

# 「常陽」特殊燃料集合体水流動試験(V)

A型集合体内の流量配分

1983年3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」特殊燃料集合体水流動試験(V) —A型集合体内の流量配分—

大坪 章<sup>\*</sup>, 金沢 光雄<sup>\*</sup>  
阿部 定好<sup>\*</sup>, 井口 達郎<sup>\*</sup>

### 要 旨

「常陽」A型特殊燃料集合体には、「もんじゅ」或は「常陽」MK-II試験燃料照射ダクトが組込まれる。本試験では、これらの各要素単体状態及び組込み状態で、損失係数実験及び電解液注入実験を行い、集合体内流量配分を評価する実験データを得た。本試験から得られた主な結論は次の通りである。

- (1) 「常陽」MK-II試験燃料照射ダクトを組込む場合には、照射ダクト周囲に広いギャップが出来るので、ギャップをせばめ漏洩流を減少させるように設計変更する必要がある。
- (2) 「もんじゅ」試験燃料照射ダクトを組込む場合には、本試験で得られた損失係数を用いて、照射ダクトの上流部に取り付けべきオリフィス径を決めればよい。
- (3) 本試験は、断面積の大きいドライバー燃料集合体について測定された損失係数を用いて、断面積の小さい照射ダクトへの流量配分量を求めるといったような、精度をあげにくい試験で、実験誤差は必ずしも小さくない。従って、実際の炉内での最初の試験ではTED (Temperature Difference) 温度計等で、本燃料集合体の熱流力特性を十分に把握するように努めるのが望ましい。

---

\* 大洗工学センター, 安全工学部, 高速炉工学室

Hydraulic Characteristics of "Joyo" Irradiation  
Test Assembly (V)

— Flow Distribution in A-Type Fuel Assembly —

A. Ohtsubo\*, M. Kanazawa\*,  
S. Abe\*, T. Iguchi\*

Abstract

The A-type fuel assembly has two kinds of irradiation ducts which contain "Monju" and "Joyo" MK-II fuel pin arrays. In this experiment, measurement test of pressure loss coefficient and electrolyte injection test were conducted for both individual elements and assembly. The experimental data can be used to calculate the coolant flow distribution in the A-type fuel assembly. The main conclusions from this experiment are as follows.

- (1) A wide gap is formed around the irradiation duct when the "Joyo" MK-II type irradiation duct is used. The gap should be narrowed by some design improvement to decrease leakage flow.
- (2) The size of the orifice at the entrance region of the "Monju" type irradiation duct can be determined by using the pressure loss coefficients led from experimental results.
- (3) The experimental results for flow distribution rates in the irradiation ducts have rather big experimental errors because of the test method to know the rates in the small ducts from the pressure drop in the large driver bundle. Therefore, it is desirable to know correctly thermal-hydraulic characteristics of the assembly by using TED (Temperature Difference) thermometers at the first irradiation.

---

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

## List of Tables

Table 4-1	Pressure Loss Coefficient of Driver Fuel .....	14
Table 4-2	Pressure Loss Coefficient of Test Fuel Duct .....	15
Table 4-3	Static Pressure Drop Coefficient of Driver Fuel .....	16
Table 4-4	Static Pressure Drop Coefficient of Test Fuel Duct .....	17
Table 4-5	Flow Distribution ("Monju" Type) .....	18
Table 4-6	Flow Distribution ("Joyo" MK-II Type) .....	19
Table 5-1	Equations for Material Properties .....	20
Table 5-2	Area and Hydraulic Diameter of Each Section .....	21
Table 5-3	Analytical Result of Flow Distribution for the Case Where "Monju" Type Irradiation Duct Is Inserted ....	22
Table 5-4	Analytical Result of Flow Distribution for the Case Where "Joyo" MK-II Type Irradiation Duct Is Inserted .....	23

## List of Figures

Fig. 2-1	A-Type Irradiation Test Assembly .....	25
Fig. 2-2	Irradiation Duct .....	27
Fig. 2-3	Test Cases .....	29
Fig. 2-4	Static Pressure Taps .....	31
Fig. 3-1	Location of Detecting and Electrolyte Injection Pins .....	33
Fig. 3-2	Electrolyte Injection Pin .....	34
Fig. 3-3	Detecting Pin .....	35
Fig. 3-4	Pulse Shape Measured by Detecting Pins .....	36
Fig. 4-1	Pressure Loss Coefficient of Driver Fuel (Whole Section) .....	37
Fig. 4-2	Pressure Loss Coefficient of Driver Fuel (Entrance Nozzle) .....	38
Fig. 4-3	Pressure Loss Coefficient of Driver Fuel (Reflector) .....	39
Fig. 4-4	Pressure Loss Coefficient of Driver Fuel (Reflector & Bundle Inlet) .....	40
Fig. 4-5	Pressure Loss Coefficient of Driver Fuel (Whole Section Except Entrance Nozzle) .....	41
Fig. 4-6	Pressure Loss Coefficient of Driver Fuel (Whole Fuel Bundle) .....	42
Fig. 4-7	Pressure Loss Coefficient of Driver Fuel (Bundle Center Part) .....	43
Fig. 4-8	Pressure Loss Coefficient of Driver Fuel (Bundle Outlet) .....	44
Fig. 4-9	Pressure Loss Coefficient of Driver Fuel (Handling Head) .....	45
Fig. 4-10	Pressure Loss Coefficient of "Monju" Type Test Fuel Duct (Whole Test Fuel Duct) .....	46
Fig. 4-11	Pressure Loss Coefficient of "Monju" Type Test Fuel Duct (Orifice (2)) .....	47

Fig. 4-12	Pressure Loss Coefficient of "Monju" Type Test Fuel Duct (Test Fuel Bundle) .....	48
Fig. 4-13	Flow Behavior .....	49
Fig. 4-14	The Relation Between Flow Rate and Velocity in Driver Fuel Bundle .....	50
Fig. 4-15	The Relation Between Total Flow Rate and Velocity in Driver Fuel Bundle When "Monju" Type Irradiation Duct Is Inserted .....	51
Fig. 4-16	The Relation Between Total Flow Rate and Velocity in Driver Fuel Bundle Where "Joyo" MK-II Type Irradiation Duct Is Inserted .....	52
Fig. 4-17	The Relation Between Flow Rate and Velocity in "Monju" Type Test Fuel Bundle .....	53
Fig. 4-18	The Relation Between Total Flow Rate and Velocity in "Monju" Type Test Fuel Bundle Inserted into Driver .....	54
Fig. 4-19	The Relation Between Flow Rate and Velocity in "Joyo" MK-II Type Test Fuel Bundle .....	55
Fig. 4-20	The Relation Between Total Flow Rate and Velocity in "Joyo" MK-II Type Test Fuel Bundle Inserted into Driver .....	56
Fig. 5-1	Schematic Flow Circuits .....	57
Fig. 5-2	Flow Chart .....	58

## 目 次

1. ま え が き .....	1
2. 試 験 体 .....	2
3. 試 験 方 法 .....	3
3.1 損失係数試験 .....	3
3.2 電解液注入試験 .....	3
4. 試 験 結 果 .....	5
4.1 損失係数試験結果 .....	5
4.2 電解液注入試験結果 .....	7
5. 流 動 解 析 .....	9
5.1 解 析 法 .....	9
5.2 解 析 例 .....	10
6. ま と め .....	11
謝 辞 .....	12
参 考 文 献 .....	13



## 1. ま え が き

「常陽」A型特殊燃料集合体は、ドライバー集合体の中央に、「もんじゅ」又は「常陽」MK-II燃料ピンの7本バンドルを挿入した照射ダクトを有するもので、各種オリフィスにより照射ダクトへの必要冷却材流量が配分される。この必要冷却材流量を精度よく配分することは、照射ダクトに内挿された照射用燃料の照射温度を設定するうえで重要である。

本報告書では、第2章で試験体の説明を簡単に行っている。本試験は、炉工室内の燃料集合体水流動試験装置で行われたが、この試験装置については、本報告書では説明を省略する。

第3章では試験方法について説明する。3.1節の損失係数試験は、試験体各所に設けられたタップで静圧を測定するものである。3.2節の電解液注入試験は、試験燃料集合体内流路に注入された電解液の速度を電気的方法により測定し、試験燃料集合体内の冷却材(本試験では水)の流量を求めるものである。

第4章では、上記2種類の試験の試験結果について説明するとともに、検討を行っている。第5章では、簡単な解析コードを作成し、損失係数試験より求めた静圧降下係数を用いて本試験に於る流量配分を計算し、電解液注入法により求めた試験結果との比較を行っている。

## 2. 試 験 体

Fig. 2-1にA型特燃の全体を、Fig. 2-2に試験燃料照射ダクト部を示す<sup>(1)</sup>。Fig. 2-3には試験時の試験部組立て状態を、Fig. 2-4にはドライバー部への静圧タップの取付け位置を示す。Fig. 2-4では、「もんじゅ」燃料照射ダクトのみを図示しているが、試験はこれよりもやや細い「常陽」MK-II燃料照射ダクトについても行った。Fig. 2-3で、Test fuel only及びTest fuel + Orifice (2)のテストの場合には、入口、出口、及びTest fuelとOrifice (2)の間の位置に静圧タップを取付けた。これらの静圧タップで、Orifice (2)或はOrifice (2)を取付けない場合には、残りの配管部及びTest fuelにおける静圧降下を測定した。

Fig. 2-4では、②の静圧タップは照射ダクトの入口位置での静圧測定用であり、①及び③～⑦の静圧タップはドライバー部の静圧測定用である。⑧はハンドリング・ヘッド部、⑨は入口、⑩は出口の静圧タップである。

なお後述するが、電解液注入試験の場合には、Fig. 3-1に示すように、試験燃料ピン束及びドライバー燃料ピン束中に1本の電解液注入ピンと2本の計測ピンを組込んだ。

### 3. 試験方法

#### 3.1 損失係数試験

試験は、照射ダクト部及びドライバー部の単体状態、及び組込み状態について行った。試験ケースを Fig. 2-3 に図示する。Fig. 2-4 には、ドライバー部に取付けられた静圧タップの位置を示す。

単体状態の試験では、測定された試験データをもとに、各タップ位置間での総圧差を計算し、損失係数 ( $\zeta$ ) を求めると共に、同様に静圧差より静圧降下係数 ( $C_p$ ) を求めた。組込み状態の試験では、ドライバー燃料中央部の中央部、即ち Fig. 2-4 の静圧タップ④-⑤間の静圧降下係数 ( $C_p$ ) を求めた。この組込み状態での  $C_p$  の値と、先に求めたドライバー単体状態の試験より求めた  $C_p$  の値の比較より、ドライバー部及び照射ダクト部を流れる流量配分を計算した。 $\zeta$  及び  $C_p$  は次式であたえられる。

$$\zeta = \frac{\Delta H}{\frac{\rho V^2}{2}} + C_v$$

$\Delta H$  : 各区間の差圧 (静圧タップによる測定値)

$V$  : 入口ノズル部での流速

$\rho$  : 流体密度

$C_v$  : 動圧補正值

$$C_p = \frac{\Delta H}{\frac{\rho V^2}{2}}$$

$\Delta H$  : 各区間の差圧 (静圧タップによる測定値)

$V$  : 各測定位置での流速

$\rho$  : 流体密度

上記の  $\zeta$  の計算式の  $V$  に、入口ノズル部での流速を採用したのは、A型特燃の製作者側からの要望によるものである。また、 $C_p$  の計算式の  $V$  に、各測定位置での流速を用いたのは、 $C_p$  及び  $R_e$  (レイノルズ数) 等の物理的意味がはっきりするからである。

#### 3.2 電解液注入試験

本試験は、試験体内を通過する冷却材 (水) 流れに乗って流れる少量注入された電解液の速

度を、2本の計測ピンにより電氣的に測定するものである。

Fig. 3-1にA型特燃中での電解液注入ピン及び計測ピンの位置を示す。また、Fig. 3-2に電解液注入ピン、Fig. 3-3に計測ピンの構造を図示する。電解液注入ピンには、電解液（本試験では塩化カリウム水溶液を使用）を注入する為の細いパイプが内挿されている。計測ピンには、軸方向3ヶ所に電極が設けられている。

集合体中には、Fig. 3-1に示すように電解液注入ピンに隣接して2本の計測ピンが配置されている。この2本の計測ピンに交流電圧を印加し、軸方向の電極対位置3ヶ所で電極対間の電圧変化を測定する。電解液注入ピンよりパルス状に注入された電解液の流れは、2本の計測ピン上の電極対間を通過する際、Fig. 3-4に示すような電気パルスとして検出される。電解液が電極対を通過する時刻は、Fig. 3-4に図示するように、検出したパルスの高さの半分の値になる2つの時刻  $T_A$  及び  $T_B$  の平均値  $\frac{1}{2}(T_A + T_B)$  とした。本試験では、最下端の電極対と最上端の電極対を電解液が通過する時刻から求まる経過時間と検出位置間の距離から、電解液の速度、即ち冷却材の流速を得た。

本試験では、「もんじゅ」及び「常陽」MK-II試験ピン照射ダクト及びドライバー部の各々につき、まず単体で試験し、これらの部分を流れる水の流量と先に説明した電解液の速度の関係を求めた。次にドライバー部に照射ダクトを組込んだ状態で、全体を流れる流量とドライバー部及び各照射ダクト内での電解液の速度の関係を求めた。上記2つの関係より、本試験の精度を求めると共に、後者の状態の場合のドライバー部及び各照射ダクト内への流量配分を求めた。

以上説明した電解液を用いる電氣的な方法は、注入された電解液が全断面に瞬時に拡がり得る小さな径の円管のような単純形状に関しては、既に確立された方法であるが、本試験のようにピン集合体形状での測定は余り無い。本測定はあくまで3.1損失係数試験のバックアップとして行ったものである。

本試験に於ては、照射ダクトについては、小さな断面積であるのでピンバンドルのような複雑な形状であってもある程度の精度で測定する事が可能である。しかし、ドライバー部のような大きな断面では、その一部に電解液を注入しても十分な精度で測定する事は望みうすい。

## 4. 試験結果

### 4.1 損失係数試験結果

流量と圧力損失（総圧）の関係として得られた測定データより、損失係数（ $\zeta$ ）を次の形の実験式として求めた。

$$\zeta = A + B \cdot Re^C \quad (4-1)$$

ここで、 $A$ 、 $B$ 及び $C$ は未知数であり、最小二乗法により決定した。 $Re$ （レイノルズ）数は、 $A$ 型特燃集合体の次に記す入口ノズル位置での流路面積及び等価直径を使用して定義した。

$$[\text{流路面積}] \quad 9.1006 \times 10^{-4} \text{ m}^2$$

$$[\text{等価直径}] \quad 3.404 \times 10^{-2} \text{ m}$$

ドライバー部について得られた結果をTable 4-1に、「もんじゅ」及び「常陽」MK-II燃料照射ダクトについて得られた結果をTable 4-2に記す。Table中の $\beta$ は変動係数<sup>(2)</sup>である。 $\beta$ の定義は、Table 4-1中に示した。Table 4-2で、Orifice (2)はOrifice (2)或はOrifice (2)を取付けない場合は残りの配管部、Whole test fuel ductはOrificeとTest fuel bundleを加えた全体の部分について求めたものである。また、Fig. 4-1~12には、実験点と実験式の間係を图示した。

次に、流量と静圧降下の関係より、静圧降下係数（ $C_p$ ）を、(4-1)式同様、

$$C_p = A + B \cdot Re^C \quad (4-2)$$

の形の実験式として求めた。得られた結果を、ドライバー部についてはTable 4-3に、「もんじゅ」及び「常陽」MK-II燃料照射ダクトについては、Table 4-4に示す。これらの表では、 $Re$ 数は、入口ノズル位置では無く、各測定位置での流路面積及び等価直径を使用して定義した。静圧降下係数は、第5章流動解析で使用する。猶、Table 4-4についても、Test fuel onlyの場合のOrifice (2)の項は、Orifice (2)を取り除いたダクトに関する値である。

次に、ドライバー単体試験及び照射ダクト組込み試験より求めたドライバー燃料バンドル中央部（Fig. 2-3では⑤、⑥のタップ間）での静圧降下係数を比較して、ドライバー部及び照射ダクト部へ流入する流量配分を求める。つまり、Fig. 4-13に示すように、ドライバー部に等しい流量が流れている状態では、ドライバー燃料バンドル中央部での静圧降下はドライバー単体試験及び照射ダクト組込み試験で等しくなる。(4-2)式を使用して次のように表わす。

$$\Delta H_a = \left\{ A_a + B_a R_e^{C_a} \right\} \frac{\rho}{2} \left( \frac{Q_0}{S} \right)^2 \quad (4-3)$$

$$S U_0 = Q_0 \quad (4-4)$$

$$\Delta H_b = \left\{ A_b + B_b R_e^{C_b} \right\} \frac{\rho}{2} \left( \frac{Q_1}{S} \right)^2 \quad (4-5)$$

$$S U_1 = Q_1 \quad (4-6)$$

$$\Delta H_a = \Delta H_b \quad (4-7)$$

上式で

添字 a ……照射ダクト組込み試験

添字 b ……ドライバー単体試験

$\rho$  ……密度

$R_e$  ……レイノルズ数 ( (4-3) 式では流速は  $\frac{Q_0}{S}$ , (4-4) 式では  $\frac{Q_1}{S}$  で表わす。)

$S$  ……ドライバー燃料バンドル部流路面積

$U$  ……流速

$Q$  ……流量

$\Delta H$  ……ドライバー燃料バンドル中央部での静圧降下

である。 $A_b$ ,  $B_b$ ,  $C_b$  の値は Table 4-3 に示した。また, (4-3) 式では流速として便宜的に  $\frac{Q_0}{S}$  を用いた。 $A_a$ ,  $B_a$ ,  $C_a$  の値は実験値との比較より次のように求まった。

「もんじゅ」燃料照射ダクト組込み試験

$$A_a = 3.1491 \quad B_a = 230.04 \quad C_a = -0.39511$$

「常陽」MK-II 燃料照射ダクト組込み試験

$$A_a = 2.8566 \quad B_a = 221.26 \quad C_a = -0.38773$$

(4-3) 式～(4-7) 式を解いて求まったドライバー部及び照射ダクト部への流量配分を, 全流量 ( Fig. 4-13 では  $Q_0$  ) をパラメータとして Table 4-5 及び Table 4-6 の Driver bundle と Orifice (2) の項に示す。計算に使用した水の物性値は Table 5-1 に示されている。Table 4-5 及び Table 4-6 で, Orifice (2) という項が Fig. 2-1 に示されている照射ダクト入口に取り付けられている Orifice (2) の中を流れる流量割合を示している。「もんじゅ」タイプの場合は全流量の約 6.5% が, 「常陽」タイプの場合は約 7.9% が流れている事がわかる。誤差は  $\pm 0.4 \sim 0.5\%$  で, ドライバー部の流量割合について考えるときには充分小さな値であるが, Orifice (2) について考える場合には少し大きな値となる。Test fuel bundle という項については次節で説明する。

## 4.2 電解液注入試験結果

ドライバー部及び「もんじゅ」型並びに「常陽」MK-II型燃料照射ダクトの各々単体状態及び組込み状態で、測定された流速と流量（組合せ状態の場合はドライバー部及び照射ダクト部の両方の流量の合計、即ち全流量）の関係を、Fig. 4-14～Fig. 4-20に示す。これらの図を使用して、まず「もんじゅ」型燃料照射ダクトをドライバー部に組込んだ状態につき、流量配分の解析を行う。

ドライバー部を流れる流量配分は次のようになる。

- ① Fig. 4-15で、全流量 $30 \text{ m}^3/\text{h}$ のときのドライバー部流速は $7.08 \text{ m}/\text{sec}$ となる。
- ② Fig. 4-14より、流速が $7.08 \text{ m}/\text{sec}$ のときのドライバー部を流れる流量は $35 \text{ m}^3/\text{h}$ となる。

全流量が $30 \text{ m}^3/\text{h}$ で、このときドライバー部を流れる流量が $35 \text{ m}^3/\text{h}$ というのは、明らかに矛盾している。元来、電解液注入法で流量を測定するのは、中に何も含まない管状流路に使用される。つまり、管内の半径方向には濃度差を無くする必要がある。Fig. 3-1に示されるような、ドライバー部の形状では流路の半径方向には大きな濃度差が存在している。また、ピンバンドルにはワイヤが巻きつけられているが、このワイヤの位置が実験中に移動する為バンドル内の流速分布に変化が起り、その為上記①、②のような結果が引起されたと想定する事も出来る。とにかく、このような結果は、ドライバー部内の流量を電解液注入試験で求めるのは不可能という事を示している。

次に「もんじゅ」型試験燃料バンドル内の流量割合を求める。Fig. 3-1でわかるように、この場合にはダクト内面積が小さいので、半径方向に電解液は或る程度ほぼ一様に広がると考えられる。Fig. 4-17には、実験点を結んだ実線と、流量を試験燃料バンドル内断面積で割り算して流速を求めた一点鎖線を示した。実線と一点鎖線は流量が $2.5 \text{ m}^3/\text{h}$ 以下の範囲で、約±15%（点線）の差で一致している。ドライバー部の場合に行ったと同様に、Fig. 4-18より全流量の或る値に対する試験燃料バンドル内の流速を読み、次にFig. 4-17の一点鎖線でこの流速値に対する試験燃料バンドル内流量を求めた。その結果を、Table 4-5のTest fuel bundleの項に示した。この表では、全流量が $50 \text{ m}^3/\text{h}$ と $60 \text{ m}^3/\text{h}$ の場合は数値が示していないが、これらはFig. 4-17で流量 $2.5 \text{ m}^3/\text{h}$ 以上の実線が大きくカーブしている部分に対応しており、とても実験データとして採用され得ないからである。Table 4-5で、誤差の±0.8%はFig. 4-17の点線から求めたものである。Table 4-5で、Orifice(2)の数値とTest fuel bundleの数値との差は、照射ダクトの外側を漏洩流として流れる流量に対応している。

以上説明した「もんじゅ」型試験燃料バンドルの場合と同様に、「常陽」MK-II試験燃料

バンドル内の流量についても求めた。求まった結果を、Table 4-6の Test fuel bundleの項に示す。この表からわかるように、Orifice (2)の数値と Test fuel bundleの数値の差の約3%の流量が、照射ダクト外側を漏洩流として流れる事になる。これはTable 5-2よりわかるように、照射ダクト外側の環状流路部分の断面積が非常に大きい為で、この面積を小さくするように設計変更をするのが望ましい。



## 5. 流動解析

### 5.1 解析法

A型特燃集合体内の流れを模式的に示した回路図を Fig. 5-1 に示す。本図で(2), (3)はドライバ部, (5), (6), (7)は照射ダクト, (8), (9), (10)は漏洩流路に各々対応する。図に示した集合体内の流路の圧力損失及び流量配分の計算は各要素の単体圧損特性から, Hardy Cross等の管路網の計算法を用いて行った<sup>(3)</sup>。この計算手法の流れ図を Fig. 5-2 に示す。計算に使用した集合体各要素の静圧降下特性は Table 4-3 及び Table 4-4 に示してある。但し, (8), (9), (10)の漏洩流路には Blasius の式を用いた。水及びナトリウムの物性値を Table 5-1 に示す。集合体各要素の流路断面積及び等価直径を Table 5-2 に示す。

次に, Fig. 5-2 によって計算手法を簡単に説明する。

- ① [ Data Input ] では, 流体(水又はナトリウム)の物性値を入力する。但し, これらは実際には, コードの中に数式で読み込んでいるので, この部分を修正する。
- ② [ Initial Q Input ] では, Fig. 5-1 に示す全流量  $Q_T$  及び部分流量  $Q_1, Q_2, Q_3$  の初期値を設定する。
- ③ ②のインプット値より, 各要素の流量  $Q(I)$  を計算する。
- ④ Hardy Cross の管路網計算によって, 流量  $Q_1, Q_2, Q_3$  の補正值  $\Delta Q_1, \Delta Q_2, \Delta Q_3$  を求める。
- ⑤  $\Delta Q_1, \Delta Q_2, \Delta Q_3$  が十分に小さいかどうか判定する。
- ⑥  $\Delta Q_1, \Delta Q_2, \Delta Q_3$  が十分に小さくなくて, 且つ, 繰返し計算回数が 100 に達していない場合には,  $Q_1, Q_2, Q_3$  に補正を行った後, 繰返し計算を新たに行う。
- ⑦ ⑤の  $\Delta Q_1, \Delta Q_2, \Delta Q_3$  が十分に小さい場合及び, 繰返し計算回数が 100 を越える場合には, 繰返し計算を打ち切り各要素の静圧降下  $\Delta H(I)$ , 流量  $Q(I)$ , レイノルズ数  $R_e(I)$  を計算し結果を出力する。

Table 5-2 の Entrance nozzle & Orifice (1) の項には, 次節での Orifice (1) 無しの計算に対応して, Entrance nozzle の値が入っている。Small pipe と Test bundle は, 試験では同じ静圧タップでいっしょに測定されるので, 両方共 Test bundle の値を用いた。また, Length/Hydraulic diameter の項で (1, 0) とある欄は試験から求めた静圧降下係数を用いたところで, (1, 0) 以外のところが Blasius の式を用いたところである。

## 5.2 解析例

Table 5-3 に「もんじゅ」試験燃料ピン照射ダクトを組込んだ場合の流量配分計算結果例を示す。この計算例では、(10)のナトリウムドレン孔の静圧降下係数を Blasius の式の 2 倍 (Blasius の式は発達した乱流に対するものなので) にしている。また、(2) Reflector の静圧降下係数は Table 4-3 の値を 0.6 倍した。これは、Fig. 4-13 の a), b) の比較でわかるように、b) では a) に比較して plug の上流側で拡大流及び縮小流が起り、その分静圧降下係数が大きくなっているからである。Table 4-5 の試験値と Table 5-3 の計算値を比較すれば、両者がほぼ一致しているのがわかる。

Table 5-4 に「常陽」MK-II 試験燃料ピン照射ダクトを組込んだ場合の計算例を示す。この計算例では上記の他に、(9) Upper annular section の Blasius の式を 2 倍した。これは、本照射ダクトの場合は Upper annular section の断面積が広い為、摩擦以外に Fig. 2-2 に図示されているスペーサディンプルの効果が相対的に顕著になって来ると考えられる為である。Table 5-4 では、2.8 ~ 2.9 % の流量が漏洩流として Upper annular section を流れているのがわかる。

## 6. ま と め

「常陽」A型特殊燃料集合体の水力特性を明らかにするために、ドライバー部と「もんじゅ」及び「常陽」MK-II試験燃料照射ダクトにつき、各々単体状態及び組込み状態で水流動試験を行い、圧力損失及び流量配分につき試験データを得た。本試験より得られた主な結果は次の通りである。

- (1) 「常陽」MK-II試験燃料照射ダクトを組込む場合には、ドライバー部と照射ダクト間に広い面積のギャップ空間が形成され、総流量の約3%弱の漏洩流量が流れるので、この部分の断面積を小さくする工夫をする必要がある。
- (2) 「もんじゅ」試験燃料照射ダクト組込みの場合には、総流量40 m<sup>3</sup>/hのとき約6%弱の流量が試験燃料部を流れるという、試験前の予想に近い結果となった。しかし、試験誤差がそう小さくないので、実際の炉内での最初の照射試験に於ては、試験燃料ピンの破損限界近くに実験条件を設定せずに、TED ( Temperature Difference ) 温度計等でA型特殊燃料集合体の熱流力特性を十分に把握するような実験を行うのが望ましい。

## 謝 辞

本試験研究の遂行にあたり、計画および実施に御協力戴いたFBR本部小山真弘副主任研究員、藤原優行副主任研究員はじめ関係者各位に謝意を表します。

試験部の解体・組立てを数回担当して戴いた実験炉部照射課の方々に感謝します。

## 参 考 文 献

- (1) ZN841-81-59 「常陽」照射炉心用A型特殊燃料(A1M, A2M, A3J)基本設計書 Preliminary Design of Uninstrumented A-Type (A1M, A2M, A3J) Test Fuel for Joyo MK-II Core
- (2) 次元解析・最小2乗法と実験式(応用数学講座 第5巻) コロナ社 本間 仁, 春日屋 伸昌 共著
- (3) 管路・ダクトの流体抵抗 日本機械学会

Table 4-1 Pressure Loss Coefficient of Driver Fuel

$$\zeta = A + B \cdot Re^C$$

$$\beta = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n \left( \frac{\zeta'_i}{\zeta_i} - 1 \right)^2}{n - 1}} \times 100\%$$

Pressure tap no.	Item	A	B	C	$\beta(\%)$
0 - 9	Whole section	2.5118	170.42	-0.27128	0.43
0 - 1	Entrance nozzle	0.0	2.5984	-6.3960x10 <sup>-2</sup>	0.92
1 - 3	Reflector	0.0	4.0872	-9.6301x10 <sup>-2</sup>	0.66
1 - 5	Reflector & bundle inlet	1.1007	88.690	-0.30679	0.49
1 - 9	Whole section except entrance nozzle	2.9162	480.32	-0.38053	0.44
3 - 8	Whole fuel bundle	1.9193	465.09	-0.38474	0.61
5 - 6	Bundle center part	0.95955	187.98	-0.35216	0.43
6 - 8	Outlet of bundle	0.18449	12.351	-0.26371	0.59
8 - 9	Handling head	0.0	0.14702	-5.3771x10 <sup>-3</sup>	0.55

n : The number of test data

Re: Reynolds' number defined at entrance nozzle

$\zeta'$ : Measured value

$\zeta$  : Calculated value

Table 4-2 Pressure Loss Coefficient of Test Fuel Duct

"Monju" type		$\zeta = A + B \times Re^C$				Re: Reynolds' number defined at entrance nozzle			
		Test fuel + Orifice (2)				Test fuel only			
Item	A	B	C	$\beta(\%)$	A	B	C	$\beta(\%)$	
Whole test fuel duct	891.21	62434.0	-0.53535	0.39	279.51	20573.0	-0.4240	0.63	
Orifice (2)	0.0	800.18	-0.26012	0.47	0.0	802.05	-0.46057	25.07	
Test fuel bundle	356.10	$1.1511 \times 10^5$	-0.62943	1.14	364.92	$1.7182 \times 10^5$	-0.68081	1.28	

"Joyo" MK-II type		$\zeta = A + B \times Re^C$				Re: Reynolds' number defined at entrance nozzle			
		Test fuel + Orifice (2)				Test fuel only			
Item	A	B	C	$\beta(\%)$	A	B	C	$\beta(\%)$	
Whole test fuel duct	982.16	84508.0	-0.51981	0.45	568.41	$4.4989 \times 10^5$	-0.73696	1.41	
Orifice (2)	0.0	820.78	-0.029094	0.55	0.0	63.785	-0.22678	18.57	
Test fuel bundle	458.80	$1.4662 \times 10^5$	-0.59927	0.74	465.21	71709.0	-0.51653	0.61	

Table 4-3 Static Pressure Drop Coefficient of Driver Fuel

$$C_p = A + B \cdot Re^C$$

Pressure tap no.	Item	A	B	C	$\beta(\%)$
0 - 9	Whole section	7.7359	222.78	-0.27127	0.44
0 - 1	Entrance nozzle	0.0	3.1438	-0.037484	0.54
1 - 3	Reflector	0.0	17.548	-0.26154	1.15
1 - 5	Reflector & bundle inlet	1.9280	103.63	-0.30678	0.60
1 - 9	Whole section except entrance nozzle	6.5197	444.66	-0.38053	0.51
3 - 8	Whole fuel bundle	5.8660	424.84	-0.38474	0.61
5 - 6	Bundle center part	2.9553	190.32	-0.35216	0.43
6 - 8	Outlet of bundle	-0.28966	16.537	-0.26371	1.11
8 - 9	Handling head	0.0	0.74293	$-8.1067 \times 10^{-3}$	0.83

Re: Reynolds' number defined at each section

PNC TN941 83-32



Table 4-4 Static Pressure Drop Coefficient of Test Fuel Duct

"Monju" type

$$C_p = A + B \cdot Re^C$$

Re: Reynolds' number defined at each section

Item	Test fuel + Orifice (2)				Test fuel only			
	A	B	C	$\beta(\%)$	A	B	C	$\beta(\%)$
Whole test fuel duct	25.657	1178.4	-0.53535	0.39	8.4066	423.47	-0.42539	0.63
Orifice (2)	0.0	3.4568	-0.025351	0.46	0.0	31.249	-0.12979	8.43
Test fuel bundle	9.7898	2018.8	-0.62954	1.17	10.044	2895.8	-0.68100	1.32

"Joyo" MK-II type

Item	Test fuel + Orifice (2)				Test fuel only			
	A	B	C	$\beta(\%)$	A	B	C	$\beta(\%)$
Whole test fuel duct	19.505	1199.6	-0.51982	0.45	11.296	5592.6	-0.73795	1.41
Orifice (2)	0.0	3.5580	-0.028352	0.53	0.0	13.631	-0.056173	5.16
Test fuel bundle	8.7944	1980.0	-0.59947	0.75	8.9206	1020.6	-0.51661	0.62

Test fuel + Orifice (2)

Test fuel only

Table 4-5 Flow Distribution ("Monju" Type)

Water 75°C

Total flow rate	10 m <sup>3</sup> /h	20 m <sup>3</sup> /h	30 m <sup>3</sup> /h	40 m <sup>3</sup> /h	50 m <sup>3</sup> /h	60 m <sup>3</sup> /h
Driver bundle*	93.2 ± 0.4%	93.2 ± 0.4%	93.3 ± 0.4%	93.4 ± 0.4%	93.5 ± 0.4%	93.6 ± 0.4%
Orifice (2)*	6.8 ± 0.4%	6.8 ± 0.4%	6.7 ± 0.4%	6.6 ± 0.4%	6.5 ± 0.4%	6.4 ± 0.4%
Test fuel bundle**	5.3 ± 0.8	5.2 ± 0.8%	5.4 ± 0.8%	5.7 ± 0.8%		

\* The values calculated by using static pressure drop through the central part of driver fuel bundle

\*\* The experimental result of electrolyte injection test

Table 4-6 Flow Distribution ("Joyo" MK-II Type)

Water 75°C

Total flow rate	10 m <sup>3</sup> /h	20 m <sup>3</sup> /h	30 m <sup>3</sup> /h	40 m <sup>3</sup> /h	50 m <sup>3</sup> /h	60 m <sup>3</sup> /h
Driver bundle*	92.5 ± 0.5%	92.2 ± 0.5%	92.2 ± 0.5%	92.1 ± 0.5%	92.1 ± 0.5%	92.2 ± 0.5%
Orifice (2)*	7.5 ± 0.5%	7.8 ± 0.5%	7.8 ± 0.5%	7.9 ± 0.5%	7.9 ± 0.5%	7.8 ± 0.5%
Test fuel bundle**	4.8 ± 0.8	4.8 ± 0.8%	4.8 ± 0.8%			

\* The values calculated by using static pressure drop through the central part of driver fuel bundle

\*\* The experimental result of electrolyte injection test

Table 5-1 Equations for Material Properties

	Water	Sodium
Density Kg/m <sup>3</sup>	<p>0°C &lt; T &lt; 100°C, kg/m<sup>3</sup></p> $\rho = (10000.79 - 7.7524 \times 10^{-2} \cdot T - 3.526 \times 10^{-3} \cdot T^2)$	$\rho_{Na} = (949.0 - 2.23 \times 10^{-1} \cdot T - 1.75 \times 10^{-5} \cdot T^2)$
Viscosity Kg·sec/m <sup>2</sup>	<p>0°C &lt; T &lt; 100°C, kg·sec/m<sup>2</sup></p> $\mu = 18.29 \times 10^{-5} / (1 + 3.687 \times 10^{-2} \cdot T + 1.660 \times 10^{-4} \cdot T^2)$	<p>T ≤ 500°C</p> $\mu_{Na} = 1.235 \times 10^{-2} \cdot \rho^{1/3} \cdot e^{\{0.697 \cdot \rho / (T + 273.13)\}}$ <p>T &gt; 500°C</p> $\mu_{Na} = 8.51 \times 10^{-3} \cdot \rho^{1/3} \cdot e^{\{1.040 \cdot \rho / (T + 273.13)\}}$
Kinetic viscosity m <sup>2</sup> /sec	$v = \frac{\mu \cdot g}{\rho}$	$v_{Na} = \frac{\mu_{Na} \cdot g}{\rho_{Na}}$

Table 5-2 Area and Hydraulic Diameter of Each Section

No. in Fig. 5-1	Section	Area $\times 10^{-4} \text{m}^2$		Hydraulic diameter $\times 10^{-2} \text{m}$		Length/Hydraulic diameter	
		Monju	Joyo MK-II	Monju	Joyo MK-II	Monju	Joyo MK-II
(1)	Entrance nozzle & Orifice (1)	9.1006	ditto	3.404	ditto	(1.0)	ditto
(2)	Reflector	12.486	ditto	1.4351	ditto	(1.0)	ditto
(3)	Driver bundle	15.971	ditto	0.25368	ditto	(1.0)	ditto
(4)	Handling head	24.718	ditto	5.61	ditto	(1.0)	ditto
(5)	Orifice (2)	0.58223	ditto	0.861	ditto	(1.0)	ditto
(6)	Small pipe	1.5441	1.2825	0.26249	0.25141	(1.0)	ditto
(7)	Test bundle	1.5441	1.2825	0.26249	0.25141	(1.0)	ditto
(8)	Lower annular section	0.1670	ditto	0.05	ditto	230.0	ditto
(9)	Upper annular section	0.3700	1.397	0.09	0.36	1827.8	456.5
(10)	Holes	0.06283	ditto	0.2	ditto	0.5	ditto

Table 5-3 Analytical Result of Flow Distribution for the  
Case where "Monju" Type Irradiation Dust Is Inserted

Water 75°C

No. in Fig. 5-1	Section	Total flow rate 20 m <sup>3</sup> /h	Total flow rate 40 m <sup>3</sup> /h
(1)	Entrance nozzle	100 %	100 %
(2)	Reflector	92.8%	93.0%
(3)	Driver bundle	92.8%	93.0%
(4)	Handling head	100 %	100 %
(5)	Orifice (2)	7.2%	7.0%
(6)	Small pipe	7.0%	6.8%
(7)	Test bundle	6.6%	6.4%
(8)	Lower annular section	0.2%	0.2%
(9)	Upper annular section	0.6%	0.6%
(10)	Holes	0.4%	0.4%

Table 5-4 Analytical Result of Flow Distribution for the Case where "Joyo" MK-II Type Irradiation Duct Is Inserted

Water 75°C

No. in Fig. 5-1	Section	Total flow rate 20 m <sup>3</sup> /h	Total flow rate 30 m <sup>3</sup> /h
(1)	Entrance nozzle	100 %	100 %
(2)	Reflector	93.0%	93.2%
(3)	Driver bundle	93.0%	93.2%
(4)	Handling head	100 %	100 %
(5)	Orifice (2)	7.0%	6.8%
(6)	Small pipe	6.6%	6.4%
(7)	Test bundle	4.1%	4.0%
(8)	Lower annular section	0.3%	0.3%
(9)	Upper annular section	2.9%	2.8%
(10)	Holes	2.6%	2.5%

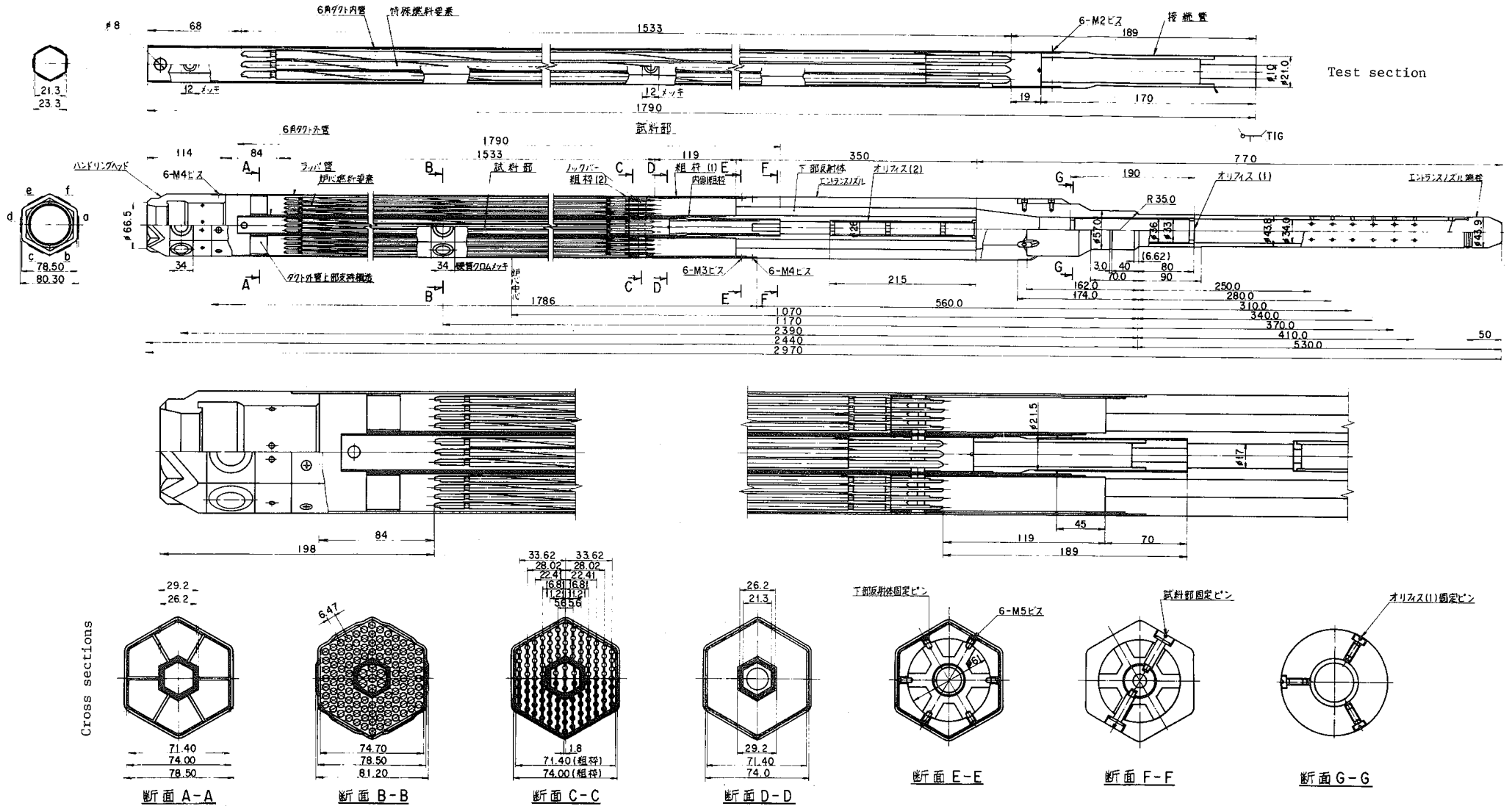


Fig. 2-1 A-Type Irradiation Test Assembly



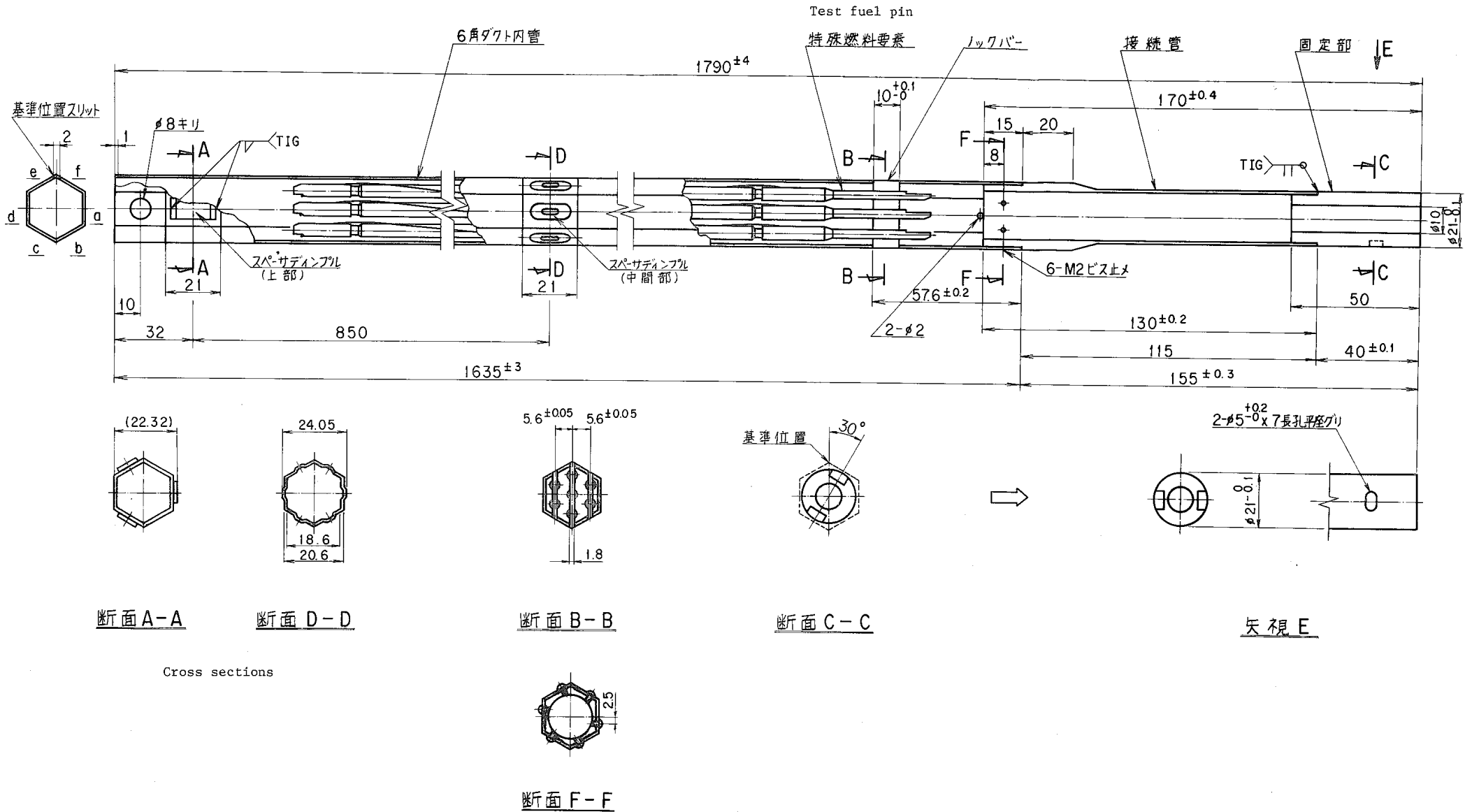


Fig. 2-2 Irradiation Duct

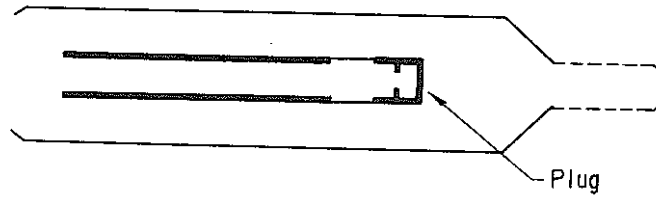
Test fuel only



Test fuel + Orifice (2)



Driver fuel only



Inserted state

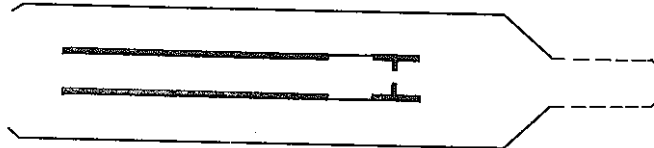
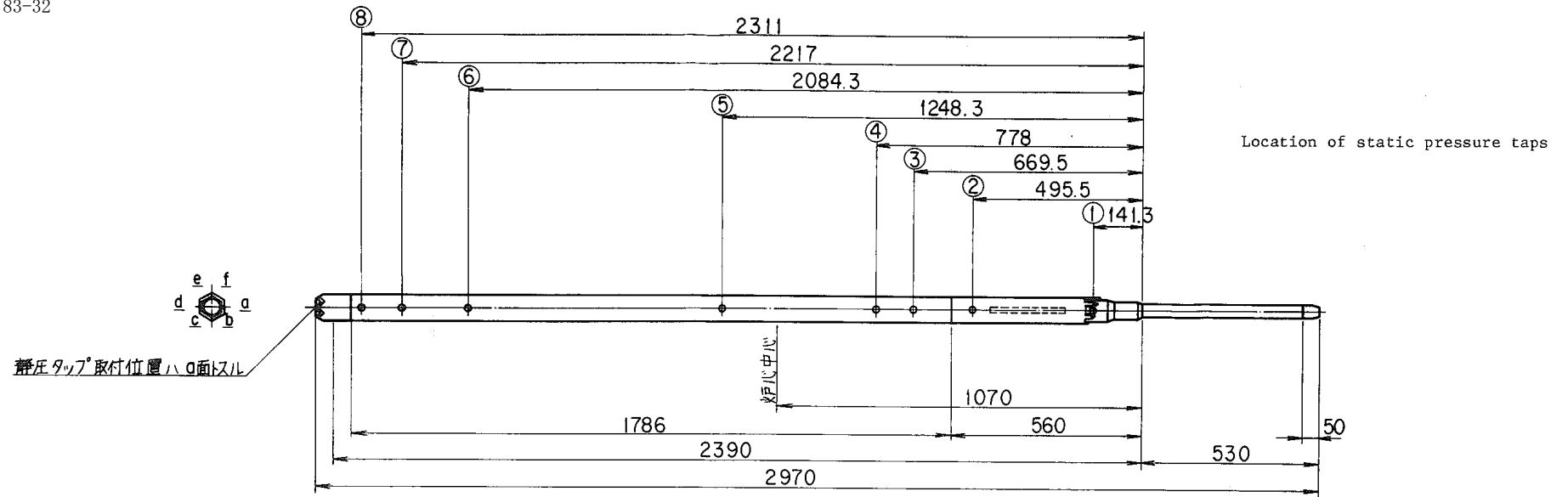
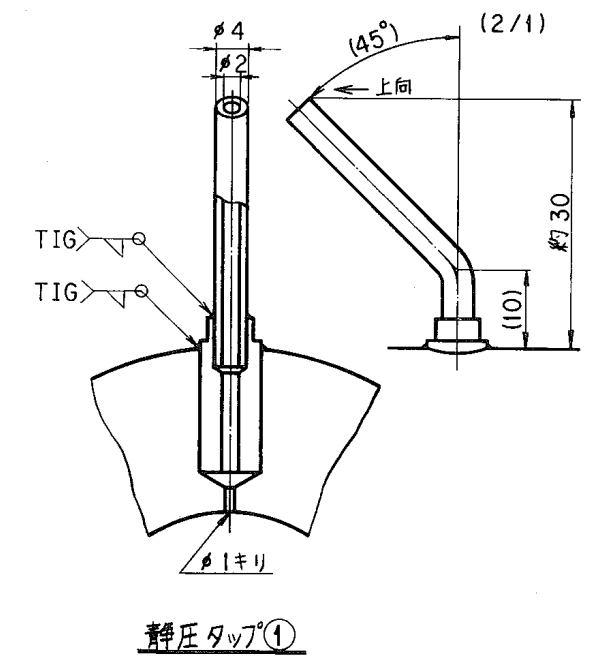
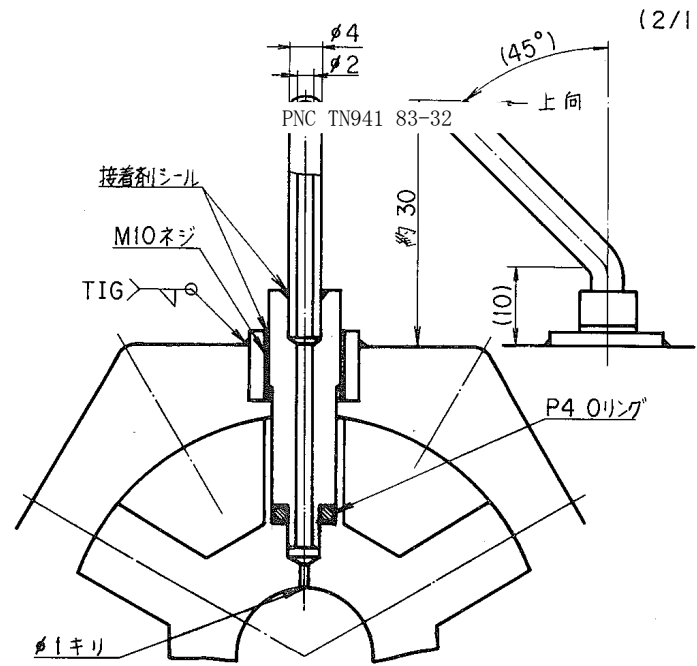
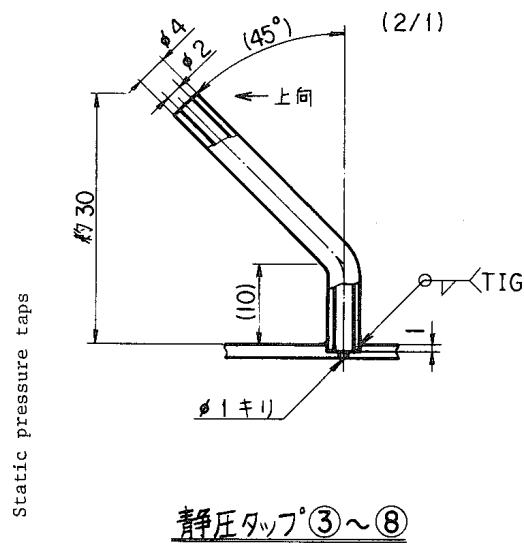


Fig. 2-3 Test Cases



Location of static pressure taps



静圧タップ②

Fig. 2-4 Static Pressure Taps

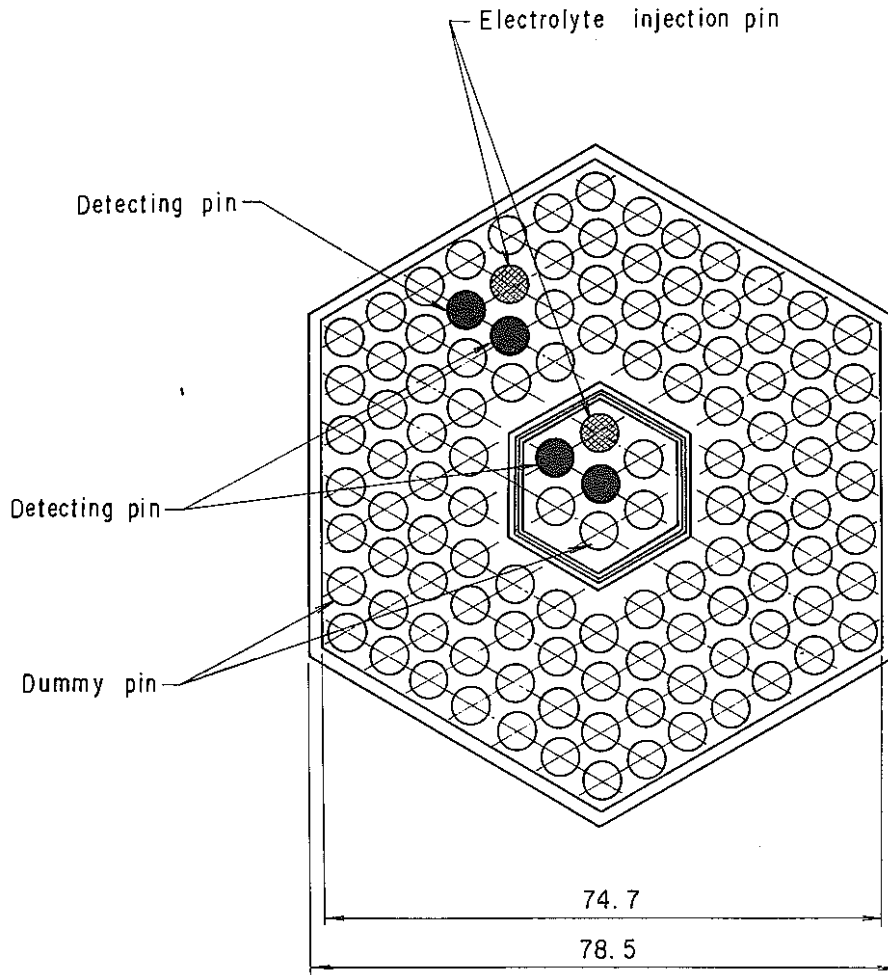
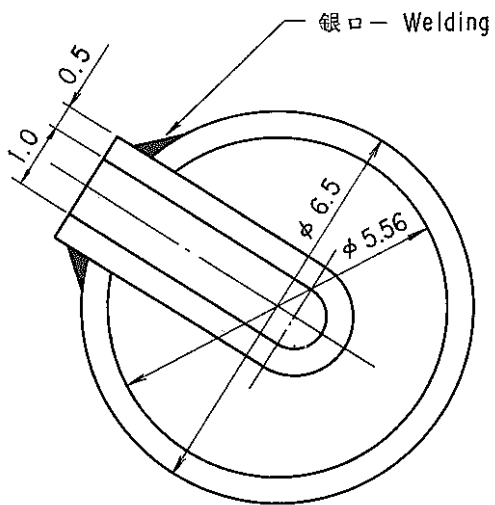
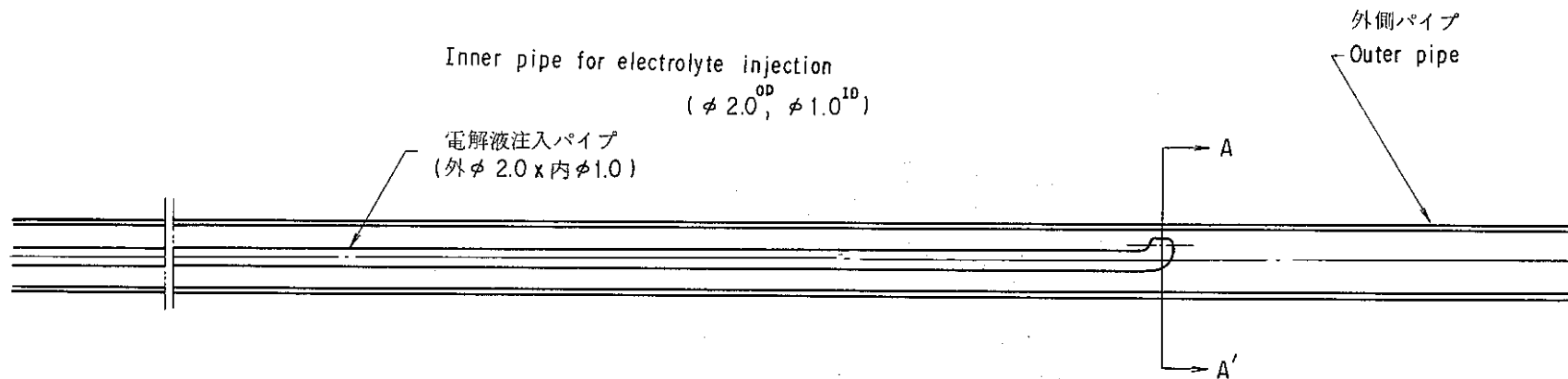


Fig. 3-1 Location of Detecting and Electrolyte Injection Pins



A-A' Cross section

Fig. 3-2 Electrolyte Injection Pin

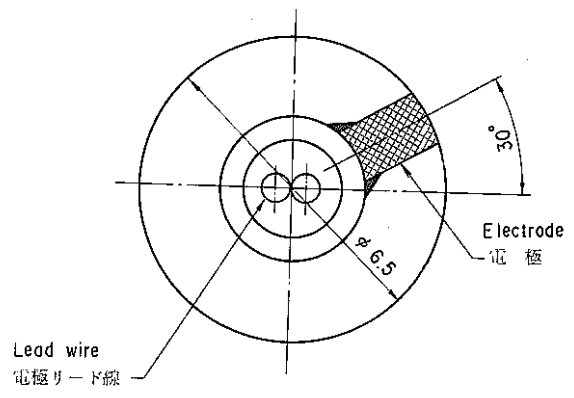
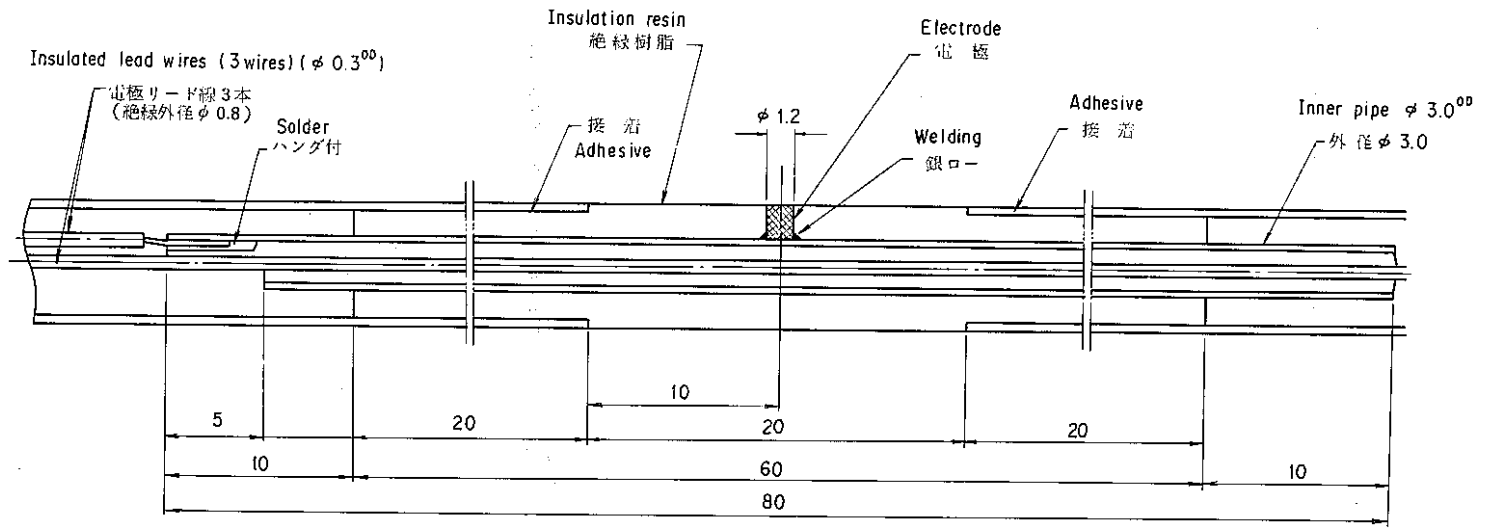


Fig. 3-3 Detecting Pin

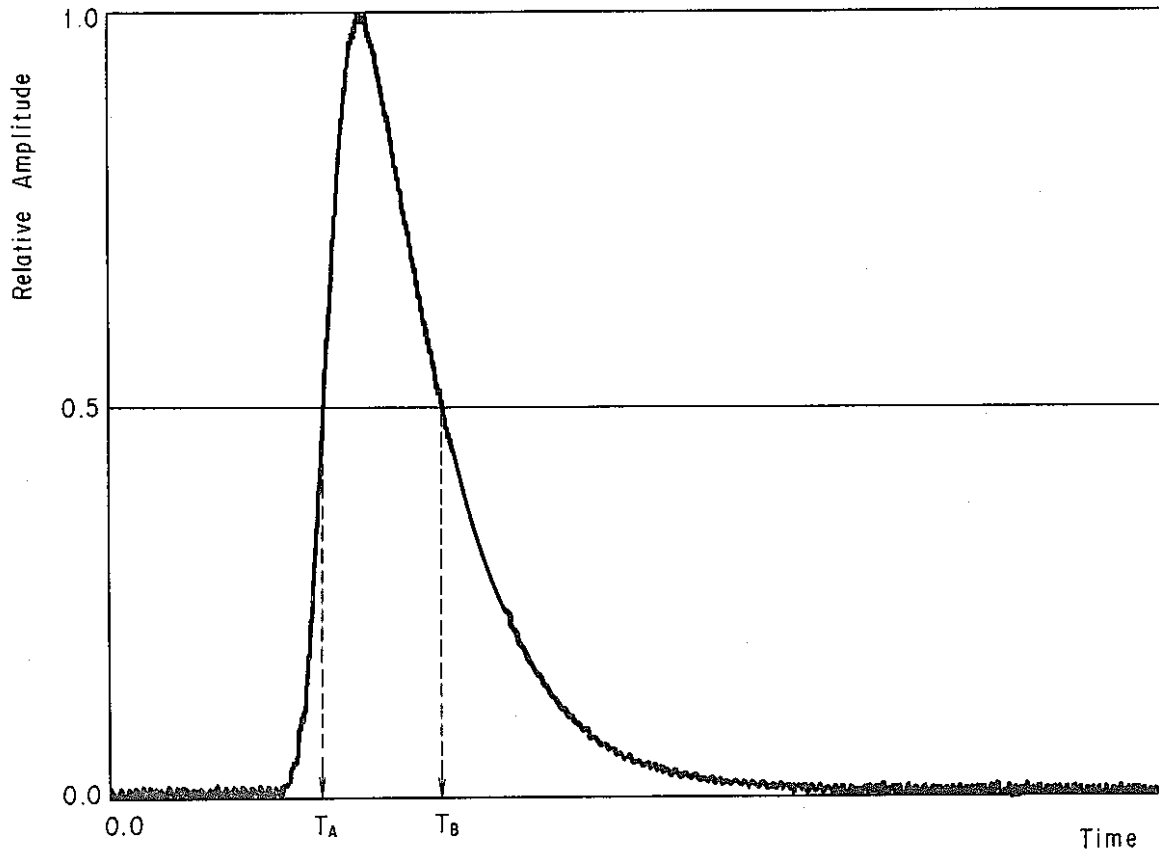


Fig. 3-4 Pulse Shape Measured by Detecting Pins

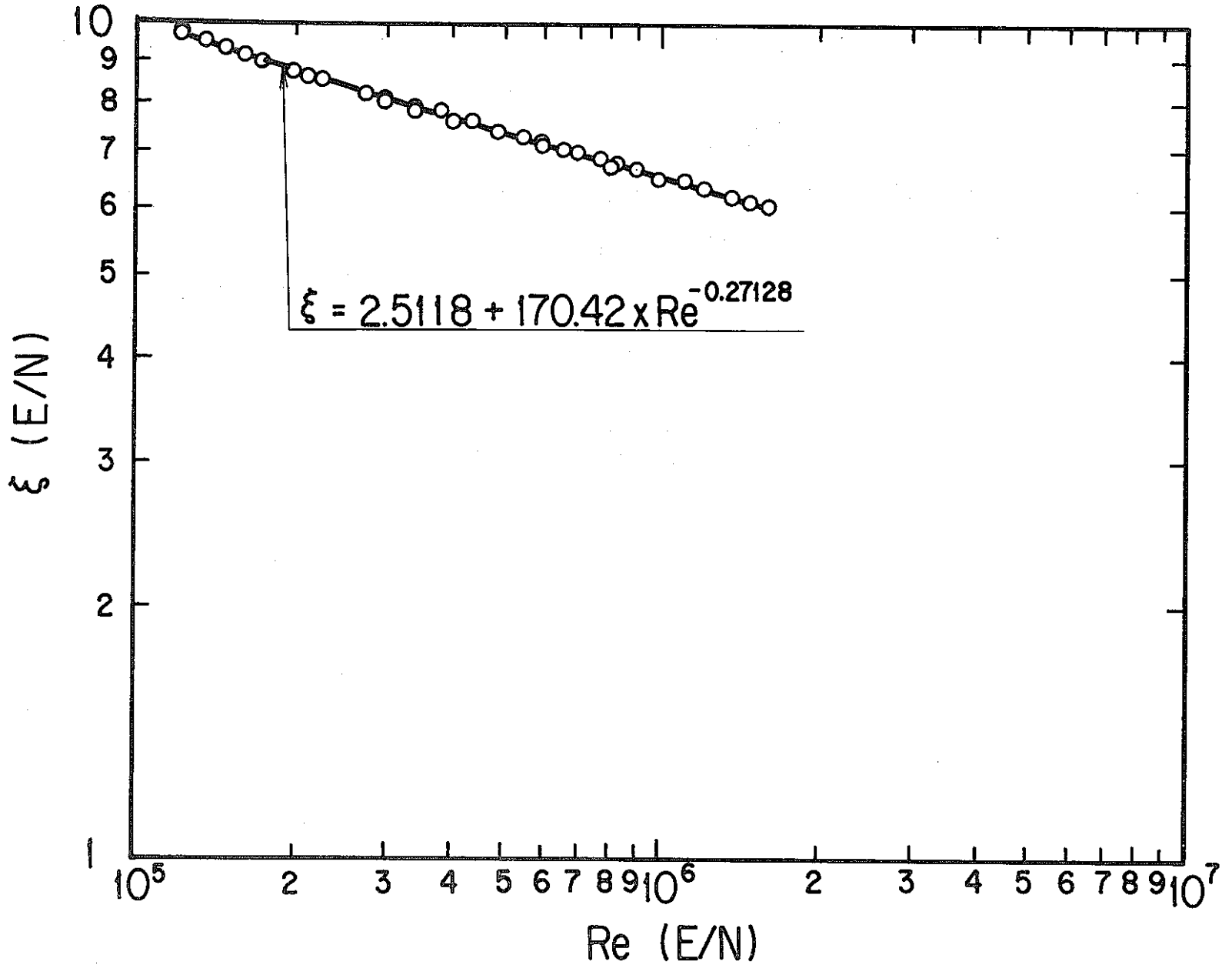


Fig. 4-1 Pressure Loss Coefficient of Driver Fuel (Whole Section)



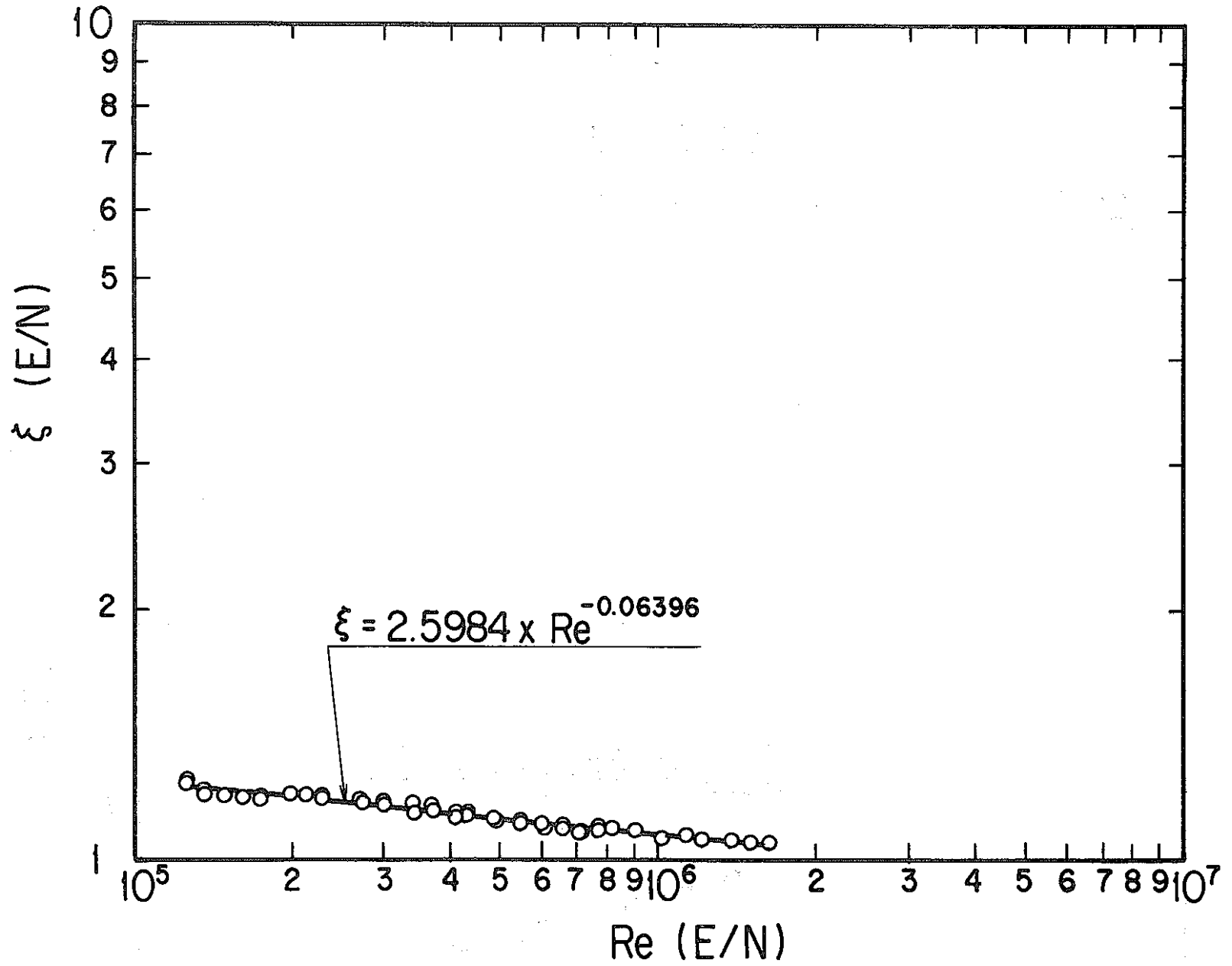


Fig. 4-2 Pressure Loss Coefficient of Driver Fuel (Entrance Nozzle)

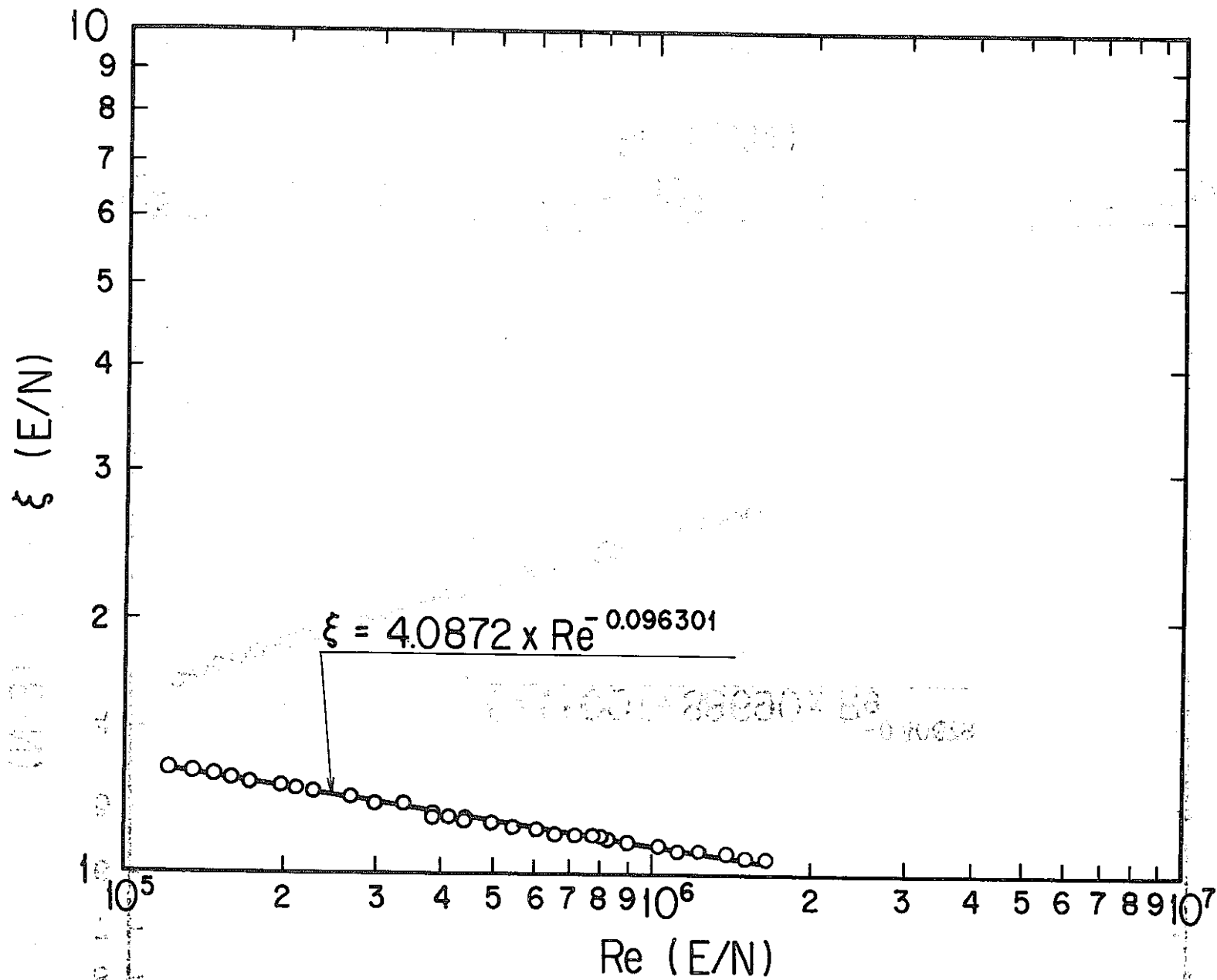


Fig. 4-3 Pressure Loss Coefficient of Driver Fuel (Reflector)

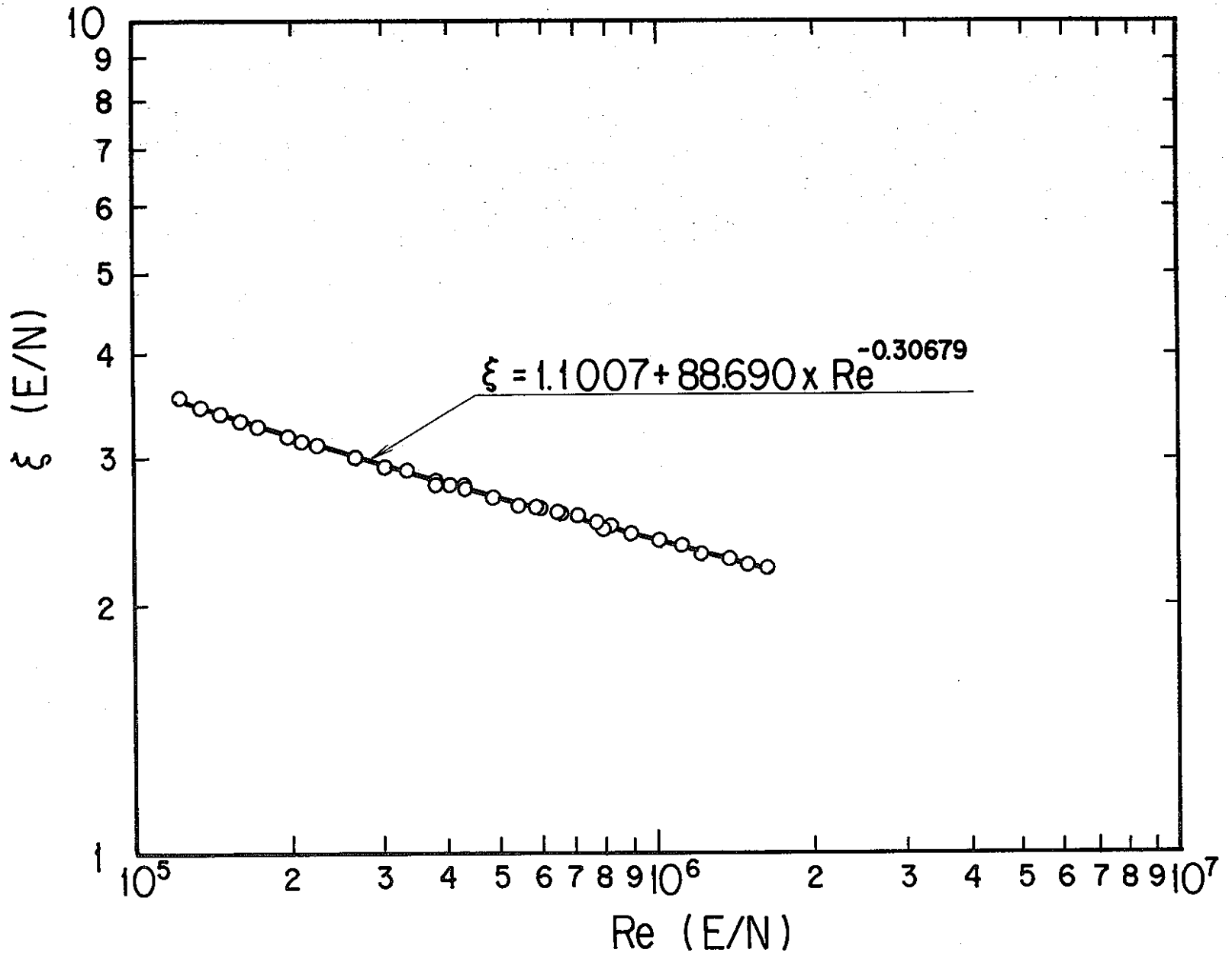


Fig. 4-4 Pressure Loss Coefficient of Driver Fuel (Reflector & Bundle Inlet)

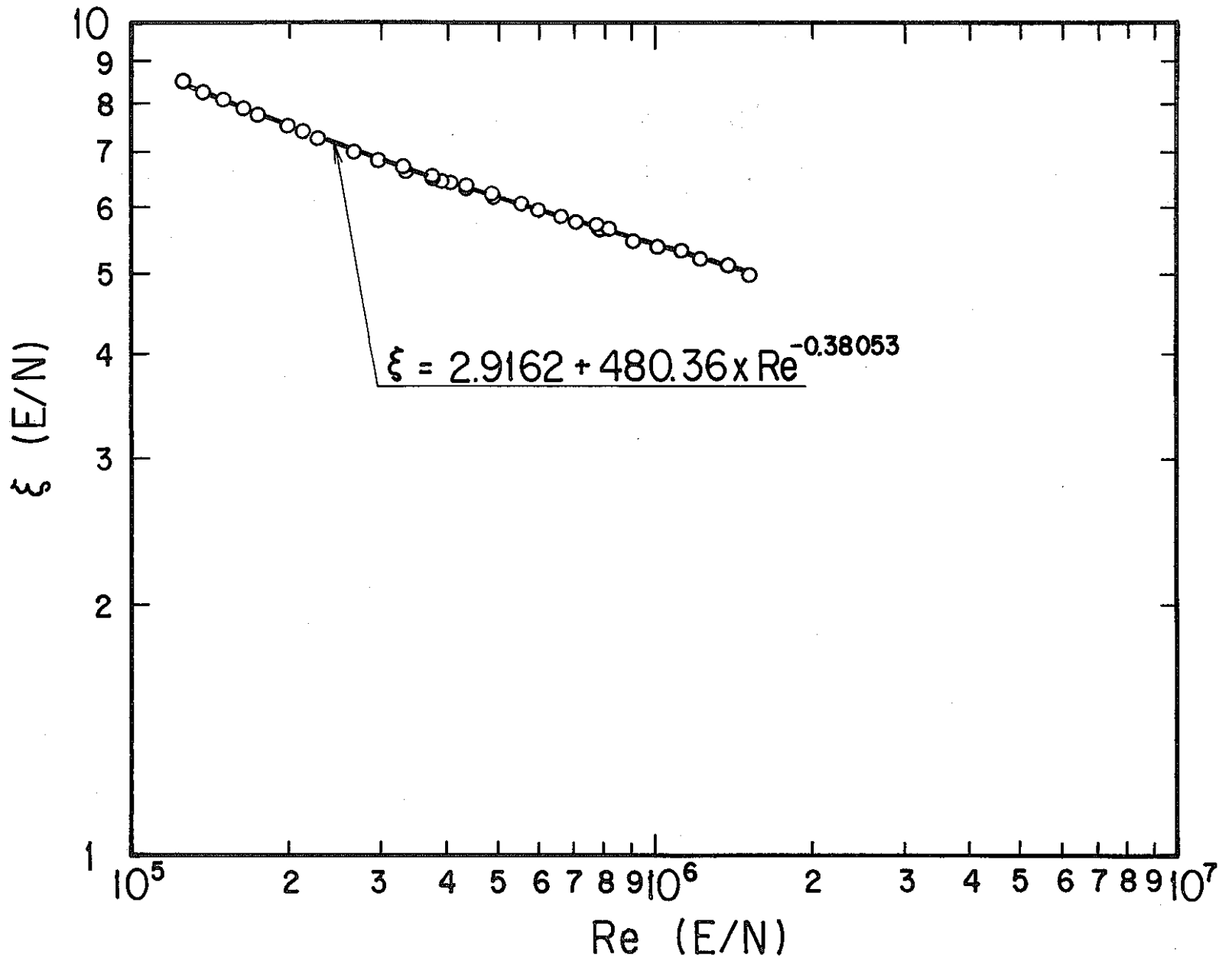


Fig. 4-5 Pressure Loss Coefficient of Driver Fuel (Whole Section Except Entrance Nozzle)

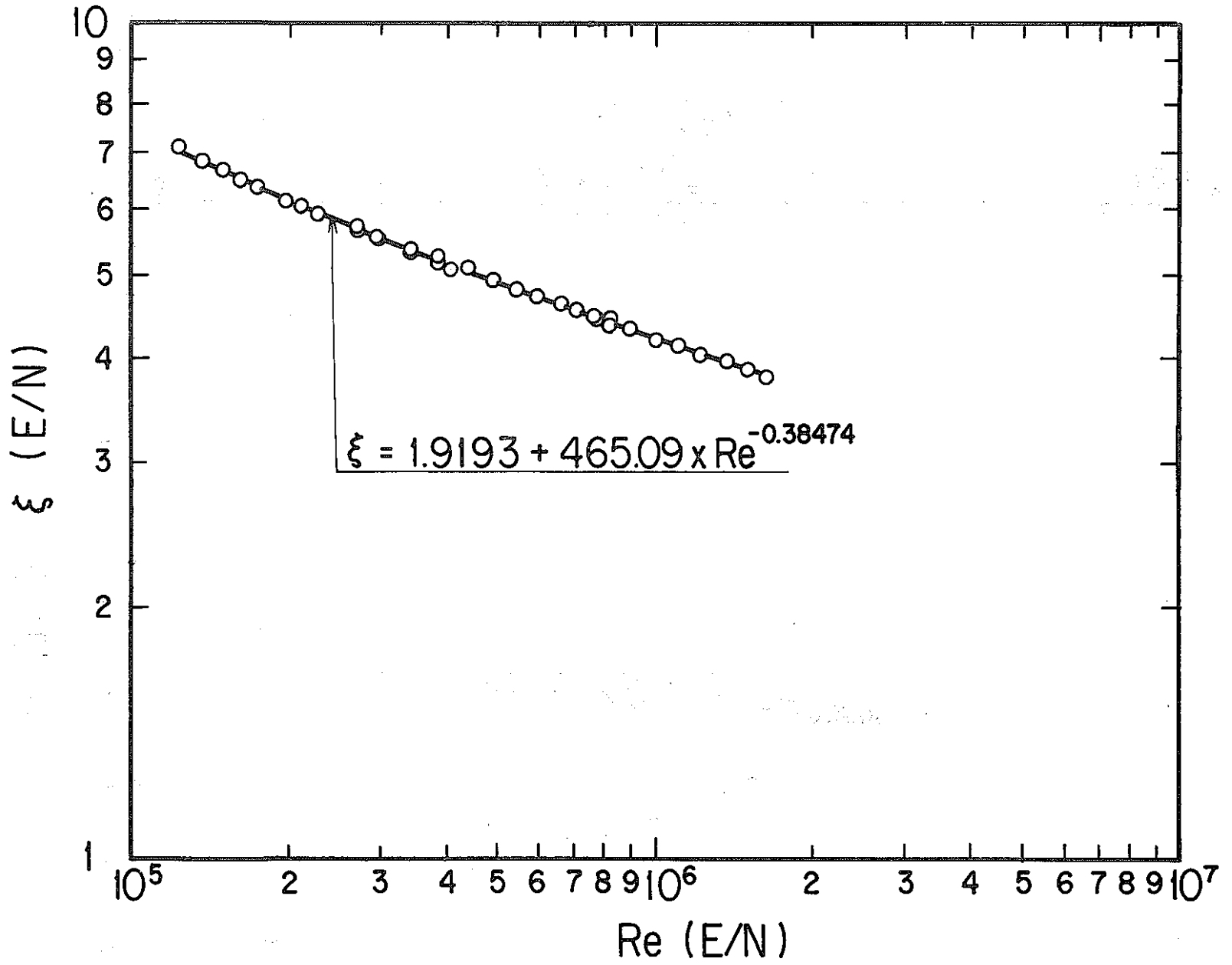


Fig. 4-6 Pressure Loss Coefficient of Driver Fuel (Whole Fuel Bundle)

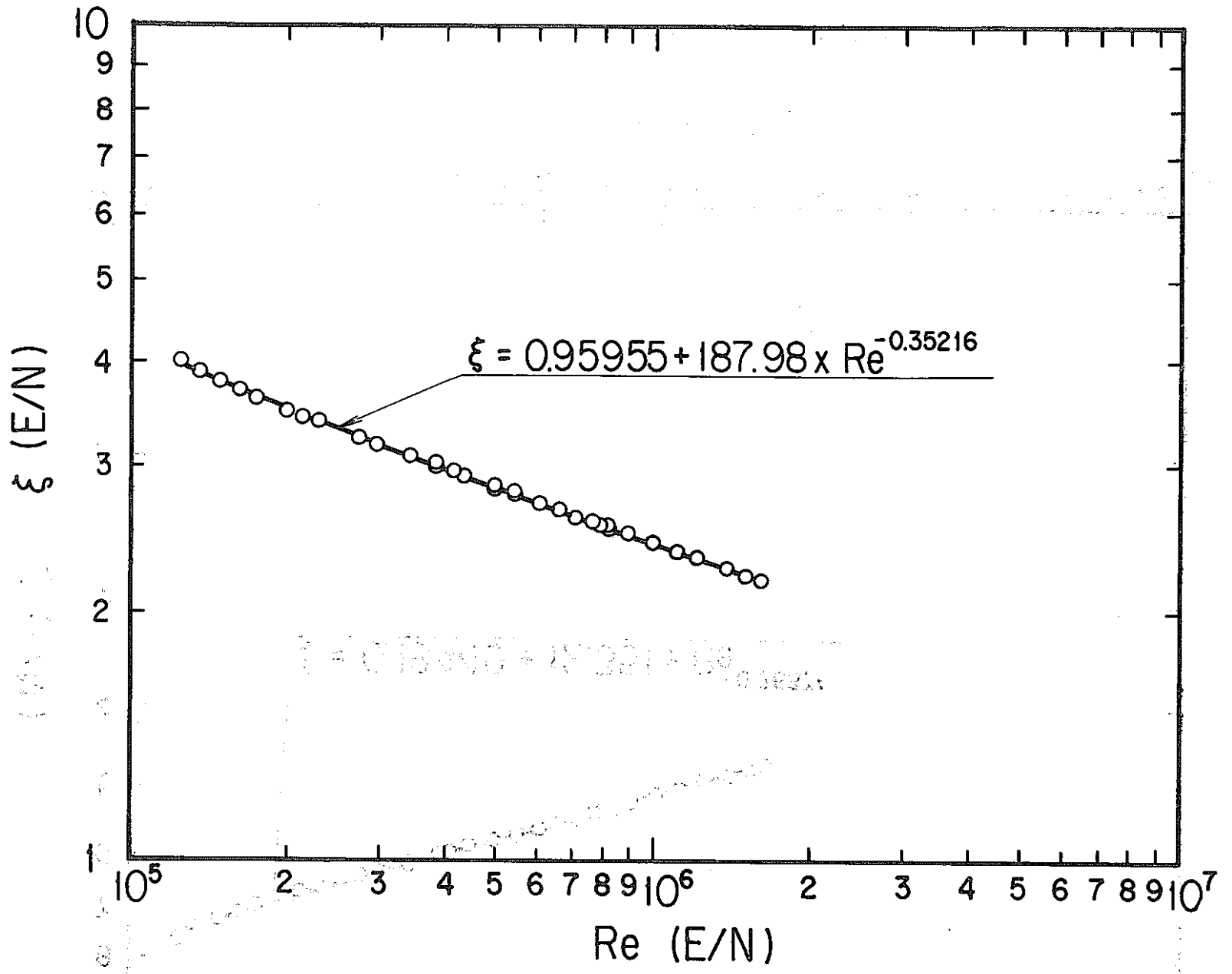


Fig. 4-7 Pressure Loss Coefficient of Driver Fuel (Bundle Center Part)

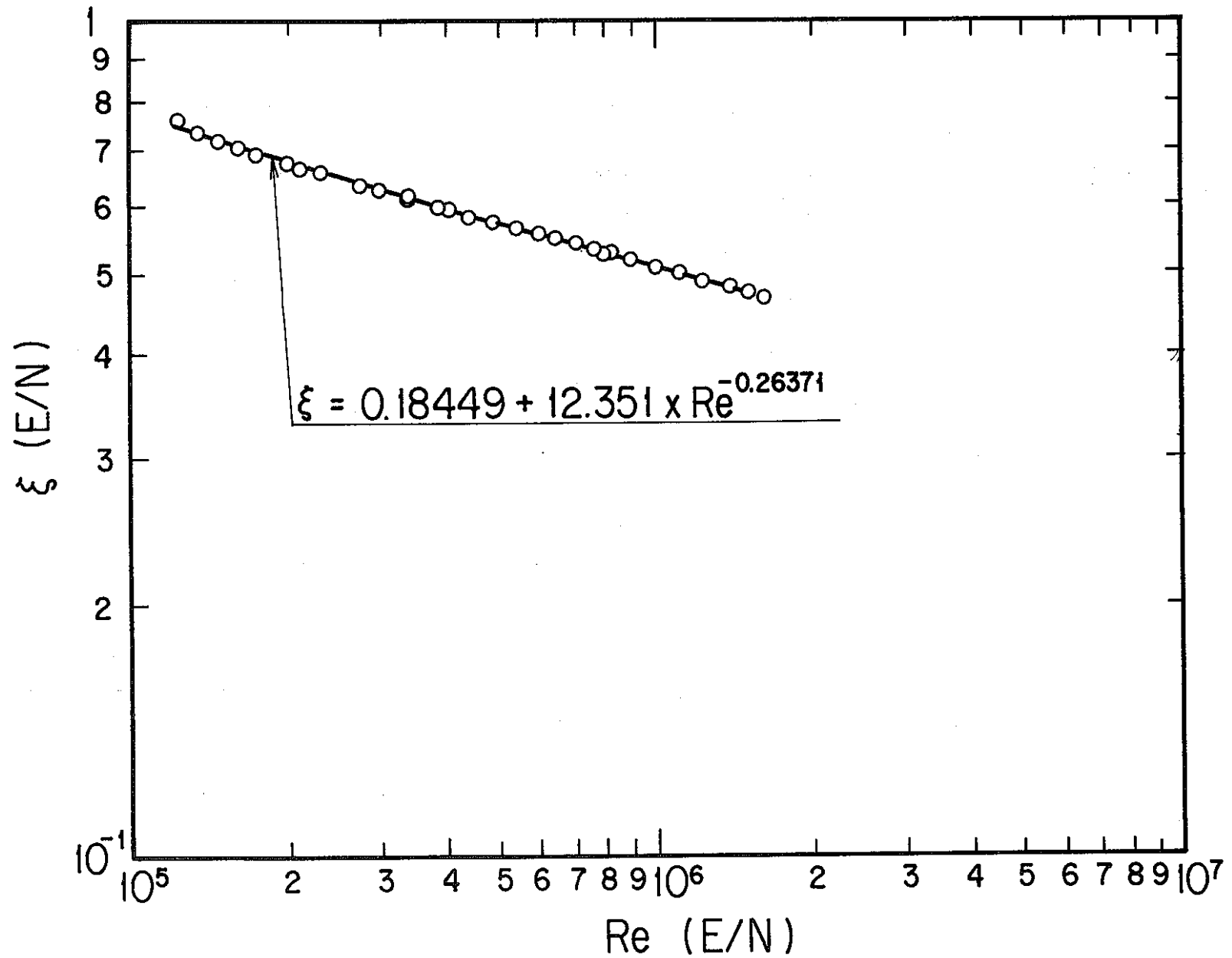


Fig. 4-8 Pressure Loss Coefficient of Driver Fuel (Bundle Outlet)

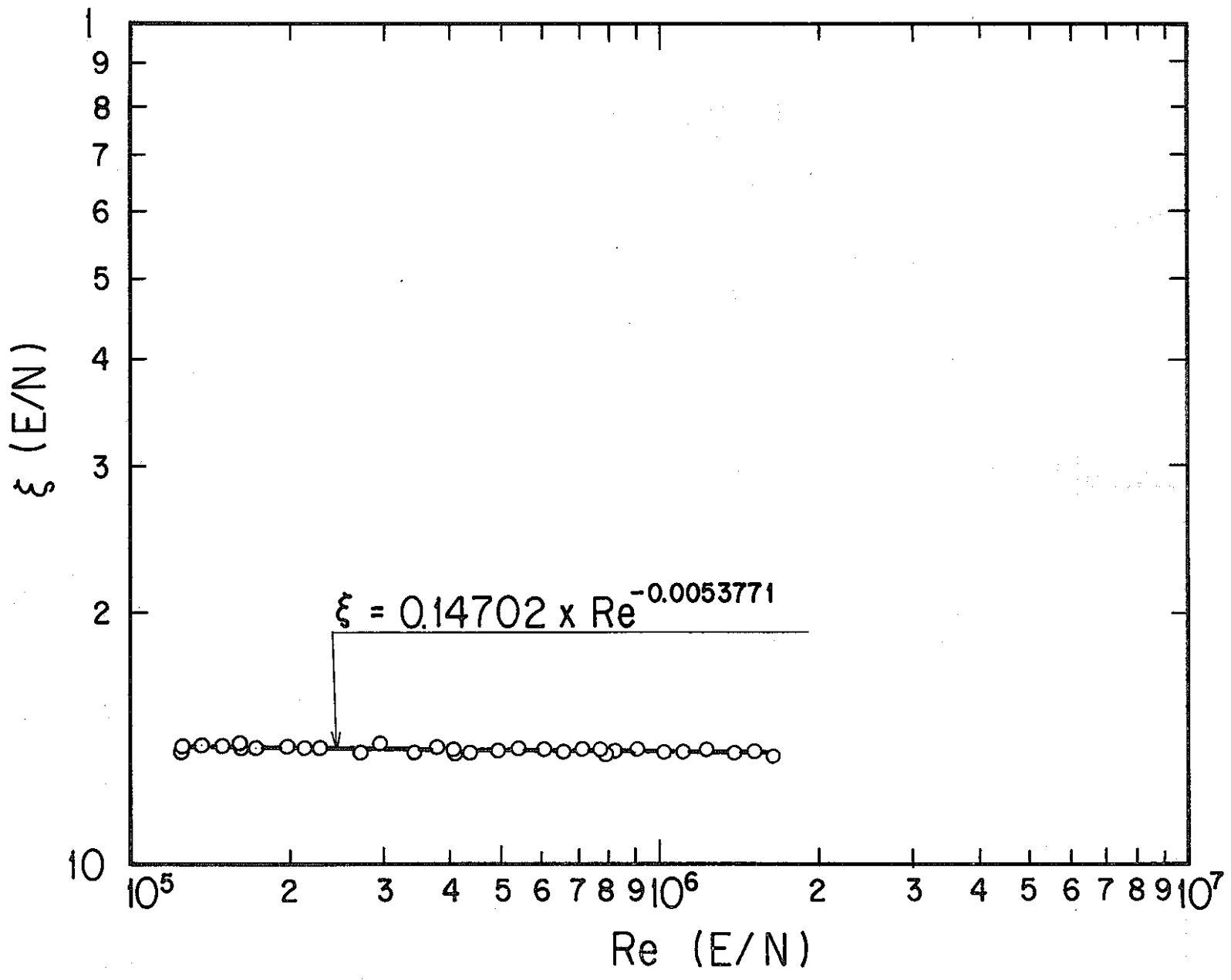


Fig. 4-9 Pressure Loss Coefficient of Driver Fuel (Handling Head)



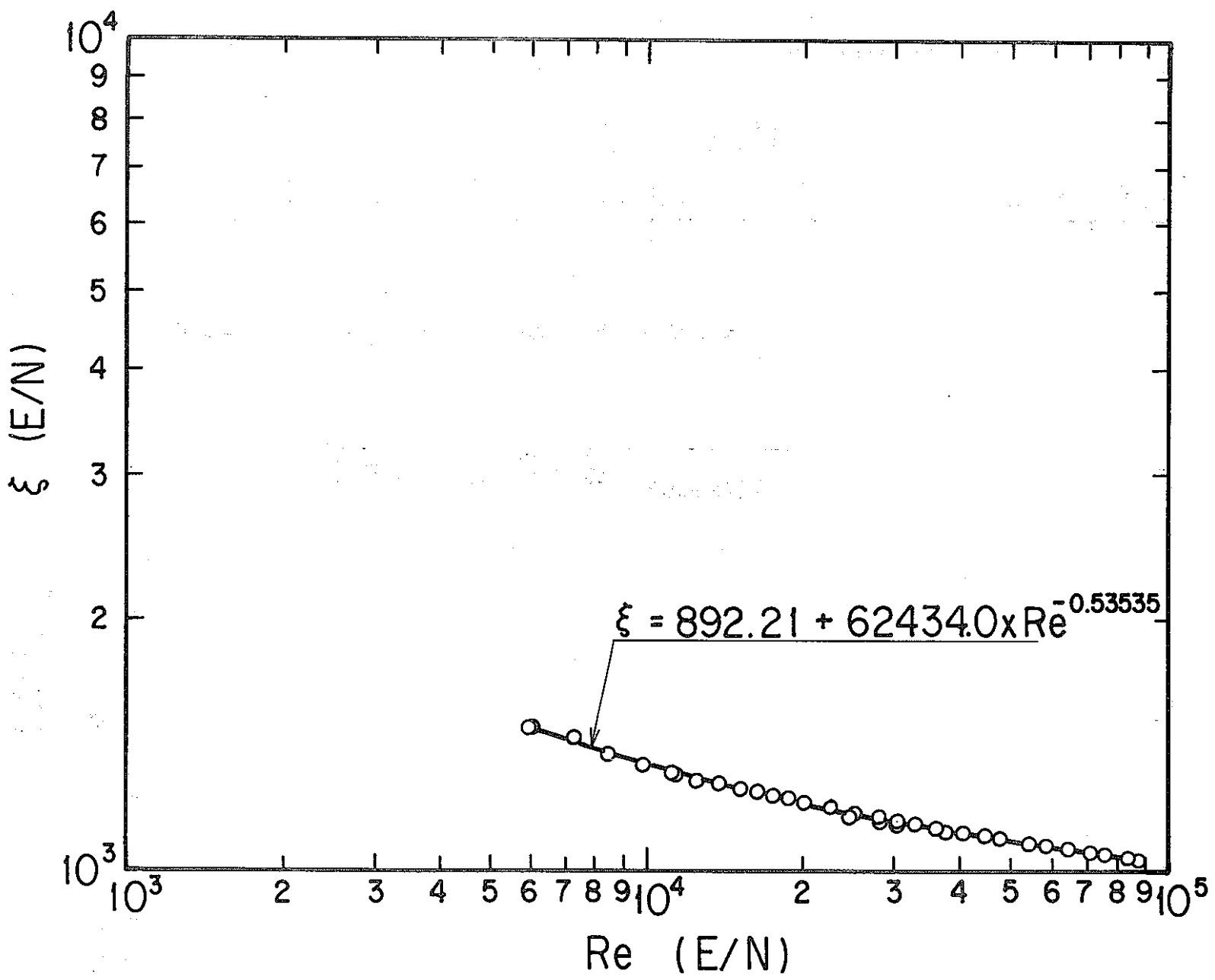


Fig. 4-10 Pressure Loss Coefficient of "Monju" Type Test Fuel Duct (Whole Test Fuel Duct)

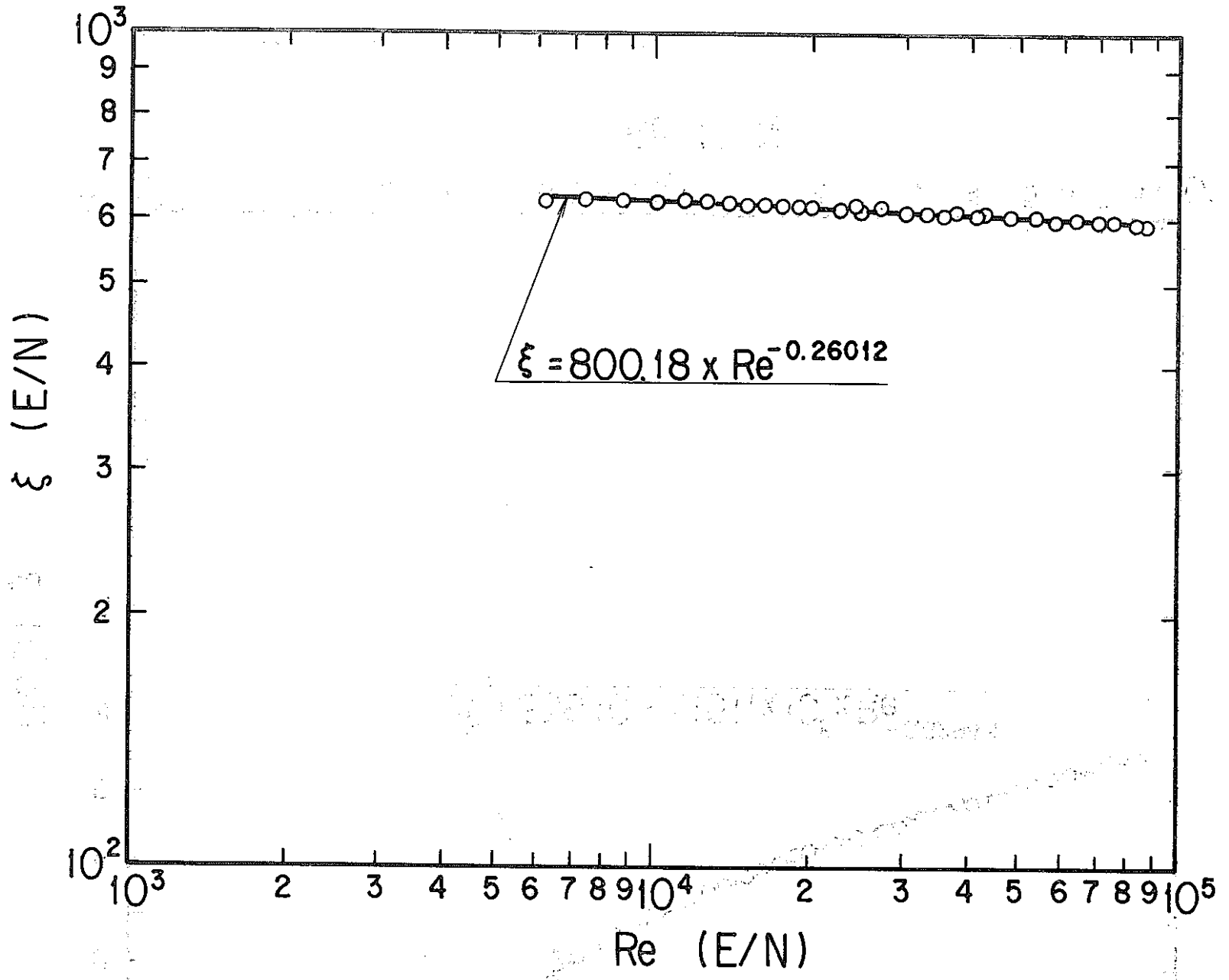


Fig. 4-11 Pressure Loss Coefficient of "Monju" Type Test Fuel Duct (Orifice (2))

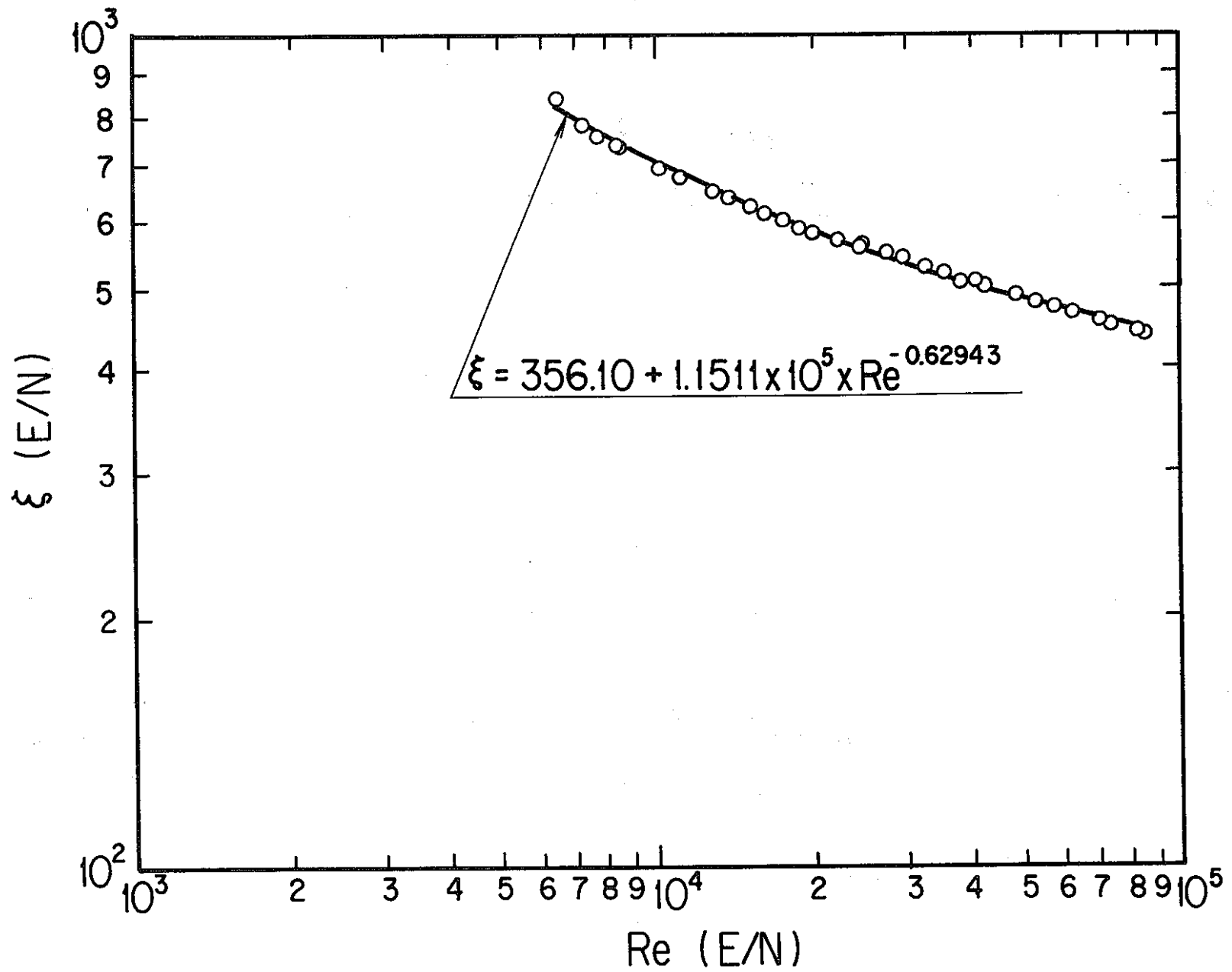
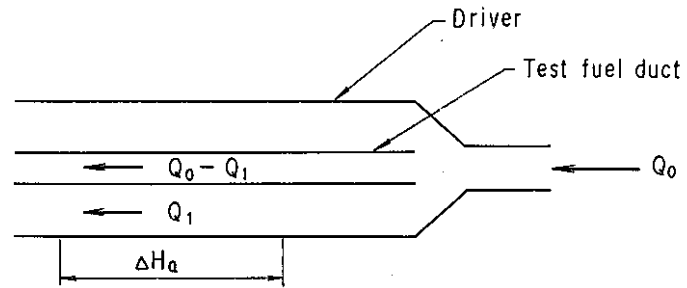
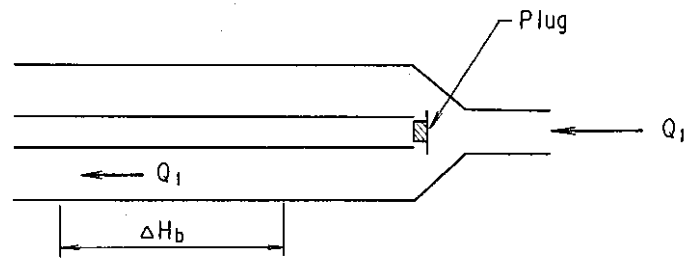


Fig. 4-12 Pressure Loss Coefficient of "Monju" Type Test Fuel Duct (Test Fuel Bundle)



a) Driver + Test Fuel Duct



b) Driver only

$$\Delta H_a = \Delta H_b$$

Q : Flow rate

$\Delta H_b$  : Static pressure drop

Fig. 4-13 Flow Behavior

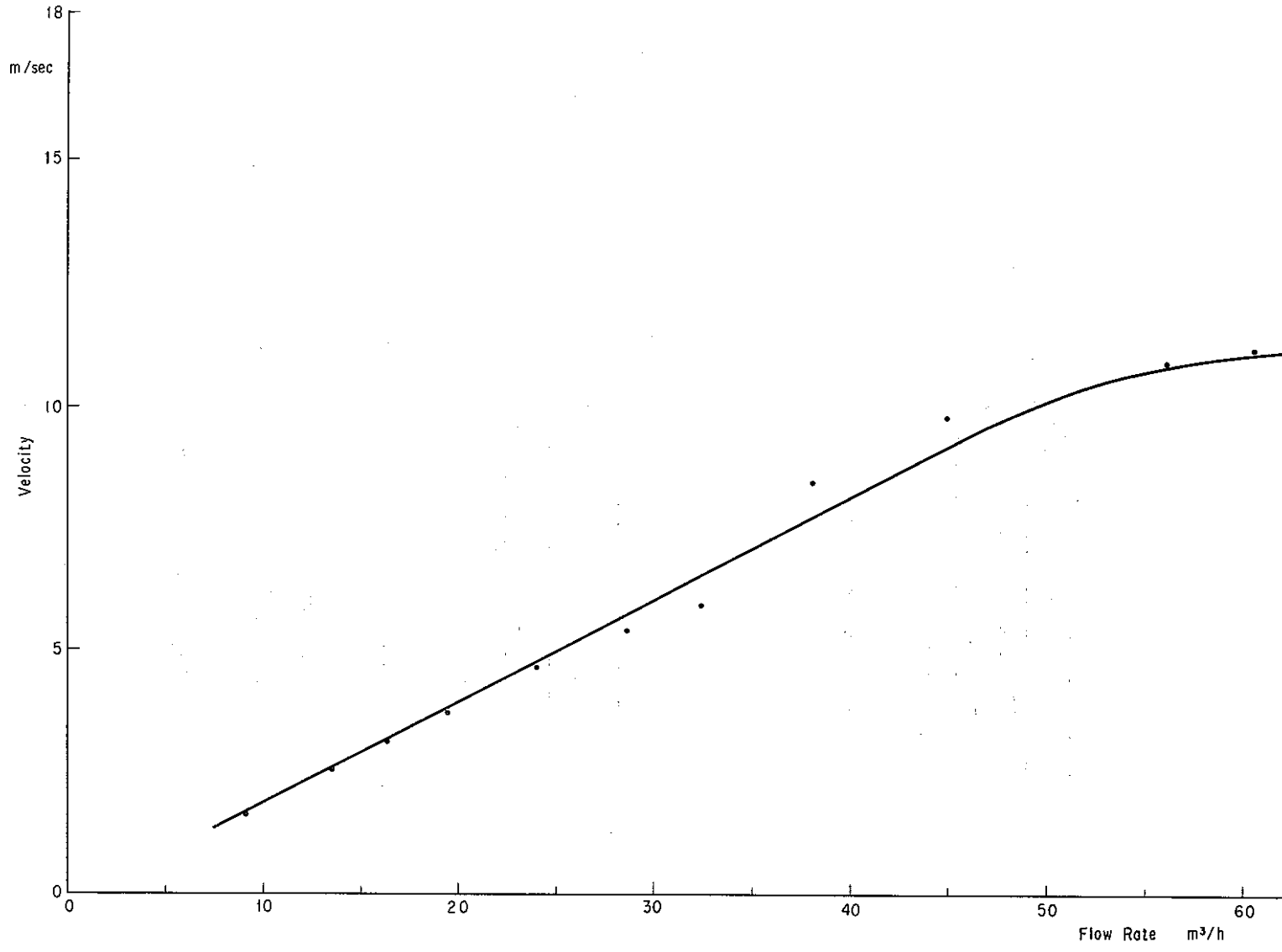


Fig. 4-14 The Relation Between Flow Rate and Velocity in Driver Fuel Bundle

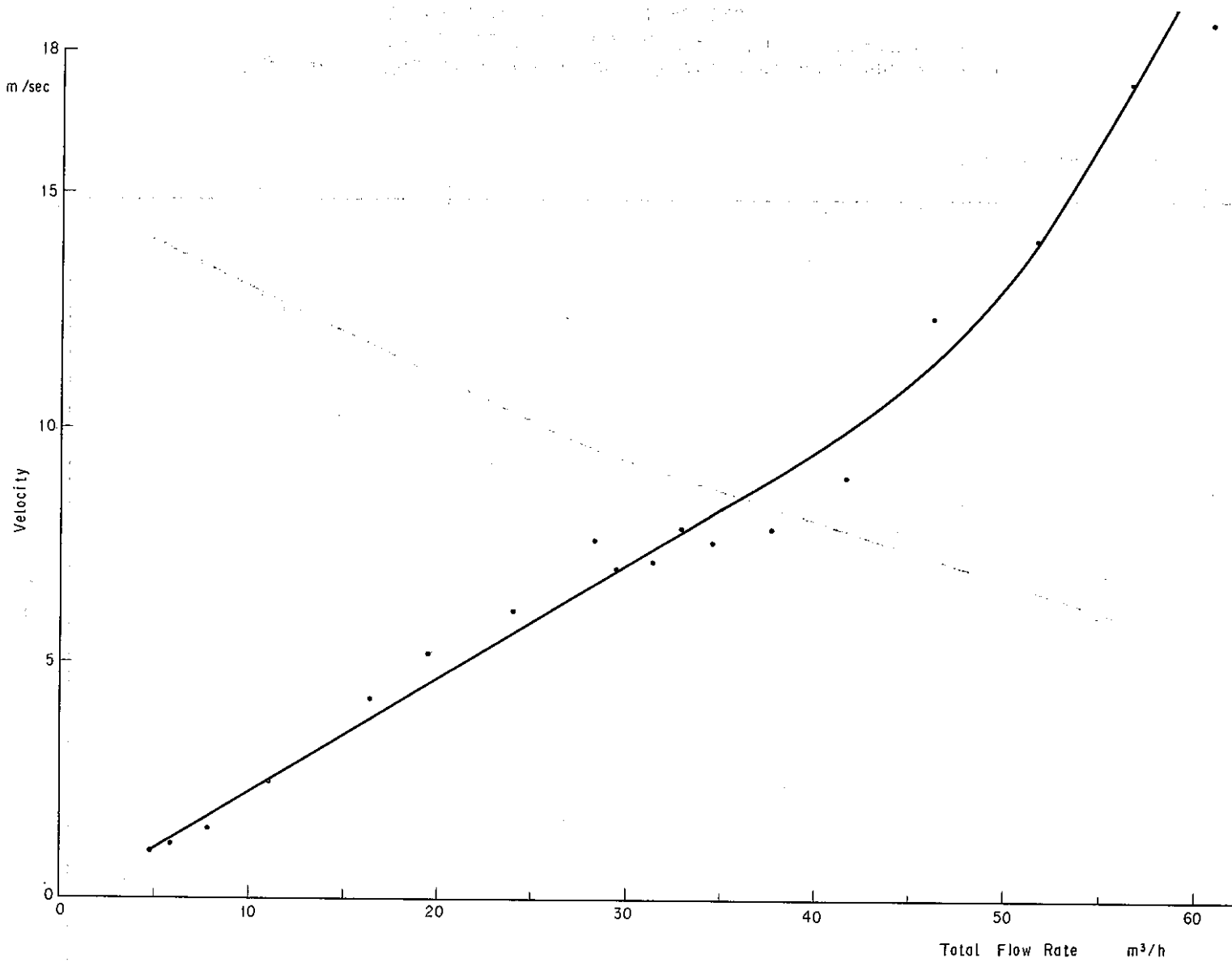


Fig. 4-15 The Relation Between Total Flow Rate and Velocity in Driver Fuel Bundle Where "Monju" Type Irradiation Duct Is Inserted

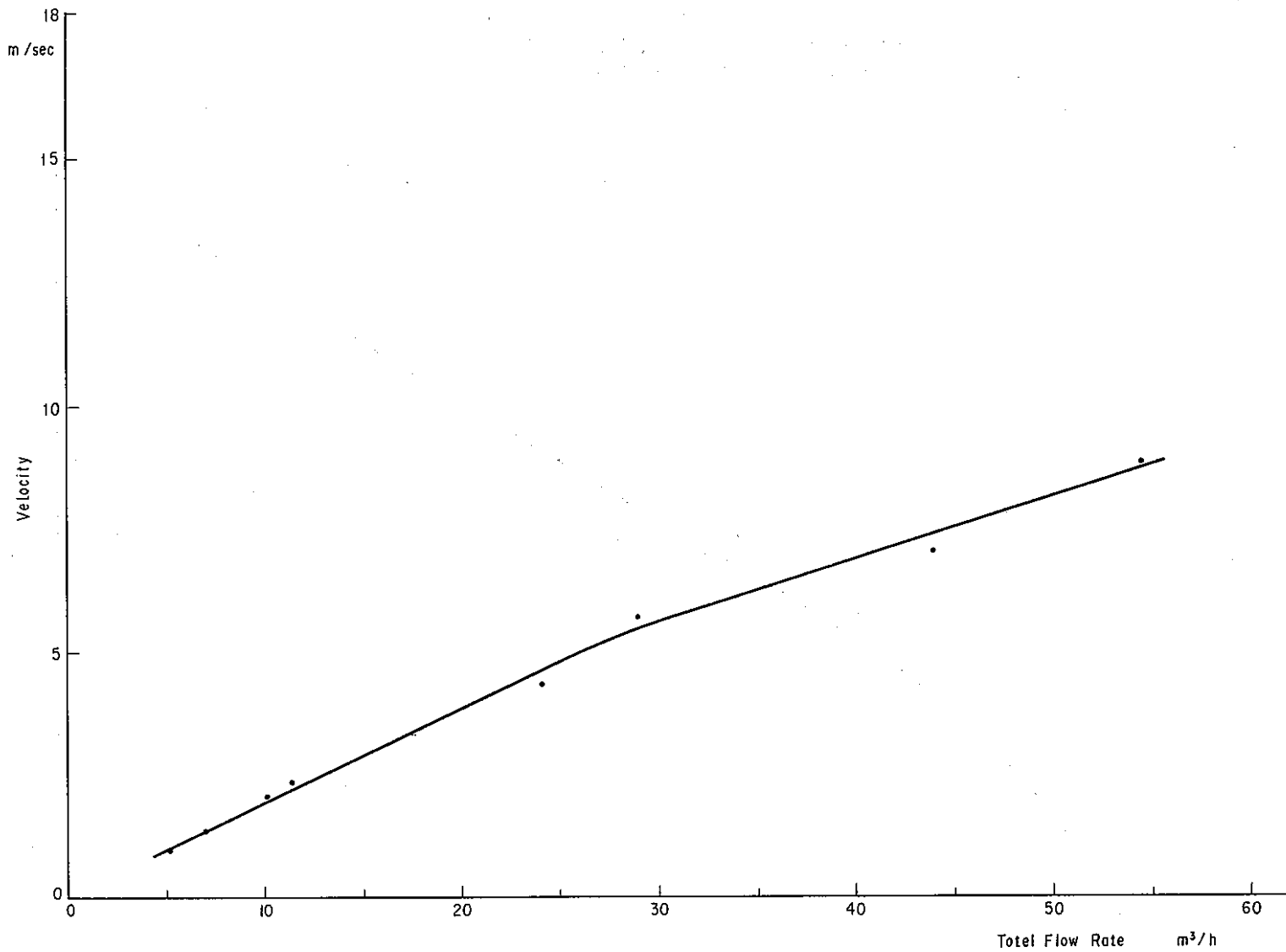


Fig. 4-16 The Relation Between Total Flow Rate and Velocity in Driver Fuel Bundle Where "Joyo" MK-II Type Irradiation Duct Is Inserted

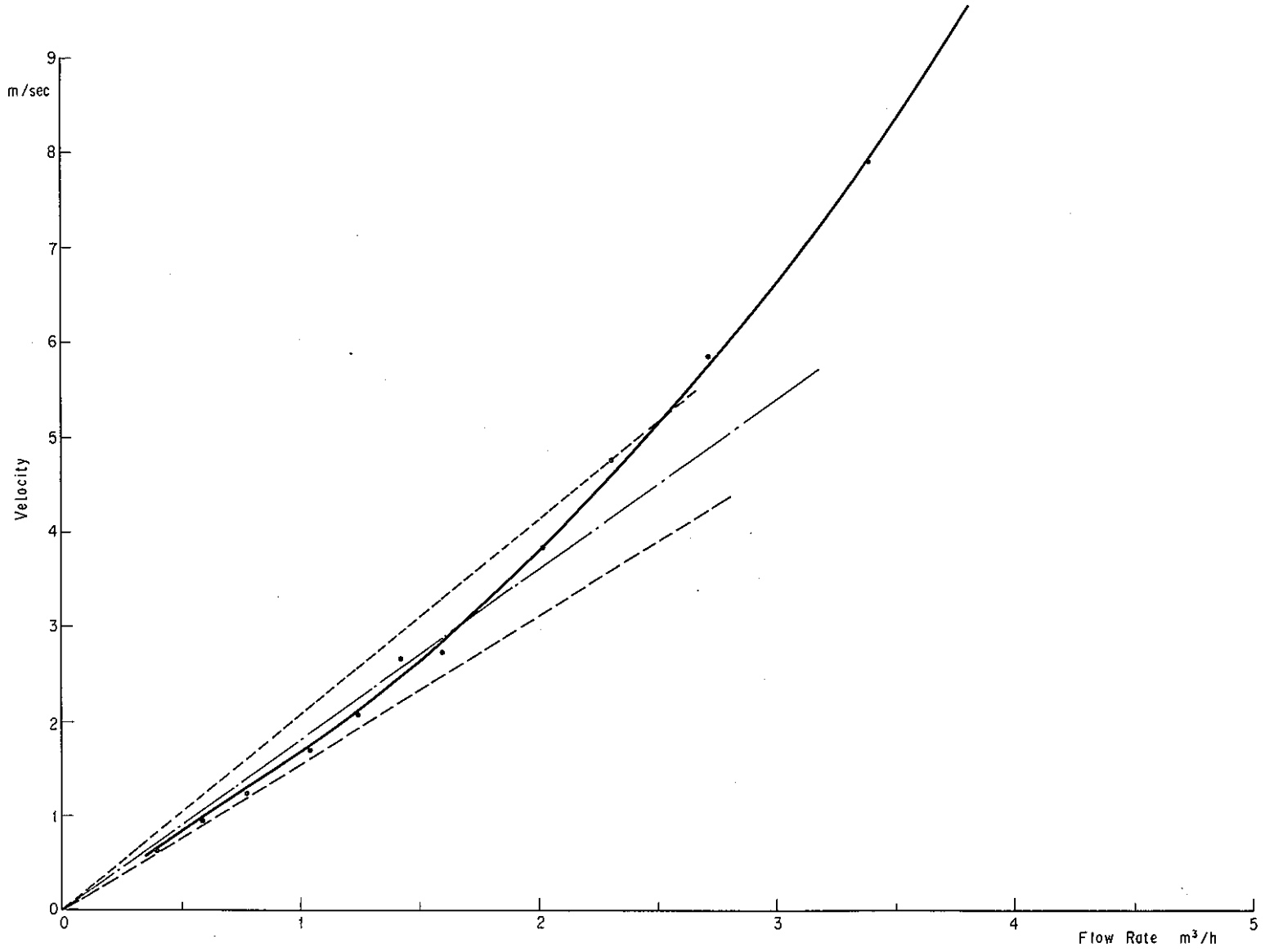


Fig. 4-17 The Relation Between Flow Rate and Velocity in "Monju" Type Test Fuel Bundle



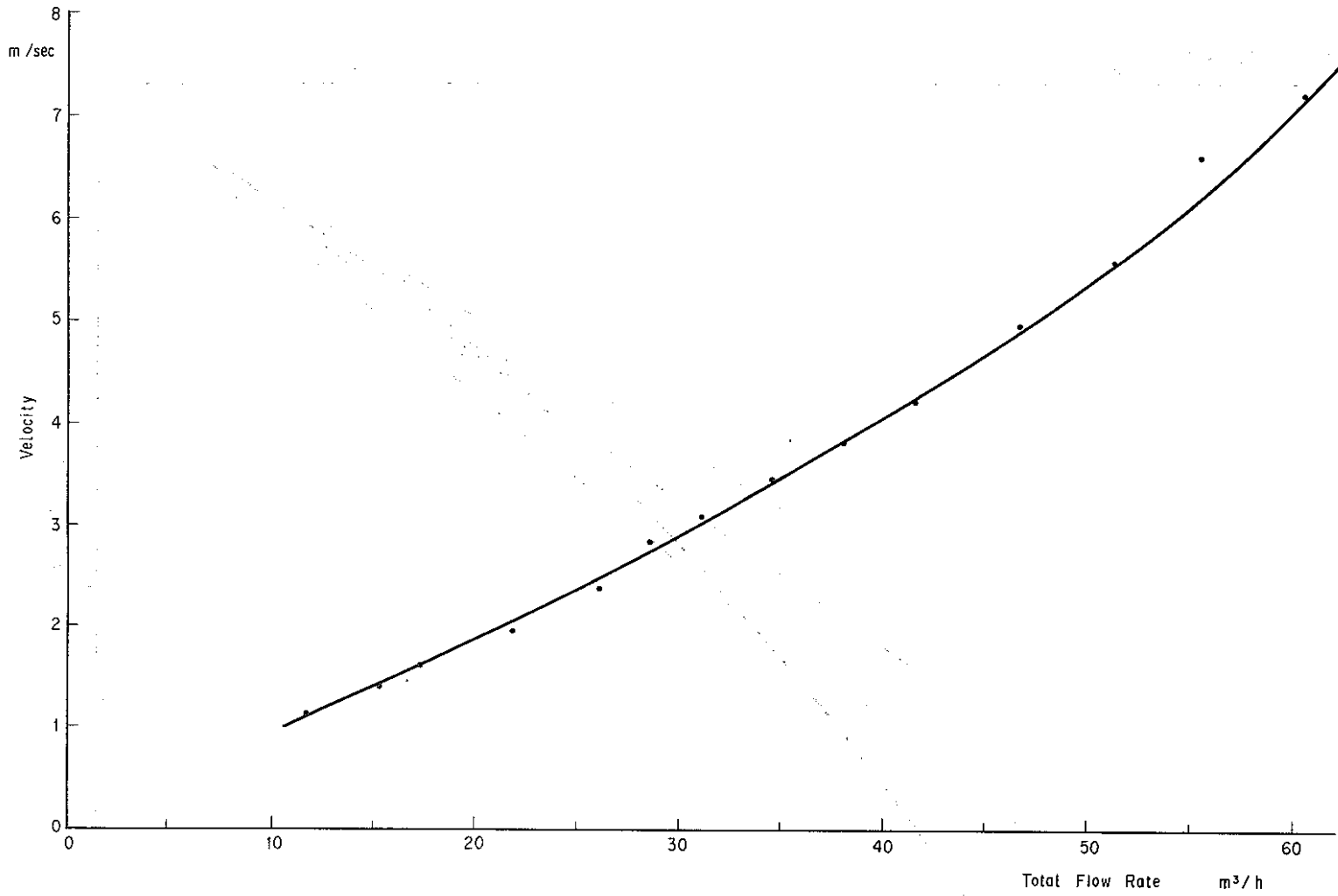


Fig. 4-18 The Relation Between Total Flow Rate and Velocity in "Monju" Type Test Fuel Bundle Inserted into Driver

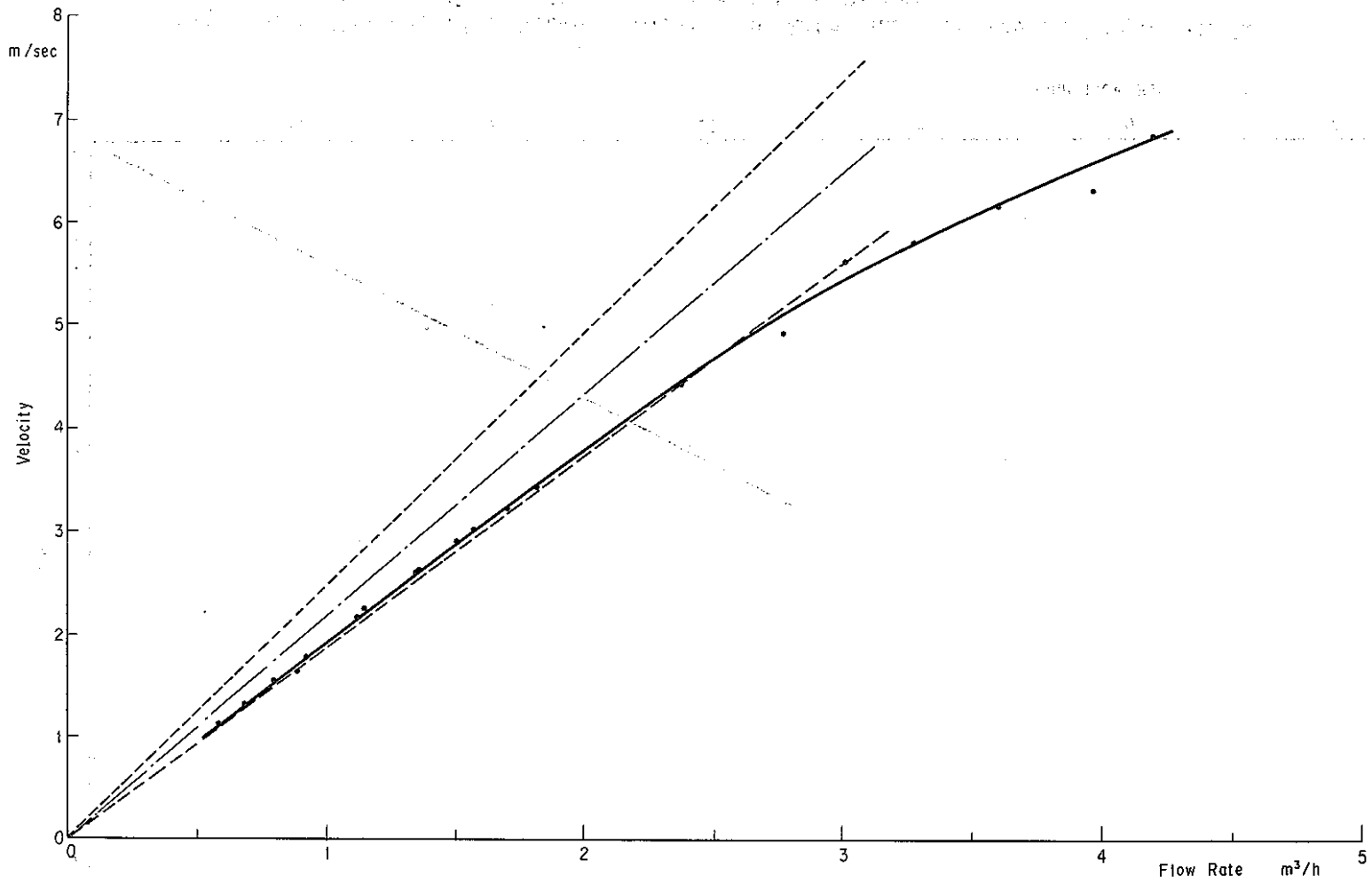


Fig. 4-19 The Relation Between Flow Rate and Velocity in "Joyo" MK-II Type Test Fuel Bundle

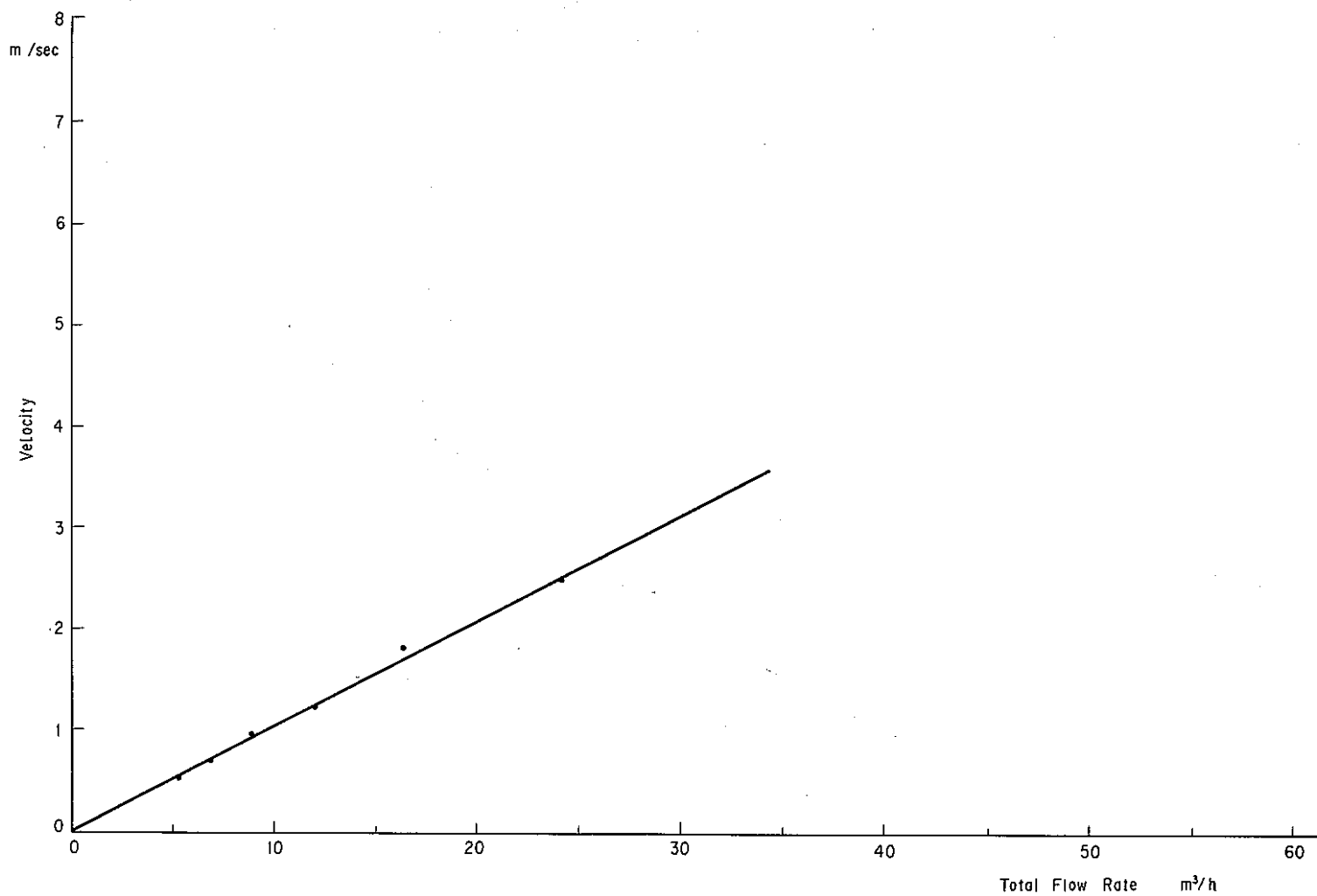
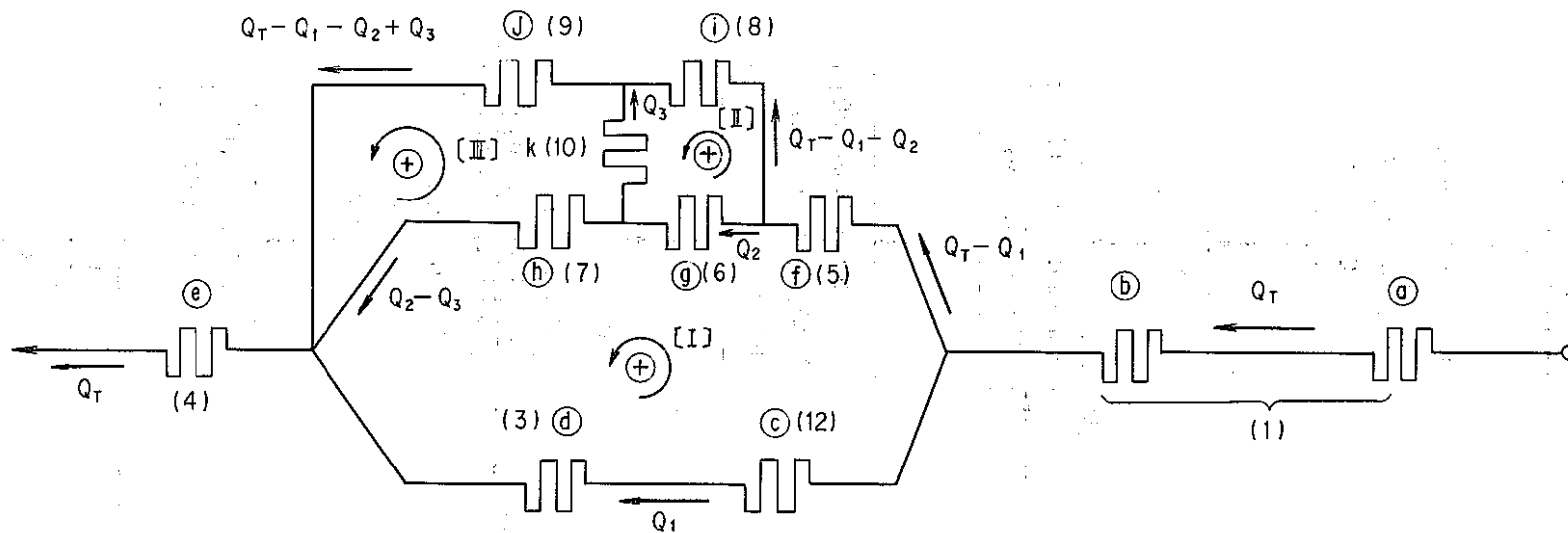


Fig. 4-20 The Relation Between Total Flow Rate and Velocity in "Joyo" MK-II Type Test Fuel Bundle Inserted into Driver



- |                     |                           |
|---------------------|---------------------------|
| (a) Entrance nozzle | (g) Small pipe            |
| (b) Orifice         | (h) Test bundle           |
| (c) Lower shield    | (i) Lower annular section |
| (d) Driver Bundle   | (j) Upper annular section |
| (e) Handling head   | (k) Holes                 |
| (f) Orifice         |                           |

Fig. 5-1 Schematic Flow Circuits

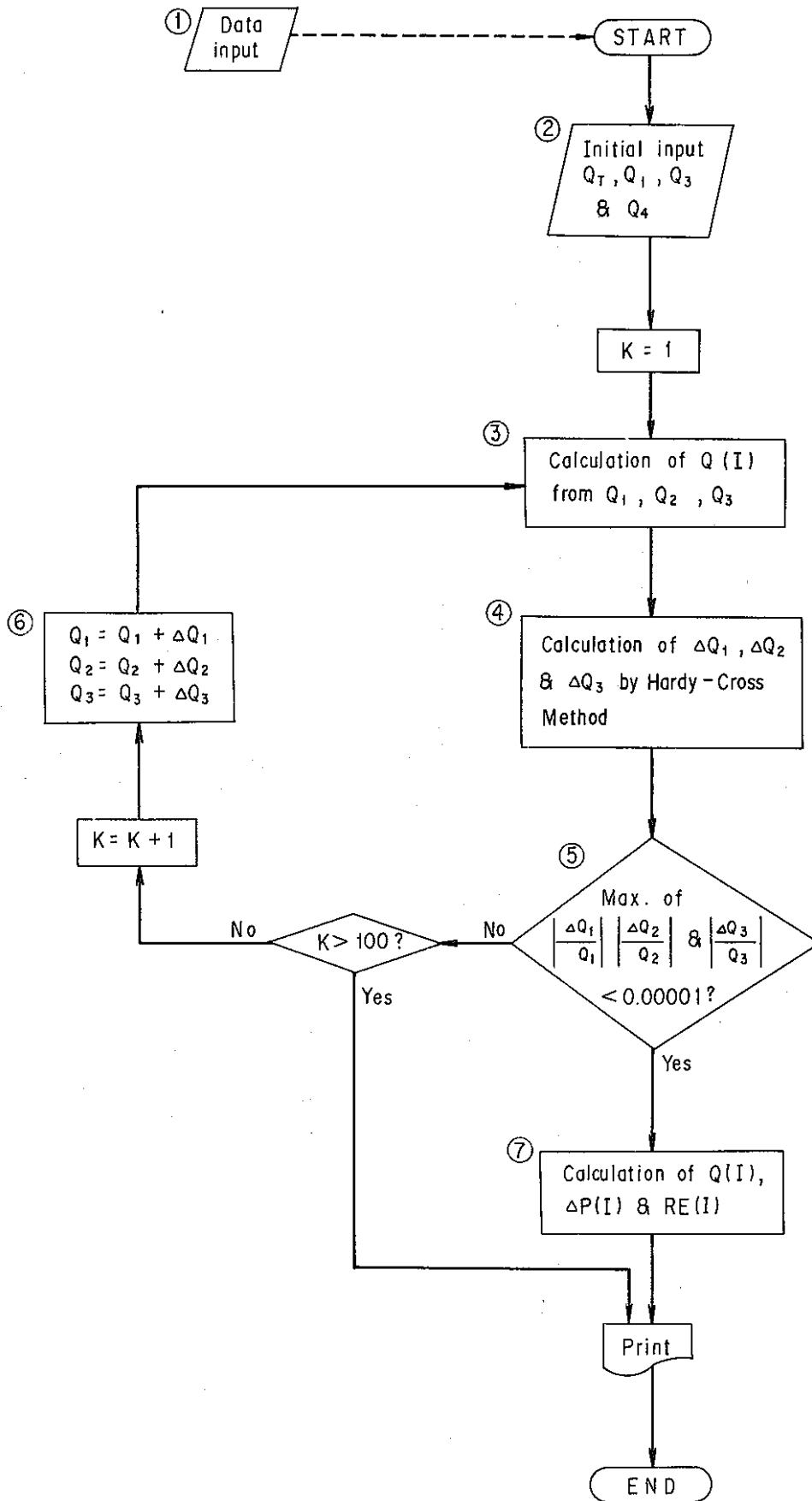


Fig. 5-2 Flow Chart