

JAERI-Tech

94-029



LSTF 蒸気発生器伝熱管の圧力損失特性

— 伝熱管内計装による圧力損失増加 —

1994年11月

鈴木光弘

日本原子力研究所

Japan Atomic Energy Research Institute

本レポートは、日本原子力研究所が不定期に公刊している研究報告書です。
入手の問い合わせは、日本原子力研究所技術情報部情報資料課(〒319-11 茨城県那珂郡東海村)あて、お申し越しください。なお、このほかに財団法人原子力弘済会資料センター(〒319-11 茨城県那珂郡東海村日本原子力研究所内)で複写による実費頒布をおこなっております。

This report is issued irregularly.

Inquiries about availability of the reports should be addressed to Information Division, Department of Technical Information, Japan Atomic Energy Research Institute, Tokai-mura, Naka-gun, Ibaraki-ken 319-11, Japan.

© Japan Atomic Energy Research Institute.1994

編集兼発行 日本原子力研究所
印刷 (株)高野高速印刷

L S T F 蒸気発生器伝熱管の圧力損失特性
 — 伝熱管内計装による圧力損失増加 —

日本原子力研究所東海研究所原子炉安全工学部
 鈴木 光弘

(1994年10月18日受理)

大型非定常試験装置 (L S T F) の蒸気発生器には、1基あたり9種類、計141本のU字型伝熱管が設置されている。このうち6本の計装伝熱管内壁には、熱電対付き触針式液面計 (Conduction Probe with a Thermocouple; CPT) が15個或いは17個、長さ方向に設置されているが、残りの非計装伝熱管135本にはCPTはない。従って、同一長さの計装及び非計装伝熱管を流体が通過する場合、CPTの圧力損失分だけ両者の流動状態に差が生じることになる。そこで、これら2種類の伝熱管を模擬した試験装置を製作して圧力損失特性試験を実施し、CPT単体の圧力損失係数 (K_{CPT}) をレイノルズ数 (Re) の関数として得た。

$$\begin{aligned} K_{CPT} &= 0.16 & 5600 \leq Re \leq 52820, \\ K_{CPT} &= 60.66 \times Re^{-0.688} & 2420 \leq Re \leq 5600, \\ K_{CPT} &= 2.664 \times 10^6 Re^{-2.06} & 1371 \leq Re \leq 2420. \end{aligned}$$

誤差は最大で±22%である。この結果をもとに、L S T F 伝熱管全長にわたる单相流圧力損失係数を評価し、最も短い計装伝熱管は中位の非計装伝熱管と圧力損失が等価であり、中位の計装伝熱管は最も長い非計装伝熱管と等価であることを明らかにした。以上のことから、L S T F 実験の計装伝熱管データを基に非計装伝熱管流体挙動を評価する場合及び計算コードにより予測する場合には、上記の圧力損失特性を有するCPTの影響を考慮する事が重要である。

Pressure Loss Characteristics of LSTF Steam Generator Heat-transfer Tubes
 — Pressure Loss Increase due to Tube Internal Instruments —

Mitsuhiro SUZUKI

Department of Reactor Safety Research
 Tokai Research Establishment
 Japan Atomic Energy Research Institute
 Tokai-mura, Naka-gun, Ibaraki-ken

(Received October 18, 1994)

The steam generator of the Large-Scale Test Facility (LSTF) includes 141 heat-transfer U-tubes with different lengths. Six U-tubes among them are furnished with 15 or 17 probe-type instruments (conduction probe with a thermocouple; CPT) protuberant into the primary side of the U-tubes. Other 135 U-tubes are not instrumented. This results in different hydraulic conditions between the instrumented and non-instrumented U-tubes with the same length. A series of pressure loss characteristics tests was conducted at a test apparatus simulating both types of U-tube. The following pressure loss coefficient (K_{CPT}) was reduced as a function of Reynolds number (Re) from these tests under single-phase water flow conditions.

$$\begin{aligned} K_{CPT} &= 0.16 & 5600 \leq Re \leq 52820, \\ K_{CPT} &= 60.66 \times Re^{-0.688}, & 2420 \leq Re \leq 5600, \\ K_{CPT} &= 2.664 \times 10^6 Re^{-2.06}, & 1371 \leq Re \leq 2420. \end{aligned}$$

The maximum uncertainty is 22%. By using these results, the total pressure loss coefficients of full length U-tubes were estimated. It is clarified that the total pressure loss of the shortest instrumented U-tube is equivalent to that of the middle-length non-instrumented U-tube and also that a middle-length instrumented U-tube is equivalent to the longest non-instrumented U-tube. Concludingly, it is important to take account of the CPT pressure loss mentioned above in estimation of fluid behavior at the non-instrumented U-tubes either by using the LSTF

experiment data from the CPT-installed U-tubes or by using any analytical codes.

Keywords : Conduction-probe Level Meter, CPT-installed Tube, LSTF, Non-instrumented Tube, Pressure Loss Experiment, PWR Plant Simulator, Single-phase Flow, Steam Generator

目 次

1. はじめに	1
2. 試験方法とデータ処理	2
2.1 試験装置	2
2.1.1 試験部本体	2
2.1.2 流量調節測定系	2
2.2 試験方法	3
2.3 データ処理	4
3. 試験結果	12
3.1 圧損特性試験の結果	12
3.2 C P T単体の流動圧損特性	13
3.3 誤差評価	14
3.3.1 測定誤差の評価	14
3.3.2 非定常性の評価	15
4. L S T FのU字伝熱管圧損係数の評価	30
4.1 U字伝熱管の单相流全圧損係数の計算式	30
4.2 L S T F伝熱管の单相流全圧損係数	31
5. ま と め	38
謝 辞	39
参考文献	39
付録A 管路内径の測定結果	40
付録B 予備試験の結果	42

Contents

1. Introduction	1
2. Test Procedures and Data Processing	2
2.1 Test Facility	2
2.1.1 Test Section	2
2.1.2 Flow Control and Measurement System	2
2.2 Test Procedures	3
2.3 Data Processing	4
3. Test Results	12
3.1 Results of Pressure Loss Characteristics Test	12
3.2 Hydraulic Pressure Loss Characteristics of One CPT	13
3.3 Uncertainty Estimation	14
3.3.1 Estimation of Measurement Uncertainty	14
3.3.2 Estimation of Unsteady-effect	15
4. Estimation of Pressure Loss Coefficient for LSTF U-tube	30
4.1 Calculation Formula for Total Pressure Loss Coefficient of U-tube	30
4.2 Total Pressure Loss Coefficient for All Kinds of LSTF U-tubes	31
5. Conclusions	38
References	39
Acknowledgment	39
Appendix A Measurement of Test Tube Inner Diameter	40
Appendix B Results of Preliminary Test	42

List of Tables and Figures

- Table 2.1 Summary of CPT pressure loss characteristics test
- Table 2.2 Time range for data processing of test results
- Table 3.1 Results of CPT pressure loss characteristics test
- (a) CPT-installed tube A,
 - (b) Non-instrumented tube B, 1st test,
 - (c) Non-instrumented tube B, 2nd test
- Table 3.2 Pressure loss coefficient of a CPT (K_{CPT})
- Table 3.3 Uncertainty estimation for experiment data
- Table 4.1 Pressure loss coefficients of all kinds of LSTF U-tubes
in single phase water flow
-
- Fig. 2.1 Concept of CPT pressure loss measurement facility
- Fig. 2.2 Detail of CPT pressure loss measurement facility
- (a) Upper part of facility,
 - (b) Lower part of facility
- Fig. 2.3 CPT installed on LSTF steam generator U-tube wall
- Fig. 2.4 Configuration of CPT model installed on tube wall
- Fig. 3.1 Example of test data (CPT-installed tube A; Runs 1-1 to 1-3)
- (a) Storage tank water level, (b) High range DP data,
 - (c) Low range DP data, (d) Fluid temperature
- Fig. 3.2 Example of test data (CPT-installed tube A; Runs 5-1 to 5-3)
- (a) Storage tank water level, (b) High range DP data,
 - (c) Low range DP data, (d) Fluid temperature
- Fig. 3.3 Correction of zero-shift in high range DP data
(Non-instrumented tube B)
- Fig. 3.4 Corrected pressure loss data related to average flow rate
(Non-instrumented tube B)
- Fig. 3.5 Pressure loss coefficient related to Reynolds number
(Non-instrumented tube B)
- Fig. 3.6 Corrected pressure loss data related to average flow rate
(Instrumented tube A)
- Fig. 3.7 Pressure loss coefficient related to Reynolds number
(Instrumented tube A)
- Fig. 3.8 Friction factor for straight test section B

Fig. 3.9 Pressure loss coefficient for one CPT installed on test tube A

Fig. 4.1 Configuration and arrangement of LSTF SG U-tubes

(a) Configuration of U-tubes and boiling section

(b) Horizontal arrangement of instrumented U-tubes (A-A section)

Fig. 4.2 CPT measurement location at LSTF steam generator U-tubes

Fig. 4.3 Effect of CPT installation on total pressure loss coefficient
of U-tubes under single phase water flow

Table A.1 Measurement of pipe inner diameter at test section

Fig. A.1 Flow control valve characteristics

1. はじめに

大型非定常試験装置(LSTF)はウェスティングハウス社の4ループ加圧水型原子炉を模擬するプラント・シミュレータであり、小破断冷却材喪失事故や自然循環時の熱水力現象、あるいはシビアアクシデント防止を目的としたアクシデントマネジメント関連の熱水力現象を研究するために活用されてきた。この装置は、実機の1次系機器を、高さ方向実寸、冷却材容積比1/48で模擬している。LSTF蒸気発生器(SG)の伝熱管は、内径が実寸大で長さの異なる9種類のU字型伝熱管141本で構成されている。

これらの伝熱管のうち、長・中・短3種類の長さの計装伝熱管(各2本)には、通過する流体の温度と二相液位の検出を目的とする、熱電対付き触針式液面計(CPT)と差圧計とが設置されている。差圧計の低圧側圧力検出端はU字管頂部に設置されているが、CPTは1つの計装伝熱管内に15~17個設置されている。伝熱管流路面積への1個あたり投影面積は約12%であり、流動圧力損失(圧損)に及ぼす影響は無視し得ないものである。出入口圧力が等しい場合に、同じ長さの計装伝熱管と非計装伝熱管の流動状態に差が生じ、計装伝熱管内の流動状態によって非計装伝熱管内の流動状態を代表しえない場合が生じる。特に、低流量の自然循環条件下ではこのような相違が大きくなる。しかし、これまでLSTFにおいてCPT設置による伝熱管圧損増加を評価した研究はなく、従って計装及び非計装伝熱管内における流体挙動の相違は調べようがなかった。

伝熱管総数の95.8%が非計装伝熱管であり、しかもCPT付き計装伝熱管が同じ長さの非計装伝熱管の流動特性と異なる場合、伝熱管全体の流体挙動を特徴づける方法が必要である。1つの方法は、内部流体挙動のわかっている長・中・短3種類の計装伝熱管と等価な流動圧損を持つそれぞれの非計装伝熱管を明らかにし、これをもとに伝熱管全体の流体挙動を推定することである。このため、伝熱管内壁に設置したCPT単体の流動圧損特性把握が不可欠であるが、これは実験的に調べる以外に方法はない。

以上の理由により、LSTFの計装及び非計装伝熱管を模擬する試験装置を製作し、自然循環流条件を含む種々の流速において、CPTの流動圧損特性試験を実施した。試験は常温常圧下(試験部の水頭約7m)で実施し、作動流体には純水を使用した。詳細な試験装置と試験方法、データ処理方法を2章に、試験結果を3章に示す。4章では、この結果を踏まえ、LSTFにおける全ての伝熱管について全長にわたる全圧損係数を算定し、3種類の計装伝熱管と等価な圧損係数を持つ非計装伝熱管を示した。5章にはまとめを示した。試験部本体の伝熱管内径の測定結果と、圧損特性試験の前に実施した予備試験についてはそれぞれ付録A、Bに示した。

2. 試験方法とデータ処理

2.1 試験装置

CPTの圧力損失測定装置の概念を Fig. 2.1に示す。本装置は、図中央にある試験部本体(Test section)と、その前後にある流量調節測定系(Control and measurement system)から成り、二相流ループ実験棟内のTPTF架構西側に設置した。設置は1992年3月19日であり、製作は有限会社中島製作所である。ただし、試験部本体は原研の工作課で製作し、支給した。以下に試験装置の詳細を示す。

2.1.1 試験部本体

Fig. 2.2(a), (b)に本試験装置の詳細を示す。試験部本体は全長 4000 mmのステンレス鋼管であり、内壁面にCPT模擬体(CPT model)を5個設置した計装管Aと、CPTを設置しない非計装管Bを製作した。AとBは互換性を有しており、それぞれフランジで流量調節測定系に接続される。鋼管内径の公称値は19.4mmであるが、実測したAとBの内径は、それぞれ 19.37 ± 0.14 mm、 19.50 ± 0.12 mmであった(付録A参照)。

試験部本体の上部と下部(入り口側)には差圧測定用の圧力タップを設置し、図のように導圧管(DP cell impulse line)で差圧伝送器に接続している。この導圧管の内径は5mmであり、LSTFのSG計装伝熱管頂部の導圧管内径と同じである。下部圧力タップは本体入り口のフランジ端から100 mm下流に、また最も近いCPT模擬体の位置からは880 mm上流にある。

LSTFのSG計装伝熱管内壁に設置されたCPT形状を Fig. 2.3に、本装置の計装管A(Instrumented tube A)内壁に設置したCPT模擬体の詳細を Fig. 2.4に示す。両CPTの形状は同一である。1個のCPTの管路に対する投影面積は約12%である。5個のCPT模擬体は管軸方向に沿って同一線上に配置され、それぞれの設置間隔は、LSTF計装伝熱管と同じ650 mmである。なお、Fig. 2.2(b)に示す試験部本体の垂直度は、全長に対して ± 2 mm($\pm 0.05\%$)以内であった。

2.1.2 流量調節測定系

これは試験部本体以外の機器をからなり、Fig. 2.1の概念に示すように、貯水タンク、導水管(Inflow line)、排水管(Drain line)、流量調節弁(Flow control valve)、エア抜きドレン弁(Air purge valve)、差圧計、水位計、流体温度測定用熱電対およびデータ集録装置が含まれる。タンク内部と流路部分は洗浄を実施し、本試験に先立ち予備試験を実施して性能を確認した(付録B参照)。以下にこれらの機器を簡単に示す。

貯水タンク(Storage tank)はポリエチレン製で、内径 $0.970 \text{ m} \pm 0.5\%$ 、断面積 $0.739 \text{ m}^2 \pm 1\%$ 、内容積約 0.6 m^3 である。試験部において溶存ガスの発泡を極力抑制するため、試験部にかかる水頭圧を大きくするよう、貯水タンクは可能な限り高い位置に設置した。タンク内最低水位位置と試験部最上部との水頭差は 5.05 m 、最下部との水頭差は 9.05 m 、中央位置で約 7 m である。流体温度測定用に、タンク内底部にはクロメル・アルメル熱電対を設置した。タンク内水位測定には、差圧式水位計(DP-type level meter; 10 kPa レンジ)とガラス管水位計(Water level gauge)を併用した。タンクへの給水は、二相流ループ実験棟の純水供給施設を利用し、給水ライン(Water supply line)を経て実施した。

試験部の差圧測定は、 3800 mm スパンの導圧管(DP impulse line)タップに強化ビニールホースを接続し、大小2種類の測定レンジの差圧計(2 kPa , 50 kPa)を使用して実施した。気泡が滞留することのないよう導圧管に勾配をつけ、透明な材質でそれを確認できるようにした。小レンジ差圧計(Low range DP cell)は最大流量 $0.8 \text{ m}^3/\text{h}$ まで測定でき、大レンジ差圧計(High range DP cell)は最大流量 $4.8 \text{ m}^3/\text{h}$ まで測定できる。

導水管及び排水管には外径 40 mm の塩化ビニール管を使用した。排水管最上部にはエア抜きのドレン弁を設置し、また排水管下流からの空気流入を避けるためにU字型ループシール部(0.75 m 深さ)を設け、ここには排水弁(Loopseal drain valve)を設置した。流量調節は、試験部下流の流量調節弁を使用した。

2.2 試験方法

CPT圧損特性試験は、貯水タンク内の水が流出する非定常過程において、一定の試験時間帯で試験部平均流量と平均圧力損失を測定するものである。本試験に先立ち、設定流量と弁開度の関係や流量安定性、試験部流量の範囲、試験部差圧と流量の関係等について見通しを得るため、予備試験を実施した(付録B参照)。本試験は1992年4月21~23日に実施した。Table 2.1に予備試験と圧損特性試験の概要を示す。以下にCPT圧損特性試験についての試験方法を示す。

まず、貯水タンクを満水にした後、排水管のエア抜きドレン弁を開いてエア抜きしたが、滞留していたエアはほとんどなかった。次に、流量調節弁を開いて弁開度を設定し、試験部に通水しながら流れが安定するまで経過を見守る。流れが安定したかどうかは、試験部差圧計ペンレコーダー出力の目視により確認する。その後1ラン分の試験時間帯を設定する。1ランあたりの目安タンク水位変化量は $0.10 \sim 0.15 \text{ m}$ であり、通水量としては $0.07 \sim 0.08 \text{ m}^3$ である。貯水タンク内の水が流出し終わるまでの試験1ステップあたり、流量条件を変えた2~3ランの試験を連続的に実施する。その後貯水タンクに再び給水し、次のステップの特性試験に移行する。

特性試験は、最初に C P T 計装管 A (CPT-installed tube A) について実施し、非計装管 B (Non-instrumented tube B) についてはその後実施した。特性試験におけるタンク内水位、流体温度および試験部差圧(大小レンジ 2種類)の時間変化を磁気テープに集録した。この他、参考値として試験装置周辺の気温を水銀温度計で測定した。

測定し得る試験部流速範囲は、安定して流量調整できる下限から最大流量までの範囲に対応して、計装管 A の場合に 0.12~4.6 m/s の範囲であり、レイノルズ数の範囲としては $1.9 \times 10^3 \sim 7.5 \times 10^4$ である。なお、試験部差圧計では流動圧力損失のみを測定するよう、ゼロ流量時に差圧計の読みをゼロに設定した。C P T 特性が重要となる低流量時の試験ラン数を多く設定し、全流量範囲では 20 点以上の試験ラン数になるようにした。

2.3 データ処理

Table 2.2 に示すように、試験ラン毎に試験時間帯を指定してデータ処理を実施した。特性試験における各試験ラン記号は X-Y で表し、X は貯水タンク満水時から空になるまでを 1 回とする試験ステップ番号、Y は 1 ステップ内の試験順番を表す。特性試験の集録データは、試験部差圧(大レンジ:DP1(mm)、小レンジ:DP2(mm))と貯水タンク水位(TL(mm))、水温(TE(°C))である。使用した磁気テープは、計装管 A の場合に 1 本(MTV=C09204)、非計装管 B の場合に 2 本(MTV=C19204, C29204)である。

各試験ランの時間帯 ($t_1 \leq t \leq t_2$) において、データの平均値や試験部流量、レイノルズ数、圧力損失係数等を求める計算式を以下に示す。

(a) タンク内平均水温 (K)

$$TEA = \{TE(t_1) + TE(t_2)\} / 2 + 273.15 \quad (1)$$

(b) 試験部中心位置の平均圧力 (Pa)

$$PC = PA + RO \times G \times (TLA + TLC) - DRF - DPA_i / 2 \quad (2)$$

ここで RO, TLA, DRF, DPA は後述の式により求める。

$$PA = 1.0133 \times 10^5 \text{ (Pa)}, \quad G = 9.807 \text{ (m/s}^2\text{)},$$

$$TLC = 6.07 \text{ m: タンク底面と試験部中心間の距離,}$$

i=1 は大レンジ差圧計、i=2 は小レンジ差圧計を使用した場合である。

(c) タンク出口から試験部入り口までの圧力損失 (Pa)

$$DRF = C0 \times RO \times (VAV)^2 \quad (3)$$

ここで C0 = 1.83 であり、試験部流速 VAV は式(9)による。

(d) 流体密度 (kg/m³): 蒸気表より求める。

$$RO = \rho_L(PC, TEA) \quad (4)$$

(e) 試験部の流動圧力損失 (Pa)

$$DPA_i = [\{DPA_i(t_1) + DPA_i(t_2)\} / 4 + DPA_i \{(t_1 + t_2) / 2\} / 2] \times RO \times G \times 10^{-3} \quad (5)$$

ここで $i=1$ は大レンジ差圧計, $i=2$ は小レンジ差圧計を使用した場合.

(f) 貯水タンク底面より上の平均水位 (m)

$$TLA = \{ [TL(t_1) + TL(t_2)] / 4 + TL \{ (t_1 + t_2) / 2 \} / 2 \} \times 10^{-3} \quad (6)$$

(g) タンク水位変化 (m)

$$DTL = \{ TL(t_1) - TL(t_2) \} \times 10^{-3} \quad (7)$$

(h) 試験部平均流量 (m^3/s): $A2 (= 0.739 m^2)$ を貯水タンク流路面積として

$$QAV = A2 \times DTL / (t_2 - t_1). \quad (8)$$

(i) 試験部平均流速 (m/s)

$$VAV = QAV / A1 \quad (9)$$

ここで試験部流路面積 $A1$ の値は、計装管 A で $2.947 \times 10^{-4} (m^2)$, 非計装管 B では $2.986 \times 10^{-4} (m^2)$.

(j) 水の動粘性係数 (m^2/s): 蒸気表より求める

$$CHV = \nu_L(PC, TEA) \quad (10)$$

(k) レイノルズ数 $Re (-)$

$$REY = VAV \times D1 / CHV \quad (11)$$

ここで試験部管内径 $D1$ の値は、計装管 A では $1.937 \times 10^{-2} (m)$, 非計装管 B では $1.950 \times 10^{-2} (m)$.

(l) 計装管 A の試験部全圧損係数 $K_T (-)$

$$TFCi = 2.0 \times DPai / \{ RO \times (VAV)^2 \} \quad (12)$$

ここで $i=1$ は大レンジ差圧計, $i=2$ は小レンジ差圧計を使用した場合.

(m) 非計装管 B における試験部全圧損係数 $K_T (-)$

$$TFC0 = C1 \times (REY)^{C2} \quad (13)$$

ここで $C1, C2$ は式(15)に示す定数である.

(n) 計装管 A における CPT 単体の圧損係数 $K_{CPT} (-)$ は、計装管 A と非計装管 B の全圧損係数の差から次式により求める。

$$K_{CPT} = (TFCi - TFC0) / 5 \quad (14)$$

ここで $i=1$ は大レンジ差圧計, $i=2$ は小レンジ差圧計を使用した場合である.

Table 2.1 Summary of CPT pressure loss characteristics test

1. Preliminary test : March 18 & 19, 1992 (Ref. Appendix B)

Test section	:	CPT-installed tube A	
Flow rate at test section	:	$0.13 \leq Q \leq 4.8$	(m ³ /h)
Flow speed at test section	:	$0.12 \leq V \leq 4.6$	(m/s)
Reynolds number	:	$1.9 \times 10^3 \leq Re \leq 7.2 \times 10^4$	(-)
Pressure loss at test section	:	$0.08 \leq DP \leq 49$	(kPa)
Fluid temperature	:	at room temperature	
Number of test step	:	4 steps	
Test run per step	:	3 to 5 runs per step	

2. Pressure loss characteristics test : April 21 to 23, 1992

(1) Test section : CPT-installed tube A

Flow rate at test section	:	$0.09 \leq Q \leq 3.47$	(m ³ /h)
Flow speed at test section	:	$0.085 \leq V \leq 3.27$	(m/s)
Reynolds number	:	$1371 \leq Re \leq 52820$	(-)
Pressure at test section	:	$148 \leq P \leq 170$	(kPa)
Pressure loss at test section	:	$0.057 \leq DP \leq 26.3$	(kPa)
Fluid temperature	:	$286.0 \leq T \leq 286.3$	(K)
Number of test step	:	8 steps	
Test run per step	:	2 to 3 runs per step	
Data recording magnetic tape	:	MTV = C09204	

(2) Test section : Non-instrumented tube B

Flow rate at test section	:	$0.14 \leq Q \leq 4.77$	(m ³ /h)
Flow speed at test section	:	$0.13 \leq V \leq 4.43$	(m/s)
Reynolds number	:	$2183 \leq Re \leq 74930$	(-)
Pressure at test section	:	$131 \leq P \leq 169$	(kPa)
Pressure loss at test section	:	$0.067 \leq DP \leq 37.1$	(kPa)
Fluid temperature	:	$286.9 \leq T \leq 287.6$	(K)
Number of test step	:	8 steps for the 1st test	
	:	4 steps for the 2nd test	
Test run per step	:	2 to 3 runs per step	
Data recording magnetic tape	:	MTV = C19204 for the 1st test	
	:	MTV = C29204 for the 2nd test	

Table 2.2 Time range for data processing of test results

(1) CPT-installed tube A

Test run	t_1 (s)	t_2 (s)	$t_2 - t_1$ (s)	Test run	t_1 (s)	t_2 (s)	$t_2 - t_1$ (s)	Test run	t_1 (s)	t_2 (s)	$t_2 - t_1$ (s)
1-1	70	165	95	1-2	190	270	80	1-3	295	370	75
2-1	60	210	150	2-2	245	370	125	2-3	410	520	110
3-1	100	300	200	3-2	350	500	150	3-3	540	670	130
*4-1	130	530	400	*4-2	620	950	330	*4-3	1040	1300	260
*5-1	150	950	800	*5-2	1100	1700	600	*5-3	1900	2350	450
*6-1	800	3400	2600	*6-2	3700	5300	1600	*6-3	5500	6450	950
7-1	75	210	135	7-2	245	365	120				
8-1	90	250	160	8-2	290	425	135				

(2) Non-instrumented tube B (1st test)

Test run	t_1 (s)	t_2 (s)	$t_2 - t_1$ (s)	Test run	t_1 (s)	t_2 (s)	$t_2 - t_1$ (s)	Test run	t_1 (s)	t_2 (s)	$t_2 - t_1$ (s)
1-1	55	125	70	1-2	150	215	65	1-3	245	305	60
2-1	80	160	80	2-2	190	265	75	2-3	290	360	70
3-1	100	195	95	3-2	220	310	90	3-3	340	425	85
4-1	115	225	110	4-2	250	355	105	4-3	390	490	100
5-1	100	300	200	5-2	560	710	150				
6-1	110	320	210	6-2	430	630	200				
7-1	170	420	250	7-2	540	770	230	7-3	860	1070	210
*8-1	160	560	400	*8-2	640	970	330	*8-3	1080	1380	300

(3) Non-instrumented tube B (2nd test)

Test run	t_1 (s)	t_2 (s)	$t_2 - t_1$ (s)	Test run	t_1 (s)	t_2 (s)	$t_2 - t_1$ (s)	Test run	t_1 (s)	t_2 (s)	$t_2 - t_1$ (s)
*1-1	250	1100	850	*1-2	1250	1900	650	*1-3	2050	2550	500
*2-1	600	2100	1500	*2-2	2450	3450	1000	*2-3	3800	4600	800
*3-1	500	1700	1200	*3-2	2100	3100	1000	*3-3	3400	4100	700
4-1	110	260	150	4-2	320	440	120	4-3	480	590	110

* Data sampling speed is 1 Hz. Other data sampling speed is 10 Hz.

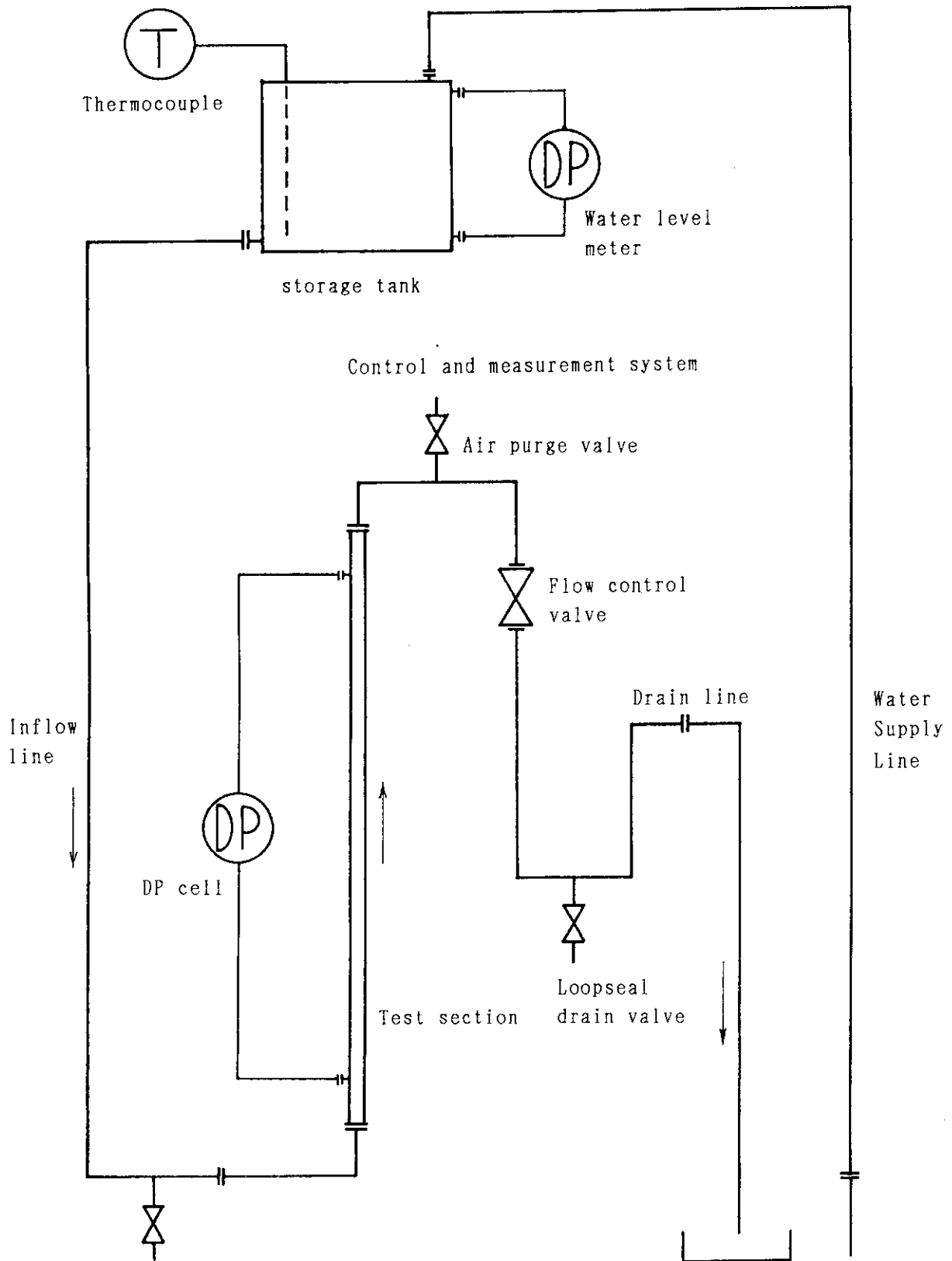


Fig. 2.1 Concept of CPT pressure loss measurement facility

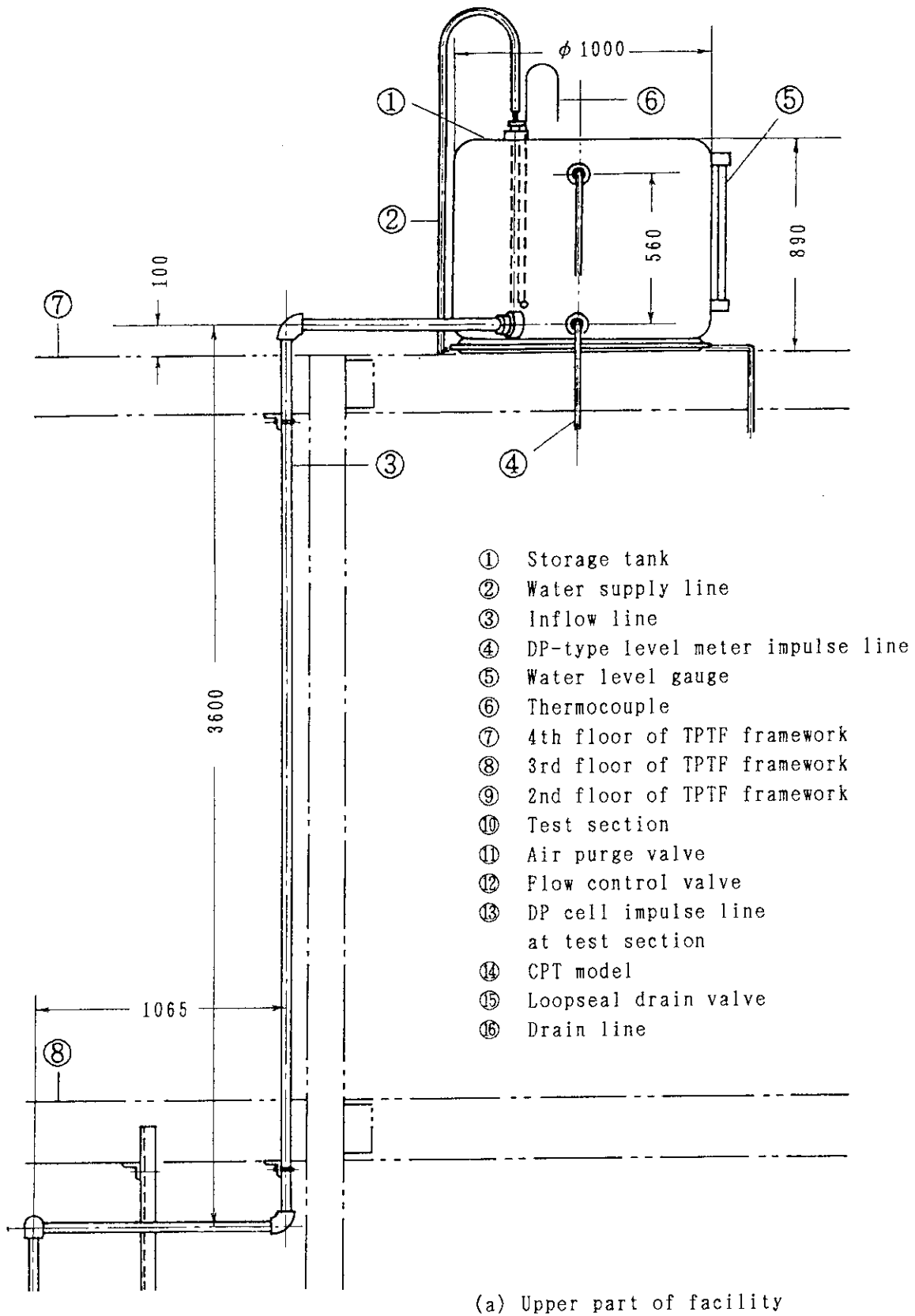
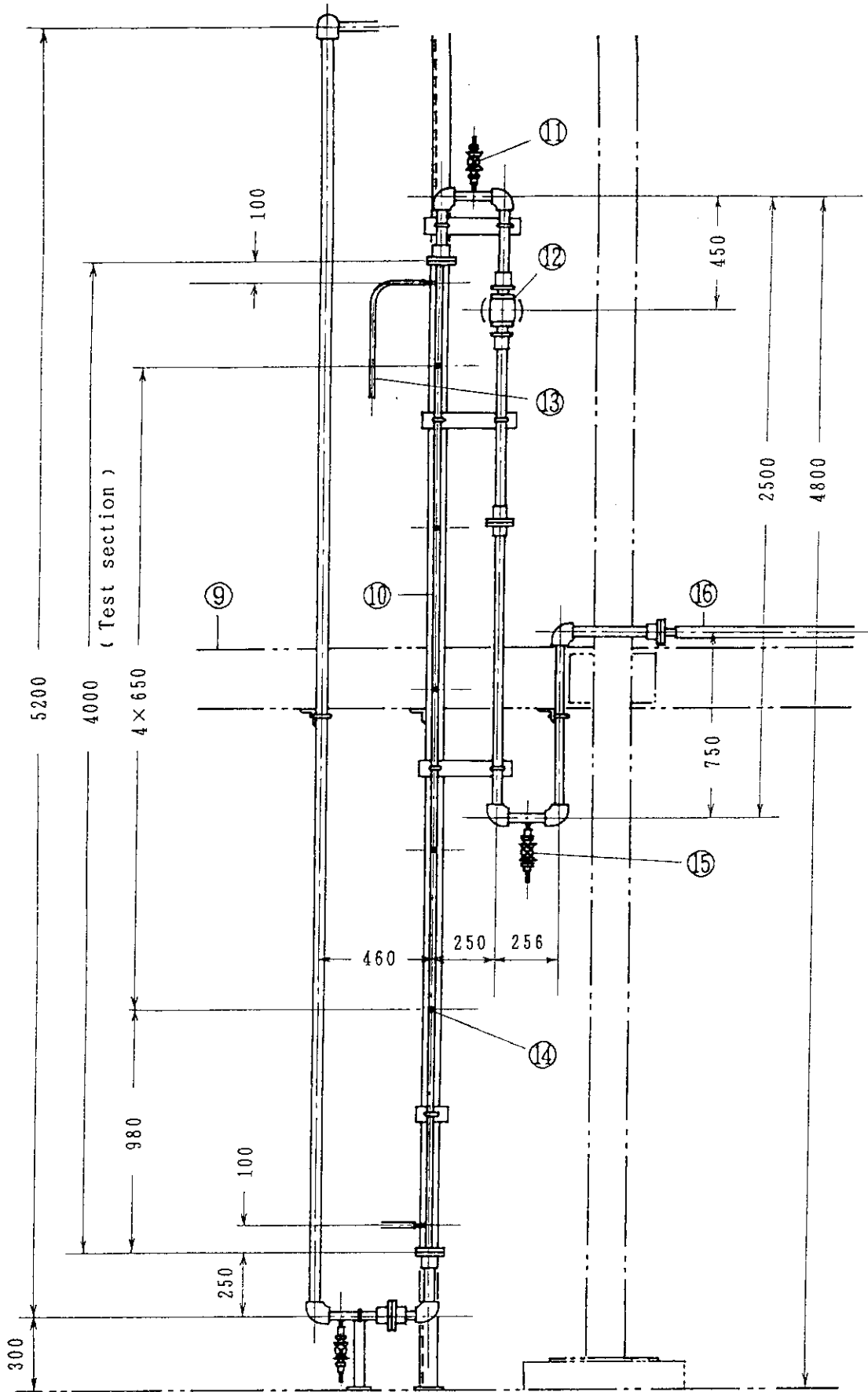


Fig. 2.2 Detail of CPT pressure loss measurement facility



(b) Lower part of facility

Fig. 2.2 Detail of CPT pressure loss measurement facility

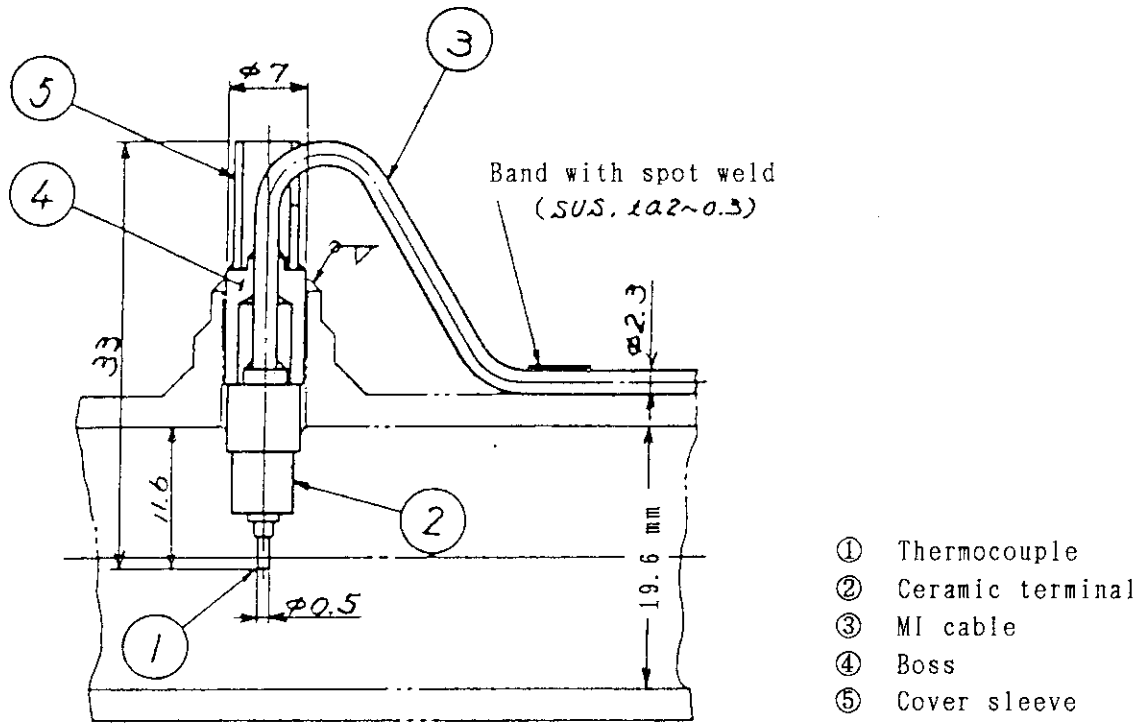


Fig. 2.3 CPT installed on LSTF steam generator U-tube wall

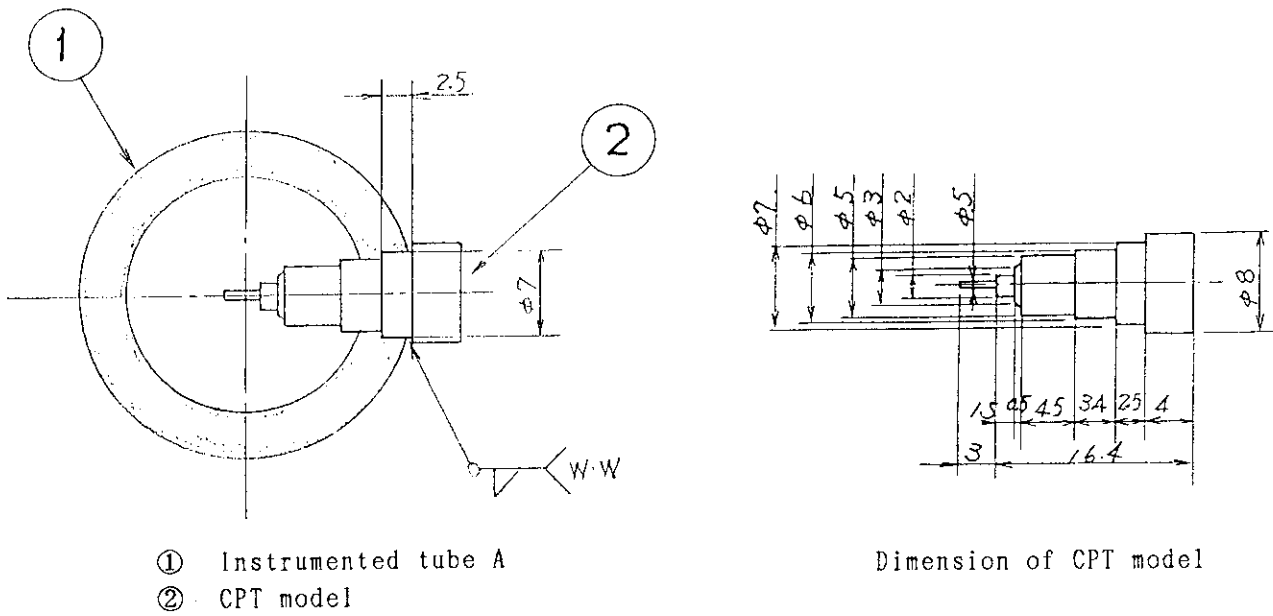


Fig. 2.4 Configuration of CPT model installed on tube wall

3. 試験結果

3.1 圧損特性試験の結果

CPT付き計装管A (CPT-installed tube A)の場合には22ラン、非計装管Bの場合には合計34ランの圧損特性試験を実施した。計装管Aの場合について、流量が比較的大きい条件の測定データの例をFig. 3.1(a)~3.1(d)に、流量が小さい場合の例を Fig. 3.2(a)~3.2(d)に示す。(a)~(d)には、貯水タンク水位、大レンジ差圧測定値、小レンジ差圧測定値、流体温度を示す。小レンジ差圧測定値は小流量時に採用し、1.96 kPa以上の差圧になる流量時にはオーバースケールのため不採用とした。一方大レンジ差圧測定値は、小レンジ差圧データが利用できない範囲で採用するものとした。また、大レンジ差圧測定値は、Fig. 3.3 に示すように差圧ゼロシフトの補正が必要であった。このゼロシフト補正は、計装管Aの場合に 270Pa、非計装管Bの場合に150 Paであった。

これらの補正を行った全試験結果を Table 3.1(a)~(c)に示す。非計装管Bの流量と圧力損失の関係及びレイノルズ数と圧損係数の関係をFig. 3.4, 3.5に示す。これらのレイノルズ数範囲は $2183 \leq Re \leq 74930$ 、流速範囲は $0.13 \leq V \leq 4.43$ m/sであり、 $Re > 13000$ の範囲では大レンジ差圧データを有効データとして採用し、それ以下では小レンジ差圧データを有効とした。

次に計装管Aについて、流量と圧力損失の関係及びレイノルズ数と圧損係数の関係を、Fig. 3.6, 3.7に示す。この場合には試験部流動抵抗が大きいため、レイノルズ数範囲は非計装管の場合よりやや小さく $1371 \leq Re \leq 52820$ 、流速範囲は $0.085 \leq V \leq 3.27$ m/s であった。有効データの判断としては、 $Re > 12000$ では大レンジ差圧データを、それ以下では小レンジ差圧データを採用した。ただし、 $Re = 11440$ では大小両レンジのデータを採用した。

得られた非計装管Bの全圧損係数から直管部の管摩擦係数 λ を(13)式で求め、Fig. 3.8に示すように次の近似式を得た。

$$\lambda = C1 \times (Re)^{C2} \quad (15)$$

$$C1 = 0.4604, \quad C2 = -0.2895 : 2183 \leq Re < 6000,$$

$$C1 = 0.3923, \quad C2 = -0.2711 : 6000 \leq Re < 35000,$$

$$C1 = 0.23866, \quad C2 = -0.2236 : 35000 \leq Re \leq 74930.$$

近似式とデータの誤差は、 $Re = 2183$ の場合を除いて $\pm 3\%$ 以内である。 $Re = 2183$ の場合には約20%の誤差である。一方、この式を管表面粗さ($\epsilon/d = 0.00008$)の場合のコールブルックの式⁽¹⁾と比べると、低流量域で最大5%の差があった。

3.2 CPT単体の流動圧損特性

非計装管の全圧損係数として前節で求めた式(15)を用い、式(14)によりCPT単体の圧損係数 K_{CPT} を求めた所、Table 3.2 及び Fig. 3.9に示す結果が得られた。ここから明らかのように、CPTの流動圧損は $Re \geq 5600$ の範囲ではほぼ一定値 (0.16) であるが、これより流速が低下すると急に抵抗が増加する。このCPT単体圧損特性を、次のように3領域の直線で近似する。なおこれは、CPT自身の圧損係数と、直管部の圧損係数がCPTにより変化する効果の両方を含んでいる。

$$\begin{aligned}
 K_{CPT} &= 0.16 & 5600 \leq Re \leq 52820, \\
 K_{CPT} &= 60.66 \times Re^{-0.688} & 2420 \leq Re < 5600, \\
 K_{CPT} &= 2.664 \times 10^6 \times Re^{-2.06} & 1371 \leq Re < 2420.
 \end{aligned} \tag{16}$$

この近似特性からのデータのばらつきは、大レンジ差圧測定の下限に近い位置で 22%の差があるものの、それ以外では $\pm 13\%$ 以内である。なお、計装管Aの試験範囲は $Re \geq 1371$ であるが、非計装管Bの試験範囲は $Re \geq 2183$ であり、式(16)で与えられる $Re < 2420$ の範囲は他の領域に比べてやや信頼性が低いと言わざるを得ない。

LSTFの水単相自然循環実験条件においては、CPT単体の圧損係数は一定値(0.16)になる。すなわち、炉心出力 3.57MW (定格出力比 5%) の場合⁽²⁾ は、1ループあたり循環流量は 9 kg/s であり、SG伝熱管内平均流速は出口側で 0.28 m/s ($Re=4.3 \times 10^4$)、入り口側で 0.32 m/s ($Re=5.2 \times 10^4$) である。一方炉心出力が 1.42MW (定格出力比 2%) の場合⁽³⁾ には、伝熱管内平均流速は出口側で 0.15 m/s ($Re=2.4 \times 10^4$)、入り口側で 0.16 m/s ($Re=2.7 \times 10^4$) である。いずれにしても、これらの流動条件下ではCPT圧損係数は一定値であるが、SG伝熱管内の流速が更に低下し停滞する場合には、CPT圧損係数は上述の様に増加するので、伝熱管相互の流動状態の差が大きくなる。

なお、本試験に使用した直管の内径とLSTF伝熱管の内径には若干の差があるので、SG伝熱管におけるCPT圧力損失係数を求めるには、管径の相違による補正が必要である。すなわち、CPT模擬体を設置した計装管Aの実測内径は 19.37mmであったが、LSTFのSG伝熱管内径は 19.6 mmである。従って本試験部の内径は 1.17%小さく、流路面積としては 2.33%小さいものである。この差は小さいものであるが、次の補正を行う。管路におけるCPT圧力損失係数は、第一義的に、形状効果として流路面積中のCPT投影面積の比の2乗に支配されると考えられるので、LSTFのU字型熱管のCPT圧力損失係数を K^*_{CPT} とすると、次のように表される。すなわち、 A_1 と A_t を、それぞれ本試験の計装管AとLSTF伝熱管の流路面積とすると、

$$K^*_{CPT} = K_{CPT} \times (A_1/A_t)^2 = 0.954 \times K_{CPT}. \tag{17}$$

第4章でLSTF伝熱管の圧力損失係数を求める場合には、この補正式を使用する。

3.3 誤差評価

3.3.1 測定誤差の評価

本試験データの誤差評価は、直接測定したデータの誤差評価と、測定データから計算で求めたデータの誤差評価から成る。誤差評価の結果を Table 3.3に示す。

考慮すべき測定データとしては、(1) 試験部流路内径、(2) 貯水タンク内径、(3) 貯水タンク水位変化、(4) 大小レンジの試験部差圧、(5) 流体温度、(6) 流体圧力及び (7) 測定時間である。このうち、試験部流路内径とタンク内径については、実測データのバラッキ誤差より相対誤差を求めた。試験部流路面積と貯水タンク流路面積の相対誤差は、それぞれの内径相対誤差より求めた。タンク水位変化と試験部差圧の測定には、いずれも差圧計を用いているので、差圧計の公称誤差 (0.1% FS) を採用し、測定データの最小値と比較した相対誤差を採用した。なお差圧計は、使用圧力範囲(最高 140 kgf/cm²)及び使用温度範囲(-50~100°C)に応じてドリフトによる誤差を生じうるが、本試験では、圧力、温度ともに低く、ほぼ一定条件であるので、これらのドリフトによる誤差への影響は無視し得るものである。

次に流体温度データについては、使用範囲(0~300°C)での公称誤差は最大 ± 2.7 Kであるが、本試験の場合には、次の条件を考慮して測定誤差を最大 ± 1.0 Kとした。すなわち、貯水タンク内流体温度は、計装管A及び非計装管Bそれぞれの試験条件において、いずれも ± 0.3 Kの範囲内で一定に保たれており、水銀温度計で測定した室温との差は 1.0 K以内であった。一方、公称誤差の導出原理から考えると、熱電対の校正は 0°Cと 300°Cの2点で実施され、両者の中間領域は直線近似されているので、最大誤差は校正点の中間領域で生じ、校正点近傍では公称誤差より大幅に小さい誤差となる。校正点近傍の誤差に直線性を想定すると、本試験条件の流体温度、約14°Cにおける誤差は公称誤差の1/10程度になる。これらの要因を総合すると、本試験条件では、温度測定誤差は最大 ± 1.0 Kと考えることができる。なお、本試験条件において、流体密度に及ぼす流体温度誤差の影響は無視し得るものであるが、動粘性係数に対しては $\pm 2.8\%$ の相対誤差を生じさせる。

圧力データ誤差が影響するのは物性値のみであり、本試験の圧力範囲では流体密度及び動粘性係数の変化は著しく小さいので、圧力の測定誤差については無視することとした。最後に時間の測定誤差であるが、これは主としてデータのサンプリング間隔に依存する。サンプリング速度は、Table 2.2に示すように、1.0 Hzと 10 Hzの2種類であるので、最大誤差はそれぞれ ± 1.0 s、 ± 0.1 sである。計装管Aと非計装管Bの特性試験における最小データ処理時間に対してこれらの相対誤差を求めると、それぞれ $\pm 0.4\%$ 、 $\pm 0.3\%$ となる。

次に、以上の測定データから計算される試験データについては、次式により相対誤差を評価する。ここでは Table 3.3に示すように、平均流速(Ave. fluid speed)、レイノルズ数、全圧力損失係数(Pressure loss coef.)、C P T 圧力損失係数(CPT pres. loss coef.)について示す。測定物理量 X_i の相対誤差を $\Delta(X_i)/X_i$ と表わす時、試験部の平均流速(VAV)の相対誤差は、式(8)、(9)から

$$\Delta(VAV)/VAV = \Delta A2/A2 - \Delta A1/A1 + \Delta(DTL)/DTL - \Delta(t_2-t_1)/(t_2-t_1). \quad (18)$$

レイノルズ数の相対誤差については、式(11)より

$$\Delta(Re)/Re = \Delta(VAV)/VAV + \Delta(D1)/D1 - \Delta(CHV)/CHV. \quad (19)$$

計装管 A の全圧力損失係数 (TFCi) については、式(12)より

$$\Delta(TFCi)/TFCi = \Delta(DPAi)/DPAi - \Delta(RO)/RO - 2\Delta(VAV)/VAV, \quad (20)$$

ここで $i=1$ は大レンジ差圧計、 $i=2$ は小レンジ差圧計を使用した場合である。密度の相対誤差は無視し得るので、 $\Delta(RO)/RO = 0$ とする。C P T 単体の圧力損失係数 (CFCi) については、式(14)から最大誤差として

$$\text{Max}\{\Delta(CFCi)/CFCi\} = \Delta(TFCA)/TFCA + \Delta(TFCB)/TFCB, \quad (21)$$

但し、 $\Delta(TFCA)/TFCA$ と $\Delta(TFCB)/TFCB$ は、それぞれ大小レンジの差圧データを含めた計装管 A と非計装管 B の全圧力損失係数の相対誤差である。

これらの計算データに関する誤差評価結果は Table 3.3に示されている。試験部平均流速の相対誤差は、計装管 A、非計装管 B いずれも $\pm 4\%$ 程度であり、レイノルズ数については、相対誤差が $\pm 8\%$ 未満であった。試験部の圧損係数の相対誤差は、計装管 A の場合に $\pm 12\%$ 未満、非計装管 B の場合に $\pm 11\%$ 未満である。C P T 単体の圧力損失係数については、2つの全圧力損失係数の差をとる結果として、最大で $\pm 22\%$ 以内の相対誤差となった。この誤差評価の結果と、Fig 3.9 に示す C P T 単体圧損係数データの最大ばらつき誤差とは偶然に一致しているが、このことは、本試験における C P T 単体圧損係数データの誤差範囲が適切であることを示すものである。

3.3.2 非定常性の評価

C P T 圧損特性試験は原理的に非定常試験である。貯水タンク水位が減少する時の試験部流速の時間変化は、差圧測定区間において次の加速度項 $DPa(Pa)$ を発生させる。

$$DPa = \int \rho_L \times (dV/dt) ds \quad (22)$$

ここで作動流体は非圧縮性であるとする、 $\rho_L \times (dV/dt)$ は流路に添う積分の外に出せ、差圧測定区間 L_0 (m)、タンク水位データの非定常性を示すパラメータ UL (-)、タンク平均水位 TLA (m)を用いて次式で与えられる。

$$DPa = - 8 \rho_L L_0 \times UL \times TLA / (t_2 - t_1)^2 \quad (23)$$

$$UL = [\{TL(t_1) + TL(t_2)\} / 2 - TL\{(t_1 + t_2) / 2\}] \times 10^{-3} / TLA \quad (24)$$

しかし、試験部流路内径に比べて貯水タンク内径を大きく設定してあるため、試験条件の範囲では流速の時間変化は著しく小さい。最大の加速度項でも $|DPa| < 0.01$ Pa であり、試験部の流動圧力損失に比較してこの非定常性は十分無視し得るものである。従って、貯水タンク水位が時間変化することによる試験部圧力損失への非定常性の影響は無視し得るものである。

Table 3.1 (a) Results of CPT pressure loss characteristics test (CPT-installed tube A)

Test run	Temperature (K)	Pressure (Pa)	Water level change (m)	Ave. flow rate (m^3/s)	Flow speed (m/s)	Reynolds number, Re	Average DP data (Pa)		K _r (-)	
							Hi-range	Low range	Hi-range	Low range
1-1	286.15	1.540×10^5	0.1105	8.598×10^{-4}	2.918	4.718×10^4	2.161×10^4	1.960×10^3	5.081	(0.461)
1-2	286.15	1.505×10^5	0.0995	9.195×10^{-4}	3.120	5.045×10^4	2.413×10^4	1.960×10^3	4.960	(0.403)
1-3	286.15	1.475×10^5	0.0977	9.627×10^{-4}	3.267	5.282×10^4	2.630×10^4	1.960×10^3	4.931	(0.368)
2-1	286.03	1.638×10^5	0.1063	5.235×10^{-4}	1.776	2.863×10^4	8.700×10^3	1.960×10^3	5.517	(1.243)
2-2	286.03	1.618×10^5	0.0940	5.560×10^{-4}	1.887	3.041×10^4	9.762×10^3	1.960×10^3	5.489	(1.102)
2-3	286.03	1.596×10^5	0.0892	5.990×10^{-4}	2.032	3.276×10^4	1.100×10^4	1.960×10^3	5.331	(0.950)
3-1	286.03	1.667×10^5	0.1002	3.700×10^{-4}	1.256	2.024×10^4	4.794×10^3	1.960×10^3	6.084	(2.488)
3-2	286.03	1.648×10^5	0.0843	4.152×10^{-4}	1.409	2.271×10^4	5.797×10^3	1.960×10^3	5.844	(1.977)
3-3	286.03	1.627×10^5	0.0824	4.686×10^{-4}	1.590	2.563×10^4	7.143×10^3	1.960×10^3	5.653	(1.551)
4-1	286.03	1.689×10^5	0.0885	1.636×10^{-4}	0.555	8.947×10^3	1.083×10^3	1.119×10^3	7.031	7.266
4-2	286.03	1.674×10^5	0.0934	2.092×10^{-4}	0.710	1.144×10^4	1.726×10^3	1.739×10^3	6.853	6.902
4-3	286.03	1.657×10^5	0.0922	2.621×10^{-4}	0.889	1.433×10^4	2.519×10^3	1.960×10^3	6.374	(4.960)
5-1	286.03	1.695×10^5	0.0928	0.857×10^{-4}	0.291	4.690×10^3	3.645×10^2	3.700×10^2	8.616	8.747
5-2	286.15	1.683×10^5	0.0830	1.023×10^{-4}	0.347	5.612×10^3	4.842×10^2	4.948×10^2	8.042	8.219
5-3	286.15	1.671×10^5	0.0782	1.284×10^{-4}	0.436	7.043×10^3	7.236×10^2	7.427×10^2	7.632	7.833
6-1	286.15	1.695×10^5	0.0879	0.250×10^{-4}	0.0848	1.371×10^3	0.652×10^2	0.567×10^2	18.136	15.769
6-2	286.21	1.685×10^5	0.0953	0.440×10^{-4}	0.149	2.418×10^3	1.250×10^2	1.213×10^2	11.224	10.892
6-3	286.27	1.674×10^5	0.0837	0.651×10^{-4}	0.221	3.582×10^3	2.448×10^2	2.318×10^2	10.043	9.510
7-1	286.27	1.550×10^5	0.1508	8.257×10^{-4}	2.802	4.545×10^4	2.025×10^4	1.960×10^3	5.163	(0.500)
7-2	286.27	1.520×10^5	0.1392	8.574×10^{-4}	2.909	4.719×10^4	2.125×10^4	1.960×10^3	5.024	(0.463)
8-1	286.27	1.573×10^5	0.1630	7.531×10^{-4}	2.555	4.145×10^4	1.714×10^4	1.960×10^3	5.252	(0.601)
8-2	286.27	1.544×10^5	0.1435	7.855×10^{-4}	2.666	4.324×10^4	1.837×10^4	1.960×10^3	5.172	(0.552)

Table 3.1 (b) Results of CPT pressure loss characteristics test (Non-instrumented tube B, 1st test)

Test run	Temperature (K)	Pressure (Pa)	Water level change (m)	Ave. flow rate (m ³ /s)	Flow speed (m/s)	Reynolds number Re	Average DP data (Pa)		K _r	
							Hi-range	Low range	Hi-range	Low range
1-1	287.58	1.393×10 ⁵	0.1154	1.218×10 ⁻³	4.081	6.897×10 ⁴	3.280×10 ⁴	1.960×10 ³	3.943	(0.236)
1-2	287.58	1.354×10 ⁵	0.1111	1.264×10 ⁻³	4.232	7.153×10 ⁴	3.421×10 ⁴	1.960×10 ³	3.823	(0.219)
1-3	287.58	1.307×10 ⁵	0.1075	1.324×10 ⁻³	4.433	7.493×10 ⁴	3.707×10 ⁴	1.960×10 ³	3.775	(0.200)
2-1	287.41	1.525×10 ⁵	0.0989	9.138×10 ⁻⁴	3.060	5.149×10 ⁴	1.917×10 ⁴	1.960×10 ³	4.097	(0.419)
2-2	287.35	1.468×10 ⁵	0.1038	1.023×10 ⁻³	3.426	5.754×10 ⁴	2.332×10 ⁴	1.960×10 ³	3.977	(0.334)
2-3	287.41	1.404×10 ⁵	0.1075	1.135×10 ⁻³	3.800	6.393×10 ⁴	2.821×10 ⁴	1.960×10 ³	3.910	(0.272)
3-1	287.35	1.574×10 ⁵	0.0989	7.695×10 ⁻⁴	2.577	4.329×10 ⁴	1.425×10 ⁴	1.960×10 ³	4.294	(0.590)
3-2	287.35	1.549×10 ⁵	0.0983	8.073×10 ⁻⁴	2.704	4.541×10 ⁴	1.549×10 ⁴	1.960×10 ³	4.242	(0.537)
3-3	287.35	1.526×10 ⁵	0.0965	8.388×10 ⁻⁴	2.809	4.719×10 ⁴	1.648×10 ⁴	1.960×10 ³	4.179	(0.497)
4-1	287.35	1.597×10 ⁵	0.1020	6.851×10 ⁻⁴	2.294	3.854×10 ⁴	1.162×10 ⁴	1.960×10 ³	4.416	(0.745)
4-2	287.35	1.575×10 ⁵	0.1020	7.177×10 ⁻⁴	2.404	4.038×10 ⁴	1.269×10 ⁴	1.960×10 ³	4.397	(0.679)
4-3	287.35	1.557×10 ⁵	0.0995	7.356×10 ⁻⁴	2.463	4.138×10 ⁴	1.311×10 ⁴	1.960×10 ³	4.324	(0.646)
5-1	287.35	1.658×10 ⁵	0.1191	4.400×10 ⁻⁴	1.474	2.475×10 ⁴	5.452×10 ³	1.960×10 ³	5.025	(1.807)
5-2	287.35	1.611×10 ⁵	0.1081	5.325×10 ⁻⁴	1.783	2.996×10 ⁴	7.427×10 ³	1.960×10 ³	4.674	(1.234)
6-1	287.35	1.646×10 ⁵	0.1380	4.857×10 ⁻⁴	1.626	2.732×10 ⁴	6.469×10 ³	1.960×10 ³	4.894	(1.483)
6-2	287.35	1.621×10 ⁵	0.1368	5.054×10 ⁻⁴	1.693	2.843×10 ⁴	6.843×10 ³	1.960×10 ³	4.780	(1.369)
7-1	287.35	1.678×10 ⁵	0.1038	3.089×10 ⁻⁴	1.028	1.726×10 ⁴	2.923×10 ³	1.960×10 ³	5.539	(3.714)
7-2	287.35	1.657×10 ⁵	0.1075	3.453×10 ⁻⁴	1.157	1.943×10 ⁴	3.582×10 ³	1.960×10 ³	5.359	(2.933)
7-3	287.35	1.637×10 ⁵	0.1081	3.804×10 ⁻⁴	1.274	2.140×10 ⁴	4.180×10 ³	1.960×10 ³	5.156	(2.418)
8-1	287.35	1.689×10 ⁵	0.0916	1.692×10 ⁻⁴	0.567	9.520×10 ³	1.083×10 ³	1.056×10 ³	6.747	6.577
8-2	287.35	1.674×10 ⁵	0.0965	2.161×10 ⁻⁴	0.724	1.216×10 ⁴	1.607×10 ³	1.564×10 ³	6.141	5.977
8-3	287.35	1.657×10 ⁵	0.1038	2.557×10 ⁻⁴	0.856	1.439×10 ⁴	2.100×10 ³	1.960×10 ³	5.731	(5.349)

Table 3.1 (c) Results of CPT pressure loss characteristics test (Non-instrumented tube B, 2nd test)

Test run	Temperature (K)	Pressure (Pa)	Water level change (m)	Ave. flow rate (m ³ /s)	Flow speed (m/s)	Reynolds number, Re	Average DP data (Pa)		K _r	
							Hi-range	Low range	Hi-range	Low range
1-1	286.99	1.692 × 10 ⁵	0.0873	0.759 × 10 ⁻⁴	0.254	4.231 × 10 ³	2.450 × 10 ²	2.620 × 10 ²	7.584	8.110
1-2	286.99	1.680 × 10 ⁵	0.0916	1.041 × 10 ⁻⁴	0.349	5.804 × 10 ³	4.246 × 10 ²	4.373 × 10 ²	6.985	7.195
1-3	286.93	1.668 × 10 ⁵	0.0861	1.273 × 10 ⁻⁴	0.426	7.081 × 10 ³	6.041 × 10 ²	6.163 × 10 ²	6.656	6.790
2-1	287.05	1.690 × 10 ⁵	0.0794	0.391 × 10 ⁻⁴	0.131	2.183 × 10 ³	6.543 × 10 ¹	6.655 × 10 ¹	7.633	7.764
2-2	287.11	1.679 × 10 ⁵	0.0806	0.596 × 10 ⁻⁴	0.199	3.330 × 10 ³	1.852 × 10 ²	1.674 × 10 ²	9.311	8.418
2-3	287.23	1.667 × 10 ⁵	0.0855	0.790 × 10 ⁻⁴	0.264	4.429 × 10 ³	3.048 × 10 ²	2.784 × 10 ²	8.721	7.966
3-1	287.23	1.694 × 10 ⁵	0.0782	0.481 × 10 ⁻⁴	0.161	2.700 × 10 ³	1.403 × 10 ²	1.228 × 10 ²	10.802	9.458
3-2	287.23	1.682 × 10 ⁵	0.0885	0.654 × 10 ⁻⁴	0.219	3.670 × 10 ³	2.450 × 10 ²	2.039 × 10 ²	10.210	8.498
3-3	287.23	1.670 × 10 ⁵	0.0849	0.896 × 10 ⁻⁴	0.300	5.025 × 10 ³	3.946 × 10 ²	3.469 × 10 ²	8.769	7.710
4-1	287.23	1.605 × 10 ⁵	0.1343	6.619 × 10 ⁻⁴	2.217	3.712 × 10 ⁴	1.088 × 10 ⁴	1.960 × 10 ³	4.433	(0.798)
4-2	287.29	1.584 × 10 ⁵	0.1099	6.769 × 10 ⁻⁴	2.267	3.802 × 10 ⁴	1.120 × 10 ⁴	1.960 × 10 ³	4.361	(0.763)
4-3	287.29	1.569 × 10 ⁵	0.1014	6.810 × 10 ⁻⁴	2.281	3.825 × 10 ⁴	1.139 × 10 ⁴	1.960 × 10 ³	4.383	(0.754)

Table 3.2 Pressure loss coefficient of a CPT (K_{CPT})

Test run	Reynolds number, Re	K_{CPT}		Test run	Reynolds number, Re	K_{CPT}	
		Hi-range	Low range			Hi-range	Low range
1-1	4.718×10^4	0.172	-----	5-1	4.690×10^3	-----	0.186
1-2	5.045×10^4	0.160	-----	5-2	5.612×10^3	-----	0.160
1-3	5.282×10^4	0.163	-----	5-3	7.043×10^3	-----	0.173
2-1	2.863×10^4	0.151	-----	6-1	1.371×10^3	-----	0.922
2-2	3.041×10^4	0.160	-----	6-2	2.418×10^3	-----	0.285
2-3	3.276×10^4	0.147	-----	6-3	3.582×10^3	-----	0.212
3-1	2.024×10^4	0.170	-----	7-1	4.545×10^4	0.181	-----
3-2	2.271×10^4	0.154	-----	7-2	4.719×10^4	0.161	-----
3-3	2.563×10^4	0.149	-----	8-1	4.145×10^4	0.181	-----
4-1	8.947×10^3	-----	0.147	8-2	4.324×10^4	0.174	-----
4-2	1.144×10^4	0.149	0.159				
4-3	1.433×10^4	0.125	-----				

Table 3.3 Uncertainty estimation for experiment data

No.	Items	Nominal instrument specification Instrument Full scale Accuracy	Tube A data range Data range Unit Accuracy	Tube B data range Data range Unit Accuracy	Relative Accuracy
1	Pipe inner diameter	Cylinder gauge 1 mm ± 0.01 mm	19.37 mm $\pm 0.7\%$	19.50 mm $\pm 0.6\%$	
2	Pipe flow area	(Calculation)	2.947×10^{-4} m ² $\pm 1.4\%$	2.986×10^{-4} m ² $\pm 1.2\%$	
3	Tank inner diameter	Scale 2000 mm ± 1 mm	970 mm $\pm 0.5\%$	970 mm $\pm 0.5\%$	
4	Tank flow area	(Calculation)	0.739 m ² $\pm 1.0\%$	0.739 m ² $\pm 1.0\%$	
5	Water level change	Level meter 1000 mmH ₂ O $\pm 0.1\%$ FS	78.2 ~ 163.0 mm $\pm 1.3\%$	78.2 ~ 138.0 mm $\pm 1.3\%$	
6	Low range DP data	DP cell 200 mmH ₂ O $\pm 0.1\%$ FS	56.7 ~ 1739 Pa $\pm 3.5\%$	66.6 ~ 1564 Pa $\pm 2.9\%$	
7	High range DP data	DP cell 5000 mmH ₂ O $\pm 0.1\%$ FS	1.73 ~ 26.3 kPa $\pm 2.8\%$	2.10 ~ 37.1 kPa $\pm 2.3\%$	
8	Fluid temperature	Thermocouple 270 ~ 570 K $\pm 0.9\%$ FS	286.0 ~ 286.3 K ± 1 K	287.0 ~ 287.6 K ± 1 K	
9	Fluid viscosity	(Equation (10))	1.17×10^{-6} m ² /s $\pm 2.8\%$	1.17×10^{-6} m ² /s $\pm 2.8\%$	
10	Time duration	(Data sampling rate = 1, 10 Hz)	75 ~ 2600 s $\pm 0.4\%$	60 ~ 1500 s $\pm 0.3\%$	
11	Ave. fluid speed	(Equation (9))	0.085 ~ 3.27 m/s $\pm 4.1\%$	0.131 ~ 4.43 m/s $\pm 3.8\%$	
12	Reynolds number	(Equation (11))	1371 ~ 52820 $\pm 7.6\%$	2183 ~ 749300 $\pm 7.2\%$	
13	Pressure loss coef.	(Equation (12) or (13))	4.93 ~ 15.77 $\pm 11.7\%$	3.78 ~ 9.46 $\pm 10.5\%$	
14	CPT pres.loss coef.	(Equation (14))	0.125 ~ 0.922 $\pm 22\%$	-----	-----

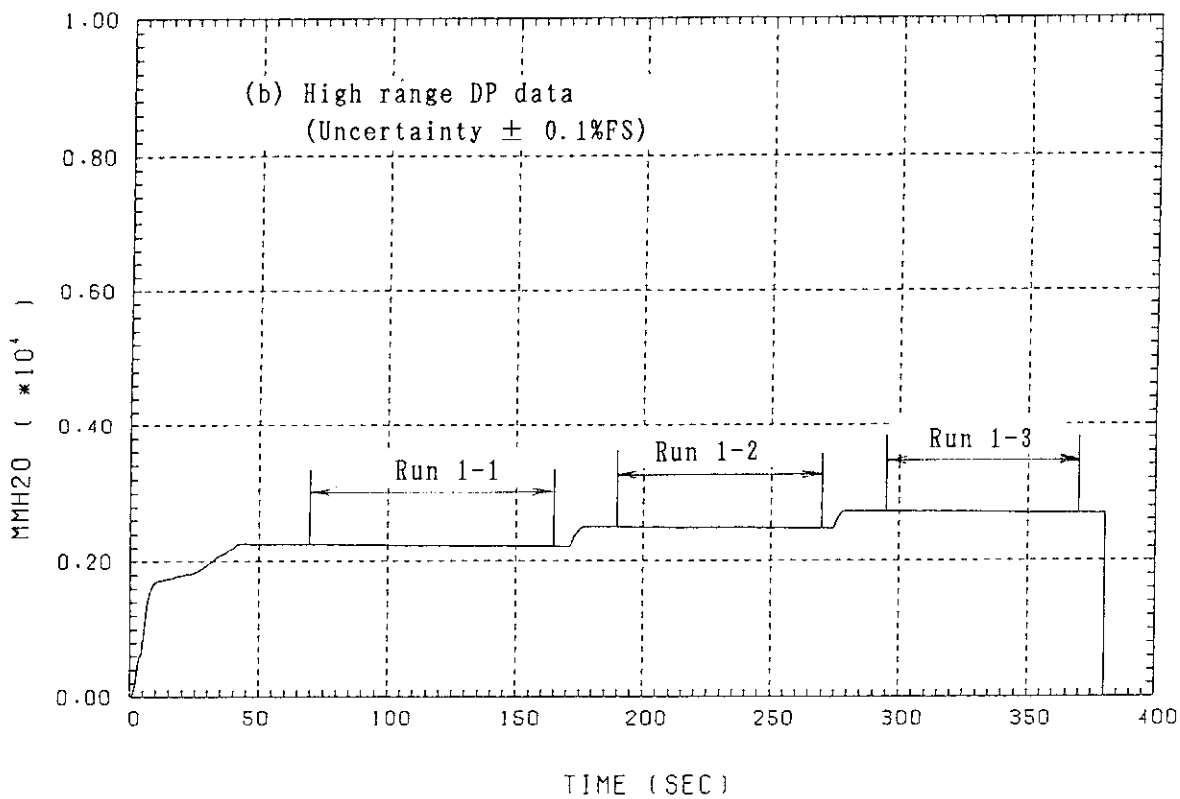
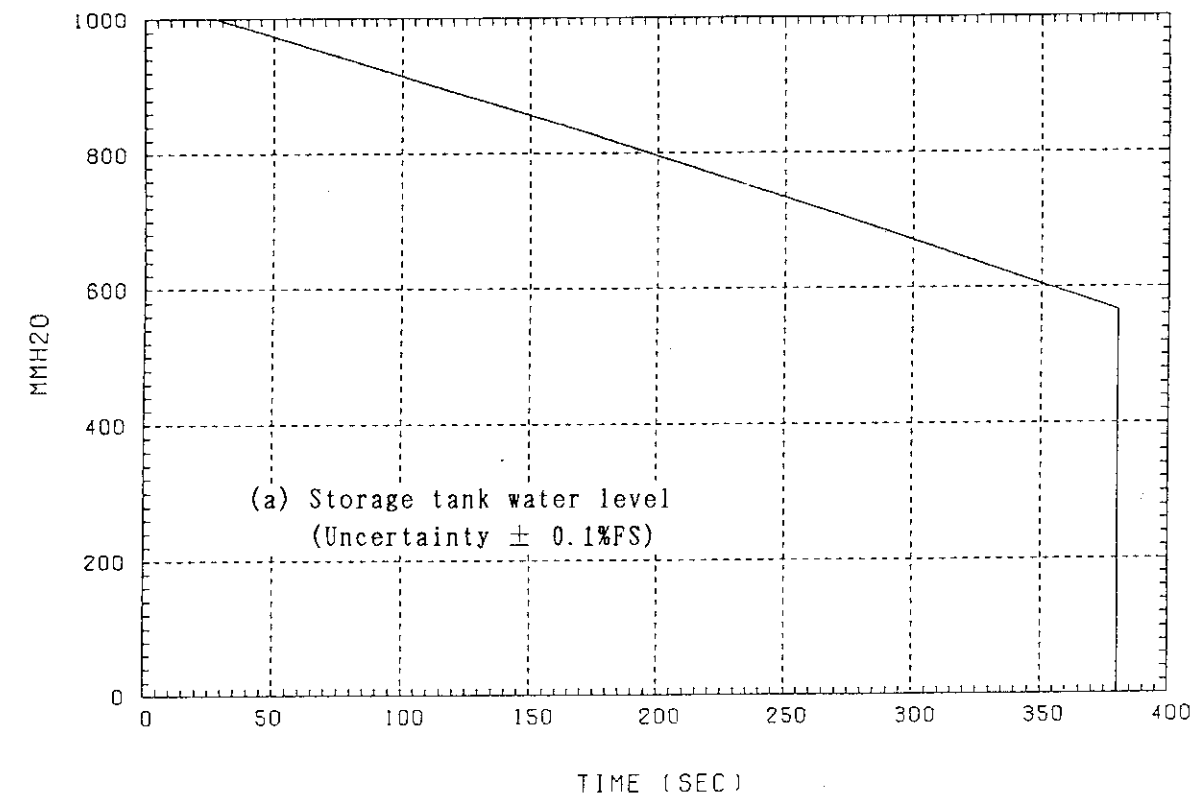


Fig. 3.1 Example of test data (Instrumented tube A; Runs 1-1 to 1-3)

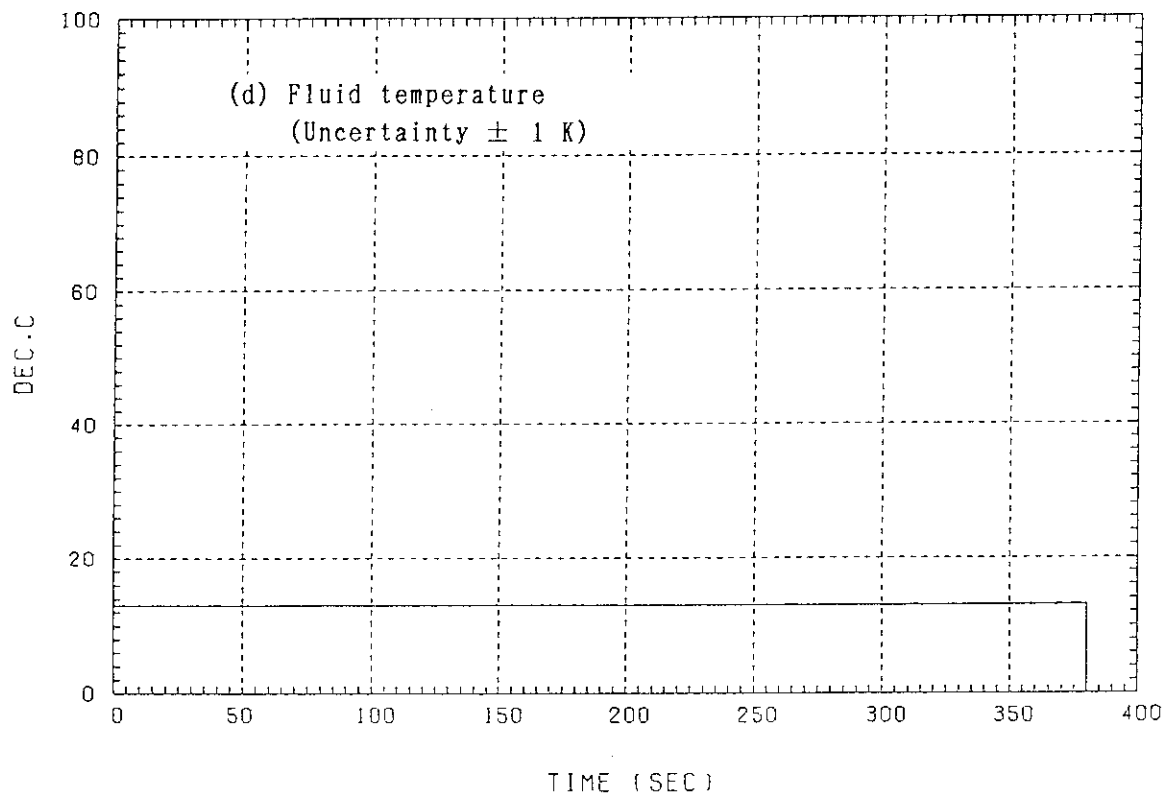
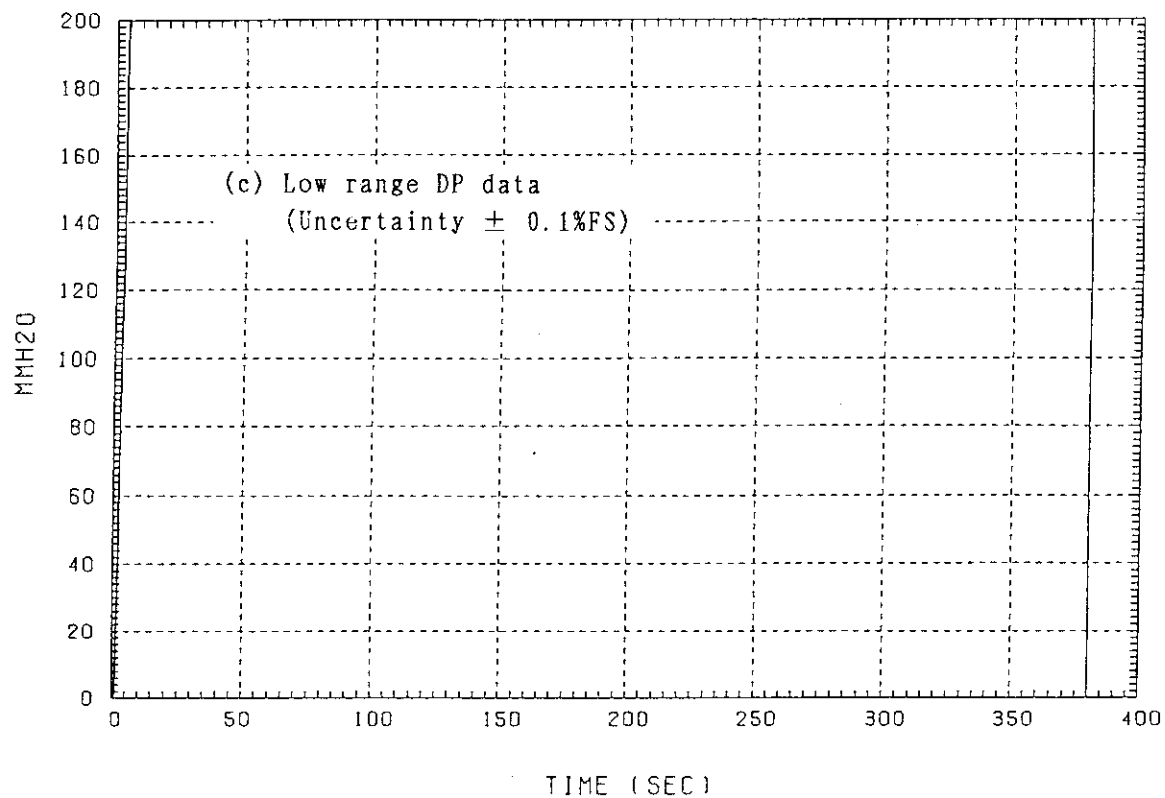


Fig. 3.1 Example of test data (Instrumented tube A; Runs 1-1 to 1-3)

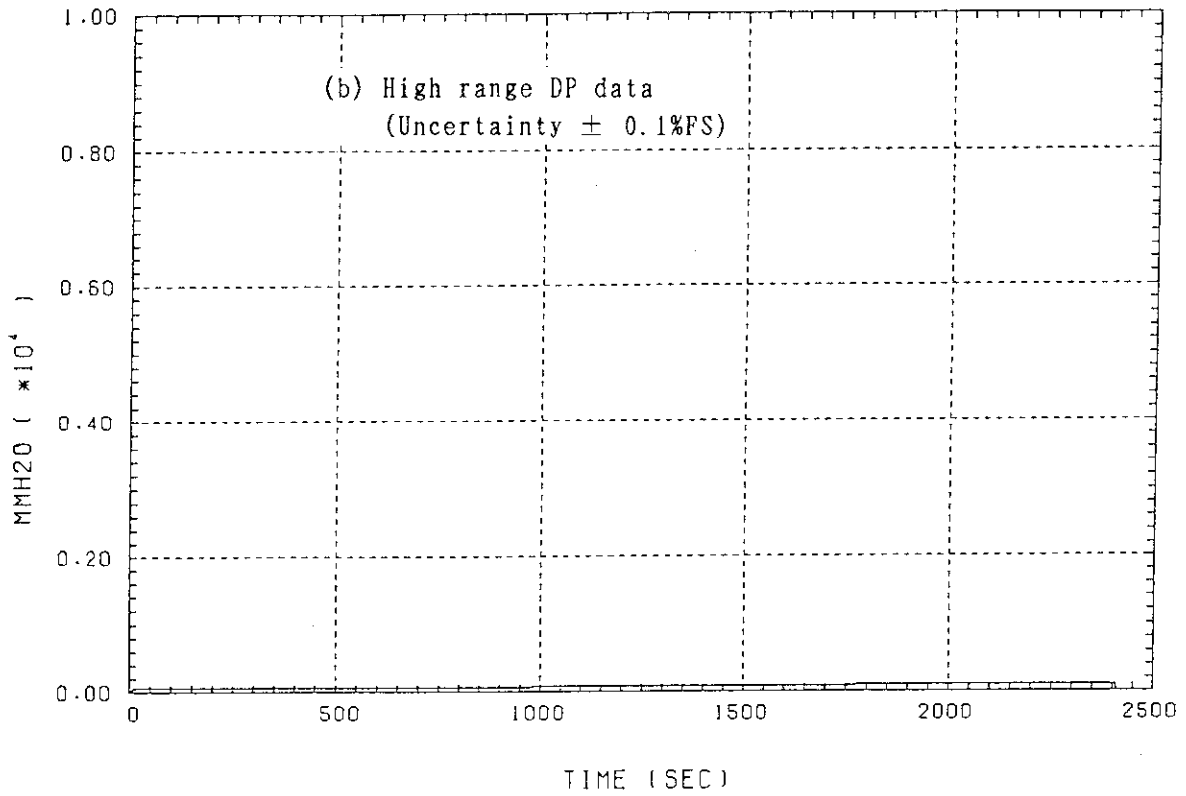
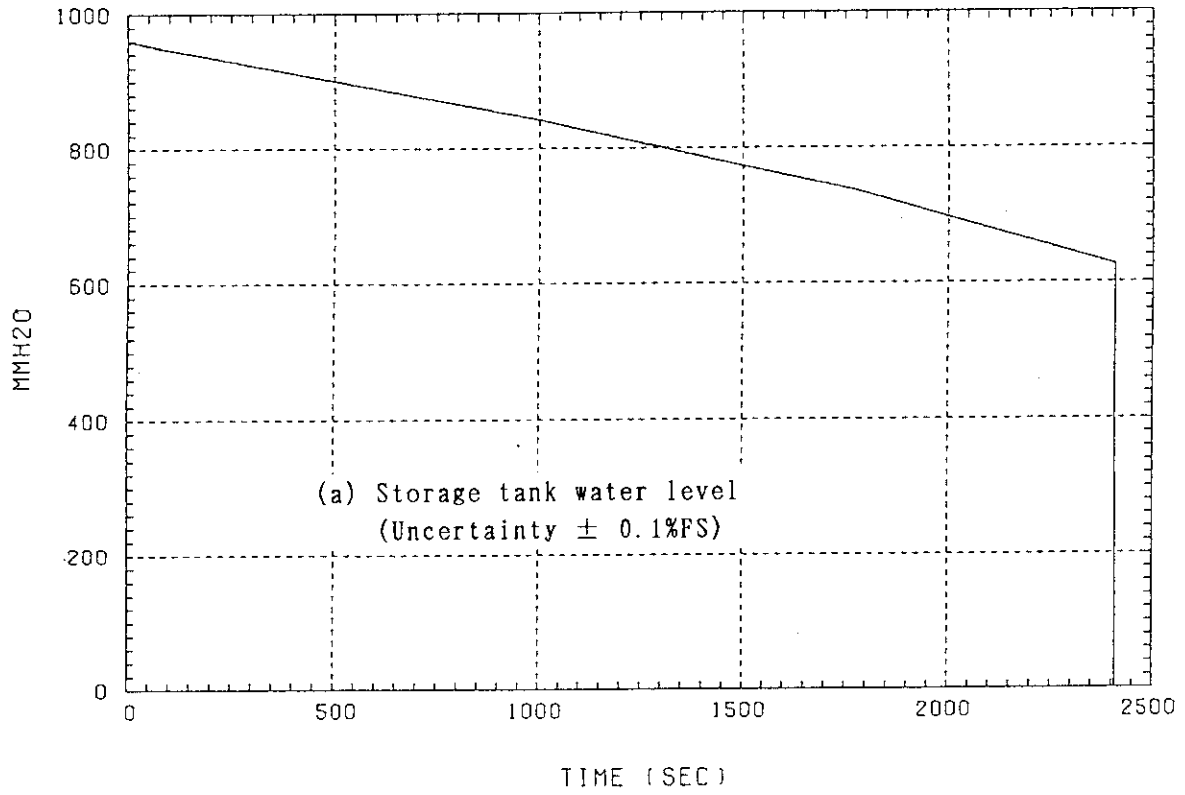


Fig. 3.2 Example of test data (Instrumented tube A; Runs 5-1 to 5-3)

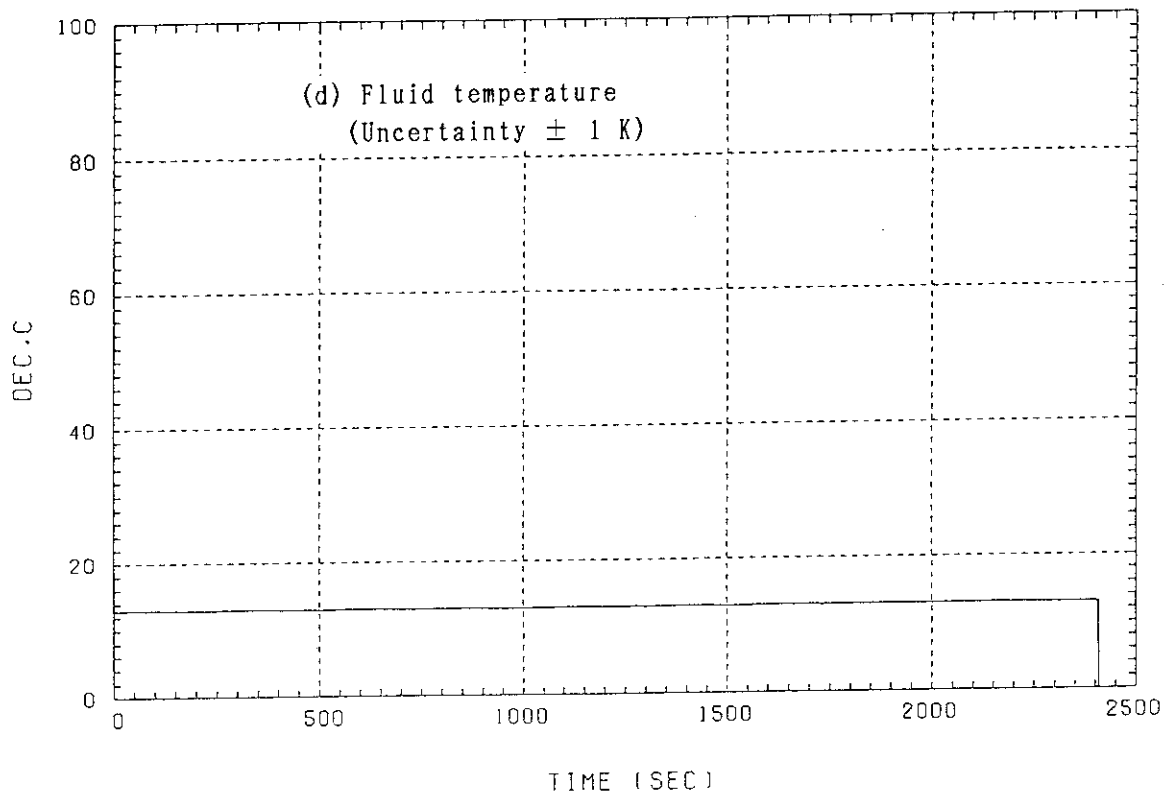
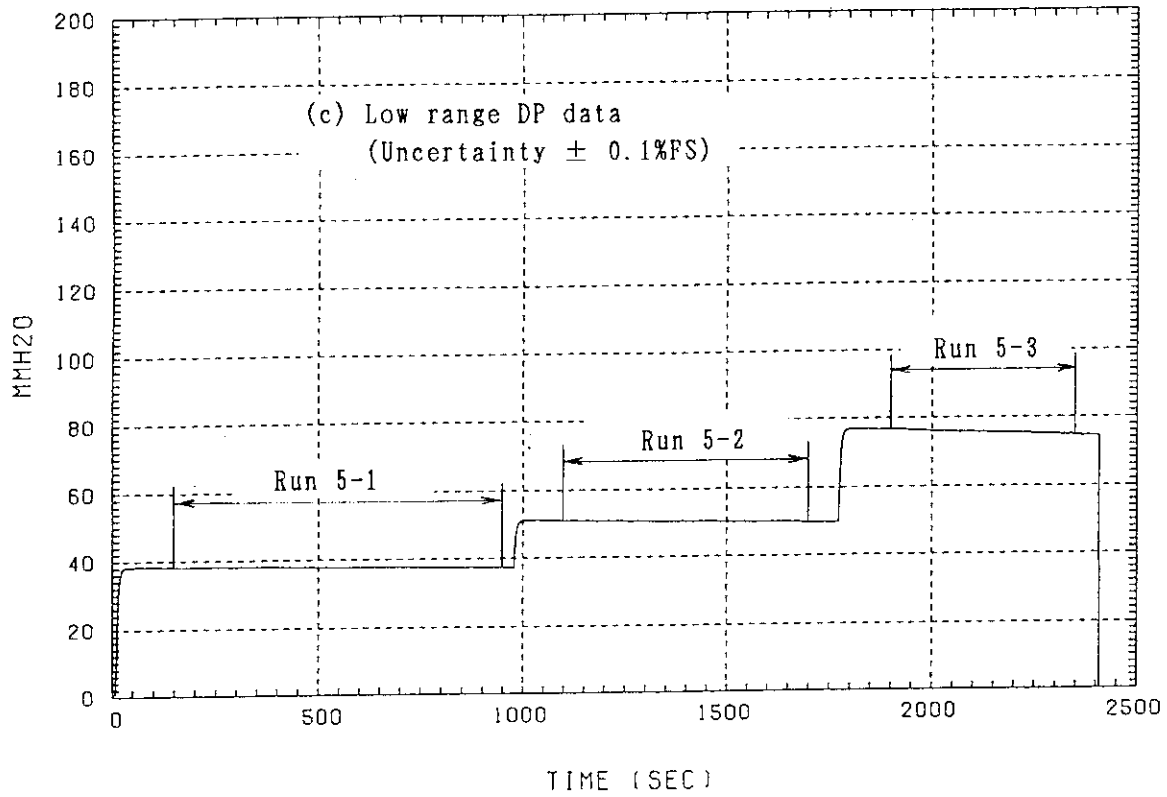


Fig. 3.2 Example of test data (Instrumented tube A; Runs 5-1 to 5-3)

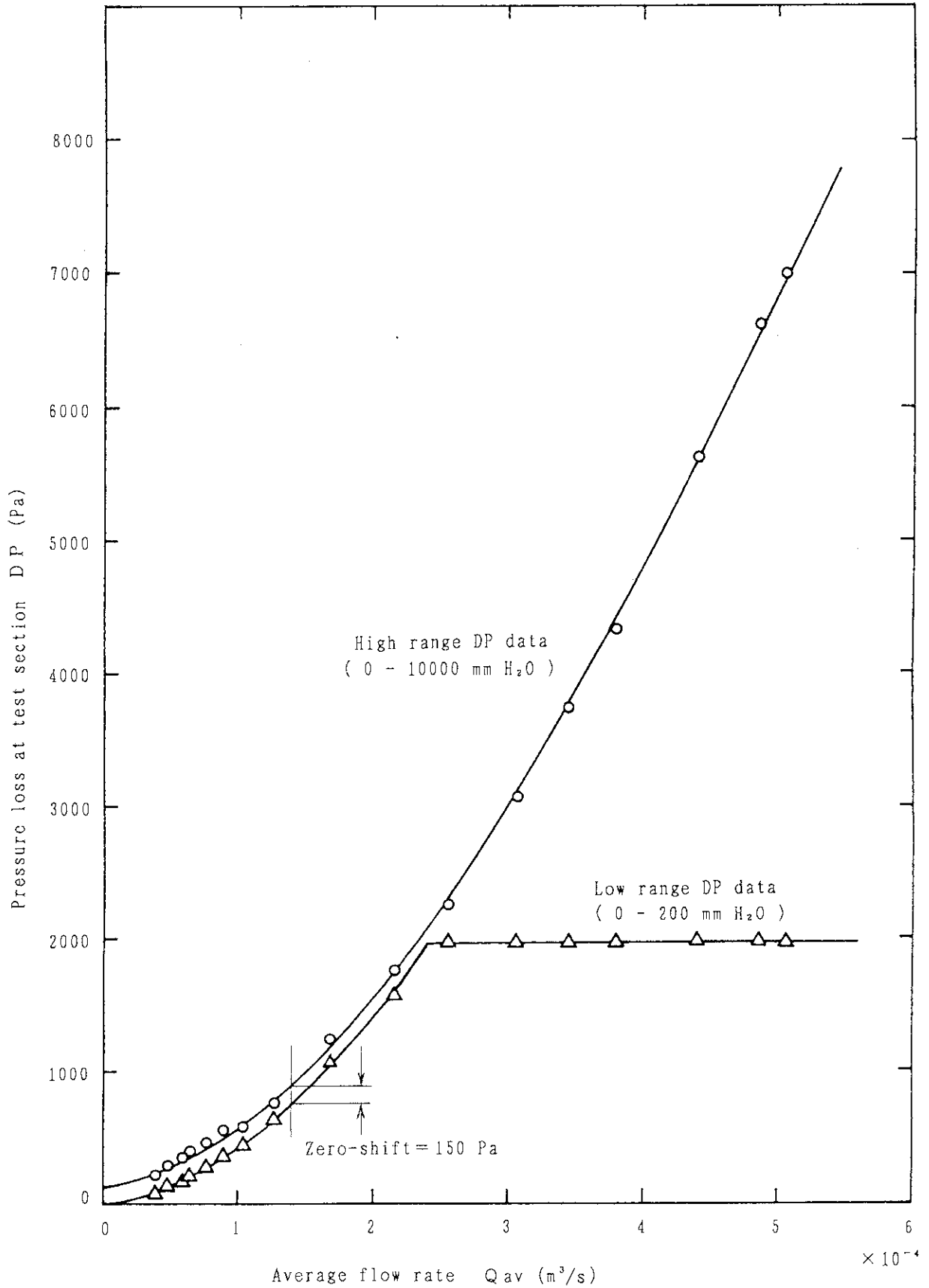


Fig. 3.3 Correction of zero-shift in high range DP data (Non-instrumented tube B)

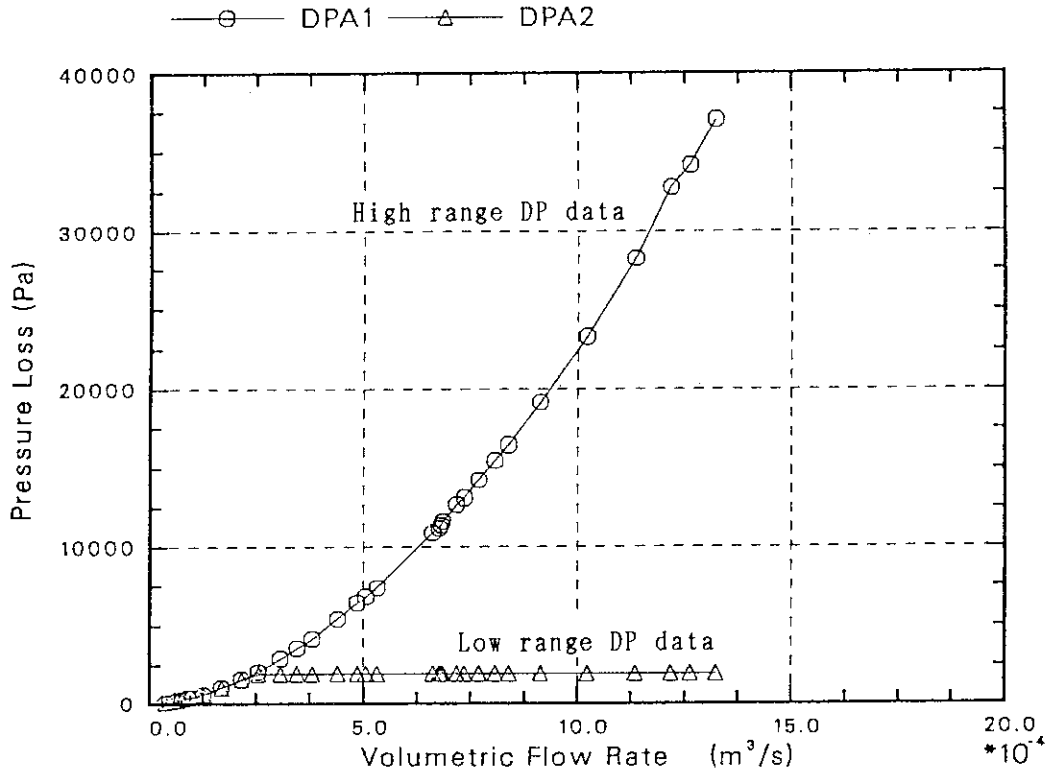


Fig. 3.4 Corrected pressure loss data related to average flow rate (Non-instrumented tube B)

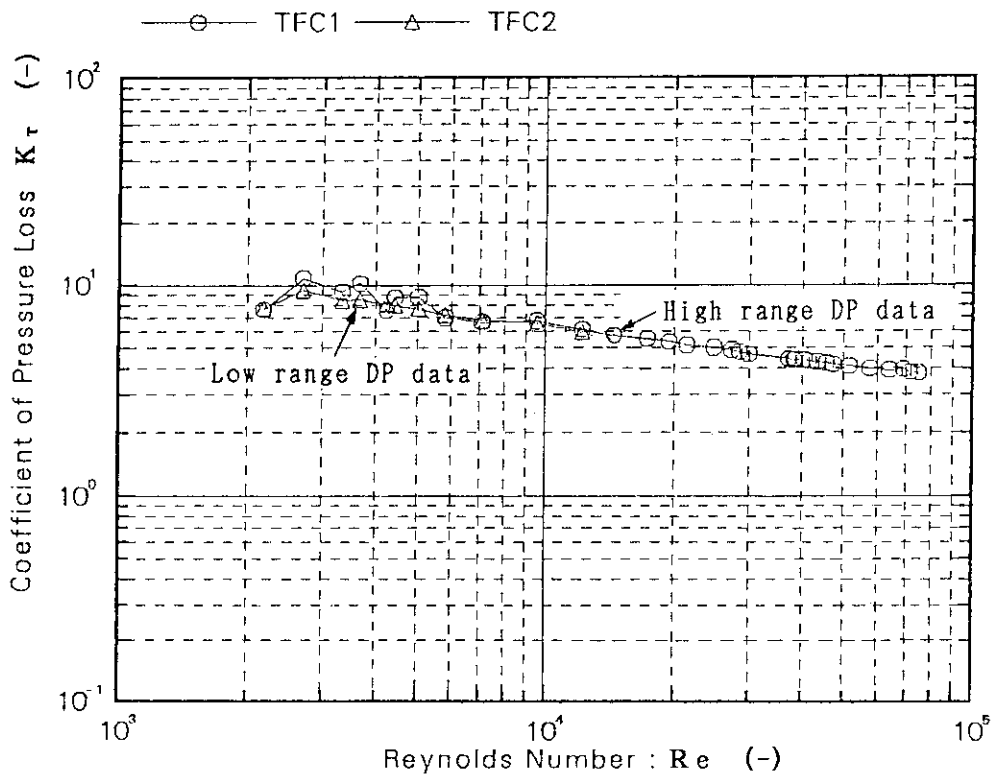


Fig. 3.5 Pressure loss coefficient related to Reynolds number (Non-instrumented tube B)

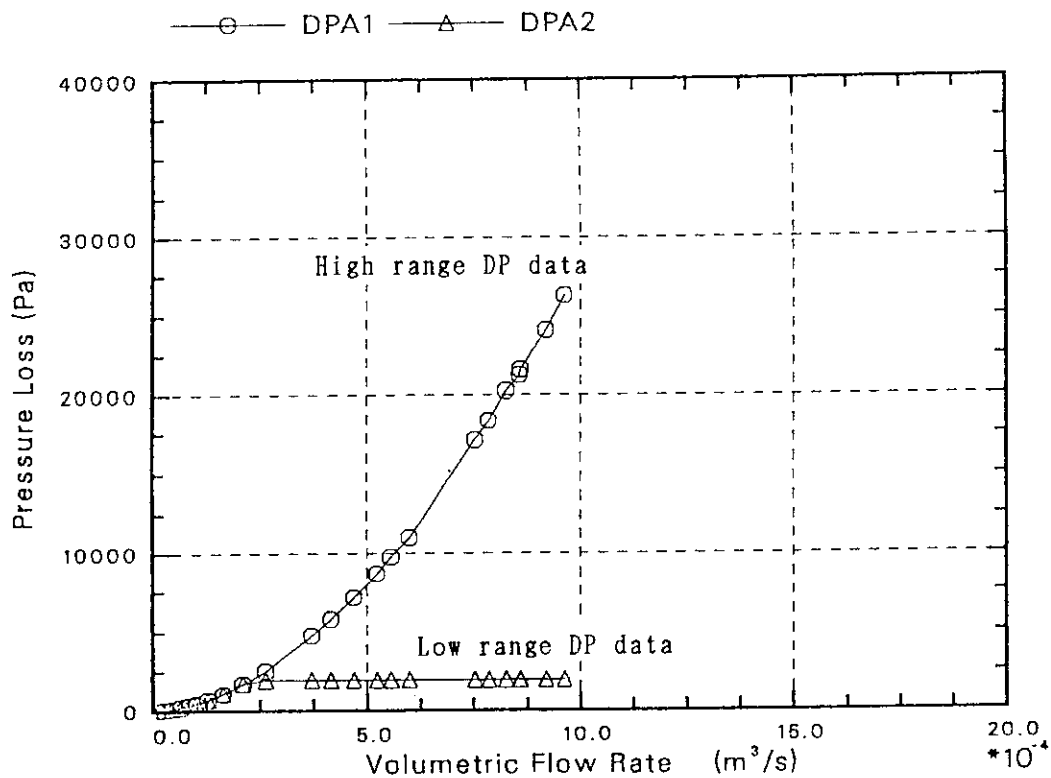


Fig. 3.6 Corrected pressure loss data related to average flow rate (Instrumented tube A)

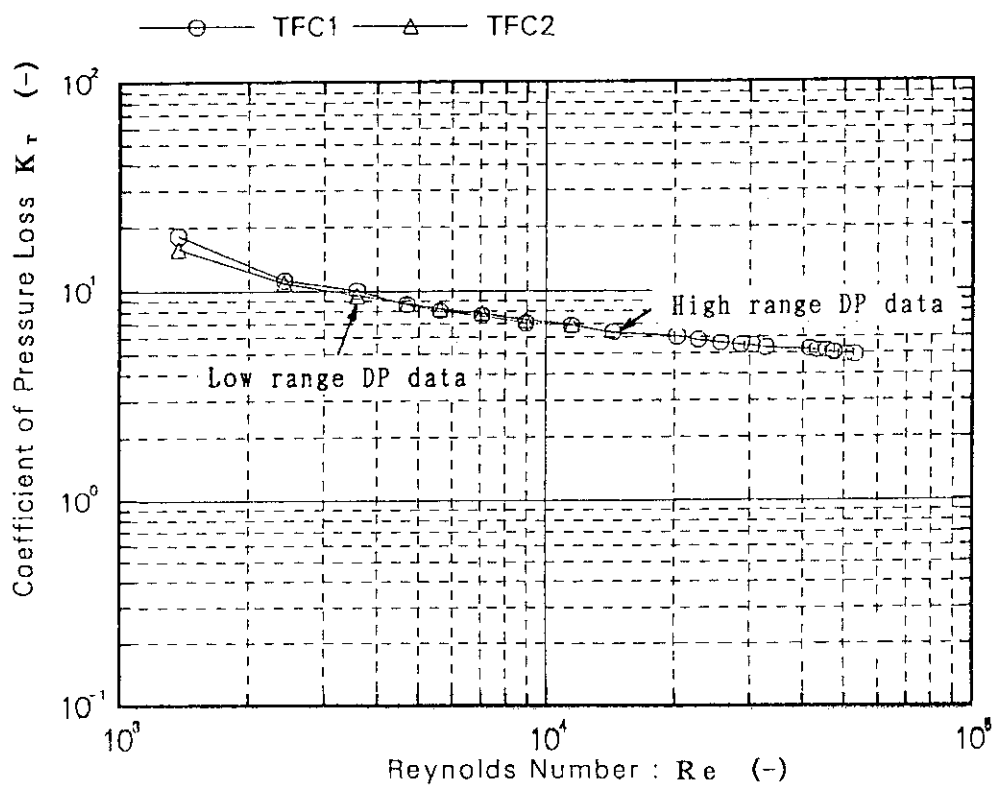


Fig. 3.7 Pressure loss coefficient related to Reynolds number (Instrumented tube A)

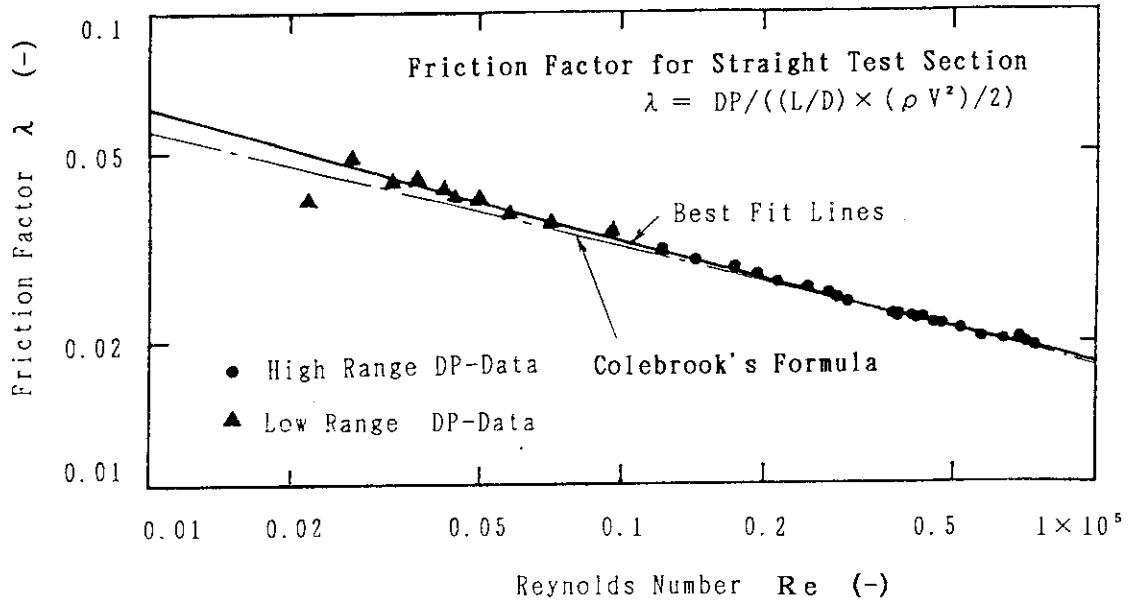


Fig. 3.8 Friction Factor for Straight Test Section

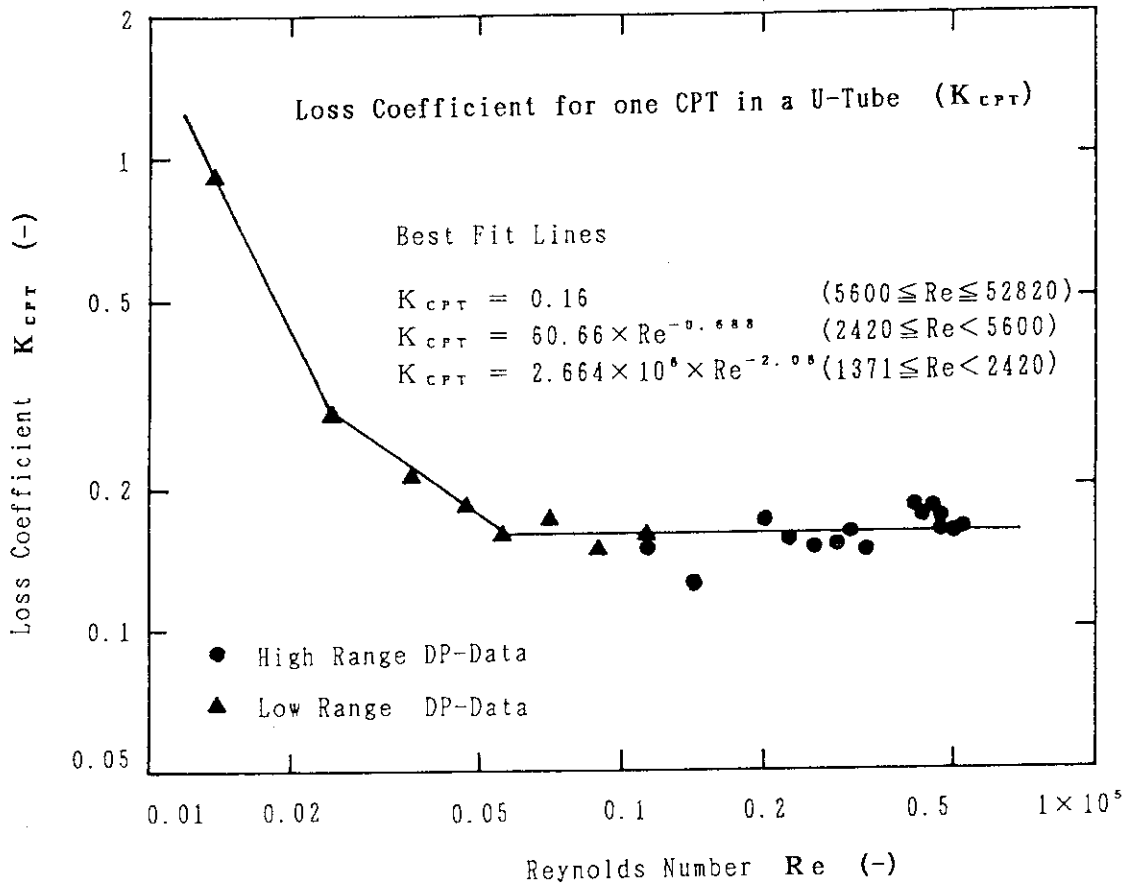


Fig. 3.9 Pressure loss coefficient for one CPT installed in test tube A

4. L S T F の U 字伝熱管圧損係数の評価

L S T F 蒸気発生器の伝熱管は、Fig. 4.1(a)に示すように内径が19.6mm、外径25.4mmであり、実機と同じ長さのU字型伝熱管 141本でS G ボイラー部を構成している。Fig. 4.1(b)には、ボイラー領域の 1/2水平断面における伝熱管配置を示す。伝熱管は長さの異なる9種類の伝熱管に分類される (Table 4.1参照)が、中央部には最短(短と略記)管が21本横一線に並び、次に長い伝熱管19本が第2列に、中位の長さ(中と略記)の伝熱管は第5列と順次配置され、最長の(長と略記)管7本は第9列に並んでいる。このうち、長・中・短3種類の計装伝熱管各2本は、Fig. 4.1(b)においては、③と④、②と⑤、①と⑥の番号で配置が示されている。Fig. 4.2には、伝熱管高さ方向のC P T設置位置を太線の円で示す。円の中には、C P T設置高さとして計装伝熱管種類(1~6)を示す数字が示されている。長・中計装伝熱管にはC P Tが17個設置されており、短計装伝熱管にはC P Tが15個設置されている。

前章に示したようにC P T単体の流動圧損特性が求められたので、計装伝熱管を含めた伝熱管全種類の単相流条件下の圧損係数を計算することができるようになった。以下に、各伝熱管の全長にわたる圧損係数の計算式と、それらの計算結果を示す。最後に、計装伝熱管に等価な圧損係数を持つ非計装伝熱管を示す。

4.1 U字伝熱管の単相流全圧損係数の計算式

U字伝熱管の全長にわたる単相流圧損係数を K_T とすると、 K_T は直管部の圧損係数に頂部の曲がり効果、出入口の形状効果、及びC P Tによる形状効果を加算した次式で求められる。U字伝熱管の出入口間差圧を ΔP 、流体の平均密度を ρ_L 、平均流速を V とすると、

$$K_T = 2\Delta P / (\rho_L \times V^2) \quad (25)$$

$$K_T = \lambda (L_t/D_t) + \zeta_b + \zeta_D + n \times K^*_{CPT} \quad (26)$$

ここで、伝熱管直管部の全長(L_t)と管径(D_t)はFig. 4.1(a)に示されているが、その管径は圧損特性試験に使用した試験部管径より若干小さい。L S T F 伝熱管自体の管摩擦係数 λ は実測されていないので、 λ としては次式により求める。すなわち、層流域 ($Re \leq 2000$) では理論式により、乱流域 ($Re \geq 4000$) ではコールブルックの式⁽¹⁾を用い壁面粗さ ($\epsilon/D_t = 0.00008$) とレイノルズ数の関数として与える。

$$\lambda = 64/Re, \quad Re \leq 2000 \quad (27)$$

$$\lambda^{-0.5} = -2 \times \log [(\epsilon/D_t)/3.71 + 2.51 \times Re^{-1} \times \lambda^{-0.5}], \quad Re \geq 4000 \quad (28)$$

遷移域 ($2000 < Re < 4000$) では両者の中間値として、内挿法により λ を求める。U字管頂部の曲がりによる圧損係数は、管の曲率半径を r (m) として、

$$\zeta_b = 0.00515 \times \alpha \theta Re^{-0.2} \times (r/D_i)^{0.9}, \quad Re(D_i/r)^2 < 364 \quad (29)$$

$$\zeta_b = 0.00431 \times \alpha \theta Re^{-0.17} \times (r/D_i)^{0.84}, \quad Re(D_i/r)^2 \geq 364 \quad (30)$$

$$\alpha = 1.0 + 5.6 \times (r/D_i)^{-4.52}.$$

ここに $\theta = 180$ (度) である。出入口の形状効果としては、Fig. 4.1(a), (b) に示す L S T F 伝熱管出入口形状を踏まえ、伝熱管流路面積を $S1$ 、伝熱管 1 本あたりの等価な出口面積として一辺が管ピッチ ($p=32.5$ mm) の正方形をとると、参考文献(4) により次の値になる。

$$\zeta_b = 0.56 + [1.0 - (S1/S2)]^2 = 0.56 + 0.51 = 1.07, \quad (31)$$

$$S1 = \pi (D_i)^2 / 4, \quad S2 = p^2.$$

C P T 圧損係数は、L S T F 伝熱管の内径と試験装置の管径の違いを補正した式(17)により計算し、伝熱管 1 本あたりの C P T 個数 (n) としては、短管の場合に $n=15$ 、中・長管の場合には $n=17$ とする。

4.2 L S T F 伝熱管の单相流全圧損係数

Table 4.1 に水单相流(乱流)条件下において求めた L S T F 全伝熱管の全長にわたる圧損係数とレイノルズ数の関係を示す。Fig. 4.3 は長・中・短 3 種類の計装伝熱管 (No. 9, 5, 1) と、同じ長さの非計装伝熱管の圧損係数を比較して示す。図中には、2つの炉心熱出力条件(実機定格出力の 2% と 5%) における L S T F の单相流自然循環 (NC) 実験^(2, 3) と、炉心の初期定常出力(同 14%) における強制対流 (FC) 条件下のレイノルズ数範囲を示す。この場合、高温側配管と低温側配管における流体温度の差により一定の幅はあるが、S G 伝熱管を单相流が流れるレイノルズ数範囲は次の通りである。

(a) 2% Power NC 実験、1次系圧力 = 15.5 MPa の場合 $2.4 \times 10^4 \leq Re \leq 2.7 \times 10^4$,

(b) 5% Power NC 実験、1次系圧力 = 11.3 MPa の場合 $4.3 \times 10^4 \leq Re \leq 5.2 \times 10^4$,

(c) 14% Power FC 実験、1次系圧力 = 15.5 MPa の場合 $1.2 \times 10^5 \leq Re \leq 1.4 \times 10^5$

なお、炉心出力が 2% 出力より低い自然循環条件では、单相流のレイノルズ数範囲はより低い範囲に移行することはあきらかである。

これらの計算結果から次のことがわかる。

(1) 伝熱管全長にわたる圧損係数の大部分を占めるのは管壁摩擦損失であるため、管長に

よる圧損係数の差は低レイノルズ数域で大きくなる。

- (2) 伝熱管全長にわたる圧損係数の中でCPTによる圧損係数の占める割合は、上記の自然循環条件下では8~10%である。
- (3) 計装伝熱管と等価な圧損係数を持つ非計装伝熱管の種類はレイノルズ数によって変化する。上記自然循環条件下では、最短の計装伝熱管(No. 1)は中位の長さの非計装伝熱管(No. 5)と等価であり、中位の計装伝熱管は最長の非計装伝熱管(No. 9)と等価である。一方、最長の計装伝熱管については、これと等価な圧損係数を有する非計装管はなく、SG全伝熱管の中で突出して圧損係数の大きい条件にある。逆に、最短の非計装伝熱管と等価な圧損係数の計装伝熱管もない。
- (4) 伝熱管内の流速がより大きい場合には、計装管に対応する非計装管の種類もより長い伝熱管の方へシフトする。
- (5) レイノルズ数が5600より小さい場合には、CPT単体の圧損係数は大きくなるため、計装管と非計装管の差が大きくなる。しかし第3章に示したように、CPT圧損係数について遷移域($2000 < Re < 4000$)や層流域($Re \leq 2000$)ではデータ点数が少ないので信頼性確認は不十分であり、定性的な評価にならざるを得ない。正確には、これらの低流量域における新たな圧損特性試験実施が必要である。

Table 4.1 Pressure loss coefficients of all kinds of LSTF U-tubes in single phase water flow

U-tube type	Number*1 and dimensions of U-tube			Total pressure loss coefficient of U-tube (K_T)*2						
	Number*1	Slender ratio, L/D	Curvature r/D	Number of CPTs, n	Reynolds number (Re)					
					4×10^3	10^4	2.5×10^4	5×10^4	10^5	10^6
Tube 1 (short)	19	971.4	2.592	0	40.36	31.56	25.38	21.90	19.17	13.86
Tube 2	19	992.0	4.250	0	41.38	32.36	26.03	22.46	19.56	14.20
Tube 3	19	1012.6	5.908	0	42.43	33.18	26.69	23.02	20.15	14.55
Tube 4	19	1033.1	7.566	0	43.47	33.99	27.34	23.59	20.64	14.89
Tube 5 (middle)	15	1053.7	9.224	0	44.50	34.81	27.99	24.14	21.12	15.23
Tube 6	15	1074.3	10.883	0	45.53	35.62	28.64	24.70	21.61	15.57
Tube 7	13	1094.8	12.541	0	46.56	36.43	29.29	25.25	22.09	15.90
Tube 8	11	1115.4	14.199	0	47.59	37.24	29.94	25.81	22.57	16.24
Tube 9 (long)	5	1136.0	15.857	0	48.61	38.04	30.59	26.36	23.05	16.58
CPT tube 1	2	971.4	2.592	15	43.24	33.85	27.67	24.19	21.45	16.15
CPT tube 5	2	1053.7	9.224	17	47.77	37.40	30.58	26.74	23.72	17.82
CPT tube 9	2	1136.0	15.857	17	51.88	40.63	33.19	28.96	25.64	19.17

*1 Total number of U-tubes is 141 in one LSTF steam generator.

*2 $K_T = \lambda(L/D) + \zeta_b + \zeta_o + n \times K_{CPT}$, $K_{CPT} = 0.954 \times K_{CPT}$, where $\lambda(L/D)$, ζ_b and ζ_o are pressure loss coefficient of straight tube, pressure loss coefficient due to U-bend curvature, and form loss coefficient at entrance and exit of each tube, respectively.

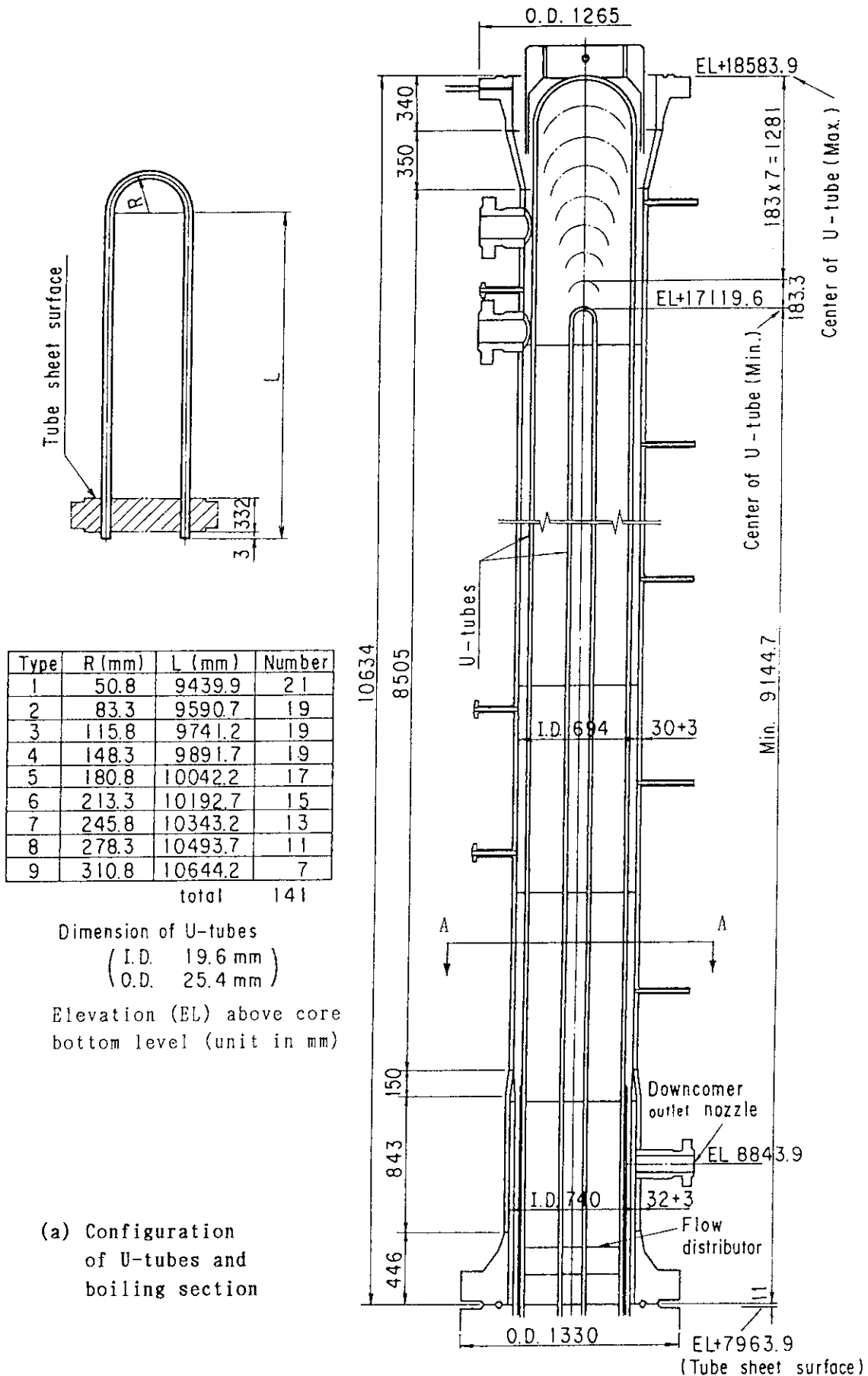
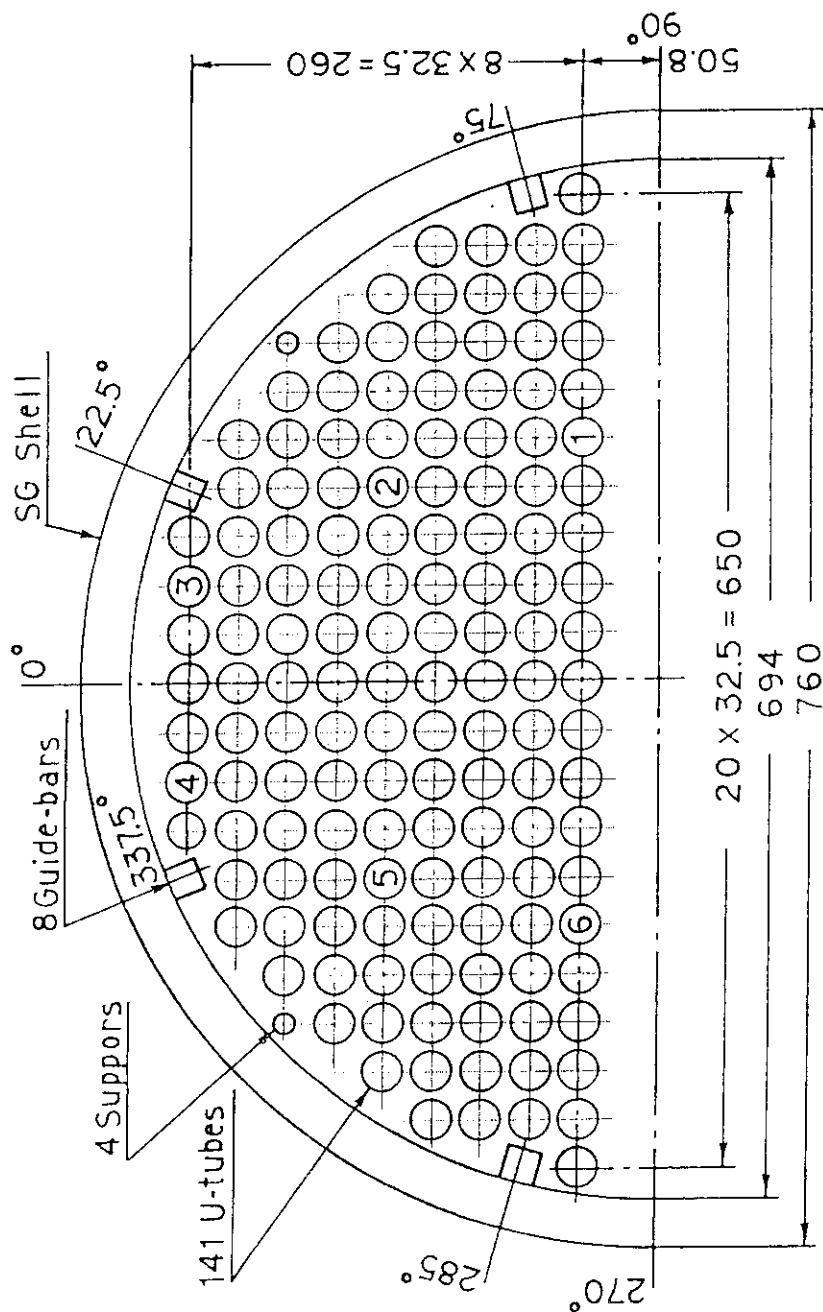


Fig. 4.1 Configuration and arrangement of LSTF SG U-tubes



(b) Horizontal arrangement of Instrumented U-tubes (A-A section)

Fig. 4.1 Configuration and arrangement of LSTF SG U-tubes

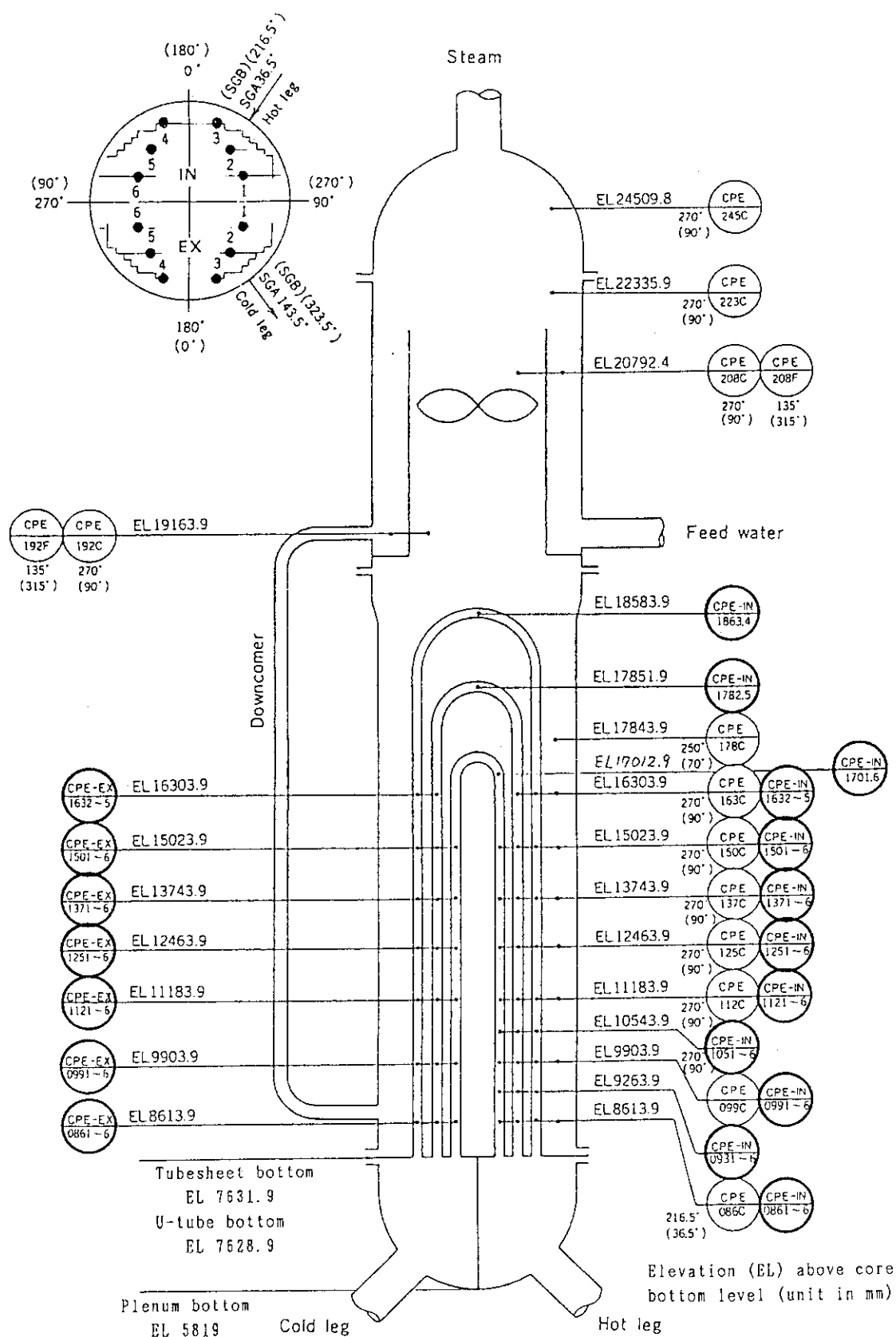


Fig. 4.2 CPT measurement location at LSTF steam generator U-tubes

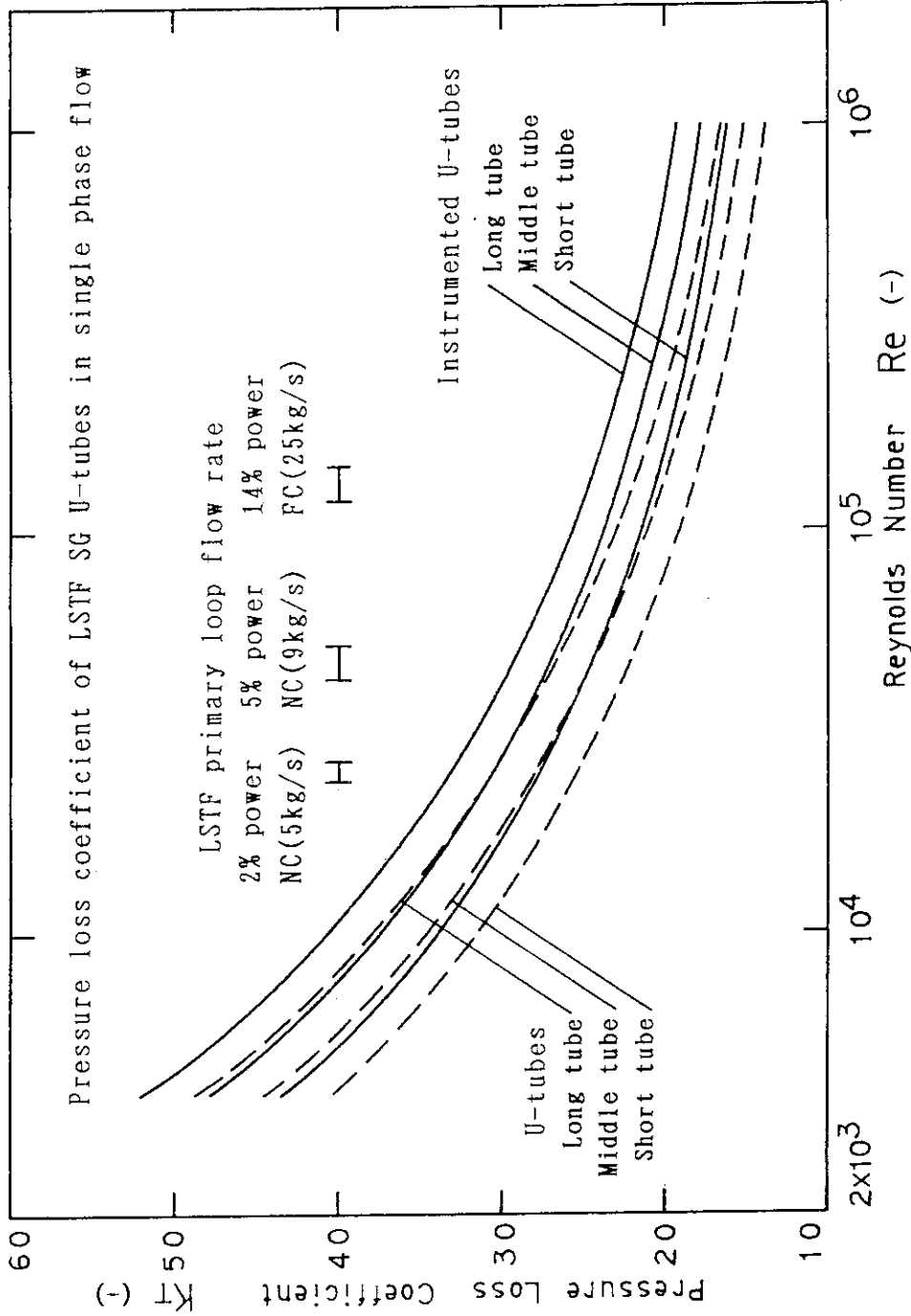


Fig. 4.3 Effect of CPT installation on total pressure loss coefficient of U-tubes under single-phase flow

5. ま と め

L S T F 蒸気発生器の計装伝熱管に設置されている熱電対付き触針式液面計(C P T)の流動圧力損失を調べる試験装置を製作し、C P T 単体と伝熱管全体の圧力損失特性を求めた。特性試験は常温常圧下で実施した。以下に得られた結論を示す。

- (1) C P T を設置した計装管と、設置しない非計装管の2種類について、水単相下の圧力損失試験を実施し、これらの差として次のC P T 単体圧力損失係数(K_{CPT})を求めた。

$$\begin{aligned} K_{CPT} &= 0.16 & 5600 \leq Re \leq 52820, \\ K_{CPT} &= 60.66 \times Re^{-0.688} & 2420 \leq Re < 5600, \\ K_{CPT} &= 2.664 \times 10^5 \times Re^{-2.06} & 1371 \leq Re < 2420. \end{aligned}$$

ただし、 Re は直管部におけるレイノルズ数である。データの不確かさの範囲は、データのばらつき範囲と誤差評価の結果から、最大 $\pm 22\%$ である。本試験における非定常性の影響は無視し得るものであった。なお、 $Re < 2420$ の範囲は他の領域に比べてデータが少なく、信頼性の確認は不十分である。

- (2) このC P T 圧損特性をもとに、L S T F 蒸気発生器の全伝熱管について、U字管全長にわたる単相流圧損特性を計算し、次のことを明らかにした。
- (a) L S T F の単相流自然循環実験条件においては、伝熱管全長にわたる圧損係数の中でC P T による圧損係数の占める割合は、8~10%である。
 - (b) 計装伝熱管と等価な圧損係数を持つ非計装伝熱管の種類はレイノルズ数によって変化する。自然循環条件下では、最短の計装伝熱管(No. 1)は中位の長さ(平均長)の非計装伝熱管(No. 5)と等価であり、中位の長さの計装伝熱管は最長の非計装伝熱管(No. 9)と等価である。
 - (c) 一方、最長の計装伝熱管については、これと等価な圧損係数を有する非計装管はなく、S G 全伝熱管の中で突出して圧損係数が大きい。また、最短の非計装伝熱管の流動圧損は最も小さい。
 - (d) 以上の結果から、L S T F 実験結果或いは解析コードにより、伝熱管内流体挙動を評価する場合には、C P T 計装伝熱管と非計装管の流動抵抗の違いを考慮する事が必要である。なお、データの少ない低レイノルズ数領域($Re < 2420$)や未評価の二相流条件下におけるC P T 圧損特性と計装伝熱管流動特性の解明は、今後の研究課題である。

謝 辞

本報告書の作成にあたり熱水力安全研究室長久木田氏より適切なコメントを頂いた。また特性試験の実施にあたり原子力エンジニアリング(株)矢内、山田、高崎、高安、薄井の各氏に、試験部本体の製作、検査にあたり工作課武山、菊池両氏の協力を頂き、データ処理ではアイ・ティ・ジェイ(株)の島根氏にお世話になった。以上の方々に感謝の意を表す。

参 考 文 献

- (1) 機械工学便覧、P.A5-75、日本機械学会編 (1987年).
- (2) Y. Kukita, et.al., "Single-Phase Natural Circulation in Pressurized Water Reactor under Degraded Secondary Cooling Conditions", ASME HTD-Vol.115, Book No.H00518, 1989.
- (3) Y. Kukita, et.al., "Nonuniform Steam Generator U-tube Flow Distribution during Natural Circulation Tests in ROSA-IV Large Scale Test Facility", Nucl. Sci. Engin. Vol.99, p289-298, 1988.
- (2) 機械工学便覧、P.A5-77、日本機械学会編 (1987年).

謝 辞

本報告書の作成にあたり熱水力安全研究室長久木田氏より適切なコメントを頂いた。また特性試験の実施にあたり原子力エンジニアリング(株)矢内、山田、高崎、高安、薄井の各氏に、試験部本体の製作、検査にあたり工作課武山、菊池両氏の協力を頂き、データ処理ではアイ・ティ・ジェイ(株)の島根氏にお世話になった。以上の方々に感謝の意を表す。

参 考 文 献

- (1) 機械工学便覧、P.A5-75、日本機械学会編 (1987年)。
- (2) Y. Kukita, et. al., "Single-Phase Natural Circulation in Pressurized Water Reactor under Degraded Secondary Cooling Conditions", ASME HTD-Vol.115, Book No.H00518, 1989.
- (3) Y. Kukita, et. al., "Nonuniform Steam Generator U-tube Flow Distribution during Natural Circulation Tests in ROSA-IV Large Scale Test Facility", Nucl. Sci. Engin. Vol.99, p289-298, 1988.
- (2) 機械工学便覧、P.A5-77、日本機械学会編 (1987年)。

付録 A 管路内径の測定結果

試験装置作成にあたり試験部本体の管内径をシリンダーゲージにより測定した。試験部本体は 3/4インチの配管用ステンレス鋼管 (Sch80)であり、外径の公称値は27.2mm、内径の公称値は 19.4mmである。内径測定器具としてシリンダーゲージを使用すると 0.01mmまでの正確な読みとりができる。測定方法については工作課の菊池六夫氏に教えて頂いた。計装管 A と非計装管 B についての測定結果を Table A.1に示す。これらの結果から、それぞれの内径 (D1)を次のように決定した。

$$\begin{aligned} \text{計装管 A : } D1 &= 19.37 \pm 0.14 \text{ (mm)}, \\ \text{非計装管 B : } D1 &= 19.50 \pm 0.12 \text{ (mm)} \end{aligned} \tag{A1}$$

2つの管 A と B の内径に若干の相違がみられる。この理由は、A 管材料は全長4mのステンレス鋼管であるが、B 管材料は別途購入した全長5mのステンレス鋼管であり、両者が別の製造行程で製作されたことに起因するものと考えられる。なお、冷間加工によるステンレス鋼管の外径の許容差は $\pm 0.3\text{mm}$ 、厚みの許容差は $\pm 0.2\text{mm}$ であり、上記内径のバラツキ誤差は、いずれもこれらの許容差内にある。

Table A.1 Measurement of pipe inner diameter at test section

(1) Non-instrumented tube B

Location	Deviation from 19.40 mm (mm)					Ave. diameter	Deviation
Inlet side (50 mm)	0.01	0.15	0.09	0.09	0.035	19.40+0.081	+0.069
	0.105	0.12	0.115	0.05	0.045		-0.071
Inlet side (150 mm)	-0.02	0.025	0.09	0.135	0.16	19.40+0.090	+0.070
	0.12	0.16	0.13	0.045	0.05		-0.110
Exit side (50 mm)	0.01	0.025	0.08	0.125	0.15	19.40+0.091	+0.079
	0.17	0.165	0.125	0.05	0.01		-0.081
Exit side (150 mm)	0.105	0.08	0.11	0.175	0.15	19.40+0.120	+0.055
	0.10	0.12	0.085	0.11	0.17		-0.040
Average of 40 points						19.496	+0.079 -0.116

Measured data of tube B inner diameter : $D_1 = 19.50 \pm 0.12$ (mm)

(2) CPT-installed tube A

Location	Deviation from 19.40 mm (mm)					Ave. diameter	Deviation
Inlet side	-0.065	-0.095	-0.145	-0.015	0.07	19.40-0.021	+0.105
	0.095	0.105	0.02	-0.08	-0.10		-0.145
Inlet side (50 mm)	-0.08	-0.11	0.045	0.065	-0.015	19.40-0.038	+0.103
	0.055	0.025	-0.095	-0.10	-0.17		-0.132
Inlet side (150 mm)	-0.075	-0.105	0.025	0.035	-0.10	19.40-0.037	+0.077
	-0.11	0.04	0.03	-0.04	-0.07		-0.073
Average of 30 points						19.368	+0.137 -0.138

Measured data of tube A inner diameter : $D_1 = 19.37 \pm 0.14$ (mm)

付録 B 予備試験の結果

B.1 予備試験の概要

貯水タンクから試験部に通水し、流量調節弁の弁開度と流量およびタンク水位変化速度との関係、流量と試験部差圧の関係、弁操作後の流動安定性、エア抜き、操作手順等の見通しを得るため、予備試験を行った。予備試験は、試験装置の検収条件である総合性能試験検査を兼ねて1992年 3月18～19日に実施した。タンク水位変化速度については、タンクのガラス管水位計(Water level gauge)の水位変化量をストップウォッチで測定し、平均値として求めた。これより平均の試験部通過流量や流速等を算定したが、データ精度については評価していないので、参考データとして利用することにした。試験部差圧データとタンク内水温はペンレコーダにより出力した。

計装管 A を試験部に設置した場合について、貯水タンク水量がなくなるまでの1試験ステップを4回、1試験ステップあたり3～5ランに区分し、合計18ランの試験を実施した。変化させた試験部流量範囲は $0.13 \sim 4.8 \text{ m}^3/\text{h}$ ($1.9 \times 10^3 \leq \text{Re} \leq 7.2 \times 10^4$) である。一方、試験部へのエア巻き込みがないことは、試験部上端のエアドレン弁において試験開始前に確認した。試験装置周囲の環境温度と作動流体の温度差は 1°C 以内であり、作動流体と差圧導圧管内流体の密度差の影響は無視し得るものであった。

B.2 試験部流動特性の確認

流量と弁開度の関係は流量調節の目安として有用であった。また、大小2種類の試験部差圧計データと平均流量との関係では、流量が $2.0 \sim 3.0 \text{ m}^3/\text{h}$ の範囲でデータのばらつきが大きかった。これは Fig. A.1 に示すように、弁開度 150度近傍で流れが安定化しなかったためであるが、原因は試験部にあるのではなく、弁構造にもとづく弁での流動特性が原因と考えられる。弁開度 150度近傍での流れの不安定化には、再現性が確認された。弁開度150度までは開度と流量に直線性が見られるが、弁自体のあそびが約12度あるため、原点からシフトした結果になっている。弁開度 400度を超えると流量は飽和する傾向を示し、500度で最大流量 $4.8 \text{ m}^3/\text{h}$ が得られた。弁開度調整後の流量安定性については、上記流量不安定範囲を除いて、流量調節弁を慎重に滑らかに操作することにより、数分以内に安定な試験部差圧を得ることができた。小流量条件と差圧データがばらつく流量範囲においては、データ精度を上げるため弁開度を変えた試験データを多数採ることとした。

なお、以上の流量調節弁特性は計装管 A を使用した場合であるが、非計装管 B を使用した場合には、不安定化する平均流量はほぼ同じであるが、その時の弁開度はやや小さい方にシフトし、130度前後になった。これは計装管 A の方が試験部流動抵抗が大きいためであり、同一流量条件で不安定になるのは弁自体の特性によることを裏付けている。

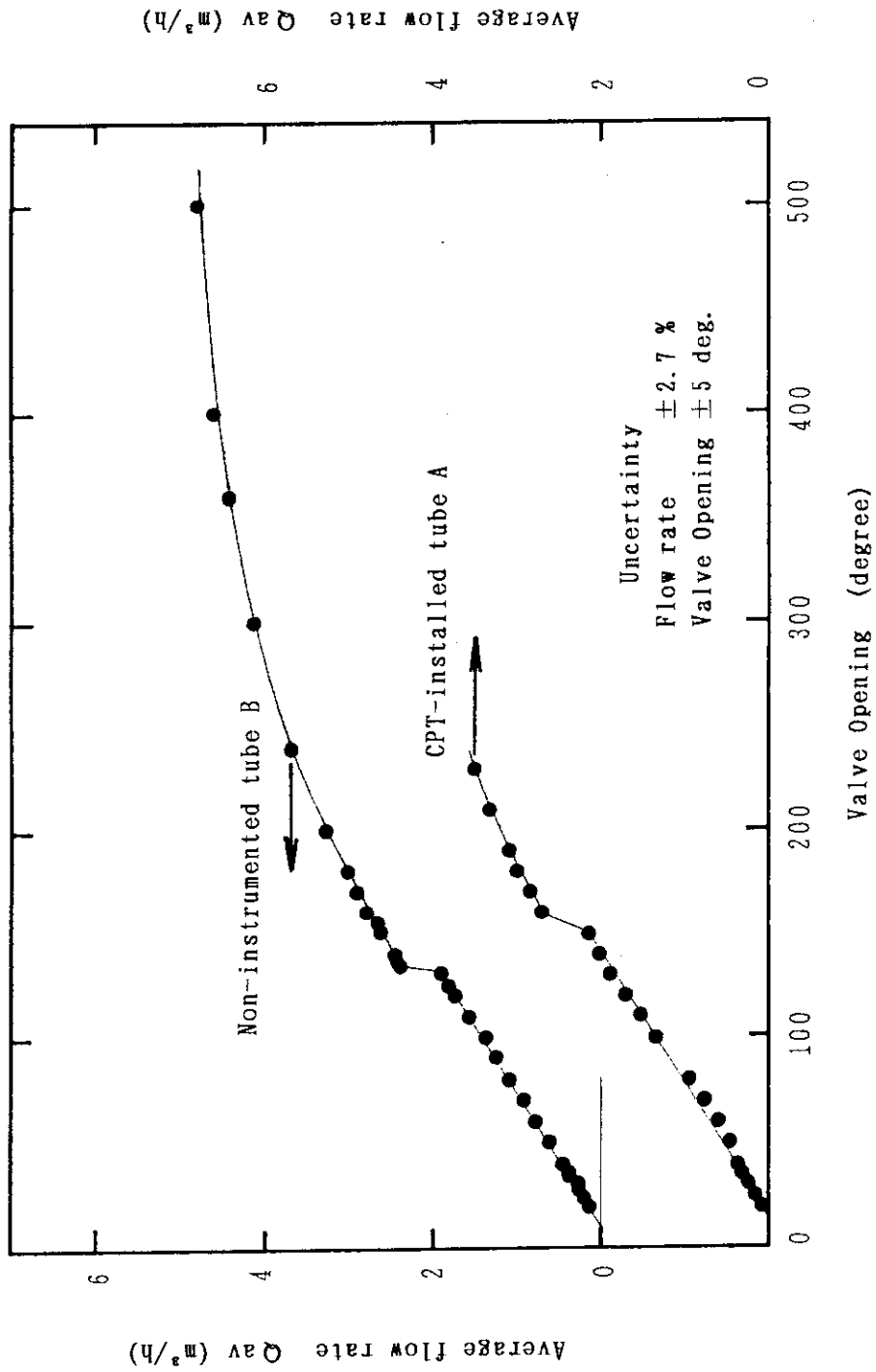


Fig.A.1 Flow control valve characteristics