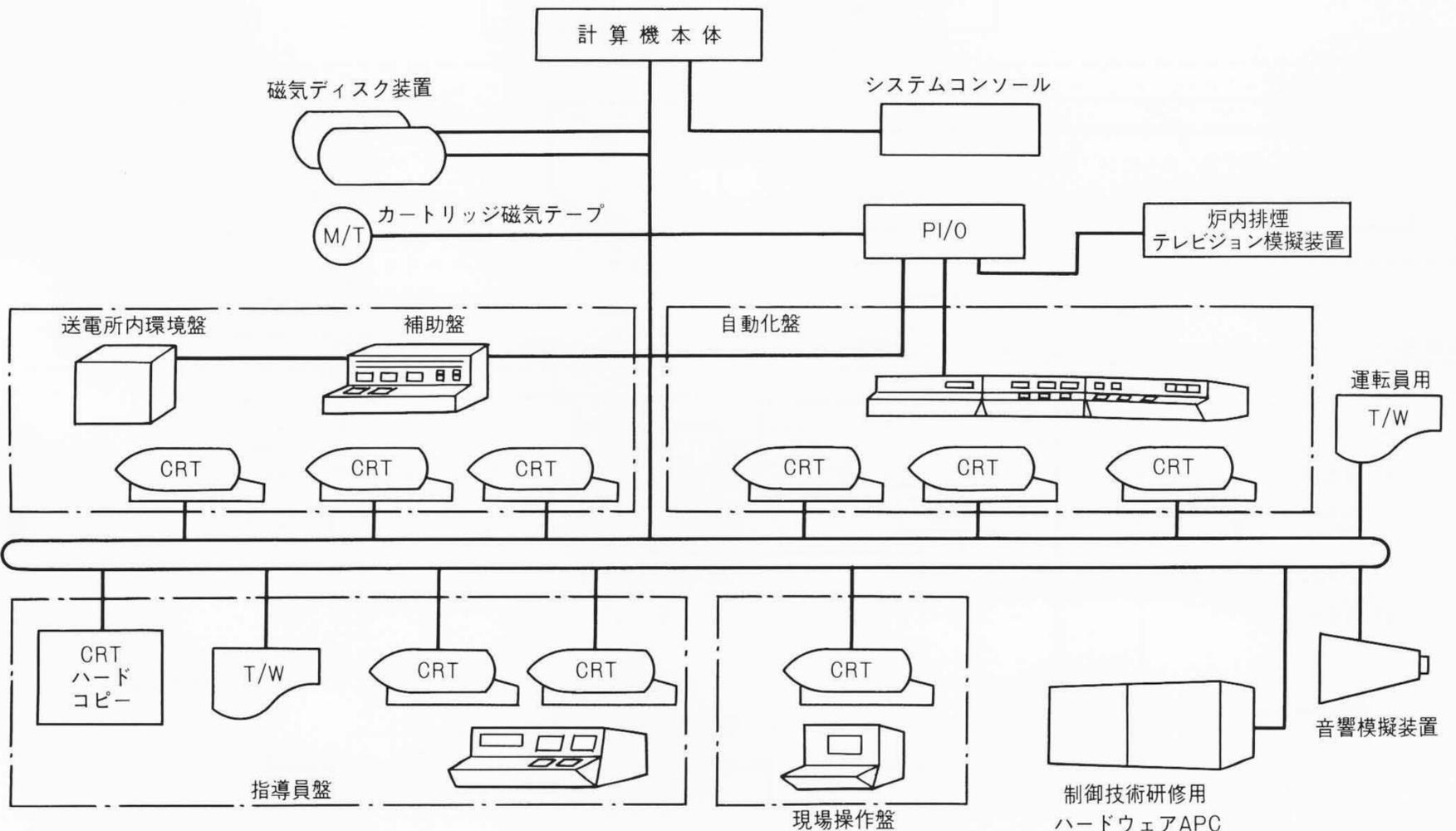
ハードウェアは基本的には共用とし、一部は切り換えることにした。まず、3プラントのデスク盤、自動化盤、送電・所内・環境盤、補助盤の各操作スイッチ、押しボタンスイッチ、指示計、記録計などの分析によって共用化の検討を行ったが、デスク盤だけは相違が大きく共用化を断念し、他の盤は共用化の見通しを得た。

(2) 全体配置と移動機構

デスク盤を3プラント分設置すると、実プラントの配置と一致させることが難しいので、3プラントの中で類似性の多い石川1号機と松島1号機を共用盤とし、竹原3号機と二つに分け、かつ移動機構を設けた。この構成を図2に示す。同図で、デスク盤(竹原3号機)とデスク盤(石川1号機、松島1号機)は固定とし、石川1号機または松島1号機をシミュレーション中は移動機構のある補助盤と自動化盤を左側に移動し(網伏せ部)、自動化盤とデスク盤の後方に補助盤が位置し、同様に竹原3号機をシミュレーション中は右側に移動し(斜線部)、実プラントと違和感がないように配慮した。計算機システムは完全に共用化を図った。計算機システムの構成を図3に示す。

(3) パッチ盤のCRT操作化

上記(1)~(2)の方策によって盤面を減らし、コンパクト化を図ったが、補助盤には手動操作用のパッチ盤のスペースがかなり大きく、さらに補助盤のコンパクト化を図るためパッチ



注：略語説明 PI/O (Process Input Output)

図3 計算機システム CRTの配置を主体とした計算機システムの全体構成を示す。

盤を主体としてCRTのタッチオペレーション化を行った。これにより補助盤の大きさを約50%縮減した。CRTの画面数は1プラント当たり約60枚である。

#### 4 シミュレーションモデル

##### 4.1 モデル化の基本的考え方

プラントの正しい運転操作を修得するには、発電所の動特性についての正しい知識を習得することが必要であり、シミュレータではこの動特性を正しく模擬することがきわめて重要である。プラントを模擬するには、統計モデル法と物理モデル法の二つの方法が考えられる。前者はプラントのデータさえあれば、プラントの動特性はわからなくてもモデル化できるが、種々の運転状態に対応するにはモデル構造が複雑になり、調整も困難になる。また、逆に後者は動特性の数式化が複雑であるが、種々の運転状態への対応がしやすいという特徴がある。本シミュレータは、マルファンクションがどのようなタイミングで注入されても、また誤操作時にもそれに対応するしかるべき動作を行うなどの高いフレキシビリティを持たせるため、中枢部はすべて物理モデル法によった。

##### 4.2 モデルの構成

モデルは機械モデル、制御モデル、センサモデルおよびバルブモデルで構成され、全体構成を図4に示す。

###### (1) 機械モデル

機械モデルは図4に示すようにボイラ、タービン、発電機、給復水系、通風系、ミルから構成される。

ボイラ系統および給復水系統は、基本的には熱交換器として模擬できる。水・蒸気やガスなどの流体は質量、エネルギーバランス式を用いて、各部の密度、エンタルピーおよび流量を求め、さらに蒸気表によって温度、圧力に変換している。タービン発電機についてはタービン入口の温度、圧力から出力エンタルピーを、エンタルピー落差と流量からタービン出力、回転数および電気出力をそれぞれ計算している。

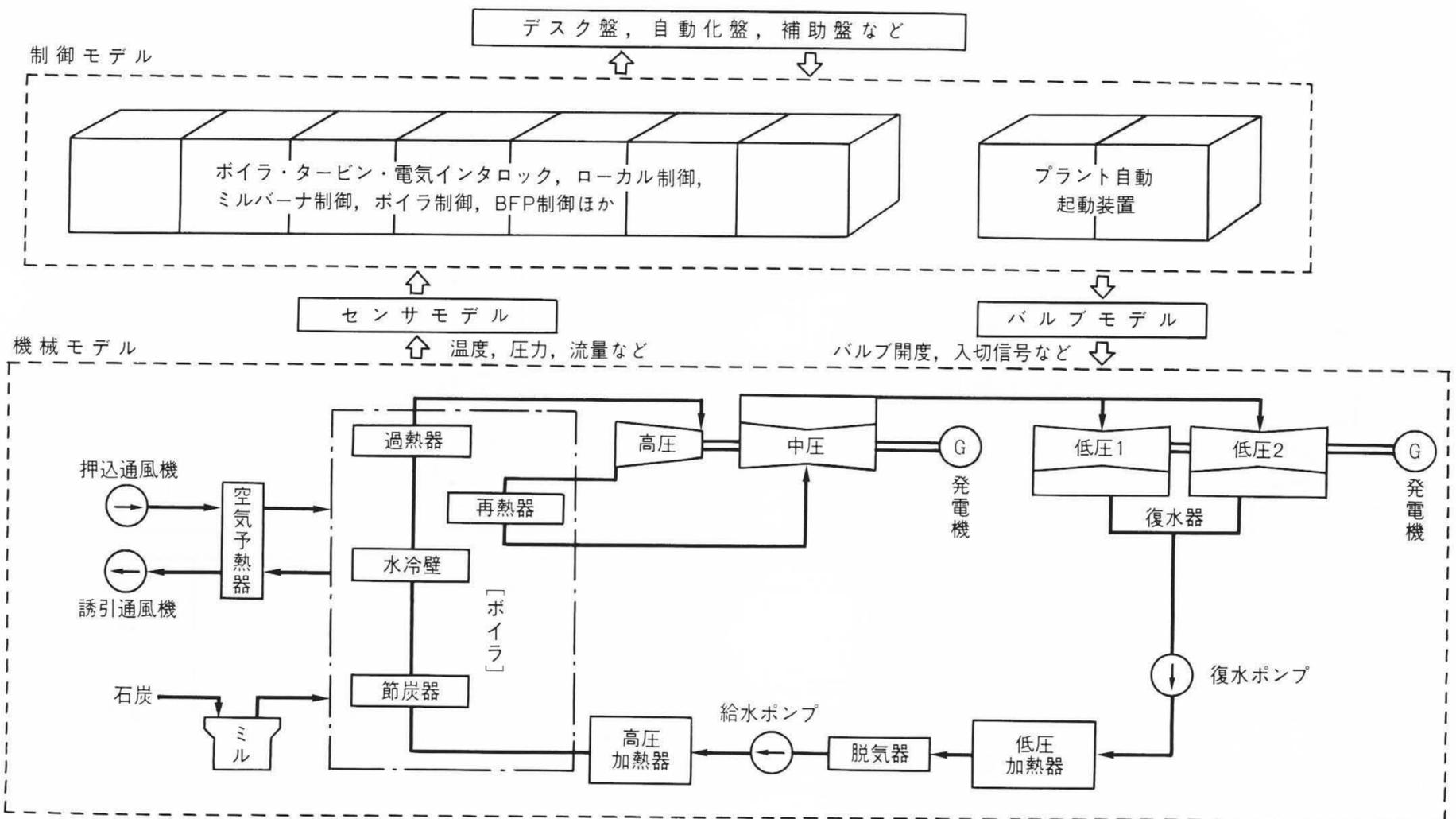
ミルについては給炭機からの石炭供給量、粉碎プロセス、一次空気の状態から火炉に入る微粉炭量、温度を計算している。

石炭については5種の銘柄の石炭、およびこれらの混焼を模擬するため、運転条件変更の一部に石炭性状変更機能を設けた。インストラクタ機能で石炭の種別および混炭率を指定することによって、カロリー、水分、硫黄分などを変えることができる。

###### (2) 制御モデル

制御モデルは、図4に示すようにボイラ、タービン、電気インタロック、ミルバーナ制御、ボイラ制御、ローカル制御などで構成している。

最近の制御装置はデジタル化されているものが多いが、リレー、電子回路から成る制御装置もあり、これらに対し演



注：略語説明 BFP (Boiler Feed water Pump)

図4 モデルの構成 竹原3号機のモデル構成の概念を示す。

算要素をマクロ命令化したものを用いてモデル化した。また、シミュレータは実時間シミュレーションが必要条件なので、どのような場合(例えば、全燃料遮断などは多くの処理を必要とする。)でも応答の遅れは許されない。したがって、処理時間の短縮化を図るため、バイナリー(ON・OFF)ロジックは複数のサブロジックに分割し、当該ロジックに関連する入力に変化があった場合だけ、そのサブロジックを処理するイベントトリガー方式を用いた。プラントの模擬と同様に基本的には実機のロジックどおりにモデル化を行ったが、励磁装置、同期投入装置など、実機の制御装置がアナログで構成され、きわめて動きの速いものは特別な構成が必要であり、一部はハードウェアによって対処した。

### (3) センサ、バルブモデル

実プラントでは、プラントと制御装置のインタフェースには実に多くの種類がある。例えば、プラントからの出力は圧力、温度、流量などの物理量が電気信号に変換されたり、ある量以上または以下でON・OFF(ヒステリシスを持つ場合もある。)するスイッチなどきわめて多種である。また、制御装置の出力はバルブも調節弁、ソレノイド弁、電動弁など種々のものがある。これらを分析し、標準化してセンサモデル、バルブモデルを作製した。これらのモデルは、種々のデータをFIF(Fill in the Form)に記入するだけで構成できるようにした。

## 4.3 実 例

竹原3号機で100%負荷運転時、ボイラ給水ポンプがトリッ

プした場合のランバックの事例を図5に示す。BFP(Boiler Feed water Pump)が1台となり、発電機出力、節炭器入口給水流量が約50%、主蒸気温度の一時的上昇、主蒸気圧力のじょう乱がみられ、時間とともに整定している。

## 5 マルファンクションと現場操作

### 5.1 マルファンクション

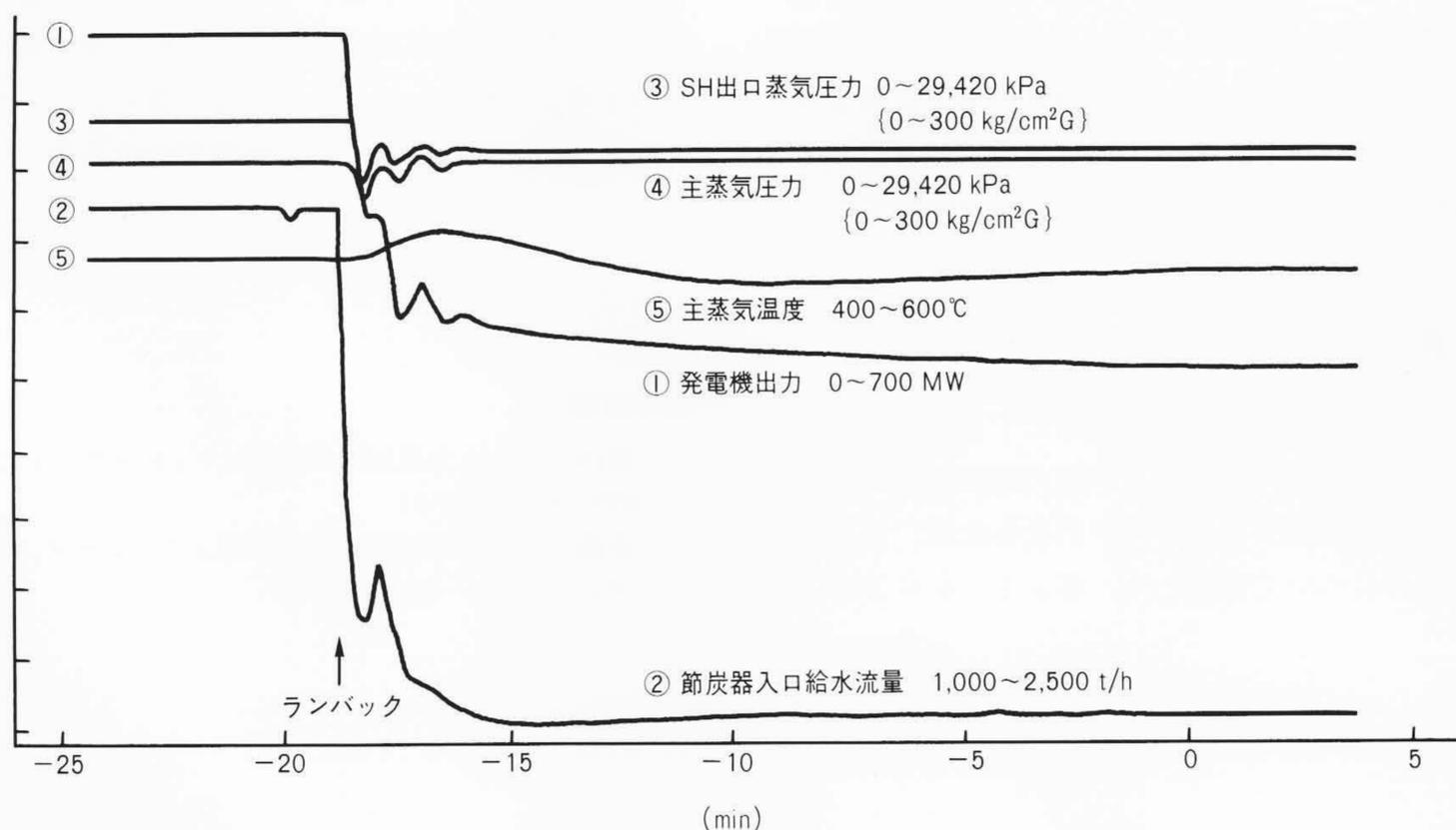
運転訓練シミュレータの大きい目的の一つに事故対応訓練がある。本シミュレータでは、各プラント当たり約160個のマルファンクションを設定し、内容もミル、ボイラ、タービン、電気、制御装置など多方面にわたるものとした。

マルファンクションのうち、バルブスティック、補機トリップなどON・OFFもあるが、ボイラチューブブリーク、炉内汚れ、温度上昇などは変化率、最終値を任意に設定でき、また制御装置異常などのハンティング現象も振幅を任意に設定でき、どのような事故の程度に応じてシミュレーションを可能とした。

マルファンクションと類似なものとして、通風系片系列停止・復旧、給水加熱器バイパス・復旧、復水器逆洗などの特殊操作は各プラントに20件設定した。

### 5.2 現場操作

事故が発生した後のプラント挙動に対して、運転員が状況を判断して事故の復旧操作を行う訓練は、シミュレータとして重要なものである。復旧操作も中央操作室でできるものが多いが、現場での状況確認および操作を伴うものもかなりある。



注：略語説明 SH(過熱器)

図5 シミュレーション例 竹原3号機でA-BFP(ボイラ給水ポンプ)トリップ時のランバックの挙動を示す。

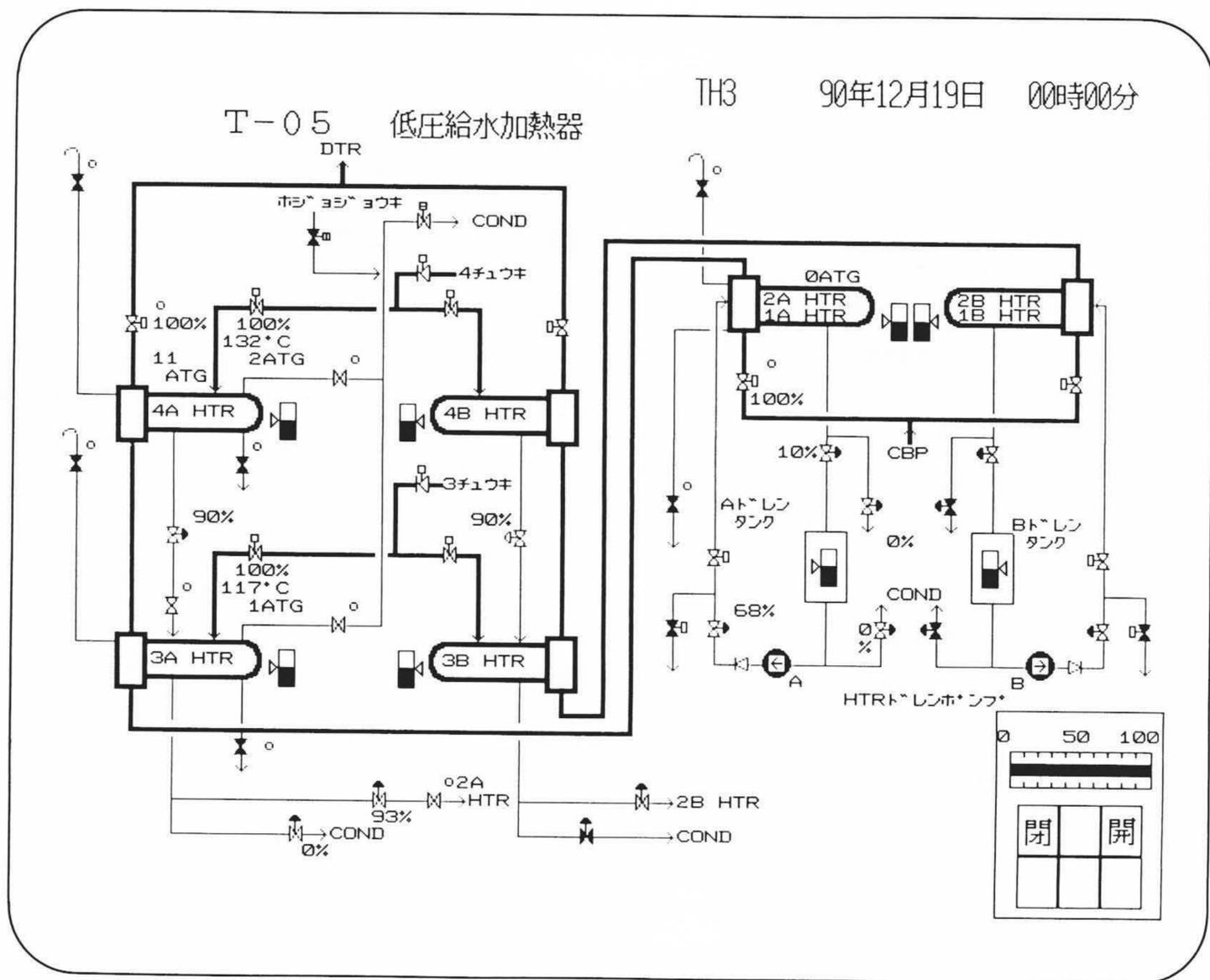


図6 現場操作盤CRT 現場操作盤CRTの例(低圧給水加熱器系統)を示す。

また、特殊操作の場合は、電源ロック・解除、ドレン弁、空気抜き弁の開閉など現場操作を伴うものが多く、これらの訓練には現場操作が必要である。

マルチファンクション、特殊操作の現場対応操作用として、CRTオペレーション機能を持った現場操作盤を設けた。現場操作盤の事例(低圧給水加熱器系統)を図6に示す。現場画面は1プラント当たり約60枚であり、臨場感を増すためおのこの現場画面に対応して、その現場に対応した暗騒音を出すようにした。

## 6 結 言

訓練盤、計算機システムなどハードウェアを共用化し、モデルを3プラント用意して3プラント分の運転訓練が可能な貫流形石炭火力運転訓練シミュレータの全体仕様、およびそのうちの主なものについて詳述した。本シミュレータは、対

象が最近の貫流、石炭プラントであること、3プラント模擬、物理式モデルによるフレキシビリティ、広い訓練範囲などの点で最新鋭の高級運転訓練シミュレータと考えている。

訓練用シミュレータは、今後の諸環境を考慮すると必要な設備で、将来は発電所設置のシミュレータの導入が増加するものと考えられる。今後とも、より良いシミュレータのあり方、効率的な製作方法など、鋭意努力する考えである。

## 参考文献

- 1) 福島，外：火力運転員訓練用シミュレータ，日立評論，65，9，629～632(昭58-9)
- 2) 佐藤：火力発電所運転員訓練用シミュレータ，電気学会雑誌，103，6，529～532(昭58-6)