

変形燃料束流力振動試験(第2報)

Porosity / Ring の 影 韻

1984年4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)

1 9 8 4 年 4 月

変形燃料束流力振動試験（第2報）

Porosity / Ring の影響

筆者氏名 大坪 章*, 阿部定好**;

井口達郎***

要 旨

「常陽」 MK - I 燃料被覆管に発生したウェアマーク（擦り痕）の発生原因の主因子の一つとして、燃料ピンの流力振動が考えられている。本試験では、流力振動に及ぼす燃料束の Porosity / Ring の影響を調べるため、「常陽」 MK - I 燃料束の 2 倍の Porosity / Ring をもつ試験体を用いた。「常陽」 MK - I 燃料束体系での第一報の試験結果と比較して、次のような事が明らかとなった。

炉内照射中の燃料束の周辺ピンの熱湾曲を模擬した変形ピンを用いた変形燃料束では、Porosity / Ring の影響よりも変形ピンの拘束効果の方が大きく、燃料ピンの振動は今回の試験でも観測されなかった。変形ピンを含まない正常燃料束試験では、Porosity / Ring を 2 倍にした影響は大きく、前報にくらべて大きい燃料ピン振動が観測された。

* 大洗工学センター、高速炉安全工学部、高速炉工学室

** 大洗工学センター、高速実験炉部、技術課

*** 現在、東芝原子力技術研究所

**** PNC SN 941 83-47

Apr. 1984

Flow Induced Vibration of a Deformed Fuel Pin Bundle (2)

Effect of Porosity/Ring on Pin Vibration

Akira OHTSUBO*, Sadayoshi ABE*
and Tatsuro IGUCHI***

Abstract

The flow induced vibration of a fuel pin bundle is considered to be one of the major factors causing wear marks observed on "JOYO" MK-I fuel claddings. This experiment was performed by using a fuel pin bundle having porosity/ring of twice as large as that of "JOYO" MK-I fuel assembly, in order to study the effect of porosity/ring on the flow induced vibration of pins.

The following was clarified from the comparison between the results of this experiment and the previous one*** using the test bundle of porosity/ring equal to that of "JOYO" MK-I fuel assembly.

Any significant fuel pin vibration was not observed in the deformed bundle test in which the deformed pins were lined up on the outermost row simulating thermal bowing of the fuel assembly irradiated in reactor, because the restrain effect of the deformed peripheral pins was larger than that of porosity/ring. The similar result had been obtained in the previous experiment.

In the test of normal bundle without any deformed pin, the fuel pin vibration was much larger in this experiment than the previous one. This experimental result showed that the effect of porosity/ring on the vibration was significant in the normal bundle.

* Reactor Engineering Section, FBR Safety Engineering Division,
O-arai Engineering Center, PNC

** Reactor Technology Section, Experimental Fast Reactor Division

*** Present, Toshiba Nuclear Technology Laboratory

**** PNC Report PNC SN941 83-47

List of Figures

Fig. 2-1	Schematic Diagram of Fuel Assembly Test Loop	10
Fig. 2-2	Acrylic Resin Test Model	11
Fig. 2-3	Stainless Steel Test Model	12
Fig. 2-4	Accelerometer and Instrument Fuel Pin	13
Fig. 4-1	Vector Plots at Top of Fuel Pin in Normal Bundle	14
Fig. 4-2	Vector Plots at Top of Fuel Pin in Half Deformed Bundle	15
Fig. 4-3	Vector Plots at Top of Fuel Pin in Deformed Bundle	16
Fig. 4-4	Auto Spectra of Fuel Pin Acceleration in Normal Bundle ..	17
Fig. 4-5	Auto Spectra of Fuel Pin Acceleration in Deformed Bundle	18
Fig. 4-6	Auto Spectra of Wrapper Tube Acceleration (Deformed Bundle)	19
Fig. 4-7	Auto Spectra of Fuel Pin Acceleration in Half Deformed Bundle	20
Fig. 4-8	Auto Spectra of Wrapper Tube Acceleration (Half Deformed Bundle)	21
Fig. 4-9	Summation of RMS Displacement (5 ~ 25Hz) versus Bundle Average Flow Velocity (Normal Bundle)	22
Fig. 4-10	Summation of RMS Displacement (5 ~ 25Hz) versus Bundle Average Flow Velocity (Deformed Bundle)	23
Fig. 4-11	Summation of RMS Displacement (5 ~ 25Hz) versus Bundle Average Flow Velocity (Half Deformed Bundle)	24
Fig. 4-12	Auto Spectra of Pressure Fluctuation on Fuel Pin (Normal Bundle)	25
Fig. 4-13	Auto Spectra of Pressure Fluctuation on Fuel Pin (Deformed Bundle)	26

Fig. A-1	Thermal Bowing of Deformed Pin Versus Temperature	27
Fig. A-2	Vector Plots at Fuel Pin Top of Underformed (Normal) Bundle	28
Fig. A-3	Vector Plots at Fuel Pin Top of Deformed Bundle	29
Fig. A-4	Auto Spectra of Center Region Fuel Pin Acceleration in Underformed (Normal) Bundle	30
Fig. A-5	RMS Displacement Versus Bundle Average Flow Velocity (Underformed Bundle, Temp. of Fluid; 50°C)	31

List of Tables

Table 2-1	Specifications of "JOYO" MK-I and Test Fuel Assembly	9
-----------	--	---

目 次

1. まえがき	1
2. 試験装置	
2.1 試験ループ及び試験体	2
2.2 計測用燃料ピン	2
2.3 変形燃料ピン	2
3. 試験方法	
3.1 可視化試験	3
3.2 流力振動試験	3
4. 試験結果	
4.1 可視化試験	4
4.2 流力振動試験	4
5. まとめ	7
謝辞	8
付録	28

1. まえがき

ワイヤ型燃料集合体の燃料被覆管表面に発生するウェアマークの原因として、集合体内の燃料ピンの流力振動が考慮されている。このため燃料ピンの、流力振動特性を把握するための水流動試験が、高速炉工学室に於て実施されて来た。本報告書と同じ表題の第1報(PNC SN 941 83-47)では、「常陽」MK-I型燃料集合体形状を模擬した試験について、

- (1) 「常陽」MK-Iの定格流速(約4.7 m/sec)以下に於ては、燃料ピンに顕著な流力振動現象は発生しない。
- (2) 燃料ピンの流力振動特性に対する周辺燃料ピンの変形の効果は、変形にもとづく拘束作用による燃料ピン相互の接触荷重の増大で、振動レベルの低下に寄与するのみである。

等の結論を得ている。

上記の結果を参考にして、高速炉工学室では、燃料ピン振動の、より生じ易い体系での試験を行い、燃料ピン振動の特性に関する知見を深めることを計画した。本報告書では、この試験の結果について報告する。

第2章及び第3章では、試験装置及び試験方法について説明する。これらは、第1報とほぼ同じ内容であるため、本報告書では、第4章の理解を助ける程度の、簡単な説明にとどめる。

第4章では、可視化試験及び流力振動試験の結果について述べ、第1報の結果と比較検討を行う。

2. 試験装置

2.1 試験ループ及び試験体

Fig. 2 - 1 に燃料集合体水流動試験装置の系統図を示す。試験部は、可視化試験部及び振動特性試験部より構成されており、これらはループ側よりの振動の影響を避ける為、防振架台の上に据付けられている。

可視化用のアクリル製試験部を、Fig. 2 - 2 に示す。試験部上部の出口容器上側には、強化ガラスの可視化窓が取り付けてあり、これを通して燃料束の上端部が観察できる。

振動特性測定用試験部を Fig. 2 - 3 に示す。これは、実機と同様の SUS 316 製ラッパ管を用いて製作した試験部であり側面には、圧力変換器及び加速度計等が設置されている。

本試験では、ラッピングワイヤの外径を、「常陽」 MK - I 燃料集合体の 1.2 mm に対して、1.1 mm とする事によって集合体の Porosity / Ring を大きくした。

常陽 MK - I 燃料集合体及び、本試験集合体の仕様を Table 2 - 1 に示す。

2.2 計測用燃料ピン

加速度計付燃料ピンを Fig. 2 - 4 に示す。この燃料ピンは、本試験のために製作したもので、前回用いたピンに比べ加速度計の取り付け位置を変更し、一対 (X 及び Y 方向の一組) 加速度計を、燃料ピン上端に取り付けたものである。これは前回の試験では、燃料ピンの下端より 1,371 mm 及び 1,105 mm の位置における加速度信号の間に、差違がなかった事と、今回は燃料ピン上端の振動観察の結果と加速度信号とによって、ピンの振動特性を評価する事を考慮したためである。なお、X 及び Y 方向は、ラッパ管の 1 つの面 (Fig. 4 - 4 の A 面) に沿う方向を X 方向とし、同一断面内のそれに直角の方向を Y 方向としたものである。

圧力変換器付燃料ピンは、前回使用したものと同様である。圧力変換器の取り付け位置は、燃料ピン下端より 1,371 mm と 1,105 mm である。

2.3 変形燃料ピン

炉内では、燃料集合体の周辺ピンは、集合体中央に凸の形で熱湾曲していると考えられている。これを模擬するために、B - 20N (高膨張合金) と B - 36 N (低膨張合金) よりなるバイメタル金属を使用して、変形燃料ピンを製作した。これは、前回の試験と同様である。解析結果によれば、水温約 68°C のときの変形燃料ピンの湾曲量が、「常陽」 MK - I 炉心の 75 MW 運転時の周辺ピンの湾曲量に、ほぼ等しくなる。付録の Fig. A - 1 に、変形燃料被覆管温度に対する湾曲量実測値を示す。

3. 試験方法

3.1 可視化試験

可視化試験では、変形の無い燃料束（以後、正常燃料束と呼ぶ）、最外周に変形燃料ピンを配した変形燃料束、及び最外周の半周に変形燃料ピンを配した半変形燃料束の3種類について、ラッパ管側面から燃料束全体について、また上部可視窓から燃料束頂部の振動の様子を観察すると共に、ビデオに収録した。

試験は、燃料束平均流速（4.4～7.3 m/sec）をパラメータとして行った。

3.2 流力振動試験

ラッパ管壁及び計測ピンに取り付けた加速度計及び圧力変換器で測定を行った。ラッパ管壁の計測器については、前回の試験で用いたものを再使用した。

4. 試験結果

4.1 可視化試験

(1) 振動観察

正常燃料束の場合、流速 4.4 m/sec で、ピン上端の振動の両振巾 (peak to peak) は 0.5 mm 以下程度である。流速 5.8 m/sec で、燃料束中央部のピン上端は両振巾 1 mm 程度の振動を始める。流速 7.3 m/sec で、燃料束全体のピン上端が両振巾 1 mm 程度振動を始める。この流速では、最外周から 2 列目のピンがピン軸方向中央部に於て、振動をしている。

変形燃料束については、周辺ピンの拘束力が過大になる場合はピン振動が小さくなり観察が困難になる事を考慮して、水温を 45°C とした。流速 4.4 m/sec ではほとんどピンは振動しない。流速 5.8 m/sec で、ピン上端は両振巾 0.1 mm 程度の振動を始める。流速 7.3 m/sec ではピン上端は 0.2 mm 程度で振動する。このときピン軸方向中央部での振動は観察されない。

半変形燃料束の場合は、正常燃料束と変形燃料束の中間程度の振動が観察された。なお、ピン軸方向中央部の振動は観察されない。

(2) 変位のベクトル図

ビデオ装置によってピン上端の動きを拡大し、画面の X-Y 座標から動きを読み取り、これをベクトル図として Fig. 4-1 (正常燃料束), Fig. 4-2 (半変形燃料束) 及び, Fig. 4-3 (変形燃料束) に示す。図には、 4.4 m/sec , 5.8 m/sec 及び 7.3 m/sec の場合について、任意に決めた時刻に於るピン位置を始点 (・印) として、その後の動きを示した。図の一本のベクトル (\rightarrow) は、時間間隔 $\Delta t = 0.005 \text{ sec}$ の変位を示す。これらの図から、変形燃料束及び半変形燃料束では、周辺の変形ピンの拘束によって、ピン上端の振動変位が正常燃料束の場合より小さくなるのがわかる。また前回試験報告書の、Fig. 4-3 及び Fig. 4-4 (付録 Fig. A-2 と Fig. A-3) と比較した場合、今回の試験では、振巾が大きくなっている。Porosity / Ring の振動特性に及ぼす効果の大きい事がわかる。

更に、Fig. 4-1 の 5.8 m/sec と 7.3 m/sec 及び、Fig. 4-2 の 7.3 m/sec の燃料ピン上端の軌跡を見れば矢印が $15 \sim 25$ ケで元の位置近くにどっているので、振動の周期は約 0.1 sec と考えられる。従ってピンの変動の周波数は、約 10 Hz となる。

4.2 流力振動試験

(1) 加速度信号の周波数分析結果

Fig. 4-4 に正常燃料束の、加速度計信号の周波数分析結果を示す。Fig. 4-4 と Fig. A-4 の縦軸の記号 α 及び MAG は同じ意味をもつもので、加速度信号の自己相関関係係数のスペクトル密度の平方根を表わし、単位は $\text{g}/\sqrt{\text{Hz}}$ (g は重力加速度) である。加速度計の位置は、半

径方向は図中に示しており、軸方向は Fig. 2 - 4 の 1,105 mm の位置である。前回の試験の結果を Fig. A - 4 に示す。この両図を比較すれば、加速度信号の様子は良く似ている。第 1 報の 11 頁に記されているように 5 Hz 以下の低周波数成分は試験体の外部から伝わってくる振動と考えられる。Fig. 4 - 4 では 9 ~ 13 Hz, Fig. A - 4 では 13 ~ 16 Hz に表われている加速度のピークが燃料ピン固有の振動によるものである。今回の試験によって得られたピンの振動加速度のピークが、前回の試験にくらべて低周波数側に寄ったのは、今回用いた試験体は Porosity / Ring が大きい、即ちピン間ギャップが大きい為、燃料ピンの振動の振巾が大きくなるとともに、周期が長くなり、周波数が小さくなつたと考えられる。Fig. 4 - 4 の縦軸の値は、Fig. A - 4 の場合より 2 倍以上大きく、Porosity / Ring の値の増加によって振動が激しくなつてゐるのがわかる。

Fig. 4 - 5 に変形燃料束の、加速度計信号の周波数分析結果を示す。加速度計の位置は、半径方向は図中に示しており、軸方向は Fig. 2 - 4 の 1,105 mm の位置である。ラッパ管に取り付けた加速度計の信号の周波数分析結果を、Fig. 4 - 6 に示す。両図のカーブはほぼ一致しており、燃料ピンの振動とラッパ管の振動が一致している事を示している。これは即ち、最外周の変形ピンが燃料束全体を拘束しているため、ラッパ管を含めて変形燃料束が一体となって振動しているという事で、この結果は第 1 報の試験の結果と同じである。Fig. 4 - 5 には、Fig. 4 - 4 にみられた燃料ピンの独自の振動による、9 ~ 13 Hz の成分はみられない。

Fig. 4 - 7 に半変形燃料束の場合の、加速度計の分析結果を示す。加速度計の位置は燃料ピン上端、即ちより正確に言えば Fig. 2 - 4 に於て燃料ピン上端より 60 mm の位置である。Fig. 4 - 7 の右上に、変形燃料ピンと加速度計を取り付けた燃料ピンの半径方向の配置を示す。ラッパ管に取り付けた加速度計信号の周波数分析結果を、Fig. 4 - 8 に示す。本試験では、水温は 50°C であった。Fig. 4 - 7 と Fig. 4 - 8 を比較してみれば、流速 4.4 m/sec と 5.8 m/sec では両者のグラフはほぼ一致しているが、流速 7.3 m/sec では Fig. 4 - 7 にのみ、10 Hz より 15 Hz の間にピークがみられる。これは流速 4.4 m/sec と 5.8 m/sec では、燃料束の半周に配置した変形ピンの拘束力が強く、ラッパ管及び半変形燃料束は一体となって振動しているが、流速が 7.3 m/sec 以上になるとこの拘束力に流力振動が打ち勝つて燃料ピンが独自に振動を始める事を示している。

即ち、Fig. 4 - 7 は、「常陽」 MK - I 炉心集合体では、燃料ピンがラッパ管と異なる独自の流力振動を始めるには、冷却材流速は最低 7.3 m/sec 以上なければならない事を示している。Fig. 4 - 7 では、変形ピンが半周だけであり、水温も 50°C と変形ピン湾曲量の設計温度の 68°C より低く、加速度計の取り付け位置も最も振動し易い燃料ピン上端であるので、実際の「常陽」 MK - I 炉心集合体の場合には、冷却材流速がもっと高速にならなければ、燃料ピンは独自の振動を始め得ないであろう。実際、先に見たように、Fig. 4 - 5 では流速 7.3 m/sec の場合に於ても、10 Hz より 15 Hz の間には燃料ピンの独自の振動を示すピークは表れていな

い。

(2) 振動変位と流速の関係

Fig. 4 - 9 より 11 に、 Fig. 4 - 4, 5 - 7 と同じ測定条件の加速度信号を 2 回積分して求めた振動変位の周波数成分のうち、 燃料ピン独自の振動を示す 5 Hz より 25 Hz までの成分より計算した和と、 流速との関係を示す。

Fig. 4 - 9 より、 正常燃料束の燃料ピン中央部では、 流速 4.4 m/sec では燃料ピン独自の振動は無いが、 5.8 m/sec になれば独自の振動が始まる事がわかる。また Fig. 4 - 10 より、 変形燃料束では、 流速が 7.3 m/sec になっても、 燃料ピン中央部に於ては燃料ピン独自の振動のみられないのがわかる。

Fig. 4 - 11 からは、 半変形燃料束の場合、 燃料ピンの先端に於ては、 流速が 5.8 m/sec までは燃料ピン独自の振動は表われないが、 7.3 m/sec になれば燃料ピン独自の振動が表われて来るのがわかる。

前回の正常燃料束の試験結果である付録の Fig. A - 5 の右図では、 集合体中央部の燃料ピン No. 2 でも、 流速 6 m/sec までは独自の振動を示していない、 流速 7.5 m/sec になってやっと独自の振動を示している。この結果と上記の Fig. 4 - 9 の結果を比較すると、 今回は Porosity / Ring を大きくした為、 燃料ピン振動が大分起り易くなっているのがわかる。

(3) 圧力振動信号の周波数分析結果

Fig. 4 - 12 及び Fig. 4 - 13 に、 正常及び変形燃料束の燃料ピンに取り付けた圧力計により測定された圧力信号の周波数分析結果を示す。正常燃料束の場合には、 5.8 m/sec 以上の流速で 5 Hz ~ 30 Hz にいくつかのピークが見られるが、 変形燃料束の場合には、 5.8 m/sec 以上で全体的にレベルが高くなるものの目立ったピークは見られない。これらは、 燃料ピン独自の振動の有無によるものと考えられる。先に説明した Fig. 4 - 4 及び Fig. 4 - 5 に於る加速度計信号のピークの有無と一致している。

5. ま　と　め

燃料ピンの流力振動に及ぼす Porosity / Ring の影響を調べる為、「常陽」 MK - I 体系 (Porosity / Ring = 0.175 mm) より Porosity / Ring の大きな体系 (Porosity / Ring = 0.35 mm) の試験部を用いて、可視化試験及び流力振動試験を行った。試験部は、正常燃料束、半変形燃料束、変形燃料束の 3 種類である。

燃料ピンの独自の振動の有無を、両振巾 (Peak to Peak) で 0.3 mm, root mean square で 50 μm 以上で決定するとして、各試験条件での燃料ピン独自振動の有無を ○ × で表わせば次のようになる。

	正　　常		半変形 (45~50°C)		変　形 (45°C)	
	上　端	中　央	上　端	中　央	上　端	中　央
4.4 m/sec	×	×	×	-	×	×
5.8 m/sec	○	○	×	-	×	×
7.3 m/sec	○	○	○	-	×	×

本試験結果と前回 (Porosity / Ring = 0.175 mm) の試験結果を比較すると、今回の試験では正常燃料束の燃料ピン中央でも流連 5.8 m/sec 以上で燃料ピン独自の振動が観測されているが、前回の試験では観測されておらず、Porosity / Ring の振動に及ぼす影響の大きい事がわかる。

変形燃料束では、今回は温度を 45°C としてバイメタル製変形ピンの湾曲量を小さくしたのにかかわらず、変形ピンの拘束が強く、前回の試験同様燃料ピン独自の振動は観測されなかった。

変形ピンの拘束をやぶって、燃料ピン独自の振動をさせる為には、変形ピンの配置を半周に減らした半変形燃料束に於ても、流速を約 7 m/sec 以上にする必要がある。

以上の結果より、「常陽」 MK - I 燃料集合体内では、定格流速が約 4.7 m/sec であり、また周辺ピンの熱湾曲による拘束力が存在する事を考慮すると、燃料ピンの流力振動によりウェアマークが発生したとは考えにくい。

謝

辞

変形燃料束流力振動試験の計画及び実施にあたり、有益な助言を頂いた、高速炉安全工学部 三本保秀部長、FBR 本部安全 ブロック 服部直三高速炉工学グループリーダー、実験の遂行に協力された常陽産業の方々に謝意を表します。

**Table 2-1 Specifications of "JOYO" MK-I
and Test Fuel Assembly**

Item	Assembly	"JOYO" MK-I	Present Test
Length of Fuel Assembly	-	2,970mm	do.
Length of Fuel Pin	-	1,910mm	do.
Number of Fuel Pins	-	91	do.
Fuel Pin Arrangement Pitch	P	7.6mm	do.
Diameter of Fuel Pin	D	6.3mm	do.
Diameter of Spacer Wire	-	1.2mm	1.1mm
Spiral Wire Pitch	H	266mm	do.
P/D Ratio	-	1.206	do.
H/D Ratio	-	42.2	do.
Inner Flat to Flat Distance of Wrapper Tube	-	74.7mm	do.
Flow Area of Bundle	-	$1.888 \times 10^{-3} \text{m}^2$	$1.905 \times 10^{-3} \text{m}^2$
Hydraulic Diameter of Bundle	-	$3.146 \times 10^{-3} \text{m}$	$3.213 \times 10^{-3} \text{m}$
Bundle Clearance	-	1.048mm	2.11mm
Porosity/Ring	-	0.175mm	0.35mm
Mean Flow Velocity in Bundle	-	4.7m/sec	4.4 ~ 7.3m/sec

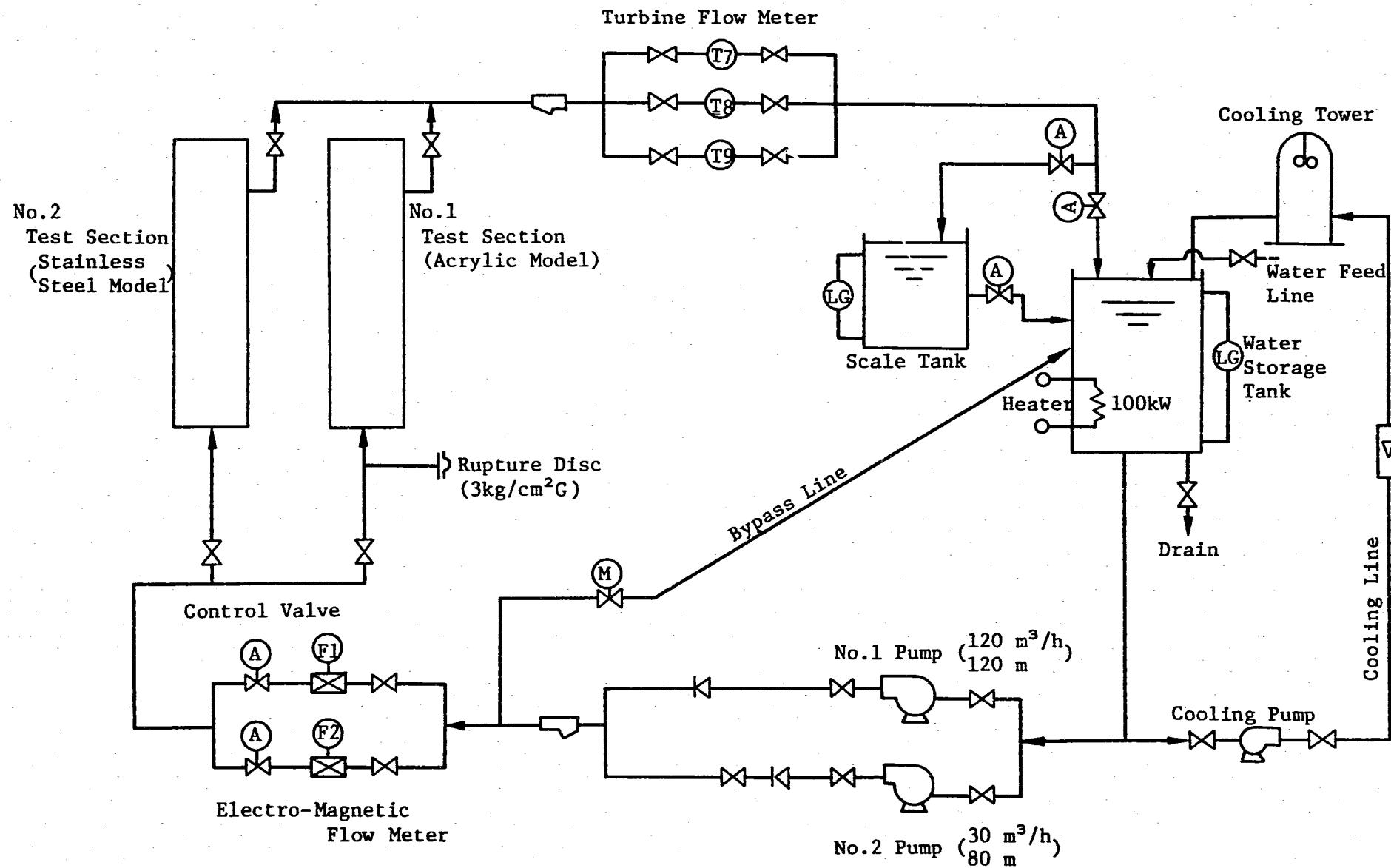
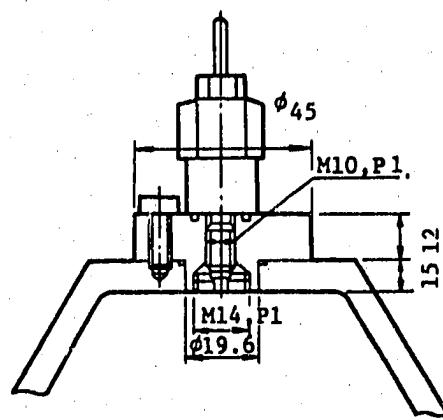
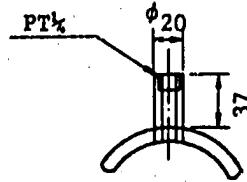


Fig. 2-1 Schematic Diagram of the Fuel Assembly Test Loop.



Details of A

(Vortex Current Displacement)
Meter Installation



Details of B

(Resistance Thermometer)
Installation Nozzle

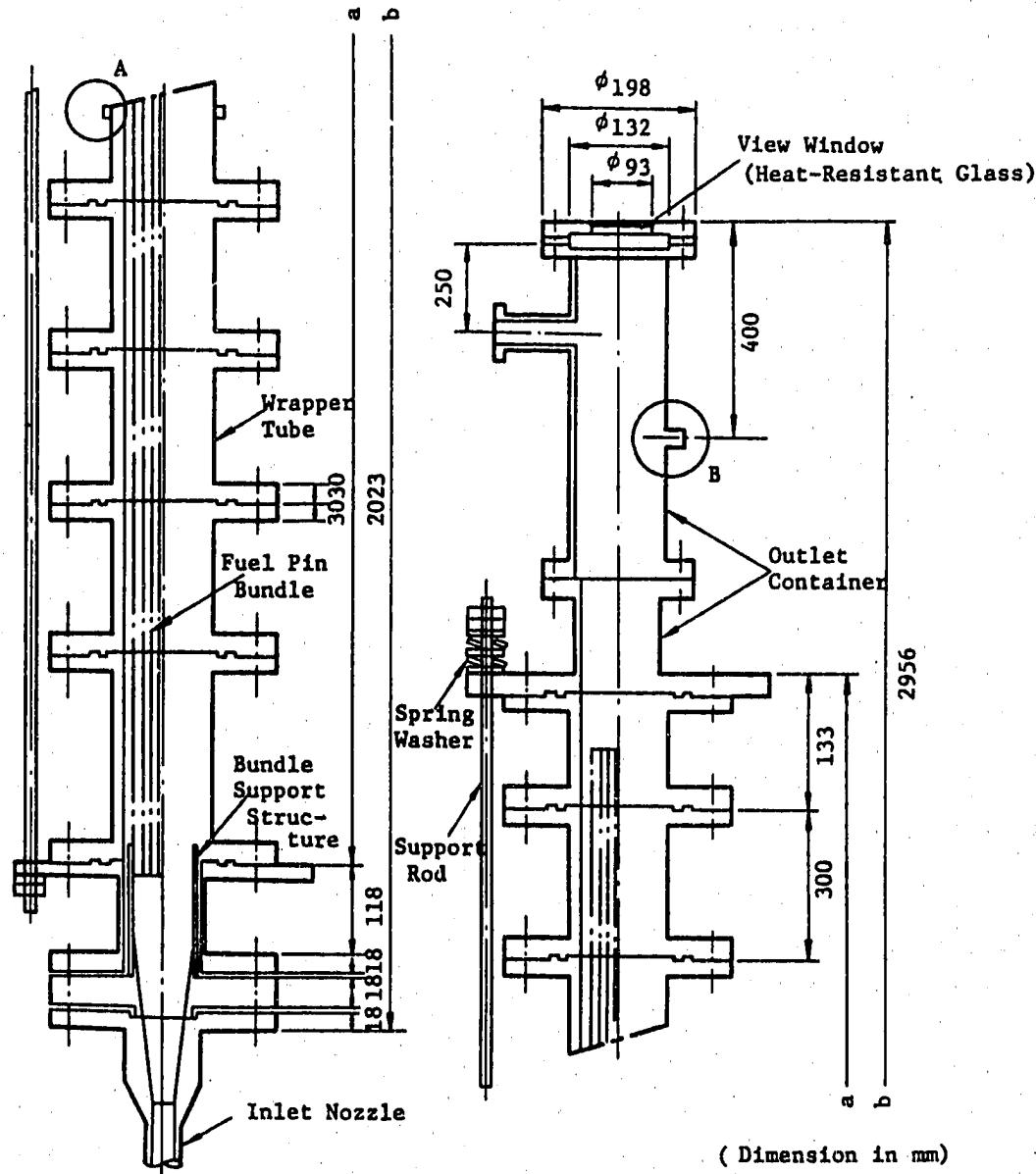


Fig. 2-2 Acrylic Resin Test Model.

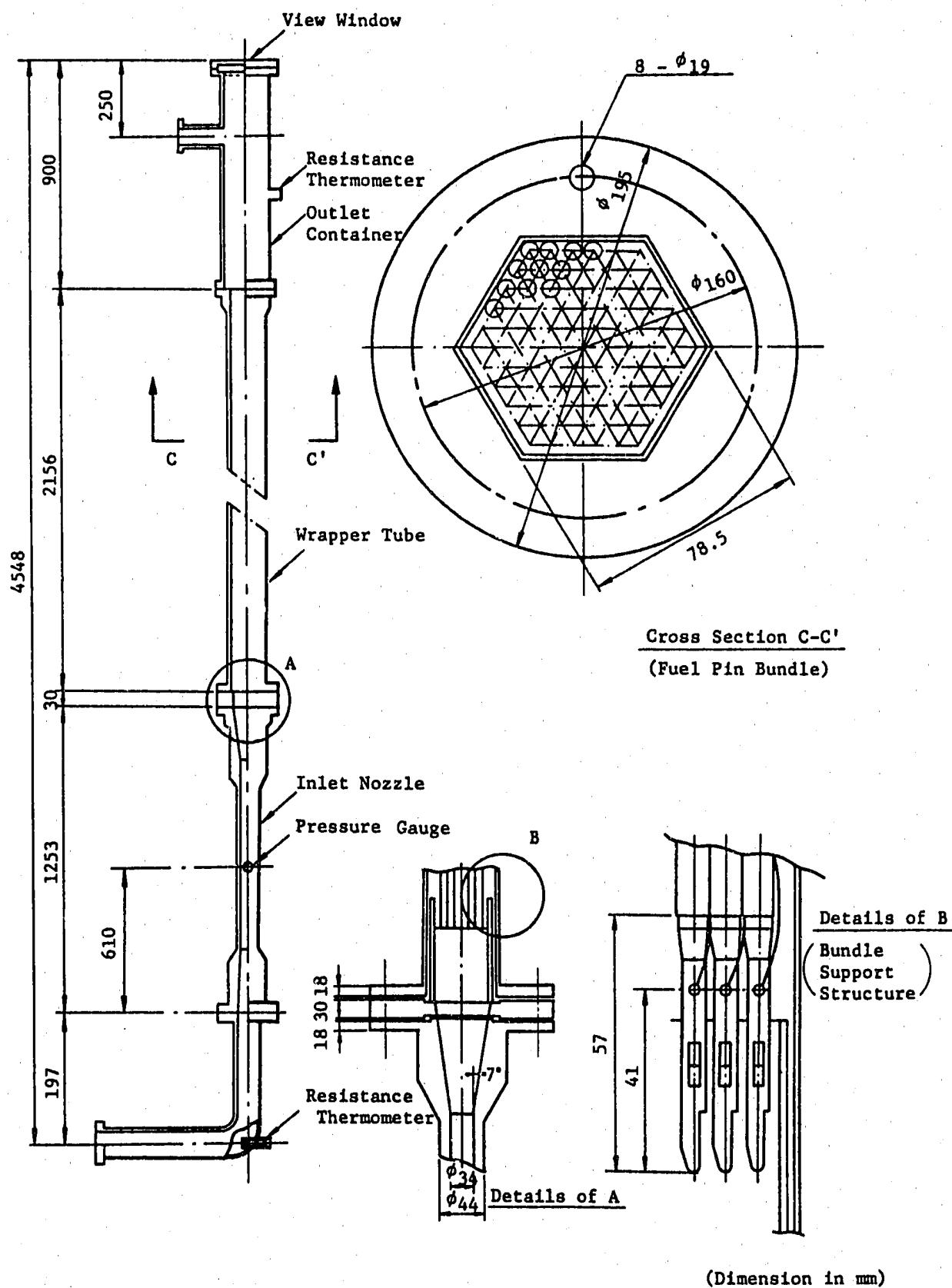


Fig. 2-3 · Stainless Steel Test Model.

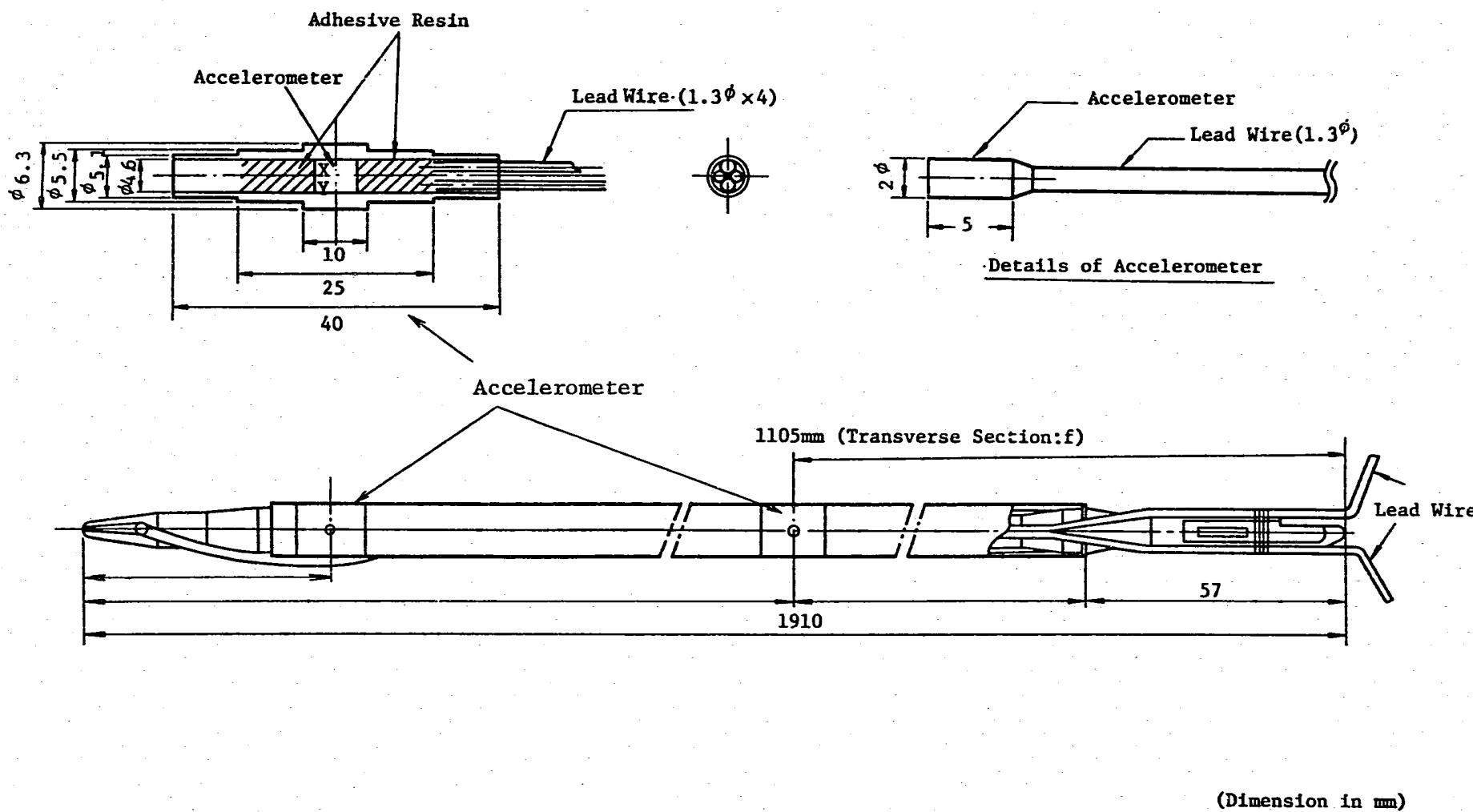
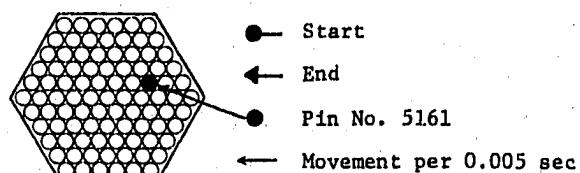
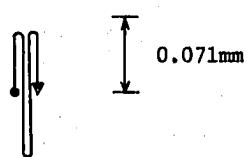


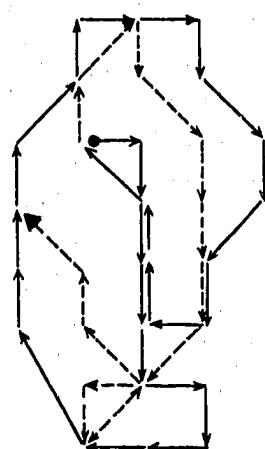
Fig. 2-4 Accelerometer and Instrument Fuel Pin.

4.4m/sec
(bundle
average
flow
velocity)

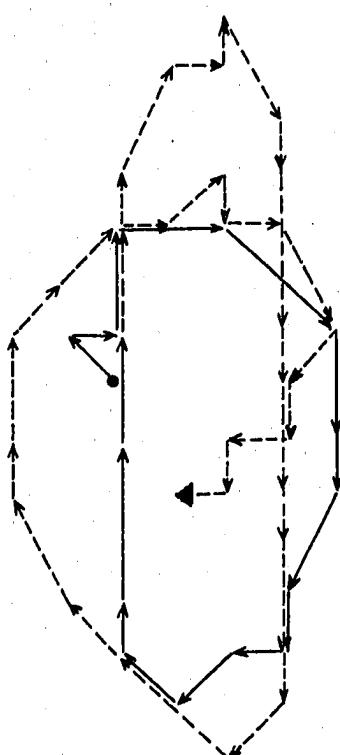
48°C Pin No. 5161
(water temperature)



5.8m/sec 48°C Pin No. 5161

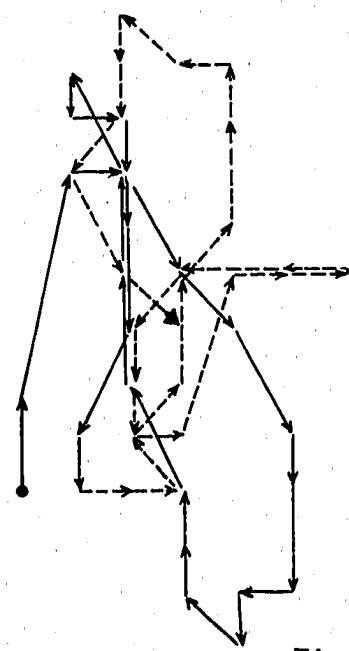


0.119 mm
0.109 mm

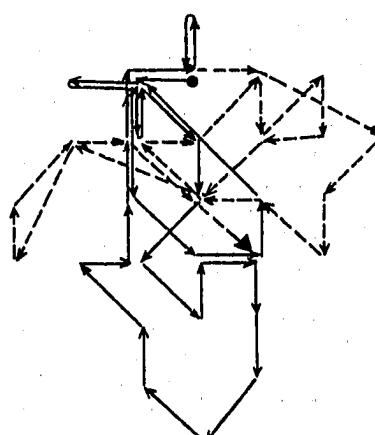


0.111 mm
0.082 mm

7.3m/sec 48°C Pin No. 5161



0.084 mm
0.062 mm



0.117 mm
0.109 mm

Fig. 4-1 Vector Plots at Top of Fuel Pin in Normal Bundle

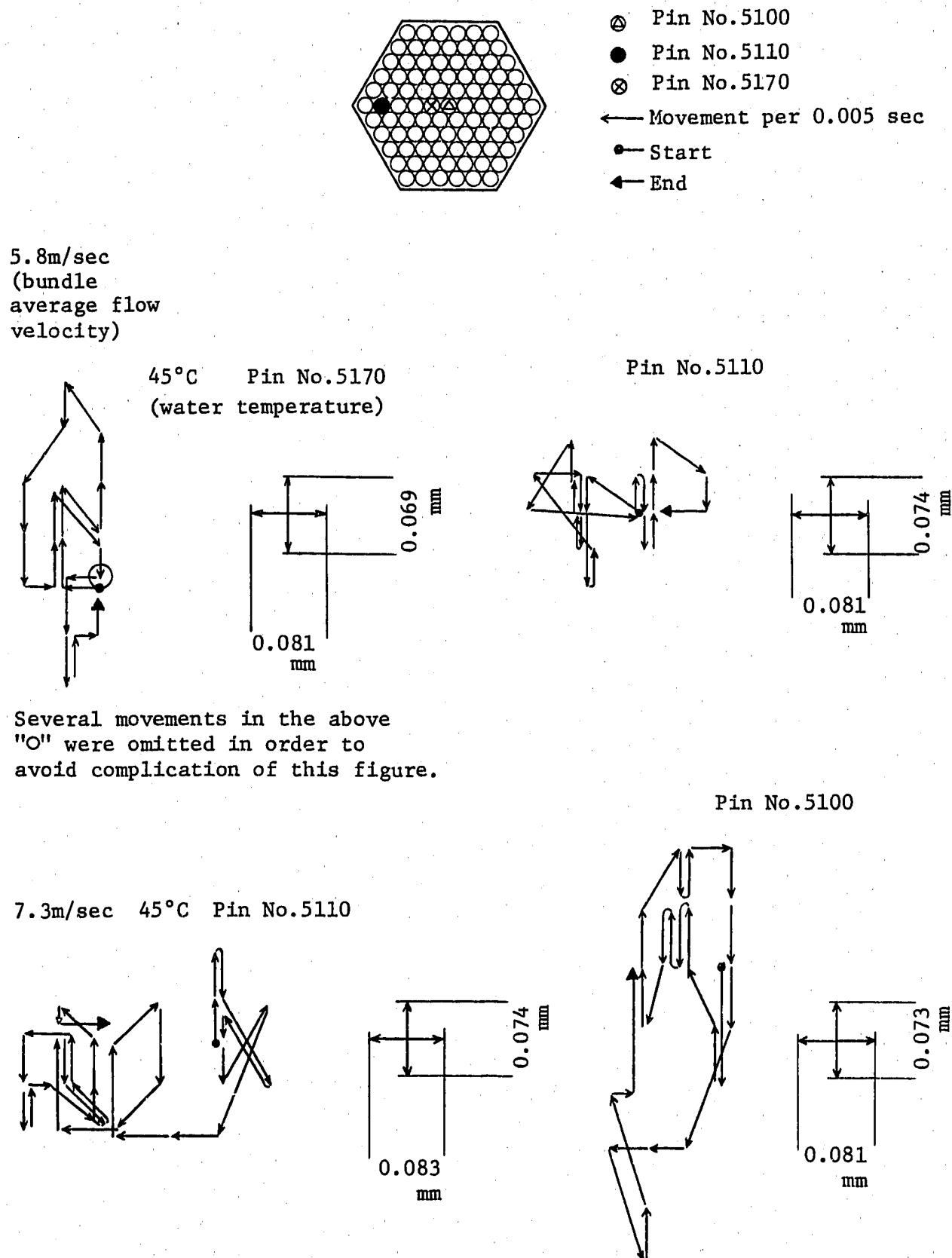
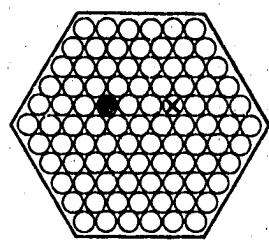


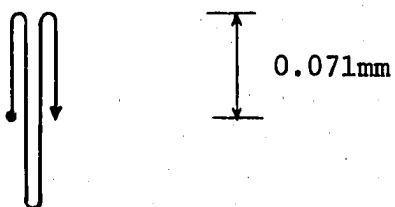
Fig. 4-2 Vector Plots at Top of Fuel Pin in Half Deformed Bundle

4.4m/sec
(bundle average flow velocity)

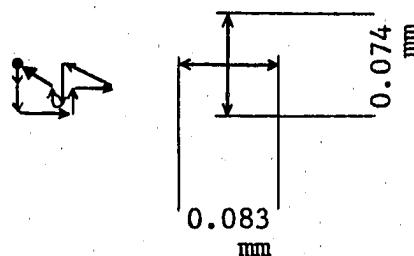
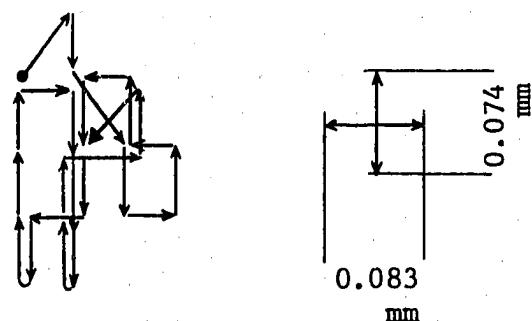
45°C Pin No.5134
(water temperature)



- Pin No.5134
- ⊗ Pin No.5114
- ← Movement per 0.005 sec
- Start
- ← End



5.8m/sec 45°C Pin No.5114



7.3m/sec 45°C Pin No.5114

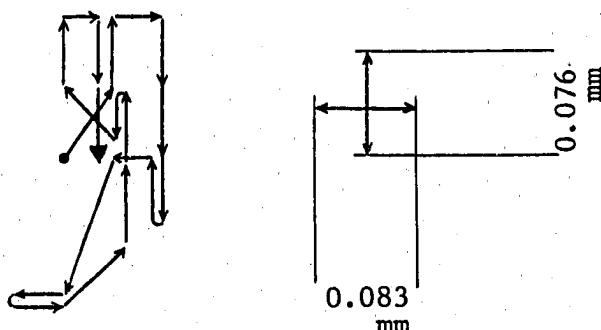
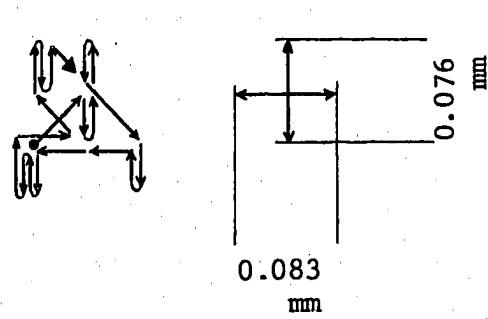
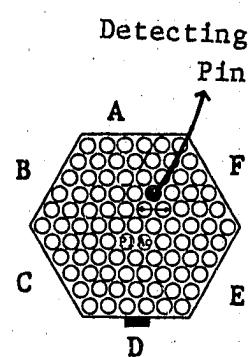


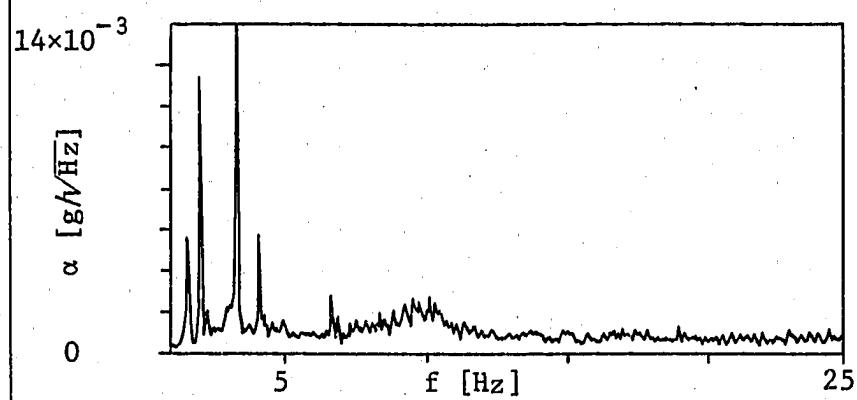
Fig. 4-3. Vector Plots at Top of Fuel Pin in Deformed Bundle

X - Direction (parallel with A-face)

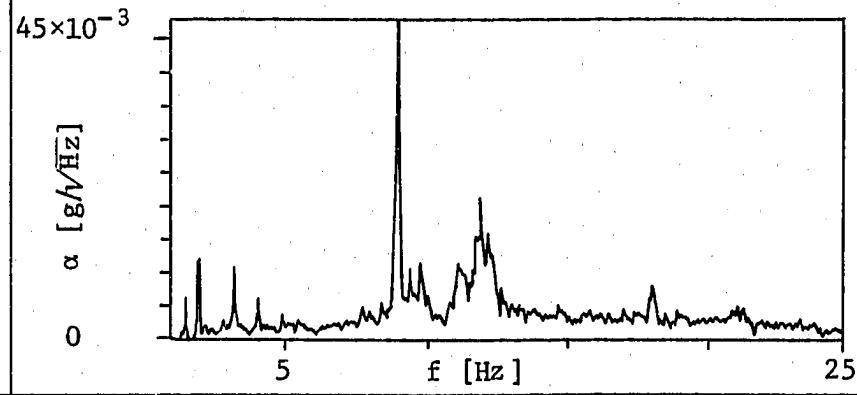
Temperature of Fluid : 45°C

Position of Detector : Transverse Section
f in Fig. 2-4

4.4m/sec
(bundle
average
flow velocity)



5.8m/sec



7.3m/sec

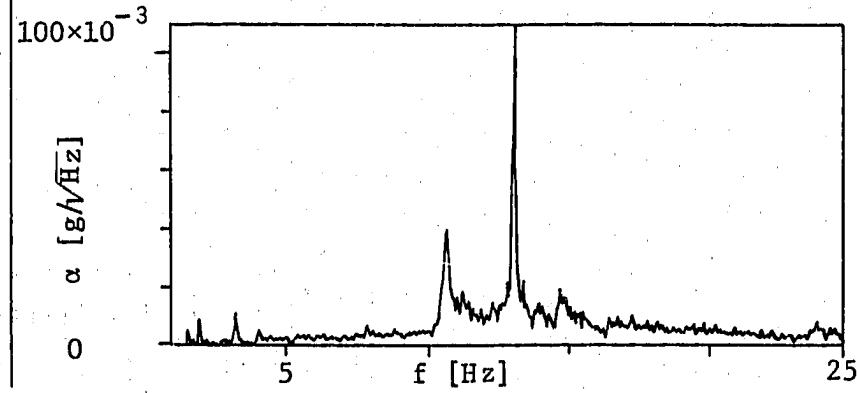
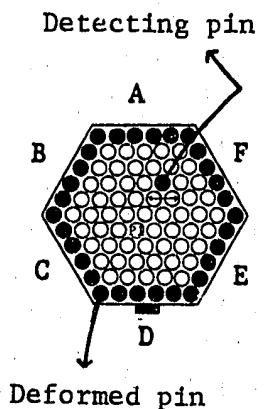
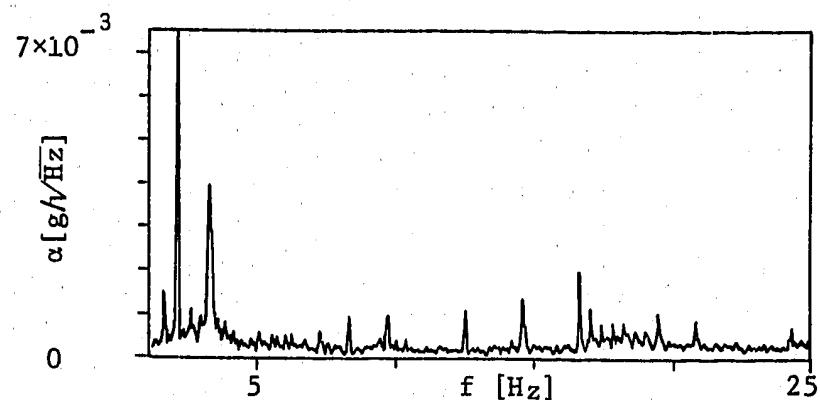


Fig. 4-4 Auto Spectra of Fuel Pin Acceleration in Normal Bundle

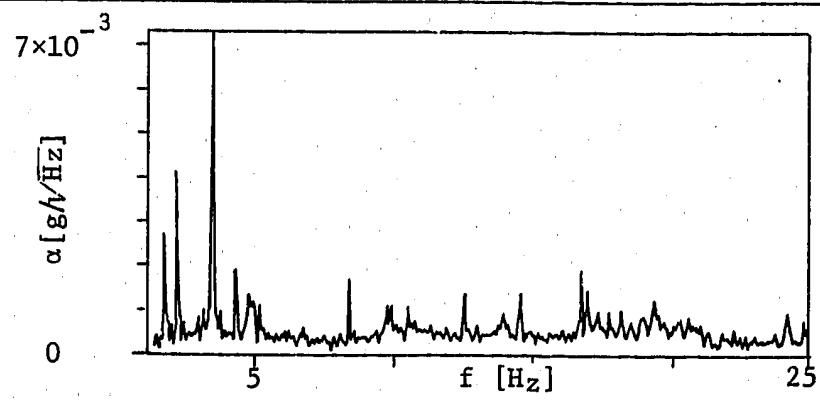
X-Direction (parallel with A-face),
 Temperature of Fluid : 45°C
 Position of Detector : Transverse Section f
 in Fig. 2-4



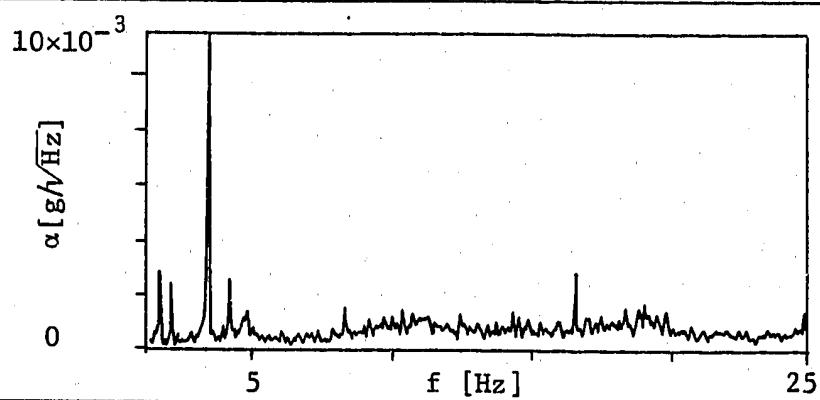
0m/sec
 (bundle
 average
 flow
 velocity)



4.4m/sec



5.8m/sec



7.3m/sec

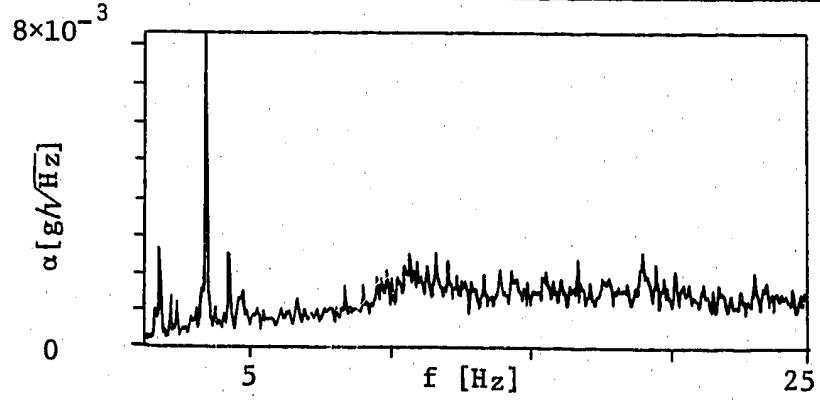


Fig. 4-5 Auto Spectra of Fuel Pin Acceleration in Deformed Bundle

X-Direction (parallel with A-face)

Temperature of Fluid : 45°C

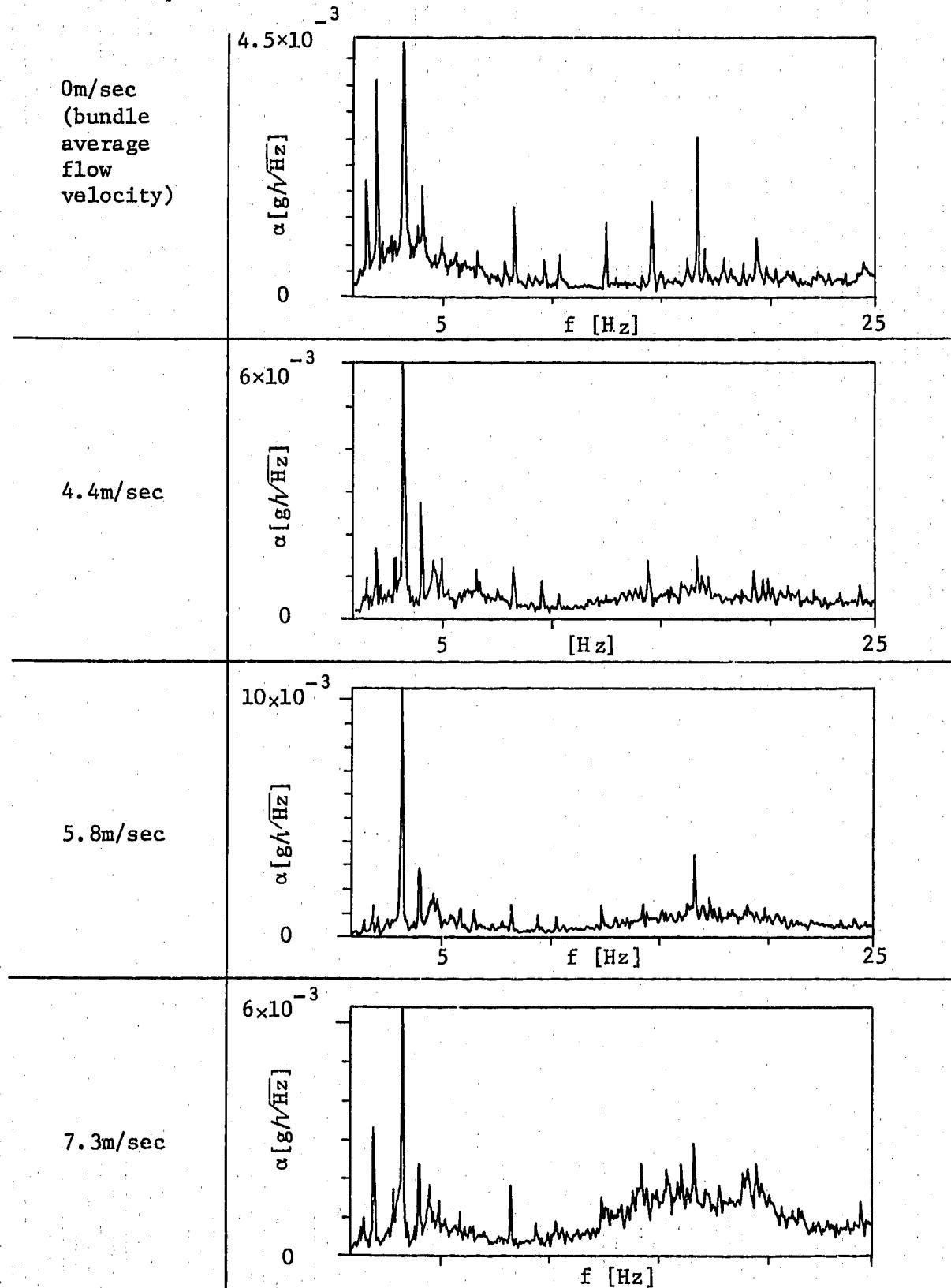


Fig. 4-6 Auto Spectra of Wrapper Tube Acceleration (Deformed Bundle)

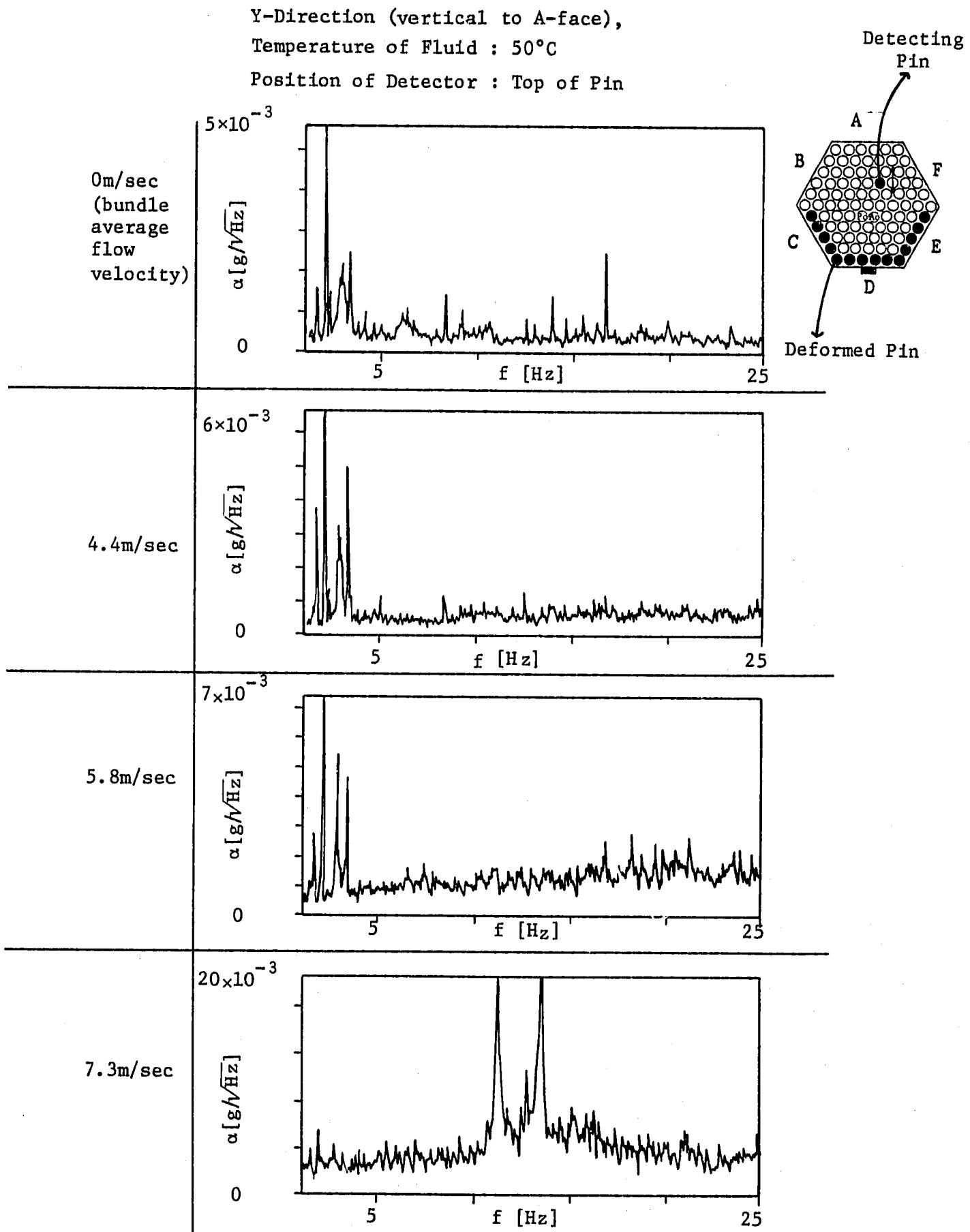


Fig. 4-7 Auto Spectra of Fuel Pin Acceleration in Half Deformed Bundle

Y-Direction (vertical to A-face),
 Temperature of Fluid : 50°C

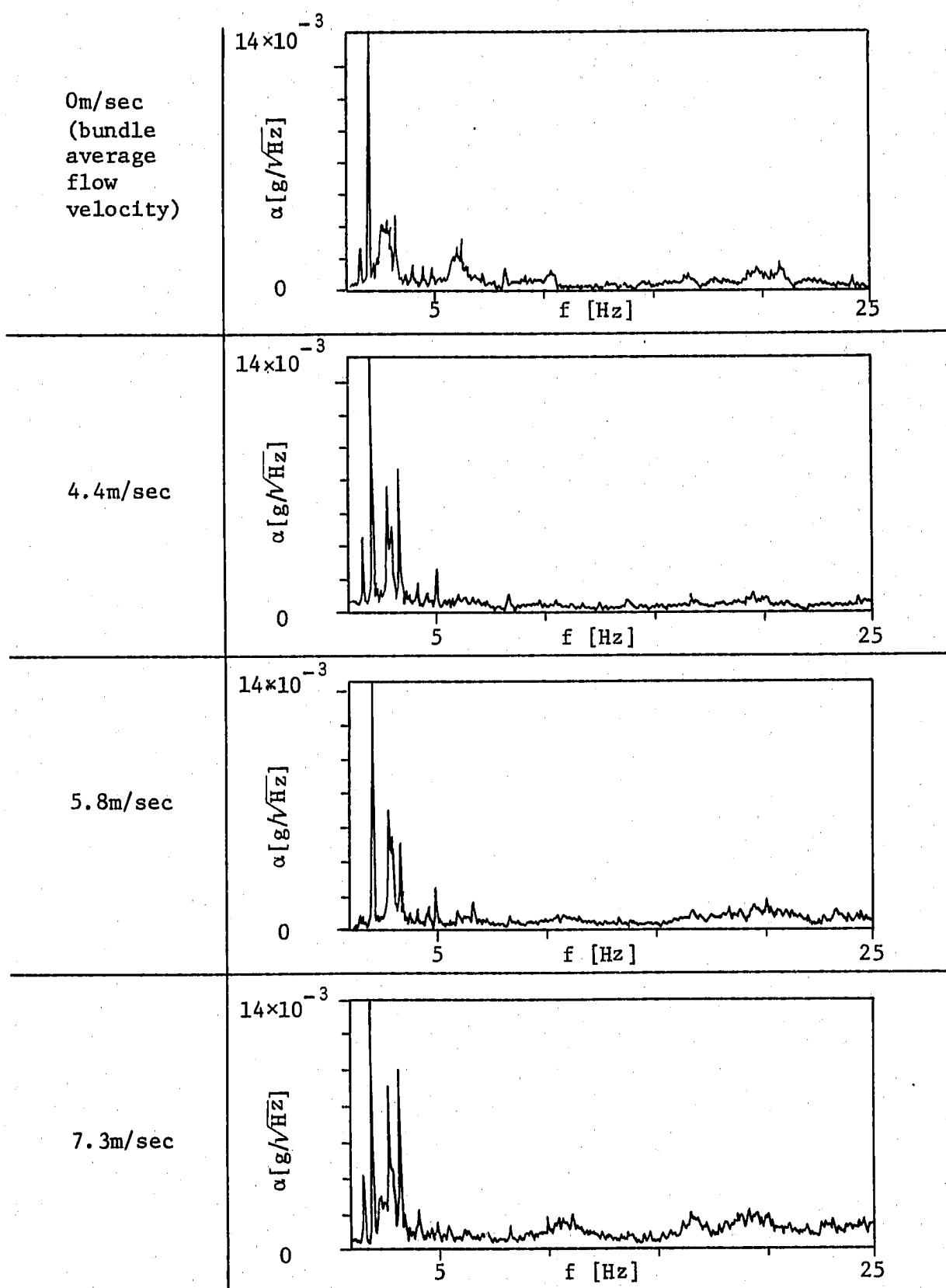


Fig. 4-8 Auto Spectra of Wrapper Tube Acceleration (Half Deformed Bundle)

X-Direction (parallel with A-face),
Temperature of Fluid : 45°C
Position of Detector : Transverse Section f in Fig. 2-4

Displacement

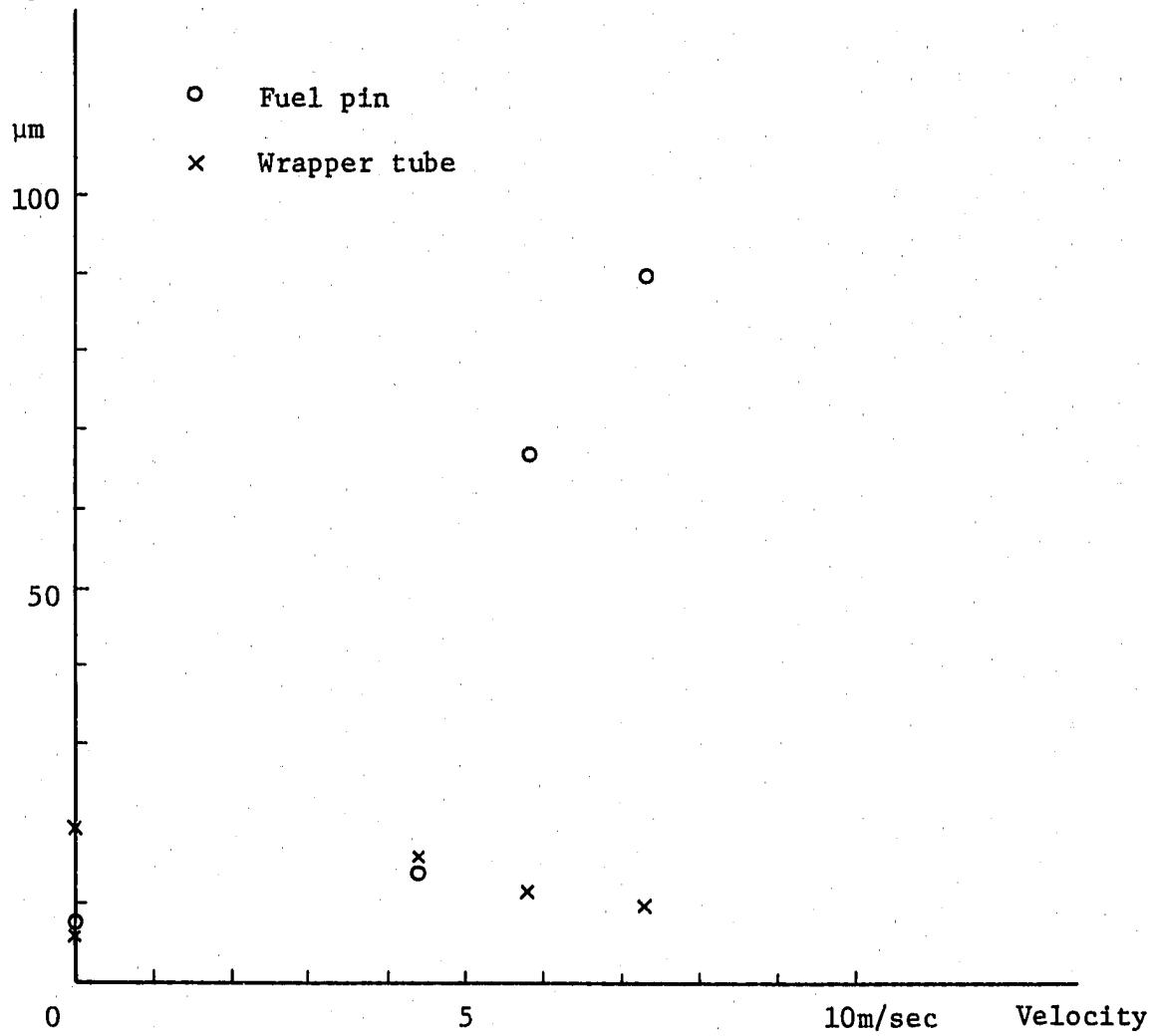


Fig. 4-9 Summation of RMS Displacement (5~25Hz) versus Bundle Average Flow Velocity (Normal Bundle)

X-Direction (parallel with A-face)

Temperature of Fluid : 45°C

Position of Detector : Transverse Section f in Fig. 2-4

Displacement

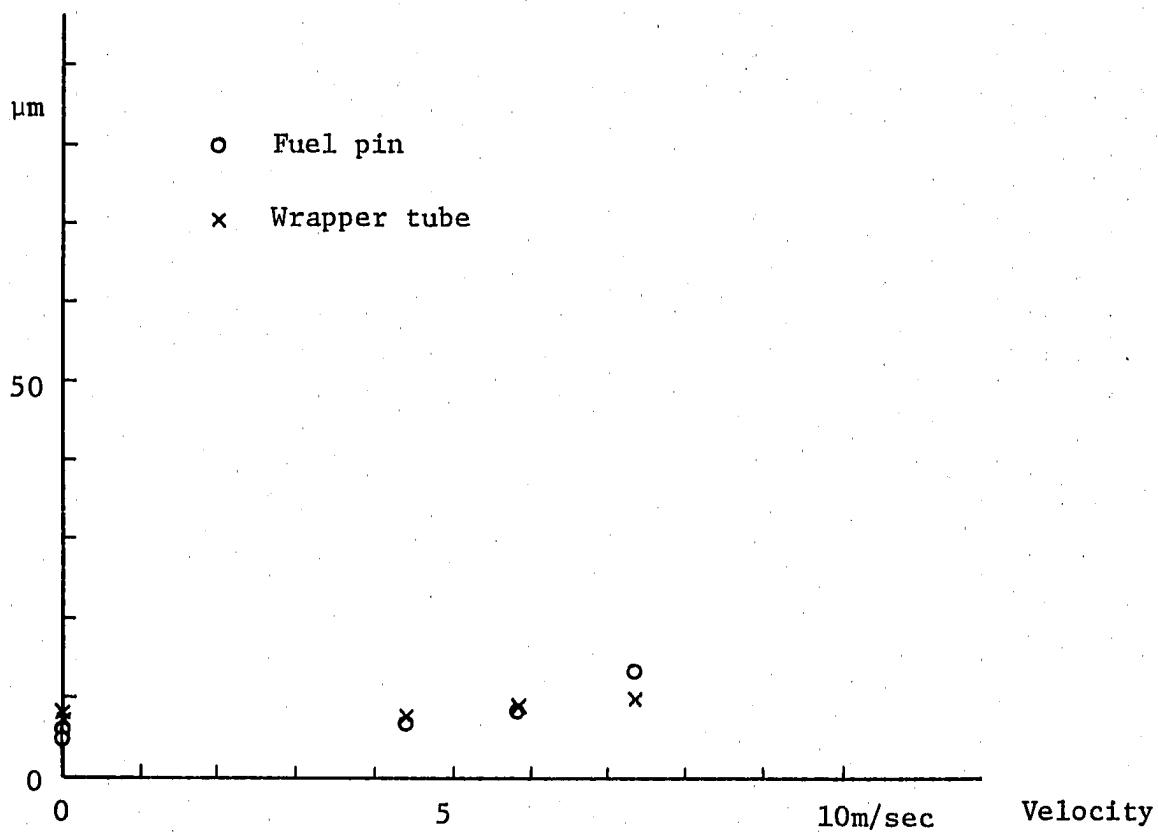


Fig. 4-10 Summation of RMS Displacement (5~25Hz) versus
Bundle Average Flow Velocity (Deformed Bundle)

Y-Direction (vertical to A-face),

Temperature of Fluid : 50°C

Position of Detector : Top of Pin

Displacement

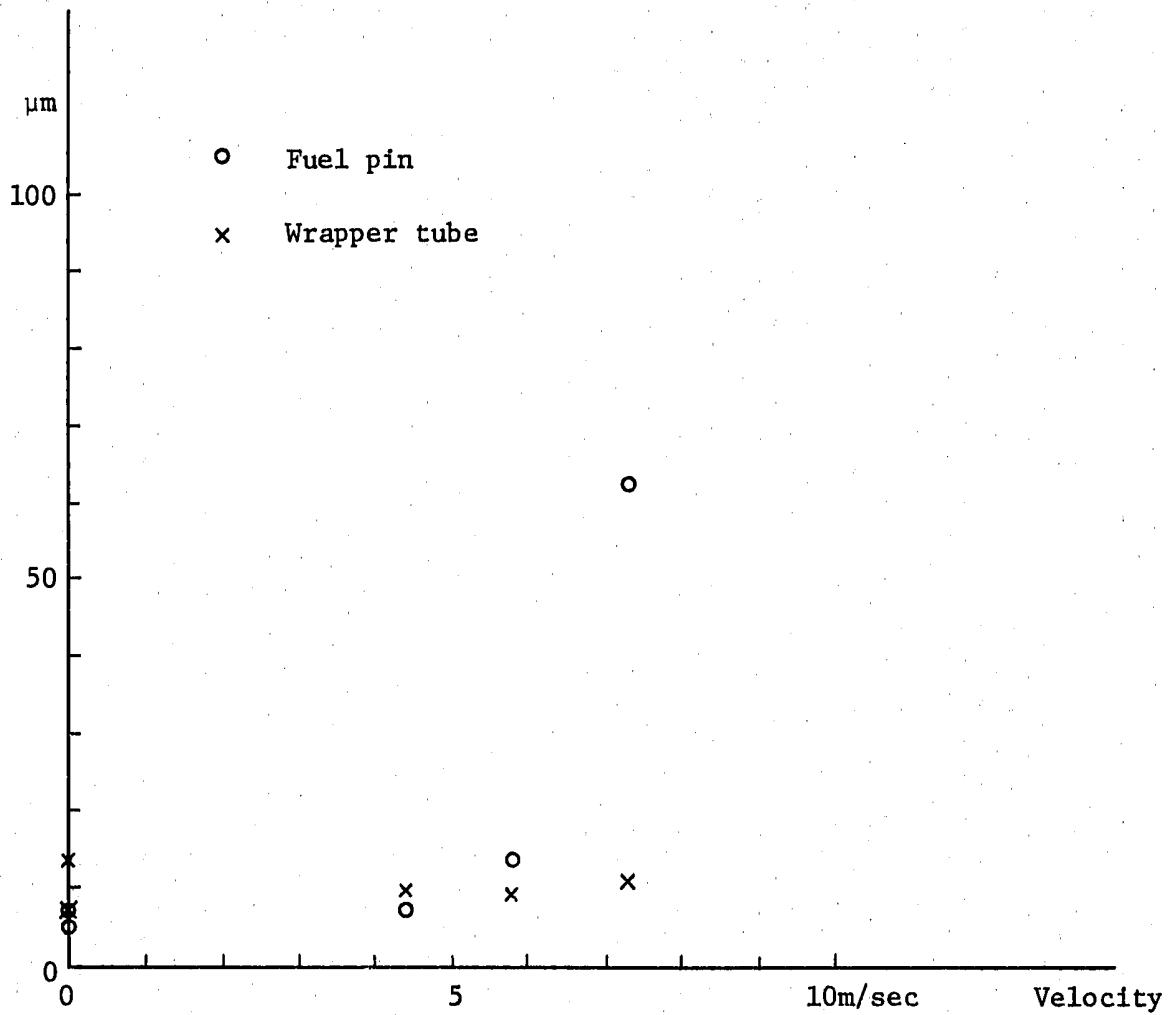


Fig. 4-11 Summation of RMS Displacement (5~25Hz) versus Bundle Average Flow Velocity (Half Deformed Bundle)

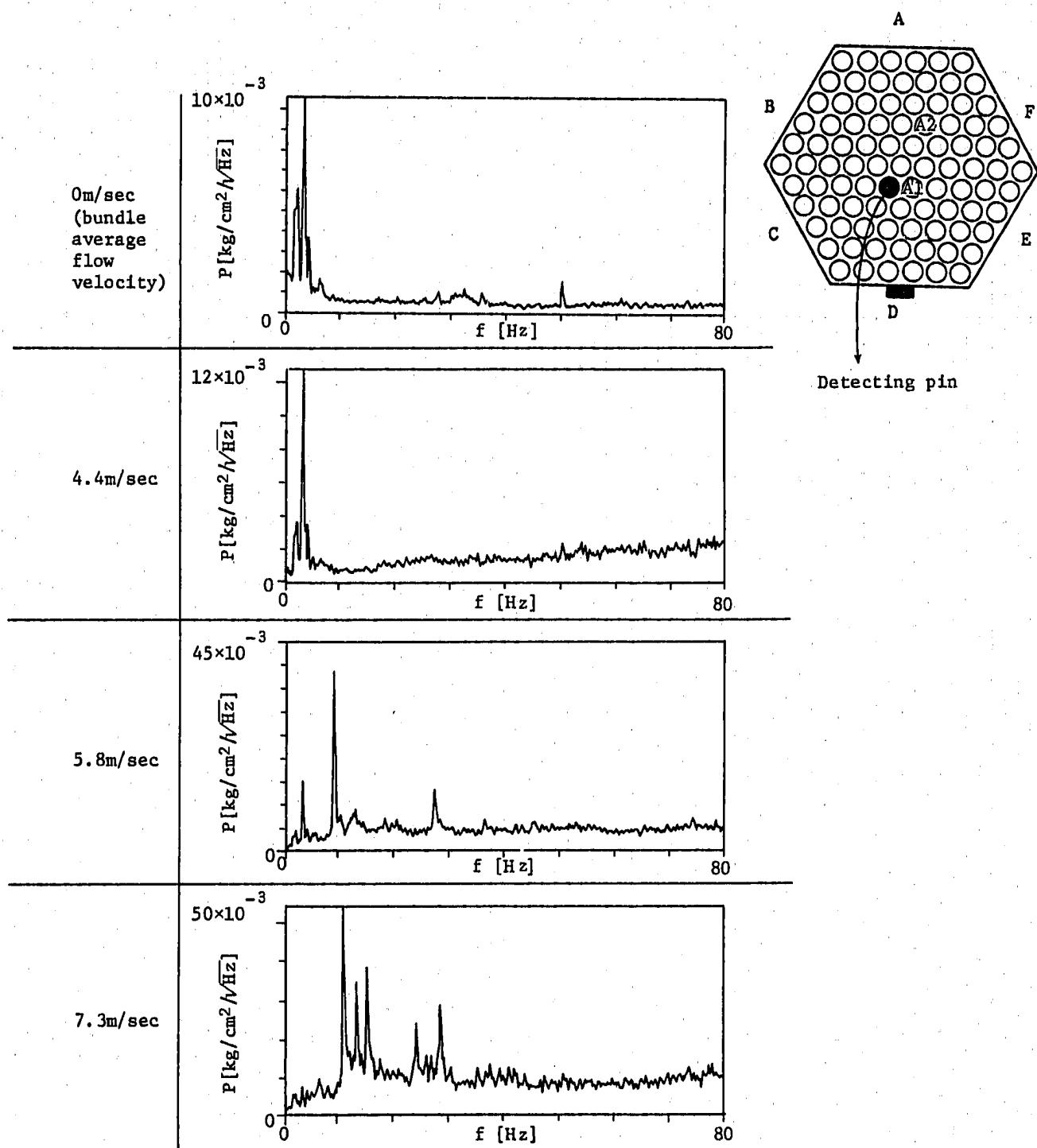


Fig. 4-12 Auto Spectra of Pressure Fluctuation on Fuel Pin (Normal Bundle)

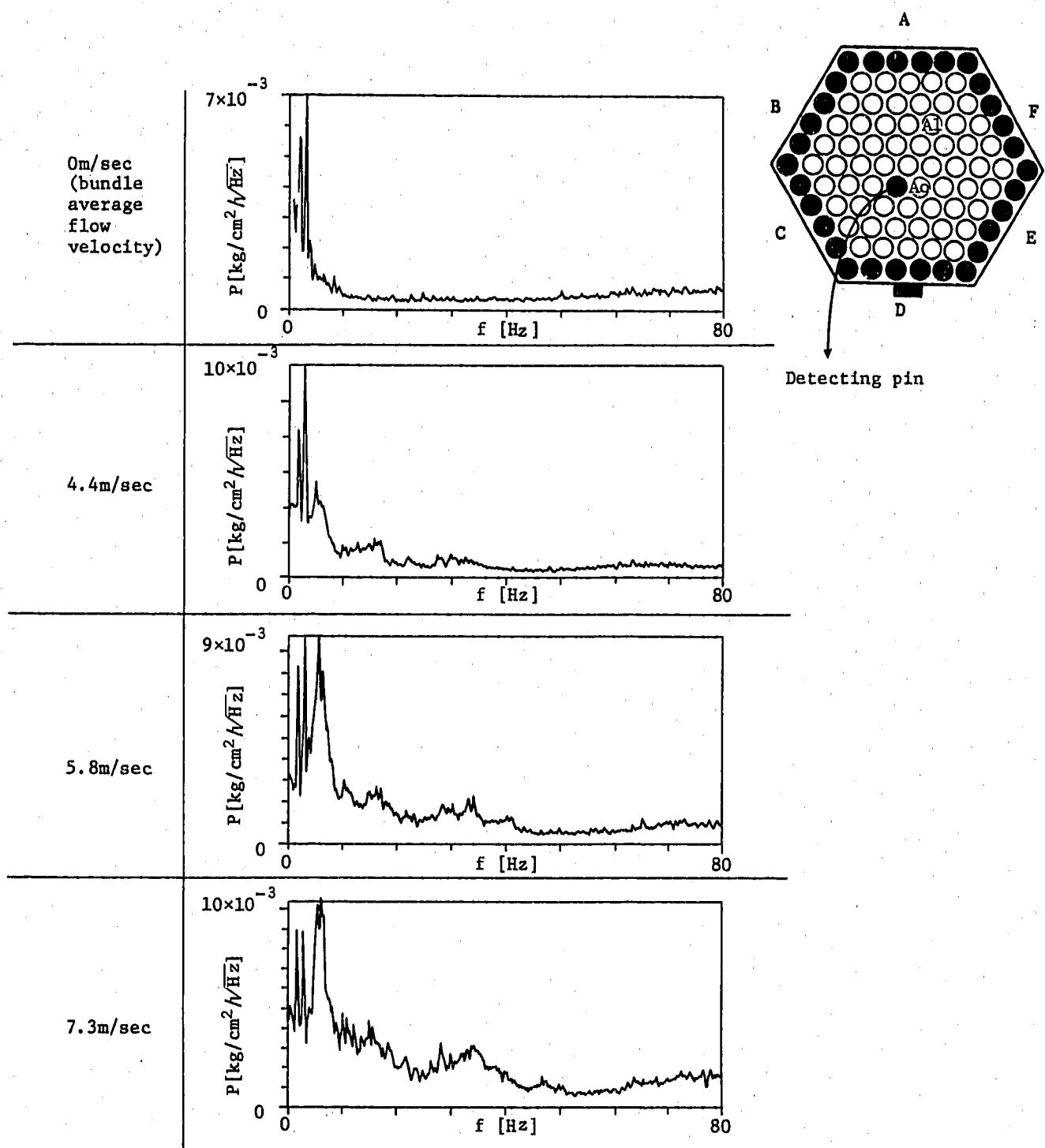


Fig. 4-13 Auto Spectra of Pressure Fluctuation on Fuel Pin (Deformed Bundle)

付

録

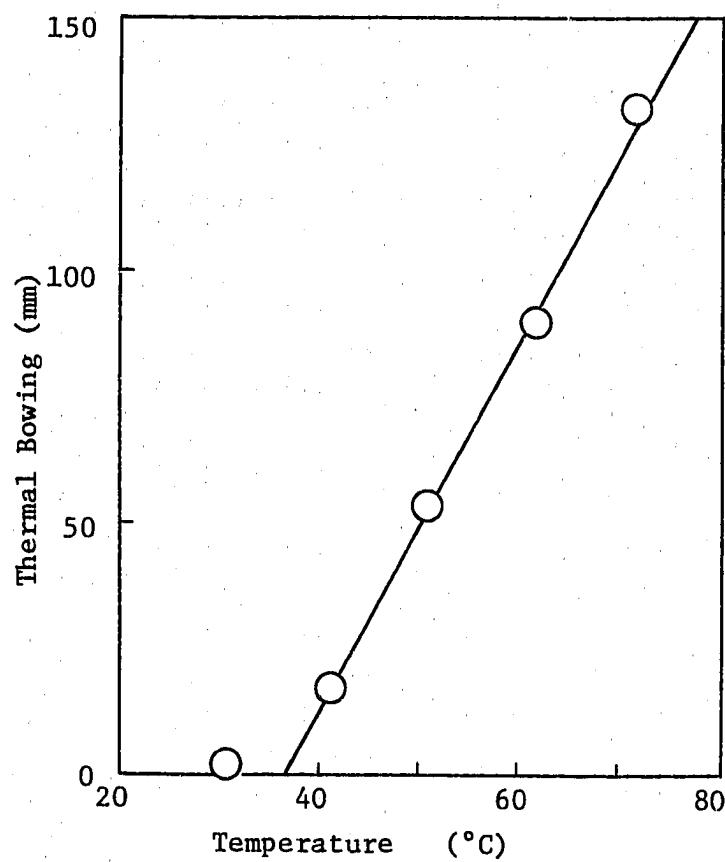
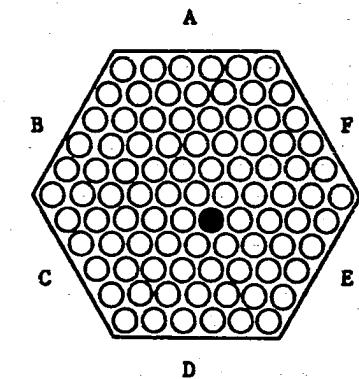
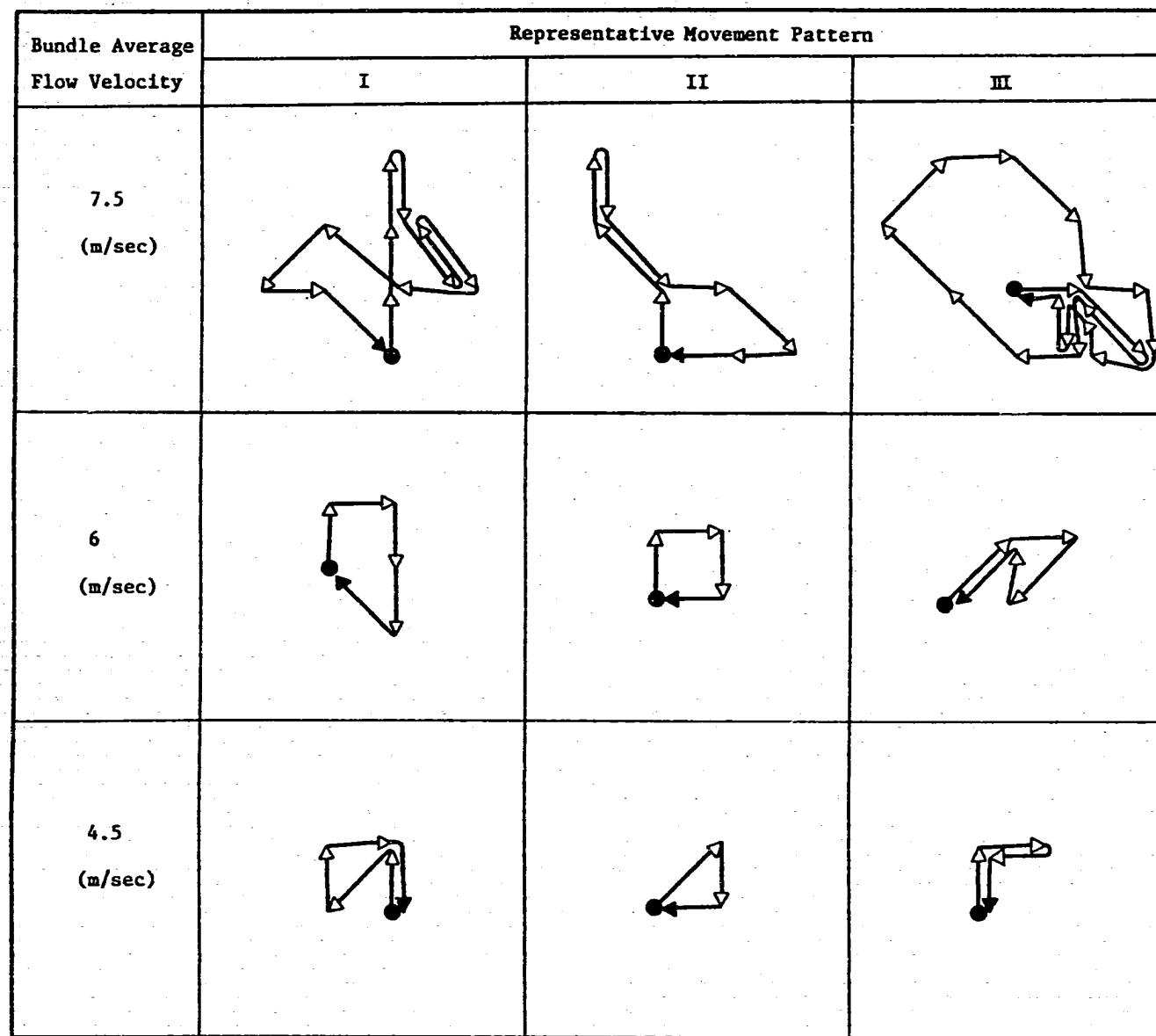
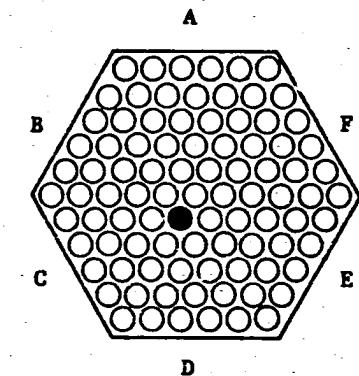
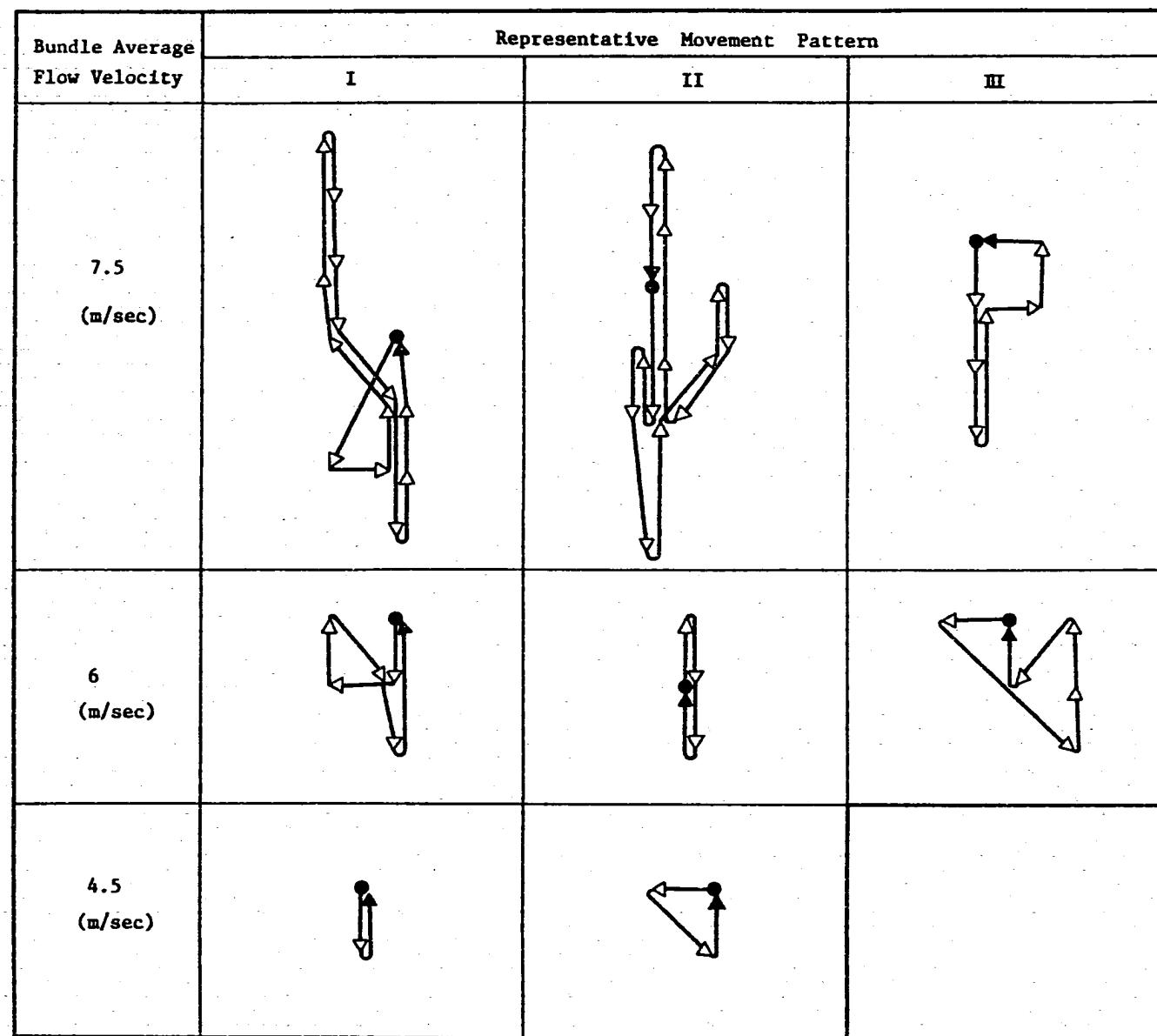


Fig. A-1 Thermal Bowing of Deformed Pin versus Temperature

Location of Observed Pin

- --- Start Point
- ▲ --- End Point
- --- 0.12 mm
- Δt --- 0.05 sec

Fig. A-2 Vector Plots at the Fuel Pin Top of Normal Bundle



Location of Observed Pin

- --- Start Point
- ▲ --- End Point
- --- 0.09 mm
- Δ --- 0.05 sec

Fig. A-3 Vector Plots at the Fuel Pin Top of Deformed Bundle

[Mea. Direction : X , Transverse Section : f]
 Temp. of Fluid : 50°C

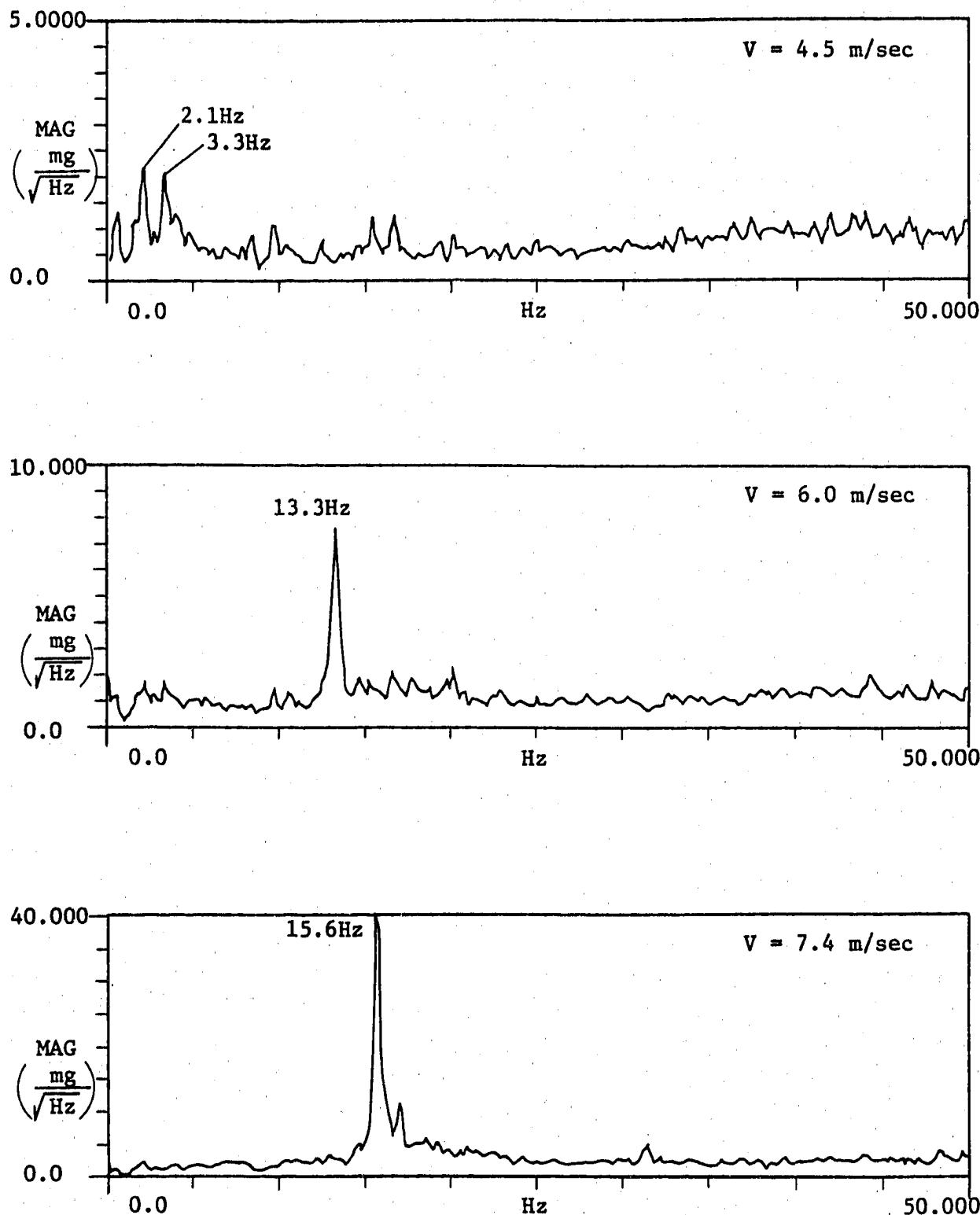


Fig. A-4 Auto Spectra of Center Region Fuel Pin Acceleration in Normal Bundle.

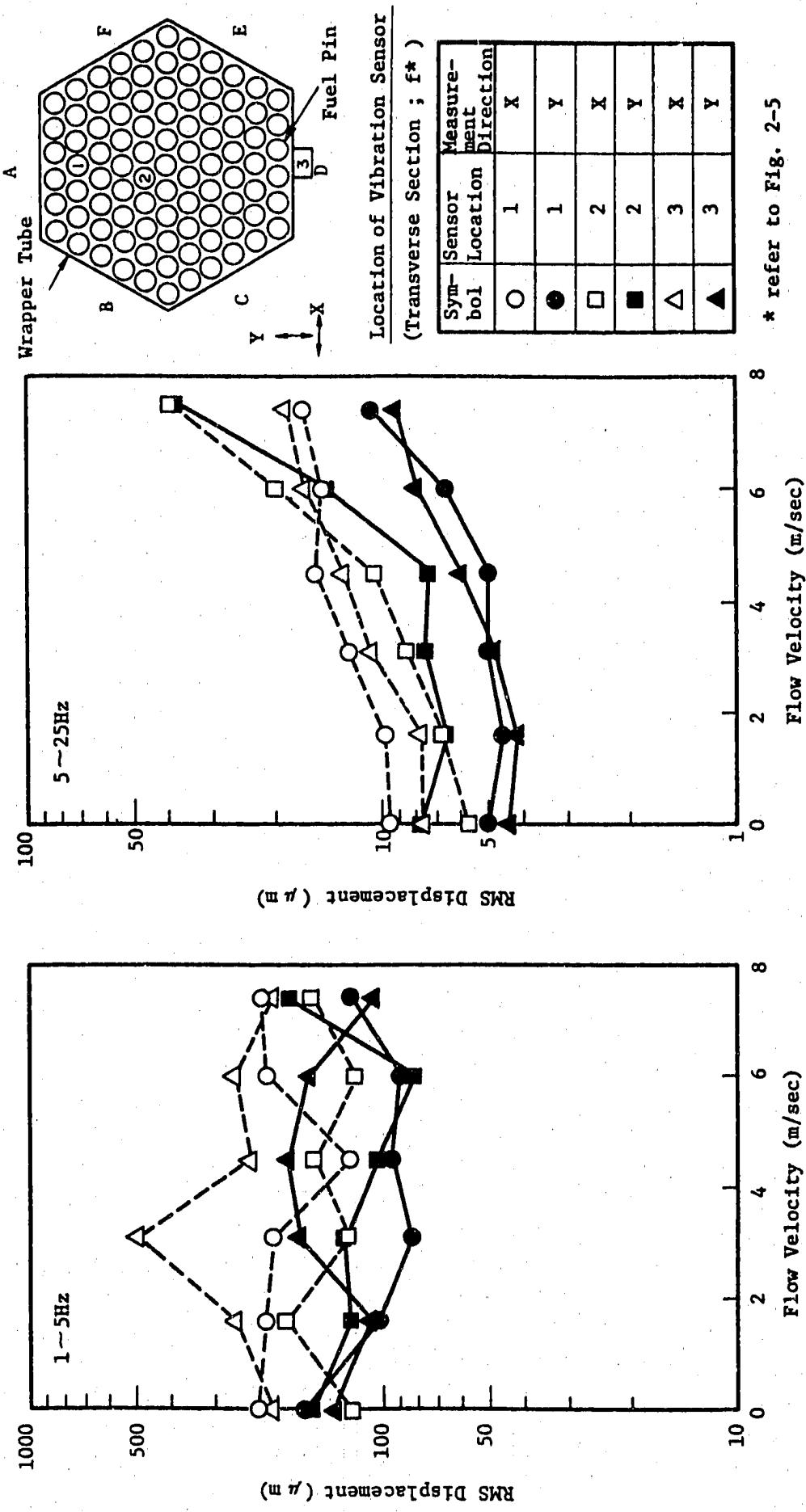


Fig. A-5 RMS Displacement versus Bundle Average Flow Velocity
(Normal Bundle, Temp. of Fluid ; 50°C).