

JAERI-M
84-137

炉雜音解析法を用いたNSRRの異常診断(II)

1984年8月

林 光二・尾熊 律雄*・島崎 潤也・渡辺 光一
篠原 慶邦・鈴川 芳弘・大友 正一・宇野 久男
谷内 茂康・堀木欧一郎

JAERI-M レポートは、日本原子力研究所が不定期に公刊している研究報告書です。

入手の問合せは、日本原子力研究所技術情報部情報資料課（〒319-11 茨城県那珂郡東海村）あて、お申しこしください。なお、このほかに財団法人原子力弘済会資料センター（〒319-11 茨城県那珂郡東海村 日本原子力研究所内）で複写による実費頒布をおこなっております。

JAERI-M reports are issued irregularly.

Inquiries about availability of the reports should be addressed to Information Section, Division of Technical Information, Japan Atomic Energy Research Institute, Tokai-mura, Naka-gun, Ibaraki-ken 319-11, Japan.

© Japan Atomic Energy Research Institute, 1984

編集兼発行 日本原子力研究所
印 刷 日立高速印刷株式会社

炉雑音解析法を用いたN S R R の異常診断（Ⅱ）

日本原子力研究所東海研究所原子炉工学部

林 光二・尾熊 律雄^{*}・島崎 潤也・渡辺 光一
篠原 慶邦・鈴木 芳弘⁺・大友 正一⁺・宇野 久男⁺
谷内 茂康⁺・堀木欧一郎⁺

(1984年7月10日受理)

本報告はN S R R にみられる炉出力変動現象の原因を探るために行われた原子炉異常診断実験（Phase-II）に関するものである。

Phase-II の実験は自動制御系の動特性評価およびディフューザー・システムの運転に起因する外乱の究明を目的として行われた。

この結果、スレーブ・サーボ系の周波応答関数が約 0.3 Hzで比較的顕著なピークを持つため、自動制御系に何らかの外乱が印加されると制御棒駆動機構の不感帯の効果が加わって炉出力に減衰振動や発振が起ることがわかった。

また、ディフューザー・ポンプを運転すると炉心周りの冷却材温度ゆらぎが著しく増大し、炉出力変動も大きくなることがわかった。

⁺ 安全工学部

* 現在、スウェーデン・ストゥツヴィック研究所

Diagnosis of NSRR Based on Reactor Noise Analysis (II)

Koji HAYASHI, Ritsuo OGUMA*, Junya SHIMAZAKI, Koichi WATANABE,
Yoshikuni SHINOHARA, Yoshihiro SUZUKAWA†, Shoichi OHTOMO†,
Hisao UNO†, Shigeyasu YACHI† and Ohichiro HORIKI†

Department of Reactor Engineering,
Tokai Research Establishment, JAERI

(Received July 10, 1984)

This report is concerned with the diagnostic experiment (Phase-II) which has been made to investigate the cause of remarkable fluctuations in reactor power of NSRR.

The Phase-II experiment was performed with the aim to evaluate the dynamics of automatic control system and to investigate the disturbance caused by the operation of diffuser system.

The results show that damped oscillation or persisting oscillation of reactor power occurs when any disturbance is applied to the automatic control system because of the transfer function of the slave servo system which has a relatively remarkable peak at about 0.3 Hz, in addition to the effect of a dead band in the driving mechanisms of control rods.

Further, it has been found that coolant temperature fluctuations around the reactor core as well as the reactor power fluctuations increase remarkably when the diffuser pump is in operation.

Key Words : Reactor Diagnosis, NSRR, Reactor Noise Analysis,
Automatic Control System

† Department of Nuclear Safety Research, Tokai, JAERI

* Present employer, Studsvik Energiteknik AB, Sweden

目 次

| | |
|-----------------------------|----|
| 1.はじめに | 1 |
| 2.原子炉異常診断実験(Phase-II) | 2 |
| 2.1 実験の経過 | 2 |
| 2.2 測定変数 | 2 |
| 2.3 測定系と収録データ | 3 |
| 3.炉雑音データの解析方法 | 9 |
| 3.1 前処理およびフーリエ変換 | 9 |
| 3.2 スペクトル推定 | 9 |
| 3.3 1入力1出力系の解析 | 10 |
| 4.解析結果 | 10 |
| 4.1 波形観測 | 10 |
| 4.2 中性子束信号(炉出力変動)の解析 | 13 |
| 4.3 自動制御系の動特性評価 | 15 |
| 4.4 冷却材温度ゆらぎ信号の解析 | 18 |
| 5.結論 | 49 |
| 謝辞 | 49 |
| 参考文献 | 49 |

CONTENTS

| | |
|--|----|
| 1. Introduction | 1 |
| 2. The Experiment (Phase-II) for Reactor Diagnosis | 2 |
| 2.1 Process of the experiment | 2 |
| 2.2 Measured variables | 2 |
| 2.3 Measurement system and recorded data | 3 |
| 3. Methods for the analysis of the reactor noise data | 9 |
| 3.1 Preprocessing and Fourier transform | 9 |
| 3.2 Spectral estimation | 9 |
| 3.3 Analysis of the single-input/single-output system | 10 |
| 4. Results | 10 |
| 4.1 Observation of the signal forms | 10 |
| 4.2 Analysis of the neutron flux signals | 13 |
| 4.3 Evaluation of the dynamics of the automatic control system | 15 |
| 4.4 Analysis of the coolant temperature fluctuation signals | 18 |
| 5. Conclusion | 49 |
| Acknowledgement | 49 |
| References | 49 |

1. はじめに

本報告は先に発表された「炉雑音解析法を用いたNSRRの異常診断(I)¹⁾」に続く第2報である。

原研NSRR(原子炉安全性試験炉: Nuclear Safety Research Reactor)は、定常出力運転時に最大出力(300kW)付近で運転すると、その運転条件によってはかなりの大きさで炉出力変動を引き起す事が知られている。この現象を解明する目的で、炉雑音解析法を用いた異常診断が計画され、第1報で述べた様に第1回目の異常診断実験(Phase-I)とその解析が行なわれた。

Phase-Iの実験は、異常診断の第1段階として「炉雑音解析の立場からみたNSRRの現状」を把握する事を目的として行なわれたものである。原子炉の運転条件としては、炉出力300kW、自動制御運転であり、ディフューザー・ポンプは運転状態(一部停止状態)とし、その水量調節用弁の開度は一定(微開)というものであった。この実験で得られたデータを解析した結果、①炉出力計に現われるパルス状の大きな変動分は、約0.04Hz～0.31Hzの周波数を基本波とする3つの変動成分に分類されるが、いずれの変動も自動制御系の不安定性に起因している事、②ディフューザー運転時に、中性子束信号に0.84Hz、2.5Hzの顕著な変動成分が生ずる事、③制御系に関しては、自動制御運転中に制御棒位置信号(Bank指示計信号)が中性子束信号より約1秒程先行して変動を起す事、等が明らかになった。

このため、異常診断の次の段階の作業としては、①自動制御系の動特性評価、②制御系を不安定にする原因(外乱)の調査、の2つの方向からのアプローチが必要であると結論された。

ところで、②の「何が外乱となっているか?」という原因調査については、その解決への糸口としてディフューザー・ポンプの運転と炉出力変動との関連性があげられる。この関連性は経験的に知られているだけで、その機構や関連の度合などはこれまでに明らかにされた事はなかったが、物理的にみてディフューザーの運転により炉心周りの水流が乱される事から、冷却水の温度変動等を通じて炉心に反応度外乱として寄与する可能性は十分考えられる。

また、①の自動制御系の特性評価については、各種入力信号を印加し制御系内部の各点での信号の応答を測定するといった本格的な実験やアナログ計算機を用いたシミュレーション・スタディも行なう必要があるが、とりあえずPhase-Iで測定されたBank指示計信号(すなわち6本の制御棒を駆動するための目標値信号)の他にいずれか1本の制御棒の位置信号を測定すれば、2重サーボ系で構成される制御系のうち少なくともスレーブ・サーボ系については動特性の概要をつかむ事が可能となる。

以上の様な検討を経て、制御系(特にスレーブ・サーボ系)の動特性評価および炉心周りの水流の乱れ(冷却材温度ゆらぎ)と炉出力変動の関連性の調査を目的とした実験Phase-IIが計画された。

本報はこのPhase-II実験の概要とその診断解析結果をまとめたものである。

2. 原子炉異常診断実験 (Phase-II)

実験は、第1章で述べた様に、主として炉心周りの水流の乱れ（水温の変動）と炉出力変動の関連性を明らかにする事を目的として行なわれた。以下に実験の概略を記す。

2.1 実験の経過

前回行なったPhase-I実験（1983年7月14日および7月18日）は熱出力校正試験のための運転に便乗して実施したものであるが、今回のPhase-II実験は原子炉の運転モードやディフューザーの運転条件を任意に設定するため単独の実験とし、1983年12月9日に実施した。

この時の運転条件はFig. 2.1に示したとおりである。炉出力は定常出力運転で最大出力(300 kW)から出力変動に対する余裕をみて10%落ちの270kWとした。また運転時間はプール水の温度上昇等を考慮して、高出力運転は3時間以内とする事とした。一方、ディフューザー・ポンプは原子炉の運転開始時は停止状態とし、その状態でのデータが収録された後に運転を開始して、ディフューザー・システムの水量調節弁の開度を適時変更しながらデータを収録する事とした。なお、原子炉の運転モードについては、出力上昇時からディフューザーの水量調節弁の開度変更時まで全ての区間に渡り自動制御運転とし、ディフューザーの弁開度依存のデータを全て収録した後に約10分間程の手動運転（自動制御系OFF）を試みた。

2.2 測定変数

測定変数としてはTable 2.1に示した11変数を選択した。前回のPhase-I実験と異なる点は、炉心周りの冷却材温度ゆらぎを捕えるために3本の熱電対（Channel 9～11）を新たに準備した点、および制御系の特性評価、特に前回の実験で問題となったBank信号と中性子束信号との関連を明らかにする目的で6本の調整棒のうちの1本Rod #1の指示計出力信号（Ch. 8）を新たに追加した点である。また、前回に行なわれた水中音響信号、中性子検出器案内管支持部の加速度計信号は今回の測定では見合わせた。

Fig. 2.2にNSRRの概観と各センサーの位置を示す。またFig. 2.3に中性子検出器、制御棒、ディフューザー・ノズルの位置関係を示す。中性子検出器（ch. 1～4）および燃料中心温度（ch. 5, 6）はPhase-I実験の場合と同じである。

さらに、Fig. 2.4には炉心部と冷却材温度ゆらぎ測定用の熱電対（ch. 9～11）の位置関係が示してある。NSRRの炉心はプール水の自然循環により冷却が行なわれている。炉心下部の支持部（スカート）には強制循環用のダクトが接続されているが、現在のところ開口部はシールされており、プール水は炉心側面のコア・シュラウドの開口部から直接炉心に流入し上部グリッド板を抜け出るという形態になっている。このため熱電対は開口部付近（ch. 9）、上部グリッド板から上に10 cm（ch. 11）およびコア・シュラウド側面（ch. 10）の3点に設定し、それ

ぞれ炉心入口、出口、炉心側面の測定を受け持たせる事にした。

一方、今回の実験で新たに追加したもう 1 つの変数である制御棒位置信号 (Rod-1) は Rod # 1 の指示計部分から信号を取り出したものであり、Bank 信号 (ch. 7) と Fig. 2.5 に示す関係にある。すなわち、Bank 信号は自動制御運転で 6 本の調整棒を動かす際の目標値信号であるのに対して、Rod # 1 信号は調整棒 (No. 1) の実際の位置を示す信号である。この両信号を解析する事により、制御系に関するある程度の評価が可能であろうと考えられる。

2.3 測定系と収録データ

前節で述べた 11 の信号は Fig. 2.6 に示すデータ収録回路を通してアナログ・データ・レコーダに録音された。各信号のゆらぎ成分は S/N 比良く収録するために直流成分 (バイアス成分) を除去した後に増幅する必要がある。このため前回の測定では音響信号や加速度計信号を除く全信号に対して電池式の逆バイアス回路で直流分を除去していたが、この方法ではバイアス成分が時間とともに変動して行く様な信号の場合データ収録中でも再調整の必要が生じ、これを行なうと収録データに不連続点が生ずるので解析に支障を来たすという欠点を持っていた。

そこで今回の測定ではハイパス・フィルタをできるだけ使用することを試みた。この結果、バイアスの無調整化が実現できたが、信号成分の周波数が低いためカットオフ周波数を低く設定しなければならず時定数の関係から過渡応答特性が悪化してしまった。

なお、各信号は出力上昇時から出力停止に至る約 3 時間に渡って収録された。テープ速度は 1.875 Inch/sec に設定され、約 1700 feet の測定データが得られた。

Table 2.1 Measurement variables in the Phase-II experiment

| Number | Variables Name |
|--------|---|
| 1 | Neutron Flux (Linear) |
| 2 | Neutron Flux (Log) |
| 3 | Neutron Flux (Safety#1) |
| 4 | Neutron Flux (Safety#2) |
| 5 | Fuel Temperature (#1) |
| 6 | Fuel Temperature (#2) |
| 7 | Control Rod Position (Bank Indicator signal) |
| 8 | Control Rod Position (Rod#1 Indicator signal) |
| 9 | Inlet Temperature of Reactor Core |
| 10 | Coolant Temperature of Reactor Core Side |
| 11 | Outlet Temperature of Reactor Core |

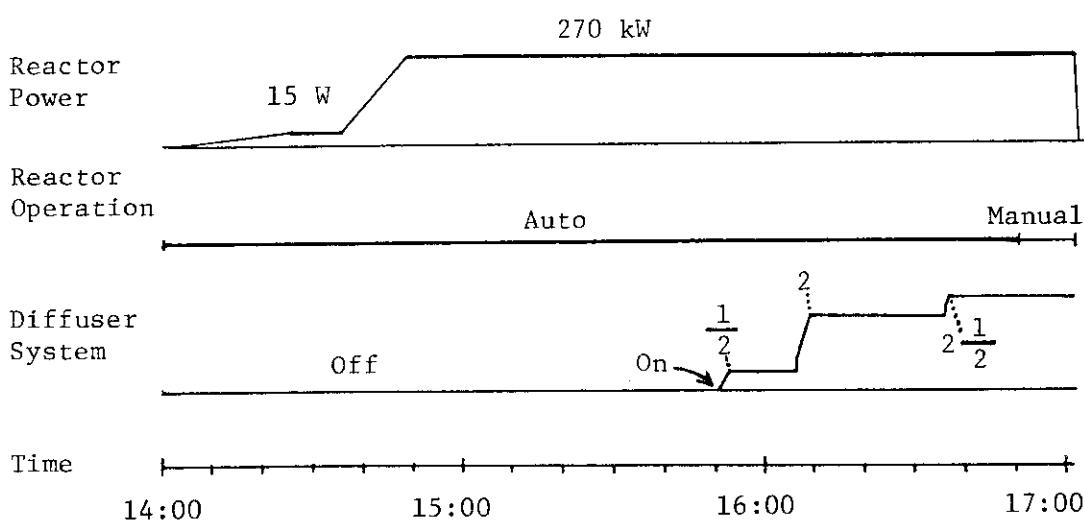


Fig. 2.1 Time table of the operational conditions of the NSRR reactor and the diffuser system in the Phase-II experiment

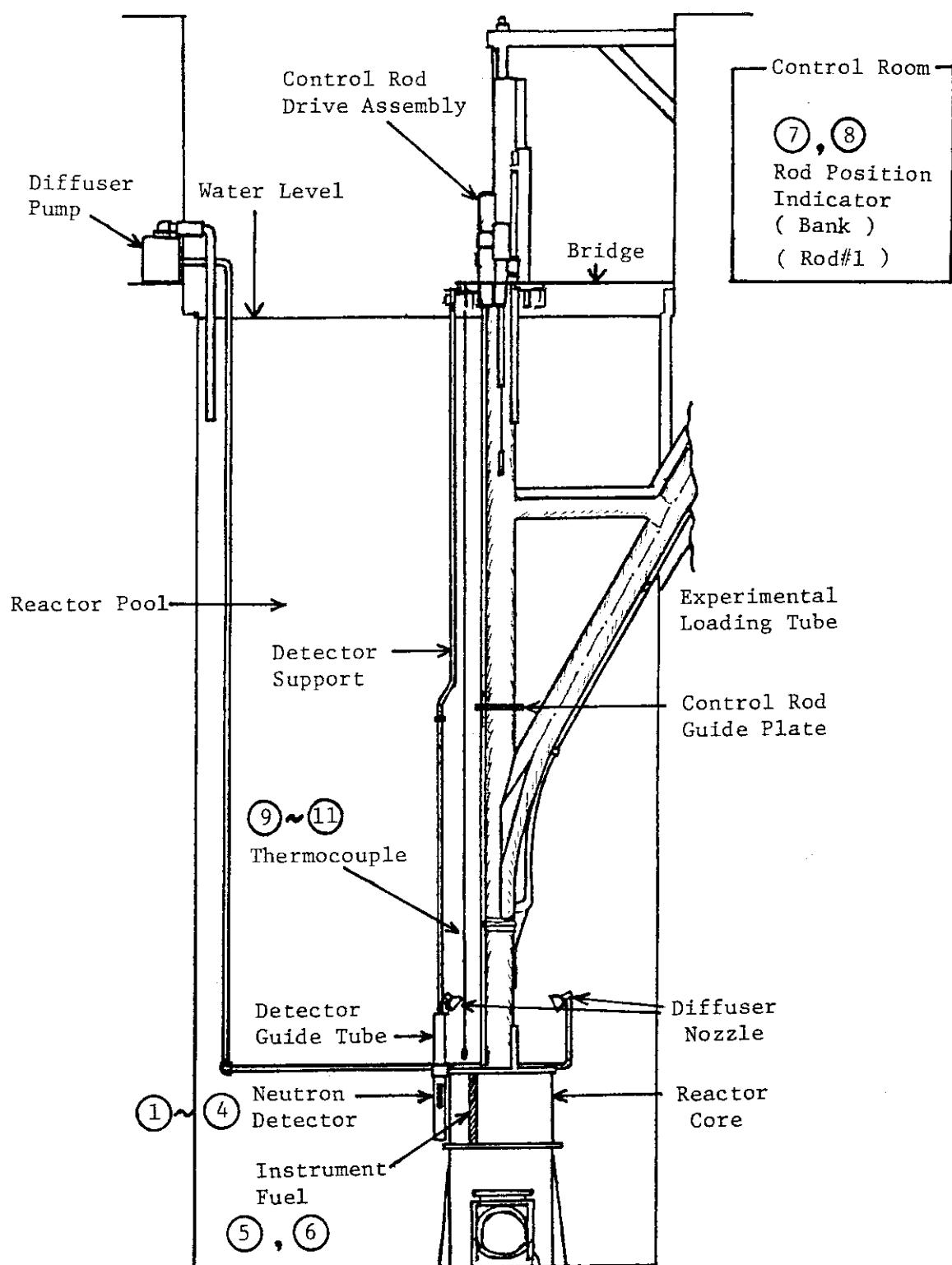


Fig. 2.2 General view of NSRR and location of sensors

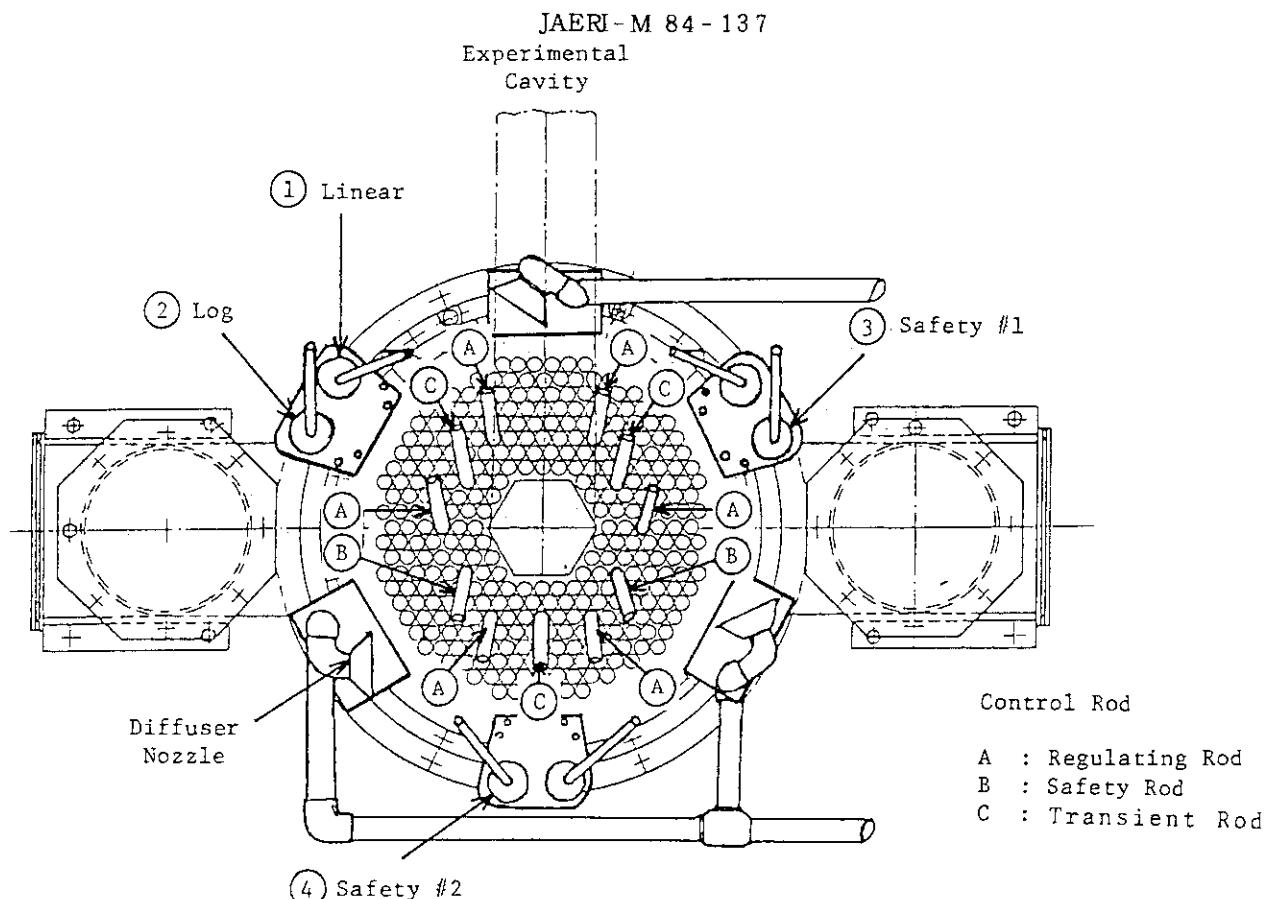


Fig. 2.3 Location of neutron detectors, control rods and diffuser nozzles

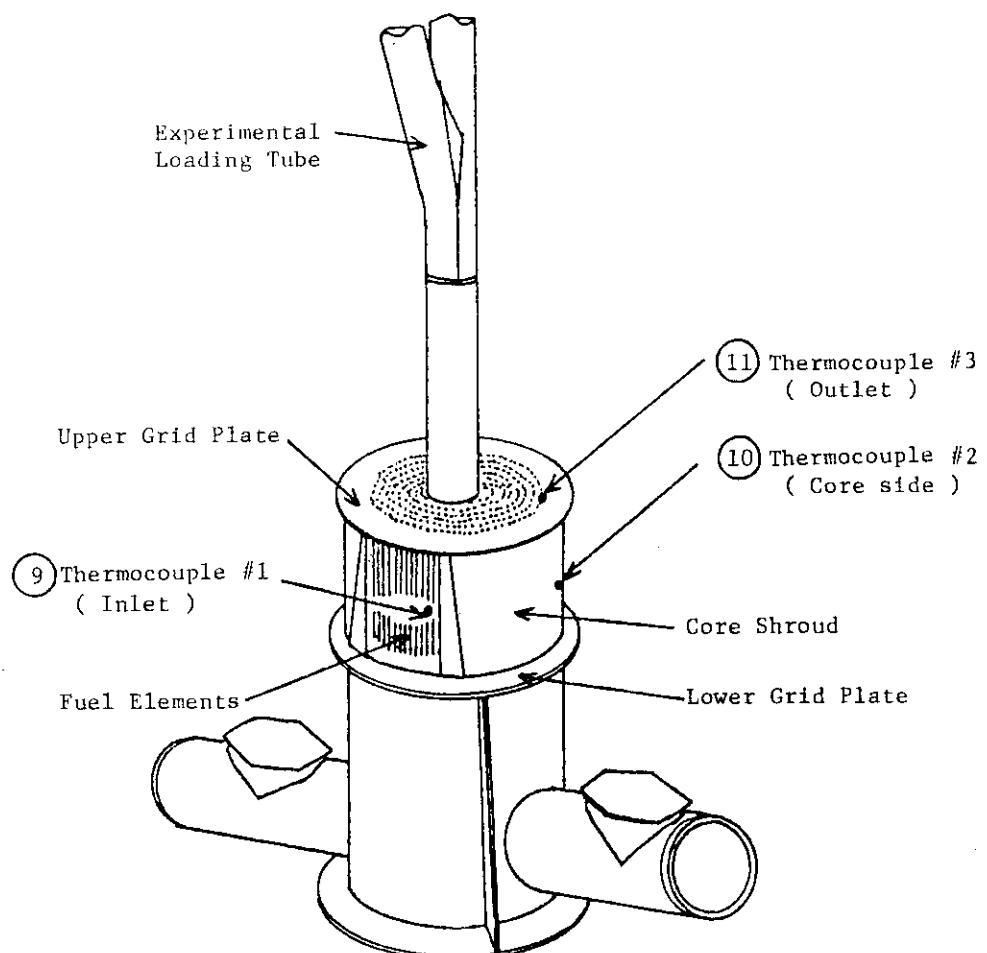
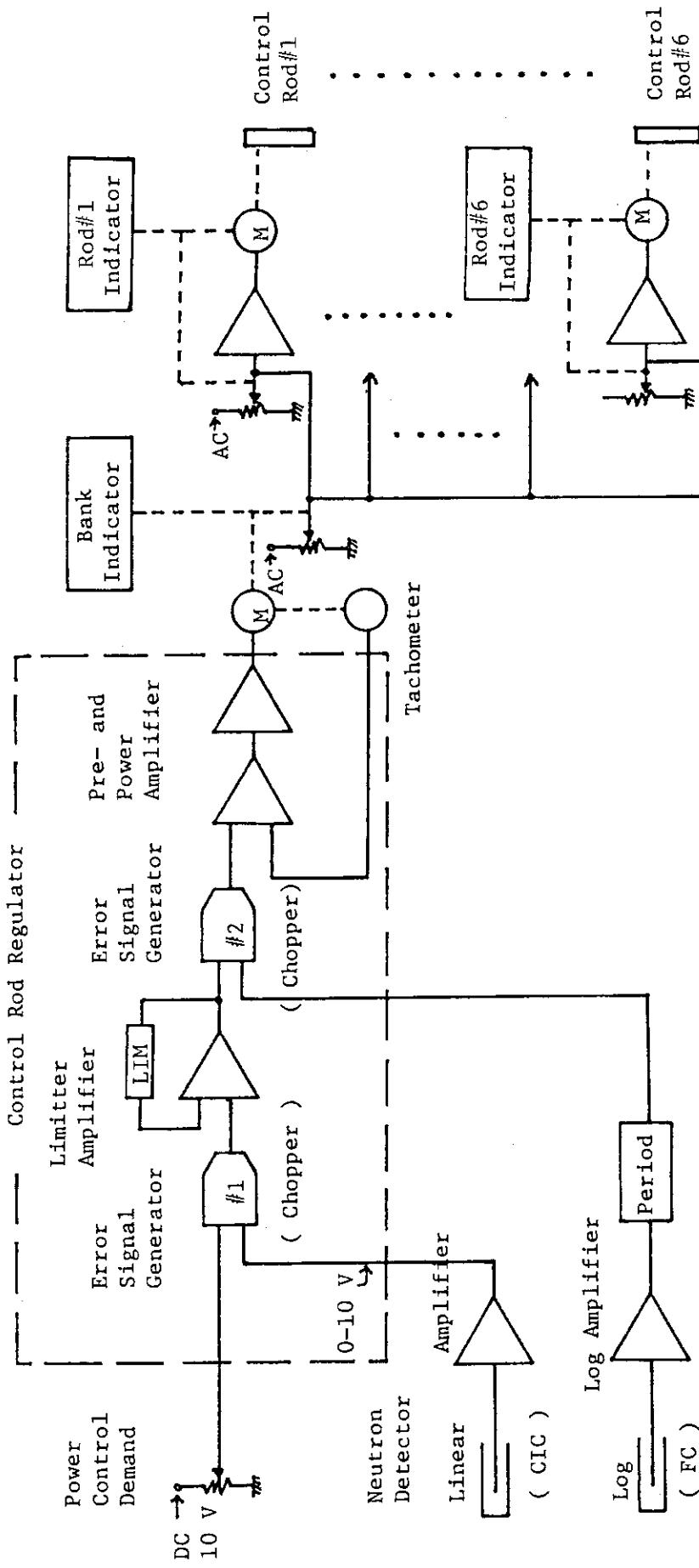


Fig. 2.4 Location of thermocouples for coolant temperature



Reactor Instrument

Reactor Control System

Fig. 2.5 Block diagram of the automatic control system

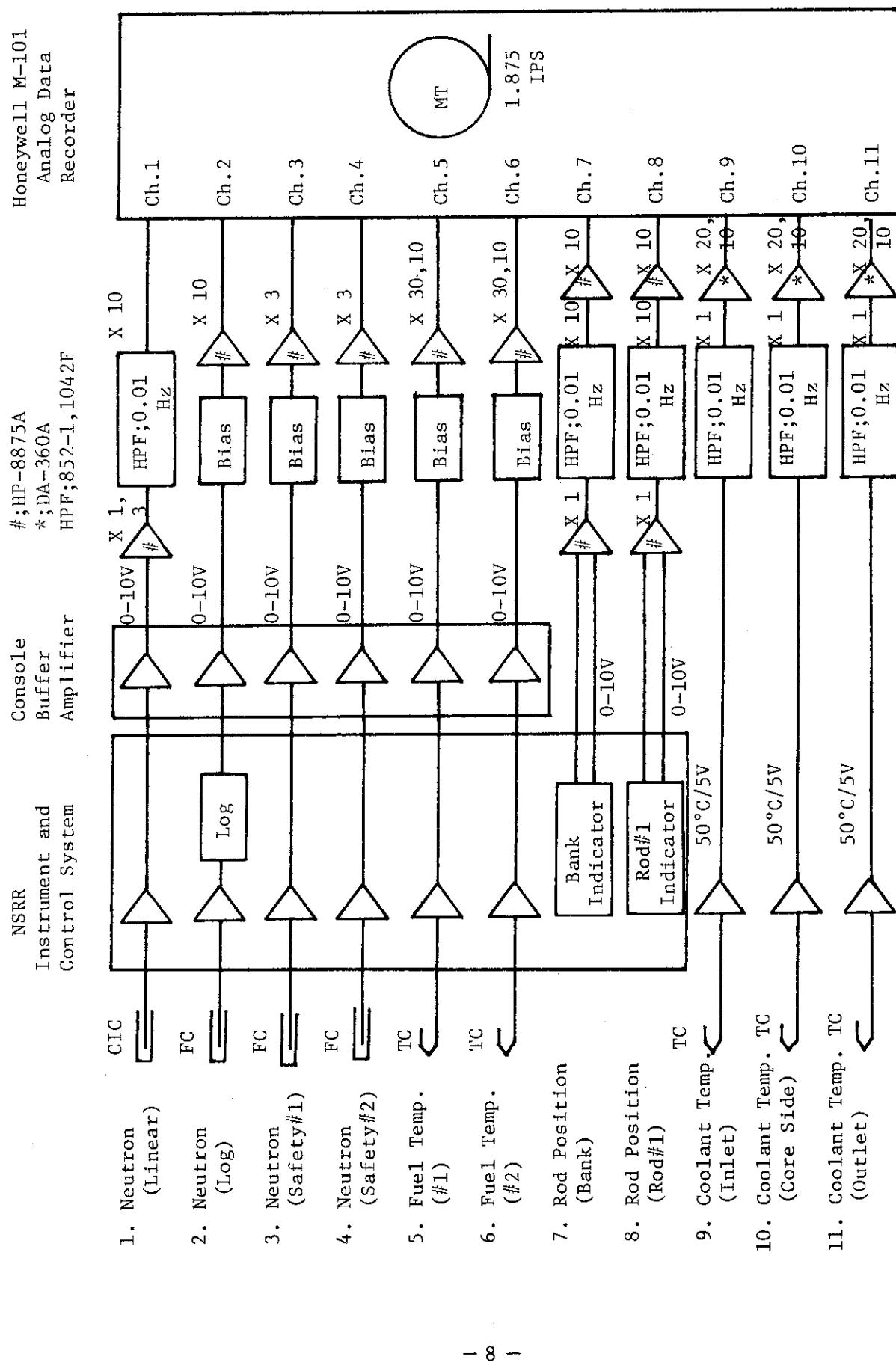


Fig. 2.6 Data recording system in the Phase-II experiment

3. 炉雑音データの解析手法

アナログ・データ・レコーダに収録された各信号の測定データはディジタル・シグナル・アナライザ HP 5420A を用いて解析が行なわれた。ここでは、この解析手法の概要を述べる事とする。

3.1 前処理およびフーリエ変換

HP 5420A ではアナログ信号が入力されると、あらかじめ設定した解析条件（周波数範囲など）に従って、アナログ・ローパス・フィルタリング、サンプリング、ディジタル・フィルタリング等の処理が自動的になされる。

いま、2つのアナログ信号 x および y が時間間隔 Δt でサンプリングされ、 N 個のサンプルデータ $\{x_t\}$, $\{y_t\}$ ($t = 1, \dots, N$)を得たとする。これらの時系列データのフーリエ変換は下記のとおりに定義される。

$$\left. \begin{aligned} X_f &= \Delta t \sum_{t=-\frac{N}{2}}^{\frac{N}{2}} x_t \cdot e^{-j \frac{2\pi f t}{F}} \\ Y_f &= \Delta t \sum_{t=-\frac{N}{2}}^{\frac{N}{2}} y_t \cdot e^{-j \frac{2\pi f t}{F}} \end{aligned} \right\} \quad \dots \dots \dots \quad (3.1)$$

ここで、 $f = 0, 1, \dots, F$

高速フーリエ変換(FFT)を使用する場合、 F は通常 $N/2$ に選ばれる。なお、HP 5420A では $N = 512$ となっている。

3.2 スペクトル推定

2つのアナログ信号 x , y のサンプル・データとして、前節で見た様な N 個のサンプルが K 組与えられているとする。

$$\{x_t, y_t, t = 1, \dots, N\}_k \quad (k = 1, \dots, K) \quad \dots \dots \dots \quad (3.2)$$

このとき、両信号の(オート)パワー・スペクトル $S_{xx}(f)$, $S_{yy}(f)$ およびクロス・スペクトル $S_{xy}(f)$ は、(3.1) のフーリエ成分を用いて次の様に表現できる。

$$\left. \begin{aligned} S_{xx}(f) &= \lim_{K \rightarrow \infty} \frac{1}{K} \sum_{k=1}^K \frac{1}{N \cdot \Delta t} X_f \cdot X_f^* \\ S_{yy}(f) &= \lim_{K \rightarrow \infty} \frac{1}{K} \sum_{k=1}^K \frac{1}{N \cdot \Delta t} Y_f \cdot Y_f^* \end{aligned} \right\} \quad \dots \dots \dots \quad (3.3)$$

$$S_{yx}(f) = \lim_{K \rightarrow \infty} \frac{1}{K} \sum_{k=1}^K \frac{1}{N \cdot \Delta t} Y_f \cdot X_f^* \quad \dots (3.4)$$

(ただし * は複素共役)

実際に測定されるデータは有限個であるから、上式の K (集合平均の回数) を任意の値に設定した式がスペクトル推定に用いられる。

3.3 1入力1出力系の解析

(1) 周波数応答関数の推定

信号 x および y が 1 入力 1 出力線形システムの入力および出力となっている場合、前節で説明したスペクトルの推定結果を用いて、その周波数応答関数 $H_{yx}(f)$ は以下の様に計算される。

$$H_{yx}(f) = \frac{S_{yx}(f)}{S_{xx}(f)} \quad \dots (3.5)$$

この関数は一般に複素量となるため、通常の場合、次のゲイン $G_{yx}(f)$ および位相 $\text{Ph}_{yx}(f)$ に分けて評価される。

$$G_{yx}(f) = |H_{yx}(f)| \quad \dots (3.6)$$

$$\text{Ph}_{yx}(f) = \angle H_{yx}(f) \quad \dots (3.7)$$

(2) コヒーレンス関数の推定

一方、2つの信号 x, y 間に存在するシステムの線形性の評価や周波数領域における両信号の相関の度合いを評価する関数として、以下の様にオーディナリ・コヒーレンス関数が定義される。

$$r_{yx}^2(f) = \frac{|S_{yx}(f)|^2}{S_{xx}(f) \cdot S_{yy}(f)} \quad \dots (3.8)$$

4. 解析結果

解析は、ディフューザ・システムや自動制御系と炉出力変動との関連性の解明に重点を置き、測定された炉雑音データを6つの区間 (Case-0~Case-V) に分けてそれぞれの区間毎にスペクトルや周波数応答関数等の推定を行ない、これらの結果を相互に比較検討するという形で進めた。

4.1 波形観察

(1) Case-0

炉出力15Wでの定常運転の状態から出力上昇を開始、270kW定常運転にはいるまでの区間を Case-0 と呼ぶことにする。Fig. 4.1 (Part-1~3)にこの測定データを示す。

$$S_{yx}(f) = \lim_{K \rightarrow \infty} \frac{1}{K} \sum_{k=1}^K \frac{1}{N \cdot \Delta t} Y_f \cdot X_f^* \quad (3.4)$$

(ただし * は複素共役)

実際に測定されるデータは有限個であるから、上式の K (集合平均の回数) を任意の値に設定した式がスペクトル推定に用いられる。

3.3 1入力1出力系の解析

(1) 周波数応答関数の推定

信号 x および y が 1 入力 1 出力線形システムの入力および出力となっている場合、前節で説明したスペクトルの推定結果を用いて、その周波数応答関数 $H_{yx}(f)$ は以下の様に計算される。

$$H_{yx}(f) = \frac{S_{yx}(f)}{S_{xx}(f)} \quad (3.5)$$

この関数は一般に複素量となるため、通常の場合、次のゲイン $G_{yx}(f)$ および位相 $\text{Ph}_{yx}(f)$ に分けて評価される。

$$G_{yx}(f) = |H_{yx}(f)| \quad (3.6)$$

$$\text{Ph}_{yx}(f) = \angle H_{yx}(f) \quad (3.7)$$

(2) コヒーレンス関数の推定

一方、2つの信号 x, y 間に存在するシステムの線形性の評価や周波数領域における両信号の相関の度合いを評価する関数として、以下の様にオーディナリ・コヒーレンス関数が定義される。

$$r_{yx}^2(f) = \frac{|S_{yx}(f)|^2}{S_{xx}(f) \cdot S_{yy}(f)} \quad (3.8)$$

4. 解析結果

解析は、ディフューザ・システムや自動制御系と炉出力変動との関連性の解明に重点を置き、測定された炉雑音データを6つの区間 (Case-0~Case-V) に分けてそれぞれの区間毎にスペクトルや周波数応答関数等の推定を行ない、これらの結果を相互に比較検討するという形で進めた。

4.1 波形観察

(1) Case-0

炉出力15Wでの定常運転の状態から出力上昇を開始、270kW定常運転にはいるまでの区間を Case-0 と呼ぶことにする。Fig. 4.1 (Part-1~3)にこの測定データを示す。

変数としては、上から順に ch.1 中性子束信号 (Linear), ch. 2 (Log), ch. 3 (Safety #1), ch. 4 (Safety #2), ch. 5 燃料温度信号 (#1), ch. 6 (#2), ch. 7 制御棒位置信号 (Bank), そして ch. 8 (Rod #1) の 8 変数が図示されている。このうち、ch. 1 の Linear はデータ収録系の都合により無信号状態となっている。

時間の経過としては、14:29~14:52 の連続した約24分間が 3 つの Part に分けて図示されている。Part-1 は炉出力 15W 定常運転時のもので、運転モードは手動（したがって、Bank 信号は制御信号に使用されてない）である。Part-2 は運転モードを自動制御運転に切替えて出力上昇を開始、270kW に近づくまでの過程、Part-3 は 270kW に到達して定常運転にはいり徐々に安定して行く過程が示されている。

各段階における測定データの特徴は以下のとおりである。

炉出力 15W 時の中性子束、燃料温度の各信号のゆらぎ成分は極めて小さく、非常に安定している。なお制御棒位置信号 (Bank, Rod #1) にみられる急峻なパルス状の変動は測定系で混入した誘導雑音である。

出力上昇を開始して 270kW に至る過程では、信号中の DC 成分が大幅に増加して行くため、各信号ともうまく測定できていない。ch. 2~6 の測定系ではバイアス調整が追従できないためプリアンプに飽和が生じているし、ch. 7, 8 のハイパス・フィルターでは設定周波数 (0.01Hz) で決まる時定数によって周期 100 sec 程度の過渡応答が強く現われてしまっている。この様に測定条件は良くないが、バイアス調整を行なった直後にかろうじて見られる中性子束の変動成分 (ch. 2~4) から重要な情報が得られた。すなわち、出力上昇時に炉出力は正弦波状の強い発振を起しているという事である。これについては、後節に詳しい解析結果を示す。

最後は 270kW に達してから安定して行く過程についてみる。制御棒位置 (Bank, Rod #1) あるいは中性子束にみられる連続した発振状態は 14 時 48 分（以下 14:48 と記す）を境にして止まり、以後は制御棒の動きは単発的なものとなる。希に数周期に渡る連続的な発振が中性子変動に現われるがすぐに消える。ここで注意すべき点は、この数周期の発振現象が中性子束信号に現われていても Rod #1 信号には現われない場合もある事である（例えば 14:50 から 20 秒後の部分）。この現象は 6 本の制御棒 (Rod #1~6) の駆動機構が持っている不感帯のレベルの違いにより生じたものと考えられる。

(2) Case-I

炉出力上昇を行なって炉出力 270kW 到達後初期変動が安定してきた 14:57 頃からディフューザー・ポンプの運転を開始する 15:51 頃までの約 54 分間の定常運転の区間を Case-I と呼ぶこととする。Fig. 4.2 (Part-1~2) にこの区間の測定データの一部 (15:11~15:22) を示す。

変数としては、Fig. 4.1 と同じ 8 変数の他に、ch. 9 冷却材温度 (入口), ch. 10 (炉心側面), ch. 11 (出口) が図示されている。Part-1 には各変数のフィルター条件が記載されている。この条件は Phase-II 実験の全区間に渡り共通である。

中性子束信号 (ch. 2~4) は平均値的には極めて安定している。ch. 1 の Linear だけはこの図より少し前の時刻で測定系に接続したためハイパス・フィルターの時定数による過渡応答が現われている (15:11~15:14 付近) が、信号としては安定していることがわかる。一部に正弦波状の振動や単発の変動がみられるが、これは制御棒の変動によるものである。ピーク値で炉

出力の2～3%に相当する。

制御棒位置信号については、ch. 8 Rod # 1はch. 7 Bank信号によってRod # 1が動いているのがわかる。ただし、どの様な外乱でBank信号の急峻な変動が起るのかは図からはわからない。

冷却材温度信号についてみると、入口では非常に静かであるのに対し、炉心側面ではいくらかの変動がみられる。さらに、出口では比較的大きな変動が割合とゆっくりとした周期でみられる。

(3) Case-II

炉出力270kW定常運転中、ディフューザー・ポンプを駆動した15:51付近から、バルブを開きその開度を $\frac{1}{2}$ として運転した16:06付近までの約15分間の区間をCase-IIとする。Fig. 4.3 (Part-1, 2)に測定データの一部(15:51～16:02)を図示する。

このケースで重要な事はディフューザーの運転とともに各信号のゆらぎ成分の変化である。

ディフューザー・ポンプの運転を開始、ディフューザー・ノズルの水量調節用バルブを0から $\frac{1}{4}$, $\frac{1}{2}$ と聞く途中(15:53付近)で、中性子束、制御棒位置の各信号、それに冷却材温度信号(出口)に大きな変動がみられる。

中性子束信号と制御棒位置信号に現われる比較的大きな変動は、Case-Iの場合と比較してその振幅自体は同程度であるが、その持続時間は約2分間で270kW定常となってからはみられなかった長さである。しかも、この変動は一旦消えるが約5分30秒後の16:00頃に再び現われその後は自動制御系をOFFにする16:49付近(Case-V)まで消えることはなかった。この事実は、ディフューザーの運転と炉出力変動現象との間に何らかの関係があることを示唆している。

一方、冷却材温度信号についてみると、各信号ともディフューザー運転前までは非常に安定していたものが、運転開始(弁を開いた)後に特に出口側で大振幅の持続した変動が現われた。測定系のゲイン調整の関係でそのピーク部分は頭打ち(飽和)が生じてしまっているが、ゆらぎ成分の変動幅は±2°C前後とみられる。また、入口側もCase-Iの場合に比べると多少変動が大きくなっている様に見える。出口側でこの様に強い変動が観測される理由は、ディフューザーの運転で炉心上部の水流が強く乱されているためと考えられる。

ディフューザーの運転を特徴づける変動としては、もう一つ、中性子束(Linear, Safety#1, #2)の微小ゆらぎの出現である。Pase-I実験でみた周期1秒程度(基本波0.84Hz)の小振幅のゆらぎ成分が15:53付近から現われ、これは程度の差はあるがディフューザーの運転中に消えることはなかった。

(4) Case-III

Case-IIにひきつづき、炉出力は270kWのままディフューザー水量調節バルブの開度 $\frac{1}{2}$ から2に変更して運転した区間(16:06～16:35の約30分間)をCase-IIIとする。Fig. 4.4 (Part-1, 2)にその測定データの一部を示す。

この区間の特徴としては、中性子束信号や制御棒位置信号の変化と冷却材温度信号の変化があげられる。

中性子束信号(Linear, Safety#1, #2)をみると、Case-IIでみられた様な比較的大きな変動は持続しているが、詳細にその波形をみてみると変動成分の周期が短くなり波形も複雑に

なってきてていることがわかる。制御棒位置信号、特に Rod#1 をみると Fig. 4.4 Part-1 の 16:06 付近 (Case-II) の変動と 16:08 以後 (Case-III) の変動の振幅が 1.5~2 倍近く大きくなっているのがわかる。この事は自動制御系に入力される外乱が強くなっている事を意味すると思われる。

一方、冷却材温度信号であるが、水量調節バルブの開度を $\frac{1}{2}$ から 2 と増加すると、これまで出口側で観測されていた強い変動成分が消えてしまい、これに代って入口側で同様の変動成分が現われる様になる。この変動成分はこの後の測定期間中持続して観測され消えることはなかった。これに対し出口側の場合、消えてから約 8 分後 (16:15頃) に振幅は小さくなっているが再び変動成分が現われた。この間も炉心側面には顕著な変動はみられなかった。

(5) Case-IV

Case-III に続いて、ディフューザー・バルブの開度を 2 から $2\frac{1}{2}$ にして運転した区間 (16:35~16:49 の約 14 分間) を Case-IV とする。Fig. 4.5 に測定データの一部を示す。

バルブの開度が Case-III とあまり差が無いので、これといった特徴はみられない。ここでは、次に述べる自動制御系 OFF の状態との比較を行うために図示した。

(6) Case-V

炉出力 270kW 定常、ディフューザー・バルブの開度 $2\frac{1}{2}$ で、自動制御系を解除した区間 (16:49~17:02) を Case-V とする。測定データのはほぼ全区間に相当する部分を Fig. 4.6 (Part-1, 2) に示す。Case-IV とは自動制御系の ON, OFF という条件が異なるのみである。

図からわかる様に、自動制御系を切ると Case-IV でみられた中性子束信号の比較的大きな周期 3 秒程度の変動は全く消えてしまう。ただし、非常に長い周期 (100 秒以上) の変動が生じている (16:50~16:52)。なお、16:52 付近で手動による制御棒操作が行なわれている。中性子束信号のうち、Linear と Safety #1, #2 でその応答に違いがみられるが、これは Linear にハイパス・フィルターが使用されているためである。

4.2 中性子束信号 (炉出力変動) の解析

波形観察 (Case 0~V) でみた様に、ディフューザー・システムの運転条件や原子炉の運転条件等により炉出力変動の様子も異なる事がわかった。ここでは、各測定データ Case-0~V から中性子束信号のパワー・スペクトルを推定しそれぞれの状態におけるスペクトル・パターンの特徴をとらえるとともに、各ケースの結果を相互に比較することで運転条件と炉出力変動との関連の程度を定量的に評価することとする。

(1) 各ケースのスペクトル・パターン

Case-0~V の中性子束信号のパワー・スペクトルを Fig. 4.7~4.12 に示す。各スペクトルは、原則として DC~2Hz (低域), DC~12.5Hz (中域), DC~64Hz (高域) の 3 つの周波数領域に分けて推定したもの同一グラフ上に示したものである。Fig. 4.7 は Safety #2 の結果を、他の図は Linear の結果を示している。

Case-0 (Fig. 4.7) は Fig. 4.1 Part 3 の始めの出力上昇中にみられる正弦波状の発振状態の区間を選んで解析したものである。この結果、発振周波数は約 0.3Hz であることがわかった。0.3

Hzを基本波とする正弦波状の炉出力変動はPhase-I実験においては300kW定常運転時に単発的に観測されている。しかし今回の測定とNSRRの運転用炉出力計の過去の運転記録から、この様な正弦波状の炉出力の発振現象は出力上昇時には常に起っているという事がわかった。

Case-I (Fig. 4.8) は Fig. 4.2 の 15:12 付近から約40分間の区間の結果である。1.0Hzより低い周波数領域、特に 0.5Hz 以下で大きな成分がみられる。この成分は 0.2~0.3Hz 付近から高い周波数になると減少していく形となっている。その減少途中の 0.8Hz 付近では片特性を示す部分があることから、この成分は後に述べるディフューザーの運転を特徴づけるピーク成分と同じものが現われているとも考えられる。1.0Hz 以上に現われている線スペクトル状の成分は観測雑音である。

Case-II~IV (Fig. 4.9~4.11) はディフューザー運転時のもので、各スペクトルはディフューザーの水量調節弁の開度が異なるのみで、他の条件は全て同一である。各スペクトルとも、0.8Hz~10Hz の領域で Case-I ではみられなかった明確なピーク成分が現われているのがわかる。これは、Phase-I 実験でみられたものと同じディフューザーの運転を特徴づけるピーク成分である。

Case-V (Fig. 4.12) は自動制御系を OFFとした場合のもので、他の条件は Case-IV と同じである。Case-IV と比べて 1.0Hz 以下の成分が異なるのがわかる。

(2) 炉出力変動に対するディフューザー運転の影響

Fig. 4.13 は先にあげた Case-I (ディフューザー停止時) と Case-IV (水量調節弁の開度 $2\frac{1}{2}$) の中性子束信号のスペクトルを比較したものである。

ディフューザーの運転により 0.8~10Hz の領域で特徴的なピーク成分 (0.8Hz, 2.5Hz, 5.1Hz 付近) が現われることは Phase-I の報告のとおりであるが、その他、1Hz より低い周波数領域でも全体的にパワー・レベルの上がっていることが明確に示されている。この領域は、自動制御運転に使用される制御棒 (6 本の調整棒) の反応度効果による応答成分が現われる領域であることから、この成分増加は、ディフューザーの運転によって生じた何らかの外乱が自動制御系に印加されて生じたものと考えることができる。

この事は Fig. 4.14 からも明らかである。Fig. 4.14 は先にあげた Case-IV (自動制御運転ON) と Case-V (同OFF) の中性子束信号のスペクトルを比較したものである。0.6Hz 以下の成分が自動制御運転か否かで大きな差を持つことが示されている。

以上から、ディフューザーの運転は自動制御系に大きな外乱を与えていていることが明らかになった。

(3) ディフューザーの水量調節弁の開度

今度は、ディフューザーを運転した場合のディフューザー・ノズル (Fig. 2.3) から噴出される水量 (あるいは水量調節弁の開度) と中性子束信号との関係をみることにする。

Fig. 4.15 は先にみた Case-II~IV の水量調節弁開度の異なるパワー・スペクトルを比較したものである。開度は $\frac{1}{2}$, 2, $2\frac{1}{2}$ の 3 つのケースについて示されている。これによると、開度が $\frac{1}{2}$ と 2 ではスペクトル・パターンに明確な差異が認められる。開度 2 と $2\frac{1}{2}$ ではほとんど差異はない。

全体の傾向をみると、前節でみた自動制御系の応答領域 (1.0Hz 以下) では開度に依存してスペクトル成分が増加すること、また 0.8Hz, 2.5Hz 付近の特徴的なピーク成分は開度を大きくする

とそのピーク高はほとんど変化しないがピークの拡がりが大きくなっていく、ということがわかる。

Fig. 4.16は前図のピーク成分の領域を拡大した図である。ここでは、Phase-I 実験で得られたスペクトル（炉出力は10%程高く 300kW、開度は微開）も合せて比較している。ディフューザーの水量調節弁は開度を知るための目盛等が付いてないため、正確な開度をおさえることは困難である。このため、Phase-I 実験の弁開度は単に微開とだけ記録されているが、図からわかる様に Phase-I 実験のピークは Phase-II の開度 $\frac{1}{2}$ の結果に比べて、さらに鋭くなっている事などから開度は $\frac{1}{2}$ よりかなり小さい事が推定できる。

以上をまとめると、ディフューザーの運転により生ずる炉出力変動（主として 1Hz 以下の周波数領域）は、ディフューザー・ノズルから噴出される水量（あるいは弁の開度）が大きい程大きくなること、また 0.8Hz 以上にみられるピーク成分は噴出水量が大きい程ピーク周波数を中心としてその拡がり方が大きくなることがわかった。

4.3 自動制御系の動特性評価

Phase-I の結果や出力上昇時の炉出力変動波形 (Fig. 4.1 および Fig. 4.7) からわかる様に、NSRR では炉出力の発振現象がみられる。この発振現象は自動制御系の不安定性に起因するものであることは Phase-I の報告で述べた通りである。ここでは、今回の実験で新たに追加した測定変数 Rod#1 の位置信号を用いて、Phase-I 実験では明らかにできなかった Bank 信号と中性子束信号間に存在する制御棒（調整棒）の駆動機構の動特性を評価することにする。

(1) 自動制御系の周波数応答関数の推定

NSRR の自動制御系 (Fig. 2.5) は伝達関数表現をすると Fig. 4.17 の様に記述できる。Bank (指示計出力) 信号と Rod#1 (指示計出力) 信号が測定されているから、図からわかる様に、スレーブ・サーボ系の 1 つである Rod#1 の駆動アンプと駆動モータ部の動特性評価が可能である。

このサブ・システムの伝達関数 $G(s)$ は次式で表現される。

$$G(s) = \frac{K_{21} K_{22}}{T_2 s^2 + s + K_{21} K_{22} K_{23}} \quad \dots \quad (4.1)$$

ここで、
 K_{21} : 駆動アンプのゲイン
 K_{22} : 駆動モータ部のゲイン
 K_{23} : フィードバック・ゲイン
 T_2 : 駆動モータ部の時定数

(4.1) 式はまた次の様に表現することもできる。

$$G(s) = \frac{1}{K_{23}} \cdot \frac{\omega_n^2}{s^2 + 2\zeta\omega_n s + \omega_n^2} \quad \dots \quad (4.2)$$

$$\text{ただし, } 2\zeta\omega_n = \frac{1}{T_2} \quad \dots \quad (4.3)$$

$$\omega_n^2 = K_{21} K_{22} K_{23} \quad \dots \quad (4.4)$$

ここで、 ω_n ：固有周波数 ($= 2\pi f_n$)

ζ ：減衰係数

以上から、このサブ・システムの伝達関数は、入力信号を受けたとき減衰振動的な応答を示す2次振動要素で構成されていることがわかる。したがって、このサブ・システムの特性を決めるパラメータ ω_n と ζ の値によっては、炉出力変動に対する自動制御運転で重要な周波数領域内で、その応答信号が振動を起す可能性を持っていることになる。 ω_n と ζ は(4.3)式、(4.4)式から以下の関係にあることがわかる。

$$\omega_n = \sqrt{K_{21} K_{22} K_{23}} \quad \dots \quad (4.5)$$

$$\zeta = \frac{1}{2\omega_n T_2} \quad \dots \quad (4.6)$$

(4.5)式より固有周波数 ω_n はゲイン調整に依存していること、(4.6)式より減衰係数 ζ は固有周波数 ω_n と時定数 T_2 に依存していることがわかる。減衰係数 ζ が 1 より小さくなるとサブ・システムの応答信号は振動する様になる。

ここで、今実験で得られたデータから周波数応答関数を推定した結果を見てみよう。Fig. 4.18~4.22 は Case-IV を除く Case-0~Vまでのデータを用いてスペクトル解析から推定した結果である。各図とも(a)はゲイン(b)は位相を示している。各図の相異点は用いたデータの長さと S/N 比に依存した推定誤差の違いだけと考えて良い。

ここでは Fig. 4.21 (Case-III) を例にとって推定結果を検討してみる。ゲイン関数は約 0.3 Hz 付近でピークを持ち、それより高い周波数で急激に減衰すること、1 Hz 以上の周波数領域ではまた平坦な応答となることが示されている。ピークの高さは低域側のはぼ平坦な部分に比較して 15 dB 程度である。一方、位相関数は低域側から徐々に遅れだし、約 0.3 Hz 付近では -90° となっている。さらに高域になると 1 Hz 以上ではほぼ 0° となっている。以上から、先に検討した Rod #1 駆動システムの 2 次振動要素としての応答が低域から 0.5 Hz 付近まで現われており、それより高域は Bank 信号および Rod #1 信号に共通な付加雑音（観測雑音）による効果が現われているとみなすことができる。

上に述べた周波数応答関数の推定値の持っている特徴は、各ケースの推定値でも共通にみられるものである。そこで、大雑把ではあるが推定された周波数応答関数から、伝達関数のパラメータ ω_n , ζ , T_2 を推定してみよう。

Fig. 4.23 は各ケースのゲイン関数を比較するために 20 dB づつずらしてプロットしたものである。各ケースともピーク周波数はほぼ一致していることがわかる。そこで、固有周波数 ω_n は

$$\frac{\omega_n}{2\pi} = f_n = 0.3 \text{ Hz} \quad \dots \quad (4.7)$$

とみなすことができる。また、減衰係数 ζ は最も S/N 比の良い結果 (Case-I~III) の場合、ピークの形状から考えて、

$$\zeta = 0.05 \sim 0.1 \quad \dots \quad (4.8)$$

にあてはまると思われる³⁾。このとき、時定数 T_2 は(4.6)式から計算して、

$$T_2 = 5.13 \sim 2.57 \text{ sec} \quad \dots \quad (4.9)$$

と推定できる。

以上をまとめると、Rod #1の駆動システムは約 0.3Hzに比較的大きなピークのある伝達関数を持っていること、このために制御用の入力信号が印加されると制御棒に振動的な運動が引き起されることがわかった。

(2) 炉出力変動との関係

Phase-I 実験では、比較的ゆっくりとした大振幅の炉出力変動成分はのこぎり波状、方形波状および正弦波状の3つのケースに分類されることが示されている。ここでは、これらの変動パターンと自動制御系の特性がどの様に係わりっているかを考察する。

最も特徴的な変動である正弦波状の炉出力変動は、基本周波数を 0.31Hz(約 3.2 sec 周期)とする非常に大きい振幅を持った発振現象であり、何の前兆現象も現われることなく突然出現し、また消失するという特徴を持っている。発振の持続時間は、Phase-Iで観測されただけでも、1.6 sec~40 数 sec (周期にして $\frac{1}{2}$ から 10 数周期) と不規則であった。

この現象は前節の結果を用いると次の様に説明できる。まず、何らかの原因で生じた 0.3Hz 付近に強い成分を持った外乱が制御棒駆動システムに印加されたとする。このシステムは固有周波数を 0.3Hz とする 2 次振動要素で構成されており、しかも減衰係数 ζ がかなり小さいから、出力信号は 0.3Hz を基本周波数として強い減衰振動を引き起す。これだけでは正弦波状の持続振動は説明できないが、Phase-I の報告にある様に制御棒の減衰機構には比較的顕著な不感帯(非線型要素)が存在すること、また炉出力変動の検出器出力がリミッター回路で振幅制限されていることを考慮すると、外乱の大きさによっては炉出力変動は持続した振動となることがある。

今度は炉出力変動のもう 1 つのパターンである方形波状の変動についてみてみよう。この変動も先に議論した正弦波状の変動と同様に自動制御系の特性に深く係わっているが、その変動波形が単純な正弦波状の振動でないことや主成分の基本周波数が 0.12Hz(約 8 sec 周期)であることなど、前節で議論した制御棒駆動システムの特性からは説明できない変動であることがわかる。

ところで、約 8 sec 周期の振動に関しては、NSRR の運転開始時の検収試験報告(1976)²⁾の中で自動制御系の特性試験に関する以下の様な興味深い報告がなされている。

この試験はマスター・サーボ系のサーボ・ゲインとフィードバック・ゲイン(Fig. 4.17 では K_{11} と K_{13})の調整に関するもので、炉出力は 50W, 1.5 kW および 150 kW で実施された。この結果、①サーボ・ゲインを大きくすると整定時間は短くなるが、約 8 sec 周期の発振を起す様になる、②フィードバック・ゲインを大きくすると応答の立ち上がり特性等が改善され系の安定性が向上するが、整定時間はほとんど変わらない、③系の不安定性は出力に依存して大きくなる、ということが明らかにされた。

この試験で見られた 8 秒周期の発振現象は炉出力 150kW のときに(300kW を 100% として) + 2.5 % のステップ入力を印加した場合に現われたもので、波形は正弦波状であった。

以上の報告とマスター・サーボ系の伝達特性が振動要素を含んでいないこと等を考え合せると、この不安定性は、原子炉自身の動特性(伝達関数)が炉出力レベルにより変化する構造を持っておりこれに自動制御系の特性が相互に組み合わされて生じるためのものであると推論できる。現在のマスター・サーボ系のゲイン設定値は、先に述べた特性試験、特に炉出力 150kW

の試験において、2つの背反的な性質（発振限界に対する余裕の確保と、整定時間の短縮等の応答特性の改善）のバランス点をとる様に設定されたものである。このため、Phase-I実験の様に300kWに近い出力での運転では、自動制御系に印加される外乱の大きさ次第ではさらに不安定となったり発振を起したりする可能性も十分ある訳である。

Phase-I実験でみられた約8秒周期の変動がこの様な機構で生じているとすれば、変動波形が方形波状である理由は炉出力検出器の出力がリミッター回路を通り振幅制限を受けているためと解釈できる。この場合、炉出力変動の振幅は±1%以下で先に考察した0.31Hzの正弦波状変動（±2%前後）に比べると小さいが、後者の場合は2次振動要素による自己発振的な変動とみられるから例えリミッターによる振幅制限を受けた外乱が印加されても正弦波状の変動になるのだと考えることができる。

4.4 冷却材温度ゆらぎ信号の解析

Phase-I実験の結果から炉出力変動を引き起す直接の原因は自動制御系の特性にあることが、また自動制御系に印加される外乱としてはディフューザーの運転による炉心周りの水流の乱れが予想された。この水流の乱れは原子炉の動特性上の問題としてとらえると、炉心を出入りする冷却材の温度ゆらぎによる反応度外乱と考えることができる。そこで、Phase-II実験では3本の熱電対を用意して、炉心入口、出口および外周部の冷却材温度ゆらぎを観測することにした。

(1) 各測定点の温度ゆらぎのパワー・スペクトル

Fig. 4.24は炉心入口付近（Fig. 2.4参照）の冷却材温度ゆらぎのパワー・スペクトルである。ディフューザーの弁開度や自動制御系のON, OFFという条件の異なったCase I~Vの各データ区間毎の推定結果を示している。

これによると、ケースによってスペクトル成分の大きさに差は見られるものの全体的な形状は同じで、低周波側に強い成分を持ち、それが周波数の増加とともに徐々に減少していくというパターンを示している。2, 3Hz付近から高域では一旦平坦になった後、10Hz付近で再び減少を示しているが、これは測定系のフィルタリング（設定周波数10Hz, ロールオフ-18dB/octのロー・パス・フィルタ）効果によるものである。一応、この温度ゆらぎ信号の主成分は約2Hz以下にあると考えて良い。

さらに同図から、この主成分の増減はディフューザーの弁開度に依存していることもわかる。すなわち、開度0（ディフューザー停止状態）から $\frac{1}{2}$ 、さらに2と大きくなるのに従いスペクトル成分も増加していくのがわかる。ただし、開度2と $2\frac{1}{2}$ あるいは $2\frac{1}{2}$ の状態での制御系のモード（AutoまたはManual）での差異はほとんどみられない。

次にFig. 4.25の炉心出口付近の冷却材温度ゆらぎについてみてみよう。スペクトルの形状は入口温度の場合と大差なく、主成分は2Hz以下に分布しているのがわかる。ところが、スペクトル成分のディフューザー弁開度に対する依存性では大きな違いがみられる。すなわち、弁開度を増していくと、開度 $\frac{1}{2}$ で約2Hz以下の成分は一挙に増大し、さらに開度を増すと今度は逆に減少していくという傾向を持っているのである。

最後に Fig. 4.26 の炉心側面の冷却材温度ゆらぎについてみてみよう。他の測定点のスペクトルと比べると、低周波側の成分はやや小さく、弁開度等の条件によっても異なるがほぼ 0.3 Hz～2 Hz より低い周波数に成分が分布しているのがわかる。ディフューザーの弁開度と成分の増減の関係は、入口出口のどちらとも異なり、開度が 0 から 2 までスペクトル成分は増大していく、開度をさらに $2\frac{1}{2}$ とすると若干減少するという傾向を持っている。

(2) 各温度ゆらぎとディフューザーの弁開度との関係

前節でみた様に、各測定の冷却材温度はディフューザーの弁開度（あるいはノズルから噴出される水量）に強く依存して変動している。そこで、今度はディフューザーの弁開度に応じて各温度ゆらぎがどの様に変化していくかをみることにする。

NSRR では出力時の炉心冷却は自然循環で炉心に流入するプール水を利用しているが、炉心自体はコア・シュラウドで囲まれており、プール水が流通できる場所は炉心側面の開口部と炉心上側の上部グリッド板に分布する小口径の穴に限られている（Fig. 2.4 参照）。このため、冷却材の流路は炉出力のレベルやディフューザー・ノズルからの噴出水流の程度に応じてかなり変化することが予想される。

炉心側面の冷却材温度ゆらぎは、炉心構造や冷却材の温度ゆらぎとは相関がなく、炉心内部で加熱された冷却材がプール内に拡散した後の自然な状態での温度変動から成り立っているとみなすことができる。このとき、炉心の冷却材流路に理想的な入口出口関係が成り立っているとすれば、入口温度ゆらぎは炉心側面の温度ゆらぎと同程度、また出口温度ゆらぎは入口温度ゆらぎよりも大きなスペクトル成分を持つはずである。

Fig. 4.27 は Case-I（ディフューザー・ポンプ停止時）の各温度ゆらぎのパワー・スペクトルを示す。約 2 Hz を境として、これより高い周波数では全く差異がみられないのに対して、これより低い周波数ではパワー・レベルの差異がみられる。約 0.1 Hz から 2 Hz の領域では、入口温度ゆらぎは炉心側面に比べて最大 10 倍程度のパワーを持っていること、また約 0.5 Hz より低い領域で出口温度ゆらぎは入口と比べて約 2 倍程度のパワーを持っていることがわかる。全体的な特徴としては、各変数のパワー・レベルの差はそれほど大きくなないといふことがいえよう。

Fig. 4.28 は Case-II（ディフューザー弁開度 $\frac{1}{2}$ ）の場合である。前図と比較してもわかる様に、出口温度ゆらぎが非常に大きなパワーを持っており、他の観測点に比べて最大 1000 倍程度の差異がみられる。これに対して入口側と炉心側面との差異はほとんどみられず、わずかに 0.1 Hz から 0.5 Hz の領域に違いがみられる程度となっている。以上から、ディフューザーを運転すると出口側の温度ゆらぎが著しく増大するのがわかる。

Fig. 4.29 は Case-III（弁開度 2）の場合である。Case-II と比較すると、出口側の温度ゆらぎは約 $\frac{1}{10}$ 程度に減少するのに対して入口および炉心側面の温度ゆらぎはともに増大し、特に入口側の温度ゆらぎは出口側と同じかそれ以上のパワー・レベルとなっているのがわかる。

Fig. 4.30 は Case-IV（弁開度 $2\frac{1}{2}$ ）の場合である。Case-III と比較して、入口側と出口側のパワー・レベルの差は増え大きくなり、入口側の方が約 10 倍も大きくなっていること、また出口側と炉心側面の場合は 0.1 から 1.0 Hz の領域で最大 10 倍程度の差があるだけになってしまふこと、などがわかる。

Fig. 4.31 は Case-V（弁開度は前図と同じ）の場合である。自動制御系を OFF とした点が

Case-IV と異なるだけである。Fig. 4.35 と比較して、ほとんど変っていないことがわかる。

また、Case-I からVまでの各温度ゆらぎ間の相関解析（コヒーレンス解析）も試みたが、その結果各ゆらぎ成分は互いに無相関であると評価された。この事は、観測された温度ゆらぎは冷却材の局所的なミキシング現象によって生じたものであると考えれば説明がつく。したがって、各温度ゆらぎは振幅（パワー）に関する情報だけを受け持っていると考えることができる。

以上の解析結果は、ディフューザーの運転にともなう炉心周りの水流変化を以下の様に考えると合理的な説明が可能となる。

まず、ディフューザー停止時（Case-I）の場合、炉心周りの水流は自然循環によるものだけである。そこで、炉心側面の開口部から炉心に流れ込んだプール水は燃料要素の間隙を通過する際に加熱され、上部グリッド板の穴を通じて炉心外部へ流れ出す。炉心を出た温水はプール上面まで直ぐに上昇流に乗って流れしていく。Fig. 4.27で入口と出口の温度ゆらぎのパワーにはほとんど差がみられないのは、炉心周りの水流が自然循環によるものであるから極めてゆっくりと安定したものであると考えられ、その結果観測用熱電対の周辺部のプール水の温度勾配は小さくなり、局所的なミキシング現象で生じる温度ゆらぎも小さくなるためと考えることができる。

次にディフューザーを運転し始め開度を $\frac{1}{2}$ とした場合（Case-II）を考える。ディフューザー・ノズルは Fig. 2.2, 2.3 に示す様に炉心上部に配置されているが、3つのノズルの向きは垂直面ではやや下向きに、また水平面ではやや中心よりに設定されているため、噴出される水（冷水）はグリッド板面めがけて流れる様になっている。このため、グリッド板付近では炉心から上昇して来る温水とディフューザー・ノズルから噴出される冷水とで激しいミキシングを起すと考えられる。この様に考えれば、Fig. 4.28で出口温度ゆらぎのパワーが急激に大きくなつた説明がつけられる。また、炉心からの上昇流が妨げられた分だけ、炉心周りの温水領域が下がる事から、炉心入口や側面の温度ゆらぎのパワーもディフューザー停止時に比べて大きくなると考えることができる。

さらにディフューザーの弁開度を大きくしてノズルからの噴出水量を増した場合（Case-III～V）を考える。この場合、噴出水の流量が多いため炉心上部グリッド板からの自然循環による温水の上昇流が極端に妨げられることになり、出口温度ゆらぎの観測点ではディフューザー・ノズルからの冷水が主成分となると考えられる。一方、炉心側面の開口部では、炉心内の加熱水がグリッド板を通じて流出していた分も含めさらに温水が外に流出するため、入口温度ゆらぎの観測点では温水と冷水のミキシングが激しくなると考えられる。こう考えれば、Fig. 4.29, 4.30, 4.31で出口温度ゆらぎに比べて入口温度ゆらぎの方が大きなパワーを持っているという現象を合理的に説明できる。

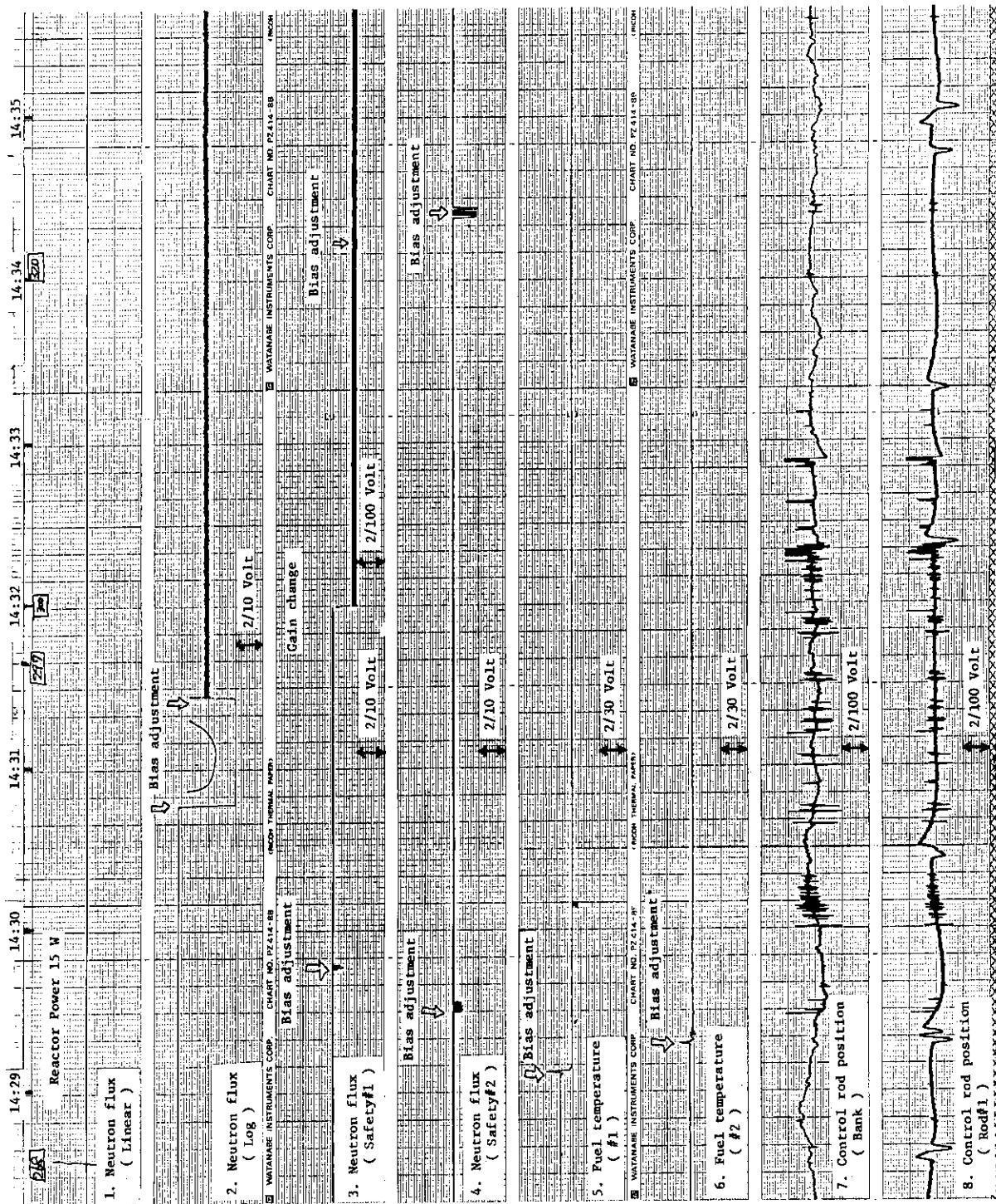


Fig. 4.1 (a) Noise data recordings for the Case-0 (Part-1)

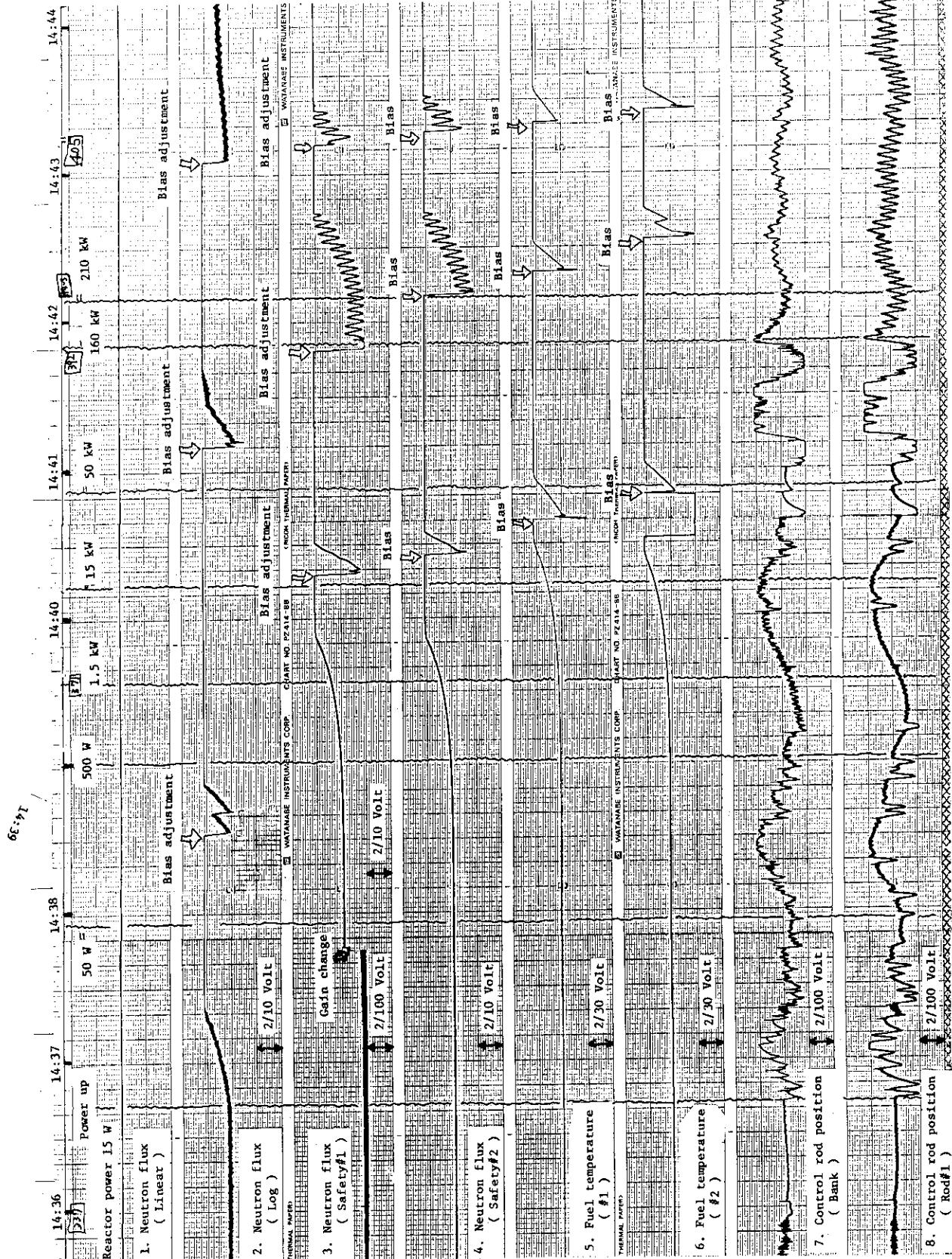


Fig. 4.1 (b) (Part-2)

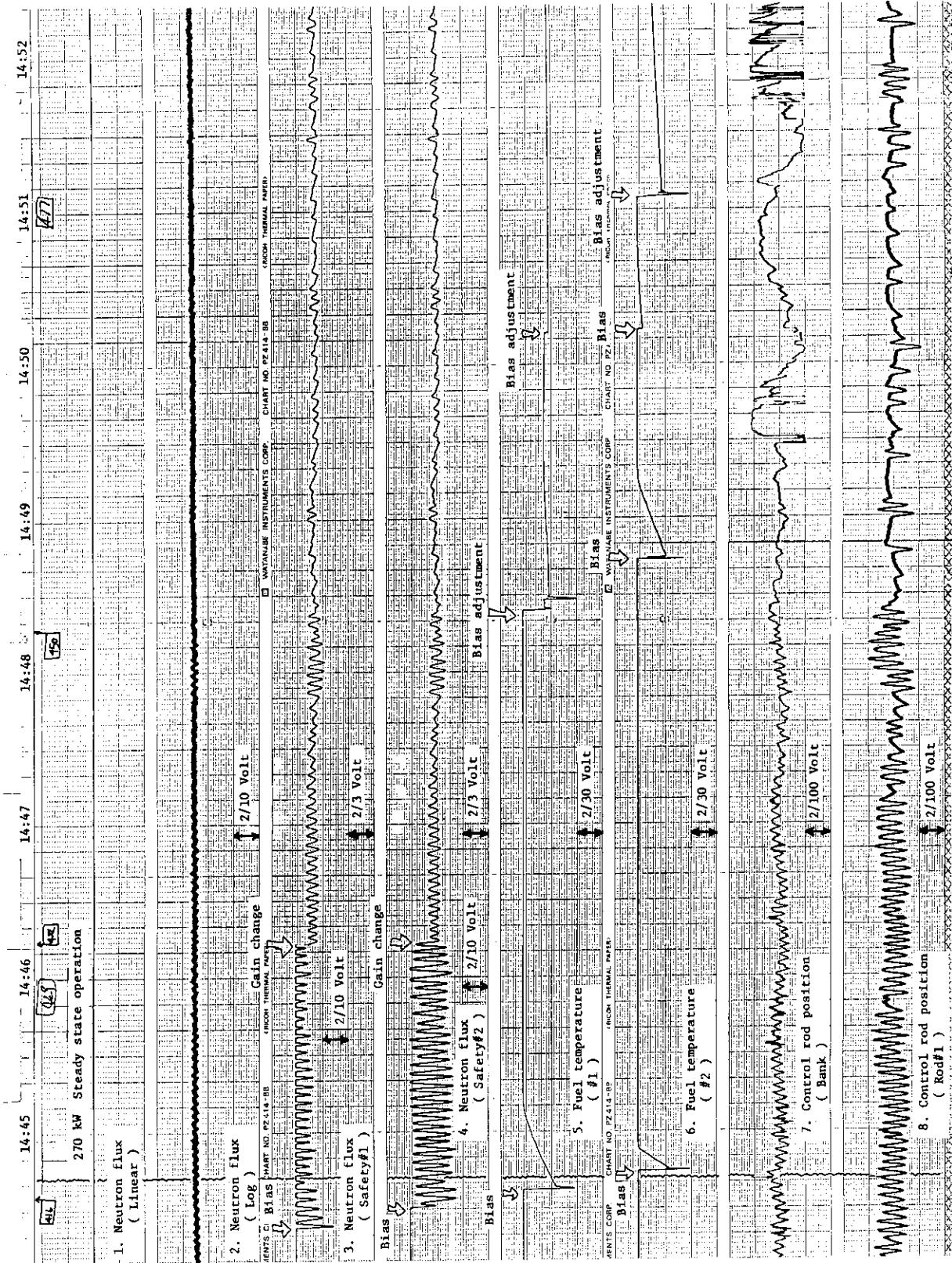


Fig. 4.1 (c) (Part-3)

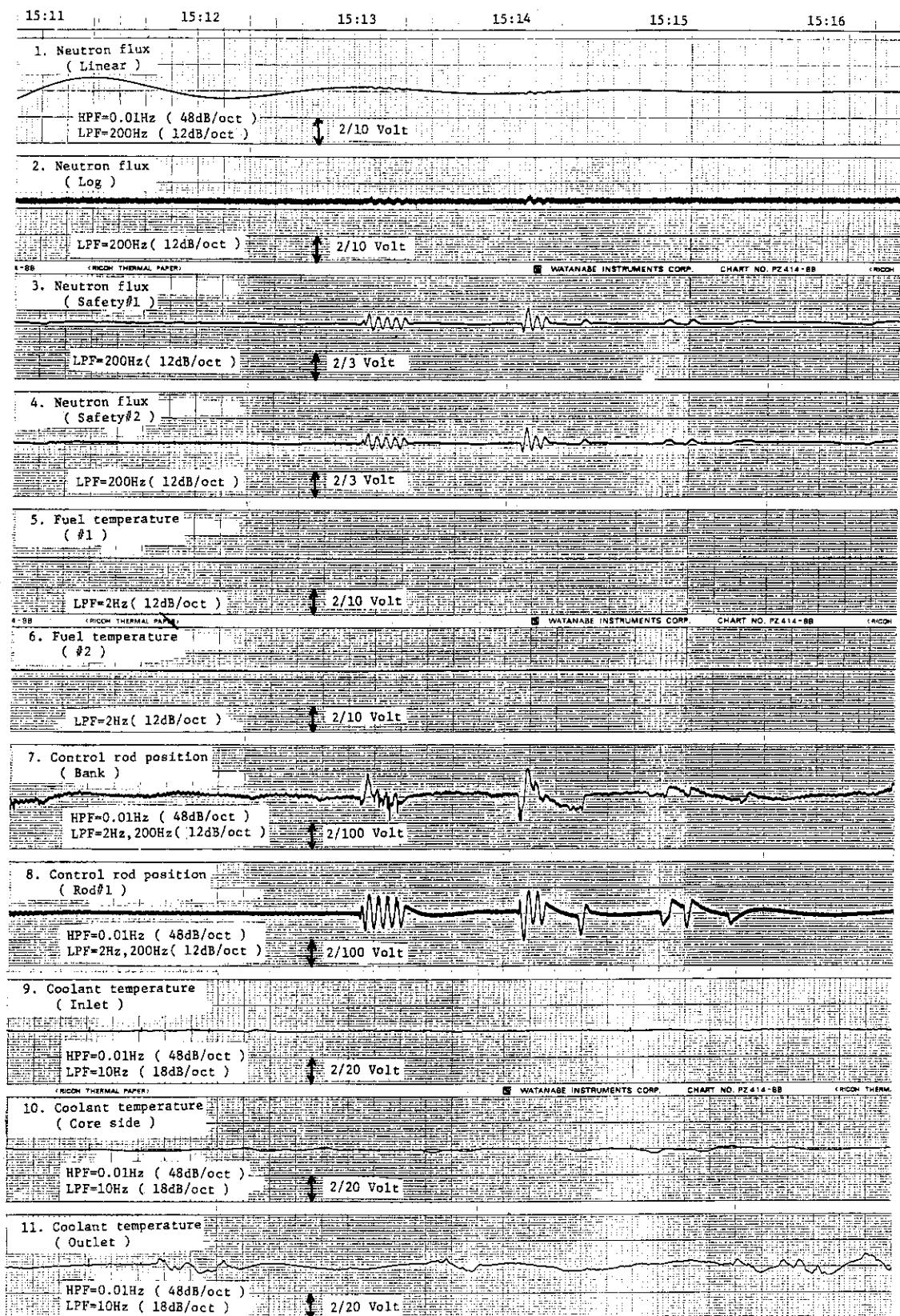


Fig. 4.2 (a) Noise data recordings of the Case-I (Part-1)

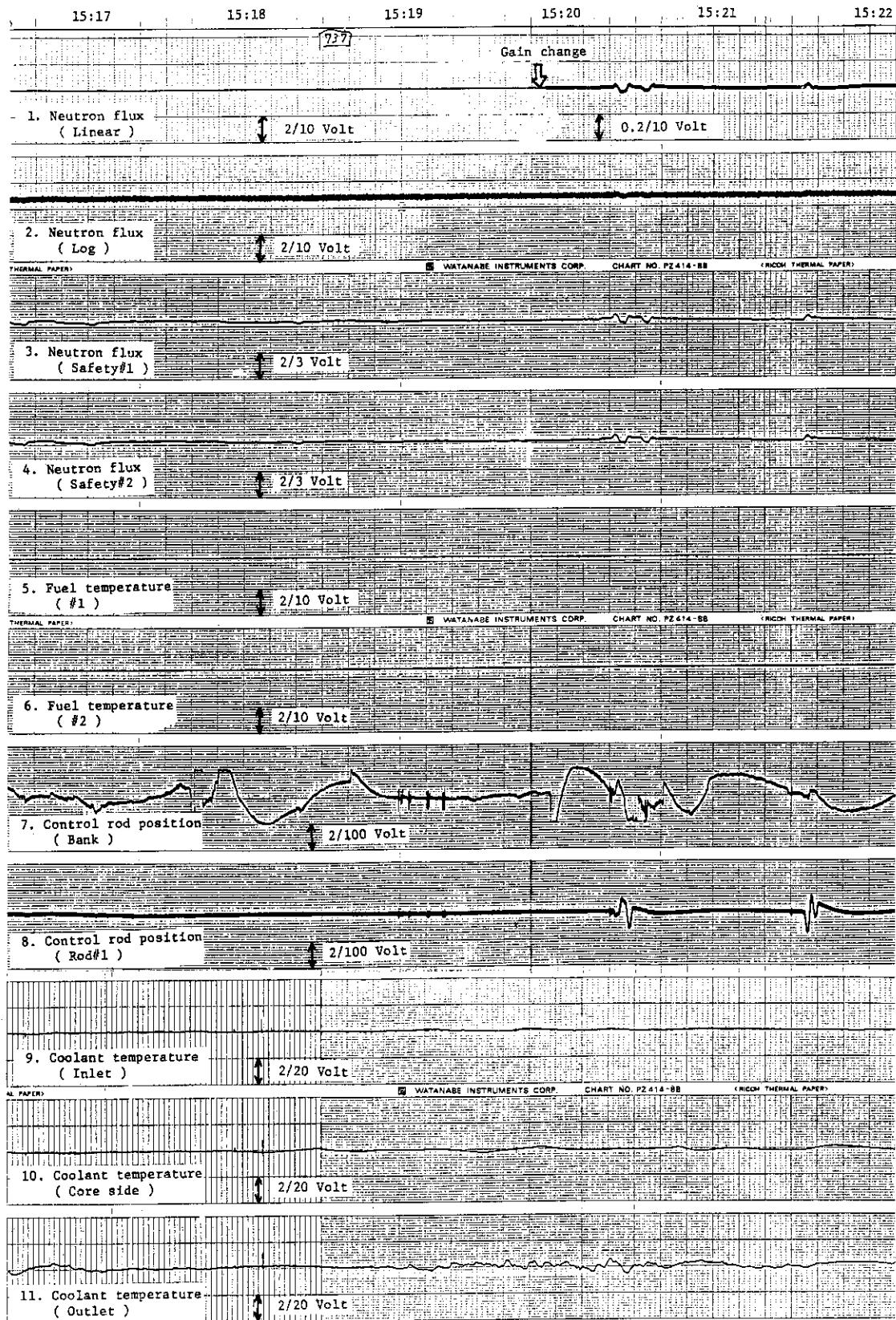


Fig. 4.2 (b) (Part-2)

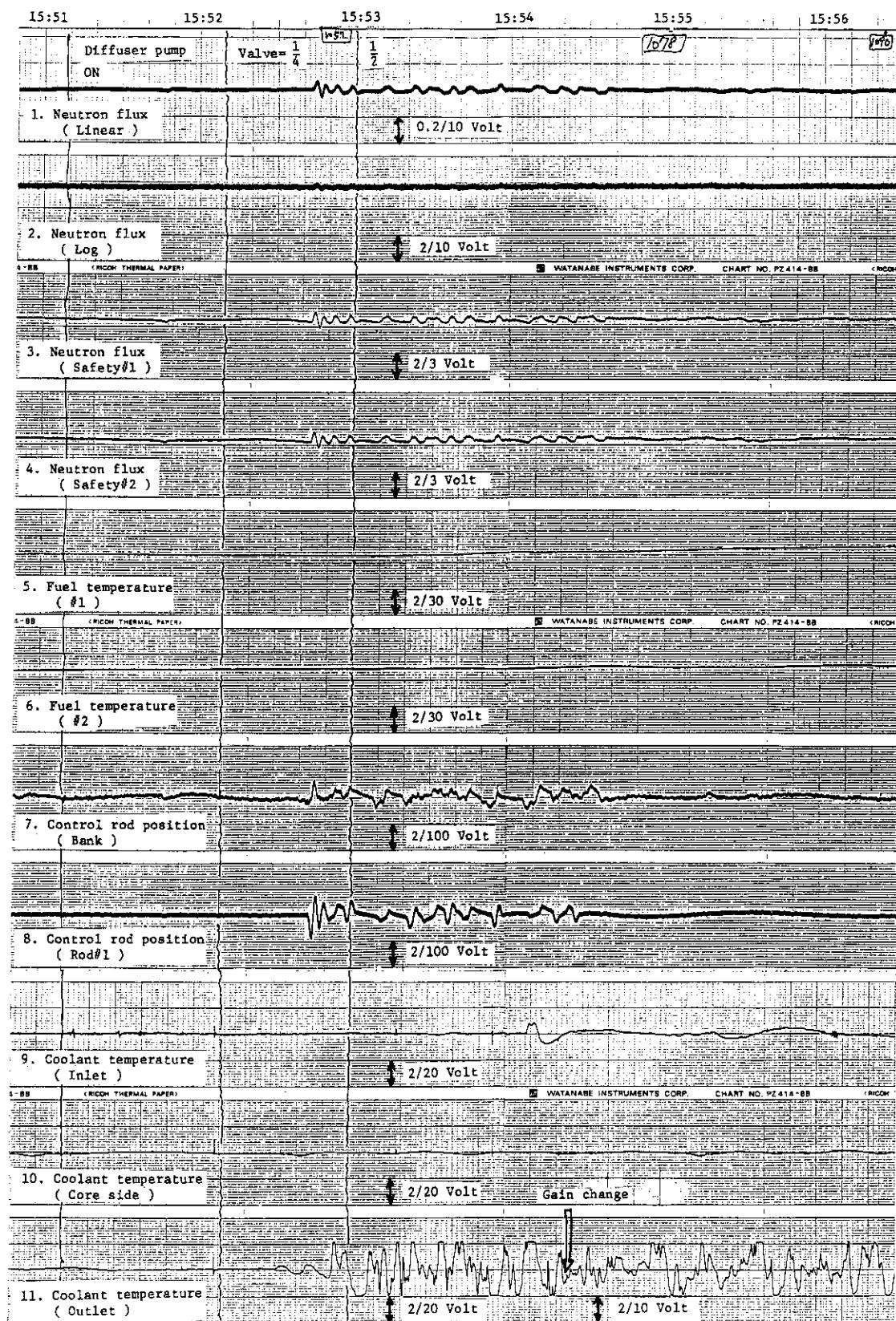


Fig. 4.3 (a) Noise data recordings of the Case-II (Part-1)

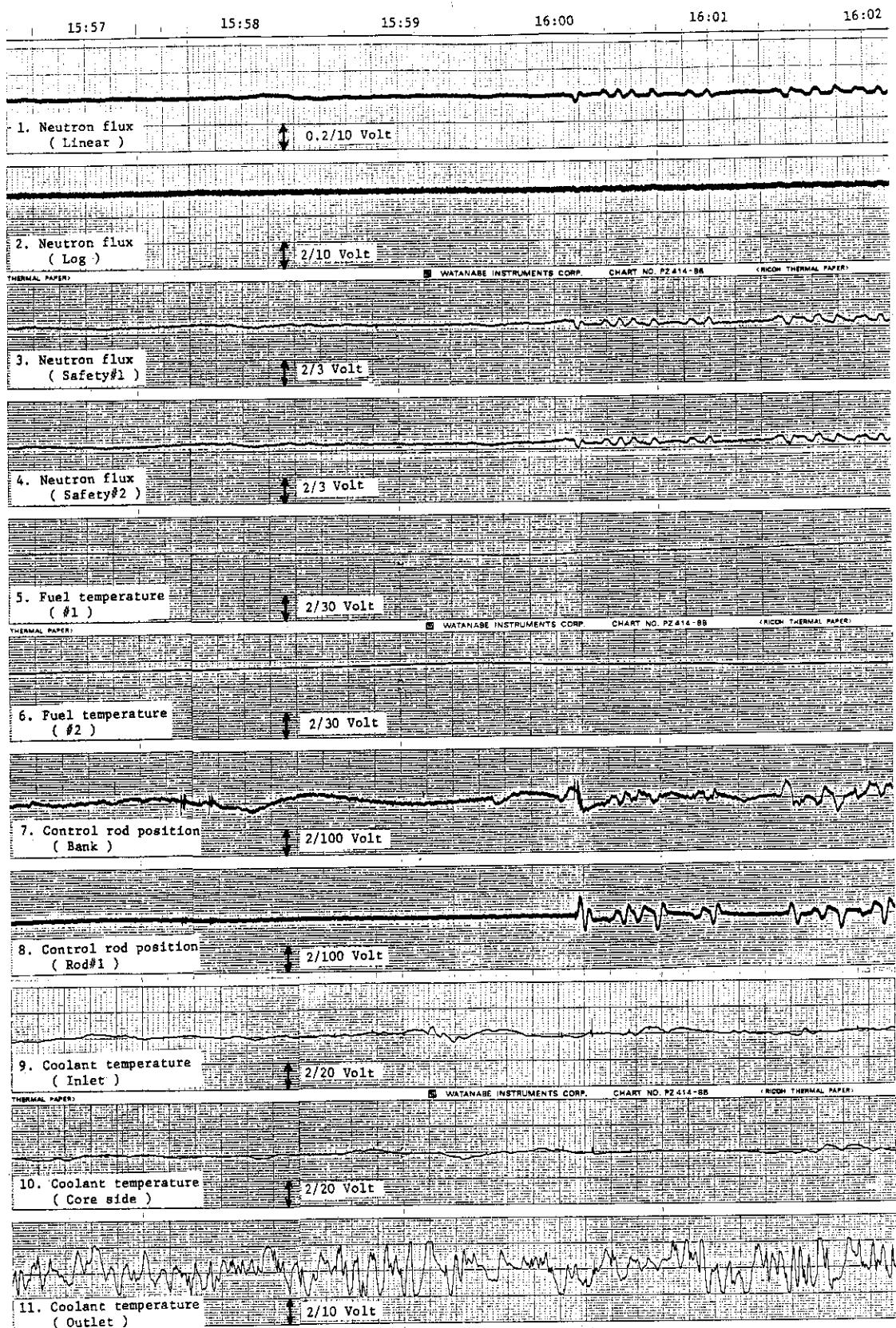


Fig. 4.3 (b) (Part-2)

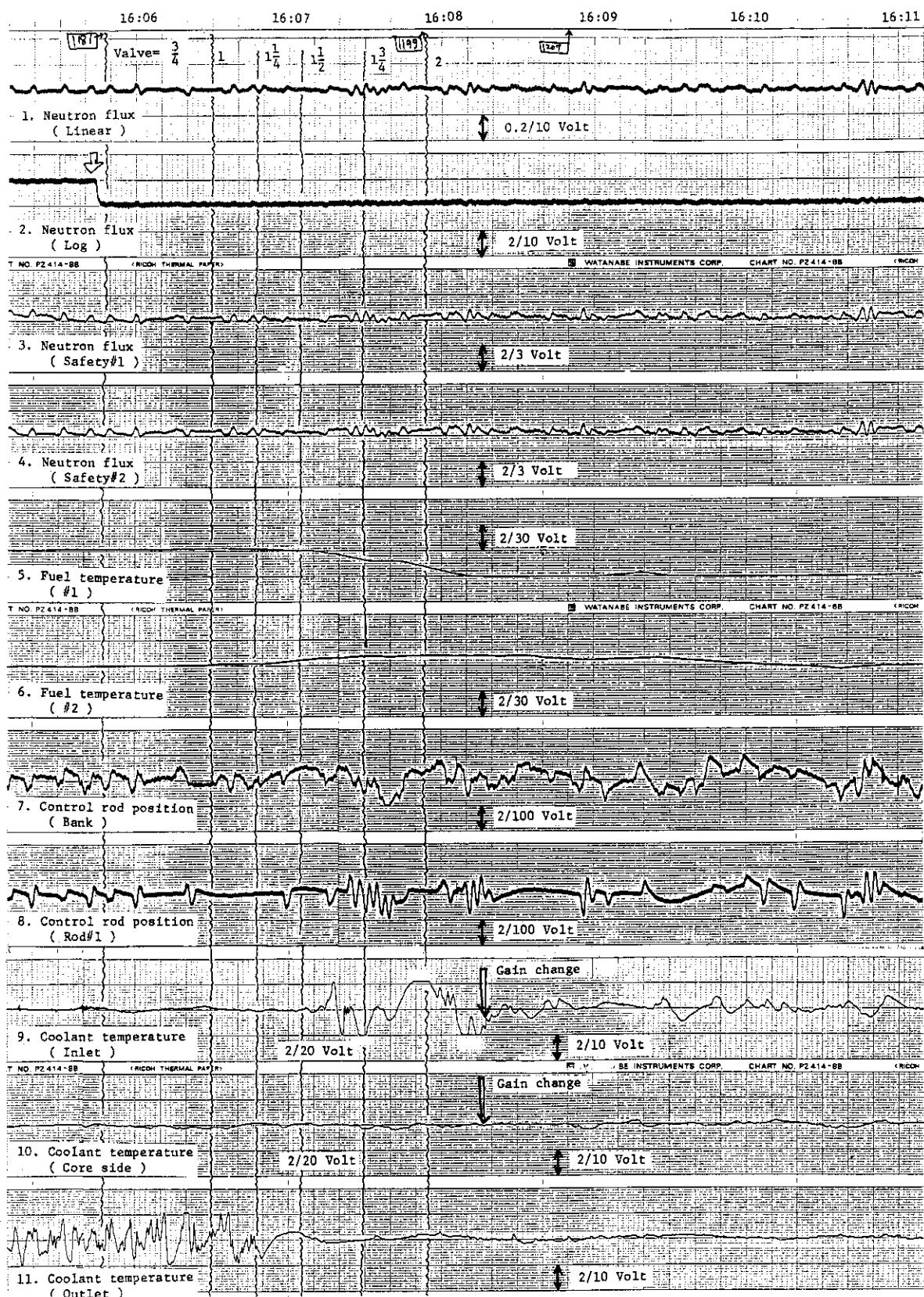


Fig. 4.4 (a) Noise data recordings of the Case-III (Part-1)

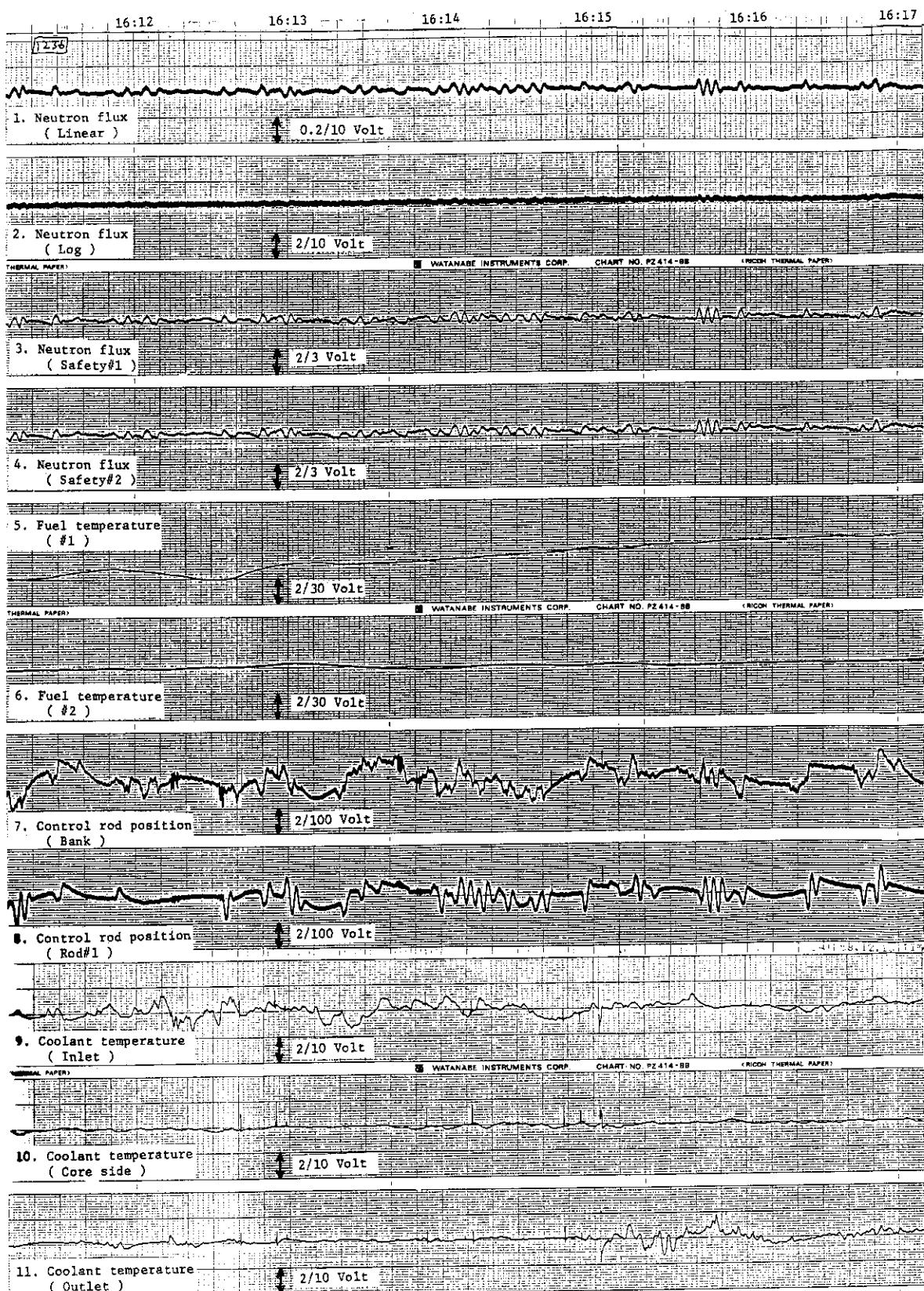


Fig. 4.4 (b) (Part-2)

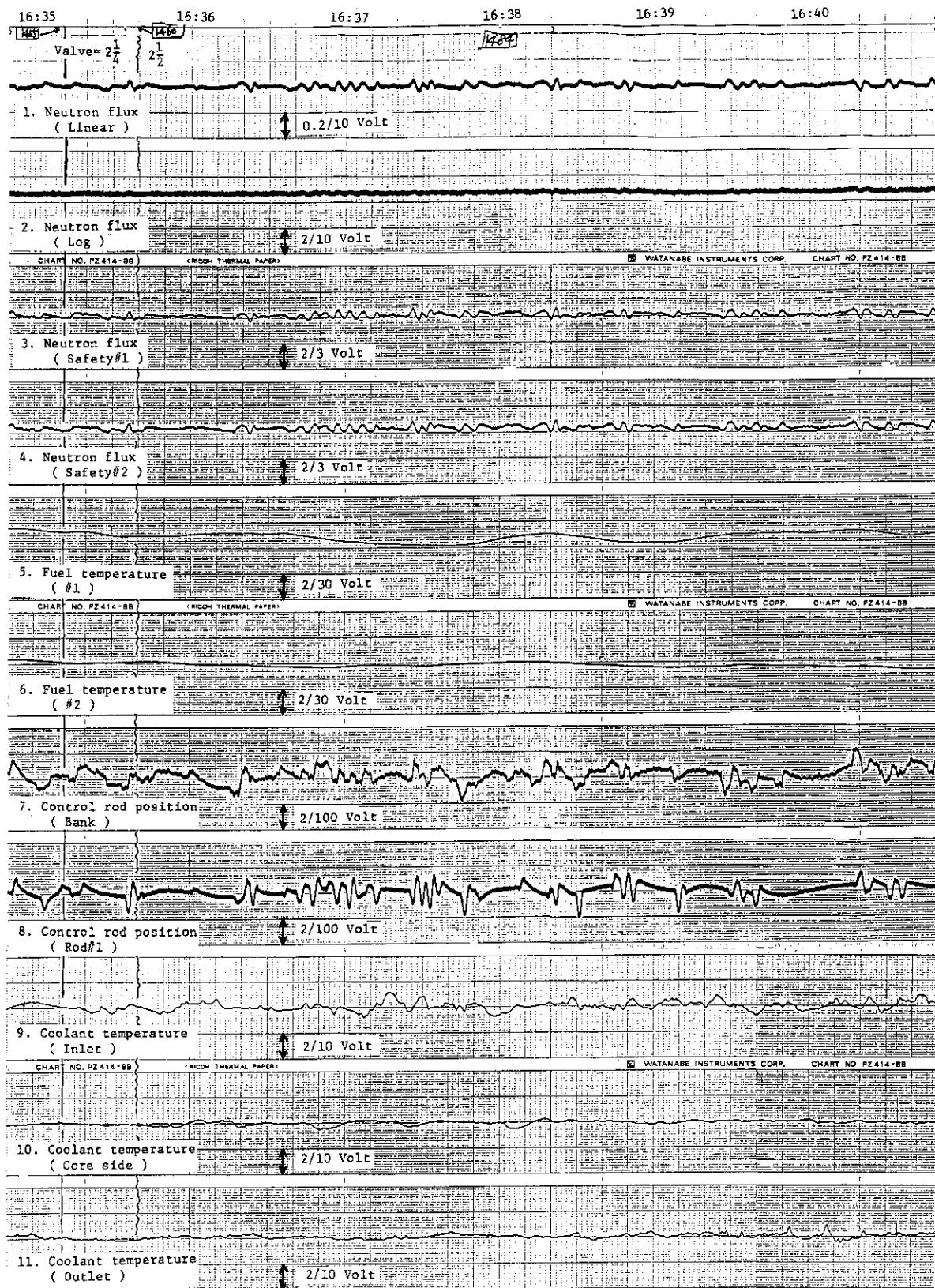


Fig. 4.5 Noise data recordings of the Case-IV

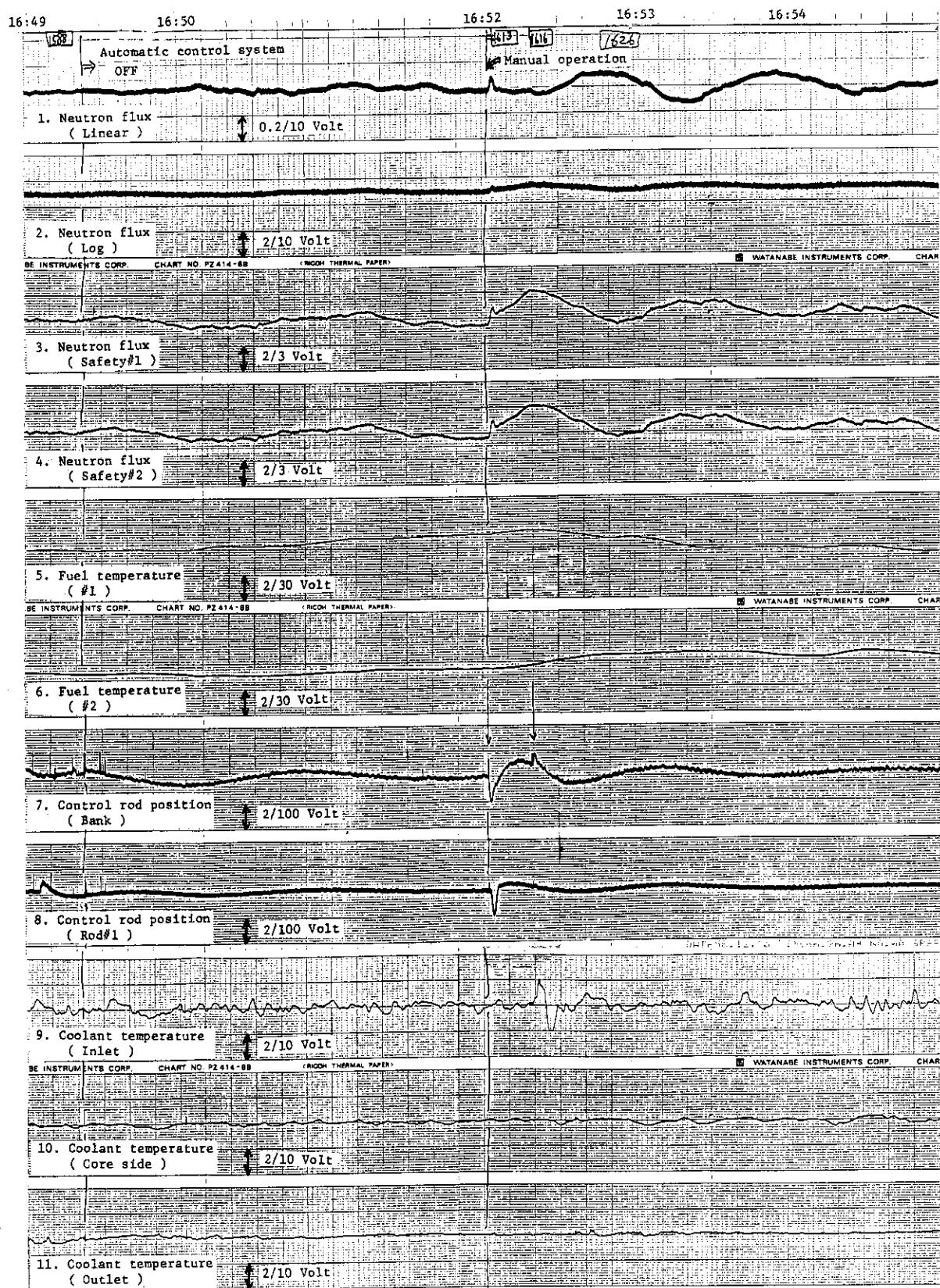


Fig. 4.6 (a) Noise data recordings of the Case-V (Part-1)

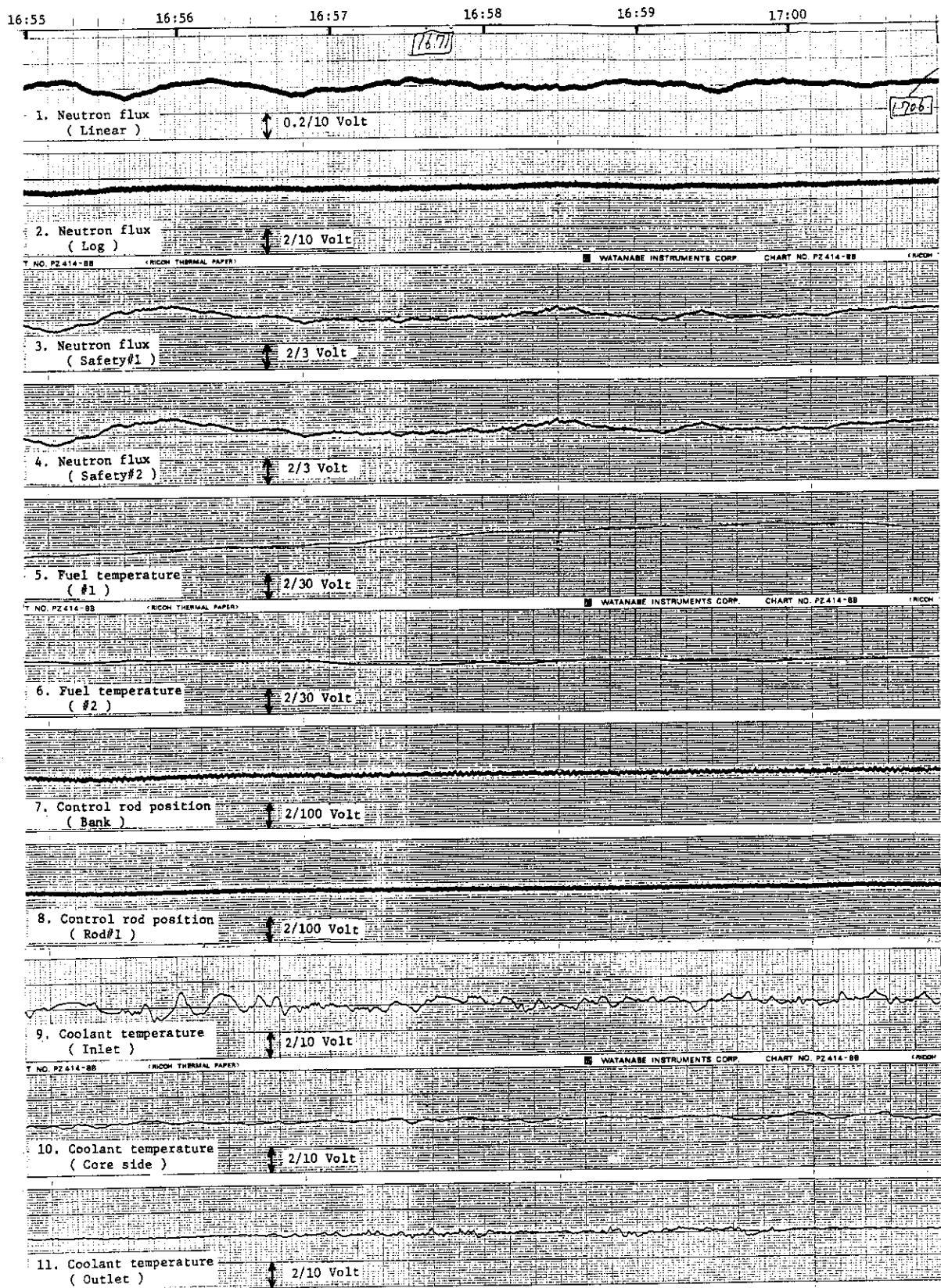


Fig. 4.6 (b) (Part-2)

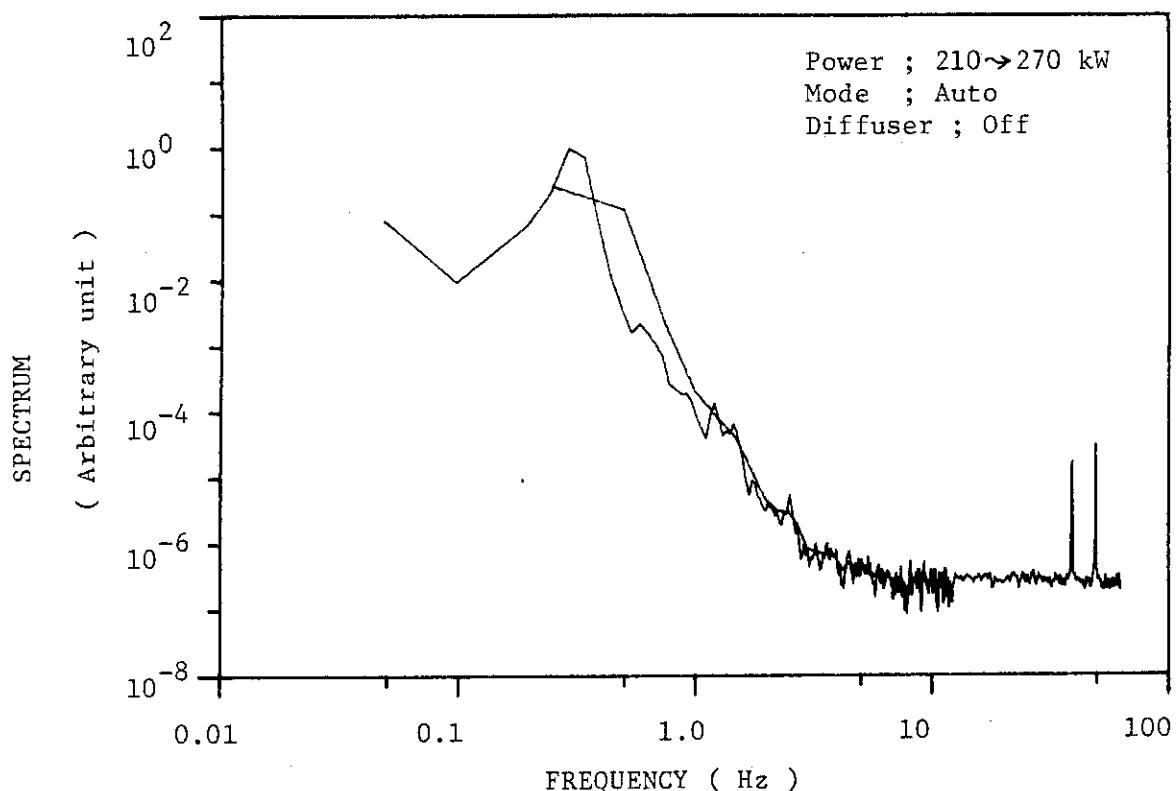


Fig. 4.7 Power spectrum of the safety #2 channel neutron noise
in the Case-0 data

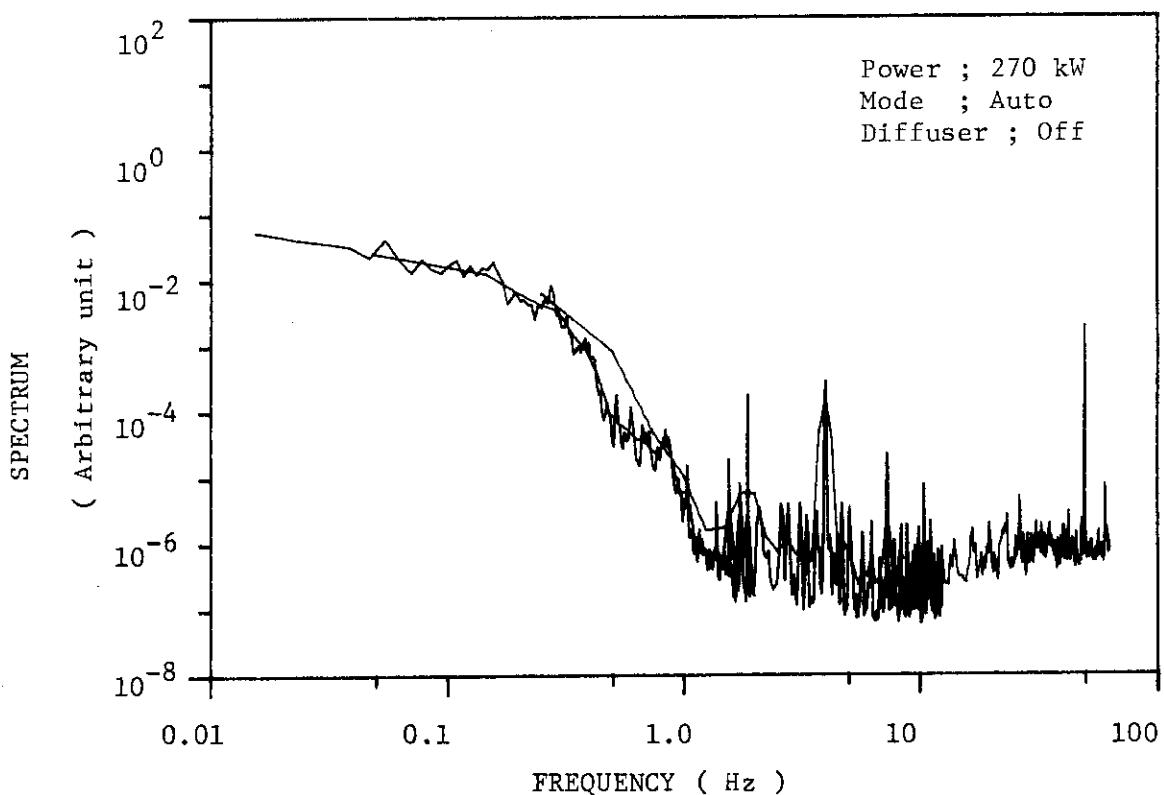


Fig. 4.8 Power spectrum of the linear channel neutron noise
in the Case-I data

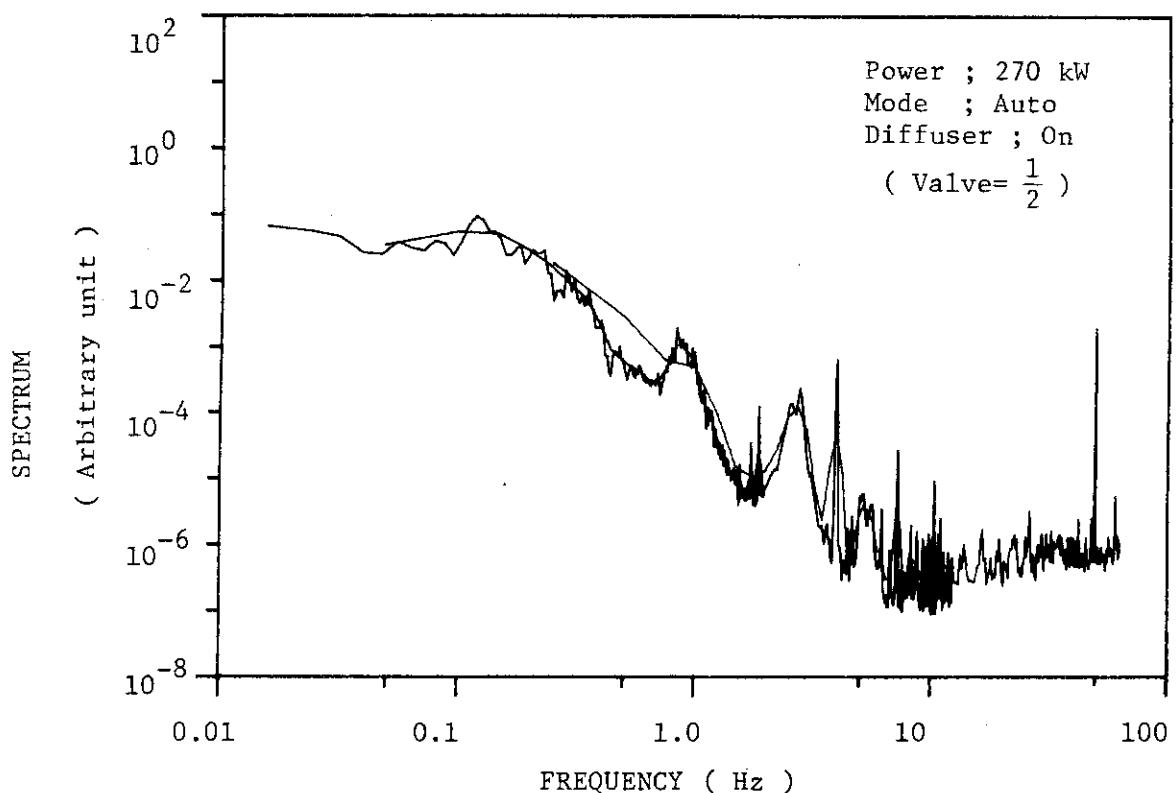


Fig. 4.9 Power spectrum of the linear channel neutron noise
in the Case-II data

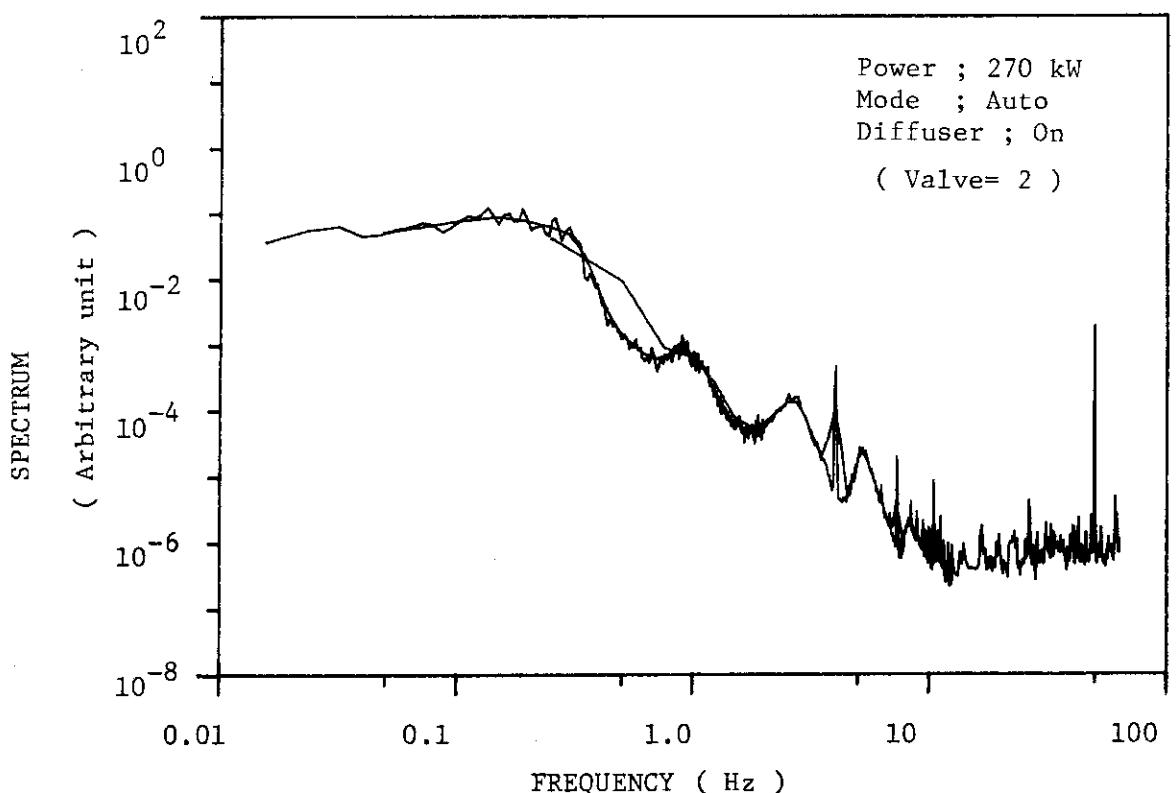


Fig. 4.10 Power spectrum of the linear channel neutron noise
in the Case-III data

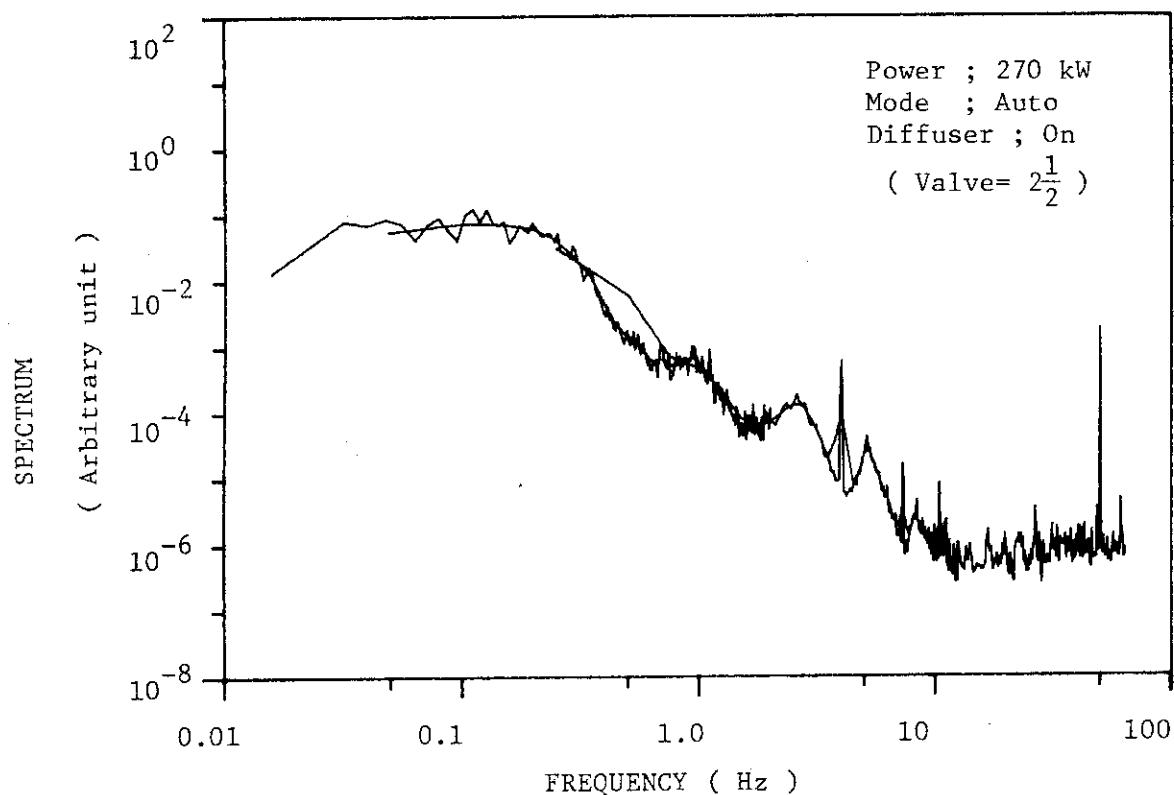


Fig. 4.11 Power spectrum of the linear channel neutron noise
in the Case-IV data

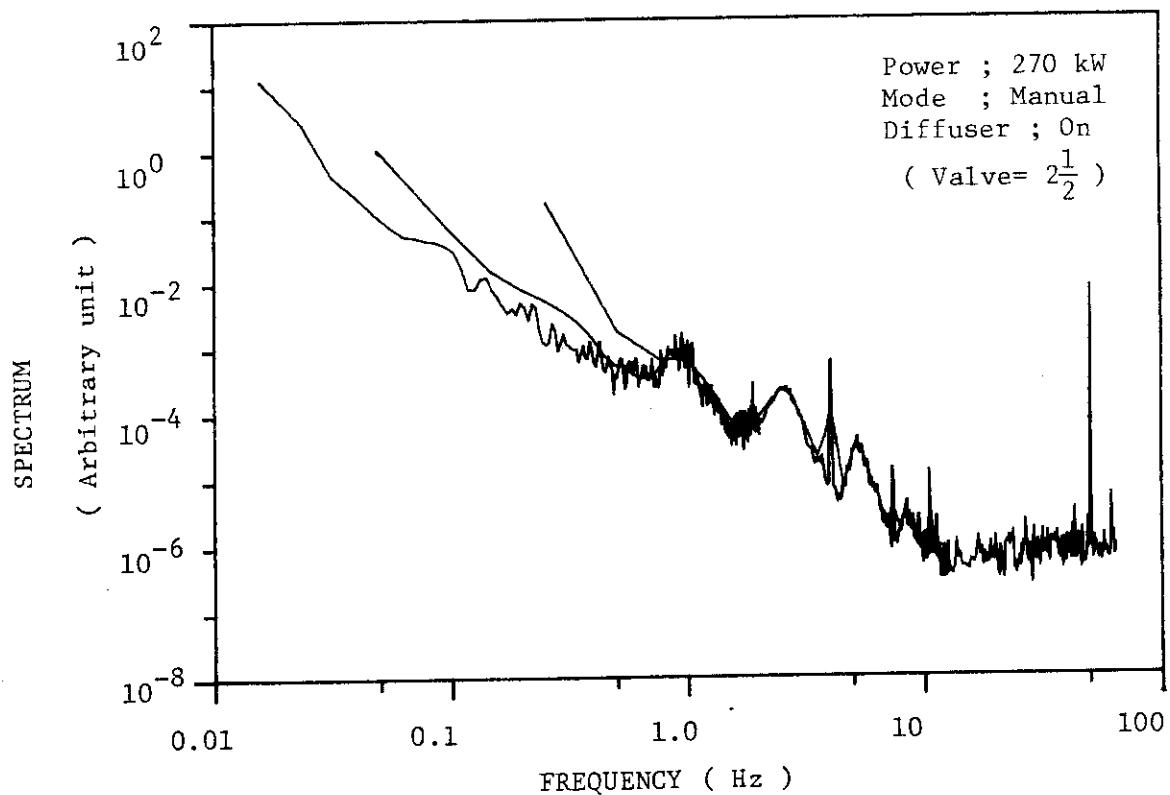


Fig. 4.12 Power spectrum of the linear channel neutron noise
in the Case-V data

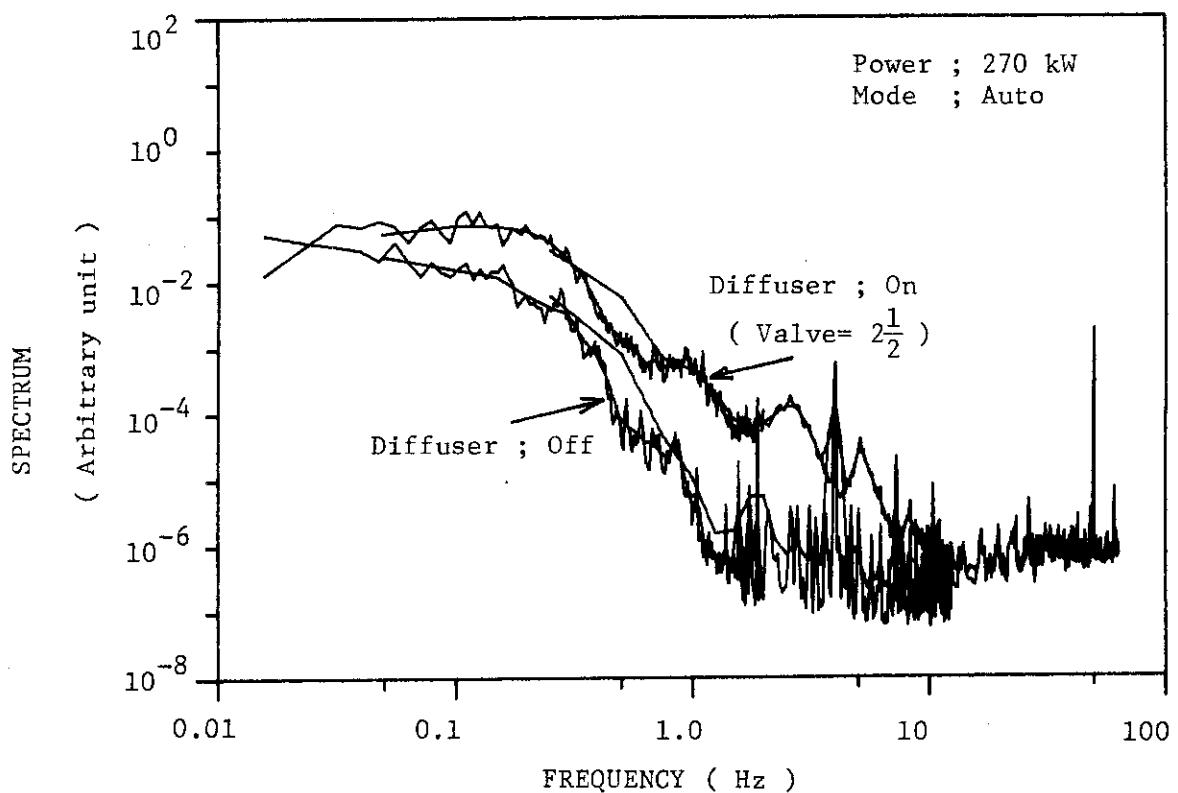


Fig. 4.13 Comparison of the neutron spectra with and without operation of the diffuser system

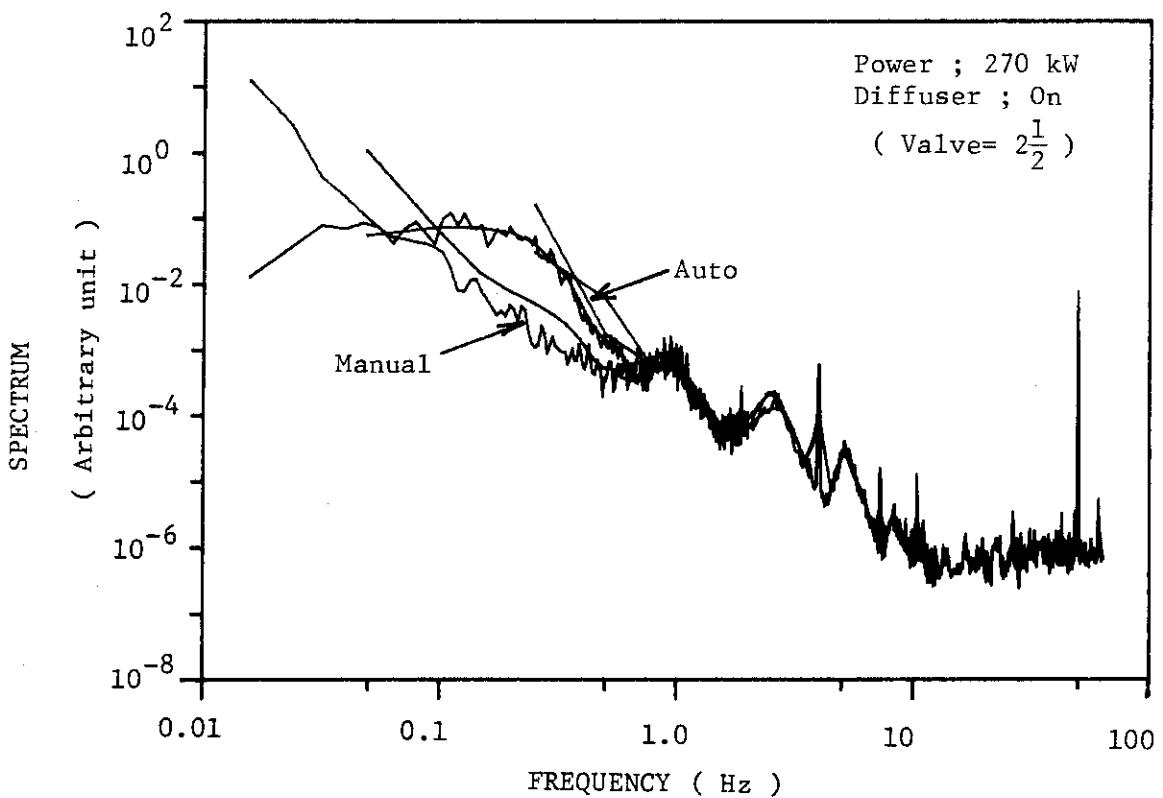


Fig. 4.14 Comparison of the neutron spectra under the automatic control and the manual mode

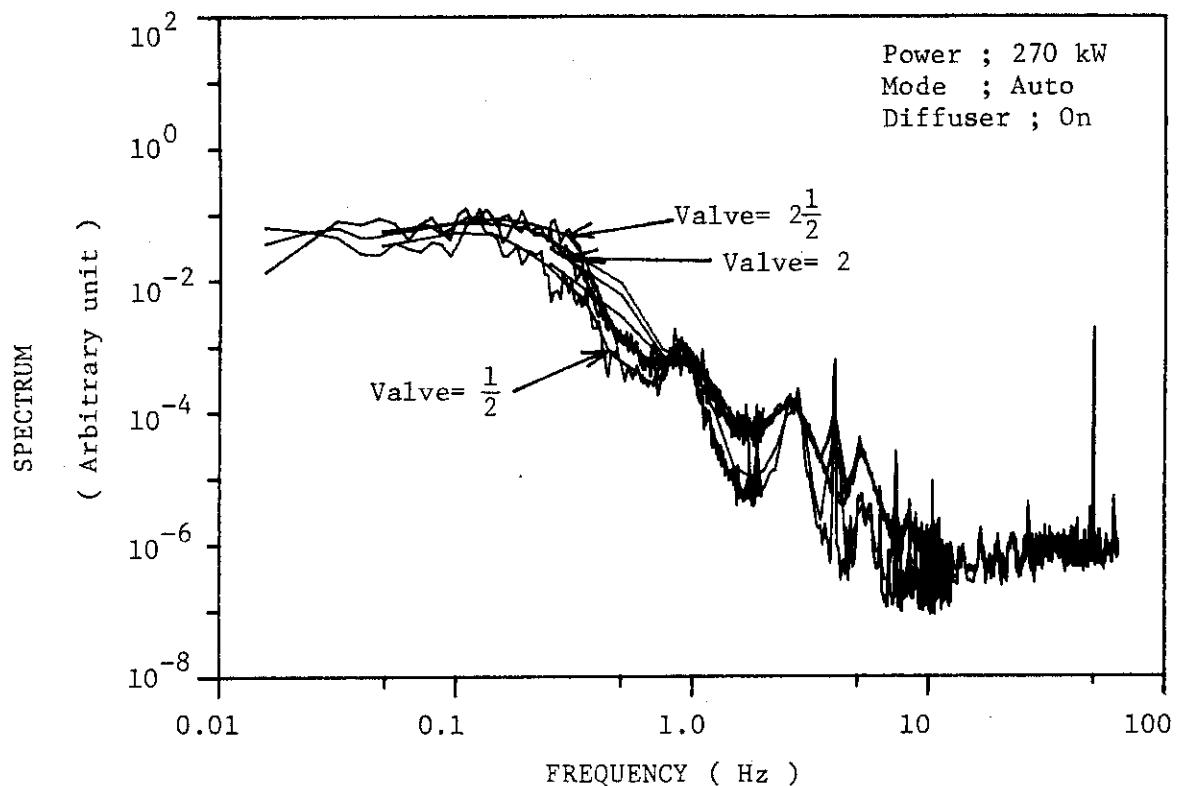


Fig. 4.15 Comparison of the neutron spectra for different valve conditions of the diffuser system operation

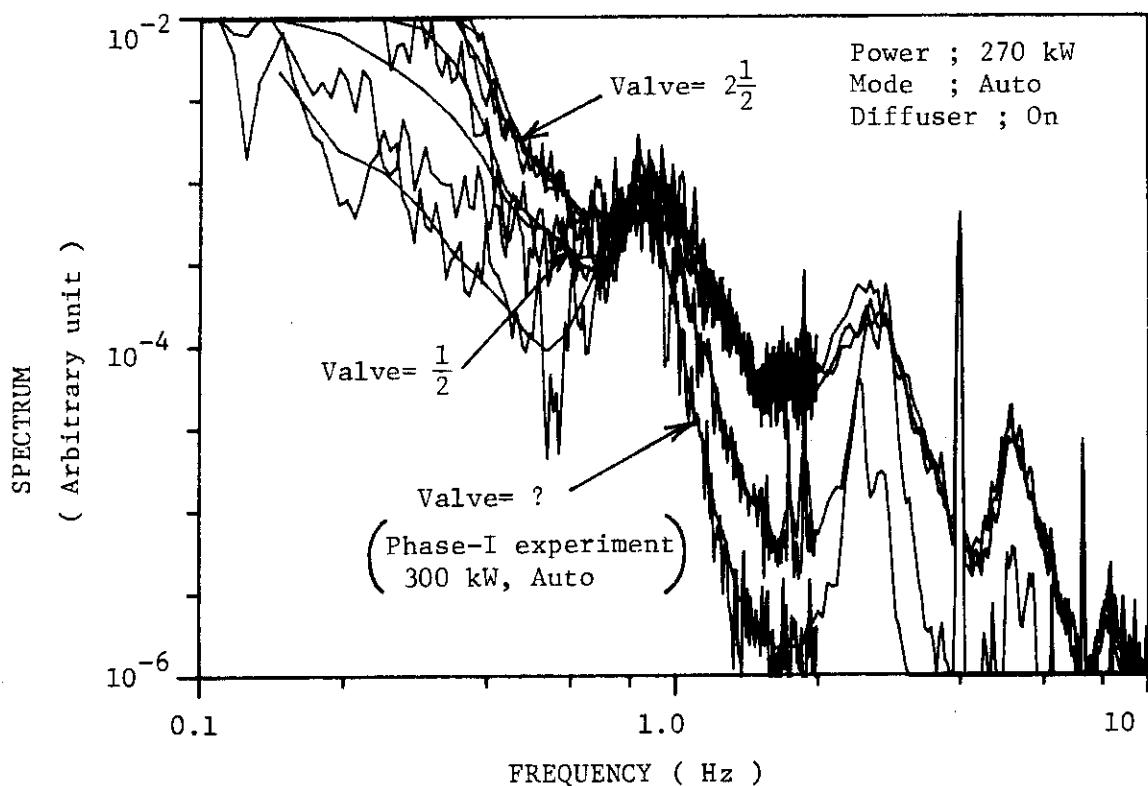


Fig. 4.16 Comparison of the spectral peaks of the neutron noise for the different valve conditions of the diffuser system operation

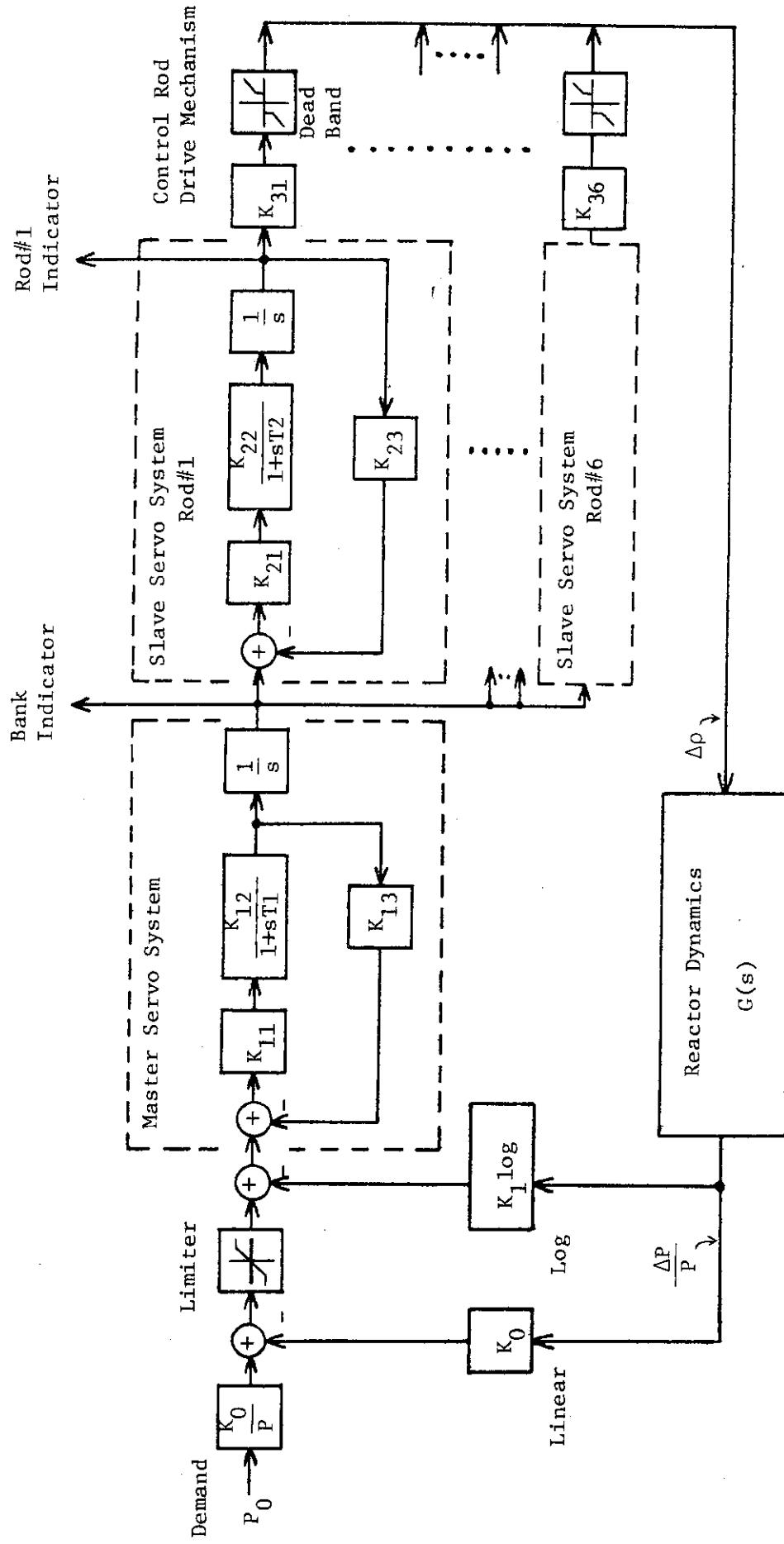


Fig. 4.17 Block diagram of the automatic control system
in terms of transfer function

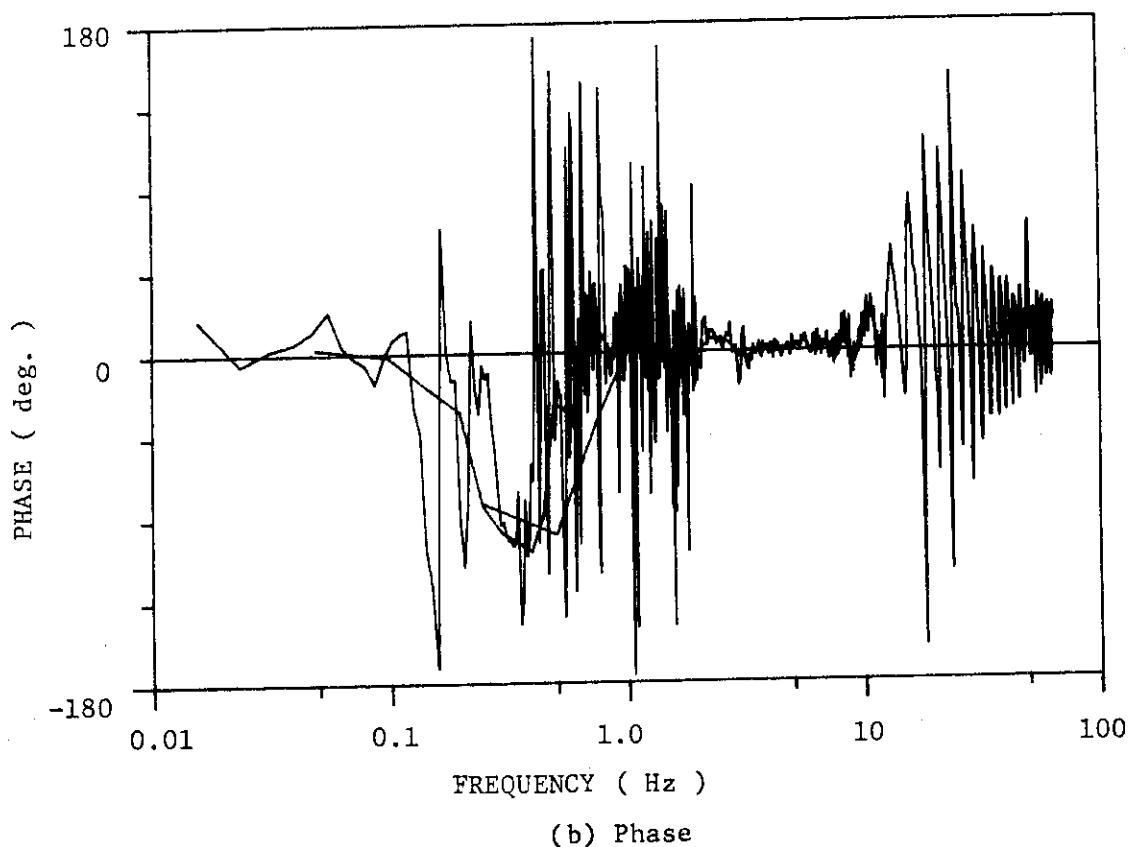
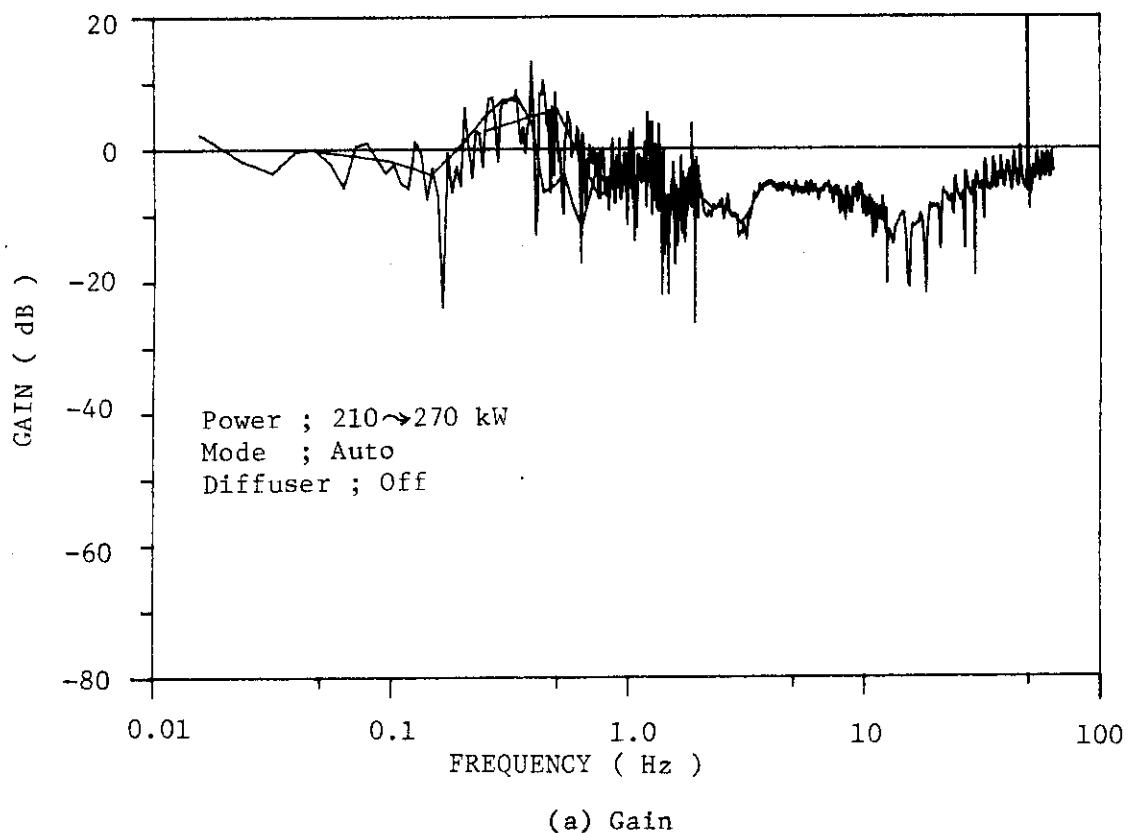
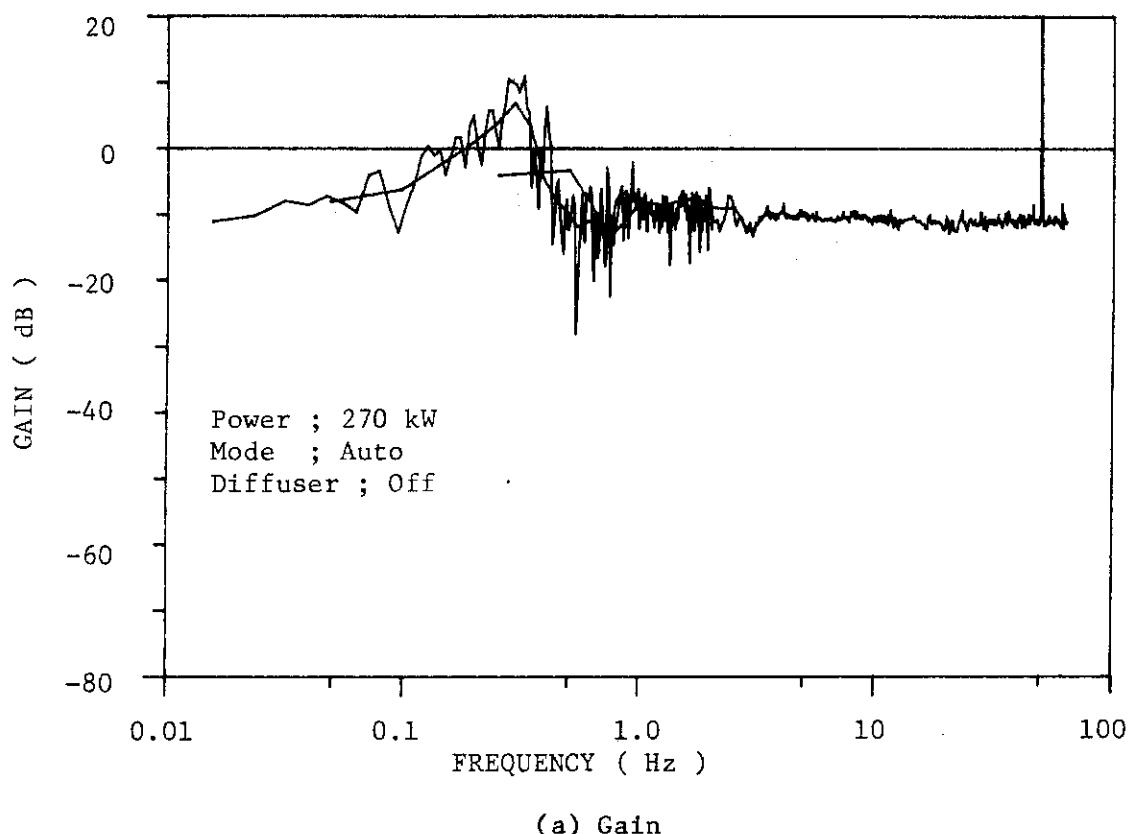
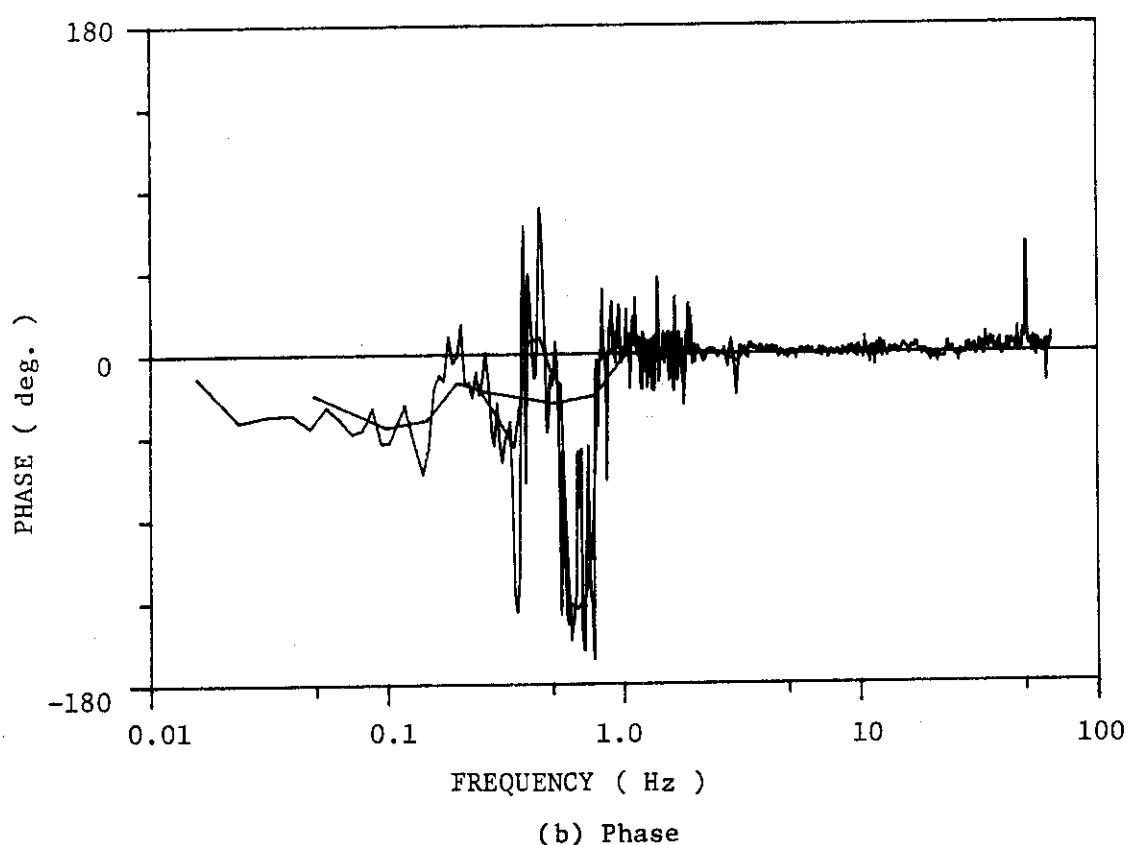


Fig. 4.18 Frequency response function from the bank signal to the rod #1 signal estimated from the Case-0 data



(a) Gain



(b) Phase

Fig. 4.19 Frequency response function from the bank signal to the rod #1 signal estimated from the Case-I data

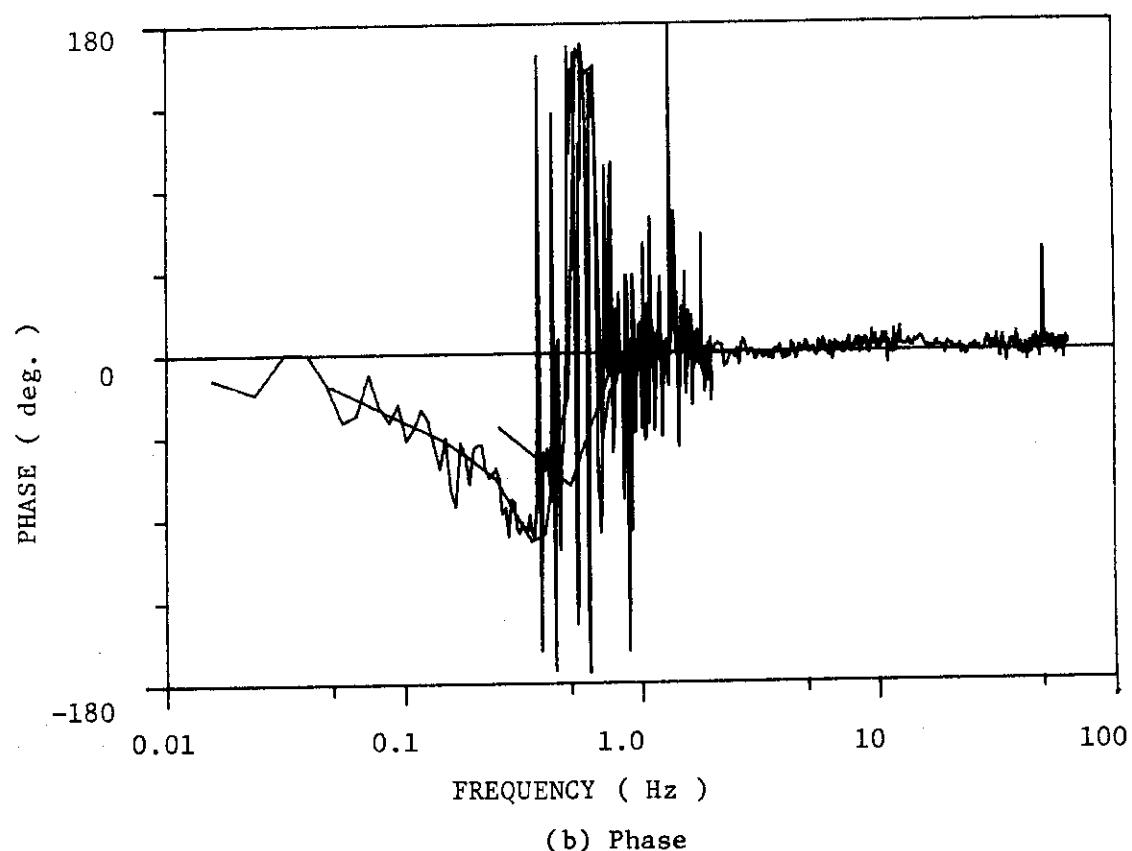
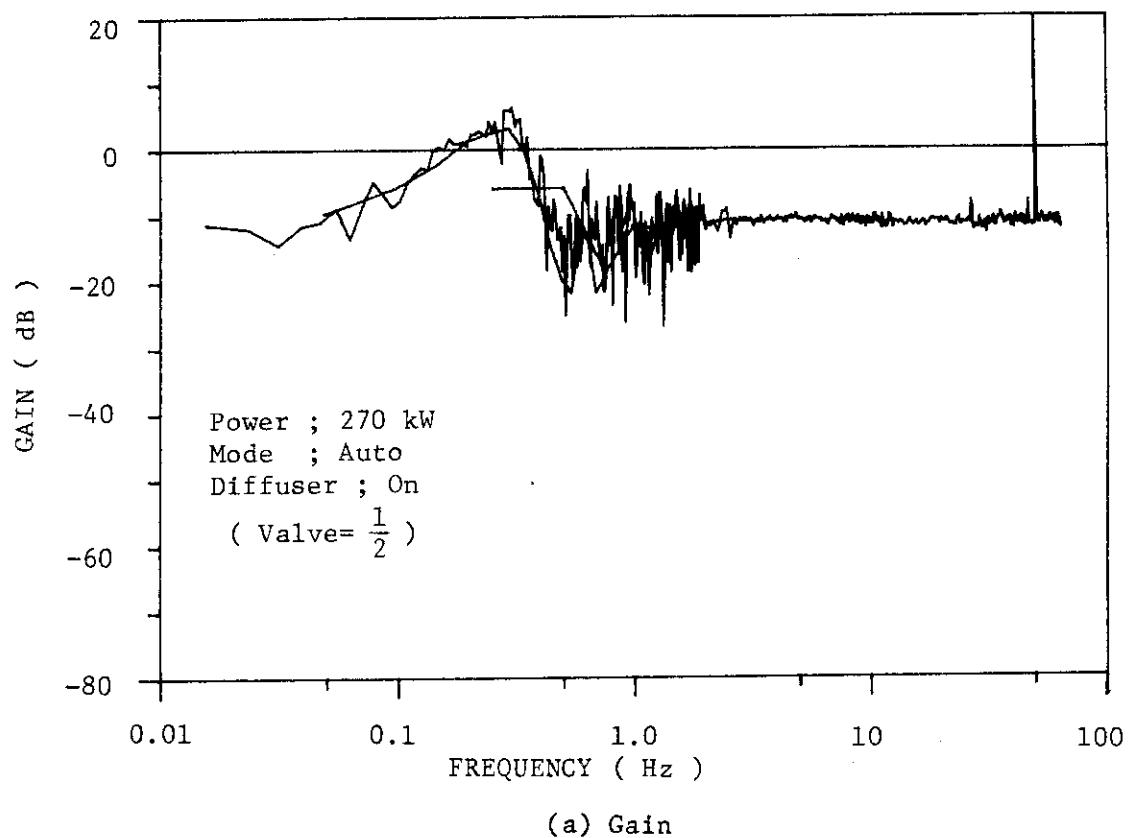


Fig. 4.20 Frequency response function from the bank signal to the rod #1 signal estimated from the Case-II data

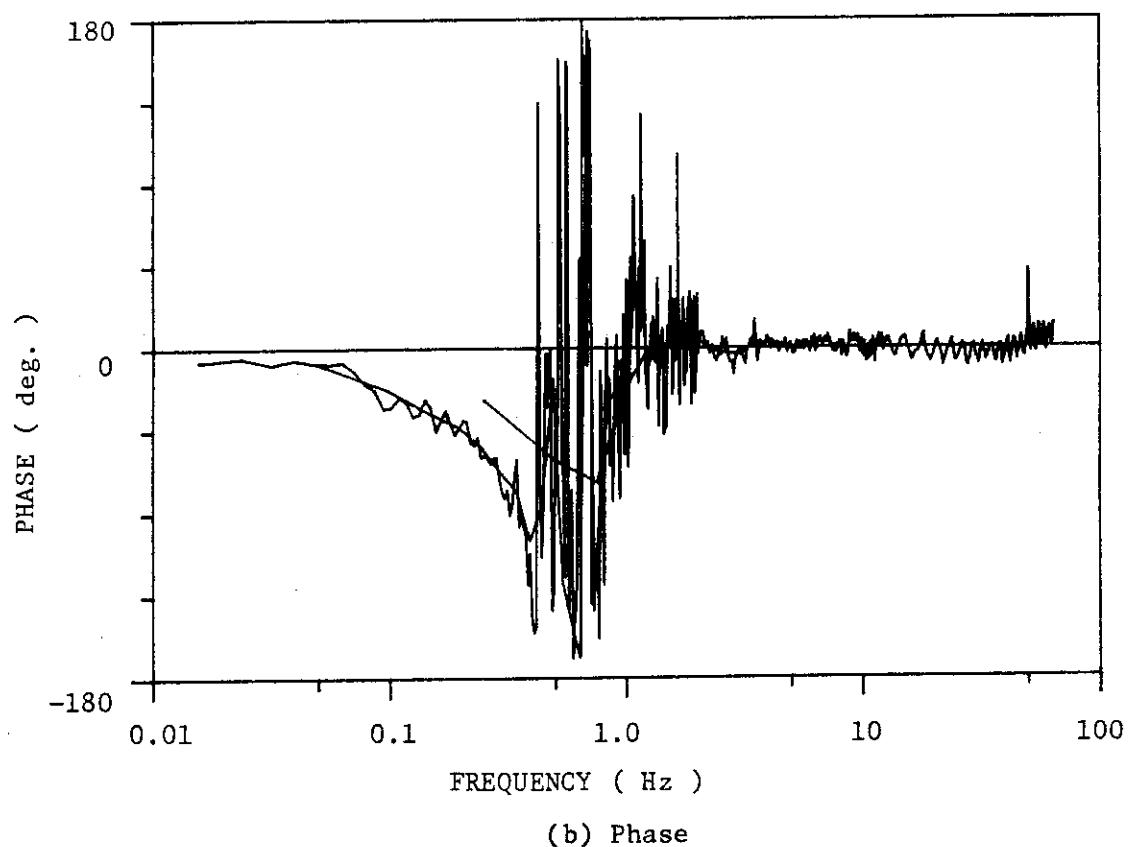
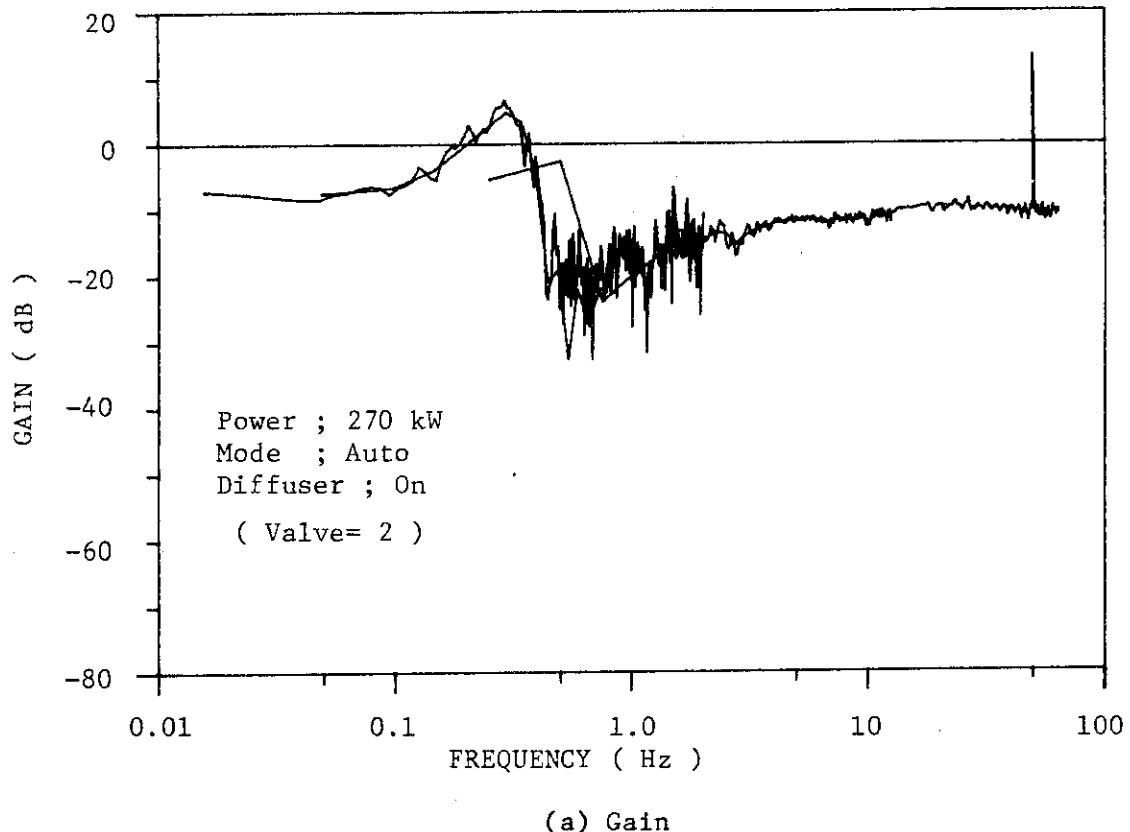
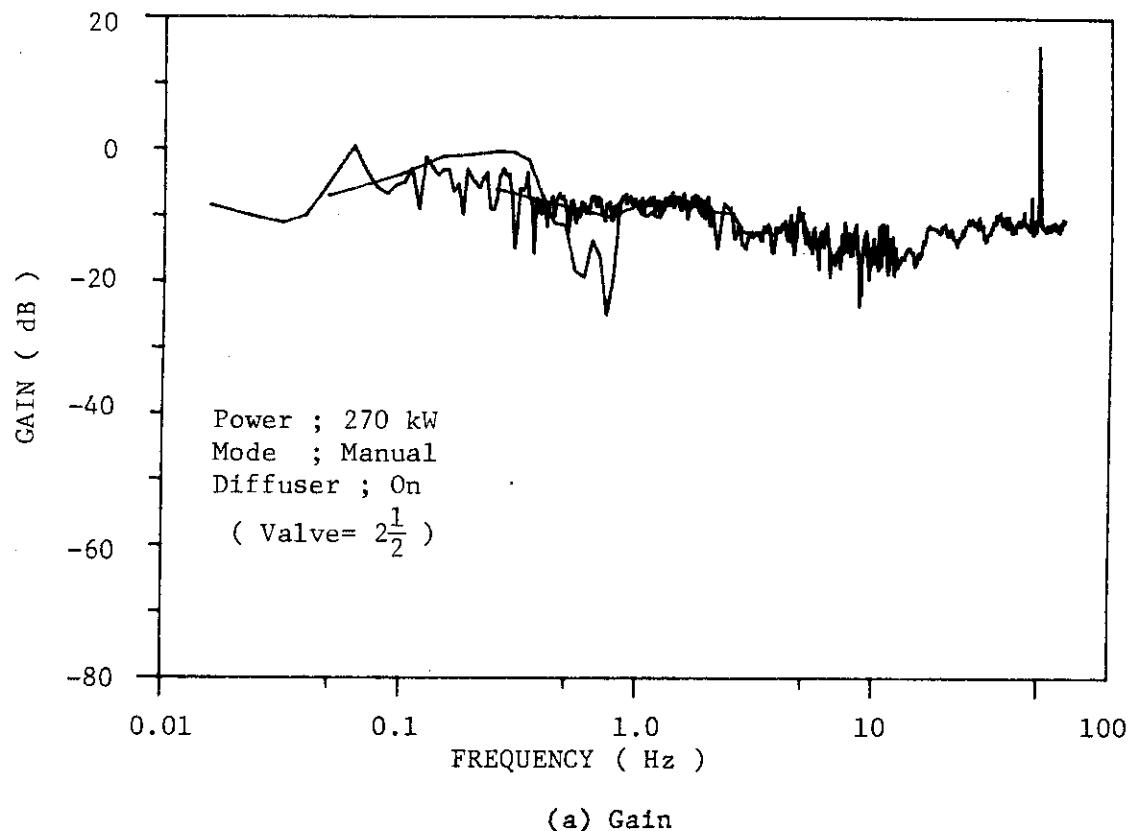
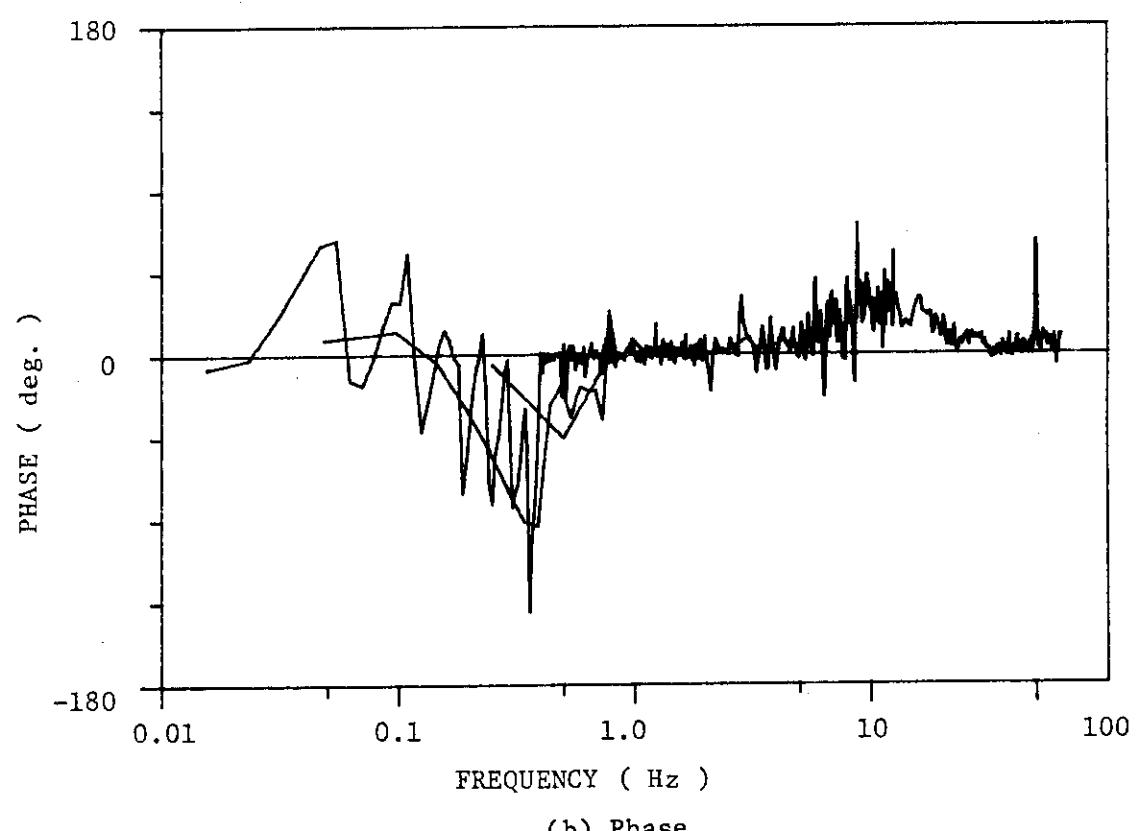


Fig. 4.21 Frequency response function from the bank signal to the rod #1 signal estimated from the Case-III data



(a) Gain



(b) Phase

Fig. 4.22 Frequency response function from the bank signal to the rod #1 signal estimated from the Case-V data

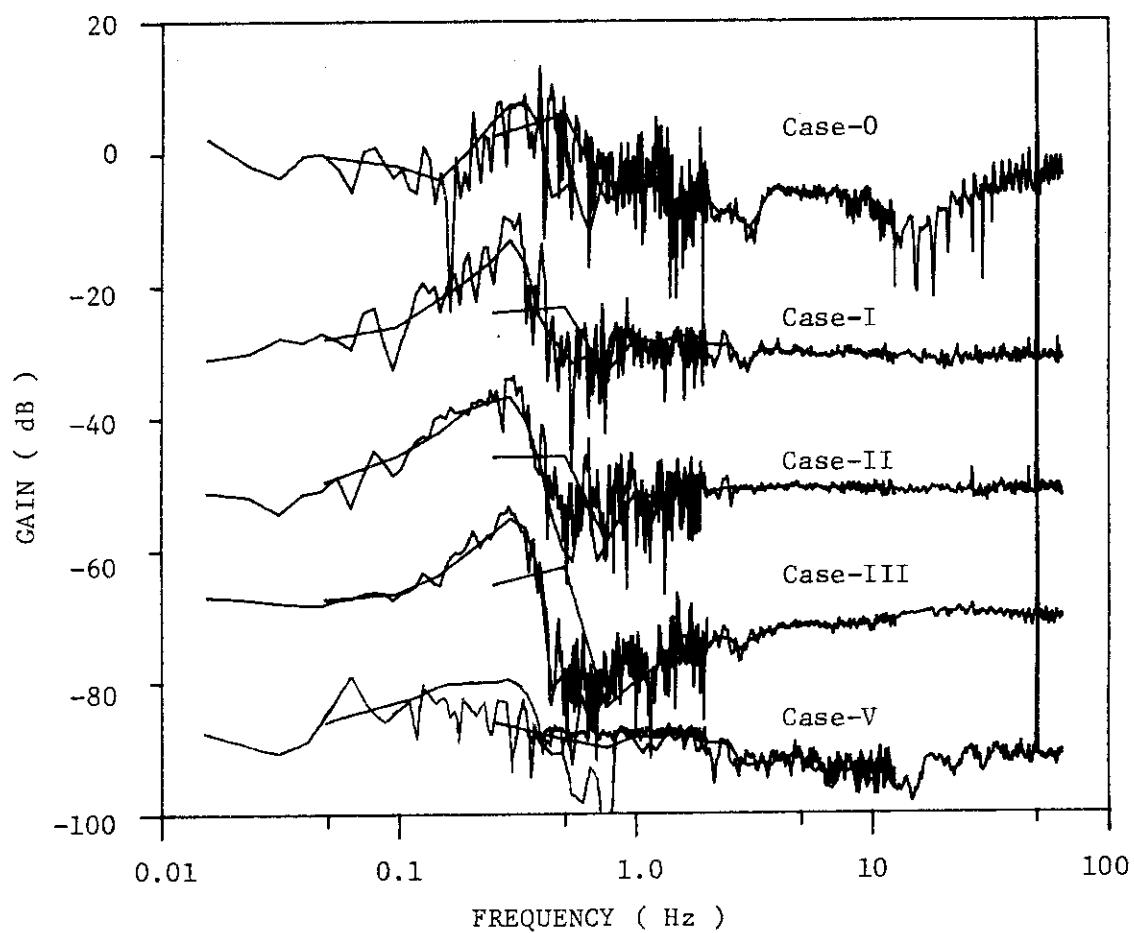


Fig. 4.23 Comparison of the gain function from the bank signal to the rod #1 signal estimated from the Case-I,II,III and V data

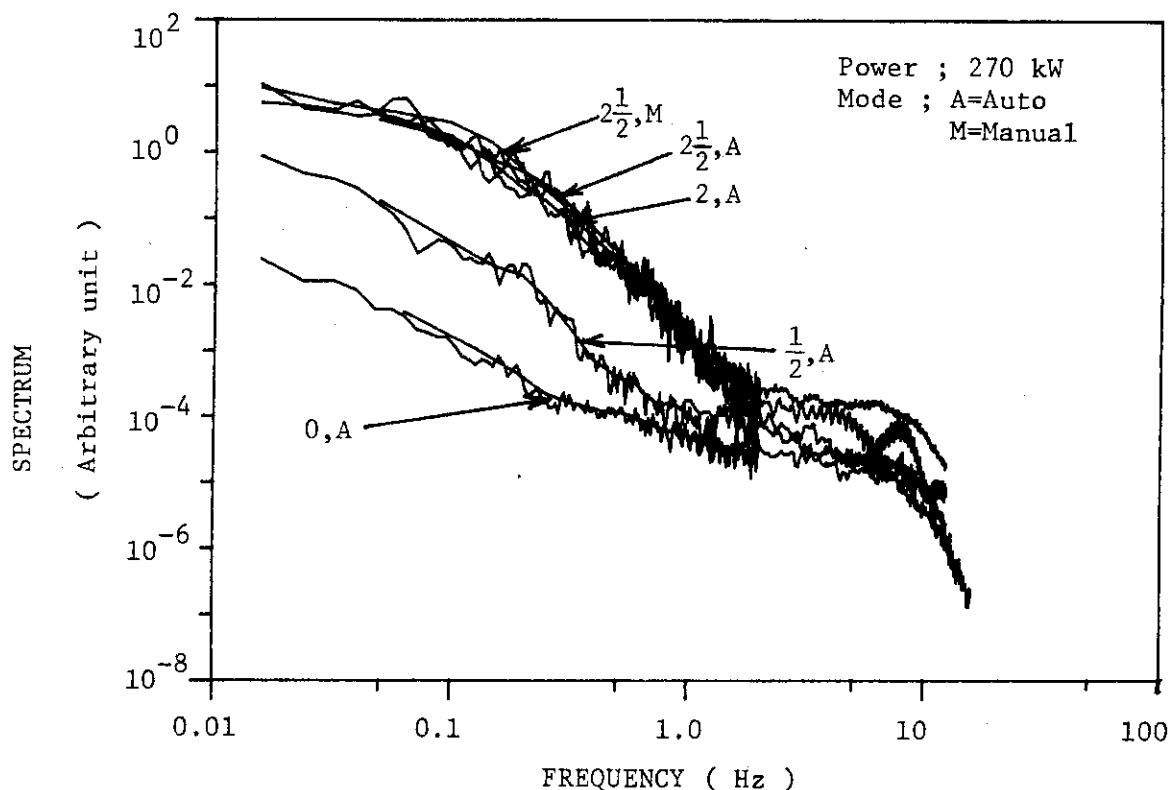


Fig. 4.24 Comparison of the power spectra of the inlet coolant temperature signal for different valve conditions of the diffuser system operation

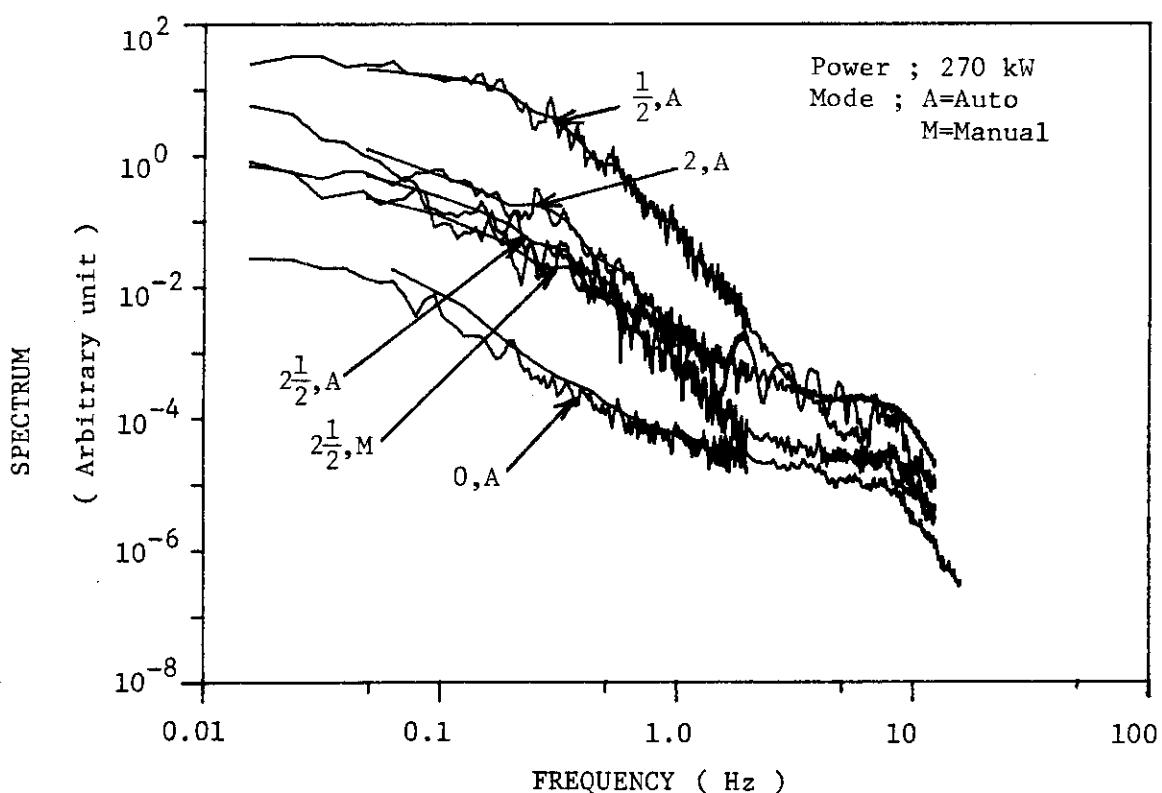


Fig. 4.25 Comparison of the power spectra of the outlet coolant temperature signal for different valve conditions of the diffuser system operation

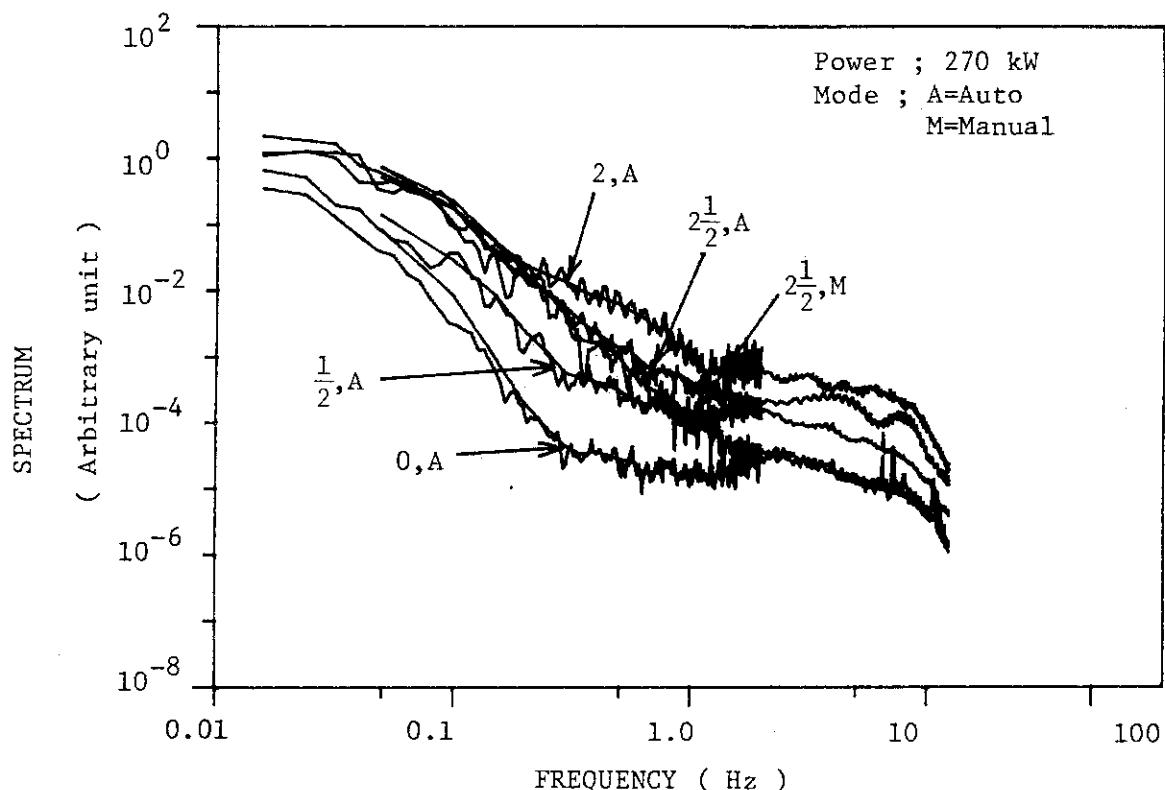


Fig. 4.26 Comparison of the power spectra of the core side coolant temperature signal for different valve conditions of the diffuser system operation

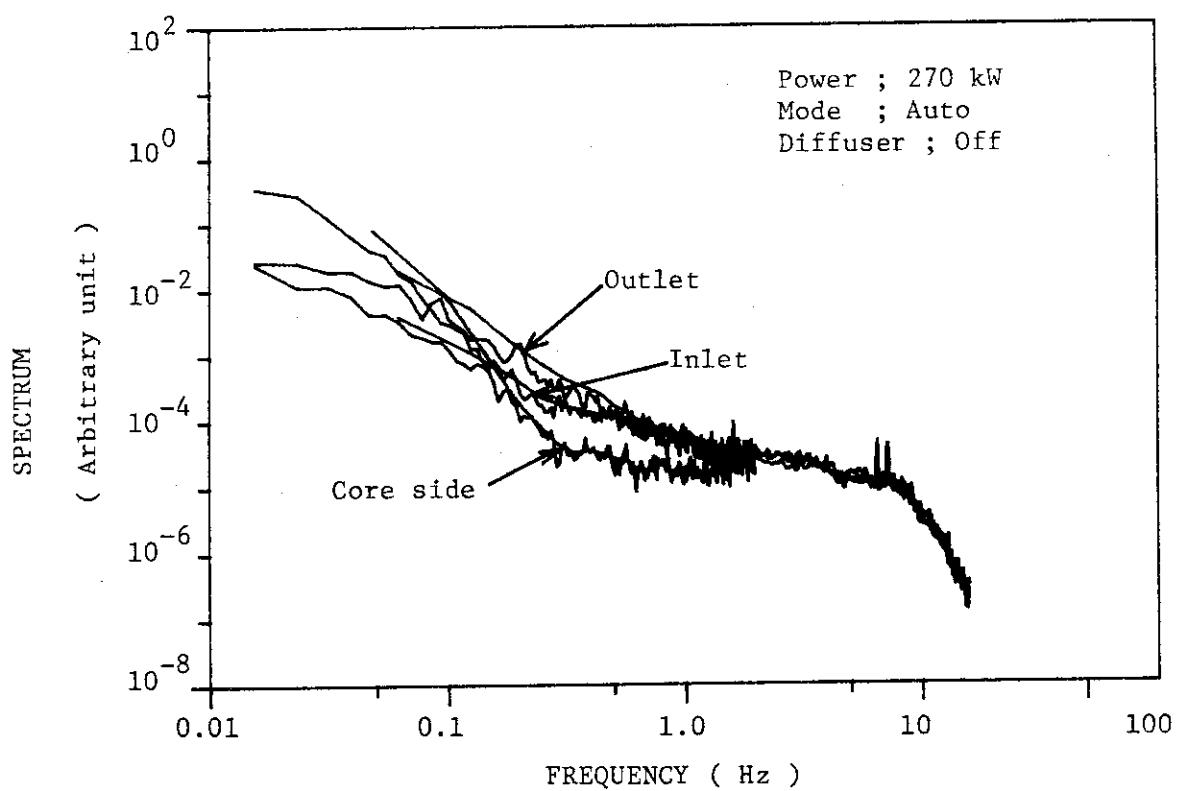


Fig. 4.27 Comparison of the power spectra of three coolant temperature signals in the Case-I

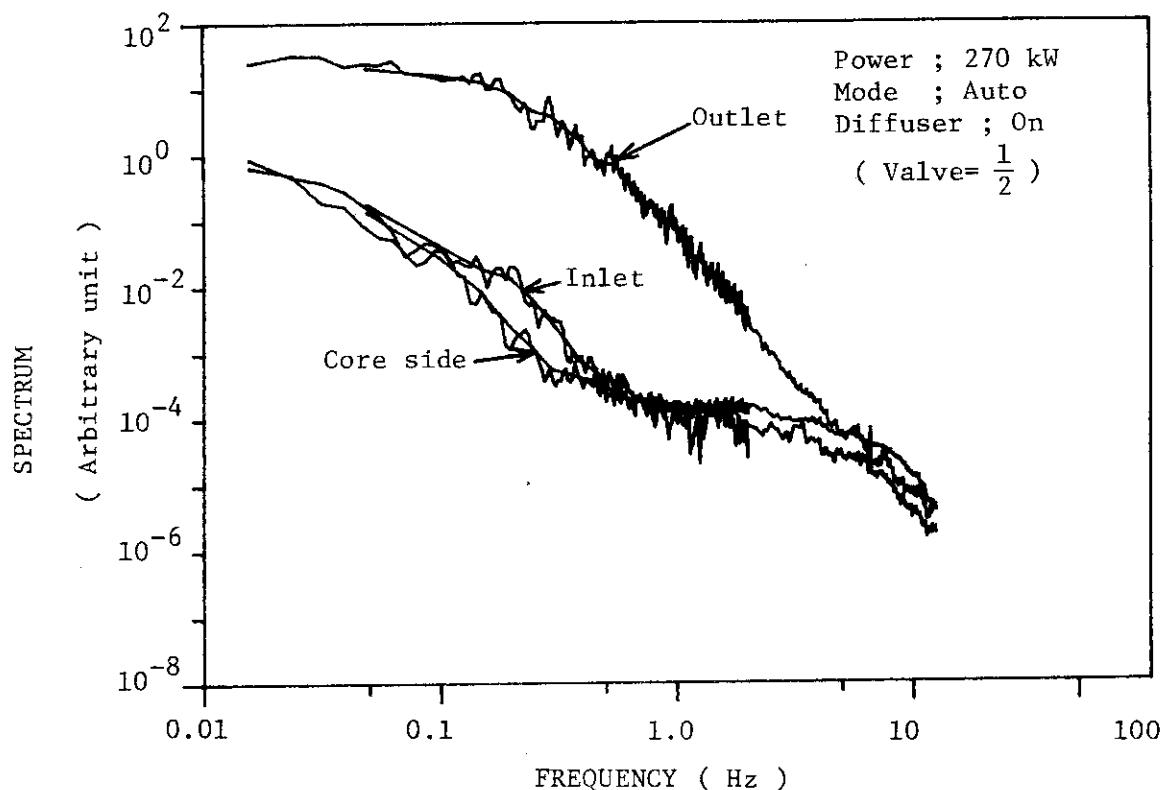


Fig. 4.28 Comparison of the power spectra of three coolant temperature signals in the Case-II

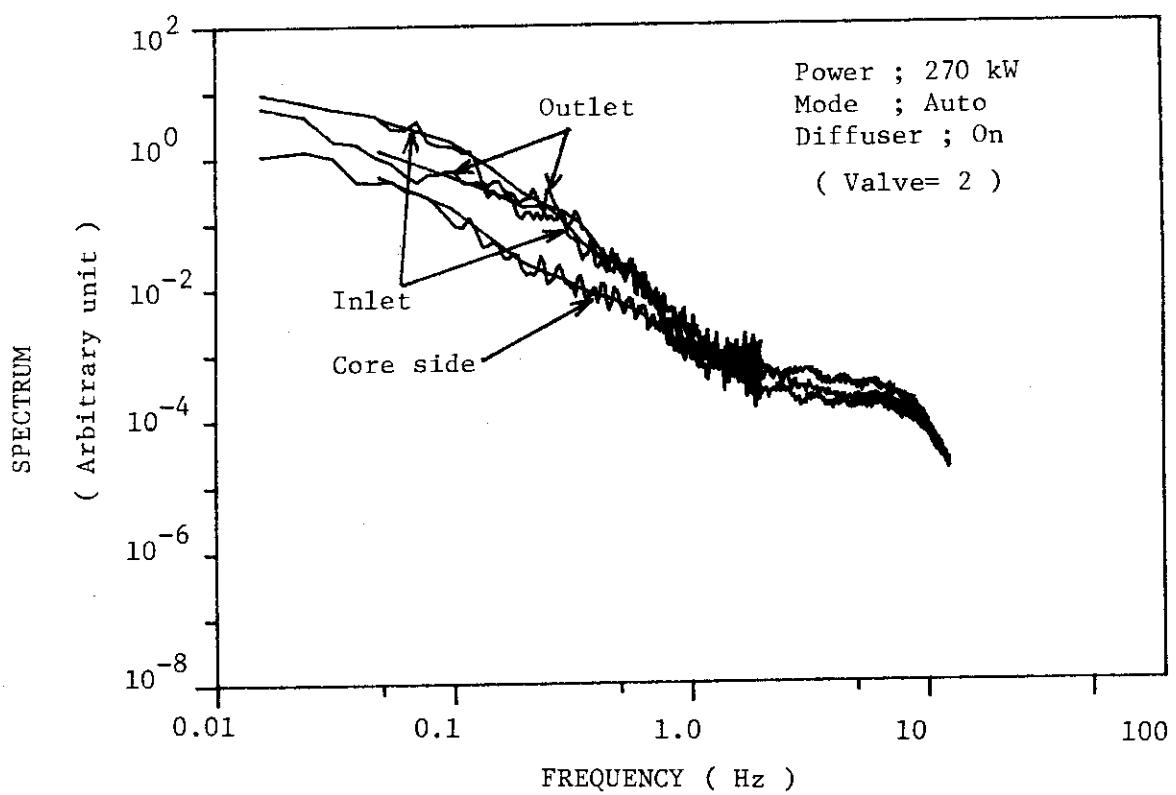


Fig. 4.29 Comparison of the power spectra of three coolant temperature signals in the Case-III

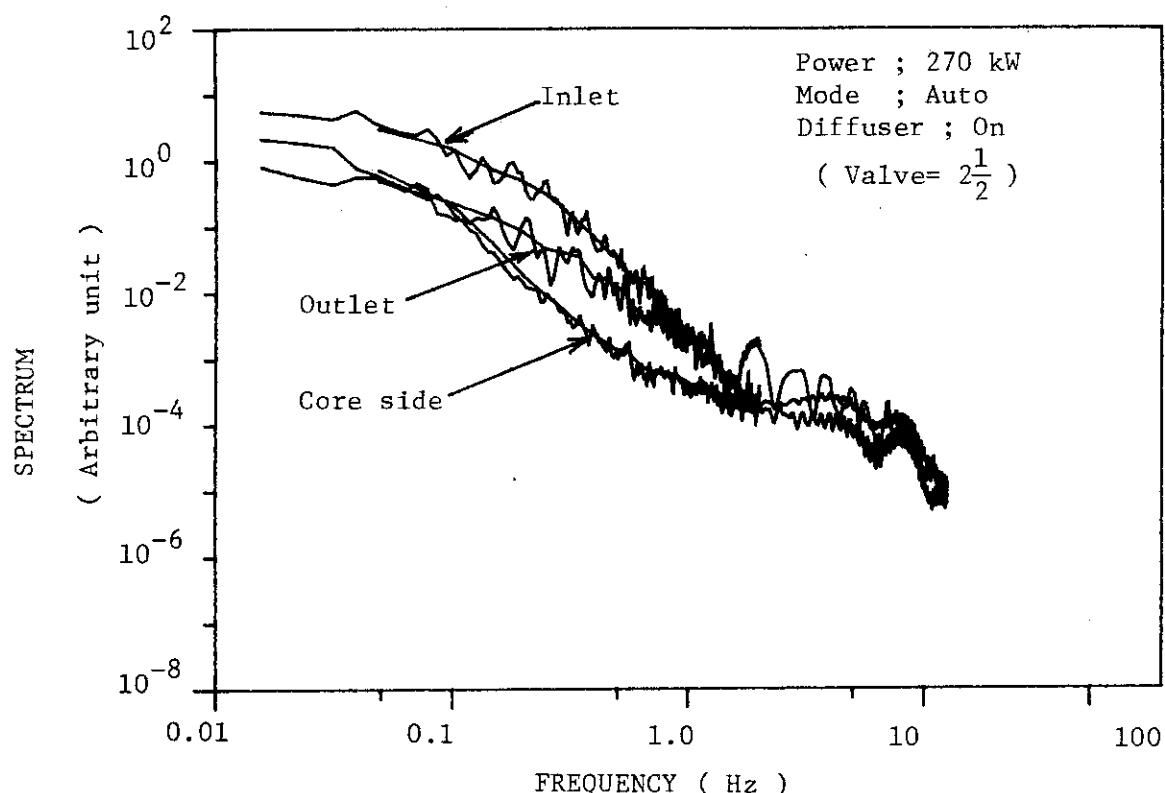


Fig. 4.30 Comparison of the power spectra of three coolant temperature signals in the Case-IV

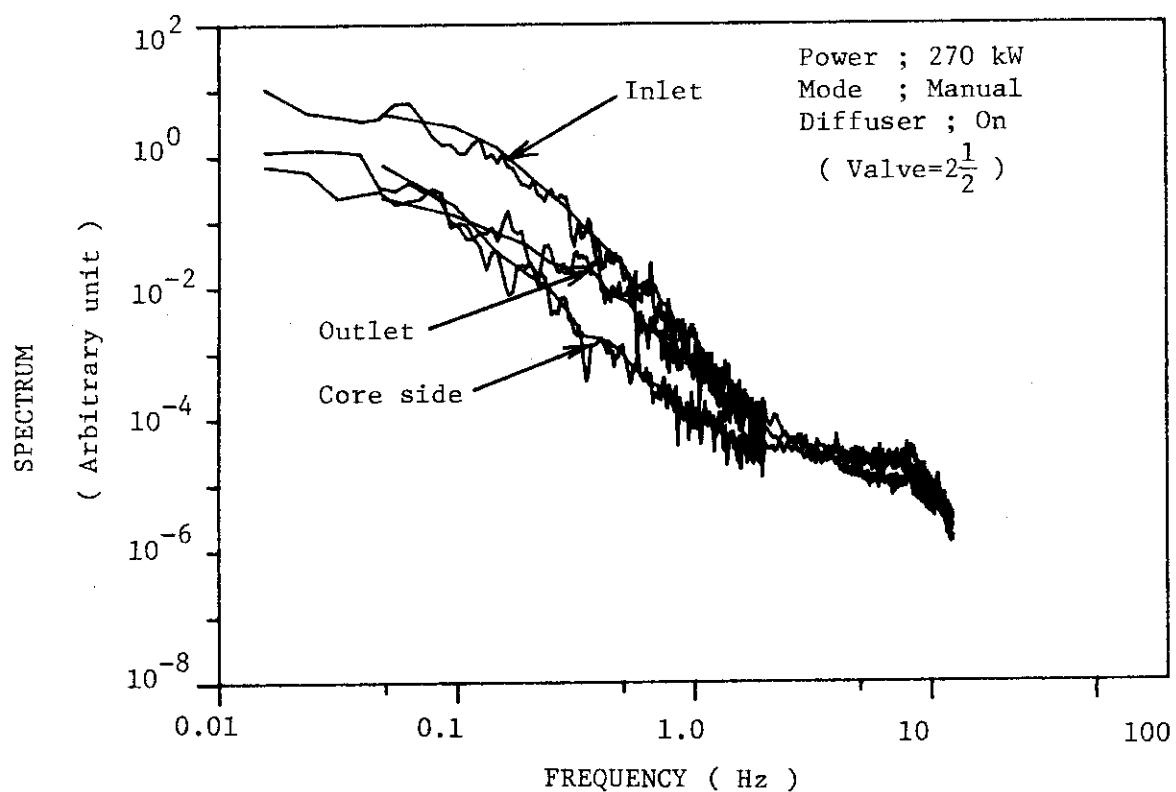


Fig. 4.31 Comparison of the power spectra of three coolant temperature signals in the Case-V

5. 結 論

NSRR の高出力運転時に見られる炉出力変動現象の原因を探るため、炉雑音解析手法を用いた 2 回目の異常診断実験 (Phase-II) を行なった。この Phase-II 実験は、主として①自動制御系の動特性評価、②制御系を不安定にする外乱の調査の 2 つを目的として行なった。

この結果、自動制御系については、制御棒駆動機構を含むサブシステム（スレーブ・サーボ系）の伝達関数が固有周波数を約 0.3 Hz、減衰係数 ζ を 0.05~0.1 とする 2 次振動要素で構成されており、そのゲイン関数は比較的顕著なピークを持つ形状をしていることが明らかとなった。これにより、Phase-I で観測された炉出力の約 0.3 Hz を基本波とする正弦波状の変動（発振状態）や減衰振動は、スレーブ・サーボ系の特性と制御棒駆動機構の持つ不感帯の相乗効果によって生じていることが明らかとなった。さらに、この発振状態は高出力定常運転時にときどきみられる現象であったが、今回の実験で自動制御系を使用しての炉出力上昇時には定常的に発振していることが確認された。

一方、制御系を不安定にする外乱としては、N16 ディフューザー・ポンプの運転に伴なう炉心周りの水流の乱れ（冷却材温度の変動）に焦点を絞り、測定解析を行なった。この結果、ディフューザー・ポンプを運転すると運転前に比べて各測定点（炉心入口、出口および側面）の冷却材温度ゆらぎ（約 1 Hz 以下の成分）がそれぞれ著しく増大すること、またこの増大の程度や傾向はディフューザーの水量調節弁の開度（ノズルからの噴出水量）や空間的な位置（測定場所）に依存して異なること等が明らかになった。これら冷却材温度変動と炉出力変動との関係については、直接の相関は見出せなかったものの、自動制御運転時の炉出力変動（0.5 Hz 以下の成分）自体はディフューザー・ポンプを運転すると増大し、その増大の程度は弁開度に依存すること、さらに自動制御系を解除すると変動が減少すること等が確認され、ディフューザー・ポンプの運転に伴なう炉心周りの水流の乱れが炉出力変動に大きく寄与していることが明らかになった。

謝 辞

Phase-II のデータ収録中、NSRR 制御室の方々には大変お世話になった。また、データ収録器材の準備では原子炉制御研究室の藤井義雄氏にお世話になった。ここに謝意を表します。

参考文献

- 1) 林 光二、他：“炉雑音解析法を用いた NSRR の異常診断(I)”，JAERI-M 84-056 (1984)
- 2) 安全工学部 NSRR 管理室・反応度安全研究室：“NSRR 臨界および特性試験報告”，JAERI-M 6791 (第 1 ~ 4 分冊) (1976)
- 3) 近藤文治、藤井克彦共編：“大学課程 制御工学”，オーム社 (1972)

5. 結 論

NSRR の高出力運転時に見られる炉出力変動現象の原因を探るため、炉雑音解析手法を用いた 2 回目の異常診断実験 (Phase-II) を行なった。この Phase-II 実験は、主として①自動制御系の動特性評価、②制御系を不安定にする外乱の調査の 2 つを目的として行なった。

この結果、自動制御系については、制御棒駆動機構を含むサブシステム（スレーブ・サーボ系）の伝達関数が固有周波数を約 0.3 Hz、減衰係数 ζ を 0.05~0.1 とする 2 次振動要素で構成されており、そのゲイン関数は比較的顕著なピークを持つ形状をしていることが明らかとなった。これにより、Phase-I で観測された炉出力の約 0.3 Hz を基本波とする正弦波状の変動（発振状態）や減衰振動は、スレーブ・サーボ系の特性と制御棒駆動機構の持つ不感帯の相乗効果によって生じていることが明らかとなった。さらに、この発振状態は高出力定常運転時にときどきみられる現象であったが、今回の実験で自動制御系を使用しての炉出力上昇時には定常的に発振していることが確認された。

一方、制御系を不安定にする外乱としては、N16 ディフューザー・ポンプの運転に伴なう炉心周りの水流の乱れ（冷却材温度の変動）に焦点を絞り、測定解析を行なった。この結果、ディフューザー・ポンプを運転すると運転前に比べて各測定点（炉心入口、出口および側面）の冷却材温度ゆらぎ（約 1 Hz 以下の成分）がそれぞれ著しく増大すること、またこの増大の程度や傾向はディフューザーの水量調節弁の開度（ノズルからの噴出水量）や空間的な位置（測定場所）に依存して異なること等が明らかになった。これら冷却材温度変動と炉出力変動との関係については、直接の相関は見出せなかったものの、自動制御運転時の炉出力変動（0.5 Hz 以下の成分）自体はディフューザー・ポンプを運転すると増大し、その増大の程度は弁開度に依存すること、さらに自動制御系を解除すると変動が減少すること等が確認され、ディフューザー・ポンプの運転に伴なう炉心周りの水流の乱れが炉出力変動に大きく寄与していることが明らかになった。

謝 辞

Phase-II のデータ収録中、NSRR 制御室の方々には大変お世話になった。また、データ収録器材の準備では原子炉制御研究室の藤井義雄氏にお世話になった。ここに謝意を表します。

参考文献

- 1) 林 光二、他：“炉雑音解析法を用いた NSRR の異常診断(I)”，JAERI-M 84-056 (1984)
- 2) 安全工学部 NSRR 管理室・反応度安全研究室：“NSRR 臨界および特性試験報告”，JAERI-M 6791 (第 1 ~ 4 分冊) (1976)
- 3) 近藤文治、藤井克彦共編：“大学課程 制御工学”，オーム社 (1972)

5. 結 論

NSRR の高出力運転時に見られる炉出力変動現象の原因を探るため、炉雑音解析手法を用いた 2 回目の異常診断実験 (Phase-II) を行なった。この Phase-II 実験は、主として①自動制御系の動特性評価、②制御系を不安定にする外乱の調査の 2 つを目的として行なった。

この結果、自動制御系については、制御棒駆動機構を含むサブシステム（スレーブ・サーボ系）の伝達関数が固有周波数を約 0.3 Hz、減衰係数 ζ を 0.05~0.1 とする 2 次振動要素で構成されており、そのゲイン関数は比較的顕著なピークを持つ形状をしていることが明らかとなった。これにより、Phase-I で観測された炉出力の約 0.3 Hz を基本波とする正弦波状の変動（発振状態）や減衰振動は、スレーブ・サーボ系の特性と制御棒駆動機構の持つ不感帯の相乗効果によって生じていることが明らかとなった。さらに、この発振状態は高出力定常運転時にときどきみられる現象であったが、今回の実験で自動制御系を使用しての炉出力上昇時には定常的に発振していることが確認された。

一方、制御系を不安定にする外乱としては、N16 ディフューザー・ポンプの運転に伴なう炉心周りの水流の乱れ（冷却材温度の変動）に焦点を絞り、測定解析を行なった。この結果、ディフューザー・ポンプを運転すると運転前に比べて各測定点（炉心入口、出口および側面）の冷却材温度ゆらぎ（約 1 Hz 以下の成分）がそれぞれ著しく増大すること、またこの増大の程度や傾向はディフューザーの水量調節弁の開度（ノズルからの噴出水量）や空間的な位置（測定場所）に依存して異なること等が明らかになった。これら冷却材温度変動と炉出力変動との関係については、直接の相関は見出せなかったものの、自動制御運転時の炉出力変動（0.5 Hz 以下の成分）自体はディフューザー・ポンプを運転すると増大し、その増大の程度は弁開度に依存すること、さらに自動制御系を解除すると変動が減少すること等が確認され、ディフューザー・ポンプの運転に伴なう炉心周りの水流の乱れが炉出力変動に大きく寄与していることが明らかになった。

謝 辞

Phase-II のデータ収録中、NSRR 制御室の方々には大変お世話になった。また、データ収録器材の準備では原子炉制御研究室の藤井義雄氏にお世話になった。ここに謝意を表します。

参考文献

- 1) 林 光二、他：“炉雑音解析法を用いた NSRR の異常診断(I)”，JAERI-M 84-056 (1984)
- 2) 安全工学部 NSRR 管理室・反応度安全研究室：“NSRR 臨界および特性試験報告”，JAERI-M 6791 (第 1 ~ 4 分冊) (1976)
- 3) 近藤文治、藤井克彦共編：“大学課程 制御工学”，オーム社 (1972)