UDC 621.182-523

最近の発電用ボイラ制御システム

*秋月 敏興(あきづき としおき) *松崎 勇二(まつざき ゆうじ) *井上 芳範(いのうえ よしのり) *若杉 繁実(わかすぎ しげみ)

1 まえがき

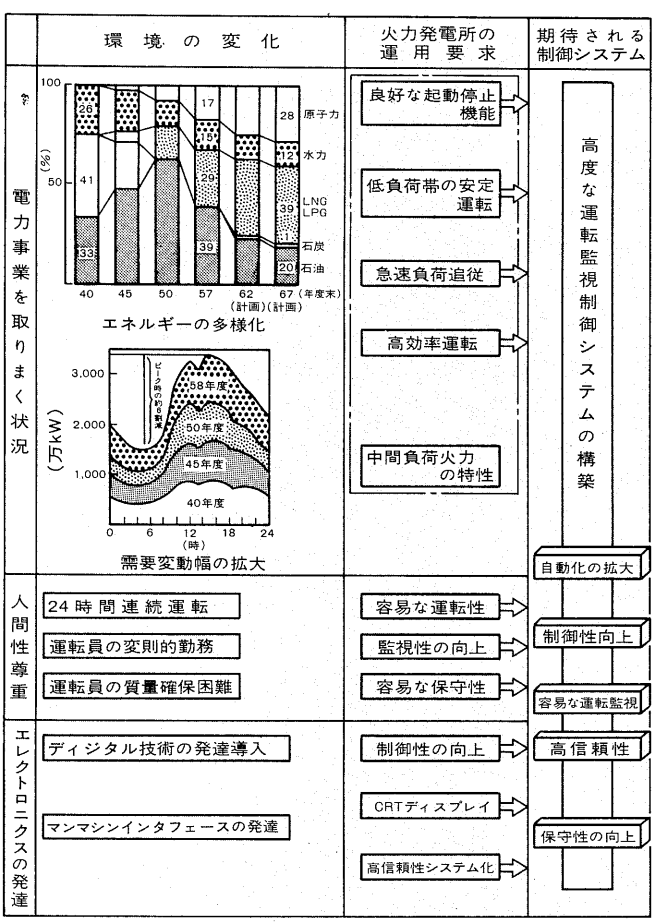
現在，まさにプロセス制御装置はマイクロプロセッサをベースとしたディジタル化の時代であり，かつてみなかった制御技術革新の時代である。

鉄鋼，化学，窯業プラントなどでのディジタル制御装置の採用が一段と活発になっており，発電用ボイラの制御装置としても，その適用が着々と進められている。

エレクトロニクス技術の急速な発達と，昭和48年に発生した石油危機問題を契機としたエネルギー安定供給のためのエネルギーの多様化，省エネルギー指向，及び社会・経済環境の変化によるニーズの多様化に対拠する技術革新が重畳されたものである。

発電用ボイラ制御技術分野での多様化するニーズと，今後の期待される制御システムの関連を，「事業用火力発電所の運用の変化と期待される制御システム」として図1に示す。

図1 事業用火力発電所の運用の変化と期待される制御システム

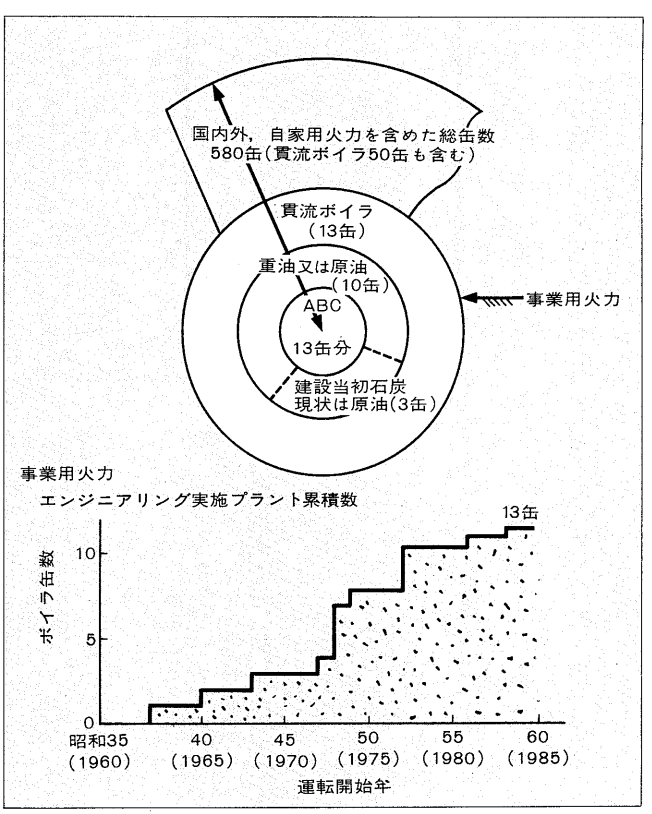


このような時代のニーズのもとに，富士電機は昭和40年代後半から各種プロセス制御装置のディジタル化を積極的に推進しており，同時に関連技術を背景に発電用ボイラ制御技術のディジタル化に取り組んできた。以下，その成果として，発電用ボイラディジタル制御システム「FAPS-8000」(登録商標)を開発したので，その概要を紹介する。

2 発電用ボイラ制御技術開発の歴史

本分野における富士電機の活動は，昭和6年，西ドイツのシーメンス社から中国電力(株)前田火力発電所向けストーカ燃焼，34t/h×3缶用ボイラACC (Automatic Combustion Control) 装置の納入に始まる。以来，その時代のヨーロッパ技術導入の役割を果たし，本分野における活動の拡大を図ってきた。産業の発展とともに，電力・蒸気の供給を果たすべく，図2に示すように総数580缶に及ぶ納入実績をもっている。このうち，事業用火力発電所向けとして，13缶のボイラ制御装置のエンジニアリングと装置の納入実績がある。特に，ドラムボイラに比較し，複雑な制

図2 富士電機のボイラ制御技術の実績



*計測事業部 技術部

御が要求される貫流ベンソンボイラの制御装置を，昭和29年に我が国で初めて旭硝子(株)牧山工場へ納入して以来，自家用・事業用合わせて50缶にも達する実績をもつことが特徴である。

特に，昭和48年，東京電力(株)大井火力発電所3号機向けとして我が国初の変圧運転制御技術及び広範囲の自動化技術がシーメンス社から導入され，現在の350MWクラスでのDSS（Daily Startup and Shutdown）運用の実現に大きく貢献した。更に，昭和56年に実施された東京電力(株)川崎火力発電所6号機用制御装置の更新は，制御装置の老朽化対策及び制御性・操作性の向上を前提とし，時代の要請に応じた変圧運転方式を採り入れて実施されたものであり，制御装置は新鋭火力発電所に匹敵するものに生まれ変わっている。

このように富士電機の発電用ボイラ制御技術は，当初シーメンス社の制御技術を母体とし，その技術を我が国の国情に合わせ，独自の制御装置の設計・製作を通して蓄積されてきたものである。

近年，設備容量のスケールアップ，効率化追求，省エネルギー対策，運用の多様化など（図1参照）による各種ニーズを満たすため，ディジタル技術の特長，すなわち，高信頼性，操作性の向上，保守の容易さ，上位計算機システムとのインタフェースの容易さ，数式モデルによる高級制御機能の実現などが発電用ボイラ制御システムに求められている。

3 発電用ボイラ制御システム「FAPS-8000」の概要

3.1 発電用ボイラ制御装置ディジタル化の進展

富士電機はアナログ制御技術の利点を継承し，近年多様化するボイラ制御技術のニーズにこたえるため，発電用ボイラ制御装置のディジタル化に取り組み，ステップバイステップでその適用性の実証を積み重ねてきた。

ディジタル制御装置適用に際して，特にサンプリング周期の制御性に及ぼす影響，高信頼化システム構築のためのバックアップ方式，更には制御系統の独立性の確保のための方式，等々の検討を行ってきた。

更にハウスマシンを用いてのプラントシミュレーションによる制御性の検討，システム高信頼化対策を加え，実機への適用を実施してきた。例えば，MICREX-Pシステム（登録商標）により，昭和53年に宇部興産(株)へボイラ用石炭ミルの制御装置として納入，昭和54年に新日本製鐵(株)八幡製鐵所へ発電用ボイラ制御装置として納入，更にコンパクトコントローラ：CC-F（登録商標）による各種ボイラ制御装置の納入である。これらの納入経験を積み重ねて，ディジタル制御技術の諸性能，すなわち制御性，操作性，信頼性，保守性などに関し確認を行ってきた。

本システムは，このように長年にわたり蓄積された富士電機のボイラ制御技術，最新のディジタル制御技術，そして計算機システムの技術をベースに，発電用ボイラ専用機種として開発されたものである。

3.2 システムの位置づけ

発電用ボイラ制御システムの構築を行う上で，CRTオペレーションを指向し，次の三つのシステムの統合化が操作・監視の集中化のために行われなければならない。

(1) ABC（Automatic Boiler Control）用フィードバック制御（Closed Loop Control）システム

(2) 電動機などの起動・停止用シーケンシャル制御（Open Loop Control）システム

(3) 発電プラントの起動・停止操作の自動化用計算機システム

これらの制御システムはデータウェイ（DPCS：Distributed Process Control System，N：Nシリアル伝送方式，伝送速度1.5Mビット/秒）で結合され，本システム「FAPS-8000」はABC装置として，発電所自動化システムの一翼を担っている。本システムの位置づけを図3に示す。

3.3 システム構成

本システムによる大形火力発電用ボイラの制御概念を図4に示す。必要とされる制御機能は図中MCU，LCU，OMUと区別されるように階層的に大きく三つのカテゴリーに分類される。

(1) マスタ制御部（MCU）

マスタ制御部は火力発電用ボイラの総括的制御機能をもっている部分であり，ユニットマスタ，ボイラマスタとして使用される。この制御部では加減算，補正演算，各種変化率演算など複雑な演算が必要とされるため，多数の演算モジュール（ウエハ）が用意されている。

(2) ループコントロール部（LCU）

ループコントロール部は，マスタ制御部の演算出力信号を設定信号として受け，各種測定信号（給水，燃料，空気流量信号など）をフィードバック量として，PID演算を主体とした制御演算に使用される。ループコントロール部は，原則として1操作端に1枚のモジュールカードが対応する。各ループ制御系のわかりやすさと更に1枚のカード故障が他のループ制御系への障害波及の防止によるシステムの危険分散が図られている。

(3) 手動操作部（OMU）

手動操作部はループコントロール部及び設定操作器（図中A/Mで表示）からの制御モード信号を受け，ループ制御系の自動・手動制御モードの選択をし，手動制御モード時の操作信号を出力する。

上述のように火力発電用ボイラの制御装置に特有な機能分類に基づき構築された制御システムが，この発電用ボイラ制御システム「FAPS-8000」システムであり，その構成の詳細を図5に示す。

本システムでは，必要な機能をモジュールとしてカード構成により実現したものであり，モジュールカード，単独あるいは複数の組合せによりユニットが構成される。このモジュールカードがキュービクル内に設けられたカード収

図3　発電所自動化システム構成図（自動化システムでのFAPS-8000の位置づけ）

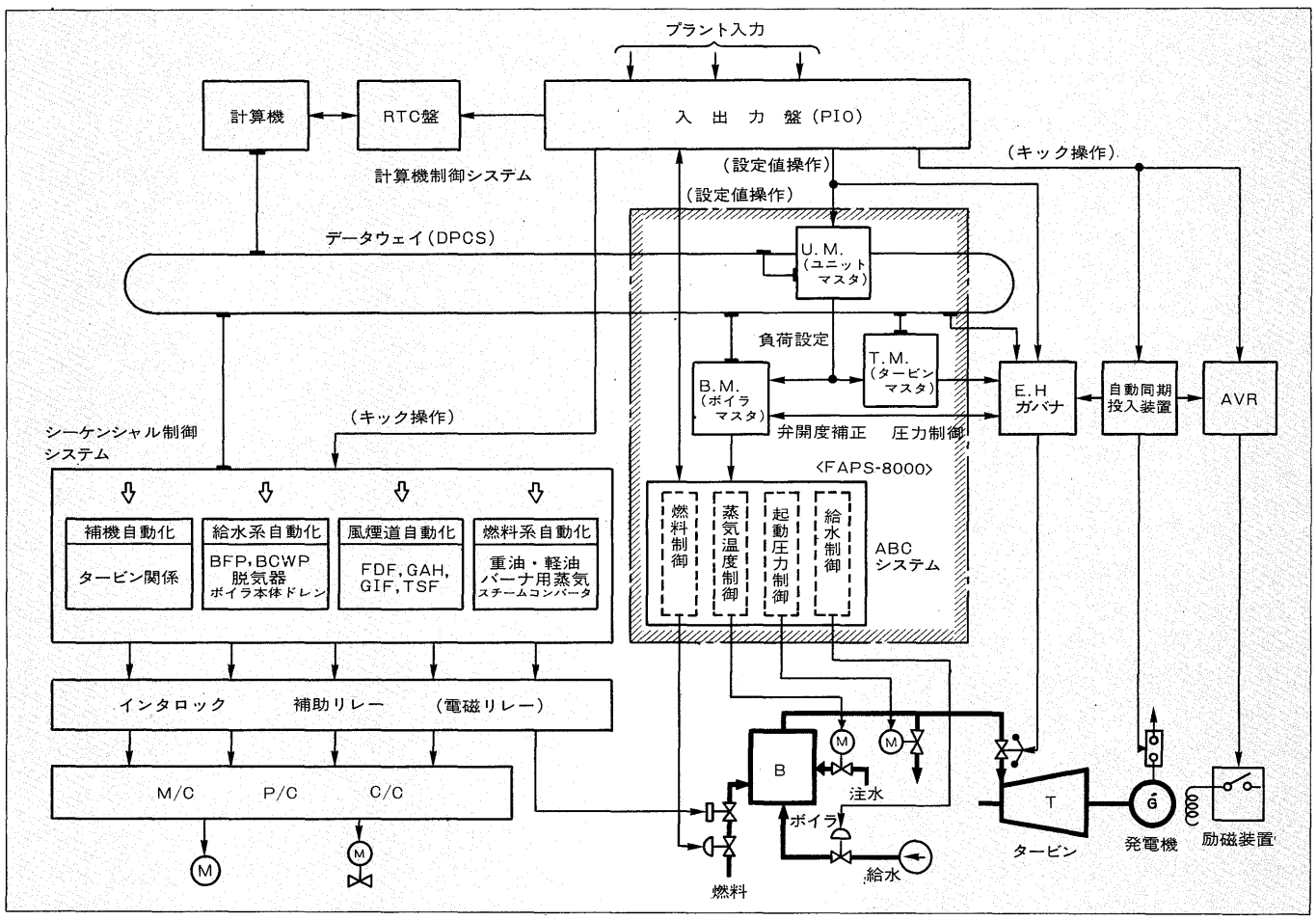


図4　変圧運転貫流ボイラ基本制御系統図

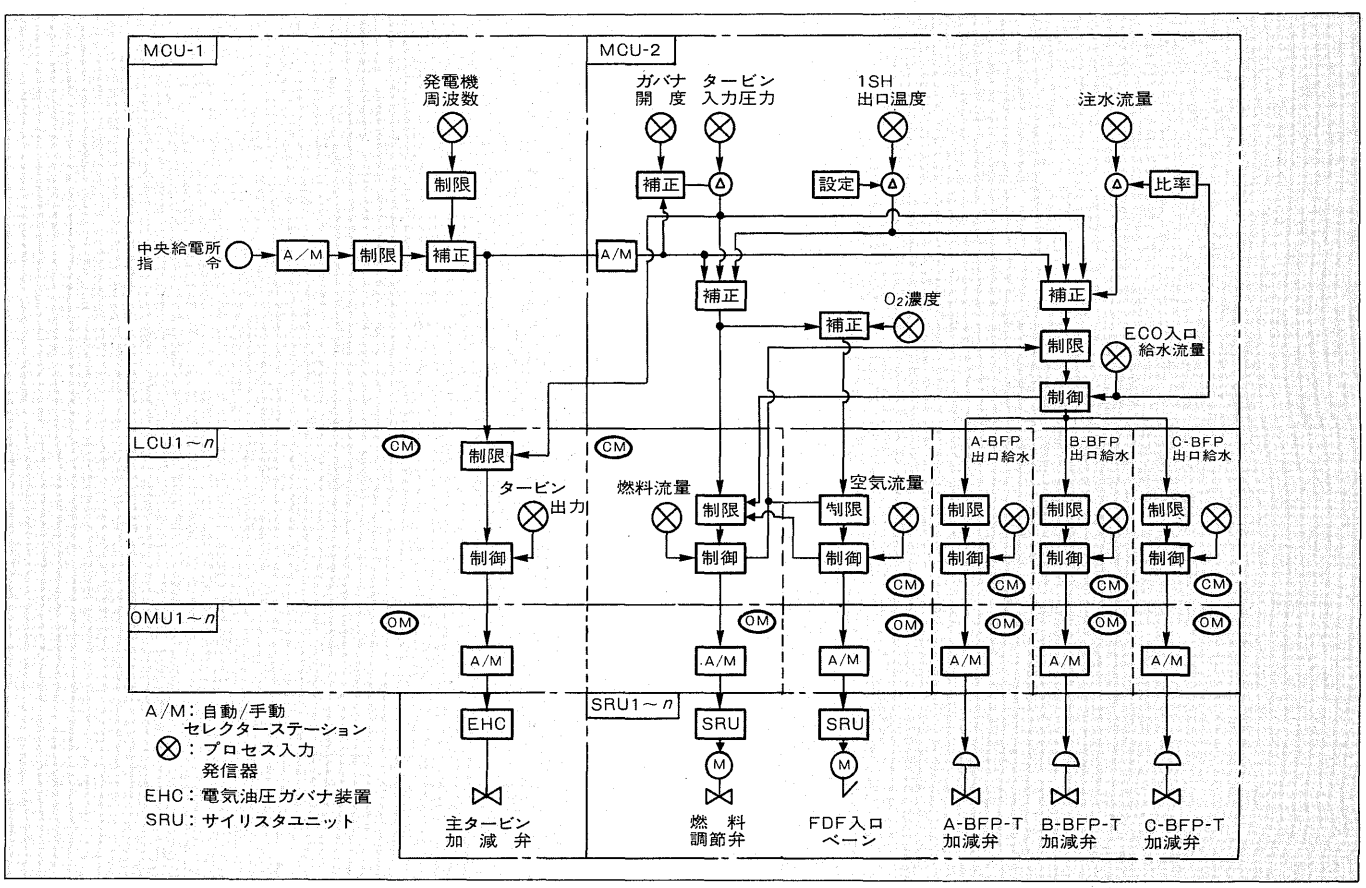
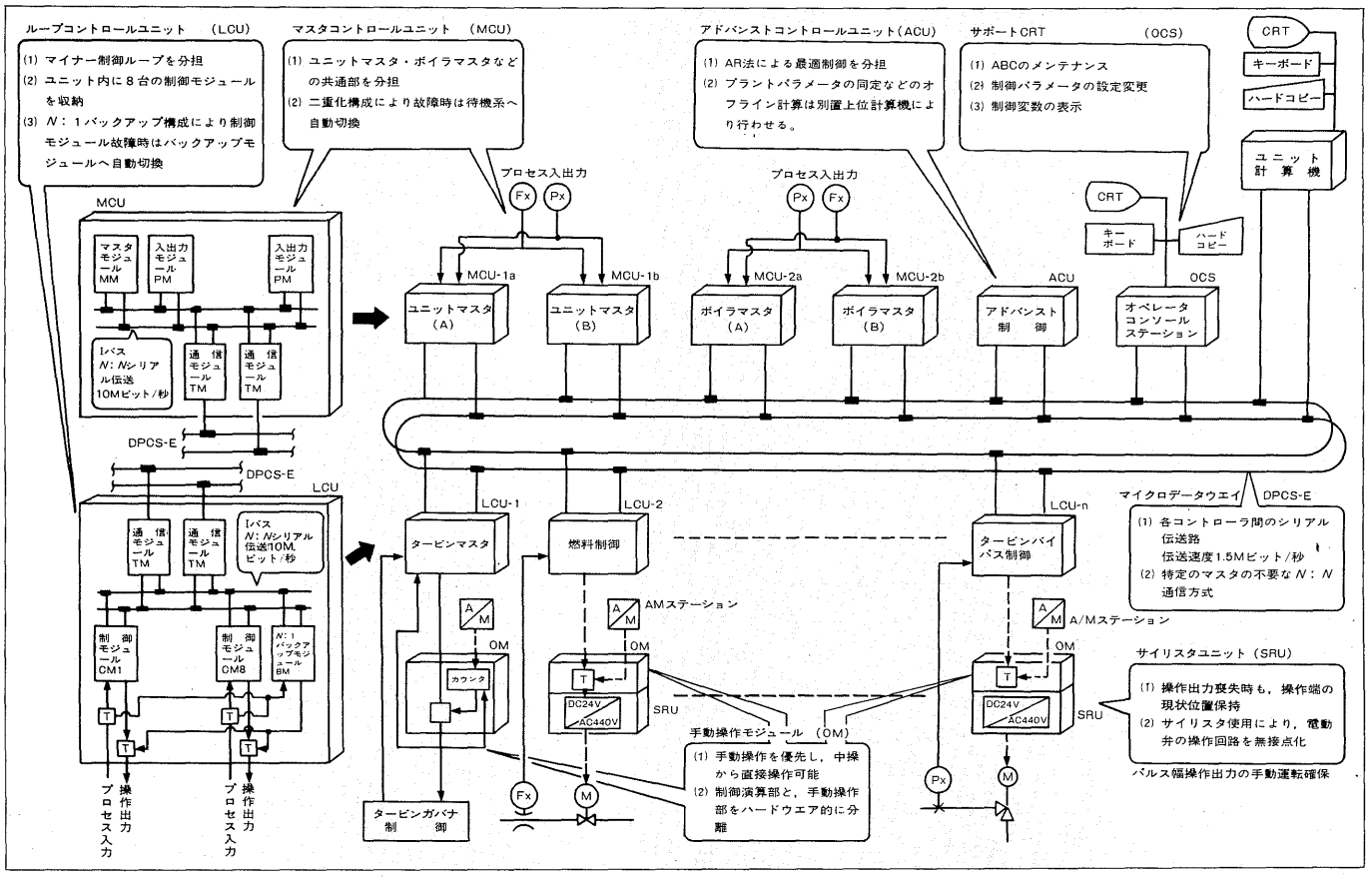


図5　FAPS-8000システムの構成



容棚（シェルフ）に実装される。シェルフ内モジュールカード間の信号伝送のため，Iバス（N：Nシリアル伝送方式，伝送速度10Mビット/秒），シェルフ間又は上位計算機との信号伝送のためDPCSが用いられ，有機的な結合が図られている。

更にボイラ制御装置としての重要な機能である高級制御理論を実現するアドバンストコントロールユニットがある。各ユニットの特長を次に示す。

(1) マスタコントロールユニット（MCU：Master Control Unit）

MCUはマスタ制御部に使用され，演算処理機能の充実のため複数のモジュールカードにより構成される。また，MCUは二重化構成が可能である。

(2) ループコントロールユニット（LCU：Loop Control Unit）

LCUはループコントロール部に使用され，原則として1操作端に1枚のモジュールカードで構成される。また，このユニットはN：1（8：1)バックアップが組み込まれている。

(3) オペレーションユニット（OMU：Operation Module Unit）

OMUは手動操作部に使用され，1操作端に1枚のモジュールカードで構成される。

(4) アドバンストコントロールユニット（ACU：Advanced Control Unit）

ACUはAR法（Auto Regressive Method）などの数式モデルによる高級制御演算に使用され，1枚のモジュールカードで構成される。

(5) サイリスタユニット（SRU：Solidstate Relay Unit）

SRUは富士電機の制御システムの一つの特長をもつパルス幅出力による電動機駆動式操作端の正転・逆転の制御に使用される。電動機駆動回路の無接点化により，この回路の信頼性・保守性を向上させたものである。

それぞれのモジュールカードの基本仕様を**表1**に，システムの共通仕様を**表2**に示す。

3.4　システムの特長

以下に本システムの特長を示す。

3.4.1　高信頼化

発電用ボイラは，何らかの故障発生により停止に至った場合には，電力・蒸気の供給停止はもちろんのこと，再起動のために相当な損失を伴うものである。したがって，発電用ボイラの制御装置製作に際しては，エンジニアリングの簡便さとともに，信頼性の高い装置としなければならない。

このような観点から，本システムはハードウェア技術，ソフトウェア技術の両面から次のような高信頼化が図られており，変圧運転貫流ボイラ制御装置のMTBF（Mean Time Between Failure）がアナログ制御装置のそれと比較して，約3,000％と大幅に改善されている。

(1) 高信頼性の品質管理を前提とした，設計・製作・品質管理

表1　モジュールの基本仕様

項目			ユニット名称	ループコントロールユニット（LCU）					マスタコントロールユニット（MCU）		アドバンスコントロールユニット（ACU）
			モジュール名称	CM				BM	MM	PM	AM
			機種	制御モジュールC PMUK	制御モジュールS PMUL	演算モジュール PMUM	論理モジュール PMUS	バックアップモジュール C形：PMUU, S形：PMUV	マスタモジュール PMUT	入出力モジュール PMUR	アドバンスモジュール PMUP
基本演算ユニット	演算方式			固定小数点演算							浮動小数点演算
	アプリケーション演算			ウエハ方式							
	処理速度			0.1 s/64 ウエハ					0.5 s/512 ウエハ	——	加算　52.4 μs 乗算　55 μs
	アプリケーション演算後										
	使用マイクロプロセッサ			16 ビットマイクロプロセッサ							
メモリ				ROM 32 k バイト　EAROM 4 k バイト RAM 16 k バイト　デュアルポート RAM 4 k バイト				ROM 32 k バイト RAM 32 k バイト デュアルポート RAM16k バイト	ROM 32 k バイト RAM144k バイト EAROM16k バイト デュアルポート RAM 4 k バイト	ROM 32 k バイト RAM 16 k バイト EAROM4k バイト デュアルポート RAM 4 k バイト	ROM 32 k バイト RAM 144 k バイト EAROM 4 k バイト デュアルポート RAM 4 k バイト
入出力装置	ディジタル入力	仕様		DC 24 V				〈注〉 下段の出力を含めてすべての PI/O はバックアップ用に内部使用される。	プロセス入出力なし	DC 24 V	プロセス入出力なし
		点数		14	14	12	18			12	
	ディジタル出力	仕様		DC 24 V　Tr 出力						DC24 V Tr 出力	
		点数		20	20	20	20			19	
	アナログ入力	仕様		DC 1 ～ 5 V	DC 1 ～ 5 V 10～100～10Ω 〈注〉					DC 1 ～ 5 V	
		点数		8	8	7	—			7	
	アナログ出力	仕様		DC 1 ～ 5 V DC4 ～ 20 mA (操作出力)	DC 1 ～ 5 V			PMUU： 操作出力としてDC 4 ～ 20 mA 1 点		DC 1 ～ 5 V	
		点数		5	4	4	1 組			4	
	パルス入力	仕様		DC 24 V						DC 24 V	
		点数		2 組	3 組	2 組	——			2 組	
	パルス出力	仕様		DC 24 V　Tr 出力				PMUV： 操作出力としてDC24V Tr 出力1組		——	
		点数		——	1 組	——	1 組			——	
データ伝送方式，速度				I バス(モジュール相互間)　N：N 10 M ビット/秒							
RAS 機能	信頼性			伝送モジュール，電源の二重化，自己診断機能							
	保全性			モジュール単位の故障表示，CRT による詳細故障内容表示							

〈注〉　AI 8 点中 1 点は開度用

(2)　カスタム LSI 化により使用部品数を削減し，故障率の低減化

(3)　冗長化・二重化システム構成

(a)　電源装置の異系統二重化

(b)　MCU の二重化，LCU の N：1 バックアップ

(c)　データウェイ（DPCS），I バスの各伝送の二重化

(3)　危険分散設計

(a)　LCU における 1 操作端，1 モジュールカードシステム設計

(b)　N：N 伝送方式（DPCS 及び I バス）採用による異常箇所切離し（縮退運転）

(4)　手動操作ユニット異常時，LCU からの操作出力の確保

(5)　実績のあるソフトウェア技術（ウエハ方式）の採用

3.4.2　自己診断機能の充実

本システムでは，モジュールカード内部電源異常診断，制御プログラム異常診断，プロセス入出力処理部異常診断，伝送処理部異常診断などの自己診断信号によって，冗長化系への自動切換が行われ，1 か所の故障では自動制御が継続される。更に常用系と冗長化系の 2 か所同時故障又は発信器信号異常による外部要因故障に対しても，操作出力の現位置ホールドが行われ，手動運転により，プラント運転が継続される。操作出力の現位置ホールドの方式を図6に示す。ここで，自己診断信号はモジュールカード内部重故障（FLT 0），内部軽故障（FLT 1），及び外部要因故障（FLT 2）の 3 レベルに分類化されており，これらは具体的なシステム設計段階で使い分けられ，発信器二重化，シェルフ間相互診断などの，より高信頼化システムが構築される。

3.4.3　操作性

システム規模が大きくなるとともに，マンマシンインタフェース用ハードウェアが増大するが，特に人間工学的操作性が重要である。本システムでは CRT オペレーション指向のシステム構築とともに，従来からのオペレータの操作感覚に対する継続性を考慮し，アナログ感覚で操作できる各種設定操作器（72形，72×144形のプラズマバーグラフ表示及び各種制御モード表示付）を用意している。

3.4.4　保守性

システムの保守性は使用者にとって大きな関心事であり，故障発見の容易さ，システム改造の容易さ及び保修予備品の極少化により向上する。本システムでは「FAPS-8000

表2　システムの共通仕様

項　目		仕　様
アナログ信号		フィールドーキュービクル間：DC 4 ～ 20 mA キュービクル内部：DC 1 ～ 5 V キュービクルー監視計器：DC 1 ～ 5 V 又は 4 ～ 20 mA
バイナリー信号		DC24 V（OFF） 0 V（ON）
データ伝送		上位システム-シェルフ間：マイクロデータウェイ （32 ポート，N：N） 1.5 M ビット/秒， シェルフ内：I バス （N：N10 M ビット/秒）
電源		システム：AC100 V 又は DC110 V （シェルフごとに二重化） 設定/操作器：AC100 V 又は DC 110 V （グループごとに二重化又は三重化）
外形		設定/操作器：IEC 及び DIN 規格72 形と 144 形 制御モジュール：233.4 (H)×30.5 (W)×284.5 (D)(mm) 電源モジュール：243.6 (H)×60.2 (W)×284.5 (D)(mm)
防爆の等級	耐圧構造	FC シリーズとの接続により JIS ds 2G4
	本質安全構造	FC シリーズとツェナーバリヤとの接続により JIS i 3nG5 （AC550 V 以下，DC 34 ）V 以下）
接地方式		本質安全防爆……JIS 第 1 種(独立) 避雷(アレスタつき)……JIS 特別第 3 種 そ の 他……JIS 第 3 種
システムキュービクル設置条件		運転状態で 0 ～ 50 °C　10 ～ 90 % RH 以下 保存状態で－10 ～ 50 °C（結露しないこと） 振　動　0.2 G 衝　撃　5 G（輸送時） 1 G（稼動時）

の保守ツール」（表3参照）が用意されている。障害発見のプロセスを図7に示す。モジュールカードで自己診断異常信号の発生の際，BTG 盤（Boiler Turbine Generator Panel）に警報が表示され，システムキュービクルの障害表示灯，更には個々のモジュールカードの表示器が点灯し，異常発生モジュールカードが容易に発見される。異常内容の詳細は，サポート CRT 又は設定ユニットで知ることができる。予備モジュールとの交換は，モジュールチェッカ，サポート CRT の支援により容易に行える。

システム改造について図8に示す。

3.4.5　システムの拡張性

「FAPS-8000 システム構成」（図6参照）に示すように，本システムは他システムとデータウェイ（DPCS）で結合されているため，急速に発展しているマンマシンインタフェース技術に容易に対応でき，更にはシェルフ単位での上位計算機との結合，シーケンシャル制御システムとの結合を可能としていると同時に，システムの拡張が容易に達成できる。

また，シェルフ内モジュールカード間は I バスにより結合されているため，モジュールプリント板単位での増設も容易である。

このようなシステムの拡張性は設備更新対策として，ステップバイステップの増設が可能となり，特に有効である。

4　FAPS-8000 の実機実証試験

前述のような開発思想により製作された本システムの一部は，沖縄電力(株)の御協力により同石川火力発電所 2 号機(125 MW，変圧貫流ボイラ，400 t/h，154 kg/cm^2，540°C）のアナログ式（富士電機 IS シリーズ）ボイラ制御装置の一部に組み込まれ，昭和58年 3 月から 1 年間の実機実証試験が実施された。なお，本発電ユニットは沖縄本島地区の主力火力ユニットとしてベースロード的運用と，昼夜電力変動調整運用の 2 面を持つ中間負荷火力として重要なユニットであり，昭和53年 6 月 9 日に運転を開始したもの

図6　自己診断信号によるシステムインタロック

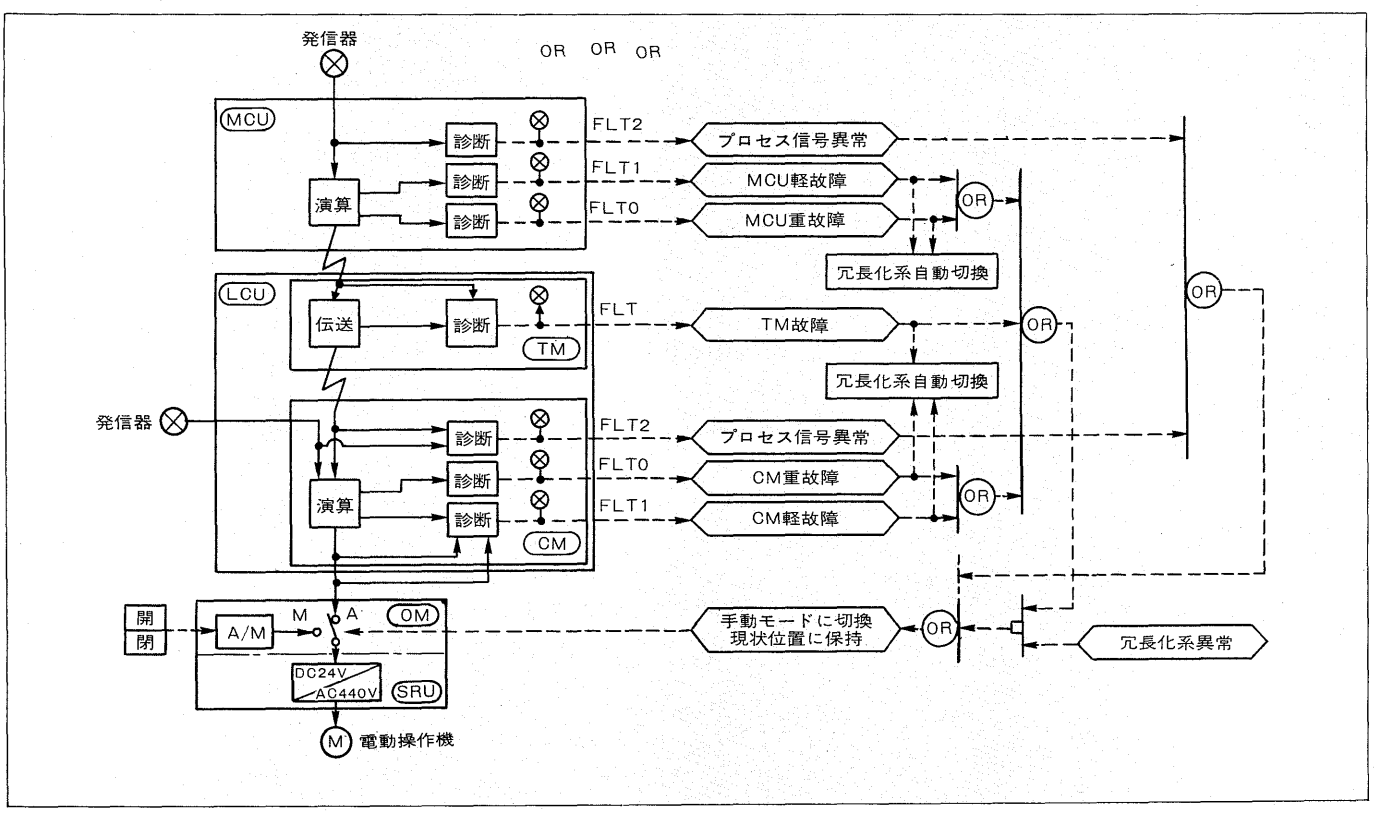
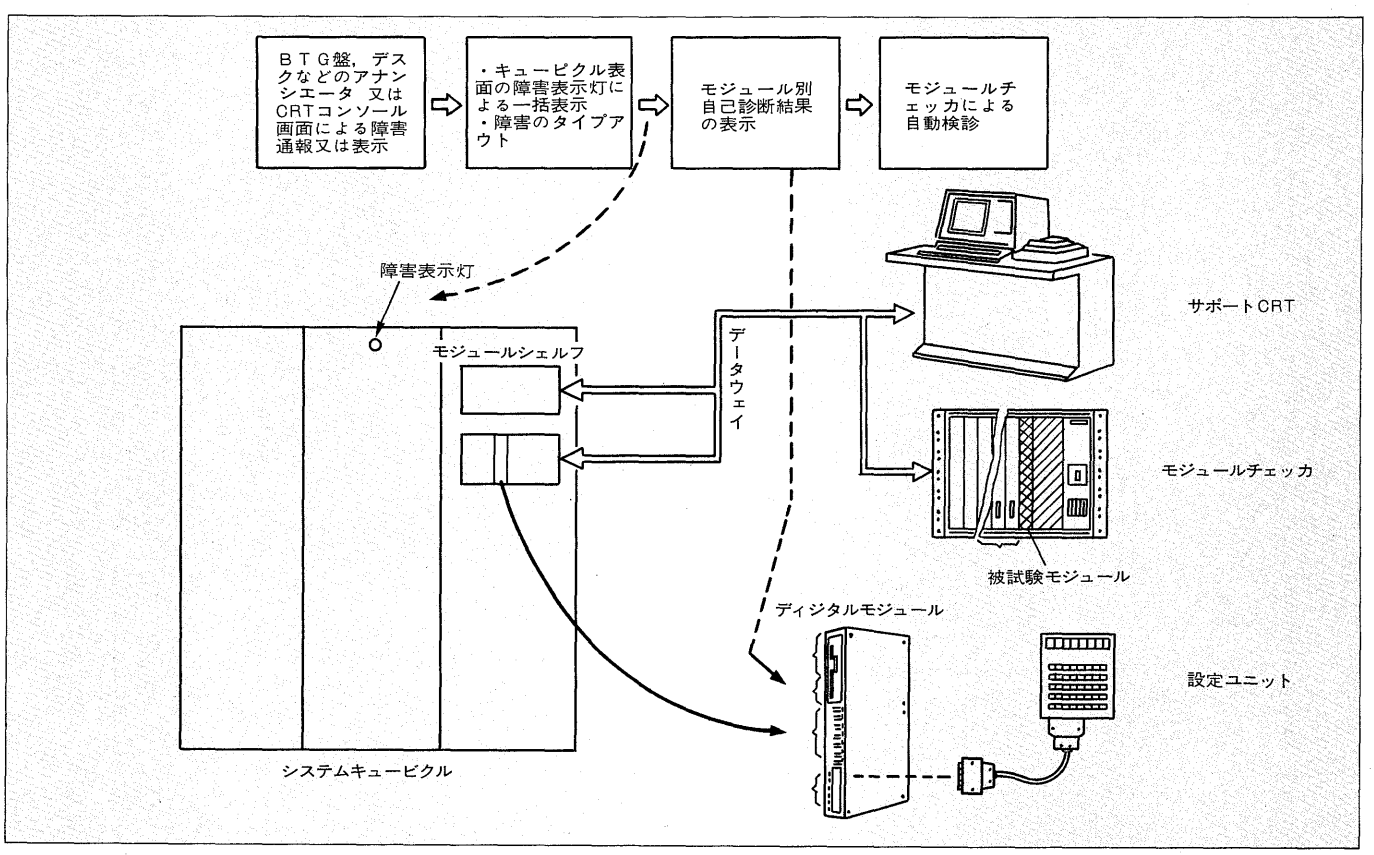


表3　FAPS-8000の保守ツール

機器	機能	使用区分	
		オンライン	オフライン
設定ユニット	(1) プログラム（ウエハ結線）の書込み，読出し	読出し	書込み
	(2) パラメータ，定数の設定，表示	○	
	(3) ディジタルモジュール内部演算結果の表示	○	
	(4) ディジタルモジュール異常内容表示	○	
モジュールチェッカ	(1) サポートCRTからのチェック指令によりオフライン自動チェックとチェック結果のCRT表示	−	−
	① メモリチェック→テストデータの書込み，再読出し照合		○
	② アナログ入出力チェック→試験入力信号と出力の表示		○
	③ ディジタル入出力チェック→試験オン・オフ信号と出力の表示		○
	(2) 制御プログラム・パラメータ・定数のディジタルモジュールへのローディング		○
	(3) ディジタルモジュール内部データの表示		○
サポートCRT	(1) プログラムサポート		
	① 制御プログラム（ウエハ結線）の作成・変更		○
	② パラメータ・定数の設定・変更	○	
	③ ①②項のディジタルモジュールへのローディング		○
	④ ディジタルモジュール内部データの吸上げ表示	○	
	⑤ ④項のデータの保存（フロッピィディスクハードコピー）	○	
	(2) 調整サポート		
	① ループ（PID）単位の測定値・設定値・操作出力の表示とパラメータ・上下値等の設定	○	
	② ディジタルモジュール部演算データ表示	○	
	(3) 保守サポート		
	① ハードシステム構成とハード異常表示	○	
	② ディジタルモジュール内異常内容表示	○	
	③ ディジタルモジュールのハード異常時系列表示	○	
	④ リアルタイムアナログトレンド記録	○	
	⑤ グループ画面表示（8ループ）	○	
	⑥ ループ画面表示（1ループ）	○	○
	⑦ モジュールチェッカと組み合わせてモジュールのハードチェック		

図7　故障発見ランプガイドシステムと保守ツール



である。

4.1　実証試験の範囲

図9に示すように，今回の実証試験は重要なループ，すなわち給水流量制御系，主蒸気温度制御系を対象に実施された。両制御系は既設アナログ式制御系との併設をし，アナログ⇄ディジタル，両制御系のバランスレスバンプレス切換が可能な設計とした。省エネルギーの観点から排ガスO_2濃度制御系については独立して今回新たに設置された。

図8　システム改造のプロセス比較（アナログ/ディジタル方式）

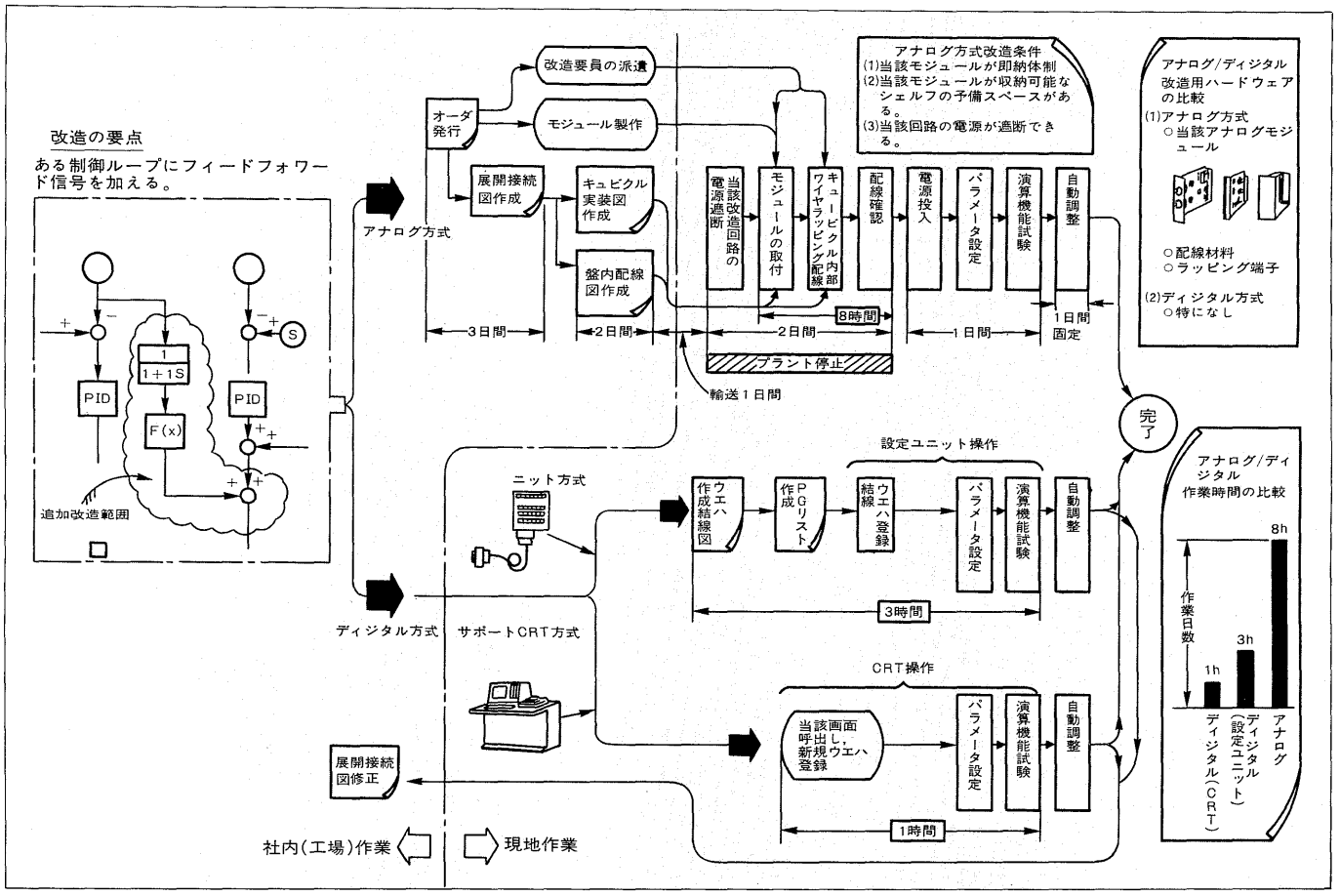
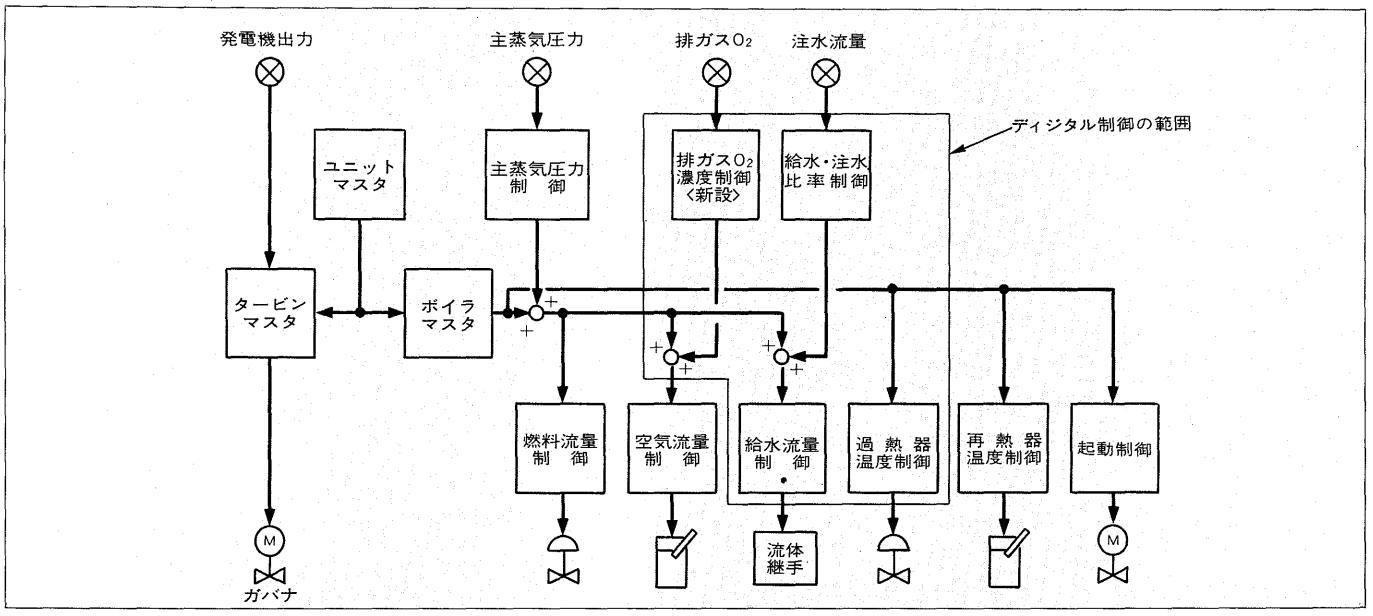


図9　沖縄電力(株)石川火力発電所2号機 変圧運転貫流ボイラの制御



4.2　実機実証試験結果

昭和58年4月24日に実施された実機試験結果を図10に示す。この記録は，左半分が本システムによる制御結果，右半分がアナログ制御装置による制御結果で16時54分に本システムからアナログ制御装置に切り換えられたことを示している。

本記録に示しているように，本システムによる制御結果としてサステンド負荷変化試験（110MW→90MW）5MW/min(4%/min)時に，主蒸気温度の変化幅は＋2～－1℃

図10　負荷変動試験記録（ディジタル/アナログ方式）

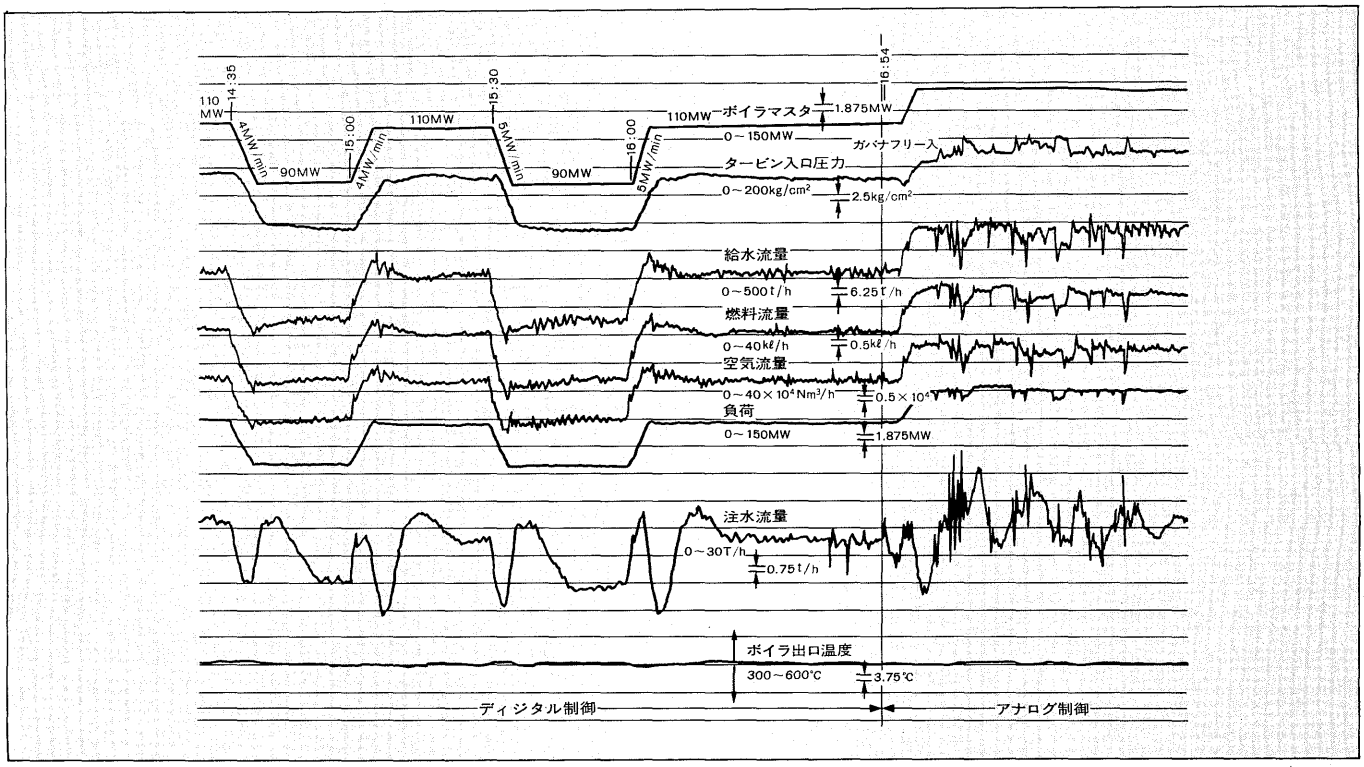
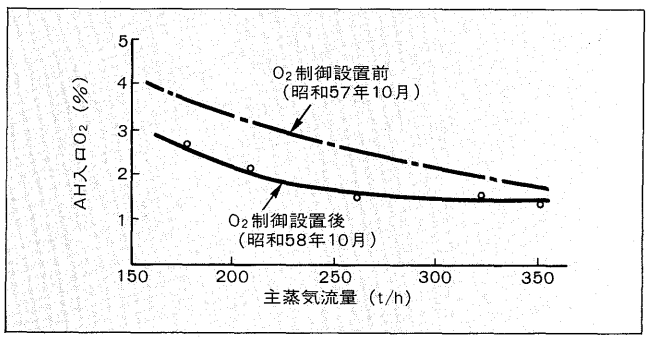


図11　排ガス O_2 濃度



であり，他日実施したステップ試験（100MW→120MW）での変化幅は0～＋2℃，サイクリック負荷試験（110MW±5MW）での変化幅は±2℃と良好な制御結果を得た。また〝AFC＋ガバナフリー〟運転など厳しい負荷変化時の運転状況においても，主蒸気温度の変化幅は±5℃を保持しており，期待どおりの良好な結果が得られた。

以上のように約1年半の実機運転により，本システムの制御性，信頼性，保守性などの優位性を実証することができた。

特に，今回新設した排ガス O_2 濃度制御系の，ち密な制御機能により，燃料費を1年間当たり約800万円節約でき，大きなメリットが得られた。この状況を図11に排ガス O_2 濃度の低減結果として示す。

5　あとがき

富士電機の最近の発電用ボイラディジタル制御システム「FAPS-8000」について，システムの概要を中心に紹介した。しかしまだ検証されねばならないこともあり，今後本システムを最良のものとするため，使用者各位の協力により改良を重ねていく所存である。

最後に実機実証試験に御協力いただいた沖縄電力(株)殿，川崎重工業(株)殿の各位の御好意に対し感謝申し上げる。

参考文献

(1)　大山泰司・吉田昌弘：分散形ディジタル計装制御技術の動向，富士時報，**56**，12，pp. 729～733（1983）

(2)　秋月敏興ほか：東京電力(株)大井3号機の自動化及び制御，富士時報，**48**，5，pp. 340～352（1975）

(3)　松崎勇二・加藤隆夫：火力発電所の計測制御装置――東京電力(株)川崎火力発電所6号ユニット計測制御装置の更新――，富士時報，**55**，11，pp. 754～763（1982）

(4)　堀木光也ほか：DDCによるボイラ用石炭ミルの制御，富士時報，**51**，7，pp. 341～345（1978）

(5)　黒木啓介ほか：DDCによるボイラ自動制御装置とその運転実績――新日本製鉄(株)八幡製鉄所の例――，富士時報，**53**，11，pp. 862～868（1980）

＊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。