

ATR28本クラス燃料集合体のドライアウト 限界に対する燃料棒間ギャップの影響

1988年6月

動力炉・核燃料開発事業団

大洗工学センター

複製又はこの資料の入手については、下記にお問い合わせください。

〒311-13 茨城県東茨城郡大洗町成田町4002

動力炉・核燃料開発事業団

大洗工学センター システム開発推進部・技術管理室

Enquires about copyright and reproduction should be addressed to: Technology Management Section O-arai Engineering Center, Power Reactor and Nuclear Fuel Development Corporation 4002 Narita-cho, O-arai-machi, Higashi-Ibaraki, Ibaraki-ken, 311-13, Japan

動力炉・核燃料開発事業団 (Power Reactor and Nuclear Fuel Development Corporation)

A T R 2 8 本クラス燃料集合体のドライアウト限界出力に対する燃料棒間ギャップの影響

堺 公明, 犬飼幸司, 菅原 悟

要旨

クラッドの付着等により燃料棒間ギャップが減少した場合のドライアウト限界出力を明らかにすることを目的として、A T R 2 8 本クラス燃料集合体を対象とする、燃料棒間ギャップを変化させた実規模のドライアウト試験を実施した。また、試験データに基づきサブチャンネル解析コード(COBRA-IV-HTL)におけるサブチャンネル間二相乱流混合係数相関式を開発した。更に、Battele Pacific Northwest Laboratories (PNL)で行われたサブチャンネル実験について解析を実施し、開発した相関式の他の体系への適用性を検証した。

以上より、以下の結論が得られた。

- (1) 試験結果から、燃料棒間ギャップが減少した場合のドライアウト限界出力は、燃料棒間ギャップがノミナル値の2.1mmから1.6mm程度の範囲ではわずかしき低下しないが、1.6mm以下ではギャップの減少にほぼ比例して急激に低下することが明らかになった。例えば、0.6mmの場合ではドライアウト限界出力はノミナルギャップの場合と比較して限界出力が約15%低下する。これはギャップの減少によってサブチャンネル間の乱流混合が低下し、サブチャンネル間のクオリティ分布の不均衡が増大するためと考えられる。
- (2) このような燃料棒間ギャップの差異に起因するサブチャンネル間のクオリティ分布の不均衡ひいてはドライアウト限界出力の変化を正しく解析できるようにするため、(燃料棒間ギャップ) / (燃料棒外径) の影響を考慮した二相乱流混合係数相関式を開発した。本相関式を組み込んだサブチャンネル解析コード(COBRA-IV-HTL)は、本試験で得られた燃料棒間ギャップ0.6～2.1mmの燃料体のドライアウト限界出力全データについて±5%の精度で予測が可能であった。
- (3) 開発した二相乱流混合係数相関式の適用性を確認するため、A T R 燃料集合体と形状の異なるBattele PNLで行われたサブチャンネル実験について解析を行った。その結果、平行した2サブチャンネルの流量及びエンタルピ分布に関して実験結果とのよい一致が得られ、開発した相関式がA T R 燃料集合体とサブチャンネル形状が異なる体系へも適用できることが確認された。

June, 1988

Effect of Rod-to-Rod Gap on Dryout Power in an ATR Fuel Bundle

Takaaki Sakai, Kohji Inukai and Satoru Sugawara

ABSTRACT

Full scale dryout tests have been conducted on an ATR 28-rod bundle in order to study an effect of rod-to-rod gaps on the dryout power of fuel bundle by changing its rod diameter. A correlation of two-phase turbulent mixing factor used in a subchannel analysis code (COBRA-IV-HTL) was developed by considering the dependence of the mixing between subchannels on the rod-to-rod gaps, based on the test results. Furthermore, validation analysis was performed for a subchannel experiment conducted in the Battele Pacific National Laboratory.

The following results were obtained from the present study.

(1) Measured dryout powers are reduced remarkably in smaller rod-to-rod gap range than $s = 1.6\text{mm}$, although dryout power does not effectively change in a rod-to-rod gap range $s = 1.6\text{mm} - 2.1\text{mm}$. For example, dryout powers at $s = 0.6\text{mm}$ are reduced to about 85% of that at $s = 2.1\text{mm}$. This reduction of dryout power is seemed to be caused by the increase of imbalance of physical properties (e.g. steam quality) in subchannels, which originates in the decrease of turbulent mixing between adjacent subchannels by a reduction of rod-to-rod gaps.

(2) A correlation of the rod-to-rod gap dependent two-phase mixing factor is developed taking account of the ratio of rod-to-rod pitch(P) to rod diameter(D). The prediction accuracy of the COBRA-IV-HTL code in which developed correlation is installed is estimated as $\pm 5\%$ for the dryout power data obtained in this experiment.

(3) Analytical results for PNL experiments show good agreement with experimental results. Through the analysis, the applicability of developed correlation to different subchannel configurations was validated.

目 次

1.	緒言	1
2.	燃料棒間ギャップをパラメータとした実規模ドライアウト試験	2
2-1.	試験体	2
2-2.	試験装置	2
2-3.	試験条件及び方法	3
2-4.	試験結果	3
3.	サブチャンネルコードによるドライアウト限界出力解析	5
3-1.	解析コード	5
3-2.	二相乱流混合係数相関式の作成	1 2
3-3.	ドライアウト限界出力予測に関する精度評価	1 4
4.	考察	1 5
5.	結論	1 6
	記号表	1 7
	参考文献	1 9
	Appendix A. 燃料棒間ギャップ測定データ	5 5
	Appendix B. 試験データ一覧	7 3
	Appendix C. PNLサブチャンネル実験解析結果	8 5

1. 緒言

原子炉燃料体では、炉内滞在期間にほぼ比例してクラッド(CRUD)が燃料棒表面へ付着するため、燃料棒間のギャップが減少する。たとえば、「ふげん」使用済み燃料の検査結果によれば、当初2.1mmであったギャップがクラッド付着によって0.6mm程度まで減少した例が報告されている[1]。

また、ATR実証炉及び実用炉構想検討ではボイド係数を低減するため、 $V_m/V_f = (\text{重水減速材体積}) / (\text{燃料棒ペレット体積})$ の値が小さくなるように燃料棒ギャップを1.5mm程度まで減少させることも検討されている。さらに高転換型軽水炉では、稠密化された燃料配列が採られるため、燃料棒間ギャップが1.0mmを下回るような設計例も見られる[2], [3]。このように燃料棒間ギャップが減少した場合には、集合体内サブチャンネル間の冷却材の混合が阻害され、結果としてドライアウト限界出力が低下することが推察される。

したがって、燃料体のドライアウト限界出力に対する燃料棒間ギャップの影響を明らかにすることは緊急かつ重要な課題である。

以上のような状況から、本研究ではATR燃料集合体を対象として、燃料棒間ギャップを変化させた実規模の試験を行い、ドライアウト限界出力に対する燃料棒間ギャップの影響を実験的に定量化する。CRUD付着が当面問題となるのは、「ふげん」標準燃料についてであるため、ここでは、当該燃料である28本クラスタ体系について試験を行う。また、この実験データに基づいて燃料棒間ギャップの影響を考慮した二相乱流混合係数相関式を作成し、サブチャンネル解析手法によって燃料棒間ギャップが減少した場合の燃料体のドライアウト限界出力を評価する手法を開発すると共に、開発した手法によるドライアウト限界出力予測精度を評価する。

2. 燃料棒間ギャップをパラメータとした実規模ドライアウト試験

2-1 試験体

本試験では、前述したように、クラッド付着が当面問題となる「ふげん」の標準燃料である 28 本クラスタについて、燃料棒間ギャップを減少させた模擬燃料集合体を用いた試験を行い、燃料棒間ギャップが変化した場合についてのドライアウト限界出力データを得る。

「ふげん」使用済み燃料検査結果によれば、観察された燃料棒間ギャップの最小値は約 0.6mm である。したがって、最小燃料棒間ギャップのノミナル値 $s = 2.10\text{mm}$ を基準として、それに加えて燃料棒間ギャップが減少した場合を模擬した $s = 1.56\text{mm}$, 1.10mm , 0.55mm の 3 通りの燃料集合体を製作して試験を実施する。ギャップの減少は、ロッド外径を増加させることにより模擬する。したがって、燃料棒外径はノミナル値で 16.46mm 、ギャップが減少した場合はそれぞれ 17.00mm , 17.5mm , 18.00mm となる。試験に用いた燃料集合体の一覧を Table 2-1 に示す。

ギャップが減少したケースについては通常のリング型スペーサを使用することが出来ないため、専用の板状スペーサを用いなければならない。したがって、ギャップの影響を調べる前にスペーサ形状の差異による影響を調べる必要がある。そのため、まず最初に基準ケースである $s = 2.10\text{mm}$ のケースについてリング型スペーサと板状スペーサを用いた比較試験を行い、その後、板状スペーサを用いて燃料棒間ギャップをパラメータとした試験を実施する。

2-2. 試験装置

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 (HTL) を使用して行った。ループの概略のフローマップを Fig. 2-1 に示す。ループは主に、循環ポンプ、予熱器、テスト部、蒸気ドラム、加圧器、凝縮器、予冷器等により構成され、使用流体は純水である。循環ポンプからの流量を測定し、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. 2-2 に示す。テスト部はふげん発熱部を模擬した内径 117.8mm の圧力管構造であり、その中に実規模大の燃料クラスタが一体挿入されている。燃料クラスタは発熱管 28 本（外層 16 本、中間層 8 本、内層 4 本）と外径 9mm のスペーサ支持管 4 本を 14 個のスペーサで束ねた形状を有しふげん燃料クラスタを同一形状かつ同一精度で模擬している。スペーサは基準ケースではリング型スペーサ及び板状スペーサを使用し、ギャップ減少ケースでは使用する発熱管外径に応じた板状スペーサを使用する。試験に使用したリング型スペーサの形状を Fig. 2-3 に、同じく 4 種の板状スペーサの形状を Fig. 2-4-1 ~ Fig. 2-4-4 に示す。

発熱方法は直流電源による直接通電加熱であり、軸方向発熱分布は均一とする。半径方向の発

熱分布は外層、中間層、内層の順で1.17/0.82/0.70とする。これは、「ふげん」28本クラスタ燃料の寿命初期における代表的発熱分布を模擬したものである。発熱管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0.5mm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. 2-5 に熱電対取り付け位置を示す。

ギャップの影響について試験を行う場合は、特に燃料集合体の製作精度を正確に把握しておく必要がある。そのため、試験前と試験後に燃料集合体の燃料棒間ギャップを測定し、その精度評価を行った。ここでは、燃料棒間ギャップがクラスタ内で最も狭い外層燃料棒間のギャップについて、各試験体毎の測定結果をヒストグラムでFig. 2-6-1～Fig. 2-6-5に示す。燃料棒間ギャップに関する組立精度は、リング型スペーサの場合、平均値2.103mmに対して±0.30mm以内、また、板状スペーサの場合、それぞれのギャップの平均値に対して±0.15mm以内である。また、組立精度は試験前後でもほとんど変わっておらず、試験期間中組立精度も不変と考えてよい。それらの測定値の詳細は、Appendix Aに外層、中間層、内層の各層についての燃料棒間ギャップの測定データ及びヒストグラムを示す。

2-3. 試験条件及び方法

流動条件及び加熱条件は「ふげん」及びATR実証炉の定格運転時を基準として、次のように設定した。

圧力	7.0	[MPa]
流量	5～40	[t/h]
入口温度	275	[℃]

試験方法は圧力及び流量を設定した後、定常状態が保たれるように徐々に出力を上昇させ、ドライアウトが発生する出力を測定した。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℃急上昇（トリップ温度は350℃）することにより判定した。

本試験における測定精度は圧力±0.5%、流量±3%、入口温度±0.5℃、加熱電力±1%であり、結果としてドライアウト出力の測定精度は約±5%以内と評価される[4]。

2-4. 試験結果

(1) リング型スペーサと板状スペーサによる比較試験

まず、最初に燃料棒間ギャップs=2.10mmの基準ケースについてリング型スペーサと板状スペーサによるドライアウト限界出力の差異について試験結果を比較する。両者の試験結果をCHF (Critical Heat Flux)とクォリティの関係でFig. 2-7に示す。図中には設計用CHF相関式による

予測結果もあわせて実線で示す。Fig. 2-7によれば、リング型と板状スパーサのデータに有意な差は認められず、限界出力測定精度 $\pm 5\%$ を勘案すると本試験においてはスパーサ形状の影響は無視できると考えられる。(測定データの詳細はAppendix Bに示す。)

(2) ドライアウト限界出力に対する燃料棒間ギャップの影響

ギャップが減少した4種類の試験体についての試験結果の比較を、「ドライアウト限界出力」対「流量」の関係でFig. 2-8に、「CHF」対「クオリティ」の関係でFig. 2-9に示す。それぞれ燃料棒間ギャップをパラメータとしている。これらの図から、ギャップの減少に伴いドライアウト限界出力が著しく低下する傾向が認められる。

このような、燃料棒間ギャップの減少によるドライアウト限界出力の低下をさらに定量化するため、各燃料毎のドライアウト限界出力とノミナル状態のギャップ($s=2.10\text{mm}$)でのドライアウト限界出力との比 $Q_c/Q_c(s=2.10)$ と流量の関係をFig. 2-10に示す。図中の実線は、各試験体毎の基準状態に対する限界出力の比の平均値である。出力比は流量の変化に対してほぼ一定値を示し、燃料棒間ギャップの変化に起因するドライアウト限界出力の低下がチャンネル流量にほとんど依存しないことが分かる。

この結果に基づき、ドライアウト限界出力比に対するギャップの影響をまとめたものがFig. 2-11である。Fig. 2-11から、燃料棒間ギャップが 1.6mm まではドライアウト限界出力はそれ程減少しないが、ギャップが 1.6mm 以下になるとギャップの減少にほぼ比例してドライアウト限界出力が急激に減少することがわかる。そして、ギャップが $s = 0.55\text{mm}$ のケースでは、ノミナルギャップ(2.10mm)の場合の約85%までドライアウト限界出力が低下している。

3. サブチャンネルコードによるドライアウト限界出力解析

2章で示した燃料棒間ギャップの減少に伴うドライアウト限界出力の低下は、燃料棒間ギャップの減少によって隣接したサブチャンネル間の冷却材の混合が低下するため、サブチャンネル間のクオリティ分布の不均衡が増大し、最もドライアウトを生じやすいサブチャンネルのクオリティが相対的に高くなることに起因すると推察される。したがって、本章では、サブチャンネル解析によって、燃料棒間ギャップ減少に伴うドライアウト限界出力の変化を解析する手法の開発と検証を行う。

著者らは、これまで、ATR燃料クラスタ体系へ適用するサブチャンネル解析コードとして、米国のPNLで開発されたCOBRA-IVコード[5]を基に改良を加えCOBRA-IV-HTLバージョンを開発してきた。COBRA-IVコードではサブチャンネル間のエネルギー交換量として、ダイバージョНКロスフロー及び乱流混合(Turbulent Mixing Flow)による熱輸送と熱伝導が仮定されている。その3つのエネルギー交換量のうち、クラスタ形状や燃料棒間ギャップにより影響を受ける乱流混合について、実規模試験結果に基づき改良を行う。

3-1. 解析コード

COBRA-IV-HTLは原子炉燃料集合体の定常及び非定常サブチャンネル解析を行うコンピュータコードであり、サブチャンネル間のクロスフローの影響を考慮することにより、沸騰及び非沸騰におけるクラスタ内の各サブチャンネルの冷却材流量とエンタルピを算出する。

サブチャンネル解析においては、流路断面はFig. 3-1に示すような個々の仮想的なサブチャンネルに分割される。そして、それらのサブチャンネルに対して、流れとクロスフローに関する適当な仮定を用いることによって、質量、エネルギー、運動量の各保存式が導かれる。

(1) COBRA-IV-HTLバージョンにおける基本的仮定

- ・ 一次元、熱平衡、分離流で示される二相流がそれぞれのチャンネルに存在する。
- ・ エンタルピ、圧力、流量、軸方向位置及び時間の関数としてボイド率が決定可能な二相流とする。
- ・ ダイバージョНКロスフローは圧力勾配に基づくサブチャンネル間のクロスフローである。乱流混合はその上にさらに付加されたものとして位置づけられる。
- ・ サブチャンネル間の乱流混合は正味の流れの変化を伴わない(即ち等質量交換である)。
- ・ 音速の伝播は無視している。
- ・ ダイバージョНКロスフローの速度は、サブチャンネル内の軸方向流速と比較して小さい。

(2) 基礎式

上記の仮定に基づき、基礎式が以下の様に与えられる。簡単のため、まず二つのサブチャンネルを設定した場合について示す。方程式はサブチャンネル*i*に対して示し、それに隣接するもう一つのサブチャンネルとして、サブチャンネル*j*を考える。

質量保存式

$$A_i \frac{\partial \rho_i}{\partial t} + \frac{\partial m_i}{\partial x} = -w_{ij} \quad (3-1)$$

ここで、

m_i : サブチャンネル*i*の質量流量 [kg/sec]

w_{ij} : ダイバージョクロスフロー [kg/sec・m]

(3-1)式の右辺は単位長さ当りのダイバージョクロスフローによるサブチャンネル流量の変化量を与える。ダイバージョクロスフローは流れがサブチャンネルから出て行くとき正の値をとる。乱流混合は正味の流れの変化を伴わないので質量保存式には現れない。密度の時間微分は流体の膨張収縮による流れの変化の成分を与える。

エネルギー式

$$A_i \frac{\partial \rho_i h_i}{\partial t} + \frac{\partial m_i h_i}{\partial x} = q'_{i1} - (h_i - h_j) w'_{ij} - (T_i - T_j) C_{ij} \\ + (h_i - h^*) w_{ij} + U_w (T_{wi} - T_i) \times P_w + Q_A \quad (3-2)$$

ここで、

q'_{i1} : 燃料棒からの熱伝達量 [W/m]

w'_{ij} : 乱流混合流量 [kg/sec・m]

C_{ij} : 冷却材の熱伝導率 [W/m・K]

U_w : 構造物と冷却材間の熱伝達係数 [W/m²・K]

T_{wi} : 構造物壁面温度 [°C]

P_w : 構造物濡れ縁長さ [m]

Q_A : 冷却材の軸方向の熱伝導項 [W/m]
 h^* : 実効エンタルピ [J/kg]

$$h^* = \begin{cases} h_i & \text{if } w_{ij} \geq 0 \\ h_j & \text{if } w_{ij} < 0 \end{cases}$$

(3-2)式の右辺第1項はサブチャンネルの燃料棒から流体への伝熱量を示し、熱的なミキシングが発生しない場合のエンタルピの変化率を与える。第2項は乱流混合によるサブチャンネル間のエンタルピ輸送の項である。この熱的な乱流混合 w' は渦拡散のアナロジーより得られるもので、後で示す経験的な相関式によって定義される。第3項はサブチャンネル間の熱伝導を考慮したものである。第4項はダイバージョネクロスフローによるエネルギー輸送項である。この項はいわゆる対流項であり、 h^* はダイバージョネクロスフローによって輸送される実効エンタルピである。

軸方向運動量式

$$\frac{\partial m_i}{\partial t} + \frac{\partial m_i u_i}{\partial x} + A_i \frac{\partial P}{\partial x} = \left[\frac{v_i \lambda_i \phi^2_i}{2 D_i} + \frac{K_i v'_i}{2 \Delta x} + \frac{\partial v_i}{\partial x} \right] \frac{m_i^2}{A_i} - (u_i - u_j) f_i w'_{ij} + (2 u_i - u^*) w_{ij} - g A_i \rho_i \cos \theta \quad (3-3)$$

u_i : 軸方向二相平均流速 [m/sec]
 v_i : 液相比容積 [m³/kg]
 v'_i : 二相平均比容積 [m³/kg]
 λ_i : 管摩擦損失係数 [-]
 ϕ^2_i : 二相流増倍係数 [-]
 K_i : スペーサ損失係数 [-]
 u^* : ダイバージョネクロスフローにおける実効速度 [m/sec]

$$u^* = \begin{cases} u_i & \text{if } w_{ij} \geq 0 \\ u_j & \text{if } w_{ij} < 0 \end{cases}$$

(3-3)式の右辺は、摩擦損失項、空間的加速項、重力項、乱流混合及びダイバージョネクロスフローによる運動量の変化率を与える項より構成される。

横方向運動量式

$$\frac{\partial w_{ij}}{\partial t} + \frac{\partial u^* w_{ij}}{\partial x} = \frac{s}{\varnothing} C_G w_{ij} - \frac{s}{\varnothing} w_{ij}^2 \frac{\cos \theta}{\rho^* s^2} + \frac{s}{\varnothing} (P_i - P_j) \quad (3-4)$$

C_G : ギャップでの圧力損失に関する項

$$C_G = \frac{K_G}{2} \frac{|w_{ij}|}{s^2 \rho^*} \quad (3-5)$$

K_G : ギャップでの圧力損失係数 [-]

ρ^* : ダイバージョクロスフローにおける実効密度 [kg/m³]

$$\rho^* = \begin{cases} \rho_i & \text{if } w_{ij} \geq 0 \\ \rho_j & \text{if } w_{ij} < 0 \end{cases}$$

横方向の運動量はFig. 3-2に示すようなコントロールボリュームを設定し計算される。 $\varnothing$ は仮想的なサブチャンネル間距離であり、 $s \times \varnothing = A'$ を満たす値を用いる。(3-4)式の右辺第1項はギャップでの損失項、第2項は鉛直方向からの傾きによる運動量の輸送を考慮するための項であるが、現在のCOBRA-IVコードではまだ、アプリケーションが為されていない。第3項はサブチャンネル間の圧力差を示す。

実際のバンドル体系のサブチャンネル形状に対応して、(3-1)式から(3-3)式の基礎式をまとめると以下のようにマトリックス表示される。

質量保存式

$$A \frac{\partial \rho}{\partial t} + \frac{\partial m}{\partial x} + [D C]^T w = 0 \quad (3-6)$$

エネルギー式

$$A \frac{\partial \rho h}{\partial t} + \frac{\partial m h}{\partial x} + [D C]^T h^* w = q' \quad (3-7)$$

軸方向運動量式

$$\frac{\partial m}{\partial t} + \frac{\partial m u}{\partial x} + [D C]^T u^* w + A \frac{\partial P}{\partial x} = F \quad (3-8)$$

横方向運動量式

$$\frac{\partial w}{\partial t} + \frac{\partial u^* w}{\partial x} + \frac{\partial u_y w}{\partial y} - [D C] P = C \quad (3-9)$$

ここで、 q' は熱源となる燃料棒表面及び構造物からの熱伝達量、 F は軸方向流れの摩擦力及び重力、 u_y は横方向流速、 C は横方向流れの摩擦力を示す。また、 $[D C]$ は差を計算するマトリックス演算子、 $[D C]^T$ は $[D C]$ を転置したマトリックス演算子で和を計算する。

方程式系を閉じてこれらの保存式の解を求めるためには、さらに状態方程式と構成方程式が必要となる。状態方程式は以下の式で示される。

$$\rho = \rho(h, P^*) \quad (3-10)$$

ここで、 P^* は参照圧力である。

(3) 構成方程式

圧力損失係数、二相流増倍係数、ボイド率、熱伝達率を求める構成方程式としては、28本クラスタに関する実規模試験データに基づいて開発された以下の相関式を用いる。ここで、燃料棒間ギャップの変化はこれらの相関式に影響を与えないと仮定し、ギャップを変化させたすべての試験ケースについて同一式を用いる。

① 圧力損失相関式[6]

(i) 燃料棒摩擦損失係数

Nikuradseの式

$$\lambda = 0.0032 + 0.221 R e^{-0.237} \quad (3-11)$$

(ii) スペーサ圧力損失係数

$$\zeta_{SP} = 13.51 - 5.61 \cdot \log_{10} Re + 0.85 (\log_{10} Re)^2 - 0.042 (\log_{10} Re)^3 \quad (3-12)$$

(iii) 上部ハウジング圧力損失係数

$$\zeta_{UP} = 3.16 - 0.6959 \cdot \log_{10} Re + 0.0531 (\log_{10} Re)^2 \quad (3-13)$$

(iv) 下部ハウジング部圧力損失係数

$$\zeta_{LP} = 12.62 - 5.10 \cdot \log_{10} Re + 0.732 (\log_{10} Re)^2 - 0.0335 (\log_{10} Re)^3 \quad (3-14)$$

(v) 燃料棒摩擦損失二相流増倍係数

$$\phi_{10,BD}^2 = R \cdot \phi_{wo,h}^2 \quad (3-15)$$

ここで、

$\phi_{10,BD}^2$: バンドル部摩擦損失二相流増倍係数

$$R = C_1 \cdot X_r \cdot \exp(C_2) + 1.0$$

$$C_2 = (-7.42 + 8.82 \cdot X_r - 8.02 \cdot X_r^2) \cdot X_r$$

$$X_r = X / X_{bo}$$

$$X_{bo} = 1.0 / (C_3 \cdot G + C_4 \cdot P + C_5)$$

$$C_1 = 9.39$$

$$C_3 = 0.00185$$

$$C_4 = 0.02$$

$$C_5 = 0.75$$

(vi) スペース及び上下ハウジング圧力損失二相流増倍係数

Homogeneous flow model

$$\phi_{wo,h}^2 = 1.0 + \left(\frac{\rho_l}{\rho_g} - 1.0 \right) X \quad (3-16)$$

② ボイド率相関式

$$\alpha = \frac{1}{1 + \left[\frac{\rho_g}{\rho_l} \cdot \frac{(1-X)}{X} \right]^n} \quad (3-17)$$

ここで、

$$n = 1.0 + f_P \cdot f_G$$

$$f_P = 2.15 \sqrt{|\log(P/P_c)| + 0.860 |\log(P/P_c)|}$$

$$f_G = 1.123 - 2.211 \left(\frac{G}{3000} \right) + 1.502 \left(\frac{G}{3000} \right)^2 - 0.3510 \left(\frac{G}{3000} \right)^3$$

$$(0 \leq G \leq 4500)$$

$$f_G = 0.0 \quad (G > 4500)$$

適用範囲：圧 力 (P) = 2~7.0 [MPa]

質量速度 (G) = 20~3000 [kg/m²・sec]

クオリティ (X) = 0~1.0

③ 熱伝達率相関式

核沸騰熱伝達率

Jens-Lottesの式

$$h_{NB} = \frac{q}{\Delta T_{sat}} = \frac{1}{0.82} q^{\frac{3}{4}} e^{\frac{P}{63}} \quad (3-18)$$

膜沸騰熱伝達率

菅原の式

$$h_{FB} = 0.8 \times h_{FB,0} \quad (3-19)$$

$$h_{FB,0} = 0.023 \frac{\lambda_g}{D_e} \cdot Pr_w^{0.4} [Re_g \{X + \frac{\rho_g}{\rho_l} (1-X)\}]^{0.8}$$

$$\cdot f_{sp} \cdot f_{sub} + 0.63 \cdot u_g^{1.2} \cdot \rho_g \cdot H_{lat} \cdot \frac{1-X}{X} \cdot \frac{1}{\Delta T}$$

$$\text{ここで、} f_{sp} = 1.57 - 0.74 \left(\frac{\Delta Z}{260} \right) + 0.17 \left(\frac{\Delta Z}{260} \right)^2 \quad (\Delta Z ; \text{mm})$$

$$f_{sub} = 1.0 + 1.58 \cdot X_{sub}^{1.8}$$

④限界熱流束（CHF）相関式

CHF相関式は、以下に示すサブチャンネル状態量に基づいて開発した式を用いる。

$$q_{o,sub} = (2.349 - 3.386 \cdot X_{sub} + 1.413 \cdot X_{sub}^2) \times 10^6 \times f_{LP} \times f_{AP} \times f_{SP} \times f_P \quad (3-20)$$

ここで、

f_{LP} : 径方向出力分布依存性に対する補正係数

f_{AP} : 軸方向出力分布依存性に対する補正係数

f_{SP} : スペーサ間隔依存性に対する補正係数

f_P : 圧力依存性に対する補正係数

3-2 二相乱流混合係数相関式の作成

COBRA-IV-HTLにおいては、(3-1)～(3-3)式に現われる冷却材の乱流混合量については次式で示されている[7]。

$$w'_{ij} = \beta s \bar{G} \quad (3-21)$$

乱流混合流量 w' は[Mass/(Length・Time)]の次元を有し、隣接するサブチャンネル間の平均流量 $\bar{G}$ 、燃料棒間ギャップ s 及び乱流混合係数 β の積で示される。現象的には渦拡散によるサブチャンネル間の等質量混合が仮定されている。したがって、その質量流量が輸送するエンタルピの差がサブチャンネル間のエネルギー交換量となる。

サブチャンネル間の乱流混合係数 β については実験的に多くの研究報告がある。Roweは炉心内サブチャンネルを模擬した並行2チャンネルの実験を行い、それぞれのサブチャンネルでの流量及びエンタルピの測定から β のReynolds数及びボイド率依存性を求めている[8],[9]。また、Singh[10]は二相流のサブチャンネル間乱流混合実験結果から、 β にはフローパターン依存性が顕著に存在しスラグ流領域でミキシングが最大となることを示している。そこで、本解析ではこれらの実験結果に基づき、Fig. 3-3に実線で示す乱流混合係数を基準として用いる。一方、燃料棒間ギャ

ップが乱流混合係数に及ぼす影響については二相流のみならず単相流においてさえも系統的な実験データや相関式は得られていない。そこで、ここではRowe及びSinghの実験結果と今回得られた燃料棒間ギャップをパラメータとした実規模ドライアウト試験データに基づき、燃料棒間ギャップの影響を考慮した二相乱流混合係数相関式を開発する。

二相乱流混合係数; β はクオリティ; X 、レイノルズ数; Re 、ピッチ/ロッド直径比; P/D の関数として次式のように表わせると考える。

$$\beta = f(X) \cdot g(Re) \cdot h(P/D) \quad (3-22)$$

ここで、 $f(X)$ は二相流の流動様式、 $g(Re)$ は流速、 $h(P/D)$ は燃料棒間ギャップの影響を表す関数である。

まず最初に(3-22)式に示される乱流混合係数 β の二相流流動様式依存性のモデル化について考える。Rowe[8]及びSingh[10]によれば、乱流混合係数はクオリティの関数として示すことが可能である。Fig. 3-3から明らかなように乱流混合は流動様式と密接な関係があり、クオリティ0.07～0.08付近のスラグ流領域にピークがある。したがって、ここでは乱流混合係数 $f(X)$ をRoweがCOBRA Aコードの解説書で推奨しているものと同じFig. 3-3に示す実線で表せると仮定し、これを基準のミキシングファクターとして用いる。図中の実線はTable 3-1に示す様な数値で与えられる。

Table 3-1 Flow Regime Dependent Two-phase Mixing Factor

quality	0.0	0.05	0.10	0.25	0.60	1.00
$f(X)$	0.01	0.06	0.06	0.02	0.01	0.005

次に、(3-22)式の流量に対する補正係数; $f(Re)$ の最適化を行う。Table 3-1に示したベースのミキシングファクターを用いてサブチャンネル解析を実施し、その結果について30[t/h]を基準として流量の異なる試験データと比較した結果、流量に関する補正係数は Re の関数として次式のように示される。

$$f(Re) = 7.19 \times 10^4 \cdot Re^{-0.933} \quad (3-23)$$

更に、(3-22)式の燃料棒間ギャップに対する補正係数; $f(P/D)$ の最適化を行う。Table 3-1及び

(2-24)式を用いてサブチャンネル解析を行い、最小ギャップを与える最外周のピッチと燃料棒外径の比(P/D)を代表値として、燃料棒間ギャップを変化させた試験データと比較することによって最適な補正係数を求めると次式が得られる。

$$f(P/D)=36.27-73.66 \cdot (P/D)+37.40 \cdot (P/D)^2 \quad (3-24)$$

ここで、ピッチ,Pは次式で定義する。

$$\text{Pitch; } P = \text{Rod Diameter; } D + \text{Minimum Gap Space; } s$$

ただし、本試験におけるP/Dの範囲は以下の通りであり、(3-24)式の適用範囲も同様である。

$$1.03 \leq P/D \leq 1.13 \quad (3-25)$$

Fig. 3-4に β の質量流量に対する依存性を、Fig. 3-5に β のP/D比に対する依存性を示す。流量の増加及びP/D比の減少に伴って乱流混合係数 β は減少している。また、以上の相関式により求めた乱流混合係数の主流の流量とP/D比に対する影響をクオリティ0.1の場合についてFig. 3-6及びFig. 3-7に示す。

3-3. ドライアウト限界出力予測に関する精度評価

今回作成した乱流混合係数を組み込んだサブチャンネル解析コード(COBRA-IV-HTL)をもちいて、燃料棒間ギャップ0.55, 1.10, 1.56, 2.10mmの各試験体毎のドライアウト限界出力の解析を実施した。ドライアウト限界出力に関する解析と全試験データの比較をTable 3-2~Table 3-5、及びFig. 2-11に示す。解析は燃料棒間ギャップの減少に伴うドライアウト限界出力の変化をよくトレースしている。また、スキャットグラムをFig. 3-8に示す。Fig. 3-8から全試験データに対するドライアウト限界出力の予測精度は±5%以内であることがわかる。

以上の結果から、燃料棒間ギャップを考慮したサブチャンネル間の二相乱流混合係数を用いることによって燃料棒間ギャップが減少した燃料集合体に対するドライアウト限界出力を評価できることが確認された。

4. 考察

A T R 2 8 本クラス燃料集合体に対して開発した二相乱流混合係数の他のサブチャンネル形状への適用性を確認するため、PNLにおいてRoweらが行った2チャンネルでのサブチャンネル混合実験[8]について、COBRA-IV-HTLコードを用いて同様の解析を実施した。

Roweらの実験は、Fig. 3-9に示すように、燃料棒間ギャップ $s = 2.134\text{mm}$ と $s = 0.508\text{mm}$ の2ケースのサブチャンネルの断面形状について行われている。そして、加熱条件下でそれぞれのサブチャンネル出口部における質量流量及びエンタルピが測定されている。Table 3-6, 3-7に示すように、燃料棒間ギャップが変化することによってサブチャンネルの等価直径は $D = 5.37 \sim 7.40\text{mm}$ まで変化している。Roweらの実験はスペーサを用いていないので、スペーサの影響は考慮しなくてもよい。また、圧力、流量、及びクオリティ等の流動条件は、圧力 $P = 6.3\text{Pa}$ 、流量 $G = 1000 \sim 4000\text{kg/m}^2\text{s}$ 、クオリティ $X = 5\% \sim 40\%$ であり、第3章の解析に使用した管摩擦損失係数、二相増倍係数、及びボイド率の各相関式はそのまま適用可能と考えてよい。

Roweらの実験結果と今回作成した乱流混合係数相関式を用いた解析結果の比較の代表例をFig. 3-10, 3-11に示す。図中には、次式に示すRoweらが作成した乱流混合係数を使用して実施した解析結果も合わせて示す。

$$\beta = 0.0062 \cdot De / (P-D) \cdot Re^{-0.1} \quad (3-25)$$

両者による解析結果はほぼ同等であり、実験結果との一致も良好である。更に、HTLモデルによる解析結果とRoweらの全実験データの比較を、質量流速についてFig. 3-12, Fig. 3-13に示す。COBRA-IV-HTLコードは、質量速度についてRoweらの実験データの92%を $\pm 15\%$ 以内の精度で予測した。また、エンタルピについての解析結果と実験データの比較をFig. 3-14, Fig. 3-15に示す。エンタルピについてはRoweらの実験データの93%を $\pm 10\%$ 以内の精度で予測可能であった。

以上の結果、開発した二相乱流混合係数相関式はA T R 燃料集合体以外のサブチャンネル形状に対しても適用可能であることが確認された。(詳細はAppendix Cを参照)

5. 結論

クラッドの付着等により燃料棒間ギャップが減少した場合のドライアウト限界出力を明らかにすることを目的として、ATR 28本クラス燃料集合体を対象とする、燃料棒間ギャップを変化させた実規模のドライアウト試験を実施した。また、試験データに基づき燃料棒間ギャップ依存性を考慮したサブチャンネル間二相乱流混合係数相関式を作成し、サブチャンネル解析コードによりギャップが減少した燃料体のドライアウト限界出力を評価する手法を開発した。更に、開発した手法の適用性を検証するため、Battele Pacific Northwest Laboratories (PNL)で行われたサブチャンネル実験について解析を実施した。

以上より以下の結論が得られた。

- (1) 試験結果から、燃料棒間ギャップが減少した場合のドライアウト限界出力は、燃料棒間ギャップがノミナル値の2.1mmから1.6mm程度の範囲ではわずかしき低下しないが、1.6mm以下ではギャップの減少にほぼ比例して急激に低下することが明らかになった。例えば、0.6mmの場合ではドライアウト限界出力はノミナルギャップの場合と比較して限界出力が約15%低下する。これはギャップの減少によってサブチャンネル間の乱流混合が低下し、サブチャンネル間のクオリティ分布の不均衡が増大するためと考えられる。
- (2) このような燃料棒間ギャップの差異に起因するサブチャンネル間の不均衡ひいてはドライアウト限界出力の変化を正しく解析するため、(燃料棒間ギャップ) / (燃料棒外径) の影響を考慮した二相乱流混合係数相関式を作成した。本相関式を組み込んだサブチャンネル解析コード(COBRA-IV-HTL)は、本試験で得られた全ドライアウト限界出力データについて±5%以内の精度で予測が可能であった。
- (3) 開発した二相乱流混合係数相関式の適用性を確認するため、ATR燃料集合体と形状の異なるBattele PNLで行われたサブチャンネル実験について解析を行った。その結果、平行した2サブチャンネルの流量及びエンタルピ分布に関して実験結果とのよい一致が得られ、開発した相関式がATR燃料集合体とサブチャンネル形状が異なる体系へも適用できることが確認された。

記号表(Nomenclature)

A	: Cross section area	[m ²]
C _{ij}	: Heat conductivity	[W/m·K]
CHF	: Critical heat flux	[W/m ²]
D	: Rod diameter	[m]
D _e	: Hydraulic equivalent diameter	[m]
g	: Acceleration by gravity	[m/sec ²]
G	: Mass flux	[kg/m ² ·sec]
h	: Enthalpy	[J/kg]
ℓ	: Length between subchannels	[m]
m _i	: Subchannel mass velocity	[kg/m·sec]
P	: Pressure	[Pa]
P	: Pitch	[m]
q	: Heat flux	[W/m ²]
Q _c	: Critical Power	[MW]
Re	: Reynolds number	[-]
s	: Gap space	[m]
t	: Time unit	[sec]
T	: Temperature	[°C]
u _i	: Flow velocity	[m/sec]
u _y	: Transversal flow velocity	[m/sec]
v _i	: Specific volume	[m ³ /kg]
V _f	: Fuel pellet volume	[m ³]
V _m	: Moderator volume	[m ³]
w' _{ij}	: Turbulent mixing flow rate	[kg/m·sec]
w _{ij}	: Diversion cross flow rate	[kg/m·sec]
W	: Mass flow rate	[t/h]
x	: Axial coordinate	[m]
X	: Quality	[-]
Y _{ij}	: Distance between sub-channels	[m]
α	: Void fraction	[-]
β	: Turbulent mixing factor	[-]

ρ	:	Density	[kg/m ³]
λ	:	Frictional coefficient	[-]
ϕ^2	:	Two phase flow multiplier	[-]
θ	:	Angle from vertical	[rad]
ζ	:	Frictional coefficient	[-]

参考文献

- [1] ふげん発電所技術課資料 「取り出し燃料の要素間間隔検査について」, 57/12/16
- [2] S.J. Green, et al., "Critical heat flux tests on a coolant channel simulating a closely spaced lattice of rods", WAPD-TM-466, Westing House, (1969)
- [3] B.W.LeTourneau, A.C.Peterson, et al. "Critical heat flux and pressure drop tests with parallel upflow of high pressure water in bundles of twenty 0.25- and 0.28-inch diameter rods", WAPD-TM-1013, Westing House, (1975)
- [4] 菅原 悟 他, 「実規模バーンアウト試験に基づく36本クラスターの定常CHF相関式の開発」 PNC ZN941 84-143 (1984)
- [5] C.W.Stewart, C.L.Wheeler, et al., "COBRA-IV:The model and the Method", (1977)
- [6] 鴨志田 洋 他, 「36本燃料集合体の圧力損失評価式の開発」 PNC SN941 85-86, (1985)
- [7] D.S.Rowe, "Cross-flow mixing between parallel flow channels during boiling Part I", BNWL-371 PT1 (1967)
- [8] D.S.Rowe, "Cross-flow mixing between parallel flow channels during boiling Part II", BNWL-371 PT2 (1967)
- [9] D.S.Rowe, "Cross-flow mixing between parallel flow channels during boiling Part III", BNWL-371 PT3 (1969)
- [10] K.Singh, "Air-water turbulent mixing in simulated rod bundle geometries", Ph.D thesis No.14786, University of Windsor, Ontario, CANADA, (1972)

Table 2-1 試験模擬燃料集合体一覧

パラメータ	基準ケース		Rod gap 減少ケース		
最小 Rod gap	2.10mm	2.10	1.56	1.10	0.55
Rod 外径	16.46mm	16.46	17.00	17.50	18.00
圧力管内径	117.8mm	117.8	117.8	117.8	117.8
スペーサー形状	リング型	板状型	板状型	板状型	板状型
軸方向発熱分布	均一	均一	均一	均一	均一
燃料表面粗さ	$\approx 1\mu\text{m}$	0.6~1.8	0.6~1.1	0.8~1.3	0.8~1.2
流路断面積	46.9cm ²	46.9	42.9	39.1	35.2
水力等価直径	9.70mm	9.70	8.67	7.73	6.81
熱力等価直径	10.3mm	10.3	9.19	8.18	7.20
伝熱面積	5.35m ²	5.35	5.53	5.69	5.85

Table 3-2 Calculation Results of Dryout Power
(s = 2.10 mm)

Flow rate [t/h]	Dryout power(Exp.) [MW]	Dryout power(Cal.) [MW]
38.6	6.71	6.52
38.8	6.68	6.48
34.1	6.18	6.12
34.4	6.22	6.18
29.6	5.73	5.78
29.6	5.72	5.77
24.8	5.22	5.29
24.8	5.23	5.30
19.6	4.69	4.64
19.7	4.70	4.65
17.5	4.48	4.41
17.5	4.44	4.38
14.7	4.13	4.05
14.9	4.11	4.03
12.4	3.77	3.69
12.5	3.79	3.71
9.8	3.25	3.17
9.8	3.21	3.13
7.9	2.70	2.63
7.9	2.71	2.64
6.8	2.41	2.34
6.8	2.41	2.34
6.0	2.16	2.10
6.0	1.86	2.10
4.9	2.16	1.80
4.9	1.86	1.80

Table 3-3 Calculational Results of Dryout Power
(s = 1.56 mm)

Flow rate [t/h]	Dryout power(Exp.) [MW]	Dryout power(Cal.) [MW]
35.1	6.35	6.15
35.2	6.29	6.13
31.1	5.82	5.74
31.0	5.80	5.72
26.3	5.27	5.24
24.4	5.07	5.06
19.4	4.48	4.63
39.1	6.87	6.53
39.5	6.84	6.49
35.5	6.42	6.21
35.1	6.41	6.21
29.3	5.73	5.66
29.4	5.71	5.64
24.6	5.13	5.11
24.4	5.14	5.12
19.3	4.54	4.69
19.3	4.61	4.77
16.9	4.33	4.37
16.9	4.32	4.36
14.5	4.02	4.00
14.6	4.03	4.01
12.4	3.62	3.59
12.2	3.60	3.57
9.8	3.09	3.07
9.8	3.10	3.08
7.9	2.65	2.59
7.8	2.63	2.57
7.0	2.46	2.40
7.1	2.41	2.35
6.0	2.09	2.03
6.0	2.09	2.03
4.9	1.80	1.75
4.9	1.82	1.77

Table 3-4 Calculation Results of Dryout Power
(s = 1.10 mm)

Flow rate [t/h]	Dryout power(Exp.) [MW]	Dryout power(Cal.) [MW]
19.1	4.45	4.40
19.4	4.40	4.35
17.0	4.16	4.11
17.2	4.13	4.08
15.1	3.90	3.84
15.0	3.89	3.83
13.1	3.58	3.52
12.5	3.59	3.51
9.9	3.03	2.96
9.9	3.05	2.98
7.9	2.55	2.49
7.9	2.53	2.47
6.8	2.25	2.19
6.8	2.24	2.18
6.0	2.02	1.96
6.1	2.02	1.96
4.9	1.72	1.67
4.9	1.70	1.65
30.1	5.41	5.29
30.4	5.49	5.37
24.9	4.89	4.81
25.1	4.93	4.85
20.2	4.44	4.39

Table 3-5 Calculation Results of Dryout Power
(s = 0.55 mm)

Flow rate [t/h]	Dryout power(Exp.) [MW]	Dryout power(Cal.) [MW]
18.6	3.84	3.85
21.7	4.18	4.20
23.5	4.36	4.35
28.5	4.87	4.83
4.9	1.63	1.59
5.0	1.63	1.59
6.0	1.86	1.82
5.9	1.86	1.82
6.9	2.08	2.04
6.9	2.10	2.06
7.9	2.31	2.27
7.9	2.31	2.27
19.0	3.97	3.98
16.9	3.69	3.68
16.9	3.73	3.72
14.5	3.45	3.43
14.6	3.47	3.45
12.1	3.10	3.07
12.0	3.10	3.07
9.6	2.76	2.72
9.6	2.77	2.73
6.9	2.11	2.07
19.5	4.07	4.11
22.7	4.39	4.39
29.0	4.87	4.83

Table 3-6 Cross-section data of PNL experiments
(s = 2.134 mm)

Ch.	Area [mm ²]	Wet-perimeter [mm]	Dh [mm]	Heat-perimeter [mm]
1	35.84	28.72	4.99	22.5
2	108.05	53.34	8.10	45.01
Total	143.89	77.79	7.40	67.51

Table 3-7 Cross-section data of PNL experiments
(s = 0.508 mm)

Ch.	Area [mm ²]	Wet-perimeter [mm]	Dh [mm]	Heat-perimeter [mm]
1	23.96	25.71	3.66	22.5
2	76.19	49.37	6.17	45.01
Total	100.15	74.58	5.37	67.51

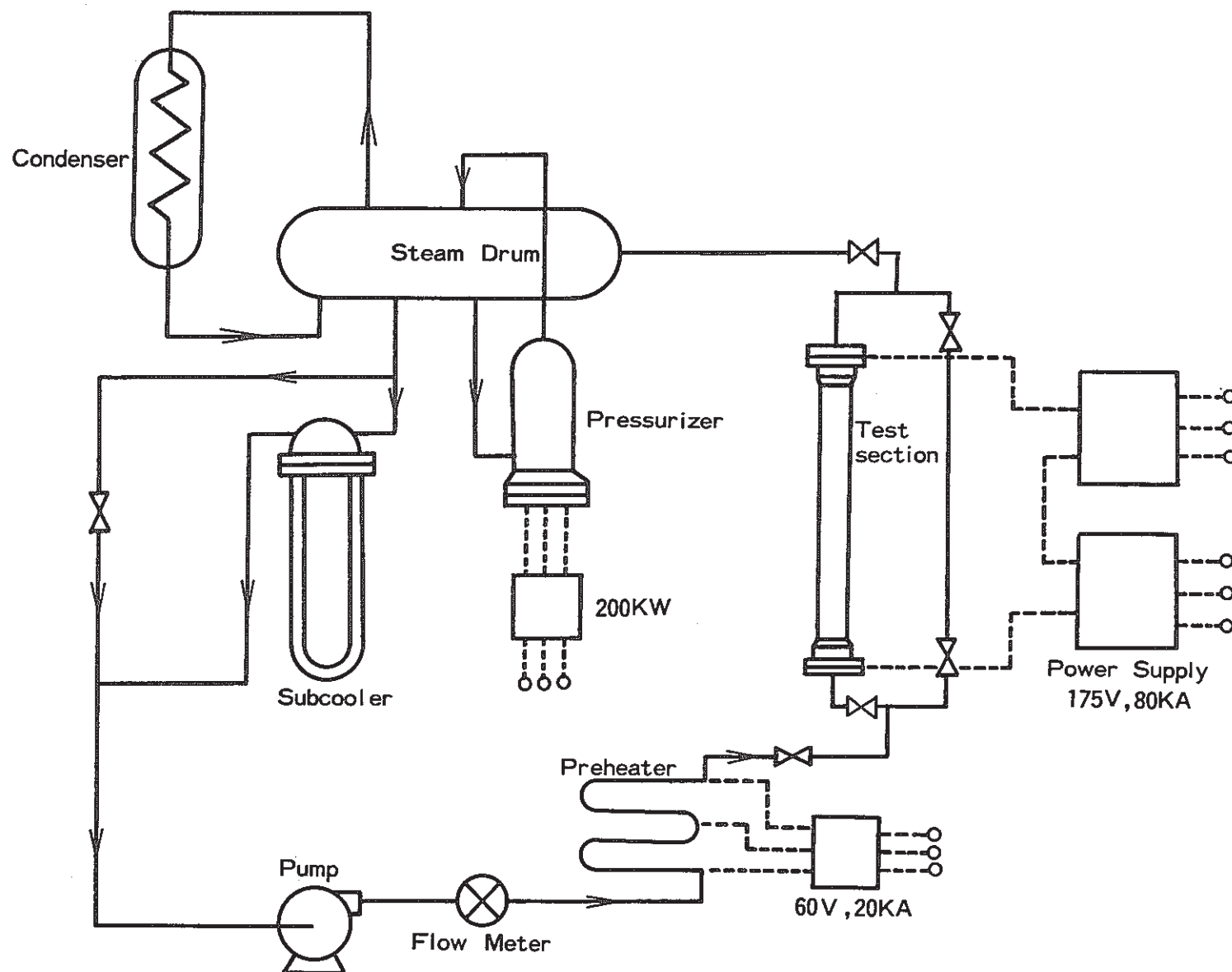


Fig. 2-1 Flow Diagram of the 14MW Heat Transfer Loop (HTL)

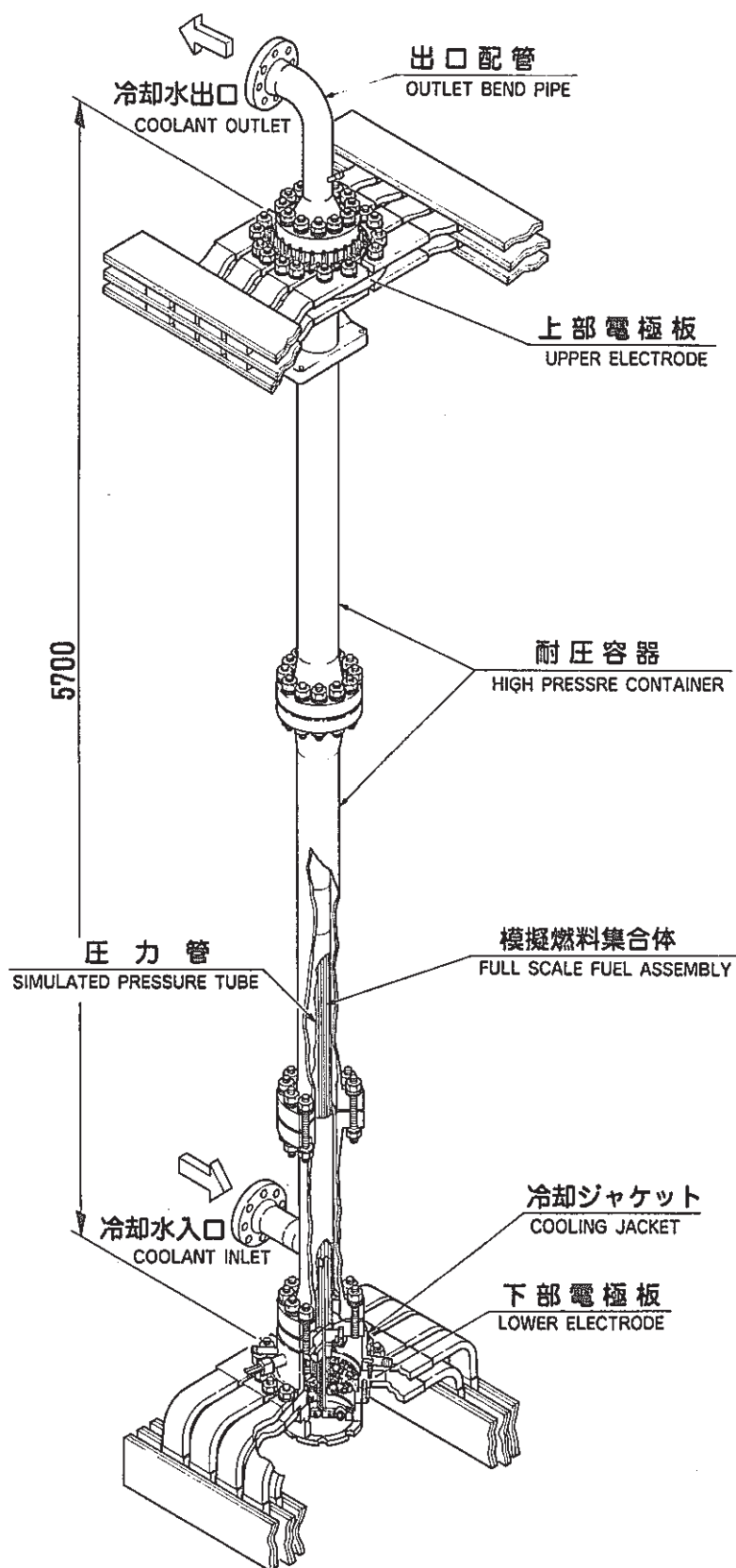


Fig. 2-2 HTL Test Section

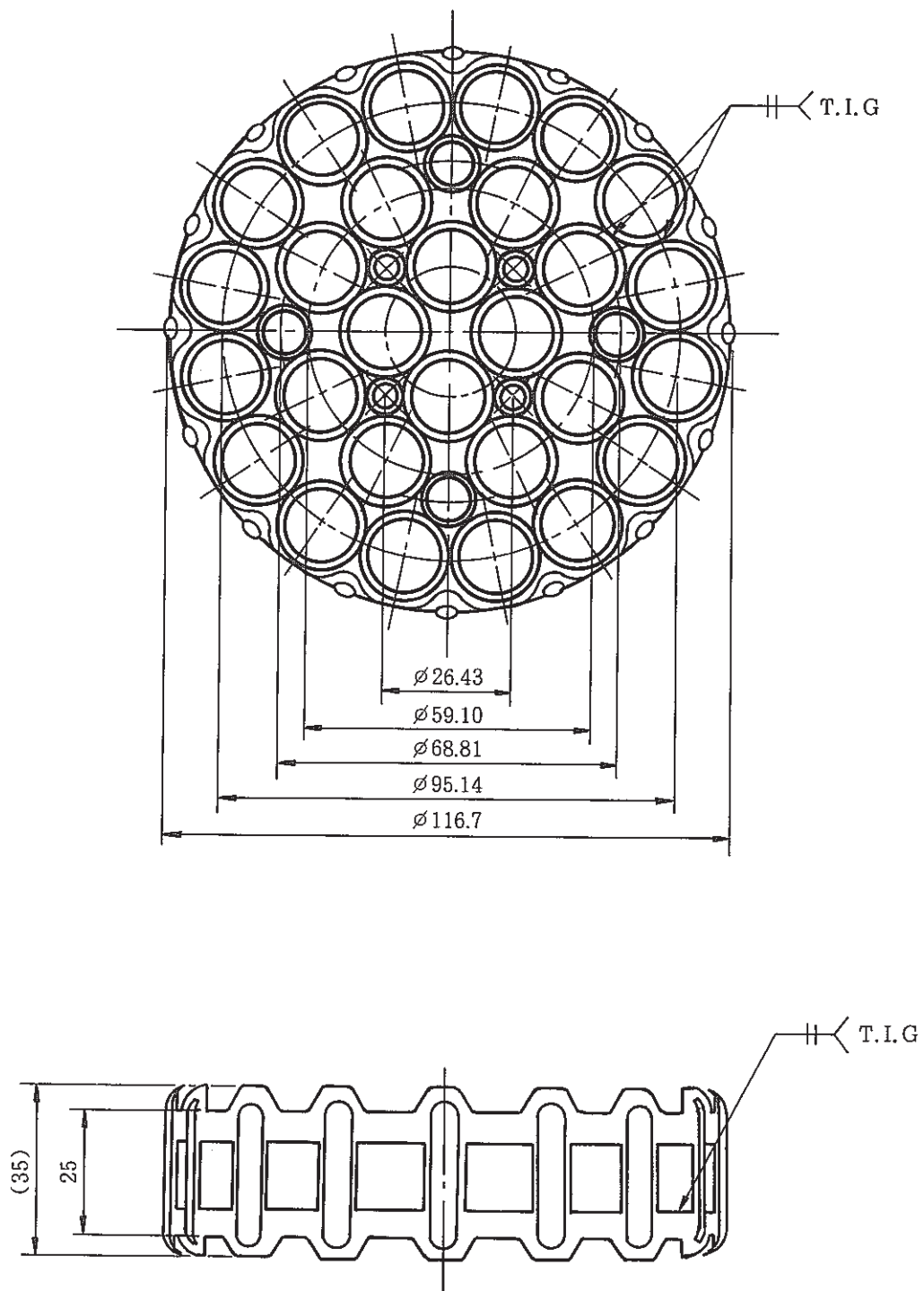


Fig.2-3 Configuration of a Ring Type Spacer

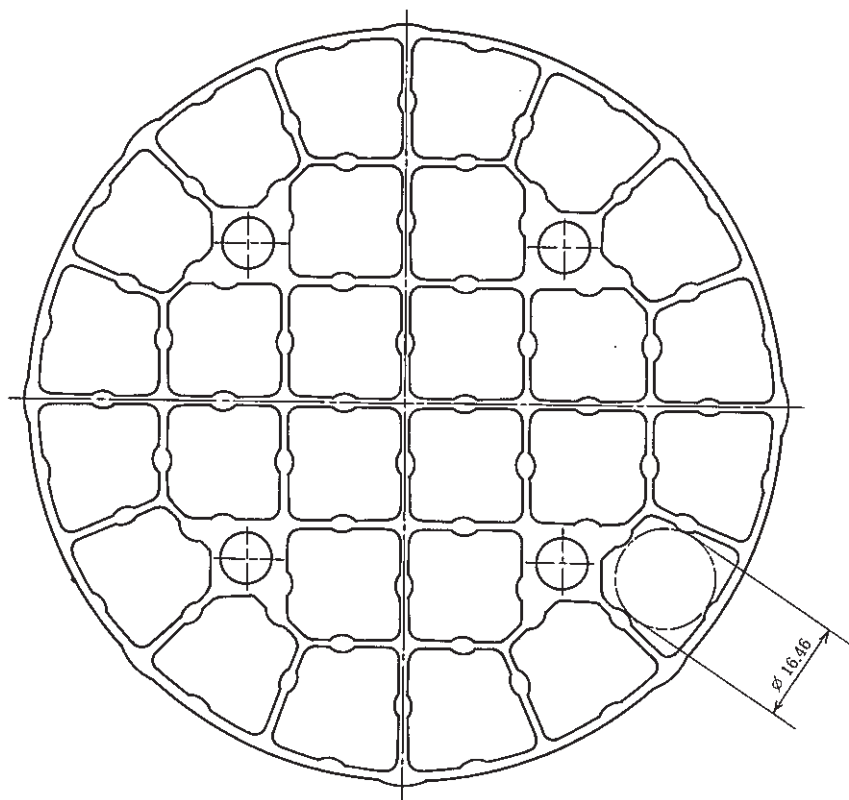


Fig.2 - 4 - 1 Configuration of a plate type spacer (Minimum gap ; 2.10 mm)

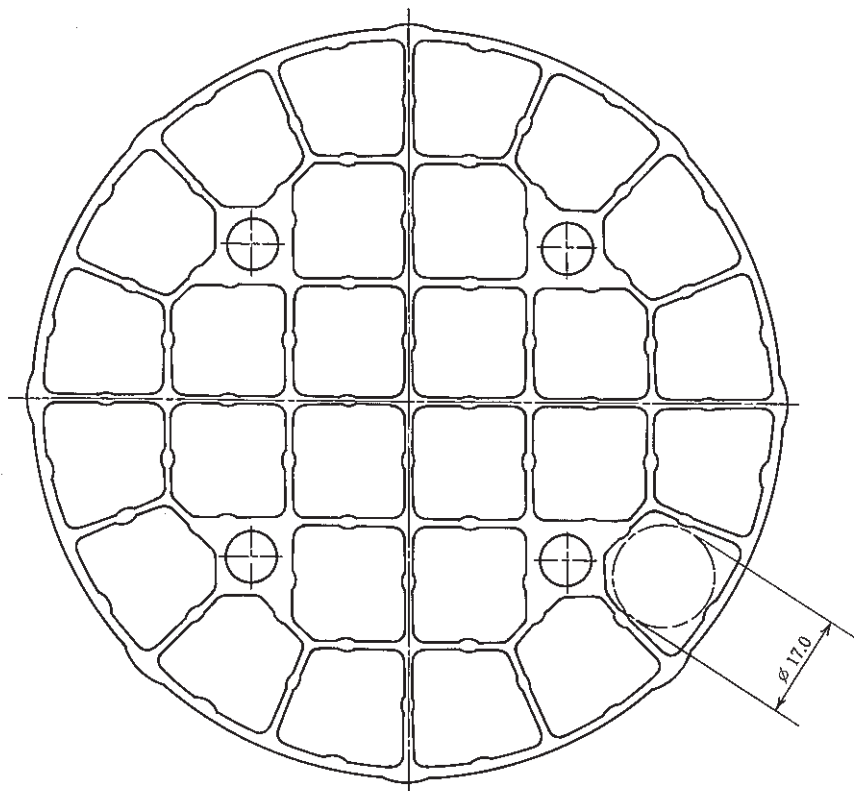


Fig.2 - 4 - 2 Configuration of a plate type spacer (Minimum gap ; 1.56 mm)

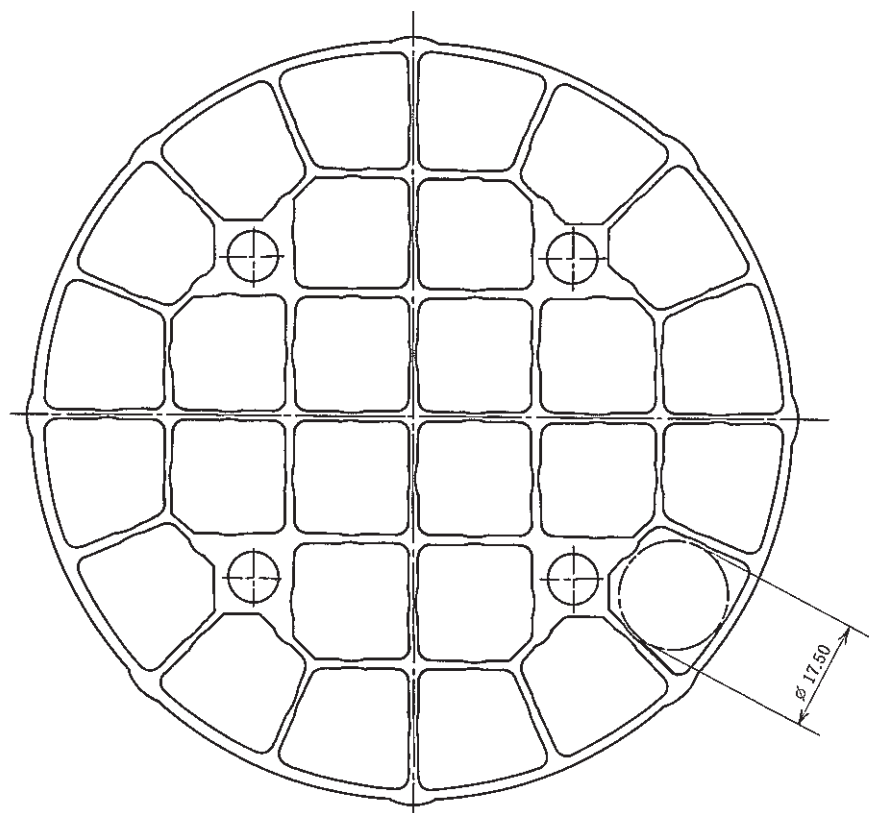


Fig.2 - 4 - 3 Configuration of a plate type spacer (Minimum gap ; 1.10mm)

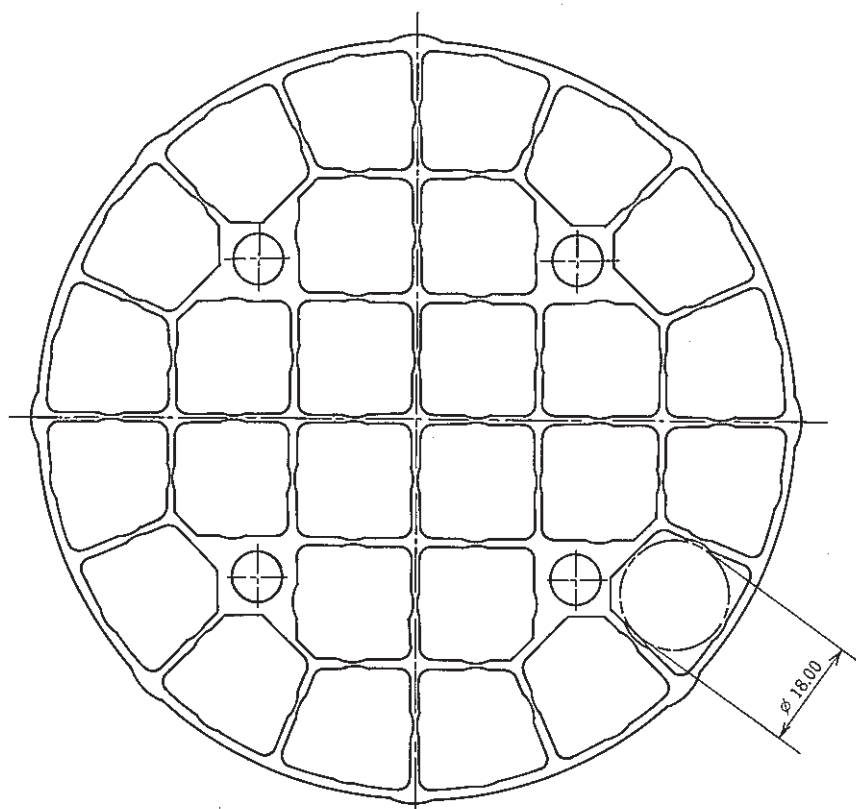


Fig.2 - 4 - 4 Configuration of a plate type spacer (Minimum gap ; 0.55mm)

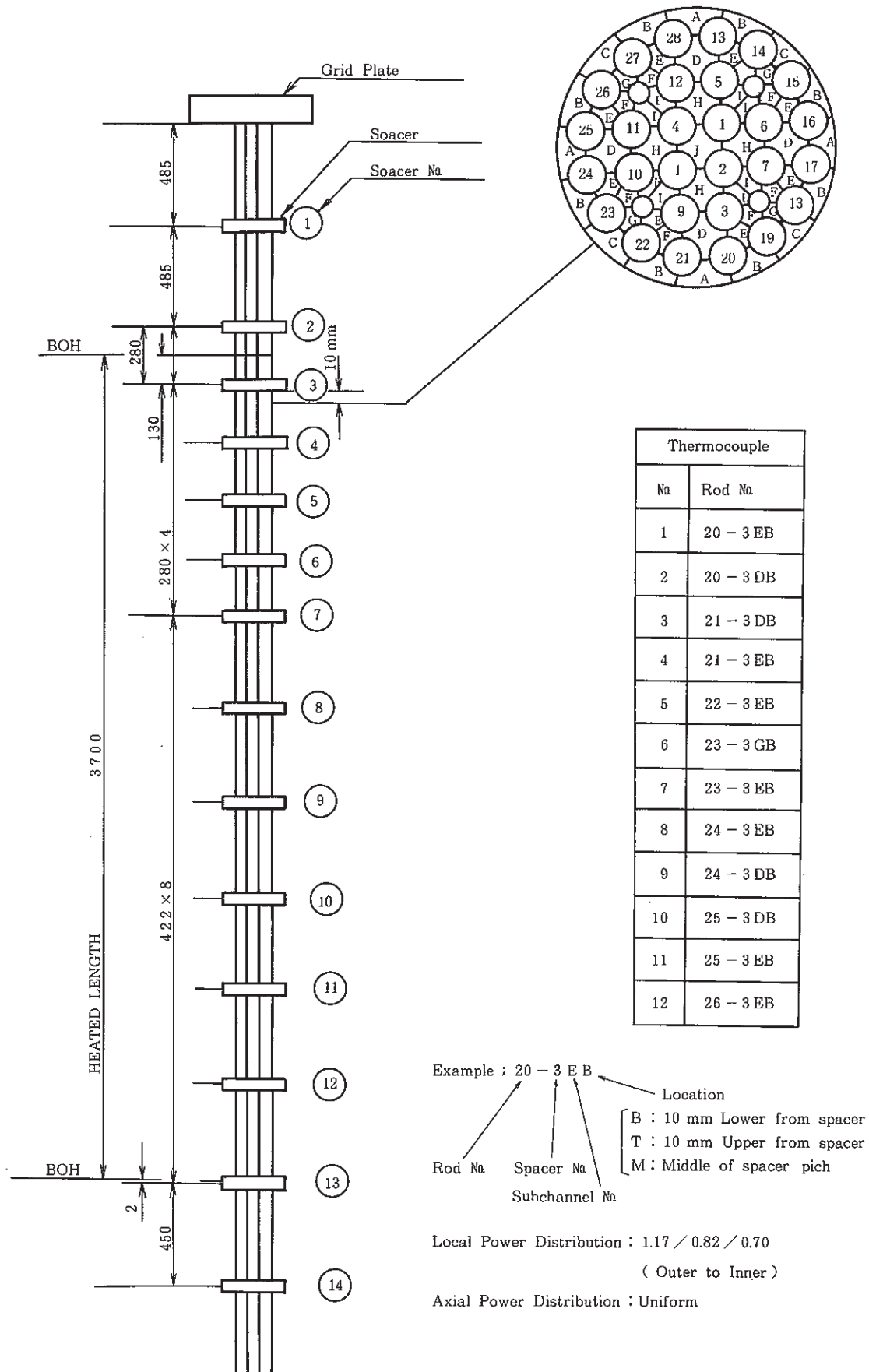


Fig. 2 - 5 Thermocouple Locations

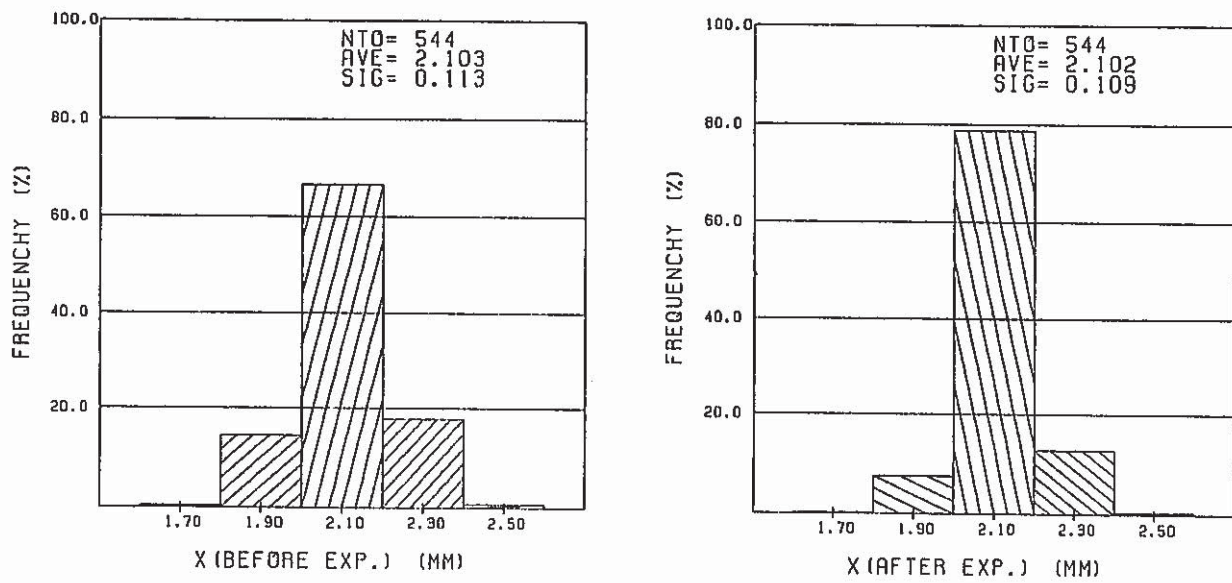


Fig. 2-6-1 Histogram of rod gap (Ring Type spacer; Outer layer)

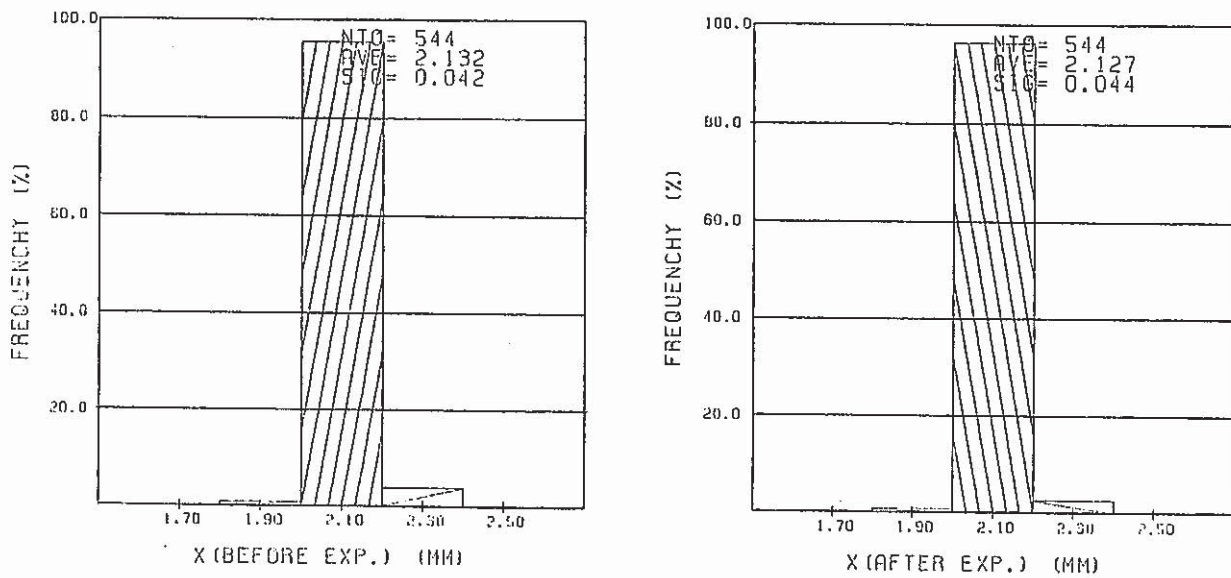


Fig. 2-6-2 Histogram of rod gap (Minimum gap = 2.10mm; Outer layer)

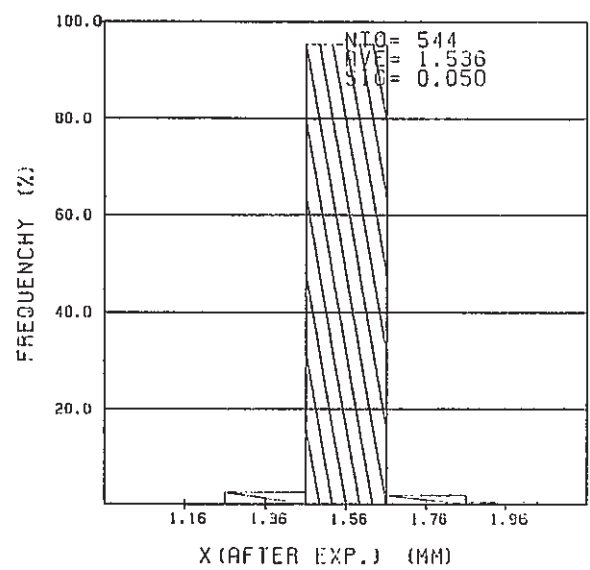
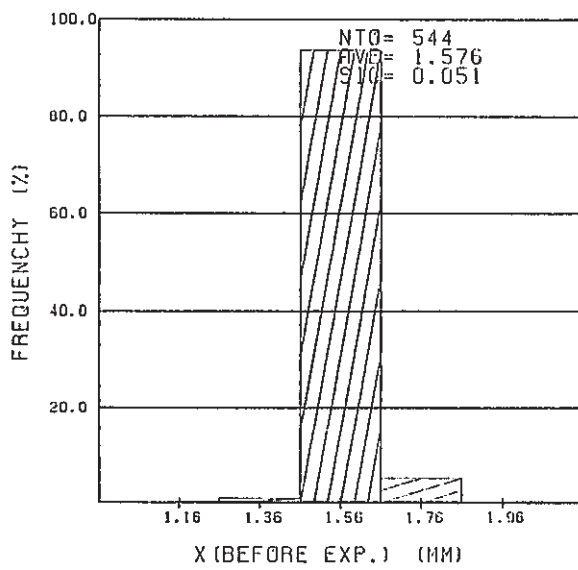


Fig. 2-6-3 Histogram of rod gap (Minimum gap = 1.56mm; Outer layer)

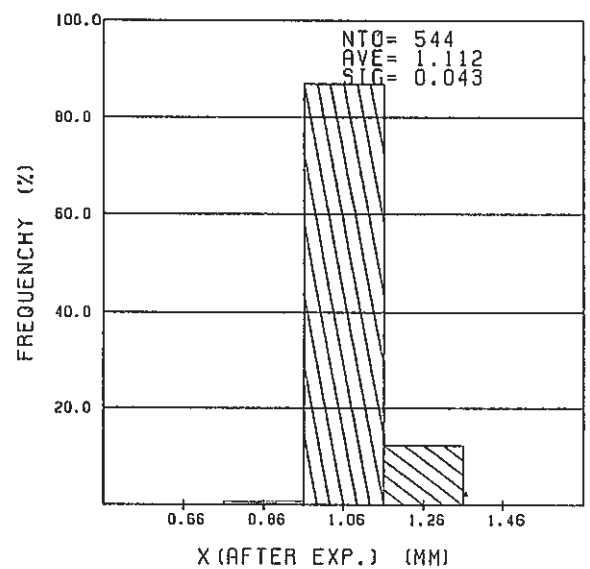
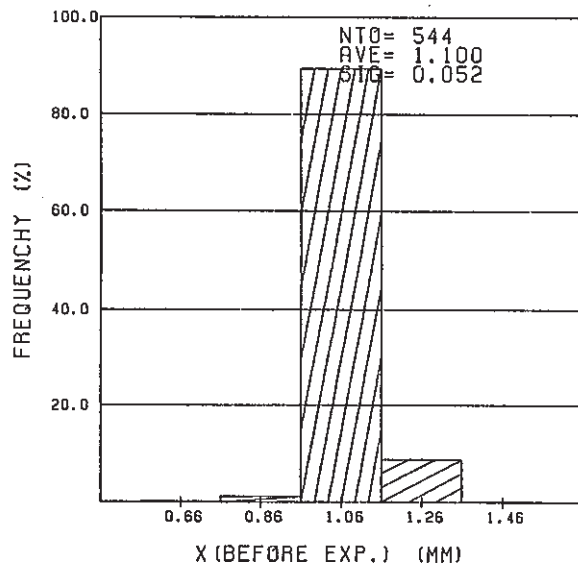


Fig. 2-6-4 Histogram of rod gap (Minimum gap = 1.10mm; Outer layer)

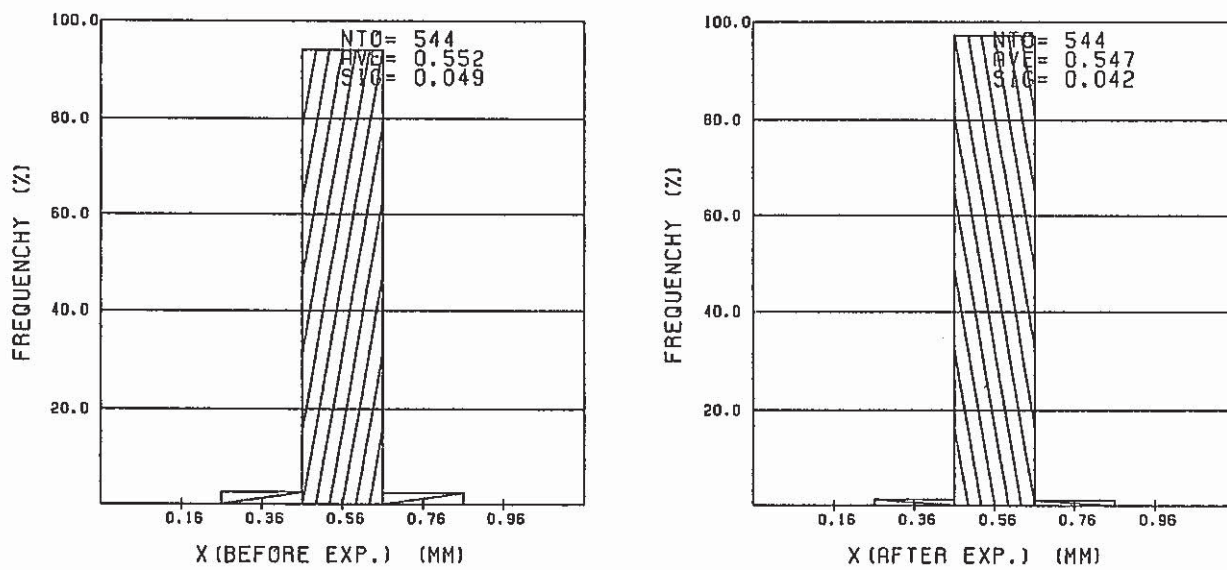


Fig. 2-6-5 Histogram of rod gap (Minimum gap = 0.55mm; Outer layer)

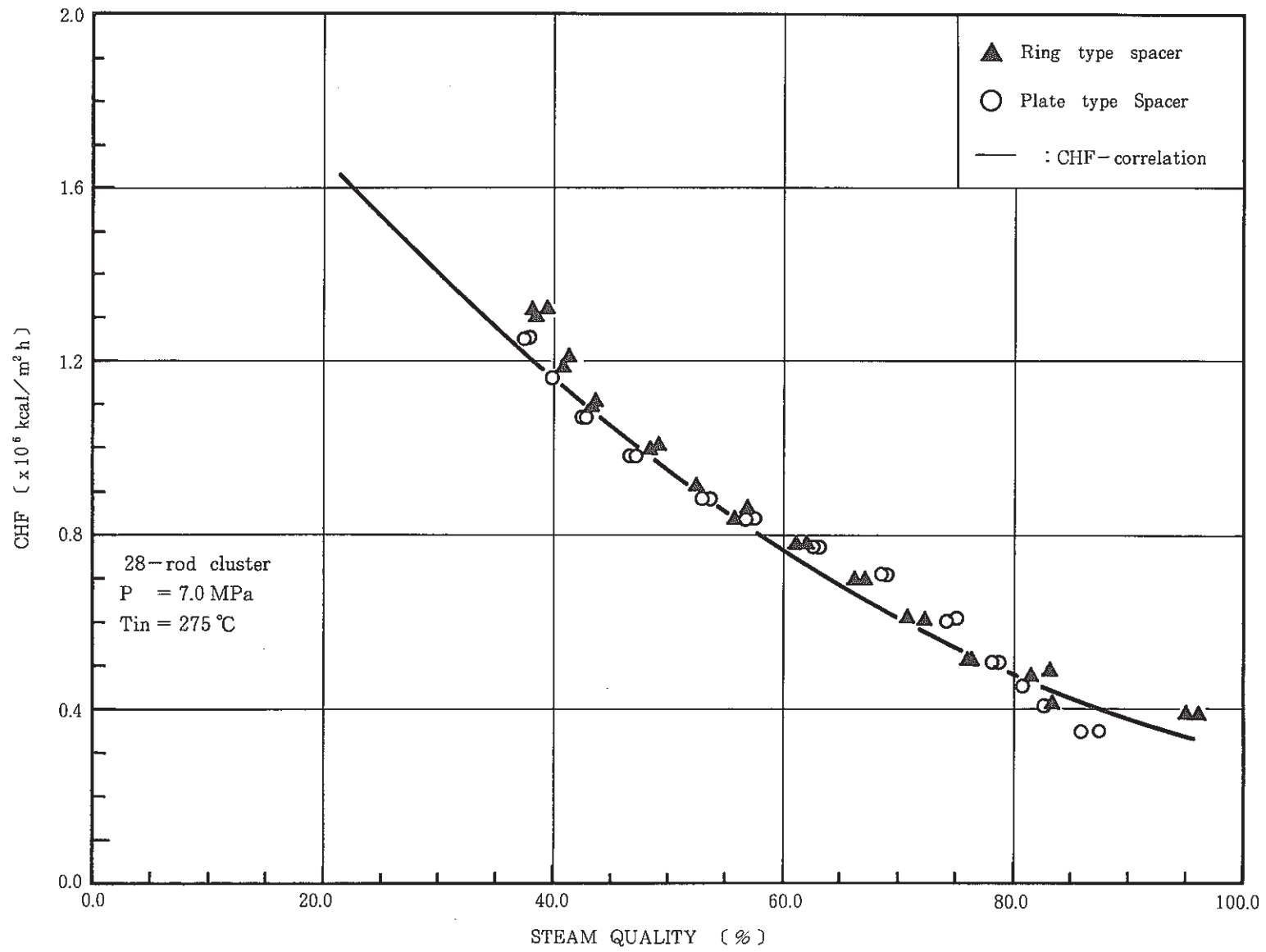


Fig.2 - 7 Comparison of CHF data between a ring type and a plate type spacer

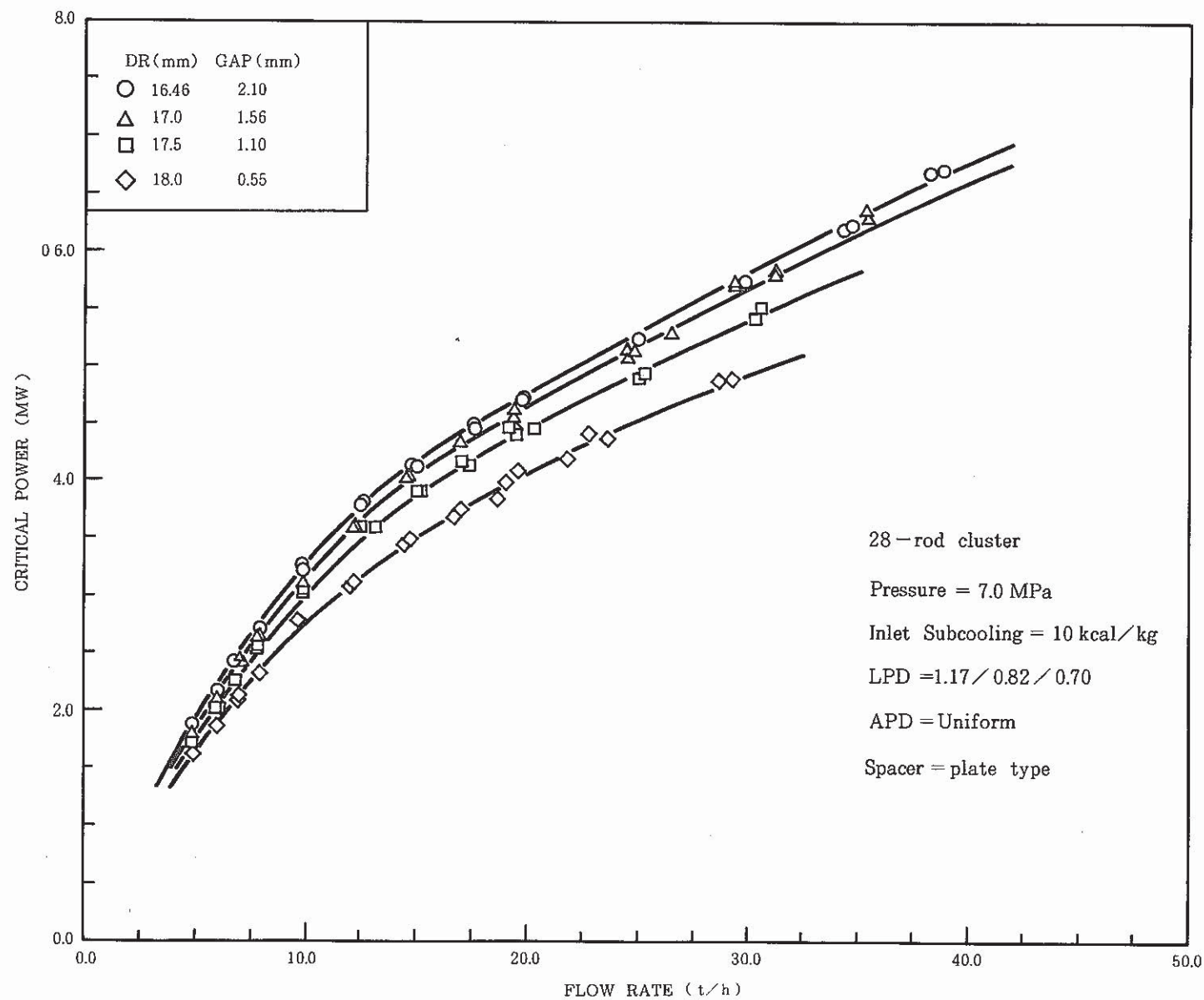


Fig.2 - 8 Experimental results of critical power on reduced rod-gap spacing

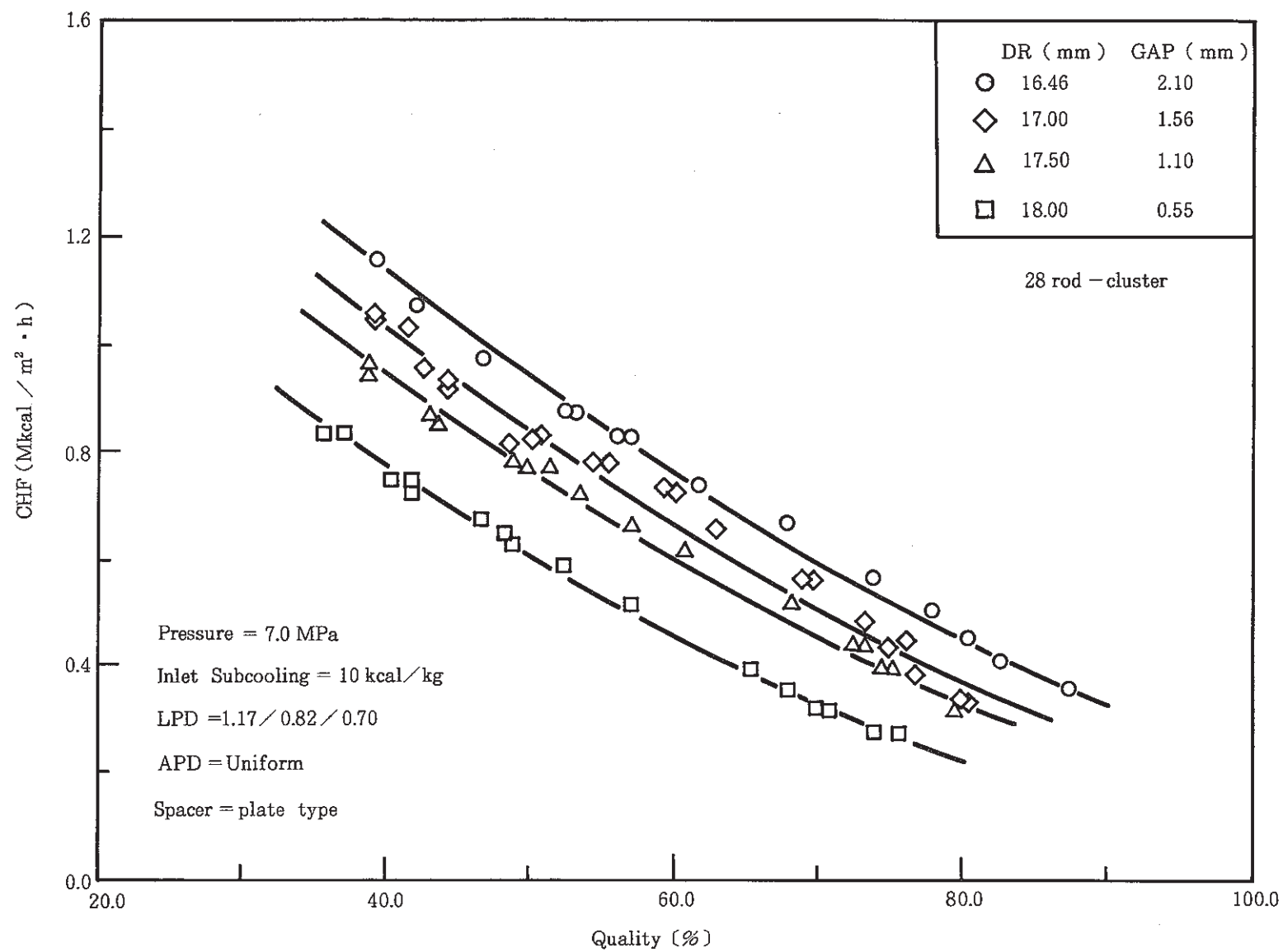


Fig.2 - 9 Effect of reduced gap space on CHF

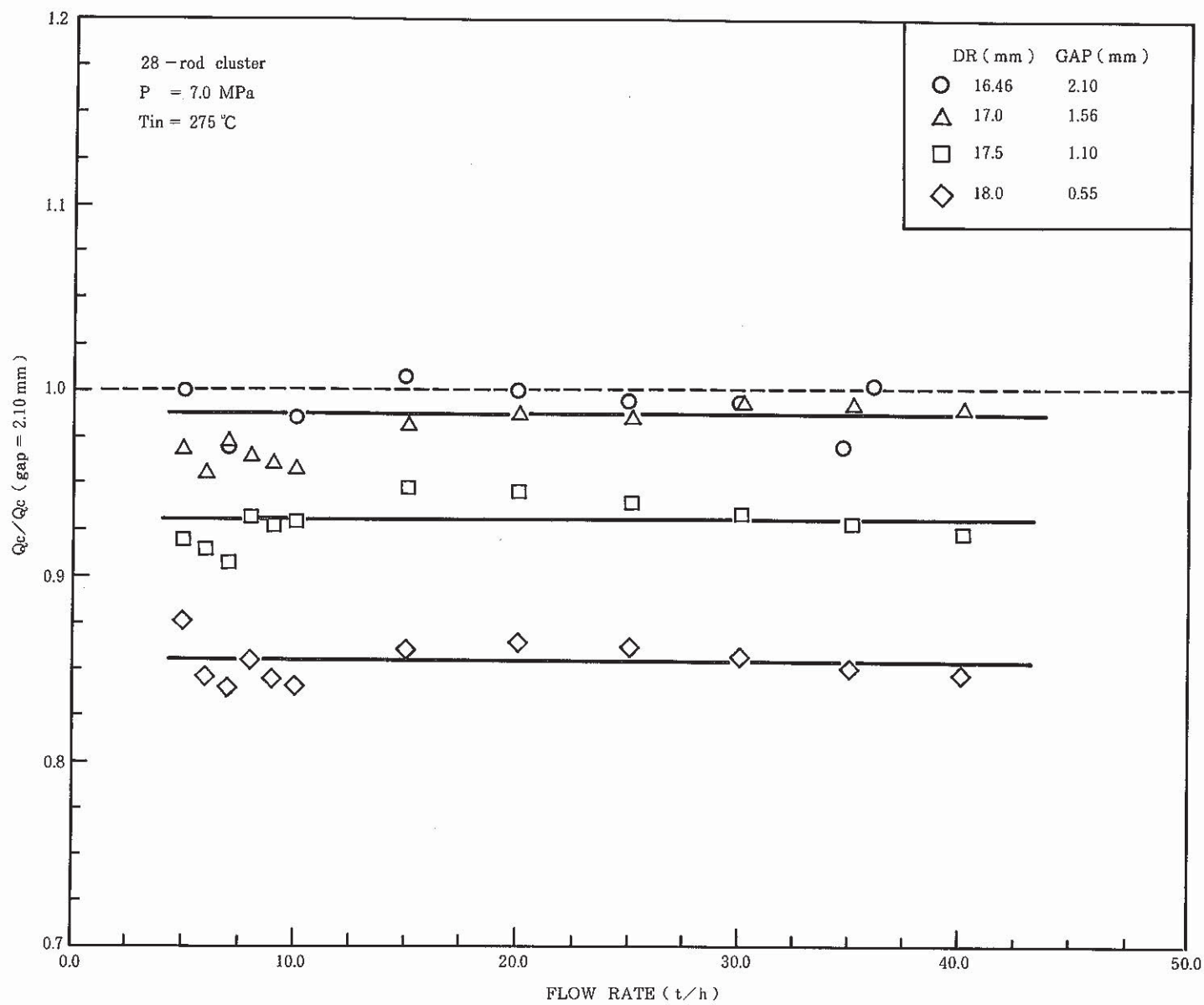


Fig.2 - 10 Critical power ratio on reduced rod-gap spacing

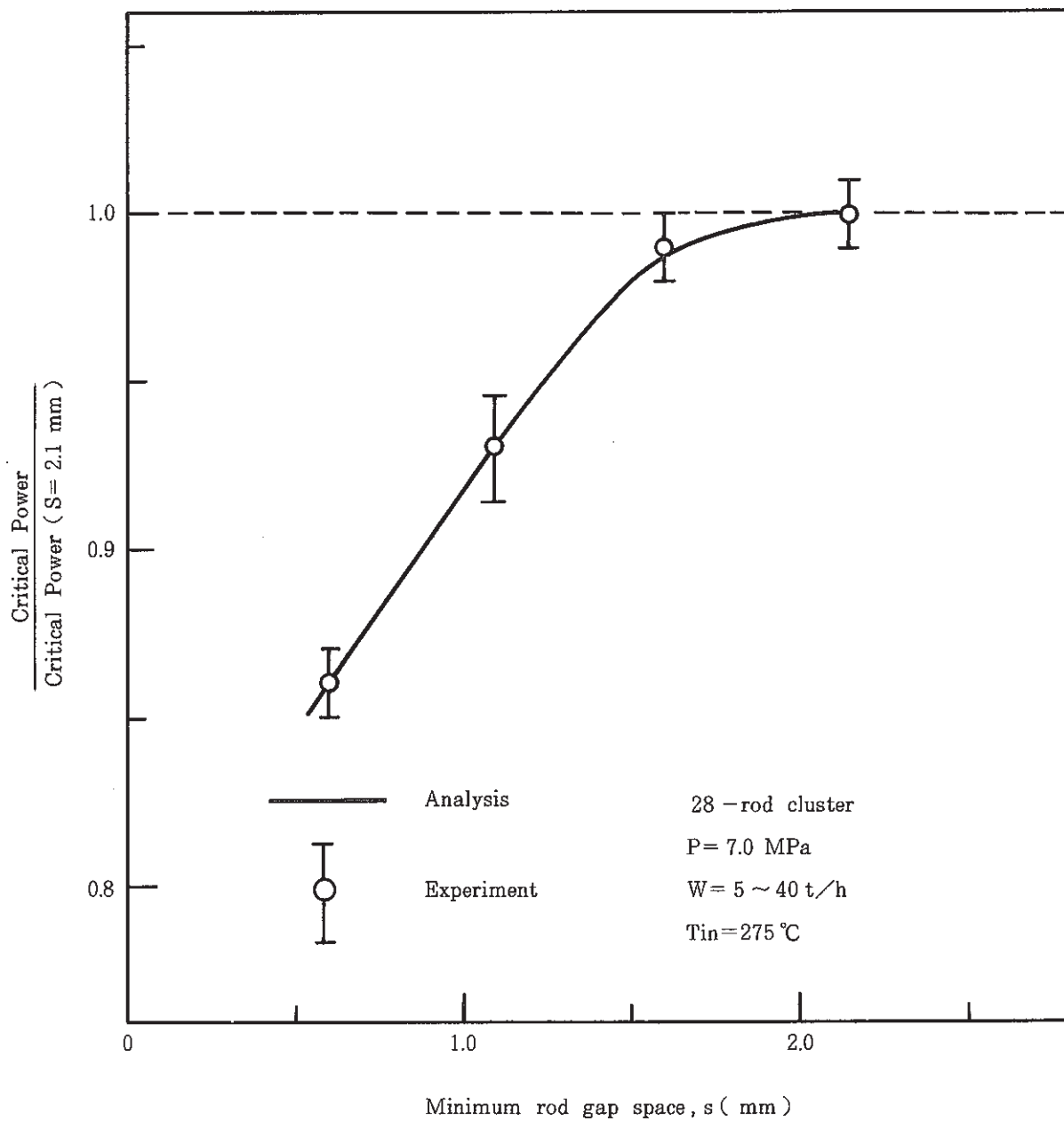


Fig.2 - 11 Effect of gap space on critical power ratio

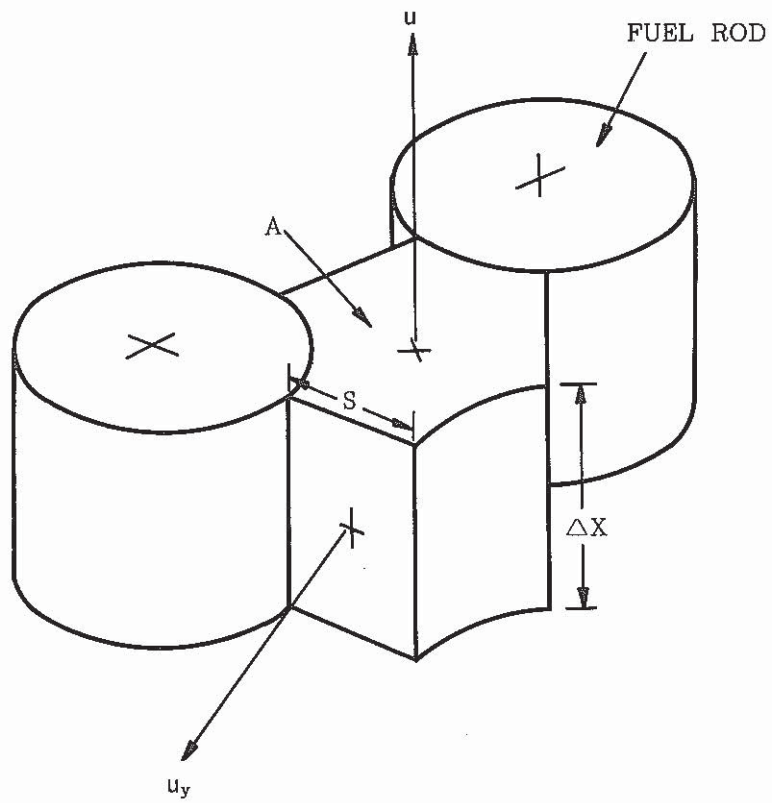


Fig. 3 - 1 Subchannel Control Volume [4]

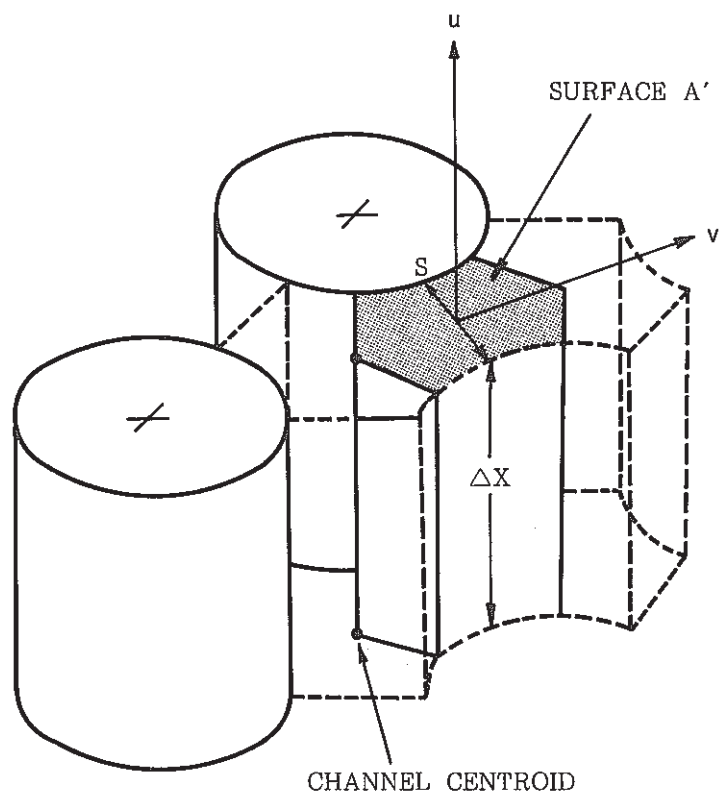


Fig.3 - 2 Control Volume for Lateral Momentum [4]

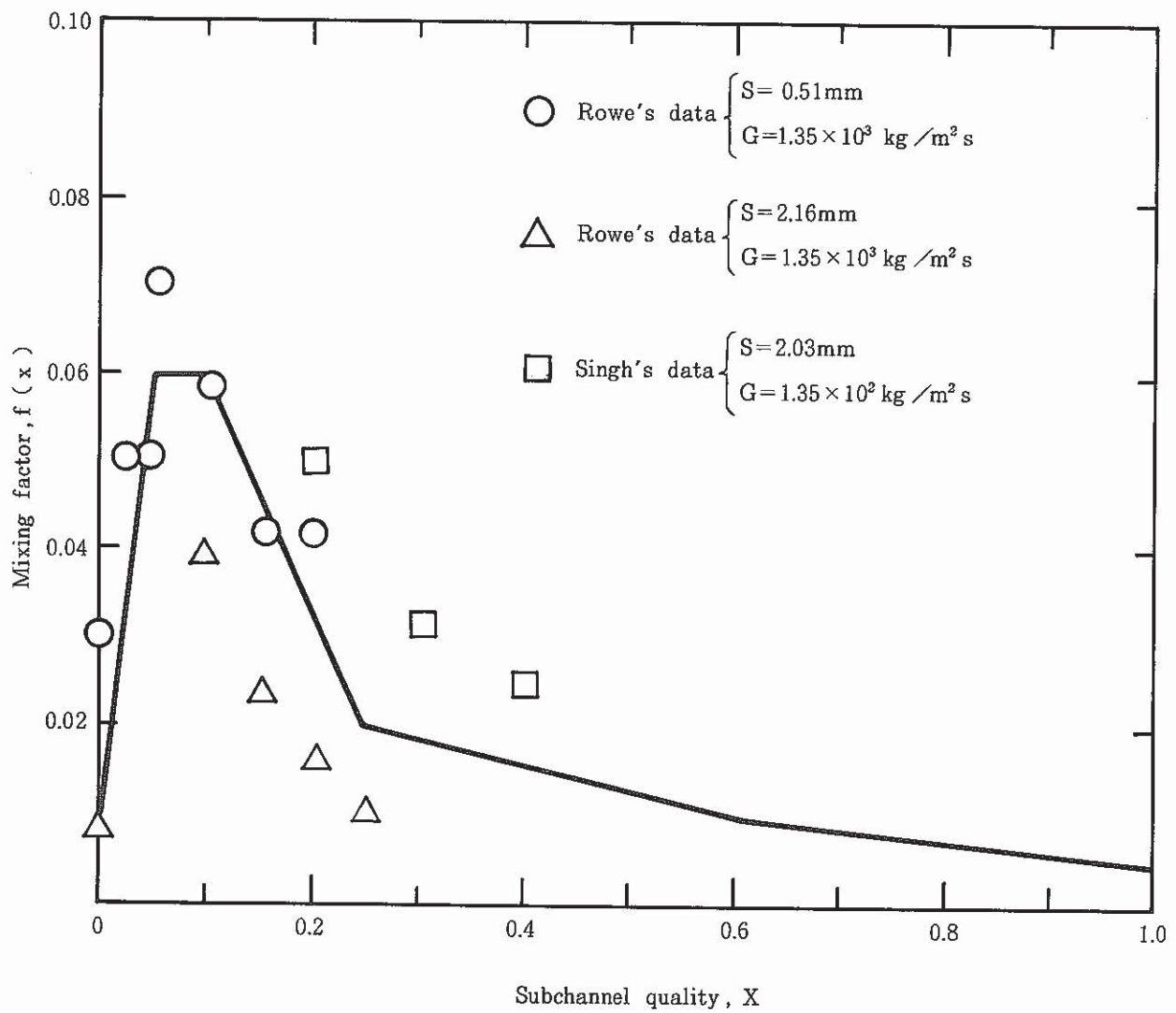


Fig. 3 - 3 Base Mixing Factor

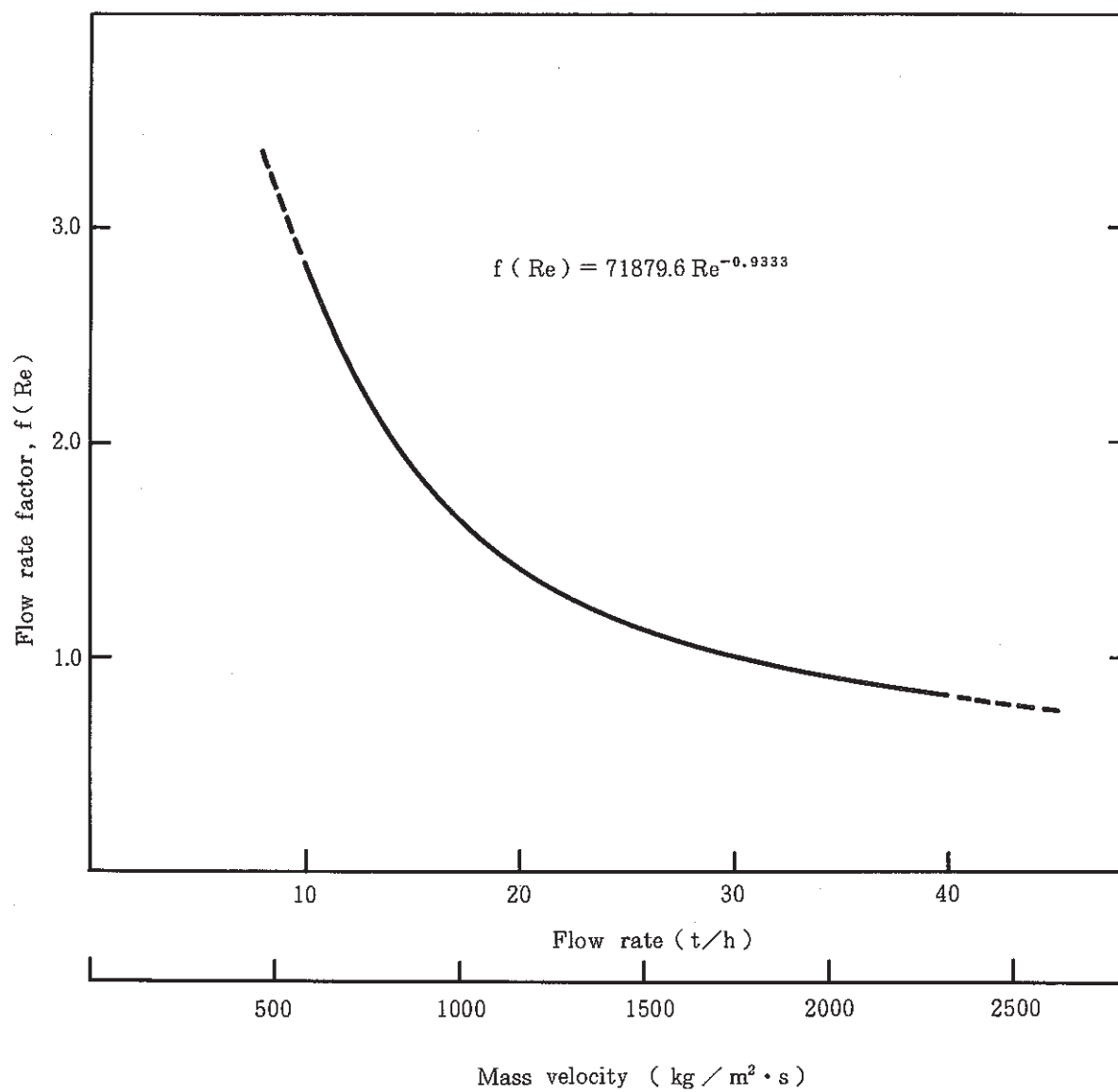


Fig.3 - 4 Flow rate factor, $f(Re)$

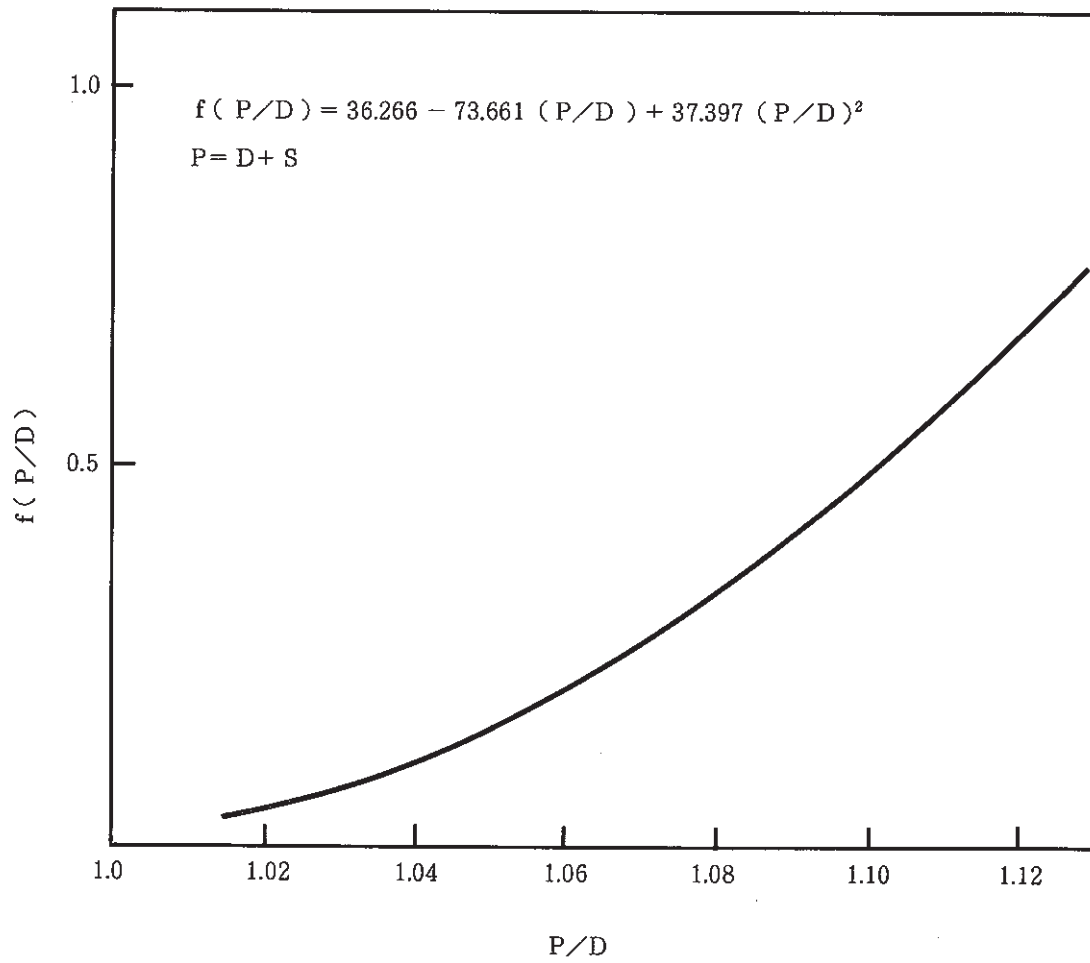


Fig. 3 - 5 Gap spacing factor, $f(P/D)$

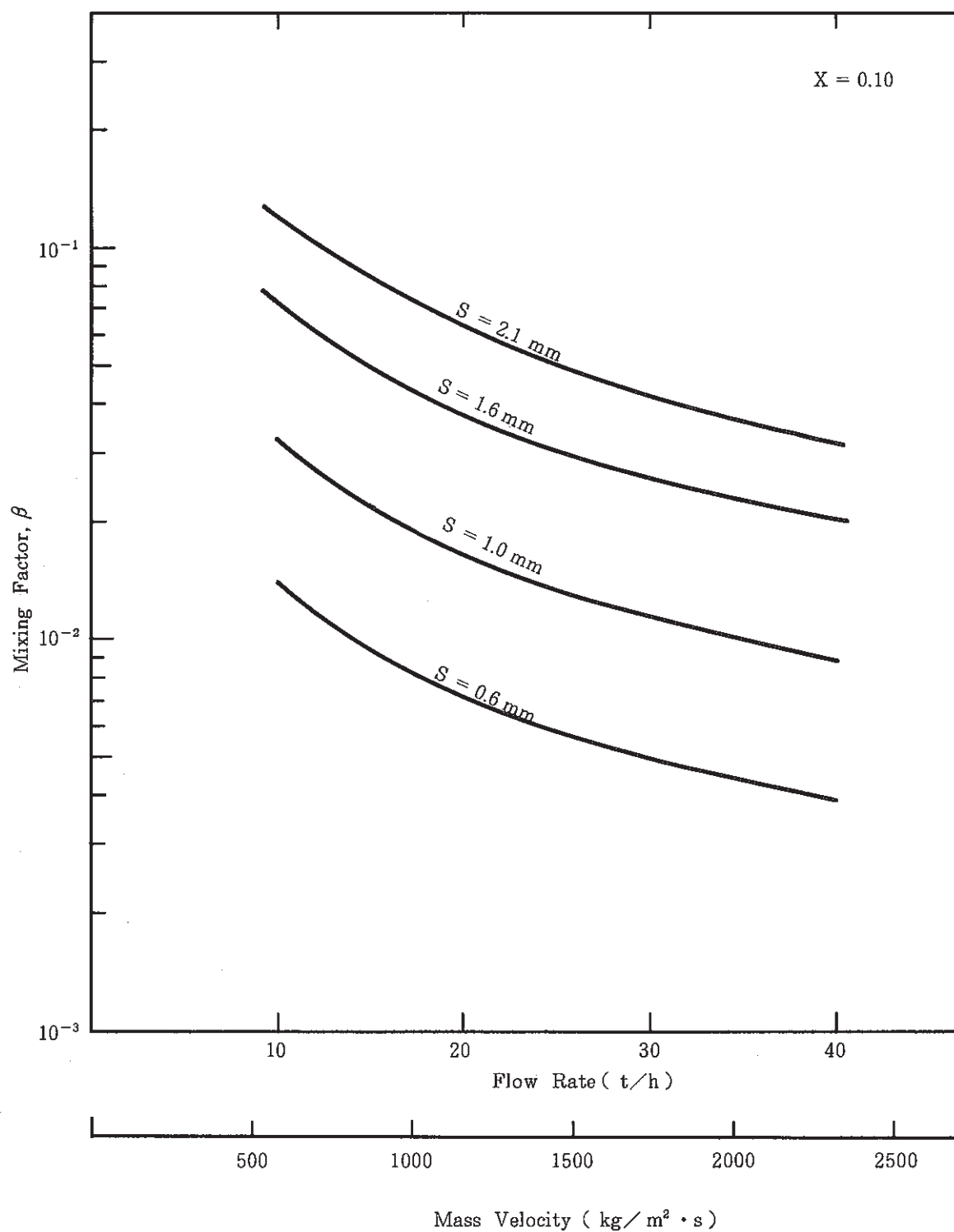


Fig.3 - 6 Effect of Flow Rate on Mixing Factor
(HTL model)

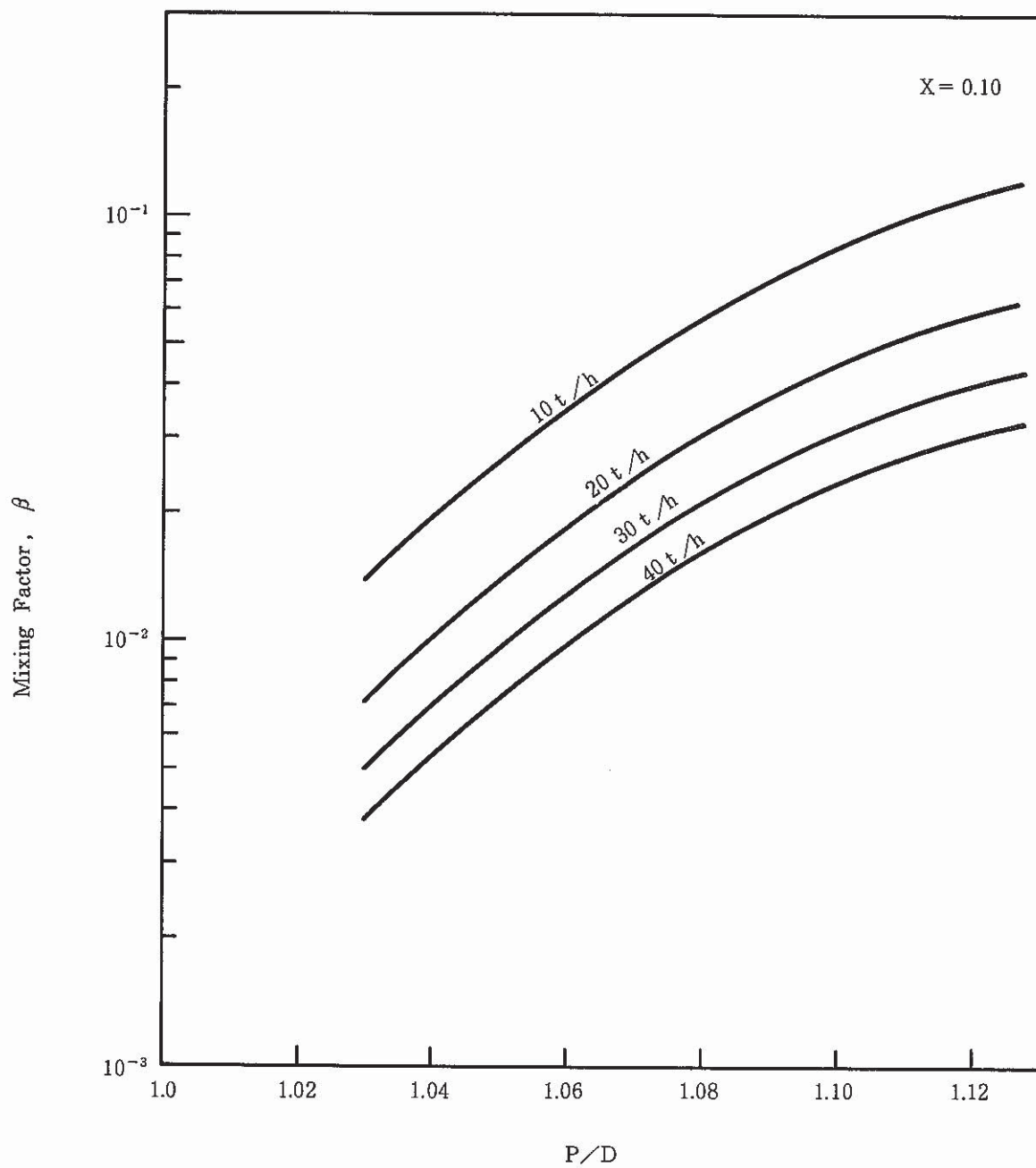


Fig.3 - 7 Effect of Pitch / Rod Diameter on Mixing Factor

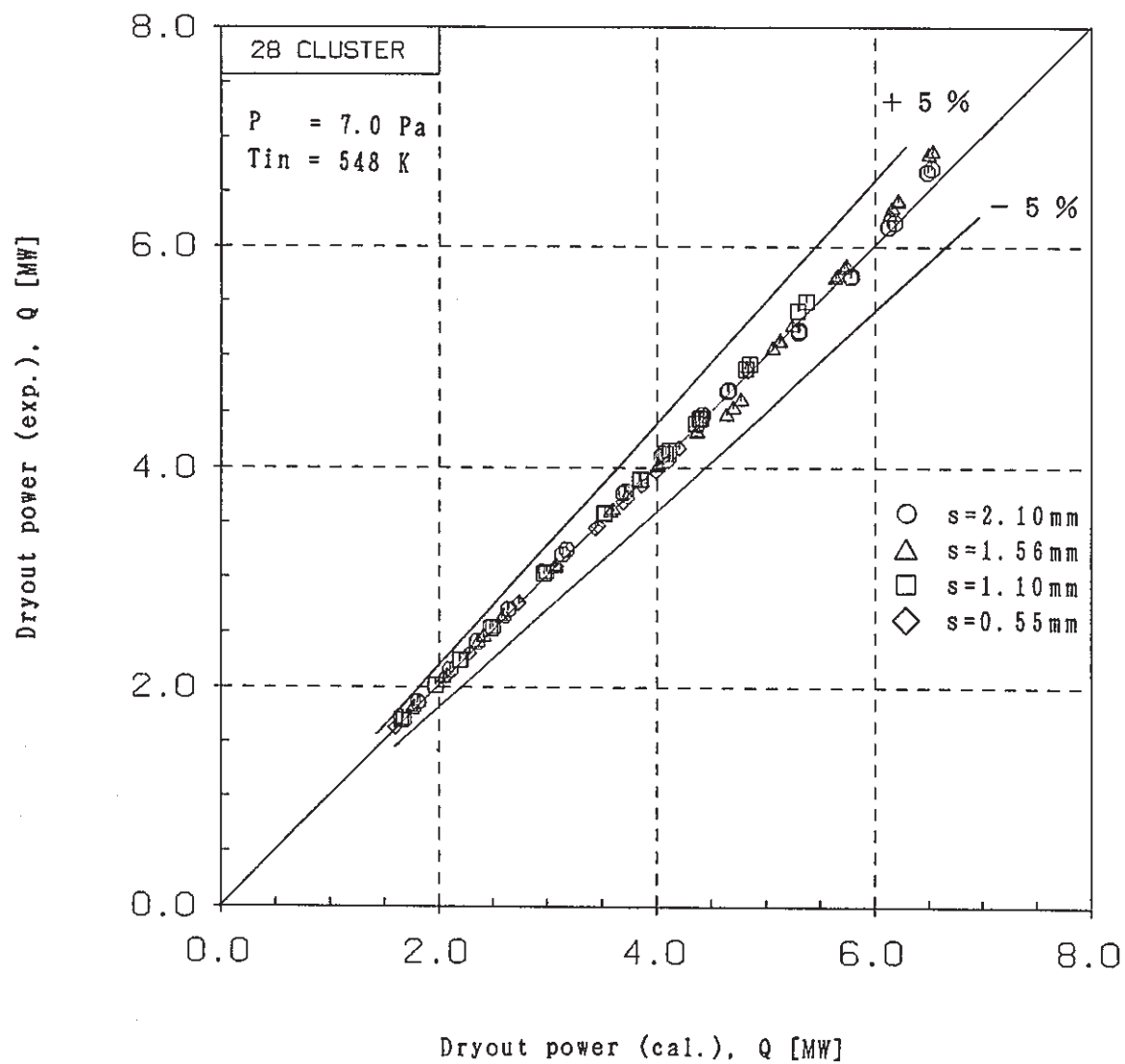
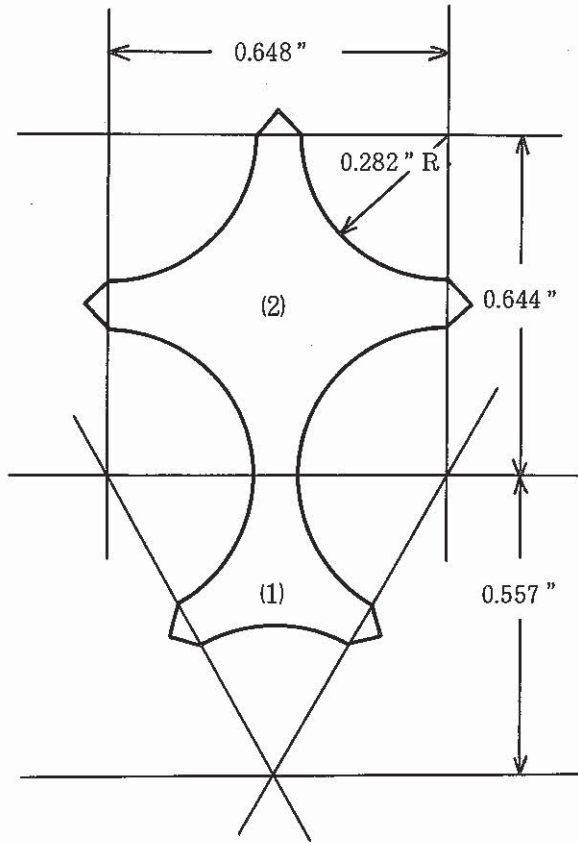
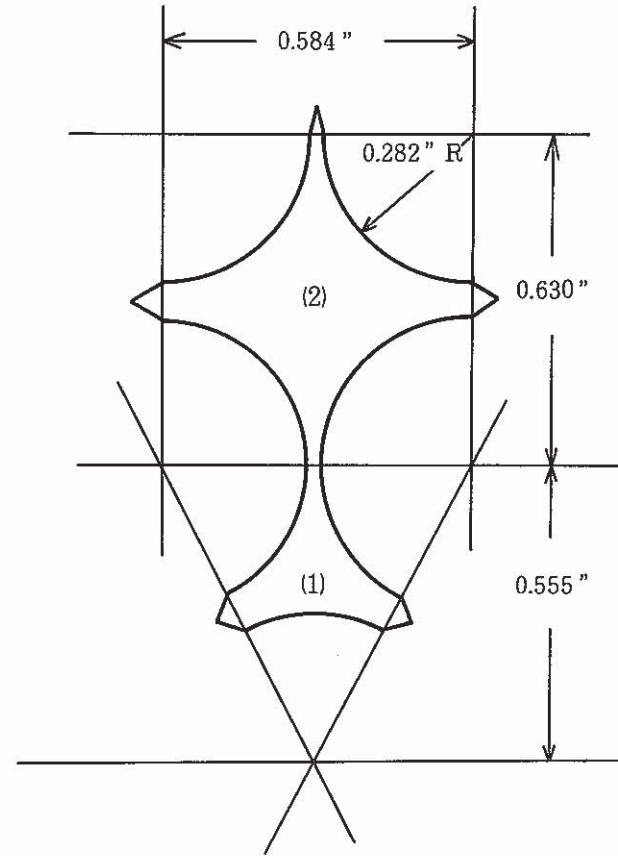


Fig. 3-8 Comparison between measurements and calculations of dryout power



② Channel Dimensions, 0.084" Gap



① Channel Dimensions, 0.020" Gap

Fig.3 - 9 Configuration of Flow Area (PNL experimets)

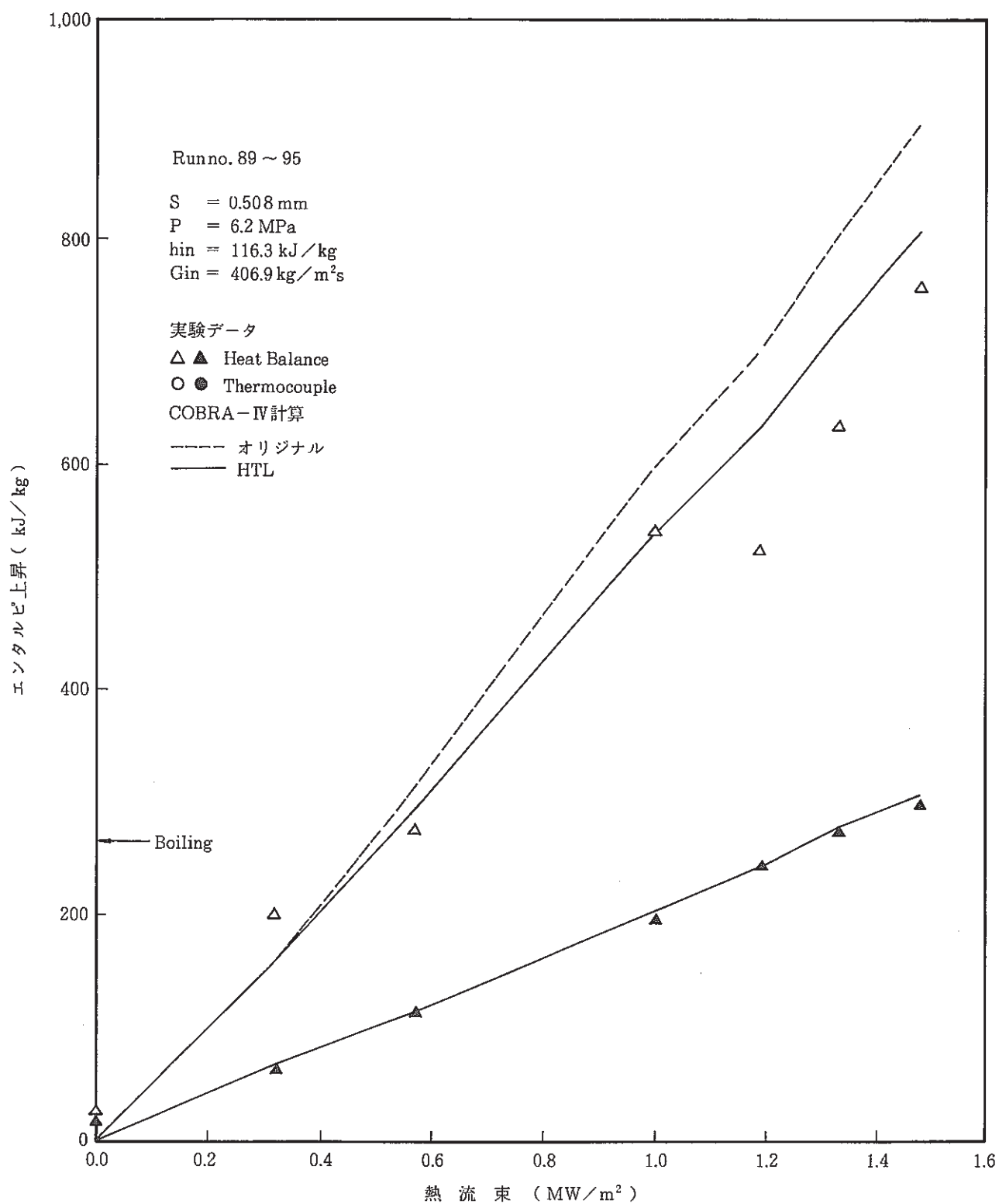


Fig. 3-10 サブチャンネルのエンタルピー上昇 (PNL 平行チャンネル)

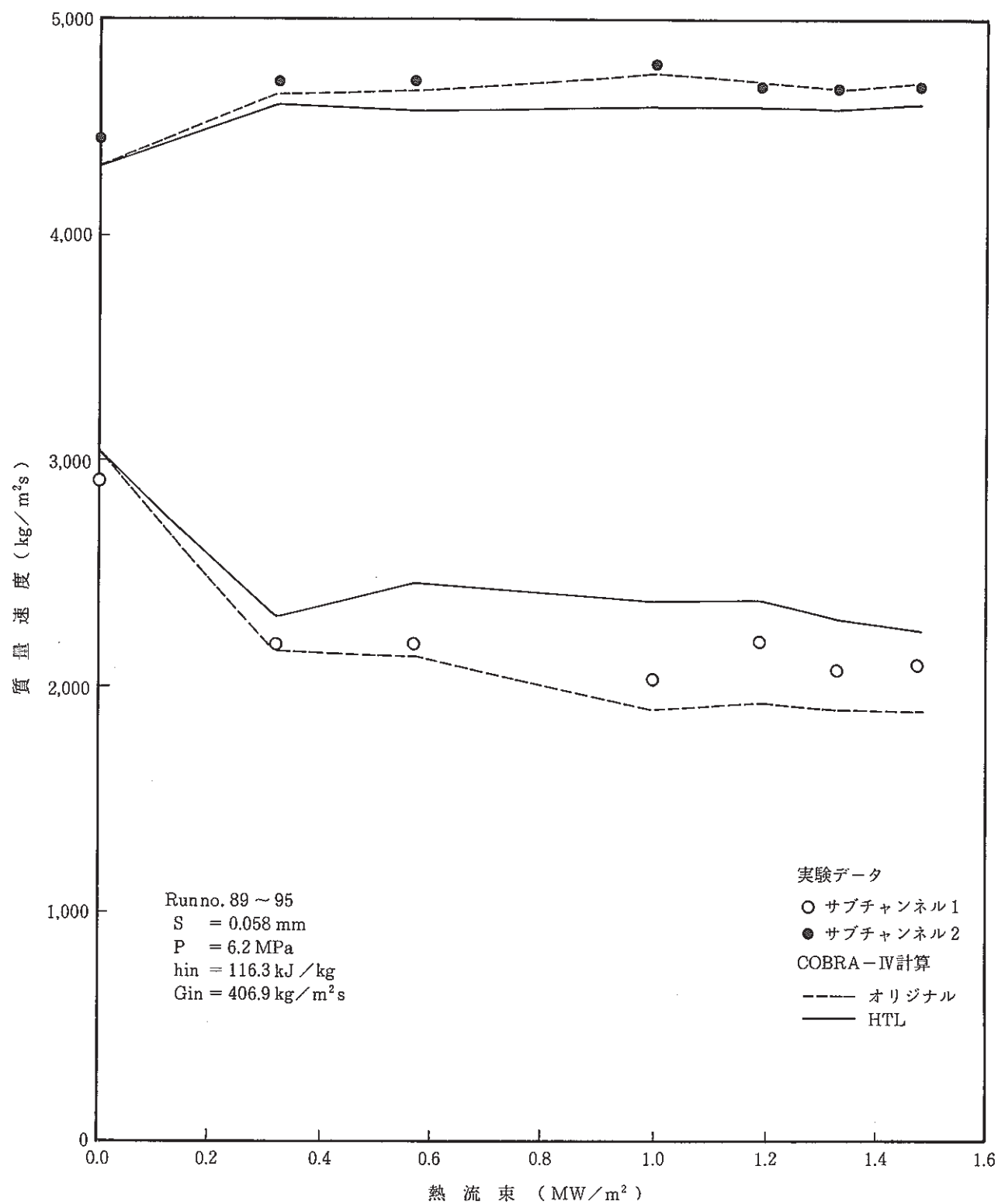


Fig. 3-11 サブチャンネルの出口質量速度 (PNL 平行チャンネル)

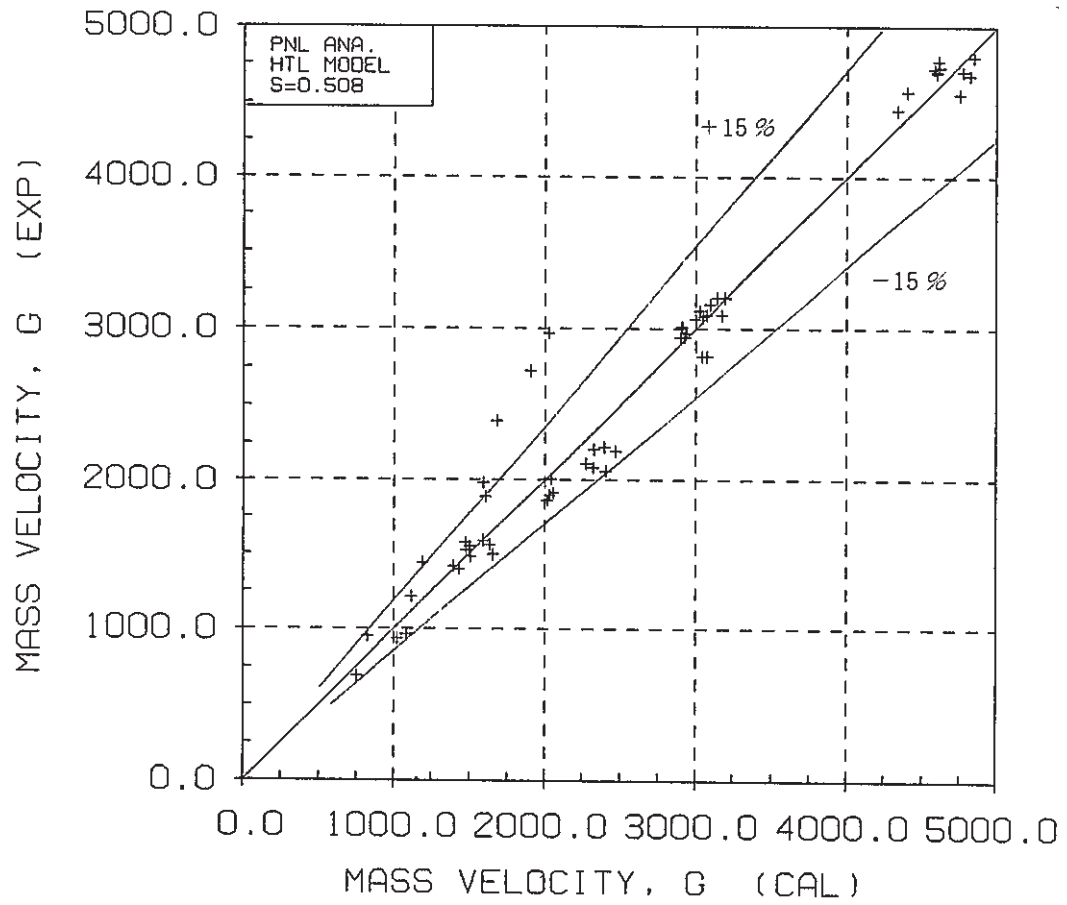


Fig. 3-12 Scatgram of Exit Mass Velocity

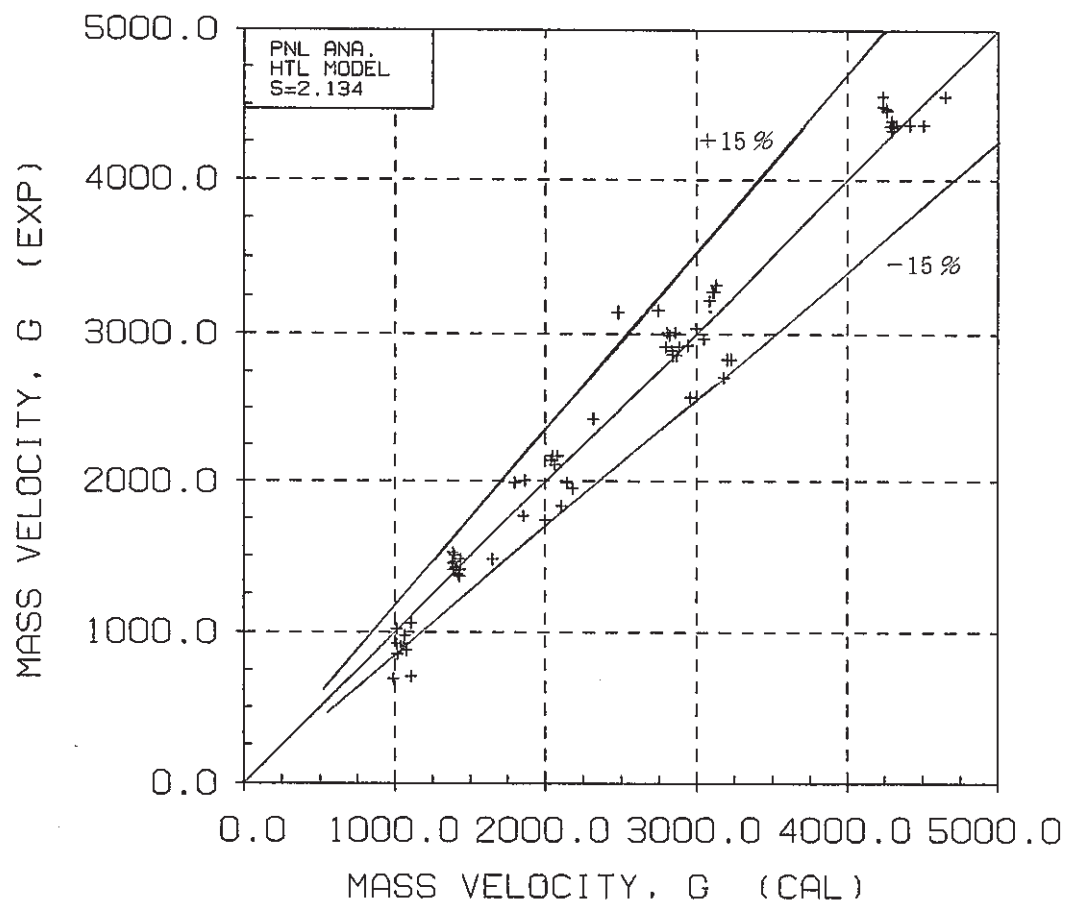


Fig. 3-13 Scatgram of Exit Mass Velocity

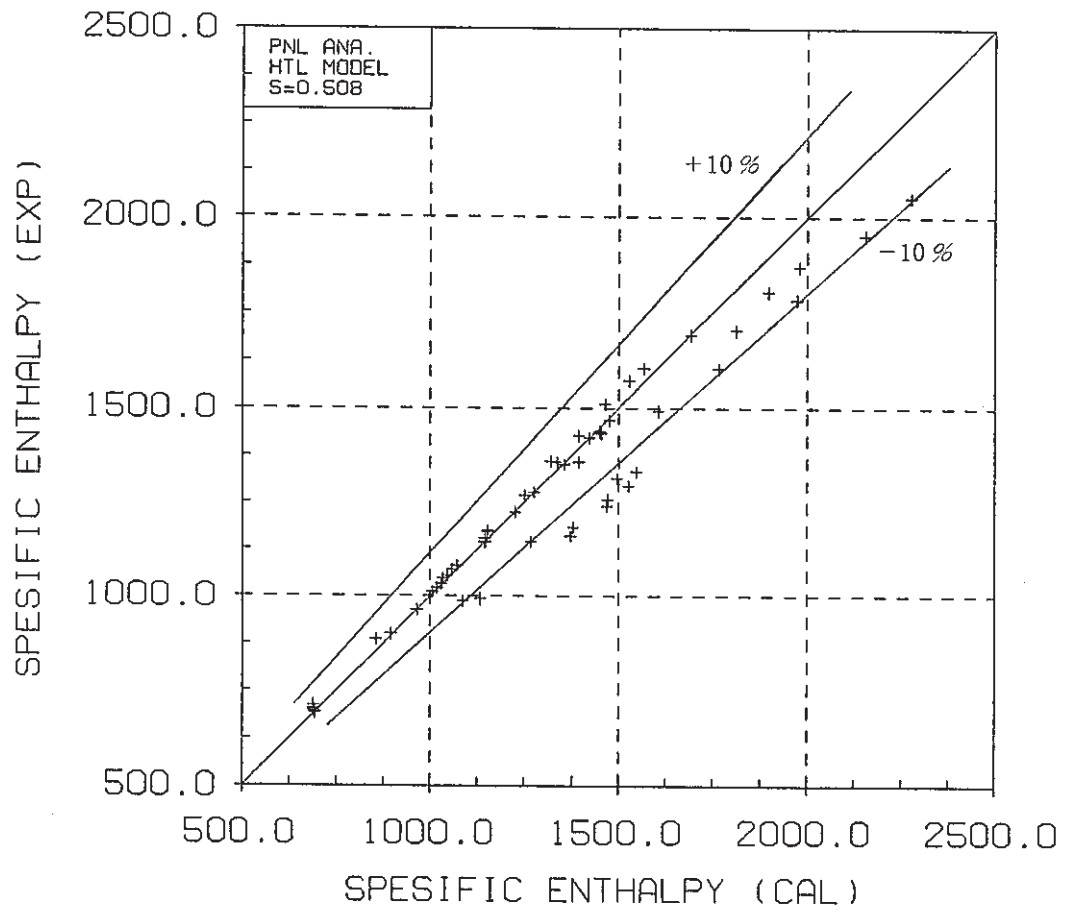


Fig. 3-14 Scatgram of Exit Enthalpy

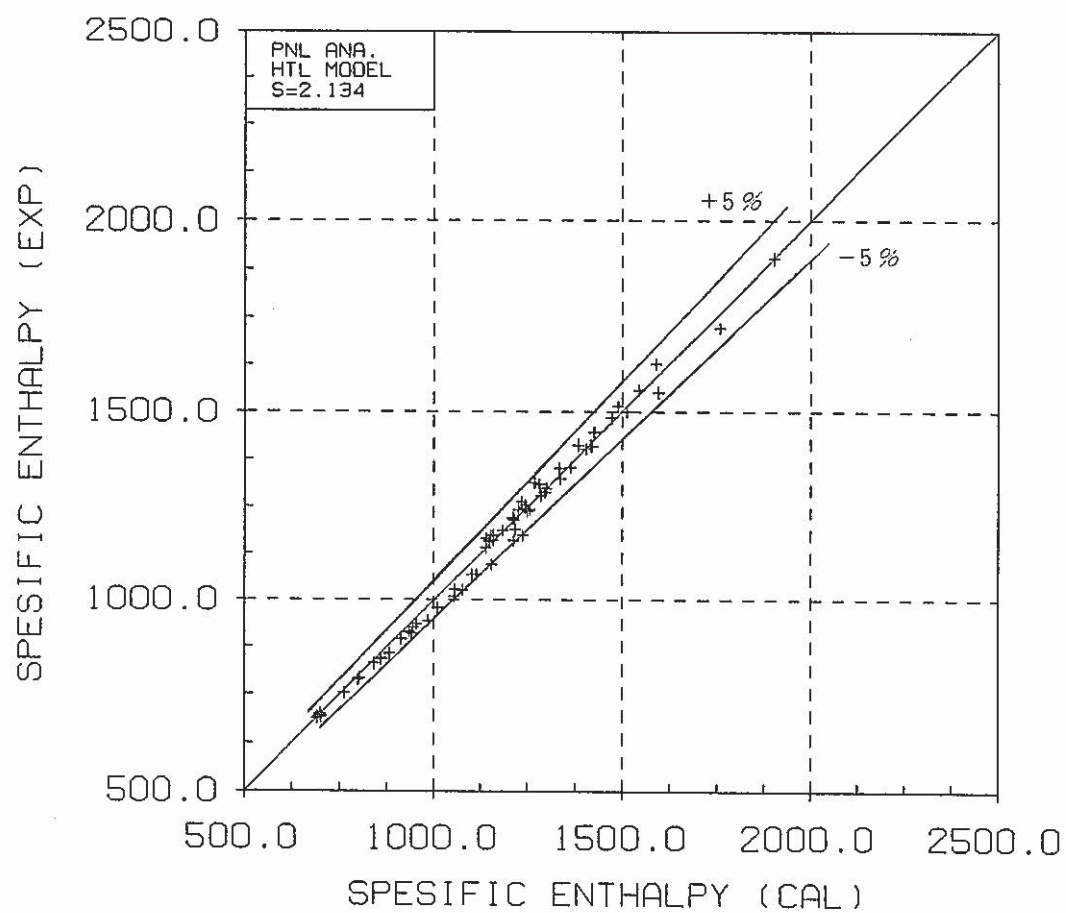


Fig. 3-15 Scattergram of Exit Enthalpy

A p p e n d i x A

燃料棒間ギャップ測定データ

A p p e n d i x A

燃料棒間ギャップ測定データ

ドライアウト試験前後に行なったロッド間ギャップの測定データおよび評価結果を以下に示す。

A - 1 ロッド間ギャップ測定データ

Fig. A-1-1 外層ギャップ測定データ (リング型スペーサ)

Fig. A-1-2 中間層ギャップ測定データ (リング型スペーサ)

Fig. A-1-3 内層ギャップ測定データ (リング型スペーサ)

Fig. A-2-1 外層ギャップ測定データ (板状スペーサ; 最小ギャップ = 2.10mm)

Fig. A-2-2 中間層ギャップ測定データ (板状スペーサ; 最小ギャップ = 2.10mm)

Fig. A-2-3 内層ギャップ測定データ (板状スペーサ; 最小ギャップ = 2.10mm)

Fig. A-3-1 外層ギャップ測定データ (板状スペーサ; 最小ギャップ = 1.56mm)

Fig. A-3-2 中間層ギャップ測定データ (板状スペーサ; 最小ギャップ = 1.56mm)

Fig. A-3-3 内層ギャップ測定データ (板状スペーサ; 最小ギャップ = 1.56mm)

Fig. A-4-1 外層ギャップ測定データ (板状スペーサ; 最小ギャップ = 1.10mm)

Fig. A-4-2 中間層ギャップ測定データ (板状スペーサ; 最小ギャップ = 1.10mm)

Fig. A-4-3 内層ギャップ測定データ (板状スペーサ; 最小ギャップ = 1.10mm)

Fig. A-5-1 外層ギャップ測定データ (板状スペーサ; 最小ギャップ = 0.55mm)

Fig. A-5-2 中間層ギャップ測定データ (板状スペーサ; 最小ギャップ = 0.55mm)

Fig. A-5-3 内層ギャップ測定データ (板状スペーサ; 最小ギャップ = 0.55mm)

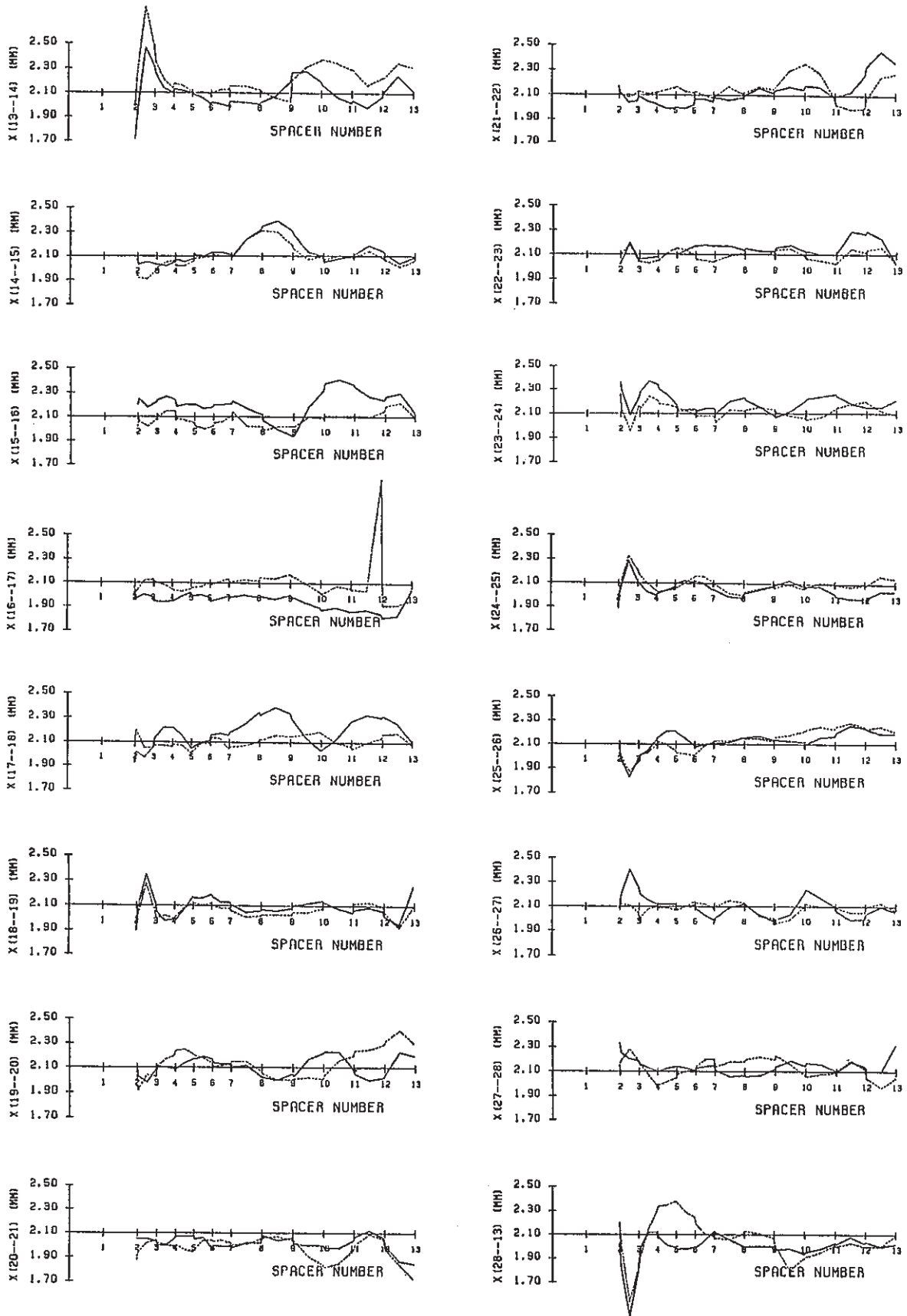


Fig. A-1-1 Measurement of rod gap (Ring Type spacer; Outer layer)

— Before exp.

---- After exp.

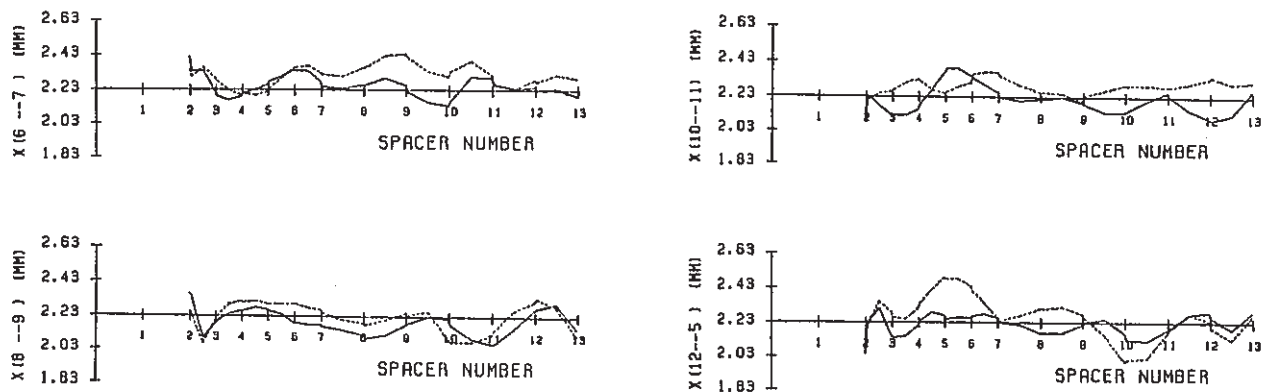


Fig. A-1-2 Measurement of rod gap (Ring Type spacer; Middle layer)
 — Before exp. - - - - - After exp.

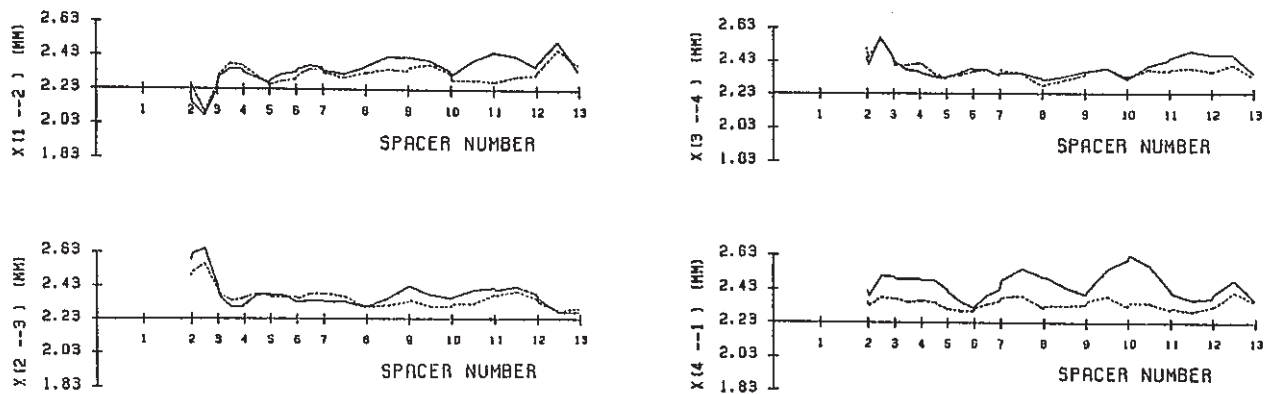


Fig. A-1-3 Measurement of rod gap (Ring Type spacer; Inner layer)
 — Before exp. - - - - - After exp.

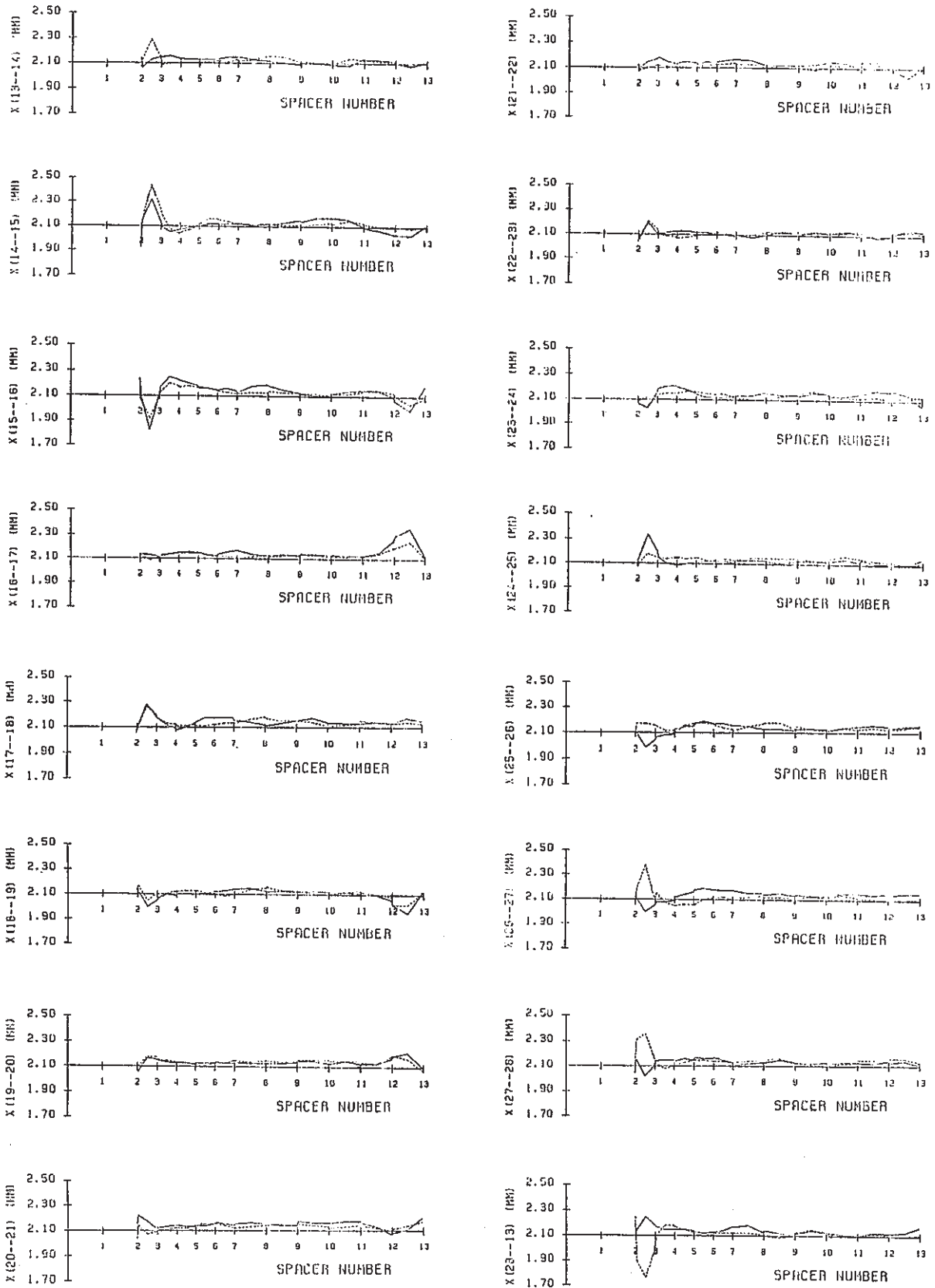


Fig. A-2-1 Measurement of rod gap (Minimum gap = 2.10mm; Outer layer)

——Before exp.

-----After exp.

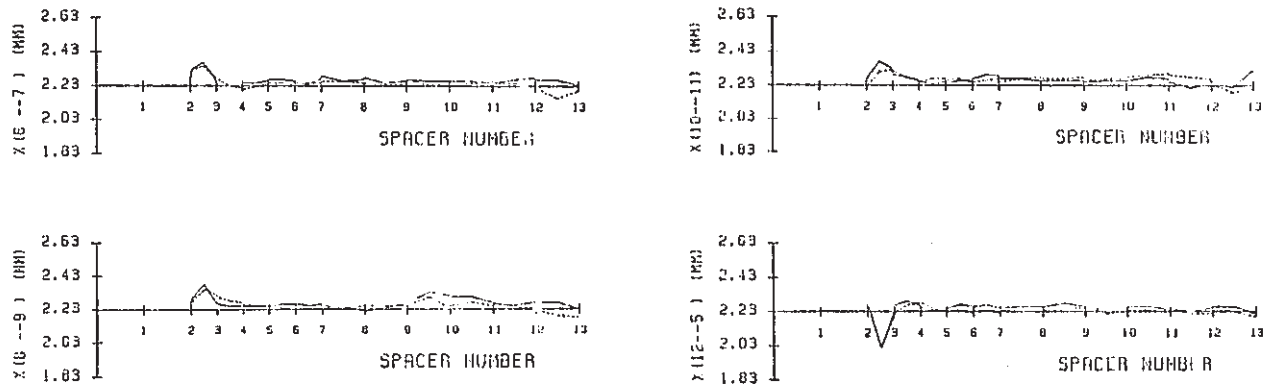


Fig. A-2-2 Measurement of rod gap (Minimum gap = 2.10mm; Middle layer)
 — Before exp. ----- After exp.

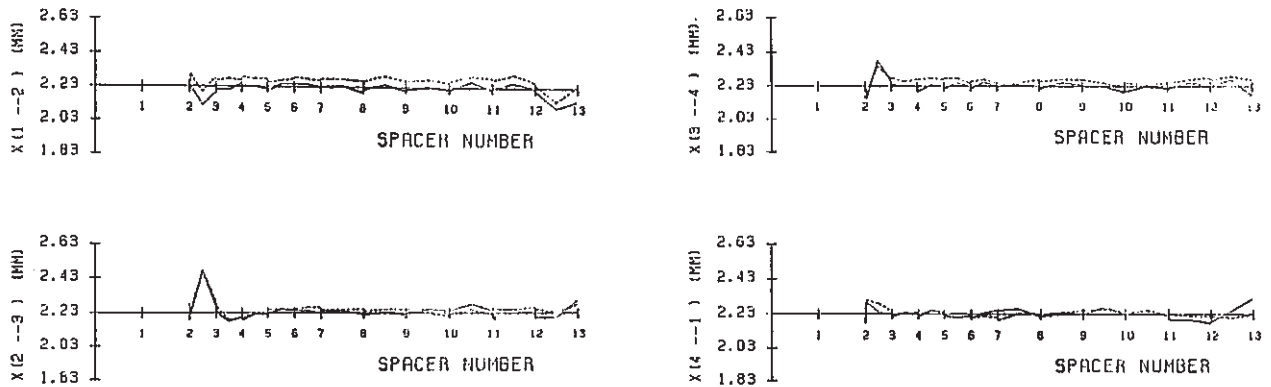


Fig. A-2-3 Measurement of rod gap (Minimum gap = 2.10mm; Inner layer)
 — Before exp. ----- After exp.

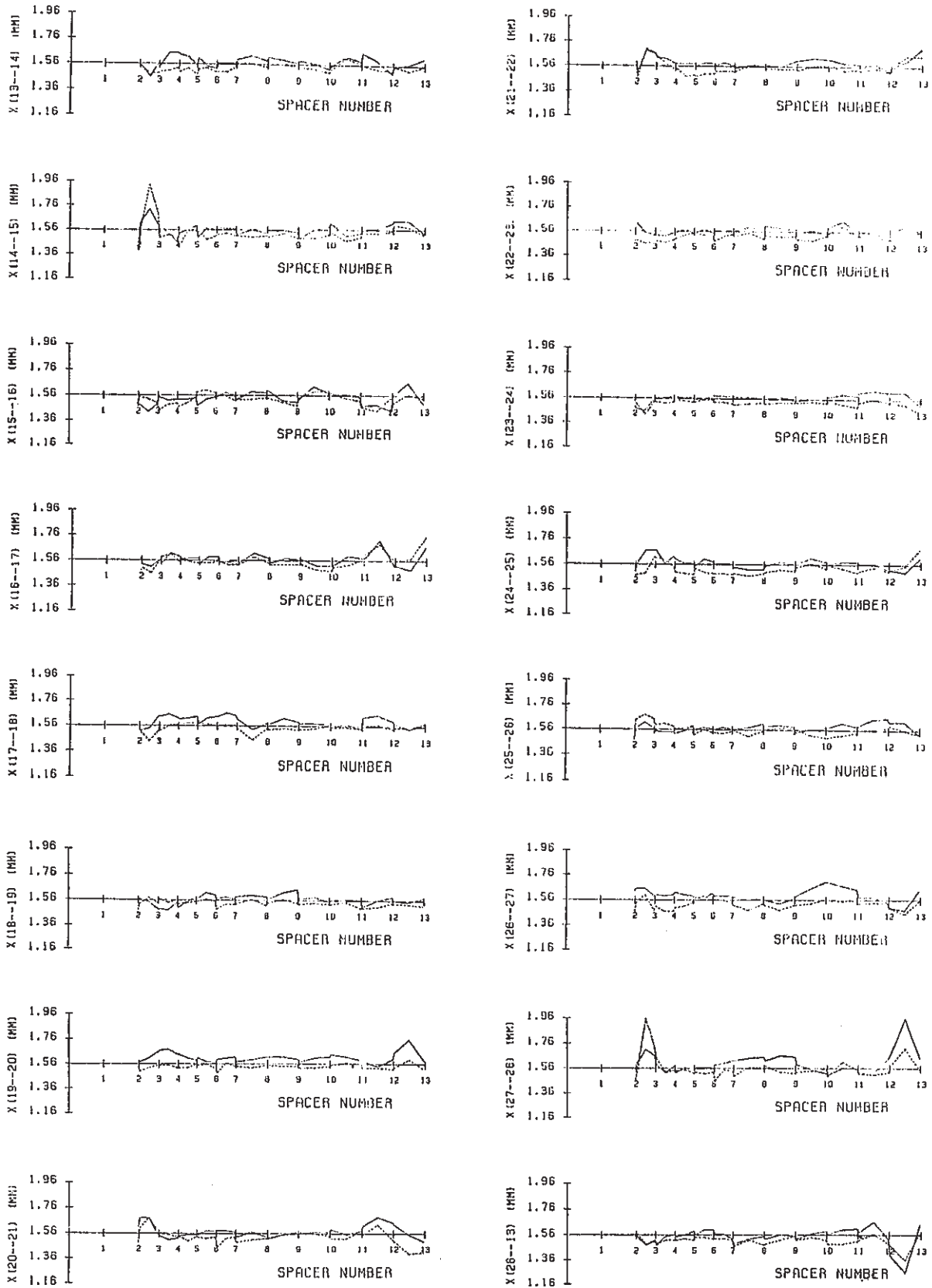


Fig. A-3-1 Measurement of rod gap (Minimum gap = 1.56mm; Outer layer)

—— Before exp.

----- After exp.

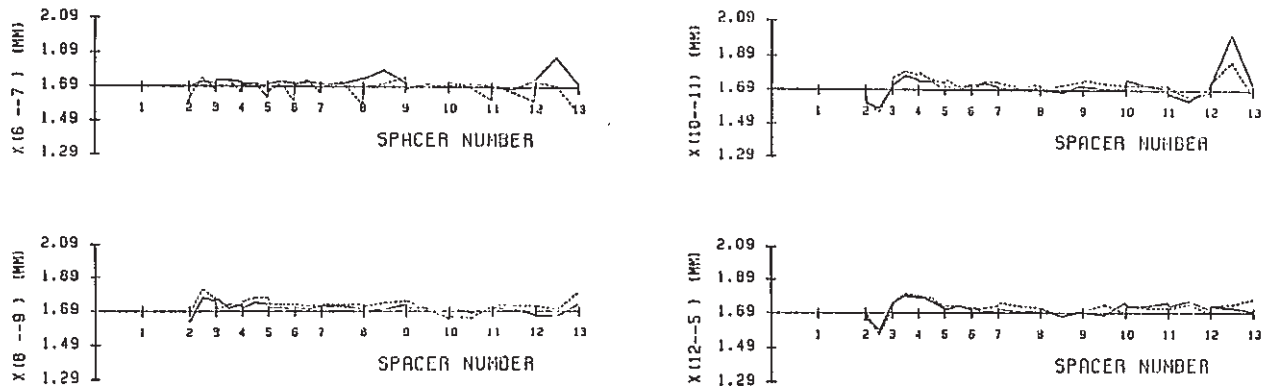


Fig. A-3-2 Measurement of rod gap (Minimum gap = 1.56mm; Middle layer)

—— Before exp.

----- After exp.

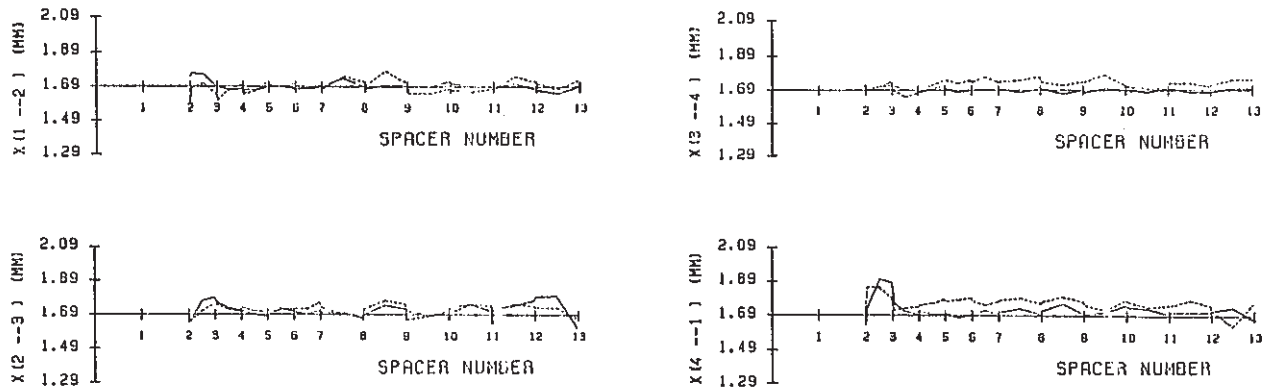


Fig. A-3-3 Measurement of rod gap (Minimum gap = 1.56mm; Inner layer)

—— Before exp.

----- After exp.

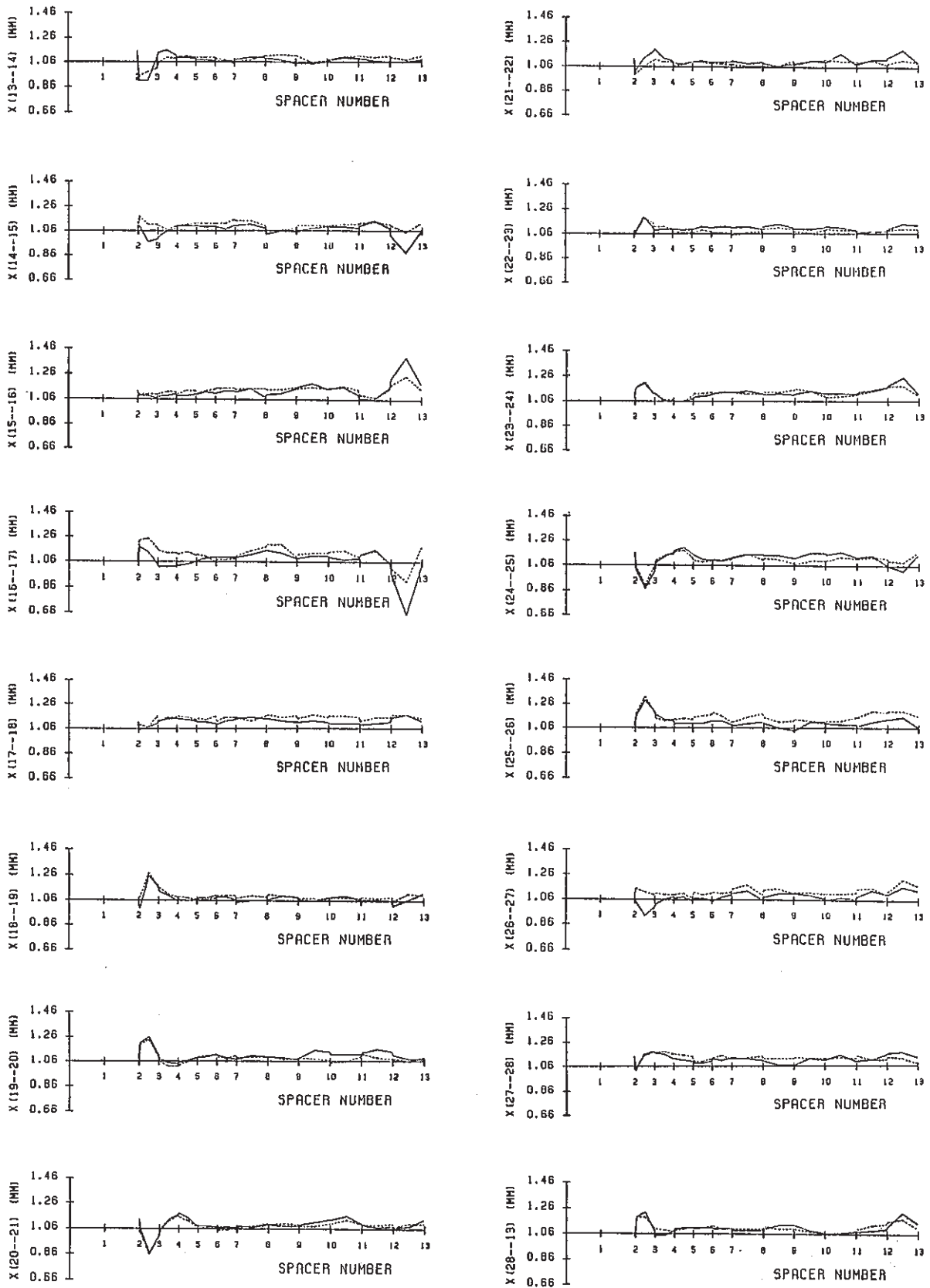


Fig. A-4-1 Measurement of rod gap (Minimum gap = 1.10mm; Outer layer)

— Before exp.

---- After exp.

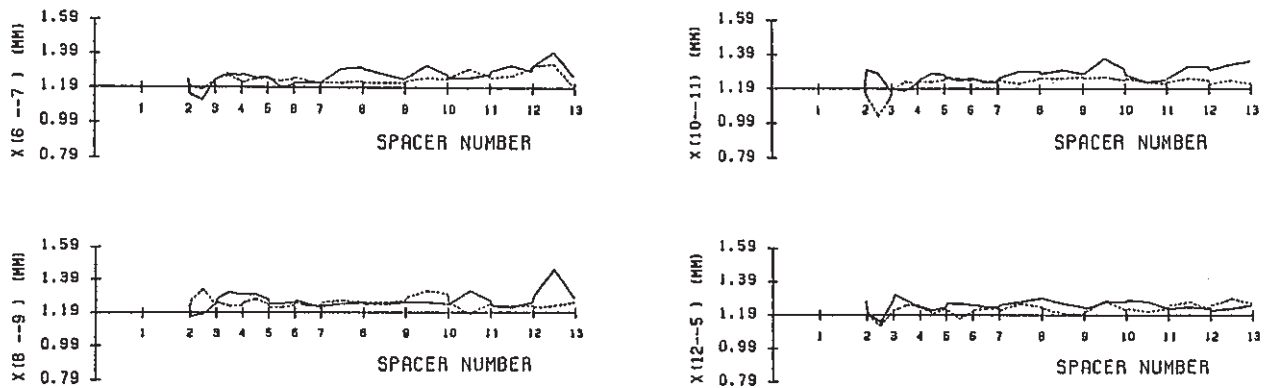


Fig. A-4-2 Measurement of rod gap (Minimum gap = 1.10mm; Middle layer)

—— Before exp.

----- After exp.

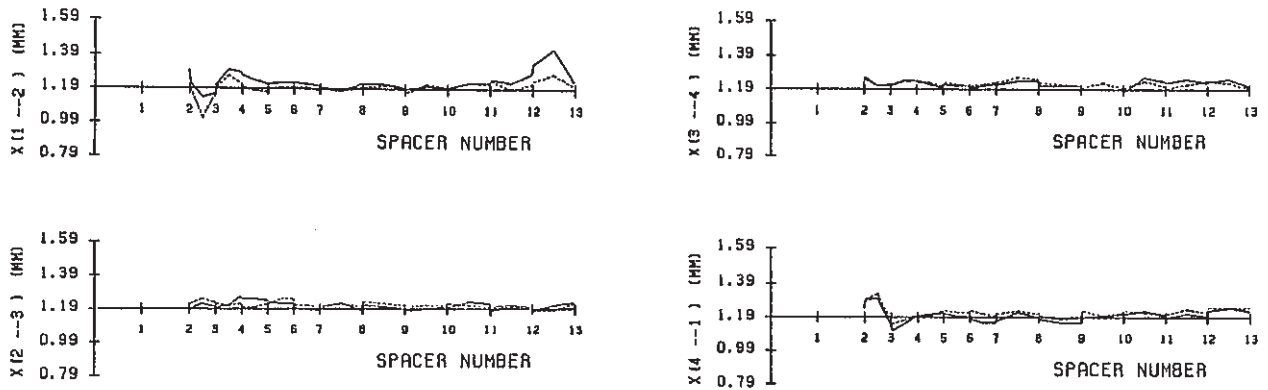


Fig. A-4-3 Measurement of rod gap (Minimum gap = 1.10mm; Inner layer)

—— Before exp.

----- After exp.

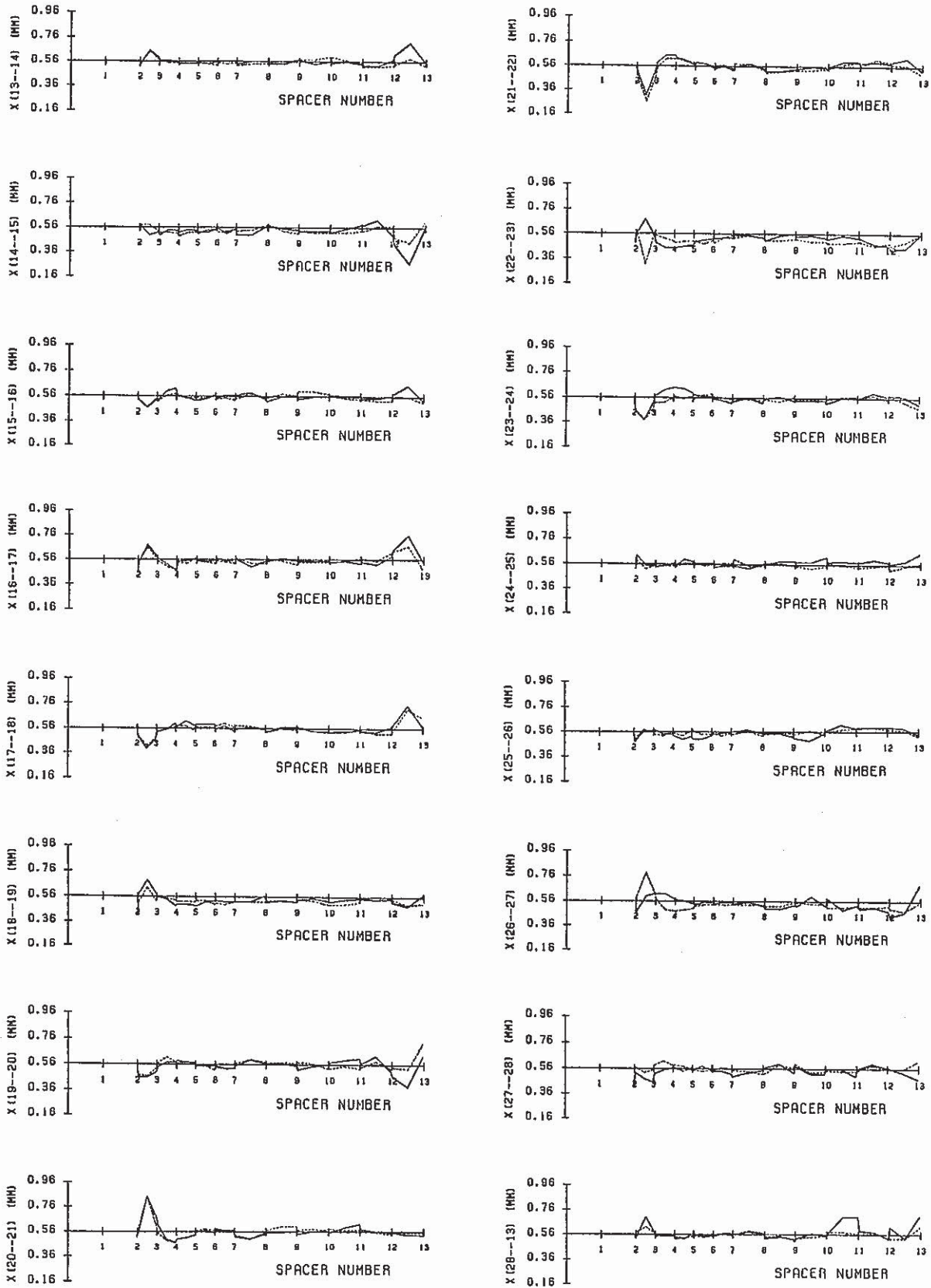


Fig. A-5-1 Measurement of rod gap (Minimum gap = 0.55mm; Outer layer)

—— Before exp.

----- After exp.

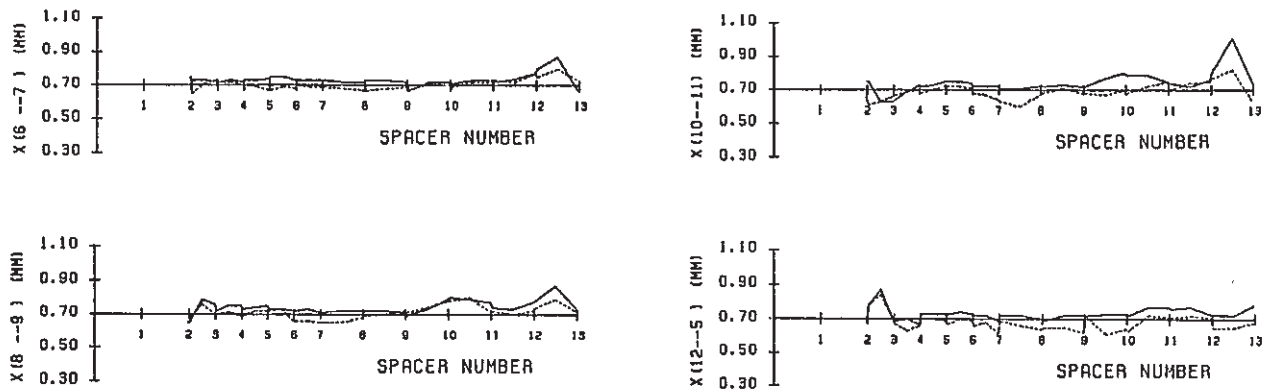


Fig. A-5-2 Measurement of rod gap (Minimum gap = 0.55mm; Middle layer)

— Before exp.

---- After exp.

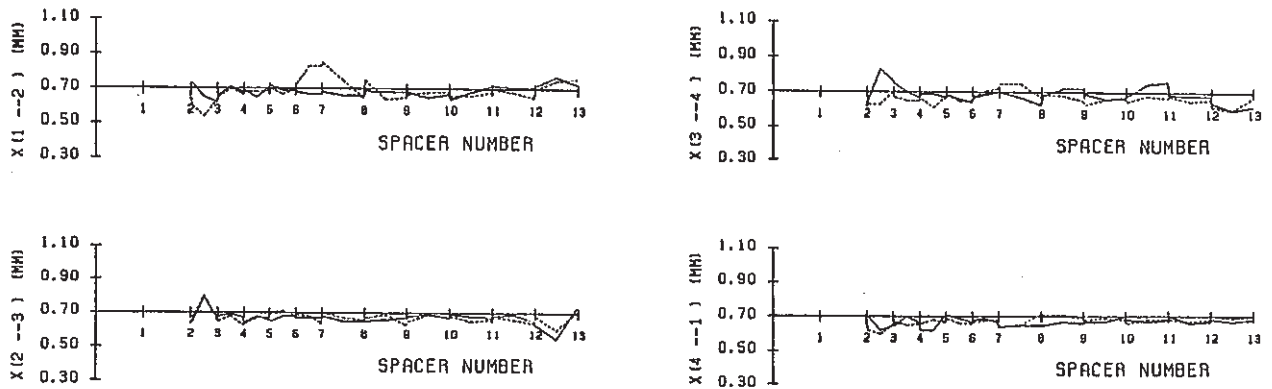


Fig. A-5-3 Measurement of rod gap (Minimum gap = 0.55mm; Inner layer)

— Before exp.

---- After exp.

A-2 ロッド間ギャップ精度評価

Fig.A-6-1 中間層ギャップ；ヒストグラム（リング型スペーサ）

Fig.A-6-2 中間層ギャップ；ヒストグラム（板状スペーサ；最小ギャップ＝2.10mm）

Fig.A-6-3 中間層ギャップ；ヒストグラム（板状スペーサ；最小ギャップ＝1.56mm）

Fig.A-6-4 中間層ギャップ；ヒストグラム（板状スペーサ；最小ギャップ＝1.10mm）

Fig.A-6-5 中間層ギャップ；ヒストグラム（板状スペーサ；最小ギャップ＝0.55mm）

Fig.A-7-1 内層ギャップ；ヒストグラム（リング型スペーサ）

Fig.A-7-2 内層ギャップ；ヒストグラム（板状スペーサ；最小ギャップ＝2.10mm）

Fig.A-7-3 内層ギャップ；ヒストグラム（板状スペーサ；最小ギャップ＝1.56mm）

Fig.A-7-4 内層ギャップ；ヒストグラム（板状スペーサ；最小ギャップ＝1.10mm）

Fig.A-7-5 内層ギャップ；ヒストグラム（板状スペーサ；最小ギャップ＝0.55mm）

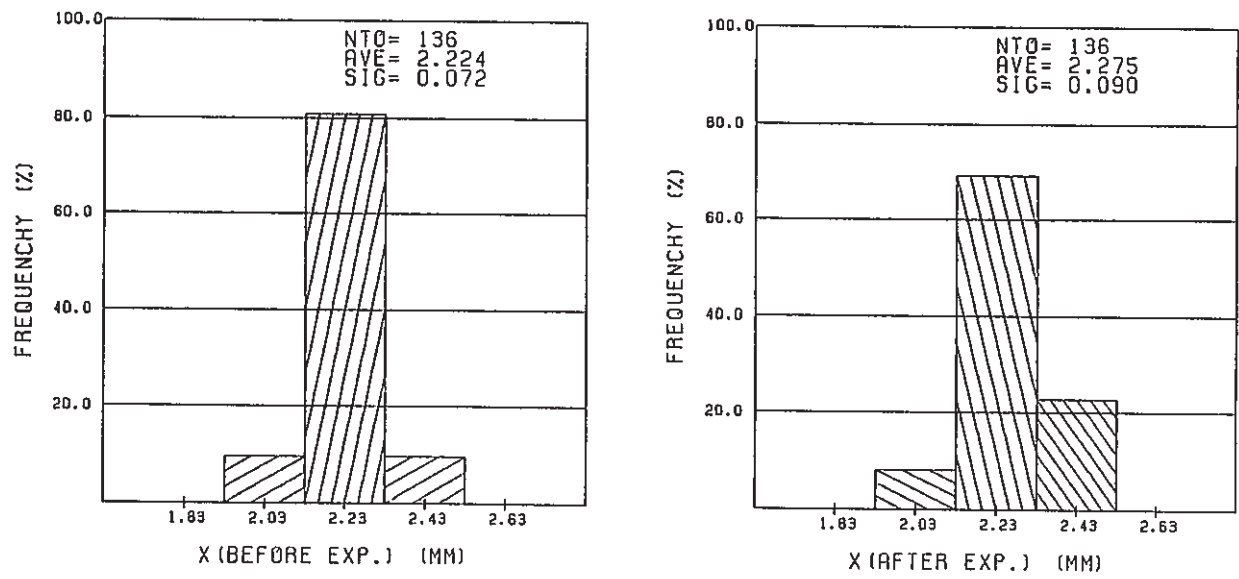


Fig. A-6-1 Histogram of rod gap (Ring Type spacer; Middle layer)

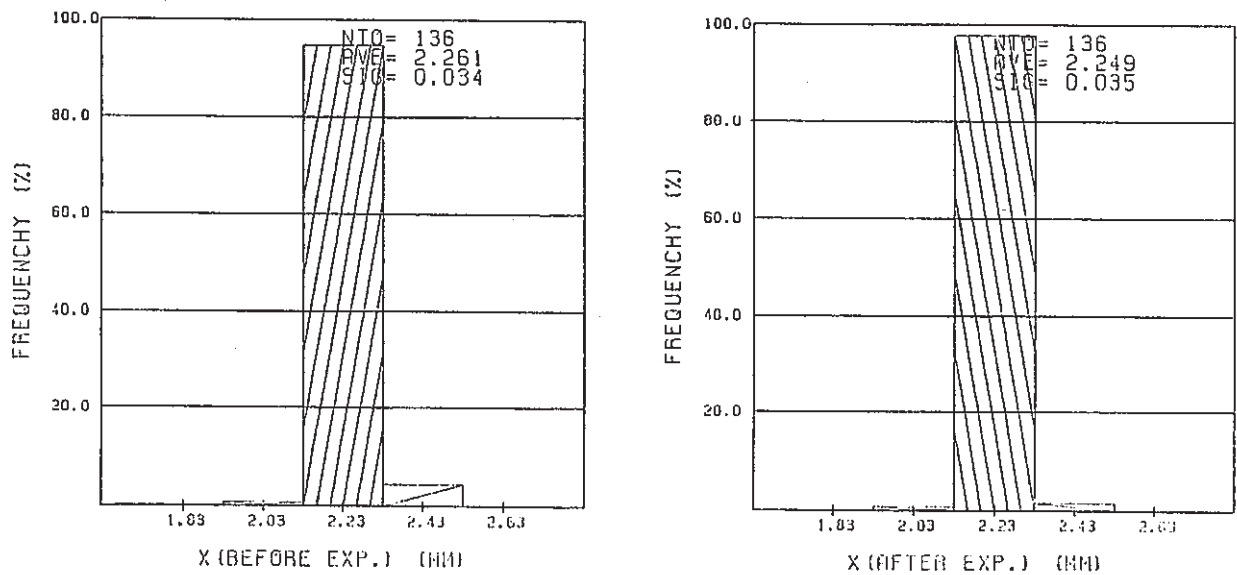


Fig. A-6-2 Histogram of rod gap (Minimum gap = 2.10mm; Middle layer)

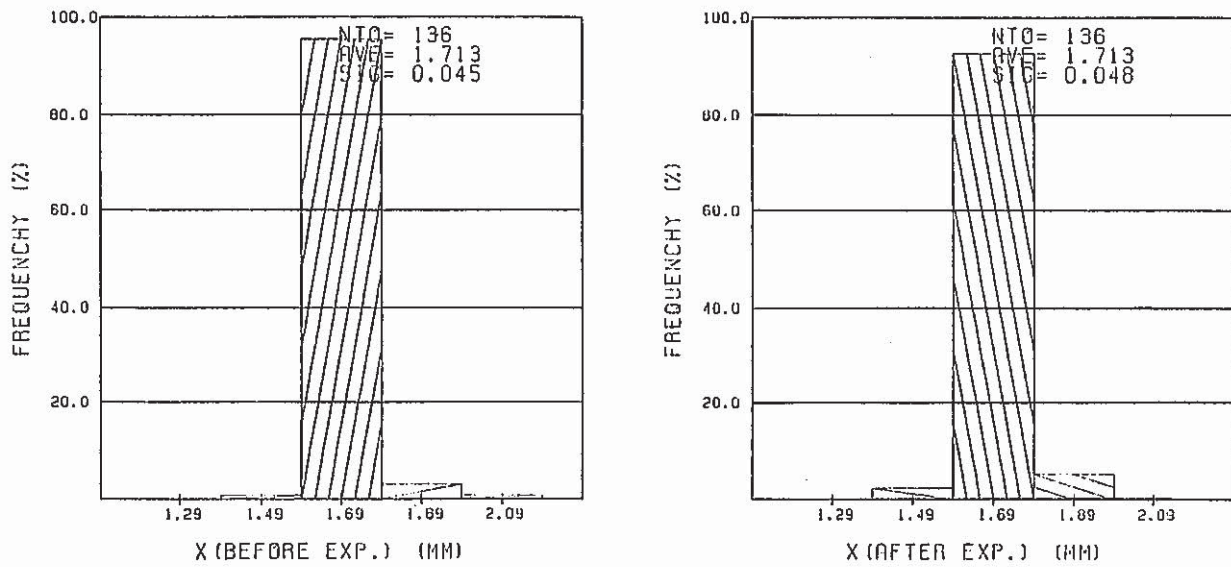


Fig. A-6-3 Histogram of rod gap (Minimum gap = 1.56mm; Middle layer)

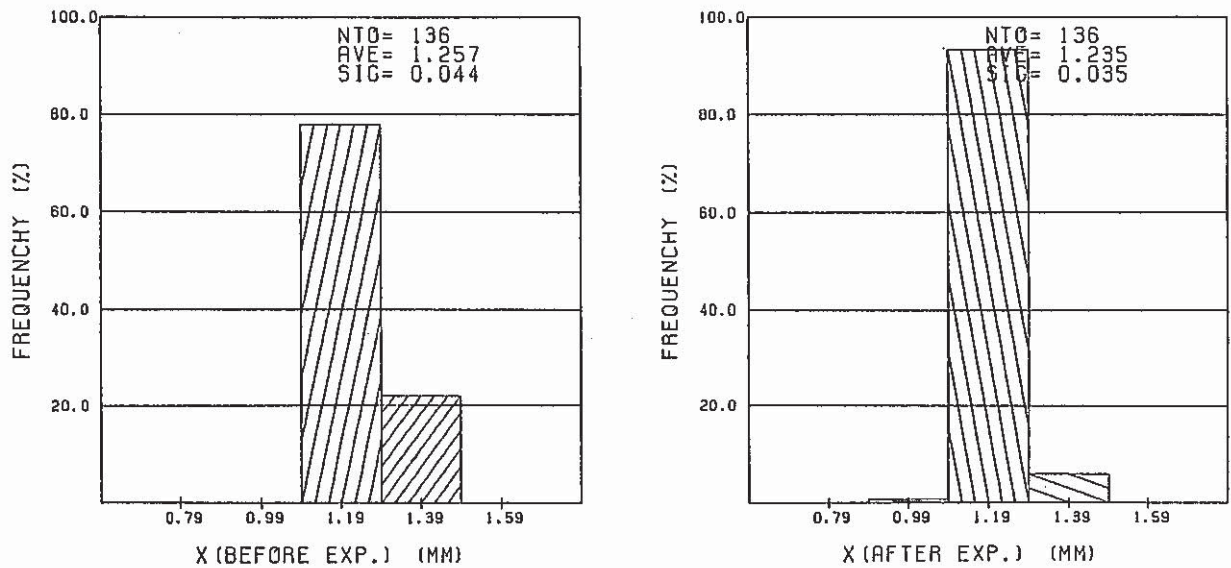


Fig. A-6-4 Histogram of rod gap (Minimum gap = 1.10mm; Middle layer)

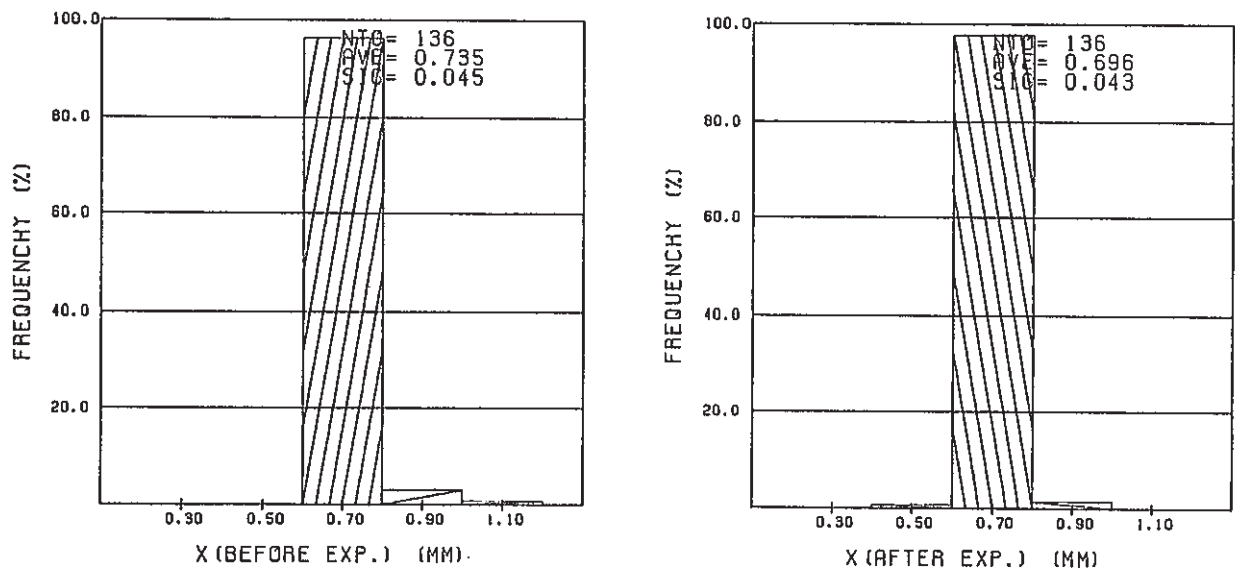


Fig. A-6-5 Histogram of rod gap (Minimum gap = 0.55mm; Middle layer)

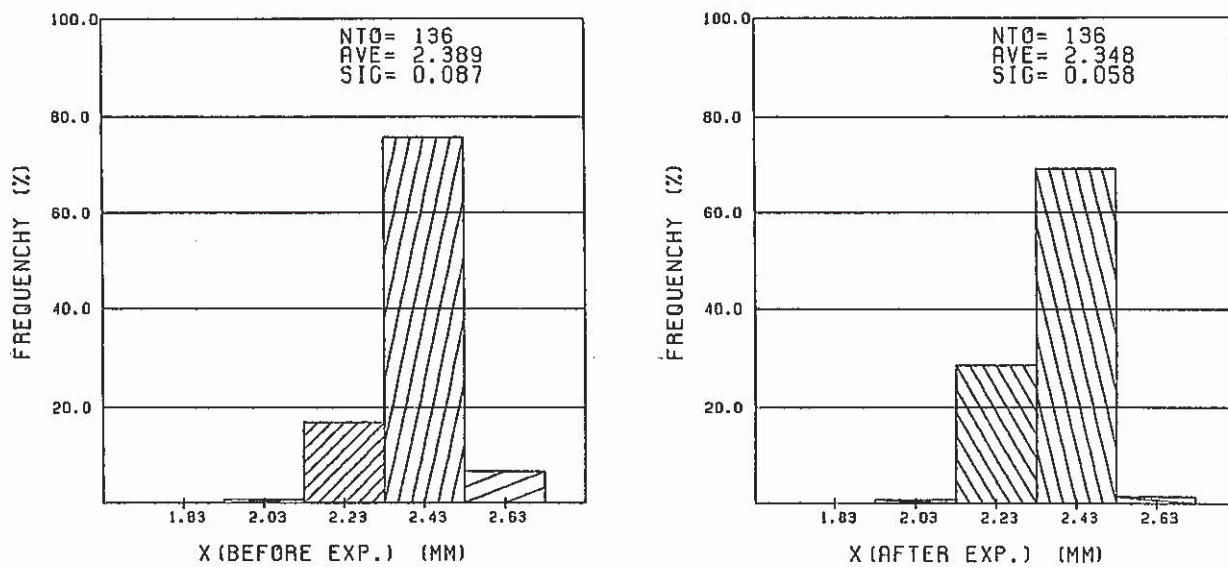


Fig. A-7-1 Histogram of rod gap (Ring Type spacer; Inner layer)

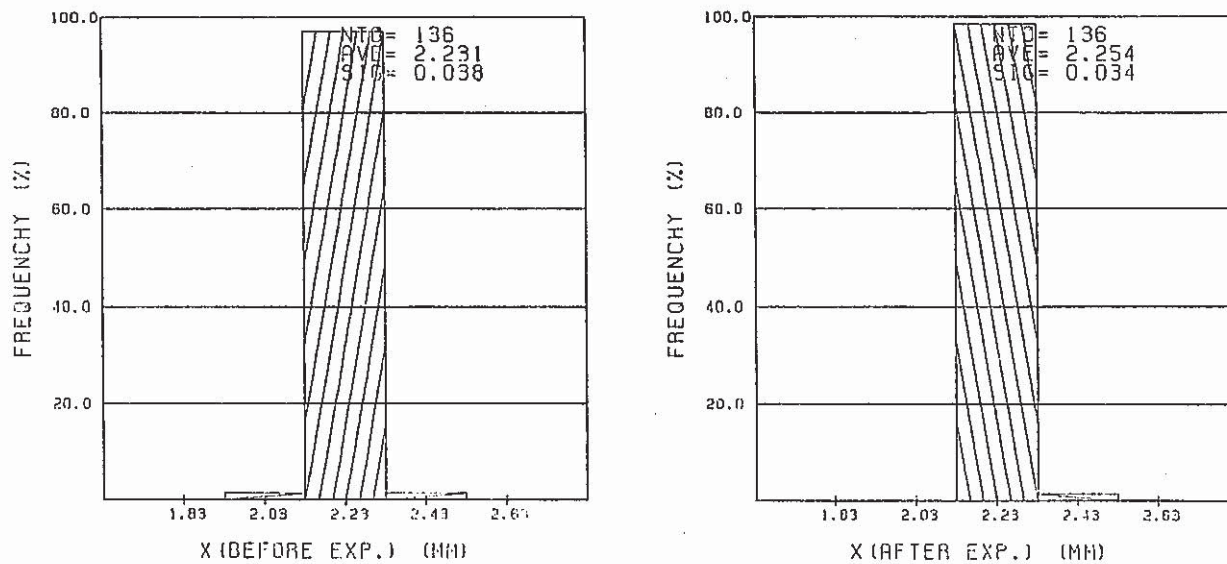


Fig. A-7-2 Histogram of rod gap (Minimum gap = 2.10mm; Inner layer)

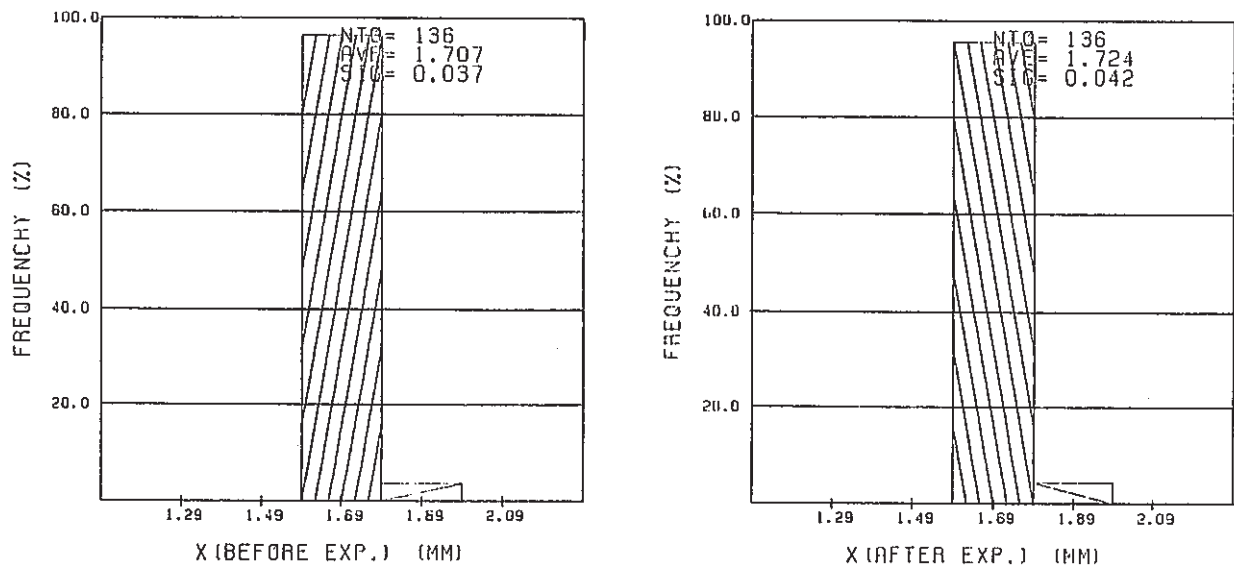


Fig. A-7-3 Histogram of rod gap (Minimum gap = 1.56mm; Inner layer)

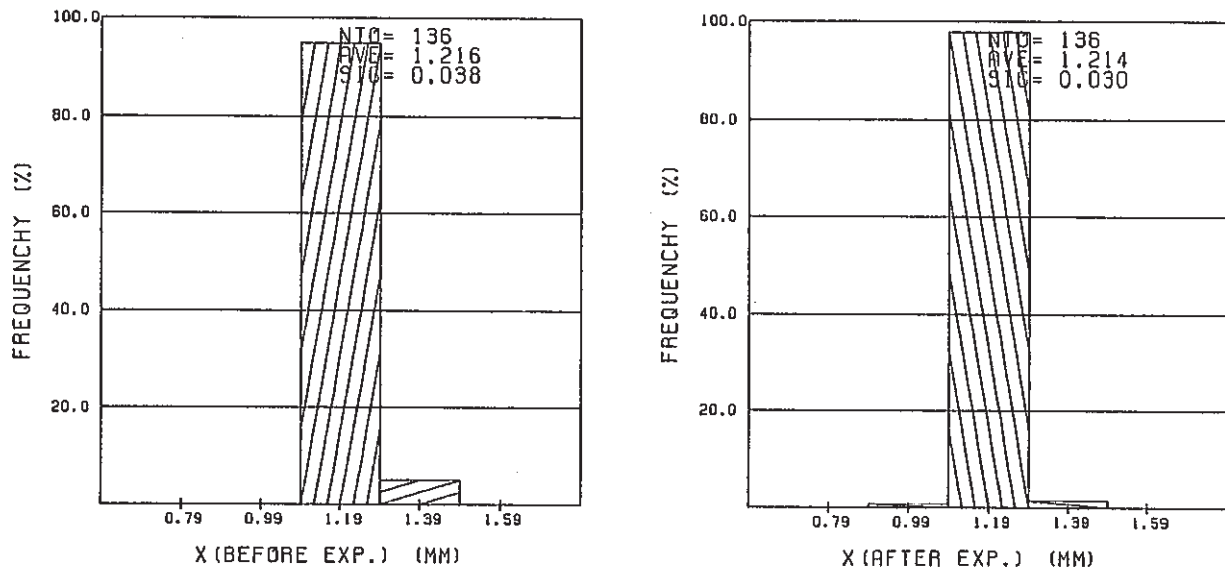


Fig. A-7-4 Histogram of rod gap (Minimum gap = 1.10mm; Inner layer)

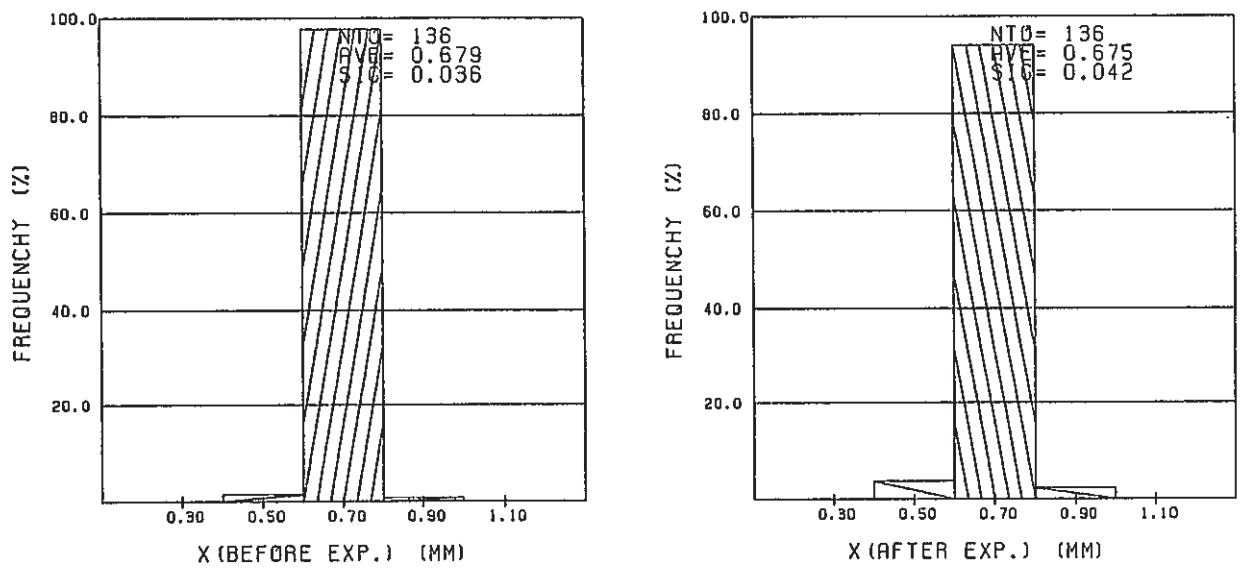


Fig. A-7-5 Histogram of rod gap (Minimum gap = 0.55mm; Inner layer)

A p p e n d i x B

試験データ一覧

A p p e n d i x B

- Tabule B-1 Experimental Results of Ring type spacer
(Minimum gap space = 2.10 mm)
- Tabule B-2 Experimental Results of Plate type spacer
(Minimum gap spacer = 2.10 mm)
- Tabule B-3 Experimental Results of Plate type spacer
(Minimum gap space = 1.56 mm)
- Tabule B-4 Experimental Results of Plate type spacer
(Minimum gap space = 1.10 mm)
- Tabule B-5 Experimental Results of Plate type spacer
(Minimum gap space = 0.55 mm)

Tabule B-1 Experimental Results of Ring type spacer
(Minimum gap space = 2.10 mm)

Test section geometry

Number of heated rods	28
Heated length (L)	3700.00 mm
Axial heat flux distribution	uniform
Radial heat flux distribution (outer-inner)	1.170/0.820/0.700/
Heated rods - OD -	Outer 16.46 mm
	Mider 16.46 mm
	Inner 16.46 mm
Presusre tube - ID -	117.80 mm
Spacing between rods (nominal)	2.10 mm
Spacing between rods and press. tube (nominal)	3.10 mm
Rods supported by ring spacers, 260 mm intvl, statig 130 mm form H, tube end	
Equivalent diameter (DW)	9.71 mm
Heated equivalent diameter (DH)	12.95 mm
Perimeter -- wetted --	1930.71 mm
Perimeter -- heated --	1447.62 mm
L/DW	331.16
L/DH	285.79
Heat transfer area	53562.08 CM ²
Cross section flow area	46.85 CM ²

Run No.	P MPa	W t/h	G t/m ² h	T _{in} °C	H _{in} kcal/kg	H _{sub}	Q MW	X _{bo} %	q Mkcal/ m ² h	Location
871 497	71.0	39.3	8.40	278.0	288.8	15.5	7.02	36.52	1.315	TC25-3EB
871 498	71.0	39.3	8.40	278.0	290.5	11.7	7.04	37.66	1.319	TC25-3EB
871 499	71.0	39.3	8.40	275.0	289.3	13.0	6.97	36.89	1.305	TC26-3EB
871 500	70.0	34.6	7.39	278.0	290.5	10.4	6.45	39.52	1.208	TC26-3EB
871 501	70.5	34.4	7.33	278.0	290.5	11.2	6.34	39.05	1.188	TC25-3DB
871 502	70.0	29.9	6.38	278.0	290.5	10.4	5.83	41.52	1.092	TC26-3EB
871 503	69.5	29.9	6.38	275.0	289.5	11.1	5.89	41.71	1.104	TC26-3EB
871 504	70.0	24.4	5.22	276.0	290.5	10.4	5.36	47.04	1.004	TC26-3EB
871 505	70.0	24.4	5.21	275.0	289.3	11.7	5.31	46.31	0.995	TC26-3EB
871 506	70.0	20.1	4.28	276.0	290.5	10.4	4.71	50.54	0.882	TC26-3EB
871 507	70.0	20.9	4.45	276.0	290.5	10.4	4.86	50.15	0.910	TC25-3DB
871 508	70.5	18.1	3.85	275.0	289.3	12.4	4.58	54.40	0.857	TC26-3EB
871 509	71.5	18.0	3.85	276.0	290.5	12.3	4.47	53.38	0.838	TC26-3EB
871 510	70.0	15.1	3.23	276.0	290.5	10.4	4.15	59.51	0.777	TC26-3EB
871 511	70.5	15.2	3.24	275.0	289.5	12.4	4.15	59.04	0.777	TC26-3EB
871 512	70.0	12.6	2.69	275.0	289.6	11.7	3.71	63.74	0.696	TC26-3EB
871 513	70.0	12.6	2.69	276.0	290.5	10.4	3.71	64.16	0.696	TC26-3EB
871 514	70.5	10.4	2.23	275.0	289.3	12.4	3.26	67.79	0.610	TC26-3EB
871 515	71.0	10.2	2.17	276.0	290.5	11.7	3.22	69.19	0.603	TC26-3EB
871 516	70.5	8.1	1.74	276.0	290.5	11.2	2.72	73.19	0.510	TC26-3EB
871 517	70.5	8.1	1.74	275.0	289.3	12.4	2.72	72.85	0.510	TC26-3EB
871 518	70.5	7.1	1.50	275.0	286.8	14.9	2.58	79.53	0.484	TC26-3EB
871 519	70.5	7.0	1.50	276.0	290.5	11.2	2.51	78.19	0.470	TC26-3EB
871 520	70.5	6.0	1.28	274.0	288.1	13.6	2.20	79.68	0.411	TC26-3EB
871 521	70.5	6.0	1.28	274.0	288.1	13.6	2.16	78.40	0.405	TC26-3EB
871 522	71.0	5.0	1.06	277.0	291.8	10.5	2.06	91.89	0.386	TC26-3EB
871 523	70.5	5.0	1.06	275.0	289.3	12.4	2.06	91.18	0.386	TC26-3EB

Tabule B-2 Experimental Results of Plate type spacer
(Minimum gap space = 2.10 mm)

Test section geometry

Number of heated rods	28
Heated length (L)	3700.00 mm
Axial heat flux distribution	uniform
Radial heat flux distribution (outer-inner)	1.170/0.820/0.700/
Heated rods - OD -	Outer 16.46 mm
	Mider 16.46 mm
	Inner 16.46 mm
Pressure tube - ID -	117.80 mm
Spacing between rods (nominal)	2.10 mm
Spacing between rods and press. tube (nominal)	3.10 mm
Rods supported by spacers, 260 mm intvl, statig 1300 mm form H, tube end	
Equivalent diameter (DW)	9.71 mm
Heated equivalent diameter (DH)	12.95 mm
Perimeter -- wetted --	1930.71 mm
Perimeter -- heated --	1447.62 mm
L/DW	381.16
L/DH	285.79
Heat transfer area	53562.08 CM ²
Cross section flow area	46.85 CM ²

Run No.	P MPa	W t/h	G t/m ² h	T _{in} °C	H _{in} kcal/kg	H _{sub}	Q MW	X _{bo} %	q Mkcal/ m ² h	Location
871 524	71.5	38.6	8.23	275.2	289.6	13.3	6.71	35.20	1.257	TC25-3DB
871 525	71.2	38.8	8.27	274.7	288.9	13.6	6.68	35.66	1.251	TC25-3DB
871 526	70.8	34.1	7.28	275.0	289.3	12.5	6.18	37.94	1.158	TC25-3DB
871 527	70.9	34.4	7.33	275.5	289.9	12.2	6.22	37.96	1.164	TC25-3DB
871 528	69.9	29.6	6.35	275.5	289.9	10.9	5.73	40.94	1.072	TC25-3DB
871 529	70.2	29.6	6.31	274.5	288.7	12.6	5.72	40.63	1.072	TC25-3DB
871 530	70.4	24.8	5.29	276.2	290.8	10.8	5.22	45.12	0.978	TC25-3DB
871 531	70.4	24.8	5.30	276.0	289.3	12.3	5.23	44.64	0.980	TC25-3DB
871 532	70.3	19.6	4.19	276.7	290.2	11.3	4.69	51.30	0.878	TC25-3DB
871 533	70.9	19.7	4.20	275.5	287.5	14.7	4.70	50.59	0.881	TC25-3DB
871 534	70.8	17.5	3.73	274.5	288.7	13.1	4.48	54.87	0.839	TC25-3DB
871 535	70.8	17.5	3.74	274.5	288.7	13.4	4.44	54.20	0.833	TC25-3DB
871 536	70.5	14.7	3.15	274.8	288.4	13.3	4.13	60.21	0.773	TC25-3DB
871 537	71.1	14.9	3.17	274.7	288.9	13.5	4.11	59.59	0.770	TC25-3DB
871 538	69.7	12.4	2.65	274.7	288.9	11.7	3.77	65.84	0.707	TC25-3DB
871 539	69.4	12.5	2.68	275.0	289.3	11.0	3.79	65.60	0.710	TC25-3DB
871 540	70.4	9.8	2.10	275.5	287.5	14.1	3.25	71.56	0.608	TC26-3EB
871 541	70.3	9.8	2.10	274.7	288.9	12.5	3.21	70.99	0.602	TC26-3EB
871 542	70.3	7.9	1.68	274.5	288.7	12.8	2.70	74.74	0.505	TC26-3EB
871 543	70.3	7.9	1.68	275.0	289.3	12.4	2.71	75.23	0.508	TC26-3EB
871 544	70.4	6.8	1.45	275.0	289.3	12.3	2.41	77.25	0.451	TC26-3EB
871 545	70.3	6.8	1.45	274.3	288.4	13.0	2.41	77.21	0.452	TC26-3EB
871 546	69.9	6.0	1.28	275.0	289.3	11.5	2.16	79.07	0.405	TC26-3EB
871 547	70.3	6.0	1.28	273.5	287.5	14.0	2.16	78.62	0.405	TC26-3EB
871 548	69.9	4.9	1.04	275.7	290.2	10.7	1.86	83.73	0.348	TC26-3EB
871 549	70.3	4.9	1.06	273.5	287.5	14.0	1.86	82.14	0.348	TC26-3EB

Tabule B-3 Experimental Results of Plate type spacer
(Minimum gap space = 1.56 mm)

Test section geometry

Number of heated rods	28
Heated length (L)	3700.00 mm
Axial heat flux distribution	uniform
Radial heat flux distribution (outer-inner)	1.170/0.820/0.700/
Heated rods - OD -	Outer 17.00 mm
	Middle 17.00 mm
	Inner 17.00 mm
Pressure tube - ID -	117.80 mm
Spacing between rods (nominal)	1.56 mm
Spacing between rods and press. tube (nominal)	2.85 mm
Rods supported by spacers, 260 mm intvl, statig 130 mm form H, tube end	
Equivalent diameter (DW)	8.67 mm
Heated equivalent diameter (DH)	11.47 mm
Perimeter -- wetted --	1978.20 mm
Perimeter -- heated --	1495.12 mm
L/DW	426.72
L/DH	322.51
Heat transfer area	55319.29 CM ²
Corss section flow area	42.88 CM ²

Run No.	P MPa	W t/h	G t/m ² h	T _{in} °C	H _{in} kcal/kg	H _{sub}	Q MW	X _{bo} %	q Mkcal/ m ² h	Location
871 580	70.8	35.1	8.18	274.5	288.7	13.4	6.35	37.64	1.151	TC25-3DB
871 581	70.6	35.2	8.21	274.0	288.1	13.7	6.29	37.00	1.141	TC25-3DB
871 582	70.8	31.1	7.26	274.7	288.9	13.1	5.82	39.12	1.056	TC25-3DB
871 583	70.6	31.0	7.24	274.7	288.9	12.9	5.80	39.07	1.051	TC25-3DB
871 584	70.4	26.3	6.13	275.2	289.6	12.0	5.27	42.40	0.956	TC25-3DB
871 585	69.9	24.4	5.69	274.3	288.4	12.4	5.07	43.94	0.920	TC25-3DB
871 586	70.3	19.4	4.52	273.5	287.5	14.0	4.48	48.90	0.813	TC25-3DB
871 674	72.3	39.1	9.11	273.8	287.8	16.0	6.87	35.95	1.245	TC25-3DB
871 675	72.1	39.5	9.22	273.3	287.2	16.4	6.84	35.17	1.240	TC25-3DB
871 676	71.3	35.5	8.29	274.3	288.4	14.2	6.42	37.44	1.165	TC25-3DB
871 677	70.3	35.1	8.18	275.2	289.6	11.9	6.41	38.39	1.163	TC24-3DB
871 678	70.0	29.3	6.84	275.5	289.9	11.0	5.73	41.41	1.039	TC25-3DB
871 679	70.1	29.4	6.85	276.2	290.8	10.4	5.71	41.38	1.035	TC25-3DB
871 680	69.9	24.6	5.73	275.0	289.3	11.5	5.13	44.31	0.930	TC25-3DB
871 681	70.1	24.4	5.70	274.5	288.7	12.5	5.14	44.47	0.932	TC25-3DB
871 682	69.8	19.3	4.51	274.7	288.9	11.8	4.54	50.16	0.823	TC25-3DB
871 683	69.9	19.3	4.51	274.0	288.1	12.8	4.61	50.70	0.836	TC25-3DB
871 684	69.2	16.9	3.93	275.2	289.6	10.5	4.33	55.41	0.785	TC25-3DB
871 685	69.4	16.9	3.95	273.3	287.2	13.1	4.32	54.35	0.783	TC25-3DB
871 686	69.9	14.5	3.39	275.7	290.2	10.7	4.02	60.08	0.729	TC25-3DB
871 687	69.6	14.6	3.41	274.5	288.7	11.8	4.03	59.38	0.732	TC25-3DB
871 688	69.7	12.4	2.89	274.5	288.7	11.9	3.62	63.01	0.656	TC25-3EB
871 689	69.9	12.2	2.85	275.5	289.9	10.9	3.60	64.04	0.654	TC25-3EB
871 690	69.6	9.8	2.28	275.7	290.2	10.3	3.09	68.96	0.560	TC25-3EB
871 691	69.5	9.8	2.28	276.6	291.3	9.1	3.10	69.65	0.562	TC26-3EB
871 692	70.6	7.9	1.83	274.7	288.9	12.9	2.65	73.38	0.480	TC26-3EB
871 693	70.4	7.8	1.83	275.0	289.3	12.3	2.63	73.17	0.477	TC26-3EB
871 694	71.3	7.0	1.63	272.8	286.6	16.1	2.46	76.06	0.446	TC26-3EB
871 695	70.8	7.1	1.64	275.9	290.4	11.6	2.41	74.75	0.436	TC26-3EB
871 696	70.9	6.0	1.39	275.2	289.6	12.6	2.09	76.72	0.380	TC26-3EB
871 697	70.9	6.0	1.39	274.7	288.9	13.2	2.09	76.46	0.380	TC26-3EB
871 698	70.8	4.9	1.15	275.2	289.6	12.5	1.80	79.85	0.326	TC26-3EB
871 699	70.7	4.9	1.15	273.8	287.8	14.1	1.82	80.35	0.330	TC26-3EB

Tabule B-4 Experimental Results of Plate type spacer
(Minimum gap space = 1.10 mm)

Test section geometry

Number of heated rods	28
Heated length (L)	3700.00 mm
Axial heat flux distribution	uniform
Radial heat flux distribution (outer-inner)	1.170/0.820/0.700/
Heated rods - OD -	Outer 17.50 mm
	Mider 17.50 mm
	Inner 17.50 mm
Pressure tube - ID -	117.80 mm
Spacing between rods (nominal)	1.10 mm
Spacing between rods and press. tube (nominal)	2.60 mm
Rods supported by plate spacers, 260 mm intvl, stat 130 mm form H, tube end	
Equivalent diameter (DW)	7.73 mm
Heated equivalent diameter (DH)	10.16 mm
Perimeter -- wetted --	2022.18 mm
Perimeter -- heated --	1539.09 mm
L/DW	478.53
L/DH	364.21
Heat transfer area	56946.33 CM ²
Cross section flow area	39.09 CM ²

Run No.	P MPa	W t/h	G t/m ² h	T _{in} °C	H _{in} kcal/kg	H _{sub}	Q MW	X _{bo} %	$\frac{q}{M}$ kcal/ m ² h	Location
871 555	69.7	19.1	4.89	274.0	288.1	12.5	4.45	49.50	0.784	TC24-3DB
871 556	70.4	19.4	4.97	274.5	288.7	12.9	4.40	48.09	0.776	TC24-3DB
871 557	68.9	17.0	4.36	274.5	288.7	11.0	4.16	52.35	0.733	TC24-3DB
871 558	70.3	17.2	4.39	274.7	288.9	12.5	4.13	51.46	0.728	TC24-3DB
871 559	70.9	15.1	3.87	274.3	288.4	13.7	3.90	55.02	0.687	TC24-3DB
871 560	70.3	15.0	3.85	274.7	288.9	12.5	3.89	55.53	0.686	TC24-3DB
871 561	71.4	13.1	3.34	273.8	287.8	14.9	3.58	58.59	0.630	TC24-3DB
871 562	70.6	12.5	3.21	273.8	287.8	14.0	3.59	61.48	0.632	TC24-3DB
871 563	70.8	9.9	2.54	274.3	288.4	13.6	3.03	65.80	0.534	TC25-3EB
871 564	70.8	9.9	2.54	274.3	288.4	13.6	3.05	66.40	0.536	TC25-3EB
871 565	70.6	7.9	2.01	273.3	287.2	14.6	2.55	69.97	0.449	TC26-3EB
871 566	70.6	7.9	2.01	273.8	287.8	14.0	2.53	69.50	0.445	TC26-3EB
871 567	70.4	6.8	1.74	274.5	288.7	12.9	2.25	71.87	0.396	TC26-3EB
871 568	70.5	6.8	1.74	274.7	288.9	12.8	2.24	71.50	0.394	TC26-3EB
871 569	70.6	6.0	1.54	273.3	287.2	14.6	2.02	73.01	0.357	TC26-3EB
871 570	70.4	6.1	1.55	274.3	288.4	13.1	2.02	72.23	0.355	TC26-3EB
871 571	70.3	4.9	1.25	272.3	286.0	15.5	1.72	75.85	0.303	TC26-3EB
871 572	70.4	4.9	1.25	273.0	286.8	14.7	1.70	75.06	0.299	TC26-3EB
871 573	71.0	30.1	7.71	275.0	289.3	13.0	5.41	37.48	0.954	TC24-3DB
871 574	71.3	30.4	7.77	274.0	288.1	14.6	5.49	37.35	0.968	TC24-3DB
871 575	68.5	24.9	6.37	275.0	289.3	9.9	4.89	41.73	0.862	TC24-3DB
871 576	70.3	25.1	6.43	275.2	289.6	11.9	4.93	41.43	0.869	TC24-3DB
871 577	69.5	20.2	5.18	275.5	289.9	10.5	4.44	47.04	0.783	TC24-3DB

Tabule B-5 Experimental Results of Plate type spacer
(Minimum gap space = 0.55 mm)

Test section geometry

Number of heated rods	28
Heated length (L)	3700.00 mm
Axial heat flux distribution	uniform
Radial heat flux distribution (outer-inner)	1.170/0.820/0.700/
Heated rods - OD -	Outer 18.00 mm
	Middle 18.00 mm
	Inner 18.00 mm
Pressure tube - ID -	117.80 mm
Spacing between rods (nominal)	0.60 mm
Spacing between rods and press. tube (nominal)	2.33 mm
Rods supported by spacers, 260 mm intvl, statig 130 mm from H, tube end	
Equivalent diameter (DW)	6.81 mm
Heated equivalent diameter (DH)	8.89 mm
Perimeter -- wetted --	2066.15 mm
Perimeter -- heated --	1583.06 mm
L/DW	543.17
L/DH	416.17
Heat transfer area	58573.36 CM ²
Corss section flow area	35.19 CM ²

Run No.	P MPa	W t/h	G t/m ² h	T _{in} °C	H _{in} kcal/kg	H _{sub}	Q MW	X _{bo} %	q Mkcal/ m ² h	Location
871 588	71.8	18.6	5.29	274.7	288.9	14.3	3.84	43.30	0.657	TC25-3DB
871 589	70.4	21.7	6.17	274.5	288.7	12.9	4.18	40.38	0.716	TC25-3DB
871 590	70.4	23.5	6.69	274.5	288.7	12.9	4.36	38.69	0.747	TC25-3DB
871 591	70.8	28.5	8.09	275.5	289.9	12.1	4.87	35.75	0.834	TC25-3DB
871 592	70.0	4.9	1.40	277.1	291.9	9.1	1.63	72.57	0.279	TC26-3DB
871 593	70.0	5.0	1.42	274.0	288.1	12.9	1.63	70.91	0.279	TC26-3EB
871 594	70.6	6.0	1.70	275.3	287.2	14.6	1.86	66.97	0.318	TC26-3EB
871 595	70.5	5.9	1.68	275.5	287.5	14.2	1.86	67.82	0.319	TC26-3EB
871 596	70.8	6.9	1.97	275.9	290.4	11.6	2.08	65.40	0.357	TC24-3EB
871 597	70.6	6.9	1.97	275.0	289.3	12.5	2.10	65.56	0.359	TC26-3EB
871 598	70.9	7.9	2.26	275.2	289.6	12.6	2.31	62.80	0.395	TC24-3EB
871 599	70.8	7.9	2.25	274.3	288.4	13.6	2.31	62.93	0.396	TC24-3EB
871 602	69.8	19.0	5.39	276.2	290.8	9.9	3.97	44.90	0.680	TC25-3DB
871 603	70.3	16.6	4.73	274.3	288.4	13.0	3.69	46.97	0.632	TC25-3DB
871 604	70.1	16.9	4.79	273.5	287.5	13.8	3.73	46.65	0.639	TC25-3DB
871 605	69.3	14.5	4.11	274.0	288.1	12.1	3.45	50.86	0.591	TC25-3DB
871 606	70.4	14.6	4.15	273.5	287.5	14.1	3.47	50.32	0.594	TC25-3DB
871 607	70.8	12.1	3.43	274.5	288.7	13.4	3.10	54.97	0.530	TC25-3DB
871 608	70.5	12.0	3.41	274.3	288.4	13.3	3.10	55.25	0.531	TC25-3DB
871 609	70.6	9.6	2.72	275.2	289.6	12.3	2.76	62.29	0.472	TC24-3EB
871 610	69.5	9.6	2.73	274.5	288.7	11.7	2.77	62.20	0.474	TC25-3EB
871 611	70.6	6.9	1.96	273.8	287.8	14.0	2.11	66.14	0.362	TC24-3EB
871 612	70.3	19.5	5.53	274.7	288.9	12.5	4.07	44.23	0.697	TC25-3DB
871 613	70.2	22.7	6.45	274.3	288.4	12.9	4.39	40.46	0.751	TC25-3DB
871 614	70.7	29.0	8.25	274.0	288.1	13.9	4.87	34.44	0.834	TC25-3DB

A p p e n d i x C

P N L サブチャンネル実験解析結果

A p p e n d i x C

PNLサブチャンネル実験解析結果

A T R 2 8 本クラス燃料集合体に対して開発した二相乱流混合係数の他のサブチャンネル形状への適用性を確認するため、PNLにおいてRowe らが行った並行2チャンネルでのサブチャンネル混合実験[7]について、COBRA-IV-HTLコードを用いて同様の解析を実施した。

Roweらが実験で用いたサブチャンネルの断面形状をFig. C-1に示す。Roweらの実験は燃料棒間ギャップ $s = 2.134\text{mm}$ と $s = 0.508\text{mm}$ の2種の流路について行われ、加熱条件下でそれぞれのサブチャンネルでの質量流量およびエンタルピが測定された。2種のサブチャンネル断面の等価直径、断面積等の数値データをTable C-1-1, 2に示す。

Roweらが実験で作成した乱流混合係数相関式と今回作成したHTLの相関式の両者を持ちいて解析を実施し、サブチャンネルの質量流量およびエンタルピについて実験結果との比較を行なった。Roweらは解析において以下に示す相関式を持ちいて乱流混合係数を算出した。

$$\beta = 0.0062 \cdot De / (P-D) \cdot Re^{-0.1} \quad (C-1)$$

上式による乱流混合係数をTable C-2に示す。同様に、HTLモデルによる乱流混合係数をTable C-3に示す。解析は $s = 2.134\text{mm}$ のケースについて38点、 $s = 0.508\text{mm}$ のケースについて28点実施した。

サブチャンネルの質量流量についてHTLモデルによる解析結果と実験結果の比較をそれぞれのギャップについてFig. C-2, Fig. C-3に示す。COBRA-IV-HTLコードは、質量速度について実験データの92%を±15%の精度以内で予測した。

また、エンタルピについての解析結果と実験結果の比較をFig. C-4, Fig. C-5に示す。エンタルピについて実験データの93%が±10%以内の精度で予測可能であった。

以上の結果、開発した二相乱流混合係数相関式のA T R燃料集合体以外のサブチャンネル形状に対する適用性が確認された。

Table C-1-1 Corss-section data of PNL experiments
(s = 2.134 mm)

Ch.	Area [mm ²]	Wet-perimeter [mm]	Dh [mm]	Heat-perimeter [mm]
1	35.84	28.72	4.99	22.5
2	108.05	53.34	8.10	45.01
Total	143.89	77.79	7.40	67.51

Table C-1-2 Cross-section data of PNL experiments
(s = 0.508 mm)

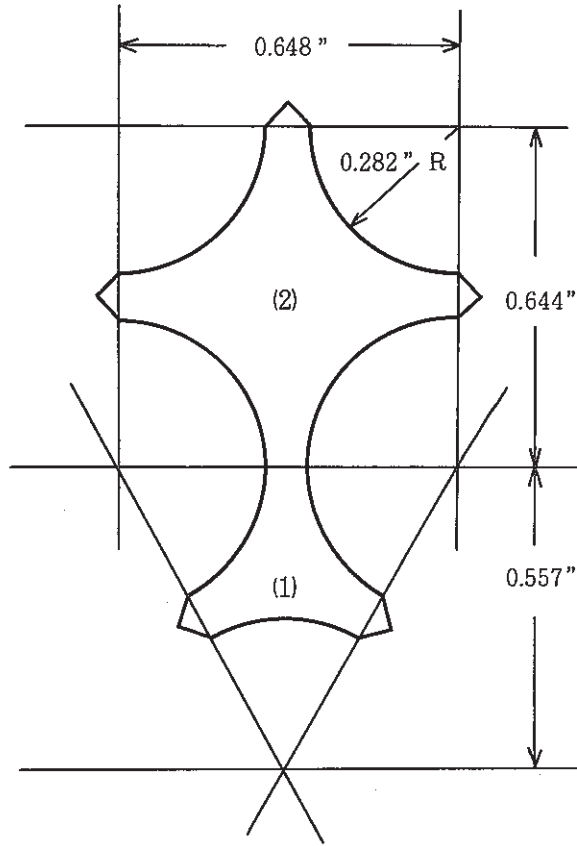
Ch.	Area [mm ²]	Wet-perimeter [mm]	Dh [mm]	Heat-perimeter [mm]
1	23.96	25.71	3.66	22.5
2	76.19	49.37	6.17	45.01
Total	100.15	74.58	5.37	67.51

Table C-2 Mixing factor calculated by the Rowe model on PNL experiments

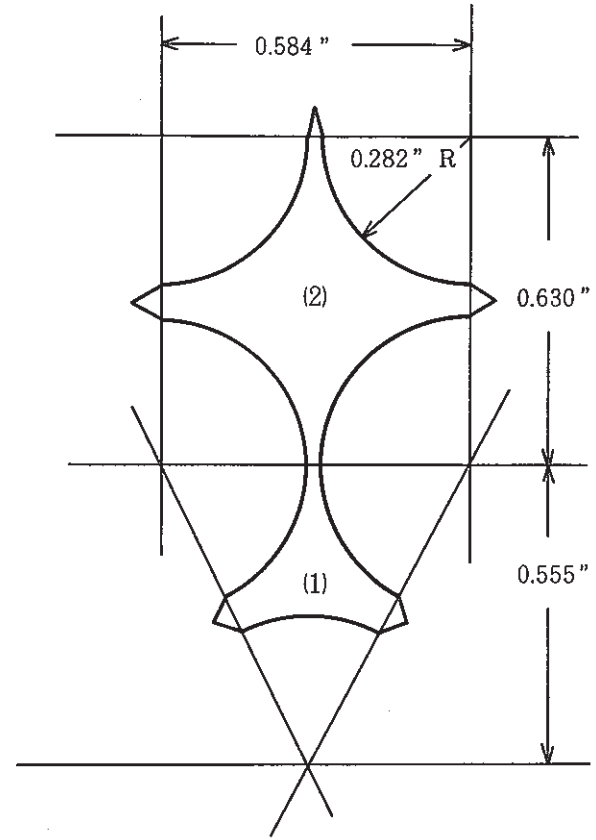
Gap space [mm]	Inlet enthalpy [Btu/lb]	Rowe's mixing factor, β		
		1.0×10^6 [lb/ft ² hr]	2.0×10^6 [lb/ft ² hr]	3.0×10^6 [lb/ft ² hr]
2.134	300	0.00661	0.00617	0.00592
	500	0.0240	0.0120	0.0120
0.508	300	0.0205	0.0191	0.0184
	500	—	0.0200	0.0200

Table C-3 Mixing factor calculated by the HTL model on PNL experiments

Gap space [mm]	Quality	Mixing factor, β		
		1.0×10^6 [lb/ft ² hr]	2.0×10^6 [lb/ft ² hr]	3.0×10^6 [lb/ft ² hr]
2.134	0.0	0.0112	0.0059	0.0040
	0.05	0.0675	0.0353	0.0242
	0.10	0.0675	0.0353	0.0242
	0.25	0.0225	0.0118	0.0081
	0.60	0.0112	0.0059	0.0040
	1.00	0.0056	0.0029	0.0020
0.508	0.0	0.0013	6.8×10^{-4}	4.7×10^{-4}
	0.05	0.0078	0.0041	0.0028
	0.10	0.0078	0.0041	0.0028
	0.25	0.0026	0.0014	9.4×10^{-4}
	0.60	0.0013	6.8×10^{-4}	4.7×10^{-4}
	1.00	0.00065	3.4×10^{-4}	2.3×10^{-4}



② Channel Dimensions, 0.084" Gap



⑥ Channel Dimensions, 0.020" Gap

Fig.C - 1 Configuration of Flow Area (PNL experimets)

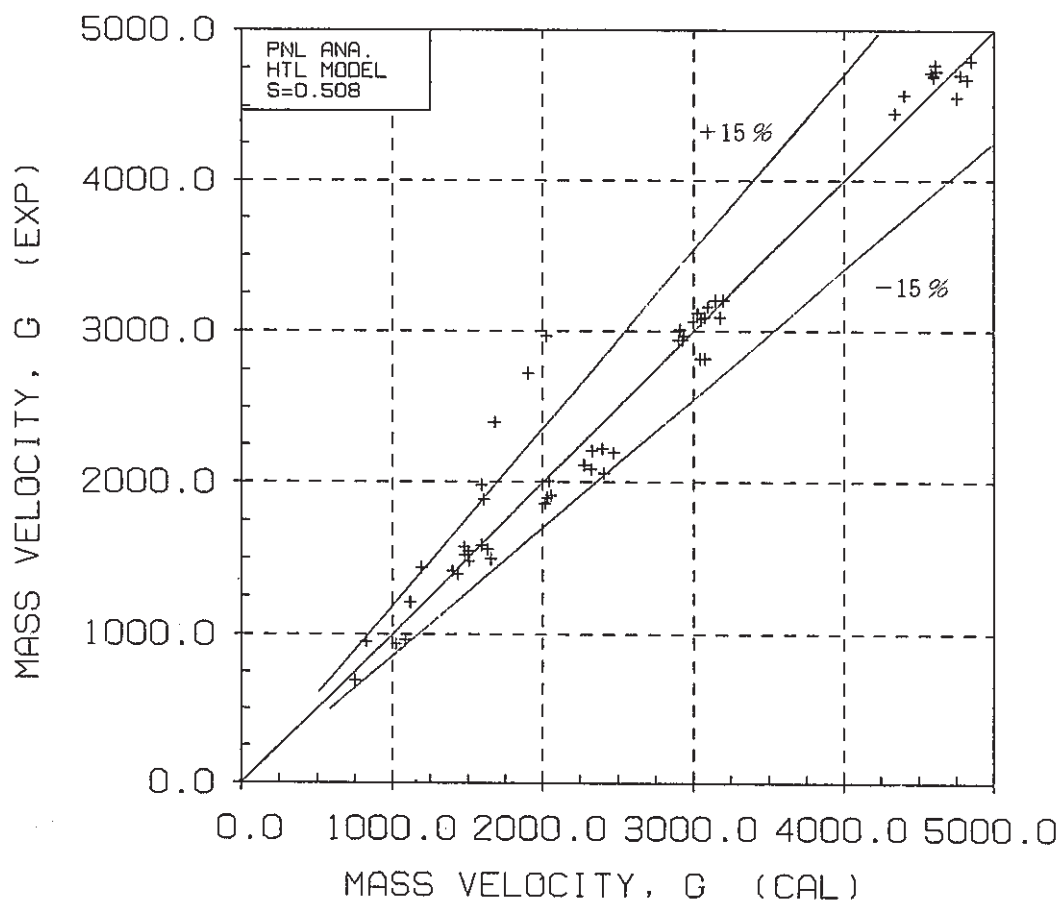


Fig. C-2 Scatgram of Exit Mass Velocity

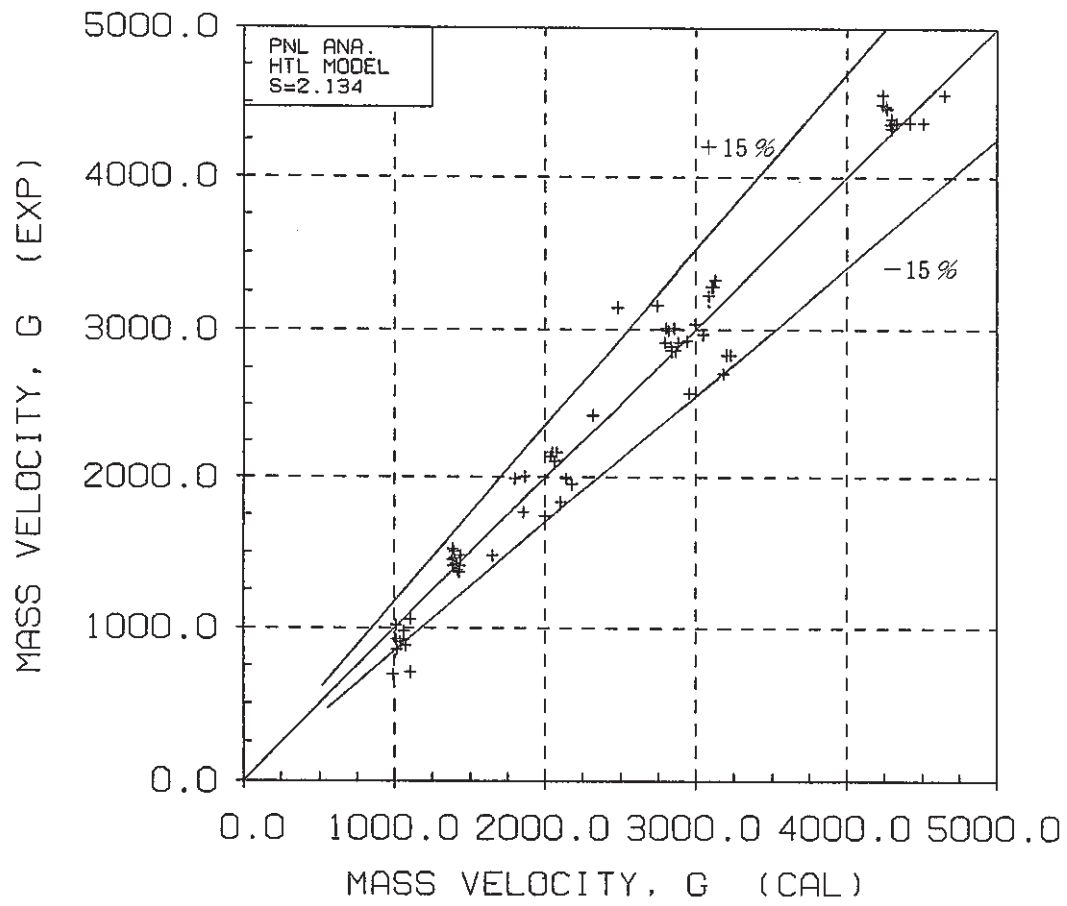


Fig. C-3 Scatgram of Exit Mass Velocity

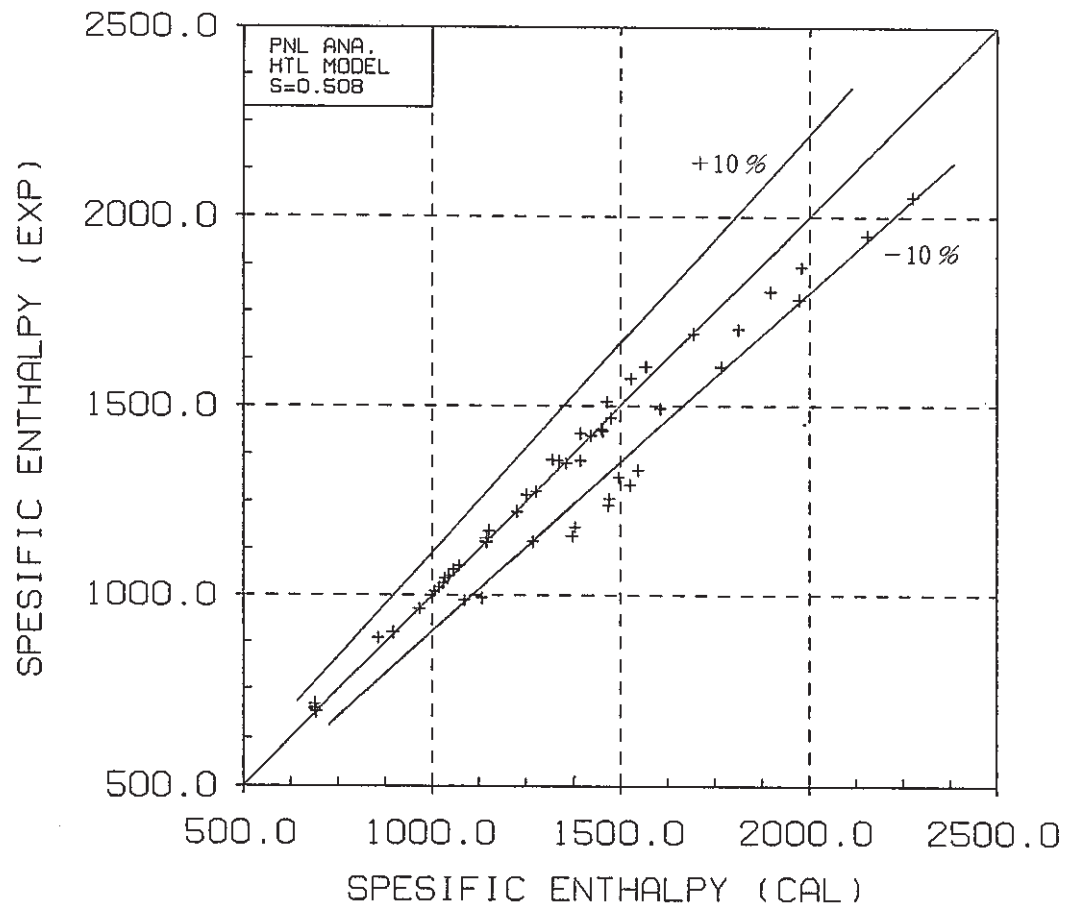


Fig. C-4 Scatgram of Exit Enthalpy

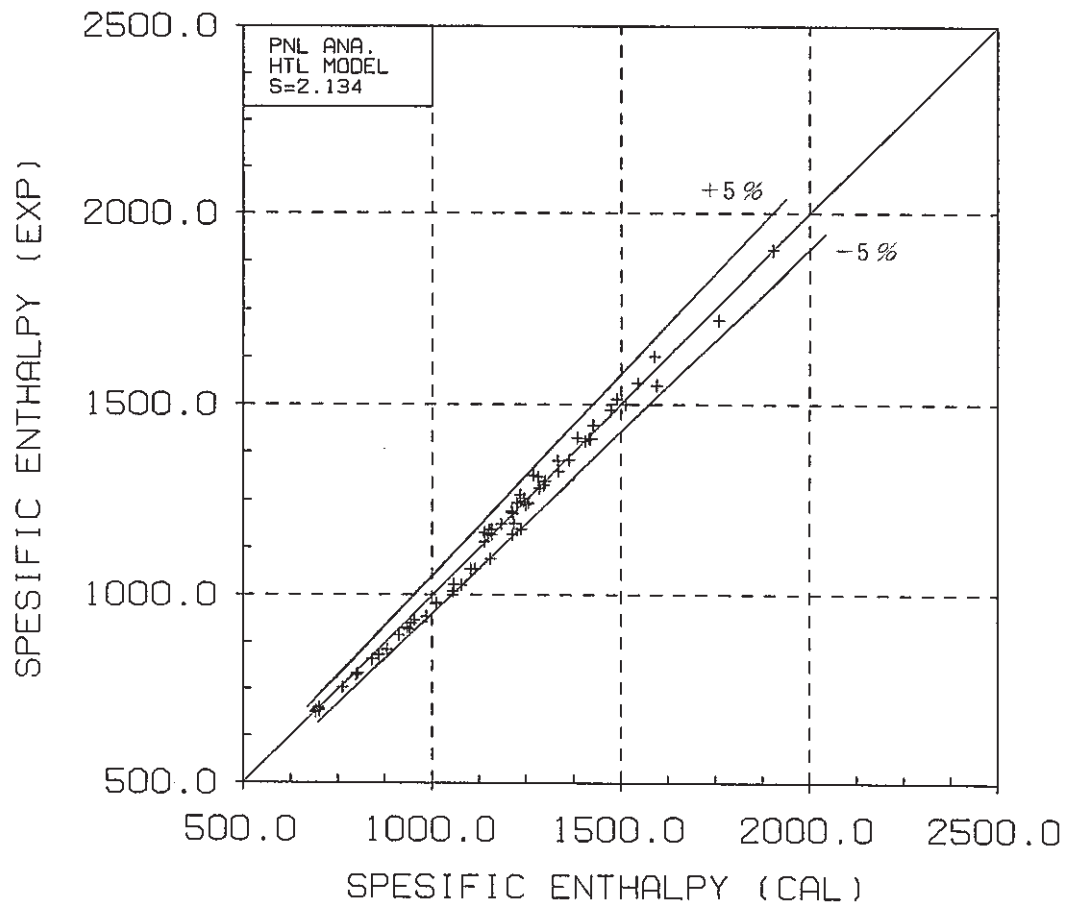


Fig. C-5 Scattergram of Exit Enthalpy

解析データ一覧

Table C-4 Calculational results on PNL experiments (Gap space 2.134mm)

Table C-5 Calculational results on PNL experiments (Gap space 0.508mm)

Fig. C-6-1 Comparison of Enthalpy in Sub-channels (Run 25~31)

Fig. C-6-2 Comparison of Mass Flux in Sub-channels (Run 25~31)

Fig. C-7-1 Comparison of Enthalpy in Sub-channels (Run 32~36)

Fig. C-7-2 Comparison of Mass Flux in Sub-channels (Run 32~36)

Fig. C-8-1 Comparison of Enthalpy in Sub-channels (Run 39~45)

Fig. C-8-2 Comparison of Mass Flux in Sub-channels (Run 39~45)

Fig. C-9-1 Comparison of Enthalpy in Sub-channels (Run 70~74)

Fig. C-9-2 Comparison of Mass Flux in Sub-channels (Run 70~74)

Fig. C-10-1 Comparison of Enthalpy in Sub-channels (Run 76~81)

Fig. C-10-2 Comparison of Mass Flux in Sub-channels (Run 76~81)

Fig. C-11-1 Comparison of Enthalpy in Sub-channels (Run 82~87)

Fig. C-11-2 Comparison of Mass Flux in Sub-channels (Run 82~87)

Fig. C-12-1 Comparison of Enthalpy in Sub-channels (Run 89~95)

Fig. C-12-2 Comparison of Mass Flux in Sub-channels (Run 89~95)

Fig. C-13-1 Comparison of Enthalpy in Sub-channels (Run 99~105)

Fig. C-13-2 Comparison of Mass Flux in Sub-channels (Run 99~105)

Fig. C-14-1 Comparison of Enthalpy in Sub-channels (Run 108~111)

Fig. C-14-2 Comparison of Mass Flux in Sub-channels (Run 108~111)

Fig. C-15-1 Comparison of Enthalpy in Sub-channels (Run 112~116)

Fig. C-15-2 Comparison of Mass Flux in Sub-channels (Run 112~116)

Fig. C-16-1 Comparison of Enthalpy in Sub-channels (Run 117~120)

Fig. C-16-2 Comparison of Mass Flux in Sub-channels (Run 117~120)

Table C-4 Calculational results of PNL experiments (Gap space 2.134mm)

Run No.	Experimental condition				Case	Exit enthalpy [kJ/kg]		Exit mass velocity [kg/m ² s]	
	P [MPa]	h _{in} [kJ/kg]	G [kg/m ² s]	q [MW/m ²]		ch. 1	ch. 2	ch. 1	ch. 2
25	6.364	697.8	3987.3	0.0	PNL exp.	700.1	695.5	3225.0	4353.5
					Rowe model	697.8	697.8	3083.1	4287.1
					HTL model	697.8	697.8	3083.1	4287.1
26	6.371	700.1	4000.9	0.653	PNL exp.	856.0	793.2	3282.1	4326.4
					Rowe model	871.8	803.6	3109.6	4296.9
					HTL model	880.4	801.5	3107.9	4296.9
27	6.364	697.8	4014.4	1.044	PNL exp.	944.4	844.3	3282.1	4367.1
					Rowe model	971.0	862.4	3121.3	4310.5
					HTL model	984.6	859.1	3117.4	4311.8
28	6.364	697.8	4000.9	1.379	PNL exp.	1025.8	895.5	3282.1	4394.2
					Rowe model	1060.6	916.2	3110.9	4295.9
					HTL model	1078.3	911.9	3110.8	4295.9
29	6.364	693.2	4000.9	1.669	PNL exp.	1095.6	935.1	3282.1	4353.5
					Rowe model	1132.6	957.5	3103.4	4298.4
					HTL model	1154.0	952.5	3100.1	4299.5
30	6.364	690.8	4000.9	1.972	PNL exp.	1174.6	979.2	3146.5	4367.1
					Rowe model	1214.2	1010.3	2586.6	4469.7
					HTL model	1235.6	1007.8	2478.4	4505.6
31	6.295	695.5	4068.7	2.142	PNL exp.	-	-	2427.7	4556.9
					Rowe model	1268.5	1041.2	2205.0	4686.5
					HTL model	1271.9	1038.9	2314.8	4650.1

Table C-4 (Continue)

Run No.	Experimental condition				Case	Exit enthalpy [kJ/kg]		Exit mass velocity [kg/m ² s]	
	P [MPa]	h _{in} [kJ/kg]	G [kg/m ² s]	q [MW/m ²]		ch. 1	ch. 2	ch. 1	ch. 2
32	6.322	688.5	2644.7	0.0	PNL exp.	693.2	688.5	2142.5	2861.7
					Rowe model	692.3	690.8	2038.4	2845.6
					HTL model	692.3	690.8	2038.4	2845.6
33	6.329	688.5	2644.7	0.640	PNL exp.	925.8	830.4	2115.7	2888.8
					Rowe model	941.7	842.3	2061.6	2838.0
					HTL model	944.6	841.6	2061.5	2838.0
34	6.329	686.2	2644.7	1.038	PNL exp.	1067.6	914.1	2115.7	2861.7
					Rowe model	1096.1	935.5	2066.3	2836.4
					HTL model	1100.5	934.5	2065.4	2836.7
35	6.322	679.2	2658.2	1.360	PNL exp.	1188.6	976.9	1993.7	2929.5
					Rowe model	1217.0	1010.6	1770.8	2952.4
					HTL model	1218.1	1009.7	1798.9	2943.1
36	6.281	690.8	2698.9	1.502	PNL exp.	-	1028.1	1478.3	2970.1
					Rowe model	1294.6	1056.6	1461.1	3109.3
					HTL model	1265.7	1056.8	1649.4	3046.9
37	6.295	1144.4	2685.3	0.167	PNL exp.	1218.8	1186.3	2170.0	2915.9
					Rowe model	1209.9	1183.8	2081.6	2885.5
					HTL model	1210.4	1183.7	2081.5	2885.5
38	6.281	1139.7	2712.5	0.319	PNL exp.	-	1214.2	1763.1	3038.0
					Rowe model	1267.5	1215.3	1757.1	3029.2
					HTL model	1261.8	1215.9	1858.3	2995.7

Table C-4 (Continue)

Run No.	Experimental condition				Case	Exit enthalpy [kJ/kg]		Exit mass velocity [kg/m ² s]	
	P [MPa]	h _{in} [kJ/kg]	G [kg/m ² s]	q [MW/m ²]		ch. 1	ch. 2	ch. 1	ch. 2
39	6.357	700.1	1315.5	0.0	PNL exp.	690.8	695.5	922.2	1383.4
					Rowe model	700.1	700.1	1008.4	1417.4
					HTL model	700.1	700.1	1008.4	1417.4
40	6.357	688.5	1329.1	0.151	PNL exp.	788.5	756.0	908.7	1369.8
					Rowe model	806.4	761.1	1037.0	1426.0
					HTL model	798.7	763.0	1034.4	1426.8
41	6.364	693.2	1315.5	0.334	PNL exp.	-	842.0	908.7	1426.8
					Rowe model	953.9	855.4	1046.9	1356.2
					HTL model	937.2	859.6	1041.7	1404.6
42	6.364	690.8	1315.5	0.498	PNL exp.	-	909.5	922.2	1410.5
					Rowe model	1076.4	932.7	1065.3	1398.5
					HTL model	1052.4	939.6	1056.8	1401.3
43	6.364	688.5	1329.1	0.738	PNL exp.	-	1009.5	-	1410.5
					Rowe model	1256.8	1049.4	933.5	1460.3
					HTL model	1214.9	1055.2	1016.8	1432.7
44	6.364	690.8	1329.1	0.839	PNL exp.	-	1067.6	691.7	1478.3
					Rowe model	1355.4	1103.2	825.0	1496.3
					HTL model	1265.5	1114.1	990.8	1441.3
45	6.364	688.5	1315.5	1.006	PNL exp.	-	1158.4	705.2	1519.0
					Rowe model	1542.1	1188.7	698.3	1520.2
					HTL model	1317.7	1213.7	1104.2	1385.2

Table C-4 (Continue)

Run No.	Experimental condition				Case	Exit enthalpy [kJ/kg]		Exit mass velocity [kg/m ² s]	
	P [MPa]	h_{in} [kJ/kg]	G [kg/m ² s]	q [MW/m ²]		ch. 1	ch. 2	ch. 1	ch. 2
70	6.371	1139.7	1315.5	0.0	PNL exp.	1139.7	1165.3	1017.2	1410.5
					Rowe model	1139.7	1139.7	1012.1	1416.2
					HTL model	1139.7	1139.7	1012.1	1416.2
71	6.357	1135.1	1315.5	0.196	PNL exp.	1314.2	1263.0	881.6	1464.7
					Rowe model	1264.5	1235.7	1043.5	1405.7
					HTL model	1267.6	1234.7	1075.6	1395.1
72	6.385	1132.8	1315.5	0.470	PNL exp.	1402.6	1411.9	1057.9	1410.5
					Rowe model	1438.3	1376.3	1013.3	1415.7
					HTL model	1404.7	1383.8	1107.3	1384.6
73	6.357	1132.8	1302.0	0.770	PNL exp.	1551.4	1556.1	976.5	1451.2
					Rowe model	1645.4	1535.3	955.1	1417.0
					HTL model	1596.1	1545.0	1062.3	1381.4
74	6.329	1132.8	1302.0	1.192	PNL exp.	1902.7	1721.2	854.4	1505.4
					Rowe model	1925.6	1755.6	970.6	1411.9
					HTL model	1903.4	1759.6	1016.3	1396.7
76	6.329	1158.4	2644.7	0.0	PNL exp.	1158.4	1174.6	2170.0	2861.7
					Rowe model	1158.3	1158.3	2046.3	2843.0
					HTL model	1158.3	1158.3	2046.3	2843.0
77	6.336	1177.0	2617.5	0.196	PNL exp.	1242.1	1242.1	2007.2	2861.7
					Rowe model	1251.1	1225.9	1860.4	2868.5
					HTL model	1255.0	1225.0	1866.3	2866.6

Table C-4 (Continue)

Run No.	Experimental condition				Case	Exit enthalpy [kJ/kg]		Exit mass velocity [kg/m ² s]	
	P [MPa]	h_{in} [kJ/kg]	G [kg/m ² s]	q [MW/m ²]		ch.1	ch.2	ch.1	ch.2
78	6.336	1165.3	2644.7	0.319	PNL exp.	1309.5	1253.7	1736.0	3010.8
					Rowe model	1284.1	1244.3	1904.1	2890.2
					HTL model	1281.6	1244.5	2001.7	2857.8
79	6.329	1153.7	2658.2	0.568	PNL exp.	1351.4	1297.6	1953.0	2997.3
					Rowe model	1365.7	1293.7	1942.7	2895.4
					HTL model	1363.4	1299.5	2178.8	2817.2
80	6.295	1165.3	2631.1	0.997	PNL exp.	1484.0	1444.5	1993.7	2915.9
					Rowe model	1492.4	1423.4	1963.0	2852.6
					HTL model	1474.0	1426.6	2143.9	2792.6
81	6.281	1165.3	2631.1	1.334	PNL exp.	1625.9	1500.3	1830.9	3010.8
					Rowe model	1675.7	1497.9	1785.1	2911.6
					HTL model	1589.8	1512.5	2104.7	2805.6
82	6.212	1146.7	4028.0	0.0	PNL exp.	1156.0	1160.7	3322.8	4367.1
					Rowe model	1147.5	1147.2	3127.5	4326.5
					HTL model	1147.6	1147.2	3127.5	4326.5
83	6.212	1160.7	4000.9	0.319	PNL exp.	1158.4	1221.2	3160.0	4367.1
					Rowe model	1239.8	1212.9	2800.9	4398.7
					HTL model	1248.5	1211.2	2746.7	4416.6
84	6.198	1165.3	3987.3	0.476	PNL exp.	1279.3	1246.7	2576.8	4556.9
					Rowe model	1283.1	1243.7	2868.0	4358.4
					HTL model	1285.6	1242.8	2959.4	4238.1

Table C-4 (Continue)

Run No.	Experimental condition				Case	Exit enthalpy [kJ/kg]		Exit mass velocity [kg/m ² s]	
	P [MPa]	h _{in} [kJ/kg]	G [kg/m ² s]	q [MW/m ²]		ch. 1	ch. 2	ch. 1	ch. 2
85	6.185	1165.3	4000.9	0.770	PNL exp.	1323.5	1288.6	2834.5	4462.0
					Rowe model	1354.4	1291.4	2935.5	4354.1
					HTL model	1336.0	1294.6	3199.9	4266.4
86	6.150	1160.7	4000.9	1.192	PNL exp.	1409.6	1353.7	2834.5	4475.6
					Rowe model	1455.6	1356.2	2834.8	4387.4
					HTL model	1416.3	1363.0	3228.1	4257.0
87	6.116	1170.0	3973.8	1.473	PNL exp.	1514.2	1409.6	2712.5	4489.1
					Rowe model	1539.3	1413.4	2739.0	4383.1
					HTL model	1489.9	1421.4	3177.7	4237.6

Table C-5 Calculational results on PNL experiments (Gap space 0.508mm)

Run No.	Experimental condition				Case	Exit enthalpy [kJ/kg]		Exit mass velocity [kg/m ² s]	
	P [MPa]	h _{in} [kJ/kg]	G [kg/m ² s]	q [MW/m ²]		ch. 1	ch. 2	ch. 1	ch. 2
89	6.336	1151.4	4028.0	0.0	PNL exp.	1174.6	1172.3	2821.0	4448.4
					Rowe model	1151.3	1151.3	3043.8	4337.5
					HTL model	1151.3	1151.3	3043.8	4337.5
90	6.322	1158.4	4055.1	0.319	PNL exp.	1360.7	1223.5	2210.7	4692.6
					Rowe model	1320.7	1227.0	2173.6	4646.8
					HTL model	1320.0	1226.2	2325.7	4599.0
91	6.295	1158.4	4068.7	0.568	PNL exp.	1435.1	1274.7	2197.1	4706.1
					Rowe model	1476.0	1276.6	2145.3	4673.5
					HTL model	1454.3	1275.8	2468.7	4773.8
92	6.240	1151.4	4082.3	1.006	PNL exp.	1691.0	1351.4	2061.5	4773.9
					Rowe model	1754.1	1360.3	1923.8	4761.0
					HTL model	1693.2	1357.3	2407.8	4608.8
93	6.219	1177.0	4068.7	1.192	PNL exp.	1702.6	1421.2	2224.2	4706.1
					Rowe model	1881.5	1425.7	1958.8	4732.2
					HTL model	1812.1	1423.4	2394.9	4595.6
94	6.205	1172.3	4041.6	1.334	PNL exp.	1805.0	1437.5	2088.6	4719.7
					Rowe model	1978.6	1451.5	1926.3	4706.8
					HTL model	1897.1	1450.1	2321.0	4582.6
95	6.185	1167.7	4055.1	1.483	PNL exp.	1870.1	1467.7	2115.7	4733.2
					Rowe model	2076.0	1476.0	1919.4	4726.8
					HTL model	1979.3	1475.8	2273.2	4615.5

Table C-5 (Continue)

Run No.	Experimental condition				Case	Exit enthalpy [kJ/kg]		Exit mass velocity [kg/m ² s]	
	P [MPa]	h _{in} [kJ/kg]	G [kg/m ² s]	q [MW/m ²]		ch. 1	ch. 2	ch. 1	ch. 2
96	6.316	1144.4	2698.9	0.0	PNL exp.	1153.7	1142.1	1898.7	3110.8
					Rowe model	1144.4	1144.4	2031.9	2908.6
					HTL model	1144.4	1144.4	2031.9	2908.6
99	6.308	1144.4	2712.5	0.0	PNL exp.	1144.4	1153.7	2007.2	2943.0
					Rowe model	1144.4	1144.4	2042.2	2923.2
					HTL model	1144.4	1144.4	2042.2	2923.2
100	6.302	1149.0	2698.9	0.325	PNL exp.	1358.4	1267.7	1491.9	3119.3
					Rowe model	1412.4	1251.8	1468.8	3085.7
					HTL model	1394.2	1251.8	1656.9	3026.6
101	6.281	1156.0	2671.8	0.574	PNL exp.	1493.3	1358.4	1559.7	3065.1
					Rowe model	1667.3	1338.5	1300.7	3162.9
					HTL model	1606.2	1337.4	1635.6	2997.6
102	6.260	1153.7	2698.8	0.770	PNL exp.	1602.6	1428.2	1586.8	3078.6
					Rowe model	1859.0	1395.8	1241.8	3157.1
					HTL model	1766.5	1394.2	1593.8	3046.4
103	6.233	1153.7	2698.9	0.997	PNL exp.	1784.0	1509.6	1478.3	3092.2
					Rowe model	2092.5	1464.6	1233.0	3159.9
					HTL model	1971.8	1465.6	1509.4	3073.6
104	6.205	1153.7	2698.9	1.192	PNL exp.	1953.2	1572.4	1396.4	3160.0
					Rowe model	2257.3	1523.0	1302.8	3137.9
					HTL model	2153.8	1528.2	1434.2	3096.6

Table C-5 (Continue)

Run No.	Experimental condition				Case	Exit enthalpy [kJ/kg]		Exit mass velocity [kg/m ² s]	
	P [MPa]	h _{in} [kJ/kg]	G [kg/m ² s]	q [MW/m ²]		ch. 1	ch. 2	ch. 1	ch. 2
105	6.191	1151.4	2726.0	1.334	PNL exp.	2053.9	1602.6	1410.5	3200.7
					Rowe model	2345.3	1559.3	1380.4	3149.2
					HTL model	2276.1	1567.7	1394.7	3144.7
108	6.233	693.2	4082.3	0.0	PNL exp.	693.2	690.8	2821.0	4570.5
					Rowe model	693.1	693.1	3071.5	4400.1
					HTL model	693.1	693.1	3071.5	4400.1
109	6.295	702.5	4068.7	1.369	PNL exp.	1181.6	1011.8	2726.0	4556.9
					Rowe model	1236.5	1015.7	1468.8	4559.4
					HTL model	1380.9	1006.4	1656.9	4749.8
110	6.302	690.8	4068.7	1.511	PNL exp.	1239.8	1032.7	2400.5	4679.0
					Rowe model	1294.6	1041.1	2110.4	4684.5
					HTL model	1469.6	1028.9	1679.7	4820.0
111	6.302	690.8	4068.7	1.511	PNL exp.	1239.8	1032.7	2400.5	4679.0
					Rowe model	1294.6	1041.1	2110.4	4684.5
					HTL model	1469.6	1028.9	1679.7	4820.0
112	6.302	670.0	2726.0	0.603	PNL exp.	988.6	886.2	1912.3	2970.1
					Rowe model	1014.6	870.9	2065.6	2933.7
					HTL model	1085.4	855.4	2059.8	2935.5
113	6.316	702.5	2685.3	0.798	PNL exp.	1144.2	965.3	1885.2	2970.1
					Rowe model	1166.6	972.8	2030.9	2891.1
					HTL model	1267.8	964.5	1608.8	2023.9

Table C-5 (Continue)

Run No.	Experimental condition				Case	Exit enthalpy [kJ/kg]		Exit mass velocity [kg/m ² s]	
	P [MPa]	h _{in} [kJ/kg]	G [kg/m ² s]	q [MW/m ²]		ch. 1	ch. 2	ch. 1	ch. 2
114	6.309	688.5	2698.9	1.028	PNL exp.	1256.0	1046.7	1437.6	3092.2
					Rowe model	1301.4	1047.9	1435.9	3096.1
					HTL model	1471.7	1033.9	1189.6	3173.7
115	6.309	688.5	2698.9	1.095	PNL exp.	1332.8	1070.0	1207.0	3200.7
					Rowe model	1358.1	1073.1	1271.5	3147.8
					HTL model	1546.7	1056.9	1113.8	3197.4
116	6.309	688.5	2685.3	0.0	PNL exp.	711.8	697.8	1858.0	2943.0
					Rowe model	688.5	688.5	2010.9	2896.8
					HTL model	688.5	688.5	2012.9	2896.8
117	6.329	688.5	1369.8	0.0	PNL exp.	702.5	697.8	935.8	1519.0
					Rowe model	688.5	688.5	1021.1	1479.4
					HTL model	688.5	688.5	1.21.1	1479.4
118	6.322	688.5	1383.4	0.338	PNL exp.	993.2	900.2	962.9	1573.2
					Rowe model	1061.1	911.4	1072.6	1481.1
					HTL model	1132.5	894.7	1082.0	1478.1
119	6.322	695.5	1369.8	0.498	PNL exp.	1158.4	1021.1	949.4	1546.1
					Rowe model	1252.1	1033.8	933.6	1507.0
					HTL model	1373.0	1018.2	825.6	1500.9
120	6.322	693.2	1369.8	0.577	PNL exp.	1314.2	1081.6	691.7	1546.1
					Rowe model	1358.9	1089.6	778.2	1507.0
					HTL model	1495.8	1070.3	752.5	1500.9

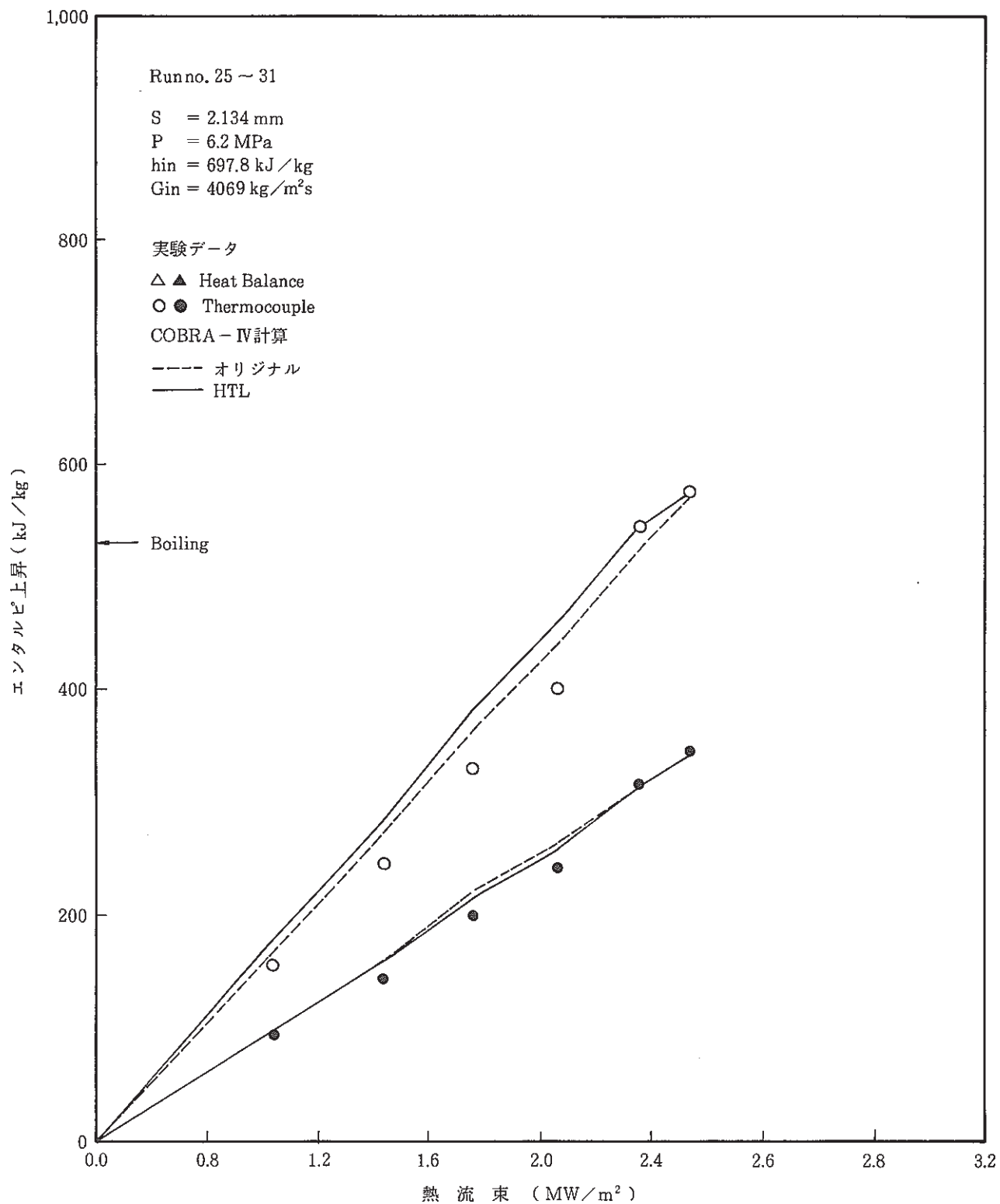


Fig. C-6-1 サブチャンネルのエンタルピー上昇 (PNL 平行チャンネル)

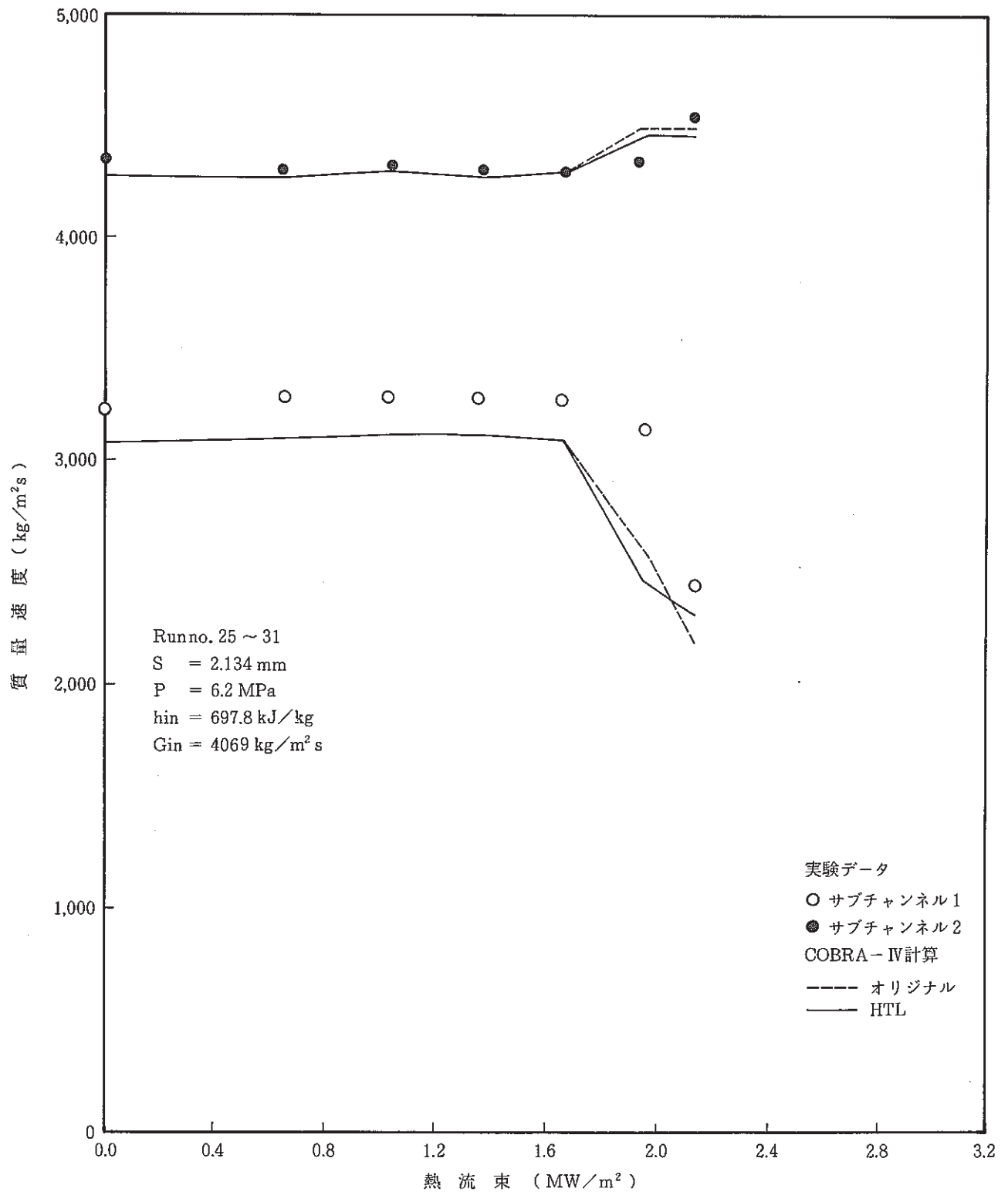


Fig. C-6-2 サブチャンネルの出口質量速度 (PNL 平行チャンネル)

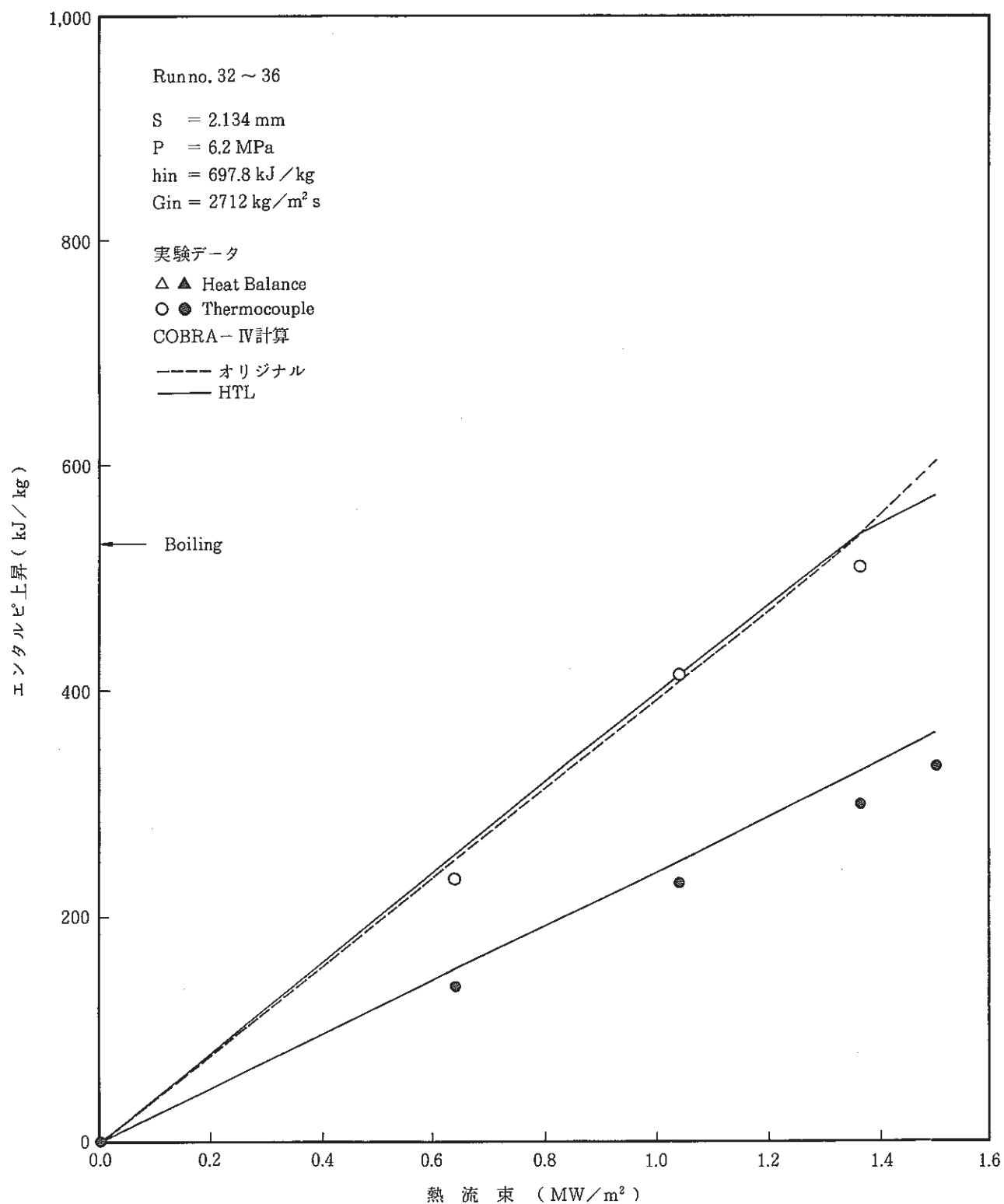


Fig. C-7-1 サブチャンネルのエンタルピー上昇 (PNL 平行チャンネル)

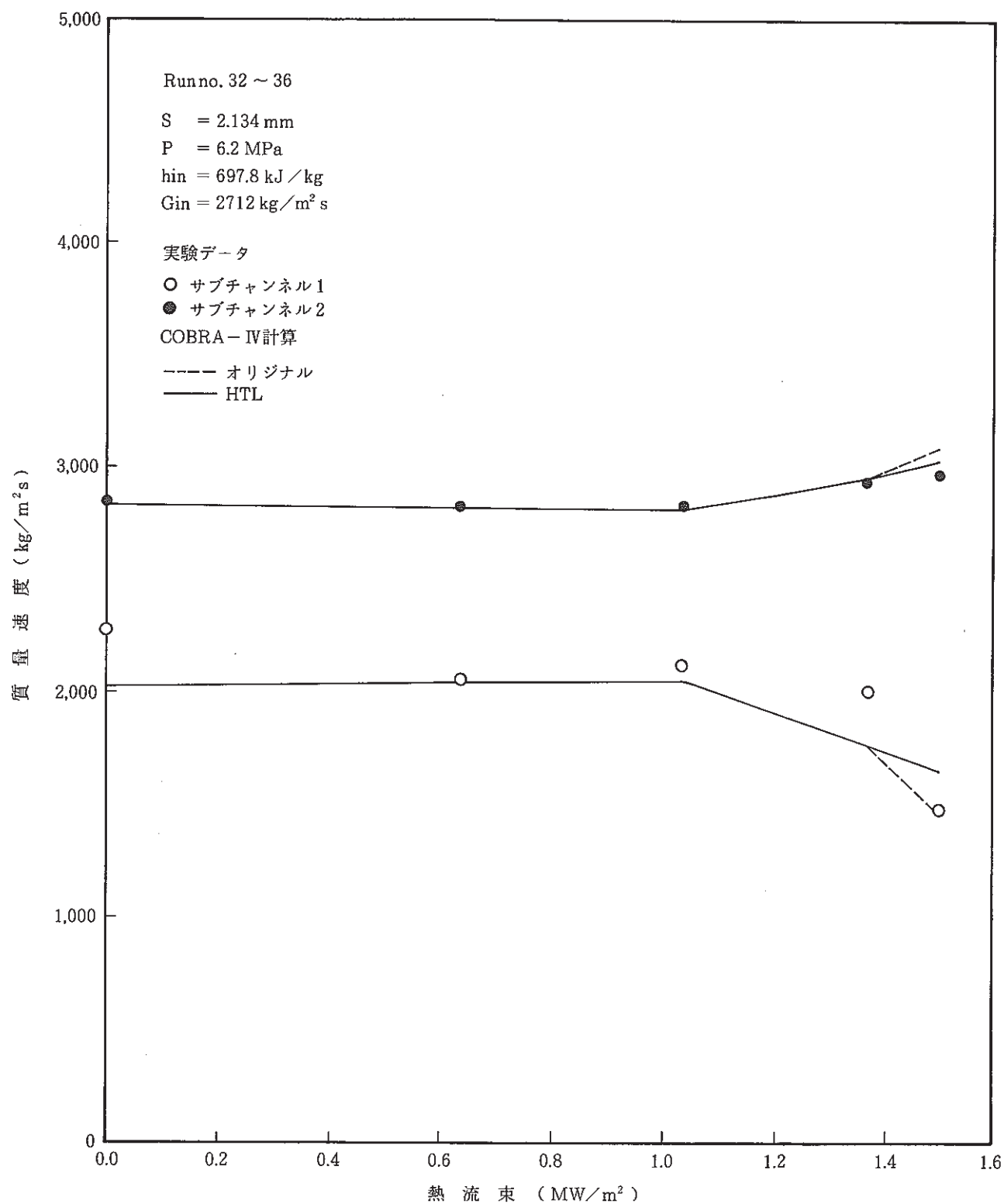


Fig. C-7-2 サブチャンネルの出口質量速度 (PNL 平行チャンネル)

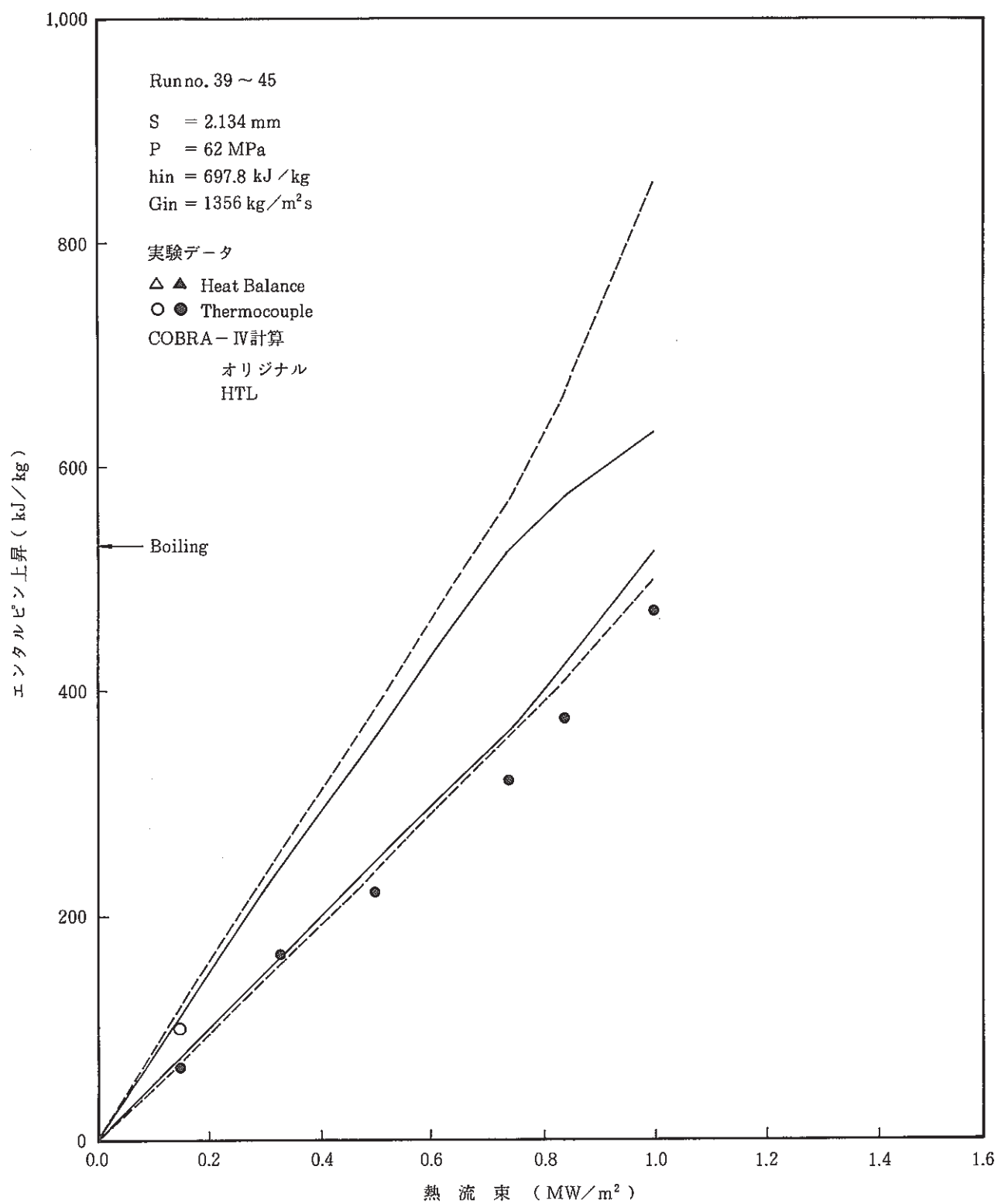


Fig. C-8-1 サブチャンネルのエンタルピ上昇 (PNL平行チャンネル)

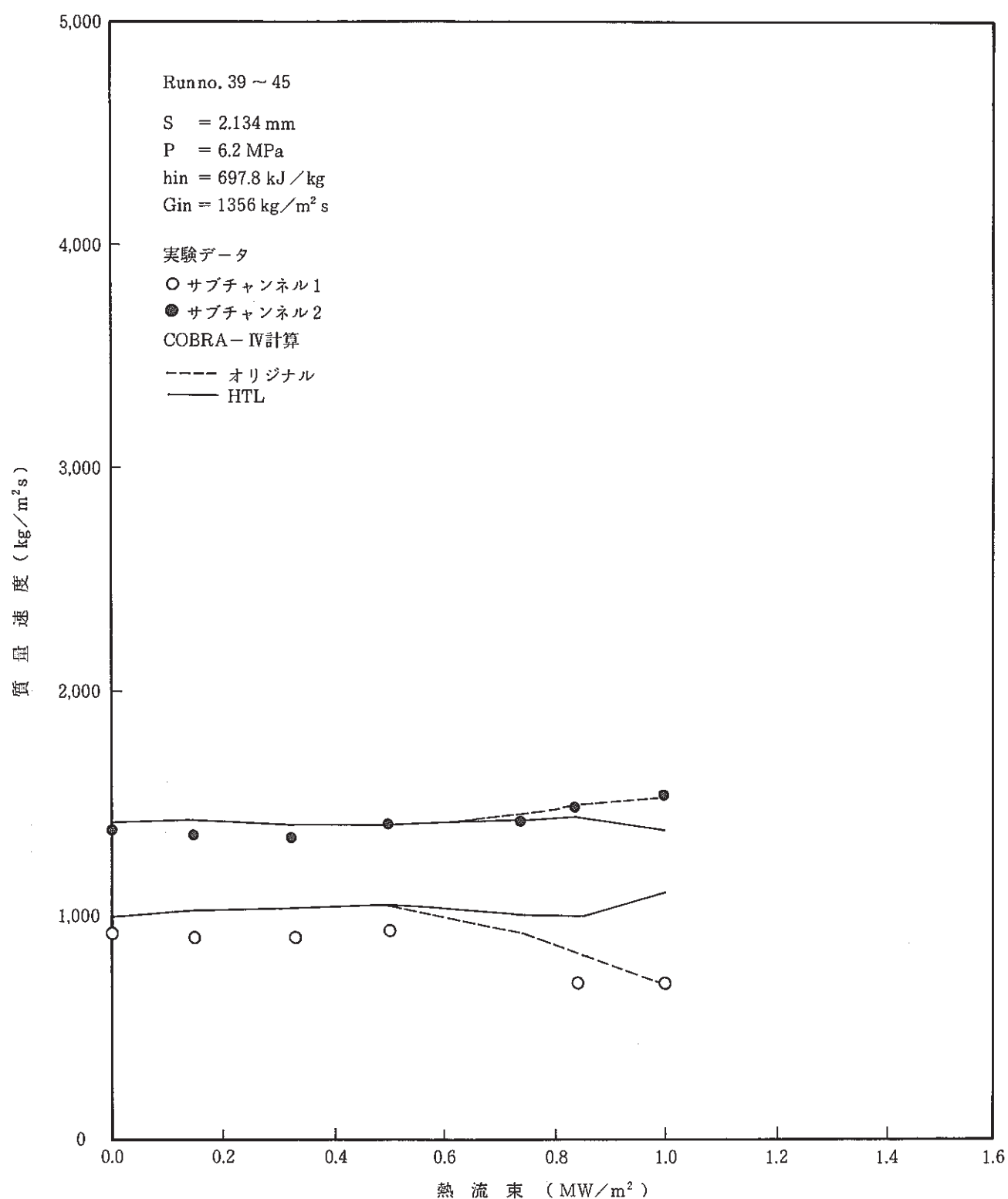


Fig. C-8-2 サブチャンネルの出口質量速度 (PNL 平行チャンネル)

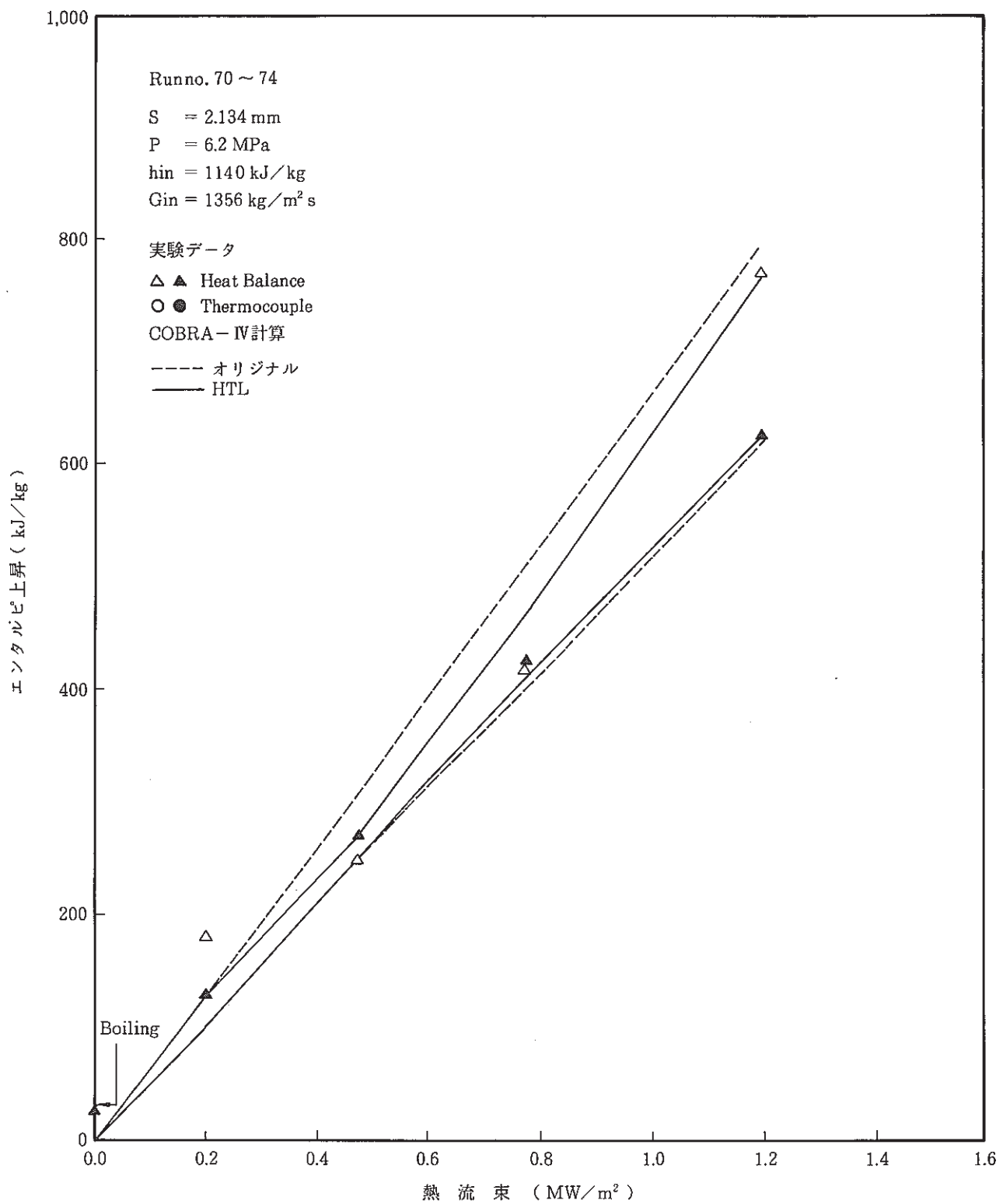


Fig. C-9-1 サブチャンネルのエンタルピー上昇 (PNL平行チャンネル)

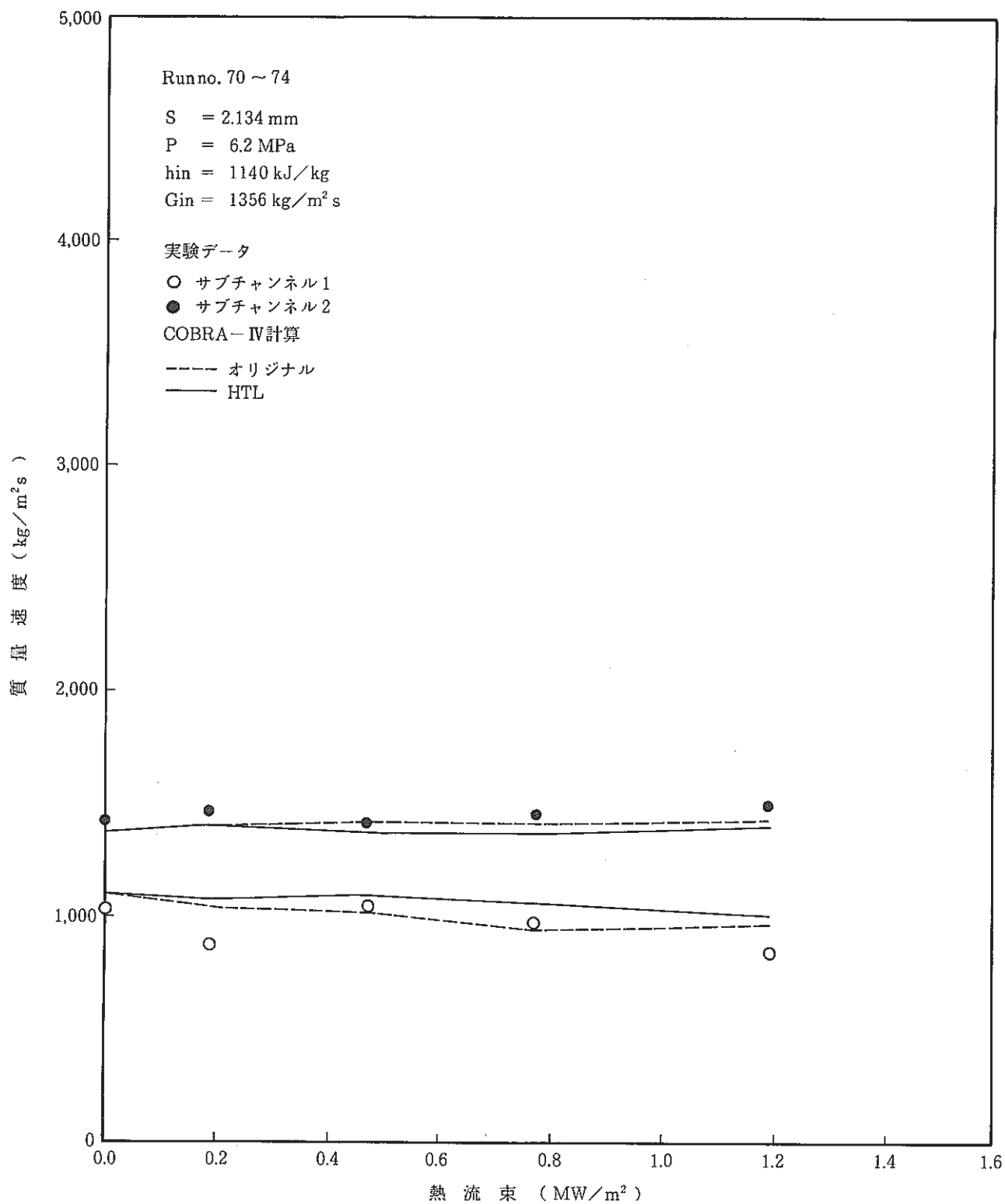


Fig. C-9-2 サブチャンネルの出口質量速度 (PNL 平行チャンネル)

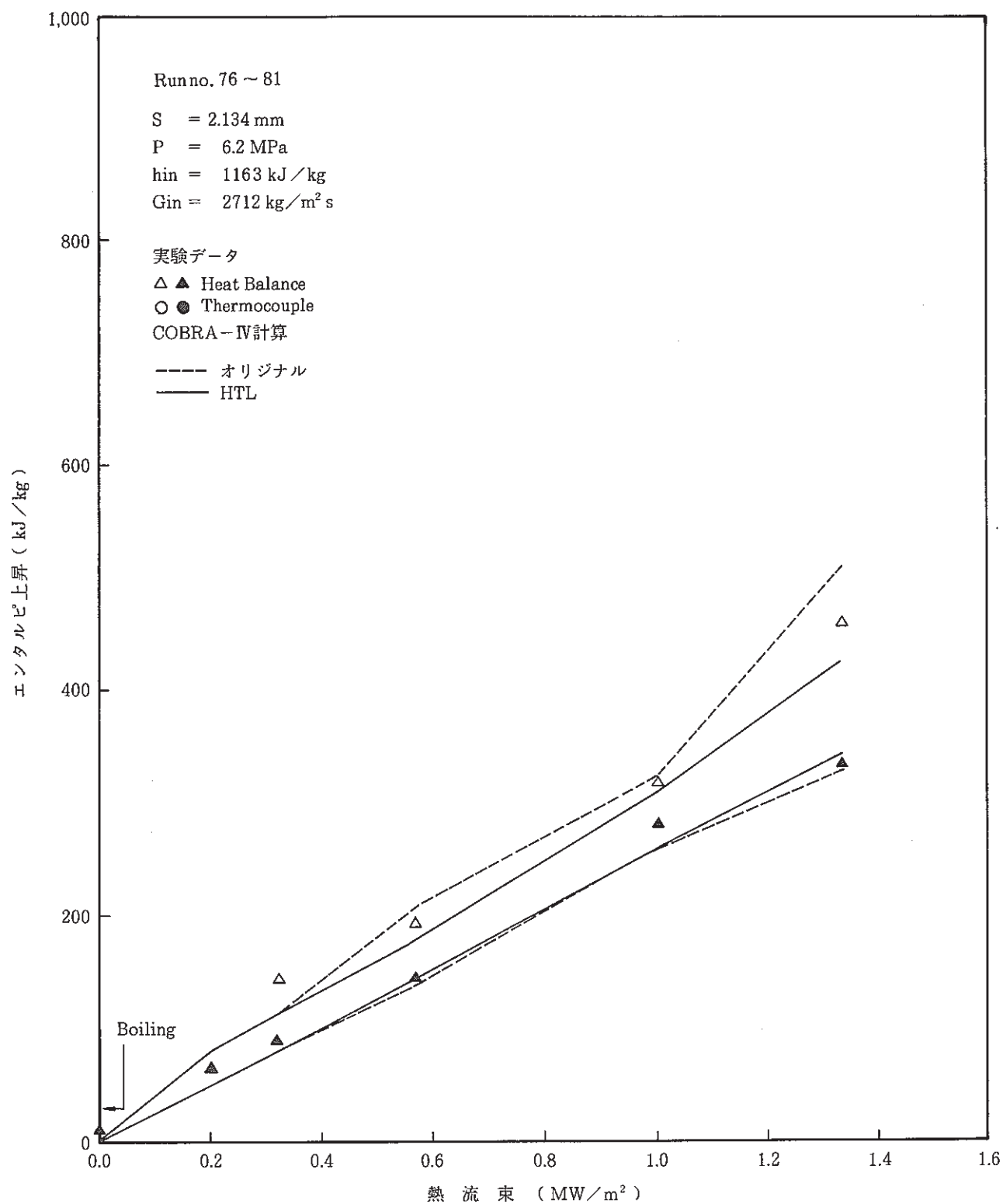


Fig.C-10-1 サブチャンネルのエンタルピー上昇 (PNL 平行チャンネル)

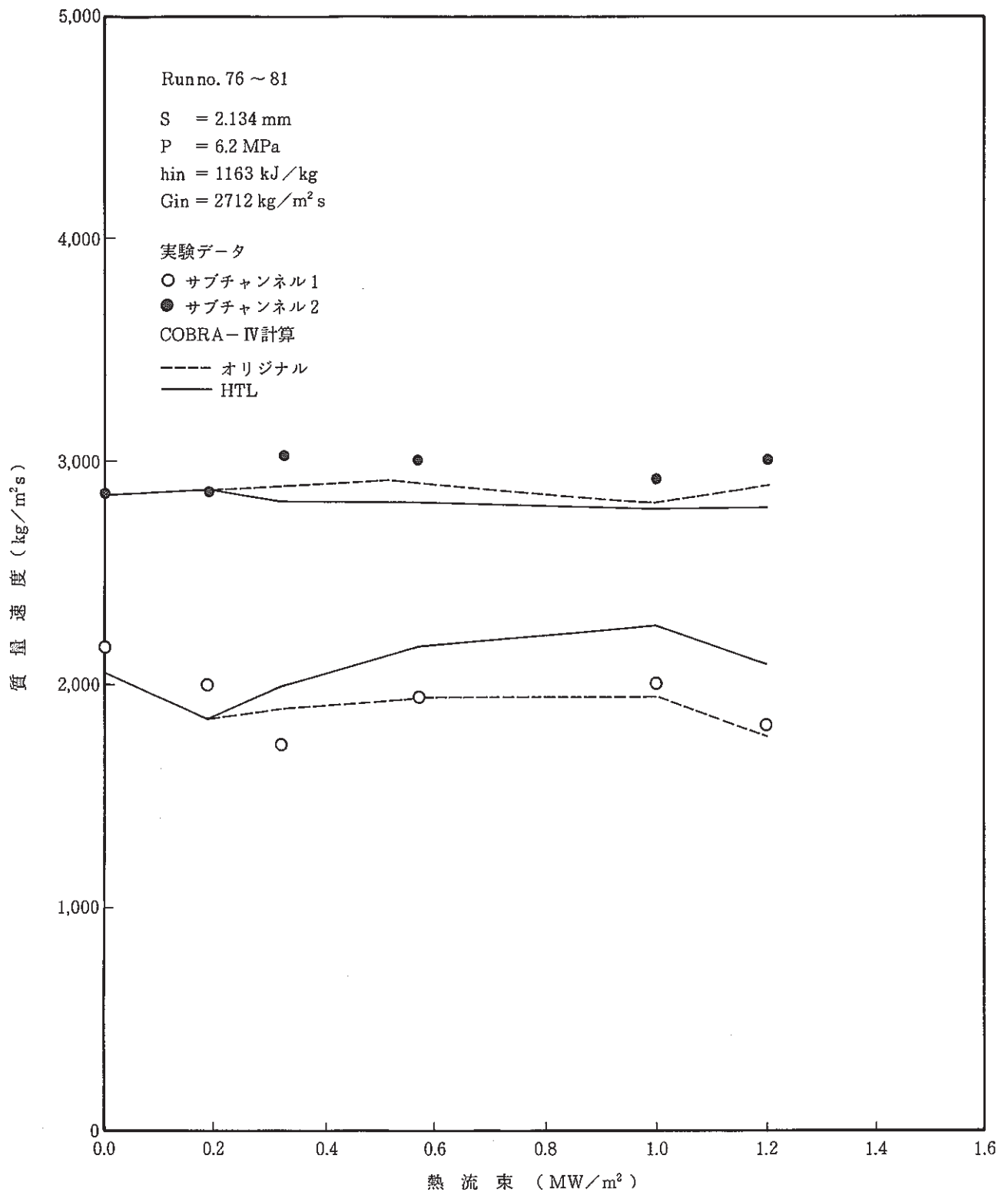


Fig. C-10-2 サブチャンネルの出口質量速度 (PNL 平行チャンネル)

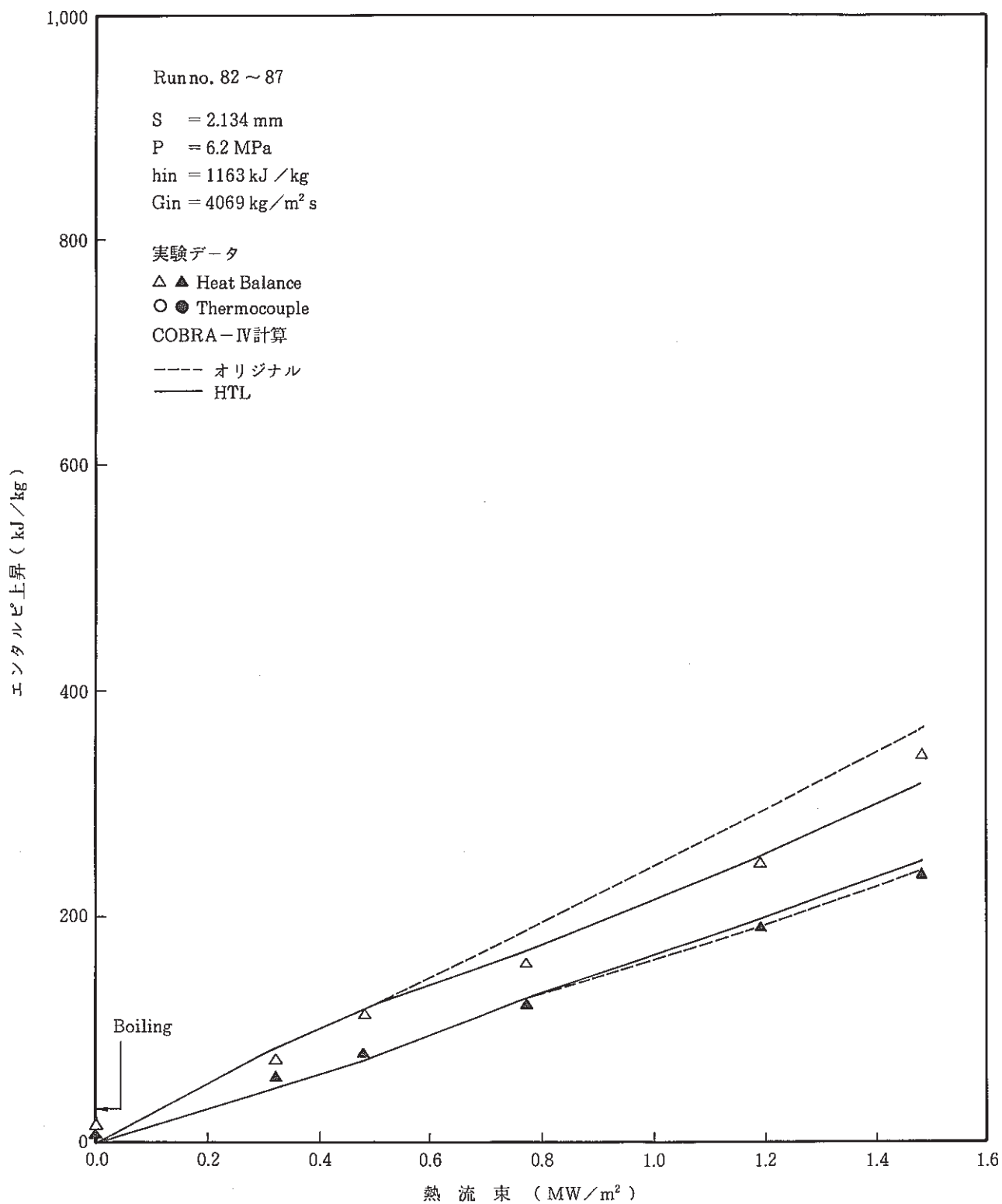


Fig. C-11-1 サブチャンネルのエンタルピー上昇 (PNL平行チャンネル)

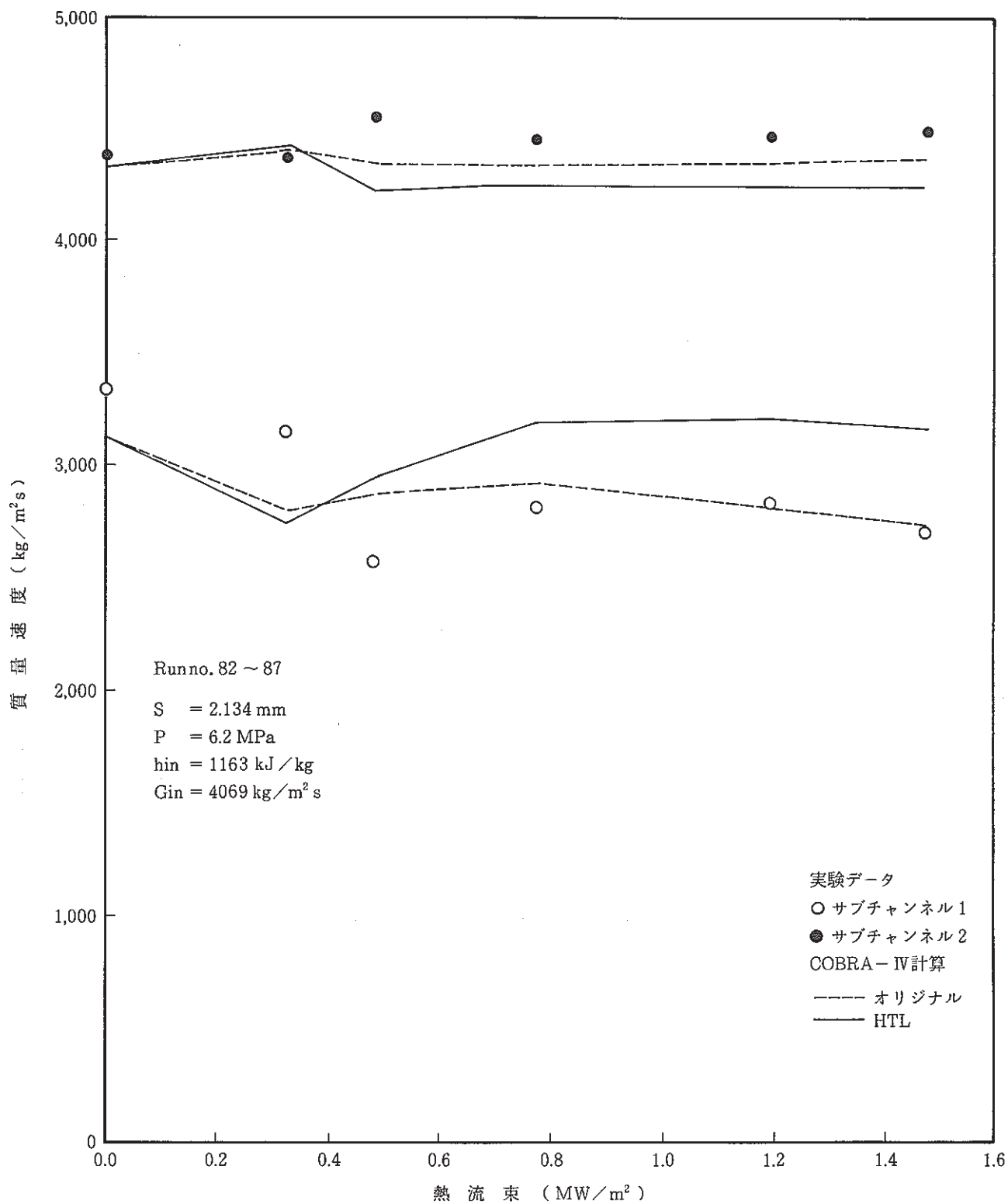


Fig. C-11-2 サブチャンネルの出口質量速度 (PNL 平行チャンネル)

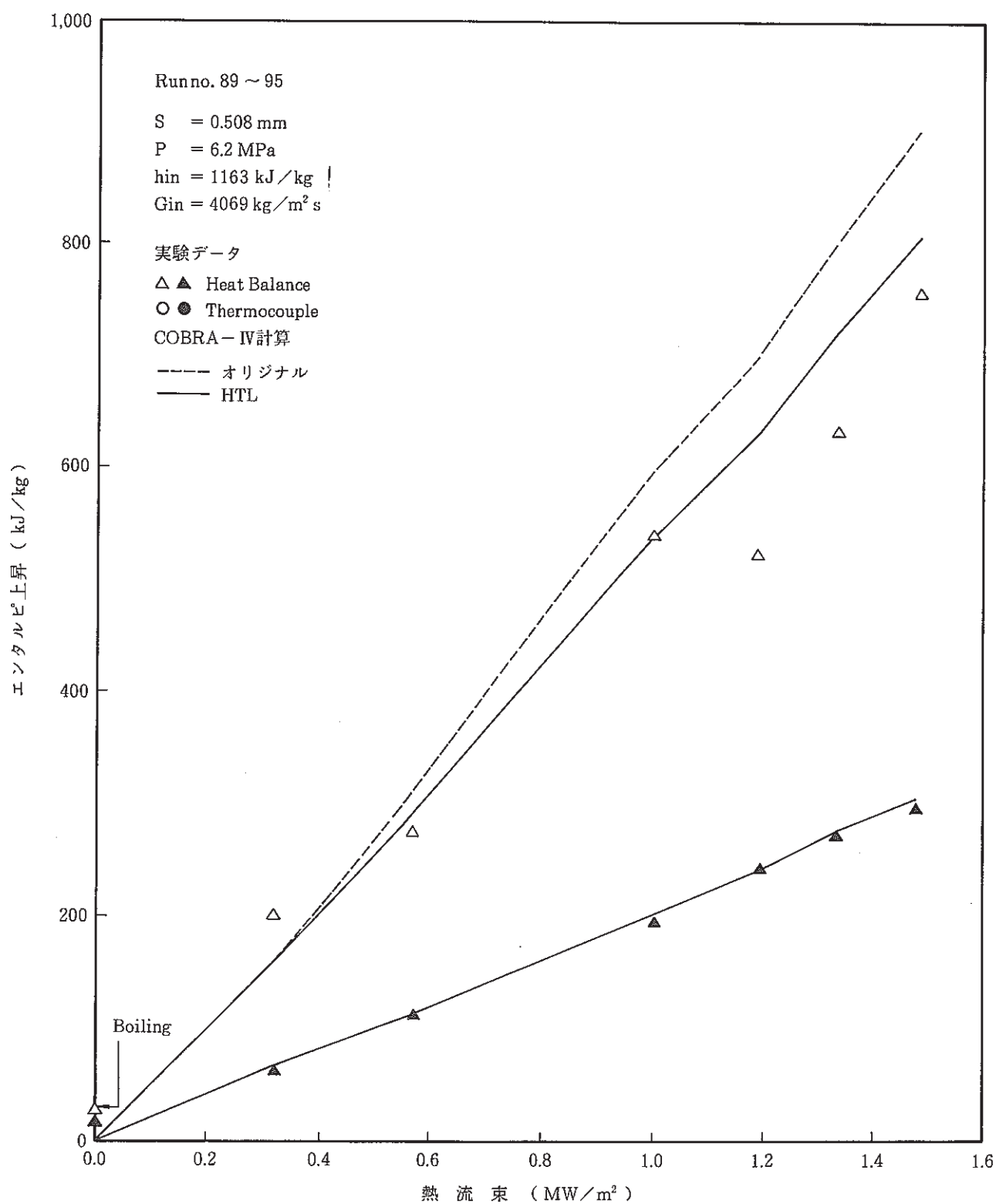


Fig.C-12-1 サブチャンネルのエンタルピー上昇 (PNL 平行チャンネル)

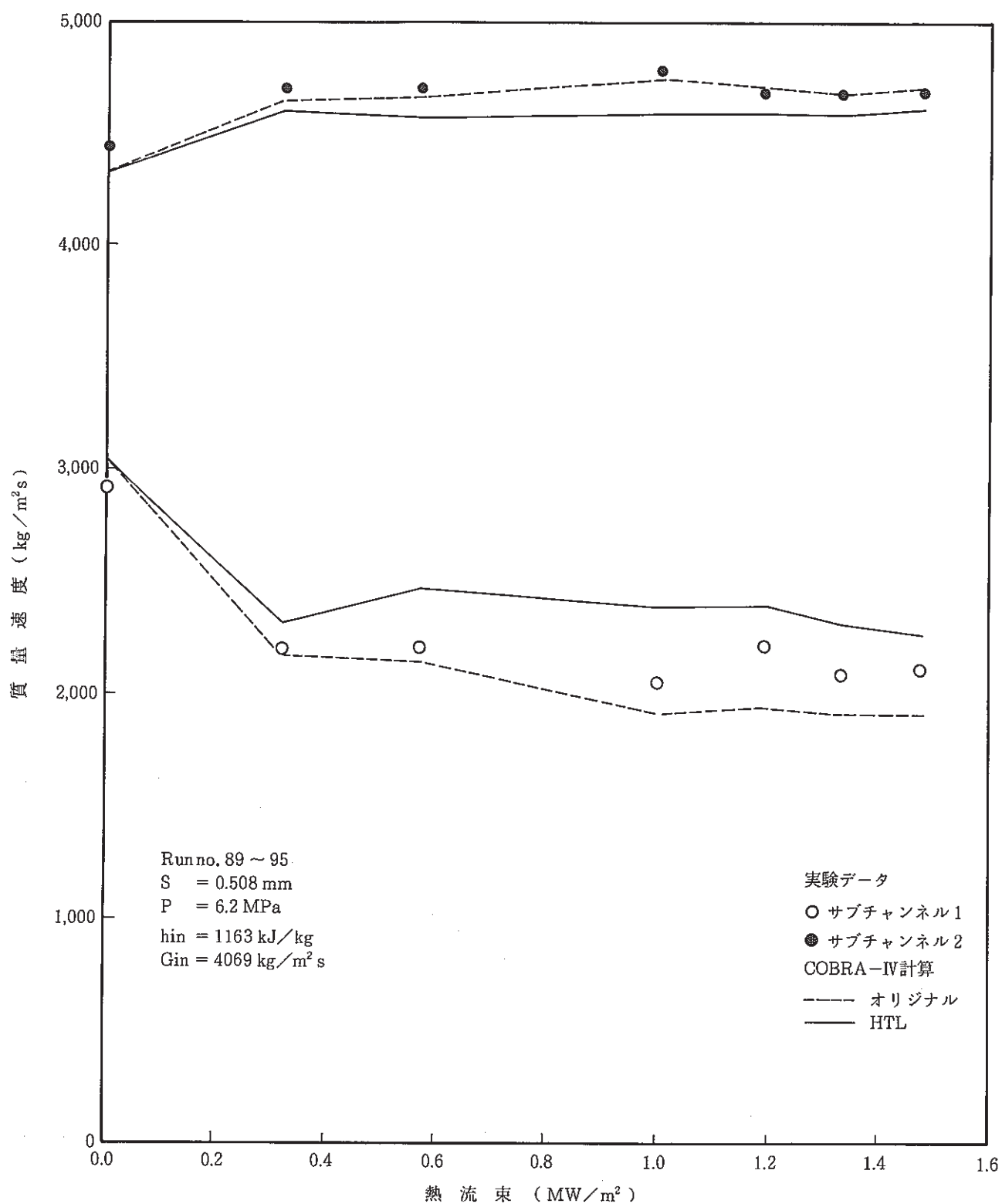


Fig. C-12-2 サブチャンネルの出口質量速度 (PNL 平行チャンネル)

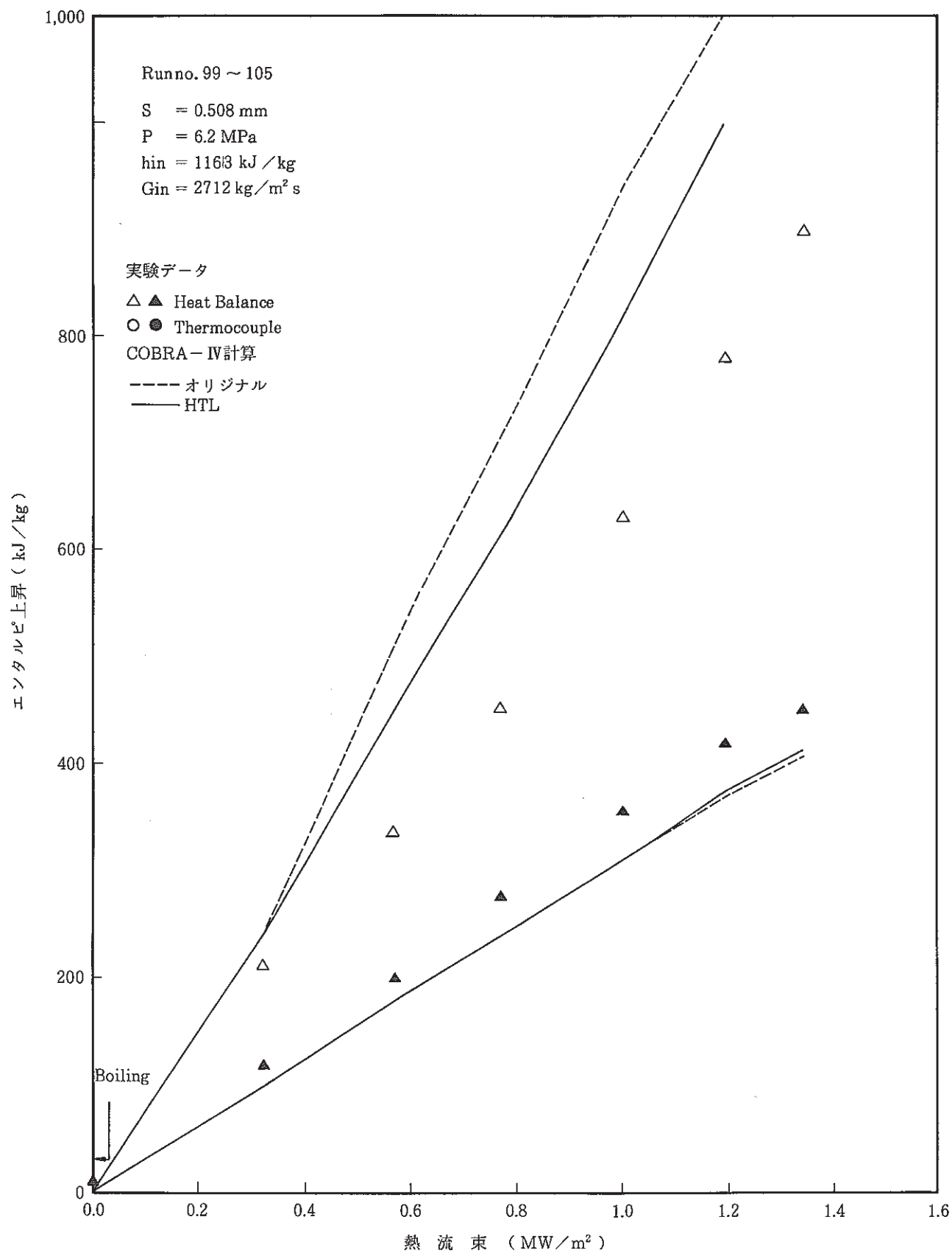


Fig.C-13-1 サブチャンネルのエンタルピー上昇 (PNL 平行チャンネル)

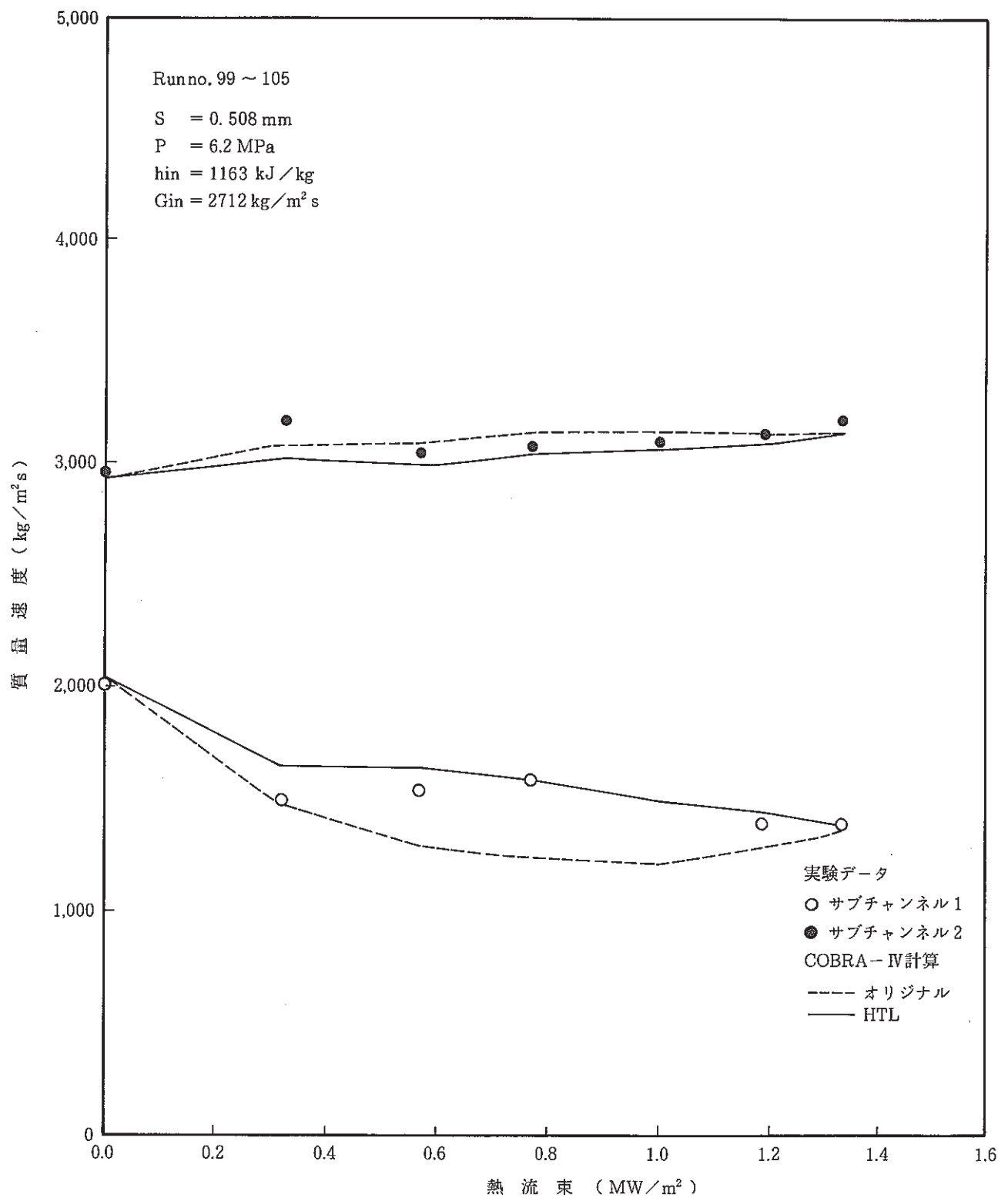


Fig. C-13-2 サブチャンネルの出口質量速度 (PNL 平行チャンネル)

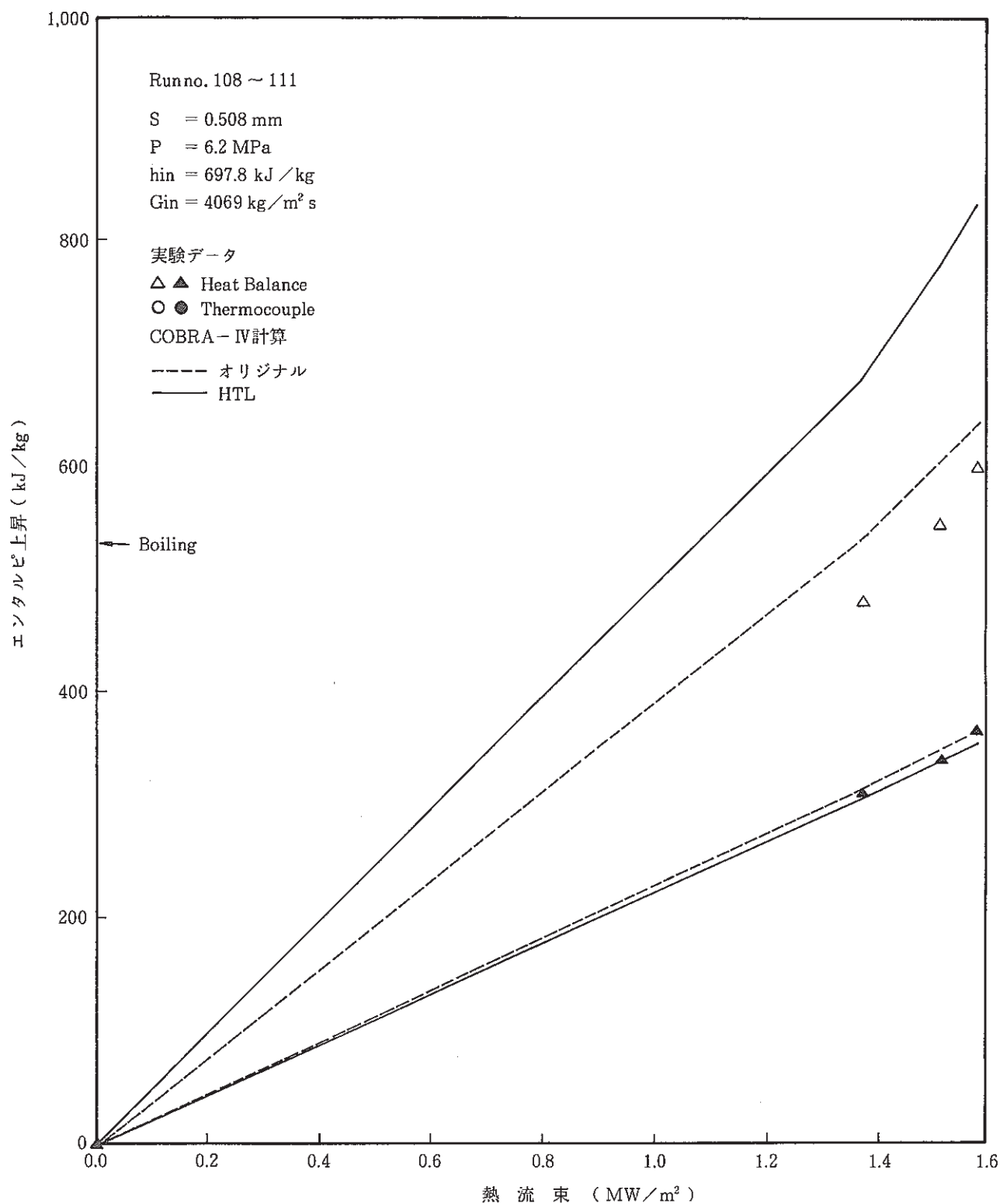


Fig. C-14-1 サブチャンネルのエンタルピー上昇 (PNL 平行チャンネル)

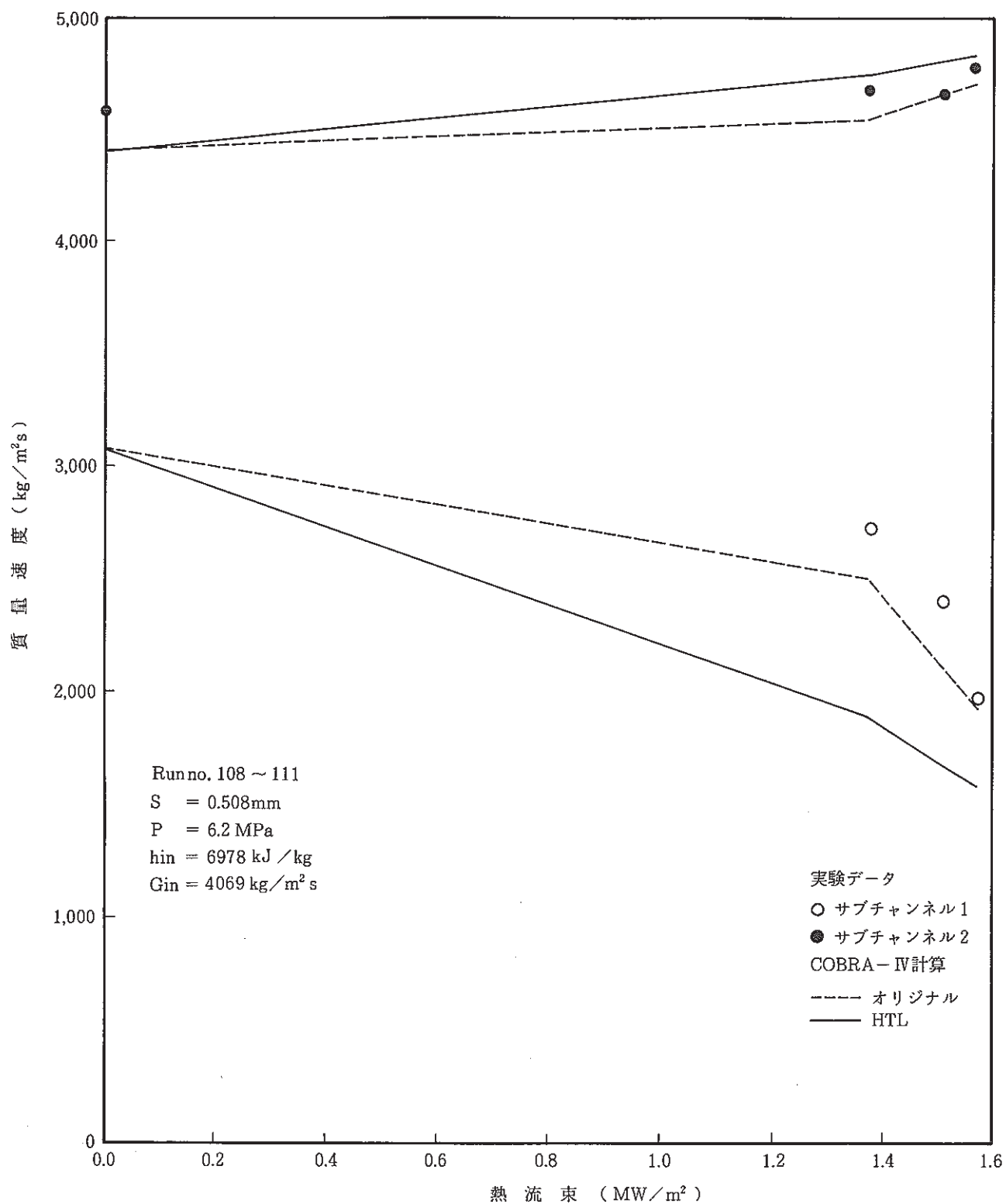


Fig. C-14-2 サブチャンネルの出口質量速度 (PNL 平行チャンネル)

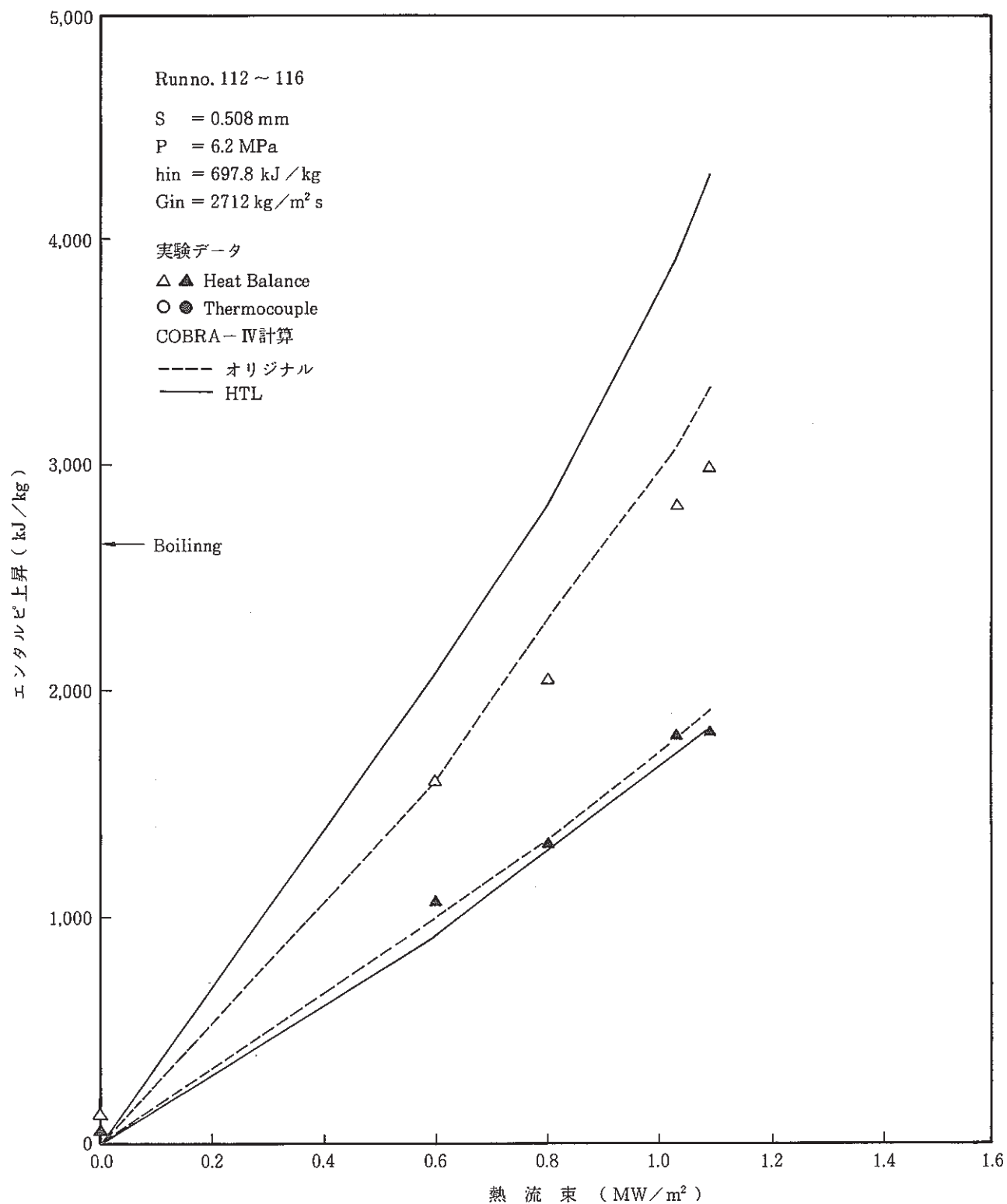


Fig. C-15-1 サブチャンネルのエンタルピー上昇 (PNL 平行チャンネル)

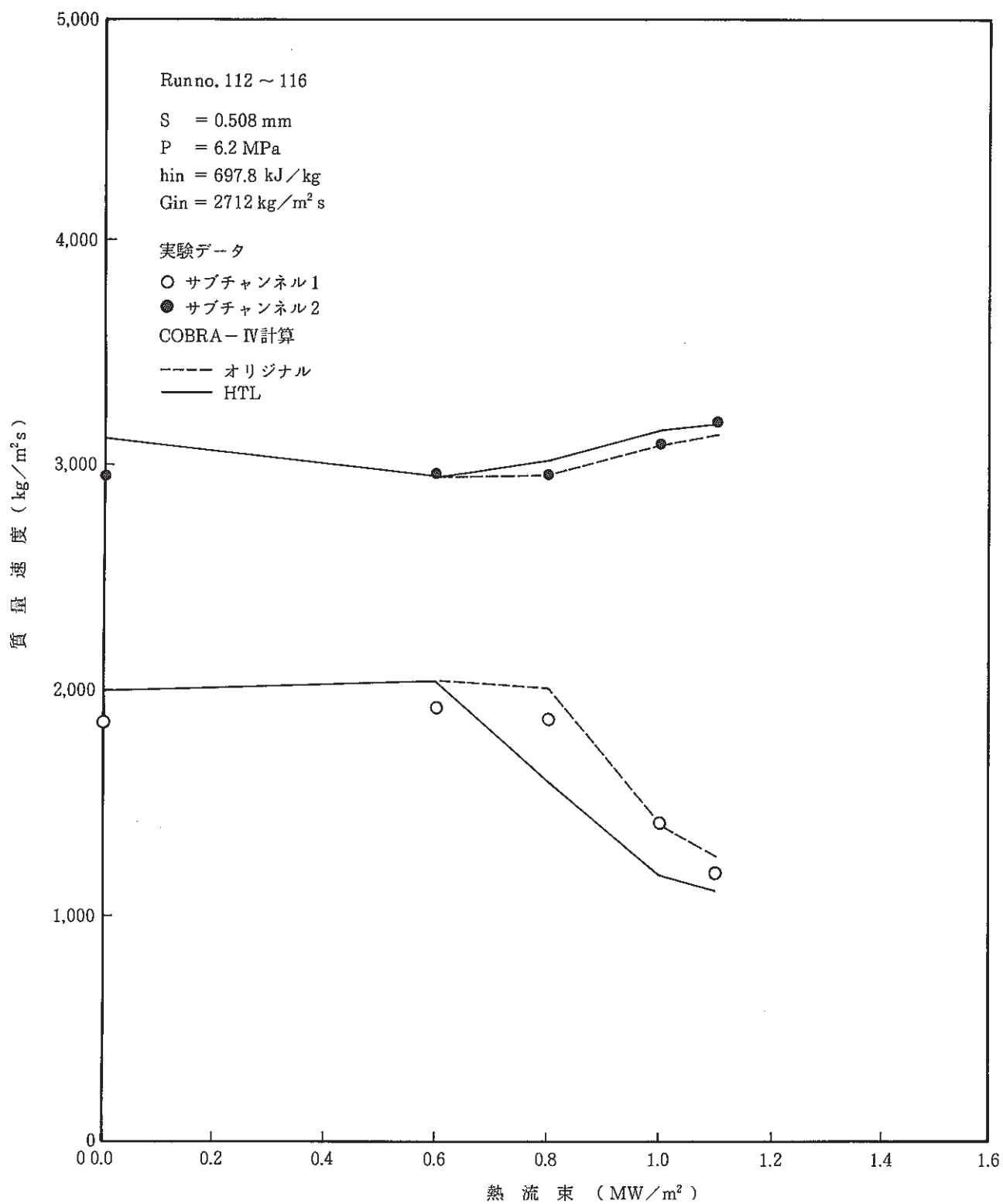


Fig. C-15-2 サブチャンネルの出口質量速度 (PNL 平行チャンネル)

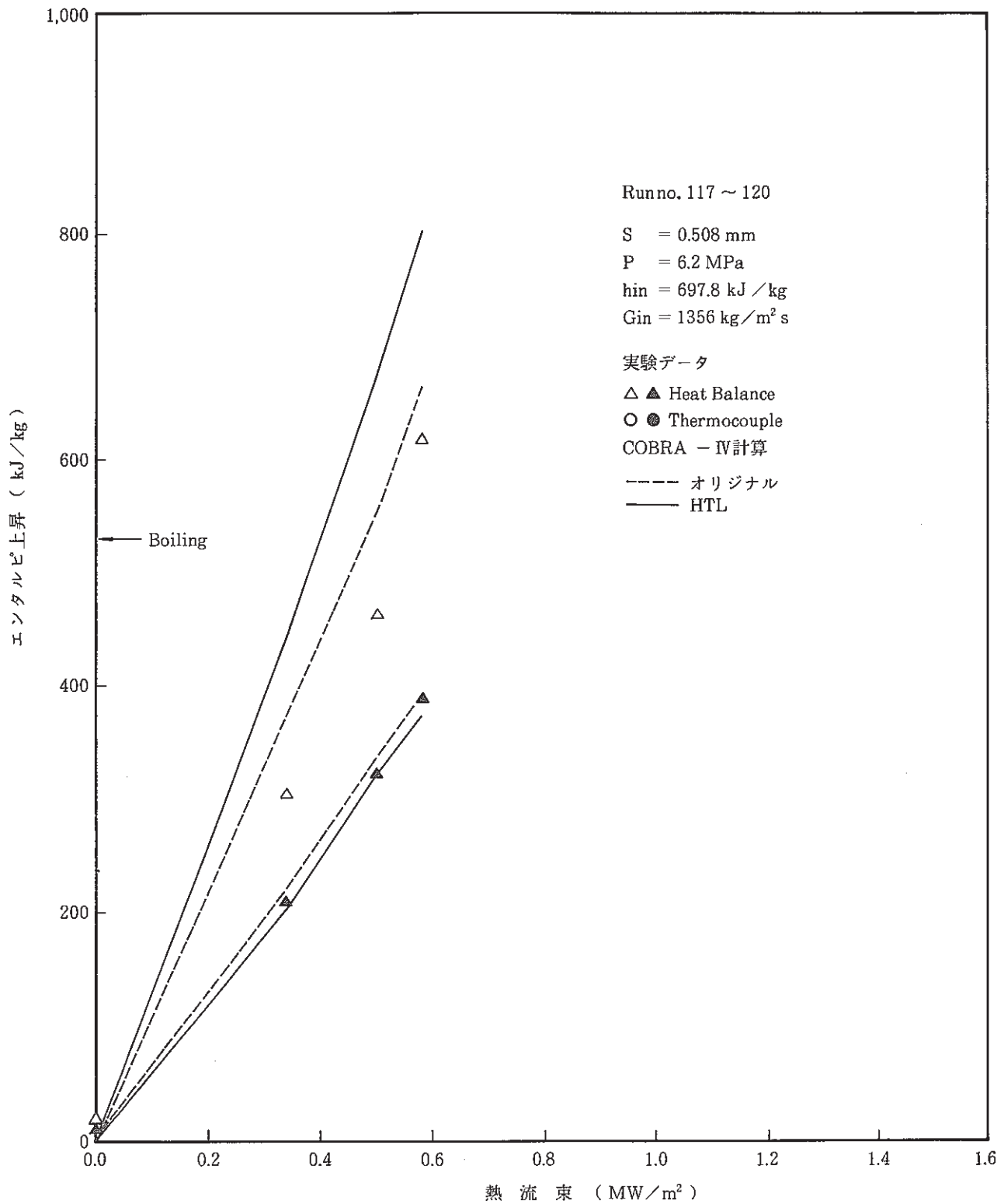


Fig. C-16-1 サブチャンネルのエンタルピー上昇 (PNL 平行チャンネル)

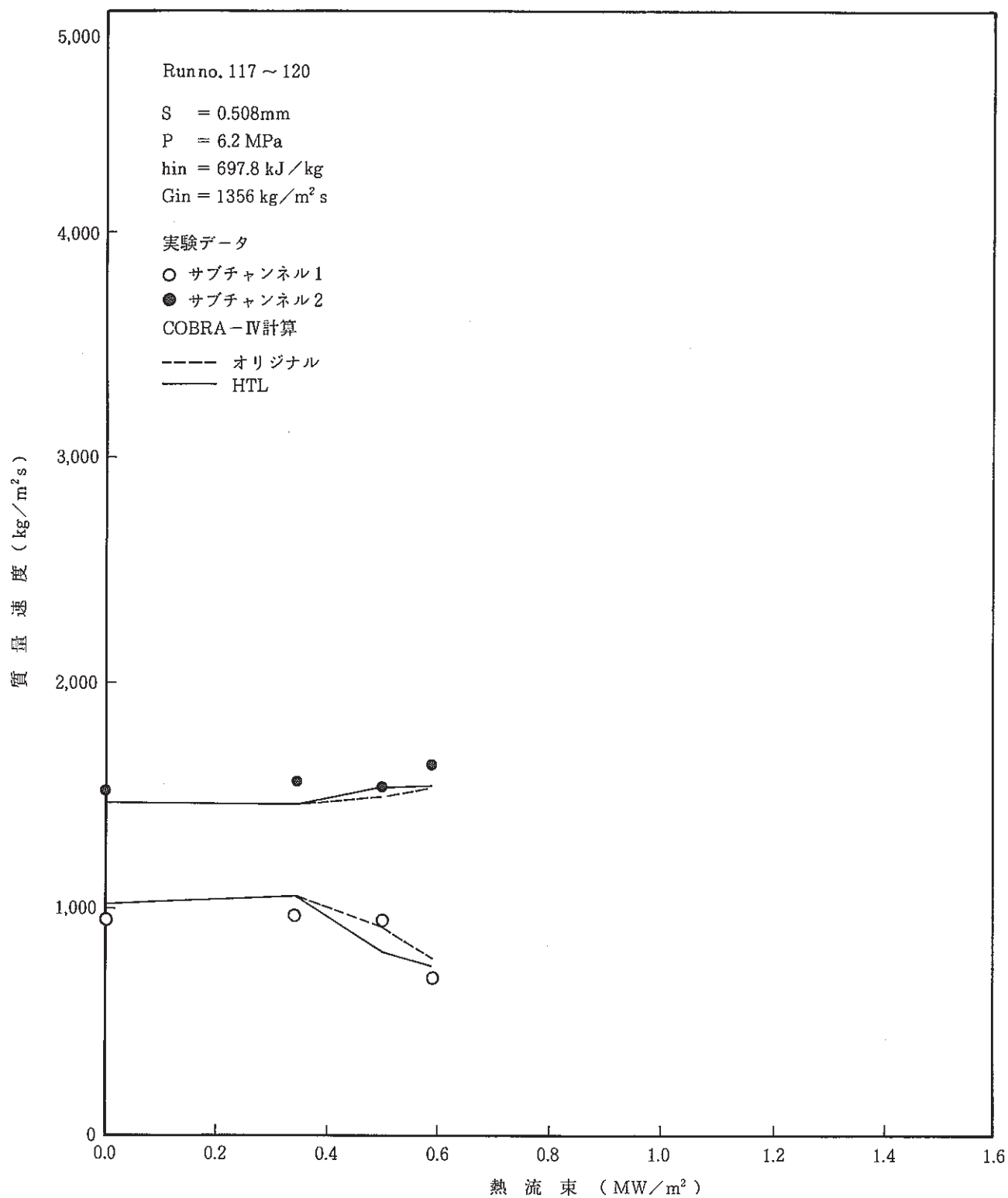


Fig. C-16-2 サブチャンネルの出口質量速度 (PNL 平行チャンネル)