

下降二相流における実規模ドライアウト限界出力測定試験

1987年12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)

下降二相流における実規模ドライアウト限界出力測定試験

堀 公明 菅原 悟

要 旨

新型転換炉において、入口管に破断を生じた場合、冷却水は圧力管の入口部より流出するため、破断チャンネルにおいて下降流状態となる。また、ポンプトリップによる流量停滞時においても同様に低出力チャンネルにおいて下降流が発生することが考えられる。このような下降流状態におけるドライアウト限界出力を正確に把握することを目的として、大洗工学センター原子炉工学室の14 MW 大型熱ループにおいて新型転換炉実証炉用 36 本クラスタを用いた実規模試験を行うとともに下降流状態におけるドライアウト評価式を作成した。本研究の結果、以下のことが明らかになった。

- (1) 下降流状態でのドライアウトには流量によって特性の異なる領域、即ち、気液同方向下降流領域、遷移領域、気液対向流領域の3つの領域が存在する。また、遷移条件は圧力 7 MPa の場合各々、 $G = 725.2$ 及び 458.3 [kg/cm²sec] である。
- (2) 気液同方向下降流領域では上昇流のドライアウト評価式が適用される。
- (3) 気液対向流領域ではドライアウト限界出力が上昇流と比較して最大 75 % 低下する。
- (4) 気液同方向下降流領域から遷移領域への遷移はフラッディングモデルから導出した

$$Jg^{*1/2} = C/m = 0.75$$

によって判定できる。

- (5) 3つの領域各々に対して作成したドライアウト評価式は本実験について ± 0.6 MW の精度で予測できる。

Full scale Dryout Tests Under the Condition of Downward Flow

Takaaki Sakai and Satoru Sugawara

Abstract

A dryout power limitation in downward flow was measured on an electrically heated 36-rod full scale bundle, which is designed for the purpose of simulating a fuel bundle of a demonstrational ATR (Advanced Thermal Reactor). Experiments were performed by using the 14MW Heat Transfer Loop (HTL) at O-arai Engineering Center of PNC, under the following conditions.

Pressure	7.0	[MPa]
Flow rate	0 ~ ±50.0	[ton/hr]
Input power	0 ~ 9.0	[MW]
Inlet temperature	275	[°C]

The dryout limitation power data obtained from the present experiments were compared with the upward flow data, and were provided for development of correlations for the dryout limitation power vs. downward flow rate. The following results were obtained from the present study.

- (1) Dryout phenomena in the downward flow can be divided into three regions depending on flow rate; gas-liquid counter-current flow region, transition region and gas-liquid co-current downward flow region.
- (2) In the region of gas-liquid co-current downward flow, dryout correlation for upward flow is applicable to the prediction of the dryout limitation.
- (3) In the region of counter-current flow, dryout limitation power decreases up to 75 percent maximum, compared with the limitation in a corresponding upward flow rate.

- (4) The transition criterion between transition region and co-current downward flow region can be given by the non-dimensional flow velocity.

$$J_1^{*1/2} = C/m = 0.75$$

at the exit of the test section.

- (5) The dryout correlations developed for the downward flow can predict the experimental data within ± 0.6 MW errors.

The correlations are available for an estimation of the dryout power limitation in the downward flow which are encountered in the case of inlet-pipe breaks or pump trip accidents of ATRs.

目 次

1. 緒 言	1
2. 試験装置および試験方法	2
3. 試験結果	3
3.1 ドライアウト限界出力	3
3.2 ドライアウト発生位置	3
4. 考 察	5
4.1 無次元流速による整理	5
(1) 流量停滞時のドライアウト限界出力	5
(2) 気液同方向下降流から気液対向二相流への遷移	6
4.2 圧力損失評価	7
4.3 ドライアウト評価式	7
(1) 上昇流時のドライアウト限界出力評価	7
(2) 下降流時のドライアウト限界出力評価	8
5. 結 言	9
記号表	10
参考文献	11

1. 緒 言

新型転換炉において、入口管に破断を生じた場合、冷却水は圧力管の入口部より流出するため、破断チャンネルにおいて下降流状態となることが考えられる。また、ポンプトリップによる流量停滞時においても同様に低出力チャンネルにおいて下降流が発生することが考えられる。下降流状態では浮力が流れ方向と逆向きであるため特に低流量状態においてドライアウト限界出力が正流時と比較して大きく低下することが報告されている。⁽¹⁾ M. CUMO⁽²⁾ は Freon-12 を作動流体とする下降流条件での実験を行い、ドライアウト限界出力が上昇流と比較し最大で 35% 低下することを示した。K. MISHIMA⁽³⁾ は下降流におけるドライアウト限界出力の低下の原因は気泡の停滞であるとした。また、J. G. Collier⁽⁴⁾ はその著書において、下降流におけるドライアウト出力はある限界流量以下となると急激に低下し始めるであろうことを示唆した。このような下降流状態におけるドライアウト限界出力を正確に把握することは事故時の燃料表面温度の挙動の評価や解析コードの最適化において非常に重要であり、このためには実規模試験によるデータが不可欠である。

そこで、大洗工学センター原子炉工学室の 14 MW 大型熱ループにおいて新型転換炉実証炉用 36 本クラスタを用いた実規模試験を行うとともに、ドライアウト評価の観点からの流動様式の分類並びに、その遷移判定条件及びドライアウト限界出力に関する実験式作成と予測精度評価を行う。

2. 試験装置および試験方法

試験は大洗工学センター原子炉工学室の 14 MW 大型熱ループを使用して行った。上昇流条件でのループの概略のフローマップと下降流条件でのフローマップをそれぞれ、Fig. 2-1, Fig. 2-2 に示す。使用流体は純水であり、循環ポンプから流量を測定し、プレヒーターでサブクール度を設定した後、テスト部へ流入する。テスト部での流れの方向は上昇流及び下降流の条件に応じてバルブ操作により設定した。テスト部で加熱された後、水は沸騰二相流となり蒸気ドラムにおいて気相と液相に分離される。そこで蒸気は凝縮器に送られ凝縮された後、サブクーラーを経て再びポンプにより循環される。

テスト部の概略を Fig. 2-3 に示す。また、テスト部下部入口配管および上部電極板の詳細図をそれぞれ、Fig. 2-4, Fig. 2-5 に示す。テスト部は実証炉発熱部を模擬した内径 117.8 mm の圧力管構造であり、その中に実規模大の燃料クラスターが一体挿入されている。燃料クラスターは外径 14.5 mm の発熱管 36 本（外層 18 本、中間層 12 本、内層 6 本）と同一外径の中心支持管 1 本をリング型スペーサ（Fig. 2-6 参照）で束ねた形状を有し実証炉燃料クラスターを同一形状で模擬している。

加熱方法は直流電源による直接通電加熱であり、軸方向発熱分布は燃料棒の肉厚を変化させることにより、Fig. 2-7, Fig. 2-8 に示すようなピーキング係数 1.30 の Chopped Cosine 型としている。径方向の発熱分布は外層から 1.20 / 0.84 / 0.72 である。燃料棒表面にはドライアウト発生位置及び表面温度を検出するために外径 0.5 mm のシース型クロメル-アルメル熱電対が設置されている。Fig. 2-9, Fig. 2-10 に熱電対取り付け位置を示す。ドライアウトはテスト部出口付近で発生するケースが多く上昇流と下降流では熱電対の取り付け位置が異なっている。

試験範囲は実機の定格運転時の条件を基本として以下のように設定した。

圧 力	7.0	[MP a]
流 量	0 ~ ± 50	[ton/hr]
	0 ~ ± 2,900	[kg/m ² . sec]
出 力	0 ~ 9.0	[MW]
入口温度	275	[°C]

試験方法は圧力及び流量を設定した後、出力を 100 [KW/sec] 程度の上昇速度でランプ状に上昇させて行きドライアウトが発生する出力を調べた。ドライアウトの発生は発熱管表面に取り付けた熱電対の温度が約 50 °C 急上昇（トリップ温度は 350 °C）することにより判定した。

3. 試 験 結 果

3.1 ドライアウト限界出力

Fig. 3-1 にドライアウト限界出力と流量の関係, Table 3-1, Table 3-2 に測定データを示す。図から下降流時のドライアウトには流量によって特性の異なる3つの領域が存在することが明らかに認められる。低流量下降流時には上昇流時と比較して、ドライアウト限界出力が大きく減少している。一方、高流量域においては上昇流時とほぼ同じ出力でドライアウトが発生している。ここでは下降流流量0～約460 [kg/m²・sec] の範囲のドライアウト限界出力が極端に小さくなる領域を気液対向流領域とし、下降流流量約460～約730 [kg/m²・sec] の範囲のドライアウト限界出力が上昇流時の値に漸近していく領域を遷移領域とし、下降流流量が約730 [kg/m²・sec] 以上のドライアウト限界出力が上昇流時の値とほぼ等しい領域を気液同方向下降流領域とする。

上昇流時と下降流時のドライアウト限界出力の比を Fig. 3-2 に示す。図中には28本ロッドクラスタを用いた試験結果についても合わせて示されている。①の気液対向流領域においては流量が増加するにしたがってドライアウト限界出力比は低下し、約460 [kg/m²・sec] において最小値をとり、上昇流時と比較して75%のドライアウト限界出力の低下がみられた。これはテスト部内を上昇する蒸気の数値と密接な関係があり下降する液相の数値が大きくなるにしたがって蒸気は上昇速度を失いテスト部に停滞しボイド率が上昇するため、ドライアウト限界出力比が低下するものと考えられる。また、②の遷移領域においては沸騰により発生した蒸気は液相と等しい下向きに流れ始めドライアウト出力は増加し、さらに、③の同方向下降流領域においては流動状態は上昇流時とほぼ等しくなりドライアウト限界出力も等しい値をとると考えられる。Fig. 3-3 に Mishima らの実験⁽³⁾ のデータとの比較を示す。Mishima らの実験は、大気圧付近で行なわれ流路形状も薄い長方形ダクトであり本実験と大きく異なるため直接的には比較できないが、本実験と同様に極小値を有することがわかる。

Fig. 3-4 にドライアウト時のテスト部出口クオリティを示す。上昇流時と比較して下降流時には流量約460 [kg/m²・sec] 付近においてドライアウトクオリティが極小値を示している。これはドライアウト限界出力特性の変化と対応している。気液対向流領域及び遷移領域では上昇流に比べてはるかに低い蒸気クオリティでドライアウトが生じており、気液対向流から気液同方向下降流へ遷移する過程において蒸気の停滞が発生し、ボイド率が上昇しているのが原因と考えられる。

3.2 ドライアウト発生位置

Fig. 3-5 および Table 3-3, Table 3-4 にドライアウト発生位置を示す。Fig. 3-5 中の斜線

の領域はドライアウトが発生した領域、プロット点は最も早くトリップ温度に達した熱電対の位置を示す。上昇流にはドライアウトはテスト部中心より上部（出口側）で発生した。しかし、気液対向流が発生していると考えられる微小下降流時および流量停滞時には気泡停滞のために軸方向全体で温度上昇がみられ、Tabl 3-3, 3-4 からわかるように、ドライアウトは軸方向全領域にわたって観察され、かつ、最初にトリップ温度に達するのは熱流速の最も大きい中心部である。また、下降流時においても高流量域では上昇流の場合と同じくドライアウトはテスト部出口付近で発生しており、ここでは蒸気-水とも下降する同方向下降流状態にあることが裏付けられる。

4. 考 察

4.1 無次元速度による整理

(1) 流量停滞時のドライアウト限界出力

流量ゼロの状態におけるドライアウト出力を評価するため、フラッディングモデルと実験値との比較を行った。

流量ゼロの状態についてテスト下部を締め切り加熱するモデルを設定する。このとき、加熱出力を増加させて行くと沸騰により発生した蒸気は上昇し、液相はテスト部上側より、蒸気と置き換わる形で供給され、蒸気と水の対向流状態となる。このような気液対向流においては蒸気流量が大きい場合、流下する液相流量が制限されるフラッディング現象、あるいは CCFL (Counter-Current Flow Limitation) と呼ばれる現象が生じる。下部を締め切った上記の様なモデルにおいてフラッディング現象が発生した場合、液相がテスト部下部へ供給されなくなりドライアウトが発生する。フラッディング相関式の代表的なものとして次の Wallis の相関式⁽⁵⁾がある。

$$J_g^{*1/2} + m J_l^{*1/2} = C \quad (4-1)$$

J_g^* , J_l^* はそれぞれ、気相および液相の無次元速度であり、

$$J_g^* = J_g \left[\frac{\rho_g}{g D (\rho_l - \rho_g)} \right]^{1/2} \quad (4-2)$$

$$J_l^* = J_l \left[\frac{\rho_l}{g D (\rho_l - \rho_g)} \right]^{1/2} \quad (4-3)$$

で示される。

マスバランスおよびエネルギーバランスより次式が成り立つ。

$$J_g \rho_g A = J_l \rho_l A = q A_h / h_{lg} \quad (4-4)$$

(4-1) ~ (4-4) 式よりフラッディング限界熱流束が次式で与えられる。

$$q_c = \frac{C^2 A h_{lg} \{ \rho_g (\rho_l - \rho_g) D \}^{1/2}}{A_h \{ 1 + m^2 (\rho_g / \rho_l)^{1/4} \}^{1/2}} \quad (4-5)$$

ここで、C および m は装置形状に依存する経験定数であり、通常 C は 0.75 ~ 1.1, m は 0.9 ~ 1.0 程度の値が用いられている。上記のモデルはサーモサイフォンにおいてドライアウト限界出力を求めるときに一般的にもちいられ、K. MISHIMA らは流量停滞時に対して同様な評価を行い実験値とよい一致を与えている。本試験の圧力 7 MPa の条件で (4-5) 式よりフラッディング限界出力を求めると、 $C = 0.75 \sim 1.1$, $m = 0.9 \sim 1.0$ として

$$Q = 100 \text{ [KW]} \sim 221 \text{ [KW]} \quad (4-6)$$

という値が算出される。フラッディング相関式は装置形状や実験の方法によって C および m の値が変化するためこれ以上の精度は要求できないが、流量ゼロ時のドライアウト限界出力の実験値は $Q = 100 \text{ [KW]} \sim 350 \text{ [KW]}$ であり、放熱等の実験上の誤差を考慮すればほぼ妥当な値であると考えられる。以上のことから流量停滞時のドライアウト限界出力はフラッディング現象によって説明できることがわかる。

(2) 気液同方向下降流から気液対向二相流への遷移

Fig. 4-1 はテスト部出口におけるドライアウト時の蒸気流量と水の流量の関係を (4-2) 式, (4-3) 式の無次元流速により整理した結果である。蒸気流量はクリオリティより換算した値を用いている。実験結果から上昇流時には水の流量が小さくなるにしたがって蒸気流量が減少して行き、水流量ゼロにおいて蒸気流量は $J_g^{*1/2} = 0.7 \sim 1.0$ を示していることがわかる。一方下降流時には液相流量の絶対値が減少しゼロに近づくにしたがって蒸気流量の絶対値も減少して行くが、水の流量が対向流の発生可能な領域 (Unstable Region) まで減少したところにおいてドライアウトクオリティの急激な減少によって蒸気流量が急激に減少している。したがってこの流量 ($725.2 \text{ (kg/m}^2 \cdot \text{sec)}$) において同方向下降流は限界に達し、対向流への遷移が始まると考えられる。この限界は図に示すように (4-1) 式において $C = 0.75$, $m = 1.0$ とした場合の $J_g^{*1/2} = 0$ と一致している。

したがって、気液同方向下降流領域 (③) から遷移領域 (②) への遷移条件は (4-1) 式の $C = 0.75$, $m = 1.0$, $J_g^{*1/2} = 0$ とおいて

$$J_1^{*1/2} = C/m = 0.75 \quad (4-7)$$

によって判別できる。

気相の停滞条件とフラッディングの関係について考察するため、ドリフト速度相関式より気相のドリフト速度を求めた。Table 4-1 にその結果を示す。相関式には気泡流に対する Zuber の式, Shulman の式, スラグ流に対する Nicklin の式, チャーンタービュレント流に対する Zuber-Findlay の式, Ishii の式を用いた。下降流時には以上の様なドリフト速度に等しい入口流速において気泡が停滞することが予想されるが、それに相当する質量流量は $70 \sim 106 \text{ (kg/sec} \cdot \text{m}^2)$ であり、フラッディング限界による遷移条件や実験結果よりかなり低い値を与える。その原因はドリフト相関式が低ボイド率のデータによるものであることや、フラッディング相関式は液相の流下が抑制される条件を示しているのに対してドリフト速度は気泡が上昇しなくなる条件を与える違いによるものと考えられる。

以上の考察より、気液同方向下降流領域から気液対向流域への遷移についてはフラッディングモデルがよい遷移条件を与えることが分かった。

4.2 圧力損失評価

動燃において開発した36本クラスタ型燃料集合体圧力損失評価式⁽⁶⁾を用いてテスト部圧力損失評価コードを作成し上昇流時及び下降流時の圧力損失の評価を行った。計算はテスト部出入口間を二相流、非加熱二相流領域に分割し加熱二相流領域についてはテスト部加熱長を37のノードに分割して計算を行った。また、ボイド率についてはガンマ線ボイド計データを用いて開発したクオリティボイド相関式⁽⁷⁾を使用した。

Fig.4-2, Fig.4-3にそれぞれ上昇流時と下降流時の計算と測定の結果を示している。また、Table.4-2, Table.4-3に計算で求めた静圧損失、摩擦損失、加速損失、および全圧損失の値を示している。Fig.4-3に示したように下降流時には低流量域において圧力損失は負の値を示す。(Fig.4-4に低流量域の拡大図を示す。)圧力損失は $\Delta P = P_{in} - P_{out}$ であり、入口圧力は出口圧力よりも低くなっている。これは下降流では静圧項の方向が逆向きであるためであり、摩擦項、加速項の値が小さくなる低流量域においては静圧項が支配的となり圧力損失は負の値となったことを示す。また、圧力損失が負の値を示す領域は対向流領域と一致しており、対向二相流領域におけるドライアウトの特徴の一つとして、圧力損失特性は静圧項が支配的となって負の値を示すことが明らかになった。

4.3 ドライアウト評価式

(1) 上昇流時のドライアウト限界出力評価

動燃では蓄積したドライアウト限界出力実験データに基づき次式で示されるCHF評価式を開発している。⁽⁸⁾

$$q_c = f(X, P, \Delta H_{sub}, \Delta Z_{sp}, D_{pT}, \Delta E, LPD, APD) \quad (4-7)$$

- ここで、 q_c ; 限界熱流束
 X ; 蒸気クオリティ
 P ; 冷却材圧力
 ΔH_{sub} ; 炉心入口冷却材サブクール度
 ΔZ_{sp} ; スペーサピッチ
 D_{pT} ; 圧力管内径
 ΔE ; 圧力管内での燃料体偏心量
 LPD ; クラスタ内局所出力分布
 APD ; 軸方向出力分布

上昇流時のドライアウト限界出力について上式を用いて計算を行った結果と実験値との比較をFig.4-5, Fig.4-6およびTable 4-4に示す。上記のCHF評価式は ± 0.6 [MW]の精度で実験値を予測した。

(2) 下降流時のドライアウト限界出力評価

下降流時の実験結果より各領域のドライアウト限界出力について次のような実験式を作成した。

- ① 気液対向流領域 ($0 \leq G_D [\text{kg}/\text{m}^2 \cdot \text{sec}] \leq 458.3$)

$$Q [\text{MW}] = 0.21403 + 1.1243 \times 10^{-3} \times G_D \quad (4-8)$$

ただし, $P = 7 [\text{MPa}]$, $T_{\text{in}} = 275 [^{\circ}\text{C}]$

- ② 遷移領域 ($458.3 \leq G_D [\text{kg}/\text{m}^2 \cdot \text{sec}] \leq 725.2$)

$$Q [\text{MW}] = -31.673 + 0.13352 \times G_D - 1.8354 \times 10^{-4} \times G_D^2 + 1.1307 \times 10^{-7} \times G_D^3 \\ - 2.5886 \times 10^{-11} \times G_D^4 \quad (4-9)$$

ただし, $P = 7 [\text{MPa}]$, $T_{\text{in}} = 275 [^{\circ}\text{C}]$

- ③ 気液同方向下降流領域 ($725.2 \leq G_D [\text{kg}/\text{m}^2 \cdot \text{sec}]$)

この領域は (4-7) 式で示される上昇時の相関式を使用する。

ただし, $P = 7 [\text{MPa}]$, $T_{\text{in}} = 275 [^{\circ}\text{C}]$

以上の評価式を用いて計算した結果と実験値との比較を Fig.4-7, Fig.4-8 および Table4-5 に示す。上記の評価式は下降流時のドライアウト限界出力を $\pm 0.6 [\text{MW}]$ の精度で示すことができる。

5. 結 言

下降流状態におけるドライアウト限界出力を正確に把握することを目的として、大洗工学センター原子炉工学室の14 MW大型熱ループにおいて新型転換炉実証炉用36本クラスタを用いた実規模試験を行うとともに、下降流状態におけるドライアウト評価式を作成した。本研究の結果、以下のことが明らかになった。

- (1) 下降流状態でのドライアウトには流量によって特性の異なる領域、即ち、気液同方向下降流領域、遷移領域、気液対向流領域の3つの領域が存在し、遷移条件は圧力7 MPaの場合、各々、 $G = 725.2$ 及び 458.3 [$\text{kg}/\text{m}^2 \cdot \text{sec}$] である。
- (2) 気液同方向下降流領域では上昇流のドライアウト評価式が適用される。
- (3) 気液対向流領域ではドライアウト限界出力が上昇流と比較して最大75%低下する。
- (4) 気液同方向下降流領域から遷移領域への遷移はフラッディングモデルから導出した

$$J_1^{*1/2} = C/m = 0.75$$

によって判定できる。

- (5) 3つの領域各々に対して作成したドライアウト評価式は本実験について ± 0.6 [MW]の精度で予測できる。

記 号 表 (Nomenclature)

A	: Flow cross-sectional area	[m^2]
C	: Empirical constant number	[-]
D	: Hydraulical equivalent diameter	[m]
G	: Mass flux	[$\text{kg}/\text{m}^2 \cdot \text{sec}$]
g	: accaleration of gravity	[m/sec^2]
h	: Enthalpy	[kcal/kg]
J*	: Non-dimensional flow velocity	[-]
J	: Superficial flow velocity	[m/sec]
m	: Empirical constant number	[-]
P	: Pressure	[kgf/cm^2]
q	: Heat flux	[KW/m^2]
Q	: Input power	[MW]
W	: Weight flow rate	[ton/hr]
ρ	: Density	[kg/m^3]

Subscripts

g	: Gas-phase
l	: Liquid-phsae
h	: Heater surface
lg	: l - g
c	: Critical
D	: Downward flow
in	: Inlet position of test section
out	: Outlet position of test section

参 考 文 献

- [1] 川又伸弘ら「低流量二相流の流動様式とドライアウト発生条件に関する実験」
PNC SN941 81-27 (1981)
- [2] M. Cumo, et al., Up-Flow and Down-Flow Burnout, Conf. Heat Fluid Flow
Water React. Saf., (GBR), p.183-192, (1977)
- [3] K. Mishima, et al., The Effect of Flow Direction and Magnitude on CHF,
Nuclear Engineering and Design, 86, p.165-181, (1985)
- [4] J. G. Collier, Future Research Suggestions on Boiling and Condensation,
Advances in Two-Phase Flow and Heat Transfer, Vol. II, p.877-895 (1983)
- [5] G. B. Wallis, One-dimensional Two-phase Flow, McGraw-Hill, (1969)
- [6] 鴨志田洋ら「36本クラスタ型燃料集合体の圧力損失評価式の開発」PNC SN941 85-86
- [7] 菅原 悟ら「ガンマ線ボイド計データに基づくクォリティーボイド相関式の開発」
PNC SN941 82-201
- [8] 菅原 悟ら「実規模バーンアウト試験に基づく36本クラスタの定常CHF相関式の開発」
PNC ZN941 84-143
- [9] 植田辰洋 気液二相流 養賢堂 (1981)

Table 3-1 Experimental Results (Upward flow)

RUN NO	P MPa	W t/h	G t/m ² h	T _{in} °C	H _{in} kcal/kg	H _{sub} kcal/kg	Q MW	q Mkcal/ m ² h	X _{bo} %	Location
640 074	7.06	8.7	1.82	276.2	290.8	11.0	3.09	0.279	80.7	TC29-3ET
640 075	7.04	8.8	1.83	276.2	290.8	10.8	3.09	0.279	79.9	TC29-3ET
640 076	7.00	6.8	1.42	271.8	285.4	15.6	2.56	0.232	84.2	TC29-3ET
640 077	7.04	4.7	0.99	275.0	289.3	12.3	2.01	0.181	96.8	TC29-3ET
640 078	6.99	3.9	0.82	274.0	288.1	12.8	1.76	0.159	101.2	TC29-3ET
640 079	7.07	3.0	0.63	275.7	290.2	11.8	1.30	0.118	99.1	TC29-3ET
640 080	6.98	2.5	0.52	276.8	291.5	9.2	1.10	0.100	101.7	TC29-3ET
640 081	7.03	2.0	0.42	274.5	288.7	12.8	0.94	0.106	100.4	TC31-4GB
640 082	7.09	1.5	0.32	272.1	285.7	16.4	0.81	0.092	114.0	TC33-4FB
640 083	7.05	1.0	0.01	271.6	285.1	16.6	0.73	0.083	3063.5	TC33-4FB
640 084	7.19	0.75	0.01	273.8	287.8	15.5	0.63	0.071	2668.5	TC33-4FB
640 085	7.20	0.5	0.01	270.1	283.3	20.2	0.59	0.053	2625.8	TC33-3FB
640 086	7.28	0.0	0.01	273.5	287.5	17.0	0.35	0.052	1407.3	TC30-5FB
640 087	7.27	0.0	0.01	272.3	286.0	18.3	0.31	0.054	1126.8	TC33-6FB
640 088	7.26	0.0	0.01	270.6	283.9	20.3	0.25	0.045	938.4	TC33-6FB
640 089	7.22	0.0	0.01	267.1	279.6	24.1	0.21	0.036	757.6	TC33-6FB
640 090	7.24	0.0	0.01	269.9	283.0	20.9	0.18	0.031	647.6	TC33-6FB
640 092	7.13	10.0	2.08	275.0	289.3	13.3	3.48	0.314	78.9	TC29-3ET
640 103	7.08	2.0	0.42	272.6	286.3	15.7	0.94	0.106	100.1	TC31-4GB
640 124	7.07	4.0	0.83	272.4	286.1	15.8	1.81	0.164	103.6	TC29-3ET
640 125	6.99	6.9	1.45	273.8	287.8	13.0	2.75	0.248	89.6	TC29-3ET
640 126	7.08	3.0	0.62	271.4	284.9	17.2	1.35	0.122	102.2	TC29-3ET

Table 3-1 (Continue)

RUN NO	P MPa	W t/h	G t/m ² h	T _{in} °C	H _{in} kcal/kg	H _{sub} kg	Q MW	q Mkcal/ m ² h	X _{bo} %	Location
640 158	7.26	38.8	8.11	275.0	289.3	14.9	7.81	1.377	35.4	TC33-6FB
640 159	7.16	34.4	7.19	274.5	288.7	14.3	7.48	1.319	38.5	TC33-6FB
640 160	7.10	29.7	6.20	276.6	291.3	11.0	7.13	1.257	43.9	TC33-6FB
640 161	7.05	24.5	5.13	276.8	291.5	10.2	6.59	0.746	57.4	TC34-4GB
640 162	6.99	20.0	4.17	274.7	288.9	11.9	6.02	0.681	64.0	TC31-4GB
640 163	6.97	14.5	3.02	275.5	289.9	10.7	4.95	0.560	73.5	TC34-4GB
640 164	6.93	9.0	1.88	274.0	288.1	12.1	3.59	0.407	85.8	TC34-4GB

Table 3-2 Experimental results (Downward flow)

RUN NO	P MPa	W t/h	G t/m ² h	T _{in} °C	H _{in} kcal/kg	H _{sub} kg	Q MW	q Mkcal/ m ² h	X _{bo} %	Location
640 193	7.08	47.4	9.89	276.4	291.0	11.0	8.54	1.002	37.2	TC19-3GT
640 194	7.09	48.9	10.22	279.0	294.2	7.9	8.58	1.006	37.0	TC19-3GT
640 195	7.12	43.0	8.98	275.9	290.4	12.1	8.22	0.964	39.5	TC34-3GT
640 196	7.04	43.2	9.02	274.6	288.8	12.8	8.31	0.974	39.4	TC34-3GT
640 197	7.05	40.1	8.37	275.3	289.7	12.0	7.94	0.931	40.9	TC34-3GT
640 198	7.13	40.4	8.43	274.3	288.4	14.2	8.03	0.942	40.6	TC34-3GT
640 199	6.85	34.2	7.14	276.2	290.8	8.4	7.31	0.857	45.0	TC19-3GT
640 200	7.06	34.5	7.20	275.0	289.3	12.5	7.42	0.871	44.7	TC34-3GT
640 201	6.95	29.3	6.13	276.4	291.0	9.3	6.79	0.797	48.9	TC19-3GT
640 202	6.93	29.4	6.15	276.9	291.7	8.5	6.73	0.789	48.5	TC19-3GT
640 203	7.00	24.4	5.10	275.5	289.9	11.0	6.37	0.747	55.0	TC19-3GT
640 204	7.00	24.4	5.09	275.3	289.7	11.3	6.31	0.740	54.5	TC19-3GT
640 205	6.96	19.4	4.06	275.7	290.2	10.3	5.73	0.672	62.7	TC19-3GT
640 206	6.96	19.5	4.06	275.0	289.3	11.2	5.83	0.684	63.6	TC19-3GT
640 207	7.00	17.3	3.61	275.7	290.2	10.8	5.48	0.643	67.7	TC19-3GT
640 208	6.98	17.3	3.62	275.7	290.2	10.6	5.53	0.649	68.1	TC19-3GT
640 209	6.98	14.9	3.10	275.3	289.7	11.1	5.19	0.609	74.8	TC34-3GT
640 210	6.98	14.9	3.11	275.2	289.6	11.2	5.18	0.608	74.4	TC19-3GT
640 211	7.00	12.3	2.57	276.0	290.5	10.4	4.56	0.534	79.7	TC34-3GT
640 212	6.98	12.6	2.63	276.0	290.5	10.2	4.56	0.534	77.5	TC34-3GT
640 213	7.00	9.7	2.03	276.6	291.3	9.7	2.92	0.623	22.9	TC34-9GT
640 214	7.01	9.8	2.05	276.0	290.5	10.7	3.01	0.353	65.4	TC34-3GT
640 215	7.00	8.1	1.69	277.1	291.9	9.1	0.72	0.160	8.9	TC34-7GT
640 216	7.01	7.9	1.65	273.8	287.8	13.4	0.93	0.206	11.4	TC34-7GT

Table 3-2 (Continue)

RUN NO	P MPa	W t/h	G t/m ² h	T _{in} °C	H _{in} kcal/kg	H _{sub} kcal/kg	Q MW	q Mkcal/ m ² h	X _{bo} %	Location
640 219	6.93	8.0	1.67	275.3	289.7	10.5	0.80	0.177	9.9	TC35-7ET
640 220	6.98	7.9	1.64	275.0	289.3	11.4	0.71	0.158	8.5	TC35-7ET
640 221	6.96	7.8	1.63	274.3	288.4	12.1	0.60	0.133	6.5	TC35-7ET
640 222	6.98	7.9	1.64	276.0	290.5	10.2	0.75	0.168	9.5	TC35-7ET
640 223	7.03	6.2	1.30	275.7	290.2	11.3	0.65	0.145	10.4	TC19-7GT
640 224	6.95	6.2	1.30	276.0	290.5	9.8	0.56	0.123	8.7	TC35-7ET
640 225	7.02	6.5	1.35	275.7	290.2	11.2	0.58	0.129	8.5	TC35-7ET
640 226	7.01	6.3	1.31	275.5	289.9	11.3	0.50	0.102	10.7	TC19-5GT
640 227	6.99	6.2	1.30	274.6	288.8	12.0	0.48	0.106	6.5	TC35-7ET
640 228	7.03	4.4	0.92	275.3	289.7	11.8	0.57	0.123	16.3	TC20-6ET
640 229	7.03	4.8	1.01	276.4	291.0	10.4	0.50	0.112	10.5	TC35-7ET
640 230	7.02	4.6	0.97	276.2	290.8	10.5	0.45	0.100	9.6	TC31-7GB
640 231	6.99	4.7	0.98	276.4	291.0	9.8	0.40	0.089	8.3	TC35-7ET
640 232	6.97	4.5	0.94	274.1	288.2	12.4	0.36	0.079	6.7	TC35-7ET
640 233	6.96	4.0	0.83	275.0	289.3	11.2	0.55	0.123	11.9	TC33-8FM
640 234	7.02	4.1	0.85	275.3	289.7	11.7	0.50	0.112	10.2	TC33-8FM
640 235	7.02	3.7	0.78	276.4	291.0	10.3	0.46	0.102	12.9	TC35-7ET
640 236	7.06	3.7	0.78	276.7	291.4	10.4	0.43	0.095	11.8	TC35-7ET
640 237	6.99	3.0	0.64	282.8	298.9	2.0	0.53	0.113	25.6	TC30-6FT
640 238	7.00	5.0	1.05	276.7	291.4	9.6	0.50	0.110	08.0	TC33-8GM
640 239	6.99	4.3	0.90	276.9	291.7	9.2	0.45	0.100	10.9	TC35-7ET
640 240	7.01	2.8	0.58	284.6	301.3	-0.1	0.42	0.085	26.1	TC33-5FM
640 241	6.99	3.0	0.63	283.3	299.5	1.3	0.35	0.078	12.3	TC33-8FM

Table 3-2 (Continue)

RUN NO	P MPa	W t/h	G t/m ² h	T _{in} °C	H _{in} kcal/kg	H _{sub} kg	Q MW	q Mkcal/ m ² h	X _{bo} %	Location
640 242	7.05	3.0	0.62	284.3	300.8	0.9	0.33	0.074	11.9	TC36-8FT
640 243	7.06	2.0	0.42	285.0	301.8	0.0	0.58	0.126	44.5	TC30-6FT
640 244	7.05	2.9	0.61	278.3	293.4	8.3	0.50	0.111	19.7	TC19-7GT
640 245	7.03	2.1	0.45	279.6	295.0	6.5	0.45	0.101	25.6	TC35-7ET
640 246	7.07	2.6	0.54	280.2	295.7	6.2	0.41	0.091	18.6	TC35-7ET
640 247	7.05	1.9	0.40	285.0	301.8	-0.1	0.36	0.080	23.9	TC35-7ET
640 248	7.05	2.0	0.42	285.0	301.8	-0.1	0.31	0.062	26.8	TC35-5FM
640 249	7.06	2.0	0.42	285.5	302.4	-0.6	0.26	0.052	22.3	TC33-5FM
640 250	7.19	1.1	0.22	286.7	303.9	-0.6	0.36	0.078	51.7	TC20-6GT
640 251	7.23	1.0	0.22	286.2	303.3	0.5	0.35	0.077	43.1	TC35-7ET
640 252	7.05	1.1	0.22	285.3	302.2	-0.5	0.31	0.063	51.0	TC19-5GT
640 253	7.01	1.0	0.22	285.3	302.2	-0.9	0.26	0.058	32.5	TC31-7GB
640 254	7.03	1.0	0.22	285.3	302.2	-0.7	0.22	0.048	22.6	TC33-8FM
640 255	7.03	1.0	0.22	285.3	302.2	-0.7	0.17	0.038	18.0	TC36-8FT
640 256	6.96	1.1	0.22	284.6	301.3	-0.8	0.08	0.019	10.4	TC35-7ET
640 257	7.21	0.3	0.06	287.1	304.4	-0.8	0.37	0.082	181.5	TC35-7ET
640 258	7.18	0.3	0.05	286.4	303.5	-0.3	0.31	0.069	154.4	TC35-7ET
640 259	7.21	0.3	0.05	286.9	304.2	-0.6	0.37	0.079	215.3	TC30-6FT
640 260	6.99	0.3	0.05	284.8	301.6	-0.7	0.26	0.058	109.4	TC36-8FT
640 261	7.00	0.3	0.05	285.0	301.8	-0.8	0.17	0.038	70.6	TC36-8FT
640 262	7.00	0.3	0.05	284.8	301.6	-0.6	0.13	0.029	53.5	TC36-8FT
640 263	6.97	0.3	0.05	284.6	301.3	-0.7	0.09	0.019	35.8	TC36-8FT

Table 3-3 Dryout Location (Upward flow)

Run No.	W (t/h)	ch. No. P (MPa)	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20
			29	29	29	29	30	30	30	30	31	31	31	31	32	32	32	32	33	33	33	33
			3 ET	5 ET	7 ET	9 ET	3 FE	5 FE	7 FE	8 FE	4 GB	6 GB	7 GM	9 GB	4 ET	6 ET	8 ET	8 EM	3 FB	4 FB	6 FB	9 FC
640		7.0																				
	074	9	●																			
	075	9	●								△				△							
	076	7	●								△											
	077	5	●								△											
	078	4	●								△											
	079	3	●								△											
	080	2.5	●					△			△								△			
	081	2	△					△	△		●				△				△	△		
	092	9	○	△				△			△				△				△	△		
	103	2	△	△				△	△		△	△			△	△			△	●	△	
	158	40		△	△										△	△		△	○			
	159	35			△										△	△	△	△	○			
	160	30			△										△	△	△	△	○			
	161	25		△	△			△			△				△	△		△	△	●		
	162	20		△				△			△				△	△		△	○			
	163	15	△	△				△			△				△	△		△	●			
	164	10		△	△			△			△				△	△		○	△			
	123	7	△	△			△								○				△	△		
	124	4	○	△			△	△				△			△	△			△	△		
	125	7	○	△			△					△			△	△			△	△		
640	126	3	7.0	○	△			△	△			△			△	△			△	△	△	

○ Point at which temperature rises first

●▲ Trip Point ($T_w = 350^\circ\text{C}$)

△ Point at which temperature rises

Table 3 - 3 (Continue)

Run No	W (t/h)	ch. P MPa	No	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20
				29	29	29	29	30	30	30	30	31	31	31	31	32	32	32	32	33	33	33	33
				3ET	5ET	7ET	9ET	3FE	5FE	7FE	8FE	4GB	6GB	7GM	9GB	4ET	6ET	8ET	8FM	3FB	4FB	6FB	9FC
640	082	1.5	7.0	△	△			△	△			△				△				△	●		
	083	1		△	△			△	△			○				△				△	▲		
	084	0.75		△	△			△	△			△				△				●	△	△	
	085	0.5		△	△			△	△			△	△			△				●	△	△	
	086	0						△	●	△	△	△	△	△						△	△	△	
	087	0							△	△	△	△	△	△						△	○	▲	
	088	0			△	△		△	△	△	△	△	△	△			△	△		△	○	▲	
	089	0			△	△		△	△	△		△	△	△			△			○	△	▲	
640	090	0	7.0			△		△	△	△		△	△	△			△			○	△	▲	

○ Point at which temperature rises first

●▲ Trip Point ($T_w = 350^\circ\text{C}$)

△ Point at which temperature rises

Table 3-4 Dryout Location (Downward flow)

Run No	W (t/h)	Ch. Na P (MPa)	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25	26	27	28	29	30
			30 4FT	30 6FT	30 8FT	31 7GB	31 9GB	31 10GB	32 8EB	32 10ET	32 12ET	33 5FM	33 8FM	33 10FM	34 3GT	34 7GT	34 9GT	35 7ET	35 9ET	35 11ET	36 8FT	36 9FT	36 10FT	19 3GT	19 5GT	19 7GT	20 4ET	20 6ET	20 8ET	21 8FT	21 9FT	21 10FT
640	193	50	7.0												●										△							
	194	50													●										△							
	195	45													●										△							
	196	45													●										△							
	197	40													●										△							
	198	40													●										△							
	199	35													△										●							
	200	35													△										●							
	201	30																							●							
	202	30																							●							
	203	25																							●							
	204	25																							●							
	205	20																							●							
	206	20																							●							
	207	17.5													△										●							
	208	17.5													△										●							
	209	15.0													●										△							
	210	15.0													●										△							
	211	12.5													●										△							
	212	12.5													●										△							
	213	10													△		●															
	214	10													△	△	△			●												
	215	8														●	△															
640	216	8	7.0						△			△	△	△		●	△								△	△						

○ Point at which temperature rises first

●▲ Trip Point (Tw= 350℃)

△ Point at which temperature rises

Table 3-4 (Continue)

Run No	W (t/h)	Ch. P (MPa)	Na																															
			1 30 4FT	2 30 6FT	3 30 8FT	4 31 7GB	5 31 9GB	6 31 10GB	7 32 8EB	8 32 10ET	9 32 12ET	10 33 5FM	11 33 8FM	12 33 10FM	13 34 3GT	14 34 7GT	15 34 9GT	16 35 7ET	17 35 9ET	18 35 11ET	19 36 8FT	20 36 9FT	21 36 10FT	22 19 3GT	23 19 5GT	24 19 7GT	25 20 4ET	26 20 6ET	27 20 8ET	28 21 8FT	29 21 9FT	30 21 10FT		
640	219	8	7.0													▲	▲	▲							○	▲	▲							
	220	8														▲	▲		●															
	221	8													▲	▲		●							▲									
	222	8													▲	▲	▲	●		▲					▲									
	223	6													▲	▲	▲	▲							▲	●	▲	▲	▲	▲	▲	▲	▲	
	224	6									▲	▲			▲	▲	▲	●	▲		▲							▲	▲	▲	▲		▲	
	225	6													▲	▲		●	▲	▲	▲							▲	▲	▲	▲			
	226	6													▲	▲		▲		▲	▲			▲	▲	●								
	227	6		▲	▲	▲	▲								▲	▲	▲	●	▲		▲	▲	▲											
	228	5		▲	▲								▲		▲	▲	▲	▲	▲	▲	▲	▲	▲			▲	●		▲	▲				
	229	5		▲	▲	▲	▲	●	▲	▲	▲	▲	▲	▲	▲	▲	▲	▲	▲	▲	▲	▲	▲			▲	●		▲	▲				
	230	5		▲	▲	▲	●	▲	▲	▲	▲	▲	▲	▲	▲	▲	▲	▲	▲		▲		▲			▲			▲	▲				
	231	5					▲			▲					▲	▲		●	▲		▲	▲	▲	▲	▲	▲								
	232	5									▲	▲	▲	▲	▲	▲	▲	●	▲		▲	▲				▲								
	233	4		▲	▲	▲				▲	▲		●	▲	▲	▲	▲	▲	▲	▲														
	234	4		▲	●	▲	▲	▲	▲	▲	▲		▲	▲		▲	▲		▲															
	235	4		▲	▲	▲	▲	▲	▲	▲	▲		▲			▲	▲	▲	●	▲		▲	▲	▲	▲	▲								
	236	4													▲	▲	▲	●	▲			▲	▲											
	237	3		▲	▲	▲												●											▲	▲	▲	▲		
	238	3										▲	▲		▲	▲	▲	●	▲		▲	▲	▲						▲	▲	▲	▲		
	239	3													▲	▲		▲	▲			▲	▲											
	240	3		▲	▲							●	▲		▲	▲	▲	▲	▲	▲	▲	▲	▲	▲	▲	▲	▲	▲	▲	▲	▲	▲		
	241	3		▲	▲	▲	▲	▲	▲	▲	▲		▲	▲		▲	▲	▲	●	▲		▲	▲	▲	▲				▲	▲				
	242	3		▲	▲	▲	▲					▲			▲	▲	▲	▲	●	▲		▲	▲	▲	▲	▲	▲	▲	▲					
243	2		▲	●	▲	▲	▲	▲	▲	▲		▲	▲		▲	▲	▲	▲	▲		▲	▲				▲	▲	▲	▲					
244	2														▲		▲	▲	▲		▲	▲				●								
245	2										▲	▲		▲	▲	▲	●	▲			▲	▲												
246	2																								●			●						
247	2										▲	▲		▲	▲	▲	●	▲			▲	▲			●									
640	248	2	7.0	▲							▲			▲	▲		▲	▲			▲	▲												

○ Point at which temperature rises first

●△ Trip Point (T_w = 350°C)

△ Point at which temperature rises

Table 3-4 (Continue)

Run No	W (t/h)	Ch. P No (MPa)	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25	26	27	28	29	30
			30	30	30	31	31	31	32	32	32	33	33	33	34	34	34	35	35	35	36	36	36	19	19	19	20	20	20	21	21	21
			4FT	6FT	8FT	7GB	9GB	10GB	8EB	10ET	12ET	5FM	8FM	10FM	3GT	7GT	9GT	7ET	9ET	11ET	8FT	7FT	10FT	3GT	5GT	7GT	4ET	6ET	8ET	8FT	9FT	10FT
640	249	2	7.0									●			△	△		△	△		△											
	250	1					△		△			△			△	△	△	△	△		△	△			△	●	△	△	△	△	△	△
	251	1										△			△	△	△	●					△	△	△	△	△	△	△	△	△	△
	252	1		△	△	△	△	△	△	△	△	△			△	△	△	△	△			△	△	△	△	△	△	△	△	△	△	△
	253	1		△	△	△	△	△	△	△	△	△	●	△	△	△	△	△	△		△	△	△	△	△	△	△	△	△	△	△	△
	254	1		△	△	△	△	△	△	△	△	△	△	△	△	△	△	△	△		●	△	△	△	△	△	△	△	△	△	△	△
	255	1		△	△	△	△	△	△	△	△	△	△	△	△	△	△	△	△	△	●	△	△	△	△	△	△	△	△	△	△	△
	256	1		△	△	△	△	△	△	△	△	△	△	△	△	△	△	△	△	△	△	△	△	△	△	△	△	△	△	△	△	△
	257	0		△	△	△	△	△	△	△	△	△	△	△	△	△	△	△	△	△	△	△	△	△	△	△	△	△	△	△	△	△
	258	0		△	△	△	△	△	△	△	△	△	△	△	△	△	△	△	△	△	●	△	△	△	△	△	△	△	△	△	△	△
	259	0		△	△	△	△	△	△	△	△	△	●	△	△	△	△	△	△	△	△	△	△	△	△	△	△	△	△	△	△	△
	260	0		△	△	△	△	△	△	△	△	△	△	△	△	△	△	△	△	△	●	△	△	△	△	△	△	△	△	△	△	△
	261	0		△	△	△	△	△	△	△	△	△	△	△	△	△	△	△	△	△	△	△	△	△	△	△	△	△	△	△	△	△
	262	0		△	△	△	△	△	△	△	△	△	△	△	△	△	△	△	△	△	●	△	△	△	△	△	△	△	△	△	△	△
640	263	0	7.0	△	△	△	△	△	△	△	△	△	△	△	△	△	△	△	△	△	●	△	△	△	△	△	△	△	△	△	△	△

○ Point at which temperature rises first

●▲ Trip Point (Tw = 350°C)

△ Point at which temperature rises

Table 4-1 Drift Velocity Comparison

NAME	FLOW PATTERN	DRIFT VELOCITY EQUATION	DRIFT VELOCITY (m/sec)	CORRESPONDING MASS VELOCITY (kg/m ² • sec)
Zuber	LARGE-BUBBLE	$V_{dj} = 1.18 \left[\frac{\sigma (\rho_1 - \rho_g) g}{\rho_1^2} \right]^{1/4}$	0.144	106.5
Peebles	LARGE-BUBBLE	$V_{dj} = 0.35 \left[\frac{D (\rho_1 - \rho_g) g}{\rho_1} \right]^{1/2}$	0.103	76.22
Nicklin	SLUG FLOW	$V_{dj} = 0.35 (gD)^{1/2}$	0.106	78.40
Zuber & Findlay	CHURN-TURBULENT	$V_{dj} = 1.53 (\sigma g / \rho_1)^{1/4}$	0.107	79.20
Ishii	CHRN-TURBULENT	$V_{dj} = 1.41 \left[\frac{\sigma (\rho_1 - \rho_g) g}{\rho_1^2} \right]^{1/4}$	0.097	71.80

Table4-2 Calculational results of pressure drop
(Upward flow)

Run No	Flow rate (ton/hr)	Static pressure drop $\times 10^3$ (kgf/m ²)	Frictional pressure drop $\times 10^3$ (kgf/m ²)	Accelerational pressure drop $\times 10^3$ (kgf/m ²)	Total pressure drop $\times 10^3$ (kgf/m ²)
640074	8.7	1.562	6.093	0.751	8.408
640077	4.7	1.447	0.961	0.286	2.695
640080	2.2	1.417	0.440	0.043	1.900
640083	0.1	0.580	0.003	0.000	0.584
640086	0.1	0.632	0.003	0.000	0.635
640158	38.8	1.662	54.778	8.632	65.073
640163	14.5	1.514	14.476	2.086	18.077
640160	29.7	1.592	39.652	6.008	47.253
640162	20.0	1.559	22.912	3.397	27.869
640161	24.5	1.569	30.595	4.564	36.728
640159	34.4	1.650	46.756	7.174	55.582

Table 4-3 Calculational results of pressure drop
(Downward flow)

Run No	Flow rate (ton/hr)	Static pressure drop $\times 10^3$ (kgf/m ²)	Frictional pressure drop $\times 10^3$ (kgf/m ²)	Accelerational pressure drop $\times 10^3$ (kgf/m ²)	Total pressure drop $\times 10^3$ (kgf/m ²)
640193	47.4	-2.252	61.595	12.825	72.168
640194	48.9	-2.218	65.742	13.727	77.250
640195	43.0	-2.271	52.555	10.525	60.808
640196	43.2	-2.274	53.694	10.887	62.307
640197	40.1	-2.290	47.630	9.408	54.748
640199	34.2	-2.266	39.026	7.297	44.056
640201	29.3	-2.263	31.290	5.658	34.684
640203	24.4	-2.275	24.258	4.332	26.315
640205	19.5	-2.242	18.249	3.280	19.287
640207	17.3	-2.214	15.405	2.822	16.013
640209	14.9	-2.186	12.650	2.329	12.794
640211	12.3	-2.152	9.757	1.773	9.378
640212	12.6	-2.151	9.759	1.769	9.378
640213	9.7	-2.383	5.182	0.697	3.495
640214	9.8	-2.364	5.406	0.750	3.791
640215	8.1	-3.476	1.474	0.075	-1.931
640219	8.0	-3.396	1.503	0.082	-1.810
640220	7.9	-3.521	1.327	0.066	-2.129
640221	7.8	-3.681	1.156	0.050	-2.474
640222	7.9	-3.472	1.412	0.073	-1.984
640223	6.2	-3.385	0.952	0.053	-2.379
640224	6.2	-3.573	0.845	0.040	-2.688
640225	6.5	-3.529	0.876	0.043	-2.610
640226	6.3	-3.654	0.789	0.035	-2.829
640227	6.2	-3.733	0.731	0.030	-2.971
640228	4.4	-3.247	0.490	0.031	-2.725
640245	2.1	-2.578	0.000	0.018	-2.560
640247	1.9	-2.826	0.000	0.013	-2.812

Table 4-4 Comparison of experimental data and calculation
on dryout power (Upward flow)

Run No	Flow rate [ton/hr]	Dryout power (exp.) [MW]	Dryout power (cal.) [MW]
640074	8.6	3.09	3.05
640075	8.7	3.09	3.07
640076	6.7	2.56	2.59
640077	4.6	2.01	1.98
640078	3.8	1.76	1.74
640079	2.8	1.30	1.45
640080	2.2	1.10	1.68
640081	1.7	0.94	1.60
640082	1.5	0.81	1.30
640092	9.9	3.91	3.35
640101	4.8	2.34	2.04
640102	4.9	2.05	2.02
640103	1.7	1.02	1.36
640104	1.6	0.99	1.12
640110	1.7	0.96	1.37
640111	1.6	0.89	1.56
640113	1.7	0.88	1.58
640124	4.0	2.08	1.77
640125	7.0	3.07	2.63
640126	3.0	1.65	1.46
640158	38.8	7.81	7.77
640159	34.4	7.48	7.28
640160	29.7	7.13	6.61
640161	24.5	6.59	6.08
640162	20.0	6.02	5.44
640163	14.5	4.95	4.04
640164	9.0	3.59	3.24

Table 4-5 Comparison of experimental data and calculation
on dryout power (Downward flow)

Run No.	Flow rate (ton/hr)	Dryout power (exp.) [MW]	Dryout power (cal.) [MW]
640193	47.4	8.54	8.65
640194	48.9	8.58	8.75
640195	43.0	8.22	8.21
640196	43.2	8.31	8.30
640197	40.1	7.94	7.90
640198	40.4	8.03	7.95
640199	34.2	7.31	7.21
640200	34.5	7.42	7.17
640201	29.3	6.79	6.52
640202	29.4	6.73	6.56
640203	24.4	6.37	6.04
640204	24.4	6.31	6.05
640205	19.4	5.73	5.32
640206	19.5	5.83	5.28
640207	17.3	5.48	5.50
640208	17.3	5.53	5.50
640209	14.9	5.19	5.18
640210	14.9	5.18	5.18
640211	12.3	4.56	4.52
640212	12.6	4.56	4.52
640213	9.7	2.92	2.90
640214	9.8	3.01	3.00

Table 4-5 (Continue)

Run No.	Flow rate (ton/hr)	Dryout power (exp.) [MW]	Dryout power (cal.) [MW]
640215	8.1	0.72	1.01
640216	7.9	0.93	0.73
640219	8.0	0.80	0.73
640220	7.9	0.71	0.72
640221	7.8	0.60	0.72
640222	7.9	0.75	0.73
640223	6.2	0.65	0.66
640224	6.2	0.56	0.62
640225	6.5	0.58	0.62
640226	6.3	0.50	0.62
640227	6.2	0.48	0.62
640228	4.4	0.57	0.50
640229	4.8	0.50	0.48
640230	4.6	0.45	0.51
640231	4.7	0.40	0.51
640232	4.5	0.36	0.51
640233	4.0	0.55	0.48
640234	4.1	0.50	0.48
640235	3.7	0.46	0.46
640236	3.7	0.43	0.46
640237	3.0	0.53	0.41
640238	5.0	0.50	0.46

Table 4-5 (Continue)

Run No.	Flow rate [ton/hr]	Dryout power (exp.) [MW]	Dryout power (cal.) [MW]
640239	4.3	0.45	0.38
640240	2.8	0.42	0.48
640241	3.0	0.35	0.41
640242	3.0	0.33	0.41
640243	2.0	0.58	0.34
640244	2.9	0.50	0.34
640245	2.1	0.45	0.33
640246	2.6	0.41	0.33
640247	1.9	0.36	0.34
640248	2.0	0.31	0.33
640249	2.0	0.26	0.34
640250	1.1	0.36	0.29
640251	1.0	0.35	0.28
640252	1.1	0.31	0.29
640253	1.0	0.26	0.28
640254	1.0	0.22	0.28
640255	1.0	0.17	0.28
640257	0.3	0.37	0.23
640258	0.3	0.31	0.23
640259	0.3	0.37	0.23
640260	0.3	0.26	0.23
640261	0.3	0.17	0.23
640262	0.3	0.13	0.23

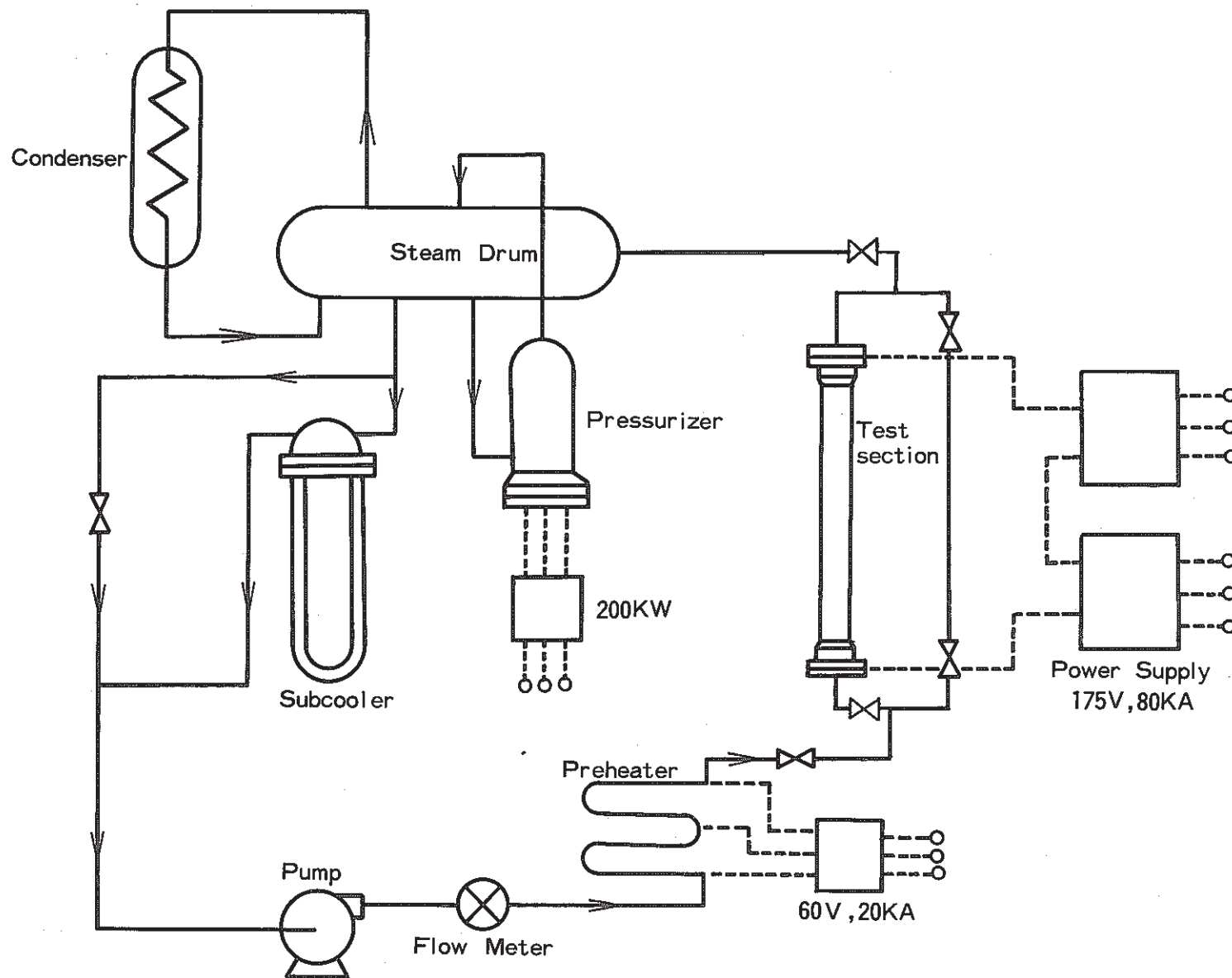


Fig.2 - 1 Flow Diagram of the 14 MW Heat Transfer Loop (HTL)

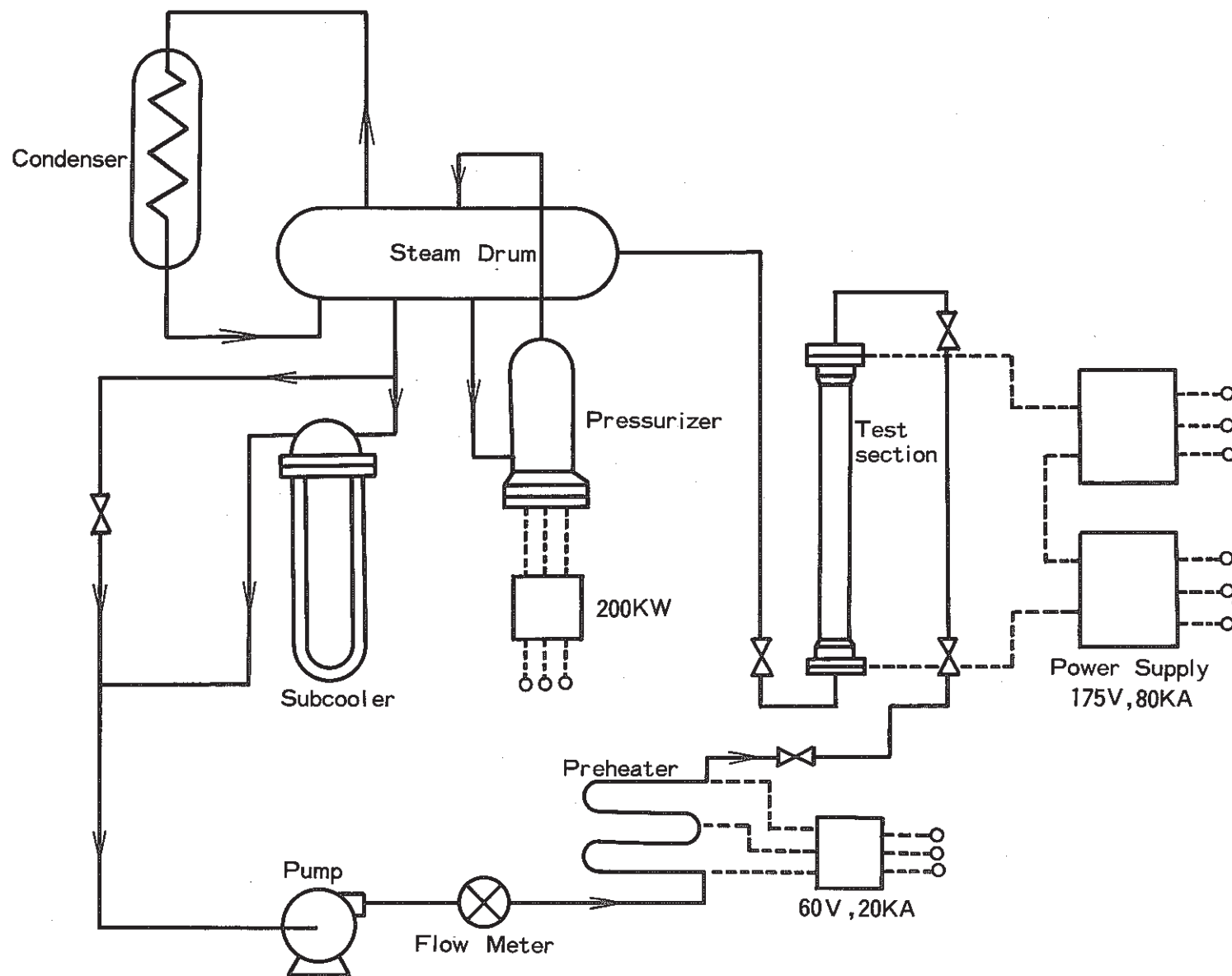


Fig.2 - 2 Flow Diagram of the 14 MW Heat Transfer Loop (HTL)
(Downward condition)

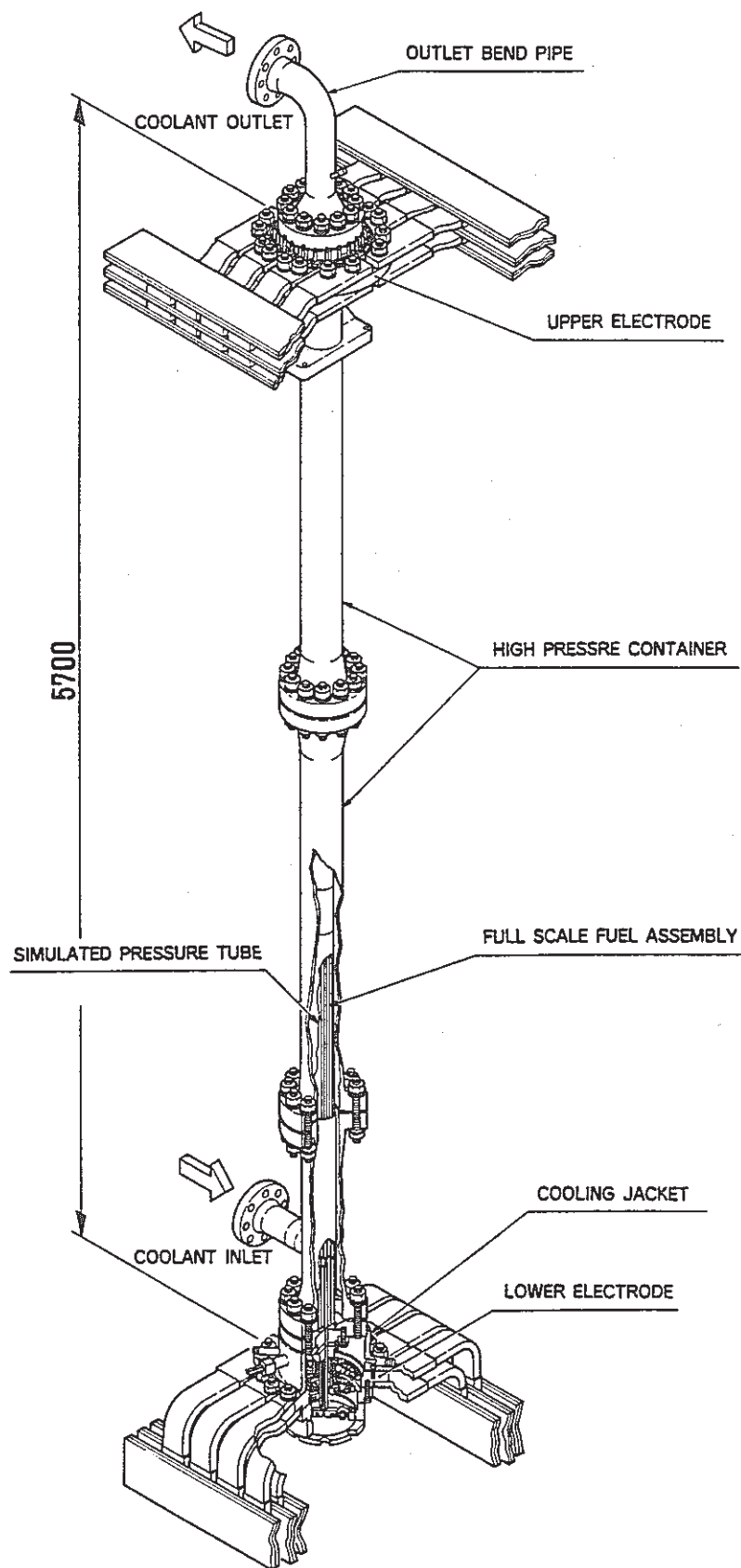


Fig.2 - 3 HTL Test Section

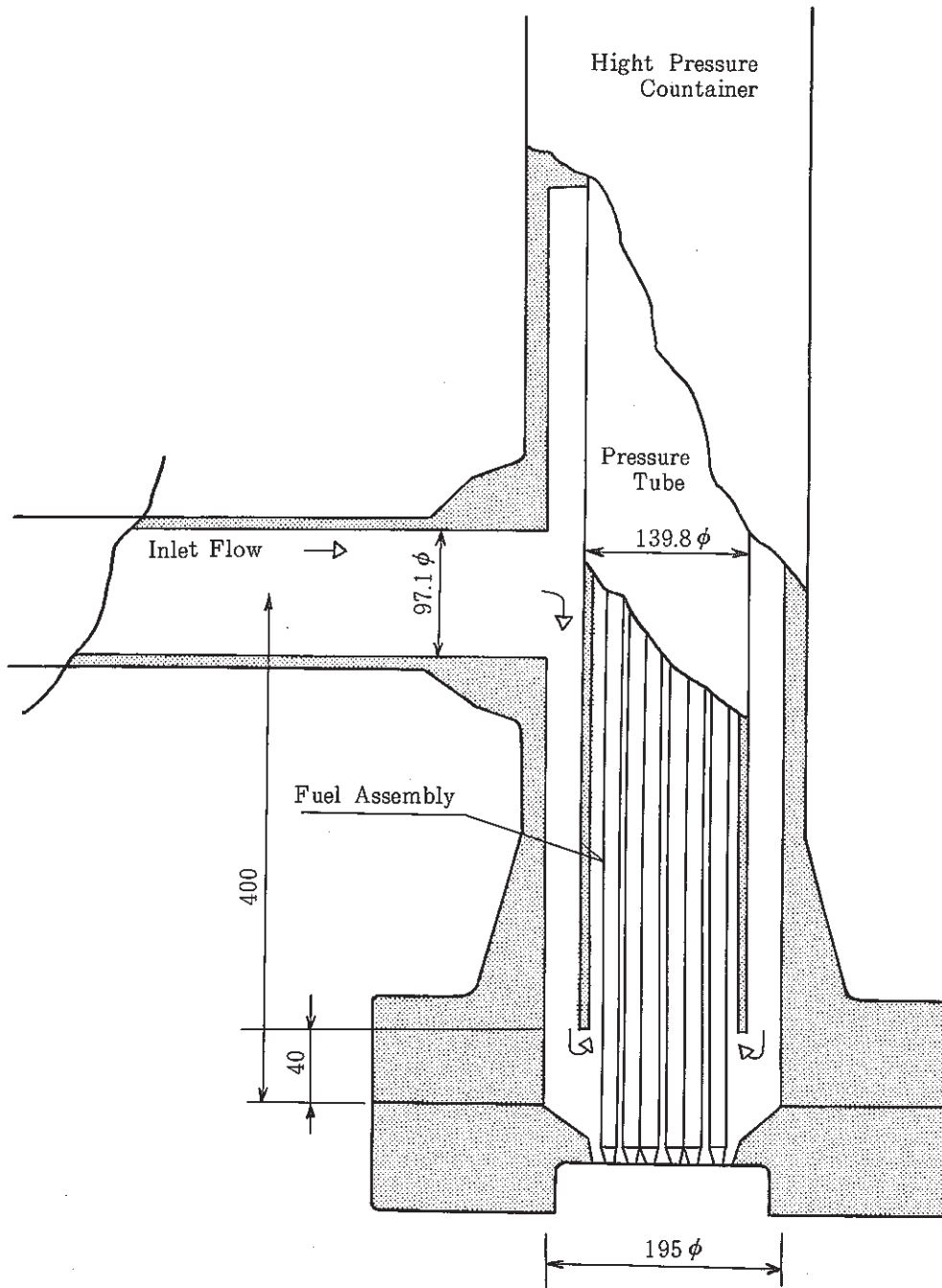
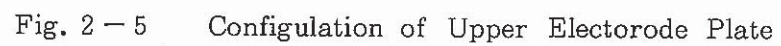


Fig. 2 - 4 Configuration of Lower Inlet Section



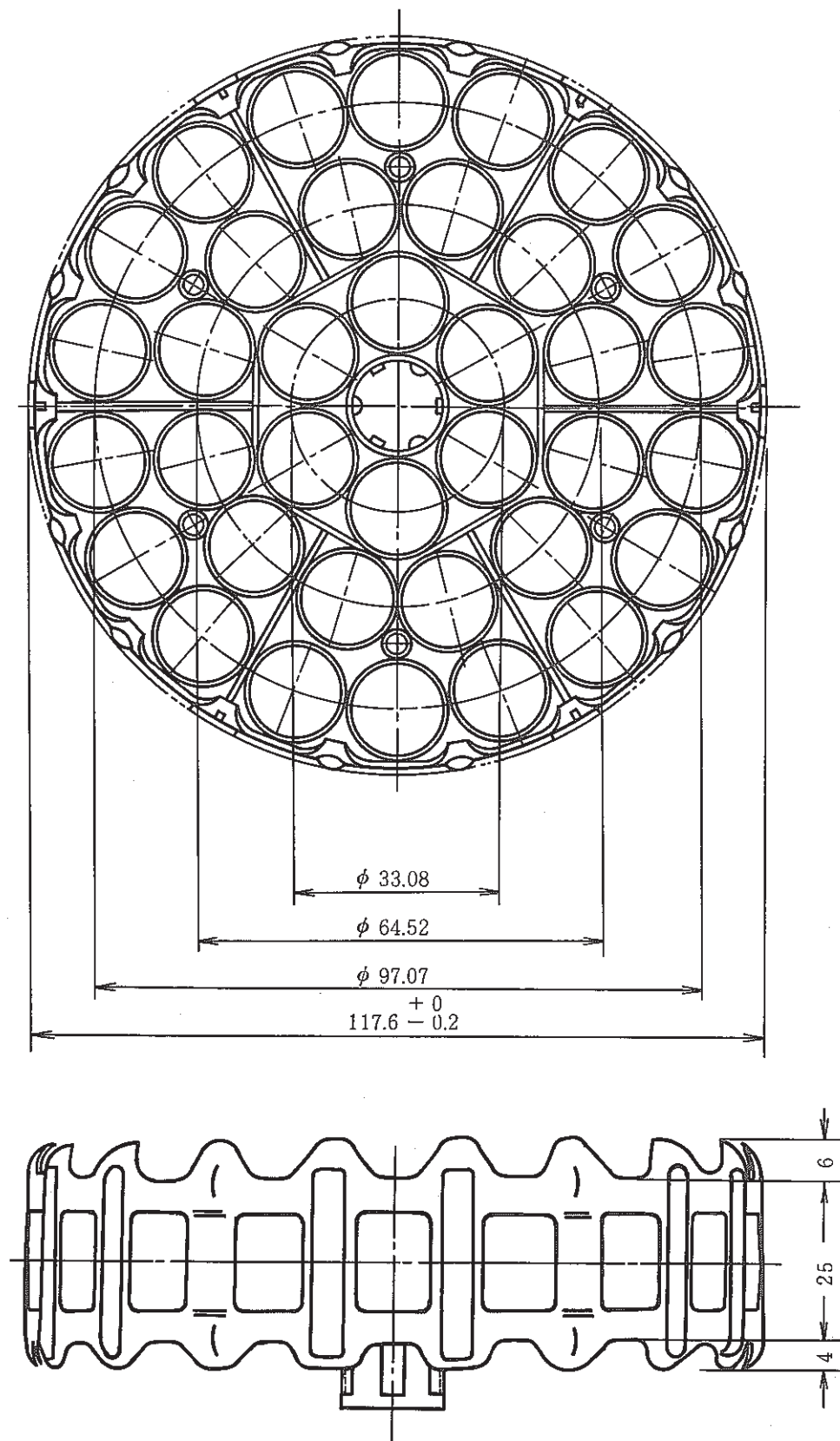


Fig. 2-6 Configuration of Ring Type Spacer (36-4R)

Radial Power Distribution = 1.20 / 0.84 / 0.72
(outer / middle / inner)

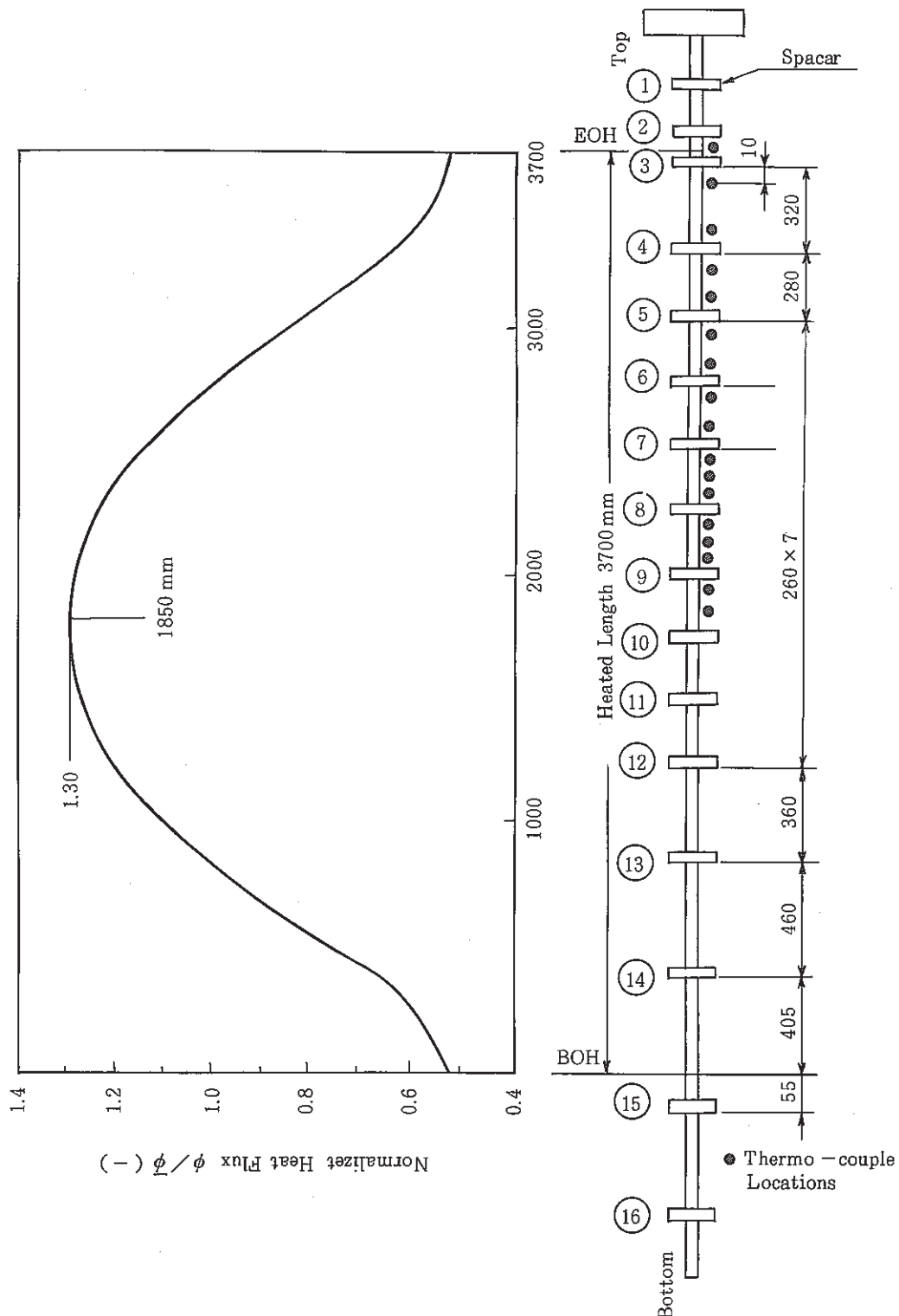


Fig. 2-7 Examples of Axial Power Distribution and Thermo-couple Locations (Spacer Locations are same as 600 MWe Demonstration ATR) For Upward Flow

Radial Power Distribution = 1.20 / 0.84 / 0.72
(outer / middle / inner)

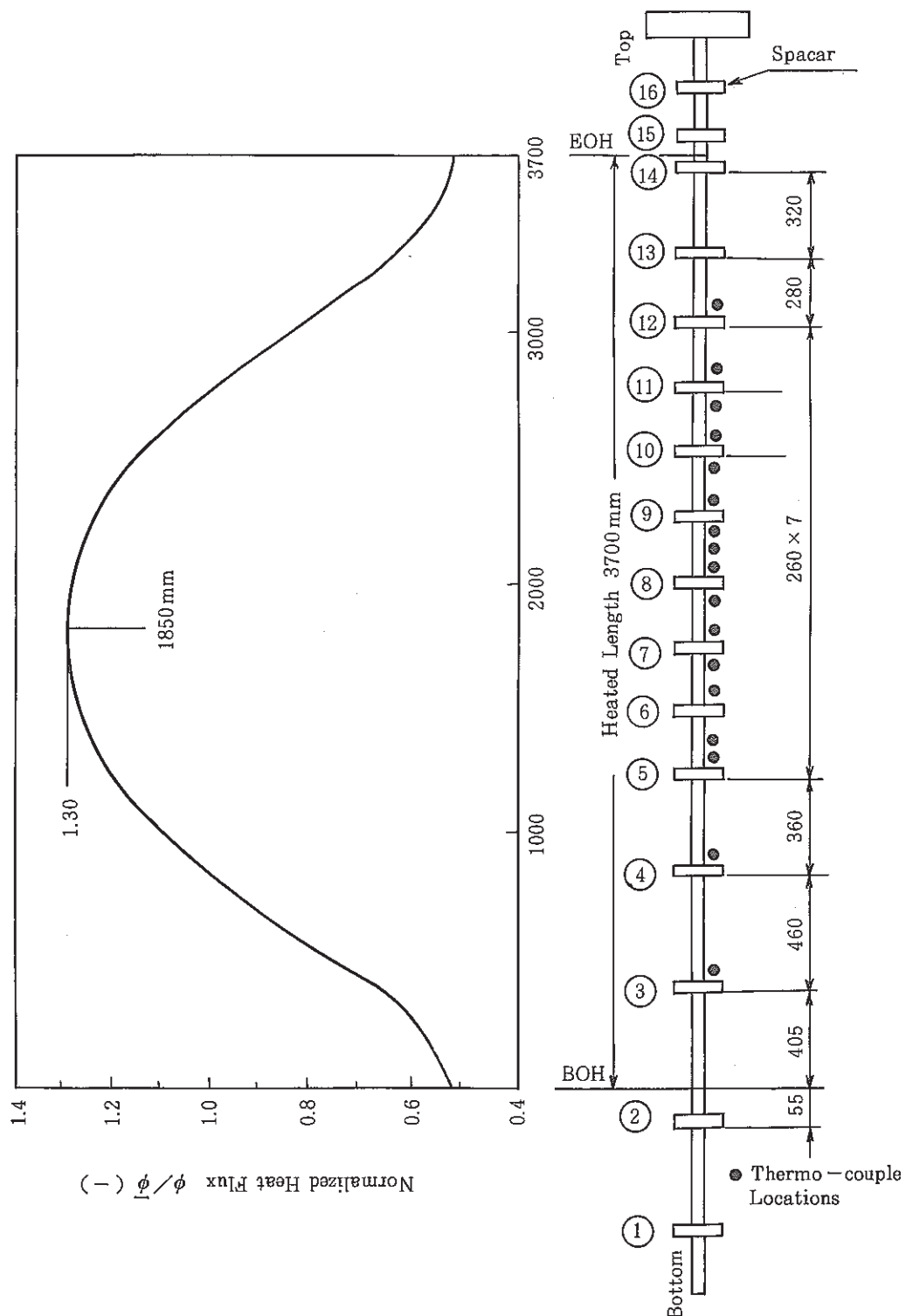


Fig. 2-8 Examples of Axial Power Distribution and Thermocouple Locations (Spacer Locations are same as 600 MWe Demonstration ATR) For Downward Flow

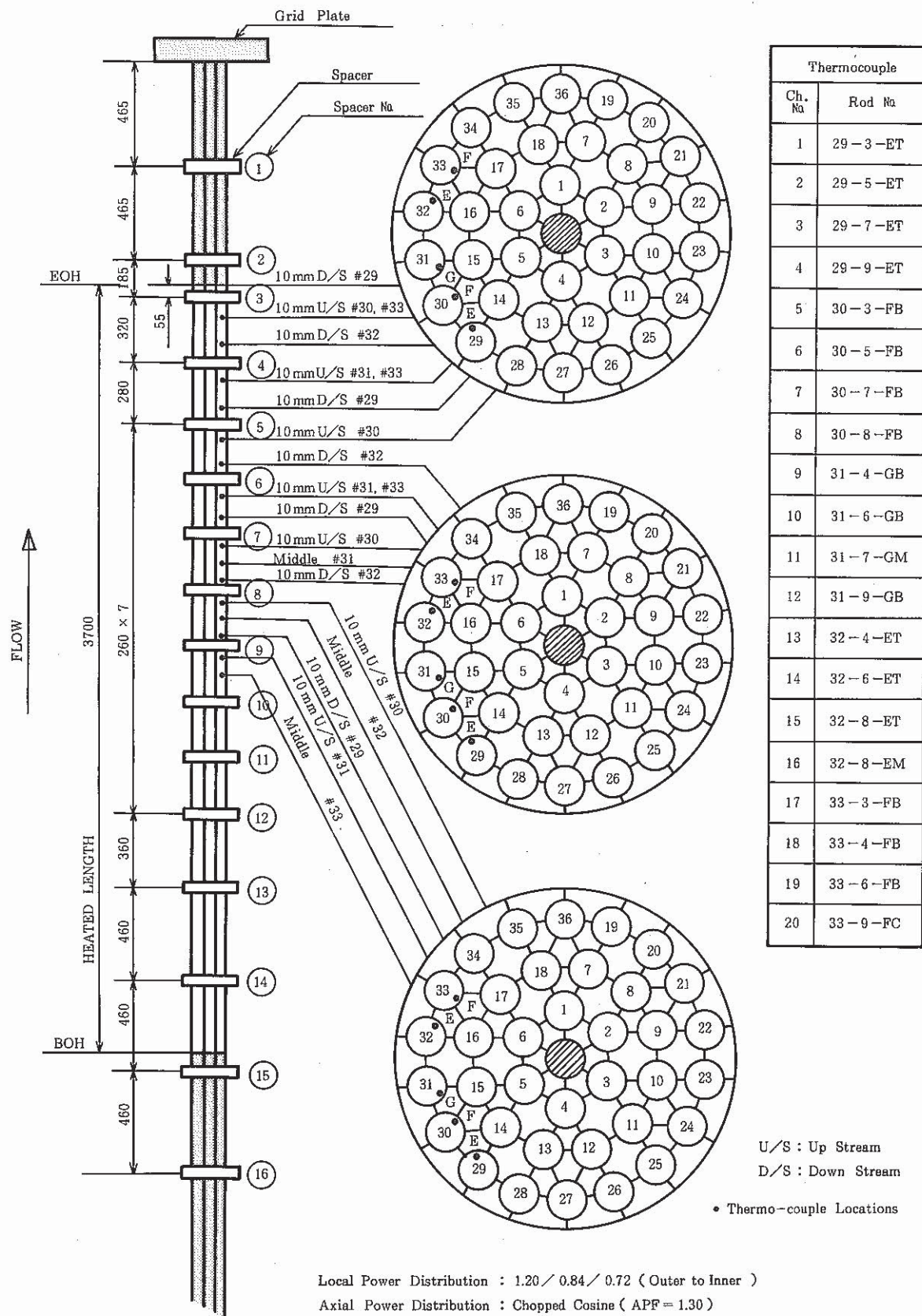


Fig. 2 - 9 Spacer and Thermo-couple Locations in Dryout Power Measurement (Assembly 36 - 4 R) for Upward Flow

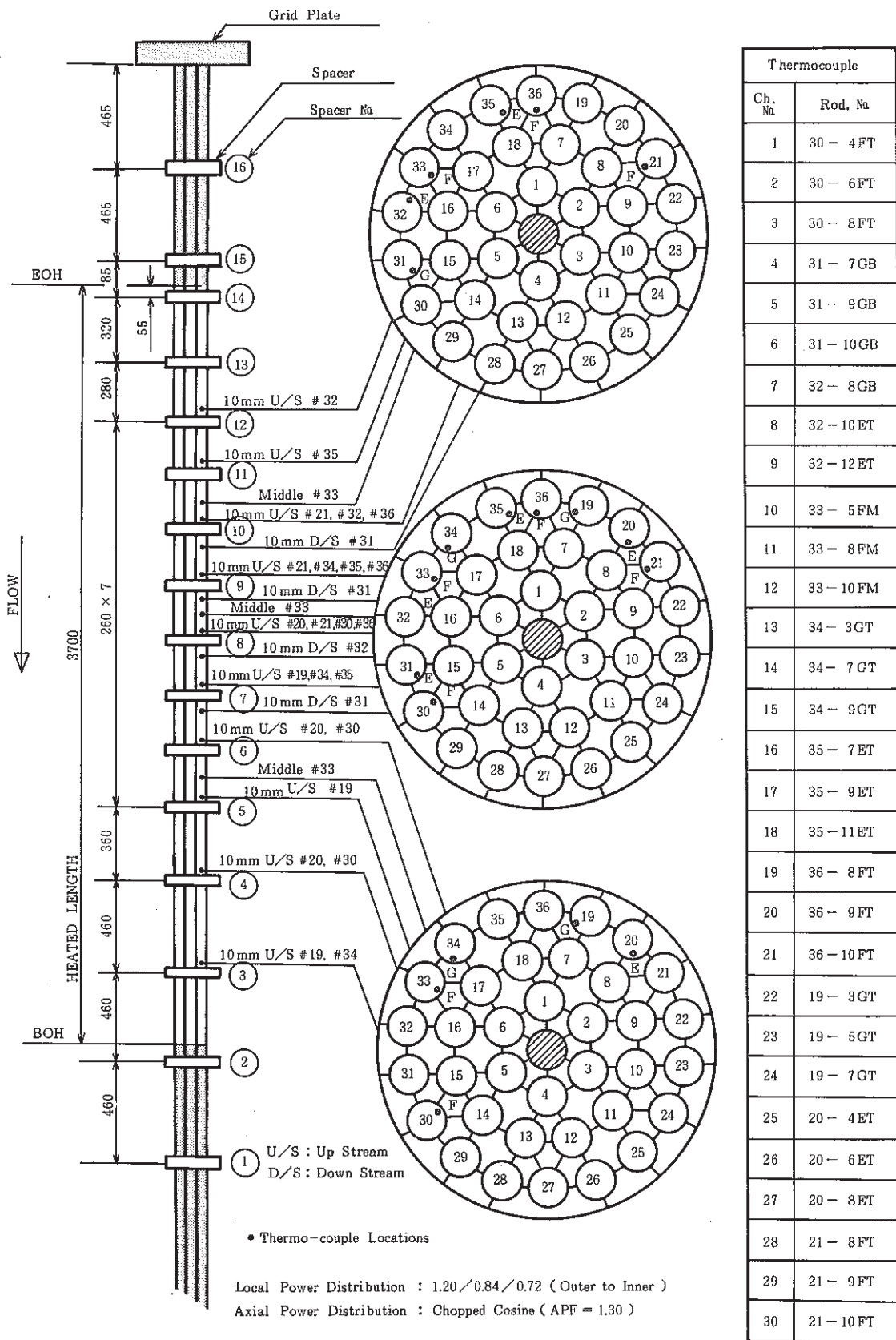


Fig. 2-10 Spacer and Thermo-couple Locations in Dryout Power Measurement (Assembly 36 - 4 R) for Down ward Flow

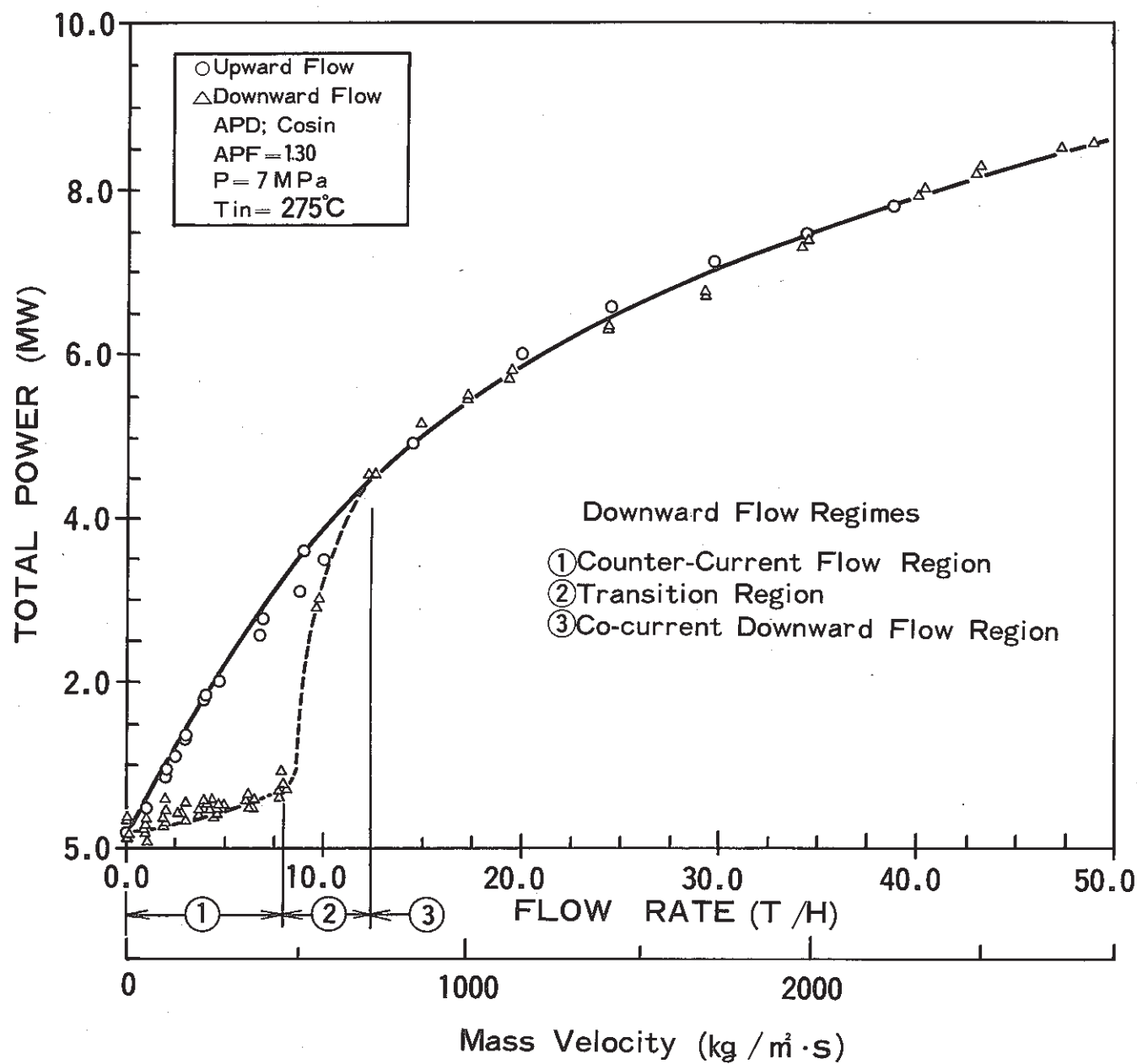


Fig.3 - 1 Experimental Results of Dryout Power

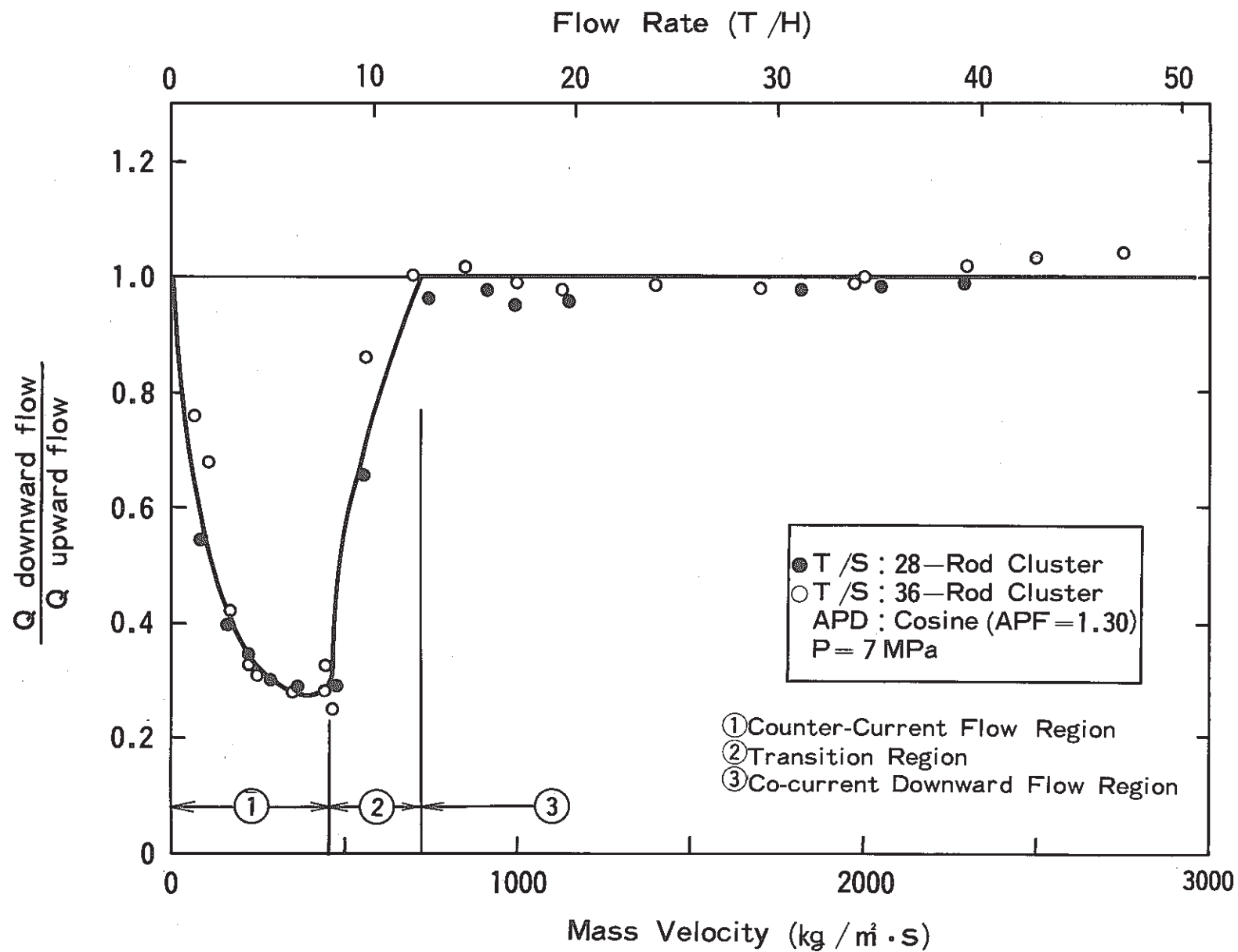


Fig.3 - 2 Effect of Downward Flow on Dryout Power

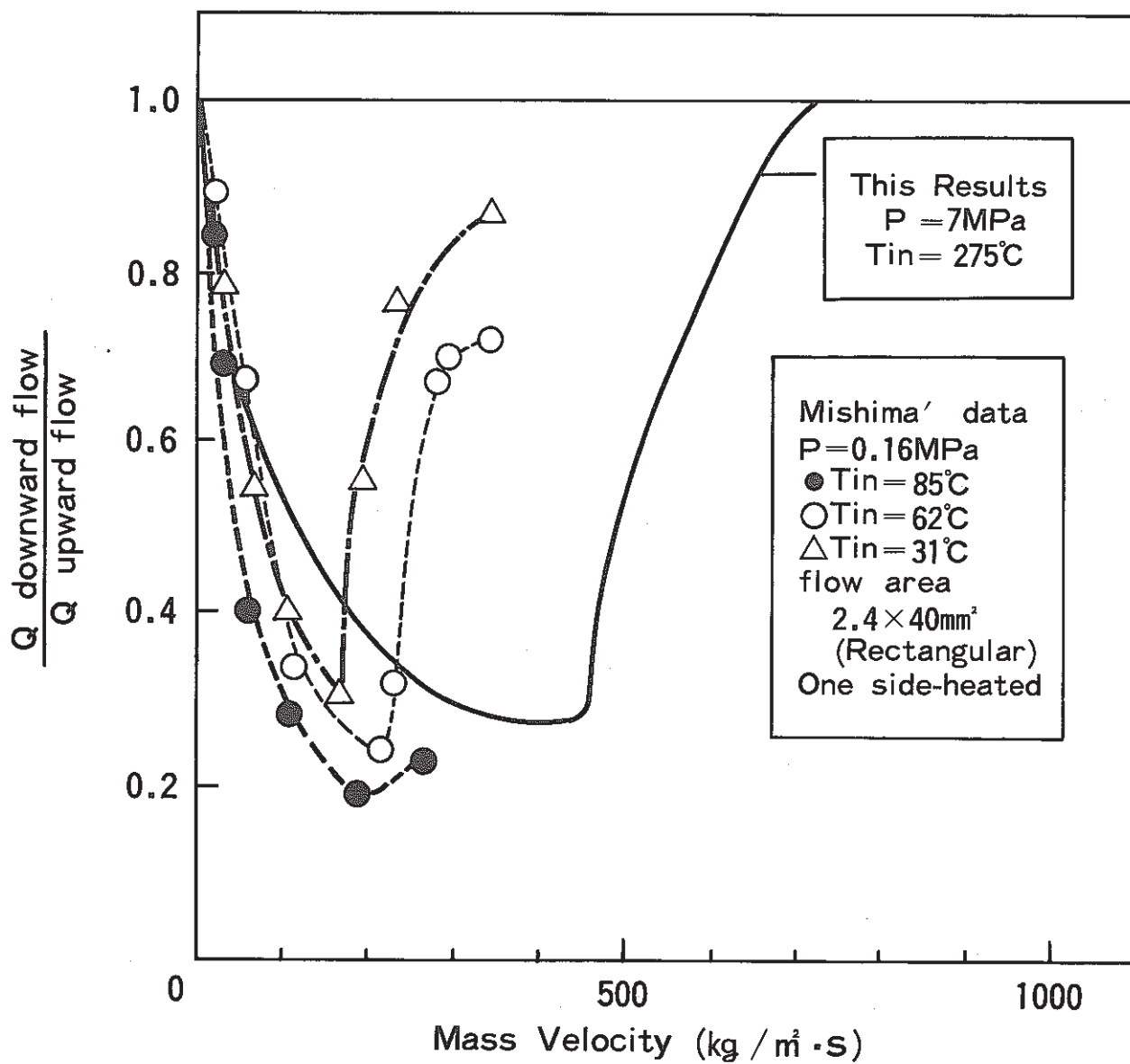


Fig. 3 - 3 Comparison with Mishima's data

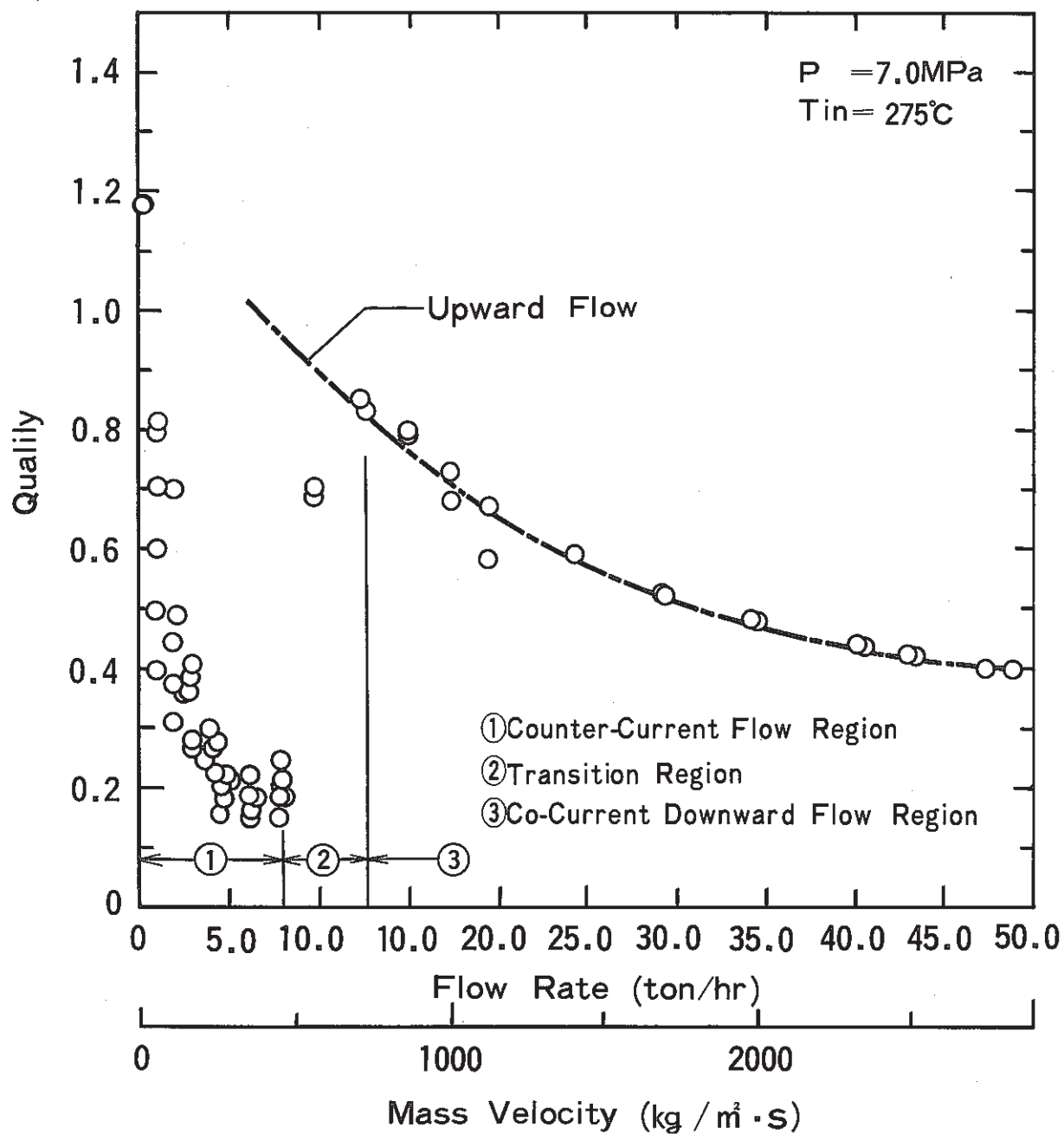


Fig.3 - 4 Exit Quality at Dryout Power (Downward Flow)

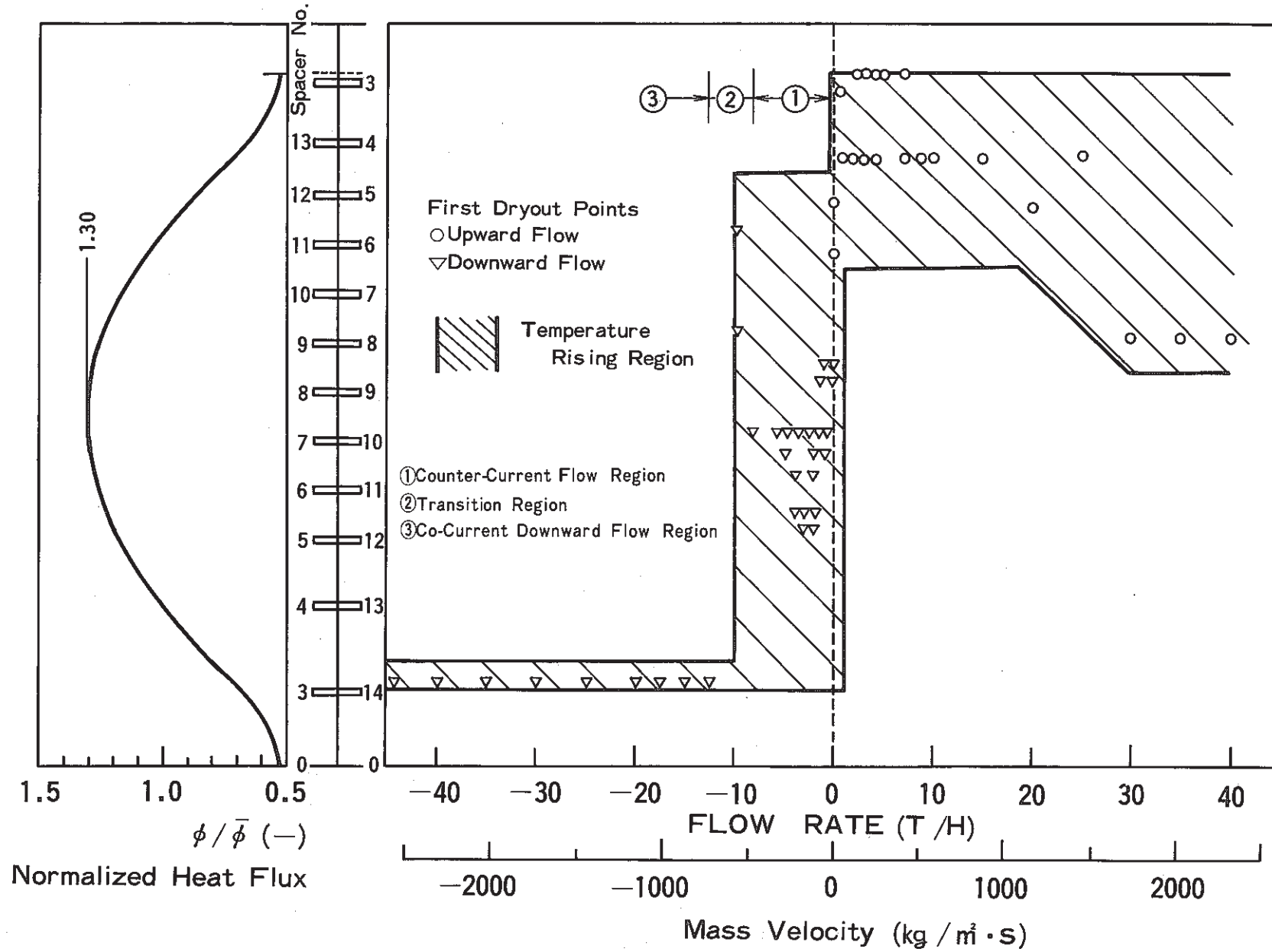


Fig. 3 - 5 Axial Location of Dryout Points

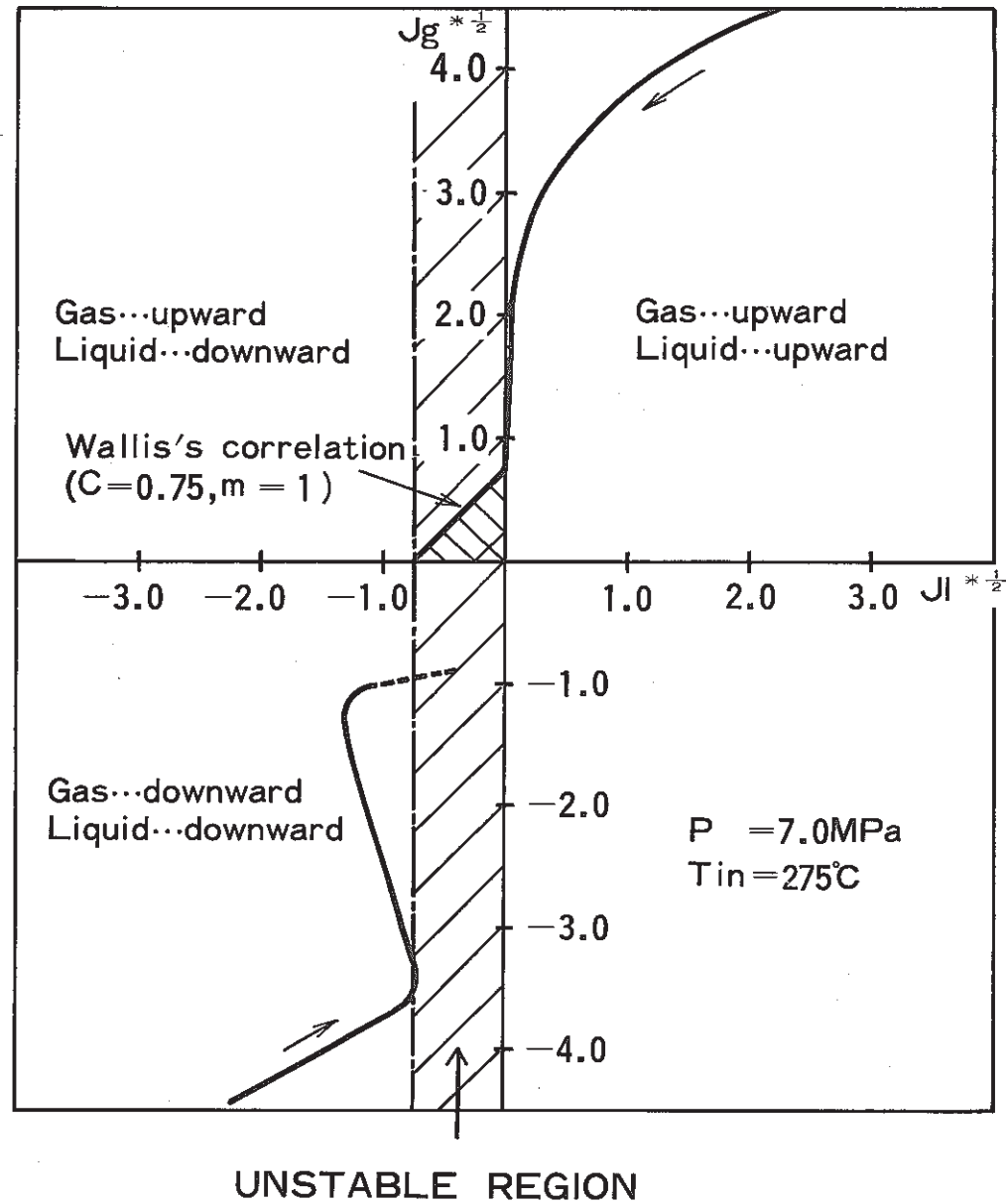


Fig.4 - 1 Non-dimensional volumetric velocity at the exit
of test section when dryout occurs

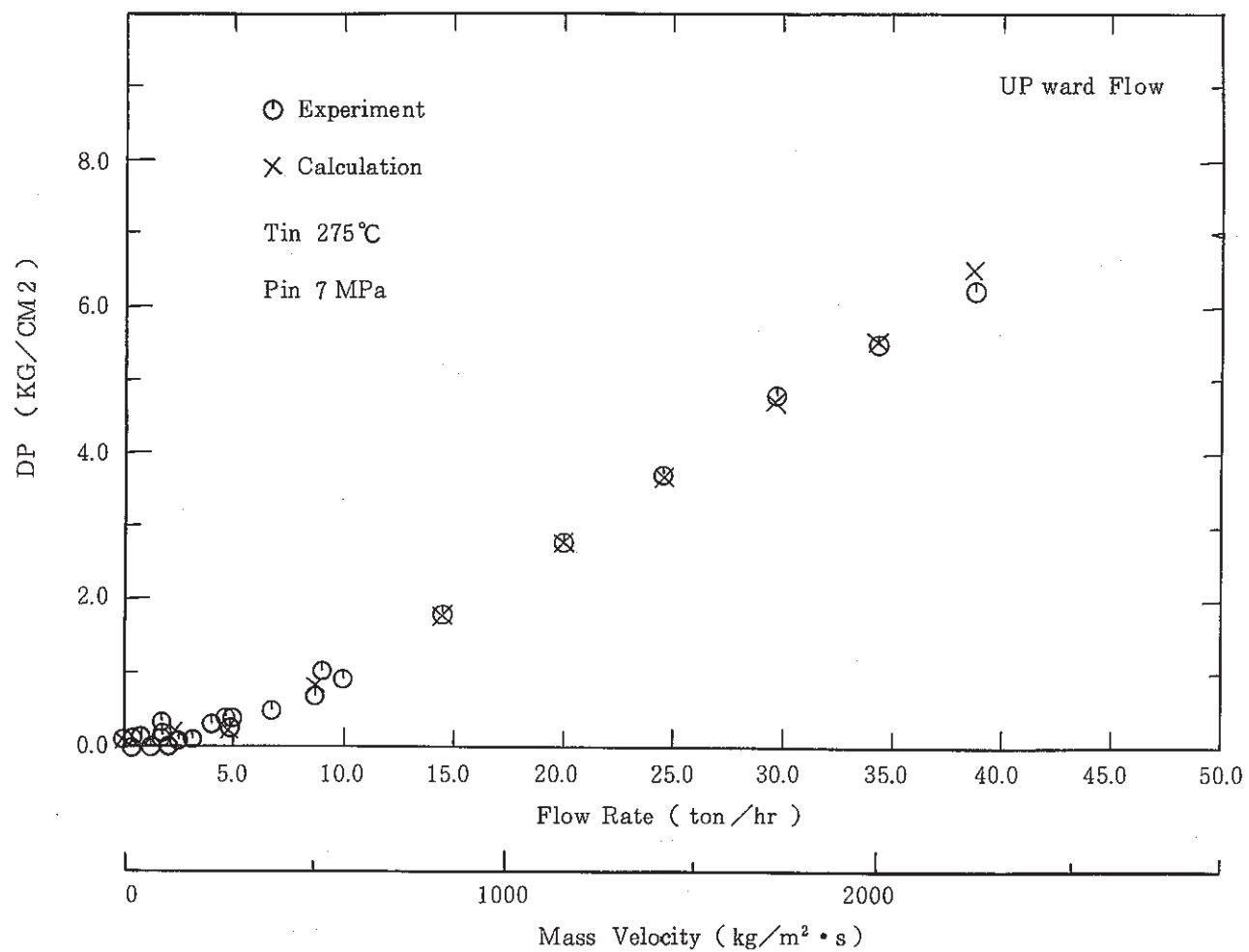


Fig. 4-2 Comparison of Differential Pressure between Calculations and Experiments for Upward Flow

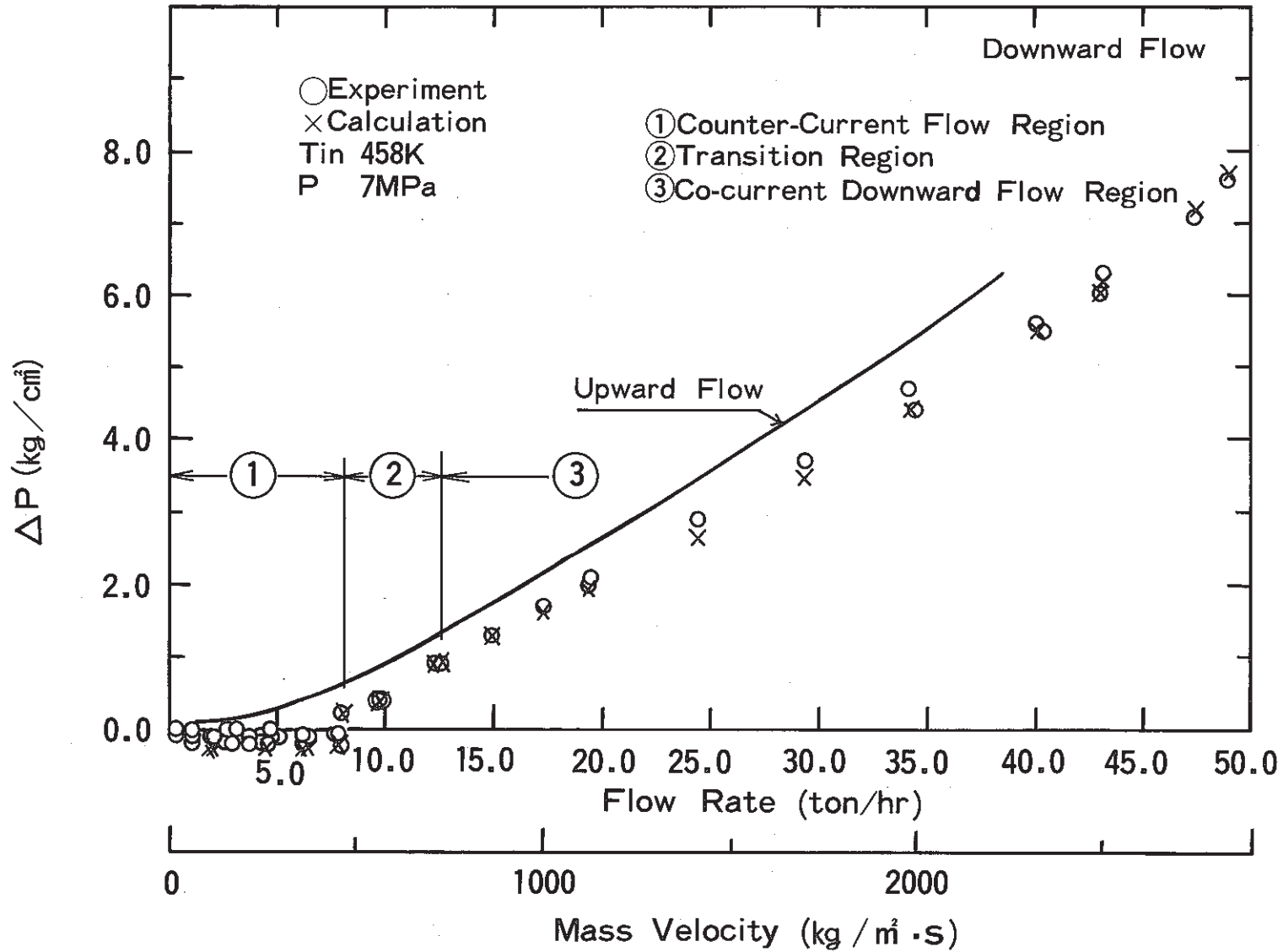


Fig.4 - 3 Comparison of Differential Pressure between Calculation and Experiment for Downward Flow

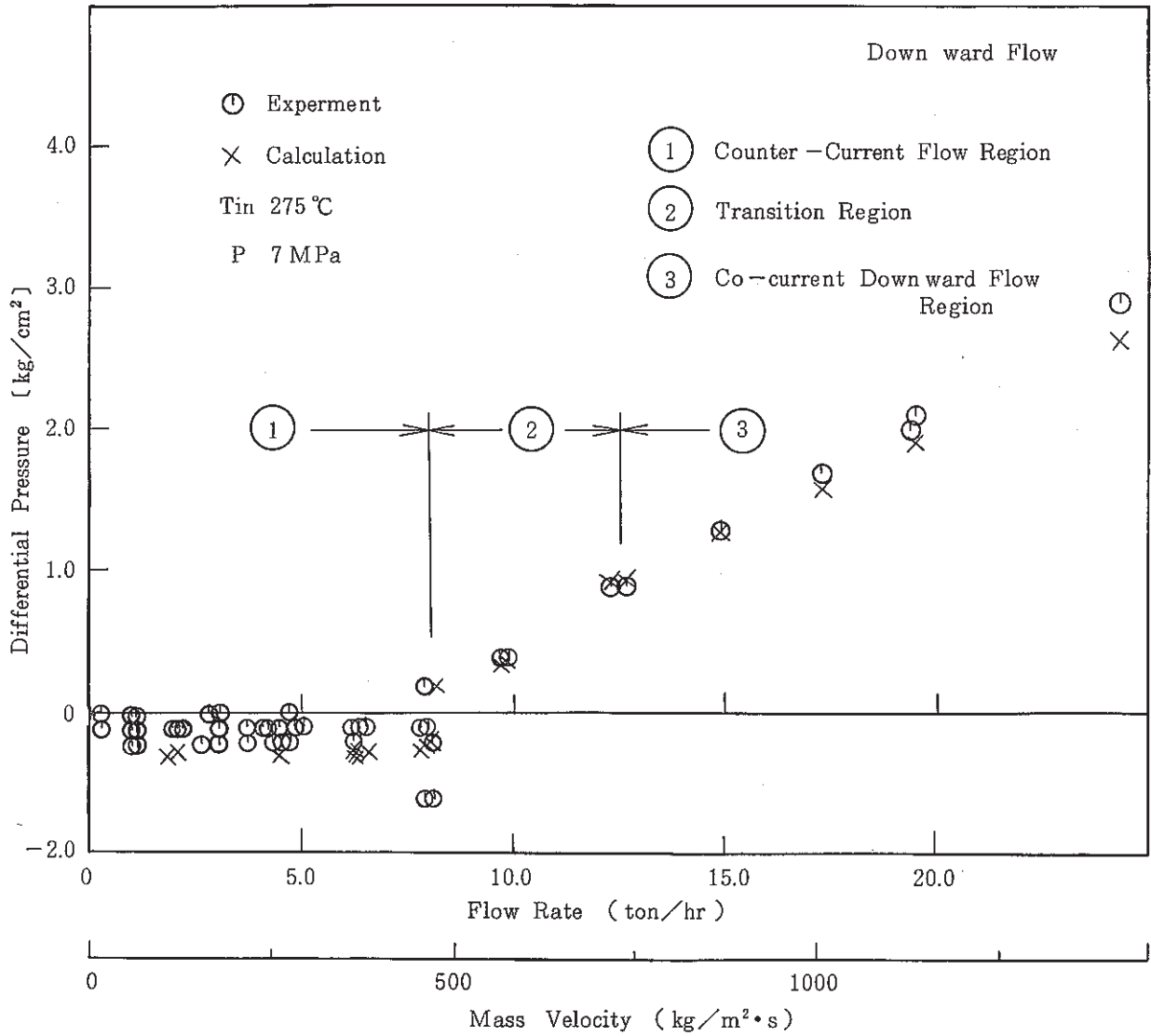


Fig. 4 - 4 Comparison of Differential Pressure between Calculation and Experiment at Low Flow Rate Region of Downward Flow

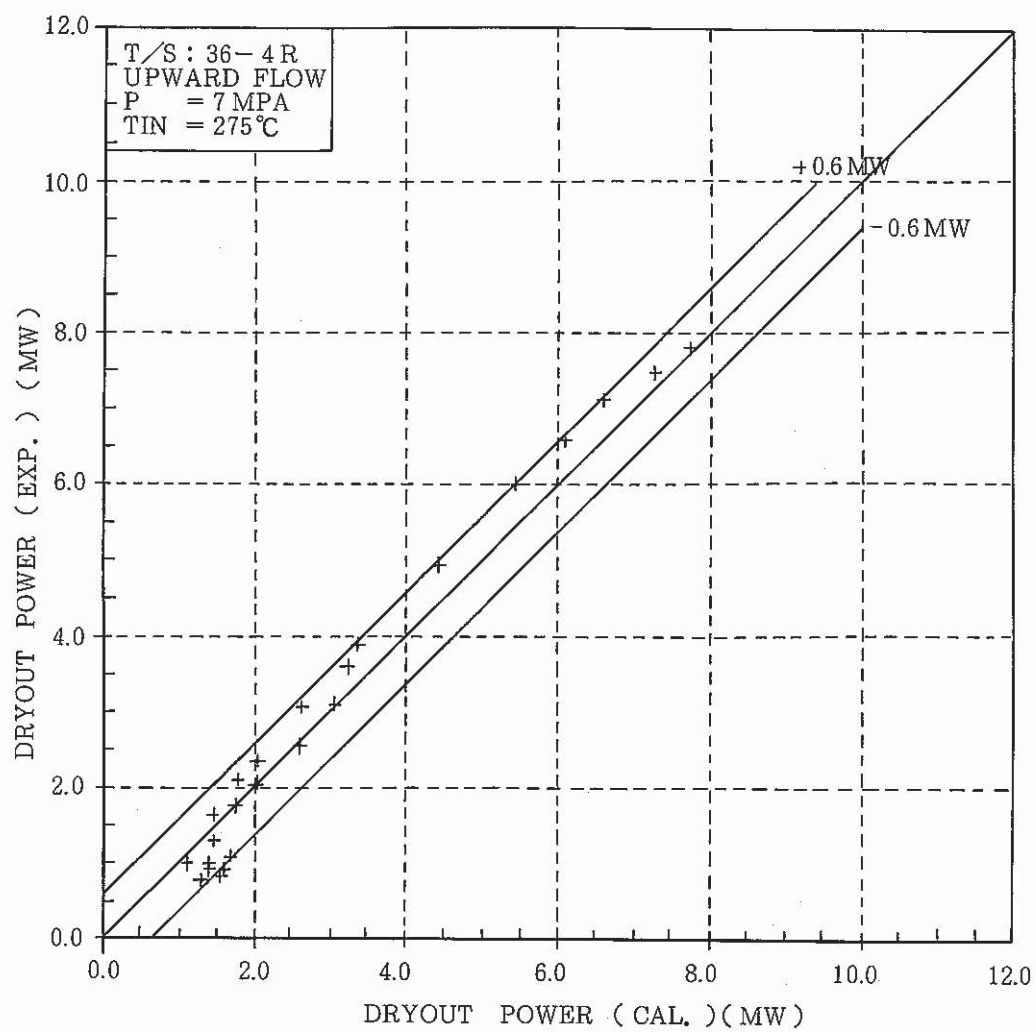


Fig. 4-5 SCATGRAM OF DRYOUT POWER
(Upward Flow)

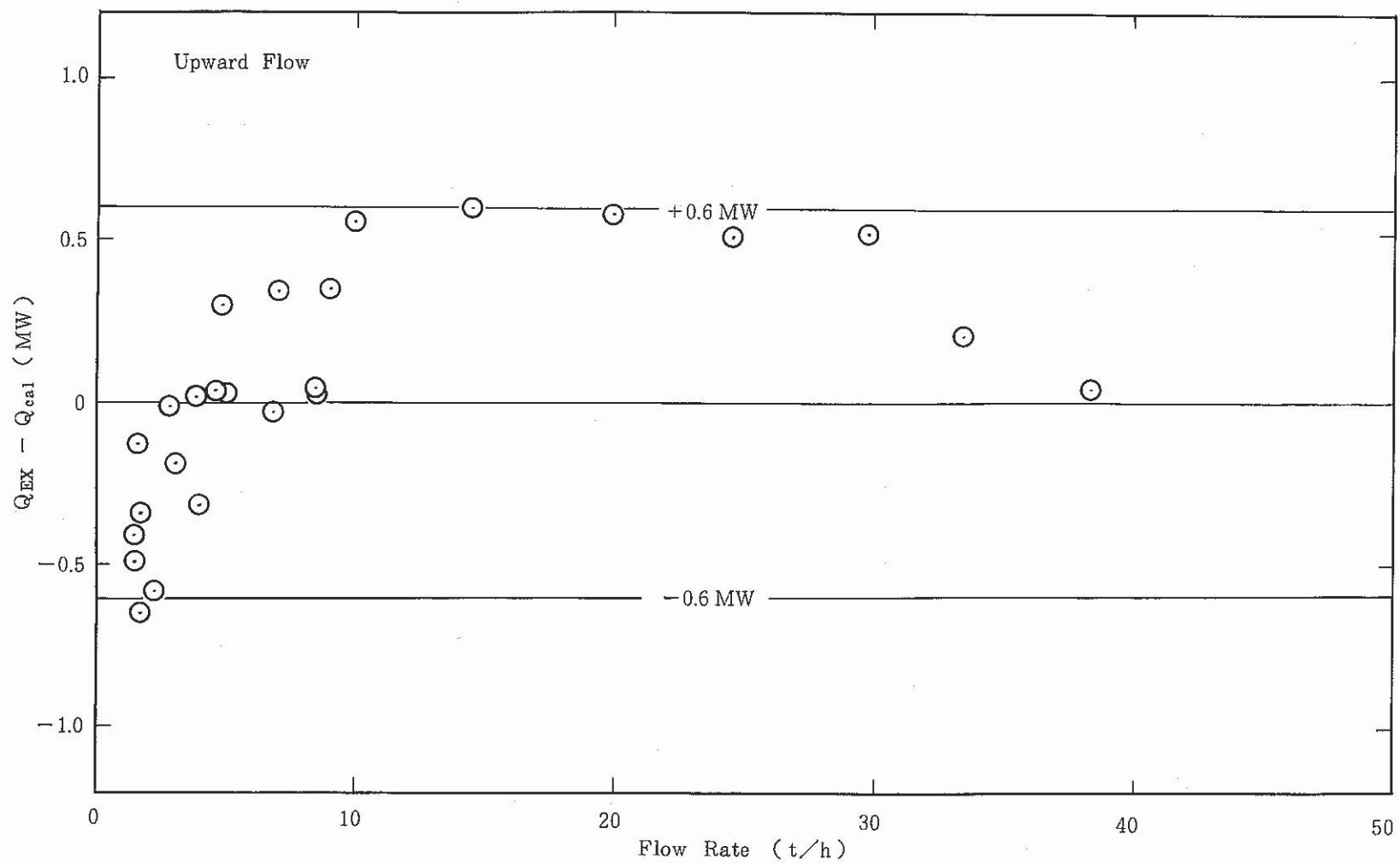


Fig. 4-6 Comparison between Calculation and Measurement
on Dryout Power of Upward Flow

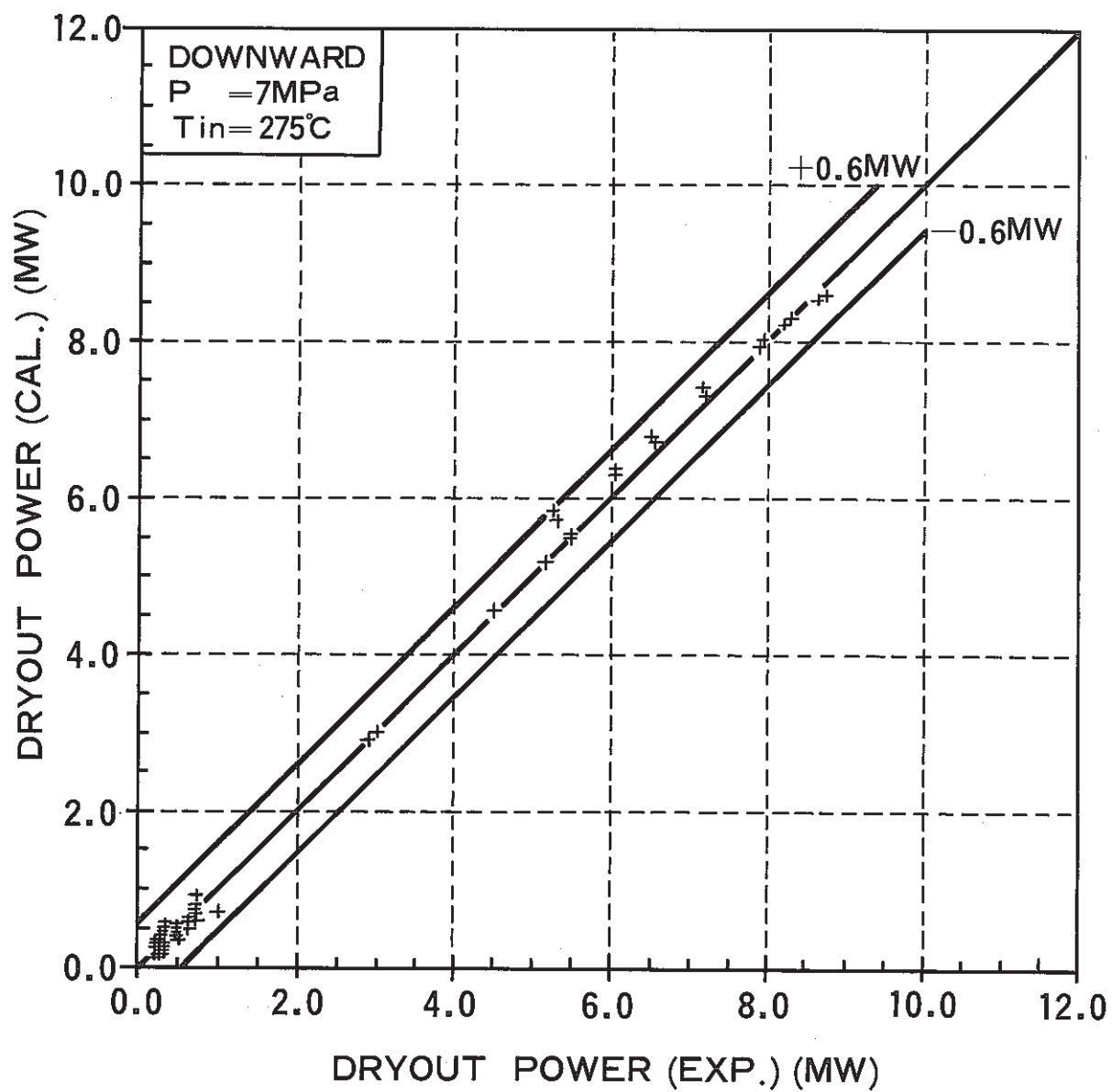


Fig.4 - 7 Scatgram of Dryout Power (Downward Flow)

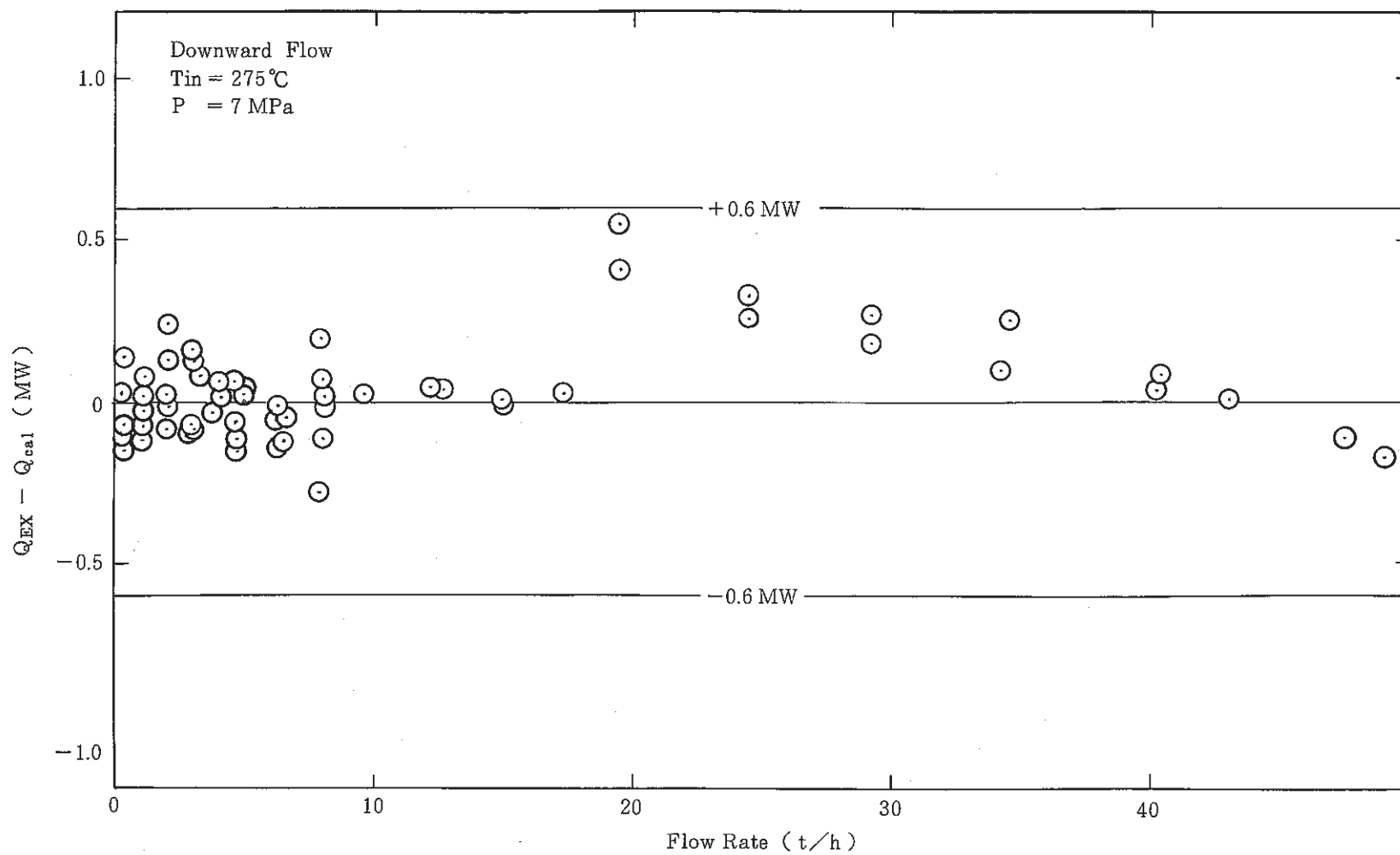


Fig. 4 - 8 Comparison between Calculation and Measurement
 on Dryout Power of Downward Flow.