

高速実験炉「常陽」性能試験報告書
高出力炉雑音特性第3報

1981年1月

動力炉・核燃料開発事業団

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 O-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)

高速実験炉「常陽」性能試験報告書

高出力炉雑音特性第3報

大谷 秀二* 佐野 健一* 田村 誠司*

要 旨

75MW出力上昇試験時に炉雑音測定を行い、主に中性子束信号のAPSDにおけるピークの存在および $5 \times 10^{-3} \sim 7 \times 10^{-2}$ Hzの周波数帯域で検出器位置の異なる中性子束信号間の相関が小さいという現象について検討を行った。また、最初の75MW出力上昇時に発生した異常反応度現象に伴ってこの現象の前後で炉出力50MWでの出力係数が変化しており、このため炉雑音特性も変化していると予想できる。この経時変化を調査し、その結果を用いて上述の中性子束信号に関する現象の検討を行った。

炉雑音解析の結果、以下の事柄が明らかになった。

- (1) 中性子束信号間の相関が小さいという現象については、この現象の定量的検討および炉雑音特性の経時変化の検討の結果、この現象は中性子束ゆらぎの空間依存性によって生じていることがほぼ明らかになった。
- (2) 炉雑音特性の経時変化については、中性子束信号間のコヒーレンス関数、原子炉入口温度-中性子束信号間の伝達関数(ゲイン)などに経時変化が見られ、これらの現象間の対応づけもほぼ得られた。この結果、異常反応度による出力係数の変化に伴って中性子束ゆらぎの空間依存性の強さが変化していることがほぼ明らかになった。
- (3) 中性子束信号のAPSDのピークについては、この中性子束ゆらぎは炉固有のゆらぎであり、炉心構成要素の移動によって発生していると推定した。これに基づき、炉心集合体の移動を伴ったラッパ管の熱わん曲量と中性子束間の共振現象を仮定した。

* 大洗工学センター高速実験炉部技術課

Jan., 1981

"JOYO" Start-Up Test Report

Reactor Noise Analysis (III)

Hideji Otani*, Kenichi Sano*
and Seiji Tomura*

Abstract

Reactor noise tests were carried out in 75 MW Power Up Test. The main purpose of this analysis is to investigate the existence of the peak in APSD of neutron flux signal and the low correlations of neutron flux signals from different position power range flux monitors in the frequency range $5 \times 10^{-3} \sim 7 \times 10^{-2}$ Hz.

The anomalous reactivity phenomenon, observed at the first 75 MW power-up, accompanied the power coefficient change of 50 MW power level, thereby it was predicted that reactor noise characteristics have also changed. These changes were investigated, and the phenomena of neutron flux signal were examined.

The primary points of the results are as follows.

- (1) By the quantitative analysis and the investigations of reactor noise characteristics changes, it became almost clear that the phenomena of the low correlation between different locations is caused by the spacial dependency effect of neutron flux fluctuations.
- (2) Coherence functions of neutron flux signals and transfer functions of reactor inlet temperature - neutron flux have changed with the power coefficient changes, thereby it became almost clear that the intensity of spacial dependency effect have also changed with the anomalous reactivity phenomenon.

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

- (3) It was estimated that the peak in APSD of neutron flux signal is the inherent phenomenon of the reactor and caused by the movements of core composition elements. Based on these estimation, it was assumed that the peak is a resonant phenomenon between thermal bowing of the subassembly wrapper tube and the neutron flux, which accompanies the movements of core subassemblies.

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	4
4. 75 MW出力上昇試験結果および検討	6
4.1 炉出力75 MW炉雑音特性	6
4.2 炉出力75 MW, 65 MW, 50 MW, 30 MW時の炉雑音特性の比較	9
4.3 定量的検討	10
5. 炉雑音特性の経時変化による検討	12
5.1 中性子束信号のAPSDの経時変化	12
5.2 中性子束信号間のコヒーレンス関数の経時変化	12
5.3 原子炉入口温度-中性子束間の伝達関数の経時変化	14
5.4 原子炉入口温度-中性子束間のコヒーレンス関数の経時変化	16
5.5 原子炉入口温度- S_A 出口温度間のコヒーレンス関数および伝達関数の経時変化	16
6. 中性子束APSDのピークおよび中性子束ゆらぎの空間依存性についての検討	19
7. 結 言	24
8. 付 録	26
8.1 補助系入口温度	26
8.2 グラファイト温度	26
8.3 原子炉入口温度の時定数	26
参 考 文 献	28

1. ま え が き

高速実験炉「常陽」では50MW出力上昇試験時(昭53.8)、50MW第2サイクル運転時(昭54.2)、75MW出力上昇試験時(昭54.8)、75MW第1サイクル運転時(昭55.2)、75MW第2サイクル運転時(昭55.6)および75MW第3サイクル運転時(昭55.7.8)に運転中の原子炉の特性把握および異常診断の目的で炉雑音測定を行っている。50MW出力上昇試験時の炉雑音については、高出力炉雑音特性第1報⁽¹⁾で包括的に炉雑音特性を報告し、また中性子束信号のAPSD(自己パワースペクトル密度)に約0.025 Hz(炉出力50MW時)でピークが存在することを指摘した。50MW第2サイクル時の炉雑音については高出力炉雑音特性第2報⁽²⁾で炉容器内及び1次系ナトリウムループ内の温度、流量および中性子束ゆらぎについて、これらのゆらぎの相関を検討した。特に中性子束信号のAPSDのピークおよび中性子束信号間(検出器位置の異なる)のコヒーレンス関数に見られる $5 \times 10^{-3} \sim 7 \times 10^{-2}$ Hzの周波数帯域で中性子束信号間の相関が小さいことの原因などについて推論を行った。

本報告では、まず75MW出力上昇試験時の炉雑音解析を行い、特に上述の第2報で示した現象について更に詳細な定量的解析を含んだ検討を行う。最初の75MW出力上昇時に(昭54.7)に発生した異常反応度現象に伴い、この現象の前後で炉出力50MWでの出力係数が変化しているため、この現象の前後で炉雑音特性は変化していると予想できる。⁽³⁾ この炉雑音特性の経時変化を調査し、その結果を用いて、上述の現象についての検討も行う。

炉雑音解析はAPSD、コヒーレンス関数、伝達関数などの統計計算ができる雑音解析コード(NOISA)を用いて行い、解析周波数帯域は $10^{-3} \sim 10^{-1}$ Hz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（75MW時最大） 2.85×10^{15} nv

○ 動特性パラメータ

	制御棒引抜時	制御棒6本挿入時
遅発中性子寿命 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

制御棒反応度価値（1本）	1.4%ΔK/K以上
反応度付加率	0.015%ΔK/K/sec以下
全制御棒反応度	8.4%ΔK/K以上

2) 熱特性（最大出力時）

○ 原子炉熱出力	75 MW
○ 燃料棒出力密度（炉心部最大）	1401 W/cc
○ 1次冷却材流量	2,200 t/h
○ 冷却材温度 原子炉入口/出口	370/470 ℃

2.2 プラント制御系

「常陽」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B₁C吸収体を内蔵している。

冷却温度制御系は、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及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つぎの通りである。

- (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合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、 r 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、液位及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 次冷却系計装設備及び(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。

3. 試 験 の 方 法

Table 3.1 に本報告で示す高出力炉雑音測定データの測定サイクル，測定日時，炉出力，主な測定点，測定時間およびAD変換の際のサンプル周期を示す。

Fig.3.1はコア構成(50 MW第2サイクル時)と中性子検出器の方向およびA，Bループのナトリウムの出入口の方向を示す。ここで，CH.6とCH.8の方向はほぼ同方向であるが，CH.7はCH.8と炉心をはさんで 180° の方向であり，CH.9はCH.7，CH.8と 90° の方向である。また，下部プレナムミキシング試験(A，Bループ入口温度に約 15°C の差をつけ運転し， S_A 出口温度を測定する。)の結果⁽⁴⁾より明らかなように，下部プレナムでのA，Bループのナトリウムのミキシングは少いために炉心はAループナトリウムが通過する集合体の領域(A領域)とBループナトリウムが通過する集合体の領域(B領域)に分割される。この分割の境界線をFig.3.1中に示す。

Fig.3.2は中性子信号， S_A 出入口，原子炉出入口温度信号および冷却材流量信号の測定および解析方法のブロック図である。各信号はノイズ増幅器によってDC成分が除去されノイズ成分のみ増幅されてアナログテープに記録される。解析時には，再生された信号はAD変換器内蔵のデジタル計算機(H-350)によりAD変換されてデジタルテープに収納される。このテープに入ったデータは大型計算機(FACOM M-510)の雑音解析コード(NOISA)により統計的に解析され，その結果自己パワースペクトル密度(APS D)，コヒーレンス関数，伝達関数などが得られる。

(NOISAコードの詳細は第1報の添付資料を参照のこと。)⁽¹⁾

つぎに，各検出器の概要を以下に示す。

(1) 中性子検出器(ch.6～ch.9)

- 種 類 r 線補償型電離箱(CIC)
- 検出器場所 黒鉛遮蔽体の外側，コンクリート遮蔽体の内側
- 中性子束測定領域 炉出力 0.1% ～ 100%
(100KW ～ 100MW)
中性子束 約 $4 \times 10^5 \text{ nv}$ ～ 約 $4 \times 10^8 \text{ nv}$
出力電流 約 $2.0 \times 10^{-8} \text{ A}$ ～ 約 $2.5 \times 10^{-5} \text{ A}$
- 検出時定数 1 msec 程度(ピコアンメータの時定数)

(2) S_A 出口温度計

- 種 類 CA熱電対，シース型先端接地ダブルエレメント
- シースの大きさ，材質
3.2 mm ϕ ，SUS316，絶縁材MgO
- ウェルの大きさ 6 mm ϕ O.D.，4 mm ϕ I.D.
- 時 定 数 S_A アドレス(O)，(5F2)のウェル内に時定数改善のために熔融金属(鉛，ビスマス，ニッケル合金)を入れている。

- この場合の時定数：約 3 sec
 - その他（溶融金属なし）の時定数：約 8 sec
 - 取付け点数 115本（1 S_A 当り 1本）
 - S_A アドレス 0列～6列
 - コア S_A 71本（50MW 第2サイクル時）
 - ブランケット S_A 44本（ " " ）

(3) 原子炉出入口温度計

- 種類 CA熱電対，シース型非接地ダブルエレメント
- シースの大きさ，材質
 - 3.2 mmφ，SUS316，絶縁材MgO
- ウェルの大きさ 10mmφ O.D.， 4mmφ I.D.
- 時定数 約 10 sec

(4) ナトリウム（1次冷却材）流量計

- 種類 電磁流量計
- 流量 100%：1250 m³/hr
（流速 4.7 m/sec）
- 時定数 100msec程度（起電力変換器の時定数）

4. 75 MW出力上昇試験結果および検討

4.1 炉出力75MW時炉雑音特性

4.1.1 中性子束信号

Fig. 4.1は中性子束信号CH.6～CH.9のAPSDである。 4×10^{-2} Hz付近にピークが見られ、中性子検出器チャンネル間にピークの位置、大きさの相違はない。 8×10^{-3} Hz以下の帯域では各チャンネルのAPSDはほぼ一致しているが、 $8 \times 10^{-3} \sim 3 \times 10^{-2}$ Hzの帯域で若干相違が見られる。

各中性子束信号間の相関を調べるためにコヒーレンス関数を解析し、その結果をFig. 4.2に示す。コヒーレンス関数とは、ふたつの信号の各周波数成分間の相関係数の2乗に相当するものであり、このような中性子束信号間のコヒーレンス関数は以下のことを示している。

- (1) どの中性子束信号の組合せのコヒーレンス関数でも、その値が、1.0近い(0.7以上)周波数帯域では、中性子束ゆらぎがコア内で均一であり(空間依存性がない)、検出雑音(炉心から検出器までの中性子透過量の変動または検出器内部の雑音)が存在しない。Fig. 4.2において、 7×10^{-3} Hz以下および 8×10^{-2} Hz以上の帯域がこれに相当している。
- (2) 中性子束信号間のコヒーレンス関数の値が小さい(0.7以下)周波数帯域では、中性子束ゆらぎがコア内で不均一である(空間依存性がある)か、または検出雑音が存在する。Fig. 4.2において、 $7 \times 10^{-3} \sim 8 \times 10^{-2}$ Hzの帯域がこれに相当している。

各中性子検出器の炉心よりの方向はFig. 3.1に示すように、CH.6, CH.8はほぼ同方向、CH.7はCH.8と炉心をはさんで 180° 方向、CH.9はCH.7とCH.8の 90° 方向でCH.6の方向に近い。

Fig. 4.2のコヒーレンス関数をFig. 4.3に示す各中性子束信号間の位相差を含めて考察すると以下のようなになる。

- (1) 4.0×10^{-2} Hz付近のピーク周波数において、炉心をはさんで 180° 方向の検出器の信号間(CH.6-CH.7, CH.7-CH.8)のコヒーレンシは中程度(約0.5)であり、位相差は、ほぼ 180° である。
- (2) ピーク周波数で近い方向の検出器の信号間(CH.6-CH.8, CH.6-CH.9)のコヒーレンシは中程度(0.3～0.7)であり、位相差はほぼ 0° である。
- (3) ピーク周波数で互いに 90° 方向の検出器の信号間(CH.7-CH.9, CH.8-CH.9)のコヒーレンシは小さい(約0.1)。
- (4) $7 \times 10^{-3} \sim 2 \times 10^{-2}$ Hzの周波数帯域でのコヒーレンシの大きさは、近い方向の信号間、互いに 90° 方向の信号間、 180° 方向の信号間の順であり、位相差はすべて 0° である。

以上をまとめると、ピーク周波数での各中性子束信号のゆらぎにおいて、CH.6とCH.8の信号は互いにゆらぎを共有しており、CH.7のゆらぎはこれと逆位相であり、CH.9の信号のゆ

らぎは、これらと無関係である。また、ピーク周波数を含んだ $7 \times 10^{-3} \sim 5 \times 10^{-2}$ Hz の周波数帯域において、互いに近い方向の検出器の信号間では多くのゆらぎを共有しており、 90° 方向および 180° 方向の検出器の信号間ではゆらぎの共有は少ない。

解明すべき課題として次の点が上げられる。

- (1) 中性子束信号 APSDに見られるピークの発生原因の解明。
- (2) ピーク周波数を含む $7 \times 10^{-3} \sim 7 \times 10^{-2}$ Hz の帯域での中性子束信号間のコヒーレンス関数および位相差から明らかになった各中性子束信号のゆらぎに中性子検出器依存性があるという現象の解明。

このため、以下原子炉入口温度、1次冷却材流量および S_A 出口温度と中性子束信号の相関関係、炉出力変化による現象の変化、および現象の経時変化等を調査する。

なお、今後上述(2)の現象を中性子検出器依存現象、その周波数帯域を中性子検出器依存性のある帯域と呼ぶ。

4.1.2 原子炉入口温度、1次冷却材流量

Fig. 4.4 に原子炉入口温度 A, B の APSD と中性子束信号 (CH.8) - 原子炉入口温度 A, B 間のコヒーレンス関数および原子炉入口温度 A - B 間のコヒーレンス関数を示す。A ループ入口温度のゆらぎの RMS 値は約 0.17 °C、B ループ入口温度のゆらぎの RMS 値は約 0.061 °C であり、A は B の約 2.8 倍である。この結果、中性子束信号のゆらぎの内 A ループ入口温度ゆらぎの寄与する割合は、B ループによる割合より大きくなる。このことは、Fig. 4.4(b) のコヒーレンス関数において 10^{-2} Hz 以下の帯域で、中性子束信号 - A ループ入口温度間のコヒーレンシは大きく、中性子信号 - B ループ入口温度間のコヒーレンシが小さいことによっても示されている。

ピーク周波数での中性子束 - 入口温度間のコヒーレンシは小さいが、中性子検出器依存性のある帯域 ($7 \times 10^{-3} \sim 7 \times 10^{-2}$ Hz) の内、 $7 \times 10^{-3} \sim 2 \times 10^{-2}$ Hz で A ループのコヒーレンシは中程度であるので、この帯域では中性子検出器依存現象に入口温度 A が関与していると考えられる。これについて 5 章で更に検討する。また、Fig. 4.4(C) より入口温度 A - B 間のコヒーレンシは小さい。

なお、A ループ入口温度のゆらぎは、本報告では示していないが A ループ入口温度 - 出口温度間および、入口温度 - IHX 2 次入口温度間のコヒーレンシが小さいため A ループ IHX 内部で発生していると推定される。

Fig. 4.5 に 1 次冷却材流量 A, B の APSD と中性子束信号 (CH.8) - 1 次冷却材流量 A, B 間のコヒーレンス関数を示す。流量の APSD において、 3×10^{-3} Hz 以下の帯域でゆらぎが増大しているのは、流量一定制御の影響が現われているためであると推定される。Fig. 4.5 (b) のコヒーレンス関数において全帯域にわたってコヒーレンシが小さく、これより中性子束ゆらぎの内流量ゆらぎの寄与する割合は小さいことが判る。

以上をまとめると、 2×10^{-2} Hz以下の周波数帯域では、中性子束信号のゆらぎは大部分Aループ入口温度のゆらぎにより影響を受けている。また、ピーク周波数における中性子束信号のゆらぎは、入口温度や流量のゆらぎに直接的な影響を受けておらず、炉内固有のゆらぎであると推定される。

4.1.3 S_A 出口温度

下部プレナムミキシング試験(A, Bループ入口温度に約15℃の温度差を付けて運転し、 S_A 出口温度を測定する。)の結果より明らかなように、下部プレナムでのA, Bループナトリウムのミキシングは少ないために、炉心はAループナトリウムが通過する S_A とBループナトリウムが通過する S_A に分割される。Fig. 3.1中に、この分割の境界線を示す。このためFig. 4.6(c)に示すように原子炉入口温度A-B間のコヒーレンスが小さいためA領域の S_A の温度はAループの入口温度、B領域はBループ入口温度にそれぞれ別々に影響を受けている。

Fig. 4.6は、 S_A 出口温度3A2, 3D2のAPSD, 中性子束信号(CH.7)- S_A 出口温度間のコヒーレンス関数およびその位相差を示す。Fig. 4.6(a)より3A2の温度ゆらぎよりも大きい。これはFig. 3.1より判るように3A2はAループナトリウムが通過する S_A , 3D2は、Bループナトリウムが通過する S_A であり、またFig. 4.4(a)より入口温度AのゆらぎがBより大であるためである。また、中性子束信号(CH.7)- S_A 出口温度間のコヒーレンスは、3A2, 3D2とも 10^{-2} Hz以下の帯域で中程度であるが、位相差は中性子束-3A2間が約 180° , 中性子束-3D2間が約 0° である。前述のように中性子束信号がほとんど入口温度Aにより影響を受けており、この中性子束信号-入口温度A間の位相差は約 180° であることから、3A2の出口温度は入口温度Aとほぼ同位相のゆらぎのため中性子束-3A2間の位相差は約 180° となっている。また、3D2の出口温度は中性子束のゆらぎの影響を直接受けているため中性子束-3D2間の位相差は約 0° となっている。

ピーク周波数(4×10^{-2} Hz付近)での中性子束信号-3列 S_A 出口温度間のコヒーレンシは小さい。

Fig. 4.7は S_A 出口温度6A4, 6C4のAPSD, 中性子信号(CH.7)- S_A 出口温度間のコヒーレンス関数を示す。

6A4, 6C4の温度ゆらぎは、全周波数帯域で3列の温度ゆらぎより大きく、中性子束信号とのコヒーレンシも小さい(Fig. 4.7(b))。

また、6列の温度ゆらぎは入口温度、冷却材流量との相関も小さいので、 S_A 出口温度測定における雑音が大部分を占めていると考えられる。この理由として、6A4, 6C4の S_A はブランケット S_A であって炉心最外列 S_A と近接しており、また6列 S_A のナトリウム流量は炉心最外列 S_A のナトリウム流量の約 $1/5$ であるため6列 S_A 出口温度測定は炉心 S_A のナトリウム温度の影響を受け、その影響の度合の変化(流動状態の変化による)が雑音となっていることが推察できる。

ピーク周波数 (4×10^{-2} Hz 付近) での中性子束信号 - 6 列 S/A 出口温度間のコヒーレンシは小さいが、温度測定における雑音は 6 列の温度ゆらぎの大部分を占めていることを考慮すると、中性子束信号と 6 列 S/A 出口温度間のピーク周波数での相関は小さいとは言えない。なお、6 章において、中性子束信号の APSD に見られるピークに関して、6 列 S/A 出口温度と中性子信号間の相関関数を用いた解析を試みる。

4.1.4 原子炉出口温度

Fig. 4.8 に原子炉出口温度 A, B の APSD と中性子束信号 (CH. 6) - 原子炉出口温度 A, B 間のコヒーレンス関数および原子炉出口温度 A - B 間のコヒーレンス関数を示す。A ループ出口温度のゆらぎは 10^{-2} Hz 以下の帯域で B ループ出口温度ゆらぎより大きい (Fig. 4.8 (a)) が、その後の 75 MW サイクル運転中には、この現象は現われていないため、この現象の原因は不明である。

ピーク周波数 (4.0×10^{-2} Hz) 付近で、中性子束信号 - 出口温度間のコヒーレンシは A, B とも 0.2 ~ 0.3 程度あり、有意な値であると考えられる。また、出口温度 A - B 間のコヒーレンシもピーク周波数付近で 0.2 ~ 0.3 程度である。これから、中性子束信号の APSD に見られるピークおよび中性子検出器依存現象は炉出口のナトリウム温度と何らかの関係があると推定できる。

4.2 炉出力 75 MW, 65 MW, 50 MW, 30 MW 時の炉雑音特性比較

Fig. 4.9 は中性子束信号 (CH. 8) の炉出力 75 MW, 65 MW, 50 MW, 30 MW 時の APSD である。炉出力が低下するに従い、ピークの位置は低周波側にシフトしており、これは 50 MW 出力上昇試験時にも確認されている。⁽¹⁾ 全体的な APSD の形状は炉出力が変化しても変わっていない。

Fig. 4.10 に炉出力 75 MW, 65 MW, 50 MW, 30 MW 時の中性子束信号 CH. 7 - CH. 8 間および CH. 6 - CH. 9 間のコヒーレンス関数を示す。Fig. 3.2 に示すように、CH. 7 と CH. 8 の検出器は炉心をはさんで互いに 180° の方向であり、CH. 6 と CH. 9 の検出器の方向は近い。炉出力 75 MW 時と 65 MW 時のコヒーレンス関数の形は CH. 7 - CH. 8 間、CH. 6 - CH. 9 間ともほぼ一致しているが 50 MW 時にはピーク周波数において CH. 7 - CH. 8 間のコヒーレンシは小さく ($0.2 \sim 0.3$) なり、一方 CH. 6 - CH. 9 間のコヒーレンシは中性子検出器依存性のある帯域 ($7 \times 10^{-3} \sim 7 \times 10^{-2}$ Hz) 全般で大きくなる。また、30 MW 時には、ピーク周波数において CH. 7 - CH. 8 間のコヒーレンシは、ほとんど 0 になる。

なお、図には示していないが炉出力 75 MW, 65 MW, 50 MW 時のピーク周波数における CH. 7 - CH. 8 の位相差は、すべて 180° となっている。また CH. 6 - CH. 9 の位相差は 0° である。

以上をまとめると、炉出力低下に伴ってピーク周波数で位相差が 180° の CH. 7 - CH. 8 間のコヒーレンシは小さくなり、検出器の方向が近い CH. 6 - CH. 9 間のコヒーレンシは大きくなっていることから、炉出力低下で中性子束ゆらぎの検出器依存性が弱くなっていると言える。この現象を 5 章で炉雑音特性の経時変化の解析に含めて検討する。

4.3 定量的検討

中性子束信号のAPSDに見られるピークと $7 \times 10^{-3} \sim 7 \times 10^{-2}$ Hzの周波数帯域での中性子束ゆらぎの検出器依存性の現象について解析結果をまとめると以下ようになる。

- (1) 原子炉入口温度Aは検出器依存性のある周波数帯域の内 $7 \times 10^{-3} \sim 2 \times 10^{-3}$ Hzの帯域で、中性子束信号と相関があり、これ以外の帯域および入口温度Bは中性子束信号と相関がない。また一次冷却材流量は中性子検出器と相関がない。これより、ピークおよび検出器依存性の現象は炉固有の現象である可能性が強いと言える。
- (2) 3列のS/A出口温度はピーク周波数付近で中性子束信号と相関がなく、6列のS/A出口温度は温度検出雑音により相関の有無は不明である。原子炉出口温度はピーク周波数付近で中性子束信号と有意な相関が見られる。
- (3) 炉出力低下に伴い、中性子束ゆらぎの検出器依存性が弱くなっていると言える。

ピークおよび検出器依存性の現象の原因として以下のような項目が考えられる。

- (1) 炉心内で局所的なナトリウム温度変化または燃料集合体の局所的な熱わん曲などの反応度を介した空間依存性のある中性子束ゆらぎが存在する。
- (2) 炉心、ブランケット、反射体S/A内ナトリウム温度の局所的変化、または炉容器と炉心間のナトリウム滞留部の局所的な温度変化に伴うナトリウムの密度変化により炉心から検出器までの中性子透過量が変化する。
- (3) 炉心構造物等の機械的振動により炉心と検出器の距離が変化する。
- (4) 検出器周辺の温度変化によって検出器特性が変化する。

定性的には上記の原因は可能性があるように思えるが、以下、定量的に可能性を検討する。

(1)の原因を定量的に考察する。ナトリウム温度変化による出力変化の場合、入口温度1℃変化によって出力はほぼ0.47MW変化し、また75MW出力時の検出器依存の周波数帯域($7 \times 10^{-3} \sim 7 \times 10^{-2}$ Hz)での中性子束ゆらぎのRMS値は約0.05 MWであるので、この中性子束ゆらぎを発生させるためにはナトリウム温度はRMS値で約0.1℃ $\left(= \frac{0.05}{0.47} \right)$ のゆらぎが必要となる。この程度のナトリウム温度ゆらぎは十分考えられる。

また、燃料集合体の熱わん曲の場合、熱わん曲の大きい炉心最外列のS/Aが半径方向へ1 mm移動すると、それによる付加反応度は約20¢であり、これを出力係数で割ると、約12.5 MWの出力変動となるので、上述の約0.05 MWの中性子束ゆらぎを発生させるためにはS/Aは約0.004 $\left(= \frac{0.05}{12.5} \right)$ mmの移動が必要である。さらに、この中性子束ゆらぎが炉心最外列のS/A近くの局所的なものであることを考慮すると、必要なS/Aの移動量は0.001 mm程度となる。この程度のS/Aの移動は十分考えられる。ところが、高速炉「常陽」の場合、軽水炉に比べて1個の中性子の行動半径は広く(平均自由行程約40 mm)、また炉心部も直径約0.7 mと小さいにもかかわらず、反応度を介した中性子束ゆらぎに空間依存性が存在し、しかも炉心から約3 m離れた中性子検出器によって、この空間依存性をもった中性子束ゆらぎを検出し得ることを仮定する必要がある、この問題点が(1)

の原因の場合残されている。

(2)の原因を定量的に考察する。炉内の全ナトリウム温度が1℃変化すると炉心から検出器までの中性子透過量の変動は約 $5.6 \times 10^{-2}\%$ であるので、炉出力75MWの場合変動量は約0.04MW/℃である。また、中性子透過量の変動においてS/A内ナトリウムの寄与率は約15%で残りの約85%はナトリウム滞留部である。^{*1}以上から、約0.05MWの中性子束ゆらぎを発生させるためには、S/A内ナトリウムは約8.3℃ $\left(= \frac{0.05}{0.04} \times \frac{100}{15}\right)$ の温度ゆらぎが必要であり、またナトリウム滞留部では約1.5℃ $\left(= \frac{0.05}{0.04} \times \frac{100}{85}\right)$ の温度ゆらぎが必要である。S/A内ナトリウム温度の約8.3℃のゆらぎはほとんど考えられないし、S/A出口温度ゆらぎでも観測されていない。

一方、ナトリウム滞留部での約1.5℃の温度ゆらぎは考えられないことはないが、ナトリウムの出入が補助系を除いてほとんど無いことから、10～100秒周期の割合早い温度ゆらぎが存在するとは考え難い。また、補助系の温度と中性子束信号間のコヒーレンス関数を調査した結果、相関は無いことが判っている。^{*2}

(3)の原因で、具体的に一番可能性のあるのは、炉心および炉心構造物と炉容器の相対位置が振動により変化し、ナトリウム層の厚さが変化することによって中性子透過量が増減するといった状況である。この場合について定量的に考察すると、ナトリウム層の厚さ変動に対する透過量の変動は約0.15%/mmであり、75MW時に約0.05MWの中性子束ゆらぎを生じるには約0.4mmの変動が必要である。炉心および炉心構造物または炉容器のような重量物を約0.4mm移動させる駆動源はほとんど考えられない。

(4)の原因では、検出器周辺の温度ゆらぎを測定した結果中性子束信号との相関は無いことが判っている。^{*3}

定性的かつ定量的に一番有望なのは(1)の原因であるので、ここでピークおよび中性子検出器依存性の現象は反応度を介した空間依存性のある中性子束ゆらぎであると仮定する。この仮定を確かなものにするため次章で特性の経時変化に注目して更に検討を加える。

なお、今後中性子検出器依存現象を空間依存現象、その周波数帯域を空間依存性のある帯域と呼ぶ。

* 1 半径方向のナトリウム層の厚さより概略計算した。

* 2 付録8.1

* 3 付録8.2

5. 炉雑音特性の経時変化による検討

75 MW出力上昇試験中の昭和54年7月11日(50→65 MW)・7月16日(65→75 MW)の最初の出力上昇時に、再現性のない大きな反応度降下が測定された。⁽³⁾これに伴い、50 MW時での出力係数は異常反応度前後で約 $8.8 \times 10^{-3} \% \Delta K / K / MW$ から約 $5.9 \times 10^{-3} \% \Delta K / K / MW$ へ変化している。^{*1}出力係数が小さくなるということは反応度変動に対する炉出力変動の伝達関数のゲインが大きくなることを意味しており、異常反応度前後で炉雑音特性が変化していると予想される。以下、中性子束信号のAPSD、中性子束信号間のコヒーレンス関数、原子炉入口温度-中性子束信号間のコヒーレンス関数、伝達関数および原子炉入口温度-S/A出口温度間のコヒーレンス関数、伝達関数の結果を異常反応度前の50 MW第2サイクル時(Case 50-A-1, 50-A-2, Feb. 6, 1979)、異常反応度後の75 MW出力上昇試験時の50 MW時(Case 50-B-1, 50-B-2, Aug. 20, 1979)、75 MW時(Case 75-B-1, 75-B-2, Aug. 22, 1979)、および75 MW第3サイクル運転時の50 MW時(Case 50-C-1, 50-C-2, Jul. 18, Jul. 22, 1980)、75 MW時(Case 75-C-1, 75-C-2, Jul. 23, Aug. 25, 1980)について示す。これらの炉雑音特性を比較することによって中性子束信号のAPSDに見られるピークおよび中性子束信号間のコヒーレンス関数に見られる空間依存性の現象の解明を試みる。

5.1 中性子束信号のAPSDの経時変化

Fig. 5.1 に50 MW第2サイクル時、75 MW出力上昇試験時および75 MW第3サイクル時の炉出力50 MWの中性子束信号(CH. 8)のAPSDを示す。各時点の解析結果は再現性を確認するため、ほぼ同時点に測定したデータの解析結果を破線で併記している。この三時点で中性子束のAPSDの全般的な形に差は見られない。

Fig. 5.2 に75 MW出力上昇試験時および75 MW第3サイクル時の炉出力75 MWの中性子束信号(CH. 8)のAPSDを示す。二時点で中性子束のAPSDの大きさ、全般的な形に差は見られない。

5.2 中性子束信号間のコヒーレンス関数の経時変化

Fig. 5.3 に三時点の炉出力50 MWの中性子束信号CH. 7-CH. 8間のコヒーレンス関数を示す。

Fig. 5.3 において、三時点のコヒーレンス関数間には以下の相違が見られる。なお、Fig. 3.1 に示すようにCH. 7とCH. 8は互いに炉心をはさんで 180° 方向にある検出器である。

- (1) 50 MW第2サイクル時には、 $5 \times 10^{-3} \sim 1.0 \times 10^{-2}$ Hzの周波数帯域でコヒーレンシイは0.1~0.4であるが、75 MW出力上昇試験時には0.55~0.7、75 MW第3サイクル時には

* 1 厳密には出力係数には符号が必要であり、常陽の場合すべて出力係数は負である。本報告では出力係数を負として取扱うとめんどうなのでその絶対値を出力係数として取扱う。すなわち、出力係数の増加とは絶対値の増加であり、出力係数の減少とは絶対値の減少である。

0.5～0.9 となって上昇している。

- (2) ピーク周波数において50MW第2サイクル時にはコヒーレンシは約0.6であるが、75MW出力上昇試験時には約0.3に低下し、75MW第3サイクル時には約0.5となり、ほぼ50MW第2サイクル時に戻っている。

なお、ピーク周波数においてCH.7 - CH.8間の位相差は三時点に変化なく、 180° である。

Fig.5.4 に三時点の炉出力50MWの中性子束信号CH.6 - CH.9間のコヒーレンス関数を示す。

Fig.5.4 において、三時点のコヒーレンス関数間には、以下の相違が見られる。なお、Fig.3.2 に示すようにCH.6とCH.9は炉心よりの方向が互いに比較的近い方向の検出器である。

すなわち、4章で示した中性子束ゆらぎに空間依存性があると仮定した周波数帯域 ($7 \times 10^{-3} \sim 7 \times 10^{-2}$ Hz) 全般において、50MW第2サイクル時にはコヒーレンシは0.1～0.4であり、75MW出力上昇試験時には0.4～0.75と上昇し、75MW第3サイクル時には0.2～0.65と前二時点の中間の値となる。

なお、この周波数帯域において、CH.6 - CH.9間の位相差は三時点に変化なく 0° である。

Fig.5.5 に二時点の炉出力75MWの中性子束信号CH.7 - CH.8間のコヒーレンス関数を示す。二時点のコヒーレンス関数を比較すると、以下の相違が見られる。

- (1) $5 \times 10^{-3} \sim 1.0 \times 10^{-2}$ Hzの周波数帯域で75MW出力上昇時には0.4～0.8であり、75MW第3サイクル時には0.65～0.9となって若干上昇している。
- (2) ピーク周波数において、75MW出力上昇試験時にはコヒーレンシは約0.45であり、75MW第3サイクル時には約0.4となり、若干低下している。

Fig.5.6 に二時点の炉出力75MWの中性子束信号CH.6 - CH.9間のコヒーレンス関数を示す。二時点のコヒーレンス関数を比較すると、中性子束ゆらぎに空間依存性のある帯域 ($7 \times 10^{-3} \sim 7 \times 10^{-2}$ Hz) 全般において75MW出力上昇試験時のコヒーレンシは0.15～0.5であり、75MW第3サイクル時には0.2～0.7と若干上昇している。

Fig.5.7 は以上の50MWの三時点および75MWの三時点についてCH.7 - CH.8における、 $5 \times 10^{-3} \sim 10^{-2}$ Hzのコヒーレンシおよびピーク周波数のコヒーレンシおよびCH.6 - CH.9における $7 \times 10^{-3} \sim 7 \times 10^{-2}$ Hzのコヒーレンシを空間依存性の強弱という観点からまとめたものである。CH.7 - CH.8における $5 \times 10^{-3} \sim 10^{-2}$ Hzの両信号間の位相差は 0° であり、また、CH.6 - CH.9における $7 \times 10^{-3} \sim 7 \times 10^{-2}$ Hzの位相差も 0° であるので、一般的にこれらの周波数帯域でのコヒーレンシが小さいほど空間依存性は強いと言える。一方、CH.7 - CH.8におけるピーク周波数の両信号間の位相差は 180° であり、空間依存性が弱くなると同位相のゆらぎ成分が多くなって、この同位相成分が逆位相のゆらぎ成分をキャンセルして少くするためピーク周波数でのコヒーレンシは小さくなると考えられる。すなわち、コヒーレンシが小さいほど空間依存性は弱いと言える。

なお、コヒーレンシの値で幅を持っているものは、その中間値を代表値とする。

Fig.5.7 より次のことが判る。

- (1) 炉出力50MWの三時点を比較すると、50MW第2サイクル時が空間依存性が強く、75MW出力上昇試験時は弱い。また75MW第3サイクル時は両者の中間である。
- (2) 炉出力75MWの二時点を比較すると、75MW出力上昇試験時は75MW第3サイクル時より空間依存性は若干強くなっていると言えるが、50MWの三時点ほどの顕著な差はない。
- (3) 異常反応度前後の炉出力50MWの50MW第2サイクル時と75MW出力上昇試験時を比較すると、空間依存性はかなり変化しており、出力係数の変化(減少)に伴って空間依存性は変化(減少)していると言える。

5.3 原子炉入口温度-中性子束間の伝達関数^{*1}の経時変化

中性子束信号間のコヒーレンス関数の経時変化を調査した結果ほぼ明らかになった中性子束ゆらぎの空間依存性の強さの変化を、原子炉入口温度-中性子束間の伝達関数およびコヒーレンス関数の解析結果を用いて更に検討する。

4章で示したように、中性子束ゆらぎの内、 1.5×10^{-2} Hz以下の周波数帯域のゆらぎは大部分Aループ原子炉入口温度により影響されているので、中性子束ゆらぎの空間依存性の現象はAループ入口温度ゆらぎと何らかの関係があると予想できる。

Fig.5.8に、50MW第2サイクル、75MW出力上昇試験および75MW第3サイクル時の三時点における炉出力50MWのAループ入口温度-中性子束(CH.8)間の伝達関数を示す。各時点の解析結果は再現性を確認するため、ほぼ同じ時期に測定したデータの解析結果を破線で併記している。

なお、75MW出力上昇試験時の入口温度測定用熱電対は他の二時点とは違った仕様のもので使用していたため温度測定における時定数が他の二時点とは異っている。その結果、50MW第2サイクル時および75MW第3サイクル時には時定数は約10秒であるものが、75MW上昇試験時には、20秒程度になっていると推定される。そこで、三時点の伝達関数を同条件下で比較するため75MW出力上昇試験時の伝達関数(ゲイン)を補正した。^{*2}

Fig.5.8 より中性子束ゆらぎの空間依存性に関係している帯域($5 \times 10^{-3} \sim 7 \times 10^{-2}$ Hz)と

*1 この伝達関数の解析は2入力(入口温度A, B), 1出力(中性子束信号)の多変量解析で行っている。

*2 付録8.3

入口温度A-中性子束間のコヒーレンシイが大きい帯域 (1.5×10^{-3} Hz 以下) がオーバーラップしている帯域 ($5 \times 10^{-3} \sim 1.5 \times 10^{-2}$ Hz) における各時点の平均ゲインは以下ようになる。

50MW第2サイクル時 (空間依存性強い) ……	約 0.12 MW/℃
75MW出力上昇試験時 (" 弱い) ……	約 0.25 MW/℃
75MW第3サイクル時 (" 中間) ……	約 0.19 MW/℃

この三時点での伝達関数の値は、上に示すように 5.2 節の中性子束信号間のコヒーレンス関数に見られた空間依存性の強弱と対応している。

なお、図には示していないが、この入口温度A-中性子束間の伝達関数を CH. 8 以外の中性子束信号を用いて解析した結果は上述の CH. 8 を用いた場合とほぼ同じ結果となっている。

Fig. 5.9 に 75MW出力上昇試験および 75MW第3サイクル時の二時点における炉出力 75 MW の A ループ入口温度-中性子束間の伝達関数を示す。Fig. 5.9 において中性子束ゆらぎの空間依存性に関係している帯域と入口温度A-中性子束間のコヒーレンシイが大きい帯域がオーバーラップしている帯域 ($5 \times 10^{-3} \sim 1.5 \times 10^{-2}$ Hz) における各時点の平均ゲインは以下ようになる。

75MW出力上昇試験時 (空間依存性やや強い) ……	約 0.20 MW/℃
75MW第3サイクル時 (" やや弱い) ……	約 0.20 MW/℃

この二時点での伝達関数の値は、ほぼ同じであり、Fig. 5.7 に示した空間依存性の若干の強弱と対応していない。

Table 5.1 に伝達関数 (ゲイン)、これより推定した出力係数および同時期の出力上昇時に測定した出力係数を示す。⁽³⁾ なお、伝達係数から出力係数を推定する場合入口温度係数 (A, B ループ入口温度 1℃変化に対する反応度変化) を用いており、この値は約 3.77 %ΔK/K/℃であり、ほとんど経時変化がないことが確認されている。炉出力 50MW の三時点で、推定した出力係数と測定した出力係数は、その大小関係について良い対応を示しており、また炉出力 75MW の二時点でもほぼ同様のことが言える。

これから A ループ入口温度-中性子束間の伝達関数 (ゲイン) の経時変化は入口温度係数よりむしろ出力係数の変化によって生じていると言える。

以上をまとめると、中性子束信号間のコヒーレンス関数に見られる空間依存性の強弱の経時変化は A ループ入口温度-中性子束間の伝達関数 (ゲイン) の経時変化と特に炉出力 50MW で良い対応を示している。また、この伝達関数の経時変化は、ほぼ反応度変動に対する炉出力変動のゲインの経時変化と言い換えることができる。

なお、4 章の 75MW出力上昇試験時のデータの解析結果の内、炉出力低下に伴い、中性子束ゆらぎの空間依存性が弱くなっている現象については、75MW出力上昇試験時の炉出力 75MW では入口温度-中性子束間の伝達関数は約 0.20 MW/℃で炉出力 50MW では約 0.25 MW/℃と炉出力低下に伴い増加しているため、空間依存性の強さは伝達関数 (ゲイン) と対応していると言える。(ゲインが増加すると空間依存性は弱くなる。)

5.4 原子炉入口温度-中性子束間のコヒーレンス関数の経時変化

Fig. 5.10 および 5.11 に 50MW 第2 サイクル時、75MW 出力上昇試験時および 75MW 第3 サイクル時の入口温度 A, B-中性子束信号 CH. 7, CH. 8 間のコヒーレンス関数を示す。50MW 第2 サイクル時には Fig. 5.10 (a) に示すように 1.5×10^{-2} Hz 以下の帯域で入口温度 A-CH. 7 間のコヒーレンス関数(実線)と入口温度 A-CH. 8 間のコヒーレンス関数(破線)に相違が見られ、また Fig. 5.11 (a) に示すように入口温度 B-CH. 7 間(実線)と入口温度 B-CH. 8 間(破線)にも相違が見られる。一方、75MW 出力上昇試験時(Fig. 5.11(b))および 75MW 第3 サイクル時(Fig. 5.11(c))には、これらの相違はほとんど見られない。

この現象は以下のことを示していると考えられる。すなわち、中性子束信号間のコヒーレンス関数において見られている空間依存性現象は 1.5×10^{-2} Hz 以下の周波数帯域では入口温度(AおよびB)の変動による中性子束ゆらぎの空間依存性により生じていると考えられる。

これを更に原子炉入口温度-中性子束間の伝達関数の経時変化も考慮して詳細に推定すると以下のようになる。

A, B ループナトリウムの下部プレナムでのミキシングがほとんどないため入口温度のゆらぎは炉内 S/A の入口ナトリウム温度に一樣に影響を与えるのではなく、領域依存的に影響を与えている。また、中性子検出器 CH. 7 と CH. 8 の方向は炉心をはさんで 180° の方向であるためこれらの方向の S/A の領域は互いにかなり離れているので、CH. 7 および CH. 8 の方向の S/A の入口ナトリウム温度のゆらぎには互いに独立の成分が多いと考えられる。50MW 第2 サイクル時には、入口温度ゆらぎによる領域依存的な S/A 入口温度ゆらぎによって生じる中性子束ゆらぎは炉心全体に広がらず空間依存性のあるゆらぎとなっており、このことは入口温度-中性子束間の伝達関数(ゲイン)が他の二時点に比べて小さいという現象と対応している。一方、75MW 出力上昇試験時および 75MW 第3 サイクル時には、入口温度ゆらぎによる領域依存的な S/A 入口温度ゆらぎによって生じる中性子束ゆらぎは炉心全体に広がって空間依存性のほとんどないゆらぎとなっており、このことは入口温度-中性子束間の伝達関数(ゲイン)が大きくなっている現象と対応している。

5.5 原子炉入口温度-S/A 出口温度間のコヒーレンス関数および伝達関数の経時変化

前節の推定を確証するため、入口温度-S/A 出口温度間のコヒーレンス関数および伝達関数の経時変化を検討する。

Fig. 5.12 および 5.13 に 50MW 第2 サイクル、75MW 出力上昇試験、および 75MW 第3 サイクル時の炉出力 50MW の入口温度 A, B-S/A 出口温度 3A1(3A2), 3D1(3D2) 間のコヒーレンス関数を示す。

Fig. 5.14 に 75MW 出力上昇試験時の炉出力 50MW の入口温度 A-S/A 出口温度 3A2, 3D2 間の位相差を示す。また、Fig. 5.15 に入口温度 A-S/A 出口温度 3A1(3A2), 3D1(3D2) 間の伝達関数を示し、Fig. 5.16 に入口温度 B-S/A 出口温度 3D1(3D2) 間の伝達関数を示す。

す。なお、下部プレナムミキシング試験より S/A 3A1 (3A2) に流入するナトリウムは、ほぼ、100% A ループからのナトリウムであり、S/A 3D1 (3D2) に流入するナトリウムは、ほぼ100% B ループからのナトリウムである。これから次のことが判る。

- (1) Fig. 5.14 より、入口温度 A - 3A2 間の位相差は 1.5×10^{-2} Hz 以下の帯域でほぼ 0° であるが、入口温度 A - 3D2 間の位相差は 180° に近い。これは、S/A 出口温度 3A2 のゆらぎは入口温度 A のゆらぎに直接影響されており、また 3D2 のゆらぎは入口温度 A のゆらぎによる中性子束ゆらぎによって影響されていることを示している。
- また同様に、3D2 のゆらぎは入口温度 B のゆらぎに直接影響されている。
- (2) Fig. 5.12 より入口温度 A - 3A1 (3A2) 間のコヒーレンス関数は 1.5×10^{-2} Hz 以下の帯域で 50MW 第2 サイクル時には約 0.75、75MW 出力上昇および 75MW 第3 サイクル時には約 0.5 と小さくなっている。また、Fig. 5.13 より入口温度 B - 3D1 (3D2) 間のコヒーレンス関数は 50MW 第2 サイクル時には約 0.45、75MW 出力上昇および 75MW 第3 サイクル時には約 0.25 と小さくなっている。一方、Fig. 5.15 より入口温度 A - 3A1 (3A2) 間の伝達関数 (ゲイン) は 1.5×10^{-2} Hz 以下の帯域で 50MW 第2 サイクル時には約 0.55 (°/°)、75MW 出力上昇試験時には約 0.55 (°/°)、75MW 第3 サイクル時には約 0.43 (°/°) であまり変化していない。また、Fig. 5.16 より入口温度 B - 3D1 (3D2) 間のゲインは 50 MW 第2 サイクル時には約 0.53 (°/°)、75MW 第3 サイクル時には約 0.60 (°/°) であまり変化していない。これら伝達関数 (ゲイン) の結果からつぎのことが判る。入口温度 A のゆらぎによる中性子束ゆらぎのゲインに変化 (増加) があれば入口温度 - S/A 出口温度 3A1 (3A2) 間のゲインに変化 (減少) があるはずであるが、入口温度 - S/A 出口温度 3A1 (3A2) 間のゲインに経時変化がないので、S/A 3A1 (3A2) 付近の入口温度 A ゆらぎによる中性子束ゆらぎのゲインはほとんど変化していないと言える。

一方、同様に S/A 3D1 (3D2) 付近の入口温度 B ゆらぎによる中性子束ゆらぎのゲインもほとんど変化していないと言える。

また、入口温度 A - 3A1 (3A2) 間のコヒーレンス関数の経時変化は、入口温度 B (または 1 次冷却材流量) ゆらぎによる中性子束ゆらぎの S/A 出口温度 3A1 (3A2) ゆらぎへの影響の度合が経時変化しているため生じているのであり、一方入口温度 B - 3D1 (3D2) 間のコヒーレンス関数の経時変化も同様に入口温度 A ゆらぎによる中性子束ゆらぎの 3D1 (3D2) ゆらぎへの影響の度合が経時変化しているため生じていると考えられる。これらの現象は中性子束ゆらぎの空間依存性の強弱の経時変化を示しているものと推定でき、以下で更に検討する。

- (3) Fig. 5.12 より入口温度 A - 3D1 (3D2) 間のコヒーレンス関数は 7×10^{-3} Hz 以下の帯域で 50MW 第2 サイクル時には約 0.2 であり、75MW 出力上昇試験時には約 0.4、75MW 第3 サイクル時には約 0.4 と大きくなっている。また、Fig. 5.15 より入口温度 A - 3D1 (3D2) 間の伝達関数 (ゲイン) も、 7×10^{-3} Hz 以下の帯域で 50MW 第2 サイクル時には約

0.15 (°C/°C), 75MW出力上昇試験時には約0.36 (°C/°C) 75MW第3サイクル時には約0.33 (°C/°C)と大きくなっている。

このことは、50MW第2サイクル時には、入口温度ゆらぎによる中性子束ゆらぎは空間依存性が強く、S/A出口温度3D1のゆらぎへの影響は小さいが、75MW出力上昇試験および75MW第3サイクル時には、この入口温度Aのゆらぎによる中性子束ゆらぎは空間依存性が弱くなり、炉心全体に広がって、S/A出口温度3D2のゆらぎへ大きく影響を与えていることを示している。

7×10^{-3} Hz以下の帯域で、入口温度AゆらぎによるS/A出口温度3D1(3D2)ゆらぎのゲインに経時変化が見られ、一方入口温度Aゆらぎによる3A1(3A2)ゆらぎのゲインに経時変化が見られないことから、S/A3A1-3D1間で50MW第2サイクル時には入口温度Aゆらぎによる中性子束ゆらぎの空間依存性が強く存在しているが、75MW出力上昇試験および75MW第3サイクル時には空間依存性が弱くなっていることが明らかになった。この事柄および前節で述べた入口温度-中性子束間の伝達関数(ゲイン)、コヒーレンス関数の経時変化を総合的に見ることにより、S/A3A1-3D1間だけではなく炉心全体でも入口温度ゆらぎによる中性子束のゆらぎに空間依存性が存在すること、また50MW第2サイクル時と75MW出力上昇試験時および75MW第3サイクル時にはこの空間依存性の強さは経時変化して弱くなっていることはほぼ明確であると言える。

また、中性子束信号間のコヒーレンス関数(Fig. 5.3, 5.4)の $5 \times 10^{-3} \sim 1 \times 10^{-2}$ Hzの周波数帯域における経時変化はこの入口温度ゆらぎによる中性子束ゆらぎの空間依存性の強さの変化ということで、ほぼ説明できる。

また、空間依存性の変化にもかかわらず入口温度A-S/A出口温度3A1間および入口温度B-3D1間のゲインにはほとんど経時変化が見られない。すなわち、入口温度-中性子束信号間のゲインの変化に伴い中性子束ゆらぎの炉心全体への広がり度合は変化(空間依存性の変化)しているが、入口温度ゆらぎの影響を直接受ける領域のS/Aでの中性子束ゆらぎの大きさはほとんど変化していない。この現象についての原因は不明である。

6. 中性子束APSDのピークおよび中性子束ゆらぎの空間依存性についての検討

4章の75MW出力上昇試験結果より、今後解明すべき課題として、中性子束信号APSDに見られるピークの発生原因の解明およびピーク周波数を含む $7 \times 10^{-3} \sim 7 \times 10^{-2}$ Hzの帯域で各中性子束信号のゆらぎに中性子検出器依存性があるという現象の解明が上げられた。4.3節での定量的検討によって中性子検出器依存現象は、ほぼ中性子束ゆらぎの炉内での空間依存現象であると推定された。また、5章での炉雑音特性の経時変化の解析によって50MW第2サイクル時には $5 \times 10^{-3} \sim 1 \times 10^{-2}$ Hzの帯域で入口温度ゆらぎによる中性子束ゆらぎの空間依存性が存在したことがほぼ明確になったことから、4.3での定量的検討において残されていた問題点、すなわち0.7 mφの小さな炉心に中性子束ゆらぎに空間依存性が存在し、しかも炉心から約3 m離れた検出器によって検出し得るかという問題点は解決した。以上から上述の中性子検出器依存現象は中性子束ゆらぎの空間依存性より発生していることがほぼ明らかとなった。この結果中性子束APSDのピークおよび中性子束ゆらぎの空間依存性を発生させる原因として以下が考えられる。

- (1) 領域的依存的なナトリウム温度ゆらぎ
 - (a) 入口温度ゆらぎによる中性子束ゆらぎ
 - (b) 一次冷却材流量ゆらぎによる中性子束ゆらぎ
- (2) 炉心構成要素の領域依存的な機械的移動またはわん曲
 - (a) ラップ管の熱わん曲による中性子束ゆらぎ
 - (b) 燃料ピンの熱わん曲による中性子束ゆらぎ
 - (c) 燃料ペレットの上下の移動による中性子束ゆらぎ

Fig. 4.4 (b)の入口温度A-中性子束信号(CH.8)間のコヒーレンス関数より、空間依存性のある帯域($7 \times 10^{-3} \sim 7 \times 10^{-2}$ Hz)の内、 $7 \times 10^{-3} \sim 2 \times 10^{-2}$ HzでAループのコヒーレンシは中程度であるので、この帯域では5章においても確認されたように上述1)-(a)の入口温度Aのゆらぎにより中性子束ゆらぎの空間依存性が発生していると言える。

2×10^{-2} Hz $\sim 7 \times 10^{-2}$ Hzの帯域では入口温度-中性子束間および一次冷却材流量-中性子束間のコヒーレンシが小さいので、このピーク周波数を含む帯域での中性子束ゆらぎは(1)のナトリウム温度ゆらぎが原因ではなく、(2)の炉心構成要素の移動またはわん曲が原因と考えられるが、これを確かめるために以下の検討を行う。

もし、(1)のナトリウム温度ゆらぎが原因であれば、S/A 出口温度-中性子束信号間の位相差は温度ゆらぎにより中性子束がゆらぐのであるから、ほぼ 180° であり、(2)の炉心構成要素の移動またはわん曲が原因であれば、中性子束ゆらぎによりナトリウム温度がゆらぐのであるからS/A 出口温度-中性子束信号間の位相差はほぼ 0° となるはずである。ところが、S/A 出口温度-中性子束信号間の位相差の把握は通常のCPSDによる解析では困難である。そこで、この位相差を明確に把握するため、ピーク周波数ではCH.7-CH.8間の位相差は 180° であることに注目し、CH.7-CH.8間で

互いに同位相の成分を消去し、ほぼピークのゆらぎ成分のみを強調したCH.7とCH.8の差信号を作り、S/A出口温度-(CH.7-CH.8)間の相関々数により位相差を検討する。

この(CH.7-CH.8)信号のAPSDをFig.6.1に示し、このデータは75MW出力上昇試験時炉出力75MW(Case 75-B-1, 1979.8.22)のものである。Fig.6.2~Fig.6.5に(CH.7-CH.8)信号-S/A出口温度6B4,6C4,6E4,6F4間のコヒーレンス関数を示す。S/A 6B4,6C4はCH.7の方向近くのS/Aであり、S/A 6E4,6F4はCH.8の方向近くのS/Aである。中性子束ゆらぎによってS/A出口温度がゆらぐのであれば、(CH.7-CH.8)信号とCH.7方向近くのS/A(6B4,6C4)間の位相差は 0° であり、(CH.7-CH.8)信号とCH.8方向近くのS/A(6E4,6F4)間の位相差は 180° であると予想できる。相関々数で時間0秒にゆらぎの上のピークがきていると位相差は 0° 、また時間0秒にゆらぎの下側のピークがきていると位相差は 180° と言える。(温度測定における時定数約8秒は相関々数にほとんど影響しないと考えられる。) Fig.6.2~6.5でS/A 6B4では位相差はほぼ 0° 、6E4では、ほぼ 180° 、6F4ではほぼ 180° であり、上述の予想と一致しているが、6C4では位相差は不明である。

Fig.6.6~6.9に(CH.7-CH.8)信号-S/A出口温度3B2,3C2,3E2,3F2間のコヒーレンス関数を示す。S/A 3B2,3C2はCH.7の方向近くのS/Aであり、S/A 3E2,3F2はCH.8の方向近くのS/Aである。

S/A 3B2では、ほぼ 0° 、3C2ではほぼ 0° 、3E2ではほぼ 180° で上述の予想と一致しているが、3F2ではほぼ 0° で上述の予想と反対である。また、全般に6列S/Aと(CH.7-CH.8)間の相関々数のピーク周波数でのゆらぎ(約25秒周期)は顕著であるのに対し、3列S/Aと(CH.7-CH.8)間では余り顕著でない。

Fig.6.10, 6.11に前のケースとほぼ同時期に測定したデータの(CH.7-CH.8)信号-S/A出口温度6B4,6E4間のコヒーレンス関数である。S/A 6B4ではほぼ 0° 、S/A 6E4では、ほぼ 180° で上述の予想とほぼ一致しているが、ピーク周波数でのゆらぎは余り顕著でない。

かならずしも明確なデータの再現性は得られていないが、ほぼCH.7の方向近くのS/A付近およびCH.8の方向近くのS/A付近で互いに 180° の位相差の中性子ゆらぎが存在し、この中性子束ゆらぎによってS/A出口温度がゆらいでいる。

以上から、 $2 \times 10^{-2} \sim 7 \times 10^{-2}$ Hzの帯域のピークを含んだ中性子束ゆらぎはほぼ炉心構成要素の移動またはわん曲が原因と推定できる。

$2 \times 10^{-2} \sim 7 \times 10^{-2}$ Hzの帯域のピークを含んだ中性子束ゆらぎの特徴をまとめると以下のようなになる。

- (1) ピーク周波数での各中性子信号のゆらぎにおいて、CH.6とCH.8の信号は互いにゆらぎを共有しており、CH.7のゆらぎはこれと位相差がほぼ 180° であり、CH.9の信号のゆらぎはこれと無関係である。
- (2) ピーク周波数を含んだ $7 \times 10^{-3} \sim 5 \times 10^{-2}$ Hzの周波数帯域において互いに炉心よりの方向

の近い検出器の信号間で多くのゆらぎを共有しており、 90° 方向および 180° 方向の検出器の信号間では共有するゆらぎは少い。

- (3) 上記(1), (2)の現象は4章の定量的検討および5章の経時変化の解析の結果から、ほぼ中性子束ゆらぎの空間依存性によって発生していると言える。
- (4) $2 \times 10^{-2} \sim 7 \times 10^{-2}$ Hz の帯域での入口温度-中性子束間および、一次冷却材流量-中性子束間のコヒーレンシは小さいので、この現象は炉固有の現象である可能性が強い。
- (5) (CH.7-CH.8)信号-S/A 出口温度間の相関々数による解析の結果、この中性子束ゆらぎは、ほぼ炉心構成要素の移動またはわん曲が原因と推定できる。
- (6) 炉出力上昇に伴い、ピーク周波数は高周波側にシフトする。
- (7) Fig.6.12 の中性子信号CH.6 ~ CH.9 の時系列データより、この帯域での中性子束ゆらぎの典型的例において、この中性子ゆらぎは3~4回連続して発生していることが判る。

これらのピークを含んだ中性子束ゆらぎの特徴より中性子束ゆらぎの発生メカニズムを明確には推定できないが、おおよそ次のように推定できる。炉出力上昇に伴い、ピーク周波数は高周波側にシフトすることから、炉出力の変化に伴って中性子束ゆらぎの発生メカニズムは若干変化していると考えられる。炉出力の変化によって機構が変化する炉心構成要素としてラッパ管が考えられる。すなわち、高出力状態で、特に炉心最外列(4または5列)およびブランケット最内列(5または6列)のS/Aのラッパ管は他のS/Aと比べて大きく熱わん曲しており、炉出力の変化に伴い、熱わん曲量は変化する。また、ピーク周波数でCH.7-CH.8間の位相差は、ちょうど 180° であることからCH.7の方向の炉心構成要素の動きとCH.8の方向の動きは互いに直接関連し合っていると考えられ、直接関連し合う炉心構成要素としてはラッパ管が考えられる。そこで、ピークを含んだ中性子束ゆらぎの発生メカニズムを以下のように仮定する。炉出力50MW以上ではラッパ管の熱わん曲に伴う集合体の相互関係は図Aのようであると推定できる。

すなわち、熱わん曲の大きな炉心最外列(およびブランケット最内列)のラッパ管は上端パッドでブランケット集合体(7~10列)に、また中間パッドで炉心集合体(0~4列)に熱わん曲による力を加えている。このことにより、炉心集合体は炉心最外列のラッパ管の熱わん曲により中間パッドの位置で四方から締めつけられて力学的にはまとまった一つの物体となっていると考えられる。もし、図Bに示すようにCH.8の方向の炉心部で局部的に炉出力が上昇し、炉心最外列ラッパ管の熱わん曲量が増加したとすると、中間パッドで炉心集合体を押す力(F_1)はCH.7の方向での力(F_2)より大きくなり、炉心集合体はCH.7の方向へ移動する(倒れる)と推定できる。^{*1}(ブランケット集合体は固定していると仮定する)

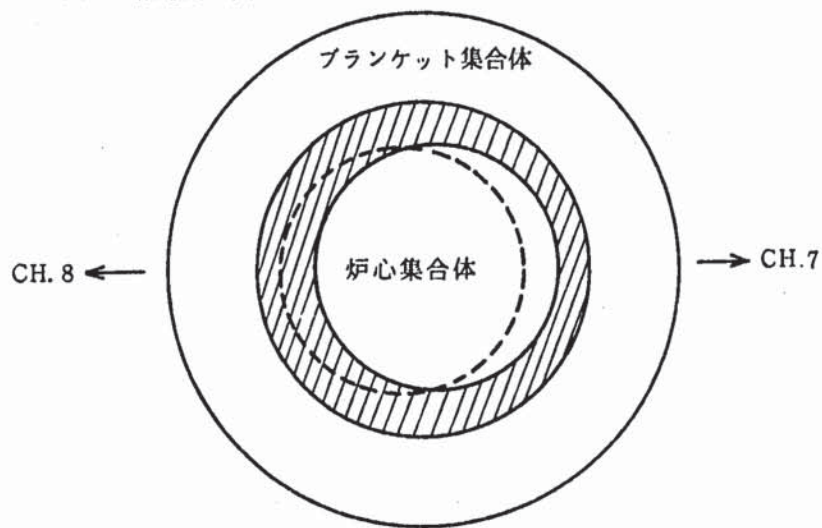
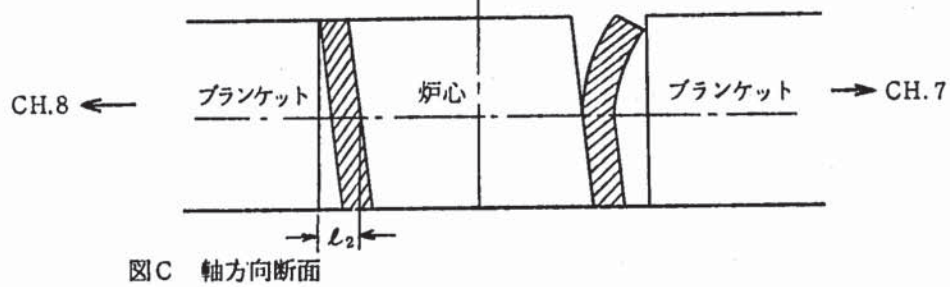
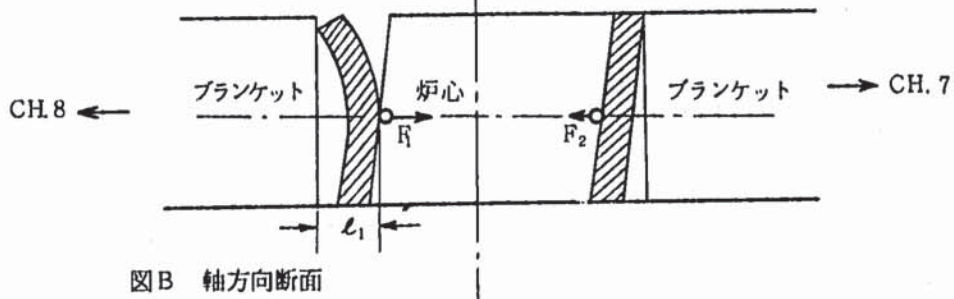
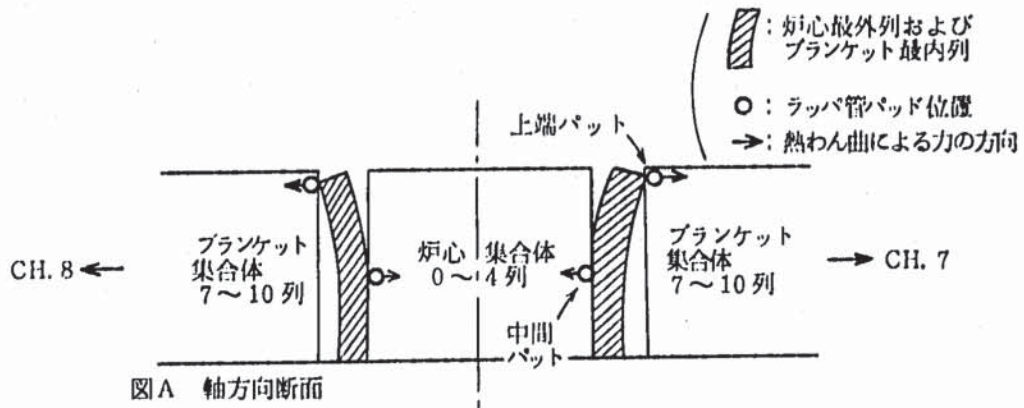
この炉心集合体の移動により、CH.8方向の炉心中心での炉心集合体とブランケット集合体の間隔(l_1)は大きくなり、一方CH.7の方向では小さくなる。このことにより、CH.8の方向では、炉心集

*1 集合体は、倒れにより炉心中心位置で最大0.9mm変位する可能性がある。

合体とブランケット集合体間のナトリウム層の厚さが増加し中性子のリーク量が増えるため、負の反応度が印加されて炉出力が低下する。CH. 7 の方向では逆にナトリウム層の厚さが減少し炉出力が上昇する。炉出力の変化によって 10 ~ 20 秒のむだ時間の後に熱わん曲量が増加し、CH. 8 の方向では熱わん曲量が減少し、CH. 7 の方向では増加するので炉心集合体は図 C のように CH. 8 の方向へ移動する。このとき、CH. 8 の方向の炉心集合体とブランケット集合体の間隔(l_2)は小さくなる。これによって又、炉出力が変化し、熱わん曲量が増加して炉心集合体は図 B の位置に戻る。この結果、CH. 8 の方向の炉心部の炉出力およびラッパ管の熱わん曲量は、20 ~ 40 秒の周期($2.5 \sim 5 \times 10^{-2}$ HZ)で振動し、CH. 7 の方向の振動とは逆位相となる。ピークを含んだ中性子束ゆらぎは、このようなラッパ管の熱わん曲と炉出力の、炉心集合体の移動を伴った共振現象であると推定できる。図 D に、炉心集合体の移動の状況を炉心中心の径方向断面で示す。炉心集合体の実線は図 B に対応し、破線は図 C に対応している。図 D より炉心集合体の移動によって、CH. 7, 8 方向の炉出力は変動するが、それ以外の方向では炉出力変動は小さいことが判る。

以上のメカニズムについて若干の定量的解析を行う。炉心集合体とブランケット集合体の間隔の増加は、ナトリウム層の厚さの増加をもたらす。その結果、中性子のリーク量が増加して炉出力が低下する。

炉心とブランケットの境界でナトリウム層の厚さが 1 mm 増加すると、それによる付加反応度は約 8 β であり、これを出力係数で割ると約 5 MW の出力変動となるので、約 0.05 MW の中性子束ゆらぎ(ピークのゆらぎの RMS 値)を発生させるのに必要なナトリウム層の厚さの変化は約 0.01 mm である。さらに、このゆらぎが炉心最外列付近の局所的なものであることを考慮すると、必要な厚さの変化は 0.002 mm 程度となると考えられる。炉心最外列のラッパ管の上端パッドの位置での熱わん曲による変化量が 1 mm 以上であることを考慮すると、0.002 mm 程度のゆらぎは十分考えられる。



7. 結 言

75 MW 出力上昇試験時の炉出力 75 MW の中性子束信号の APSD および中性子束信号間 (CH.6 ~ CH.9) コヒーレンス関数の解析結果より今後解明すべき課題として中性子束信号 APSD に見られるピークの発生原因の解明および、このピーク周波数を含む $7 \times 10^{-3} \sim 7 \times 10^{-2}$ Hz の帯域で各中性子束信号ゆらぎに中性子検出器依存性があるという現象の解明が上げられた。

これらの解明のため、75 MW 出力上昇試験のデータを用いて原子炉入口温度、一次冷却材流量、S/A 出口温度および原子炉出口温度と中性子信号間の相関関係の検討を行った。また、炉出力変化による上述の現象の変化の調査および現象の定量的検討を行った。更に、炉雑音特性の経時変化として、50 MW 第 2 サイクル時、75 MW 出力上昇試験時および 75 MW 第 3 サイクル時の三時点の炉出力 50 MW、75 MW の炉雑音特性を調査した。特に異常反応度現象前後で炉出力 50 MW での出力係数は変化しているので、現象前後の炉雑音特性に変化が見られると予想できる。

検討の結果、次の事が判った。

- (1) $7 \times 10^{-3} \sim 7 \times 10^{-2}$ Hz の帯域の中性子検出器依存性の現象に関して定量的検討を行った結果、この現象は中性子ゆらぎの空間依存性によって生じていることが推定された。

また、5 章の炉雑音特性の経時変化の解析を行った結果、入口温度ゆらぎによって生じる中性子束ゆらぎに空間依存性が存在することが、ほぼ明確になった。このことから、中性子検出器依存性の現象は中性子ゆらぎの空間依存性によって生じていることがほぼ明らかになった。更に、 $7 \times 10^{-3} \sim 7 \times 10^{-2}$ Hz の帯域の内、 $7 \times 10^{-2} \sim 2 \times 10^{-2}$ Hz の帯域では、この現象は入口温度ゆらぎによる中性子束ゆらぎの空間依存性現象であることが、ほぼ明らかになった。

- (2) 炉雑音特性の経時変化については、上述の三時点で炉出力 50 MW の中性子束信号間のコヒーレンス関数、入口温度-中性子束間および入口温度-S/A 出口温度間の伝達関数 (ゲイン)、コヒーレンス関数に経時変化が見られ、これらの現象間の対応づけもほぼ得られた。

この結果、出力係数の変化 (減少) に伴って中性子束ゆらぎの空間依存性の強さが変化 (減少) し、また入口温度-中性子束間の伝達関数 (ゲイン) も変化 (増加) していることが、ほぼ明らかになった。すなわち、異常反応度現象による炉出力 50 MW での出力係数の減少に伴って 75 MW 出力上昇試験時炉出力 50 MW の中性子束ゆらぎの空間依存性の強さは 50 MW 第 2 サイクル時と比較して減少していることが、ほぼ判った。

- (3) ピーク周波数を含む $2 \times 10^{-2} \sim 7 \times 10^{-2}$ Hz の帯域の中性子束ゆらぎに関して、この帯域では中性子束信号-入口温度、一次冷却材流量間のコヒーレンシが小さいことから、この中性子束ゆらぎは炉固有のゆらぎであると推定した。また、中性子束信号 CH.7 と CH.8 の差信号 (CH.-CH.8 信号) と S/A 出口温度間の相関々数による解析の結果、この中性子束ゆらぎは、ほぼ炉心構成要素の移動によって発生していると推定した。更に、これに基づき、炉心集合体の移動を伴ったラッパ管の熱わん曲量と中性子束変動間の共振現象を仮定した。

今後、中性子束ゆらぎの空間依存性に関しては各運転サイクル毎に種々の炉出力での炉雑音特性の測定をなるべく多く採取して本報告の解析結果の再現性を確認する必要がある。また、ピークの発生原因に関しては、ラッパ管の変位測定、炉心内中性子束、温度測定の試験を行う必要がある。また、炉雑音特性に見られる種々の現象について高出力炉雑音理論等に基づく定性的および定量的な理論解析も行う必要がある。

NAIG 研玉置哲男, 河野耕司, 東芝佐藤増雄の各氏に測定, 解析などの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。

8. 付 録

8.1 補助系入口温度

通常運転の場合、補助系は逆流しているため、ナトリウム滞留部に流出する補助系のナトリウム温度は補助系入口温度である。

Fig. 8.1 (a)に炉出力75MW時の補助系入口温度のAPSD, Fig. 8.1 (b)に補助系入口温度-中性子束間のコヒーレンス関数を示す。この結果、補助系入口温度と中性子束信号間の相関は無いことが判った。

8.2 グラファイト温度

Fig. 8.2 (a)に炉出力75MW時のグラファイト温度 (TE 83-5) のAPSD, Fig. 8.2 (b)にグラファイト温度-中性子束間のコヒーレンス関数を示す。この結果、グラファイト温度と中性子束信号間の相関は無いことが判った。

8.3 原子炉入口温度の時定数

50MW 第2サイクル時および75MW第3サイクル時には3章に示すように原子炉入口温度のCA熱電対のシースは3.2mmφであり、ウェルの大きさは10mmφ O.D., 4mmφ I.D., 時定数は約10秒である。ところが、75MW出力上昇試験時には時定数改善の目的で同じウェルに0.5mmφのシース熱電対を挿入したが、折れることを恐れて完全にシースをウェル内に押し込まなかった。このため時定数が逆に増加していることが懸念される。

Fig. 8.3に75MW出力上昇試験時と75MW第3サイクル時の炉出力75MW, 原子炉入口温度A-S/A 出口温度3A2間の伝達関数(ゲイン)を示す。 7×10^{-3} HZ以上の帯域では75MW出力上昇試験時のゲインは75MW第3サイクル時のゲインより大きい。この二時点では炉雑音特性に大きな変化は見られていないので、この二時点間のゲインの変化は入口温度測定における時定数の変化と考えられる。すなわち、75MW出力上昇試験時の入口温度測定の伝達関数は75MW第3サイクル時の伝達関数に更に約15秒の時定数^{*1}の一次遅れを付加したものになっていると考えられる。

Fig. 8.4 および Fig. 8.5 に各時点での炉出力75MWの原子炉入口温度AのAPSD, Fig. 8.6 および Fig. 8.7 に各時点での炉出力50MWの原子炉入口温度AのAPSDを示す。Fig. 8.6より 7×10^{-3} HZ以上の周波数帯域で75MW出力上昇試験時のAPSDはその他の時点(50MW第2サイクルおよび75MW第3サイクル時)でのAPSDより小さくなっている。また、Fig. 8.5および Fig. 8.7より、75MW出力上昇試験時以外では、入口温度AのAPSDの形は、ほぼ再現性が判ることが判る。

以上から、75MW上昇試験時の入口温度Aの温度測定時定数は他の時点の時定数より大きくなっ

* 1 折点周波数を 10^{-2} HZとして計算した。

ていることがほぼ明らかになり、時定数約 10 秒が 27 秒程度^{*2}になっていると推定できる。

これによって、75MW出力上昇試験時の炉雑音解析結果（入口温度 A - 中性子束間伝達関数、入口温度 A - S/A 出口温度間、伝達関数）を 6×10^{-3} Hz 以上の帯域で補正する必要が生じる。このため、Fig.8.4 の炉出力 75MW における Case 75 - B - 1 と Case 75 - C - 2 の APSD の各周波数毎の比率および Fig.8.6 の炉出力 50MW における Case 50 - B - 1 と Case 50 - C - 1 の APSD の比率を平均し開平して各周波数毎の補正ゲインを求めた。この結果を以下に示す。

周波数	5×10^{-3} HZ 以下	6×10^{-3} HZ	7×10^{-3} HZ	8×10^{-3} HZ	9×10^{-3} HZ	10^{-2} HZ	2×10^{-2} HZ 以上
補正ゲイン	1.0	0.93	0.83	0.68	0.71	0.64	0.61

Fig.8.3 の 75MW出力上昇試験時の炉出力 75MW 入口温度 A - S/A 出口温度 3A2 間の伝達関数に、このゲインを用いて補正すると Fig.8.8 になり、75MW 第 3 サイクル時とほぼ一致する。

なお、B ループの入口温度測定も同様の状況であると予想できるが、Fig.4.4 (a) に示すように B ループの入口温度のゆらぎが A ループのように大きくないため A ループの場合のような APSD の形の違いによる補正ゲイン算出は出来ていない。

* 2 時定数 10 秒の一次遅れと 15 秒の一次遅れを接続した二次遅れのステップ応答において、63.2%となるまでの遅れ時間を計算した。

参 考 文 献

- (1) 三田敏男, 大谷秀二, 佐野健一, 牧戸正紀, 網島幹泰, 村松寿晴, 関口善之 ; 「高速実験炉「常陽」性能試験結果報告書 高出力炉雑音特性」PNCレポート SN941 79-218(1979)
- (2) 大谷秀二, 佐野健一, 高山義人, 田村誠司「高速実験炉「常陽」性能試験結果報告書 高出力炉雑音特性第2報」PNCレポート SN941 79-237(1979)
- (3) 山本寿, 関口善之, 田村誠司, 古平清, 寺田和道, 佐々木誠, 洲崎輝雄「高速実験炉「常陽」75MW 性能試験報告書総集編」PNCレポート SN941 79-164(1979)
- (4) 田村誠司, 村松寿晴, 三田敏男, 池上哲雄「高速実験炉「常陽」性能試験報告書-燃料集合体出口温度測定-」 PNCレポート SN 941 80-03 (1980)

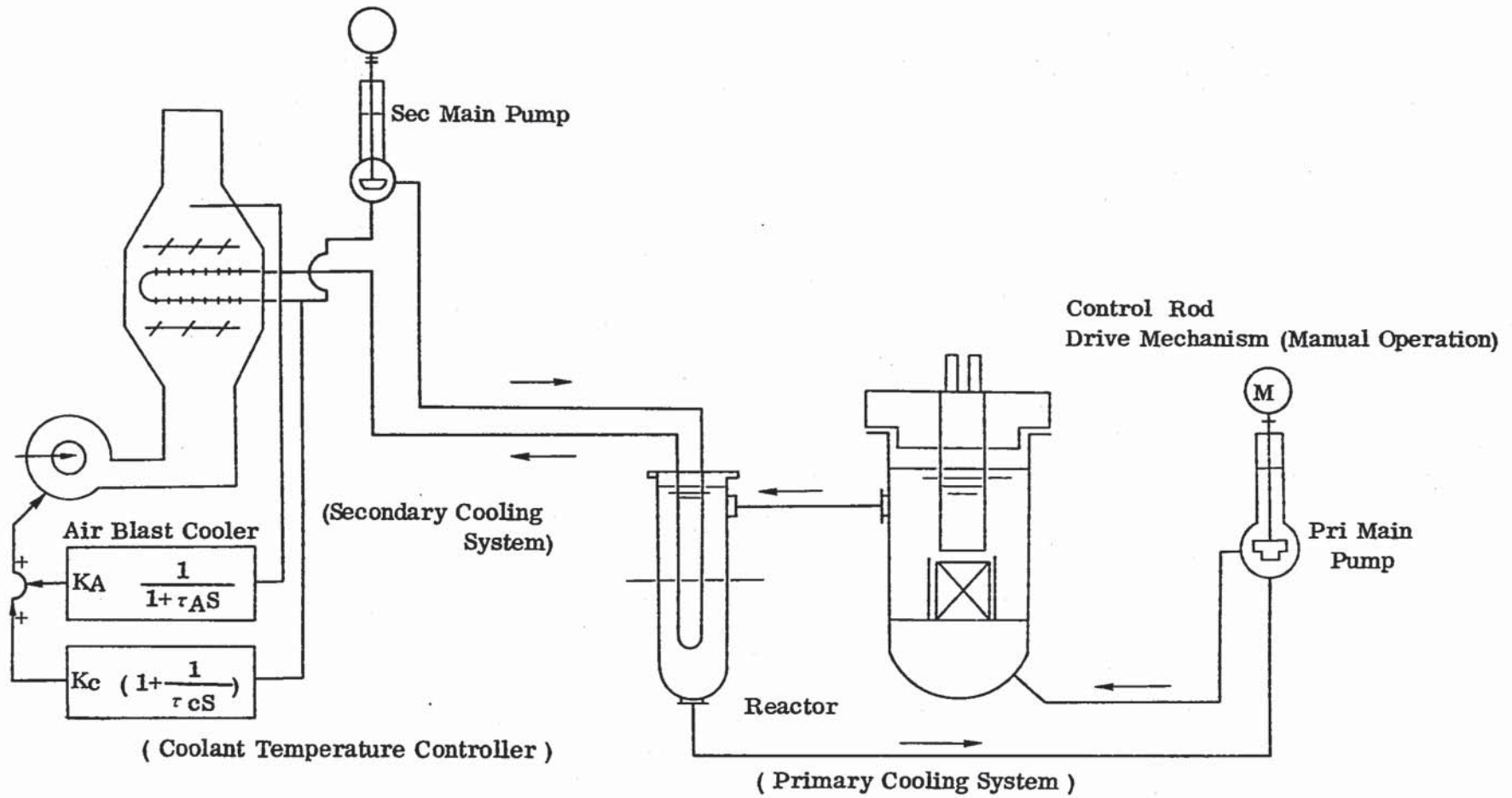


Fig. 2.1 Plant Controllers

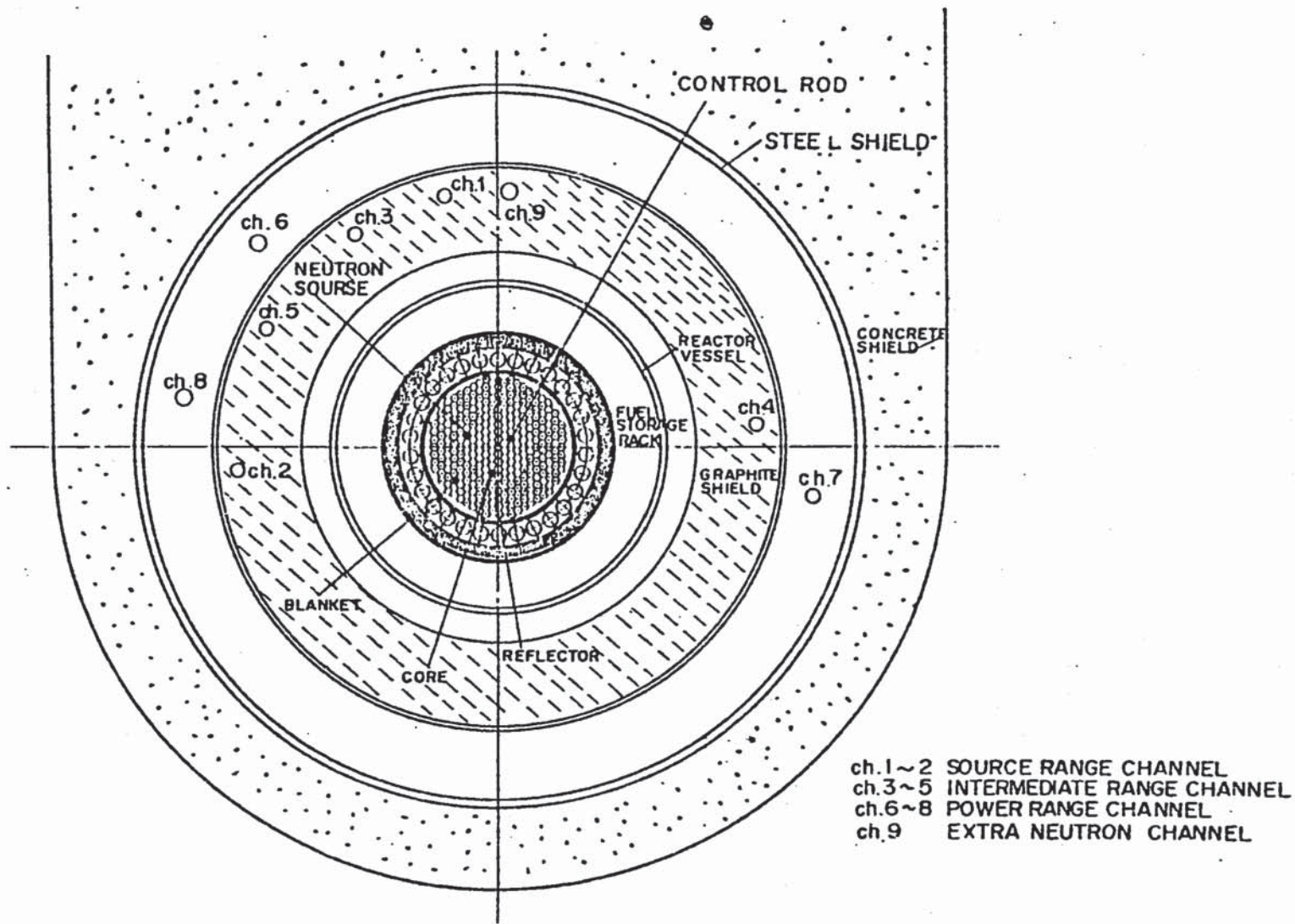
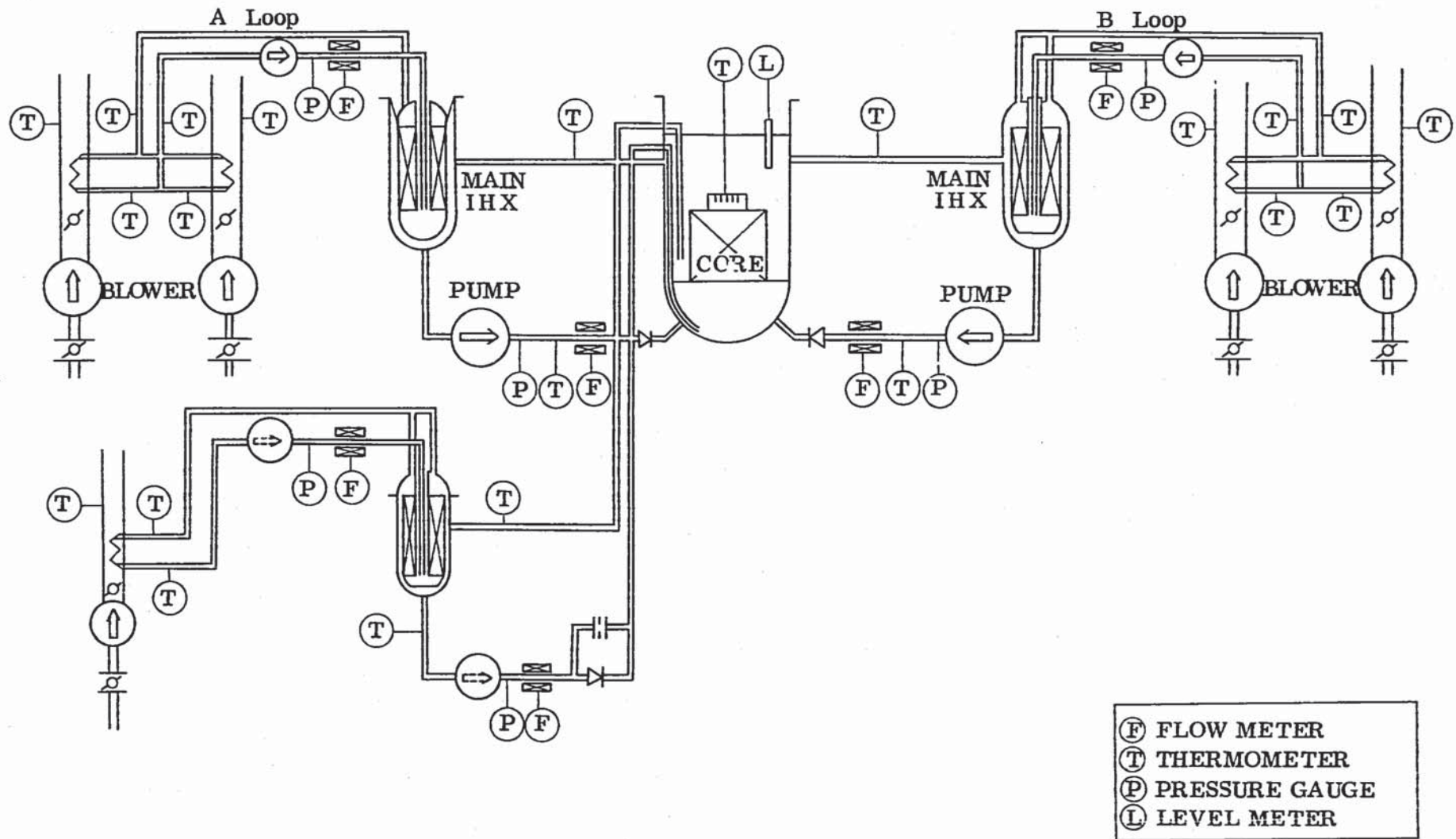


Fig. 2.2 Neutron Counter Location



- ⓕ FLOW METER
- Ⓣ THERMOMETER
- Ⓟ PRESSURE GAUGE
- Ⓛ LEVEL METER

Fig. 2.3 Flow Diagram of Cooling System

Table 3.1 Reactor Noise Data (1)

Case No.	Cycle	Date	Power Level	Main Measuring Point	Data Length	Sampling Period
50-A-1	50MW No.2 Cycle	Feb.6, 1979	50MW	Neutron Flux, Reactor Inlet,Outlet and S/A Outlet(3A1,3B1,3D1,3E1) Temperature,Primary Sodium Flow	5 hours	2 sec.
50-A-2	50MW No.2 Cycle	Feb.6, 1979	50MW	Neutron Flux, Reactor Inlet,Outlet and S/A Outlet(3A1,3B1,3D1,3E1) Temperature,Plimary Sodium Flow	5 hours	2 sec.
75-B-1	75MW Power Up Test	Aug.22, 1979	75MW	Neutron Flux, Reactor Inlet,Outlet and Secondary Loop Temperature,Primary Sodium Flow	2.5 hours	1 sec.
75-B-2	75MW Power Up Test	Aug.22, 1979	75MW	Neutron Flux,Reactor Inlet,Outlet and S/A Outlet(3A2,3B2,3C2,3D2, 3E2,3F2,6A4,6B4,6C4, 6D4,6E4,6F4) Temperature, Primary Sodium Flow	2.5 hours	1 sec.
65-B-1	75MW Power Up Test	Aug.21, 1979	65MW	(Same 75-B-1)	2.5 hours	1 sec.
65-B-2	75MW Power Up Test	Aug.21, 1979	65MW	(Same 75-B-2)	2.5 hours	1 sec.
50-B-1	75MW Power Up Test	Aug.20, 1979	50MW	(Same 75-B-1)	2.5 hours	1 sec.
50-B-2	75MW Power Up Test	Aug.20, 1979	50MW	(Same 75-B-2)	2.5 hours	1 sec.
30-B-1	75MW Power Up Test	Aug.19, 1979	30MW	(Same 75-B-1)	2.5 hours	1 sec.
30-B-2	75MW Power Up Test	Aug.19, 1979	30MW	(Same 75-B-2)	2.5 hours	1 sec.

Table 3.1 Reactor Noise Data (2)

Case No.	Cycle	Date	Power Level	Main Measuring Point	Data Length	Sampling Period
75-C-1	75MW No.3 Cycle	Jul.23,1980	75 MW	Neutron Flux,Reactor Inlet, Outlet and S/A Outlet(3A2, 3B2,3C2,3D2,3E2) Tempera- ture,Primary Sodium Flow	5 hours	2 sec.
75-C-2	75MW No.3 Cycle	Aug.25,1980	75 MW	(Same 75-C-1)	5 hours	2 sec.
50-C-1	75MW No.3 Cycle	Jul.18,1980	50 MW	Neutron Flux,Reactor Inlet, Outlet Tempera- ture, Primary Sodium Flow	5 hours	2 sec.
50-C-2	75MW No.3 Cycle	Jul.22,1980	50 MW	(Same 75-C-1)	5 hours	2 sec.

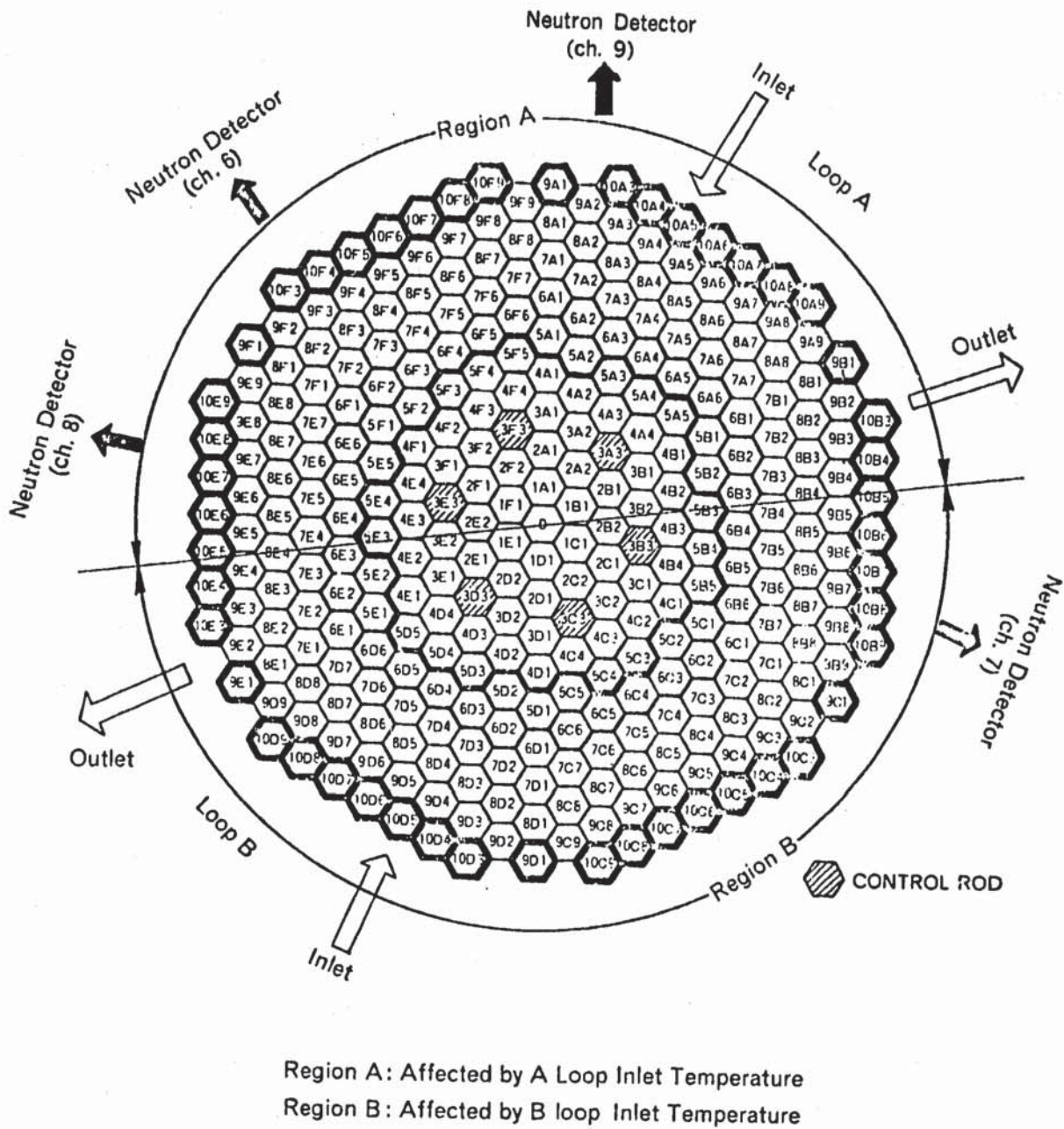


Fig. 3.1 Schematic Diagram of the Sensor Positions

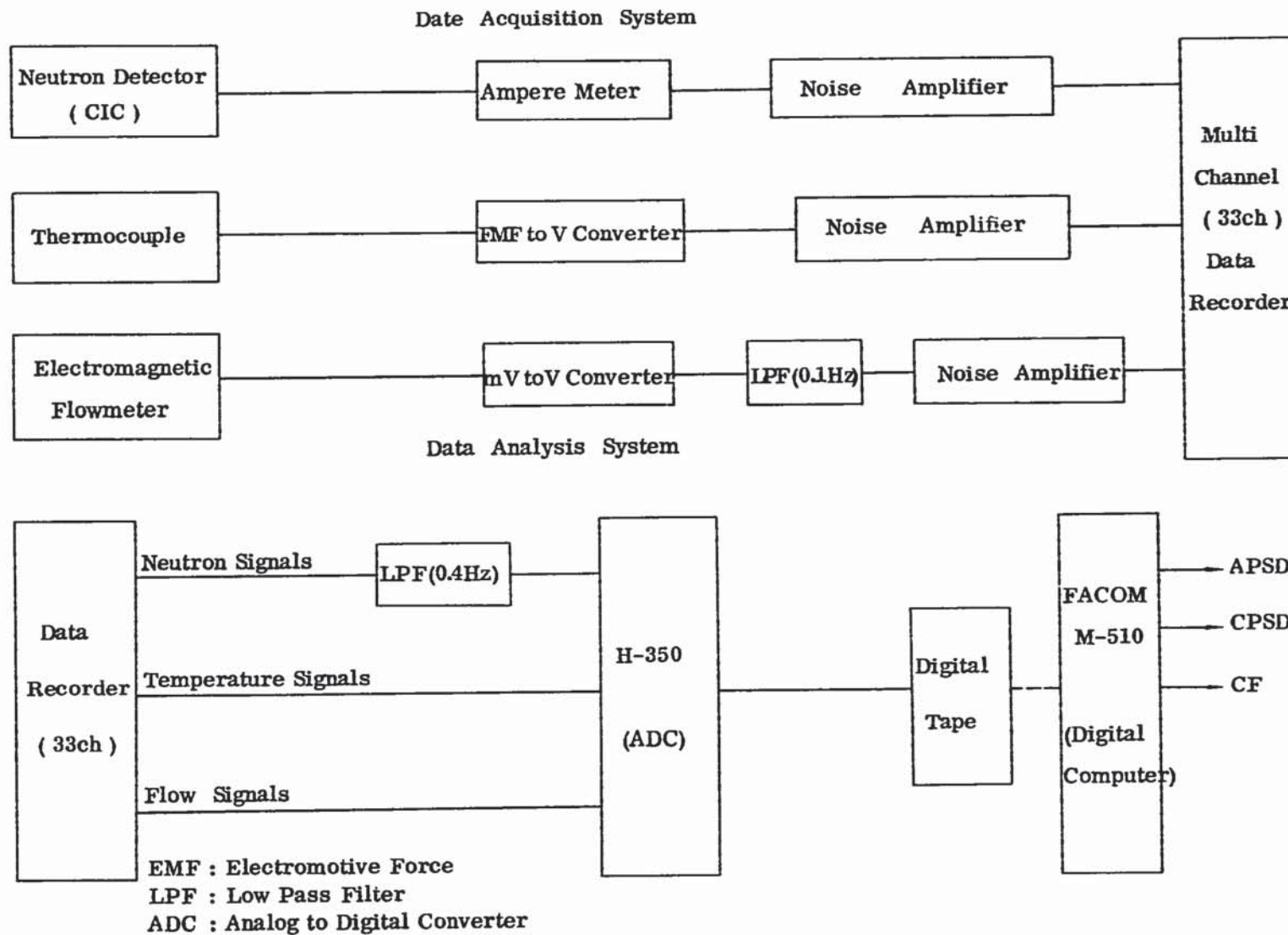


Fig. 3.2 Data Acquisition and Analysis System

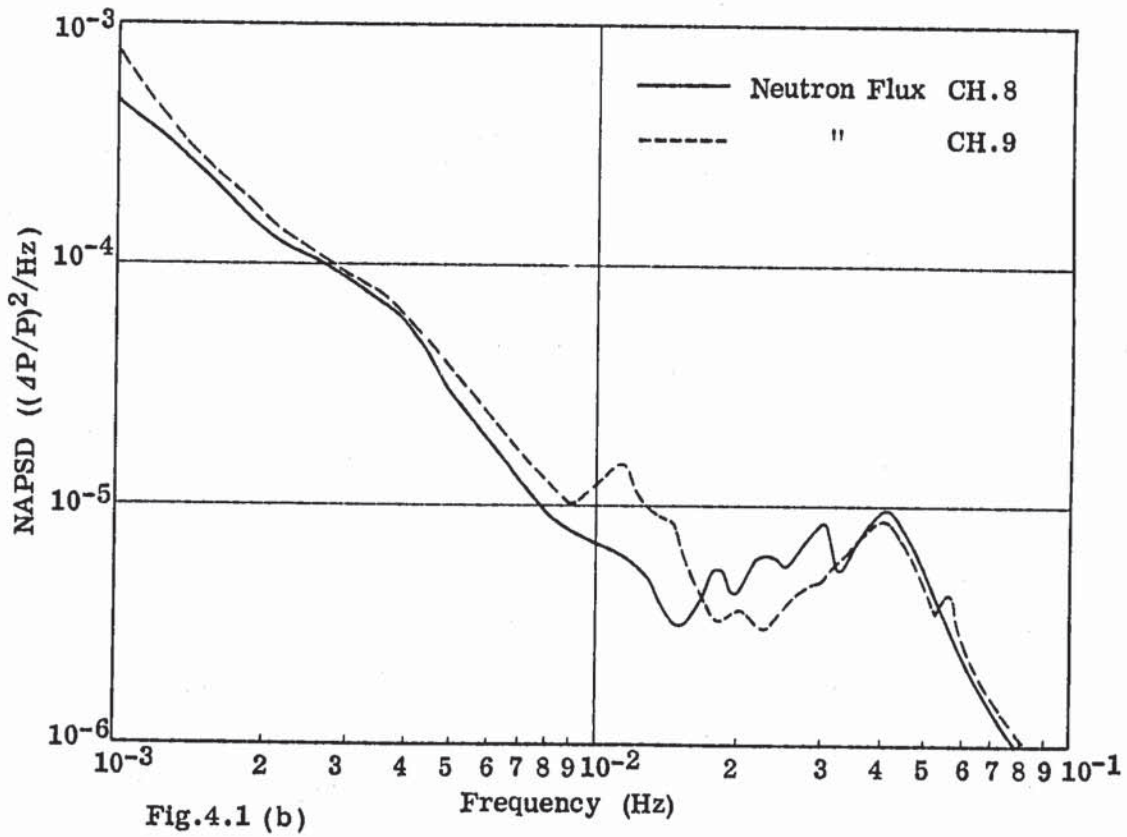
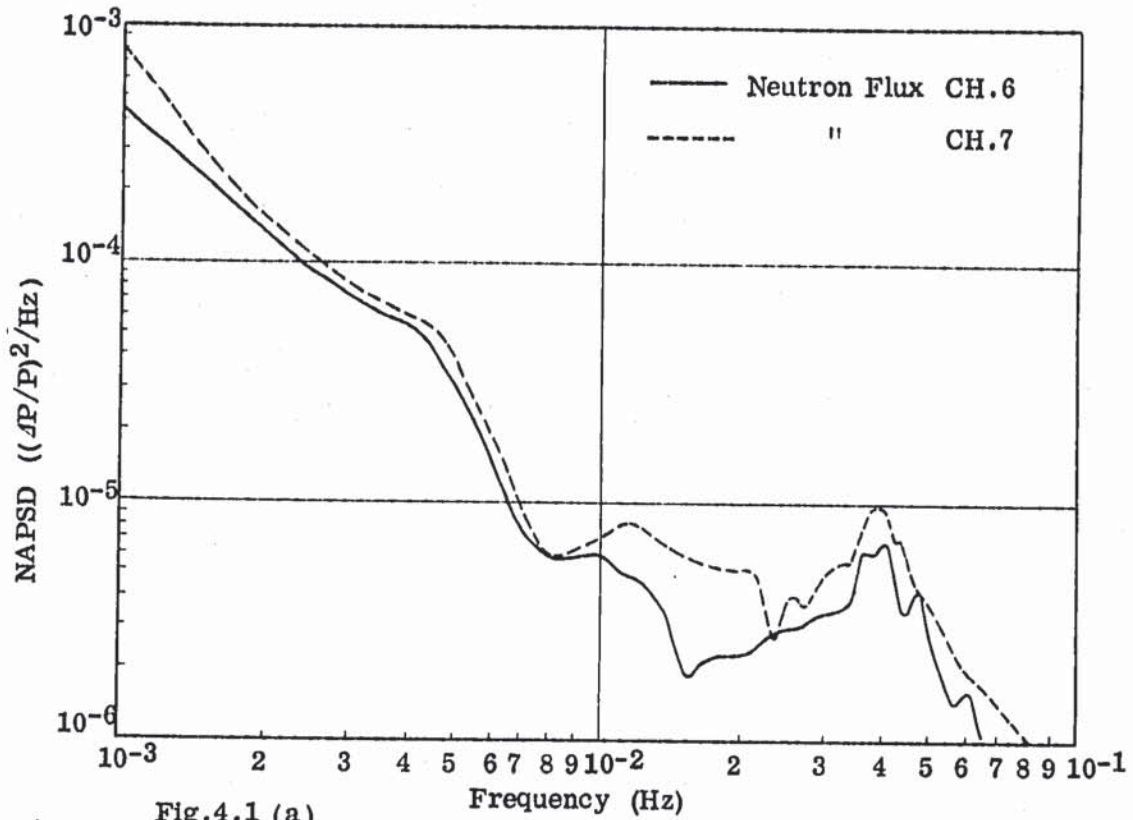


Fig. 4.1 APSDs of Neutron Flux Signals CH.6, 7, 8 and 9 of 75MW Power Level (Case 75-B-1, Aug. 22, 1979)

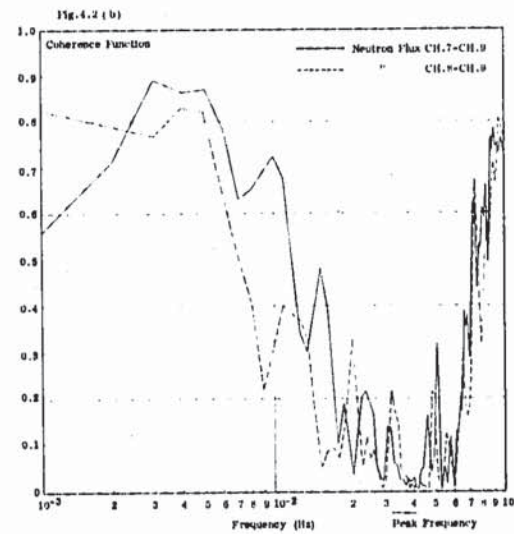
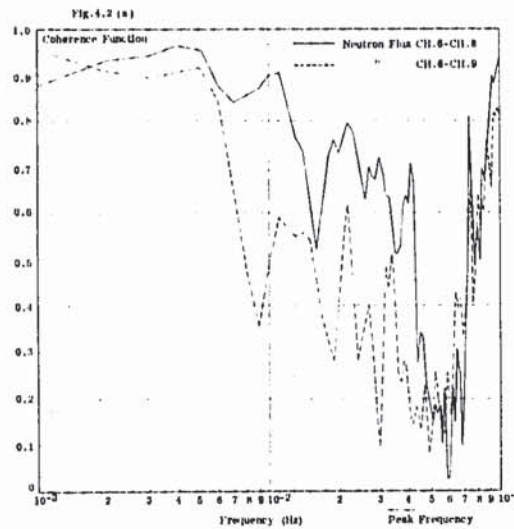
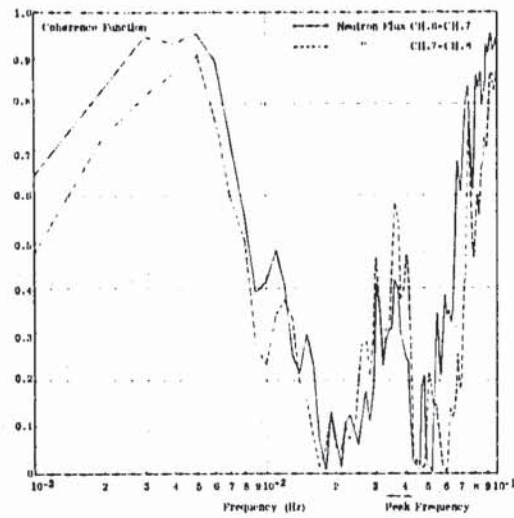


Fig.4.2 Coherence Functions of Neutron Fluxes CH.6-CH.7, CH.7-CH.8, CH.6-CH.8, CH.6-CH.9, CH.7-CH.9, and CH.8-CH.9 of 75MW Power Level (Case 75-B-1, Aug.22, 1979)

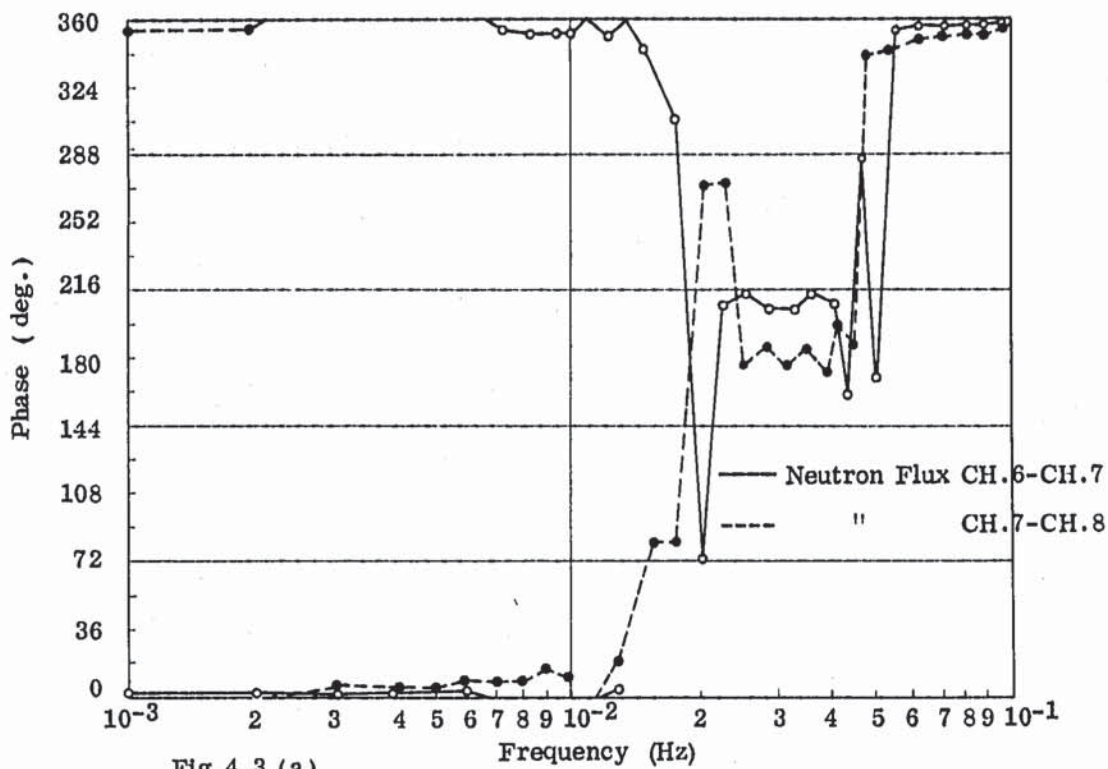


Fig.4.3 (a)

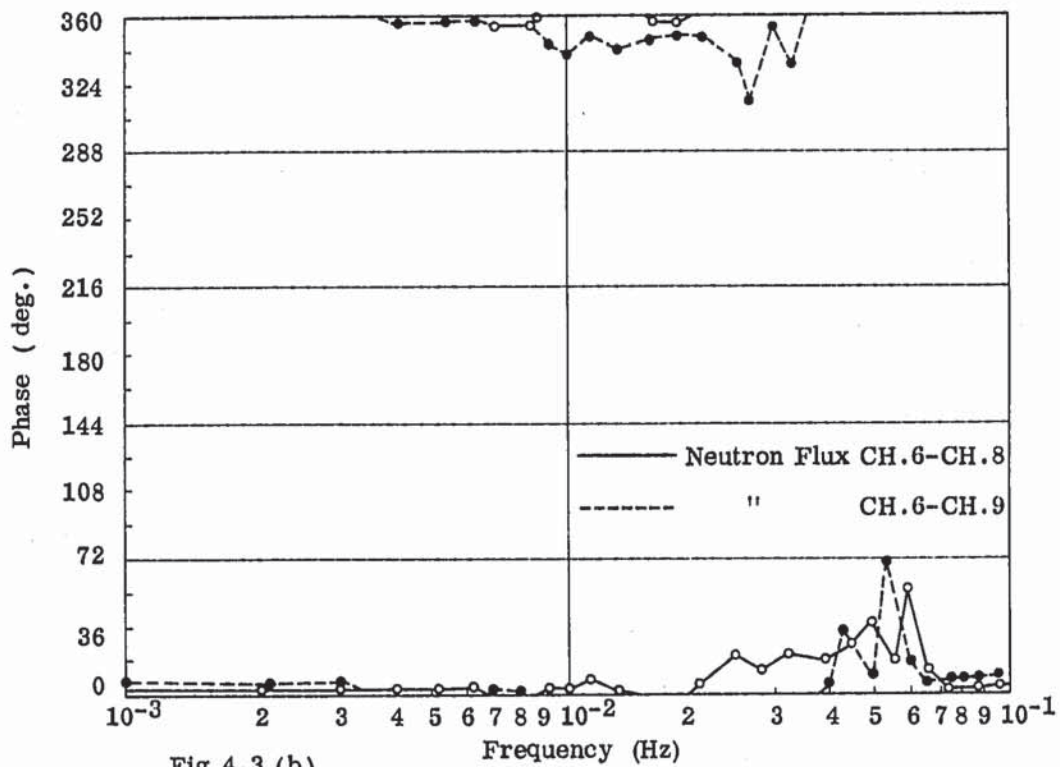


Fig.4.3 (b)

Fig.4.3 Phases of Neutron Fluxes CH.6-CH.7, CH.7-CH.8, CH.6-CH.8 and CH.6-CH.9 of 75MW Power Level (Case 75-B-1, Aug.22, 1979)

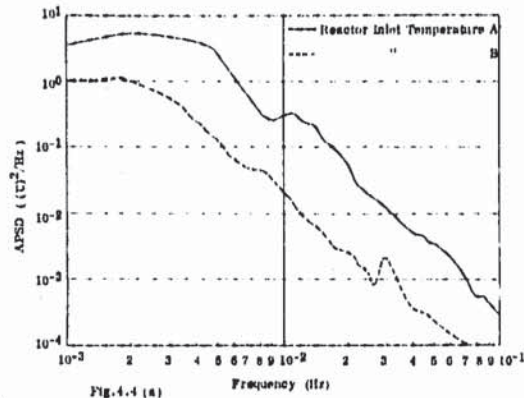


Fig. 4.4 (a)

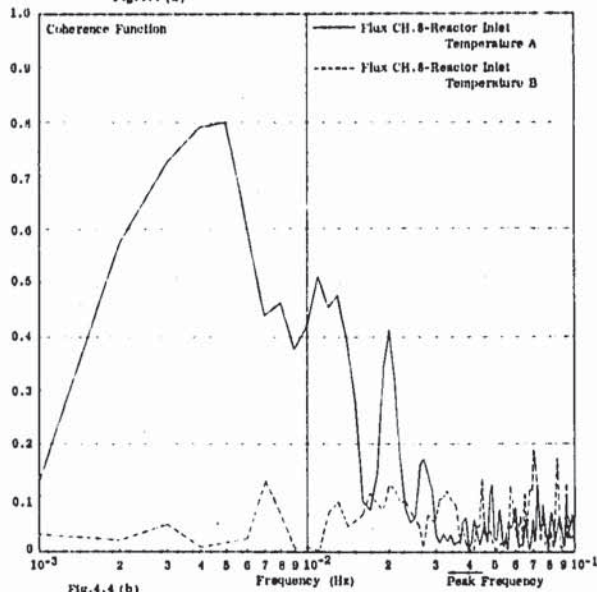


Fig. 4.4 (b)

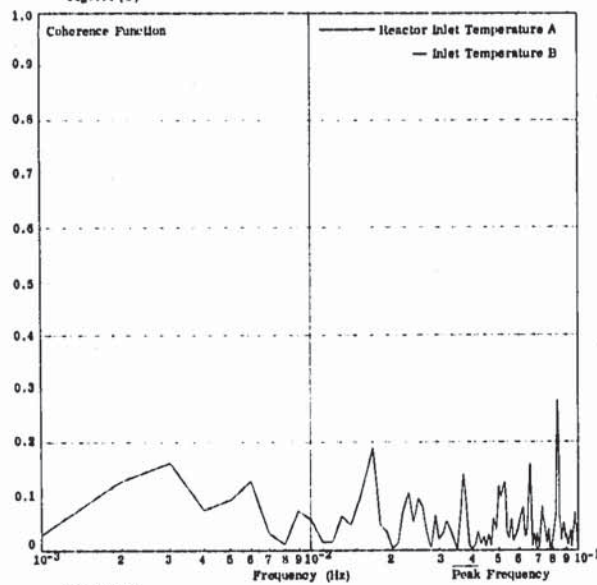


Fig. 4.4 (c)

Fig. 4.4 APSDs of Reactor Inlet Temperature A, B (4.4(a)), Coherence Functions of Neutron Flux CH.8-Reactor Inlet Temperature A, B (4.4(b)) Coherence Function of Reactor Inlet Temperature A-B(4.4(c)) of 75MW Power Level. (Case 75-B-1, Aug. 22, 1979)

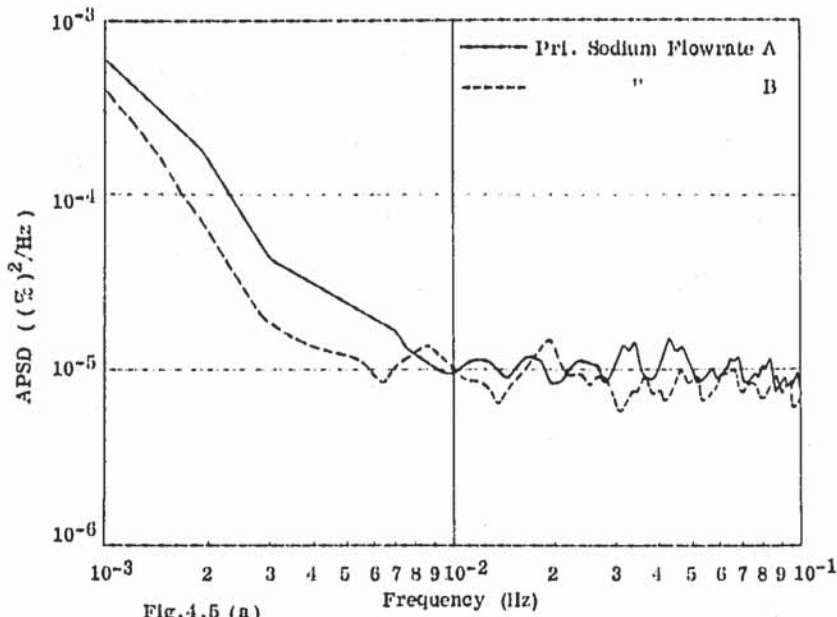


Fig.4.5 (a)

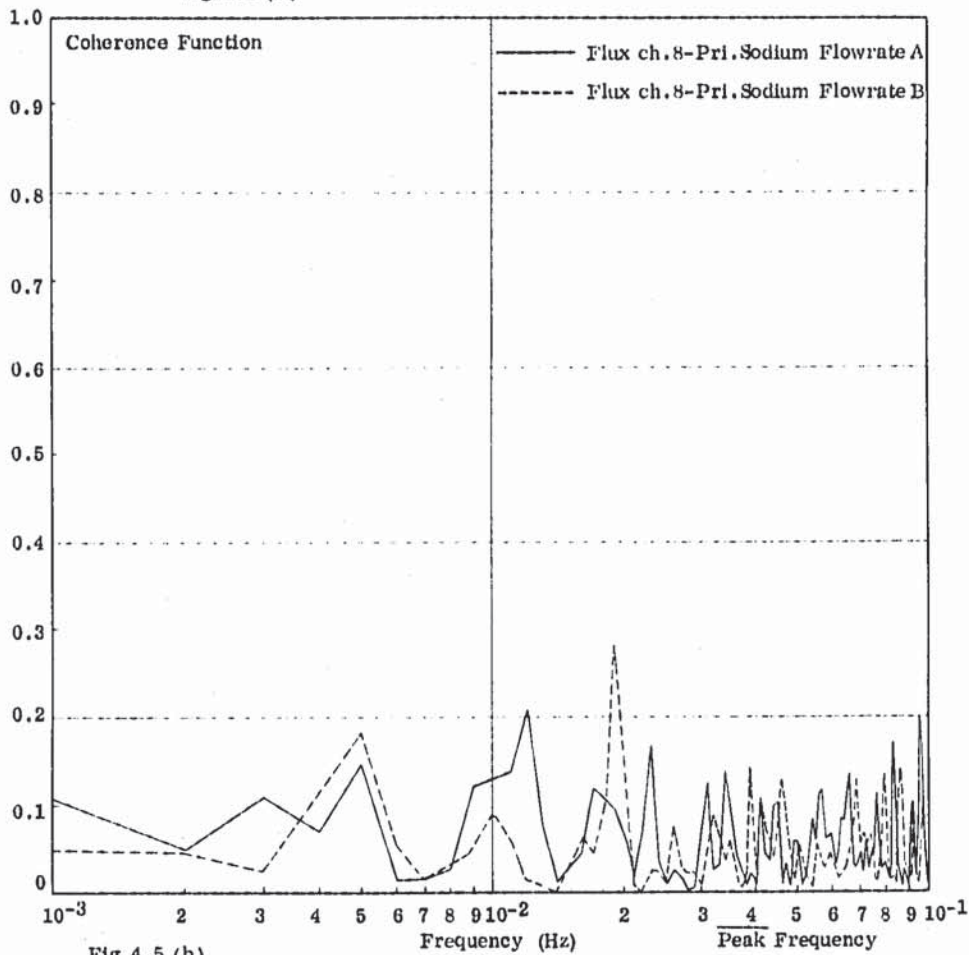


Fig.4.5 (b)

Fig.4.5 APSDs of Primary Sodium Flowrate A, B (4.5(a)), Coherence Functions of Neutron Flux CH.8-Primary Sodium Flowrate A, B (4.5(b)) of 75MW Power Level. (Case 75-B-1, Aug.22, 1979)

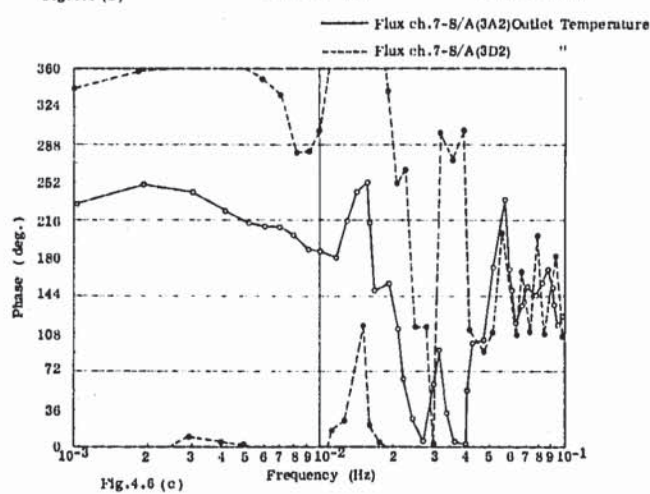
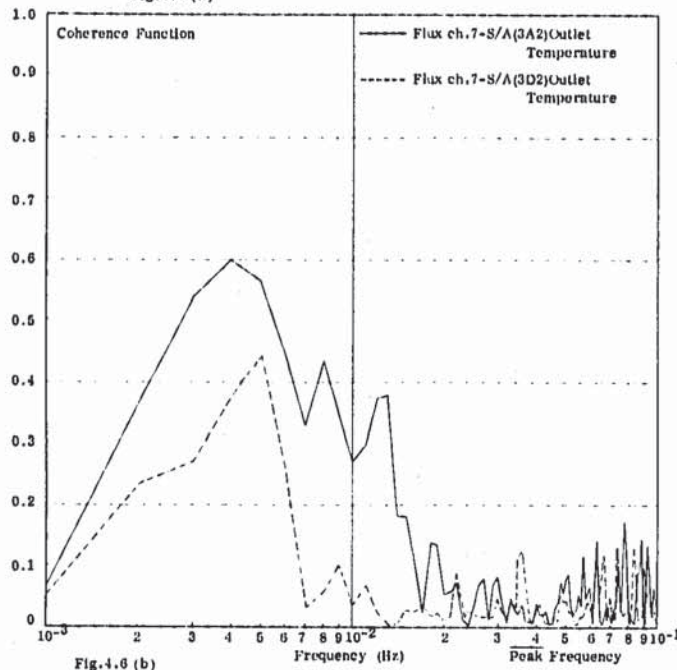
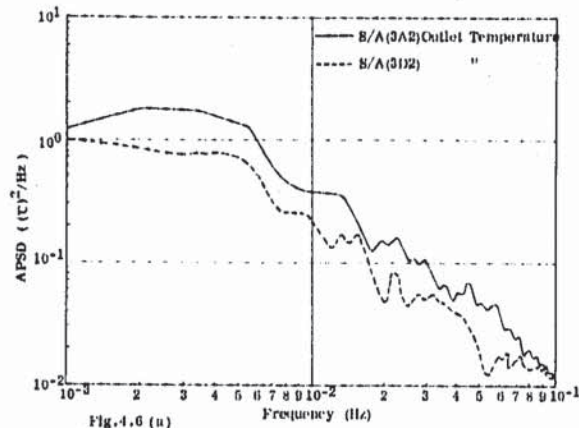


Fig.4.6 APSDs of S/A Outlet Temperature 3A2, 3D2(4.6(a)), Coherence Functions of Neutron Flux (CH.7)-Temperature 3A2, 3D2(4.6(b)), Phases of Neutron Flux (CH.7)-Temperature 3A2, 3D2 (4.6(c)), of 75MW Power Level. (Case 75-B-1, Aug.22, 1979)

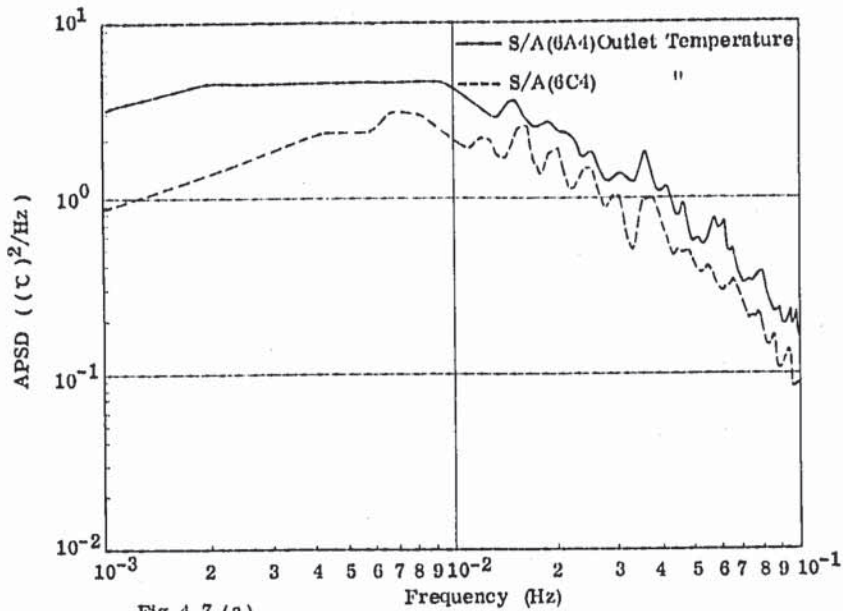


Fig.4.7 (a)

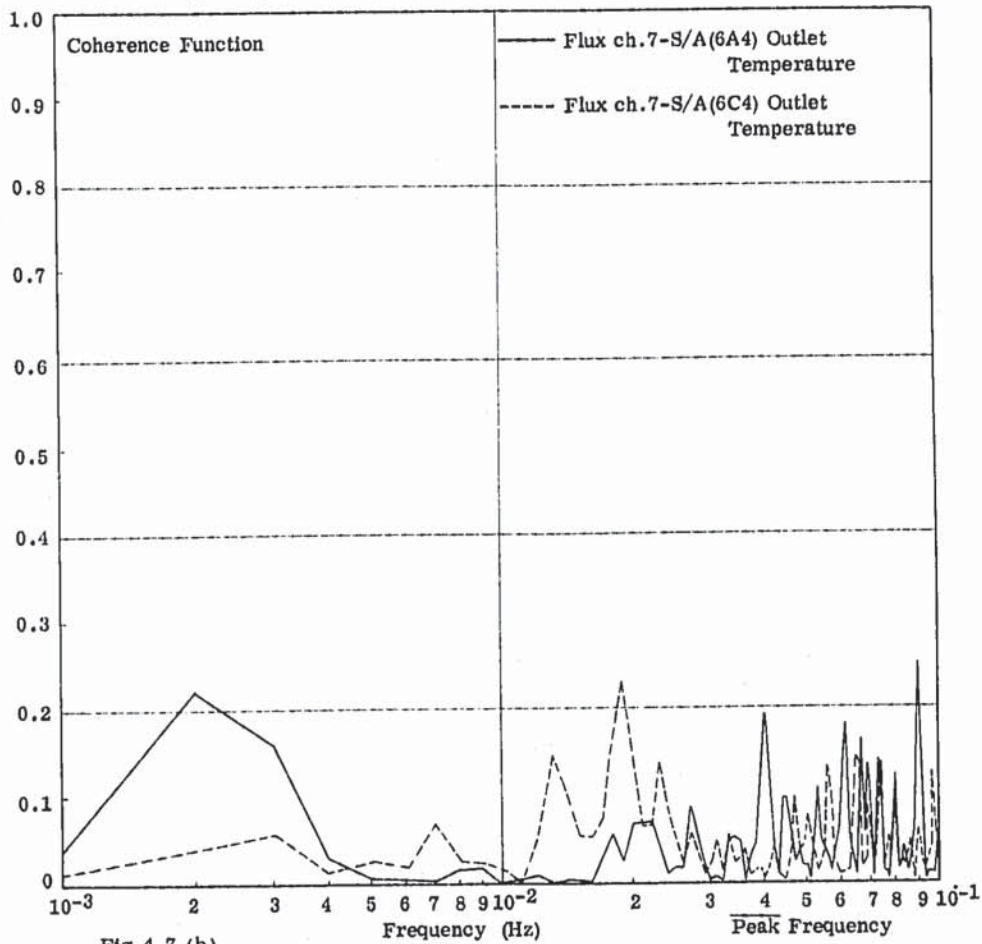


Fig.4.7 (b)

Fig.4.7 APSDs of S/A Outlet Temperature 6A4, 6C4(4.7(a)), Coherence Functions of Neutron Flux(CH.7)-Temperature 6A4, 6C4(4.7(b)) of 75MW Power Level. (Case 75-B-1, Aug.22, 1979)

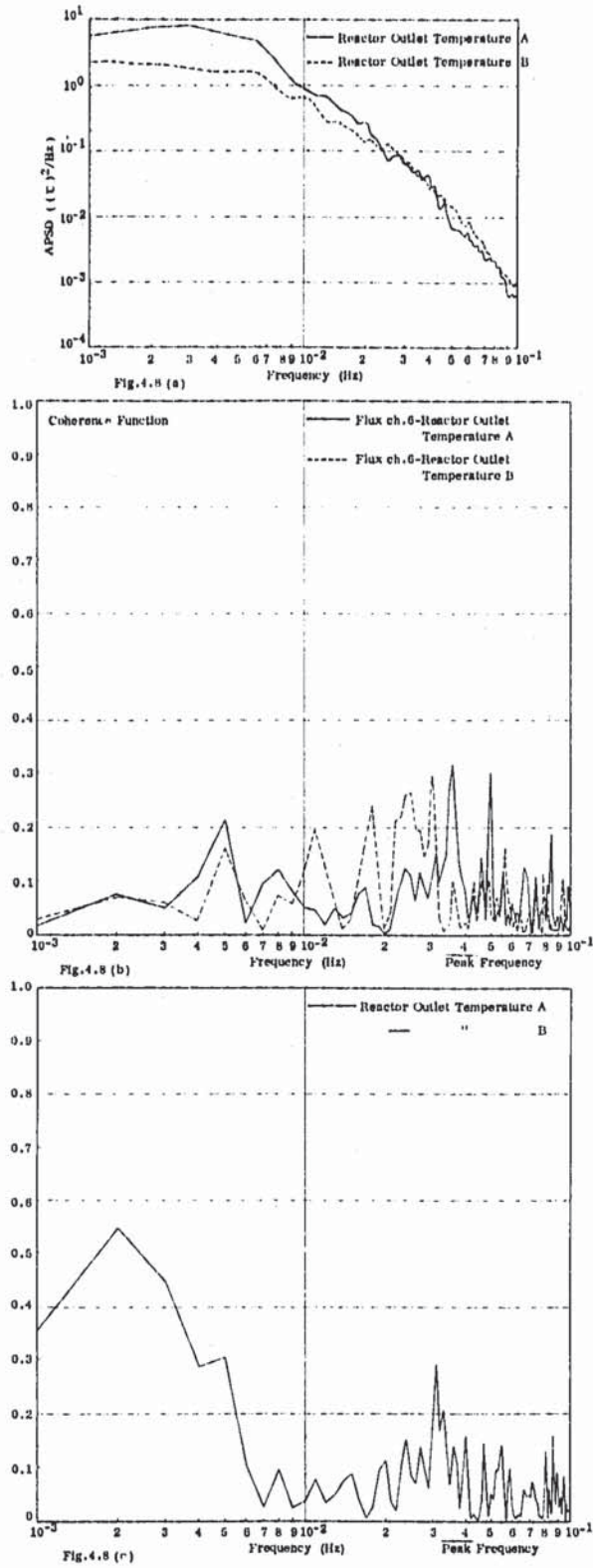


Fig. 4.8 APSDs of Reactor Outlet Temperature A, B (4.8(a)), Coherence Functions of Neutron Flux CH.6-Reactor Outlet Temperature A, B (4.8(b)), Coherence Function of Reactor Outlet Temperature A-B (4.8(c)), of 75MW Power Level. (Case 75-B-1, Aug. 22, 1979)

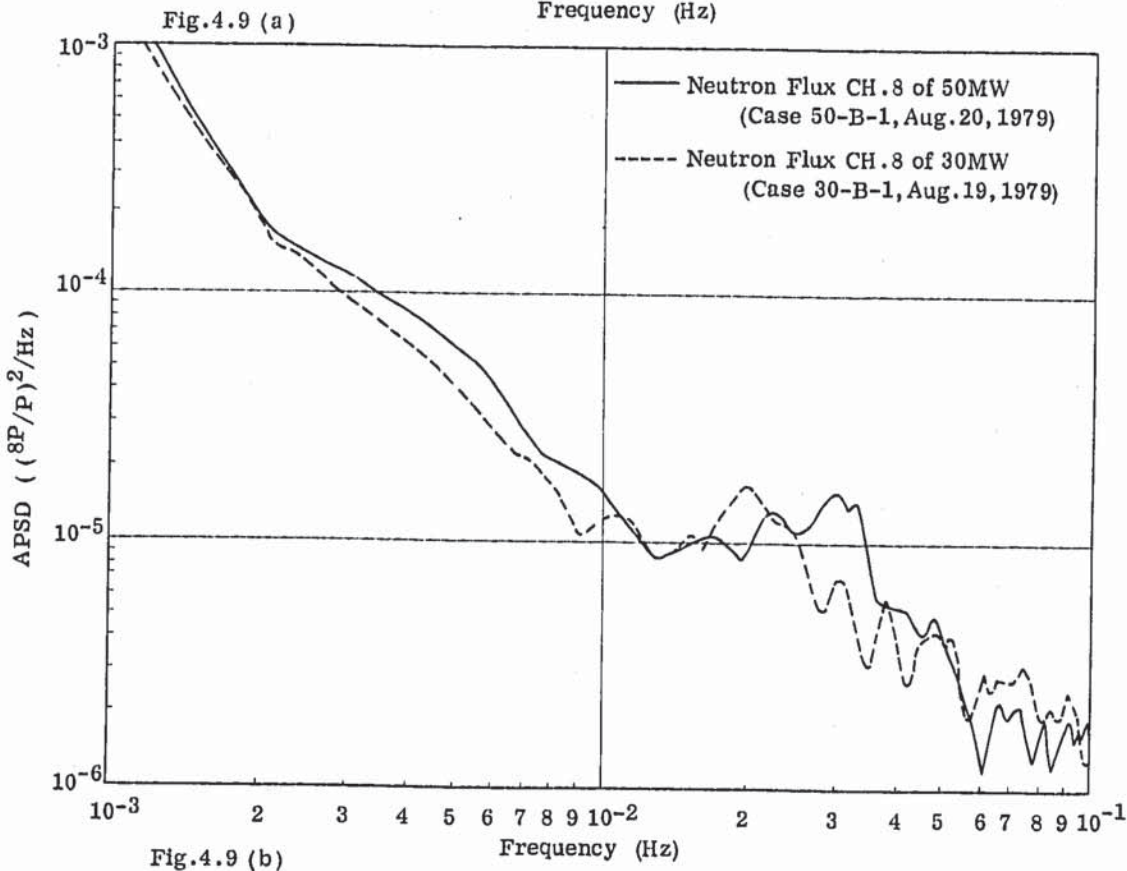
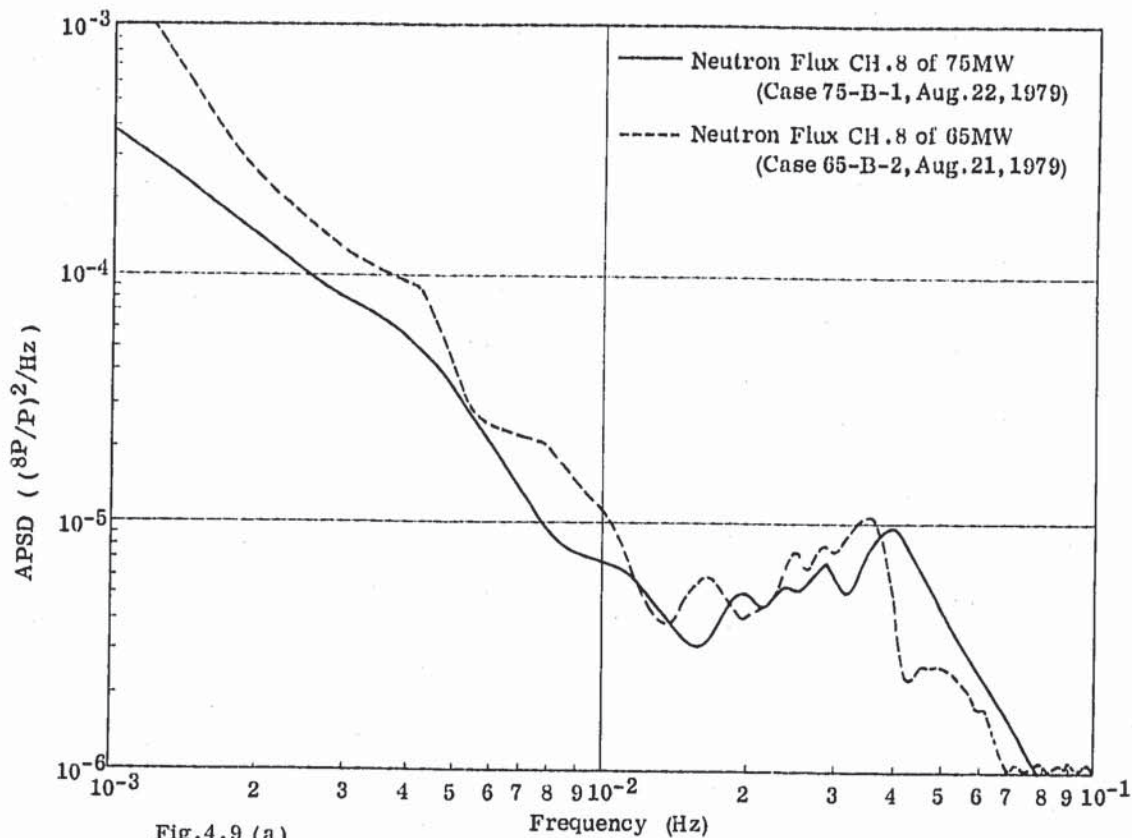


Fig.4.9 APSDs of Neutron Flux CH.8 of 75MW, 65MW, 50MW and 30MW Power Level.

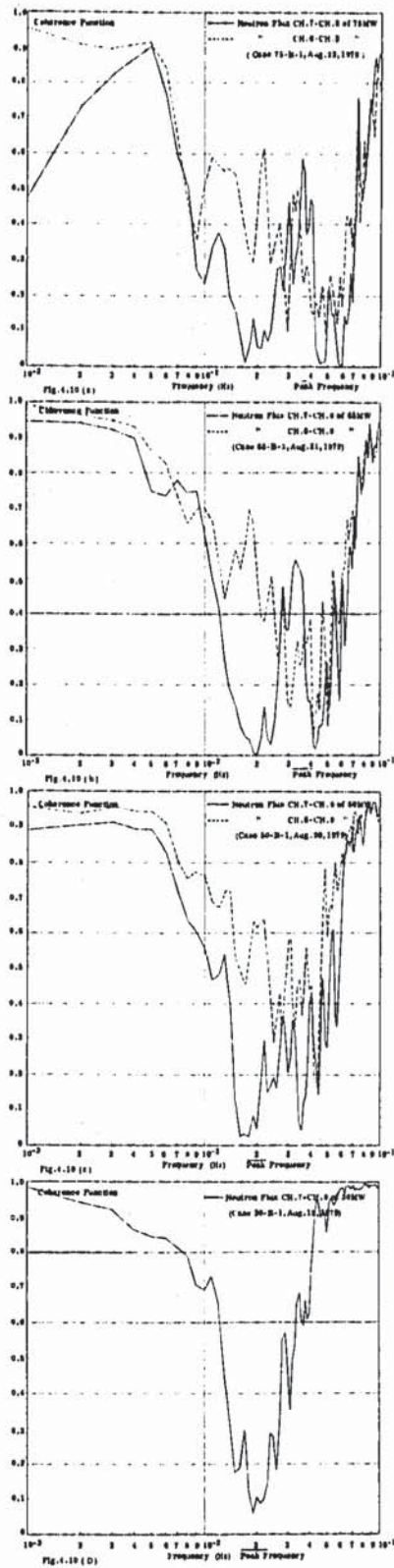


Fig.4.10 Coherence Functions of Neutron Fluxes CH.7-CH.8 and CH.6-CH.9 of 75MW(a), 65MW(b), 50MW(c) and 30MW(D) Power Level.

Table 5.1 Transfer Function (Gain) of Inlet Temperature-Flux and Power Coefficient

Power Level	Case	Transfer Function (Gain) (Inlet Temperature-Flux)	Power Coefficient* (Estimated from Transfer Function)	Power Coefficient (Measured)
50MW	50MW No.2 Cycle	about 0.12 MW/°C	$\times 10^{-3} \% \Delta k/k / MW$ 15.7	$\times 10^{-3} \% \Delta k/k / MW$ 8.8
	75MW Power Up Test	" 0.25 "	7.5 "	5.9
	75MW No.3 Cycle	" 0.19 "	9.9 "	6.2
75MW	75MW Power Up Test	" 0.20 "	9.4 "	8.9
	75MW No.3 Cycle	" 0.20 "	9.4 "	8.9

* Power Coefficient (Estimated) ($\% \Delta k/k / MW$)

= Inlet Temperature Coefficient ($\% \Delta k/k / ^\circ C$) / Transfer Function (MW/°C)

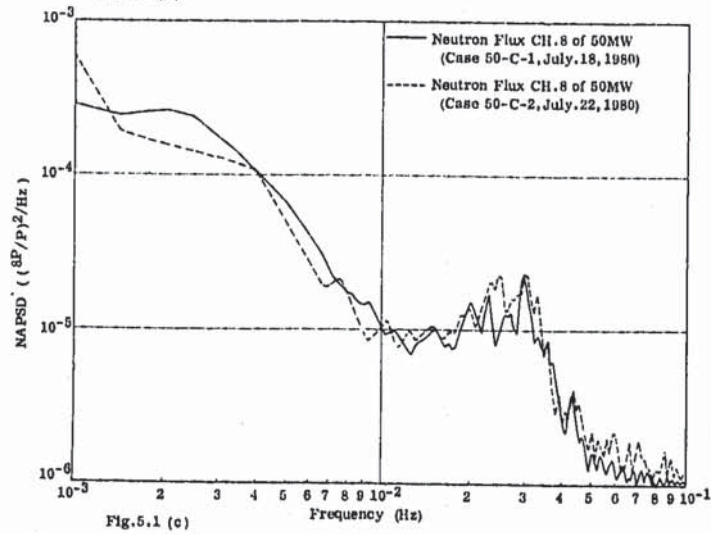
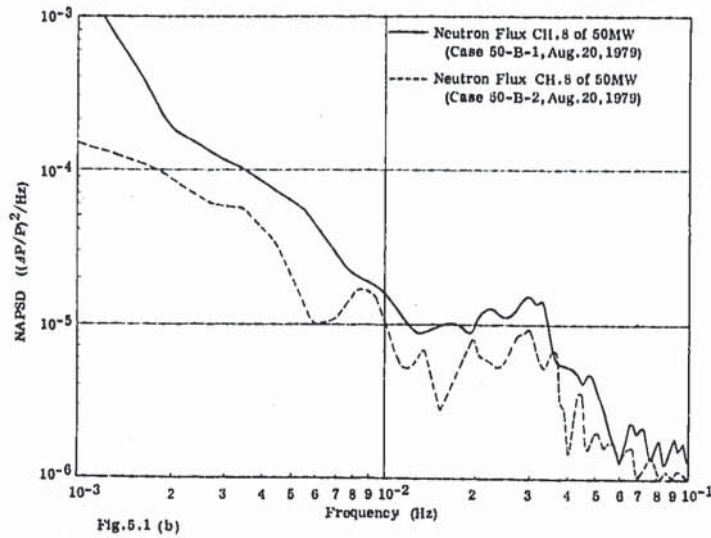
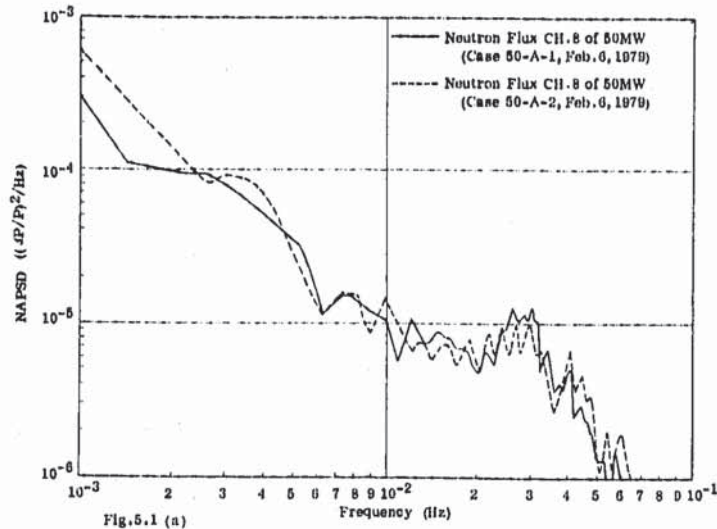


Fig. 5.1 APSDs of Neutron Flux CH.8 of 50MW Power Level when 50MW No.2 Cycle, 75MW Power Up Test and 75MW No.3 Cycle.

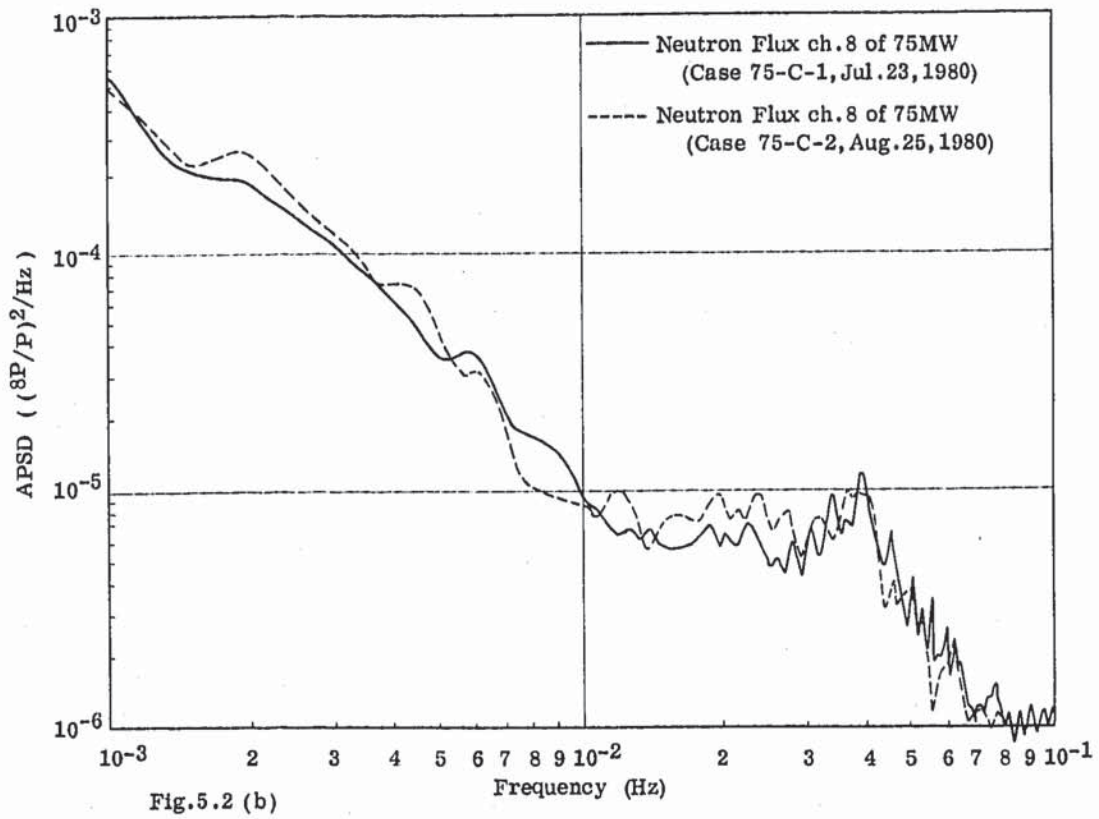
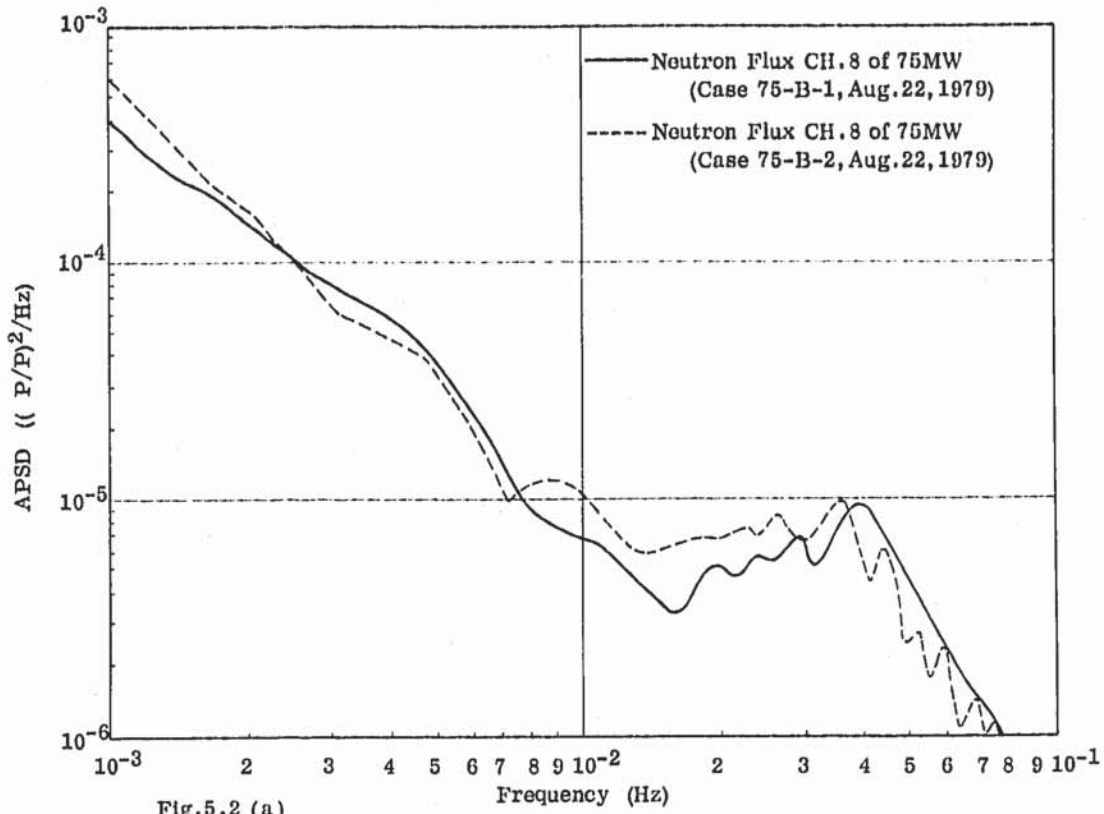


Fig.5.2 APSDs of Neutron Flux CH.8 of 75MW Power Level when 75MW Power Up Test and 75MW No.3 Cycle.

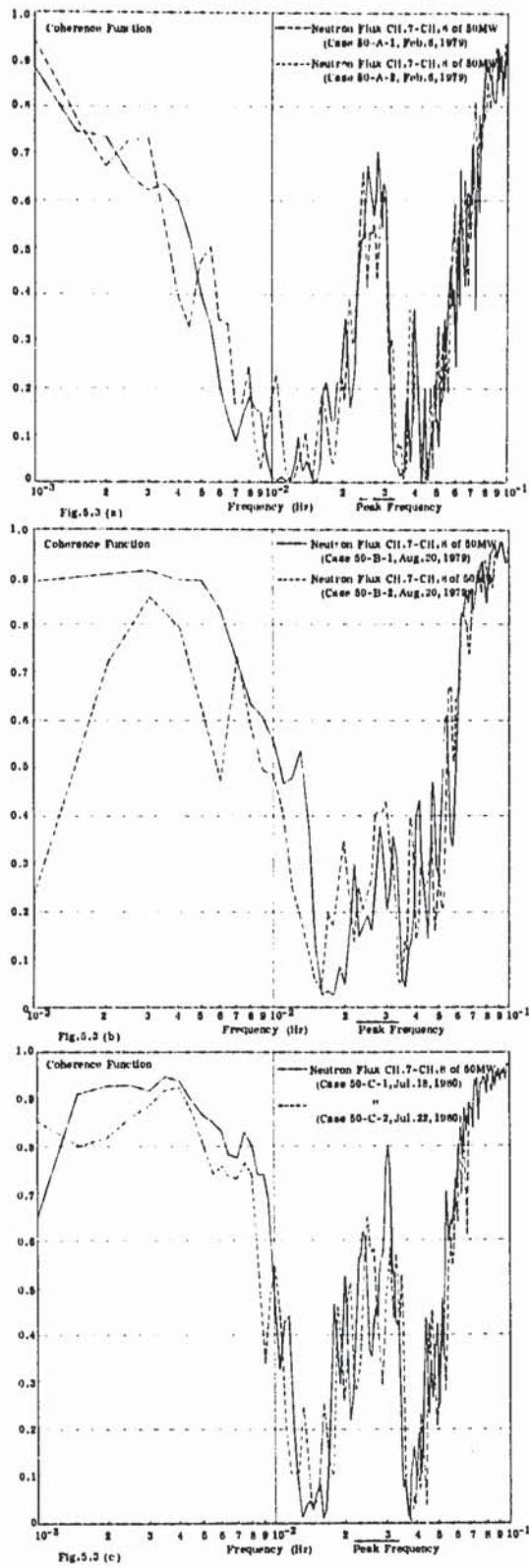


Fig. 5.3 Coherence Functions of Neutron Fluxes CH.7-CH.8 of 50MW when 50MW No.2 Cycle, 75MW Power Up Test and 75MW No.3 Cycle.

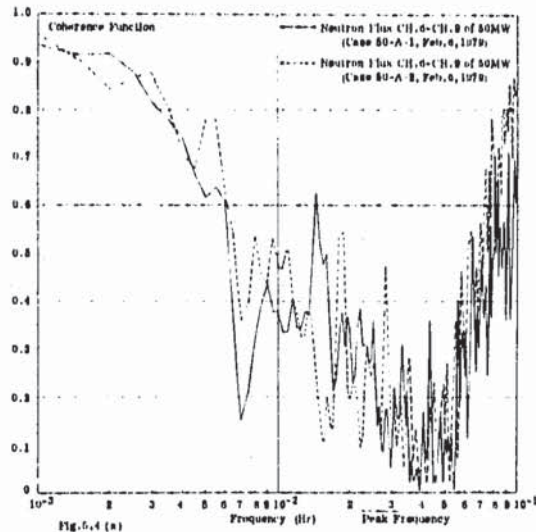


Fig. 5.4 (a)

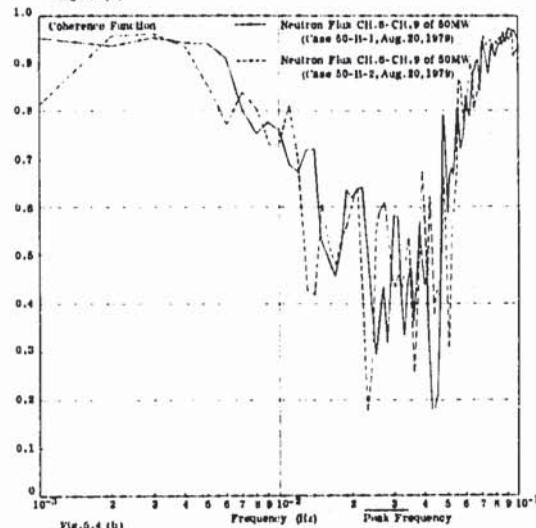


Fig. 5.4 (b)

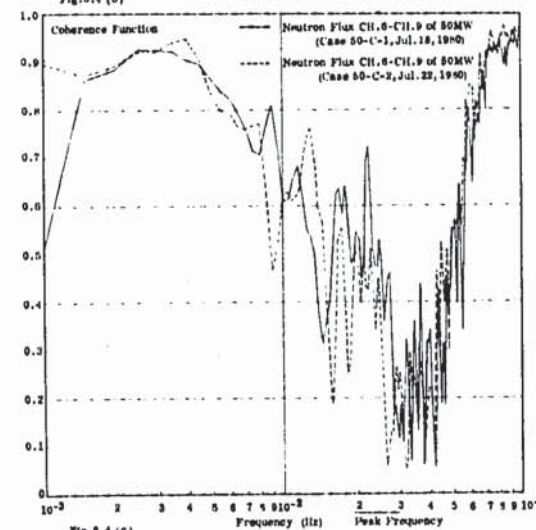


Fig. 5.4 (c)

Fig. 5.4 Coherence Functions of Neutron Fluxes CH.6-CH.9 of 50MW when 50MW No.2 Cycle, 75MW Power Up Test and 75MW No.3 Cycle.

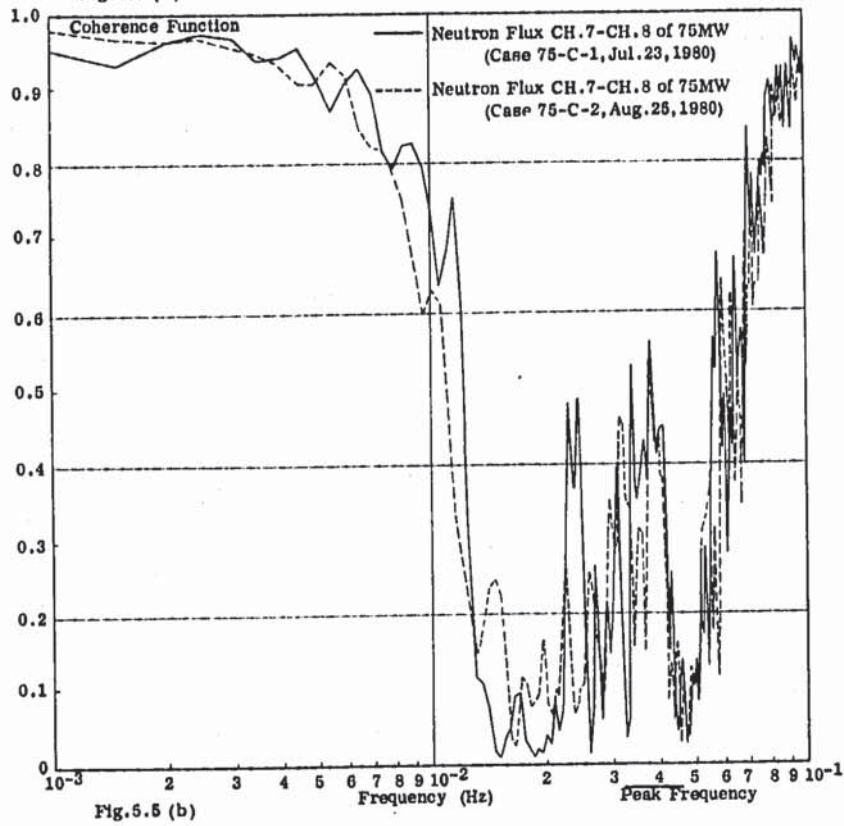
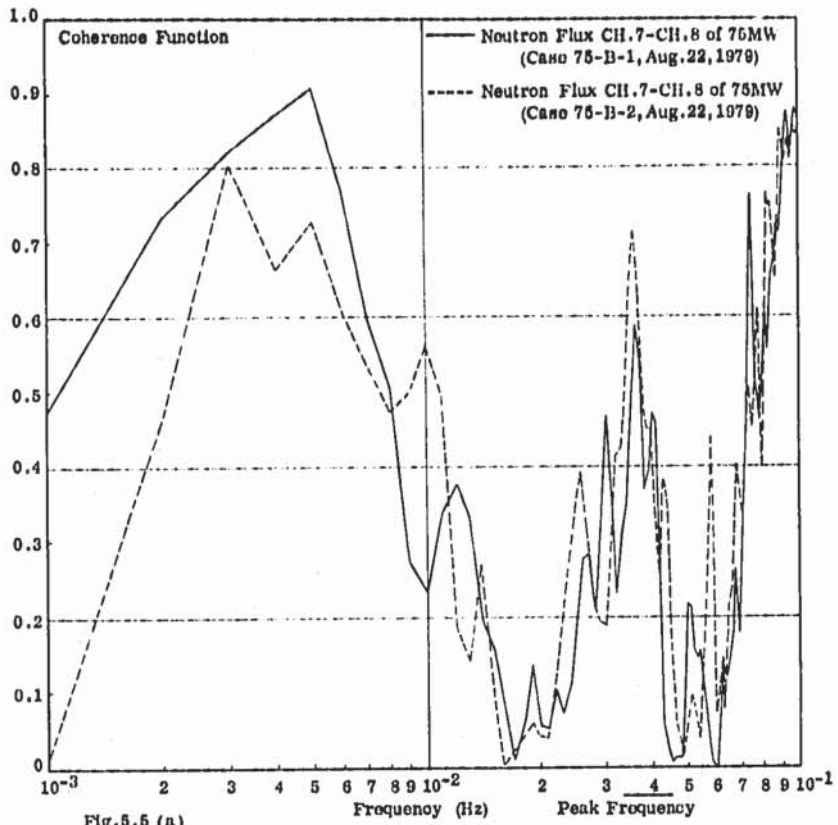


Fig.5.5 Coherence Functions of Neutron Fluxes CH.7-CH.8 of 75MW when 75MW Power Up Test and 75MW No.3 Cycle.

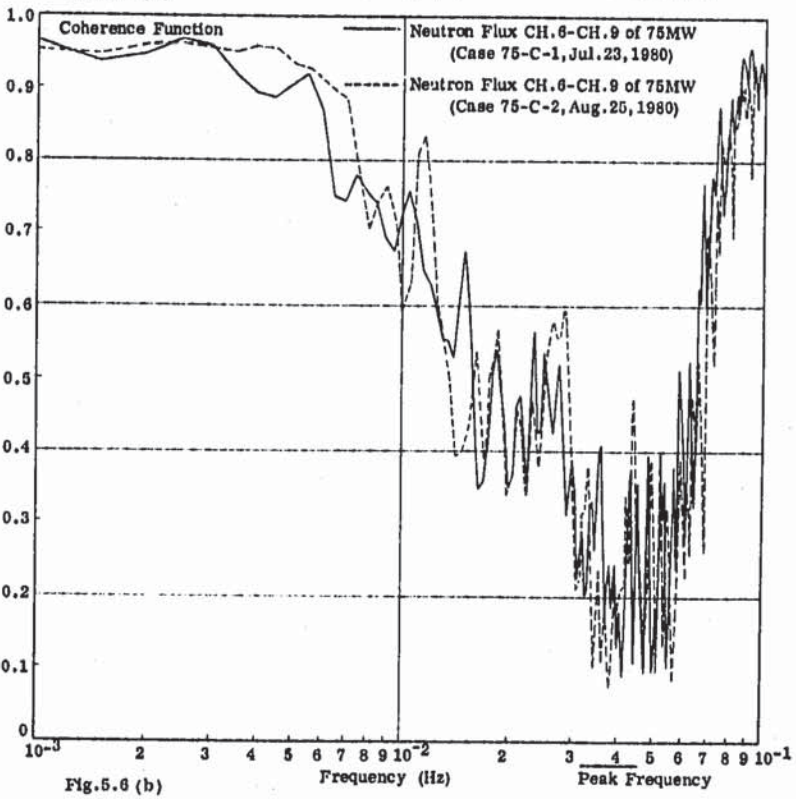
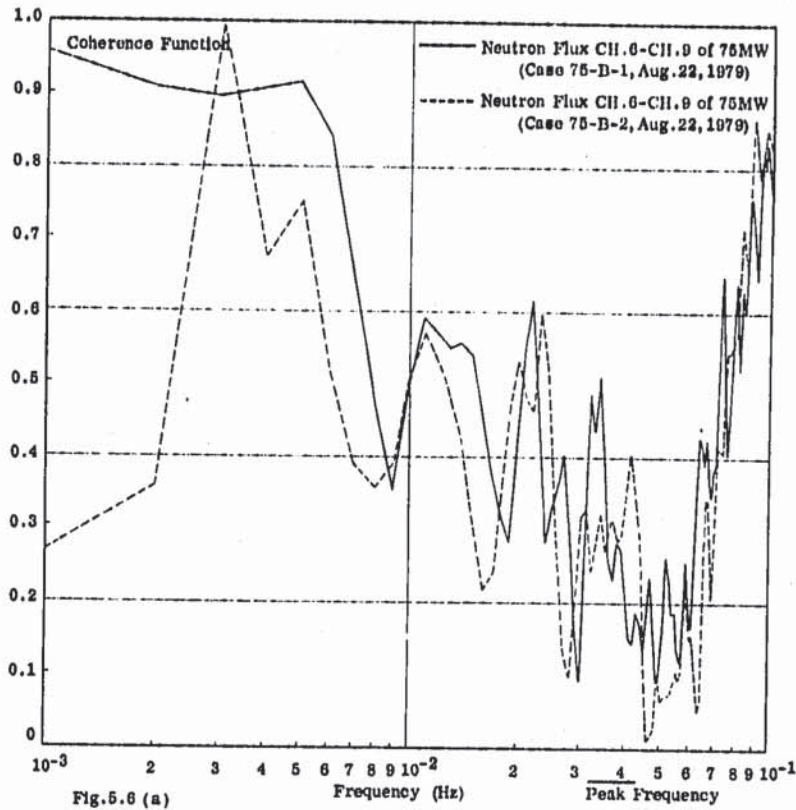


Fig. 5.6 Coherence Functions of Neutron Fluxes CH.6-CH.9 of 75MW when 75MW Power Up Test and 75MW No.3 Cycle.

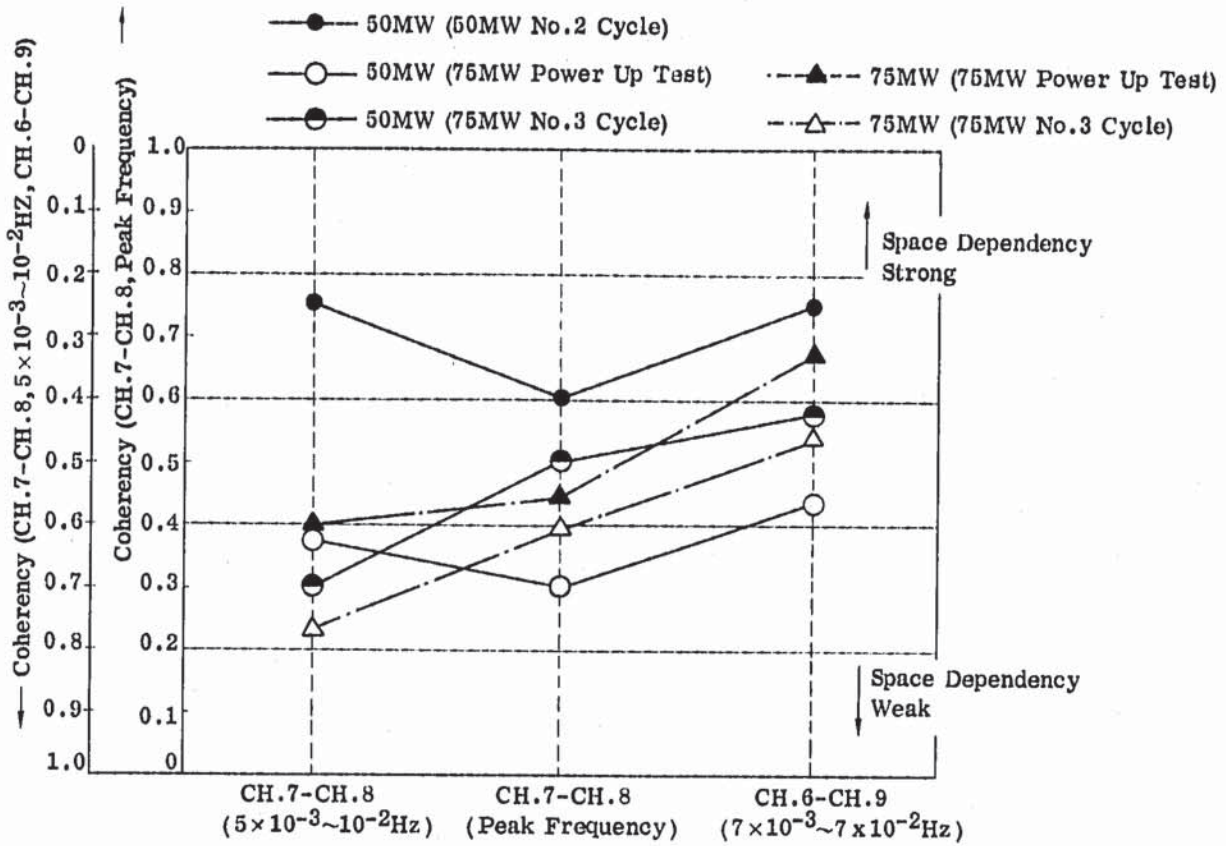


Fig. 5.7 Coherencies of Neutron Fluxes CH.7-CH.8 and CH.6-CH.9 of 50MW and 75MW Summarized for Space Dependency

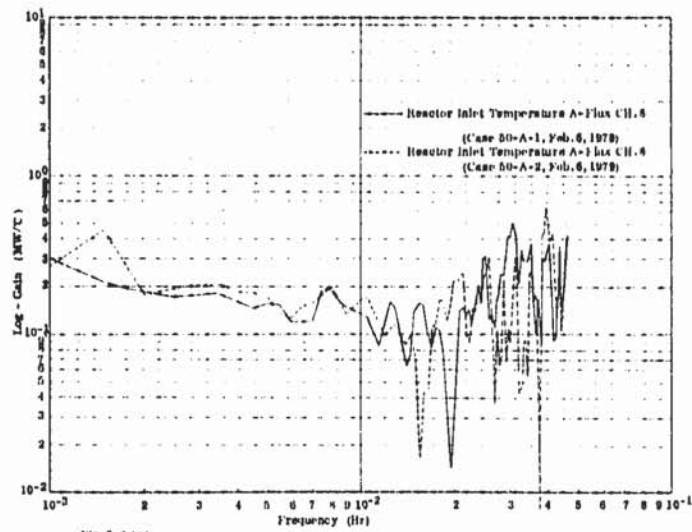


Fig. 5.8 (a)

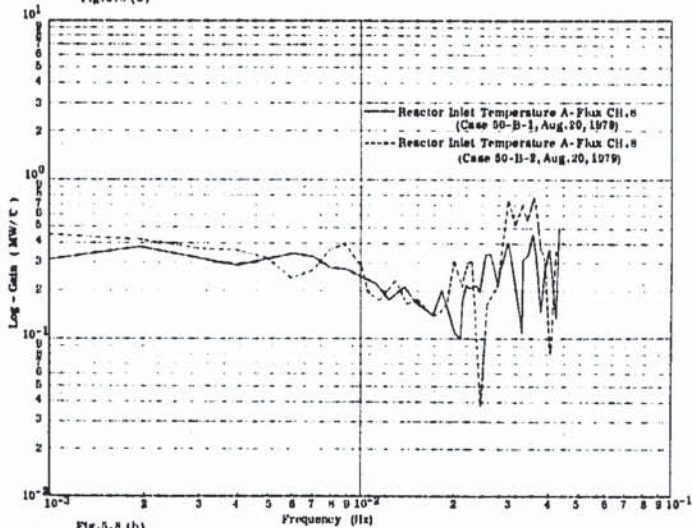


Fig. 5.8 (b)

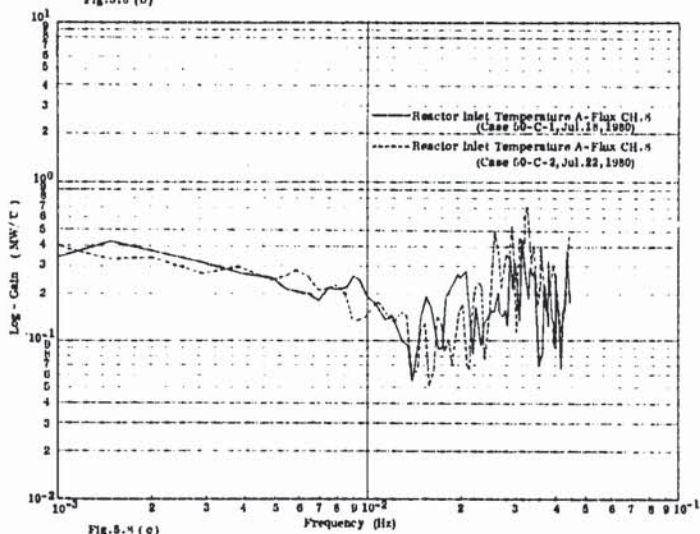


Fig. 5.8 (c)

Fig. 5.8 Transfer Functions (Gain) of Reactor Inlet Temperature A-Neutron Flux (CH.8) of 50MW when 50MW No.2 Cycle, 75MW Power Up Test and 75MW No.3 Cycle.

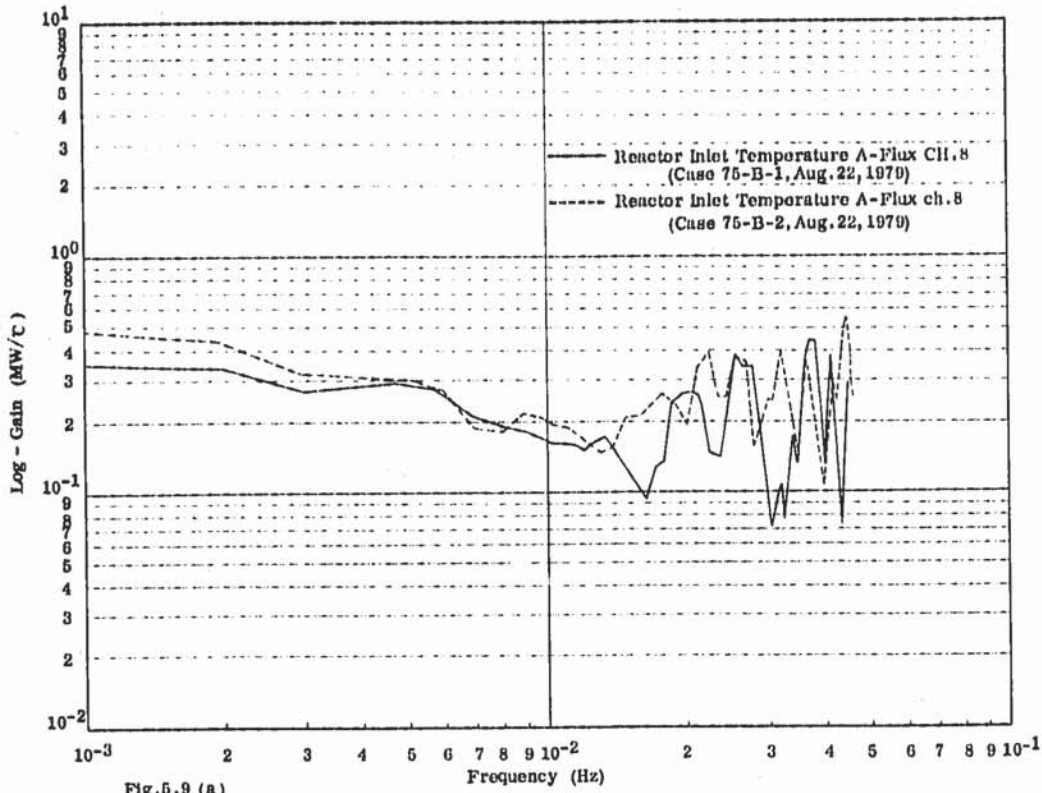


Fig. 5.9 (a)

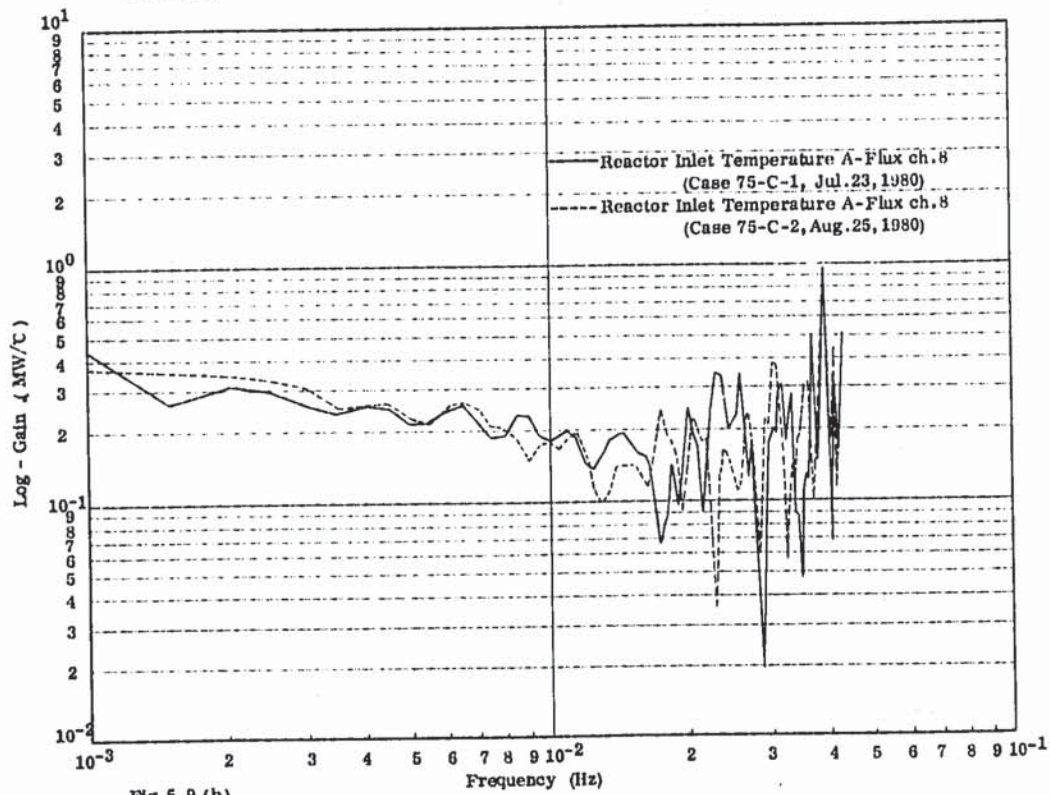


Fig. 5.9 (b)

Fig. 5.9 Transfer Functions (Gain) of Reactor Inlet Temperature A-Neutron Flux (CH.8) of 75MW when 75MW Power Up Test and 75MW No.3 Cycle.

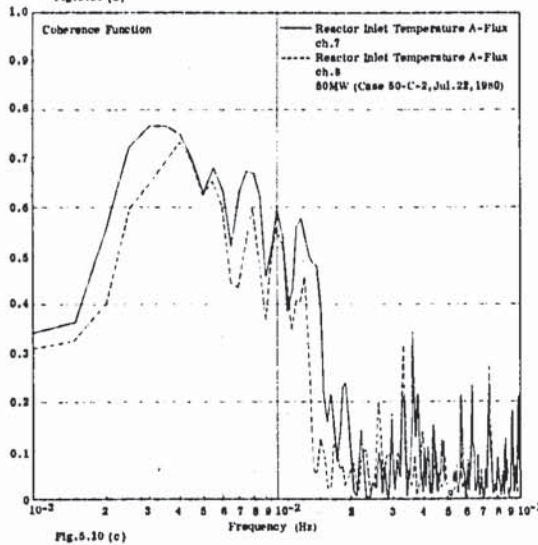
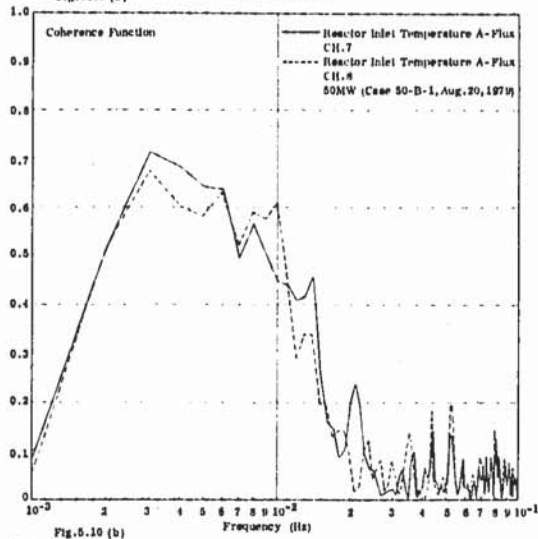
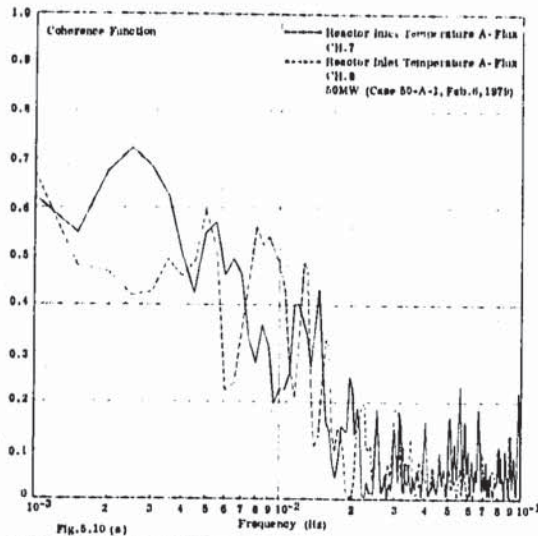


Fig. 5.10 Coherence Functions of Reactor Inlet Temperature A-Neutron Flux CH.7, CH.8 of 50MW when 50MW No.2 Cycle, 75MW Power Up Test and 75MW No.3 Cycle.

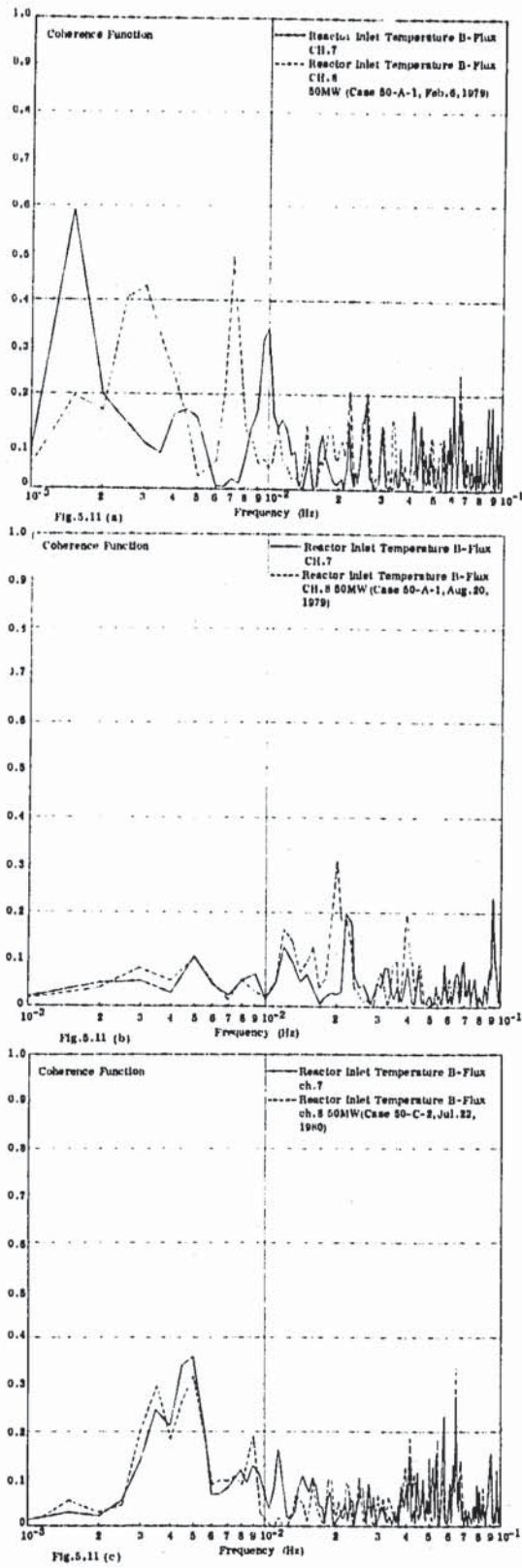


Fig. 5.11 Coherence Functions of Reactor Inlet Temperature B-Neutron Flux CH.7, CH.8 of 50MW when 50MW No.2 Cycle, 75MW Power Up Test, and 75MW No.3 Cycle.

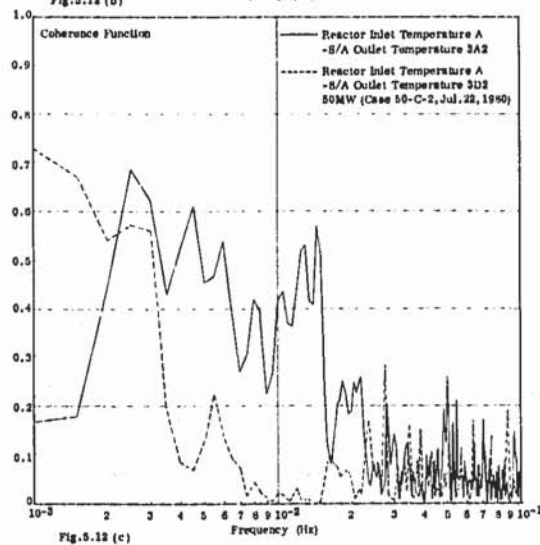
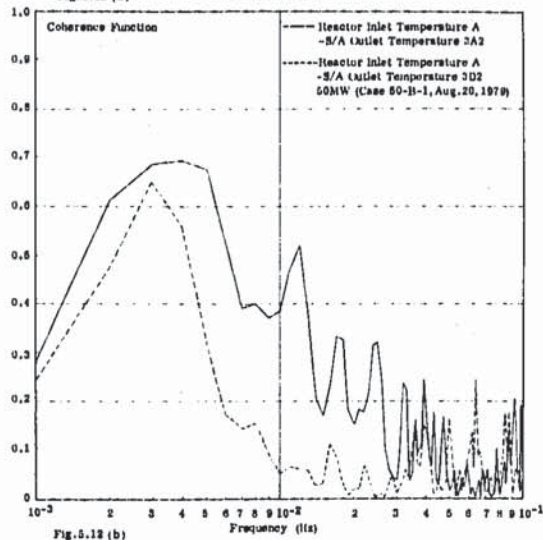
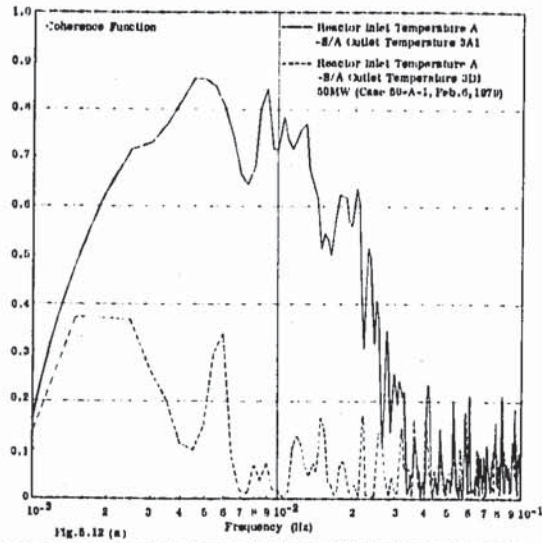


Fig. 5.12 Coherence Functions of Reactor Inlet Temperature A-S/A Outlet Temperature 3A1 (3A2), 3D1 (3D2) of 50MW when 50MW No.2 Cycle, 75MW Power Up Test and 75MW No.3 Cycle.

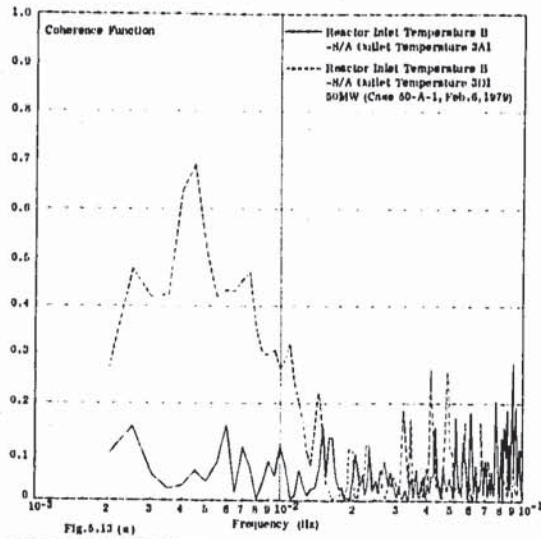


Fig. 5.13 (a)

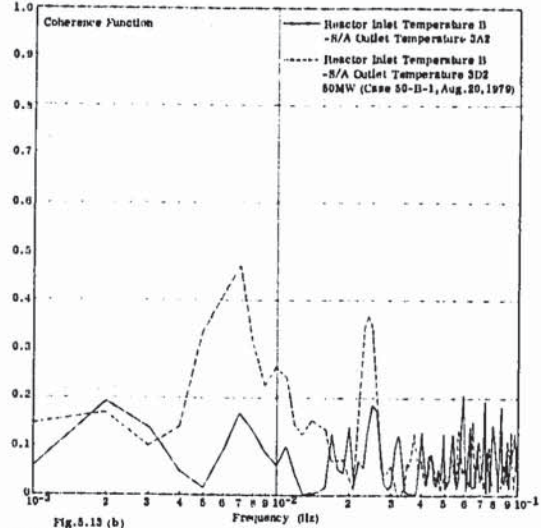


Fig. 5.13 (b)

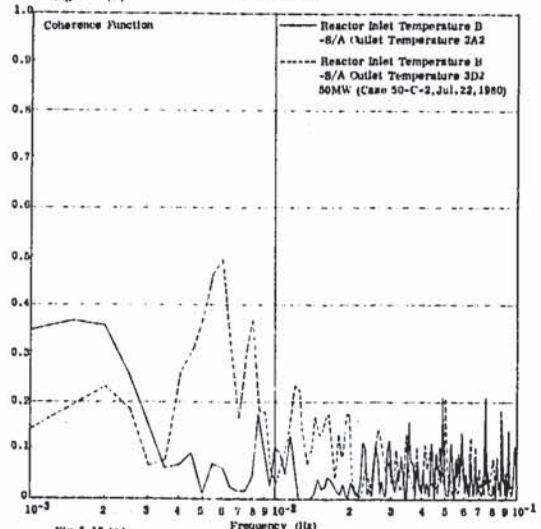


Fig. 5.13 (c)

Fig. 5.13 Coherence Functions of Reactor Inlet Temperature B-S/A Outlet Temperature 3A1 (3A2), 3D1 (3D2) of 50MW when 50MW No.2 Cycle, 75MW Power Up Test and 75MW No.3 Cycle.

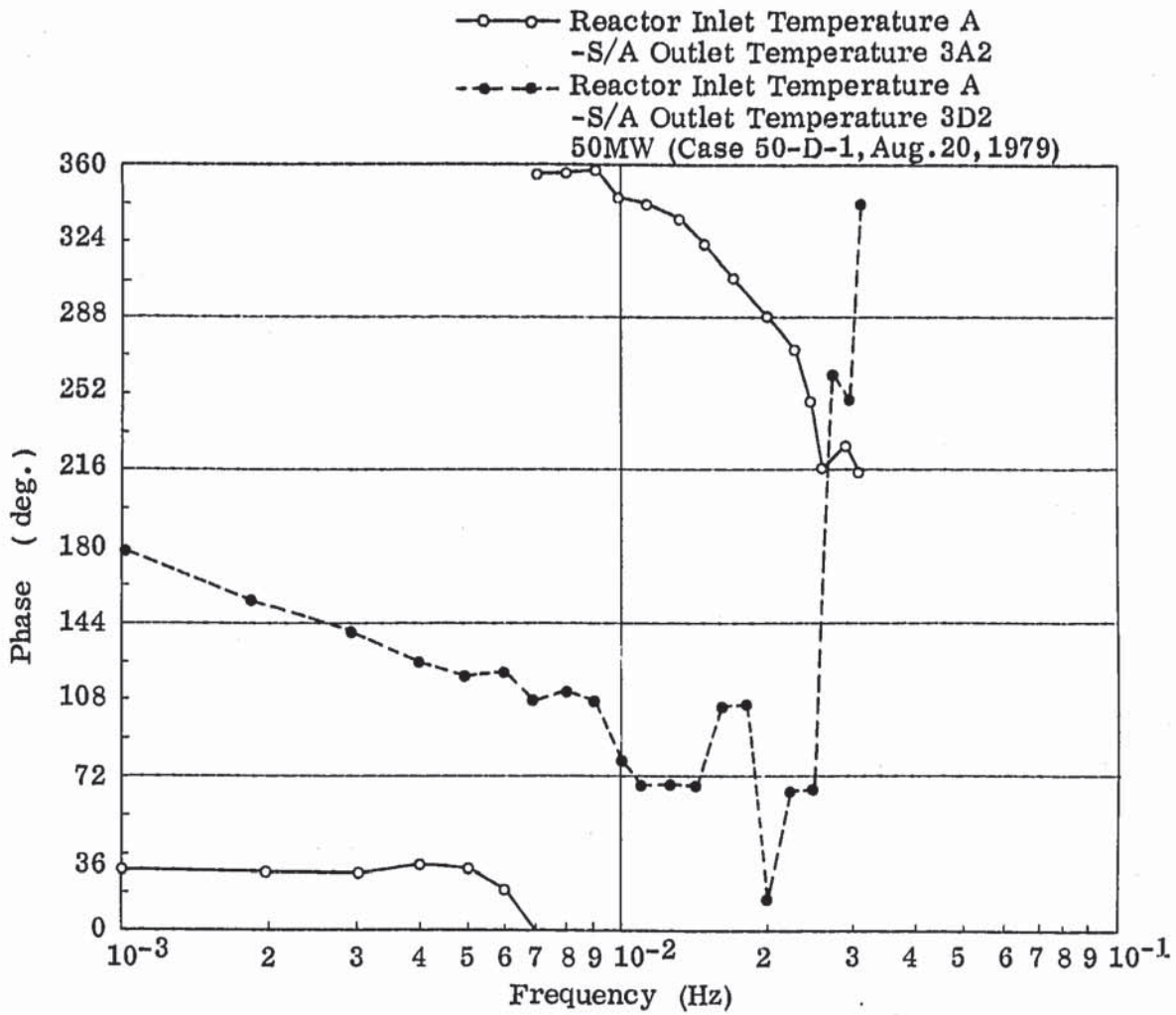


Fig.5.14 Phases of Reactor Inlet Temperature A-S/A Outlet Temperature 3A2, 3D2 of 50MW when 75MW Power Up Test.

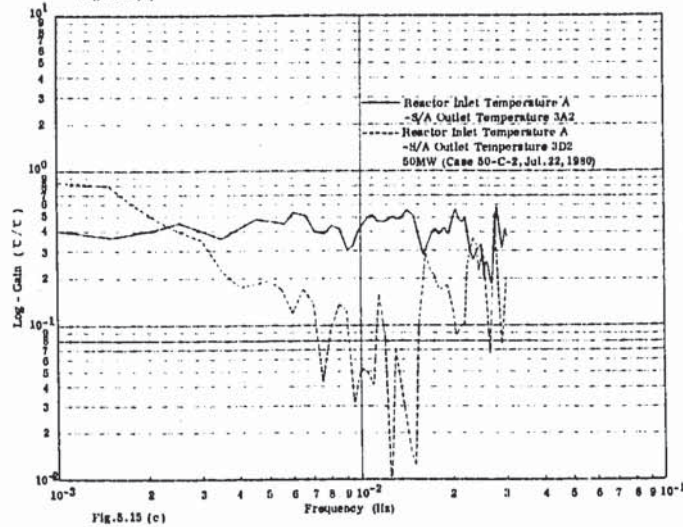
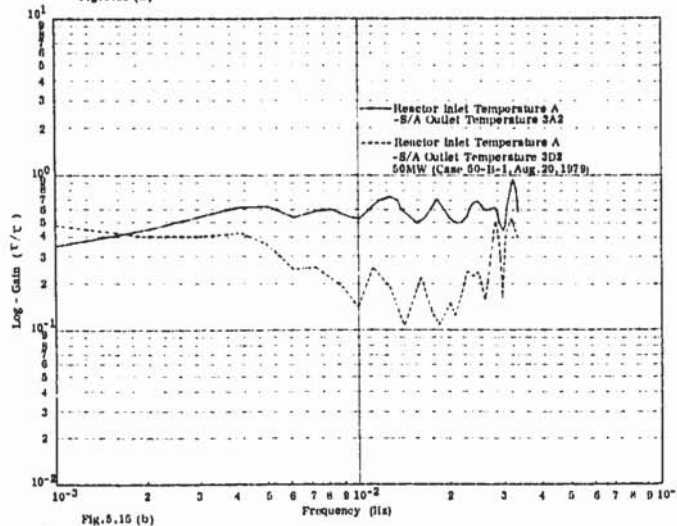
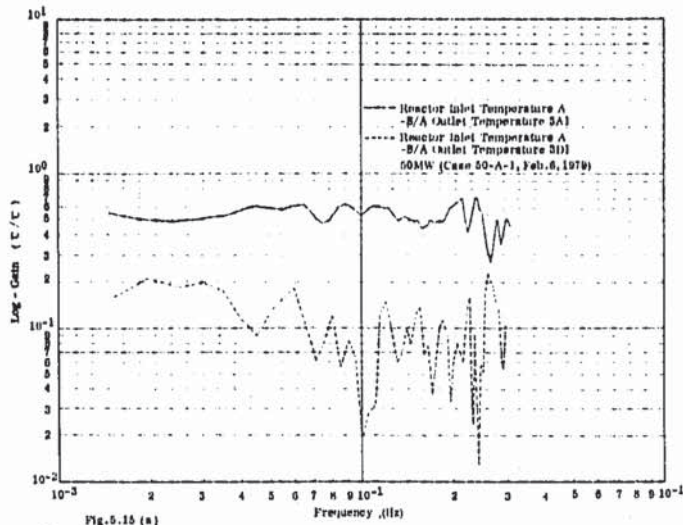


Fig.5.15 Transfer Functions of Reactor Inlet Temperature A-S/A Outlet Temperature 3A1 (3A2), 3D1 (3D2) of 50MW when 50MW No.2 Cycle, 75MW Power Up Test, and 75MW No.3 Cycle.

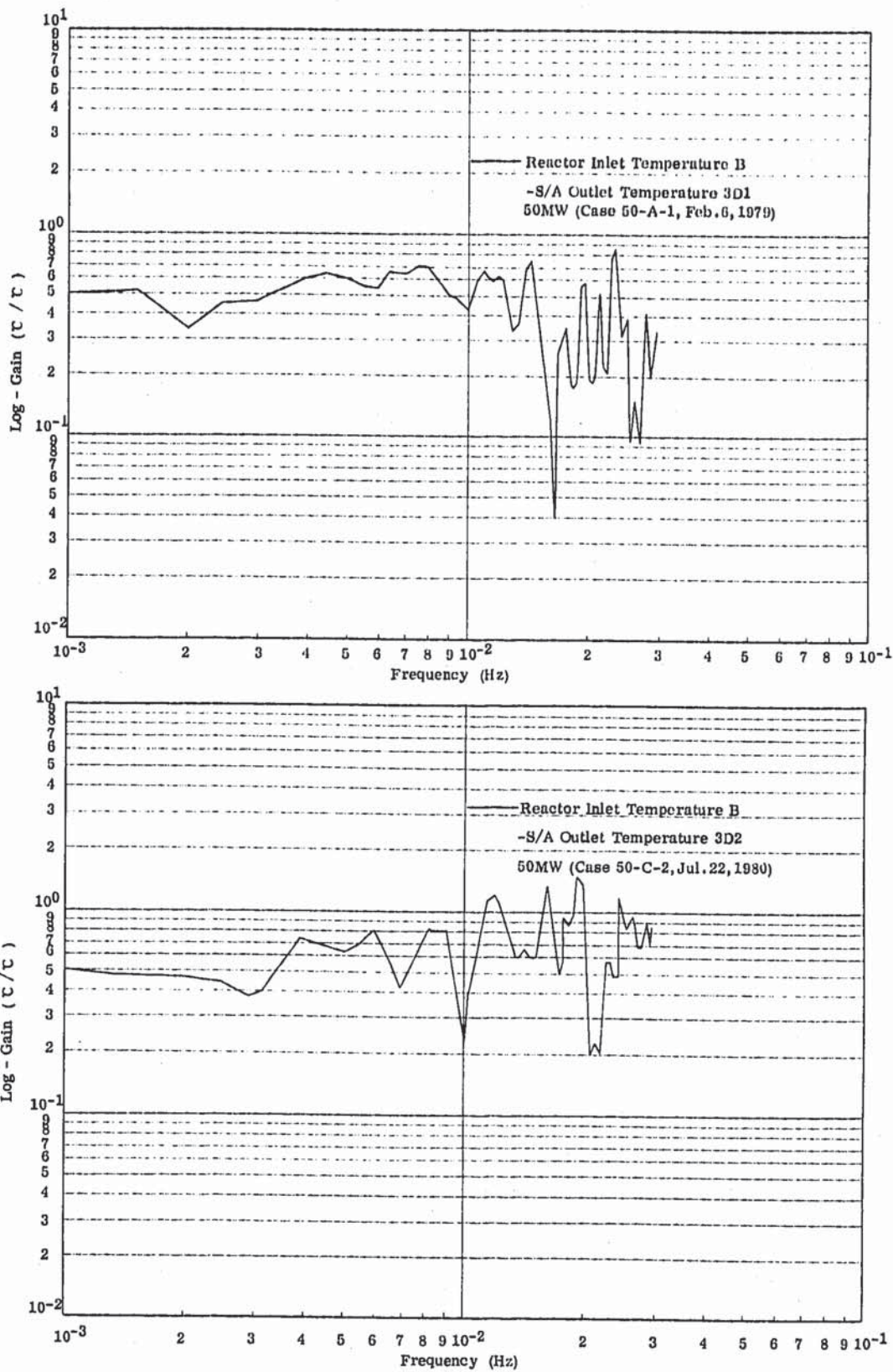


Fig.5.16 Transfer Functions of Reactor Inlet Temperature B-S/A Outlet Temperature 3D1 (3D2) of 50MW when 50MW No.2 Cycle, and 75MW No.3 Cycle.

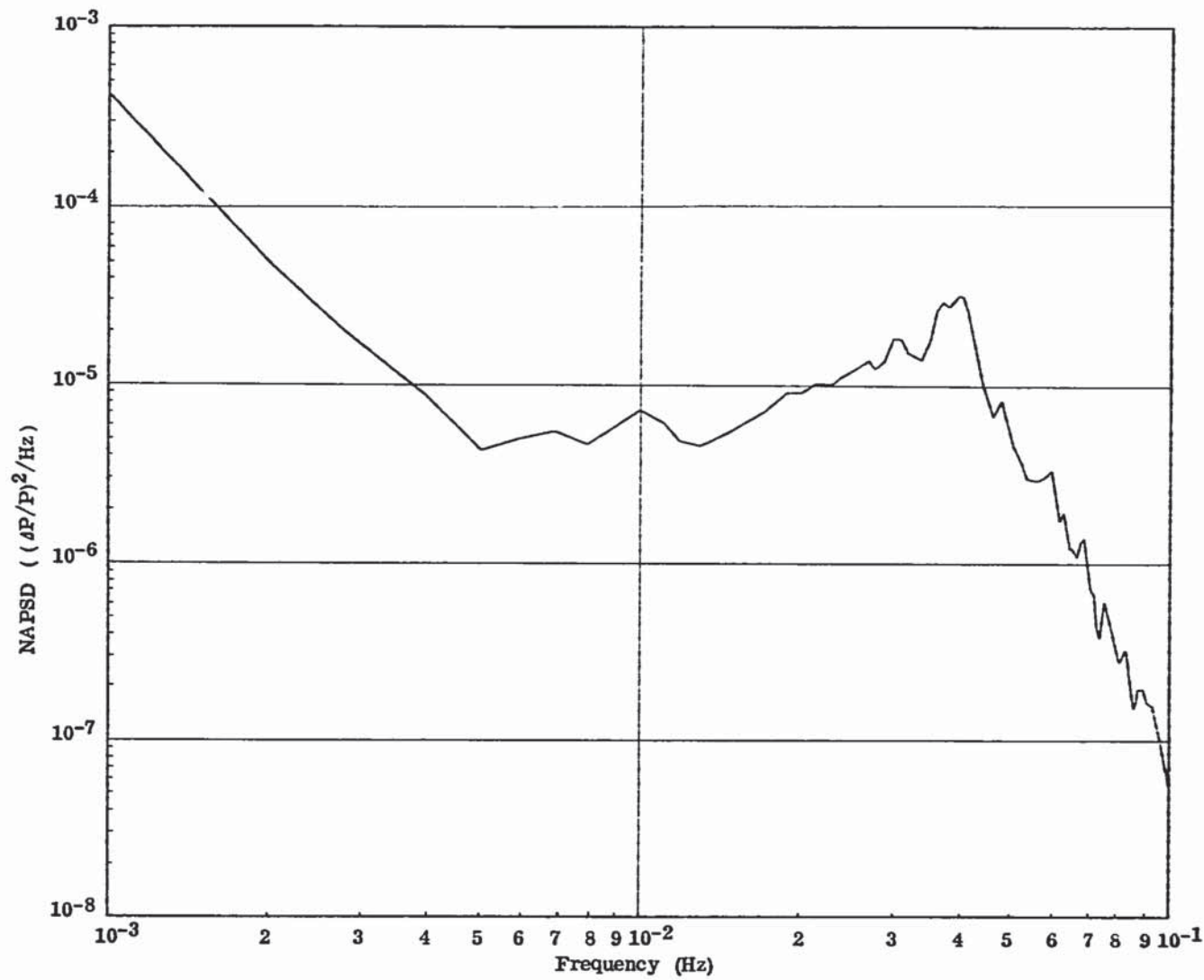


Fig.6.1 APSD of Neutron Flux (CH.7-CH.8) Signal of 75MW Power Level when 75MW Power Up Test (Case 75-B-1, Aug.22, 1979)

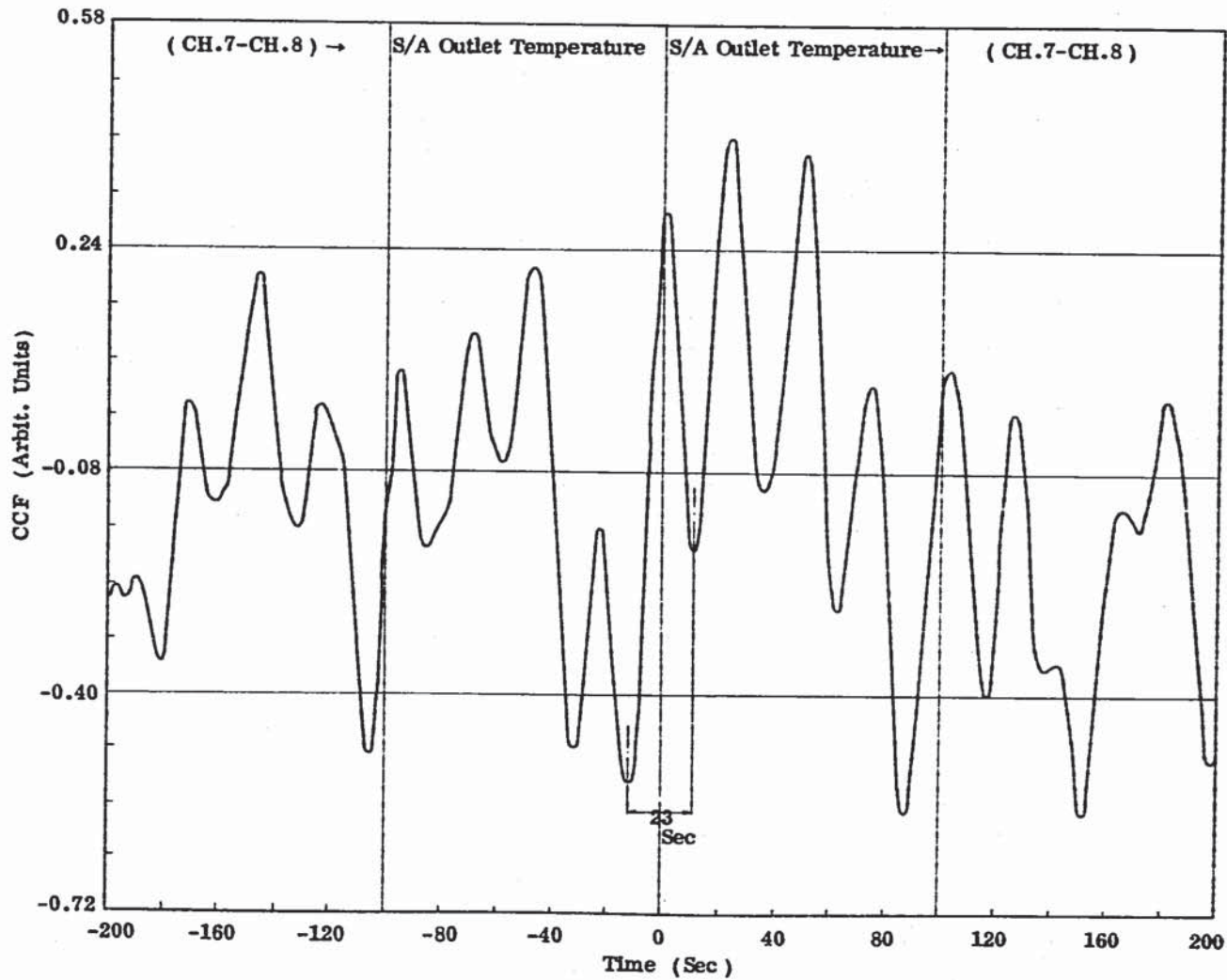


Fig.6.2 CCF of Neutron Flux (CH.7-CH.8) Signal-S/A Outlet Temperature 6B4 of 75MW Power Level when 75MW Power Up Test (Case 75-B-1, Aug.22, 1979)

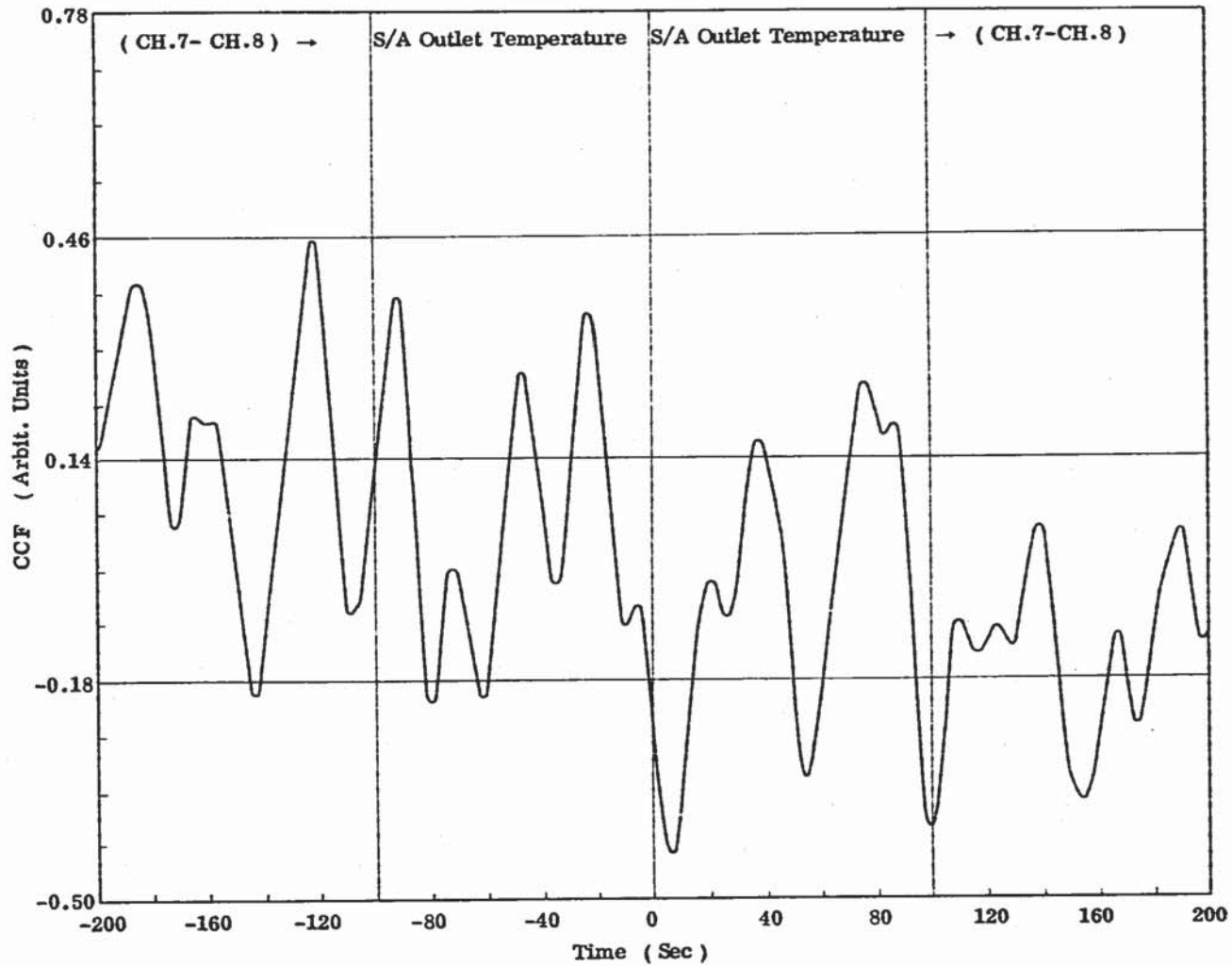


Fig.6.3 CCF of Neutron Flux (CH.7-CH.8) Signal-S/A Outlet Temperature 6C4 of 75MW Power Level when 75MW Power Up Test (Case 75-B-1, Aug.22,1979)

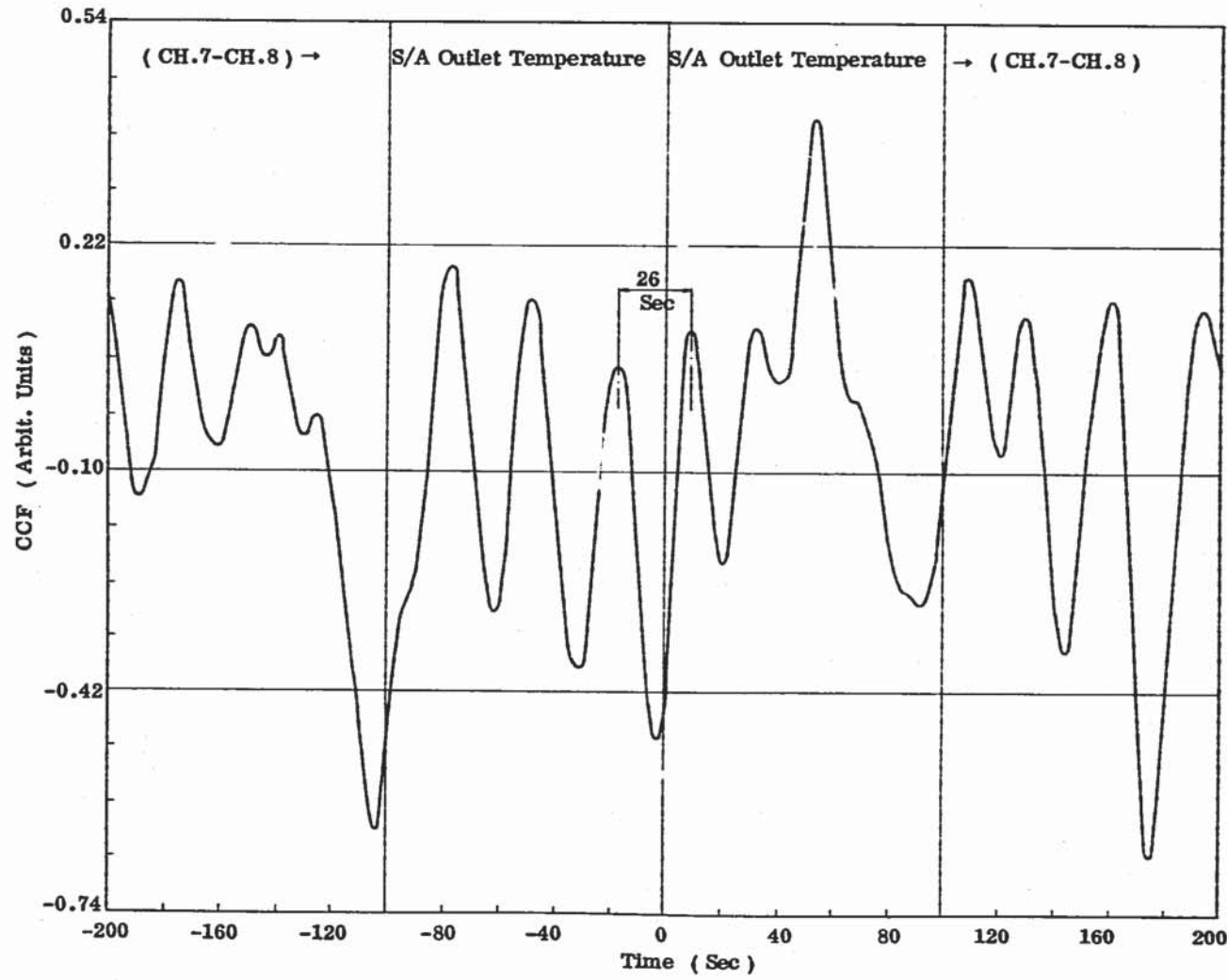


Fig.6.4 CCF of Neutron Flux (CH.7-CH.8) Signal-S/A Outlet Temperature 6E4 of 75MW Power Level when 75MW Power Up Test (Case 75-B-1, Aug.22, 1979)

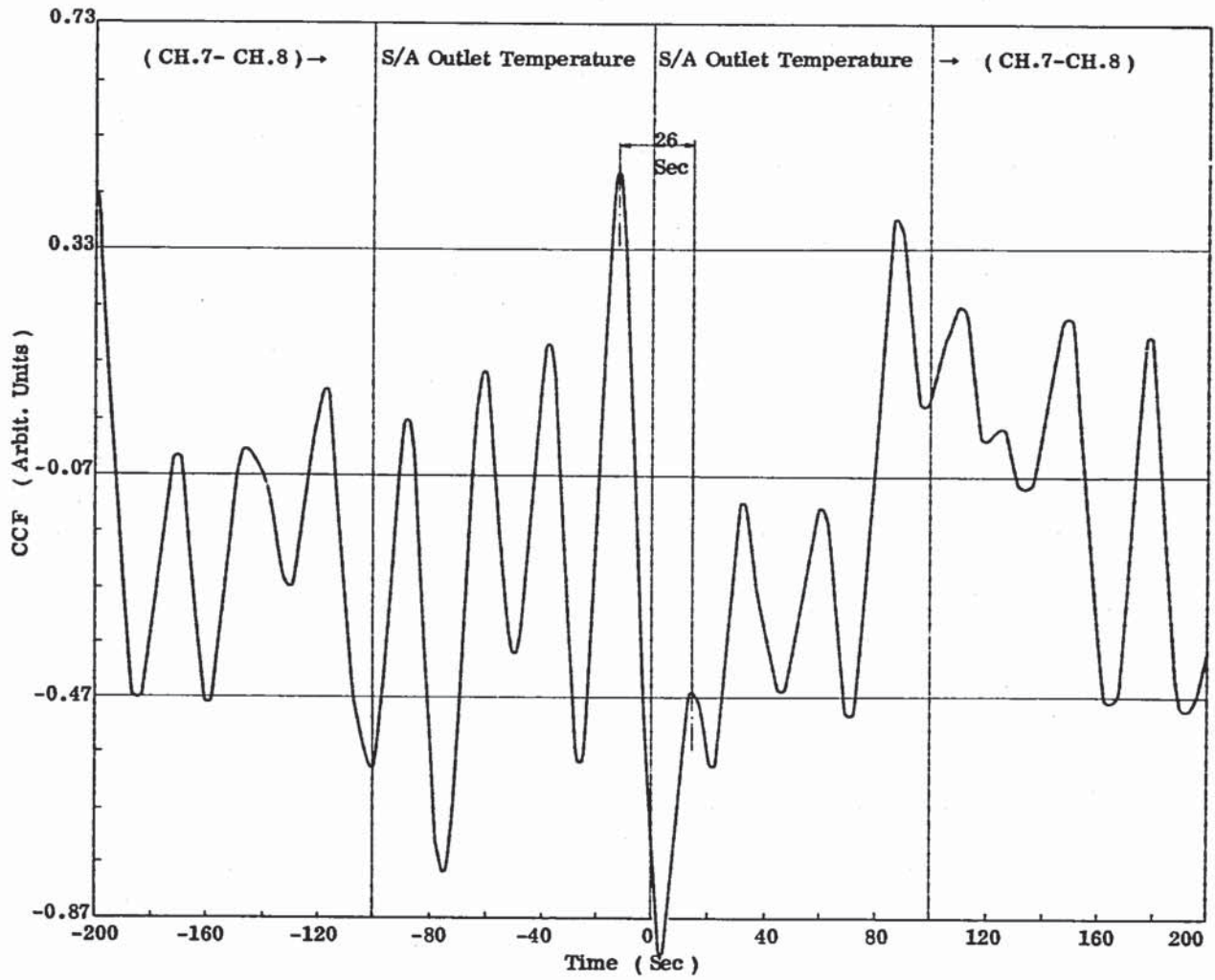


Fig.6.5 CCF of Neutron Flux (CH.7-CH.8) Signal-S/A Outlet Temperature 6F4 of 75MW Power Level when 75MW Power Up Test (Case 75-B-1, Aug.22, 1979)

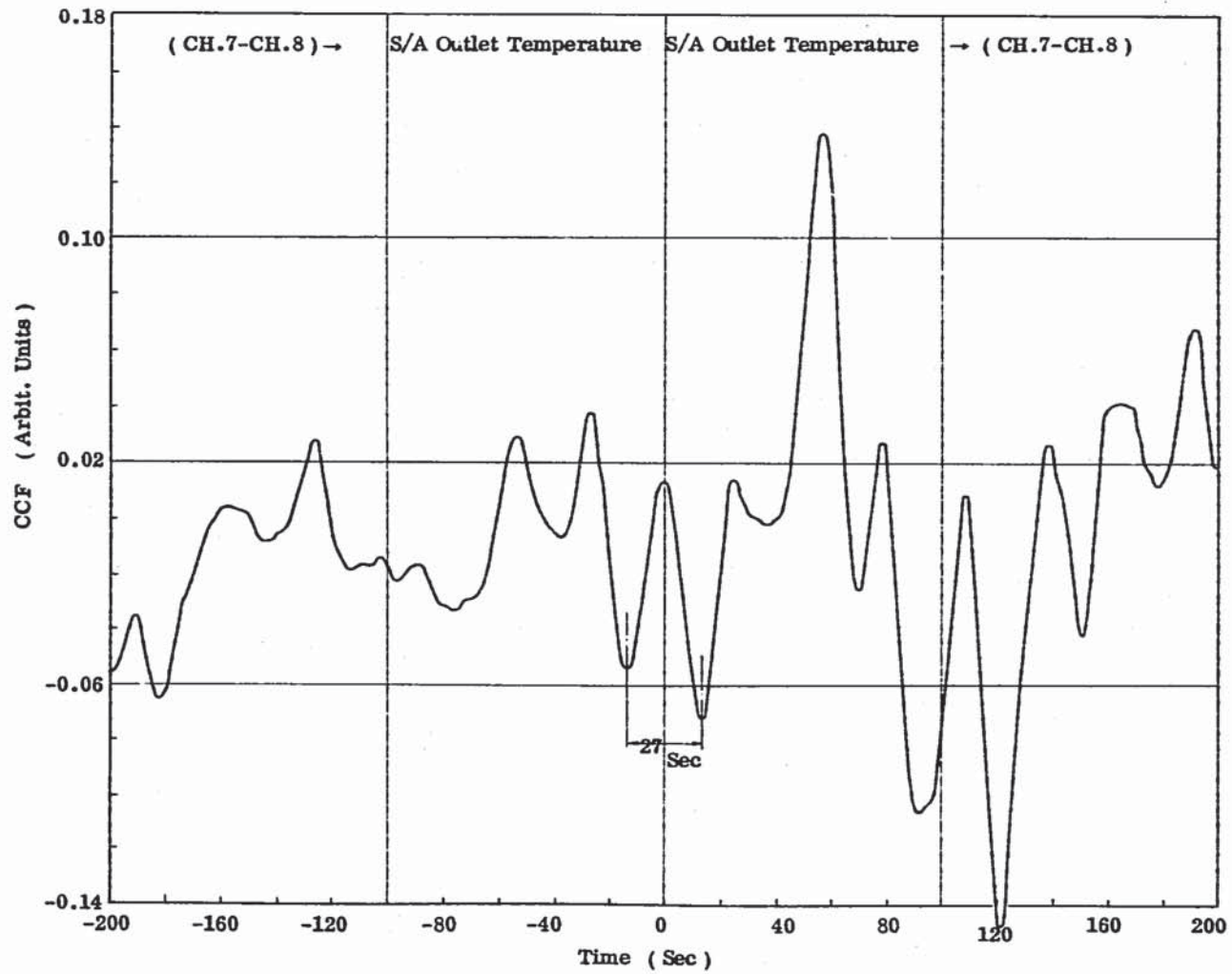


Fig.6.6 CCF of Neutron Flux (CH.7-CH.8) Signal-S/A Outlet Temperature 3B2 of 75MW Power Level when 75MW Power Test (Case 75-B-1, Aug.22, 1979)

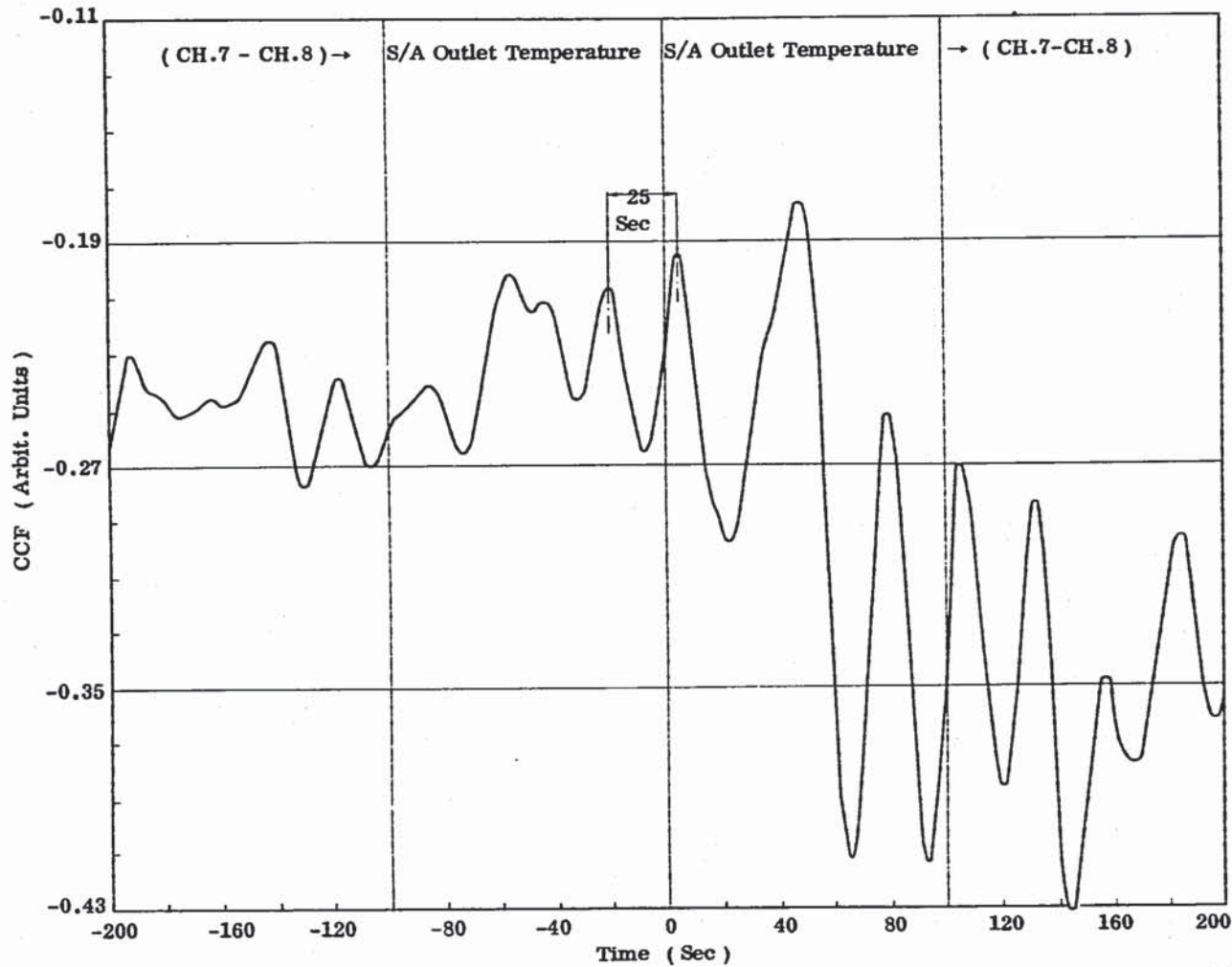


Fig.6.7 CCF of Neutron Flux (CH.7-CH.8) Signal-S/A Outlet Temperature 3C2 of 75MW Power Level when 75MW Power Up Test (Case 75-B-1, Aug.22, 1979)

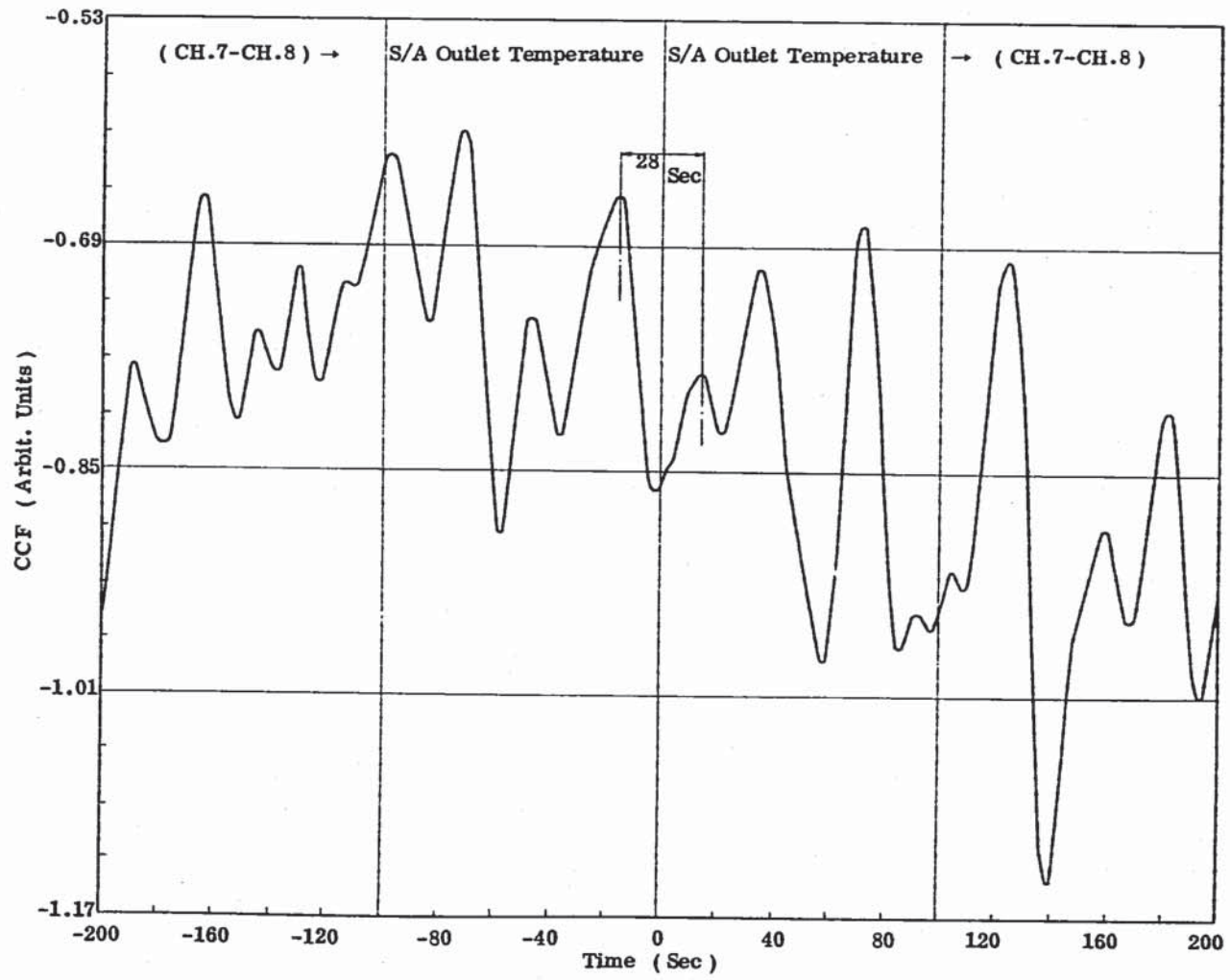


Fig.6.8 CCF of Neutron Flux (CH.7-CH.8) Signal-S/A Outlet Temperature 3E2 of 75MW Power Level when 75MW Power Up Test (Case 75-B-1, Aug.22, 1979)

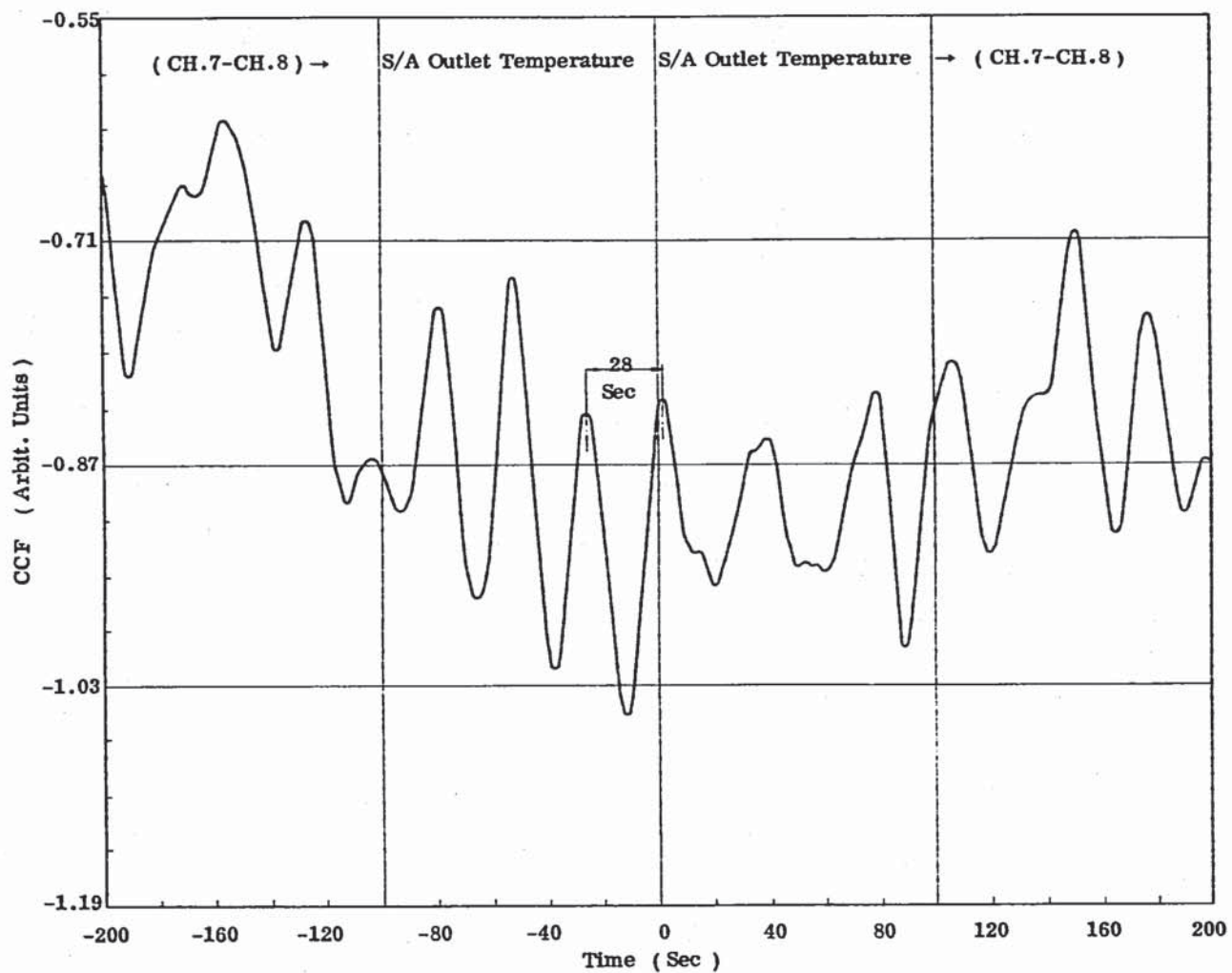


Fig.6.9 CCF of Neutron Flux (CH.7-CH.8) Signal-S/A Outlet Temperature 3F2 of 75MW Power Level when 75MW Power Up Test (Case 75-B-1, Aug.22, 1979)

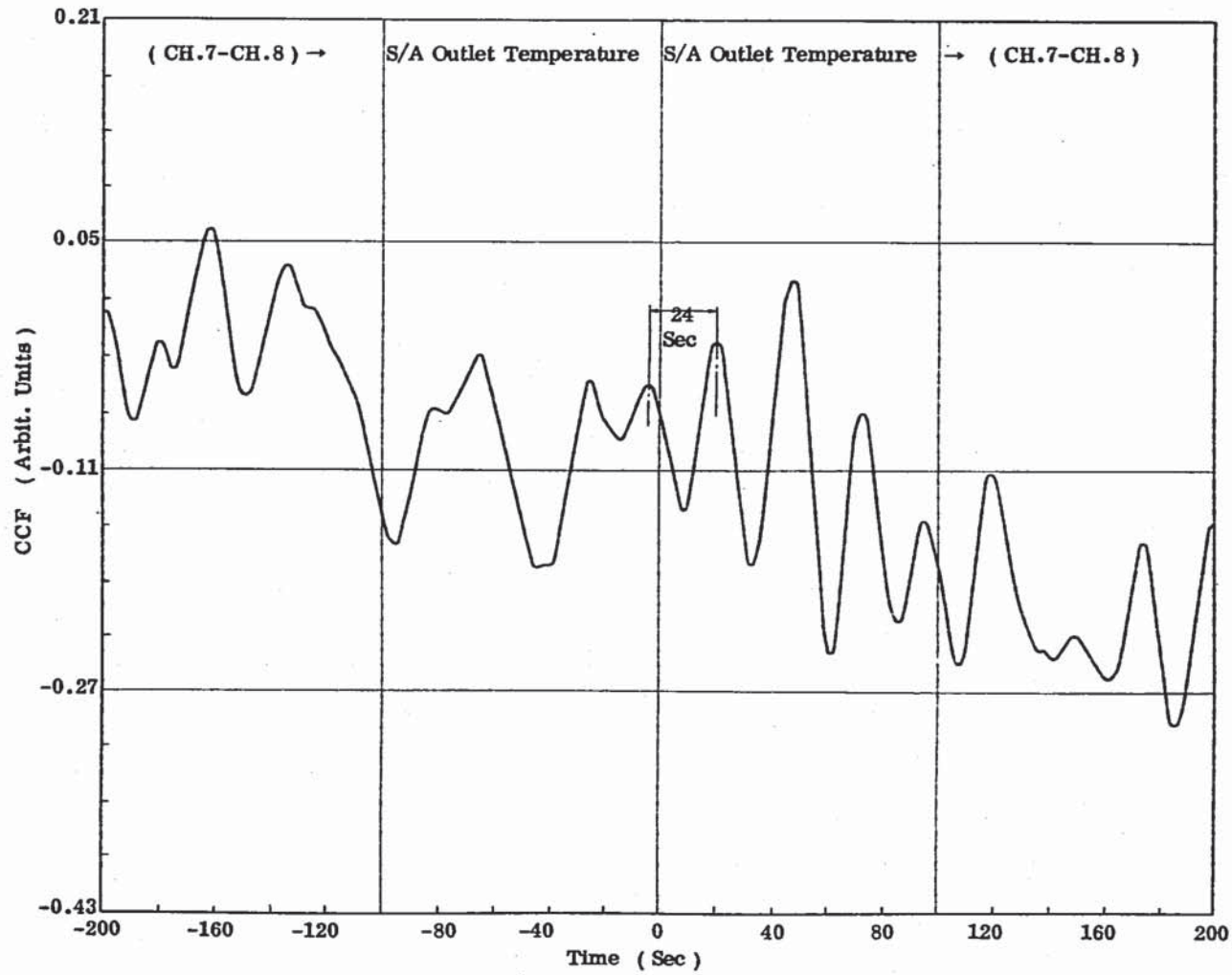


Fig.6.10 CCF of Neutron Flux (CH.7-CH.8) Signal-S/A Outlet Temperature 6B4 of 75MW Power Level when 75MW Power Up Test (Case 75-B-1, Aug.22, 1979)

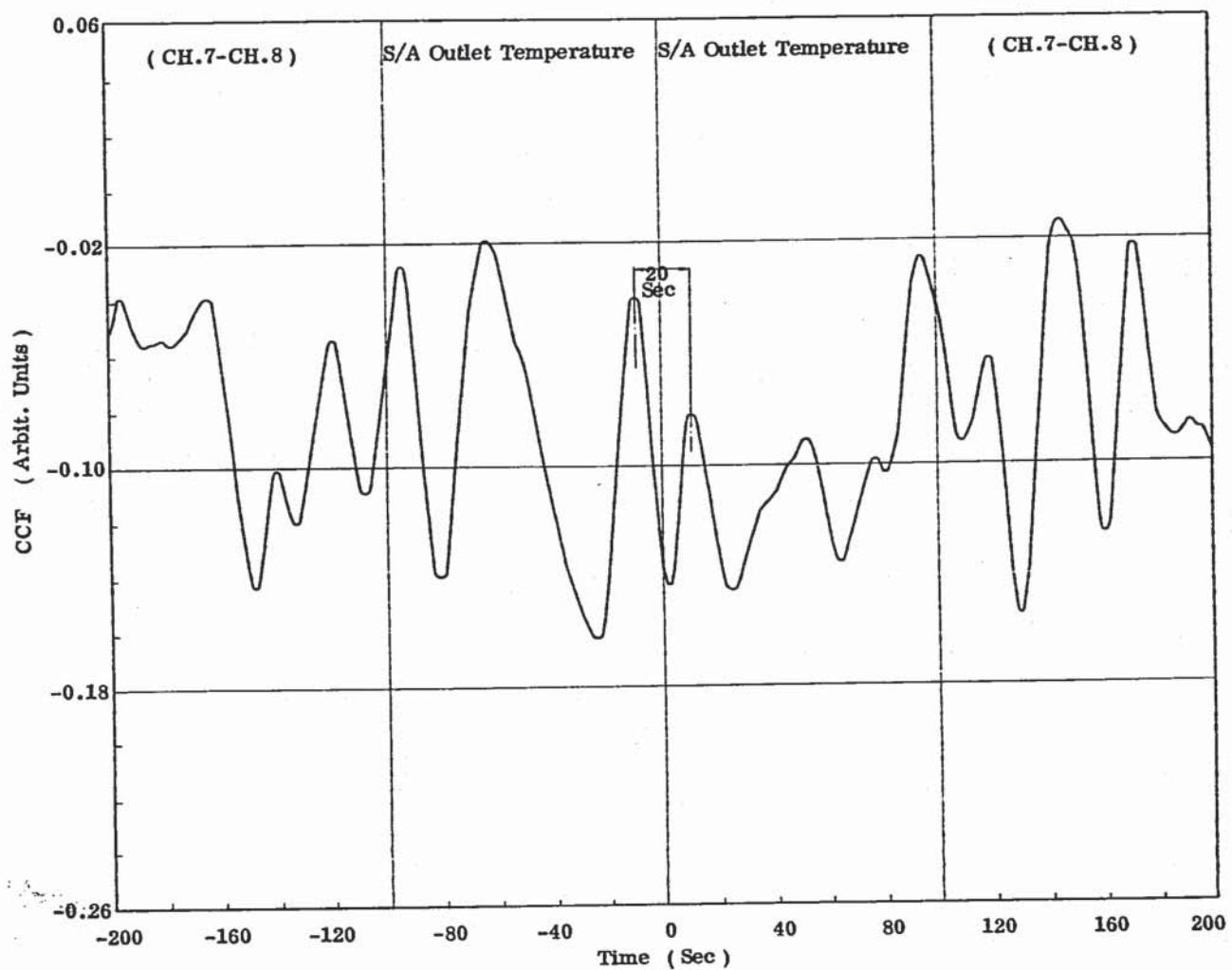


Fig.6.11 CCF of Neutron Flux (CH.7-CH.8) Signal-S/A Outlet Temperature 6E4 of 75MW Power Level when 75MW Power Up Test (Case 75-B-1, Aug.22, 1979)

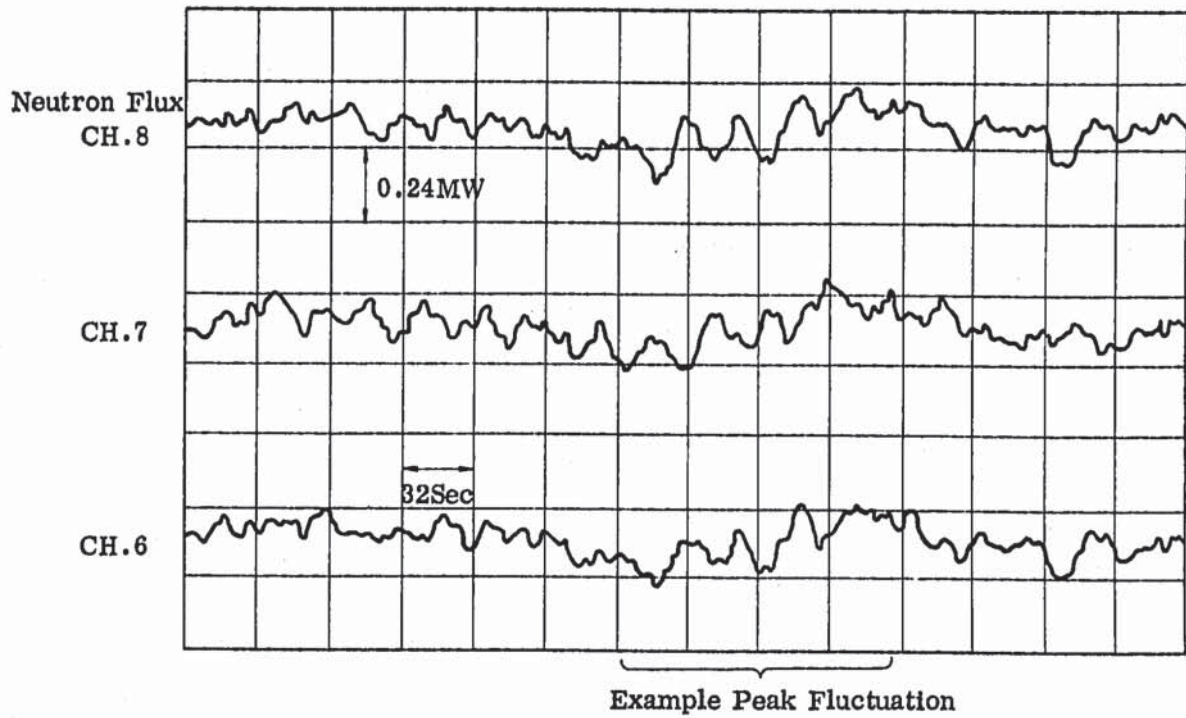


Fig.6.12 Time Sequences of Neutron Flux CH.6, CH.7 and CH.8 of 75MW Power Level.

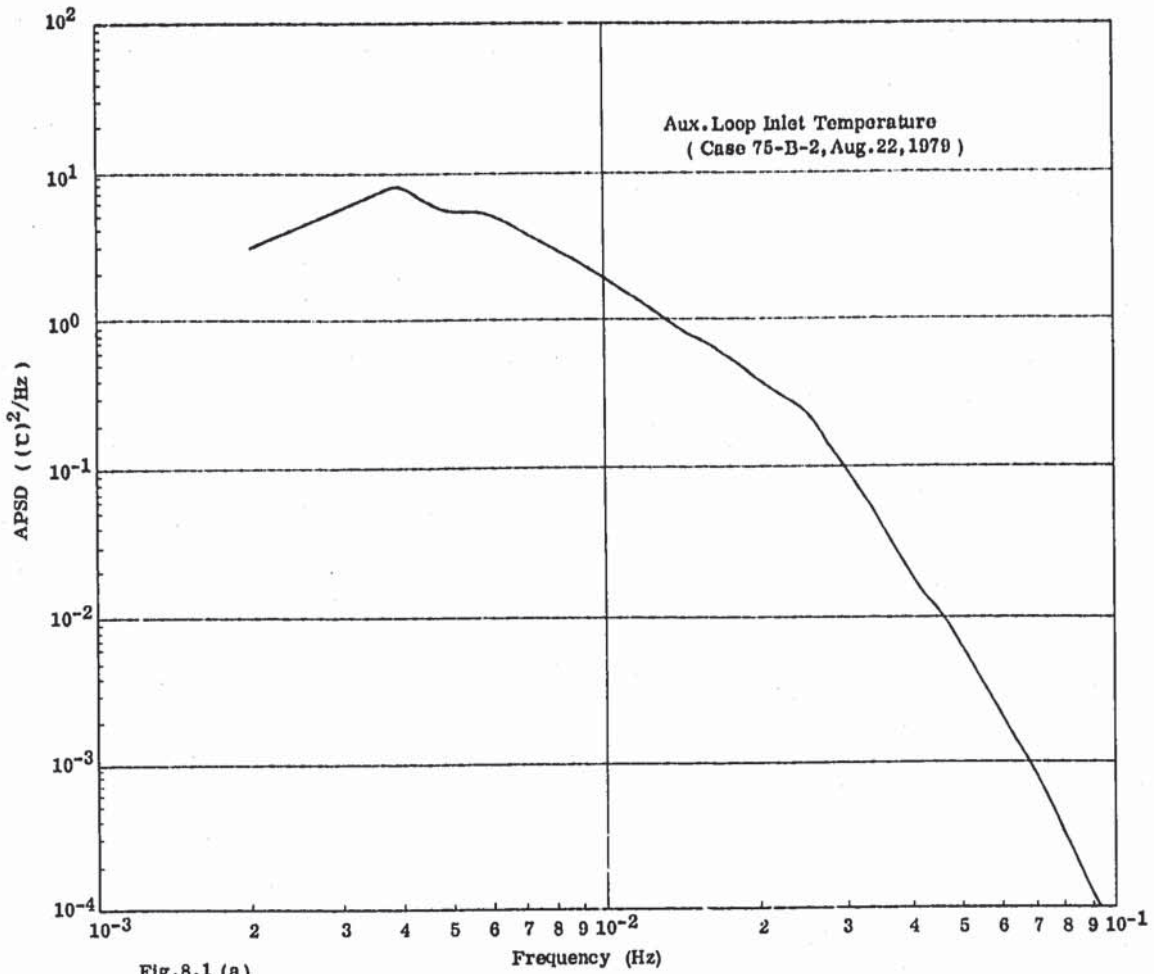


Fig. 8.1 (a)

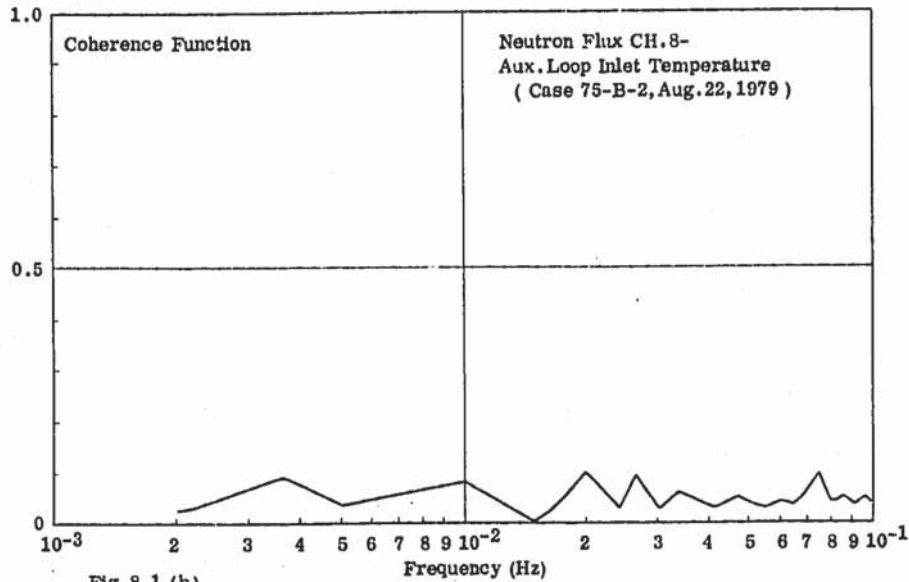


Fig. 8.1 (b)

Fig. 8.1 APSD of Auxiliary Inlet Temperature and Coherence Function of Neutron Flux CH.8-Aux. Loop Inlet Temperature of 75MW Power Level.

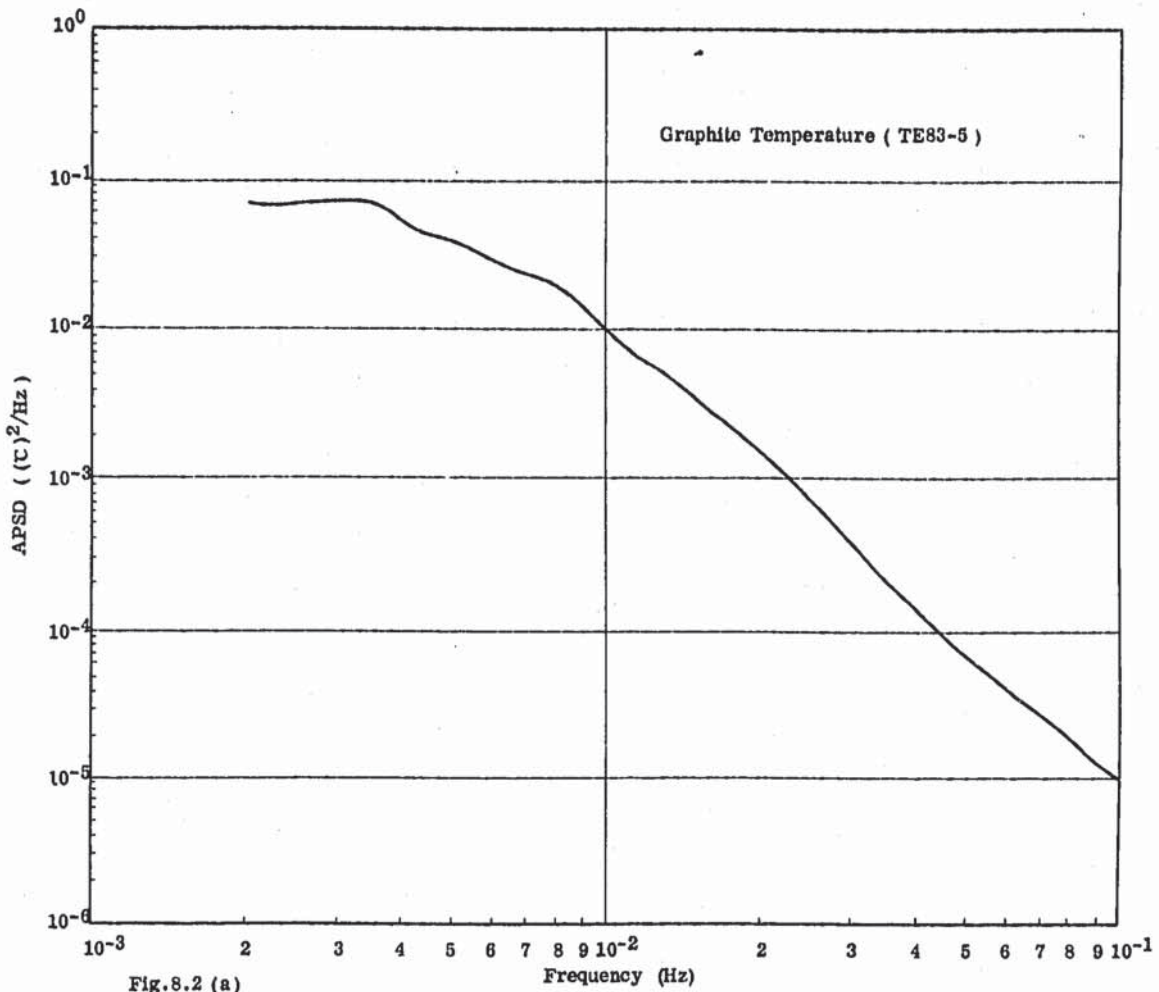


Fig.8.2 (a)

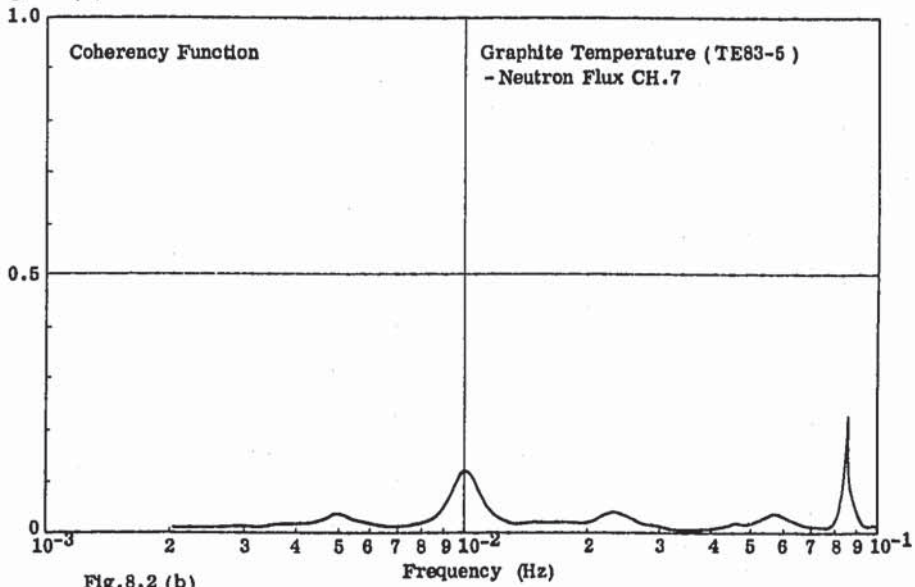


Fig.8.2 (b)

Fig.8.2 APSD of Graphite Temperature and Coherence Function of Neutron Flux CH.7-Graphite Temperature of 75MW Power Level.

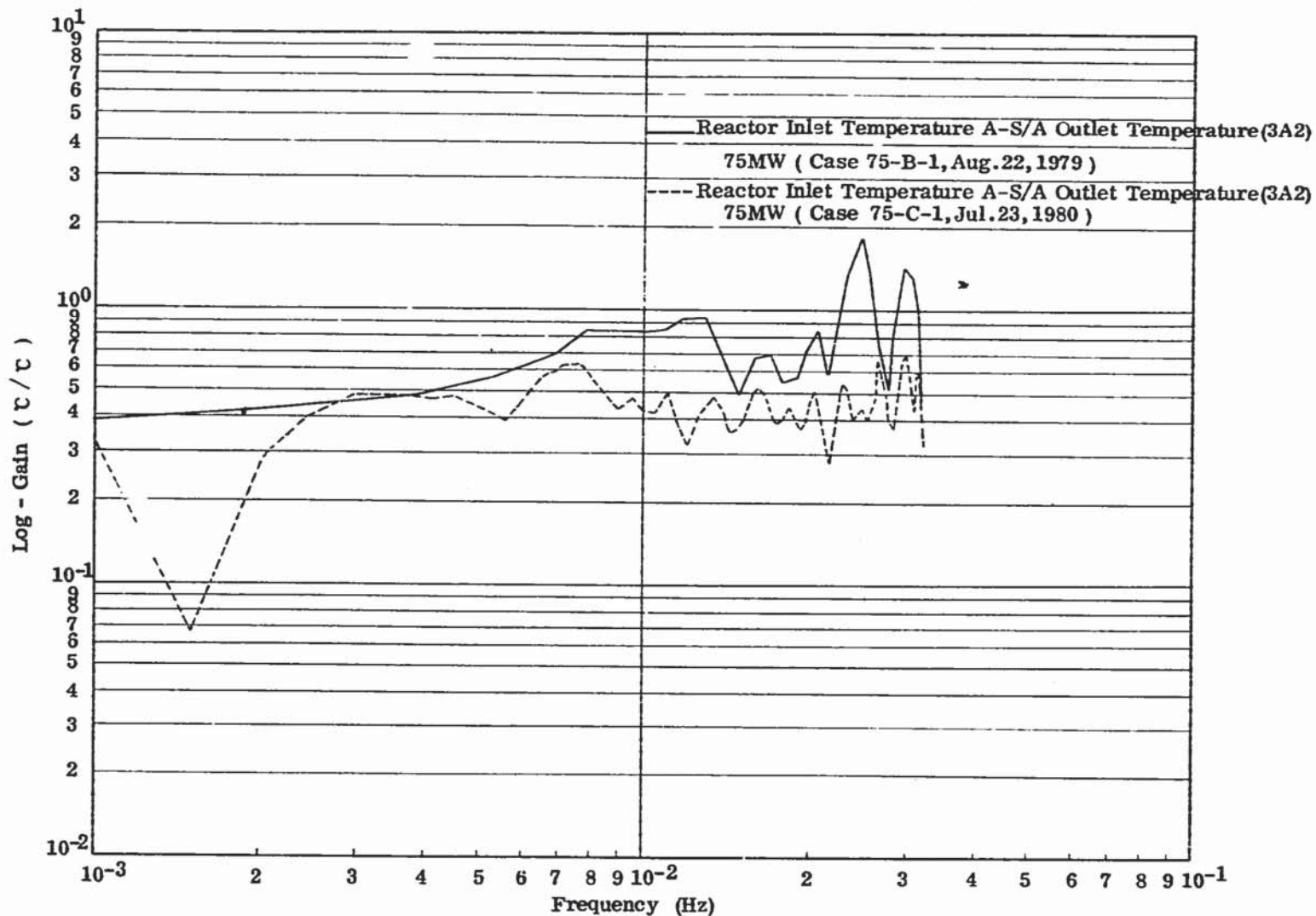


Fig.8.3 Transfer Functions (Gain) of Reactor Inlet Temperature A-S/A Outlet Temperature 3A2 of 75MW when 75MW Power Up Test and 75MW No.3 Cycle.

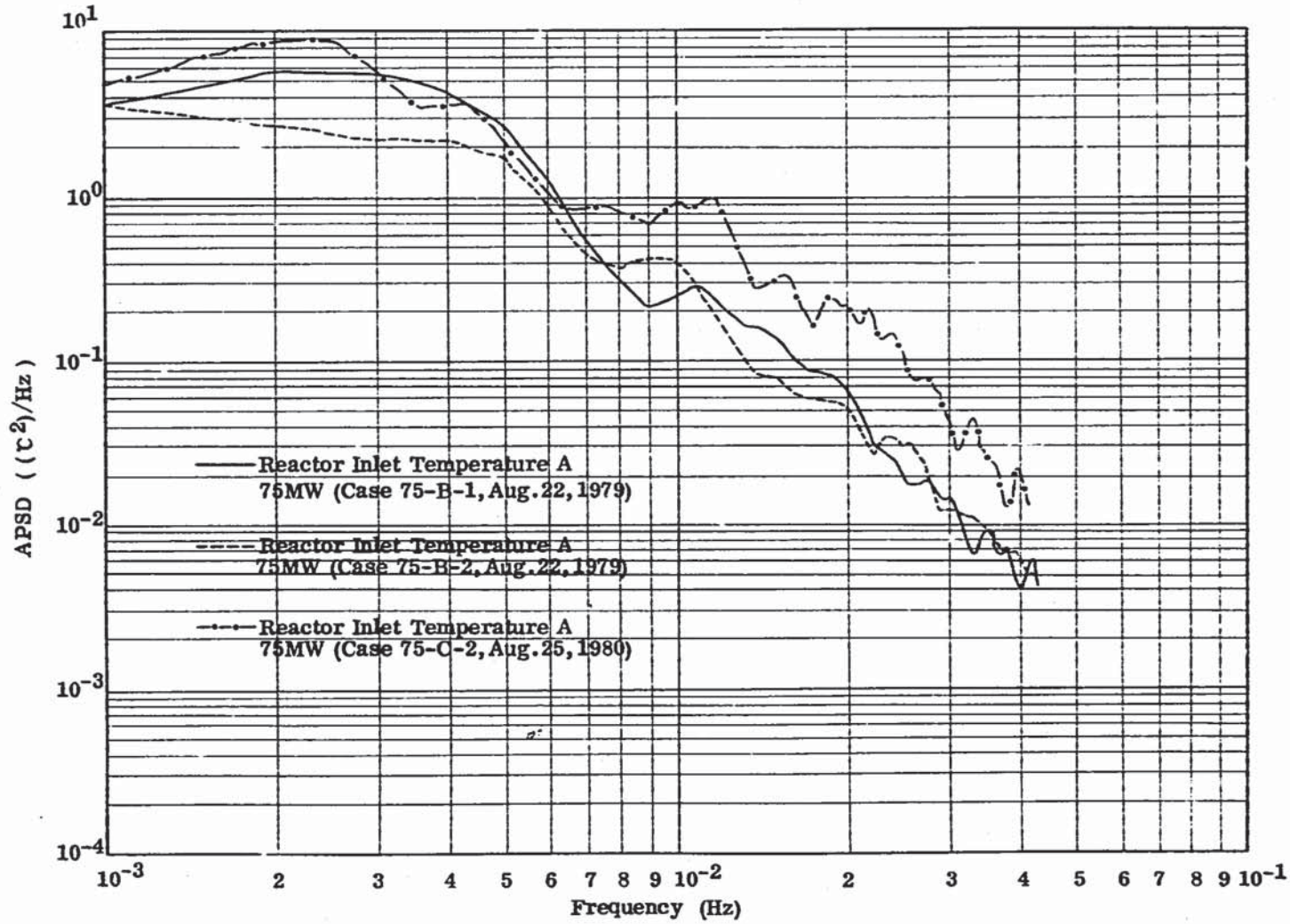


Fig. 8.4 APSDs of Reactor Inlet Temperature A of 75MW when 75MW Power Up Test and 75MW No.3 Cycle.

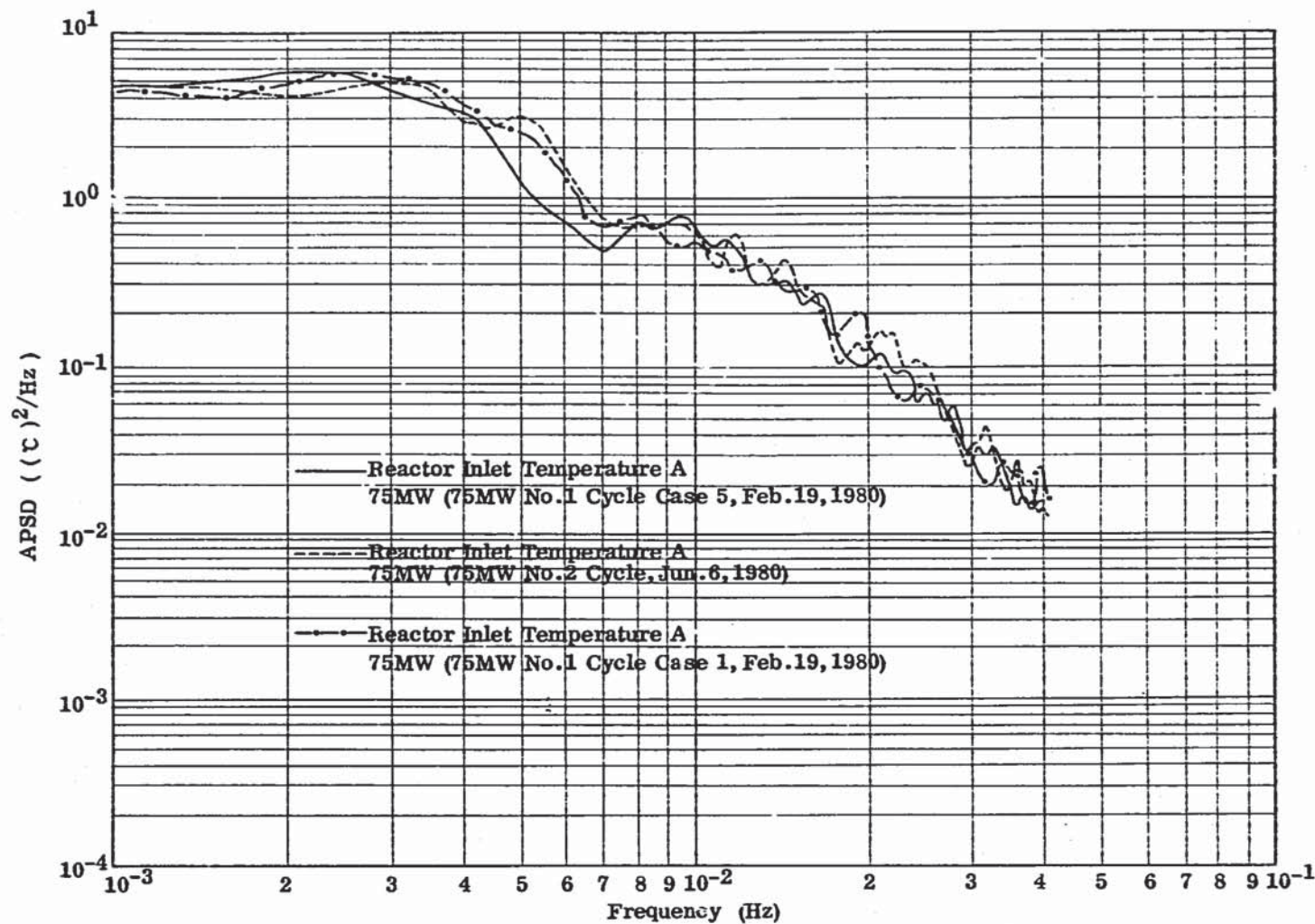


Fig.8.5 APSDs of Reactor Inlet Temperature A of 75MW when 75MW No.1 Cycle and 75MW No.2 Cycle.

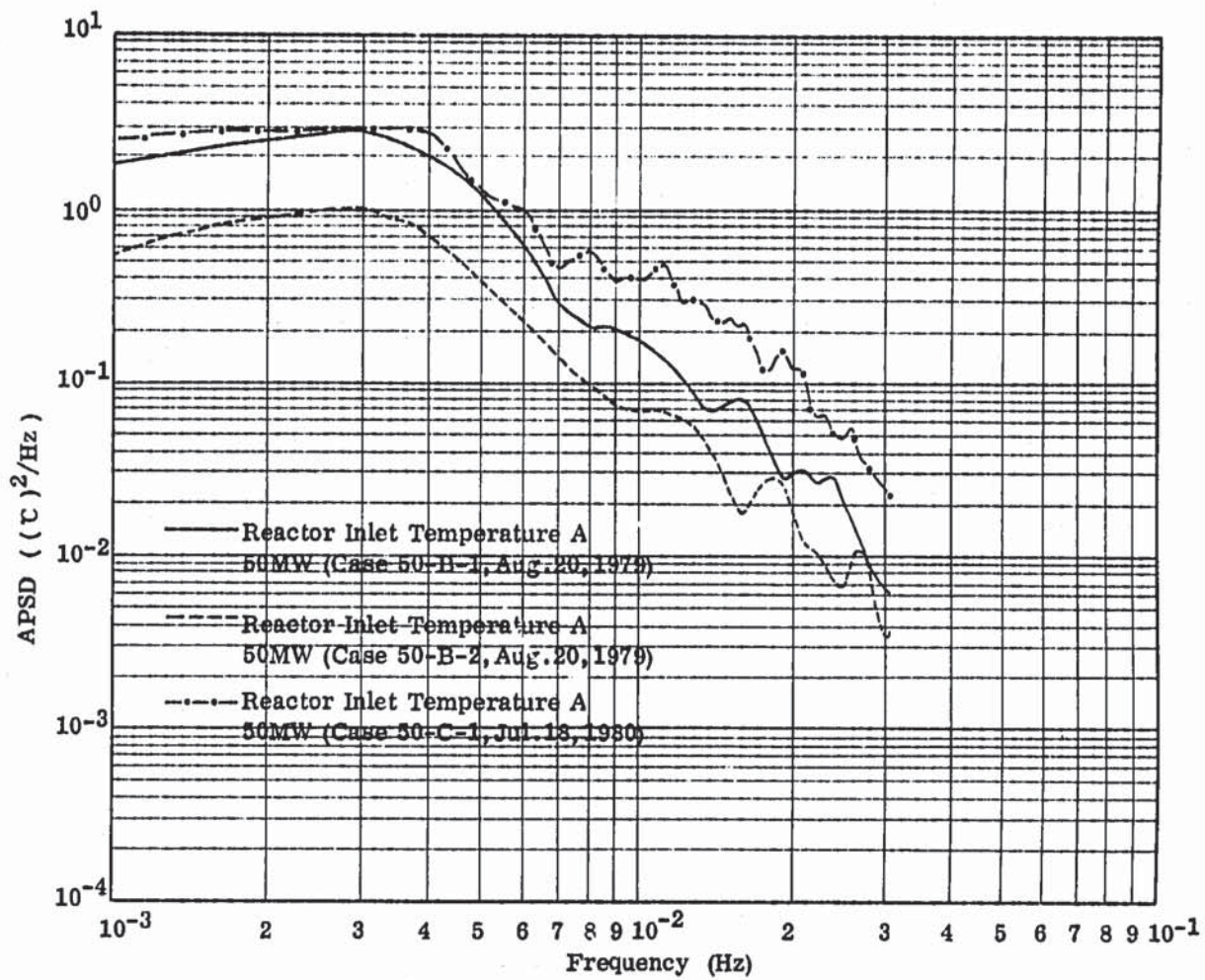


Fig. 8.6 APSDs of Reactor Inlet Temperature A of 50MW when 75MW Power Up Test and 75MW No.3 Cycle.

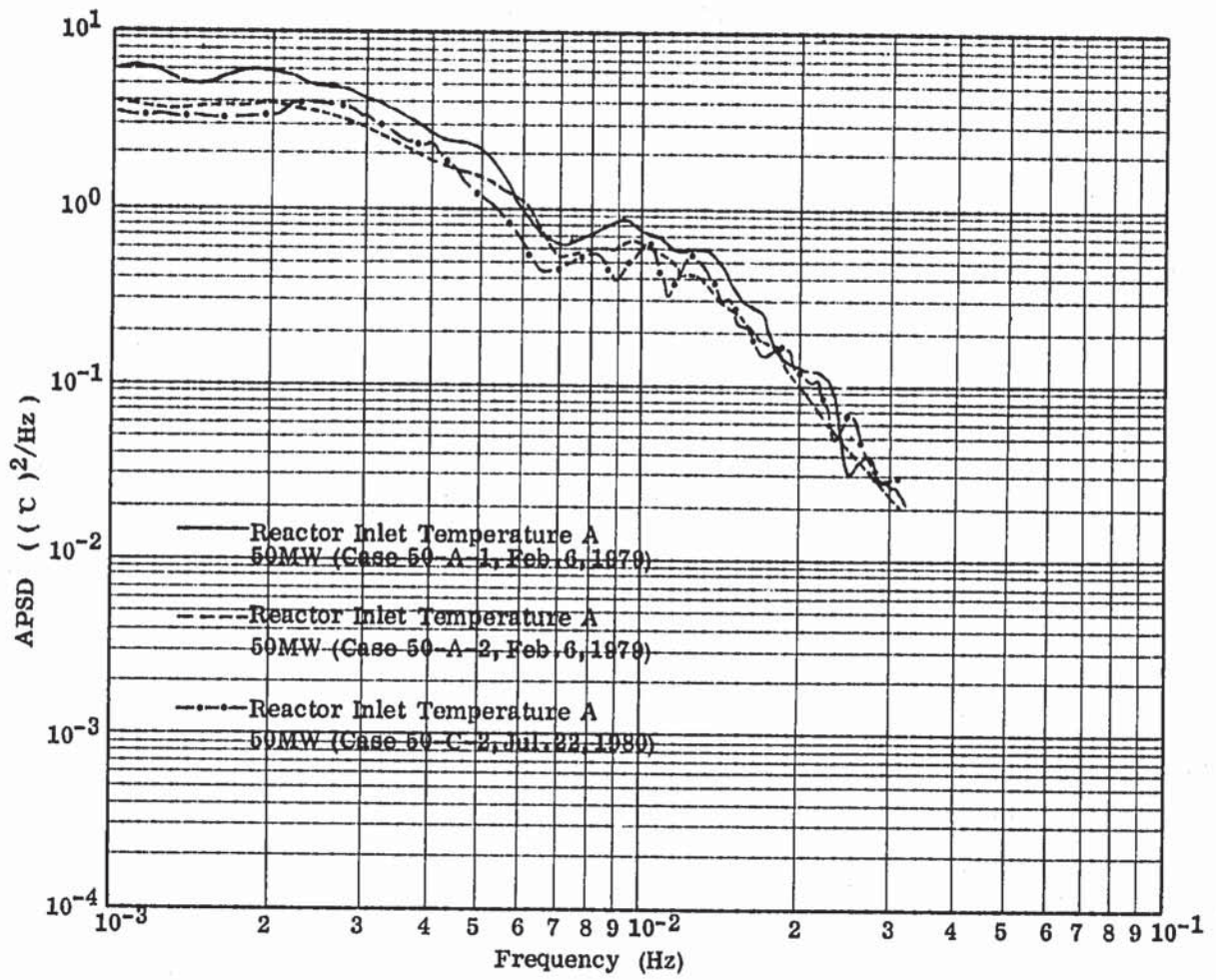


Fig.8.7 APSDs of Reactor Inlet Temperature A of 50MW when 50MW No.2 Cycle and 75MW No.3 Cycle.

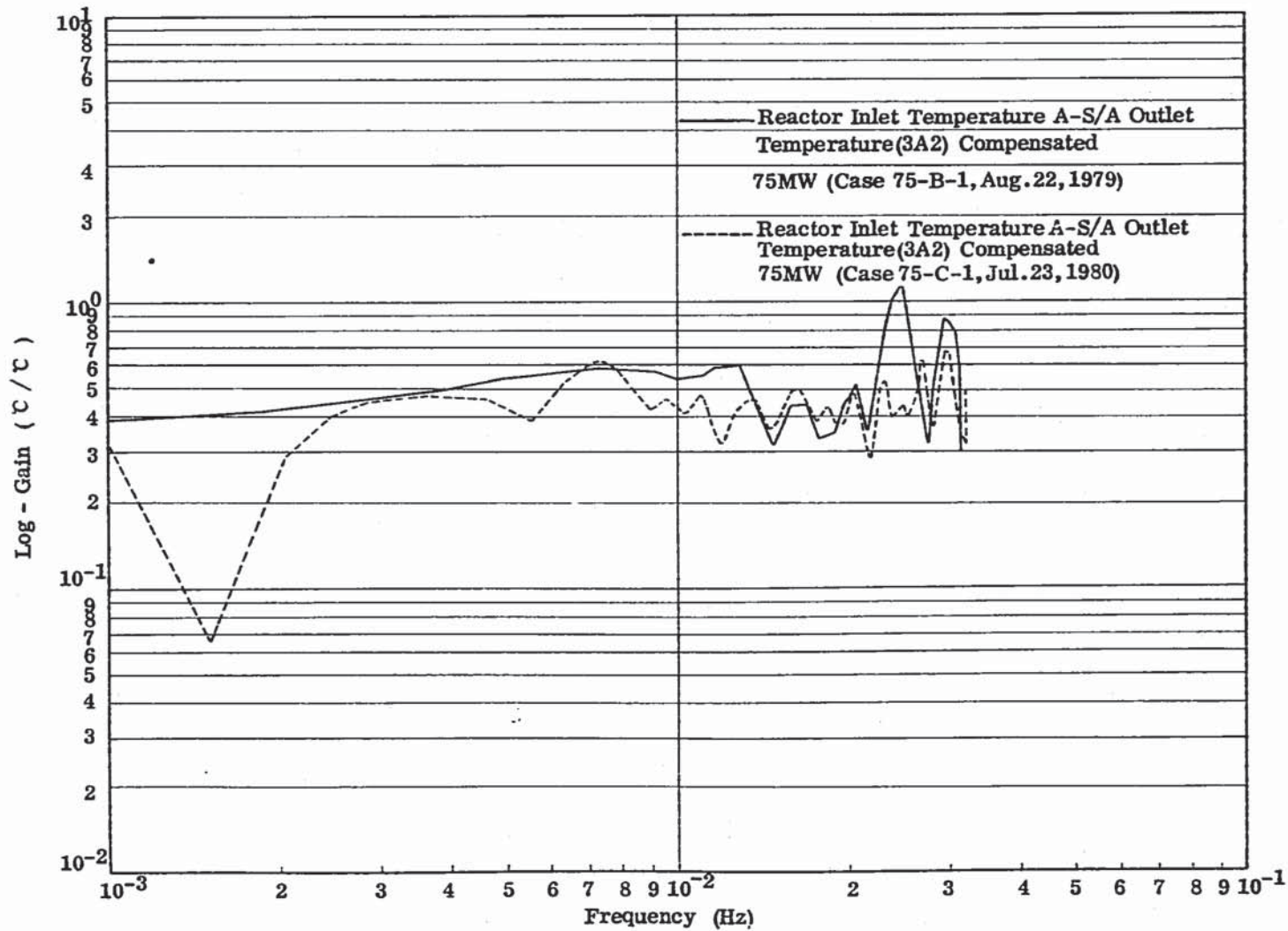


Fig.8.8 Compensated Transfer Functions (Gain) of Reactor Inlet Temperature A-S/A Outlet Temperature 3A2 of 75MW when 75MW Power Up Test and 75MW No.3 Cycle.