

原子炉異常診断装置の開発

The Development of Reactor Anomaly Diagnosis System

The authors developed a reactor anomaly diagnosis system which is capable of detecting abnormal conditions of a reactor in early stage, whereby preventing them from developing into a fault or breakdown.

This system consists of an input data process unit which collects from the data logger such reactor signals concerning reactor power, control rod position, coolant inlet and outlet temperatures, etc., a central process unit HITACHI computer 10 which detects the anomaly and determines the cause of the detected anomaly, and a color display unit which indicates the result of computation.

In a field test conducted at the Japan Atomic Power Research Institute, in which a material testing reactor (JMTR) was used, this system proved to have an anomaly detecting capability of 2 cent in terms of reactivity, and $\pm 2^{\circ}\text{C}$ in terms of coolant temperature change, and the time from signal collection to computation result indication was 1.5 sec. The abnormal conditions to be dealt with this system fall under the following three categories, i.e., the variation of operational conditions, anomalies in the reactor signal system, and unknown reactivity insertion, and expected percentage of correct judgement for the above abnormal conditions is more than 90%.

大沢康男* Yasuo Ôsawa
加藤監治* Kanji Katô
標 宣男* Nobuo Shimegi
佐野健治* Kenji Sano

1 緒 言

原子炉事故を未然に、あるいは初期の段階で検出し、事故の発生を防止する手段として、原子炉の診断技術が内外において注目されている⁽¹⁾。われわれは原子炉の異常を検出する原子炉異常診断装置（以下診断装置と略す）の開発に着手した。まず日本原子力研究所の材料試験炉（以下JMTRと略す）を対象として、軽水炉炉心の診断装置の試作試験を実施した。JMTRは金属ウランウムを燃料とする材料照射用の軽水冷却炉で熱出力50MWである。

この診断装置を人の診断にたとえてみる。人はまず体温を測り、体の異常の有無を調べ、体温が高いとその原因を調べることになる。診断装置も、まず原子炉の種々の因子に依存する反応度^(*)の動きから原子炉の異常の有無を調べ、もし異常が検出されると、その原因を調べることになる。この診断装置をJMTRにおいて試験した結果、検出感度は冷却水温度変化にして約 $\pm 2^{\circ}\text{C}$ 、制御棒位置では全ストロークの $\pm 0.5\%$ （微調整棒において）の変動を検出できる感度を有する。また信号取込みから異常原因を判定し、結果をカラーディスプレイに表示するまでの所要時間は約1.5秒である。この診断装置はJMTRによる試験の後⁽²⁾⁽³⁾、さらにタービン系を含む動力炉プラントを対象とした診断装置の開発を進め、その実用化を図る所存である。

2 装置の概要

JMTRにおいて試験した軽水炉炉心の診断装置は、HITAC 10を主体として構成される。図1は構成の概要を示すものである。原子炉信号はすでにJMTRに設置されていたデータロガから分岐して利用した。原子炉信号は線形出力系からの出力信号1本、冷却水の炉心出口および入口温度信号各1本、制

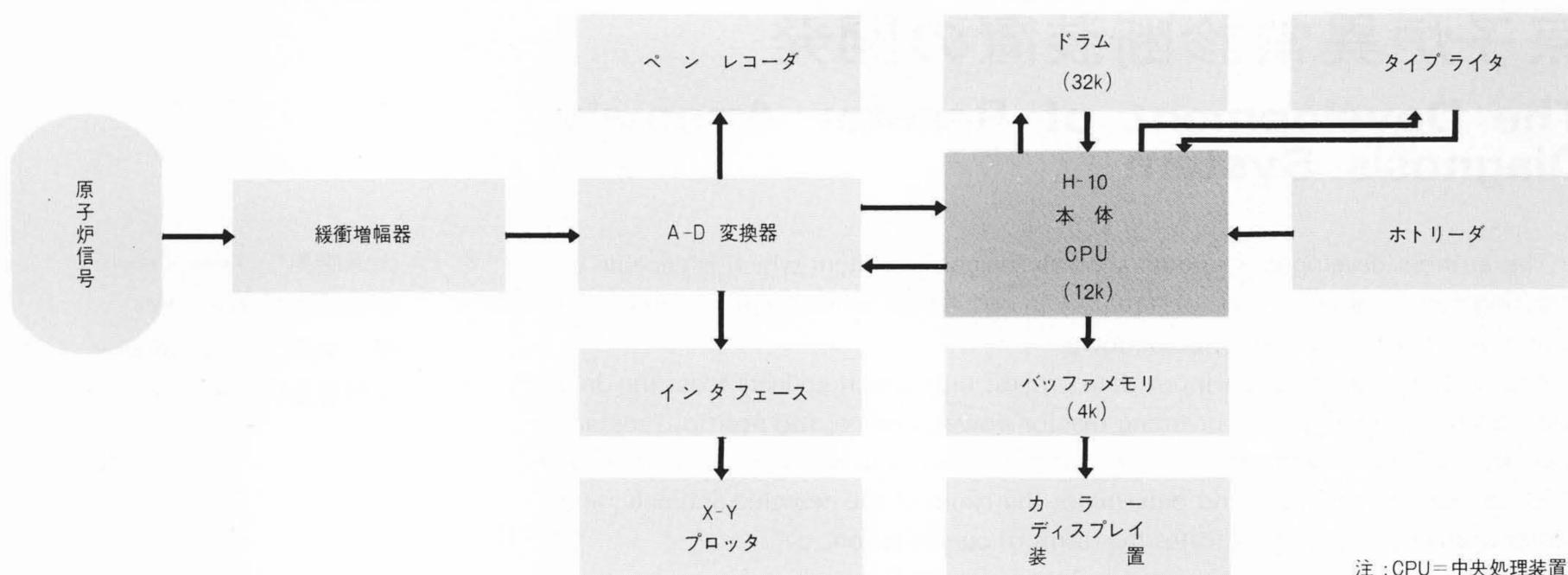
御棒のそう入位置を示す粗調整棒SH-1、SH-2およびSH-3位置指示信号3本、SR-1微調整棒1本およびSA-1、SA-2安全制御棒2本の位置指示信号の合計9種類である。これら原子炉信号は3秒間隔で取り込まれ、各信号はそれぞれ16回採取した値の算術平均として求められる。この1回の信号取込みに要する時間は約150msである。各入力信号はA-D変換器によりデジタル化され、HITAC 10本体で演算処理される。HITAC 10本体はサイクルタイム1.3 μs 、記憶容量12k語のコアメモリを有している。ここでの演算処理の役割は人間の体温測定に対応する入力信号から原子炉炉心内の異常を検出すること、体温が高い場合にその原因を診察することに対応する異常が検出された場合に原因を判定すること、演算処理の結果を必要に応じてドラムに転送あるいは取出しをすることである。これら処理時間は約1.5秒である。さらに、HITAC 10本体は演算処理を制御するため、データタイプライタによる修正、割込みなどの命令を受け、演算処理過程を修正することなどの機能を有している。ドラムは記憶容量32k語を有し、異常検出結果あるいは異常原因判定結果などをデータタイプライタに表示するため、それらのデータを記憶させ、順次表示させる機能を持つ。出力表示装置としては、カラーブラウン管表示（表示時間は平均150ms）、X-Yプロッタ、ペンレコーダおよびタイプライタなどが設置されている。

3 診断技術

3.1 異常検出

異常状態は反応度平衡法を用いて、原子炉からの信号を処理することによって得られる残留反応度の挙動を観察して検出される。ここで検出される異常は、JMTRが出力一定の自

* 日立製作所原子力研究所



注：CPU=中央処理装置

図1 JMTR異常診断装置構成図 JMTRにおける異常診断試験に用いたHITAC 10を主体とする装置の構成図を示す。

Fig. 1 The Block Diagram of Reactor Anomaly Diagnosis System in JMTR

動制御運転で微調整棒が燃料の燃焼に伴う反応度効果を補償している状態を正常として、これ以外の計画的な制御を含めた変動を異常とする。

反応度平衡は次式で与えられる。

$$\rho_{pres} = \rho_{nk} - (\rho_{prod} + \rho_{xs} + \rho_{bu} + \rho_{CT}) + \rho_0 \dots\dots(1)$$

ここに、 ρ_{pres} ：残留反応度

ρ_{nk} ：出力変化による動特性反応度

ρ_{prod} ：制御棒のそう入位置変化による制御棒反応度

ρ_{xs} ：核分裂生成物 ^{135}Xe 、 ^{149}Sm の生成に伴う毒物効果反応度

ρ_{bu} ：燃焼による燃焼反応度

ρ_{CT} ：冷却水温度変化による冷却水温度反応度

ρ_0 ：補正項

残留反応度は上述のように、出力変化による動特性反応度と、その原因とあらかじめ考えられる上記諸反応度との差として示されるため、諸反応度以外の異常反応度がそう入されなければゼロレベルを保つ。しかし実際には、諸反応度の評価誤差のため、正常時にもゼロレベルからずれ、反応度の値にして数cent程度の異常の検出は困難である。しかし残留反応度とその3秒間の変化分（以下時間変化分という）を観察すると、原子炉炉心状態の変化、原子炉信号の異常などに対して挙動が変わることがわかった。この挙動から異常を検出した。

(1) 推定検出法

諸反応度の評価誤差が残留反応度に与える影響を過去のデータから求め、正常時において短時間（3秒程度）ではそれが変わらないとして、次のステップの推定残留反応度を計算する。次に、その時点の実測残留反応度と推定反応度を比較し、あらかじめ信号雑音、計算精度から定めた許容幅より大きい差があれば異常とする。

(2) 統計的検出法

3秒間隔で計算される時間変化分 $\Delta\rho_{pres}$ は実測データを調べると不規則変動をしており、これを正規分布として統計的取扱いが適用できる。集合Aは $n=1.2\dots, N$ の $\Delta\rho_{pres}$ のデータ、集合Bは $n=2.3\dots, N+1$ のデータとする。集合Aはすべて正常な $\Delta\rho_{pres}$ をデータとして持つ。ここで集合Bの $N+1$ 番めの $\Delta\rho_{pres}$ を検定する。A、B両集合のデータがすべて正常であれば、各集合の分散の比はF-分布をする。この

F-分布の値が危険率 α に対応する値 $F(\alpha)$ より大であれば集合Bの $N+1$ 番めの $\Delta\rho_{pres}$ は異常となる。

3.2 異常原因判定

異常の原因は、(1)運転状態の変更 (2)原子炉信号系の異常 (3)未知反応度そう入の3項目に分類される。原因判定は出力信号、粗調整棒位置信号、微調整棒位置信号および冷却水温度信号の4信号を用いる。これら信号の正常時のゆらぎの標準偏差をもとに変動しきいを決める。各信号がそれぞれ、その変動しきい値より増加すれば+1、減少すれば-1、変化しなければ0として3値パターンをつくる。この3値パターンの空間を識別関数により、あらかじめ起こることが予想される異常原因に対応する部分に分割し、これと3値パターンとを照合して原因を判定する。図2は上記異常検出とその原因判定の流れを示すものである。

4 実証試験

本試験は昭和45年6月のJMTR第2サイクル運転から、オフライン試験、オンラインによる残留反応度の挙動、異常検出法、ならびに異常原因判定法などの試験を実施した。さらに計算機システムの試験、カラーディスプレイ装置の製作など一連の試験を実施して、昭和47年3月のJMTR第14サイクル運転をもって終了した。

残留反応度と原子炉運転状態との関係を調べた。制御棒入替え、出力調整、制御棒位置指示信号の雑音発生などにより、残留反応度が顕著な変化をすることを観察した。さらに時間変化分の挙動を調べたところ制御棒入替え、出力調整、制御棒位置指示信号の雑音発生においてパルス的变化を示した。図3は出力調整、制御棒入替えにおける残留反応度とその時間変化分の挙動を示すものである。

図4は異常原因の判定結果を示すもので、ここでは出力が32.5MWから36.0MWの調整において、約1.5MW上昇した

(*1) 反応度とは、原子炉の出力変動をもたらす要因を量的に表わすもので、正の反応度がある限界を越して原子炉に加わると、出力が0.01秒間に数百倍になる。この限界の反応度の値を1dollarと定義し、その1/100を1centとする。

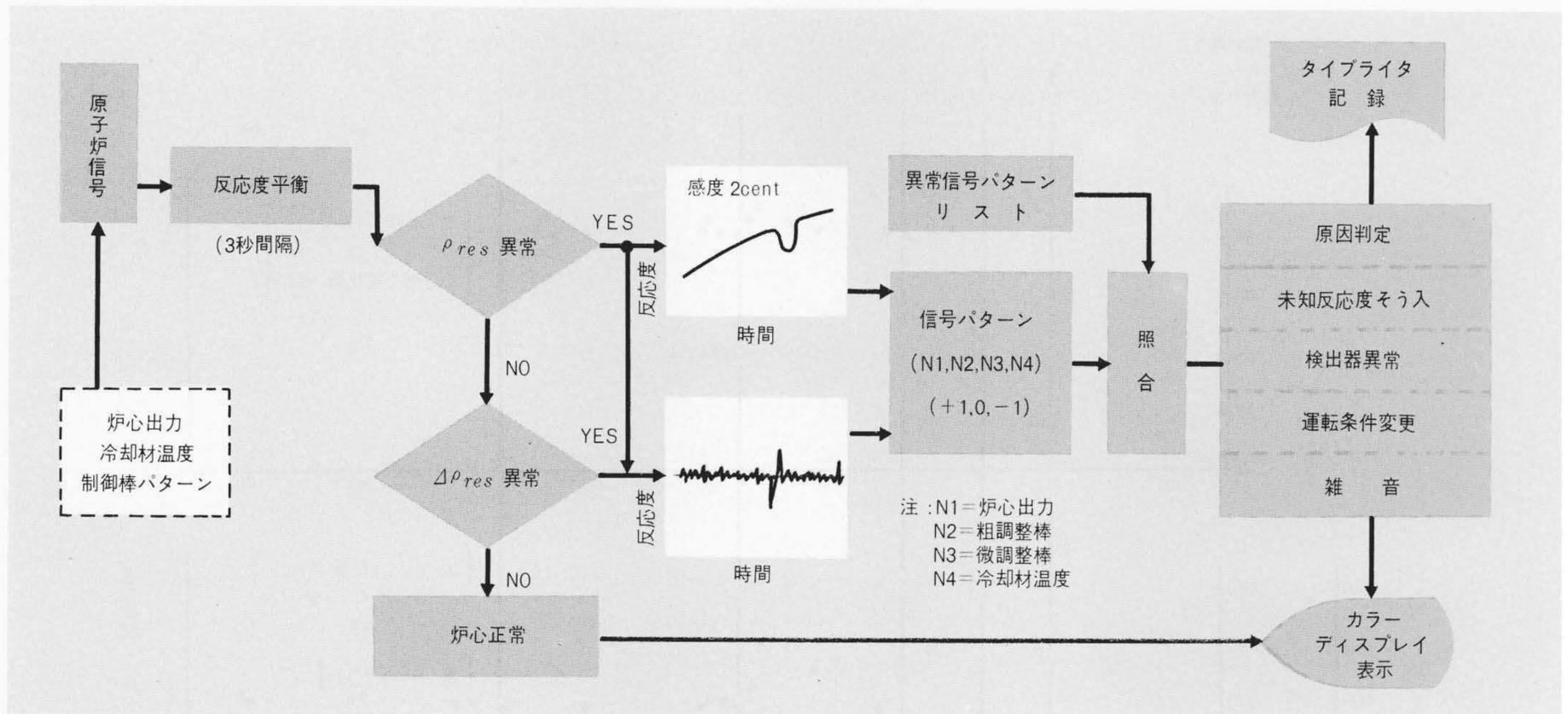


図2 原子炉異常診断装置の流れ図 反応度平衡の残留反応度による異常検出と、異常検出時の異常原因判定および結果の表示の流れを示す。

Fig. 2 The Flow of Reactor Anomaly Diagnosis System

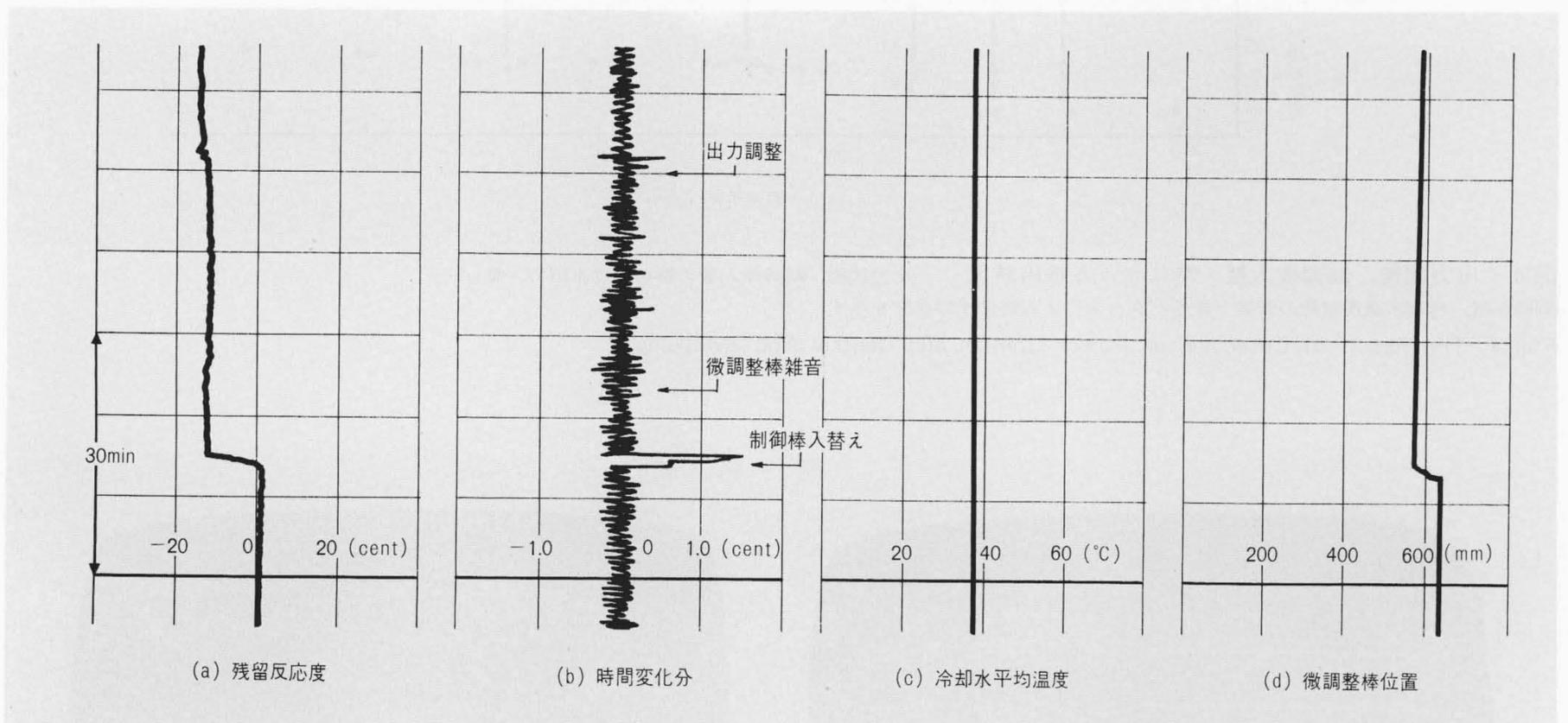


図3 残留反応度と時間変化分の挙動 出力調整，微調整棒位置指示信号の雑音発生，および制御棒入替えにおける残留反応度とその時間変化分の挙動を示す。

Fig. 3 The Behaviors of Residual Reactivity and its Change Rate

時点（時刻番号(2)）で出力変更を検出している。また制御棒入替えの検出状態が時刻番号(4)に示されている。

次に試験結果をまとめると、制御棒入替えでは、粗調整棒を 0.1mm/s の速さで引き抜くと、それを補償する微調整棒による自動制御系は十分追従できるが、粗調整棒を 0.2mm/s の速さで引き抜くと自動制御系の追従不十分により出力ゆらぎが生じた。これらから自動制御系の追従性能と本診断装置の検出性能から、粗調整棒の 2 秒間の連続引抜きによる出力上

昇が検出可能である。

原子炉検出系の欠陥に対する診断装置の応答を調べ、微調整棒と粗調整棒の位置指示系の接触不良などによる雑音を検出した。

未知反応度そう入では微調整棒が位置指示信号の雑音により変動しきい値を越えたと誤判定される可能性がある。この誤判定について尤度比⁽⁶⁾を用いて検討した結果、微調整棒の変動しきい値を標準偏差(0.8mm)とすると、雑音と真の未知

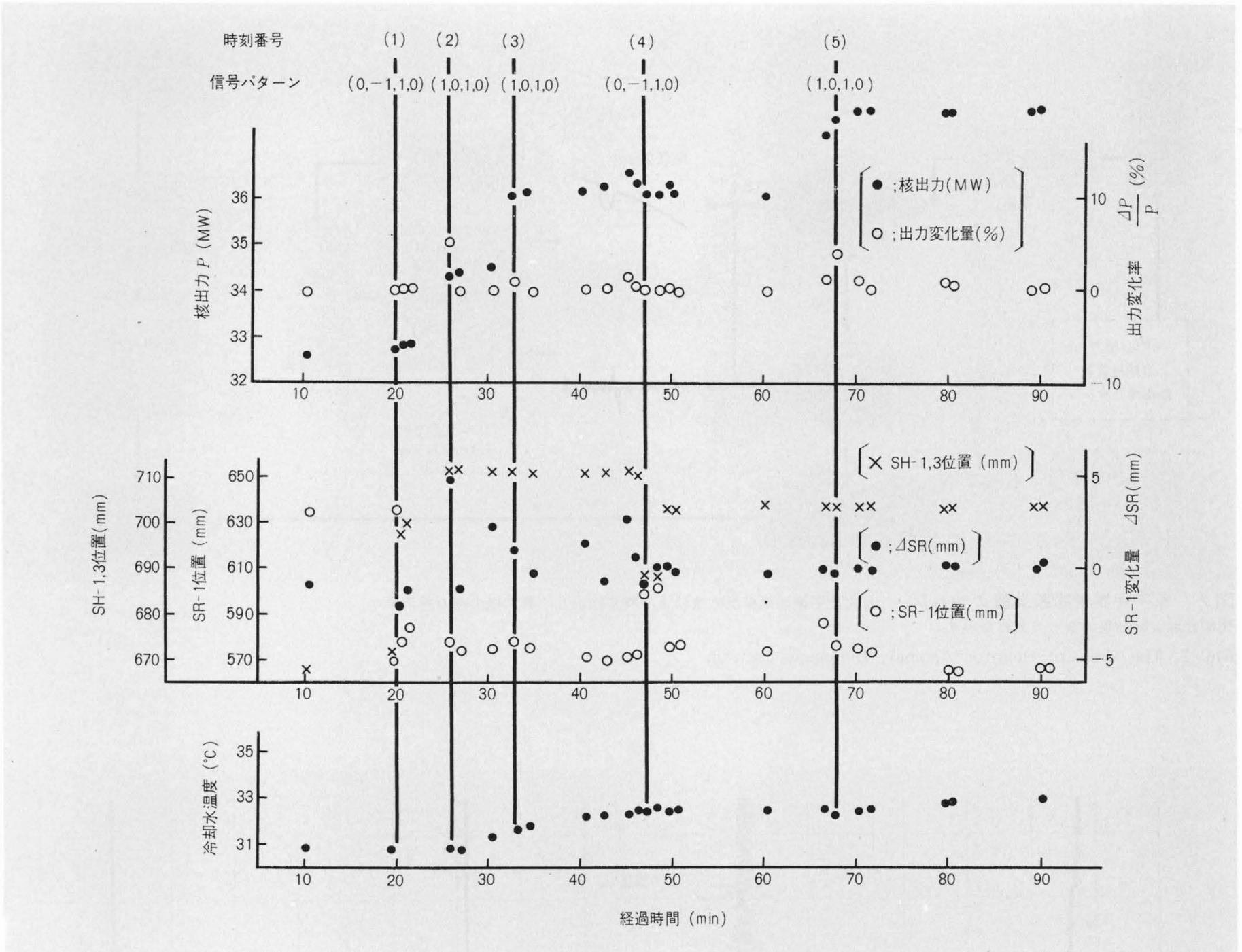


図4 出力調整，制御棒入替え時における検出結果 出力調整，制御棒入替え時における出力，制御棒位置，冷却水温度信号の変動と信号パターンによる異常検知状態を示す。

Fig. 4 The Result of Detection on Power Control and Control Rod Swapping

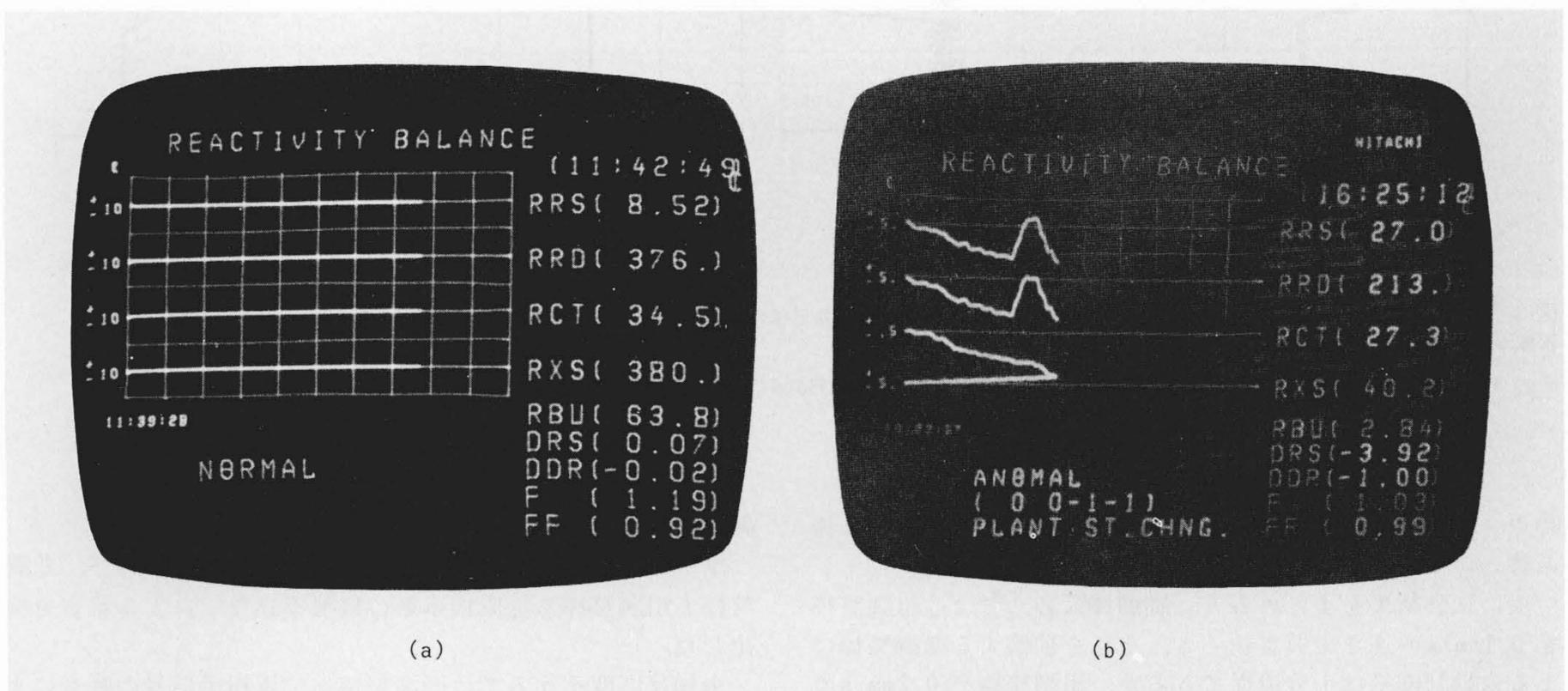


図5 原子炉異常診断装置のカラーディスプレイ表示例 (a)は正常時のカラーディスプレイ表示例を示す。(b)は異常が検出された場合のカラーディスプレイ表示例を示す。

Fig. 5 The Colour Picture Display of Reactor Anomaly Detection System

表1 第11サイクル実験における判定結果 JMTR第11サイクル運転で296時間、約30万回の診断結果を異常原因別に各判定数、正起率を整理した。

Table 1 The Results of Anomaly Cause Decision in No. 11 Cycle Operation

異常原因 θ_i	未知反応度そう入	制御棒入替え	出力調整	粗調整棒異常 (信号異常)	信号雑音
判定数	43	18	1	171	65
生起率*	1.4×10^{-4}	6.0×10^{-4}	3.3×10^{-6}	5.7×10^{-3}	2.2×10^{-4}
信号パターンX	0, 0, ± 0 , 0	0, ± 1 , ∓ 1 , 0	± 1 , 0, ± 1 , 0	0, ± 1 , 0, 0	0, 0, 0, 0

注：*は生起率 = $\frac{\text{判定数}}{\text{診断回数}}$

反応度とを分離することは不可能であるが、信号の標準偏差の3倍(2.4mm)を変動しきい値とすれば雑音を真の未知反応度と分離することが可能になる。図5は本診断装置による異常検出時のカラーディスプレイ表示の一例を示すものである。

5 原子炉診断評価

原子炉炉心にそう入された異常の検出感度を調べるため、常時、制御に使用していない微調整棒SR-2を4mm, 10mm, 16mm反応度に換算してそれぞれ2cent, 5cent, 8centをそう入した。それから反応度として2centの検出感度があることがわかった。ここで一点炉近似動特性モデルを用いて、ランプ状(直線的)反応度そう入におけるJMTRの核熱応答を計算し、これと実験的に求めた診断装置の検出感度とを比較した。反応度そう入速度として0.5cent/sでは統計的検出法によりこれを検出できる。0.67cent/s以上のそう入速度では推定検出法により検出可能となる。

JMTR第11サイクル運転で296時間、約30万回の診断結果から、異常原因の判定結果が正しく求められた割合(正識別率)を求めると0.835を得る(100回の判定のうち83.5回が正しい判定になる)。正識別率を向上させるためには、信号パターン作成における変動しきい値を各信号ゆらぎの標準偏差の3倍にとると0.90以上が期待できる。表1はJMTR第11サイクル運転における試験結果を示すものである。

6 動力炉プラントへの適用

ここで、動力炉として沸騰水型動力炉(以下BWRという)を考えると、まず問題はプラントの大形化により反応度のみでは異常を完全に検出できないことである。これには、体温に相当するパラメータとして反応度のほかに、炉内圧力、冷却水温度、蒸気流量を選ぶ。あらかじめ原子炉の正常状態を模擬するモデルから得られるこれらの値と、実測値との差をパラメータとして異常を検出する。さらに原子炉以外のタービン系、給水系などを含むプラント部分の診断が必要となる。これには、ポンプなど駆動機構についてはその機械音から異常を検出する技術およびインサーブスインスペクションのための各種手法などが開発されて実用化も可能である。またプラント全体の診断システムの一部としては、タービン初段圧力調節系、給水制御系など各サブシステムの異常を、これら各系の状態方程式から得られる逆システムを用いて求める方式も開発されている。これらBWRあるいは高速増殖炉などを対象とした診断装置は、まだシミュレーション実験の段階のものが多く、実用化のためには、実プラントにおける実証実験により信頼性を含めた性能の確認が急がれている。

7 結 言

(1) 検出感度と検出時間

異常の検出感度は反応度に換算して2cent、冷却水温度にして2°C、微調整棒の位置にして4mmである。またこれは反応度のそう入速度としては0.67cent/s以上の検出感度を有することになる。本診断装置は信号取込みから異常原因を判定し、結果をカラーディスプレイに表示するまでに約1.5秒を要する。

(2) 検出異常

本診断装置の試験において検出された異常は、JMTRの出力一定の自動制御以外の運転状態をすべて含んでいる。異常検出において、その原因は一律に原因判定の分類項目により表示され、異常が原子炉事故に拡大する程度など内容的な判定はないが、潜在的な危険性の評価に必要な資料を提供しうる。また原因判定の正識別率は0.90以上が可能である。

(3) 動力炉プラントへの適用

JMTRにおける実験を基に、われわれは動力炉プラントへの診断装置の適用を図っている。動力炉では反応度以外の圧力、温度等の診断用パラメータへの利用、あるいはポンプ系、各制御系個々のサブシステムのための診断技術の利用などに関する実用化試験を進め、動力炉プラントに適用するよう努めている。

本研究にあたっては、日本原子力研究所大洗研究所材料試験炉の関係各位に多大のご協力をいただいた。ここに深く感謝の意を表わす次第である。

参考文献

- (1) Papers Presented at the IAEA Specialist Meeting on Analysis of Measurements to Diagnose Potential Failures. 10-11 April 1972 ROME (ITALY)
- (2) 加藤ほか「JMTR異常診断装置の実証実験」日本原子学会年会要旨集 D22 (昭47-3)
- (3) Y. Osawa et al "On-Line Detection of Anomalous Reactivity in the JMTR" ANS Transaction 14, 2, 677 (1971)
- (4) 加藤ほか「JPDR-2異常診断(炉心部異常検出システム)」日本原子学会年会要旨集 D31 (昭48-3)
- (5) 村田ほか「JPDR-2異常診断(原子炉を除く1次系の異常検出)」日本原子学会年会要旨集 D32 (昭48-3)
- (6) W. B. Davenport, Jr. 瀧保夫訳：不規則信号と雑音の理論 pp368 (昭43 好学社)
- (7) 坂井利之：パターン認識の理論 (情報科学講座 E19.1) pp71 (昭40 共立出版)