

高速実験炉「常陽」性能試験結果報告書

高出力炉雑音特性

1979年12月

動力炉・核燃料開発事業団

高速実験炉「常陽」性能試験結果報告書

高出力炉雑音特性

三田敏男^{**} 大谷秀二^{**} 佐野健一^{*}
牧戸正紀^{***} 細島幹泰^{*} 村松寿晴^{*}
関口善之^{*}

要 言

高速実験炉「常陽」の動特性試験の一環として、炉雑音試験を行った。本試験では、50 MWまでの出力上昇の各段階において、中性子束、燃料出口温度、主冷却系1次系回り及び2次系回りの温度信号のゆらぎを測定した。解析においては、各信号のパワースペクトル密度、相関関数、伝達関数及びコヒーレンス関数を求めて、これより原子炉の特性の解析を行った。

主な試験結果は、以下の通りである。

- (1) 原子炉に不安定現象がないことを確認した。
- (2) 各信号とも低周波領域で変動が大きく、信号間の相関が強い。この領域における中性子束及び原子炉出口温度の定常変動の要因を検討した。
- (3) 中性子束の自己パワースペクトル密度には、約1.8 Hz及び約0.025 Hzに顕著なピークが存在するが、前者のピークは制御棒振動効果によるものであり、後者のピークは炉出力依存性が顕著であり、検出器位置による空間依存性が存在する。
- (4) 2次系回りの各信号の相互相関関数から各信号間の輸送遅れ時間を求めた。この結果は、流速と配管長から計算される値とよく一致した。

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-arai Engineering Center, Power Reactor
and Nuclear Fuel Development Corporation 4002, Narita 0-arai-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)

* 大洗工学センター高速実験炉部技術課

** (現)日立製作所エネルギー研究所

*** (現)三菱電機中央研究所

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 | 4 |
| 2.4 プロセス計装設備 | 4 |
| 3. 試験の方法 | 8 |
| 3.1 測定 | 8 |
| 3.2 解析 | 12 |
| 4. 試験結果 | 13 |
| 4.1 炉心部及び1次冷却系各種信号の解析結果 | 13 |
| 4.2 2次冷却系各種信号の解析結果 | 16 |
| 5. 検 討 | 76 |
| 5.1 各信号の定常変動の因果関係 | 76 |
| 5.2 中性子変動 (約0.025Hz) についての考察 | 82 |
| 5.3 2次冷却系の輸送遅れ | 90 |
| 6. 結 語 | 92 |
| 7. 謝 辞 | 93 |
| 8. 添付資料 | 94 |

Dec., 1979

"JOYO" Start-Up Test Report

Reactor Noise Analysis

Toshio Sanda**, Hideji Otani*, Kenichi Sano*,
Masanori Makido***, Mikiyasu Tsunashima*,
Toshiharu Muramatsu* and Yoshiyuki Sekiguchi*

Abstract

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

At some power levels, up to 50MW, fluctuations of the flux, the outlet temperatures of fuel assemblies and temperatures of primary and secondary main cooling loops were measured.

The power spectral density, correlation function, transfer function and coherence function of these signals were obtained and reactor characteristics were analyzed.

The major results are as follows.

- (1) It was confirmed that no unstable phenomenon exists in JOYO.
- (2) At low frequency region, fluctuations of these signals are larger and give better correlations. At this region, the primary contributors to fluctuations of the flux and the reactor outlet temperature were investigated.
- (3) In power spectral density of the flux, the noticeable peaks exist at about 1.8Hz and 0.025Hz. The former peak is due to control rod vibration effect and the latter peak has reactor power dependency and the neutron detector position dependency.
- (4) By the correlation functions of the secondary cooling loop temperatures, coolant transport delay times were obtained, which showed good agreement with the times calculated by flow velocity and the pipe length.

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

** Energy Research Lab., Hitachi Ltd. (in the present)

*** Central Research Lab., Mitsubishi Electric. (in the present)

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炉雑音試験を行った。

炉雑音法は、原子炉になんら外乱を与えずに、運転中の原子炉の特性が把握でき、異常診断技術の一手法としてその有効性が注目されている方法である。

本試験では、出力上昇試験時の各ステップごとに、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、主冷却器出口空気温度等の2次系回りの信号まで測定対象とした。解析においては、各信号の自己パワースペクトル密度、各信号間の相互パワースペクトル密度、伝達関数、相関関数、コヒーレンス関数等を求めて、原子炉の特性を把握し、原子炉に不安定現象がないことを確認した。

今後、更に解析を進めて、また合わせて行ったバイアルレンテック試験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いく予定である。

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 (50MW時最大) 1.9×10^{15} nv
 - 動特性パラメータ
- | | 制御棒引抜時 | 制御棒6本挿入時 |
|---|------------------------|------------------------|
| 即発中性子寿命 ℓ_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}/ℓ_p (sec ⁻¹) | 1.79×10^4 | 2.56×10^4 |
- 制御棒特性
- | | 制御棒反応度節値 (1本) |
|---------|------------------------|
| 反応度付加率 | 1.4% $\Delta K/K$ 以上 |
| 全制御棒反応度 | 0.015% $\Delta K/K$ 以上 |
| 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) 374 KW/i
 - 1次冷却材流量 2200 t/h
 - 冷却材温度 原子炉入口/出口 370 / 435 °C

2.2 プラント制御系

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

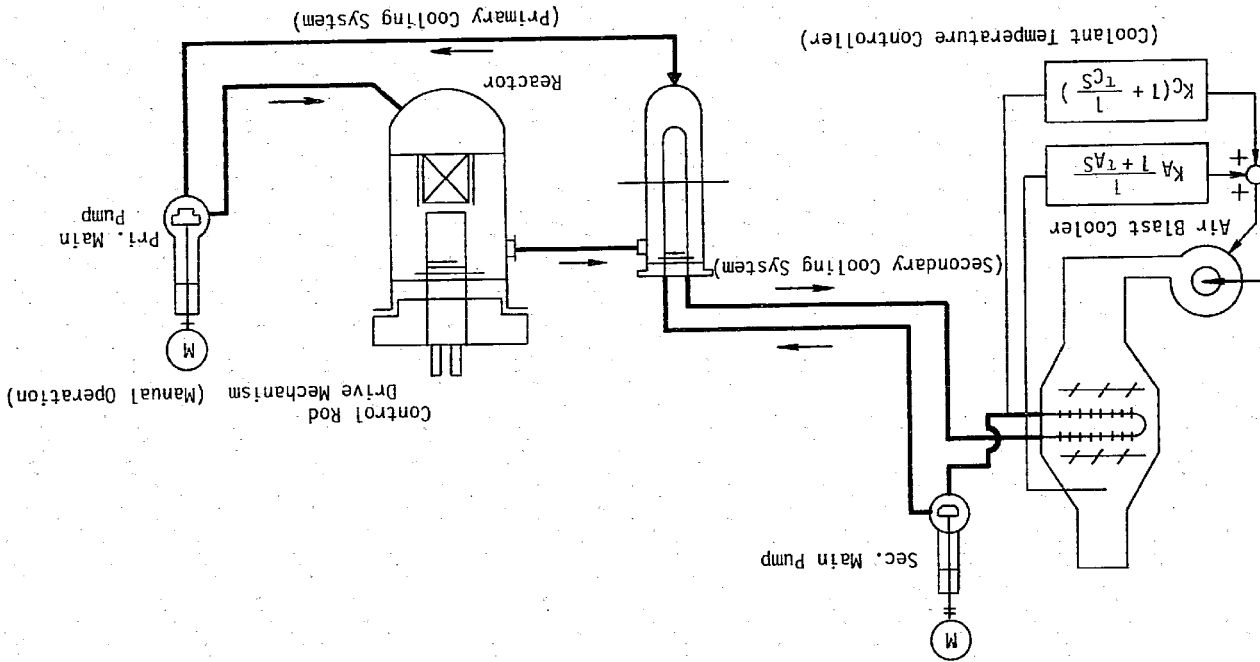
(1) 出力制御系 (2) 冷却材温度制御系

プラント制御系の概略図を図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、外乱に応じてステータ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係つ機能を有する。

図2.1 プラント制御系概略図



高速実験炉の運転に関する基準はつきの通りである。

- (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出力運転時は370℃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み合わせることによって行う。出力レベルが10MW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、10MW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の計装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。図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、待設の計装設備としてch.9の位置にCIC系を設置する。また、図2.3に炉心アドレスと中性子検出器およびA、Bルーブナトリウムの出入口方向を示す。

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循環などを検出して、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次冷却計装設備、(2)2次冷却計装設備および(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。

本試験時には、これらの主要なプロセス量を入力信号として使用する。図2.4に原子炉冷却系統図と主要なプロセス量検出器配置を示す。

- ch.1~2 SOURCE RANGE CHANNEL
- ch.3~5 INTERMEDIATE RANGE CHANNEL
- ch.6~8 POWER RANGE CHANNEL
- ch.9 EXTRA NEUTRON CHANNEL

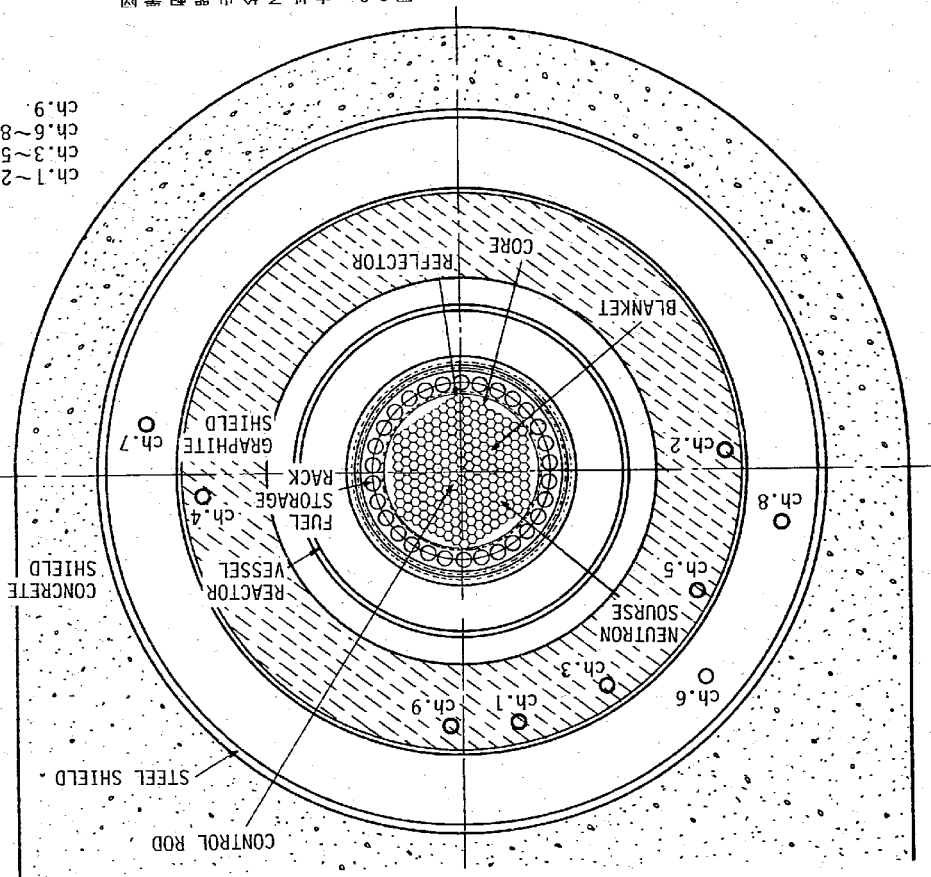


図 2.2 中性子検出器配置図

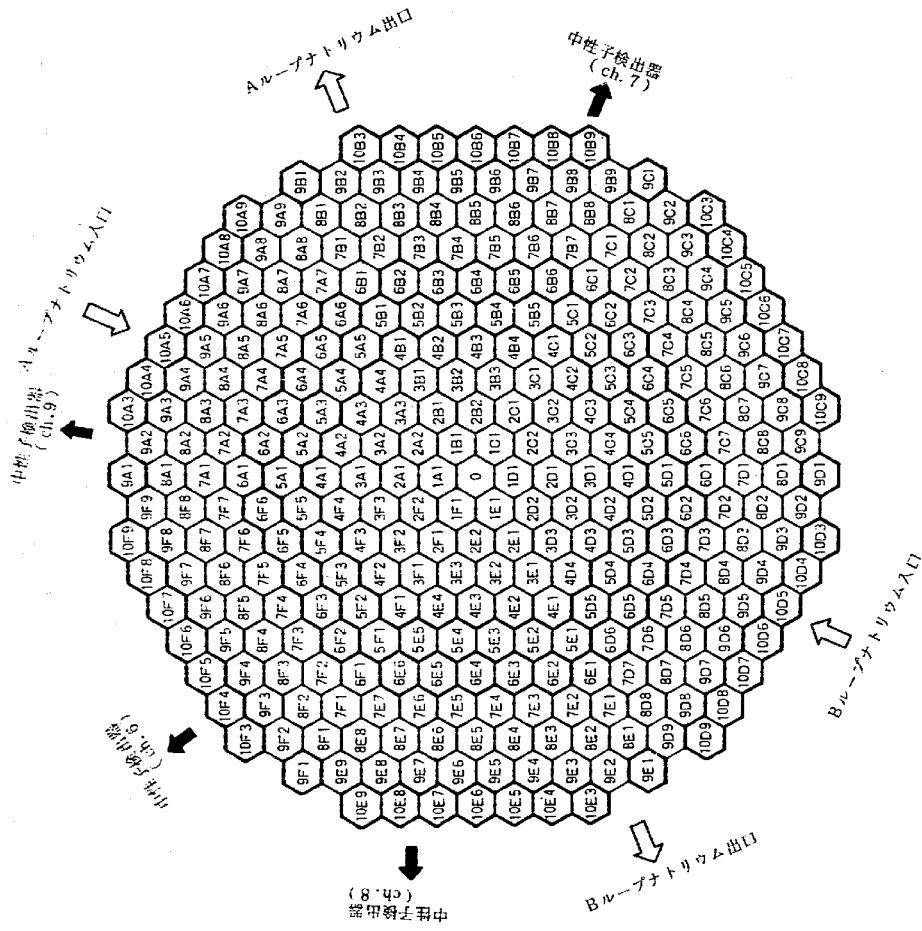


図 2.3 炉心アドレスと中性子検出器および A, B-プルトリウムの出入口方向

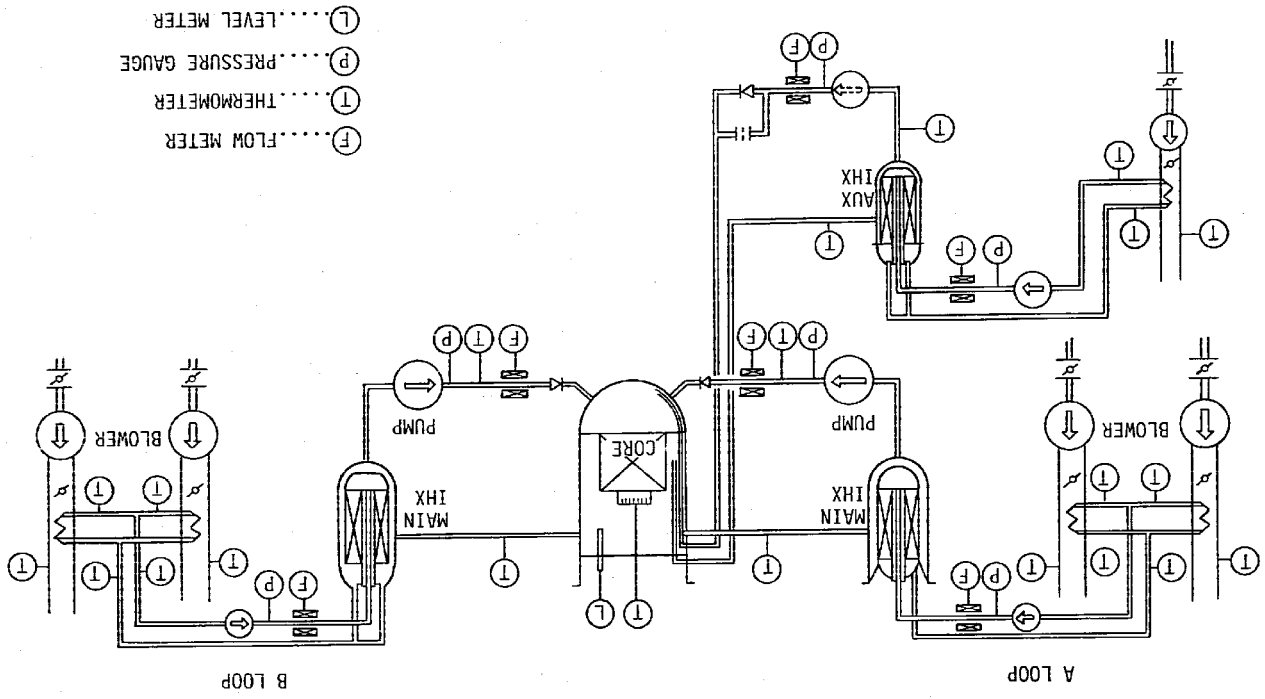


図 2.4 原子炉冷却系概図

3. 試験の方法

表 3.1 測定条件

3.1 測定

原子炉を出力(900 KW)から50 MWまで表3.1に示すごとく出力レベルで一定にして、中性子束(核計装信号および特設チャンネル信号)および温度・流量信号(1次系, 2次系冷却材温度, 燃料集合体出口温度, 1次系冷却材流量等)等をデータレコーダに記録し、off-lineで炉雑音解析した。測定時の2次系流量制御系のパラメータ値は、ナトリウム側が比例ゲイン2.5, 積分時定数37.5秒, 空気側は比例ゲインが0.5, 1次遅れ時定数が40秒である。

具体的な測定信号として、昭和58年8月6, 7日の測定でデータレコーダに記録した信号の組み合わせを表3.2に示す。各信号共、ゆらぎ成分を増幅してデータレコーダに記録しS/N比を高くするために、サブレンジョン・アンプを使用した。また、熱電対からの温度信号はリニアライザに通しS/N比の向上を計ったが、一部の燃料集合体出口温度には、リニアライザ台数の制限からリニアライザは使用できなかった。更に、リニアライザを通じた燃料集合体出口温度には多量の50 Hz電磁雑音が含まれていたため、50 Hzバンド・エリミネーション・フィルタ又は10 Hzローパス・フィルタを用いて、50 Hz成分を除いた。信号は、33ch及び7chのデータレコーダに記録した。記録時のテープスピードは、それぞれ15/16 ips, 1/7/8 ipsである。記録時間は約1時間半であり、データレコーダのノイズ補償機能を使用した。

7/28以前の測定では、サブレンジョン・アンプの台数の制限から、ゆらぎ成分のみを増幅してデータレコーダに記録できた信号は、少ない。

| Date | Reactor Thermal Power | Primary Flow Rate | Reactor Inlet Temperature | | Reactor Outlet Temperature | | Others |
|------|-----------------------|-------------------|---------------------------|-------|----------------------------|-------|--|
| | | | A | B | A | B | |
| 4/20 | 900 KW | 100% | 342°C | 341°C | 344°C | 342°C | Coolant Temperature Controller : Auto Mode Sodium side Gain : 2.5 Reset: 1.6 Air side Gain : 0.5 Time Const: 40sec |
| 4/22 | 9 MW | 100 | 357 | 354 | 365 | 364 | |
| 5/ 8 | 12 MW | 100 | 368 | 363 | 382 | 379 | |
| 5/19 | 18.5 MW | 100 | 366 | 365 | 392 | 389 | |
| 5/26 | 23 MW | 100 | 367 | 366 | 398 | 395 | |
| 6/ 9 | 25 MW | 100 | 367 | 367 | 401 | 398 | |
| 7/28 | 40 MW | 100 | 368 | 367 | 421 | 418 | |
| 7/28 | 38 MW | 80 | 366 | 366 | 430 | 428 | |
| 8/ 6 | 48 MW | 100 | 360 | 360 | 422 | 420 | |
| 8/ 6 | 50 MW | 100 | 362 | 360 | 425 | 424 | |
| 8/ 6 | 40 MW | 100 | 361 | 360 | 413 | 412 | |
| 8/ 7 | 30 MW | 100 | 360 | 361 | 401 | 399 | |
| 8/ 7 | 25 MW | 100 | 359 | 360 | 394 | 392 | |
| 8/ 7 | 18 MW | 100 | 356 | 359 | 382 | 381 | |
| 8/ 7 | 12 MW | 100 | 360 | 361 | 378 | 377 | |
| 8/ 7 | 9 MW | 100 | 359 | 356 | 373 | 371 | |

表 3.2 测定信号一览表 (8/6, 7) (I)

| Signals | Signal Conditioner | | | Data Recorder | | Tape Speed |
|--|--------------------|-----------|-------------------|---------------|-----|------------|
| | Linearizer | Sup. Amp. | Filter (QOHZ LPF) | 33ch | 7ch | |
| Neutron Flux ch 6 | | ○ | | ○ | | |
| " ch 7 | | ○ | | ○ | | |
| " ch 8 | | ○ | | ○ | | |
| " ch 9 | | ○ | | ○ | | 33ch |
| Primary Flow A | | ○ | ○ | ○ | | :15/16ips |
| " B | | ○ | ○ | ○ | | |
| S/A Outlet Na Flow [0] | | ○ | | ○ | ○ | 7ch |
| Primary Pump *1 | | ○ | | ○ | | :17/8ips |
| Rotational Frequency A | | ○ | | ○ | | |
| " B *1 | | ○ | | ○ | | |
| S/A Outlet Matemp. A | ○ | ○ | ○ | ○ | | |
| " B | ○ | ○ | ○ | ○ | | |
| Reactor Outlet Na Temp. A | ○ | ○ | ○ | ○ | | |
| " B | ○ | ○ | ○ | ○ | | |
| S/A Outlet Na Temp. [0] (flowmeter output) | | ○ | | ○ | ○ | |
| " (T/C) [0] | ○ | ○ | *2 | ○ | ○ | |
| " [1A1] | ○ | ○ | ○ | ○ | ○ | |
| " [2A1] | | ○ | ○ | ○ | | |
| " [3A1] | | ○ | ○ | ○ | | |
| " [4A1] | | ○ | ○ | ○ | | |
| " [5A1] | ○ | ○ | ○ | ○ | ○ | |
| " [6A2] | ○ | ○ | ○ | ○ | | |
| IHX Secondary Inlet Na Temp. A | ○ | ○ | ○ | ○ | | |
| " B | ○ | ○ | ○ | ○ | | |

表 3.2 测定信号一览表 (8/6, 7) (2)

| Signals | Signal Conditioner | | | Data Recorder | | Tape Speed |
|---------------------------------|--------------------|-----------|--------|---------------|-----|------------|
| | Linearizer | Sup. Amp. | Filter | 33ch | 7ch | |
| IHX Secondary Outlet Na Temp. A | ○ | ○ | ○ | ○ | | |
| " B | ○ | ○ | ○ | ○ | | |
| Main Cooler Inlet Na Temp. A | ○ | ○ | ○ | ○ | | |
| " B | ○ | ○ | ○ | ○ | | 33ch |
| Main Cooler Outlet Na Temp. 1A | ○ | ○ | ○ | ○ | | :15/16ips |
| " 1B | ○ | ○ | ○ | ○ | | |
| " 2A | ○ | ○ | ○ | ○ | | 7ch |
| " 2B | ○ | ○ | ○ | ○ | | :17/8ips |
| Main Cooler Outlet Air Temp. 2A | ○ | ○ | ○ | ○ | | |
| " 2B | ○ | ○ | ○ | ○ | | |

*1 : Time Constant of Rate Meter 5sec

*2 : 50Hz B.E.F.

3.2 解 析

解析には、炉内音響解析装置、ミニコンピュータTOSBAC-40Cを主体に構成されている多チャネル雑音解析システムおよび炉雑音解析コードNOISAを用いた大型計算機によって行った。これらの装置の詳細については、添付資料に示す。

本報では、主として多チャネル雑音解析システムを用いた解析結果について述べる。本システムにより、高速フーリエ変換 (FFT) あるいは、逆FFT演算により、データレコーダに取込んだ信号の自己パワースペクトル密度 (APSD)、各信号間の相互相関関数 (CCF)、コヒーレンス関数 (CF)、伝達関数 (TF) を求めた。

解析帯域は、信号の種類、検出器の時定数を考えて、 $0.001 \text{ Hz} \sim 0.25 \text{ Hz}$ を主とし、中性子束信号等、高周波成分を含む信号については一部 $0.01 \sim 2.5 \text{ Hz}$ の範囲も解析した。なお、解析に当っては、多くの場合 0.001 Hz High-pass filter を通過させた信号を用いた。これは、特に低出力時に、一部信号の極低周波成分の振幅が全周波数成分に占める割合が非常に大きくなるためである。もちろん、aliasing 防止のため解析帯域に応じて Low-pass filter を使用した。また、低周波領域の解析時には、データレコーダのテープスPEEDを速くして再生する手法も用いた。

今回測定したデータの全解析は膨大となるので、本報告では、 50 MW 出力時 (8/6 測定) のデータ解析結果を中心に述べ、出力依存性に関しては主として 30 MW 出力時 (8/7 測定) の結果と比較して述べる。

4. 試 験 結 果

4.1 炉心部及び1次冷却系各種信号の解析結果

炉心及び1次冷却系に関して各種信号のパワースペクトル密度 (APSD)、各信号間のコヒーレンス関数 (CF) 及び各信号間の伝達関数 (TF) を求めた。解析周波数帯域は $0.001 \sim 0.25 \text{ Hz}$ が主で、遮断周波数約 0.001 Hz のハイパスフィルタ (HPF) を通して解析したが、以下の図において、「 2.5 Hz まで」と記入してある場合はこのフィルタを通していない。

4.1.1 各種信号のパワースペクトル密度

図 4.1 (a) の様式で「NA PSD」の NN は解析信号の AC 成分を DC レベルで規格化したことを意味し、「平均回数」は FFT の許容回数を「RMS」は図中の面積の平方根 (従って AC 成分の自乗平均値を DC レベルで規格化したもの) を各々表わす。

(1) 中性子束 (図 4.1 ~ 4.5)

0.0025 Hz 付近と 0.025 Hz 付近にピークがみられる。(図 4.1 (a)) 前者のピークは測定チャネル (ch) による差がなく、後者のピークは ch により大きさが異なり (図 4.1 (a))、また出力が低下するにつれて低周波側へ移動するともに自立たなくなる。(図 4.3 ~ 4.5)

なお、出力が低下するにつれてレベルが上昇しているのは、一定の大きさの外乱ノイズが入っているためと考えられる。

0.0025 Hz 付近のピークは主冷却器側の制御効果によるものと思われるが、 0.025 Hz のピークについては炉出力依存性があり、測定チャネルに依存しそうであることが判明したが、その原因については第 5 章で検討する。

図 4.1 (b) に 2.5 Hz まで解析した結果を示すが、約 1.8 Hz 付近に制御棒振動によるピークが見られる。なお、制御棒振動効果については別途報告書「炉雑音特性 (NT-62) 制御棒振動効果」で報告する予定である。

(2) 原子炉入口温度と原子炉出口温度 (図 4.6 ~ 4.7)

入口温度の APSD のレベルは A 系の方が約 2 倍大きい (図 4.6)、出口温度は A, B 同程度である。(図 4.7) 入口温度の A 系と B 系のレベル差は大きく、出口温度のレベル差はあまりないのは、炉上部でのミキシングによるものと考えられる。

また、スペクトルの形については入口温度は殆んど同じだが、出口温度は高周波側 (約 0.1 Hz 以上) に差が現われている。これは、A 側の出口温度測定に用いたリニアライザは雑音除去のためのローパスフィルタ (約 0.8 Hz) が内蔵されているのに対して B 側のリニ

アライザには内蔵されていないため、A側の出口温度信号はB側よりも外來雑音の影響が小さいことによると推察される。

(3) 燃料集合体(S/A)出口温度(図4.8)

2A1位置、3A1位置、4A1位置の温度信号(熱電対)のスペクトルの形が高周波側で他の温度信号と異なるのは、信号の取込み方がリアライザを通さずに直接熱電対からのmv信号を取込むという方法であるため、上述のローパスフィルクを通っておらず外來雑音の影響が大きいと推察できる。そのため、上記の3信号は以下の解析対象からはずした。

流量計温度信号と1A1位置、0位置の温度信号を比較した場合(図4.8)、流量計温度信号は1A1位置、0位置の温度信号より応答特性が優れているようであるが、同時にこの信号はその原理上S/Nが悪い、雑音の影響も大きいと考えられる。

(参照 図2.3の炉心アドレス)

(4) 原子炉入口流量、ポンプ回転数、燃料集合体(S/A)出口流量(注)(図4.9~4.11)

原子炉入口流量信号は1.5 Hz近くまで成分があることが判る。(図4.9)

S/A出口流量信号には0.25 Hz以上の成分があり(図4.11)、2.5 Hzまでの解析でも殆んど平坦であったことから高い成分があるものと予想される。(しかし、本信号はS/Nが極めて悪いので、高周波領域の雑音成分の寄与が大きいと予想される。)

これに対してポンプ回転数は高周波領域の成分がない。(図4.10)このことから、原子炉入口流量の高周波領域の成分にはポンプ回転数の変動が寄与する部分ほとんどなく、ナトリウム温度やポンプ入口圧力のゆらぎが大きく寄与していると考えられる。

4.1.2 各信号間のコヒーレンス関数

(1) 原子炉入口温度と中性子束(図4.12)

A系では低周波側(1×10^{-2} Hz以下)で相関が強く、B系では低周波、高周波とも相関が殆んどない。(図4.12)

このことは、B系の入口温度のAPSDがA系と比べて低周波側の領域で小さいことに対応している。

(2) 原子炉入口温度とS/A出口温度(図4.13~14)

1A1位置温度と6A2位置温度はA系原子炉入口温度と低周波側で相関が強く、B系とは相関が弱い。(図4.13)図2.3の炉心アドレスにおいて、1A1、6A2の位置はA系ナトリウム入口方向に近く、B系ナトリウム入口方向に遠いので、この現象は下部プレナムでのナトリウムのミキシングが少いために生じていると考えられる。

(注) 中心燃料集合体出口位置にはうず流式流量計を設置している。流量計温度信号とは、この流量計から得られる温度信号であり、その原理上応答が極めて早い。

また、0位置温度は1A1位置や6A2位置の温度程相関は強くない。(図4.14)

(3) 原子炉入口温度と原子炉出口温度(図4.15)

A系、B系共に比較的low周波側に相関があるが、S/A出口温度程ではない。S/A出口以降の上部プレナムでのミキシングの効果に影響していると思われる。

(4) 中性子束間(図4.16)

どのch間の組み合わせも相関が強く、各ch間とも0.025 Hz付近を中心に相関が小さくなる部分があり、その程度はchにより異なる。

一方、出力が低下するにつれて、どの部分も相関が大きくなる。

(5) 中性子束とS/A出口温度(図4.17)

低周波側で相関があり、S/A出口の位置で1A1が最も大きい。

(6) S/A出口温度間(図4.18)

5A1位置と6A2位置の組み合わせ以外は外來雑音の影響が大きく、その結果は信頼度でない。5A1位置と6A2位置の温度間には低周波側で大きな相関があり、また30MW時では相関の強い範囲が高周波側まで広がっている。

(7) 原子炉出口温度(A系)と原子炉出口温度(B系)(図4.19)

高出力の場合、低周波側に相関がみられる。これはS/A出口以降のミキシング効果によるものと思われる。

4.1.3 各信号間の伝達関数(TF)

各信号とも外來雑音の影響が大きく、TFはうまく求まっていない。

(1) 原子炉入口温度(A系)から中性子束へ(図4.20)

TFは各chともほぼ同じゲイン-周波数特性を示している。

全体に炉出力が下がるとゲインは大きくなっていく。

(2) 中性子束ch6からS/A出口温度へ(図4.21)

図4.21(a)の中性子束ch6からS/A出口温度(1A1)へのTFから強いて伝達関数の時定数を求めると10秒程度となる。一方、中性子束と0位置T/Cの伝達関数の時定数は図4.21(b)から2秒程度であると思われる。しかし、パイルオンレネータ試験結果では中性子束と0位置S/A出口温度計の伝達関数は時定数3.5秒と3.2秒の2次選れで近似できているので、本結果は高周波側でノイズ成分の影響を受けていると考えられる。

(3) 中性子束ch6から原子炉出口温度(A系)へ(図4.22)

時定数を求めると1A1位置T/Cと同程度で8~10秒となる。

4.2 2次冷却系各種信号の解析結果

2次冷却系各種信号のパワースペクトル密度 (APSD)、各信号間のコヒーレンス関数 (CF)、各信号間の伝達関数 (TF) 及び各信号間の相互相関々数 (CCF) を以下に示す。解析方法は 4.1 と同じである。

4.2.1 各種信号のパワースペクトル密度

(1) IHX 2次側入口温度 (図 4.23 ~ 24)

A系のAPSDは高出力時にはほとんど差が無いが、炉出力12MWでは低周波領域のレベルが低下している。これは、12MWの時に2Aの制御系のコントローラ出力9.6.2秒でベーン・ダンパともほぼ全閉状態のためフィードバック制御動作の働かない領域に入ってしまったためと考えられる。なお、B系のAPSDには炉出力依存性は見られない。

また、B系の温度ゆらぎはA系より大きい。

(2) IHX 2次側出口温度 (図 4.25 ~ 26)

A, B両系共、炉出力の低下に依存してAPSDも低下する。

低出力時を除けば約0.025Hz迄の低周波域においてA系の方が大きい。

(3) 主冷却器入口温度 (図 4.27 ~ 28)

A, B両系共、炉出力の低下に依存してレベルが低下する。

IHX 2次側出口温度と比較してAPSDのレベルが下がっている。これは、配管等の熱容量で温度変動が多少吸収されていると考えられる。

(4) 主冷却器出口温度 (図 4.29 ~ 30)

2Bの出口温度のAPSDは炉出力が変化してもレベルは変わらないが、2Aの出口温度のAPSDのレベルは50MW時で、大きく、12MW時で小さい。12MW時で小さいことと理由はIHX 2次側入口温度の項で述べたが、50MW時で大きいことと理由は不明である。

(5) 主冷却器出口空気温度 (図 4.31 ~ 32)

2A, 2Bの比較をすると、約0.01Hzより高周波側で2Aの方が2BよりAPSDのレベルが大きいことが判る。これは制定時2Aの制御特性が不調で、空気流量が常に変動していたためであると考えられる。(現在2Aの制御系は調整済である)

なお、炉出力40MW時の2AのAPSD及び18MW出力時の2BのAPSDは記録時のアンペグインの記録が誤っていたと思われる。

また、出力が低下すると、2次系各部の温度のAPSDが低下し、主冷却器出口空気温度のAPSDは逆に大きくなる傾向があるが、これは出力が低下すると制御系のループゲインが低下すること及び自然逆風の効果によるものと思われる。

4.2.2 各信号間のコヒーレンス関数

(1) 原子炉出口温度とIHX 2次側出口温度 (図 4.33)

低周波領域では炉出力によらずB系の方がA系よりCFが大きい。これは、A系IHX 2次側出口温度の変動には別の要因 (1次系流量変動など) が含まれているためか、又はB系のIHXの方が1次側から2次側への熱交換率が大きいためであると考えられる。

(2) IHX 2次側入口温度と向出口温度 (図 4.34)

A, B両系とも低周波領域で相関がある。

(3) IHX 2次側出口温度と主冷却器入口温度 (図 4.35)

A, B両系ともCFは大きく、この2点間には大きな雑音源は存在しないと云える。図 4.27, 4.28の比較から、この2点間での信号の減衰率は約50%であると言えらる。

(4) 主冷却器出入口温度 (図 4.36)

A, B両系の差はほとんどない。

(5) 主冷却器出口温度とIHX 2次側入口温度 (図 4.37)

50MW出力時のA系の場合はCFが大きいのは、2A出口温度変動が今回測定していない1A出口温度に比べてかなり大きいためであると思われる。これ以外は、2A出口温度と1A出口温度、2B出口温度と1B出口温度にはほぼ同程度の温度ゆらぎが存在していると思われる。

(6) IHX 2次側入口温度と原子炉入口温度 (図 4.38)

図はB系の結果であるが、低周波領域に相関がある。50MW時の方が30MW時よりCFが大きいのは30MW時の温度変動には別の要因 (1次系流量変動など) の影響が含まれているためであると思われる。

4.2.3 各信号間の相互相関々数

相互相関々数の解析は、信号間の時間的な関係の把握に有効であり、ここでは2次系各信号間の輸送遅れの確認を主目的に行った。

(1) 原子炉出口温度とIHX 2次側出口温度 (図 4.39, 40)

両図から、この信号間の輸送遅れはA系が50MW出力時3.3秒、30MW出力時に2.3秒、B系が50MW出力時約1.7秒、30MW出力時1.8秒と判る。

(2) IHX 2次側入口温度と向出口温度 (図 4.41, 42)

出口温度の方が入口温度よりも位相が進んでおり、出口温度の変動が2次系を一巡してIHX入口に迄伝わることを示している。この出口から入口迄の一巡時間はA系で約98.5秒、B系で約8.8秒と判る。

(3) IHX 2次側出口温度と主冷却器入口温度 (図 4.43, 44)

この間の輸送遅れはA系で27秒、B系で約26秒と判る。

(4) 主冷却器入口温度と同出口温度 (図 4.45, 46)

輸送遅れはA系が50 MW出力時に28秒、30 MW出力時に34秒、B系は50 MW出力時に24秒、30 MW出力時に32秒である。

また、出口温度の変動が制御系を介して再び出口温度に影響するため負の相関が更に現われる。この時間はA系の方が50 MW出力時に172秒、30 MW出力時に295秒、B系の方が50 MW出力時に125秒、30 MW出力時に144秒と判る。ここに示した時間は主冷却器出口温度が変化し制御系を一巡して再び出口温度に伝わる迄の時間である。

また、図 4.45 には主冷却器出口から2次系を一巡して入口に戻ってくる信号によると思われる小ピークが負の時間に見られる。この時間は50 MW出力時にA系で134秒、B系で119秒である。図 4.46 からはB系で135秒にピークが見られるもの、A系にはピークが存在していない。

(6) 主冷却器出口温度と I H X 2 次側入口温度 (図 4.47, 48)

この間の輸送遅れは、A系で50 MW出力時に38秒、30 MW出力時に34秒、B系で50 MW出力時に26秒、30 MW出力時に29秒と判る。

(6) 主冷却器出口ナトリウム温度と同出口空気温度 (図 4.49, 50)

空気温度が変わってから出口ナトリウム温度が変わる迄の遅れはA系で50 MW出力時に55秒、30 MW出力時に27~76秒、B系で50 MW出力時に19秒、30 MW出力時に27秒である。出口ナトリウム温度が変わってから制御系が作用して出口空気温度が逆位相に変化する迄の時間はB系で50 MW出力時に70秒、30 MW出力時に105秒である。A系の方は正確には判らないが、B系より遅れが大きい様子が見られる。

| 線種 | 番号 | 名称 | 出力 | 平均回数 | RMS |
|---------|---------|------------|-------|------|-----------------------|
| — | — | 中性子束 ch. 6 | 50 MW | 5 | 0.59×10^{-4} |
| - - - | - - - | " ch. 7 | 50 MW | 5 | 0.73×10^{-4} |
| - - - - | - - - - | " ch. 8 | 50 MW | 5 | 0.68×10^{-4} |

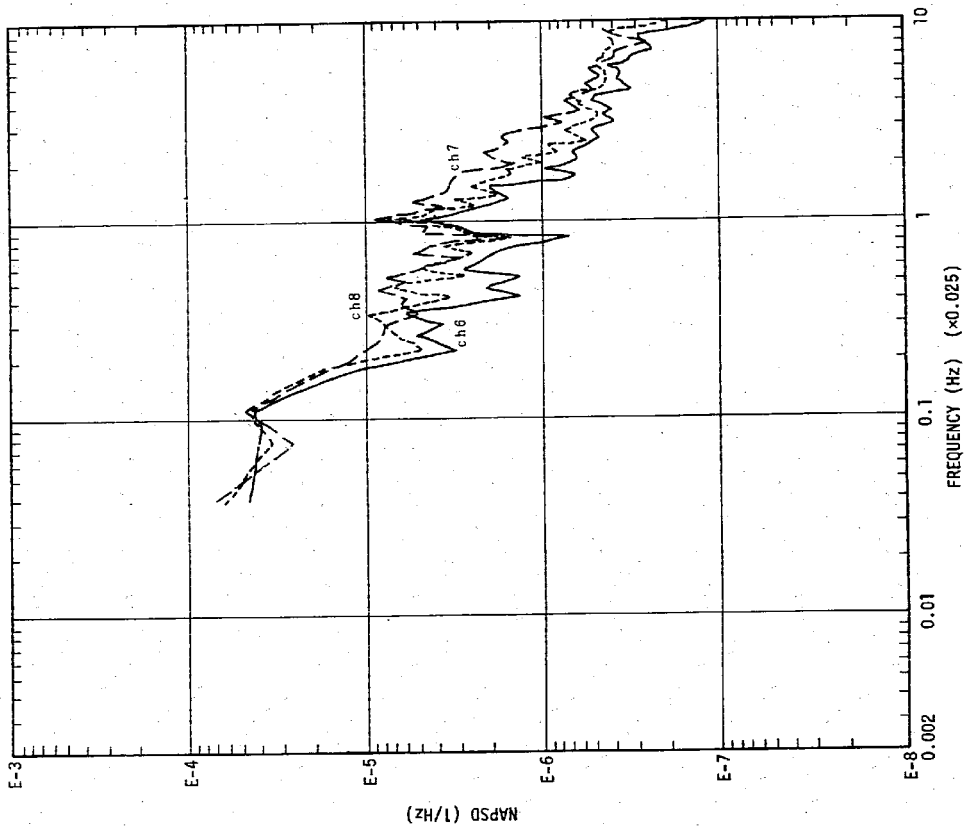


図 4.1(a) 炉出力 50 MW 時の中性子束の APSD (0.025 Hz まで)

| 信号名 | 出力 | 平均回数 | RMS |
|------------|------|------|-----------------------|
| 中性子束 ch. 6 | 50MW | 51 | 0.11×10^{-4} |
| " ch. 7 | 50MW | 51 | 0.12×10^{-4} |
| " ch. 8 | 50MW | 51 | 0.11×10^{-4} |

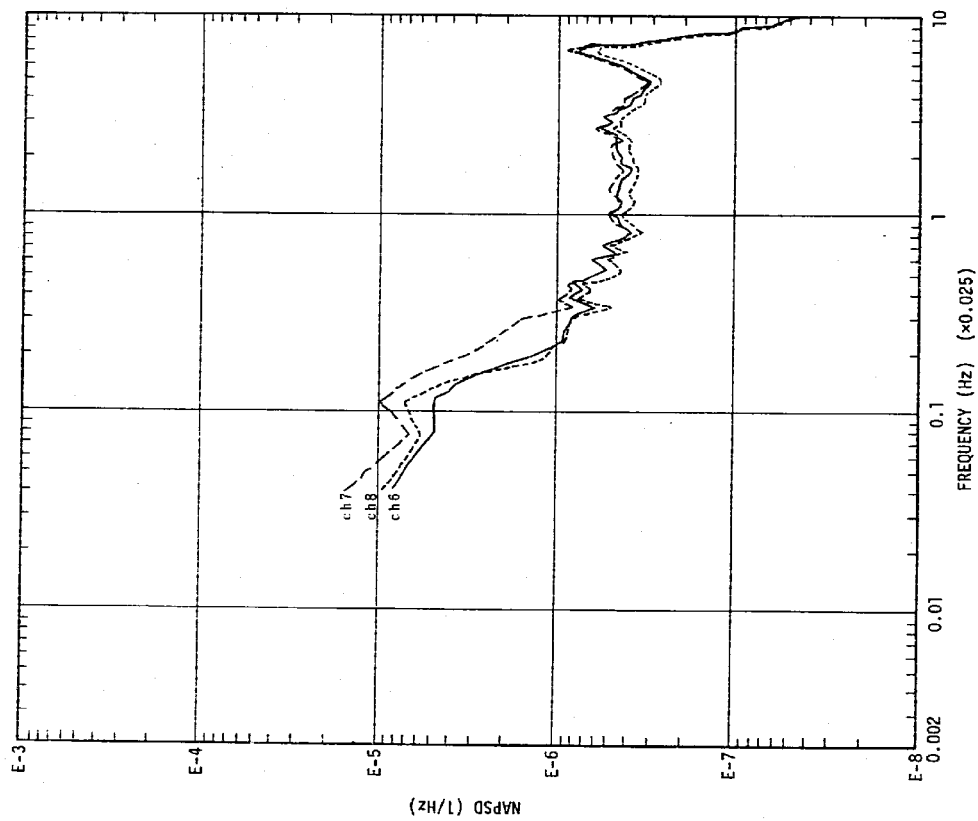


図 4.1(b) 炉出力 50 MW 時の中性子束の APSD (2.5 Hz まで)

| 信号名 | 出力 | 平均回数 | RMS |
|------------|------|------|-----------------------|
| 中性子束 ch. 6 | 30MW | 5 | 0.69×10^{-4} |
| " ch. 7 | 30MW | 5 | 0.80×10^{-4} |
| " ch. 8 | 30MW | 5 | 0.75×10^{-4} |

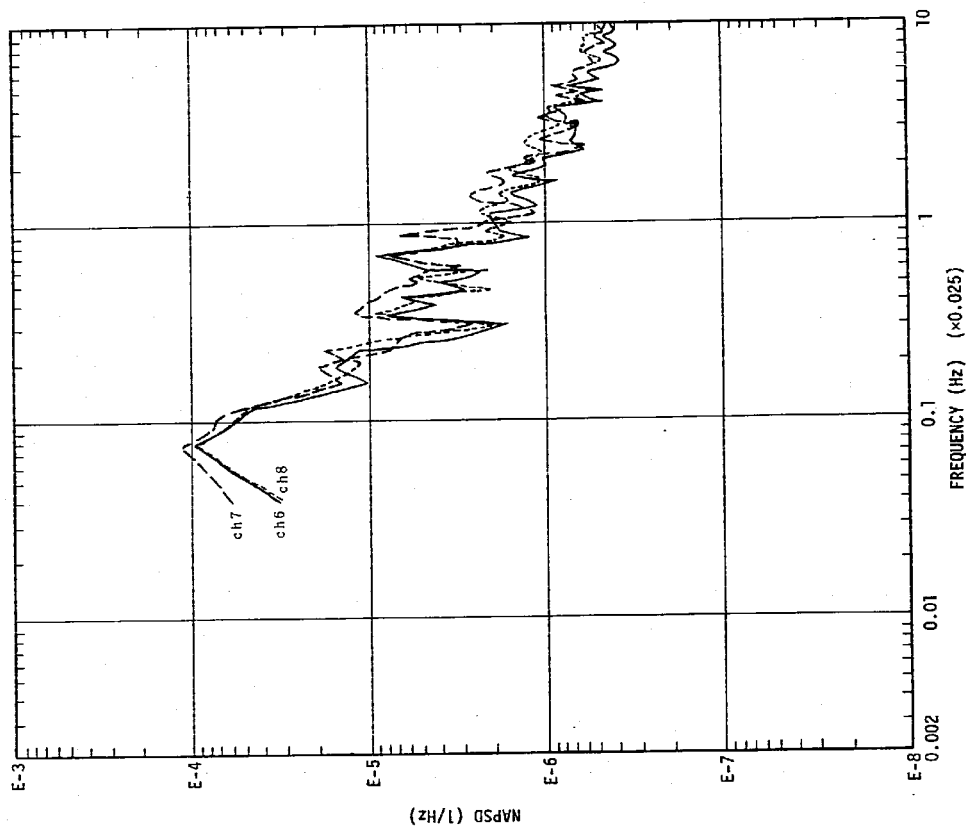


図 4.2 炉出力 30 MW 時の中性子束の APSD

| 番号 | 名称 | 炉出力 | 平均回数 | RMS |
|-------|------------|-------|------|-----------------------|
| — | 中性子束 ch. 6 | 5.0MW | 5 | 0.58×10^{-4} |
| - - - | " | 4.0MW | 5 | 0.64×10^{-4} |
| - - - | " | 3.0MW | 5 | 0.69×10^{-4} |

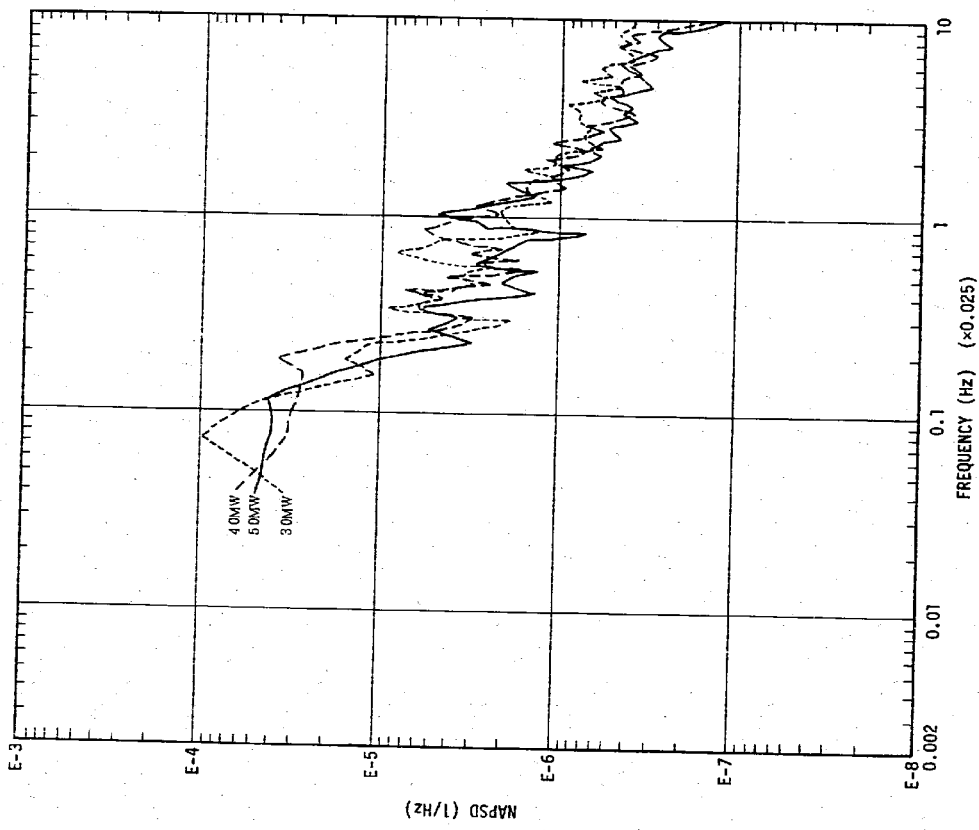


図 4.3(a) 中性子束 ch. 6 の APSD (1)

| 番号 | 名称 | 炉出力 | 平均回数 | RMS |
|-------|------------|-------|------|-----------------------|
| — | 中性子束 ch. 6 | 2.5MW | 5 | 0.72×10^{-4} |
| - - - | " | 1.8MW | 5 | 1.13×10^{-4} |
| - - - | " | 1.2MW | 5 | 1.42×10^{-4} |

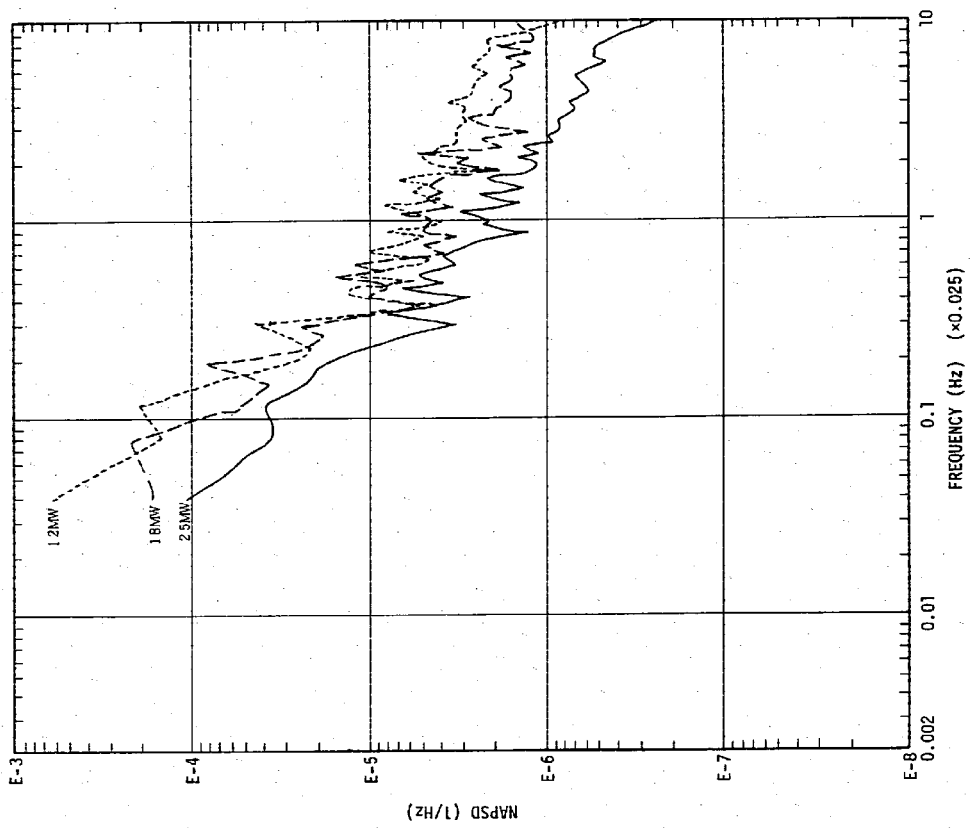


図 4.3(b) 中性子束 ch. 6 の APSD (2)

| 信号名 | 炉出力 | 平均回数 | RMS |
|------------|-------|------|-----------------------|
| 中性子束 ch. 7 | 50 MW | 5 | 0.79×10^{-3} |
| " | 40 MW | 5 | 0.77×10^{-3} |
| " | 30 MW | 5 | 0.80×10^{-3} |

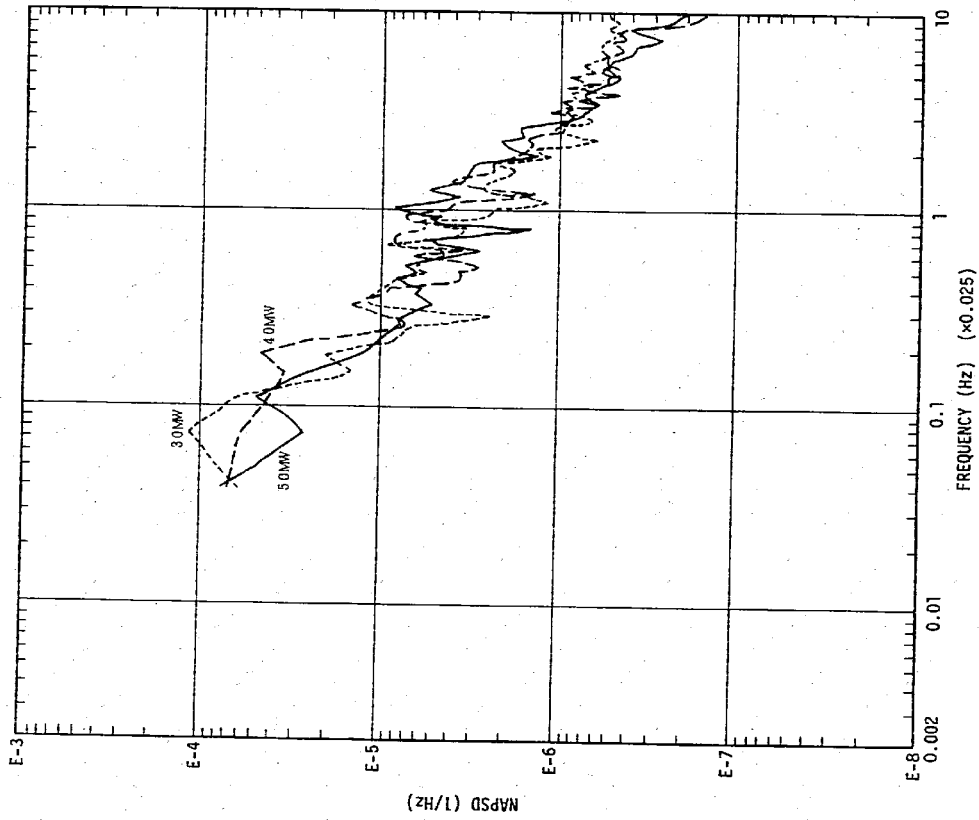


図 4.4(a) 中性子束 ch. 7 の APSD (1)

| 信号名 | 炉出力 | 平均回数 | RMS |
|------------|-------|------|-----------------------|
| 中性子束 ch. 7 | 25 MW | 5 | 0.80×10^{-3} |
| " | 18 MW | 5 | 1.10×10^{-3} |
| " | 12 MW | 5 | 1.29×10^{-3} |

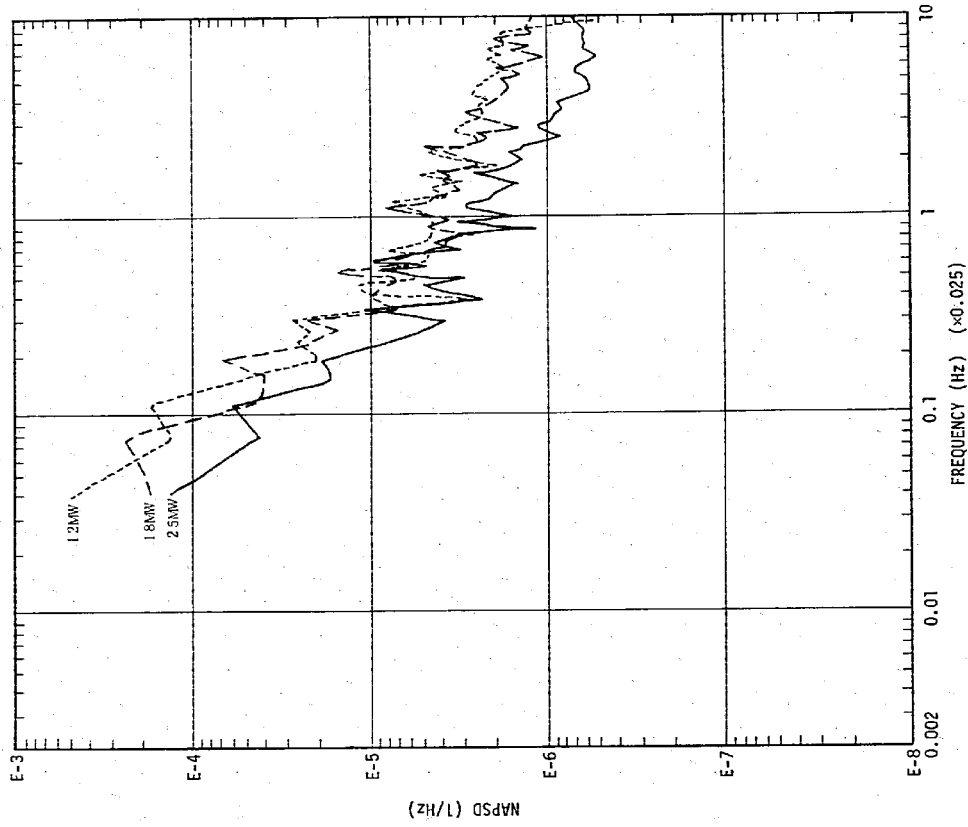


図 4.4(b) 中性子束 ch. 7 の APSD (2)

| 信号名 | 出力 | 平均回数 | RMS |
|------------|--------|------|-----------------------|
| 中性子束 ch. 8 | 5.0 MW | 5 | 6.82×10^{-4} |
| " | 4.0 MW | 5 | 7.36×10^{-4} |
| " | 3.0 MW | 5 | 7.47×10^{-4} |

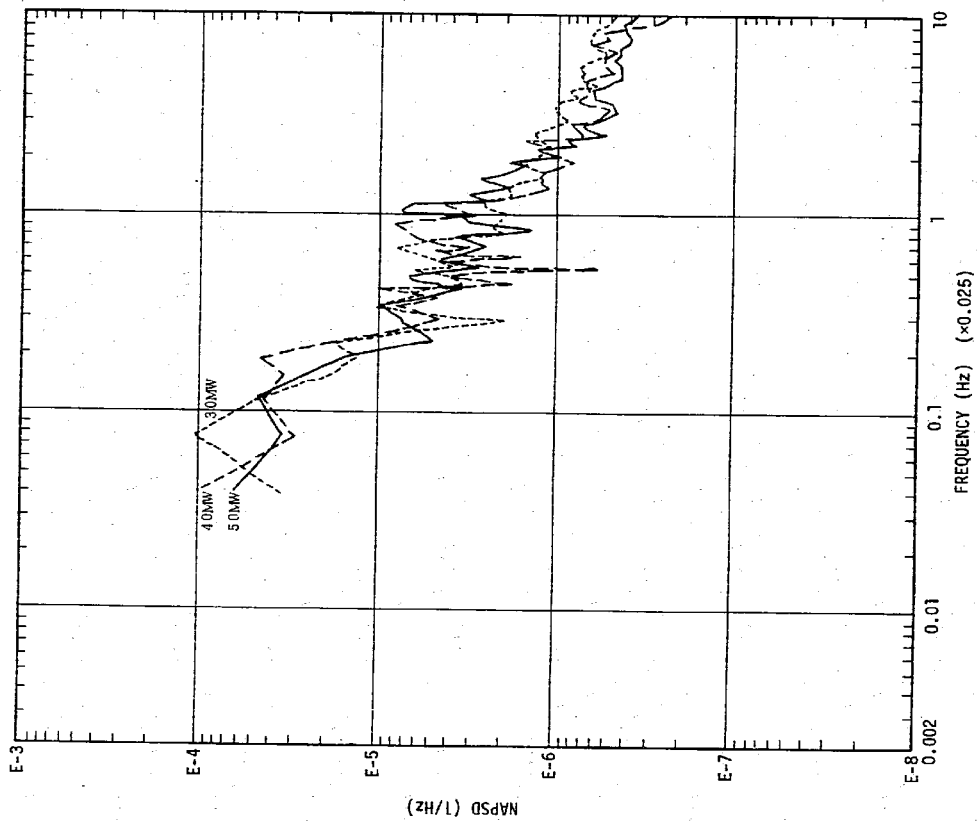


図 4.5(a) 中性子束 ch. 8 の APSD (1)

| 信号名 | 出力 | 平均回数 | RMS |
|------------|--------|------|-----------------------|
| 中性子束 ch. 8 | 2.5 MW | 5 | 8.05×10^{-4} |
| " | 1.8 MW | 5 | 1.08×10^{-3} |
| " | 1.2 MW | 5 | 1.35×10^{-3} |

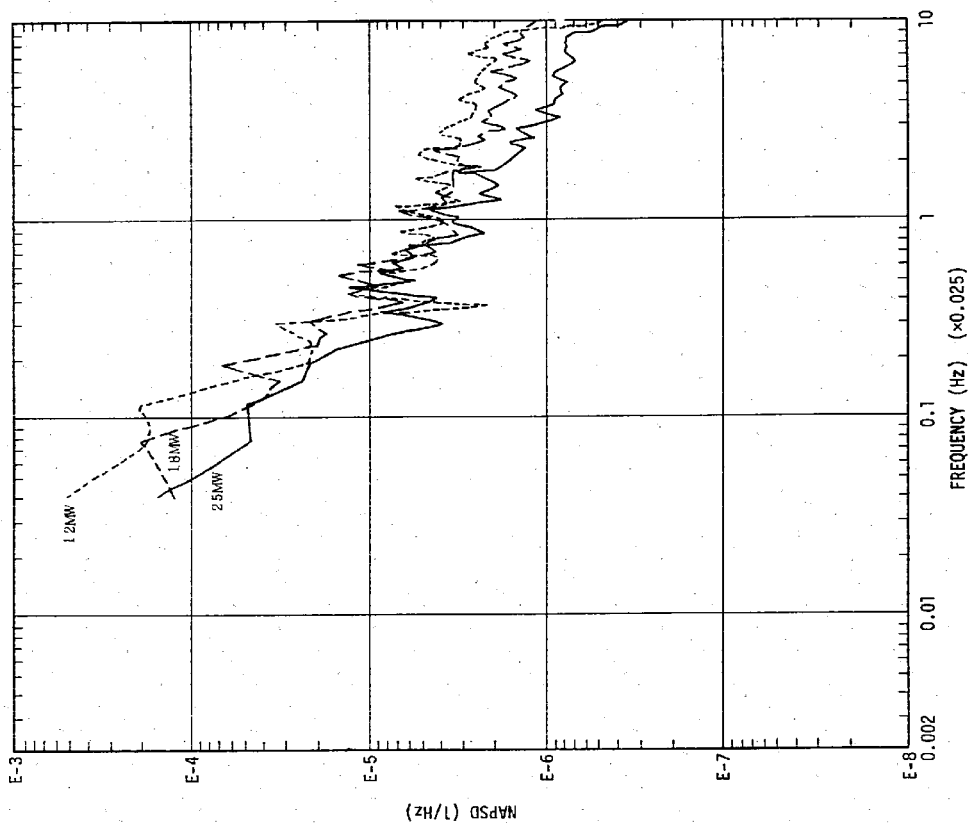


図 4.5(b) 中性子束 ch. 8 の APSD (2)

| 信 号 名 | 炉 出 力 | 平均回数 | R M S |
|-------------|-------|------|-----------------------|
| — A系原子炉入口温度 | 50 MW | 5 | 4.16×10^{-4} |
| - - - B系 " | 50 MW | 5 | 1.94×10^{-4} |

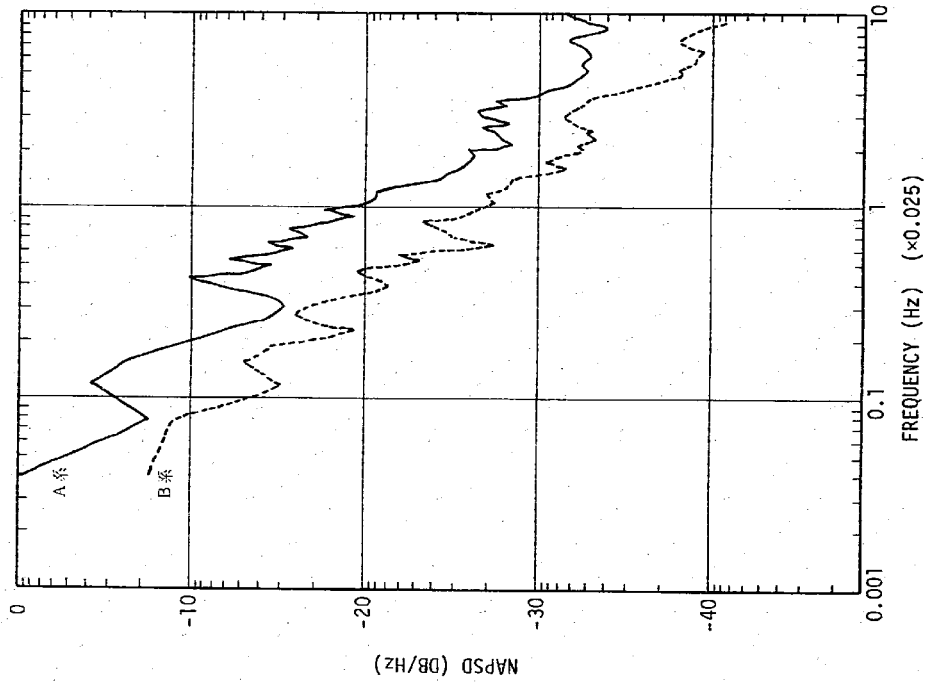


図 4.6 炉出力 50 MW 時の原子炉入口温度 (A系, B系) の APSD

| 信 号 名 | 炉 出 力 | 平均回数 | R M S |
|-----------------|-------|------|-----------------------|
| - - - A系原子炉出口温度 | 50 MW | 5 | 3.18×10^{-4} |
| — B系 " | 50 MW | 5 | 4.00×10^{-4} |

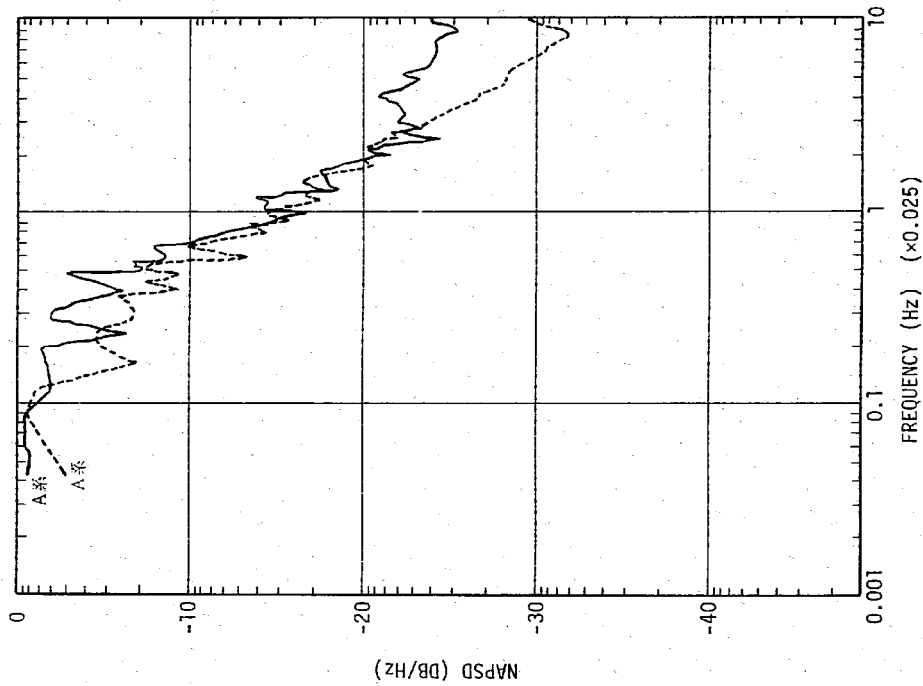


図 4.7 炉出力 50 MW 時の原子炉出口温度 (A系, B系) の APSD

| 信号名 | 炉出力 | 平均回数 | RMS |
|----------------|------|------|-----------------------|
| S/A 出口温度 (1A1) | 50MW | 5 | 2.01×10^{-4} |
| " (0) | 50MW | 5 | 3.30×10^{-4} |
| 爐内温度 (0) | 50MW | 5 | 3.94×10^{-4} |

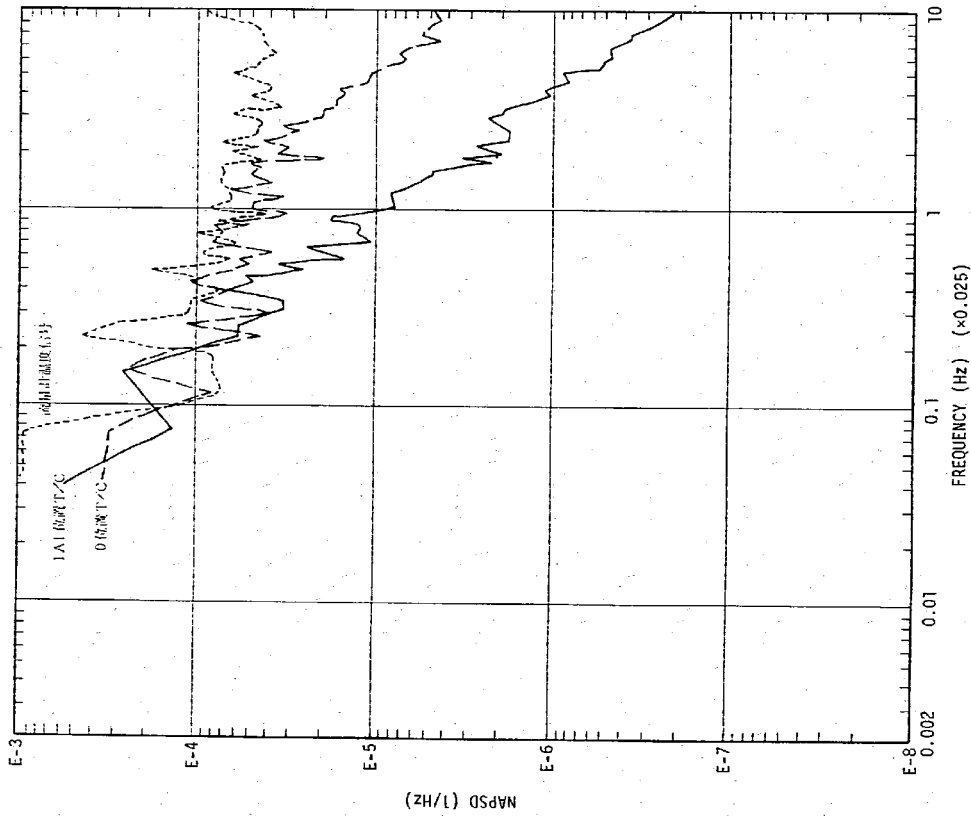


図 4.8 S/A 出口温度の APSD

| 信号名 | 炉出力 | 平均回数 | RMS |
|--------------|-------|------|-----------------------|
| 原子炉入口流量 (A系) | 50 MW | 5 | 1.77×10^{-3} |

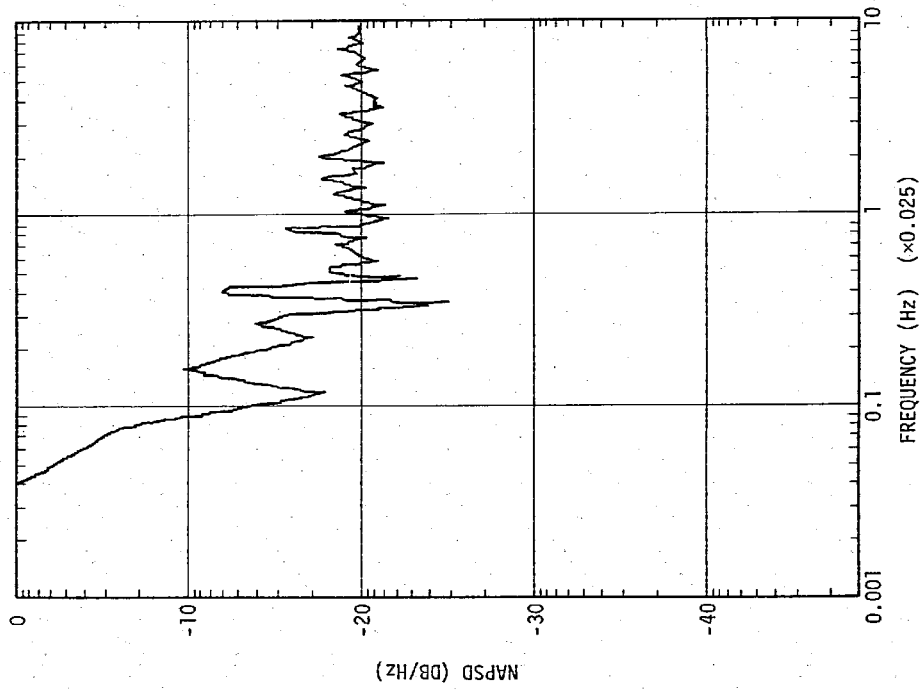


図 4.9 (a) 原子炉入口流量 (A系) の APSD (0.25 Hz まで)

| 信 号 名 | 炉 出 力 | 平均回数 | RMS |
|--------------|-------|------|-----------------------|
| 原子炉入口流量 (A系) | 50 MW | 51 | 4.80×10^{-3} |
| | | | |
| | | | |

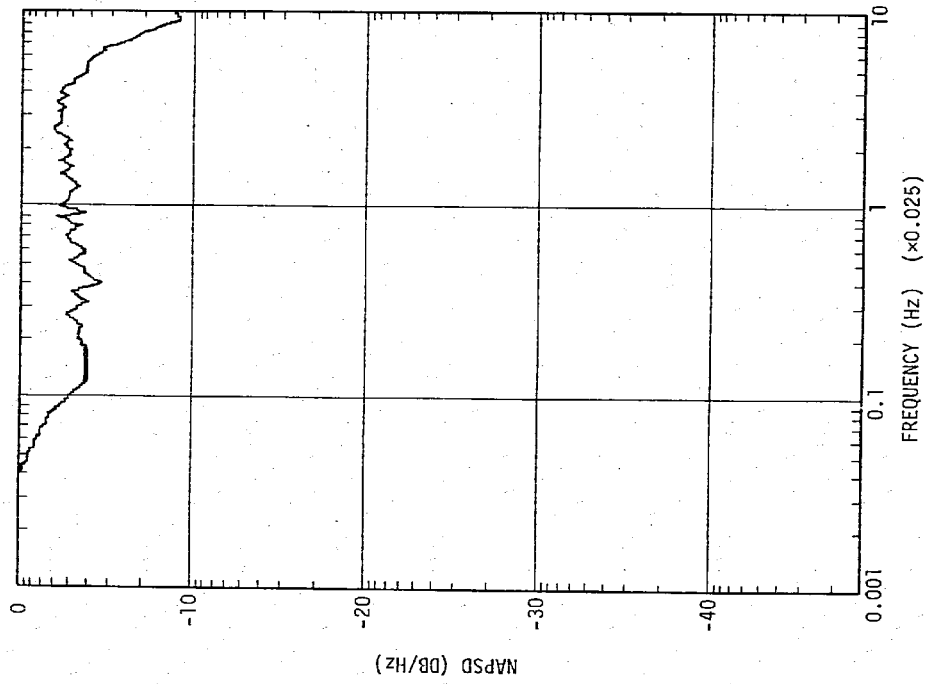


図 4.9 (b) 原子炉入口流量 (A系) のAPSD (2.5 Hzまで)

| 信 号 名 | 炉 出 力 | 平均回数 | RMS |
|-----------------|-------|------|-----------------------|
| 原子炉入口ポンプ回転数 (B) | 50 MW | 5 | 4.96×10^{-4} |
| | | | |
| | | | |

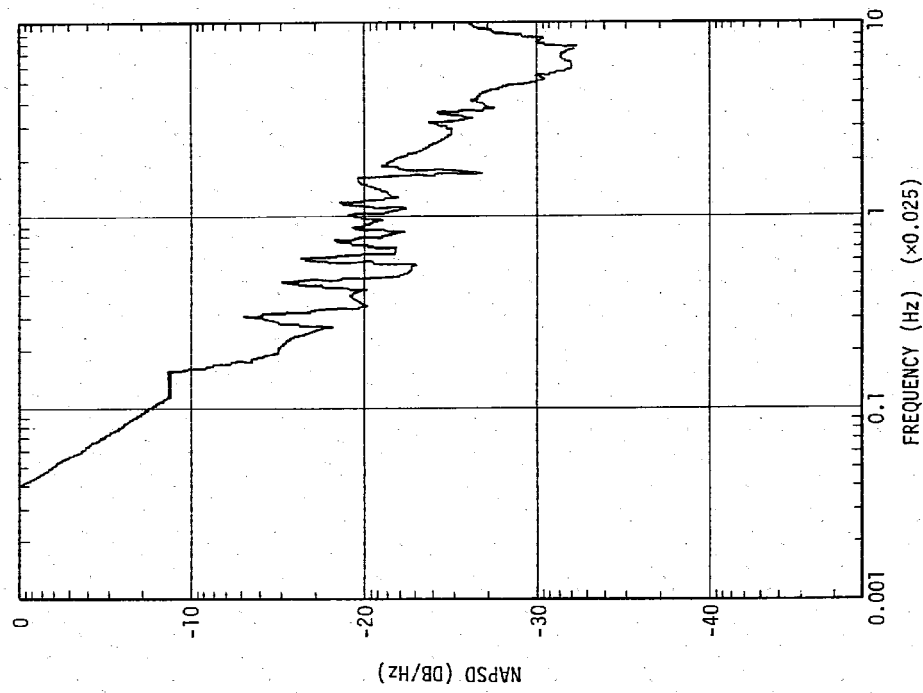


図 4.10 原子炉入口ポンプ回転数 (B系) のAPSD

| 信号名 | 炉出力 | 平均回数 | RMS |
|------------|-------|------|-----------------------|
| S/A 出口流量信号 | 50 MW | 5 | 0.21×10^{-1} |
| | | | |
| | | | |

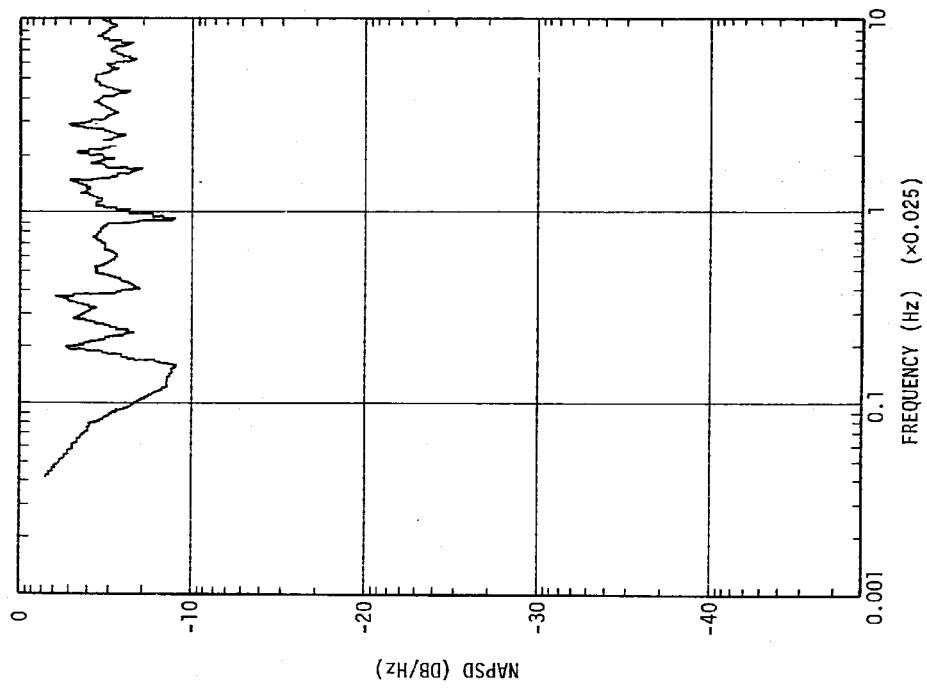


図 4.11 S/A 出口流量信号の APSD

| 信号名 | 炉出力 | 平均回数 | RMS |
|---------------------|-------|------|-----|
| 原子炉入口温度(A系) 中性子束ch7 | 50 MW | 5 | |
| 原子炉入口温度(B系) 中性子束ch7 | 50 MW | 5 | |
| | | | |

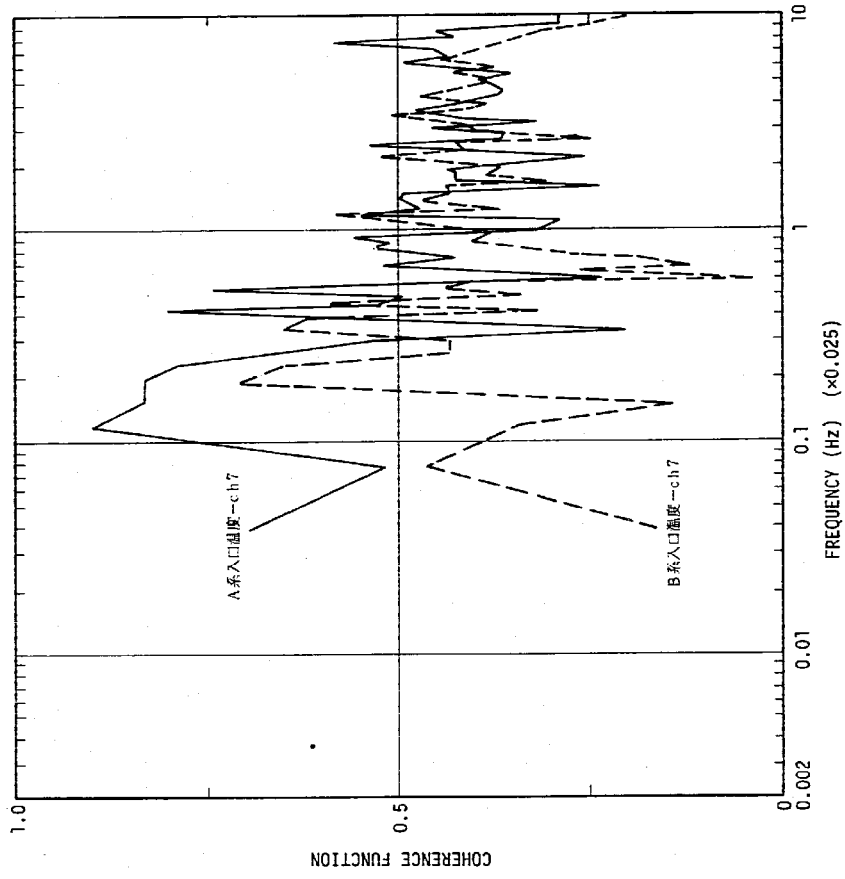


図 4.12 原子炉入口温度 (A系, B系) と中性子束 ch. 7 の間の CF

| 信号名 | 炉出力 | 平均回数 | RMS |
|------------------------------|-------|------|-----|
| 原子炉入口温度 (A系) - S/A出口温度 (IA1) | 50 MW | 5 | |
| " (A系) - S/A出口温度 (6A2) | 50 MW | 5 | |

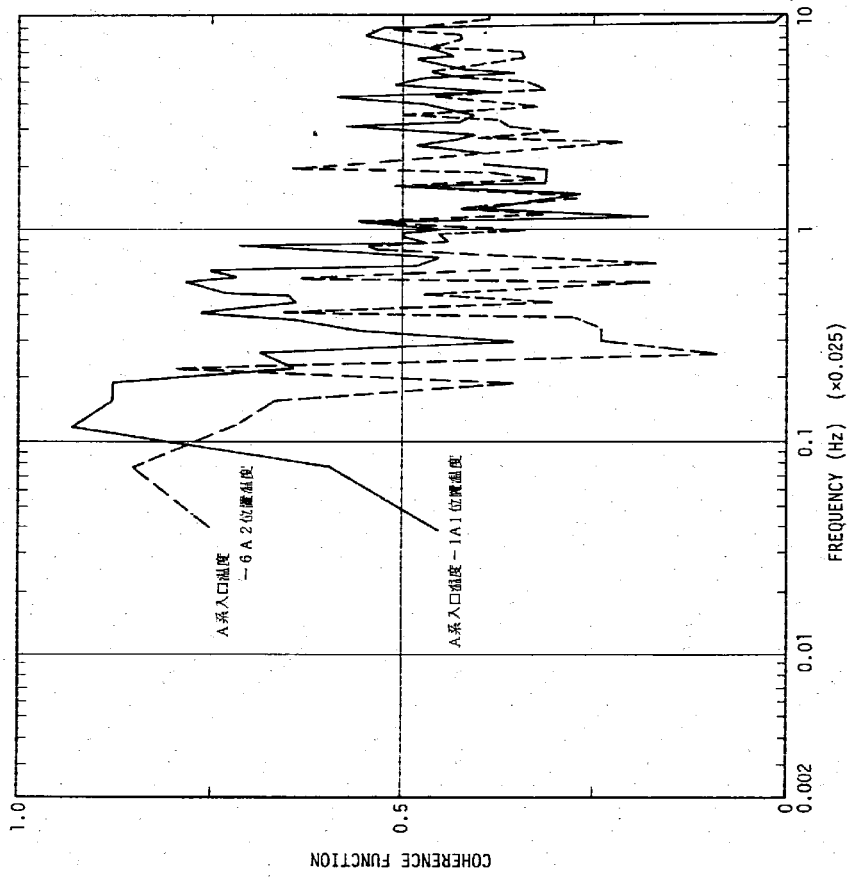


図 4.13 (a) 原子炉入口温度 (A系) と S/A 出口温度 (IA1, 6A2) の CF

| 信号名 | 炉出力 | 平均回数 | RMS |
|------------------------------|-------|------|-----|
| 原子炉入口温度 (B系) - S/A出口温度 (IA1) | 50 MW | 5 | |
| " (B系) - S/A出口温度 (6A2) | 50 MW | 5 | |

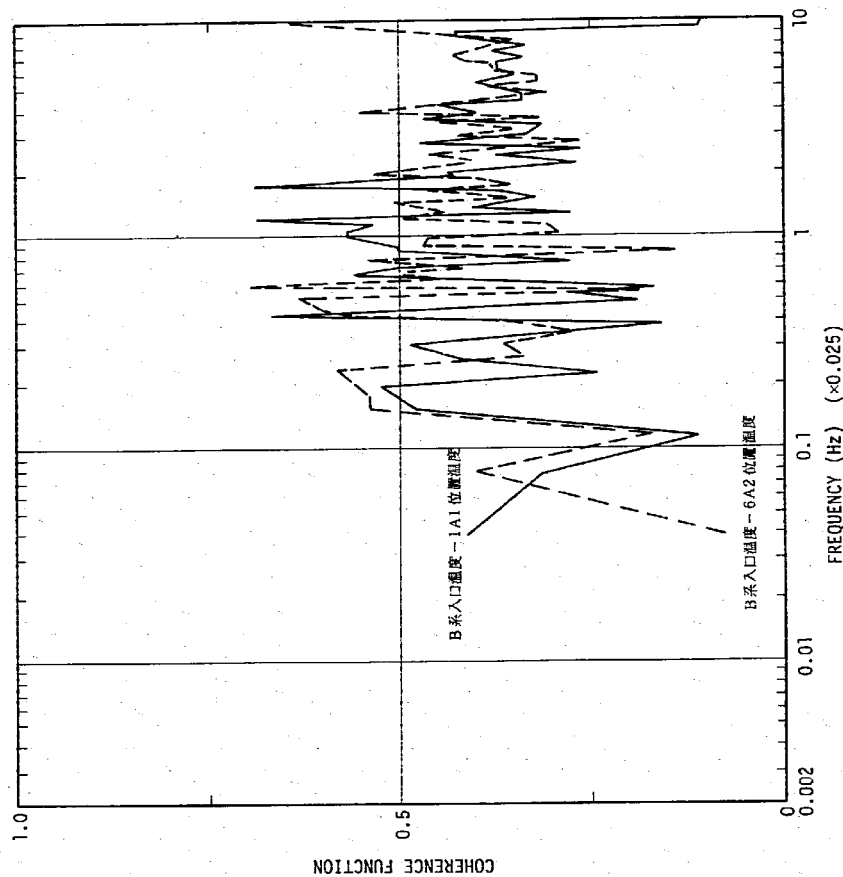


図 4.13 (b) 原子炉入口温度 (B系) と S/A 出口温度の CF

| 借号名 | 炉出力 | 平均回数 | RMS |
|----------------------|-------|------|-----|
| 原子炉入口温度-S/A出口温度 (A系) | 50 MW | 5 | |
| | | | |
| | | | |

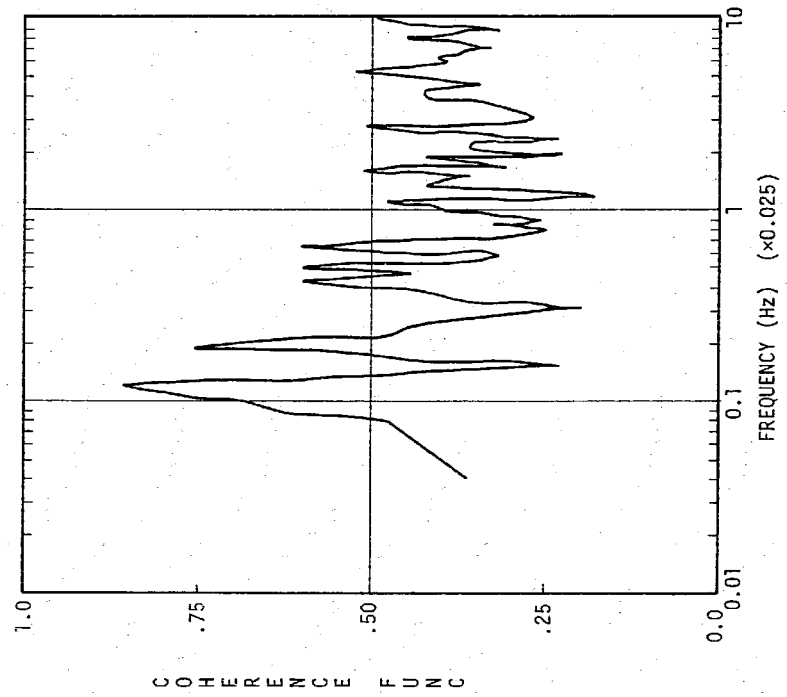


図 4.14 原子炉入口温度 (A系) と S/A 出口温度 (O位置) の CCF

| 借号名 | 炉出力 | 平均回数 | RMS |
|----------------------|-------|------|-----|
| 原子炉入口温度-原子炉出口温度 (A系) | 50 MW | 5 | |
| 原子炉入口温度-原子炉出口温度 (B系) | 50 MW | 5 | |
| | | | |

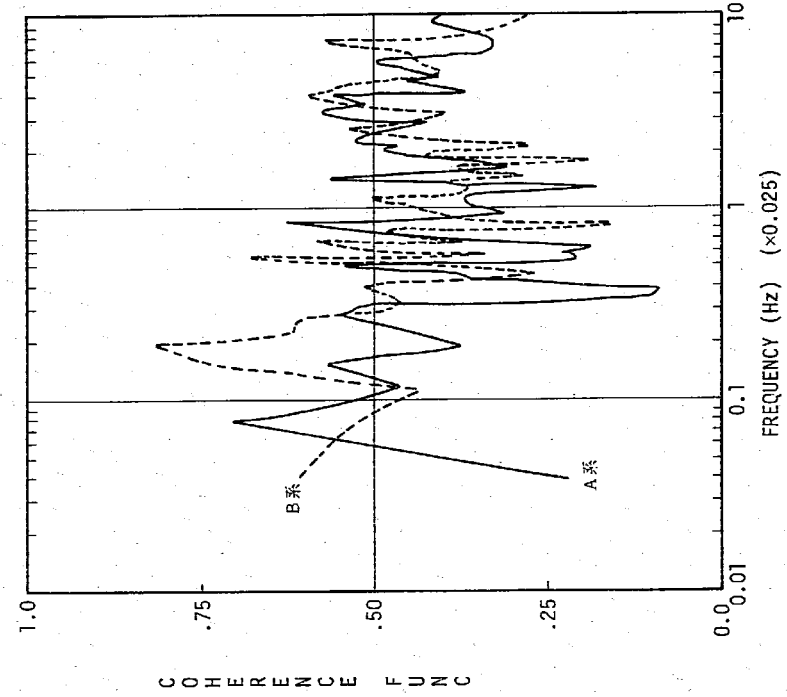


図 4.15 原子炉入口温度と原子炉出口温度の CCF

| 組 号 名 | 平均出力 | 平均回数 | RMS |
|-------------------------|-------|------|-----|
| 中性子束 ch. 6 - 中性子束 ch. 7 | 50 MW | 5 | |
| " ch. 6 - " ch. 8 | 50 MW | 5 | |
| " ch. 7 - " ch. 8 | 50 MW | 5 | |

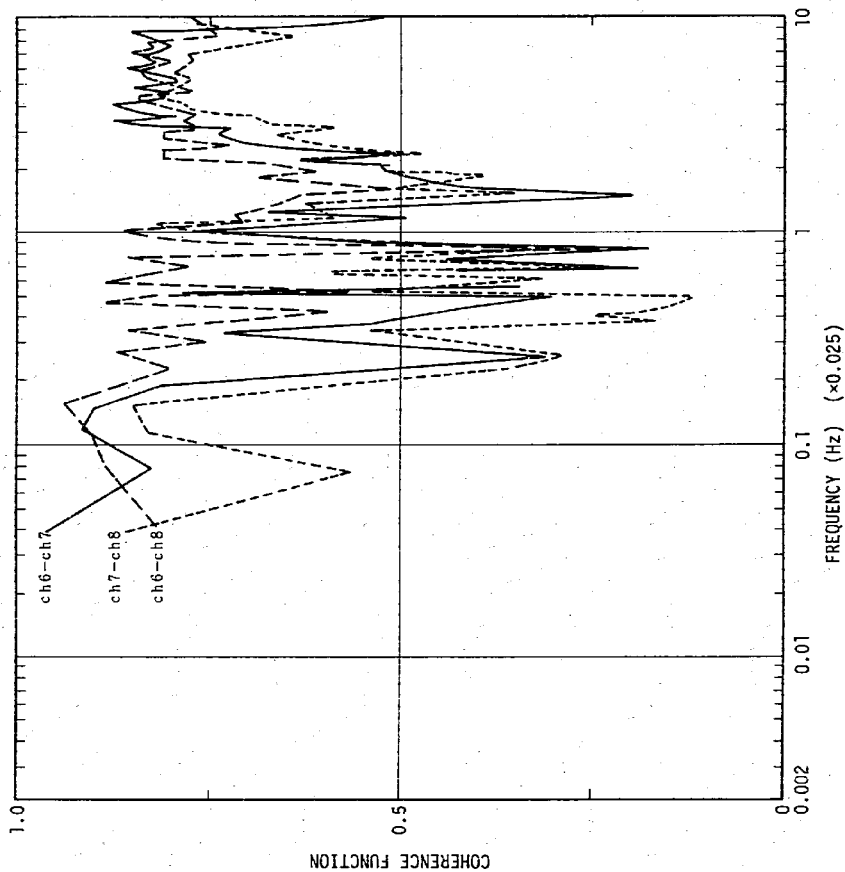


図 4.16 中性子束 ch. 6, 7, 8 間の CF

| 組 号 名 | 平均出力 | 平均回数 | RMS |
|-----------------------------|-------|------|-----|
| 中性子束 ch. 6 - S/A 出口温度 (IA1) | 50 MW | 5 | |
| " " (5A1) | 50 MW | 5 | |
| " " (6A2) | 50 MW | 5 | |

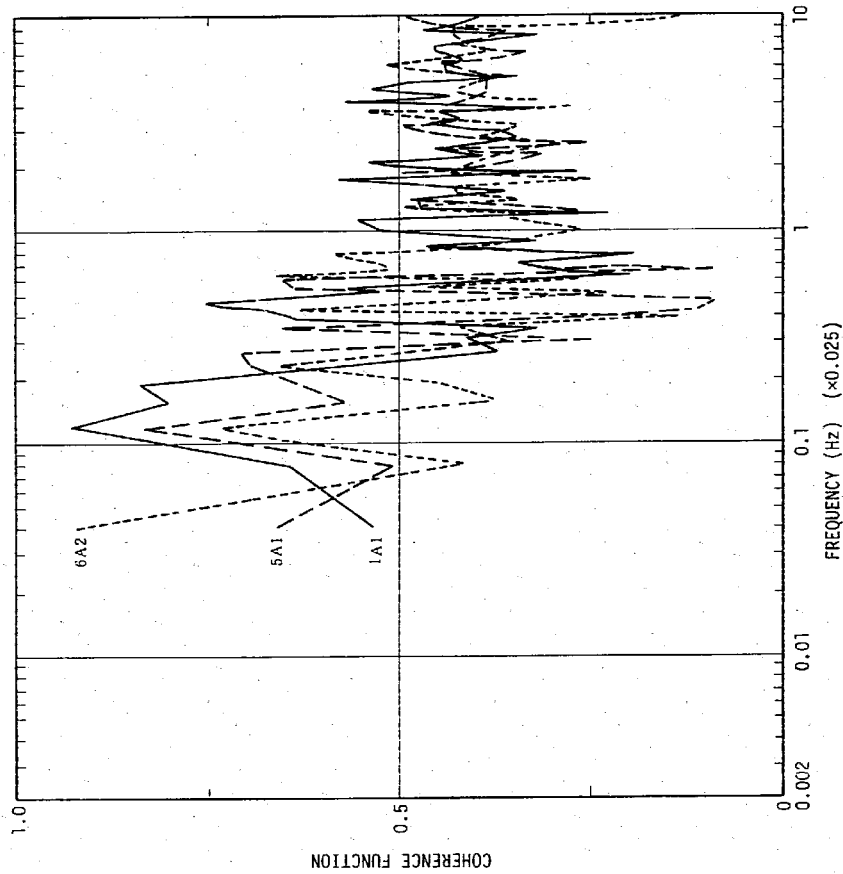


図 4.17 中性子束 ch. 6 と S/A 出口温度の CF

| 信号名 | 平均出力 | 平均回数 | R.M.S |
|---------------|------|------|-------|
| S/A出口温度 (5A1) | 50MW | 5 | |
| " | 30MW | 5 | |

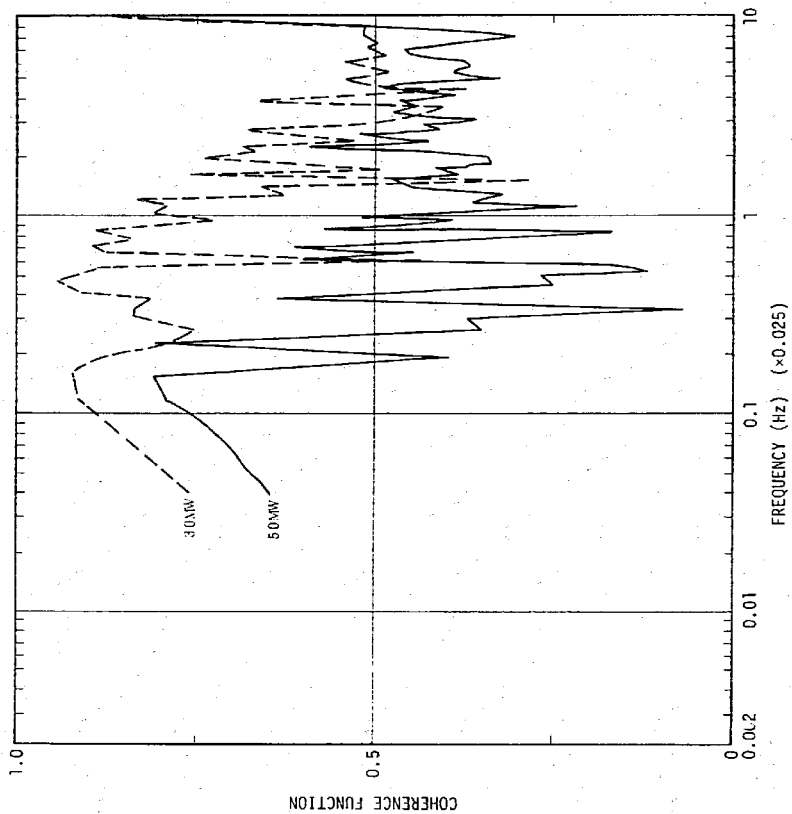


图 4.18 S/A出口温度 (5A1) と S/A出口温度 (6A2) の CF

| 信号名 | 平均出力 | 平均回数 | R.M.S |
|--------------|------|------|-------|
| 原子炉出口温度 (A系) | 50MW | 5 | |
| " | 40MW | 5 | |
| " | 30MW | 5 | |

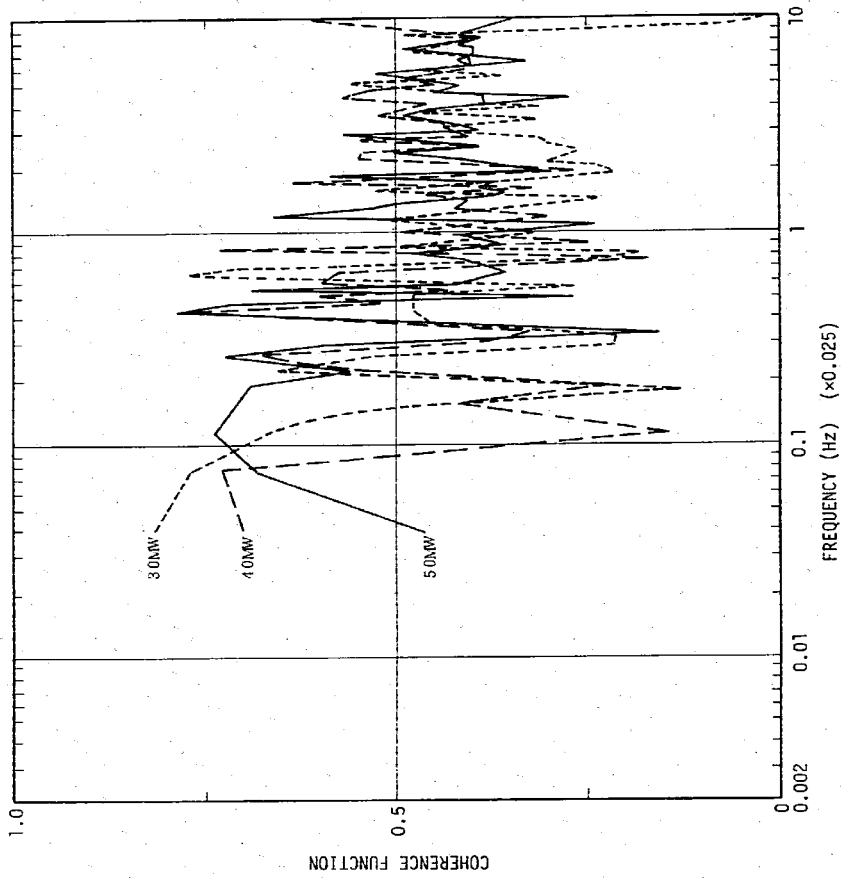


图 4.19 原子炉出口温度 (A系) と 原子炉出口温度 (B系) の CF

| 借 号 名 | 炉 出 力 | 平均回数 | R M S |
|--------------------------|-------|------|-------|
| 原子炉入口温度 (A系) → 中性子束 ch.6 | 30 MW | 5 | |
| " " " " " " | 30 MW | 5 | |

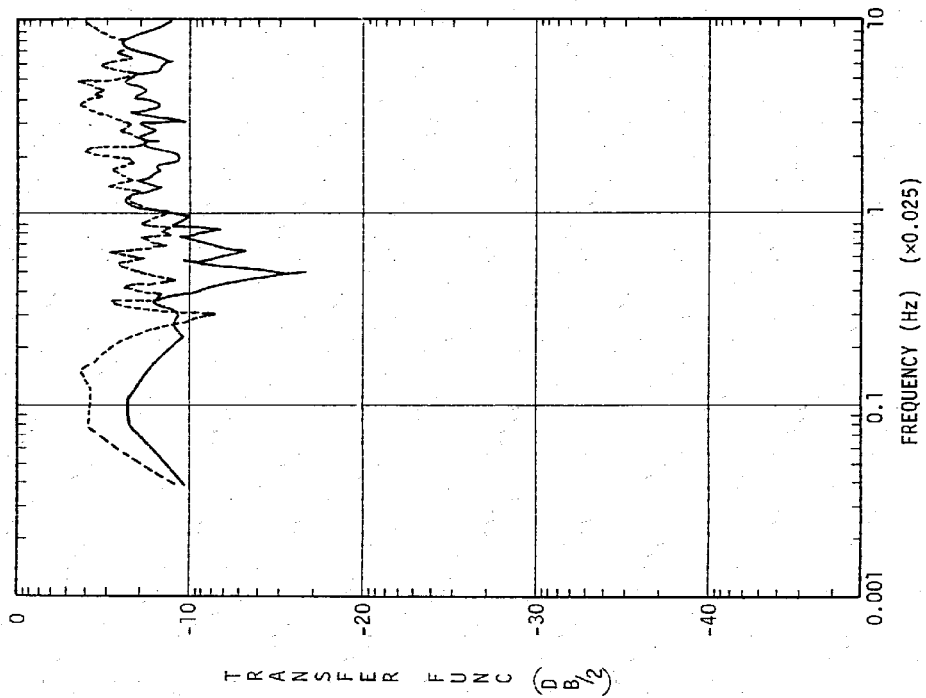


图 4.20 原子炉入口温度 (A型) から中性子束 ch.6 への TF

| 借 号 名 | 炉 出 力 | 平均回数 | R M S |
|----------------------------|-------|------|-------|
| 中性子束 ch.6 → S/A 出口温度 (1A1) | 50 MW | 51 | |

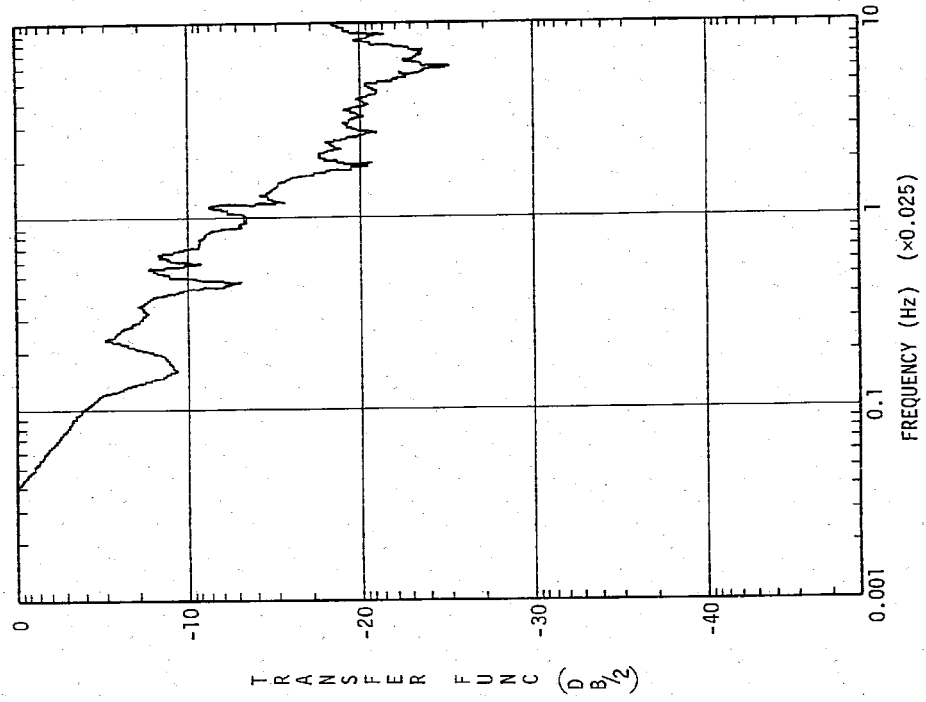


图 4.21 (a) 中性子束 ch.6 から S/A 出口温度 (1A1 位置) への TF (2.5 Hz まで)

| 信号名 | 炉出力 | 平均回数 | RMS |
|----------------------------|-------|------|-----|
| 中性子束 ch.6 -- S/A出口温度 (0位置) | 50 MW | 51 | |
| | | | |
| | | | |

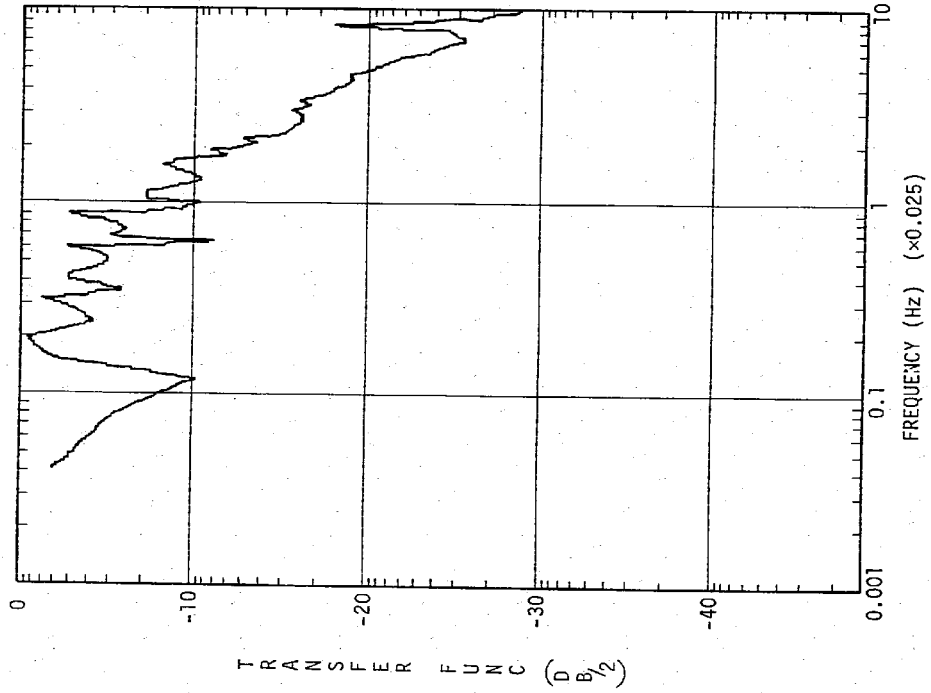


図 4.21 (b) 中性子束 ch. 6 から S/A 出口温度 (0 位置) への TF (2.5 Hz まで)

| 信号名 | 炉出力 | 平均回数 | RMS |
|----------------------------|-------|------|-----|
| 中性子束 ch. 6 -- 原子炉出口温度 (A系) | 50 MW | 5 | |
| " -- " | 30 MW | 5 | |
| | | | |

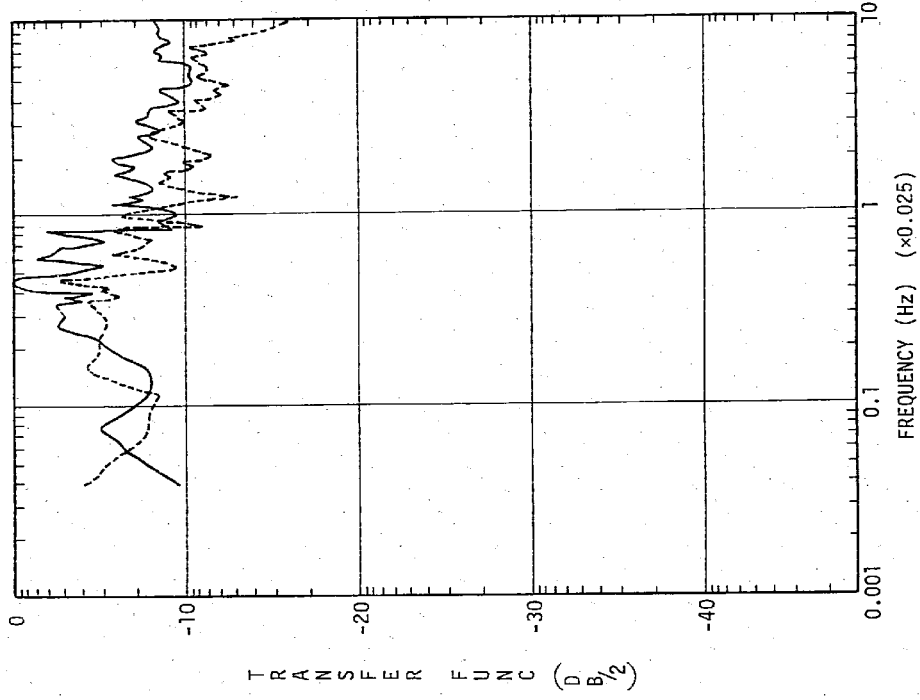


図 4.22 中性子束 ch. 6 から原子炉出口温度 (A系) への TF

| 作 号 名 | 射 出 力 | 平均回数 | RMS |
|-----------------|-------|------|------------------------|
| IHX 2次側入口温度(A系) | 5.0MW | 5 | 2.168×10^{-4} |
| " | 3.0MW | 5 | 2.184×10^{-4} |
| " | 1.2MW | 5 | 1.283×10^{-4} |

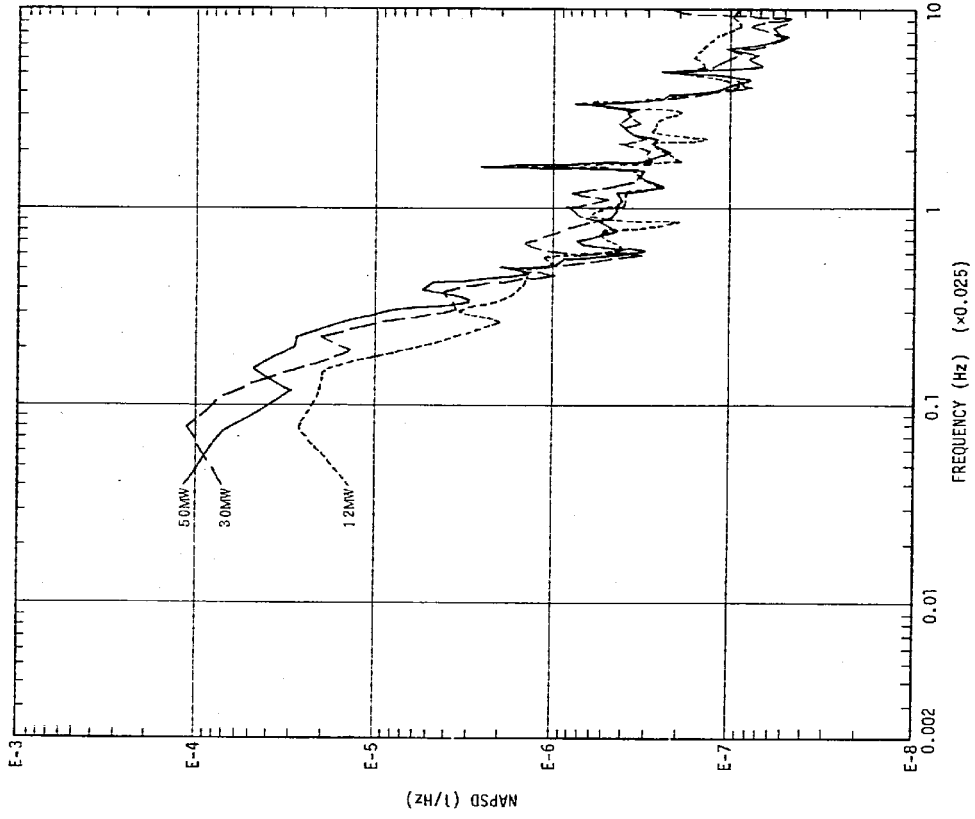


図 4.23 IHX 2次側入口温度のAPSD (A系)

| 作 号 名 | 射 出 力 | 平均回数 | RMS |
|-----------------|-------|------|------------------------|
| IHX 2次側入口温度(B系) | 6.0MW | 5 | 2.833×10^{-4} |
| " | 3.0MW | 5 | 2.802×10^{-4} |
| " | 1.8MW | 5 | 2.827×10^{-4} |

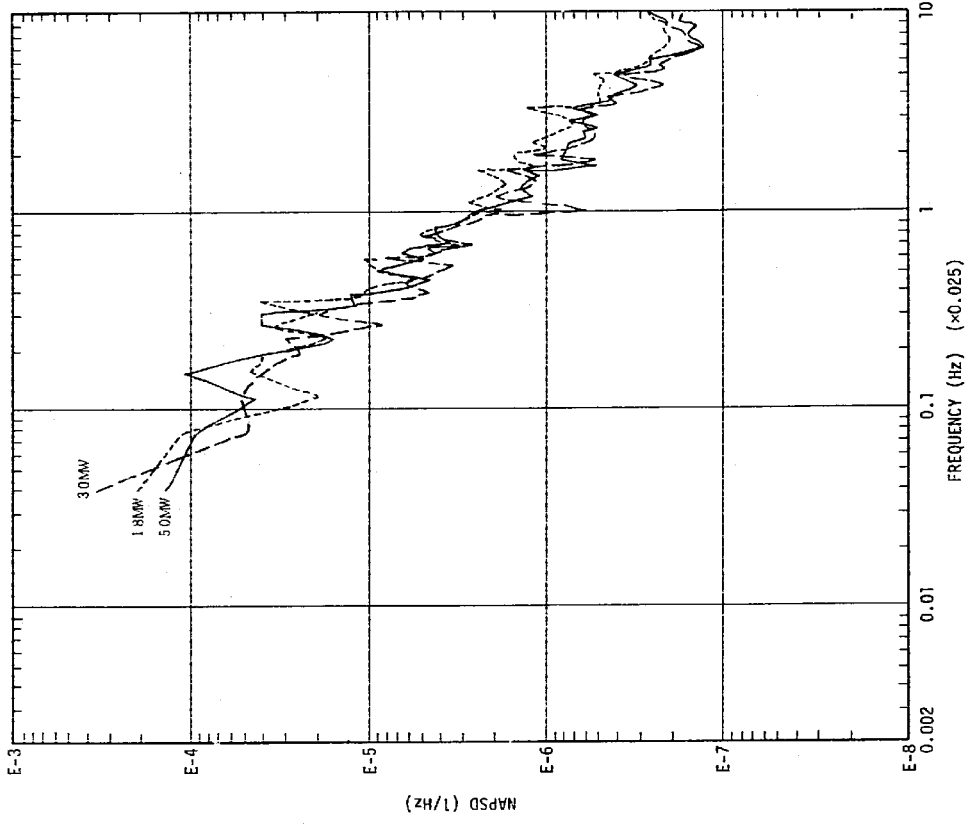


図 4.24 IHX 2次側入口温度のAPSD (B系)

| 符号名 | 炉出力 | 平均回数 | RMS |
|------------------|--------|------|------------------------|
| IHX 2 次側出口温度(A系) | 5.0 MW | 5 | 5.990×10^{-4} |
| " | 3.0 MW | 5 | 4.189×10^{-4} |
| " | 1.2 MW | 5 | 1.873×10^{-4} |

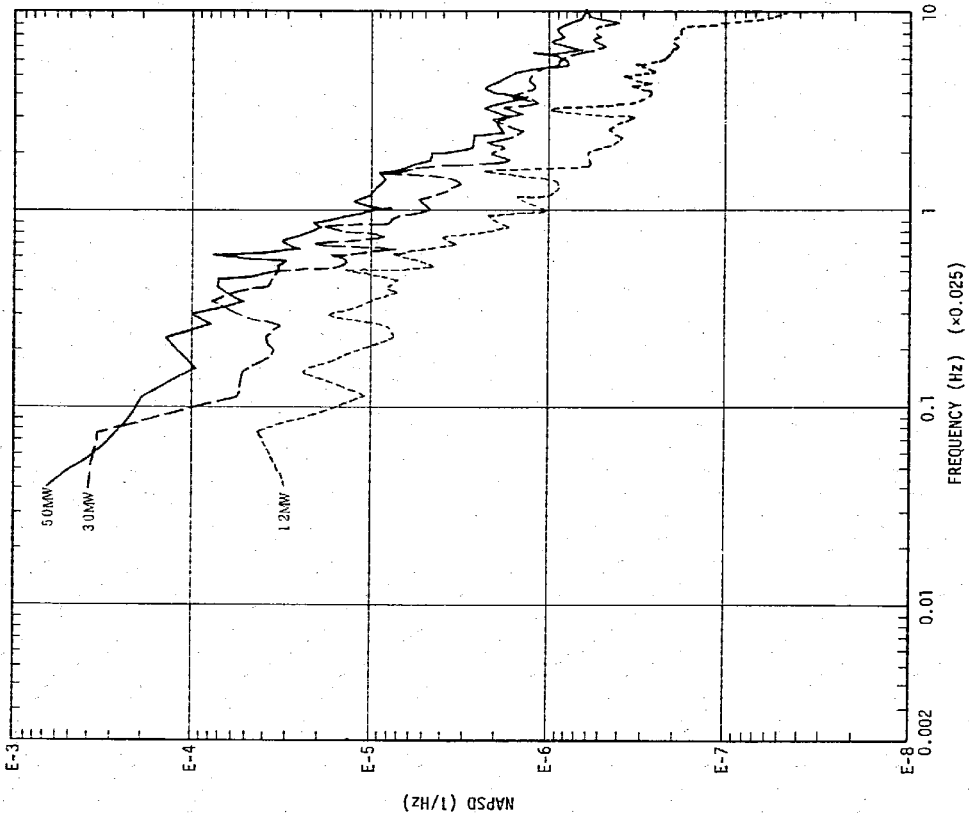


図 4.25 IHX 2 次側出口温度のAPSD (A系)

| 符号名 | 炉出力 | 平均回数 | RMS |
|------------------|--------|------|------------------------|
| IHX 2 次側出口温度(B系) | 5.0 MW | 5 | 3.771×10^{-4} |
| " | 3.0 MW | 5 | 3.470×10^{-4} |
| " | 1.8 MW | 5 | 2.598×10^{-4} |

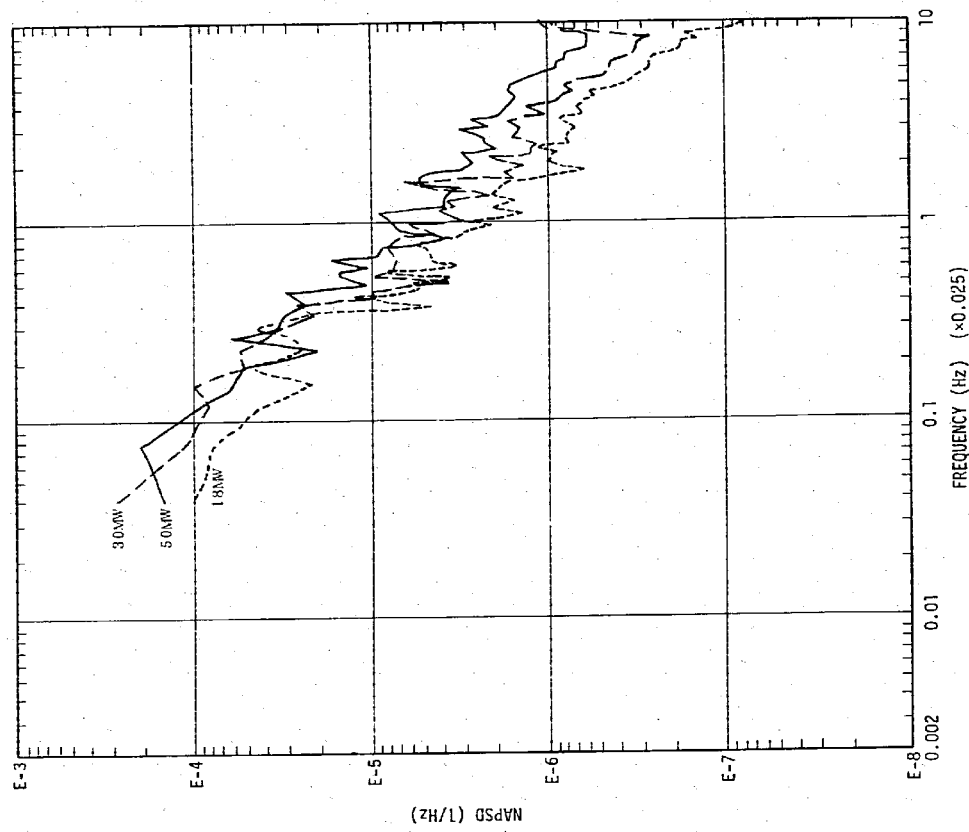


図 4.26 IHX 2 次側出口温度のAPSD (B系)

| 作号名 | 炉出力 | 平均回数 | RMS |
|---------------|-------|------|-----------------------|
| 主冷却器入口温度 (A系) | 50 MW | 5 | 3.63×10^{-4} |
| " | 30 MW | 5 | 2.66×10^{-4} |
| " | 12 MW | 5 | 1.36×10^{-4} |

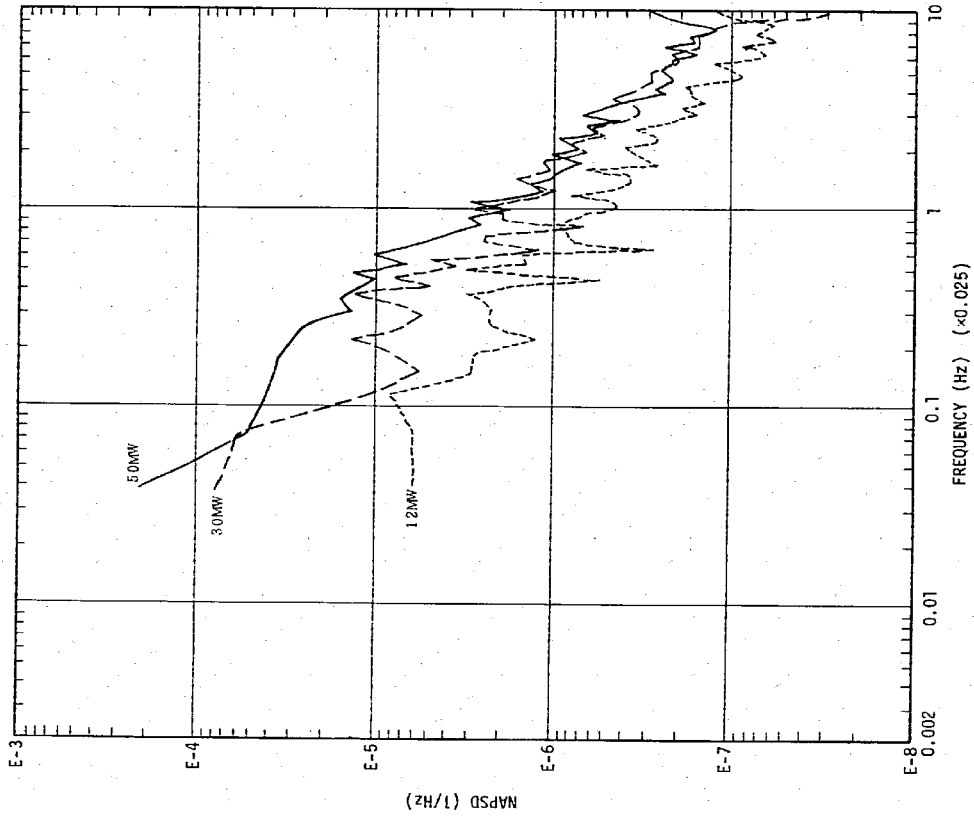


图 4.27 主冷却器入口温度 (A系)

| 作号名 | 炉出力 | 平均回数 | RMS |
|---------------|-------|------|------------------------|
| 主冷却器入口温度 (B系) | 50 MW | 5 | 2.816×10^{-4} |
| " | 30 MW | 5 | 2.775×10^{-4} |
| " | 18 MW | 5 | 1.970×10^{-4} |

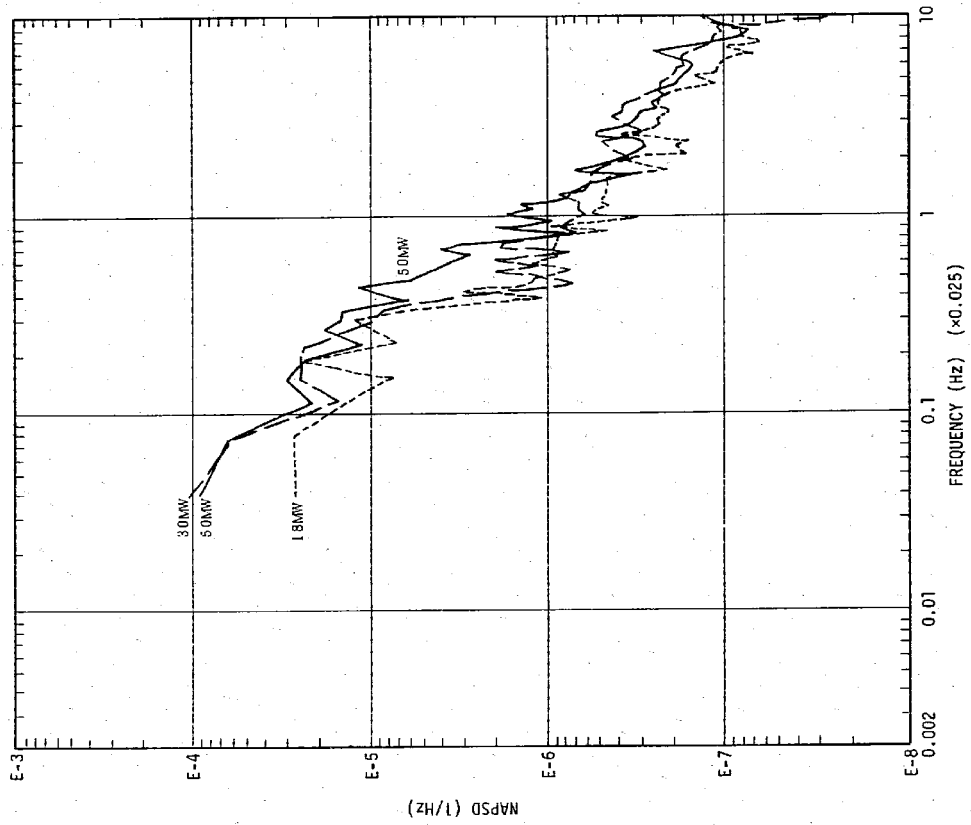


图 4.28 主冷却器入口温度 (B系)

| 番号名 | 出力 | 平均回数 | RMS |
|---------------|--------|------|-----------------------|
| 主冷却器出口温度 (2A) | 5.0 MW | 5 | 4.23×10^{-4} |
| " | 3.0 MW | 5 | 2.67×10^{-4} |
| " | 1.2 MW | 5 | 1.16×10^{-4} |

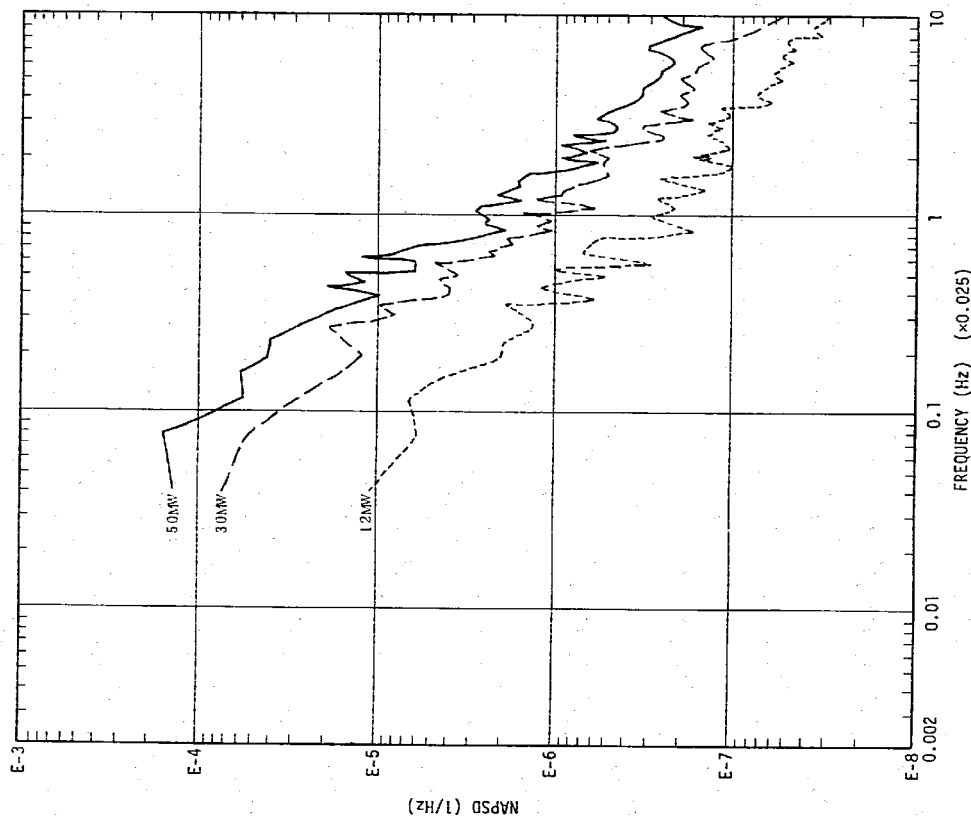


図 4.29 主冷却器出口温度の APSD (2A)

| 番号名 | 出力 | 平均回数 | RMS |
|---------------|--------|------|-----------------------|
| 主冷却器出口温度 (2B) | 5.0 MW | 5 | 2.21×10^{-4} |
| " | 3.0 MW | 5 | 2.61×10^{-4} |
| " | 1.8 MW | 5 | 1.96×10^{-4} |

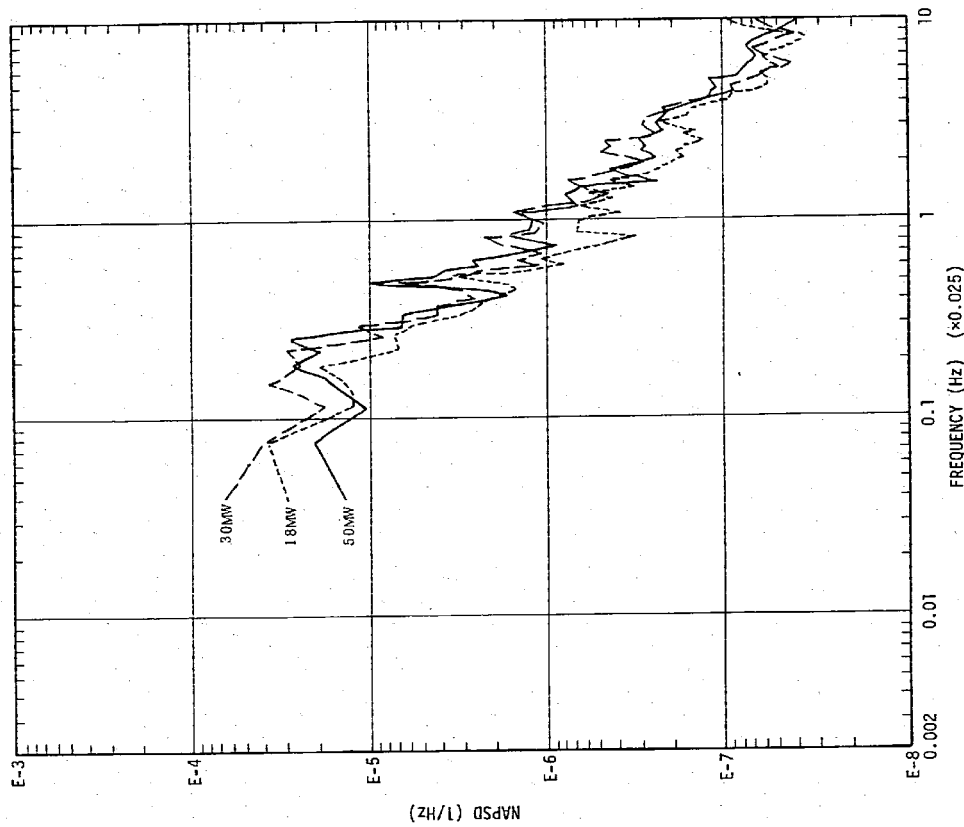


図 4.30 主冷却器出口温度の APSD (2B)

| 値 号 名 | 掛 出 力 | 平均回数 | RMS |
|-----------------|-------|------|------------------------|
| 主冷却器出口空気温度 (2A) | 50 MW | 5 | 1.454×10^{-1} |
| " | 40 MW | 5 | |
| " | 30 MW | 5 | 1.491×10^{-1} |
| " | 12 MW | 5 | 1.749×10^{-1} |

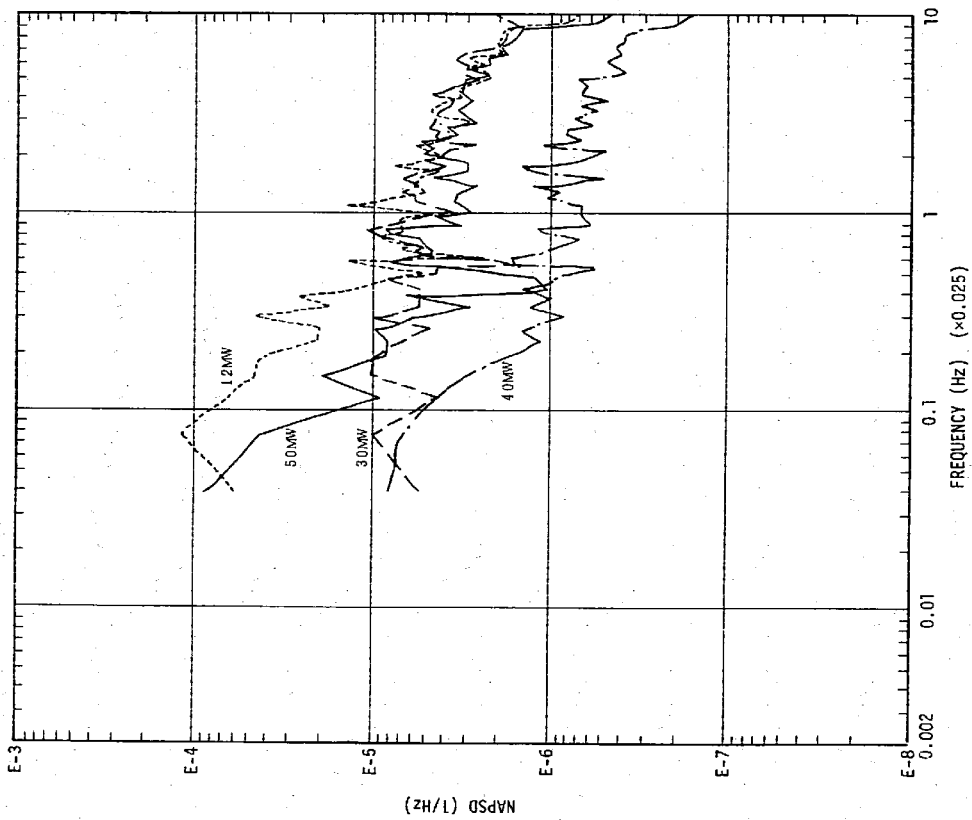


図 4.31 主冷却器出口空気温度のAPSD (2A)

| 値 号 名 | 掛 出 力 | 平均回数 | RMS |
|-----------------|-------|------|------------------------|
| 主冷却器出口空気温度 (2B) | 50 MW | 5 | 4.161×10^{-1} |
| " | 40 MW | 5 | |
| " | 30 MW | 5 | 3.894×10^{-1} |
| " | 18 MW | 5 | 6.981×10^{-1} |

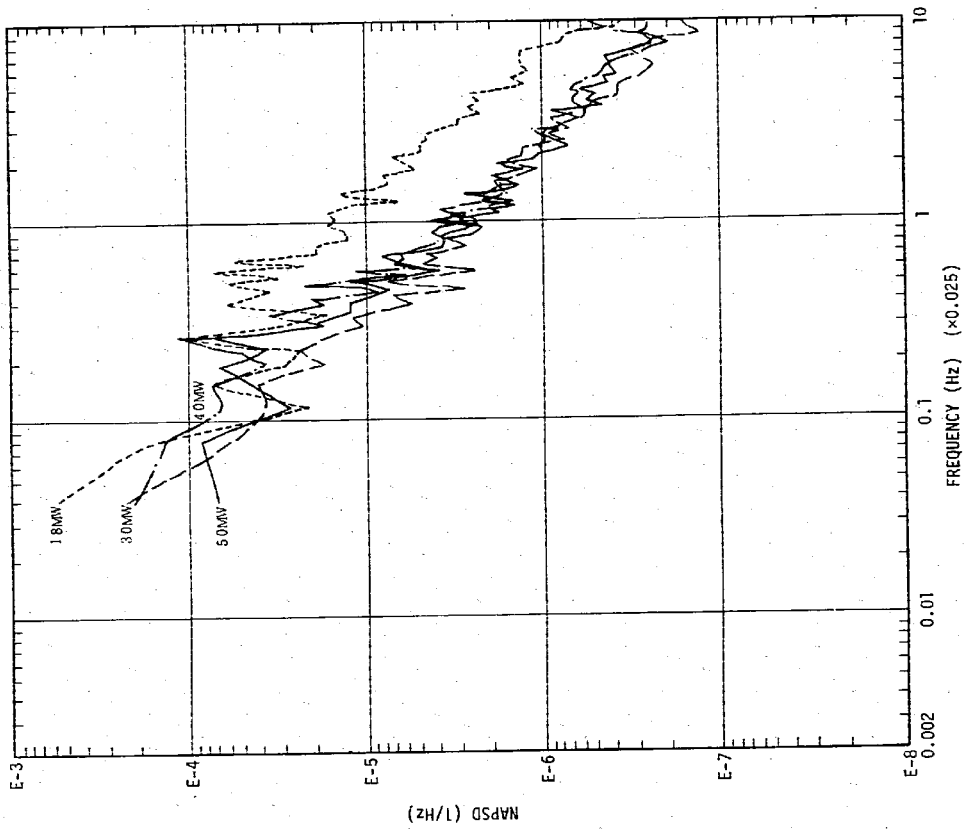


図 4.32 主冷却器出口空気温度のAPSD (2B)

| 信号名 | 输出功率 | 平均回数 | RMS |
|--------------------------|------|------|-----|
| 原子炉出口温度-IHX 2次側出口温度 (A系) | 50MW | 5 | |
| " (B系) | 50MW | 5 | |

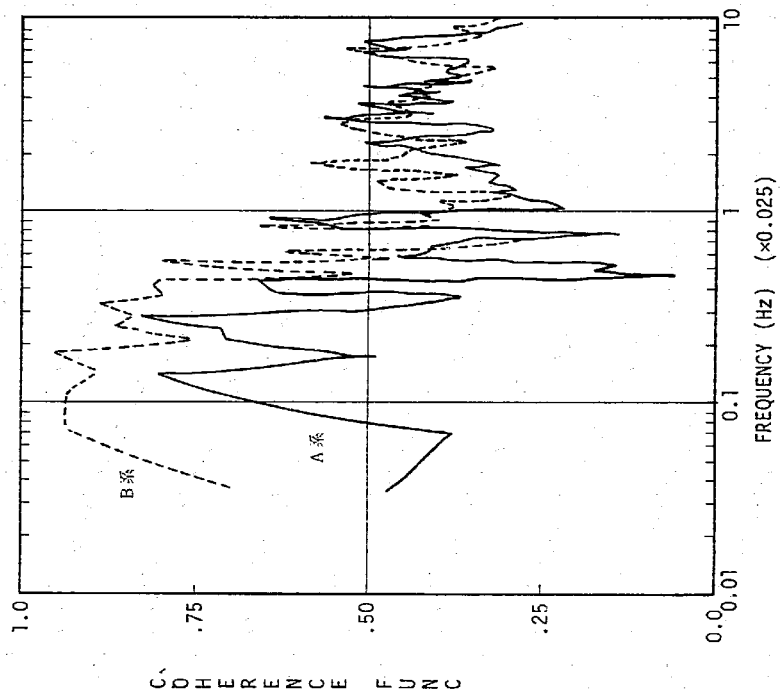


图 4.33 原子炉出口温度と IHX 2 次側出口温度の CF

| 信号名 | 输出功率 | 平均回数 | RMS |
|-----------------------|------|------|-----|
| IHX 2次側入口温度-出口温度 (A系) | 50MW | 5 | |
| " (B系) | 50MW | 5 | |

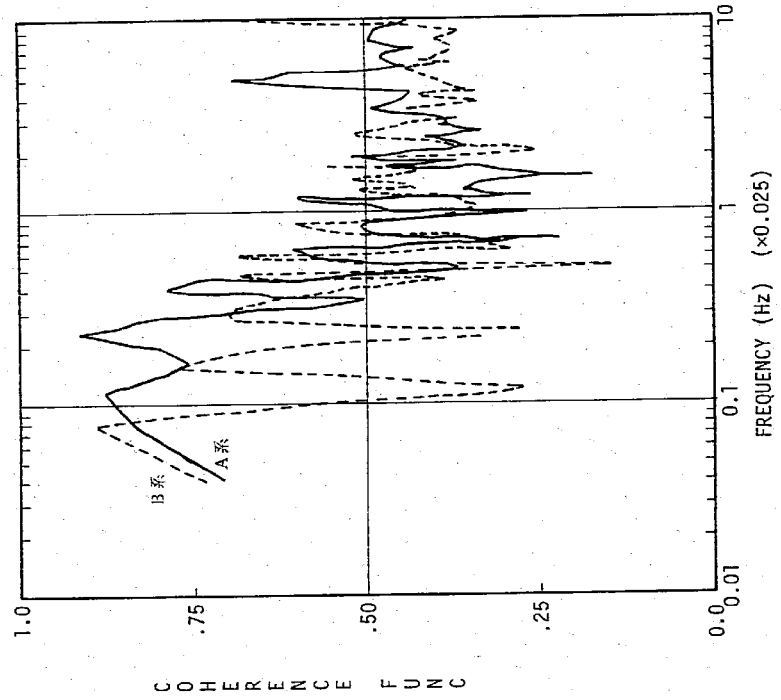


图 4.34 IHX 2 次側入口温度と出口温度の CF

| 信号名 | 炉出力 | 平均回数 | RMS |
|-----------------------------|-------|------|-----|
| —— IHX2次側出口温度-主冷却器入口温度 (A系) | 50 MW | 5 | |
| ----- " (B系) | 50 MW | 5 | |

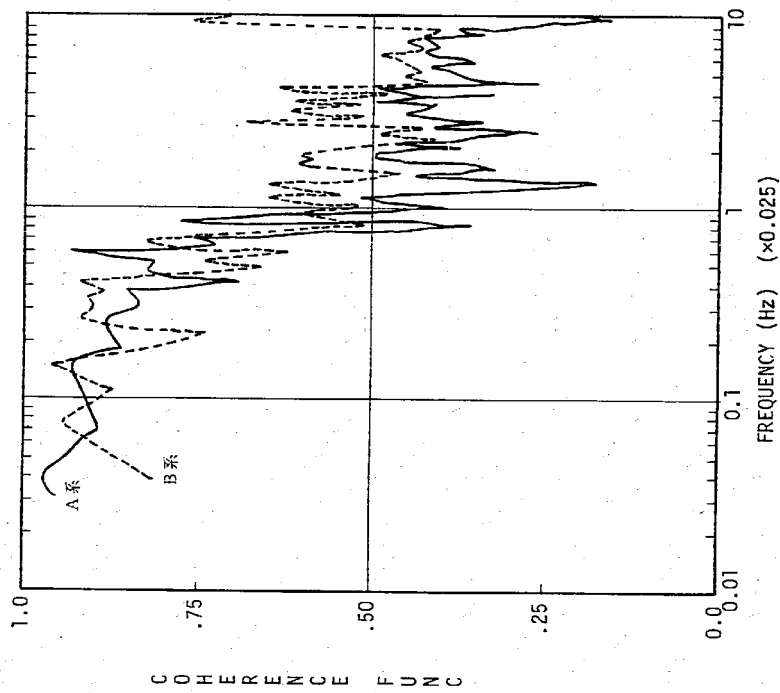


图 4.35 IHX 2 次侧出口温度与主冷却器入口温度的 C F

| 信号名 | 炉出力 | 平均回数 | RMS |
|---------------------|-------|------|-----|
| —— 主冷入口温度-出口温度 (A系) | 50 MW | 5 | |
| ----- " (B系) | 50 MW | 5 | |

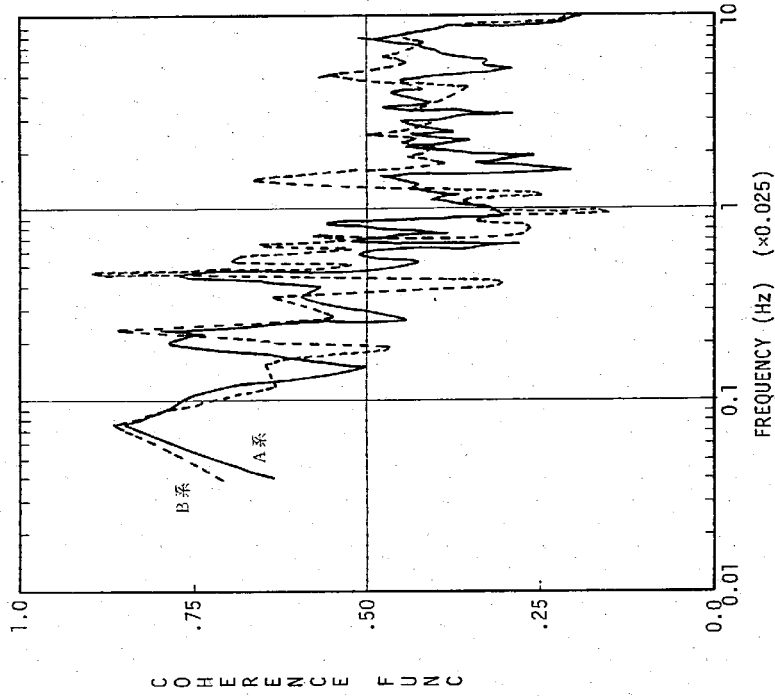


图 4.36 主冷却器出入口温度的 C F

| 信号名 | 炉出力 | 平均回数 | RMS |
|-----------------------|-------|------|-----|
| 炉内温度- IHX2次側入口温度 (2A) | 50 MW | 5 | |
| " (2B) | 50 MW | 5 | |

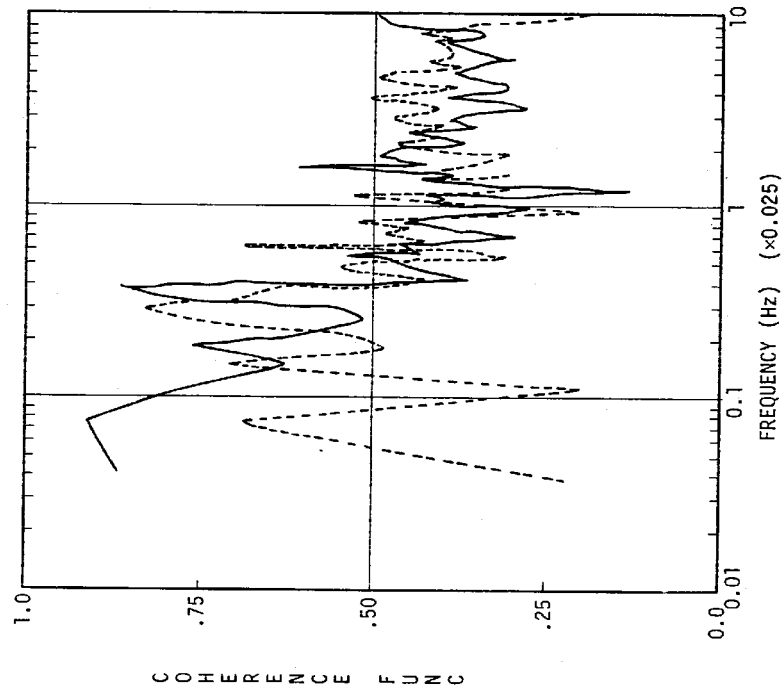


図 4.37 主冷却器出口温度と IHX2 次側入口温度の C.F

| 信号名 | 炉出力 | 平均回数 | RMS |
|-------------------------|-------|------|-----|
| IHX2次側入口温度-原子炉入口温度 (B系) | 50 MW | 5 | |
| " (B系) | 30 MW | 5 | |

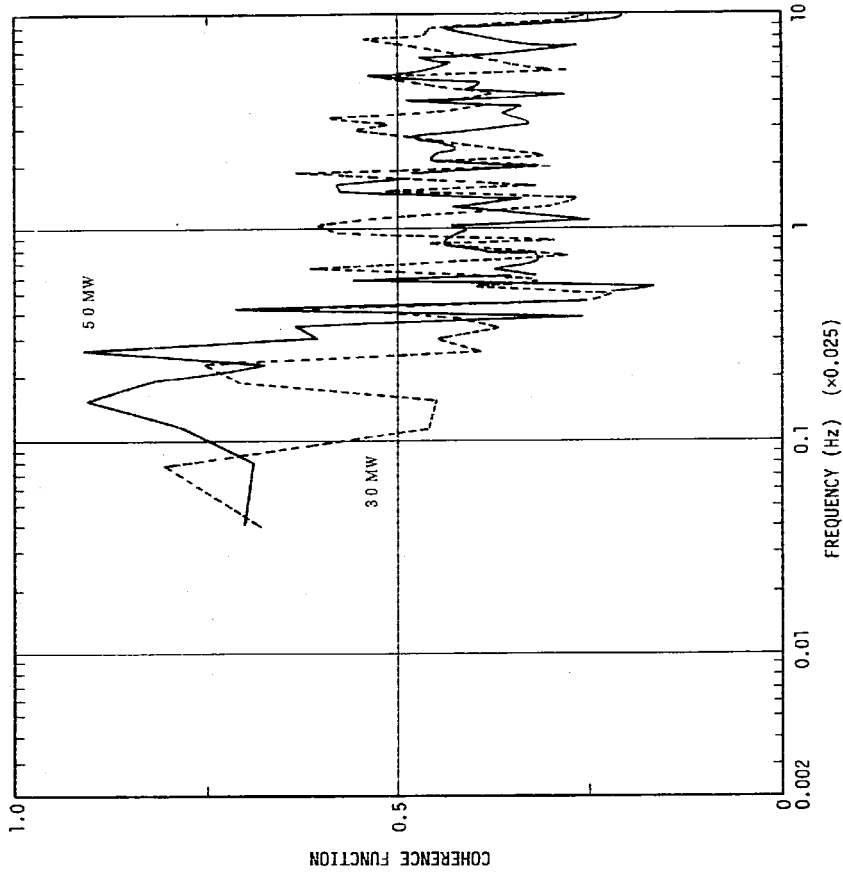


図 4.38 IHX 2 次側入口温度と原子炉入口温度の C.F (B 系)

— A 系
- - - B 系

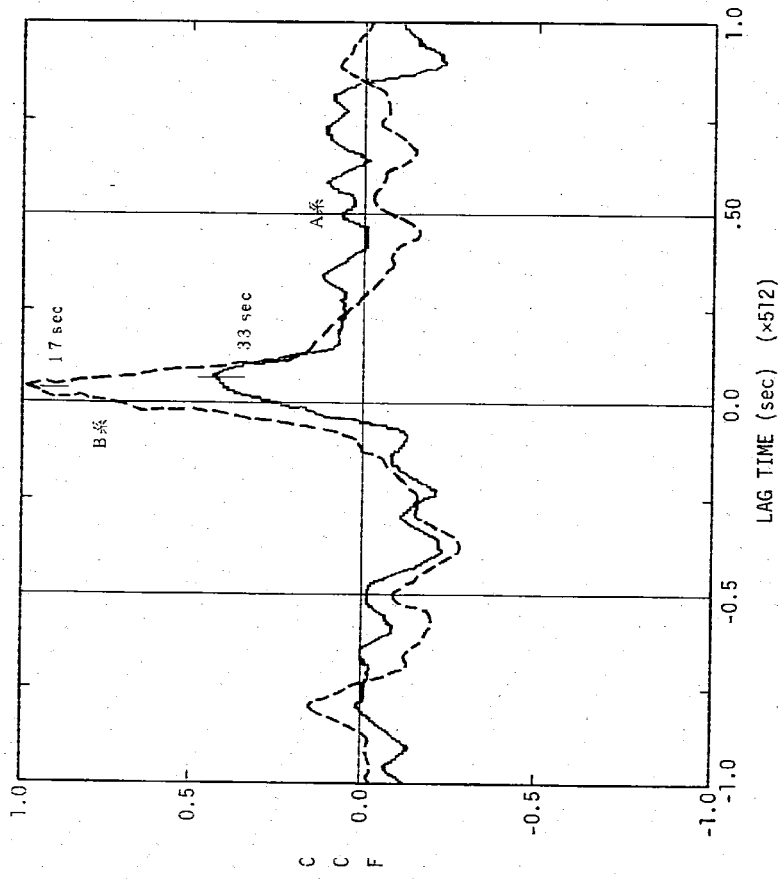


图 4.39 炉出力 50 MW 時の原子炉出口温度と IHX 2 次側出口温度の CCF

— A 系
- - - B 系

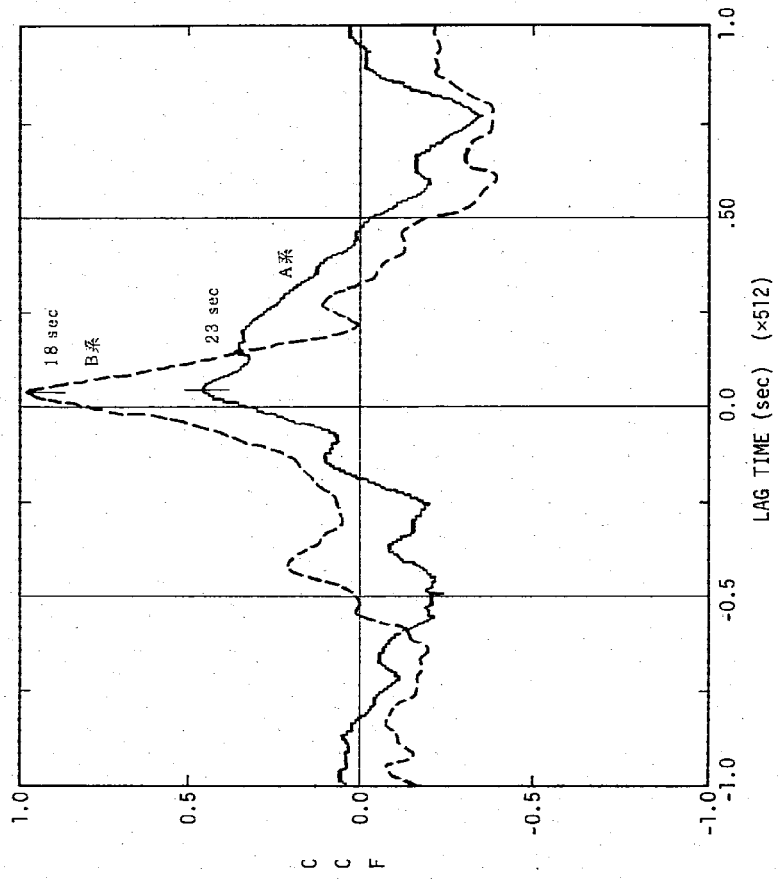


图 4.40 炉出力 30 MW 時の原子炉出口温度と IHX 2 次側出口温度の CCF

— A系
- - - B系

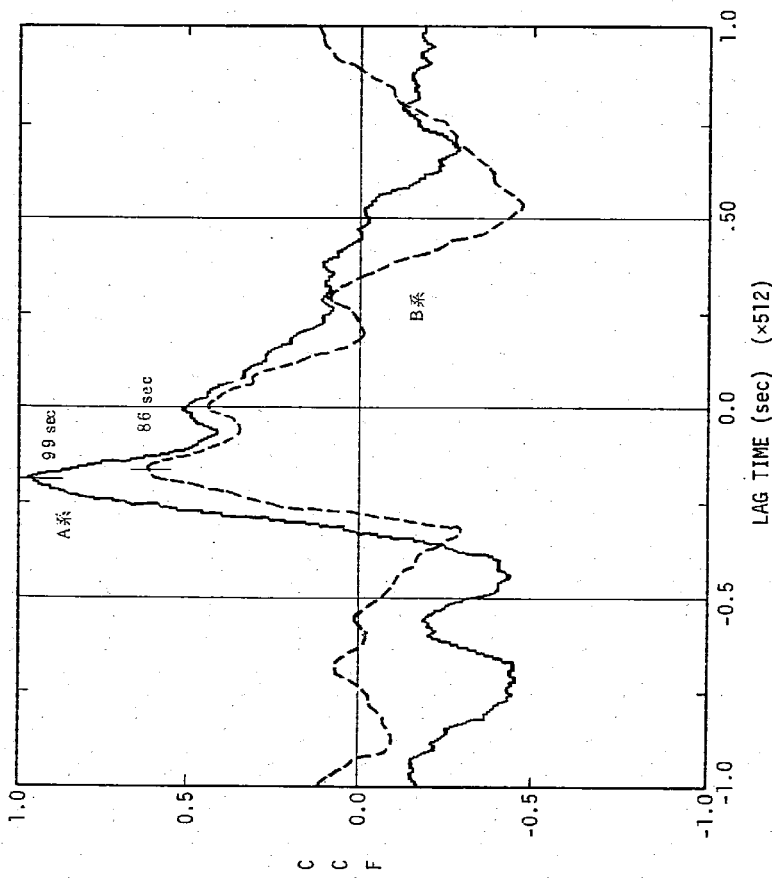


図 4.41 炉出力 50 MW 時の IHX 2 次側入口温度と向出口温度の CCF

— A系
- - - B系

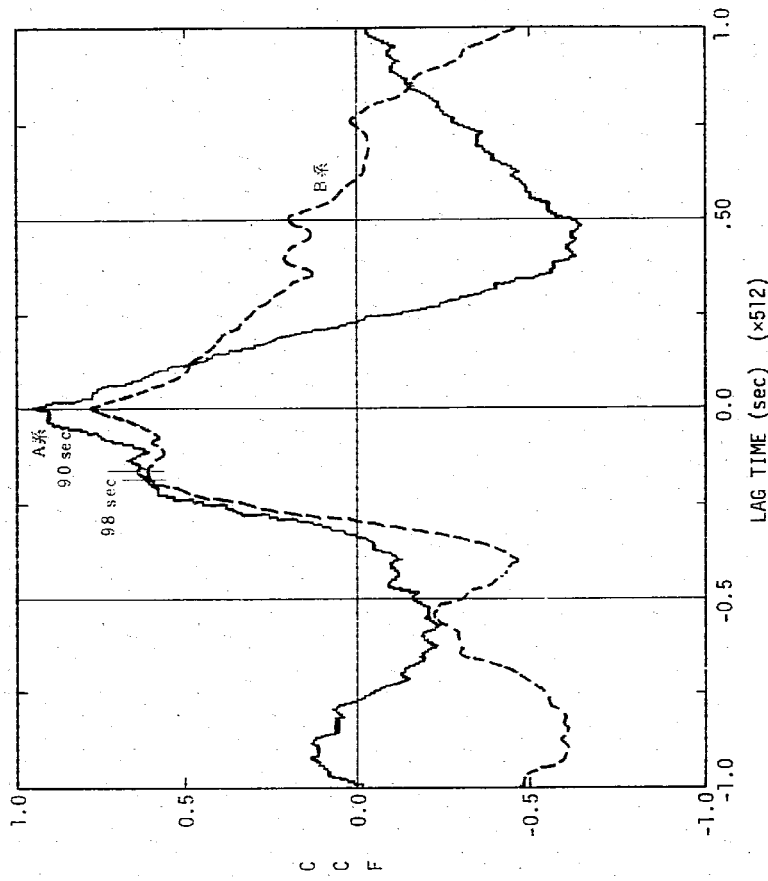


図 4.42 炉出力 30 MW 時の IHX 2 次側入口温度と向出口温度の CCF

— A 系
- - - B 系

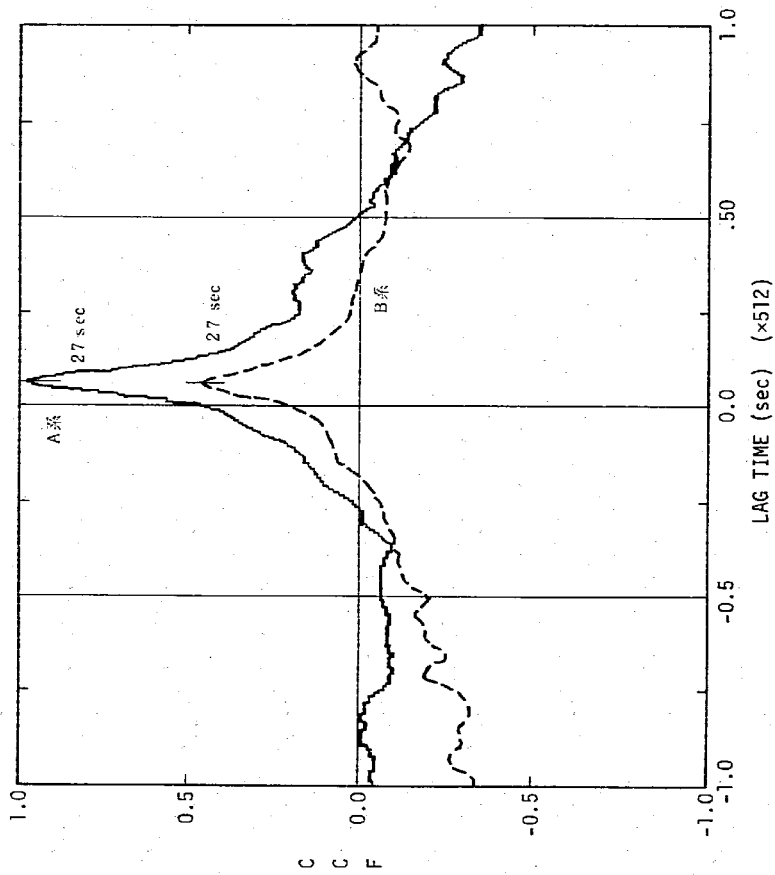


図 4.3 炉心力 50 MW 時の IHX 2 次側出口温度と主冷却器入口温度の CCF

— A 系
- - - B 系

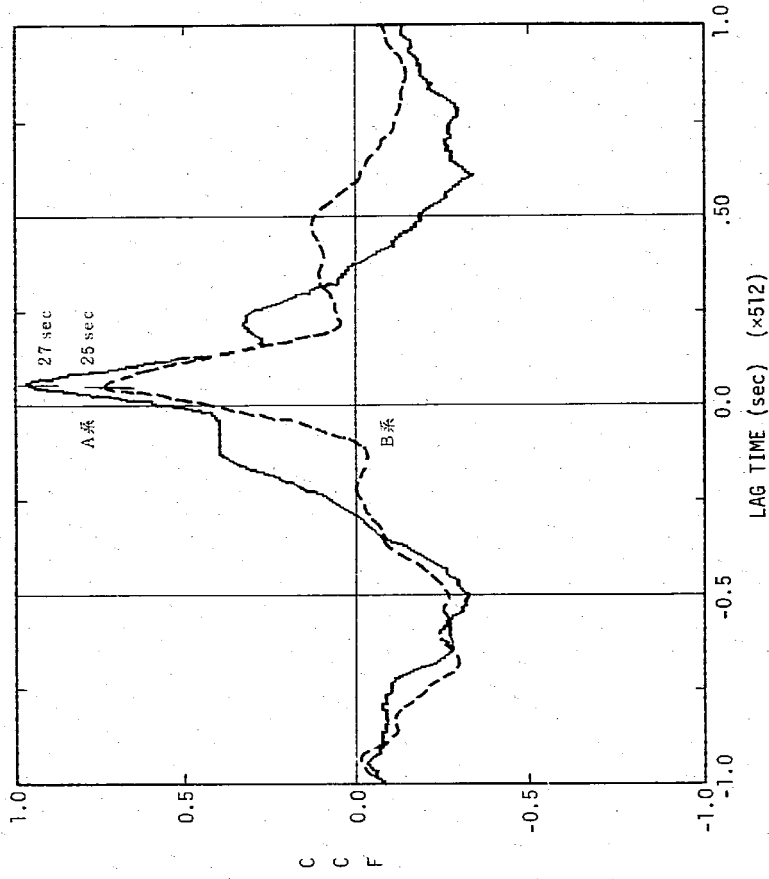


図 4.4 炉出力 30 MW 時の IHX 2 次側出口温度と主冷却器入口温度の CCF

— A 系
- - - B 系

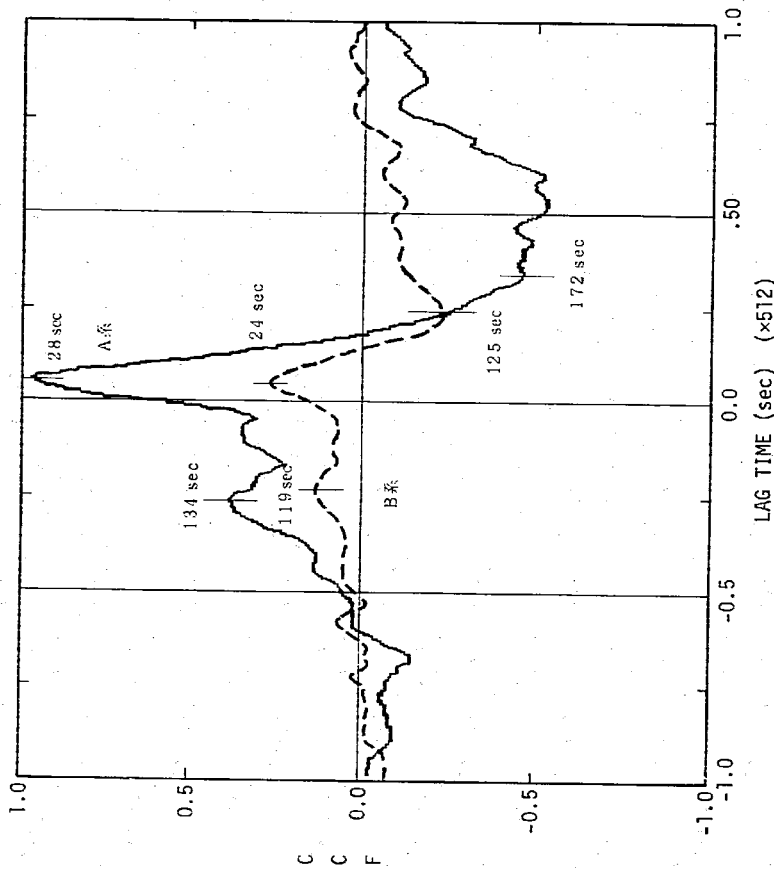


図 4.45 炉出力 5.0 MW 時の主冷却器入口温度と同出口温度の CCF

— A 系
- - - B 系

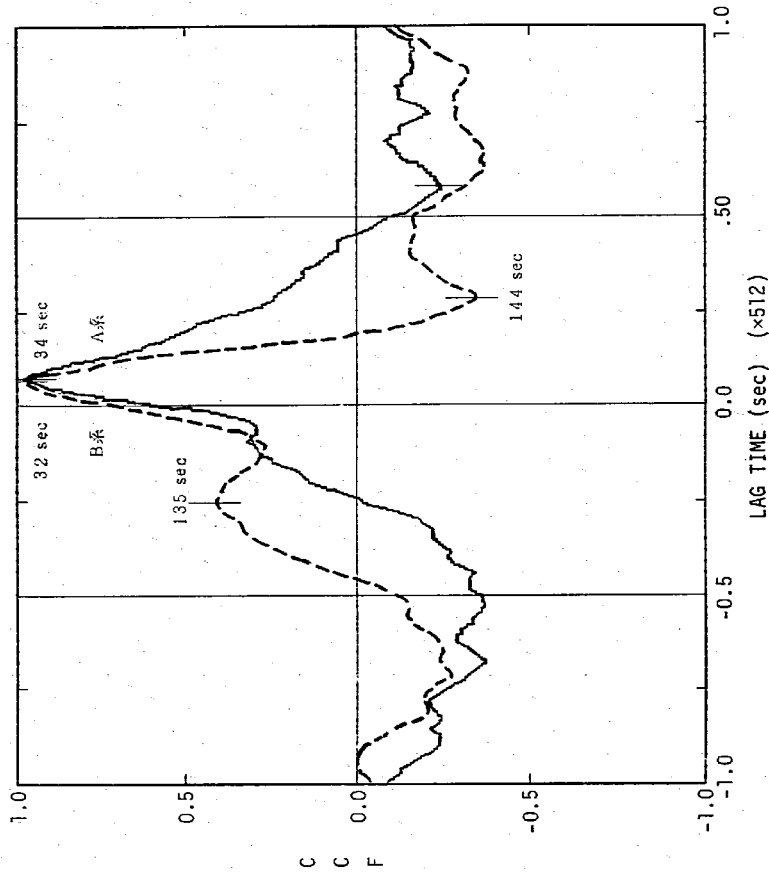


図 4.46 炉心力 30 MW 時の主冷却器入口温度と同出口温度の CCF

— A 系
- - - B 系

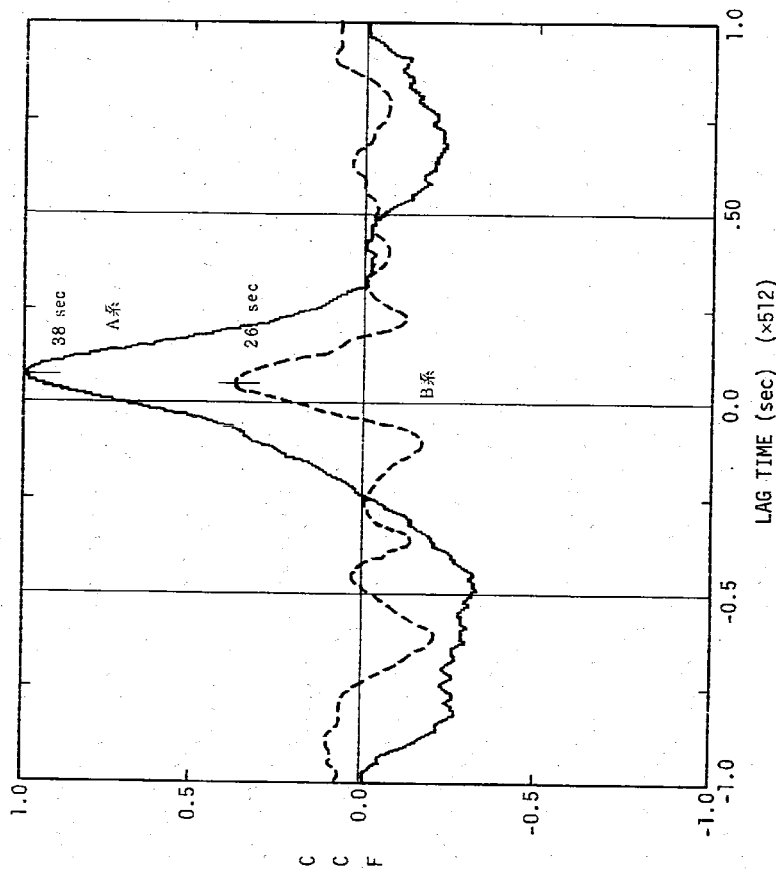


図 4.47 炉出力 50 MW 時の主冷却器出口温度と IHX 2 次側入口温度の CCF

— A 系
- - - B 系

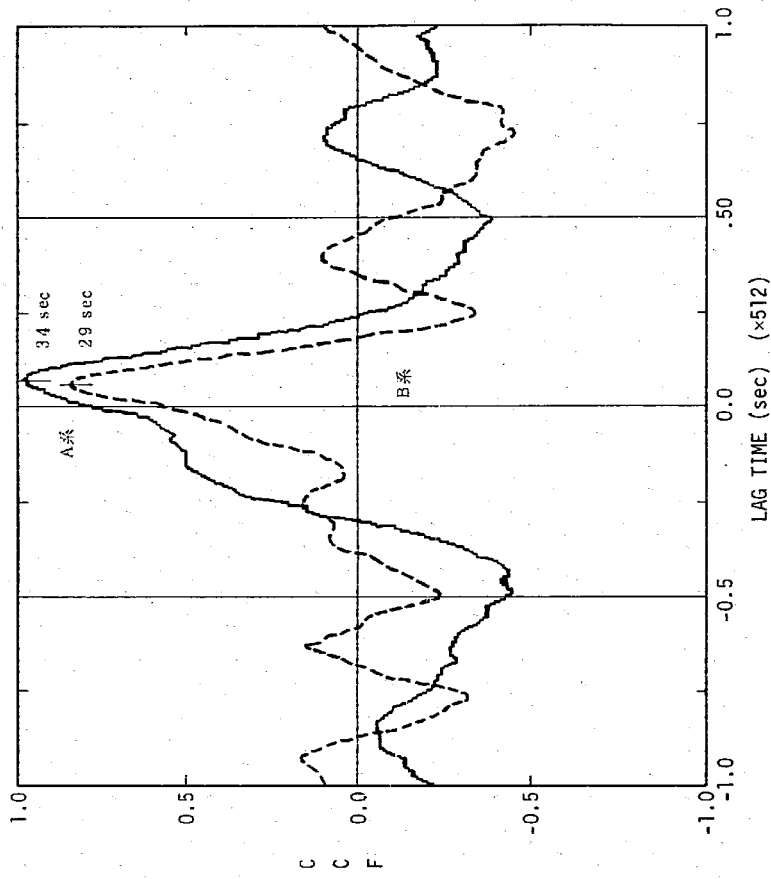


図 4.48 炉出力 30 MW 時の主冷却器出口ナトリウム温度と同出口空気温度の CCF

— A系
- - - B系

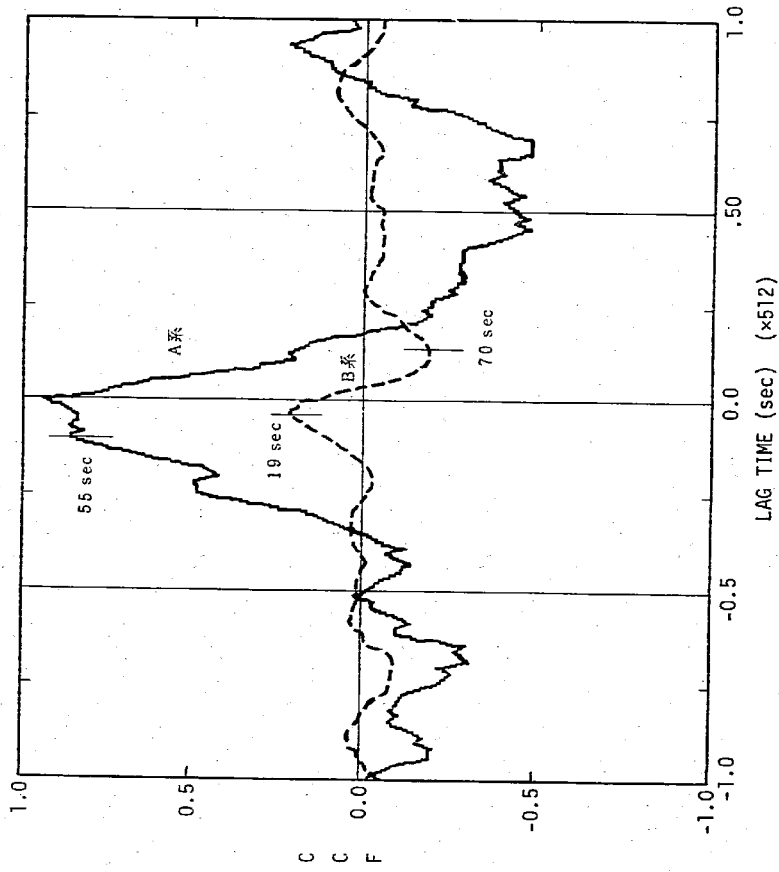


図 4.49 炉出力 50 MW 時の主冷却器出口ナトリウム温度と同出口空気温度の CCF

— A系
- - - B系

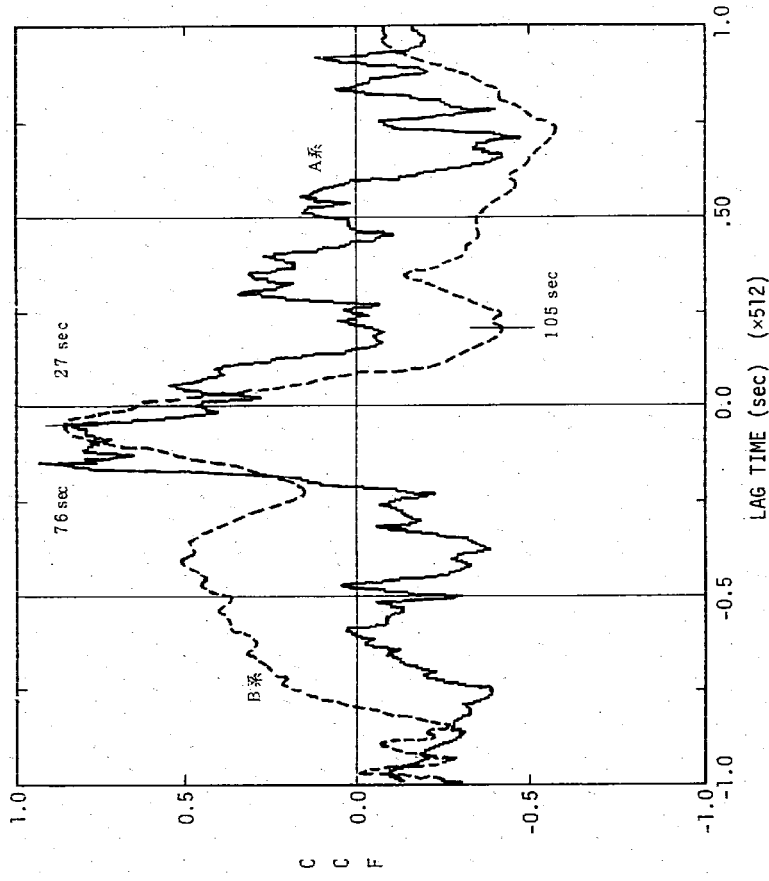


図 4.50 炉出力 30 MW 時の主冷却器出口ナトリウム温度と同出口空気温度の CCF

5.1.1 中性子束の定常変動の要因

中性子束が低周波数帯域（0.01 Hz以下）で変動する主な要因としてつぎの点が上げられる。

- (1) 原子炉入口温度の変動
- (2) 1次冷却系Na流量の変動

ここでは、(1)の要因による影響の大きさを測定値をもとに定量的に求め考察する。

A、B両系の原子炉入口温度が1℃変化した場合の反応度変化の大きさは約 3.77×10^{-3} %ΔK/K（等温係数）であるという試験データが与えられており、これより片方系の原子炉入口温度のみ1℃変化した場合の反応度変化の大きさは半分の約 1.885×10^{-3} %ΔK/Kであるとす。また、表5-2は出力係数の実測値である。

表5-2 出力係数

| 炉出力 | 出力係数 (%ΔK/K/MW) |
|--------|-----------------------|
| 50 MW時 | 9.02×10^{-3} |
| 40 MW時 | 8.42×10^{-3} |
| 30 MW時 | 7.83×10^{-3} |
| 25 MW時 | 7.53×10^{-3} |
| 18 MW時 | 7.12×10^{-3} |
| 12 MW時 | 6.76×10^{-3} |
| 9 MW時 | 6.58×10^{-3} |

以上のデータを用いて各出力について原子炉入口温度の変動のRMS値から計算により中性子束の変動のRMS値を推定する。

推定結果と実測した変動のRMS値を比較したものを表5-3に示す。なお、実測値の計算において、両信号の変動の位相差はランダムであると仮定している。

表5-3 中性子束変動のRMS値（推定値と実測値の比較）

| 炉出力 | A系入口温度 変動による反応 度変動(推定) (%ΔK/K) | A系入口温度 変動による出力 変動(推定) (MW) | B系入口温度 変動による反応 度変動(推定) (%ΔK/K) | B系入口温度 変動による出力 変動(推定) (MW) | B系入口温度 変動による出力 変動(推定) (MW) | ch6, 7, 8の 変動の平均 値(実測) (MW) |
|-------|---|-------------------------------------|---|-------------------------------------|-------------------------------------|--------------------------------------|
| | 0.279×10^{-3} | 0.031 | 0.124×10^{-3} | 0.014 | 34×10^{-2} | 333×10^{-2} |
| 50 MW | 0.238×10^{-3} | 0.028 | 0.117×10^{-3} | 0.014 | 31×10^{-2} | 290×10^{-2} |
| 40 MW | 0.173×10^{-3} | 0.022 | 0.111×10^{-3} | 0.014 | 26×10^{-2} | 227×10^{-2} |
| 30 MW | 0.155×10^{-3} | 0.021 | — | — | — | 193×10^{-2} |
| 25 MW | 0.115×10^{-3} | 0.016 | 0.092×10^{-3} | 0.013 | 21×10^{-2} | 197×10^{-2} |
| 18 MW | 0.089×10^{-3} | 0.013 | — | — | — | 160×10^{-2} |
| 12 MW | — | — | 0.047×10^{-3} | 0.007 | — | — |
| 9 MW | — | — | — | — | — | — |

* 実測値 = $\sqrt{\left(\begin{matrix} \text{A系入口温度変動} \\ \text{による出力変動} \end{matrix} \right)^2 + \left(\begin{matrix} \text{B系入口温度変動} \\ \text{による出力変動} \end{matrix} \right)^2}$

(注) 値はすべてRMS値である。

表5-3において、入口温度変動による出力変動の実測値は、ch6, 7, 8の変動の平均値と各炉出力において良く一致している。このことから、中性子束変動の大部分は原子炉入口温度変動が原因であり、Na流量変動による影響は小さいと言える。

また、原子炉入口温度の変動のRMS値はA系の方がB系より大きく、その結果、中性子束の変動においてA系入口変動が要因の変動が支配的となっている。このことは図4.12の原子炉入口温度と中性子束のCFの計算結果からも明らかである。

5.1.2 原子炉出口温度の定常変動の要因

表 5.1 より、各出力で原子炉出口温度の変動の RMS 値は原子炉入口温度の変動の RMS 値より A 系、B 系とも大きく、また A 系の入口温度の変動は B 系より大きい。出口温度の変動は両系統で同程度である。(やや B 系が大きい) 前者の現象については、入口温度、炉出力および炉内ナトリウム流量の変動が重畳されて出口温度が変動しているためであると考えられる。表 5-4 は以上の事を定量的に解析したものであり、ここでは炉内流量変動の RMS 値は不明であるので入口流量変動の RMS 値 (0.15%) を採用する。表 5-4 における炉内流量変動および炉出力変動が原子炉出口温度変動に与える影響の大きさは下記の計算により求める。

$$\phi_{t_1} = \frac{\phi_f}{100} \cdot (T_o - T_i) \quad \text{----- (5-1)}$$

$$\phi_{t_2} = \phi_p \cdot K \quad \text{----- (5-2)}$$

ここに、 ϕ_{t_1} : 炉内流量変動による原子炉出口温度変動 (RMS 値) (°C)

ϕ_{t_2} : 炉出力変動による原子炉出口温度変動 (RMS 値) (°C)

ϕ_f : 炉内流量変動 (RMS 値) (%) ($\approx 0.15\%$)

ϕ_p : 炉出力変動 (RMS 値) (MW)

T_o : 原子炉出口温度 (°C)

T_i : 原子炉入口温度 (°C)

K : 炉出力変動による原子炉出口温度変動の割合 (°C/MW) (≈ 1.3)

表 5-4 において原子炉出口温度変動の最確値は其測の原子炉出口温度の変動より小さくなっているが、この一因として炉内流量変動を小さく見積り過ぎたためと考えられる。

表 5-4 原子炉出口温度変動の RMS (推定値と実測値の比較)

| 炉出力 | 原子炉入口温度の変動の最確値 [*] 1 (°C) | 炉内流量変動による原子炉出口温度変動 (°C) | 炉出力変動による原子炉出口温度変動 (°C) | 原子炉出口温度の変動の最確値 [*] 2 (°C) | 原子炉出口温度の変動の平均値 (実測) (°C) |
|-------|------------------------------------|-------------------------|------------------------|------------------------------------|--------------------------|
| 50 MW | 0.081 | 0.095 | 0.043 | 0.132 | 0.156 |
| 40 MW | 0.070 | 0.078 | 0.038 | 0.111 | 0.120 |
| 30 MW | 0.055 | 0.062 | 0.030 | 0.088 | 0.128 |
| 18 MW | 0.039 | 0.039 | 0.026 | 0.061 | 0.095 |

(注) 値はすべて RMS 値

*1 原子炉入口温度の変動の最確値

$$= \sqrt{\left(\frac{\text{A系入口温度の変動}^2}{2}\right) + \left(\frac{\text{B系入口温度の変動}^2}{2}\right)}$$

*2 原子炉出口温度の変動の最確値

$$= \sqrt{\left(\frac{\text{入口温度変動による出口温度変動}^2}{2}\right) + \left(\frac{\text{炉内流量変動による出口温度変動}^2}{2}\right) + \left(\frac{\text{炉出力変動による出口温度変動}^2}{2}\right)}$$

なお、入口温度の変動の RMS 値が A 系と B 系で差があり、出口温度で差が少なくなるとは、炉上部でのミキシング効果によるものと考えられる。

また、表 5-4 の最確値の計算においても表 5-3 の場合と同様に信号間の位相差はランダムであると仮定している。

5.2 中性子束変動(約0.025 Hz)についての考察

ch 6, 7, 8の中性子束のAPSD(図4.1~5)には、0.025 Hzのピークが存在している。このピークに着目し、APSDや各ch間のCFや位相差を解析すると次のことが判る。

(1) 5.0 MW出力時には各chとも約0.025 Hzにピークが存在し、このピークは4.0 MW出力時には約0.016 Hzに移動し、2.5 MW出力以下では顕著なピークはなくなる。(図4.3~5)

(2) 各ch間の相関は、ピークの周波数成分では強いが、その前後の周波数成分では高出力時には大きく低下している。(図4.16)

(3) 図5.1は「常陽」の中性子検出器配置図であり、図5.2~5.7は炉出力5.0 MW時と3.0 MW時の各ch間の位相差である。各ch間の上述のピークにおける位相差は、5.0 MW時においてch 6, 7間及びch 7, 8間ではほぼ180°であり、ch 6, 8間では約30°である。

また、炉出力が3.0 MWになるとこの位相差は小さくなる。このことから、図5.1におけるA, B面系の炉容器入口を結ぶ線を中心として出力系ch 6, 8及びch 7側で180°の反転した何らかの振動現象が存在することが判る。

このピークが存在する要因について以下のように推定する。図4.13~14の原子炉入口温度とS/A出口温度のコヒーレンス関数は下部プレナムでのA系, B系の冷却材のミキシングが少なかったことを示しており、このことにより炉心はA系入口温度のゆらぎに強く影響される部分とB系入口温度のゆらぎに強く影響される部分に分かれている。A系, B系の入口温度が約0.025 Hzの周波数で逆位相でゆらぐとすると、炉心内のA系入口温度に影響される部分の変動とはB系入口温度に影響される部分とは180°の位相差を持っており、この変動の周波数は約0.025 Hzである。このような炉心内のナトリウム温度の変動は出力変動および炉心から中性子検出器の間における中性子の透過率の変動を引き起こし、中性子信号に約0.025 Hzの周波数の変動を与える。

炉心の中性子検出器ch 6およびch 8の方向の部分はA系のナトリウム温度に強く影響されch 7の方向の部分はB系のナトリウム温度に影響されていることが他のミキシング効果の測定より確認されている。このことからch 6とch 8の信号の変動とch 7の信号の変動の位相差が180°あることが説明できる。

なお、4章の原子炉入口温度, S/A出口温度の各信号のAPSDには約0.025 Hz付近に有意なピークは存在せず、中性子信号との相関はほとんどない。このことは上述の推定と対立しているが、温度検出系(CA熱電対)の時定数が約8秒であるため(これによる折点周波数は約0.02 Hz)、温度測定における約0.02 Hz以上の周波数のS/Nが悪いためであると考察えられる。

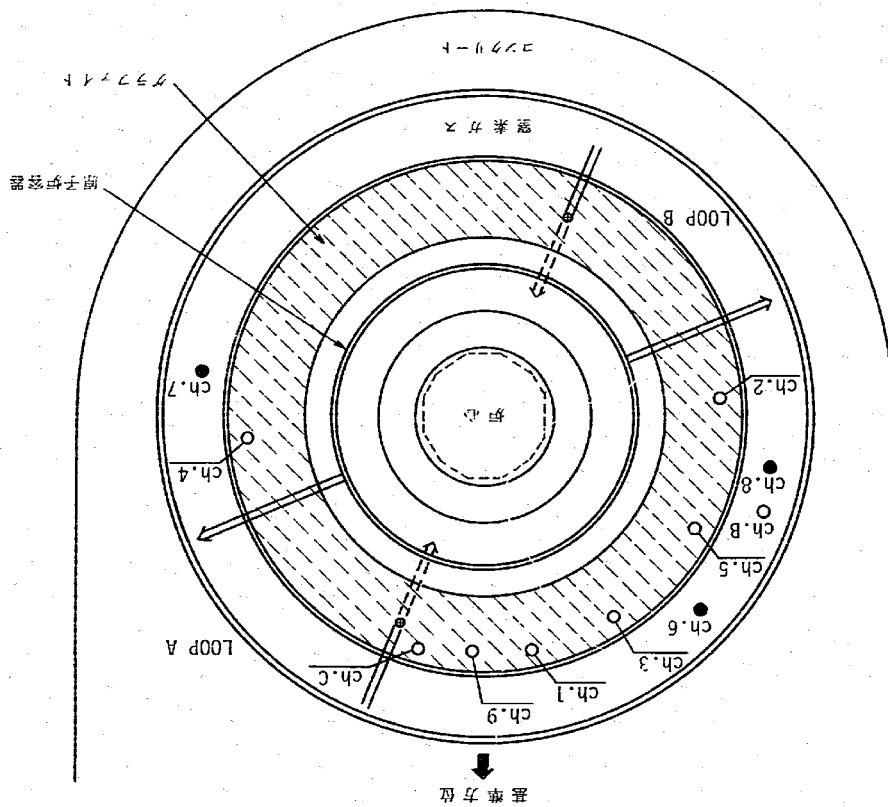


図5.1 「常陽」の中性子検出器配置図

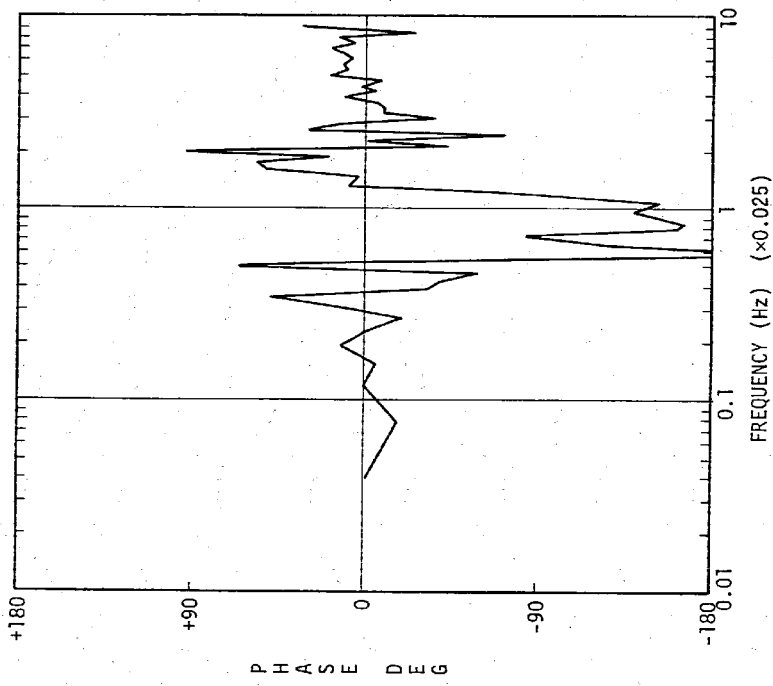


図 5.2 中性子束 ch6 と中性子束 ch7 の間の位相 (炉出力 50MW)

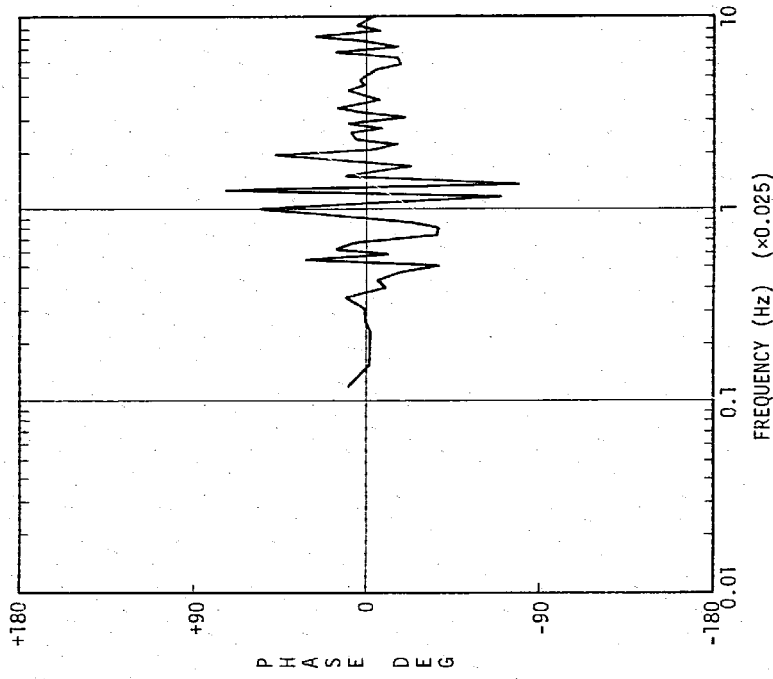


図 5.3 中性子束 ch6 と中性子束 ch7 間の位相 (炉出力 30MW時)

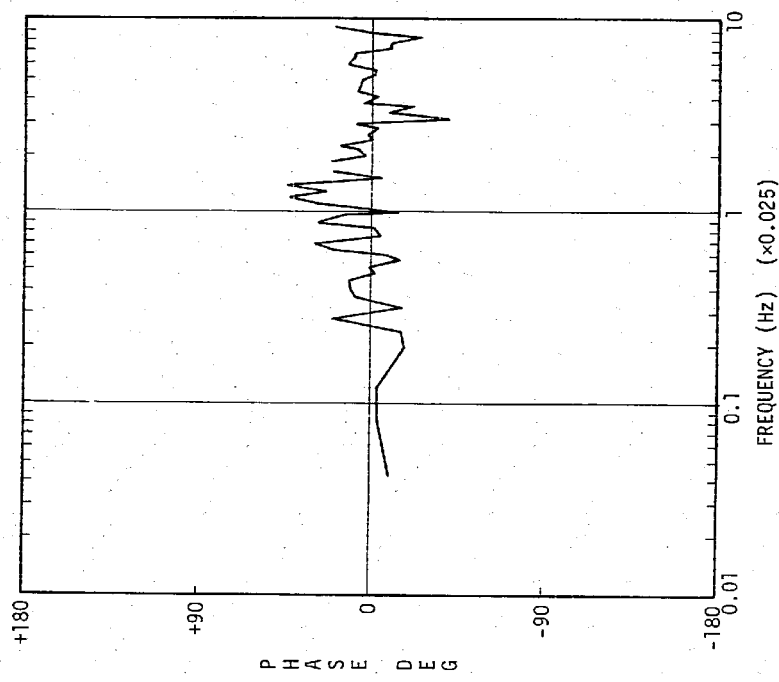


図 5.4 中性子束 ch6 と中性子束 ch8 の間の位相 (炉出力 50MW)

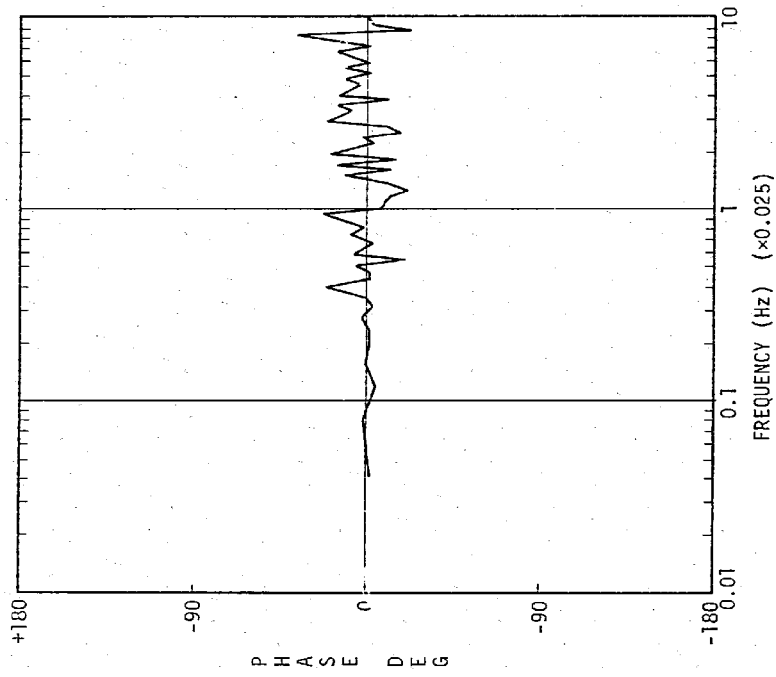


図 5.5 中性子束 ch6 と中性子束 ch8 の間の位相 (炉出力 30MW時)

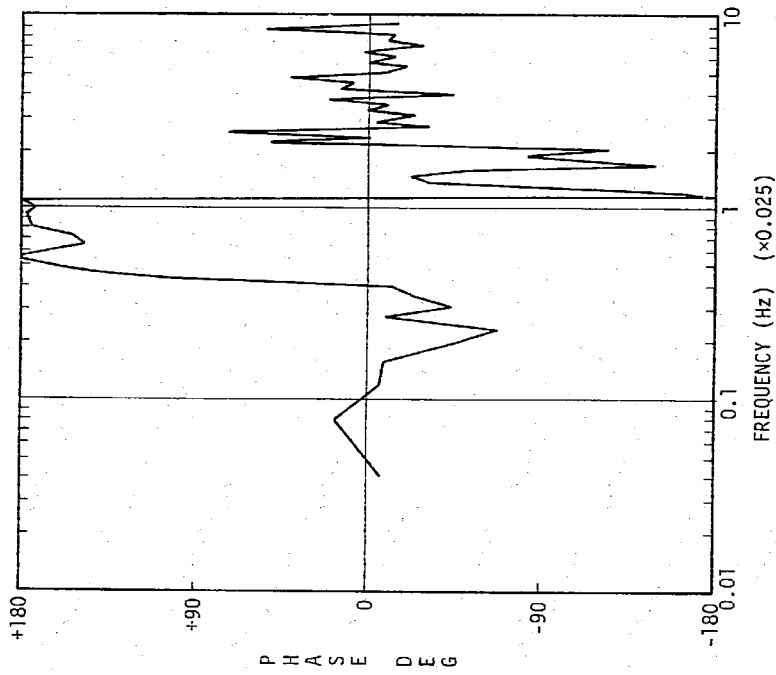


図 5.6 中性子束 ch7 と中性子束 ch8 の間の位相 (炉出力 50 MW)

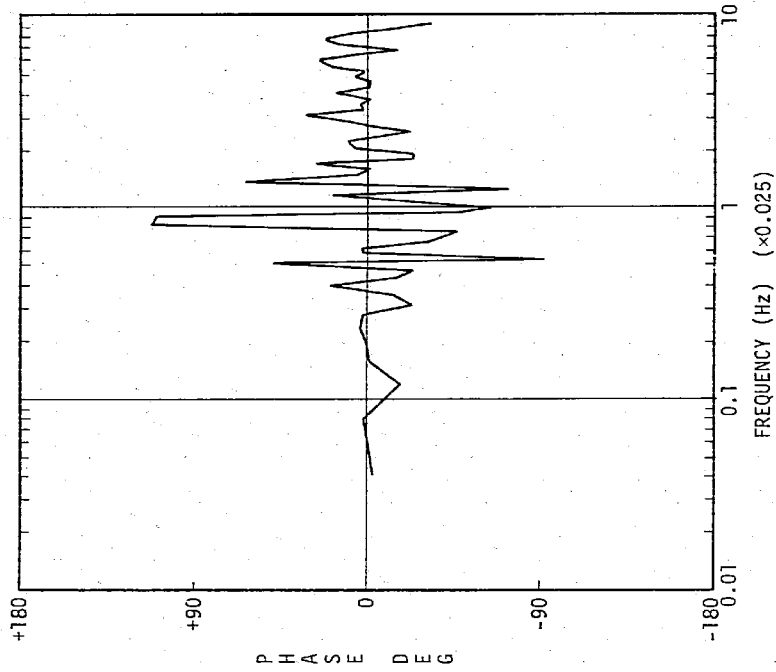


図 5.7 中性子束 ch7 と中性子束 ch8 の間の位相 (炉出力 30 MW時)

5.3 2次冷却系の輸送遅れ

4章では相互相関関数の解析結果を用いて2次冷却系の輸送遅れを推定したが、図5.9はこれらをまとめたものであり、括弧内に流速と配管長から計算した値を比較のために示す。

A、B両系ともIHX、主冷却器間および主冷却器、IHX間の輸送遅れは流速と配管長から計算した値とほぼ一致しているが、この温度ゆらぎから輸送時間を求める方式には温度検出器の時定数の違いおよび配管の熱容量による温度の伝送おくれなどの誤差を生じさせる原因が存在するのでこの測定結果はかならずしも良い精度を示しているとは言えない。

今後、流量変化した場合のデータの解析を行い、この方式の有効性を考察する必要がある。

()は流速と配管長から算出した値

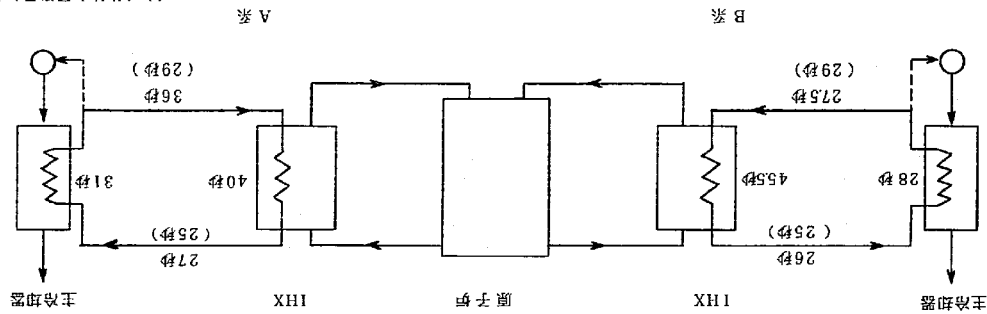


図 5.9 二次系各信号間の遅延遅れ (100%流量)

6. 結 言

出力上昇試験の各ステップ（各出力）ごとに、中性子束、燃料出口Na温度、原子炉出入口Na温度など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、主冷却器出口空気温度などの2次系回りの信号も測定し、各信号の自己パワースペクトル密度、各信号間のコヒーレンス関数、伝達関数及び相互相関関数を求め、原子炉の特性の解析を行った。その結果、つぎの事情が明らかになった。

- (1) 原子炉に不安定現象がないことを確認した。
- (2) 各信号とも低周波域の変動が大きく、各信号間のコヒーレンス関数を見るとこの帯域での相関が強く存在している場合が多い。この低周波域の変動に着目し、中性子束および原子炉出口温度の定常変動の要因の解析を行い、両信号の低周波域での定常変動の要因をほぼ明らかにした。
- (3) 中性子束のAPSDには約0.025 Hzの顕著なピークが存在している。このピークは炉出力依存性が顕著であり、また検出器位置による空間依存性が存在する。この現象はA系、B系の原子炉入口温度の変動による出力変動および中性子透過量の変動によるという推察を行った。
- (4) 2次冷却系の各信号の相互相関関数を計算することにより信号間の時間的な把握が可能であり、推定した輸送遅れ時間は流速と配管長から計算した値とほぼ一致している。今後、更に解析を進めて、また合わせて行ったパイルオシレーション試験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いく予定である。

7. 謝 辞

NAIG研玉置研男、河野耕司、東芝佐藤増雄の各氏に測定、解析計算ならびに結果の検討まで御協力をいただいた。

本報告をまとめるにあたり、上記各位の御好意に深く感謝する次第である。

8. 添付資料

炉雑音の解析には、炉内音響解析装置、ミニコンピュータOSBAC-40Cを主体に構成されている多チャンネル雑音解析システムおよび炉雑音解析システムおよび炉雑音解析コードN OISAを用いた大型計算機によって行った。この添付資料では、これらの解析装置の概要を示す。

8.1 炉内音響解析装置

図8.1は、解析装置の概要であり、この装置を用いると自己パワースペクトル密度と相互パワースペクトル密度と相互パワースペクトル密度を求めることができる。

8.2 多チャンネル雑音解析システム

本システムはOSBAC-40Cの汎用データ処理OSを利用して雑音信号の解析を行うものである。各解析用パラメータの設定、解析計算実行の指示、解析結果のファイル化、プリント及びCRTへの出力指定などを全てCRTを介して行う。

本システムで同時に処理できる信号数は最大16チャンネルであり信号間の組み合わせは最大25組まで可能である。

処理方法としては高速フーリエ変換(FFT)または逆FFTを採用しており、FFTにより自己及び相互パワースペクトル密度を求める。

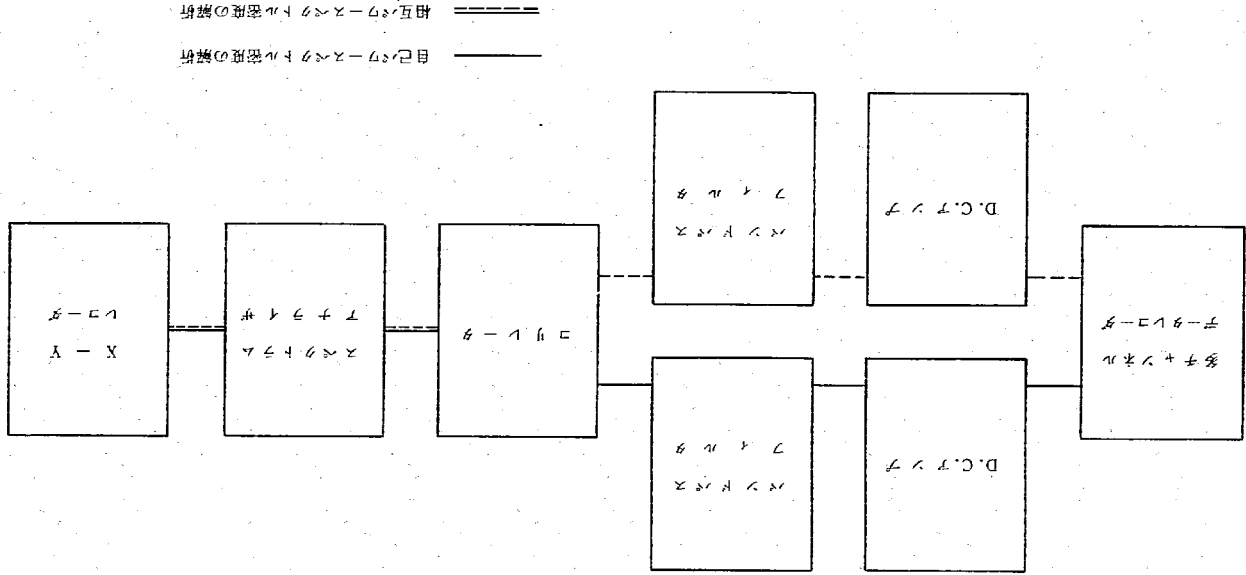
また、これからコヒーレンス関数、伝達関数が直ちに算出され、更に逆FFTにより自己及び相互相関々数、逆コヒーレンス関数を求めている。この他各信号のケプストラム、確率密度関数並びに1~4次の確率モーメントも計算できる。

解析周波数は上限を50Hzとして可変であり、データ・レコーダのテープ速度操作により更に高周波数までの解析が可能である。解析周波数分点数も最大を256点として可変である。

また、解析結果は磁気テープに全て保存可能であり、任意の2つの結果をCRTに比較出力できる。

本システムのハードウェア構成を図8.2に示す。

図8.1 炉内音響解析装置の概要



8.3 雑音解析コード「NOISA」

雑音解析ソフトウェアNOISAは、磁気テープの形式で得られる定常時系列データを処理して、自己相関関数、相互相関関数、自己パワースペクトル、相互パワースペクトル、周波数応答およびコヒーレンス関数を求め、かつ、それらを直観的なグラフとして得るためのソフトウェアシステムである。NOISAの構成を図8.3に示す。

- (1) サブシステム1
計測された時系列データを校正曲線表を与えて、物理的単位の時系列データに変換する。
- (2) サブシステム2
雑音解析プログラムパッケージ(サブシステム3)で処理できるようにサブシステム1で得られた物理単位の時系列データを編集する。
- (3) サブシステム3
サブシステム2により編集された時系列データに対し、表8-1に示すプログラム群により雑音解析を行う。
- (4) サブシステム4
サブシステム3から得られるデータ処理し、CALCOMPにより其分散、自己および相互パワースペクトルおよびコヒーレンス関数の作図を行う。

図8.2 多チャンネル雑音解析システム

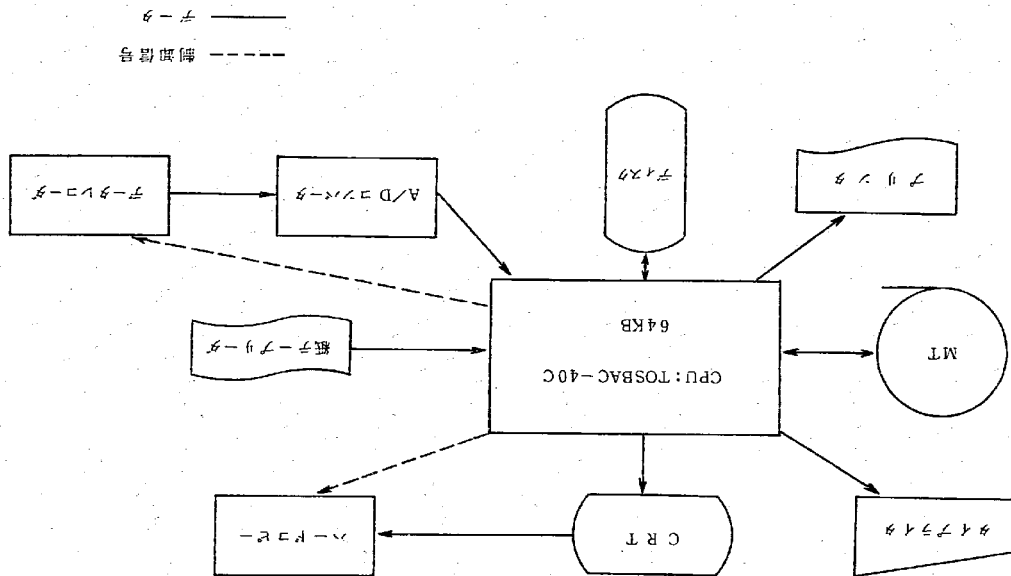
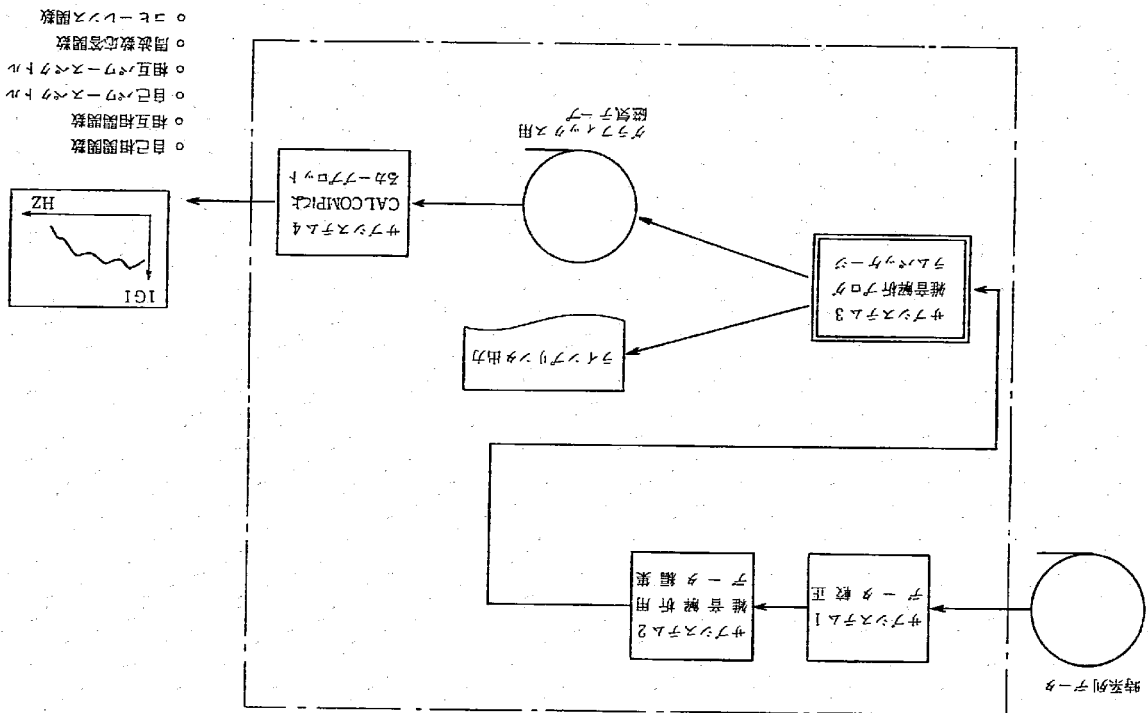


表 8.1 サブシステム3のプログラム

| プログラム名 | 計算対象 (解析法) | | 制限等 |
|--------|--|------|-----------------|
| | 自己共分散 | 直接法 | |
| AUTCOR | 自己共分散 | 直接法 | 1変量のみ |
| MULCOR | 自己および相互共分散 | 直接法 | 10変位まで |
| FFTCOR | " | FFT法 | 2変重まで 計算時間速い |
| AUSPEC | 自己パワースペクトル | | 1変量のみ |
| MULSPE | クロスパワースペクトル コヒーレンス関数 | | 10変位まで |
| SGLFRF | 周波数応答関数 | | 1入力1出力 |
| MULFRF | パーシヤルコヒーレンス関数 " およびマルチプルコヒーレンス関数 | | 9入力まで 1出力 |

図 8.3 NOISA の構成



- 自己相関数
- 相互相関数
- 自己パワースペクトル
- 相互パワースペクトル
- 周波数応答関数
- コヒーレンス関数

システム4
スクリーンプロット

システム出力

システム3
雑音解析ログ

システム1
雑音除去
データ校正

システム4
CALCOMP
スクリーンプロット

