

JAERI-Tech  
99-019



JP9950113



リブつき狭隘流路の温度助走区間における  
熱伝達特性

1999年2月

須々木晃・金丸修久\*・神永雅紀・日野竜太郎・数土幸夫

日本原子力研究所  
Japan Atomic Energy Research Institute

本レポートは、日本原子力研究所が不定期に公刊している研究報告書です。

入手の問合せは、日本原子力研究所研究情報部研究情報課（〒319-1195 茨城県那珂郡東海村）あて、お申し越しください。なお、このほかに財団法人原子力弘済会資料センター（〒319-1195 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。

This report is issued irregularly.

Inquiries about availability of the reports should be addressed to Research Information Division, Department of Intellectual Resources, Japan Atomic Energy Research Institute, Tokai-mura, Naka-gun, Ibaraki-ken 〒319-1195, Japan.

---

©Japan Atomic Energy Research Institute, 1999

---

編集兼発行 日本原子力研究所

## リブつき狭隘流路の温度助走区間における熱伝達特性

日本原子力研究所東海研究所中性子科学研究センター  
須々木 晃・金丸 修久\*・神永 雅紀・日野竜太郎  
数土 幸夫<sup>+</sup>

(1999年2月1日受理)

核破碎中性子源（熱出力 1.5 MW）として機能する固体ターゲットでは、大強度陽子加速器からの陽子ビームによる核破碎反応で高密度の熱を発生する。これを効果的に除去するため冷却面に微小リブを設けた伝熱促進型固体ターゲット板について、特に温度助走区間の熱伝達性に関する実験的検討を行った。温度助走区間は冷却材流路入口から水力等価直径の 50 ~ 60 倍程度であり、その区間での熱伝達率は Gnielinski の式で表せることがわかった。

---

東海研究所：〒319-1195 茨城県那珂郡東海村白方白根 2-4

+ 企画室

\* 宇都宮大学

Heat Transfer Performance of the Thermal Entrance Region of  
the Narrow Ribbed-surface Channel

Akira SUSUKI, Nobuhisa KANAMARU \*, Masanori KAMINAGA,  
Ryutaro HINO and Yukio SUDO +

Center for Neutron Science  
Tokai Research Establishment  
Japan Atomic Energy Research Institute  
Tokai-mura, Naka-gun, Ibaraki-ken

(Received February 1, 1999)

The heat transfer argumentation in the thermal entrance region of a narrow rectangular channel roughened with repeated ribs was investigated experimentally for removing high-density heat generated in a solid target. This solid target works as a spallation neutron source coupled with a proton beam accelerator of 1.5MW power. Experimental results showed that the thermal entrance region could extend to the range of 50-60 times as long as the equivalent diameter from the coolant inlet, and that the heat transfer coefficient in the region could be estimated with the Gnielinski's correlation.

Keywords : Heat Transfer Augmentation, Thermal Entrance Region,  
Narrow Rectangular Channel, Repeated Rib, Solid Target

---

+ Office of Planning

\* Utsunomiya University

# 目 次

1. 緒言	1
2. 固体ターゲットの構造	2
3. 矩形突起列による伝熱促進	3
3.1 実験装置及び条件	3
3.2 発達した領域の熱伝達実験結果	3
4. 助走区間の熱伝達特性評価	5
4.1 解析モデルと条件	5
4.2 解析結果	6
5. 結言	8
謝辞	8
参考文献	8
記号表	9

# Contents

1. Introduction	1
2. Structure of Solid Target	2
3. Heat Transfer Augmentation by Repeated Rectangular Ribs	3
3.1 Experimental Apparatus and Conditions	3
3.2 Experimental Results Obtained in Fully Developed Flow Region	3
4. Evaluation of the Heat Transfer Coefficients in Thermal Entrance Region	5
4.1 Analytical Model and Conditions	5
4.2 Analytical Results	6
5. Concluding Remarks	8
Acknowledgements	8
References	8
Nomenclature	9

This is a blank page.

## 1. 緒 言

原研では、大強度陽子加速器を用いた新しい中性子源を開発し、中性子を生命科学や材料物性などの基礎科学研究から消滅処理等の原子力分野まで幅広く利用する中性子科学研究計画を進めている<sup>(1)</sup>。このうち、基礎科学研究のために、第一段階として、1.5GeV、1mA（熱出力 1.5MW）の高エネルギーかつ大電流の陽子ビームをターゲットに入射して大強度中性子ビームを発生させる計画を進めており、その後、陽子ビームを 5MW まで増強する予定である。

中性子源となるターゲットでは、MW 規模の陽子ビームの照射により核破碎反応を起こし、それに伴い内部で高密度の核発熱を生じるため、この熱の除去がターゲットの成立性の重要な鍵となっている<sup>(2)</sup>。そこで、MW 規模の核破碎ターゲットとして、水銀などを用いる液体重金属ターゲットと、タンクスチンなどの重金属板を積層した固体ターゲットの 2 種類について熱・構造を中心とした概念検討を進めてきた<sup>(3)</sup>。このうち、固体ターゲットは研究炉や核融合炉などの技術開発基盤を活用できることから、液体重金属ターゲットよりも技術的に早期に実現できるものと考えられる。ただし、現在、世界最強の核破碎固体ターゲットである ISIS（ラザフォード・アップルトン研究所、英）は 160kW であり、本計画のターゲットはそれよりも 1 衍出力が高くなるため、発生する高密度の熱の除去は極めて重要な課題である。また、高密度の熱に起因する応力によるターゲット板の変形・破壊を防止することは、これらによる冷却材流路の閉塞と閉塞した流路内の冷却材沸騰・圧力上昇およびターゲット板の温度上昇による溶融の防止、最終的には圧力上昇、溶融金属による一次冷却系バウンダリの破壊防止につながる。

固体ターゲットでは、現在検討中の水冷却方式固体ターゲットは、厚さ約 5mm～数 10mm のタンクスチン製のターゲット板を 1.2mm の隙間を設けて重ね合わせ、この隙間に重水を通すことによって冷却を行う。この時、中性子収率を確保するため、ターゲット全体に占める水の体積ができるだけ低減するように冷却用水流路を極めて狭くする構造とする。圧力損失、流体誘起振動や流量配分の観点から、冷却水流速はできるだけ低くすることが望ましいが、冷却水流速を低くすると十分な除熱性能を得ることができない。このため、低流速で十分な除熱性能を確保できるように、冷却面に微小なりブを設けターゲット板表面の熱伝達を促進する方法に着目して検討を進めている。このようなりブ付きターゲット板に発生する熱応力分布を詳細に評価するに当たっては、ターゲット板冷却面の熱伝達率分布、とりわけ温度助走区間の熱伝達率分布を知る必要があるが、冷却材に液体を用いたりブ付き伝熱面、特にターゲット冷却流路のような狭い矩形流路（狭隘矩形流路）の報告は極めて少ない。そこで、これまでに行ってきた矩形りブ付き狭隘流路の実験データ<sup>(4)</sup>を基に温度助走区間の熱伝達特性を検討した。本報告ではその結果について述べる。

## 2. 固体ターゲットの構造

Fig. 2.1 に設計検討中の核破碎固体ターゲットの構造を示す。厚さ数 mm のタンクステンなどの重金属製の板を約 1mm の隙間を設けて重ね合わせ、この隙間に冷却水（重水）を流してターゲット材を冷却する構造である。中性子収率を高めるには冷却水の体積割合を減少させる必要があるため、中性子収率に最も影響を与える陽子ビーム入射部近傍におけるターゲット板群内の冷却水の体積割合は 20%以下になるようにターゲット板厚さを 6mm 程度にしている。また、固体ターゲット板の両サイドに設置されているマニホールド部の断面積もできるだけ小さくし、かつ、必要な流量を効率よく分配できるように、陽子ビーム入射部側は並列に設置したターゲット板冷却流路群をワンスルーで冷却する方式、それよりも後流側は並列冷却流路群をシリーズに接続する折返し流路方式にしている。なお、ターゲット容器は二重構造とし、内側容器に亀裂等を生じたときにターゲット板冷却材の外部漏えい防止と崩壊熱除去のために、内側容器の外周には重水冷却壁を設けてある。

このような構造の固体ターゲットでは、並列冷却流路群の流量配分特性をできるだけ均一化して、熱伝達特性の偏差を小さくし、発生する高密度の熱を有効に除去することが重要である。このため、冷却水流速はできるだけ低くする必要があるが、低流速で十分な除熱性能を得るためにターゲット表面の熱伝達性能を向上させることが要件である。そこで、リブを設けて狭隘流路の伝熱促進を図ることに着目し、ターゲット板表面に比較的低成本で製作歩留まりの極めて高い 2 次元矩形リブを加工することとした。

### 3. 矩形突起列による伝熱促進

#### 3. 1 実験装置及び条件

冷却材に液体を用いた矩形リブ付き伝熱面、とくにターゲット流路のように狭い流路に伝熱促進を行った場合の設計データを取得・整備するために、ターゲットを模擬した伝熱面に高さ 0.2mm の矩形リブを設けた片面加熱の矩形狭隘流路を製作し、冷却水のレイノルズ数 (Re)、リブピッチ (p)、流路高さ (H) などをパラメータにして伝熱促進効果を調べてきた<sup>(4)</sup>。Fig. 3.1 に試験装置の概要を示す。試験流路であるリブ付き矩形狭隘流路には、予熱ヒータ、水ポンプ、流量計を経て所定の流量の水が供給される。試験流路を出た水はフィルター、冷却器を経て水タンクに戻る。

Fig. 3.2 に試験体の構造を示す。試験体は、銅製の矩形リブ付き伝熱板、その側面に流れ等を観察するための石英ガラス窓、伝熱板の対向側にはステンレス製(SUS304)の導圧管板を設けて矩形流路を構成している。伝熱板の背面には加熱用のニクロムヒータ板を設置し、ヒータには 60V-300A(max) の直流電源から電力を供給する。伝熱板の幅は 20mm、長さは 250mm、有効加熱長は 200mm である。

伝熱板の流れ側表面には高さ、巾ともに 0.2mm の矩形リブを一定のピッチで冷却水の流れに直交する方向に加工してある。伝熱板表面には、中心線に沿って熱電対を流れ方向に 26 力所、8mm 間隔で設置している。導圧管板は非加熱の平滑表面であり、流れ方向 11 力所に圧力損失を測定するための導圧孔を設けている。伝熱板と導圧管板との距離（流路の高さ）は、1mm～5mm まで変えることができる。

Table 3.1 に実験条件を示す。実験は、平滑面、矩形リブをピッチ 2mm 及び 4mm で設けたリブ付き面の 3 種類の伝熱板を使用し、流路高さをターゲット板冷却流路と同じ 1.2mm とそれよりも大きい 3.2mm に設定して、圧力損失と熱伝達率を測定した。入口水温は常温、入口圧力は最高 1.5MPa で、矩形流路内の水流速は最高 14m/s である。

#### 3. 2 発達した領域の熱伝達実験結果

実験は、流路の加熱ヒーターには一様な熱流束を与えるものとして行ったが、加熱部の流路出入口に近い両端では、ヒータからの熱は冷却材に接する面の流路出入口部（流路板下部にヒーターが存在しない部分）に拡散するので、有効加熱長全体にわたって必ずしも一様な熱流束とはならない。Fig. 3.3 と Fig. 3.4 に実験データの一例を示す。流路板表面から 2mm 離れた位置の温度分布は、流路入口部では低く下流に行くに従って上昇し、ほぼ線形な温度分布になり、その後、出口付近では下降している。これは、流路板下部の非加熱部に熱拡散して、有効加熱長の端部の熱流束が、中央部に比して減少していることを示している。

そこで、温度境界層が完全に発達した領域、すなわち流れが発達した部分に相当する、流路板の温度が線形な領域では熱流束一様な分布が実現しているものとして熱伝達率を評価した。Fig.3.5 と Fig.3.6 にリブ付き流路のレイノルズ数 Re とヌッセルト数 Nu の関係を示す。図中の各実線は、以下の実験式を表す<sup>(4)</sup>。

$$\text{Nu} = 0.416 \text{Re}^{0.57} \text{Pr}^{0.4} ; \quad p/k = 10, H = 1.2 \text{mm}, 1.2 \text{mm} \quad (3.1)$$

$$\text{Nu} = 0.434 \text{Re}^{0.55} \text{Pr}^{0.4} ; \quad p/k = 20, H = 1.2 \text{mm}, 1.2 \text{mm} \quad (3.2)$$

$$\text{Nu} = 0.384 \text{Re}^{0.6} \text{Pr}^{0.4} ; \quad p/k = 10, H = 1.2 \text{mm}, 3.2 \text{mm} \quad (3.3)$$

$$\text{Nu} = 0.365 \text{Re}^{0.6} \text{Pr}^{0.4} ; \quad p/k = 20, H = 1.2 \text{mm}, 3.2 \text{mm} \quad (3.4)$$

## 4. 助走区間の熱伝達特性評価

### 4. 1 解析モデルと条件

固体ターゲット内の温度分布をより詳細に把握するためには流路全体の熱伝達率分布、特に流路入口近傍の温度助走区間の熱伝達率分布を知る必要がある。これについて実験データを数値解析で再現することを試みた。解析モデルを Fig.4.1 に示す。解析には、陰解法有限要素法コードの ABAQUS-Standard を用いた。以下に解析に使用した実験条件と、解析に当たっての境界条件・パラメータについて述べる。

#### (1) 解析に使用した実験条件

流路高さは実機ターゲットの流路幅を考慮し 1.2mm についてのみ行った。Re の条件は平滑流路では 13086 と 21732、リブのピッチ  $p$  が 2mm の流路 ( $p/k=10$ ) では 13789 と 21100、リブのピッチ  $p$  が 4mm の流路 ( $p/k=20$ ) では 13841 と 22221 の 6 通りについて解析した。流体圧力の条件はすべて 1.5MPa とした。なお、圧力を下げてもプランタル数 (Pr) 等の水物性値はほとんど変化しない。一方、冷却材の温度分布は、流路方向に沿って加熱部入口から加熱部出口まで線形に変化させた。平滑流路の実験条件をまとめたものを Table.4.1 に、リブのピッチ  $p$  が 2mm の流路の実験条件を Table.4.2 に、リブのピッチ  $p$  が 4mm の流路の実験条件を Table.4.3 にそれぞれ示す。

#### (2) 境界条件・パラメータ

解析対象の境界条件は実験環境の状態に合わせて、次の 4 種類の境界条件（面 B1～B4）を与えた。解析パラメータを含め、それぞれ以下のように設定した。

##### ①面 B1

冷却材入口プレナム及び出口プレナムに面した部分である。本実験装置のプレナムは極めて容積が小さいため、出入口近傍では流路内と同等の冷却材流速があるものと推測されることから、強制対流熱伝達の条件を与えた。熱伝達率は次の Dittus-Boelter の式<sup>(5)</sup>で与えた。

$$Nu = 0.023 Re^{0.8} Pr^{0.4} \quad (4.1)$$

##### ②面 B2

冷却流路面であり、流路の表面形状によって以下のように境界条件を与えた。

###### (a) 平滑流路：

ターゲット板を模擬した試験流路では、冷却材入口近傍では助走区間に相当し、このような領域でのヌセルト数  $Nu$  は一般に発達した領域でのそれ ( $Nu_\infty$  と記す) よりも大きいことが知られている。流路における  $Nu$  の分布  $Nu(x)$  を、次の Gnielinski による関係式<sup>(6)</sup>で与えた。式 (4.2) 中で  $x$  は流路方向の座標、 $D_e$  は流路の水力等価直径である。

$$Nu(x) = Nu_\infty (1 + (x / D_e)^{-2/3}) \quad (4.2)$$

ここで  $Nu_{\infty}$  は Dittus-Boelter の式<sup>(5)</sup>で与える。

(b) リブピッチ  $p$  が 2mm の流路 ( $p/k=10$ ) :

流路における  $Nu$  の分布  $Nu(x)$  として前記の Gnielinski による関係式で与え、 $Nu_{\infty}$  は Shafiqul らの実験式(3.1)で与える。

(c) リブピッチ  $p$  が 4mm の流路 ( $p/k=20$ ) :

流路における  $Nu$  の分布  $Nu(x)$  として前記の Gnielinski による関係式を与え、 $Nu_{\infty}$  は Shafiqul らの実験式(3.2)で与える。

### ③面 B3

銅板がステンレス支持材に接している部分であり、ヒータと接触していないことから熱流束 0 として断熱の仮定を与えた。これは銅の熱伝導率 383 W/mK に対し、ステンレスの熱伝導率は 16.28W/mK と約 1/20 程度と小さいためである。

### ④面 B4

ヒータと接触している部分であり、基本的には熱流束が一様に分布しているものとした。与えている熱流束は Table.4.1~3 に示した通りである。

ただし、実験結果をより再現できるように、加熱熱流束を一部分調整した。流路板内の温度分布を示す Fig.3.3 及び 3.4 において、加熱開始点より 25~70mm の部分（冷却材流路入口からは 50~95mm の点に相当する）の温度分布は凹んだ形となっている。これは、本来一様熱流束を達成するために加熱ヒータと流路加熱板は隙間なく接着していたものが、実験中に加熱ヒータと流路板の熱膨張率の違いにより接着した一部分が剥がれ、その部分にはヒータの熱が伝わりにくくなつたためと考えられる。平滑流路の  $Re=13086$  の場合について、加熱熱流束分布の一部を変更し、実験の温度分布を再現する加熱熱流束分布についてパラメータサーベイを行った。検討した加熱熱流束の分布を Fig.4.2 に示す。なお、これにより決定した熱流束分布は、他の流路板表面条件および流動条件パラメータを解析する時にも用いた。

## 4. 2 解析結果

### (1) ヒータからの熱流束

$Re=13086$  (平滑流路) の場合について加熱熱流束の一部を変更したときの温度分布解析結果を Fig.4.3 に示す。加熱ヒータからの熱流束が Fig.4.2 の Case1 に示した一様分布であれば、測定点での温度分布は Fig.4.3 の Case1 に示すような角のとれた台形状になる。この分布形状にあつて実験データは流路入口から 40mmまでのものと 130mm 以降のものであり、それ以外の計測データは Case1 の曲線を下回っている。これは、冷却材流路入口から 50~95mm の部分の熱流束が与えた熱流束よりも小さいことを示している。

ヒータからの熱が伝わっていない部分及び伝わった量をパラメータとした解析 Case2~5 と実験データを比較した結果、Case5 (流路入口から 50~70mm の部分でヒータの接触が不完全なために、この部分は加熱されていないという仮定) が一番良く実験データを模擬できることが分か

った。この結果から他の流路板表面条件および流動パラメータを解析する時にも、冷却材流路入口から 50~70mm の部分の加熱はないものとして解析を行った。なお、この仮定は Fig.4.1 の B4 の加熱領域（Heating）に当てはめる。

## (2)局所 Nu 数の分布解析結果

Fig.4.4~9 に各流路板表面条件及び流動パラメータにおける実験で得られた温度分布と解析結果との比較を示す。図に見られるように解析値は実験値と良く一致している。

測定点の温度（実測値）と温度測定点を通過する熱流束の解析値を基にして、局所 Nu 数を算出した。局所 Nu 数と流路入口からの距離を水力等価直径との比で無次元化した距離との関係を Fig.4.10 及び Fig.4.11 に示す。図中には平滑な円管流路における助走区間の熱伝達を表す Gnielinski の式と同様の関数形式で最小自乗法によりフィッティングした次の結果を実線で示してある。この時、 $Nu_{\infty}$  は平滑流路については Dittus-Boelter の式(4.1)、リブ付き流路については式(3.1)、(3.2)を用いた。

Fig.4.10 については、

$$\text{平滑流路} \quad Nu=114(1+(x/De)^{-2/3}) \quad (4.3)$$

$$P/k=20 \quad Nu=164(1+(x/De)^{-2/3}) \quad (4.4)$$

$$P/k=10 \quad Nu=217(1+(x/De)^{-2/3}) \quad (4.5)$$

Fig.4.11 については、

$$\text{平滑流路} \quad Nu=135(1+(x/De)^{-2/3}) \quad (4.6)$$

$$P/k=20 \quad Nu=213(1+(x/De)^{-2/3}) \quad (4.7)$$

$$P/k=10 \quad Nu=277(1+(x/De)^{-2/3}) \quad (4.8)$$

で与えられる。

図に見られるように、Nu 数は  $P/k=10$  が最も高く、次いで  $P/k=20$ 、平滑流路（Smooth Surface）が最も低くなっている。また、リブ付き流路についての実験結果は、Re 数の違いによらず Gnielinski の式の形式によるフィッティング曲線でほぼ表すことができる。ただし、リブ付き流路の結果はばらつきが大きいので、さらに精度を上げた実験を行い、リブの影響を明らかにする必要がある。現在、試験体の改良などを進めている。

## 5. 結 言

リブ付き矩形狭隘流路の温度助走区間における熱伝達特性について以下の結果を得た。

- (1) 流路高さ 1.2mm における無次元長さ( $x/De$ )と Nu 数の関係は、平滑な流路における温度助走区間の熱伝達率分布を表す Gnielinski の式でほぼ表せる。
- (2) 温度助走区間は平滑な流路、リブ付き流路( $p/k=10, 20$ )とともに等価直径の 50~60 倍程度であった。

このような結果を踏まえて、今後、温度助走区間についての高精度な実験データを取得・整備し、核破碎固体ターゲットの熱流動設計に反映していく予定である。

## 謝 辞

本報告をまとめるに当たり、核熱利用研究部高温機器開発試験室の稻垣嘉之氏の有意義な助言を賜りました。ここに記して謝意を表します。

## 参考文献

- (1)日本原子力研究所、“中性子が開く 21 世紀の科学と原子力－中性子科学研究計画－”(1997)
- (2)日野 他：機械学会第 75 期通常総会講演会、Vol.VI、pp.514(1998)
- (3)日野 他：“ターゲットシステムの概念検討－(I)システム構成－”，JAERI-Tech 97-035(1997)
- (4)I.M.Shafiqul 他：“Experimental Study on Heat Transfer augmentation for High Heat Flux Removal in Rib-roughened Narrow Channels”，JAERI-Tech 97-032(1997)
- (5)日本機械学会編、伝熱工学資料 改訂第 4 版 (1986)
- (6) Gnielinski,V.,Int. Chem. Eng., 16-2(1976),359

## 記号表

$D_e$	: 水力等価直径[m]
$k$	: 突起高さ[m]
$Nu$	: ヌッセルト数[-]
$Pr$	: プラントル数[-]
$p$	: リブのピッチ[m]
$Re$	: レイノルズ数[-]
$x$	: 流路方向座標[m]
$y$	: 加熱部厚さ方向座標[m]

Table .3.1 Experimental conditions<sup>(4)</sup>

Fluid	Water
Reynolds number	2,414 to 98,485
Flow velocity	up to 25 m/s
Inlet temperature	Up to 15°C
Heat flux	up to 0.4725 MW/m <sup>2</sup>
System pressure	up to 1.5MPa
Flow direction	Vertical
Flow condition	Fully developed turbulent flow
Heating condition	Uniform heating from one side

Table. 4.1 Experimental Conditions of smooth heated wall<sup>(4)</sup> (Channel height : 1.2mm)

Reynolds number	Inlet coolant Temperature °C	Exit coolant Temperature °C	Heat flux kW/m <sup>2</sup>
13086	11.46	12.51	154.4
21732	12.23	12.99	120.0

Table.4.2 Experimental Conditions of ribbed surface wall<sup>(4)</sup>

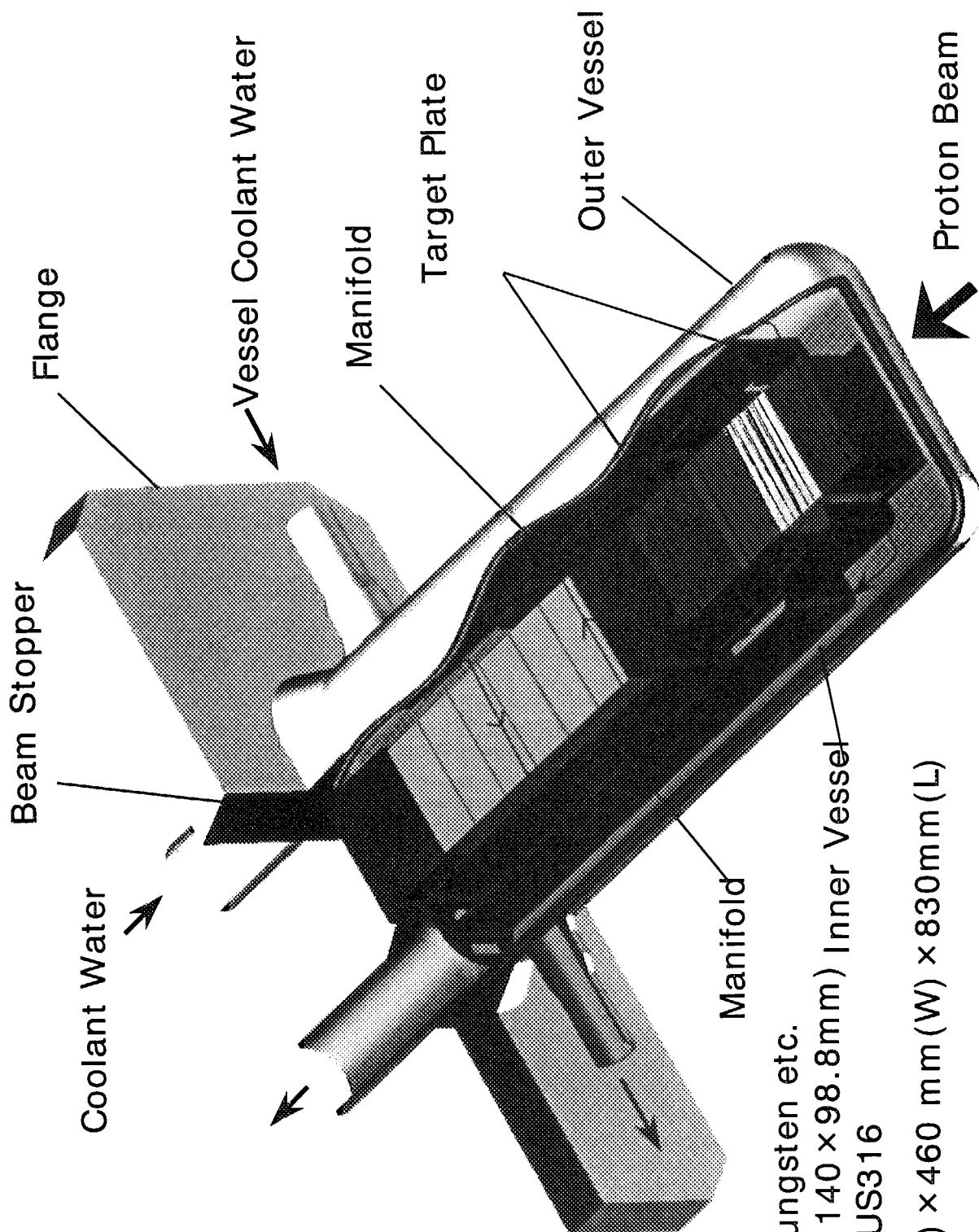
(Channel height : 1.2mm,Rib pitch : 20mm)

Reynolds number	Inlet coolant Temperature °C	Exit coolant Temperature °C	Heat flux kW/m <sup>2</sup>
13789	8.47	10.29	364.0
21100	10.38	11.72	364.0

Table.4.3 Experimental Conditions of ribbed surface wall<sup>(4)</sup>

(Channel height : 1.2mm,Rib pitch : 40mm)

Reynolds number	Inlet coolant Temperature °C	Exit coolant Temperature °C	Heat flux kW/m <sup>2</sup>
13841	10.93	12.67	304.0
22221	12.80	14.34	389.0



Target : Tungsten etc.  
( 140 x 98 .8mm ) Inner Vessel  
Vessel : SUS316  
120mm (H) x 460 mm (W) x 830mm (L)

Fig.2.1 Cutaway view of solid target

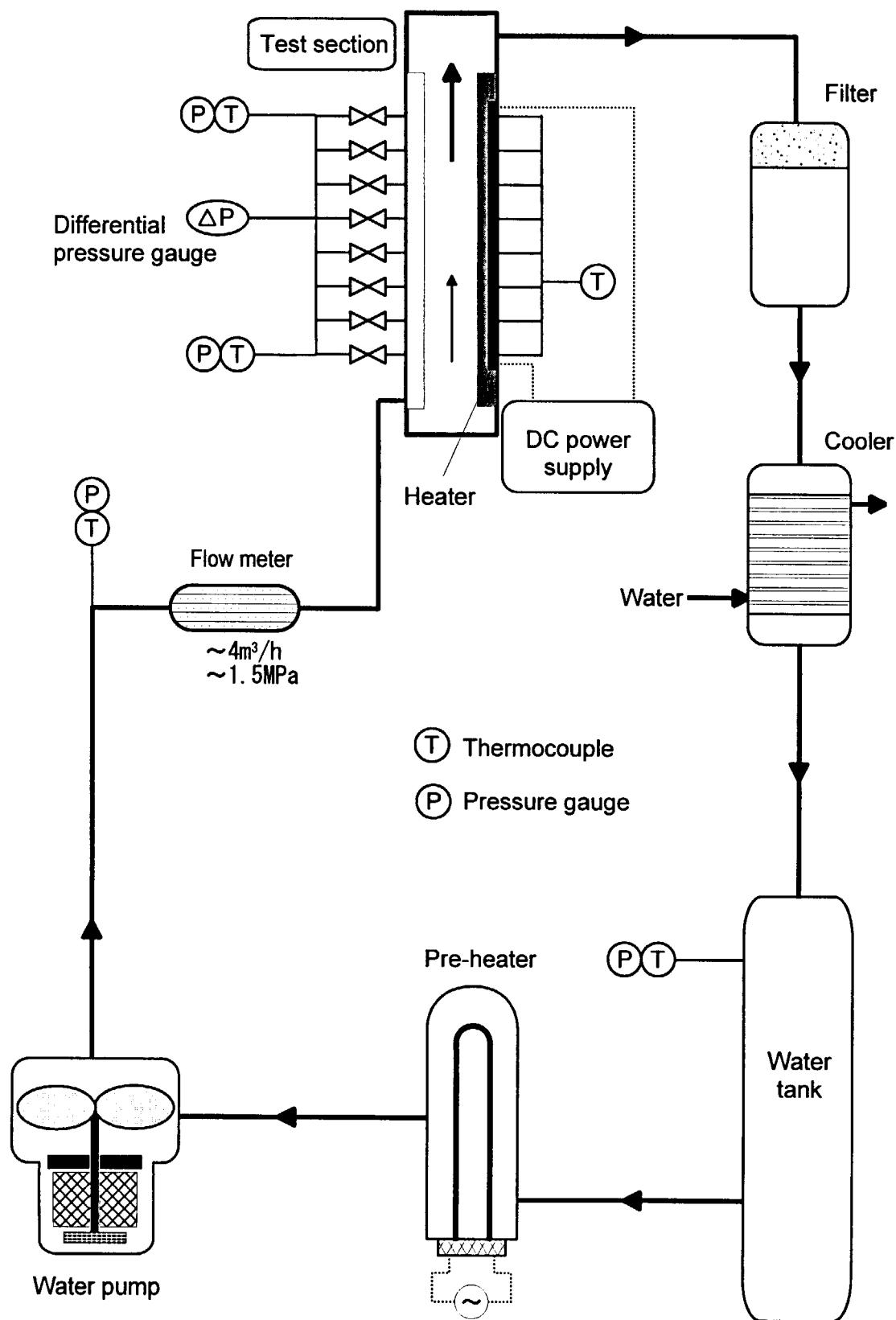


Fig.3.1 Experimental Apparatus

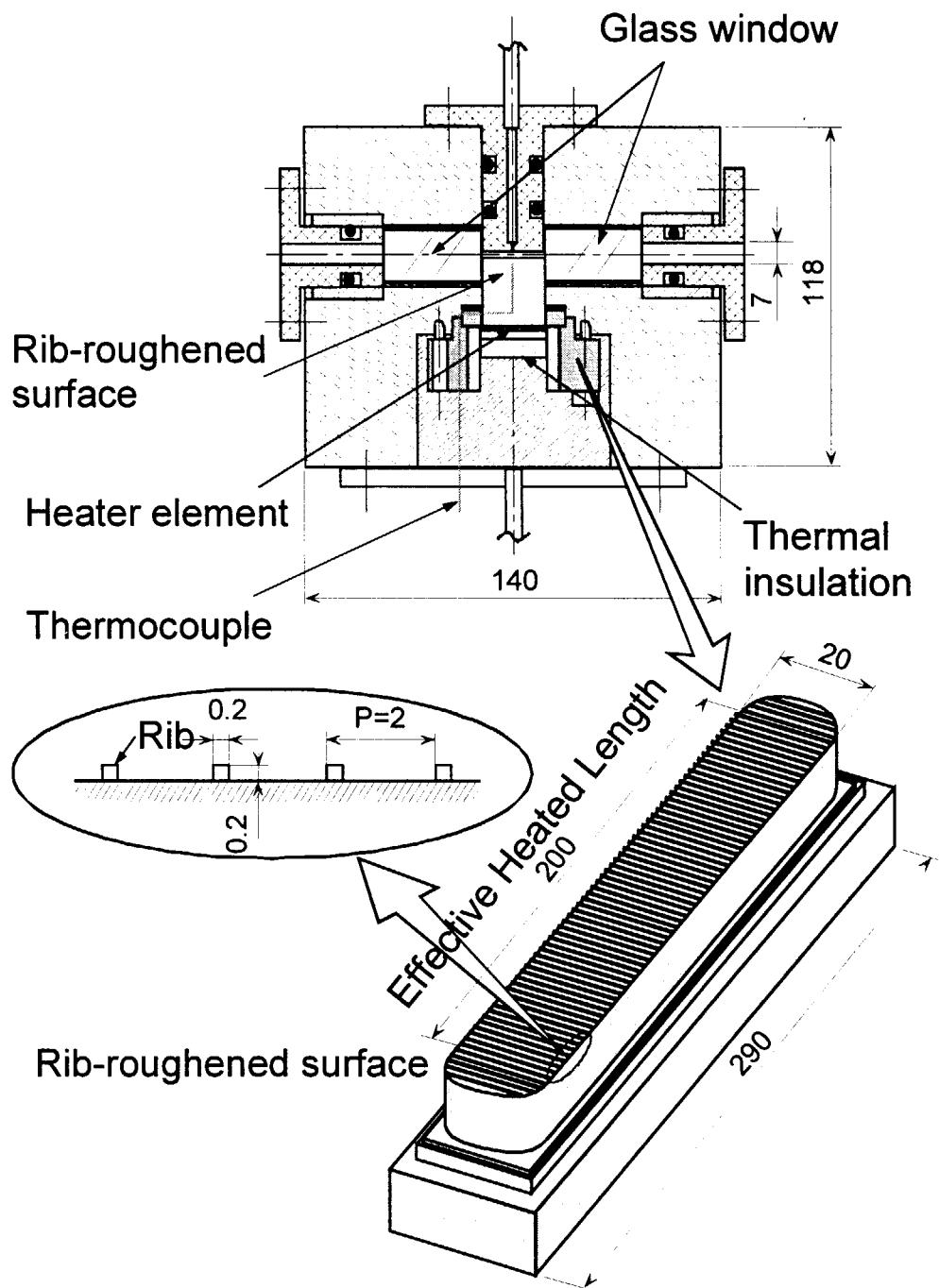


Fig. 3.2 Test section of simulated target cooling channel

Experimental condition  
 Channel height : H=1.2mm  
 Fluid : Water  
 Smooth heated wall  
 Reynolds number : Re=13086

Experimental condition  
 Channel height : H=1.2mm  
 Fluid : Water  
 Rib pitch : p=2mm  
 Rib height : k=0.2mm  
 Reynolds number : Re=13789

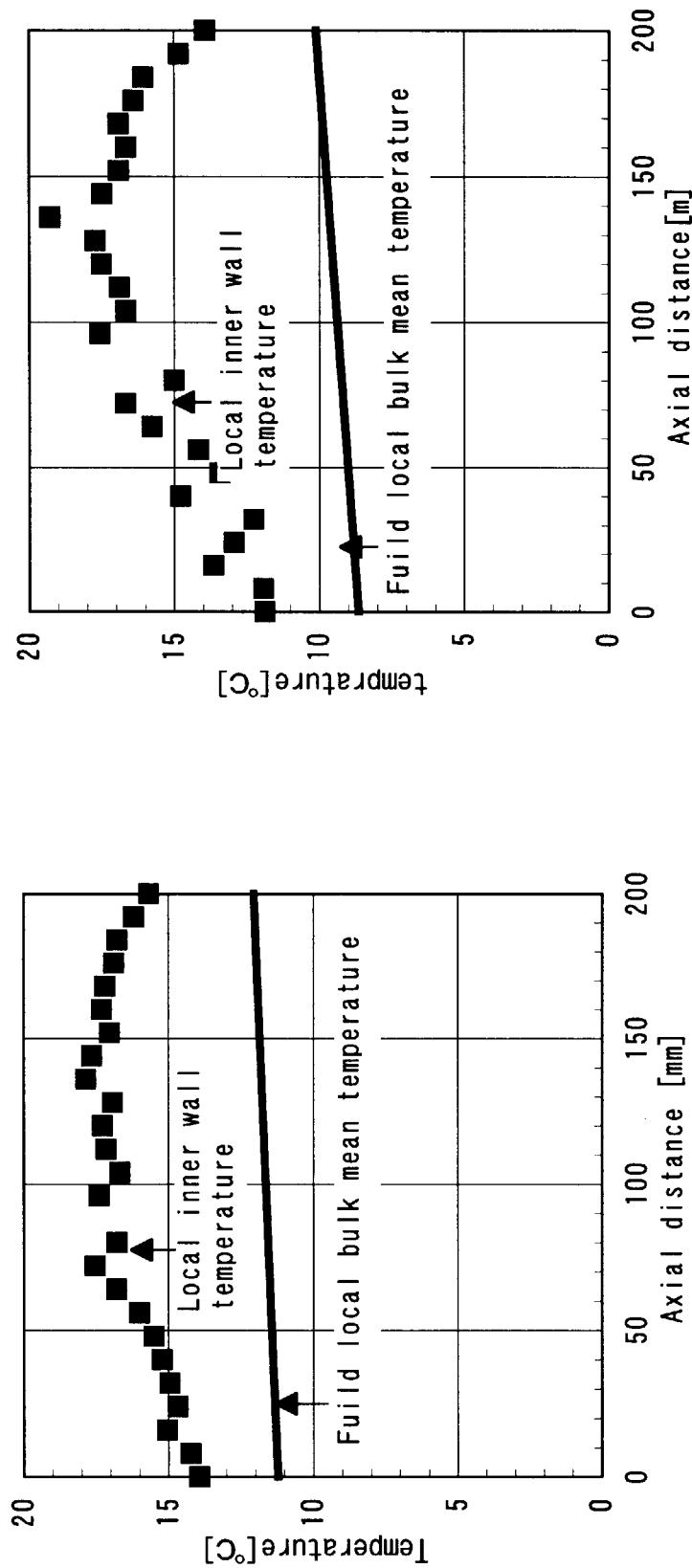


Fig. 3.3 Experimental data (4)  
 (Local wall and bulk water temperature distributions along the flow direction of the test section)

Fig. 3.4 Experimental data (4)  
 (Local wall and bulk water temperature distributions along the flow direction of the test section)

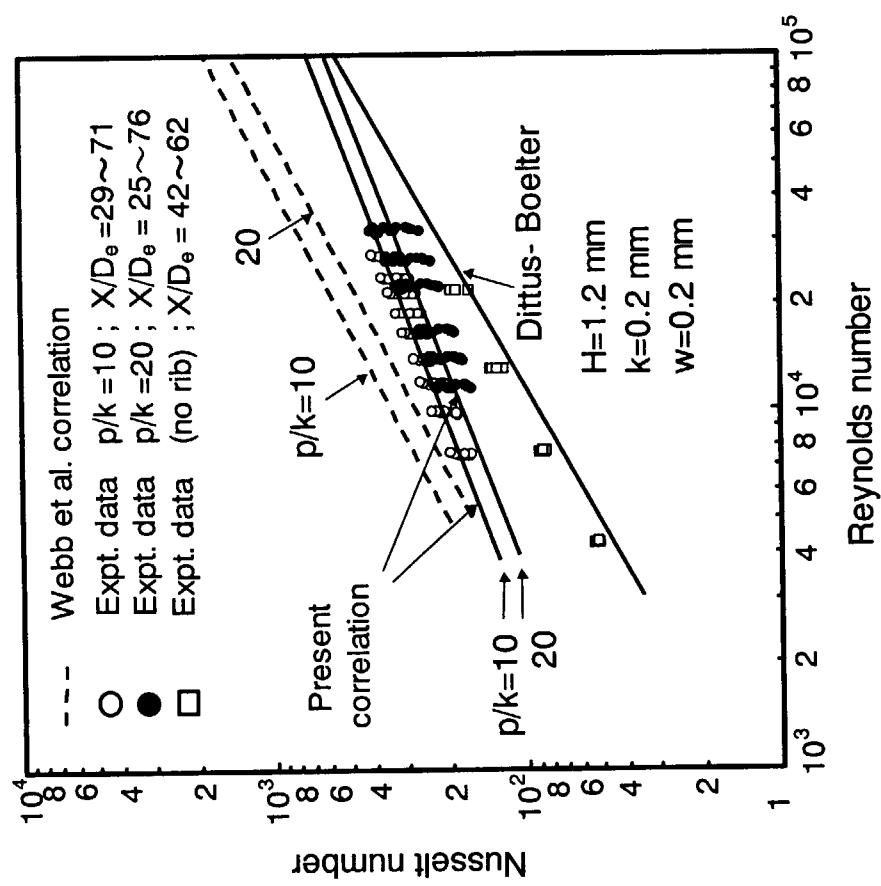


Fig. 3.5 Comparison of heat transfer correlations with  
Webb et al.<sup>(4)</sup>

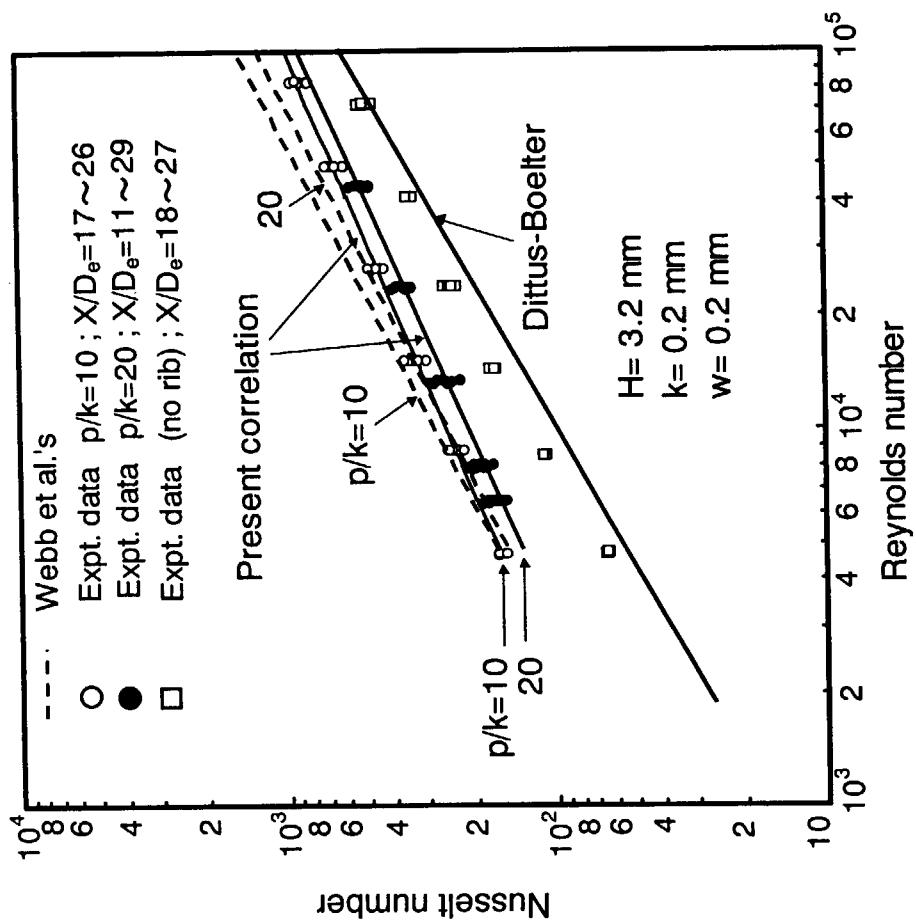


Fig. 3.6 Comparison of heat transfer correlations with  
Webb et al.<sup>(4)</sup>

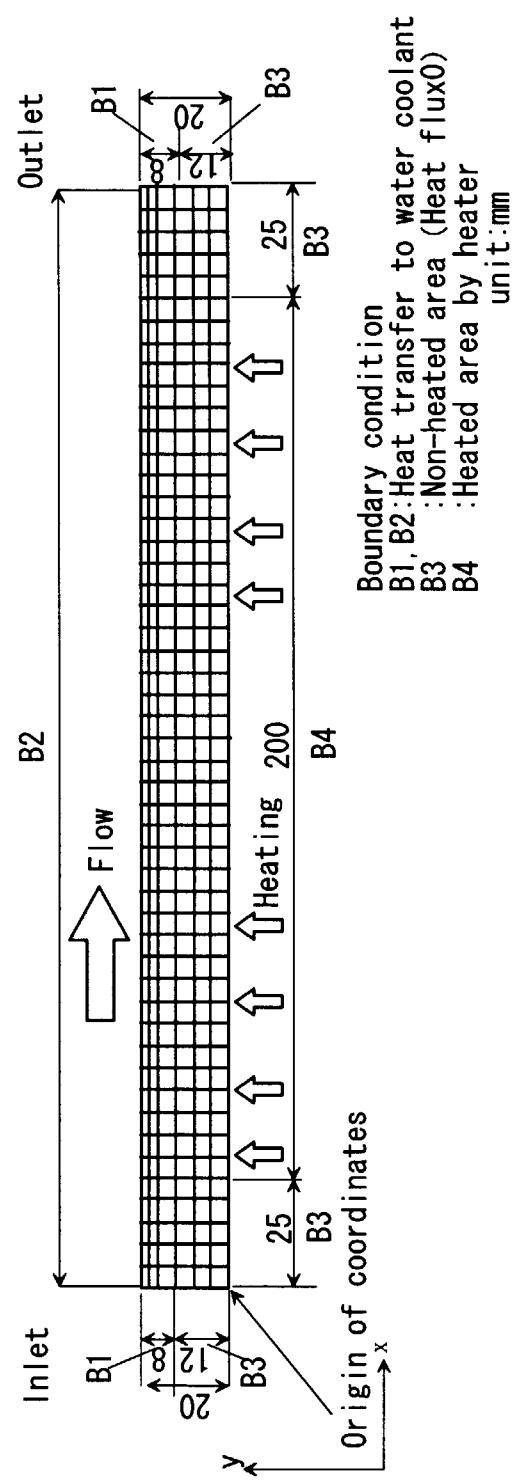


Fig. 4.1 Analytical model

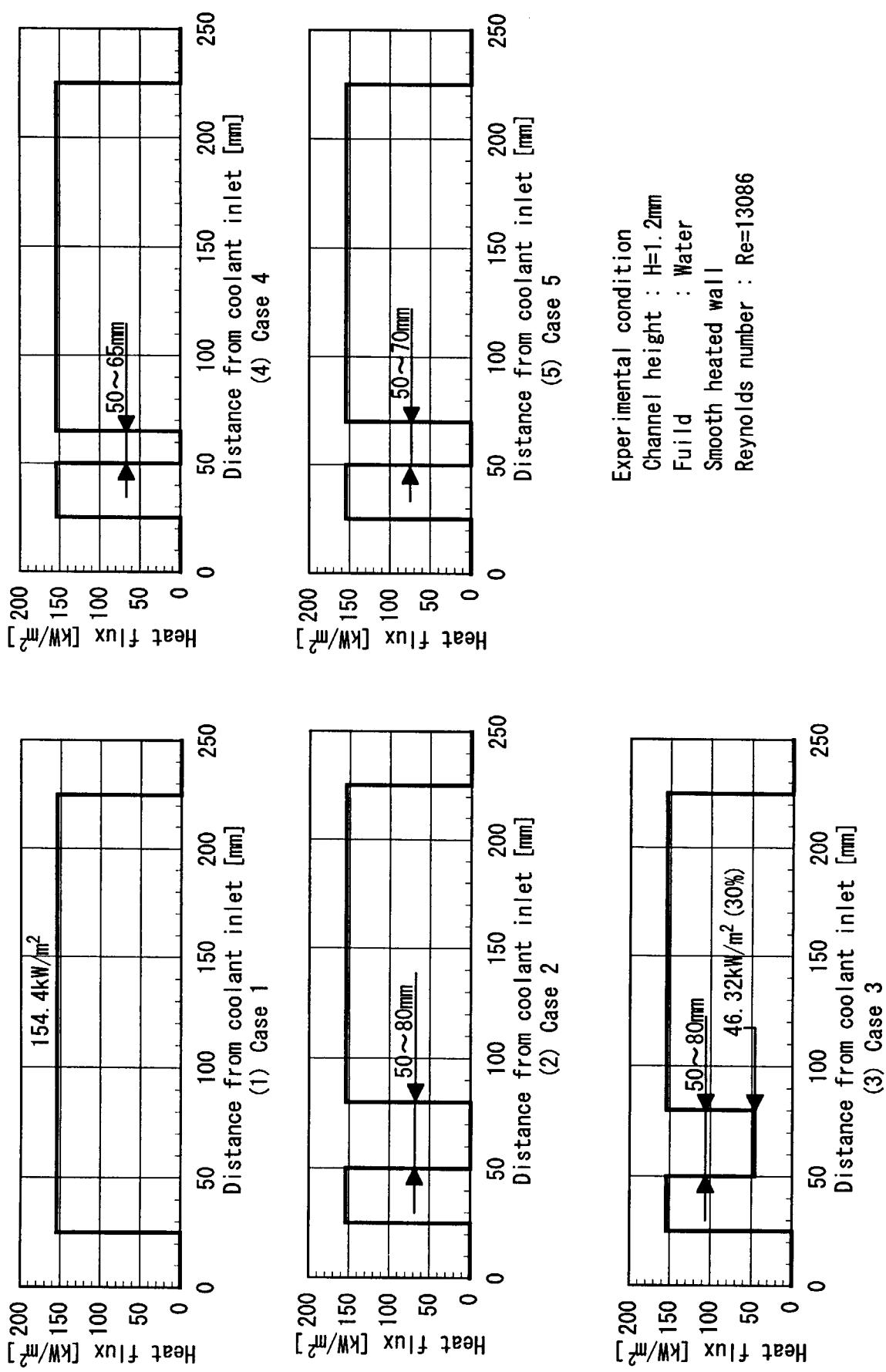


Fig. 4.2 Heat flux distributions

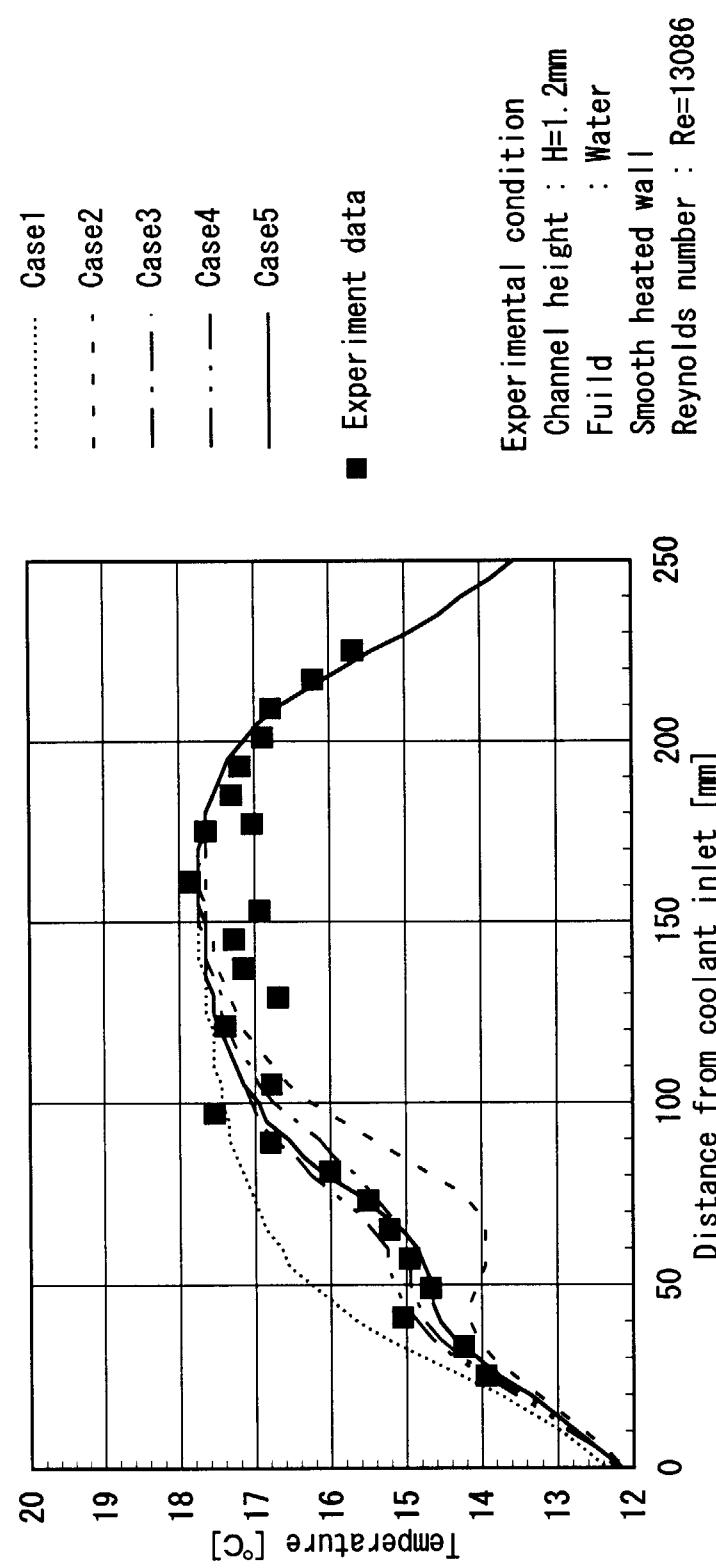


Fig. 4.3 Relationship between temperature and heat flux distributions

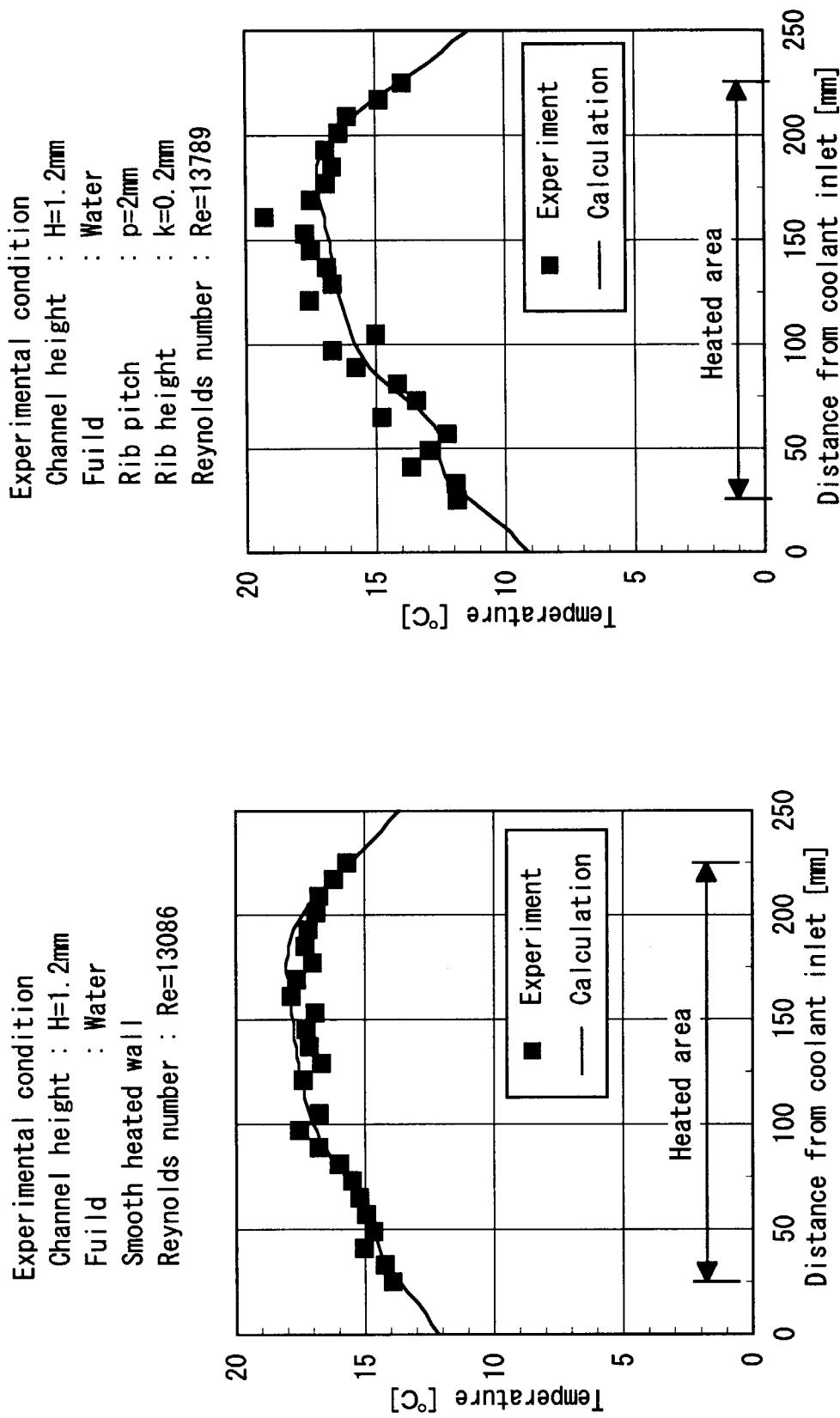


Fig. 4.4 Comparison between experimental and analytical temperature distributions (Local wall temperature distributions along the flow direction of the test section)

Fig. 4.5 Comparison between experimental and analytical temperature distributions (Local wall temperature distributions along the flow direction of the test section)

Experimental condition  
 Channel height : H=1.2mm  
 Fluid : Water  
 Rib pitch : p=4mm  
 Rib height : k=0.2mm  
 Reynolds number : Re=13841

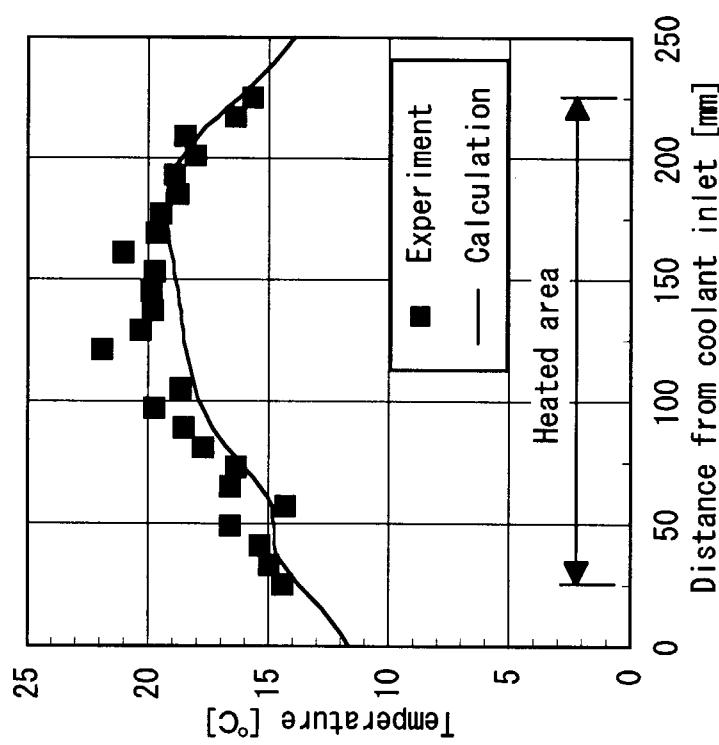


Fig. 4.6 Comparison between experimental and analytical temperature distributions  
 (Local wall temperature distributions along the flow direction of the test section)

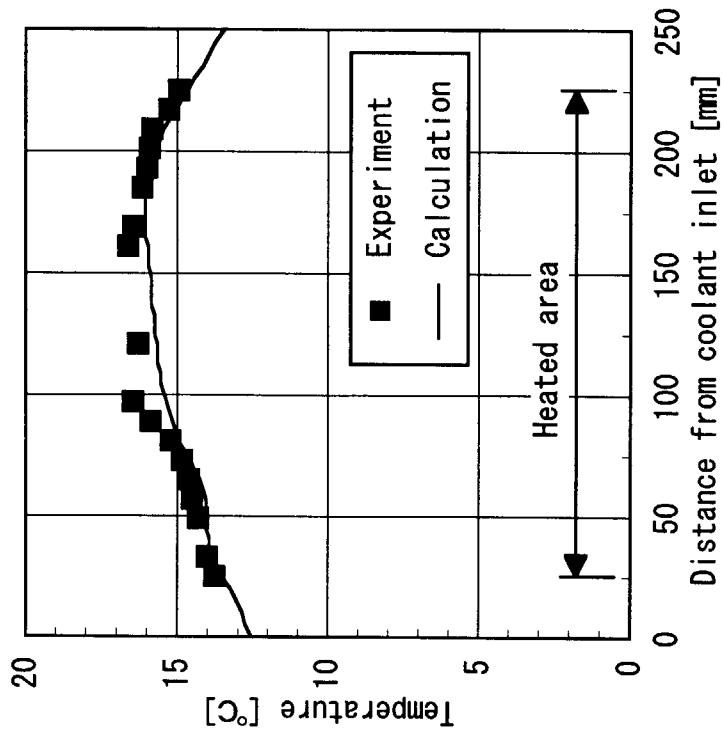


Fig. 4.7 Comparison between experimental and analytical temperature distributions  
 (Local wall temperature distributions along the flow direction of the test section)

Experimental condition

Channel height	: H=1.2mm
Fluid	: Water
Rib pitch	: p=2mm
Rib height	: k=0.2mm
Reynolds number	: Re=21100

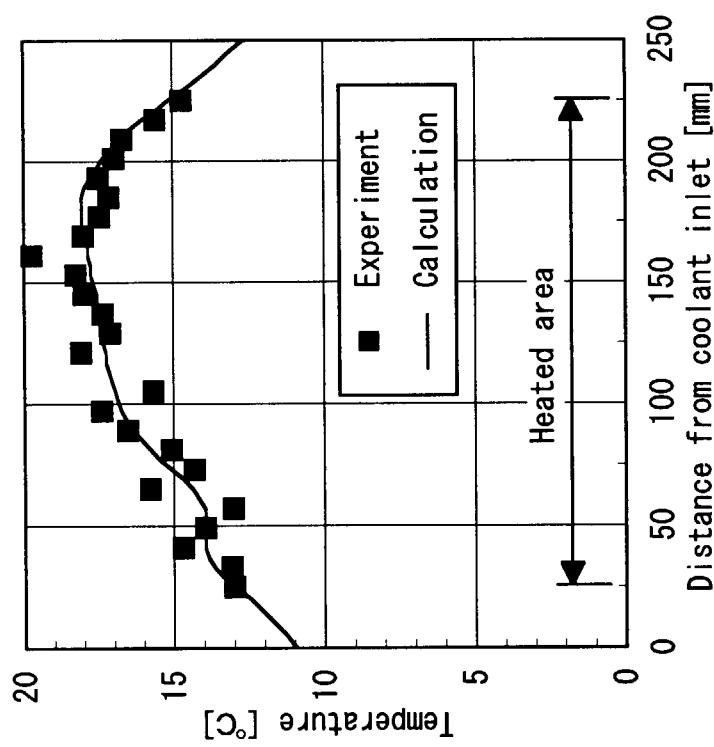


Fig. 4.8 Comparison between experimental and analytical temperature distributions  
(Local wall temperature distributions along the flow direction of the test section)

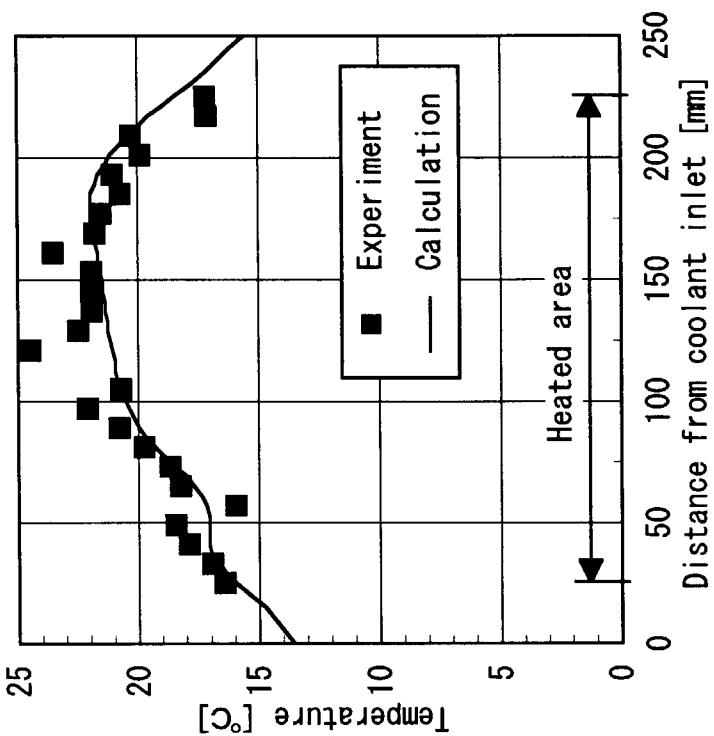


Fig. 4.9 Comparison between experimental and analytical temperature distributions  
(Local wall temperature distributions along the flow direction of the test section)

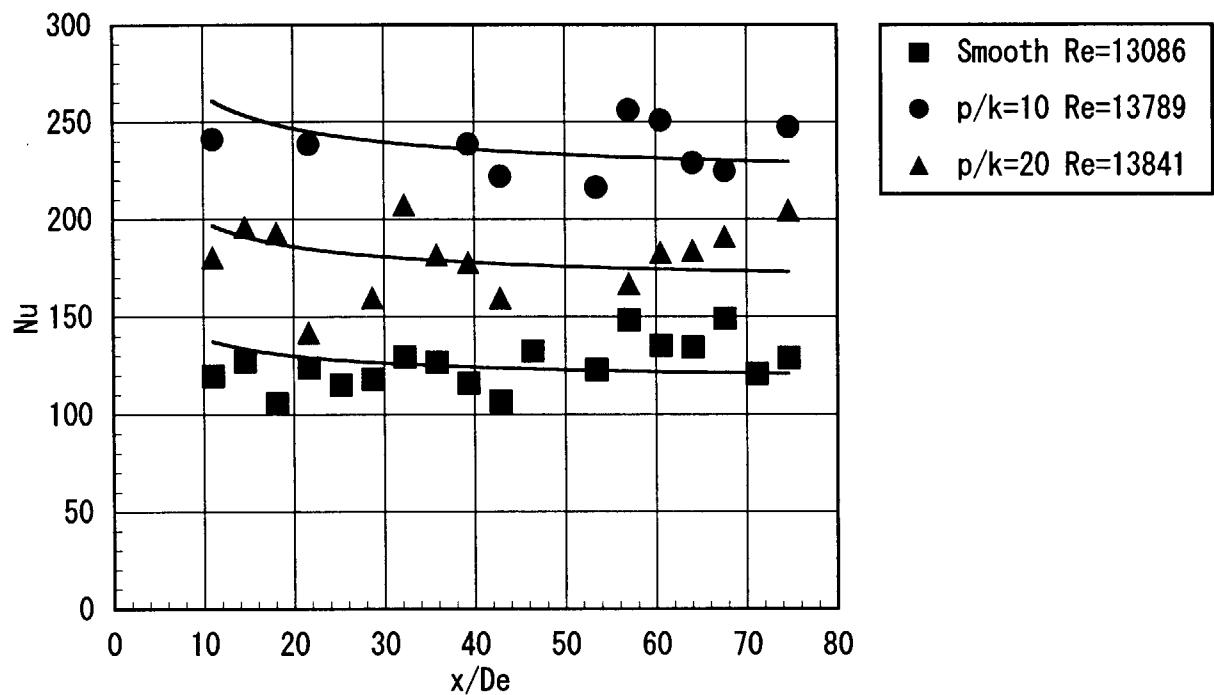


Fig. 4.10 Local Nusselt number distribution in thermal entrance region( $Re=13000\sim14000$ )

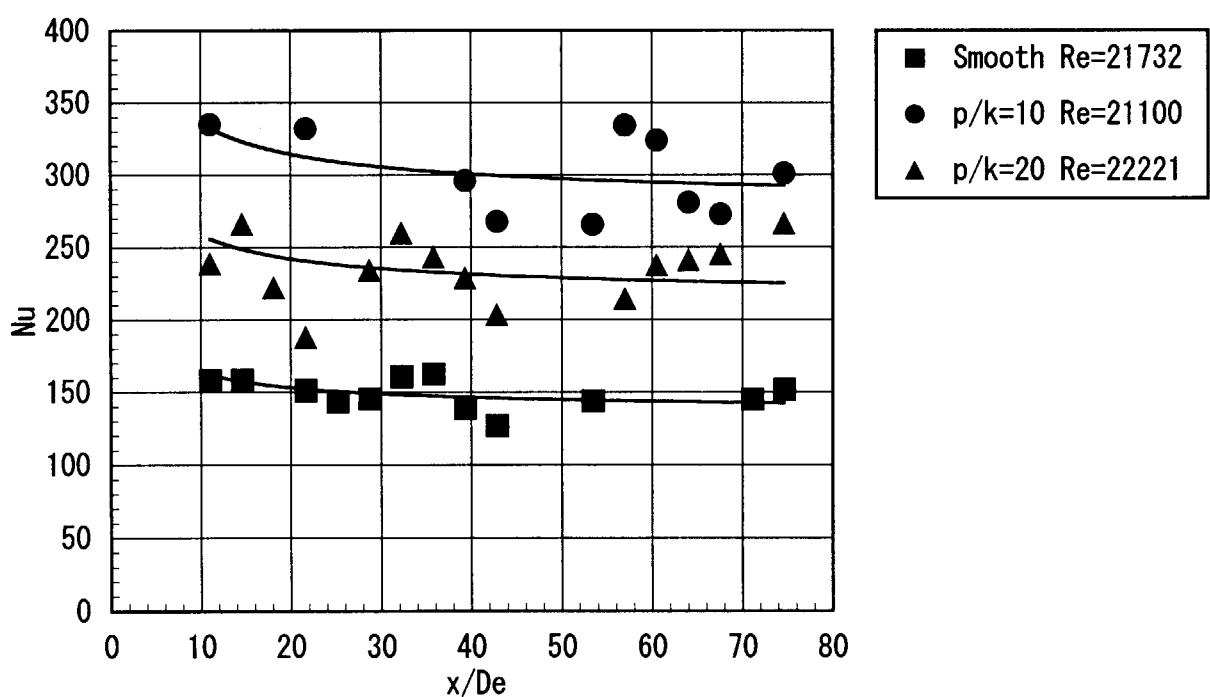


Fig. 4.11 Local Nusselt number distribution in thermal entrance region( $Re=21000\sim22000$ )

# 国際単位系(SI)と換算表

表1 SI基本単位および補助単位

量	名称	記号
長さ	メートル	m
質量	キログラム	kg
時間	秒	s
電流	アンペア	A
熱力学温度	ケルビン	K
物質量	モル	mol
光强度	カンデラ	cd
平面角	ラジアン	rad
立体角	ステラジアン	sr

表3 固有の名称をもつSI組立単位

量	名称	記号	他のSI単位による表現
周波数	ヘルツ	Hz	s <sup>-1</sup>
力	ニュートン	N	m·kg/s <sup>2</sup>
圧力、応力	パスカル	Pa	N/m <sup>2</sup>
エネルギー、仕事、熱量	ジュール	J	N·m
功率、放射束	ワット	W	J/s
電気量、電荷	クーロン	C	A·s
電位、電圧、起電力	ボルト	V	W/A
静電容量	ファラード	F	C/V
電気抵抗	オーム	Ω	V/A
コンダクタンス	ジーメンス	S	A/V
磁束	ウェーバ	Wb	V·s
磁束密度	テスラ	T	Wb/m <sup>2</sup>
インダクタンス	ヘンリー	H	Wb/A
セルシウス温度	セルシウス度	°C	
光束	ルーメン	lm	cd·sr
照度	ルクス	lx	lm/m <sup>2</sup>
放射能	ベクレル	Bq	s <sup>-1</sup>
吸収線量	グレイ	Gy	J/kg
線量当量	シーベルト	Sv	J/kg

表2 SIと併用される単位

名称	記号
分、時、日	min, h, d
度、分、秒	°, ', "
リットル	L, L
トン	t
電子ボルト	eV
原子質量単位	u

$$1 \text{ eV} = 1.60218 \times 10^{-19} \text{ J}$$

$$1 \text{ u} = 1.66054 \times 10^{-27} \text{ kg}$$

表5 SI接頭語

倍数	接頭語	記号
10 <sup>18</sup>	エクサ	E
10 <sup>15</sup>	ペタ	P
10 <sup>12</sup>	テラ	T
10 <sup>9</sup>	ギガ	G
10 <sup>6</sup>	メガ	M
10 <sup>3</sup>	キロ	k
10 <sup>2</sup>	ヘクト	h
10 <sup>1</sup>	デカ	da
10 <sup>-1</sup>	デシ	d
10 <sup>-2</sup>	センチ	c
10 <sup>-3</sup>	ミリ	m
10 <sup>-6</sup>	マイクロ	μ
10 <sup>-9</sup>	ナノ	n
10 <sup>-12</sup>	ピコ	p
10 <sup>-15</sup>	フェムト	f
10 <sup>-18</sup>	アト	a

(注)

- 表1～5は「国際単位系」第5版、国際度量衡局1985年刊行による。ただし、1eVおよび1uの値はCODATAの1986年推奨値によった。
- 表4には海里、ノット、アール、ヘクタールも含まれているが日常の単位なのでここでは省略した。
- barは、JISでは流体の圧力を表わす場合に限り表2のカテゴリーに分類されている。
- EC開発理事会指令ではbar、barnおよび「血圧の単位」mmHgを表2のカテゴリーに入れている。

## 換算表

力	N(=10 <sup>6</sup> dyn)	kgf	lbf
	1	0.101972	0.224809
	9.80665	1	2.20462
	4.44822	0.453592	1

$$\text{粘度 } 1 \text{ Pa}\cdot\text{s}(\text{N}\cdot\text{s}/\text{m}^2) = 10 \text{ P(ポアズ)}(\text{g}/(\text{cm}\cdot\text{s}))$$

$$\text{動粘度 } 1 \text{ m}^2/\text{s} = 10^4 \text{ St(ストークス)}(\text{cm}^2/\text{s})$$

圧	MPa(=10 bar)	kgf/cm <sup>2</sup>	atm	mmHg(Torr)	lbf/in <sup>2</sup> (psi)
力	1	10.1972	9.86923	7.50062 × 10 <sup>3</sup>	145.038
	0.0980665	1	0.967841	735.559	14.2233
	0.101325	1.03323	1	760	14.6959
	1.33322 × 10 <sup>-4</sup>	1.35951 × 10 <sup>-3</sup>	1.31579 × 10 <sup>-3</sup>	1	1.93368 × 10 <sup>-2</sup>
	6.89476 × 10 <sup>-3</sup>	7.03070 × 10 <sup>-2</sup>	6.80460 × 10 <sup>-2</sup>	51.7149	1

エネルギー・仕事・熱量	J(=10 <sup>7</sup> erg)	kgf·m	kW·h	cal(計量法)	Btu	ft · lbf	eV	1 cal = 4.18605 J(計量法)
	1	0.101972	2.77778 × 10 <sup>-7</sup>	0.238889	9.47813 × 10 <sup>-4</sup>	0.737562	6.24150 × 10 <sup>18</sup>	= 4.184 J(熱化学)
	9.80665	1	2.72407 × 10 <sup>-6</sup>	2.34270	9.29487 × 10 <sup>-3</sup>	7.23301	6.12082 × 10 <sup>19</sup>	= 4.1855 J(15 °C)
	3.6 × 10 <sup>6</sup>	3.67098 × 10 <sup>5</sup>	1	8.59999 × 10 <sup>5</sup>	3412.13	2.65522 × 10 <sup>6</sup>	2.24694 × 10 <sup>25</sup>	= 4.1868 J(国際蒸気表)
	4.18605	0.426858	1.16279 × 10 <sup>-6</sup>	1	3.96759 × 10 <sup>-3</sup>	3.08747	2.61272 × 10 <sup>19</sup>	仕事率 1 PS(仏馬力)
	1055.06	107.586	2.93072 × 10 <sup>-4</sup>	252.042	1	778.172	6.58515 × 10 <sup>21</sup>	= 75 kgf·m/s
	1.35582	0.138255	3.76616 × 10 <sup>-7</sup>	0.323890	1.28506 × 10 <sup>-3</sup>	1	8.46233 × 10 <sup>18</sup>	= 735.499 W
	1.60218 × 10 <sup>-19</sup>	1.63377 × 10 <sup>-20</sup>	4.45050 × 10 <sup>-26</sup>	3.82743 × 10 <sup>-20</sup>	1.51857 × 10 <sup>-22</sup>	1.18171 × 10 <sup>-19</sup>	1	

放射能	Bq	Ci
	1	2.70270 × 10 <sup>-11</sup>
	3.7 × 10 <sup>10</sup>	1

吸収線量	Gy	rad
	1	100
	0.01	1

照射線量	C/kg	R
	1	3876
	2.58 × 10 <sup>-4</sup>	1

線量当量	Sv	rem
	1	100
	0.01	1

(86年12月26日現在)

