Japan Society for Simulation Technology

≪技術報告≫

火力発電所用レプリカタイプ運転訓練シミュレータ

小平　高敏*・久保　岳明*

ABSTRACT A replica type operator training simulator was developed for a coal fired fossil power plant.

This system simulates the computerized central control board and the related auxiliary panels in the central control room by means of three sets of process computers. The system, replicating a referenced plant not only for the appearance of its panels but also for their response to operator's manipulation, is a useful tool for operator training.

The simulation models are constructed based on the physical laws and this results in accurate responses to extensive malfunctions. The system realizes a real time response even in the case of large scale plant trips by means of a high speed processing oriented software architecture.

1. 緒　言

1970年代の2度にわたるオイルショックは発電プラントの燃料構成に大きなインパクトを与え，その結果火力発電所では石油から石炭のへの燃料シフトが行われる一方，負荷変動の範囲が相対的に小さい原子力発電の構成比率増大により，火力発電所が日々の電力需要変動を吸収するよう求められることとなった．このため火力発電では主蒸気の流量に加えて圧力を変動させ負荷変動幅を拡大させる変圧運転が普及するなど運転技術が高度化し，運転員の効率的訓練が求められている．さらに1979年の米国 TMI (Three Mile Island) 事件によりプラント異常時に対する運転員の対応を日頃から訓練しておくことの重要性が広く認識されるところとなり運転訓練シミュレータへの期待が増大することとなった．

海外においても通常の電力需要の伸びに対応するだけでなく，石炭コストの相対的優位性を活用する目的で産炭地に火力発電所を建設し，アルミ精錬等の電力多消費型産業を興す例が増え，その場合従来工業化されていない地域に発電所を建設する場合も多く，熟練運転員の不足解消のために運転シミュレータを併せて設置することが多くなっている．

シミュレータには従来より大別して3種類あり，特定の発電所に対象を限定せずに一般的な運転方法を訓練する汎用運転訓練シミュレータ，特定の発電所を模擬したレプリカタイプ運転訓練シミュレータ，およびプラント特性研究評価用のシミュレータである．このなかで運転員訓練に最も有効なものがレプリカタイプ運転訓練シミュレータであり，次の点が特徴である．

①中央監視操作盤ほか訓練の範囲に含まれる盤の外見が対象プラントと同一である．

②通常運転だけでなく，各種のプラント異常を対象プラントと同様に所定の精度範囲内で模擬する．

今回石炭焚き350MW出力の火力発電所を対象に，上記の項目に加え，次の特色を備えたレプリカタイプ運転訓練シミュレータを新規に開発したので以下報告する．

① CRT を主体とした計算機化中央盤，計算機によるプラント自動起動システムを含めた全ての中央計装をシミュレーション

②高度な制御機能を持つ総合ディジタル化制御装置を実機と全く同一のロジックでシミュレーション

③シミュレーションの計算負荷が高くなるプラントトリップ時においても，従来困難であった実時間応答を実現し，運転員の異常時対応能力の向上に役上てる

A Replica Type Operator Training Simulator for a Fossil Power Plant. By *Takatoshi Kodaira* and *Takeaki Kubo* (Hitachi Ltd.).

* 日立製作所

NII-Electronic Library Service

Japan Society for Simulation Technology

2. シミュレーション・モデル

2.1 火力発電プラントの概要

火力発電プラントは大別して，エネルギーを発生する蒸気ボイラ系と，熱エネルギーを機械エネルギー，電気エネルギーへと変換する蒸気タービン，発電機系より構成され，これに種々の補機，計装制御装置が付随している．近年燃料の石油から石炭への移行に伴い運転操作が石油焚きに較べ複雑な石炭焚き火力の運転訓練が重要となっている．**図1**には石炭焚きの代表的なプラント構成を示した．中央給電所よりの負荷指令値に基づきボイラ自動制御装置が石炭供給量を定め，微粉炭機により粉砕，空気と混合され，燃料ガスとなりバーナに送られ火炉内で燃焼する．この時発生する熱を火炉内水壁，過熱器および再熱器で熱交換し，蒸気タービンに導く．復水器にて液化した水蒸気はタービン各段よりの油気と熱交換しながら再び給水ポンプによりボイラへ導かれ，ひとつの熱サイクルを構成する．またこれに付随する計装制御系をみると，近年火力発電所に対する負荷変動の要求が厳しくなるのに伴い高度化複雑化しており，マイクロコンピュータを利用したディジタル化計装が主体となっている．

2.2 モデル作成の基本方針

本システムの目的は教育訓練装置であり，運転員が遭遇すると予想されるプラント状態は全て正確にシミュレーションしなくてはならない．すなわち通常の起動停止操作，各種補機の切替操作，負荷変動操作および各種異常状態（マルファンクション）に対しシミュレータが実プラントと同様の応答を示す必要がある．各種異常状態の各シミュレーションを考えてみると，実プラントと同様の個所で異常を発生させ，実プラントと同様の経路でその影響が波及することを実現しなくてはならない．すなわち，プラント機器の故障か，センサの故障かあるいは制御装置内部論理の故障かを正確にシミュレートし，かつその影響が流量，圧力，温度などのプラント物理量，それらの計測値，制御装置内部変動にどのように現われているかを求める必要がある．この目的のためにモデルの構成にあたってはこれら各変数を明確に区別することとし，次の3区分に分けてモデル化を行った．

(1)プラントダイナミックモデル（ボイラ系，タービン系，発電機系のプラント機械モデル）
(2)制御，インタロックモデル
(3)インタフェースモデル（センサおよびアクチュエータ）

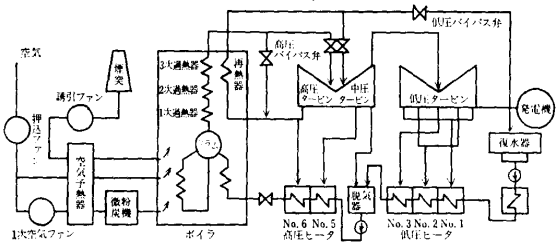

図1 プラント構成図

表1 モデル一覧表

区分		モデル名称
プラントダイナミックモデル	燃料・空気系	微粉炭機 空気予熱器 火炉ドラフト 軽油系
	ボイラ系	火炉ガス温度 蒸気ドラム ボイラ水蒸気
	主蒸気系	ボイラ蒸気管 高圧タービンバイパス系 低圧タービンバイパス系 補助蒸気
	タービン主機	タービン熱力特性 蒸気流量・圧力 タービン制御機構
	タービン補助系	タービン温度 軸伸び，伸び差，軸位置 軸偏心，振動 軸受油圧 発電機温度 グランド蒸気
	給復水系	復水器 冷却水系 復水系 低圧ヒータ 脱気器 高圧ヒータ 給水系 補給水系 水処理系
	電気系	所内系統 外部系統
インタフェースモデル		センサ アクチュエータ
制御・インタロックモデル		バーナ制御 ボイラ制御 タービンバイパス制御 タービンガバナ制御 タービン補機制御 ボイラインタロック タービンインタロック 自動電圧調節系

NII-Electronic Library Service

Japan Society for Simulation Technology

プラントダイナミックモデルは原則として物理式により実現する．これは第1に実プラントデータの実測が不可能な各種の異常状態に対しても妥当な応答が求められること，第2に実プラント運開前に運転訓練を開始するためにも実プラントの実測データ入手前には設計データのみで実プラントに近い特性を出すことを目的としたためである．次の3式を原理式としている．

(1)エネルギー保存則

$V\rho_0 dH_0/dt=\sum H_i F_i-\sum H_0 F_0+Q$

ここで　V：体積，ρ：密度，H：エンタルピー

F：流量，Q：熱量

添字0は出口側，iは入口側を示す．

(2)質量保存則

$F_0=F_i$

(3)運動量保存則

$P_0=P_i+KF_i^2/\rho_0$

ここで　P：圧力

(1)～(3)までの式は流体の圧縮膨張については定常式として扱い動特性を考慮していない．また水の相変化を含む状態決定に蒸気表を検索して求めるものとするほか，火炉内の放射による熱伝達にはシュテファンボルツマンの式，燃焼ガスの対流による熱伝達は実験式によっている．また実プラントでは各部の状態が並列的，同時進行的に変化するが，シミュレータの場合には処理が逐次的となる．このためモデル演算順序を主要エネルギーの流れに沿って定めプラント状態の変化が遅れ時間なしに正しく伝播するようにした．

2.3 プラントダモナミックモデル

プラント機械部分のモデルは**表1**に示すようにプラントの各系統に対応して作られ燃焼プロセスを表わす火炉ガス系，水蒸気の挙動を示す水蒸気系，さらにタービン系，電気系，給復水系等より構成される．モデル式の決定にあたっては運転訓練シミュレータであることを念頭におき短時間（おおねね1秒以下）の過渡応答を正確に表現するよりむしろ運転員に実プラントと同一と認識させることを目標とし下記方針でモデル化してある．

(1)モデル各部の動特性を検討し時定数が1秒以下の部分は静特性として表現する．このことによりモデル演算周期が最短0.5秒程度であっても実時間で安定な応答が得られる．

(2)火炉内ガス挙動，熱交換器内熱伝達プロセス，管部熱伝達プロセス等は本来分布定数系として表現すべきものであるが，計測点の存在する個所を特定することを一義的な目標として集中定数系または区分的集中定数系として表現することとし，計算負荷の増大を抑えた．

2.4 制御・インタロックモデル

近年の制御・インタロックシステムはマイクロコンピュータの性能向上に伴いこれを取り入れたものが多くなっている．マイコン化した制御・インタロック装置は盤面を大幅に増やすことなしに高性能・広範な制御を実現できるのが特徴でプラント全体で1500～2000ゲートの大規模な論理になることが多い．制御インタロックモデルは周期的に演算する閉ループ制御系とリミットスイッチ，盤面押ボタン等の状態変化があった時のみ演算するインタロックモデルがある．前者はボイラ制御装置，タービン制御装置など以前はPID制御系で実現されたものであり，後者はバーナ制御系等従来ハードワイヤードな論理ゲートで実現されていたものである．いづれの部分もPID演算，算術演算，および論理演算のブロックダイアグラムで記述することができるので，これと一対一の対応関係を持つPOL（Problem Oriented Language）で記述した．POL命令の例を**表2**に示すが計算時間の短縮と記述性の向上を目的として極力高度な機能を持った標準的命令を用意した．**図2**に示すのは最も高度なPOL命令の1つであり，アクチュエータの駆動ロジックと盤面とのインタフェースを標準化したものである．

2.5 インタフェースモデル

プラントダイナミックモデルの物理量を制御・インタロックモデルへの入力となる信号データに変換するものとしてセンサモデルを設け，また制御・インタロックモデルによるプラント制御指令をプラントの物理量に反映させるためにアクチュエータモデルがある．センサ，アクチュエータモデルは各々実際のプラント計装に対応しており，アクチュエータの動作時定数を個別に実プラントに合わせて調整することができ実プラント特性との一致化を高められる．また計装制御系のデータのルートと物理量データのルートをシミュレーションモデル内で明確に区分したことにより下記マルファンクションにつき実プラントと同様の波及効果を実現することができた．

(1)センサ

断線，オーバスケール，スティック，ノイズ重畳

(2)アクチュエータ

誤動作による全開／全閉，スティック，指令値に対するノイズ重畳

NII-Electronic Library Service

Japan Society for Simulation Technology

表 2 POL 命令の例

命令	略号	シンボル	命令	略号	シンボル
論理積	AND	X1, X2 — AND — Y	加重加算	WSM	X1, X2, Xn — C1 WSM C2 Cn — Y
論理和	OR	X1, X2 — OR — Y	乗算	MUL	X1, X2 — MUL — Y
否定	NOT	X — NOT — Y	除算	DIV	X1, X2 — DIV — Y
比較器	CM	X — CM (C1 C2) — Y	ゲイン	GAI	X — GAI C — Y
フリップフロップ	FF	X1, X2 — S FF R — Y	リミッタ	LM	X — LM C2/C1 — Y
オンディレイタイマ	TP	X — TP S Y TD — Y	関数	FG	X — FG — Y
オフディレイタイマ	TD	X — TD S Y TD — Y	上記ほか計64種の命令		

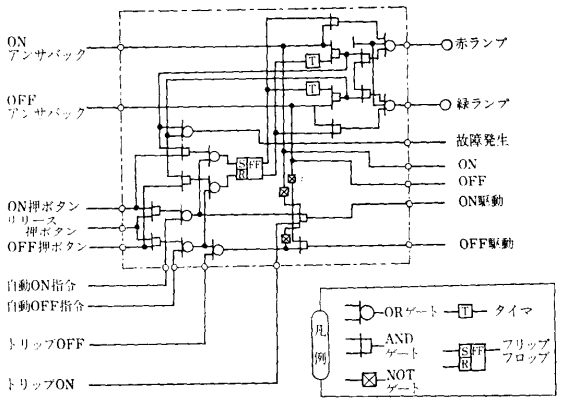

図 2 標準POL命令の例 (Drive Control Module)

3. シミュレータシステムの構成

3.1 教育支援機能

運転訓練シミュレータにはシミュレーションモデルのほかに教育機器としての機能があり，教習内容に従ってインストラクター卓よりシミュレーション内容を変更することができる．**表 3** にこれらの機能をまとめてあるが，次の５つに大別できる．第１に時間の進行速度の制御，進行の停止・再開，時間の逆戻り等の時間軸に関する制御であり，第２にシミュレーション中の任意のプラント状態を要求に応じて記憶・再生するほか，予め定められている初期状態（コールドスタート，ホットスタートほか）を選択する初期値選択機能がある．第３に約 150 種のマルファンクションを任意に選択し注入する誤動作制御機能，第４にモデルパラメータを入力点番号を指定して変更する機能，さらに第５に任意のモデル変数を CRT 上のトレンドグラフに表示してプラントの挙動を評価する機能である．

表 3 教育支援機能

区分	項目
時間軸操作	シミュレーション開始／中断，高速（５倍）／低速（1／5）
	ステップバック，リシミュレーション（５分毎30分前まで）
初期値操作	初期値設定（６種），スナップショット設定(100種)
	スナップショット 記憶（100種）
誤動作	マルファンクション項目，開始条件設定
	マルファンクション項目のプログラム化
パラメタ変更	モデルパラメタ変更
応答評価	モデル変数トレンドグラフ表示

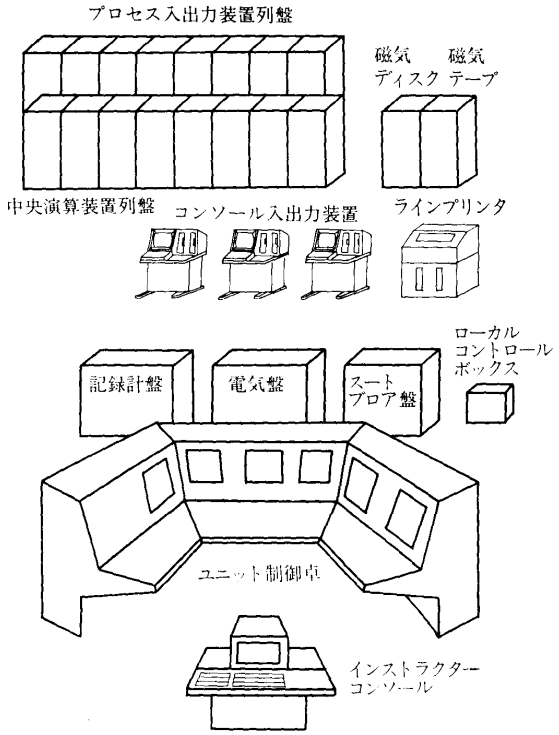

図 3 シミュレータ構成機器

3.2 ハードウェア構成

シミュレータの構成機器を**図 3** に示すが各部の機能は次の通りである．

(1)ユニット制御卓

ボイラ，タービン，発電機および関連補機の操作を行う中央監督制御卓でありユニット計算機により制御される６台のカラー CRT が設置されている．

(2)電気盤

NII-Electronic Library Service

Japan Society for Simulation Technology

表 4 計算機システム構成機器

中央演算処理装置	HIDIC80E	512Kw付	2台
	HIDIC80E	256Kw付	1台
共有主記憶装置		96Kw	1台
磁気ディスク装置		34Mw	1台
		4Mw	1台
		2Mw	1台
コンソール入出力装置			3台
カラー CRT 表示装置	4032文字		7台
ラインプリンタ			1台
磁気テープ記憶装置			1台
プロセス入出力装置			1式
	アナログ出力	558点	
	ディジタル入力	1130点	
	ディジタル出力	1536点	

所内電気系統の模擬表示盤であり系統各部の切離し，同期併入操作を行う．

(3)ストーブロア盤

スートブロア（ボイラ灰じん除去装置）の操作と状態監視を行う．

(4)記録計盤

(5)ローカルコントロールボックス

現場盤にて操作するスイッチの中で教習に不可欠な項目を抽出しまとめて配置してある．

(6)インストラクター卓

3.1 にて述べた教育支援機能をカラー CRT とキーボード，押ボタンにより行う．

(7)計算機システム

構成機器は表 4 にまとめてあるが次の点を構成上の特徴としている．

(a) 3台のプロセッサを使用し負荷分担を行う．

(i)モデルプロセッサ

プラントダイナミックモデル，制御・インタロックモデル，およびセンサモデルの演算を行う．

(ii)盤インタフェースプロセッサ

各種の盤面押ボタン，表示器よりのデータ取込と表示を行い，併せてセレクタステーション等のアナログメモリの模擬とアクチュエータモデルの計算を実施する．

(iii)ユニット計算機シミュレーションプロセッサ

ユニット制御卓がユニット計算機を用いた CRT 化盤であるためこれを模擬するほか，インストラクター卓の制御を行いシステム全体の統括制御を行う．

(b) 3台のプロセッサは共有主記憶装置により密結合されており，すべてのシミュレーションデータを共有主記憶装置に格納することによりプロセッサ間のデータ交信によるオーバヘッドを排除しシステム全体の処理能力向上を図っている．

(c)盤面よりの入力データ取込はマイクロコンピュータ化されておりセレクタステーション押ボタン等のインチング操作に対しても高い時間分解能でボタンの押されている時間幅を認識しアナログメモリ内容の増減を模擬する．

3.3 ソフトウェア構成

シミュレーションモデルはモデル総括プログラムのもとに一括管理され予め定められたスケジュールに従い起動される．図 4 に全体のソフトウェア構成を示すがモデル間のデータ交信は共有メモリ上にあるプラントデータベースを経由して行われ，モデル間で直接データを交信しあうことはない．この結果プラント構成機器の変更に対してもモデルをモジュール式に交換すればよい構造になっている．プログラミング言語としてはプラントダイナミックモデルが共通に頻繁に参照する蒸気表検索ルーチンと近似関数等をアセンブラで記述し処理速度を向上させているほかはプラントダイナミックモデルは保守性を考えて FORTRAN，制御インタロックモデルは実プラント機器との対応性を考えて専用言語で記述してある．また時間軸上の操作を含む教育支援機能を実現するためにはモデルの起動スケジュールは一意に定まらなくてはならない．このため図 5 に示すように時間軸をタイムスロットに分割し各スロット内で処理内容を明確に規定する．①のプラントダイナミックモデルの演算に基づき②にて関連するセンサの値が計算される．さらにこの値に基づき関連する閉ループ制御系の処理が行われる．④はイベント発生に応じて処理を行う期間でユニット制御卓よりの押ボタン操作，センサモデルよりのリミットスイッチ，閉ループ制御モデル内でのモニタリレー要素の状態変化が発生すると対応するインタロックモデルが計算される．大規模なプラントトリップが発生すると実プラントにおいては全インタロックの80～90%が駆動されるのでシミュレータの場合でもインタロックモデル部の計算負荷が急増し実時間応答を実現できないことが従来多かった．本システムでは次の原則を実現し実時間シミュレーションを可能とした．

(1)インタロックモデルではデータの流れに沿って全ての演算順序を事前に決めておき，入力部に状態変化が

NII-Electronic Library Service

Japan Society for Simulation Technology

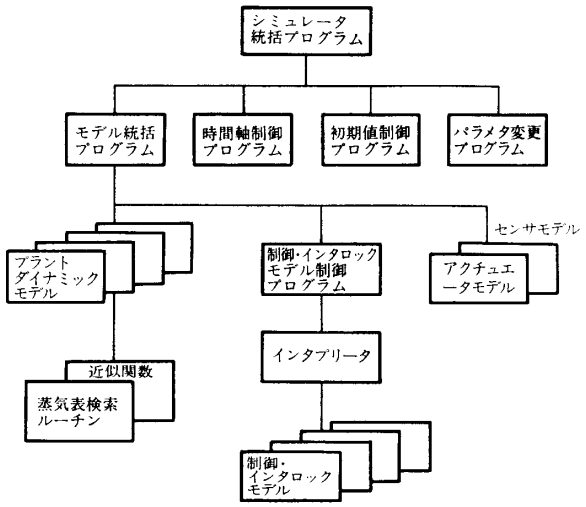

図 4　ソフトウェア構成図

発生しても１回の演算で最終状態値が確定するようにする．

⑵状態変化データのインタロック内での廻り込みによる重複演算の排除．

⑶状態変化のあった経路に沿ってのみの演算

ユニット計算機の模擬では実プラントでのプロセス入出力装置によるデータの取り込みの替りに，モデルプロセッサが共有メモリ上に格納したデータをユニット計算機シミュレーションプロセッサが参照している以外は実プラントのユニット計算機と同一のソフトウェアを用いており，実プラント機能との同一化のための保守が容易となるよう考慮されている．

4.　シミュレーション実施例

本シミュレータの特徴の１つにプラントトリップ時の実時間応答の保持があるが，**図 6** に発電機出力を定格値から約５％に急減させ外部系統との切離しを行う Fast Cutback 運転の応答例を示す．発電負荷の急減に対応しボイラマスタ（ボイラ出力指令値）は 100％より35％へ約１分で減少し燃料投入量が減少する．一方タービン側の負荷急減に対しボイラ側の出力減少は内部蓄積エネルギーが大きく遅いためボイラ側熱出力に余剰が生じる．この余剰分を放出するために主蒸気を高圧バイパス系を経由して直接復水器の導くため高圧バイパス弁を発電負荷急減後直ちに急速開する．この間，ボイラ蒸気ドラムの水位は高圧バイパス弁の急開によるエネルギー放出過多により一時的に減少するが最終的に定格値に復帰することがシミュレートされている．

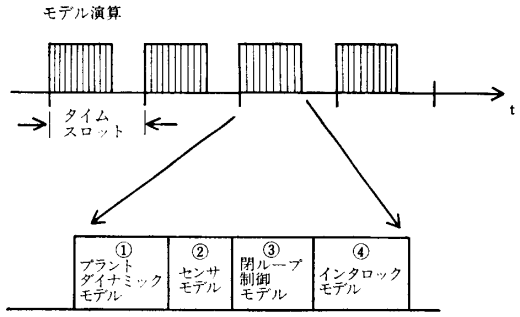

図 5　タイムスロットの割当て

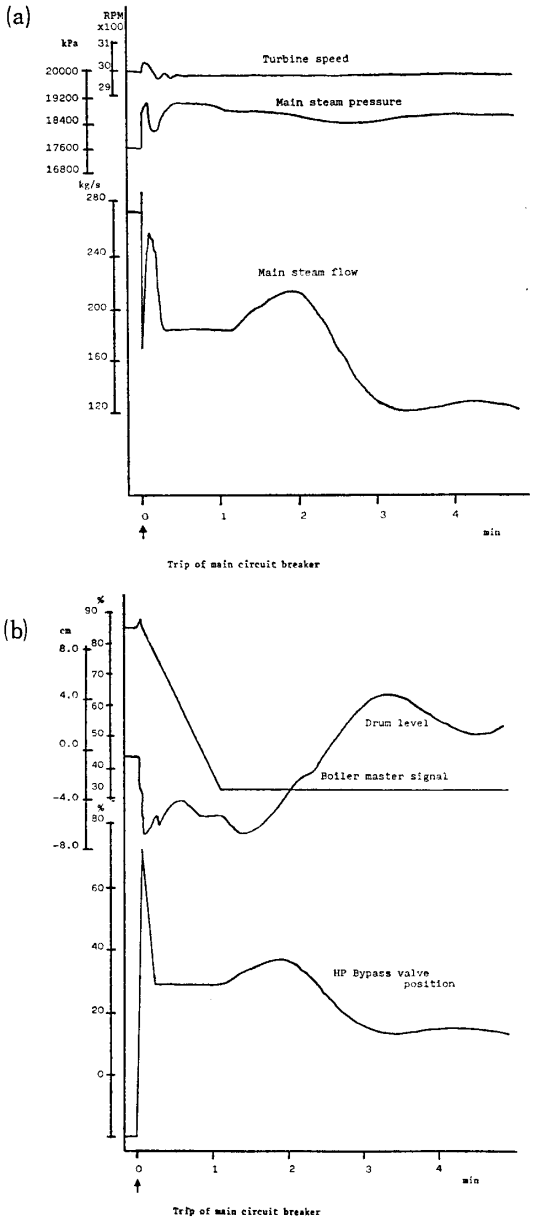

図 6　シミュレーション例
(FCB : Fast cutback)

NII-Electronic Library Service

Japan Society for Simulation Technology

5. 結　言

プロセス計算機によるプラント自動制御機能を含む全ディジタル方式計装制御システムを適用した石炭焚き火力発電プラントに対し，完全実時間のレプリカタイプ運転訓練シミュレータを開発し，対象プラントの運開に先立ち実用化に供した．この結果現時点までに40名の運転員の訓練を完了し運転員不足解消に有益であった．

物理原則を反映し対象プラントの設計データに基づく高精度プラントモデルと実機制御装置と同一のアルゴリズムを持つ制御モデルを総合し，対象プラントの試運転に先立ち総合特性評価を行うことができた．この結果制御装置間のデータリンケージの妥当性，制御アルゴリズムの妥当性などを事前に確認することにより試運転時の不良を削減できたほか，プラントの特性に対応した運転手順書の作成に有効であった．

レプリカタイプ運転訓練シシュレータは運転員の訓練のみならずプラント建設・運用に有効であることが立証できた．

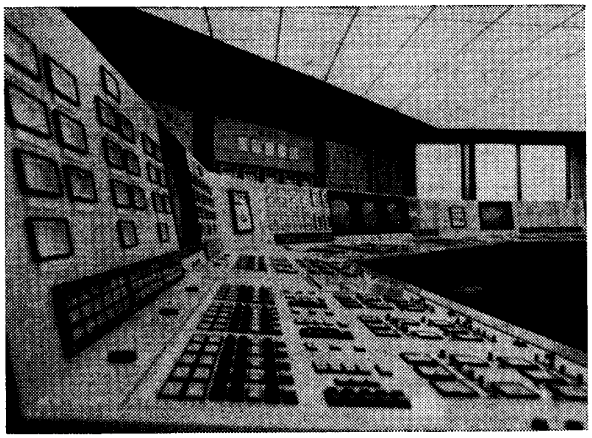

写真1　シミュレータ外観

謝　辞

本報告の火力発電所運転訓練シミュレータはオーストラリア国クイーンズランド州電力庁（QEGB）殿納タロン火力発電所建設プロジェクトの一環として開発されたものである．

本開発に当り種々御指導を戴いた QEGB 関係者各位に深く感謝の意を表わします．

参 考 文 献

1) R. Dolezal 他：Process Dynamics Automatic Control of Steam Generation Plant, Elsevier Publishing (1970)

2) R. Dolezal：Modelling of Large State Variations Appearing in Starting-up Processes and Failures in a Power Prant Unit, Stuttgart (1983)

NII-Electronic Library Service