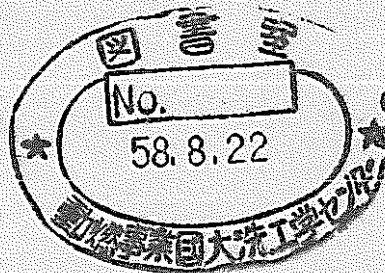


# 燃料集合体出口における温度・流量 ゆらぎを用いた沸騰検出試験

技術資料コード	
開示区分	レポートNo.
T	N941 83-97
この資料は 図書室保存資料です 閲覧には技術資料閲覧票が必要です	
動力炉・核燃料開発事業団大洗工学センター技術管理室	

1983年6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)

## 燃料集合体出口における温度・流量 ゆらぎを用いた沸騰検出試験

犬 島 浩<sup>\*\*\*</sup> 萩 野 敬 迪<sup>\*\*\*</sup> 羽 賀 一 男<sup>\*\*</sup>  
山 口 勝 久<sup>\*\*</sup> 中 本 香 一 郎<sup>\*</sup>

### 要 旨

高速増殖炉における局所沸騰事故が、燃料集合体出口における温度・流量ゆらぎを用いて、検出できる沸騰規模を評価するため、片側50%が閉塞されたワイヤースペーサー付91本組模擬燃料集合体を用いて局所沸騰実験を行った。

局所沸騰実験の初期条件は以下の通りである。

- 1) 冷却材入口温度 : 400 ~ 500 °C
- 2) 熱 流 束 : 72 ~ 93 w/cm<sup>2</sup>
- 3) 冷却材流量 (正常バンドル部流束) : 0.64 ~ 1.13 m/s

実験方法は、冷却材入口温度、冷却材流量を一定に保ち、熱流束を徐々に増大させることで、閉塞部下流直下に局所沸騰を生じさせる手法を用いた。温度・流量ゆらぎを測定するための計装系の仕様は以下の通りである。

- 1) 熱 電 対
  - i) 種 類 : クロメル・アルメル, 接地型 (直径 0.3 mm) および非接地型 (直径 4.8 mm)
  - ii) 時定数 (63.2%) : 10 msec, 2.14 sec の 2 種類
- 2) 流 量 計
  - i) 種 類 : 渦電流型温度・流速計
  - ii) 励磁周波数 : 425 Hz
- 3) ゆらぎ測定回路
  - i) 最大ゲイン : 60 dB
  - ii) 周波数特性 : 0.01 Hz ~ 15 Hz 間で平坦な特性 (0.01 Hz 以下で 20 dB/dec, 15 Hz 以上

\* 動力炉・核燃料開発事業団, 大洗工学センター高速炉機器開発部, 機器開発室。

\*\* 動力炉・核燃料開発事業団, 大洗工学センター高速炉安全工学部, 炉心安全工学室。

\*\*\* 非常勤嘱託 (三菱電機中央研究所)

で 200 dB/dec の減衰特性を有する)

本報告書では、局所沸騰時における沸騰情報の伝達特性を、ピンバンドル部冷却材流動方向数カ所で観測された温度ゆらぎ、および出口での温度・流量ゆらぎ信号を用いて調べた。その結果にもとづいて、燃料集合体出口計装から得られる温度・流量ゆらぎ信号を用いた局所沸騰事故検出のための沸騰規模を評価した。この結果以下の事項が明らかとなった。

- 1) 局所沸騰領域の最も近い場所で観測された冷却材の温度ゆらぎと、それより下流で観測された温度ゆらぎ（複数）との間のコヒーレンス関数を用いて、温度ゆらぎの冷却材流動による伝達特性評価した結果、局所沸騰に起因する温度ゆらぎ情報は、バンドル下流端まで明瞭に伝わるが、バンドル下流端以後での冷却材の強い混合により、集合体出口計装設置場所では、伝達情報の識別が困難となっている。また径方向、軸方向にも検出最適点は見い出せない。
- 2) 局所沸騰が生じると、バンドル内の各点における温度ゆらぎのパワスペクトル密度には、4 Hz 付近にピークが観察された。このピーク周波数は、沸騰による気泡の生成・消滅の周期と一致しており、試験体の体系および沸騰規模に依存したものと考えられる。
- 3) 沸騰規模が大きくなると、沸騰に伴う 4 Hz のピークが、流動ゆらぎとなって、バンドル出口に伝達する。局所沸騰検知には、流量ゆらぎの RMS 値より、残差別の白色性検定法を用いるのが最も有効であると考えられる。

Jun. 1983

Experimental Study of Local Sodium Boiling Detection by Use of  
Temperature and Flow Fluctuations at the Outlet of Subassembly

Hiroshi INUJIMA, Takamichi OGINO,  
Kazuo HAGA, Katsuhisa YAMAGUCHI,  
and Koichiro NAKAMOTO

Abstract

Out-of-pile local boiling experiments were carried out with a wire spacer type 91-pin bundle. A half edge part of its cross-sectional area was blocked by a 5mm thick stainless-steel plate. The purpose of the experiments is to study the feasibility of detecting coolant boiling accident within a LMFBR fuel subassembly using the temperature and flow fluctuations at the outlet of individual subassembly.

Initial conditions of the experiment are as follows:

- (1) Bundle inlet temperature : 400 ~ 500°C
- (2) Heat flux : 72 ~ 93 W/cm<sup>2</sup>
- (3) Coolant flow velocity at the normal bundle section : 0.64 ~ 1.13 m/s

Local boiling was generated immediately behind the blockage by increasing heat flux gradually, with inlet sodium temperature and coolant flow rate being held to be constant.

Specifications of the instrumentation system for measuring temperature and flow fluctuations are listed below:

- (1) Thermocouples
  - Chromel-Alumel thermocouples, Grounded-type (O.D. 0.3mm) and ungrounded-type (O.D. 4.8mm)
  - Time constant (63.2%) : 10 msec and 2.14 sec respectively
- (2) Flowmeter
  - Eddy-current type temperature and flowmeter
  - Exciting frequency : 425 Hz
- (3) Fluctuation measuring circuit :
  - Maximum gain : 60 dB

- Frequency characteristics : flat in the frequency range from 0.01 to 15 Hz, 20 dB/dec attenuation slope below 0.01 Hz and 200 dB/dec attenuation slope above 15 Hz.

The following subjects have been studied.

- (1) To investigate how boiling informations are transferred.
- (2) Anomaly detection methods by use of the temperature and flow fluctuations.
- (3) Feasibility of detecting local boiling accident by fluctuation signals.

These studies yielded the following conclusions.

- (1) Spectral peak arround 4 Hz in the power spectral density functions of the temperature fluctuations was observed at the downstream bundle section of the blockage. This frequency peak is consistent with that of void formation and collapse and may strongly depend on the geometry of the test section and the intensity of boiling. The temperature fluctuation due to local boiling became bundle at the outlet of test section by the violent mixing of sodium. This result was obtained through the estimation of coherence functions of sodium temperature fluctuations. On the other hand, the flow fluctuation at the boiling region was transferred toward the outlet when the local boiling took place in a fairly large region.
- (2) In designing the anomaly detection system which uses the temperature fluctuations at the outlet of the subassembly, the system is needed to have high sensitivity enough to detect the moderate local boiling. The most promissing way within the capability of recent instrument system will be to use the flow fluctuation measured by eddy current-type flowmeter. Out of many anomaly detection method by use of fluctuations, the whiteness test method of residual random process was proved to have the best sensitivity and responsibility.

## 目 次

序 論 .....	1
第 1 章 試験部，ゆらぎ測定システム，局所沸騰実験 .....	2
1.1 試験部 .....	2
1.2 ゆらぎ測定システム .....	2
1.3 局所沸騰実験 .....	3
第 2 章 温度，流量ゆらぎのRMS値，パワスペクトル密度（PSD） .....	4
2.1 局所沸騰実験データ：91 WLB-105 .....	4
2.2 温度ゆらぎのRMS値 .....	5
2.3 温度・流量ゆらぎのPSD .....	6
2.3.1 温度ゆらぎのPSD .....	6
2.3.2 流量ゆらぎのPSD .....	7
第 3 章 局所沸騰時における沸騰情報の伝達 .....	8
3.1 解析結果 .....	8
3.2 温度ゆらぎの伝達性の評価 .....	8
第 4 章 温度・流量ゆらぎを用いた局所沸騰検出の可能性 .....	10
4.1 温度・流量ゆらぎの残差別を用いた異常検出法の適用 .....	10
4.2 残差別を用いた異常検出法 .....	10
4.3 残差別を用いた異常検出法適用結果 .....	12
4.4 局所沸騰検出感度の評価 .....	13
結 論 .....	15
謝 辞 .....	16
参考文献 .....	17

## List of Table

Table 1	Experimental conditions of local boiling
---------	--

## List of Figures

Fig. 1	Local Blockage 91-pin bundle test section
Fig. 2(a)	Arrangement of heated pins; Run 91WLB-101
Fig. 2(b)	Arrangement of heated pins; Run 91WLB-102 and 91WLB-103
Fig. 2(c)	Arrangement of heated pins; Run 91WLB-104 and 91WLB-105
Fig. 3	Schematic diagram of data acquisition for fluctuation signals
Fig. 4	Schematic time chart of the local boiling experiment
Fig. 5(a)	Signals under local boiling condition : Run 91WLB-105
Fig. 5(b)	Signals under local boiling condition : Run 91WLB-105
Fig. 6	Signals under local boiling condition : Run 91WLB-103
Fig. 7(a)	Temperature field behind edge blockage observed in Run 91WLB-103 under Local Boiling Condition I
Fig. 7(b)	Temperature field behind edge blockage observed in Run 91WLB-103 under Local Boiling Condition II
Fig. 8(a)	Temperature field behind edge blockage observed in Run 91WLB-105 under Local Boiling Condition I
Fig. 8(b)	Temperature field behind edge blockage observed in Run 91WLB-105 under Local Boiling Condition II
Fig. 8(c)	Temperature field behind edge blockage observed in Run 91WLB-105 under Local Boiling Condition III
Fig. 9	RMS value of temperature fluctuations at the positions downstream from the blockage : Run 91WLB-105
Fig. 10(a)	RMS value of temperature fluctuations at the outlet under Non Boiling Condition : Run 91WLB-105
Fig. 10(b)	RMS value of temperature fluctuations at the outlet under Local Boiling Condition III : Run 91WLB-105
Fig. 11(a)	Power spectral density of the temperature fluctuations at the position of 2 mm downstream from the blockage : Sensor T04D, Run 91WLB-105
Fig. 11(b)	Power spectral density of the temperature fluctuations at the position of 12 mm downstream from the blockage : Sensor T08E, Run 91WLB-105



- Fig. 11(c) Power spectral density of the temperature fluctuations at the position of 22 mm downstream from the blockage : Sensor T08F, Run 91WLB-105
- Fig. 11(d) Power spectral density of the temperature fluctuations at the position of 34.1 mm downstream from the blockage : Sensor T08G, Run 91WLB-105
- Fig. 11(e) Power spectral density of the temperature fluctuations at the position of 56.2 mm downstream from the blockage : Sensor T08H, Run 91WLB-105
- Fig. 11(f) Power spectral density of the temperature fluctuations at the position of 78.3 mm downstream from the blockage : Sensor T08I, Run 91WLB-105
- Fig. 11(g) Power spectral density of temperature fluctuations at the position of 122 mm downstream from the blockage : Sensor T08K, Run 91WLB-105
- Fig. 11(h) Power spectral density of temperature fluctuations at the position of 255 mm downstream from the blockage : Sensor T08P, Run 91WLB-105
- Fig. 11 (i) Power spectral density of temperature fluctuations at the position of 1195 mm downstream from the blockage : Sensor T010T, Run 91WLB-105
- Fig. 11(j) Power spectral density of temperature fluctuations at the position of 1230 mm downstream from the blockage : Sensor T004, Run 91WLB-105
- Fig. 11(k) Power spectral density of temperature fluctuations at the outlet : Sensor TEC4, Run 91WLB-105
- Fig. 12 Summary of power spectral densities of temperature fluctuations at downstream from the blockage under Local Boiling Condition III : Run 91WLB-105
- Fig. 13 Power spectral density of temperature fluctuations under Local Boiling I, Local Boiling II and Local Boiling III at the position of 12 mm downstream from the blockage : Sensor T05E, Run 91WLB-105
- Fig. 14(a) Power spectral density of temperature fluctuations at the position of 1269 mm downstream from the blockage : Sensor T07U, Run 91WLB-105
- Fig. 14(b) Power spectral density of temperature fluctuations at the position of 1269 mm downstream from the blockage : Sensor

T010U, Run 91WLB-105

- Fig. 15 Power spectral density of flow fluctuations at the outlet  
: Sensor FEC4, Run 91WLB-105
- Fig. 16 Power spectral density of flow fluctuation at the outlet  
: Sensor FEC4, Run 91WLB-103
- Fig. 17(a) Coherence functions between temperature fluctuation  
immediately behind the blockage, T08H, and that in the  
downstream from the blockage under "Non-boiling" : Run  
91WLB-105
- Fig. 17(b) Coherence functions between temperature fluctuation  
immediately behind the blockage, T08H, and that in the  
downstream from the blockage under "Local Boiling I"  
: Run 91WLB-105
- Fig. 17(c) Coherence functions between temperature fluctuation  
immediately behind the blockage, T08H, and that in the  
downstream from the blockage under "Local Boiling II"  
: Run 91WLB-105
- Fig. 17(d) Coherence functions between temperature fluctuation  
immediately behind the blockage, T08H, and that in the  
downstream from the blockage under "Local Boiling III"  
: Run 91WLB-105
- Fig. 18 Coherence functions between temperature fluctuation  
immediately behind the blockage, T08H, and temperature  
fluctuations at the outlet of the bundle (T07V, T08V,  
T09V, T010V) under "Local Boiling III" : Run 91WLB-105
- Fig. 19 Coherence functions between temperature fluctuation  
immediately behind the blockage, T08H, and flow fluctuation  
at the outlet of the bundle, FEC4 : Run 91WLB-105
- Fig. 20(a) RMS value and AR-index of temperature fluctuation measured  
by the outlet thermocouple, T010V : Run 91WLB-105  
Averaging time = 10 sec
- Fig. 20(b) RMS value and AR-index of flow fluctuation measured by the  
outlet eddy current type flowmeter, FEC4 : Run 91WLB-105  
Averaging time = 10 sec
- Fig. 20(c) RMS value and AR-index of temperature fluctuation measured  
by the outlet eddy current type thermometer TEC4  
: Run 91WLB-105
- Fig. 21 AR-indexes of temperature fluctuation measured by thermocouple

at the outlet (T07V, T08V, T09V, T010V) : Run 91WLB-105  
Averaging time = 10 sec

Fig. 22 Effect of local boiling on the AR-indexes for the outlet  
temperature and flow fluctuations : Run 91WLB-105

Fig. 23(a) Effect of averaging time on AR-index of flow fluctuation  
measured by the outlet eddy current type flowmeter, FEC4,  
Averaging time =  $0.1\sqrt{2}$  sec : Run 91WLB-105

Fig. 23(b) Effect of averaging time on AR-index of flow fluctuation  
measured by the outlet eddy current type flowmeter, FEC4,  
Averaging time =  $3\sqrt{10}$  sec : Run 91WLB-105

## 序 論

炉心局所事故を可能な限り迅速かつ正確に検知することは、高速炉の安全上及び運転上の重要な課題となっている。この要請に応えるために導入される炉心監視システムは、通常のプロセス信号（中性子束密度，1次流量，原子炉出口温度，冷却材中遅発中性子レベル等）の他に，中性子雑音，カバーガス中の核分裂生成物が放出する各種放射線，燃料集合体出口における温度・流量，炉内音響等を入力信号とすることが考えられる。また炉心監視システムは，安全系が検知しない程度のごく小規模な異常情報を提供する必要があることから，特に異常に対する高い感度が要求される。筆者らは，この要求に応えるため，燃料集合体出口における温度・流量ゆらぎを用いた異常検出法の基礎的な研究を続けてきた。<sup>(1)~(7)</sup>

<sup>(23)</sup> 前報では，温度・流量ゆらぎを用いた局所沸騰の早期検出の可能性を評価するため，ワイヤラップスペース付61本組局所流路閉塞試験により検討した。その結果，以下の結論が得られた。

- (1) 燃料集合体出口計装の中で，熱電対から得られる，温度ゆらぎを用いても，局所沸騰検出の可能性は薄い。
- (2) 渦電流型温度流速計を用い，その流速信号に着目すれば，局所沸騰検出の可能性はある。温度信号は，局所沸騰検出に関して，ほとんど期待できない。
- (3) 信号処理法としては，RMS法より残差列の白色性検定法が優れている。

本報告では，これらの結果を確認し，さらに局所沸騰時の流量ゆらぎについての検討をバンドル規模のより大きいワイヤスペース付91本組局所流路閉塞試験部を用いて行い，検出可能な局所沸騰規模を評価したので，その結果を報告する。

## 第1章 試験部, ゆらぎ測定システム, 局所沸騰実験

### 1.1 試験部

試験部は、高速炉燃料集合体を模擬したもので、91本の模擬燃料棒で構成され「91 A試験部」と呼ばれる。試験部の模式図をFig. 1に示す。91本すべて電気加熱シーズ型ヒータピンであったが沸騰試験に入る前の各種試験でピンの絶縁劣化が2本のピンで生じており、また本試験でもランを重ねるにつれ±5に絶縁不良のピンが数を増したため、各ランは89から75本のピンを発熱させて行われた。各ランでの発熱ピン、非発熱ピンの位置をFig. 2(a)から(c)に示す。ヒータピン、ダミーピンの両方とも全長1495 mm、外径は6.5 mmである。各ピンは、1.3 mm $\phi$ のスペーサワイヤーが265 mmの巻きピッチで巻かれていて、ピンピッチは、7.9 mmに保たれている。ヒータピンの有効発熱長は300 mmで、熱流束は一様である。発熱開始位置から15～20 mmのところ、閉塞物を設けている。閉塞物は厚さ5 mmのステンレス枚で、燃料集合体の中の冷却材流路断面積50%部分を閉塞している。

冷却材流路に沿って、試験部各部における温度ならびに温度ゆらぎを測定するため、熱電対を設置している。熱電対は、クロメル・アルメル接地型シーズ熱電対で、その外径は0.3 mm、63.2%時定数は10 msecである。ただし、試験部出口に設置した検出器番号T-004の熱電対は、クロメル・アルメル非接地型シーズ熱電対で、その外径は、4.8 mm、63.2%時定数は2.14 secである。

冷却材の流量を測定するため、試験部出口に渦電流型温度・流速計を設置した。渦電流型温度流速計の励磁周波数は、425 Hzで、その周波数特性は、流量計の演算回路で決められており、DC～10 Hz程度まで平坦な特性を有している。渦電流型温度・流速計の出力のうち、温度信号をTEC-4、流速信号をFEC-4と名付けた。

### 1.2 ゆらぎ測定システム

温度・流量ゆらぎ測定システムをFig. 3に示す。熱電対および渦電流型温度・流速計からの信号は、2重シールドケーブルにより制御室まで伝送される。ケーブルの距離はおよそ30 mである。これら、温度信号、流量信号はヒューレット・パッカード社製データ収集システムによってA/D変換され、磁気テープに収集される。サンプリング周期は0.02秒である。

ゆらぎ測定回路は、0.01～300 Hzで平坦な最大60 dBのゲインを有する交流増幅器と、0.01～15 Hzで平坦な特性を有する帯域フィルタで構成されている。帯域フィルタの減衰率は0.01 Hz以下で20 dB/dec、15 Hz以上で200 dB/decである。

### 1.3 局所沸騰実験

局所沸騰実験は以下の手順で行った。

- (1) 所定の流量とヒータ入力の下で、定常状態を設定する。ここでは初期流量と初期熱入力が実験パラメータである。
  - (2) 冷却材流量を一定とし、ステップ状に熱流束が  $4 \text{ W/cm}^2$  上昇する様ヒーター投入電力を調節する。
  - (3) 試験部の最高温度が  $850 \text{ }^\circ\text{C}$  を超えると、ステップ状に熱流束が  $2 \text{ W/cm}^2$  ずつ上昇する様ヒータ投入電力を調節する。
  - (4) 沸騰検出は、ラッパ管上部圧力計P-110により局所沸騰発生の有無を確認する。
  - (5) 局所沸騰が開始したら、ヒータ投入電力を熱流束にして  $2 \text{ W/cm}^2$  下げる。
  - (6) 計測器の調整が済んでいることを確認したのち、データ収録を開始する。
  - (7) 熱流束と再び  $2 \text{ W/cm}^2$  上昇させ沸騰を開始させる。約2分間この局所沸騰状態を保持する（局所沸騰Ⅰと呼ぶ）。
  - (8) 2分間局所沸騰Ⅰを保持後、 $1 \text{ W/cm}^2$  ずつ30秒ごとに上昇させて、次の熱流束レベルに到達させる（局所沸騰Ⅱと呼ぶ）。
  - (9) 2分間局所沸騰Ⅱの状態を保持したのち、 $1 \text{ W/cm}^2$  ずつ30秒ごとに上げて次の熱流束レベルに到達させる（局所沸騰Ⅲと呼ぶ）。
  - (10) 2分間局所沸騰Ⅲの状態を保持したのち、熱流束をステップ状に下げ、実験を終了する。
- 実験全体における熱流束と時間の関係の概念図をFig.4に示した。
- Table 1に本試験のために行われた5つのランの試験条件を示す。

## 第2章 温度, 流量ゆらぎのRMS値, パワースペクトル密度 (PSD)

### 2.1 局所沸騰実験データ 91WLB-105

5回のランのうち沸騰規模が比較的大きかったRun 91WLB-105のデータを重点的に解析したので、本報告書でもこのランについての検討結果を中心に述べていく。Run WLB-105の概要は次の通りであった。

流量を100 ℓ/min (正常バンドル部流速 0.78 m/s), に保ち、ヒータピン投入電力を熱流束が 79.5 W/cm<sup>2</sup>の状態から徐々に増加させ、閉塞部下流直下において局所沸騰を発生させた。沸騰開始時の熱流束は 85.5 W/cm<sup>2</sup>である。沸騰開始前, 沸騰開始, 局所沸騰拡大段階までの代表的な信号の時間的変化をFig. 5(a), Fig. 5(b)に示す。これらは、試験部出口渦電流式温度流速計で測定されたゆらぎ (FEC-4 A) 流量信号 (FEC-4) と流量, 同じく流量・温度計で測定された温度信号 (TEC-4) と温度ゆらぎ (TEC-4A), それに試験部出口温度 T 004, その温度ゆらぎ T 004 A, 閉塞部下流 12mm 温度 T 08E, その温度ゆらぎ T 08EA, ラップ管上部圧力計 P110, 入口配管部設置永久磁石型電磁流量計 F 103 である。沸騰開始時刻は、圧力計 (P-110) からデータ収録開始後 167 秒後であることがわかる。データ収録開始後 0~41 秒間 (正確には 2048 点×0.02 秒 (サンプリングレート) = 40.96 秒) を定常な非沸騰状態 (Steady state non-boiling condition), 181 秒~222 秒の 41 間を局所沸騰 I (Local boiling I), 252 秒~293 秒の 41 秒間を局所沸騰 II (Local boiling II), 343 秒~384 秒の 41 秒間を局所沸騰 III (Local boiling III) と呼ぶことにする。150 秒前後, 260 前後, 335 秒前後において、ヒータピン熱流束を各々 2 W/cm<sup>2</sup> から 4 W/cm<sup>2</sup> あげて局所沸騰規模を拡大させている。

今回の実験では、片側 50 %閉塞の実験体系を用いているため、模擬サブアセンブリの中央部より閉塞部側の管壁側で沸騰が発生している。また、沸騰の発生は、閉塞部下流直下で発生しているのではなく、閉塞部下流 50mm 以降で発生している。以下に局所沸騰規模についてより詳細に検討を加えた。

Run 91 WLB-105 の局所沸騰規模を熱電対信号から直接評価するには、当日データ収録装置が故障しそれに接続されていた熱電対信号の一部が収録されていなかったため困難であった。このため、91 WLB-105 の沸騰規模を評価するために、予定していた 128 チャンネルの信号がすべて収録されている。Run 91 WLB-103 の実験データを用いて類推することにした。

Run 91 WLB-103 の局所沸騰実験の概要を以下に示す。実験の方法は 91 WLB-105 の場合と全く同様である。冷却材流量を 100 ℓ/min (正常バンドル部流速 0.81 m/s), 熱流束を 97 W/cm<sup>2</sup> に保ち、ヒータピン投入電力を徐々に増加させ、閉塞部下流直下において局所沸騰を発生させた。沸騰開始時の熱流束は、99 W/cm<sup>2</sup> である。沸騰開始前, 局所沸騰拡大段階での代表的な信号の

変化をFig.7に示す。これらは、試験部出口渦電流型流量計流量ゆらぎFEC-4A, 試験部出口渦電流型温度計温度ゆらぎTEC-4A, 試験部出口温度T-004, その温度ゆらぎT 004 A, ラップ管上部圧力計P 110である。91 WLB-103における局所沸騰Ⅰは、181秒～222秒の41秒間であり、局所沸騰Ⅱは312秒～353秒の41秒間とする。局所沸騰Ⅲはここでは省略する。

Fig.7(a)に局所沸騰Ⅰにおける沸騰規模を示す。図に示されている様に、局所沸騰は、閉塞部下流約30mm前後のところで発生し、その領域は下流へ20～22mmの軸方向の長さを持っていると推定される。また径方向の巾は10mm程度と推定される。局所沸騰の位置は、ここで行った実験体系が、片側50%閉塞の体系であることから、ラップ管壁に近い部分、高々数mmのところでは発生していると考えられる。局所沸騰Ⅱにおける沸騰規模をFig.7(b)に示す。局所沸騰Ⅰ, 局所沸騰Ⅱにおいても測定された温度は、大きく変化しておらず、局所沸騰Ⅱでは熱流束にして $2\text{ W/cm}^2$  ヒータピンに多く熱入力が入力された分だけ局所沸騰が大きくなっていると推定される。その沸騰規模は、軸方向に30mm, 径方向に10mm程度であろう。

以上に示したRun No 91 WLB-103の温度分布および局所沸騰範囲を参考にし、収録された熱電対信号から求められたRun No 91 WLB-105の温度分布および局所沸騰範囲をFig.8(a)～Fig.8(c)に示す。まずFig.4(a)は局所沸騰Ⅰの温度分布および局所沸騰範囲を示した。局所沸騰の位置は、閉塞部下流30mmぐらいから発生し、下流へ向かって40～45mm程度の軸方向の長さを有し、径方向には約10mmの幅で、管壁から10～15mm程度と推定される。Run No 91 WLB-105における局所沸騰Ⅱ, 局所沸騰Ⅲの温度分布および局所沸騰範囲をFig.4(b), Fig.4(c)にそれぞれ示した。局所沸騰Ⅱ, Ⅲは、局所沸騰Ⅰと同様に閉塞部下流30mmぐらいから発生しているが、下流での軸方向の長さがより長く、局所沸騰Ⅱでは70～75mm局所沸騰Ⅲでは75～80mm程度と推定される。沸騰規模の径方向の幅は、局所沸騰の大きさにかかわらず、約10mmであった。

## 2.2 温度ゆらぎのRMS値

Run 91 WLB-105非沸騰時と局所沸騰Ⅲにおける軸方向バンドル各部の温度ゆらぎのRMS値をFig.9に示す。局所沸騰Ⅲにおける各部の温度ゆらぎのRMS値と非沸騰時における各部の温度ゆらぎのRMS値にはほとんど変化がないが、局所沸騰時の方が、若干温度ゆらぎが大きくなっている。これは、冷却材流量が一定で、ヒータピンの熱流束を大きくした場合一般に温度ゆらぎが大きくなる<sup>(1)(2)</sup>ことが知られており、局所沸騰によって温度ゆらぎが大きくなったとは断言できない。今回、温度ゆらぎを測定した場所は、冷却材流路の中央部である。また、2.1節の温度分布、沸騰規模の評価において述べた様に、局所沸騰している位置は閉塞している側の下流でしかもラップ管壁に近い部分である。こうして、冷却材流路の中央部まで局所沸騰が波及していないため、冷却材流路中央部で観測された温度ゆらぎのRMS値には、顕著に表われなかったと考えられる。中性子しゃへい体より下流の上部プレナム部では、温度ゆらぎは、冷却材混合効果により一時的



に大きくなるが (Fig. 5 の U 断面に設置された T 07 U ~ T 010 U の温度ゆらぎ), 下流にゆくに従って冷却材が混合され, 均質の温度となるために, 温度ゆらぎは小さくなる傾向にある。

燃料集合体出口における, 軸方向および径方向の温度ゆらぎを Fig. 10(a), Fig. 10(b) に示す。Fig. 10(a) は非沸騰時の温度ゆらぎ場であり, Fig. 10(b) は局所沸騰Ⅲにおける温度ゆらぎ場を示している。非沸騰時, 局所沸騰Ⅲにおける温度ゆらぎを比較すると, その性質にほとんど差がない。Fig. 10(a), Fig. 10(b) から次のことが言える。

- (1) 中性子しゃへい体に近いすなわち上流側ほど温度ゆらぎが大きい。
- (2) 冷却材流路中心部ほど温度ゆらぎが大きい。
- (3) ラップ管壁に近い位置の温度ゆらぎは, 上記(1)の傾向があるものの, その変化は小さくほとんど等しい。
- (4) 最下流に位置している W 断面においては, ラップ管壁に近い部分の温度ゆらぎと, 冷却材流路中央部の温度ゆらぎとの大きさの差が小さい。

以上, 燃料集合体出口付近での温度ゆらぎは, バンドル下流まで混合されなかった冷却材が, 燃料集合体出口で混合されることにより大きくなる。しかし, 冷却材が金属であるため, 急速に温度差がなくなる。Fig. 10(b) の局所沸騰Ⅲにおける実験に示される様に U 断面で, 冷却材流路中央部の温度ゆらぎは約 5℃ あったのにもかかわらず 78 mm 下流の W 断面では約 3℃ にまで減衰している。またラップ管壁付近の温度ゆらぎと冷却材流路中央部の温度ゆらぎの差が, U 断面において約 3℃ あるが, W 断面では約 1℃ である。また, ラップ管壁付近の温度ゆらぎは U 断面, V 断面, W 断面といずれの断面においても差がなく約 2℃ である。これは, ラップ管およびそれを覆う断熱材などの大きな熱容量を有する物体が存在するため, 温度変化が小さくなるためと考えられる。

流量ゆらぎの RMS 値に関しては, 後述する局所沸騰検出感度評価の節で述べる。

## 2.3 温度・流量ゆらぎの PSD

### 2.3.1 温度ゆらぎの PSD

閉塞部下流域の各点における温度ゆらぎの PSD を Fig. 11(a) ~ Fig. 11(k) に示す。ただし Fig. 11(a) ~ Fig. 11(j) は熱電対信号によるもの, Fig. 11(k) は渦電流型温度・流速計信号によるものである。各図には, Run 91 WLB-105 での非沸騰時, 局所沸騰Ⅲにおける PSD が示してある。また Fig. 12 に局所沸騰Ⅲにおけるバンドル各点での PSD をまとめて表示した。PSD の形状は沸騰規模が大きくなるにつれて, 4 Hz のピークが顕著となっていることがわかった。一例として, バンドル内部 E 断面における温度ゆらぎの PSD を局所沸騰Ⅰ, Ⅱ, Ⅲの状態について Fig. 13 に示した。また Fig. 14(a), Fig. 14(b) には, 試験部出口 U 断面 2 箇所における非沸騰, 局所沸騰Ⅲ状態の PSD を示した。これらの PSD 解析結果から以下のことがわかった。

- (1) 局所沸騰が生じると、バンドル内閉塞下流域の温度ゆらぎには、4 Hz 近傍にスペクトルのピークが現れるが、バンドル出口においては、径方向、冷却材流路方向いずれの位置においても現れない。このピークは、ボイドの生成・消滅サイクルに対応したものと考えられる。
- (2) 局所沸騰Ⅰ、Ⅱ、Ⅲ状態における温度ゆらぎのPSDを比較すると、信号レベルは沸騰規模が大きくなるほど増大する傾向がある。一方PSDの形状そのものは、いずれも類似している。
- (3) バンドル出口における温度ゆらぎのPSDは、検出位置が同一であれば非沸騰、局所沸騰Ⅰ、Ⅱ、Ⅲのいずれにおいても、その形状およびレベルの両方に明確な区別をつけることが困難である。
- (4) 渦電流型温度・流速計の温度信号ゆらぎのPSDは、非沸騰、局所沸騰にかかわらず、その形状および信号レベルにはほとんど変化が見られない。

### 2.3.2 流量ゆらぎのPSD

バンドル出口に設置した渦電流型流速計の流量ゆらぎのPSDをFig.15に示す。前回の報告<sup>(23)</sup>で行った61ピンバンドで構成された体系の実験ではほとんど流量ゆらぎのPSDに局所沸騰規模に対応した変化が見られなかった。今回の実験でも非沸騰時の流量ゆらぎのPSDと、局所沸騰ⅠのPSDはほとんど変化が見られない。しかし局所沸騰ⅡにおけるPSDには4 Hz 近傍のスペクトルピークが見られ、局所沸騰Ⅲではこのピークが大きくなる傾向にある。Run 91 WLB-103における局所沸騰Ⅰ、Ⅱ状態の流量ゆらぎのPSDをFig.16に示したが、4 Hz 近傍のスペクトルピークは見られない。この4 Hz のピークは、局所沸騰に伴うボイドの生成・消滅サイクルに対応したものと考えられるが、沸騰の規模がある程度大きくなると、出口の流量に現われないと考えられる。さきにRun 91 WLB-103とRun 91 WLB-105の局所沸騰規模の評価を2-1-1で行った。この結果局所沸騰規模はRun 91 WLB-103における局所沸騰Ⅱで約8 mm(幅)×25 mm(長さ)、Run 91 WLB-105の局所沸騰Ⅰで、およそ8 mm(幅)×45 mm(長さ)、局所沸騰Ⅱで8 mm×80 mm程度であった。局所沸騰Ⅰでは、試験部出口流量に影響をほとんど与えておらず、局所沸騰Ⅱでは明らかに試験部出口流量に影響を与えている。この結果から、8 mm×60 mm程度の沸騰規模が発生すれば、試験部出口の流量にバンドル内で発生した局所沸騰の影響が現われると推定される。

### 第3章 局所沸騰時における沸騰情報の伝達

第2章では、局所沸騰が生じると、閉塞部下流のバンドル内各部における温度ゆらぎのPSDにボイドの生成・消滅サイクルに対応して、41Hz近傍のピークが観測されることを示した。本章では、コヒーレンス関数を用いて、沸騰情報の温度・流量ゆらぎによる局所沸騰情報の伝達性を詳細に報告する。

#### 3.1 解析結果

局所沸騰が開始する位置に最も近い位置（T08H）における温度ゆらぎとその下流域軸方向各点における温度ゆらぎ間のコヒーレンス関数をFig. 17(a)～Fig. 17(d)に示す。さらに局所沸騰開始点に最も近い位置の温度ゆらぎと流量ゆらぎのコヒーレンス関数をFig. 19に示す。局所沸騰開始点に最も近い位置の温度ゆらぎと出口（V断面）での径方向各点における温度ゆらぎのコヒーレンス関数をFig. 18に示す。

これらの解析から判った事項をまとめる。

- (1) 局所沸騰位置に最も近い温度ゆらぎと（H断面，T08H），バンドル内の温度ゆらぎのコヒーレンス関数には、いずれも約4Hz程度に顕著なピークを有する。
- (2) 局所沸騰位置に最も近い温度ゆらぎと（H断面，T08H），バンドル出口での温度ゆらぎのコヒーレンスには約4Hzのピークはなく、また、コヒーレンス関数自体の値も小さい。これは沸騰規模に依存しない。
- (3) 局所沸騰位置に最も近い温度ゆらぎ（H断面，T08H）とバンドル出口における流量ゆらぎ信号には、沸騰規模に応じた相関関係がある。局所沸騰Ⅰでは、コヒーレンス関数には約4Hzのピークもなく値も小さい。局所沸騰Ⅱにおいては約4Hzのピークがあり、このピークの値も約0.8ときわめて強い相関を示している。局所沸騰Ⅲになると、コヒーレンス関数の4Hzのピークはさらに大きくなり0.9程度になる。前回の報告<sup>(23)</sup>では、局所沸騰箇所とバンドル出口における温度ゆらぎ信号の相関関係はきわめて小さいと報告した。これは、沸騰規模が小さかったため、出口の流量に現われなかったことによると推定される。

#### 3.2 温度ゆらぎの伝達性の評価

3.1節の解析結果から、局所沸騰時の温度ゆらぎの伝達性について、以下の推論が得られる。

- (1) 局所沸騰の情報は、有効発熱部下流端（P断面）まで達している。今回の実験では、バンドル下流先端部の温度ゆらぎを計測できなかったが、前回の報告<sup>(23)</sup>では計測できて、強いコヒーレンスが見られた。このことから、今回の実験においても、バンドル下流先端部（閉塞部下流

1013 mm)までは局所沸騰情報は伝達していると考えられる。

(2) 局所沸騰箇所とバンドル出口における温度ゆらぎ信号の相関関係は、今回行った沸騰規模では極めて小さい。これは温度ゆらぎのRMS値解析から推論できることで、参考文献(1),(2)で考察した様にバンドル出口における冷却材の乱流混合により発生する温度ゆらぎが、バンドル出口において主要であると考えられるためである。沸騰規模が十分大きくなると(例えば、バルク沸騰程度)検出可能である<sup>(11)</sup>から、バンドル出口まで沸騰情報が温度ゆらぎによって伝達される沸騰規模が存在する。

(3) 局所沸騰箇所の温度ゆらぎとバンドル出口における流量ゆらぎの相関関係は、沸騰規模に応じて大きくなる。局所沸騰箇所に最も近い温度ゆらぎ(H断面, T 08 H)とバンドル出口に設置された渦電流型流速計から得られた流量ゆらぎとのコヒーレンス解析では、沸騰規模が大きくなると、沸騰に起因する約4 Hzのピークが見られ、その値も0.8~0.9と極めて大きい。沸騰によって生じたボイドの生成・消滅サイクルが、冷却材流量に影響を与え、それが出口まで伝達していると推論される。前回の報告<sup>(23)</sup>では「残差列の白色性検定法によれば、流量ゆらぎに非沸騰、局所沸騰時においてその検定指標に差が見い出せる。これは局所沸騰に起因する温度ゆらぎの情報が、直接流量ゆらぎに伝達していないことを示しているが、局所沸騰に伴う流動の変化が伝わっていないとは言えない。」と結論した。はからずも、局所沸騰の情報が流動ゆらぎとなって、バンドル出口まで伝わっていることが判明した。8 mm × 60 mm程度の領域で、局所沸騰が発生すると、バンドル出口の流動に変化が現われる。しかし局所沸騰領域が、8 mm × 50 mm程度では、ほとんどバンドル出口の流動に変化を与えないと推定される。

## 第4章 温度・流量ゆらぎを用いた局所沸騰検出の可能性

### 4.1 温度・流量ゆらぎの残差列を用いた異常検出法の適用

筆者らは、先に残差列を用いた異常検出法について報告している。参考文献<sup>(11)</sup>で報告した実験は、試験体系が37本ピンバンドル（グリッド型スペーサ）であり、局所沸騰規模が大きく、試験部出口に設置された熱電対の温度ゆらぎ信号の形状に、沸騰前、後のパターンがはっきり異なるほどの局所沸騰実験であった。前回の報告<sup>(23)</sup>では、61本ピンバンドル（ワイヤー・スペーサ）を用いた実験である。この61本ピンの実験では、局所沸騰情報の温度ゆらぎによる伝達性を評価することができた。そして、バンドル出口における流動ゆらぎを用いれば、局所沸騰検出の期待がもてるとの結論が得られたが、局所沸騰規模が小さかったため、検出可能な局所沸騰規模の評価が困難であった。試験では局所沸騰の規模を小さい領域からある程度大きな領域まで変化させたデータが得られたので、温度ゆらぎ、あるいは流量ゆらぎの残差列の白色性検定による局所沸騰検出の可能性について検討した。

以後Run 91 WLB-105の温度・流量ゆらぎに残差列を用いた異常検出法を適用し、温度・流量ゆらぎに現われる変動をどの様に検出するか比較する。なお、Run 91 WLB-105は、これまでの局所沸騰実験の中で、ピンバンドルの体系が現在最大であり、長い時間をかけて局所沸騰を持続させ、しかも、その局所沸騰の規模が試験部出口に設置した熱電対から得られる温度ゆらぎ信号に目で判別できない程度、小規模におさえられているという特徴を有する。

### 4.2 残差列を用いた異常検出法

一般に異常検出法としては、正常状態と検証しようとする状態を比較し、その差異から判定しようとするのが考えられる。非沸騰時における温度ゆらぎ、流量ゆらぎは、正規不規則過程であり、AR（自己回帰 Autoregressive）モデルで表現可能である。したがって、検証されるデータの正常時ARモデルへの適合性に着目するのが、有力な考え方である。

本節においては、残差列を用いた異常検出アルゴリズムについて述べる。

#### (1) 残差列を用いた異常検出アルゴリズム

正常状態におけるゆらぎの時系列データを $x_i$  ( $i = 1, 2, \dots, N$ ) とすると、 $x_i$ の自己回帰モデルは(1)式で与えられる。

$$x_n = \hat{x}_n + \epsilon_n = \sum_{i=1}^n \hat{a}_i \cdot x_{n-1} + \epsilon_n \quad (1)$$

$$(n = 1, 2, \dots, N)$$

ここで、

$\hat{x}_n$  :  $x_n$  の予測値

$\epsilon_n$  :  $x_n$  の残差列

$\hat{a}_i$  : 自己回帰モデル係数

(1)式の中の  $M$ ,  $a_i$  ( $i = 1, 2, \dots, M$ ) は, 例えば(2)式が最小となるように決める。

$$FPE = \frac{N+M+1}{N-M-1} \left\{ \frac{1}{N-M} \sum_{k=M+1}^N |\epsilon_k|^2 \right\} \quad (2)$$

検証すべきゆらぎを  $x_j$  ( $j = M+1, M+2, \dots$ ) とするとその残差列  $\epsilon_j$  は次式(3)で与えられる。

$$\text{Step 1} \quad \epsilon_j = x_j - \hat{x}_j = \hat{x}_j - \sum_{\ell=1}^M \hat{a}_\ell \cdot x_{j-\ell} \quad (3)$$

$$\text{Step 2} \quad \psi_{\epsilon\epsilon}(j, \tau) = \frac{1}{L} \sum_{k=1}^{N_0} \epsilon_{j+k} \cdot \epsilon_{j+k-\tau} \quad (4)$$

$$\tau = 1, 2, \dots, \tau_{\max}$$

ここで,

$L$  :  $\phi_{\epsilon\epsilon}(j + N_0, \tau)$  を計算するために用いたデータ数

$N_0$  : 異常検知実行周期内のサンプリングデータ数

$\tau$  : 自己相関関数のおくれ数

$$\text{Step 3} \quad \phi_{\epsilon\epsilon}(j + N_0, \tau) = \phi_{\epsilon\epsilon}(j, \tau) + \Delta \phi_{\epsilon\epsilon}(j, \tau)$$

$$= \phi_{\epsilon\epsilon}(j, \tau) + \psi_{\epsilon\epsilon}(j - \tau) - \psi_{\epsilon\epsilon}(j - L, \tau) \quad (5)$$

$L$  と  $N_0$  は,  $L/N_0$  が整数となる様にする。

Step 4 次に, 異常検知指標  $I(j + N_0, M, L, \tau_{\max})$  を定義し,

$$I(j + N_0, M, L, \tau_{\max}) = \sum_{\tau=1}^{\tau_{\max}} |\phi_{\epsilon\epsilon}(j + N_0, \tau)|^2 \quad (6)$$

この  $I(j + N_0, M, L, \tau_{\max})$  を残差列の白色性検定指標 (AR-Index) とする。

$$\text{Step 5} \quad I_{\ell_{mt}}^{\ell} \leq I(j + N_0, M, L, \tau_{\max}) \leq I_{\ell_{mt}}^u \quad (7)$$

の場合を正常, これを超えた場合を異常とする。

この異常検知指標の特徴, 異常検出法の誤判定確率については, 参考文献(1)に示した。

### 4.3 残差列を用いた異常検出法適用結果

Run 91 WLB-105 の実験で得られた温度・流量ゆらぎに、残差列を用いた異常検出法を適用し、温度・流量に現われる変動の検出感度を評価する。

#### (1) 温度・流量ゆらぎ測定系の周波数特性

異常検出感度を評価する前に、温度・流量ゆらぎ測定系の周波数特性を調べておく必要がある。データ処理法により異常検出法感度が異なるが、温度・流量ゆらぎの周波数特性を把握せず、解析を進めても、効果的ではない。

熱電対の時定数（63.2%）は 10 msec であり、ゆらぎ回路の周波数帯域特性のうち、上限の遮断周波数は 15 Hz である。熱電対の時定数が 10 msec であるから、周波数特性はおよそ 16 Hz 程度である。熱電対とゆらぎ回路の上限の遮断周波数はほぼ一致する。流量計の周波数特性は、その流量演算処理回路において、遮断周波数 10 Hz の低域通過フィルタが組み込まれており、この周波数が、流量計の周波数特性に相当する。ゆらぎ回路は十分流量計の周波数特性をカバーしている。ゆらぎ回路は、その構成上一種の微分回路であるから、急激な変化（ $\approx 15$  Hz）に対しては、高感度に応答するが、緩慢な変化に対しては検出限界がある。これは、ゆらぎ回路の下限の遮断周波数で決まる。下限の遮断周波数は 0.01 Hz であるから検出限界は約 16 秒のオーダーである。

#### (2) 温度・流量ゆらぎを用いた残差列の白色性検定結果

局所沸騰実験 91 WLB-105 における温度・流量ゆらぎの残差列を用いた白色性検定結果を以下に示す。Fig. 19(a)には、試験出口に設置された熱電対（T 010 V）から得られた温度、温度ゆらぎ、温度ゆらぎの RMS 値、温度ゆらぎの残差列の白色性検定結果および沸騰開始時間の指示計として圧力信号 P 110 を示す。Fig. 19(b)には、試験部出口に設置された渦電流型温度流量計の流量信号（FEC4）、流量ゆらぎ信号、流量ゆらぎの RMS 値、流量ゆらぎの残差列の白色性検定結果および圧力信号 P 110 を示した。Fig. 19(c)には、試験部出口に設置された渦電流型温度流量計の温度信号（TEC4）、温度ゆらぎ信号、温度ゆらぎの RMS 値、温度ゆらぎの残差列の白色性検定結果および圧力信号 P 110 を示す。Fig. 9(a)～Fig. 9(c)に示した異常検知法の解析条件は、データのサンプリング周期が 0.02 秒/点、データの平均時間 10 秒である。Fig. 20(a)～Fig. 20(c)の図から以下のことがわかった。

温度ゆらぎの RMS 値は、非沸騰状態と局所沸騰状態を比較してほとんど変化していない（1.1～1.2 倍）。また温度ゆらぎの残差列の白色性検定指標（AR-index）も、非沸騰状態と局所沸騰状態を比較しても、1.2～1.5 倍程度とほとんど変化していない。局所沸騰状態の熱流束は、非沸騰状態と比較して大きく、またバンドル出口における温度ゆらぎはヒータピンの熱流束が大きくなるほど大きいということが知られており、局所沸騰のために試験部出口の温度ゆらぎの RMS 値が若干大きくなったとは断言できない。熱電対から得られた温度ゆらぎおよび、渦電流型温度・流速計から得られた温度ゆらぎの双方に上記のことが現われており検出器の形式

には依存しない。

試験部出口V断面における径方向の温度ゆらぎを測定し、残差列の白色性検定法を用いた異常検知結果をFig. 21に示す。図から、試験部出口の径方向各点で、局所沸騰に伴う明確な温度ゆらぎの変動は見られない。

流量ゆらぎ信号のRMS値は、局所沸騰規模が、局所沸騰Ⅰの規模のとき、非沸騰状態のRMS値と比べて、1.2倍程度である。局所沸騰Ⅱの時のRMS値は、2.0倍、局所沸騰Ⅲでは約2.5倍である。一方、AR-indexは、局所沸騰Ⅰでは、非沸騰時のAR-indexと比較して2倍、局所沸騰Ⅱでは5倍、局所沸騰Ⅲでは、7倍程度大きくなっている。沸騰規模が大きくなるほど、流量ゆらぎのRMS値およびAR-indexが大きくなる傾向がある。前回の報告<sup>(23)</sup>では、この現象が明らかでなかったが、これは前回の実験での局所沸騰規模が小さかったためであろう。こうして局所基準時における流量ゆらぎのPSD解析、および局所沸騰箇所近傍の温度ゆらぎと流量ゆらぎのコヒーレンス関数評価により、局所沸騰により生じるボイドの生成・消滅サイクルは、ある程度大きくなるとバンドル出口の流動に影響を与えると考えられる。このバンドル出口の流動に影響を与える局所沸騰領域は、2.1.1節で評価した様に、少なくともおよそ8mm×60mmの領域が必要と推定される。

#### 4.4 局所沸騰検出感度の評価

非沸騰時におけるAR-indexを基準とし、局所沸騰時のAR-index増大比を、各検出器(T0 10V, TEC4, FEC4)ごとデータ平均時間が2秒の場合を例にとり、Fig. 22に示した。横軸は局所沸騰規模を評価する一つの指標として、局所沸騰領域の体積とすることを提案を示している。値は非沸騰時、局所沸騰Ⅰ、Ⅱ、Ⅲとも定常状態と考えられる41秒(40.96秒)を平均して用いた。

データ平均時間が2秒程度であると、局所沸騰領域が一番大きい領域を有している局所沸騰Ⅲの状態では、AR-indexは非沸騰時に比べ温度ゆらぎで約1.5倍、流量ゆらぎで7倍程度の感度を有していることがわかった。またRMS値では局所沸騰Ⅲの状態では温度ゆらぎが約1.2倍、流量ゆらぎが2倍程度大きい。

この結果、温度ゆらぎを用いた局所沸騰検出は、その沸騰規模がかなり大きくなると検出が困難であると考えられる。少なくとも、今回現われた幅10mm×長さ80mm程度の沸騰領域の検出は不可能である。またバンドル出口の径方向に最適検出点も存在しない。局所沸騰によりボイドの生成・消滅に伴って発生した4Hz程度の温度ゆらぎの局所沸騰情報は、下流域にゆくに従って大きく減衰し、上部プレナム部での冷却材混合効果により、消滅すると考えられる。

流量ゆらぎを用いた局所沸騰検出は、有望である。局所沸騰Ⅰにおける流量ゆらぎのPSDには、ボイド生成・消滅に伴う4Hzのピークが見られないが、流量ゆらぎのAR-indexは、非沸騰時と比較して約2倍程度ある。流量信号は、温度の影響が小さくなる様設計されているため、ほと



んど流動による変化と考えると良い。局所沸騰Ⅱになると、流量ゆらぎのPSDには、ボイド生成・消滅に伴う4 Hzのピークが観測され、流量ゆらぎのAR-indexも、非沸騰時と比較して4～5倍程になる。この状態になると局所沸騰ははっきりとらえることができる。一方流量ゆらぎのRMS値は1.5倍程度しかなく、沸騰検出に対する感度は悪い。沸騰規模が拡大し、局所沸騰Ⅲになると、流量ゆらぎのPSDには、ボイド生成・消滅に伴う4 Hzのすどいピークが現われる。流量ゆらぎのAR-indexも、非沸騰時と比較して7～8倍大きくなる。流量ゆらぎのRMS値も大きくなる傾向にあるが、非沸騰状態と比較して2倍程度である。Fig. 23(a), Fig. 23(b)にデータ平均時間をパラメータ（0.1秒, 0.5秒, 1秒, 2秒, 3秒, 4秒, 5秒, 10秒）として、流量ゆらぎの残差列を用いた異常検知を行った。データ平均時間は、1～2秒程度で十分であることがわかる。

## 結 論

1. 局所沸騰が発生すると、バンドル内各点における温度ゆらぎのパワスペクトル密度には、4 Hz 付近のピークが観測された。このピークは沸騰気泡の拡大・縮小の周期と一致しており、バンドルの体系と沸騰規模に依存していると考えられる。
2. 局所沸騰箇所近傍における温度ゆらぎと下流における温度ゆらぎのコヒーレンス関数を評価した結果、発熱部下流端までは、局所沸騰情報が伝わる。前回の報告<sup>(23)</sup>では、バンドル下流端まで、局所沸騰情報が伝達されていたことから、今回の実験においても、バンドル下流端まで、局所沸騰情報は伝達すると推定される。
3. 今回行った実験の局所沸騰規模では、局所沸騰に伴う温度ゆらぎ情報の変化をバンドル出口で検出することは困難であった。これは、上部プレナム部における冷却材混合効果による温度ゆらぎの方が局所沸騰による温度ゆらぎよりはるかに大きな要因となっていると考えられるからである。
4. 局所沸騰箇所近傍における温度ゆらぎと、バンドル出口に設置した渦電流型流速計から得られる流量ゆらぎとのコヒーレンス関数を評価した結果、局所沸騰規模が小さいときには、気泡拡大・縮小サイクルに起因する 4 Hz 付近のピークが観測されなかった。しかし、局所沸騰規模が拡大するにつれ、このピークは大きくなった。これは、局所沸騰規模が大きくなると気泡の拡大・縮小にともなうバンドル内の流動変化が、バンドル出口にも伝達されることを示している。
5. 本報告では、バンドル出口における局所沸騰検知指標として、ゆらぎの残差列を用いた白色性検定法 (AR-index) と RMS 値を示した。局所沸騰検知感度は非沸騰状態の検知指標との比較で評価した。今回実現された局所沸騰規模に対し、温度ゆらぎ・流量ゆらぎに上記検出指標を適用した場合以下の結果が得られた。

	RMS 値	AR-index
温度ゆらぎ	1.2	1.5 ~ 1.8
流量ゆらぎ	2.0	7.0 ~ 8.0

これは、流量ゆらぎの残差列の白色性を用いた検定法が有効であることを裏付けるものである。温度ゆらぎに現われない程度の小規模な局所沸騰も検知できる可能性があり炉心の安全上有益と考えられる。

6. 渦電流型温度流速計は、各燃料集合体冷却材の温度や流速を計測することができるだけでなく、局所沸騰の規模によってはその検知にも有効と考えられる。高速炉にとって、渦電流型温度・流速計は炉心監視上、有用な計装機器の 1 つと考えられる。

## 謝 辞

解析に使用したデータは、大洗工学センター炉心安全工学室SIENA ループを用いて行われた実験により得られたものである。実験の実施を取りまとめられた同室の磯崎正氏に感謝いたします。

## 参 考 文 献

- (1) 荻野, 犬島他, "スパーサワイヤ付19本組模擬燃料集合体出口における温度ゆらぎ" PNC SN 941 77 - 122, 1977
- (2) 犬島, 荻野他; "中心24サブチャンネルが閉塞された37本ピンバンドルにおける温度ゆらぎ", PNC SN 941 77 - 147, 1977
- (3) 荻野, 犬島, 羽賀; "高速炉燃料集合体内におけるFPガス放出に関する炉外試験-3", PNC SN 941 78 - 28, 1978
- (4) 荻野, 犬島; "燃料破損伝幡検出法の開発(I)", PNC SJ 223 78 - 02, 1978
- (5) 荻野, 秋月他; "自己回帰モデルの残差列を用いた異常検知", 第27回SICE 学術講演会, 1978.8月
- (6) 羽賀, 荻野, 犬島; "ナトリウム冷却高速炉炉心異常検出実験(1)" 日本原子力学会 秋の分科会 Oct. 1978
- (7) 羽賀, 荻野, 犬島他; "高速増殖炉炉心局所事故の検出", SICE 主催異常検出予測技術シンポジウム, 1978年11月13日
- (8) 荻野, 犬島; "燃料破損伝幡検出法の開発(II)", PNC SJ 223 79 - 02, 1979
- (9) 犬島, 荻野; "高速炉燃料集合体内におけるFPガスに関する炉外試験(IV)", PNC N 941 79 - 49, 1979
- (10) 魚谷, 山口他 "局所流路沸騰試験(I)", PNC SN 941 79 - 120, 1979
- (11) 荻野, 犬島, 羽賀 "ナトリウム渦渡沸騰試験(II)", PNC SN 941 79 - 56, 1979
- (12) T. Ogino, H. Inujima, K. Haga, A. Ohtsubo ; "Feasibility study of local core anomaly detection by use of temperature and flow fluctuations at LMFBR fuel subassembly outlet", Proceeding of the international meeting on fast reactor safety technology, Vol.5, pp.2630-2650, 1979
- (13) H. Nishihara and A. Ohtsubo ; "Measurement of temperature noise in an out-of-pile heat transfer loop", J. of Nuclear Energy, Vol.23, pp.99-111, 1969
- (14) E. Ohlmer and D. Schwalm ; "The use of the amplitude distribution function of temperature noise for malfunction detection in a simulated reactor subassembly", Atomkernenergie 25, 281, 1975
- (15) DCG Smith, KQ. Bagley et al. ; "DFR special experiments", IAEA-SM-225/49, Bologna, Italy, 10-14 April, 1978

- (16) D.N. Fry, W.H. Leavell ; "Temperature noise analysis at the exit of blocked and unblocked 19-pin electrically heated LMFBR fuel subassembly mockups", ORNL-TM-5464, August, 1976
- (17) R.K. Mehra and J. Peshon ; "An innovation approach to fault detection and diagnosis in dynamic systems", Automatica, Vol.7, 1971
- (18) 赤池弘次, 中川東一郎; "統計的解析と制御", サイエンス社, 昭和50年
- (19) 中溝高好; "不規則データの数学モデルの同定", システムと制御, Vol.22 (10), pp 596 ~ 605, 1978
- (20) J.S. Bendat and A.G. Piesol ; "Random data", Wiley-interscience, 1971, pp.234-237
- (21) M.D. Carelli ; "Core Exit Instrumentation of the Clinch River Breeder Reactor Plant", Nuclear Technology, Vol.37, pp.261-273, May 1978
- (22) 魚谷, 山口他 "局所流路沸騰試験(2)", PNC SN 941 80-97, 1980
- (23) 犬島, 荻野他, "ナトリウム渦渡沸騰試験(15)", PNC SN 941 80-82, 1980

Table 1 Experimental condition of local boiling

Item		Unit	Run number				
			91WLB-101	91WLB-102	91WLB-103	91WLB-104	91WLB-105
Inlet flow velocity		m/s	0.64	0.66	0.81	1.03	0.81
Heat flux at	Inception of local boiling	W/cm <sup>2</sup>	74				
	Data acquisition start point		72	81	97	93	79.5
	Local boiling I		74	84	99	96	83,85
	Local boiling II		—	86	101	100	87
	Local boiling III		—	89	97	104	91
Cover gas pressure		kg/cm <sup>2</sup> abs	1.005	1.04	1.00	1.00	1.00
Inlet temperature		°C	500	400	400	500	500
Maximum outlet temperature		°C	657	705	686	657	723
Heated pin number		—	89	81	81	75	75
Bypass flow/test section flow		—	0.975	0.975	0.850	1.450	0.970
Date			Apr.21,1982	May 20,1982	May 20,1982	May 21,1982	May 21,1982

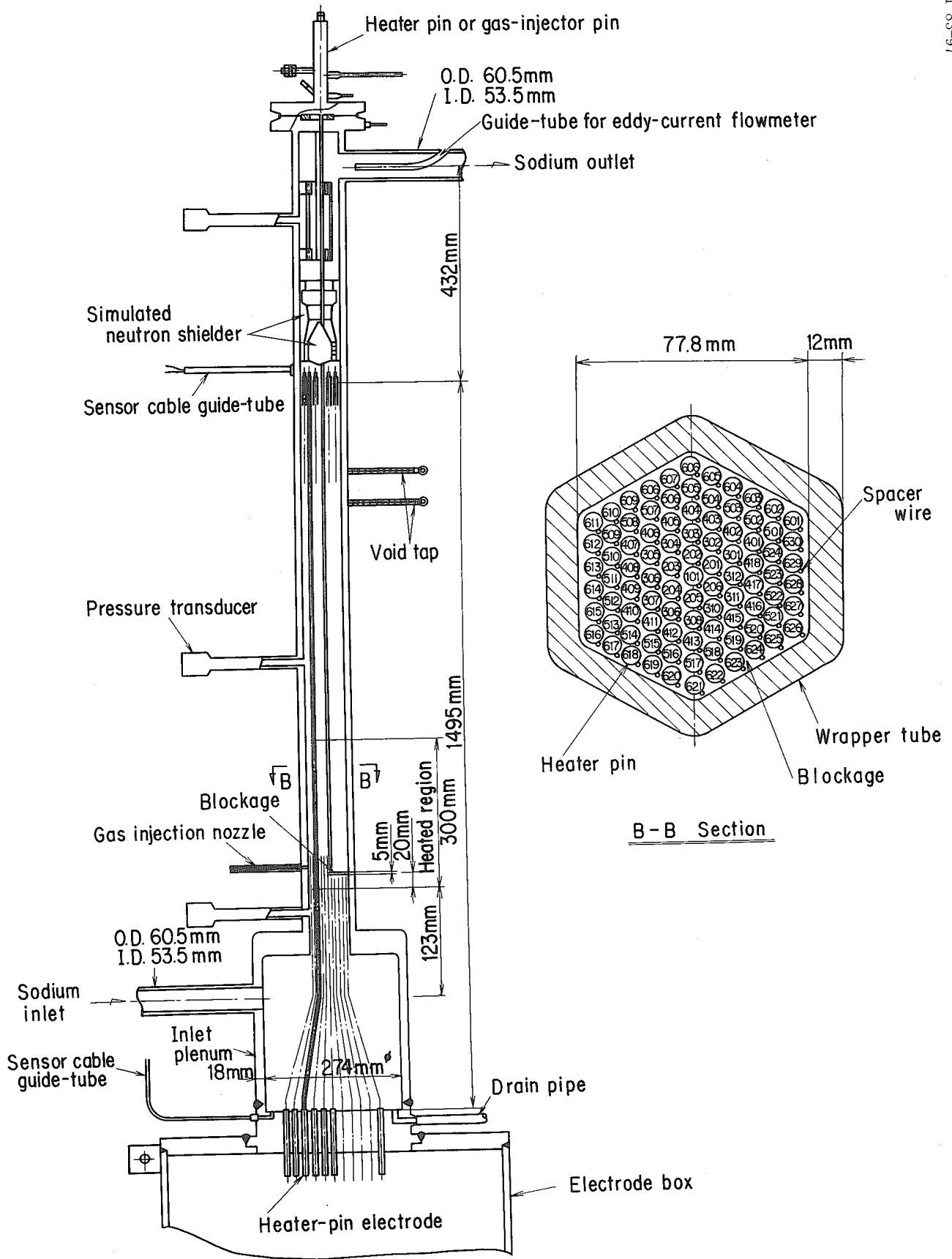
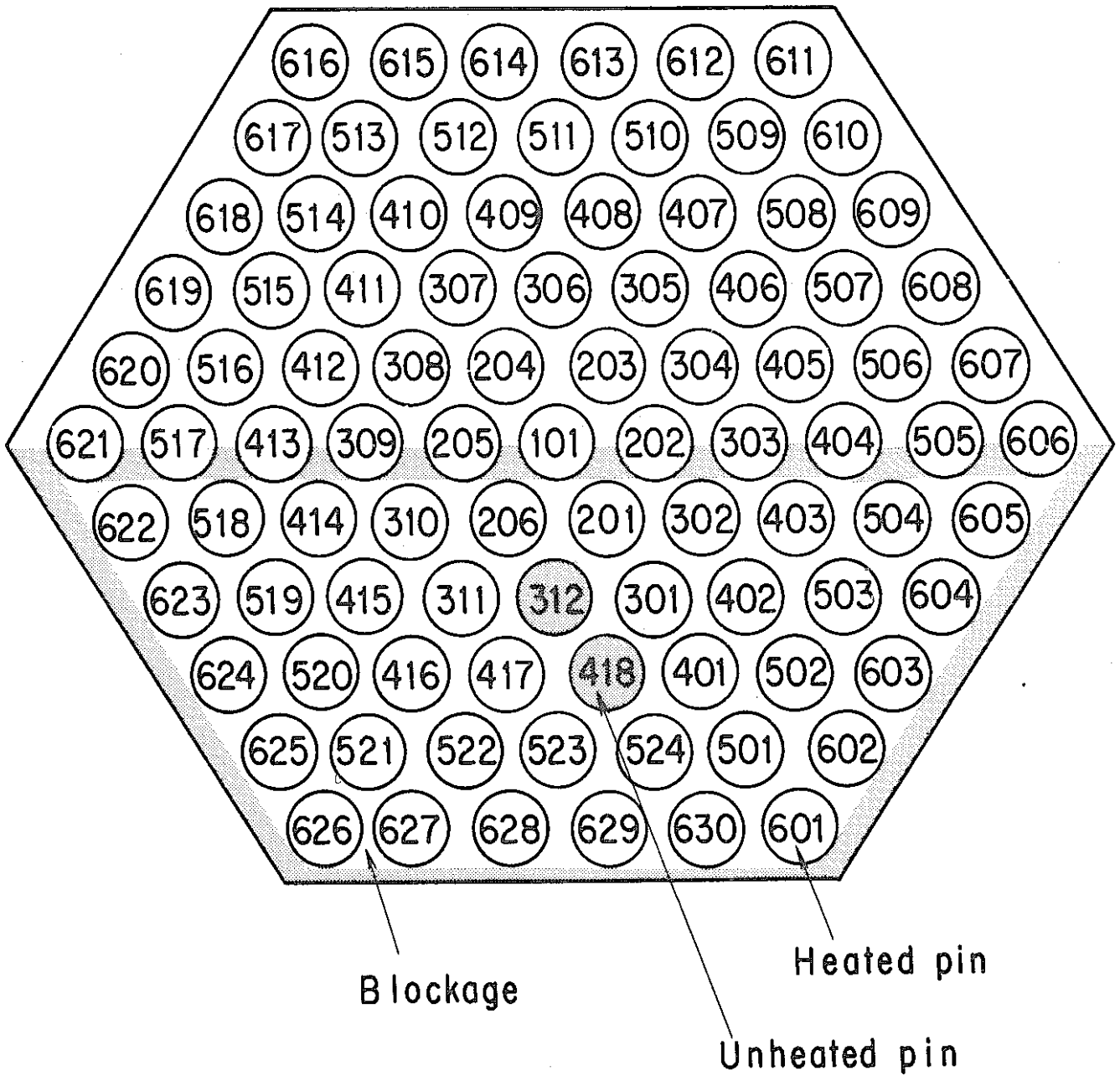


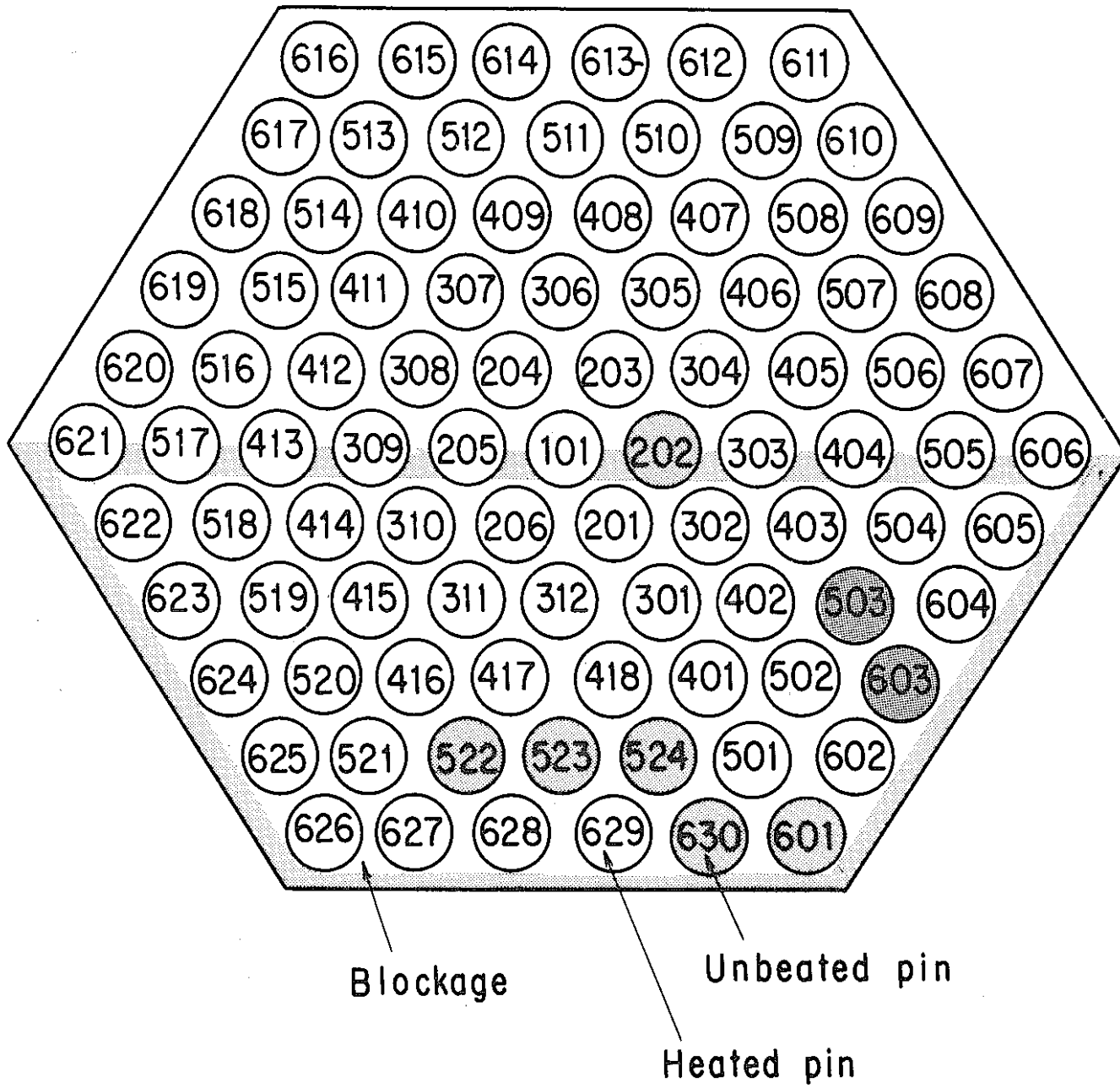
Fig. 1 Local blockage 91-pin bundle test section



Number of heated pin : 89

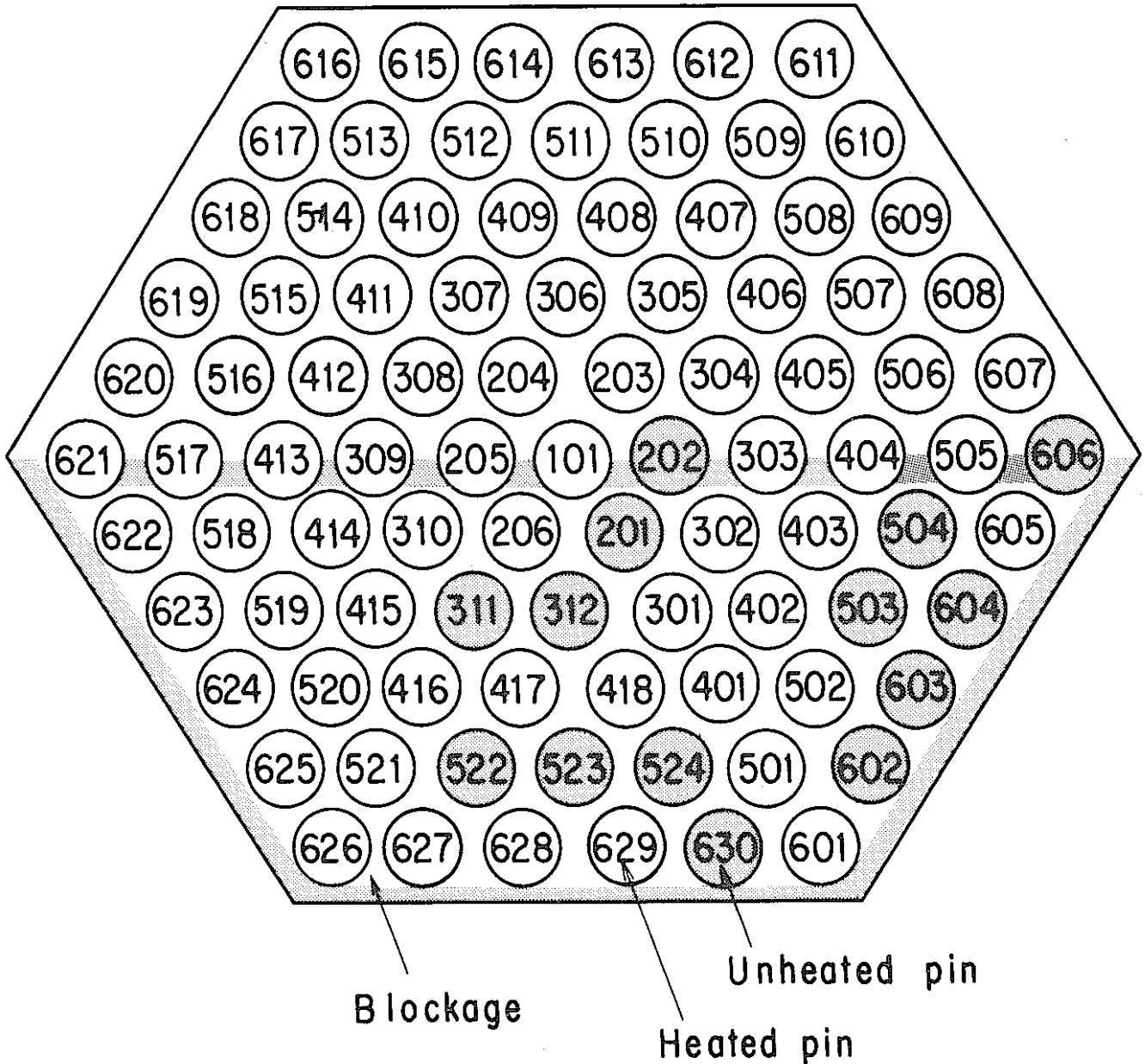
Fig. 2 (a) Arrangement of heated pins ;  
Run 91WLB-101





Number of heated pins : 81

Fig. 2(b) Arrangement of heated pins ;  
Run 91WLB-102 and Run 91WLB-103



Number of heated pins : 75

Fig. 2(c) Arrangement of heated pins ;  
Run 91WLB-104 and Run 91WLB-105

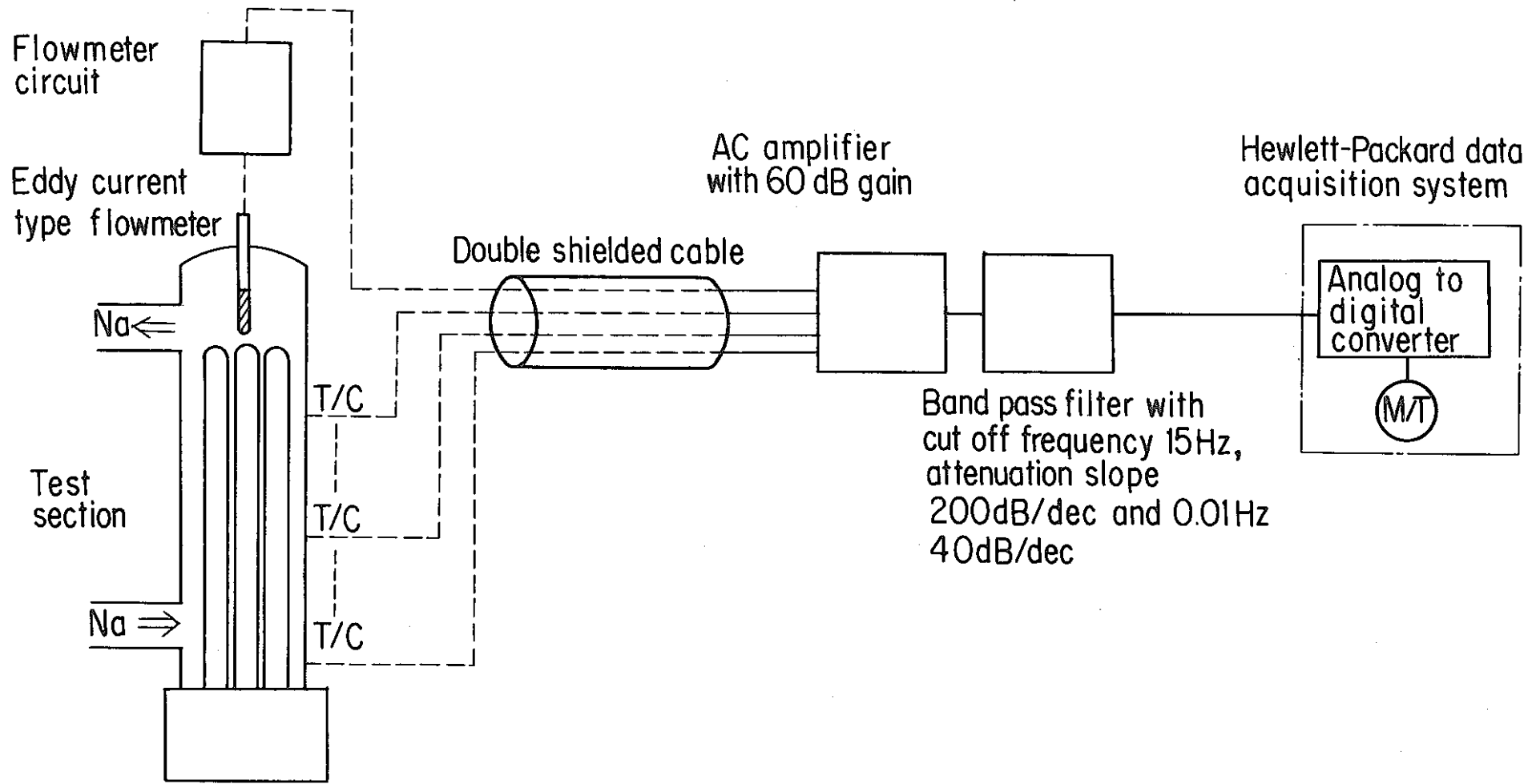


Fig. 3 Schematic diagram of data acquisition system for fluctuation signals

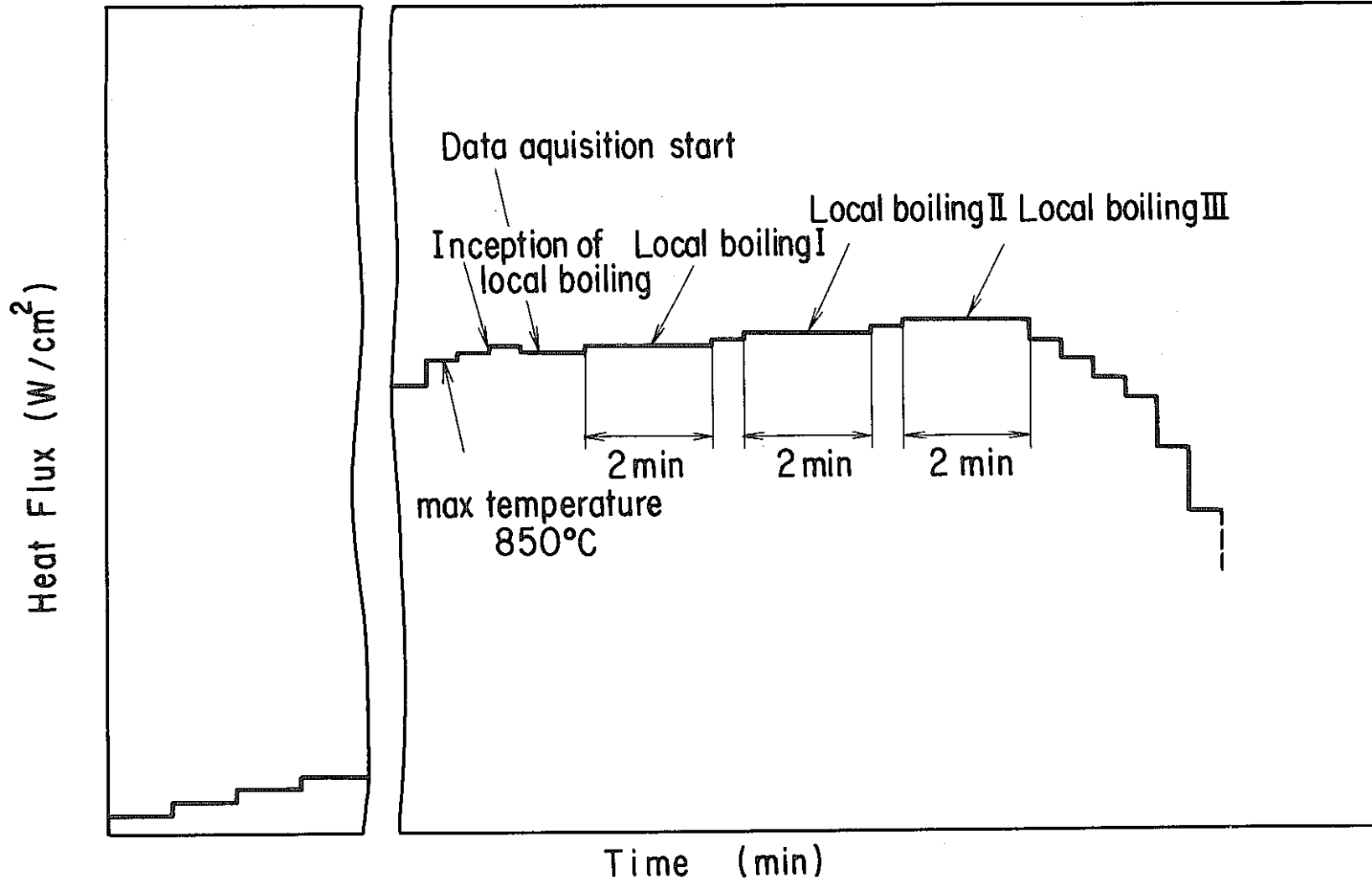


Fig.4 Schematic time chart of the local boiling experiment

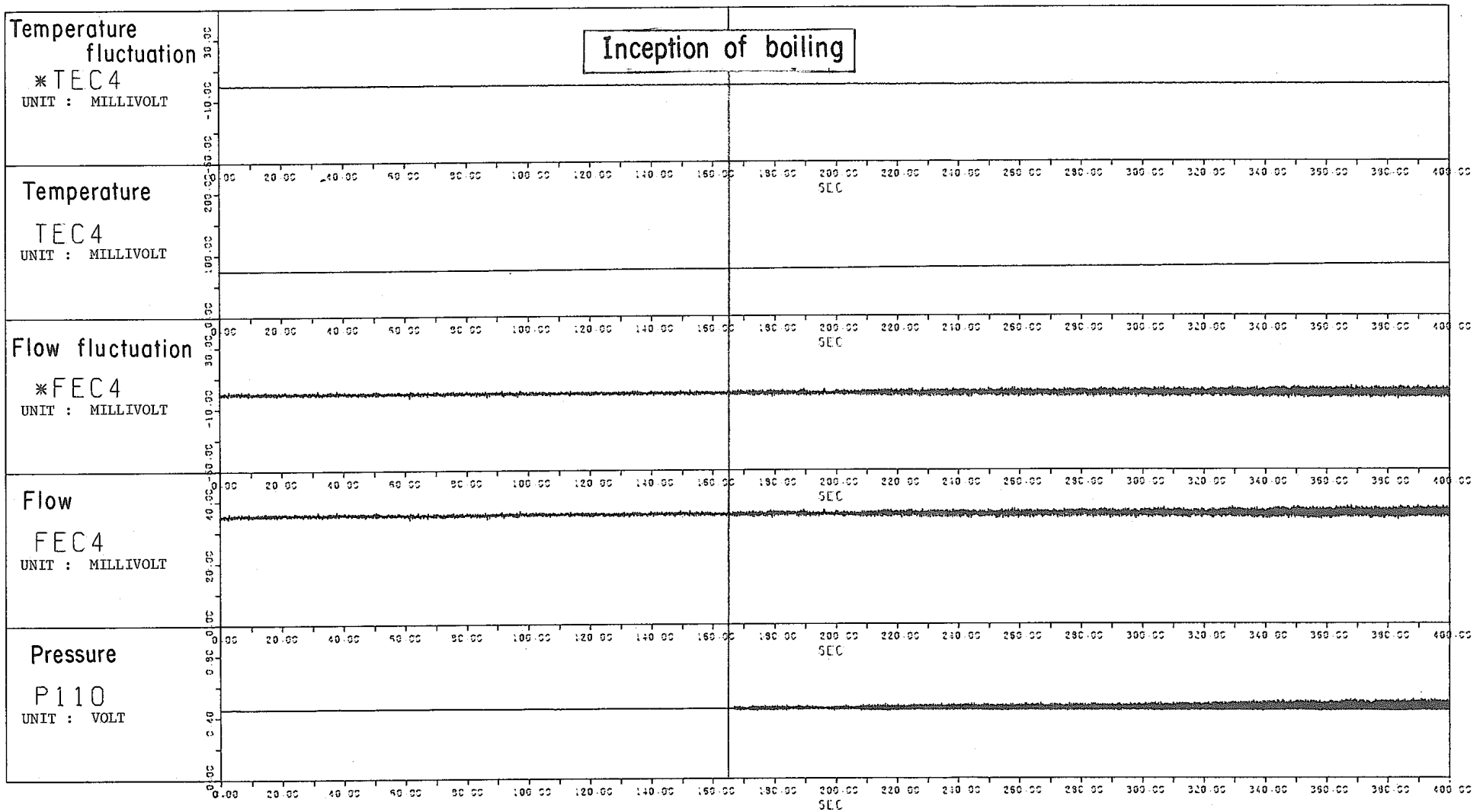


Fig.5(a) Signals under local boiling Condition  
: Run 91WLB-105

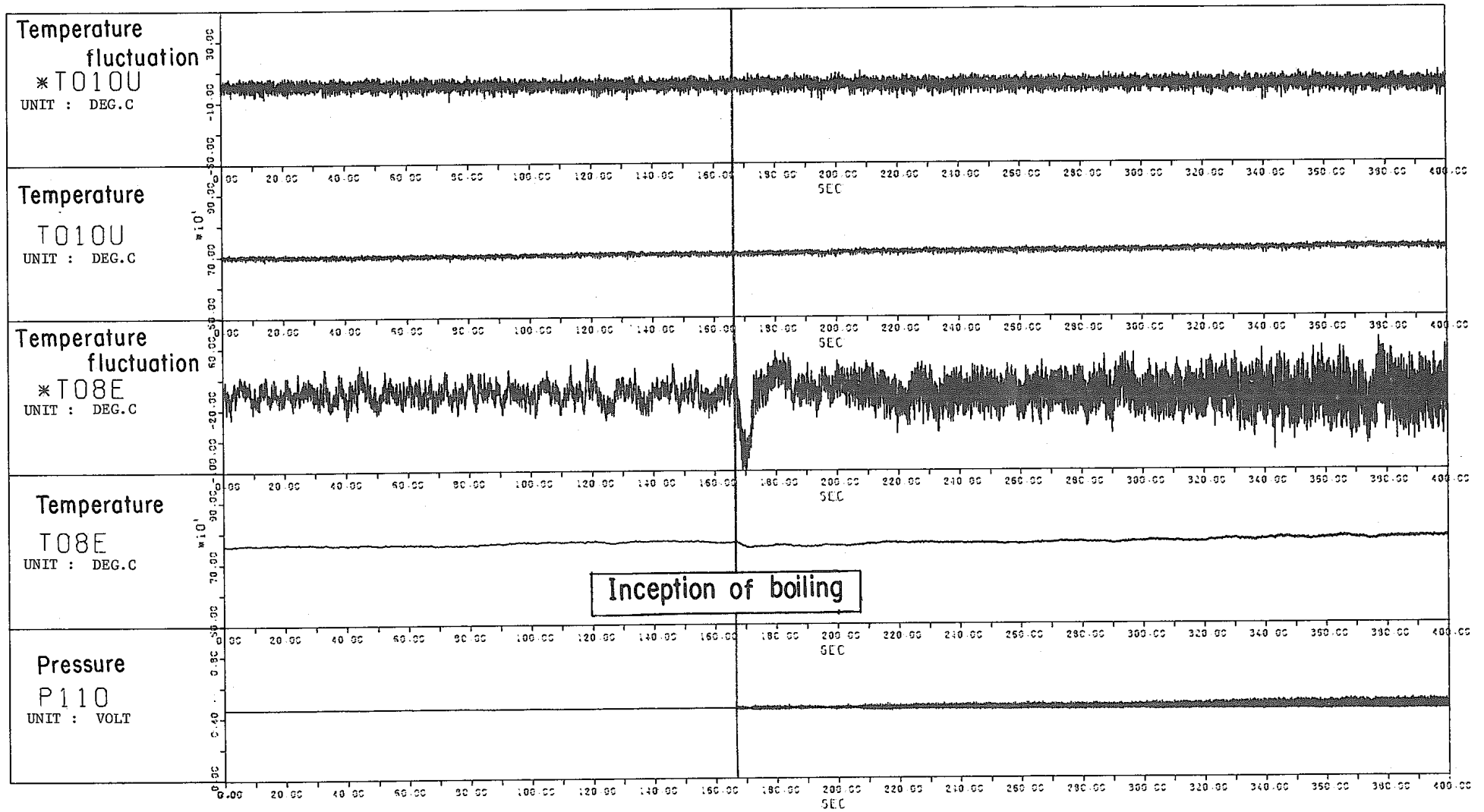


Fig.5(b) Signals under local boiling Condition  
: Run 91WLB-105

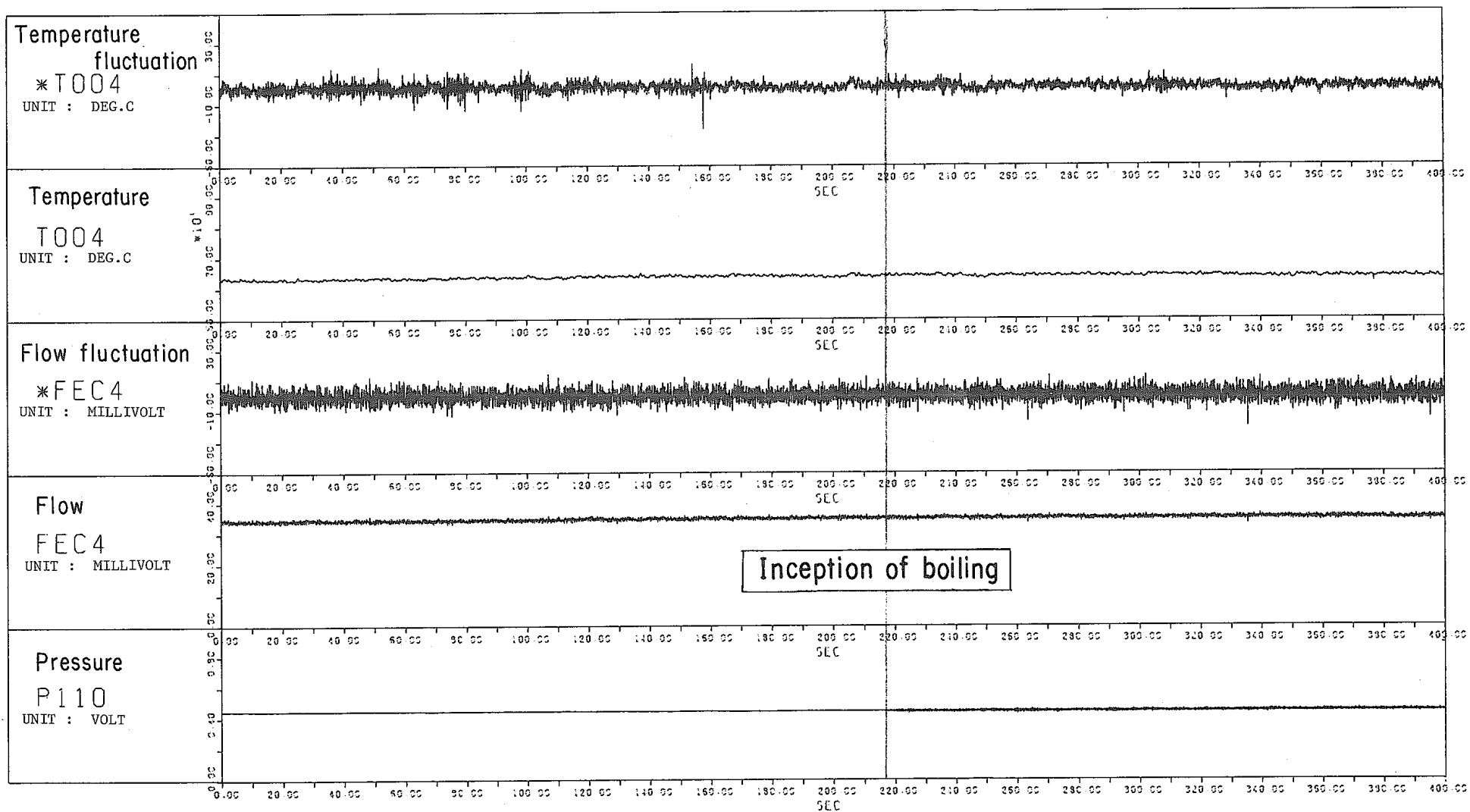


Fig. 6 Signals under local boiling Condition  
: Run 91WLB-103

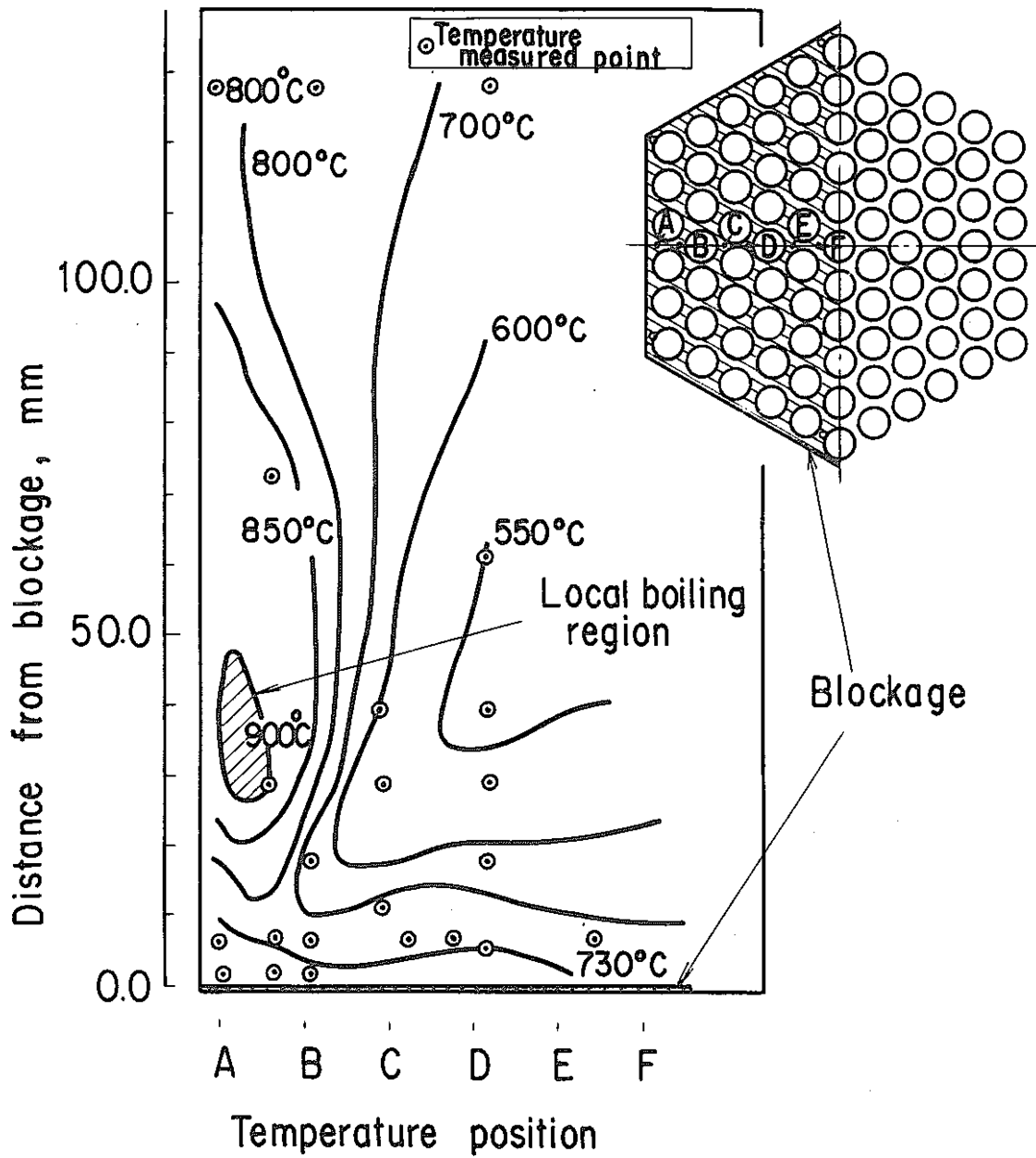
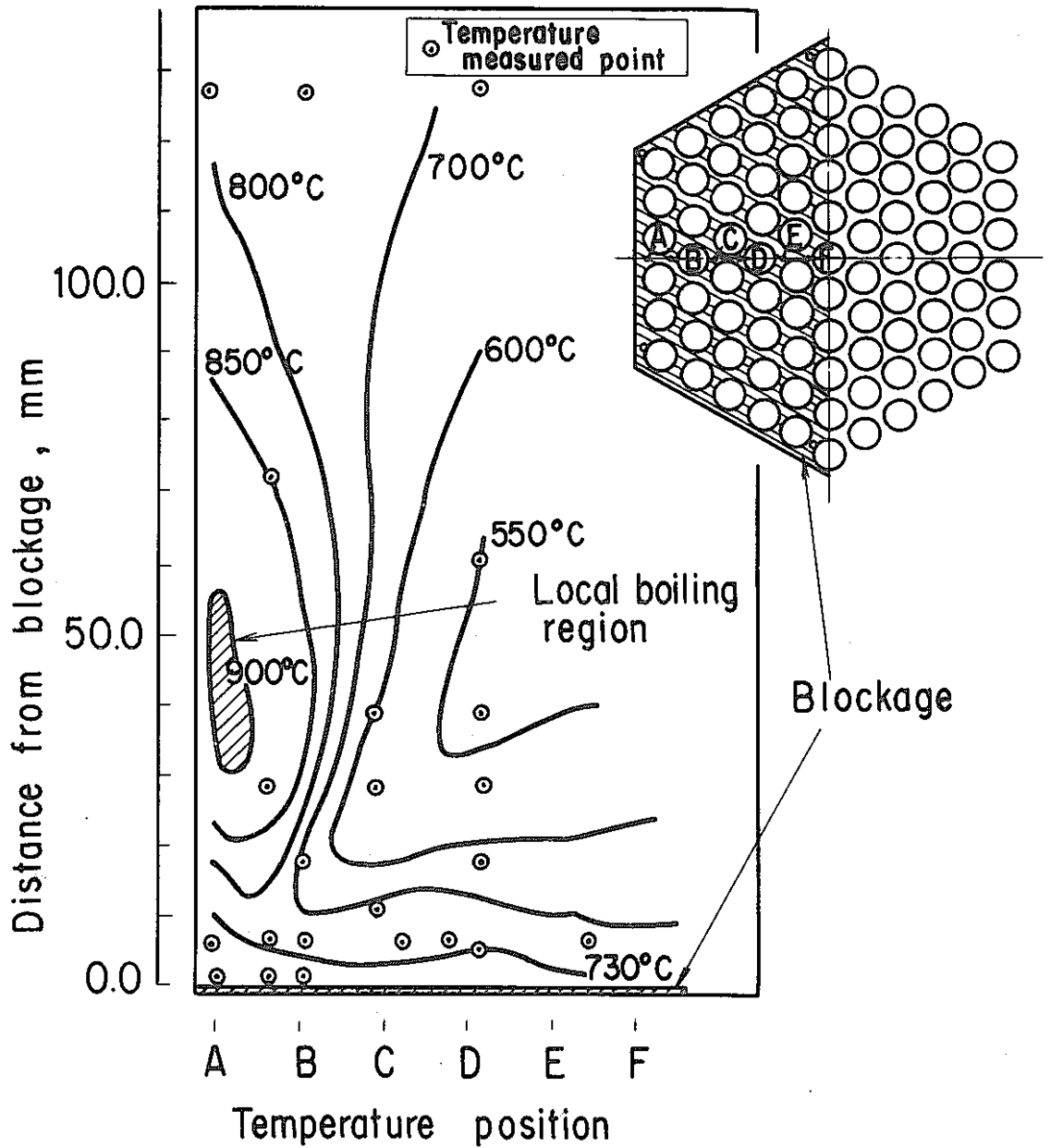


Fig.7(a) Temperature field behind edge blockage observed in Run 91WLB-103 under Local Boiling Condition I

Run 91WLB-103 Local Boiling I





g.7(b) Temperature field behind edge blockage observed in Run 91WLB-103 under Local Boiling Condition II

Run 91WLB-103 Local Boiling II

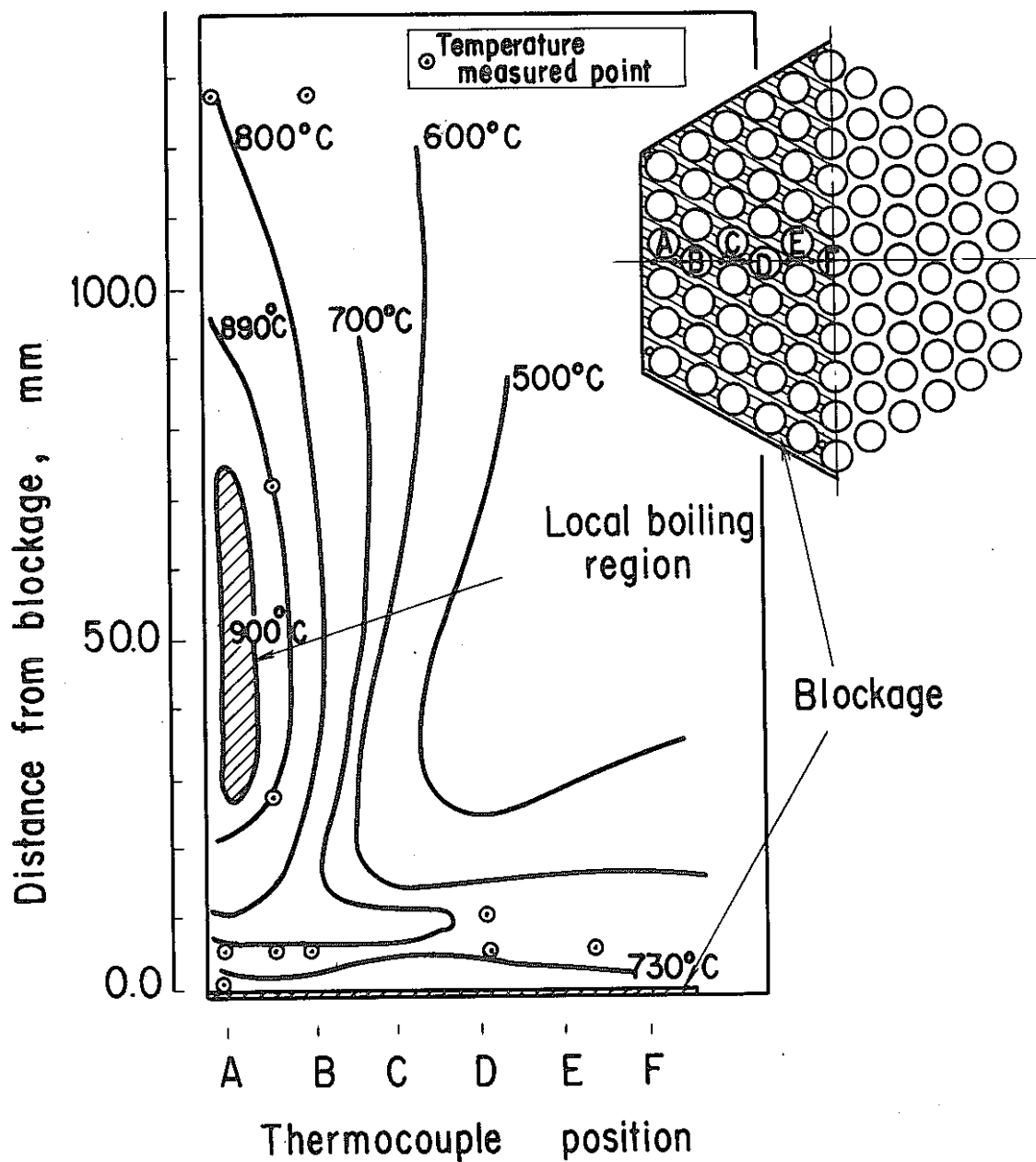


Fig.8(a) Temperature field behind edge blockage observed in Run 91WLB-105 under Local Boiling Condition I

Run 91WLB-105 Local Boiling I

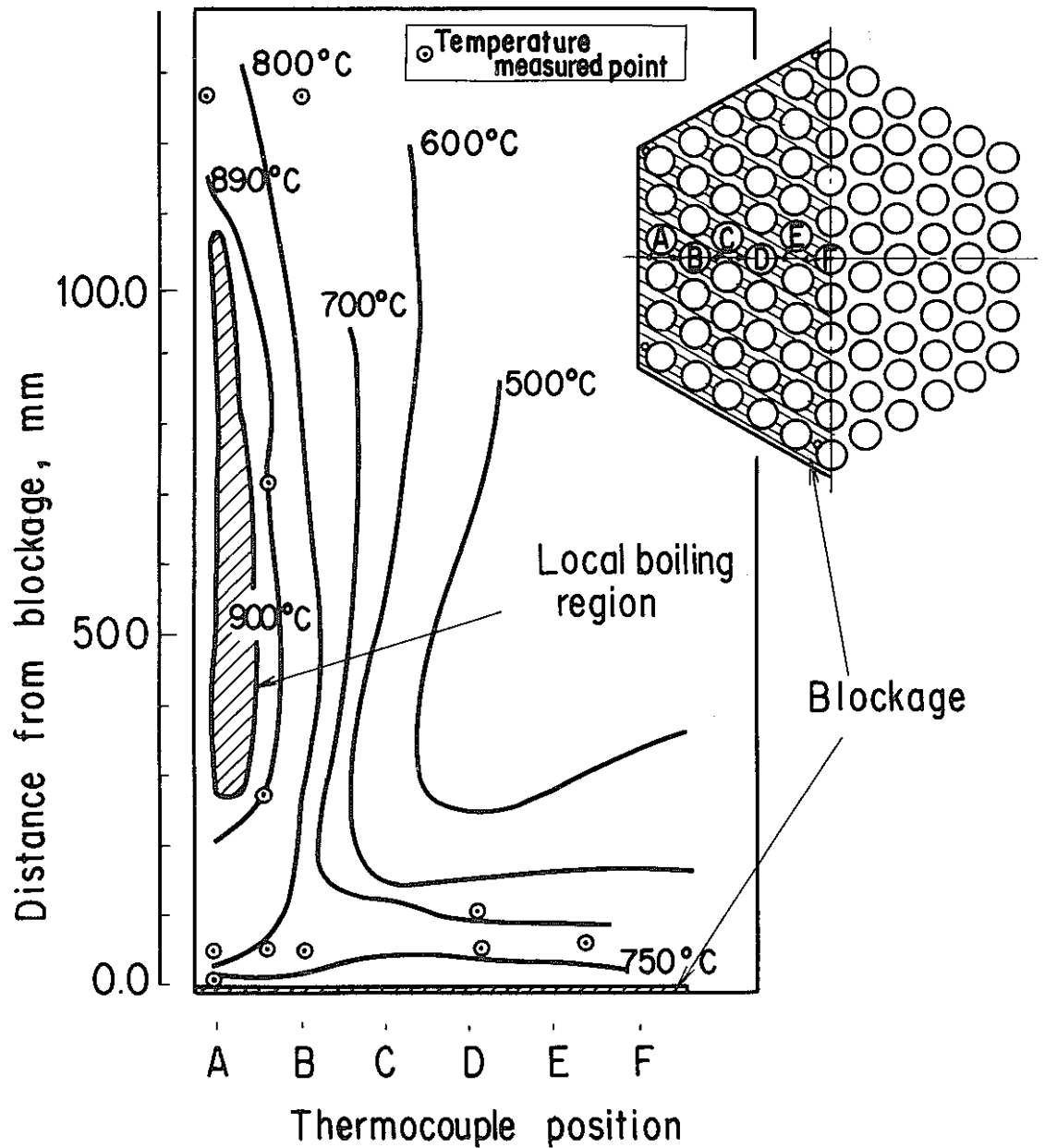


Fig.8(b) Temperature field behind edge blockage observed in Run 91WLB-105 under Local Boiling Condition II

Run 91WLB-105 Local Boiling II

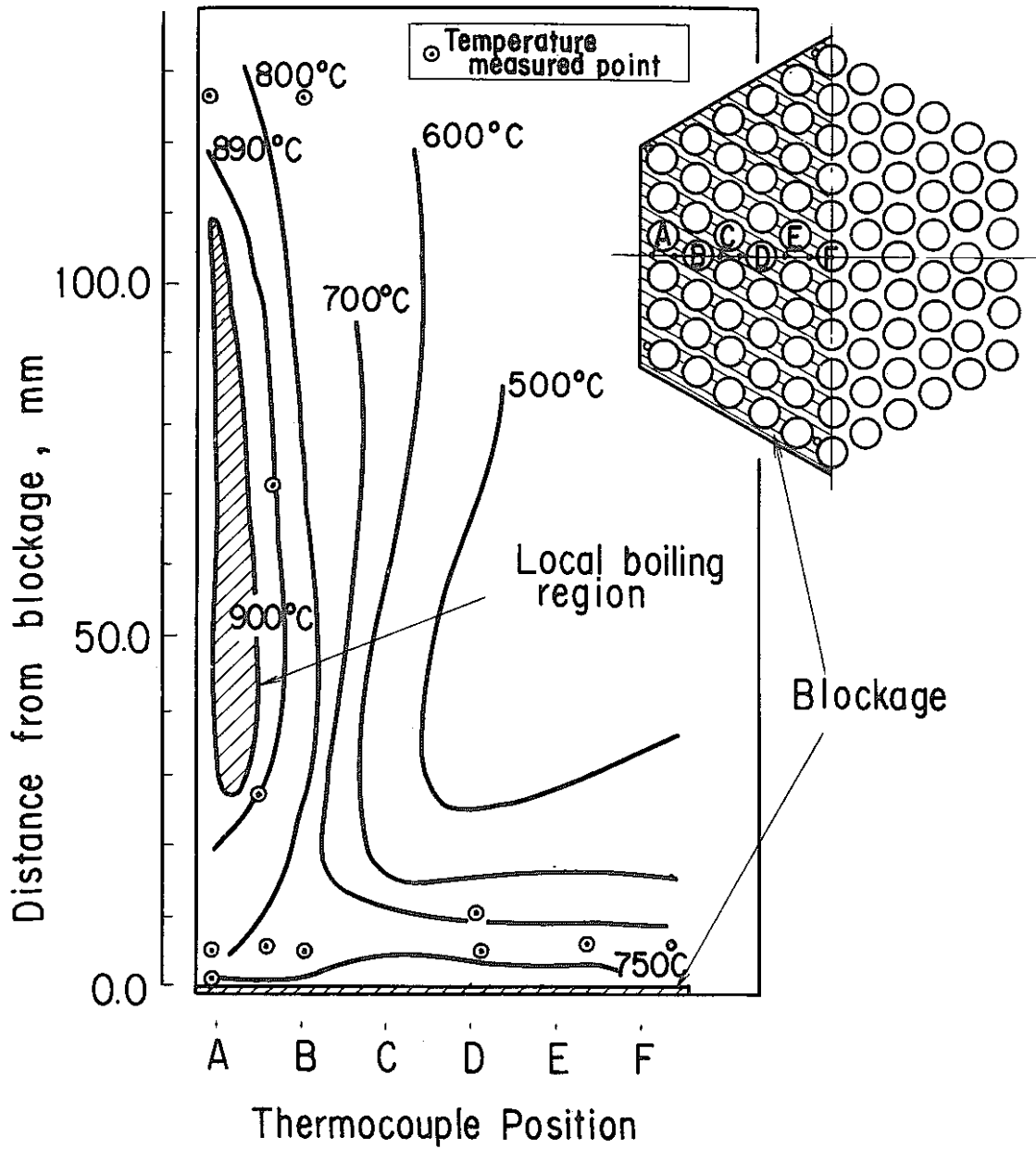


Fig.8(c) Temperature field behind edge blockage observed in Run 91WLB-105 under Local Boiling Condition III

Run 91WLB-105 Local Boiling III

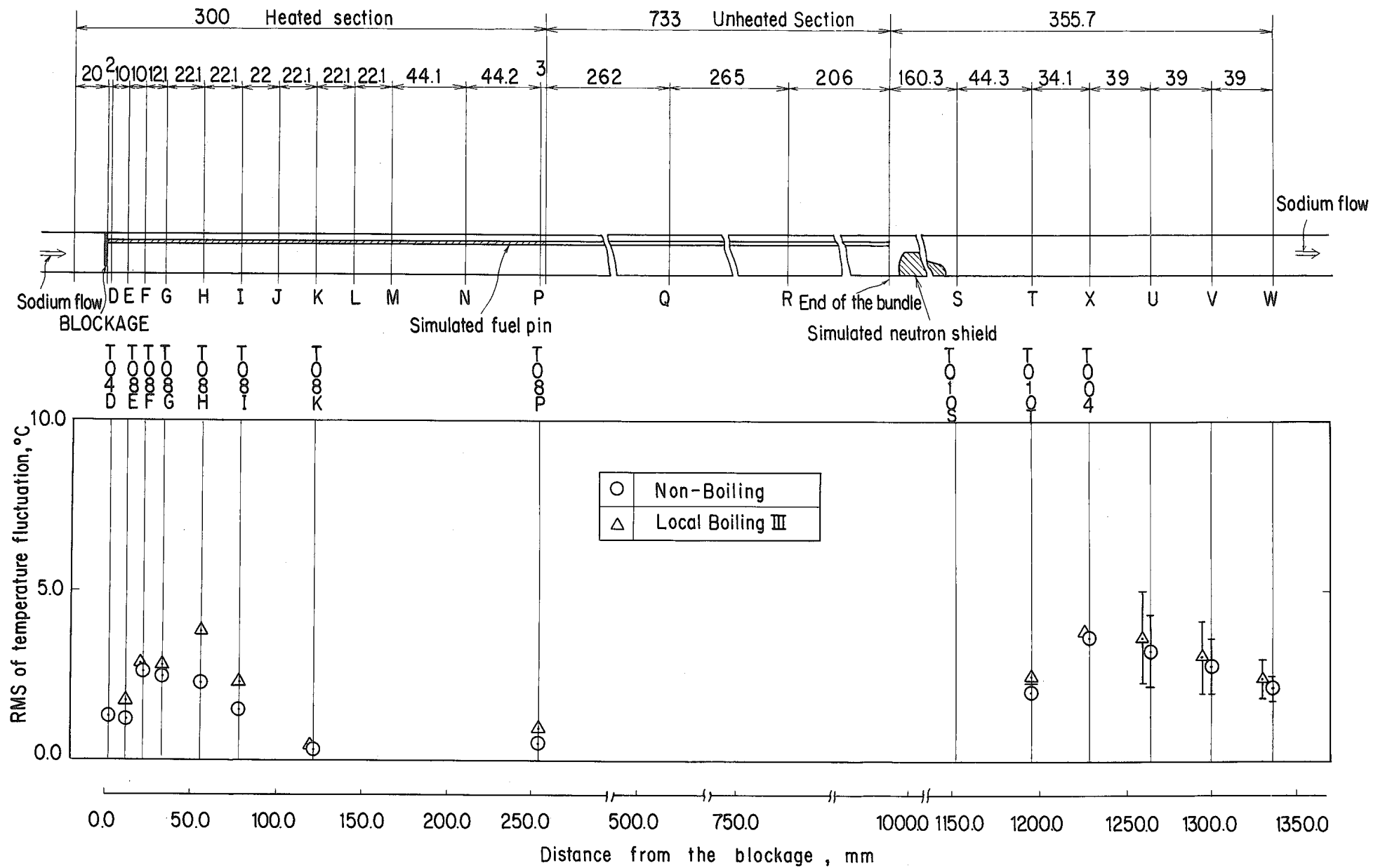


Fig.9 RMS value of temperature fluctuations at the positions downstream from the blockage : Run 91WLB-105

Run No	91WLB-105
status	Non-Boiling

↑ Temperature  
fluctuation, °C/5mm

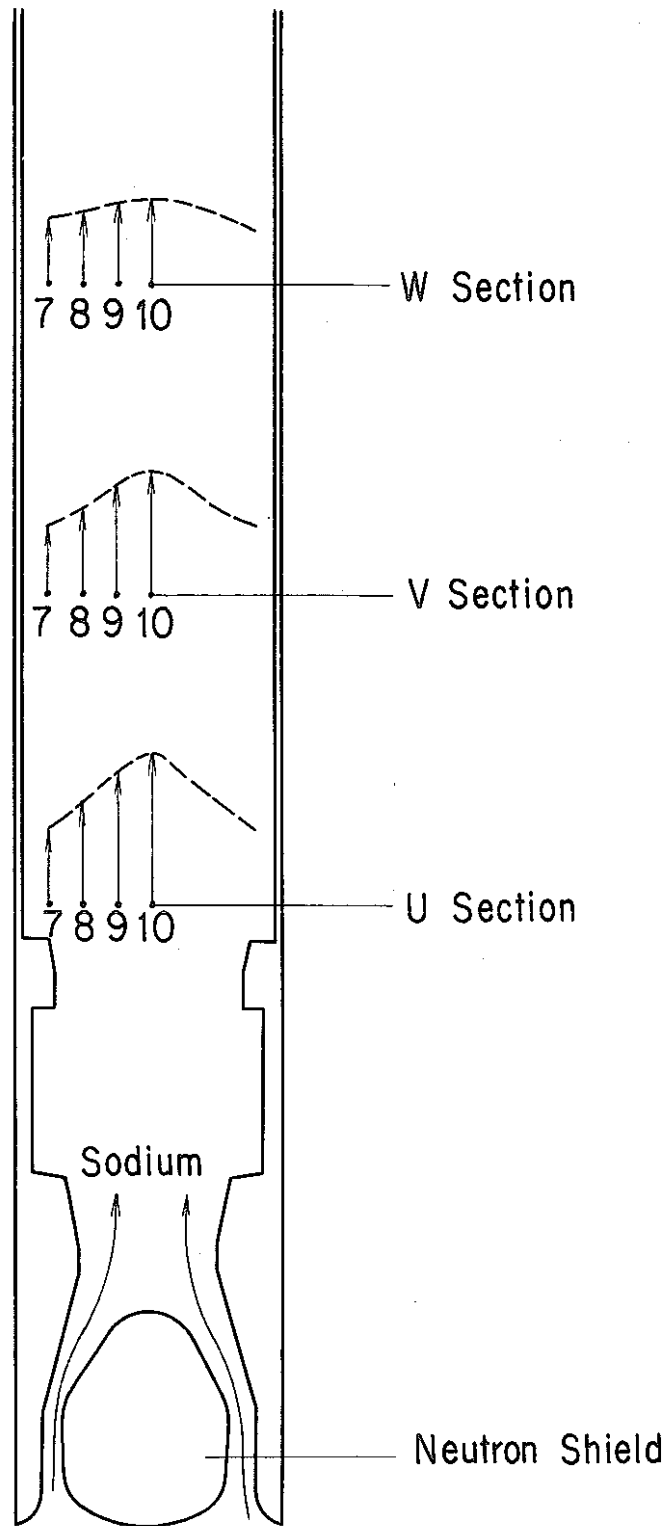


Fig.10(a) RMS value of temperature fluctuations at the outlet under Non-Boiling Condition: Run 91WLB-105

Run No. 91WLB-105
status Local Boiling III

↑ Temperature  
fluctuation, °C/5mm

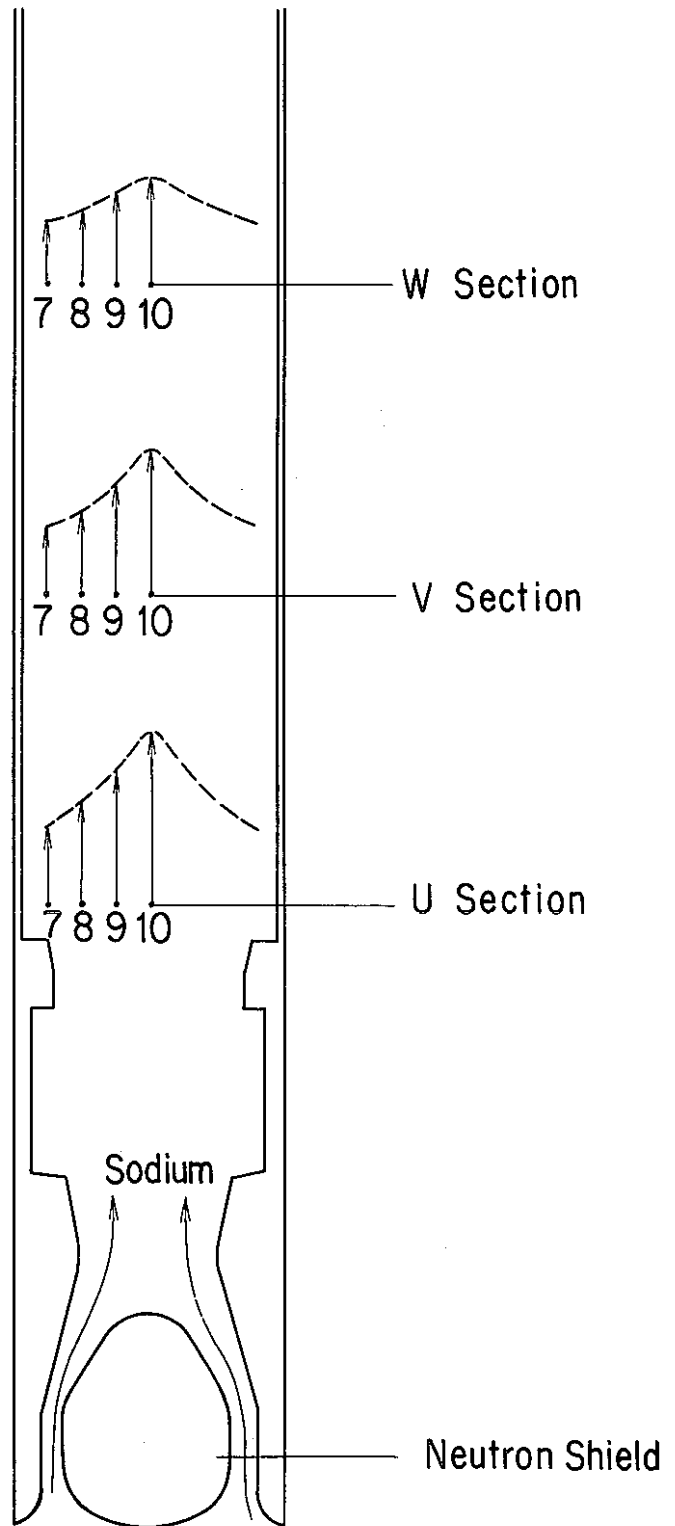


Fig.10(b) RMS value of temperature fluctuations at the outlet under Local Boiling Condition III :Run 91WLB-105

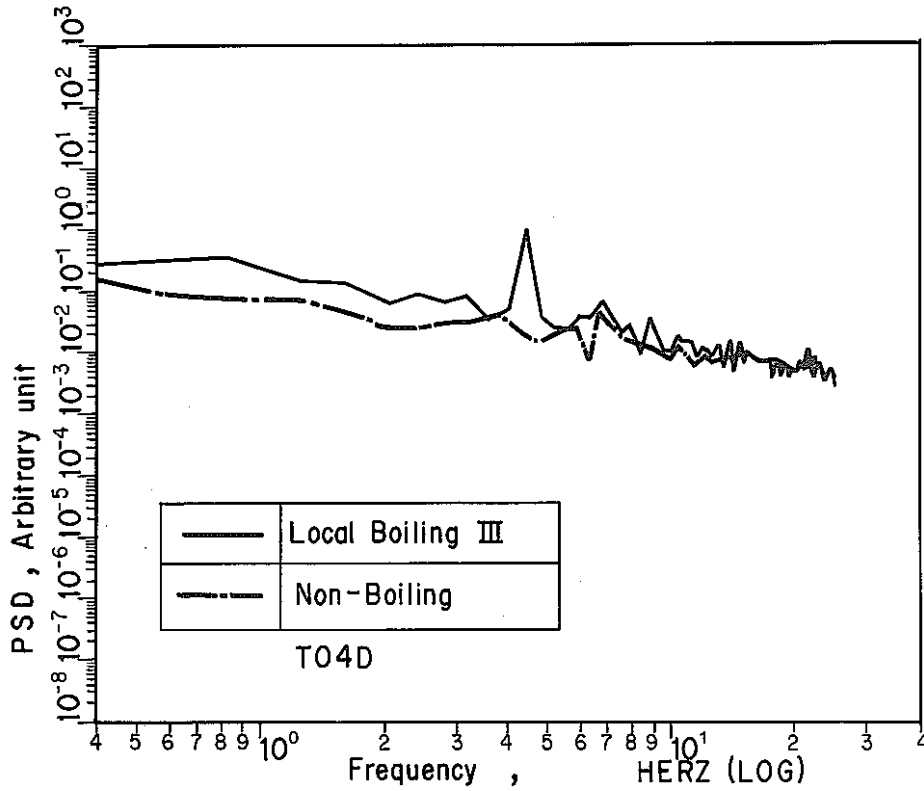


Fig.11(a) Power spectral density of temperature fluctuations at the position 2 mm downstream from the blockage: Sensor T04D, Run 91 WLB-105

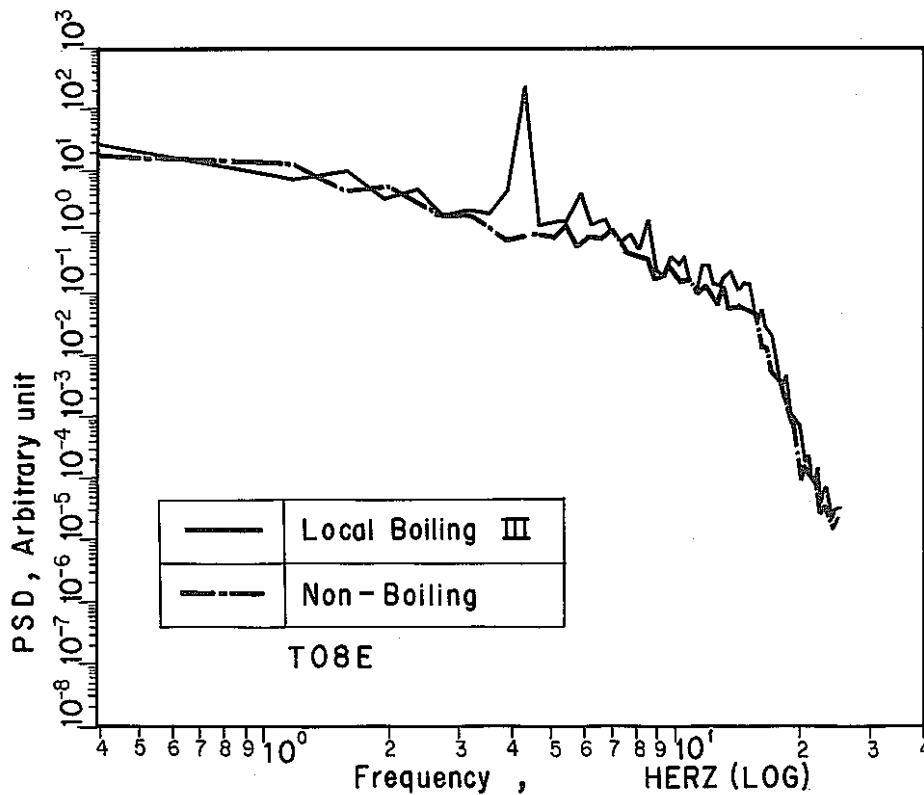


Fig.11(b) Power spectral density of temperature fluctuations at the 12mm downstream from the blockage Sensor T08E, Run 91 WLB-105



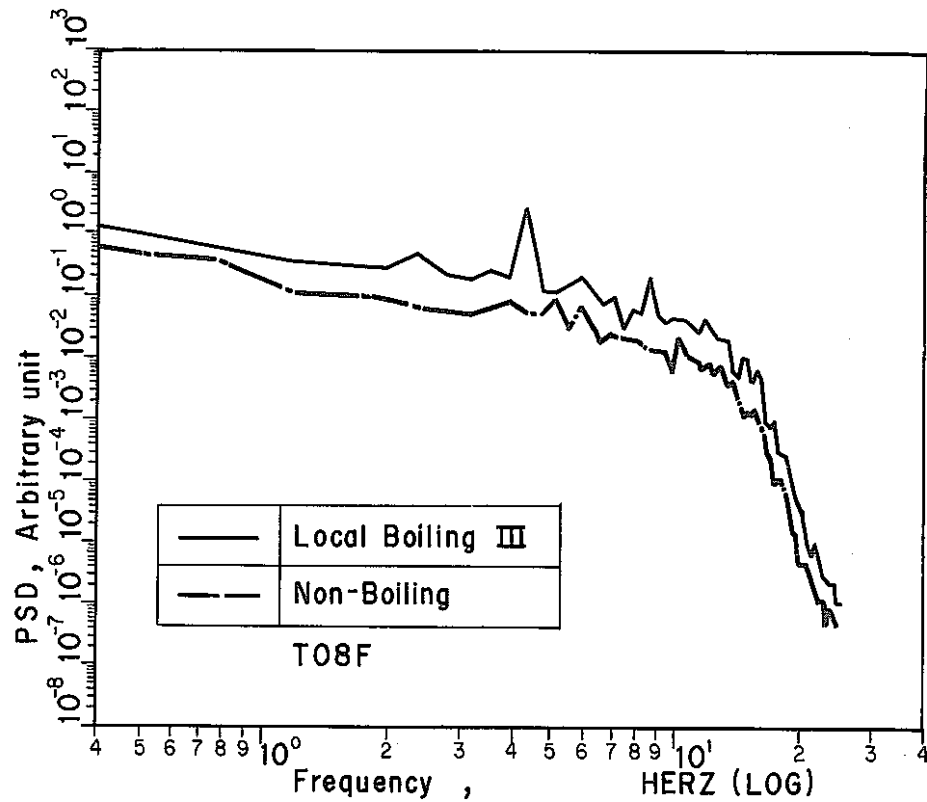


Fig.11(c) Power spectral density of temperature fluctuations at the position of 22 mm downstream from the blockage: Sensor T08F, Run 91WLB-105

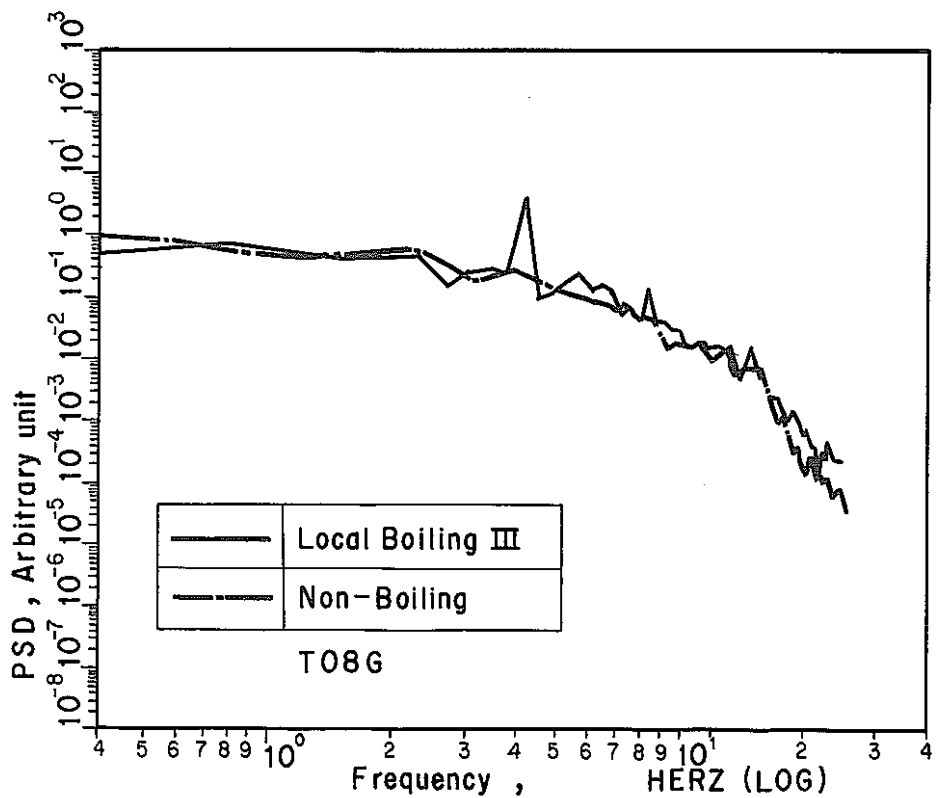


Fig.11(d) Power spectral density of temperature fluctuations at the position of 34.1mm downstream from the blockage Sensor T08G, Run 91WLB-105

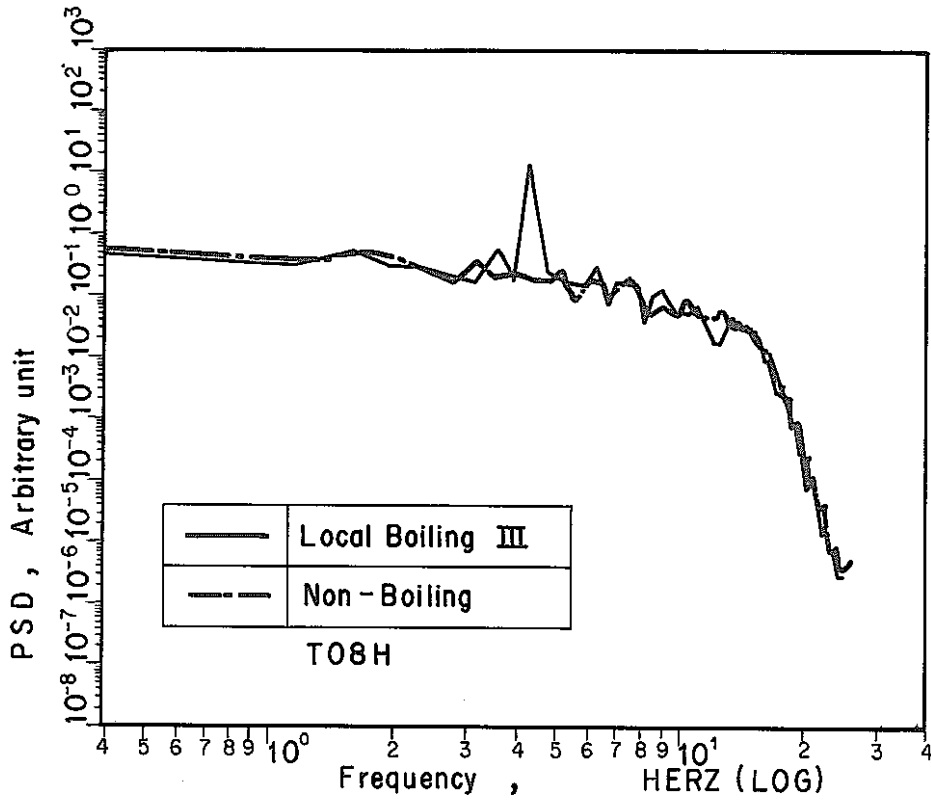


Fig.11(e) Power spectral density of temperature fluctuations at the position of 56.2mm downstream from the blockage Sensor T08H, Run 91WLB-105

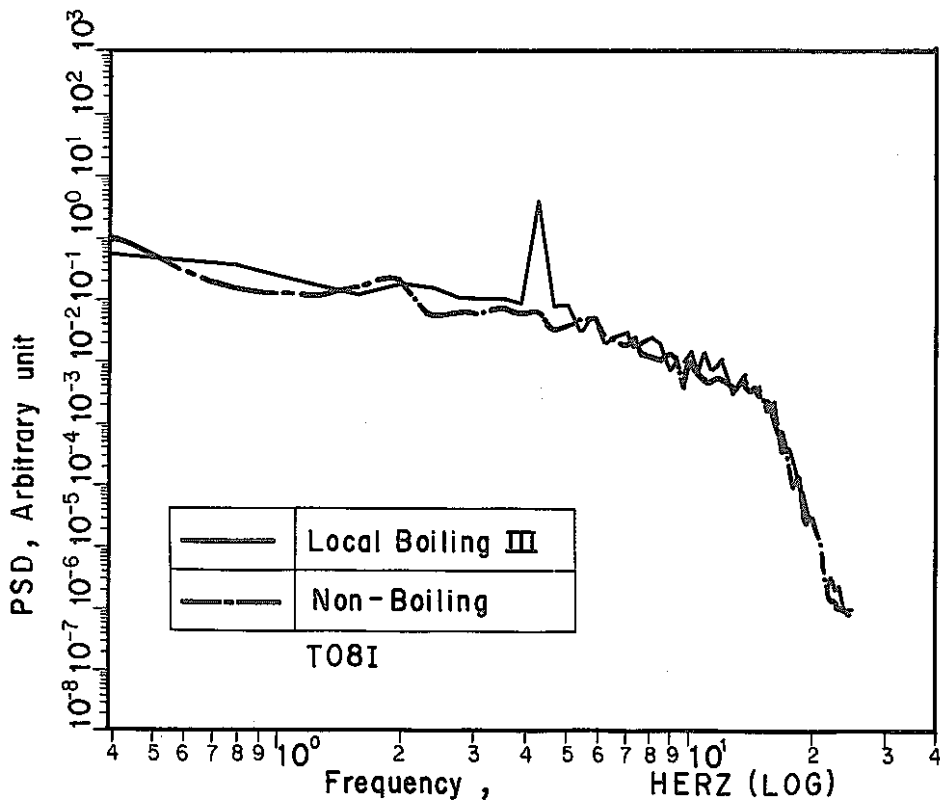


Fig.11(f) Power spectral density of temperature fluctuations at the position of 78.3mm downstream from the blockage Sensor T08I, Run 91WLB-105

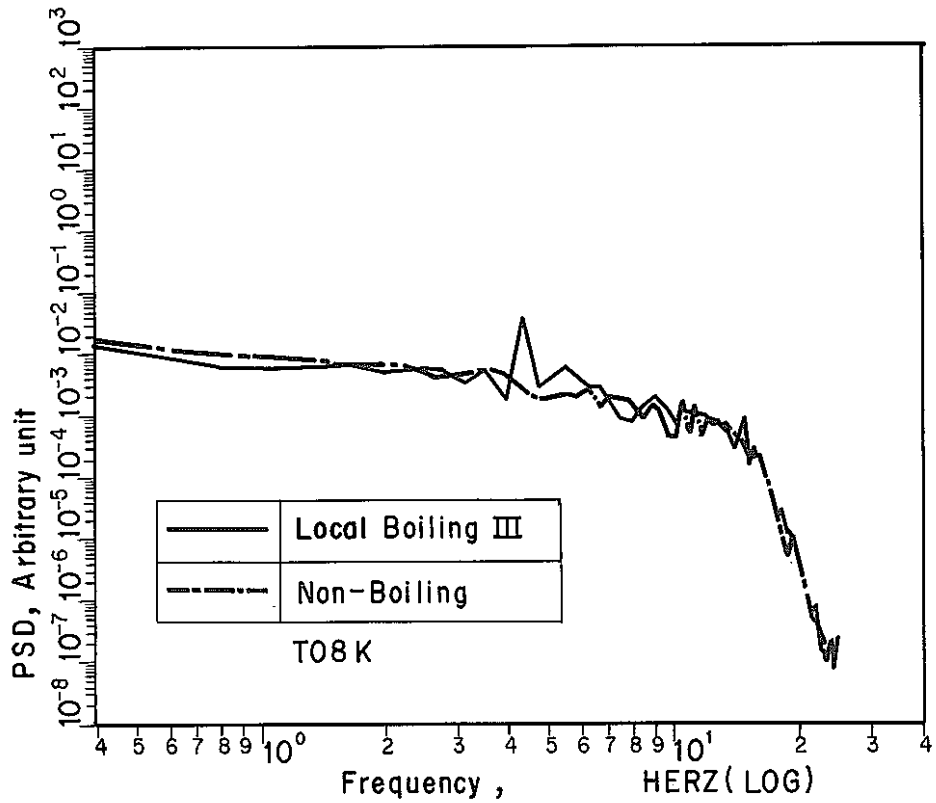


Fig.11(g) Power spectral density of temperature fluctuation at the position of 122 mm downstream from the blockage: Sensor T08K, Run 91WLB-105

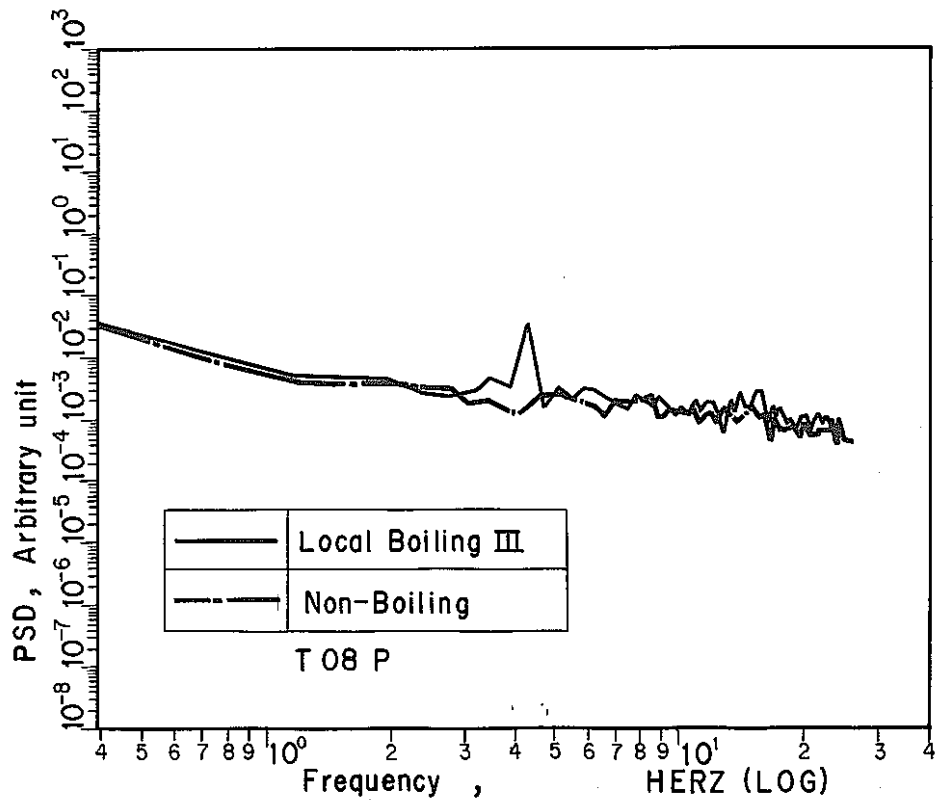


Fig.11(h) Power spectral density of temperature fluctuations at the position of 255mm downstream from the blockage Sensor T08P, Run 91WLB-105

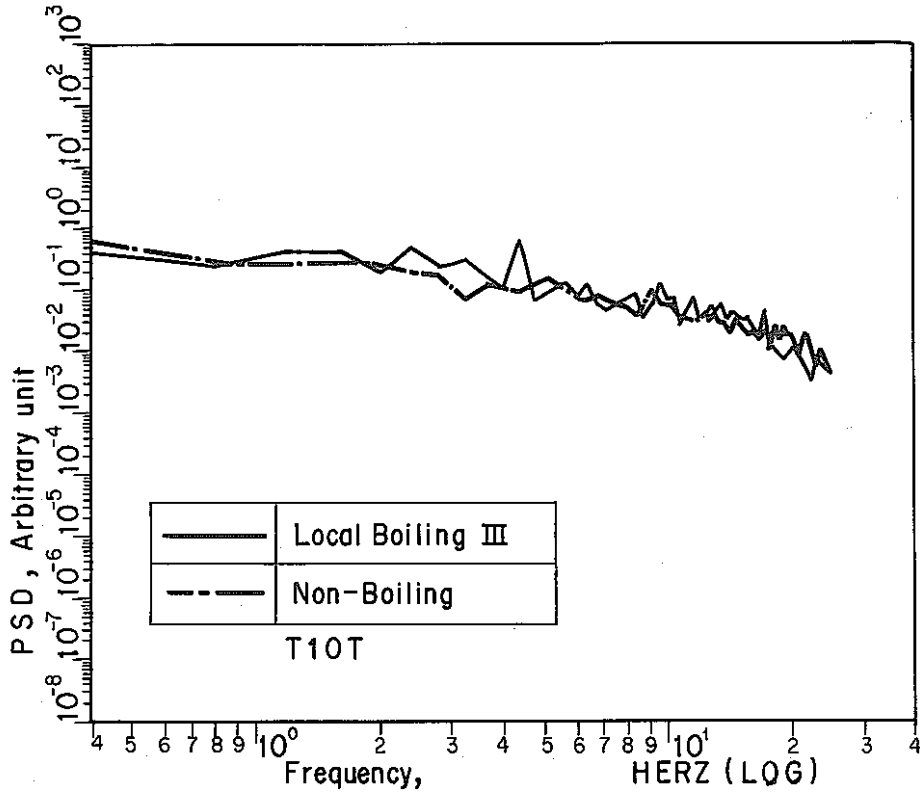


Fig.11(i) Power Spectral density of temperature fluctuations at the position of 1195mm downstream from the blockage: Sensor T10T, Run 91WLB-105

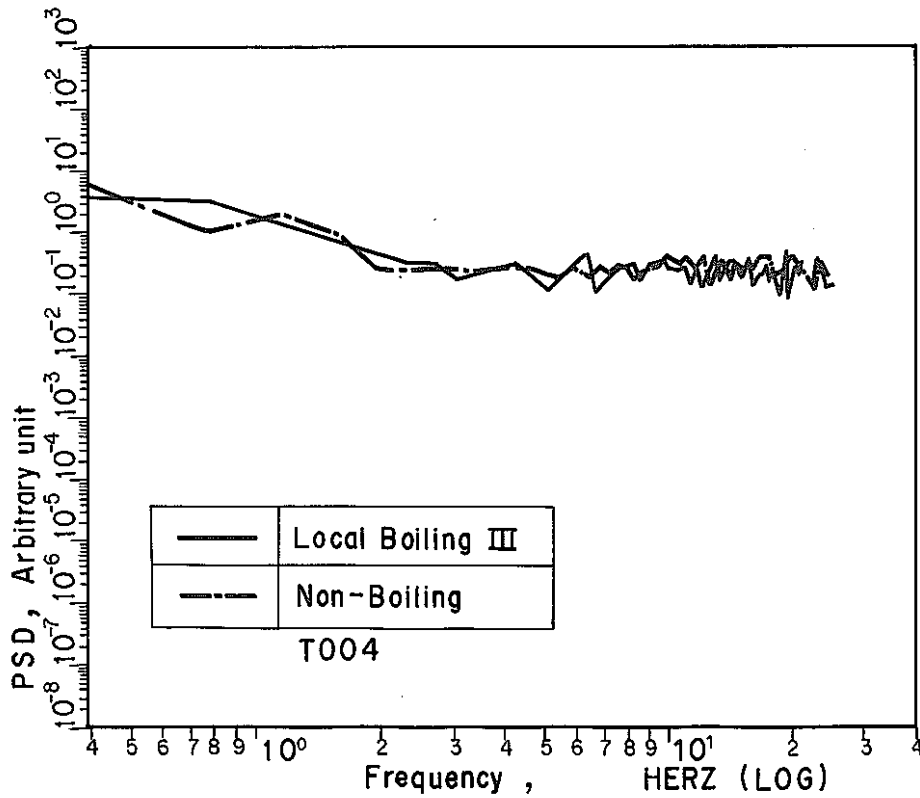


Fig.11(j) Power spectral density of temperature fluctuations at the position of 1230mm downstream from the blockage Sensor T004, Run 91WLB-105

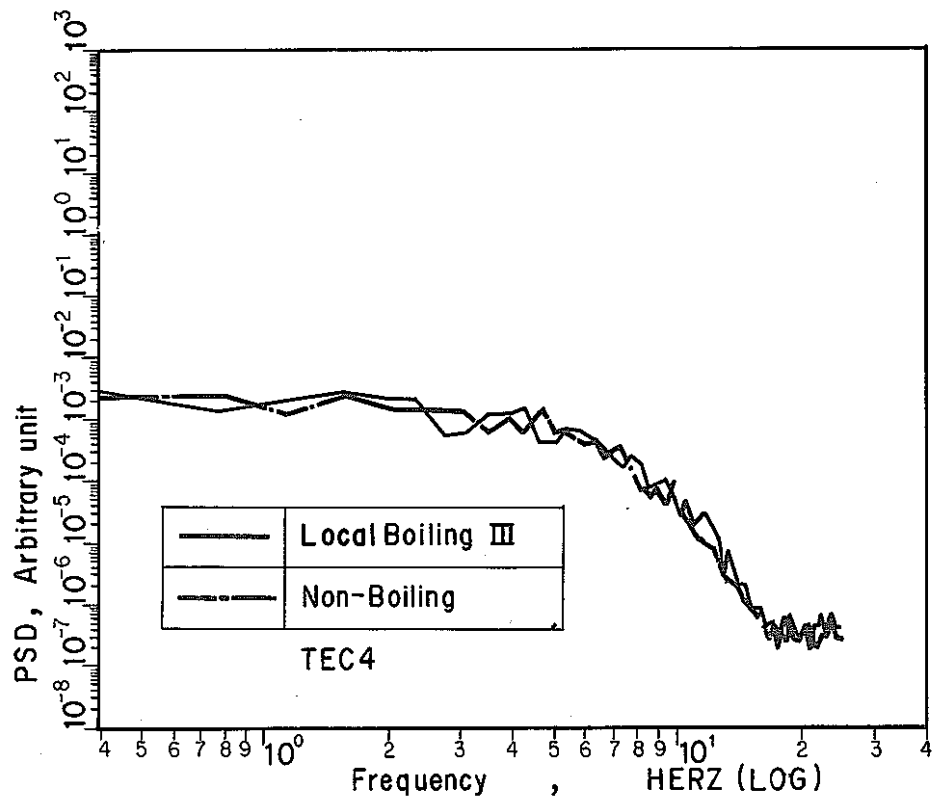


Fig.11(k) Power spectral density of temperature fluctuations at the outlet : Sensor TEC4, Run 91WLB-105

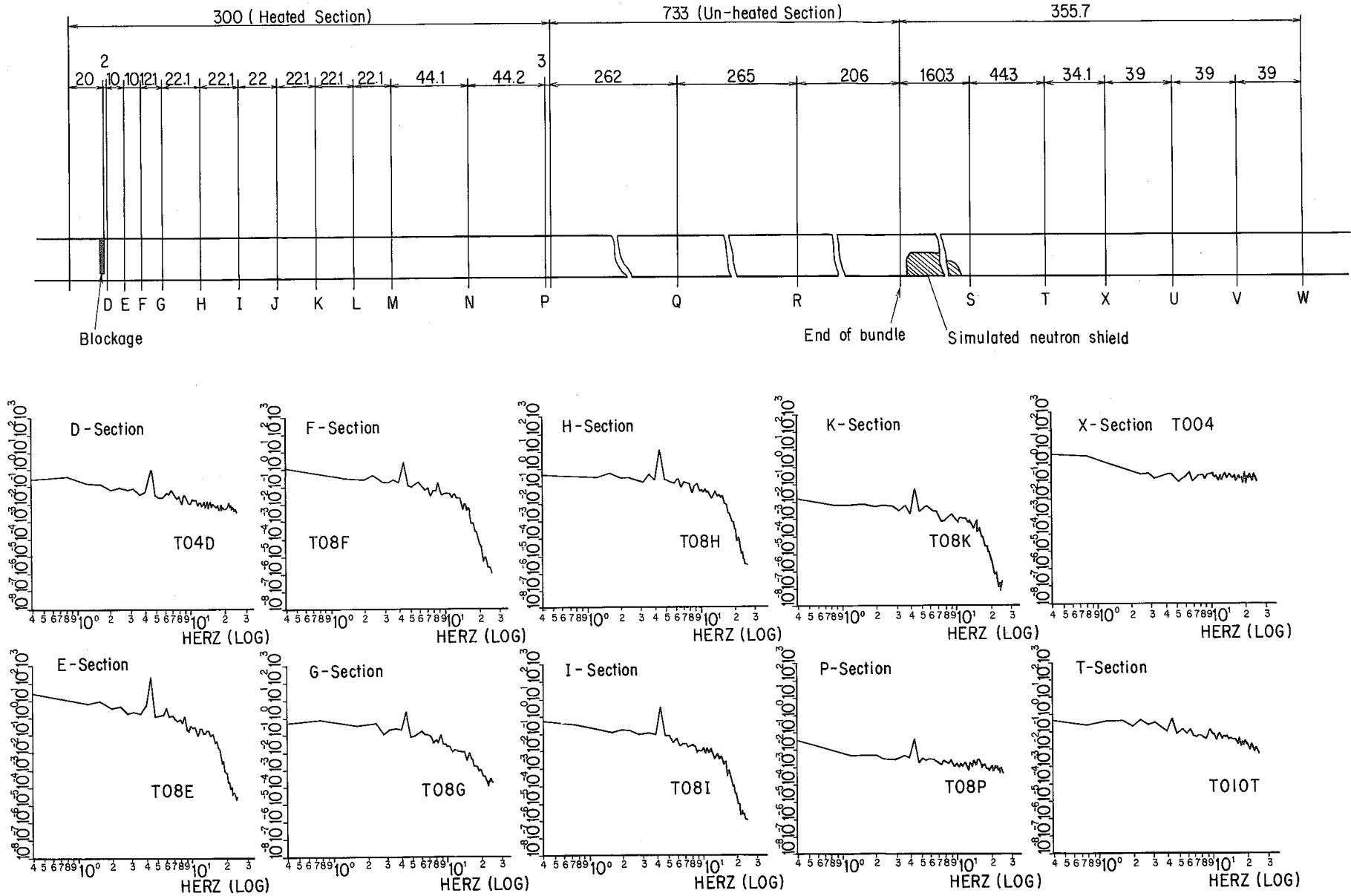


Fig.12 Power spectral densities of temperature fluctuations at the position downstream from the blockage under Local Boiling Condition III : Run 91 WLB-105

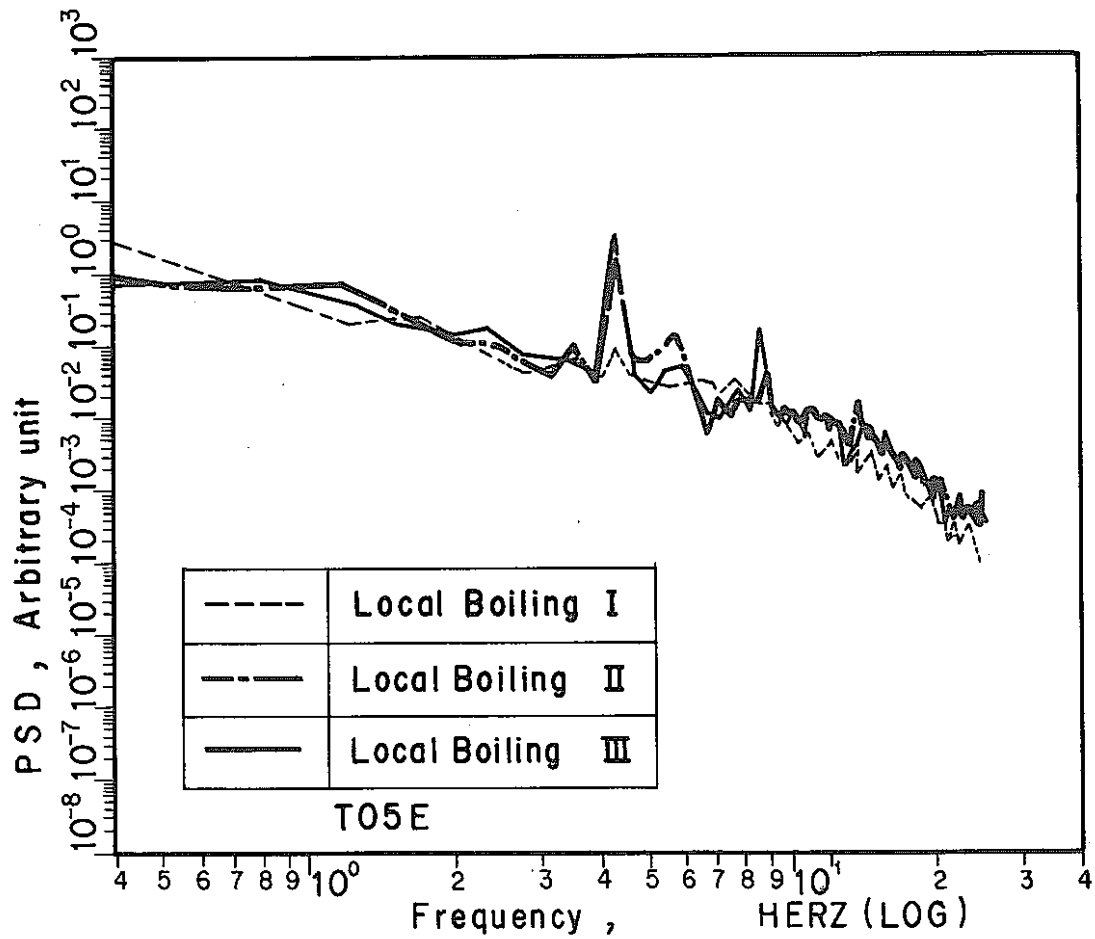


Fig.13 Power spectral density of temperature fluctuations at the position 12mm downstream from the blockage :Sensor T05E, Run 91WLB-105

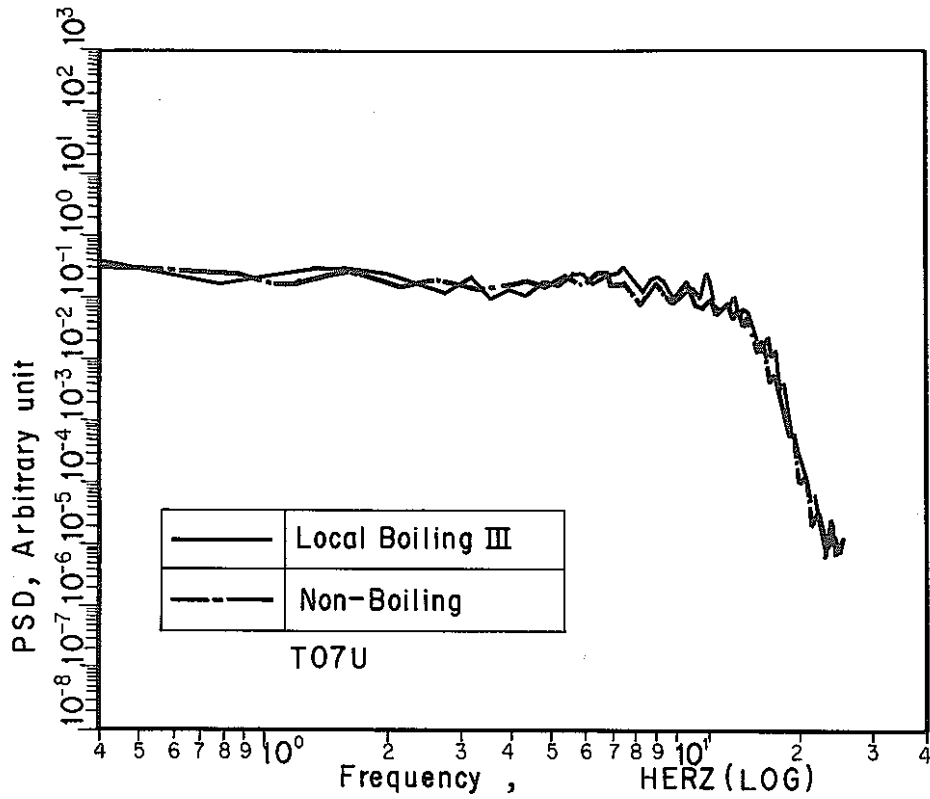


Fig.14(a) Power spectral density of temperature fluctuation at the position 1269 mm downstream from the blockage Sensor T07U, Run 91WLB -105

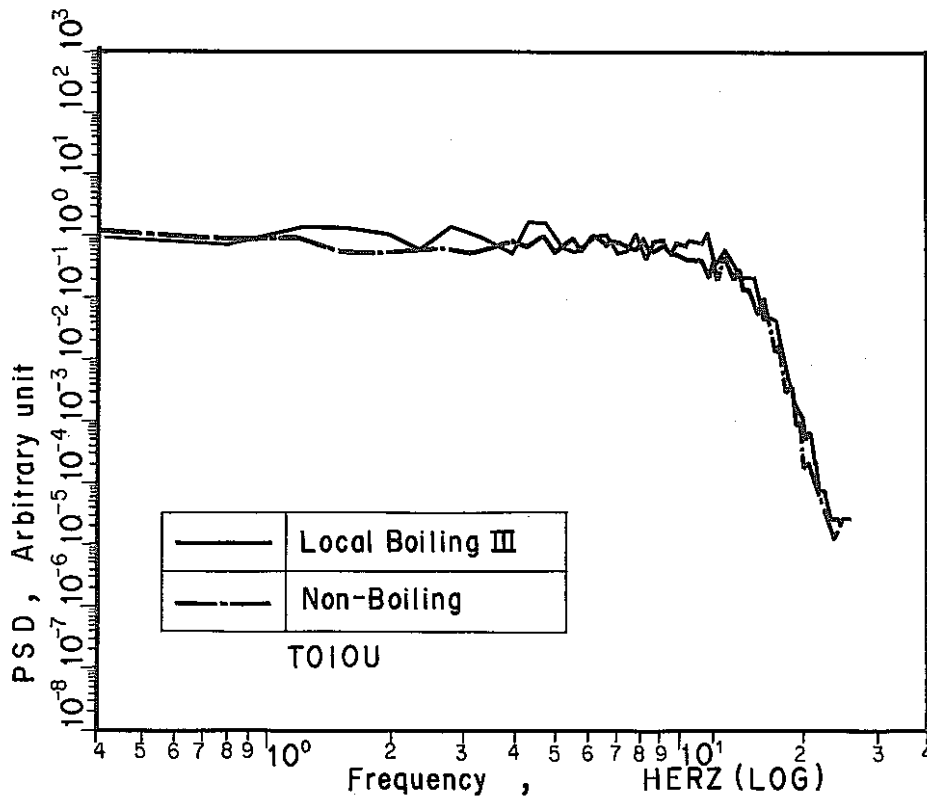


Fig.14(b) Power spectral density of temperature fluctuation at the position 1269 mm downstream from the blockage Sensor T010U, Run 91WLB-105



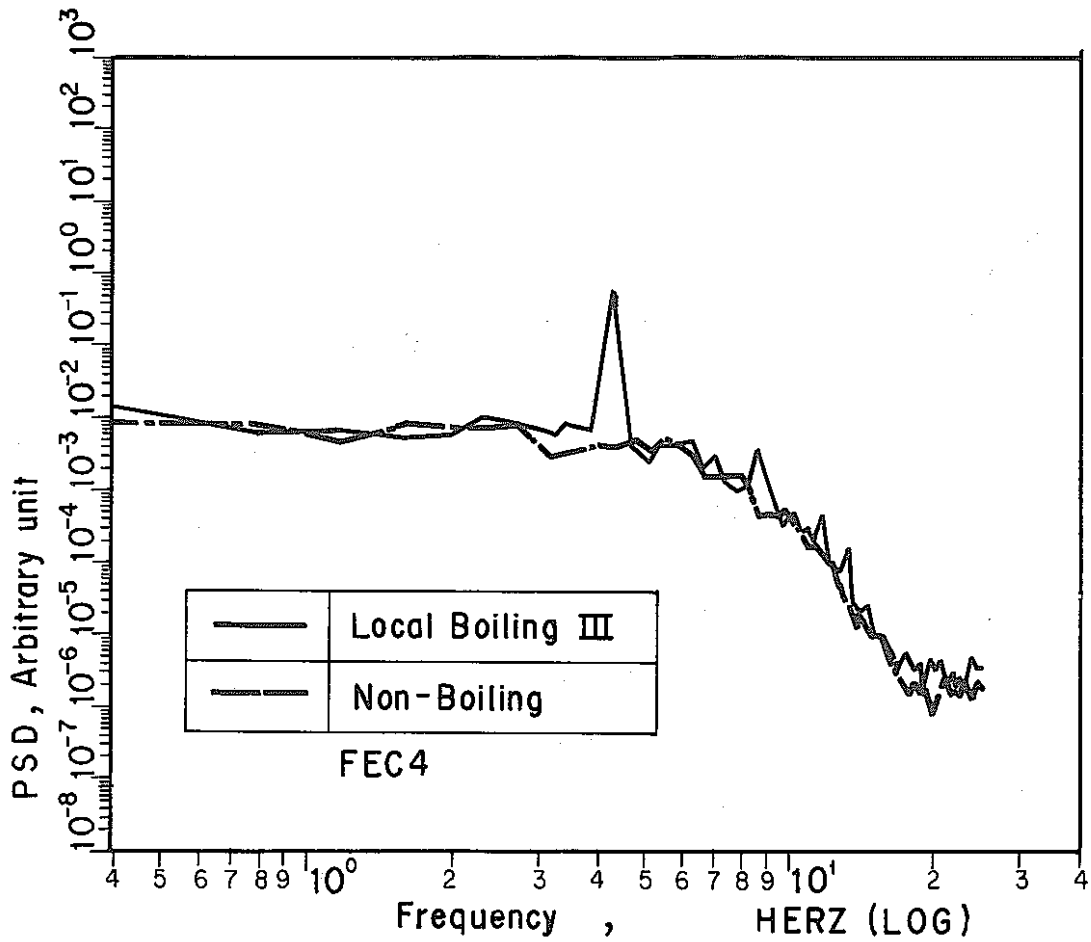


Fig.15 Power spectral density of flow fluctuations at the outlet : Sensor FEC4, Run 91WLB-105

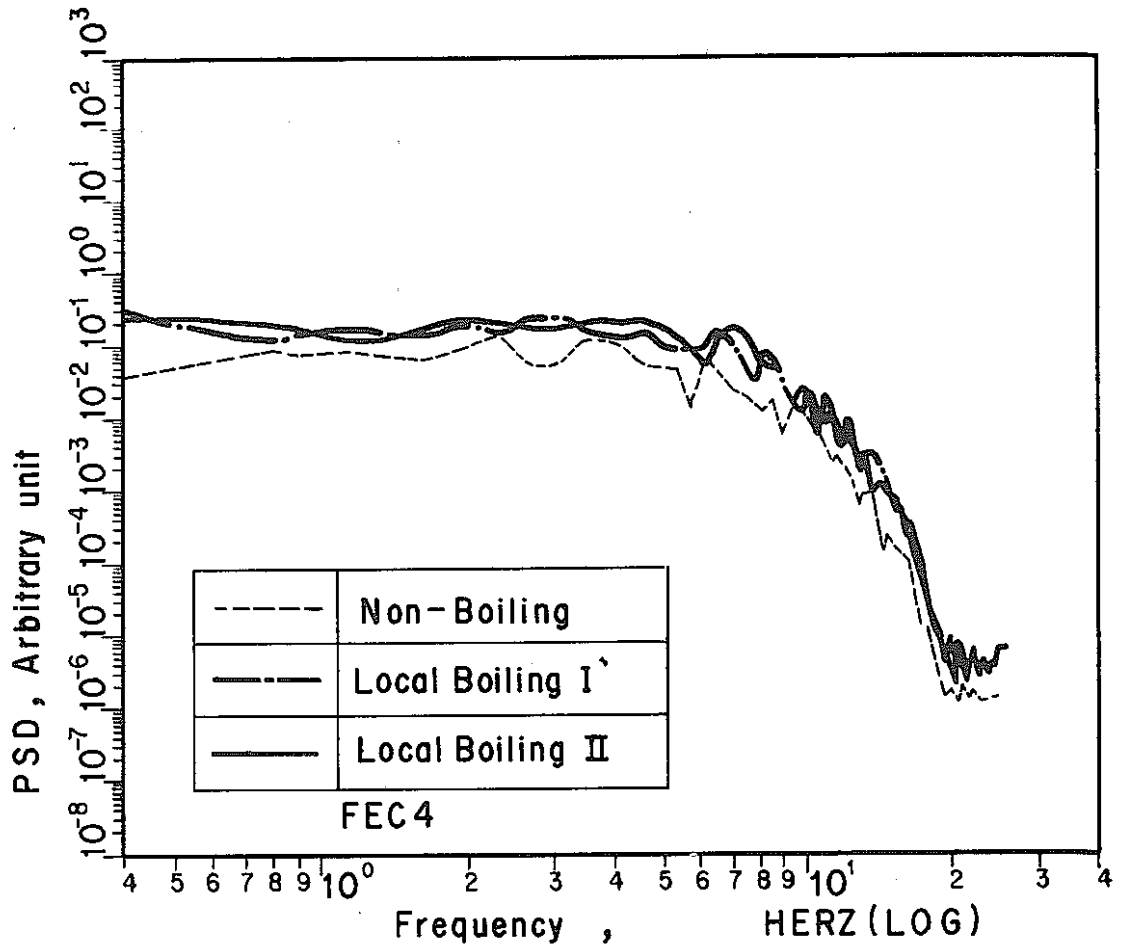


Fig.16 Power spectral density of flow fluctuation at the outlet  
:Sensor FEC 4, Run 91WLB-103

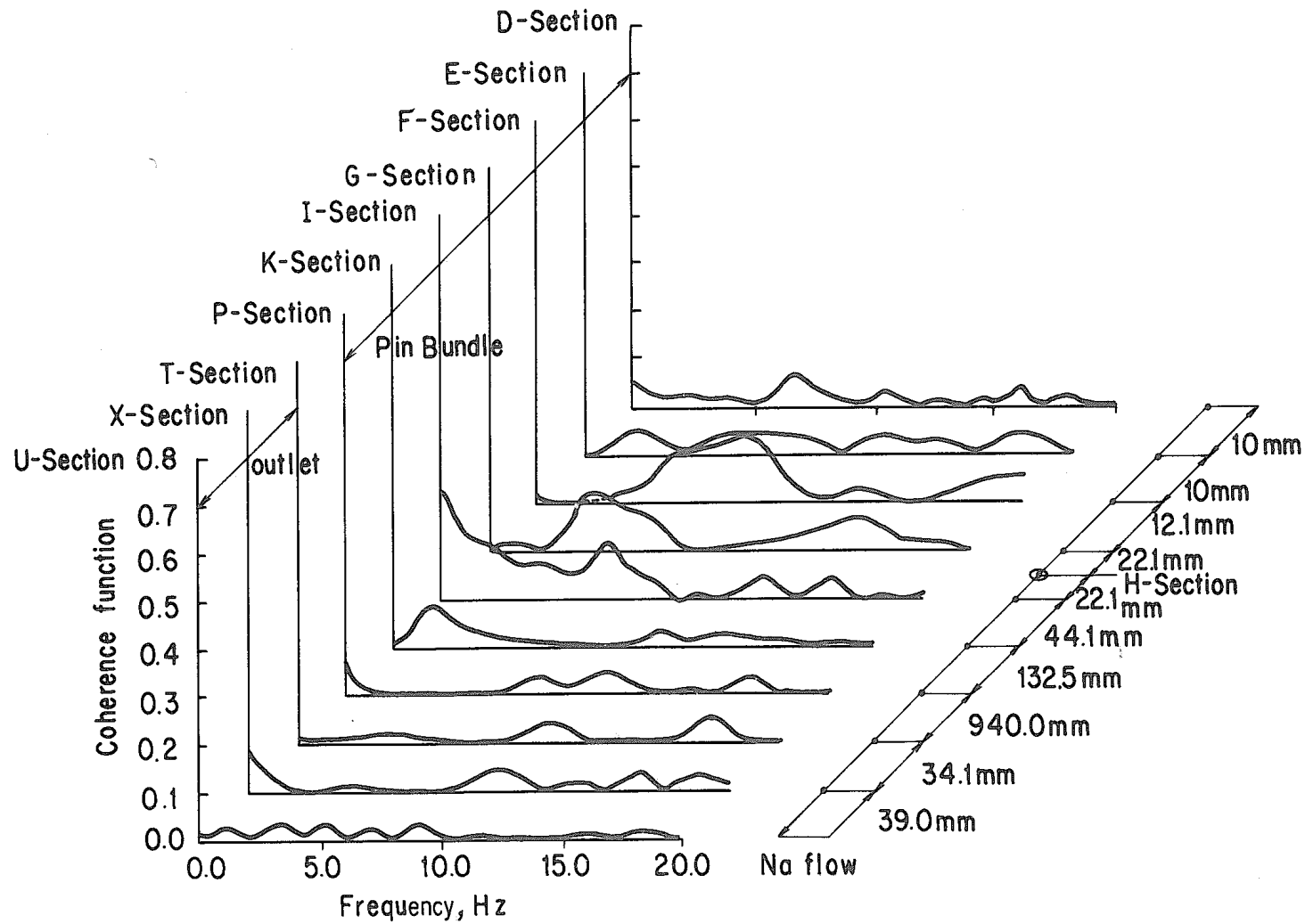


Fig.17(a) Coherence functions between temperature fluctuation immediate behind the blockage, TO8H, and that in the downstream from the blockage under "Non-boiling" :Run 91 WLB-105

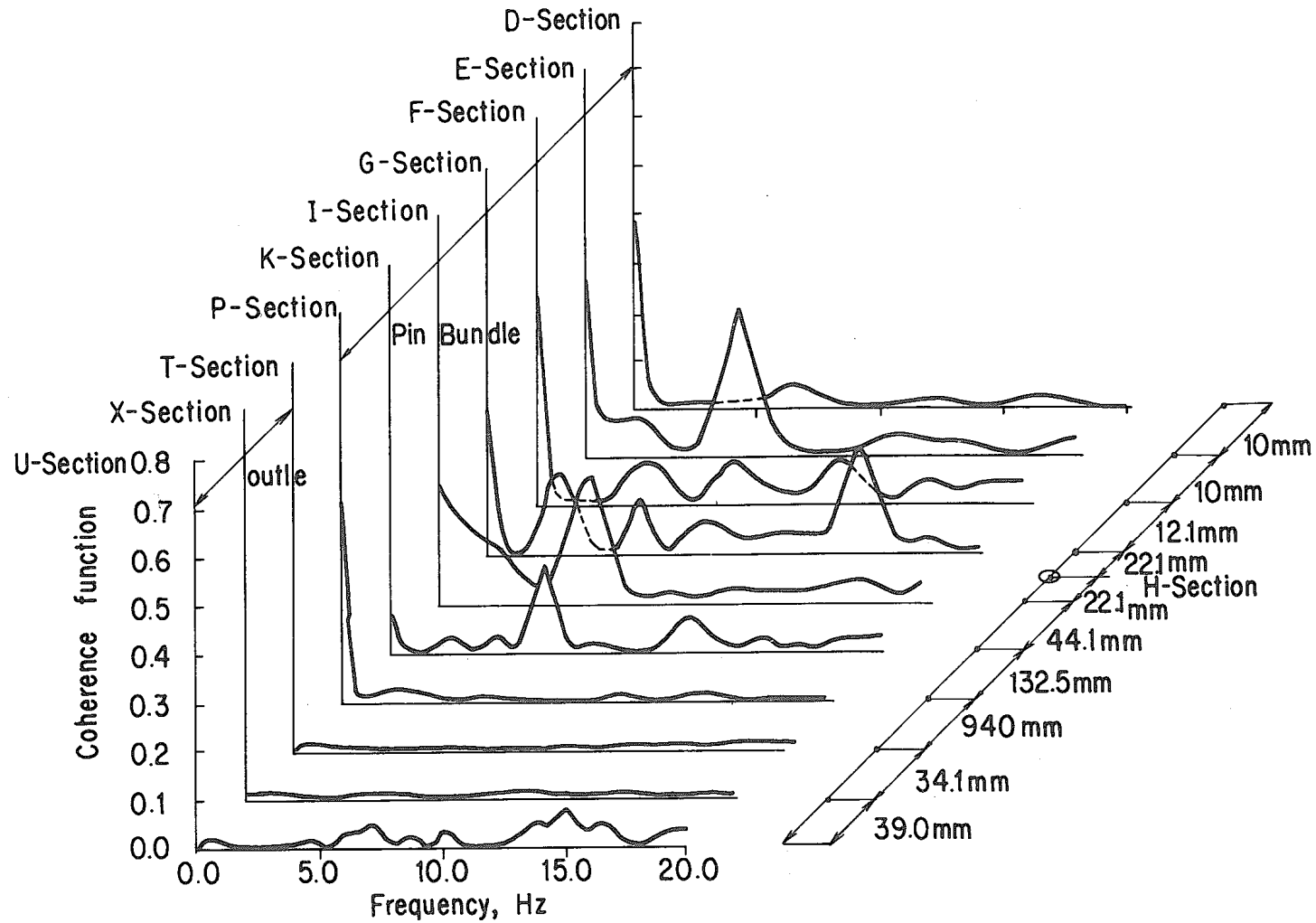


Fig.17(b) Coherence functions between temperature fluctuation immediately behind the blockage, T08H, and that in the downstream from the blockage under "Local Boiling I" :Run 91WLB-105

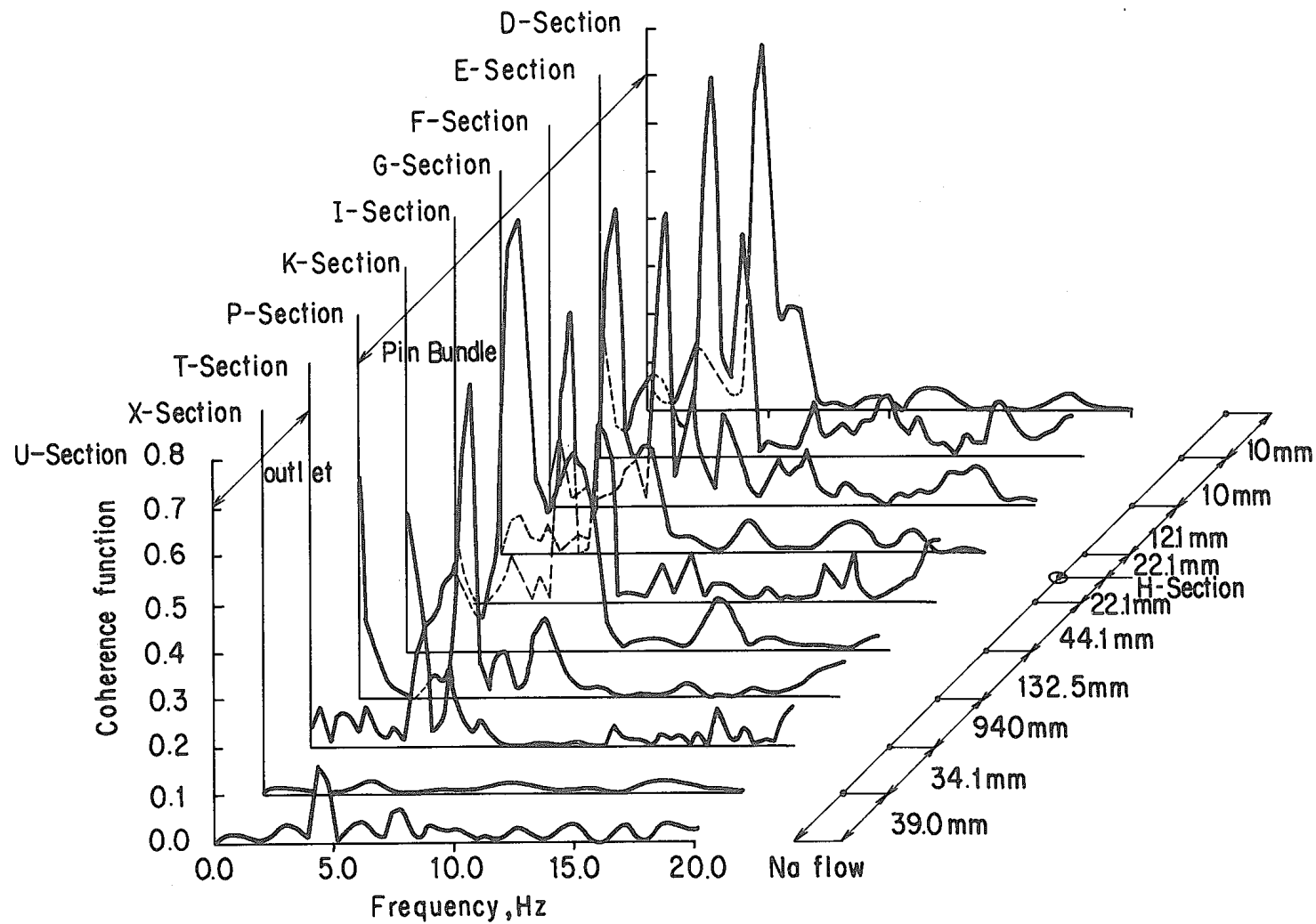


Fig.17(c) Coherence functions between temperature fluctuation immediately behind the blockage, T08H, and that in the downstream from the blockage under "Local Boiling II": Run 91 WLB-105

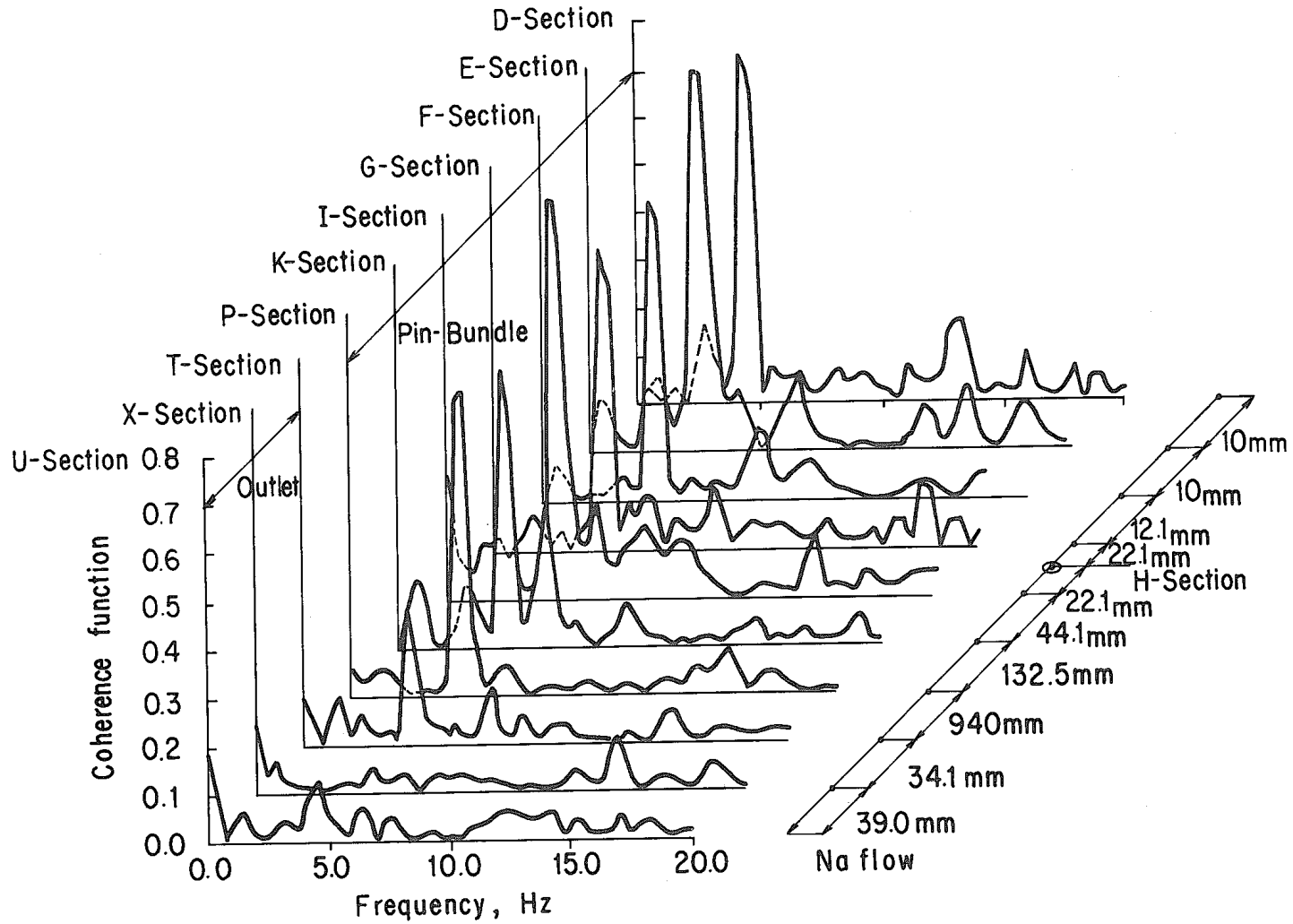


Fig.17(d) Coherence functions between temperature fluctuation immediately behind the blockage, T08H, and that in the downstream from the blockage under "Local Boiling III" :Run 91 WLB-105

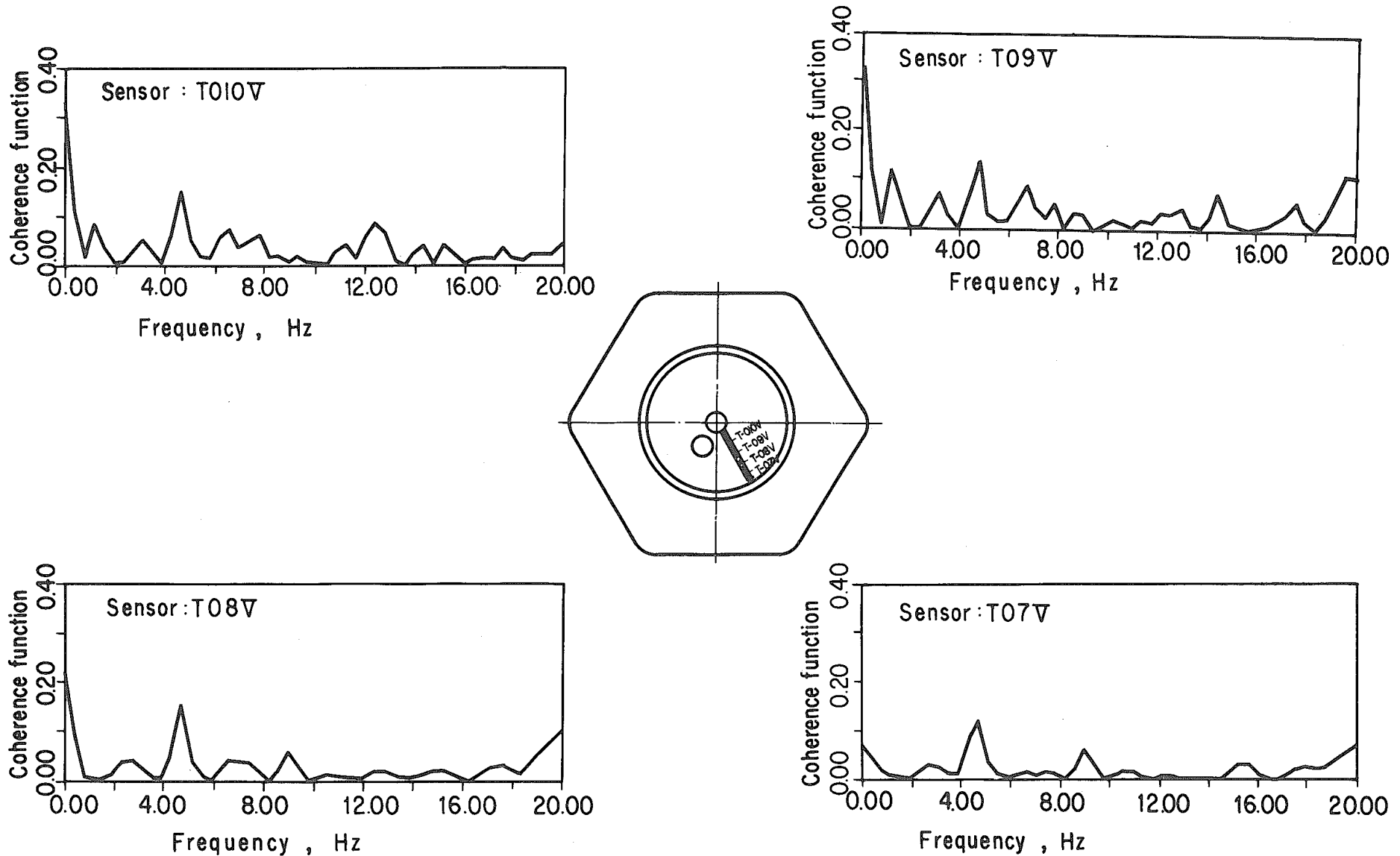


Fig.18 Coherence function between temperature fluctuation immediately behind the blockage, T08H, and temperature fluctuations at the outlet of the bundle (T07V, T08V, T09V, T010V) under Local Boiling III: Run 91WLB-105

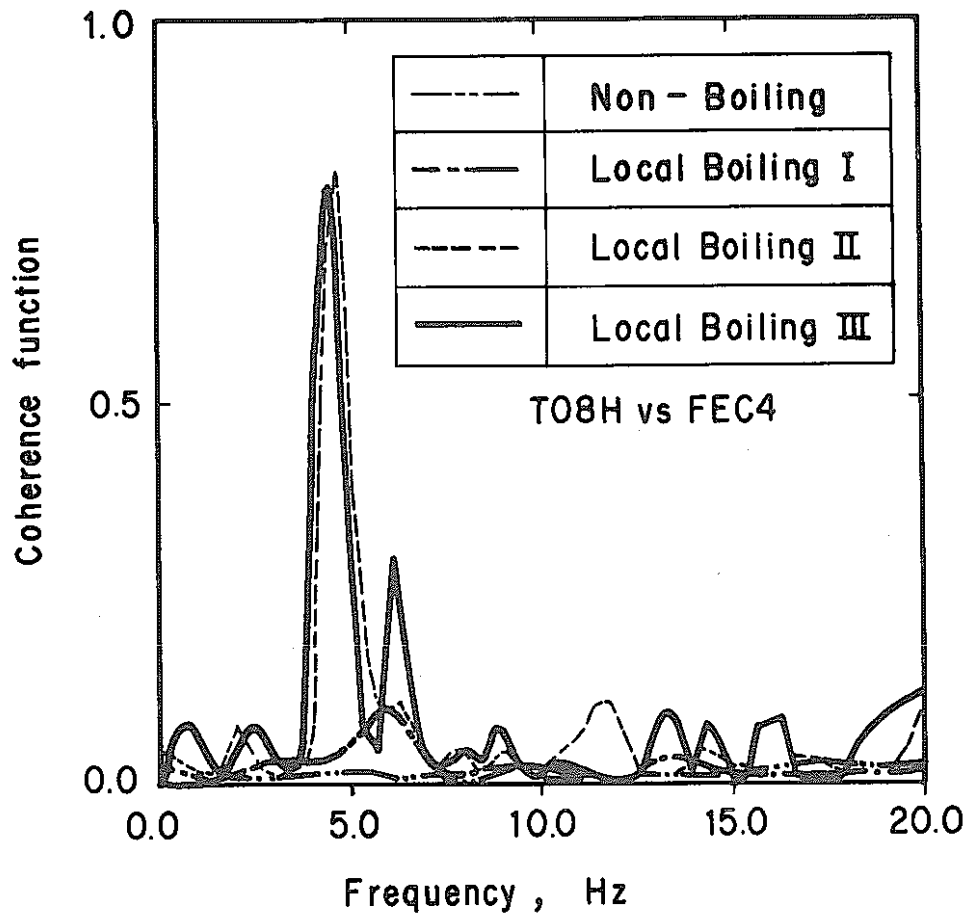


Fig.19 Coherence functions between temperature fluctuation behind the blockage, T08H, and flow fluctuation at the outlet of the bundle, FEC4 :Run 91WLB-105



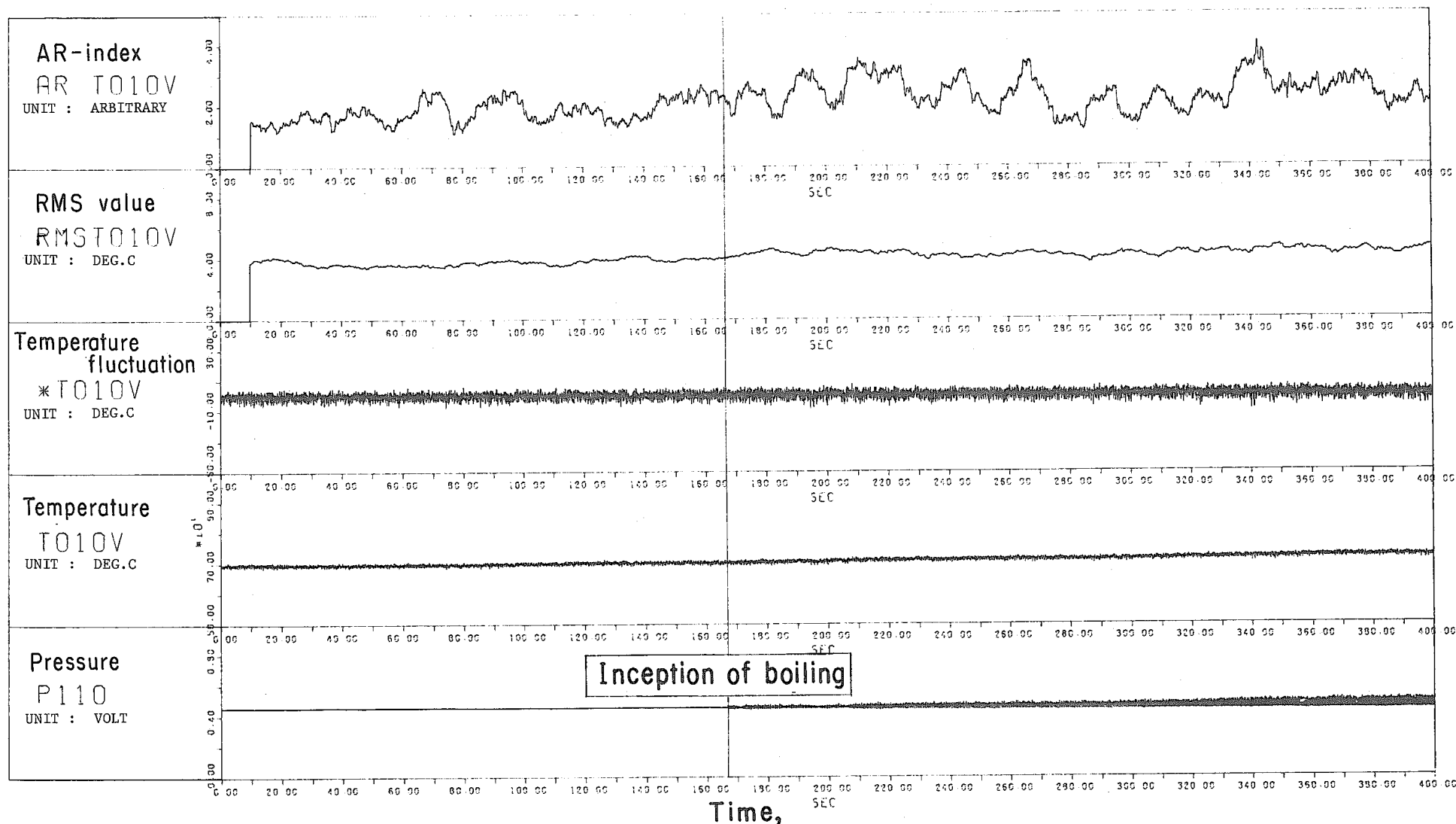


Fig.20(a) RMS value and AR-index of temperature fluctuation measured by the outlet thermocouple, TO10V : Run 91WLB-105 Averaging time =10sec

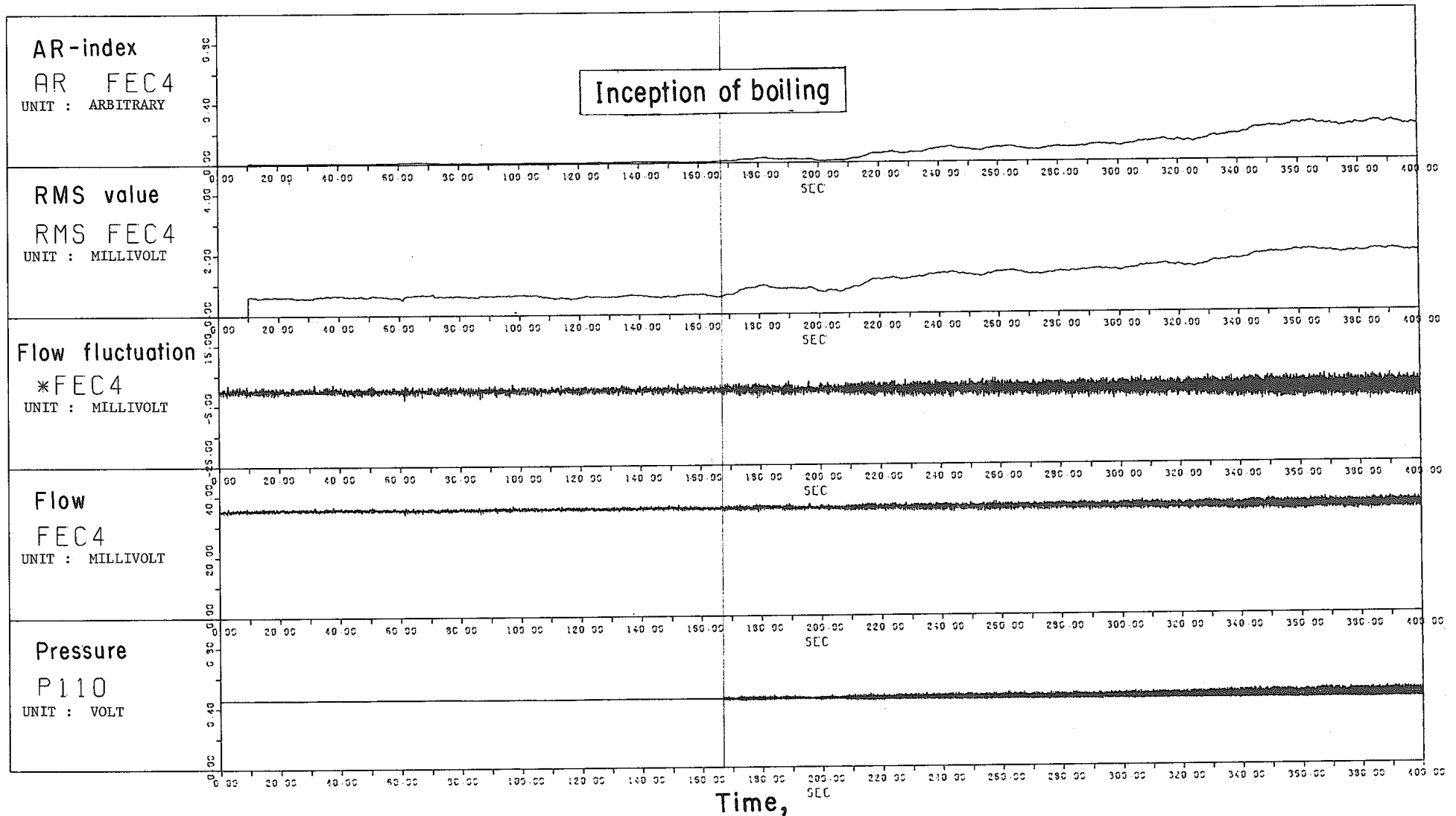


Fig.20(b) RMS value and AR-index of flow fluctuation measured by eddy-current type flowmeter, FEC4 : Run 91WLB-105 Averaging time=10 sec

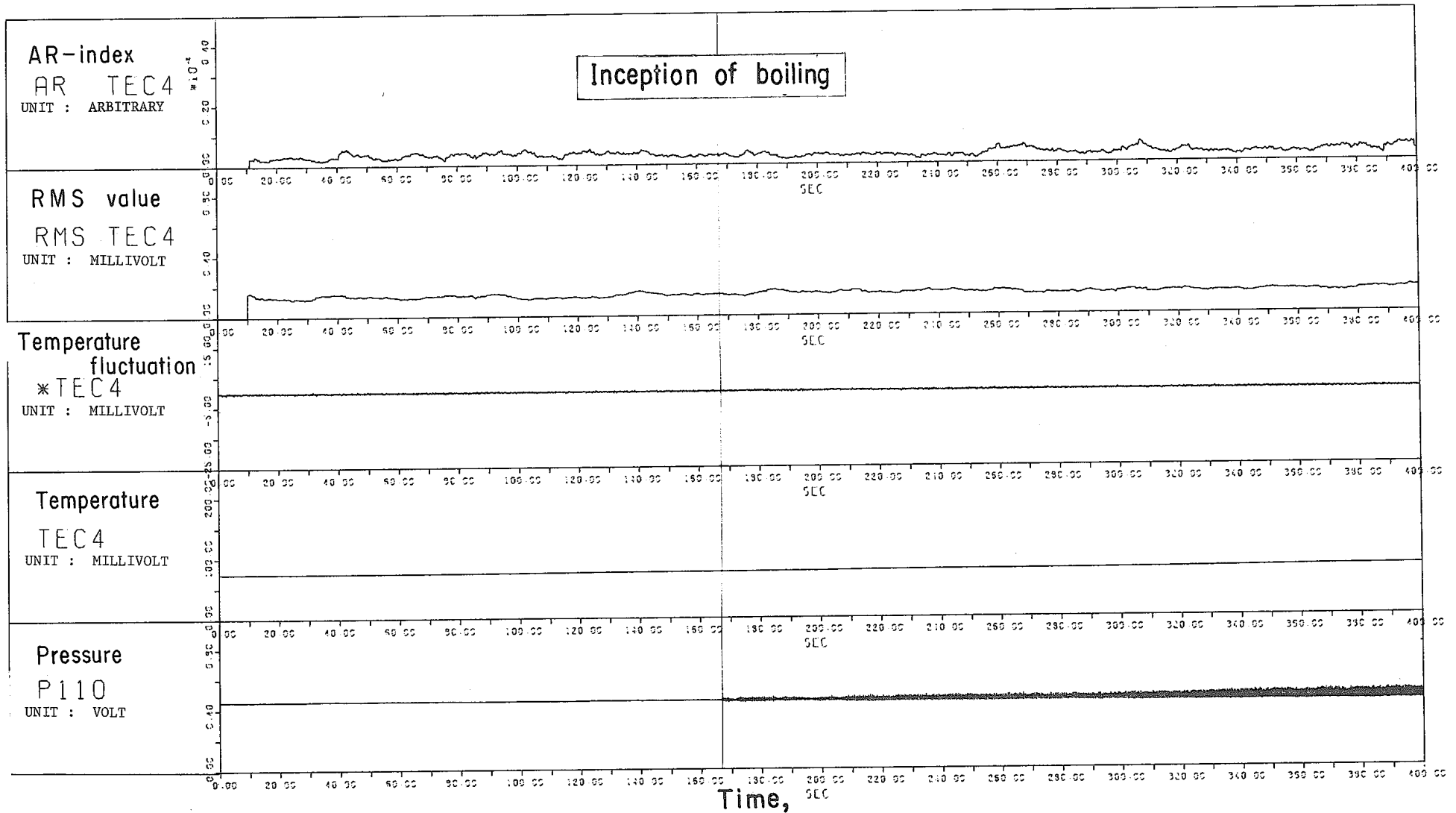


Fig.20(c) RMS value and AR-index of temperature fluctuation measured by eddy-current type thermometer, TEC4 : Run 91 WLB-105  
Averaging time = 10sec

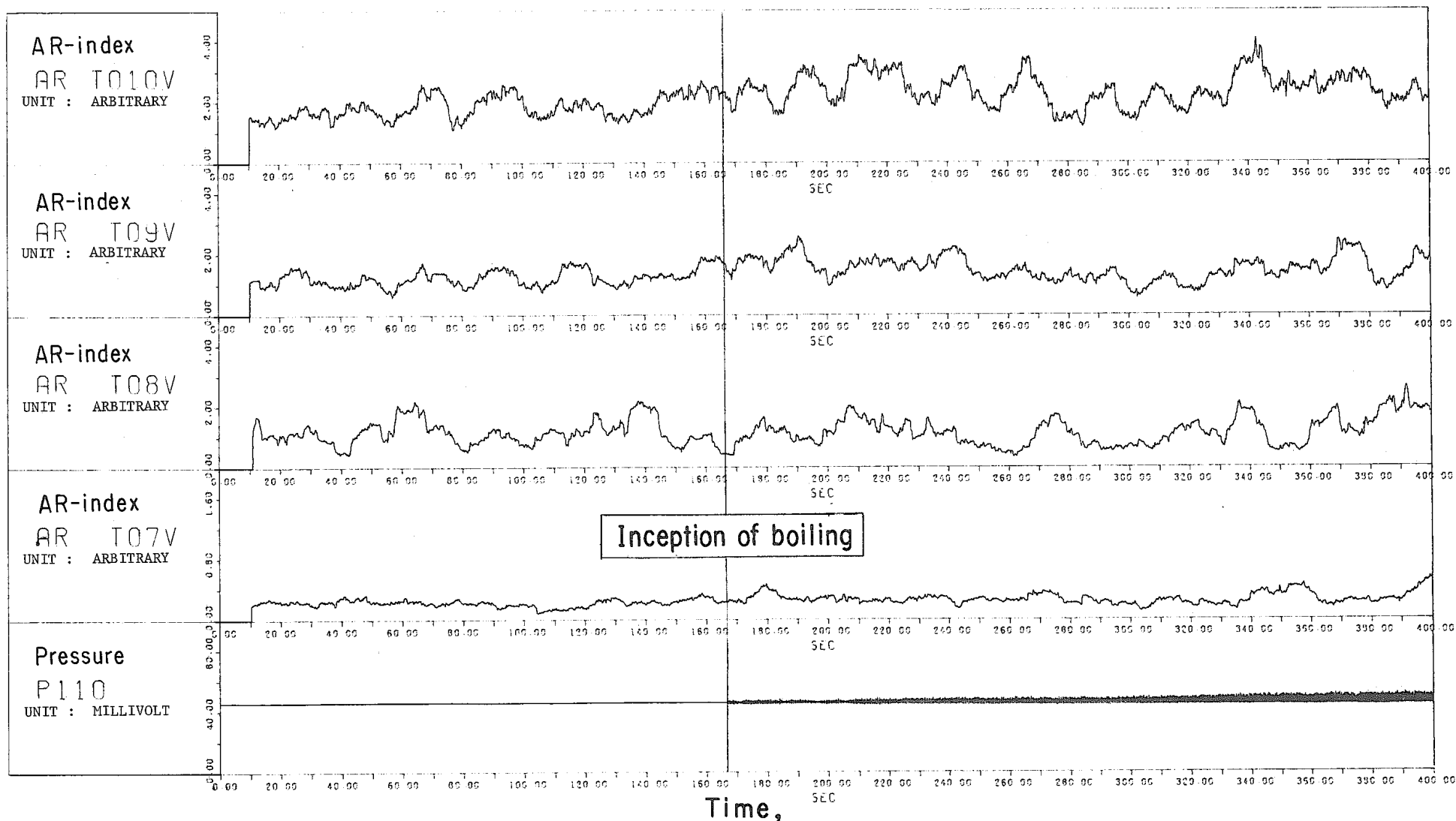


Fig.21 AR-indexes of temperature fluctuations measured by thermocouple at the outlet (T07V, T08V, T09V, T010V)  
: Run 91WLB-105 Averaging time = 10sec

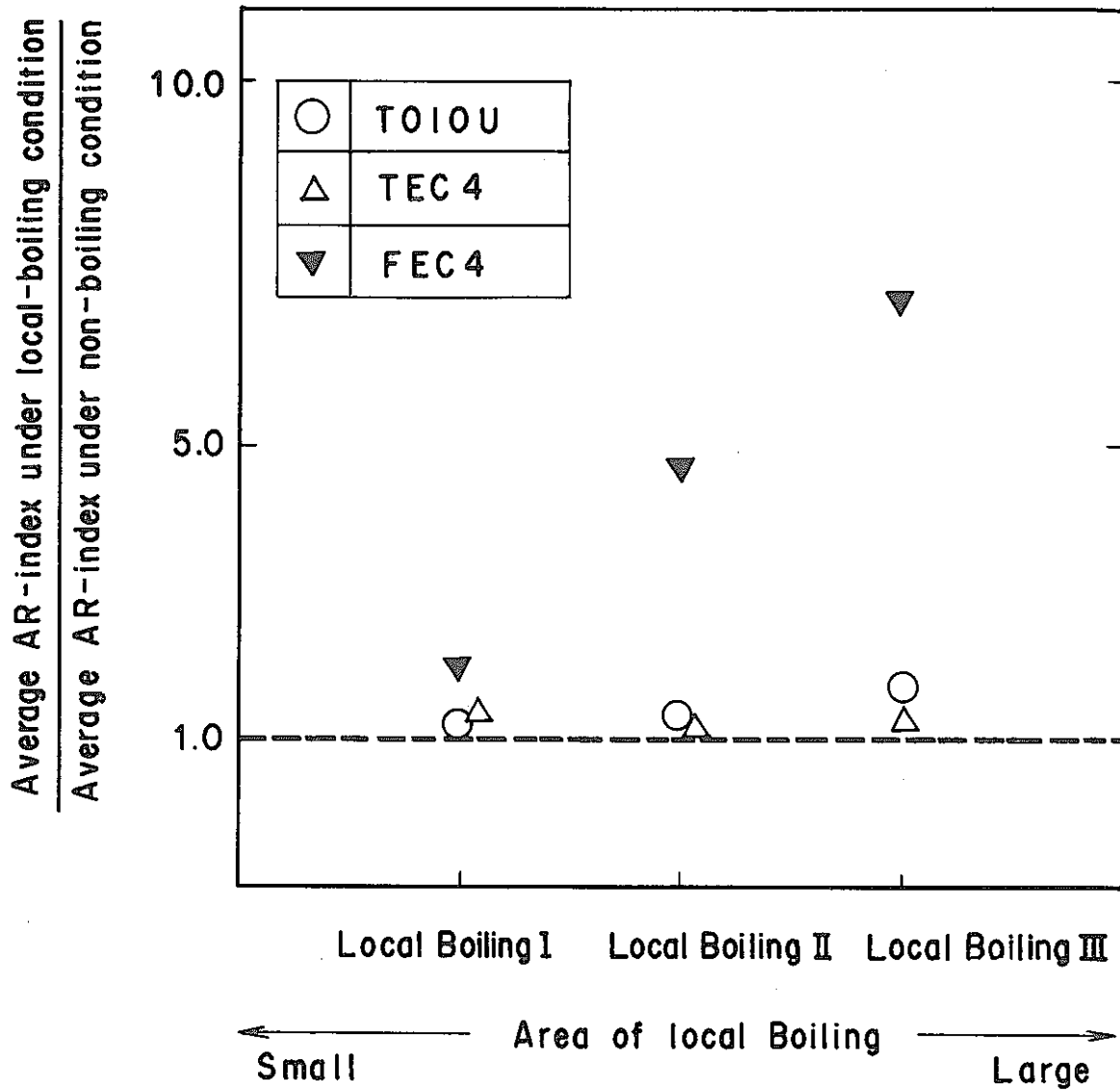


Fig.22 Effect of local boiling on the AR-indexes for the outlet temperature and flow fluctuations  
:Run 91WLB-105

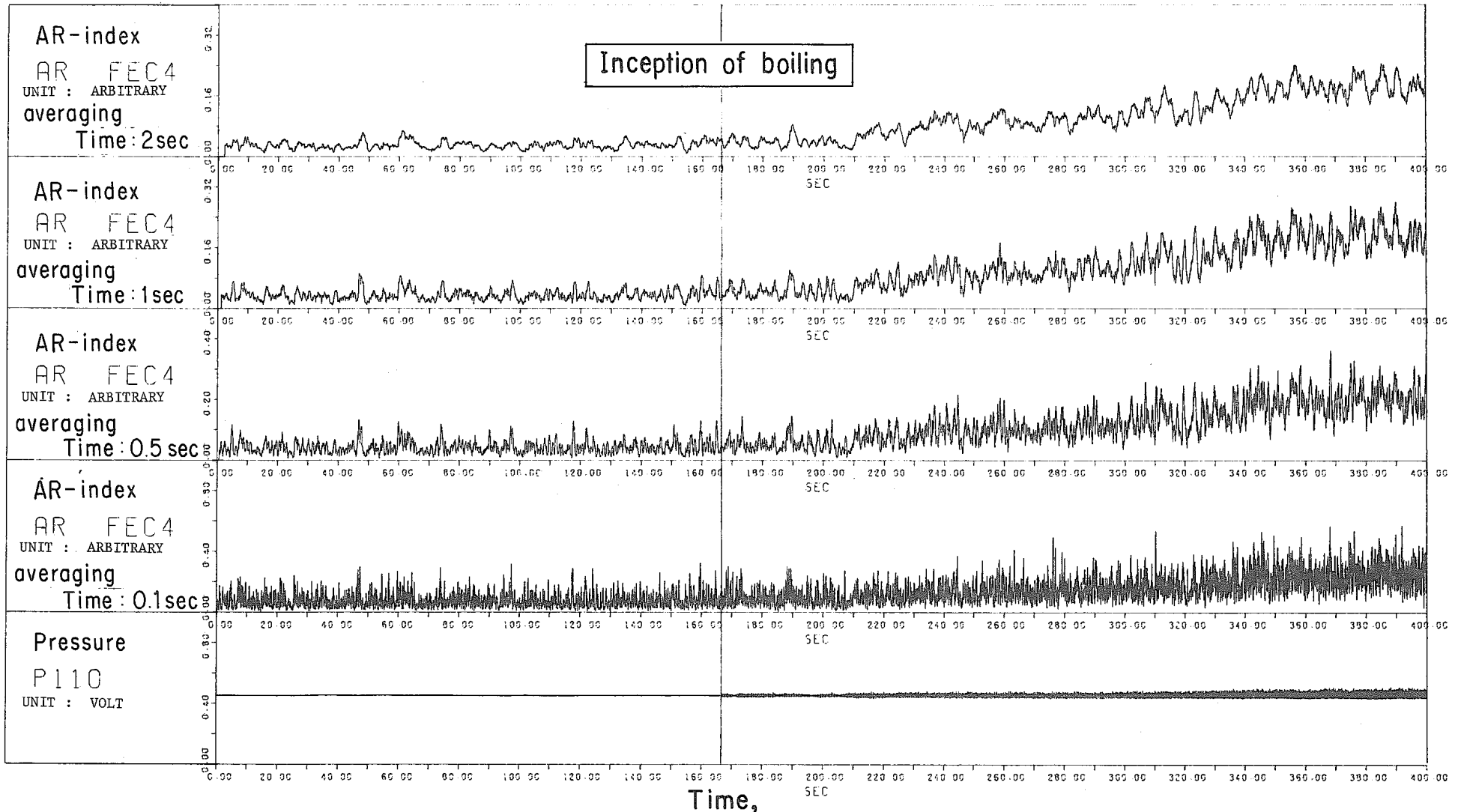


Fig.23(a) Effect of averaging time on AR-index of flow fluctuation measured by the outlet eddy-current type flowmeter, FEC4, Averaging time = 0.1~2 sec : Run 91 WLB-105

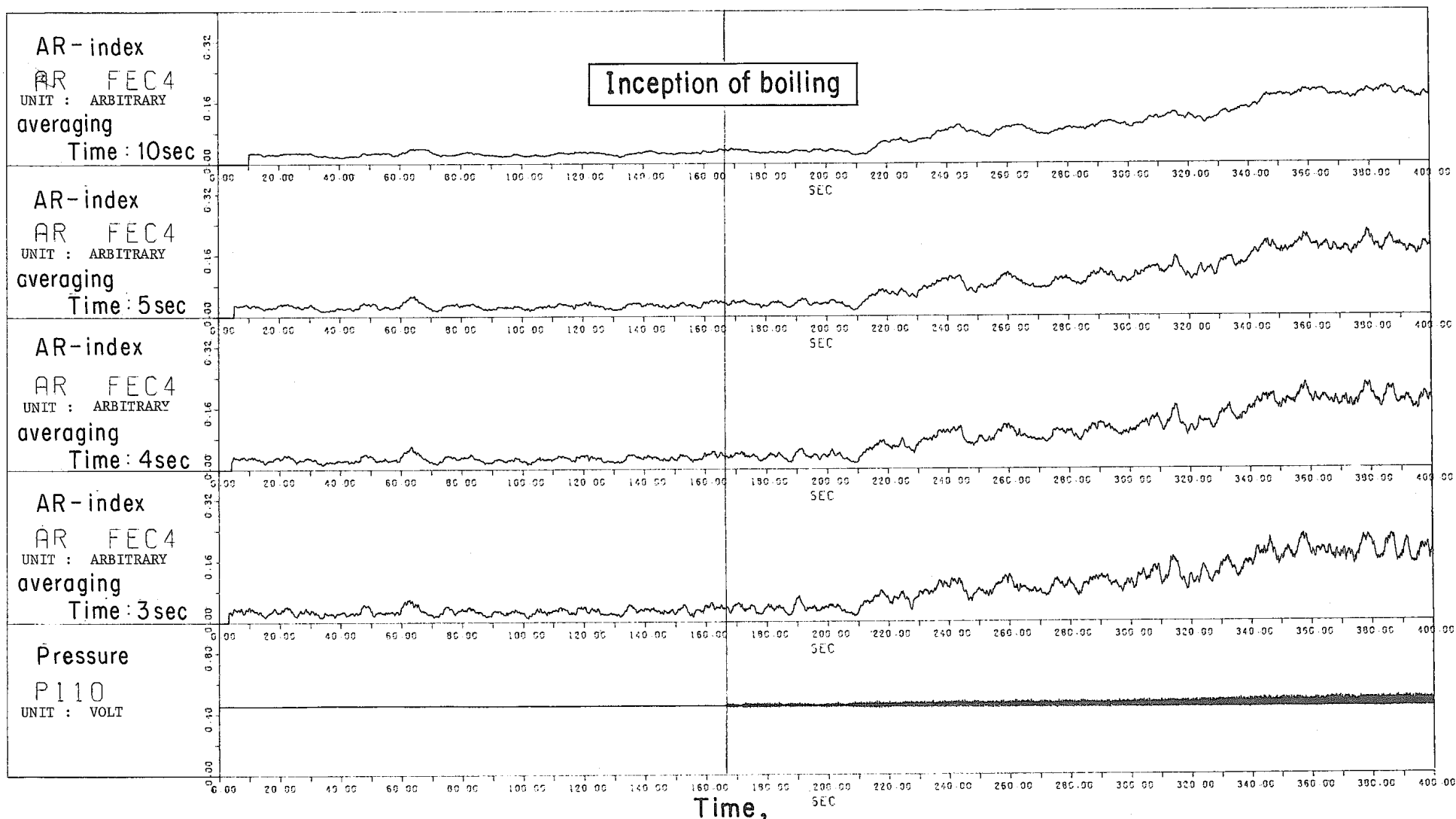


Fig.23(b) Effect of averaging time on AR-index of flow fluctuation measured by the outlet eddy-current type flowmeter, FEC4, Averaging time = 3~10sec : Run 91 WLB-105