

J A E R I - M

7 5 8 0

J P D R - II の 動 特 性 同 定 実 験  
— 自 己 回 帰 モ デ リ ン グ の 適 用 —

1 9 7 8 年 3 月

北 村 正 晴 • 松 原 邦 彦 • 尾 熊 律 雄

日 本 原 子 力 研 究 所  
Japan Atomic Energy Research Institute

この報告書は、日本原子力研究所が JAERI-M レポートとして、不定期に刊行している研究報告書です。入手、複製などのお問い合わせは、日本原子力研究所技術情報部（茨城県那珂郡東海村）あて、お申しこしください。

JAERI-M reports, issued irregularly, describe the results of research works carried out in JAERI. Inquiries about the availability of reports and their reproduction should be addressed to Division of Technical Information, Japan Atomic Energy Research Institute, Tokai-mura, Naka-gun, Ibaraki-ken, Japan.

JPDR-II の動特性同定実験  
- 自己回帰モデリングの適用 -

日本原子力研究所東海研究所原子炉工学部  
北村正晴<sup>\*</sup>・松原邦彦<sup>†</sup>・尾熊律雄

(1978年2月1日受理)

原子炉プラントの動特性を実験的に求める実用的な同定手法を用いて実験的検討を行った。この方法は原子炉プラントから得られる多数の変量の時系列データを多変数系自己回帰モデルにフィッティングするものである。モデル決定には、Final Prediction Error (FPE) を最小化するよう回帰次数を選択しながら、Yule-Walker 方程式を解いてモデルパラメータを決定するという方法をとっている。JPDR-II 45 MW 出力時に擬似ランダムノイズを印加して実験を行い、観測データに本手法を適用した。その結果、充分な有用性をもつことが確認された。本手法の有効な応用例として、プラント動特性の理論モデルに含まれている不確定パラメータ値の推定が試みられ、有意義な推定結果が得られている。

\* 東北大学（協力研究員）

† 原研大洗研究所材料試験炉部

JAERI-M 7580

Identification Experiments in JPDR-II Dynamics Application  
of Autoregressive Modeling

Masaharu KITAMURA<sup>\*</sup>, Kunihiko MATSUBARA<sup>+</sup> and  
Ritsuo OGUMA

Division of Reactor Engineering, Tokai Research  
Establishment JAERI

(Received February 1, 1978)

A practical identification method has been studied experimentally for estimation of dynamics of nuclear power plants. In this method, time series data of process variables from a nuclear power plant are fitted to a multivariate autoregressive (AR) model. The optimal model parameters are determined by minimizing criterion Final Prediction Error (FPE) and solving the Yule-Walker equations. Pseudo-random binary sequences were applied to the JPDR-II plant of power 45Mwt and 17 variables were observed. AR model fitting was made to the observed data for dynamic analysis.

Feasibility of this method was confirmed by physically examining the identified dynamic response functions. Uncertain parameters in a theoretical dynamics model could be estimated successfully by comparing with the AR model obtained, indicating usefulness of the method.

Keywords: Identification Method, BWR, Plant Dynamics, Autoregressive Modeling, Pseudo-random binary Sequences, Multivariable System, Response Function

---

<sup>\*</sup>) Tohoku University (cooperative researcher of JAERI)

<sup>+</sup>) Div. of JMTR Project, Oarai Research Establishment, JAERI

## 目 次

1. 序 論 .....	1
2. 同定、解析手法の概要 .....	3
3. 同定実験 .....	7
3.1 JPDR-II プラントの概要 .....	7
3.2 実験条件 .....	7
3.2.1 プラント変量の選択 .....	7
3.2.2 外乱信号の特性 .....	8
3.2.3 解析変量の組合せ .....	9
3.2.4 実験方法 .....	10
4. 実験結果 .....	16
4.1 測定結果 .....	16
4.2 同定モデルの近似度 .....	16
4.3 同定されたモデルに基づくシステム解析 .....	17
4.3.1 主要プラント変量の応答 .....	17
4.3.2 周波数領域での表現 .....	18
5. 理論モデルとの比較検討 .....	40
5.1 JPDR-II 動特性の理論モデル .....	40
5.2 理論モデルと実験モデルとの比較検討 .....	40
6. 同定手法に関する考察 .....	45
6.1 実験手法の改良 .....	45
6.1.1 観測変量の選択 .....	45
6.1.2 観測機構の特性 .....	45
6.2 データ処理法と可同定性 .....	46
6.2.1 A R 法による可同定性 .....	46
6.2.2 F P E 最小化に関する付記 .....	48
7. 結 論 .....	49
謝 辞 .....	49
参考文献 .....	50
付 錄 修正三井田-須田モデル (MMS モデル) の伝達係数およびパラメータ値 .....	52

## Contents

1. Introduction .....	1
2. Summary of Identification and Analysis .....	3
3. Identification Experiment .....	7
3.1 Summary of the JPDR-II Plant .....	7
3.2 Experimental Conditions .....	7
3.2.1 Selection of Plant Variables .....	7
3.2.2 Characteristics of Disturbance Signals .....	8
3.2.3 Combination of Variables .....	9
3.2.4 Method of the Experiment .....	10
4. Results of Experiment .....	16
4.1 Results of Measurements .....	16
4.2 Checking of the Resultant AR Model .....	16
4.3 System Dynamics Analysis by the Use of AR model .....	17
4.3.1 Responses of Major Plant Variables .....	17
4.3.2 Representation in a Frequency Region .....	18
5. Comparison with Theoretical Dynamic Model .....	40
5.1 Theoretical Model of JPDR-II Dynamics .....	40
5.2 Comparison with the Theoretical Model .....	40
6. Discussions on the Identification Method .....	45
6.1 Improvement of Experimental Method .....	45
6.1.1 Choice of Plant Variables .....	45
6.1.2 Dynamic Characteristics of Detector System .....	45
6.2 Data Processing and Identifiability .....	46
6.2.1 Identifiability in AR Modeling Method .....	46
6.2.2 Comments on FPE Minimization .....	48
7. Conclusions .....	49
Acknowledgments .....	49
References .....	50
Appendix Transfer Functions and Parameters of Modified Mlida-Suda (MMS) Model .....	52

## 1. 序 論

原子力プラントが高い信頼性を確保して安全に安定した動作を続けるという望ましい状態をめざして、様々な研究がおこなわれつつある。この目的達成のための重要な課題のひとつに信頼性の高い原子炉動特性の数学的モデルの確立があげられる。この数学的モデル決定のための方法が理論的方法と実験的方法に大別されることはあるが、前者においては、いくつかの簡略化の仮定に基づいて原子炉動特性に影響を与える諸過程を表現する基礎方程式が導びかれ、これらを結合して最終的には動特性解析コードの形でモデルが提示される。この種のモデルを以下では理論的モデルと称する。これに対し後者では、各種の過渡応答測定法、周波数応答測定法を中心的な技法であった。これらの測定から直接に与えられる実験データは動特性のノンパラメトリック表現と呼ばれ、それ自身、動特性のひとつの表現形式とみなされるのが普通であるが、本報では特に、これらを何らかのデータ処理を通じてプロセス方程式あるいは伝達関数の形に変換したものも実験的モデルと呼ぶことにする。またこの実験的モデルを観測データから定めることをモデリング、モデル同定、あるいは単に同定(Identification)と呼ぶ。

現在迄のところ理論的手法に比べると実験的手法からは対象の特性の詳細にわたった、いわゆるきめの細かなモデルは特にくいのが実情である。たとえば通常の過渡応答実験では対象への入力(操作量)から出力(被操作量)への伝達特性についての情報は与える。しかし、出力量相互間の伝達特性についての情報は得られないのが普通であり、これを得るためにには種々の工夫がなされてきたが非白色雑音存在下では有効な手法は報告されていなかった。この意味では従来の実験的モデルは理論モデルに比べてマクロなモデル、あるいはブラックボックス的モデルといわざるを得ないであろう。このため原子炉プラントの動特性に関する諸解析はむちシミュレーションスタディ、安定性解析、制御系の設計などは主に理論的モデルによりなされてきた。しかしながら理論的モデルも決して充分な開発がなされているとは言いがたい。理論的モデル作成に際しては基礎方程式導出過程における簡略化、単純化は避けないことであり、さらに数値計算上の諸近似も含まないのが通常である。しかもこれらの簡略化、近似等に伴う誤差を先驗的に定めることは一般に極めてむずかしい。理論的モデルの精度、適用範囲などに関する吟味は実験的モデルとの対比を通じてなされるのが望ましいが実験的モデル同定技法が上述したように未だ不充分なものであることから、この比較、検討が行ないにくかったのが現状といえよう。理論的モデルの進展のためにも、また動特性の実験的評価技術の向上という意味でも同定手法の発展、改良が必要と考える。筆者らは、この同定手法の具備すべき性質として、

- (i) 対象の数学モデルを、多入力、多出力系として、单一の実験により決定できる；
  - (ii) 入出力関係に加えて、観測変量相互の結合関係についても具体的な表現が得られる；
  - (iii) 観測量に混在する有色雑音(ゆらぎ)成分を、システムの構造に由来する部分と、固有の雑音源(本質的ゆらぎ)に分離して評価できる；
- の三つが特に重要であると考えた。在來の方法は、ほとんど1入力、1出力の形で測定あるいは同定を行なっており、かつ有色雑音の処理方式も確立しておらず、これら3つの条件はいずれ

も満たされているとはいがたい。

出力炉においては、観測される物理量のほとんどのものが多かれ少なかれ、ゆらぎをもつてゐる。それゆえ、このゆらぎの解析を通じて同定を行なうことを考えれば(iii)の条件は特に重要なものと考えられる。本実験では人工的ゆらぎ(外乱信号)を挿入して、その応答を解析するという立場をとったので、この限りにおいては、(iii)の条件は特に要求されない。しかし、後述するように人工ゆらぎに依存せず、対象に存在するゆらぎだけに着目した場合も同じ手法を統一的に用いることを将来の目的にしているので、本研究の段階においてもこの条件を重視して手法を選択することとした。

この観点に立つと、これ迄に試みられた方法の中では統計的解析方法に基づく回帰形モデル同定法<sup>(1)</sup>が最も有望な技法であると期待できる。この方法は統計的データ処理技術として古くから用いられているものの、回帰次数(ある時点での状態の原因として、過去のどの時点迄の状態が影響しているかを示すパラメータ詳しくは次章に述べる)を決定するための規準が不明確な点が実用上の障害となっていた。近年、赤池<sup>(1)</sup>によりこの次数の決定法に関してきわめて実用的な手法が開発され、複雑なシステムの動特性を効率よく同定できる手法が開発されて様々な分野で有益な成果が得られつつある。<sup>(1)~(3)</sup>この考え方では、次章に述べるように、情報理論的なある規準について最適な回帰次数が、得られた観測データのみから簡単に決定される。この方法は著者らの一部によつても、水ループ(OWL-Φ)動特性同定実験に実用化され、<sup>(4)</sup>その有用性と、実用上の留意点とに関する知見が得られている。また、福西<sup>(5)</sup>による出力炉雑音スペクトル解析の結果も同様の手法を用いたものであるが、やはり、この手法の有用性を示す結果が得られている。このような発展をふまえて本研究では、この回帰次数決定法に基づく回帰モデルの同定アルゴリズムと、同定されたモデルに基づく線形システム解析アルゴリズムを統合した、多変数時系列解析コード(DYSAC)<sup>(1)(6)</sup>を用いてJPDR-IIプラントシステムの動特性同定を行なった。実験的手段としては、バイナリー外乱信号をプラントの複数個の操作端から独立に併行して印加し、その応答を解析してプラント全体についての多変数動特性モデルを同定するという方法をとった。これにより、

- (A) 手法が、在来の動特性測定法に比してどの程度に有利なものであるかを検討し、
- (B) 実用上の問題点を整理して、原子炉プラント同定手法としての基礎を固め、
- (C) 応用例として既存の理論モデルの評価を試みる。

以上が本研究の直接の目的である。

原子力プラントの高信頼化という目的に関しては、上記の理論モデル(動特性解析コード)の改良に加えて、いわゆる異常診断の重要性が認識されつつある。異常診断法に関しては、種々の方法が提案されているものの、信頼できる技術は未だ確立されていないのが現状である。筆者らは動特性モデルを高精度で、かつ迅速に同定できる手法の確立が有力なアプローチとなると考える。先に述べた(i)~(iii)の特性をもつモデルが実用的な時間内で同定できるならば、変量相互間の伝達関係、各変量のゆらぎ特性などを断え間なく評価し、その変化の監視が可能になる訳であり、これにより異常診断に有意義な情報を提供できることは確実といえる。

実用的な異常診断システムを考えるならば、この同定を通常運転状態で行えることが必要となる。その意味からは、原子炉システムに内在する各種ゆらぎ、すなわち炉雑音のみの解析を通じ

て同定がなされることが望ましいことはいうまでもない。しかしながらここで、炉雑音のみの解析から対象とするプラント動特性を必要な精度で評価可能か否かという問題がある。一般に変量相互間伝達特性の実験的評価に際しては、入力として扱う変量に含まれる独立な変動成分が着目する周波数領域の全域にわたって充分な振巾を有していることが必要であるが、炉雑音がこの条件を満しているか否かを先駆的に決めるることは困難である。それゆえ第一段階としては、この条件を満す人工的入力を印加して同定を行い、しかし後に炉雑音を用いた同定結果と比較検討するのが合理的であろう。前述したような入力信号の利用はこの理由によるものである。

最初の同定実験は昭和 50 年 12 月、JPDR 出力上昇試験 Phase IV (出力 50 %) においてなされた。異常診断を含めた多くの角度からの解析が進行中であるが、本報では、これらのうち前記のように目的(A)～(C) に関してなされた解析の結果をまとめて報告する。

## 2. 同定、解析手法の概要

本研究で用いられた統計的解析による多変数システムの同定法、ならびに同定結果にもとづくシステム解析の方法について以下にそのアウトラインを述べる。より詳しい説明については、別の報告書<sup>(6)</sup>を参照されたい。

前章に述べたように、原子力プラントのような複雑なシステムの特性を多変数系として把握する目的のためには在来のシステム同定手法では充分な成果が期待できない。特に、現在扱おうとするJPDR のような発電炉においては、観測諸量が様々な原因によるゆらぎを示し、それぞれのゆらぎはまた、複雑なフィードバック関係をもって相互に影響し合っている。このような対象の動特性について意味ある情報を得るために、システムの特性そのものと、雑音成分に固有の（本質的に内在する）特性とを分離して、それを定量的に評価できるような同定手法の採用が望まれる。以下に明らかにするように、本研究で用いた自己回帰モデル（Autoregressive model - A.R. モデルと略す）は、この要求をある程度満足するものである。

人工的入力（操作量）が存在する時の、多変数線形回帰方程式は次の形に書き表わされる。

$$\mathbf{X}(s) = \sum_{m=1}^M A(m) \mathbf{X}(s-m) + \sum_{m=1}^M B(m) \mathbf{U}(s-m) + \mathbf{W}(s) \quad (1)$$

ここで、 $\mathbf{X}(s)$  は時点  $s$  における  $r$  次元出力変数ベクトル、 $\mathbf{U}(s)$  は  $\ell$  次元入力ベクトル、 $M$  が回帰次数である。 $A(m)$ 、 $B(m)$  はそれぞれ  $(r \times r)$ 、 $(r \times \ell)$  マトリクスで回帰係数をあらわす。簡単のため、 $\mathbf{U}(s)$  と  $\mathbf{X}(s)$  は平均値が零であるものとする。 $\mathbf{U}(s)$  については入力をそのように選択すれば満たされる。 $\mathbf{X}(s)$  については観測値から平均値を差引いたものをあらためて  $\mathbf{X}(s)$  とおけばよい。 $\mathbf{W}(s)$  については次の条件を満たすものとする。

$$\left. \begin{aligned} E\{\mathbf{W}(s)\} &= 0 \\ E\{\mathbf{W}(s) \cdot \mathbf{X}^T(s-m)\} &= 0, \quad m \geq 1 \\ E\{\mathbf{W}(s) \cdot \mathbf{W}^T(s-m)\} &= S \cdot \delta_{sm} \end{aligned} \right\} \quad (2)$$

ここで、 $\delta_{sm} = 1 (s=m)$ 、あるいは  $= 0 (s \neq m)$  である。また、記号  $E\{\quad\}$  は期待値を、

て同定がなされることが望ましいことはいうまでもない。しかしながらここで、炉雑音のみの解析から対象とするプラント動特性を必要な精度で評価可能か否かという問題がある。一般に変量相互間伝達特性の実験的評価に際しては、入力として扱う変量に含まれる独立な変動成分が着目する周波数領域の全域にわたって充分な振巾を有していることが必要であるが、炉雑音がこの条件を満しているか否かを先駆的に決めるることは困難である。それゆえ第一段階としては、この条件を満す人工的入力を印加して同定を行い、しかし後に炉雑音を用いた同定結果と比較検討するのが合理的であろう。前述したような入力信号の利用はこの理由によるものである。

最初の同定実験は昭和 50 年 12 月、JPDR 出力上昇試験 Phase IV (出力 50 %) においてなされた。異常診断を含めた多くの角度からの解析が進行中であるが、本報では、これらのうち前記のように目的(A)～(C) に関してなされた解析の結果をまとめて報告する。

## 2. 同定、解析手法の概要

本研究で用いられた統計的解析による多変数システムの同定法、ならびに同定結果にもとづくシステム解析の方法について以下にそのアウトラインを述べる。より詳しい説明については、別の報告書<sup>(6)</sup>を参照されたい。

前章に述べたように、原子力プラントのような複雑なシステムの特性を多変数系として把握する目的のためには在来のシステム同定手法では充分な成果が期待できない。特に、現在扱おうとするJPDR のような発電炉においては、観測諸量が様々な原因によるゆらぎを示し、それぞれのゆらぎはまた、複雑なフィードバック関係をもって相互に影響し合っている。このような対象の動特性について意味ある情報を得るために、システムの特性そのものと、雑音成分に固有の（本質的に内在する）特性とを分離して、それを定量的に評価できるような同定手法の採用が望まれる。以下に明らかにするように、本研究で用いた自己回帰モデル（Autoregressive model - A.R. モデルと略す）は、この要求をある程度満足するものである。

人工的入力（操作量）が存在する時の、多変数線形回帰方程式は次の形に書き表わされる。

$$\mathbf{X}(s) = \sum_{m=1}^M A(m) \mathbf{X}(s-m) + \sum_{m=1}^M B(m) \mathbf{U}(s-m) + \mathbf{W}(s) \quad (1)$$

ここで、 $\mathbf{X}(s)$  は時点  $s$  における  $r$  次元出力変数ベクトル、 $\mathbf{U}(s)$  は  $\ell$  次元入力ベクトル、 $M$  が回帰次数である。 $A(m)$ 、 $B(m)$  はそれぞれ  $(r \times r)$ 、 $(r \times \ell)$  マトリクスで回帰係数をあらわす。簡単のため、 $\mathbf{U}(s)$  と  $\mathbf{X}(s)$  は平均値が零であるものとする。 $\mathbf{U}(s)$  については入力をそのように選択すれば満たされる。 $\mathbf{X}(s)$  については観測値から平均値を差引いたものをあらためて  $\mathbf{X}(s)$  とおけばよい。 $\mathbf{W}(s)$  については次の条件を満たすものとする。

$$\left. \begin{aligned} E\{\mathbf{W}(s)\} &= 0 \\ E\{\mathbf{W}(s) \cdot \mathbf{X}^T(s-m)\} &= 0, \quad m \geq 1 \\ E\{\mathbf{W}(s) \cdot \mathbf{W}^T(s-m)\} &= S \cdot \delta_{sm} \end{aligned} \right\} \quad (2)$$

ここで、 $\delta_{sm} = 1 (s=m)$ 、あるいは  $= 0 (s \neq m)$  である。また、記号  $E\{\quad\}$  は期待値を、

記号 $T$ は転置をあらわす。 $S$ は $(r \times r)$ マトリックスである。数学的議論を統一的に行うために、次のスペクトルおよびマトリックスを定義する。

$$\left. \begin{aligned} Z(s) &= \begin{bmatrix} X(s) \\ U(s) \end{bmatrix} \\ C(m) &= \begin{bmatrix} A(m), & B(m) \\ * , & * \end{bmatrix} \\ V(s) &= \begin{bmatrix} W(s) \\ * \end{bmatrix} \end{aligned} \right\} \quad (3)$$

$Z(s)$ は $k$  $(= r + \ell)$ 次元ベクトル、 $C(m)$ は $(k \times k)$ 次元マトリックス、 $V(s)$ は $k$ 次元ベクトルであり、記号 $*$ は解析に際して不用な部分を表わしている。これらの量を用いて(1)式を書き直すと、通常の自己回帰モデルの式

$$Z(s) = \sum_{m=1}^M C(m) Z(s-m) + V(s) \quad (4)$$

が得られる。この形式は入力信号が存在する場合も存在しない場合も含むから、(1)式の形式をも包含しており、定常線形なランダム過程から得られる観測データのモデル式として広く適用しうるものである。

$k$ 次元時系列データ $[Z(s); s = 1, 2, \dots, N]$ が与えられた時に、回帰次数 $M$ が何らかの方法で前もって定められていれば(4)式のモデルの係数マトリックス、 $C(m)$ の最小自乗の意味で最良の推定値 $\hat{C}(m)$ は、次の連立方程式を解いて得られている。

$$\sum_{m=1}^M \hat{C}(m) R(m-j) = R(j), \quad j = 0, 1, \dots, M \quad (5)$$

ここで $R(j)$ は $Z(s)$ と $Z(s+j)$ との共分散マトリックスである。従来、多くなされてきた解析では、物理的考察などから $M$ の概略値を指定し、その概略値の近傍の数個の $M$ 値について(5)式を解き、その内で最も良く観測データを再現できるような $C(m)$ を採用するのが普通であったが、このやり方では、 $k$ の値の増加につれて計算上の困難が急増することになり実用的ではなかった。

これに対して、前章でふれたように赤池<sup>(1)</sup>によって、次の評価量

$$FPE(M) = \left(1 + \frac{Mk+1}{N}\right)^r \left(1 - \frac{Mk+1}{N}\right)^{-r} // D_{Mr} // \quad (6)$$

を最小にする $M$ がone step prediction errorの期待値を最小にするという意味で最良のものであることが示されている。ただし、

$$D_M = R(0) - \sum_{m=1}^M \hat{C}(m) R^T(m) \quad (7)$$

であり、 $// D_{Mr} //$ は、マトリックス $D_M$ 中の $(r \times r)$ サブマトリックス<sup>\*)</sup>のDeterminantをあらわしている。連立方程式(5)式を、 $M = 1$ から逐次解いていく能率的なアルゴリズムも、同じ著者によって公表されており、これを用いて(6)式のF P Eなる量を最小にする $M$ とその $M$ に対

\*)  $D_M$ の内 $X(s)$ と $X(s+m)$ の相関に対応する部分のみを取り出したもの。

応する最良の  $\{\hat{C}(m); m=1, 2, \dots, M\}$  を比較的短い計算時間で求めることができる。

この  $\hat{C}(m)$  が推定され、モデルが決まれば、これを用いて、時間領域、周波数領域で様々な解析が可能である。作成された時系列解析コード「DYSAC」には Fig. 1 に示すような各種の解析ルーチンが用意されているが、ここでは本報での結果に関連したインパルス応答、および周波数応答の評価の式だけを記して置く。

インパルス応答の重み列  $\{g_{ij}(s), i=1, 2, \dots, r, j=1, 2, \dots, \ell\}$  は、次のように求めることができる。

$$\left. \begin{aligned} g_{ij}(1) &= B_{ij}(1) \\ g_{ij}(s) &= \sum_{m=1}^{s-1} \sum_{h=1}^r A_{ih}(m) g_{hj}(s-m) + B_{ij}(s) \\ &\quad (s \leq M \text{ の場合}) \\ g_{ij}(s) &= \sum_{m=1}^M \sum_{h=1}^r A_{ih}(m) g_{hj}(s-m) \quad (s > M) \end{aligned} \right\} \quad (8)$$

ただし  $A_{ij}(m), B_{ij}(m)$  は、 $\hat{C}(m)$  中の左上 ( $r \times r$ )、および右上 ( $r \times \ell$ ) サブマトリクスの  $(i, j)$  要素である。

周波数応答関数  $G_{ij}(f)$  は、 $A(s), B(s)$  の Fourier 変換から直ちに次のように与えられる。

$$G_{ij}(f) = \sum_{h=1}^r \left\{ A_{ih}(f) \right\}^{-1} B_{hj}(f) \quad (9)$$

$$\text{ただし, } A_{ih}(f) = I_{ih} - \sum_{m=1}^M A_{ih}(m) \exp(-i 2\pi f m) \quad (10)$$

$$B_{ih}(f) = \sum_{m=1}^M B_{ih}(m) \exp(-i 2\pi f m)$$

である。ここに  $\{A_{ih}\}^{-1}$  は  $A$  の逆マトリクスの  $ih$  要素、 $I_{ih} = \delta_{ih}$  である。

以上の関係式を用いることにより、同定実験から得られる実験モデルと物理的考察から導びかれた理論モデルとを定量的に比較検討できる。

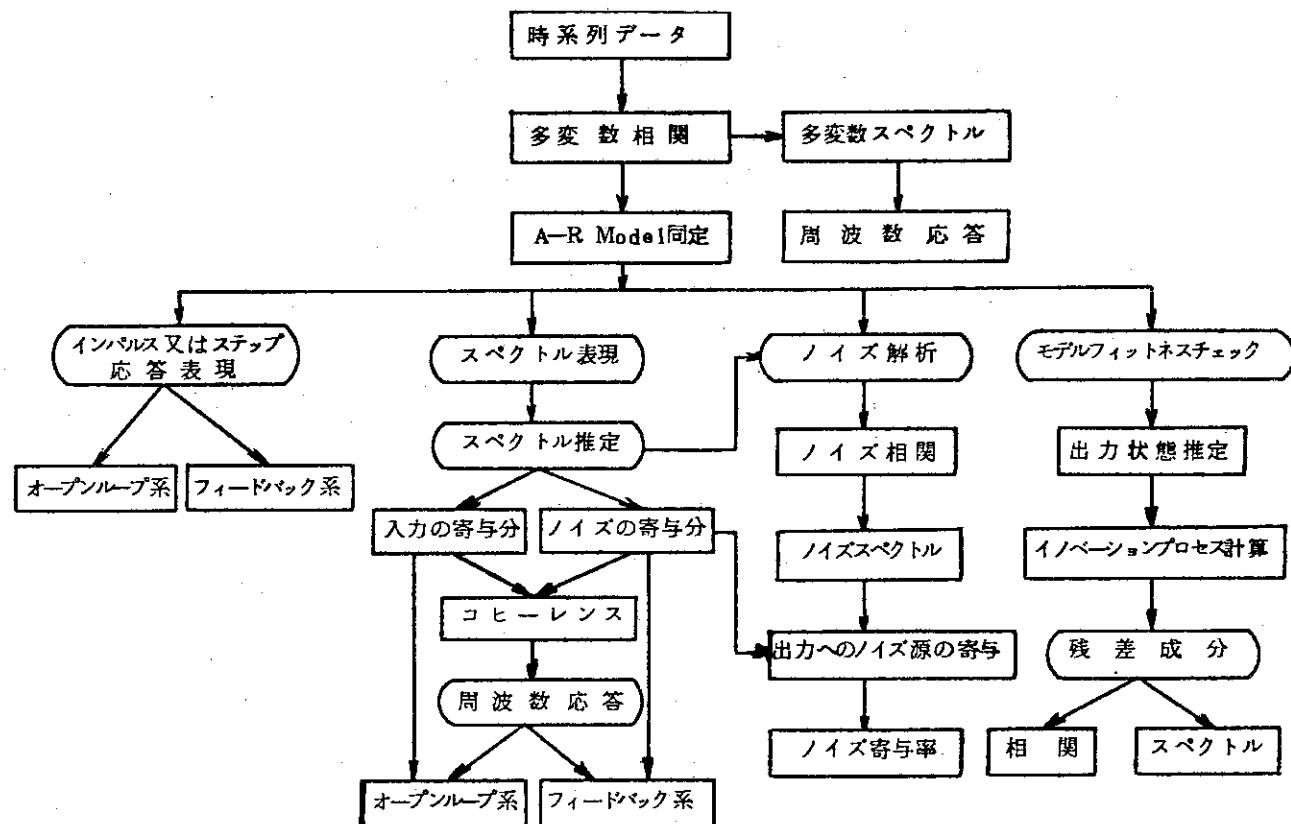


Fig. 1 Software construction of dynamic system analysis code "DYSAC"

### 3. 同 定 実 験

#### 3.1 JPDR-II プラントの概要

JPDR-IIは、直接サイクル、軽水冷却沸騰水形熱中性子炉であり、熱出力の定格値は90MWで2負荷系から成るプラントシステムと結合している研究用発電炉システムである。燃料はZircaloy-2被覆の2.7%濃縮UO<sub>2</sub>を使用し、7×7燃料棒から成る燃料集合体が72体装荷されている。炉心内に4体の計装燃料集合体(Instrumented Fuel Assembly-IFA)が実装されている。このIFAにより冷却材チャンネル出入口温度、同じく流量、燃料中心温度、などを測定することができる。燃料集合体およびIFAの炉心内配置をFig. 2に示す。

冷却材は2基の強制循環ポンプ(Forced Circulation Pump-FCP)により駆動されて原子炉容器の下部プレナムに入る。炉心チャンネル入口流速の定格値は約1.8(m/sec)であり、入口温度は~270°Cでサブクールは~7°Cである。

プラントは、Fig. 3の概念図のような構成になっている。2つの負荷系の1つはタービン-発電機システムで容量45MWt(12MWe)であり、他の1つはダンプコンデンサ系で、同じ熱容量をもつ。通常の運転状態においては、タービン蒸気流量はタービン制御弁(Turbine Control Value-TCV)を通してタービン初期圧力調整装置(Initial Pressure Regulator)により制御される。バイパス蒸気流量はバイパス弁(Bypass Valve-BPV)を通じてバイパス圧力調整装置(Bypass Pressure Regulator-BPR)により制御される。冷却材流を駆動するFCPはFCPマスターコントローラーにより制御される。この場合、流量の変化率は反応度の急増を避けるため比較的小さい値に制御されていることを注意しておく。給水の制御については、タービン側は三要素制御、ダンプコンデンサ側は二要素制御となっている。

#### 3.2 実験条件

同定実験の成功のためには、前章に述べた解析法の適用に先立って、実験条件を適切に設定しておくことが必要不可欠である。この設定は、実験の目的、対象の特性、プラント運転上の制約などを勘案してなされるべきものである。ここでは、JPDRについてわれわれがとった考え方を述べ、具体例に沿った設定上の注意点をあげておくことにする。

##### 3.2.1 プラント変量の選択

操作変量と従属変量を総称してプラント変量と呼ぶ。

この変量として、対象の特性を記述するのに必要十分なものを選択することが同定の成否を支配する条件である。前節に述べたように、JPDRには通常のプラント計装に加うるに多くのIFAやその他の検出器が備えられていることから、変量選択の自由度は大きい。本研究ではプラント全体の動特性同定を第一の目的としたため、諸物理量の炉心内分布に着目した測定は行なわず、

Table 1 に示す 17 変量を観測することとした。各変量の実験時における定格値も同表に併記した。IFA の選択に際しては、炉心内で空間的に非対称な位置にある 2 体をとりあげることにより、対称位置にある組を選ぶよりも多くの情報を得ることが期待できると考えて #4 と #6 からの観測値をとりあげた。

対象プラントを励起するための入力操作端は、従属変量の数に比して少數である。同定実験全体としては、Table 2 に示すような操作量組合せを計画している。これらは、(i)可能な範囲で多種類の操作端からの応答を調べる、(ii)実験の効率化のための複数の操作端から同時に独立の外乱を加える<sup>\*</sup>、(iii)同一の物理量を直接駆動する量を同時には変化させない、という各条件を総合して選択されている。本報の段階では、このうちの FCP および BPR 外乱印加実験のみがなされている。

### 3.2.2 外乱信号の特性

外乱信号のもつ特性もまた、同定実験の結果に対して決定的な影響をもつ。外乱信号の種類は、单発形（ステップ、インパルスなど）とくり返し形（正弦波、疑似ランダムノイズなど）に大別される。本研究では、解析手法からの要請として、外乱が定常不規則過程に近いものであることが望まれたため、疑似ランダムノイズを用いることにした。この種の信号では、多くの周波数成分に関する情報を同時に得ることができるという点にも実験上の利点がある。疑似ランダムノイズにも種々の型のものが提案されており<sup>(8)(9)</sup>、これまでに疑似ランダム 2 値系列（Pseudo - Random Binary Sequence - PRBS）、疑似ランダム 3 値系列（Pseudo - Random Ternary Sequence - PRTS）、n - 系列（n - Sequence）、多周波数 2 値系列（Multi - Frequency Binary Sequence - MFBS）などを用いた実験がなされている。PRBS のうちでは、指定されたビット数のメモリーで生起できる最大周期をもつ系列（Maximum Length Binary Sequence - MLBS）が代表例である。PRTS は土 A の 2 値に加えてゼロレベルもとるランダム系列であり、n - Sequence は非線形効果が相殺されるように設計された信号である。MFBS は、測定目的とする離散的周波数成分を指定した時、この周波数成分を可能な限り大きく含むよう最適化された 2 値系列である。特定の変数間の伝達関数測定を目的とした場合は MFBS を用いることが望ましいが、限定された測定時間の範囲で不規則過程に近い外乱を印加することを目的とする本研究においては MLBS を採用した。MLBS の特性を決める主要パラメータとその決定法は次の通りである。

MLBS の特性は、系列全体がもつビット数 Z、單一ビットあたりのパルス巾  $\Delta t$ 、および振巾 A によって規定される。ここで、Z は任意の値をとることはできず、シフトレジスタを用いて MLBS を発生させる場合

$$Z = 2^m - 1 \quad (m \text{ は正の整数}) \quad (11)$$

なる値のみをとることになる。MLBS の信号としての全エネルギー  $E_s$  は

\* それぞれの外乱信号の統計的独立性が保たれているなら、3.で述べた手法の適用により单一の端作端に外乱を加えた複数個の実験と同等の結果が得られるはずである。

$$E_s \propto n \Delta t Z A = TA \quad (12)$$

なる関係をもつ。ここに  $n$  は実験的に印加する MLBS のくり返し数（周期数）であり、  $T$  は全実験時間である。  $T$  を指定した時の  $E_s$  は  $A$  のみによって定まることになる。

$A$  の値の決定には、まず理論モデルに基づくシミュレーションコード JPDYN 2M<sup>(10)</sup>、および JPDYN 4<sup>(11)</sup> を用いて予備計算をし、プラント運転上の制約を過渡応答が越えない範囲で十分な大きさの  $A$  の値を見積った。さらに本実験に先立って、この見積り値を目安として運転員の試行により適当な振幅を決定した。

入力 MLSB のもつ周波数成分は次式で与えられることが知られている。

$$\begin{aligned} a_0 &= 1/Z^2 \\ a_k &= \{ 2(Z+1)/Z^2 \} \{ \sin(k\pi/Z) / (k\pi/Z)^2 \} \end{aligned} \quad (13)$$

ここに  $a_k$  は  $\omega_k = 2k\pi/T$  に対応する成分の大きさであり、  $Z$  と  $\Delta t$  の選択により決定される。この値は、システムの着目している物理量間の伝達特性に関する予備知識（事前情報）を考慮して、測定の重点となる周波数帯域で充分な入力が印加できる様に決めるべきである。しかし今回の実験では、実験時間に制約があったため、パラメータ選択の自由度が少なく、このような最適選択をおこなうことはできなかった。むしろ、制約された実験時間内に MLBS の一周期以上を印加することに重点をおいた選択となっている。印加 MLSB に関して選ばれた仕様は Table 3 にまとめて示した。この入力の周波数スペクトルを(13)式にしたがって求めた結果を Fig. 4 に示した。動特性的に意味ある周波数の大部分は一応カバーされている。

### 3.2.3 解析変量の組合せ

本実験で測定した 17 変量全体について直接に AR モデル同定をおこなうのは次のような理由から得策ではない。

まず第一に計算量および計算誤差の問題がある。これらの量はいずれも取扱う変数の数の増加につれて急激に増大する傾向を有するから、この観点からは変数はなるべく少ない方が好都合である。次に、(1)式あるいは(4)式のような多変量自己回帰モデルを採用する際に不可避な問題として、時間特性の大きく異なる変数を総合して扱うことの困難さがあげられる。回帰次数をすべての変数に共通に  $M$  としている現方法は、すべての変数についていずれも  $M \cdot \Delta t$  だけ過去からの影響を因果律の中に含めて考えることを意味するが、これでは物理的に考えて妥当性を欠く場合も生じうる。このため、場合によってはいずれかの変数についての回帰表現は不完全なものになることが経験的にも知られており、変量の組合せを選ぶ際に配慮が必要である。第三に、変量  $x_i(k)$  と  $x_j(k)$  ( $j \neq i$ ) との間の線形独立性が失われることを避ける必要があげられる。このような場合に回帰係数の決定がうまくなされることは、この計算に変量間の分散共分散行列の逆行列をとる操作が含まれることから明らかである。物理的考察からは線形独立と考えられる変量の組合せを選んでも、サンプリング間隔の値によっては見かけ上線形従属性があらわれることもあるからこの点についても留意するべきであろう。

これらの諸点を考えると、解析の初期段階では、特定の着目する過程（たとえば、中性子束 - 燃料棒中心温度間伝達特性、蒸気流量 - 壓力動特性など）ごとに、必要最小限の変量の組を選ん

でモデルを同定し、それから遂次、付加的効果をもつと考えられる変量をとり入れたモデルを考えていくという接近法が妥当なものと考える。

後述する解析例における変量組合せは、このような考え方に基づき選択されている。

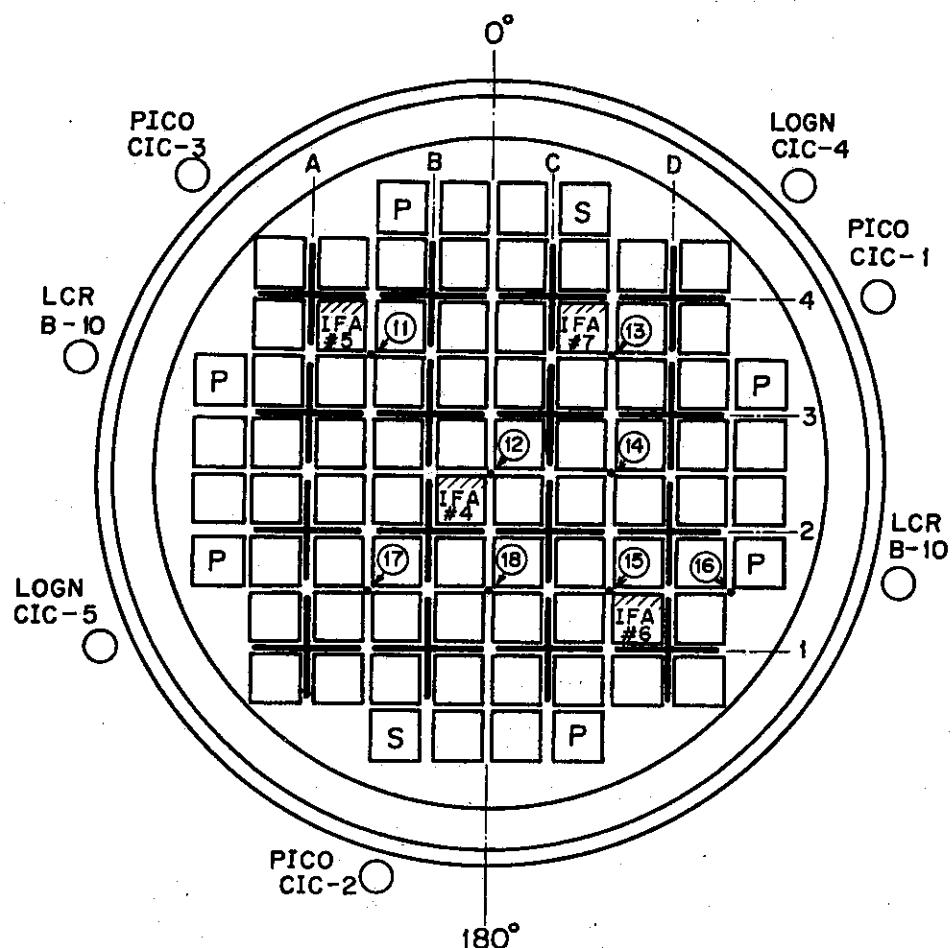
### 3.2.4 実験方法

実験に際してとられた具体的な方法を以下に記す。外乱信号による原子炉の駆動は次のようになされた。

- (i) 原子炉の自動制御を外し手動モードにする。
- (ii) 各変量が定常とみなせるまで手動調整を行う。
- (iii) 所定の操作端につき、外乱振巾の最終調整のためMLBS印加を行い、制御条件の満足と定常性の保持とを確認する。この段階で得られる観測値は予備実験データと称する。
- (iv) 最終的に選定された仕様 (Table 3) の外乱信号を2つの操作端から投入する。
- (v) 外乱印加時間が目標値に達した後、制御系を自動に戻す。

外乱印加のための特別な装置は設けず、操作員が磁気テープに記録された指令信号に従って操作量を変更するという方法をとった。このため、実際の印加信号形はMLBSとは若干異なったものとなっているが、その程度は小さく、解析上の障害はなかった。

測定系では、検出器出力量から直流分を差引き、フィルター付増巾器で必要な増巾を行なった後アナログデータレコーダへ入力している。磁気テープに記録されたアナログデータは、ハイブリッド計算機 (EAI-PACER 600) のAD変換部を通じてデジタル化され、同計算機のディスクに収納される。さらに、この電圧値のデータを、前もって作成してある変換表を用いてプロセス量に換算し、その結果得られるデータについて同定、解析を行なった。



- |  |                         |  |                  |
|--|-------------------------|--|------------------|
|  | Control Rod             |  | Neutron Detector |
|  |                         |  | In-core Motor    |
|  | Fuel Assy               |  | Neutron Source   |
|  | Instrumented Fuel Ass'y |  | Core Plug        |

Fig. 2 JPDR-II core configurations

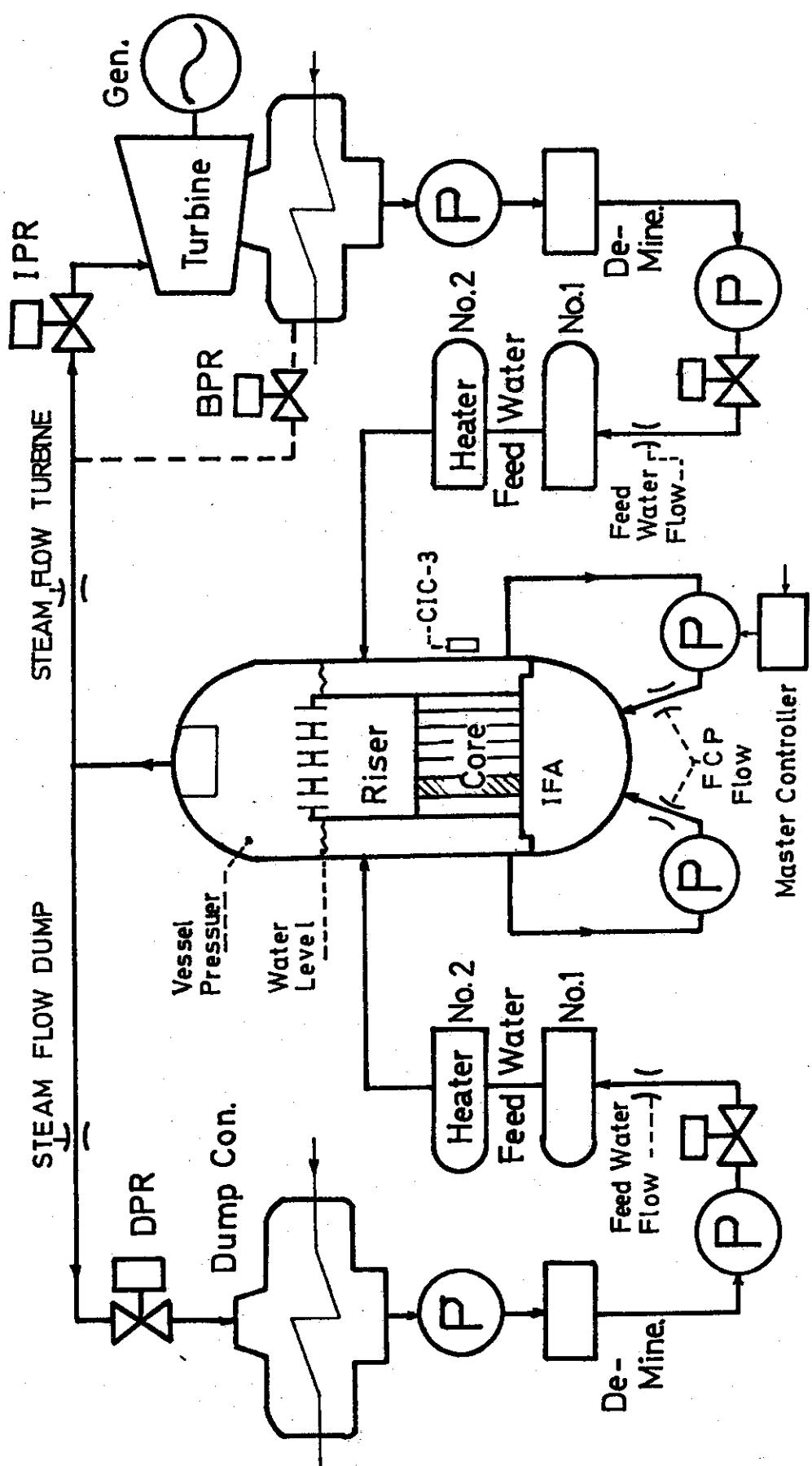


Fig. 3 Schematic diagram of the JPDR-II plant

Table 1 Observed outputs and their steady state values

Number	Variable Name	Steady state value	b)
1	Neutron Density (CIC-3)	49.1 %	* #
2	Reactor Pressure	61.5 kg/cm <sup>2</sup>	* #
3	Steam Flow to Turbine	25.9 t/h	* #
4	Incore Monitor, No. 14 B <sup>a)</sup>	51.9 %	
5	Outlet Flow of IFA #6	15.9 l/s	
6	Outlet Temperature of IFA #6	273.2 °C	
7	Inlet Flow of IFA #4	8.1 l/s	* #
8	Outlet Flow of IFA #4	14.8 l/s	* #
9	Inlet Temperature of IFA #4	269.3 °C	* #
10	Outlet Temperature of IFA #4	274.8 °C	
11	Forced Circulation Pump Flow (total)	95.9 %	* #
12	BPR Valve Position	4.72 %	*
13	Master Controller Set Point	94.6 %	*
14	Reactor Water Level	29.1 cm	*
15	Steam Flow to Dump Condenser	23.0 t/h	*
16	Feedwater Flow from Turbine	38.1 t/h	
17	Feedwater Flow from Dump Condenser	27.0 t/h	

a) B indicates the position of the detector in the axial direction: 52.5 cm from the core bottom.

b) \*, # indicate the variables selected for AR model identification.

Table 2 Design of the identification experiment  
at the JPDR

	Kind of input signals	Input terminals	Reactor power	Core flow
I	MLBS	Control rod driver Feedwater control valve	75/100 (%)	100 (%)
II	MLBS	FCP master controller Dump steam flow control valve	75/100	100
III	MLBS	FCP master controller Turbine steam flow bypass valve	50/75/100	100
IV	None	None (system noise)	50/75/100	40 100
V	Step	Control rod driver FCP master controller Turbine steam flow bypass valve Dump steam flow control valve	50/75/100	40 100

Table 3 Parameters of the input signals (MLBS)

Input terminal	Manipulated variable	Parameter		
		Period	Bit interval	Amplitude
BPR valve position	Steam flow to turbine	635 s	5 s	±1.5% of steady value
FCP master controller	FCP flow	504 s	8 s	±1.5% of steady value

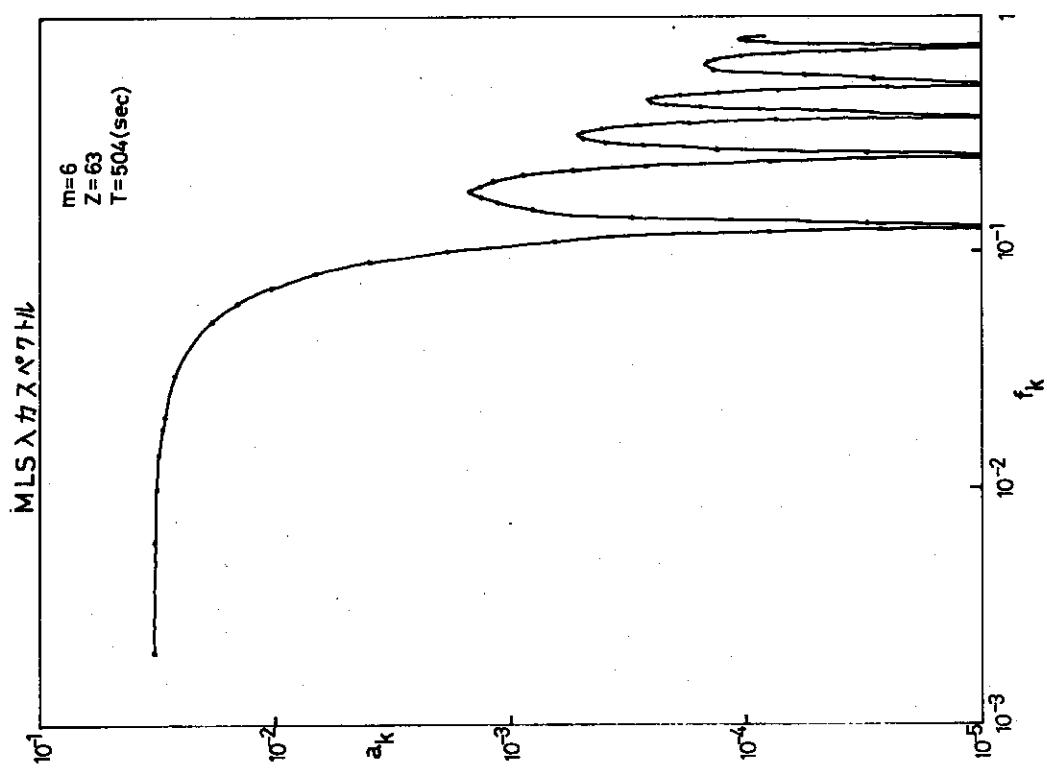


Fig.4(a) Spectrum of MLBS calculated by Eq. (13)

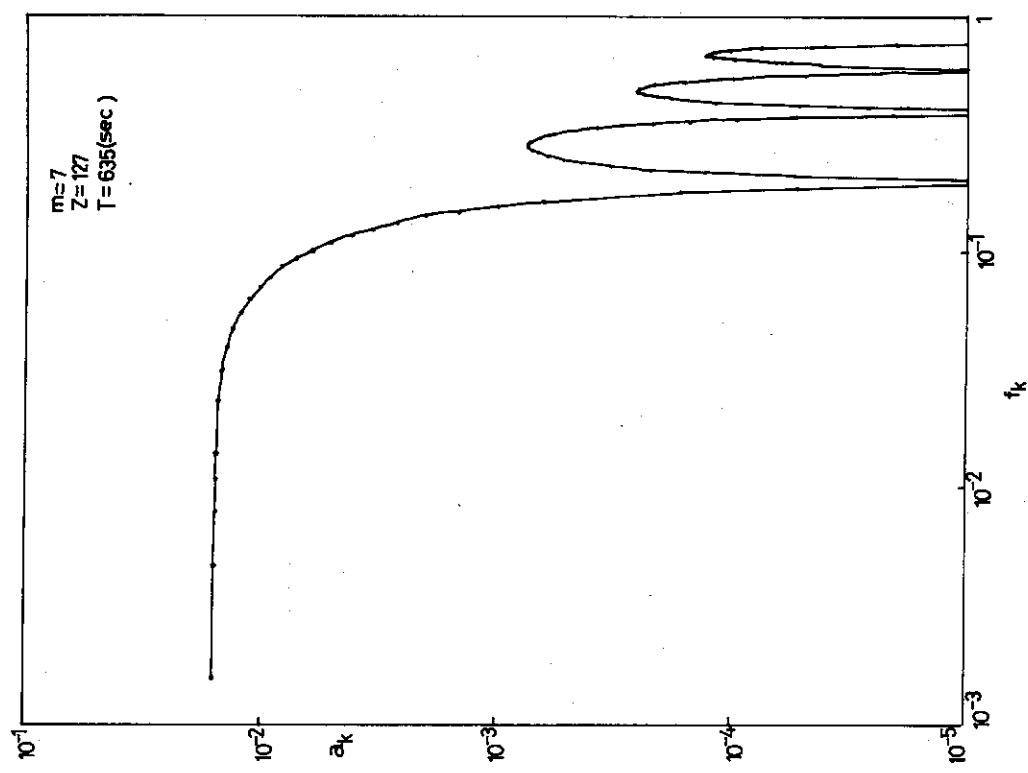


Fig.4(b) Spectrum of MLBS calculated by Eq. (13)

## 4. 実験結果

### 4.1 測定結果

外乱入力印加時の各変量のふるまいを Fig. 5(a)～5(c)に示す。ただし単位は物理量に変換後のもので、かつ平均値まわりの変動成分のみを図示している。このようなデータに2.で述べた手法を適用する際、厳密には線形性、定常性、正規性などの吟味が必要であるが本報の段階ではこれらは行なわなかった。図からも知られるように各変量とも少なくとも目立って非定常な変化はしていないので、特に定常化のための処理（差分フィルターなど）は施さず直ちに解析を行なった。

AR モデル同定に先立ち、データの共分散関数を計算し、さらに Fourier 変換してスペクトル密度関数を求めた。操作変量について得られたパワースペクトル密度を Fig. 6, Fig. 7 に示す。操作量は FCP マスター・コントローラーと BPR バルブ開度（これを一次操作量と呼ぶことにする）であるが、解析目的によっては FCP 流量と蒸気流量を操作量として扱うことが多いので（これを二次操作量とする）、このパワースペクトル密度も Fig. 8 および Fig. 9 に示した。一次操作量は操作員の介在にもかかわらず計算された MLBS スペクトル、Fig. 4 とよい一致を示している。二次操作量においては、一次操作量と比較して高い周波数成分が減じているが、これは操作端の物理的特性を考えれば止むを得ないことである。

一次操作量においても約  $5 \times 10^{-1} \text{Hz}$  以上の周波数においては印加変動エネルギーが最大の周波数に比して 1% 以下となっている。このことは同定結果に対して重大な影響をもたらす可能性もあり注意を要する。

予備実験の段階で得られた時系列データについても同定を試みた。予備実験時の変量の変動は Fig. 10 (a), 10 (b) に示す。この場合は本実験の場合に比してやや非定常な傾向を示しているので、このデータについての同定結果を本実験についてのそれと比較することにより非定常性の影響をある程度調べることができる。

### 4.2 同定モデルの近似度

同定のために選択したデータは Table 1 の右欄に \* 印で示した 10 変量である。まず AR モデルが同定に用いた時系列データをどの程度に近似しているか検討した。モデルの質の良否は本来そのモデルの使用目的と結びつけて論ずるべきである。本同定手法で得られるモデルは、最小自乗の意味で最良の線形予測モデルとなっているはずであり、その意味では FPE の値そのものがモデルの良否の目安を与えているのであるが、ここではもっと直接的かつ単純に次の三つの観点からの吟味を行なった。まず原データに対するモデルのあてはめの良否を調べるために操作量データ  $\mathbf{U}(s)$  のみを用いた出力予測

$$\hat{\mathbf{X}}(s) = \sum_{m=1}^M A(m) \hat{\mathbf{X}}(s-m) + \sum_{m=1}^M B(m) \mathbf{U}(s-m) \quad (13)$$

と原データ  $\mathbf{X}(s)$  を比較してみた。この結果、Fig. 11 に示すように大部分の変数について、あてはめは良好であることが確認された。圧力および入口温度においては時間的にゆるやかな不一致が多少認められるが数 10 秒程度の時間スケールで見ればその程度は小さく、かつ定性的傾向はこの変量についても再現できている。なお、圧力と入口温度とは極めて密接な関係で結ばれる量であり、図には示さなかったが類似した変動を示しているが、モデルのあてはめも同程度となっていることは興味深い。データの採取時間を充分大きくとれば、この 2 変量についてのモデルのあてはめは改善されるものと思われる。

次に、FPE 最小化と対応して過去の入力、出力両方の値にもとづく one step prediction

$$\tilde{\mathbf{X}}(s) = \sum_{m=1}^M A(m) \mathbf{X}(s-m) + \sum_{m=1}^M B(m) \mathbf{U}(s-m) \quad (4-2)$$

と  $\mathbf{X}(s)$  との比較を行なってみた。この結果を Fig. 12 に示す。当然のことながら操作量データのみに基づく予測に比して両者の一致は格段に良好である。このような時間領域における比較でのモデルの良否の判断に加えて周波数領域での検討も有用である。 $\tilde{\mathbf{X}}(s)$  と  $\mathbf{X}(s)$  の差すなわち fitting residual が実質的に白色に近いスペクトルを有していることが fitting の成功の一つの証明と考えられるが、このスペクトルは Fig. 13 に示すように解析の対象である周波数領域ではほぼ平坦と見なしうるものとなっている。以上を要約すると、得られている同定モデルは、同定に用いられた時系列データをよく近似しているという意味で、“良い” モデルであると見なしうるのでこれによるシステム解析を行なった。システム解析に際しては 3. に述べた考え方から従がい、Table 1 中の #印の 7 変量の組合せをとりあげた。この場合、後述する理論モデル検証の便宜も考えて操作量としては二次操作量の方をとりあげ、一次操作量の方は解析範囲から除外した。ただし、特に制御系の特性を問題にするような場合にはもちろん一次、二次の各操作量を統合した同定、解析を行っている。

#### 4.3 同定されたモデルに基づくシステム解析

同定された AR モデルは 2. に示したような等価表現におきかえることにより物理的考察が行いやすくなる。

本報では、最も直接的な意味をもつ、操作量 - 被制御量間伝達特性に重点をおいて考察した。

##### 4.3.1 主要プラント変量の応答

先に述べたように必要最小限の変量組合せとして、まず最も基本的な 7 変量を選んだ。被制御量の応答を操作量のステップ変化に対して求めた結果を Fig. 14～Fig. 18 に示す。予備実験データから同定されたモデルについて同じ計算を行った結果も併せて示した。一見して明らかのように各変量の応答は 2 つの実験データについて大体良く一致している。特に一致度の良いものは、蒸気流量に対する中性子束、圧力、出口流量、入口温度の各応答である。これに対して、FCP 流量に対する中性子束、圧力、入口流量、入口温度の応答では定性的傾向は一致しているが長時間応答において無視できない系統的偏差がみられた。さらに、ステップ印加直後の時間帯においても、中性子束、入口流量にみられるオーバーシュート波形、入口温度応答の立ち上りなどに

差異がみられるが、その程度は小さい。

各応答のパターンはいずれも、過去の運転経験、あるいは理論モデルからの予測に照らして妥当なものである。中性子束のオーバーシュート、入口温度応答にみられる時間遅れなどの現象は理論的には計算されていたが、実験的に直接観測は困難な現象である。これが同定という手続きを介して定量的に評価できたことは手法の有用性を示すものといえる。理論モデルとの対比については次章に論じるのでここでは結果を示すだけに止めるが、観察によっても明らかに定常性の異なる二組の時系列データを用いた同定結果がほぼ一致していることは強調しておきたい。このことは結果の再現性を示すと共に同定手法の安定性をも示していると考える。

一次操作量を操作量とし、二次操作量は被制御量として扱った場合の同定結果を Fig. 19～Fig. 26 に示した。この場合は Table 1 中の \* 印の 10 変数であり、上でとりあげられた変量の組に FCP マスター・コントローラ設定値 (FCPMC)、BPR バルブ開度 (BPV) を付け加えてこの二つを操作量とみなし、他の量は被制御量として解析した。なお被制御量には水位変動 ( $W_L$ ) も追加した。この解析例では、 $U(1)$  が FCPMC、 $U(2)$  が BPV に対応しているが、 $U(2)$  に対する蒸気流量、 $U(1)$  に対する FCP 流量の応答が興味深い。すなわち、それぞれは一次操作量のステップ増に対する二次操作量の応答を示している。一次操作端へのフィードバック制御は働いておらず、それぞれが独立の M 系列信号で駆動されていた状態からの時系列データを用いて同定を行っているから Fig. 21 および Fig. 25 の応答はそれぞれ制御器の動作特性をステップ応答の形で示したものとみなしてよい。それぞれの制御系応答はいずれも設定条件と考え合わせて妥当なものである。その他の変量の応答パターンは、二次操作量のステップ増の場合に比して全体になまった形になっている。これは、一次操作量ステップ増に対して二次操作量が速応できず、多少高周波成分が低下した形で追従し、他の変量の変動はこの二次操作量変化に対応する形で生じていることによる。逆に応答の低周波成分、すなわち応答の整定値における一致の程度は、操作量変動分を二次操作量変動に換算した場合良好となっている。ただし、水位の応答は物理的解釈が困難なパターンとなっているが、これについては水位測定系の動特性の効果も含めて考察する必要がある。ここでは結果を図示するにとどめた。

#### 4.3.2 周波数領域での表現

時系列データのパワースペクトルは既に Fig. 6～Fig. 9 に示したが、この直接法では高周波領域におけるスキャッタリングが顕著となり見通しが良くない。一度 AR モデルにデータフィッティングしてから周波数スペクトルを求める推定フィルタリングがなされたことになり、スキャッタリングが抑えられる。

AR モデルから操作量 - 被制御量間周波数伝達特性を求めた結果を Fig. 27～Fig. 31 に示す。この場合の変量組合せは Table 1 の # 印の組合せのものであり、予備実験データの解析結果も併せて示している。各操作量 - 中性子束伝達関数および蒸気流量 - チャンネル入口流量伝達関数に若干の不一致がみられる。これらは Fig. 10 (b) にみられるように操作入力の 1 つ (BPR position) の非定常性と関係があるように思われる。またチャンネル入口流量の蒸気流量に対する伝達特性は本来殆ど認められないことは、ステップ応答 (Fig. 22) にみられる通りである。したがってこの伝達関数は trivial なものであり計算上たまたま導出されたものといえる。事実、伝

達関数の利得はかなり小さい。これらの点を除くと、各伝達関数とも比較的良い一致を示しているといってよいであろう。このことは、ステップ応答の一致からも予想されることであった。伝達関数の内容についての議論は次章で行なう。

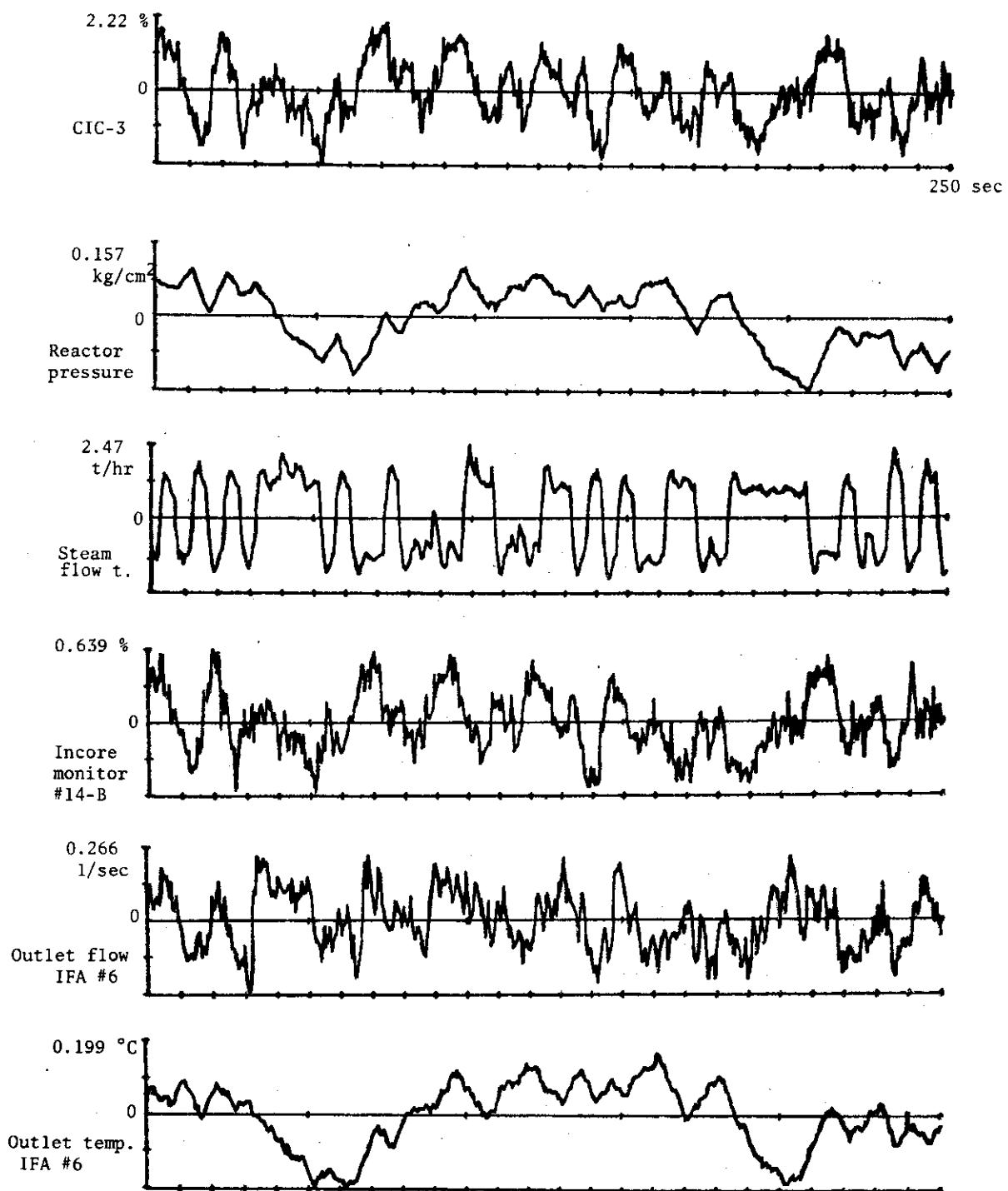


Fig.5(a) Responses of plant variables to the insertion of MLBS' (I)

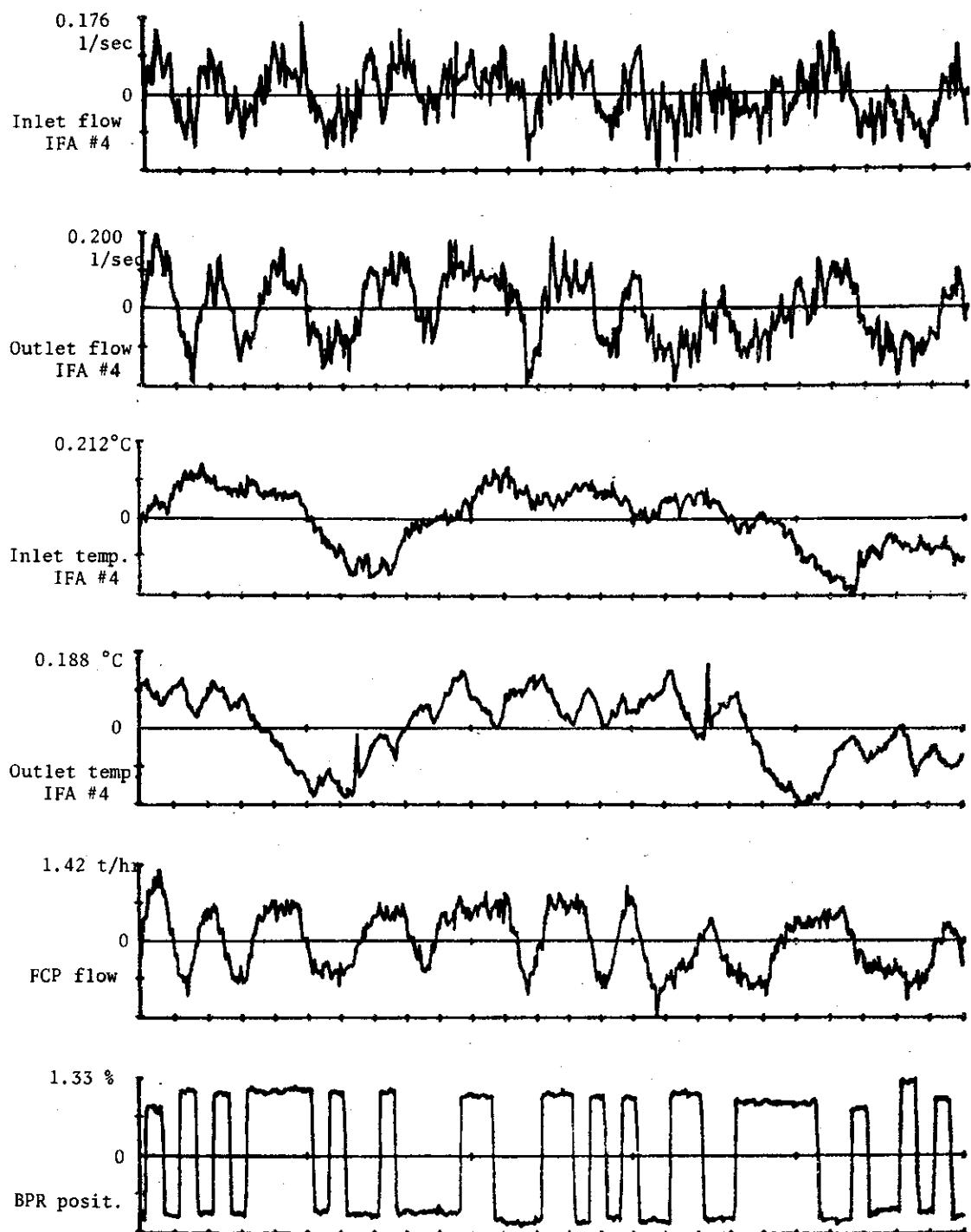


Fig.5(b) Responses of plant variables to the insertion  
of MLBS's (II)

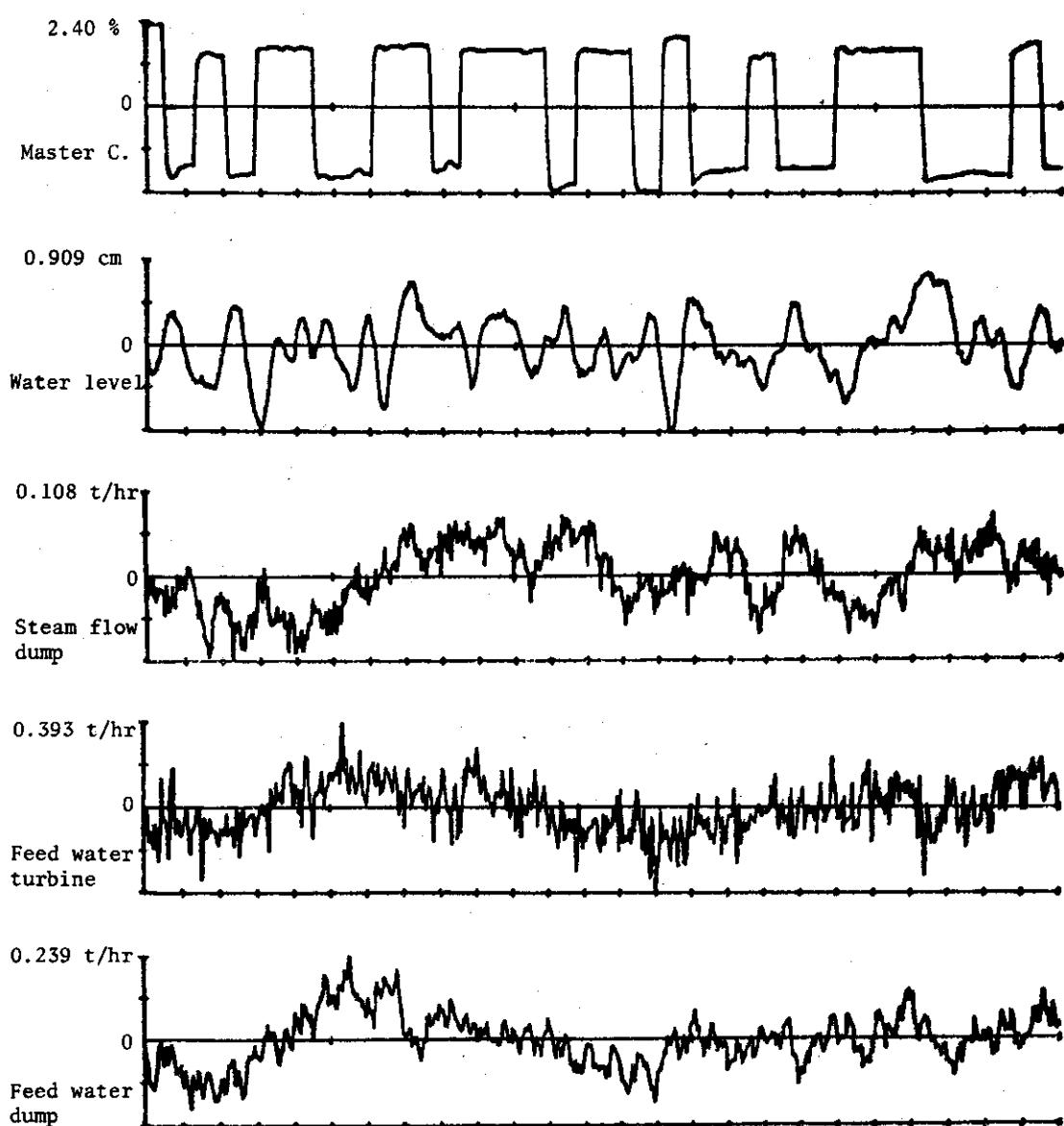


Fig.5(c) Responses of plant variables to the insertion  
of MLBS's (III)

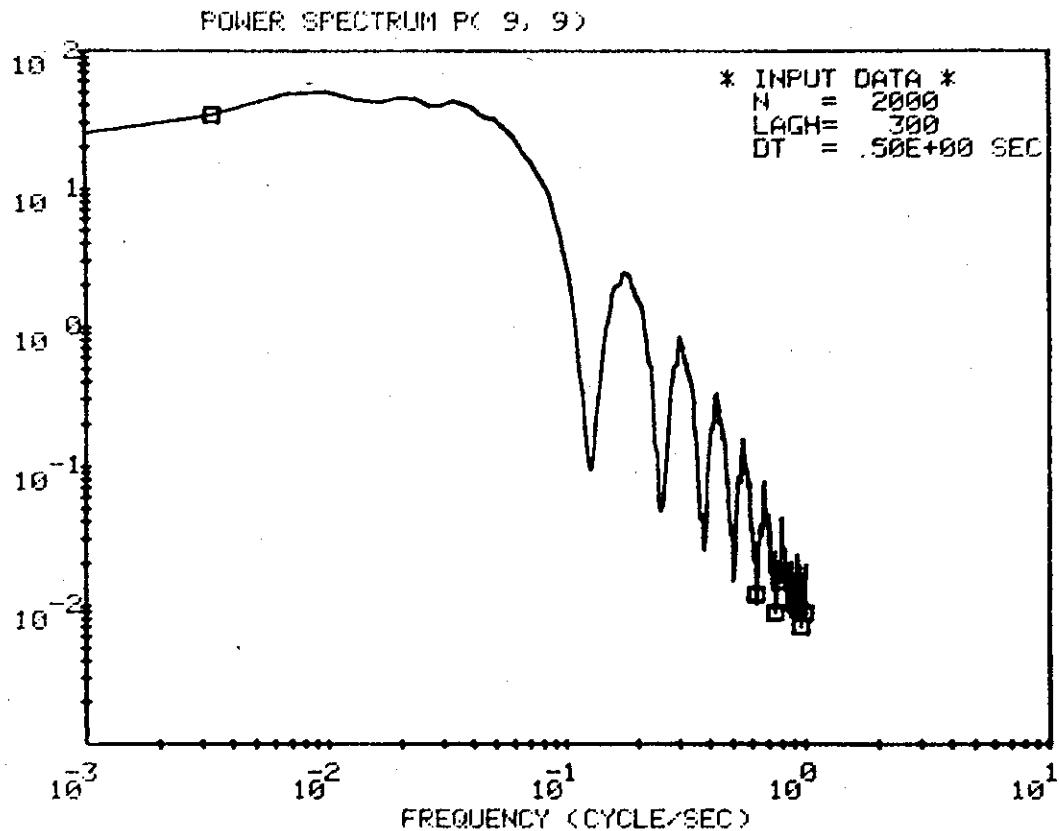


Fig. 6 PSD of FCP master controller set point change signal

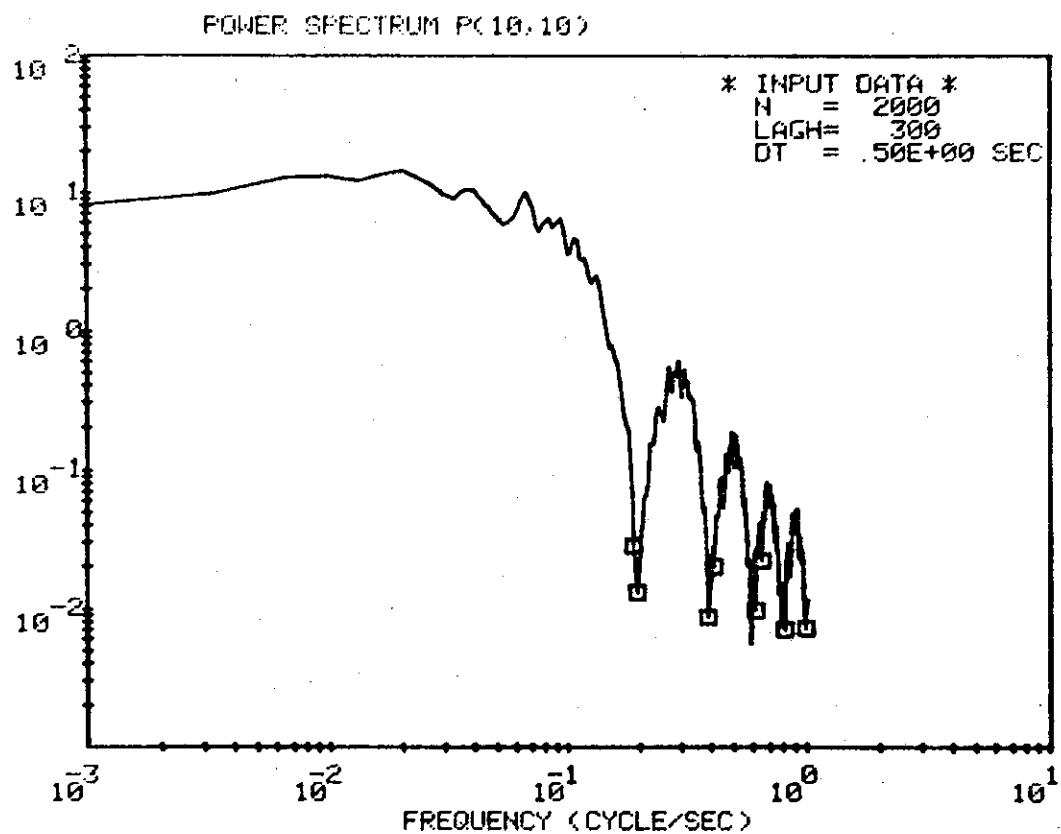


Fig. 7 PSD of BPR valve opening change signal

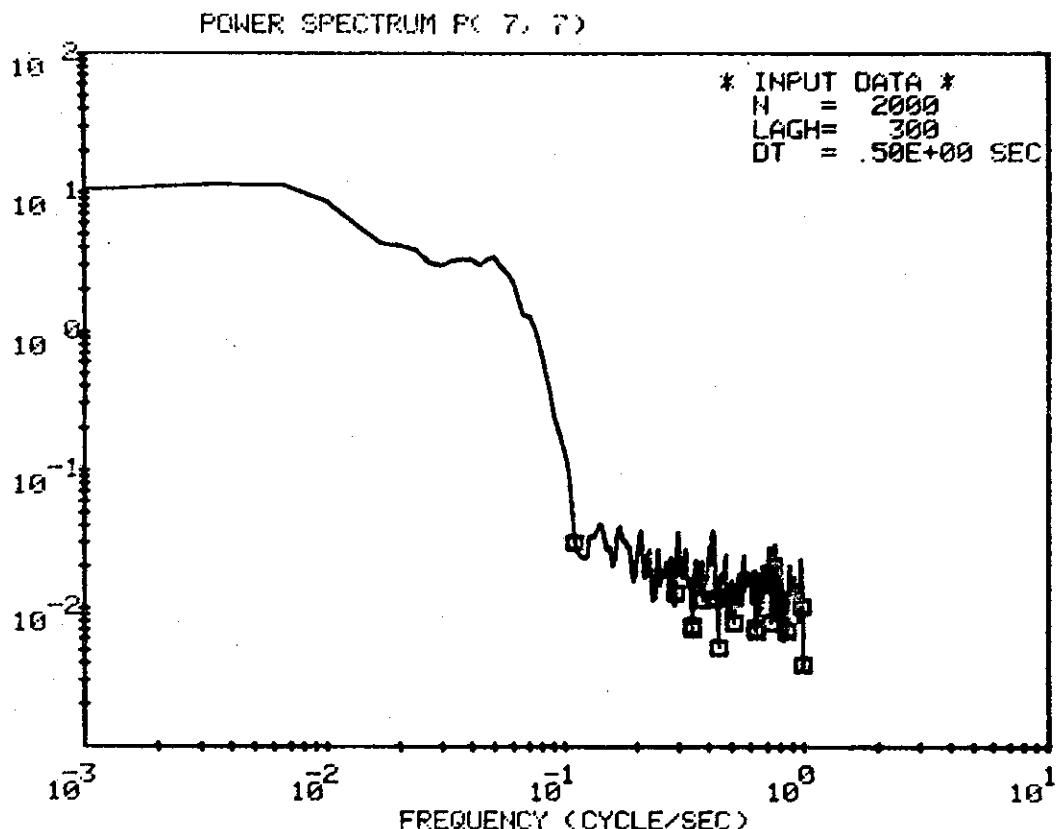


Fig. 8 PSD of FCP flow rate

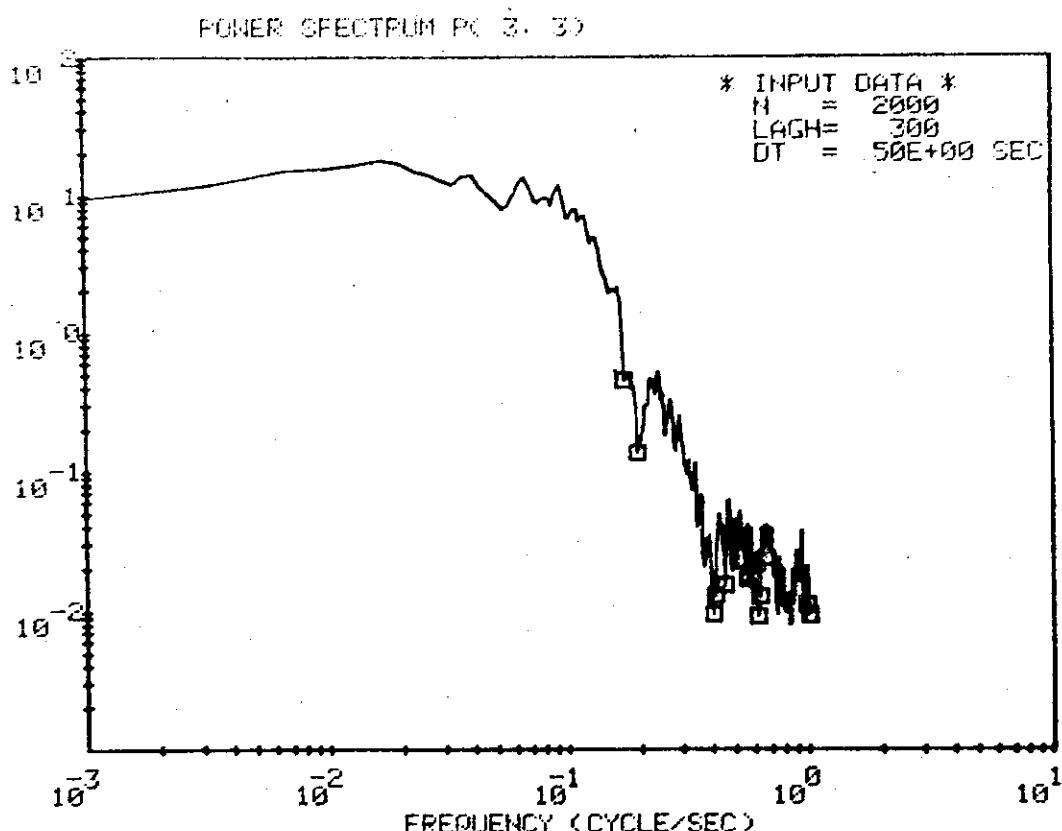


Fig. 9 PSD of steam flow rate to turbine system

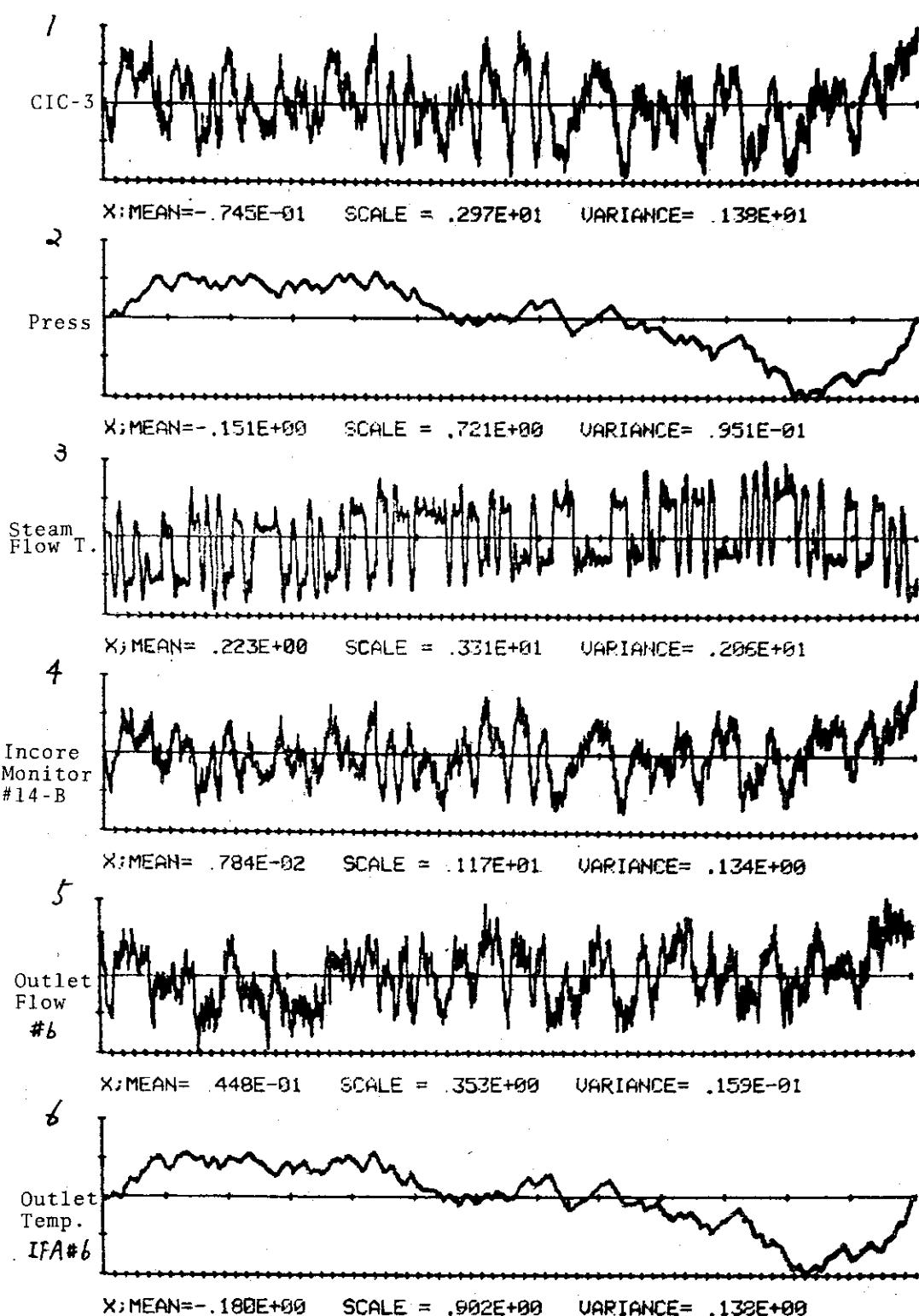


Fig.10(a) Responses of plant variables to the insertion of MLBS's (IV), observed at the preliminary experiment, N=1500, DT=0.5 sec.

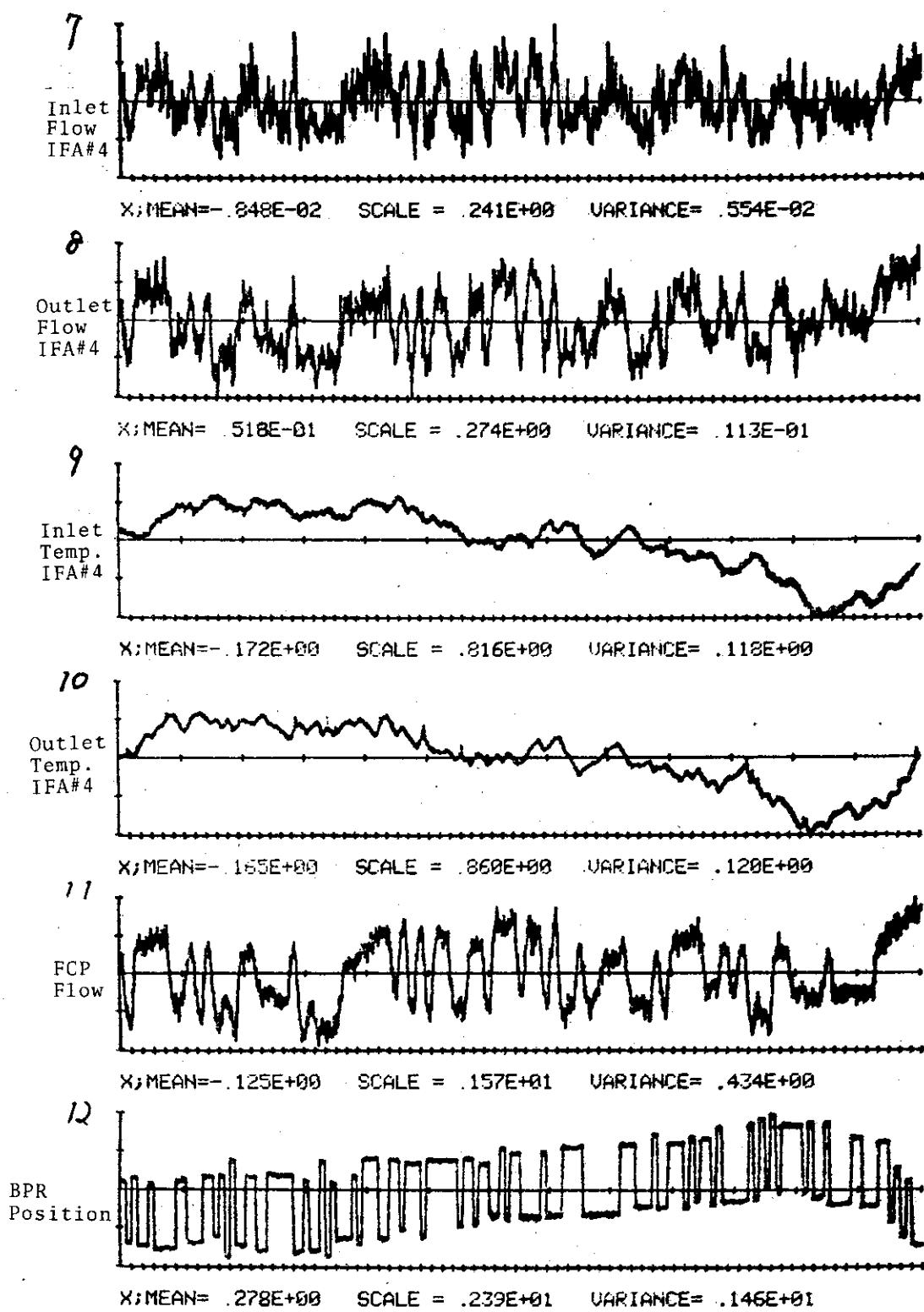


Fig.10(b) Responses of plant variables to the insertion of MLBS's (V), observed at the preliminary experiment

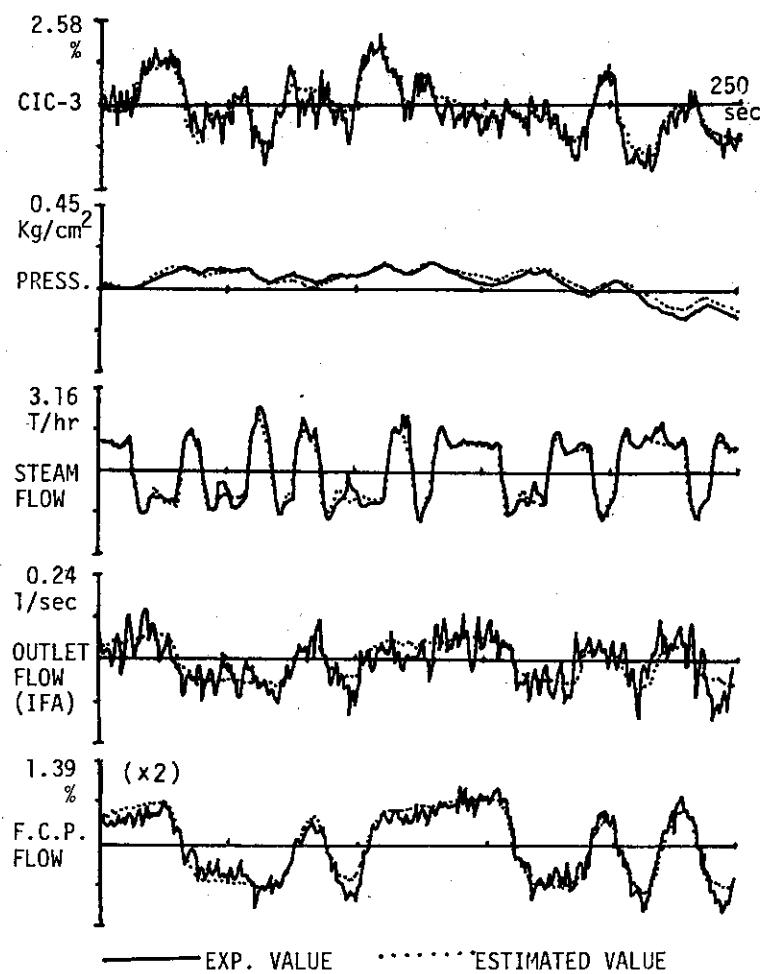


Fig. 11 Output state estimation by AR model.  
The estimated values are calculated from input  $U(s)$   
by the use of Eq. (13).

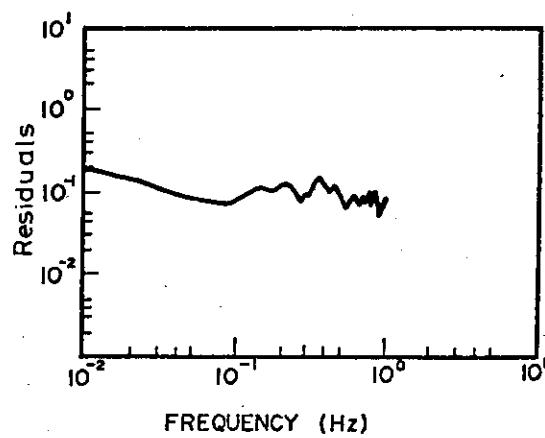


Fig. 13 Whiteness of the residuals of neutron density.  
This indicates the PSD of differences between  
observed data and one step predictions.

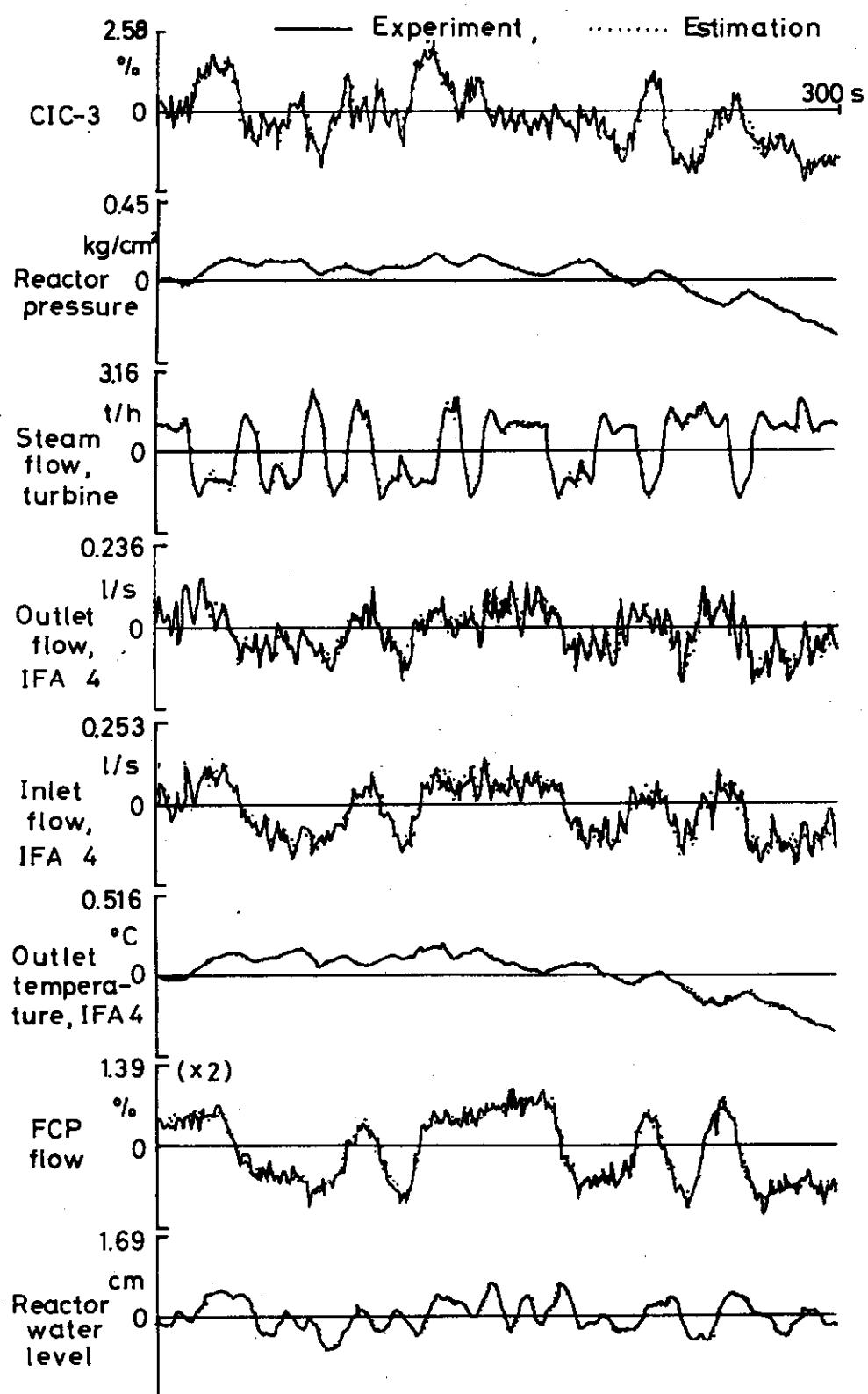


Fig. 12 Comparison between one step predictions by AR model and observed data

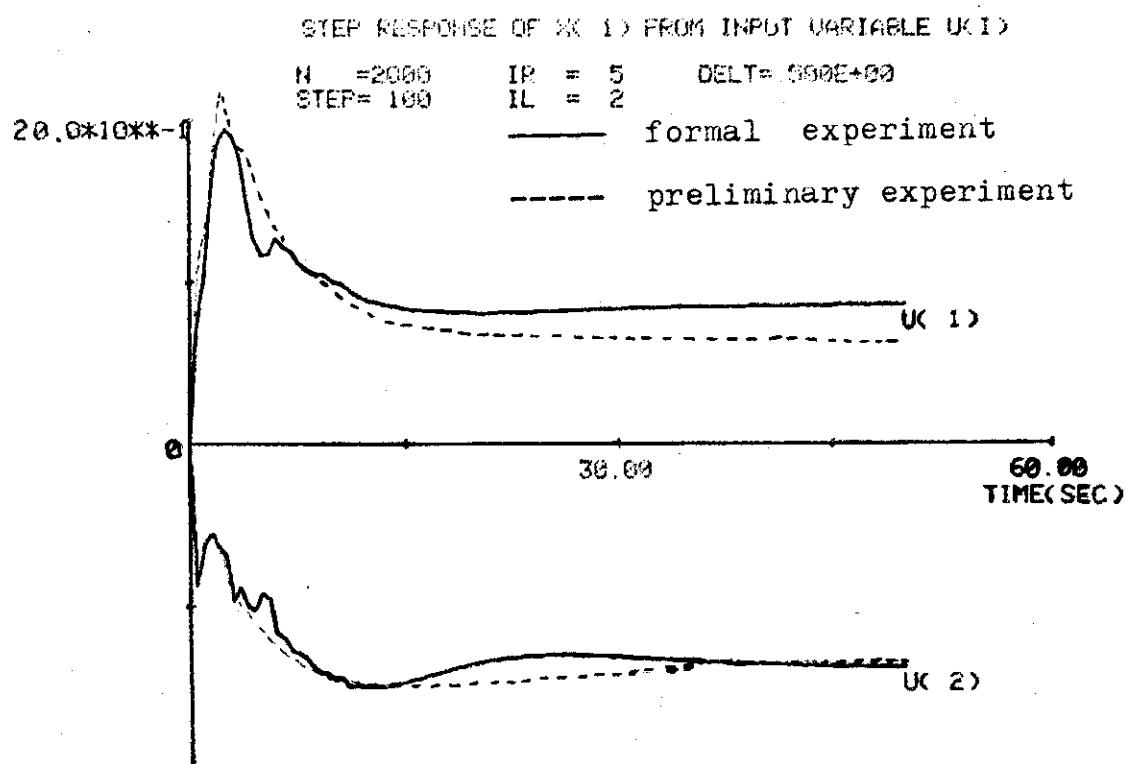


Fig. 14 Step responses of the neutron density to the FCP flow rate  $U(1)$  and to the steam flow rate  $U(2)$ .

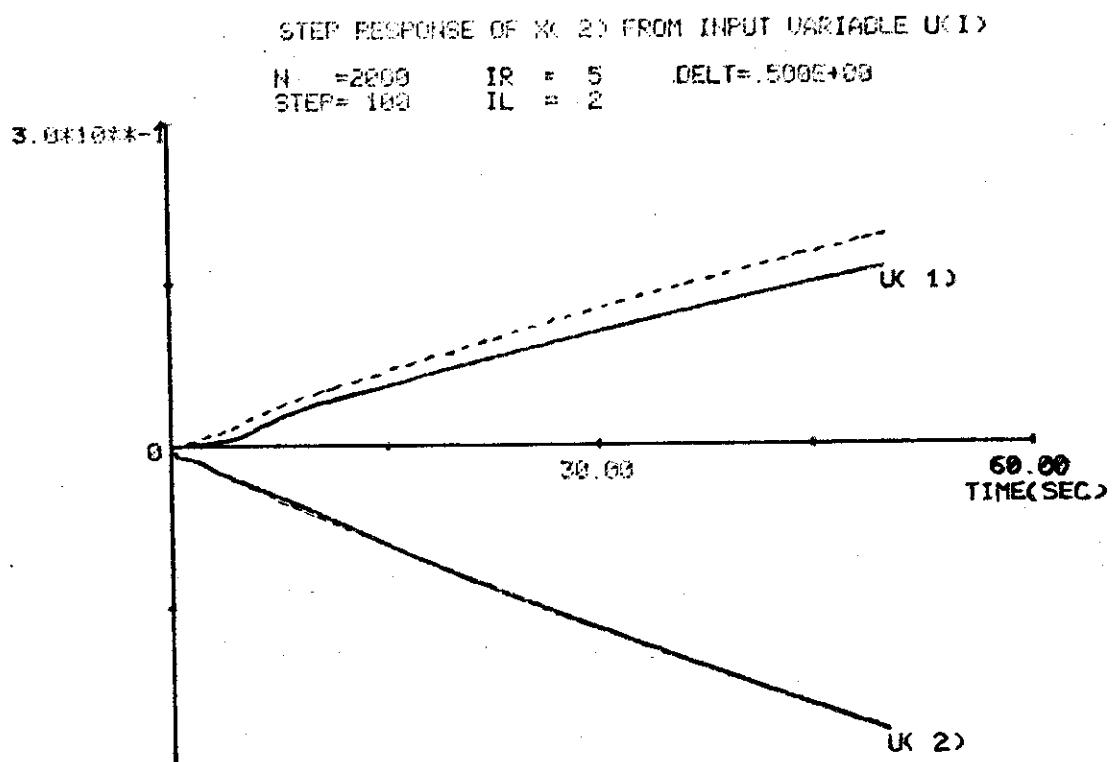


Fig. 15 Step responses of the reactor pressure to the FCP flow rate  $U(1)$  and to the steam flow rate  $U(2)$

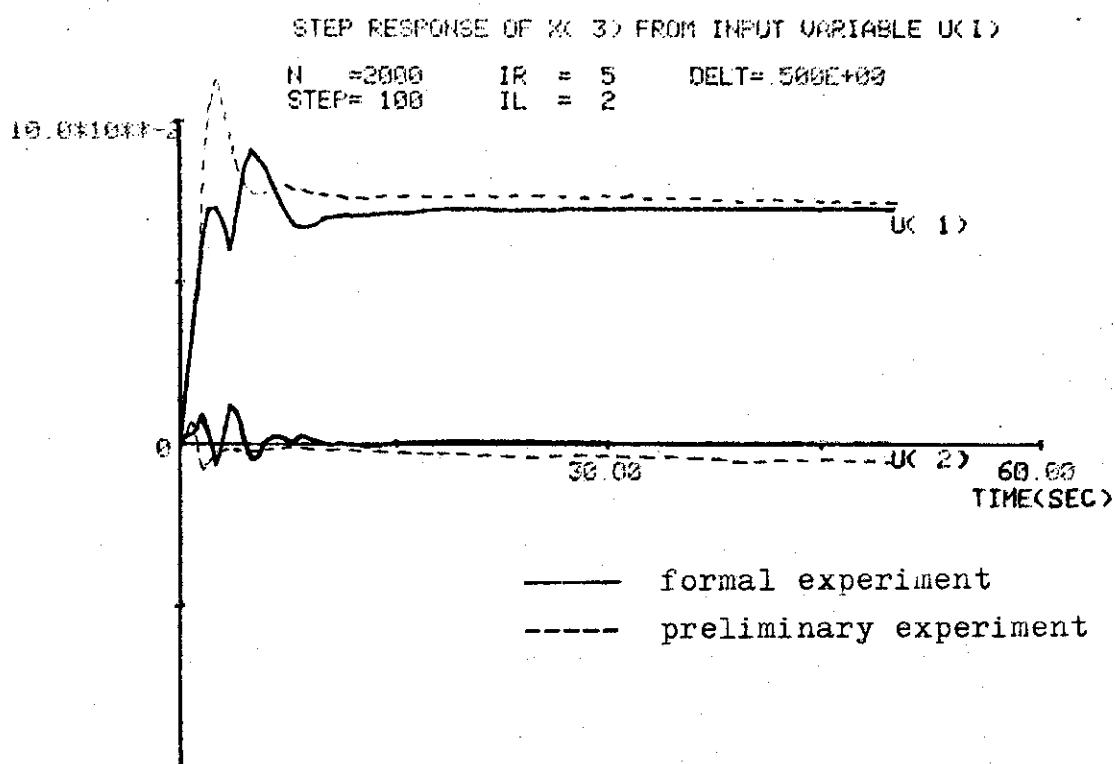


Fig. 16 Step responses of the inlet flow rate of IFA #4 to the FCP flow rate  $U(1)$  and to the steam flow rate  $U(2)$

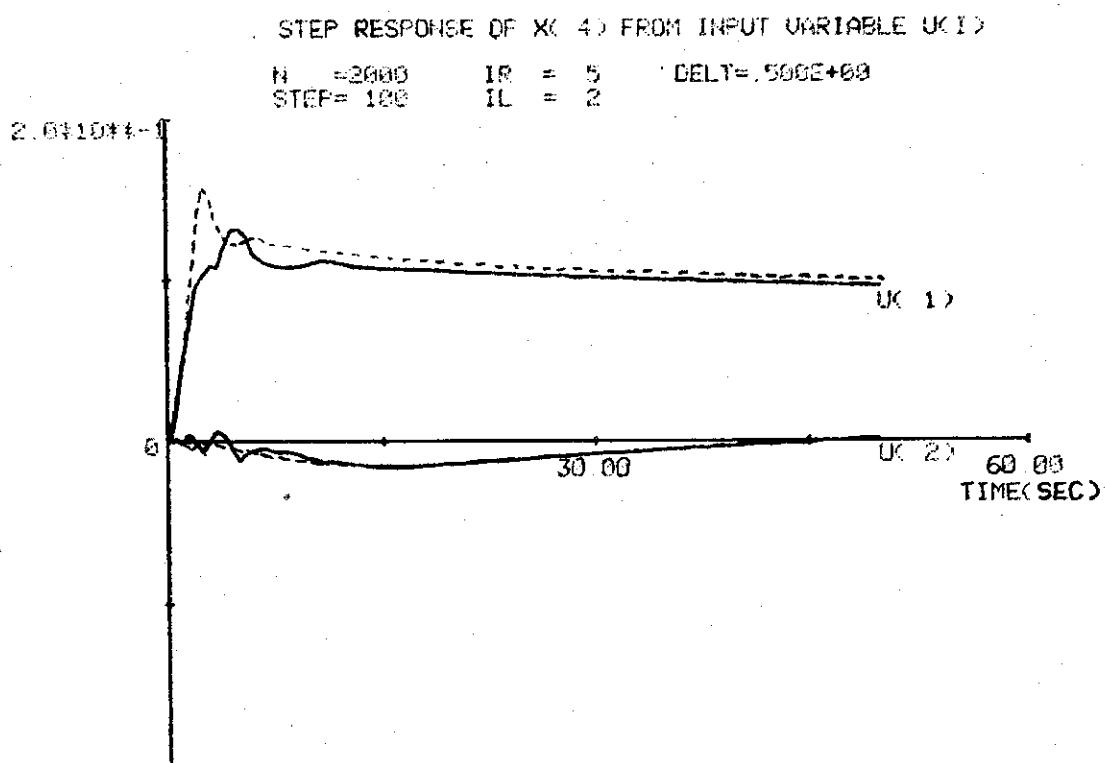


Fig. 17 Step responses of the outlet flow rate of IFA #4 to the FCP flow rate  $U(1)$  and to the steam flow rate  $U(2)$

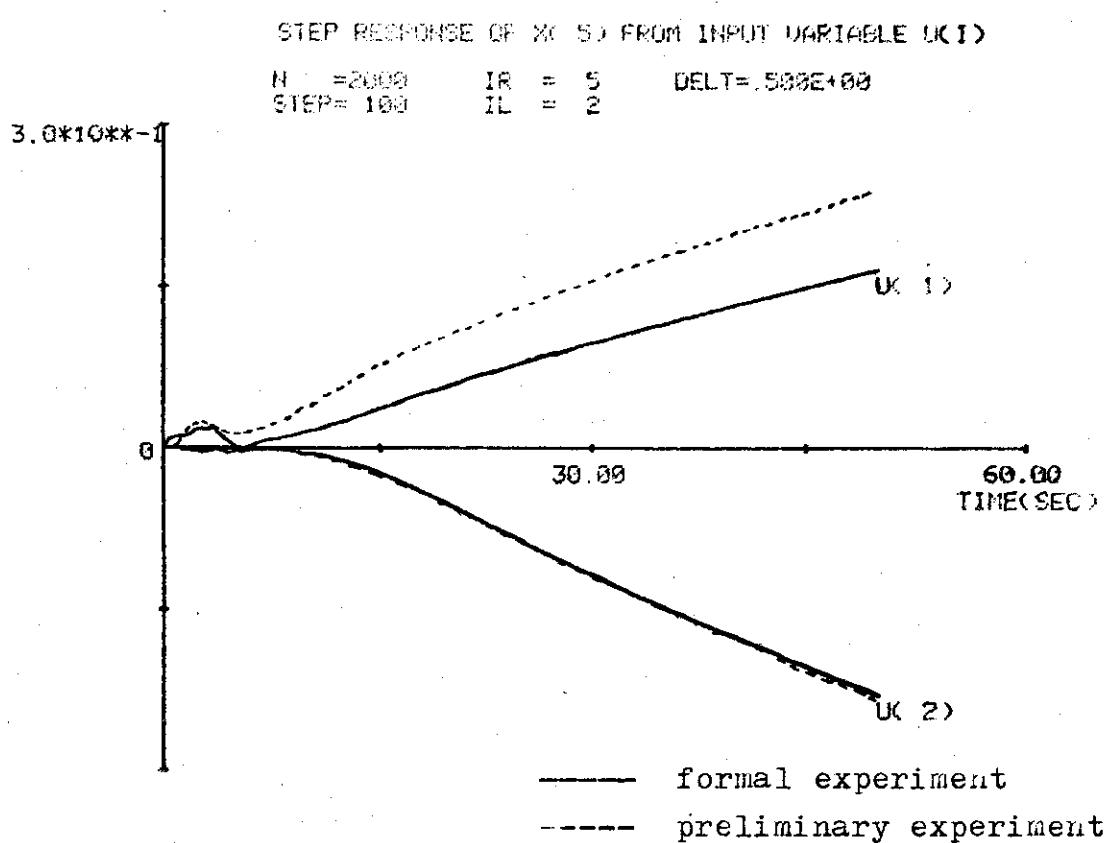


Fig. 18 Step responses of the inlet temperature of IFA #4 to the FCP flow rate U(1) and to the steam flow rate U(2)

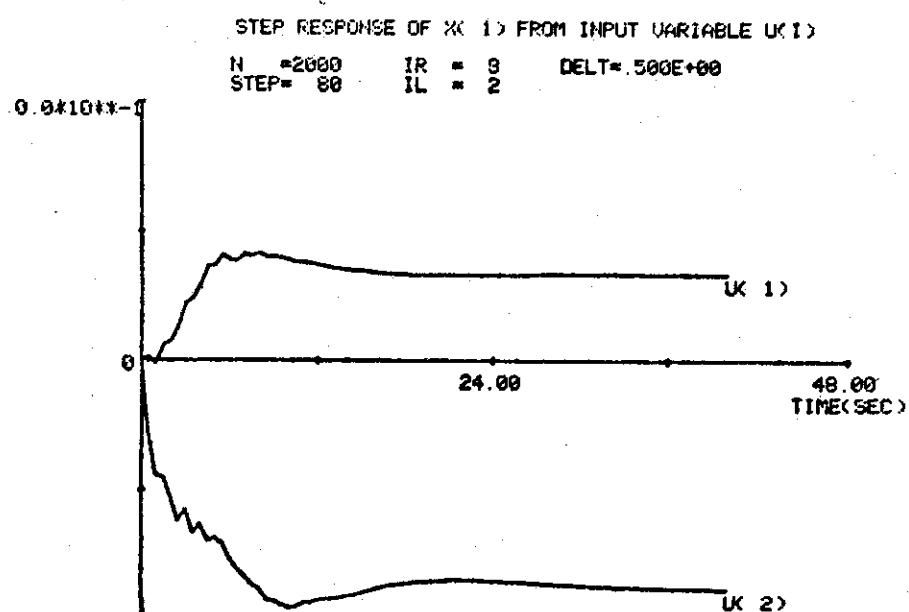


Fig. 19 Step responses of the neutron density to the FCP master controller  $U(1)$  and to the BPR valve position  $U(2)$

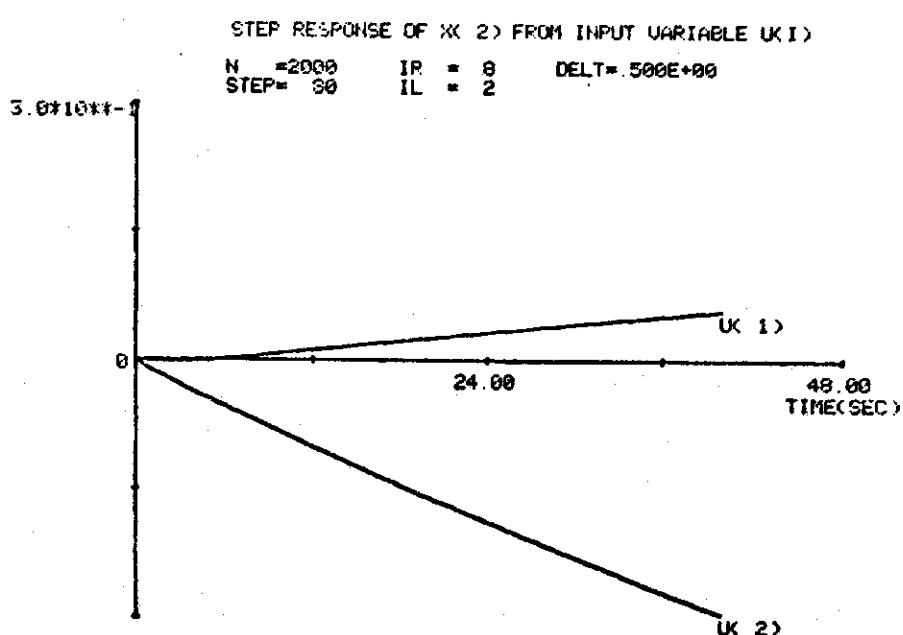


Fig. 20 Step responses of the reactor pressure to the FCP master controller  $U(1)$  and to the BPR valve position  $U(2)$

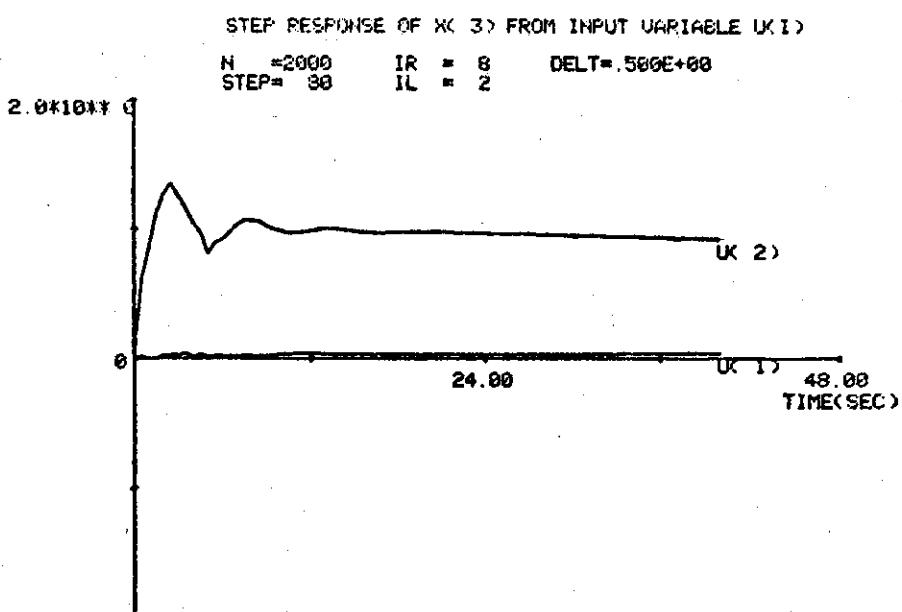


Fig. 21 Step responses of the steam flow rate to the FCP master controller U(1) and to the BPR valve position U(2)

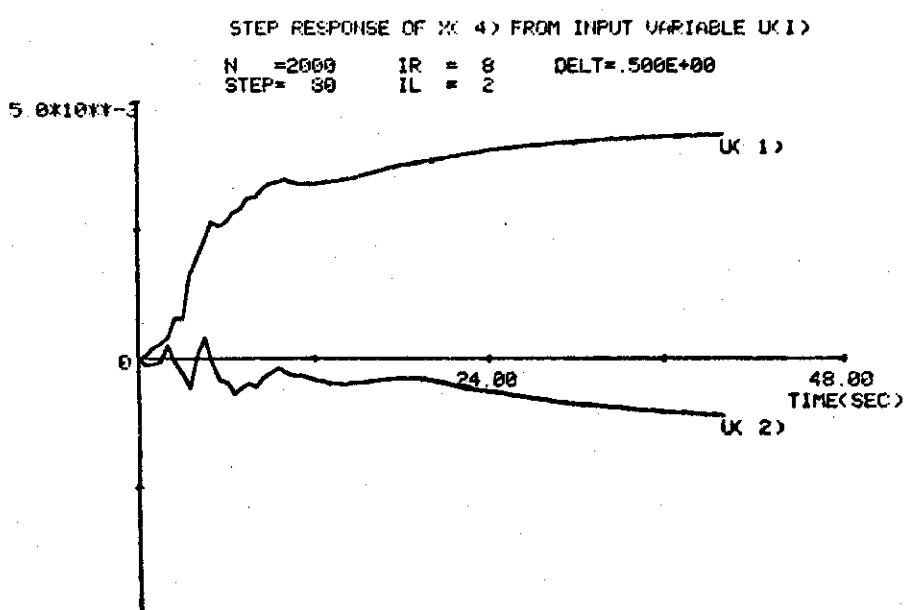


Fig. 22 Step responses of the inlet flow rate of IFA #4 to the FCP master controller U(1) and to the BPR valve position U(2)

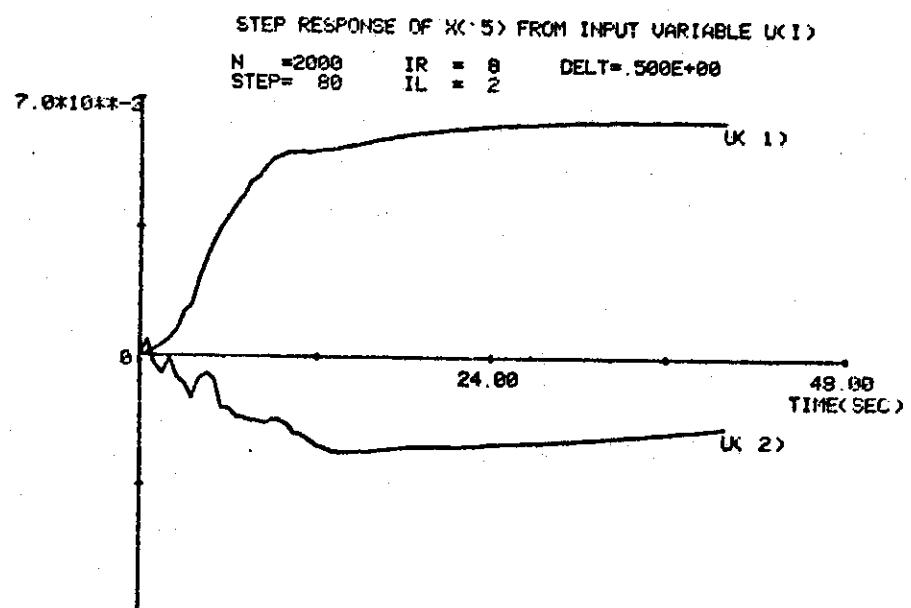


Fig. 23 Step responses of the outlet flow rate of IFA #4 to the FCP master controller U(1) and to the BPR valve position U(2)

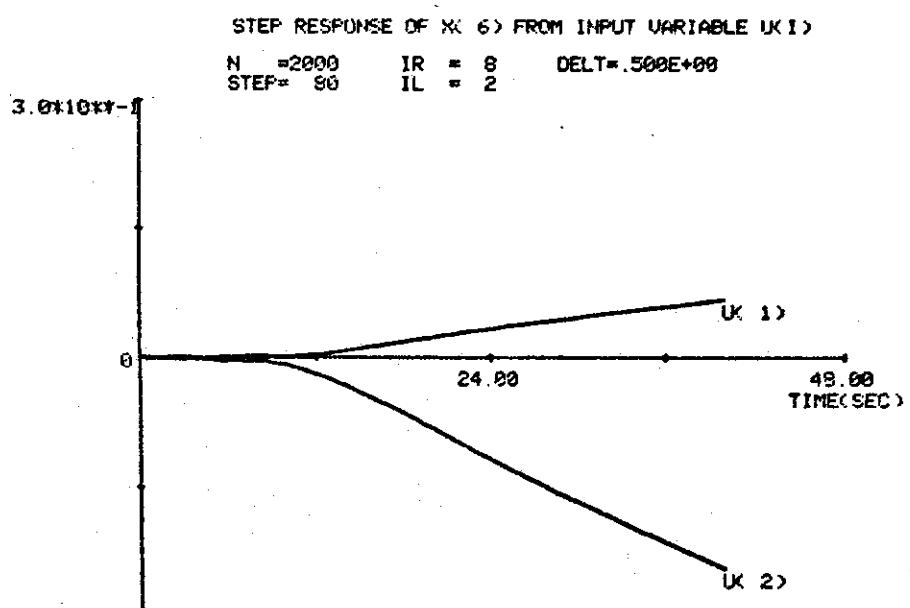


Fig. 24 Step responses of the inlet temperature of IFA #4 to the FCP master controller U(1) and to the BPR valve position U(2)

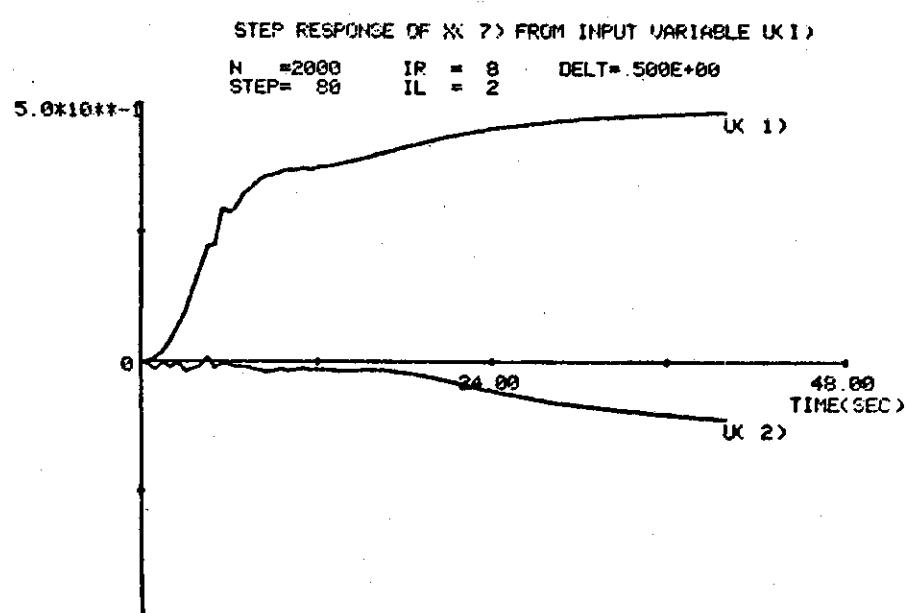


Fig. 25 Step responses of the FCP flow rate to the FCP master controller U(1) and to the BPR valve position U(2)

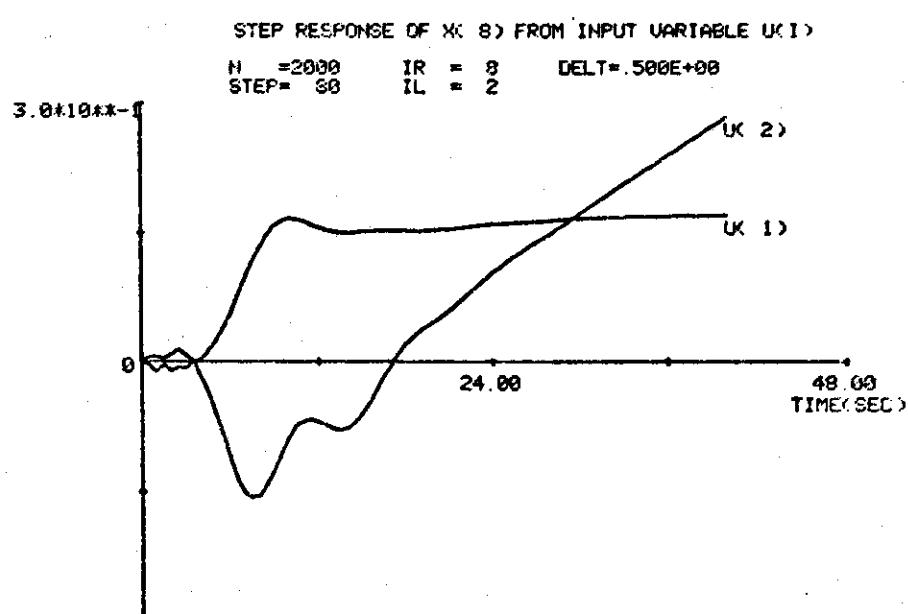
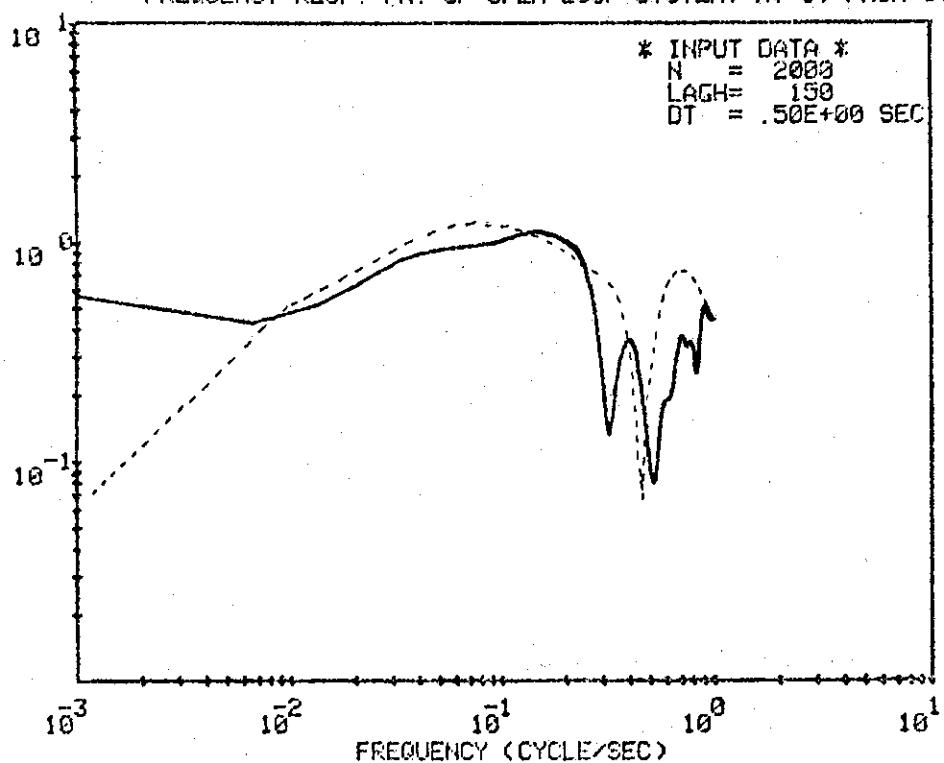


Fig. 26 Step responses of the water level to the FCP master controller U(1) and to the BPR valve position U(2)

FREQUENCY RESP. FN. OF OPEN LOOP SYSTEM. X(1) FROM U(1)



FREQUENCY RESP. FN. OF OPEN LOOP SYSTEM. X(1) FROM U(2)

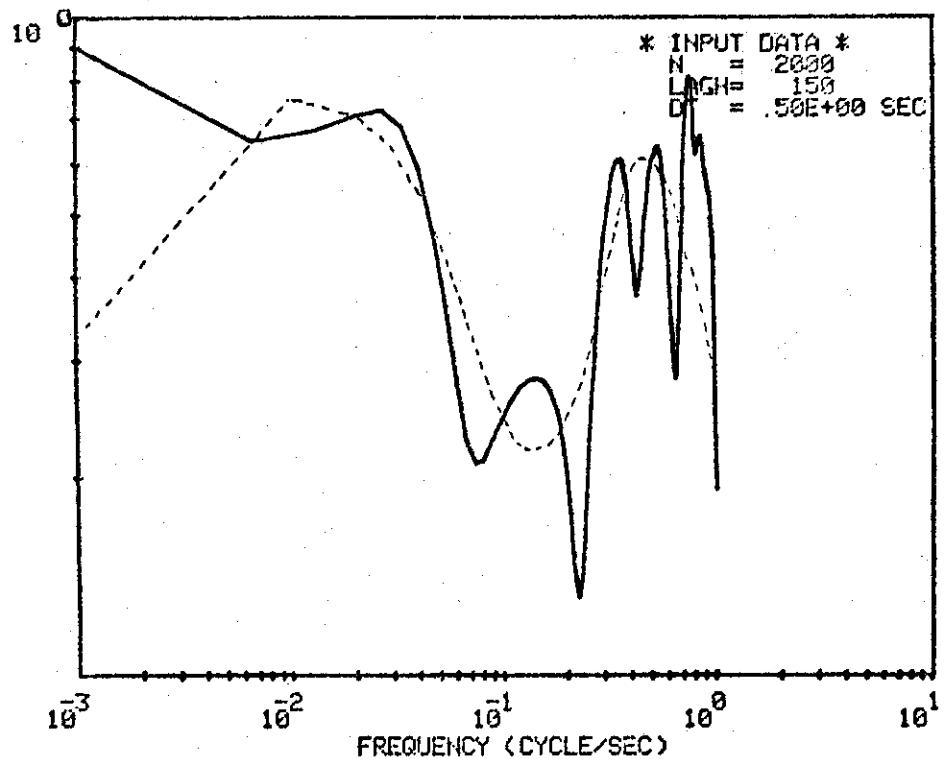


Fig. 27 Frequency responses of the neutron density to  
the FCP flow rate  $U(1)$  and to the steam flow  $U(2)$

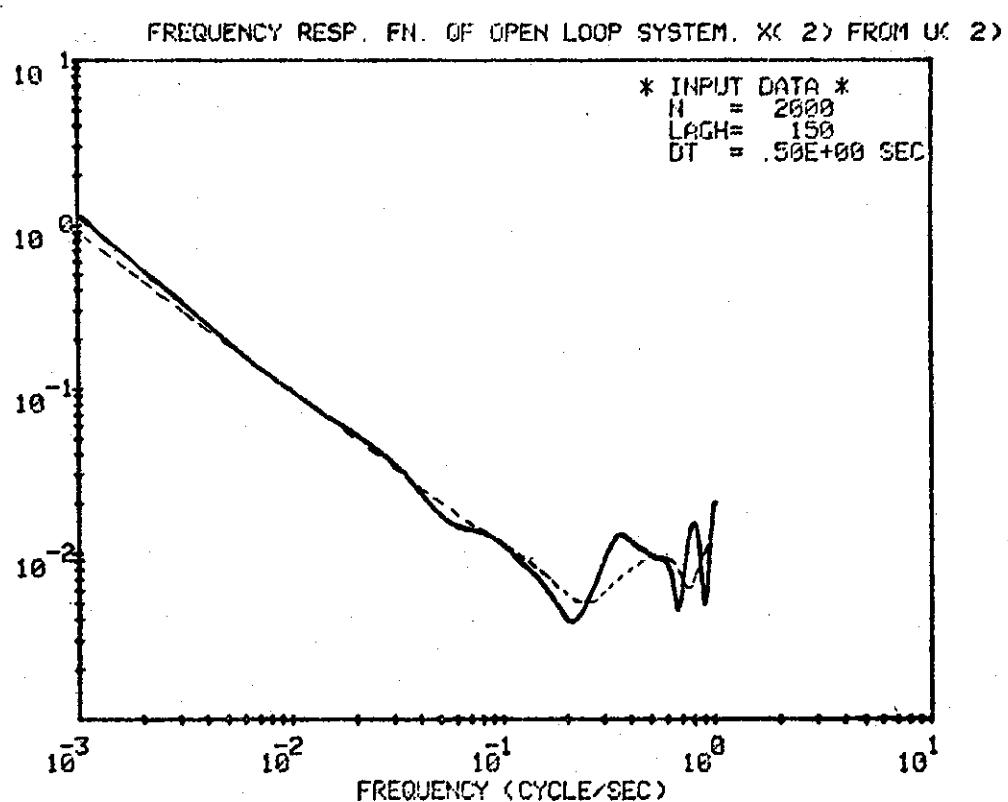
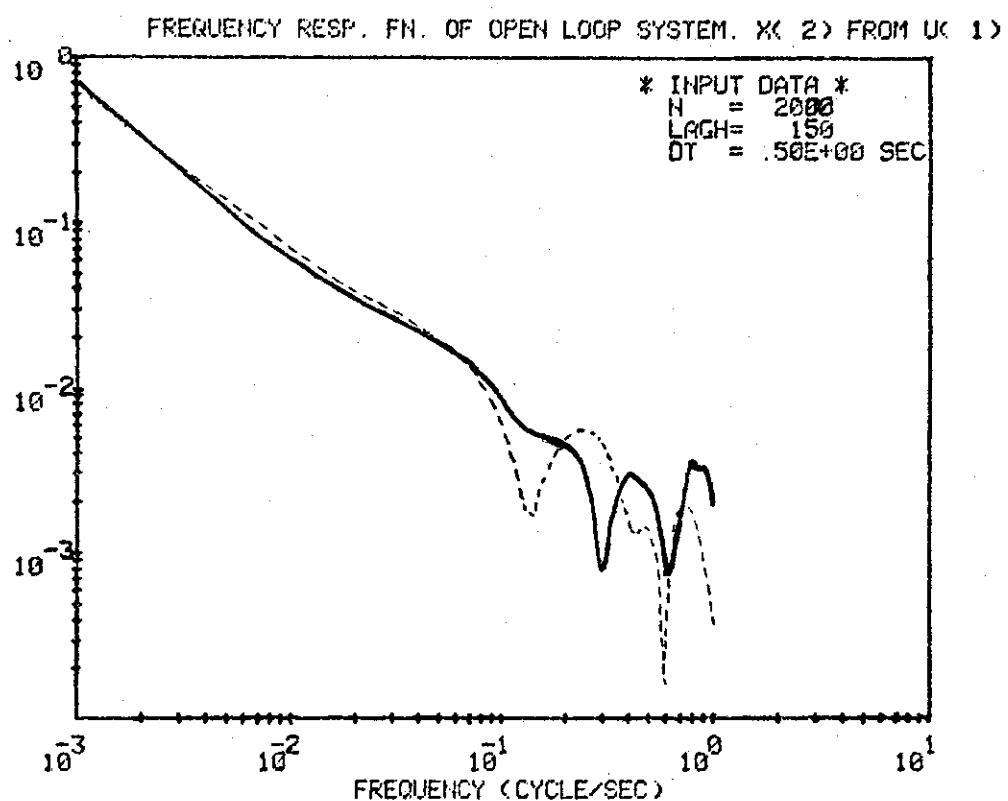


Fig. 28 Frequency responses of the reactor pressure to the FCP flow rate  $U(1)$  and to the steam flow  $U(2)$

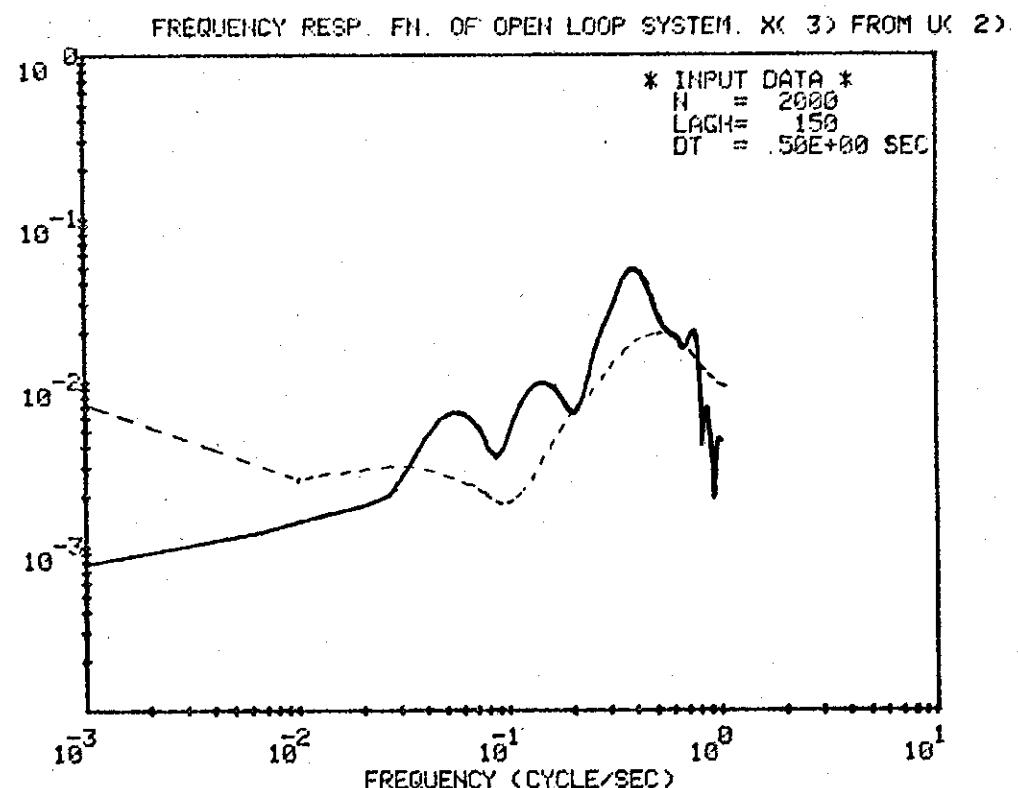
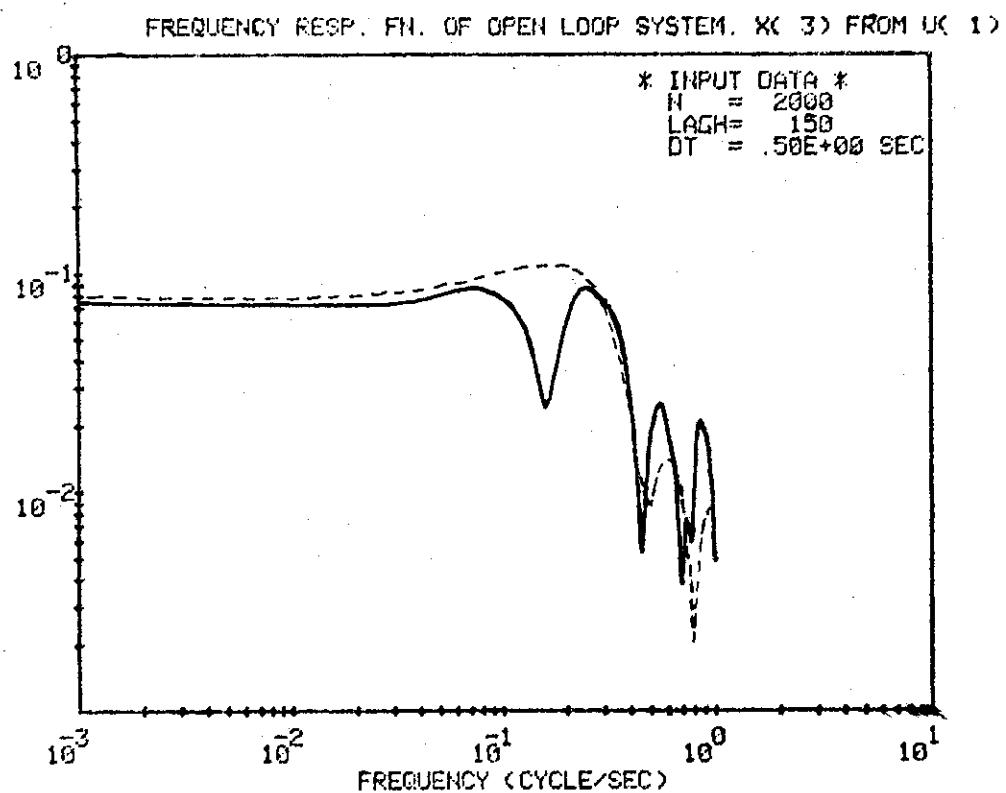
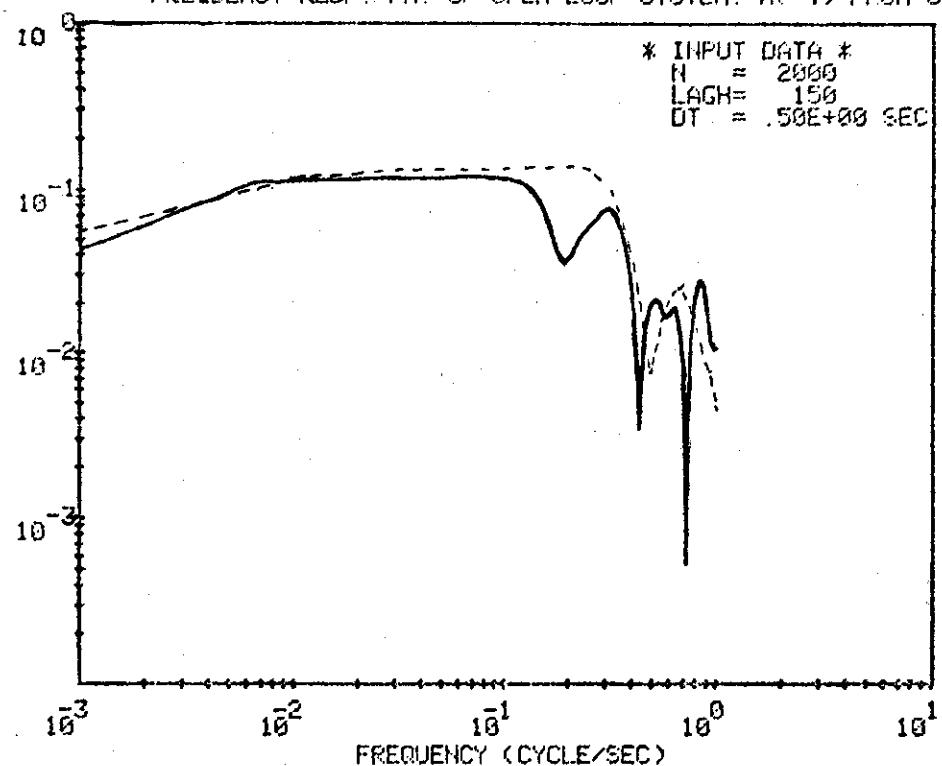


Fig. 29 Frequency responses of the inlet flow rate of IFA #4 to the FCP flow rate U(1) and to the steam flow rate U(2)

FREQUENCY RESP. FN. OF OPEN LOOP SYSTEM. X(4) FROM U(1)



FREQUENCY RESP. FN. OF OPEN LOOP SYSTEM. X(4) FROM U(2)

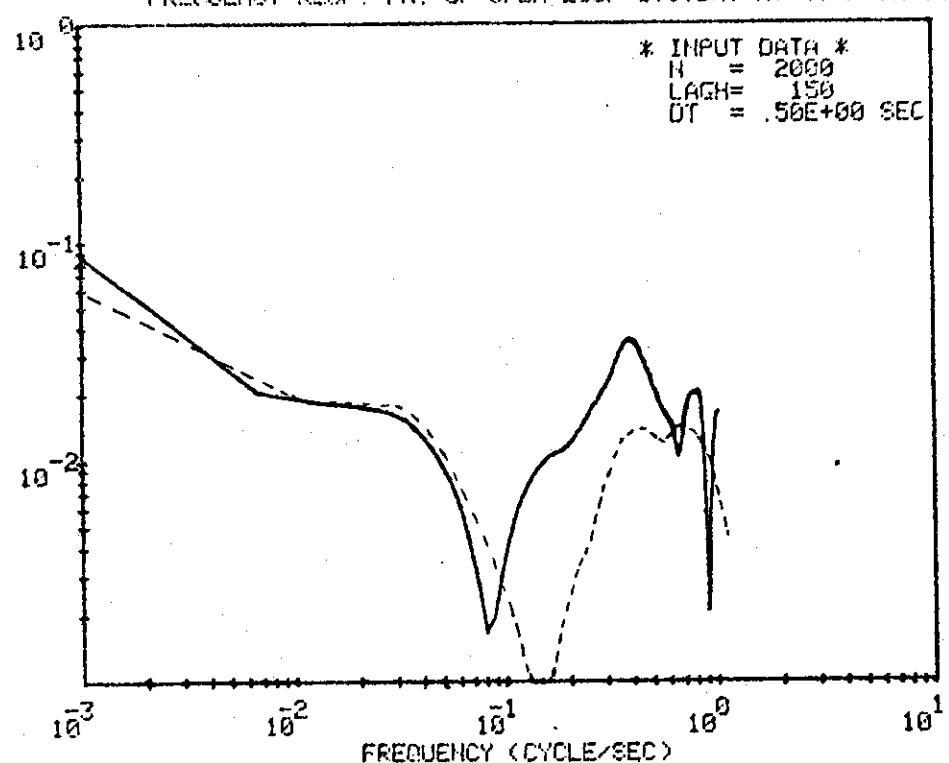


Fig. 30 Frequency responses of the outlet flow rate of IFA #4 to the FCP flow rate  $U(1)$  and to the steam flow rate  $U(2)$

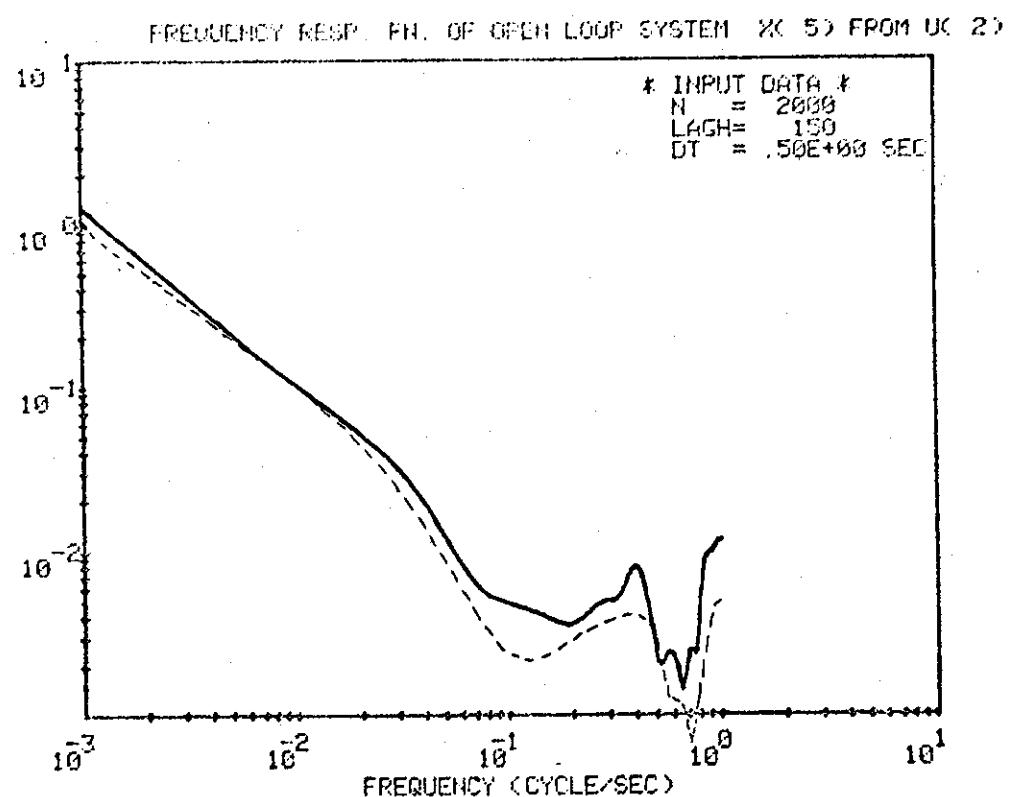
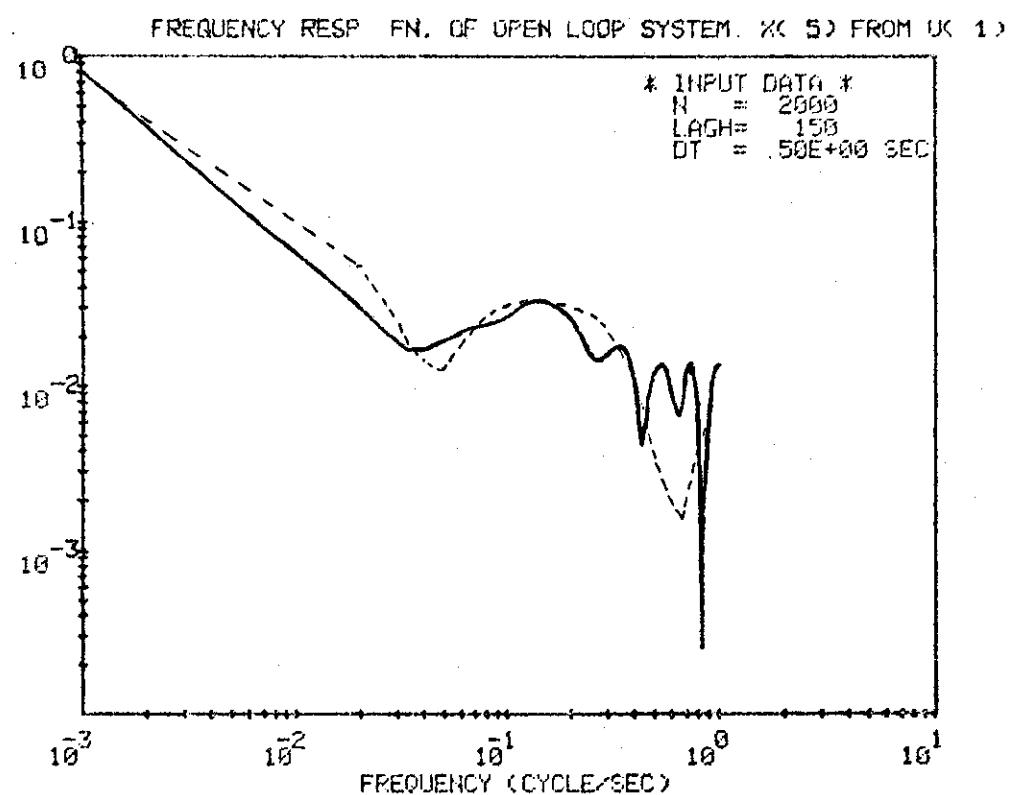


Fig. 31 Frequency responses of the inlet temperature of IFA #4 to the FCP flow rate U(1) and to the steam flow rate U(2)

## 5. 理論モデルとの比較検討

### 5.1 JPDR-II 動特性の理論モデル

JPDR-IIについてはこれまでに種々の理論モデルが提唱されているが、本研究ではこれらのうちから、MIIDA-SUDAモデル<sup>[12]</sup>（MS モデル）を一部改変した修正MIIDA-SUDA モデル（MMS モデル）をとりあげ、同定実験結果との比較を通じてこのモデルについての考察を試みた。このモデルをとりあげたのは、それが比較的簡潔な形をしていること、圧力のフィードバックループが含まれているため外部ループを含めた特性検討が容易にできることなどの理由による。モデルの詳細にはここではふれず、その前提となっている理論的仮定のみまとめて記しておく。

MS モデルにおいては、出力から反応度へのフィードバック効果として燃料棒温度およびボイド率の変化の影響をとりあげ、減速材の温度の影響は小さいものとして無視している。さらに伝達関数の導出過程で次のような仮定を用いている。

- ① 核的には一点近似、遅発中性子束一群近似とする。
- ② 炉心熱水力は单一チャンネルに着目し、軸方向は分布定数系として扱うが半径方向の分布は考慮しない。
- ③ 炉心軸方向の圧力変動は一様とする。
- ④ チャンネルに沿った熱流束分布を一様とする。
- ⑤ 蒸気と水との間のスリップ比を 1 とする。
- ⑥ サブクール水の密度は圧力、温度に依存しない。
- ⑦ 圧力容器内の圧力伝達関数は集中定数形モデルで取り扱う。
- ⑧ 定常状態からの微小変化分に着目した線形化を行なっている。

改造前のJPDR は自然循環方式をとっていたので、今回実験を行った JPDR-II は強制循環方式をとっており、これに対応して次の修正を施すことにより MMS モデルが構成された。

- a) 遅発中性子束は 6 群とする。
- b) 燃料棒熱伝達関数は、3 つの 1 次遅れ項の和で表わされるものとした。
- c) 強制循環方式の採用により炉心入口流速の変化はポンプ流量によって与えられると考え、この現象に関する伝達関数を省略した。
- d) 主蒸気管の効果による圧力から蒸気流量への伝達関数を組み入れた。

以上の仮定から得られた MMS モデルの簡略化されたブロック図を Fig. 3.2 に示す。各伝達関数の形および解析に用いたパラメータ値について参考のため付録にまとめて示してある。

### 5.2 理論モデルと実験モデルとの比較検討

予備実験ならびに本実験データからの同定結果の一致、変量の組合せを変えた同定結果の整合性などから総合的にみて本同定手法ならびに得られている同定結果は、少くとも採用された実験

条件の範囲では信頼できるものと判断した。この結果に基づいて、当初の目的のひとつである理論モデルに含まれる不確定パラメータの推定を試みた。

まず、重要な問題点として、圧力動特性の理論モデル中の不確定量をとりあげた。Vessel 内の飽和水の量は圧力動特性に大きな影響を与えるパラメータであり、その正確な評価が望まれてきた。しかしながら、RISER まわりの Stagnant Water は、わずかにサブクールされていると考えていたが、この寄与をどのように評価すべきかについては定説がなく、飽和水量を幾何学的形状から単純に計算するだけでよいかどうかわからなかった。Fig. 33 にこの点についての検討結果を示す。この図は、主要なプラント変量である中性子密度、圧力、チャンネル入口温度の、操作量ステップに対する応答を示しており、同定結果（点線）と理論モデルからの計算結果（破線、実線）を比較したものである。Stagnant Water の寄与を無視した場合の理論モデル応答は同定結果と大きな不一致を生じることが知られた。FCP ステップに対する中性子密度応答に着目してこの不一致を低減するよう飽和水の評価量を調整して得られた応答が図中の実線である。明らかなように各変量の応答における一致度に大巾な改善がみられた。入口温度応答、および蒸気流量変化に対する圧力の応答になお若干の不一致分は残るが、調整したパラメータが唯一つだけであることを考えればこの改善は極めて効果的なものといえよう。

もう 1 つ重要なパラメータとして再循環水の輸送時間がある。炉心チャンネルから流出する二相流は、RISER 部を通り気水分離器により気体分が分離されてからダウンカマーを通ってポンプに至る。この流路の通過時間が入口温度（エンタルピー）動特性に大きく影響する。解析に用いた理論モデルでは、この値を約 8 秒に見積っているがその妥当性についての検証はこれまでにはなされていなかった。Fig. 33 の同定結果には、入口温度が入力印加に対して明確な時間遅れの後、立上っている様子があらわれている。この遅れ時間は前記の値と良好な一致を示しており、構成された理論モデルにおける見積りが妥当なものであったことを立証する結果となっている。

理論モデルと同定結果とはこのように全体としては良好な一致を示すことが知られたが、明らかな差異もいくつか認められた。中性子密度の FCP に対する応答においては、2 秒以下の領域で不一致が見られる。すなわち、理論モデルにおいてはステップ印加後、ごく短い時間で鋭いピークが生じているが、同定結果ではこのピークがやや遅れてあらわれ、かつ、その形状がいくらかはなまつたものとなっている。この不一致の原因を現段階ではっきりと示すことはむずかしいが、定性的には以下に示すような解釈ができる。

まず、中性子束の流量変化に対する応答には、比較的高周波領域（～0.6 から 1.0 Hz 付近）に大きい成分をもつことを指摘しておこう。これは BWR における伝達関数を検討すれば一般的に言えることである。Fig. 33 の中性子束のステップ応答波形について説明すれば、流量増加にともなって炉心内のボイド量が減少し、正の反応度が加って出力レベルが急上昇する。次に出力上昇にともなうボイドの回復とそれにともなう負の反応度フィードバック効果により出力は減少し、あるレベルに整定する。このような過程が、周波数応答特性の上で上記の周波数帯に大きい成分を形成させている。したがって中性子束の上記のようなピークが応答関数の特性として充分な精度で実験的モデルに同定されるためには、この周波数帯で充分な大きさの励起信号が与えられている必要がある。

しかしながら、3.1 に述べたように FCP 流量の速度制御器により急激な流量変動が与えられ

ないようになっている。このため高周波領域まで充分な励起が与えられない。このことはFCP流量のパワースペクトル、Fig. 8を見れば明らかである。したがって、このピークを表現するに必要な周波数成分はバックグラウンドノイズにマスクされていると考えられる。

さらに自己回帰モデルフィッティングの特徴的な次の点に注目するべきである。(1)式の表現形式への最小自乗フィッティングということから、入力Uか、あるいは、他の変数Xの過去の値に明らかに関連づけられない成分は、自分自身のノイズ分か、あるいはホワイトノイズ分Wの成分に繰り入れられる。このことを考えるなら、もしも高周波領域において充分な精度を出すだけの励起が与えられていなければ、応答関数の同定においても、その周波数領域での値はバラツキの多いものになっているであろう。しかるにARモデルの特質により、これらはノイズ成分（自分自身の観測ノイズか、ホワイトなランダムノイズW）に繰り入れられてしまう。

以上のような考察により、中性子束のピークの表現が理論と実験と良く一致しない理由として、炉心流量の励起が速度制限器により障害を受けていることが考えられる。

もちろん、理論モデルの側にも、いくつかの検討すべきパラメータはあるが（ボイドの炉心スイープ時間、および燃料棒熱伝達の時間遅れ）いずれも理論的な考察によれば、修正すべき巾はほとんどない。定量的な、これらパラメータの吟味は当然今後の課題として残るが、さらにこれらの解明を進めるためには、励起信号を与える上で制約となる条件が、可能な限り緩和される必要がある。

理論モデル検証への本同定手法の応用につき、2.3の例を示した。入出力間の伝達特性のみならず出力量相互間の伝達特性についての同様な考察も本手法を用いて行なうことが可能であり、これにより、さらに詳細な理論モデルの吟味がなし得ると期待できる。これについては別報にまとめて報告したい。

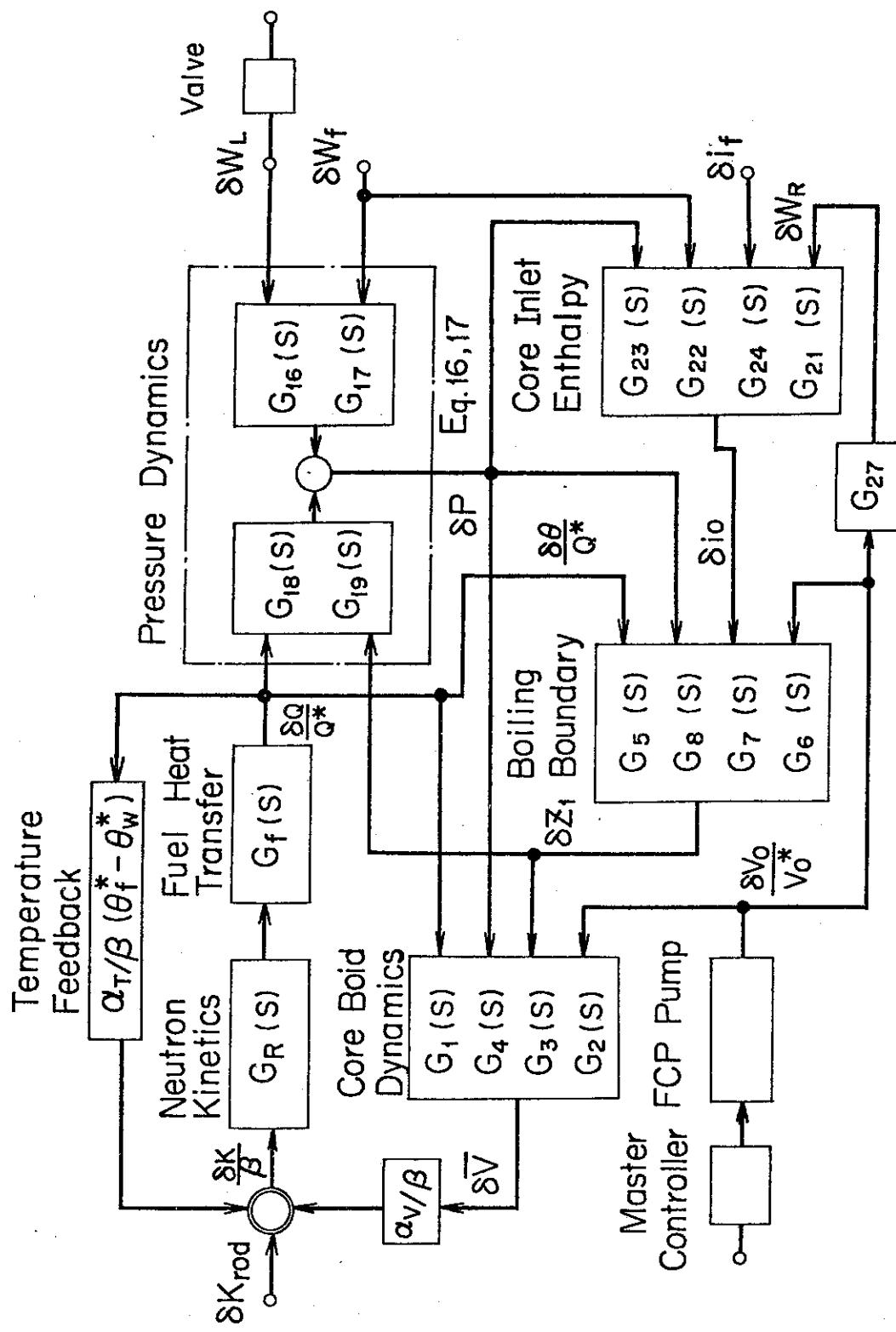


Fig. 32 Schematic diagram of the MMS model  
(modified Miida-Suda model)

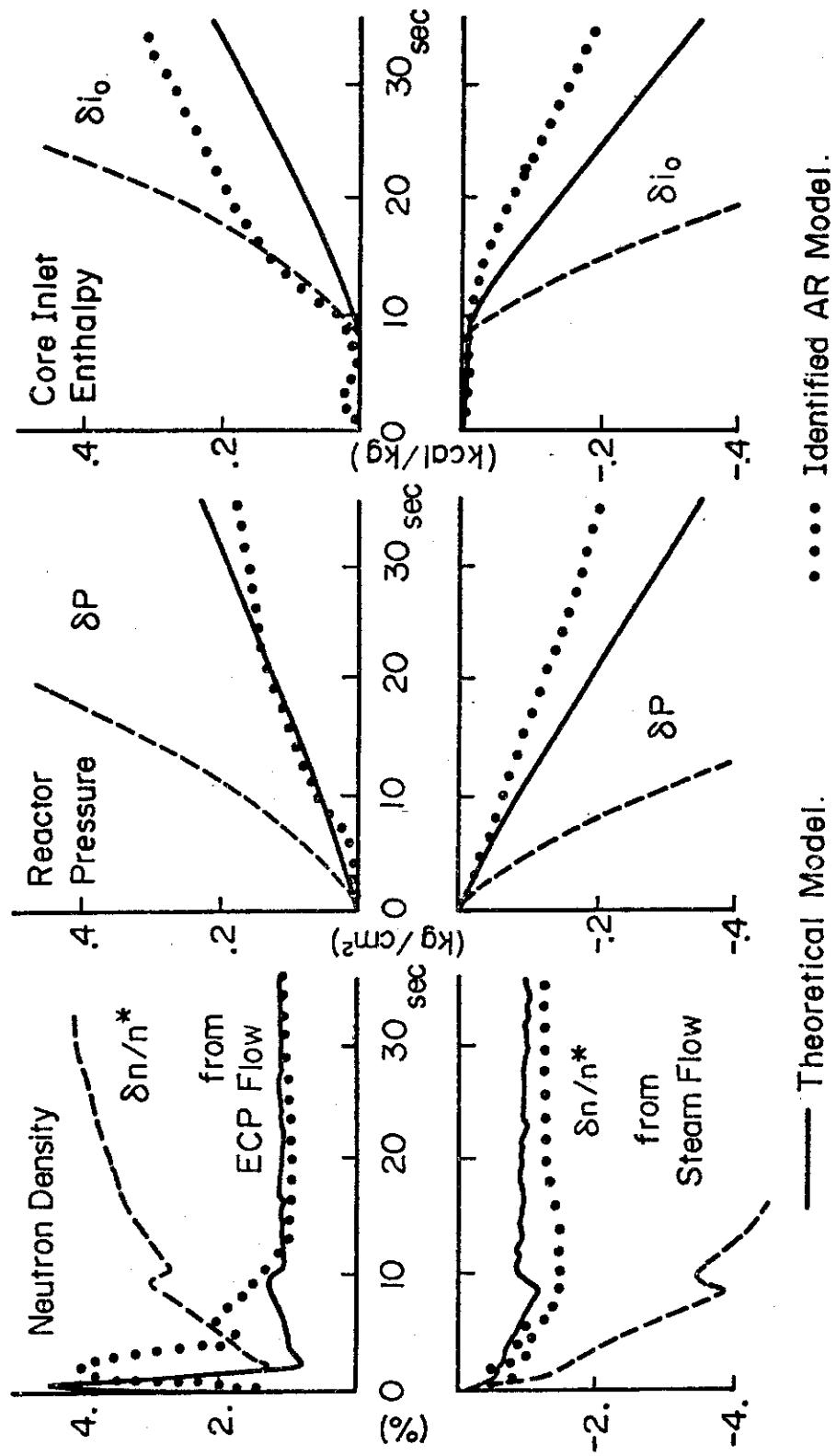


Fig. 33 Comparison between the theoretical model (MMS model) and the experimental model (AR model). The upper part shows the responses to the step change of the FCP flow rate and the lower part the responses to step change of the steam flow rate.

## 6. 同定手法に関する考察

AR モデリング法と、それを用いたJPDR-II動特性の同定結果について述べてきた。この手法は多くの長所を有し実用性が高いことが確認されたが、なおいくつかの点に改良の余地もある。以下ではこれらの問題点を指し、可能な限りその解決のための方策も示すこととする。便宜上、実験手法上の問題点とデータ処理（同定計算）上の問題とに分けて論じるが、実際の改良にあたってはこの両者を総合した観点に立って改良方策を選ぶ必要があることを強調しておきたい。

### 6.1 実験手法の改良

#### 6.1.1 観測変量の選択

システム同定実験に際しては、観測変量の適切な選択が極めて重要であることは先にも述べた。しかしこの選択のための指針は確立されておらず一般的な考察は困難である。ここでは、本同定実験の場合に論点を限定して考察する。

対象の物理的特性を考えると、今回の実験では観測されなかったボイド率は重要な変量である。今回はボイド計の不調のため止むを得ず観測量に入れないので実験を行なっている。この量の重要性は Fig. 3.2 の理論モデルブロック図を参照すればより明らかに知られる。Fig. 3.2 のネットワークは一つの重みつき有向グラフとみなすことが可能である。グラフ理論の術語を用いればボイド率は圧力、燃料温度、沸騰開始点の 3 つの変量に対応する節 (Node) からの有向枝の共通の節になっている。本手法によれば観測変量相互間は伝達特性（すなわち枝の重み）は少なくとも原理的には評価可能であるから、ボイド率が実測されればそれにより同定可能範囲（同定可能なブロックの数）が増すことが期待できる。

沸騰開始点もまた複数個の有向枝と結ばれた共通節となっていることは明らかであろう。しかしながら沸騰開始点は実測が極めて難しい量である。特に過渡現象時の沸騰開始点の実測は事实上不可能と考えられ、関連する伝達特性も直接には推定できないことになる。理論モデルの実験的検証可能性に重きをおいて考えるなら、沸騰開始点なる概念を含まないモデルの方が望ましいといえよう。

#### 6.1.2 観測機構の特性

- ・観測機構の特性としては単に計測器（トランステューサー）の伝達関数だけでなく、解析の行われる計算機に取り込まれるデジタルデータに変換されるまでに受けるすべての歪の付加過程の特性を考えなければならない。これらの過程の特性は、単純化して考えると、信号伝達特性と観測雑音（又は検出器ノイズ）特性とに分けられる。

信号伝達特性については事前にある程度評価されているのが普通であるが、プラントに実装されている状態での動特性を含む測定がなされている例はむしろまれである。最近、運転状態において計測器の動特性を測定する研究が試みられつつあり、<sup>(B)</sup> 近い将来実用化されるものと思われ

るが、現時点では計測器出力が対応する物理量の良い近似になっていると仮定して同定を行わざるを得ない。対象とする周波数領域によってはこの前提が不適当な場合もある。今回の実験における観測データについては、 $\sim 1\text{ Hz}$  以上の領域では観測機構の特性が無視できないものと考えなければならない。

観測雑音の評価に関しても問題が残されている。通常の意味での観測雑音を考えた時の取りあつかいについては多くの研究がなされているが、本報告書でいう観測雑音はやゝ意味が広い。現実のプラントを扱う場合、対象は極めて多くの要因（変量）により影響を受け、かつ非線形、非定常性を有するものであるのが普通である。他方、同定モデルはこの対象に比べればはるかに簡単な数学的形式をとらざるを得ない。これにより、仮に物理的な意味での雑音成分が全く存在しない体系を考えても同定モデルには雑音的成分を含めて扱うことが必要となる。この雑音的成分がシステム雑音として組み込まれるか観測雑音として扱われるかはモデルの構造、プラントの変量間伝達特性、同定実験の条件設定などに強く依存し、一概にはいえないが、ここに述べた理由による“観測雑音”が存在しうること、本報でいう観測雑音はこの意味のものと通常の意味によるものの合成であることを注意しておきたい。

観測雑音の処理法については、一部 6.2 と重複する点もあるが以下に考察を記す。観測雑音は通常の推定理論では次のような形に定式化されて扱われることが多い。

$$\begin{aligned}\mathbf{X}(k+1) &= A \mathbf{X}(k) + B \mathbf{Y}(k) + \mathbf{U}(k), \\ \mathbf{Z}(k) &= C \mathbf{X}(k) + \mathbf{W}(k),\end{aligned}$$

ここで、 $\mathbf{X}(k)$ ,  $\mathbf{Y}(k)$ ,  $\mathbf{U}(k)$  はそれぞれ状態変数、操作量、システム雑音をあらわすベクトル、 $\mathbf{Z}(k)$ ,  $\mathbf{W}(k)$  はそれぞれ観測量、観測雑音をあらわすベクトルである。対象のモデルがこのような形に設定され、かつ観測雑音とシステム雑音とがいくつかの条件を満すのであれば、状態変量の推定に対する観測雑音の効果は実質的に除去できることが知られている。<sup>(14)</sup> しかし、原子炉プラントに対し、上の形のモデルを設定することは多くの場合困難を伴い、かつ雑音成分が必要とされる統計的性質を有しているという保証もない。一方 AR モデルを選んだ場合には、このようにデータ処理の段階で実質的に観測雑音の効果を除くことはできないため実験段階で少くとも通常の意味の観測雑音はできる限り除く努力が必要である。このような実験上の注意を払ってもなおすべての雑音成分の除去はできないが、本研究では外乱印加を行っているため観測量の変化巾が大きくなってしまい、観測雑音の効果が相対的に低減されていることが期待できる。将来、外乱印加をせず、炉雑音のみを解析して同定を行う際には、本研究結果との対比において本節で言及した広義の“観測雑音”的効果がある程度、評価しうると考えている。

## 6.2 データ処理法と可同定性

### 6.2.1 AR 法による可同定法

与えられた多変数時系列データが自己回帰形式によって精度良く近似されるためには種々の条件が満たされている必要がある。一般に、ある実験的手続きをより対象とする系の特性同定が可能であるという時、この対象は定められた実験的手続きを対して同定可能、あるいは可同定性

(Identifiability) をもつ、という。可同定性は対象とするシステム、採用したモデル、実験条件、同定手法（アルゴリズム）のいずれにも支配される上、"同定がなされた" という表現自体、対応する状態の数学的記述は一義的ではなく統一的理論は困難である。<sup>(15)</sup> 以下の議論は、対象として BWR プラント、実験法としてフィードバック制御切離し状態における MLBS（2 操作端より）印加、モデルとして AR モデル、同定手法として FPE 最小化原理に基づく Yule-Walker 方程式求解法をとりあげた場合に限定して行なう。

まず、AR 法が適用されるための大前提として、時系列が正規雑音源により駆動される線形定常不規則過程の出力であることが挙げられる。本研究も含め従来の解析例ではこの点についての事前検討なしに手法の適用がなされていることが多いが、本来は各種の検定<sup>(16)</sup> を行なうなどの配慮が必要であろう。

この他に重要な条件としては、3. および 6. に述べた内容と一部重複するが、次の各項があげられる。

- i) 操作変量、観測変量の選択の適正さ。
- ii) データ取得条件および前処理の妥当性、
- iii) システムおよび雑音源の特性の十分性。

これら各項は本質的要請であり、それゆえに実験条件設定の際もデータ処理条件設定の際も充分に注意すべき事項である。

i) については、変量  $x_i(k)$  が他の変量  $x_j(k)$  ( $j \neq i$ ) の代数的線形結合となる事態を避けるべきであることを既に述べた。実験条件設定段階でこの点に配慮がなされたとしても、データ処理条件（サンプリング時間）、フィルタの遮断周波数など）が不適切であれば上記の様な条件が生じうる。それゆえ、厳密には、実際に AR モデル同定に用いられる時系列データにつき、この点について検定を行なっておくべきである。この問題点は前掲条件 i) のみならず ii) にもかかわっている。

i) に関する他の問題点として、複数個の変量の時間的特性が大きく異なる場合に物理的に解釈のつかない同定結果が得られてしまうという経験的事実を指摘できる。

たとえば、中性子束と炉圧力の組合せを考えるとこの二つの量の動特性の時間スケールには大きな差異がある。このような時、二つの量のそれぞれの振舞を精度良く記述する AR モデルを同定することはしばしば困難となり、いずれか一方の変量の推定精度が犠牲にされるような事態が生じている。これは経験的知見にはすぎないが直観的にも首肯しうる傾向であり、AR モデル同定法を多変数時系列に適用する際の留意点として挙げておく。

ii) に関して最大の問題は観測雑音の寄与が近似的には無視できることを前提にしている。逆にいうと、測定される変量ゆらぎはすべてシステム外乱源と変量相互間の伝達特性として解釈されてしまうため、観測雑音の効果があれば誤った伝達特性を同定する可能性が強い。<sup>(1)</sup> 実験方法の決定に際してなるべく観測雑音を低減させる様な措置をとることはもちろん必要であるが、データ処理方式にしても今後何らかの手段を工夫することが必要となろう。ただし、本実験結果に限っていえば、前節に述べた理由により～1 Hz 以下の周波数領域において観測雑音の影響は無視できるものと考えてよい。

iii) の条件はより正確には、(a)システム外乱（励起入力）とシステム特性との相互関係の十分

性, と(b)システム特性の満たすべき条件, とに分けられる。(a)に関しては, 入力信号が同定すべき系の伝達特性が有意である周波数領域に比して広い範囲にわたり雑音レベルより高いパワーを有していることが望まれる。各入力の統計的独立性もまた要求される。外的入力の印加が許される場合は, この条件は入力設計問題となるが, 系固有のゆらぎを利用した同定においてはこの点について検討がなされねばならない。

(b)ではARモデルリング法を用いる際に常に伴う問題であるところの有限次数AR表現の適用性に注意する必要がある。一般の定常時系列はARMAモデルによれば, 線形系において妥当な記述が得られることが知られているが, ARモデルを用いる場合この保証はない。

対象とする系が移動平均形モデルで表わされる場合にこの系がARモデルでも表現されるためには, 移動平均係数が Invertibility<sup>(16)</sup> なる条件を満たすことが要求される。Invertibility が保証されたとしても, 実用的にはARモデルの次数はなるべく少ないことが望まれるゆえ Invertibility は最低限の必要条件と考えるべきである。この点についても本来は, 手法適用に先立って吟味を行うべきであろう。しかし本研究では採用したFPEによる次数決定法では考察する次数を20まで評価しており, この次数内でFPEの最小値が表われており, この問題は実質的に回避できている。この意味でもFPE最小化原理に基づく本手法の有効性は顕著であり実用性が高いといえる。

### 6.2.2 FPE最小化に関する付記

FPE最小化原理を用いたARモデルリング法は, 以上に示したように実用性の高いものであるが, その適用, あるいは結果の解釈において不適切な適用事例も若干ある<sup>(17)</sup>ことから, 以下に注意点を記しておく。

FPE最小という意味でのAR次数の“最適”決定においては, 与えられた観測データの組に対しての“最適”な次数が定められるのである。ここで“最適”とはそのモデルを用いて同定計算に使用した時系列データを生成した確率過程から別の時系列サンプルを抽出したとし, このサンプルデータの予測に同定モデルを用いた時に one step prediction error の期待値が最小になるという意味であった。それゆえ, もしも観測データ(サンプル数)が有限であればモデルの回帰次数を多く選び, それぞれを通常の最小自乗法の意味で最良に調整したとしても, 上記の意味で最適なモデルとはなりえない。データ数, 回帰次数(モデルパラメータ数), 予測精度の間にはある相互関係が成立している。FPE法は, この相互関係の考察から導かれた, データの有限性を考慮に入れた最適予測モデルの次数決定法と解釈されるべきである。したがって, 結果的に得られる最適次数に, システム論的意味での次数との対応関係を期待することは無理である。このような意味の次数決定は将来の別種のモデリング法の発展に待つべきであると考える。

## 7. 結 論

原子炉プラントの動特性を実験的に定める方法、いわゆる同定手法の確立を目的として、多変量自己回帰モデルの適用性に関する実験的吟味を行なった。具体的にはJPDR-IIにおいて外乱印加実験を行い、得られた時系列データを上記モデルにあてはめることにより動特性の数学的モデルを求めた。このモデル決定ならびにモデルを用いた解析の結果、次の結論が得られた。

- 1) 推定残差、残差時系列の周波数スペクトルなどの検討結果は、同定モデルが信頼性の高いものであることを示している。
- 2) 非定常性の強い時系列データからも、概ね同様の同定結果が得られていることから、本手法は実用の際の頑健性（robustness）に富むものと考えられる。
- 3) 同定計算は対話形式プログラム DYSAC により能率的に行え、統計的検定に際して生じがちな実験者の主観的判断による誤まりを含まない。
- 4) 理論モデルとの比較から、理論モデルに含まれる不確定パラメータの推定を行うことができた。本手法は理論モデルの吟味、改良に関し、在来の実験的諸手法に比べてより有効な手段を与えるものと考える。
- 5) 本報に述べた結果を得るために実験時間は約 30 分であった。結果として行なわれた解析の多様さにかんがみ、本手法は所要時間の上でも能率の高いものといえよう。

本研究では同定精度を高めることを目的として、対象プラントに外的入力による励起を与え実験を行なった。

しかし本手法は原理的にはプラントのシステムノイズのみに着目しても適用可能である。このことを上記の手法の長所と考え合わせれば、本手法は単なる動特性同定のみならず、状態監視、異常早期検出など原子炉プラントの診断技術への応用にも有用な手段として利用できるであろう。

## 謝 辞

本研究を遂行するにあたり、原子炉制御研究室、原昌雄室長には多くの御指唆と御指導をいただきました。また原子炉制御研究室、藤井義雄氏には実験データ採取に際し増巾器、レコーダなどの配備、調整、採録などを担当していただき、この実験の成功に多大の貢献をされております。さらに同研究室の渡辺光一氏、臼井甫積氏にはデータ処理に関して多くの御協力をいただきました。

本実験をJPDRにおいて行うにあたり、JPDR開発室長、石塚信氏には多大の御援助をいただきました。またJPDR出力上昇テストグループの動特性関係担当のメンバーには実験の遂行に御助力をいただきました。原子炉1課の運転担当の方々には、特殊な外乱、M系列信号の挿入にあたり、非常な苦労をいとわず、遂行していただき、運転班の方々の協力なくしては本実験の成功はなかったことと思います。

## 7. 結 論

原子炉プラントの動特性を実験的に定める方法、いわゆる同定手法の確立を目的として、多変量自己回帰モデルの適用性に関する実験的吟味を行なった。具体的にはJPDR-IIにおいて外乱印加実験を行い、得られた時系列データを上記モデルにあてはめることにより動特性の数学的モデルを求めた。このモデル決定ならびにモデルを用いた解析の結果、次の結論が得られた。

- 1) 推定残差、残差時系列の周波数スペクトルなどの検討結果は、同定モデルが信頼性の高いものであることを示している。
- 2) 非定常性の強い時系列データからも、概ね同様の同定結果が得られていることから、本手法は実用の際の頑健性(robustness)に富むものと考えられる。
- 3) 同定計算は対話形式プログラムDYSACにより能率的に行え、統計的検定に際して生じがちな実験者の主観的判断による誤まりを含まない。
- 4) 理論モデルとの比較から、理論モデルに含まれる不確定パラメータの推定を行うことができた。本手法は理論モデルの吟味、改良に関し、在来の実験的諸手法に比べてより有効な手段を与えるものと考える。
- 5) 本報に述べた結果を得るために実験時間は約30分であった。結果として行なわれた解析の多様さにかんがみ、本手法は所要時間の上でも能率の高いものといえよう。

本研究では同定精度を高めることを目的として、対象プラントに外的入力による励起を与え実験を行なった。

しかし本手法は原理的にはプラントのシステムノイズのみに着目しても適用可能である。このことを上記の手法の長所と考え合わせれば、本手法は単なる動特性同定のみならず、状態監視、異常早期検出など原子炉プラントの診断技術への応用にも有用な手段として利用できるであろう。

## 謝 辞

本研究を遂行するにあたり、原子炉制御研究室、原昌雄室長には多くの御指唆と御指導をいただきました。また原子炉制御研究室、藤井義雄氏には実験データ採取に際し増巾器、レコーダなどの配備、調整、採録などを担当していただき、この実験の成功に多大の貢献をされております。さらに同研究室の渡辺光一氏、臼井甫積氏にはデータ処理に関して多くの御協力をいただきました。

本実験をJPDRにおいて行うにあたり、JPDR開発室長、石塚信氏には多大の御援助をいただきました。またJPDR出力上昇テストグループの動特性関係担当のメンバーには実験の遂行に御助力をいただきました。原子炉1号機の運転担当の方々には、特殊な外乱、M系列信号の挿入にあたり、非常な苦労をいとわず、遂行していただき、運転班の方々の協力なくしては本実験の成功はなかったことと思います。

M系列信号挿入によるプラント応答のシミュレーションにはJPDR開発室、横林正雄氏に計算をしていただきました。

以上の皆様に深く感謝いたします。

## 参考文献

- (1) 赤池弘次, 中川東一郎, ダイナミックシステムの統計的解析と制御, サイエンス社, 東京
- (2) Otomo T., Nakagawa T. and Akaike H. "Statistical Approach to Computer Control of Cement Rotary Kilns", *Automatica*, 8, pp.35 (1972)
- (3) Jones R.H., "Identification and Autoregressive Spectrum Estimation", *IEEE Trans. Automat. Contr.*, AC-19, pp. 894 (1974)
- (4) 尾熊律雄, 藤井義雄, 昭和 50 年日本原子力学会炉物理炉工学分科会 C 31
- (5) Fukunishi K. "Diagnostic Analysis of a Nuclear Power Plant Using Multivariate Autoregressive Processes", *Nucl. Sci. and Eng.*, 62, pp. 215 (1977)
- (6) 尾熊律雄, 藤井義雄, 渡辺光一 "自己回帰モデリングに基づく多変数システムの同定と動特性解析コード, DYSAC", JAERI-M 6897 (1977)
- (7) 黒田義輝, 他 "原子炉診断技術の現状" (解説) 日本原子力学会誌, 15(12), PP. 792 (1973)
- (8) Steffy R.C., "Frequency Response Testing of the Molten-Salt Reactor Experiment", ORNL-TM-2823 (1973)
- (9) Buckner M.R. and Kerlin T.W. "Optimum Binary Signals for Reactor Frequency Response Measurements", *Nucl. Sci. and Eng.*, 49, pp. 255 (1972)
- (10) 松原邦彦, 佐藤一男, 辻本巖 "BWR プラントの動特性および事故解析用コード, JPDYN - 2 M" JAERI-M 4613 (1971)
- (11) 横林正雄, 石塚信 "BWR 動特性解析コード JPDYN- 4" 内部メモ (JPDR開発室) (1973)
- (12) Miida J. and Suda N. "Derivation of Transfer Functions of Natural Circulation Boiling Water Reactor", JAERI 1044 (1963)
- (13) Benkert J., Mica C., Raes K.H. and Stageman D. "Determination of Thermocouple Transfer Functions and Fluid Flow Velocities by Temperature-Noise Measurements in Liquid Sodium" Proc. of 2nd Specialist's Meeting on Reactor Noise, Pergamon Press (1977)  
(to be published)

M系列信号挿入によるプラント応答のシミュレーションにはJPDR開発室、横林正雄氏に計算をしていただきました。

以上の皆様に深く感謝いたします。

## 参考文献

- (1) 赤池弘次、中川東一郎、ダイナミックシステムの統計的解析と制御、サイエンス社、東京
- (2) Otomo T., Nakagawa T. and Akaike H. "Statistical Approach to Computer Control of Cement Rotary Kilns", *Automatica*, 8, pp.35 (1972)
- (3) Jones R.H., "Identification and Autoregressive Spectrum Estimation", *IEEE Trans. Automat. Contr.*, AC-19, pp. 894 (1974)
- (4) 尾熊律雄、藤井義雄、昭和 50 年日本原子力学会炉物理炉工学分科会 C 31
- (5) Fukunishi K. "Diagnostic Analysis of a Nuclear Power Plant Using Multivariate Autoregressive Processes", *Nucl. Sci. and Eng.*, 62, pp. 215 (1977)
- (6) 尾熊律雄、藤井義雄、渡辺光一 "自己回帰モデリングに基づく多変数システムの同定と動特性解析コード, DYSAC", JAERI-M 6897 (1977)
- (7) 黒田義輝、他 "原子炉診断技術の現状" (解説) 日本原子力学会誌, 15(12), PP. 792 (1973)
- (8) Steffy R.C., "Frequency Response Testing of the Molten-Salt Reactor Experiment", ORNL-TM-2823 (1973)
- (9) Buckner M.R. and Kerlin T.W. "Optimum Binary Signals for Reactor Frequency Response Measurements", *Nucl. Sci. and Eng.*, 49, pp. 255 (1972)
- (10) 松原邦彦、佐藤一男、辻本巖 "BWR プラントの動特性および事故解析用コード, JPDYN - 2 M" JAERI-M 4613 (1971)
- (11) 横林正雄、石塚信 "BWR 動特性解析コード JPDYN- 4" 内部メモ (JPDR開発室) (1973)
- (12) Miida J. and Suda N. "Derivation of Transfer Functions of Natural Circulation Boiling Water Reactor", JAERI 1044 (1963)
- (13) Benkert J., Mica C., Raes K.H. and Stageman D. "Determination of Thermocouple Transfer Functions and Fluid Flow Velocities by Temperature-Noise Measurements in Liquid Sodium" Proc. of 2nd Specialist's Meeting on Reactor Noise, Pergamon Press (1977)  
(to be published)

- (14) 有本卓, "カルマンフィルター" システムサイエンスシリーズ, 産業図書(東京)  
(1977)
- (15) Gustavisson I., Ljung L. and Soderstrom T. "Identification of Processes in Closed Loop — Identifiability and Accuracy Aspects — ", Automatica, 13, pp. 59 (1977)
- (16) Box G.E.P. and Jenkins G.M. "Time Series Analysis, Forecasting and Control" Holden-Day, San Francisco (1970)
- (17) Allen J.W. "The Autoregressive Time-Series Model for Analysis of a Noisy Signal", Proc. of 2nd Specialist's Meeting on Reactor Noise, Pergamon Press (1977) (to be published)

## 付 錄

修正三井田-須田モデル(MMSモデル)  
の伝達関数およびパラメータ値

修正三井田-須田モデル(MMSモデル)の伝達関数およびパラメータ値

修正三井田-須田モデルによる伝達関数を表にして示すと共に5章で取り扱った原子炉圧力の動特性パラメータのうち、原子炉内の水量に關係した部分を説明しておく。

## 1. 伝達関数の表

Table A.1 に示す。伝達関数は三井田-須田モデルに基づき、強制循環BWR用に修正を加えたものである。また  $G_R$ ,  $G_f$ などについても群数をふやしてある。Symbol は Fig. 32 のブロックダイヤグラム中のものと対応がついている。この表中に表われるパラメータの数値は後節に記されている。

## 2. 原子炉圧力容器圧力動特性と飽和水量

圧力動特性について詳細な記述をしておき5章の議論に役立てる。

理論モデルで使われている圧力動特性方程式は

$$(H_{pr} s + H'_{pr}) \delta p = (z_2 - z_1) \delta Q - \Delta i \delta W_L \\ + \frac{V_w}{\Delta v} \Delta i \delta W_f - Q^* \delta z_1 \quad (A.1)$$

ここに

$$H_{pr} = M_s^* \left( \frac{\partial i_{ss}}{\partial p} - \frac{\Delta i}{\Delta v} \frac{\partial v_s}{\partial p} \right) + M_w^* \left( \frac{\partial i_w}{\partial p} - \frac{\Delta i}{\Delta v} \frac{\partial v_w}{\partial p} \right) \\ - \frac{V_{sat}}{J} + H_{prr} \quad (A.2)$$

(A.1) 式の右辺は与えられた領域への熱エネルギーの流入と流出のバランスを表わし、左辺はその領域内の内部エネルギーと機械的エネルギーを表わす。圧力変化は流入する熱エネルギーを(内部エネルギー+機械エネルギー)が吸収することができるようになる。したがって領域内の飽和水の量が多ければそれだけ圧力変化は少なくてすむ。式中の記号でみれば、 $H_{pr}$  が大きければ圧力変化  $\delta P$  は小さくおさえられる。

$H_{pr}$  の値を定めている量は水の物性値の他に  $M_s^*$ ,  $M_w^*$  など飽和水または蒸気の量がある。このうち最も支配的なものは飽和水量  $M_w^*$  である。原子炉内の飽和水量は、圧力容器の構造上から計算されるが、炉心の外側に停留していると考えられるいわゆる死水の領域があるがこの水は三井田-須田モデルの考え方から見れば、ごくわずかサブクールされていると考え、飽和水量の中には含められていなかった。これを含めるべきか否かは、議論のわかれるところであったが、本文

に取り扱われた同定の結果と比較すると、この死水を  $M_w^*$  の中に含めて得られる  $H_{pr}$  を用いた理論モデルの計算によく合うことが確かめられた。同定結果に近づけるために修正可能なパラメータは  $M_w^*$  以外に見出すことはできなかった。

3. 理論モデル伝達関数に使われているパラメータの数値 (JPDR-II 43.7 MWt, 炉心流量 92.5%, 炉圧力 61.5 Kg/cm<sup>2</sup>g の場合)

<u>Symbol</u>	<u>Description</u>	<u>Numerical Value</u>	<u>Unit</u>
$a_1$	$=(v_s/\Delta v)\tau_{12}V_o^*A_{co}$	$5.10 \times 10^5$	cm <sup>3</sup>
$a_3$	$=(v_s/\Delta v)A_{co}(1-y_2)/y_2$	$-2.39 \times 10^3$	cm <sup>2</sup>
$a_4$	constant determined with $a_1$ , $i_s$ , $i_w$ , $v_s$ , $v_w$ and $y_2$	$-2.71 \times 10^4$	cm <sup>5</sup> /kg
$A_{co}$	flow area of core	83.27	cm <sup>2</sup>
$b_1$	$=(y_2-1)/(y_2 \ln y_2)$	0.793	-
$c_4$	constant determined with $a_1$ , $i_s$ , $i_w$ , $v_s$ , $v_w$ and $y_2$	$2.56 \times 10^4$	cm <sup>5</sup> /kg
$H'_{pr}$	$=(\Delta i/\Delta v)V_o^*\frac{1}{\partial \Delta i} \frac{\partial \Delta i}{\partial p}(y_2-1)$ (ignored as it is so small)		
$H'_{prr}$	constant determined with $i_s$ , $i_w$ , $v_s$ , $v_w$ , $z_3-z_2$ , $V_o^*$ and flow area of riser		
$i_s$	enthalpy of saturated steam	665.	kcal/kg
$i_w$	enthalpy of saturated water	292.	"
$\Delta i$	$=i_s - i_w$	373.	"
$\delta i_o$	core inlet enthalpy	(variable)	"
$J$	mechanical equivalent of heat	$4.27 \times 10^4$	kg·cm/kcal
$\delta k$	reactivity change	(variable)	
$M_s, M_w$	saturated steam and water mass in vessel (excluding core and riser in the original model)		kg
$n$	neutron density		cm <sup>-3</sup>
$\delta p$	pressure change	(variable)	
$K_8$	$=(\tau_e/\tau_{o1})(\Delta v/\Delta i)(\partial i_w/\partial p)/v_w$	0.325	cm <sup>2</sup> /kg
$\hat{K}_8$	$=(\partial v_w/\partial p)/v_w$	$2.42 \times 10^{-3}$	"

<u>Symbol</u>	<u>Description</u>	<u>Numerical Value</u>	<u>Unit</u>
Q	heat flux per unit length, $Q^*=73.3$		kcal/sec·cm
$T_1$	time constant	0.1925	sec
$T_3$	"	0.3316	"
$R_i$	constants	0.8774, 0.1000, 0.02226	-
$V_o$	inlet water velocity, $V_o^*=169.$		cm/sec
$V_{sat}$	saturated steam and water volume		cm <sup>3</sup>
$V_{sub}$	subcooled water volume	$1.16 \times 10^7$	"
$\delta V$	void volume change		"
v	inverse of density per unit length		cm/kg
$\Delta v$	$=v_s - v_w$		"
$T_4$	time constant	0.307	sec
$W_o$	water flow at core inlet, $W_o^*=766.13$		kg/sec
$W_R$	recirculation flow	$W_R^*=747.$	"
$W_L$	steam flow		"
$y_2$	$= 1 + (z_2 - z_1) / (\tau_e V_o^*)$	1.62	-
z	position in axial direction		cm
$\tau_d$	transport time from feedwater inlet to core inlet		
		8.1	sec
$\tau_e$	$=\Delta i/Q^*\Delta v$	1.0	"
$\tau_{01}$	$=(z_1 - z_0) / V_o^*$	0.248	"
$\tau_{12}$	$=\tau_e \ln y_2$ : void transit time	0.483	"
$\tau_i$	time constants of fuel rod	5.952, 1.068, 0.4112	"
Subscript : 0 core inlet, 1 boiling boundary,			
	2 top of core		
superscript : * steady state value			

Table A.1 Transfer functions

Symbol	Output Input	Transfer Function	Symbol	Output Input	Transfer Function
$G_R$	$\frac{\delta n/n^*}{\delta k/\beta}$	$1/s \left\{ \frac{\lambda}{\beta} + \sum_{i=1}^6 \frac{b_i/\beta}{s+\lambda_i} \right\}$	$G_8$	$\frac{\delta z_1}{\delta p}$	$(z_1 - z_0) K_8 - \frac{K'_8}{1+(2/\pi)\tau_{01}s}$
$G_F$	$\frac{\delta Q/Q^*}{\delta n/n^*}$	$\sum_{i=1}^3 \frac{R_i}{1+\tau_i s}$	$G_{16}$	$\frac{\delta p}{\delta w_L}$	$-\Delta i / (H_{prs} + H'_{pr})$
$G_1$	$\frac{\delta V}{\delta Q/Q^*}$	$a_1 \frac{(1-b_1)}{1+\tau_1 s}$	$G_{18}$	$\frac{\delta p}{\delta Q/Q^*}$	$(z_2 - z_1) Q^* / (H_{prs} + H'_{pr})$
$G_2$	$\frac{\delta V}{\delta V_0/V^*}$	$(= -G_1)$	$G_{19}$	$\frac{\delta p}{\delta z_1}$	$-Q^* / (H_{prs} + H'_{pr})$
$G_3$	$\frac{\delta V}{\delta z_1}$	$\frac{a_3}{1+\tau_3 s}$	$G_{21}$	$\frac{\delta i_0}{\delta w_R}$	$\frac{w_f^*}{w_0^*} \frac{i_w - i_f}{w_R - w_f^*} e^{-\tau_d s}$
$G_4$	$\frac{\delta V}{\delta p}$	$a_4 + \frac{c_4}{1+(2/\pi)\tau_{12}s}$	$G_{23}$	$\frac{\delta i_0}{\delta p}$	$\frac{w_R^*}{w_0^*} \frac{\partial i_w}{\partial p} e^{-\tau_d s} + \frac{1}{w_0^*} \frac{v_{sub}}{J} s$
$G_5$	$\frac{\delta z_1}{\delta Q/Q^*}$	$\frac{-(z_1 - z_0)}{1+(2/\pi)\tau_{01}s}$	$G_{26}$	$\frac{\delta w_R}{\delta v_0/v_0^*}$	$v_0^*/v_w$
$G_6$	$\frac{\delta z_1}{\delta V_0/V_0^*}$	$(= -G)$	$G_{27}$	$\frac{\delta w_R}{\delta p}$	$-\frac{v_0^*}{v_w^2} \frac{\partial v_w}{\partial p} - \frac{M_{sub}}{v_{sub}} \frac{\partial v_{sub}}{\partial p} s$
$G_7$	$\frac{\delta z_1}{\delta i_0}$	$-(z_1 - z_0) \frac{\rho_w}{\tau_{01}Q^*} e^{-\tau_{01}s}$			