

「常陽」渦電流式温度流速計の炉内特性試験(I)

1981年4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ください。

〒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

Enquires about copyright and reproduction should be addressed to: Technology Management Section O-arai Engineering Center, Power Reactor and Nuclear Fuel Development Corporation 4002 Narita-cho, O-arai-machi, Higashi-Ibaraki, Ibaraki-ken, 311-13, Japan

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

## 「常陽」渦電流式温度流速計の炉内特性試験(I)

村松 寿晴\* 佐野 建一\* 池上 哲雄\*\*  
大谷 秀二\* 田村 誠司\*

## 要 旨

「常陽」中心燃料出口部に渦電流式温度流速計が設置されており、運転中の中心燃料集合体出口冷却材流速が測定できる。この情報は集合体毎に得られる出口Na温度情報と合わせて、炉内異常監視のための手法の1つとして活用される。

本報告書は、50 MW出力上昇試験時から75 MW定格第3サイクル終了時まで得られた流速計の性能について記したものである。

各種試験により得られた結果を以下に示す。

- (1) 不平衡残留電圧の正確な零調整を行なうことにより、1次系流量変化に対する流速信号の直線性および温度変化に対する流速信号への影響が、6%誤差内に納まる結果が得られた。
- (2) 不平衡残留電圧は、サイクル運転を行なうことにより大きな変化を起し、毎サイクル開始前に零再調整を行なう必要が生じた。(1サイクルについて約4%の変化)
- (3) 原子炉定常状態において、フルスケールの2%程度に相当する流速信号のドリフトが見られた。
- (4) 和信号がスクラム時のNa温度変化を、ほぼ時間遅れなく忠実に検出していることが確認された。
- (5) 相関法を用いて流速を計算した結果、設計流量より20%程度低い値を示した。

---

\* 大洗工学センター高速実験炉部技術課

\*\* 現FBR本部

In-Core experiment of eddy current type flow meter for "JOYO"

Toshiharu Muramatsu<sup>\*</sup>, Kenichi Sano<sup>\*</sup>  
Testuo Ikegami<sup>\*\*</sup>, Hideji Otani<sup>\*</sup>  
and Seiji Tamura<sup>\*</sup>

Abstract

Eddy current type flow meter has been installed above center of the core in "JOYO", to measure outlet sodium velocity of center channel. This information is applied, together with outlet sodium temperatures subassemblies, in monitoring the malfunction of the center subassembly.

This paper presents a study of flow measurements from the initial 50 MWt power ascension to the third cycle operation of 75 MWt power.

The results of the tests are as followings.

- (1) If an unbalance of the secondary coils is adjusted to zero, lineality of velocity vs. primary main flow and temperature dependency above the temperature of 350°C are obtained within error of 6%.
- (2) The unbalance signal must be adjusted prior to every cycle operation, because of its drift during the power operation.
- (3) On constant power operation, the flow signal drifts 2% of full scale.
- (4) It was confirmed that added signal detected temperature change with almost zero delay time.
- (5) The flow velocity obtained by cross-correlation method was approximately 20% less than the flow signal reading.

---

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

\*\* FBR Development Project.

## 「常陽」渦電流式温度流速計の炉内特性試験(I)

## 目 次

|                                     |   |
|-------------------------------------|---|
| 1. 緒 言 .....                        | 1 |
| 2. 渦電流式温度流速計 .....                  | 2 |
| 2.1 動作原理 .....                      | 2 |
| 2.1.1 流速測定 .....                    | 2 |
| 2.1.2 温度測定 .....                    | 2 |
| 2.2 「常陽」渦電流式温度流速計設備概要 .....         | 2 |
| 3. 試験方法 .....                       | 4 |
| 3.1 試験内容 .....                      | 4 |
| 3.1.1 流速計の流速信号特性 .....              | 4 |
| (1) 直線性および不平衡残留電圧 .....             | 4 |
| (2) 感 度 .....                       | 4 |
| (3) ノイズレベル .....                    | 5 |
| (4) 連続試験 .....                      | 5 |
| (5) 絶縁抵抗, 導通抵抗 .....                | 5 |
| 3.1.2 流速計の温度信号特性 .....              | 5 |
| (1) 直線性および感度 .....                  | 5 |
| (2) 応 答 性 .....                     | 5 |
| (3) ノイズレベル .....                    | 6 |
| 3.1.3 速応性熱電対の温度信号特性 .....           | 6 |
| 3.1.4 相関関数, コヒーレンス関数を用いた流速計較正 ..... | 6 |
| 3.2 測定方法 .....                      | 6 |
| 3.2.1 測 定 系 .....                   | 6 |
| 3.2.2 解 析 系 .....                   | 6 |
| 4. 試験結果と検討 .....                    | 7 |
| 4.1 流速計の流速信号特性 .....                | 7 |
| 4.1.1 直線性および不平衡残留電圧 .....           | 7 |
| 4.1.2 感 度 .....                     | 8 |
| 4.1.3 ノイズレベル .....                  | 8 |
| 4.1.4 連続試験 .....                    | 9 |
| 4.1.5 絶縁抵抗, 導通抵抗 .....              | 9 |

|       |                         |    |
|-------|-------------------------|----|
| 4.2   | 流速計の温度信号特性              | 10 |
| 4.2.1 | 直線性および感度                | 10 |
| 4.2.2 | 応答性                     | 10 |
| 4.2.3 | ノイズレベル                  | 10 |
| 4.3   | 速応性熱電対の温度信号特性           | 11 |
| 4.3.1 | ノイズレベルおよび応答性            | 11 |
| 4.4   | 相関関数, コヒーレンス関数を用いた流速計校正 | 11 |
| 4.5   | 結 言                     | 12 |
| 5.    | 謝 辞                     | 13 |
| 6.    | 参考文献                    | 14 |

## 1. 緒 言

高速実験炉「常陽」の炉心中心燃料集合体出口部に渦電流式温度流速計が設置されており、炉心中心燃料集合体の冷却材流速が測定される。この情報は、原子炉運転中の炉心部の挙動を知る一手段であり、燃料集合体毎の出口冷却材温度情報と合わせて集合体毎の熱流動的監視に用いられる。

また高速炉の場合、局所的流路閉塞は燃料ピンの溶融という重大事故につながるものであり、炉心の健全性を確認する上でも炉心燃料集合体出口での冷却材流速測定が必要とされている。

本流速計は、高温・高中性子束条件下での実用性を確認するために、試験的に設置したものである。

本報告書は、昭和53～56年に実施した出力上昇試験および定格サイクル運転中に得られた試験結果とその検討結果についてまとめたものである。

なお、本流速計は昭和56年1月に撤去され、もんじゅ用に開発された流速計が設置される予定である。

## 2. 渦電流式温度流速計

### 2.1 動作原理

#### 2.1.1 流速測定

渦電流式温度流速計の原理は良く知られているように、導電性流体の流速とそれに直交する交流磁界によって生じた渦電流が、もとの磁界に及ぼす影響(歪み)を、1次コイル(励磁コイル)に対して対称な位置に配置した2個の2次コイルで検出するものである。2個の2次コイル出力の差(すなわち差信号)は、励磁条件(電流の大きさと周波数)が一定でかつ導電性流体の導電率と透磁率が一定という条件の下では、流速にほぼ比例する。

Fig 2.1に原理図を示す。(本流速計は5コイル式であるが、簡単のために3コイル式流速計で話を展開する。)流体が静止している場合は1次コイルによって生じる渦電流は上左流側と下右流側で対称となり、各2次コイル出力の差は互いに打ち消し合って零となる。次に流体が左から右に流れている場合は、1次コイルによって流体中につくり出される磁場のうち半径方向成分 $B_r$ と流速 $V$ は直交するので、それらいずれの方向にも直角な方向に電界が生じ渦電流が流れる。この渦電流の大きさは流速に比例するが、上流側と下流側で $B_r$ の向きが逆であるから渦電流も逆向きに流れる。その結果磁場はFig 2.1に示すように下流側に歪むことになる。したがって流速によって生じる非対称な渦電流によって、上流側2次コイルを鎖交する磁束は減少して出力は低下し、これとは逆に下流側2次コイル出力は上昇する。前述したように1次コイルに対して対称な成分は各2次コイル出力の差をとることによって相殺されるため流速依存の出力のみが得られる。

#### 2.1.2 温度測定

渦電流式温度流速計は1次コイルによって非磁性導体中に流れる渦電流の大きさがほぼ非磁性導体の導電率によって決まり、導電率は温度と共に変化するので2個の2次コイルの出力の和(すなわち和信号)をとれば導体の温度に応じた出力が得られるという原理を利用している。原理的に熱電対などのような熱容量がないため、導体の温度変化に対する速い出力応答が期待される。ここで各2次コイル出力の和をとると、流速によって生じる非対称な出力は相殺されるので、温度信号のみが検出される。

### 2.2 「常陽」渦電流式温度流速計設備概要

本渦電流式温度流速計は5コイル型のものであり、炉心上部機構下端に設置され炉心中心燃料集合体出口部の冷却材流速を測定する。Fig 2.2, Fig 2.3に流速計の設置位置を示す。またFig 2.4に燃料集合体位置と検出器との位置関係を示す。燃料集合体のハンドリングヘッドより流出した冷却材は、ハンドリングヘッド頂部より30mm上部にある整流格子へ流れ込み、その中央部に設置された流速計で測定される。Fig 2.5に流速計の詳細を示す。また、流速計の主要仕様をTable 2.



2.1 に示す。

流速計は、渦電流式流速計と 3.2φ の C.A. ダブルエレメント・シース型熱電対から成り、これら 2 つの検出器は高温のナトリウム中で使用し得るように SUS 316 の保護管内に設置してある。渦電流式流速計検出部は、純鉄の巻棒に MI ケーブル(芯線はニッケル、絶縁物は MgO、シース材は SUS 316) を巻いたもので、検出器支持プラグ上部の MI ケーブル端末処理部まで同じケーブルを用いている。熱電対の先端には保護管との間に低温(126℃)で溶融する合金(Pb, Bi, Ni) を封入し、時定数 1.46 秒<sup>\*</sup>の応答性を持たせてある。この合金は流速検出器の巻棒とも接触させ、熱伝導によって  $\gamma$  加熱による巻棒の温度上昇を最小限に防いでいる。

Fig 2.6 に回路構成を示す。励磁回路(Exciter)では、発振器(Oscillator)からの 500 Hz の信号を増幅し 1 次コイルに負荷抵抗 0Ω ~ 750Ω の範囲で安定な交流電流 35mA<sub>p-p</sub> を供給している。2 つの 2 次コイル出力信号は、前置増幅器(Pre Amplifier)で約 40 dB(約 100 倍)の利得を得て加算回路(Adding Circuit)、減算回路(Subtracting Circuit)に入力される。減算回路には、位相制御回路(Phase Control Circuit)よりの信号も入力している。この信号は、Na 流速のない状態で減算回路出力に現われる電圧を、同振幅でかつ逆位相の電圧を加えることにより除去するためのものである。位相制御回路の特性を Fig 2.7 に示す。ここで演算された各信号は、500 Hz の帯域フィルターを通った後、整流されて割算回路(Dividing Circuit)に入力される。割算回路では、流速に対する差信号の出力曲線の傾きが温度上昇と共に大きくなり、和信号はほぼ温度に比例して増加することを利用して差信号を和信号で除することによって温度補償を行なっている。この温度補償後の信号と熱電対からの信号を 2 ペン記録計で連続記録する。

---

\* 納入前工場検査

### 3. 試験方法

#### 3.1 試験内容

##### 3.1.1 流速計の流速信号特性

##### (1) 直線性および不平衡残留電圧

プラント状態

|              | 流量変化時  | 温度変化時    |
|--------------|--------|----------|
| 1次系冷却材流量     | 0～100% | 100%     |
| S/A(000)出口温度 | 250℃   | 250～520℃ |

上記のプラント状態で測定を行ない、差信号および流速信号の直線性を評価する。また不平衡残留電圧(Na流速のない状態で流速信号出力に現われる電圧)を確認し、据付時のデータと比較して経時変化を評価する。

##### (2) 感度

プラント状態

|              | 流量変化時  |
|--------------|--------|
| 1次系冷却材流量     | 0～100% |
| S/A(000)出口温度 | 250℃   |

上記のプラント状態において1次コイル励磁周波数を200Hz, 500Hz, 1kHzに変化させ差信号および流速信号の感度を測定、評価する。

(3) ノイズレベル

プラント状態

|              | 流量変化時  | 温度変化時    |
|--------------|--------|----------|
| 1次系冷却材流量     | 0～100% | 100%     |
| S/A(000)出口温度 | 250℃   | 250～520℃ |

上記プラント状態において、流速信号に含まれる電気ノイズ(商用電源周波数、サイリスタノイズ、等)、流動ノイズの大きさ、周波数成分を調べ、流速信号への影響の程度を評価する。

(4) 連続試験

原子炉の定格出力運転に従って、主冷却系流量信号と同時に連続的に流速信号を測定し、両者の関連性を確認する。

(5) 絶縁抵抗、導通抵抗

1次コイルの絶縁抵抗及び導通抵抗の経時変化を評価するため、温度を250～520℃まで変化させ測定を行なう。

3.1.2 流速計の温度信号特性

(1) 直線性及び感度

プラント状態

|              | 流量変化時  | 温度変化時    |
|--------------|--------|----------|
| 1次系冷却材流量     | 0～100% | 100%     |
| S/A(000)出口温度 | 250℃   | 250～520℃ |

上記プラント状態において、流速計温度信号と内蔵速応性熱電対信号を測定して流速計温度信号の直線性及び感度を求め、内蔵速応性熱電対を基準として流速計温度信号の流速依存性を評価する。

(2) 応答性

原子炉スクラム時のデータから流速計温度信号の応答性を調査する。

## (3) ノイズレベル

## プラント状態

|              | 流量変化時  | 温度変化時    |
|--------------|--------|----------|
| 1次系冷却材流量     | 0～100% | 100%     |
| S/A(000)出口温度 | 250℃   | 250～520℃ |

上記プラント状態において、電気ノイズ、温度ノイズの大きさ、周波数成分を調べ、温度信号への影響の程度を評価する。

## 3.1.3 速応性熱電対の温度信号特性

## (1) ノイズレベル及びレスポンス

隣接集合体出口計装熱電対と共に、ノイズレベルの周波数成分を調べ、温度ノイズ、電気ノイズの区別、レスポンスの差を評価する。

## 3.1.4 相関関数、コヒーレンス関数を用いた流速計較正

相関関数およびコヒーレンス関数を用いて、S/A(000)出口Na流速を計算し、妥当性を検討する。

## 3.2 測定方法

## 3.2.1 測定系

各試験項目においてデータを磁気テープに記録する場合には、Fig 2.7に示す測定系を使用した。

## 3.2.2 解析系

上記測定系により記録した信号は、オフラインでパワースペクトル及びコヒーレンス等を求めた。解析手法は主に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 $\Delta T$ 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通して周波数解析を行なった。

## 4. 試験結果と検討

### 4.1 流速計の流速信号特性

#### 4.1.1 直線性および不平衡残留電圧

本流速計納入時より撤去時までの間に不平衡残留電圧を除去するために、ほぼ毎定格サイクル開始前に調整を行なってきた。その経過をTable 4.1.1に示す。Table内には、Case 3とCase 6以外は、1次系流量が完全に零になっていない状態で調整を行なったため、信頼できるデータは得られなかった。このため、本報告書内においては、Case 3とCase 6のデータを主に用いて話を展開する。

1次系冷却材流量変化に対する差信号特性および流速信号特性をそれぞれFig 4.1.1, Fig 4.1.2に示す。図中において「●」印で表わしてある1/18, '80のデータが、この時点における状態で不平衡残留電圧が零となるように位相制御回路を調整した直後のものであり、直線性は差信号のフルスケールに対し±5%以内、また流速信号に対しては±6%以内で直線近似可能である。<sup>(1)</sup> 一般に流速信号 $E_o$ は、式(4.1)により表わされる。

$$E_o = \epsilon_v(f, T) \times \vartheta + E_{OF}(f, T) \dots\dots\dots (4.1)$$

ここで  $\epsilon_v$  : 流速信号の検出感度

$\vartheta$  : Na 平均流速

$E_{OF}$  : 不平衡残留電圧

$\epsilon_v$ と $E_{OF}$ は、励磁周波数 $f$ とNa温度 $T$ の関数であり、 $f$ と $T$ が一定である場合には、 $E_o$ に一定の $E_{OF}$ が付加されることになる。 $E_{OF}$ の零調整作業を行なう際には、電気雑音混入を極力避けるために差信号(減算回路出力信号)を用いており、位相制御回路のphase (potentiometer)により、差信号レベルが最小になる設定を捜す。その後gain (potentiometer)により、差信号レベルが最小になる設定を行なう。この作業時には、差信号レベルよりも計装回路よりの電気雑音レベルの方が相対的に大きくなり、この雑音レベル以下での設定であるために、設定誤差が存在すること、また崩壊熱による自然循環によって正確な流量零状態にならない条件で設定を行なうことによる誤差の存在は、防ぐことはできない。したがって、これら誤差要因のために $E_{OF}$ が完全な零とはならず、真の流速に一定の $E_{OF}$ が付加される。

「●」印のデータが完全な直線にならないことに関しては、温度上昇要因(ポンプ運転による入熱と崩壊熱)と温度降下要因(ポンプ運転による熱除去)のバランス変化により、集合体出口Na温度が変化を起し(Fig 4.1.1上図)、この変化により前述した不平衡残留電圧零調整時の誤差が存在するために $E_{OF}$ が変化すること、また $\epsilon_v$ が変化することが原因として考えられる。

図中の「○」印と「△」印は、1/18, '80に位相制御回路の調整を行なって得られた1サイクル後と3サイクル後に同じ調整値に設定を行なって得られたデータである。これら差信号および流速信号は、1/18, '80のデータと比較して不平衡残留電圧と直線性に有位な差がみられる。この

変化の原因として先に述べたプラント状態の違いに伴う測定条件の差違等に加え、原子炉運転停止に伴う熱サイクルにより検出コイルの相対位置に変化が現われたことが考えられる。Fig 4.1.2 中の「□」印は、本流速計納入時のものである。

Fig 4.1.3, Fig 4.1.4 は、温度変化時の差信号特性および流速信号特性を示すものである。図中で示す印の意味は、Fig 4.1.1 と同じである。ここで温度補償を行っていない差信号については、どの温度領域についても当然のことながら温度依存性が確認される。流速信号については、320°C~360°C付近のNi キュリーポイントの領域を除いて、ほぼ後述する和信号による温度補償がなされており、原子炉運転中の温度領域である370°C以上では使用上問題はなく、370°C以上のデータの平均値からのズレは約2%以内に納まる。

「●」印のデータから1サイクル経過した時点の「○」印のデータで、差信号については感度に変化がみられ、流速信号については温度補償の効果が全く見られない。温度補償特性に寄与するパラメータとしては式(4.1)内の $E_0$ のみが対象となる。 $E_{OF}$ は、1次系流量零状態で完全に除去されていないと温度上昇に伴って増加を示すことになる。つまり、1/18, '80の流速信号は、位相制御回路により不平衡残留電圧零調整を行なった直後の出力上昇であったため、 $E_{OF}$ は温度上昇を行なっても増加を示さず、和信号による温度補償で温度依存性は除去された。しかし、1サイクルを経た5/8, '80の時点では、前述した不平衡残留電圧変化により、この電圧が現われてくるため温度上昇により電圧も増加するので和信号による温度補償では温度依存性を除去できない。したがって、 $E_{OF}$ の温度関数が明らかになれば差信号から各温度での $E_{OF}$ を差引いた値を和信号で割ることにより温度依存性のない流速信号が得られるものと思われる。

#### 4.1.2 感 度

1次コイルの励磁周波数 $f$ を200Hz, 500Hz, 1KHzに変化させた場合の差信号特性および流速信号特性をそれぞれFig 4.1.5, Fig 4.1.6に示す。本流速計の規格仕様は、励磁周波数500Hz, 励磁電流35mA<sub>p-p</sub>であり、これらの図より低温時における感度に関しては500Hzよりも200Hzの方が良好であるが、直線性については500Hzの方が良好である。

ON-POWER状態では流量は変えられないため高温時におけるデータは測定されていないが、最適感度はNa温度上昇と共に高周波側に移行するため、常陽75MW出力運転時のS/A(000)出口Na温度においては、Fig 4.1.7に示した炉外校正試験結果が示すように200Hzよりも500Hzにおける感度の方が良好になるであろうことが予想される。低温時におけるデータのみの据付時からの経時変化は、感度に大きな変化を与える程のものは起っていないと判断できる。

#### 4.1.3 ノイズレベル

1次系流量変化における流速信号の周波数解析結果をFig 4.1.11(a)に示す。この解析を実施する際、高周波雑音によるエイリアシングを防ぐため磁気テープから解析装置にデータを入力する前に0.0625~6.25Hzのバンドパスフィルタを通した(実際には、テープ再生速度を8倍にし0.5~50Hzのバンドパスフィルタで処理した。)図中で注意すべき点として、1次系流量零状態

における1Hz～6Hz, および18%流量状態における3Hz～6Hzの帯域については, フラットなスペクトルが表われているが, このレベルは解析装置の解析限界レベルであり, 実際にはこのレベル以下の値であるということである。1次系流量が増加するに従い全体のスペクトルレベルが上昇しており, 特に3Hz～6Hzの信号の上昇が著しい。これらは, 流量が増加するに従い燃料集合体内で発生する乱流が増加する傾向が表われているものと思われる。崩壊熱による自然循環を考慮する必要があるが, 一応流れがないとされる1次系流量零状態における結果から流れによるもの以外の信号を見ることができる。

図より, 1次系流量18%, および燃料交換モード時の20%以上の流量状態においては, 流速信号へのノイズ混入による影響は問題とならない。

温度変化における流速信号の周波数解析結果をFig 4.1.11(b)に示す。図中でわかるように, どの温度状態においても, ノイズ的なピークは存在せず流速信号検出に与える影響は問題ない。

#### 4.1.4 連続試験

Fig 4.1.12, Fig 4.1.13に75MW定格出力に到達した時点から10日間の流速信号の傾向をS/A(000)出口Na温度および1次系流量と共に示した。これら図中の1ポイントはチャートデータからの12時間の平均値であり, それぞれ75MW定格第1サイクル, 第2サイクルのものである。1次系流量は, セルピウス一定制御であり約 $10\text{m}^3/\text{h}$ の範囲で変動しているが, それに追従する流速信号の変化は確認できない。平均化された流速信号は, フルスケールの約2%の範囲で変動しており, この2%の変動は, S/A(000)Na流速で約2～3cm/secに相当する。センターチャンネルの発熱は, プロットしている期間程度では一定と考えることができるため, この2%の流速変動が発生すればS/A出口Na温度に変化が見られるはずであり, この傾向が図中で確認できないことから, 流速変動は集合体で実際には発生していないものであることが推定される。両図で流速信号レベルに差が見られるのは, Case 4の不均衡残留電圧零調整時に1次系流量が完全に零状態になっていない条件で調整を行なったためである。

#### 4.1.5 絶縁抵抗, 導通抵抗

Fig 4.1.14, Fig 4.1.15に温度変化時の導通抵抗, 絶縁抵抗の変化傾向を示す。Fig 4.1.14の導通抵抗については, サイクルを経るに従い増加傾向を示している。一般に金属は, 中性子および重荷電粒子照射により格子欠陥を起し電気抵抗が増加を示すことが知られており, 本流速計もこの効果として導通抵抗増加を説明することが可能であろう。

流速計装荷位置における75MW時中性子束は<sup>(2)</sup> $1.47 \times 10^{11} \text{ n/cm}^2 \cdot \text{sec}$ であり, 流速計納入時より4/15, '80までの積算量(フルエンス)は,  $2,000 \times 10^{18} \text{ n/cm}^2$ , 8/29, '80までは,  $3,020 \times 10^{18} \text{ n/cm}^2$ である。導通抵抗増加の原因の1つが中性子照射によるものと仮定した場合, 導通抵抗変化が中性子束積算量に依存していることは明らかであり, 長期間使用中に流速検出に影響を及ぼす可能性は十分あり得る。

Fig 4.1.15の絶縁抵抗は, 温度が上昇するに従って減少してゆく傾向にある。しかし, 経時

変化については有位な差は見られず、絶縁は十分である。

## 4.2 流速計の温度信号特性

### 4.2.1 直線性および感度

Fig 4.2.1 に 1 次系流量変化時の和信号特性を示す。ここで和信号は、1 次系流量増加に伴ないわずかな上昇傾向を示している。直線性として、1/18, '80 に位相制御回路の設定を行なった時点のものは、良い傾向を示している。1/18, '80 から 1 サイクルおよび 2 サイクルを経た時点のものも流量増加に対しわずかな上昇傾向を示しており、直線性は、1/18, '80 のものより多少悪くなっている。

上図の熱電対信号が流量上昇と共に減少傾向を示しており、本来ならば、これに追従すべき和信号は上昇を示している。ここでサイクルを経るに従って増加する DC 成分は、不平衡残留電圧の増加によるものと解釈すると、S/A 出口 Na 温度 5 ~ 6 °C の変動では、和信号による温度補償特性は変化しないものであることが予想される。

Fig 4.2.2 に温度変化に対する和信号特性を示す。ここで「●」印、「○」印ともかなりの直線性を有しており、前述した 5 ~ 6 °C の不感幅を考慮すれば、数%以内で近似できる。両者の DC 成分の差は、不平衡残留電圧の違いによるものであろう。

Fig 4.2.3 は、1 次系流量変化時に励磁電流 35 mA<sub>p-p</sub> 一定で励磁周波数を 200 Hz, 500 Hz および 1 KHz に設定した場合の和信号特性であり、DC 成分の違いが表われているのみで直線性、感度には有位な差は見られない。

### 4.2.2 応答性

Fig 4.2.4 に原子炉スクラム時の和信号等のデータを示す。また、Fig 4.2.5 に計装回路の時定数測定時のデータを示す。計装回路時定数の測定方法は、加算回路および減算回路に外部発振器からの 500 Hz 模擬信号を入力しておき、この信号を切った後の加算回路出力信号、減算回路出力信号および割算回路出力信号を電磁オシロで観測するものである。

燃料集合体出口 Na 温度は、スクラムによって完全なステップ状変化を起こすのではなく、ある時間遅れを持った 1 次遅れに近い応答を示すと考えられる。和信号の温度検出原理の温度変化に対する導電率の変化を信号として用いているため、熱容量がなく、スクラム時の Na 温度変化をほぼ時間遅れなく忠実に検出しているものと思われる。

計装回路の時定数は、加算回路で 12.5 m sec, 減算回路で 14.0 m sec, 割算回路で 15.0 m sec であり、スクラム時の応答を検出する上では問題とならない時間であろう。

### 4.2.3 ノイズレベル

温度変化時および 1 次系流量変化時における和信号の周波数解析結果を、それぞれ Fig 4.2.6 (a), Fig 4.2.6 (b) に示す。ここでの解析方法は、流速信号のノイズレベルを解析する時と同じであり、エイリアシングの混入を防止している。Fig 4.2.6 (a) の温度変化時の結果で、どの温度に



対しても約 5.4 Hz 付近にピークが見られる。また、測定レンジ全域に渡って温度上昇に従いスペクトルレベルが減少している。この 5.4 Hz 付近のピークについては現在検討中である。Fig 4.2.6(b)の 1 次系流量変化時の結果では、約 2.0 Hz 付近にピークが見られ、流量が上昇するに従いスペクトルレベルも増加している。この 2.0 Hz 付近のピークは、どの流量状態においても同レベルであることから、電気ノイズによるものと思われる。

#### 4.3 速応性熱電対の温度信号特性

##### 4.3.1 ノイズレベルおよび応答性

溶融金属を封入し速応性を持たせてある S/A(000)熱電対の温度変化時における周波数解析結果を Fig 4.3.1(b)に示す。また、溶融金属を用いていない S/A(1A1)熱電対の解析結果を Fig 4.3.1(b)に示す。両図とも、約 1 Hz 以上では解析装置の解析限界レベル以下の値であり、電気ノイズによる影響は見られない。

Fig 4.3.2 にスクラム時の S/A(000), S/A(1A1), S/A(2A1), 中性子束 ch 8 の挙動を示す。

温度信号  $S(t)$  は、

$$S(t) = C_1 + C_2 \quad (t < T_D)$$

$$S(t) = C_1 + C_2 \cdot \exp\left(-\frac{t - T_D}{T_c}\right) \quad (t \geq T_D)$$

ここで、 $C_1, C_2$  : 定数

$t$  : 経過時間

$T_D$  : 不感時間

$T_c$  : 時定数

の形で近似できるとして、スクラム開始を 0 とおいた経過時間において温度信号をこの式にフィッティングした結果を Table 4.3.1 に示す。なお、フィッティング方法は目視によるものであるため誤差が存在する。先にも記したように、燃料集合体出口 Na 温度はスクラムに対して完全なステップ状変化を示すのではなく、ある時間遅れを持った 1 次遅れに近い応答を示すと考えられる。和信号は、集合体出口 Na 温度を不感時間、時定数ともほぼ 0 に近い速さで検出していると仮定できるので、この信号を基準として熱電対信号の応答を算出したものが Table 4.3.2 である。

#### 4.4 相関関数、コヒーレンス関数を用いた流速計較正<sup>(3)</sup>

ラッピングワイヤおよび集合体ハンドリングヘッドの構造より発生すると思われる冷却材乱流(流動ゆらぎ)は、流速計出力に微妙な時間的不規則信号(ゆらぎ信号)をもたらすので、流れに沿った 2 つの観測点でゆらぎ信号を観測し、両者の相互相関またはコヒーレンスを求めれば、流れに乗った流動ゆらぎが 2 点間を移行する時間が得られる。流動ゆらぎの移行速度が流体の速度と一致もし

くは比例関係にあれば、観測した流動ゆらぎの移行時間は流速に逆比例すると予想される。ここで観測点間の実効距離が与えられれば、これを移行時間で割ることによって流動ゆらぎの移行時間が求まる。

この手法を本流速計に適用し、中心集合体出口部でのNa流速の計算を行なった。この計算結果をFig 4.4.1に、また、相互相関およびコヒーレンス処理結果をFig 4.4.2～Fig 4.4.9に示す。Fig 4.4.1に示した相互相関およびコヒーレンスにより計算した流速データ中で、1次系流量50%前後で傾きが両者とも変化を起している。これについては現在検討中であるが、50%を堺として2つの領域に分けて直線近似を行なうと良い直線性が得られる。また、設計流速(設計流量よりの計算結果)と比較すると相関法により算出した値が平均20%程度低い値を示す。

5コイル式流速計の2つの2次コイル信号は、原理上逆相であるためコヒーレンス関数計算時の位相については、0Hz時に $180^\circ$ を示すべきものである。しかし、Fig 4.4.3～Fig 4.4.9で示した位相については $0^\circ$ を示しているものが多い。この結果については、現在検討中である。

#### 4.5 結 言

原子炉の運転停止に伴う熱サイクルにより、流速計検出コイルの相対位置が変化を起す可能性がある。温度を高温状態から降下させた場合、もとの検出コイル位置に戻る可能性は小さいと考えられる。このため、各運転サイクル開始前に毎回不平衡残留電圧の零調整を行なう必要がある。この零調整が完全に行なわれていない場合には、流速信号の直線性、感度および温度補償特性に大きな影響を与え、また、可能な範囲で十分調整を行なっても定格出力定常状態で2%程度の流速信号のドリフトが見られる。これらの現象は、炉心が正常であるか異常であるかの判定を行なう上でも大きな障害となるものであり、局所流路閉塞を早期に発見するための検出器の1つとしては、不十分な性能である。したがって、不平衡残留成分の零調整方法の開発が必要であり、また、不平衡残留電圧の温度、周波数依存の関数を明確に把握しておくことが必要であろう。

なお、当流速計は昭和56年1月に常陽の炉心より取外す。その後もんじゅ用に開発された3コイル式の渦電流式流速計が同位置に装荷され、各種プラント状態における実証試験を実施する計画である。

## 5. 謝 辞

本報告書をまとめるにあたり、終始御指導頂いたナトリウム技術開発室、中本香一郎副主任研究員、石井清和氏に感謝の意を表します。

## 6. 参 考 文 献

- (1) 中本, 大山, "渦電流式温度流速計の特性試験II", PNC資料  
SN941 77-55 (1977年3月)
- (2) 関口, 鈴木, "高速実験炉「常陽」性能試験報告書, 炉体まわり遮蔽特性(ST-21)",  
PNC資料 SN941 79-111 (1979年7月)
- (3) 中本, 石井, "流動ゆらぎ相関法による渦電流式流速計現場校正法の研究(I)",  
PNC資料 SN941 79-216 (1979年11月)

Table 2.2.1 Main specification of eddy current type flow meter for "JOYO"

| Item  | Specification  |
|---|--|
| <p>Type</p> <p>Size</p> <p>Material : bobbin</p> <p style="padding-left: 20px;">: coil</p> <p style="padding-left: 20px;">: insulator</p> <p style="padding-left: 20px;">: lead wire</p> <p>Thermocouple<br/>(mounted inside the bobbin)</p> <p>Operation condition</p> <p style="padding-left: 20px;">: temperature</p> <p style="padding-left: 20px;">: pressure</p> <p style="padding-left: 20px;">: exciting current</p> <p style="padding-left: 20px;">: sodium velocity</p> | <p>Eddy current with 5 coils type</p> <p>Bobbin : 21.5mm O.D.x86.0mm L</p> <p>Fe</p> <p>Ni</p> <p>MgO</p> <p>MI cable</p> <p>3.2<math>\phi</math> sheathed C.A. type<br/>(double element)</p> <p>less than 650<math>^{\circ}</math>C</p> <p>0.5 kg/cm<math>^2</math>·G max.</p> <p>35mA<sub>p-p</sub> (500 Hz)</p> <p>0.1 ~ 3.0 m/sec.</p> |
| Gain of pre amplifier   | $\cong$ 40dB   |

Table 4.1.1 Change of the phase control circuit condition

| Case No. | Setting date. | Gain                | Phase               | Memo  |
|----------|---------------|---------------------|---------------------|---|
|          |               | Potentiometer value | Potentiometer value |   |
|          |               | (mVp-p)             | (deg.)              |   |
| 0        | 3/8, '78      | 0.472               | 9.273               | at delivery                                       |
|          |               | 8.00                | -5.10               |   |
| 1        | 8/6, '78      | 0.550               | 8.920               | 75MW power up test period                         |
|          |               | 9.37                | -19.20              |   |
| 2        | 11/21, '79    | 0.655               | 8.375               | Annual inspection period                          |
|          |               | 11.21               | -27.43              |   |
| 3        | 1/18, '80     | 0.780               | 8.825               | First cycle of 75MW power operation period        |
|          |               | 13.40               | -20.13              |   |
| 4        | 5/8, '80      | 0.775               | 8.800               | Under second cycle of 75MW power operation period |
|          |               | 13.31               | -21.37              |   |
| 5        | 7/16, '80     | 0.788               | 8.464               | Under third cycle of 75MW power operation period  |
|          |               | 13.54               | -28.29              |   |
| 6        | 10/23, '80    | 0.900               | 8.820               | Before removal                                    |
|          |               | 15.50               | -20.70              |   |

(Polarity of phase control circuit is all negative.)

**Table 4.3.1 Response Time of Added Signal and thermocouple signal (scram = 0 sec.)**

| Signal                 | Dead Time (s) | Time constant (s) |
|------------------------|---------------|-------------------|
| Added Signal           | 1.5 ± 0.5     | 5.3 ± 0.5         |
| S/A Outlet Temp. (000) | 2.5 ± 0.5     | 7.4 ± 0.5         |
| " (1A1)                | 3.0 ± 0.5     | 11.2 ± 1.0        |
| " (2A1)                | 3.0 ± 0.5     | 14.2 ± 1.0        |

**Table 4.3.2 Response Time of Thermocouple Signal (Response of added signal = 0 sec)**

| Signal                 | Dead Time (s) | Time constant (s) |
|------------------------|---------------|-------------------|
| Added Signal           | ~ 0.0         | ~ 0.0             |
| S/A Outlet Temp. (000) | 1.0 ± 1.0     | 2.1 ± 1.0         |
| " (1A1)                | 1.5 ± 1.0     | 5.9 ± 1.5         |
| " (2A1)                | 1.5 ± 1.0     | 8.9 ± 1.5         |

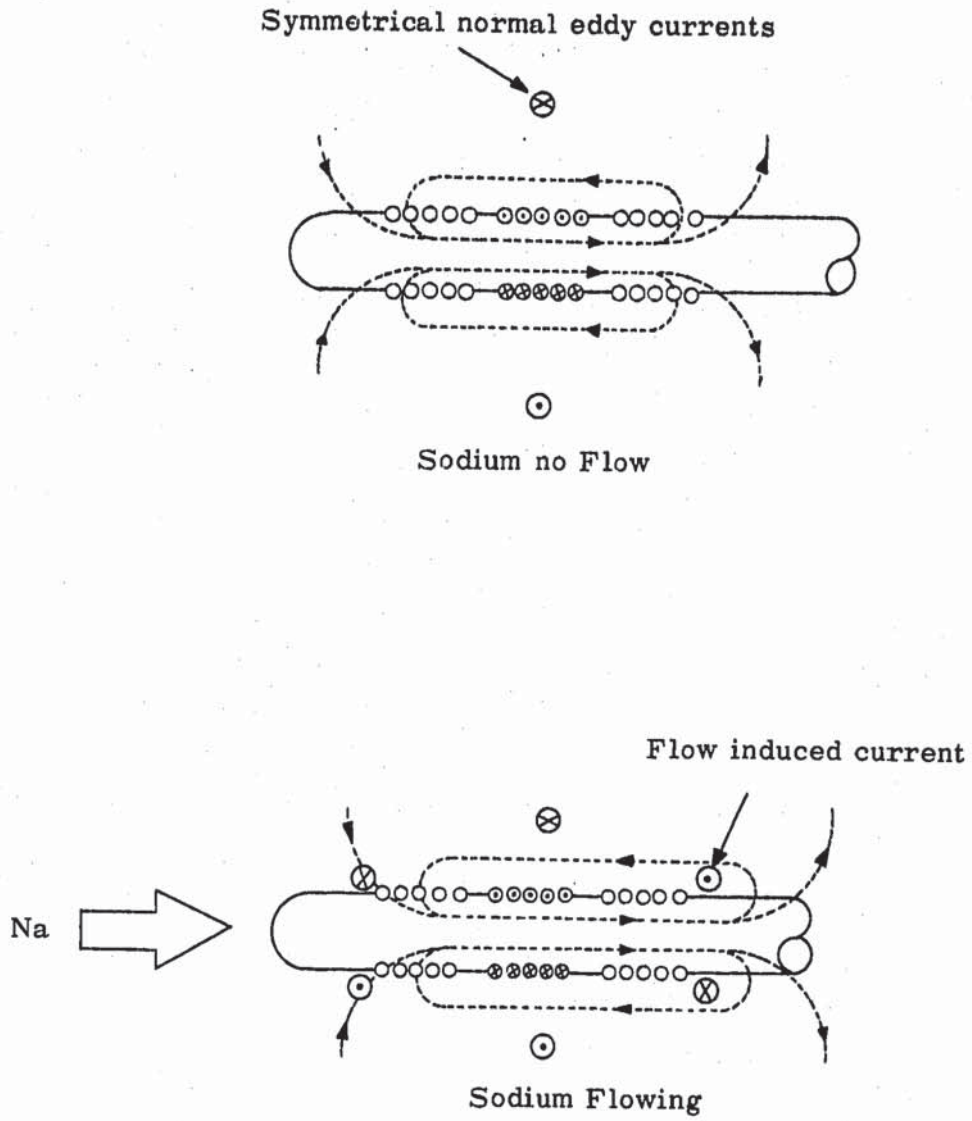


Fig. 2.1 Principle of Flowmeter



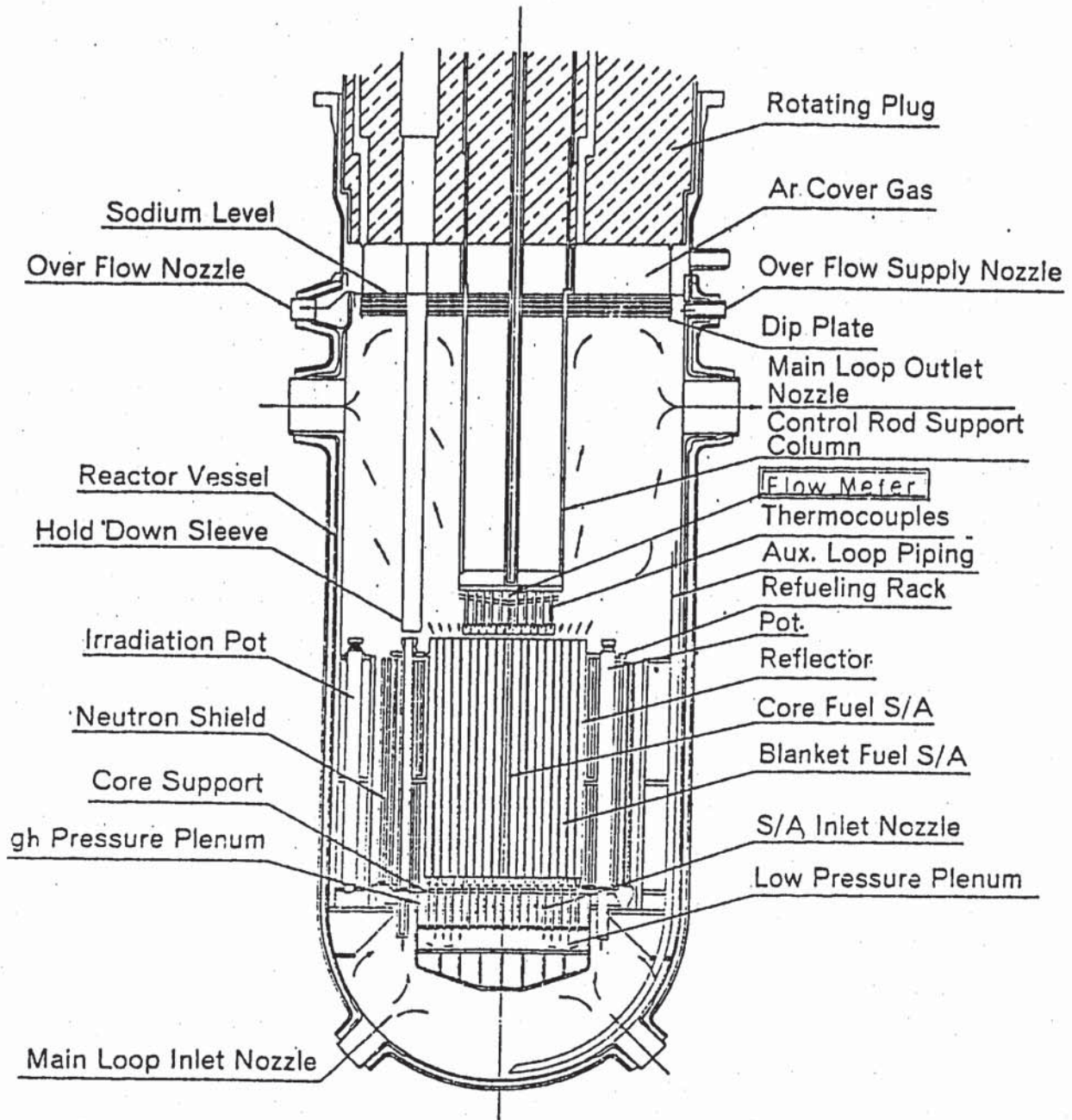


Fig. 2.2 Cross section of reactor vessel



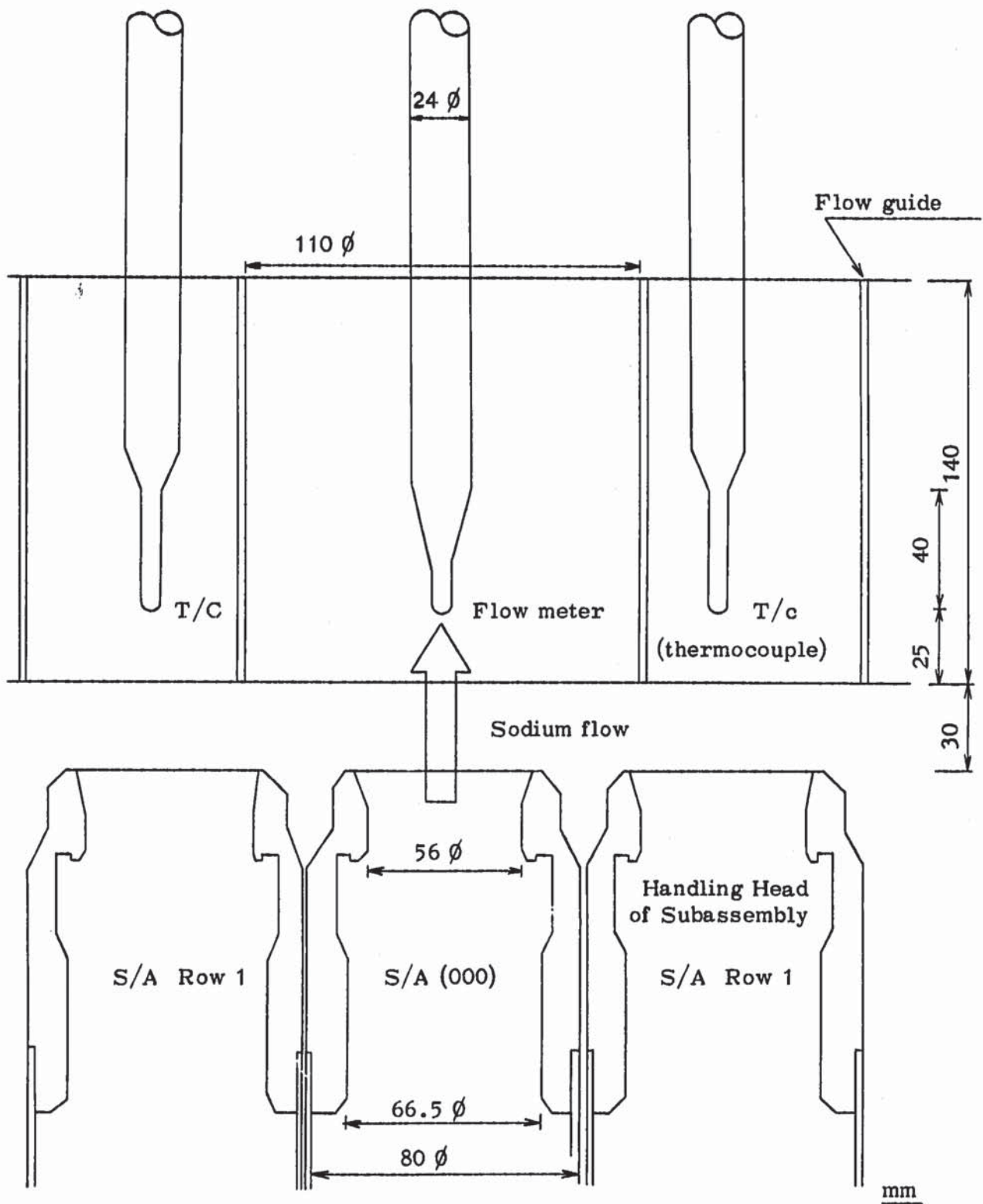


Fig. 2.4 Relative location of flow meter and T/C against subassemblies

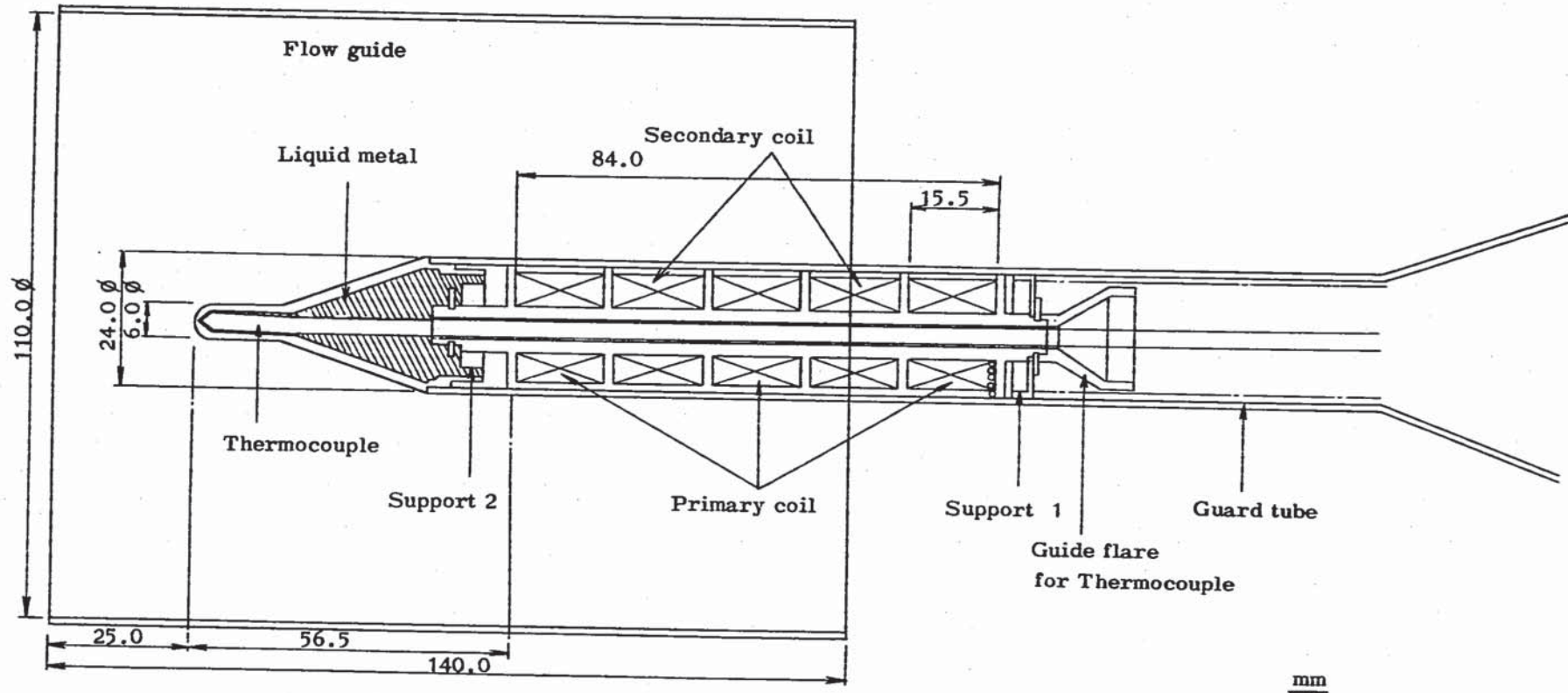


Fig. 2.5 Configuration of eddy current type flow meter

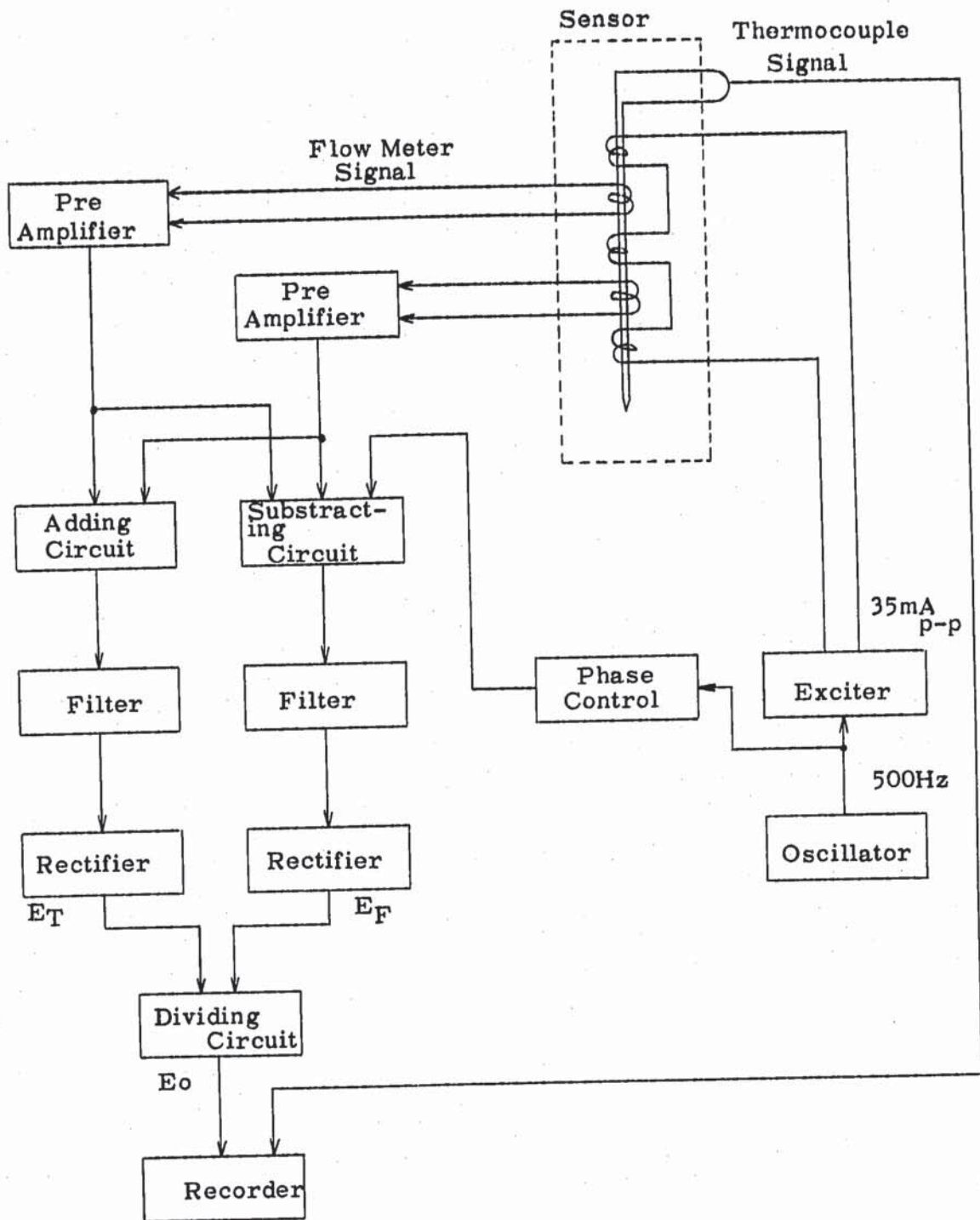


Fig. 2.6 Block diagram of S/A outlet flow monitoring system

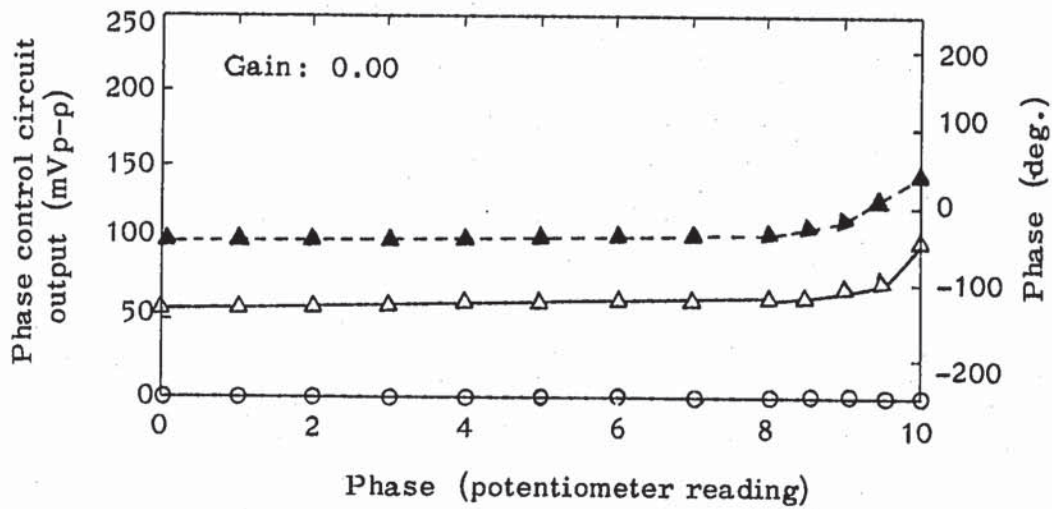
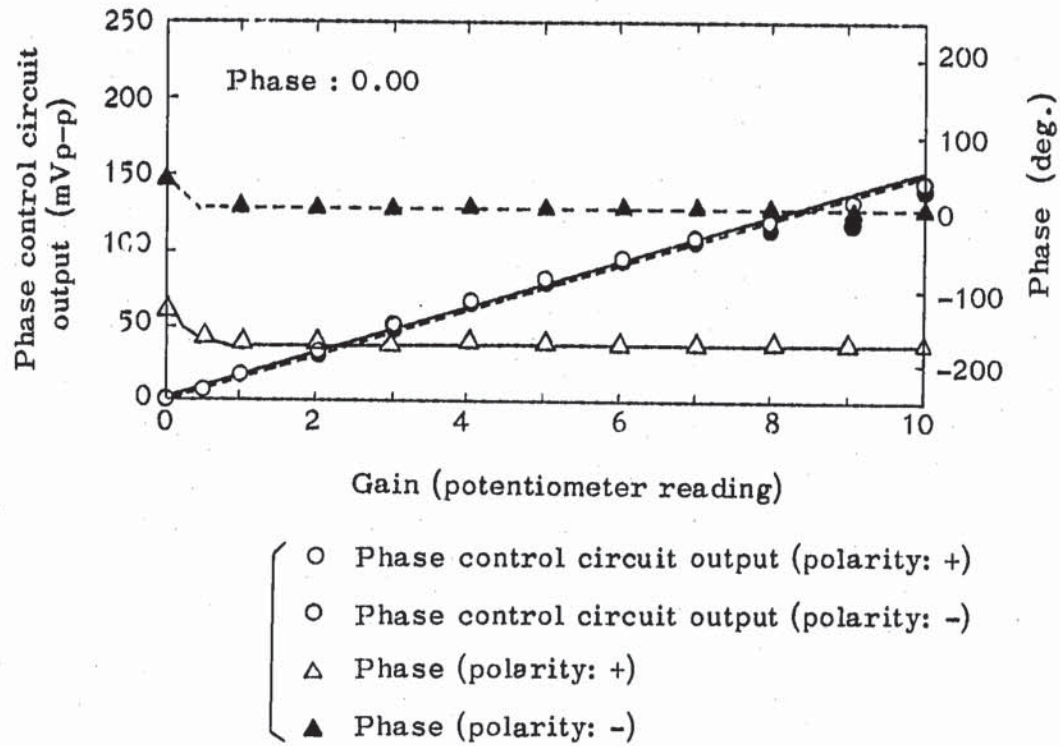


Fig. 2.7 Characteristic of phase control circuit

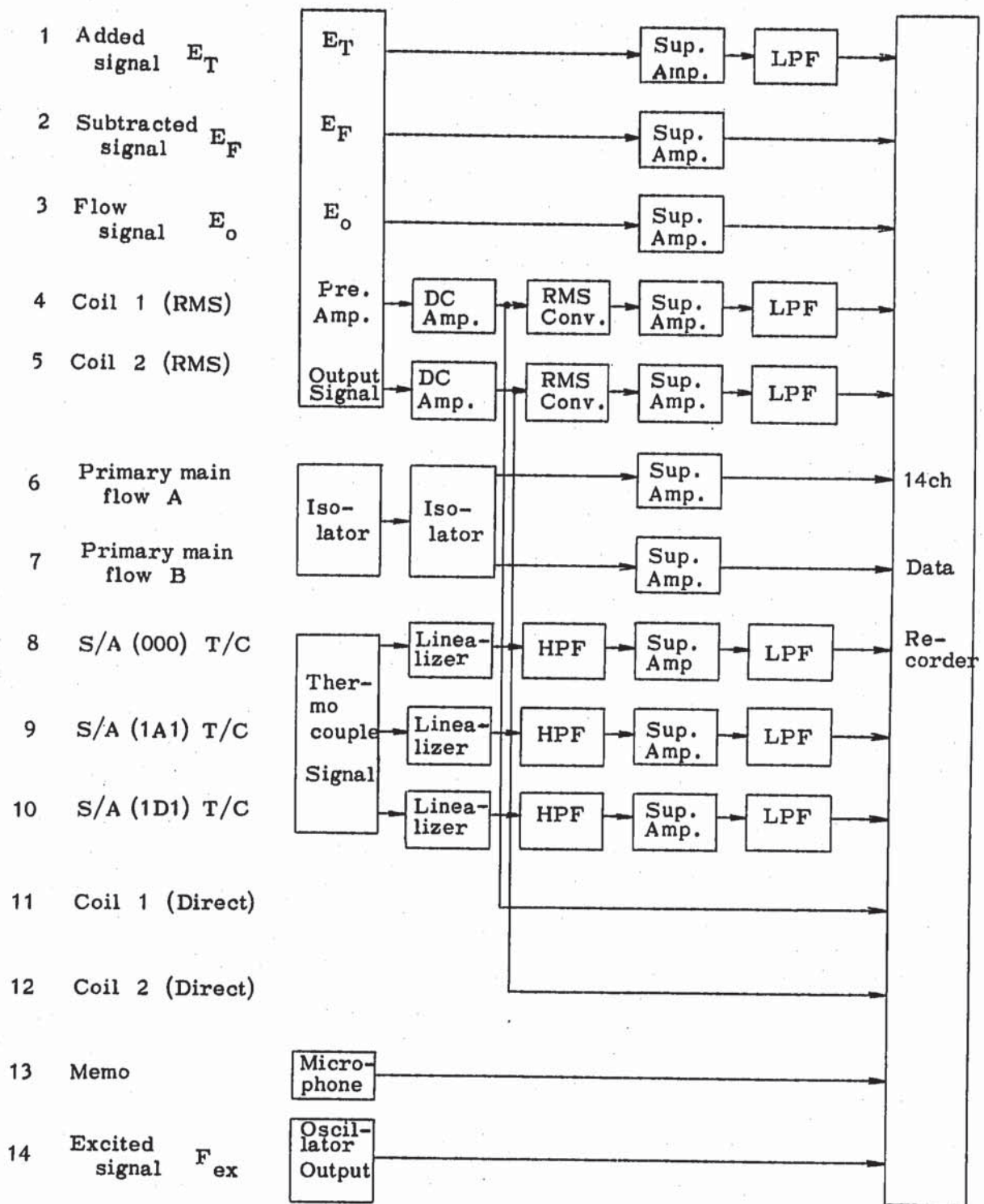


Fig. 2.8 Block diagram of measuring system

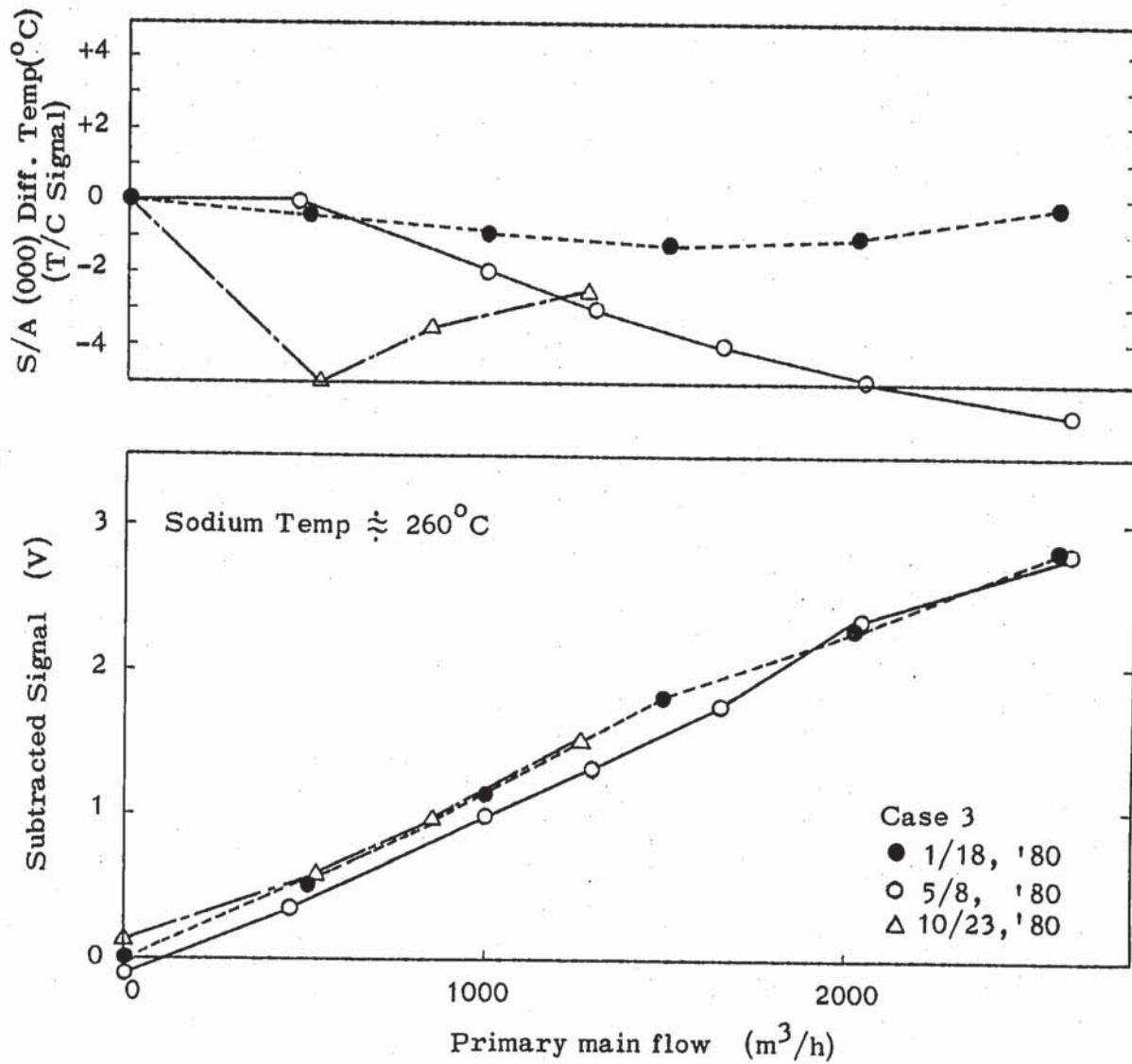


Fig. 4.1.1 Subtracted signals of the S/A (000) flow meter vs. primary main flow



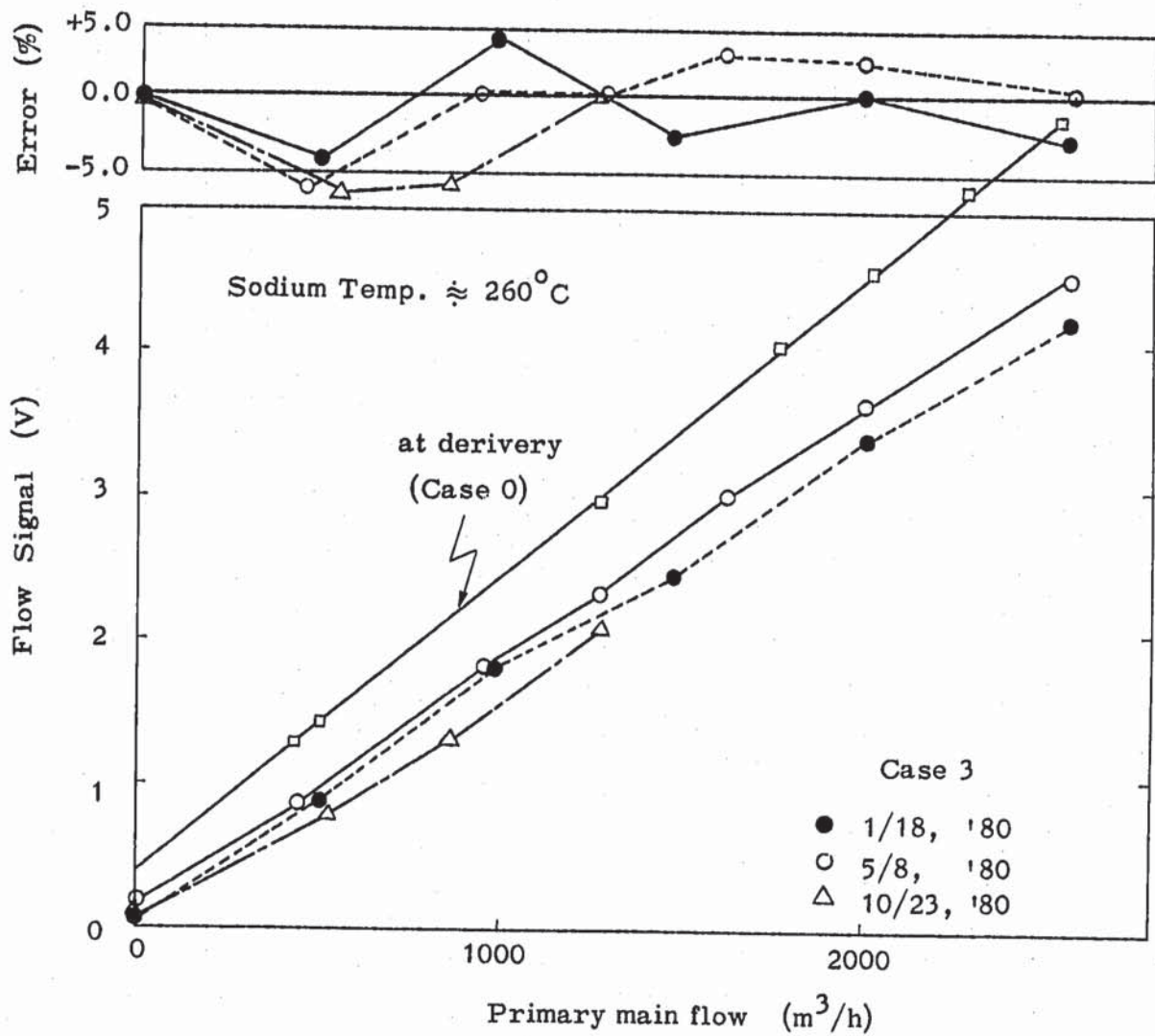


Fig. 4.1.2 Flow signals of the S/A (000) flow meter vs. primary main flow

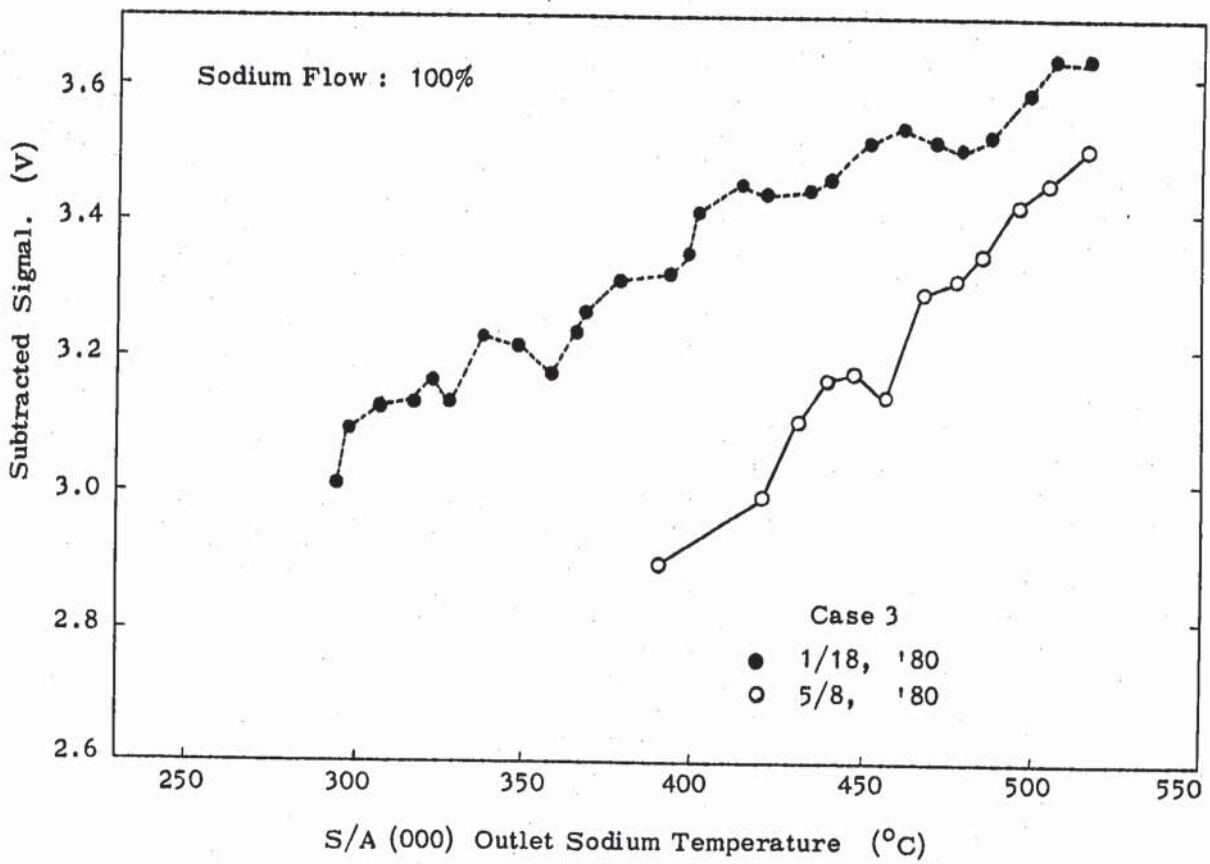


Fig. 4.1.3 Subtracted signals of the S/A (000) flow meter vs. outlet sodium temperature.

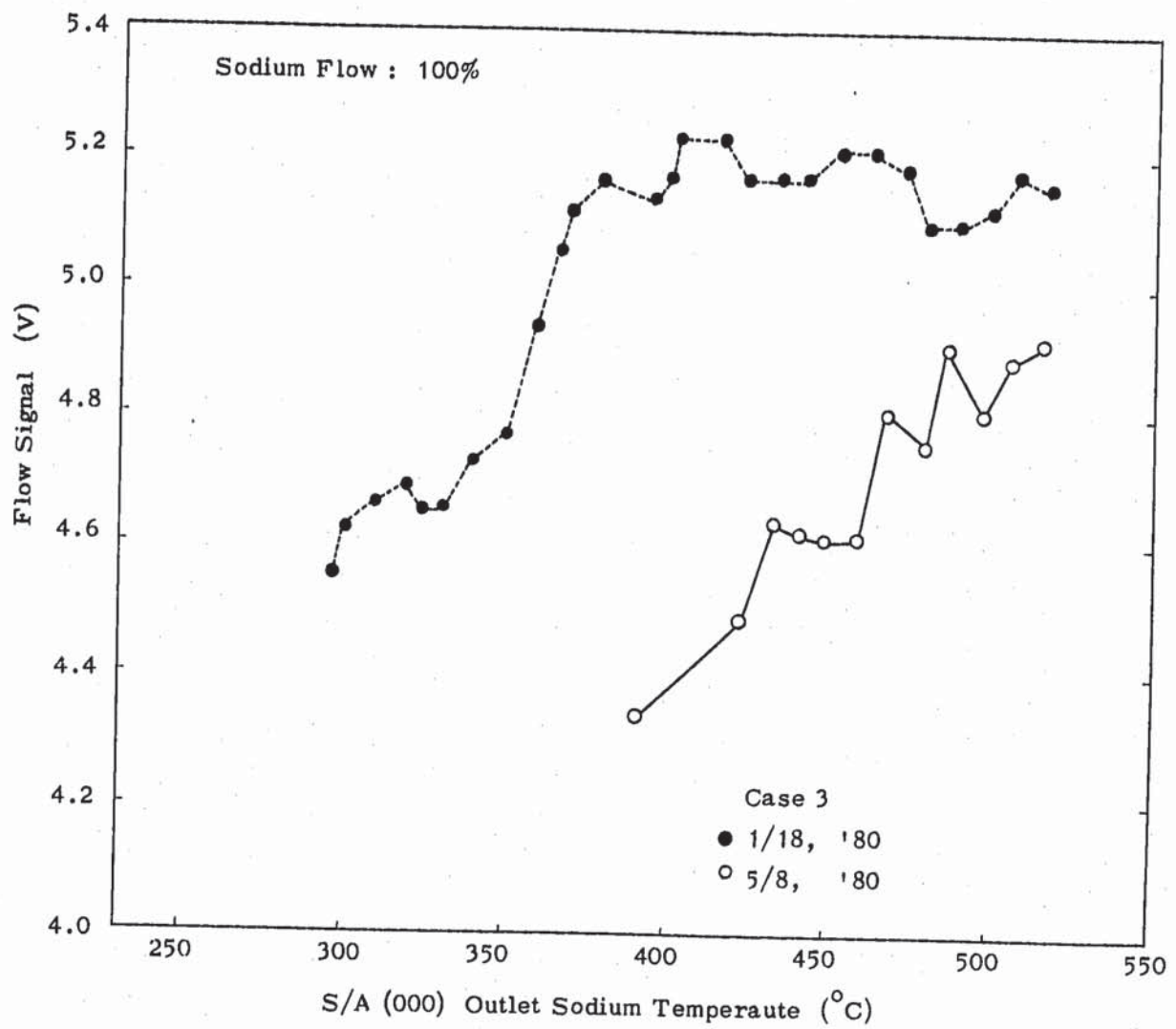


Fig. 4.1.4 Flow signals of the S/A (000) flow meter vs. outlet sodium temperature.

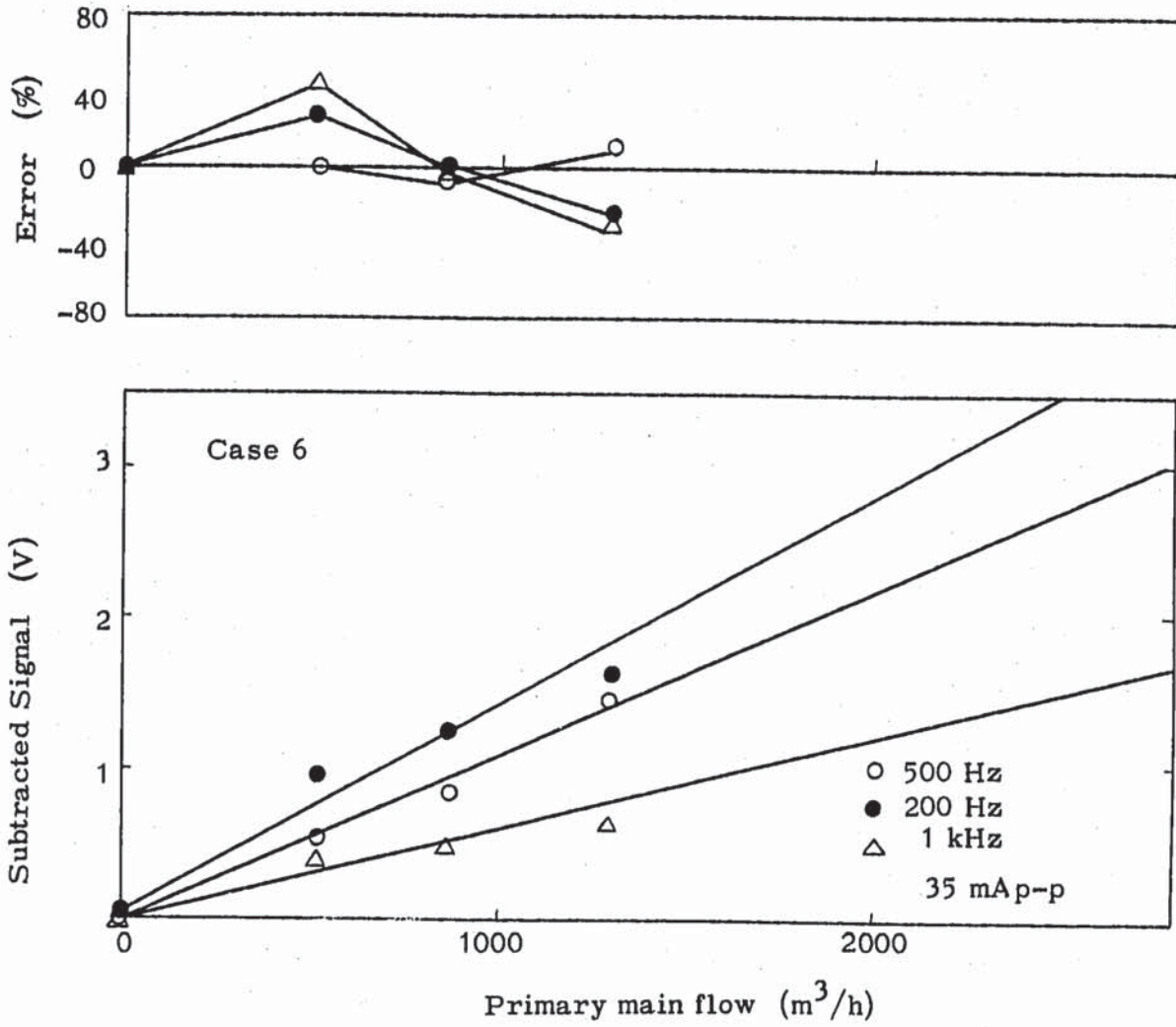


Fig. 4.1.5 Sensitivity of subtracted signals vs. exciting frequencies

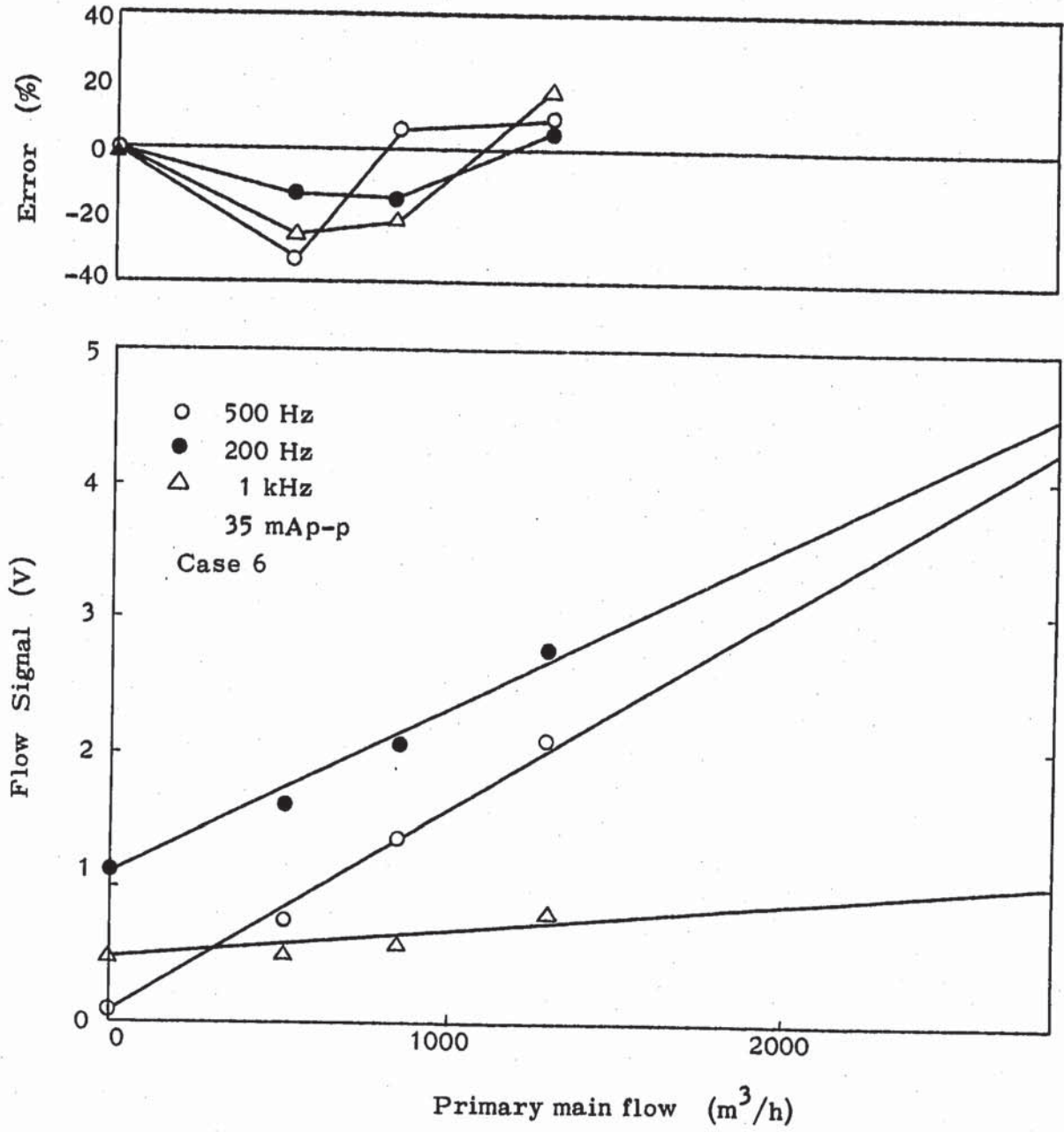


Fig. 4.1.6 Sensitivity of flow signals vs. exciting frequencies

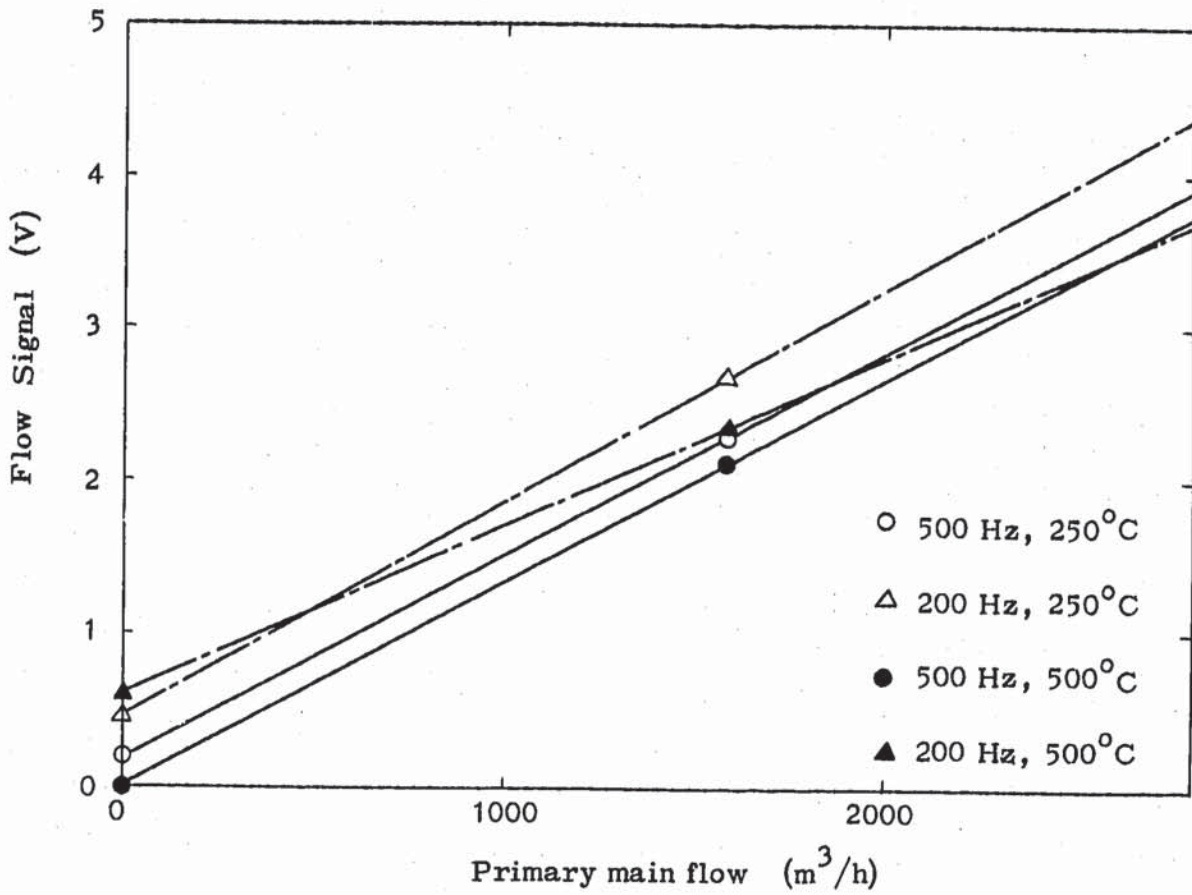


Fig. 4.1.7 Sensitivity of flow signals vs. exciting frequencies at off-site experiment

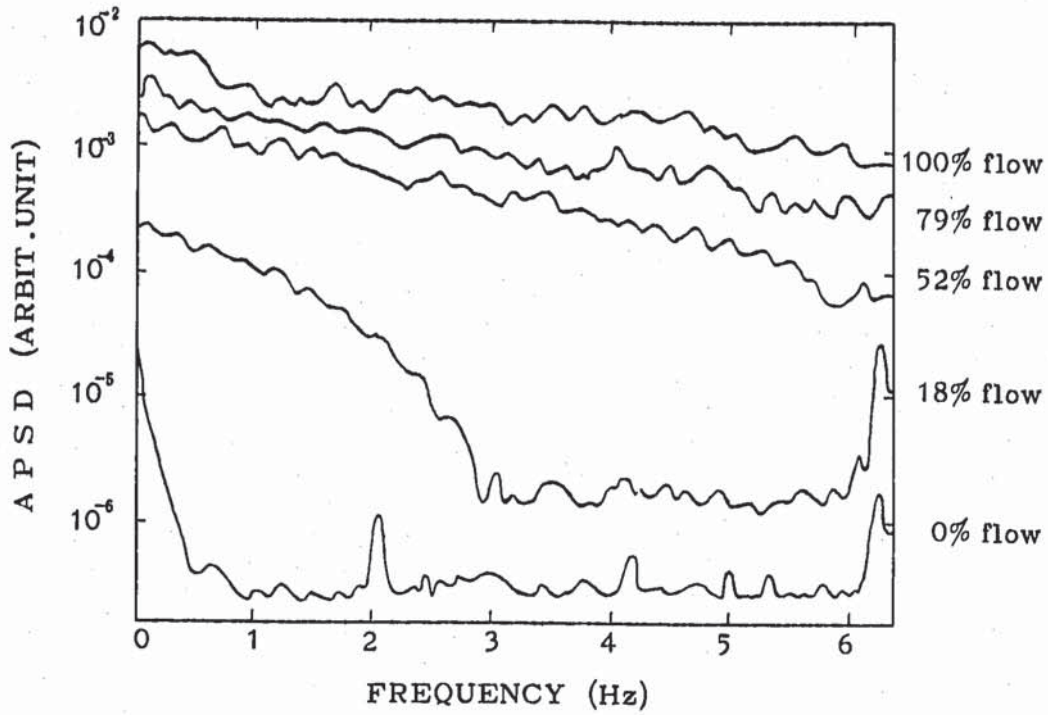


Fig. 4.1.11 (a) Auto power spectral density of Flow Signals vs. primary main flow rates.

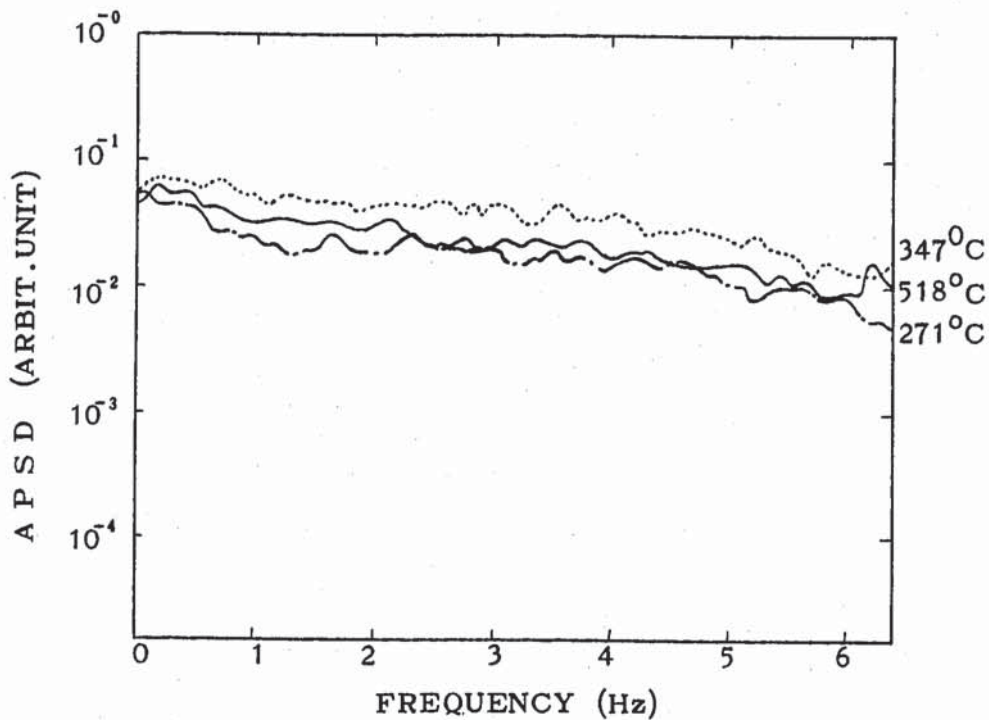


Fig. 4.1.11(b) Auto power spectral density of flow signals vs. sodium temperature of center-channel.





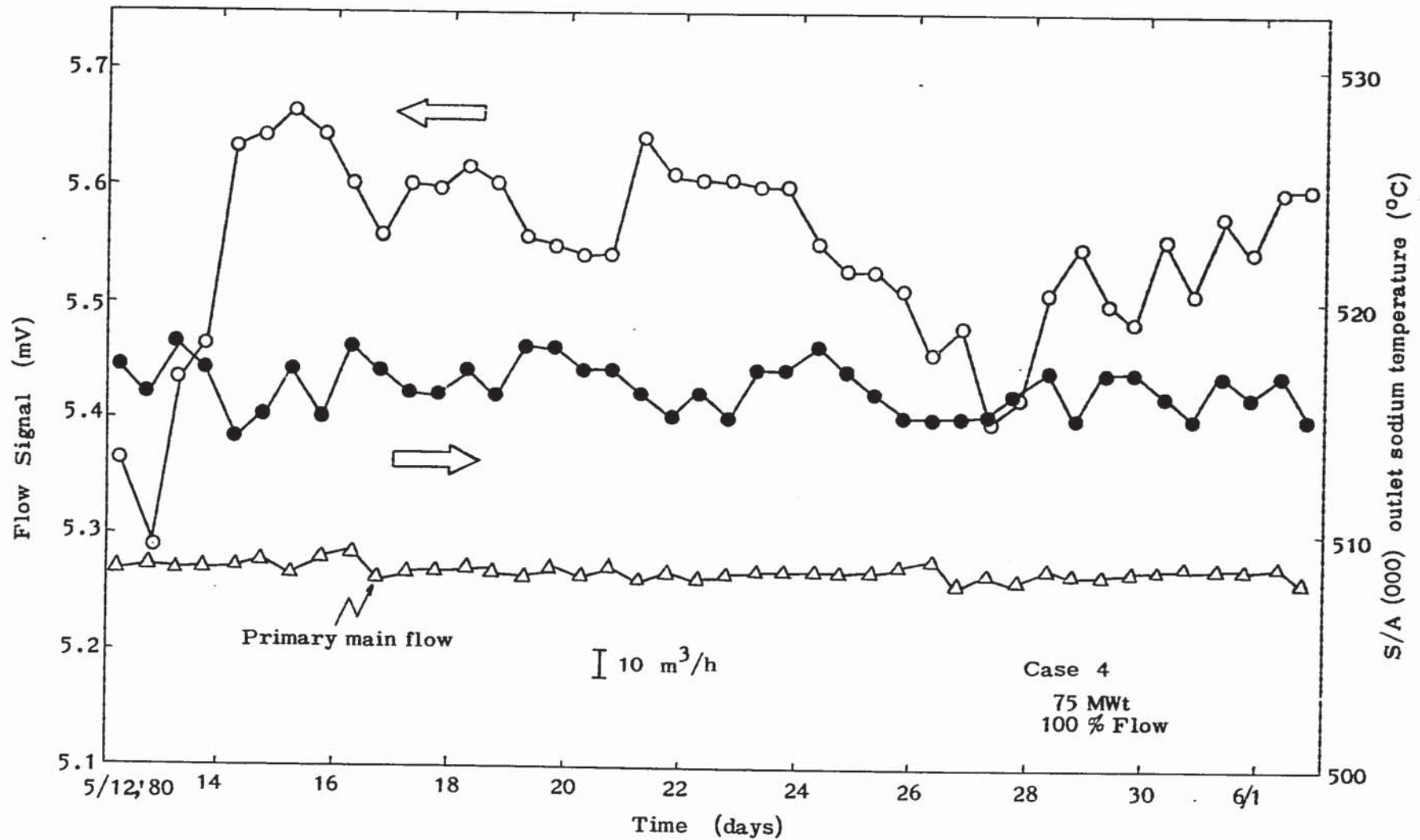


Fig. 4.1.13 Trend of flow signal at second cycle of 75 MW power operation (Flow signal is averaged for 12 hours from chart data)

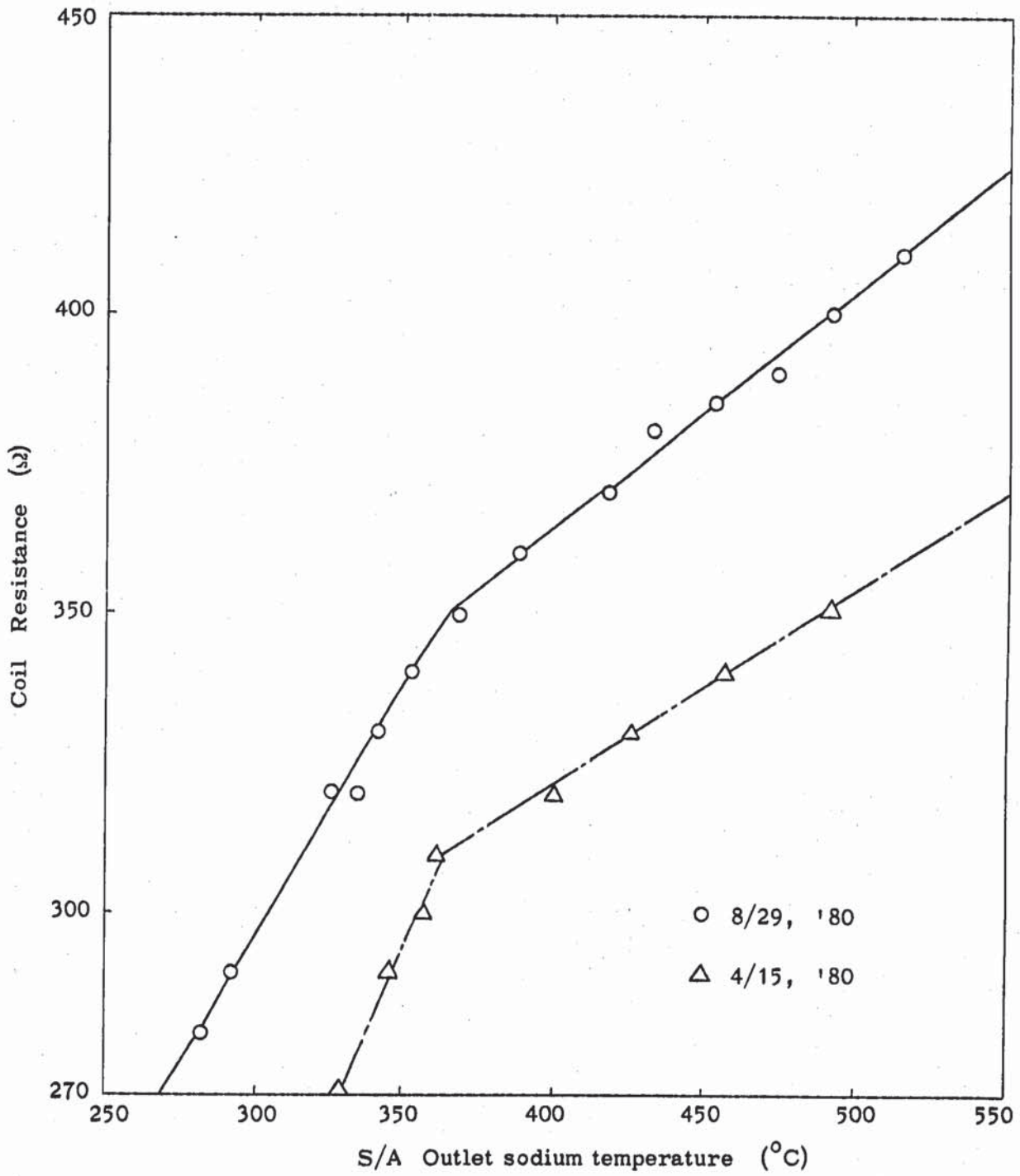


Fig. 4.1.14 Resistance of an exciting coil vs. temperature

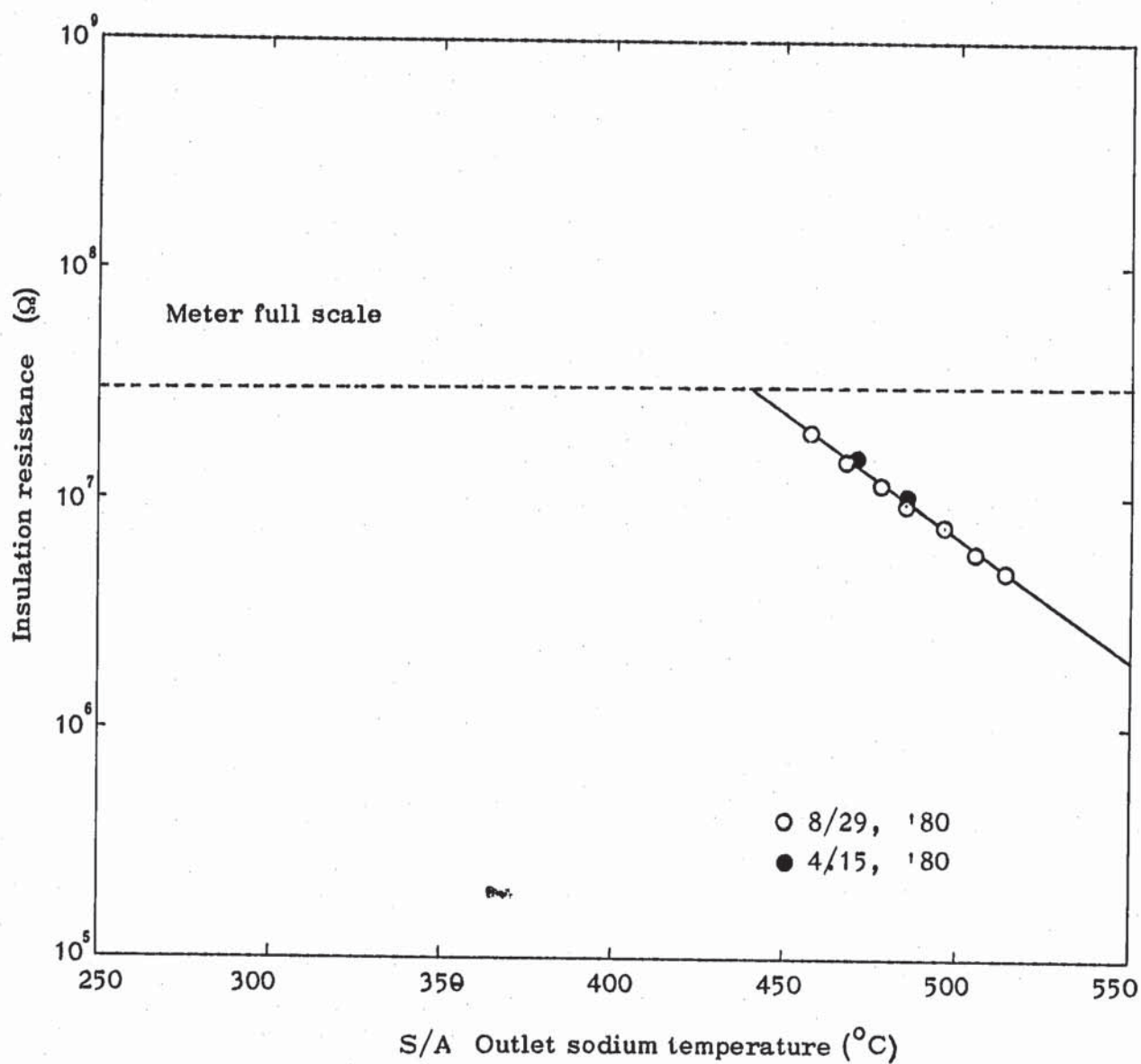


Fig. 4.1.15 Insulation resistance of an exiting coil vs. temperature

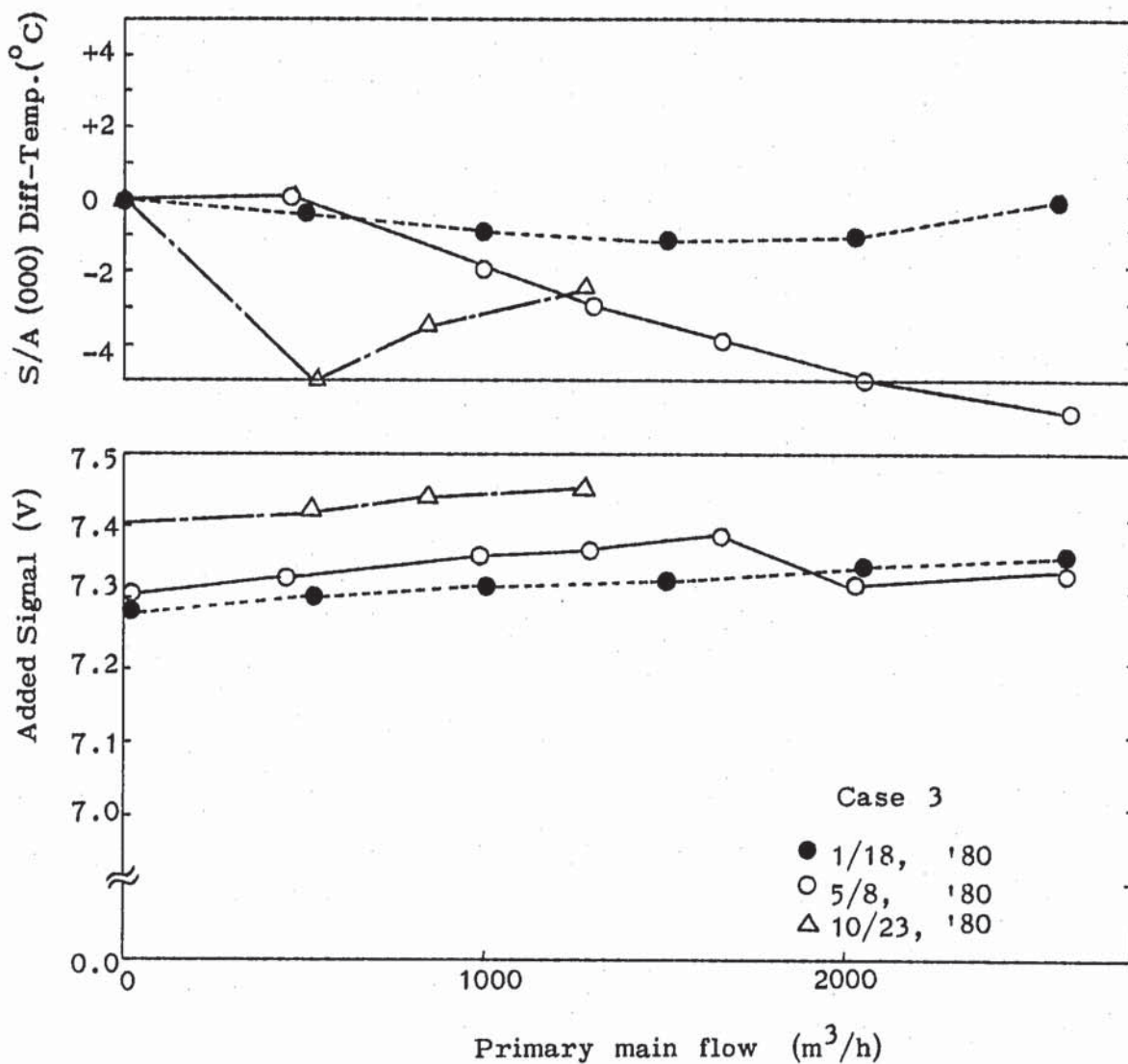


Fig. 4.2.1 Added signals of the S/A (000) flow meter vs. primary main flow

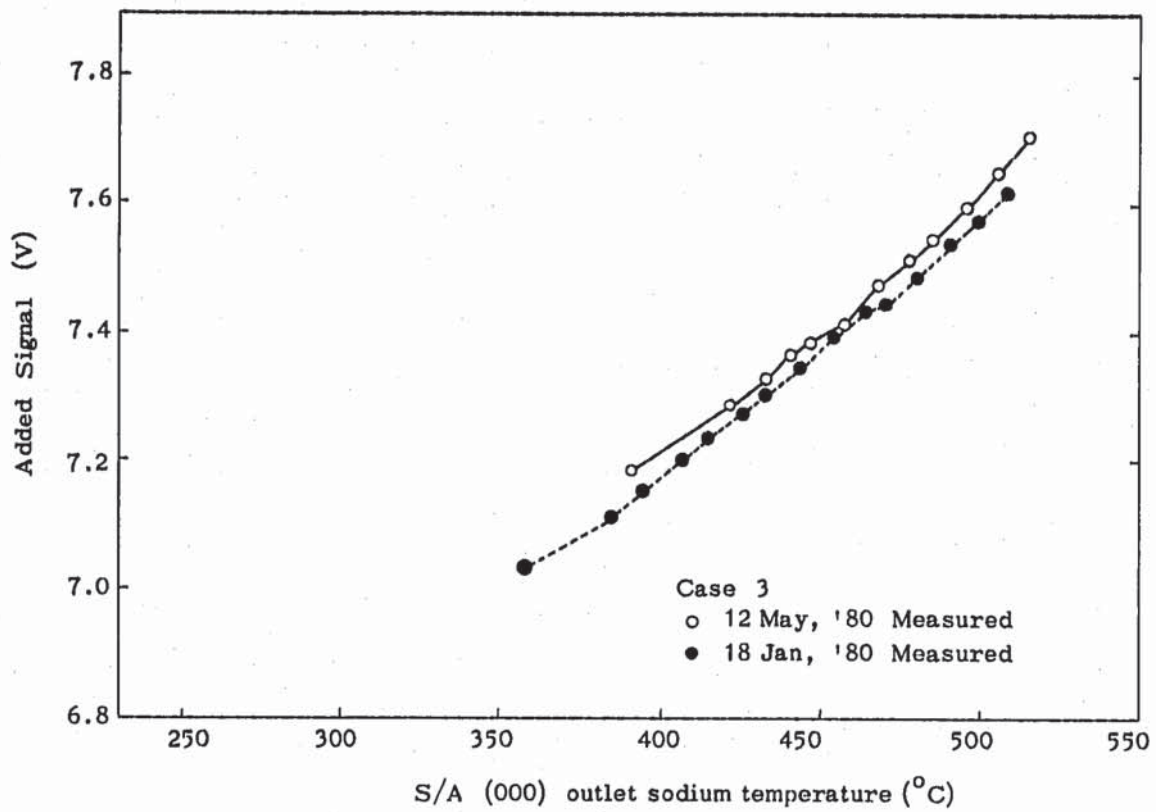


Fig. 4.2.2 Added signals of the S/A (000) flow meter vs. outlet sodium temperature.

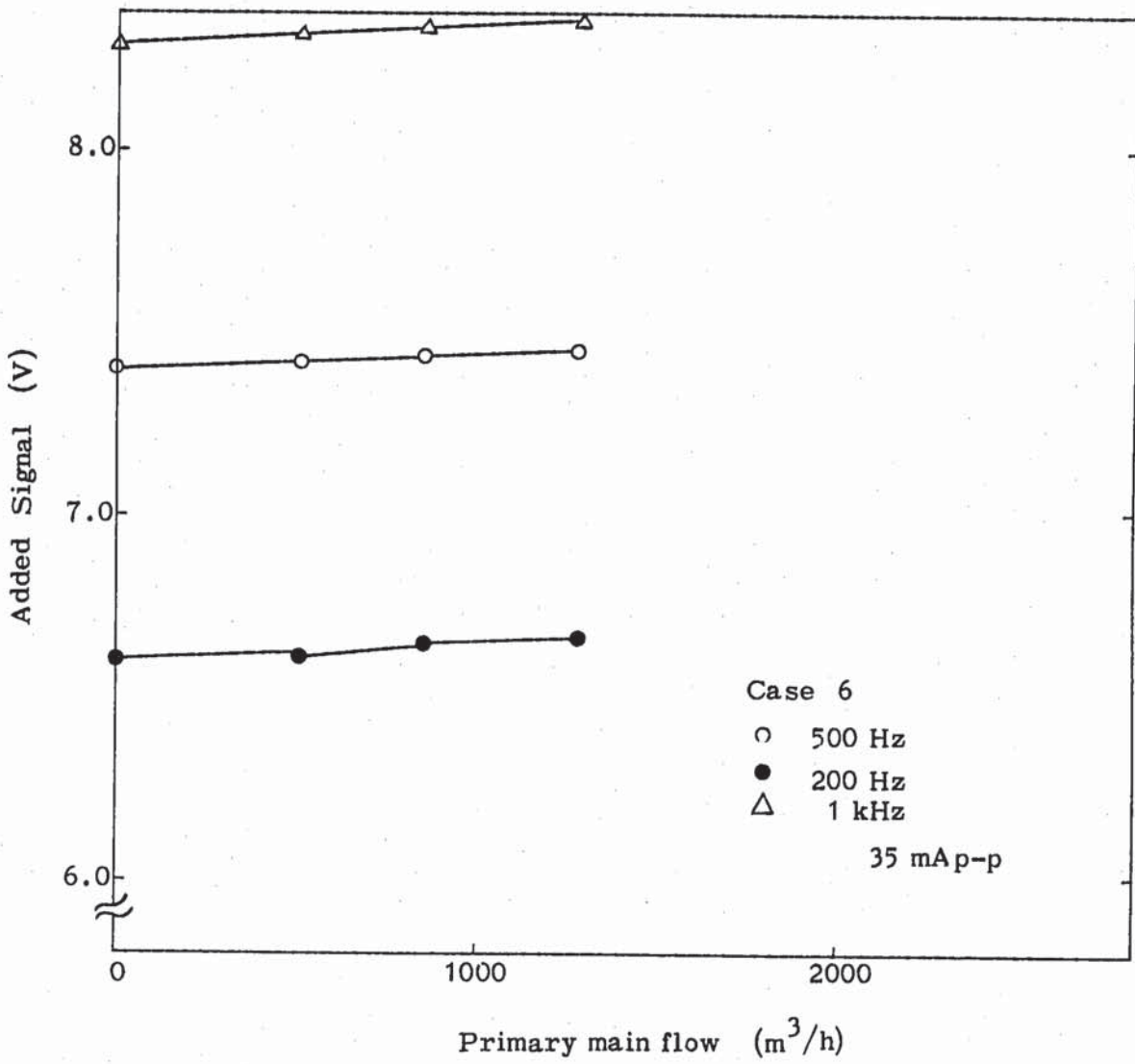


Fig. 4.2.3 Sensitivity change of added signals due to exciting frequencies

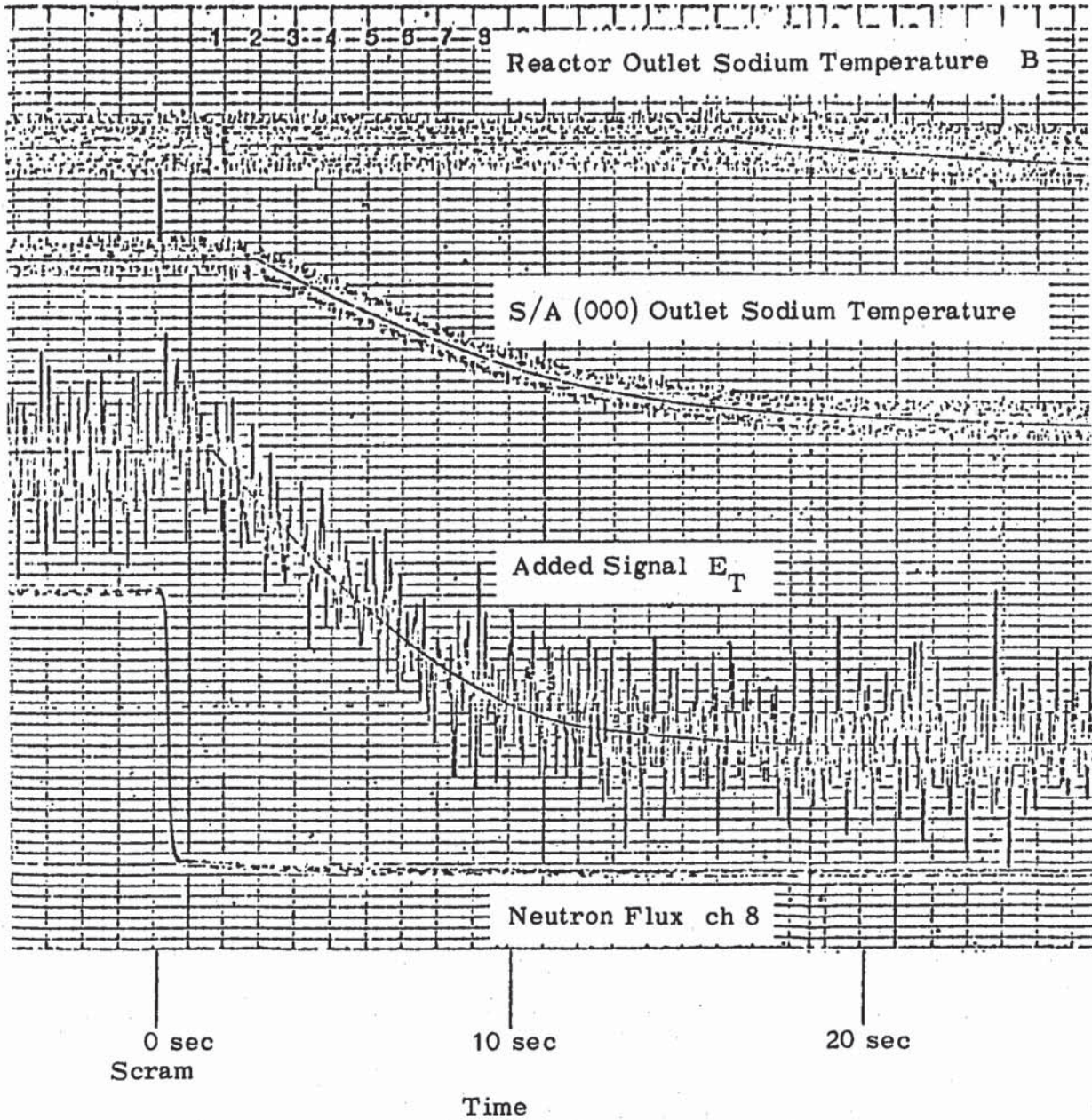


Fig. 4.2.4 Response time of added signal for scram

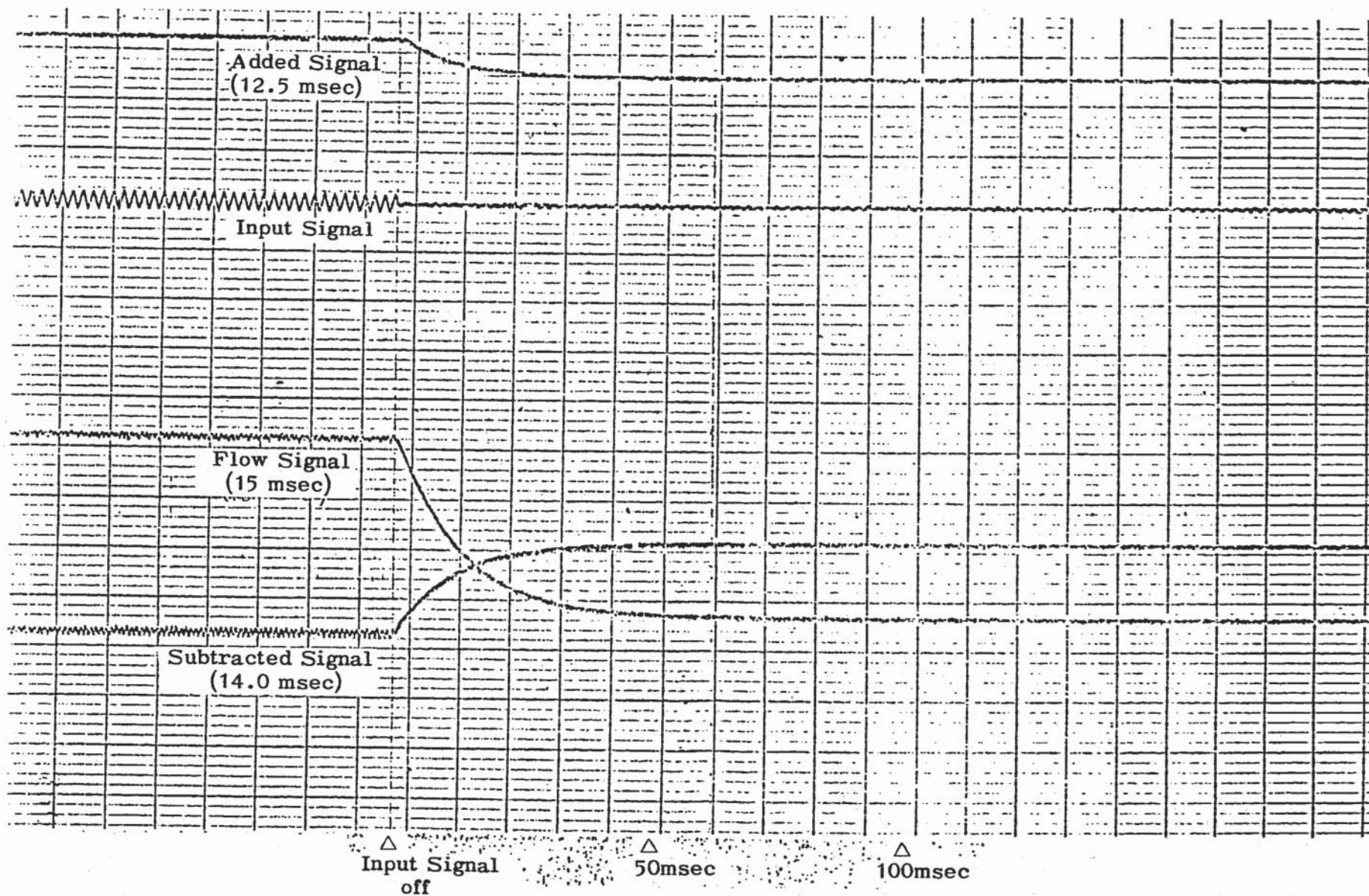


Fig. 4.2.5 Response of measurement circuit for zero input signal



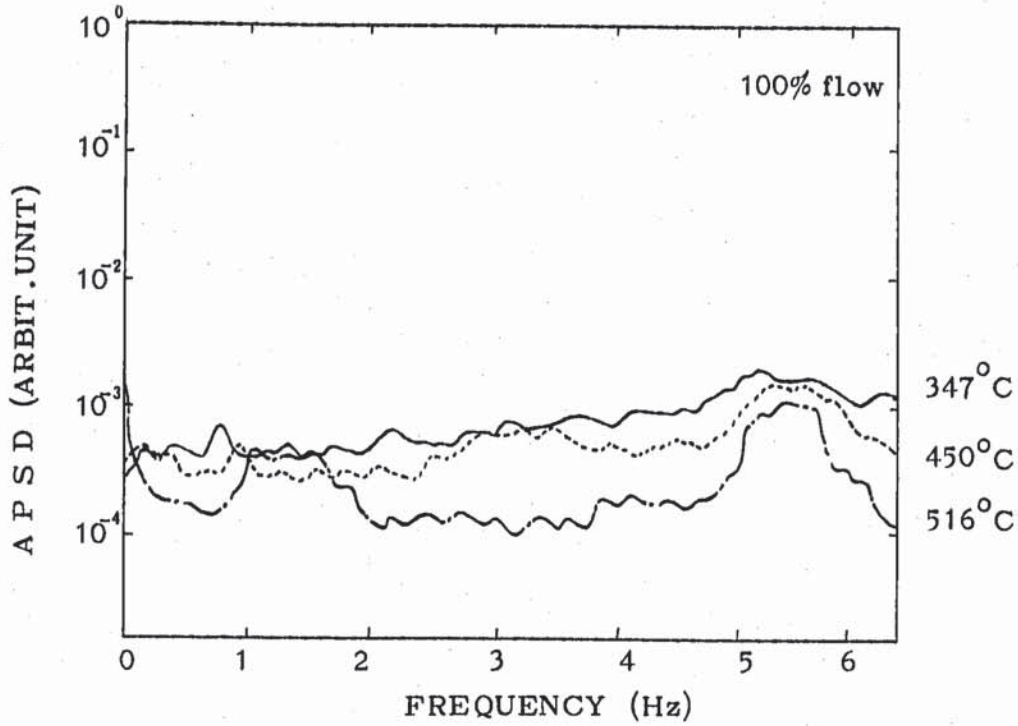


Fig. 4.2.6(a) Auto power spectral density of Added Signals under various sodium Temperatures of center channel

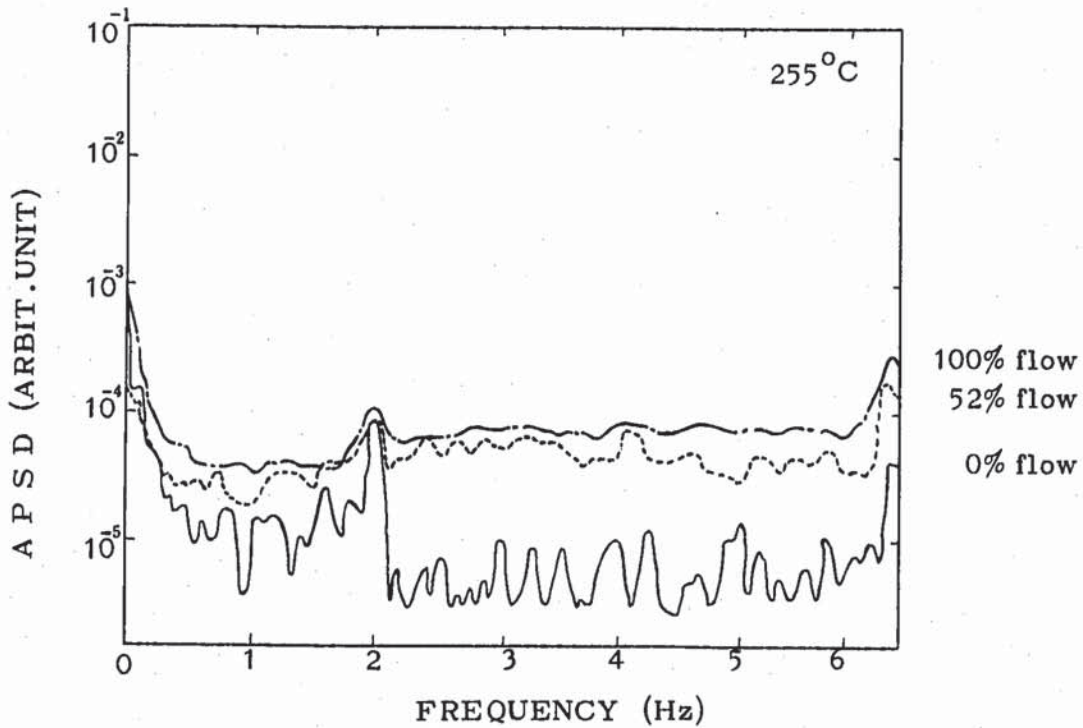


Fig. 4.2.6(b) Auto power spectral density of Added Signals under various primary main flow rates.

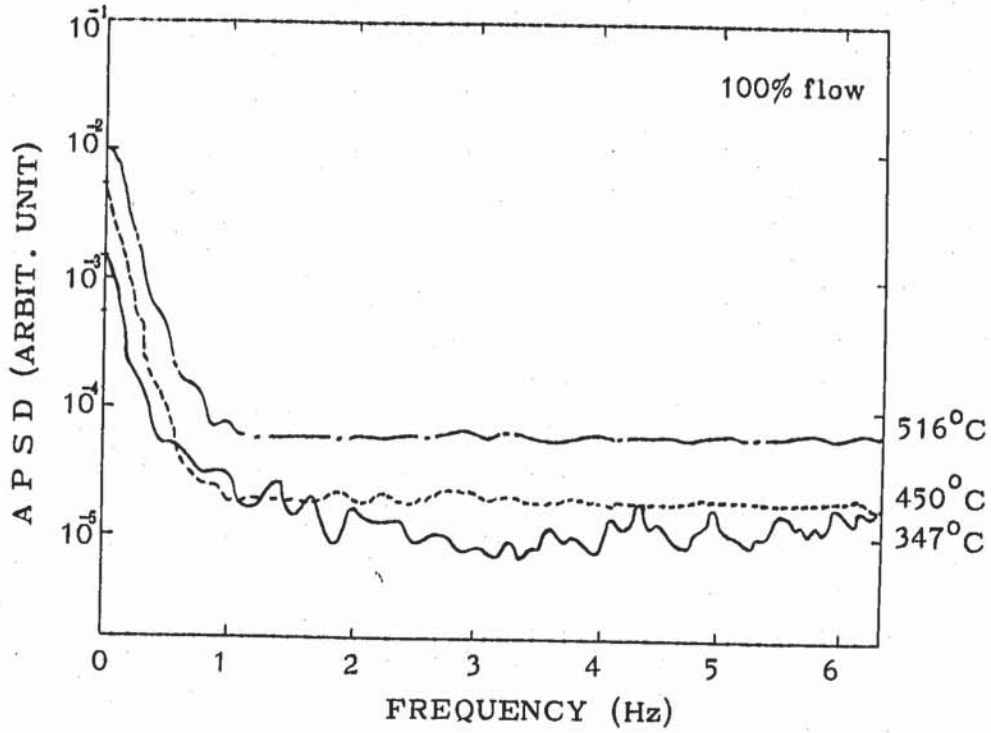


Fig. 4.3.1(a) Auto power spectral density of S/A (000) signal from thermocouple under various sodium temperatures.

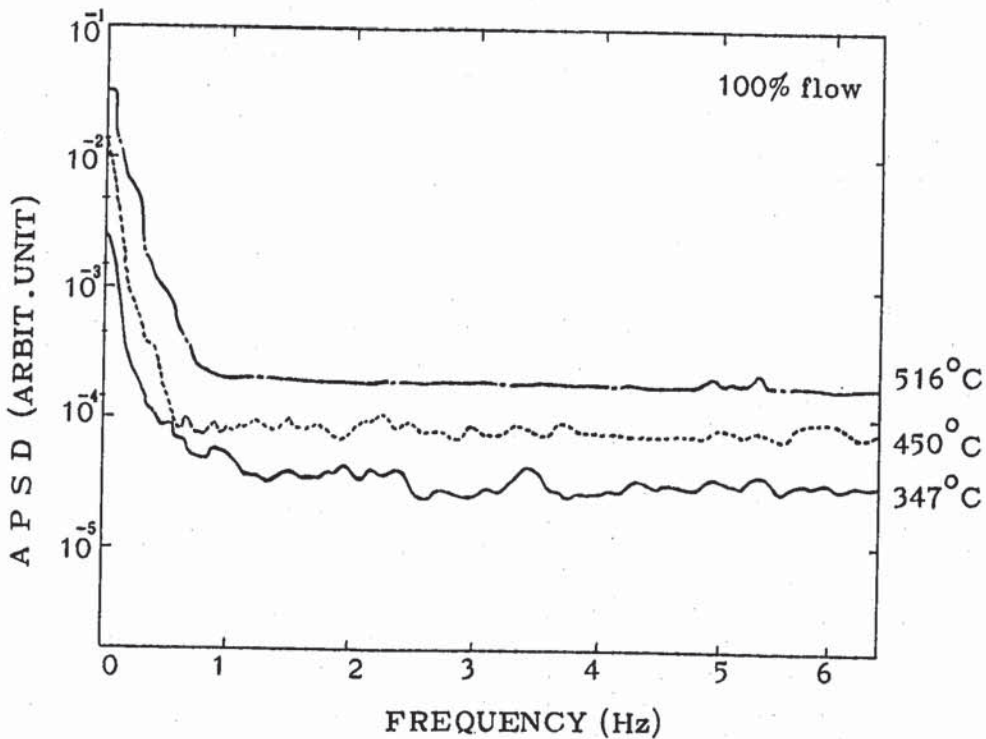


Fig. 4.3.1(b) Auto power spectral density of S/A (1A1) signal from thermocouple under various sodium temperatures

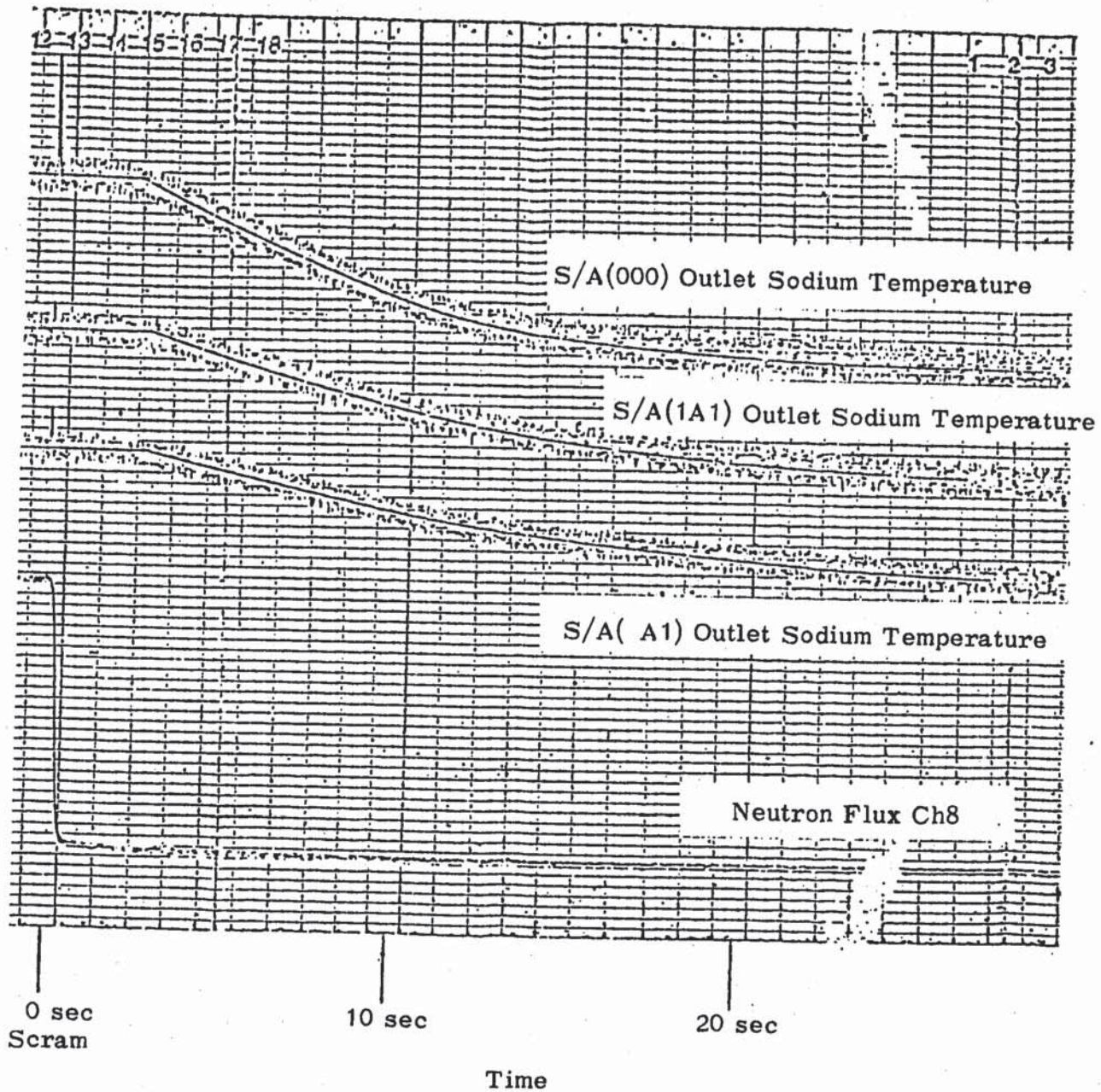


Fig. 4.3.2 Response of thermocouple signal for scram

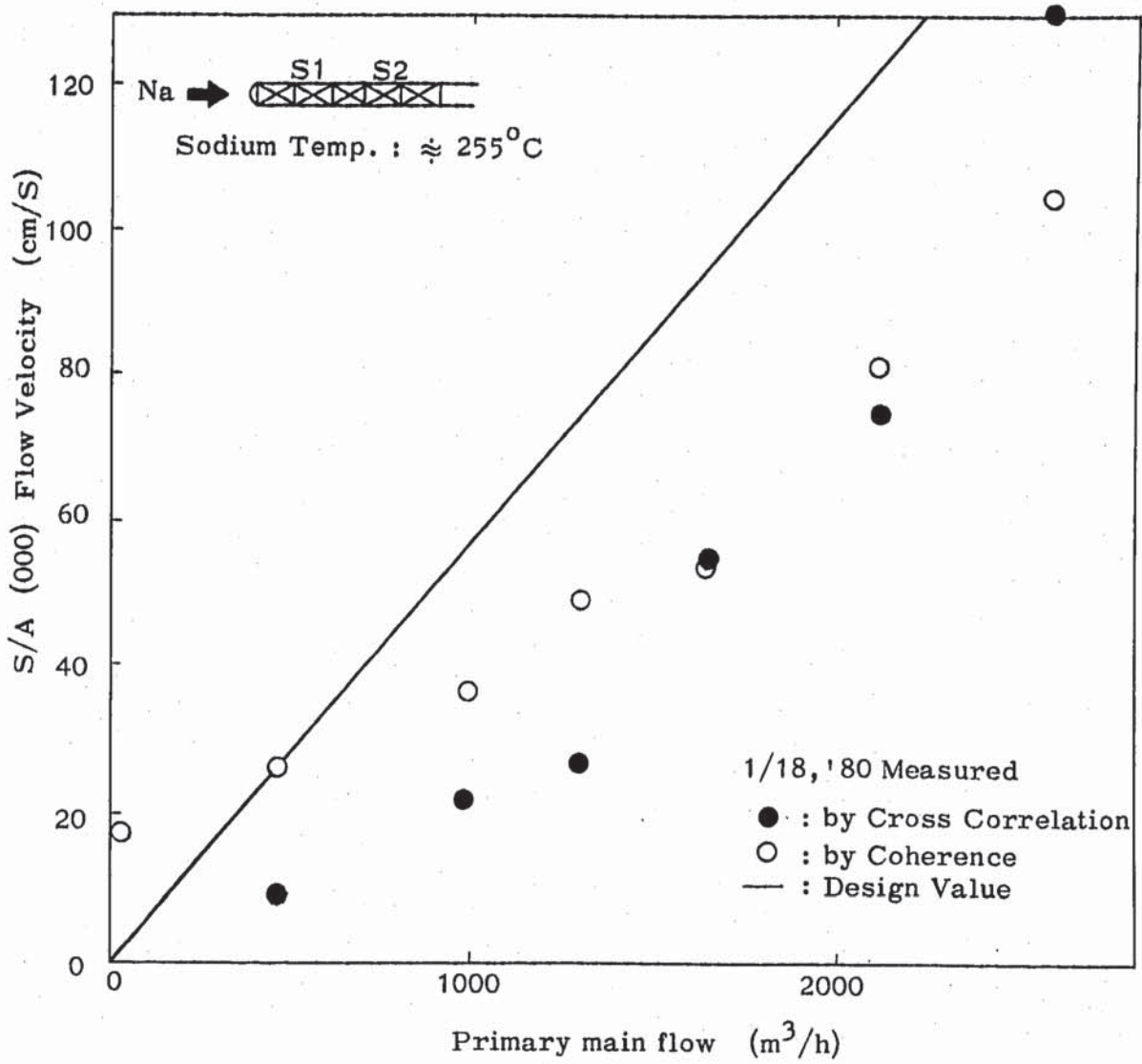


Fig. 4.4.1 Flow velocity by correlation method

(Flow velocity of the center channel was calculated by Cross correlation function and coherence function of fluctuation signals of two secondary coils)

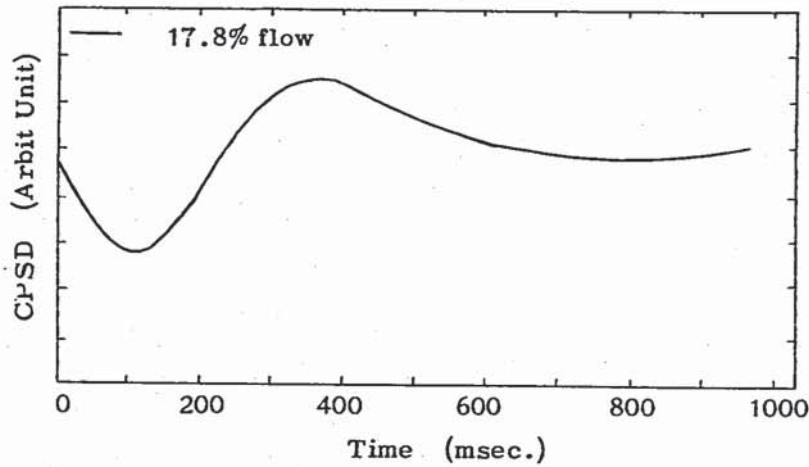
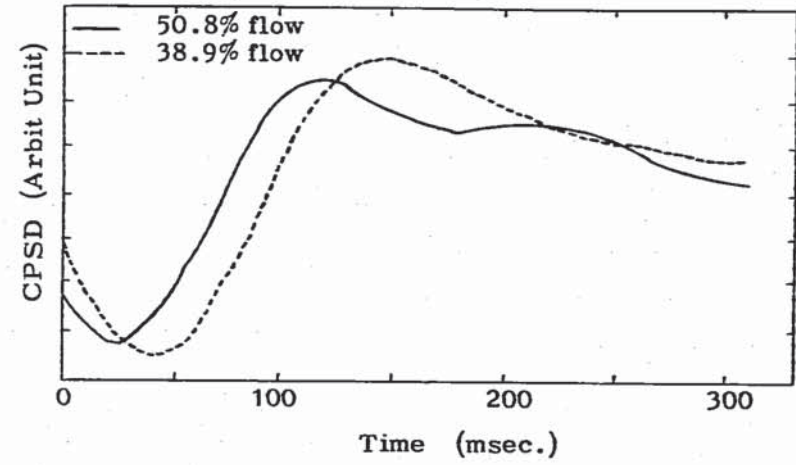
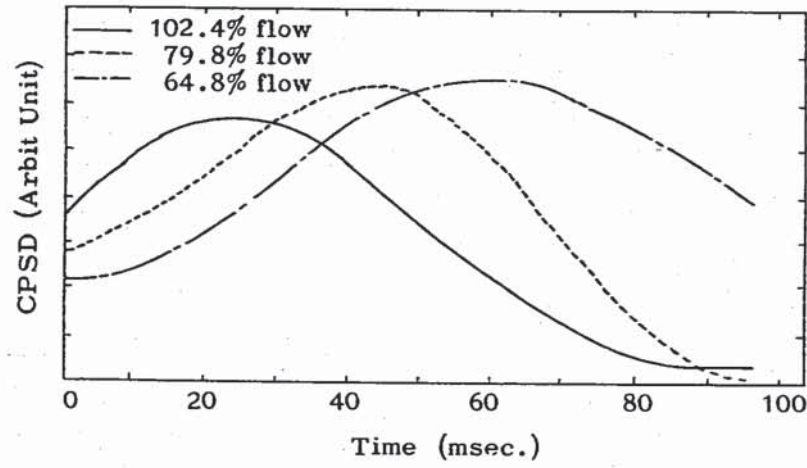


Fig. 4.4.2 CPSDs' of secondary coils for various flow rates ('80, 1/12)

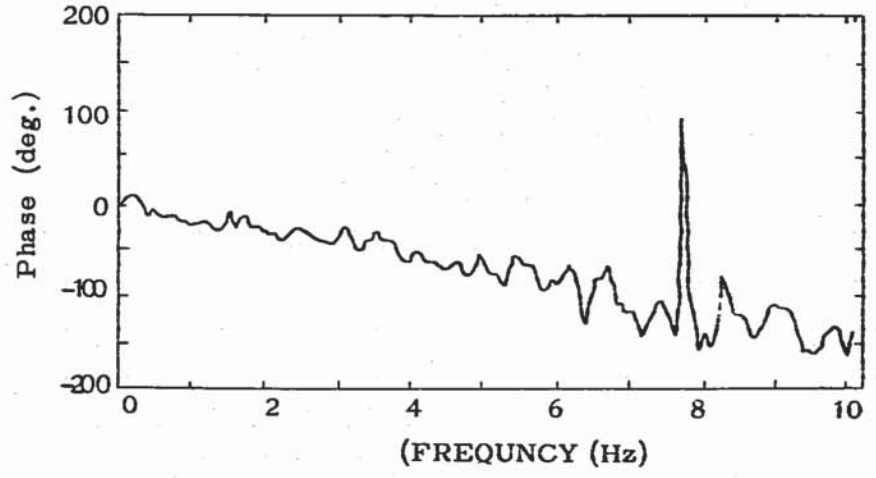
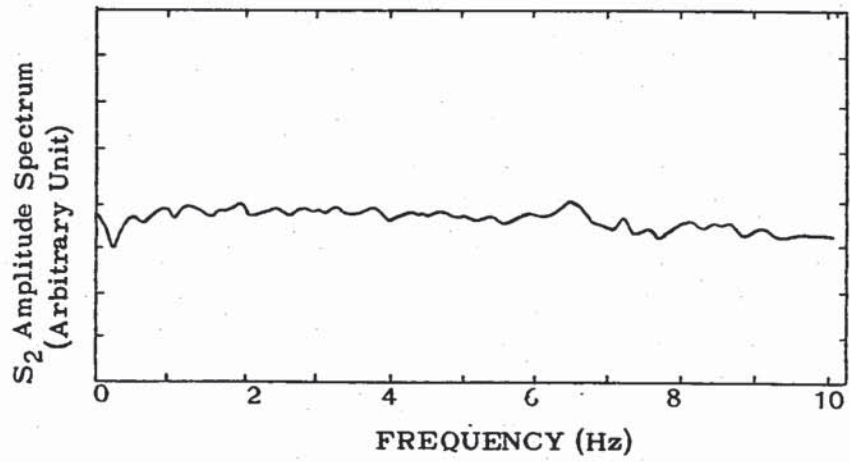
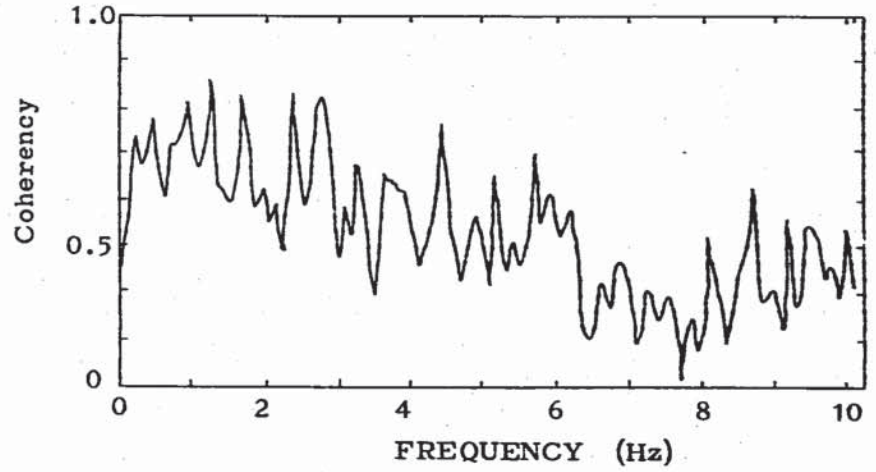
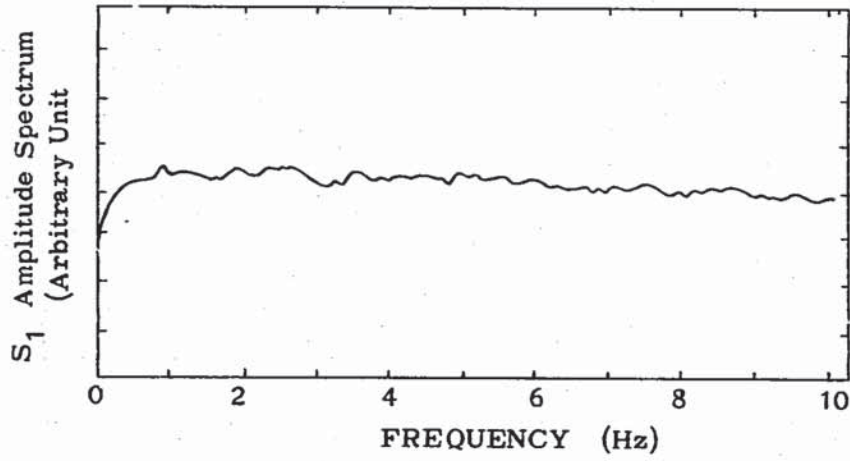


Fig. 4.4.3 Coherence function for 102.4% flow rate ('80, 1/18)

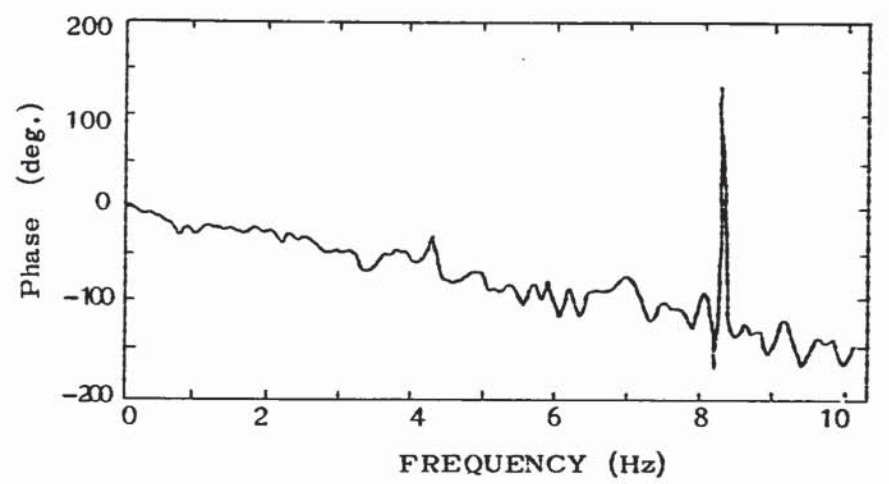
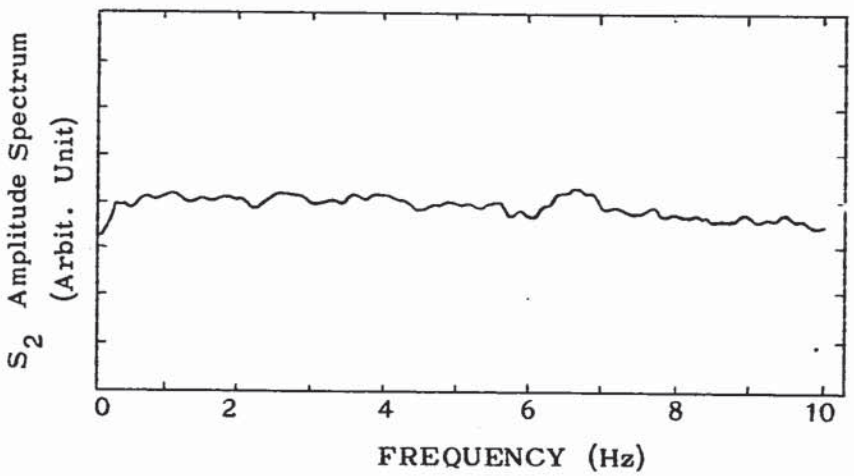
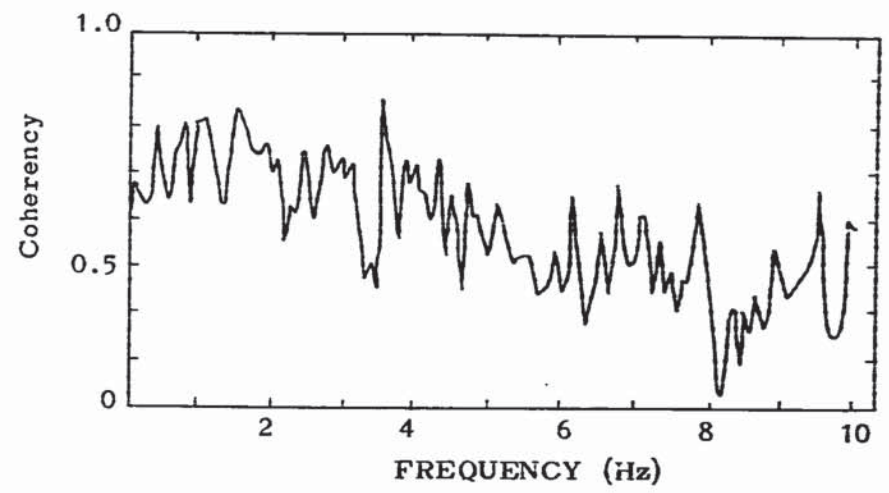
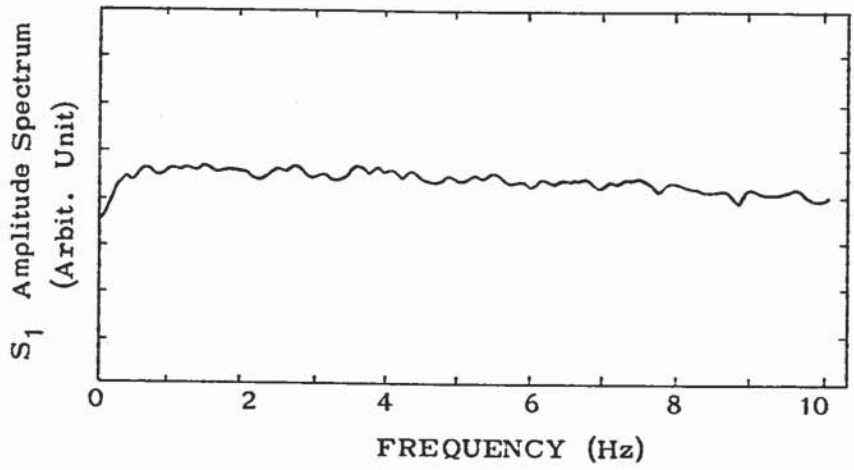


Fig. 4.4.4 Coherence function for 79.8% flow rate ('80, 1/18)

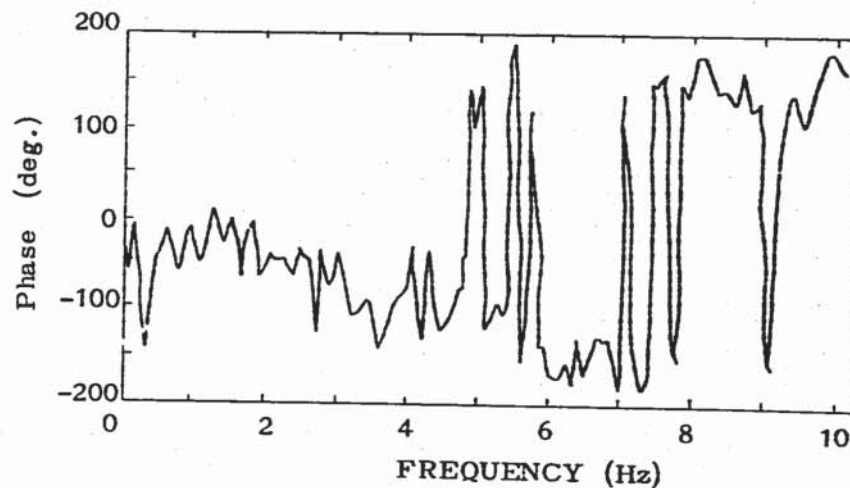
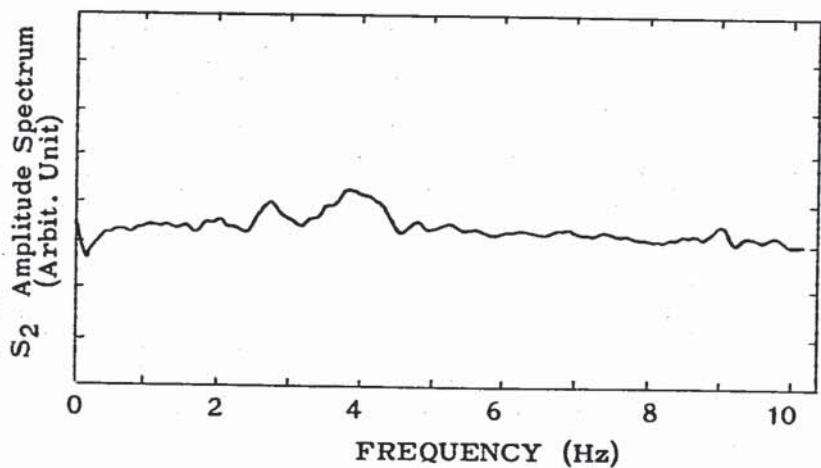
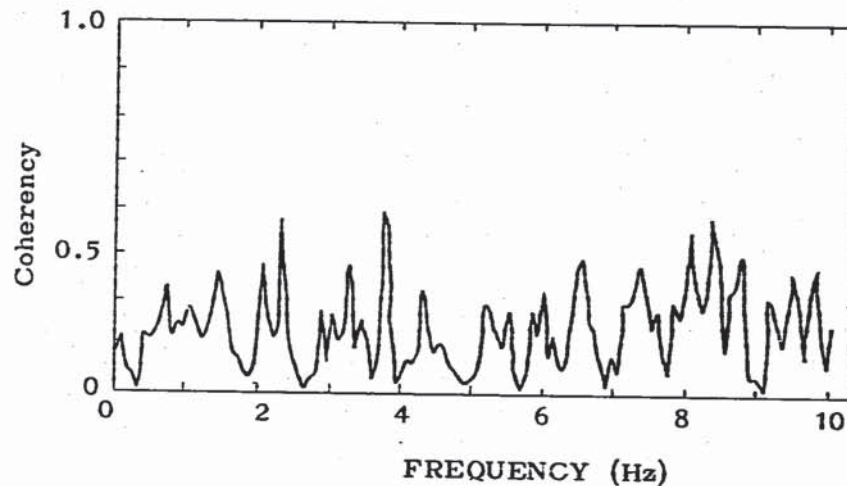
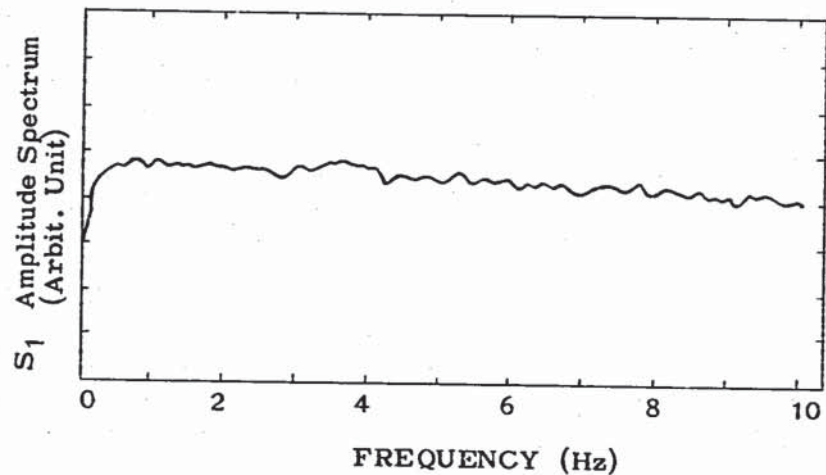


Fig. 4.4.5 Coherence function for 64.8% flow rate ('80, 1/18)



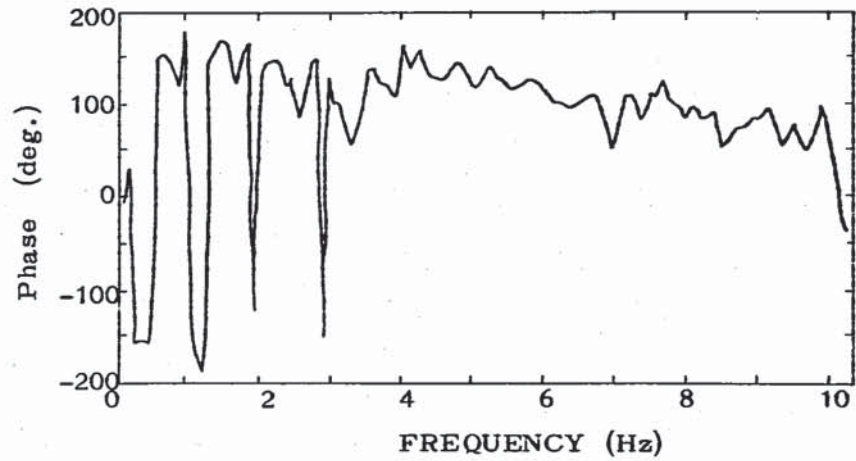
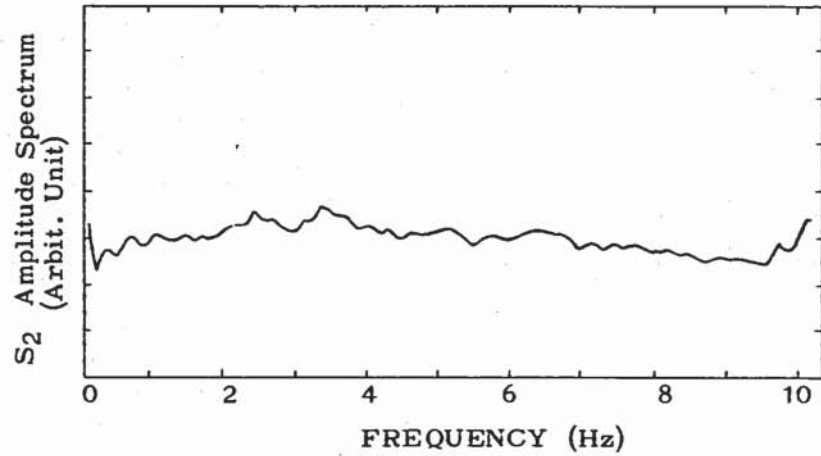
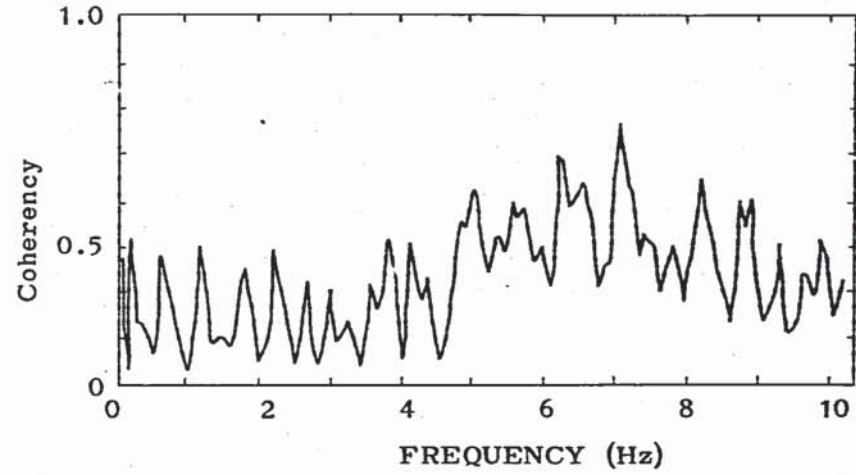
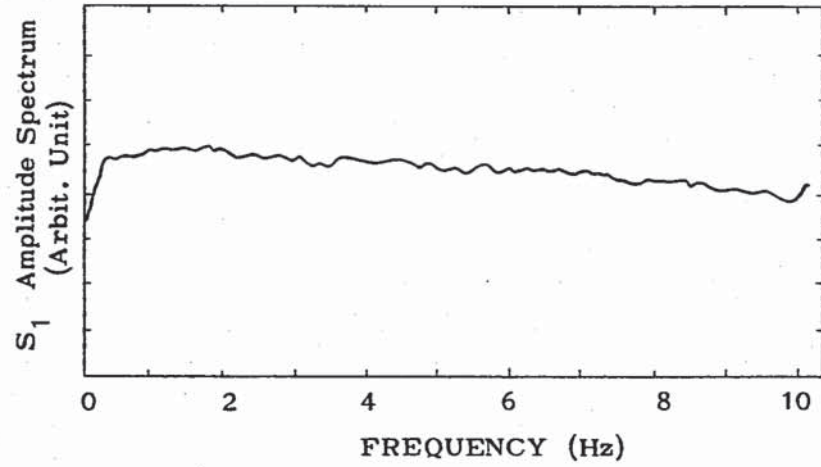


Fig. 4.4.6 Coherence function for 50.8% flow rate ('80, 1/18)

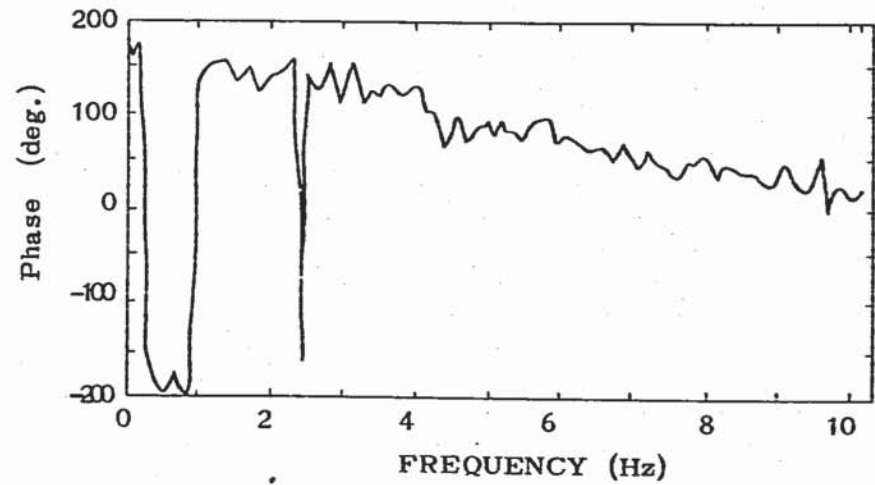
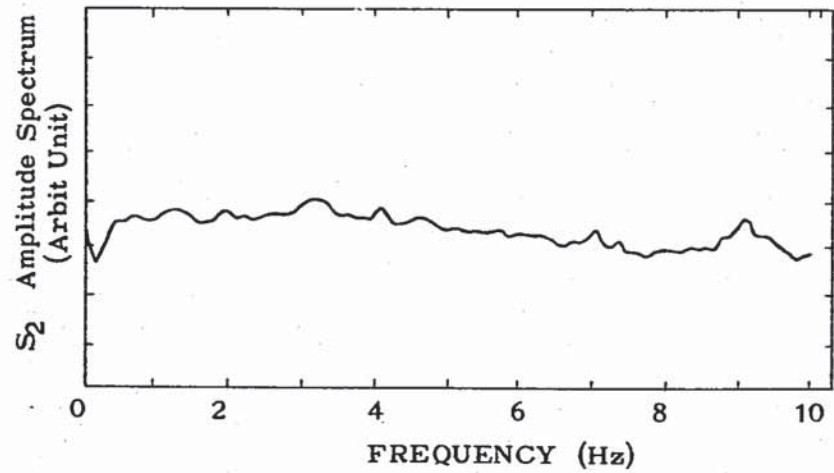
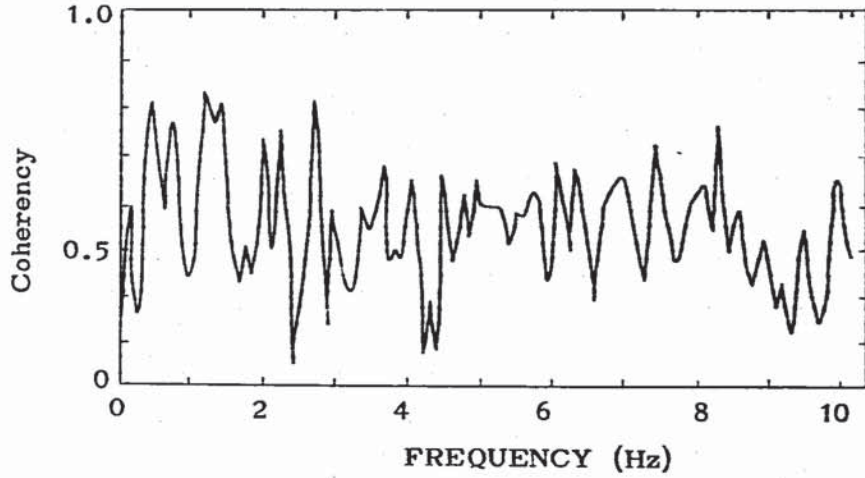
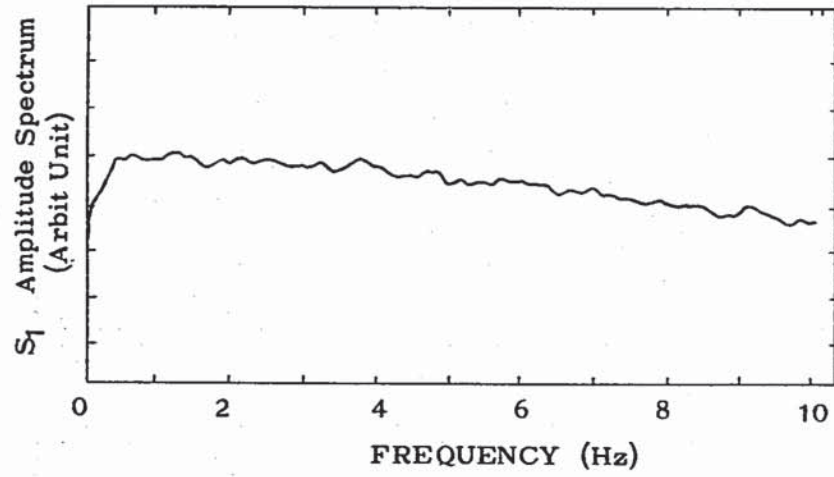


Fig. 4.4.7 Coherence function for 38.7% flow rate ('80, 1/18)

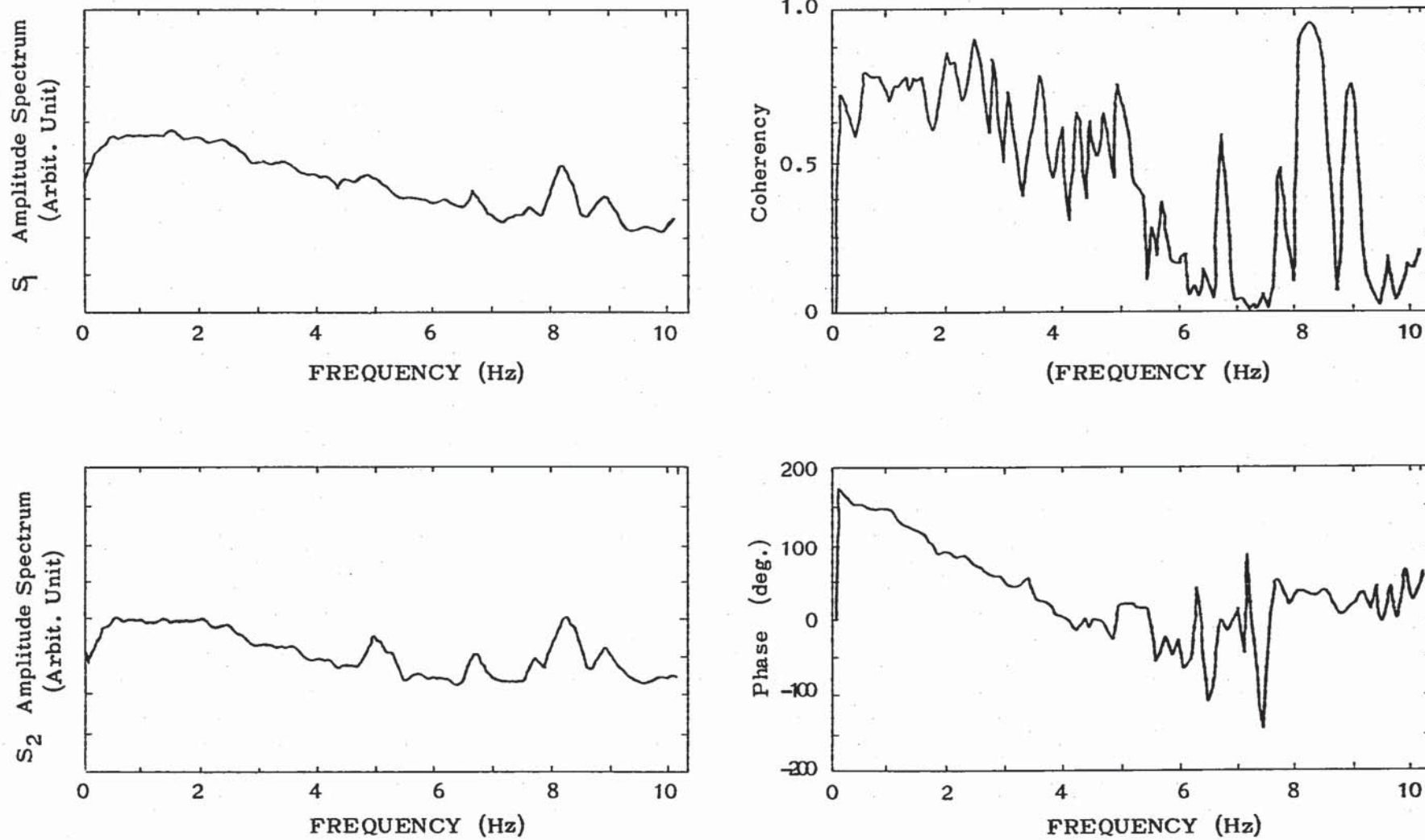


Fig. 4.4.8 Coherence function for 17.8% flow rate ('80, 1/18)