

“常陽”渦電流式温度流速計の炉内特性試験(II)

1982年 8月

動力炉・核燃料開発事業団
大洗工学センター

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(II)

村松寿晴^{*} 田村誠司^{*} 大谷秀二^{**}
綱島幹泰^{***} 庄野 彰^{*} 奈良義彦^{****}

要 旨

高速原型炉「もんじゅ」炉内計装用として開発された渦電流式温度流速計が昭和56年3月に「常陽」炉心中心孔プラグ内に設置された。

本報告書は、75 MW 定格第4～第6サイクル中に得られた上記検出器の特性について記したものである。得られた特性を以下に列記する。

- (1) 原子炉起動停止に伴う熱サイクル印加に対し、各検出器の不均衡残留電圧最大変化は、第4サイクル時の値を基準にすると約-40%であった。
- (2) 中心検出器流速信号の1次系統流量に対する直線性は、フルスケール(2520 m³/hr)に対し各ケースとも±5%以内であった。
- (3) 中心検出器流速信号の温度依存性は、内蔵熱電対温度を基準とするとフルスケール600℃に対し各ケースとも±4%以内であった。
- (4) 中心検出器温度信号の内蔵熱電対に対する直線性は、フルスケール(600℃)に対し各ケースとも±1%以内であった。
- (5) 各検出器コイルの導通抵抗は、中性子束照射積算量約 4.06×10^{19} n/cm²に対し、有意な変化は認められなかった。

* 大洗工学センター-高速実験炉部技術課

** 現、日立造船(株)

*** 現、日立製作所(株)エネルギー研究所

**** 現、FBR本部実証炉Gr.

Aug. 1982

In-Core experiments of the eddy current type
flow meter at "JOYO" (II)

Toshiharu Muramatsu^{*}, Seiji Tamura^{*},
Hideji Otani^{**}, Mikiyasu Tsunashima^{***},
Akira Shono^{*}, Yoshihiko Nara^{****}

Abstract

The eddy current type flow meters were installed above the center of the core in "JOYO", in order to study their feasibility under high temp and high energy neutron flux condition.

The characteristics of flowmeter placed at the center are as followings,

- (1) The unbalance signal of flow signal drifted-40%, compared with result at 4th cycle operation of 75MW power.
- (2) The linearity of flow signal at sensor #1 VS. main flow was obtained as $\pm 5\%$ of full scale in each test case.
- (3) The linearity of temperature dependency of flow signal at #1 sensor was obtained as $\pm 4\%$ of 600°C full scale.
- (4) The linearity of temperature signal at sensor #1 VS. Thermocouple (TC-1) was obtained as $\pm 1\%$ of full scale 600°C on each test cycle.
- (5) Change of each coil resistance was very significant at neutron flux level of about $4.06 \times 10^{19} \text{n/cm}^2$ for 130 days.

* Reactor Technology Section, Experimental fast reactor div, OEC. PNC.
** Hitachi Ship Building Co, Ltd. Currently.
*** Energy Research Laboratory, Hitachi Co, Ltd, Currently.
**** FBR development project. Currently.

目 次

第1章 緒 言	1
第2章 被試験体	2
2.1 検出器	2
2.2 設備概要	2
2.3 計測系	2
第3章 試験内容及び試験方法	4
3.1 流速検出特性	4
3.1.1 直線性	4
3.1.2 温度依存性・励磁周波数依存性	4
3.1.3 ノイズレベル	4
3.1.4 連続監視	4
3.2 温度検出特性	5
3.2.1 直線性	5
3.2.2 励磁周波数依存性	5
3.2.3 連続監視	5
3.3 コイル導通抵抗	5
3.4 速応性熱電対の応答性	5
3.5 相関法による流速絶対値測定	5
3.6 自然循環流量検出特性	6
第4章 試験結果及び検討	7
4.1 流速検出特性	7
4.1.1 直線性	7
4.1.2 温度依存性・励磁周波数依存性	8
4.1.3 ノイズレベル	9
4.1.4 連続監視	9
4.2 温度検出特性	9
4.2.1 直線性	9
4.2.2 励磁周波数依存性	10
4.2.3 連続監視	10
4.3 コイル導通抵抗	11

4.4	速応性熱電対の応答性	11
4.5	相関法による流速絶対値測定	11
4.6	自然循環流量検出特性	12
第5章	燃料集合体出口部流動状況	14
5.1	燃料置換による流動状況の変化	14
5.2	流動解析コードによる流動状況推定	15
5.3	圧力勾配による集合体間クロスフロー	17
第6章	結 言	20
	謝 辞	21
	参考文献	21

List of Tables.

- Table. 4.1 Change of detection characteristics for flow signal.
- Table. 4.2 Change of temperature dependency of flow signal.
- Table. 4.3 Change of detection characteristics for temperature signal.
- Table. 4.4 Response time of added signal and thermocouple signal.

List of Figures.

- Fig. 2.1.1 Configuration of MK-IV probe.
- Fig. 2.2.1 Cross section of reactor vessel.
- Fig. 2.2.2 JOYO core configuration and Location of S/A outlet flow meter.
- Fig. 2.2.3 Relative location of flow meter and T/C against S/A(000).
- Fig. 2.2.4 Lateral location of T/C's and flow meter's.
- Fig. 2.3.1 Block diagram of detecting circuit.
- Fig. 2.3.2 Block diagram of S/A(000) outlet flow monitoring system.
- Fig. 3.5.1 Block diagram of measuring system for correlation method.
- Fig. 4.1.1 Flow signal VS. main flow rate at 4th cycle of 75MW power on PPJX13 loading.
- Fig. 4.1.2 Flow signal VS. main flowrate at special test of 50MW power on PPJD1N loading.
- Fig. 4.1.3 Flow signal VS. main flowrate at 5th cycle of 75MW power on PPJX13 loading.
- Fig. 4.1.4 Flow signal VS. main flowrate at test of fuel reactivity measurement on PPJD1B loading.
- Fig. 4.1.5 Flow signal VS. main flowrate at test of fuel reactivity measurement on PPJX13 loading.
- Fig. 4.1.6 Flow signal VS. main flowrate at 6th cycle of 75MW power on PPJX13 loading.
- Fig. 4.1.7 Flow signal VS. main flowrate at test of fuel reactivity measurement on PPJD1N loading.
- Fig. 4.1.8 Temperature dependency of flow signal at 4th cycle of 75MW power on PPJX13 loading.
- Fig. 4.1.9 Temperature dependency of flow signal at special test of 50MW power on PPJD1N loading.
- Fig. 4.1.10 Temperature dependency of flow signal at 5th cycle of 75MW power on PPJX13 loading.
- Fig. 4.1.11 Temperature dependency of flow signal at 6th cycle of 75MW power on PPJX13 loading.
- Fig. 4.1.12 Frequency characteristics of flow signal.
- Fig. 4.1.13 Amplitude spectrum of Sensor #1 flow signal for various flow rate.
- Fig. 4.1.14 Trend of flow signal on the 5th constant operation at 75MW power.

- Fig. 4.1.15 Coherence function of flow signal VS. primary main flow signal (A) for 100% flowrate.
- Fig. 4.2.1 Temperature signal VS. thermocouple reading at 4th cycle of 75MW power on PPJX13 loading.
- Fig. 4.2.2 Temperature signal VS. thermocouple reading at special test of 50MW power on PPJD1N loading.
- Fig. 4.2.3 Temperature signal VS. thermocouple reading at 5th cycle of 75MW power on PPJX13 loading.
- Fig. 4.2.4 Temperature signal VS. thermocouple reading at 6th cycle of 75MW power on PPJX13 loading.
- Fig. 4.2.5 Frequency characteristics of temperature signal.
- Fig. 4.2.6 Trend of temperature signal on the 5th constant operation at 75MW power.
- Fig. 4.3.1 Coil resistance (#2) VS. temperature.
- Fig. 4.3.2 Coil resistance (#3) VS. temperature.
- Fig. 4.3.3 Coil resistance (#4) VS. temperature.
- Fig. 4.4.1 Response time of added signal and TC-1 for scram.
- Fig. 4.4.2 Response time of added signal and TC-2 for scram.
- Fig. 4.4.3 Response time of added signal and TC-3 for scram.
- Fig. 4.4.4 Response time of added signal and TC-4 for scram.
- Fig. 4.4.5 Response time of added signal and (1A1) T/C for scram.
- Fig. 4.5.1 Coherence function between each secondary coil of sensor #1 for 100% flowrate.
- Fig. 4.5.2 Coherence function between each Secondary coil of sensor #2 for 100% flowrate.
- Fig. 4.5.3 Coherence function between each secondary coil of sensor #3 for 100% flowrate.
- Fig. 4.5.4 Coherence function between each secondary coil of sensor #4 for 100% flowrate.
- Fig. 4.5.5 Transit time VS. Main flowrate.
- Fig. 4.5.6 Transit time VS. Main flowrate.
- Fig. 4.6.1 Trend of sensor #1 temperature signal at natural circulation.
- Fig. 4.6.2 Trend of sensor #2 temperature signal at natural circulation.
- Fig. 4.6.3 Trend of sensor #1 flow signal at natural circulation.
- Fig. 4.6.4 Trend of sensor #2 flow signal at natural circulation.
- Fig. 4.6.5 Sensor #2 flow signal ratio cope with sensor #1 flow signal at natural circulation.
- Fig. 4.6.6 Trend of TC-1 at natural circulation.

- Fig. 4.6.7 Trend of TC-2 at natural circulation.
- Fig. 4.6.8 Trend of TC-3 at natural circulation.
- Fig. 4.6.9 Trend of TC-4 at natural circulation.
- Fig. 4.6.10 Trend of main flowrate (A) at natural circulation.
- Fig. 4.6.11 Trend of main flowrate (B) at natural circulation.
- Fig. 5.1 Change of flow distribution at center subassembly outlet region on each cycle operation.
- Fig. 5.2 Change of temperature distribution at center subassembly outlet region on each cycle operation.
- Fig. 5.3 The region of flow analysis for outlet sodium of S/A.
- Fig. 5.4 Velocity distribution of core fuel at the end of fuel pins.
- Fig. 5.5 Flow pattern of the joined S/A (1A1) and S/A (1D1) line at the flow guide region.
- Fig. 5.6 The application of jet diffusion on subassembly outlet sodium.
- Fig. 5.7 Fundamental model of cross flow effect between adjacent subassembly.

第 1 章 緒 言

高速原型炉「もんじゅ」炉内計装用として新たに開発された 3 コイル渦電流式温度・流速計（以下、流速計と称す）が昭和 56 年 3 月に「常陽」炉内中心孔プラグ内に 4 体設置された。

本タイプの流速計は、液体金属を冷却手段とする高速増殖炉の燃料集合体（S / A）出口部保護管内に設置・使用される検出器である。流速計出力信号の応答性が速いこと、さらには装荷位置が S / A の出口部であることと相まって、炉心情報を迅速かつ正確に捕え易い状況にあるため、種々の炉心熱流動情報を得るための有力な一手段として囑望されている。

本流速計は、流速計開発計画の一環として、高温・高中性子束条件下での長時間にわたる実用性を確認することを目的として設置されたものである。

本報は、75 MW 定格第 4 サイクル（昭和 56 年 3 月）より 75 MW 定格第 6 サイクル（昭和 57 年 1 月）までに得られた種々のプラント状態における試験結果とその検討結果について報告するものである。また、得られた諸情報を基に集合体出口部における流動モデル（2次元）を推定したので合わせて報告する。

第2章 被 試 験 体

2.1 検出器⁽¹⁾

本渦電流式温度・流速計は、3コイルタイプであり、Fig. 2. 1. 1に示す構造を有す。コイルはアルミナのボビンに巻かれており、巻線は0.2mmφのコンスタンタン線にアルミナ系セラミックを約25μm塗布したものである。総巻数は220回(4層)で、650℃で焼結したのち最外周をセラミック・ペーストで固定している。コアは電磁軟鉄(JIS SUYB 2)製で、950℃で磁気焼鈍しており、全長は47mmである。コアの両端にはツバがあり、これはコアの中心部を貫通するC.A熱電対の磁性の影響を受けにくくするためのものである。リード線は1.6mmφのコンスタンタン2芯対よりMIケーブルで、対よりピッチは約40mm、リード抵抗は約12Ω/mである。尚、内蔵の熱電対としては、1.6mmφシース式クロメル・アルメル熱電対3本を先端にて溶接したものである。また、検出器が保護管内へ挿入された際、押付け力により熱電対先端に力が加わり破損することのないよう、ルース構造とし、押付け力は流速計の肩で受けるように設計されている。熱電対と保護管内壁との間隙には、速応性を持たせるため低温(～126℃)で溶融する合金(Pb, Bi, Ni)が封入されている。

2.2 設備概要

Fig. 2. 2. 1, Fig. 2. 2. 2に流速計設置位置を示す。流速計は、小回転プラグ下部に位置する炉心上部機構(Above core mechanism)下端の整流格子(Flow Guide)内部に位置し、炉心中心に相当する炉心アドレス(000)の炉心燃料集合体上部に設置される。

Fig. 2. 2. 3, Fig. 2. 2. 4に燃料集合体と検出器の相対位置関係を示す。検出器は、センタープラグ内に4体組み込まれており、1体は燃料集合体中心軸上に、他3体は中心軸より約29mm離れて120°対称に設置されている。周辺3体の検出器は、流動的相互干渉を防ぐため、中心検出器位置より約115mm上部に設置されている。

燃料集合体ハンドリング・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上部に位置する整流格子内に流入し、上記検出器により計測される。その後冷却材は、整流格子上端より約200mm上部に位置する熱遮蔽板に衝突し、上部プレナムに至る。

2.3 計測系

Fig. 2. 3. 1に渦電流式温度・流速計の信号処理ブロックを示す。

電源、発振ユニット(Power supply & Oscillator unit)は、シグナル・コンディショナとプリアンプ用に±24V_{DC}の直流電圧と、5V_{r.m.s}の基準周波数信号を供給する。シグナル・

コンディショナでは、基準周波数信号を電力増幅して、1次コイルを駆動する。コイル抵抗は検出器の温度により大きく変化するが、変流器 (C.T.) で電流を検出し、この値が一定になるようにA.G.C. (Automatic Gain Control) がかけてあるため、コイル抵抗、周波数のいかによらず、コイル電流は常に100 mAに維持される。2次コイルの起電力は、プリアンプユニットで10倍に増幅したのち、シグナル・コンディショナに入り、和と差の演算と復調を行って出力される。和信号の復調にはダイオード検波、差信号の復調には励磁電流と同位相での同期検波を用いている。また、検出器と信号処理回路との間は、変流器を含む4個のトランスによって完全に絶縁されている。

Fig. 2.3.2に流速計監視システムのブロック図を示す。4体の流速計のうち、中心の1体は常時監視可能であるが、周辺の3体についてはこのうちの1体をリレー・ボックスにより切り換えて監視を行う。しかし、熱電対については、12体常時監視可能である。これらの信号はプラント信号とともにスキャナ (HP 3495 A) に入力 (熱電対信号は外部零点補償後) され、スキャンされた信号はデジタル・ボルトメータ (HP 3455 A) にてA-D変換される。A-D変換後の信号は、平均化されコントローラ (HP 9835 B) テープカートリッジに出力される。

監視信号は以下の通りである。

◦ 原子炉出入口温度 (C.A)	計 4 点
◦ 1次系統流量 (EMFM)	計 2 点
◦ 1次主循環ポンプ吐出圧, 回転数	計 4 点
◦ 流速計出力信号 (流速, 温度)	計 4 点
◦ 流速計内蔵熱電対指示温度	計 12 点
◦ 炉心第1列集集体出口部熱電対指示温度	計 6 点

平均化計算は、熱電対信号以外の信号については1秒サンプリングで100回、熱電対信号については前述平均化計算前後の2回平均である。

第3章 試験内容及び試験方法

3.1 流速検出特性

3.1.1 直線性

1次コイル駆動励磁周波数 375 Hz（ナトリウム技術開発室における炉外試験結果により得られた、常陽MK-I炉心での温度条件に最適な値）において、1次系統流量に対する流速信号の直線性を確認し、経時変化を評価する。また、炉心体系の変化（炉心燃料集合体本数の増加）に伴う集合体流量の変化を測定する。

試験は、各定格サイクル開始前に実施される流速計較正特性試験時及び1次系統流量を変化させる機会を適時とらえ、1次系統流量を0%（全ポンプ停止）から100%（2520 m³/h、定格流量）まで10%ステップで変化させ、各ステップの安定状態において測定を行なう。安定状態は1次系統流量の変動を極力減少させるため、セルビウス自動制御方式より1次主ポンプ回転数一定マニュアル制御方式に切替える。

3.1.2 温度依存性・励磁周波数依存性

流速検出特性の経時変化等の特性を把握するために、流速信号の温度依存度を測定する。また、1次コイルを駆動する励磁周波数を150 Hz～500 Hzまで変化させ、ナトリウム技術開発室における炉外試験結果との比較を行う。

流速信号の温度依存性測定は、各定格サイクル開始時の核加熱系統昇温（250℃～370℃）及び、出力上昇（中心集合体出口温度で370℃～520℃）において、ほぼ20℃毎に測定を実施する。また、流速信号の励磁周波数依存性測定は、1次系統流量100%状態でかつ、中心集合体出口温度約520℃（75 MW出力運転）及び約250℃（温態待機）のそれぞれの状態において励磁周波数を変化させて測定を行う。

3.1.3 ノイズレベル

流速信号中に混入する電氣的ノイズ、流動ノイズ等のレベル及び周波数成分を調べ、流速信号への影響の程度を評価する。

測定は、直線性測定と同じ時期であり、アナログ・レコーダに各流量状態での信号を記録する。測定終了後、レコーダを再生し、周波数解析を行う。

3.1.4 連続監視

原子炉定格出力運転に従って、1次系統流量信号と同時に流速信号を測定し、両者の関連性を

確認する。また、流速信号の安定性を確認する。

3.2 温度検出特性

3.2.1 直線性

1次コイル駆動励磁周波数 375 Hz 状態において、中心流速計内蔵熱電対に対する流速計温度信号（周辺検出器を含めて4信号）の直線性を確認する。

測定は、各定格サイクル開始時の核加熱系統昇温（250～370℃）及び出力上昇（370℃～520℃）においてほぼ20℃毎に測定を行う。

3.2.2 励磁周波数依存性

1次コイルを駆動する励磁周波数を150 Hz から500 Hz まで変化させて測定を行い、特性の確認を行う。

測定は、1次系統流量100%で、かつ、中心集合体出口温度約520℃（75 MW出力運転）及び約250℃（温態待機）のそれぞれの状態において実施する。

3.2.3 連続監視

原子炉定格出力運転に従って、流速計温度信号を測定し、安定性を確認する。

3.3 コイル導通抵抗

コイル導通抵抗を温度上昇に従って各定格サイクル運転毎に測定することにより、検出器特性の経時変化を確認する。測定は、各定格サイクル開始時の核加熱系統昇温（250℃～370℃）及び出力上昇（370℃～520℃）において約20℃毎に測定を行う。基準温度は、中心流速計内蔵熱電対出力とする。

3.4 速応性熱電対の応答性

熱電対先端と保護管内壁との間隙に低温で溶融する合金を封入して速応性を持たせた熱電対の応答性を確認する。

測定は、原子炉スクラム時の信号を用い、評価は時定数（ $1/e$ に達するまでの時間）を用いる。

3.5 相関法による流速絶対値測定

ラッピングワイヤ及びハンドリング部構造より発生している冷却材乱流（流動ゆらぎ）信号を、軸方向（流れ方向）の異なる2点に位置する流速計2次コイルによって検出し、両信号間の相関関数を計算して得られる移行時間より Na の絶対流速を計算する。計測系は、Fig. 3.5.1 に示す

ものを用い、相関計算は計算センタの大型計算機 (FACOM M-200) を用いた。

測定は、流速検出特性・直線性の項で述べたプラント状態と同じである。

3.6 自然循環流量検出特性

「常陽」特殊試験の一つとして実施される自然循環試験時に、本流速計を用いて自然循環流量の検出を行う。自然循環流量領域においては、強制流時に比べ乱流の程度が小さいため、平均化回数を強制流時の $1/10$ とする。

第4章 試験結果及び検討

4.1 流速検出特性

4.1.1 直線性

1次系統温度約 250 °C等温状態、励磁周波数 375 Hz 時における1次系統流量に対する流速信号特性をFig. 4.1.1～Fig. 4.1.7に示す。これらのグラフのうち、Fig. 4.1.1, Fig. 4.1.3, Fig. 4.1.6の3ケースは、75 MW 定格運転開始前に実施された流速計較正特性試験結果であり、炉心中心位置にはPPJX13（低出力試験時より装荷されている燃料集合体で最も燃焼が進んだもの）が装荷されている状態である。Fig. 4.1.2では、75 MW 定格第4サイクル運転と第5サイクル運転の間に実施された50 MW 特殊運転時に得られた特性である。この時の炉心中心位置には、PPJD1N（未燃焼燃料集合体）が装荷されている状態である。また、Fig. 4.1.4, Fig. 4.1.5, Fig. 4.1.7は、燃料置換反応度測定試験時の結果であり、Fig. 4.1.4はPPJD1B（未燃焼燃料集合体）、Fig. 4.1.5はPPJX13、Fig. 4.1.7はPPJD1Nがそれぞれ装荷されている状態である。各図上「○」印は中心検出器SENSOR #1、「△」印は周辺検出器SENSOR #2、「□」印はSENSOR #3、「▽」印はSENSOR #4の各流量における測定値である。これら測定点を最小二乗法で1次式に近似し、この回帰直線よりの偏差をフルケース（2520 m³/h 定格流量）に対して%表示したものが各図の上部に示した図である（但し、中心検出器SENSOR #1のみ）。

図中より判る通り、中心検出器についてのみ言えば各ケースとも回帰直線よりの偏差（ERROR）は、±5%以内で良好であり、乱流場におけるサンプリング周期の1秒を考慮すればデータのバラツキは妥当なものであると判断できる。また、各図において見られる下に凸のエラーの傾向は、定格流量時以外の流量状態における流量再配分特性を表わしていることが解析⁽²⁾により得られている。すなわち、炉心中心集合体のような炉心燃料の圧力損失分担は、バンドル部摩擦圧力損失が支配的（全圧力損失の約6割）である。この圧力損失係数は流量の減少とともに増大するため、低流量時には流量を抑制する傾向となる。この傾向は、系統流量で500 m³/h以上の領域で顕著に現われており、系統流量の減少割合よりも集合体流量の減少割合の方が大きいことから理解できる。一方、500 m³/hよりも低い系統流量領域においては、ナトリウム水頭による圧力損失が支配的となり、炉心崩壊熱による浮力の影響が表われ易い状況となる。この影響は各図における約500 m³/h以下の領域で明確に表われている。

各ケースにおけるフィッティング係数a（1次系統流量に対する流速検出感度（V/(m³/h)）、およびb（不平衡残留電圧(V)）をTable 4.1（1/3）～（3/3）に示す。各検出器下段の%表示値は、75 MW 定格第4サイクル開始時に得られた各検出器のa およびb を基準として、この値からの偏差を他6ケースについて算出したものである。この結果より、不平衡残留電圧b の変化は

各検出器ともほぼ±10%以内であり、中心燃料集合体崩壊熱による自然循環流量の影響を大きく受けているのが判る。また、不平衡残留電圧の偏差は、サイクルを経るに従って徐々に大きくなっているが、自然循環流量の違い（崩壊熱量の違い）および測定を実施した系統流量ポイントの違い（測定ポイントの重み）等により単純に検出器の経時変化であると断言できない。また、1次系統流量に対する流速検出感度 a についても、上述した違いによる誤差が含まれようが、炉心中心位置に装荷される燃料集合体の違いによっても上記誤差では説明しきれないであろう量の変化が見られる。これに関しては、第5章で詳しく述べる。

なお、流速信号により炉心体系拡大に伴う中心燃料集合体流量の減少を確認するという試みは、炉心燃料1体増加による流量変化がたかだか1%弱であり、測定誤差内に含まれてしまうため不可能である。また、第4サイクル（77体炉心）から第6サイクル（79体炉心）にかけての2体の炉心体系拡大においても明確な傾向は表われていない。

4.1.2 温度依存性・励磁周波数依存性

各運転サイクルの出力上昇（温度上昇）時に流速信号の温度依存特性を得た。結果を Fig. 4.1.9 ~ Fig. 4.1.12 に示す。横軸の温度は、いずれの検出器についても中心検出器内蔵の熱電対出力である。各温度における流速信号測定値は、1次系統流量のセルビウス制御による流量変動を補正するため、2520 m³/h 定格流量にリニアで規格化した。

各図より判る通り、中心検出器 SENSOR #1 の温度依存性は、熱電対出力に対して割合良い直線性を有するが、周辺検出器 SENSOR 2 ~ 4 については良好ではない。この原因として、熱電対先端から各流速計コイル中心位置までの距離の違いが考えられる。中心検出器のそれは約 49.5 mm であるが、周辺検出器のそれは流動的相互干渉を減少させる為 164.5 mm である。すなわち、熱電対により検出されたある温度の冷却材が各流速計位置に達するまでの間に冷却材混合が起ればその温度における流速信号値を示さない。これは、距離が長い程混合が促進されるため、周辺検出器の流速信号温度依存特性は非直線性を示すものと考えられる。

本試験期間中に於ては、温度補償回路を作動させなかったが、温度補償をかけた場合、各流速信号とも±5%以内で補償可能であろう。

Fig. 4.1.13 に中心検出器・流速信号の励磁周波数依存特性を示す。測定は、513°C（75 MWt）出力運転状態）および 257°C（温態待期状態）において実施した。両信号は Na 技術開発室で実施されたオフセット励磁周波数依存特性確認試験結果を用いて、オフセット分を差し引いてある。炉外試験の各ピーク周波数の値は、炉外試験における流速検出感度励磁周波数依存特性カーブより得た値であるが、各温度について流速に対する直線性が良好なことから流速信号（DC 値）にピーク周波数の値を用いても問題はないものと思われる。各温度における炉外試験と炉内試験とのピーク周波数の違いは、どちらも流速信号値で 7 mV（約 1%）程度であることから測定誤差（温度ゆらぎ、流量ゆらぎ等）内に含まれる。以上より、流速信号の励磁周波数依存特性は、Na

技術開発室で実施された炉外試験結果と有意な差は見られないと判断する。

4.1.3 ノイズレベル

1次系統流量を変化させ流速信号の周波数解析を実施した。結果をFig. 4.1.14に示す。周波数解析に用いた流速信号はシグナル・コンディショナ出力であり、シグナル・コンディショナの出力信号帯域はD.C.～10 Hzである。このため、周波数解析時の周波数帯域も10 Hz以下とした。

図から判る通り、1次系統流量減少に伴ない各周波数レベルも減少している。これらは、燃料集合体の構造より発生している流動ゆらぎ成分であり、0.5～6.0 Hzの帯域成分が支配的である。20%流量における周波数解析結果より判る通り、電気ノイズの流速信号への影響は見られない。

4.1.4 連続監視

一例として、75 MW 定格第5サイクル時の流速信号（SENSOR #1, #2）および1次系統流量(A)の傾向をFig. 4.1.15に示す。サンプリング周期は、図中0～4日までは10分、4.5～9.3日までは30分である。1次系統流量は、静止セルビウス方式により流量は一定制御されているが数十分の周期でステップ状変化を起す。図中のスパイク的変動はこのためであり、約 $10^3/h$ の変動量である。Fig. 4.1.16に示す通り、中心流速信号と1次系統流量との間には大きな関連性は無く、セルビウス制御によるステップ状変化時を除けば流速信号は1次系統流量のゆらぎに依存・影響されない。

4.2 温度検出特性

4.2.1 直線性

励磁周波数375 Hz、出力上昇（温度上昇）時における中心流速計内蔵熱電対出力に対する各流速計温度信号特性をFig. 4.2.1～Fig. 4.2.4に示す。測定は、ほぼ20℃温度上昇毎に実施し、測定点を最小二乗法で1次近似した。また、回帰直線からの各測定点の偏差を600℃フルスケールにて算出し、各図上部に%表示した。ここで注意すべき点として、周辺流速計温度信号も中心流速計内蔵熱電対出力を基準にしているということである。これは、各周辺流速計温度信号が各周辺流速計内蔵熱電対出力を基準としてみても熱電対先端より流速計中心位置までのギャップ間における冷却材混合等により、あまり良い直線性が得られないという理由によるものである。

図より判る通り、中心検出器については各測定ケースとも±1%以内で直線近似が可能であり、かなり良い直線性を有する。しかし、周辺検出器については図中に記してはいないが、各測定ケース、各検出器とも±5%以内の直線性である。

各測定ケースにおけるフィッティング係数a（中心流速計内蔵熱電対出力1℃に対する出力電圧感度（V/℃））、b（0℃時出力電圧、Y切片（V））をTable 4.2（1/2）～（2/2）に示す。各検出器下段の%表示値は、75MW 定格第4サイクル出力上昇時に得られた各検出器のa、bを

基準として、この値からの偏差を他サイクル3ケースについて算出したものである。表中、50MW特殊試験サイクル時のみ炉心中心位置に新炉心燃料集合体（PPJD1N）が装荷され、他サイクルについては最も燃焼の進んだ炉心燃料集合体（PPJ X 13）が装荷されている。フィッティング係数 a は、熱電対位置より流速計中心位置までの間で冷却材混合状況が変化しなければ不変である。すなわち、 a の減少は冷却材混合状況の促進を表わし、 a の増加はその逆である。また、フィッティング係数 b は、燃料集合体出口 Na 温度絶対値の変化を表わす。すなわち、燃焼による温度変化と炉心体系の変化に伴う出力分担率変動による温度変化である。「常陽」に於ては、75 MW 定格第 4 サイクルから第 6 サイクルにかけて炉心は 77 体より 79 体に拡大されており、また燃焼により、中心集合体において合計約 4.0% の出力分担率の減少が簡易計算コードにより計算されている。仮に、混合状況が変らず出力分担率の変化のみであるならばフィッティング係数 b の変化のみが観測されるはずである。しかし、実測した各サイクル間の変化は、各検出器のフィッティング係数 a 、 b 両方に見られる。この結果より、出力分担率変化による状況変化よりも他効果（冷却材混合状況変化、検出器特性変化、測定誤差等）の方が量的に大きいことが予想される。このうち、中心燃料集合体为新燃料に置換された場合の変動量が他ケースに比べて平均的に大きい。これに関しては、第 5 章で詳しく述べる。

いずれにしろ、装荷される燃料集合体の違いによって前述した様な変化が見られ基準点が定まらないため、流速計温度信号の厳密な経時変化は明確に評価することができない。

4.2.2 励磁周波数依存性

Fig. 4.2.5 に中心流速計温度信号の励磁周波数依存特性を示す。流速計温度信号は、1次コイルと2次コイルの相互インダクタンスにより決定され、理論的には $f \cdot \sigma$ (f : 励磁周波数, σ : 流体の導電率) で作用する。ところで、磁場内に存在する構造物としては、検出器自身（純鉄コア）、保護管（SUS 316）およびナトリウムがあり、このように異種材料が混在する環境においては、励磁周波数 f は磁束浸透深さの違いとして、また導電率 σ はこれら材料個々の導電率の相乗効果（温度依存）の違いとして流速計温度信号に影響を与える。

図中の2つのカーブが持つ非直線性は、前述因子による効果である。しかし炉外試験結果と比較すると直線性がより悪く、検討を要する。

4.2.3 連続監視

75 MW 定格第 5 サイクル安定時における温度信号（SENSOR #1, #2）の挙動を Fig. 4.2.6 に示す。図中両信号の約半日周期のステップ変化は、原子炉熱出力調整によるものである。両信号は、きわめて安定な傾向を示しており、温度ドリフトは特に見られない。

4.3 コイル導通抵抗

温度変化に対する周辺流速計3体のコイル抵抗をFig. 4.3.1～Fig. 4.3.3に示す。各図中、「○」「△」「□」は75 MW 定格第4サイクル出力上昇時測定値、「●」「▲」「■」は75 MW 定格第5サイクル出力上昇時測定値および「○」「△」「□」は75 MW 定格第6サイクル出力上昇時測定値である。また、「○」「●」「○」は1次コイル導通抵抗、「△」「▲」「△」は上流側2次コイル導通抵抗および「□」「■」「□」は下流側2次コイル導通抵抗である。各ポイントを点線で結んだものは、炉外試験結果である。

各検出器、各コイルとも炉内測定値の方が炉外測定値に比べて導通抵抗は大きく、75 MW 定格第4、5サイクル時には約400℃付近に変曲点を持つ温度特性である。しかし各サイクルで同一方向の変化傾向を持たず、流速計に有意な経時変化は起っていない。

参考として、周辺流速計装荷位置における75 MW 出力運転時中性子束と流速計設置から75 MW 定格第6サイクル終了時までの間中性子束積算量を以下に記す。

75 MW 出力運転時中性子束	約 1.45×10^{11} n/cm ² ・sec
中性子束積算量	約 4.06×10^{19} n/cm ²

4.4 速応性熱電対の応答性

速応性熱電対の応答性を調べるために、原子炉スクラム試験時に流速計温度信号を含めて速応性熱電対信号をデータレコーダに記録した。試験後、信号を再成し電磁オシロに信号を描かせたものがFig. 4.4.1～Fig. 4.4.5である。燃料集合体出口Na温度は、原子炉スクラムに対して完全なステップ状変化を起すのではなく、ある時間遅れを持った1次遅れに近い応答を示す。ところで、流速計温度信号の検出原理は、温度変化に対するNa導電率の変化を信号として用いているため、検出器の熱容量による遅れ時間がなく原子炉スクラム時のNa温度変化を忠実に検出しているものと考えられる。

スクラム開始を零とにおいて各熱電対の時定数を算出したものがTable 4.4(A)である。また、流速計温度信号を基準として各熱電対時定数を算出したものがTable 4.4(B)である。速応性を持つTC-1～TC-4の熱電対時定数は、速応性を持たない(1A1)熱電対時定数に比べ平均3.2秒小さく、約半分の値である。但しこれら測定値には、目視による読み取り誤差(±0.5 sec)が存在する。速応性熱電対TC-1～TC-4の時定数のばらつきは、誤差を含めて最大1.8秒である。ばらつきの原因として、熱電対装荷状況の違い、熱電対の個差等が考えられるが、詳細は不明である。

4.5 相関法による流速絶対値測定

Fig. 4.5.1～Fig. 4.5.4に1次系統流量100%における各流速計の上・下流2次コイル出力ゆらぎ信号のAmplitude Spectrumと両者のCoherenceを示す。各Amplitude Spectrumのパワ

一で低周波帯が著しく減衰している理由は、測定系で使用したアクティブ型バンドパス・フィルタの特性（2～32 Hz，-48 dB/oct，図中に矢印で示した周波数帯域）によるものである。両ゆらぎ信号のCoherencyは、15 Hz 付近まではほぼ1に近い。これは、上流側2次コイルで検出されたゆらぎ情報が下流側2次コイルに正確に伝達されていることを意味する。位相は、3コイル型流速計の原理より2個の2次コイル信号が逆相になるため、180度付近の値を持つ。

相関計算により得られた2次コイル間のゆらぎ移行時間の逆数（1/ゆらぎ移行時間(sec)）をFig. 4.5.5, Fig. 4.5.6に示す。両図は炉心中心位置に新燃料（PPJD1B）および旧燃料（PPJX13）を装荷した測定条件の違うものである。図より判る通り、新燃料の方が旧燃料に比べ各検出器ともゆらぎ移行時間が小さく、Na流速が大きいことを意味している。

ところで、流れに沿って配置した1組の観測点間を流動ゆらぎが移行するのに要する時間(τ_0)は、流速に反比例するはずであるから、

$$V = \ell / \tau_0 \quad (\ell : \text{constant})$$

となる。ここで観測点間の実効距離 ℓ がわかれば上式よりゆらぎ移行速度 V がわかる。渦電流式流速計では実効距離を正確に決定することは困難である。しかし、1次コイル両端に近い部分で各2次コイルの流速検出感度が最大になることが非磁性ポピンを用いた数値計算結果より予想されるので、磁性ポピンを有する本流速計でも同様に検出コイル間の実効距離 ℓ は1次コイル長15 mmより少し大きい値と考えられる。ここで、 $\ell = 15$ mmを用いて100%流量時の中心流速計付近でのNa流速を計算すると、PPJD1Bの場合には1.8 m/sec，PPJX13の場合には1.6 m/secとなる。しかし、実効距離 ℓ は、15 mmより大きいと考えられるため、各流速は実際には上述流速より小さな値をとる。

1次系統流量に対するゆらぎ移行時間の逆数の関係は、4.1.1項の流速信号直線性で述べたように、流速信号と同様の下に凸の傾向を有しており、定格流量時以外の流量状態における流量再配分特性を表わしている。図中に示した回帰直線からの測定点の偏差がFig. 4.1.1～Fig. 4.1.7に示した値と異なるとは言え、異なる測定手法（2次コイル信号差より求めた流速信号と2次コイル間ゆらぎ移行時間より求めた流速信号）により同様の傾向が表われていることは、実際の現象を両測定法とも正確にとらえていることを示している。なお、回帰直線からの測定点の偏差の違いは、測定法に帰因するもの（1つの測定点のデータ平均化、フィルターバンド等）による差と考えられる。

4.6 自然循環流量検出特性

高速実験炉「常陽」においては、外部電源喪失時の崩壊熱除去手段として、1次系についてはボニーモータ（無停電々源系統により駆動）により1次主ポンプ（2台）が運転され、更にそのうち1台が駆動不可能となった場合でも補助冷却系の起動により2ループの崩壊熱除去手段が確保される。2次冷却系については系統の自然循環により1次冷却系の除熱を行う。このように、

事故時には崩壊熱除去手段が確保されているが、プラント固有の安全性（自然循環能力）を確保することは、安全対策上大きなバックアップとなる。以上のような背景により、30 MWt、75 MWt 出力運転状態よりポンプトリップによって原子炉をスクラムさせ、自然循環により崩壊熱除去を行なう試験を実施した。30 MWt 出力より行なうケースを Test - D とし、75 MWt 出力より行なうケースを Test - E とする。

両ケース時の流速計温度信号の挙動を Fig.4.6.1, Fig.4.6.2 に示す。定常運転時において中心流速計温度信号と周辺流速計温度信号は、集合体中心軸をゼロとする COS 分布状の温度分布を示すが、自然循環状態に移行してもわずかにこの状態は保持されている。これらの流速計温度信号を用いて、得られた流速信号の温度補正（流速信号の温度依存分布）を行ない、実際の Na 流速のみに依存する真の流速信号を算出した。結果を Fig.4.6.3, Fig.4.6.4 に示す。Test - E における中心流速信号は定格流量時の約 8% である。両ケースの強制流時における周辺流速信号は、中心流速信号の約 6 割程度である。しかし、自然循環領域に入ることにより、この傾向は逆転している。Fig.4.6.5 に中心流速信号と周辺流速信号の比の変化を示す。図より判かる通り、自然循環領域における周辺流速信号は、中心流速信号の約 1.5~1.6 倍である。Fig.4.6.6~Fig.4.6.9 に流速計内蔵熱電対の温度挙動を示す。また、Fig.4.6.10, Fig.4.6.11 に 1 次系統流量を示す。自然循環時の系統流量は、定格流量の 2~3% である。

以上自然循環試験時に得られた結果を記述したのみで詳細検討は含まれていない。今後以下の項目に着目して解析を実施し、報告する予定である。

- i) 流速計近傍における Na 流動状況
- ii) 流速の絶対値評価

いずれにせよ自然循環時のような微小流量状態においても、流速計により流速を確実に検出できる確証を得た。

第5章 燃料集合体出口部流動状況

5.1 燃料置換による流動状況の変化

4.1 流速検出特性および4.2 温度検出特性の項で、炉心中心位置に装荷される燃料集合体の違いによって各検出特性が大きく変化することを述べた。この相違を明示するために、各測定ケースで得られた中心検出器信号の値を100%とし、周辺検出器信号の値を極座標系に%表示した。流速信号についての結果をFig.5.1に、熱電対温度についての結果をFig.5.2に示す。両図中において円で結んだシンボル各3点は、各測定ケースでの各検出器の測定値であり、極座標中心が100%（中心検出器出力値）である。また、円に含まれない中心付近の各シンボルは、各円の中心点であり、流速分布または、温度分布の仮想ピークポイントである。各結果より大きく2種類の流速分布または温度分布に分類することが可能である。すなわち、流速分布については「●」、 「▲」、 「▽」のグループとその他のグループであり、温度分布については「○」、 「□」、 「▽」のグループと「△」である。

これら分類に寄与するであろう測定環境条件の違いとして、

- 1) 燃焼度の違いによるもの
- 2) 燃料集合体炉内装荷方位の違いによるもの
- 3) 炉心燃料本数の違いによるもの
- 4) Na 中浸漬時間の違いによるもの

が考えられる。

1)の燃焼度の違いによる影響は、燃料材料試験部より照射後試験結果³⁾として報告がなされているように、燃焼度にほぼ比例する燃料ピンの bowing 効果によるものである。燃焼に伴って燃料ピンの bowing 量が増加した場合、燃料ピンが垂直に林立している場合のバンドル部圧力損失に比べ、この値が変化を起して集合体内流動状況に影響を与えるであろうことは容易に想像がつく。実際、集合体内冷却材混合効果解析コード“SWIRL”により燃料ピンが同一方向に3mm 偏心した場合の冷却材混合状況の相違が計算されており、この相違は正常に燃料ピンが配列されている場合に比べ約7%混合効果が減少している。この解析ケースには、燃料ピンの bowing 効果は含まれておらず、これを考慮した場合には、より複雑な流動状況となることが想定され、冷却材混合効果にも大きな変化の現われることが想像される。現在、中心燃料集合体の照射後試験結果待ちであり、得られる結果をもとにして詳細検討を実施する予定である。

2)の燃料集合体炉内装荷方位の違いによる影響は、炉心基準方位と燃料集合体マックスキー方位との角度差の違いによる測定状況の相違である。この角度差は、ワイヤ・スパーサ巻き始め位置をパラメータとする集合体内冷却材混合効果への影響であり、前述“SWIRL”コードにより計

算されている。計算結果によると最大5%の効果が現われており、集合体径方向に完全に対称な流速分布および温度分布を持たない。このため、燃料集合体炉内装荷方位が異なれば、検出器は同位置であるために各集合体毎に非対称性を持つ各分布が検出される可能性は十分あり得る。実際、炉心基準方位からPPJX 13は-30度、PPJD 1NおよびPPJD 1Bは+30度に装荷されていた。現在、“SWIRL”コードによる流速・温度分布を用いて集合体流出後のNa流動状況を解析中である。

3)の炉心燃料本数の違いによる影響は、炉心体系の違いによる炉心内流量分布の変化によるものである。炉心燃料本数が増加し炉心体系が拡大した場合、炉心燃料1体当りの冷却材流量は減少する。しかし、炉心体系1体分拡大による中心集合体の流量減少は、たかだか、0.045 kg/sec (1%弱、炉心内流量分布測定結果)であり、“SWIRL”コードによる計算においても大きな冷却材混合状況の変化は見られない。したがって、炉心体系が拡大しても集合体出口部における流速および温度の分布形が変化しないと仮定するならば、各検出器とも同じ割合で減少傾向を示すであろう。しかし、実測した現象として炉心拡大により各検出器指示値が一律に減少していないことから、この効果は他の効果と比べてさほど大きなものでないことが推測される。

4)のNa中浸漬時間の違いによる影響は、ナトリウム技術部⁴⁾および燃料材料試験部より報告がなされている燃料被覆管の表面あらさ進行に伴う流動圧力損失変化によるものである。表面あらさの程度は、ほぼNa中の浸漬時間に依存して増加し、その結果として流動抵抗が増加する。仮にある位置の分布(温度分布に従う荒さ分布)を持って表面あらさの程度が進行した場合、検出される流速分布および温度分布が変化を起す可能性がある。現段階においては詳細は不明であり、照射後試験結果を待って検討を進める。

5.2 流動解析コードによる流動状況推定

本流速計がどのような流動状況場の情報を検出しているのかを確認するために、「常陽」に設置してから75MW定格第6サイクル終了時迄に得られた種々の試験結果を用いて、中心燃料集合体出口部における流動状況を解析コードにより計算した。使用した解析コードは、差分計算法による非定常2次元流動解析コードであり、温度計算ルーチンは含まれていない。解析範囲は、燃料集合体0、1列ハンドリングヘッド部(1A1-000-1D1)より熱遮蔽板までとした。解析部の構造をFig. 5.3に示す。ただし、図中の流速計保護管は解析対象物から除いた。集合体流出Na流速(解析モデル入力Na流速)は、集合体内冷却材混合効果解析コード“SWIRL”により計算された流速分布(Fig. 5.4)が集合対流量により変化しないものと仮定し、79体炉心体系における炉心内流量分布測定試験結果を用いてリニアに補正を加え、各集合体が炉内に装荷されている状況(マックスキー方位)に相当する断面(A-A', B-B', C-C')の流速を用いた。解析モデルからのNaの流出は、ハンドリングヘッド-整流格子間および整流格子-熱遮蔽板間よりの自由流出とし、これら各流速成分の微分値をゼロとした。

本計算で使用した解析条件は以下の通りである。

1) 動粘性係数 ν

$$0.278 \times 10^{-6} \text{ m}^2/\text{sec} \quad (520 \text{ }^\circ\text{C相当})$$

2) 時間きざみ幅 Δt

$$1 \text{ msec} \quad (\text{時間ステップ } \Delta t \text{ の間に流体が1つのセルを通過しないという制限})$$

3) 境界条件

全て NO - SLIP

Fig.5.5 に流動解析結果を示す。図中の矢印は方向のみで、速度情報は含んでいない。各集合体ハンドリングヘッドより流出したNaは、Fig.5.4 に示した流速分布をほぼ保ち、各集合体上部に位置する整流格子内へ流入している。しかし、1A1集合体流量が000集合体流量に比べ約2%多い(79体炉心体系における炉心内流量分布測定試験結果より)こと、および中心整流格子が円筒形で第1列目集合体上部までおよんでいることから、1A1集合体流量の約8%が中心整流格子内に流入している。また、1D1集合体流量は、000集合体流量に比べ約0.5%多いが、前記した1A1集合体より000集合体整流格子内へのクロスフロー(5.3節参照)による圧力分布の影響により、000集合体より1D1集合体整流格子内へ000集合体流量の約0.7%のクロスフローが見られる。整流格子流出Naは、その上部200mm位置にある熱遮蔽板に衝突することにより横方向ベクトルを得るが、その効果は整流格子流出直後のNa流動にすでに見られ、周辺流速計による流速信号情報は横方向ベクトルを含んでいる可能性が大きい。

ところで、燃料集合体ハンドリングヘッドからの冷却材の流出は、一種の噴流効果(Jet effect)と見なせる。Fig.5.6に自由噴流効果を集合体出口部に適用させた場合の流動状況の予想を示す。集合体ハンドリングヘッドより流出した冷却材は、周辺の冷却材を巻き込みながら減速を促進するが、図中のA領域の長さは通常噴出孔の形状が決まればその代表長さ(集合体ハンドリングヘッド冷却材流出直径)により一義的に決定されるものであり、Albertson⁵⁾によるとA領域の長さxは、

$$x = 1.93 \times D_0 \quad (5.2.1)$$

D : 噴出孔代表長さ (mm)

で表わされる。

この式に「常陽」燃料集合体ハンドリングヘッド冷却材流出直径56mmを代入して、A領域の長さxを求めると、xは約108mmとなる。今回の流動解析結果においてもこの噴流効果によるA領域が現われているのを確認しており、それによるとxの値は約92mmである。この値は上式より求めた値と比べて小さくなっているが、この主な原因として、上部に熱遮蔽板が存在すること、およびハンドリングヘッド部構造等が考えられる。

ハンドリングヘッド頂部より中心流速計中心位置までは104.5mmであり、流動計算結果によ

るA領域内に完全に入っておらず、中心位置における流速は V_0 の約78%という値が得られている。また、周辺流速計中心位置における流速は、 V_0 の約53%である。

流動解析結果より中心流速計については、中心燃料集合体より流出したNa流速をほぼ条件良く測定しているが、周辺流速計については、その上部に位置する熱遮蔽板等の影響による横方向ベクトルを持った流れを検出していることが想定される。

5.3 圧力勾配による集合体間クロスフロー

原子炉運転中において燃料集合体ハンドリングヘッド頂部より整流格子下端までは30mmのギャップが存在するために、燃料集合体相互での圧力勾配によりクロスフローが発生する。

まず、Fig.5.7に示すような簡単なモデルを用いて検討する。図より以下の関係式が簡単に導びかれる。

$$V_{00} = \alpha_1 \cdot V_{10} \quad (5.3.1)$$

$$V_{10} = \alpha_2 \cdot V_{20} \quad (5.3.2)$$

とすると

$$P_0 = P + \Delta H + \zeta \frac{V_0^2}{2g} + \zeta_c \frac{V_{0c}^2}{2g} + \zeta_c \frac{V_{1c}^2}{2g} + \zeta_c \frac{V_{2c}^2}{2g} - \frac{V_{00}^2}{2g} \quad (5.3.3)$$

$$P_1 = P + \Delta H + \zeta \frac{V_1^2}{2g} + \zeta_c \frac{V_{1c}^2}{2g} + \zeta_c \frac{V_{2c}^2}{2g} - \frac{V_{10}^2}{2g} \quad (5.3.4)$$

$$P_2 = P + \Delta H + \zeta \frac{V_2^2}{2g} + \zeta \frac{V_{2c}^2}{2g} - \zeta \frac{V_{20}^2}{2g} \quad (5.3.5)$$

$$A_c V_{0c} = AV - Ag V_{01} = AV_0 \quad (5.3.6)$$

$$A_c V_{1c} = A(V_{00} + V_{10}) - Ag V_{12} = A(V_0 + V_1) \quad (5.3.7)$$

$$A_c V_{2c} = A(V_{00} + V_{10} + V_{20}) = A(V_0 + V_1 + V_2) \quad (5.3.8)$$

$$|P_0 - P_1| = \zeta_g \frac{V_{01}^2}{2g} \quad (5.3.9)$$

$$|P_1 - P_2| = \zeta_g \frac{V_{12}^2}{2g} \quad (5.3.10)$$

以上より

$$P_0 - P_1 = \zeta \frac{V_0^2 - V_1^2}{2g} + \zeta_c \frac{V_{0c}^2}{2g} - (\alpha_1^2 - 1) \frac{V_{10}^2}{2g} \quad (5.3.11)$$

$$P_1 - P_2 = \zeta \frac{V_1^2 - V_2^2}{2g} + \zeta_c \frac{V_{1c}^2}{2g} - (\alpha_2^2 - 1) \frac{V_{20}^2}{2g} \quad (5.3.12)$$

となる。

ここで、

- P : 圧力
 ΔH : 圧力水頭
 ζ : 動摩擦係数
 g : 重力加速度
 A : 断面積

である。

圧力勾配によるクロスフローがなくなる条件は、

$$P_0 = P_1 = P_2 \quad (5.3.13)$$

である。したがって (5.3.11), (5.3.12) より

$$\zeta = (A_c/A)^2 \cdot (1 - 1/\alpha_1^2) \cdot (1 - \zeta) \equiv \zeta_{co} \quad (5.3.14)$$

$$(\alpha_1/\alpha_2)^2 = \alpha_1^2 - (\alpha_1^2 - 1) \cdot (\alpha_1 + 1)^2 \equiv \beta_0^2 \quad (5.3.15)$$

であるとき各燃料集合体間のクロスフローはなくなる。

上記条件からはずれた場合は、

$$\zeta_c > \zeta_{co} \text{ の場合} \quad P_0 > P_1 > P_2 \quad (5.3.16)$$

すなわち、中央側から周辺側へクロスフローが発生する。

$$\zeta_c < \zeta_{co} \text{ の場合} \quad P_0 < P_1 < P_2 \quad (5.3.17)$$

すなわち、周辺側から中央側へクロスフローが発生する。

$$\alpha_1 / \alpha_2 > \beta_0 \text{ の場合} \quad P_0 < P_1 = P_2 \text{ or } P_0 = P_1 > P_2 \quad (5.3.18)$$

すなわち、周辺部のクロスフローをなくすと中央部で内向きのクロスフローが発生する。逆に中央部をなくすと周辺部で外向きのクロスフローとなる。

$$\alpha_1 / \alpha_2 < \beta_0 \text{ の場合} \quad P_0 > P_1 = P_2 \text{ or } P_0 = P_1 < P_2 \quad (5.3.19)$$

すなわち、周辺部のクロスフローをなくすと中央部で外向きのクロスフローが発生する。逆に中央部をなくすと周辺部で内向きのクロスフローとなる。

実機においては

$$(1A1) \quad 7.42 \text{ kg/sec}$$

$$(000) \quad 7.28 \text{ kg/sec}$$

$$(1D1) \quad 7.32 \text{ kg/sec}$$

であり、

$$\zeta_c \approx \zeta_{co} \quad (5.3.20)$$

$$\alpha_1 / \alpha_2 < \beta_0^2 \quad (5.3.21)$$

の状況である。すなわち、中央部から周辺部への外向きのクロスフローが発生しているものと思われる。この傾向は流動解析結果とほぼ一致し、簡単な圧損計算によりクロスフローの状況を定性的に説明できる。

第 6 章 結 言

高速原型炉「もんじゅ」炉内計装用として新たに開発された渦電流式温度・流速計を「常陽」炉内に装荷し、実証試験を実施した。

得られた検出特性を以下に列記する。

(1) 原子炉起動・停止に伴う熱サイクル印加に対して、中心検出器の不均衡残留電圧変化は、75MW定格第4サイクル時の値を基準とするとMK-I運転サイクル中最大-39.9%であった。ただし、この変化量には、炉心崩壊熱による自然循環流量分が含まれている。

(2) 中心検出器流速信号の1次系統流量に対する直線性は、フルスケール(1次系統流量 2520 m³/hr)に対し、各測定ケースとも±5%以内で直線近似可能であった。

(3) 中心検出器流速信号の温度依存性は、中心検出器内蔵熱電対温度を基準とすると、フルスケール 600℃に対し各測定ケースとも±4%以内の直線性であった。

(4) 中心検出器温度信号の中心検出器内蔵熱電対温度に対する直線性は、フルスケール 600℃に対し各測定ケースとも±1%以内で1次近似可能であった。

(5) 各流速計コイルの導通抵抗は、中性子束照射積算量約 4.06×10^{19} n/cm² に対し有意な変化は認められない。

また、本流速計を用いて得られた「常陽」炉心内情報として以下のものが得られた。

(1) 「常陽」自然循環試験時に於て、中心燃料集合体出口部で定格流量時流速の約8% (Test-E, 75MW出力運転よりスクラム) の流速が検出された。

(2) 2次コイルゆらぎ信号間の相関計算より中心燃料集合体出口部のNaの流速絶対値を求めた結果、中心流速計位置で約 1.8 m/sec, 周辺流速計位置で約 1.6 m/secが得られた。

(3) 炉心中心位置に装荷されている炉心燃料を旧燃料から新燃料に置換することにより、集合体出口部における流速および温度分布に相違の生じることが確認された。

前述した通り、「もんじゅ」用流速計は実プラントにおいても良い特性を示していることから、将来炉において、流速計を用いた炉心内異常監視(チャンネル閉塞, チャンネル沸騰等)を実施する場合には有力な情報源となるであろう。

今後、「常陽」において実施してゆく本流速計についての試験として、

- (1) 各検出特性の経時変化追跡
 - (2) 流速計による集合体実流量測定法の検討
- 等を実施する予定である。

謝 辞

本試験実施にあたっては、高速増殖炉開発本部の関口 信忠氏（現、高速実験炉部部付）、荒木等主任研究員（現、機器開発室室付）ならびに大洗・ナトリウム技術開発室の高荷 智室長（現、高速炉機器開発部部長代理）に終始御指導をいただきました。また、ナトリウム技術開発室（現、機器開発室）の中本 香一郎副主任研究員、大山 信美研究員ならびに横河電機製作所の石井 清和氏には、貴重な御意見を賜りました。ここに厚く謝意を表します。

参 考 文 献

- (1) 石井, 中本他 “渦電流式温度流速計の特性試験 (IV)”
PNC資料 SN941 81-249 (1981年12月)
- (2) 飯田他 “中心列集合体流速信号特性に関する検討”
東芝技術連絡票 ECS-FC-01017 (1981年8月)
- (3) 渡辺他 “高速実験炉「常陽」炉心燃料集合体の照射後試験結果概要 (第2報)” PNC資料
SN941 81-198 (1981年10月)
- (4) 石橋, 姫野他 “常陽模擬炉心燃料集合体のナトリウム流動試験 (I)” PNC資料
SN 941 71-14 (1971年12月)
- (5) Albertson, L.M. et al., "Diffusion of submerged jets", Proc. of ASCE,
VOL.74 (DEC. 1948)

Table 4.1 (1/3) Change of detection characteristics for flow signal.

CYCLE SENSOR		The 4th cycle of 75MW		The 50MW special test		The 5th cycle of 75MW		Memo
		Unbalance signal (V)	Sensitivity (V/(m ³ /h))	Unbalance signal (V)	Sensitivity (V/(m ³ /h))	Unbalance signal (V)	Sensitivity (V/(m ³ /h))	
1		9.16×10 ⁻²	1.66×10 ⁻⁴	9.31×10 ⁻²	1.87×10 ⁻⁴	9.25×10 ⁻²	1.66×10 ⁻⁴	
	Diff. (%)			+1.64	+12.65	+0.98	0.0	
2		2.14×10 ⁻¹	9.09×10 ⁻⁵	2.27×10 ⁻¹	4.52×10 ⁻⁵	2.14×10 ⁻¹	9.01×10 ⁻⁵	
	Diff. (%)			+6.07	-50.28	0.0	-0.88	
3		2.29×10 ⁻¹	8.41×10 ⁻⁵	2.41×10 ⁻¹	8.04×10 ⁻⁵	2.33×10 ⁻¹	8.90×10 ⁻⁵	
	Diff. (%)			+5.24	-4.40	+1.75	+5.83	
4		1.48×10 ⁻¹	3.15×10 ⁻⁵	1.45×10 ⁻¹	9.93×10 ⁻⁵	1.44×10 ⁻¹	4.45×10 ⁻⁵	
	Diff. (%)			-2.03	+215.24	-2.70	+41.27	
Bundle ID No. of S/A (000)		PPJX13		PPJD1N		PPJX13		
Number of Core Fuel		77		77		78		

Table 4.1 (2/3) Change of detection characteristics for flow signal.

CYCLE SENSOR		Test of fuel reactivity measurement (1)		Test of fuel reactivity measurement (2)		The 6th cycle of 75MW		Memo
		Unbalance signal (V)	Sensitivity (V/(m ³ /h))	Unbalance signal (V)	Sensitivity (V/(m ³ /h))	Unbalance signal (V)	Sensitivity (V/(m ³ /h))	
1		8.46×10^{-2}	1.91×10^{-4}	8.90×10^{-2}	1.69×10^{-4}	8.26×10^{-2}	1.65×10^{-4}	
	Diff. (%)	-7.64	+15.06	-2.84	+1.81	-9.83	-0.60	
2		2.16×10^{-1}	3.35×10^{-5}	2.09×10^{-1}	9.48×10^{-5}	2.16×10^{-1}	1.00×10^{-4}	
	Diff. (%)	+0.93	-63.15	-2.34	-4.29	+0.93	+10.01	
3		2.41×10^{-1}	1.07×10^{-4}	2.46×10^{-1}	9.86×10^{-5}	2.69×10^{-1}	9.00×10^{-5}	
	Diff. (%)	+5.24	+27.23	+7.42	+4.78	+17.47	+7.02	
4		1.63×10^{-1}	9.46×10^{-5}	1.61×10^{-1}	3.96×10^{-5}	1.65×10^{-1}	2.94×10^{-5}	
	Diff. (%)	+10.14	+200.32	+8.78	+25.71	+11.49	-6.67	
Bundle ID No. of S/A (000)		PPJD1B		PPJX13		PPJX13		
Number of Core Fuel		78		78		79		

Table 4.1 (3/3) Change of detection characteristics for flow signal.

CYCLE SENSOR		Test of fuel reactivity measurement (3)		Memo
		Unbalance signal (V)	Sensitivity (V/(m ³ /h))	
1		5.50×10^{-2}	2.04×10^{-4}	
	Diff. (%)	-39.90	+22.89	
2		2.18×10^{-1}	3.63×10^{-5}	
	Diff. (%)	+1.87	-60.07	
3		2.29×10^{-1}	9.89×10^{-5}	
	Diff. (%)	0.0	+17.60	
4		1.43×10^{-1}	8.07×10^{-5}	
	Diff. (%)	-3.38	+156.19	
Bundle ID No. of S/A (000)		PPJD1N		
Number of Core Fuel		79		

Table 4.2 (1/2) Change of temperature dependency of flow signal

CYCLE SENSOR		The 4th cycle of 75MW		50MW special test		The 5th cycle of 75MW		Memo
		Output signal at 0°C (V)	Sensitivity (V/°C)	Output signal at 0°C (V)	Sensitivity (V/°C)	Output signal at 0°C (V)	Sensitivity (V/°C)	
1		3.55×10^{-1}	6.17×10^{-4}	4.76×10^{-1}	4.14×10^{-4}	3.83×10^{-1}	5.54×10^{-4}	
	Diff. (%)			+34.08	-32.90	+7.39	-10.21	
2		3.63×10^{-1}	3.82×10^{-4}	1.41×10^{-1}	7.82×10^{-4}	3.37×10^{-1}	4.44×10^{-4}	
	Diff. (%)			-61.16	+104.71	-7.16	+16.23	
3		2.84×10^{-1}	5.46×10^{-4}	4.18×10^{-1}	4.16×10^{-5}	3.42×10^{-1}	4.19×10^{-4}	
	Diff. (%)			+47.18	-92.38	+20.42	-23.26	
4		6.56×10^{-2}	5.27×10^{-4}	2.59×10^{-1}	5.10×10^{-4}	1.42×10^{-1}	3.99×10^{-4}	
	Diff. (%)			+294.82	-3.23	+116.46	-24.29	
Bundle ID No. of S/A (000)		PPJX13		PPJD1N		PPJX13		
Number of Core Fuel		77		77		78		

Table 4.2 (2/2) Change of temperature dependency of flow signal

CYCLE SENSOR		The 6th cycle of 75MW		Memo
		Output signal at 0°C (V)	Sensitivity (V/°C)	
1		4.03×10^{-1}	3.92×10^{-4}	
	Diff. (%)	+13.52	-36.47	
2		4.27×10^{-1}	2.34×10^{-4}	
	Diff. (%)	+16.53	-38.74	
3		4.10×10^{-1}	2.56×10^{-4}	
	Diff. (%)	+44.37	-53.11	
4		1.46×10^{-1}	2.87×10^{-4}	
	Diff. (%)	+122.56	-45.54	
Bundle ID No. of S/A (000)		PPJX13		
Number of Core Fuel		79		

Table 4.3 (1/2) Change of detection characteristics for temperature signal

CYCLE		The 4th cycle of 75MW		50MW special test		The 5th cycle of 75MW		Memo
		Output signal at 0°C (V)	Sensitivity (V/°C)	Output signal at 0°C (V)	Sensitivity (V/°C)	Output signal at 0°C (V)	Sensitivity (V/°C)	
SENSOR		-4.14×10^{-1}	2.16×10^{-3}	-3.85×10^{-1}	2.13×10^{-3}	-3.81×10^{-1}	2.11×10^{-3}	
		Diff. (%)			+7.00	-1.39	+8.00	-2.31
2		-3.67×10^{-1}	1.94×10^{-3}	-3.82×10^{-1}	2.00×10^{-3}	-3.80×10^{-1}	1.99×10^{-3}	
	Diff. (%)			-4.09	+3.09	-3.54	+2.58	
3		-4.56×10^{-1}	2.16×10^{-3}	-5.06×10^{-1}	2.33×10^{-3}	-4.48×10^{-1}	2.15×10^{-3}	
	Diff. (%)			-10.96	+7.87	+1.75	-0.46	
4		-4.77×10^{-1}	2.22×10^{-3}	-5.74×10^{-1}	2.51×10^{-3}	-4.80×10^{-1}	2.22×10^{-3}	
	Diff. (%)			-28.41	+13.06	-7.38	0.0	
Bundle ID No. of S/A (000)		PPJX13		PPJD1N		PPJX13		
Number of Core Fuel		77		77		78		

Table 4.3 (2/2) Change of detection characteristics for temperature signal

CYCLE SENSOR		The 6th cycle of 75MW		Memo
		Output signal at 0°C (V)	Sensitivity (V/°C)	
1		-3.81×10^{-1}	2.11×10^{-3}	
	Diff. (%)	+8.00	-2.31	
2		-3.77×10^{-1}	1.99×10^{-3}	
	Diff. (%)	-2.72	+2.58	
3		-4.89×10^{-1}	2.25×10^{-3}	
	Diff. (%)	-7.24	+4.17	
4		-5.30×10^{-1}	2.34×10^{-3}	
	Diff. (%)	-18.59	+5.41	
Bundle ID No. of S/A (000)		PPJX13		
Number of Core Fuel		79		

(A) Response time of ECFM's temperature signal and thermocouple signals (scram = 0sec.)

	Dead time (sec)	Time constant (sec)	memo
ECFM's temperature signal	0.6	5.1	scram = 0
TC - 1	1.7	8.1	
" 2	2.1	8.3	
" 3	1.6	7.2	
TC - 4	1.7	9.0	
1A1	1.7	11.4	

(B) Response time of thermocouple signals
(Response of ECFM's temperature signal = 0sec.)

	Dead time (sec)	Time constant (sec)	memo
ECFM's temperature signal	~0.0	~0.0	Response of ECFM's temperature signal = 0sec
TC - 1	1.1	3.0	
" 2	1.5	3.3	
" 3	1.0	2.1	
TC - 4	1.1	3.9	
1A1	1.1	6.3	

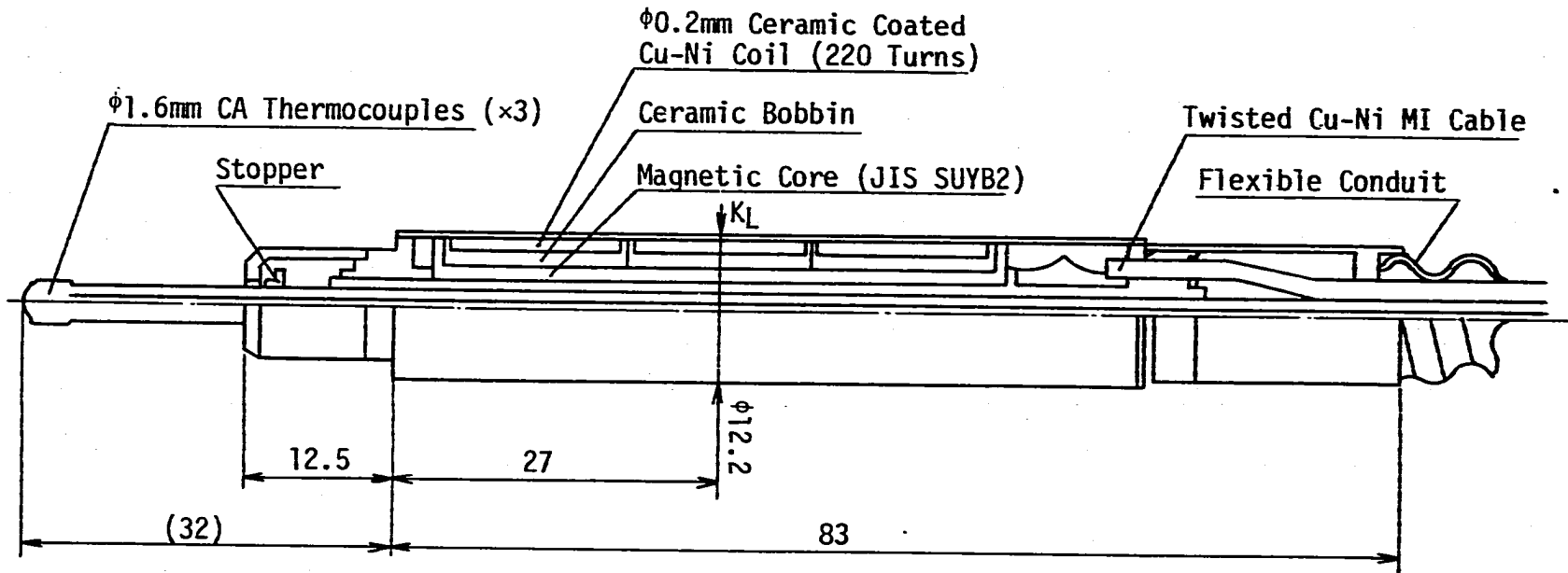


Fig. 2.1.1 Configuration of MK-IV Probe

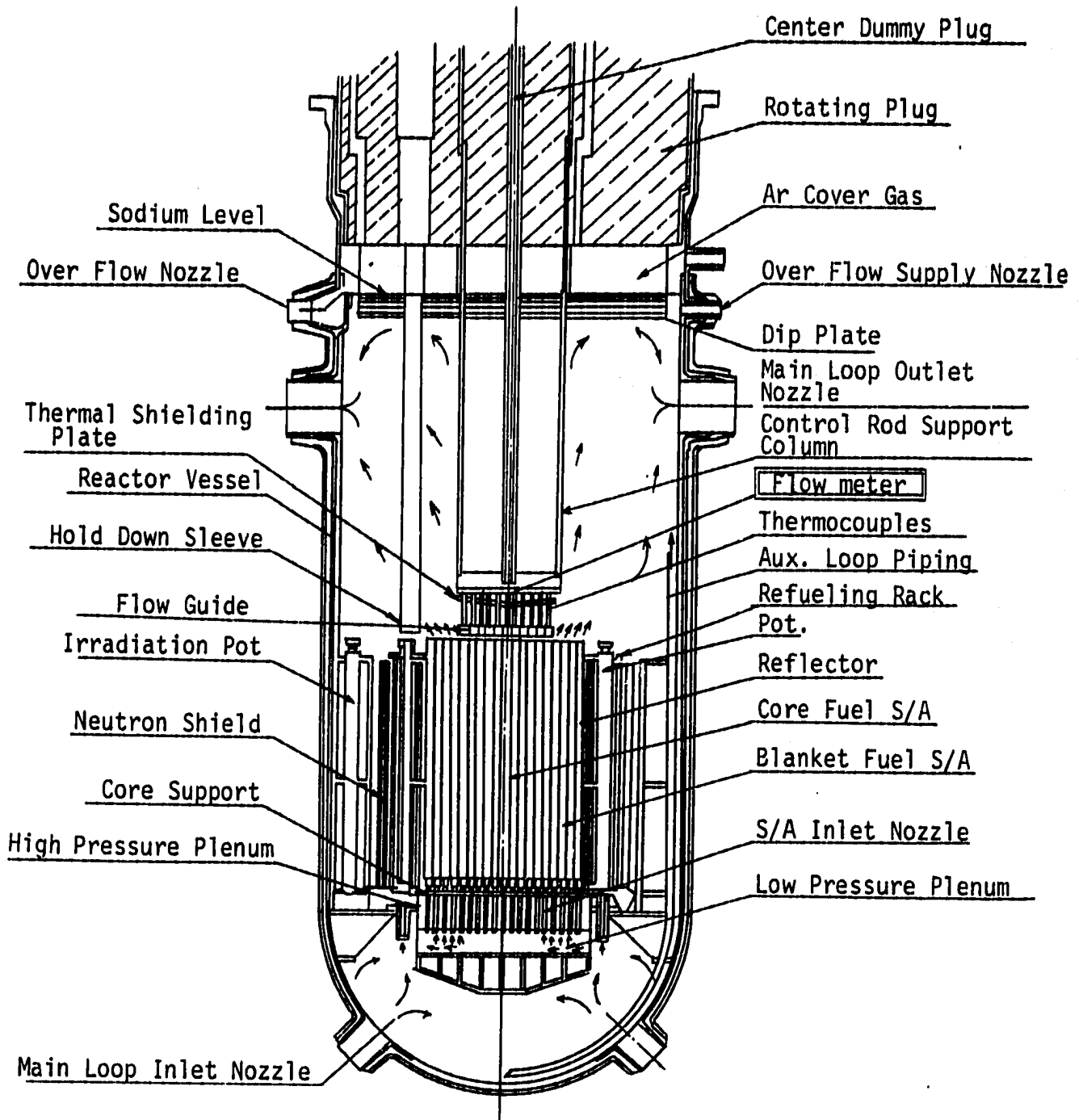


Fig. 2.2.1 Cross section of reactor vessel

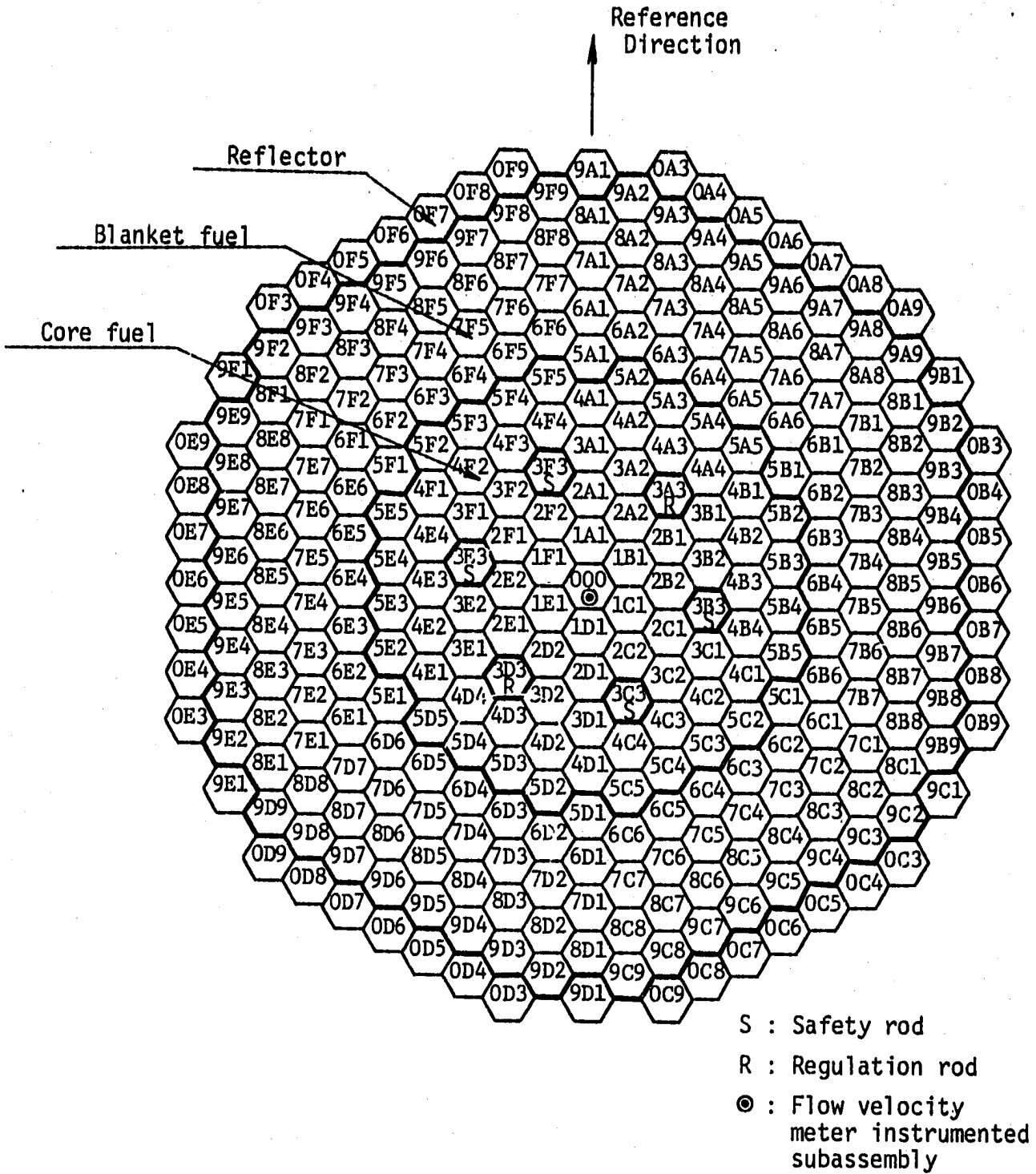


Fig. 2.2.2 JOYO core configuration and location of S/A outlet flow meter

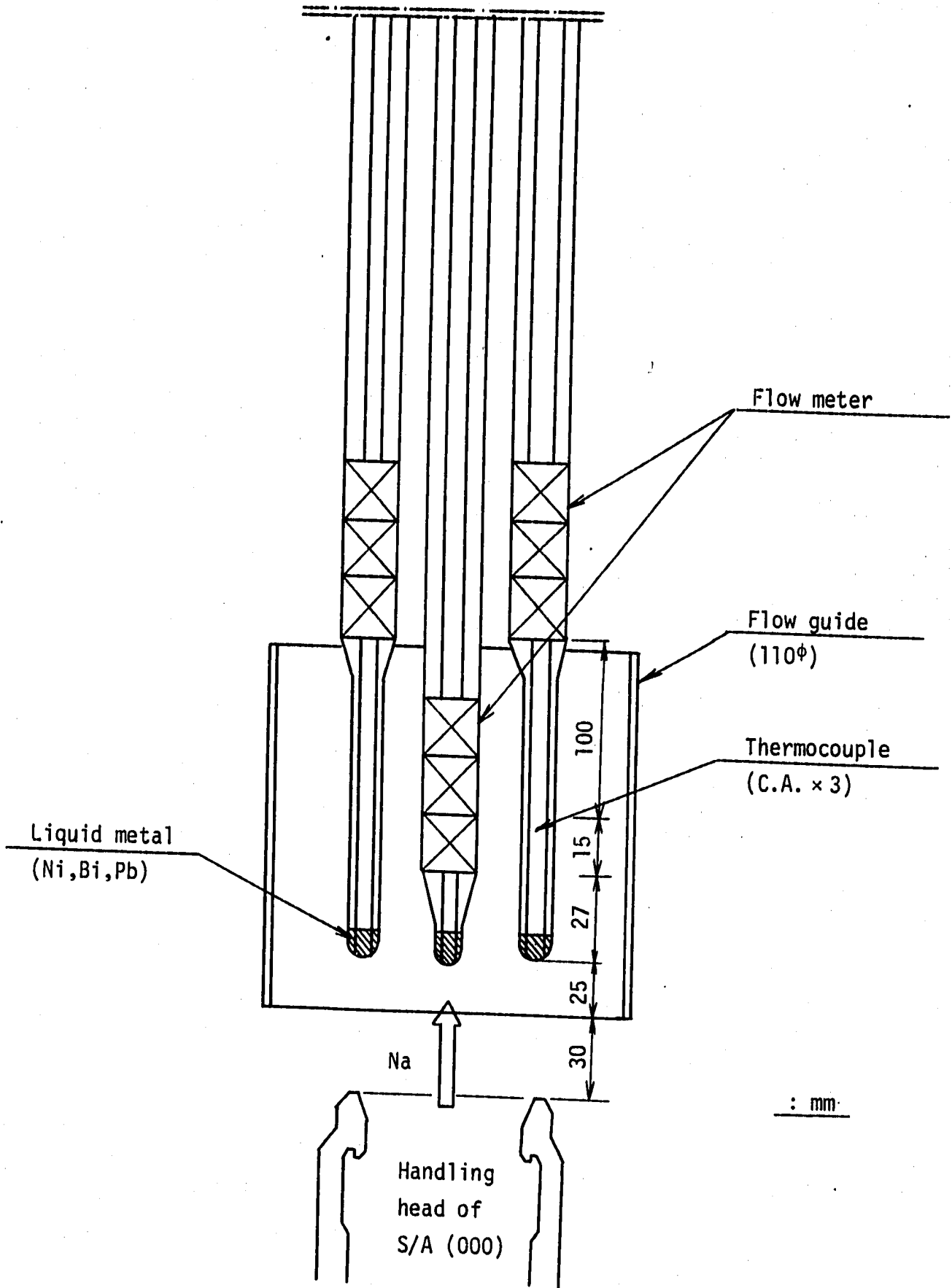


Fig. 2.2.3 Relative location of flow meter and T/C against S/A (000)

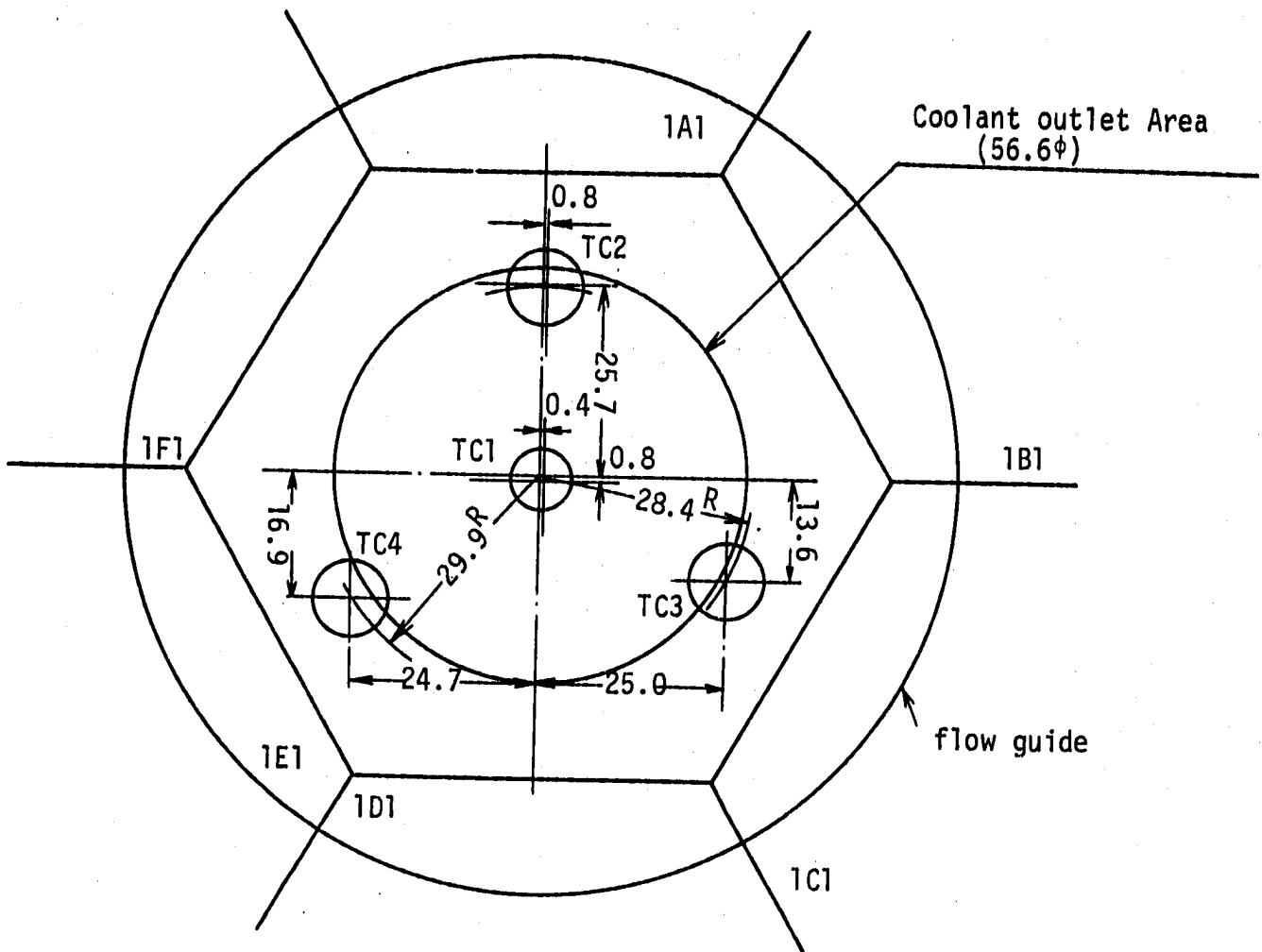


Fig. 2.2.4 Lateral Location of TC's and flow meter's

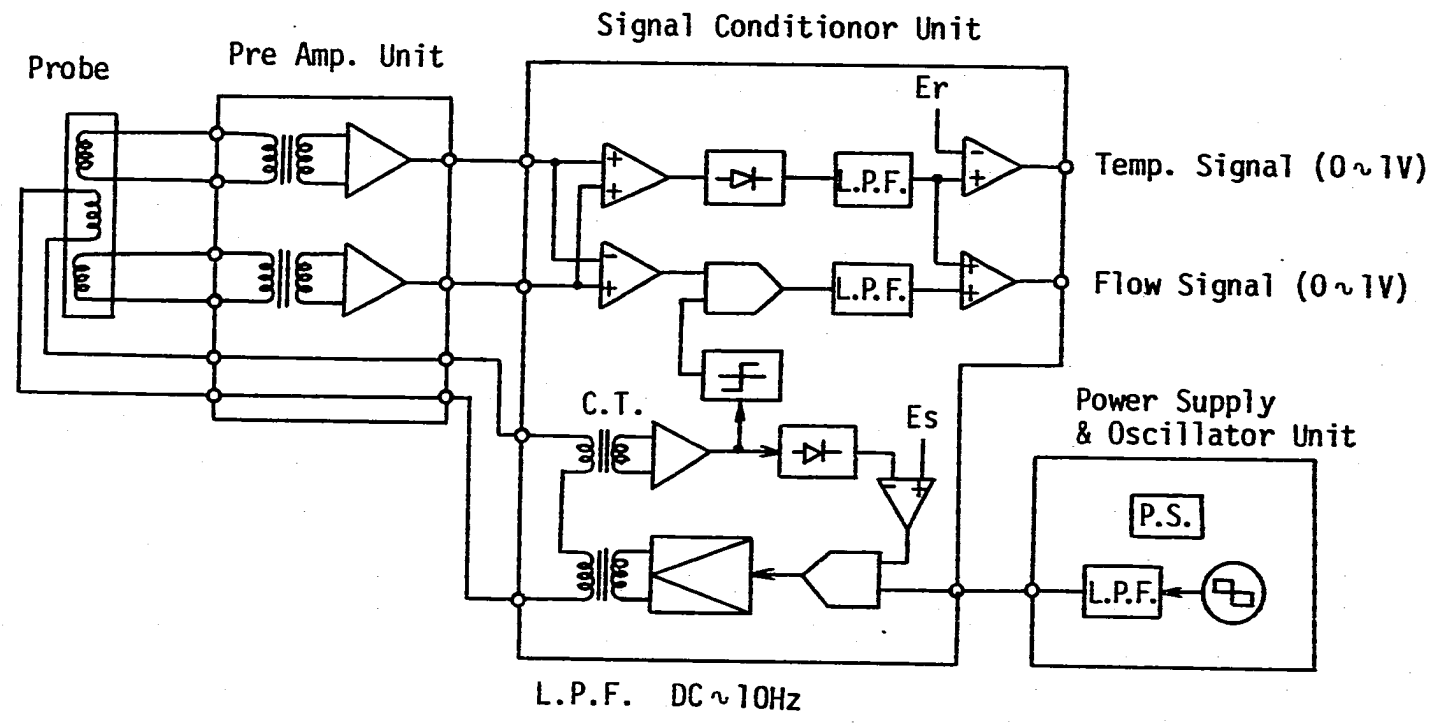


Fig. 2.3.1 Block Diagram of Detecting Circuit

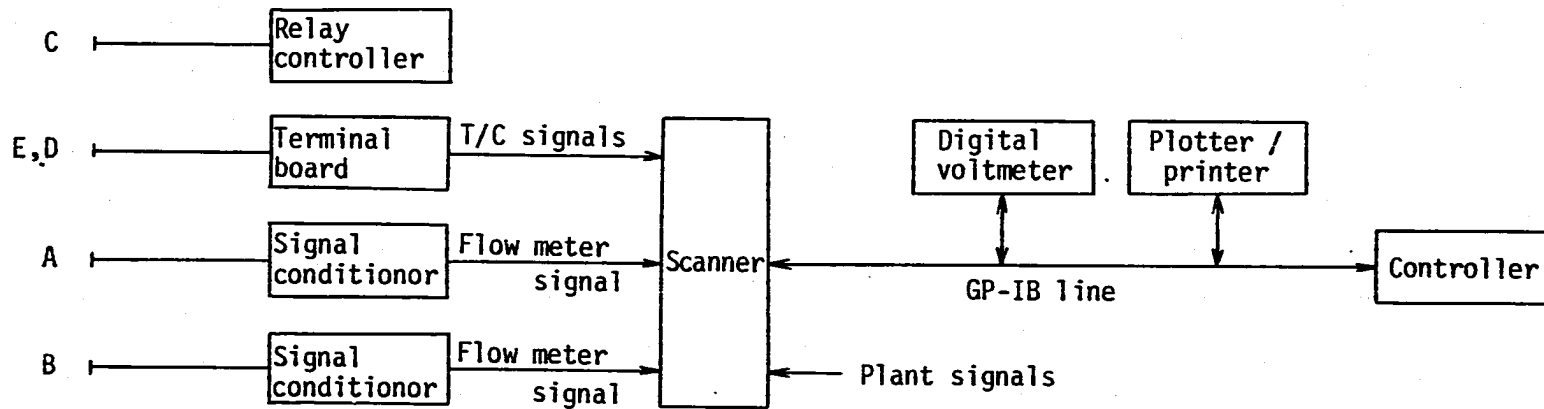
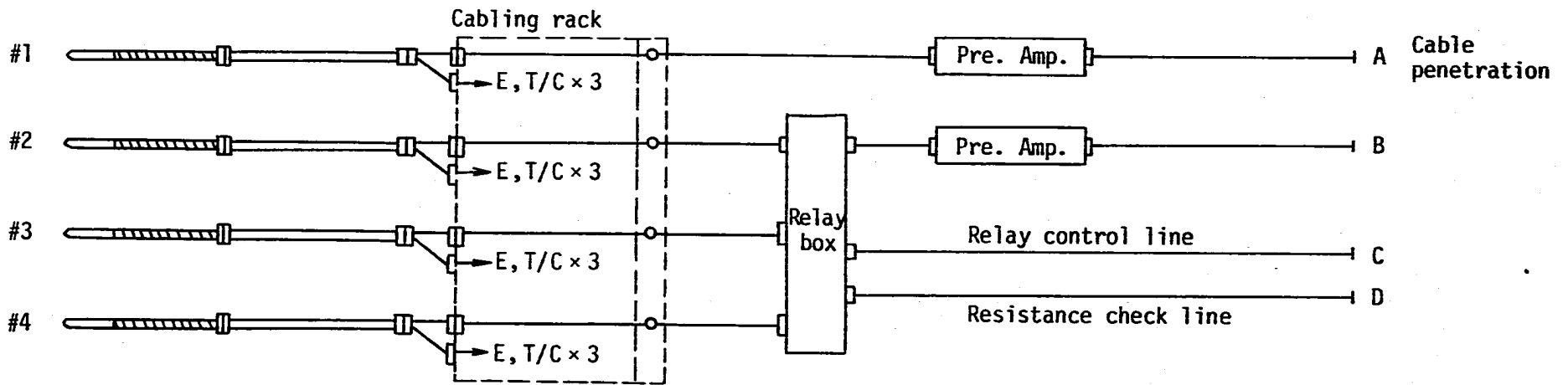


Fig. 2.3.2 Block diagram of S/A(000) outlet flow monitoring system

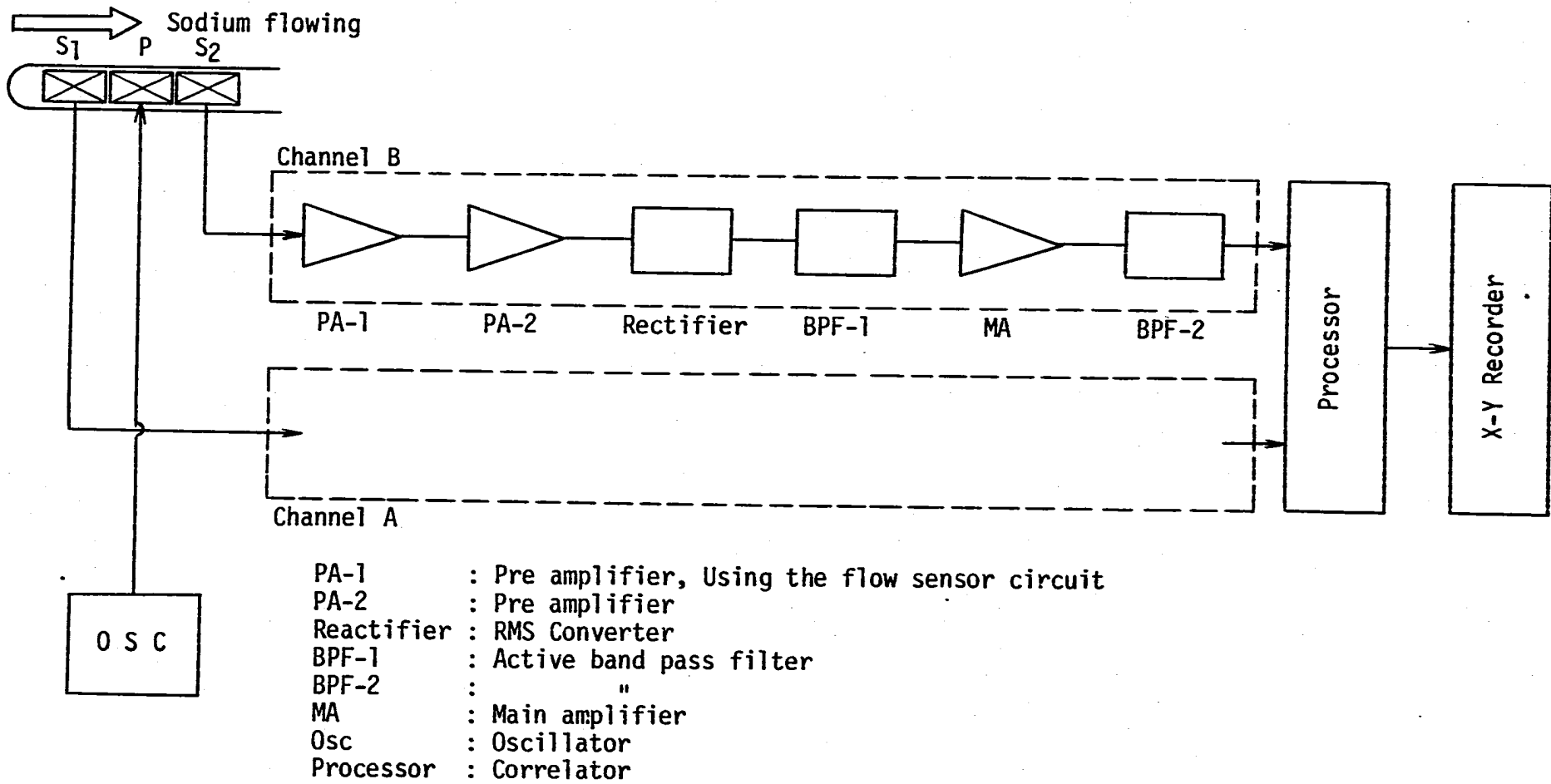


Fig. 3.5.1 Block diagram of measuring system for correlation method

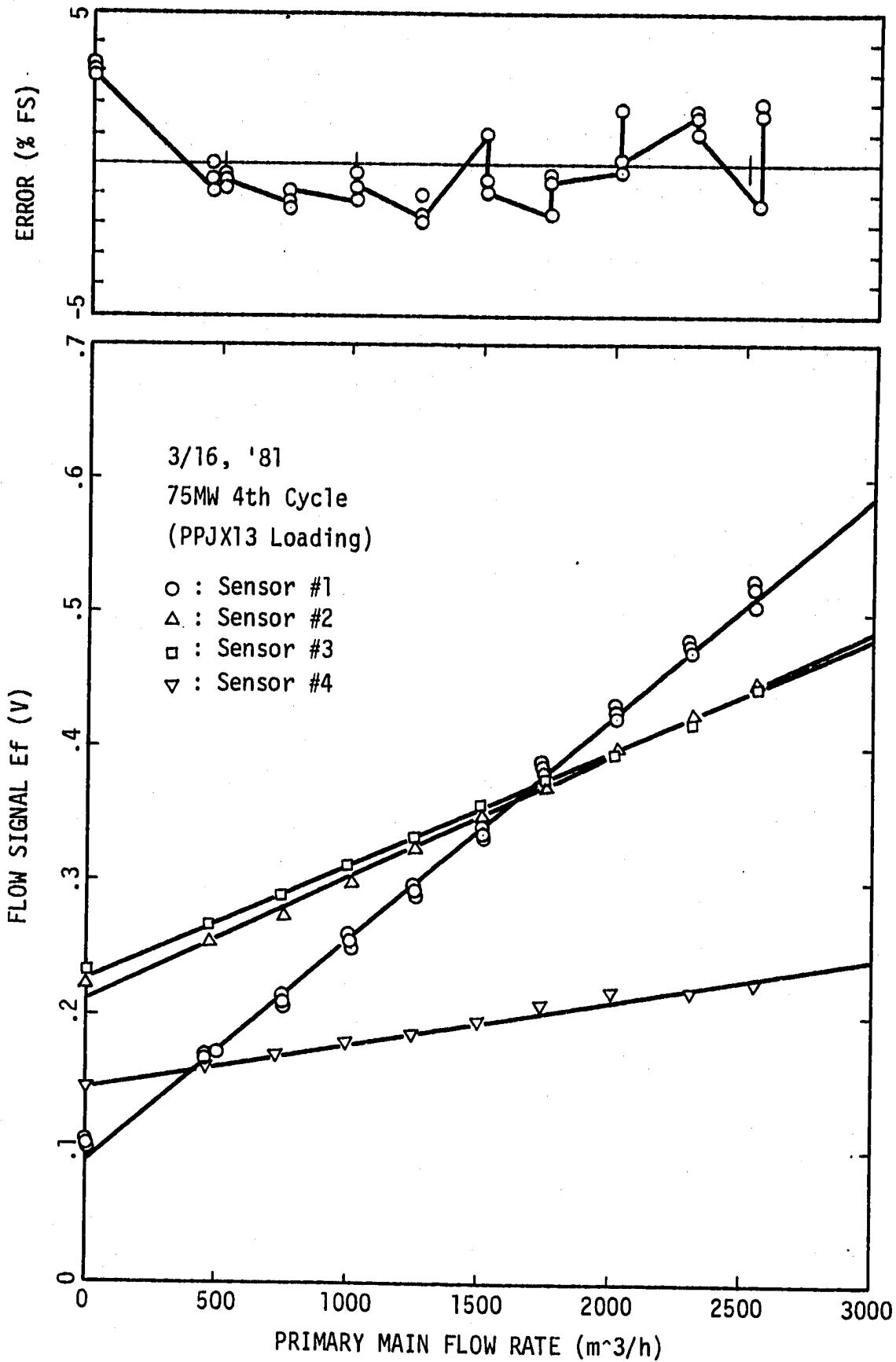


Fig. 4.1.1 Flow Signal VS. Main Flowrate at 4th Cycle of 75MW Power on PPJX13 Loading

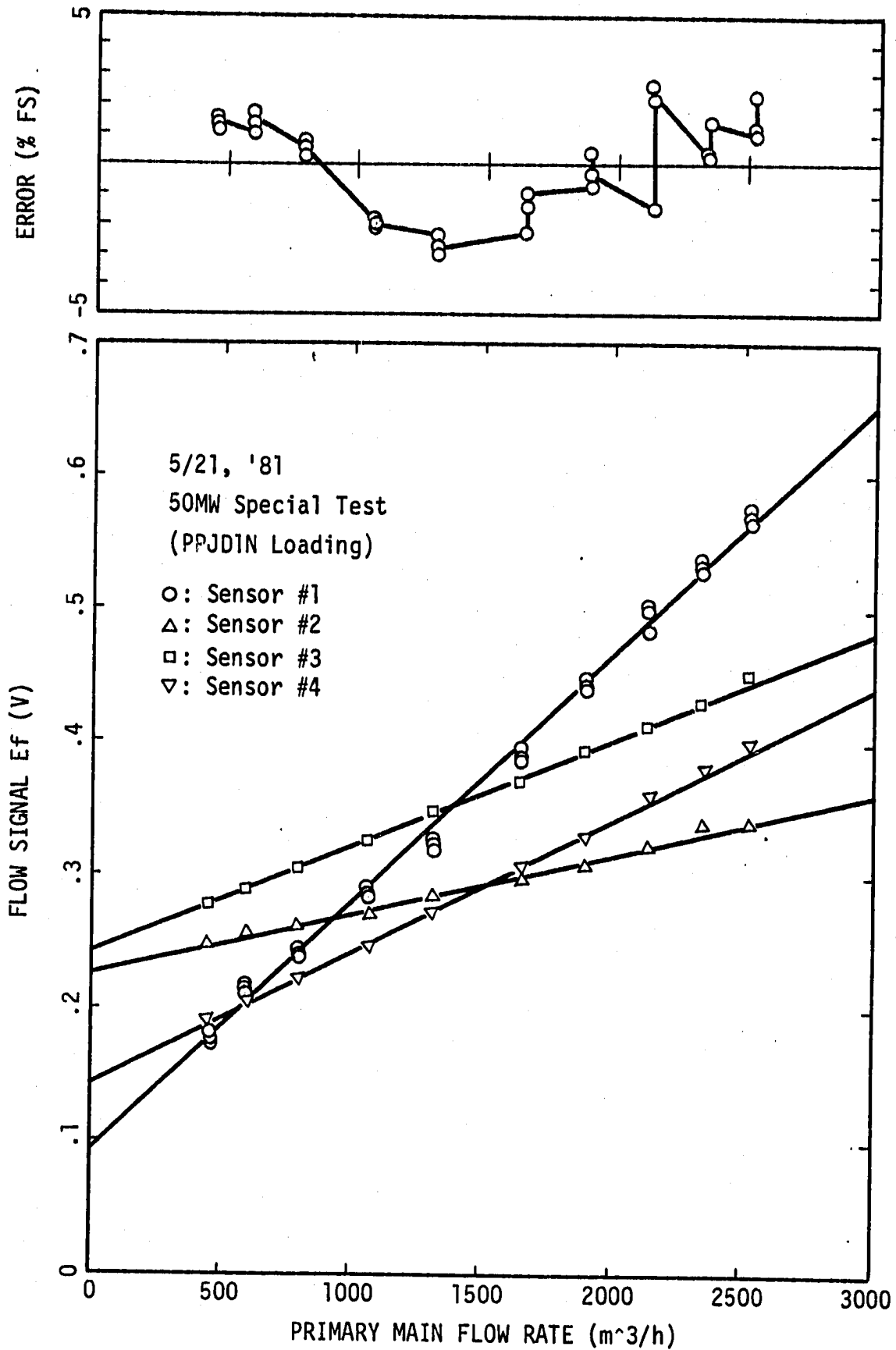


Fig. 4.1.2 Flow Signal VS. Main Flowrate at Special Test of 50MW Power on PPJDIN Loading

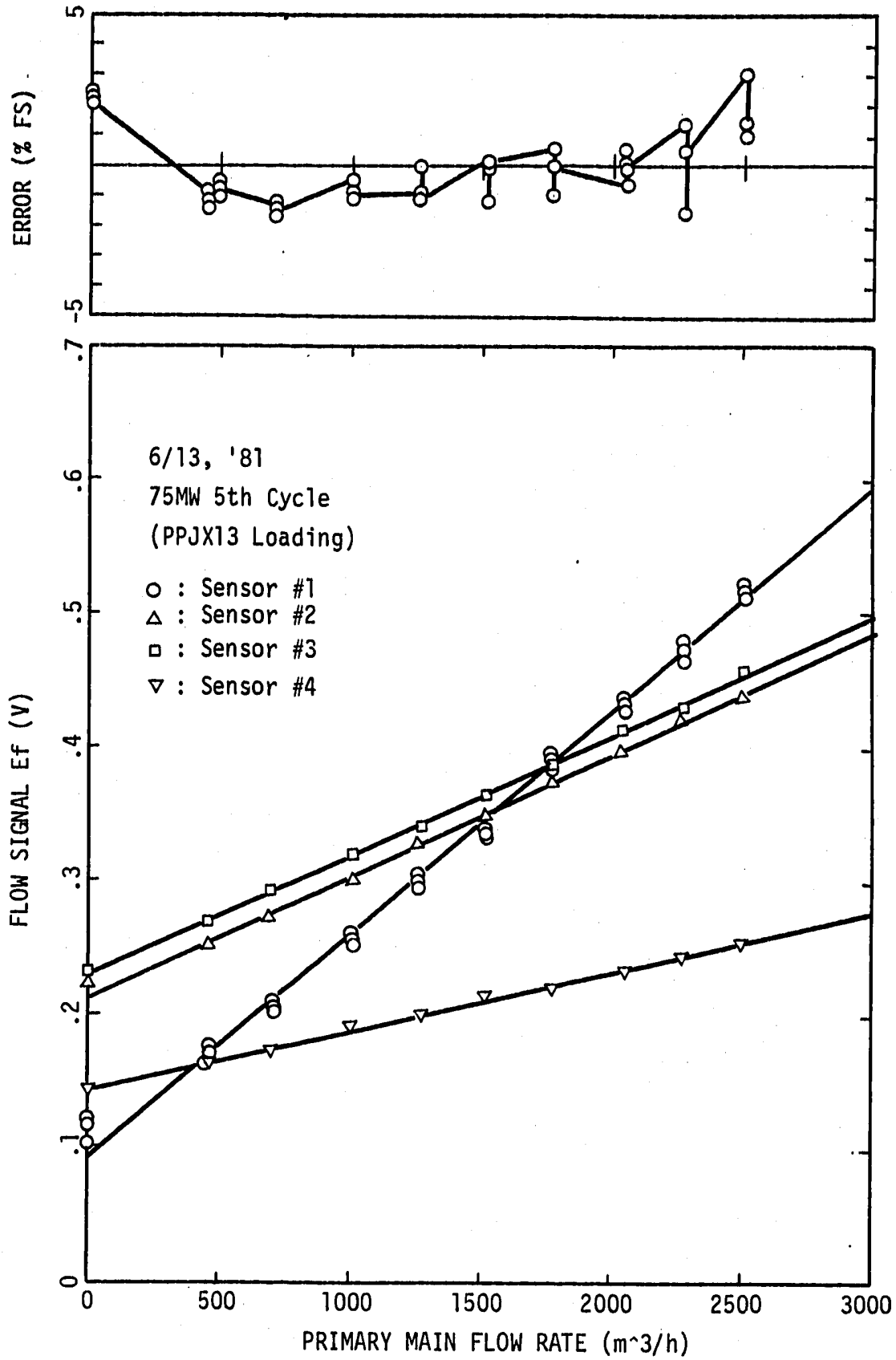


Fig. 4.1.3 Flow Signal VS. Main Flowrate at 5th Cycle of 75MW Power on PPJX13 Loading

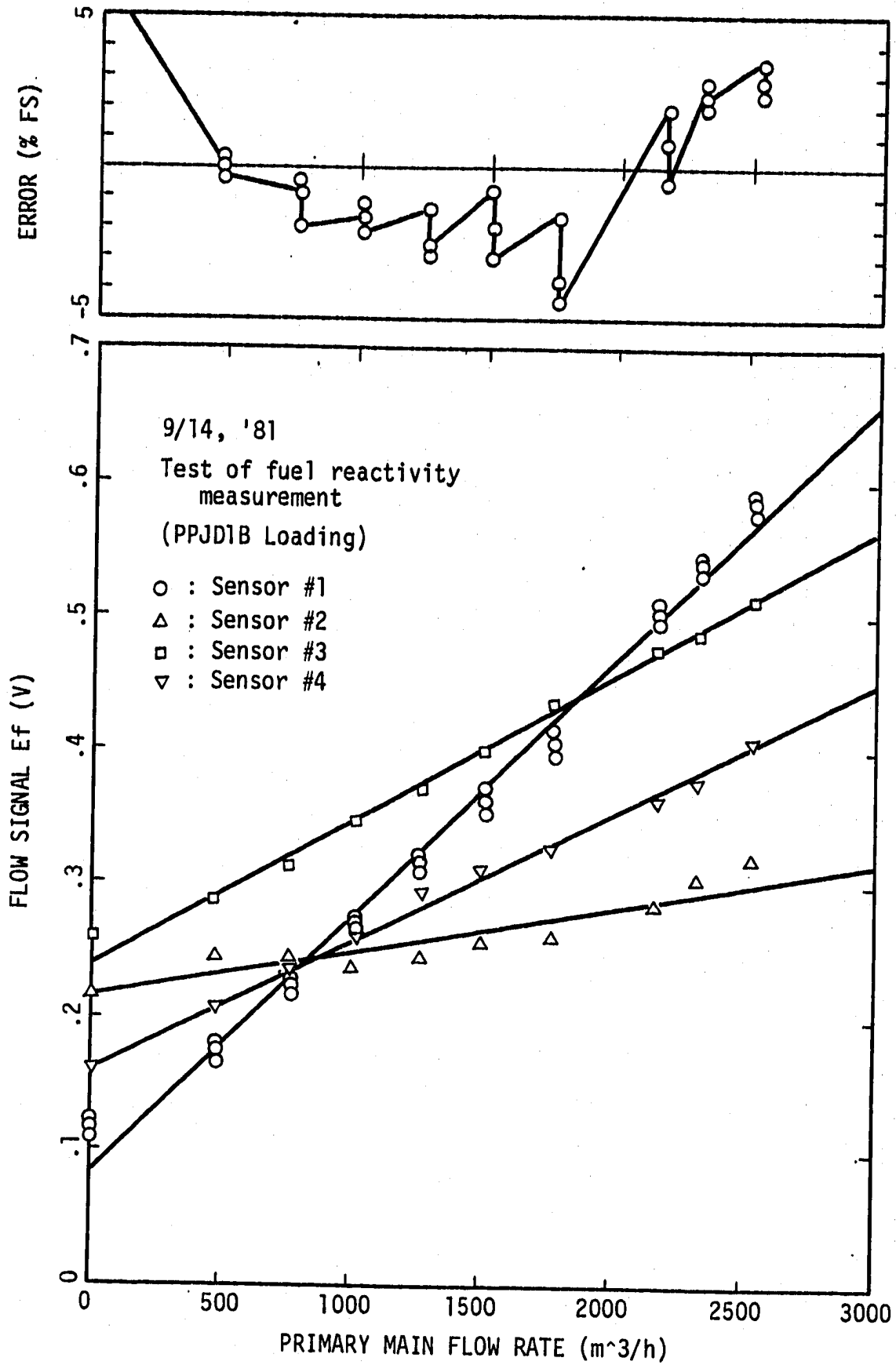


Fig. 4.1.4 Flow Signal VS. Main Flowrate at Test of Fuel Reactivity Measurement on PPJD1B Loading

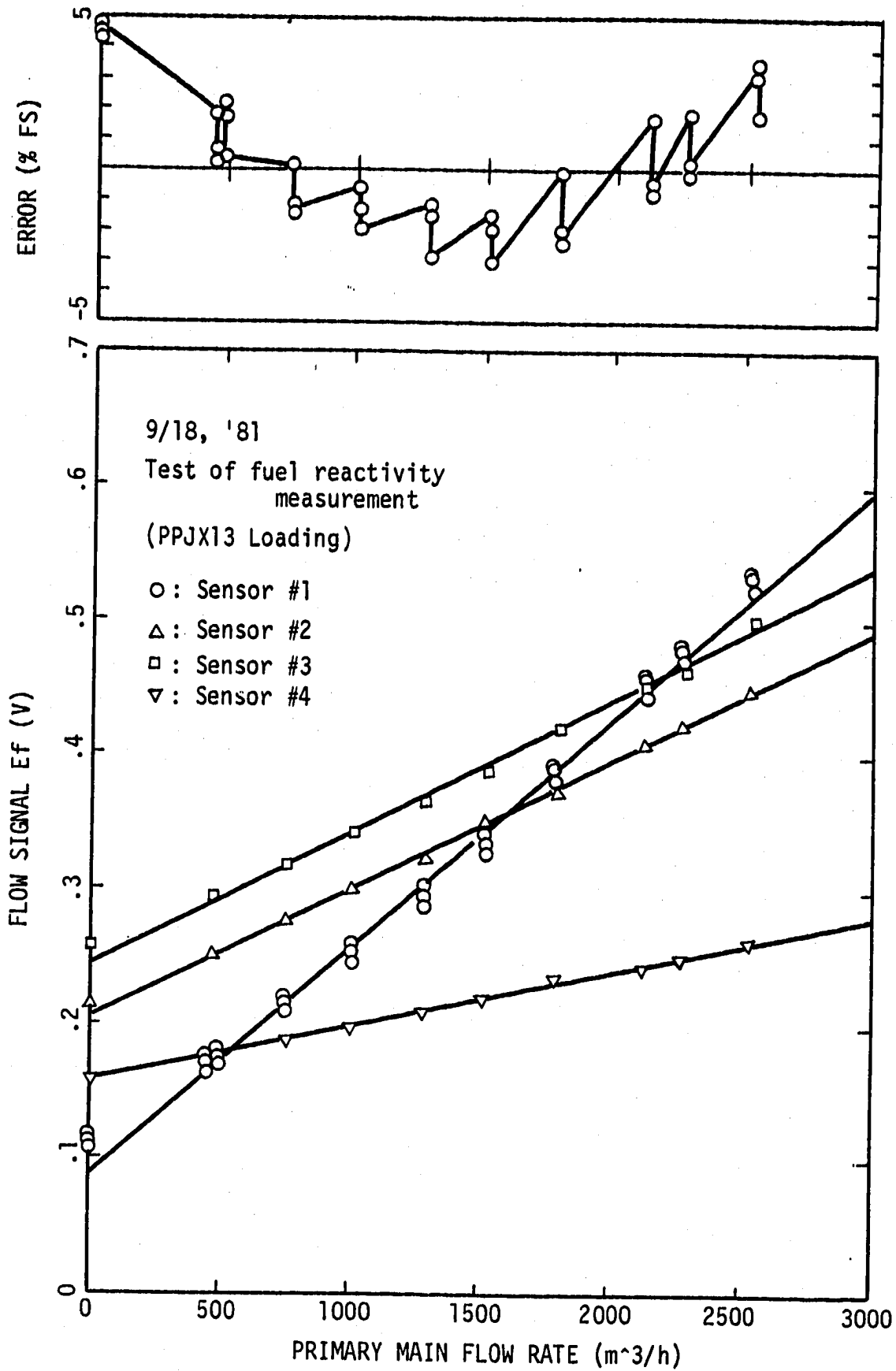


Fig. 4.1.5 Flow Signal VS. Main Flowrate at Test of Fuel Reactivity Measurement on PPJX13 Loading

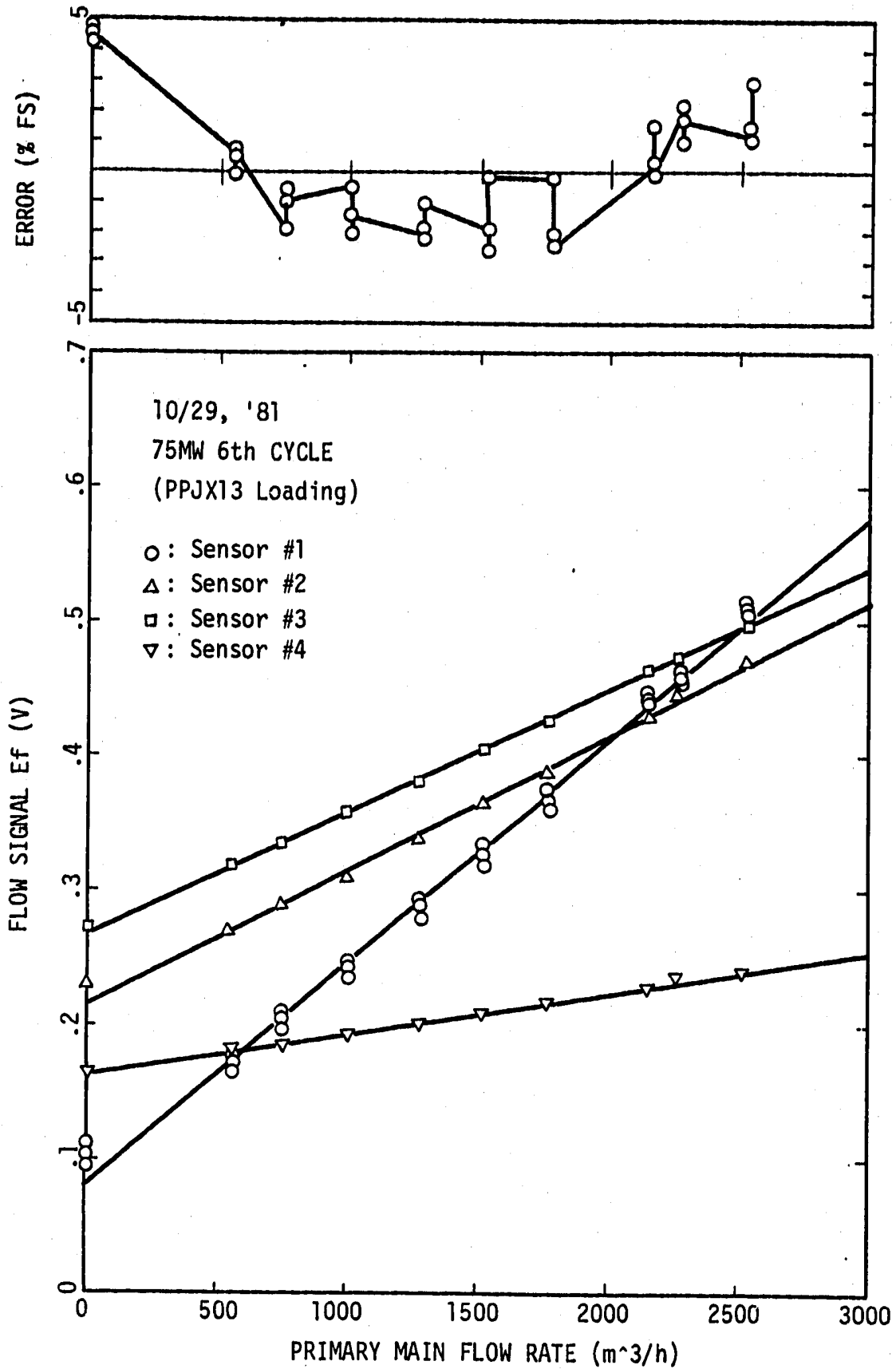


Fig. 4.1.6 Flow Signal VS. Main Flowrate at 6th Cycle of 75MW Power on PPJX13 Loading

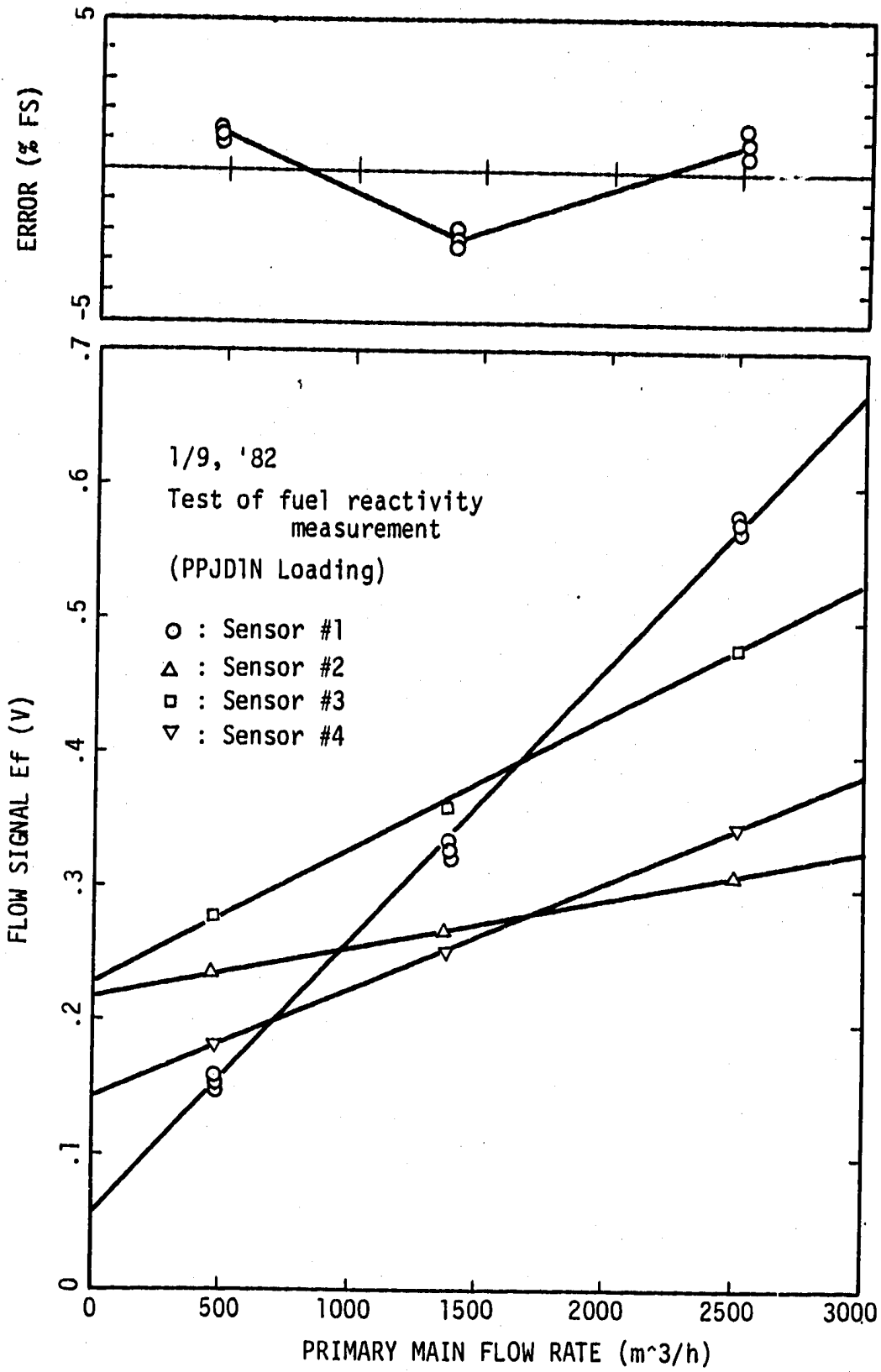


Fig. 4.1.7 Flow Signal VS. Main Flowrate at Test of Fuel Reactivity Measurement on PPJD1N Loading

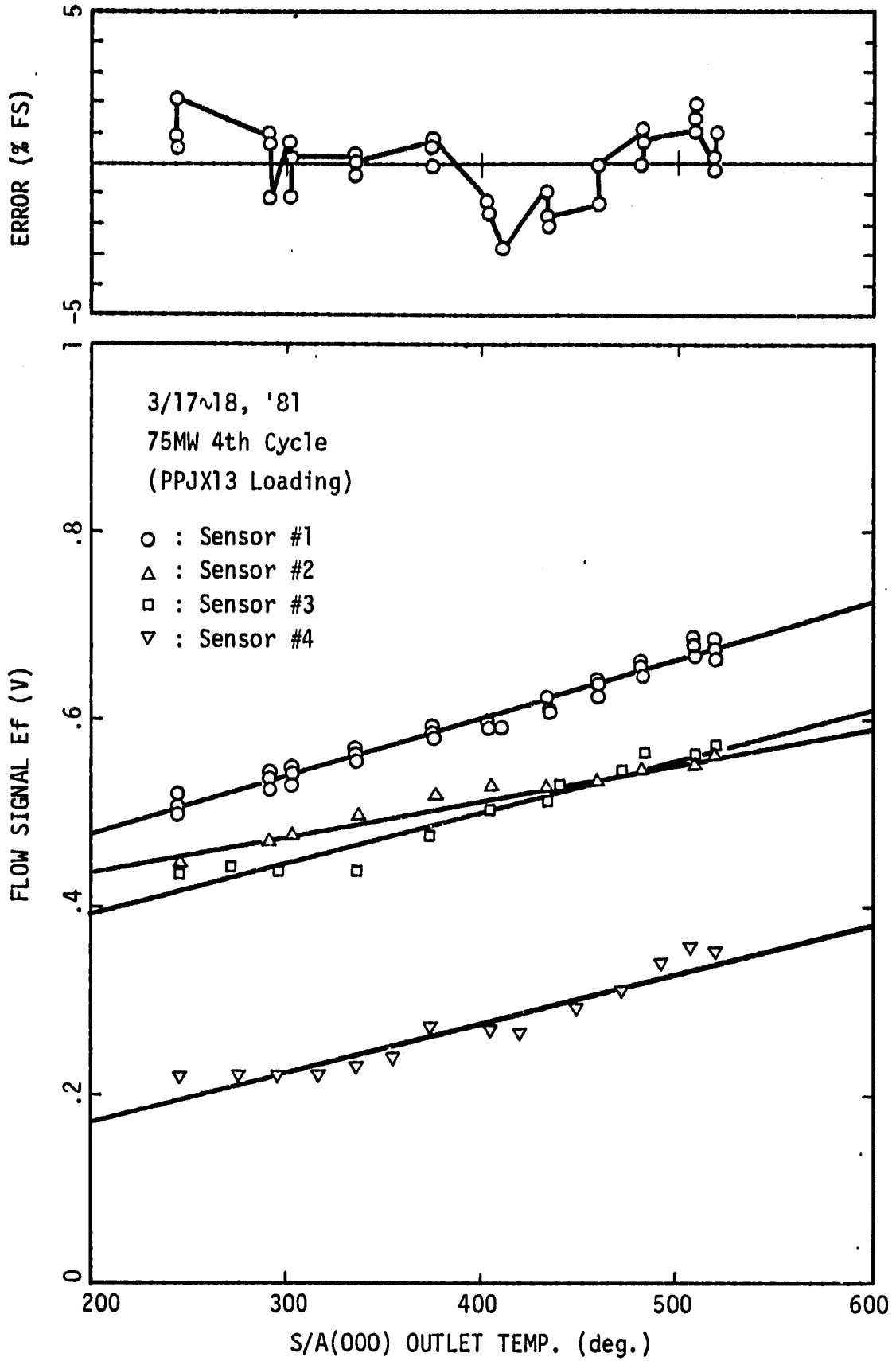


Fig. 4.1.8 Temperature Dependency of Flow Signal at 4th Cycle of 75MW Power on PPJX13 Loading

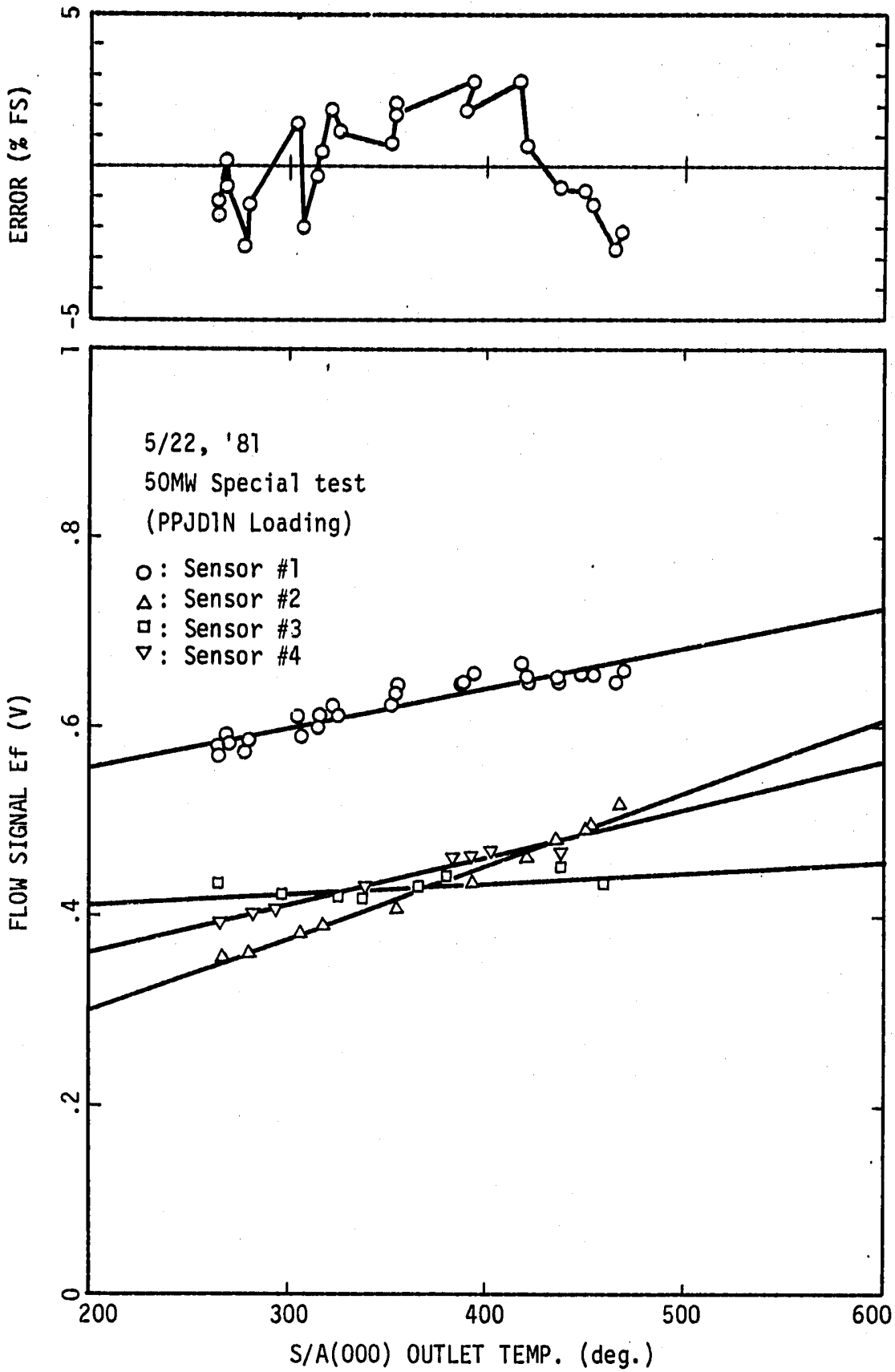


Fig. 4.1.9 Temperature Dependency of Flow Signal at Special Test of 50MW Power on PPJD1N Loading

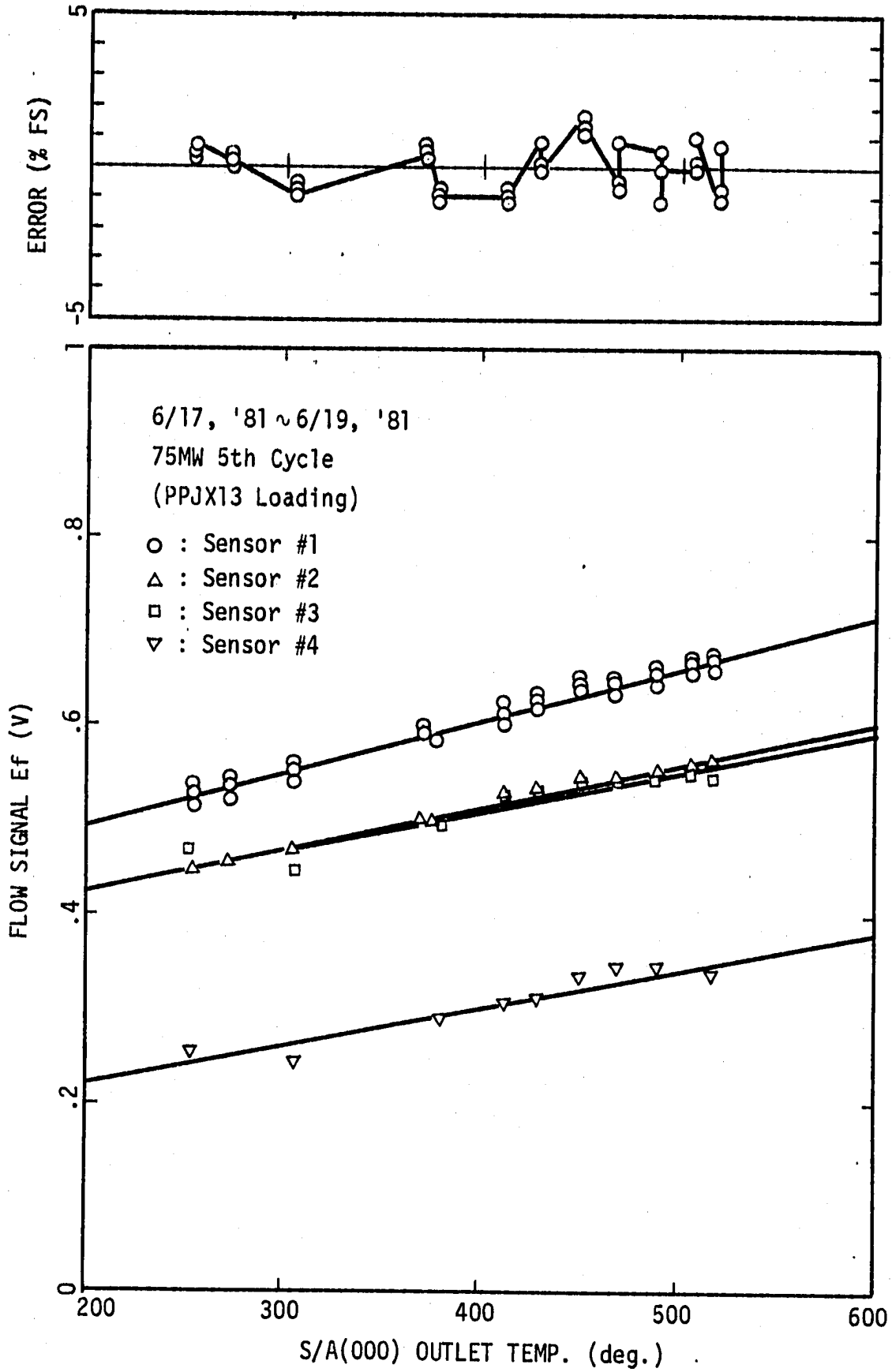


Fig. 4.1.10 Temperature Dependency of Flow Signal at 5th Cycle of 75MW Power on PPJX13 Loading

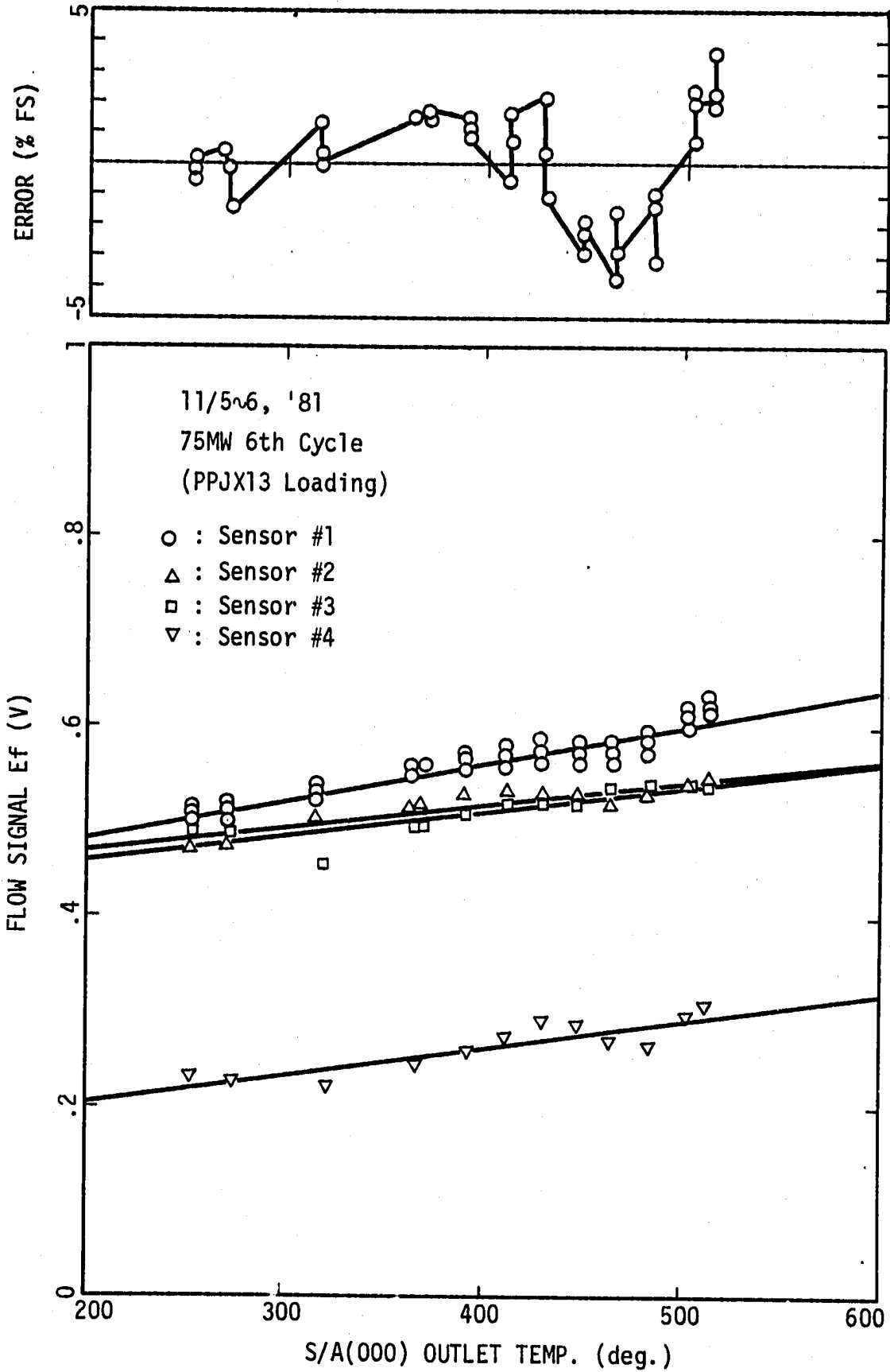


Fig. 4.1.11 Temperature Dependency of Flow Signal at 6th Cycle of 75MW Power on PPJX13 Loading

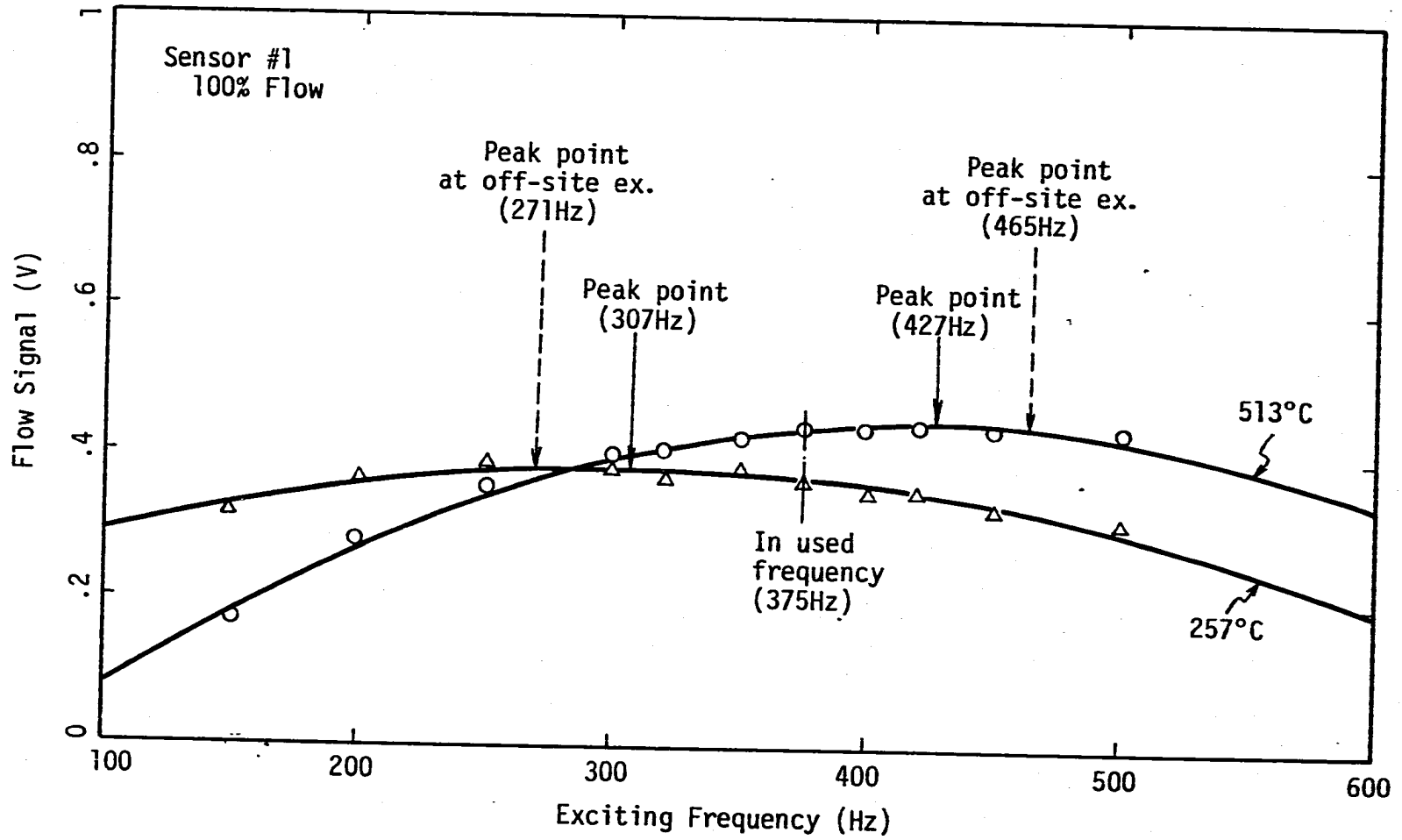


Fig. 4.1.12 Frequency Characteristics of Flow Signal

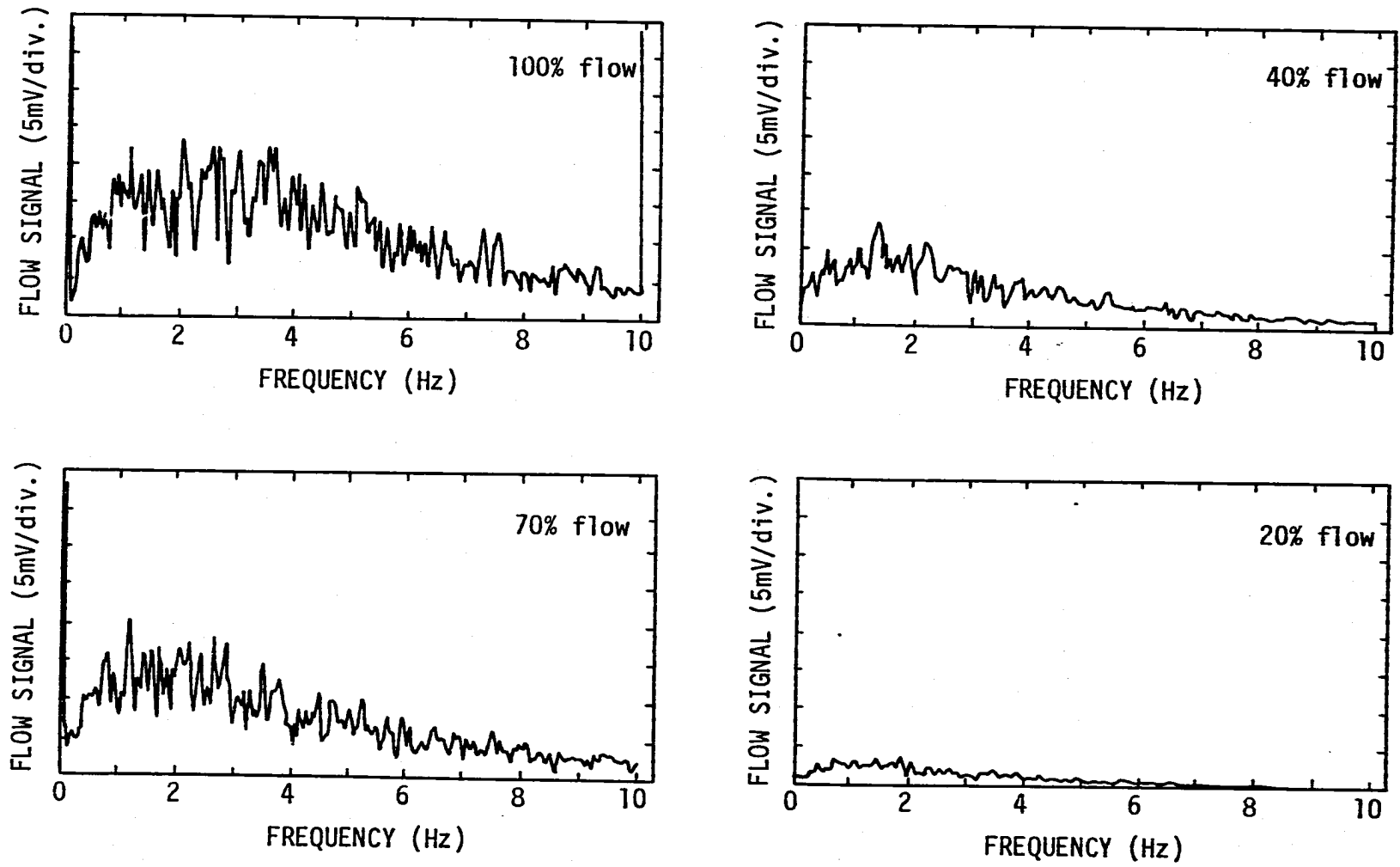


Fig. 4.1.13 Amplitude spectrum of sensor #1 flow signal for various flow rate (Vertical scale is 5mV/div, signal \times 3.52)

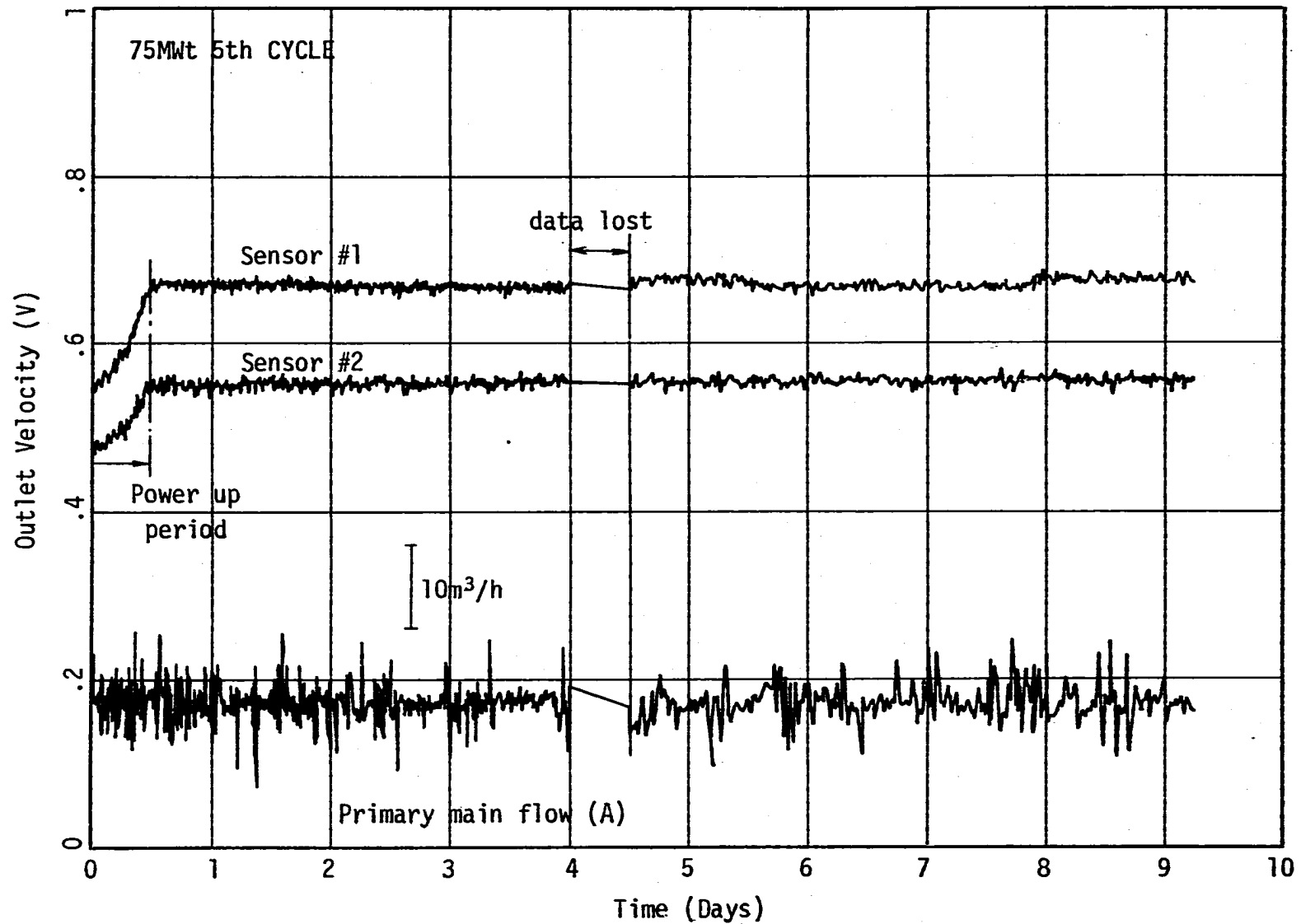
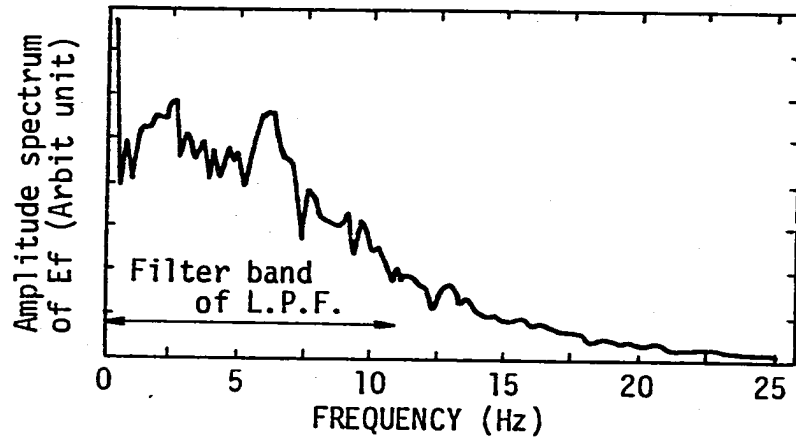
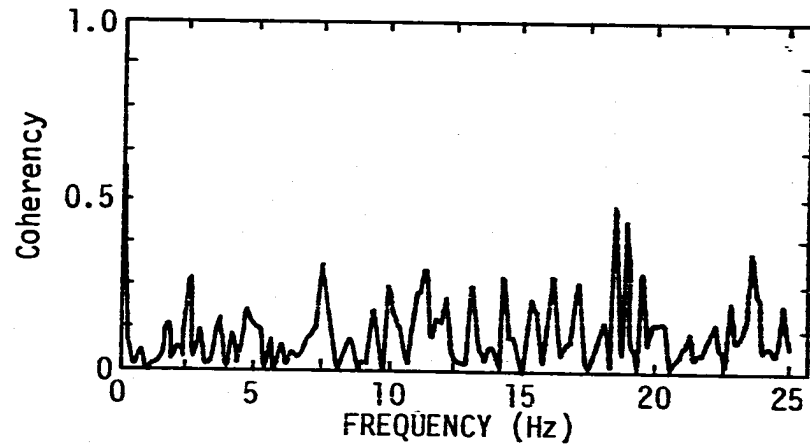


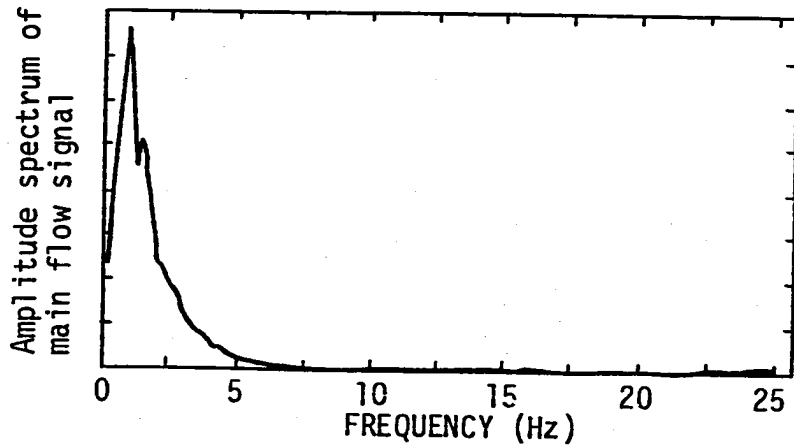
Fig. 4.1.14 Trend of Flow Signal on 5th Constant Operation at 75MW power



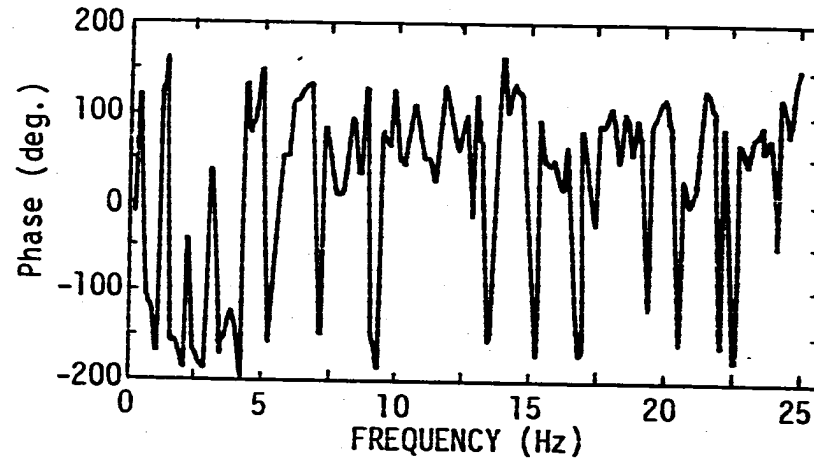
(a)



(c)



(b)



(d)

Fig. 4.1.15 Coherence function of flow signal VS. primary main flow signal (A) for 100% flow rate and individual spectrums

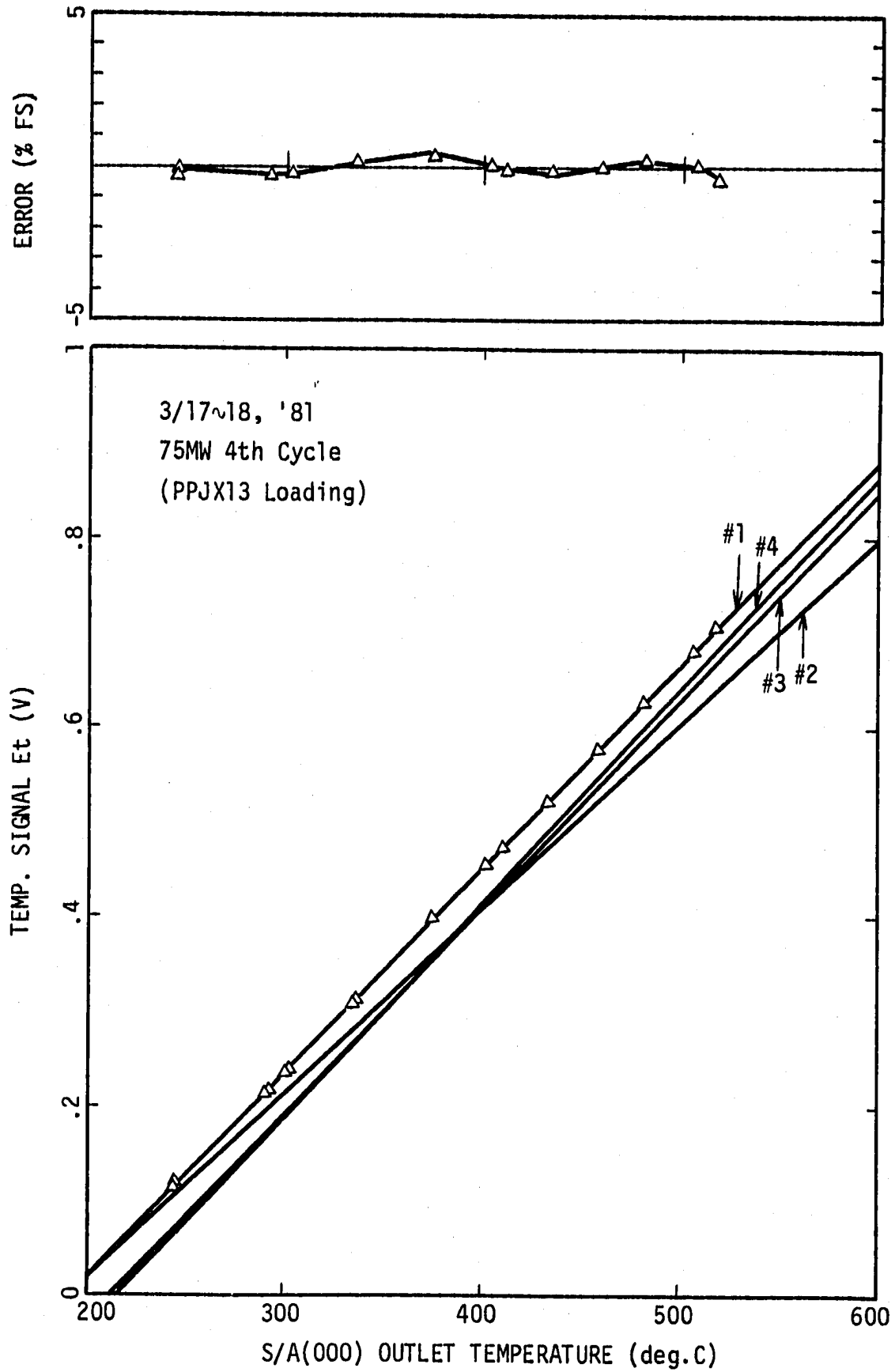


Fig. 4.2.1 Temperature Signal VS. Thermocouple Reading at 4th Cycle of 75MW Power on PPJX13 Loading

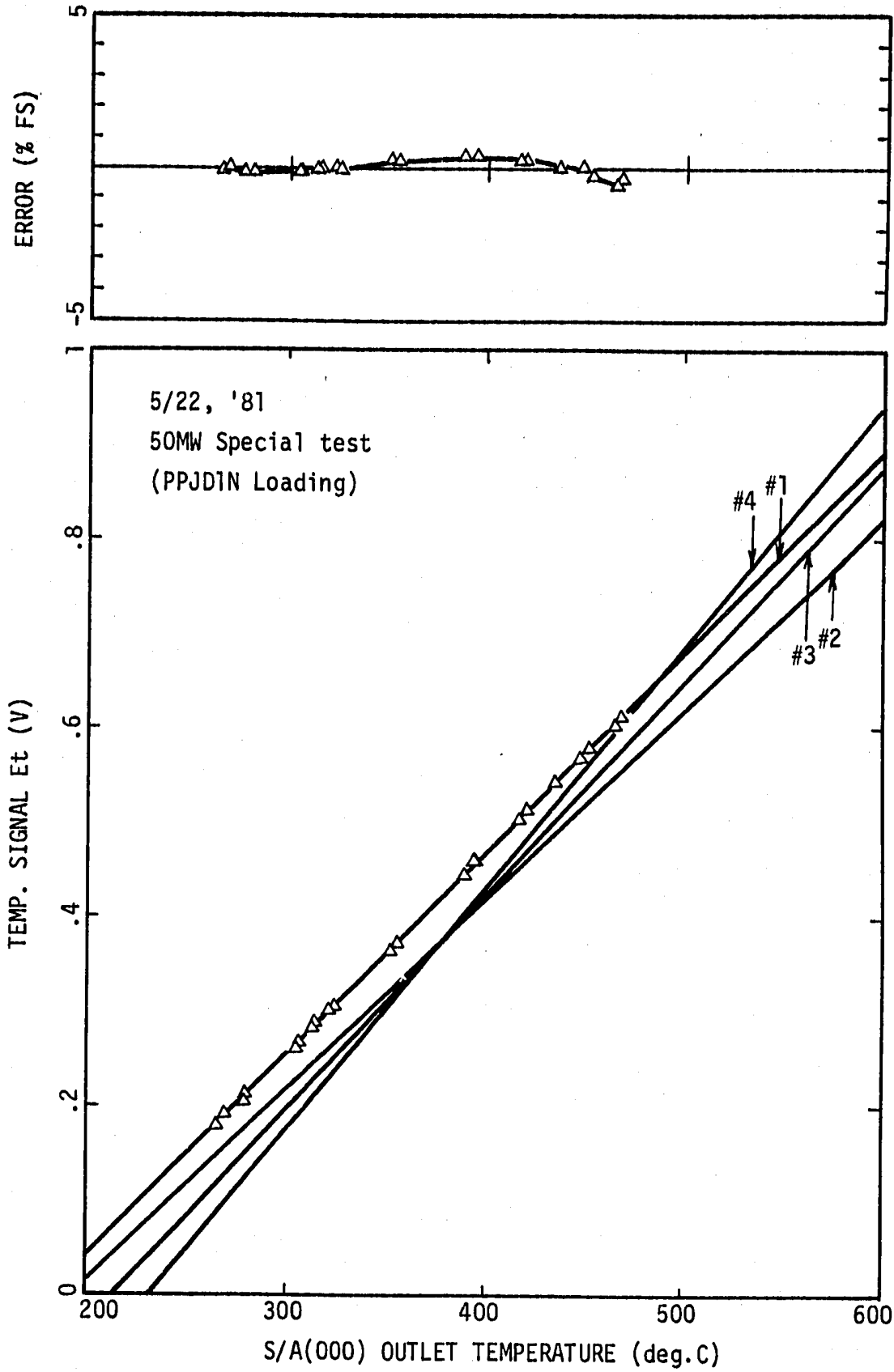


Fig. 4.2.2 Temperature Signal VS. Thermocouple Reading at Special Test of 50MW Power on PPJD1N Loading

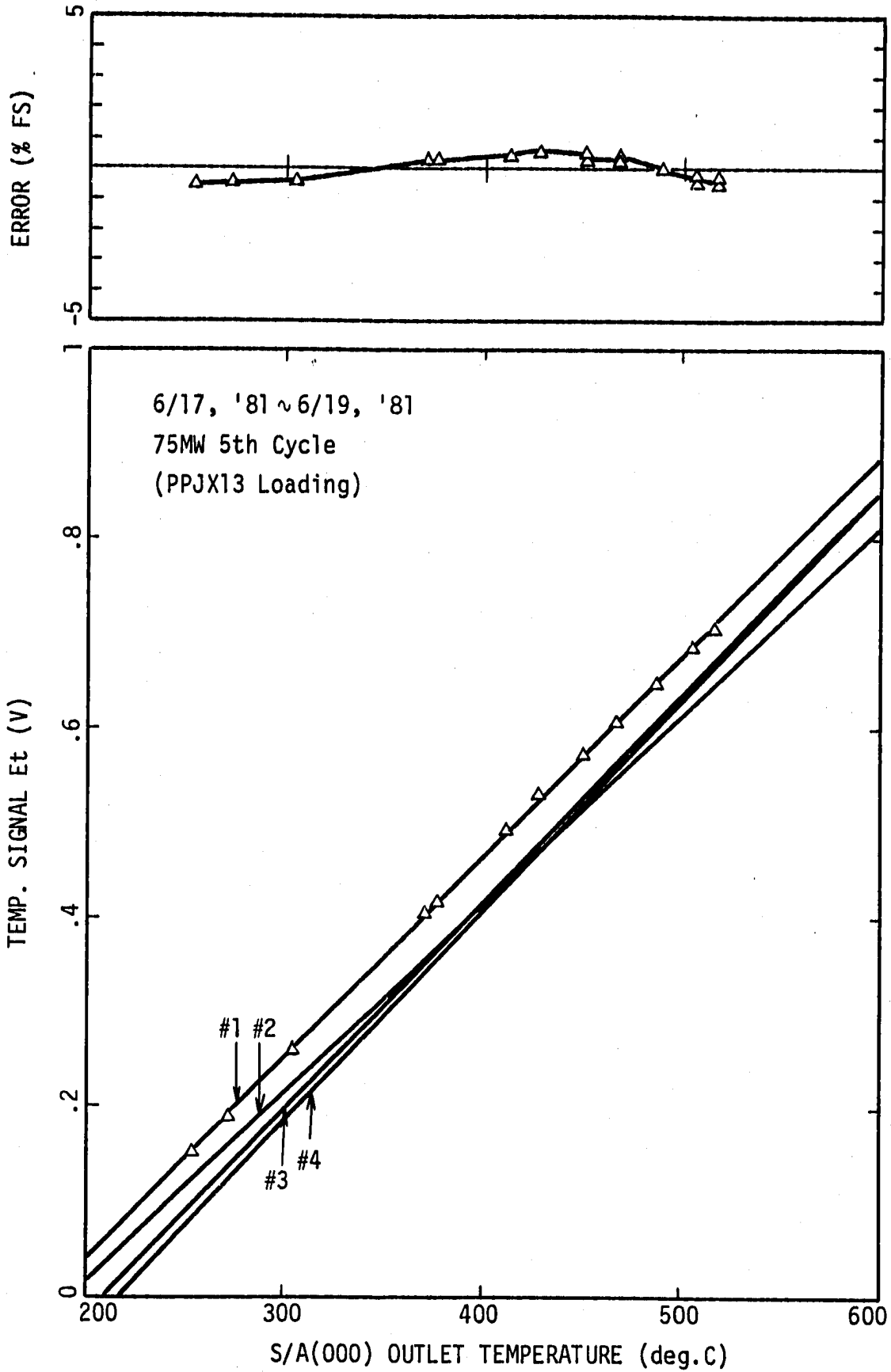


Fig. 4.2.3 Temperature Signal VS. Thermocouple Reading at 5th Cycle of 75MW Power on PPJX13 Loading

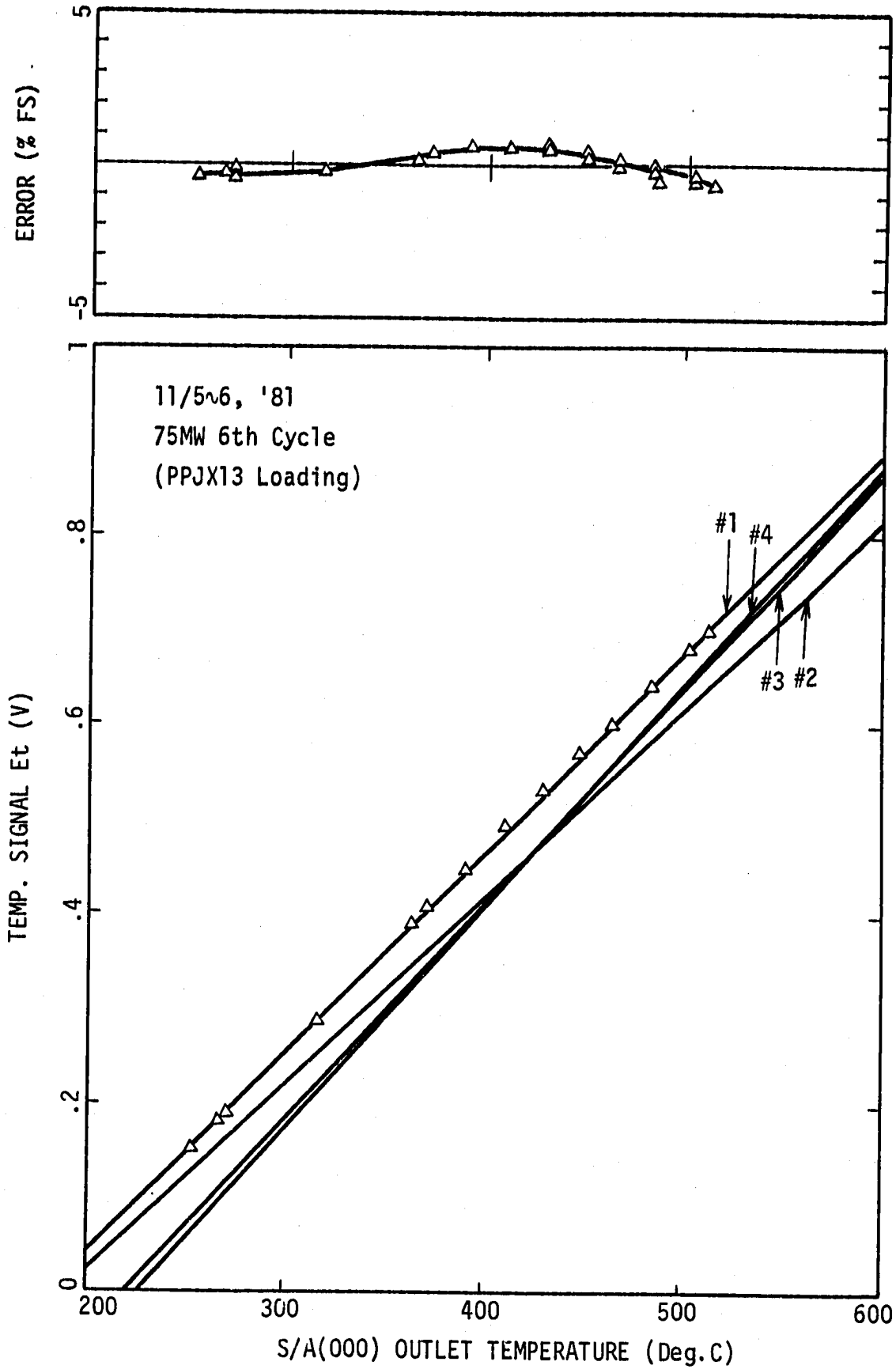


Fig. 4.2.4 Temperature Signal VS. Thermocouple Reading at 6th Cycle of 75MW Power on PPJX13 Loading

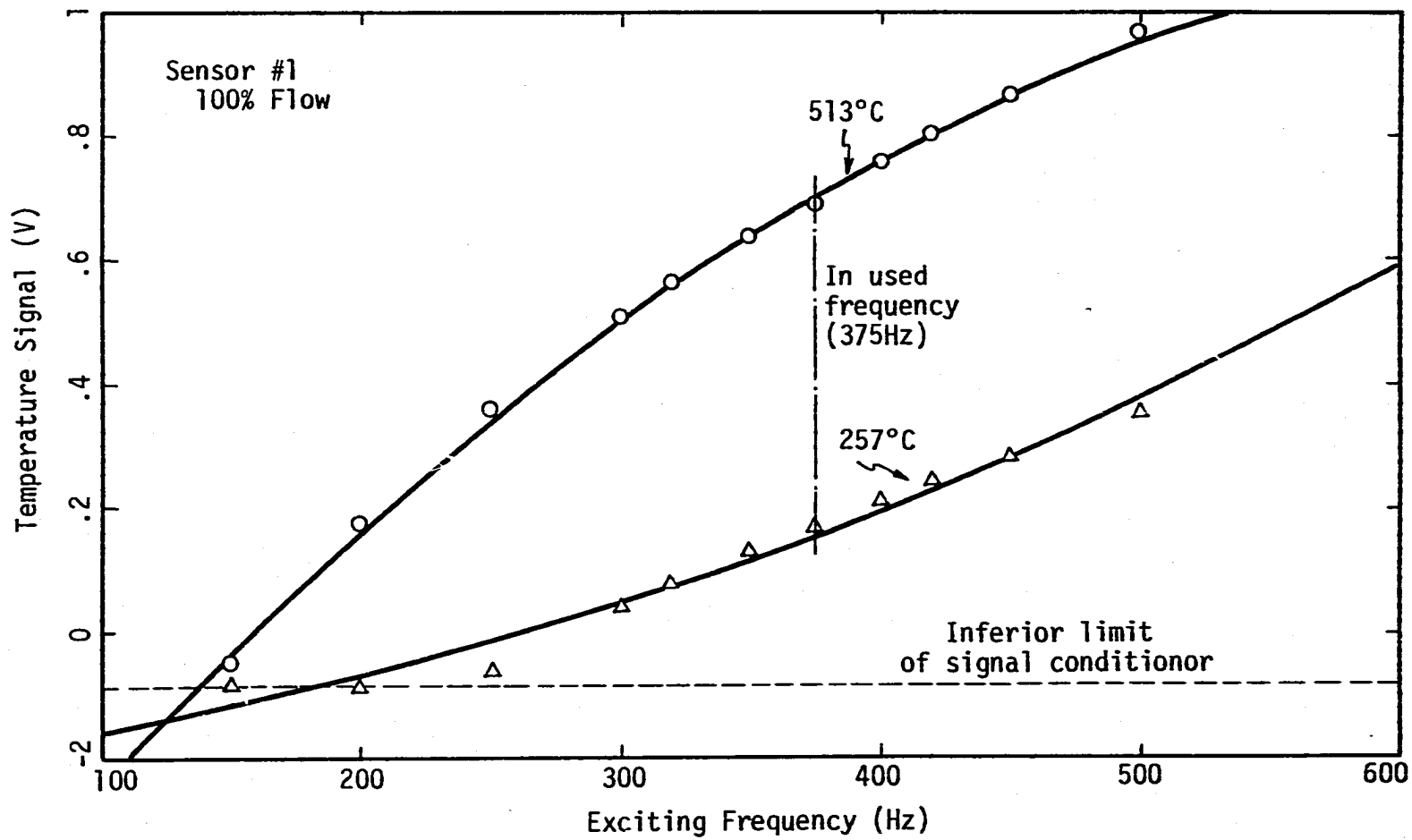


Fig. 4.2.5 Frequency Characteristics of Temperature Signal

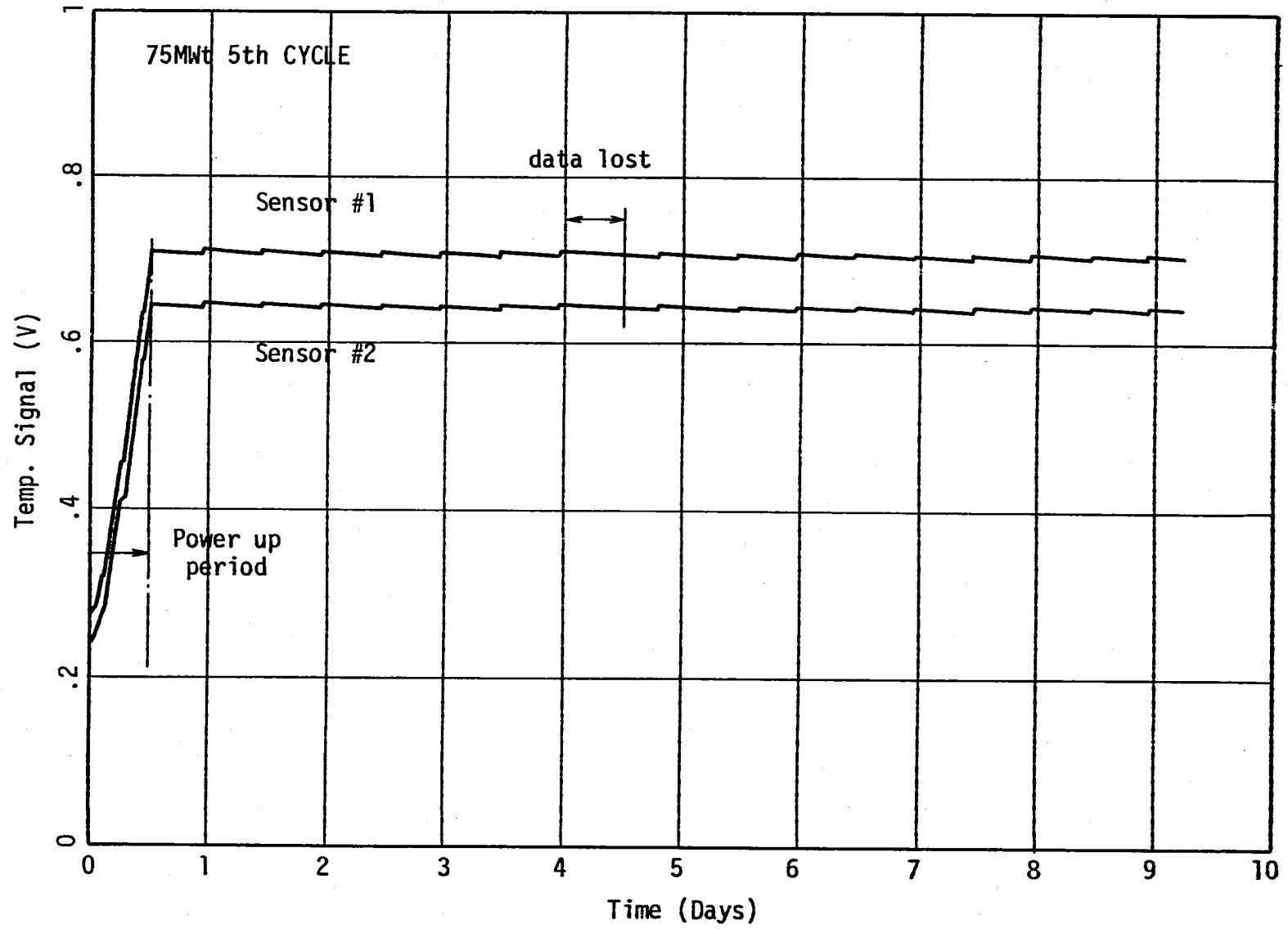


Fig. 4.2.6 Trend of Temperature Signal on 5th Constant Operation at 75MW power

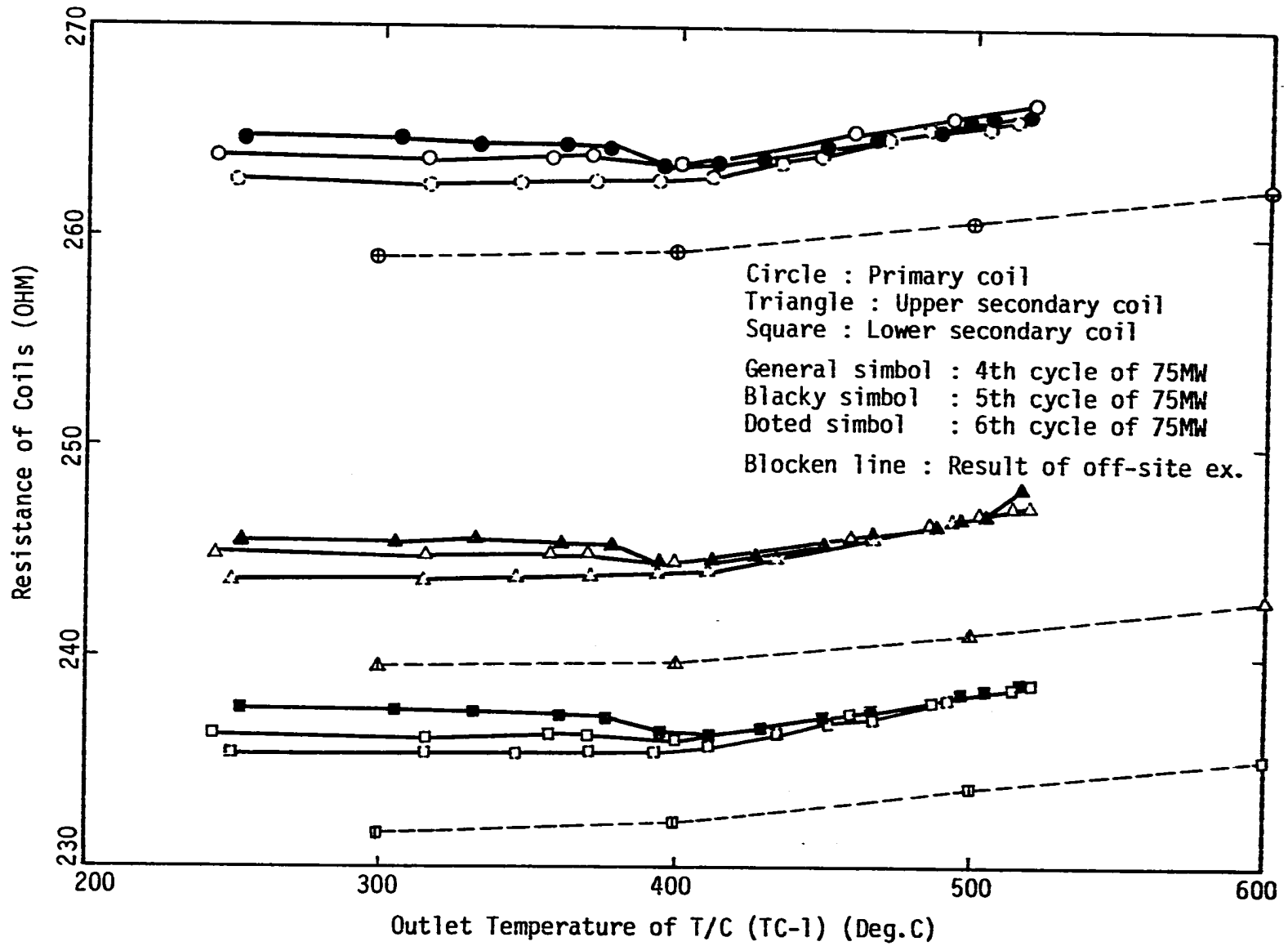


Fig. 4.3.1 Coil Resistance (#2) VS. Temperature

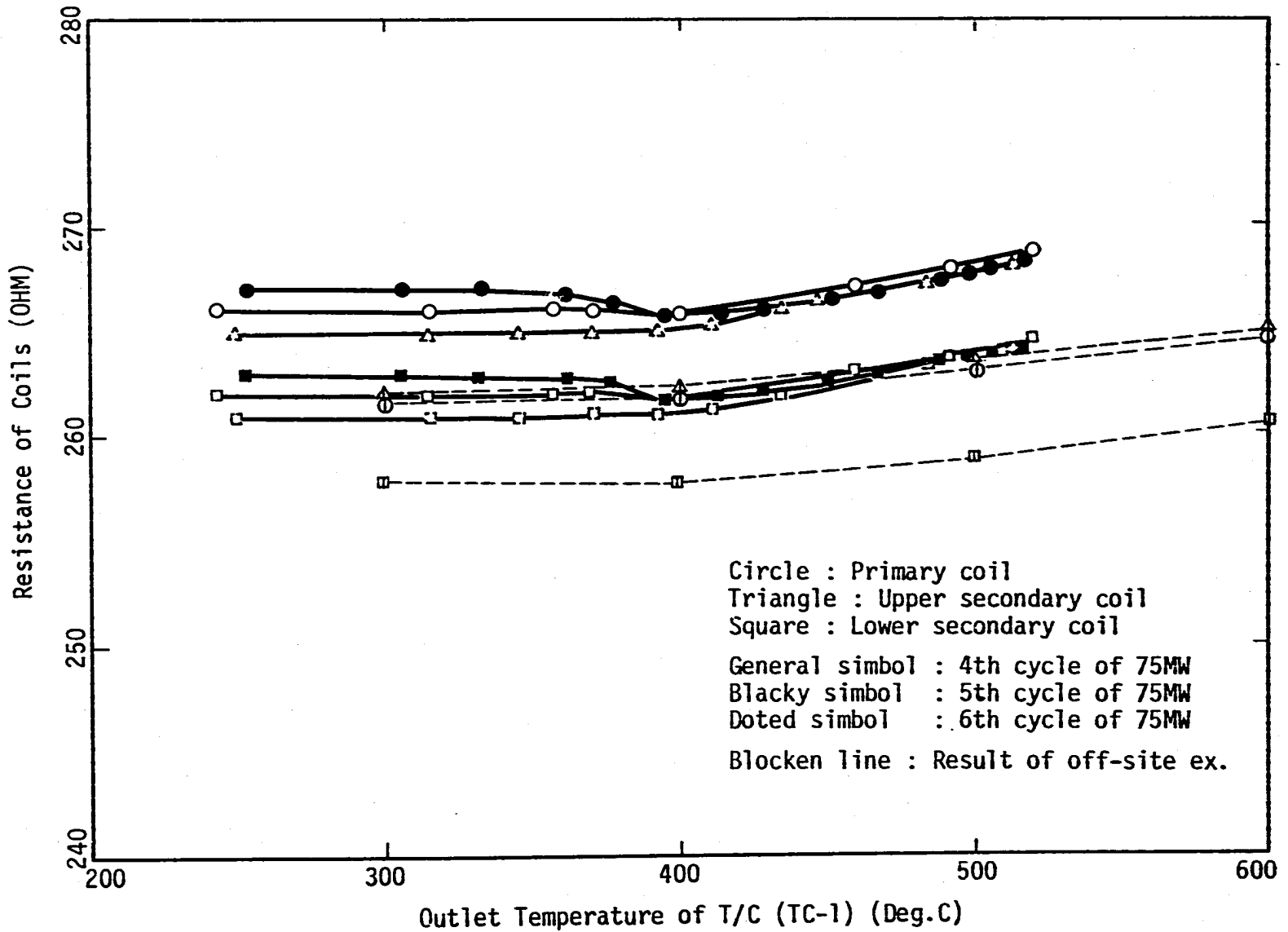


Fig. 4.3.2 Coil Resistance (#3) VS. Temperature

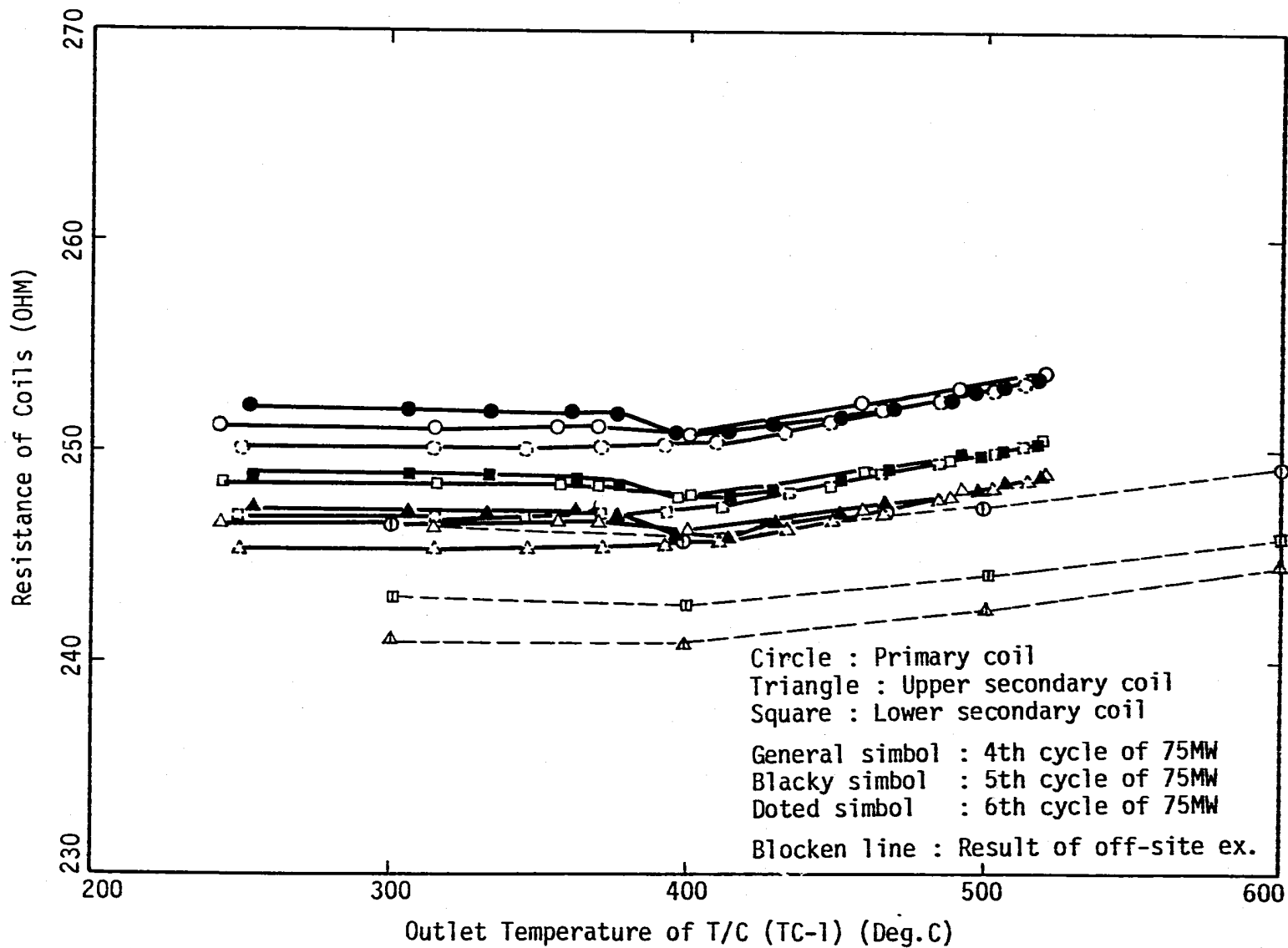


Fig. 4.3.3 Coil Resistance (#4) VS. Temperature

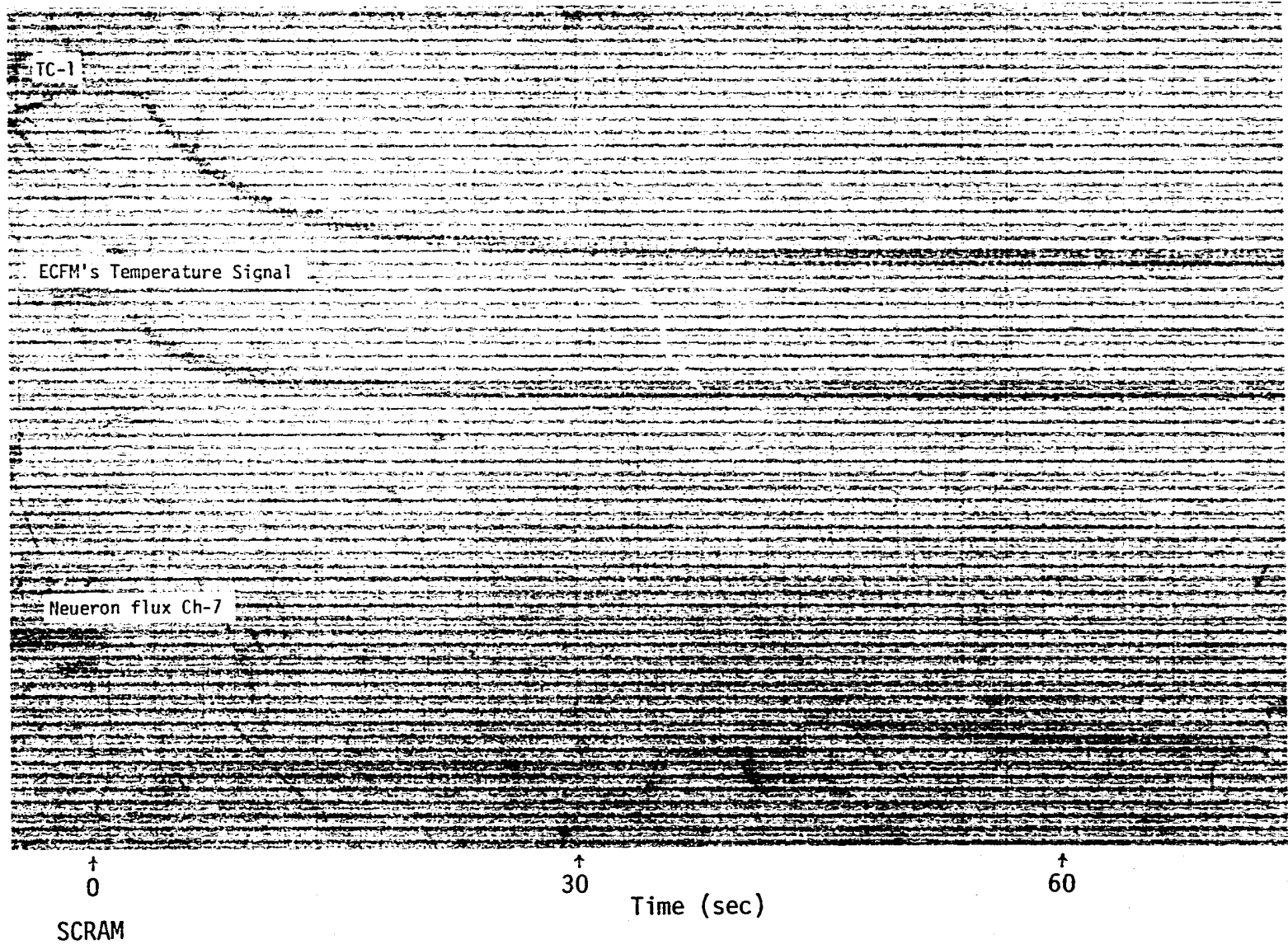


Fig. 4.4.1 Response time of ECFM's temperature and TC-1 for scram

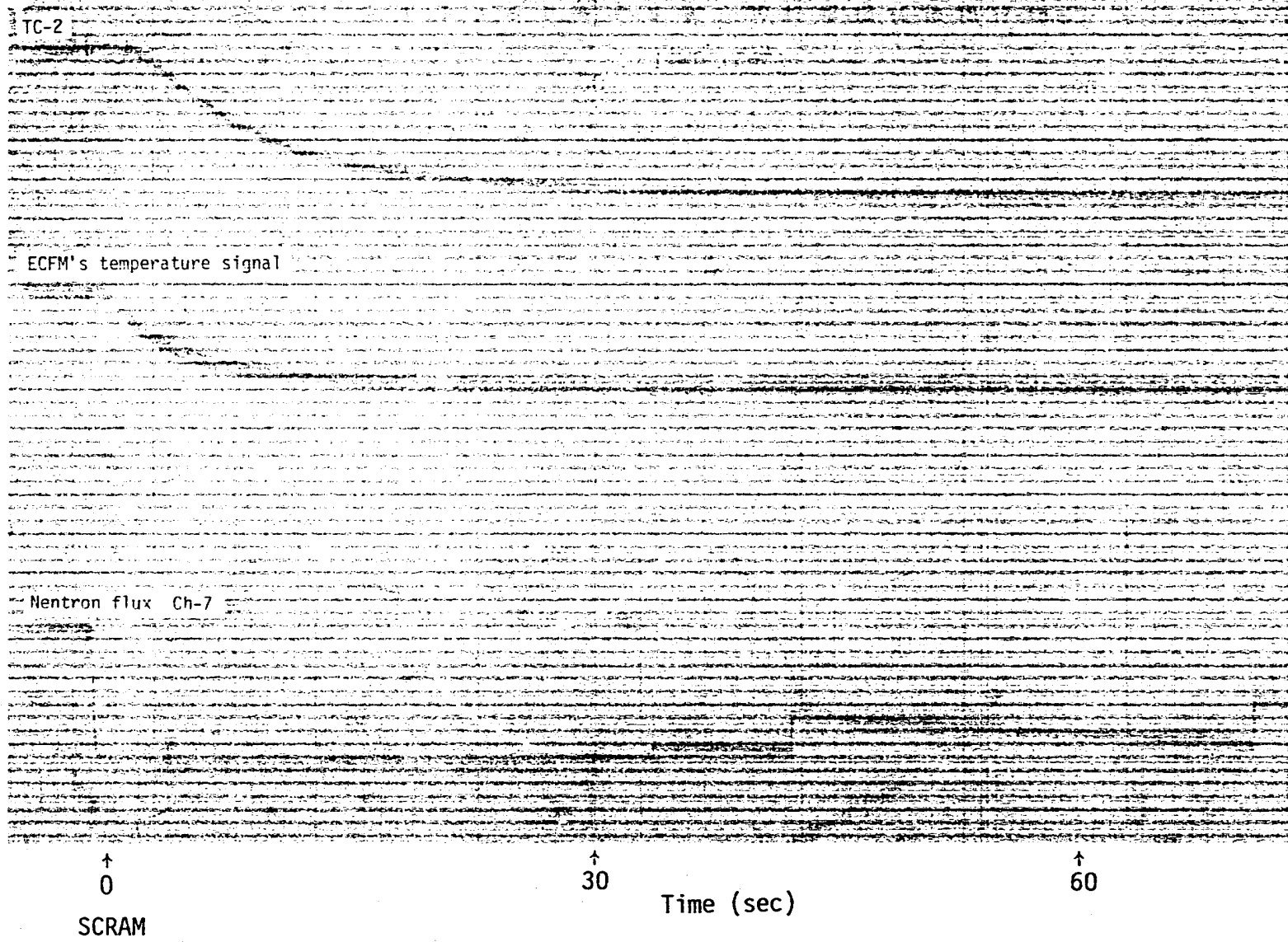


Fig. 4.4.2 Response time of ECFM's temperature and TC-2 for scram

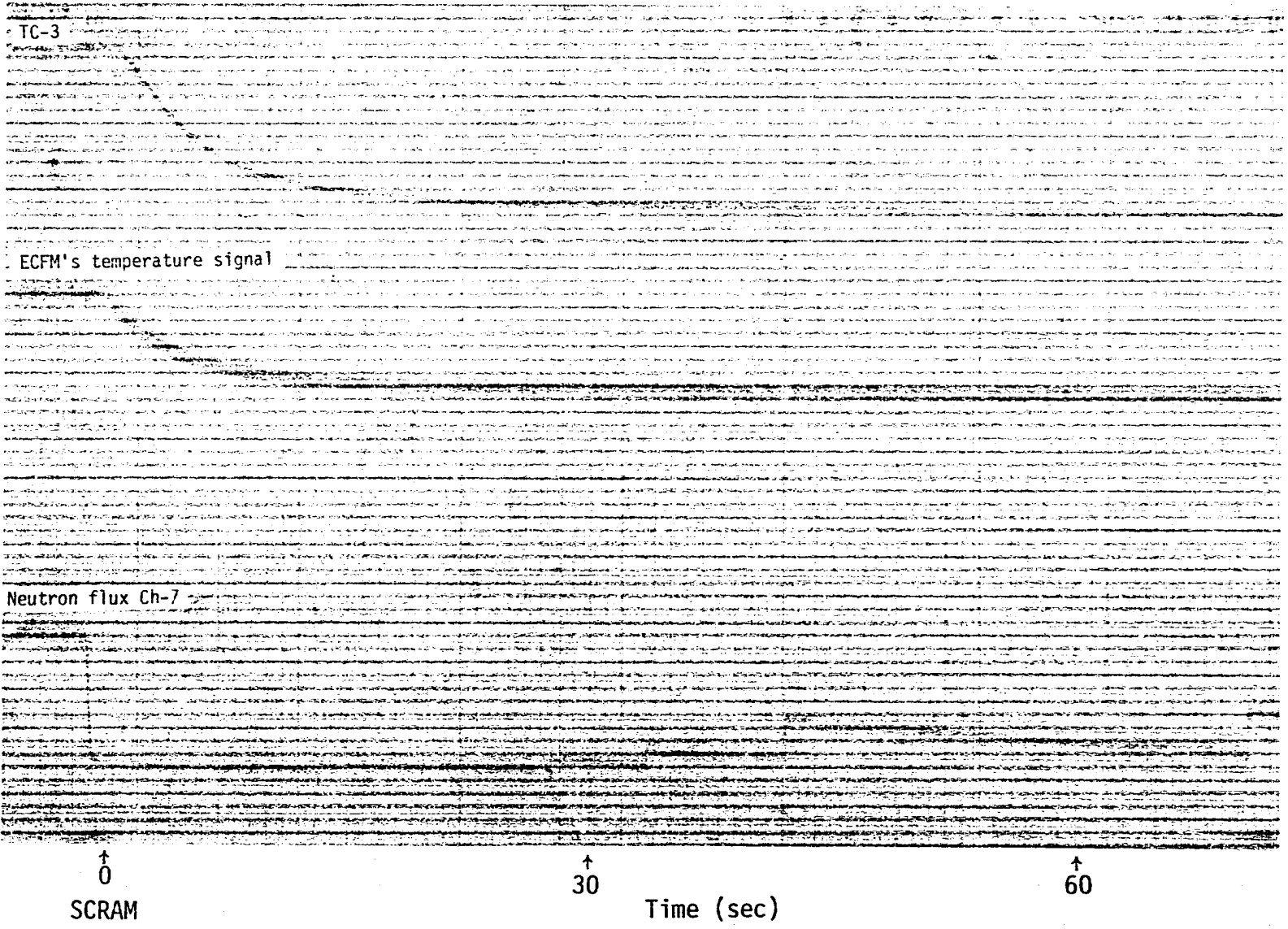


Fig. 4.4.3 Response time of ECFM's temperature and TC-3 for scram

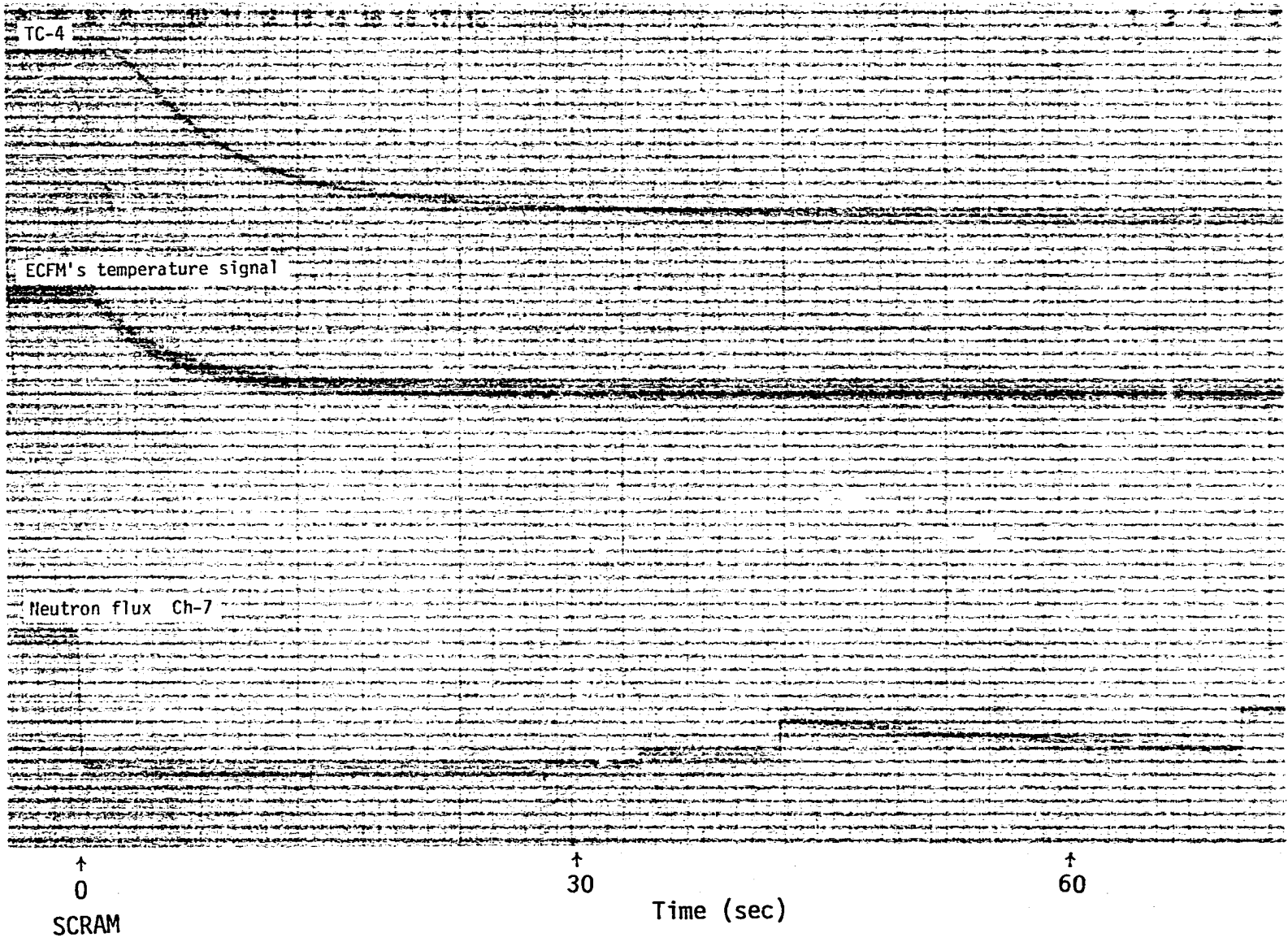
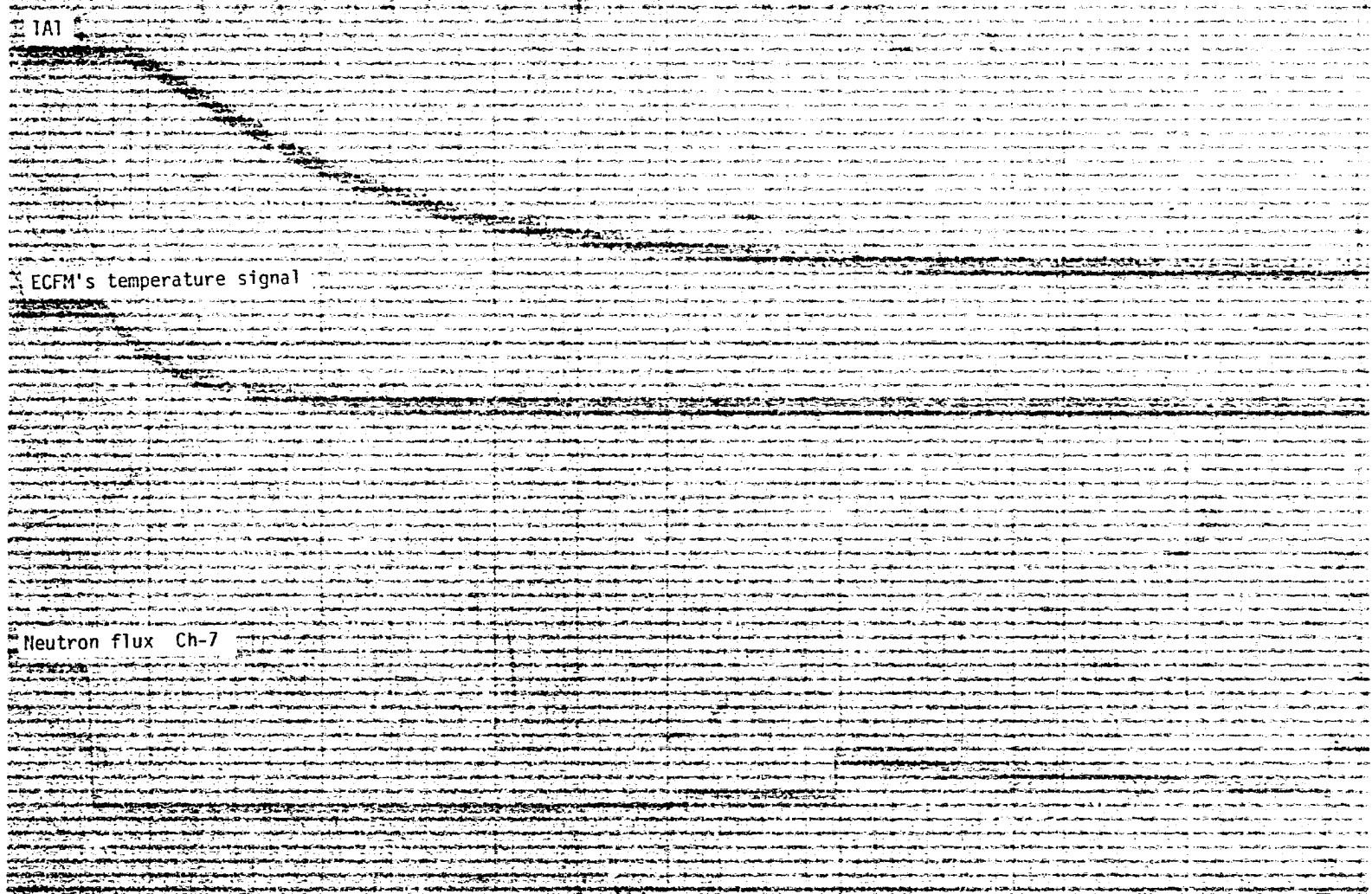


Fig. 4.4.4 Response time of ECFM's temperature and TC-4 for scram



ECFM's temperature signal

Neutron flux Ch-7

↑
0
SCRAM

↑
30
Time (sec)

↑
60

Fig. 4.4.5 Response time of ECFM's temperature and (IA1) T/C for scram

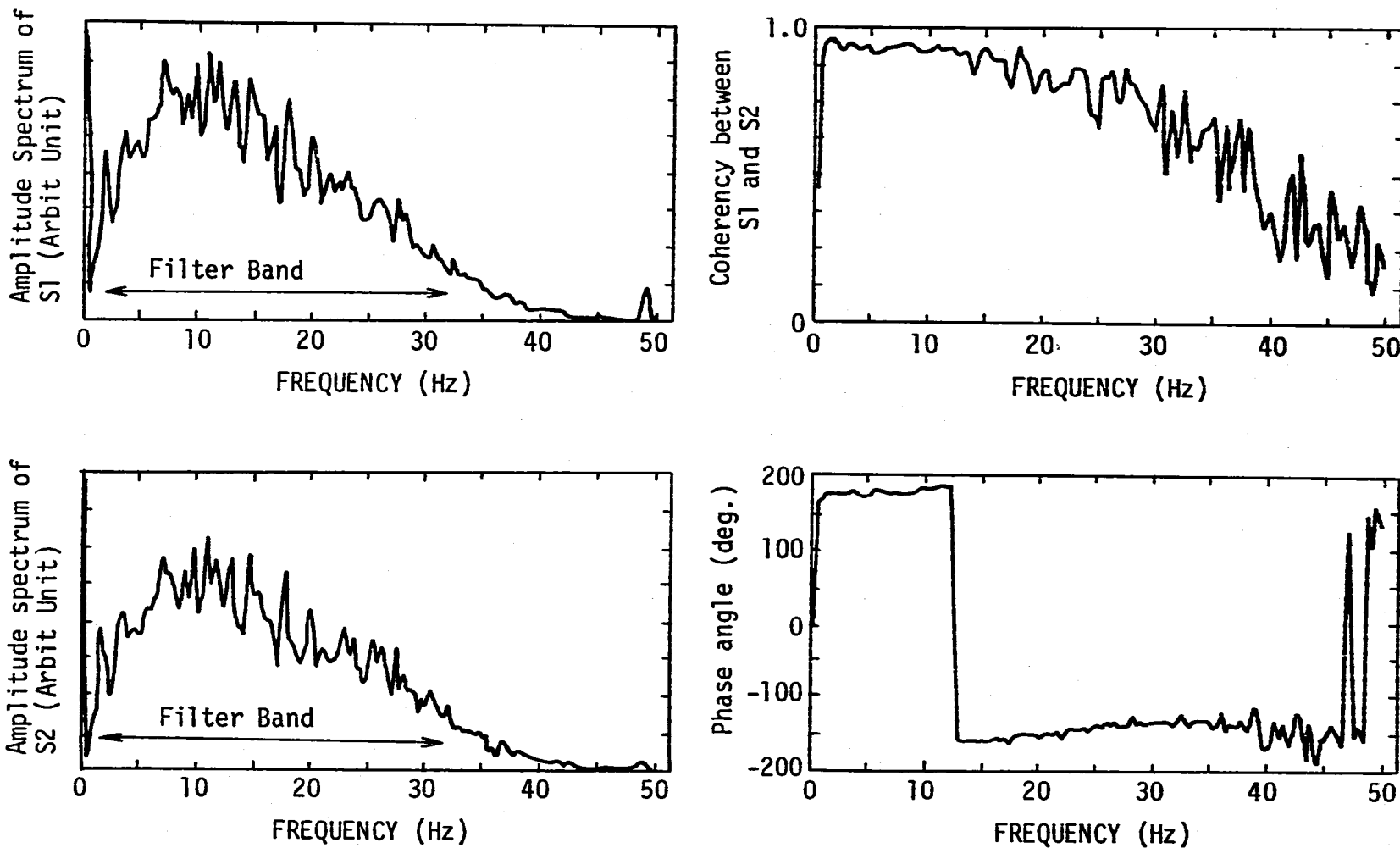


Fig. 4.5.1 Coherence function between each secondary coil of Sensor #1 for 100% flow rate (9/18, '81)

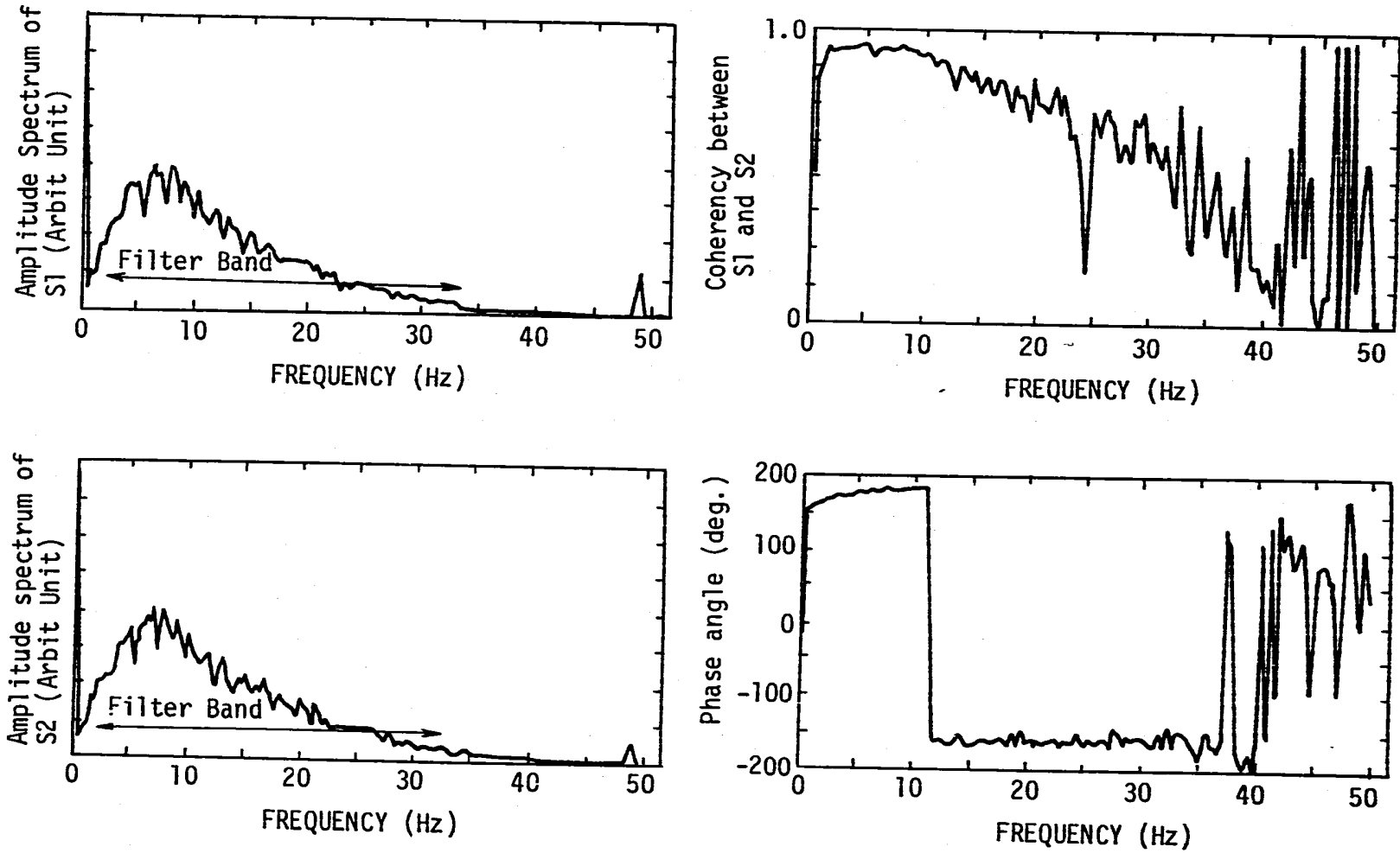


Fig. 4.5.2 Coherence function between each secondary coil Sensor #2 for 100% flow rate (9.18, '81)

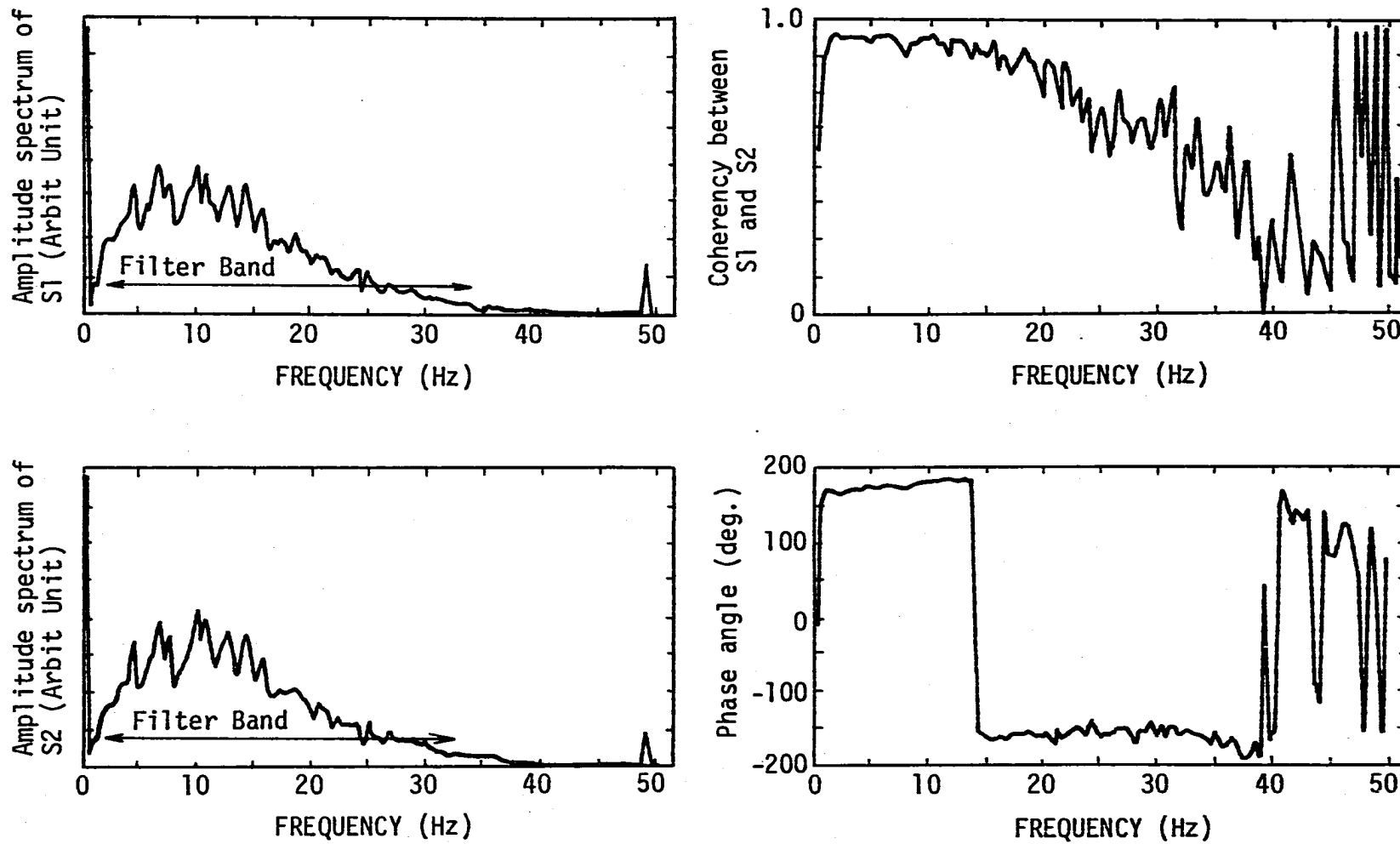


Fig. 4.5.3 Coherence function between each secondary coil of Sensor #3 for 100% flow rate (9/18, '81)

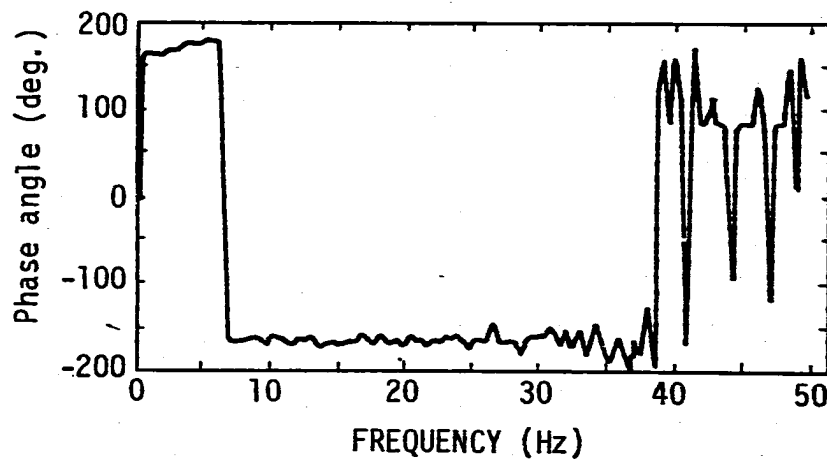
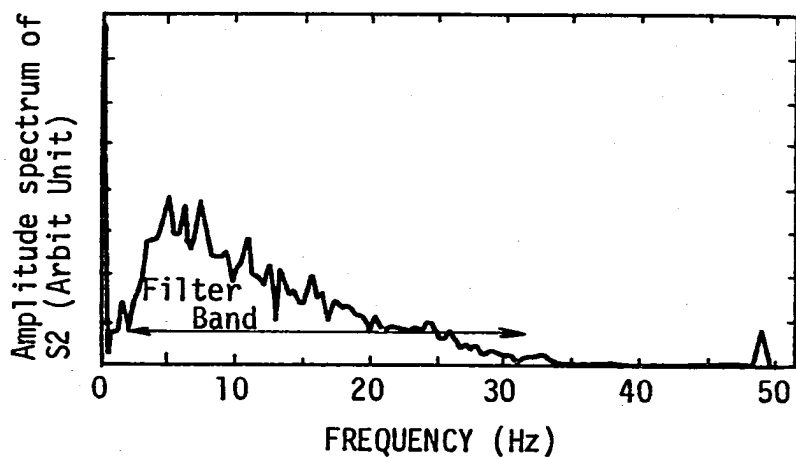
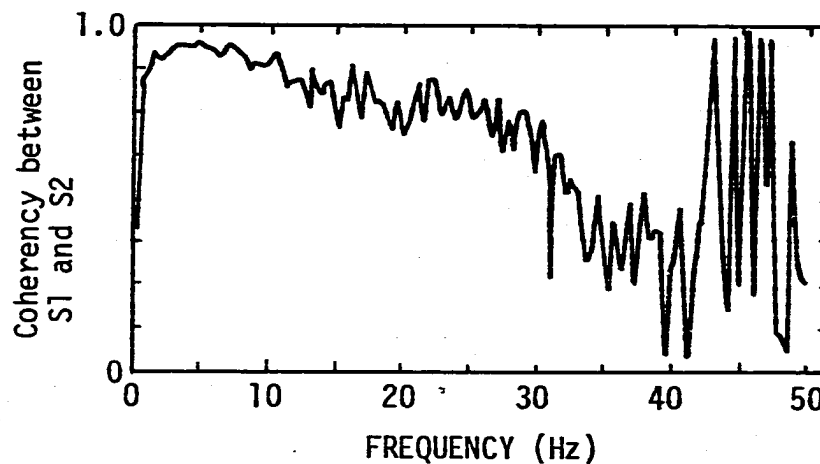
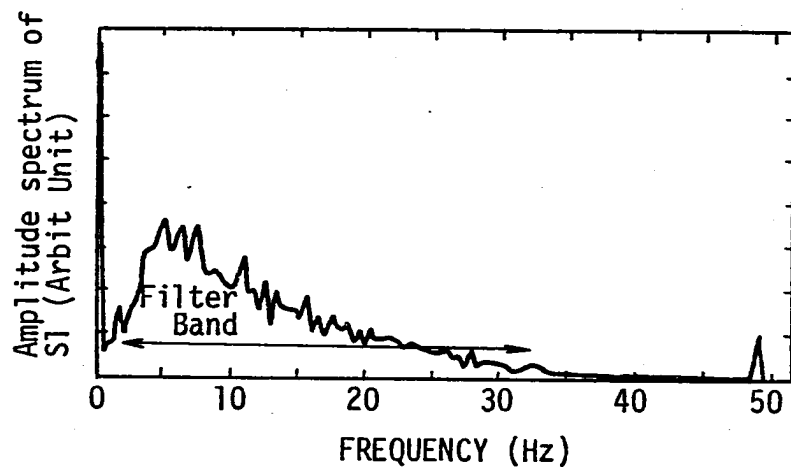


Fig. 4.5.4 Coherence function between each secondary coil of Sensor #4 for 100% flow rate (9/18, '81)

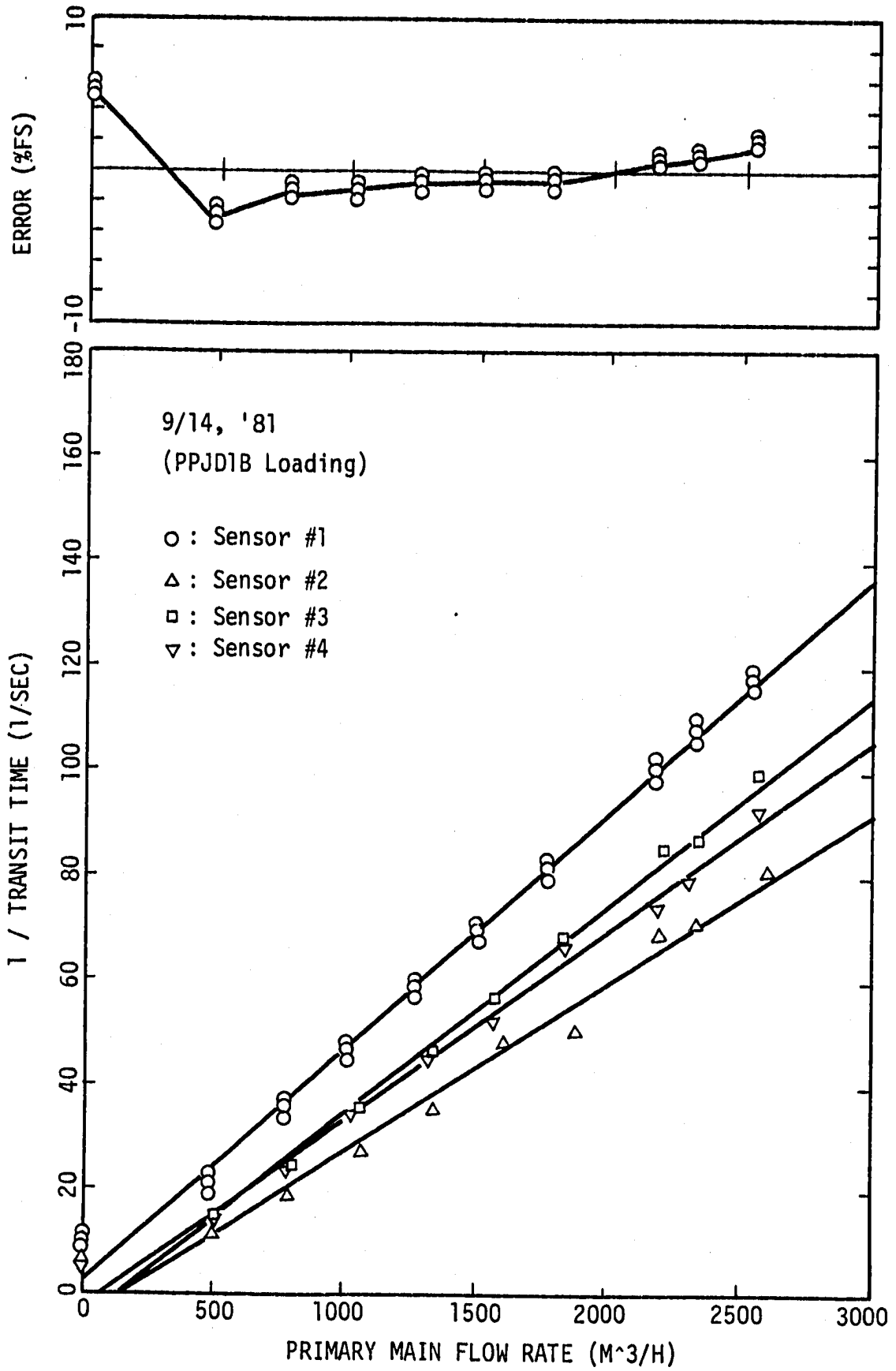


Fig. 4.5.5 TRANSIT TIME VS. MAIN FLOW RATE

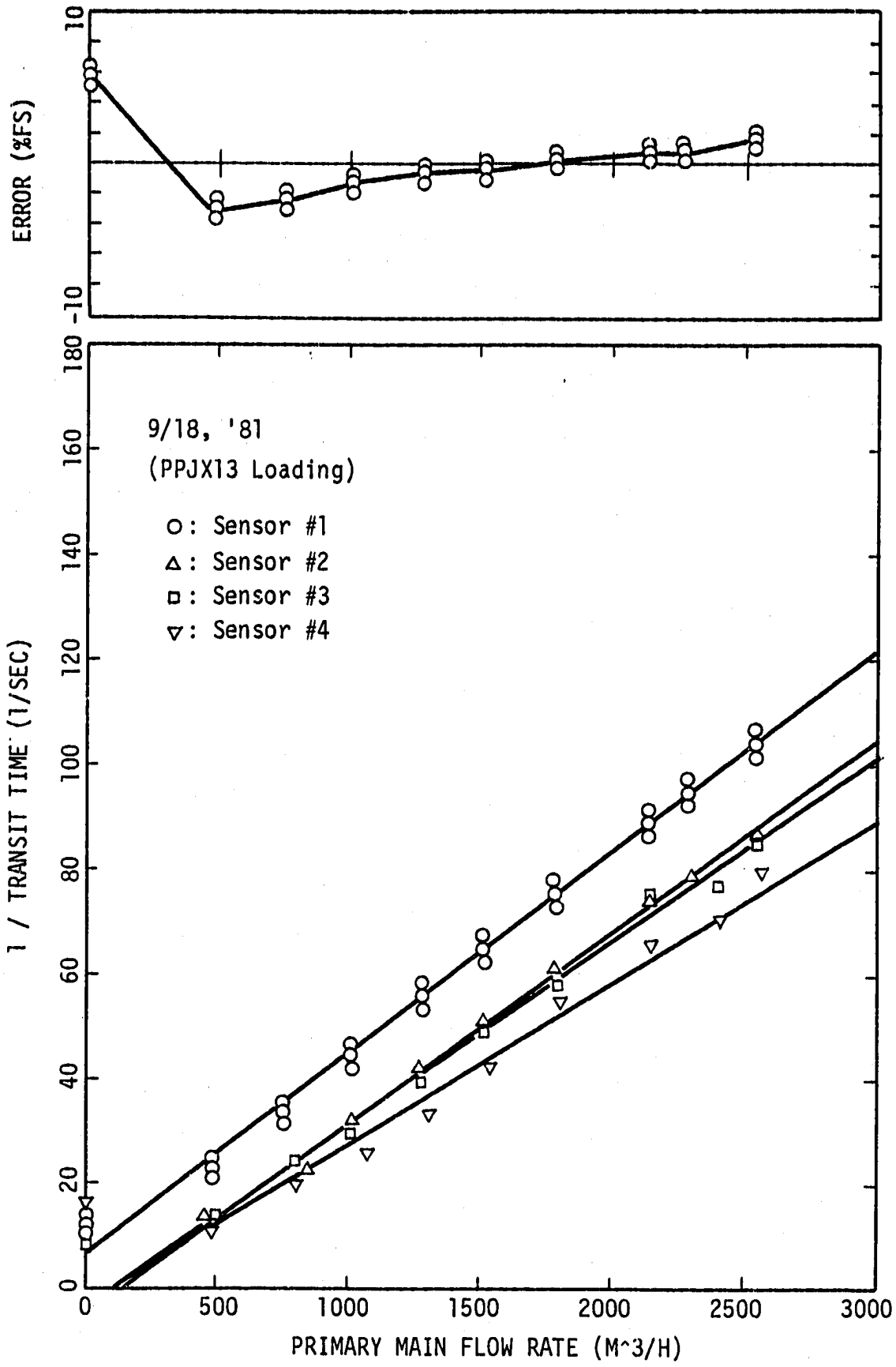


Fig. 4.5.6 TRANSIT TIME VS. MAIN FLOW RATE

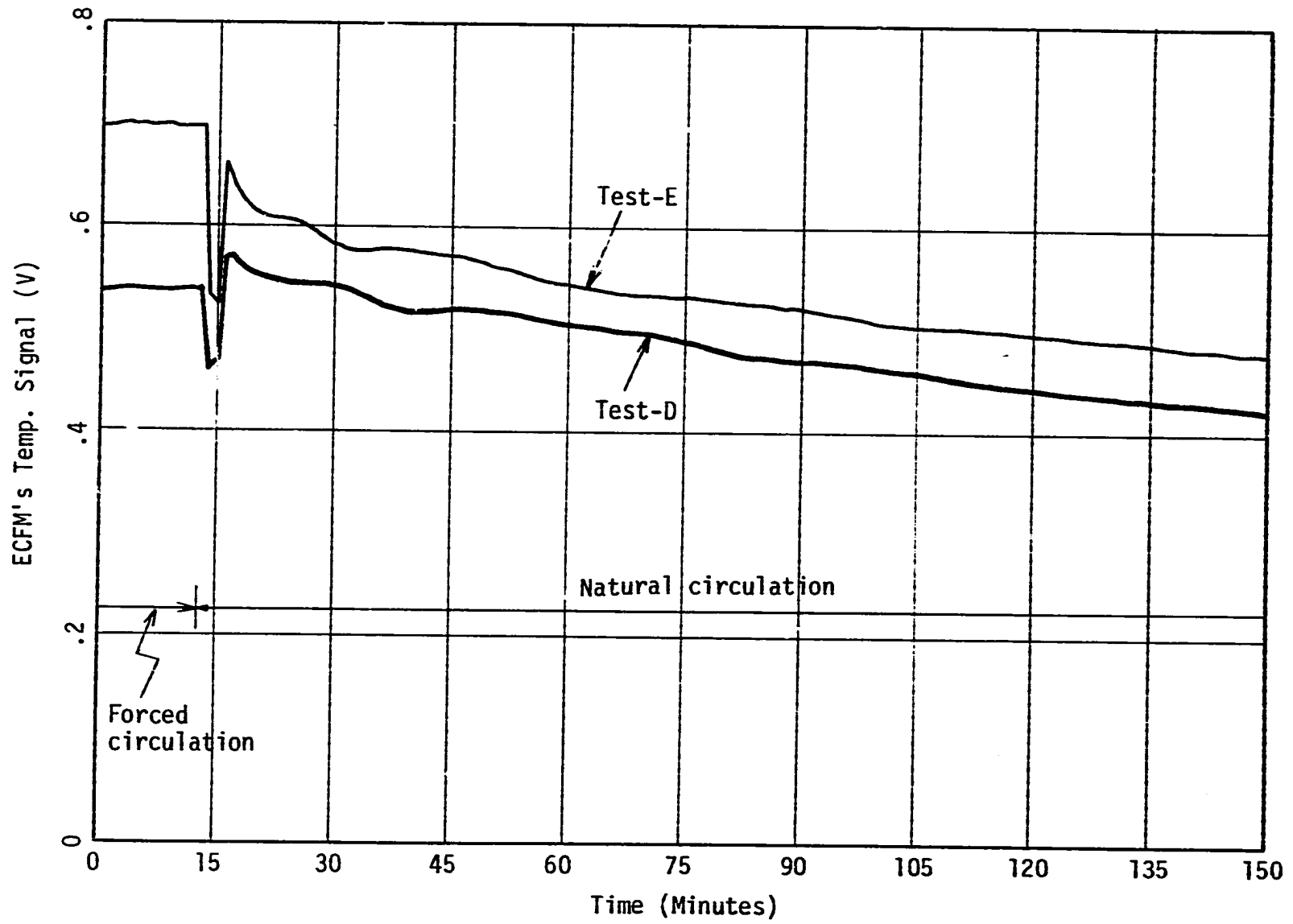


Fig. 4.6.1 Trend of Sensor #1 Temperature Signal at Natural Circulation

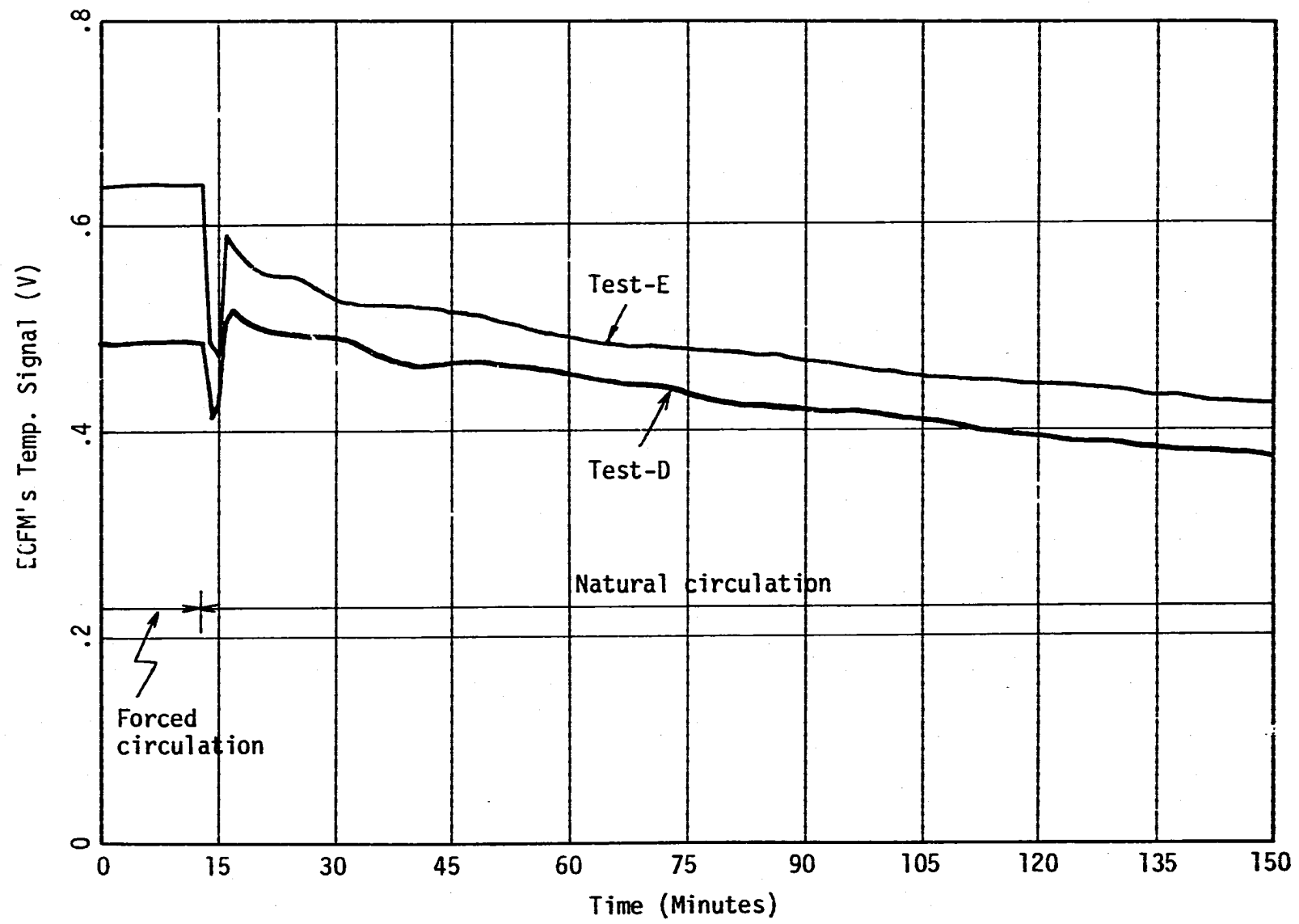


Fig. 4.6.2 Trend of Sensor #2 Temperature Signal at Natural Circulation

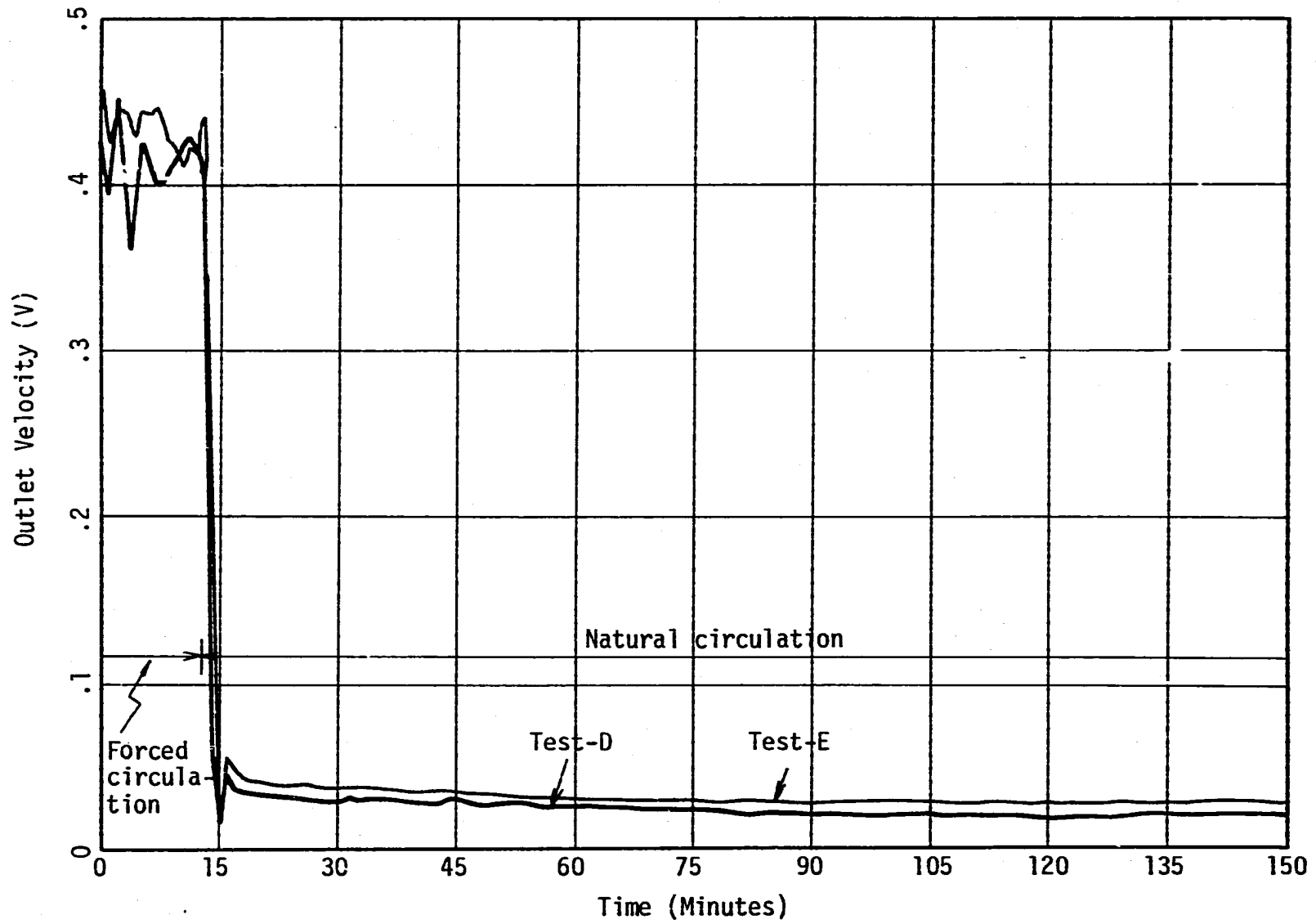


Fig. 4.6.3 Trend of Sensor #1 Flow Signal at Natural Circulation

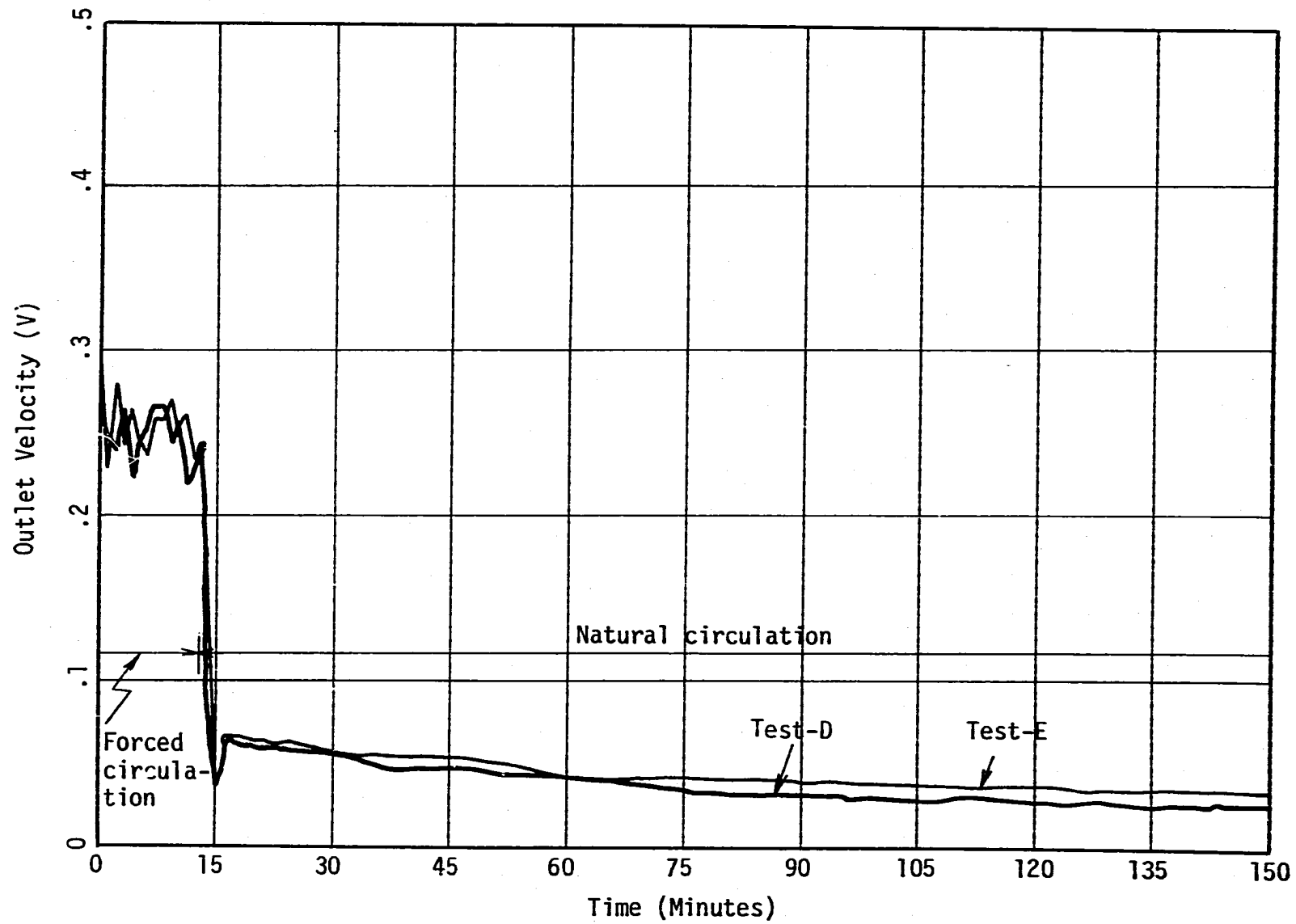


Fig. 4.6.4 Trend of Sensor #2 Flow Signal at Natural Circulation

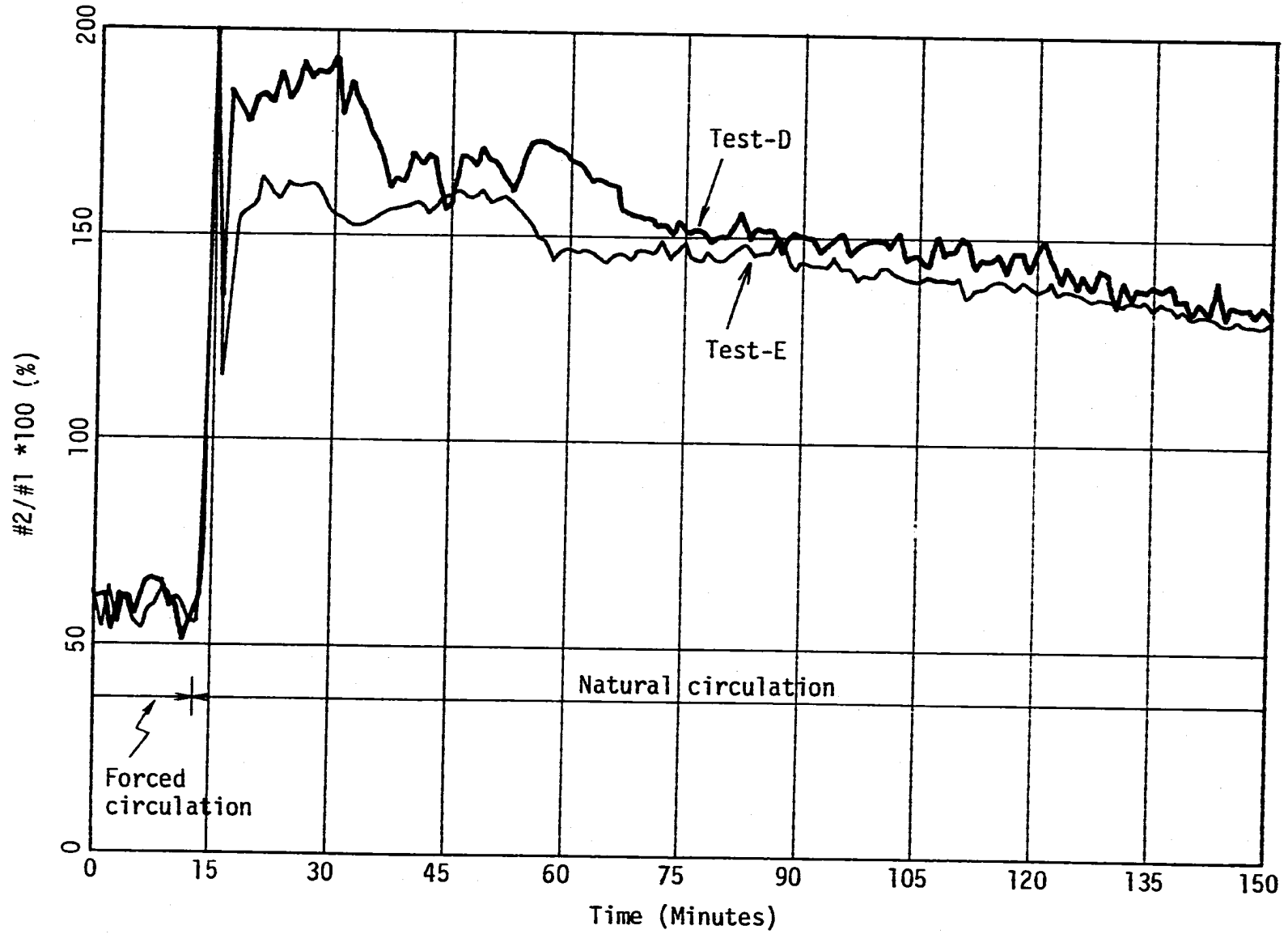


Fig. 4.6.5 Sensor #2 Flow Signal Ratio Cope with Sensor #1 Flow Signal at Natural Circulation

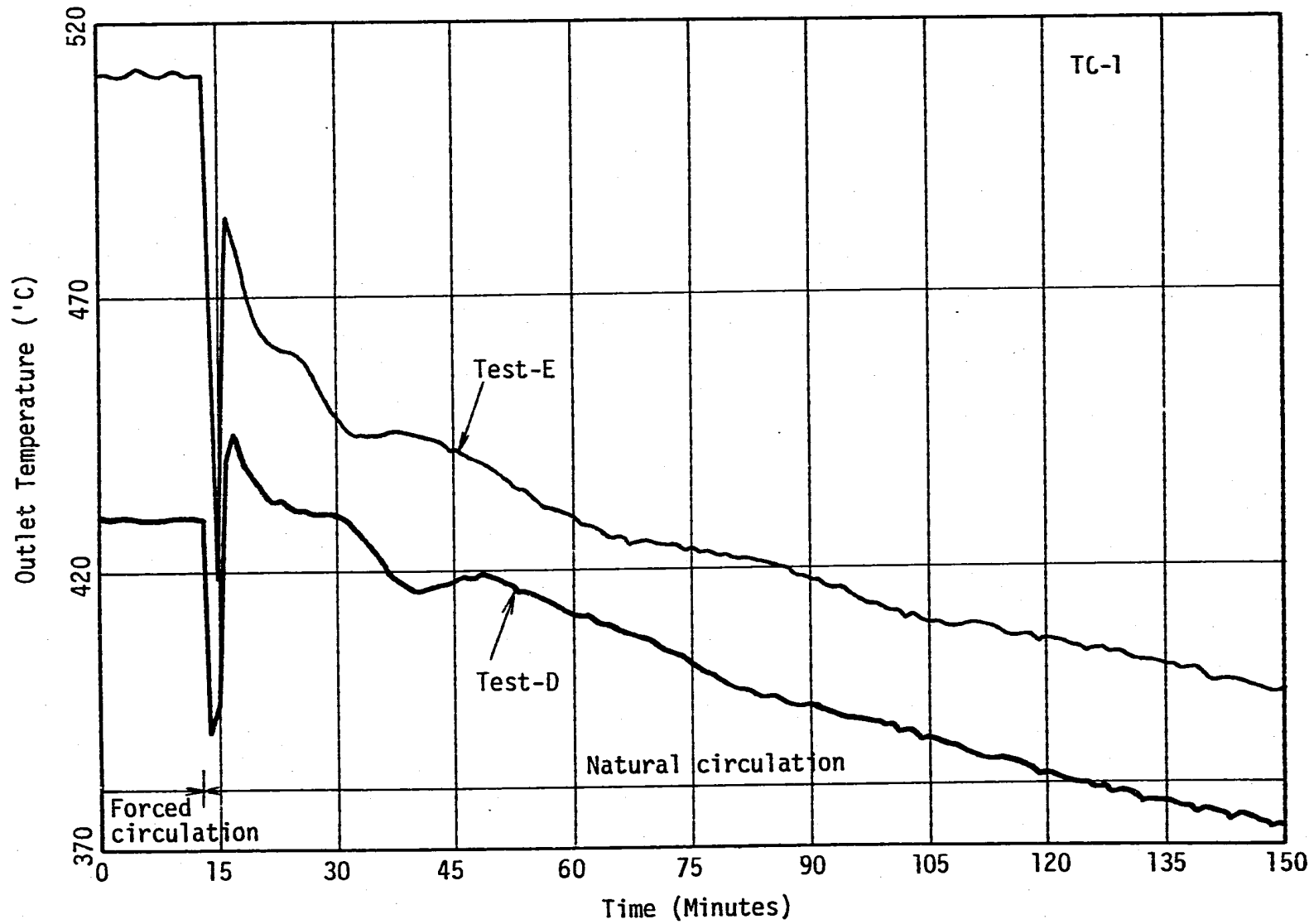


Fig. 4.6.6 Trend of TC-1 at Natural Circulation

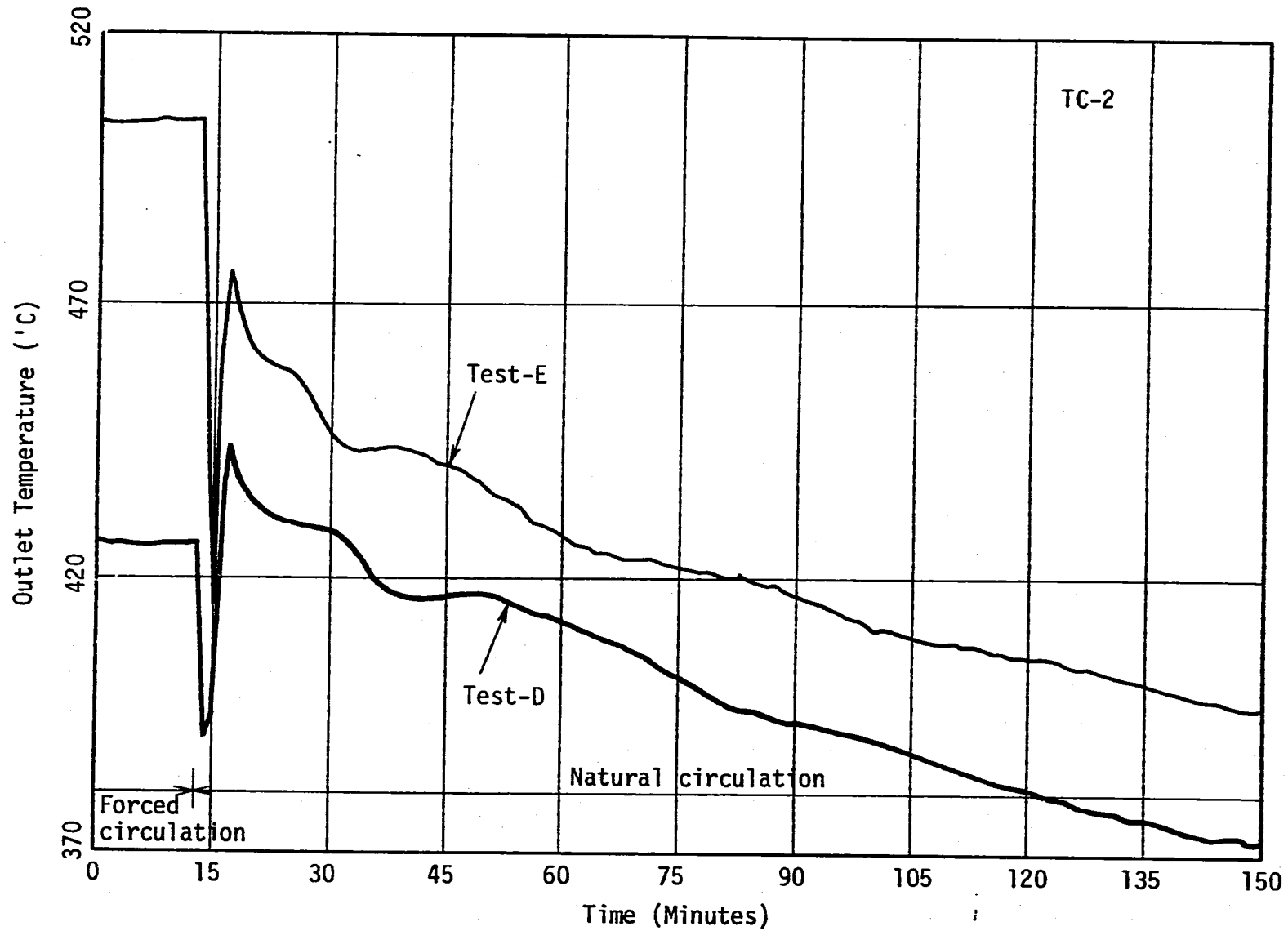


Fig. 4.6.7 Trend of TC-2 at Natural Circulation

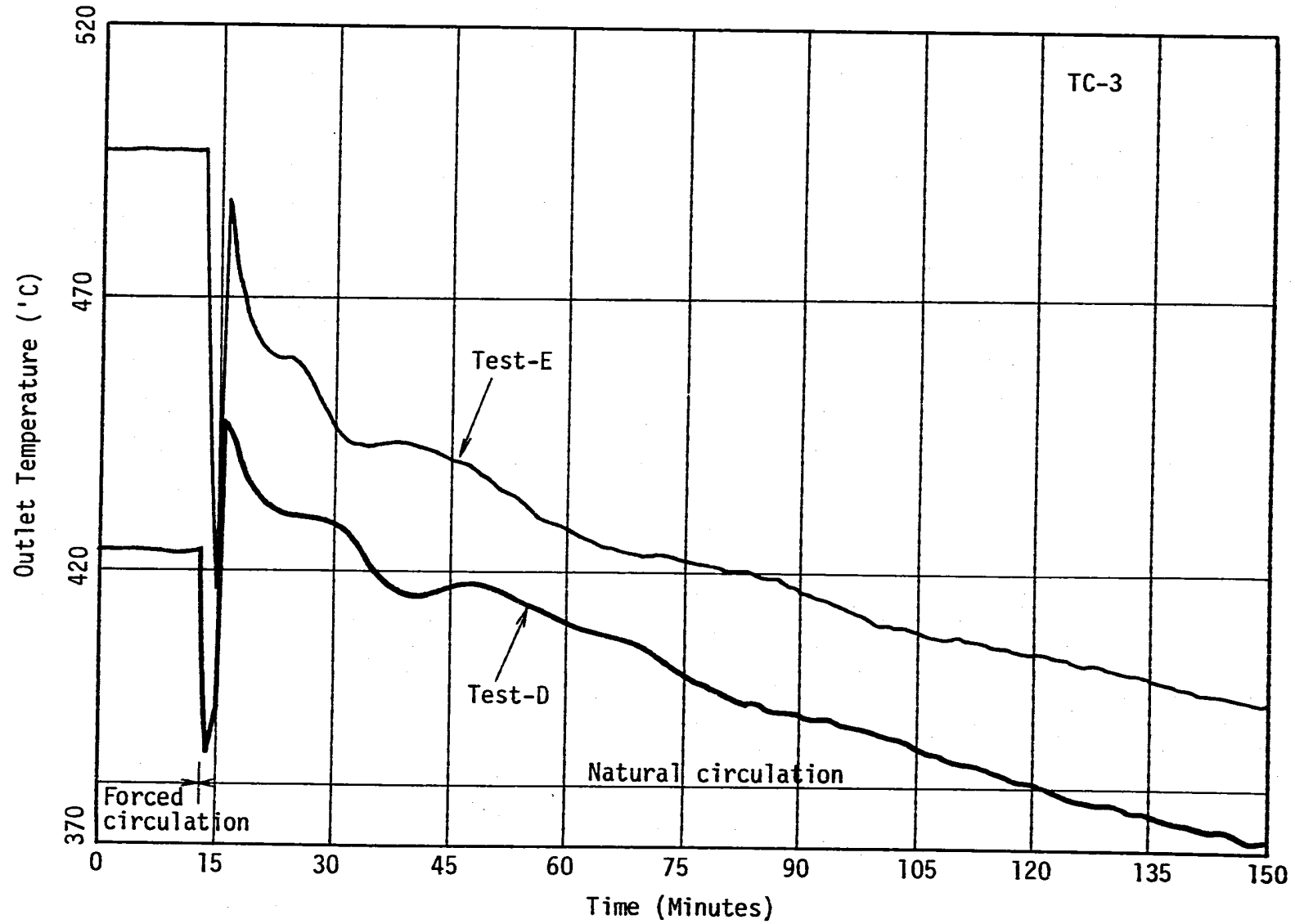


Fig. 4.6.8 Trend of TC-3 at Natural Circulation

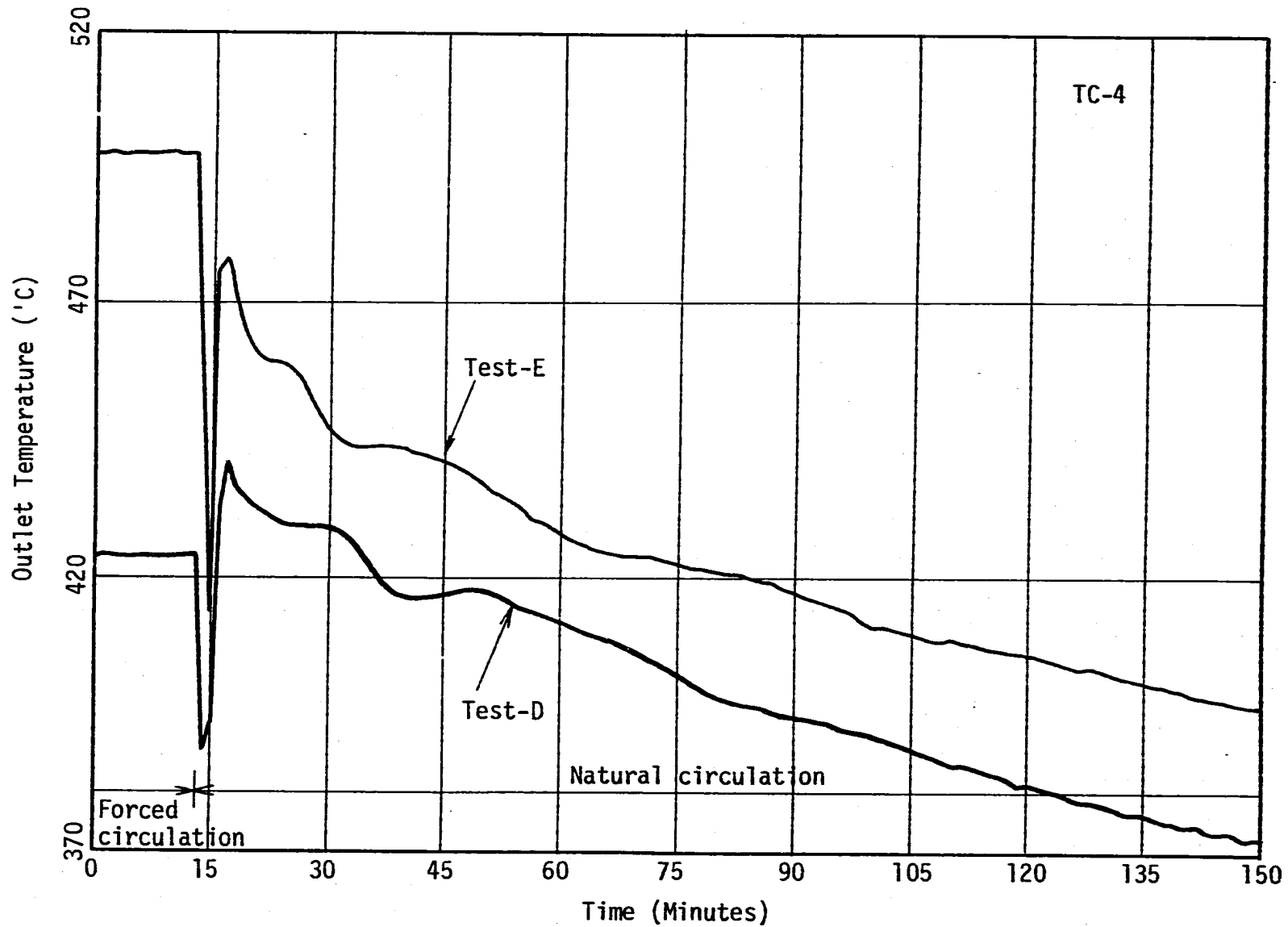


Fig. 4.6.9 Trend of TC-4 at Natural Circulation

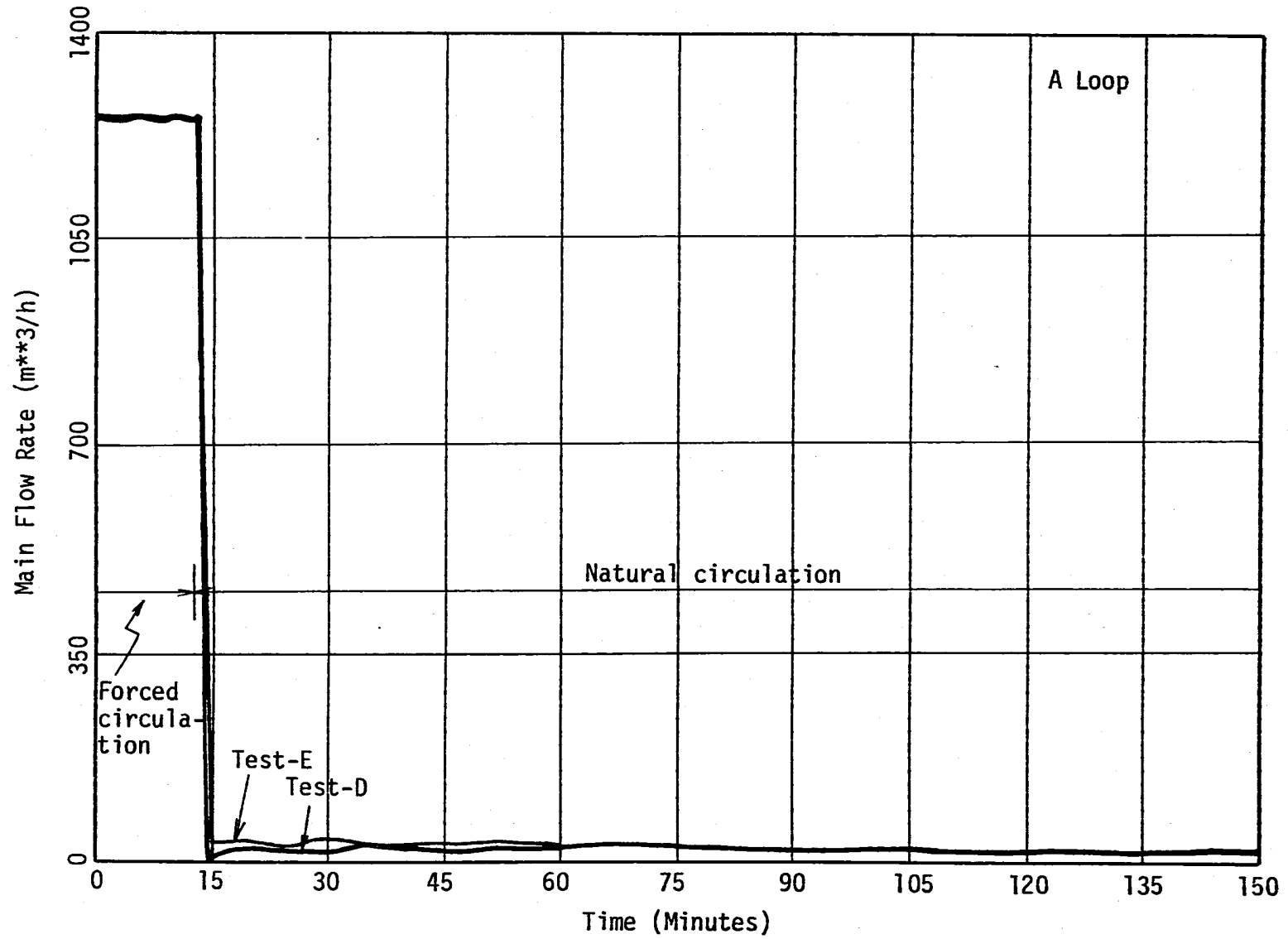


Fig. 4.6.10 Trend of Main Flow Rate (A) at Natural Circulation

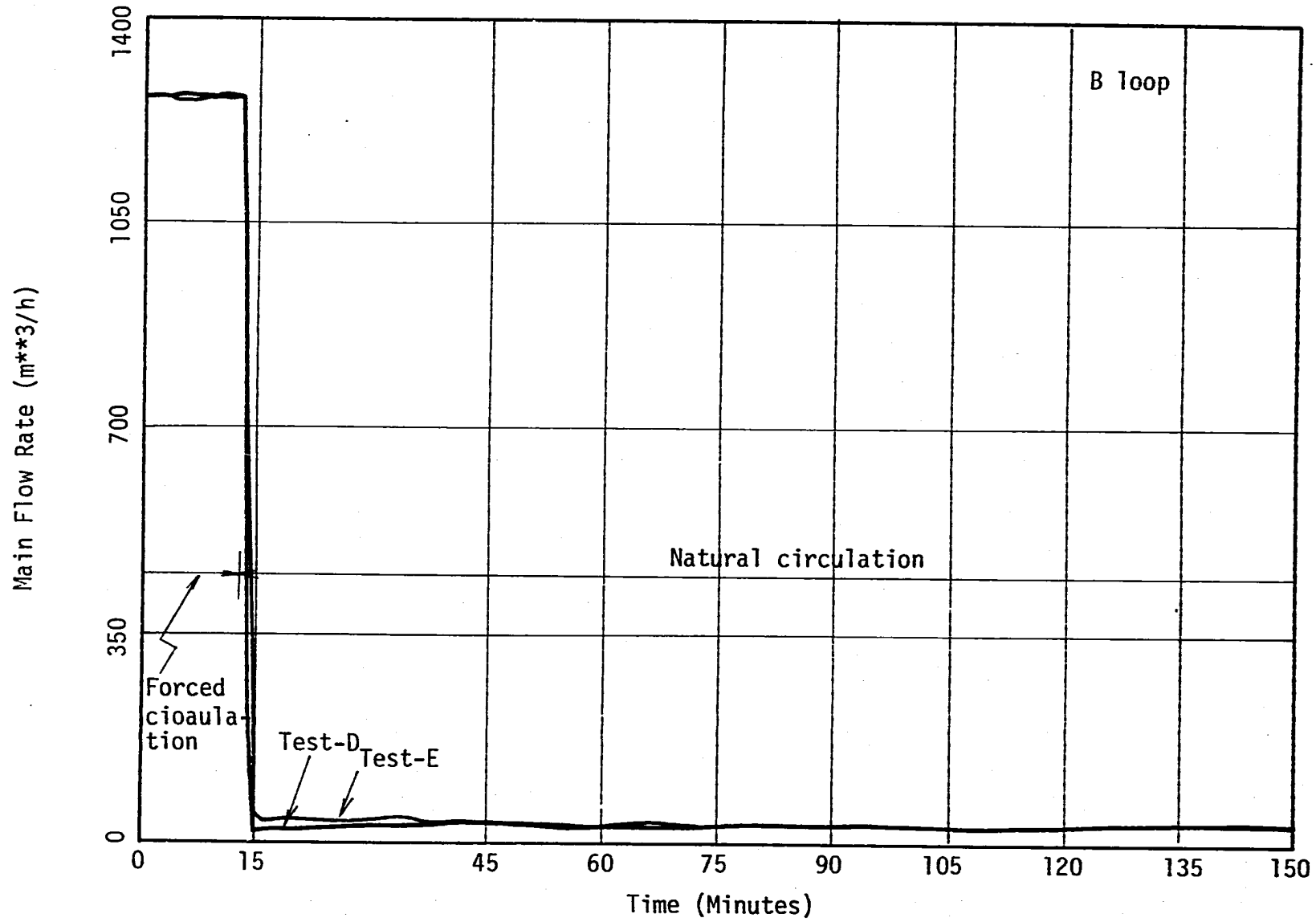


Fig. 4.6.11 Trend of main flowrate (B) at Natural Circulation

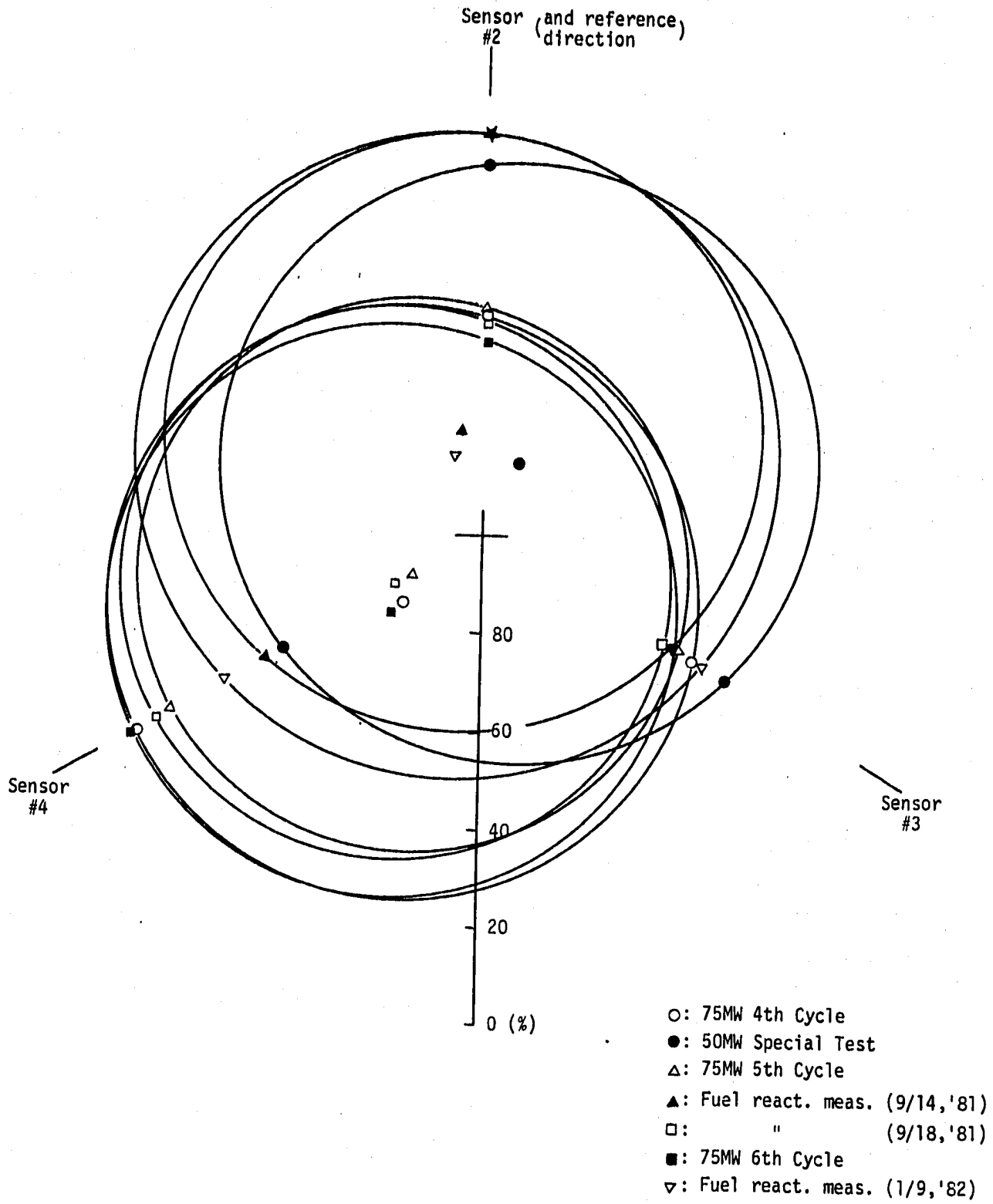


Fig. 5.1 Change of flow distribution at center subassembly outlet region on each cycle operation

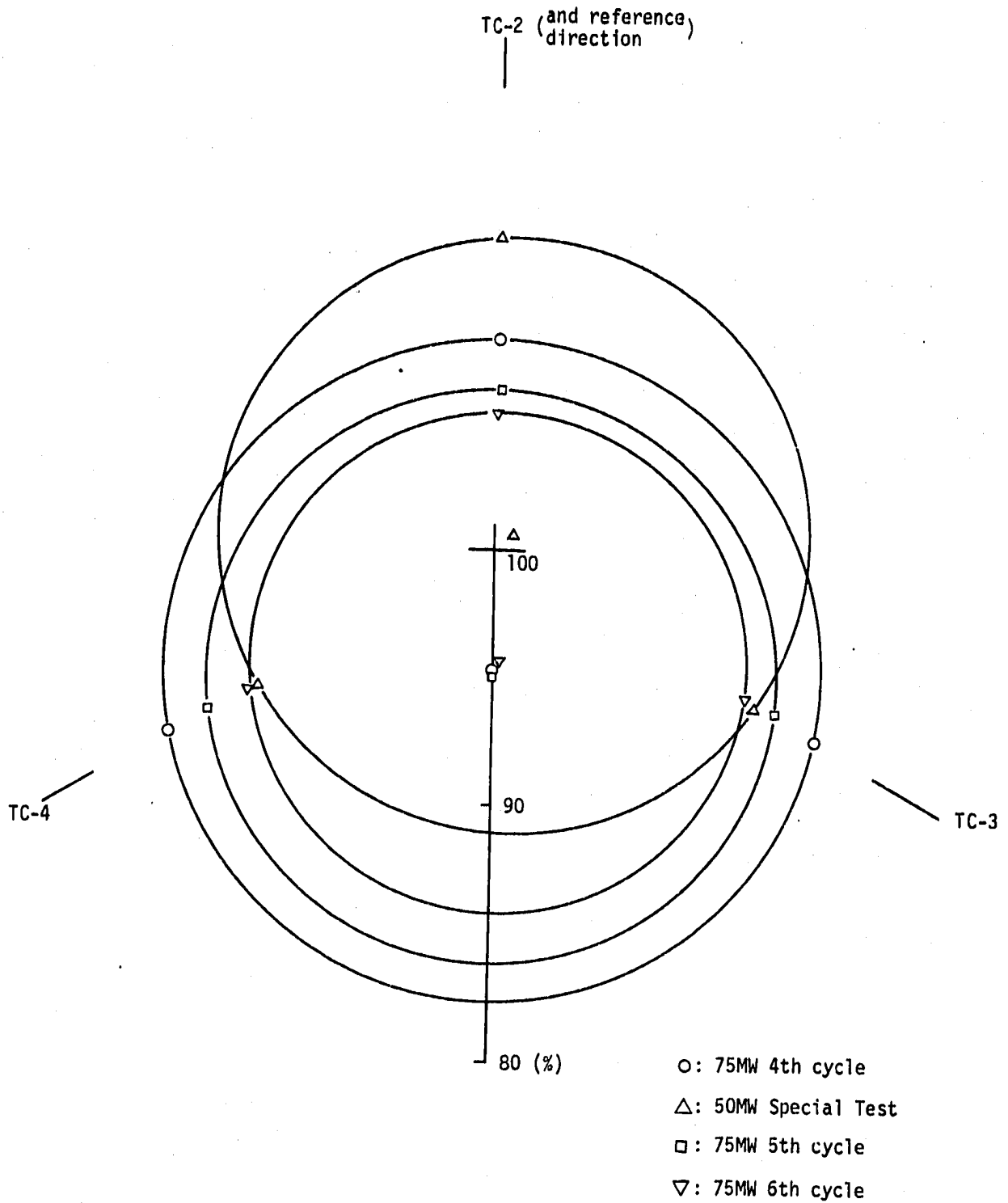


Fig. 5.2 Change of temperature distribution at center subassembly outlet region on each cycle operation

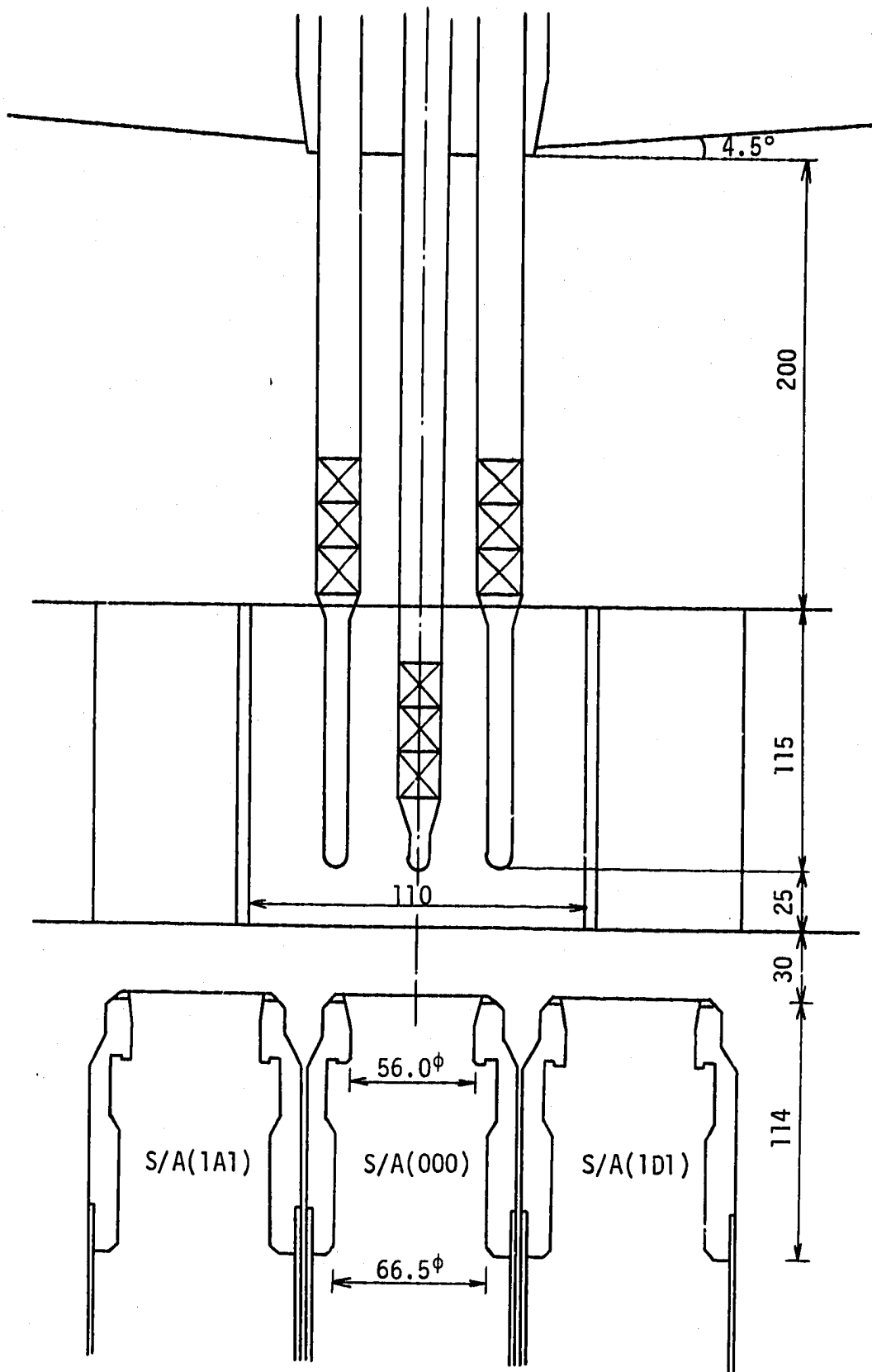


Fig. 5.3 The region of flow analysis for outlet sodium of S/A

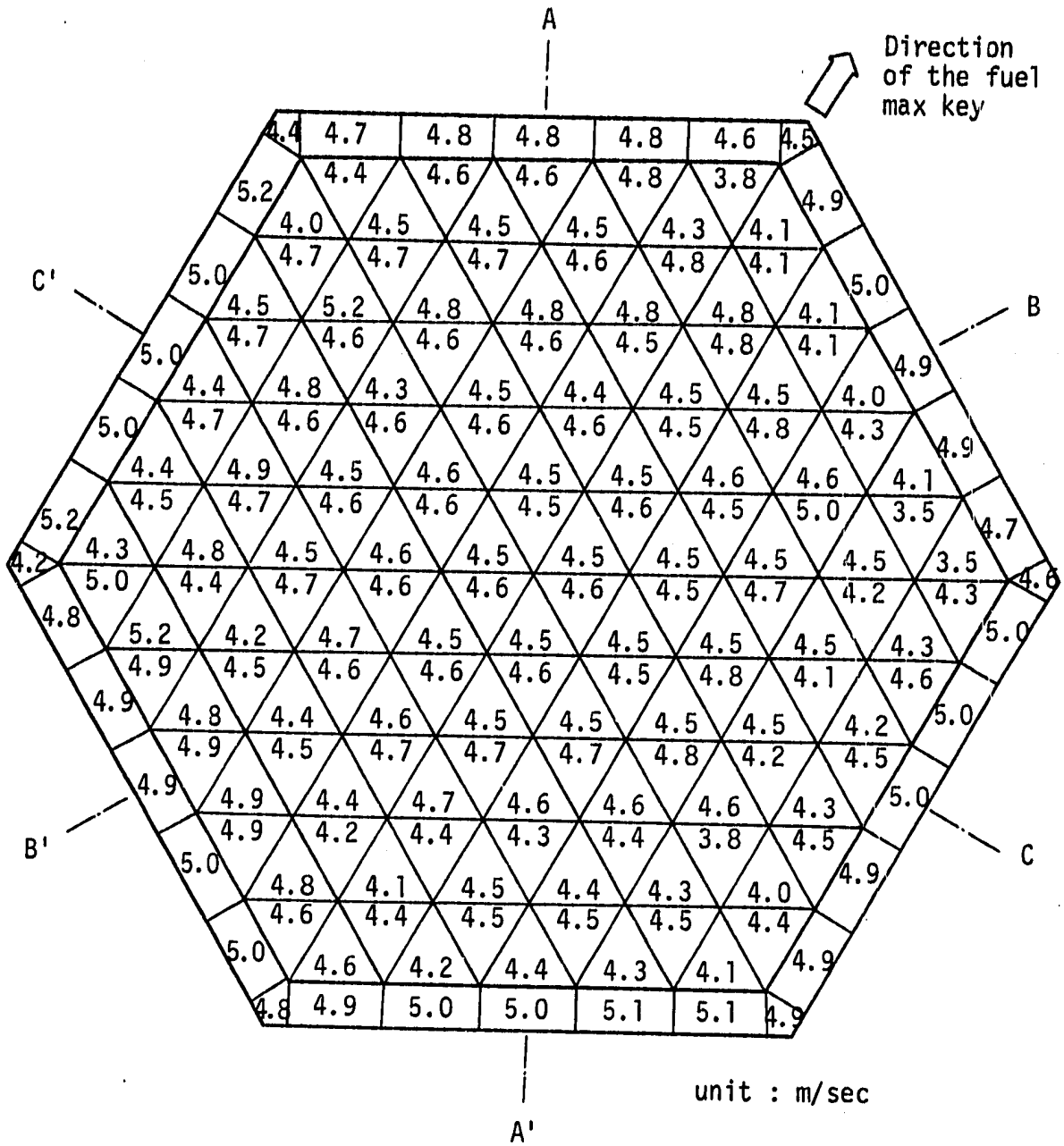


Fig. 5.4 Velocity distribution of core fuel at the end of fuel pins.
(These velocities were calculated by the "SWIRL" code)

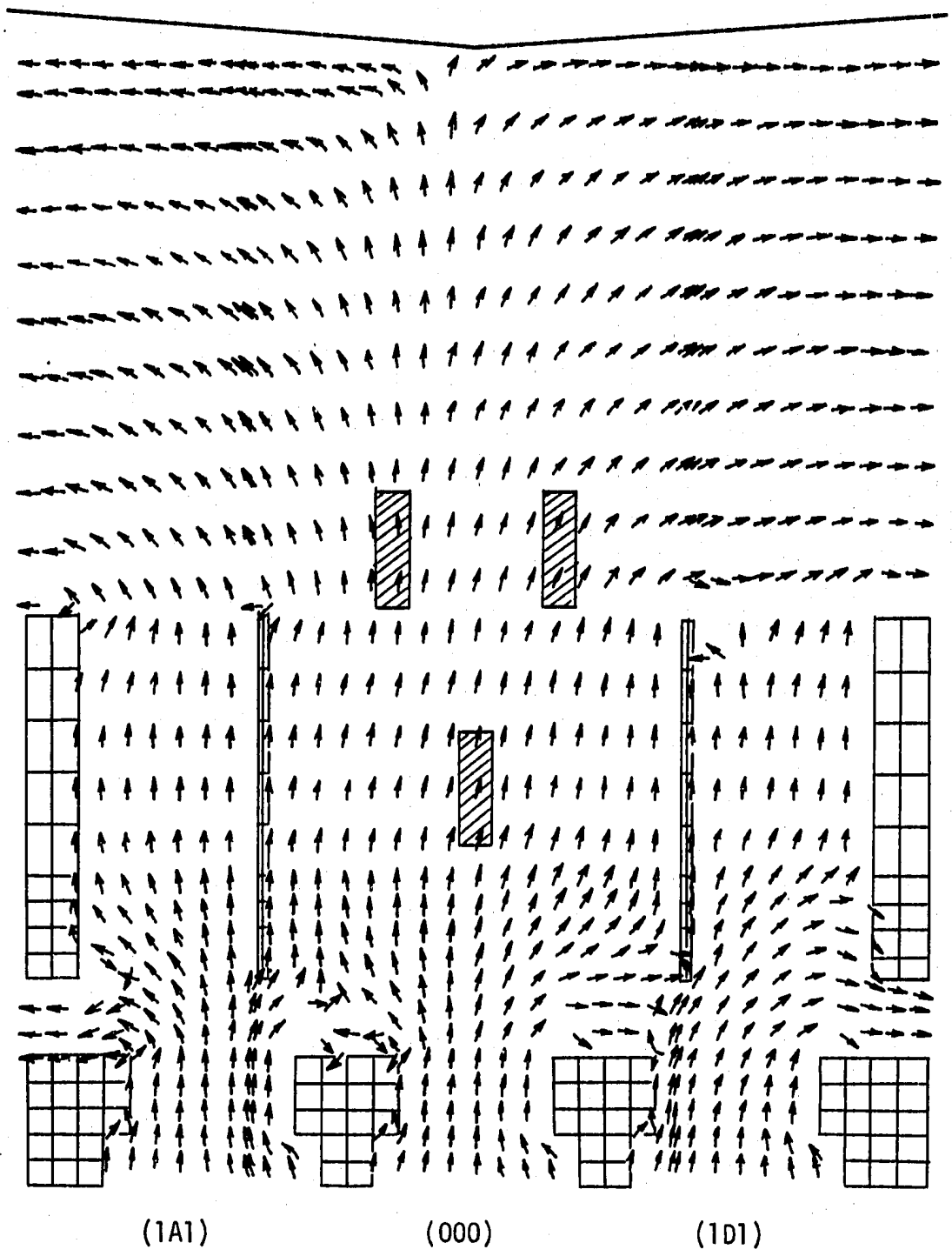


Fig. 5.5 Flow pattern of the joined S/A(1A1) and S/A(1D1) line at the flow guide region.

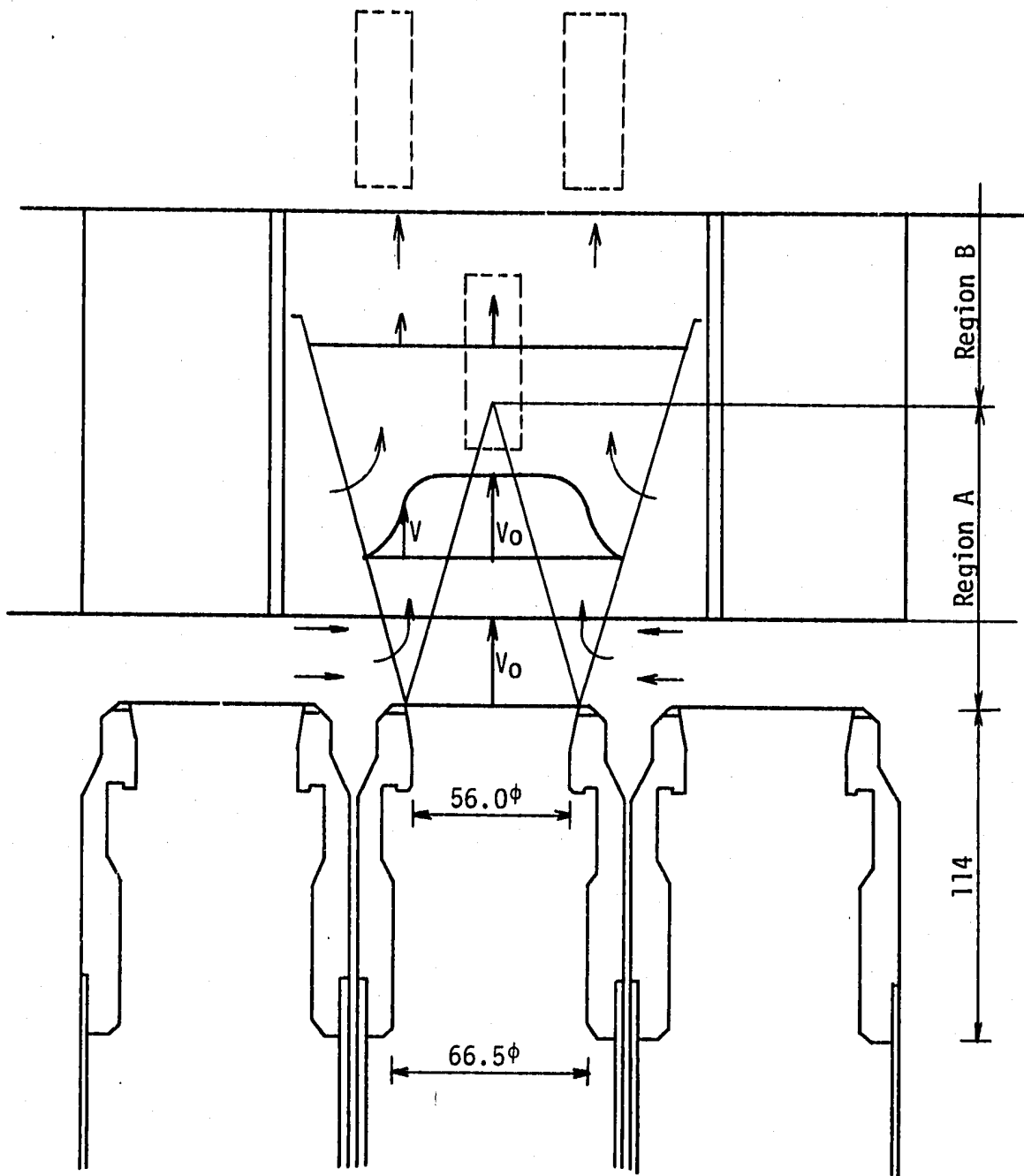


Fig. 5.6 The application of jet diffusion on subassembly outlet sodium.

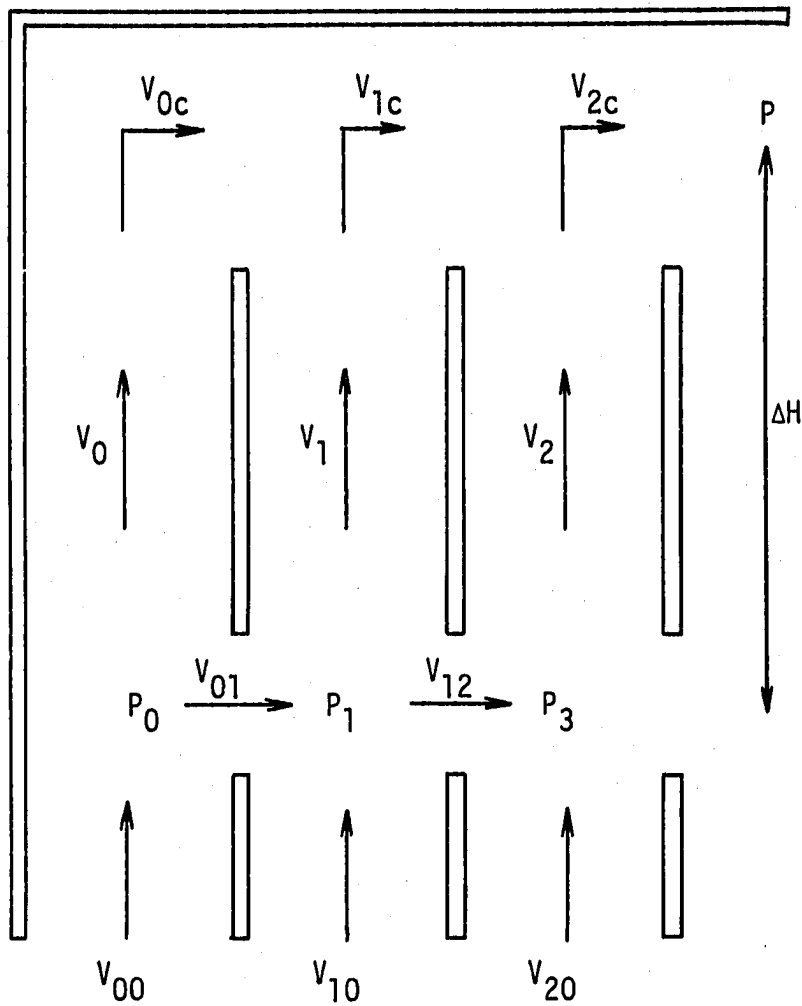


Fig. 5.7 Fundamental model of cross flow effect between adjacent subassemblies.