

動力炉・核燃料開発事業団

1979年12月

音響法異常監視(MT-31)
—炉内音響監視(1)—

高速実験炉「常陽」性能試験報告書

高速実験炉「常陽」性能試験報告書

音響法異常監視(MT-31)
— 炉内音響監視(1) —

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 Higashimaki,
Ibaraki-gun, Ibaraki, 311-14, Japan

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

高速炉の異常を早期に発見し、安全性及び経済性を高めるための音響できる異常監視技術の開発
が望まれている。

異常監視技術には、いくつかの方法があるが、「常陽」では炉内の異常監視法の一つとして音響法を採用している。この方法は、炉内に設置した音響検出器からの信号のパワースペクトル及びRMS値を監視し、それらに正常時との差が生じたら異常の可能性有りと判断して原因を調査するものである。

現在、音響検出器は炉心上部位置に2体設置しており(炉心位置[5A2]及び[5C2])の側
鋼棒予備孔位置), 低出力試験及び50MW出力上昇試験期間中の正常時に収集した炉内音響データ
の解析結果を検討した。その結果は次のようになる。

(1) [5A2]と[5C2]炉内音響検出系では特性が相当異なり、[5C2]炉内音響検出系は高溫時に信号の振幅が

回転プラグ上の騒音の影響を強く受け、また[5A2]炉内音響検出系は半減する。

(2) 本検出系は各種のノイズためSN比が極めて悪く、炉内のナトリウム中を伝播していく音響
を、どの程度検出しているかは、現在のところ不明である。

(3) 制御棒駆動による衝撃音については、制御棒駆動機構ハウジング音響検出器の方が、よく検出
できた。

(4) 現在までのところ、炉内音響監視からは特に異常は認められない。

Dec., 1979

"JOYO" Start-Up Test Report**In-Core Acoustic Monitoring (1)**

Kenichi Saito*, Toshiro Sanda**,
 Tetsuo Ikegami***, Toshiharu Muramatsu*,
 Hideji Ohtani*, Seiji Tamura*
 and Hisashi Yamamoto*

Abstract

A great interest exists in developing the reliable rapid malfunction detection system for the safe and economic operation of LMFBR.

In the experimental fast reactor "Joyo", the acoustic detection technique was adopted to monitor the reactor core as one of malfunction detection techniques. According to this technique, power spectral density and rms value of the signal from the in-core acoustic detector are monitored. If they vary greatly from their normal pattern and value, the inspection is held to assure the failure part.

Two in-core acoustic detectors are inserted above the reactor core (address, [5A2] and [5C2]). The data from them at normal reactor condition were collected during the low power test and the power up test up to 50 MW.

Some conclusions were derived from the analysis of the data.

- (1) The characteristics of [5A2] and [5C2] in-core acoustic monitoring systems are different. The [5C2] in-core acoustic monitoring

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

** Hitachi Energy Research Laboratory.

*** FBR Development Project, PNC.

目

次

1 まえがき	1	5.1 炉内音響検出系の特性	44
2 油槽構造	2	5.2 炉内音響信号で識別可能な対象	45
2.1 原子炉本体	2	5.3 今後の課題	45
2.2 炉心部	2	6 結言	46
2.3 音響法炉内異常監視装置	2	7 添付資料	47
3 試験の方法	12	7.1 炉内音響検出器の絶縁抵抗	47
3.1 音響スペクトル測定	12	7.2 エイリアンシング	47
(1) データ収集時期	12		
(2) データ収集及び解析方法	12		
(3) 異常監視の対象	13		
3.2 通観監視	13		
4 試験結果と考察	14		
4.1 1次冷却材流量変化の影響	14		
4.2 制御棒駆動音の影響	14		
4.3 Naドレンの影響	14		
4.4 プリアンプ位置の影響	14		
4.5 音響検出器の有無	15		
4.6 プリアンプ交換	15		
4.7 格納容器内圧力の影響	16		
4.8 中性子束ゆらぎとの相関	16		
4.9 「RB.2」ハウジング音響信号との相關	16		
4.10 放出力時の炉内及びハウジング音響信号のパワースペクトル	17		
4.11 回転プラグ冷却用ブースタ・ファンの影響	17		
4.12 原子炉出力による炉内音響信号パワースペクトルの変化	18		
4.13 出力上昇中の炉内及びハウジング音響信号 RMS 値の変化	18		
4.14 バイルオシレータの影響	18		
4.15 1次主ポンプトリップ及び手動スクラムの影響	19		
4.16 RMS 値連続監視	19		

まえがき

本報は、「常陽」の炉心上部に設置された音響検出器の出力信号を、解析することにより、早期に炉内の異常を発見し、原子炉の安全性を顧める目的としている。監視対象は、ナトリウム流動による制御棒振動音、燃料集合体や、炉内構造物振動音、その他、ナトリウム沸腾音等である。異常監視の手法としては、各プラント状態での音響信号の正常時データを収集しておき、その正常時データから異常にされたものがいかどうかを監視する。具体的には、異常監視としてパワースペクトル密度の異常監視と、RMS値の連続監視を行なう。前者は、音響信号のパワースペクトル密度、及び他の原子炉信号との相互スペクトル密度を、原子炉の出力上升、運転履歴、運転条件の変化と共に監視し、これらのスペクトル密度に変化が生じたなら、その点の周波数等から異常を得る分析する。音響信号と他の原子炉信号との相関をとつて解析することにより、より多くの情報を得ることができる。後者は、音響信号のRMSボルトメータ出力を連続記録し、異常信号の有無を監視する。音響検出器は、炉内に最高3体まで挿入できるが、低出力試験中は炉心マトリックス[5A2]の上部に設置し、50MW出力上昇試験中は[5C2]位置にも設置し、データを収集した。

本報告書では、その解析結果と検討を述べる。

2 設備概要

2.1 原子炉本体

原子炉本体は、Fig. 2.1 に示す様に、原子炉容器、その上部に配置した回転プラグ、及び炉心部より構成される。

原子炉容器は、炉心を収容する堅型円筒形の二重容器で、内部には炉心を支える炉心構造物が設けられ、上部には回転プラグで蓋がされている。

回転プラグは、大回転プラグと小回転プラグより成る二重回転方式であり、小回転プラグには燃料交換機構造が据付けられるが心止部機構等を備えている。

2.2 炉心部

炉心部はFig. 2.2 (50MW出力上昇試験中の炉心構成) に示す様に、炉心燃料集合体と、その周囲をとり囲む半径方向ランケット燃料集合体及び反射体によって構成され、これらの炉心部成要素は、炉心構造物の炉心支持板によつて位置決めされ、ハイドロリックホールドダウン機構によつて保持される。

炉心部を構成する燃料集合体は、六角形状のラッパ管内にウラン・ブルトニウム混合酸化物ベレットを収納した9本の燃料要素を内蔵する炉心燃料集合体と劣化ウラン酸化物ベレットを収納した19本の燃料要素を内蔵する半径方向ランケット燃料集合体より成る。

反射体は、半径方向ランケット燃料集合体の外側に配置され、炉心より漏れる中性子を反射する機能と高圧プレナムより導入される冷却材を低圧プレナムへ送る際の圧力調整の機能を有している。

中性子源は、Sb-Be型で放射性Sbを内蔵したアлюミン部とそれを吸納するBeを内蔵した受入集合体より構成される。

制御棒は、調整棒2本、安全棒4本より成る。安全棒と調整棒は等量のB-10濃縮B₄C吸収材を充填したステンレス鋼管製制御要素7本をクラスターとしてステンレス鋼製の保護管で包んだものであり、保護管の肉厚および外径寸法が異なる以外は全く同一の構造を有している。

2.3 音響法炉内異常監視装置

本装置は、原子炉建家内回転プラグより原子炉容器内に挿入される検出器と中央制御室内に設置される測定解析系より成る。

検出器部は、音響検出器、検出器支持部、上部、下部遮蔽体、上部プラグ、前置増幅器台より成り (Fig. 2.3)、全長は約6mである。音響検出方法はS/N比を上げるため、検出器を炉

器内部 (燃料集合体頂部の真上約40cm) まで挿入する方式をとっている。 (Fig. 2.4)

検出器はC.R.D.予備孔プラグのスリーブ管 (ウェル) 内に入れられ、1次冷却系の圧力カバーソンダリーとは無関係に挿入、引抜が容易にできる構造となっている。また、スリーブ管と検出器受圧面の空間的ギャップによる音響波の減衰を極めるため、スリーブ管内に音響媒体となる脊椎金属 (インジウム) を入れる。

音響検出器はLiNO₃の結晶を使用する。また、音響検出器は同時に3体を炉容器内に設置することができる。音響検出器の仕様をTable 2.1に示し、音響検出器の挿入位置をFig. 2.2に示す。測定解析系のロック回路をFig. 2.5に示す。信号の流れはチャージセンシティブ前級増幅器、主増幅器 (周波数特性はFig. 2.6, 2.7 (工場試験成績)) を経た後、次の3系統に分かれる。

- i) I・m・sボルトメータに入った後、記録計に入る。同時にI・m・sの設定値を越えたものについては警報を発する。また、スピーカで直接音を聴くこともできる。
- ii) 解析装置に入り相関関数を求めたり、これをフーリエ変換しハワースペクトル密度を求める。CRTに表示したり、X-Yレコーダーに記録する。また、相關関数の出力はミニコンに入力し、ディジタルでハーベクトル密度を求めることもできる。
- iii) データレコーダに入力し生データを記録する。このデータレコーダには同時に、炉出力や主1次流量等の原子炉信号も記録し、音響音と、これら原子炉信号の相関をみるとともできる。

Table 2) Specification of In-core Acoustic Detector

1. Type and Dimensions	
1.1 Sensor	
Type	Piezoelectric Microphone (Li_1NiO_2)
Diameter	3.2 mm
Length	4.5 mm
1.2 Cable	
Diameter	3.2 mm
Length	6120 mm
2. Design Conditions	
Temperature	600 °C
Pressure	1.2 kg/cm²
Leak Rate	less than 10^{-7} torr. cc/sec
Sensitivity	$1 \sim 10^{-4}$ atm. (~ 10 kHz)
Signal to Noise Ratio	more than 5 (at 10^4 atm.)
Frequency Range	~ 50 kHz
Resonance Frequency	about 1.8 MHz

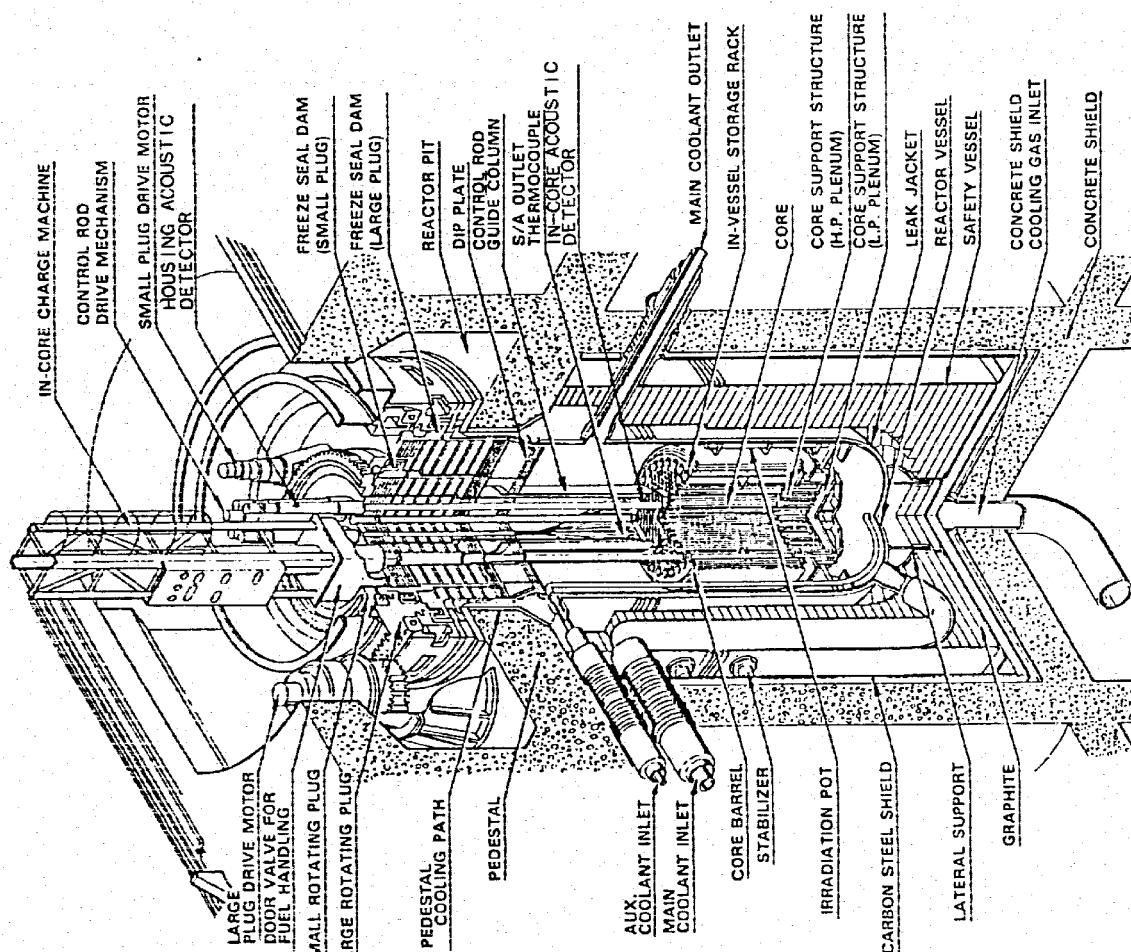


Fig. 2.1 JOYO Reactor System

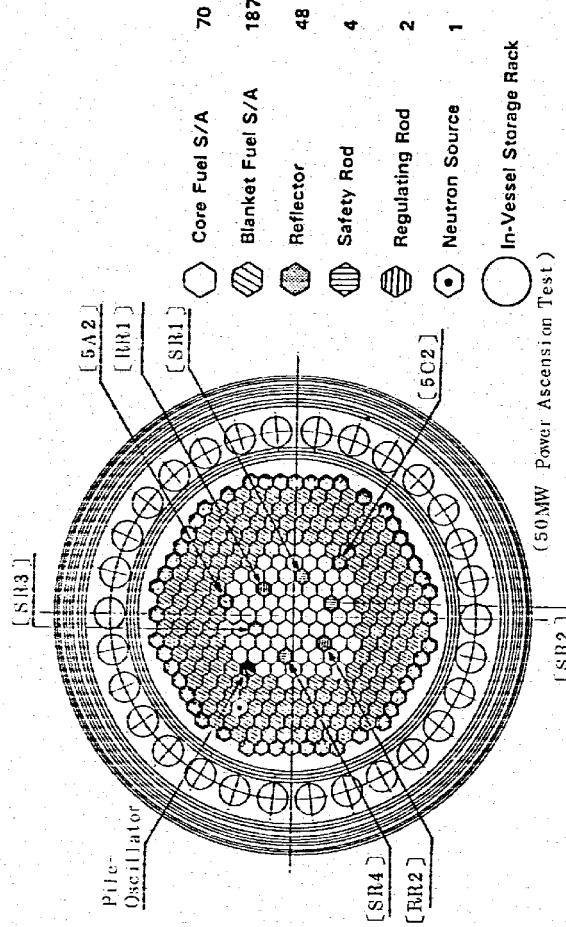


Fig. 2.2 Core Arrangement

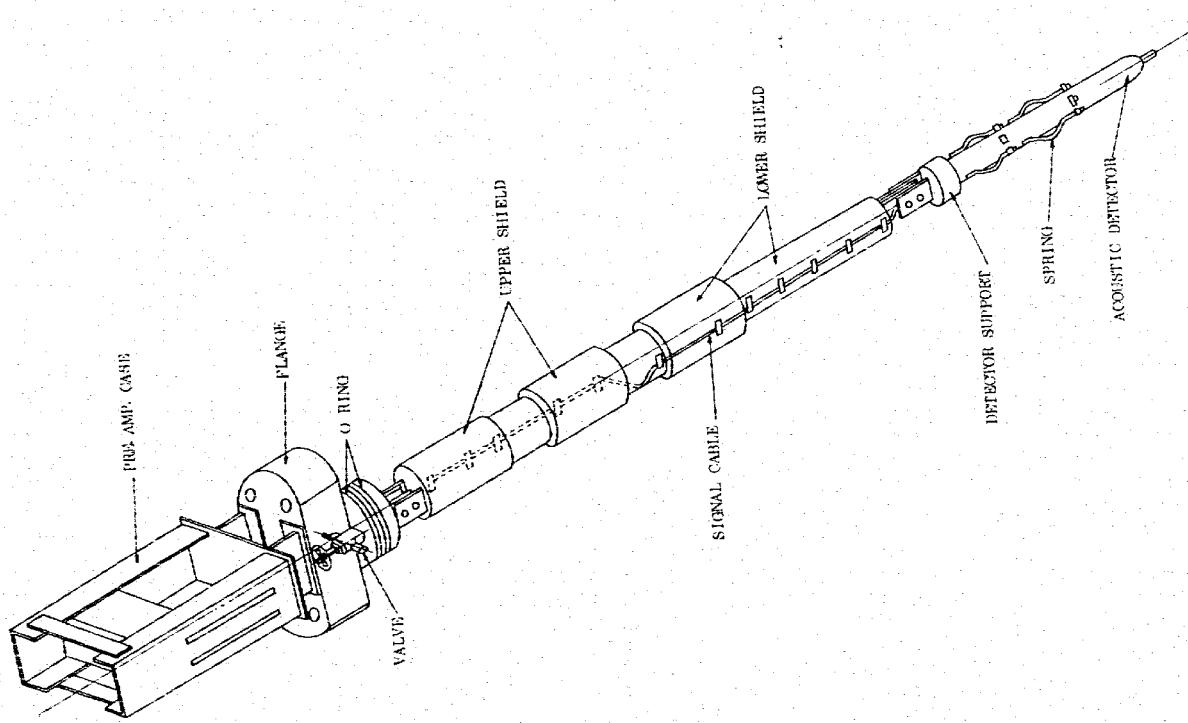


Fig. 2.3 In-core acoustic detector holder

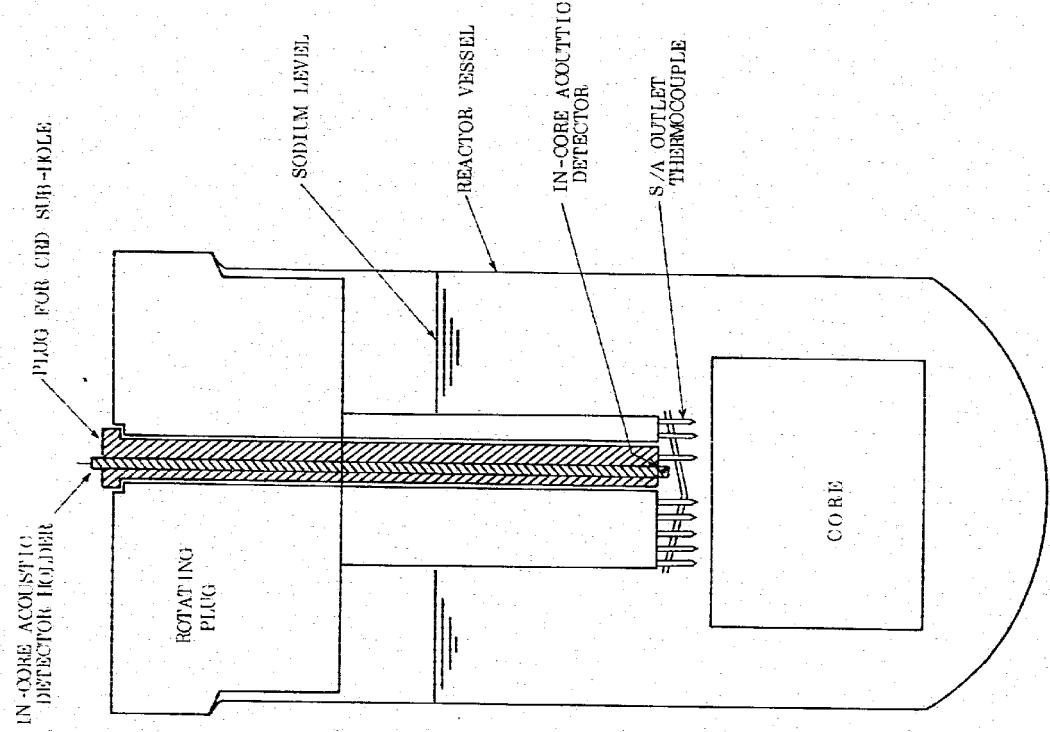
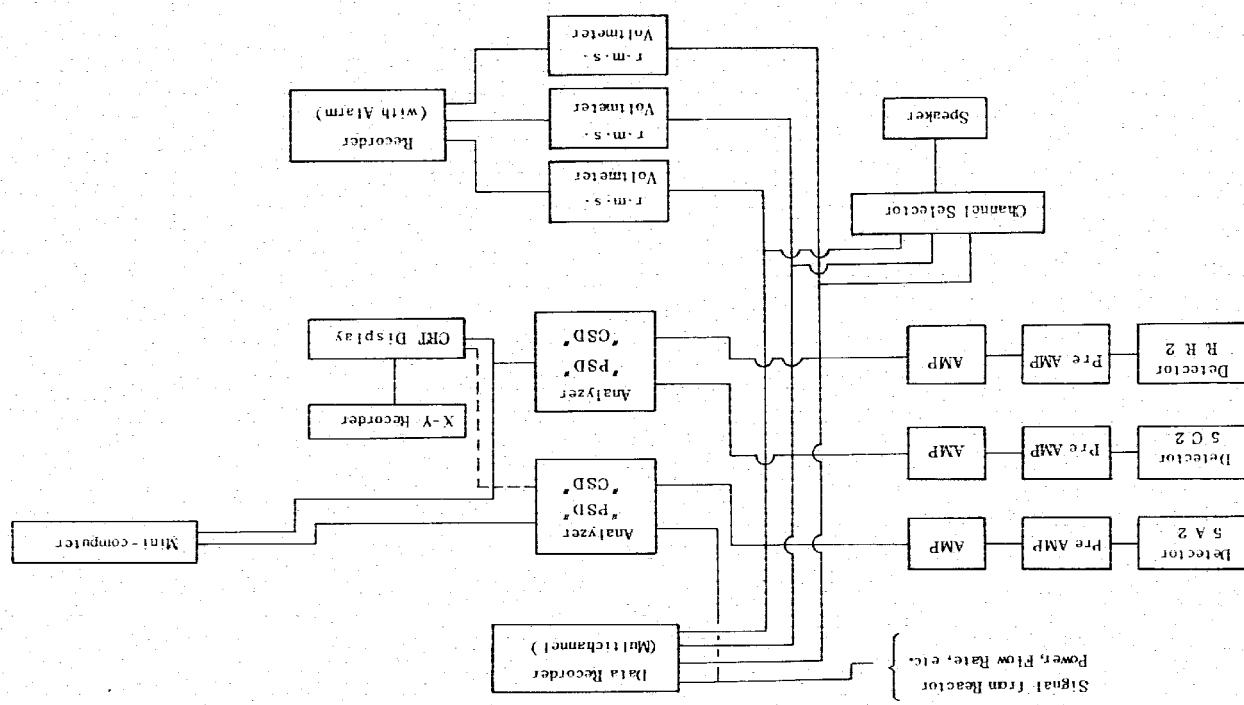


Fig. 24 Location of the in-core acoustic detector

Fig. 25 Block Diagram of Acoustic In-core Malfunction Detection System.



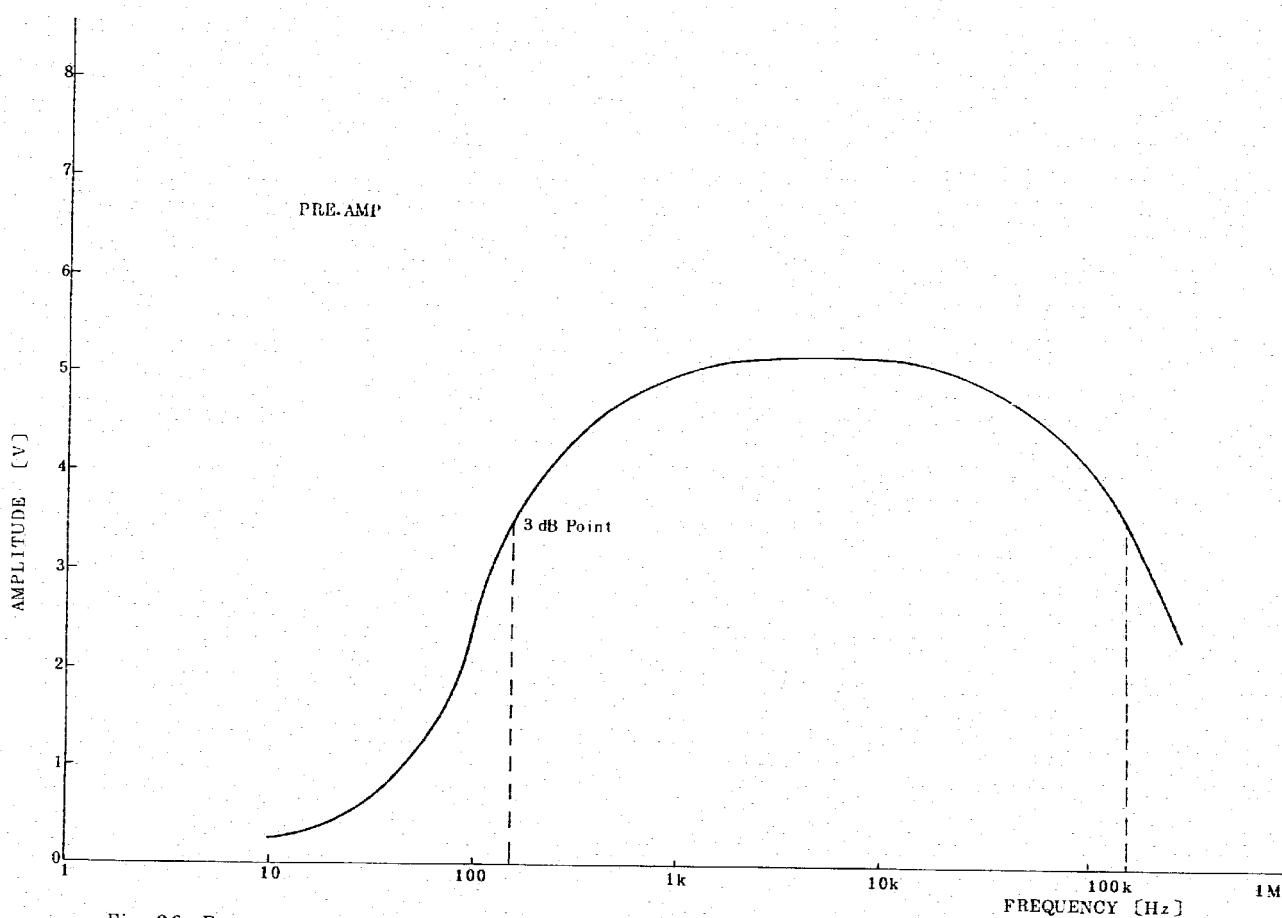


Fig. 26 Frequency response of a pre. amplifier of the in-core acoustic malfunction detection system.

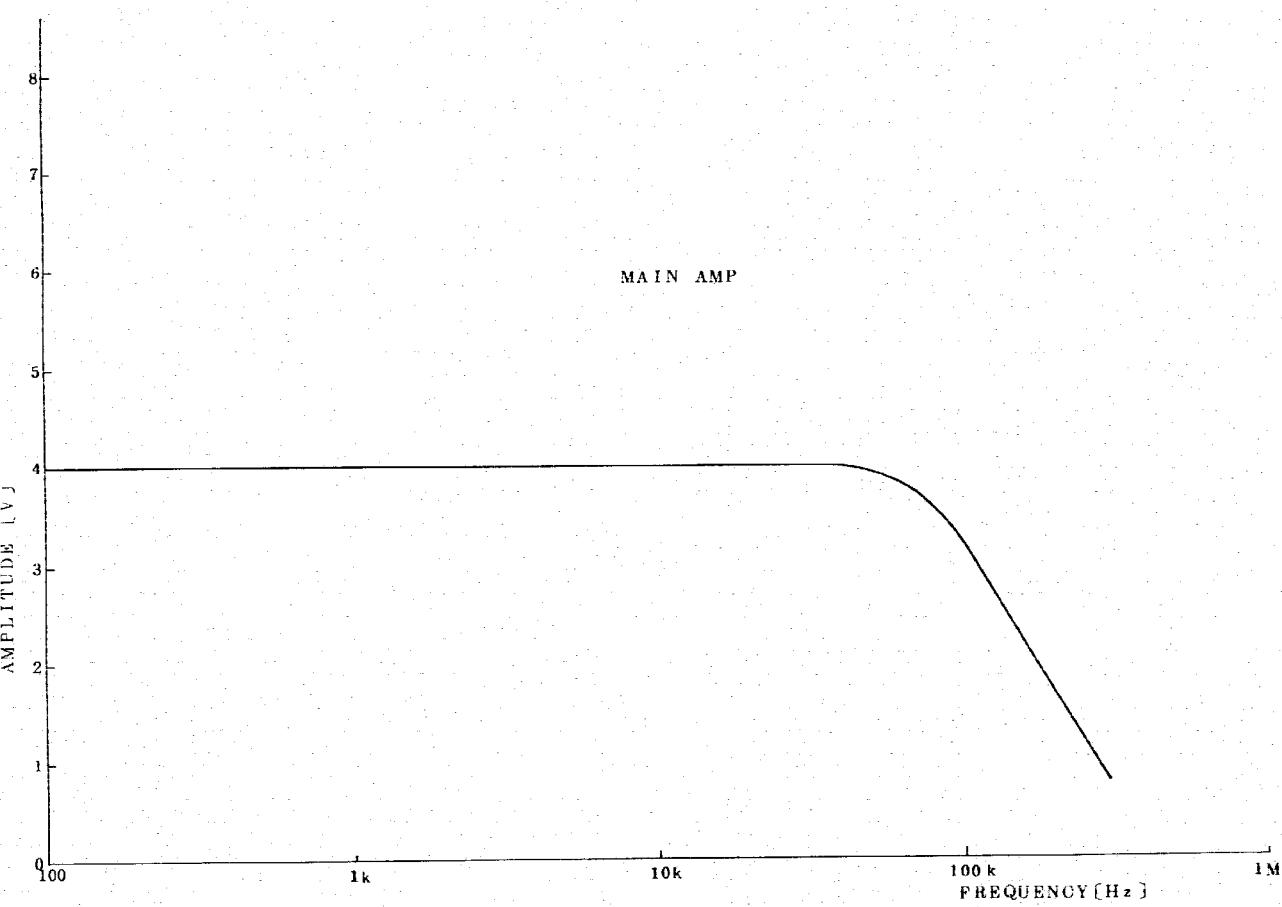


Fig. 27 Frequency response of a main amplifier of the in-core acoustic malfunction detection system.

3 試験の方法

本試験はその性格上、次の 2 つの部分に大きく分かれれる。すなわち、パワースペクトル密図等の測定試験および過渡監視である。

3.1 音響スペクトル測定

(1) データ収集期間

次のプラント状態の時にデータを収集した。

(a) 原子炉熱出力

① 炉停止

② 1.5 MW

③ 2.5 MW

④ 4.0 MW

⑤ 5.0 MW

(b) 1 次系冷却材流量

① 100%

② 80%

③ 50%

(c) 燃料交換モード(約 2.0 %)

(d) ポンプ停止

(e) ボンブ停止

なお本試験のためにプラントを上記の状態にすることは特にせず、性能試験の過程でプラントが上記の状態になった時にデータを収集した。

また、制御棒駆動中、ナトリウムドレン中、格納容器漏洩試験中、バイオレンタ試験中、1 次主ポンプトリップ試験中にもデータを収集した。

(2) データ収集及び解析方法

他出力試験期間は、[5A2]と[5C2]燃料集合体上部のみ炉内音響検出器を挿入した。出力上昇試験期間中は[5A2]と[5C2]燃料集合体上部に炉内音響検出器を 2 体挿入した。

Fig. 2.5 に炉内音響検出器の測定系を示したが、出力上昇試験期間中は、2 チャンネルを炉内音響検出器からの信号を使用し、残りの 1 チャンネルは R.R.2(調整棒 2)駆動機構ハウジングに取り付けた音響検出器からの信号に使用した。

測定時は、種々のプラント状態において、主としてこれらの音響信号及び他のプラント信号をデータレコーダに記録し、オフラインでパワースペクトル及びクロススペクトルを求め

た。なお、高周波成分はデータレコーダに記録できないので、高周波領域の測定時にはリアルタイムで周波数解析を行った。解析手法は相関法によるものであり、各信号をサンプリングし、デジタル計算により相関関数を求め、それを周波数分析してパワースペクトルを得た。この時、エイリアシング防止のためにサンプリング間隔 ΔT に対応するナイキスト周波数 ($f_c = 1 / (2\Delta T)$) と、その $1 / 100$ の周波数の間を帯域とするバンドパスフィルタを通じて周波数解析を行なった。

また、音響信号と中性子束信号のクロススペクトルを求める時は、音響信号を RMS 変換器に通して音響信号の包絡線に対応する RMS 信号に変換し、それと中性子束信号との相關を調べた。なお、エイリアシングに関しては添付資料 7.2 に述べてある。

(8) 异常監視の対象

(a) 制御棒及び燃料集合体の振動

冷却材の流動により、制御棒及び燃料集合体に振動が生じる。振動によつて生じる音響を監視することにより、異常な振動が生じていないことを確認する。監視としては、炉内音響信号 RMS 値の変動とパワースペクトルの変化を見る。

また制御棒の振動を解析するために、音響信号のパワースペクトル、及び音響信号と中性子束信号のクロススペクトルをとる。

(b) ナトリウム沸騰及びキャビテーション

流路閉塞によるナトリウムの沸騰もしくはキャビテーションによつて生じる気泡がつぶれる時には数 + kHz の音響を発生する。正常時には発生するはずのない、このような音響が生じていないことを監視する。監視としては、炉内音響信号 RMS 値の変動及びパワースペクトルの変化を見る。

(c) その他のルースバーツ

炉内ルースバーツが存在すれば、冷却材の流動により他の構造物と衝撃音を生じる。炉内の音響を監視することによりルースバーツが存在しないことを確認する。監視としては、炉内音響信号 RMS 値の変動及びパワースペクトルの変化を見る。

3.2 連続監視

連続監視は、Fig. 2.5 のロック因のアナログ処理系で行なつた。5.0MW 出力上昇試験期間中は、[5A2]と[5C2]炉内音響信号及び [RR2] ハウジング音響信号の RMS ボルトメータの出力を記録計に連続記録し、毎朝、記録計の 1 日分の記録を観べ、前日の運動状態から異常信号が出ていないかをチェックし、プラント状態と共に記録した。

4 試験結果と考察

4.1 1次冷却材流量変化の影響 (Fig. 4.1~4.4)

Fig. 4.1 ~ 4.4 に1次冷却材流量を変化させた時の〔5A2〕と〔5C2〕炉内音響信号のパワースペクトルを示す。Fig. 4.1, 4.2 の縦軸はログ目盛であるが、Fig. 4.2, 4.3 では、わずかな差を表すためにリニア目盛にしてある。

〔5C2〕炉内音響信号において、1.801 Hz付近と4.50 Hz付近にあるビーカーが流量の増加にしたがって高くなる。〔5A2〕炉内音響信号では、2.50 ~ 3.501 Hz付近に流量の増加と共に増大する部分があるが、それはどの鍋蓋ではない。

4.2 制御棒駆動音の影響 (Fig. 4.5, 4.6)

Fig. 4.5, 4.6 には各制御棒駆動中の〔5A2〕と〔5C2〕の炉内音響信号のパワースペクトルを示す。

検出器と制御棒駆動装置の位置は Fig. 2.2 に示してある。
 〔5A2〕炉内音響信号では、2.00 ~ 2.50 Hzに制御棒駆動音に対応するビーカーが見える。S.R.3 駆動音のビーカーが小さいが、他是、だいたい検出器の近くの制御棒駆動音のビーカーが高い。〔5C2〕炉内音響信号では、6.00 ~ 7.00 Hzに制御棒駆動音に対応するビーカーが見える。だいたい検出器近くの制御棒駆動音のビーカーが高い。

4.3 Na ドレンの影響 (Fig. 4.7, 4.8)

Fig. 4.7, 4.8 に1次系Naドレン時に、炉内音響検出器がNa液面下にある時と液面上に出た時の〔5A2〕と〔5C2〕の炉内音響信号のパワースペクトルを示す。
 炉内音響検出器が、Na液面上に出ると〔5A2〕炉内音響信号では4.50 Hz付近と7.50 Hz付近のビーカーが著しく低下する。〔5C2〕炉内音響信号でも、4.50 Hz付近と7.50 Hz付近のビーカーが著しく減少している。これらのビーカーは、Na中より検出したか、または、温度変化による検出器のインピーダンス変化で生じたものと考えられる。

4.4 プリアンプ位置の影響 (Fig. 4.9)

Fig. 4.9 に〔5C2〕炉内音響検出系のプリアンプを定位に設置した場合と、別の位置(回転プラット上の燃料交換用ドアバルブの横)に仮設した場合の〔5C2〕炉内音響信号のパワースペクトルを示す。

プリアンプ付近から混入する信号を調べるために、〔5C2〕炉内音響検出系のプリアンプを定位位置から回転プラット上の燃料交換用ドアバルブの横へ移動させた。定位位置は、回転プラット上

面近くのため、種々の装性が林立している中で、音がにもりやすい場所である。それに対して、ドアバルブの横は定位より上部にあり、回りは開けていて音はこもらないが、他の多くの音も聞こえる。

プリアンプをドアバルブ横に移動すると、2.80 Hz付近に顕著なビーカーが生じ、6.501 Hz付近にあつたビーカーは減少する。

このように、プリアンプ及びプリアンプまでの信号ケーブルの場所依存性が大であり、プリアンプ付近から混入する聲音及び電気磁気的雑音信号が相当存在することを示している。なお、音響信号のスペクトルにおいて、全体的なパターンに変化はなくとも、個々のビーカーの高さは常に多少変動している。

4.5 音響検出器の有無 (Fig. 4.10)

Fig. 4.10 に〔5C2〕炉内音響検出系で音響検出器を切り離した場合と、正規の検出系の場合の〔5C2〕炉内音響信号のパワースペクトルを示す。尚、プリアンプはドアバルブ横の位置である。

音響検出器の有無とは、M1ケーブルより先の部分からの信号が、プリアンプに入力されているかどうかである。音響検出器無しの場合、プリアンプと、その入力端に接続されている同軸ケーブルから拾った信号である。音響検出器有りの場合との差が、同軸ケーブルより先に接続されているM1ケーブルと音響検出器から検出した信号である。パワースペクトルのレベルは2オクタ度違うが、バーンは類似している。これより〔5C2〕炉内音響信号は、回転プラット上で検出できる音響と同種の音響が大部分をしめていると予想される。

4.6 プリアンプ交換 (Fig. 4.11, 4.12)

Fig. 4.11, 4.12 に〔5A2〕と〔5C2〕炉内音響検出系のプリアンプ以後のラインを交換した場合と、正規のラインを使用した場合の炉内音響信号のパワースペクトルを示す。〔5A2〕のプリアンプ以後のラインを使用すると、〔5A2〕及び〔5C2〕炉内音響信号のパワースペクトルに共通して、6.00 Hz付近にビーカーを存在する。同様に、〔5C2〕のプリアンプ以後のラインを使用すると、6.50 Hz付近に広いビーカーを存在する。正規のプリアンプ以後のラインを使用していれば、このビーカーの他に、〔5A2〕炉内音響信号では4.80 Hz付近にビーカーが存在し、〔5C2〕炉内音響信号では4.80 Hz付近、7.00 Hz付近それに7.50 Hz付近にビーカーが存在する。しかし、プリアンプ以後のラインを交換すると、これらのビーカーは目立なくななる。この交換では、プリアンプの仕様は同じであるので、プリアンプの設置場所が実質的に影響する。このことから、本測定系の信号には、センサからではなくプリアンプの設置場所による要因も含まれていることがわかる。

4.7 格納容器内圧力の影響 (Fig. 4.13)

Fig. 4.13 に格納容器内の気圧の変化と、それに対応する [5C2] 炉内音響信号の RMS 値の変化を示す。これは、格納容器内を加圧した時のデータである。尚、この試験中は格納容器内は密閉カスであった。

[5C2] 炉内音響信号 RMS 値のゆらぎが大きいが、その平均的な変化と気圧の変化は、よく対応している。これは、気圧変化による伝播条件の変化を示しており、信号のうち、気体中を伝播してくるものの割合が多いため気圧変化の影響を受けるものと考えられる。

4.8 中性子束ゆらぎとの相関 (Fig. 4.14)

Fig. 4.14 に、原子炉出力約 1.3 kW の中性子束ゆらぎのパワースペクトル、[5A2] 炉内音響信号 RMS 値ゆらぎのパワースペクトル、及びそれらの間の相互スペクトルを示す。RMS 値変換器の時定数は 0.01 秒である。中性子検出器は ^3He 電離管で炉心中心に挿入されていた。

中性子束ゆらぎのパワースペクトルには、約 1.8 Hz に制御棒振動に対応すると思われる頗る大きなビーカーが存在するが、[5A2] 炉内音響信号 RMS 値ゆらぎのパワースペクトルには、それに対応するビーカーがほとんど現れていない。これは、この音響信号をスピーカで聞いても、制御棒の衝撃音らしきものが極めて小さいことからもわかる。これららの 2 信号の相互スペクトルには約 1.8 Hz に頗るなびーかークが見えるが、これは中性子束ゆらぎのビーカーが頗る著なことにによるものであり、ビーカーの周波数での両者のコヒーレンスを図の値から考えてみると 1 も以下となり、両者の相関はないことがわかる。

4.9 [RR2] ハウジング音響信号との相関 (Fig. 4.15)

Fig. 4.15 には、原子炉出力約 1.3 kW の [RR2] ハウジング音響信号 RMS 値ゆらぎのパワースペクトル、[5A2] 炉内音響信号 RMS 値ゆらぎのパワースペクトル、及びそれらの間の相互スペクトルを示す。RMS 値変換器の時定数は 0.005 秒である。

[RR2] ハウジング音響信号 RMS 値ゆらぎのパワースペクトルには、約 1.8 Hz に制御棒振動に対応すると思われるビーカーが存在するが、信号の中には制御棒の衝撃音らしき音響以外の音響も含まれているため、中性子束はどう頗るない。

[5A2] 炉内音響信号 RMS 値ゆらぎのパワースペクトルには対応するビーカーは現われておらず、これらの 2 信号の相互スペクトルにも、対応するビーカーは現われていない。制御棒振動音に注目する場合は、炉内音響信号は S/N 比が悪く、ハウジング音響信号の方が感度がよい。なお、ハウジング音響と中性子束の相関については「制御棒振動効果」の報告書に譲る。

4.10 高出力時の炉内及びハウジング音響信号のパワースペクトル (Fig. 4.16~4.19)

Fig. 4.16, 4.17 には、原子炉出力 50 MW の [5A2] 炉内音響信号のパワースペクトルを示す (高周波領域)。

Fig. 4.18, 4.19 には、[5A2] と [5C2] が内音響信号及び [RR2] ハウジング音響信号のパワースペクトルを示す (低周波領域)。原子炉出力は 50 MW 時の停止時である。

Fig. 4.16 の 50 MW の [5A2] 炉内音響信号のパワースペクトルにおいて (a) に見られる約 5.9 kHz と約 11.0 kHz のビーカーは波形がきわめて安定で周期的であることから、回路の雑音によるものと思われる。(b) に見られる 23 kHz 付近に広がる広いビーカーは、1 次主循環ポンプのセルピュアス制御系のサイリスタの影響で出来るものである。実質的なビーカーは (c) のレンジで現われる。

Fig. 4.17 の 50 MW の [5C2] 炉内音響信号のパワースペクトルにおいても、[5A2] と [5C2] 内音響信号と同様に、約 11.0 kHz 及び 23 kHz 付近にビーカーが見られる。[5A2] と [5C2] 炉内音響信号を比較した時、これらのビーカーの高さの比は必ずしも一定ではないが、同一原因のノイズが状況によって各検出系への寄与の割合を変えながら出入してくるものと考えられる。

原子炉運転中は、回転プラグ冷却用にブースタ・ファンが運転されているが、現場では、これによる騒音が大きい。特に [5C2] ではブリアンプ及び、その後の M1 ケーブルで、この騒音を拾っているようである。Fig. 4.18 の (c) と (d) は、原子炉停止中でブースタ・ファンが停止している時の [5A2] と [5C2] の炉内音響信号のパワースペクトルであるが、周囲の (a), (b) と比較すると、[5C2] にブースタ・ファンの騒音が大量に含まれていることがわかる。

同様に、Fig. 4.19 は、[RR2] ハウジング音響信号のパワースペクトルで、(a) 50 MW でブースタ・ファン運転中と (b) 原子炉停止中でブースタ・ファン停止中の比較である。尚、50 MW と原子炉停止中では 1 次冷却材流量は共に 100% である。

また、信号の中には 50 Hz, 150 Hz, 250 Hz に、電源ノイズとその高調波が観測される。

4.11 回転プラグ冷却用ブースタ・ファンの影響 (Fig. 4.18~4.20)

Fig. 4.20 には、回転プラグ冷却用ブースタ・ファンを停止した時の、[5A2] と [5C2] 炉内音響信号、及び [RR2] ハウジング音響信号の RMS 値の変化を示す。

回転プラグ冷却用ブースタ・ファンの騒音の影響は、[5C2] 炉内音響信号と [RR2] ハウジング音響信号に顯著に現われているが、[5A2] 炉内音響信号には、それはどの現われていな

これらは、ノースタ・ファンの駆動が入る前軸アリゲ上に、[RR2] ハウジング音響検出器があることと、振動を検出しやすいと思われる [5C2] 炉内音響信号ノリアンプがあることにによる。[5A2] が内音響検出系ノリアンプは、回りの振動を信号の中に拾いにくいため考えられる。なお、ブロム・ファンは、[5A2] に近い回軸アリゲ外にある。

[RR2] の RMS 値の変化がみると、ノースタ・ファンの動作条件の割合は [5A2] 炉内音響信号で約 1.3 倍、[5C2] 炉内音響信号で約 9.4 倍、[RR2] ハウジング音響信号で約 9.1 倍である。

4.12 原子炉出力による炉内音響信号パワースペクトルの変化 (Fig. 4.21, 4.22)

Fig. 4.21, 4.22 には [5A2] と [5C2] 炉内音響信号のパワースペクトルの原子炉出力による変化を示す。

これには、ノースタ・ファン騒音の影響が含まれている。[5A2] では、50MW になると、パワースペクトルが全体的に低下する。これは、音響検出器の温度上昇による絶縁抵抗の低下が原因の 1 つとして考えられる。この様子は、出力上昇中の RMS 値を記録した Fig. 4.23 にも現われている。[5C2] では、前述のとおりノースタ・ファン騒音の寄与が大きいと予想される。なお、検出器の絶縁抵抗に関するは、添付資料 7.1 に述べてある。

4.13 出力上昇中の炉内及びハウジング音響信号 RMS 値の変化 (Fig. 4.23)

Fig. 4.23 には、原子炉出力 50MW へ出力上昇時の [5A2] と [5C2] 炉内音響信号及び [RR2] ハウジング音響信号の RMS 値の変化を示す。

[RR2] でハイクが多く出ているが、これは [RR2] を駆動した時の音響である。

[5C2] にも、この [RR2] の駆動音は記録されている。[5A2] には、[RR2] の駆動音は、ほとんど観測できない。[5A2] では、出力上昇中に 40MW を起す付近で信号が低下する。パワースペクトルのハイクは、ほとんど変化しないので、検出器の温度上昇による絶縁抵抗の低下が原因の 1 つと考えられる。

4.14 バイルオシレータの影響 (Table 4.1, Fig. 4.24, 4.25)

Fig. 4.24, 4.25 には、バイルオシレータ駆動中の [5A2] 炉内音響信号の RMS 値とパワースペクトルに現われた変化を示す。Table 4.1 には、ロッドの回転数変化とともに、スペクトル上で周波数が変化するビーカーの周波数と RMS 値及び、ロータリーエンコーダからのバルス発生率を示してある。

バイルオシレータ駆動中に [5A2] 炉内音響信号 RMS 値のみに変化が生じる。ロッドの回転数が 0.2 ～ 0.3 Hz の時が RMS 値は最大である。

[5A2] 炉内音響信号のパワースペクトルを見ると、ロッドの回転数に比例して周波数の増加してゆくビーカー（側線）が観測される。このビーカーのパワー（面積）から計算した RMS 値の変化も、測定した RMS 値の変化と同様に 0.2 ～ 0.3 Hz 附近が最大である。また、このビーカーの周波数は、ロッドの回転速度情報を与えるロータリーエンコーダからのバルスの発生率と、きわめてよく一致している。それゆえ、RMS 値の変化は、炉内の音響によるものではなく、このバルスの振幅によるものと思われる。なお、[5C2] 炉内音響信号にバイオルオシレータの影響がないのは、[5C2] 位置がバイオルオシレータ装置位置 [5F2] から選いためと思われる。

このように、炉内音響信号には電気的雑音が混入しやすい。

4.15 1 次主ポンプ・トリップ及び手動スクランの影響 (Fig. 4.26, 4.27)

Fig. 4.26 に 50MW での 1 次主ポンプトリップ試験及び手動スクラン試験時の [5A2] 炉内音響信号 RMS 値の変化を示す。

1 次主ポンプトリップ時には、トリップから 1 時間以上経過して、RMS 値が徐々に上升し、トリップ前の 2 倍の値になっているが、手動スクラン時にはスクラン直後から 2 倍の値になっている。

これは前者の場合には、トリップ後、流量が低下するのにに対して後者は低下しないため、前者では Na の温度低下が後者に比べて甚く、温度による絶縁抵抗の変化が起きにくいためと考えられる。

Fig. 4.27 に 50MW での 1 次主ポンプトリップ試験時の、中心位臘燃料集合体出口 Na 温度、原子炉出口 Na 温度及び 1 次冷却材流量の変化を示してある。これに対して、手動スクラン時は、温度低下が速く、スクラン 1 分後には、中心位臘燃料集合体出口 Na 温度は約 375°C、原子炉出口温度は約 400°C まで低下している。

調整棒一齊挿入試験時にも、スクラン時と同様な結果が得られており、[5A2] の信号レベル半減の現象は、高溫 Na による絶縁抵抗の低下が有力となつた。なお、[5C2] では、このような現象は見られていない。

4.16 RMS 値連続監視 (Fig. 4.28, 4.29)

Fig. 4.28 には、炉内音響 RMS 値連続監視結果の一例として、50MW 1.0 時間連転時のデータを示す。

Fig. 4.29 には、原子炉出力が定常になつてからの炉内音響及びハウジング音響 RMS 値の変動分布を示す。原子炉出力は、50MW, 40MW, 2.5MW, 1.5MW それに停止時であり、出力上昇試験期間中の定時記録 (1 日 3 回) のデータを使用した。

50MW 1.0 時間連転時に、[5A2] 炉内音響信号 RMS 値は、50MW 到達直前から値が

半減し、5 MWより出力降下時に、再び値が回復しており、これは前述した断温による絶縁低下の現象と一致している(Fig. 4.23参照)。[RR2]は出力上昇とともに上升しており、これもFig. 4.23と同傾向を示している。原子炉停止後に値が高くなっているのは、制御棒ドリッパーによるものである。

[5.8.2]炉内音響信号のRMS値の分布は原生炉が起動されると停止時よりも多少高くなる。これは、回転ブリッヂ・アースタ・ファンの騒音によるものと考えられる。原子炉出力による分布の変化はほとんど見られない。5 MWになると、RMS値が約半分になるが、半分になつていい瞬もある。これは、「消音」が最初に5 MWに到達した頃の値であり、その後の50 MW時には、RMS値は約半分になる。これからも、高溫による音響検出器の絶縁抵抗の劣化が考えられる。

[5.8.2]炉内音響信号のRMS値の分布は、2.5 MW以下では、高い値まで広く分布しているが、4.0 MW以上では低い値に集中している。出力上昇試験の後半では、出力上昇中に2.5 MW以下でも、4.0 MW以上と同程度の低い値に集中するようになつた。

[RR2]ハウジング音信号のRMS値の分布は、原子炉停止時は、高い値まで広く分布している。これは、制御棒ドリッパー状態にあるために、衝撃音が多く発生しているためと思われる。出力上昇と共に、RMS値は増加する傾向にある。

ROD	FREQUENCY [Hz]	PEAK [Hz]	PULSE RATE [Hz]	CALCULATED RMS VALUE	MEASURED RMS VALUE	*1 ROTARY ENCODER 3600 PULSE/ROD TURN		
						*2 RELATIVE VALUE (FROM PSD)	*3 RELATIVE VALUE (BY RMS METER)	*1
0.007		24	24.5	0.016	0			
0.03	102	108	024	0.08				
0.07	248	248	067	0.5				
0.3	105K	1040	1.00	1.0				
0.7	24K	2480	0.64	0.5				
3	103K [Hz]	10700 [1/S]	-	0				

Table 4.1 Rod frequency vs. peak frequency and rms value

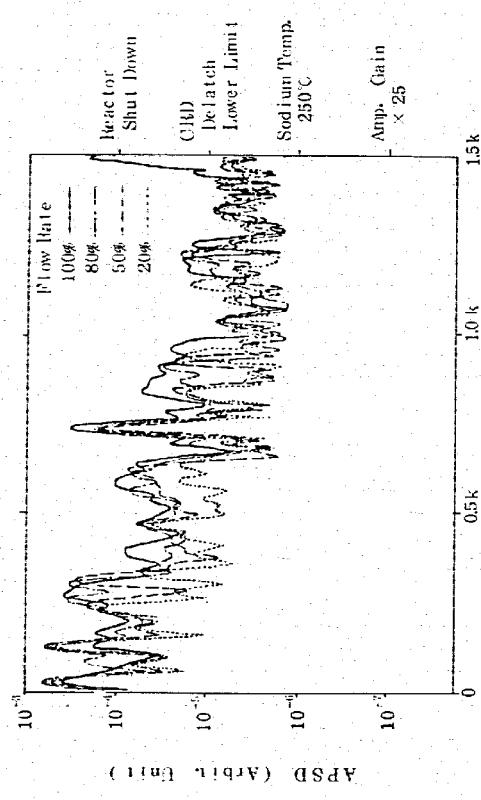


Fig. 4.1 Auto power spectral densities of [5A2] in-core acoustic signal.

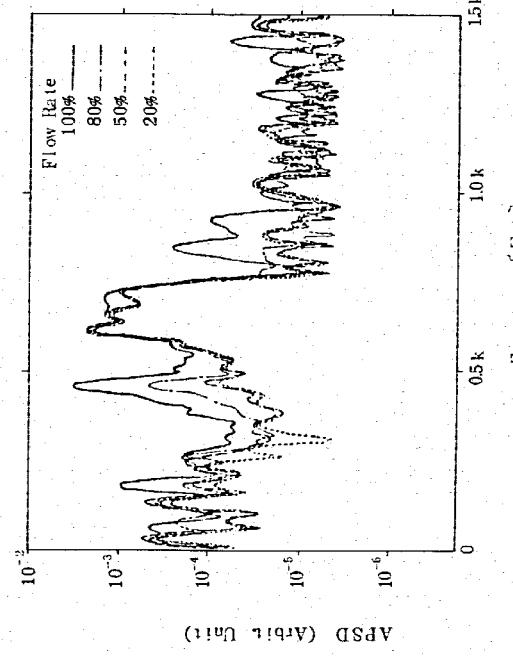


Fig. 4.2 Auto power spectral densities of [5C2] in-core acoustic signal.

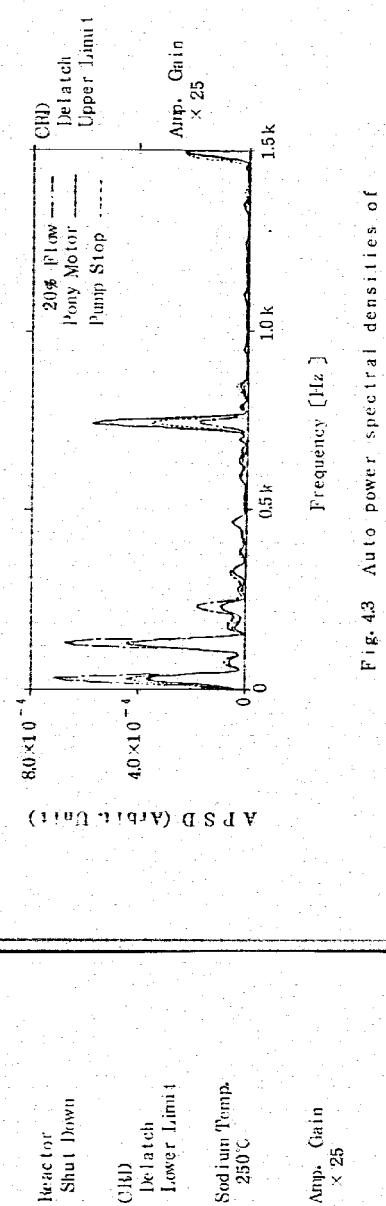


Fig. 4.3 Auto power spectral densities of [5A2] in-core acoustic signal.

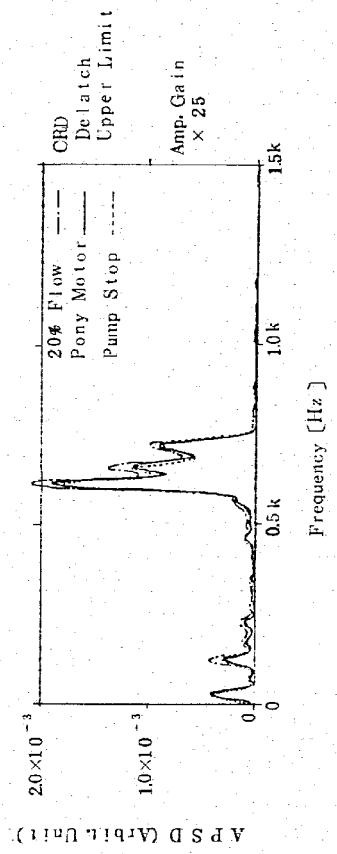


Fig. 4.4 Auto power spectral densities of [5C2] in-core acoustic signal.

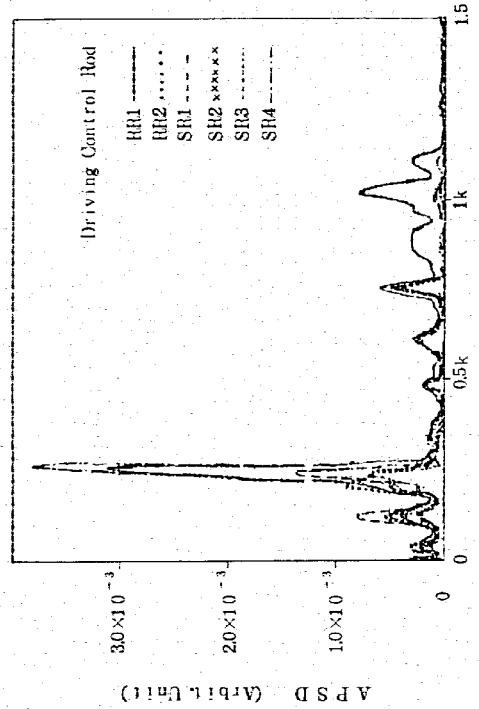


Fig. 45 Auto power spectral densities of [5A2] in-core acoustic signal during driving a control rod.

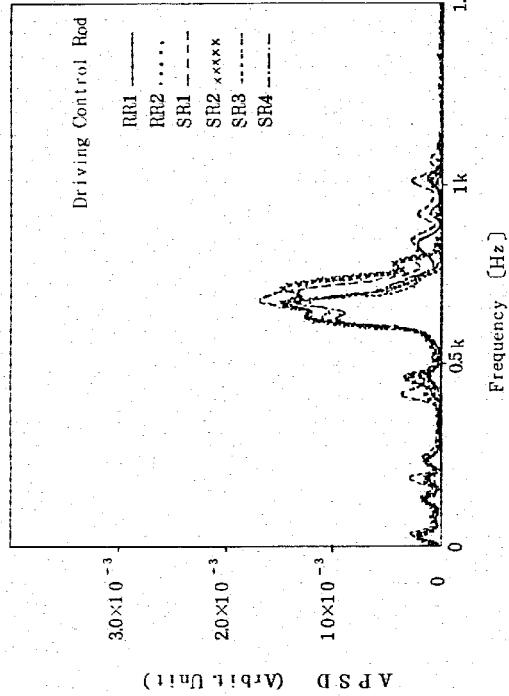
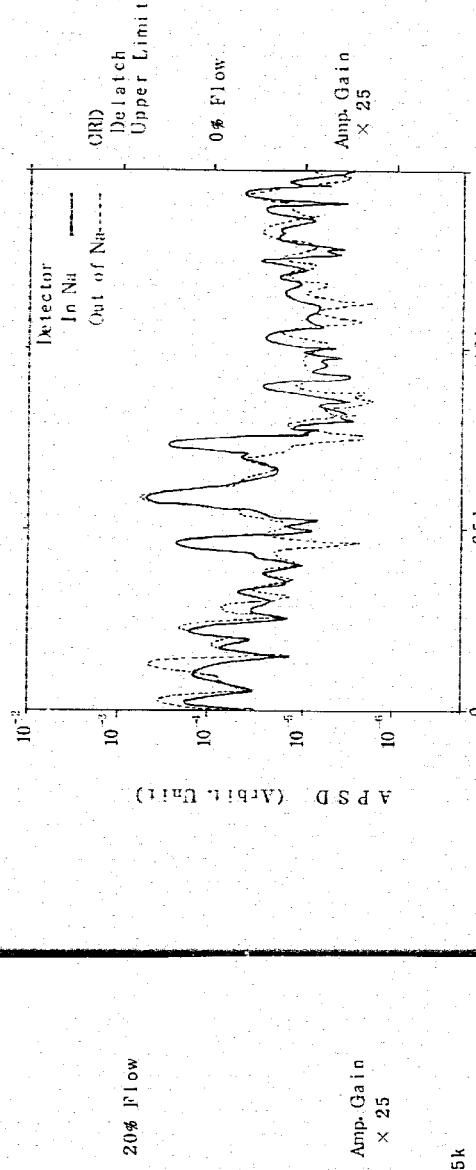


Fig. 46 Auto power spectral densities of [5C2] in-core acoustic signal during driving a control rod.

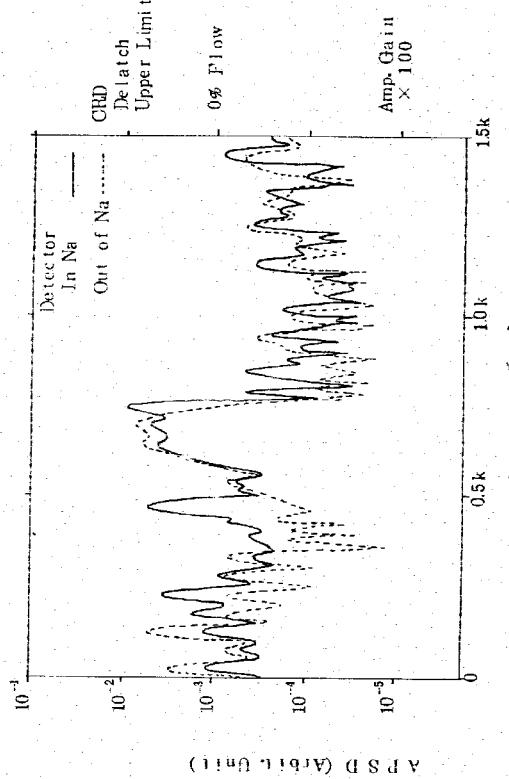


Fig. 47 Auto power spectral densities of [5A2] in-core acoustic signals with a detector in and out of Na.

Fig. 48 Auto power spectral densities of [5C2] in-core acoustic signals with a detector in and out of Na.

Fig. 48 Auto power spectral densities of [5C2] in-core acoustic signals with a detector in and out of Na.

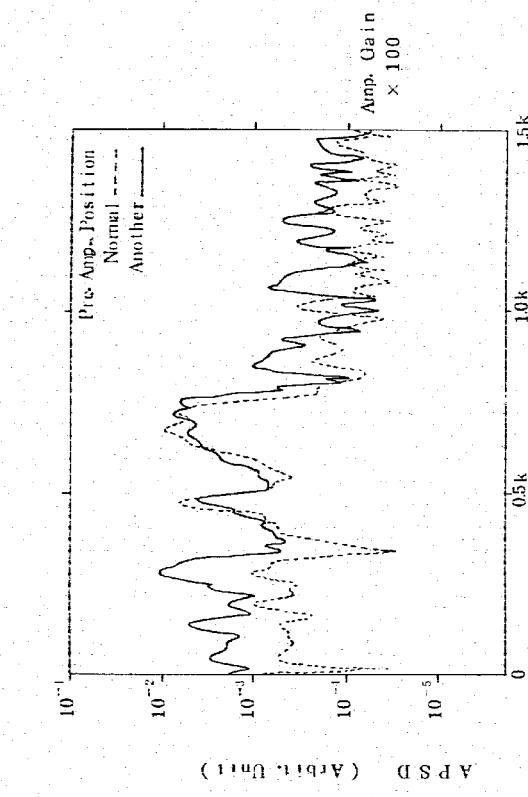


Fig. 4.9 Auto power spectral densities of [5C2] in-core acoustic signal through a pre. amp. at different positions.

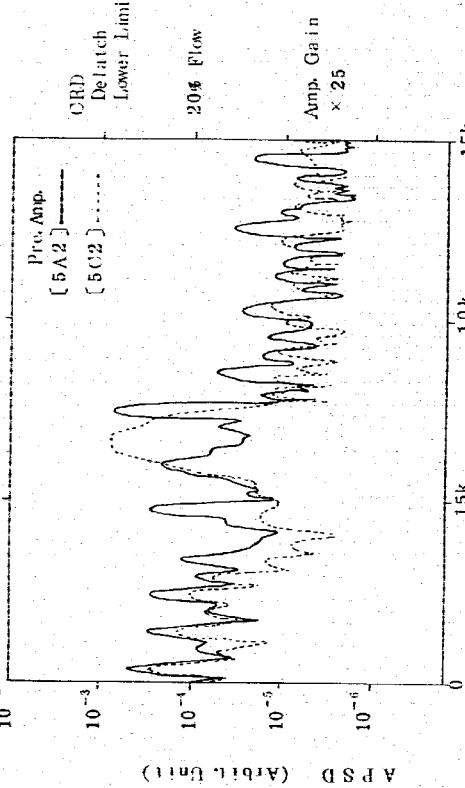


Fig. 4.11 Auto power spectral densities of [5C2] in-core acoustic signal through [5C2] and [5C2] pre. amp. s

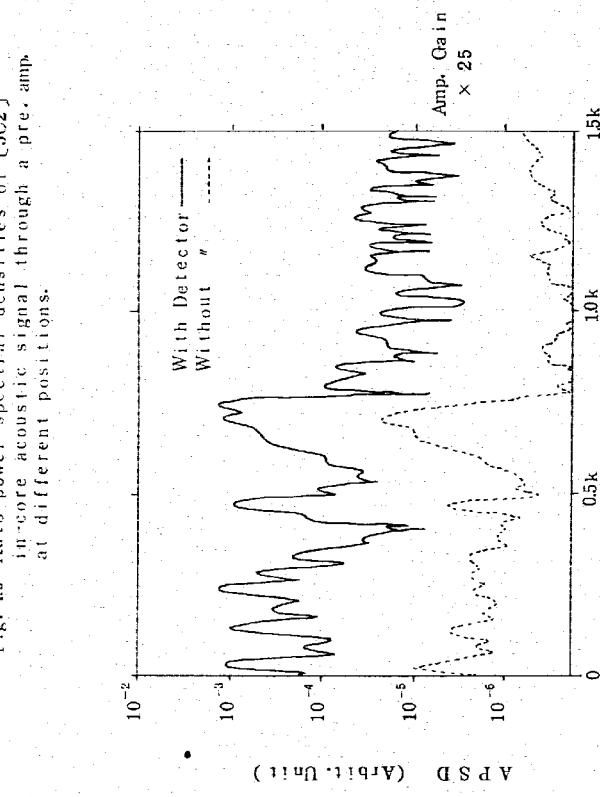


Fig. 4.10 Auto power spectral densities of [5C2] in-core acoustic signal with and without the detector.

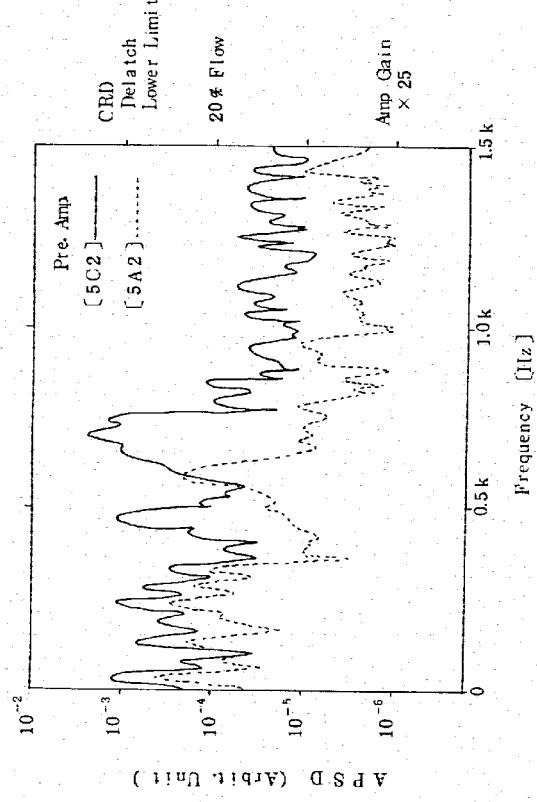


Fig. 4.12 Auto power spectral densities of [5C2] in-core acoustic signal through [5C2] and [5A2] pre. amp. s

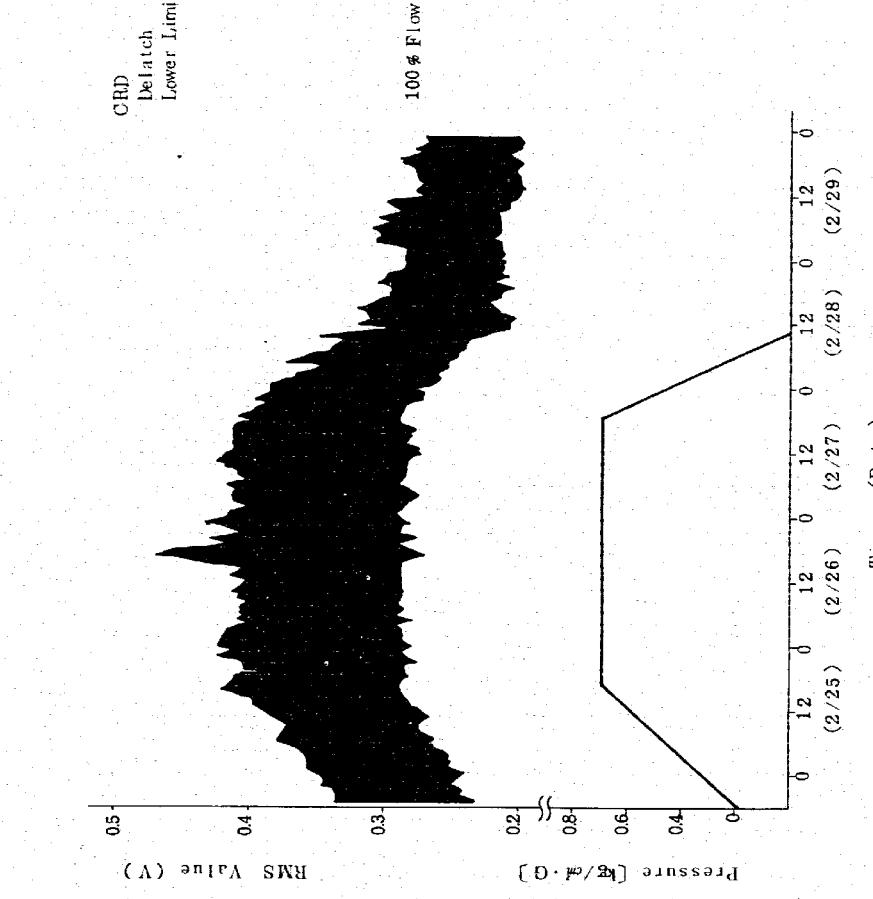


Fig. 413 RMS value of [5C2] in-core acoustic signal and pressure in PCV (primary containment vessel) during the PCV leak test.

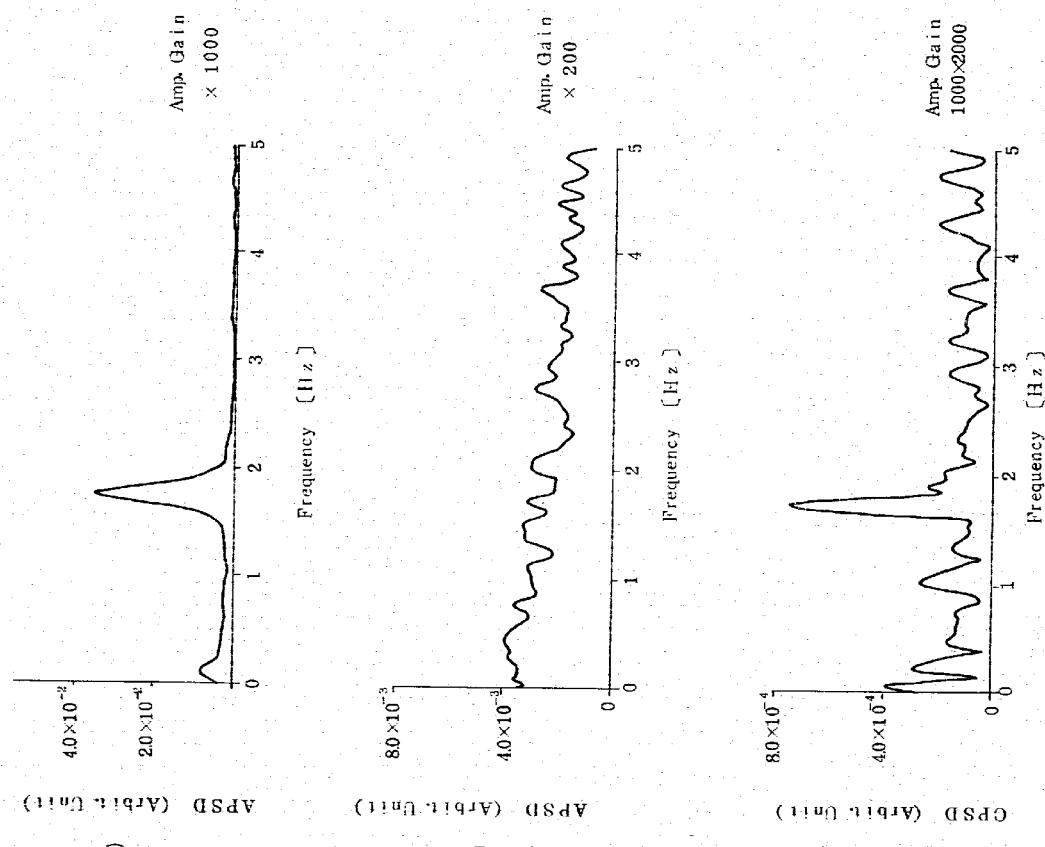


Fig. 414 Auto power spectral density of neutron flux (a), and RMS converted [5A2] in-core acoustic signal (b), and cross power spectral density between them (c)

Flow Rate 100 %
RR1 6277 mm
RR2 400 mm
Neutron Flux (ch) 10^4 CPS (≈ 1.3 kW)
Time Constant of 0.01 sec
RMS Converter

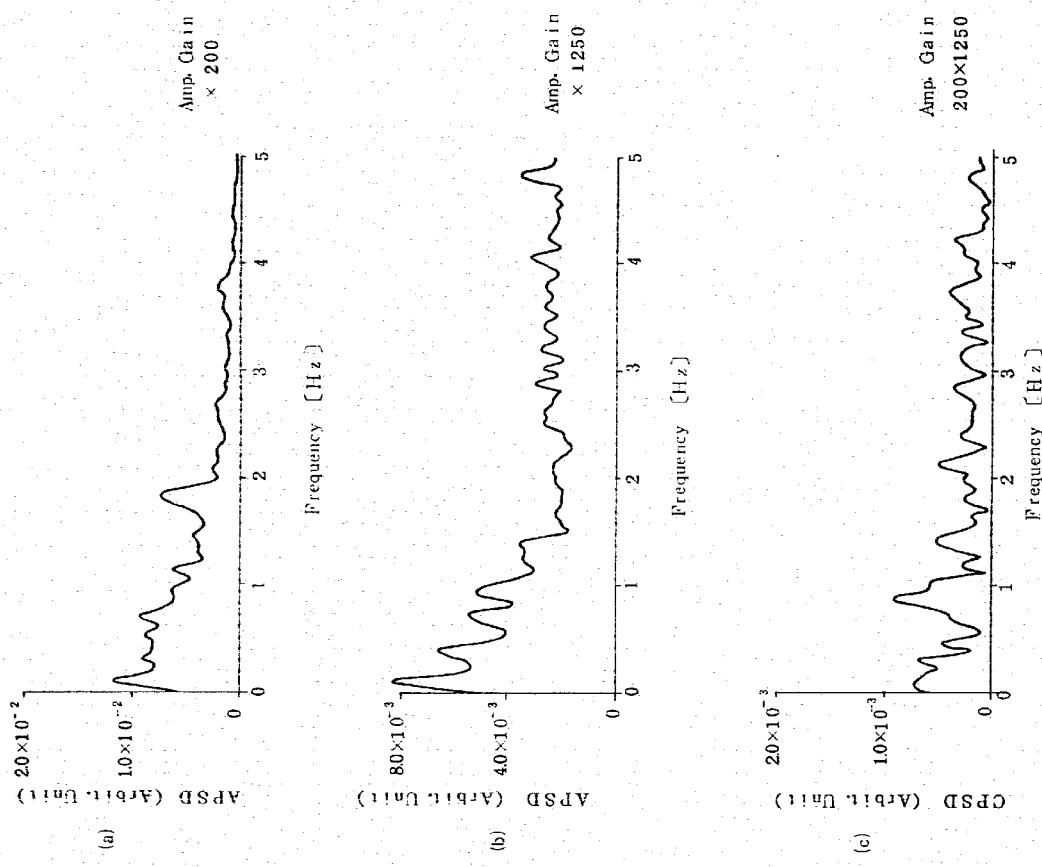


Fig. 415 Auto power spectral density of RMS converted [RR2] housing acoustic signal (a) and RMS converted [5A2] in-core acoustic signal (b), and cross power spectral density between them (c)

Flow Rate: 100%
 RR1: 62.77 mm
 RR2: 4.00 mm
 Neutron Flux (chl): 10^4 CFS (≈ 1.3 kW)
 Time Constant: 0.005 sec
 of RMS Converter

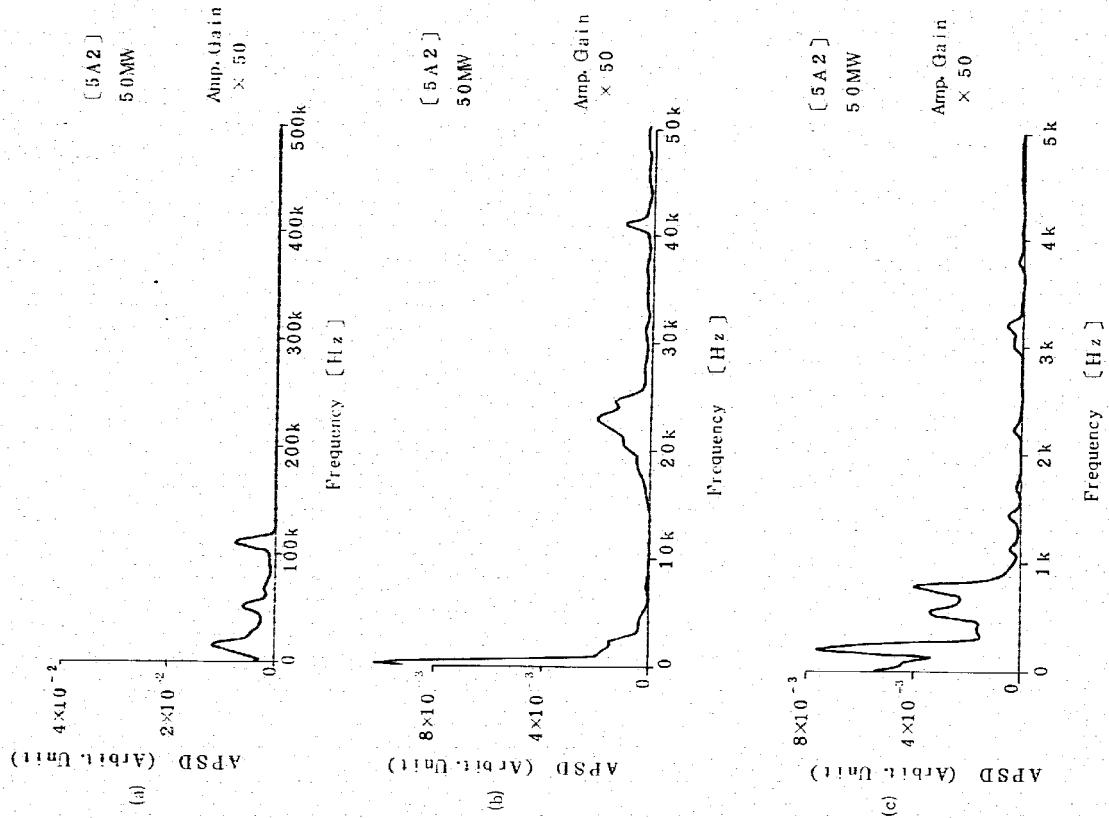


Fig. 416 Auto power spectral density of [5A2] in-core acoustic signal

(a)(b)(c) 5.0 MW RR1=515.0 RR2=53.02

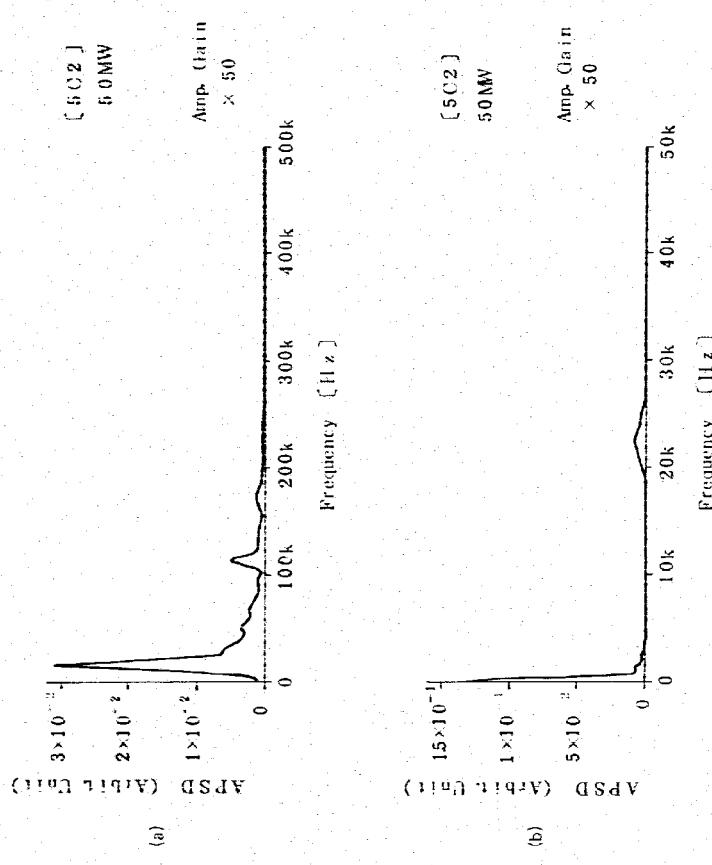


Fig. 4.17 Auto power spectral densities of [5C2] in-core acoustic signal.

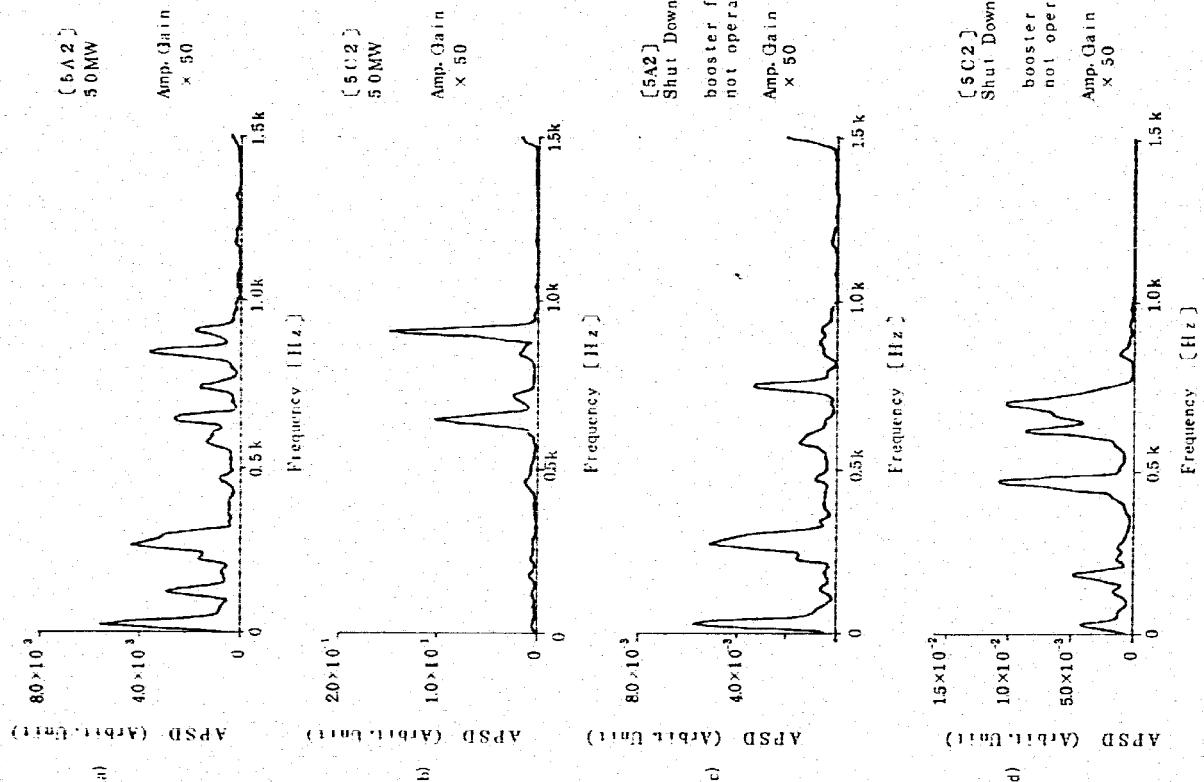


Fig. 4.18 Auto power spectral density of [5A2] and [5C2] in-core acoustic signal with and without noise of a booster fan.

(a)(b)(c) RR1=51.50 RR2=53.02
(d) CHD : elatch lower limit (SR3 : del. upper limit)

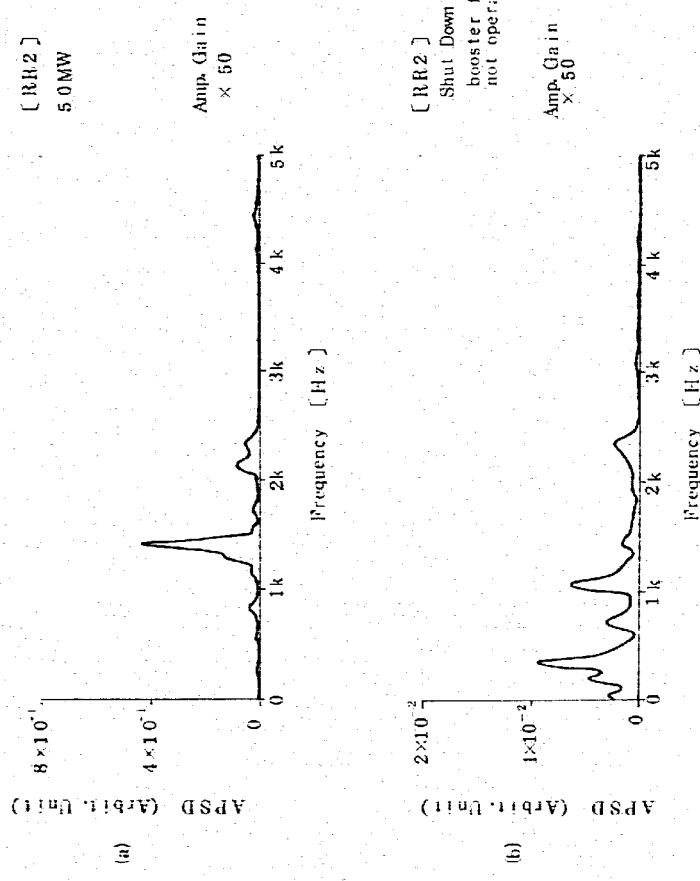
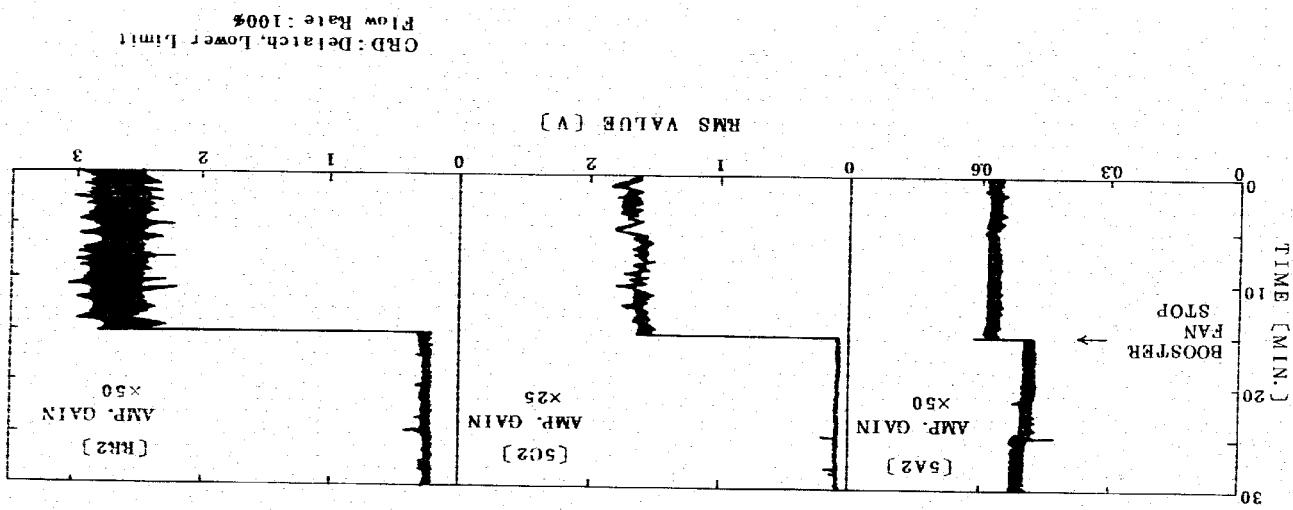


Fig. 419 Auto power spectral density of [RR2] housing acoustic signal with and without noise of a booster fan.

- (a) $\text{RR1}=5.150 \quad \text{RR2}=5.302$
- (b) CRD: detailch lower limit
(SR3 : del. upper limit)



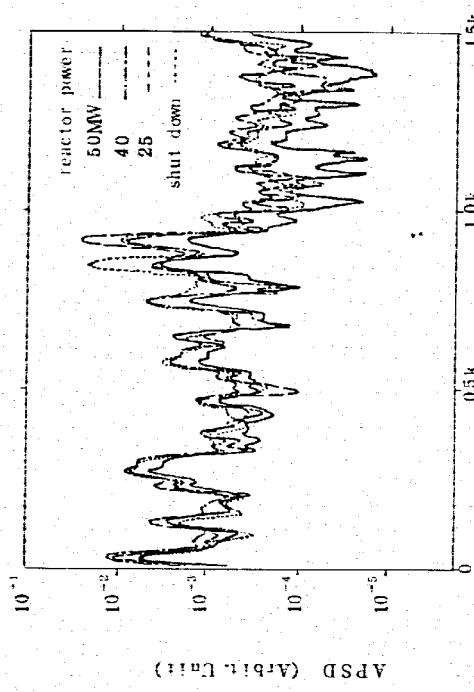


Fig. 4.21 Auto power spectral density of [5A2] in-core acoustic signal.

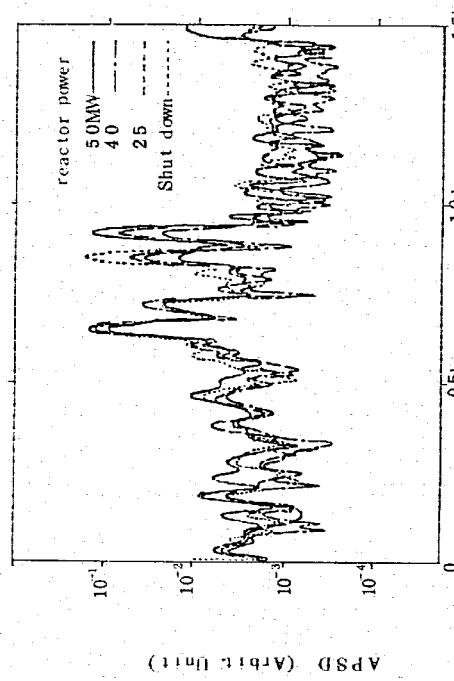


Fig. 4.22 Auto power spectral density of [5C2] in-core acoustic signal.

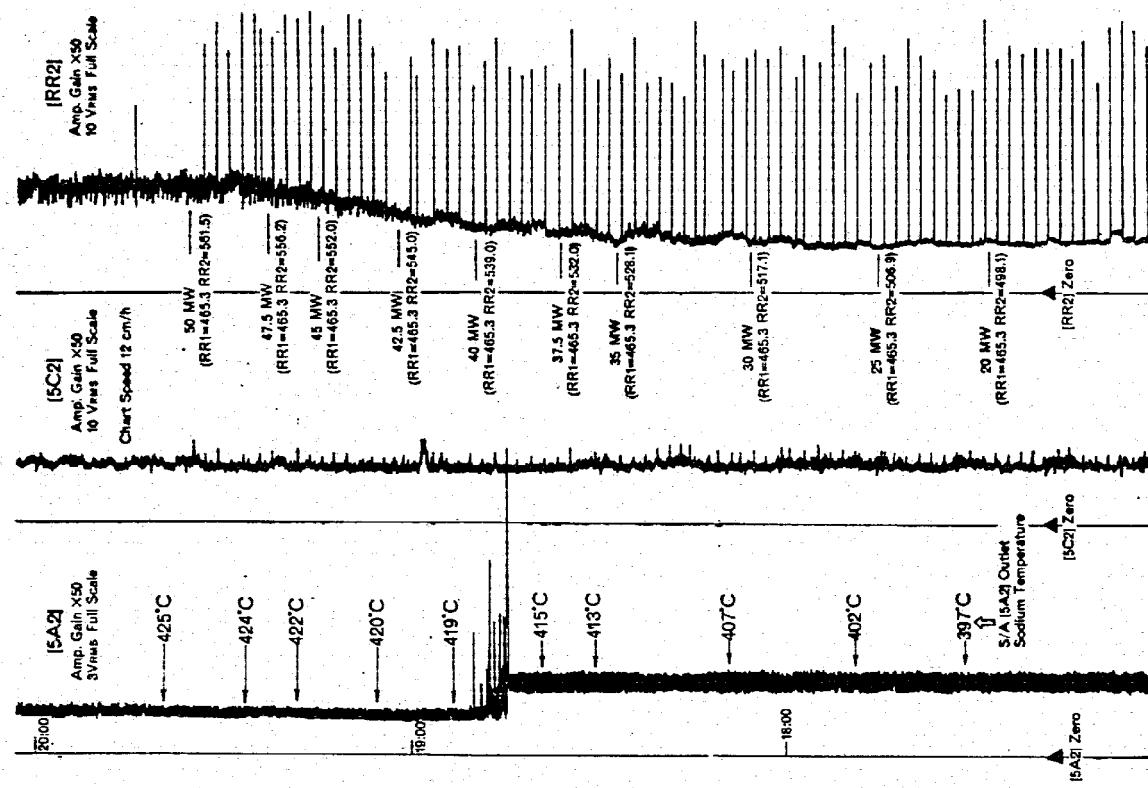


Fig. 4.23 RMS Values of [5A2], [5C2] In-Core Acoustic Signals and [RR2] Housing Acoustic Signal.

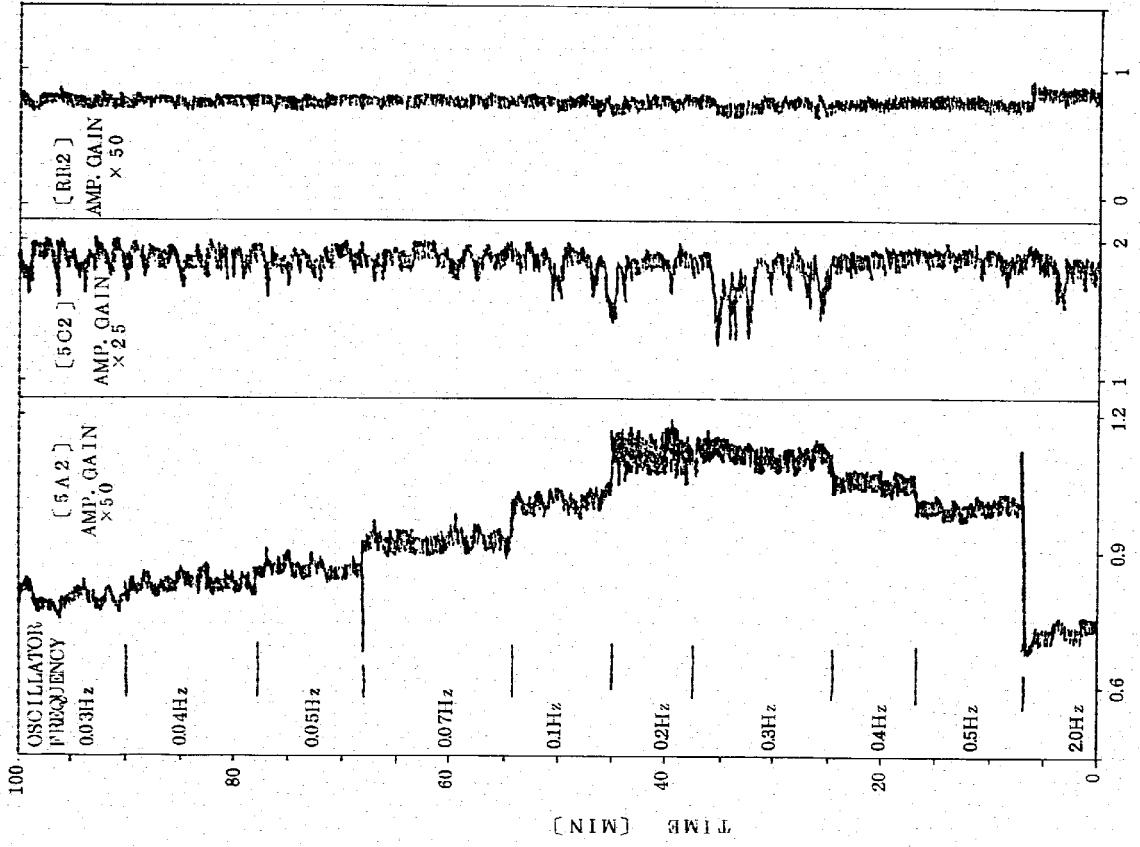


Fig. 4.24 RMS values of [5A2], [5C2] in-core acoustic signals and [RR2] housing acoustic signal during the pile-oscillator measurement.
REACTOR POWER : 15MW
FLOW RATE : 100%
Oscillator Frequency,
(a) 0.07Hz (b) 0.3Hz (c) 0.07Hz (d) 0.03Hz
Power : 15MW RR1 : 4.527mm RR2 : 4.500mm Flow Rate : 100%

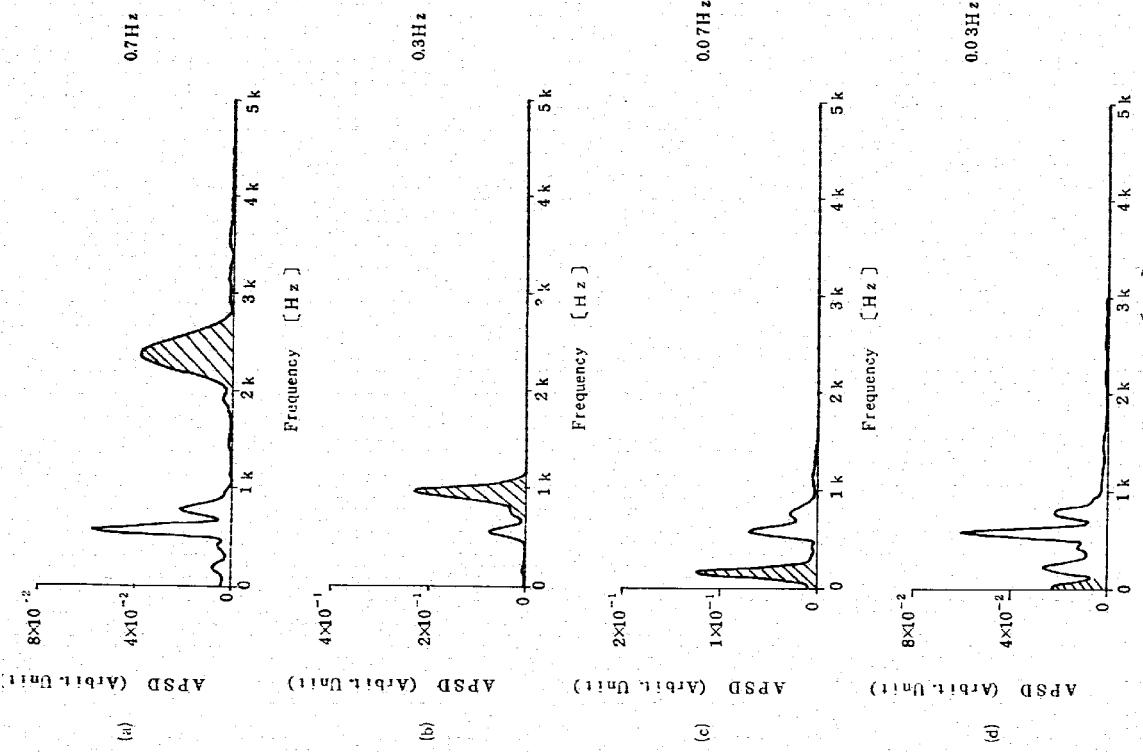
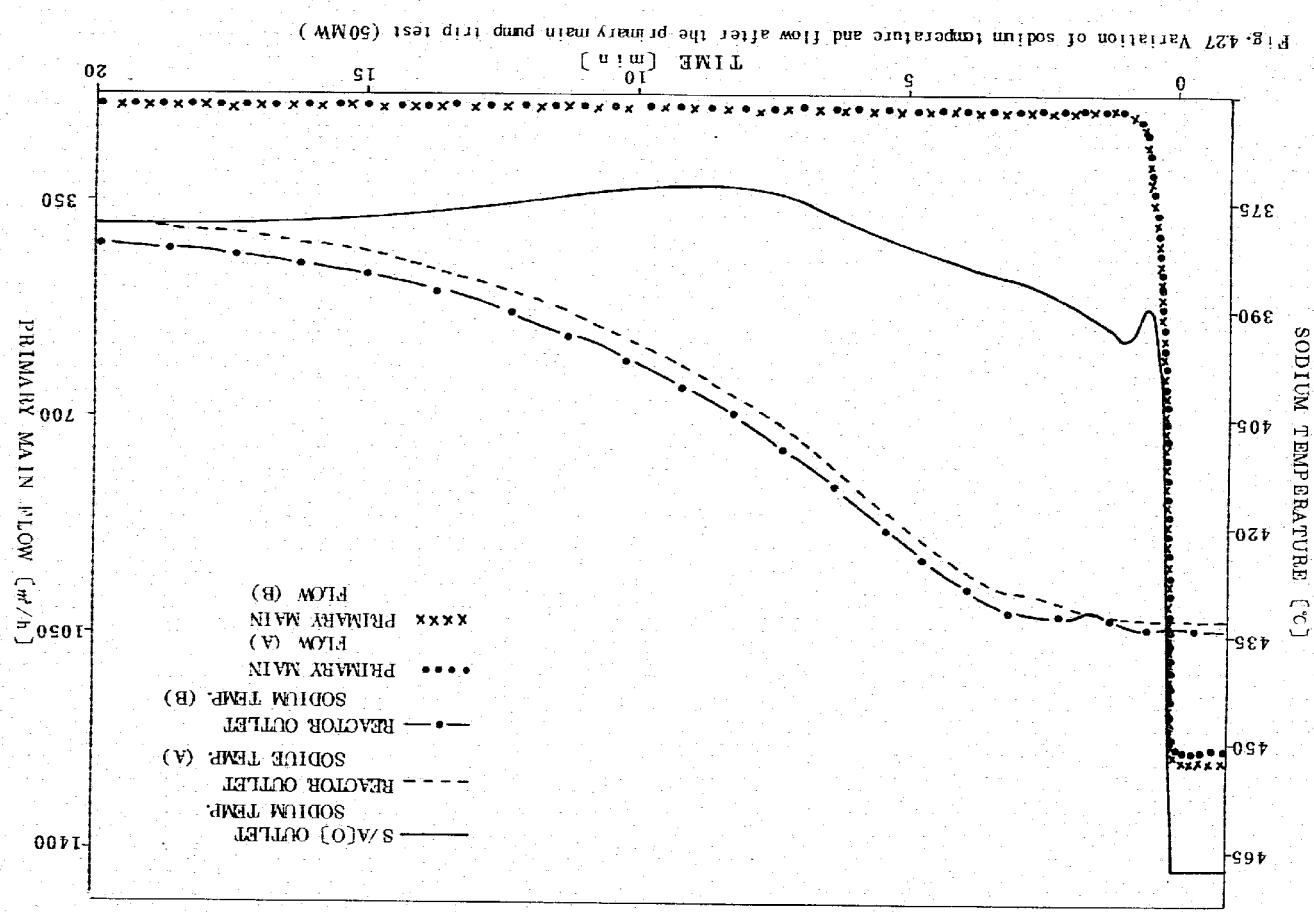
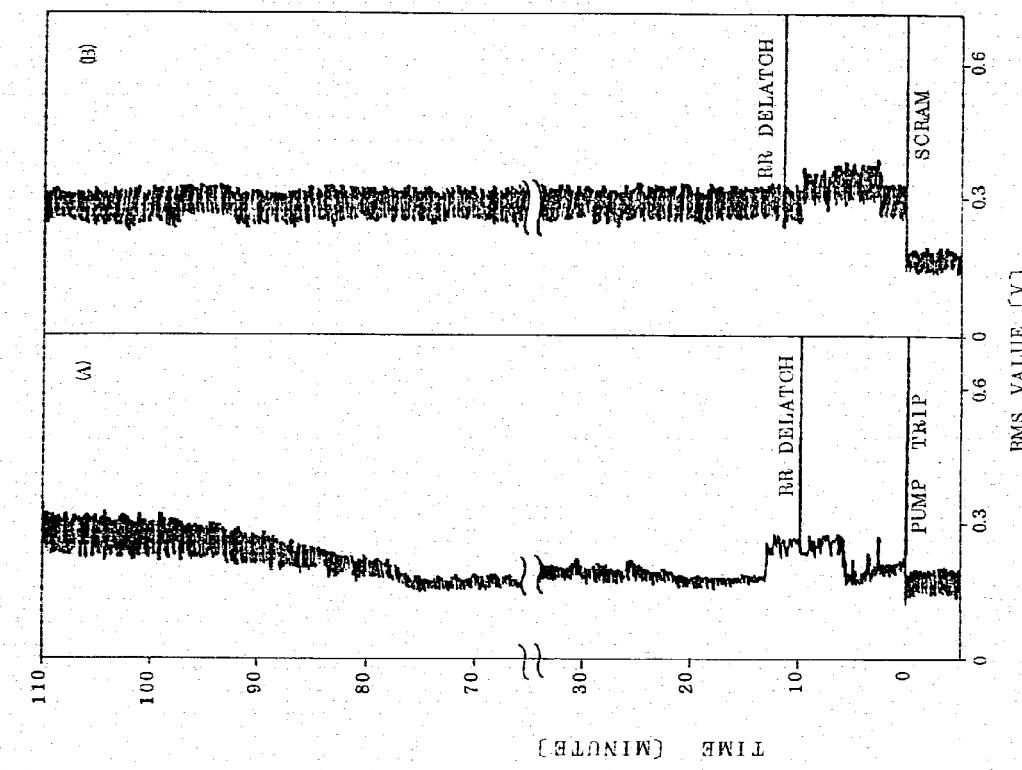
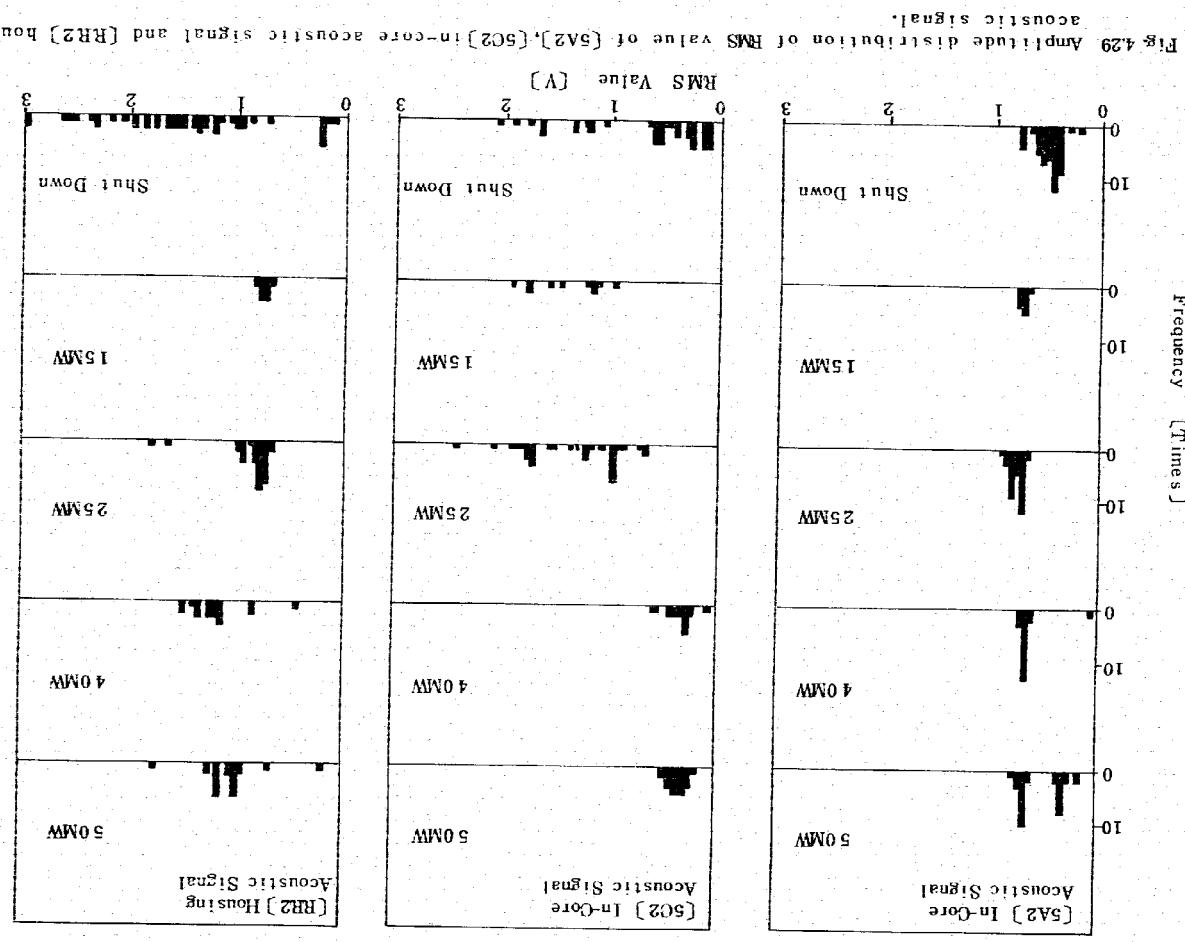


Fig. 4.25 Auto power spectral densities of [5A2] in-core acoustic signal when the pile-oscillator measurement was made
Oscillator Frequency,
(a) 0.07Hz (b) 0.3Hz (c) 0.07Hz (d) 0.03Hz





—4-3—

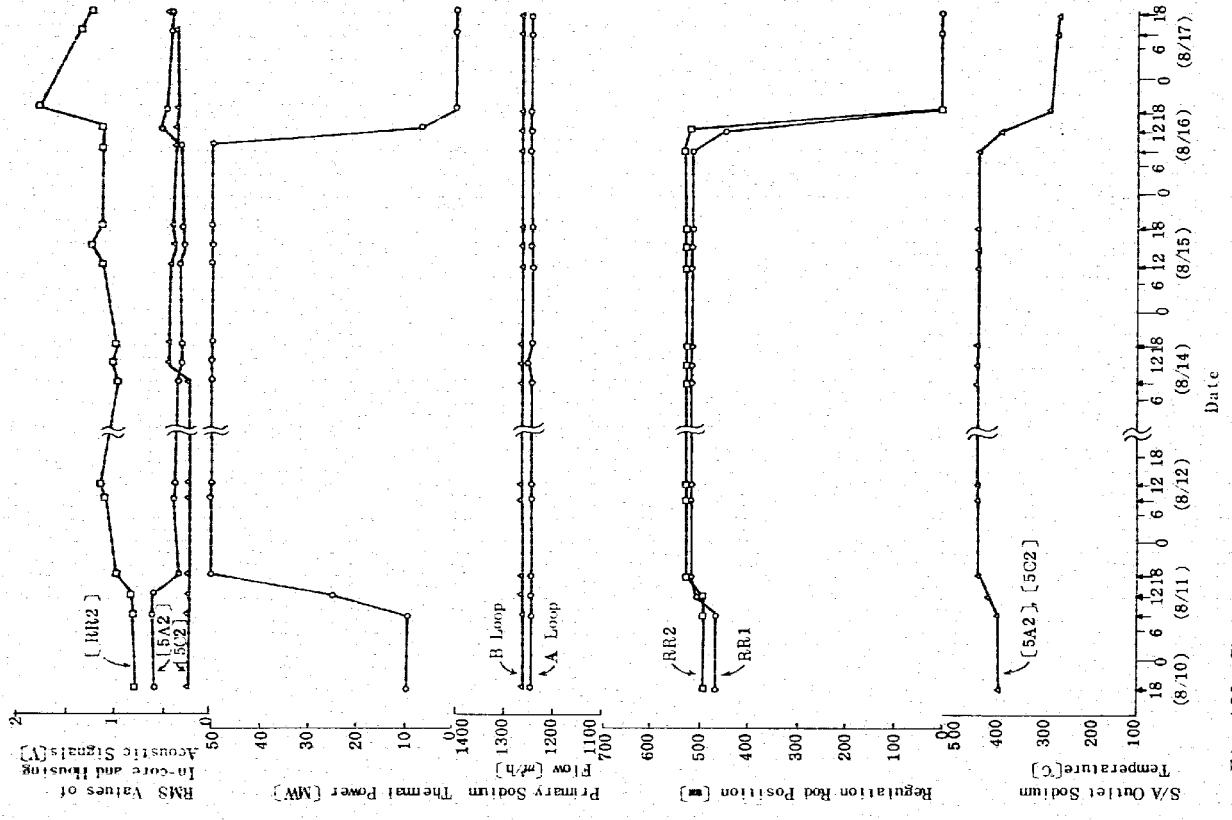


Fig. 4.28 RMS values of [5A2], [5C2] in-core acoustic signals and [RR2] housing acoustic signal vs. other plant conditions.

—4-2—

5 検討

5.2 炉内音響信号で識別可能な対象

5.1 炉内音響検出系の特性

「5A2」と「5C2」の内音響信号は、パワースペクトル及びRMS値について明らかに特性が違う。炉内のナトリウム中を伝播する音響には、それはほど大きな相違は考えられないのでも、音響検出系の特性及び検出系近傍の穿孔部の違いが原因と考えられる。

両信号に共通している電気的ノイズには、サイリスタのゲート信号である約3.3msごとに発生するバルス波のノイズ（パワースペクトルでは2.3kHz付近に広がるピーカー）、停止セルビラム制御系によるボンブ回転数依存性の数kHzのノイズ（50…0.05NpHz:Np〔RFM〕），電源による50Hz及びその高調波ノイズがあり、音響検出器及びそれに続くMTIケーブルのシールド側が接地されているため、この種のノイズは除きれない。なお、音響法炉外監視用検出系でも同様な問題が生じていたが、検出器を絶縁型にすることで50Hzノイズの問題は解決した。現在の炉内音響検出器は絶縁型にはできない。

その他、電気的ノイズと考えられるものが、パワースペクトル上で約110kHzに観測される。「5A2」炉内音響信号には、約59kHzにも観測される。また、両信号共通に約450Hzと約750Hz成分が観測されるが、これも電気ノイズの可能性がある。さらには、電流型流量計の励磁周波数である約500Hzの成分が、「5A2」が内音響信号に混入している。「5C2」炉内音響信号では他の信号に隠れているためか、観測できない。

音響的ノイズとしては、回転プラグ冷却扇ブースタファンの騒音及びヘーシング音が顯著である。これは主に「5C2」炉内音響信号と「RR2」ハッシュング音響信号に影響を与える。ピッカート蓋が設置された時は、ヘーシング音の影響はほとんどなくなる。

ブースタファンの騒音は、バンド・エリミネーション・フィルタで、かなり除去できる。しかし、フィルタで除去した周波数帯域にある音響信号は、解析できない。ブースタファンによる騒音の周波数と音響信号の周波数は、「RR2」ハッシュング音響信号で多少ずれているが、「5C2」炉内音響信号では重なっている部分があるので問題が残る。また、ブリアンプをガーゼで巻いてみたが、ほとんど変化はなかった。

炉内の音響を、どの程度検出できるかは現在のところ不明であるが、工場試験によると、音響検出器のノイズレベルは0.36mVrmsであり、現在のブリアンプ（約1000倍）及びマイアンプ（50倍と25倍）のゲインを考えると、ノイズレベルにまで増幅していることになる。10k~100kHz以外の音響には、検出感度は試験されておらず、炉外及び炉内の機械実験を行なう必要がある。

5.3 今後の課題

炉内音響信号は、炉内の検出器で検出される信号のみならず、検出器とブリアンプ間のNIMケーブルで検出する音響信号も含んでいるようである。そういう意味では、ウェイブガイドを使用する場合と同じである。炉内の構造物をウェイブガイドとして利用したハッシュング音響信号は、ルースハーフモニターとして有効と思われる。

また、炉内音響検出器は高温、高放射線下で使用するため、寿命が短かく、しばしば交換しなければならない。高感度で長寿命の炉内用音響検出器の開発が望まれる上に、振動に対して信号を拾わないようなケーブルとブリアンプの開発も望まれる。更に、ウェイブガイドを使用した検出方法も検討されるべきである。

炉内音響検出器を3体、炉内に挿入して音源の位置推定可能性を調べる計画もあり、今後の課題となつていて。

6 準
計

7 準付資料

「常温」の低出力試験、50 MWへの出力上昇試験期間を通じて取扱したデータの解析結果より次のことが言える。

(1) 「5A2」と「5C2」炉内音響検出器では特性が悪い、〔5C2〕炉内音響検出系は回転ブリッジ上の騒音の影響が大きく受けているが、〔5A2〕炉内音響検出系はほとんど影響を受けない。

(2) 炉内音響検出系の検出器とM1ケーブルのシールド側が接地されているため、サイリストからノイズ、静止セルにラバ制御系からのノイズ、及び電磁ノイズなどの電気的ノイズの影響が大きい。

(3) 音響信号には種々の音階が含まれているため、特定の音響に注目しようとするとSN比が悪い。特に回転ブリッジ冷却用ブースターファンを運転中は、その騒音により〔5C2〕炉内音響検出系では微弱な音階の検出は極めて困難である。

(4) 制御盤振動による衝撃音については、炉内音響検出器よりもハリシング音響検出器の方がよく検出できた。

(5) 「5A2」炉内音響検出器は、ナトリウム温度が高溫になるとパワースペクトルのバーンは変化せず、信音レベルが半減する。理由として、背盤による検出器の絶縁抵抗の低下が考えられる。

今後の課題として次のことが考えられる。

(1) 現在の炉内音響検出器の特性を更に調べて検出する試験が必要である。

(2) よりSN比の良い炉内音響検出器、及び検出方法の開発が必要である。

7.1 炉内音響検出器の絶縁抵抗

炉内音響検出器の絶縁抵抗の履歴による変化をFig. 7.1 に示す。室温での抵抗は、検出器の搬付前に測定したものであり、メーターでの予備試験によると、250Ωで数百回、400Ωで、約50Ω、600Ωで約20Ωになることである。

現在、使用中の検出器〔5A2〕、〔5C2〕では、試験操作成績書によると、M1ケーブルの絶縁抵抗はそれぞれ2.2×10¹²Ω、1.0×10¹¹Ωであり、検出器本体の絶縁抵抗はそれぞれ1.5MΩ、0.47MΩである。

音響検出器の高温による絶縁低下に関する以下のような報告がある。1.1NaNO₃結晶でできている検出器は、高温で被覆灰の導通気中では、酸素が放出され結晶の電気伝導度が増加するため、検出器の抵抗が低下する。完全に密閉された検出器を高温導通気中に入れると、検出器ケースとケーブルの間にによりケースの中は十分な液体状態となり、抵抗の低下が生じる。しかし、この現象は検出器の前処理とバージ系が十分であれば避けができる。3.8個のANLi高温マイクロファンを高温中で運用した結果、2～3個の検出器に上記のようないNaNO₃結晶の破壊による抵抗低下が認められた。

(以上 SMORN-II conference (1977), W.M. Caley et al.)

The Detection of Sodium Vapor Bubble Collapse in a Liquid Metal Fast Breeder Reactor

7.2 エリアシング

ディジタルデータ解析のためのサンプリングを、余り広いサンプリング間隔で行うとともに、もとのデータの低周波成分と高周波成分が混合してしまう。この問題はエリアシング(aliasing)と呼ばれており、直接アナログデータ処理をする時には起こらないが、AD変換によって行われるすべてのディジタル処理に必ずつきまとひ誤差の主要な原因となるものである。古い歌詞を見ると、車が前方に走っているにもかかわらず、車輪が逆に回転していることに気がつく時があるが、これは、映画カメラによるサンプリングの結果生じたエリアシング誤差の簡単な例である。

もとのデータの周波数成分を定めるためには、1サイクル当たり少なくとも2回サンプルされることが必要である。したがって、△1秒の間隔でサンプリングすることによって定めることができる最高周波数は1/2△1Hzである。このとき、もとのデータにおける1/2△1Hz以上の周波数はFig. 7.2に示すように、より低い周波数範囲のデータと混合してしまう。この遮蔽周波数fc=1/2△1はNyquist周波数とか、折りたたみ周波数と呼ばれている。特に、0≤

式 c_e の範囲の任意の周波数に対して、 f でエイリアスされる高周波の周波数は、
 $(2f + f_e), (4f + f_e), \dots, (2n f + f_e), \dots$ と定められる。

このエイリアシングの問題を処理するためには、2つの実験的な方法がある。第1の方法は、
 f_e を十分小さく選ぶことであり、一般に f_e を予期される最大周波数より 1.5 から 2 倍大き
 \times く選ぶのが適当である。第2の方法は、サンプリングする前にあらかじめデータをフィルタし、
 \times 最大周波数以上の情報が含まれないようにすることである。

(引： J.S.Bendat, A.G.Piersol著「ランダムデータの統計的処理」)

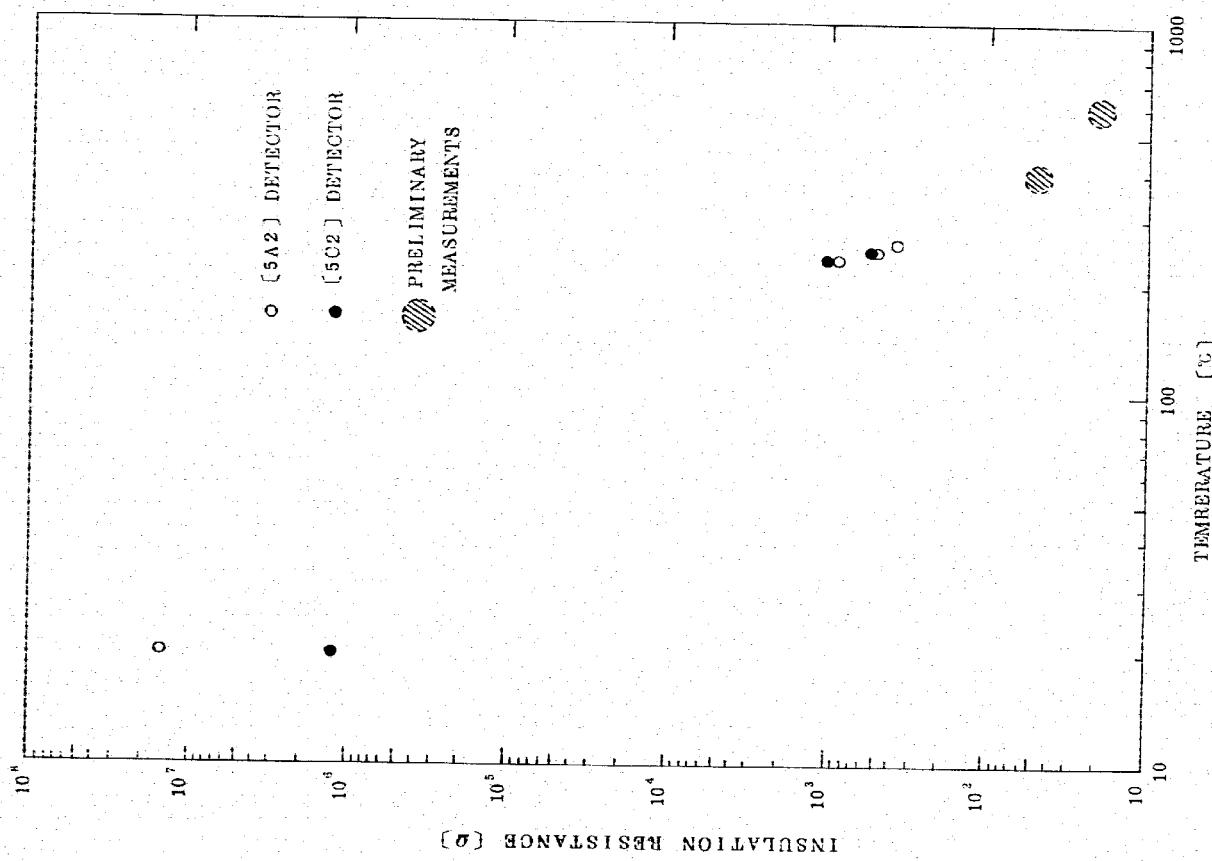


Fig. 7.1 Insulation resistance of in-core acoustic detectors

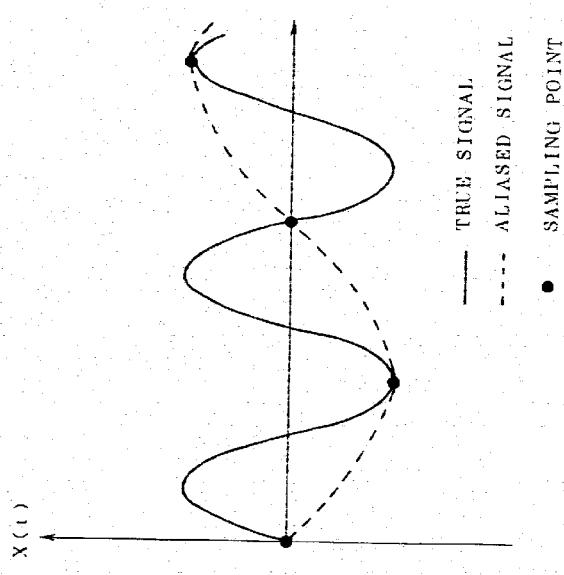


Fig. 7.2 Example of aliasing