

沸騰水型原子力発電プラント診断システムの実機適用とその評価

On-Line Application of a BWR Plant Diagnosis System

原子力発電所は、プラントの稼働率向上及び安定運転が特に強く要求される。そこで、プラントの異常兆候の早期発見、ひいては計画外炉停止の防止を目的とするため、中国電力株式会社島根原子力発電所1号機に対しプラント診断システムを適用した。この種のシステムの実発電プラントへの適用は世界的にも初めての試みであるが、その適用範囲も原子炉炉心部、圧力制御系、給水制御系と多岐に及んでいる。このシステムは、制御用計算機を中心に構成され、10種のプラント信号を使用し、モデルによる推定値との偏差をもとに12に分割されたブロックの診断を5秒周期で実施している。診断の結果は、中央制御室に設置されているカラーCRT及びタイプライタに出力されるとともに、アナンシェータによる警報も出力される。

三宅雅夫* Miyake Masao
 加藤監治** Katô Kanji
 上下利男*** Jôge Toshio

1 緒言

プラントへのプロセス計算機の導入は、従来、主として省力化、あるいはプラント性能の向上を目的としていたが、最近ではプラント稼働率の向上のため、計算機を積極的に活用すべく各応用分野で研究が進められている。従来からプラントには、保護装置、警報装置などが設けられているが、これらはいずれも既に発生したプラントの異常に対する事後処置を目的とするものであり、異常の前兆をとらえ事前処置を行なうものではない。計算機によるプラント稼働率向上を目的とする新しいシステム^{1),2)}(以下、プラント診断システムと呼ぶ)は、プラントの運転状態を監視し、解析することにより異常状態を早期に発見し、計画外炉停止を未然に防ぐための情報を提供することができるようなシステムであることが究極のねらいである。

今回、中国電力株式会社島根原子力発電所1号機に対するプラント診断システムの適用範囲は、原子炉炉心部、圧力制御系、給水系に及んでいる。このプラント診断システムでは各系統ごとに正常時の動特性モデルを持ち、このモデルの出力と実測値との偏差を統計的に処理する方法を採用している。本稿では、このプラント診断システムの実機への適用とその評価を中心に述べる。

2 プラント診断システムの構成

2.1 ハードウェア構成

プラント診断システムの中国電力株式会社島根原子力発電所1号機への適用は、昭和49年3月以来稼働中のプロセス計算機システムに対する機能追加という形をとっている。

図1にプラント診断システム用増設機器も含めたプロセス計算機システム全体のハードウェア構成を示す。プラント診断システムで使用されるプラント入力信号は、表1に示すように10種・17個で、これらは電圧又は電流信号として計算機プロセス入出力装置を介して読み込まれる。また診断結果は、カラーCathode Ray Tube(以下、CRTと略す)、あるいはタイプライタに出力され、異常検出の場合は更に原子炉制御盤上の診断用アナンシェータを駆動して運転員に警報を発する。

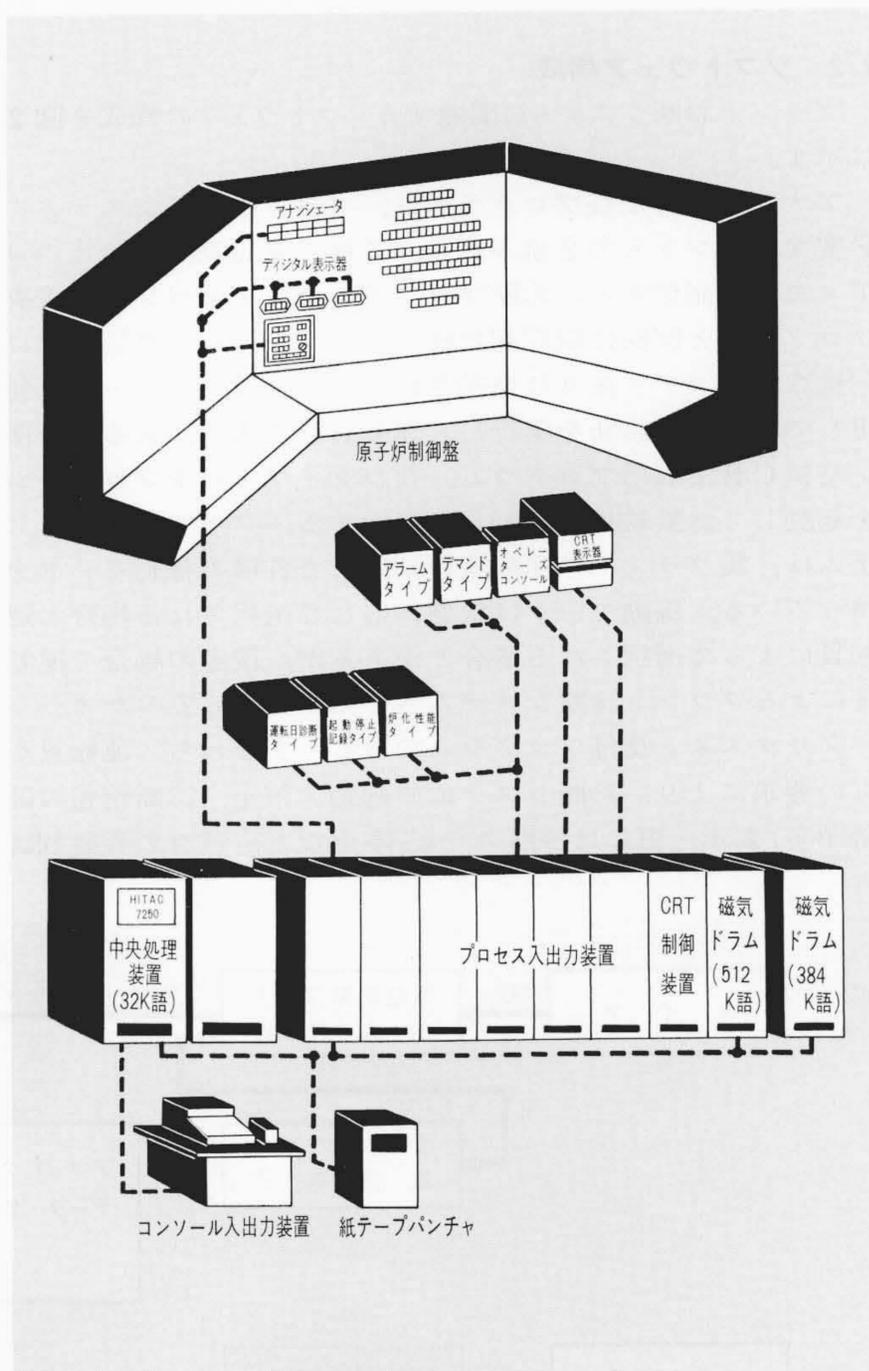


図1 計算機ハードウェア構成 診断結果は、CRT表示器、タイプライタに出力されるとともに、異常時にはアナンシェータが駆動され運転員に知らせる。

* 日立製作所大みか工場 ** 日立製作所原子力研究所 *** 日立製作所電力事業本部

表1 原子炉一次系診断システム関連計測点 観測信号とモデルによる推定値との偏差をもとに診断が実施される。また、これら観測信号はモデルパラメータの同定用データとしても収集される。

No.	診断用入力点		関連系統		
	計測点名称	点数	炉心	圧力制御系	給水制御系
1	APRM	6	○		
2	原子炉圧力	1	○	○	
3	炉心流量	1	○		
4	主蒸気流量	1	○	○	○
5	原子炉水位	1	○		○
6	EPR位置	1		○	
7	加減弁カム開度	1		○	
8	給水温度	2	○		
9	給水調整器出力	1			○
10	給水流量	2			○

注：APRM=Average Power Range Monitor
EPR=Electric Pressure Regulator

2.2 ソフトウェア構成

プラント診断システムに関連するソフトウェアの構成を図2に示す。

アナログ入力走査プログラムは、プラント診断システムに必要なプラント入力を読み込み、これらを周期的に所定のコアメモリに記憶する。診断プログラムは、アナログ入力走査プログラムと同様に周期起動統括プログラムにより周期的に起動され、コアメモリに格納されているプラントデータを使用してプラント診断を実行し、運転員の要求時、あるいは所定時にCRT表示プログラム、及びタイプアウトプログラムを起動して診断結果を運転員に提示する。プラント診断システムは、実プラントの運転状態に応じて各種の稼動モードを持っている。稼動モードは状態に応じて選択される場合と運転員によって選択される場合とがあるが、後者の場合で運転員によるプラント診断システムへの指示を伝えるのがオペレータリクエスト受付プログラムである。すなわち、運転員からの要求により、診断システムの起動/停止、診断情報の随時印字/表示、更には診断の一時停止など、種々の稼動制御

が可能になっている。診断データテーブルには、診断情報が格納され、必要に応じて各プログラムがこれを使用できる構造になっている。

3 プラント診断システムの診断方式

3.1 プラント診断システムの処理手順

図3にプラント診断システムの対象範囲を、また、図4にプラント診断システムの機能構成の概要を示す。すなわち、各系統は主蒸気流量計測系、給水操作機構など幾つかのサブシステムに分割され、状態量計算部で、このサブシステムごとの正常時の動特性モデル^{3),4)}を使って、5秒ごとに走査されたプラント信号よりプラント状態量を計算する。続いて監視量計算部では、この計算されたプラント状態量とこれに対応する実測値とを比較して偏差をとる。この偏差信号は、プラント定常運転時は一般に平均値まわりにゆらいでいるので、偏差信号の平均値及び標準偏差を用いて正規化する。この正規化された偏差信号をサブシステム監視偏差信号と呼ぶ。次に、異常原因と監視偏差信号との因果関係〔例えば、原子炉圧力計測系が異常の場合は反応度、原子炉圧力及びEPR (Electric Pressure Regulator)出力の3個の監視偏差信号が大きく変化する〕を利用し、異常発生ブロック単位の監視指標⁵⁾(ブロック監視指標信号と呼ぶ)をサブシステム監視偏差信号から作成する。このブロック監視指標は、各ブロックの異常の程度を示す指標となる。異常判定部ではこれらのブロック監視指標に対し誤判定率から注意レベル及び警報レベルの2種の判定値を設け、ブロック監視指標がこれらの判定値を超えたときには、異常ブロックをタイプライタに印字するとともにCRTに表示する。

3.2 オンラインのモデル補正

実プラントを良く表現するためには、運転状態などの変化によってモデル補正を行なう必要がある。特に、原子炉は燃料集合体の燃焼が進行するにつれ、反応度が徐々に変化する。更に、ガドリニウムなどの可燃性ポイズンを含む燃料集合体については、このポイズンが燃え尽きるまでは反応度は漸次増加し、以後減少するという複雑な特性を持っている。このためプラント運転では、これら燃料及び可燃性ポイズンの燃焼による反応度変化を炉心流量の調整で補正している。プラント診断システムでは、炉心部については動特性モデルのほかに、上記の燃焼反応度をポイズン効果を含めて計算するモ

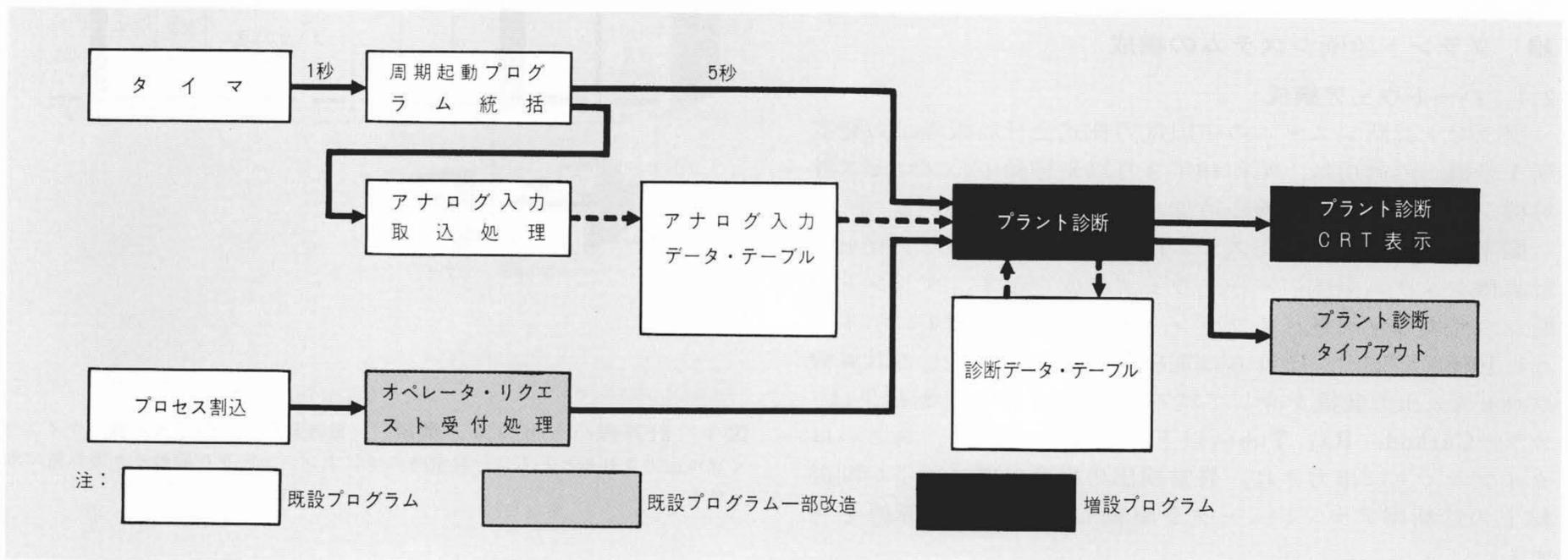


図2 診断システムソフトウェア構成 プロセス計算機に組み込まれた診断プログラムは、5秒周期で稼動し、取り込まれたプラント入力信号を用いて診断を行なう。

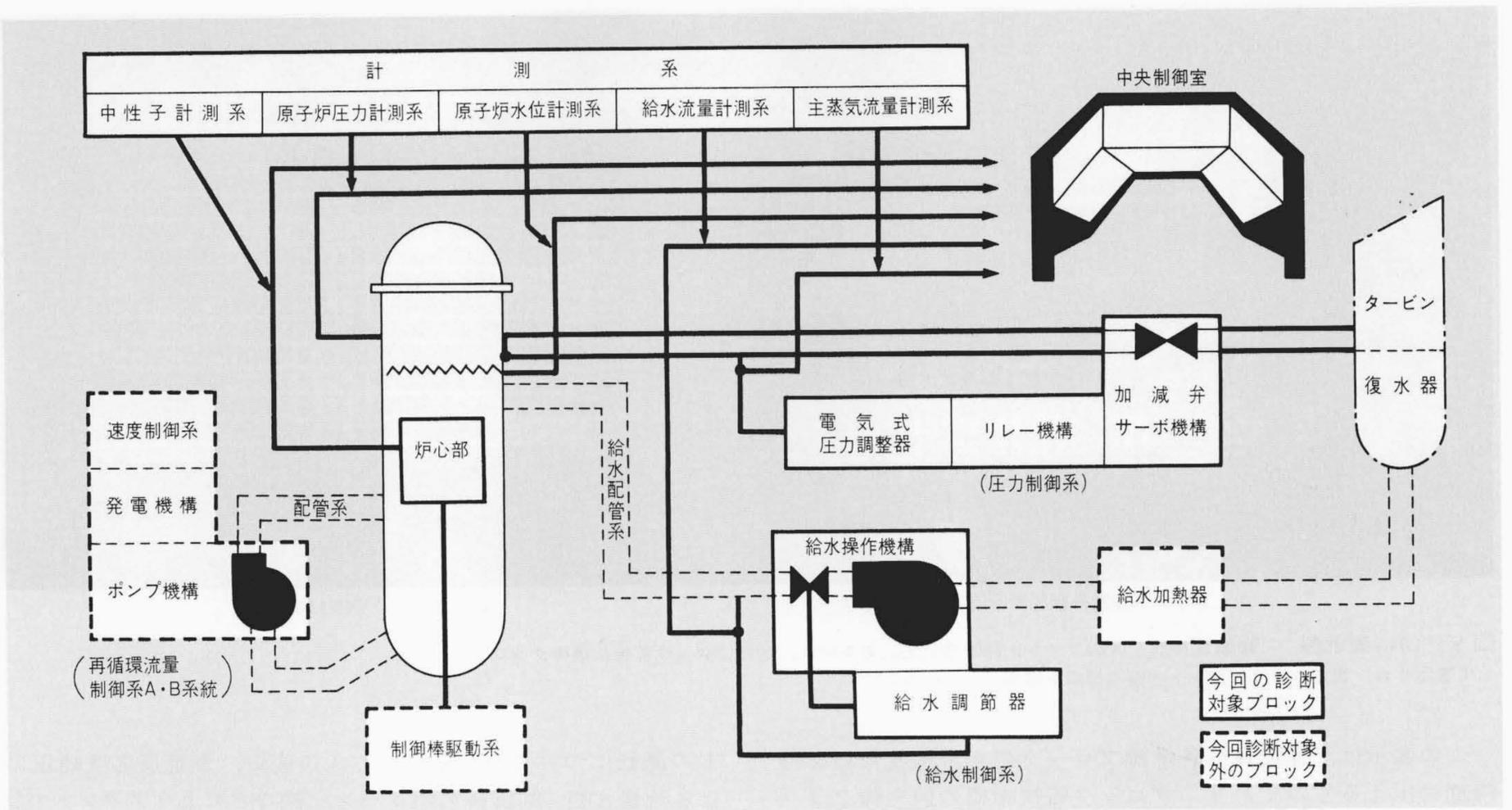


図3 プラント診断システムの診断対象範囲 各系統を計測系、制御回路、操作機構、配管系などにブロック分けしている。合計12のブロックが診断の対象となっている。

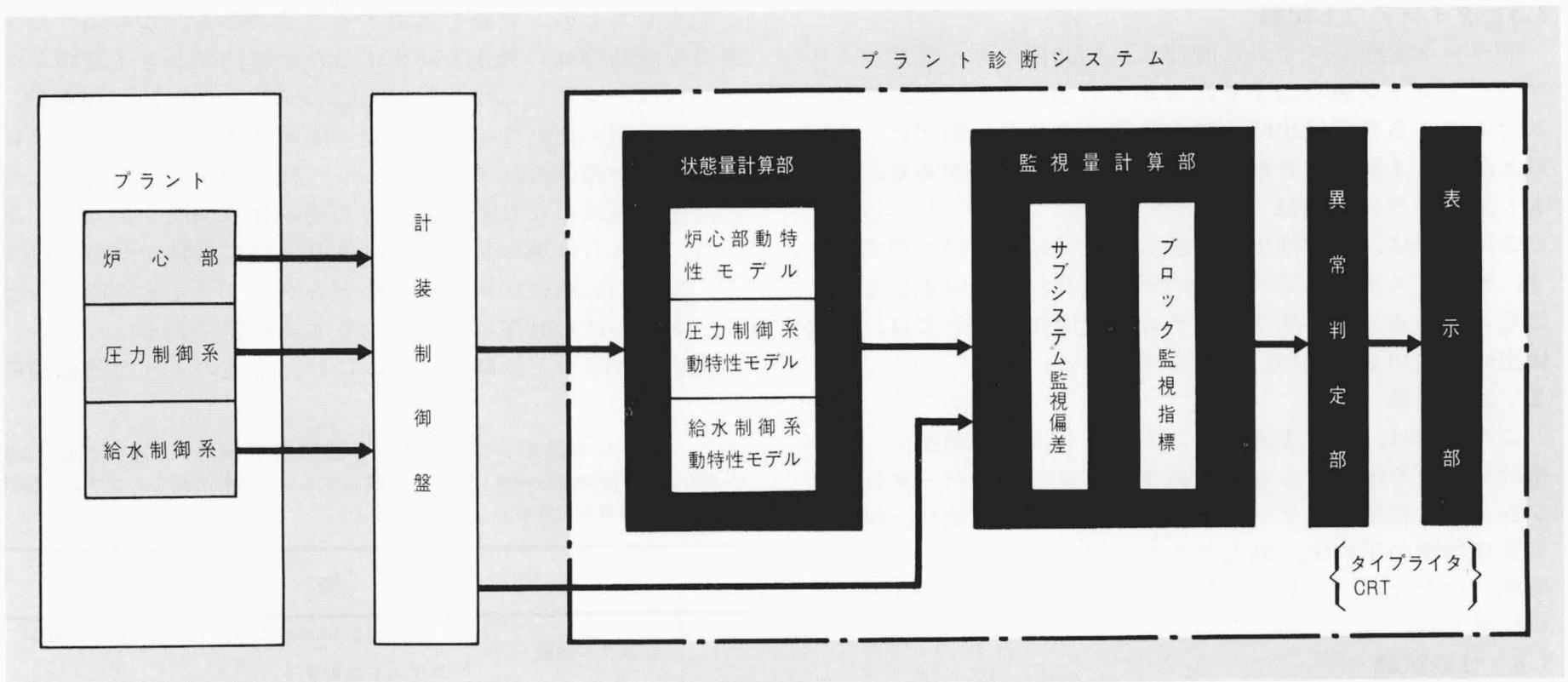


図4 プラント診断システム機能構成図 プラント診断システムは、状態量計算部、監視量計算部及び異常判定部をもち、診断は12個に分割されたブロック単位に行なわれる。

デルを備えている。

3.3 異常判定レベルの設定

プラント診断システムはプラントに対する一種の警報装置である。このため、診断システムの誤動作、例えばプラントが正常であるにもかかわらず、異常と判断しこれを運転員に報知することは運転員のプラント診断システムに対する信頼を失わせる結果となる。このため、運転員に対する人間工学的観点よりプラント診断システムの誤警報率の目標を0.2回/年と設定した。

3.4 CRT表示

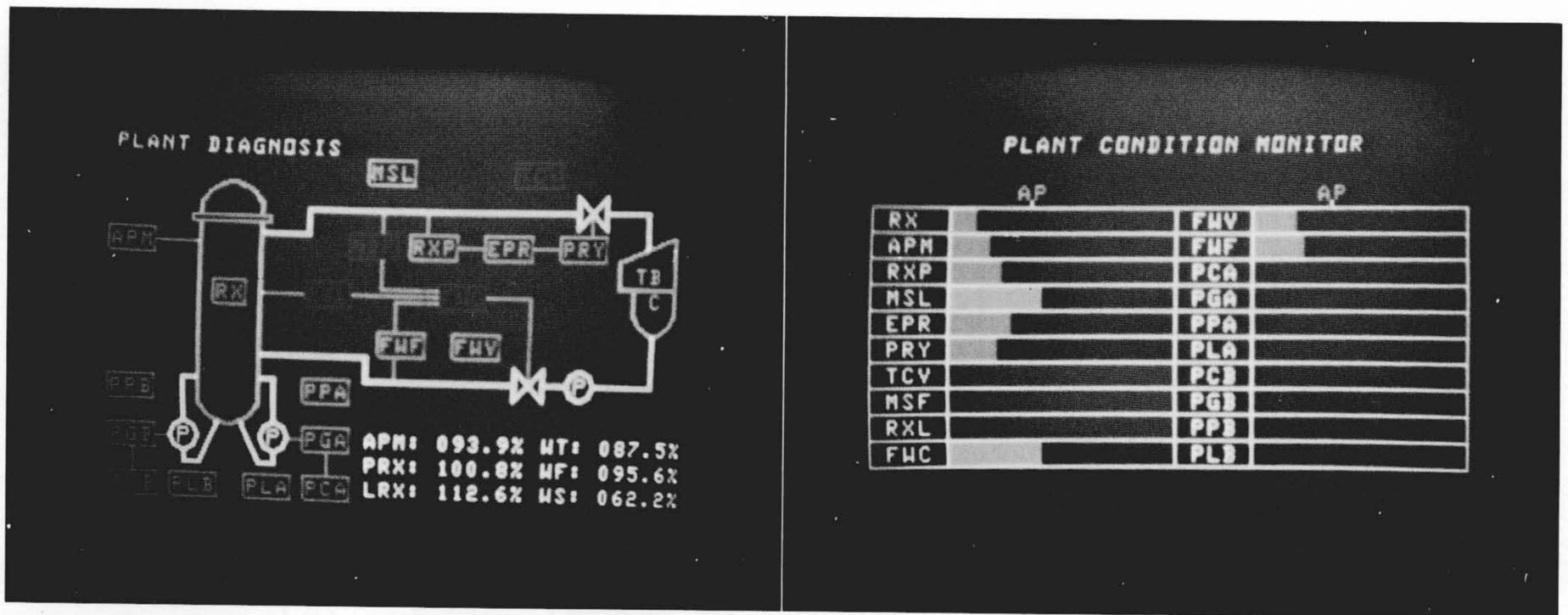
プラント診断システムには、2種のCRTフォーマットを

用意している。その一つはプラント診断結果の系統図表示であり、もう一つはブロック監視指標の棒グラフ表示である。図5(a)にプラント診断シミュレーションテスト時の系統図表示を、(b)にブロック監視指標表示の例をそれぞれ示す。

(1) プラント診断結果の系統図表示

この表示は、プラント系統図中に診断対象の各系統のブロックの状態を色別表示するものであり、各ブロックの枠及び略号は、当該ブロックが正常時は緑色、注意レベルを超えた時は黄色、異常時は赤色でそれぞれ表示される。これらの表示により、運転員は容易に異常箇所の判別ができる。

(2) ブロック監視指標の棒グラフ表示



(a) プラント診断系統図表示

(b) ブロック監視指標表示

図5 CRT表示例 診断結果は、(a)のプラント診断系統図、あるいは、(b)のブロック監視指標棒グラフとして表示され、視覚によりプラント状態の把握を容易にしている。

この表示は、運転員へ各系統ブロックの異常の度合いを時刻々伝えるものであり、ブロック監視指標の値を棒グラフの形で示している。この棒グラフの色は、指標の値により正常領域にあるときは緑色、注意領域の場合は黄色、異常領域の場合は赤色というように3色でそれぞれ表示される。

3.5 タイプアウト記録

プラント診断システムに関連し、約30種のタイプアウト・フォーマットが適時印字されるがその主なものには、診断システムによる異常検出時自動的に印字される診断アラーム記録と、毎日1回印字される診断システム日報とがある。

(1) 診断アラーム記録

この記録は、異常検出時自動的に、又は運転員の要求により、サブシステム偏差及びその平均値及び標準偏差を記録するものである。特にサブシステム監視偏差については、異常検出時前後の2分間の計算値を印字する。

(2) 診断日誌

この日誌は、毎日1回プラント診断システム関連データの統計データを印字するものであり、プラント・データ及びサブシステム監視偏差データの平均値、標準偏差並びにブロック監視指標の平均値、最大値などが印字される。この日誌は、長期間にわたるプラント状態の変化を把握するためのデータを提供する。

3.6 性能試験

このプラント診断システムの性能を調べるため、沸騰水型原子力発電プラントの起動試験時のデータを磁気テープに採取し、これを使って試験を実施した。制御系の設定値変更など、通常の運転では実施しない操作を行なったときのプラントの応答を模擬異常データとして使った。この一例として、圧力制御系の圧力設定点を 0.7kg/cm^2 減少させた場合のプロセス量の変動状態、及びブロック監視指標の応答を、それぞれ図6(a)、(b)に示す。

4 実機への適用

4.1 運転補助機能

沸騰水型原子力発電プラントでは、プラントの安全運転の確認のためプラント運転中に、弁の動作試験、計器の較正、あるいは制御棒の動作試験などが行なわれる。また、プラン

トの運転についても、出力レベルの変更、燃焼反応度補正による流量変更、制御棒のパターン交換などによりプラントの状態は変化をする。しかし、プラント診断システムは、この変化が人為的な原因によるものであると判定するための情報をプラントからは得られないため、プラントになんらかの異常が発生したものと判断し処置することになる。このような不適当な診断警報の発生を防止するために、プラント診断システムには、システムの起動/停止、診断の一時停止/再起動、基準統計量の更新などを運転員の随時要求により行なう運転補助機能が設けられている。もう一種の運転補助機能としては、運転員による診断情報出力の随時要求機能がある。すなわち、それらは運転員の要求により、特に異常がない場合でも、現在の診断の状況、経過などをタイプライタに印字したり、あるいはCRTに表示したりする機能である。

現状のプラント診断システムには、上述のような運転補助

表2 プラント診断システムの主な随時要求機能 現状では、15個のこのような随時要求機能により、実際のプラント運転に即したプラント診断システムの運用ができる。

No.	名 称	機 能 概 要
1	システム起動	現在の出力レベルに応じて、プラント診断システムを起動する。
2	システム停止	プラント診断システムを停止するとともに、それまでの診断情報を出力する。
3	診断情報印字	プラント診断システムの診断情報をタイプライタに印字する。
4	CRT表示	診断情報をCRTに表示する。
5	基準統計量更新	EPR設定点変更時などに、その基準統計量を更新する。
6	システム一時停止	各種定期試験、計器更正時などに、診断を一時停止する。
7	システム再起動	上記一時停止からの回復を行なう。自動モードによる再起動もある。
8	警報レベル変更	機器特性変化などによる警報レベルの変更を行なう。

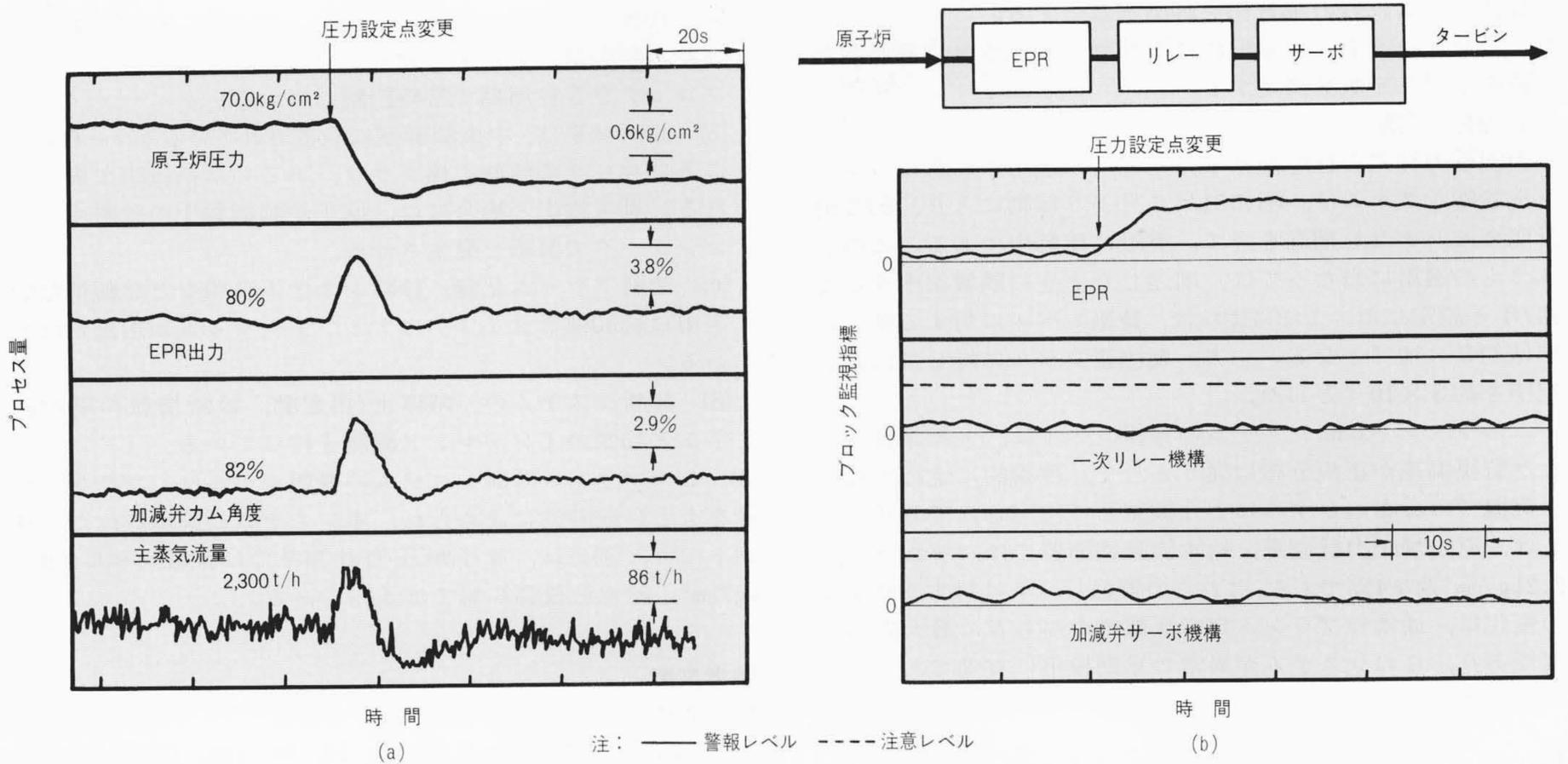


図6 模擬異常データを使った性能試験結果の例 (a)EPR圧力設定点を0.7kg/cm²減少させたときのプロセス量の変動状態を示す。(b)EPR圧力設定点0.7kg/cm²減少時の監視指標の変化を示す。

機能として15個の随時要求機能があり、これらを適宜利用することによって、種々のプラント運転状態に即した診断システムの運用が可能になるとともに、運転員への情報提供にも便宜が図られている。随時要求機能のうち主なものを表2に示す。

4.2 データ収集とパラメータ同定

プラント診断システムの精度は、モデルの精度に依存する。しかし、商用発電所では、モデル同定のためのデータ収集を目的とするプラント運転は実際上不可能である。これを解決するため、プラント診断システム自体にモデル同定用データ収集機能を盛り込み、これによりプラント運転の適切な時期を確実にとらえてデータ収集が行なえるようにしている。

プラント動特性モデルの時定数、ゲインなどのパラメータ

はプラント運転状態、特に原子炉出力に依存する。このため、パラメータを炉心出力ごとに100%用、90%用、80%用として準備し、いずれを使用するかは運転員により選択が可能となっている。これらのパラメータ決定のためのプラントデータは、プラント定期点検後のプラント起動の機会を利用し、上述のデータ収集機能により種々のケースにつき収集される。代表的なデータ収集時期でのプラント運転状態と収集期間を図7に示す。収集するデータは表1に示した全プラント入力信号の5秒ごとのサンプル値である。プラントモデル用パラメータとして、現状の診断範囲では約50個があり、これらパラメータは収集された観測データを基に次に述べる手順により同定している。

(1) プラントシミュレータの出力(計算値)と観測値との差分

データ採取時点	分類	プラント運転状態及びデータ採取期間
A	給水制御変化	410MW → 400MW (5分ずつ)
B	給水制御変化	340MW → 330MW (5分ずつ)
C	原子炉水位変更	90cm → 94cm (5分、10分、25分)
D	EPR設定点変更	0.4kg/cm ² (5分、10分、5分、10分、20分) (発電機出力370MW時)
E	EPR設定点変更	Dに同じ (発電機出力430MW時)
F	定常運転時	100%定常負荷運転中、データ採取期間25分

図7 モデル同定用データ収集時プラント運転状態 これらのプラント運転状態で収集されたデータから、診断用モデルのパラメータが同定される。

を算出し、これらの平方和を評価関数とする。

(2) パラメータを二次勾配法により微小変化させ、評価関数を最小とする定数を決定する。

4.3 評価

中国電力株式会社島根原子力発電所に適用されたこのプラント診断システムは、昭和51年6月より稼動に入り、約2箇月間のモニタラン期間を経て、実際に稼動中である。このシステムの適用に当たっては、前述したように誤警報率を0.2回/年と設定した。これによれば、警報レベルに対する誤判定率は約 3×10^{-8} となる。一方、要注意レベルに対しては誤判定率を約 3×10^{-3} とした。

このプラント診断システムの警報レベルは、上記誤判定率より監視偏差が正規分布に従うとして、理論的に定めた数値を実機での分布のひずみにより調整して決定されており、例えば、原子炉圧力計測系、給水流量調節器では、それぞれ、 0.2 kg/cm^2 及び4%である。これらの警報レベルに対する状態量の変化は、通常のプロント定常状態でのゆらぎの最大振幅程度であり、このシステムが異常の早期検出に有効であることが期待される。

5 結 言

(1) プラントの異常の前兆を早期に検出し、プラント停止を未然に防ぐ処置に関する情報を提供して、プラント稼動率を向上させることを目的としたプラント診断システムを開発し、これを実機プラントに適用して昭和51年6月から稼動に入った。

(2) 実機プラントに適用されたプラント診断システムは、既設のプロセス計算機システムに組み込まれており、次に述べるような特徴をもっている。

(a) 10種類のプラント信号を使い、炉心部、圧力制御系及び給水制御系の3系統を12のブロックに分割し、これらのブロックを5秒周期で常時診断している。

(b) 診断結果は、中央制御室に設置されているカラーCRTに各ブロックの状態を棒グラフ、あるいは系統図で表示される。異常検出の場合には、原子炉制御盤上の診断用アナウンシャータで警報を発生させる。

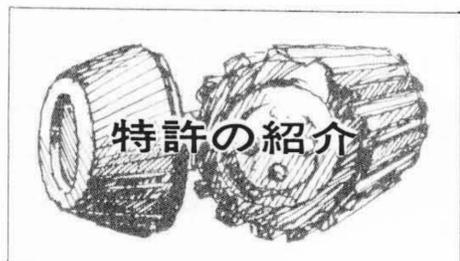
(c) 診断アラーム記録、診断システム日報など診断情報印字用に約30種のタイプアウト・フォーマットが用意されている。

(d) 診断システムの一時停止/再起動、診断情報の随時印字など15個のオンデマンド機能を持っている。

(3) このプラント診断システムの警報レベルは、プラント信号をもとに統計的に決められ、本システムが適用されたプラントでは、例えば、原子炉圧力計測系では警報レベルは 0.2 kg/cm^2 、給水流量調節器では4%である。

参考文献

- 1) 平賀、ほか4名：沸騰水型原子力発電プラントにおける最近の電子計算機応用、日立評論、58、99～104、(昭51-2)
- 2) 飯田：原子力発電プラント診断システムの実機適用とその評価、火力発電大会、10/6～7、1976
- 3) K. Kato : Anomaly Detection System for Nuclear Power Plant Dynamics, Control Testing and Applications Symposium, Knoxville, Tennessee(Oct. 1973)
- 4) F. Murata et al : Experience of Diagnosis System for a BWR ANS Trans., 21(June 1975)
- 5) K. Kato et al : A New Monitoring Method for a BWR Plant Equipment, ANS Trans., 23(June 1976)



特許の紹介

両方向性半導体装置

田中知行・亀井達弥・他2名

特許 第799125号(特公昭50-13634号)

本発明は、それぞれ3個のP-N接合をもち、互いに逆並列的に同一半導体基体中に一体化して配置された2個のサイリスタ領域をもつ両方向性サイリスタに関するものである。

一般に両方向性サイリスタは、2個のサイリスタ領域のエミッタ層を除く他の3層を共通の層から構成する場合が多い。そのような構成の両方向性サイリスタは、負荷電流が一方のサイリスタ領域から他方のサイリスタ領域に移るいわゆる転流時に、一方のサイリスタ領域内に蓄積したキャリアが他方のサイリスタ領域内に移動して、他方のサイリスタ領域に対するトリガー信号として作用し、他方のサイリスタ領域が正規のトリガー信号の与えられる前に導通状態になるいわゆる転流失敗を招く欠点をもっている。この欠点を除去するには、両サイリスタ領域相互間にサイリスタとして動

作しない隔離領域を形成することが考えられるが、その場合には電流容量が減少する欠点が生ずる。

そこでこの発明は図1に示すように、2個のサイリスタ領域のエミッタ層①、②の、積層方向に投影した際に互いに隣接する部分1a、2aのエミッタ効率を他の部分1b、2bより低くしたものである。このような構成にすれば、転流時に一方のサイリスタからキャリアが移動して来ても、1a、2aと隣接層との間のP-N接合は順バイアスされにくく、したがって、転流失敗のおそれなくなる。一方、部分1a、2aは導通時特に負荷電流の大きい間はエミッタ層として通電に寄与し、したがって、隔離領域を形成する場合に比較して電流容量が大きくなる。以上のように、この発明によれば、転流特性が優れ電流容量の大きい両方向性サイリスタが得られる。

なお、部分1a、2aのエミッタ効率を低くする方法としては、図1に示すように厚さを小さくすることのほかに、その部分の短絡エミッタの割合を大きくすることが考えられる。

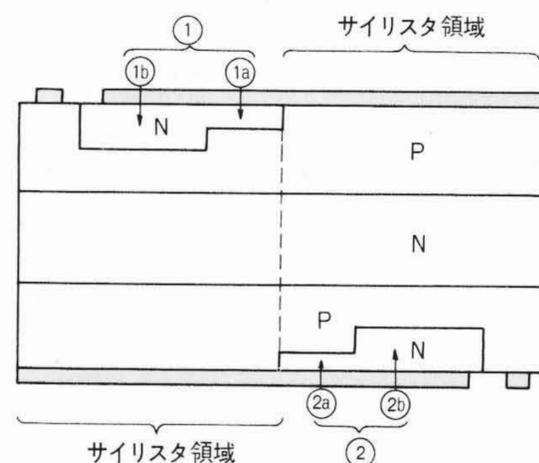


図1 装置の概略断面図