

# 高速実験炉「常陽」75MW性能試験報告書

音響法異常監視(MT-31)

— 炉内音響監視 —

1980年8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」75MW性能試験報告書

## 音響法異常監視(MT-31)

## —炉内音響監視—

佐野 健一\*，大谷 秀二\*，  
田村 誠司\*

## 要 旨

高速実験炉「常陽」では，ナトリウム沸騰等の炉内の異常を早期に発見するために，炉内音響検出器による異常監視を続行している。

現在，炉内音響検出器は，炉心位置〔5A2〕，〔5C2〕および〔5F2〕に合計3体設置されており，これらの検出器による，75MW定格第1サイクルまでの測定および連続監視の結果，以下のことが明らかになった。

- (1) ナトリウム沸騰音響検出を目的とする数十kHzの周波数帯域では，バックグラウンド雑音は1次冷却材流量制御系による電磁氣的雑音が主となっており，周波数成分としては，22kHz付近を中心とする幅広いスペクトルを有している。このバックグラウンド雑音レベルは，原子炉出力および1次冷却材流量（主ポンプ運転時）には，ほとんど依存しない。
- (2) ナトリウム過渡沸騰試験結果からの類推によると，現在の炉内音響測定系ではSN比が悪く，局所沸騰（サブクール沸騰）の検出はむずかしいかもしれない。
- (3) 〔5C2〕および〔5F2〕炉内音響検出器の絶縁抵抗は，予想通り温度の上昇とともに減少したが，〔5A2〕炉内音響検出器だけは330℃前後で300倍以上に急増した。
- (4) 現在までのところ，炉内音響監視から，炉内の異常を示す結果は得られていない。

---

\* 大洗工学センター，高速実験炉部技術課

"JOYO" 75MW Start-Up Test Report

In-Core Acoustic Monitoring

Kenichi Sano\*, Hideji Ohtani\*,  
and Seiji Tamura\*

Abstract

In the experimental fast reactor "JOYO", in-core acoustic monitoring has been continued, in order to detect in-core abnormal condition like sodium boiling at an early stage.

Three in-core acoustic detectors are situated in the core addressed [5A2], [5C2] and [5F2]. The following facts were derived from the measurements and the monitoring by these detectors through the first 75 MW duty cycle operation.

- (1) The background noise at several ten kHz range, which is suitable range for sodium boiling detection, is mainly composed of electromagnetic noise from the primary sodium flow control system. The power spectral density of the noise has a broad peak at about 22 kHz. The signal level of the noise are independent of reactor power and primary sodium flow (primary sodium pump in operation).
- (2) Since this in-core acoustic detection system has poor SN ratio, the analogy of the result of the local sodium boiling test conducted at off-site may resulted in difficulty for detection of local sodium boiling by this system.
- (3) Insulation resistance of the detectors became lower as sodium temperature became higher. Over about 330°C, however, the resistance of [5A2] in-core acoustic detector suddenly increased more than 300 times of its normal value.
- (4) Abnormal core condition has not been found until now according to the in-core acoustic monitoring system.

---

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

## 目 次

1. ま え が き	1
2. 設 備 の 概 要	2
3. 試 験 の 方 法	5
3.1 プラント状態変化時の測定	5
3.2 連続監視	5
4. 試 験 結 果 と 考 察	7
4.1 原子炉出力の影響	7
4.2 1次冷却材流量の影響	14
4.3 格納容器内圧力の影響	22
4.4 検出器の絶縁抵抗	29
4.5 連続監視	37
5. 検 討	42
5.1 雰囲気圧力による音響伝播の変化	42
5.2 [5A2]炉内音響検出器絶縁抵抗の上昇	44
5.3 ナトリウム沸騰の検出可能性	44
5.4 今後の課題	46
6. 結 論	50
7. 参 考 文 献	51
付 録 1 1次冷却材流量制御系による雑音	52
2 回転プラグ冷却用ブースタ・ファンによる雑音	58

## 1. ま え が き

炉内音響監視装置は、高速実験炉「常陽」の原子炉容器内炉心上部に設置された音響検出器からの信号を監視することにより、早期に炉内の異常を検出することを目的としている。

報告書「炉内音響監視<sup>(1)</sup>」では、この炉内音響監視装置の原子炉出力50 MWまでの特性、特に数百 Hz の周波数帯域の特性について報告したが、本報告書では、75 MW出力上昇試験における原子炉出力75 MWまでの特性で特にナトリウム沸騰検出に重要な数十 kHz の周波数帯域に関して報告する。また、炉心位置〔5 F 2〕に、75 MW出力上昇試験終了後に新たに設置された炉内音響検出器の75 MW定格第1, 2サイクルにおける特性についても報告する。

## 2. 設備の概要

音響法炉内異常監視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なる。

音響検出器は $\text{LiNbO}_3$ の結晶であり、制御棒予備孔ダミープラグのスリーブ管内に挿入するため、1次冷却材のナトリウムには直接接触せずに、燃料集合体頂部の上方約40 cmまで挿入されている。また、スリーブ管壁と検出器受圧面の間隙による音波の減衰を減ずるために、スリーブ管内に音響媒体として熔融金属（インジウム）が入れられている。75 MW出力上昇試験終了時までは、2体の音響検出器が炉心位置〔5A2〕と〔5C2〕に設置されていたが、新たに〔5F2〕位置にも1体設置されたため、75 MW定格第1サイクルからは3体となった。しかし、〔5A2〕と〔5C2〕炉内音響信号用の配線を別の信号の測定に使用したため、75 MW定格第1, 2サイクルでは〔5F2〕炉内音響信号しか測定できなかった。これらの音響検出器の設置されている炉心位置をFig. 2.1に示す。

測定解析系のブロック図をFig. 2.2に示す。この解析系では信号のパワースペクトル密度等を計算でき、rms値の連続監視もできる。

なお詳しくは、報告書「炉内音響監視<sup>(1)</sup>」に述べてある。

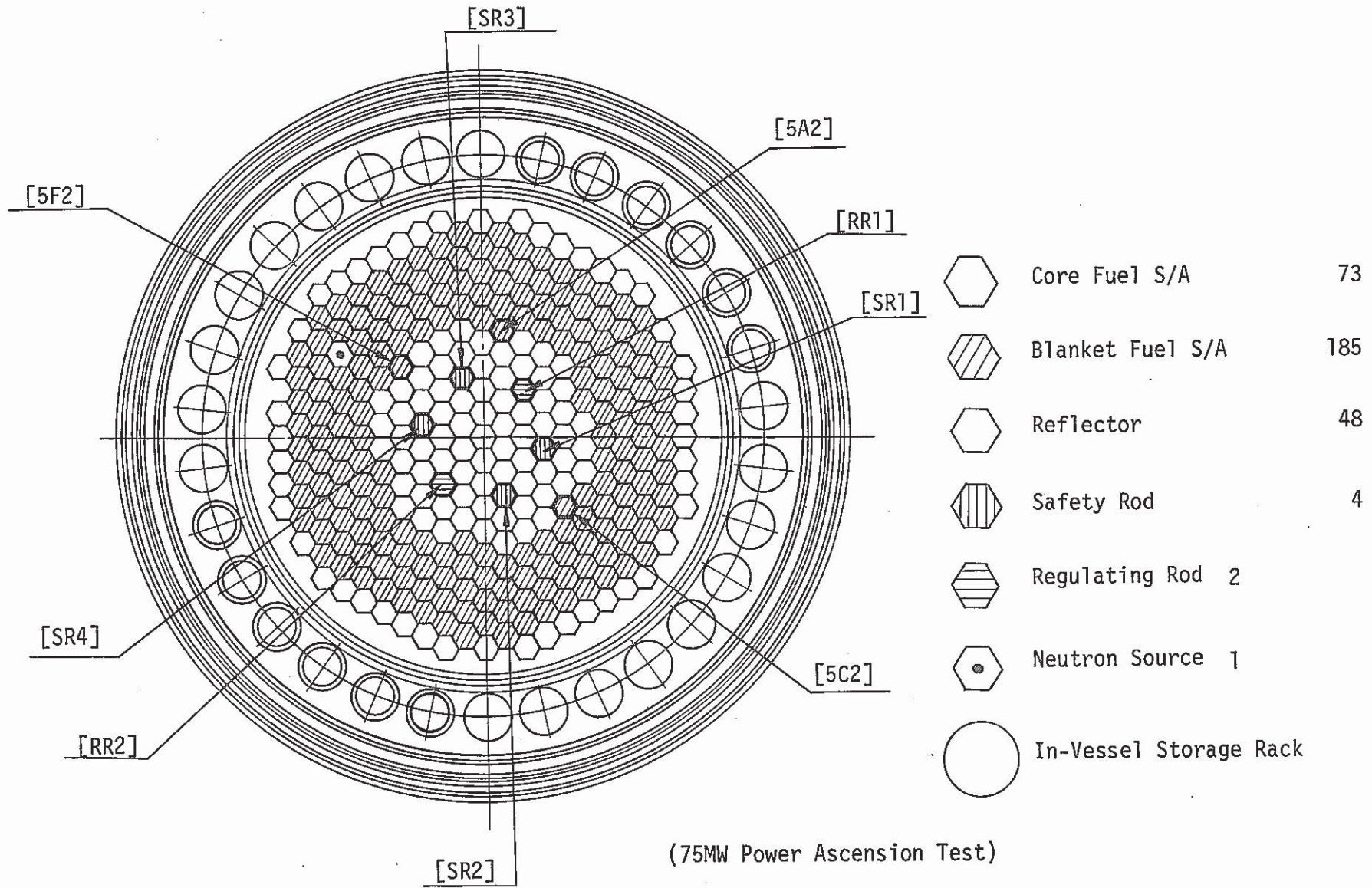


Fig. 2.1 Core Arrangement



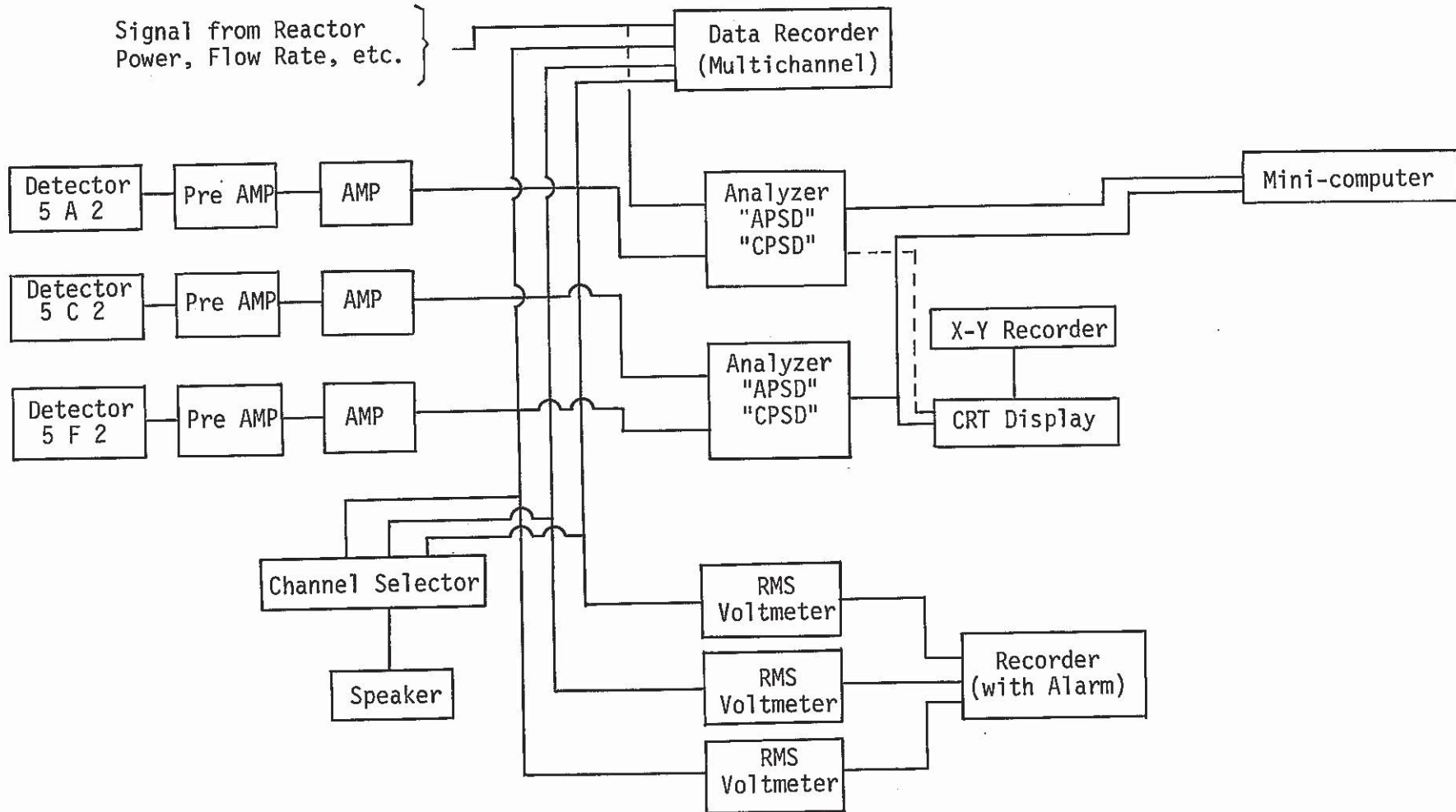


Fig. 2.2 Block Diagram of Acoustic In-core Malfunction Detection System.

### 3. 試験の方法

#### 3.1 プラント状態変化時の測定

炉内音響検出系が影響を受けるプラント・パラメータとしては、1次冷却材の流量と温度（原子炉出力）が考えられる。この流量と温度（原子炉出力）が変化した時に試験を行うのであるが、本試験のためにプラント状態を変化させることは特にせず、性能試験（75 MW出力上昇試験）の過程でプラントが希望する状態になった時に測定を行った。（〔5 F 2〕炉内音響信号は75 MW定格第1, 2サイクル）

測定時のプラント状態は次のごとくである。

- (1) 温度（原子炉出力）変化：250～456℃（0～75 MW）
- (2) 流量変化                    :     0～100%

また、格納容器漏洩率試験時には格納容器内を窒素に置換して加圧したため、その時も測定を行った。その時の圧力を次に示す。

- (3) 格納容器内圧力：0～0.69 kg/cm<sup>2</sup>・g

この時は〔5 C 2〕位置の前増幅器ケースの振動も測定した。その時の測定系のブロック図をFig. 3.1に示す。詳しくは4.3で述べる。

上記のプラント状態における測定としては、炉内音響解析装置を使用してリアルタイムでパワースペクトル密度を求めた。またrms値の連続記録も行った。パワースペクトル密度を求める時には、エイリアシング防止のためにサンプリング間隔 $\Delta T$ 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使用した。

#### 3.2 連続監視

75 MW定格第1サイクルにおいて、75 MW出力上昇試験終了後に新たに〔5 F 2〕位置に設置した炉内音響検出器の信号を連続監視した。装置としては炉内音響解析装置を使用し、rms値を連続記録した。また、パワースペクトル密度も求めた。

なお、検出器の絶縁抵抗は原子炉停止時にテストで測定した。

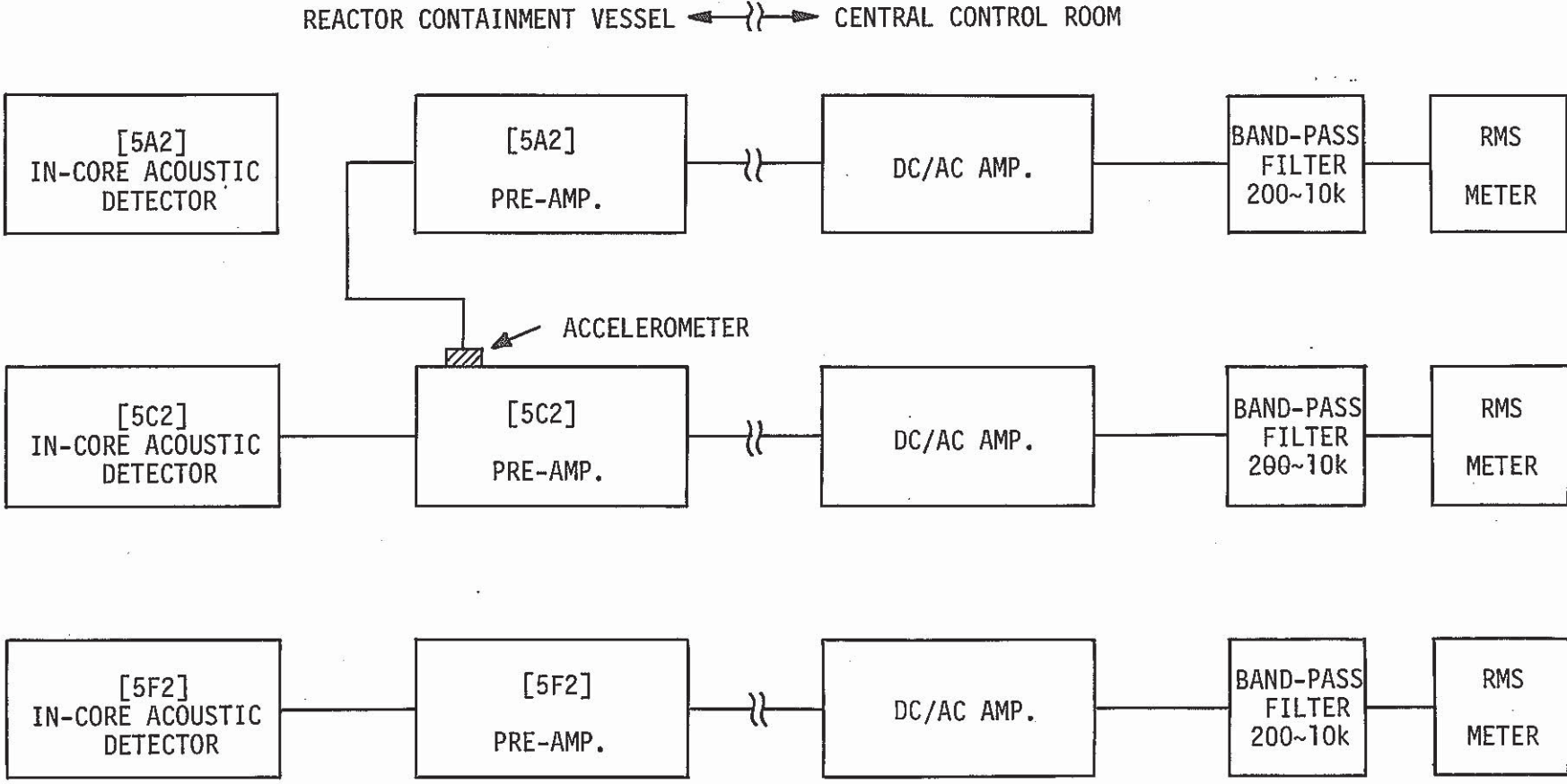


Fig. 3.1 Block Diagram of the Measuring System

## 4. 試験結果と考察

### 4.1 原子炉出力の影響

#### (1) [5A2] 炉内音響信号のパワースペクトル

[5A2] 炉内音響信号のパワースペクトルを Fig. 4.1 に示す。50 kHz レンジ (A) と 1.5 kHz レンジ (B) における、75 MW 時と原子炉停止時のスペクトルを比較してある。(A) では、約 22 kHz に 1 次冷却材流量制御系からのノイズによるピークが見られるが、75 MW の方のスペクトルが低下している。これは、検出器の絶縁抵抗の上昇に対応する現象と考えられる。絶縁抵抗に関しては 4.4 で、また 1 次冷却材流量制御系からのノイズに関しては付録 1 で詳細に述べる。(B) では、原子炉出力によるスペクトル・パターンの変化はほとんどない。この周波数レンジでは、出力運転中は回転プラグ冷却用ブースタ・ファンの騒音の影響を受ける可能性があるが、ブースタ・ファンを運転している 75 MW 時と運転していない 0 MW 時でスペクトル・パターンの変化がほとんどないことから、[5A2] 炉内音響検出系はブースタ・ファン騒音の影響をほとんど受けないことがわかる。

50 MW 出力上昇試験では、1.5 kHz レンジのパワースペクトルで 50 MW のスペクトルが低下したが、今回は 75 MW でも低下していない。この原因は検討中である。

#### (2) [5C2] 炉内音響信号のパワースペクトル

[5C2] 炉内音響信号のパワースペクトルを Fig. 4.2 に示す。50 kHz レンジ (A) では、他の炉内音響信号と同様に約 22 kHz に 1 次冷却材流量制御系からのノイズによるピークが見られる。このピークは、原子炉出力に、ほとんど依存していないことがわかる。1.5 kHz レンジ (B) では、75 MW 時のスペクトルで約 650 Hz に顕著なピークが現われているが、これは回転プラグ冷却用ブースタ・ファンの騒音の影響である。なお、0 MW 時にはブースタ・ファンは運転されていない。

50 MW 出力上昇試験の結果では、1.5 kHz レンジのパワースペクトルに、約 650 Hz のピーク以外にも約 850 Hz と約 900 Hz に大きなピークが存在していた。<sup>(1)</sup> 今回の結果で、顕著なピークが約 650 Hz のピークのみになった原因として一番可能性のあるものは、検出系の取付け状態 (前置増幅器の架台への取付けぐあい、前置増幅器ケースのネジの締めぐあい等) の違いが考えられる。

#### (3) [5F2] 炉内音響信号のパワースペクトル

[5F2] 炉内音響信号のパワースペクトルを Fig. 4.3 に示す。50 kHz レンジ (A) では、他の炉内音響信号と同様に約 22 k ~ 25 kHz に 1 次冷却材流量制御系からのノイズによるピークが見られる。このピークは高出力時には低出力時に比べて低下している。これ

は、他の炉内音響信号と傾向を異にするものである。1.5 kHz レンジ ( B ) では、0.5 kHz 以上で高出力時には低出力時に比べてパワースペクトルが上昇している。これは回転プラグ冷却用ブースタ・ファンの騒音の影響によるものである。

75 MW 第 2 サイクルの出力上昇時に測定した 50 kHz レンジのパワースペクトルを Fig. 4.4 に示す。24 kHz 付近の幅広いピークは原子炉出力には依存しておらず、〔 5 A 2 〕および〔 5 C 2 〕炉内音響信号と同一傾向にある。約 8 kHz には原子炉出力に依存しないピークがあり、約 14 kHz には出力上昇すると見えなくなるピークがある。これは、他の炉内音響信号にも、75 MW 第 1 サイクルでの〔 5 F 2 〕炉内音響信号にも見られなかったピークであり、原因は検討中である。

(4) 〔 5 A 2 〕および〔 5 C 2 〕炉内音響信号の rms 値

〔 5 A 2 〕および〔 5 C 2 〕炉内音響信号の 10 k から 50 kHz 成分の rms 値の原子炉出力依存性を Fig. 4.5 に示す。〔 5 A 2 〕炉内音響信号では、0 MW から 10 MW になると rms 値が半減し、10 MW 以上ではほぼ一定である。これより、高温による検出器の絶縁抵抗の急増が 10 MW 以下で生じることと、1 次冷却材流量制御系からのノイズの寄与が原子炉出力 ( 10 MW 以上 ) にはほとんど依存しないことがわかる。〔 5 C 2 〕炉内音響信号では、rms 値の半減は生じていないが、それ以外は〔 5 A 2 〕と同様である。

10 k から 50 kHz 成分は、バンド・パス・フィルタを使用して取り出したものがあるが、この周波数帯域は音響検出器の仕様と同様に選んだ。

(5) 〔 5 F 2 〕炉内音響信号の rms 値

〔 5 F 2 〕炉内音響信号の、5 k から 10 kHz 成分の rms 値の原子炉出力依存性を Fig. 4.6 に示す。0 MW から 10 MW になると rms 値が少し上昇している。これは、この間に回転プラグ冷却用ブースタ・ファンが起動されているためで、バンド・パス・フィルタの下限を 5 kHz に下げたことにより、ブースタ・ファン騒音が混入したためと考えられる。10 MW 以上では rms 値はほぼ一定である。このことから、バンド・パス・フィルタの下限から混入してくるブースタ・ファン騒音の寄与と、上限から混入してくる 1 次冷却材流量制御系からのノイズの寄与は原子炉出力 ( 10 MW 以上 ) には、ほとんど依存しないことがわかる。

また、rms 値の半減を伴うような絶縁抵抗の急増が生じていないこともわかる。

このバンド・パス・フィルタの周波数帯域は、10 kHz 付近で、良い SN 比でナトリウム沸騰音響を検出できるように選んだものであり、高周波側および低周波側からのノイズの混入は多少あるが、十分に有効な周波数帯域である。

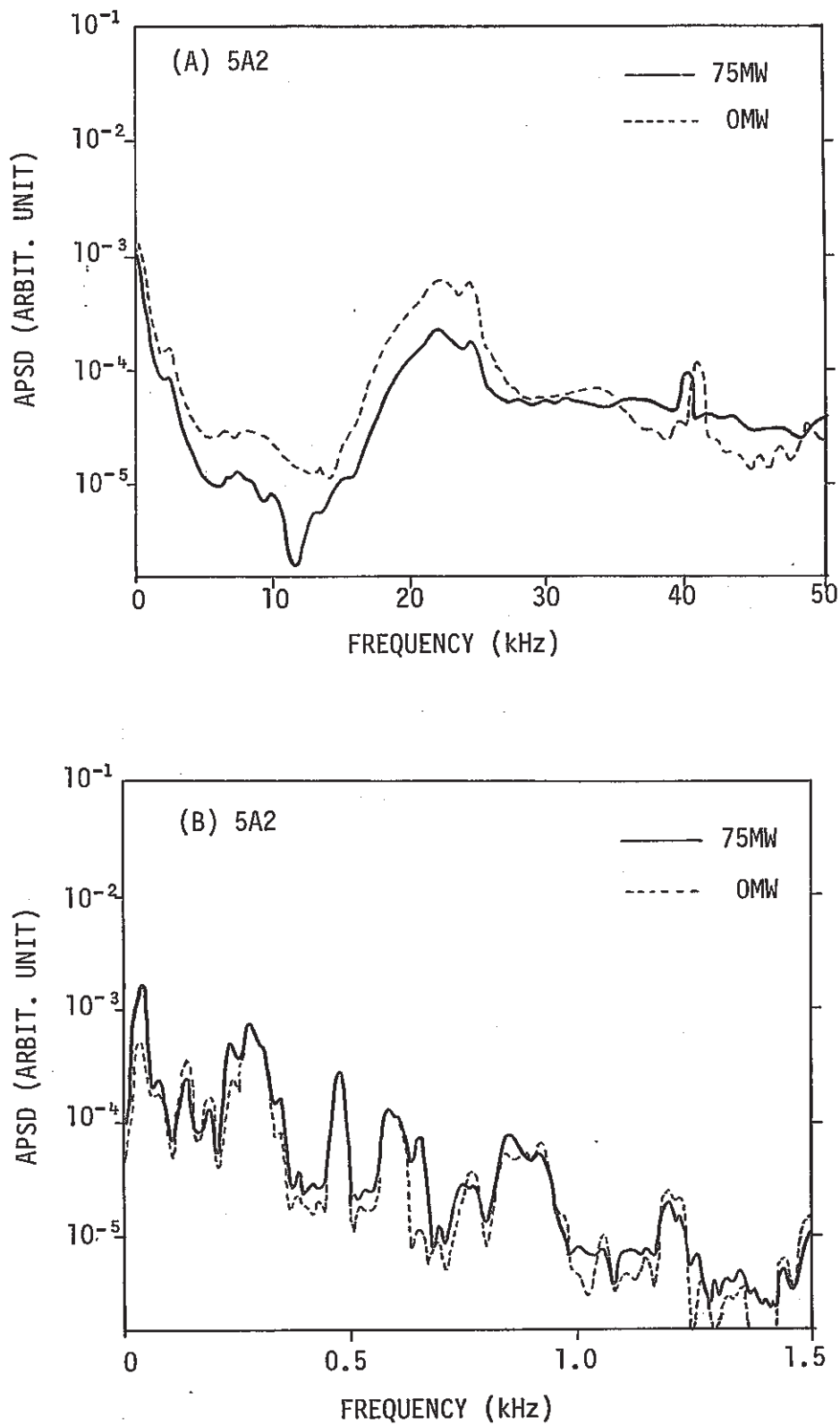


Fig. 4.1 Auto Power Spectral Densities of [5A2] In-Core Acoustic Signal; 100% Flow, Amp. Gain  $\times 10$ .

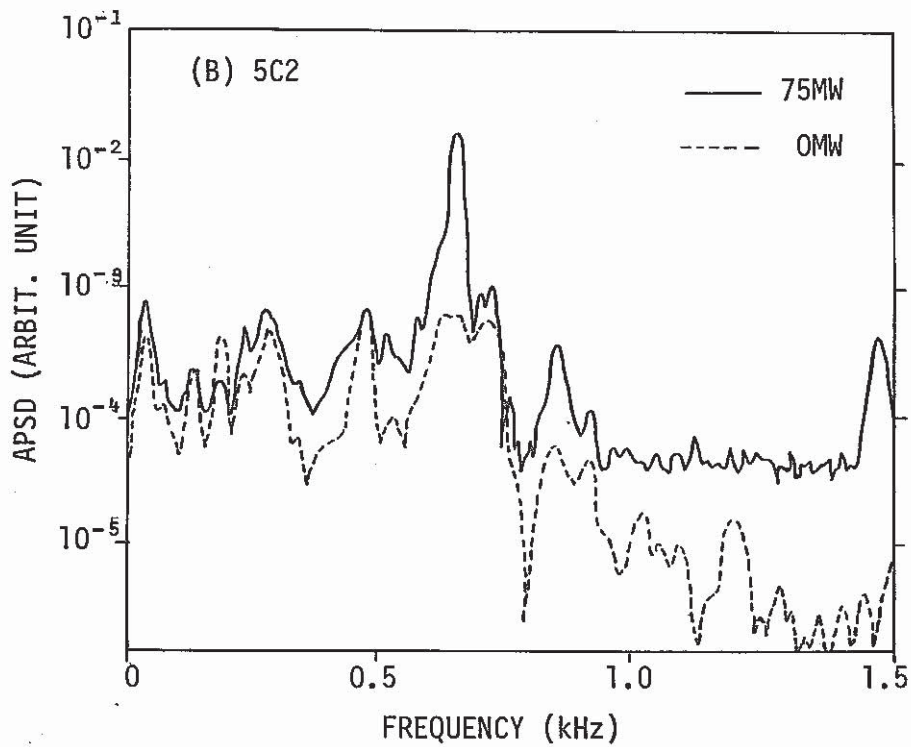
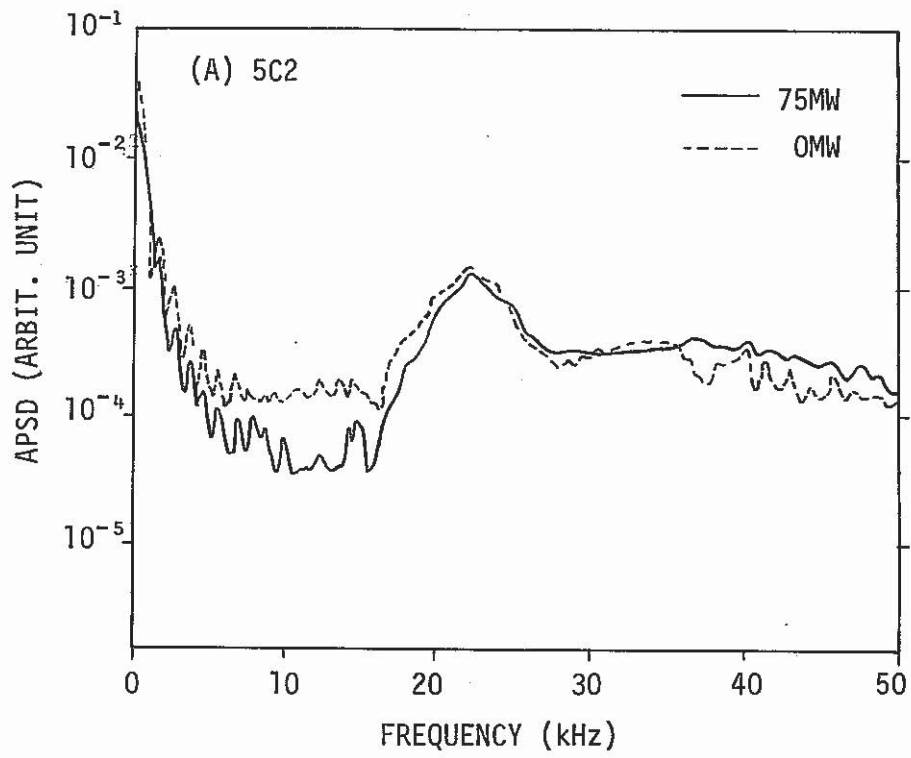


Fig. 4.2 Auto Power Spectral Densities of [5C2] In-Core Acoustic Signal; 100% Flow, Amp. Gain  $\times 10$ .

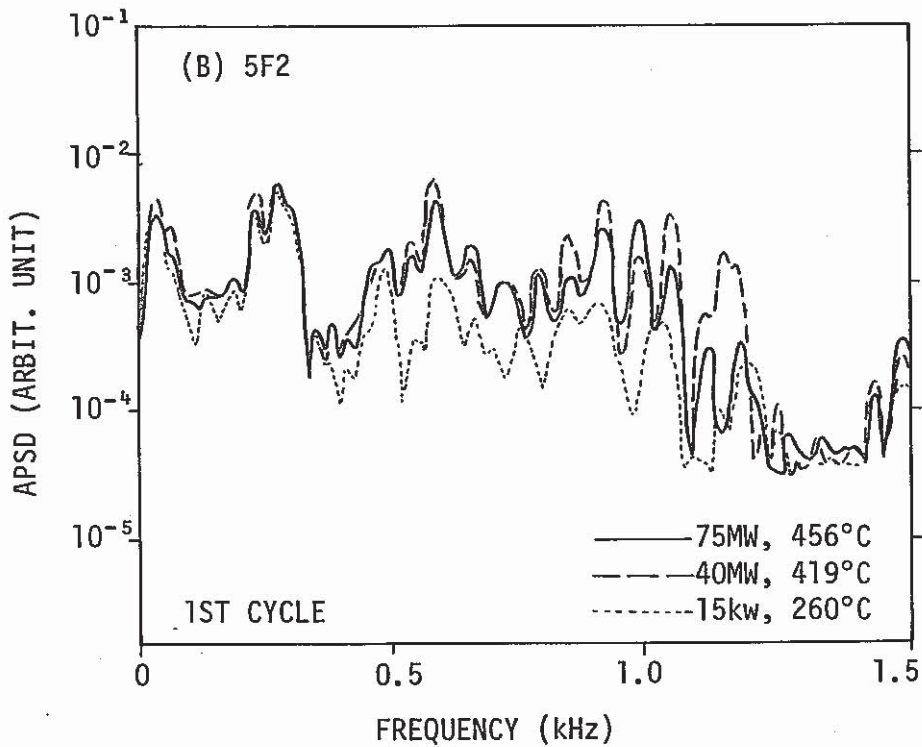
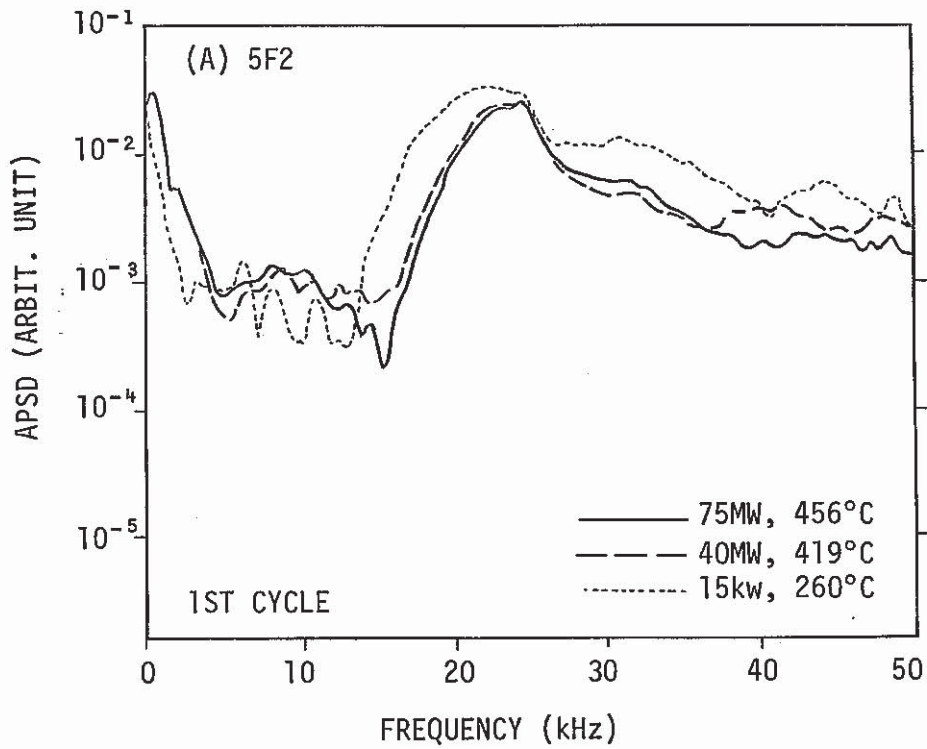


Fig. 4.3 Auto Power Spectral Densities of [5F2] In-Core Acoustic Signal; 100% Flow, Amp. Gain  $\times 10$ , 75MW 1st Duty Cycle.



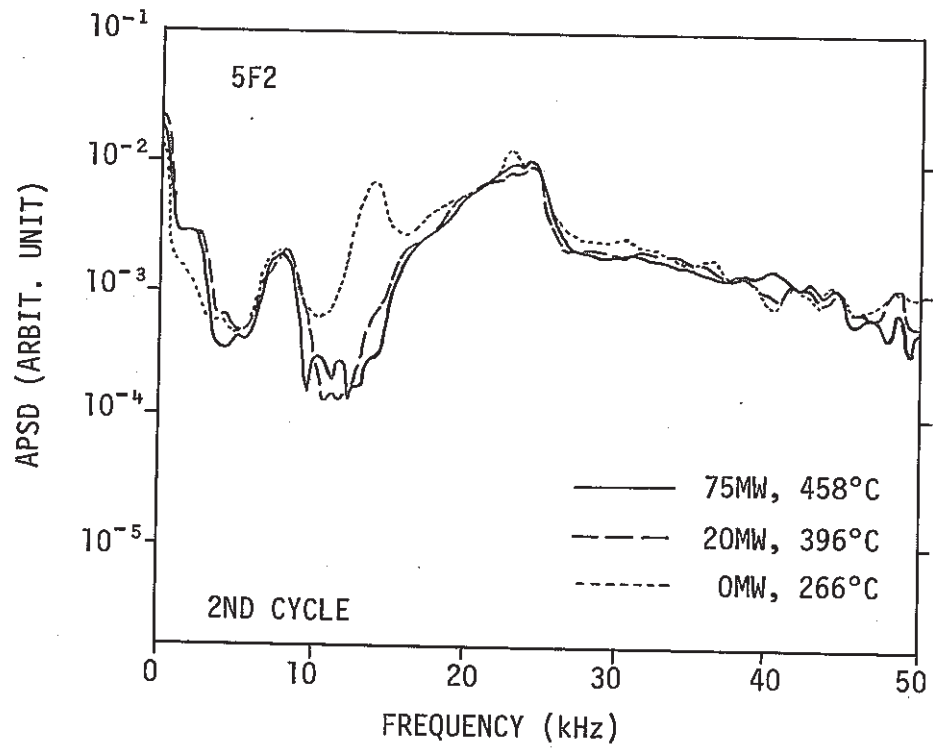


Fig. 4.4 Auto Power Spectral Densities of [5F2] In-Core Acoustic Signal; 100% Flow, Amp. Gain  $\times 10$ , 75 MW 2nd Duty Cycle.

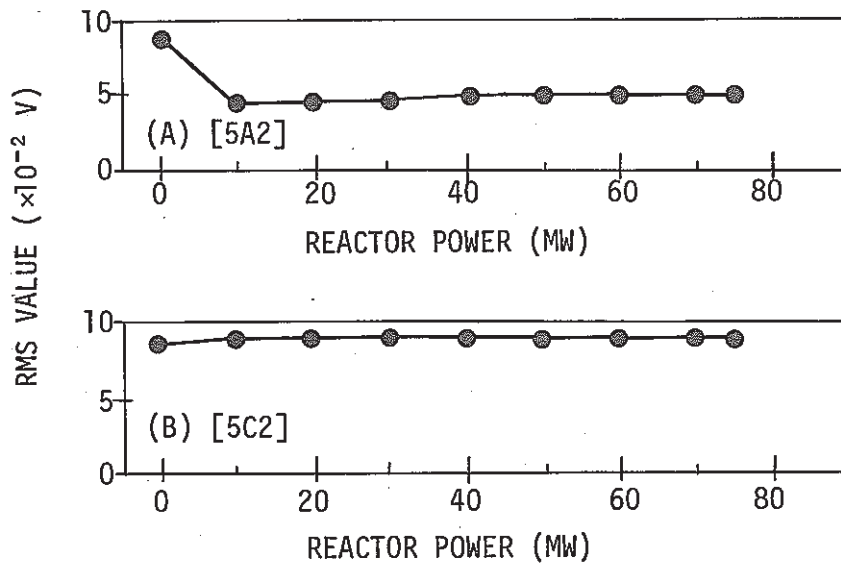


Fig. 4.5 RMS Values of 10k-50k Hz Component of [5A2] and [5C2] In-Core Acoustic Signals vs. Reactor Power; 100% Flow, Amp. Gain  $\times 10$

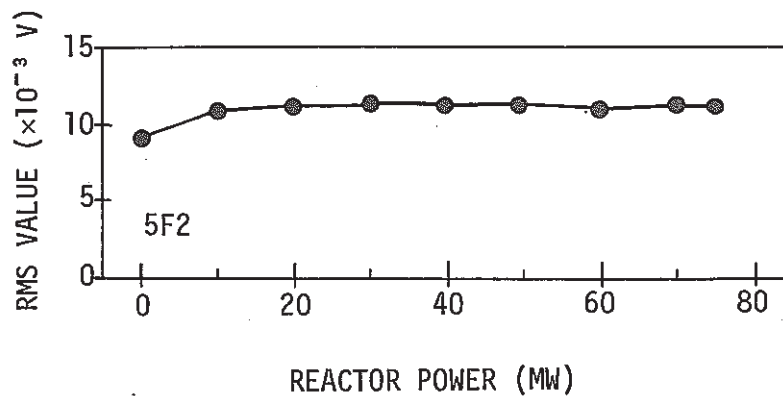


Fig. 4.6 RMS Value of 5k-10k Hz Component of [5F2] In-Core Acoustic Signal vs. Reactor Power; 100% Flow, Amp. Gain  $\times 10$

## 4.2 1次冷却材流量の影響

### (1) [5A2] 炉内音響信号のパワースペクトル密度

[5A2] 炉内音響信号の1次冷却材流量を変化させた時のパワースペクトル密度をFig. 4.7に示す。50 kHzレンジ(A)では、エイリアシング防止等のため原則としているバンド・パス・フィルタの周波数帯域(0.5 k~50 kHz)とは違って、10 k~50 kHzの帯域となっているので数kHz以下の成分が低下している。付録1に述べてあるが、約22 k~25 kHzを中心とする幅広いピークは1次冷却材流量制御系からのノイズによるものであり、20%流量と100%流量ではほとんど変わらず、主ポンプ停止状態のポニーモータ流量では明らかに低下している。これからも、このピークが1次冷却材流量制御系の影響であることが確認される。約41 kHzに存在するピークは、約59 kHzに存在するピークのエイリアシング効果で出たものであるが、これは波形が規則的な正弦波であることから回路的なノイズかと思われる。1.5 kHzレンジ(B)では、ポニーモータ流量のスペクトルが、100%流量のより低い。これは1次冷却材流量の低下により、流動による振動が低下したことによると考えられる。なお、回転プラグ冷却用ブースタ・ファンは両流量とも低止している。

50 MW出力上昇試験時との比較では、1.5 kHzレンジのスペクトルの変化傾向は、ほぼ同じであるが、50 MW出力上昇試験時には約750 Hzにするどいピークが存在していたが、今回は約450 Hzにするどいピークが見られる。この原因は検討中である。

### (2) [5C2] 炉内音響信号のパワースペクトル密度

[5C2] 炉内音響信号の1次冷却材流量を変化させた時のパワースペクトル密度をFig. 4.8に示す。50 kHzレンジ(A)では、10 k~50 kHzのバンド・パス・フィルタを使用しているため、数kHz以下の成分が低下している。ここでも、[5A2] 炉内音響信号と同様に約22 k~25 kHzのピークは1次冷却材流量制御系からのノイズによるものであるが、20%流量と100%流量ではほとんど変わらず、ポニーモータ流量では明らかに低下している。約41 kHzのピークも、[5A2] 炉内音響信号と同様の回路的なノイズかと思われる。1.5 kHzレンジ(B)でも、[5A2] 炉内音響信号とはスペクトルのパターンは違うが、ポニーモータ流量のスペクトルが100%流量のスペクトルより低いのは同様であり、1次冷却材流量の低下による振動の低下が原因と考えられる。[5A2] 炉内音響信号とのスペクトルのパターンの違いは、両検出系の音響的雰囲気の違いの他に、前置増幅器の振動により混入する信号が前置増幅器によって違うことも原因している。なお、回転プラグ冷却用ブースタ・ファンは両流量とも停止している。

50 MW出力上昇試験時との比較では、1.5 kHzレンジのスペクトルの変化傾向は、ほぼ

同じであるが、50 MW出力上昇試験時には約450 Hzに流量の増加とともに大きくなるピーク<sup>(1)</sup>が存在していたが、今回は約450 Hzのピークには50 MW出力上昇試験時ほどの流量依存性が見られない。

(3) [5 F 2] 炉内音響信号のパワースペクトル密度

[5 F 2] 炉内音響信号の1次冷却材流量を変化させた時のパワースペクトル密度をFig. 4.9に示す。50 kHzレンジ(A)では、約17 kHzに幅の広いピークがあり、これは1次冷却材流量制御系からのノイズによるものであるが、[5 A 2]および[5 C 2]炉内音響信号の約22 kHzのピーク周波数より低い周波数に存在している。また、約10 kHz以上では、100%流量時のスペクトルが0%流量時よりも大きくなっており、このことも、[5 A 2]および[5 C 2]炉内音響信号とは傾向を異にしている。このスペクトルは検出器設置(1979年11月9日)後、間もなく測定されたものであり、設置後初めての原子炉出力上昇時のスペクトルはFig. 4.3の(A)に示すように、他の炉内音響信号とスペクトルのパターンが類似してきているため、Fig. 4.9のスペクトルは設置後の一時的なものと考えられる。1.5 kHzレンジ(B)では、他の炉内音響信号と同様に、流量が低下するとスペクトルも低下しており、1次冷却材流量の低下による振動の低下が原因と考えられる。

なお、回転プラグ冷却用ブースタ・ファンは両流量とも停止している。

50 kHzレンジのスペクトルの再測定として、75 MW第2サイクル起動直前に測定された1次冷却材流量変化時のスペクトルをFig. 4.10に示す。24 kHz付近に存在する幅広いピークは、20%~100%流量では変化がなく、0%では低下している。これは、[5 A 2]および[5 C 2]炉内音響信号と同様の傾向である。しかし、流量に依存しない約8 kHzのピークと、流量に依存する約14 kHzのピークが見られる。これらのピークの原因は検討中である。

(4) [5 A 2]および[5 C 2]炉内音響信号のrms値

[5 A 2]および[5 C 2]炉内音響信号の10 kから50 kHz成分のrms値の1次冷却材流量依存性をFig. 4.11に示す。両信号とも流量には、ほとんど依存していない。

(5) [5 F 2] 炉内音響信号のrms値

[5 F 2] 炉内音響信号の5 kから10 kHz成分のrms値の1次冷却材流量依存性を、Fig. 4.12に示す。これは75 MW第1サイクルでのデータである。流量の増加とともにrms値も増加している。これは、流量の増加とともに流動による振動も増加し、Fig. 4.9の(A)からもわかるように、数kHzの成分が増加したことによるものである。なお、75 MW第2サイクルでの[5 F 2]炉内音響信号には、前に述べたように、5 kから10 kHz成分の中に新たに現われた不明な成分(約8 kHz)を含んでいるため、rms値の1次冷却

材流量依存性のデータには使用しなかった。

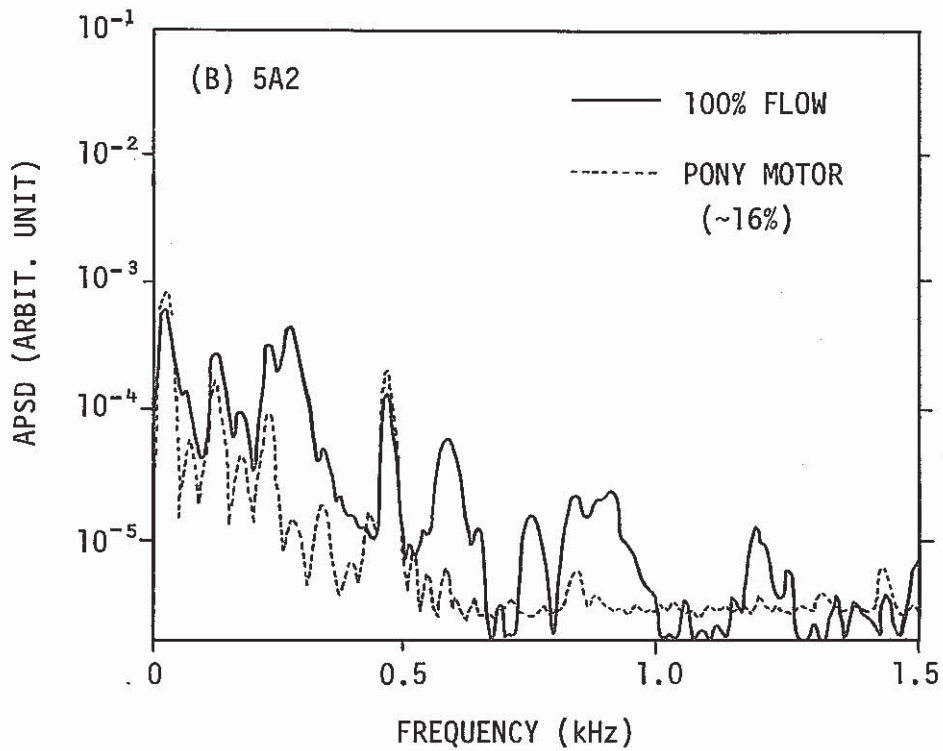
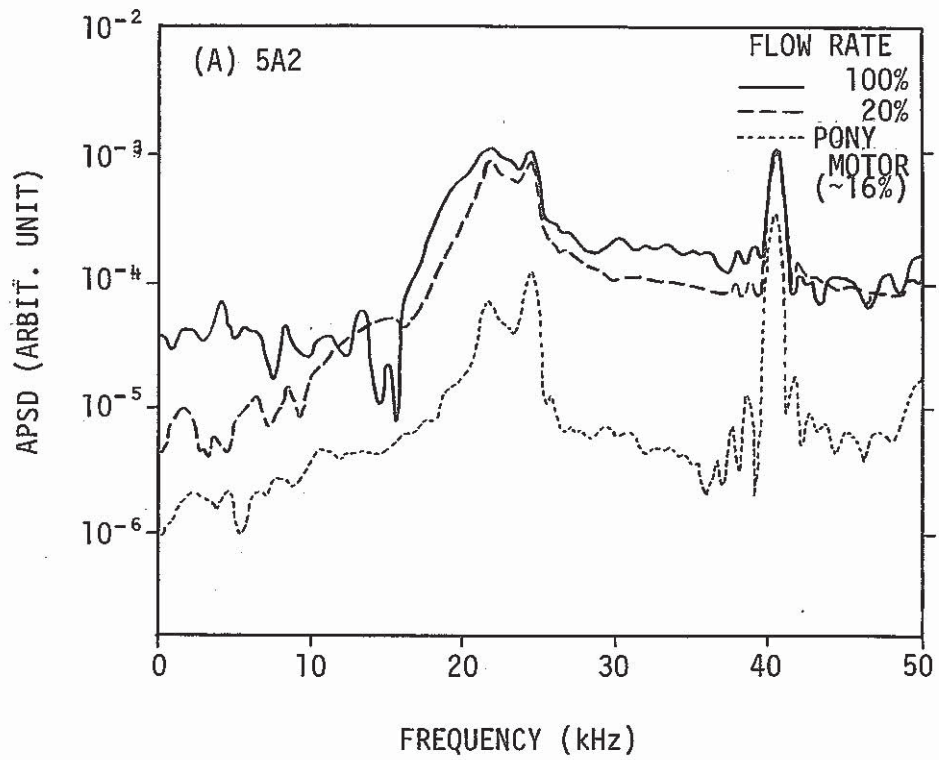


Fig. 4.7 Auto Power Spectral Densities of [5A2] In-Core Acoustic Signal; Reactor Shut Down, Amp. Gain  $\times 10$ .

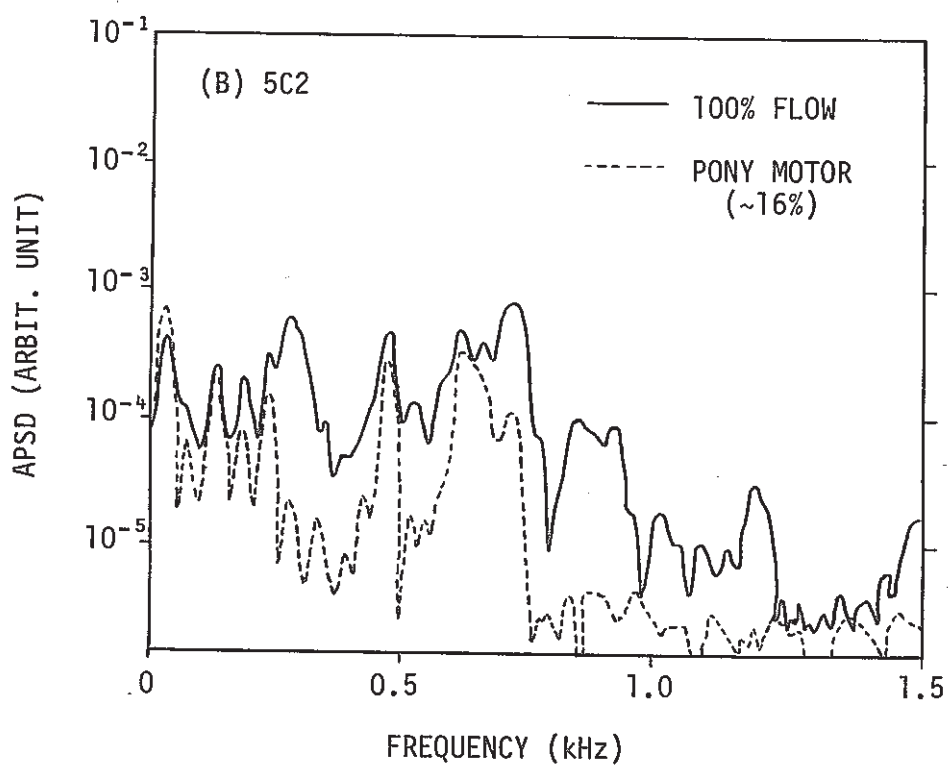
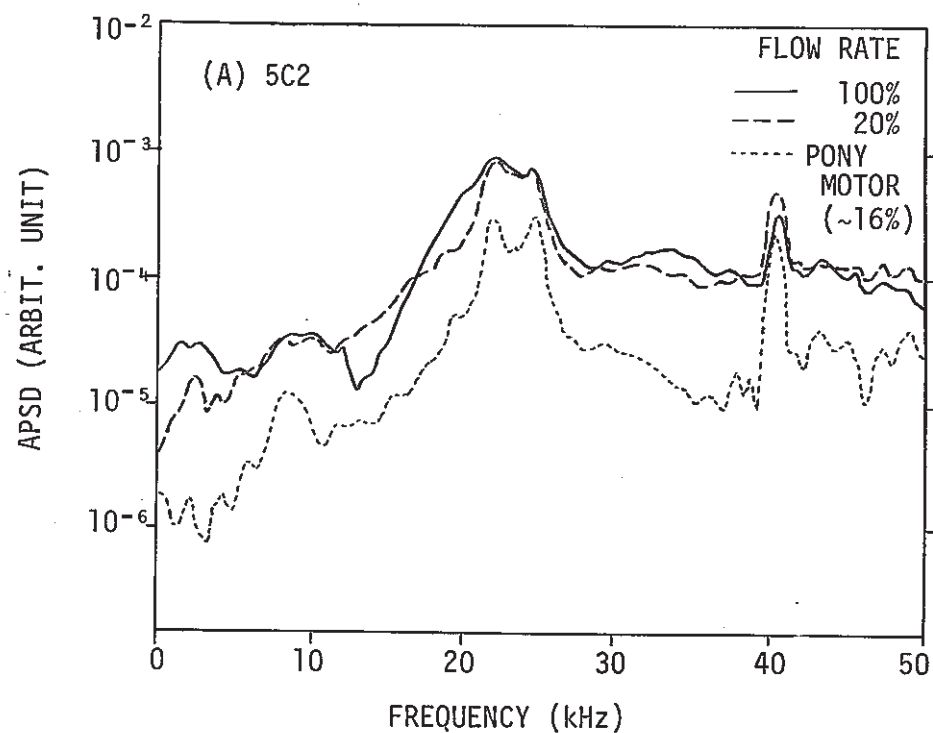


Fig. 4.8 Auto Power Spectral Densities of [5C2] In-Core Acoustic Signal; Reactor Shut Down, Amp. Gain  $\times 10$ .

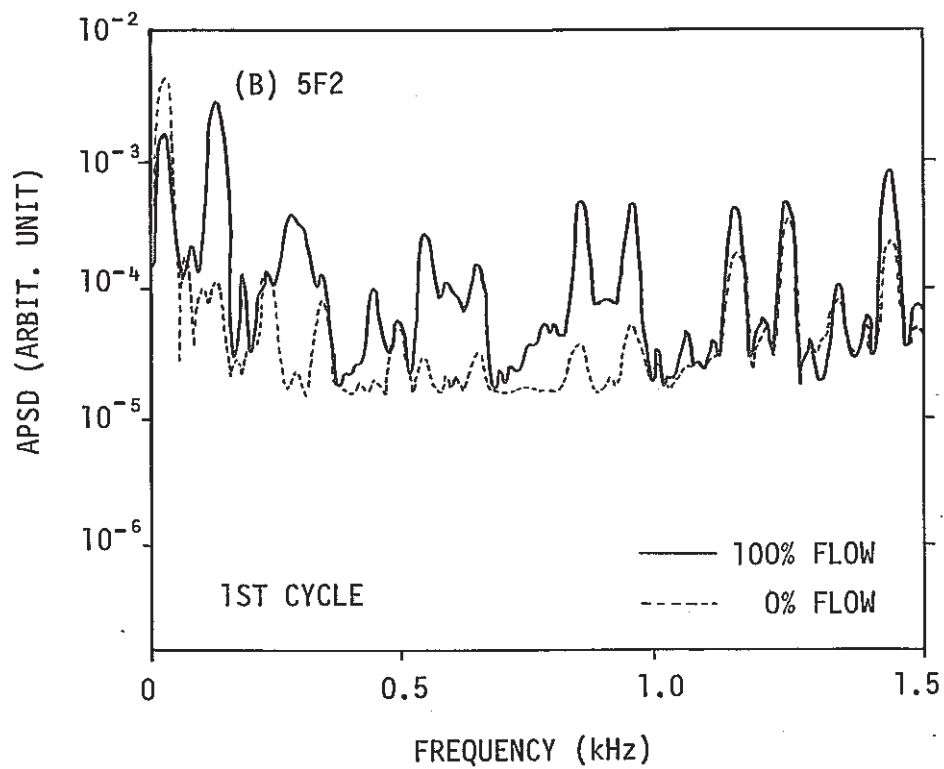
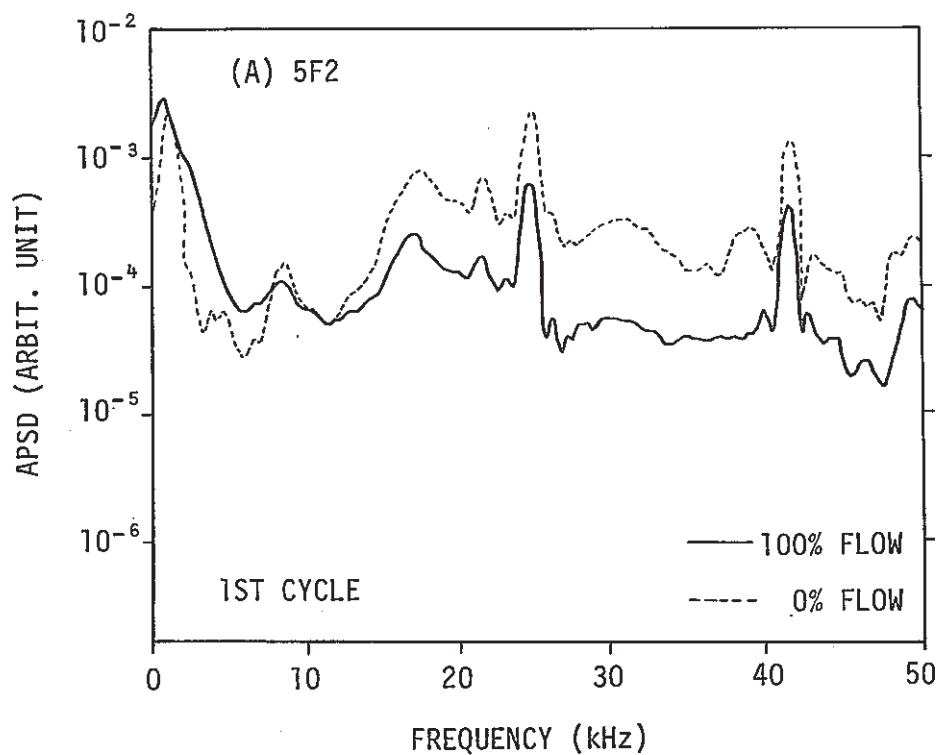


Fig. 4.9 Auto Power Spectral Densities of [5F2] In-Core Acoustic Signal; 0 MW, 200°C, Amp. Gain  $\times 10$ , Just Before 75 MW 1st Duty Cycle.



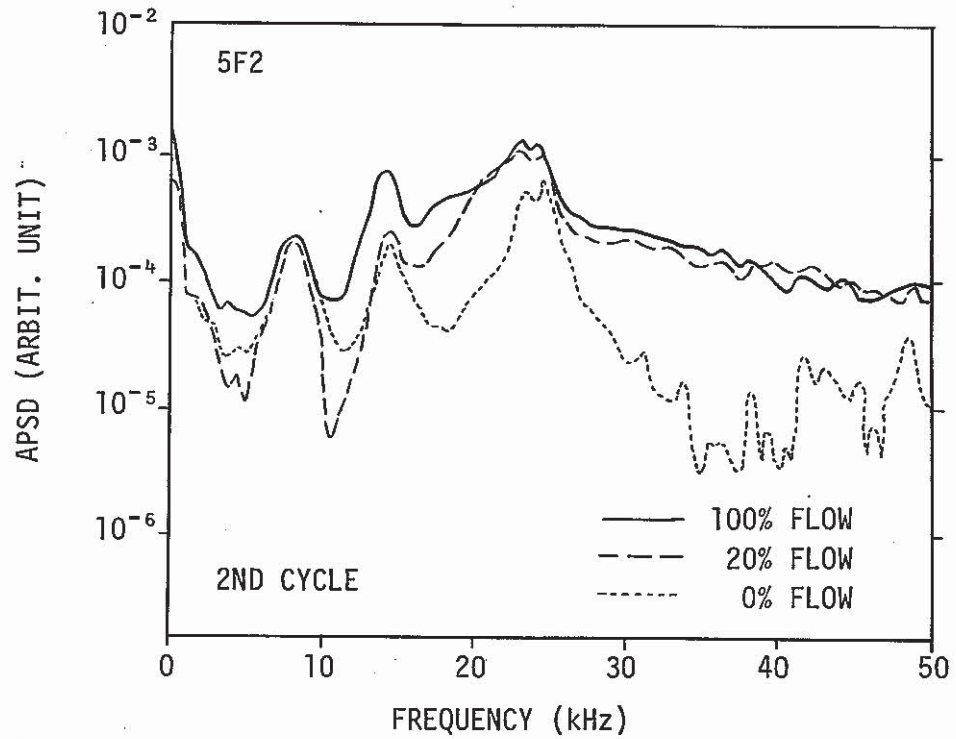


Fig. 4.10 Auto Power Spectral Densities of [5F2] In-Core Acoustic Signal; 0 MW, 266°C, Amp. Gain  $\times 10$ , Just Before 75 MW 2nd Duty Cycle.

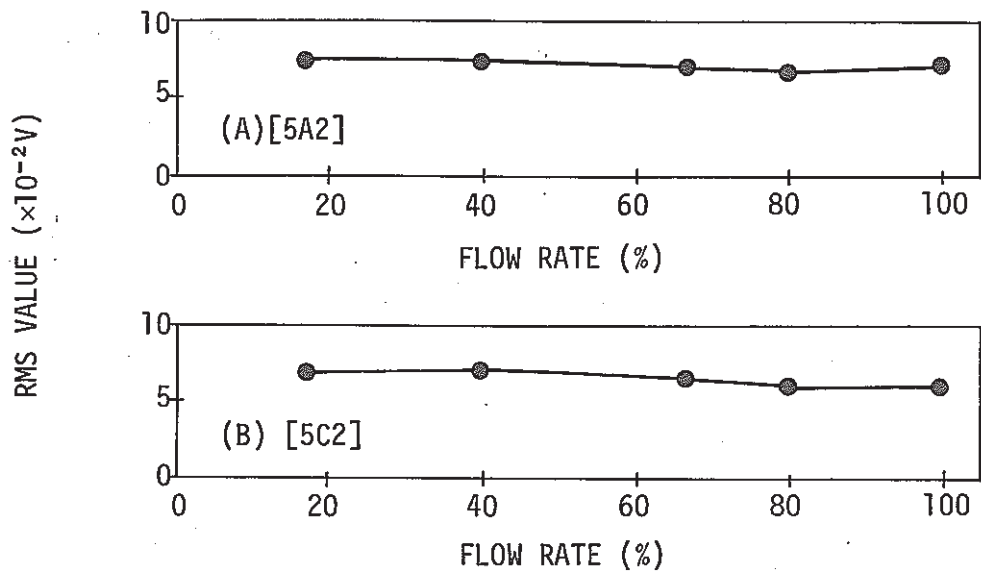


Fig. 4.11 RMS Values of 10k~50kHz Component Of [5A2] and [5C2] In-Core Acoustic Signals vs. Primary Sodium Flow Rate; Amp. Gain  $\times 10$ .

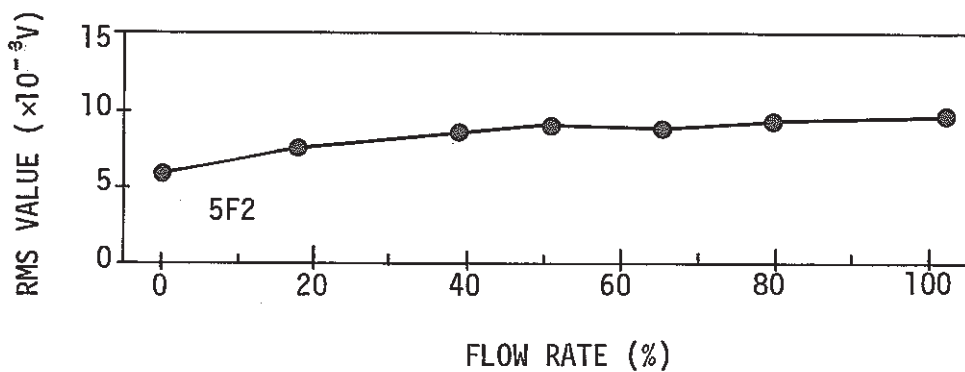


Fig. 4.12 RMS Value of 5k~10kHz Component of [5F2] In-Core Acoustic Signal vs. Primary Sodium Flow Rate; Amp. Gain  $\times 10$ .

### 4.3 格納容器内圧力の影響

昭和53年2月下旬に行われた前回のRCV ( Reactor Containment Vessel , 原子炉格納容器 ) 漏洩率試験時に、炉心位置〔5C2〕に設置してある炉内音響検出器からの信号のrms値が、RCV内の圧力上昇とともに上昇するという現象が観測された。<sup>(1)</sup>その原因として、N<sub>2</sub>ガス中を伝播する音響が測定系に振動を与えており、その音響の伝播がN<sub>2</sub>ガス圧力の変化により影響を受けるものであろうと推測した。<sup>(1)</sup>この推測の確証のために、昭和54年12月上旬に行われたRCV漏洩率試験時に炉内音響プリアンプの振動を測定し、以上の推測を検討した。測定系はFig. 3.1に示してある。

Fig. 4.11にRCV漏洩率試験中のRCV内圧力(ゲージ圧)の変化と、〔5C2〕プリアンプに付けた加速度計の信号、〔5C2〕および〔5F2〕炉内音響信号の200 Hz から10 kHz成分のrms値の変化を示す。〔5C2〕プリアンプの加速度信号では、圧力の上昇降下とともにrms値も上昇降下している。圧力が0.69 kg/cm<sup>2</sup>・Gの時のrms値は、N<sub>2</sub>で0 kg/cm<sup>2</sup>・Gの時の約1.6倍である。これよりプリアンプは絶縁のためにビニールをはさんでプリアンプ保持台に固定されているため、プリアンプ保持台からの高周波の振動はプリアンプに伝わりにくいということを考慮すると、測定された〔5C2〕プリアンプの振動の変化はN<sub>2</sub>中を伝播してくる振動の伝播条件の変化によるものと考えられる。〔5C2〕および〔5F2〕炉内音響信号のrms値も圧力上昇とともに多少増加しており、0.69 kg/cm<sup>2</sup>・Gの時はN<sub>2</sub>で0 kg/cm<sup>2</sup>・Gの時の約1.1倍になっている。回転プラグ上での振動を拾いやすいこれらの炉内音響検出系での、このrms値の上昇もN<sub>2</sub>中を伝播してくる振動によるものの可能性が強い。

Fig. 4.14～4.16に空気で0 kg/cm<sup>2</sup>・G、N<sub>2</sub>で0 kg/cm<sup>2</sup>・G、N<sub>2</sub>で0.69 kg/cm<sup>2</sup>・Gの圧力の時 ( Fig. 4.13にPSD 1～3の矢印で示してある ) の〔5C2〕プリアンプ加速度信号、〔5C2〕および〔5F2〕炉内音響信号のパワースペクトル密度を示す。〔5C2〕プリアンプ加速度計の場合は、空気からN<sub>2</sub>に置換された時に10 kHz付近のパワースペクトルが上昇しているが、パワースペクトルのパターンが違ふことと、空気とN<sub>2</sub>の音響インピーダンスがほぼ同じであることから、<sup>(2)</sup>空気中とN<sub>2</sub>中の音響伝播の違いとは考えにくく、音源そのものの違い(たとえば別の装置が駆動されて別の音が出た場合)によるものと考えられる。N<sub>2</sub>圧力が上がると、パワースペクトルは全体的に上昇しており、パワースペクトルのパターンが同じことから、これはN<sub>2</sub>圧力上昇による音響伝播の変化が原因と考えられる。〔5C2〕および〔5F2〕炉内音響の場合は、10 kHz以下では数百HzのパワースペクトルがN<sub>2</sub>圧力の上昇とともに大きくなっている。特に〔5C2〕炉内音響では、約200 Hz.と約500 Hzのスペクトルが大きくなっている。この原因は以下に述べるプリアンプの振動によるものと考えられる。

Fig. 4.15には〔5C2〕プリアンプの入力端を開放にしてプリアンプをたたいた時とたたかない時の出力信号の周波数スペクトルを示す。このスペクトルはパワースペクトルではない。たたいた時のスペクトルでは約200 Hzと約500 Hzに大きなピークがあり、これはFig. 4.15でN<sub>2</sub>加圧時に高くなった周波数と一致する。このことより、N<sub>2</sub>圧力の上昇でN<sub>2</sub>中を伝播する音響によるプリアンプの振動が大きくなり、その結果プリアンプ内で生じた振動信号がプリアンプより前から来る信号に加えられたものと考えることができる。従って、加圧時に振動信号が増加したのはプリアンプで外来音響信号をひろったものと思われる。なお、Fig. 4.17のプリアンプ衝撃時のピーク周波数とFig. 4.14のプリアンプ振動のピーク周波数が違うのは、プリアンプケースの振動とその振動によって生じるプリアンプ内の回路の振動（特に入力端子からプリント基板までのケーブル）が違うためと考えられる。

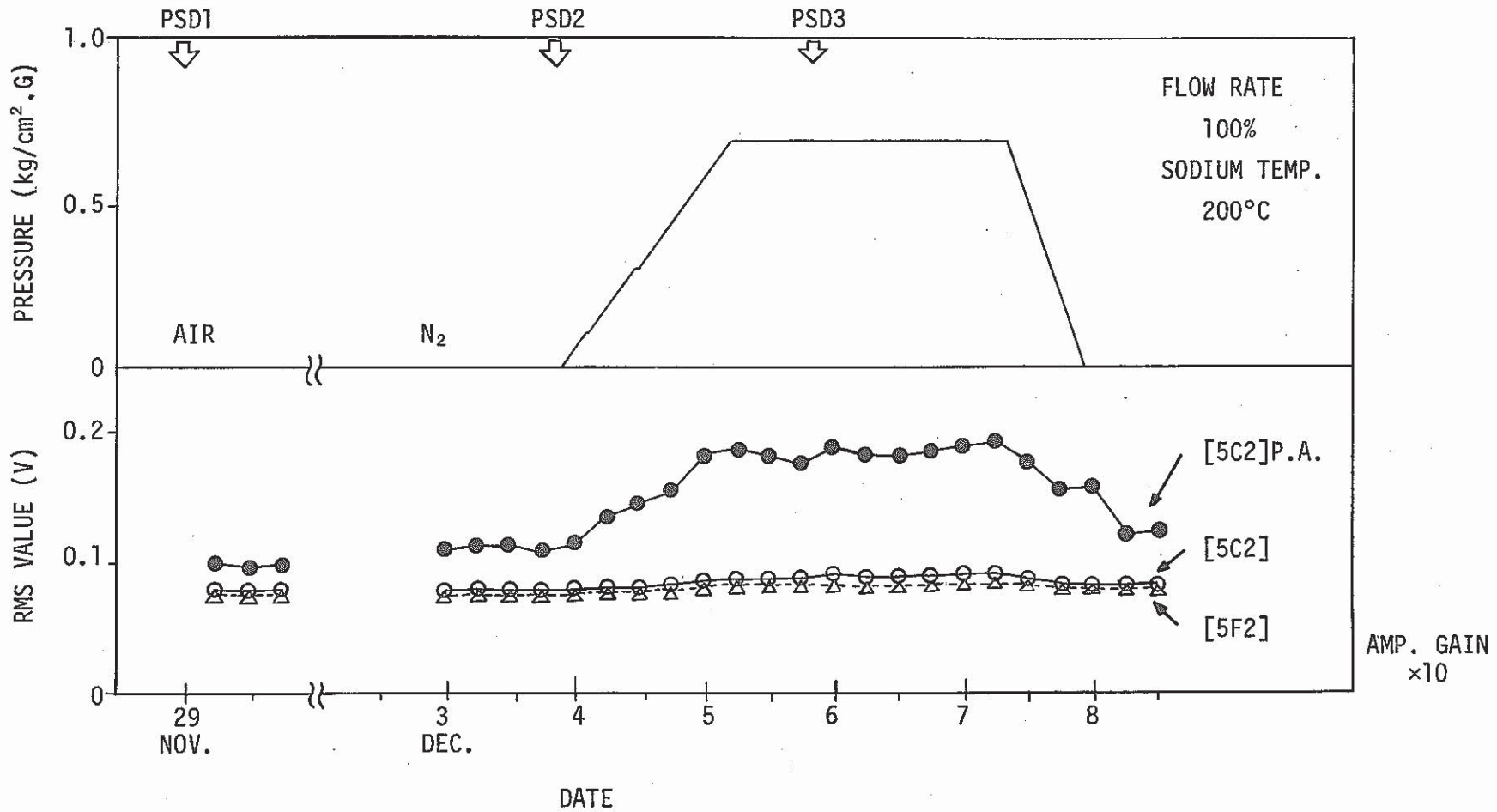


Fig. 4.13 Rms Value of 200Hz~10kHz Component of [5C2] Pre-amp Acoustic Signal, [5C2] and [5F2] In-Core Acoustic Signal vs. RCV Pressure during RCV Leak Test.

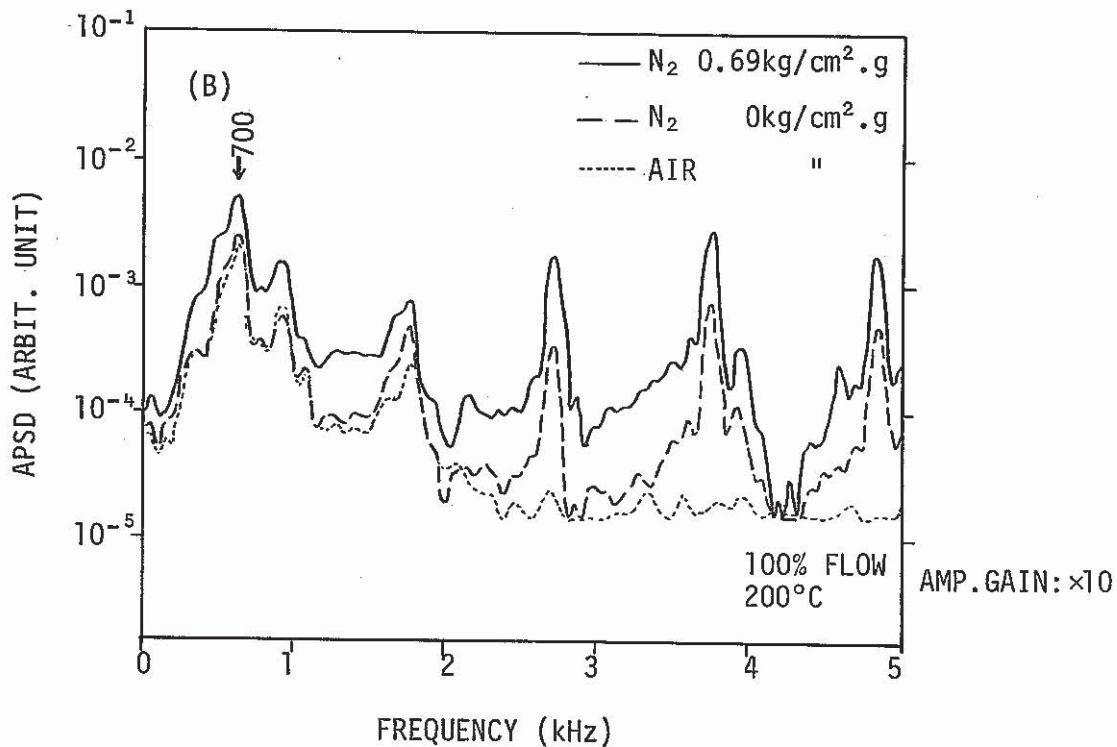
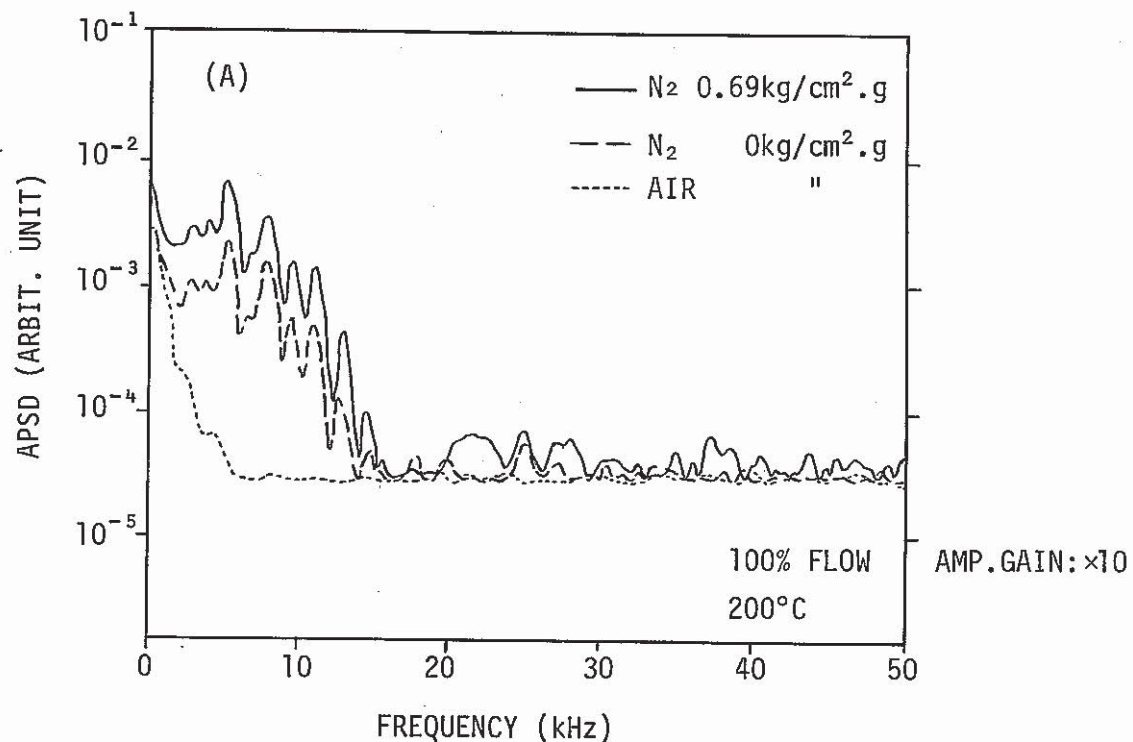


Fig. 4.14 Auto Power Spectral Densities of [5C2] Pre-amp. Vibration during RCV Leak Test; Primary Flow Rate 100%; Sodium Temperature 200°C. (A) 0~50kHz (B) 0~5kHz

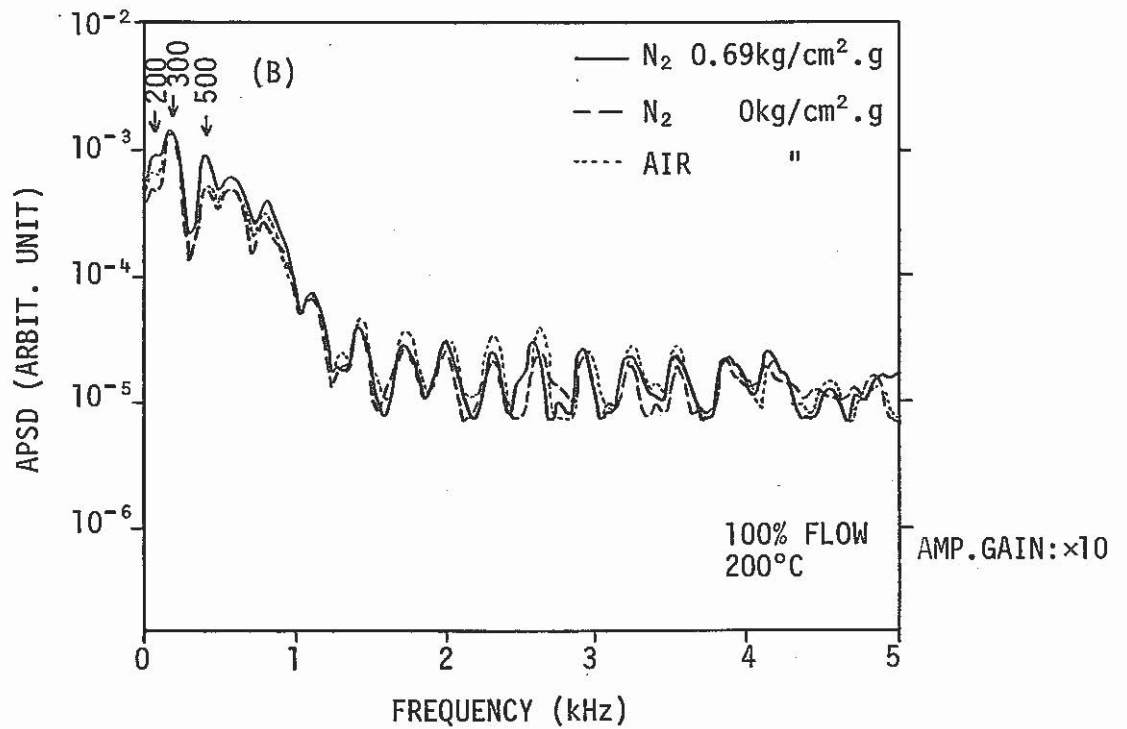
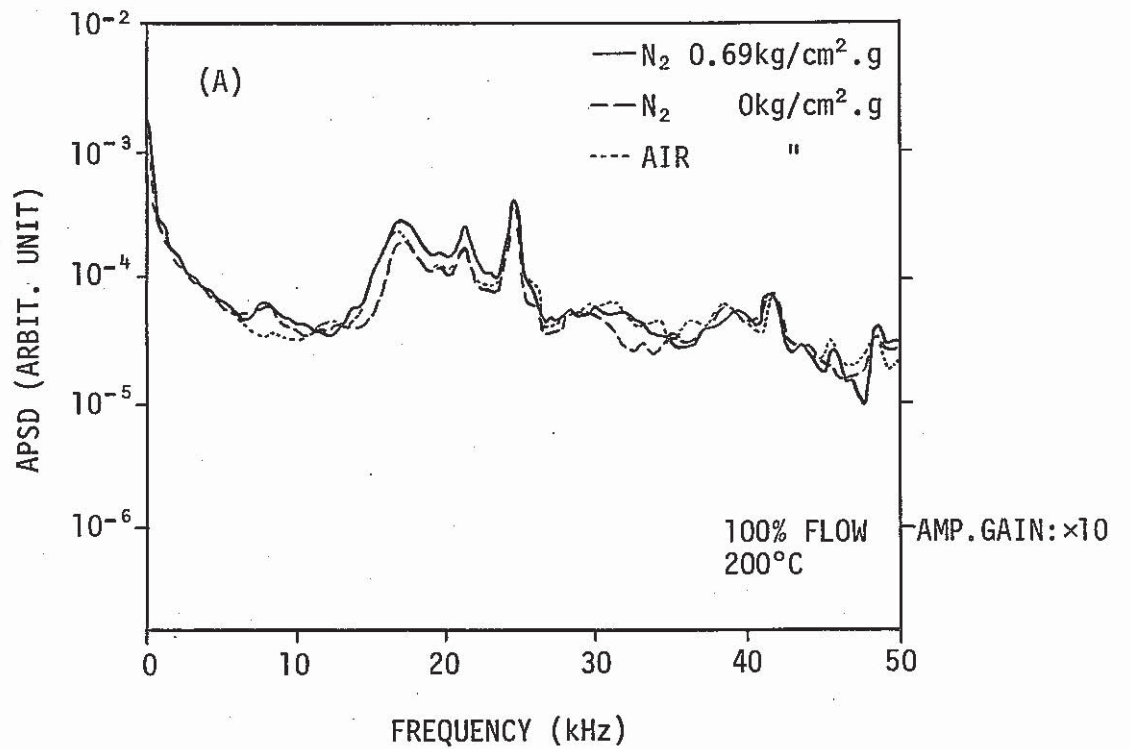


Fig. 4.15 Auto Power Spectral Densities of [5C2] In-Core Acoustic Signal during RCV Leak Test; Primary Flow Rate 100%; Sodium Temperature 200°C. (A) 0~50kHz (B) 0~5kHz

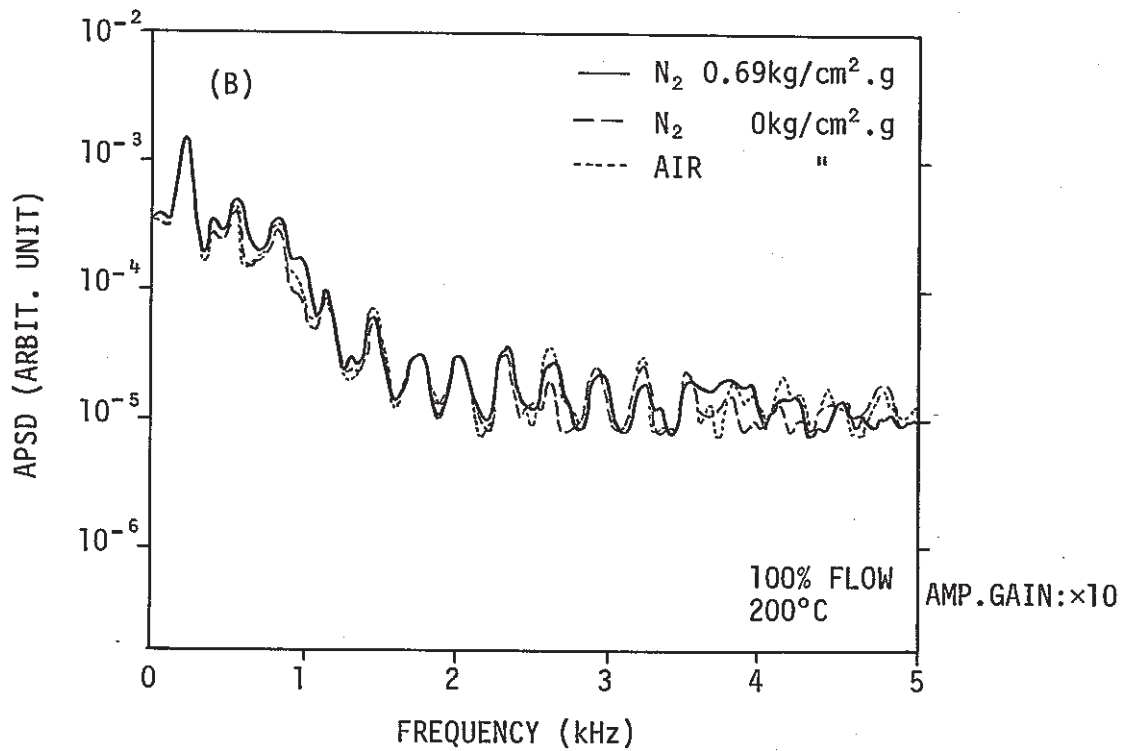
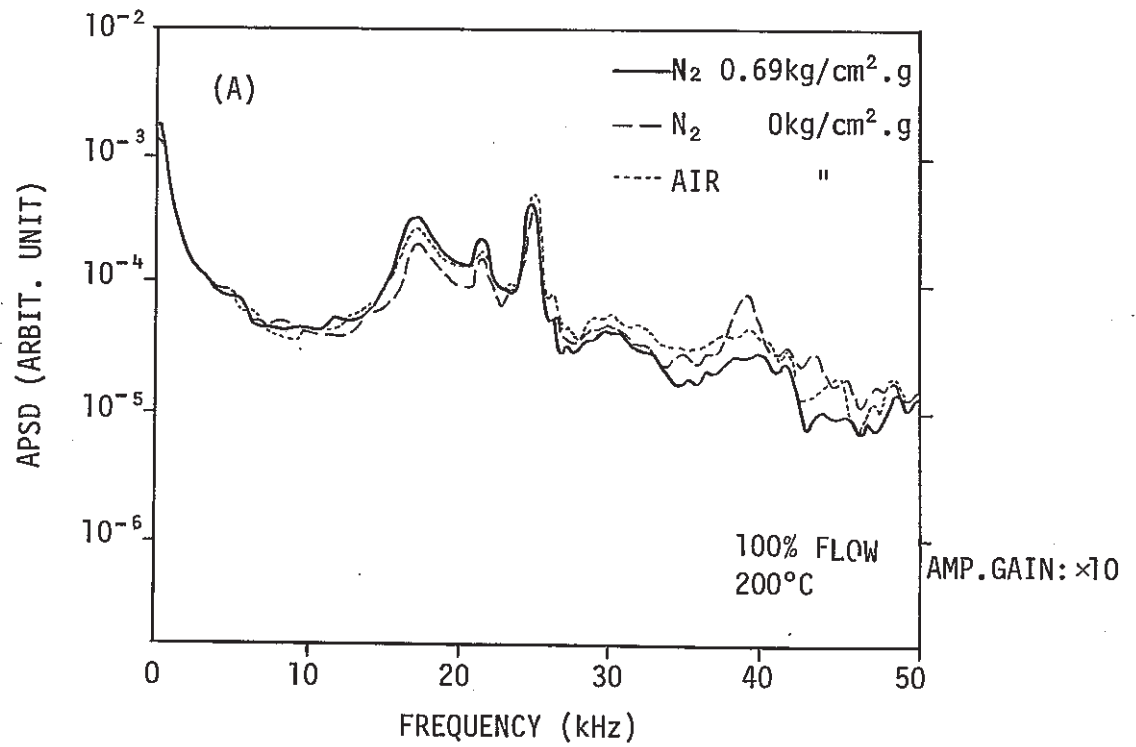


Fig. 4.16 Auto Power Spectral Densities of [5F2] In-Core Acoustic Signal during RCV Leak Test; Primary Flow Rate 100%; Sodium Temperature 200°C. (A) 0~50kHz (B) 0~5kHz



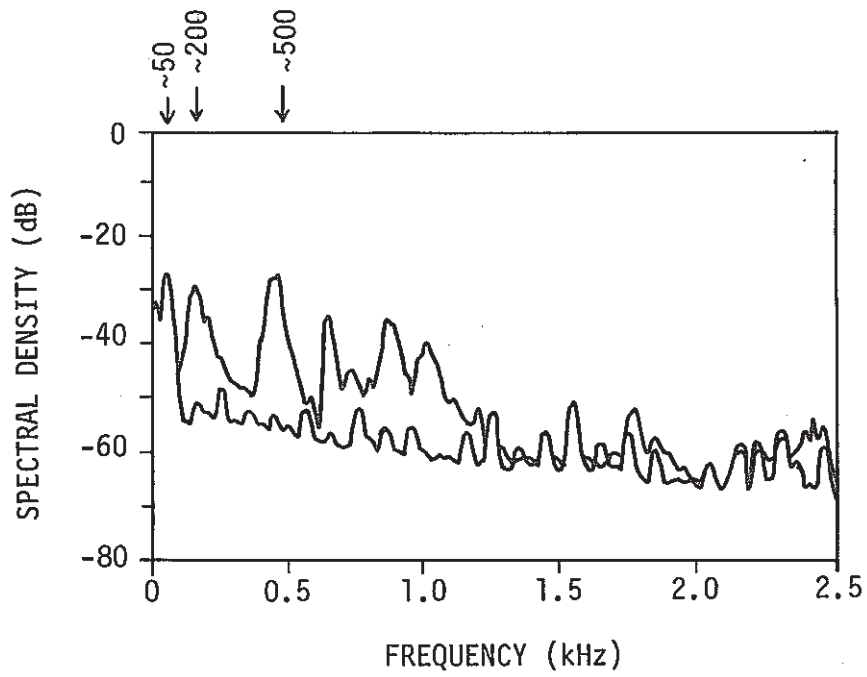


Fig. 4.17 Spectral Densities of [5C2] Pre-amp Output Signal;  
Upper-Impacted, Lower-Not Impacted.

#### 4.4 検出器の絶縁抵抗

##### (1) 250℃付近での絶縁抵抗

Fig. 4.18に〔5A2〕および〔5C2〕炉内音響検出器の250℃付近での絶縁抵抗を示す。図中には、検出器設置後（1978年3～4月）と、50MW定格第2サイクル終了後（1979年4～5月）、および75MW出力上昇試験終了後（1979年8月～1980年3月）の測定値を示してある。検出器の設置直前の室温での絶縁抵抗は〔5A2〕炉内音響検出器が14MΩ、〔5C2〕炉内音響検出器が1.2MΩであった。Fig. 4.19には、〔5F2〕炉内音響検出器の250℃付近での絶縁抵抗を示す。検出器設置後（1979年11月～1980年1月）と、設置後しばらくたった時（1980年3月）の抵抗値を示してある。検出器設置直前の室温での絶縁抵抗は7.5MΩであった。3体の検出器とも、温度の上昇とともに絶縁抵抗は低下しているが、時期による抵抗の変化も見られる。

##### (2) 260℃から430℃での絶縁抵抗

回転プラグ上で測定した抵抗値と中央制御室で測定した抵抗値との差により、回転プラグ上から中央制御室までの信号ケーブルによる抵抗値を求め、補正值とした。それらを次に示す。（中央制御室での抵抗値が大きい）

炉内音響検出器絶縁抵抗：-20Ω

CRT表示の温度の補正值としては、75MW第1サイクル直前に測定されたS/A出口温度計測用熱電対誤差の値を用いた。この値は、75MW第1サイクル直前に、等温状態で、原子炉入口温度の平均値を正しいNa温度として比較した、各S/A出口温度計測用熱電対の温度表示（H-500による）誤差である。補正值を次に示す。（CRT表示が、実際の温度より大きい）

〔5A2〕	-3.0℃
〔5C2〕	-3.4″
〔5F2〕	-1.4″

Fig. 4.20は、炉内音響検出器の絶縁抵抗を示す。〔5C2〕と〔5F2〕は温度上昇とともに絶縁抵抗が低下しており、メーカーでの測定結果（250℃で数百Ω、400℃で約50Ω、600℃で約20Ω）に近い値を示している。しかし、〔5A2〕は321～337℃の間で急激に絶縁抵抗が上昇している。〔5A2〕炉内音響信号は、今までにも、ある原子炉出力になると信号が半減する現象が生じていたが、それに対応する現象が、この絶縁抵抗の急上昇と考えられる。前報告では、この現象の原因として、高温による検出器の絶縁低下を

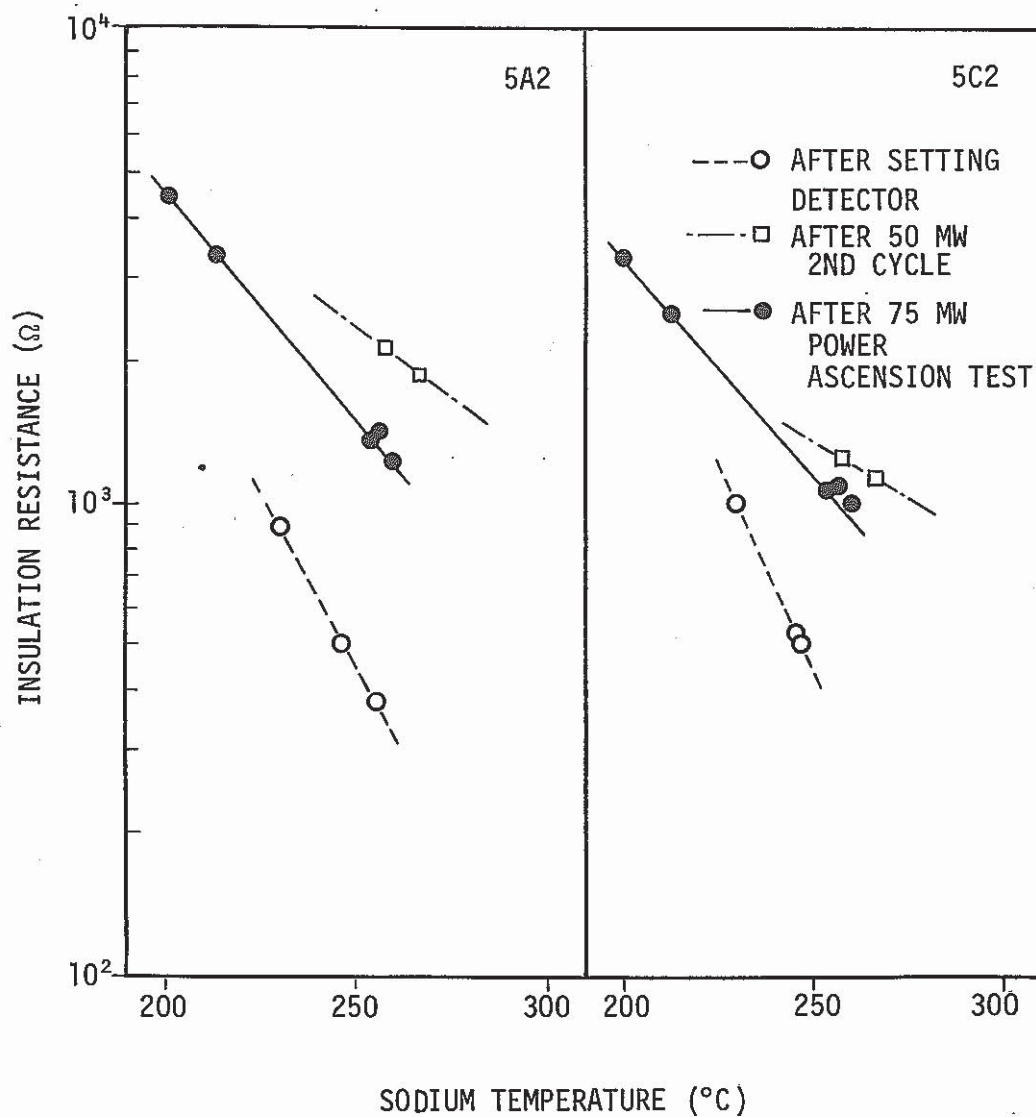


Fig. 4.18 Insulation Resistance of [5A2] and [5C2] In-Core Acoustic Detectors

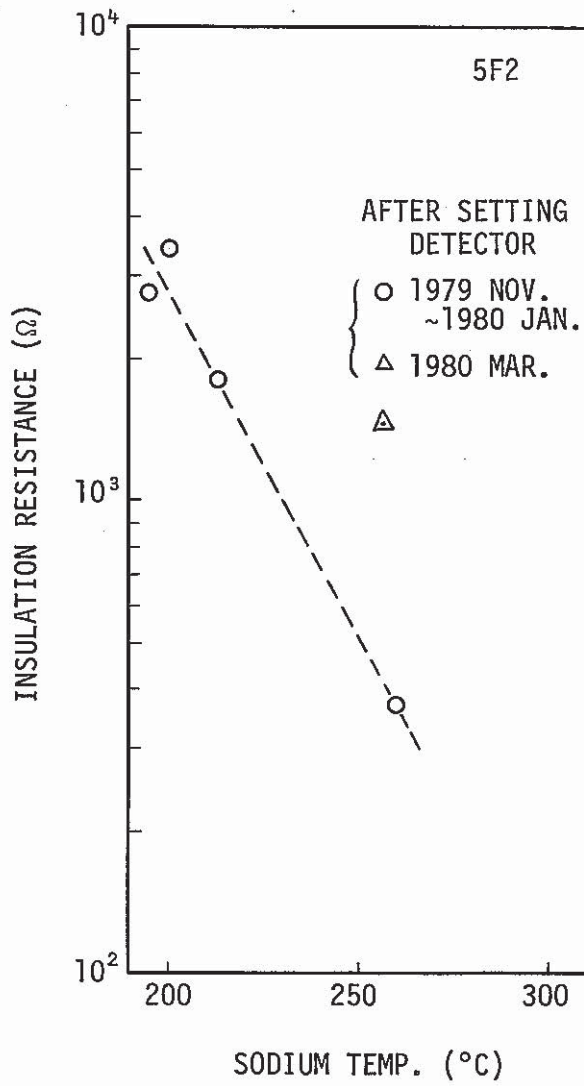


Fig. 4.19 Insulation Resistance of [5F2]  
In-Core Acoustic Detector

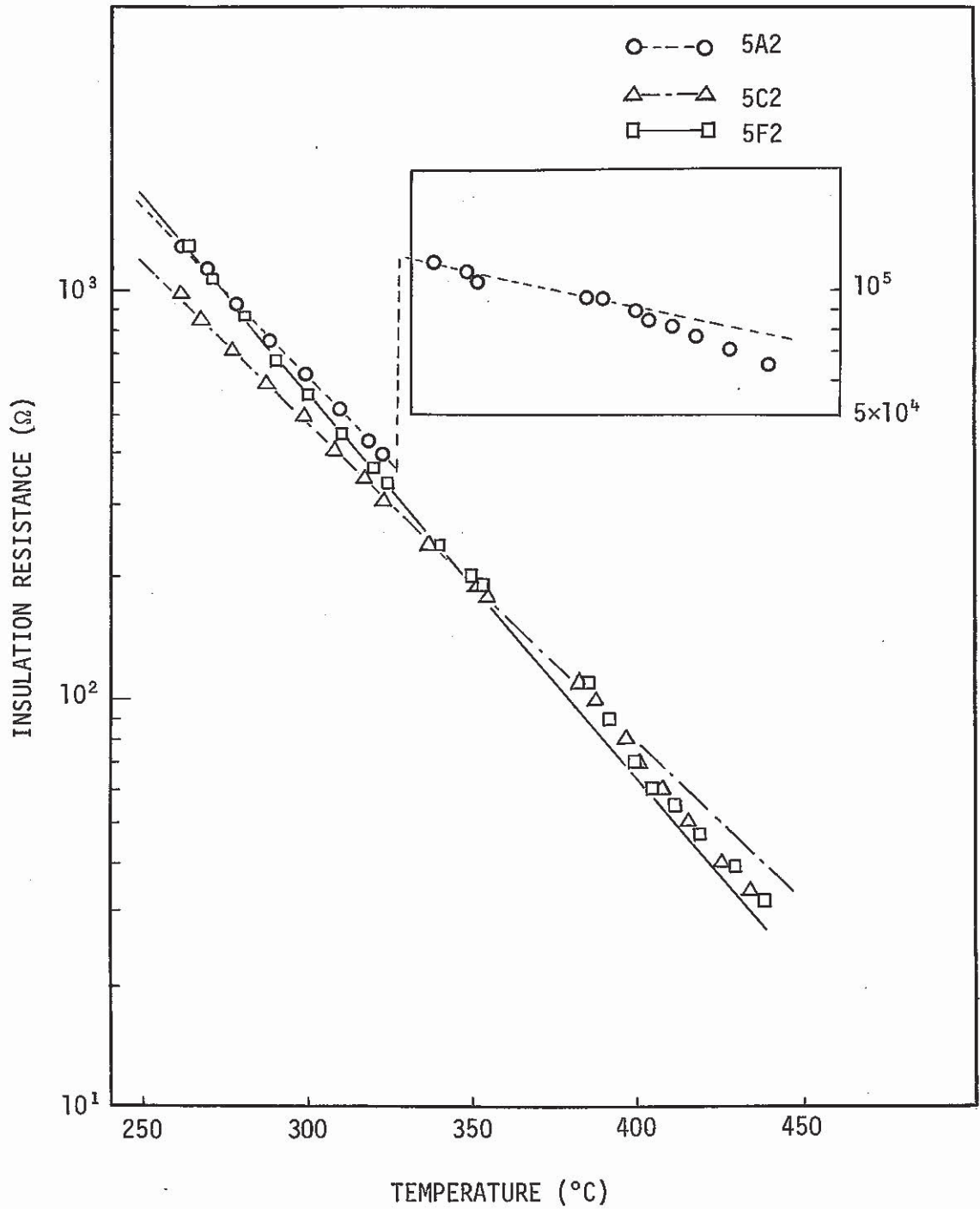


Fig. 4.20 Insulation Resistance of In-Core Acoustic Detectors.

推論したが、それは原因ではないことが判明された。

(3) [ 5 A 2 ] 炉内音響信号が半減する温度

原子炉出力が上昇してナトリウム温度が上昇すると、ある温度以上では[ 5 A 2 ] 炉内音響信号の rms 値が半減し、原子炉出力降下でナトリウム温度が降下すると、ある温度で rms 値が復帰するという現象がある。この現象のナトリウム温度に対する再現性はあり、温度上昇時と降下時の、ある温度は同一温度である。ところが、この、ある温度には経時変化があり、最初は 40 MW 付近 (約 424°C) であったものが、しだいに低下して、最近では系統昇温中 (250°C~370°C) に生じるようになった。この rms 値の半減する温度の経時変化を Fig. 4.21~4.23 に示す。これらは同じデータであるが、横軸の表示として Fig. 4.21 では時間、Fig. 4.22 では積算出力、Fig. 4.23 では 50 MW 以上に出力上昇した出力上昇回数を採用した。Fig. 4.21 には、50 MW 出力上昇試験、50 MW 定格第 1 サイクル、50 MW 定格第 2 サイクル、および 75 MW 出力上昇試験の実施された時期も示した。これらの図を比較したとき、rms 値半減温度の低下が、より直線的に表示されるのは出力上昇回数を横軸にとった場合であることがわかる。絶縁抵抗の急上昇の原因が、ロウ付け部分の破損だとすると、rms 値半減温度の低下が出力上昇回数に依存することは妥当と考えられる。

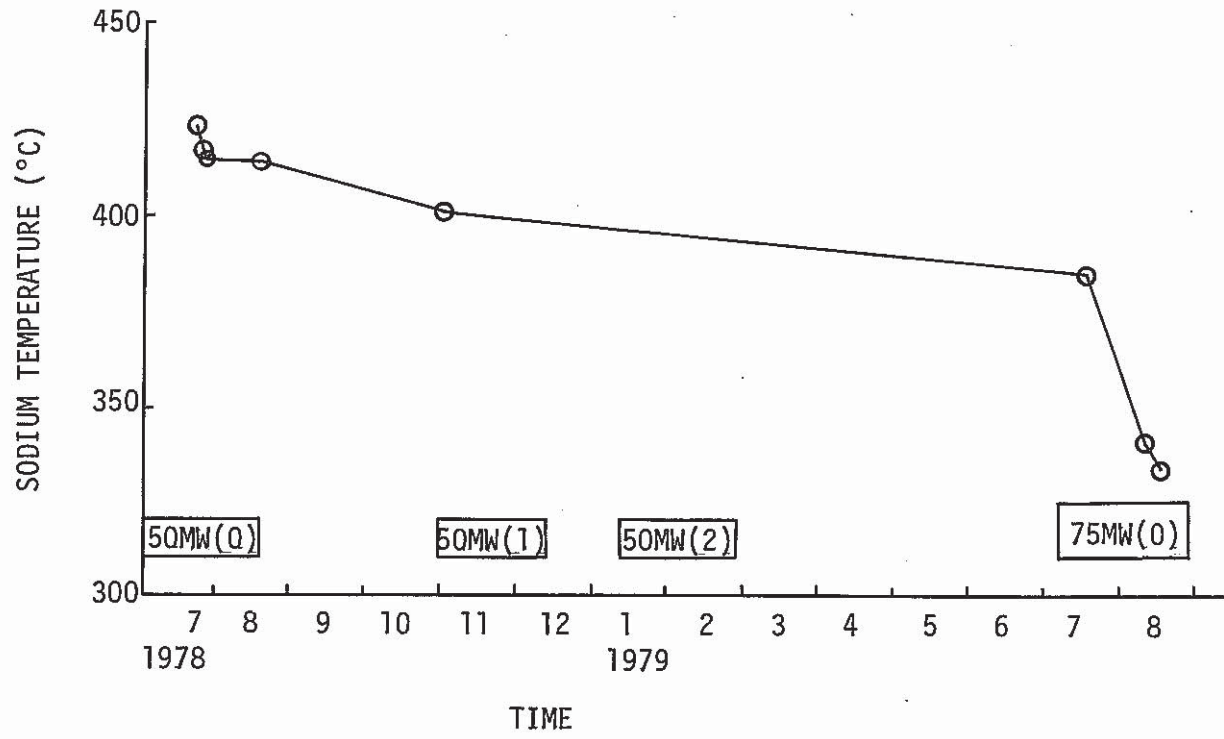


Fig. 4.21 Change of [5A2] S/A outlet sodium temperature at which [5A2] in-core acoustic signal was reduced by half.

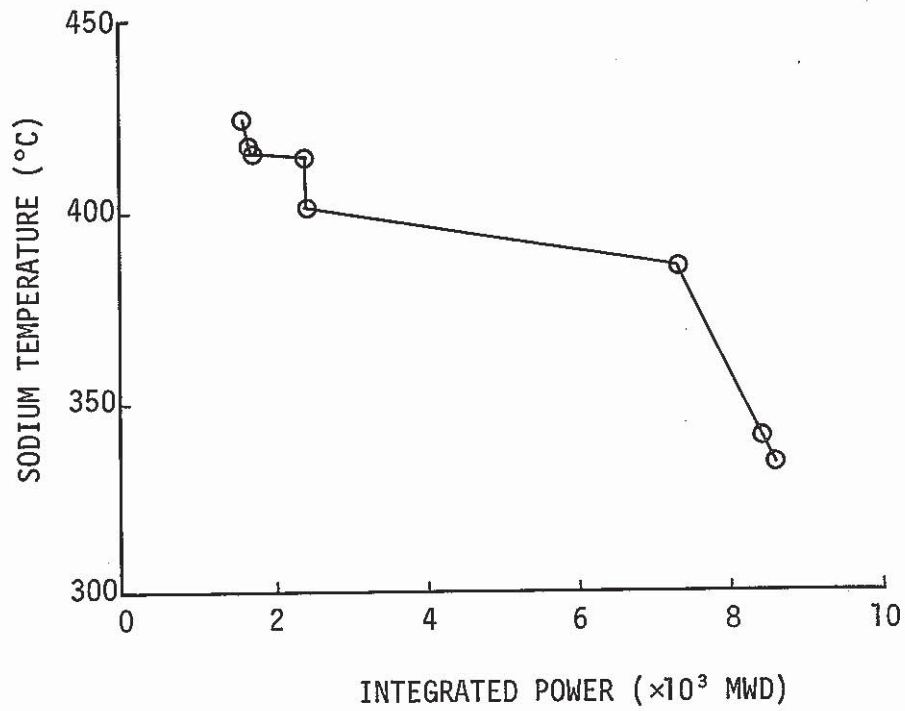


Fig. 4.22 Change of [5A2] S/A outlet sodium temperature at which [5A2] in-core acoustic signal was reduced by half vs. integrated power.



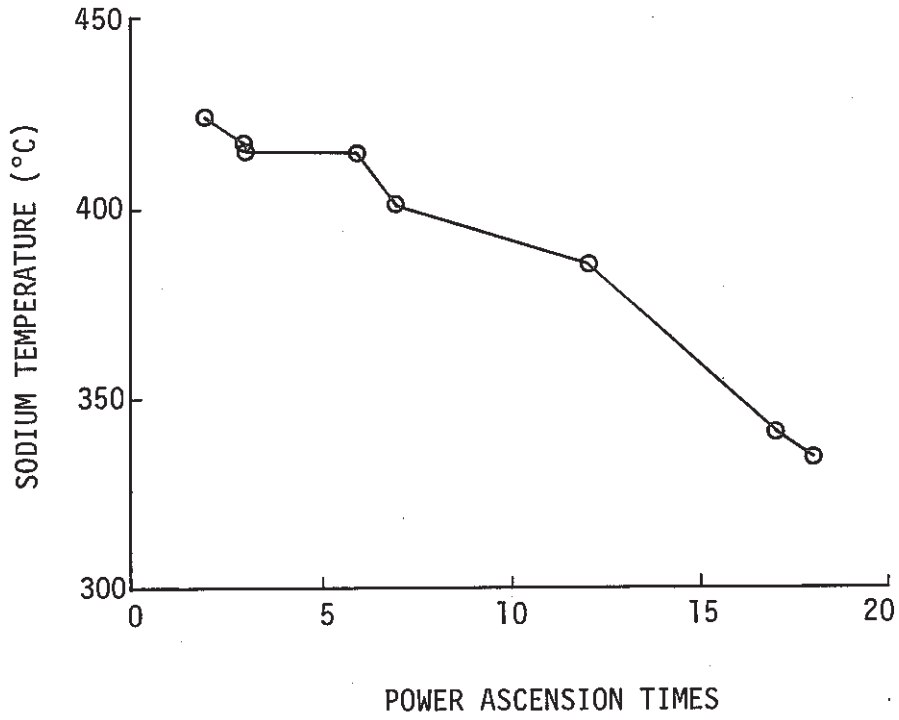


Fig. 4.23 Change of [5A2] S/A outlet sodium temperature at which [5A2] in-core acoustic signal was reduced by half vs. the number of times of power ascension over 50 MW.

#### 4.5 連続監視

##### (1) [ 5 A 2 ] および [ 5 C 2 ] 炉内音響信号

Fig. 4.24 に、50 MW 第 1 サイクルおよび第 2 サイクルで測定した [ 5 A 2 ] 炉内音響信号のパワースペクトル密度を示す。スペクトルに大きな変化は認められない。

Fig. 4.25 には、同様に [ 5 C 2 ] 炉内音響信号のパワースペクトル密度を示す。650 Hz 付近に広がっているピークは、回転プラグ冷却用ブースタ・ファンの騒音によるものであり、サイクルが変わると、この部分も変わっている。この騒音は、前置増幅器を介して信号中に混入してくるものと考えられており、混入のぐあいは前置増幅器の設置状態によって変化すると考えられる。

##### (2) [ 5 F 2 ] 炉内音響信号

Fig. 4.26 に、75 MW 第 1 サイクルで連続監視した [ 5 F 2 ] 炉内音響信号の 5 k ~ 10 kHz 成分の rms 値の変化を示す。同時に原子炉出力、[ 5 F 2 ] 燃料集合体出口温度、および 1 次冷却材流量も示してある。rms 値は、サイクル運転中ほぼ一定値であることがわかる。

Fig. 4.27 には、上記 75 MW 第 1 サイクルの 1 日目、15 日目、29 日目に測定した [ 5 F 2 ] 炉内音響信号のパワースペクトル密度を示す。上記 rms 値と同様に、大きな変化はない。

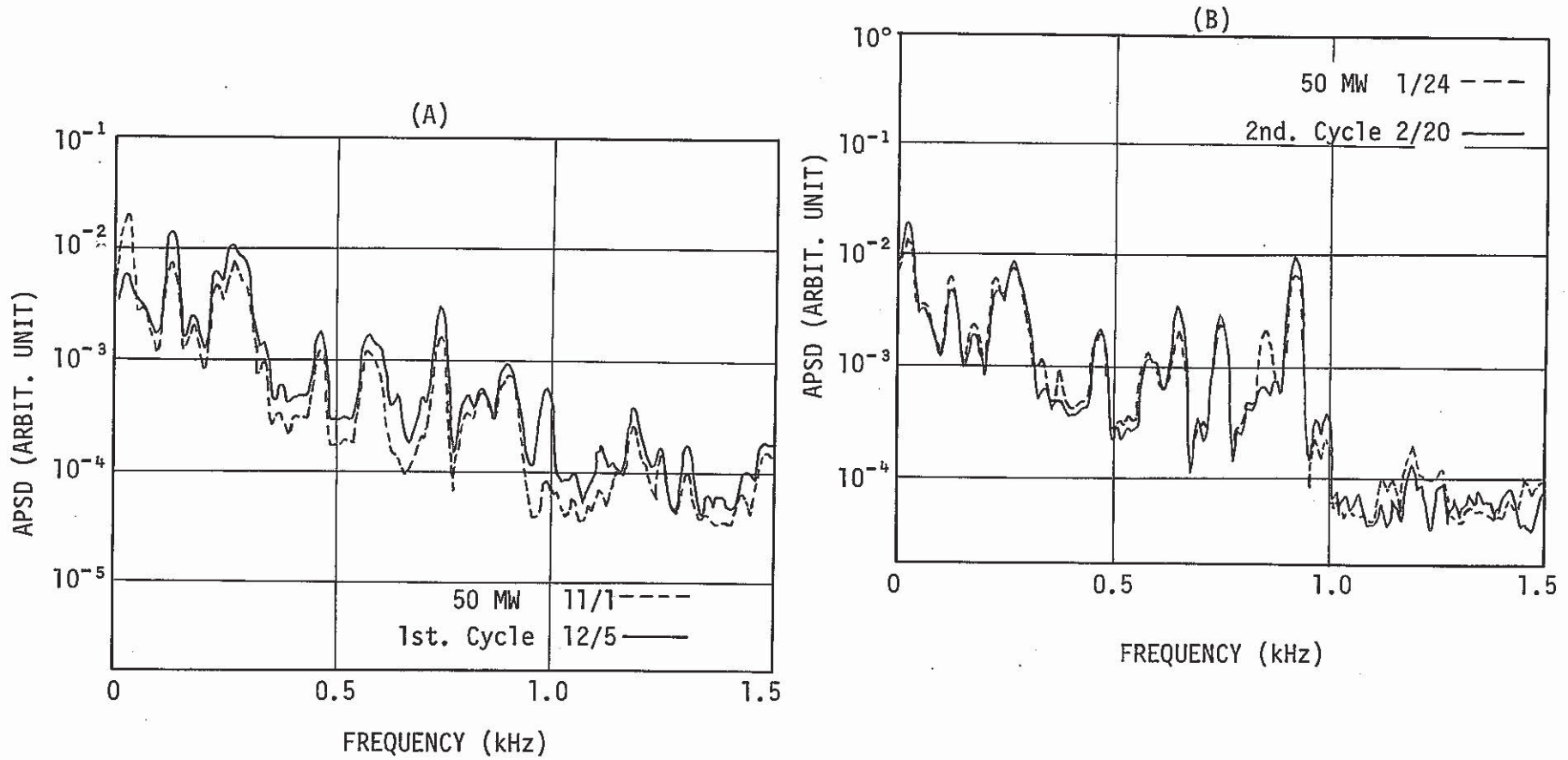


Fig. 4.24 Auto Power Spectral Densities of [5A2] In-Core Acoustic Signal; Amp. Gain  $\times 50$

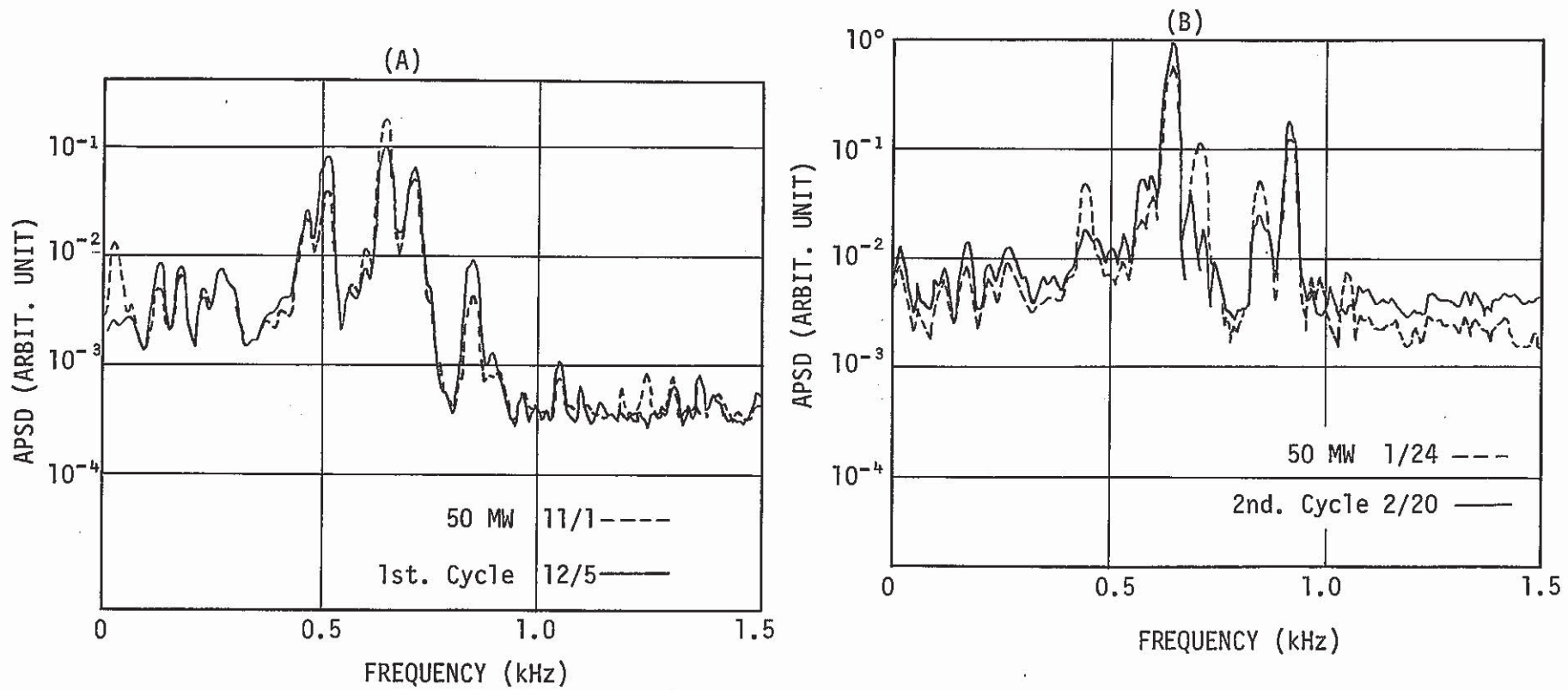


Fig. 4.25 Auto Power Spectral Densities of [5C2] In-Core Acoustic Signal; Amp. Gain  $\times 50$

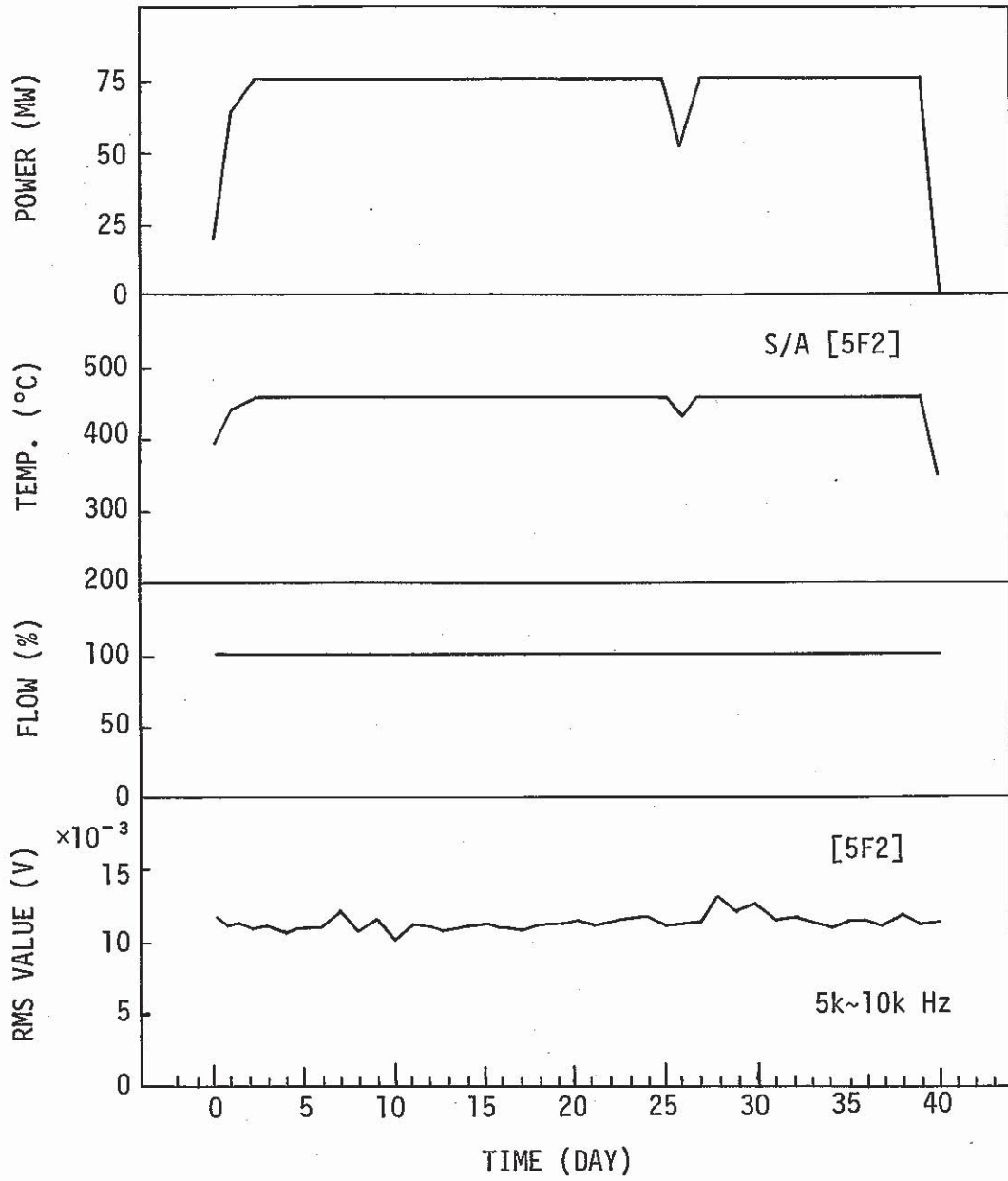


Fig. 4.26 Rms Values of 5k~10k Hz Component of [5F2] In-Core Acoustic Signal during 75 MW 1st Duty Cycle; Amp. Gain  $\times 10$ .

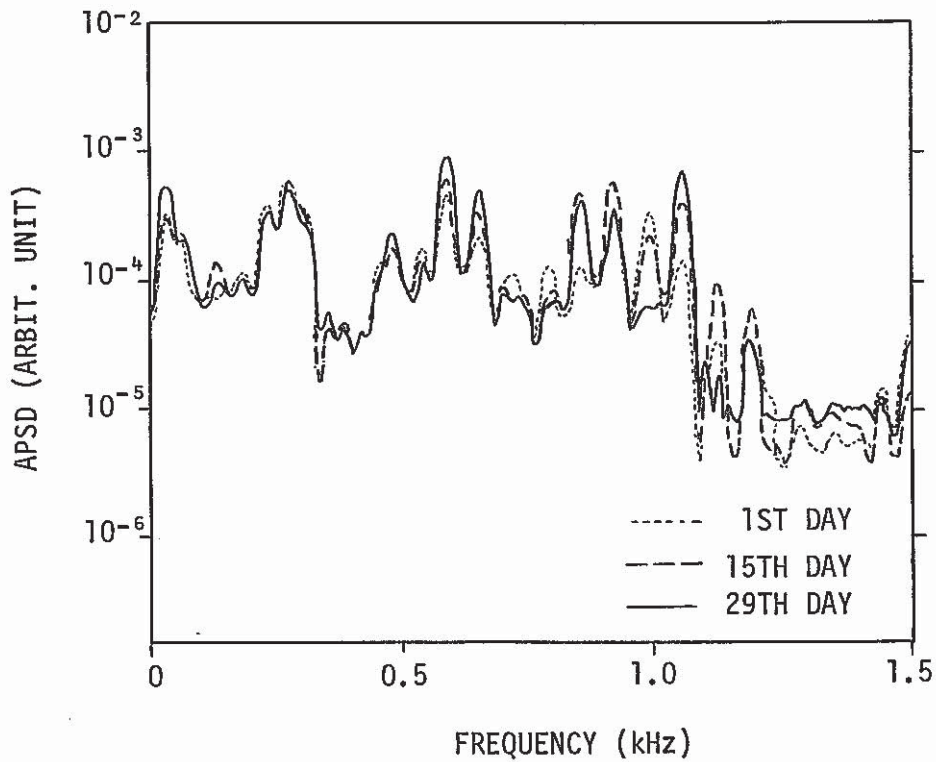
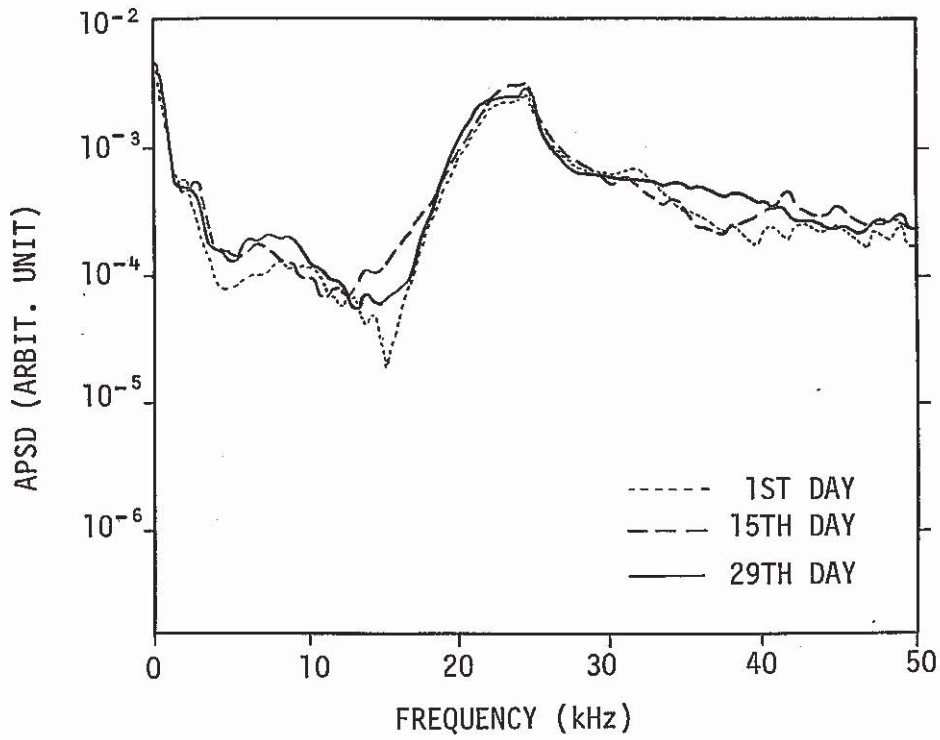


Fig. 4.27 Auto Power Spectral Densities of [5F2] In-Core Acoustic Signal; 75 MW, 458°C, 100% Flow, Amp. Gain  $\times 10$ .

## 5. 検 討

## 5.1 雰囲気圧力による音響伝播の変化

$N_2$  圧力が  $1 \text{ kg/cm}^2$  から  $1.69 \text{ kg/cm}^2$  に上昇したことによる音響伝播の変化を検討する。

(1) 音源から  $N_2$  ガスへの音響エネルギーの透過率の変化

無限媒質内の平面波を考えて、音源（鉄とする）と  $N_2$  ガスの音響インピーダンスを  $Z_1$ ,  $Z_2$  とすると、透過率  $T_1$  は

$$T_1 = 1 - \frac{(Z_1 - Z_2)^2}{(Z_1 + Z_2)^2}$$

となる。<sup>(2)</sup> 音響インピーダンスは密度と音速の積に等しく、<sup>(2)</sup> また気体中の音速は圧力にはほとんど無関係であることから、<sup>(2)</sup>  $1.69 \text{ kg/cm}^2$  の時の  $N_2$  ガスの音響インピーダンス  $Z_3$  は密度の変化のみで、

$$Z_3 = 1.69 Z_2$$

となる。 $N_2$  圧力  $1.69 \text{ kg/cm}^2$  時の透過率  $T_2$  は

$$\begin{aligned} T_2 &= 1 - \frac{(Z_1 - Z_3)^2}{(Z_1 + Z_3)^2} \\ &= 1 - \frac{(Z_1 - 1.69 Z_2)^2}{(Z_1 + 1.69 Z_2)^2} \end{aligned}$$

となる。<sup>(2)</sup> 圧力変化による音響エネルギーの透過率の変化は

$$\frac{T_2}{T_1} = 1.69 \left( \frac{Z_1 + Z_2}{Z_1 + 1.69 Z_2} \right)^2$$

となる。ところで  $0^\circ\text{C}$ , 1 気圧では

$$Z_1 = 4.64 \times 10^6 \text{ (dyn} \cdot \text{S/cm}^3\text{)}$$

$$Z_2 = 42.1$$

となる。<sup>(2)</sup>  $Z_2$  は  $Z_1$  に比べて十分小さいため 2 乗の項はほぼ 1 となり

$$\frac{T_2}{T_1} = 1.69 \quad \text{となる。}$$

(2)  $N_2$  ガス中の音響エネルギーの伝播の変化

平面波が媒質中を X 方向に伝播する時に振幅  $A(x)$  の減衰状態は

$$A(x) = A(0) e^{-\alpha x}$$

(3)  
と表わされる。この減衰定数  $\alpha$  は

$$\alpha = \frac{8\pi^2 \mu}{3\rho_0 C \lambda^2}$$

(4)  
と表わされる。ここで、 $\mu$  は粘性係数、 $\rho_0$  は密度、 $C$  は波動の伝播速度、 $\lambda$  は波長である。気体の場合、圧力変化では  $\mu$  と  $C$  は、ほとんど変化せず、また  $\lambda$  を特定の波長のものに限定すれば  $\alpha$  は  $\rho_0$  で決まる。 $N_2$  ガス圧力が  $1 \text{ kg/cm}^2$  の時の  $\alpha$  を  $\alpha_1$ 、 $1.69 \text{ kg/cm}^2$  の時の  $\alpha$  を  $\alpha_2$  とすると

$$\alpha_2 = \frac{\alpha_1}{1.69}$$

となる。ここで圧力変化による減衰の比を求めてみると

$$\begin{aligned} \frac{A_2(X)}{A_1(X)} &= \frac{e^{-\alpha_1 X}}{e^{-\alpha_2 X}} \\ &= \frac{e^{-\frac{\alpha_1}{1.69} X}}{e^{-\alpha_1 X}} \\ &= e^{0.408 \alpha_1 X} \end{aligned}$$

(2)  
となる。ここで  $0^\circ\text{C}$ 、1 気圧での定数の値 ( $N_2$ )

$$C = 337 \text{ (m/S)}$$

$$\rho = 1.25055 \text{ (kg/m}^3\text{)}$$

$$\mu = 0.0174 \text{ (cp)} = 1.74 \times 10^{-5} \text{ (N}\cdot\text{S/m}^2\text{)} \text{ (ただし } 20^\circ\text{C)}$$

を使用し、 $500 \text{ Hz}$  の周波数 ( $\lambda = 0.674 \text{ m}$ ) と  $X = 14 \text{ m}$  ( $\text{RCV}$  の半径) の場合について計算してみると



$$\frac{A_2}{A_1} = 1.00001$$

となり、有効数字の範囲では、伝播の減衰による変化はない。

(8) N<sub>2</sub> ガスからプリアンプへの音響エネルギーの透過率の変化

プリアンプを鉄と考えると(1)と同じとなり変化は1.69倍である。

以上のことより、全体を通じての音響エネルギーの伝播はN<sub>2</sub>圧力が1.69倍になると

$$1.69 \times 1 \times 1.69 = 2.86 \text{ 倍}$$

になる。これに対して測定された〔5C2〕プリアンプ加速度信号 rms 値は約1.6倍になっており、エネルギーとしては2乗の2.6倍になっている。この両者は比較的良く一致しており、プリアンプの振動変化はN<sub>2</sub>中を通した音響伝播の変化によるものといえる。

炉内音響プリアンプの振動は、気体中を伝播してくる音響振動によるものが大部分であり、その振動によりプリアンプ内で発生した信号が、プリアンプよりも前から来る信号に加えられることがわかった。

## 5.2 〔5A2〕炉内音響検出器絶縁抵抗の上昇

〔5A2〕炉内音響検出器の絶縁抵抗の急上昇の原因として、検出器の破損が考えられる。この検出器は、ニオブ酸リチウムの結晶を検出器ケースにロウ付けしているが、この部分が急激な温度変化には弱く、検出器の据付け時には急激な温度変化を与えないように、十分注意しなければならない。毎秒40℃以上の熱衝撃を与えると、結晶とダイアフラムの熱膨張率の違いから、結晶がしばしば破損することがあるという報告もある。<sup>(6)</sup>もし、据付前あるいは据付時に与えられた衝撃によって、ロウ付けの部分が破損したとすれば、温度変化により結晶とケースの変位が生じた時に、2者間に間隙が生じ、抵抗が大きくなる可能性は十分にある。なお、検出器は炉心バウンダリーの外なので安全上の問題はない。

## 5.3 ナトリウム沸騰の検出可能性

### (1) 受波感度

炉内音響検出器の周波数範囲は、設計条件では10k～50kHzとなっているが、1次冷却材流量制御系からのノイズが約22kHzを中心に広がっているために、10kHz付近のみを使用せざるを得ない。納入前のメーカーでの測定結果では、10kHzでの受注感度は、それ以上の周波数での受波感度より多少低くなっており、3検出器の平均値は約-160dB

(7)  
 (  $0 \text{ dB} = 1 \text{ V rms} / \mu\text{bar}$  ) である。これは常温水中での値であり、高温液体ナトリウム中 (  $600^\circ\text{C}$  ) では更に  $5 \text{ dB}$  <sup>(8)</sup> の低下があるため、結局、約  $-165 \text{ dB}$  となる。前置増幅器の利得は約  $60 \text{ dB}$  (  $1000$  倍 ) であり、主増幅器の利得は  $20 \text{ dB}$  (  $10$  倍 ) に選んであるので、最終的には  $-85 \text{ dB}$  となり、出力信号としては  $5.6 \times 10^{-5} \text{ V rms} / \mu\text{bar}$  となる。

## (2) 沸騰音響の検出例

大洗工学センター高速炉安全性試験室で実施されたナトリウム過渡沸騰試験において、「常陽」の炉内音響検出器と同一メーカーで同様な仕様の検出器も使用されており、それによる検出結果を次に簡単に示す。<sup>(9)</sup>

試験は中心 24 サブチャンネルが閉塞された 37 本ピンバンドルを用いて行われており、「常陽」の炉内音響検出器と同様な  $\text{LiNbO}_3$  の高温マイクロホンが 3 個使用された。これらのうち 2 個は、試験部入口の導波棒先端、残りの 1 個は試験部から約 9 m 離れた膨張タンク内のナトリウム中 ( 沸騰部とこの検出器は約 13 m 離れている ) に浸けられていた。

Table. 5.1 に、これらの検出器で検出した、非沸騰時と沸騰時の音響ノイズレベル ( rms 値 ) の代表値を示す。沸騰時のデータとしては、この試験中の最大の音響ノイズレベルを示した。また、沸騰状態は、すべて飽和温度以下の局所沸騰 ( サブクール沸騰 ) であった。

## (3) 「常陽」での沸騰検出の予想

以上のナトリウム過渡試験の報告を元にして、「常陽」でナトリウム沸騰が生じた場合の検出可能性について検討する。

「常陽」において、炉心中心位置で局所沸騰が生じたと仮定すると、炉内音響検出器 ( 例えば [ 5 F 2 ] ) までの直線距離は約 1.8 m であり、ナトリウム中のみを流路の方向に伝搬するとすると、最短距離は約 2.1 m となる。ナトリウム中の音響伝搬モードが平面波であれば、伝搬損失はほとんどないのであるが、燃料集合体の外部では平面波では近似できないと考えられるため、伝搬損失を考慮しなければならない。距離的には、上記ナトリウム中過渡沸騰試験の 2 ケースの間にあるので、 $12 \sim 135 \mu\text{bar}$  ( バックグラウンド・ノイズを引いてある ) の音圧が検出器付近に到達するものと考えられる。<sup>(10)</sup>

「常陽」の炉内音響検出器は、直接ナトリウムに浸っているのではなく、ナトリウム中に挿入されているステンレス製のスリーブ管内に設置されている。そして、このスリーブ管と検出器間の伝播損失を少なくするために熔融金属 ( インジウム ) が入れられている。これらの境界面での音響エネルギーの透過率は、ナトリウムとステンレス間で約 70 %、ステンレスとインジウム間で約 80 %、インジウムと検出器間で約 80 % と言われている。<sup>(11)</sup> これらを合計するとナトリウムから検出器へのエネルギー透過率は約 45 % となり、振幅としては約

70% (エネルギーの平方根) に減衰すると考えられる。これを考慮すると、上記検出器付近の12~135  $\mu\text{bar}$  の音圧は、検出器で検出される時は、8~95  $\mu\text{bar}$  となっている。この音圧が、(1)で述べた受波感度 ( $5.6 \times 10^{-5} \text{ V}/\mu\text{bar}$ ) で電圧に変換されたら、0.5~5 mVとなる。

「常陽」の測定系では、ノイズ除去のために、5 k~10 k Hz のバンド・パス・フィルタを使用しているため、更に信号は減少する。ナトリウム沸騰のパワースペクトルは白色雑音<sup>(12)</sup>に近いと考えられるが、検出器とかその付近の構造物の振動特性により、検出されるパワースペクトルは検出系固有のスペクトルになると考えられる。このスペクトルのパターンがわからなければ、5 k~10 k Hz の成分が全体の何%にあたるかはわからない。現在までのところ、「常陽」ではナトリウム沸騰音響検出試験が行われていないため、検出系固有のスペクトルがわかっていない。そのため、このバンド・パス・フィルタによる信号減少の効果は不明であるが、一応、数分の1になるとしておく。この結果、信号は0.5~5 mVの数分の1になると考えられる。

この信号レベルは、[5 F 2] 炉内音響で通常、観測されるいる信号レベルの約12 mV (Fig. 4.26 参照) に対して、極めておおざっぱに言って、1~20%程度に相当する。また、沸騰が生じれば、気泡による音響の吸収が生じるので、信号レベルは低くなる方向となる。

結局、上記のナトリウム過渡沸騰試験と同程度の局所沸騰(サブクール沸騰)が「常陽」で発生した場合には、監視している炉内音響信号のレベルにおいて、極めておおざっぱに言って、バックグラウンドレベルの10%程度以下の上昇が見られるのではないかと考えられる。[5 F 2] 炉内音響の連続監視結果 (Fig. 4.26 参照) では、この程度の変動は観測されているので、ノイズレベル(主に1次冷却材流量制御系からのノイズ)の、より有効な低減策を講じないと局所沸騰(サブクール沸騰)の検出はむずかしくなることも考えられる。

#### 5.4 今後の課題

##### (1) ノイズ処理

炉内音響信号に対する重大なノイズとしては、回転プラグ冷却用ブースタ・ファンによるものと、1次冷却材流量制御系によるものがあるが、ナトリウム沸騰検出に障害となるノイズは後者の方である。しかし、音響検出器は接地型であり、MIケーブルもシールド側が接地されているので、プラントの隅々まで行き渡っているこの種のノイズを拾わないようにすることは、現在の測定系では不可能である。現在、可能な対策としては、信号処理による方法<sup>(13)</sup>であり、より有効なフィルタの使用と、音響 - 中性子束相互相関法の採用が考えられる。

Table 5.1 Sound Intensity<sup>(9)</sup>

	Non-Boiling (Back Ground Noise)	Boiling
Microphone on Wave Guide (Near the Boiling Point)	15 $\mu$ bar $\left( \begin{array}{c} 1.98 \text{ m/s} \\ 487 \text{ }^\circ\text{C} \end{array} \right)^{**}$	150 $\mu$ bar* $\left( \begin{array}{c} 1.98 \text{ m/s} \\ 487 \text{ }^\circ\text{C} \\ 237 \text{ W/cm}^2 \end{array} \right)^{**}$
Microphone in Sodium $\left( \begin{array}{c} 13 \text{ m Far from the} \\ \text{Boiling Point} \end{array} \right)$	13 $\mu$ bar $\left( \begin{array}{c} 0.98 \text{ m/s} \\ 469 \text{ }^\circ\text{C} \end{array} \right)^{**}$	25 $\mu$ bar* $\left( \begin{array}{c} 0.98 \text{ m/s} \\ 469 \text{ }^\circ\text{C} \\ 127 \text{ W/cm}^2 \end{array} \right)^{**}$

\* Max. Value in This Test

\*\* Flow Velocity, Inlet Temperature and Heat Flux of Heater Pin

この相関法は、互いに独立な、音響と中性子束のバックグラウンド雑音を、相互相関をとることにより除去する方法であり、沸騰現象を曖昧さなく検出できる方法として期待できる。

## (2) 炉内音響検出方法

現在、炉内音響検出器は制御棒予備孔内に設置されているが、照射用炉心に改造後は、制御棒予備孔には計測線付集合体およびナトリウム・インパイルループを設置する計画があり、その時は一部の炉内音響検出器は引き抜くことになる。そこで、ナトリウム中に検出器を設置するという現在の方法以外の検出方法も考慮する必要があるが生じる。ナトリウム沸騰検出には導波棒方式が有望であるという報告もある<sup>(9)</sup>ので、別の検出方法として、導波棒方式を採用し、従来のナトリウム中での検出方式と比較するのも興味深い。導波棒としては、設置されているプラグを利用するのが簡単である。

更に、可能ならば、構造材中を伝播するナトリウム沸騰音響を検出するために、AE測定も兼ねて、高温用耐放射線音響検出器を炉容器等の構造物に取り付けることも望ましい。

## (3) 模擬沸騰音響検出試験

「常陽」では、まだ模擬沸騰音響検出試験が行われていないため、沸騰が生じた時に、どのような信号レベルで、どのようなパワースペクトルの信号が検出できるかということとは不明であり、沸騰音響を検出したとしても判断の基準となるデータが乏しい。それゆえ、模擬沸騰音響検出試験の実施が望まれる。

音響検出試験としては、音響発振器による試験が考えられる。現在、〔5D2〕制御棒予備孔には炉内音響検出器は設置されておらず、その制御棒予備孔を使用すれば、バウンダリを破ることなしに音響発振器をナトリウム中の炉内音響検出器の位置に設置することができる。

ナトリウム・インパイル・ループでは、燃料の冷却材流量が減少した時、あるいは流路が閉塞<sup>(14)</sup>した時の挙動調査が可能であるため、実際に沸騰を生じさせることができる。この時、沸騰音響検出試験を組み込むことが望ましい。しかし、沸騰はループ内で生じるので、実際の燃料での沸騰時とは音響伝播経路が違う。

音響伝播経路が実際の沸騰に極めて近いものとして、ラプソディ炉では“NABO”<sup>(12)</sup>と呼ばれる試験集合体で、ナトリウム沸騰検出試験を行っている。この試験集合体はタンタルでできた7本のピンを内蔵しており、ヒータ加熱装置はなく、ガンマ加熱だけで沸騰が生じるようになっている。集合体内の流量は、50%出力運転で沸騰が起きるように設計されている。このような試験集合体を製作すれば、ナトリウム沸騰音響検出試験は実施しやすいと考えられる。

(4) 照射後試験

炉内音響検出器が炉内から取り出された時は、検出器の性能および構造の照射効果とか、溶融金属のインジウムとスリーブ管との共存性の調査等を行えば、重要なデータが得られるものと思われる。

## 6. 結 論

「常陽」の75 MW出力上昇試験および75 MW定格第1, 2サイクルにおける炉内音響の測定および監視結果から、以下のことが明らかになった。

- (1) 炉内音響信号に混入してくる大きな雑音としては、1次冷却材流量制御系による電磁氣的雑音と、回転プラグ冷却用ブースタ・ファンによる音響的雑音がある。周波数成分としては、前者は22 kHz付近を中心とする幅広い成分を持ち、後者は数百Hzの成分を持っている。これらの雑音の寄与としては、前者のすべての炉内音響信号に同様に混入しているが、後者は〔5A2〕, 〔5F2〕, 〔5C2〕炉内音響信号の順に寄与が大きくなっている。
- (2) ナトリウム沸騰音響検出を目的とする数十kHzの周波数帯域では、上記の前者雑音を主とする炉内音響信号のバックグラウンド雑音レベルは、原子炉出力および1次冷却材流量（主ポンプ運転時）には、ほとんど依存しない。これらのバックグラウンド雑音の影響の少ない5k~10kHz範囲でも、まだかなりのバックグラウンド雑音が存在する。
- (3) 数百Hzのバックグラウンド雑音の混入経路として、空气中を伝播してくる音響が前置増幅器を振動させ、その結果、信号中に雑音が混入するという経路があることがわかった。
- (4) 炉内音響検出器（MIケーブル含む）の絶縁抵抗は温度の上昇とともに低下するが、〔5A2〕炉内音響検出器だけは330℃前後で絶縁抵抗が300倍以上、上昇した。この絶縁抵抗の上昇は、今まで観測されていた炉内音響信号のrms値の半減する現象に対応しているものと考えられる。このrms値半減現象の生じる時のナトリウム温度は出力上昇回数に依存して低下してきているように思われる。この現象の原因として、据付前あるいは据付時の機械的もしくは熱的衝撃で、結晶が破損した可能性がある。
- (5) 75 MW定格第1サイクルでの炉内音響（〔5F2〕炉内音響信号）連続監視では、信号には大きな変化はなかった。50 MW定格第1および第2サイクルでの炉内音響（〔5A2〕および〔5C2〕炉内音響, 0~1.5 kHz）監視でも、信号には大きな変化はなかった。
- (6) ナトリウム過渡沸騰試験結果からの類推によると、現在の測定系ではSN比が悪く、ノイズレベルの、より有効な低減策を講じないと、局所沸騰（サブクール沸騰）の検出は、むずかしいかもしれない。対応策としては、より有効なフィルタ処理と、音響 - 中性子束相互相関法の採用が有望である。
- (7) 今後の課題として、導波棒方式の併用、模擬沸騰音響検出試験および検出器等の照射後試験を考える必要がある。
- (8) 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ていない。

## 7. 参 考 文 献

- (1) 佐野健一, 三田敏男, 池上哲雄, 村松壽晴, 大谷秀二, 田村誠司, 山本寿, 『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)—』, PNC SN941 79-227 (1979年12月)。
- (2) 理科年表, 東京天文台編纂 (1976)
- (3) 超音波探傷法, 日本学術振興会製鋼第19委員会編 (1974)
- (4) 伊藤毅, 音響工学原論(上)
- (5) 岩波理科学辞典, 第3版 (1974)
- (6) N. Uesugi et al., "Preliminary Investigation of On-line AE Monitoring System for Nuclear Power Plants", the Third Acoustic Emission Symposium, Tokyo, 1976.
- (7) 常陽用音響検出器特性資料(メーカーでの納入前試験結果), 東芝 (1975)
- (8) 高温で使用できる超音波トランスジューサ, 東芝レビュー, 34(10), 865 (1979)。
- (9) 菊地義弘ら, 「ナトリウム過渡沸騰試験-11」, PNC SN941 79-16 (1979年1月)。
- (10) 安田力, 小林健二, 吉村幸雄, 「高速増殖炉異常検出系の設計評価に関する研究,—炉内音響伝搬解析(1)—」, SJ261 79-01 (1979年3月)。
- (11) メーカーからの私信
- (12) G. Le Guillou, R. Berger and M. Brunet, "Boiling Detection in Fast Reactors by Noise Analysis Studies Performed in France", the SMORN-II Conference, Catlingburg, USA, 1977.
- (13) W.M. Carey et al., "The Detection of Sodium Vapor Bubble Collapse in a Liquid Metal Fast Breeder Reactor", *ibid.*
- (14) 「常陽」と照射試験 —JOYO MARK-IIについて—, PNC N908 79-01, (1979)。



## 付録 1 1次冷却材流量制御系による雑音

## (1) 信号に混入している雑音

炉内音響信号には、3.3 mS 間隔でパルス状の雑音が混入している。典型的な例として、Fig 1 に〔5 A 2〕炉内音響信号の波形を示す。(A)では、3.3 mS 間隔のパルス状の信号が見られる。この1つのパルスを拡大してみると、(B)のように約45  $\mu$ S 周期の減衰振動をしていることがわかる。このような炉内音響信号を、10  $\mu$ S の間隔でサンプリングして自己相関関数を求めると、Fig. 2 のようになる。遅れ時間100  $\mu$ S までには、信号波形に見られた約45  $\mu$ S 周期の減衰振動が見られ、遅れ時間100  $\mu$ S 以後には、周期約25  $\mu$ S の振動が見られる。この自己相関関数から自己パワースペクトルを求めると、Fig. 3 のようになる。自己相関関数に見られた周期約45  $\mu$ S の減衰振動に対応するピークが、約22 kHz を中心にして幅広く存在していることがわかる。同様に、周期約25  $\mu$ S の振動に対応するピークは、約40 kHz に見られる。ついでながら、この約40 kHz のピークは、約60 kHz のゆらぎ成分のエイリアシングとして現われていることがわかっている。

(1)  
(2) 1次冷却材流量制御系

「常陽」の1次冷却材主循環ポンプの速度制御には、静止セルビウス方式が採用されている。誘導電動機の2次誘起電圧  $E_2'$  と、すべり  $S$  の間には次の関係がある。

$$E_2' = S E_2 \quad (1)$$

ここで、 $E_2$  は最大2次電圧 ( $S = 1$  の時の電圧) である。すべり  $S$  は、次式で定義される。

$$S = \frac{N_0 - N}{N_0}$$

ここで  $N$  は電動機の回転数、 $N_0$  は同期回転数である。 $E_2'$  は電動機によって定まる定数であるから、(1)式の関係より、外部から  $E_2'$  を変化させれば  $S$  が変わり、回転数  $N$  を変えることができる。

静止セルビウス方式は、Fig. 4 に示すように、この2次電圧  $E_2'$  を制御するために、シリコン整流器と逆変換器(サイリスタインバータ)を使用した方式である。電動機の2次電圧を、シリコン整流器により整流した直流電圧を  $E_D$  とし、逆変換器のゲート信号を制御して得た任意の値の逆変換電圧を  $E_{INV}$  とすれば、

- (a)  $E_D > E_{INV}$  のときは、電動機の2次電流は増加し、電動機は加速され、トルクが増加して負荷トルクが増加して負荷トルクと平衡する点で、すべりが決まり、一定速度となる。

(b)  $E_D < E_{INV}$  のときは、電動機の 2 次電流は減少し、電動機は減速され、トルクが減少して負荷トルクと平衡する点で、すべりが決まり、一定速度となる。

したがって、通常運転においては、逆変換器のゲート制御を行い、逆変換電圧  $E_{INV}$  を変化させれば、電動機は対応する速度まで加速され、目的の速度で運転される。

この逆変換器のゲート制御には、パルスを用いるが、入力される交流電流に対して制御角（位相遅れ角） $\alpha$  を有するパルスを与えると、逆変換電圧  $E_{INV}$  は次のようになる。

$$E_{INV} = \frac{\sqrt{3} E_D}{\pi} \cos \alpha$$

結局、電動機の速度を制御するには、制御角  $\alpha$  を変えればよいことになる。

この制御パルスは、50 Hz 電源の 1 周期の間に、6 台の逆変換器に順番に送られるので、パルスの発生間隔は、

$$\frac{1}{50} \times \frac{1}{6} = 3.3 \times 10^{-3} \text{ ( sec )}$$

3.3 mS となる。

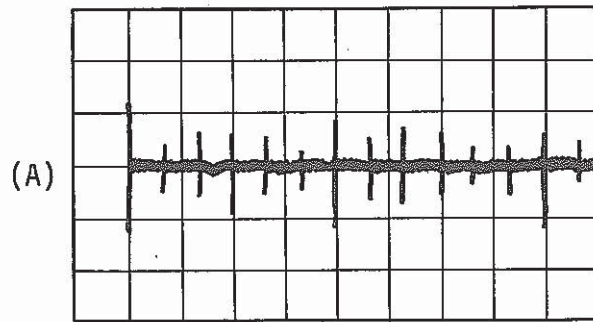
### (3) 約 22 kHz 雑音の雑音源

(1) で述べたように、炉内音響信号のパワースペクトル上に見られる約 22 kHz を中心に幅広く広がるピークは、3.3 mS 間隔のパルス状の雑音によるものであることがわかった。

このような、パルス状の信号は、回転機器の軸受けに傷がある場合にも発生するが、そのパルスの周期は回転数に依存する。ところが、炉内音響信号に混入しているパルスの周期は、1 次冷却材主循環ポンプ回転数には依存していないので、ポンプ軸受けの傷ではない。

サイリスタを使った位相制御方式は、雑音という面から見ると大変始末の悪いもので、制御パルスに対応する間隔でリングング波形の雑音を発生させる。<sup>(3)</sup>

(2) で述べた 1 次冷却材流量制御系の逆変換器ゲート制御パルスの間隔は、ちょうど 3.3 mS であるから、位相制御された出力の誘導で炉内音響信号にリングング状雑音が混入してきたものとも考えることができる。50 Hz 3 相交流で使用されているサイリスタは、他にもあろうが、1 次冷却材主循環ポンプ運転中は流量にかかわらず約 22 kHz のピークはほとんど変化せず、ポンプを停止すると、そのピークが減少するという現象から、この約 22 kHz のピークは、1 次冷却材流量制御系による雑音と考えられる。<sup>(4)</sup>



1 V/div, 5ms/div, No-Filter



0.5 V/div, 50 $\mu$ s/div, 10k~50kHz Filter

Fig. 1 Signal Shape of [5A2] In-Core Acoustic Signal;  
250°C, 20% Flow, Amp. Gain  $\times 10$ .

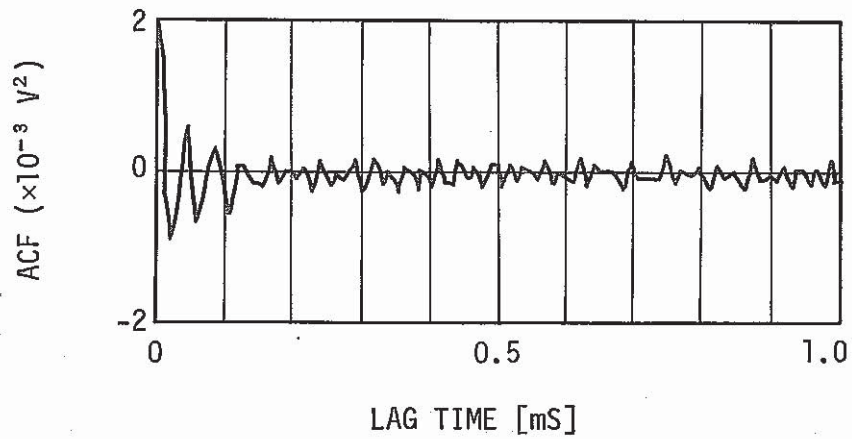


Fig. 2 Auto Correlation Function of [5A2] In-Core Acoustic Signal; 250°C, 20% FLOW, Amp. Gain  $\times 10$ , 10k~50k Hz Filter.

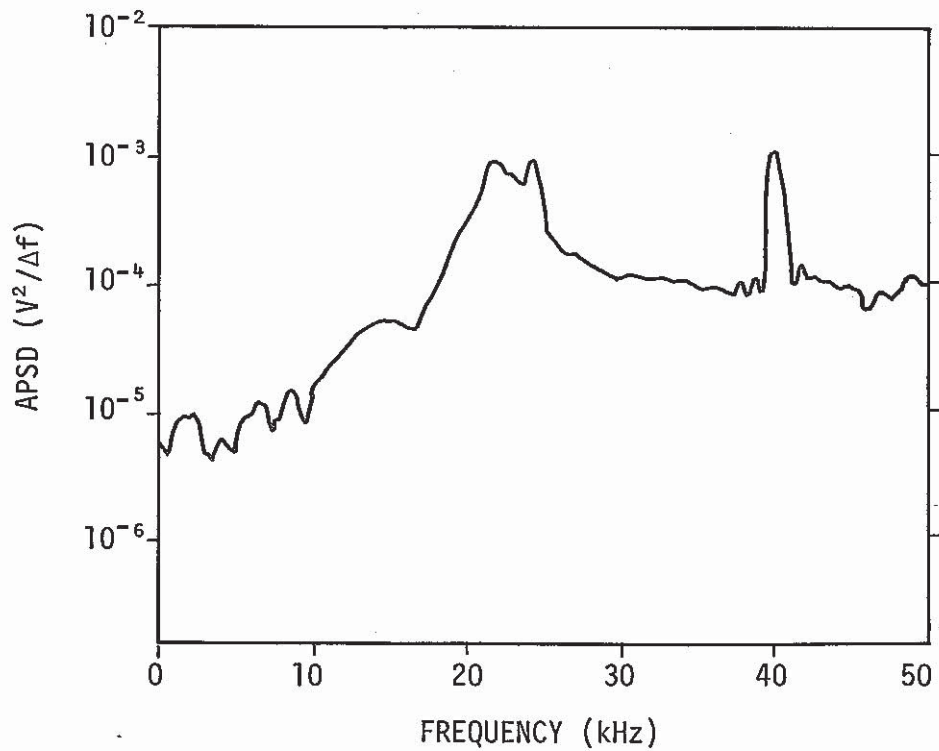


Fig. 3 Auto Power Spectral Density of [5A2] In-Core Acoustic Signal; 250°C, 20% FLOW, Amp. Gain  $\times 10$ , 10k~50k Hz Filter,  $\Delta f=500$ Hz.

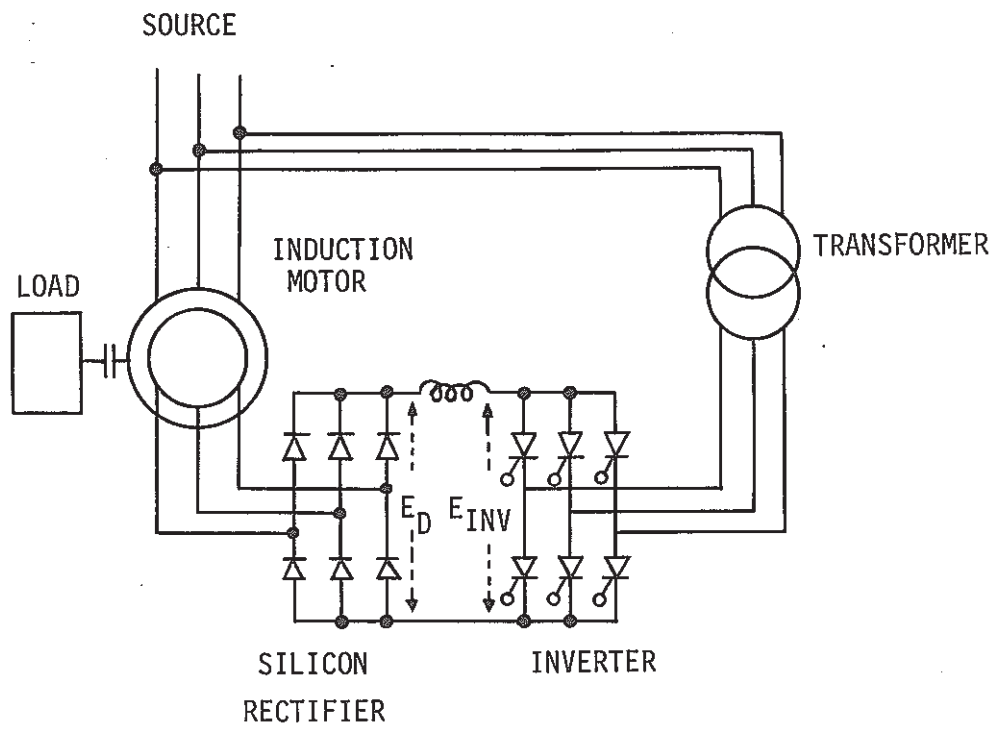


Fig. 4 Induction Motor Control System (Servius Method)

参 考 文 献

- (1) 誘導電動機の2次励磁制御取扱い説明書
- (2) 谷口 修, 「振動工学ハンドブック」 養賢堂(1976)
- (3) 古谷勝美, 「電磁雑音対策便覧」 第1編, 第1章
- (4) 本報告書, 本文4.2

## 付 録 2 回転プラグ冷却用ブースタ・ファンによる雑音

### (1) 回転プラグ冷却用ブースタ・ファン

格納容器内に発生する熱除去のために、窒素ガス冷却装置で所定の温度にまで冷却した窒素ガスを、ダクトを通して所定の場所へ送気分布させている。回転プラグの冷却には、この窒素ガスを、回転プラグ冷却ブースタ・ファンと冷凍器により、更に加圧冷却して回転プラグに送るようになっている。

(1)  
このファン(ブロー)の設計仕様を次に示す。

形 式	ルーツブロー
駆 動 法	Vベルト駆動
容 量	1500 m <sup>3</sup> /h
全 圧	5000 mm Aq
軸 動 力	30 kW
付属電動機	37 kW × 4P × 3φ × 400 V × 50 Hz

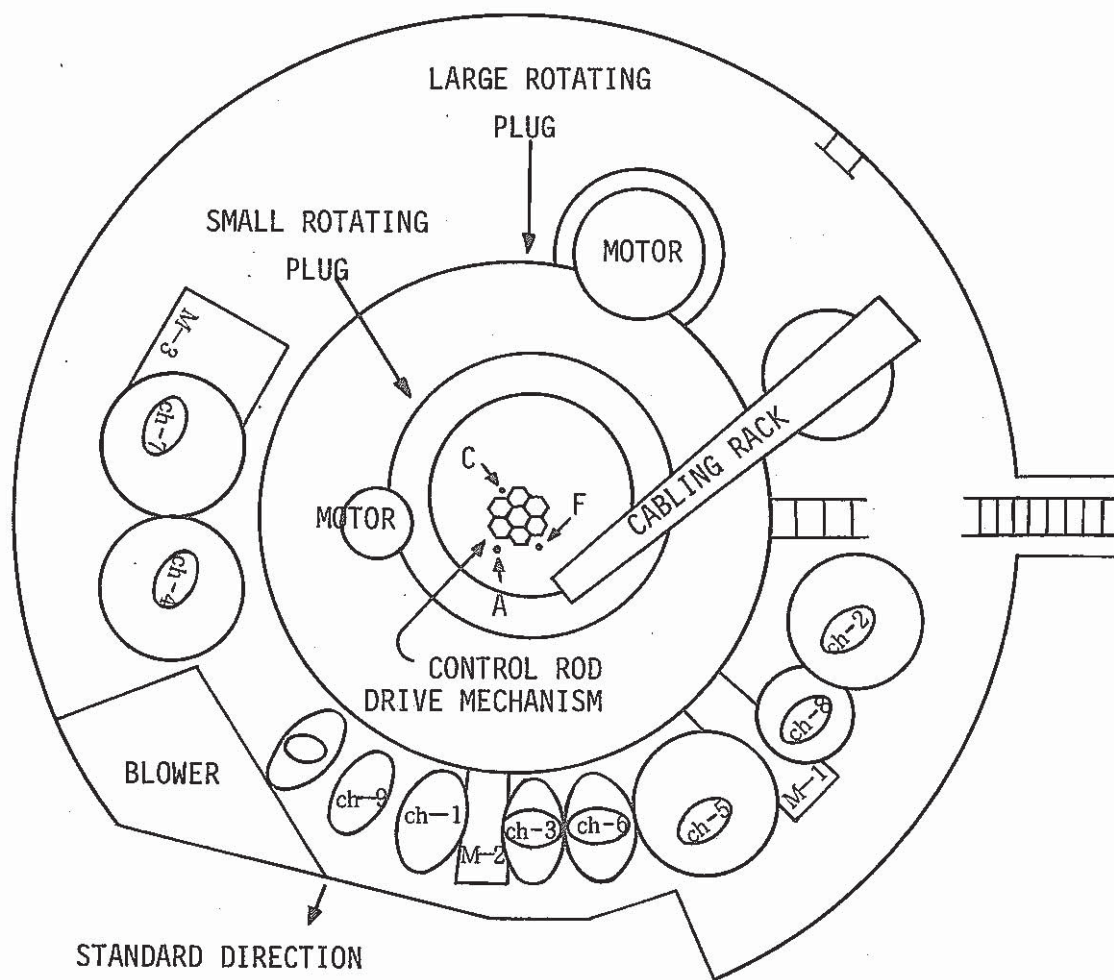
この形式のブローは、1対の砂時計形のロータがケーシング中で回転し、比較的低い圧力の増加で大容量のガスを送り出すことができる。<sup>(2)</sup>このファン(ブロー)は、Fig. 1に示すように、原子炉ピット内の、大回転プラグの横に設置されている。

このファンを起動させると、極めて大きな騒音が発生し、その騒音は近くで数分間いるだけで、しばらく難聴ぎみになるほど大きなものである。騒音測定の結果、ファンの近傍では、<sup>(3)</sup>107 dBであった。

### (2) 騒音による雑音の混入経路

炉内音響信号には、数百Hzの周波数帯域で、上記ファンの騒音による雑音が混入する。<sup>(4)</sup>しかし、炉内音響検出器は、回転プラグからは約6mも下方のナトリウム中(ナトリウム中に挿入されたスリーブ管中)に挿入されているため、騒音による振動が検出器まで伝播してゆくという経路以外に、回転プラグ上の前置増幅器付近で混入する経路も考えられる。

この経路をとる雑音としては、<sup>(5)</sup>マイクロフォニック雑音が考えられる。この雑音は、機械的な振動が雑音に変換されるものの総称であり、接触面の抵抗値の変化、静電容量の変化、インダクタンスの変化、歪、応力、静電気などが雑音源となりうる。高利得の増幅器を使う電子装置では初段に近い部分で、この雑音を拾いやすい。また、ケーブル中のtriboelectric効果、つまり、同軸ケーブルが曲がったり、ねじられた時に、シールド絶縁材が分離して生じる摩擦電荷によっても、雑音が発生する。結局、前置増幅器および、それより前段の同軸ケーブルと



CH.1~9: NEUTRON FLUX MONITOR  
 M-1~3: MANHOLE  
 A,C,F : [5A2],[5C2] AND [5F2] IN-CORE  
 ACOUSTIC DETECTORS

Fig. 1 Reactor Pit



MIケーブルが、変換素子と同じ働きをしていることになる。

炉内音響信号の数百Hzのパワースペクトルのパターンが、炉内音響検出器ではなく、前置増幅器に依存していることと<sup>(4)</sup>か、炉内音響信号をスピーカで聞いていると、回転プラグ上で作業をしている物音が時々聞こえてくることから、前置増幅器および、それより前段の同軸ケーブルとMIケーブルで、振動が信号に変換されていることは確実である。そして、このような、検出器以外の部分で変換されて混入してくる雑音の、炉内音響信号に対する割合は、かなり多い可能性がある。しかし、炉内の音響を検出器以外の部分でも検出することは、本来、何ら問題はない。ただ「常陽」では、回転プラグ冷却用ブースタ・ファンの騒音が大きすぎるので、SN比を悪くする結果となっている。

#### 参考文献

- (1) 高速実験炉「設計及び工事の方法の認可申請書」 27
- (2) マグロウヒル科学技術用語大辞典 日刊工業新聞社
- (3) 課内のメモ 技-(55)-13
- (4) 高速実験炉「常陽」性能試験報告書 - 炉内音響監視 - PNC SN 941 79-227
- (5) 古谷勝美 「電磁雑音対策便覧」 第1編, 第1章