

JAERI-M
88-170

燃料温度解析コードTEM DIMの検証

1988年9月

丸山 創・藤本 望・藤井 貞夫*・渡部 隆*
数土 幸夫

JAERI-Mレポートは、日本原子力研究所が不定期に公刊している研究報告書です。

入手の間合わせは、日本原子力研究所技術情報部情報資料課（〒319-11 茨城県那珂郡東海村）あて、お申しこしてください。なお、このほかに財団法人原子力弘済会資料センター（〒319-11 茨城県那珂郡東海村日本原子力研究所内）で複写による実費領布をおこなっております。

JAERI-M reports are issued irregularly.

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

© Japan Atomic Energy Research Institute, 1988

編集兼発行 日本原子力研究所
印刷 日青工業株式会社

燃料温度解析コードTEMDIMの検証

日本原子力研究所大洗研究所高温工学試験研究炉設計室

丸山 創・藤本 望・藤井 貞夫*

渡部 隆*・数土 幸夫

(1988年8月12日受理)

本報は、現在日本原子力研究所が設計を進めている高温工学試験研究炉 (HTTR: High Temperature Engineering Test Reactor) の炉心熱流体力設計において、燃料温度解析に用いる計算コードTEMDIMの検証結果についてまとめたものである。検証解析は、HENDEL燃料体スタック実証試験部1チャンネル試験装置 (T₁₋₃) による伝熱流動試験結果を用いて行い、燃料温度評価手法の妥当性、保守性が確認された。

Verification of Fuel Temperature Analysis
Code "TEMDIM"

Soh MARUYAMA, Nozomu FUJIMOTO, Sadao FUJII*
Takashi WATANABE* and Yukio SUDO

HTTR Designing Laboratory
Oarai Research Establishment
Japan Atomic Energy Research Institute
Tokai-mura, Naka-gun, Ibaraki-ken

(Received August 12, 1988)

This report presents the verification results of fuel temperature analysis code "TEMDIM" for core thermal and hydraulic design of the High Temperature Engineering Test Reactor (HTTR), which has been designed at the Japan Atomic Energy Research Institute (JAERI). The experimental results obtained by the single-channel test rig of HENDEL fuel stack test section (T_{1-s}) were used for the verification of TEMDIM code. The verification results show the adequateness and conservativeness of fuel temperature analysis methods in core thermal and hydraulic design.

Keywords: HTTR, Fuel Temperature Analysis, Computer Code, TEMDIM,
Verification, Core Thermal and Hydraulic Design,
Single-channel Test Rig, HENDEL

* KAWASAKI HEAVY INDUSTRIES, LTD.

目 次

1. 緒 言	1
2. TEMDIMの概要	6
2.1 コードの特徴	6
2.2 計算モデル	6
3. HENDEL T _{1-s} 試験装置及び試験結果	12
3.1 HENDEL T _{1-s} 試験装置の概要	12
3.2 検証解析に使用した試験結果	12
4. 解析モデル及び解析条件	35
4.1 解析モデル	35
4.2 解析条件	35
5. 検証解析結果	47
6. 結 言	71
謝 辞	72
参考文献	72

Contents

1. Introduction	1
2. Outline of TEMDIM Code	6
2.1 Features of Code	6
2.2 Calculation Model	6
3. HENDEL T _{1-s} and Experimental Results	12
3.1 Outline of HENDEL T _{1-s}	12
3.2 Experimental Results for Verification	12
4. Analytical Model and Conditions	35
4.1 Analytical Model	35
4.2 Analytical Conditions	35
5. Analytical Results	47
6. Conclusion	71
Acknowledgement	72
References	72

1. 緒 言

現在、日本原子力研究所では、高温ガス炉の基盤技術の確立と高度化、高温における先端的基礎研究を目的とした、熱出力30MW、原子炉出口冷却材温度950°Cの高温工学試験研究炉⁽¹⁾ (HTTR: High Temperature Engineering Test Reactorの略)の設計を進めている。

HTTRの炉心領域は、Fig. 1.1及び1.2に示すように、六角柱状の黒鉛ブロックを積み重ねたカラムの集合体であり、燃料カラム30カラムと制御棒案内カラム7カラム(燃料照射試験時には中央の1カラムを照射用カラムとする場合がある)の計37カラムから成る燃料領域と、それを取り囲む可動反射体カラム15カラム(内3カラムは照射用カラム)と制御棒案内カラム9カラムの計24カラムから成る反射体領域の合計61カラムにより構成されている。燃料体は、高さ580mm、面間距離360mmの黒鉛ブロックに燃料要素(燃料棒又は燃料球)を装荷し、冷却材流路を確保したものである。その代表的な例をFig. 1.3に示す。

1次冷却材(40kg/cm³Gのヘリウムガス)は、原子炉压力容器(炉容器)底部の1次ヘリウムノズルから395°Cで流入し、炉床部及び炉側部の金属構造物並びに固定反射体を冷却しながら上向きに流れ、上部プレナムにおいて逆転して下降流となり、燃料体及び制御棒案内ブロックの冷却材流路に配分される。冷却材の流路には、これらの計画された流路の他に、カラム間、固定反射体間、黒鉛ブロック積層面等の隙間を流れる流路がある。燃料カラムに配分された冷却材は、燃料要素により加熱されながら下向きに流れ、高温プレナムにおいて他の流路から流出する冷却材と混合した後、出口管の内側を通過して炉外へ導びかれる。

HTTRの炉心熱流体力設計においては、Fig. 1.4に示すように、核計算により得られた出力分布、照射量分布及び炉内流動解析コードFLOWNET⁽²⁾を用いた冷却材流量配分解析により得られた冷却材流量配分を入力条件として、燃料温度解析コードTEMDIM⁽³⁾を用いて燃料最高温度を評価する。またTEMDIMにより得られた燃料温度分布に基づいて、被覆燃料粒子の破損率、燃料からの核分裂生成物(FP)放出率、1次冷却系循環放射線量等を評価する。

したがって炉心熱流体力設計上、TEMDIMによる燃料温度評価の妥当性の確認が重要となる。このため、HTTRとほぼ同一条件の下で行われた。HENDEL燃料体スタック実証試験部1チャンネル試験装置(T_{1-s})による伝熱流動試験結果を用いて、TEMDIMの検証解析を実施し、燃料温度評価方法の精度、保守性を確認した。

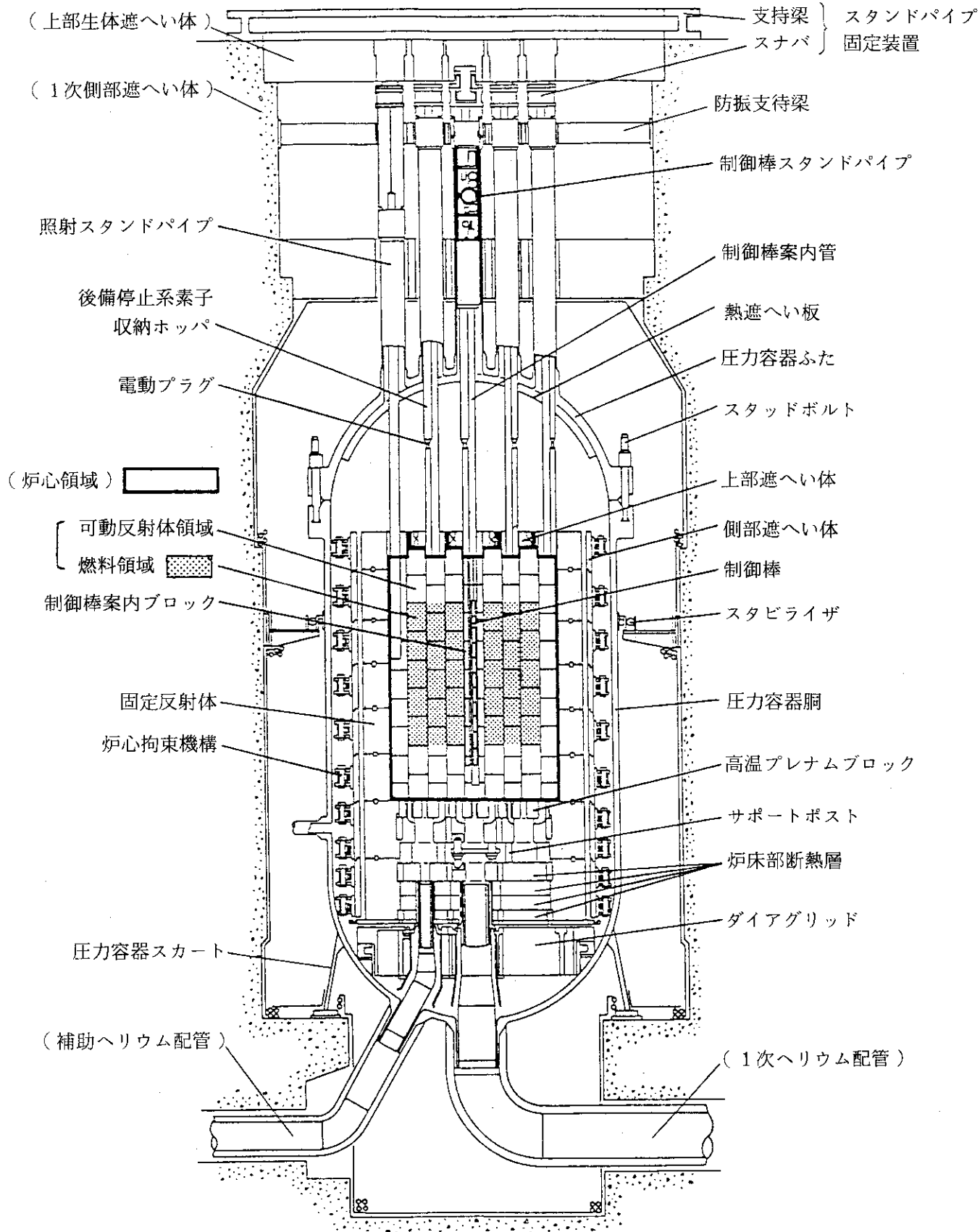


Fig. 1.1 原子炉縦断面図

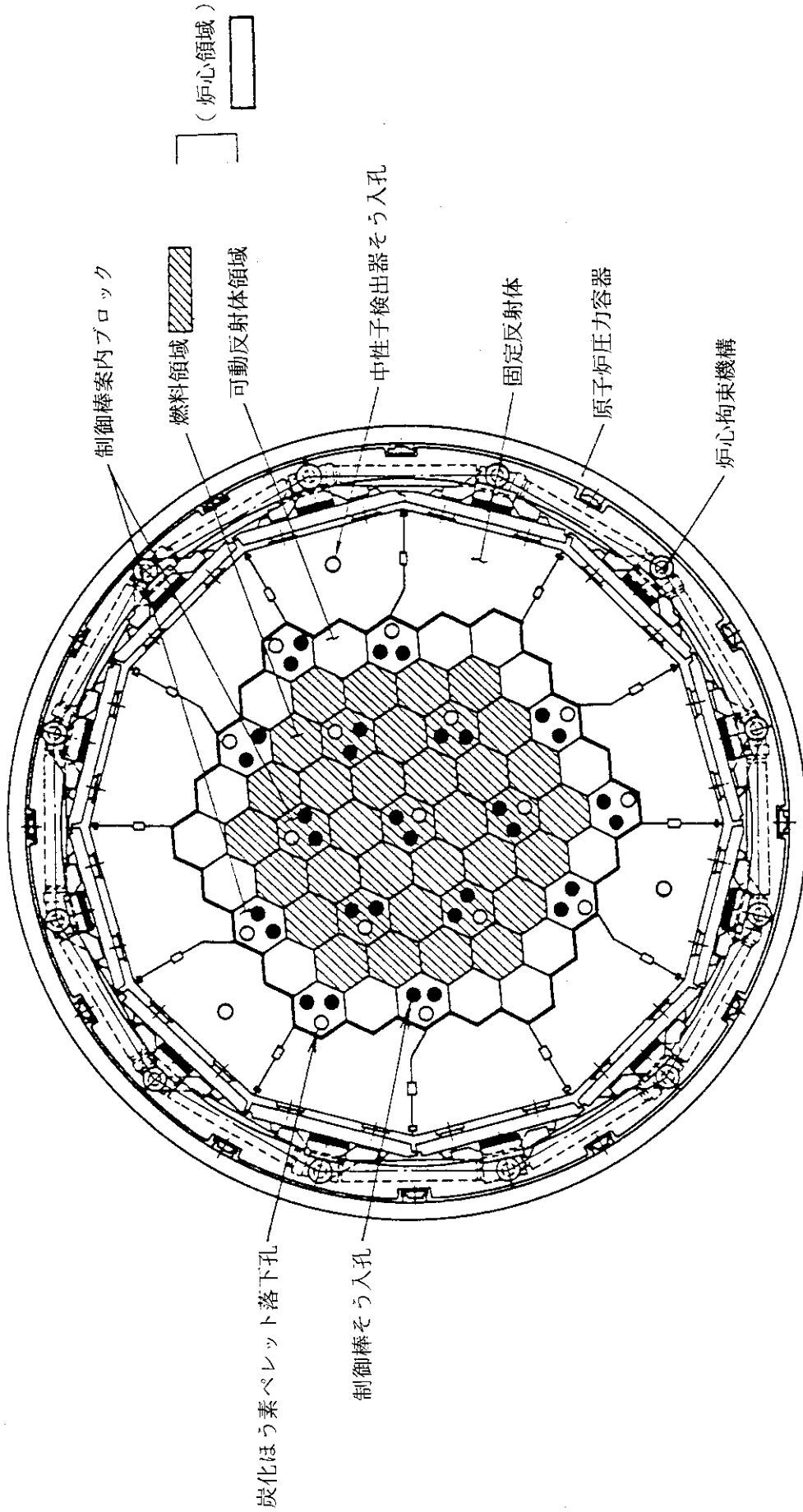


Fig. 1.2 原子炉水平断面図

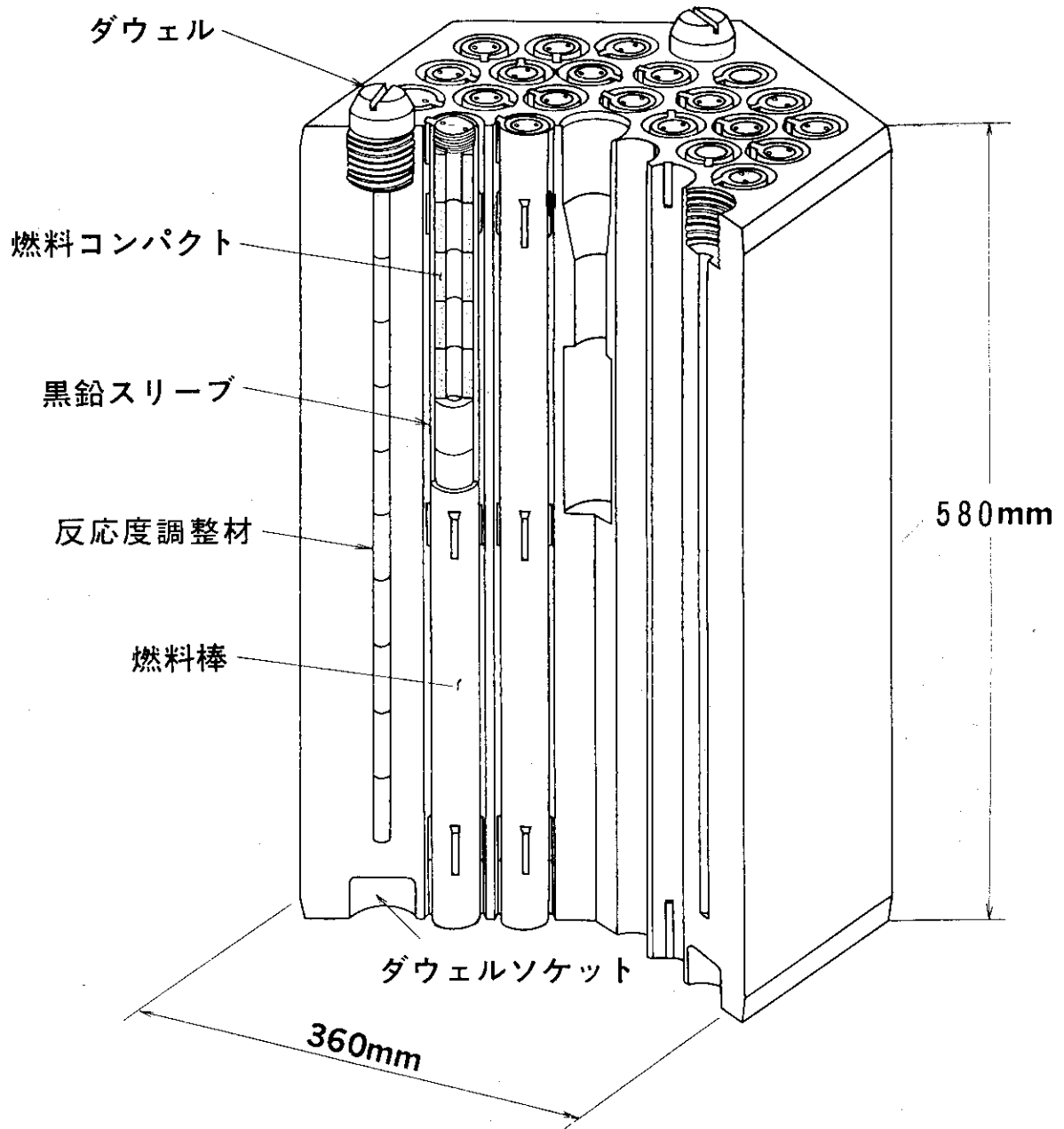


Fig. 1.3 燃料体概略構造図

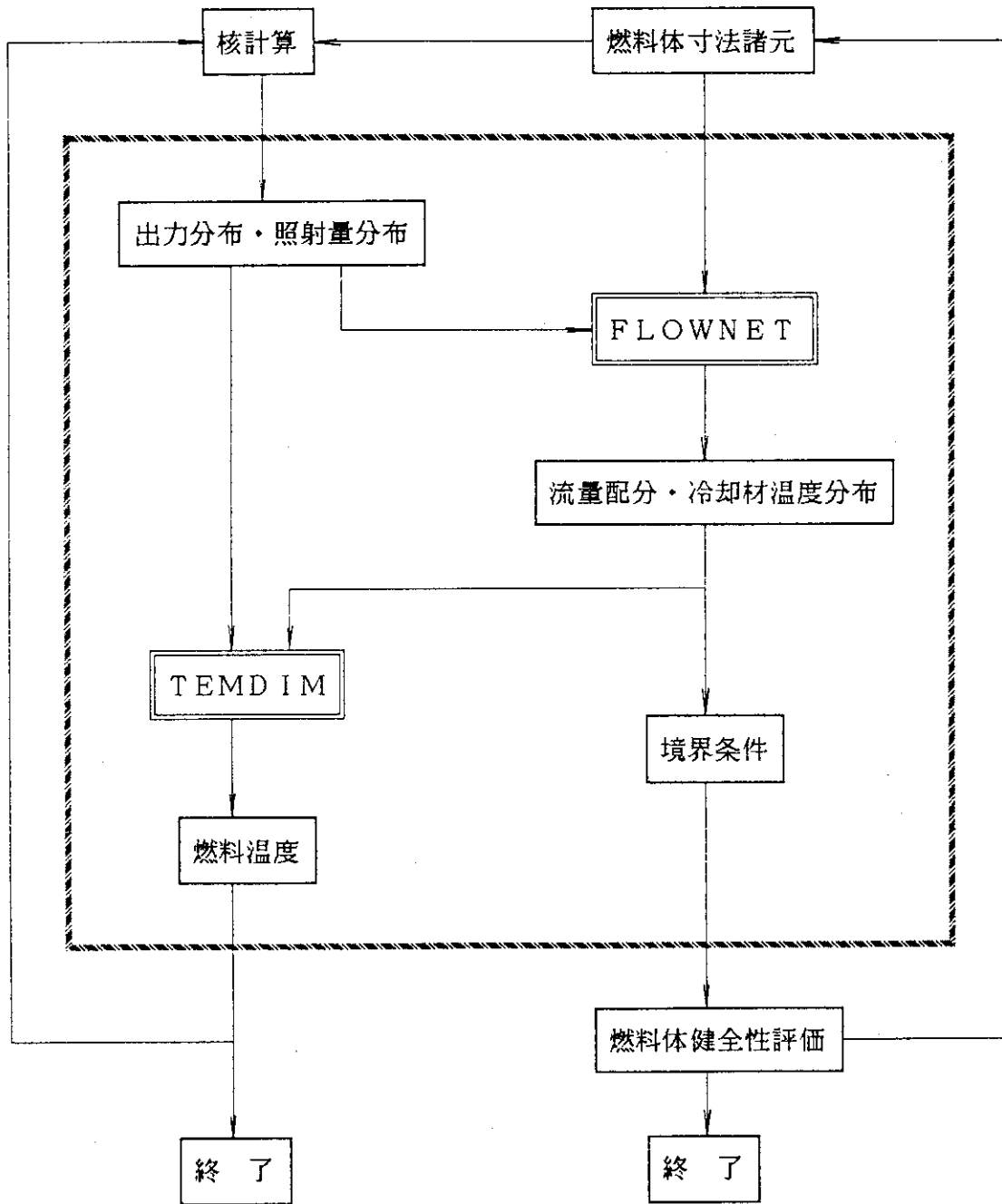


Fig. 1.4 熱流力設計の概要

2. TEMDIMの概要

2.1 コードの特徴

TEMDIMは、主に、ピン型燃料（球状燃料も取り扱い可能）を用いるガス冷却型原子炉を対象として、定常状態及び非定常状態における原子炉内温度分布、流量分布および原子炉出力を求める核・熱結合の炉心動特性解析コードである。本検証作業では、このうち定常温度計算部について検証するものである。以下に、ピン型燃料を例に定常計算部について述べる。

計算体系は、炉心部を複数の円筒形状チャンネルで代表するものとし、その2次元温度分布、各チャンネルの冷却材流量分布、熱応力、熱変形量を与えられた境界条件のもとで相互収れんにより求める。

本コードは、大きく分けて、①ノミナル温度分布を計算するPLANDY部 ②炉心内冷却材流量分布を計算するSIZUKA部 ③熱応力、変位量を計算するDEFORM部 ④ホットスポット温度を計算するHSPOT部より構成されている。その概略のフローチャートをFig. 2.1に示す。

本コードの主要な特徴を以下に示す。

- (i) 解析の対象とする原子炉を複数の領域に分割し、各領域は、その領域を代表する仮想の平均チャンネルと複数のサブチャンネルで構成されるものとする。
- (ii) 各チャンネルの形状は任意の2次元形状とし、温度分布は2次元熱伝導方程式を差分化して求める。チャンネルの冷却方式は任意である。また、物性値、発熱分布、熱伝達データ、境界条件は温度、空間等の任意関数とすることができる。
- (iii) 各チャンネルの形状、冷却方式、物性値等の計算条件は、全てチャンネルごとに異なってもよい。
- (iv) 輻射効果は1次元の扱いとし、燃料コンパクト表面と黒鉛スリーブ内面の間及び黒鉛スリーブ表面と燃料棒挿入孔内面（黒鉛ブロック）の間で考慮している。
- (v) 圧力損失計算には、静圧、摩擦、オリフィス、出入口、加速等の損失を考慮することができる。
- (vi) 本コードは全て可変ディメンジョンでプログラムされているので、解析の対象とするチャンネル数、種類、計算メッシュ数等は任意にとることができる。

2.2 計算モデル

本コードで採用されている計算モデルおよび基本計算式を、PLANDY部、SIZUKA部及びHSTOT部について示す。

(1) チャンネル温度計算部（PLANDY部）

炉心内チャンネルは、Fig. 2.2に示されるような2次元円筒領域の組合せでモデル化する。従

って、チャンネル温度分布は以下に示す2次元定常熱伝導方程式及び冷却材熱平衡式を与えられた境界条件（冷却材入口温度，チャンネル表面境界条件）のもとで連立させることによって得られる。

固体領域

$$\nabla k \nabla T + Q = 0 \quad (2.1)$$

冷却材領域

$$dq = g c_p dT \quad (2.2)$$

ここで、

- ∇ : ラプラス演算子
- k : 熱伝導率
- T : 温度
- Q : 体積発熱率
- dq : 壁面から冷却材への流入熱量
- g : 冷却材流量
- c_p : 冷却材比熱
- dT : 冷却材流れ方向温度差

(2.1) 式は固体領域をさらに要素分割し、領域表面における輻射伝熱、冷却条件を考慮して差分化し、(2.2) 式との連立方程式より解を求める。燃料コンパクトと黒鉛スリーブの間及び黒鉛スリーブと黒鉛ブロックの間での輻射効果および熱伝導率、熱伝達率等の温度依存性のため、反復計算により温度分布が決定される。

(2) 冷却材流量計算部 (SIZUKA 部)

コード内で流量を計算する場合は、Fig. 2.3 に示されるような多並列流路モデルにより求める。全チャンネルは、上部及び下部の共通のプレナム部を有するものとし全流路の圧力損失は同一である。

各チャンネルの圧力損失は、次式より求める。

$$\begin{aligned} \Delta P_i = & \Delta P_{or} + \Delta P_{in} + \Delta P_{ex} + \Delta P_j + \\ & \Delta P_f + \Delta P_{ac} + \Delta P_h \cdot f_h \end{aligned} \quad (2.3)$$

ここで、

- ΔP_i : チャンネル圧力損失
- ΔP_{or} : オリフィス圧力損失
- ΔP_{in} : 入口圧力損失
- ΔP_{ex} : 出口圧力損失
- ΔP_j : ジョイント圧力損失
- ΔP_f : 摩擦圧力損失
- ΔP_{ac} : 加速圧力損失
- ΔP_h : 静圧
- f_h : 流れ方向オプション (-1 : 下向流, +1 : 上向流)

圧力損失計算に使用する温度分布は、PLANDY部で計算する。

(3) ホットスポット温度計算部 (HSPOT部)

ホットスポット燃料温度 (システムティック燃料最高温度) は、公称燃料温度 (ノミナル温度) に基づいて、設計上の不確かさを考慮するための工学的不確定因子を用いて評価する。工学的不確定因子には、Table 2.1 に示すように統計的性格を有するランダム因子と系統的性格を有するシステムティック因子がある。ランダム因子は、正規分布を有するものとして燃料温度分布評価に用いる。

以下にシステムティック燃料最高温度 (ホットスポット) の評価式を示す。

$$Tf_{\max}^S = T_{in} + \sum_j [Hf_{ij}^S \{ \sqrt{\sum_i (f_{ij}^R)^2 + 1} \}] \times \Delta T_j^N \quad (2.4)$$

ここで、

Tf_{\max}^S : システムティック燃料最高温度

T_{in} : 入口冷却材温度

f_{ij}^S : システムティック因子

f_{ij}^R : ランダム因子

ΔT_j^N : 公称温度差

$j = 1$: 冷却材混合平均温度上昇

$j = 2$: 膜温度差

$j = 3$: 黒鉛スリーブ温度差

$j = 4$: ギャップ温度差

$j = 5$: 燃料コンパクト温度差

本検証解析では、寸法は実測値、相関式及び物性値は最適式と燃料温度評価上保守性を持たせた設計式を用いることから、システムティック因子は全て1.0、ランダム因子は全て0.0とした。

Table 2.1 工学的不確定因子の項目と内容

項 目	内 容
1. ランダム因子	
(1) 製造公差	
・燃料寸法公差	燃料棒及び燃料体の寸法, 諸元に関わる製造公差
・燃料装荷公差	燃料粒子の寸法・諸元, 粒子充填率, 燃料濃縮度等の製造公差
(2) 物性値等	冷却材の比熱, 熱伝導率や粘性係数, スリーブの熱伝導率と照射変形, 核データ等の不確かさ
(3) ギャップコンダクタンス	物性値及びコンパクト/スリーブの偏心による不確かさ
2. システマティック因子	
(1) 出力及び出力分布	
・出力較正誤差	熱出力測定誤差及び出力制御誤差
・出力分布誤差	該設計で用いる解析手法の誤差
(2) 冷却材流量	
・冷却材全流量誤差	熱出力測定誤差や出入口温度指示誤差に基づく流量誤差及び流量の変動
・流量配分誤差	炉内流量配分誤差 (クロス流れ, 漏れ流量, 流路変形等) や燃料/制御棒チャンネル間流量配分誤差等
(3) 冷却材温度	
・炉心入口温度誤差	炉側部温度上昇, 上部プレナム内混合評価誤差, 入口温度指示精度等

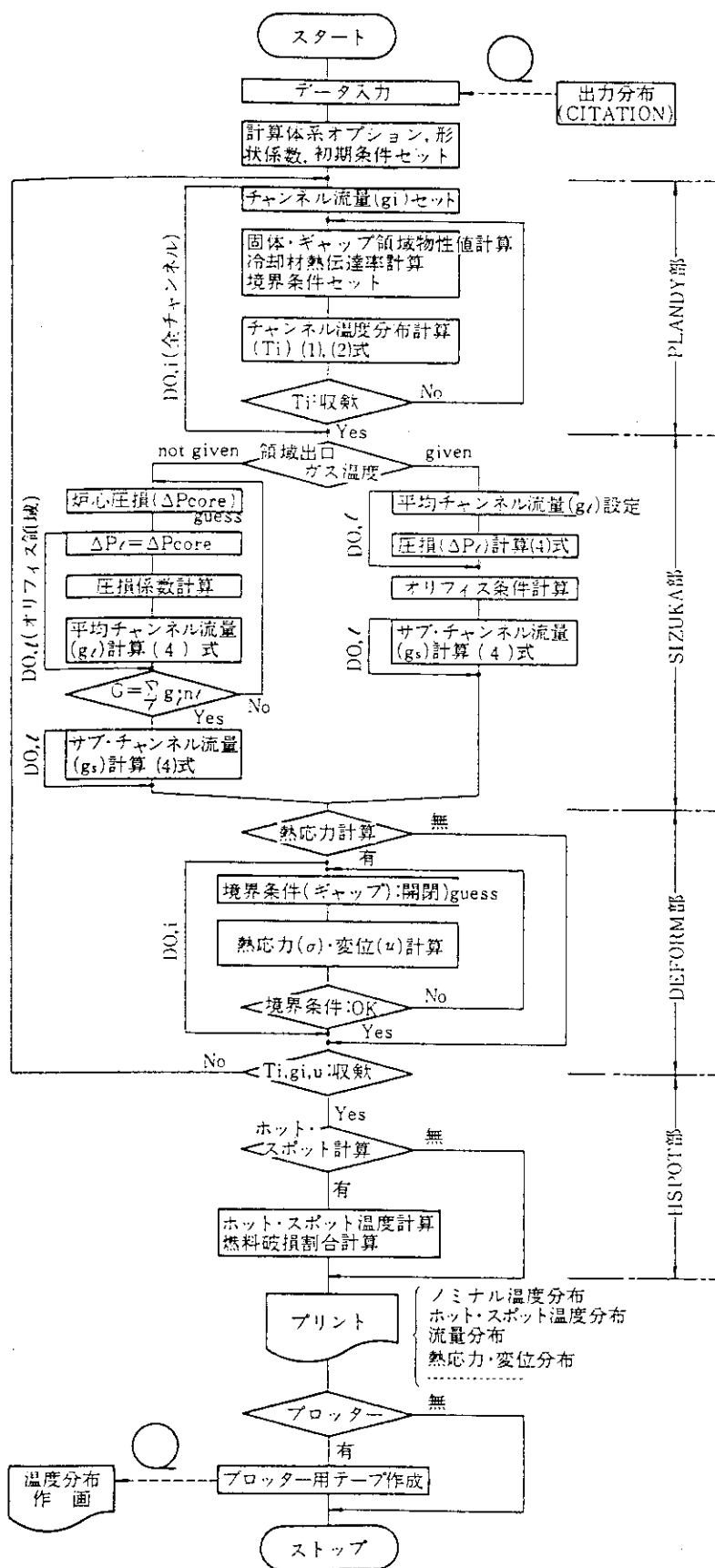


Fig. 2.1 TEMDIMフローチャート

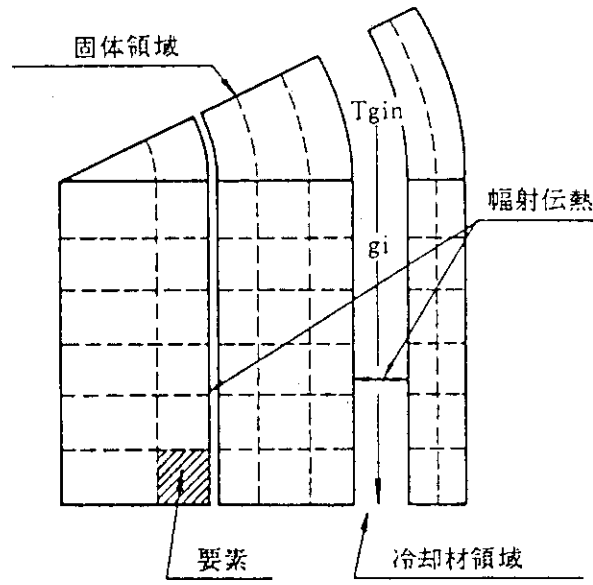


Fig. 2.2 温度分布計算モデル

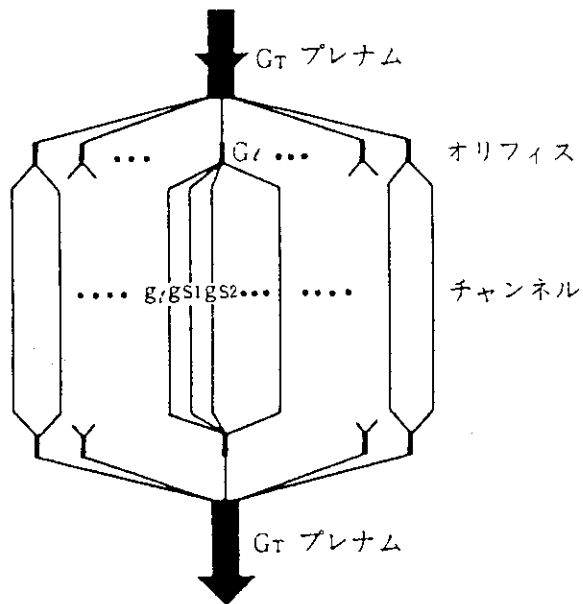


Fig. 2.3 流量配分モデル

3. HENDEL T_{1-s} 試験装置及び試験結果

3.1 HENDEL T_{1-s} 試験装置の概要⁽⁴⁾

大型構造機器実証試験装置（HENDEL：Helium Engineering Demonstration Loop）の燃料体スタック実証試験部（ T_1 ）は、HTTR燃料体の伝熱流動特性を把握することを目的とした試験部であり、Fig. 3.1に示すように冷却材流路1本を模擬した1チャンネル試験装置（ T_{1-s} ）と燃料体1カラムを模擬した多チャンネル試験装置（ T_{1-m} ）から構成されている。ガス循環機①を出たヘリウムガスは、加熱器②により試験条件に応じた温度にまで昇温された後、オリフィス型流量計を経て試験部に流入する。試験部において最高1,000℃にまで加熱されたヘリウムガスは、圧力容器に内蔵された加圧水型冷却器⑤および冷却器⑥をへて循環機に戻る。

T_{1-s} 試験体の構造は、Fig. 3.2に示すように、実機燃料棒とほぼ同一形状を有する模擬燃料棒①を Hastelloy X 製の流路管②に挿入したものである。ヘリウムガスは、装置上部より流入し、上部プレナム部に設置した入口温度制御用ヒータにより温度調整された後、内径53mmの流路管と外径46mmの模擬燃料棒の間の環状流路⑤（等価直径 $De = 7$ mm）内を下向きに流れながら加熱される。流路管の外周には、流路管の支持と流路管と補償ヒータブロック④の隙間の充填を兼ねた断熱材③が配置されている。補償ヒータブロックは、コージライト製の断熱ブロックにカンタル線のヒータエレメントを巻き付けたもので、さらにその外側に繊維状断熱材、金属ケーシングが設置されている。ヒータは、軸方向に9分割され、9回路から構成されている。同ヒータの出力は流路管表面温度と断熱ブロック温度が等しくなるように自動制御され、半径方向への熱損失の低減化を図っている。

模擬燃料棒は、中温試験用模擬燃料棒であり、ニクロム合金を発熱体とした金属シースヒータの外側を黒鉛スリーブで覆ったものである。黒鉛スリーブは合計7本使用し、1本の寸法は長さ570mm、外径46mmで、その表面にはスペーサリブが軸方向および周方向にそれぞれ3箇所取り付けられている。発熱体は、長さ530mmのニクロム合金製のコイルをニッケル製の接続電極により7本連結したものである。発熱体と金属シースの間には、絶縁材の窒化ホウ素（BN）が充填されている。本模擬燃料棒の軸方向熱流速分布はほぼ均一である。また、本模擬燃料棒には、温度分布を詳細に測定するために、Fig. 3.3に示すように黒鉛スリーブ表面に19本のK型熱電対（インコネルシース、 $\phi 1.6$ mm）が取り付けられている。さらにヒータ中心温度測定用のK型熱電対（No.20の位置）が、模擬燃料棒第2段目の上から410mmの位置に挿入されている。

流路管には、Fig. 3.4に示すように模擬燃料棒各段毎（570mm毎）の圧力損失を測定するための静圧タップが設置されている。

3.2 検証解析に使用した試験結果

本検証解析に使用した T_{1-s} による試験データは、No.1830～1834、1908～1911の合計9ケースの試験により得られた結果である。各ケースにおける温度等の実測値を Table 3.1～3.9に、圧力分布等の実測値を Table 3.10～3.18に示す。

Table 3.1 T_{1-s} 試験結果 (温度分布: No. 1830)

Run No.1830				Date & Time 1986_Nov_11/23:36-23:54							
Flow rate = 17.22 (g/s)				Electric input = 43.30 (kW)							
Inlet temp. = 141.6 (°C)				Outlet temp. = 635.0 (°C)							
Inlet press. = 30.18 (kg/cm ² .abs)				Outlet press. = 30.13 (kg/cm ² .abs)							
Inlet Reynolds No. = 9003				Outlet Reynolds No. = 5299							
Qplus = 1.231E-03				Heat efficiency = 101.93 (%)							
Emissivity of outer tube = 0.30											
No	Z/De	Qh(kW)	Qr(kW)	Qc(kW)	Tw(°C)	Tws(°C)	Tb(°C)	Re	Nu	Ratio	
1	22.2	6.2	.08	6.1	265.7	265.7	159.9	8745	27.40	1.244	
2	56.9	6.2	.08	6.1	314.6	314.6	193.5	8319	22.67	1.259	
3	136.0	6.3	.12	6.1	377.1	377.1	264.4	7563	22.14	1.210	
4	193.1	6.2	.16	6.0	427.2	427.0	313.9	7127	20.42	1.193	
5	193.1	6.2	.16	6.0	421.7	421.7	313.9	7127	21.42	1.184	
6	193.1	6.2	.16	6.0	435.3	431.3	313.9	7127	19.66	1.200	
7	215.3	6.2	.16	6.0	445.7	445.7	335.4	6955	20.42	1.181	
8	272.4	6.1	.18	5.9	490.0	489.8	384.3	6601	19.77	1.160	
9	272.4	6.1	.18	5.9	480.0	480.0	384.3	6601	21.79	1.146	
10	272.4	6.1	.18	5.9	497.9	494.1	384.3	6601	18.99	1.167	
11	294.6	6.1	.18	5.9	512.2	512.2	405.5	6460	19.10	1.157	
12	351.5	6.2	.20	6.0	567.0	566.8	454.4	6162	17.36	1.155	
13	351.4	6.2	.20	6.0	558.3	558.3	454.2	6163	18.76	1.143	
14	351.5	6.2	.20	6.0	572.1	568.2	454.4	6162	17.15	1.156	
15	373.8	6.2	.20	6.0	560.5	560.5	475.7	6043	22.56	1.113	
16	452.8	6.2	.26	5.9	648.5	644.6	546.2	5684	18.13	1.120	
17	452.9	6.2	.26	5.9	640.4	640.4	546.3	5683	18.97	1.115	
18	531.9	6.2	.35	5.8	717.1	717.1	616.6	5374	16.54	1.113	

Table 3.2 T_{1-s} 試験結果 (温度分布: No.1831)

Run No.1831			Date & Time 1986_Nov_12/00:00-01:36							
Flow rate = 17.20 (g/s)			Electric input = 43.31 (kW)							
Inlet temp. = 141.7 (°C)			Outlet temp. = 635.3 (°C)							
Inlet press. = 30.19 (kg/cm ² .abs)			Outlet press. = 30.13 (kg/cm ² .abs)							
Inlet Reynolds No. = 8989			Outlet Reynolds No. = 5291							
Q _{plus} = 1.232E-03			Heat efficiency = 101.80 (%)							
Emissivity of outer tube = 0.30										
No	Z/De	Q _h (kW)	Q _r (kW)	Q _c (kW)	T _w (°C)	T _{ws} (°C)	T _b (°C)	Re	Nu	Ratio
1	22.2	6.2	.08	6.1	265.5	265.5	160.1	8732	27.48	1.243
2	56.9	6.2	.08	6.1	314.4	314.4	193.6	8306	22.73	1.259
3	136.0	6.3	.12	6.1	377.2	377.2	264.6	7552	22.16	1.209
4	193.1	6.2	.16	6.0	427.3	427.1	314.1	7116	20.43	1.192
5	193.1	6.2	.16	6.0	421.8	421.8	314.1	7116	21.44	1.183
6	193.1	6.2	.16	6.0	435.3	431.4	314.1	7116	19.68	1.200
7	215.3	6.2	.16	6.0	445.8	445.8	335.6	6945	20.43	1.181
8	272.4	6.1	.18	5.9	490.1	489.9	384.5	6591	19.78	1.160
9	272.4	6.1	.18	5.9	480.1	480.1	384.5	6591	21.81	1.145
10	272.4	6.1	.18	5.9	498.0	494.1	384.5	6591	19.02	1.167
11	294.6	6.1	.18	5.9	512.4	512.4	405.7	6451	19.11	1.157
12	351.5	6.2	.20	6.0	567.1	566.9	454.6	6153	17.37	1.154
13	351.4	6.2	.20	6.0	558.3	558.3	454.4	6154	18.78	1.143
14	351.5	6.2	.20	6.0	572.1	568.2	454.6	6153	17.17	1.156
15	373.8	6.2	.20	6.0	560.3	560.3	475.9	6034	22.66	1.113
16	452.8	6.2	.25	5.9	648.5	644.6	546.4	5676	18.17	1.120
17	452.9	6.2	.25	5.9	640.6	640.6	546.6	5675	18.96	1.115
18	531.9	6.2	.36	5.8	717.4	717.4	616.9	5366	16.52	1.113

Table 3.3 T_{1-s} 試験結果 (温度分布: No. 1832)

Run No.1832			Date & Time			1986_Nov_13/15:24-17:24					
Flow rate = 13.42 (g/s)			Electric input = 32.61 (kW)								
Inlet temp. = 133.8 (°C)			Outlet temp. = 615.7 (°C)								
Inlet press. = 30.24 (kg/cm ² .abs)			Outlet press. = 30.20 (kg/cm ² .abs)								
Inlet Reynolds No. = 7104			Outlet Reynolds No. = 4190								
Qplus = 1.212E-03			Heat efficiency = 103.00 (%)								
Emissivity of outer tube = 0.30											
No	Z/De	Qh(kW)	Qr(kW)	Qc(kW)	Tw(°C)	Tws(°C)	Tb(°C)	Re	Nu	Ratio	
1	22.2	4.6	.07	4.6	250.7	250.7	151.8	6902	22.29	1.233	
2	56.9	4.6	.07	4.6	299.7	299.7	184.5	6567	18.15	1.252	
3	136.0	4.7	.10	4.6	361.3	361.3	253.9	5973	17.75	1.204	
4	193.1	4.7	.13	4.6	409.2	409.1	302.4	5628	16.55	1.185	
5	193.1	4.7	.13	4.6	403.7	403.7	302.4	5628	17.43	1.176	
6	193.1	4.7	.13	4.6	413.4	410.5	302.4	5628	16.33	1.188	
7	215.3	4.7	.13	4.6	425.5	425.5	323.5	5493	16.87	1.171	
8	272.4	4.6	.15	4.5	472.1	472.0	371.4	5213	15.83	1.156	
9	272.4	4.6	.15	4.5	463.7	463.7	371.4	5213	17.24	1.143	
10	272.4	4.6	.15	4.5	478.3	475.4	371.4	5213	15.31	1.161	
11	294.6	4.6	.15	4.5	495.2	495.2	392.1	5103	15.10	1.155	
12	351.5	4.7	.17	4.5	546.4	546.3	439.9	4868	13.94	1.149	
13	351.4	4.7	.17	4.5	538.9	538.9	439.8	4869	14.96	1.139	
14	351.5	4.7	.17	4.5	548.8	545.9	439.9	4868	13.99	1.149	
15	373.8	4.7	.17	4.5	544.6	544.6	460.7	4774	17.33	1.114	
16	452.8	4.6	.22	4.4	626.8	623.9	529.3	4493	14.25	1.118	
17	452.9	4.6	.22	4.4	618.3	618.3	529.5	4492	15.18	1.111	
18	531.9	4.6	.30	4.3	691.1	691.1	597.8	4249	13.44	1.107	

Table 3.4 T_{1-s} 試験結果 (温度分布: No. 1833)

Run No. 1833		Date & Time 1986_Nov_14/11:24-13:24								
Flow rate = 9.95 (g/s)		Electric input = 24.30 (kW)								
Inlet temp. = 125.0 (°C)		Outlet temp. = 608.3 (°C)								
Inlet press. = 30.25 (kg/cm ² .abs)		Outlet press. = 30.23 (kg/cm ² .abs)								
Inlet Reynolds No. = 5344		Outlet Reynolds No. = 3124								
Qplus = 1.246E-03		Heat efficiency = 102.77 (%)								
Emissivity of outer tube = 0.30										
No	Z/De	Qh(kW)	Qr(kW)	Qc(kW)	Tw(°C)	Tws(°C)	Tb(°C)	Re	Nu	Ratio
1	22.2	3.4	.06	3.4	237.2	237.2	142.9	5188	17.59	1.227
2	56.9	3.4	.06	3.4	285.3	285.3	175.7	4932	14.33	1.244
3	136.0	3.5	.09	3.4	349.6	349.6	245.2	4477	13.72	1.201
4	193.1	3.5	.12	3.4	395.6	395.5	293.9	4214	13.06	1.179
5	193.1	3.5	.12	3.4	390.5	390.5	293.9	4214	13.73	1.170
6	193.1	3.5	.12	3.4	397.4	395.3	293.9	4214	13.08	1.179
7	215.3	3.5	.12	3.4	413.2	413.2	315.2	4110	13.17	1.167
8	272.4	3.4	.14	3.3	458.0	457.9	363.3	3897	12.61	1.149
9	272.4	3.4	.14	3.3	451.0	451.0	363.3	3897	13.60	1.138
10	272.4	3.4	.14	3.3	462.4	460.3	363.3	3897	12.30	1.152
11	294.6	3.4	.14	3.3	483.9	483.9	384.2	3813	11.69	1.152
12	351.5	3.5	.15	3.3	530.9	530.8	432.2	3635	11.23	1.140
13	351.4	3.5	.15	3.3	525.5	525.5	432.1	3635	11.85	1.133
14	351.5	3.5	.15	3.3	532.2	530.1	432.2	3635	11.31	1.139
15	373.8	3.5	.15	3.3	533.3	533.3	453.1	3563	13.53	1.110
16	452.8	3.5	.20	3.3	611.5	609.4	521.9	3351	11.43	1.110
17	452.9	3.5	.20	3.3	606.6	606.6	522.1	3351	11.84	1.106
18	531.9	3.4	.27	3.2	675.7	675.7	590.5	3168	10.84	1.099

Table 3.5 T_{1-s} 試験結果 (温度分布: No.1834)

Run No.1834			Date & Time 1986_Nov_16/11:30-13:24							
Flow rate = 7.52 (g/s)			Electric input = 18.24 (kW)							
Inlet temp. = 115.0 (°C)			Outlet temp. = 592.5 (°C)							
Inlet press. = 30.27 (kg/cm ² .abs)			Outlet press. = 30.25 (kg/cm ² .abs)							
Inlet Reynolds No. = 4111			Outlet Reynolds No. = 2392							
Q _{plus} = 1.268E-03			Heat efficiency = 102.32 (%)							
Emissivity of outer tube = 0.30										
No	Z/De	Qh(kW)	Qr(kW)	Qc(kW)	Tw(°C)	Tws(°C)	Tb(°C)	Re	Nu	Ratio
1	22.2	2.6	.06	2.5	224.5	224.5	132.6	3990	13.68	1.226
2	56.9	2.6	.06	2.5	268.3	268.3	164.9	3791	11.51	1.236
3	136.0	2.6	.08	2.6	334.1	334.1	233.4	3439	10.77	1.199
4	193.1	2.6	.11	2.5	375.8	375.8	281.5	3235	10.66	1.170
5	193.1	2.6	.11	2.5	371.7	371.7	281.5	3235	11.14	1.163
6	193.1	2.6	.11	2.5	376.8	375.2	281.5	3235	10.72	1.169
7	215.3	2.6	.11	2.5	394.3	394.3	302.5	3155	10.66	1.159
8	272.4	2.6	.12	2.5	437.6	437.5	350.2	2990	10.37	1.140
9	272.4	2.6	.12	2.5	432.3	432.3	350.2	2990	11.03	1.132
10	272.4	2.6	.12	2.5	441.5	439.9	350.2	2990	10.09	1.144
11	294.6	2.6	.12	2.5	464.3	464.3	370.8	2924	9.46	1.145
12	351.5	2.6	.13	2.5	510.5	510.4	418.4	2786	9.13	1.133
13	351.4	2.6	.13	2.5	506.9	506.9	418.3	2787	9.48	1.128
14	351.5	2.6	.13	2.5	511.5	509.9	418.4	2786	9.18	1.132
15	373.8	2.6	.13	2.5	512.7	512.7	439.2	2731	11.19	1.103
16	452.8	2.6	.17	2.4	587.4	585.9	507.2	2567	9.61	1.101
17	452.9	2.6	.17	2.4	586.5	586.5	507.4	2566	9.54	1.101
18	531.9	2.6	.23	2.3	653.1	653.1	574.9	2426	8.86	1.092

Table 3.6 T_{1-s} 試験結果 (温度分布: No. 1908)

Run No.1908				Date & Time 1987_Feb_14/17:00-18:54						
Flow rate = 26.10 (g/s)				Electric input = 63.33 (kW)						
Inlet temp. = 53.2 (°C)				Outlet temp. = 535.1 (°C)						
Inlet press. = 20.65 (kg/cm ² .abs)				Outlet press. = 20.55 (kg/cm ² .abs)						
Inlet Reynolds No. = 16010				Outlet Reynolds No. = 8696						
Qplus = 1.510E-03				Heat efficiency = 103.17 (%)						
Emissivity of outer tube = 0.30										
No	Z/De	Qh(kW)	Qr(kW)	Qc(kW)	Tw(°C)	Tws(°C)	Tb(°C)	Re	Nu	Ratio
1	22.2	9.0	.05	9.0	177.9	177.9	71.1	15451	47.23	1.310
2	56.9	9.0	.05	9.0	230.0	230.0	103.8	14544	37.44	1.335
3	136.0	9.2	.08	9.1	293.9	293.9	173.1	12994	34.93	1.271
4	193.1	9.1	.11	9.0	336.4	336.1	221.4	12127	33.77	1.232
5	193.1	9.1	.11	9.0	329.7	329.7	221.4	12127	35.76	1.219
6	193.1	9.1	.11	9.0	354.7	349.4	221.4	12127	30.26	1.259
7	215.3	9.1	.11	9.0	362.6	362.6	242.4	11791	31.28	1.233
8	272.4	8.9	.14	8.8	406.0	405.7	290.1	11108	29.93	1.205
9	272.4	8.9	.14	8.8	390.5	390.5	290.1	11108	34.46	1.178
10	272.4	8.9	.14	8.8	420.2	414.9	290.1	11108	27.72	1.222
11	294.6	8.9	.14	8.8	428.7	428.7	310.8	10841	28.59	1.202
12	351.5	9.1	.15	8.9	484.1	483.8	358.6	10279	25.62	1.198
13	351.4	9.1	.15	8.9	473.4	473.4	358.5	10281	27.93	1.182
14	351.5	9.1	.15	8.9	496.4	491.1	358.6	10279	24.22	1.210
15	373.8	9.1	.15	8.9	488.8	488.8	379.4	10055	28.66	1.168
16	452.8	9.1	.22	8.8	585.9	580.5	448.3	9394	21.99	1.183
17	452.9	9.1	.22	8.8	556.8	556.8	448.5	9393	26.83	1.150
18	531.9	9.0	.34	8.7	635.5	635.5	517.2	8830	22.77	1.150

Table 3.7 T_{1-s} 試験結果 (温度分布: No.1909)

Run No.1909			Date & Time 1987_Feb_15/02:12-04:12								
Flow rate = 20.57 (g/s)			Electric input = 49.93 (kW)								
Inlet temp. = 49.2 (°C)			Outlet temp. = 532.3 (°C)								
Inlet press. = 20.68 (kg/cm ² .abs)			Outlet press. = 20.59 (kg/cm ² .abs)								
Inlet Reynolds No. = 12719			Outlet Reynolds No. = 6870								
Qplus = 1.529E-03			Heat efficiency = 103.37 (%)								
Emissivity of outer tube = 0.30											
No	Z/De	Qh(kW)	Qr(kW)	Qc(kW)	Tw(°C)	Tws(°C)	Tb(°C)	Re	Nu	Ratio	
1	22.2	7.1	.05	7.1	170.3	170.3	67.2	12269	38.84	1.303	
2	56.9	7.1	.05	7.1	222.0	222.0	100.0	11540	30.74	1.327	
3	136.0	7.2	.07	7.2	289.8	289.8	169.6	10295	27.87	1.272	
4	193.1	7.2	.10	7.1	328.1	327.8	218.2	9599	28.02	1.223	
5	193.1	7.2	.10	7.1	322.6	322.6	218.2	9599	29.42	1.213	
6	193.1	7.2	.10	7.1	342.5	338.3	218.2	9599	25.57	1.245	
7	215.3	7.2	.10	7.1	354.2	354.2	239.3	9330	25.95	1.224	
8	272.4	7.1	.13	6.9	398.8	398.5	287.3	8784	24.60	1.199	
9	272.4	7.1	.13	6.9	388.6	388.6	287.3	8784	27.01	1.181	
10	272.4	7.1	.13	6.9	411.0	406.9	287.3	8784	22.89	1.213	
11	294.6	7.1	.13	6.9	425.2	425.2	308.1	8571	22.76	1.201	
12	351.5	7.1	.14	7.0	478.0	477.8	356.0	8124	20.73	1.194	
13	351.4	7.1	.14	7.0	469.7	469.7	355.8	8125	22.19	1.181	
14	351.5	7.1	.14	7.0	486.0	481.9	356.0	8124	20.06	1.200	
15	373.8	7.1	.14	7.0	478.4	478.4	376.8	7946	24.30	1.156	
16	452.8	7.1	.20	6.9	569.0	564.9	445.6	7422	19.10	1.166	
17	452.9	7.1	.20	6.9	550.6	550.6	445.8	7421	21.72	1.146	
18	531.9	7.1	.31	6.8	626.6	626.6	514.4	6976	18.78	1.142	

Table 3.8 T_{1-s} 試験結果 (温度分布: No. 1910)

Run No.1910			Date & Time			1987_Feb_16/12:06-14:06					
Flow rate = 4.27 (g/s)			Electric input = 10.62 (kW)								
Inlet temp. = 35.2 (°C)			Outlet temp. = 532.8 (°C)								
Inlet press. = 20.65 (kg/cm ² .abs)			Outlet press. = 20.64 (kg/cm ² .abs)								
Inlet Reynolds No. = 2718			Outlet Reynolds No. = 1425								
Qplus = 1.639E-03			Heat efficiency = 103.85 (%)								
Emissivity of outer tube = 0.30											
No	Z/De	Qh(kW)	Qr(kW)	Qc(kW)	Tw(°C)	Tws(°C)	Tb(°C)	Re	Nu	Ratio	
1	22.2	1.5	.03	1.5	141.7	141.7	53.4	2617	9.63	1.270	
2	56.9	1.5	.03	1.5	195.6	195.6	86.7	2453	7.28	1.303	
3	136.0	1.5	.05	1.5	261.4	261.4	157.6	2176	6.77	1.241	
4	193.1	1.5	.07	1.5	303.3	303.2	207.5	2021	6.70	1.199	
5	193.1	1.5	.07	1.5	301.0	301.0	207.5	2021	6.86	1.195	
6	193.1	1.5	.07	1.5	303.9	303.0	207.5	2021	6.71	1.199	
7	215.3	1.5	.07	1.5	321.5	321.5	229.3	1962	6.74	1.184	
8	272.4	1.5	.08	1.4	365.9	365.8	278.9	1841	6.57	1.157	
9	272.4	1.5	.08	1.4	363.1	363.1	278.9	1841	6.78	1.153	
10	272.4	1.5	.08	1.4	368.4	367.5	278.9	1841	6.45	1.161	
11	294.6	1.5	.08	1.4	391.0	391.0	300.5	1794	6.14	1.158	
12	351.5	1.5	.09	1.4	435.6	435.6	350.3	1696	6.15	1.137	
13	351.4	1.5	.09	1.4	434.0	434.0	350.2	1696	6.26	1.134	
14	351.5	1.5	.09	1.4	437.1	436.2	350.3	1696	6.11	1.138	
15	373.8	1.5	.09	1.4	447.8	447.8	372.1	1657	6.76	1.117	
16	452.8	1.5	.11	1.4	517.1	516.2	443.5	1543	6.42	1.101	
17	452.9	1.5	.11	1.4	516.4	516.4	443.6	1543	6.41	1.102	
18	531.9	1.5	.14	1.4	582.1	582.1	514.4	1447	6.29	1.086	

Table 3.9 T_{1-s} 試験結果 (温度分布: No.1911)

Run No.1911		Date & Time		1987_Feb_18/04:00-06:00							
Flow rate = 2.96 (g/s)		Electric input = 7.21 (kW)									
Inlet temp. = 33.9 (°C)		Outlet temp. = 518.8 (°C)									
Inlet press. = 20.73 (kg/cm ² .abs)		Outlet press. = 20.72 (kg/cm ² .abs)									
Inlet Reynolds No. = 1888		Outlet Reynolds No. = 999									
Q _{plus} = 1.612E-03		Heat efficiency = 103.35 (%)									
Emissivity of outer tube = 0.30											
No	Z/De	Qh(kW)	Qr(kW)	Qc(kW)	Tw(°C)	Tws(°C)	Tb(°C)	Re	Nu	Ratio	
1	22.2	1.0	.03	1.0	128.0	128.0	51.6	1820	7.54	1.235	
2	56.9	1.0	.03	1.0	174.6	174.6	84.0	1708	5.93	1.254	
3	136.0	1.0	.04	1.0	237.4	237.4	152.8	1519	5.64	1.199	
4	193.1	1.0	.05	1.0	276.0	276.0	201.4	1413	5.86	1.157	
5	193.1	1.0	.05	1.0	274.3	274.3	201.4	1413	6.00	1.154	
6	193.1	1.0	.05	1.0	276.3	275.8	201.4	1413	5.88	1.157	
7	215.3	1.0	.05	1.0	295.1	295.1	222.5	1372	5.84	1.146	
8	272.4	1.0	.05	1.0	338.9	338.8	270.8	1288	5.76	1.125	
9	272.4	1.0	.05	1.0	337.0	337.0	270.8	1288	5.93	1.122	
10	272.4	1.0	.05	1.0	340.5	339.9	270.8	1288	5.67	1.127	
11	294.6	1.0	.05	1.0	363.4	363.4	291.8	1256	5.33	1.127	
12	351.5	1.0	.06	1.0	407.9	407.9	340.4	1188	5.37	1.110	
13	351.4	1.0	.06	1.0	407.0	407.0	340.3	1188	5.43	1.109	
14	351.5	1.0	.06	1.0	409.0	408.4	340.4	1188	5.33	1.111	
15	373.8	1.0	.06	1.0	417.9	417.9	361.6	1161	6.29	1.089	
16	452.8	1.0	.07	1.0	485.9	485.3	431.5	1082	6.01	1.076	
17	452.9	1.0	.07	1.0	489.9	489.9	431.6	1081	5.55	1.083	
18	531.9	1.0	.09	.9	554.7	554.7	500.8	1015	5.47	1.070	

Table 3.10 T_{1-s} 試験結果 (压力分布: No. 1830)

Run No.1830		Date & Time						1986_Nov_11/23:36-23:54
Flow rate	= 17.22 (g/s)	Electric input= 43.30 (kW)						
Inlet temp.	= 141.6 (°C)	Outlet temp. = 635.0 (°C)						
Inlet press.	= 30.18 (kg/cm ² .abs)	Outlet press. = 30.13 (kg/cm ² .abs)						
Inlet Reynolds No.	= 9003	Outlet Reynolds No. = 5299						
Qplus	= 1.231E-03	Heat efficiency = 101.93 (%)						
Emissivity of outer tube	= 0.30							
Block No.	1	2	3	4	5	6	7	
X / De	39.6	118.0	197.9	277.1	356.3	435.4	514.6	
Mean temp (°C)	176.7	247.6	318.6	388.8	458.9	529.5	599.9	
Velocity (m/s)	9.8	11.3	12.9	14.4	15.9	17.4	19.0	
Reynolds No.	8525	7727	7088	6570	6137	5764	5444	
Ploss (mmAq)	53.44	63.16	71.14	76.02	83.36	87.19	96.21	
Dpacc (mmAq)	4.76	4.84	4.79	4.73	4.79	4.79	4.77	
Dpfric (mmAq)	48.68	58.32	66.35	71.29	78.57	82.40	91.44	
Friction factor	.01001	.01037	.01039	.00998	.00995	.00952	.01065	
DP-total (mmAq)	53.44	116.60	187.74	263.76	347.12	434.31	530.52	
Tmean/Twall	.7966	.8252	.8481	.8653	.8793	.8911	.9008	

Table 3.11 T_{1-s} 試験結果 (圧力分布: No.1831)

Run No.1831	Date & Time 1986_Nov_12/00:00-01:36						
Flow rate = 17.20 (g/s)	Electric input = 43.31 (kW)						
Inlet temp. = 141.7 (°C)	Outlet temp. = 635.3 (°C)						
Inlet press. = 30.19 (kg/cm ² .abs)	Outlet press. = 30.13 (kg/cm ² .abs)						
Inlet Reynolds No. = 8989	Outlet Reynolds No. = 5291						
Qplus = 1.232E-03	Heat efficiency = 101.80 (%)						
Emissivity of outer tube = 0.30							
Block No.	1	2	3	4	5	6	7
X / De	39.6	118.8	197.9	277.1	356.3	435.4	514.6
Mean temp (°C)	176.9	247.7	318.8	389.0	459.1	529.7	600.1
Velocity (m/s)	9.8	11.3	12.8	14.4	15.9	17.4	18.9
Reynolds No.	8512	7715	7077	6561	6127	5756	5436
Ploss (mmAq)	53.32	63.00	70.98	75.85	83.14	87.02	96.00
Dpacc (mmAq)	4.74	4.82	4.78	4.71	4.78	4.78	4.76
Dpfric (mmAq)	48.57	58.17	66.20	71.14	78.36	82.24	91.24
Friction factor	.01001	.01037	.01039	.00999	.00995	.00953	.01065
DP-total (mmAq)	53.32	116.31	187.30	263.15	346.29	433.31	529.31
Tmean/Twall	.7971	.8255	.8484	.8655	.8794	.8912	.9008

Table 3.12 T_{i-s} 試験結果 (圧力分布: No.1832)

Run No.1832	Date & Time 1986_Nov_13/15:24-17:24						
Flow rate = 13.42 (g/s)	Electric input = 32.61 (kW)						
Inlet temp. = 133.8 (°C)	Outlet temp. = 615.7 (°C)						
Inlet press. = 30.24 (kg/cm ² .abs)	Outlet press. = 30.20 (kg/cm ² .abs)						
Inlet Reynolds No. = 7104	Outlet Reynolds No. = 4190						
Qplus = 1.212E-03	Heat efficiency = 103.00 (%)						
Emissivity of outer tube = 0.30							
Block No.	1	2	3	4	5	6	7
X / De	39.6	118.8	197.9	277.1	356.3	435.4	514.6
Mean temp (°C)	168.1	237.4	307.0	375.8	444.3	513.1	581.5
Velocity (m/s)	7.5	8.6	9.8	11.0	12.1	13.3	14.4
Reynolds No.	6730	6102	5598	5189	4848	4556	4304
Ploss (mmAq)	33.98	40.15	45.29	48.39	52.94	55.71	61.02
Dpacc (mmAq)	2.81	2.87	2.85	2.80	2.83	2.82	2.81
Dpfric (mmAq)	31.16	37.28	42.45	45.59	50.11	52.89	58.21
Friction factor	.01077	.01115	.01118	.01075	.01069	.01030	.01143
DP-total (mmAq)	33.98	74.13	119.42	167.81	220.75	276.46	337.48
Tmean/Twall	.8037	.8298	.8515	.8682	.8821	.8941	.9043

Table 3.13 T_{i-s} 試験結果 (圧力分布: No. 1833)

Run No. 1833	Date & Time 1986_Nov_14/11:24-13:24						
Flow rate = 9.95 (g/s)	Electric input = 24.30 (kW)						
Inlet temp. = 125.0 (°C)	Outlet temp. = 608.3 (°C)						
Inlet press. = 30.25 (kg/cm ² .abs)	Outlet press. = 30.23 (kg/cm ² .abs)						
Inlet Reynolds No. = 5344	Outlet Reynolds No. = 3124						
Qplus = 1.246E-03	Heat efficiency = 102.77 (%)						
Emissivity of outer tube = 0.30							
Block No.	1	2	3	4	5	6	7
X / De	39.6	118.8	197.9	277.1	356.3	435.4	514.6
Mean temp (°C)	159.3	228.7	298.6	367.7	436.7	505.6	574.2
Velocity (m/s)	5.4	6.3	7.2	8.0	8.9	9.7	10.6
Reynolds No.	5056	4575	4190	3979	3619	3398	3209
Ploss (mmAq)	19.88	23.52	26.80	28.73	31.57	33.55	36.41
Dpacc (mmAq)	1.55	1.58	1.57	1.55	1.56	1.55	1.54
Dpfric (mmAq)	18.34	21.94	25.23	27.18	30.01	32.00	34.86
Friction factor	.01177	.01216	.01228	.01181	.01179	.01146	.01258
DP-total (mmAq)	19.88	43.40	70.20	98.93	130.50	164.06	200.46
Tmean/Twall	.8080	.8330	.8544	.8715	.8860	.8989	.9100

Table 3.14 T_{1-s} 試験結果 (压力分布: No. 1834)

Run No.1834	Date & Time 1986_Nov_16/11:30-13:24						
Flow rate = 7.52 (g/s)	Electric input = 18.24 (kW)						
Inlet temp. = 115.0 (°C)	Outlet temp. = 592.5 (°C)						
Inlet press. = 30.27 (kg/cm ² .abs)	Outlet press. = 30.25 (kg/cm ² .abs)						
Inlet Reynolds No. = 4111	Outlet Reynolds No. = 2392						
Qplus = 1.268E-03	Heat efficiency = 102.32 (%)						
Emissivity of outer tube = 0.30							
Block No.	1	2	3	4	5	6	7
X / De	39.6	118.8	197.9	277.1	356.3	435.4	514.6
Mean temp (°C)	148.8	217.1	286.1	354.5	422.8	491.1	558.8
Velocity (m/s)	4.0	4.6	5.3	5.9	6.6	7.2	7.9
Reynolds No.	3888	3515	3217	2975	2774	2603	2457
Ploss (mmRq)	12.01	13.79	16.17	17.33	19.11	20.83	22.05
Dpacc (mmRq)	.87	.89	.89	.88	.88	.88	.87
Dpfric (mmRq)	11.14	12.90	15.28	16.45	18.23	19.95	21.18
Friction factor	.01282	.01279	.01330	.01277	.01277	.01273	.01362
DP-total (mmRq)	12.01	25.80	41.97	59.29	78.41	99.24	121.28
Tmean/Twall	.8105	.8364	.8585	.8762	.8910	.9040	.9147

Table 3.15 T_{1-s} 試験結果 (圧力分布: No.1908)

Run No.1908	Date & Time 1987_Feb_14/17:00-18:54						
Flow rate = 26.10 (g/s)	Electric input = 63.33 (kW)						
Inlet temp. = 53.2 (°C)	Outlet temp. = 535.1 (°C)						
Inlet press. = 20.65 (kg/cm ² .abs)	Outlet press. = 20.55 (kg/cm ² .abs)						
Inlet Reynolds No. = 16010	Outlet Reynolds No. = 8696						
Qplus = 1.510E-03	Heat efficiency = 103.17 (%)						
Emissivity of outer tube = 0.30							
Block No.	1	2	3	4	5	6	7
X / De	39.6	118.8	197.9	277.1	356.3	435.4	514.6
Mean temp (°C)	87.5	156.6	226.0	294.5	363.0	432.0	500.8
Velocity (m/s)	17.4	20.7	24.0	27.3	30.6	34.0	37.3
Reynolds No.	14981	13325	12051	11050	10231	9541	8956
Ploss (mmHg)	134.18	143.66	142.69	143.70	143.14	143.30	144.70
Dpacc (mmHg)	15.64	15.91	15.78	15.58	15.81	15.83	15.74
Dpfric (mmHg)	118.54	127.75	126.91	128.12	127.32	127.47	128.96
Friction factor	.00906	.00820	.00701	.00623	.00552	.00499	.00504
DP-total (mmHg)	134.18	277.84	420.53	564.23	707.37	850.67	995.37
Tmean/Twall	.7547	.7887	.8148	.8339	.8487	.8611	.8708

Table 3.16 T_{1-s} 試験結果 (圧力分布: No.1909)

Run No.1909	Date & Time 1987_Feb_15/02:12-04:12						
Flow rate = 20.57 (g/s)	Electric input = 49.93 (kW)						
Inlet temp. = 49.2 (°C)	Outlet temp. = 532.3 (°C)						
Inlet press. = 20.68 (kg/cm ² .abs)	Outlet press. = 20.59 (kg/cm ² .abs)						
Inlet Reynolds No. = 12719	Outlet Reynolds No. = 6870						
Qplus = 1.529E-03	Heat efficiency = 103.37 (%)						
Emissivity of outer tube = 0.30							
Block No.	1	2	3	4	5	6	7
X / De	39.6	118.8	197.9	277.1	356.3	435.4	514.6
Mean temp (°C)	83.6	153.1	222.8	291.7	360.4	429.3	498.0
Velocity (m/s)	13.5	16.2	18.8	21.4	24.0	26.6	29.2
Reynolds No.	11891	10560	9539	8738	8085	7539	7076
Ploss (mmHg)	86.75	102.70	120.45	130.65	142.87	143.07	144.48
Dpacc (mmHg)	9.71	9.91	9.84	9.70	9.81	9.79	9.74
Dpfric (mmHg)	77.03	92.79	110.62	120.95	133.05	133.28	134.74
Friction factor	.00959	.00968	.00992	.00953	.00934	.00844	.00852
DP-total (mmHg)	86.75	189.45	309.90	440.55	583.41	726.49	870.97
Tmean/Twall	.7587	.7911	.8168	.8361	.8517	.8650	.8760

Table 3.17 T_{1-s} 試験結果 (圧力分布: No. 1910)

Run No.1910	Date & Time 1987_Feb_16/12:06-14:06						
Flow rate = 4.27 (g/s)	Electric input = 10.62 (kW)						
Inlet temp. = 35.2 (°C)	Outlet temp. = 532.8 (°C)						
Inlet press. = 20.65 (kg/cm ² .abs)	Outlet press. = 20.64 (kg/cm ² .abs)						
Inlet Reynolds No. = 2718	Outlet Reynolds No. = 1425						
Qplus = 1.639E-03	Heat efficiency = 103.85 (%)						
Emissivity of outer tube = 0.30							
Block No.	1	2	3	4	5	6	7
X / De	39.6	118.8	197.9	277.1	356.3	435.4	514.6
Mean temp (°C)	70.1	140.7	212.2	283.5	354.9	426.6	497.6
Velocity (m/s)	2.7	3.3	3.8	4.4	4.9	5.5	6.0
Reynolds No.	2532	2235	2008	1831	1688	1568	1469
Ploss (mmAq)	5.80	6.70	8.05	9.17	10.53	11.65	12.79
Dpacc (mmAq)	.42	.43	.43	.43	.44	.43	.43
Dpfric (mmAq)	5.37	6.26	7.61	8.74	10.09	11.22	12.36
Friction factor	.01613	.01562	.01620	.01624	.01662	.01659	.01820
DP-total (mmAq)	5.80	12.50	20.54	29.72	40.24	51.89	64.63
Tmean/Twall	.7755	.8088	.8375	.8614	.8826	.9019	.9189

Table 3.18 T_{1-s} 試験結果 (圧力分布: No. 1911)

Run No.1911	Date & Time 1987_Feb_18/04:00-06:00						
Flow rate = 2.96 (g/s)	Electric input = 7.21 (kW)						
Inlet temp. = 33.9 (°C)	Outlet temp. = 518.8 (°C)						
Inlet press. = 20.73 (kg/cm ² .abs)	Outlet press. = 20.72 (kg/cm ² .abs)						
Inlet Reynolds No. = 1888	Outlet Reynolds No. = 999						
Qplus = 1.612E-03	Heat efficiency = 103.35 (%)						
Emissivity of outer tube = 0.30							
Block No.	1	2	3	4	5	6	7
X / De	39.6	118.8	197.9	277.1	356.3	435.4	514.6
Mean temp (°C)	67.8	136.4	206.0	275.3	344.9	414.9	484.3
Velocity (m/s)	1.9	2.2	2.6	3.0	3.4	3.7	4.1
Reynolds No.	1762	1559	1403	1281	1182	1099	1030
Ploss (mmAq)	3.46	4.07	4.98	5.76	6.78	7.49	8.19
Dpacc (mmAq)	.20	.20	.20	.20	.20	.20	.20
Dpfric (mmAq)	3.26	3.87	4.77	5.56	6.58	7.29	7.99
Friction factor	.02063	.02039	.02153	.02192	.02303	.02293	.02504
DP-total (mmAq)	3.46	7.53	12.51	18.27	25.06	32.55	40.74
Tmean/Twall	.8023	.8368	.8648	.8867	.9048	.9204	.9328

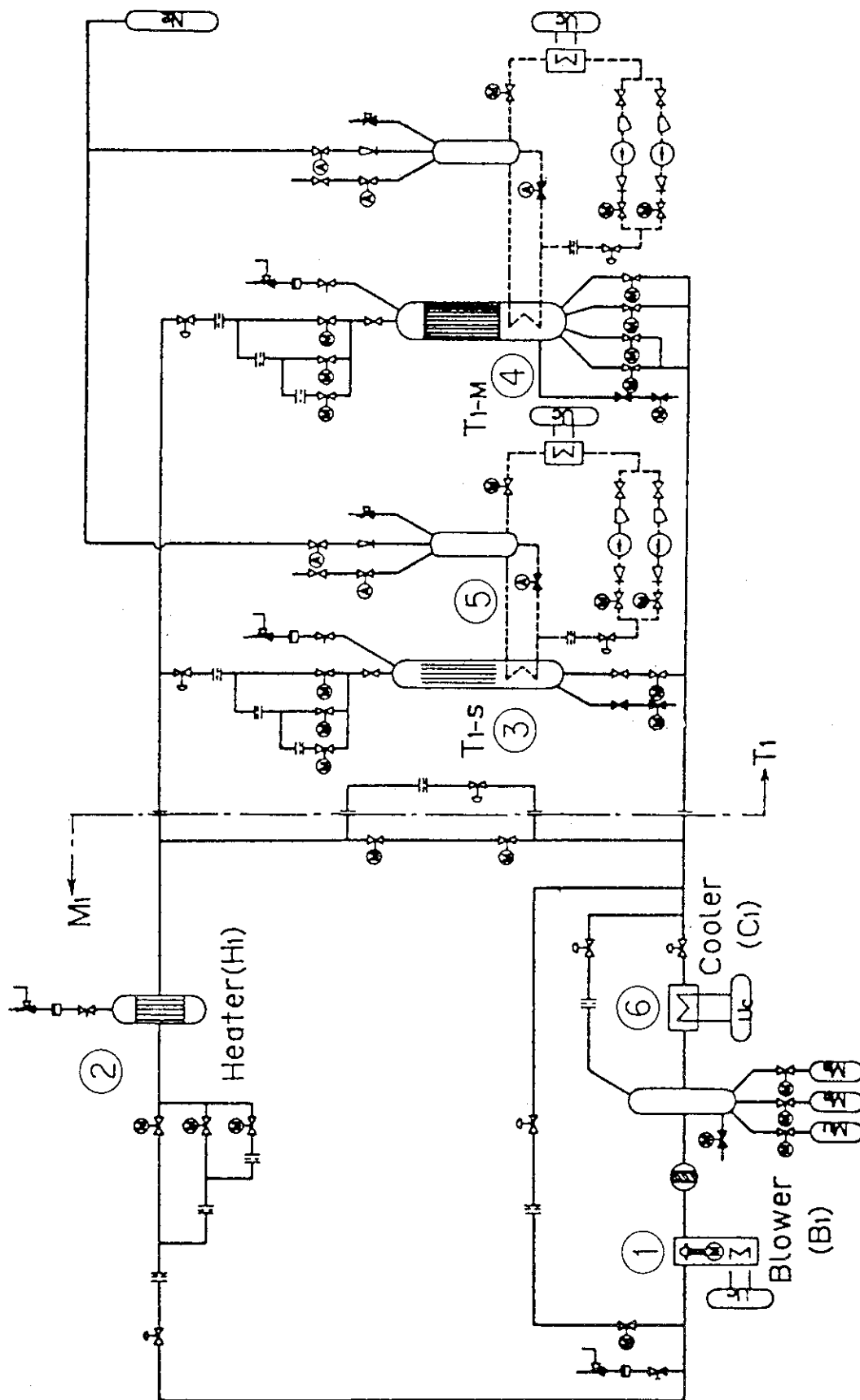


Fig. 3.1 HENDEL T₁試験部の概要

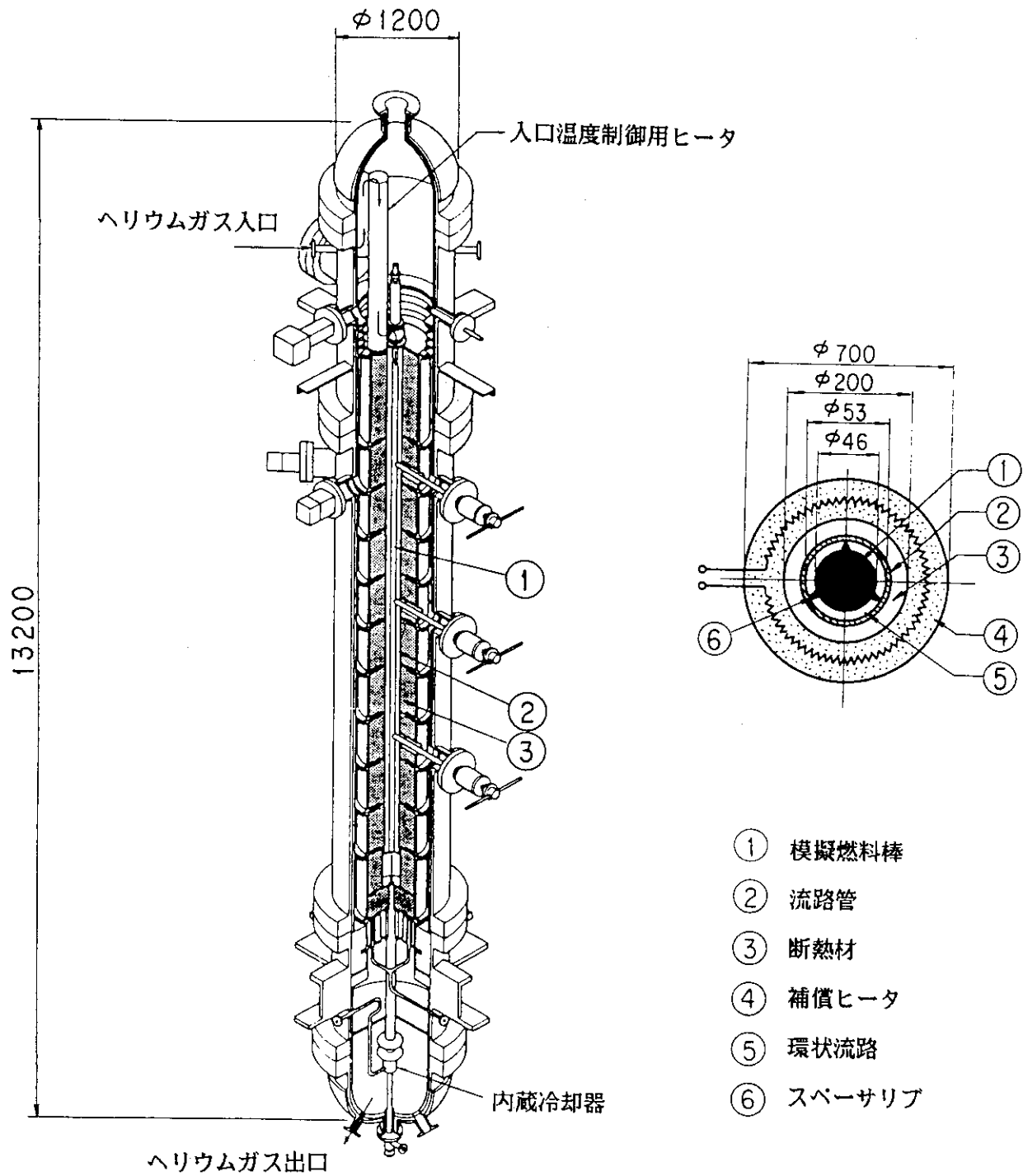
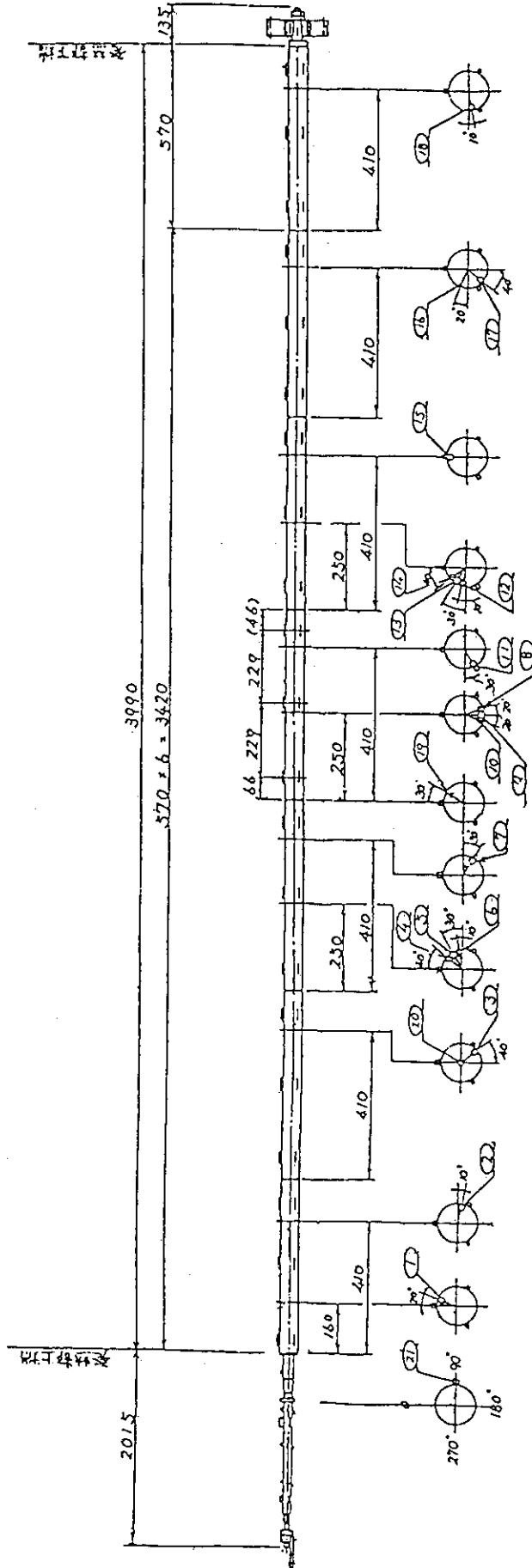


Fig. 3.2 T_{1-s} 試験装置の概略構造



No.	Tag. No.	取付位置方法	No.	Tag. No.	取付位置方法	No.	Tag. No.	取付位置方法
①		才1段 ○	⑧		⊖	⑮		才5段 ○
②		才1段 ○	⑨		○	⑯		才6段 ●
③		才2段 ○	⑩		⊕	⑰		才6段 ○
④		才3段 ⊖	⑪		○	⑱		才7段 ○
⑤		↑	⑫		⊖	⑲		才4段 ▲
⑥		↑	⑬		○	⑳		才2段 中心部
⑦		才3段 ○	⑭		⊕	㉑		入口He温度

Fig. 3.3 模擬燃料棒温度計測位置

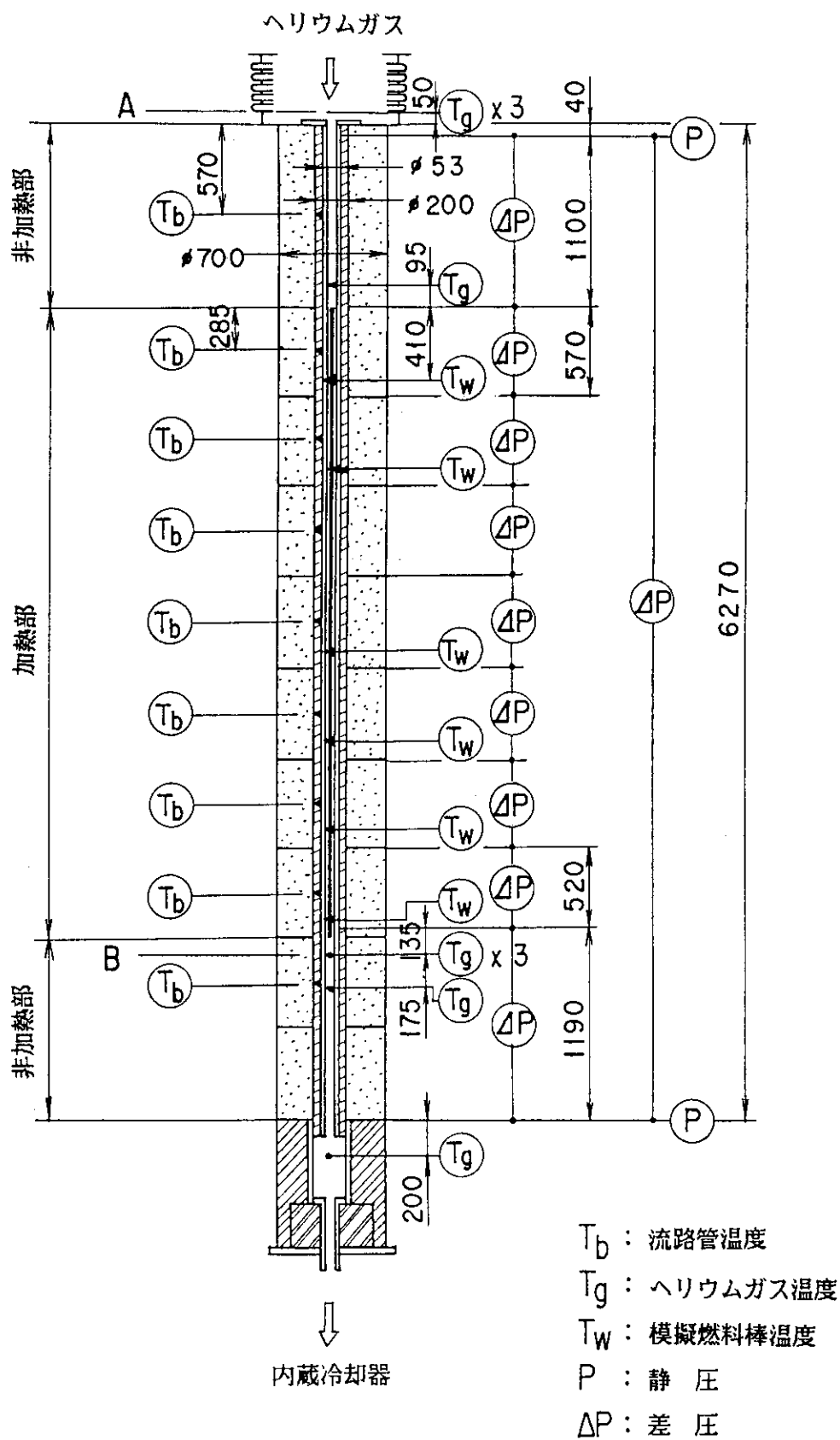


Fig. 3.4 T₁₋₁ 試験装置計測位置

4. 解析モデル及び解析条件

4.1 解析モデル

試験に使用した模擬燃料棒（以下ヒーターと呼ぶ）の構造を、Fig. 4.1, Fig. 4.2に示す。ヒーターは、径方向にはギャップを有する5層の同心円筒、軸方向には接続電極を介して7本継ぎ合わせたユニットヒーターで構成されている。ヒーターと流路管の諸元及び材質をTable 4.1に示す。ヒーターは、長さ570mm（有効発熱長530mm）で電気加熱による軸方向一様発熱分布を有する。軸方向と円周方向には、それぞれ3個所ずつスペーサ・リブがヒーター表面に取り付けられている。

Fig. 4.3に、TEM DIM温度分布計算モデルを示す。TEM DIMにおける温度分布計算は、以下の条件で行った。

- (i) RZ 2次元体系でモデル化し、軸方向には熱移動はない。また流路管最外側は断熱とする。
- (ii) HENDEL T_{1-s}の各実験条件のうち、入口ヘリウムガス温度及びヘリウム質量流量を同一として温度計算する。
- (iii) ヒーターの熱は全てニクロム部分で生じ、径軸方向に一様発熱とする。
- (iv) 黒鉛スリーブとシース間のギャップでは、充填ガスの熱伝導とふく射熱伝達を考慮する。
- (v) 冷却材流路では、対流熱伝達と内外壁間のふく射を考慮する。

本検証作業では、燃料温度（ヒーター表面温度及びヒーター中心温度）、ヘリウムガス温度及び圧力分布、それぞれの測定結果と計算結果を比較する。

4.2 解析条件

検証解析に用いる燃料体の熱伝達率、圧力損失係数は、HTTR炉心熱流力設計に使用している設計式及びHENDEL T_{1-s}により得られた最適式である。また使用する各材料の熱伝達率、ふく射率等の物性値についても同様に、設計式と最適式を設定した。それぞれの相関式を以下に示す。

- (i) 熱伝達率 ($Re > 2000$)

$$a. \text{ 設計式 } : Nu = 0.02 (D_i / D_o)^{-0.16} \cdot Re^{0.8} \cdot Pr^{0.4} \cdot (T_w / T_b)^{-0.5} \quad (4.1)$$

(Fig. 4.4参照)

$$b. \text{ 最適式 } : Nu = 0.0215 Re^{0.8} \cdot Pr^{0.4} \quad (4.2)$$

但し、層流域 ($Re \leq 2000$) においては従来から使用している設計式で計算する。

- (ii) 圧力損失係数

- a. 設計式 ; スペーサ・リブ圧損係数、燃料チャンネル摩擦係数及びチャンネルオフセット効果等を考慮する。(Fig. 4.5, 4.6参照)

但し、本解析では、スペーサ・リブ圧損と燃料チャンネル摩擦係数を考える。

b. 最適式 ; $f = 0.094 \text{Re}^{-1/4}$ (スパーサ・リブ圧損込み) (4.3)

但し、層流域 ($\text{Re} \leq 2000$) においては従来から使用している設計式で計算する。

(iii) BN

熱伝導率は、Fig. 4.7 に示す次式を用いる。 (4.4)

a. 設計式 $\lambda = 4.30 \text{ kcal/mhr}^\circ\text{C}$

b. 最適式

$$\lambda = 3.88362 + 6.070614 \times 10^{-3} T - 1.046514 \times 10^{-5} T^2 + 5.06314 \times 10^{-9} T^3 \quad (4.5)$$

λ ; kcal/mhr $^\circ\text{C}$, T ; $^\circ\text{C}$

(iv) ニクロム 5

ニクロム 5 の熱伝導率は、文献(5)に示されているデータを 3 次式で近似して使用する (Fig. 4.8 中の⑦)。

$$\lambda = 5.9469 \times 10^{-2} + 2.2922 \times 10^{-4} T - 7.8110 \times 10^{-8} T^2 + 3.5044 \times 10^{-11} T^3 \quad (4.6)$$

λ ; W/cm $^\circ\text{C}$, T ; $^\circ\text{C}$

上式を最適式とし、設計式は Fig. 4.8 の各データのバラツキから (4.6) 式の 90% とする。

(v) インコネル 600

インコネル 600 の熱伝導率は、ニクロム 5 と同様に、文献(5)に示されているデータを 3 次式で近似して使用する (Fig. 4.9 中の⑥)。

$$\lambda = 1.1433 \times 10^{-1} - 4.5430 \times 10^{-5} T + 2.5719 \times 10^{-7} T^2 - 8.2833 \times 10^{-11} T^3 \quad (4.7)$$

λ ; W/cm $^\circ\text{C}$, T ; $^\circ\text{C}$

上式を最適式とし、設計式は、図中のデータのバラツキから (4.7) 式の 80% とする。

ふく射率は、同文献等から設計式・最適式共に $\epsilon = 0.3$ とする。

(vi) 黒鉛

T-4 黒鉛の熱伝導率は、設計で使用している IG-110 の熱伝導率に基づいて、試験体の実測値から設計式、最適式共に設計標準値の 70% とする (Fig. 4.10 参照)。

(vii) ハステロイ X

ふく射率は、 $\epsilon = 0.3$ とする。

(viii) ヘリウム

炉心熱流力設計で使用している式を設計式、最適式双方に用いる。

Table 4.1 T_{1-s} 試験部の諸元

名 称	領域番号	内/外径 mm	材 質	径方向分割数 (TEMDIM)	備 考
ヒータ (シース) (スリーブ)	1	0.0 /22.05	B N	2	
	2	22.05/24.05	ニクロム5	2	発熱部分
	3	24.05/28.65	B N	5	
	4	28.65/31.55	インコネル600	2	領域4と5の間にギャップ
	5	32.0 /45.9	黒 鉛	3	領域5と6の間は冷却材
流路管	6	53.1 /62.3	ハステロイX	2	

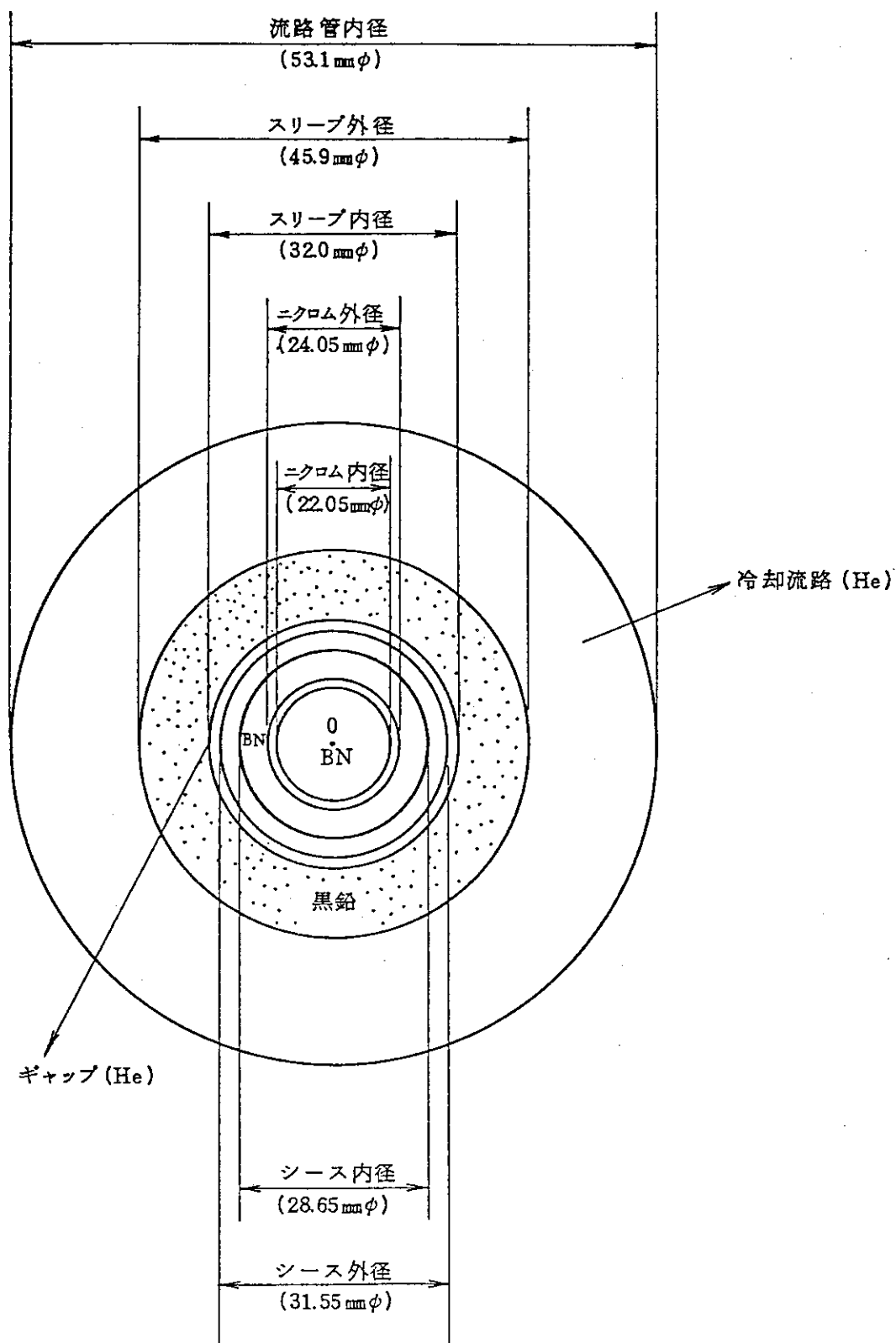


Fig. 4.1 模擬燃料棒断面図

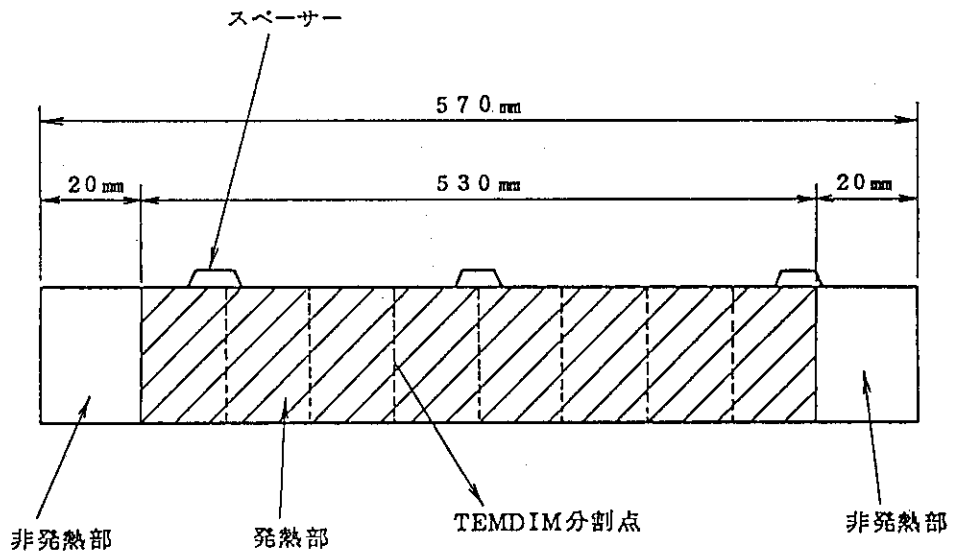


Fig. 4.2 模擬燃料棒軸方向模式図

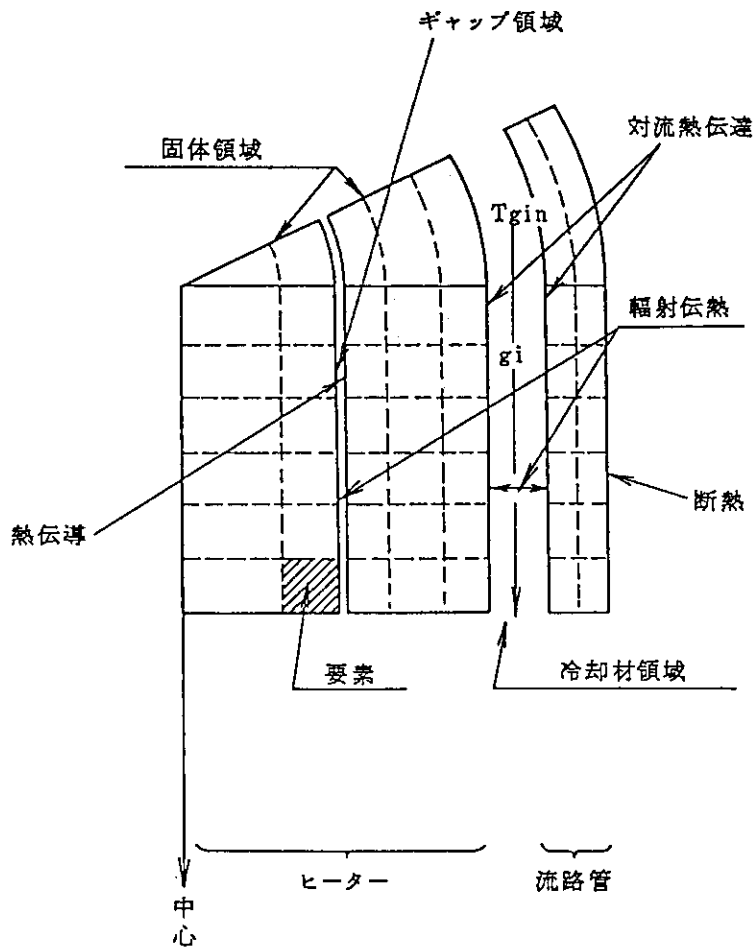


Fig. 4.3 TEMDIM温度分布計算モデル

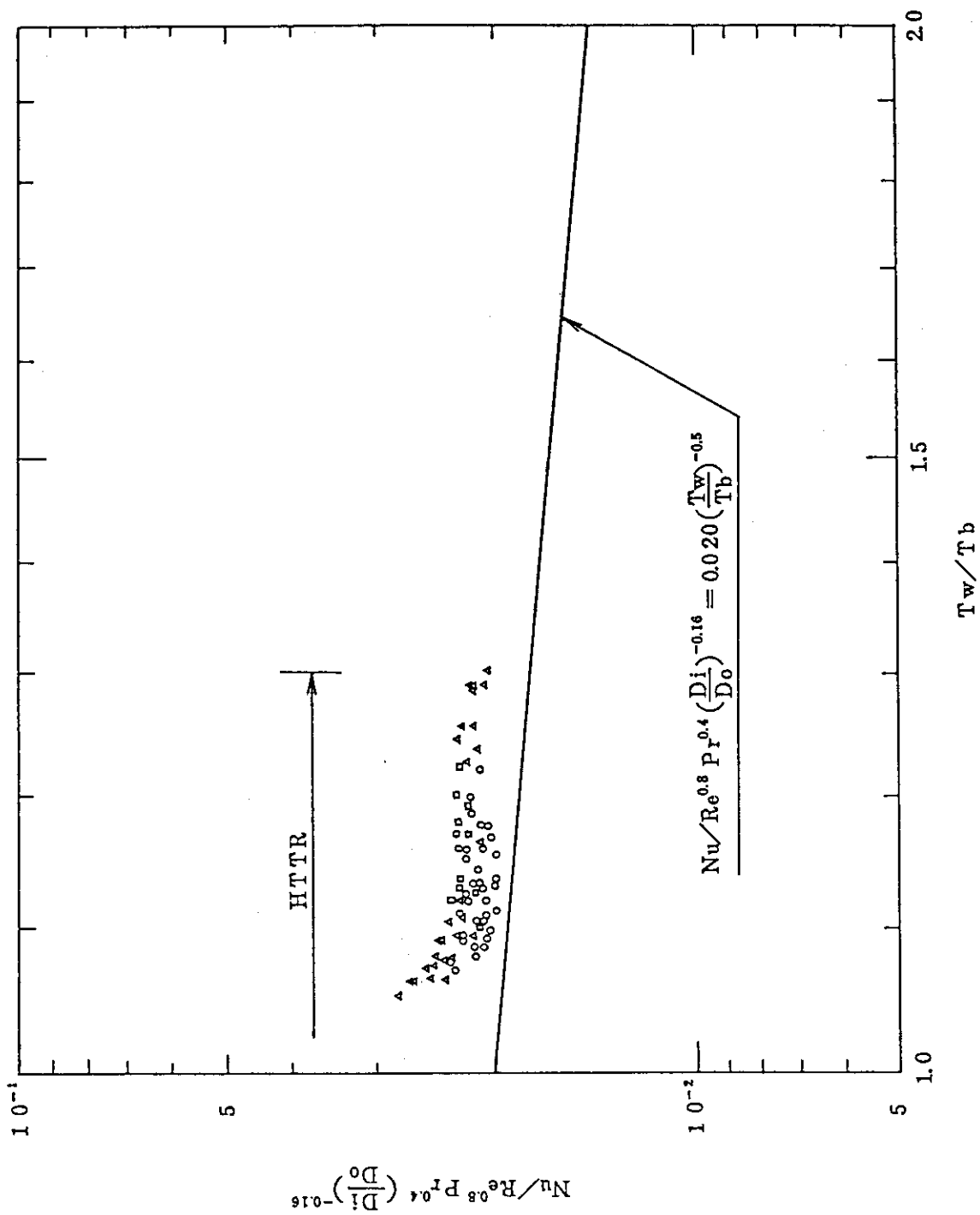


Fig. 4.4 燃料チャンネル熱伝達率相関式 (設計式)

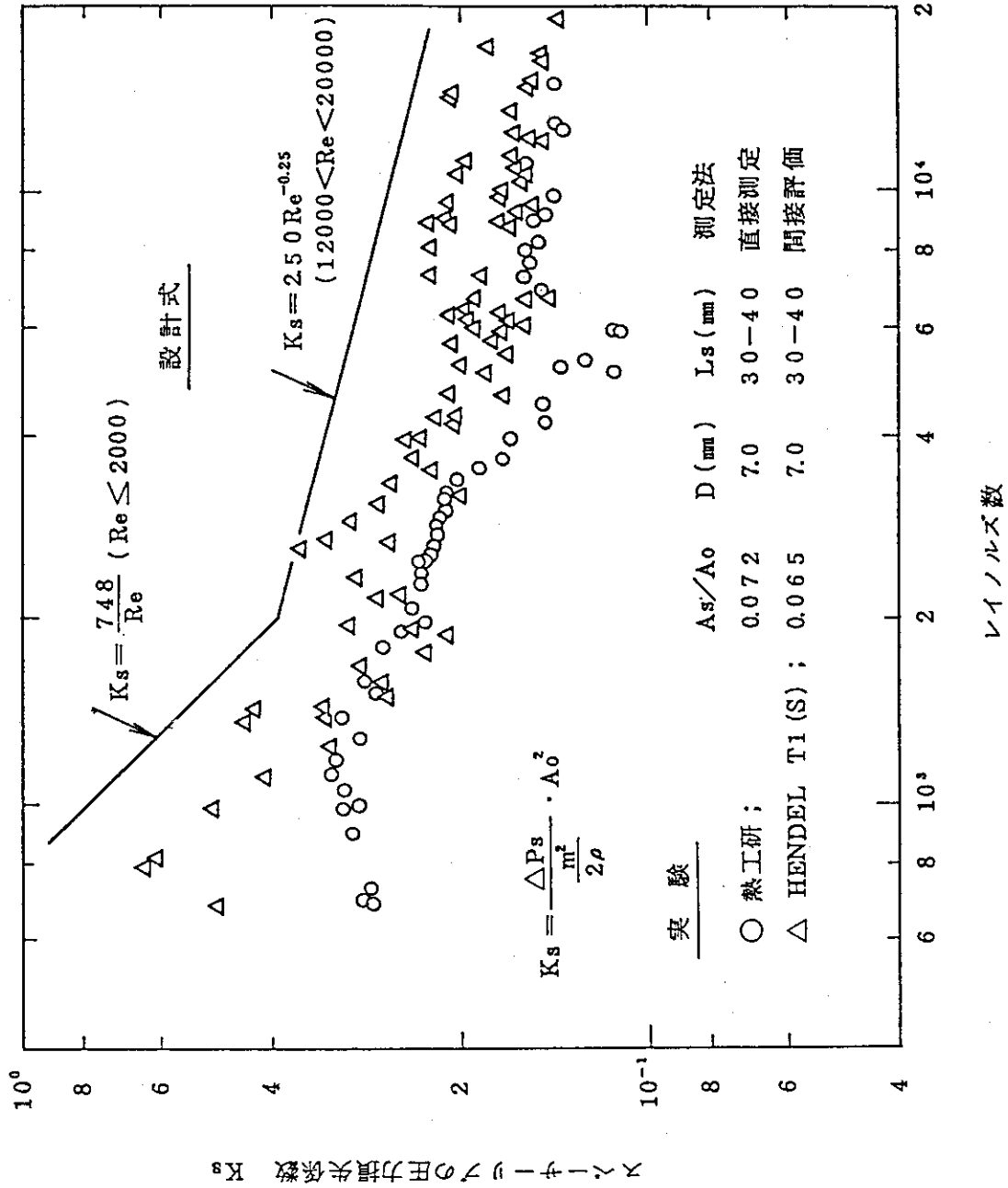


Fig. 4.5 1段当りのスパーサーの圧力損失係数 (設計式)

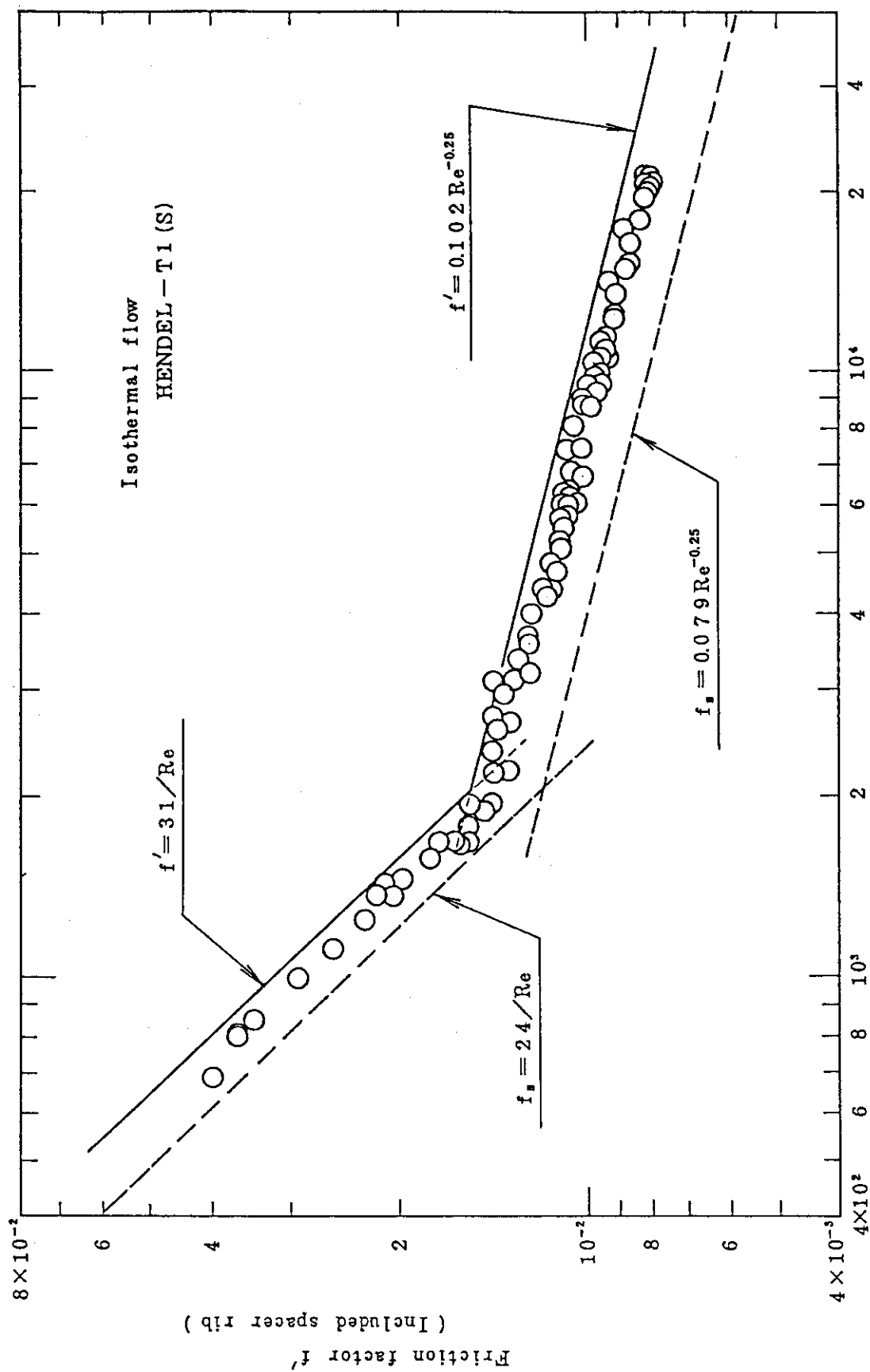
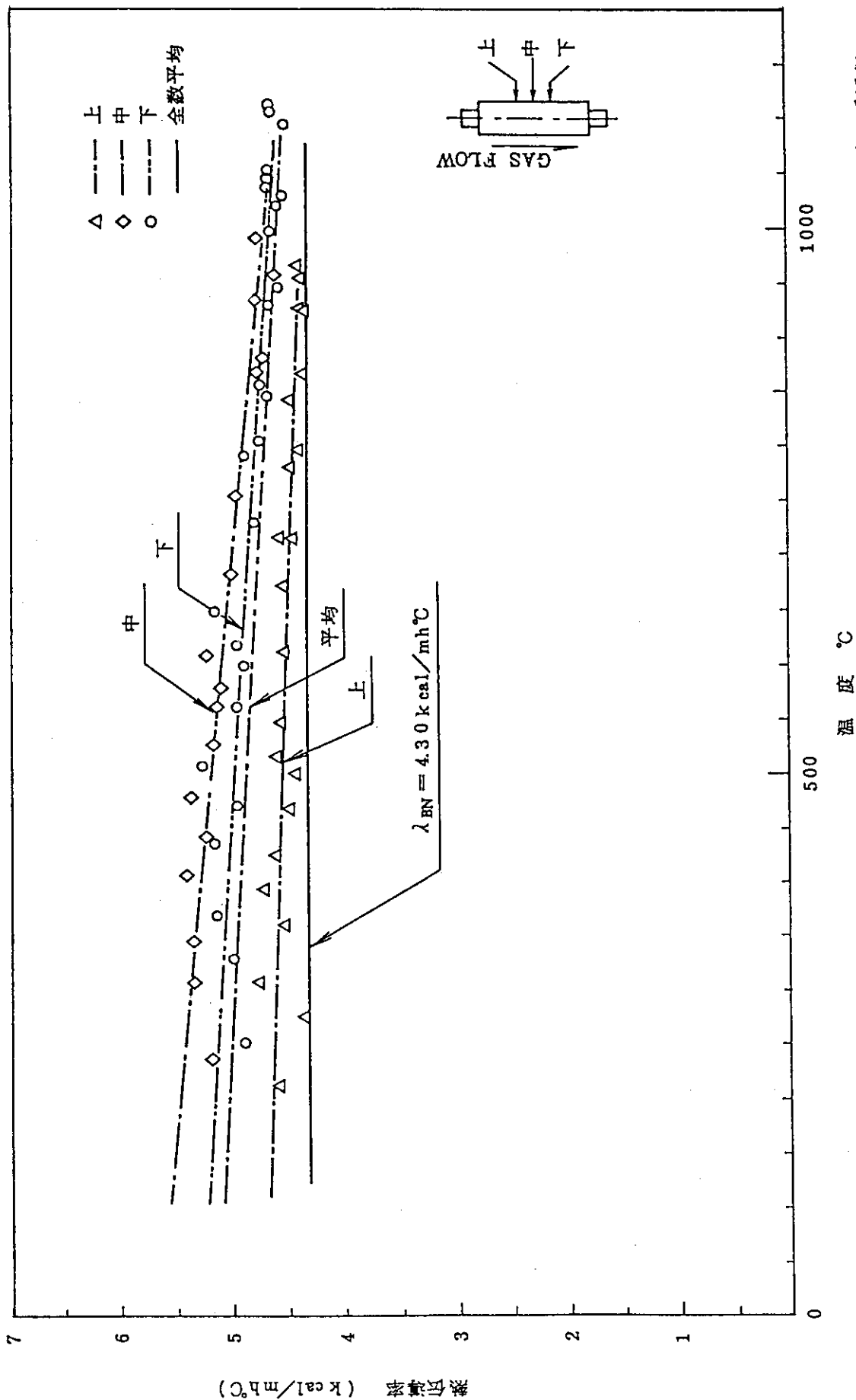


Fig. 4.6 スペーサーリブ (1段/190mm) を含んだ実効摩擦係数 (等価直径7mm) 相関式



それぞれの直線は、最小 2 乗近似
したものである (一次直線)

Fig. 4.7 BN の熱伝導率

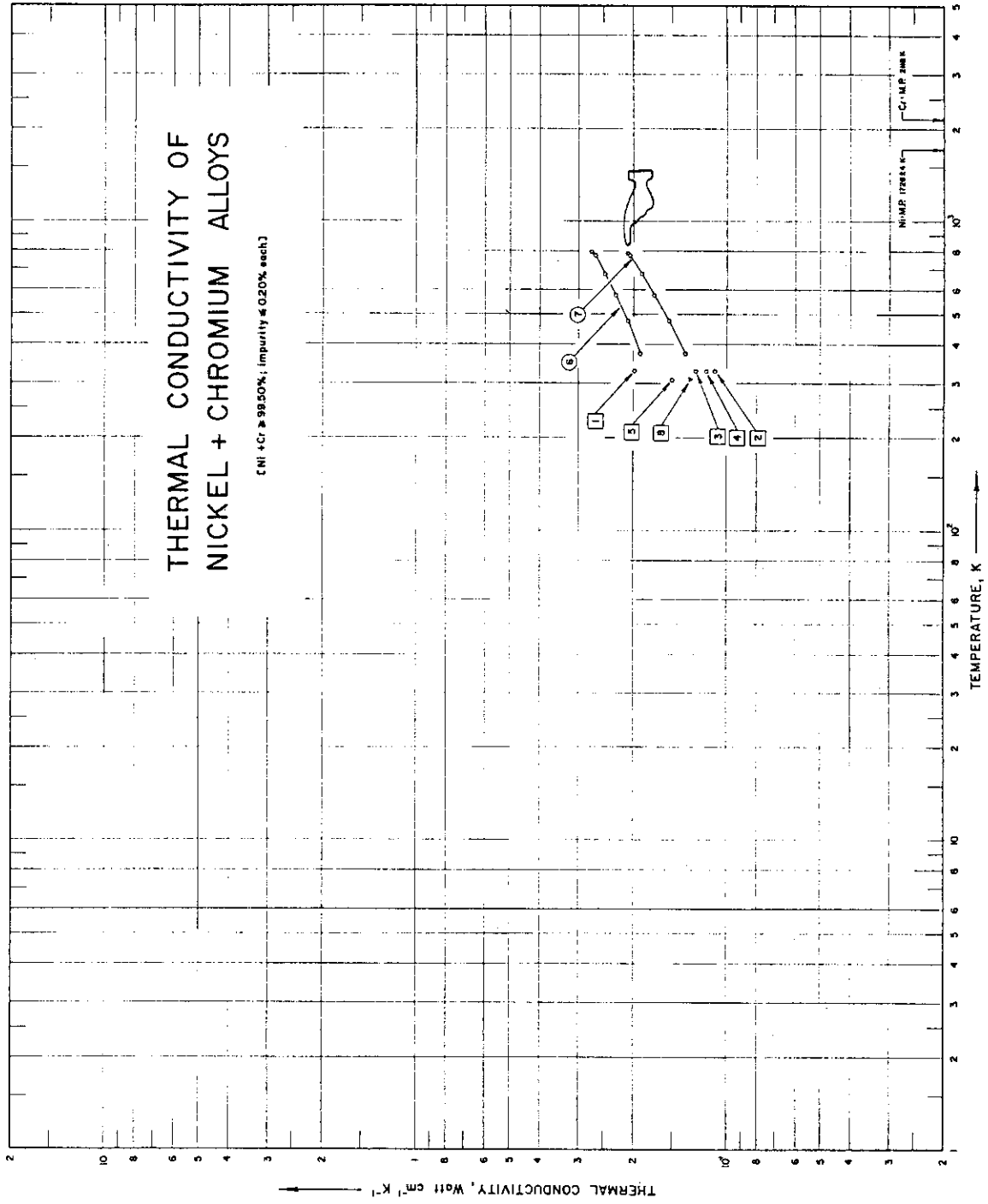


Fig. 4.8 ニクロム5の熱伝導率(5)

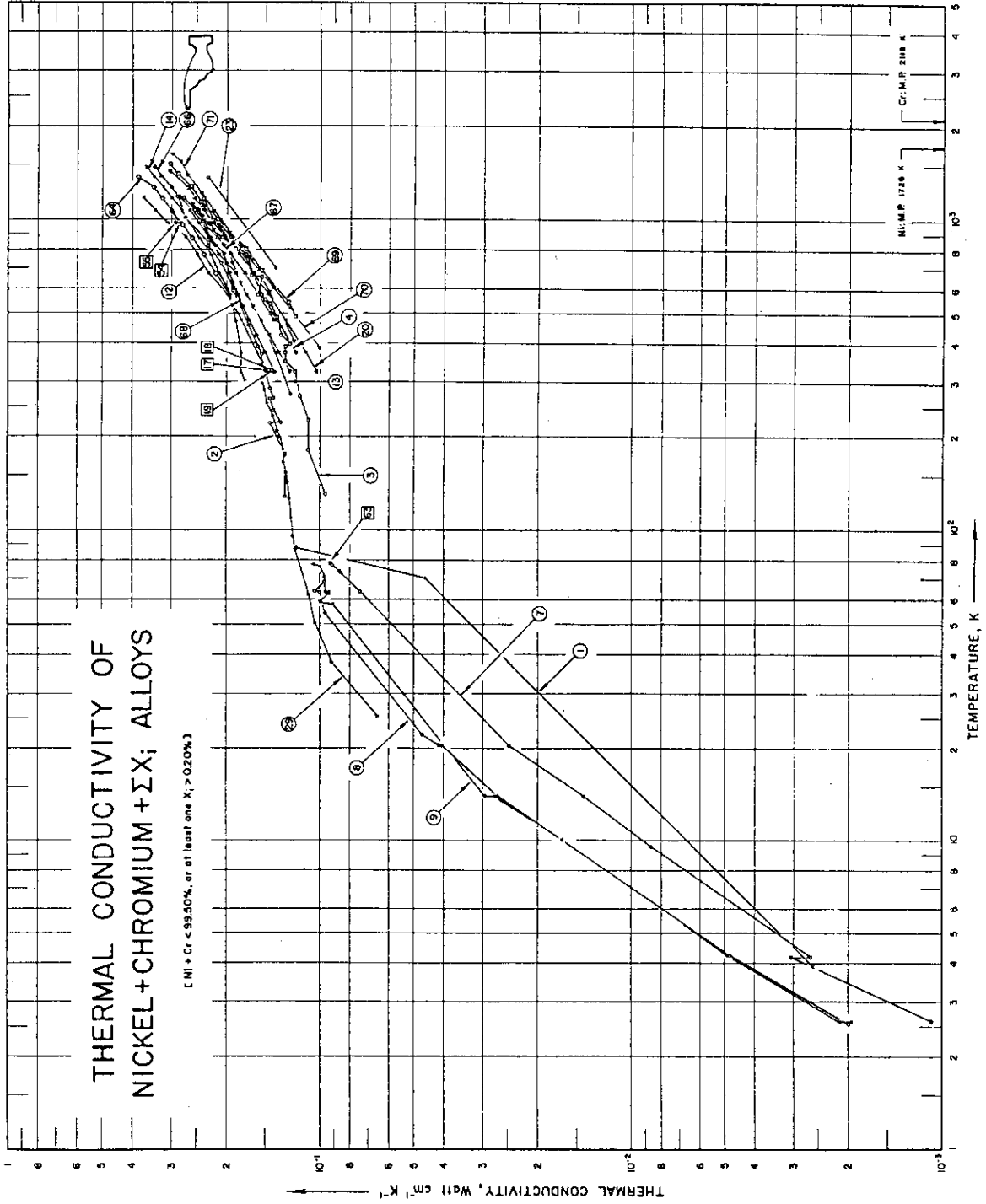


Fig. 4.9 インコネル 600 の熱伝導率⁽⁶⁾

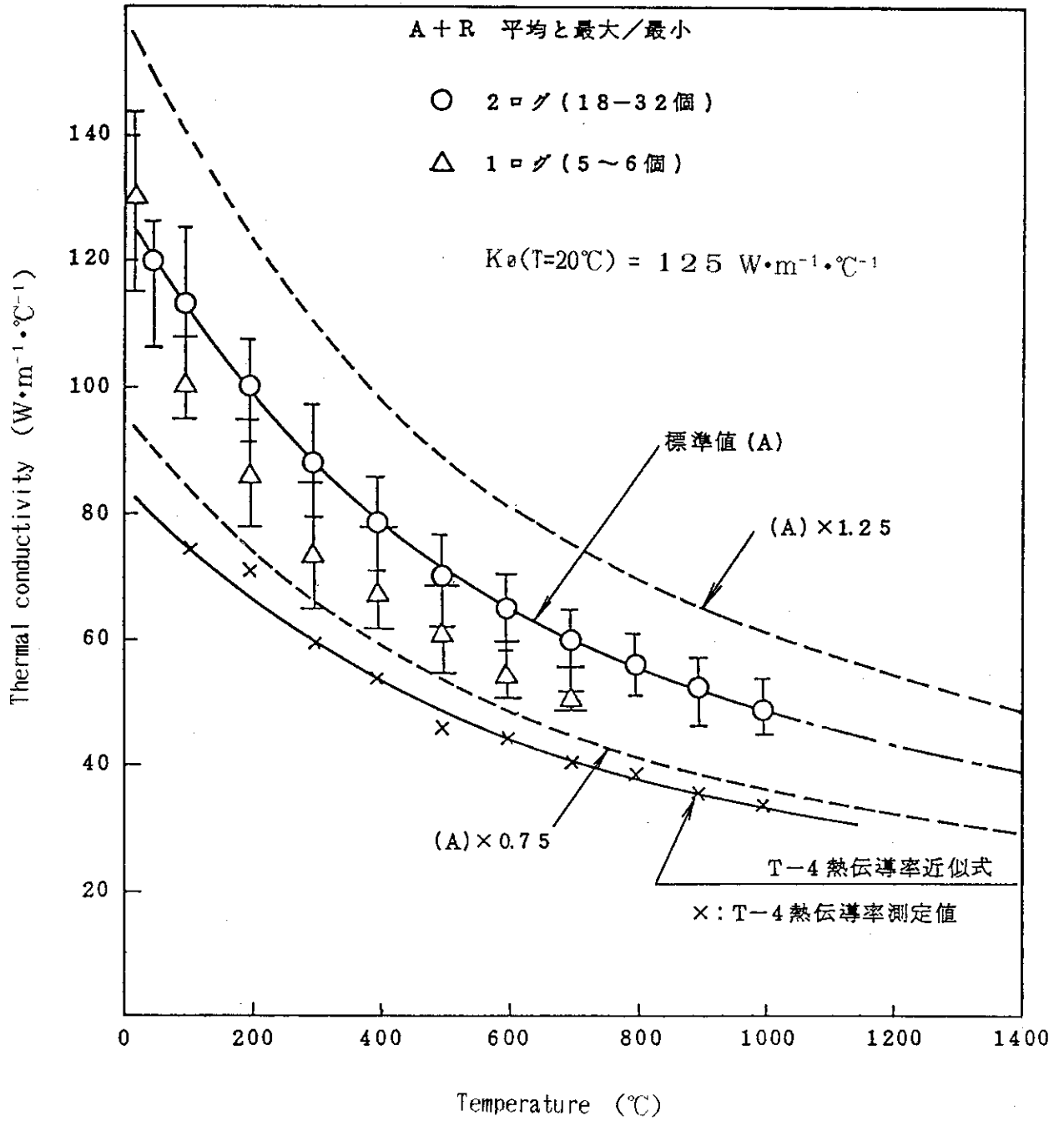


Fig. 4.10 IG-110 黒鉛及びT-4 黒鉛の熱伝導率

5. 検証解析結果

Fig. 5.1 ~ 5.9にHENDEL T_{1-s} によるヒータ温度分布の実測値とTEMDIMによる解析結果の比較を示す。図中の○及び●印は、それぞれヒータ温度とヘリウムガス温度の実測値を示している。また、□印と実線は、熱伝達率の相関式にHENDEL T_{1-s} により得られた最適式を用いて得られたヒータ温度分布の解析結果を、+印と破線は、炉心熱流力設計に用いている設計式を用いて得られたヒータ温度分布の解析結果を示している。ヒータ温度分布は、ヘリウムガス温度に基づいて、ヘリウムガスとヒータ表面の温度差（境膜温度差）或いはヒータ内部の温度差を加算して求めている。このときヒータの発熱量（電気・入力）は、ヘリウムガスの温度上昇と釣り合うように定めている。

また、本検証作業では、境膜温度差及びヒータ中心温度についての検討をおこなった。前者は、最適式と設計式による解析結果の比較に重点を置き、後者は、TEMDIMの熱伝導計算手法の保守性・妥当性に着目して行った。

Fig. 5.10, 5.11に、境膜温度差についてTEMDIMによる計算値 (ΔT_{CAL})と実測値 (ΔT_{EXP})の比較を示す。HTTRの炉心熱流力設計では、最小レイノルズ数を2000以上に制限していることから、層流域における実験である実験番号1910, 1911の結果は図中に記入していない。最適式による解析結果は、45度の線（計算値と実測値が一致する線）を中心に約±15%の範囲内にばらついている。一方設計式を用いた解析結果は、全点が45度の線よりも上側にあり、解析結果は実測値よりも大きくなることが確認された。

TEMDIMによるヒータ中心温度の計算値 (T_{CAL})とHENDEL T_{1-s} による実測値 (T_{EXP})の比較をFig. 5.12に示す。最適式を用いた評価では、計算値と実測値との差は最大でも5%程度であり、両者は良好な一致を示している。一方設計式による評価では、計算値は常に実測値よりも高くなっており、設計手法の保守性・妥当性が確認された。

Fig. 5.13 ~ 5.21にHENDEL T_{1-s} による圧力分布の実測値とTEMDIMによる解析結果の比較を示す。図中の○印は実測値を、□印と実線は圧力損失係数の相関式にHENDEL T_{1-s} により得られた最適式を用いて得られた圧力分布の解析結果を、+印と破線は設計式を用いて得られた圧力分布の解析結果を示している。またヒータ各段毎の圧力損失の計算値 (ΔP_{CAL})と実測値 (ΔP_{EXP})の比較をFig. 5.22, 5.23に示す。最適式を用いて得られた解析結果は、45度の線を中心に約±15%の範囲内にばらついており、設計式を用いて得られた解析結果は、全点が実測値よりも大きな値を示している。

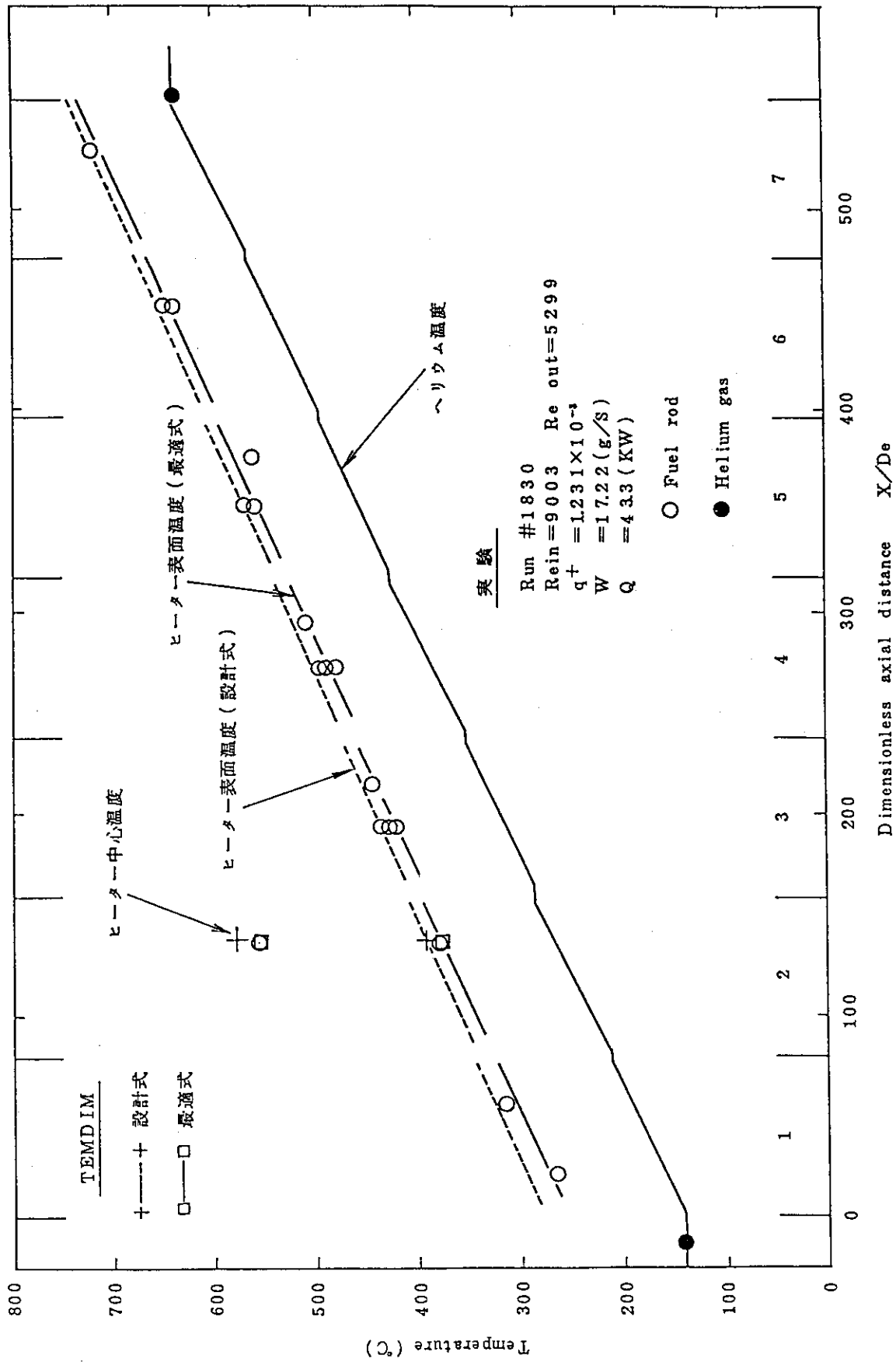


Fig. 5.1 温度分布の比較 (No. 1830)

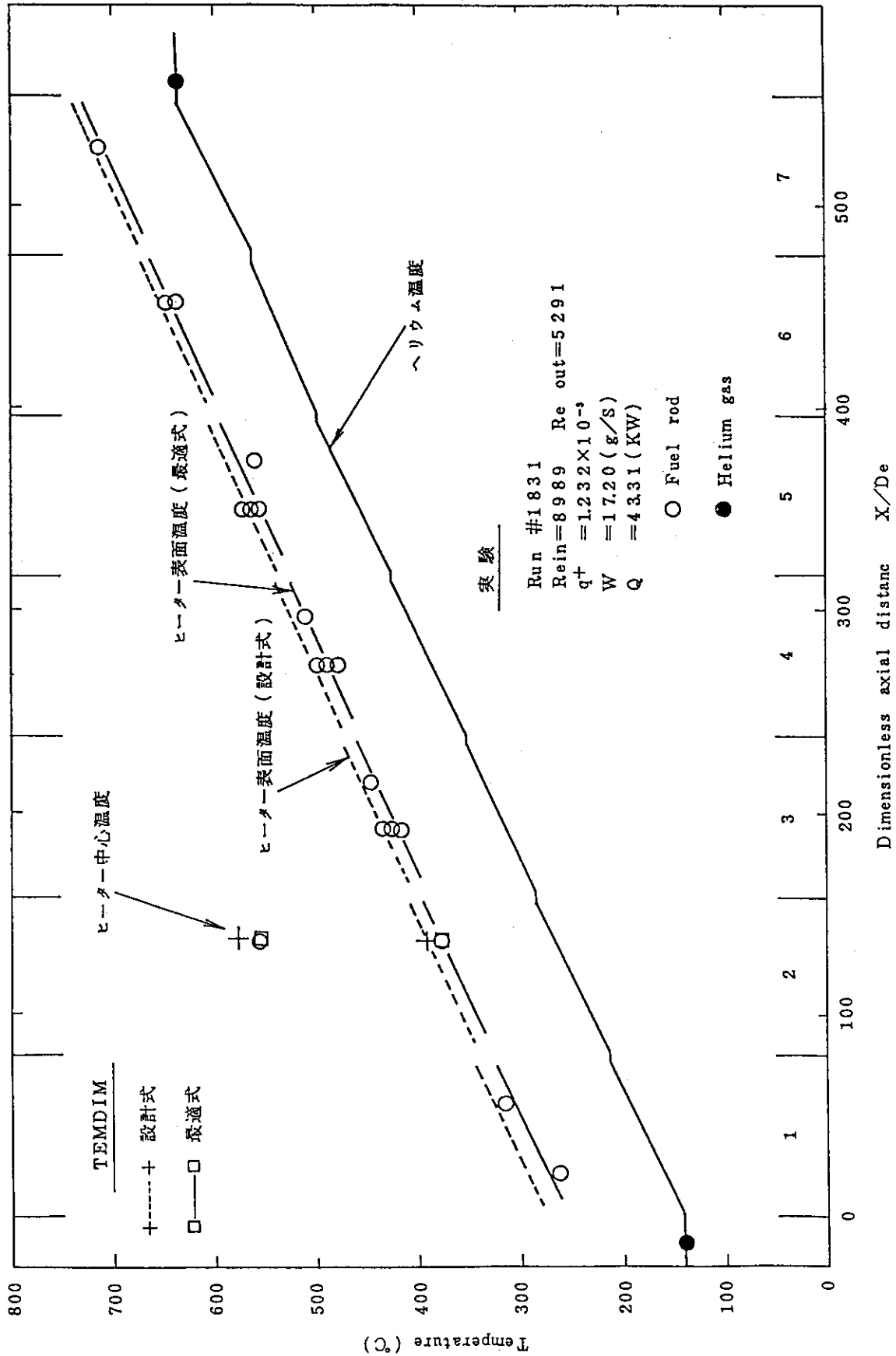


Fig. 5.2 温度分布の比較 (No.1831)

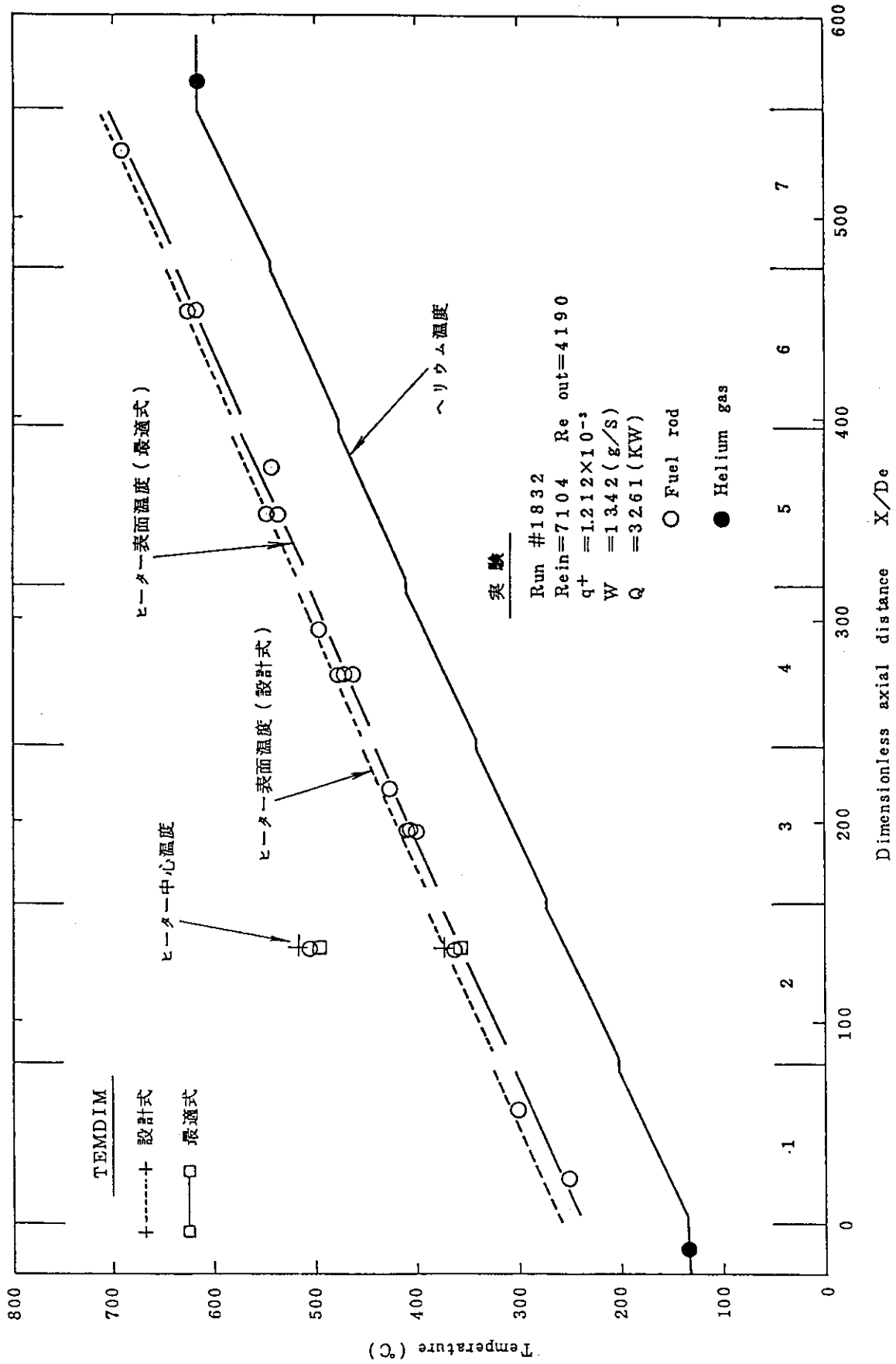


Fig. 5.3 温度分布の比較 (No.1832)

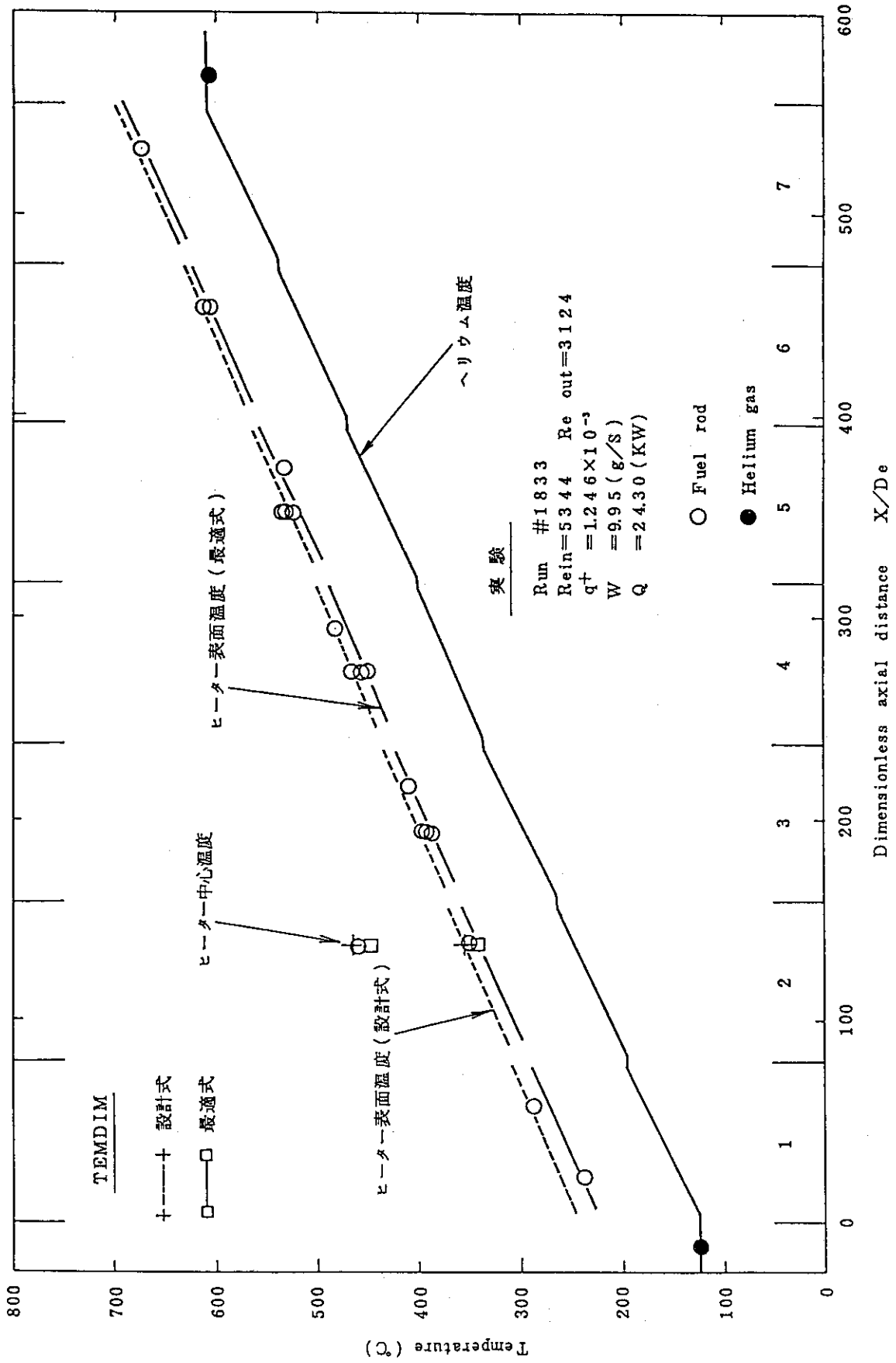


Fig. 5.4 温度分布の比較 (No.1834)

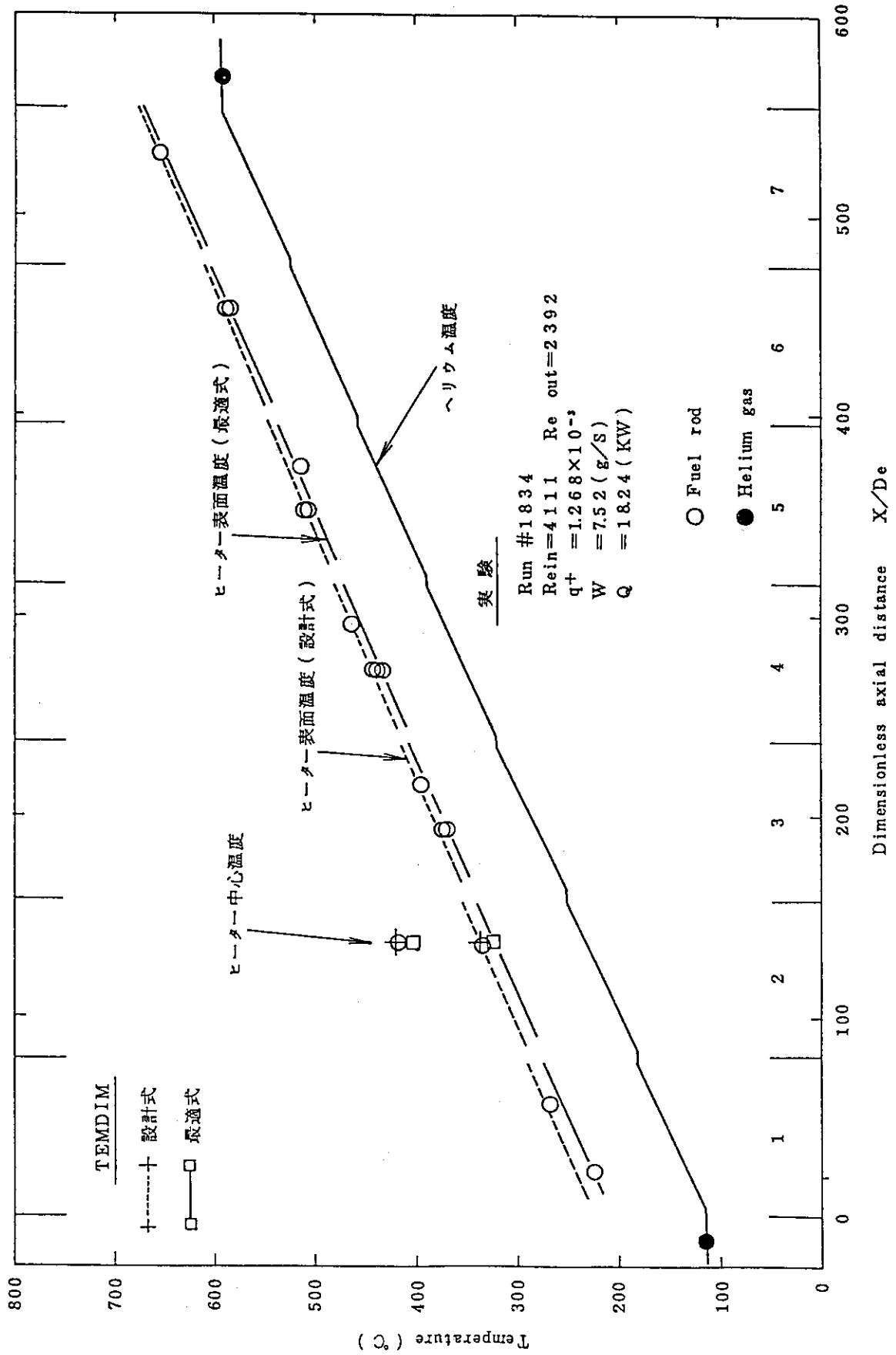


Fig. 5.5 温度分布の比較 (No.1834)

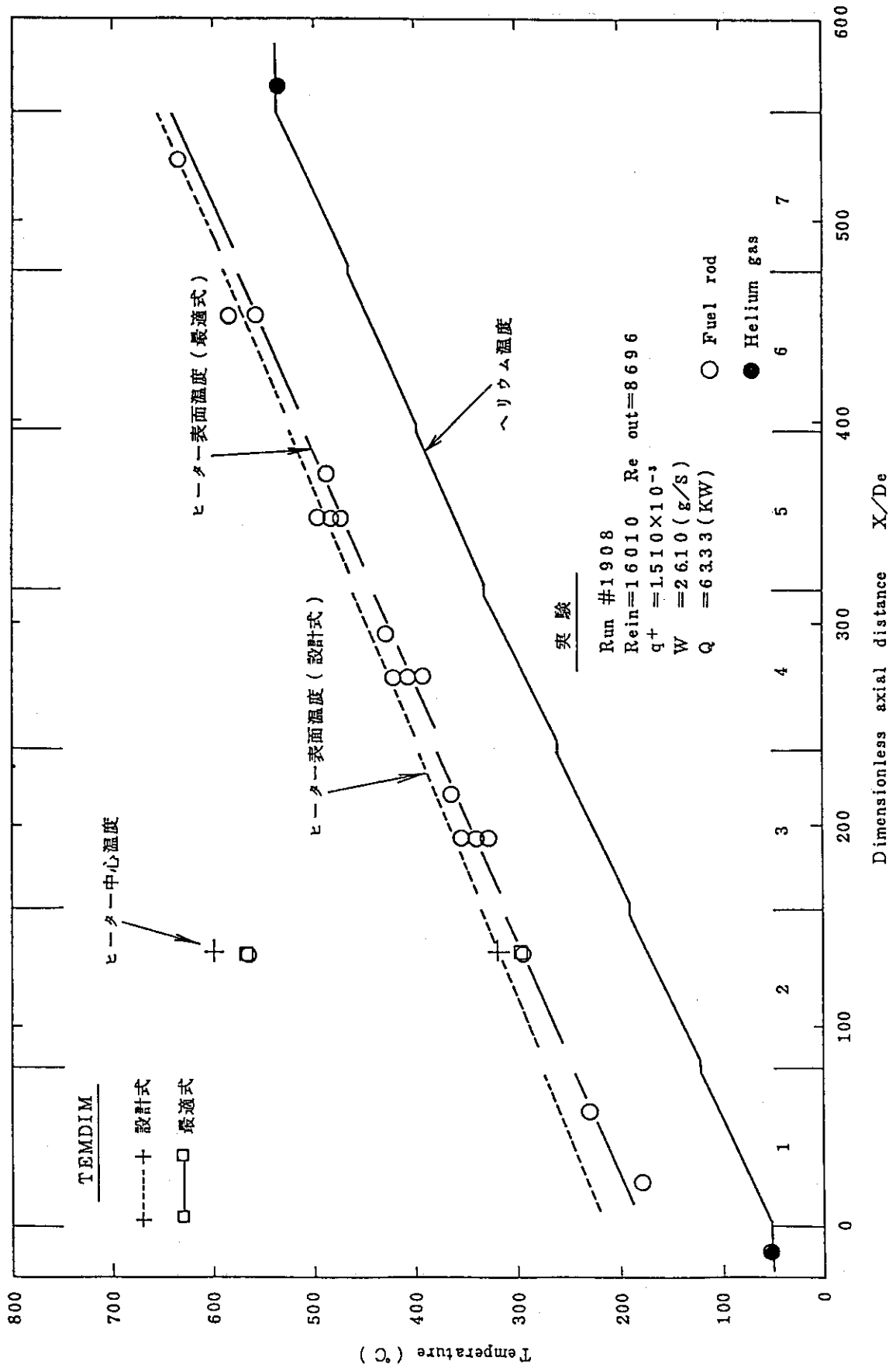


Fig. 5.6 温度分布の比較 (No.1908)

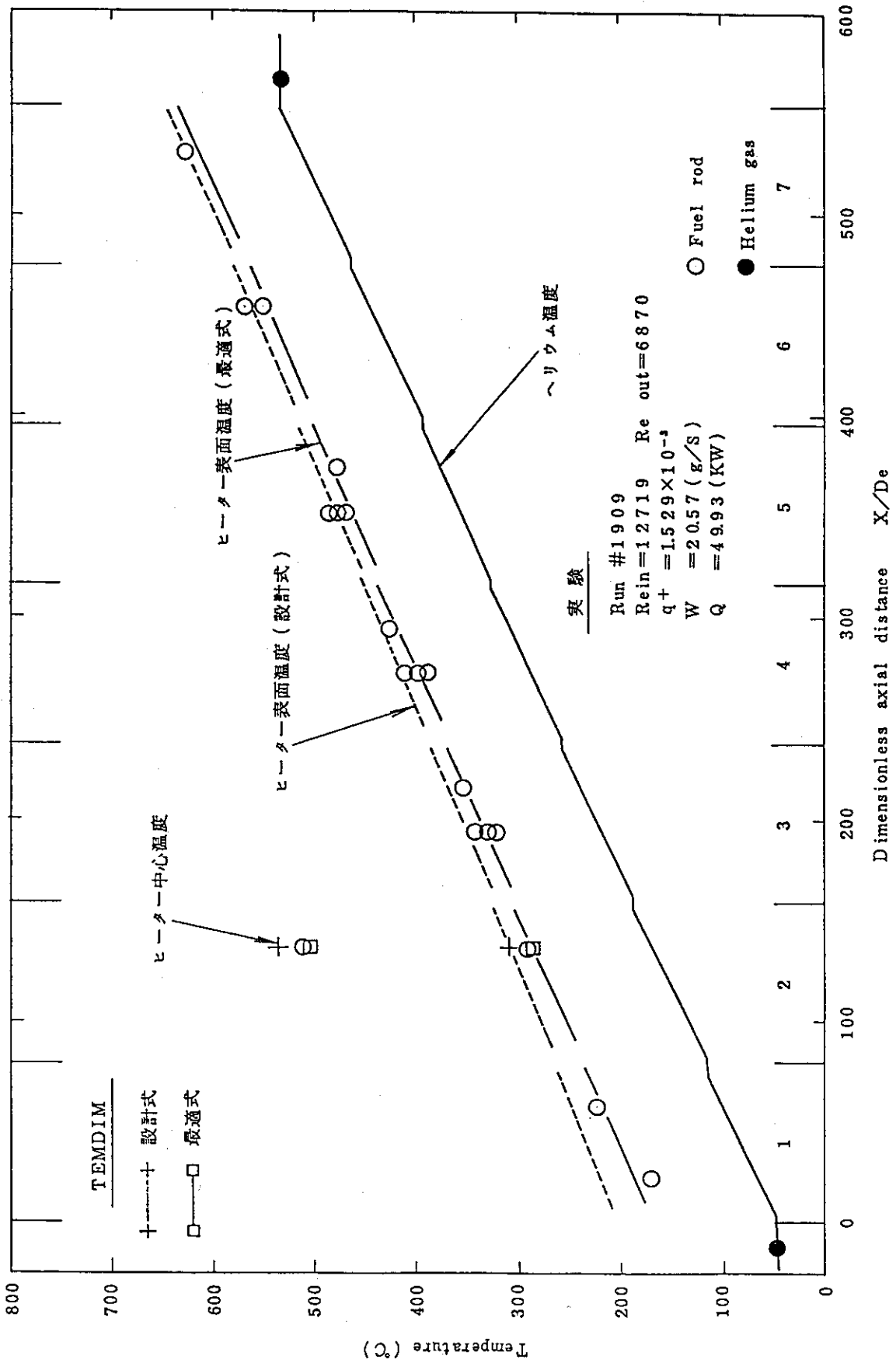


Fig. 5.7 温度分布の比較 (No.1909)

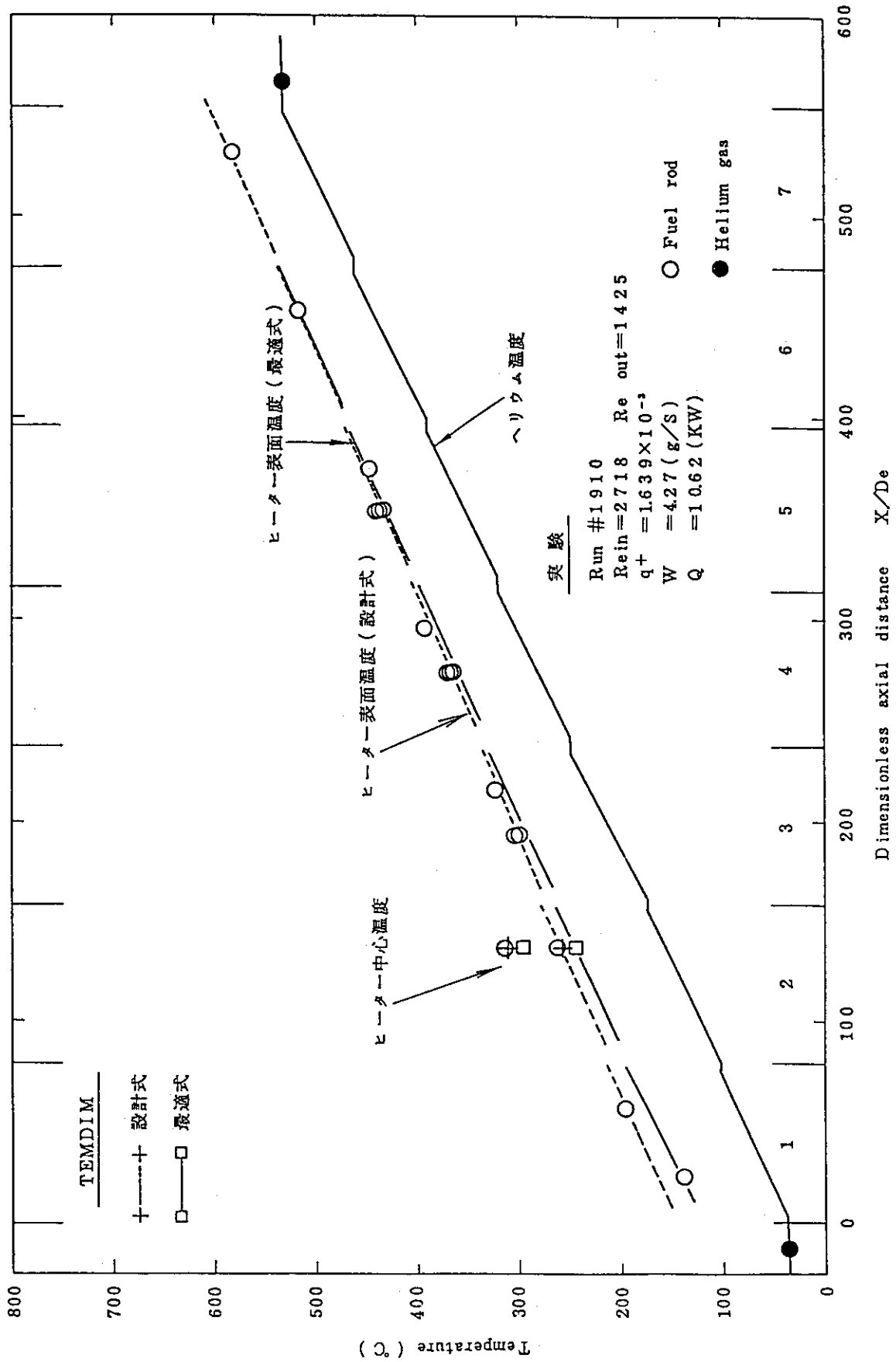


Fig. 5.8 温度分布の比較 (No. 1910)

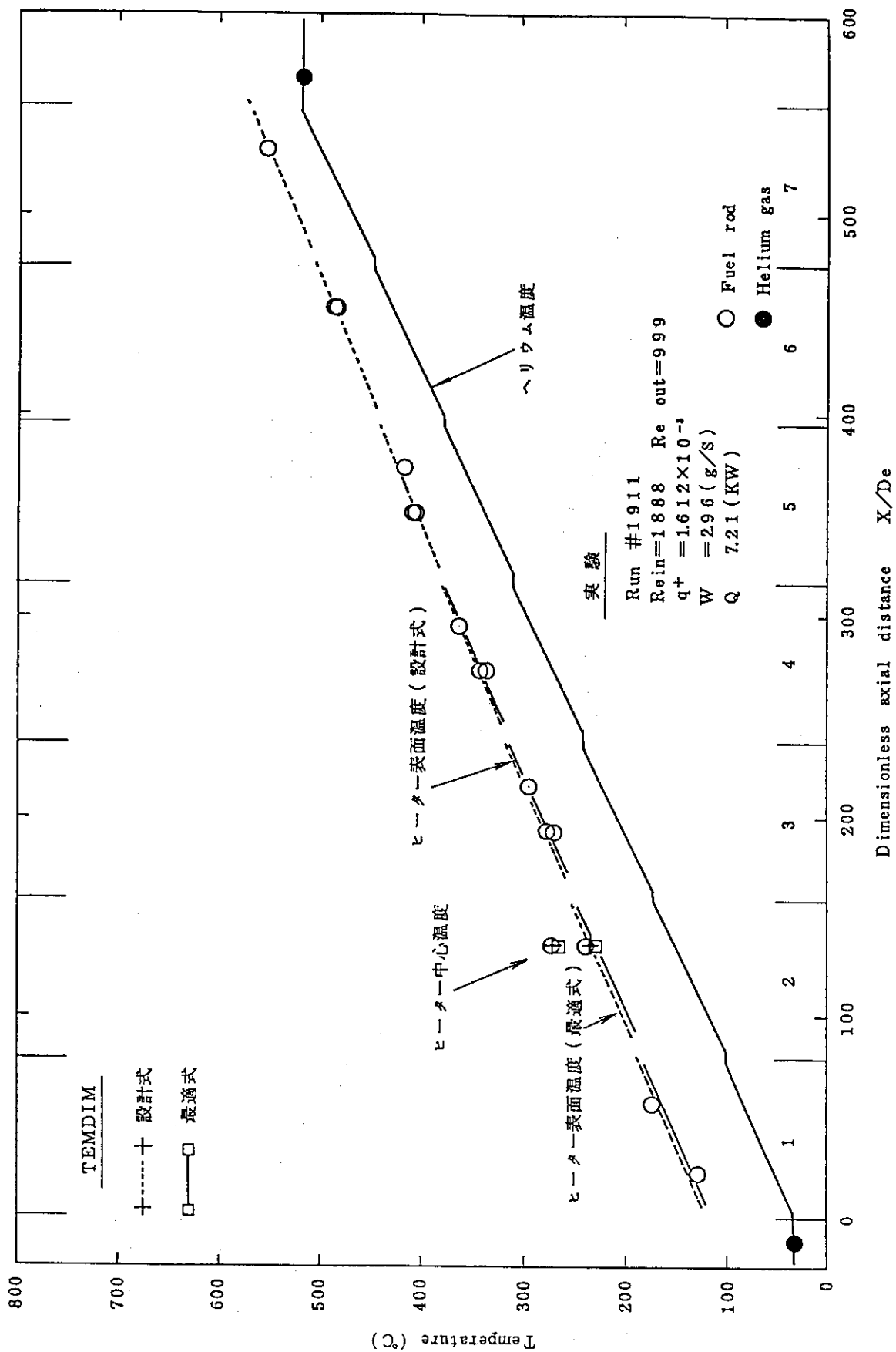


Fig. 5.9 温度分布の比較 (No.1911)

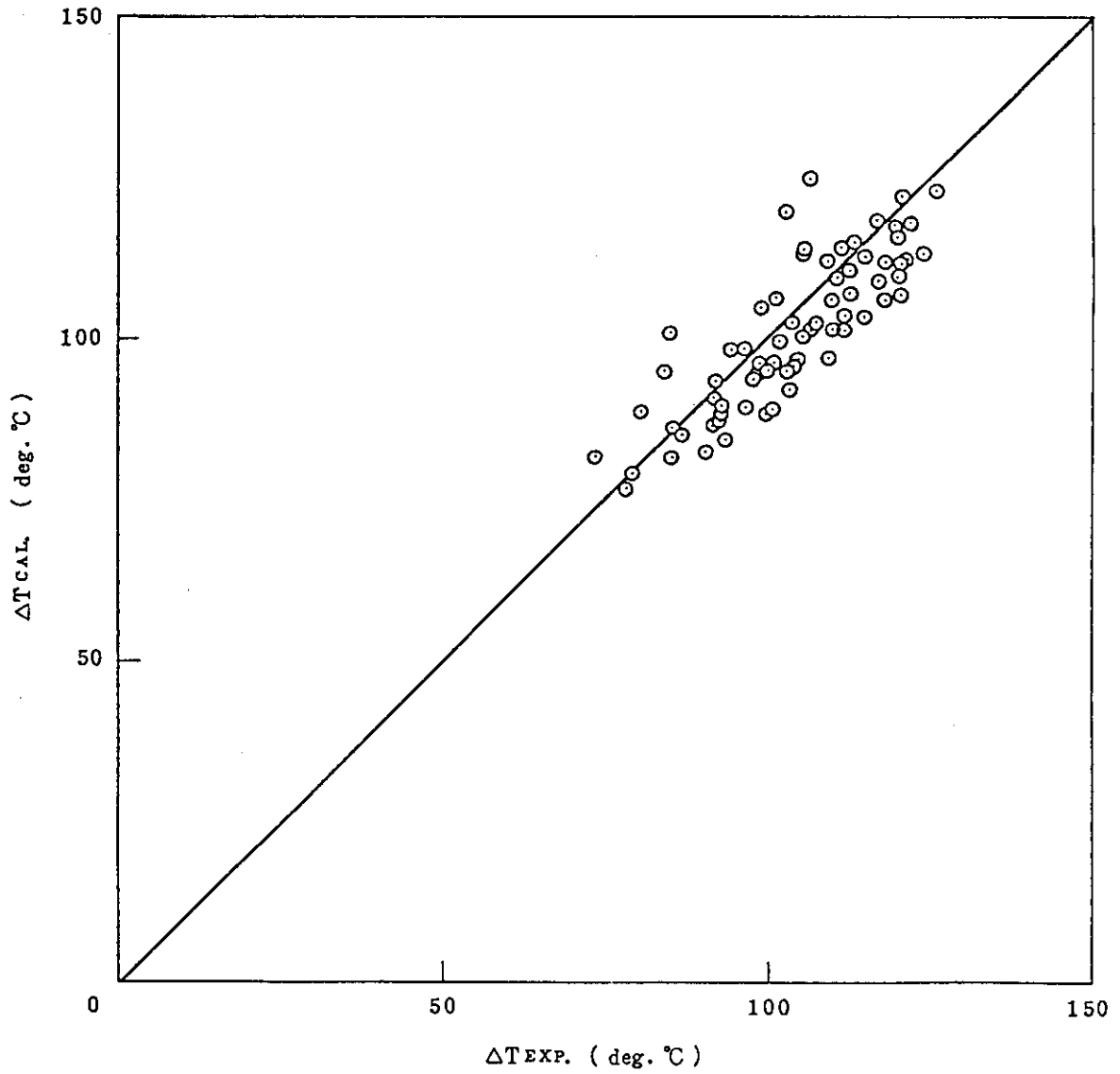


Fig. 5.10 境膜温度差の比較 (最適式)

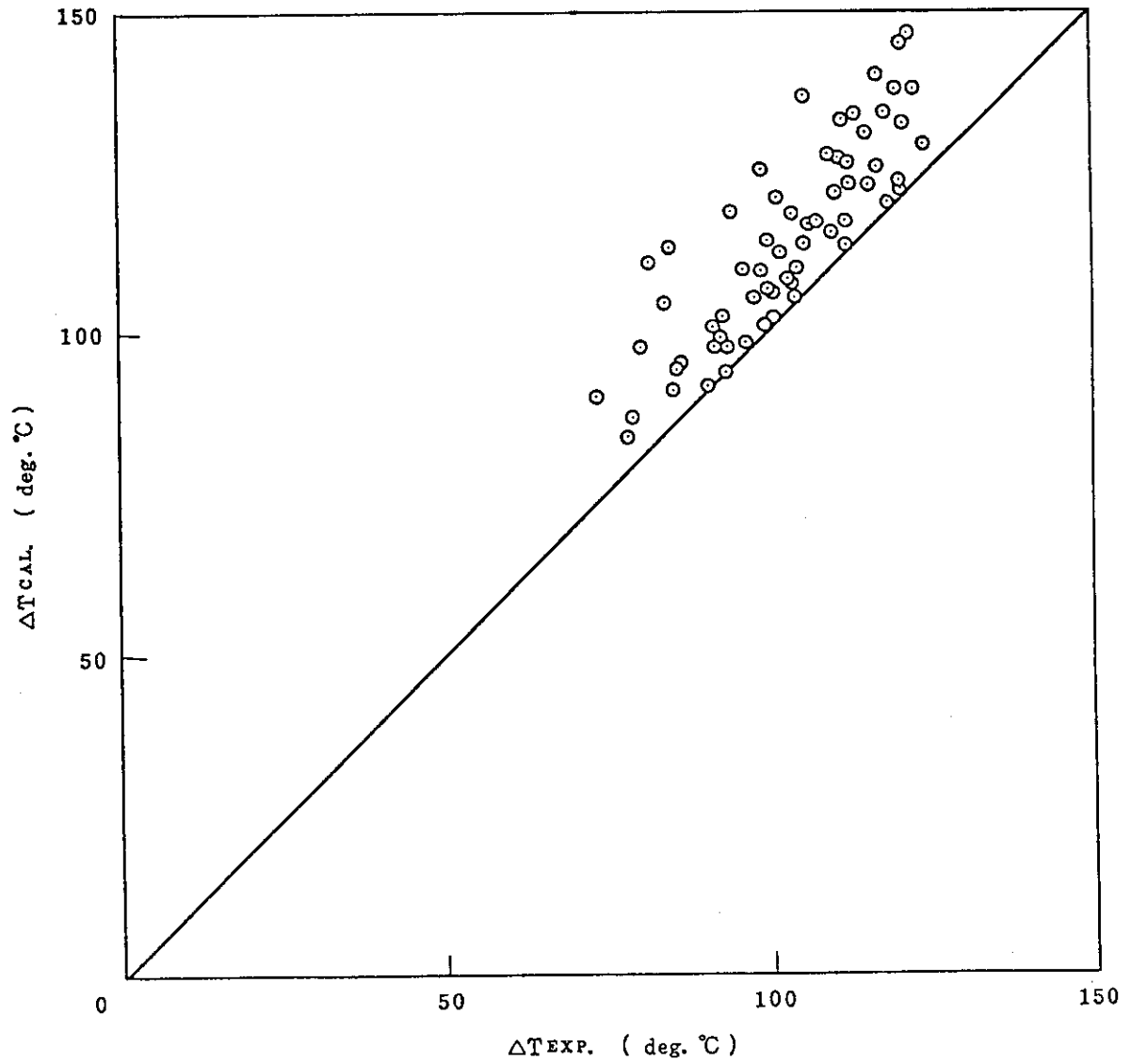


Fig. 5.11 境膜温度差の比較 (設計式)

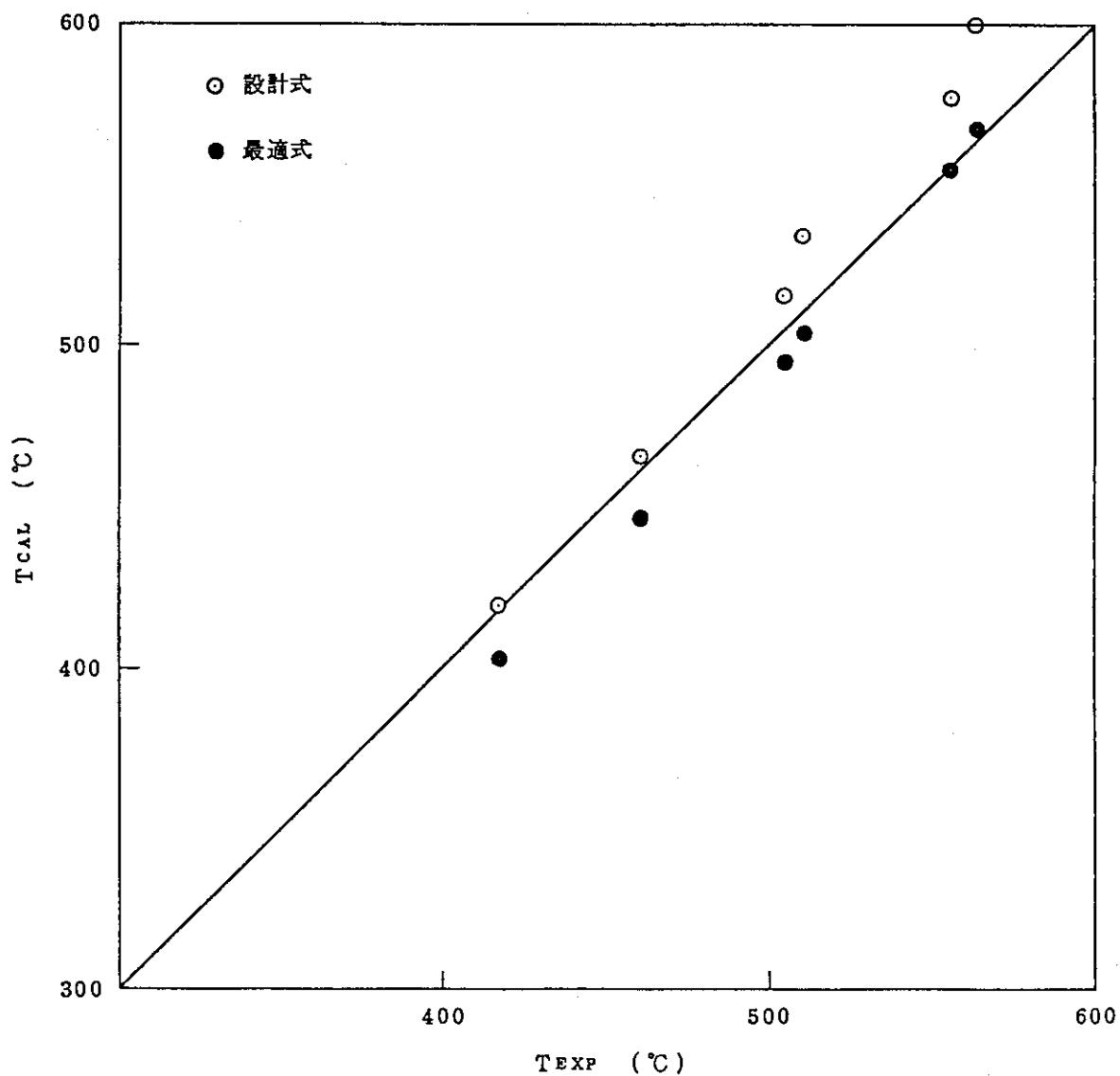


Fig. 5.12 ヒーター中心温度の比較

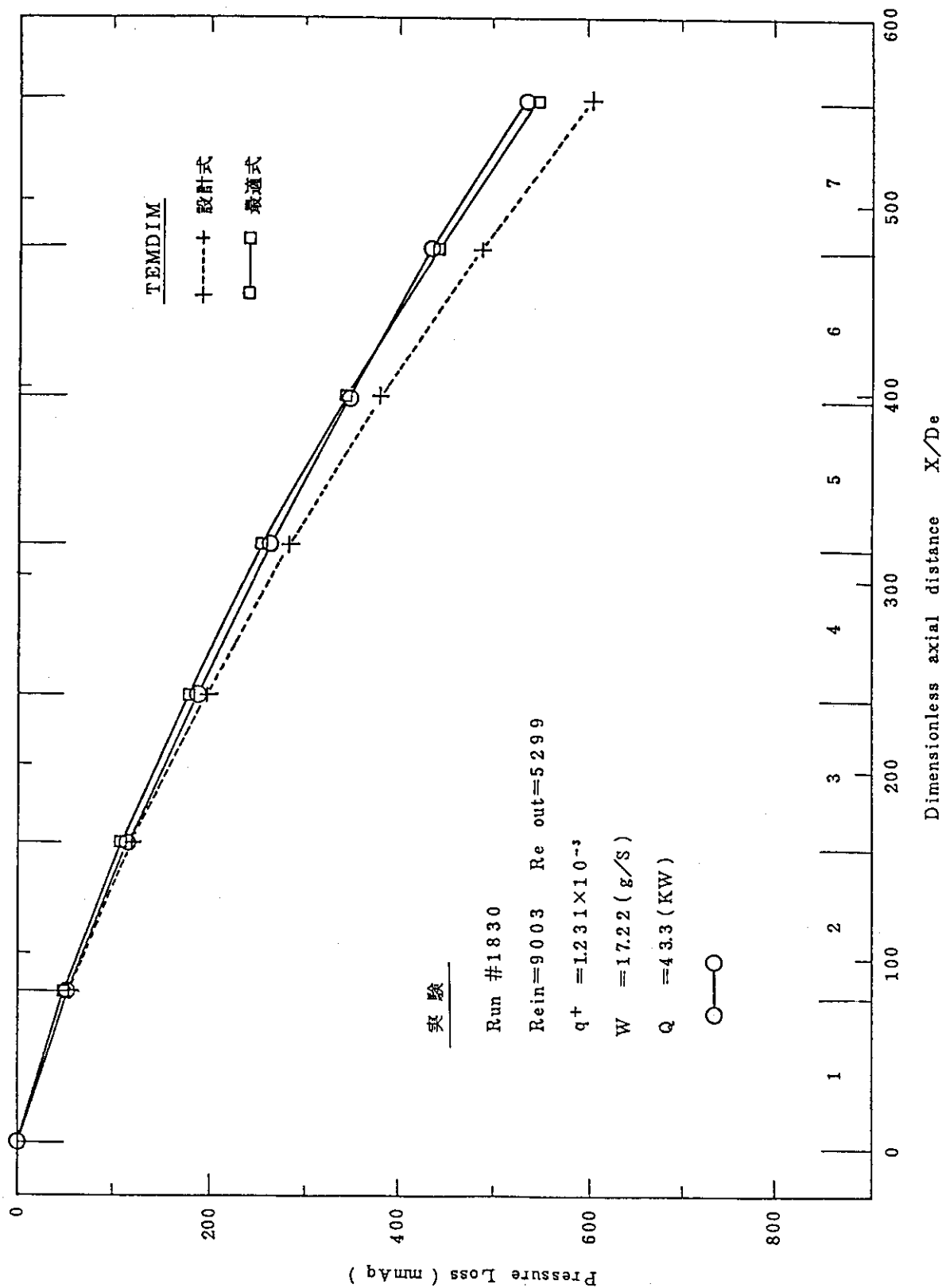


Fig. 5.13 圧力損失の比較 (No. 1830)

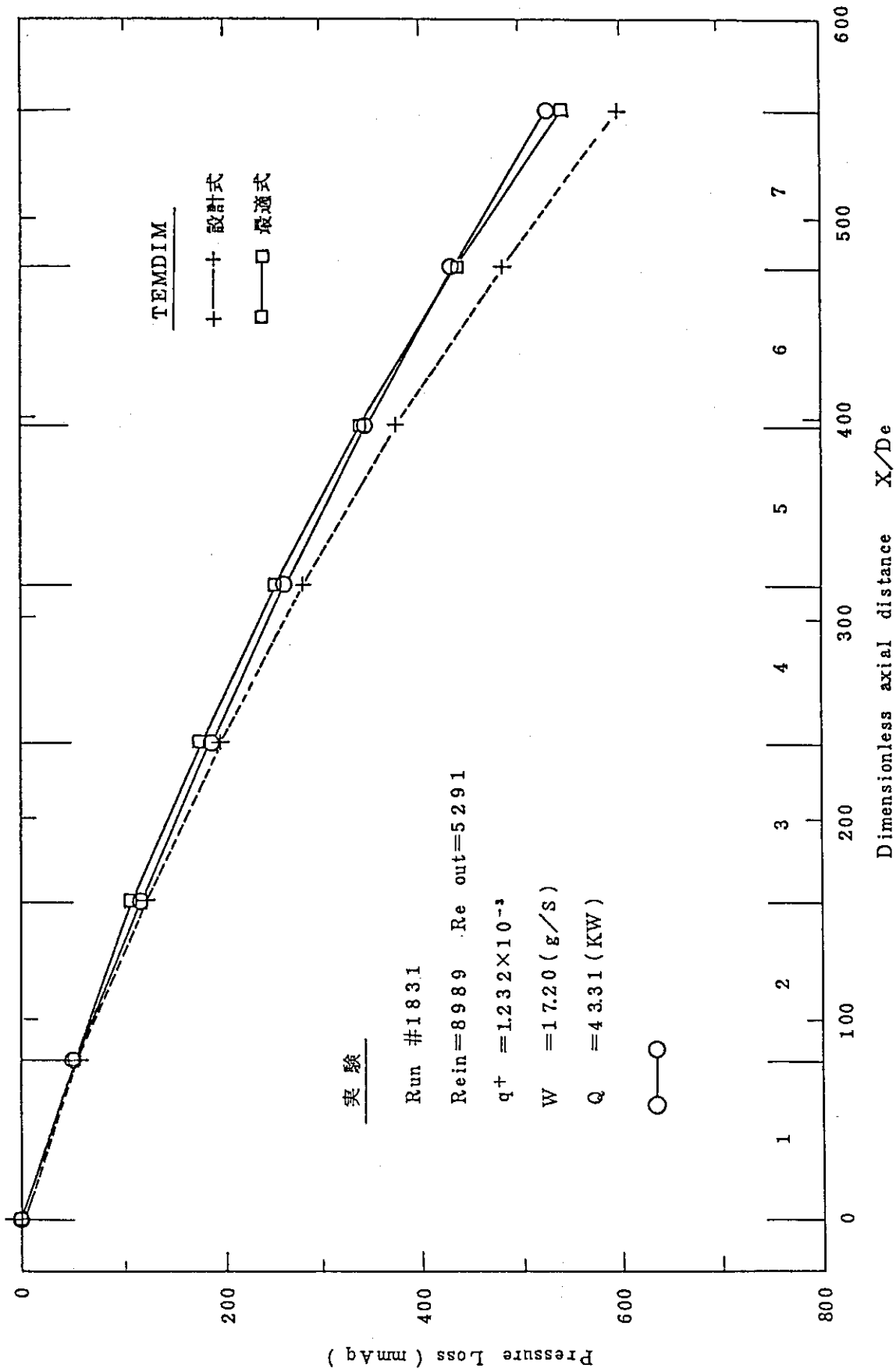


Fig. 5.14 圧力損失の比較 (No.1831)

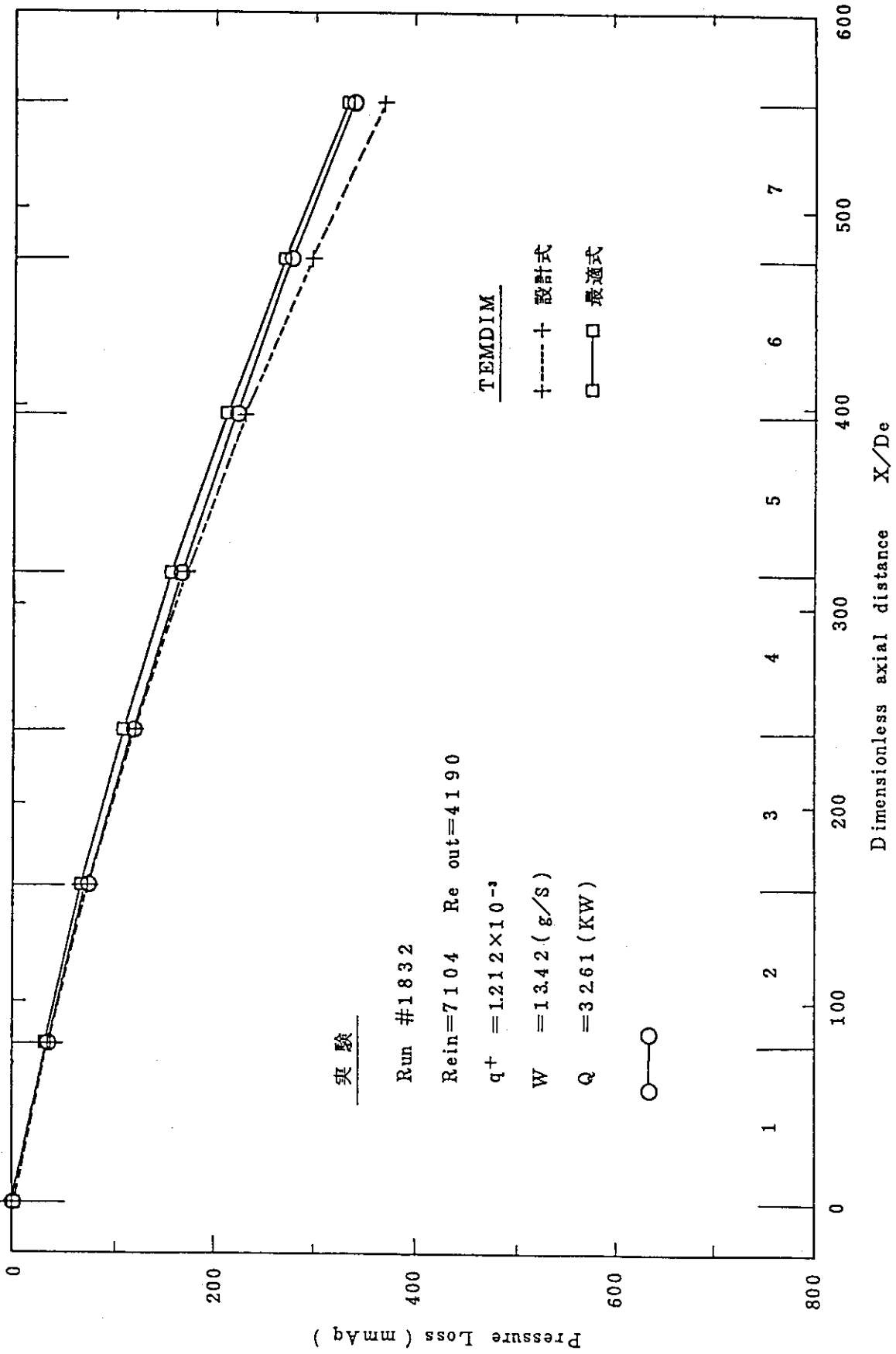


Fig. 5.15 圧力損失の比較 (No. 1832)

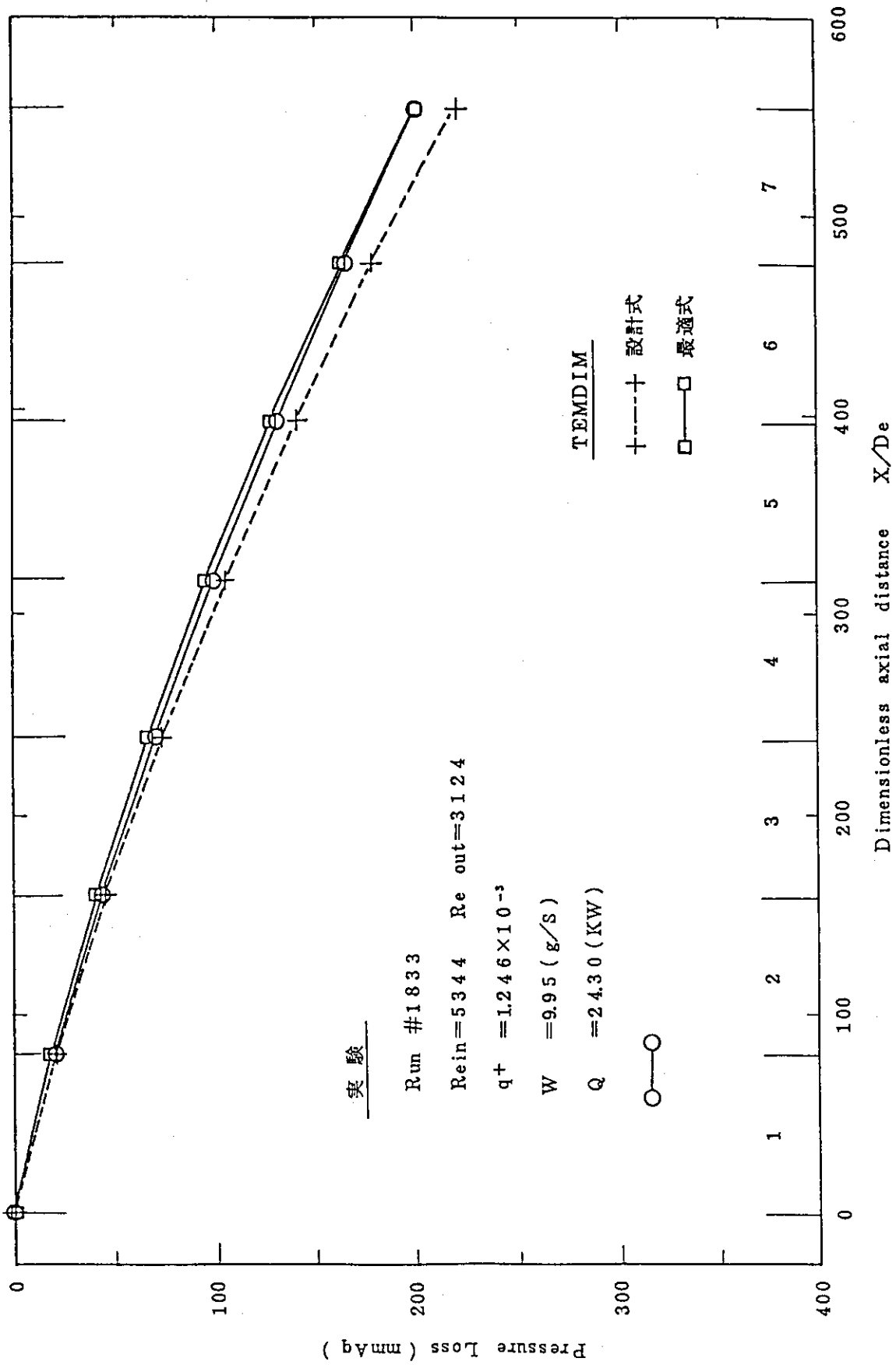


Fig. 5.16 圧力損失の比較 (No. 1833)

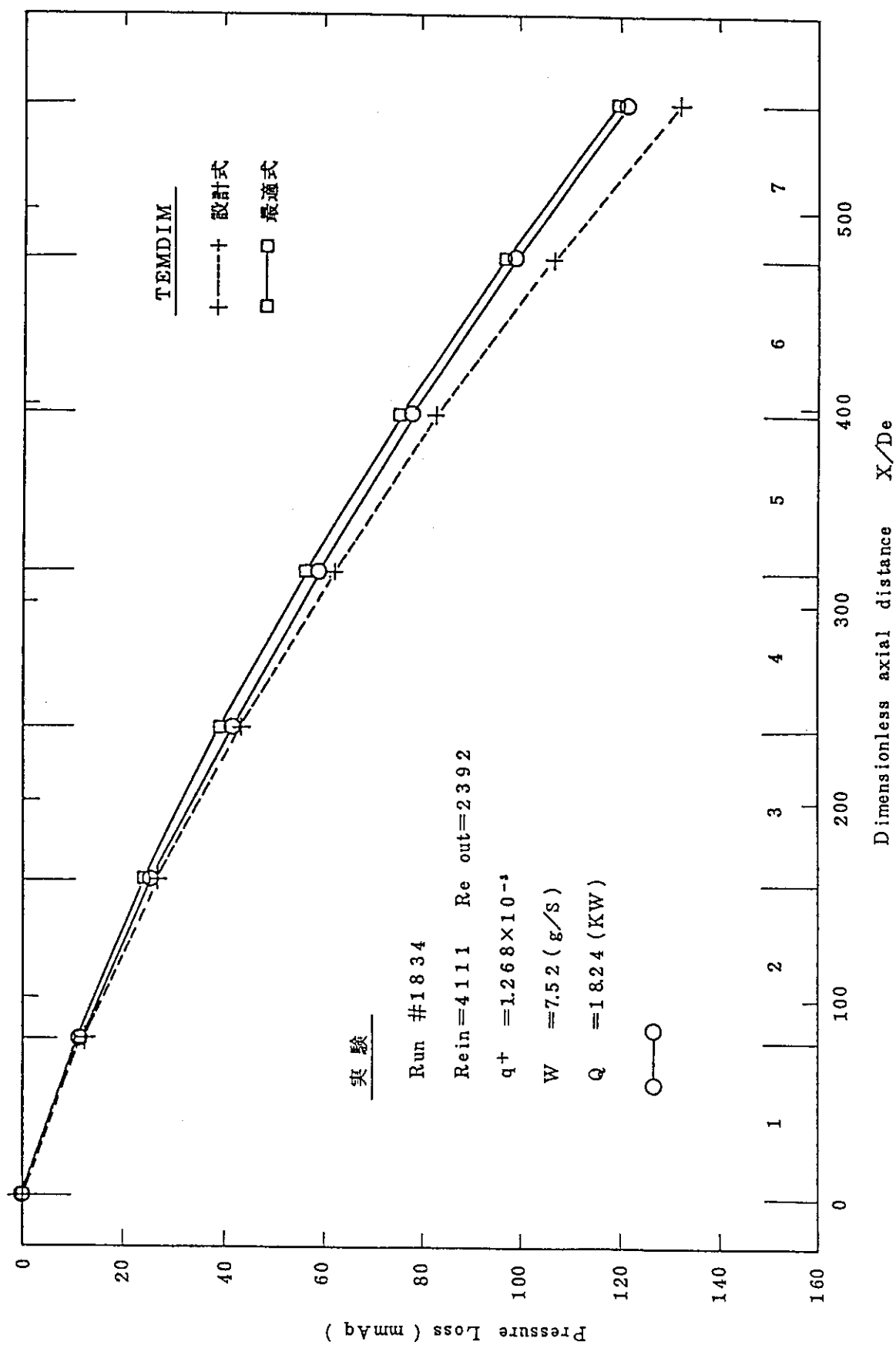


Fig. 5.17 圧力損失の比較 (No.1834)

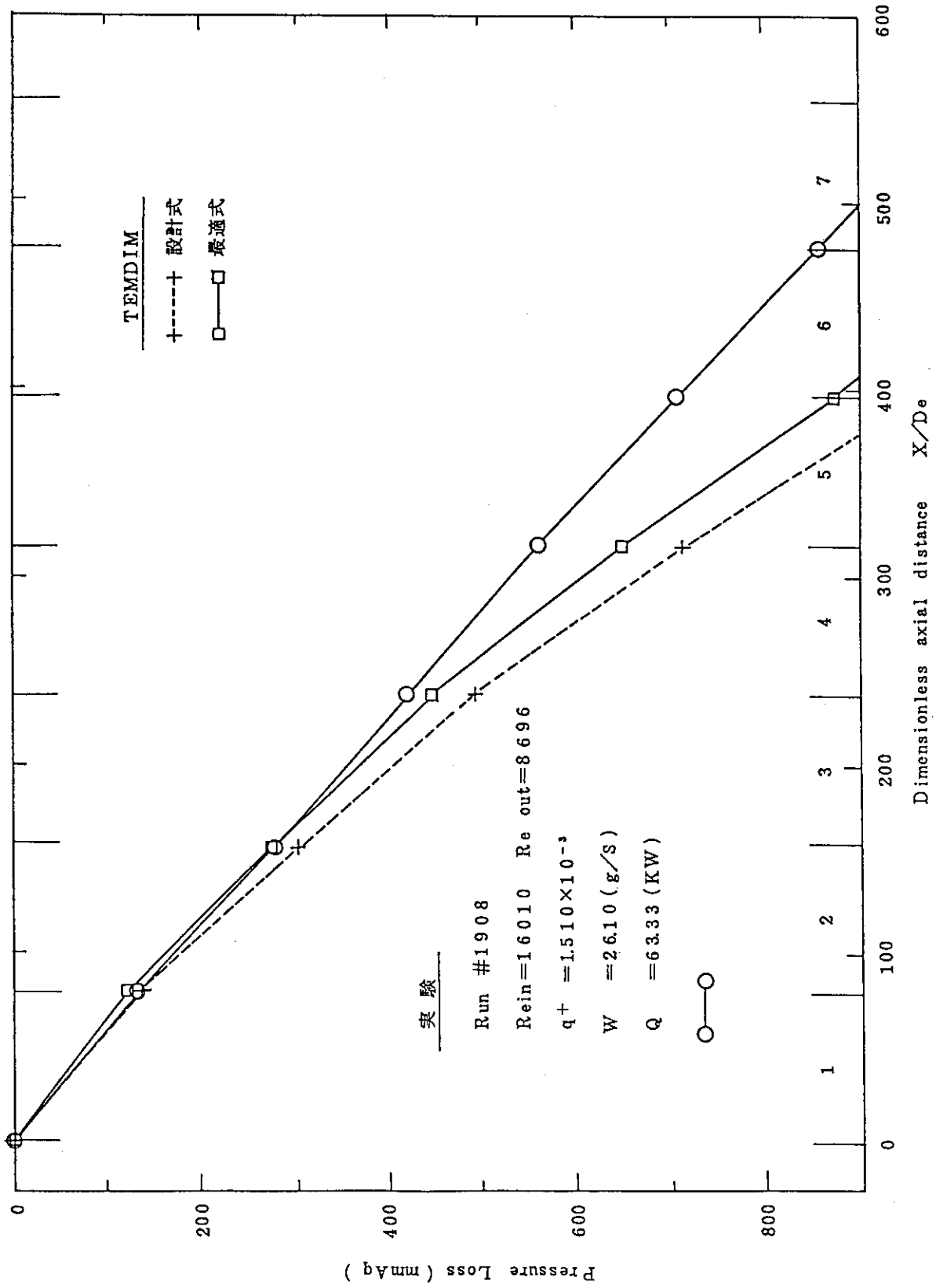


Fig. 5.18 圧力損失の比較 (No. 1908)

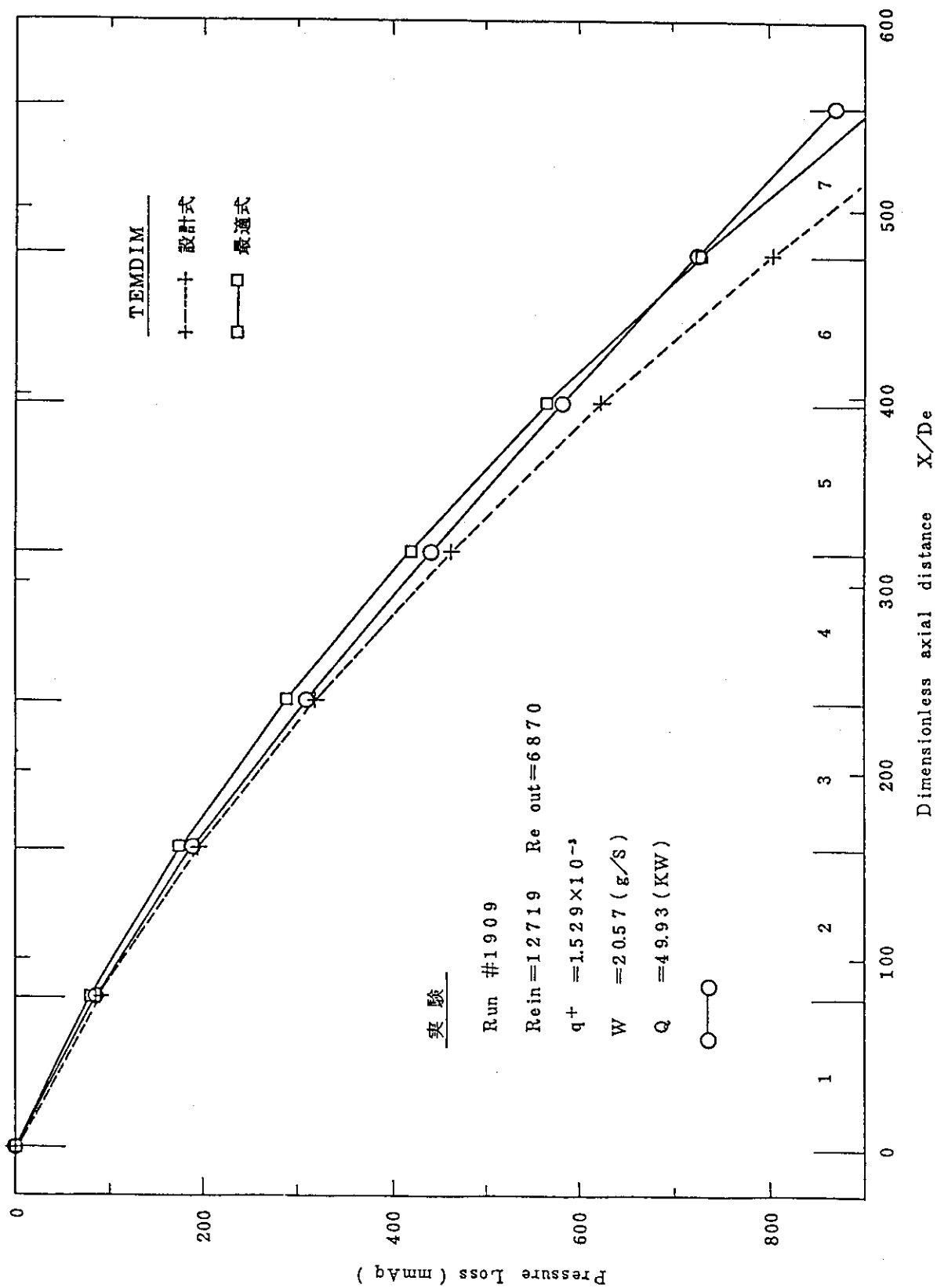


Fig. 5.19 圧力損失の比較 (No. 1909)

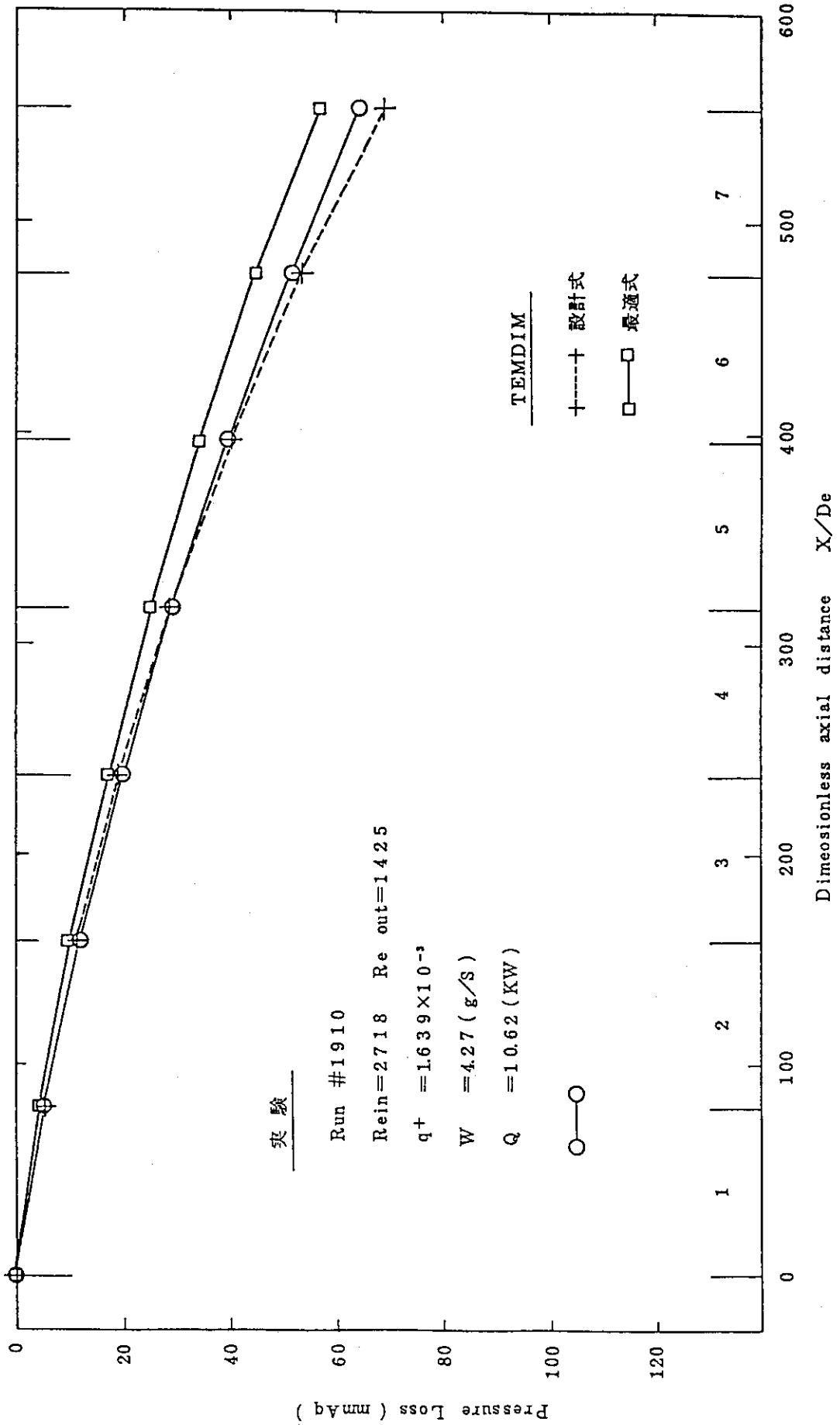


Fig. 5.20 圧力損失の比較 (No.1910)

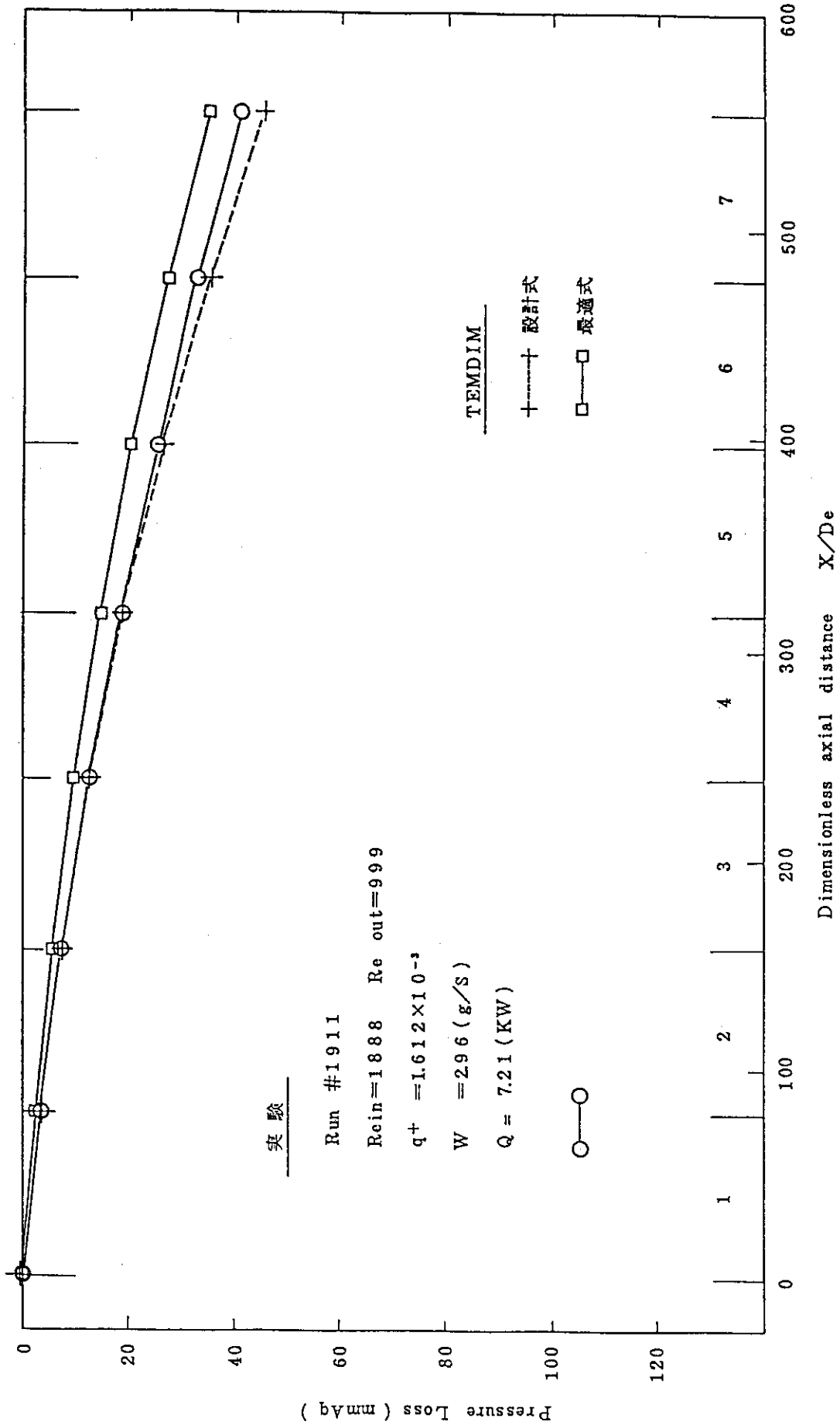


Fig. 5.21 圧力損失の比較 (No.1911)

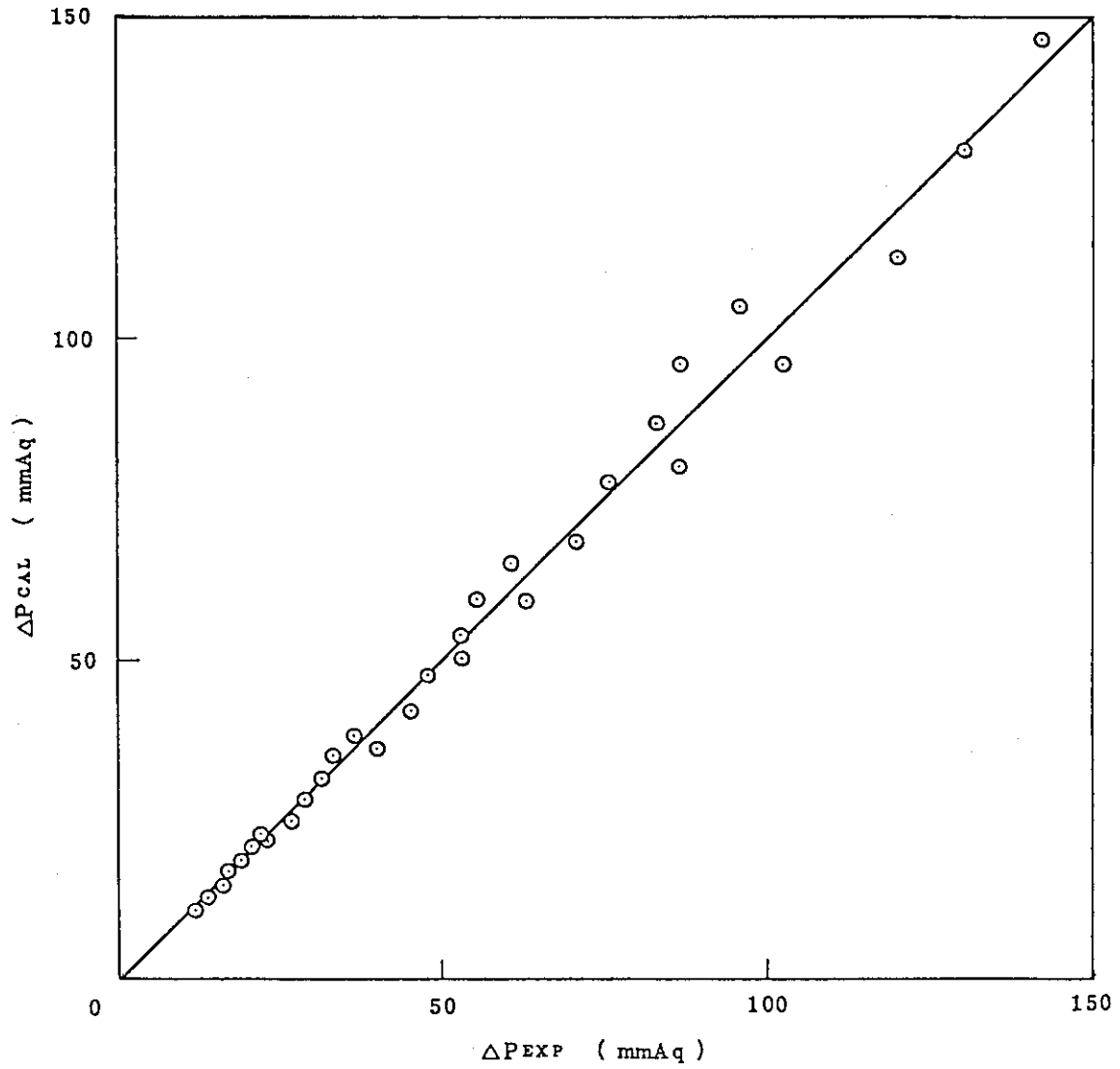


Fig. 5.22 各段毎の圧力損失の比較 (最適式)

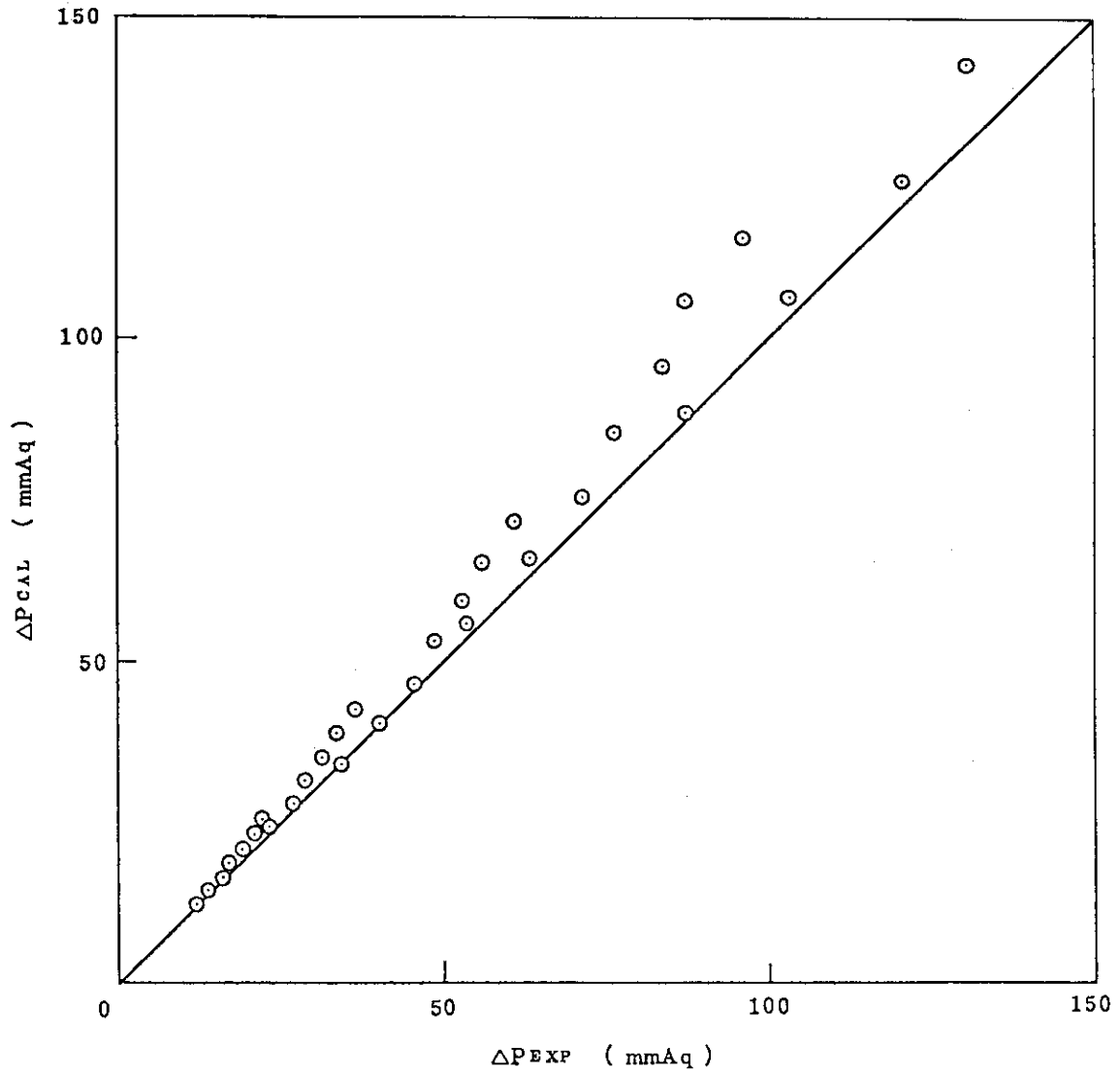


Fig. 5.23 各段毎の圧力損失の比較 (設計式)

6. 結 言

HENDEL T_{1-s} による試験結果について、熱伝達率、圧力損失係数、物性値等の最適式と設計式の双方を用いて、燃料温度解析コードTEMDIMにより評価した結果、以下のことが結論される。

(1) 燃料温度について

相関式として、最適式と設計式の双方について境膜温度差を比較した結果、熱流力設計に重要なレイノルズ数2000以上の領域で、設計式による評価が保守的であること、最適式による評価が実験結果を良く再現することが確認された。

ヒーター中心温度については、ヒーター内部の複雑な構造や伝熱上の種々な不確かさがあるにもかかわらず、最適式では、計算値と実測値との良好な一致がみられた。設計式による評価では、常に計算値が実測値よりも高くなった。従って、TEMDIMによる設計手法は保守性・妥当性を有していることがわかった。

(2) 圧力損失について

レイノルズ数2000以上の領域で、設計式による評価が測定値よりも大きくなることがわかった。

以上から、TEMDIMによる燃料温度評価は妥当なものであり、TEMDIMを用いたHTTR炉心熱流力設計手法の保守性、妥当性が確認された。

謝 辞

燃料温度解析コードTEMPDIMの検証解析を行うにあたり、HENDEL T_{1-s}による実験データを御提示頂いたHENDEL 開発試験室及びHENDEL 管理室、並びに本報をまとめるにあたり御指導頂いた高温工学試験研究炉設計室の関係各位に深謝致します。

参 考 文 献

- 1) 日本原子力研究所, 「高温工学試験研究の現状」, 1987.
- 2) 丸山 創他, 「炉内流動解析コードFLOWNETの検証」, JAERI - M 88-138 (1988).
- 3) 小林武司他, 「高温ガス炉用炉心伝熱流動解析コード TEMPDIMの開発」, FAPIG 第88号, pp. 12-18 (1978).
- 4) 高瀬和之他, 「高温ガス実験炉燃料体の伝熱流動試験 (I) HENDEL 1チャンネル試験装置による一様発熱試験の結果」, 日本原子力学会誌, Vol. 28, No 5, pp. 428 - 435 (1986).
- 5) Y. S. Touloukian et al., "Thermophysical Properties of Matter, Volume 1, Thermal Conductivity, Metallic Elements and Alloys", Plenum Publishing Co. (1970).

謝 辞

燃料温度解析コードTEMPDIMの検証解析を行うにあたり、HENDEL T_{1-s}による実験データを御提示頂いたHENDEL 開発試験室及びHENDEL 管理室、並びに本報をまとめるにあたり御指導頂いた高温工学試験研究炉設計室の関係各位に深謝致します。

参 考 文 献

- 1) 日本原子力研究所, 「高温工学試験研究の現状」, 1987.
- 2) 丸山 創他, 「炉内流動解析コードFLOWNETの検証」, JAERI - M 88-138 (1988).
- 3) 小林武司他, 「高温ガス炉用炉心伝熱流動解析コード TEMPDIMの開発」, FAPIG 第88号, pp. 12-18 (1978).
- 4) 高瀬和之他, 「高温ガス実験炉燃料体の伝熱流動試験 (I) HENDEL 1チャンネル試験装置による一様発熱試験の結果」, 日本原子力学会誌, Vol. 28, No 5, pp. 428 - 435 (1986).
- 5) Y. S. Touloukian et al., "Thermophysical Properties of Matter, Volume 1, Thermal Conductivity, Metallic Elements and Alloys", Plenum Publishing Co. (1970).