

高速実験炉「常陽」性能試験報告書

パイロシレータ試験 (NT-61)

1979年10月

動力炉・核燃料開発事業団

高速実験炉「常陽」性能試験報告書

バイオリシレータ試験 (NT-61)

三田 敏男* 牧戸 正紀**
 大谷 秀二* 佐野 健**
 網島 幹泰* 村松 暁*
 山本 秀*

要 旨

高速実験炉「常陽」の動特性試験の一環としてバイオリシレータ試験を行った。本試験では、零出力から約 60 MW までの出力上昇の各段階において、バイオリシレータ装置により正弦波状反応度変化を与え、中性子束、燃料出口温度、原子炉出口温度等の応答から伝達関数を求めた。測定周波数範囲は、0.001 Hz から 3 Hz である。

主な試験結果は、以下の通りである。

- (1) 零出力伝達関数は、測定値と計算値がよく一致した。
- (2) 高出力伝達関数測定結果から、原子炉は大きな負のフィードバック効果のため、安定であることが確認できた。
- (3) フィードバック伝達関数および中性子束と燃料出口温度の伝達関数は、ほぼ同じ時定数(約 3 秒)をもつ 1 次遅れで近似できる。
- (4) 2 次系の温度制御系の効果は、今回の測定 (反応度幅約 7%) では 0.001 Hz 付近の低周波領域のみに限られた。
- (5) 中心燃料集合体出口温度計 (熱電対) の時定数は、約 32 秒である。

* 大洗工学センター 高速実験炉部 技術課
 ** 現在 三菱電機 (株) 中央研究所

複製又はこの資料の入手については、下記にお問い合わせ下さい。

〒311-13 茨城県東茨城郡大洗町成田町4002
 動力炉・核燃料開発事業団 大洗工学センター
 システム開発推進部 技術管理室

Inquiries about copyright and reproduction should be addressed to:
 Technology Management Section, O-ara! Engineering Center, Power Reactor
 and Nuclear Fuel Development Corporation 4002, Narita O-ara!-machi Higashi-
 Ibaraki-gun, Ibaraki, 311-14, Japan

動力炉・核燃料開発事業団 (Power Reactor and Nuclear Fuel Development
 Corporation)

目 次

1. まえがき	1
2. 系統設備の概要	2
2.1 炉心特性 (設計値)	2
2.2 プラント制御系	2
2.3 中性子計装設備	3
2.4 プロセス計装設備	3
3. 試験の方法	7
3.1 正位渡反応度変化測定	7
3.2 伝達関数測定	7
4. 試験結果	16
4.1 正位渡反応度変化測定結果	16
4.2 伝達関数測定結果	16
5. 検 討	34
6. 結 言	38
7. 謝 辞	39
8. 添付資料	40
8.1 試験装置の概要	40
8.2 データ処理法の概要	42
8.3 零出力原子炉の伝達関数の計算	44
8.4 炉心フィードバック伝達関数の計算	45

Oct., 1979

"JOYO" Start-Up Test Report

Pile Oscillator Tests (NT-61)

Toshio Sanda*, Masanori Makito**, Hideji Otani*
 Kenichi Sano*, Mikiyasu Teunashima*,
 Toshiharu Muramatsu*, Hisashi Yamamoto*

Abstract

As a part of dynamics tests in the experimental fast breeder reactor "JOYO", pile oscillator tests were carried out.

At some power levels, from zero power to about 50 MW, the transfer functions between sinusoidal reactivity change with a pile oscillator equipment and the response of the neutron flux, the outlet temperatures of fuel assemblies, reactor outlet temperatures and etc., were measured. Measurements were made in the range from 0.001 Hz to 3Hz.

Major results are as follows.

- (1) The agreement between the measured and calculated zero-power transfer function was satisfactory.
- (2) By the measurements of the at-power frequency responses, the stability of JOYO was confirmed and the large and negative feedback effects were observed.
- (3) The feedback transfer function and the transfer function between the flux and the response of the outlet temperature of the center fuel assembly are approximately expressed by a first-order lag with the same time constant (about 3 seconds).
- (4) In those measurements, in which the reactivity change inserted in the reactor was about 7 ϕ (peak-to-peak), the effect of the coolant temperature controller in the secondary cooling loop was reflected only in so far as the measurements were made at so low frequency, around 0.001 Hz.
- (5) The time constant of the thermocouple of the center fuel assembly was about 3.2 seconds.

* Reactor Technology Section, Experimental Fast Reactor Division,
 O-arai Engineering Center, PNC.

** Mitsubishi Electric Corp. Central Research Laboratory.

1. ま え が き

高速実験炉「常陽」の性能試験において、動特性試験の一環としてバイオルシレータ試験を行った。バイオルシレータ法は、炉心内に正弦波状反応度外乱を与えて、これに対する中性子束、温度流量信号等の応答から伝達関数を求める一手法であり、試験装置は大きかりになるが、極めて精度のよい測定方法である。

本試験では、原子炉の露出力伝達関数および高出力フィードバック伝達関数を測定して原子炉が安定であることを確認し、また各種伝達関数よりプラントの特性を把握することを目的としている。このため、本試験時には、中性子束、燃料出口 Na 温度、原子炉出入口 Na 温度等の炉心回りの信号ばかりでなく、主中間熱交換器 2 次側出入口 Na 温度、主冷却器出入口 Na 温度、主冷却器出口空気温度等の 2 次系回りの信号まで測定対象とした。

本報告書は、下記に記す炉心回りの信号の解析結果についてまとめたものである。

- (1) 中性子束 (ch 9)
- (2) 中心燃料出口温度計 (熱電対)
- (3) 同上 (流量計温度信号)
- (4) 原子炉出口温度計

今後、更に解析を進め、また合せて行った炉雑音測定結果とも比較検討して、総合的にプラントの性能を評価してゆく予定である。

2. 系統設備の概要

2.1 炉心特性 (設計値)

- 1) 核特性
- 炉心中性子束 (50 MW時最大) 1.9×10^{15} n/v
 - 助特性パラメータ

	制御棒引抜時	制御棒5本挿入時
即発中性子寿命 λ_p (sec)	2.804×10^{-7}	1.936×10^{-7}
遅発中性子割合 β_{eff}	5.007×10^{-3}	4.963×10^{-3}
β_{eff} / λ_p (sec ⁻¹)	1.79×10^4	2.56×10^4
◦ 制御棒特性		
制御棒反応度幅値 (1本)		$1.4 \% \Delta K / K$ 以上
反応度付加率		$0.015 \% \Delta K / K / \text{sec}$ 以下
全制御棒反応度		$8.4 \% \Delta K / K$ 以上
2) 熱特性 (最大出力時)		
◦ 原子炉熱出力		50 MW
◦ 出力密度 (最大)		$370 \text{ kW} / \text{m}^2$
◦ 1次冷却材流量		$2,200 \text{ t} / \text{h}$
◦ 冷却材温度	原子炉入口/出口	$370 / 435 \text{ }^\circ\text{C}$

2.2 プラント制御系

「常置」には炉を安全に運転するために、下記の2種類よりなるプラント制御系が設けられている。

- (1) 出力制御系 (2) 冷却材温度制御系
- プラント制御系の概略図を Fig. 2.1 に示す。
- 出力制御系は、手動の制御棒操作により原子炉で発生する熱出力を制御し、プラントの一部に異常が認められた場合には原子炉保護系より信号を受けて、外乱に応じてスクラムまたは制御棒一斉挿入を行い、原子炉の安全性を確保する系統である。この制御棒は、安全棒4本と調整棒2本から構成されており、いずれも等量のB₄C吸収体を内蔵している。

冷却材温度制御系は、4基の主冷却器の冷却空気流量を制御して、各主冷却器ナトリウムおよび空気出口温度を以下の運転基準のもとで、プラント全体のヒートバランスより決定される設定値に保つ機能を有する。

高速実験炉の運転に関する基準は下記の通りである。

- (1) 原子炉出力は制御棒の手動調整により制御する。
- (2) 冷却材流量は1次系、2次系共原子炉出力によらず一定とする。
- (3) 冷却材温度は、原子炉入口温度を原子炉出力によらず一定とする。
- 上記冷却材温度制御のための冷却空気流量制御は、主冷却器の空気入口ダンパと主送風器のインレットベーンの開閉を組合せることにより行う。出力レベルが10 MW以下では、自然通風により入口ダンパ、インレットベーンにより制御し、10 MW以上では、強制通風により入口ダンパはほぼ全開で固定されてインレットベーンにより制御する。

2.3 中性子計装設備

中性子計装設備は、起動系、中間系、線形出力系の3系統から成り、安全確保のためそれぞれ2または3の計測系で構成されている。起動系、中間系は核分裂計数管で、線形出力系は、7線補償型電離箱 (CIC) である。Fig. 2.2 に中性子計装設備の配置を示す。出力上昇試験時には、特設の計装設備として ch. 9 の位置にCIC系を設置する。

2.4 プロセス計装設備

プロセス計装設備は、冷却材ナトリウムの温度、圧力、流量、液位およびナトリウム漏洩などを検出して原子炉冷却系統施設を制御する一方、プロセス量の異常を検知してトリップ信号を発生し、原子炉保護回路に伝え、原子炉の安全動作を行わせ、安全運転を確保する設備である。プロセス計装設備は、(1) 1次冷却系計装設備、(2) 2次冷却系計装設備および(3) 燃料集合体出口温度計装設備よりなり、主要な信号は中央制御室に集中配置されている。

本試験には、これらの主要なプロセス量を入力信号として使用する。Fig. 2.3 に冷却系のブロック図と主要なプロセス量検出器配置を示す。

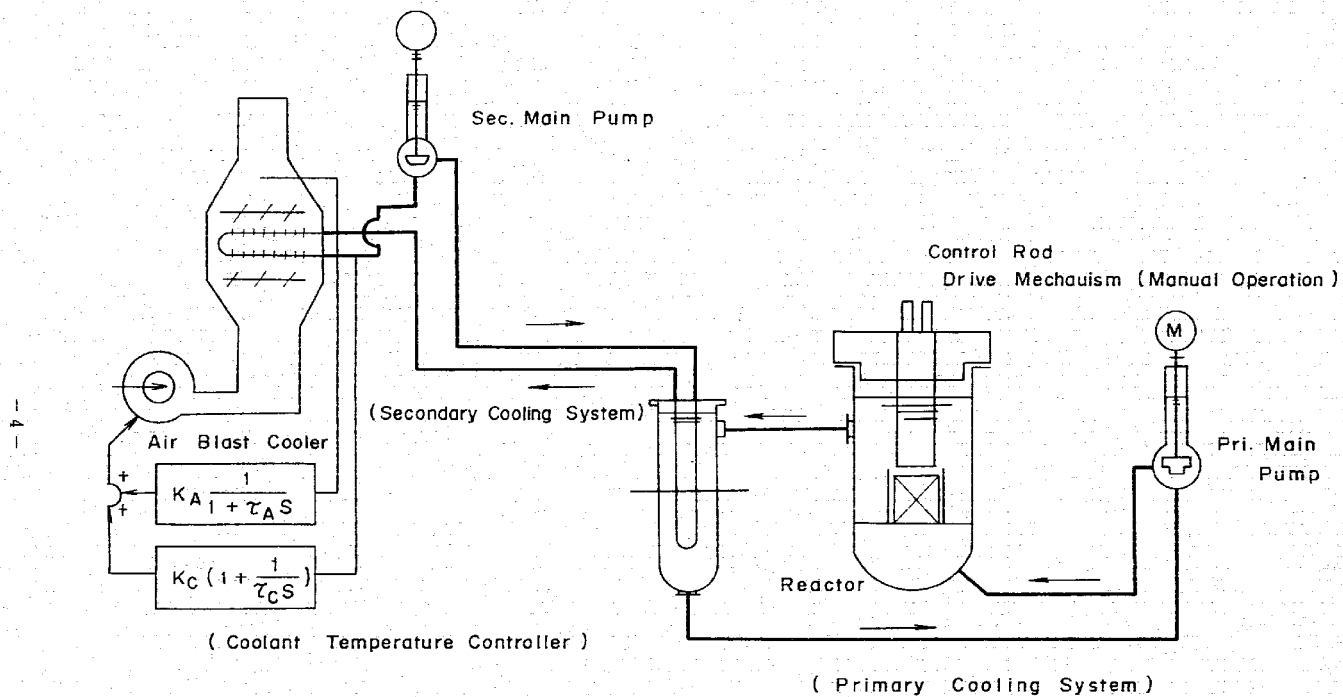


Fig. 2.1 Plant Controllers

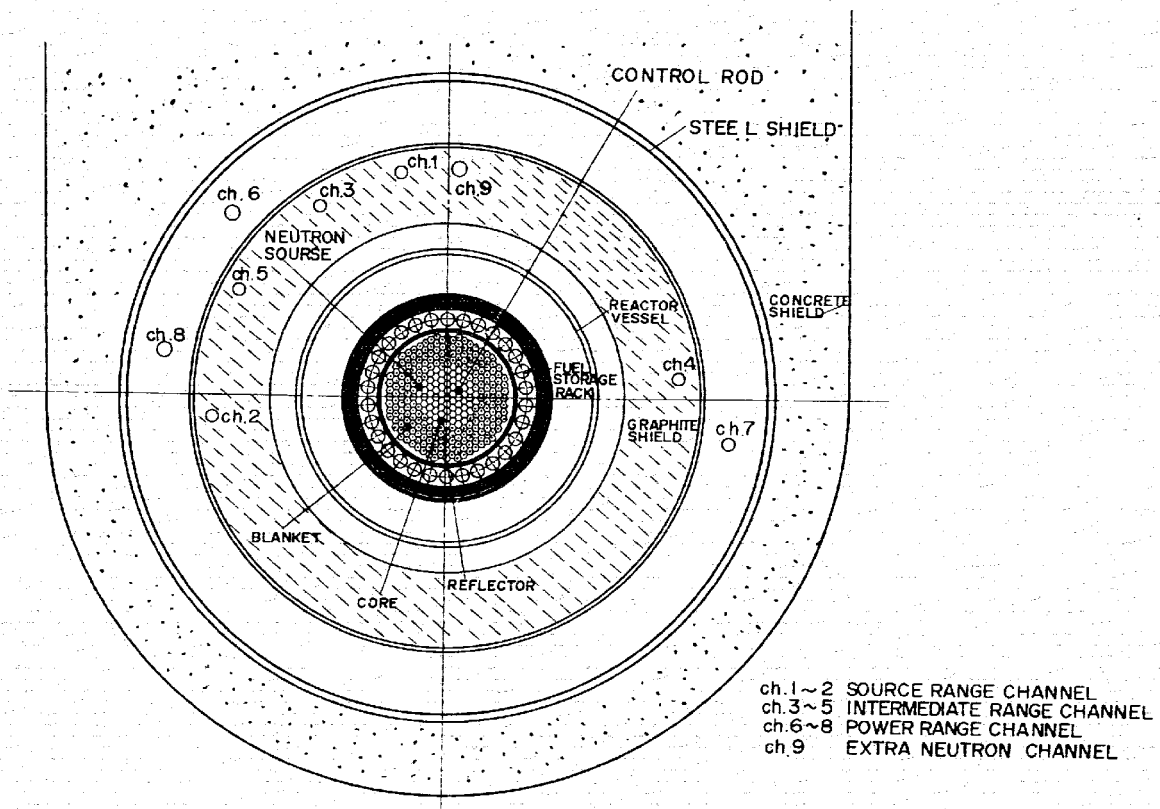


Fig. 2.2 NEUTRON COUNTER LOCATION

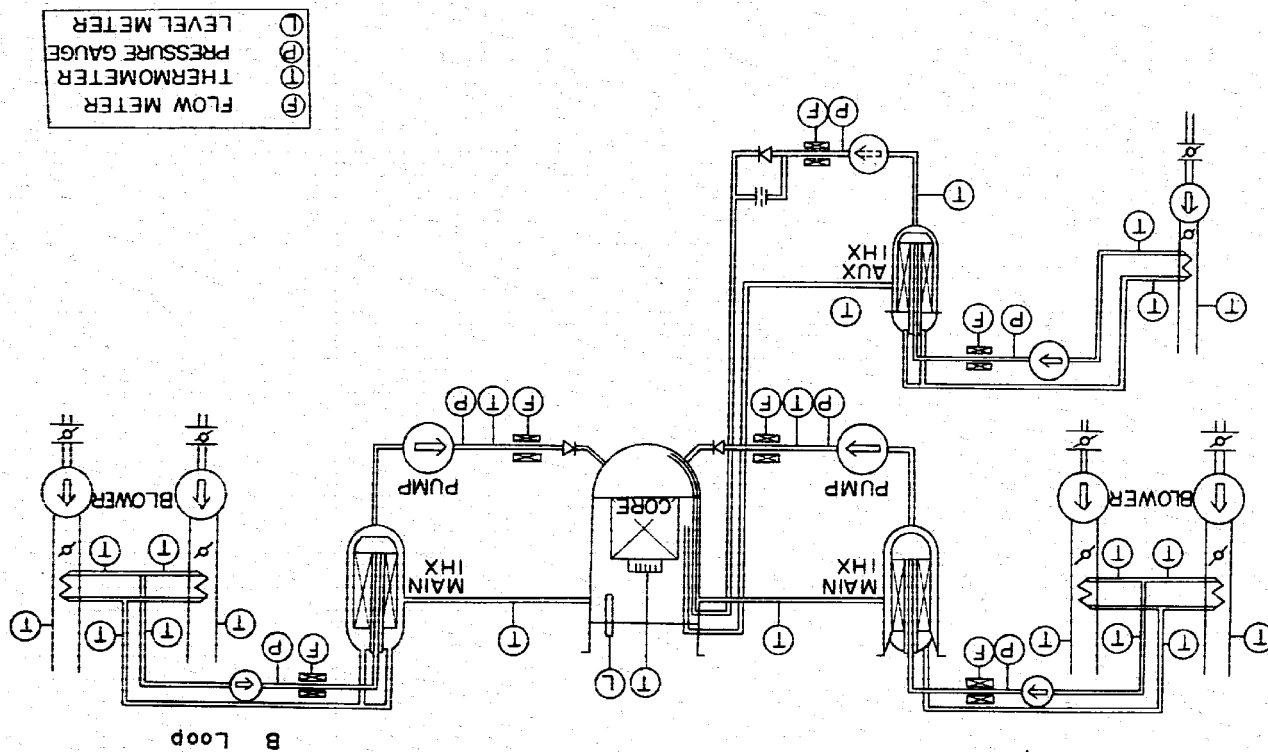


Fig 2.3 FLOW DIAGRAM OF COOLING SYSTEM

3. 試験の方法

3.1 正弦波状反応度変化測定

- (1) 試験条件
 原子炉熱出力 約 560 kW
 原子炉出口温度 約 300 °C
 1 次系流量 100 多
- (2) 試験方法

回転吸収体を 30° おきに回転してゆき、その位置での反応度を調整棒 1 と交換することにより、置換法によって正弦波状反応度変化を測定した。

3.2 伝達関数測定

3.2.1 零出力伝達関数測定

- (1) 試験条件
 炉出力 約 20 kW, 約 900 kW
 原子炉出口温度 約 250 °C, 約 345 °C
 1 次系流量 100 %
- (2) 試験方法

上記 2 ケースについて、回転吸収体を 0.001 Hz から 3 Hz まで約 20 点変化させて、反応度 - 中性子束の伝達関数を測定した。中性子束信号は、出力系 ch 6, ch 7, ch 8 および幹線チャンネル ch に設置されている線補償型電離箱で測定した。測定においては、サブレンジオンアンプで直流成分をカットした後変動分を増幅し、データレコーダに反応度信号とともに記録した。解析は、主として OFF - line で行ったが、ch 9 の記号については ON - line でも解析を行った。

3.2.2 高出力伝達関数測定

- (1) 試験条件
 原子炉熱出力約 12 MW, 約 19 MW, 約 25 MW, 約 30 MW, 約 39 MW, 約 48 MW に
 おいて試験を実施したが、その試験ケースおよび試験条件について Table. 3.1 に示す。本表に
 おいて、原子炉熱出力および温度は、データ処理装置による値である。2 次系風温制御系の
 Na 温度制御系のリセット値 1.0, 1.6 は各々積分時定数 60 秒, 37.5 秒に相当し、空気制御系
 は、1 次おくれ時定数が 40 秒である。

なお、測定点は少ないが、約30 MWにおいて上冷却系流量を90%および80%に低下させた試験も行った。

(2) 試験方法

Table 3.1の各ケースについて、回転吸収体を0.001 Hzから3 Hzまで約20点変化させて、正放線反応度変化に対する中性子束変化および温度流量変化を記録測定した。Fig. 3.1にパイルオシレータ伝達関数測定解析系のブロック図を示すが、中性子束信号および温度流量信号はできるだけサプレッションアンプを通し、直流成分をカットした後変動分を増幅し記録した。熱電対による温度信号は、できるだけリアライザを通した。反応度変化に相当する回転吸収体の角度信号はシンクロ電機で検出され、サイン変換器でアナログ量に変換して記録した。使用した記録計は、33 ch データレコーダ (TEAC-R 630)、7 ch データレコーダ (TEAC-R 510)、9 ベンレンコーダ (横河製)、2 ベンレンコーダ (横河製) である。

解析は、中性子束 (ch 9) 信号についてはモニタとして ON-line でも行ったが、他の信号についてはデータレコーダに記録した後⑧に示すごとく OFF-line で行った。

Table 3.2に ON-line 測定における測定周波数、測定時間及び制御回路と相関計の設定値を示す。

Table 3.3, Table 3.4にデータレコーダに記録した信号のリストを示すが、Table 3.3は P-1~P-5までの試験時のリストであり、サプレッションアンプは10台しか使用していないが、Table 3.4に示す P-6~P-14での試験時には、すべての信号にサプレッションアンプを通し測定精度を向上した。

また、信号取込時には応答が速いと予想される信号には、すべて10 Hzの low pass filter を通した後記録した。

なお、本表で流量計温度信号 (S/A outlet Na Temp. (0) (Flow meter)) とは、中心燃料集合体出口位置に設置されたうず電流式流量計から得られる温度信号であり、応答が極めて早い。詳細については、付録 7.1(3)に記した。

原子炉出入口温度計に関しては、本設備では3.2φの熱電対を用いているが、仮設温度計として ch 6, ch 7, ch 8の信号は、出力系のモニタ端子より取込んだ。

(3) 解析方法

解析系のブロック図を Fig. 3.2 に示す。

解析は、相関計 (HEWLETT PACARD 3721 A) で、反応度信号と中性子信号および温度信号等のプロセス信号との相互相関関数を求め、そのピーク値とピーク位置から伝達関数のゲイン位相を求めた。このとき、測定周波数に応じて適当な low pass filter を通した後解析し、S/N比を向上した。

また、記録時にはテープスピード1 1/4 ips で記録したが、再生時には解析時間を低減するため解析周波数領域に応じて3% ips, 7 1/2 ips, 15 ips で再生し、解析した。解析誤差を少なくするため、計算時間が入力周期の整数倍に等しくなるように制御回路により、相関計を制御した。解析方法の詳細については付録 7.2 に記した。

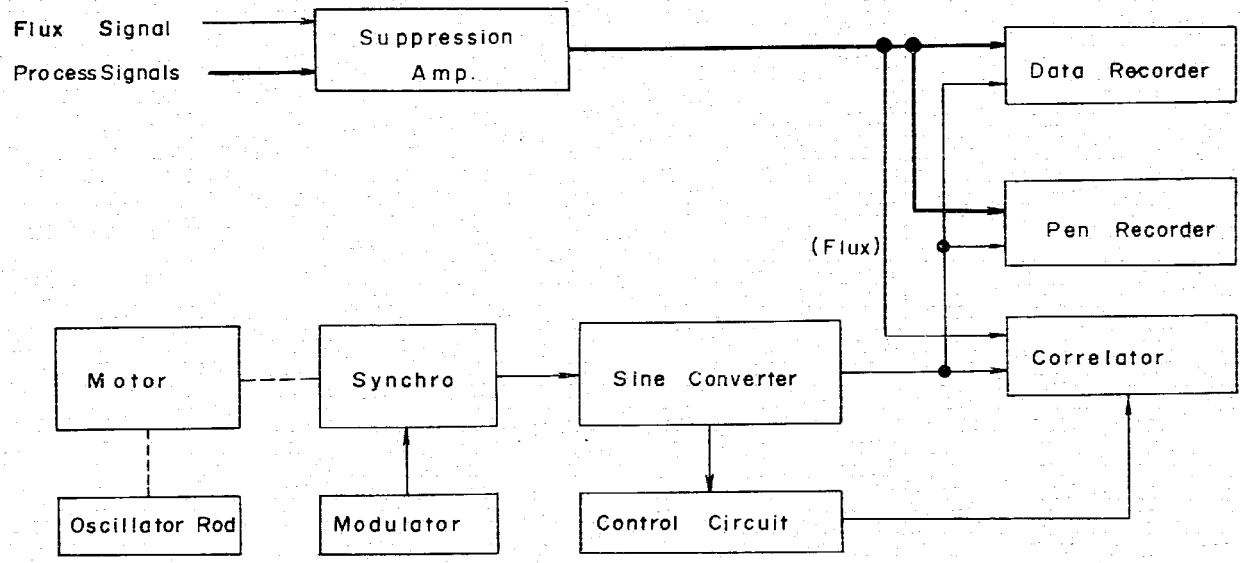


Fig. 3.1 Data Acquisition System Diagram in Pile Oscillator Tests

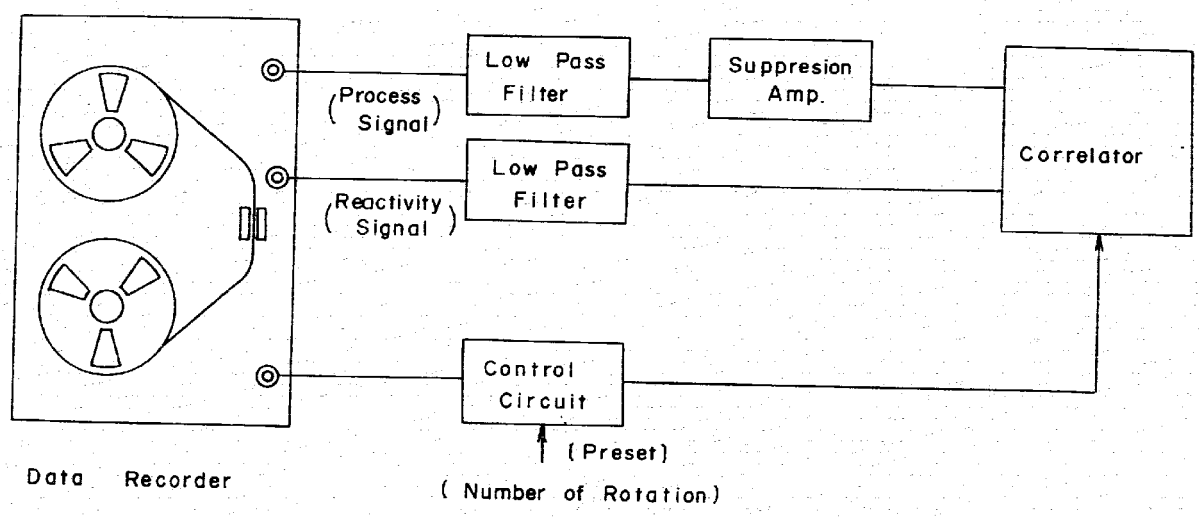


Fig. 3.2 Block Diagram of Transfer Function Analyzer

Table 3.2 Analyzer Preset Valve (on-line)

Frequency (Hz)	Cycle (sec)	Rotational Number	Sampling Time (sec)	Sampling Number	Measuring Time (min, sec)
3.0	0.333	390	0.001	128K	2'11"
2.0	0.5	420	0.00333	64K	3'38"
1.0	1.0	210	0.00333	64K	3'38"
0.7	1.42	220	0.01	32K	5'27"
0.5	2.0	160	0.01	32K	5'27"
0.4	2.5	128	0.01	32K	5'27"
0.3	3.33	96	0.01	32K	5'27"
0.2	5.0	50	0.0333	8K	4'32"
0.1	10.0	24	0.0333	8K	4'30"
0.07	14.3	28	0.1	4K	6'47"
0.05	20.0	20	0.1	4K	6'40"
0.04	25.0	16	0.1	4K	6'40"
0.03	33.3	12	0.1	4K	6'40"
0.02	50.0	13	0.333	2K	11'15"
0.01	100.0	6	0.333	2K	10'50"
0.007	143.0	7	1.0	1K	16'41"
0.005	200.0	5	1.0	1K	16'41"
0.003	333.3	6	1.0	2K	33'20"
0.002	500.0	4	1.0	2K	33'30"
0.001	1000.0	2	1.0	2K	33'20"

Table 3.1 Experimental Conditions of At-Power Transfer Function

RUN NO.	Data	Thermal Power	Primary Flow Rate	Reactor Inlet Temp.	Reactor Outlet Temp.	Coolant Temperature Controller
P-1	SS3.5.7	12MW	100%	368°C	382°C	Gain : 2.5 Reset: 1.6
P-2	5.21	19MW	100%	366°C	391°C	Gain : 2.5 Reset: 1.6
P-3	5.27	25MW	100%	367°C	398°C	Gain : 2.5 Reset: 2.5
P-4	7.3	39MW	100%	361°C	412°C	Gain : 2.5 Reset: 1.6
P-5	7.3	39MW	100%	361°C	414°C	Manual
P-6	8.2	12MW	100%	361°C	375°C	Gain : 2.5 Reset: 1.6
P-7	8.2	13MW	100%	361°C	377°C	Manual
P-8	8.2	31MW	100%	362°C	402°C	Gain : 2.5 Reset: 1.6
P-9	8.3	31MW	100%	364°C	404°C	Manual
P-10	8.3	48MW	100%	361°C	422°C	Gain : 2.5 Reset: 1.6
P-11	8.4	46MW	100%	361°C	417°C	Manual
P-12	8.4	46MW	100%	361°C	418°C	Gain : 4.0 Reset: 1.0
P-13	8.4	46MW	100%	361°C	420°C	Gain : 4.0 Reset: 1.0
P-14	8.4	46MW	100%	361°C	419°C	Gain : 1.6 Reset: 1.6
P-15	8.3	31MW	90%	362°C	405°C	Gain : 2.5 Reset: 1.6
P-16	8.3	31MW	80%	361°C	410°C	Gain : 2.5 Reset: 1.6

Table 3.3 Recorded Signals (Data Recorder)

Signals	Signal Conditioner		Data Recorder	
	Linearizer	Sup. Amp. 10Hz L.P.F.	33ch	7ch
S/A Outlet Temp. (0)				
" (1A1)				
" (2A1)				
" (3A1)				
" (4A1)				
" (5A1)				
" (6A2)				
S/A Outlet Flow (0)				
Flux Flux (ch6)				
" (ch7)				
" (ch8)				
" (ch9) *				
Reactor Inlet Na Temp. (A) *				
" (B) *				
" (B)				
Reactor Outlet Na Temp. (A)				
" (B) *				
" (B)				
Primary Pump Rotational Frequency (A)				
" (B)				
Primary Flow Rate (A)				
IXH Secondary Inlet Na Temp. (B)				
" Outlet Na Temp. (B)				
Main Cooler Inlet Na Temp. (1A)				
" Outlet Na Temp. (1B)				
" Inlet Na Temp. (2A)				
" Outlet Na Temp. (2B)				
Main Cooler Outlet Air Temp. (2A)				
Rotational Signal of Oscillator Rod				
S/A Outlet Na Temp. (0) [Flowmeter]				
Rotational Number of Oscillator Rod				
Start Signal for Measurement				

: Used *: temporary establishment

Table 3.4 Recorded Signals (Data Recorder)

Signals	Signal Conditioner		Data Recorder	
	Linearizer	Sup. Amp. 10Hz L.P.F.	33ch	7ch
S/A Outlet Na Temp. (0)				
" (1A1)				
" (2A1)				
" (3A1)				
" (4A1)				
" (5A1)				
" (6A2)				
S/A Outlet Flow (0)				
" (ch6)				
" (ch7)				
" (ch8)				
" (ch9) *				
Reactor Inlet Na Temp. (A) *				
" (B) *				
Reactor Outlet Na Temp. (A)				
" (B) *				
" (B)				
IXH Secondary Inlet Na Temp. (A)				
" (B)				
IXH Secondary Outlet Na Temp. (A)				
" (B)				
Main Cooler Inlet Na Temp. (A)				
" (1A)				
Main Cooler Outlet Na Temp. (1B)				
" (B)				
" (2A)				
" (2B)				
Controller Signal (Na) (2A)				
" (2B)				
Main Cooler Outlet Air Temp. (2A)				
" (2B)				
S/A Outlet Na Temp. (0) [Flowmeter]				
Rotational Signal of Oscillator Rod				
Rotational Number of Oscillator Rod				
Start Signal for Measurement				

4. 試験結果

4.1 正弦波状反応度変化測定結果

Fig. 4.1 に試験結果を示すが、ほぼ正確な正弦波状反応度変化が求められ、この反応度変化の peak-to-peak 値は $(34.7 \pm 2.8) \times 10^{-3} \% \Delta K / K$ である。

なお、測定誤差として以下のもを考慮した。

- (i) 制御棒位置指示計の精度 $\pm 1 \times 10^{-3} \% \Delta K / K$
- (ii) 臨界点位置の精度 $\pm 1 \times 10^{-3} \% \Delta K / K$
- (iii) 校正曲線の精度 $\pm 0.5 \times 10^{-3} \% \Delta K / K$
- (iv) 温度測定精度 ($\pm 0.2^\circ C$) $\pm 0.7 \times 10^{-3} \% \Delta K / K$

4.2 伝達関数測定結果

4.2.1 零出力伝達関数の測定結果

Fig. 4.2 に反応度一中性子束 (ch 9) の伝達関数の測定値と計算値を示す。位相遅れが測定値の方がやや小さいが、比較的良好である。計算は遅発中性子 6 群の 1 点近似計算であり、詳細については付録 7.3 に示す。

なお、測定値と計算値がよく一致していることは、計算に使用した β_1, λ_1 (制御棒校正曲線測定時に使用したものと同一) が妥当なものであったことを示している。

伝達関数のゲインを $\delta n / n_0 \delta \rho$ で定義すれば、測定値は周波数が高くなるにつれて 1 に漸近する。この傾向は計算値に一致する。ここで n_0 は中性子束の直流成分値、 δn は正弦波状中性子束の peak-to-peak 値であり、 $\delta \rho$ は \$ 単位での正弦波状反応度の peak-to-peak 値 (ここでは 0.034 \$) である。

4.2.2 高出力伝達関数の測定結果

本報告書では、Table 3.3, 3.4 に示したデータのうち 7ch データレコーダに記録したデータ解析結果について報告する。

(1) 反応度一中性子束間伝達関数

Fig. 4.3, 4.4 は、零出力から 48 MW まで変化させたときの反応度に対する中性子束 (ch 9) の伝達関数の測定値であり、熱出力 12 MW 以上においては、制御系は Auto 状態であり、そのパラメータは本試験に先立って行った安定性試験で決定したものである。Na 温度制御系パラメータは A, B 側ともゲイン 2.5, 積分時定数 37.5 秒である。本測定結果では、ゲイン、

位相遅れとも特に求めた peak もなく、平坦で熱出力の増加とともに負のフィードバックが強くなるので、Gain は低下してゆき位相遅れは少なくなり本原子炉は安定であると言える。

Fig. 4.5, 4.6 は、今回測定した高出力伝達関数と零出力伝達関数 (計算値) から求めたフィードバック伝達関数である。

フィードバック伝達関数 $H(j\omega)$ は、零出力伝達関数 $G_0(j\omega)$ 高出力伝達関数 $G_P(j\omega)$ から次式により求めた。

$$H(j\omega) = \frac{1}{G_P(j\omega)} - \frac{1}{G_0(j\omega)} \dots \dots \dots (4.1)$$

従って、本フィードバック伝達関数には冷却材温度制御系によりフィードバックの効果も含まれている。Fig. 4.5, 4.6 の結果から、各出力ともフィードバック伝達関数はほぼ 1 次遅れで近似でき、48 MW での時定数は約 3.5 秒である。時定数は、出力が上昇するに従って長くなる傾向がある。これは、燃料ペレットの熱電導度が高くなると小さくなり、熱電導の時間が長くなることから定性的に説明できる。本伝達関数で 0.2 Hz より大きい周波数領域では高出力伝達関数の値が零出力伝達関数の値に近づくため、計算誤差が大きくなり 1 次遅れからずれていく。また、周波数が 0.003 Hz より小さい領域では、冷却材温度制御系の効果のため 1 次遅れからはずれている。

Fig. 4.5, Fig. 4.6 のフィードバック伝達関数のゲインは、 $\delta \rho / (\delta n / n)$ (\$) で表わしたものである。低周波側の外挿値を各熱出力で取った値は、出力係数 (\$/MW) に相当する。

Fig. 4.7 は、これから求めた出力係数 ($\% \Delta K / K / MW$) を熱出力に対して、設計値と共にプロットしたものである。

本方法による出力係数は、高出力伝達関数と零出力伝達関数から計算を介してフィードバック伝達関数を求め、その中間周波数領域 (0.01 Hz ~ 0.1 Hz) から低周波数側の値を外挿し、これから出力係数を求めるという方法であるので、精度はあまり良くないと思われるが、本測定値は設計値と比較的によく一致したと言える。

伝達関数で表わされた系の安定性判別法の一手法としてナイキストの安定性判別法があるが、ここでは本手法により「常陽」の安定性を確認する。

狭義のナイキストの安定条件は、「開ループ伝達関数 $G_0(j\omega) H(j\omega)$ ((4.1) 式参照) のナイキスト軌跡が点 $(-1, j0)$ を囲めば系は不安定であり、囲まなければ系は安定である。」のごとくいい表わされる。

Fig. 4.8, 4.9 は 31 MW, 48 MW での開ループ伝達関数 $G_0(j\omega) H(j\omega)$ のベクトル軌跡であり、点 $(-1, j0)$ を囲まない。Nyquist 判定法からも「常陽」は安定であると言える。

Fig. 4.10 は、熱出力 48 MW 又は 46 MW において冷却材温度制御系の制御系パラメータを

変化させたとき、および制御系OPFのときの反応度中性子束の伝達関数の測定値であるが、ほとんど差がなく、極めて低周波領域の0.001 Hzで差がでていく程度である。今回程度の反応度変化幅 (peak-to-peak 約7%) では、冷却材温度制御系の効果は伝達関数にほとんど影響を与えないものと思われる。これは、冷却材温度制御系が2次系にあり、原子炉から相当離れていること及び主中間熱交換器がバフアとなっていること等によるものと思われる。

Fig. 4.11は熱出力31 MWでの流量変化時の反応度と中性子束 (ch 9) との伝達関数であるが、流量を変化させても伝達関数はほとんど変化がない。

(2) 中性子束-温度計間伝達関数

中性子束と温度計との伝達関数の測定結果について述べる。

解析においては、反応度の変化幅が一定であるため、反応度-中性子束の伝達関数 $G_{\rho N}(j\omega)$ および反応度-温度計の伝達関数 $G_{\rho T}(j\omega)$ をまず求めて、次に次式より中性子束-温度計の伝達関数 $G_{NT}(j\omega)$ を求めた。

$$G_{NT}(j\omega) = G_{\rho T}(j\omega) / G_{\rho N}(j\omega) \dots\dots\dots (4.2)$$

Fig. 4.12は、中性子束と中心燃料集合体出口位置の流量計温度信号の伝達関数であるが、ゲインに関しては48 MW、25 MWともフィードバック伝達関数とほぼ同じ時定数約3.5 secの1次遅れで近似できる。また、位相については燃料集合体内から温度計位置までの輸送遅れを1秒と仮定して、測定値を補正するとやはり約3.5秒の1次遅れで近似できる。

流量計の温度信号は、その原理上応答が極めて早いので (炉雑音測定時にはそのパワースペクトル密度を求めたが約15 Hzまではほぼ平坦であった)、本温度計で得られた結果は、燃料出口温度の応答を正確に (フィルタを逆さず) 測定していると言える。

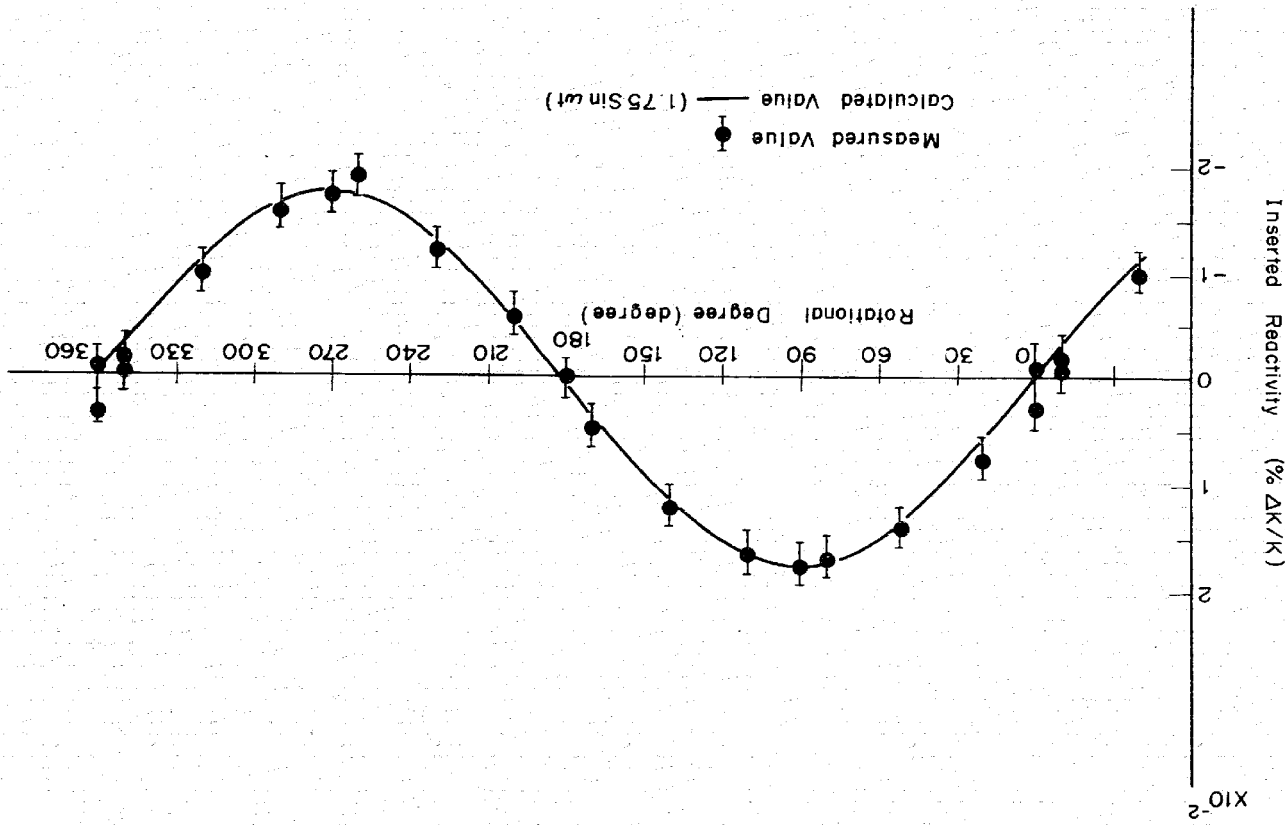
Fig. 4.13は、中性子束と中心燃料出口温度計 (熱電対) との伝達関数であるが、48 MW、25 MWとも時定数約3.5秒と約3.2秒の2次遅れで近似できる。これは中心燃料出口温度計の時定数が約3.2秒であることを示している。

メーカでの水中試験の結果では約1.5秒であるが、この相違は熱電対と保護管との間に封入した合金 (Pb, Bi, Niの三つの合金) の融点が約126°Cであるため、本試験時とは状態が異なるためと思われる。

Fig. 4.14は、中性子束と原子炉出口温度計 (B側取設) の伝達関数であるが、原子炉出口温度計は原子炉出口ノズルから約18 mはなれた出口配管上に設置された熱電対であり、炉容器内でのミキシング、輸送おくれ、熱電対の時定数の影響等が大きいのので単純な1次遅れで近似できないが、1次遅れで近似できると時定数は約50秒となる。

Fig. 4.15は、流量変化時の反応度と流量計の温度信号の伝達関数であるが、80多流量時の測定は測定点が少ないので、両測定結果から輸送遅れ時間を算出しても精度が悪いが、80多流量の方が輸送遅れ時間が長い傾向を示している。

Fig. 4.1 Sinusoidal Reactivity Change



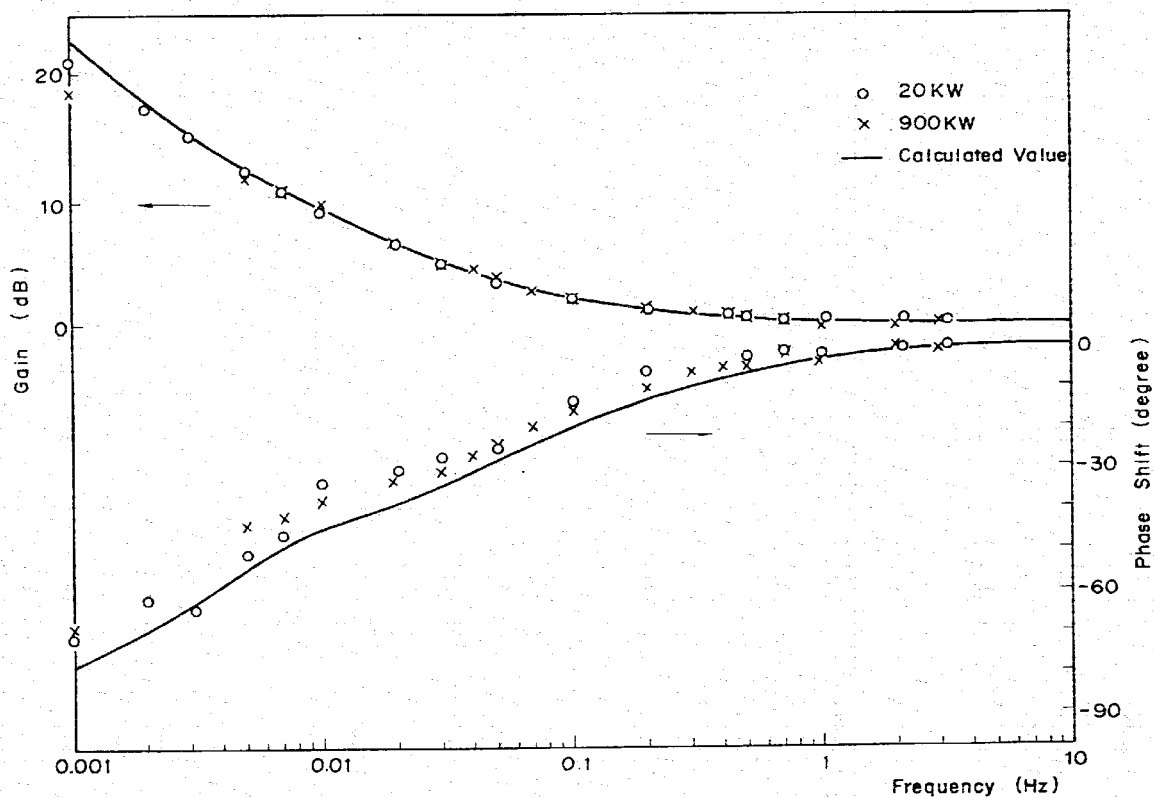


Fig. 4.2 Zero-power Transfer Function

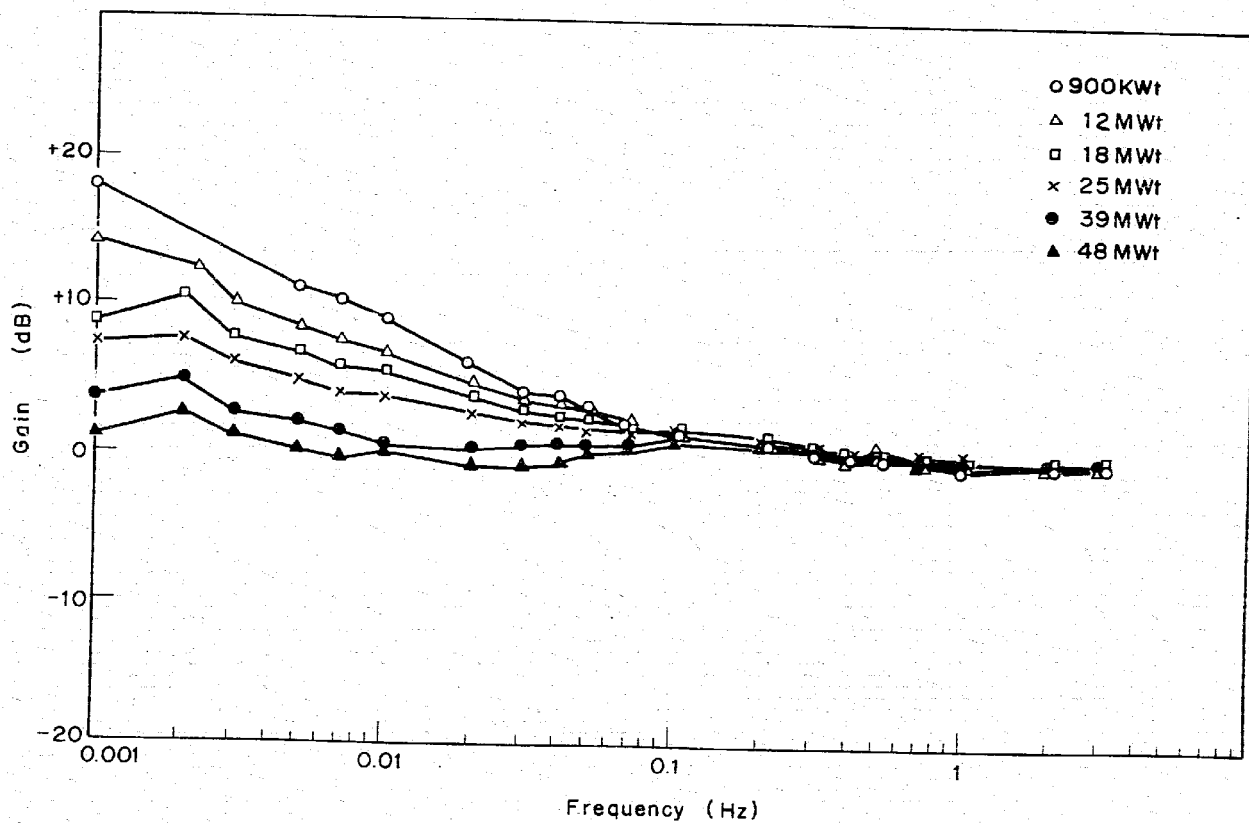


Fig. 4.3 Transfer Function (Reactivity-Flux) (Gain)

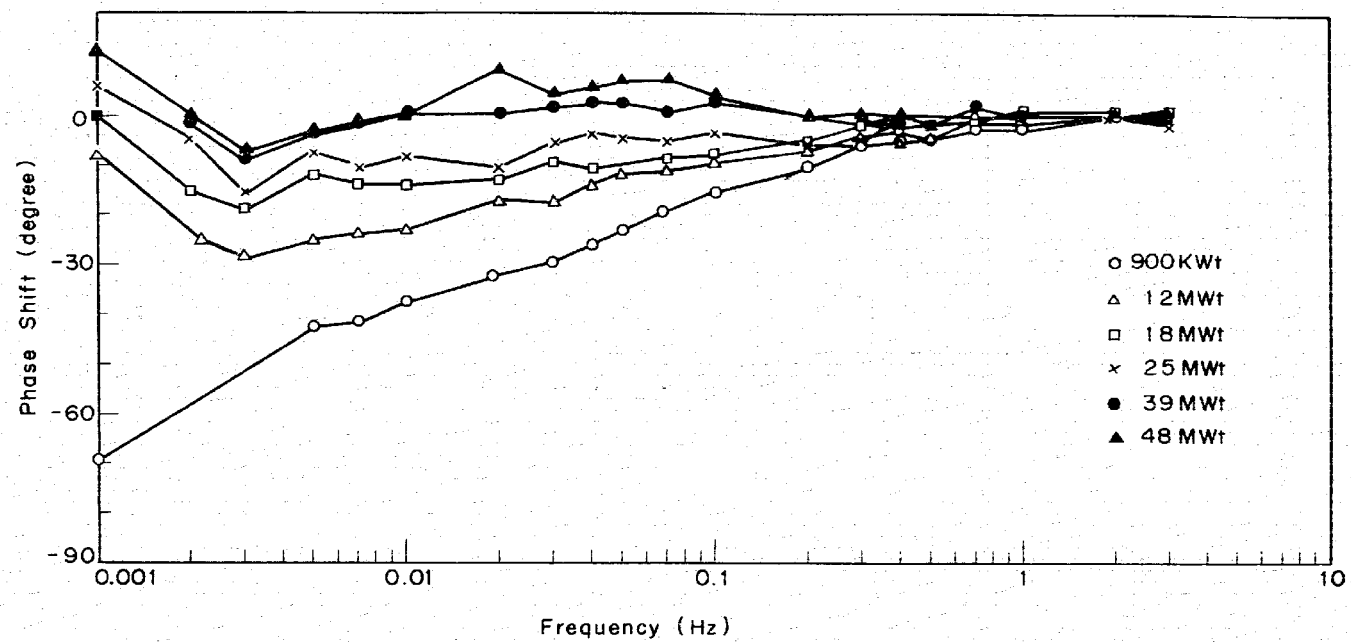


Fig. 4.4 Transfer Function (Reactivity-Flux) (phase Shift)

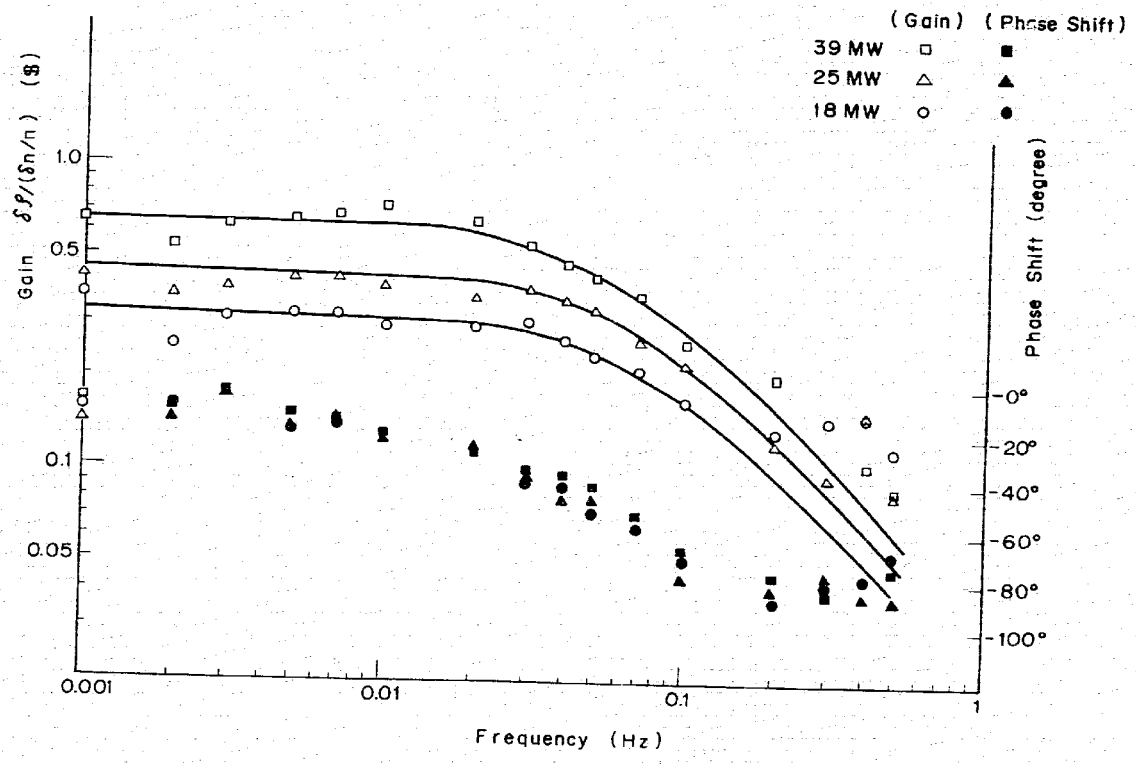


Fig. 4.5 Feedback Transfer Function

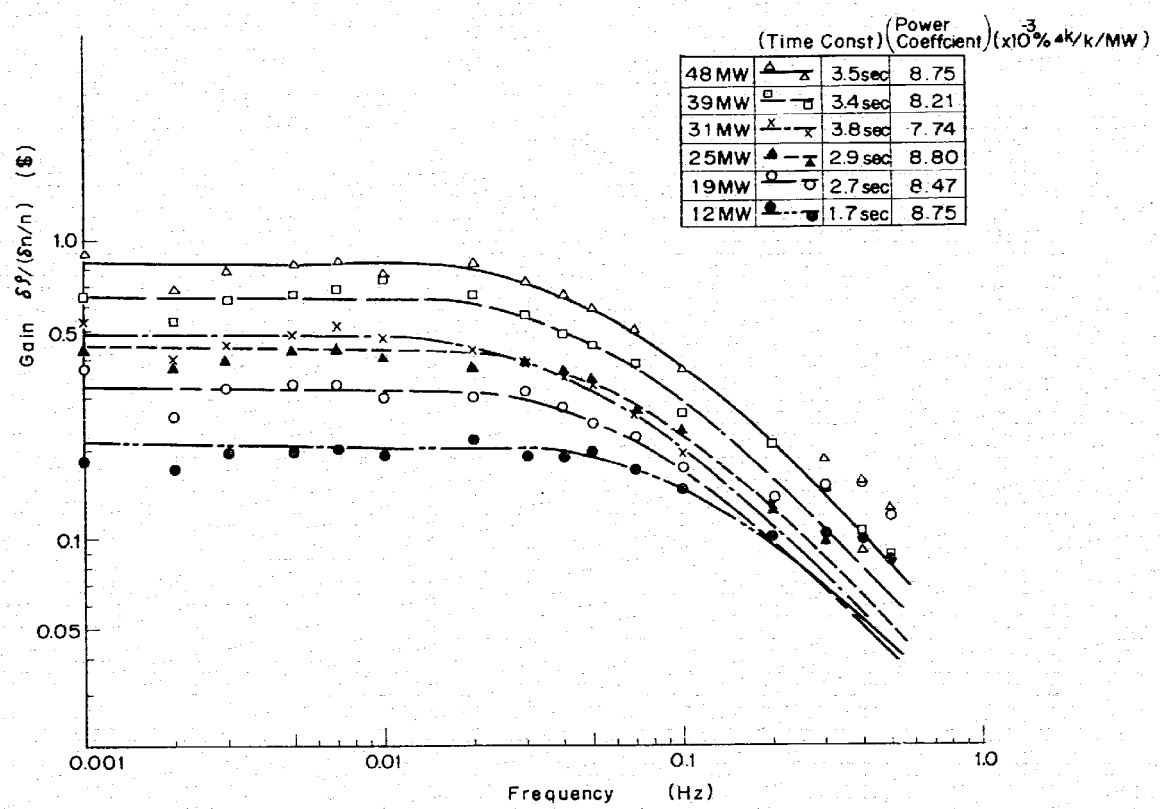


Fig. 4.6 Feedback Transfer Function

- 24 -

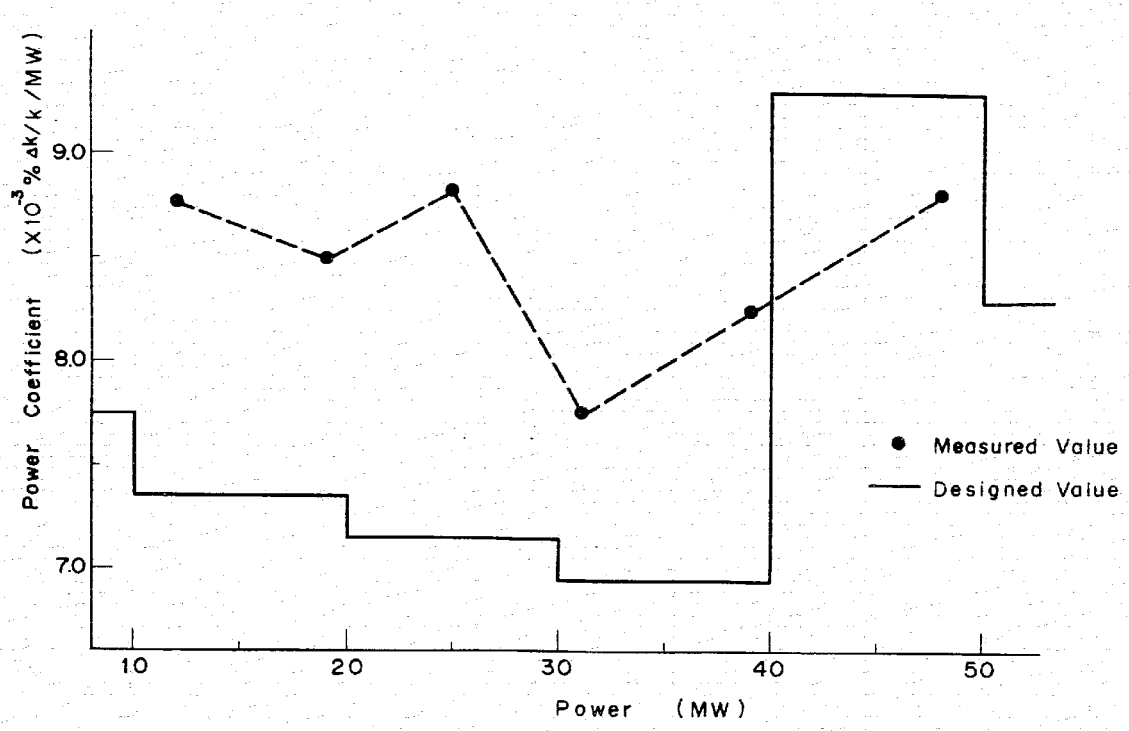


Fig. 4.7 Power Coefficient

- 25 -

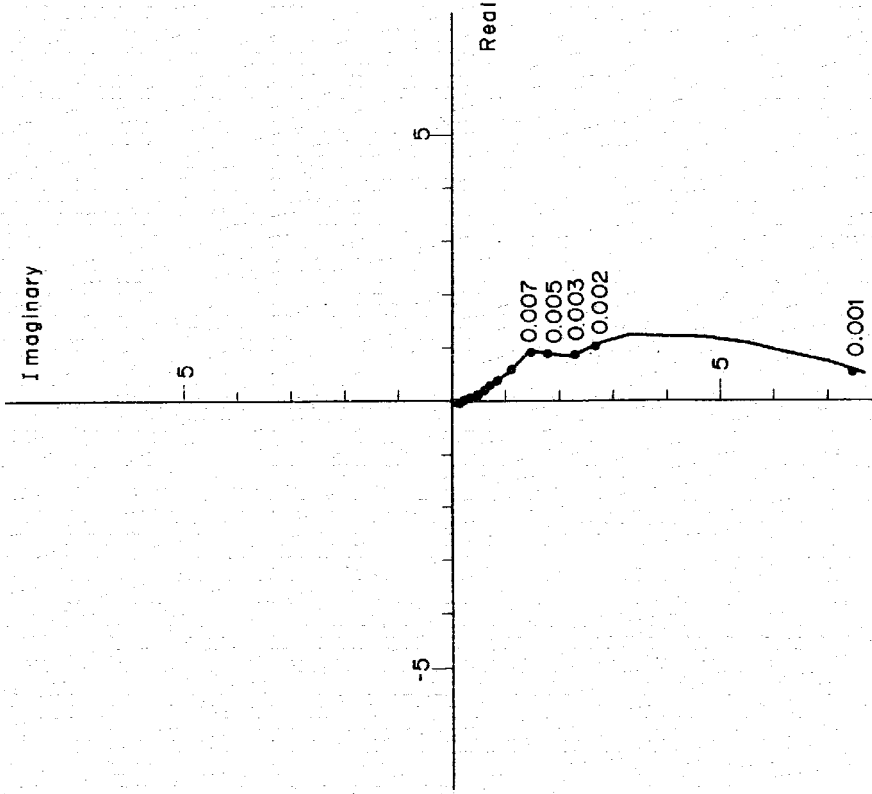


Fig 4.8 Nyquist Plot of $G_o(S) H_o(S)$
(31 MW)

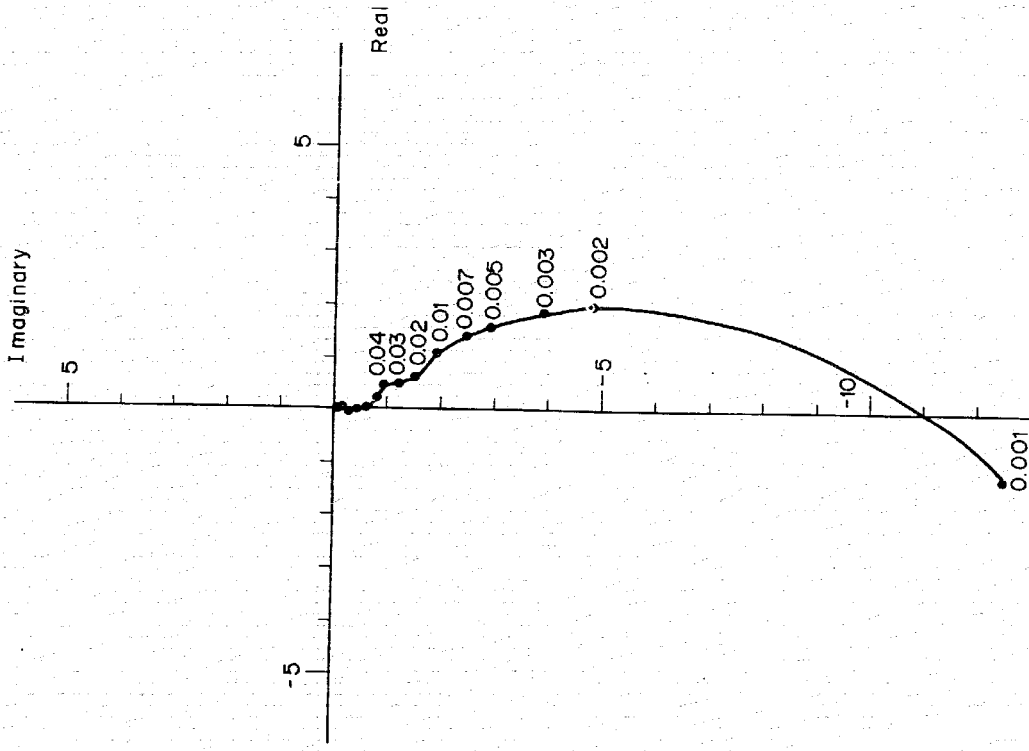


Fig 4.9 Nyquist Plot of $G_o(S) H_o(S)$
(48 MW)

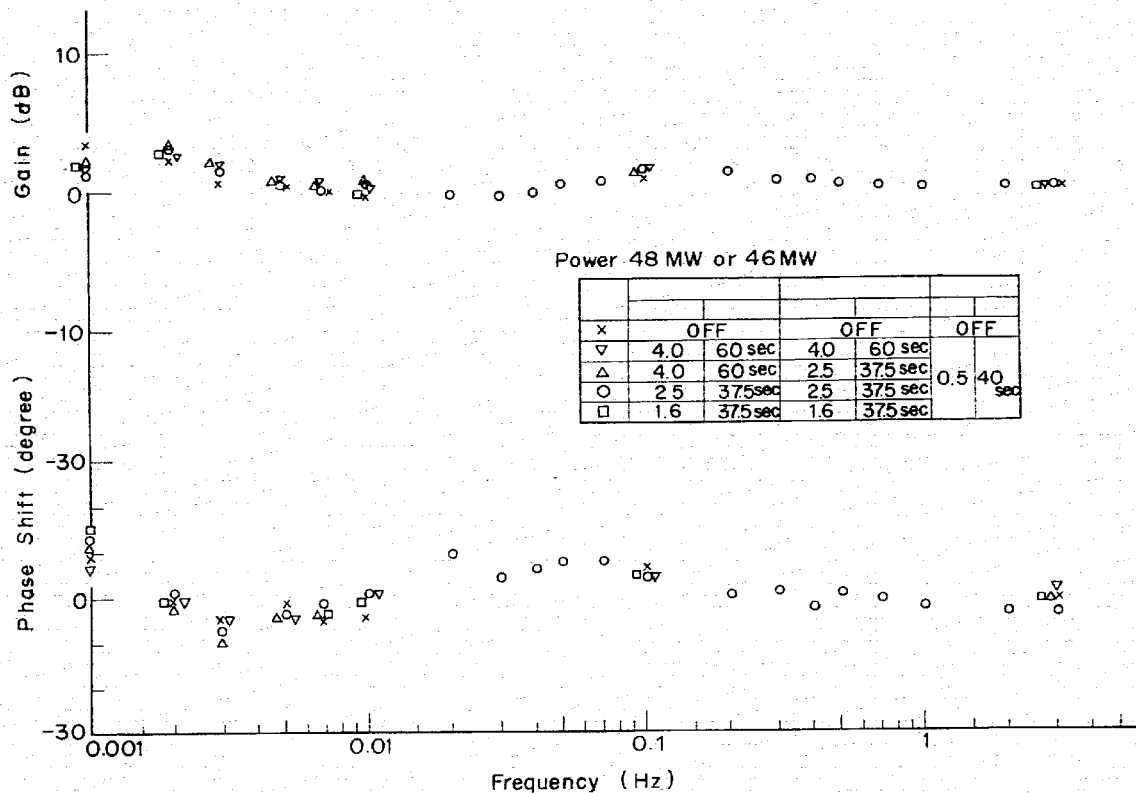


Fig. 4.10 Transfer Function (Reactivity-Flux)

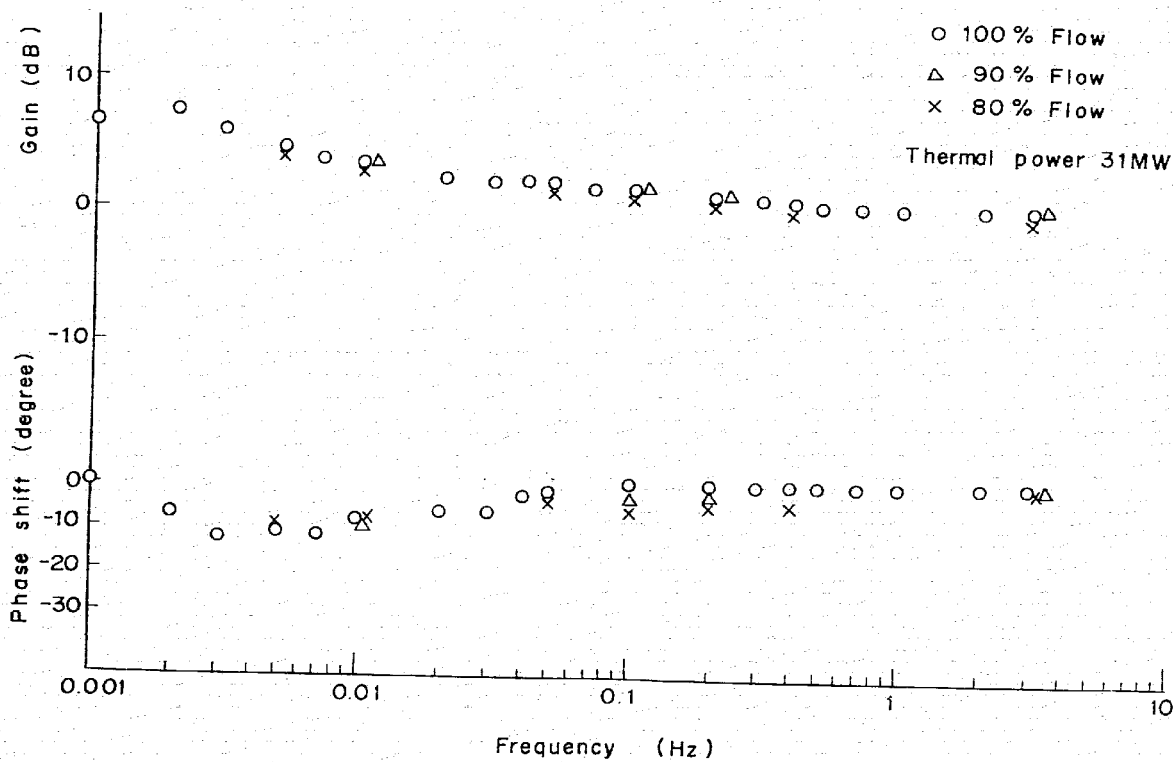


Fig. 4.11 Transfer Function (Reactivity-Flux) in Changed Flow

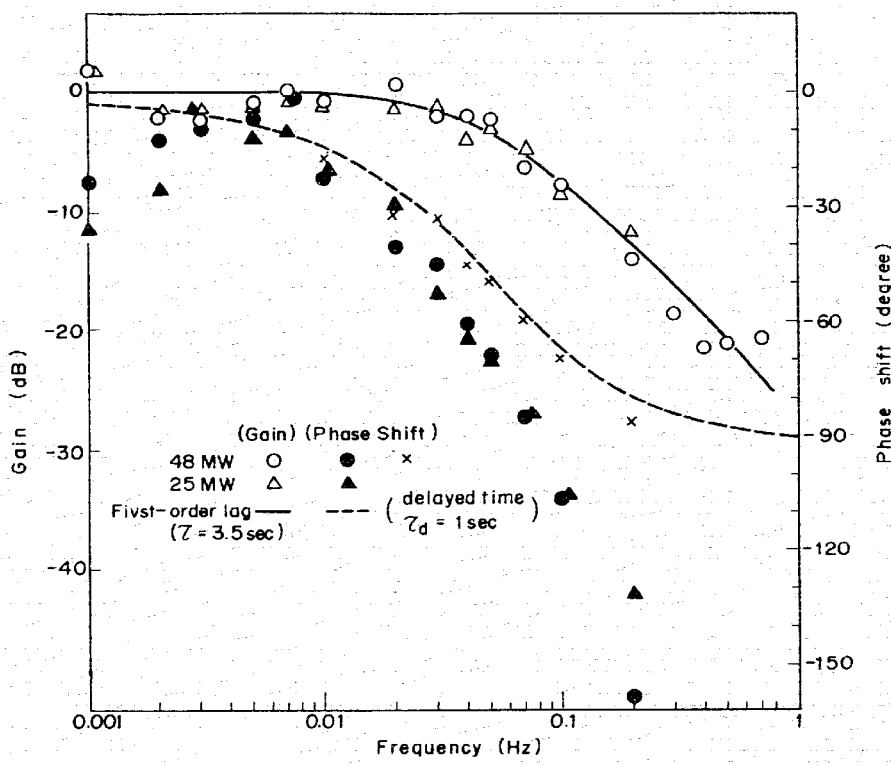


Fig. 4.12 Transfer Function (Flux - S/A outlet temperature Signal (flowmeter output))

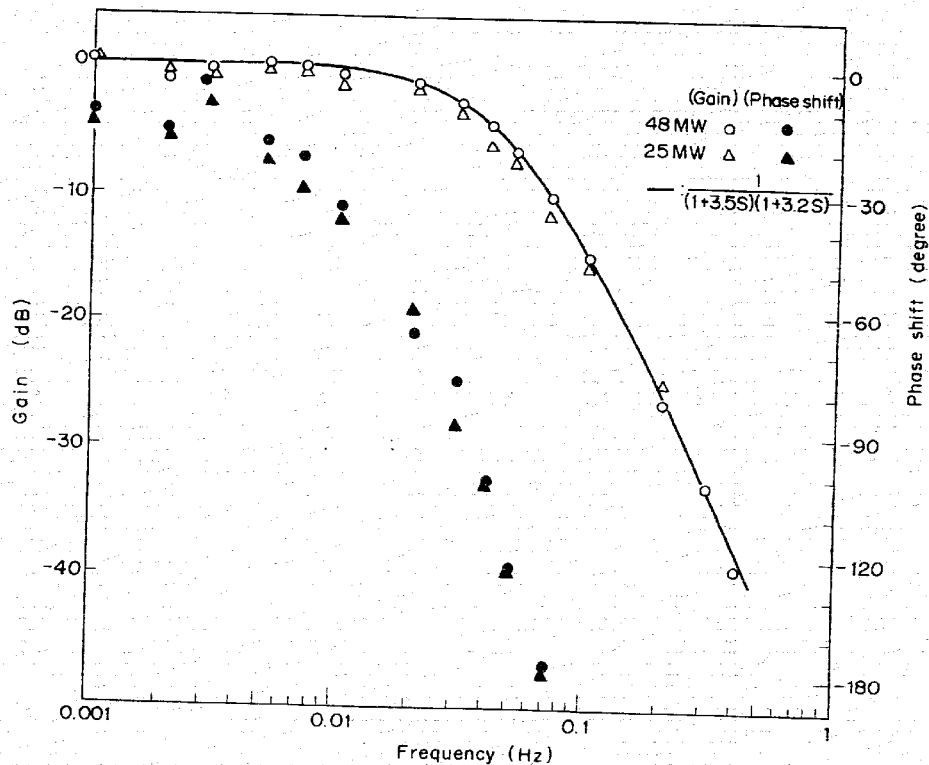


Fig. 4.13 Transfer Function (FLUX - S/A Outlet Thermocouple)

Fig. 4.14 Transfer Function (Flux-Reactor Outlet thermocouple)

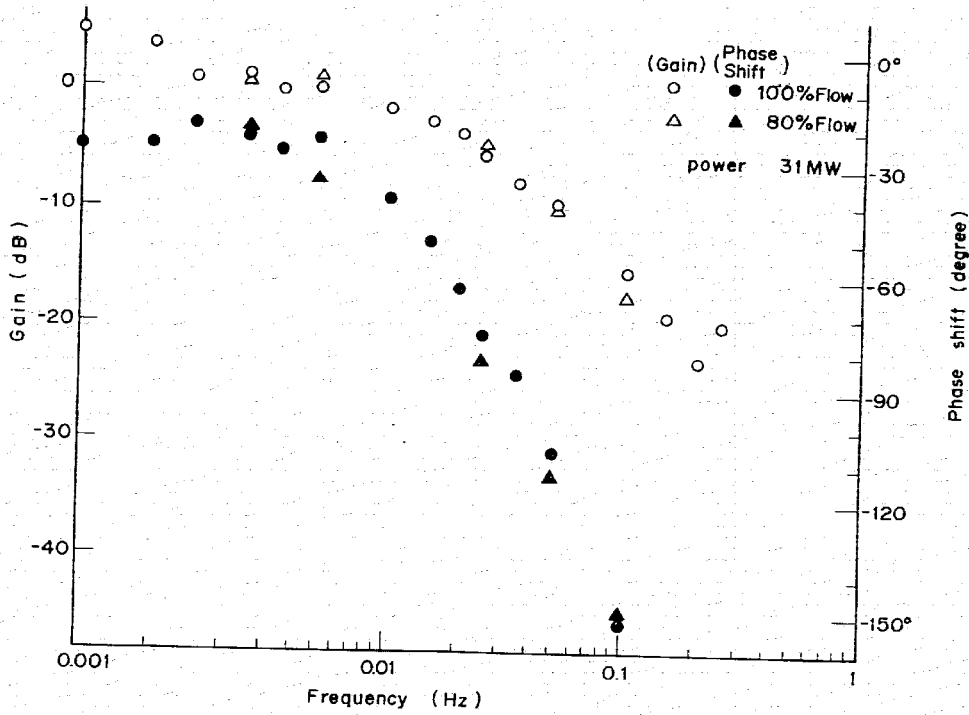
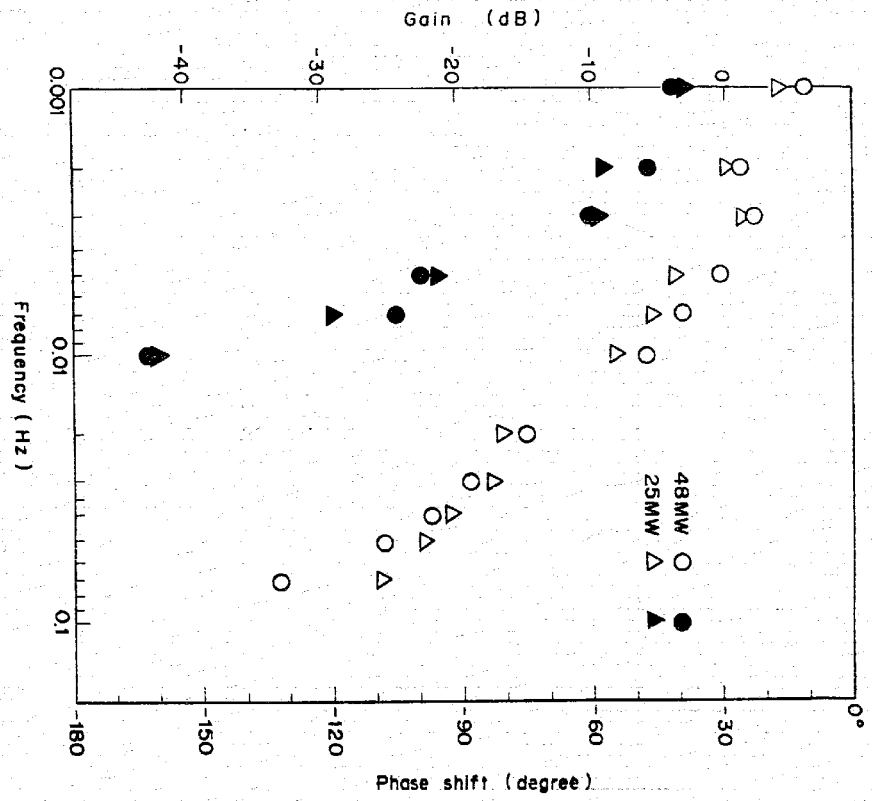


Fig. 4.15 Transfer Function (Flux-S/A Outlet Temperature Signal (Flowmeter-Output) in Changed Flow

5. 検 討

本報告書は、7 ch データレコーダに記録したデータ解析結果の報告であり、解析データは炉心部に限られ、中性子束についても ch 9 のみである。ch 9 については、Fig. 5.1 に示すごとく熱出力と出力電流は直線性があつた。ch 6, 7, 8 に関しては設置位置の関係で出力電流が約 1 桁低いことが、今回の測定の間隙内直線性があることが確認されている。出力系 ch 6, 7, 8 については正確な解析はまだ行っていないが、ペンレコーダ測定結果、及び炉雑音測定の結果から ch 9 とは同様の応答を示すことが判り、反応度-中性子束の伝達関数の場所依存性はほとんどないと言えらる。

次に、高出力時のフィードバック伝達関数が、ほぼ 1 次遅れで近似できることを検討する。このため、簡単な集中定数近似モデルでフィードバック伝達関数を計算した。

計算モデルは Fig. 5.2 に示すごとく、炉心部のみを対象とし、燃料温度変化、被覆材温度変化、冷却材温度変化、構造材温度変化によるフィードバックを考へる。このとき原子炉入口温度の変化はないものとする。フィードバック伝達関数は、これらの温度変化が反応度係数を介して反応度変化となり、その和として表現される。また、中性子束と燃料出口温度計との伝達関数は、つぎのようなモデルを考へる。すなわち、Fig. 5.2 において、中性子束の変化が燃料および被覆管を介して冷却材の温度変化となり、この変化が冷却材の流れとともに輸送されて、温度計位置に到達する。このときゲインは、ほとんど減衰せず、輸送遅れ時間 t_d のため、位相が $360^\circ \times \frac{t_d}{T}$ (T は測定時のバイルシレンシタ回転周期) 遅れる。

そして、燃料出口温度計の応答関数を至て燃料出口温度計の応答となる。Fig. 5.3 は 50 MW 時のフィードバック伝達関数の計算値であるが、フィードバック伝達関数のうち燃料出口温度変化による寄与が相当大きく、冷却材温度変化やその他によるものは 1 桁以上小さい。また、どの温度変化の応答も同程度の時定数の 1 次遅れに近い応答を示している。これは、燃料から被覆管までの熱伝達の時間が被覆管から冷却材、構造材までの熱伝達の時間に比べて十分長いことによると思われる。

Fig. 5.3 には計算値とともに、約 48 MW での測定値をプロットしているが、計算値の方が低周波数でのゲインが低く、時定数が短いが、簡単な集中定数モデルにしてはよく一致していると言えらる。

なお、中性子束と中心燃料出口位置の流體計の温度信号との伝達関数が、フィードバック伝達関数とは同じ時定数の 1 次遅れで近似できることも、Fig. 5.3 の計算結果から説明できる。

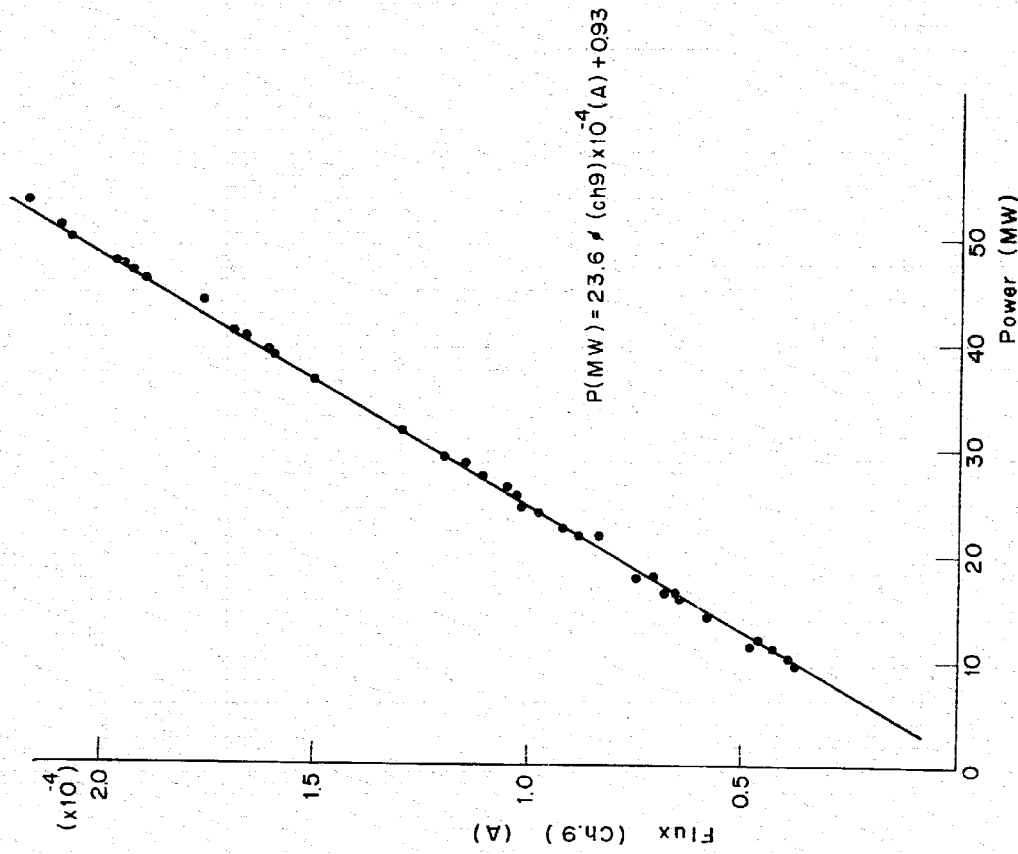


Fig 5.1 Flux vs. Power Curves

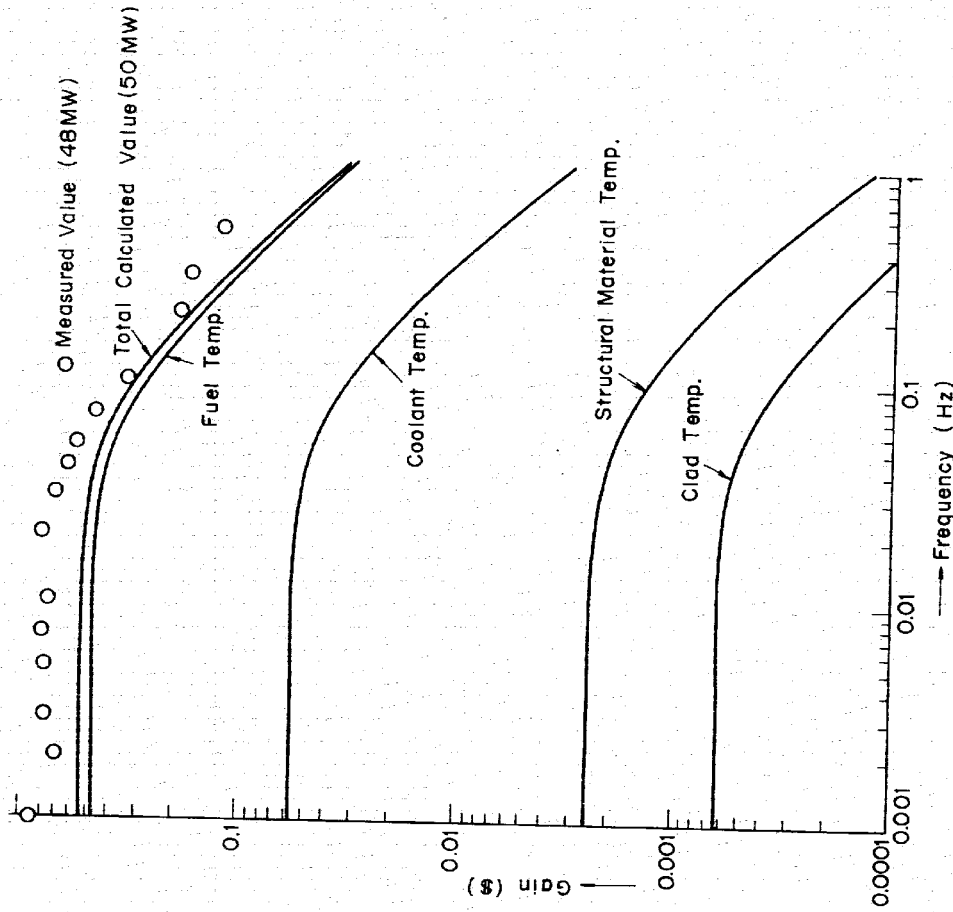
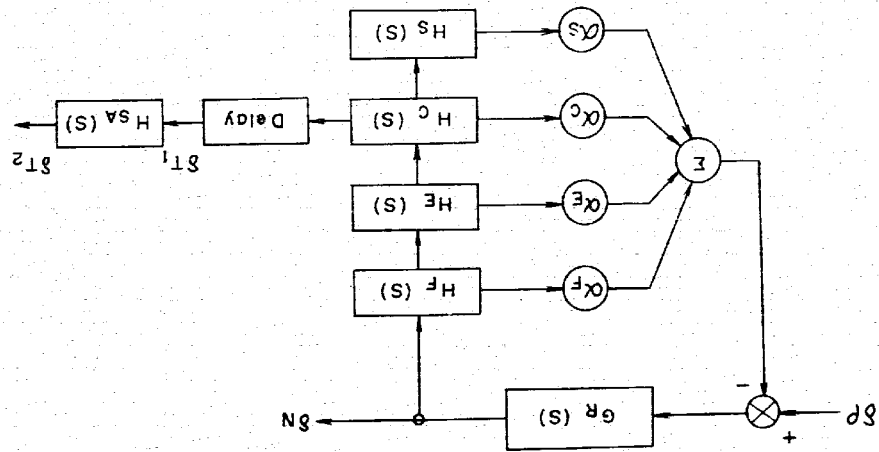


Fig. 5.3 Calculated Value of Feedback Transfer Function
 (Gain (\$) = $\frac{\delta P/\beta}{\delta n/n}$)

Fig. 5.2 Calculational Model

$G_R (S)$: Zero-Power Transfer Function
 $H^A (S)$: Response of S/A Outlet Thermocouple
 $H^F (S)$: Transfer Function (Power - Fuel Temp.)
 $H^E (S)$: Transfer Function (Fuel Temp.-Clad Temp.)
 $H^C (S)$: Transfer Function (Clad Temp.-Coolant Temp.)
 $H^S (S)$: Transfer Function (Coolant Temp.-Structural Material Temp.)
 T_1 : S/A Outlet Temp.
 T_2 : S/A Outlet Thermocouple Signal
 N : Reactor Power
 ρ : Reactivity
 $\alpha_F, \alpha_E, \alpha_C, \alpha_S$: Reactivity Coefficient



6. 結 言

以上の試験結果をまとめると以下の通りである。

- (1) 零出力伝達関数は、測定値と計算値がよく一致した。これは、今回計算に使用した β, τ, τ_1 が妥当なものであることを示している。
- (2) 高出力伝達関数は、ゲインは非担で顕著なピークもなく負のフィードバック効果が大きく、原子炉は安定である。また、Nyquist 判定法からも安定であることを確認した。
- (3) フィードバック伝達関数は時定数2~4秒の1次もしくは2次で近似でき、集中数近似で求めた計算結果とよく一致した。その時定数は、出力が上昇すると共に長くなる。これは、燃料ペレットの熱電導度の温度特性から定性的に説明できる。
- (4) 中性子束と燃料出口温度の伝達関数は、フィードバック伝達関数とほぼ同じ時定数をもつ1次遅れで近似できた。これは、上記両伝達関数とも、燃料温度変化の寄与が大きいためであることが明らかになった。
- (5) 中心燃料集合体出口温度計（熱電対）の時定数は、約3.2秒である。
- (6) 2次系のNa温度制御系の効果は、今回の測定（反応度幅約7 μ ）では、0.001Hz付近の低周波領域のみに限られることが判った。

今回の報告は、炉心振回りの解析結果に限られており、今後1次、2次冷却系回りの解析を進め、炉雑音測定結果と対比しながら総合的に、プラントの性能を評価してゆく予定である。

7. 謝 辞

本試験の実施にあたり、御協力いただいた原子炉第2課の堀江、前田、長広の諸氏、東京芝浦電気株式会社、NAIG 研、及び北大実習生の諸氏に厚く感謝の意を表します。

する。

2次コイルで検出された信号はブリアンフで一旦増幅され、炉内流量温度監視盤へ送られる。2つの2次コイルは、1次コイルから直接受ける信号は同相で、誘導電流によって受ける信号は逆位相で検出するように接続されているため、減算回路により流量に比例した信号（以後：差信号と呼ぶ）に、和算回路により流量に依存しない主に温度に依存した信号（以後：和信号と呼ぶ）になる。減算回路の出力には、サトリウムが流れていない時に構造上、検出部が完全に対称でないため多少信号が出るが（不平衡成分）これを除去するために、発振器から位相制御回路を組んで不平衡成分と逆位相の信号が減算回路の入力に送られる。一方、和算回路にも検出部が対称でないために混入する流量信号を除去する回路がある。

これら両信号及び差信号は、それぞれ帯域フィルター、整流回路を通り割算回路へと送られる。割算回路では、流量に対する差信号の出力曲線の傾きが温度の上昇と共に大きくなり、和信号はほぼ温度に比例して増加することを利用して差信号を和信号で除することにより温度補償を行う。

この温度補償後の信号と、小型流量温度検出器内の熱電対からの信号が2ペン記録計で記録される。

ナトリウムループを用いて行った流速計の校正結果をFig. 8.5に示す。

Fig. 8.6, Fig. 8.7は、「常態」に据付後、冷却材温度220℃～245℃の間で、主に1次流量計出力の特性試験結果を示す。

Fig. 8.8は、流量計温度信号（和信号）の温度特性の試験結果であるが、冷却温度390℃～480℃まではほぼ線形で近似できる。

8.2 データ処理法の概要

(1) 伝達関数の測定解析法

反応度変化（回転吸収体回転信号）に対する中性子束、原子炉出口温度等の伝達関数を求める解析方法について記述するが、解析は主としてパイルオリシレータ測定解析装置で行うので、本解析装置について以下に説明する。

(1) パイルオリシレータ測定解析装置

本装置では、広い周波数帯域に渡って解析可能なこと、振幅と位相の情報が増えられること、測定が容易なことからシンクロノス法を採用している。この方法の原理を説明する。

正弦波状入力角周波数を ω 、振幅を a とし $(a \sin \omega t)$ 、解析する出力信号を $b \sin(\omega t + \theta)$ とする。振幅 b と入力位相差 θ を求めるわけだが、出力信号には通常様々な雑音成分が含まれているため、その影響を除く必要がある。そこで入力信号 \sin と \cos を用いて次のような操作を行う。即ち、測定時間 T とすると、

$$I_1 = \frac{1}{T} \int_0^T a \sin \omega t \cdot b \sin(\omega t + \theta) dt \quad \dots \dots \dots (1)$$

$$I_2 = \frac{1}{T} \int_0^T a \cos \omega t \cdot b \sin(\omega t + \theta) dt \quad \dots \dots \dots (2)$$

を求めれば、 T が非常に大きい場合には、近似的に

$$b = \frac{1}{a} \sqrt{I_1^2 + I_2^2} \quad \dots \dots \dots (3)$$

$$\theta = \tan^{-1} \frac{I_2}{I_1} \quad \dots \dots \dots (4)$$

となり、振幅と位相を得ることができる。

しかし、 T は有限なので厳密には、

$$I_1 = \frac{1}{2} ab \cos \theta - \frac{1}{\omega T} \cos(\omega T + \theta) \sin \omega T \quad \dots \dots \dots (5)$$

$$I_2 = \frac{1}{2} ab \sin \theta + \frac{1}{\omega T} \cos(\omega T + \theta) \sin \omega T \quad \dots \dots \dots (6)$$

となり、 b と θ を(8)、(4)で求めると測定時間 T によって誤差を生じる。

T を入力角の半周期の整数倍にすると、 $\sin \omega T$ がゼロとなり上記誤差はゼロとなる。

ここで、入力信号の相互関数を求めると、近似的に

$$\phi(\tau) = \frac{1}{T} \int_0^T a \sin \omega t \cdot b \sin(\omega t + \theta - \tau) dt \quad \dots \dots \dots (7)$$

となる。前述の I_1 は $\phi(0)$ に等しい。

T を半周期の整数倍にとると、

$$\phi(\tau) = \frac{1}{2} ab \cos(\tau - \theta) \quad \dots \dots \dots (8)$$

となり、ピークの位置 $\tau = \tau_0$ とピーク値 $A = \frac{1}{2} ab$ から下記の式から、 b と θ が得られる。（周期を T_1 とする）

$$b = \frac{2A}{a} \quad \dots \dots \dots (9)$$

$$\theta = -360^\circ \times \frac{\tau_d}{T_1} \quad \dots \dots \dots (10)$$

Fig. 8.9にパイルオリシレータ測定解析装置のブロック図を示す。

動作の概要を以下に述べる。

回転吸収体の回転軸にギヤーによって結合されたシンクロ検出器からは400 Hzで変調された $\sin \omega t$ と $\cos \omega t$ に比例した電圧がえられる。この2信号はサイン・コサイン変換器

に送られ、副調され $\sin \omega t$, $\cos \omega t$ に比例したアナログ電圧を発生させる。
 この $\sin \omega t$ に比例した信号が、回転吸収体によって印加される反応度比に比例して出力される。
 一方、解析される原子炉からの出力信号はサブレンジ・アップに送られ、直流分を差引かれて変動のみ取出し、増幅される。サブレンジ・アップ及びサイン・コサイン変換器の出力が相関計に送られ、相互相関関数が計算される。このとき制御回路により計算時間が入力周期の整数倍に等しくなるよう制御する。実際の解析では、設定表示器において予め解析回転数を設定すれば、回転吸収体の回転数が設定値と一致した時、制御回路により相関計を停止する。

(ロ) その他の解析方法

伝達関数の解析のための適便な方法として、ペンレコーダ上に書かせた入出力信号のカーブから振幅と位相差を直接求めることにより伝達関数が求まる。本方法により、測定直後にモニタとして伝達関数を求めた。

また、データが膨大であるため前記のバイオリネータ測定解析装置では非常に時間がかかるので、入出力信号を A-D 変換器を使用して大型計算機に取り込み、相互相関関数を計算する方法により、今後は解析を進める予定である。

8.3 零出力原子炉の伝達関数の計算

(1) 計算方法

臨界状態におけるゼロ出力原子炉の伝達関数を $G(j\omega)$ とおくと、

$$G(j\omega) = \frac{1}{1 + \frac{\omega}{\beta} + \frac{\beta_1/\beta}{j\omega + \lambda_1}} \dots \dots \dots (1)$$

ただし ω : 角周波数

β_1 : 第 1 群の遅発中性子生成割合

λ_1 : 第 1 群の遅発中性子崩壊定数

ω : 角周波数

j : 複素変数

$\beta = \sum \beta_i$

である。「常陽」では、バイオリネータの回転周波数領域 (0 ~ 10 Hz 程度) にあっては、式(1)の分母の第 1 項は第 2 項に比べて無視でき、

$$G(j\omega) \approx \frac{1}{j\omega (\sum \beta_i / \beta + \lambda_1)} \dots \dots \dots (2)$$

と近似できる。

従って、 β_1 および λ_1 を与えてやれば式(2)より $G(j\omega)$ が求まる。今回の計算に使用した β_1 (注 1) λ_1 (注 2) を Table 8.1 に示す。これらの値は、どちらも G.R.Keepin のデータを用いて算出されている。

Fig. 8.10, 8.11 に計算結果を示す。

8.4 ファイードバック伝達関数の計算

(1) 基本式

集中定数モデルによる、炉心ファイードバック伝達関数を求めるための基本式は以下の通りである。

(イ) 燃料温度

$$\frac{d\theta_f}{dt} = \frac{\alpha_P \cdot n}{\rho_P \cdot C_P} - \frac{2 \cdot h^* \cdot F \rightarrow c}{\rho_P \cdot C_P \cdot R_F} (\theta_f - \theta_c) \dots \dots \dots (1)$$

(ロ) 被覆材温度

$$\frac{d\theta_c}{dt} = \frac{2 \cdot R_B \cdot h^* \cdot F \rightarrow c}{\rho_B \cdot C_B \cdot (R_B^2 - R_C^2)} (\theta_f - \theta_c) - \frac{2 \cdot R_C \cdot h^* \cdot F \rightarrow c}{\rho_C \cdot C_C \cdot (R_C^2 - R_S^2)} (\theta_c - \theta_s) \dots \dots \dots (2)$$

(ハ) 冷却材温度

$$\frac{d\theta_s}{dt} = \frac{2 \cdot R_B \cdot h^* \cdot F \rightarrow c}{\rho_C \cdot C_C \cdot (R_C^2 - R_B^2)} (\theta_c - \theta_s) - \frac{2 \cdot R_C \cdot h^* \cdot F \rightarrow c}{\rho_C \cdot C_C \cdot (R_C^2 - R_S^2)} (\theta_c - \theta_s) - \frac{2 \cdot G_c}{\rho_c \cdot H} (\theta_c - \theta_{in}) \dots \dots \dots (3)$$

(ニ) 構造材温度

$$\frac{d\theta_s}{dt} = \frac{2 \cdot \pi \cdot R_c \cdot H \cdot h^* \rightarrow s}{\rho_s \cdot C_s \cdot V_s} (\theta_c - \theta_s) \dots \dots \dots (4)$$

ここで、

θ_f : 燃料温度 (°C)

θ_c : 被覆材温度 (°C)

θ_s : 冷却材 " (°C)

θ_s : 構造材 " (°C)

θ_{in} : 冷却材炉心入口温度 (°C)

その他は、Table 8.2 の定数表に数値とともに示す。
 (2) 炉心ファイードバック伝達関数
 原子炉伝達関数は、Fig. 8.12 のごとく表わされる。

(注 1) 表 - (52) - 73

(注 2) 「常陽」安全性確認のための炉心解析 (I) 核特性解析

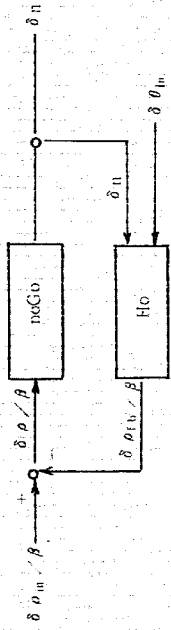


Fig. 8.12 Reactor Transfer Function

$\delta \theta_f = 0$ と仮定すれば、フィードバック伝達関数 H_0 は以下の通り表わされる。

$$H_0 = \frac{\delta \rho_{fb} / \beta}{\delta \theta_m} \dots (5)$$

$$\delta \rho_{fb} / \beta = -(a_f \cdot \delta \theta_f + a_e \cdot \delta \theta_e + a_c \cdot \delta \theta_c + a_s \cdot \delta \theta_s) \dots (6)$$

$$a_f = a_{11} + a_{12} \dots (7)$$

基本式(1), (2), (3), (4)式を整理すれば、次式のごとくなる。

$$\frac{d}{dt} \theta_f = a' \cdot n - b' (\theta_f - \theta_e)$$

$$\frac{d}{dt} \theta_e = c' (\theta_f - \theta_e) - d' (\theta_e - \theta_c)$$

$$\frac{d}{dt} \theta_c = e' (\theta_e - \theta_c) - f' (\theta_c - \theta_s) - g' G_c (\theta_c - \theta_m)$$

$$\frac{d}{dt} \theta_s = h' (\theta_c - \theta_s)$$

ここで、 $a' = \alpha_F / \rho_F C_F = 320$

$$b' = 2 \cdot h \cdot \frac{V}{V_c} / \rho_F C_F R_F = 0.4764$$

$$c' = 2 \cdot R_c h \frac{V}{V_c} / \rho_F C_F (R_F^2 - R_c^2) = 1.541$$

$$d' = 2 \cdot R_e \cdot h \cdot \frac{V}{V_c} / \rho_F C_E (R_E^2 - R_c^2) = 54.73$$

$$e' = 2 \cdot R_e \cdot h \cdot \frac{V}{V_c} / \rho_c C_c (R_c^2 - R_E^2) = 55.63$$

$$f' = 2 \cdot R_c h c_{\rightarrow s} / \rho_c C_c (R_c^2 - R_E^2) = 72.94$$

$$g' = 2 / \rho_c \cdot H = 0.00386$$

$$h' = 2 \pi R_c H h c_{\rightarrow s} / \rho_s C_s V_s = 537.5$$

$$G_c = 4197.3$$

(7)式をラプラス変換し、 $\delta \theta_{i,n} = 0$ とおいて $\delta \theta_f / \delta n$, $\delta \theta_e / \delta n$, $\delta \theta_c / \delta n$ を求める。

$$\delta \theta_f / \delta n = \frac{a'}{s + b'} \left(1 + \frac{b'c'}{s^2 + (b' + c' + d')s + b'd'} \left(1 + \frac{d'e'(s + b')}{X_0} \right) \right)$$

$$\delta \theta_e / \delta n = \frac{a'c'}{s^2 + (b' + c' + d')s + b'd'} \left(1 + \frac{d'e'(s + b')}{X_0} \right)$$

$$\delta \theta_c / \delta n = \frac{a'c'e'(s + h')}{X_0}$$

$$\delta \theta_s / \delta n = \frac{a'c'e'h'}{X_0}$$

ここで、 $\dots (8)$

$$X_0 = s^4 + (b' + c' + d' + e' + f' + g' G_c + h') s^3 + (b' + c') (e' + f' + g' G_c) + d' (b' + f' + g' G_c) + h' (b' + c' + d' + e' + g' G_c) s^2 + (b'd' (f' + h' + g' G_c) + e'h' (b' + c')) + g' G_c h' (b' + c' + d') s + b'd' g' G_c h'$$

(6), (8)式より、 $S = j\omega$ とおいてフィードバック伝達関数 H_0 のボード線図を計算により求める。

(3) 計算結果

Fig. 8.12, 8.13は、フィードバック伝達関数のボード線図(ゲイン,位相)であり、計算結果(50 MW)と測定結果(48 MW)を示す。

Fig. 8.14は燃料, 冷却材, 構造材および被覆材における温度変動がフィードバック伝達関数のゲインに寄与する割合を示したものであり、次式は図中の各変数の内容を示す。(6)式参照)

(1) トータル

$$\delta \rho_{fb} / \beta = -(a_f \cdot \delta \theta_f + a_e \cdot \delta \theta_e + a_c \cdot \delta \theta_c + a_s \cdot \delta \theta_s)$$

$$G_{total} = \frac{\delta \rho_{fb} / \beta}{\delta n / n} \quad \text{ここで、} \delta n / n = \frac{1}{50}$$

(2) 燃料温度

$$\delta \rho_f / \beta = -a_f \cdot \delta \theta_f$$

$$G_f = \frac{\delta \rho_e / \beta}{\delta n / n}$$

(3) 被覆材温度

$$\delta \rho_e / \beta = -a_c \cdot \delta \theta_e$$

$$G_e = \frac{\delta \rho_c / \beta}{\delta n / n}$$

(4) 冷却材温度

$$\delta \rho_c / \beta = -a_c \cdot \delta \theta_c$$

$$G_c = \frac{\delta \rho_c / \beta}{\delta n / n}$$

(中) 構造材温度

$$\delta \rho_s / \beta = -\alpha_s \cdot \delta \theta_s$$

$$C_s = \frac{\delta \rho_s / \beta}{\delta n / n} \dots \dots \dots (9)$$

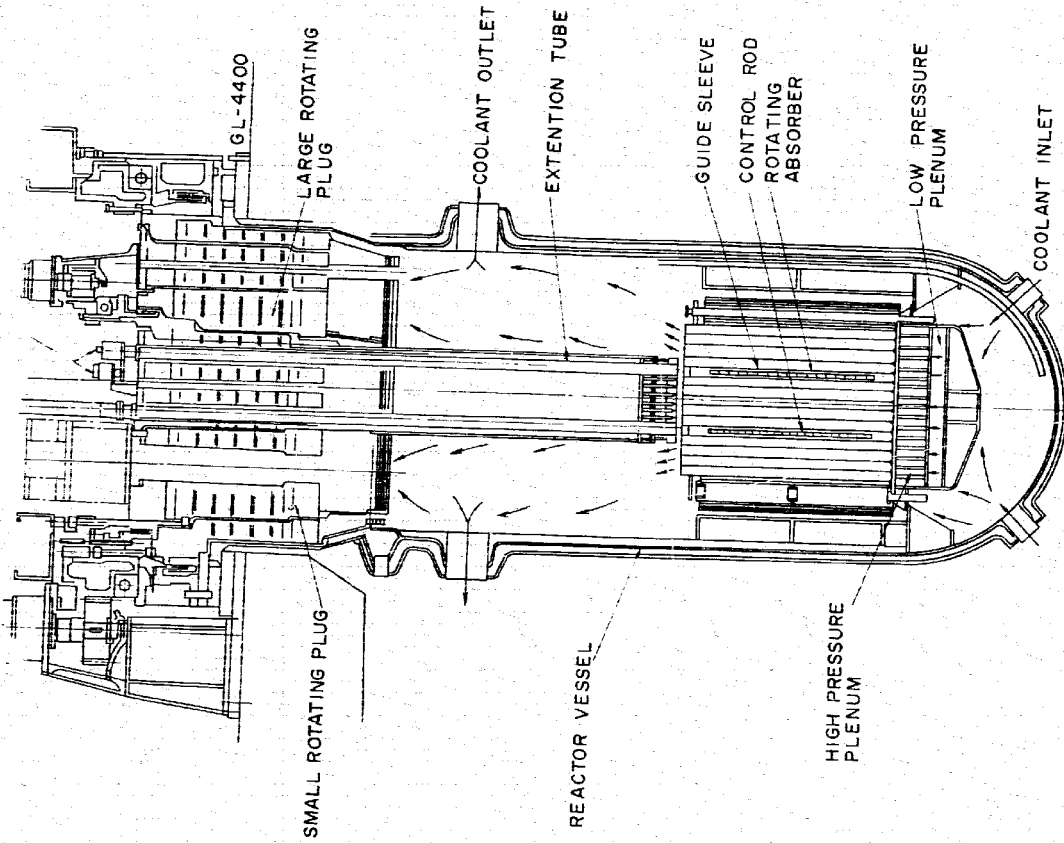


Fig 8.1 PILE OSCILLATOR

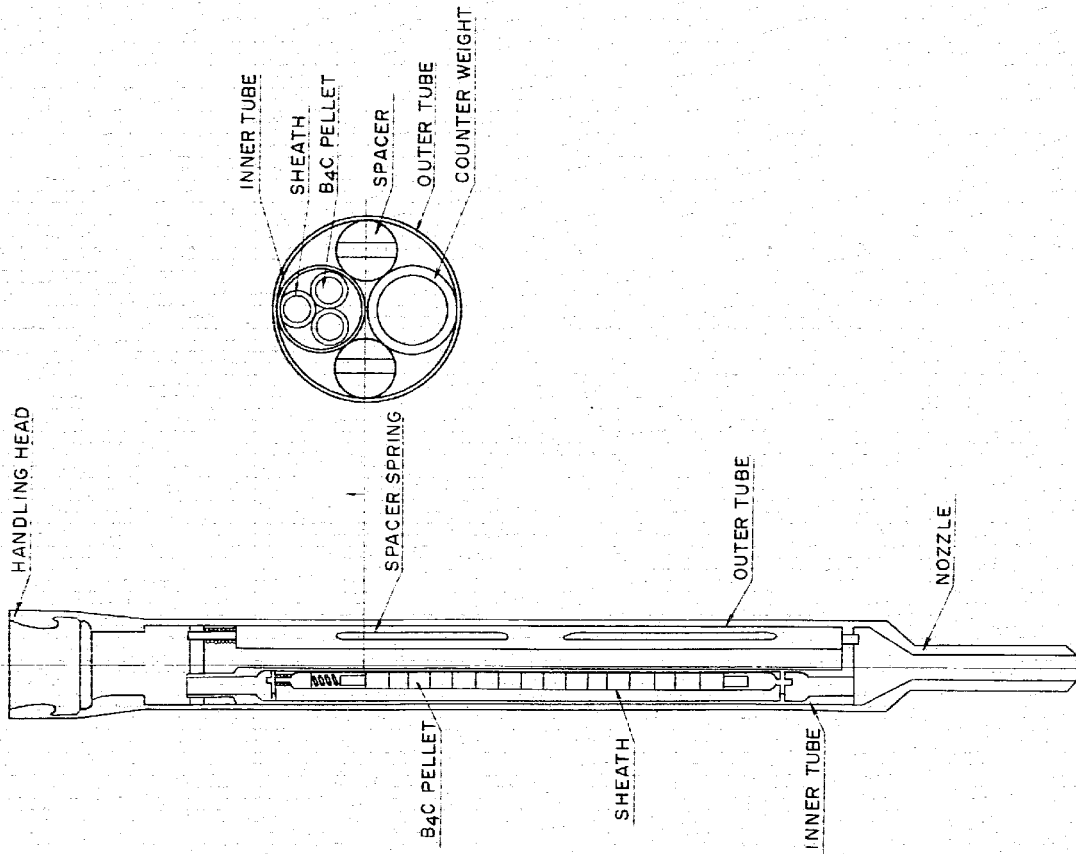


Fig 8.2 OSCILLATOR ROD

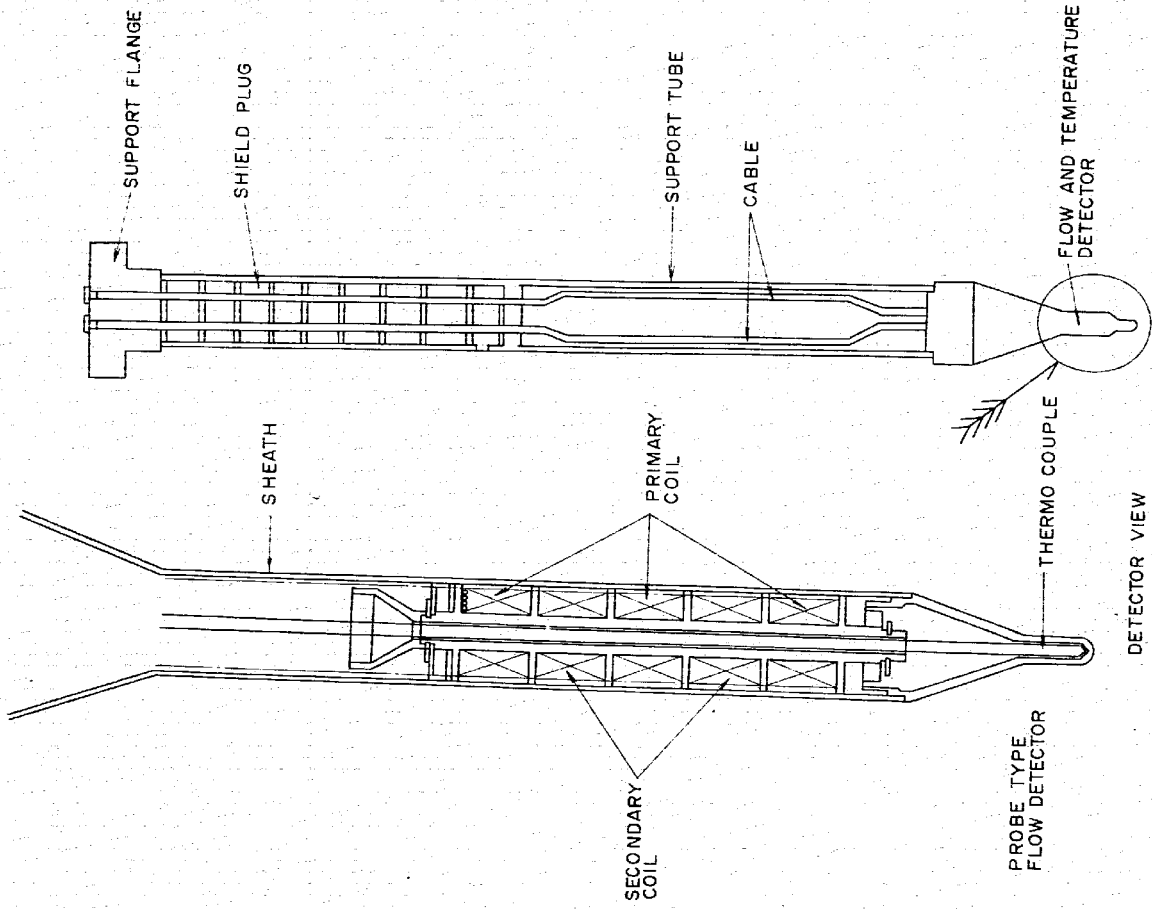


Fig. 8.3 SUB-ASSEMBLY FLOW TEMPERATURE DETECTOR

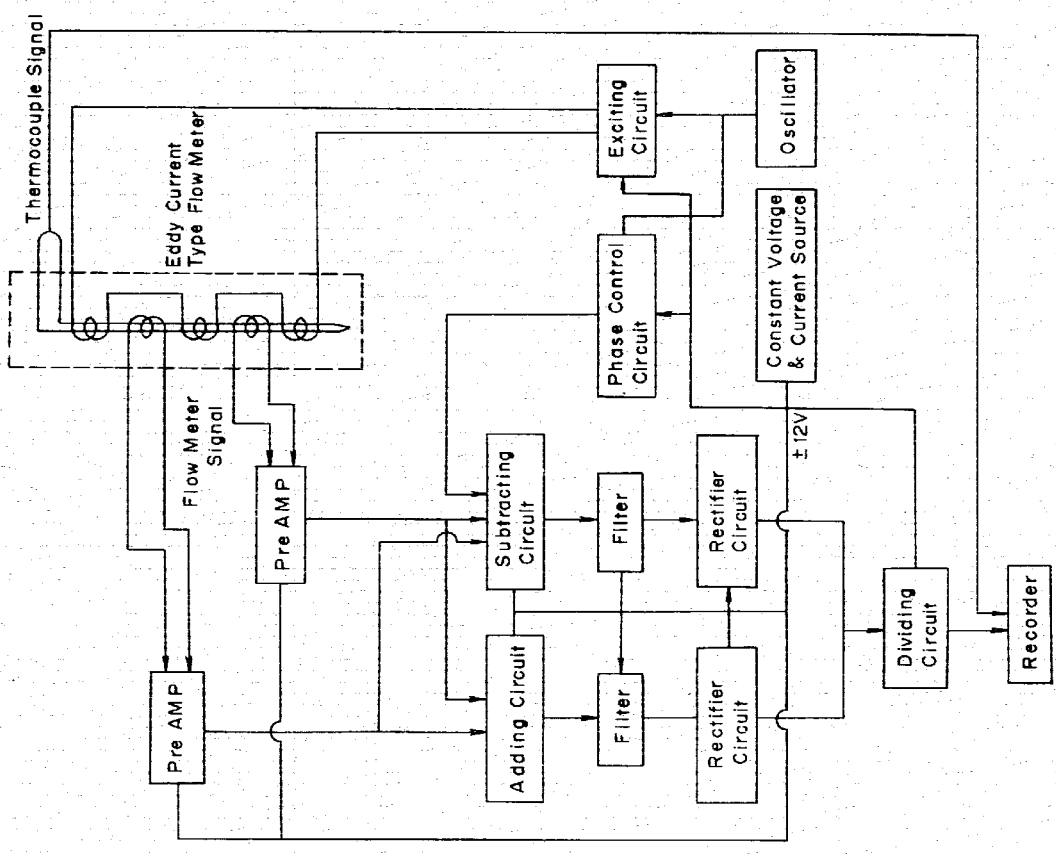


Fig. 8.4 Block Diagram of Core Outlet Flow Monitoring System

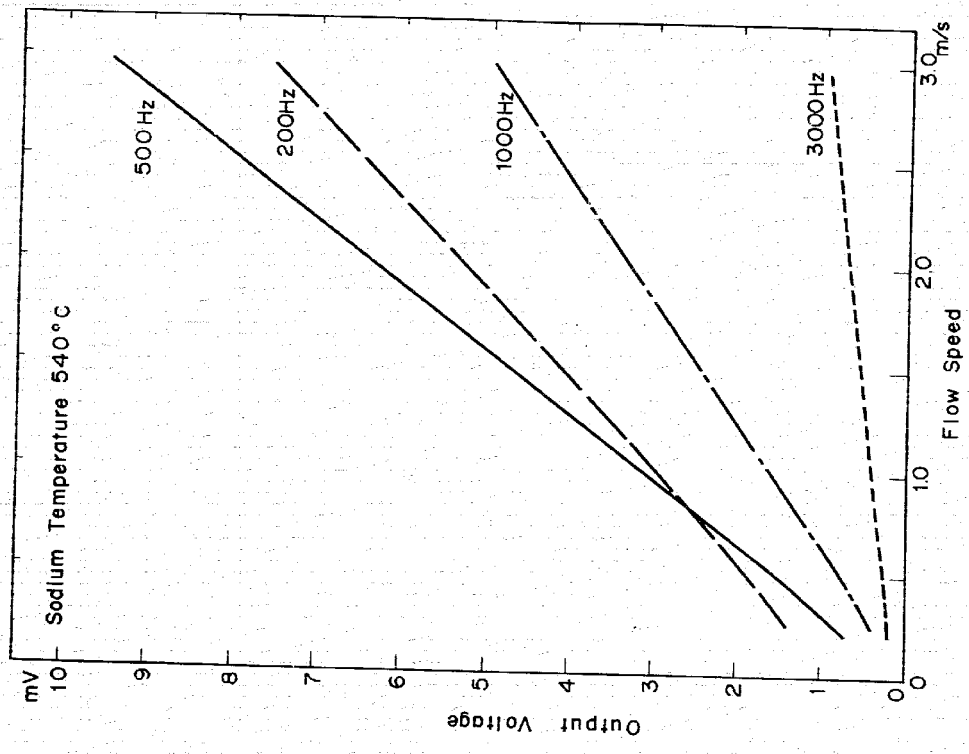


Fig 8.5 Flow Speed vs. Output Voltage Curves

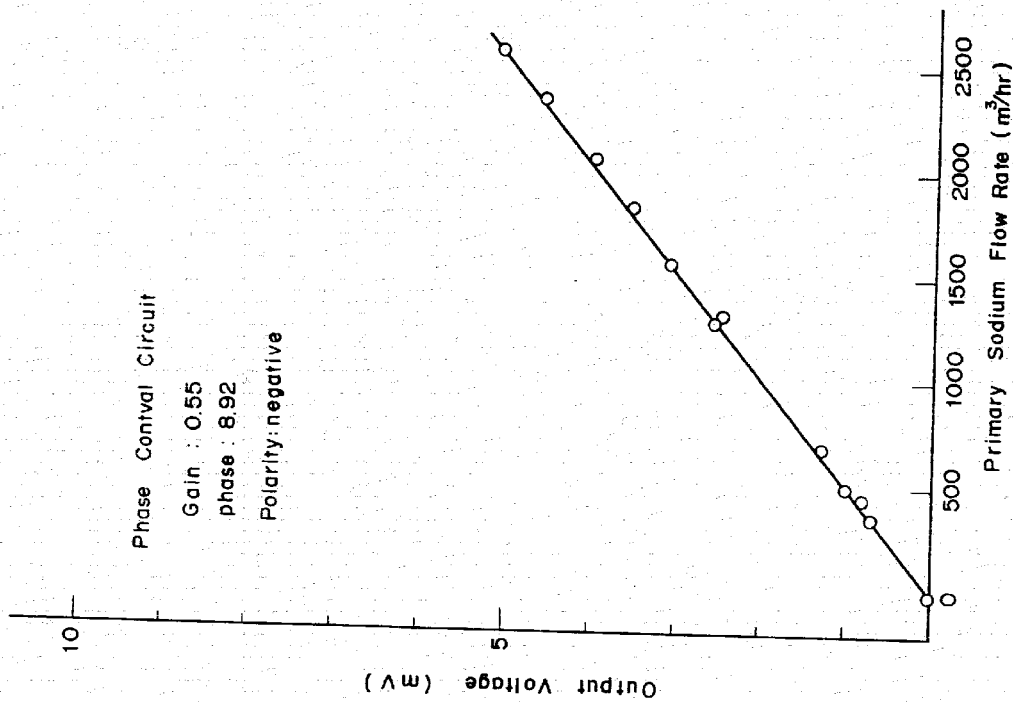


Fig. 8.7 Flow meter Characteristics (an Eddy Current Type)

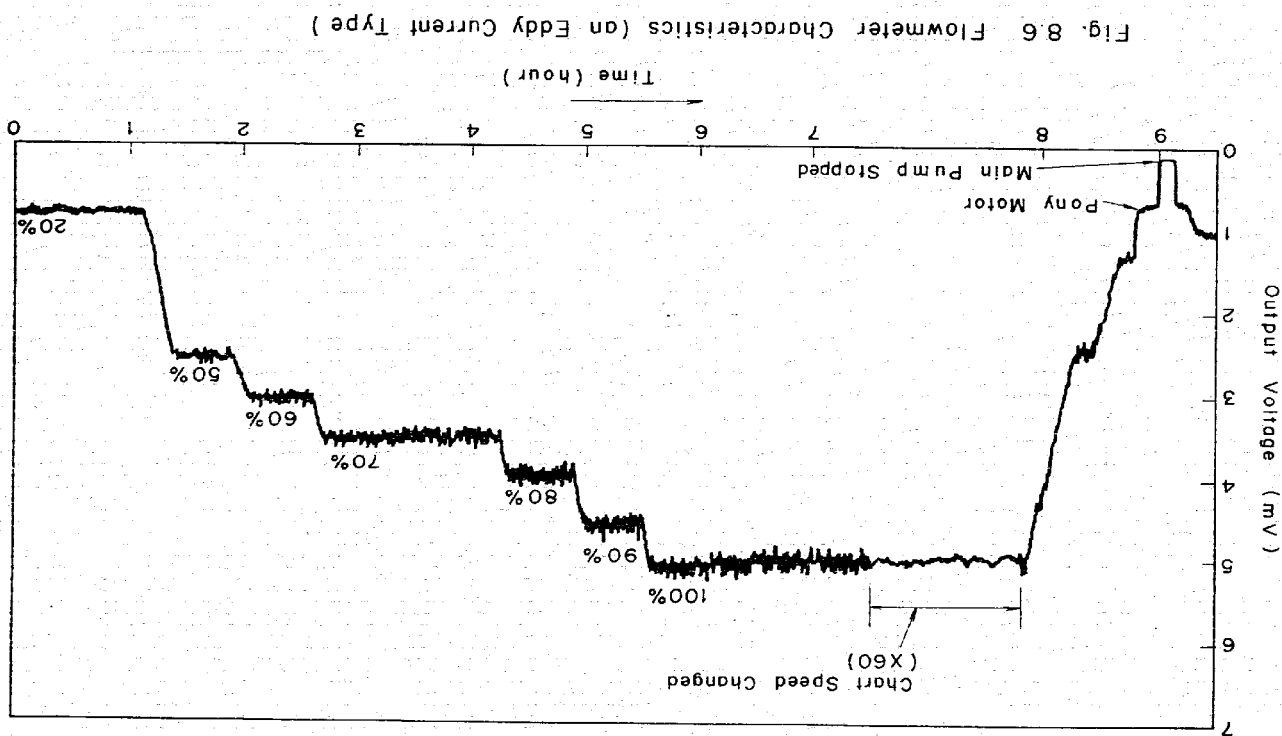


Fig. 8.6 Flowmeter Characteristics (an Eddy Current Type)

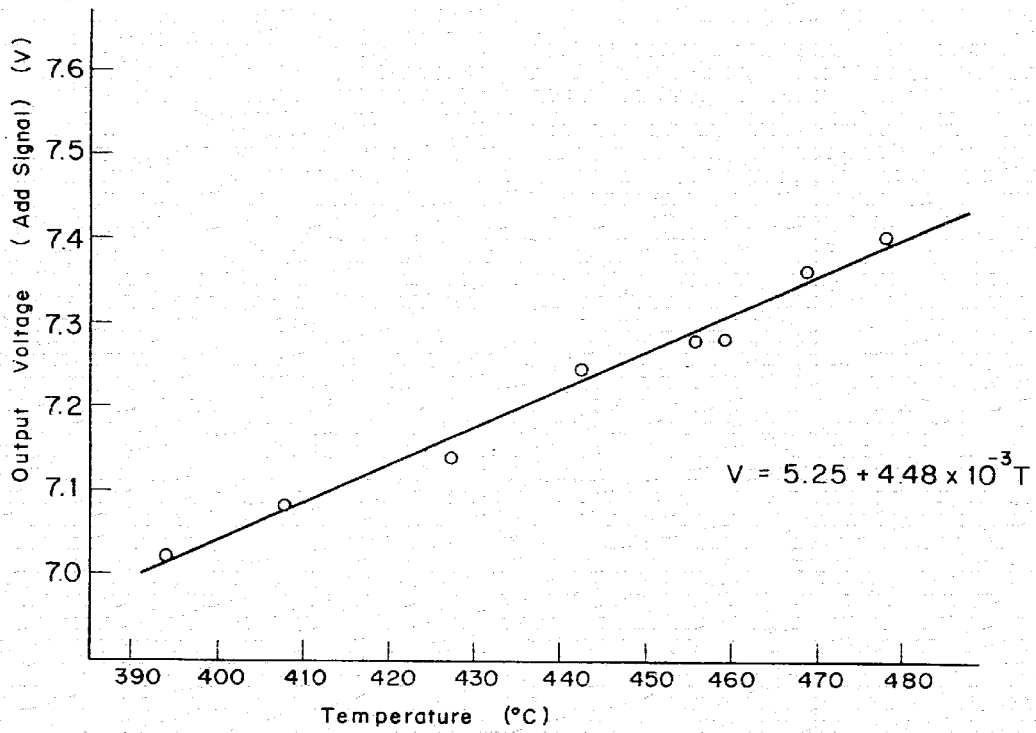


Fig. 8.8 Temperature vs. Output Voltage (Add Signal) Curve

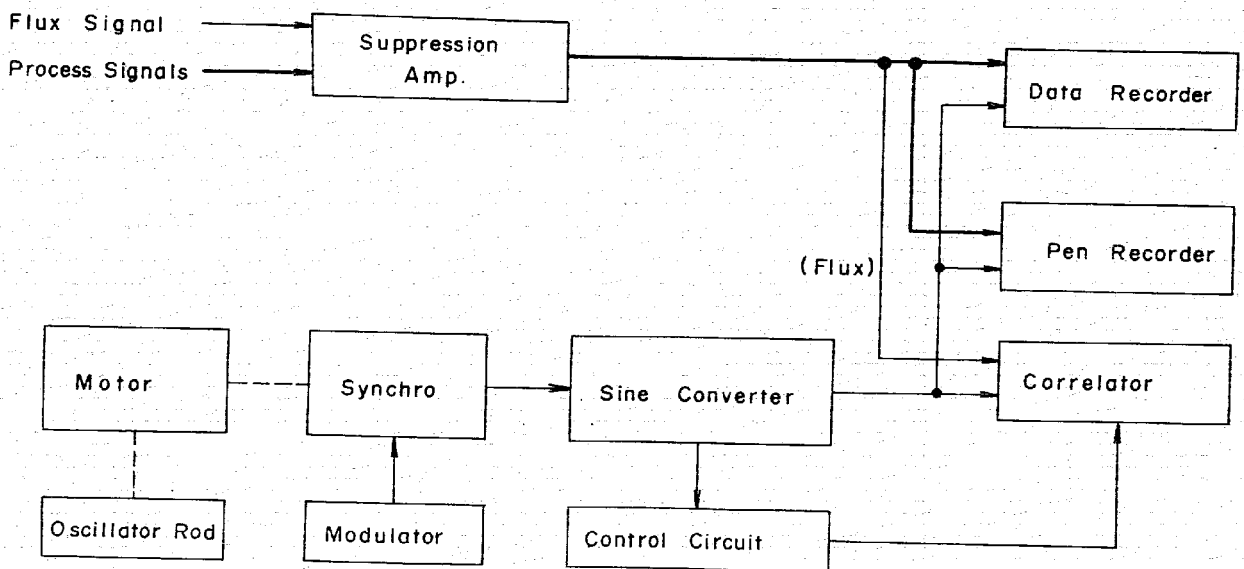


Fig. 8.9 Data Acquisition System Diagram in Pile Oscillator Tests

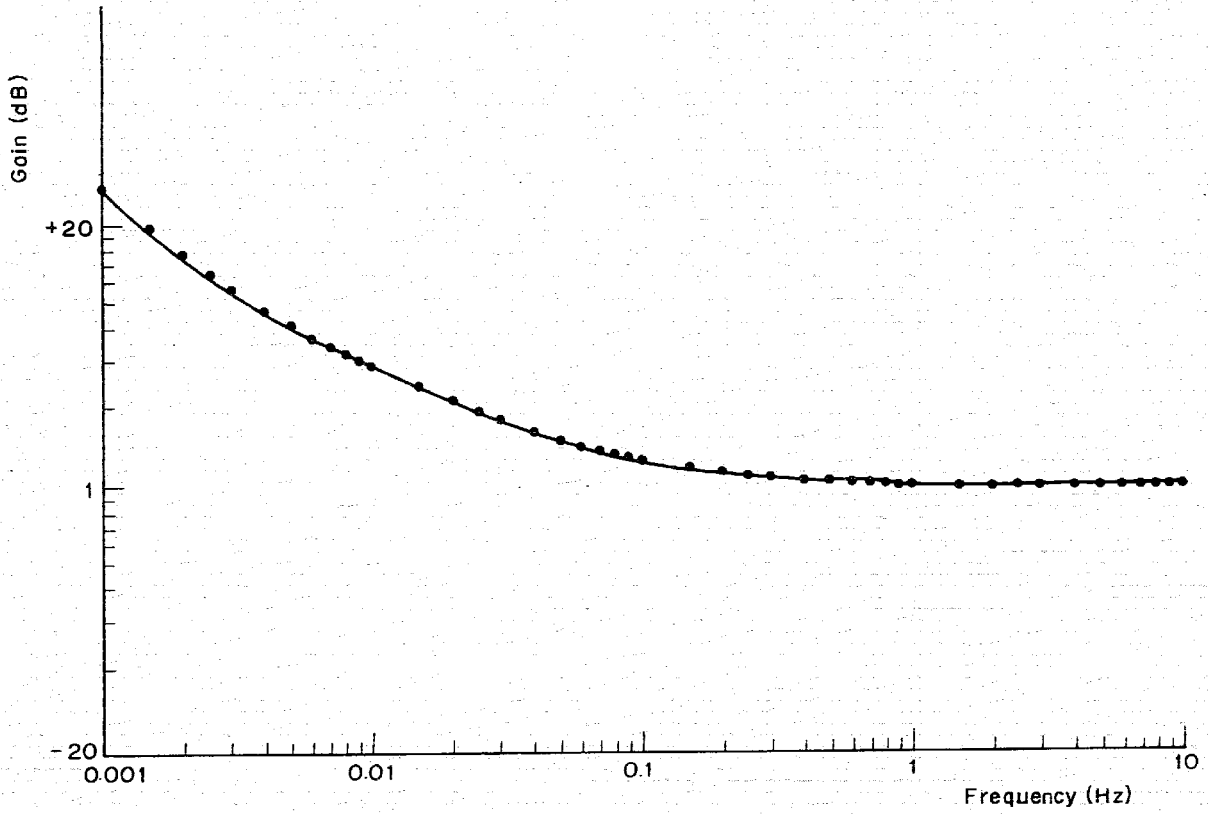


Fig. 8.10 Calculated Zero-Power Transfer Function (Gain)

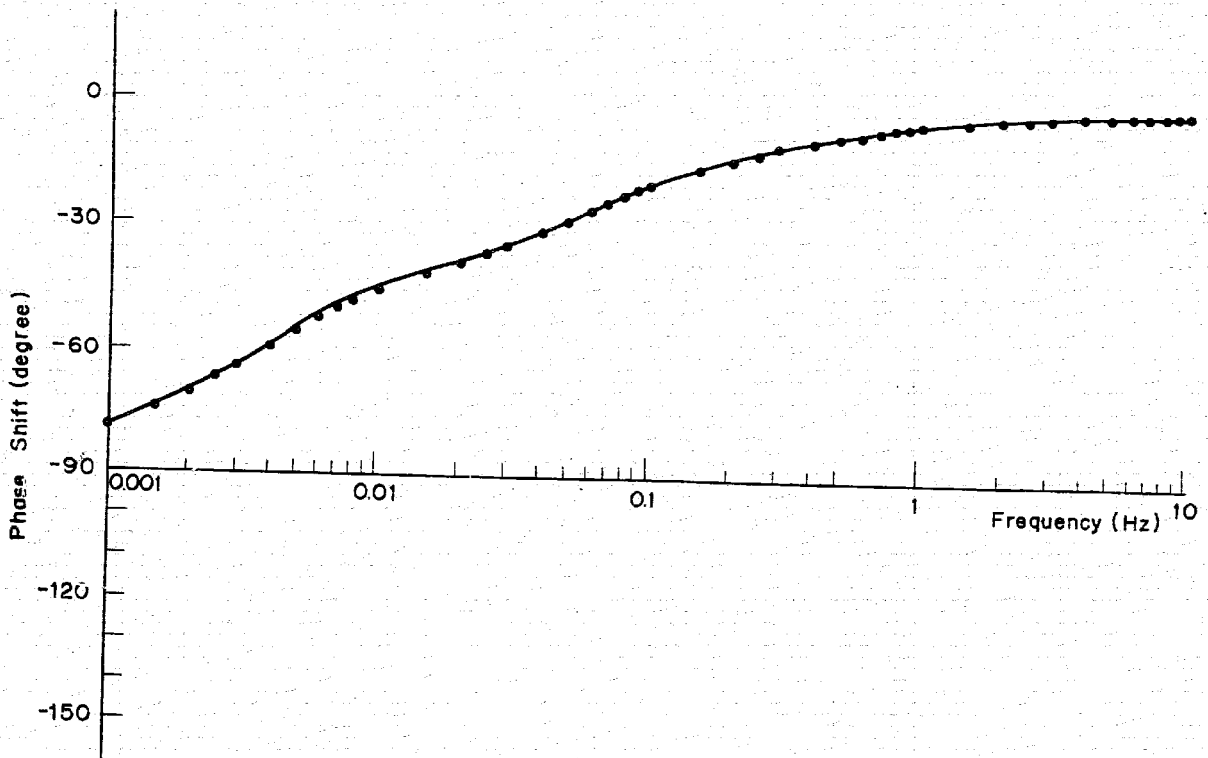


Fig. 8.11 Calculated Zero-Power Transfer Function (Phase Shift)

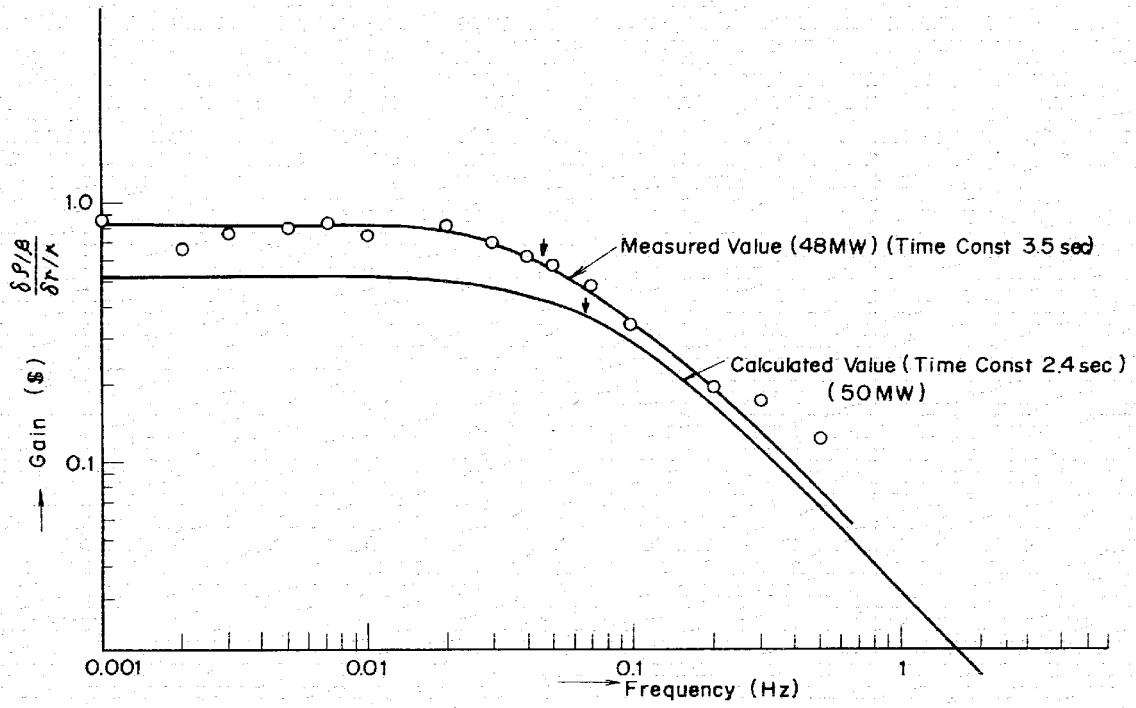


Fig 8.12 Feedback Transfer Function (I) (Gain)

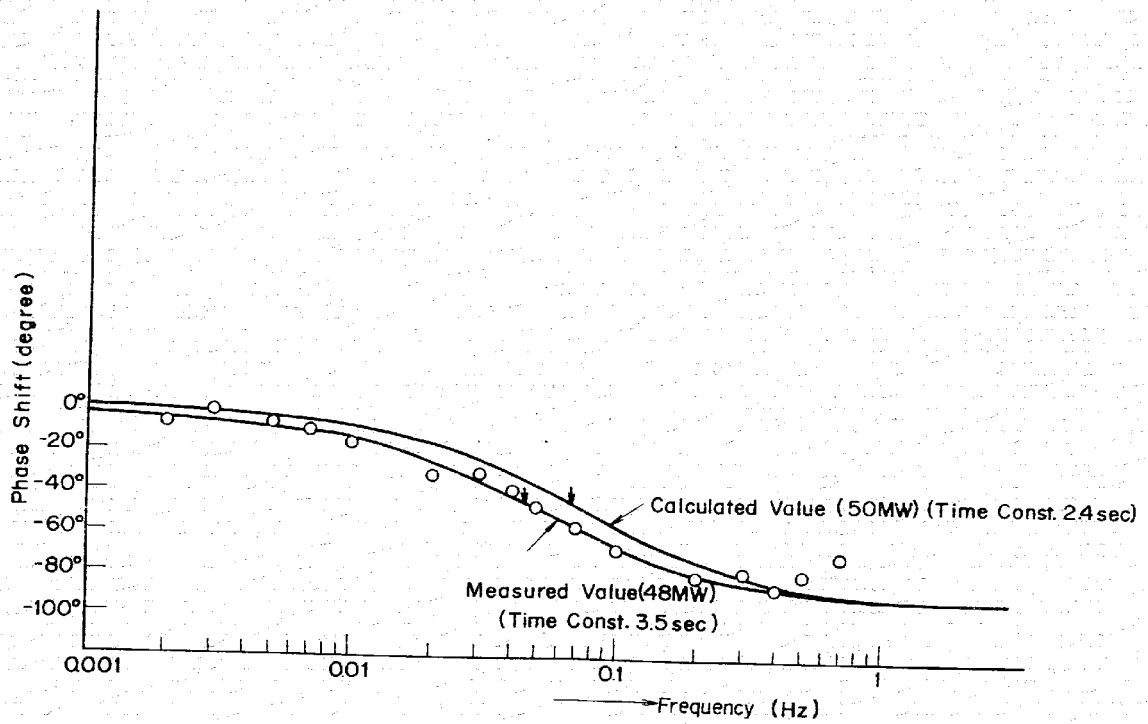


Fig 8.13 Feedback Transfer Function (phase Shift)

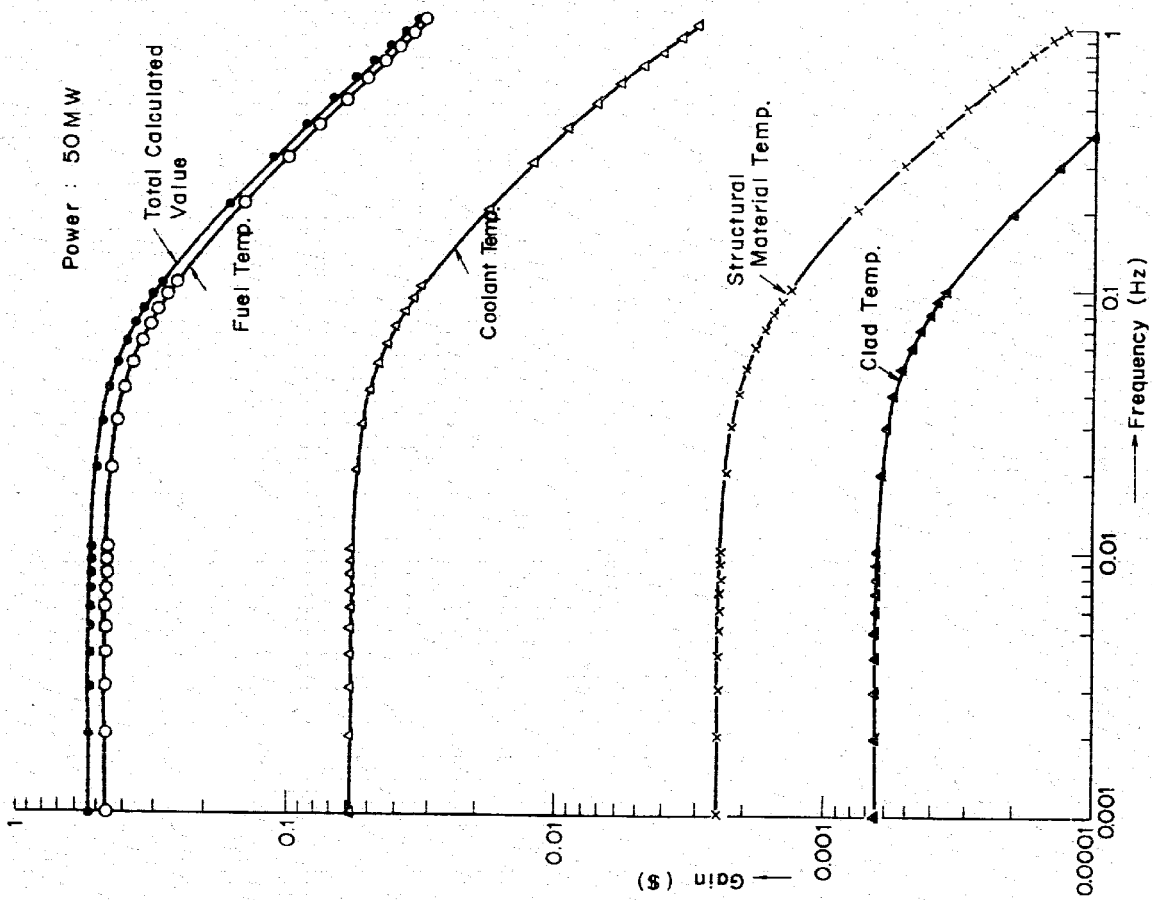


Fig. 8.14 Calculated Value of Feedback Transfer Function
 (Gain (\$) = $\frac{\delta S/\beta}{\delta W/M}$)

Table 8.1 Delayed Neutron Yield from Fission

Group Index (i)	Decay Constant λ_i (sec ⁻¹)	Group Delayed Neutron Fraction (β_i)
1	0.0128	0.0001641
2	0.0316	0.001058
3	0.125	0.0009562
4	0.326	0.001999
5	1.385	0.0007591
6	3.840	0.0002026
Total Delayed Neutron Fraction (β)		0.005139

Table 8.2 Constant Table

Symbol	Item	Unit	Value
ρ_p	Heat Density	Kcal/m ³ ·s·MW	0.257×10^4
h^*_{F+E}	Heat Transfer Coefficient (fuel-clad)	Kcal/m ² ·s·°C	0.526
h^*_{E+C}	" (clad-coolant)	"	16.6
h^*_{C+S}	" (coolant-structure)	"	16.6
ρ_F	Density (fuel)	Kg/m ³	1.0388×10^4
ρ_E	" (clad)	"	0.7980×10^4
ρ_C	" (coolant)	"	0.864×10^3
ρ_S	" (structure)	"	0.798×10^4
C_p	Specific Heat (fuel)	Kcal/Kg°C	0.0773
C_E	" (clad)	"	0.115
C_C	" (coolant)	"	0.305
C_S	" (structure)	"	0.115
R_F	Fuel Pin Radius	m	2.75×10^{-3}
R_E	Clad Outer Radius	"	3.15×10^{-3}
R_C	Clad Inner Radius	"	2.80×10^{-3}
R_S	Structure Inner Radius	"	4.13×10^{-3}
H	Core Height	"	0.6
V_S	Structural Material Volume	m ³	5.24×10^{-7}
G _C	Total Flow	Kg/m ² S	4197.3
α_{f1}	Temperature Coefficient of Fuel	\$/°C	-6.6×10^{-4}
α_{f2}	Doppler Coefficient	"	-6.0×10^{-4}
α_e	Temperature Coefficient of Clad	"	-1.04×10^{-4}
α_C	" of Coolant	"	-1.8×10^{-3}
α_S	" of Structure	"	-7.6×10^{-5}