

JAERI-M

8 5 7 9

多変数自己回帰モデルの適用によるハル
デン炉の出力共鳴振動現象の解析

1979年11月

尾熊 律雄

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

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

多変数自己回帰モデルの適用によるホルデン炉の
出力共鳴振動現象の解析

日本原子力研究所 東海研究所 原子炉工学部
尾熊 律雄

(1979年10月29日受理)

HBWRでは、約9.5MWt以上の出力レベルにおいて、この原子炉に固有の0.04Hzの周期を持つ出力共鳴振動現象が存在する。この共鳴振動は、原子炉の運転上支障をきたすほど大きなものではないが、その特性を把握し変動を引き起こしている原因を明らかにしておくことは原子炉診断技術の観点からは重要である。

この共鳴振動の駆動源を明らかにするために雑音解析が行われた。その結果、本現象は原子炉に対して並列結合した2つの熱交換器の間で起こっている熱交換プロセスの動的な干渉効果によるものであることが示された。

本解析を通じて、ここで用いた解析手法がシステム内の変量の変動を引き起こしているいわゆる雑音源を追跡する上で極めて有効であることが示されると同時に、原子炉雑音解析および診断の種々の問題に適用可能であることが示された。

JAERI-M 8579

Application of the Multivariate Autoregressive Modeling Technique
to Study of the Resonant Power Oscillation in the Halden Boiling Water
Reactor

Ritsuo OGUMA

Division of Reactor Engineering, Tokai Research Establishment, JAERI

(Received October 29, 1979)

In the HBWR(Halden Boiling Water Reactor), there is a resonant power oscillation with period about 0.04 Hz at power levels higher than about 9.5 MWt. While the resonant oscillation is not so large as to affect the normal reactor operation, it is significant, from the viewpoint of reactor diagnosis, to grasp its characteristics and find the cause.

Noise analysis based on the autoregressive(AR) modeling technique has been made to reveal the driving source for this oscillation which lead to the suggestion that it is attributed to the dynamic interference of heat exchange process between two parallel-connected steam transformers against the reactor.

The present study demonstrates that the method used here is highly effective for tracing back to a noise source inducing the variation of quantities in a system, and also applicable to problems of reactor noise analysis and diagnosis.

Key words; Reactor Diagnosis, Resonant Power Oscillation, Noise Source, HBWR Reactor, Multivariate Autoregressive Modeling Technique, Reactor Noise Analysis, Dynamic Interference.

目 次

1. 序 論	1
2. HBWRプラントの概要と出力共鳴振動現象の特徴	4
2.1 プラントの概要	4
2.2 観測された出力共鳴振動現象の特徴	4
3. 自己回帰 (AR) モデルを用いた雑音源の同定法	5
3.1 ARモデルによるノイズ寄与率解析	5
3.2 ARモデルの同定	7
4. 出力共鳴振動の雑音源に関する解析結果	8
4.1 スペクトル解析	9
4.2 ノイズ寄与率解析	9
4.3 熱交換器1次側入口蒸気流量の相関解析	10
5. 過去の炉運転データからの出力共鳴振動に関する考察	11
6. 結 論	12
謝 辞	12
参考文献	13

CONTENTS

1.	Introduction.....	1
2.	Description of the HBWR Plant and Phenomenal Feature of the Resonant Power Oscillation.....	4
2.1	The Plant Description.....	4
2.2	The Feature of the Observed Resonant Power Oscillation...	4
3.	A Method of Noise Source Identification based on Auto- regressive (AR) Model.....	5
3.1	Noise Contribution Analysis Using the AR Model.....	5
3.2	Identification Method of the AR Model.....	7
4.	Results from the Analysis Concerning the Noise Source of The Resonant Power Oscillation.....	8
4.1	Spectral Analysis.....	9
4.2	Noise Contribution Analysis.....	9
4.3	Correlation Analysis of Inlet Steam Flow in the Primary Side of the Steam Transformer.....	10
5.	Examination of the Resonant Power Oscillation based on the Past Operational Data at the HBWR.....	11
6.	Conclusions.....	12
	Acknowledgments.....	12
	References.....	13

1. 序 論

ハルデン炉 (HBWR; Halden Boiling Water Reactor) は自然循環沸騰重水炉である。炉は1959年に臨界に達して以来、OECD-NEAの運営する国際研究プロジェクト、いわゆるハルデンプロジェクトの主要な実験施設として今日まで種々の研究に利用されて来た。この原子炉プラントは3重の冷却ループより成り⁽¹⁾、2次系、3次系には軽水を用いている。原子炉の定格出力はそのつど実験スケジュールに沿って調節されるが、通常10～15MWtで運転されている。

さて、ハルデンプロジェクトではかつて原子炉及びプラントの動特性と制御、あるいは炉雑音に関連して、HBWRを対象とした多くの実験と研究が行われた。即ち原子炉運転の初期の1960年代には原子炉プラントの動特性を実験的に明らかにするために、正弦波状外乱⁽²⁾、疑似ランダム信号外乱⁽³⁾、ステップ状外乱⁽⁴⁾、等を反応度外乱として与え、得られた動特性の測定結果が相互に比較評価された。さらに炉雑音解析手法を用いた原子炉プラントの動特性測定も行われ⁽⁵⁾、出力炉の炉雑音解析に関して貴重な経験が得られた。

上記のような種々の動特性測定、炉雑音解析は一般に稼動中の原子炉で見られる定格値のまわりでの炉出力の不規則変動現象を理解する上で有益な情報を提供してくれる。また、このような炉雑音と動特性に関する知識を獲得する事は、原子炉出力が何らかの特異な変動現象、例えば共鳴振動現象等を伴う場合には特に重要である。炉出力の共鳴振動は原子炉を不安定な状態に導いたり、あるいはその繰返し変動が炉及びプラントの構造物、燃料棒などに好ましくない効果を与える事も考えられる。

HBWRにおいても高出力運転中に出力の共鳴振動現象の発生が観測され、上記の一連の研究を通じてその特性、原子炉の安定限界、雑音源等が明らかにされた。それらのうち主な結果を示すと次の通りである。

- (1) この現象は1966年までの第2燃料サイクルの間の7MWt以上の出力運転中に見られたもので、0.006Hzという低い周波数で出力が振動する。
- (2) 出力振動の振幅は出力の上昇と共に大きくなり15MWt以上では炉は不安定になる。
- (3) 冷却材中のフラッシング効果がこの現象に重要な作用をおよぼして冷却材のサブクーリングを増すことによって原子炉を安定化することができる。

HBWRにおいては上記結果に基づいて冷却材のサブクール度を増すように原子炉内の1次系ループが改造された。それ以後この出力振動現象は観測されていない。

しかしながら現在のHBWRにおいても上記の現象と特性の異なる新たな炉出力共鳴振動現象が見られる。この現象はSeifritzによって初めて取上げられた⁽⁶⁾⁽⁷⁾。しかし、出力振動の振幅が通常の定格出力運転に支障をきたさない程度に小さいため、その後より立入った考察は行われていない。過去に得られた実験データ及び本現象に言及した報告書⁽⁶⁾等から、この炉出力共鳴振動現象は次のような特徴を持つ事が明らかとなった。

- (i) この振動は炉出力約9.5MWt以上で観測される。

(ii) 一旦振動を開始すると中性子束は約 0.04 Hz の周期を持つ継続振動をし、炉出力を上記振動発生限界の出力以下にしない限り消滅しない。

(iii) 振動振幅は定常値に対し約±2%である。

また、V章のサーベイでも明らかにされるが、本現象はHBWR運転の第2燃料サイクル(1962~1966)までの炉運転期間では観測されておらず、その後新たに発生した現象である。

上記のように本現象は先に述べた0.006Hz付近での共鳴振動とは本質的に異なるものである。その振幅は炉出力から見る限り比較的小さく直接には原子炉の不安定現象を引起すような性格のものではないが、その特性を把握し雑音源を明らかにしておく事は原子炉の診断という観点からは重要な意義を持っている。

本報告書は自己回帰(AR)モデル同定手法を用いて上記炉出力共鳴振動現象を解析した結果をまとめたものである。

従来、炉雑音解析では与えられた炉雑音時系列データに対し相関解析、スペクトル解析を主体とした手法が最も多く用いられて来た⁽⁸⁾⁽⁹⁾。しかし、この種の方法では一般に測定変数間の入出力関係はあらかじめ規定されている。従って物理的因果関係の明らかな系に対しては有効であるが、変数間にフィードバック効果を伴う系に対してはこの種の方法は正しい解を与えない事が知られている。この事は沸騰水型原子炉のように炉の動特性が炉心の熱水力動特性とフィードバック効果を介して複雑に結合した系を取扱う場合充分注意をばらう必要のあることを示唆している。

従来の炉雑音解析のこの種の限界を克服し原子炉動特性の内部構造にまで立入った議論を行う事を目的として、近年確率論的モデルを用いたシステム同定の方法が炉雑音解析の分野でも積極的に取入れられるようになった。その主な特徴としては次のような事が挙げられる。

- (a) 同定される確率論的モデルは系の変動を引越す雑音源を記述する項と、それを観測によって得られる現象にまで変換するシステム動特性との2つの項から成る。従って一旦モデルを同定すると、これを用いて雑音源の特性とシステムの特性を分離して個々に評価する事が可能となる。
- (b) システム動特性を記述する項のみに着目すれば、変数相互間のフィードバック効果の分離が可能となる。
- (c) 多変数系の取扱いが極めて容易である。
- (d) 系に加わる雑音は有色かつ入力変数と相関を持っていてもかまわない。

そこで問題は確率論的モデルをいかに精度良く同定するかという事であるが、それに対し時系列解析の分野で以前からいくつかの方法が提案されている^{(10)~(12)}。そのうち、モデル同定の容易さと計算の簡単さからARモデルを用いた同定手法が今まで最も多く用いられて来た。原子炉工学の分野でもすでに、原子炉プラントあるいはそれに関連したプラントの動特性と制御系の評価^{(13)~(15)}、炉雑音解析^{(16)~(20)}、診断技術⁽²¹⁾等に応用され一定の成果を納めている。

本報告書では3章でARモデルを用いた雑音源の評価法について概説している。4章ではこの手法をHBWR炉雑音解析に応用した結果について述べる。HBWRではII章に示されているように炉心で発生した蒸気は原子炉に対して並列結合した2つの熱交換器に導かれており、

これを通して2次系に熱が伝達される構造になっている。結論から言うと本炉雑音解析では、前述した0.04Hz近傍の出力共鳴振動現象は並列結合された2つの熱交換器の間で起る熱伝達動特性の干渉効果によるものであるという結果を得た。即ち、本解析結果は炉出力共鳴振動がHBWRプラントの構造的特性に起因するものである事を示唆している。

本解析結果の妥当性を確かめるために過去に逆上ってHBWR運転データ及びプラント状態に関するサーベイが行われた。その結果、1976年の原子炉運転期間中にだけ前述した炉出力共鳴振動現象の見られない事が明らかにされた。さらに原子炉運転記録によるとこの期間中は熱交換器からの水漏れのため熱交換器1ユニットで原子炉運転の行われていた事が確認された。この事実は2つの熱交換器の間の相互干渉効果が炉出力共鳴振動の雑音源であるという本解析結果を支持するもので、上記期間中の原子炉運転条件はその雑音源を取除いた事に対応している。以上の結果については5章で詳しく論じられている。

本炉雑音解析結果は原子炉診断という観点からいくつかの重要な意味を持っている。

まず、本解析結果は中性子束のスペクトルパターンを原子炉運転履歴に伴なってモニターする事の重要性を指摘している。特に、その炉での主要な雑音源が何であるか明らかにし、それが原子炉プラントを改造したり運転条件にそれまでと違った質的な変更を加えた場合、どう変化するかを必要に応じて確かめておく事は、万一異常現象が起った場合異常なスペクトルパターンを正常な場合と比較し識別する上で必要である。炉雑音の正常時のスペクトルパターンの変遷が意識的にかつ継続的に把握されていれば、ここで解析された炉出力共鳴振動の雑音源は新たな実験と解析を行わなくても解明されていた性格のものである点を指摘しておくのは意義のある事と思われる。

今日までに診断技術への応用を意識した種々の炉雑音解析が出力炉を対象として行われているが、炉雑音レベルでのプラント変量と原子炉炉心変量との動特性的関係についてはまだはつきりしない点の多い事も報告されている⁽²²⁾⁽²³⁾。本解析で扱った問題はこのカテゴリーに属するもので、ARモデル同定手法が今後この分野での炉雑音解析の有効な道具となり得ることを示している。

さらに雑音源及びフィードバック系の分離評価が可能な確率論的モデルを用いた炉雑音解析はまだその端緒についたばかりであり、今後さらに多くの問題に対して適用されて行くものと思われる。

2. HBWRプラントの概要と出力共鳴振動現象の特徴

2.1 プラントの概要

Fig. 1 にはHBWRプラントの構成の概略が示されている。1次系は原子炉，サブクーラーA，及び炉に対して並列結合された2つの熱交換器（STA，STB）により構成され重水が使用されている。炉心で発生した蒸気は2つの熱交換器の1次側を通過して凝縮され水になる。この水はポンプでサブクーラーAに送られその1次側を通り2つのパスに分枝して原子炉に戻る，その1つはサブクール水が冷却材に供給される経路で，炉心のまわりの反射材中に配置された24個のチューブを通して冷却材中に戻される。他のパスは炉心下部のプレナムに導かれている。

2次系では軽水が使用されていて，2つの熱交換器（STA，STB）の2次側，サブクーラーA，スチームドラム，蒸気発生器1次側，及びサブクーラーBより構成されている。スチームドラムより送られた軽水は並列結合された2つの熱交換器の2次側を通過しそれぞれのループのポンプでスチームドラムに再び送り返される。

3次系はオープンループ系で，蒸気発生器2次側，サブクーラーB，及び給水タンクより構成されている。この系で発生した蒸気は近くの製紙工場に送り消費されている。

ここで，プラントの構造的特徴として2つの熱交換器STAとSTBが1次側では原子炉と，また2次側ではスチームドラムと並列結合している点を指摘しておく。この事は5章で考察されているように着目している炉出力共鳴振動と密接な関係を持っている。

2.2 観測された出力共鳴振動現象の特徴

1章で触れたように，HBWRでは高出力時に0.04Hz付近に出力共鳴振動現象が観測される。以下にその現象的な特徴について述べる。

Fig. 2 には3つの異なる出力レベル（6.0，9.6，12.1MWt）で取られた中性子束信号のチャート記録が示されている。図から，出力9.6及び12.1MWtでは約25secの周期成分が容易に認められる。しかし6MWtではこの成分は現われない事がわかる。これらの信号の統計的性質をより詳細に調べるためにスペクトル解析が行われた。Fig. 3 ではその結果を単純化して特徴のみを示している。これから明らかなように，HBWRにおける中性子束のパワースペクトルは9.6及び12.1MWtの場合0.04Hz付近に鋭いピークを持っていて，これが上記の25secの周期成分に対応している事がわかる。また，出力9.6MWtと12.1MWtのスペクトルピークを比較すると炉出力の上昇に伴ってピークの位置が周波数の高い方へいくらかシフトしているのが認められる。しかし，6MWtではこの周波数領域にはピークは存在せずスペクトルはなめらかである。さらにこの図から0.8Hz付近には共通なスペクトルピークのある事がわかる。このピークは炉心内で冷却材の沸騰が起っている限り現われるもので，冷却材が炉心

を通過する際のチャンネル内での流動変動によって形成されるものと理解されている⁽²⁴⁾。

生データに対する考察とスペクトル解析結果から明らかなように、周波数 0.04 Hz の振動成分は炉出力変動の中で最も支配的な要素でありその振幅は出力レベルに対して±2%程度となる。また、出力 6 MWt ではこのスペクトルピークが全く認められなかった事はこの現象がある特定の出力レベル以上で発生する事を示している。

3. 自己回帰 (AR) モデルを用いた雑音源の同定法

3.1 ARモデルによるノイズ寄与率解析

時系列データが与えられた時、従来我々は相関解析や、スペクトル解析手法を用いてそのデータの持つ統計的性質を調べて来た。もし時系列データをうまく処理して、さらに時系列の生成メカニズムまでも決定する事ができればその意義は極めて大きい。そのような解析のための一般的手法としていわゆるシステム同定の手法を応用することができる。即ち実データに対し何らかの評価規範を最適にするような動特性モデルをフィッティングし、そのモデルを解析する事によって時系列の生成メカニズムを考察する事が可能となる。

与えられた時系列データが定常不規則過程である時、その数学的表現は確率論的な線型モデルで与えられる。モデルのタイプとしては自己回帰 (AR)、移動平均 (MA)、及びそれを結合した自己回帰移動平均 (ARMA) 型等のモデルが今日まで時系列解析の分野で取扱われて来た⁽⁹⁾。そのうち最も一般性を持つ表現としては ARMA モデルである。しかし多変数系における同定の容易さから、解析上の多少の一般性を犠牲にする事にはなるが、実用上 AR モデルを用いた手法が今日迄比較的多く受け入れられている。

r 次元測定変数を $X(k) = (x_1(k), x_2(k), \dots, x_r(k))^T$ とすると定常時系列に対する AR モデル表現は次のように与えられる。(Tは転置を表わす)

$$X(k) = \sum_{m=1}^M A(m) X(k-m) + U(k) \quad (1)$$

ここで、 $A(m)$ は $(r \times r)$ 次元のシステムマトリックス、 $U(k)$ は k 次元ベクトルで雑音駆動源を表わし白色雑音とする。その確率モーメントは2次まで定常とし次のように与えられるものとする。

$$\begin{cases} E[U(k)] = 0 & (\text{ゼロベクトル}) \\ E[U(k) \cdot U(k-l)^T] = \Sigma \cdot \delta(l) \\ (\Sigma)_{ij} \triangleq \sigma_{ij} \end{cases} \quad (2)$$

但し $E(\cdot)$ は期待値を表わす。また、 Σ は雑音駆動源に対する共分散マトリックスでその (i, j) 要素は σ_{ij} で与えられる。 $\delta(l)$ はデルタ関数で $l=0$ でのみ値を持ち $\delta(0)=1$ である。

(1)式よりベクトル $U(k)$ と時間を l だけシフトしたその転置 $U(k-l)^T$ の積をとり期待値操作をほどこすと、

を通過する際のチャンネル内での流動変動によって形成されるものと理解されている⁽²⁴⁾。

生データに対する考察とスペクトル解析結果から明らかなように、周波数 0.04 Hz の振動成分は炉出力変動の中で最も支配的な要素でありその振幅は出力レベルに対して±2%程度となる。また、出力 6 MWt ではこのスペクトルピークが全く認められなかった事はこの現象がある特定の出力レベル以上で発生する事を示している。

3. 自己回帰 (AR) モデルを用いた雑音源の同定法

3.1 ARモデルによるノイズ寄与率解析

時系列データが与えられた時、従来我々は相関解析や、スペクトル解析手法を用いてそのデータの持つ統計的性質を調べて来た。もし時系列データをうまく処理して、さらに時系列の生成メカニズムまでも決定する事ができればその意義は極めて大きい。そのような解析のための一般的手法としていわゆるシステム同定の手法を応用することができる。即ち実データに対し何らかの評価規範を最適にするような動特性モデルをフィッティングし、そのモデルを解析する事によって時系列の生成メカニズムを考察する事が可能となる。

与えられた時系列データが定常不規則過程である時、その数学的表現は確率論的な線型モデルで与えられる。モデルのタイプとしては自己回帰 (AR)、移動平均 (MA)、及びそれを結合した自己回帰移動平均 (ARMA) 型等のモデルが今日まで時系列解析の分野で取扱われて来た⁽⁹⁾。そのうち最も一般性を持つ表現としては ARMA モデルである。しかし多変数系における同定の容易さから、解析上の多少の一般性を犠牲にする事にはなるが、実用上 AR モデルを用いた手法が今日迄比較的多く受け入れられている。

r 次元測定変数を $X(k) = (x_1(k), x_2(k), \dots, x_r(k))^T$ とすると定常時系列に対する AR モデル表現は次のように与えられる。(Tは転置を表わす)

$$X(k) = \sum_{m=1}^M A(m) X(k-m) + U(k) \quad (1)$$

ここで、 $A(m)$ は $(r \times r)$ 次元のシステムマトリックス、 $U(k)$ は k 次元ベクトルで雑音駆動源を表わし白色雑音とする。その確率モーメントは 2 次まで定常とし次のように与えられるものとする。

$$\begin{cases} E[U(k)] = 0 & (\text{ゼロベクトル}) \\ E[U(k) \cdot U(k-l)^T] = \Sigma \cdot \delta(l) \\ (\Sigma)_{ij} \triangleq \sigma_{ij} \end{cases} \quad (2)$$

但し $E(\cdot)$ は期待値を表わす。また、 Σ は雑音駆動源に対する共分散マトリックスでその (i, j) 要素は σ_{ij} で与えられる。 $\delta(l)$ はデルタ関数で $l=0$ でのみ値を持ち $\delta(0)=1$ である。

(1)式よりベクトル $U(k)$ と時間を l だけシフトしたその転置 $U(k-l)^T$ の積をとり期待値操作をほどこすと、

$$\begin{aligned}
 E[U(k)U(k-\ell)^T] &= E\left[\left(X(k) - \sum_{m=1}^M A(m)X(k-m)\right)\left(X(k-\ell) - \sum_{n=1}^M A(n)X(k-n-\ell)\right)^T\right] \\
 &= E\left[\left(\sum_{m=0}^M B(m)X(k-m)\right)\left(\sum_{n=0}^M B(n)X(k-n-\ell)\right)^T\right] \\
 &= \sum_{m=0}^M \sum_{n=0}^M B(m)E[X(k-m)X(k-n-\ell)^T]B(n)^T = \sum_{m=0}^M \sum_{n=0}^M B(m)R_{xx}(\ell-m+n)B(n)^T \\
 \therefore R_{UU}(\ell) &= \sum_{m=0}^M \sum_{n=0}^M B(m)R_{xx}(\ell-m+n)B(n)^T \tag{3}
 \end{aligned}$$

但し、 $B(m)$ 、 $R_{xx}(\ell)$ 、 $R_{UU}(\ell)$ は次式によって与えられる。

$$B(m) = -A(m) \quad m = 1, 2, \dots, M.$$

$$B(0) = I$$

$$R_{xx}(\ell) = E[X(k)X(k-\ell)^T]$$

$$R_{UU}(\ell) = E[U(k)U(k-\ell)^T]$$

(3)式両辺に $\sum_{\ell=-\infty}^{\infty} \cdot \exp(-i2\pi f\ell)$ の演算をほどこしフーリエ変換すると、

$$\begin{aligned}
 \sum_{\ell=-\infty}^{\infty} R_{UU}(\ell) \cdot \exp(-i2\pi f\ell) &= \sum_{m=0}^M B(m) \exp(-i2\pi fm) \cdot \\
 &\quad \sum_{\ell=-\infty}^{\infty} R_{xx}(\ell-m+n) \exp(-i2\pi f(\ell-m+n)) \cdot \sum_{n=0}^M B(n)^T \exp(i2\pi fn) \\
 \therefore \Sigma &= B(f)P_{xx}(f)\overline{B(f)}^T \\
 \therefore P_{xx}(f) &= B(f)^{-1} \cdot \Sigma \cdot (\overline{B(f)}^T)^{-1} \tag{4}
 \end{aligned}$$

ここで

$$P_{xx}(f) = \sum_{\ell=-\infty}^{\infty} R_{xx}(\ell) \exp(-i2\pi f\ell) \tag{5}$$

$$B(f) = \sum_{m=0}^M B(m) \exp(-i2\pi fm) = I - \sum_{m=1}^M A(m) \exp(-i2\pi fm) \tag{6}$$

とすると $P_{xx}(f)$ は出力変数のパワースペクトルを与える。

今雑音駆動源の各要素がすべて独立であるとする、この時(2)式共分散マトリックスの非対角要素はすべてゼロとなる。従って(4)式は、簡単化されて

$$P_{xx}^{ii}(f) = \sum_{j=1}^r |d_{ij}(f)|^2 \sigma_{jj} \tag{7}$$

と表わされる。ここで、 $P_{xx}^{ii}(f)$ は変数 $x_i(k)$ のオートパワースペクトルを、また $d_{ij}(f)$ は $(B(f)^{-1})_{ij}$ 要素をそれぞれ表わすものとする。

$$Q_{xx}^{ii}(f) = |d_{ij}(f)|^2 \sigma_{jj} \tag{8}$$

と定義すると $Q_{xx}^{ii}(f)$ は雑音駆動源 $u_j(k)$ からの出力変数 $x_i(k)$ のオートパワースペクトルへの寄与分を示す。各雑音源から出力変数のパワースペクトルへの寄与分を評価し易い形に表わすため、

$$NCR^{ij}(f) = \frac{Q_{xx}^{ij}(f)}{P_{xx}^{ii}(f)} \quad (9)$$

を定義しこれをノイズ寄与率 (Noise Contribution Ratio) と呼ぶ。雑音駆動源の各要素がすべて独立であるという仮定が成立する時、我々は(9)式を用いて各雑音源から出力変数への影響の程度を評価することができる。

3.2 ARモデルの同定

雑音源パワーの各出力変数パワースペクトルへの影響の程度を(9)で定義したノイズ寄与率を用いて評価するに当って、ARモデルを前もって同定しておく必要がある。ARモデルの同定は時系列解析の分野で以前から用いられているが、評価関数FPE (Final Prediction Error)法を用いた同定手法が赤池によって提案されて以来、この方法がエンジニアリングの分野で広く用いられるようになった⁽¹⁰⁾。その手順は概略次の通りである。

即ち、与えられた時系列データ $\{X(k); k=1, 2, \dots, N\}$ に対し共分散関数次式を計算する。

$$C_{xx}(\ell) = \frac{1}{N} \sum_{s=1}^{N-\ell} (X(s) - \bar{X})(X(s-\ell) - \bar{X})^T \quad (10)$$

但し \bar{X} は平均値を表わす。

今適当な数 L を与え初期条件として

$$A_0(m) = B_0(m) = 0 \quad (\text{ゼロマトリックス}) \quad m=1, 2, \dots, L \quad (11)$$

とする。また、

$$\begin{cases} S_0 = f_0 = C_{xx}(0) \\ e_0 = C_{xx}(2) \end{cases} \quad (12)$$

として各 M 、($M=1, 2, \dots, L$) に対して次式を計算する。

$$S_M = C_{xx}(0) - \sum_{m=1}^M A_M(m) C_{xx}^T(m) \quad (13)$$

$$e_M = C_{xx}(M+1) - \sum_{m=1}^M A_M(m) C_{xx}(M+1-m) \quad (14)$$

$$f_M = C_{xx}(0) - \sum_{m=1}^M B_M(m) C_{xx}(m) \quad (15)$$

$$D_M = e_M f_M^{-1} \quad (16)$$

$$E_M = e_M^T S_M^{-1} \quad (17)$$

$$A_{M+1}(m) = \begin{cases} A_M(m) - D_M B_M(M+1-m) & m=1, 2, \dots, M \\ D_M & m=M+1 \end{cases} \quad (18)$$

$$B_{M+1}(m) = \begin{cases} B_M(m) - E_M A_M (M+1-m) & m=1, 2, \dots, M \\ E_M & m=M+1 \end{cases} \quad (19)$$

同時に

$$FPE(M) = \left(1 + \frac{Mr}{N}\right)^r \left(1 - \frac{Mr}{N}\right)^{-r} |S_M| \quad (20)$$

を計算し、 $M=1, 2, \dots, L$ に対して (20) が最小となる M を決定する。この M が求める AR モデルの次数を与え、この時の $\{A_M(m); m=1, 2, \dots, M\}$ がモデルの係数を与える。また、AR モデル雑音駆動源 (2) の推定値は (19) で与えられる。雑音駆動源各要素の間の独立性は次のようにして調べることができる。

$$\lambda_{ij} = \frac{(S_M)_{ij}}{\sqrt{(S_M)_{ii}} \sqrt{(S_M)_{jj}}} \quad (21)$$

λ_{ij} が 1 と比して十分小さければ、それに対応した雑音駆動源は相互に無相関である。

4. 出力共鳴振動の雑音源に関する解析結果

出力共鳴振動の解析に当って一連の実験が行われた。まず、反応度自動制御系の本現象に対する効果を調べるため、制御棒駆動を自動から手動に切換え、その効果を調べた。その結果自動制御系は本現象に対して何らの作用を及ぼしていない事が明らかとなった。続いて炉心及びプラントの各変量間の動的な相互関係を調べるため、1次系の主要なセンサーからの信号を取り相関解析が行われた。これらの予備的考察にもとづき、Fig. 4 に示されている測定変数の中から次の6つが解析のための変数として採用された。

N F ; 中性子束

P ; ベッセル圧力

F A ; 熱交換器 A の蒸気流量

F B ; 熱交換器 B の蒸気流量

T I ; プレナムへの冷却水入口温度

T F ; 燃料棒中心温度

以下の解析に用いられるデータが取られた時の実験条件が Table 1 に示されている。実験の間炉出力は 11.8 MWt に維持され、データはファーストスキャンシステム (fast scan system) を用いて IBM-1800 計算機磁気テープに収録された。データはさらにノルド (NORD) 計算機ディスクに転送され NORD-50 計算機により解析が行われた。これら一連のデータ取得、解析の手順は図式的に Fig. 5 に示されている。

$$B_{M+1}(m) = \begin{cases} B_M(m) - E_M A_M (M+1-m) & m=1, 2, \dots, M \\ E_M & m=M+1 \end{cases} \quad (19)$$

同時に

$$FPE(M) = \left(1 + \frac{Mr}{N}\right)^r \left(1 - \frac{Mr}{N}\right)^{-r} |S_M| \quad (20)$$

を計算し、 $M=1, 2, \dots, L$ に対して FPE が最小となる M を決定する。この M が求める AR モデルの次数を与え、この時の $\{A_M(m); m=1, 2, \dots, M\}$ がモデルの係数を与える。また、AR モデル雑音駆動源(2)の推定値は(19)で与えられる。雑音駆動源各要素の間の独立性は次のようにして調べることができる。

$$\lambda_{ij} = \frac{(S_M)_{ij}}{\sqrt{(S_M)_{ii}} \sqrt{(S_M)_{jj}}} \quad (21)$$

λ_{ij} が 1 と比して十分小さければ、それに対応した雑音駆動源は相互に無相関である。

4. 出力共鳴振動の雑音源に関する解析結果

出力共鳴振動の解析に当って一連の実験が行われた。まず、反応度自動制御系の本現象に対する効果を調べるため、制御棒駆動を自動から手動に切換え、その効果を調べた。その結果自動制御系は本現象に対して何らの作用を及ぼしていない事が明らかとなった。続いて炉心及びプラントの各変量の間動的な相互関係を調べるため、1次系の主要なセンサーからの信号を取り相関解析が行われた。これらの予備的考察にもとづき、Fig. 4 に示されている測定変数の中から次の6つが解析のための変数として採用された。

N F ; 中性子束

P ; ベッセル圧力

F A ; 熱交換器 A の蒸気流量

F B ; 熱交換器 B の蒸気流量

T I ; プレナムへの冷却水入口温度

T F ; 燃料棒中心温度

以下の解析に用いられるデータが取られた時の実験条件が Table 1 に示されている。実験の間炉出力は 11.8 MWt に維持され、データはファーストスキャンシステム (fast scan system) を用いて IBM-1800 計算機磁気テープに収録された。データはさらにノルド (NORD) 計算機ディスクに転送され NORD-50 計算機により解析が行われた。これら一連のデータ取得、解析の手順は図式的に Fig. 5 に示されている。

Table 1 Experimental Conditions during the Noise Experiment.

reactor power	11.8 MWt
length of data recording	2 h 45m
sampling period	0.1 sec.
moderator temperature	235 °C
steam flow FA	8.5 t/h
FB	11.2

4.1 スペクトル解析

Fig. 6 には上記解析変数のオートパワースペクトル密度 (APSD) 関数が示されている。0.04Hz 付近の鋭いスペクトルピークはいずれの変量にも共通に現われている。さらに NF, TF の 2 つの変数には 0.8Hz 付近にもう 1 つのピークが見られる。

Fig. 7 には中性子束と各変量間のシンプルコヒーレンス (Simple Coherence) が示されている。コヒーレンス関数は周波数領域での 2 つの変数間の相関の程度を表わす。図から明らかのように中性子束と他のすべての変量との間のコヒーレンスは 0.04 Hz 付近で 1 近くになっている。一方 0.8Hz 付近では TF との間のコヒーレンスだけが高い値を示している。

以上の事から 0.04 Hz の振動現象は炉心及び 1 次系全体を励起しており、一方 0.8Hz のそれは炉心内部でのみ見られる現象であることを示唆している。以下の解析では 0.04 Hz の振動についてのみ着目する。一般にこの種の振動現象の雑音源を調べる場合、変数相互間にフィードバック効果があると現象伝播に関する因果律がマスクされてしまい、従来のスペクトル解析手法からだけでは有益な情報を得る事はできない。このような場合、3章で述べたノイズ寄与率が有効である。

4.2 ノイズ寄与率解析

ノイズ寄与率解析に必要な計算アルゴリズムは 3章に述べられている。ここでは特に重要と思われる、NF, P, FA, FB, TI の 5 つの変数に関する AR モデルを同定し、これを用いてノイズ寄与率解析を行った。Table 1 で示した実験データに対して得られた AR モデルの次数は $M=15$ であった。雑音源の独立性をチェックした後、このモデルを用いてノイズ寄与率解析が行われた。Fig. 8 にはその結果を示している。ここで図中のカーブは(9)式の累積表現で与えられており、周波数 f の関数としてパーセンテージで示されている。今ある周波数 f に着目した時、図中の各カーブには含まれたそれぞれの区間がそこに書込まれた変数に対応した雑音源の寄与率を与えている。即ち下から順番に NF, FA, FB, TI, P のそれぞれの部分が各変数に対応した雑音源からの着目している変数へのノイズ寄与率を表わす。それらを順次たすと正味 100% となりもとのパワースペクトルが得られる。Fig. 8-(a) における

N Fの部分は他の変数に対応する雑音源からの影響として説明できないすべてのものが含まれている。具体的には観測雑音、システムの非線型性、ここでは採用されていない変数からの影響等が含まれる。その他のF A, F B, T, Pの部分はそれぞれの雑音源からN Fへのパワーの伝播の程度を示す。ここで0.04 Hz付近に着目すると、この周波数領域で熱交換器に導かれている2つの蒸気流量の和(F A+F B)は全体の55%以上となっており他のいかなる雑音源からの影響にも勝っている。この事は中性子束共鳴振動が蒸気流量変動によってもたらされている事を示唆している。Fig. 8-(b)には圧力Pに関する同様の解析結果が示されている。結果はN Fの場合と同様で蒸気流量変動の影響が50%以上となりこれが0.04 Hz付近での圧力変動の雑音源となっている事を示している。又、Fig. 8-(c)及びFig. 8-(d)では2つの蒸気流量F A及びF Bに関する結果が示されている。この2つの図は前の2つと比べ全く異なるパターンを示している。即ち、ここではF A+F Bの占める部分が大半で、蒸気流量の変動はそれ自身の持つ雑音源によって引起されているか、あるいは少なくともそれが炉心部変量の変動によって引起されたものではないことを示している。

以上のノイズ寄与率解析から、我々は炉出力共鳴振動を引起している雑音源とその伝播経路について次のような結論を得る。即ち、着目している0.04 Hz付近の出力共鳴振動は、2つの熱交換器に導かれているループの蒸気流量変動によってもたらされたものである。

4.3 熱交換器1次側入口蒸気流量の相関解析

上記ノイズ寄与率解析結果に対する考察を加え、2つの蒸気流量の間の動的な関係についてさらに詳しく調べるために相関解析が行われた。

Fig. 9にその結果を示している。この図から、それぞれの蒸気流量は0.04 Hzの振動をすると同時に相互に逆位相の動きをしている事がわかる。このような現象は熱交換のプロセスを通じて2つの熱交換器の間で干渉効果のある事を意味している。今、Fig. 1で示された2つの熱交換器S T A, S T Bに着目するとそれらは1次系では原子炉と、また2次系ではスチームドラムとそれぞれ並列結合となっている事がわかる。このような構造を持つプラントではある一定の条件の下で次のような現象が起り易いものと思われる。即ち、今何らかの原因でS T A 2次側の蒸気発生割合が増えたたとすると、それはスチームドラムの圧力を上昇させる方向に作用する。しかし、スチームドラムの容量は相対的に大きいのでこの圧力変動はS T B 2次側の蒸気流量に影響をおよぼす。このようにして2次側での蒸気流量はS T Aで増加すればS T Bで減少させるように働く。全く同様にして、今度はS T Bを変動の原因と見なす事ができ、逆の動作が引起される。この現象はかようにして持続振動となる傾向を持つ。

本蒸気流量振動現象が起る条件としては2次系の圧力及び蒸気発生割合が重要であると考えられる。この事は本現象が原子炉出力が十分高いレベルでのみ起る事を意味しており、2章で述べた出力共鳴振動のレベル依存性の結果とも対応している。

5. 過去の炉運転データからの出力共鳴振動に関する考察

4章における解析結果の妥当性をチェックするために、過去の実験データについてサーベイが行われた。その結果HBWR出力のPSDパターンは原子炉運転の一定の時期に対応して次のように変化していることが明らかになった。

(a) HBWR運転の初期(1966年まで)

Fig. 10はHBWR第2燃料サイクル(1962~1966)で得られた中性子束のPSDパターンを示している。ここでは出力の上昇とともに0.006Hz付近に顕著なスペクトルピークが見られる。この現象に関しては多くの実験と研究が重ねられ、その結果この出力振動を引起している雑音源はサブクーリングシステム、または冷却材中にあると判断された⁽⁶⁾。この現象はそれが現われる周波数領域から見て現在着目している共鳴振動とは明らかに異なる性質のものである。

(b) 1967~1975年の間

この期間中の中性子束PSDには高出力時に現在着目しているものと同じ0.04Hzの共鳴振動現象の見られる事が報告されている⁽⁶⁾。即ち、7MWtと13MWtの2つの出力レベルで中性子束PSDを測ったところ、13MWt時にも共鳴振動が現われた。Fig. 11には出力13MWtでの中性子束PSDを示す。1975年1月には炉雑音データの取得が行われている。その時の出力は9.1MWtであった。Fig. 12にはその時の結果を示すがそこには共鳴振動を示すスペクトルピークは見られない。

(c) 1975年6月~1976年の間

この期間には数回の炉雑音測定が行われている。原子炉出力はいずれも11.2MWtと比較的高いにもかかわらず、この期間中の中性子束PSDにはいずれも共鳴振動は現われていない。Fig. 13には代表的な2つのケースが示されている。

(d) 1976~1978年の間

この期間にも種々の炉雑音測定が行われている。それらの取得データに関するスペクトル解析の結果9.5MW以上の中性子束PSDにはすべて0.04Hz付近にスペクトルピークが認められた。しかし出力7.4及び6MWtで測られた中性子束PSDにはピークは現われなかった。これら一連の結果は(b)の期間の結果とよく対応している。

以上の各時期の中性子束PSDパターンと原子炉及びプラントの運転条件との関係を調べるために、原子炉運転記録の簡単なサーベイが行われた。その結果明らかとなった事柄と上記(a)~(d)までのスペクトルパターンの特徴をまとめてFig. 14に示す。そのうち特に注意すべき点として、次の点が指摘できる。

- (i) 0.006Hz 炉出力共鳴振動を抑えるために1966年にプラントは1部改造され、冷却材のサブクール度を増すような処置がほどこされた。と同時に、この時熱交換器STBは以前より大きな容量を持つものに取替えられた。0.04Hzの共鳴振動はそれ以後起つてい

る点に注意する必要がある。

- (ii) (e)で示されたように1975年6月～1976年1月までの間だけは高出力時にも共鳴振動は見られなかった。この期間中は図に書込まれているように熱交換器水漏れトラブルのため、原子炉はSTB1ユニットで運転されていた。

以上のように炉運転記録から明らかにされた2つの事実は4章で行った雑音源についての解析結果の妥当性を明確な形で支持している。即ち、0.04 Hzの炉出力共鳴振動は並列結合した2つの熱交換器の間での干渉効果によるもので上記(ii)のように熱交換器1ユニットで炉を運転すると雑音源が失われ、それに伴って共鳴振動も消失する。さらに上記(i)より2つの熱交換器の間で容量に若干のアンバランスがある為に共鳴振動現象がより生じ易くなっているものと考えられる。

6. 結 論

HBWR高出力運転時、0.04 Hz付近に現われる炉出力共鳴振動についてその雑音源の同定が行われた。ARモデルを用いたノイズ寄与率解析の結果、本出力共鳴振動は1次系においては原子炉、また2次系においてはスチームドラムと並列結合している2つの熱交換器の間の動的な干渉効果にもとづくものである事が明らかにされた。この解析結果は過去の原子運転データ及び運転記録のサーベイ結果によっても支持された。

本解析を通じて、ここで用いられた炉雑音解析手法が雑音源の同定及び雑音伝播のメカニズムの解明に当って極めて有力な道具となり得る事が明らかとなった。

またこの種の炉雑音解析手法は原子炉診断技術の確立にとっては今後より重要な意義を持つものと考えられる。即ち、ここで用いられた手法は確率論的モデルの同定を基礎にして展開されており、雑音源とシステムの特性の分離評価、フィードバック系の評価等が原理的に可能である。もしこれらが十分実行可能であれば異常の場所、性格、程度等を実験データから評価する上で本手法は有益な道具となるであろう。今後この種のフィージビリティ、スタディが行われる予定である。

謝 辞

本実験解析は筆者がハルデンプロジェクトへ出張期間中に行ったもので、HBWRでの実験に当っては、Brakas, Svanholm, Aamot, 皆川の各氏及びエレクトロニクス課のスタッフと原子炉オペレータの人々の多くの援助を受けた。また、Bjørlo, Aamot, Hernes, Smidt Olsen の各氏からは有益な討論および助言を受けた。ここに各氏の名前を付し感謝の意を表す。

る点に注意する必要がある。

- (ii) (e)で示されたように1975年6月～1976年1月までの間だけは高出力時にも共鳴振動は見られなかった。この期間中は図に書込まれているように熱交換器水漏れトラブルのため、原子炉はSTB1ユニットで運転されていた。

以上のように炉運転記録から明らかにされた2つの事実は4章で行った雑音源についての解析結果の妥当性を明確な形で支持している。即ち、0.04 Hzの炉出力共鳴振動は並列結合した2つの熱交換器の間での干渉効果によるもので上記(ii)のように熱交換器1ユニットで炉を運転すると雑音源が失われ、それに伴って共鳴振動も消失する。さらに上記(i)より2つの熱交換器の間で容量に若干のアンバランスがある為に共鳴振動現象がより生じ易くなっているものと考えられる。

6. 結 論

HBWR高出力運転時、0.04 Hz付近に現われる炉出力共鳴振動についてその雑音源の同定が行われた。ARモデルを用いたノイズ寄与率解析の結果、本出力共鳴振動は1次系においては原子炉、また2次系においてはスチームドラムと並列結合している2つの熱交換器の間の動的な干渉効果にもとづくものである事が明らかにされた。この解析結果は過去の原子運転データ及び運転記録のサーベイ結果によっても支持された。

本解析を通じて、ここで用いられた炉雑音解析手法が雑音源の同定及び雑音伝播のメカニズムの解明に当って極めて有力な道具となり得る事が明らかとなった。

またこの種の炉雑音解析手法は原子炉診断技術の確立にとっては今後より重要な意義を持つものと考えられる。即ち、ここで用いられた手法は確率論的モデルの同定を基礎にして展開されており、雑音源とシステムの特性の分離評価、フィードバック系の評価等が原理的に可能である。もしこれらが十分実行可能であれば異常の場所、性格、程度等を実験データから評価する上で本手法は有益な道具となるであろう。今後この種のフィージビリティ、スタディが行われる予定である。

謝 辞

本実験解析は筆者がハルデンプロジェクトへ出張期間中に行ったもので、HBWRでの実験に当っては、Brakas, Svanholm, Aamot, 皆川の各氏及びエレクトロニクス課のスタッフと原子炉オペレータの人々の多くの援助を受けた。また、Bjørlo, Aamot, Hernes, Smidt Olsen の各氏からは有益な討論および助言を受けた。ここに各氏の名前を付し感謝の意を表す。

る点に注意する必要がある。

- (ii) (e)で示されたように1975年6月～1976年1月までの間だけは高出力時にも共鳴振動は見られなかった。この期間中は図に書込まれているように熱交換器水漏れトラブルのため、原子炉はSTB1ユニットで運転されていた。

以上のように炉運転記録から明らかにされた2つの事実は4章で行った雑音源についての解析結果の妥当性を明確な形で支持している。即ち、0.04 Hzの炉出力共鳴振動は並列結合した2つの熱交換器の間での干渉効果によるもので上記(ii)のように熱交換器1ユニットで炉を運転すると雑音源が失われ、それに伴って共鳴振動も消失する。さらに上記(i)より2つの熱交換器の間で容量に若干のアンバランスがある為に共鳴振動現象がより生じ易くなっているものと考えられる。

6. 結 論

HBWR高出力運転時、0.04 Hz付近に現われる炉出力共鳴振動についてその雑音源の同定が行われた。ARモデルを用いたノイズ寄与率解析の結果、本出力共鳴振動は1次系においては原子炉、また2次系においてはスチームドラムと並列結合している2つの熱交換器の間の動的な干渉効果にもとづくものである事が明らかにされた。この解析結果は過去の原子運転データ及び運転記録のサーベイ結果によっても支持された。

本解析を通じて、ここで用いられた炉雑音解析手法が雑音源の同定及び雑音伝播のメカニズムの解明に当って極めて有力な道具となり得る事が明らかとなった。

またこの種の炉雑音解析手法は原子炉診断技術の確立にとっては今後より重要な意義を持つものと考えられる。即ち、ここで用いられた手法は確率論的モデルの同定を基礎にして展開されており、雑音源とシステムの特性の分離評価、フィードバック系の評価等が原理的に可能である。もしこれらが十分実行可能であれば異常の場所、性格、程度等を実験データから評価する上で本手法は有益な道具となるであろう。今後この種のフィージビリティ、スタディが行われる予定である。

謝 辞

本実験解析は筆者がハルデンプロジェクトへ出張期間中に行ったもので、HBWRでの実験に当っては、Brakas, Svanholm, Aamot, 皆川の各氏及びエレクトロニクス課のスタッフと原子炉オペレータの人々の多くの援助を受けた。また、Bjørlo, Aamot, Hernes, Smidt Olsen の各氏からは有益な討論および助言を受けた。ここに各氏の名前を付し感謝の意を表す。

参 考 文 献

1. E. Jamne, et al.:Description of the HBWR Plant, HPR-95.(1967).
2. V. Tosi, et al.:Sinusoidal Reactivity Perturbation Experiment with the HBWR Second Fuel Charge, HPR-49.(1964).
3. Y. Fishman,:Pseudo Random Reactivity Perturbation Experiment with the HBWR Second Fuel Charge, HPR-50.(1964).
4. A. Brouwers,:Step Perturbation Experiments with the HBWR Second Fuel Charge, HPR-51.(1964).
5. T. Eurola,:Noise Experiments with the HBWR Second Fuel Charge, HPR-53.(1964).
6. W. Seifritz,:Measurment of the Ratio of the Prompt to the Delayed Neutronic Response of a Self-powered Vanadium Detector by Cross-correlation Techniques, HPR-146.(1972).
7. W. Seifritz,:Results of Space Dependent In-Core Power Noise Measurements at the Lingen and Halden Boiling Water Reactors, Paper presented at the specialist meeting on "Analysis of Measurements to Potential Failures in Nuclear Power Plants", Roma.(1972).
8. J.A. Thie,"Reactor Noise", Rowman and Littlefield, Inc.(1963).
9. R.E. Uhrig,"Random Noise Technique in Nuclear Reactor Systems", The Ronald Press Company.(1970).
10. G.P. Box, G.M. Jenkins,"Time Series Analysis", Holden-Day.(1969).
11. 赤池, 中川, "ダイナミックシステムの統計的解析と制御", サイエンス社(1972).
12. H. Akaike,:Maximum Likelihood Identification of Gaussian Autoregressive Moving Average Models", Biometrika,60.2, p255,(1973).
13. 尾熊, 他, "OWL-0プラントの動特性河定と制御系の評価" JAERI-M 6801, (1976).
14. K. Matsubara, et al.:A Multivariable Autoregressive Model of the Dynamics of a Boiling Water Reactor, Nucl. Sci. and Eng.65 pp1-16, (1978).
15. M. Kitamura, et al.:Identification of BWR Dynamics from Autoregressive Analysis of Multivariable Experiments, Progress in Nucl. Energy, Vol.1, pp231-240,(1977).
16. K. Matsubara, et al.:Experimental Studies of Core Flow Fluctuations and Neutron Noise in a BWR, Progress in Nucl. Energy, Vol.1, pp 137-149,(1977).
17. K. Matsubara, et al.:Experimental Studies of Core Flow Fluctuations as Noise Source in BWR, Journal of Nucl. Sci. and Tech., vol.15, No.4, pp249-262,(1978).
18. K. Fukunishi,:Diagnostic Analysis of a Nuclear Power Plant Using Autoregressive Processes, Nucl. Sci. and Eng. 62, pp215-225,(1977).

19. K. Fukunishi, :Noise Source Estimation of BWR Power Fluctuation by Autoregression, Nucl. Sci. and Eng. 67, pp296-308, (1978).
20. R. Oguma, E. Robinson, :Evaluation of the Dynamic Behaviour of Fuel Rod Elongation by Noise Analysis, Paper presented at the Enlarged Halden Programme Group Meeting, Norway, (1978).
21. Y. Ando, et al. :BWR Simulation Diagnosis by Noise Analysis, Progress in Nucl. Energy, Vol.1, pp163-174, (1977).
22. W.H. Sides, :Identification of Neutron Noise Sources in a Boiling Water Reactor, Progress in Nucl. Energy, Vol.1, pp119-135, (1977).
23. E. Türkcan, J.B. Dragt, :Borssele PWR Noise: Measurements, Analysis and Interpretation, Progress in Nucl. Energy, Vol.1, pp293-307, (1977).
24. T.J. Bjørlo, et al. :In-pile and Out-of-pile Hydrodynamics Studies on Natural Circulation Boiling Water Channels, HPR-82, (1967).

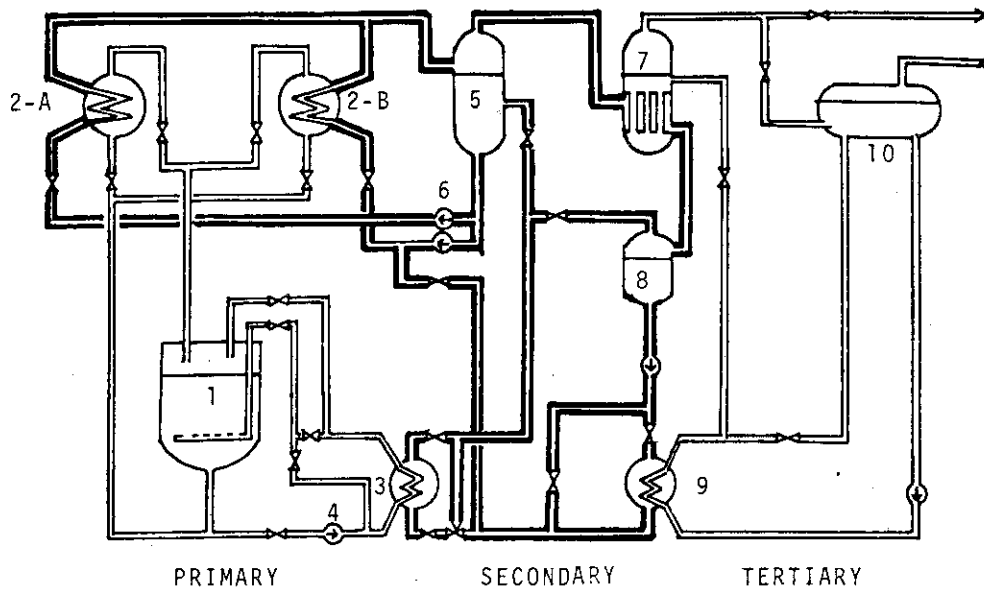


Fig.1 Simplified Flow Sheet of the HBWR Plant.

1. Reactor Vessel	6. Circulation Pump
2. Steam Transformer	7. Steam Generator
3. Subcooler A	8. Hot Well
4. Subcooler Pump	9. Subcooler B
5. Steam Drum	10. Feed Water Tank

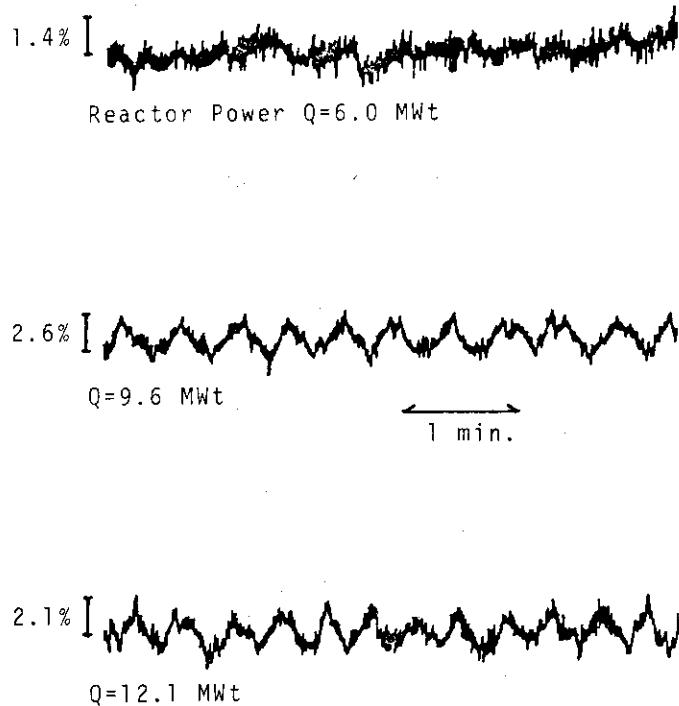


Fig.2 Chart Recordings of Neutron Flux Signal at Different Power Levels.

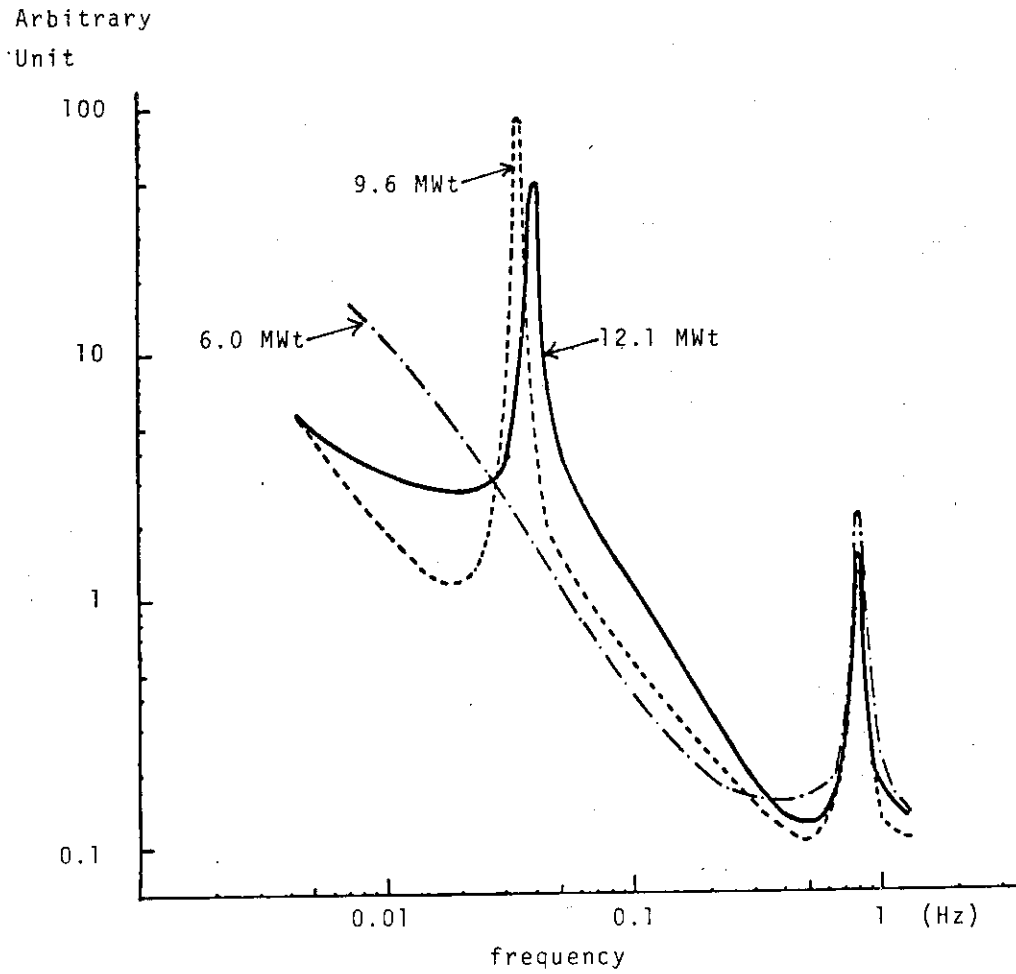


Fig.3 The Power Spectral Density Functions of Neutron Flux Signal Illustrating the Power Dependent Feature.

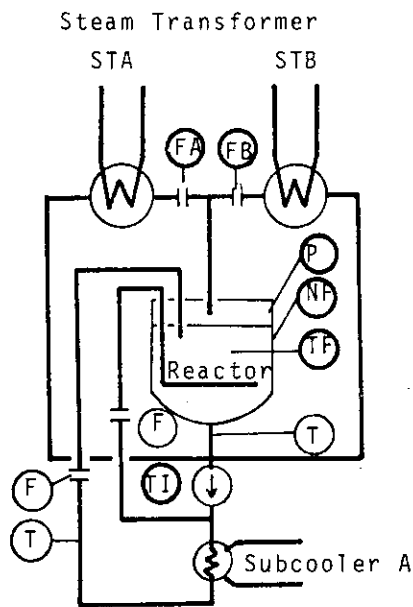


Fig.4 Measurement Signals for Noise Analysis.

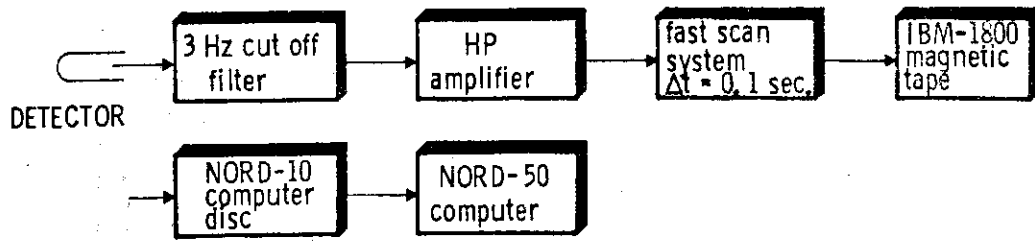


Fig.5 Block Diagram of Signal Conditioning and Processing.

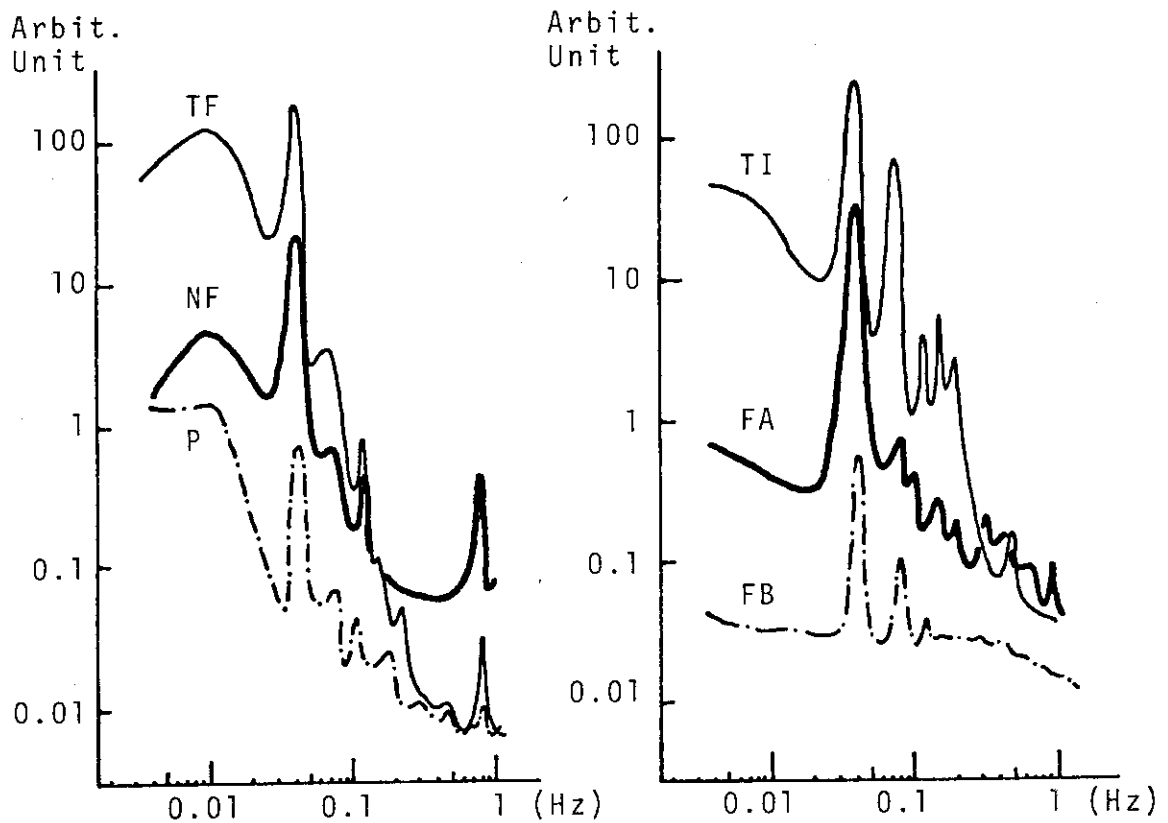


Fig.6 Power Spectral Density Functions of Signals Measured in the Noise Experiment.

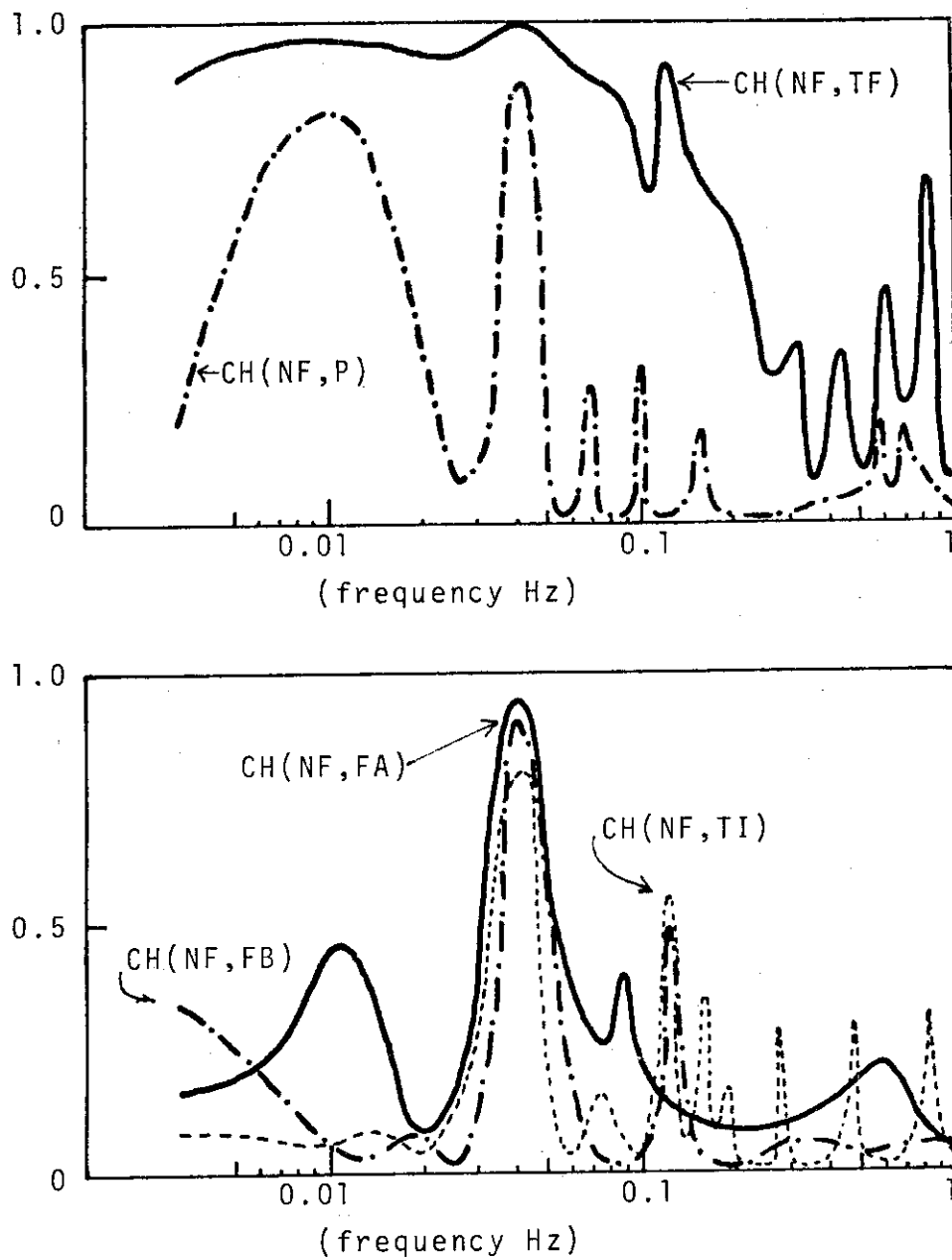


Fig.7 Simple Coherence Functions between Neutron Flux and Other Signals, Respectively.

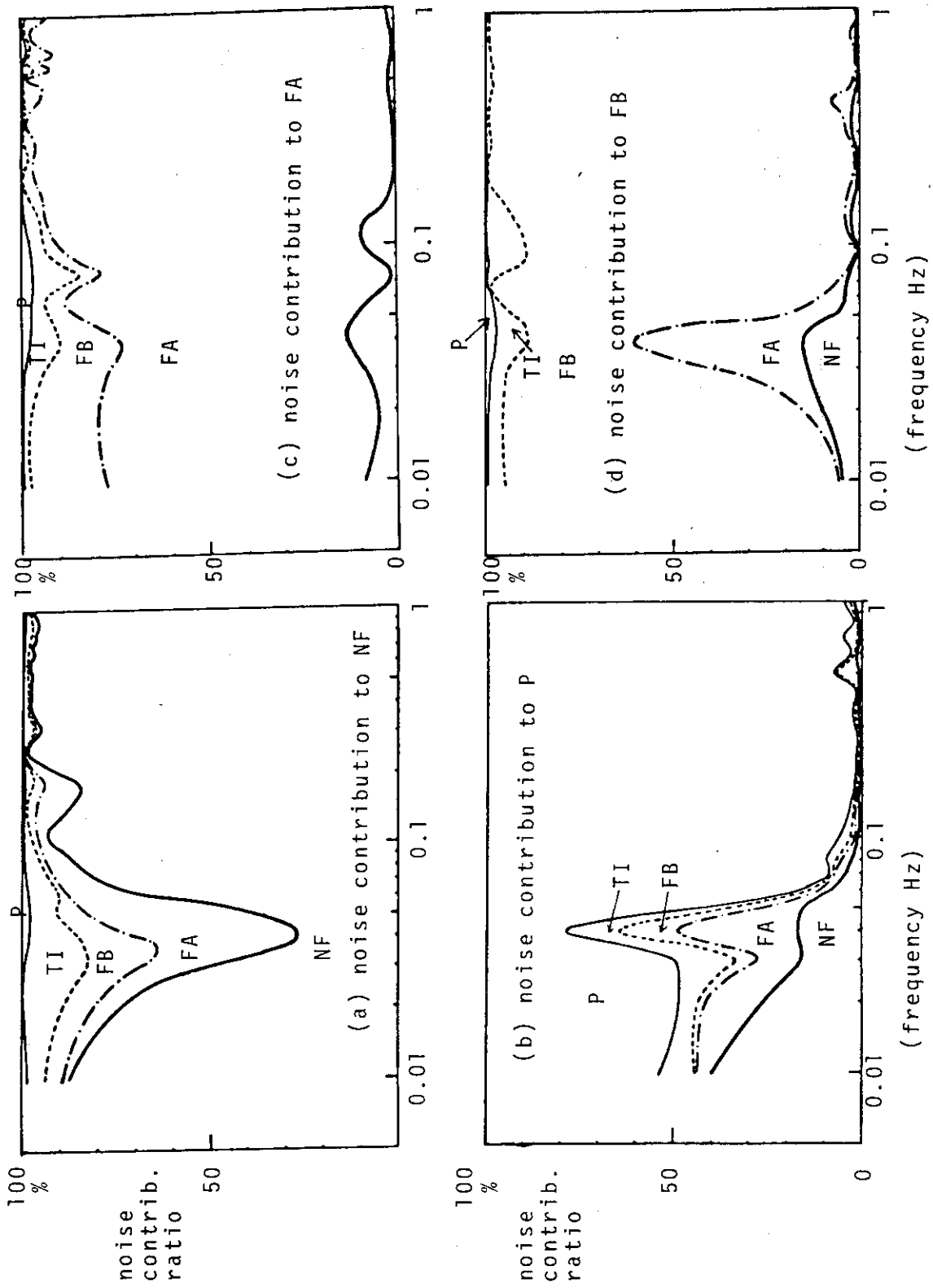


Fig.8 Results from the Noise Contribution Analysis for Variables Measured in the Noise Experiment.

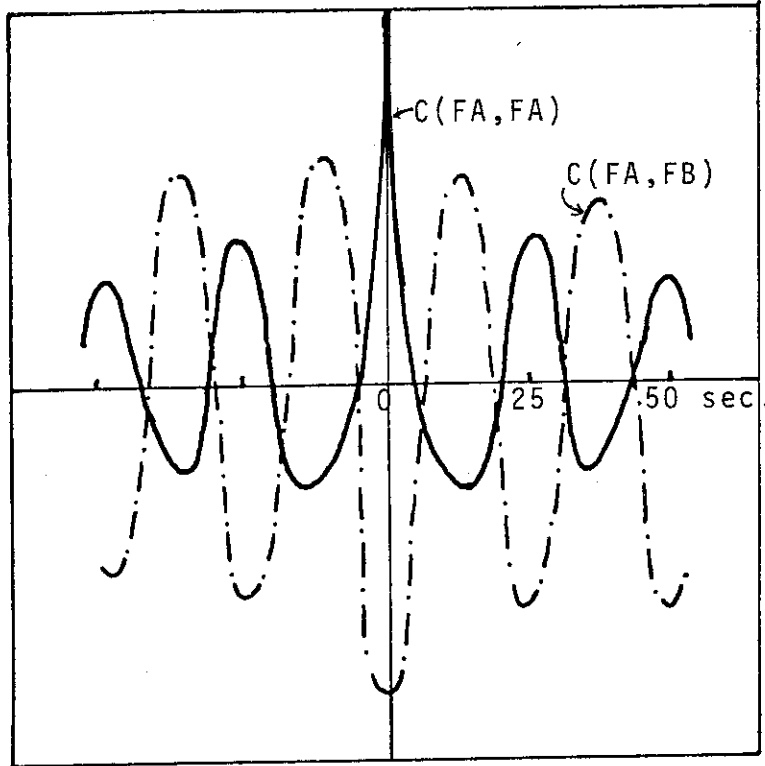


Fig.9 Auto- and Cross- Correlation Functions of Steam Flow Signals, FA and FB.

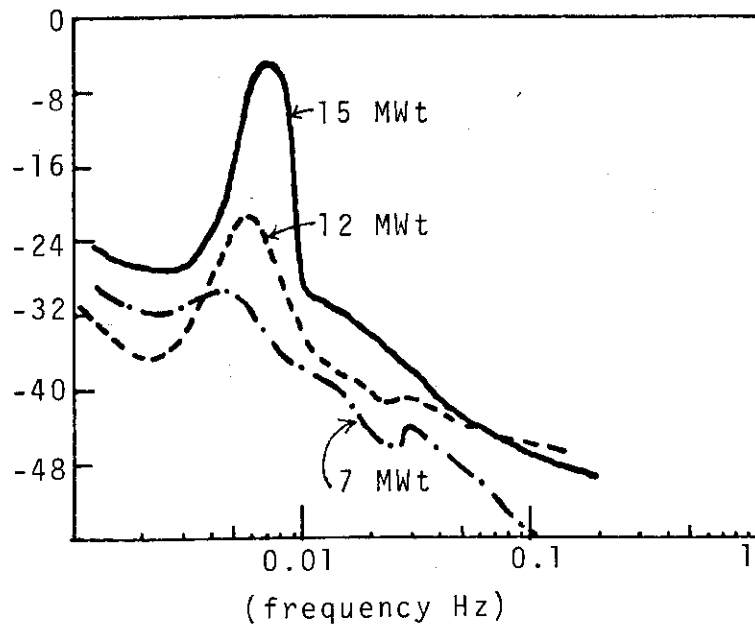


Fig.10 Power Spectral Density Functions of Neutron Flux Signals Measured in Second Fuel Charge Operation.

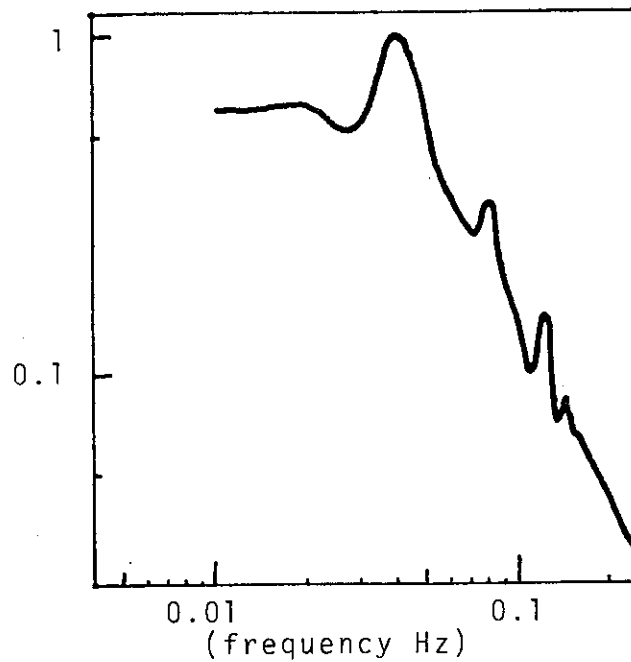


Fig.11 Power Spectral Density Function of Neutron Flux Signal Measured at Reactor Power of 13 MWt during Third Fuel Charge Operation.

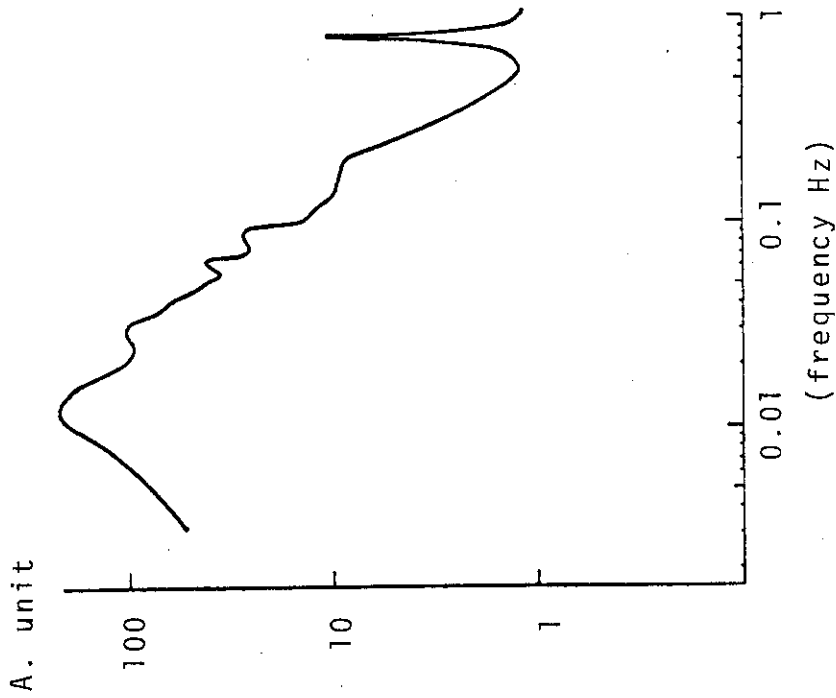
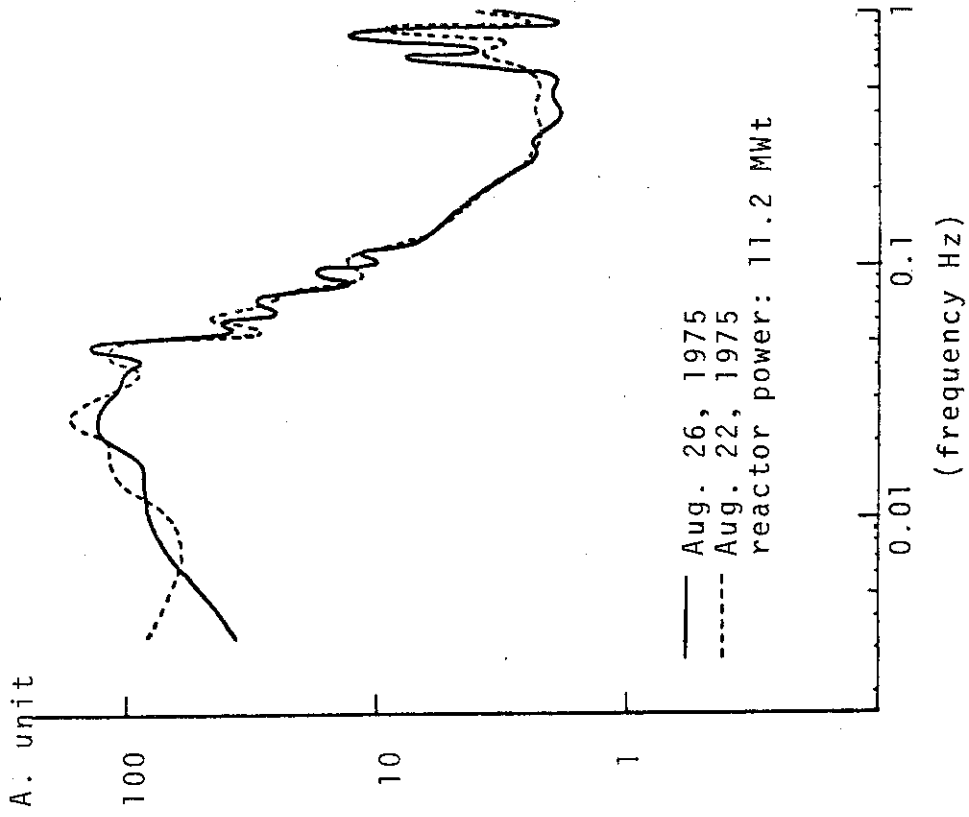


Fig.12 Power Spectral Density Function of Neutron Flux Signal Measured at Power Level of 9.1 MWt during Third Fuel Charge Operation.

Fig.13 Power Spectral Density Function of Neutron Flux Signal for the Period Operating the Reactor with One Steam Transformer(STB).

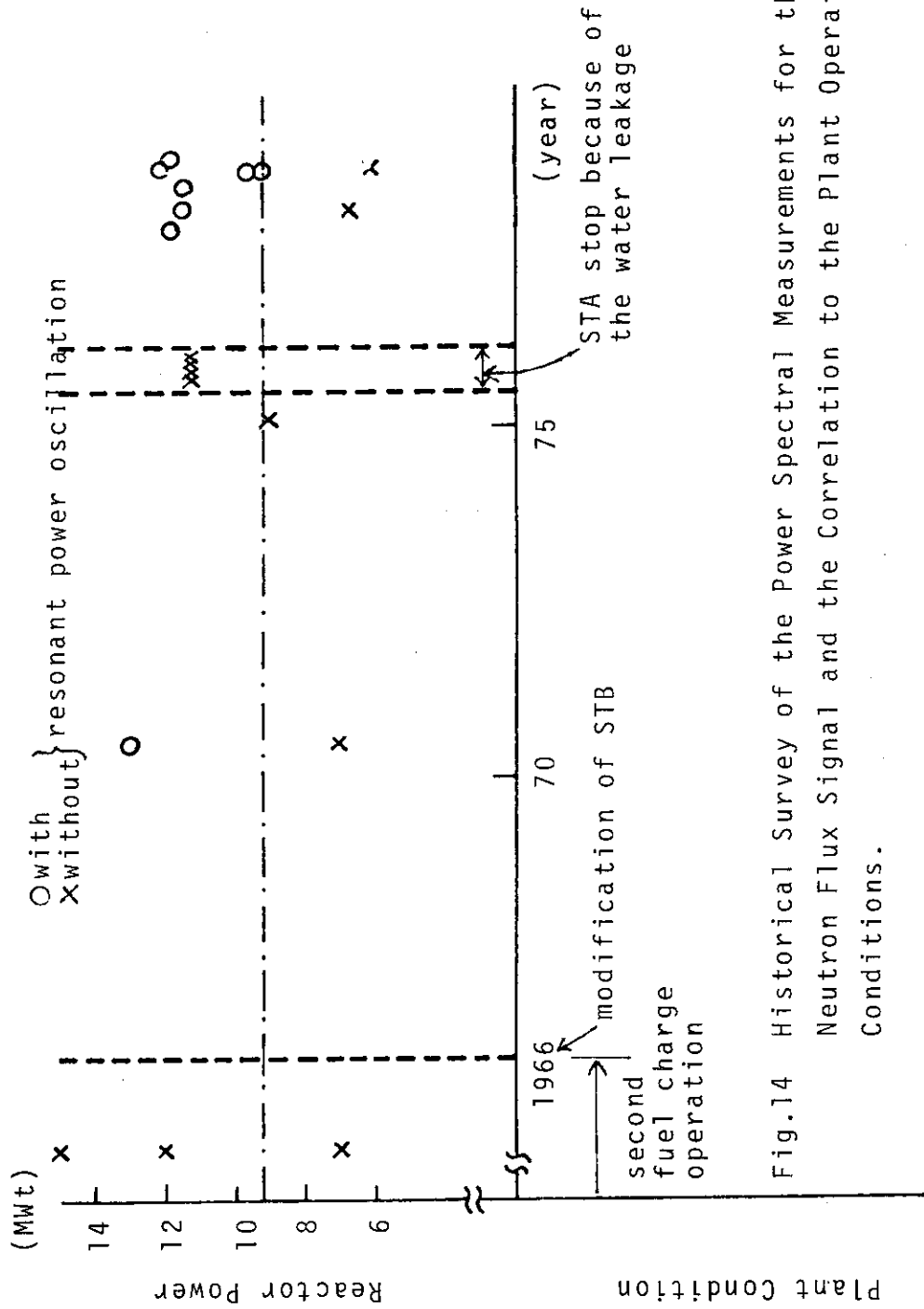


Fig.14 Historical Survey of the Power Spectral Measurements for the Neutron Flux Signal and the Correlation to the Plant Operational Conditions.