

自然循環時燃料集合体内熱流動現象の予測評価
—側面からの冷却の影響—
(研究報告)



核燃料サイクル開発機構
大洗工学センター

本資料の全部または一部を複写・複製・転載する場合は、下記にお問い合わせください。

〒319-1184 茨城県那珂郡東海村村松4番地49
核燃料サイクル開発機構
技術展開部 技術協力課

Inquiries about copyright and reproduction should be addressed to:

Technical Cooperation Section,
Technology Management Division,
Japan Nuclear Cycle Development Institute
4-49 Muramatsu, Tokai-mura, Naka-gun, Ibaraki, 319-1184,
Japan

© 核燃料サイクル開発機構
(Japan Nuclear Cycle Development Institute)
2001

自然循環時燃料集合体内熱流動現象の予測評価
— 側面からの冷却の影響 —
(研究報告)

川又 伸弘* 上出 英樹*

要 旨

実機規模の大型燃料集合体について、インターラッパーフローあるいは集合体間熱移行によって冷却される場合の熱流動現象を予測評価するために、自然循環に相当する条件にて解析を行った。対象は217本ピン束の炉心燃料集合体で、汎用3次元熱流動解析コードAQUAを用いて解析した。解析手法は、3本の燃料ピンに囲まれたサブチャンネルに1つのコントロールボリュームを割り当てるスタガートハーフピンメッシュ分割とサブチャンネル解析コード用に開発された軸方向流動抵抗相関式を組み合わせたもので、これまでに側面から冷却される条件を含め、37, 61, 169ピン束集合体の実験データにより検証してきている。予測解析の結果、次の知見を得た。

- (1) 大型燃料集合体であっても、ラッパー管壁を通して側面から冷却されれば、集合体内的最高温度は低下する。低下の傾向は、出力／流量条件の影響を含めて、浮力パラメータ Gr^*/Re と壁面熱流束比 $q''_{wall/pin}$ を用いて整理できる。
- (2) 集合体内的水平方向温度分布は、集合体の出力／流量条件、側面からの除熱量に依存して変化する。断面平均温度に対する最高温度の比であるピーキングファクターについて、集合体内的浮力の強さを示す浮力パラメータ Gr^*/Re を用いることで、出力、流量依存性を整理して評価できる。一方、ラッパー管壁近傍の温度については、浮力パラメータでグルーピングすることにより、壁サブチャンネルファクターと壁面熱流束比で整理できる。
- (3) これまでの実験結果との比較では、217本ピンの大型バンドルは37本ピンバンドルより、ピーキングファクターは大きく、壁サブチャンネルファクターは小さいことが分かった。
- (4) 壁面からの除熱が軸方向に一様でなく、軸長の上半分のみが冷却される条件について検討した結果、ピーキングファクターおよび壁サブチャンネルファクターについて、平均の熱流束を用いて整理できることが分かった。

* 大洗工学センター 要素技術開発部 新技術開発試験グループ

Evaluation on Thermo Hydraulics in Core Fuel Subassemblies
under Natural Circulation Conditions

—Effect of Heat Removal through a Wrapper Tube Wall—

N. Kawamata*, H. Kamide*

Abstract

A large-scale core fuel subassembly in a real reactor was analyzed under the conditions including natural circulation in order to evaluate thermo hydraulics where it was cooled by inter-wrapper flow or heat transfer among the subassemblies. The core fuel subassembly of a 217-pin bundle was analyzed by using a three-dimensional thermal-hydraulic analysis code, AQUA. The analysis method is the combination of staggered half-pin mesh arrangement and correlations of axial flow resistance, the former approach assigning a control volume to a subchannel surrounded by three fuel pins and the latter one developed for subchannel analysis codes. This method has been validated, based on experimental data on the 37, 61 and 169-pin bundles, including the conditions of sidewall cooling. After implementing the prediction analysis, the following conclusions were obtained:

- (1) Even if the 217-pin subassembly is cooled through a wrapper tube wall, the peak temperature in the subassembly decreases. A decreasing trend of temperature, including the effects of power / flow rate conditions, can be correlated with buoyancy parameter, Gr^*/Re , and heat flux ratio of wrapper wall to pin surface, $q''_{wall/pin}$.
- (2) The horizontal temperature distribution in the subassembly varies, dependent on the power / flow rate and heat removal. The peaking factor, the ratio of peak temperature to cross-sectional average temperature, can be evaluated by using buoyancy parameter Gr^*/Re , and $q''_{wall/pin}$ considering the dependency on power / flow rate. On the other hand, the temperature near the wrapper tube wall is represented by a wall subchannel factor. It is correlated with $q''_{wall/pin}$, by grouping the buoyancy parameters.
- (3) Comparison with the past sodium experimental results, the 217-pin large bundle has higher peaking factors and lower wall subchannel factors than 37-pin bundles.
- (4) To see an influence of non-homogeneous cooling in axial direction, only the upper-half of subassembly is cooled. As a result, it was found that peaking factors and wall subchannel factors could be correlated with average heat flux on the wrapper wall.

* New Technology Development Group, Advanced Technology Division,
O-arai Engineering Center , JNC

目 次

1. 序 論	1
2. 解析手法	3
3. 解析体系	5
4. 解析条件	6
5. 解析結果	7
5. 1 集合体内の温度分布、速度分布	7
5. 2 集合体内最高温度の低下	8
5. 3 ピーキングファクター	9
5. 4 壁サブチャンネルファクター	10
6. 評価・検討	13
6. 1 試験結果との比較	13
6. 2 除熱条件の影響	14
7. まとめ	15
謝 辞	16
参考文献	17

表 リスト

Table 3.1	217本燃料集合体の形状	19
Table 4.1	解析条件一覧表	20
Table 5.1	無次元量の算出	21

図 リスト

Fig. 1.1	直接炉心補助冷却系	22
Fig. 2.1	CCTL-CFR試験体概略図	23
Fig. 2.2	CCTL-CFR発熱部上端部および中央断面における温度分布の比較	24
Fig. 2.3	CCTL-CFRミキシング係数の有無による速度分布の比較	25
Fig. 2.4	水平断面温度分布のトラバースライン	26
Fig. 2.5	発熱上端部におけるミキシング係数有無による温度分布の比較	27
Fig. 3.1	217ピンバンドルAQUAコード解析モデル	28
Fig. 3.2	メッシュ分割図	29
Fig. 3.3	集合体の軸方向出力分布	30
Fig. 3.4	除熱量の調整方法	31
Fig. 3.5	熱流束境界のインプットデータ	32
Fig. 5.1.1	断面温度分布の発熱量依存性 ($q''_{wall}=0.0$, $Vin=0.1m/s$, $Z=26$)	33
Fig. 5.1.2	規格化温度分布の発熱量依存性 ($q''_{wall}=0.0$, $Vin=0.1m/s$, $Z=26$)	34
Fig. 5.1.3	流速分布の発熱量依存性 ($q''_{wall}=0.0$, $Vin=0.1m/s$, $Z=26$)	35
Fig. 5.1.4	断面温度分布の入口流速依存性 ($q''_{wall}=0.0$, $q''_{pin}=14.85kW/m^3$, 断面Z=26)	36
Fig. 5.1.5	規格化温度分布の入口流速依存性 ($q''_{wall}=0.0$, $q''_{pin}=14.85kW/m^3$, 断面Z=26)	37
Fig. 5.1.6	流速分布の入口流速依存性 ($q''_{wall}=0.0$, $q''_{pin}=14.85kW/m^3$, $Z=26$)	38
Fig. 5.1.7	断面温度分布の除熱量依存性 ($q''_{pin}=14.85kW/m^3$, $Vin=0.1m/s$, $Z=26$)	39
Fig. 5.1.8	規格化温度分布の除熱量依存性 ($q''_{pin}=14.85kW/m^3$, $Vin=0.1m/s$, $Z=26$)	40
Fig. 5.1.9	流速分布の除熱量依存性 ($q''_{pin}=14.85kW/m^3$, $Vin=0.1m/s$, $Z=26$)	41
Fig. 5.1.10	断面温度分布の発熱量依存性 ($q''_{wall}=-10kW/m^3$, $Vin=0.1m/s$, $Z=26$)	42
Fig. 5.1.11	規格化温度分布の発熱量依存性 ($q''_{wall}=-10kW/m^3$, $Vin=0.1m/s$, $Z=26$)	43
Fig. 5.1.12	流速分布の発熱量依存性 ($q''_{wall}=-10kW/m^3$, $Vin=0.1m/s$, $Z=26$)	44
Fig. 5.1.13	断面温度分布の入口流速依存性 ($q''_{pin}=14.85kW/m^3$, $q''_{wall}=-10kW/m^3$, $Z=26$)	45

Fig. 5.1.14 規格化温度分布の入口流速依存性 ($q''_{pin}=14.85\text{kW/m}^3$, $q''_{wall}=-10\text{kW/m}^3$, $Z=26$)	46
Fig. 5.1.15 流速分布の入口流速依存性 ($q''_{pin}=14.85\text{kW/m}^3$, $q''_{wall}=-10\text{kW/m}^3$, $Z=26$)	47
Fig. 5.2.1 最高温度の壁面熱流束比依存性 (発熱量 $q''_{pin}=7.43\text{kW/m}^3$)	48
Fig. 5.2.2 最高温度の壁面熱流束比依存性 (発熱量 $q''_{pin}=14.85\text{kW/m}^3$)	49
Fig. 5.2.3 最高温度の壁面熱流束比依存性 (発熱量 $q''_{pin}=29.71\text{kW/m}^3$)	50
Fig. 5.2.4 最高温度の壁面熱流束比依存性 —浮力パラメータの違いによる比較—	51
Fig. 5.3.1 ピーキングファクタの浮力パラメータ依存性 (除熱量 $q''_{wall}=0.0\text{ kW/m}^3$)	52
Fig. 5.3.2 ピーキングファクタの浮力パラメータ依存性 (発熱量 $q''_{pin}=14.85\text{kW/m}^3$)	53
Fig. 5.3.3 ピーキングファクタの浮力パラメータ依存性 (除熱量 $q''_{wall}=-5\text{kW/m}^3$)	54
Fig. 5.3.4 ピーキングファクタの浮力パラメータ依存 (除熱量 $q''_{wall}=-10\text{kW/m}^3$)	55
Fig. 5.3.5 ピーキングファクタの浮力パラメータ依存性 (入口流速 $Vin=0.1\text{m/s}$)	56
Fig. 5.3.6 ピーキングファクタの浮力パラメータ依存性 — 壁面熱流束比の違いによる比較 —	57
Fig. 5.3.7 ピーキングファクタの熱流束比依存性 (入口流速 $Vin=0.1\text{m/s}$)	58
Fig. 5.3.8 ピーキングファクタの壁面熱流束比依存性 (発熱量 $q''_{pin}=14.85\text{kW/m}^3$)	59
Fig. 5.3.9 ピーキングファクタの壁面熱流束比依存性 —浮力パラメータの違いによる比較—	60
Fig. 5.4.1 壁サブチャンネルファクタの浮力パラメータ依存性 (除熱量 $q''_{wall}=0.0\text{ kW/m}^3$)	61
Fig. 5.4.2 壁サブチャンネルファクタの浮力パラメータ依存性 (発熱量 $q''_{pin}=14.85\text{kW/m}^3$)	62
Fig. 5.4.3 壁サブチャンネルファクタの浮力パラメータ依存性 (除熱量 $q''_{wall}=-5\text{kW/m}^3$)	63
Fig. 5.4.4 壁サブチャンネルファクタの浮力パラメータ依存性 (除熱量 $q''_{wall}=-10\text{kW/m}^3$)	64
Fig. 5.4.5 壁サブチャンネルファクタの浮力パラメータ依存性 (入口流速 $Vin=0.1\text{m/s}$)	65
Fig. 5.4.6 壁サブチャンネルファクタの浮力パラメータ依存性 — 壁面熱流束比の違いによる比較 —	66
Fig. 5.4.7 壁サブチャンネルファクタの壁面熱流束比依存性 (入口流速 $Vin=0.1\text{m/s}$)	67

Fig. 5.4.8 壁サブチャンネルファクタの壁面熱流束比依存性 (発熱量 $q''_{pin}=14.85\text{kW/m}^2$)	68
Fig. 5.4.9 壁サブチャンネルファクタの壁面熱流束比依存性 — 浮力パラメータの違いによる比較 —	69
Fig. 6.1.1 ピーキングファクタの浮力パラメータ依存性 (除熱量 $q''_{wall} = 0.0 \text{ kW/m}^2$)	70
Fig. 6.1.2 壁サブチャンネルファクタの浮力パラメータ依存性 (除熱量 $q''_{wall} = 0.0 \text{ kW/m}^2$)	71
Fig. 6.1.3 ピーキングファクタの浮力パラメータ依存性 — 37本ピンバンドル試験結果との比較 —	72
Fig. 6.1.4 壁サブチャンネルファクタの浮力パラメータ依存性 — 37本ピンバンドル試験結果との比較 —	73
Fig. 6.2.1 断面温度分布の除熱条件依存性 ($q''_{pin}=14.85\text{kW/m}^2$, $Vin=0.1\text{m/s}$, $Z=26$)	74
Fig. 6.2.2 規格化温度分布の除熱条件依存性 ($q''_{pin}=14.85\text{kW/m}^2$, $Vin=0.1\text{m/s}$, $Z=26$)	75
Fig. 6.2.3 ピーキングファクタの浮力パラメータ依存性 — 除熱条件の違いによる比較 —	76
Fig. 6.2.4 ピーキングファクタの壁面熱流束比依存性 — 除熱条件の違いによる比較 —	77
Fig. 6.2.5 壁サブチャンネルファクタの浮力パラメータ依存性 — 除熱条件の違いによる比較 —	78
Fig. 6.2.6 壁サブチャンネルファクタの壁面熱流束比依存性 — 除熱条件の違いによる比較 —	79
Fig. 6.2.7 最高温度の壁面熱流束比依存性 — 除熱条件の違いによる比較 —	80

1. 序論

自然循環による崩壊熱除去はナトリウム冷却高速炉の特性を活かして、その安全性をより向上させることのできる重要な機能の一つとして位置づけられる。すなわち、冷却材の通常の運転温度が沸点より十分に低いことから高温部と低温部の温度差（密度差）と機器配置上の高低差により冷却材をポンプ等の動的機器の作動を期待せずに循環させ、自然通風による空気冷却器などの除熱源さえ確保できれば炉心を冷却することができる。

その一方で自然循環時には循環流量と流路内の温度分布が相互に関係し合うことから複雑な現象を呈する場合がある。特に崩壊熱除去系として直接炉心補助冷却系（Direct Reactor Auxiliary Cooling System, DRACS）を採用した場合には炉心部の直上に冷却器（Dipped Heat Exchanger, DHX）が配置されること（Fig. 1.1 参照）から DHX からの低温ナトリウムと高温の炉心部との間で負の浮力による熱流動的相互作用が生じ得る。日本原子力発電（株）の DFBR^[1]、European Fast Reactor^[2, 3]など近年の高速炉の設計例では多くがこの DRACS を採用しており、炉心部における熱流動現象の解明が自然循環時の安全性の評価を行う上で重要となっている。

このような自然循環時の現象として DHX からの低温ナトリウムが炉心の燃料集合体間の隙間部に入り込み対流するインターラッパーフロー（Inter-Wrapper Flow, IWF）が炉心部の温度に大きな影響を与えることから注目されている。この他、炉心部の径方向の温度分布により集合体を横切るように熱が輸送される集合体間熱移行の寄与が大きくなると考えられる。

IWF については、これまでに 7 体の模擬炉心を有する PLANDTL-DHX 試験装置を用いたナトリウム試験を実施し、その現象を解明してきた。^[4-16] すなわち、IWF は自然循環時の炉心最高温度を低減する効果を有し、燃料集合体をラッパー管を通して側面から冷却することができる。また、このような効果は長期の自然循環崩壊熱除去状態のような準定常的状態ばかりでなく、スクラム後の過渡時にも炉心冷却に寄与することを明らかにした。しかしながら、試験装置では模擬燃料集合体として燃料ピンは実寸大とし 37 ピン束をモデル化しており、217 あるいは 271 ピン束となる実機集合体の部分モデルを用いている。このような少数ピン束集合体では、燃料ピンの数に対して相対的にラッパー管の周長が大きくなり、IWF のような外側からの冷却効果が集合体の内部により大きな影響を与えると考えられる。従って実機集合体での冷却効果について検討する必要がある。

一方、集合体間熱移行現象についても、CCTL-CFR 試験装置、PLANDTL-DHX 試験装置を用いたナトリウム試験により集合体内部の熱流動現象に与える影響を解明してきた。^[8, 17-24] 集合体内の温度分布は集合体間熱移行によるラッパー管壁を通した熱流束により大きく変化することが示された。温度分布の変化は集合体内部の出力、流量条件に依存すると共に、側面からの熱流束の大きさに依存する。その特性を表す指標として、集合体内部の浮力の相対的な強さを示す浮力パラメータ、ピン表面熱流束に対するラッパー管壁での熱流束の比を導入し、その有効性を示してきた。

また、このような集合体内温度分布の変化を評価する手法として、Cartesian 座標系にて集合体内のサブチャンネルを一つのメッシュにより表現するスタッガードハーフピンメッシュ分割手法と複数領域を独立してメッシュ分割し領域間の熱輸送を考慮できる多領域モデルを組み合わせた複数集合体解析手法を開発した。集合体内温度分布の評価では、サブチャンネル解析手法のために米国 MIT で開発されたサブチャンネル間混合効果の評価式を導入し、これを過渡時へ拡張した。本手法が集合体間熱移行を受けた集合体内温度を高い精度で予測できることを定常および過渡試験データにより検証した。また、燃料ピン束の規模について、7 集合体 37 ピン束試験、3 集合体 61 ピン束試験、単一集合体部分発熱 169 ピン束試験データにより、集合体内温度分布を検証した。これにより、本手法が大型燃料集合体にも十分適用できることを明らかにした。

上記のように検証された複数集合体解析モデルを用い、実機規模の大型燃料集合体における自然循環時の熱流動現象を予測評価することにより、実験では得られなかった大型燃料集合体での側面から冷却された場合の最高温度の挙動を把握する。これにより実機規模の大型燃料集合体について、IWF あるいは集合体間熱移行により冷却された場合の最高温度低減効果を定量的に把握する。

2. 解析手法

これまで、集合体内熱流動現象や集合体間熱移行現象を解析する手法として汎用3次元熱流動解析コードAQUAを開発し、7集合体37ピン束試験、3集合体61ピン束試験、単一集合体部分発熱169ピン束試験などのデータを解析して検証してきた。AQUAコードの概要とモデル化の考え方を以下に示す。

(1) メッシュ分割

AQUAコードでは、集合体内部の各サブチャンネルを、1個のコントロールボリュームとし、x-y-z体系の中でメッシュ分割する。このようなメッシュ分割法は、序論でも述べたようにStaggered Half-pin Mesh Arrangementと呼ばれ、差分法を用いて解析する上で有効な手法である。本手法を用いることにより、個々のコントロールボリュームが3本の燃料ピンに囲まれた内部サブチャンネルに1対1対応し、サブチャンネル解析で用いられてきた軸方向流動抵抗等の相関式を3次元解析に直接適用することができる。ただし、2本の燃料ピンとラッパー管に囲まれた壁サブチャンネルやラッパー管の角に当たるコーナーサブチャンネルについては、3次元領域でのコントロールボリュームと1対1に対応しない。このような部分は、壁サブチャンネルとしての平均的挙動が一致するように3次元側のコントロールボリュームに相関式を導入している。

(2) PermeabilityおよびPorosity

コントロールボリューム内の実際の流路面積は、燃料ピンの占める領域だけ小さくなっている。このため、流体の流れ方向毎の面積についてはPermeability、流体の体積についてはPorosityという概念を取り入れて補正している。縦軸(z)方向のPermeabilityおよびPorosityについては計算メッシュ面積中の流路面積の割合を用いている。実際のピンバンドルでは内部サブチャンネルに比べ壁サブチャンネルの流路面積が大きく、流れやすいこと、流路面積当たりのピン発熱量が小さいことがここに反映される。また、横軸(x-y)方向のPermeabilityについてはメッシュ境界の線分の長さに対する実際の流路の長さの比を用いている。

(3) 軸方向流動抵抗係数

軸方向流動抵抗係数については、MITの相関式が、ワイヤースペーサ付き3角配列ピンバンドルに対して最も信頼性が高いと判断し、これを選定した。MITの相関式は、内部サブチャンネルと壁サブチャンネル、コーナーサブチャンネルで、それぞれ異なった式が与えられており、Permeabilityと同様に各サブチャンネルタイプ毎に軸方向流動抵抗係数を区別して与えている。また、MITの相関式では、ピン径、配列ピッチ、ワイヤー径、巻きピッチ、最外周ピンとラッパー管との隙間の依存性、Re数依存性を考慮できるようになっている。

(4) サブチャンネル間混合の評価

3次元解析では、圧力分布に応じた正味のクロスフローは内部で計算される。しかし、スペーサワイヤーの効果や乱流混合のような現象はメッシュ内部の現象であるため、陽には考慮されない。そこで、サブチャンネル間混合の評価について、MITから公開されているサブチャンネル解析用のミキシング係数モデルをAQUAコードに組み込んで使用している。MITのモデルでは、燃料集合体内の混合効果を以下の2成分に分類している。

①スペーサワイヤーのsweepおよび乱流による効果

スペーサワイヤーが誘起する旋回流および乱流による水平面内の混合効果

②加熱によるthermal plumeの混合効果

加熱により燃料ピン表面から立ちのぼるplumeがちぎれ、高温流体塊となって隣接サブチャンネルへ輸送されることにより生じる水平面内の混合効果

また、サブチャンネル単位大のメッシュ間の拡散計算に対して、サブチャンネル形状を模擬しきれないことに起因する誤差を補正するための係数も導入している。

(5) これまでの検証結果例

これまでの検証結果例を、CCTL-CFRでの61ピン体系、および、169ピン部分発熱集合体について以下に示す。

①CCTL-CFRでの61ピン体系 [25]

CCTL-CFR試験体系の概略図をFig. 2.1に示す。本試験体は、並列した3集合体（61ピンバンドル1体、19ピンバンドル2体）と側壁冷却流路、上部プレナム、および下部プレナムから各集合体へナトリウムを分配する連絡配管により構成されている。

発熱部上端部および中央断面における温度分布の解析結果を、試験結果と比較してFig. 2.2に示す。発熱部上端部の温度分布については、ミキシング係数を用いない既往モデルの方が、実験との一致が良好である。しかしながら、61ピン集合体内最高温度と冷却流路内温度との差に着目すると、ミキシング係数有りのモデルの方が良く一致している。発熱部中央断面では、ミキシング係数を用いたモデルが、より実験との良好な一致を示している。発熱部上部ではミキシング効果をやや過大に評価する傾向があるが、ミキシング係数モデルを導入することにより、温度分布に対する解析精度の向上が図られた。

ミキシング係数モデルの有無による速度分布の違いをFig. 2.3に示す。流速分布は、ミキシング係数を使用したモデルでは若干一様化しているが、速度分布に対してはモデルの有無による差は小さい。

② 169ピン部分発熱集合体 [24]

試験体は、Fig. 2.4に示すように、ワイヤー巻き模擬燃料ピン169本からなっており、ヒーターピン12本、熱電対装着ピン55本、ダミーピン102本で構成されている。ヒーターピンは12本設置されているが、電源設備の制約から、一度に加熱できるピン本数は7本までである。

代表的な解析結果を、試験結果と比較してFig. 2.5に示す。温度分布は、Fig. 2.4に示すトラバースラインに沿ったものである。Fig. 2.5から分かるように、ミキシング係数モデルを導入した解析結果が試験結果を良く再現しており、ミキシング係数モデルを適用しない場合に生じていた径方向温度勾配の過大評価が解消され、集合体内の平均レイノルズ数が2,500～55,000の広範囲にわたって試験結果を良く再現できることが確認できた。

3. 解析体系

第2章で示した解析手法を用い、大型炉の設計で検討されている集合体について評価を行う。解析対象は、Table 3.1に示す217本ピン燃料集合体で、ピン径が8.5mm、ラッパー管内対面距離が144.5mm、発熱部長さが1.0mの上下にブランケットと非発熱部を含む全長2.4mの体系である。

(1) メッシュ分割図

メッシュ分割図を、Fig. 3.1、およびFig. 3.2に示す。本解析では、集合体の形状および境界条件の対称性から、伝熱流動場の対称性を仮定し、1/2水平断面を解析領域としたモデルを適用した。

(2) 軸方向出力分布

集合体の軸方向出力分布は、Fig. 3.3に示すような平衡炉心末期の分布とした。

(3) ラッパー管外表面の伝熱面積

ラッパー管外表面からの除熱を模擬するためFig. 3.2に示す表面①,②,④に負の熱流束を与えることにした。このとき、ラッパー管外表面の伝熱面積をメッシュの形状に従って求めると、伝熱面積が実際より大きくなり、除熱量が大きくなる。このため、次のようにして算出した α を、表面④の面積に掛けて、解析の伝熱面積が実際の伝熱面積になるように調整した。

$$\frac{0.0844375 \times 3}{\text{(実際の表面長さ)}} = \frac{0.0844375}{\text{(表面①の長さ)}} + \frac{0.0844375}{\text{(表面②の長さ)}} + \frac{0.1445}{\text{(表面④の長さ)}} \times \alpha$$

$$\alpha = 0.5843425$$

・ X=1,18の表面積

$$\frac{0.005394 \times 2.4}{36} \times \alpha = 0.00021013 \text{ (m^2)}$$

(自動計算の表面積)

・ X=2～17の表面積

$$\frac{0.008357 \times 2.4}{36} \times \alpha = 0.00032556 \text{ (m^2)}$$

(自動計算の表面積)

以上 の方法で求めた表面積を用い、インプットデータを、Fig. 3.4とした。また、外表面からの除熱は、Fig. 3.5に示すように、熱流束境界を用いて設定した。

4. 解析条件

自然循環時の熱流動条件を対象に、AQUAコードのVER.7.2 [26] を用いて定常解析を実施した。解析条件は、発熱量が、7.43, 14.85, 29.71 kW/m² (発熱部1.0mの平均熱流束) の条件に対して、それぞれ、ラッパー管外面熱流束 (除熱量)、入口流速を、パラメトリックに変えて解析した。14.85 kW/m²が定格出力の1.5%で、0.1 m/sが定格流量の2%に相当する。また、今回の解析では、ラッパー管の外表面が一様に除熱されると仮定して、全外表面 (Z=1～36) に負の熱流束を与えた。実際の現象では、集合体の上半分における除熱が主体となることが考えられる。このため、集合体の上半分 (Z=19～36) のみの除熱を想定した解析も実施した。

解析条件一覧表を、Table 4.1に示す。なお、発熱量が大きくて入口流速が小さい条件では、Na温度が800°Cを越えた。また、発熱量は小さくて除熱量が大きい条件では、Na温度が入口温度 (450°C) 以下、あるいは入口温度に近い温度となり、不自然な解析結果になった。このため、これらの条件は、一覧表から除外した。

解析に使用した主なモデルは次の通りである。

- ・乱流モデル : 使用しない (ITURKE = 0)
- ・運動量計算 : 完全陰解法 (ISYMCH = 3)
- ・エネルギー計算 : 完全陰解法 (IFITEN = 3)
- ・運動量対流項 : 1次風上差分法 (IFMMO = 1)
- ・エネルギー式対流項 : 1次風上差分法 (IFMEN = 1)

5. 解析結果

解析結果については、温度分布や流速分布の他、水平断面内の温度分布を示すピーキングファクター (P_f)、後述する壁サブチャンネルファクター (W_f) を、壁面熱流束比 (q''_{wall}/q''_{pin})、浮力パラメータ (Gr^*/Re) 等の無次元量で整理した。無次元量や各パラメータの定義を Table 5.1に示す。解析結果を整理するに際して着目した断面は、集合体発熱部上端 ($Z=26$ の高さ) の、 $X=10$ で、 $Y=1\sim18$ のノード (Fig. 3.1参照) である。浮力パラメータを算出する場合の形状データは、Table 5.1 に示すように、集合体の発熱長については上下ブランケットを除いた1.0mとし、入口温度および物性値は450°Cの値に固定して算出した。

5. 1 集合体内の温度分布、速度分布

集合体内の熱流動状態を、温度分布と速度分布で整理した結果を、Fig. 5.1.1～Fig. 5.1.15 に示す。

(1) 除熱がない場合

(発熱量の影響)

ラッパー管外表面からの除熱がない場合の温度分布を発熱量の違いで見てみると、Fig. 5.1.1に示すように、集合体中心部と外周部との温度差は小さい。規格化温度で見てみると、Fig. 5.1.2に示すように、発熱量が大きいほど平坦になっている。また、発熱部上端での流速分布を見てみると、Fig. 5.1.3に示すように、外周部では、各発熱量とも、ほぼ同じ流速になっているが、入口流速が等しいにもかかわらず、発熱量が大きいほど流速がやや大きくなっている。これは、発熱量が大きいほど流体温度が高く、流体が体積膨張していること、並びに浮力により中心部の高温領域の流速が増加しているためである。この流速分布の変化が、先の規格化温度分布において発熱量の大きいケースほど平坦となった原因である。

(入口流速の影響)

ラッパー管外表面からの除熱がない場合の温度分布を入口流速の違いで見てみると、Fig. 5.1.4に示すように、流速が大きい条件では集合体中心部と外周部との温度差が大きく、流速が小さい条件では温度分布が平坦になっている。規格化温度で見てみると、Fig. 5.1.5に示すように、温度分布が流速に顕著に依存していることが分かる。また、流速分布については、Fig. 5.1.6に示すように、流速が大きいほど、壁サブチャンネルの流速が大きくなっている。これは、壁サブチャンネルの流動抵抗係数が集合体中心部より小さいため、流量が大きい条件では、浮力による中央部への流量再配分の効果が相対的に小さくなり、壁サブチャンネルに多くの流量が配分されることによる。

(2) 除熱がある場合

(除熱量の影響)

ラッパー管外表面からの除熱がある場合の温度分布を除熱量の違いで見てみると、Fig. 5.1.7に示すように、除熱量が大きい条件では、外壁側の温度低下が大きく、分布が急峻になっている。また、ラッパー管外表面からの除熱により、ピーク温度も低くなっている。規格化温度で見ると、Fig. 5.1.8に示すように、その傾向が顕著に現れている。また、流速分布は、Fig. 5.1.9に示すように、除熱量が小さい条件では平坦であるが、除熱量が大きい条件では、外周での温度低下に伴う負の浮力により、中心と外周の差が大きくなっている。

(発熱量の影響)

ラッパー管外表面からの除熱がある場合の温度分布を発熱量の違いで見てみると、Fig. 5.1.10に示すように、発熱量の違いによって、集合体中心部と外周部との温度差はほとんど変わらないが、規格化温度で見てみると、Fig. 5.1.11に示すように、発熱量が大きい条件では相対的に除熱量が小さくなる結果として、平坦になっている。また、流速分布を見てみると、Fig. 5.1.12に示すように、外周部では、各発熱量とも、ほぼ等しい流速となっている。除熱がない条件であるFig. 5.1.3と比較すると、発熱量の小さいケースで外周の流速が負の浮力により低下していることがわかる。

(入口流速の影響)

温度分布を入口流速の違いで見てみると、Fig. 5.1.13に示すように、流速が大きい条件では集合体中心部と外周部との温度差が大きく、流速が小さい条件では温度分布が平坦になっている。規格化温度で見てみると、Fig. 5.1.14に示すように、温度分布が流速に顕著に依存していることが分かる。除熱がない条件であるFig. 5.1.5と比較すると、特に高流速条件で分布がより急峻となっている。また、流速分布を見てみると、Fig. 5.1.15に示すように、流速が大きいほど、流動抵抗が小さい壁サブチャンネル側に多くの流量が配分されているのが分かる。これらの傾向は、Fig. 5.1.4～Fig. 5.1.6に示した除熱がない場合と基本的に同じであるが、温度分布、速度分布とともに、ラッパー管外表面からの除熱によって、集合体中心部と外周部との差が大きくなっている。

5. 2 集合体内最高温度の低下

集合体側面からの冷却によって集合体内最高温度が低下することを示すために、下記の無次元数 (T_p^*) を用いて整理した。

$$T_p^* = (T_p - T_{in}) / (\Delta T)$$

ここで、

T_p = 集合体内最高温度

T_{in} = 集合体入口温度

$\Delta T = Q / (\rho \cdot C_p \cdot M)$

Q = 集合体発熱量

ρ = 密度

C_p = 定圧比熱

M = 体積流量

無次元化した最高温度 (T_p^*) の壁面熱流束比 ($q''_{wall/pin}$) 依存性を、入口流速 (V_{in}) の違いで整理してFig. 5.2.1～Fig. 5.2.3に示す。それぞれ、集合体の発熱量 (q''_{pin}) が、7.43, 14.85, 29.71 kW/m³の条件である。各図で入口流量が大きいケースほど T_p^* が大きい理由は、前節で示したように、集合体内の流量配分にある。

次に、壁面熱流束比依存性について集合体内の浮力の強さを表す浮力パラメータ (Gr^*/Re) の違いで整理してみる。浮力パラメータは、Table 5.1に定義を示す Gr^* 数と Re 数の比 (Gr^*/Re) である。無次元化した最高温度の壁面熱流束比依存性は、Fig. 5.2.4に示すように、データが近似線上によく乗っており、浮力パラメータを用いてよく整理できることが分かる。

5. 3 ピーキングファクター

集合体内の径方向温度分布として、最高温度と断面平均温度の比であるピーキングファクター (P_f) で整理した結果を、Fig. 5.3.1～Fig. 5.3.9に示す。

(1) 浮力パラメータ依存性

浮力パラメータ (Gr^*/Re) を用いて、出力／流量条件による温度分布への影響を整理する。流量が小さく、温度差（出力）が大きいと、浮力パラメータは大きくなり、浮力が支配的な条件となる。

(除熱がない場合)

ラッパー管外表面から除熱がない場合のピーキングファクターの浮力パラメータ依存性を見てみると、Fig. 5.3.1に示すように、ピーキングファクターは、浮力パラメータが小さい条件では大きく、大きい条件では小さい傾向になっている。除熱がない場合のピーキングファクターは発熱量の影響が少なく、浮力パラメータで整理すれば、発熱量によらず整理できることがわかる。

(除熱がある場合)

ラッパー管外表面から除熱がある場合のピーキングファクターの浮力パラメータ依存性を、除熱量の違いで見てみると、Fig. 5.3.2に示すように、ピーキングファクターは、除熱量が大きい条件では大きくなっている。浮力パラメータが小さい条件では除熱量の影響が大きいが、浮力パラメータが大きくなると、ピーキングファクターは1.0に近づいて、除熱量の影響が小さくなっている。また、除熱がある場合の発熱量の影響を見てみると、Fig. 5.3.3に示すように、除熱量が5kW/m³の条件では、発熱量の違いによって顕著な差が認められないが、除熱量が10kW/m³の条件では、Fig. 5.3.4に示すように、発熱量が小さいほどピーキングファクターが大きくなっている。

ラッパー管壁での除熱量が集合体内温度分布に及ぼす影響を壁面熱流束比、すなわち、

ビン表面熱流束に対するラッパー管壁面熱流束の比で整理することを試みた。ピーキングファクターの浮力パラメータ依存性を、壁面熱流束比の違いで見てみると、入口流速 $V_{in}=0.1\text{m/s}$ の条件では、Fig. 5.3.5に示すように、ピーキングファクターは、壁面熱流束比が大きい条件では大きくなっている。このような出力、流量依存性を浮力パラメータで整理する上で、壁面熱流束比によりデータを分類した結果をFig. 5.3.6に示す。グラフより、壁面熱流束比が同程度であれば、ピーキングファクターが浮力パラメータで整理できること、並びに、ピーキングファクターは壁面熱流束比が大きいほど大きくなることが分かる。

(2) 壁面熱流束比依存性

(発熱量の影響)

ピーキングファクターの壁面熱流束比依存性を、発熱量の違いで見てみると、Fig. 5.3.7に示すように、ピーキングファクターは、壁面熱流束比が大きく、発熱量が小さい条件では大きい。また、壁面熱流束比が小さく、発熱量が大きい条件では小さくなっている。

(入口流速の影響)

ピーキングファクターの壁面熱流束比依存性を、入口流速の違いで見てみると、Fig. 5.3.8に示すように、ピーキングファクターは、壁面熱流束比が大きく、入口流速が大きい条件では大きい。また、壁面熱流束比が小さく、入口流速が小さい条件では小さくなっている。

(壁面熱流束比による分類)

ピーキングファクターの壁面熱流束比依存性を、浮力パラメータの大中小でグルーピングして整理することを試みた。その結果を、Fig. 5.3.9に示す。ピーキングファクターは浮力パラメータが小さいほど大きく、大きいほど小さくなっている。同一グループのデータを仔細に見れば、ピーキングファクターは発熱量が大きいほど大きい傾向が見られるが、発熱量や入口流速の影響は相対的に小さく、近い値の浮力パラメータでまとめれば、壁面熱流束比で整理できることが分かる。

5. 4 壁サブチャンネルファクター

集合体外からの除熱による温度分布の変化、特に外周部の温度低下を評価するために、壁サブチャンネルファクター (w_f) で整理して、Fig. 5.4.1～Fig. 5.4.9に示す。壁サブチャンネルファクターは、(壁サブチャンネル温度－入口温度) と (断面平均温度－入口温度) の比で定義された無次元量である。

(1) 浮力パラメータ依存性

(除熱がない場合)

ラッパー管外表面から除熱がない場合の壁サブチャンネルファクターの浮力パラメータ依存性を見てみると、Fig. 5.4.1に示すように、壁サブチャンネルファクターは、浮力パラメータが小さい条件では小さく、大きい条件では大きい傾向になっている。ラッパー管外表面からの除熱がない場合の壁サブチャンネルファクターは、発熱量の違いによって大きな差はない。しかし、Fig. 5.3.1で示したピーキングファクターと比べて、発熱量による差が認められる。

(除熱がある場合)

ラッパー管外表面から除熱がある場合の壁サブチャンネルファクターの浮力パラメータ依存性を、除熱量の違いで見てみると、Fig. 5.4.2に示すように、壁サブチャンネルファクターは、除熱量が大きい条件では小さくなっている。浮力パラメータが小さいほど除熱量の影響が大きいが、浮力パラメータが大きくなると、壁サブチャンネルファクターは1.0に近づいて、除熱量の影響が小さくなっている。また、除熱がある場合の発熱量の影響を見てみると、Fig. 5.4.3に示すように、除熱量が 5kW/m^3 の条件では、発熱量の違いによって顕著な差が認められないが、除熱量が 10kW/m^3 の条件では、Fig. 5.4.4に示すように、発熱量が小さいほど壁サブチャンネルファクターが小さくなっている。

壁サブチャンネルファクターの浮力パラメータ依存性を、壁面熱流束比の違いで見てみると、入口流速 $V_{in}=0.1\text{m/s}$ の条件では、Fig. 5.4.5に示すように、壁サブチャンネルファクターは、壁面熱流束比が大きいほど小さくなっている。このような出力、流量依存性を浮力パラメータで整理する上で、壁面熱流束比によりデータを分類した結果をFig. 5.4.6に示す。グラフより、壁面熱流束比が同程度であれば、壁サブチャンネルファクターが浮力パラメータで整理できること、並びに壁サブチャンネルファクターは壁面熱流束比が大きいほど小さくなることが分かる。

(2) 壁面熱流束比依存性

(発熱量の影響)

壁サブチャンネルファクターの壁面熱流束比依存性を、発熱量の違いで見てみると、Fig. 5.4.7に示すように、壁サブチャンネルファクターは、壁面熱流束比が大きく、発熱量が小さい条件では小さい。また、壁面熱流束比が小さく、発熱量が大きい条件では大きくなっている。

(入口流速の影響)

壁サブチャンネルファクターの壁面熱流束比依存性を、入口流速の違いで見てみると、Fig. 5.4.8に示すように、壁サブチャンネルファクターは、壁面熱流束比が大きく、入口流速が大きい条件では小さい。また、壁面熱流束比が小さく、入口流速が小さい条件では大きくなっている。

(壁面熱流束比による分類)

壁サブチャンネルファクターの壁面熱流束比依存性を、ピーキングファクターと同様に、

浮力パラメータの大中小でグルーピングして整理した。その結果を、Fig. 5.4.9に示す。壁サブチャンネルファクターは浮力パラメータが小さいほど小さく、大きいほど大きくなっている。同一グループのデータを仔細に見れば、壁サブチャンネルファクターは発熱量が大きいほど小さい傾向が見られるが、発熱量や入口流速の影響は相対的に小さく、近い値の浮力パラメータでまとめれば、壁面熱流束比で整理できることが分かる。

6. 評価・検討

6. 1 試験結果との比較

今回の解析結果を、下記の条件の試験結果 [27, 28] と比較した。

ピン本数	3 7 本
ピン外径	8. 3 mm
ピン熱流束	1 9 ~ 3 8 kW/m ²
熱出力	1 8 ~ 3 7 kW
バンドル部平均流束	0. 0 5 ~ 0. 3 m/s
入口Na温度	3 0 0 °C

(1) 除熱がない条件

ラッパー管外表面から除熱がない場合の試験結果と解析結果を比較して、Fig. 6.1.1およびFig. 6.1.2に示す。

ピーキングファクターの浮力パラメータ依存性は、Fig. 6.1.1に示すように、浮力パラメータが小さい条件、すなわち慣性力が大きい条件では、217本ピンの大型バンドルのピーキングファクターは、37本ピンバンドルの値より大きくなっていてピンバンドルの大きさの違いが現れている。浮力パラメータが大きい条件、すなわち浮力による集合体内流量再配分の効果が大きい条件では、217本ピンの大型バンドルは、37本ピンバンドルと比較して差がなくなって、ピーキングファクターが1.0に近づく。

一方、壁サブチャンネルファクターは、Fig. 6.1.2に示すように、217本ピンの大型バンドルは、37本ピンバンドルより小さくなっているが、ピーキングファクターと同様に、浮力パラメータが大きい条件では、1.0に近づいて両者とも差がなくなる。

(2) 除熱がある条件

ラッパー管外表面から除熱がある場合の試験結果と解析結果を比較して、Fig. 6.1.3およびFig. 6.1.4に示す。試験結果は、壁面熱流束比が1.3~2.4であるのに対して、解析結果の壁面熱流束比は、1.437である。

除熱がある場合には、ラッパー管外壁から冷却されるため、径方向の温度分布が大きくなり、ピーキングファクターは除熱がない場合より大きく、217本ピンの大型バンドルのピーキングファクターは、37本ピンバンドルより大きい。浮力パラメータが大きな条件では、ピーキングファクターは、1.0に漸近して、ピンバンドルの大きさによる違いがなくなっている。また、壁サブチャンネルファクターは、除熱がある場合には外壁側の温度が低下するため、除熱がない場合に比べて小さく、217本ピンの大型バンドルは、37本ピンバンドルより、さらに小さい。これらの全体的な傾向は、除熱がない条件と同様である。

以上のように、ピーキングファクターおよび壁サブチャンネルファクターとともに、浮力パラメータが小さい条件において、ピンバンドルの大きさの違いが現れている。特に、ピーキングファクターより壁サブチャンネルファクターの方が、ピンバンドルの大きさの影響が顕著である。

6. 2 除熱条件の影響

これまでの解析では、除熱の条件をラッパー管の全外表面から一様に除熱されると仮定しているが、インターラッパーフローによる冷却では、低温ナトリウムは炉心の上方にある上部プレナムから供給されるため、集合体の上半分での除熱が主体となると考えられる。このため、集合体の上半分 ($Z=19\sim36$) のみの除熱を想定して解析した。

集合体の全外表面から 10 kW/m^2 の熱流束で除熱するとした解析結果と、集合体の上半分から 10 kW/m^2 の熱流束で除熱される条件の解析結果とを比較して Fig. 6.2.1 に示す。図に示すように、集合体の上半分からのみ除熱するとした場合の方が温度が高くなっているが、全表面からの除熱と比較して、断面全体がほぼ同じ温度幅で高くなっている。中心部の最高温度が 9°C だけ高くなるにとどまっている。規格化温度で比較してみると、Fig. 6.2.2 に示すように、全外表面から 10 kW/m^2 の熱流束で除熱した場合より、集合体の上半分から 10 kW/m^2 の熱流束で除熱した場合の方が、分布がやや平坦になっている。

次に、ピーキングファクターおよび壁サブチャンネルファクターを浮力パラメータ、壁面熱流束比で整理した結果を、両者で比較した。上半分からのみ除熱するとした場合の壁面熱流束については発熱長 1 m の平均とした。ピーキングファクターの浮力パラメータ依存性は、Fig. 6.2.3 に示すように、集合体の上半分からのみ除熱するとした場合は、全面から除熱される壁面熱流束比 ($q''_{\text{wall/pin}} = 0.673$) と比較して壁面熱流束比が $1/2$ となり、壁面熱流束比が 0.337 の近似線と良く一致している。ピーキングファクターの熱流束比依存性を浮力パラメータの違いで整理してみると、Fig. 6.2.4 に示すように、集合体の上半分からの除熱であっても、全外表面から除熱した条件と同一グループの中に入っている。ピーキングファクター同様に、平均の熱流束を用いて整理できることが分かる。

壁サブチャンネルファクターの浮力パラメータ依存性は、Fig. 6.2.5 に示すように、集合体の上半分から除熱した条件は、ピーキングファクターと同様に壁面熱流束比が 0.337 の近似線に一致している。壁サブチャンネルファクターの熱流束比依存性は、Fig. 6.2.6 に示すように、集合体の上半分からの除熱であっても、全外表面から除熱した条件と同一グループの中に入っている。ピーキングファクター同様に、平均の熱流束を用いて整理できることが分かる。

また、無次元化した最高温度 T_p^* の壁面熱流束比依存性を、浮力パラメータで整理した結果について Fig. 6.2.7 に示す。図から分かるように、集合体の上半分から除熱した場合のデータが、グループ分けされたデータの範囲から逸脱せずプロットされており、集合体の上半分の除熱であっても壁面熱流束比で整理できることが分かる。

7. まとめ

実機規模の大型燃料集合体について、インターラッパーフローあるいは集合体間熱移行によって冷却される場合の熱流動現象を予測評価するために、自然循環に相当する条件にて解析を行った。対象は217本ピン束の炉心燃料集合体で、汎用3次元熱流動解析コードAQUAを用いて解析した。解析手法は、3本の燃料ピンに囲まれたサブチャンネルに1つのコントロールボリュームを割り当てるスタガートハーフピンメッシュ分割とサブチャンネル解析コード用に開発された軸方向流動抵抗相関式を組み合わせたもので、これまでに側面から冷却される条件を含め、37, 61, 169ピン束集合体の実験データにより検証してきている。予測解析の結果、次の知見を得た。

- (1) 大型燃料集合体であっても、ラッパー管壁を通して側面から冷却されれば、集合体内の最高温度は低下する。低下の傾向は、出力／流量条件の影響を含めて、浮力パラメータ Gr^*/Re と壁面熱流束比 $q''_{wall/pin}$ を用いて整理できる。
- (2) 集合体内の水平方向温度分布は、集合体の出力／流量条件、側面からの除熱量に依存して変化する。断面平均温度に対する最高温度の比であるピーキングファクターについて、集合体内の浮力の強さを示す浮力パラメータ Gr^*/Re を用いることで、出力、流量依存性を整理して評価できる。一方、ラッパー管壁近傍の温度については、浮力パラメータでグルーピングすることにより、断面平均温度に対する壁近傍温度の比である壁サブチャンネルファクターと壁面熱流束比で整理できる。
- (3) これまでの実験結果との比較では、217本ピンの大型バンドルは37本ピンバンドルより、ピーキングファクターは大きく、壁サブチャンネルファクターは小さいことが分かった。
- (4) 壁面からの除熱が軸方向に一様でなく、軸長の上半分のみが冷却される条件について検討した結果、ピーキングファクターおよび壁サブチャンネルファクターについて、平均の熱流束を用いて整理できることが分かった。また、無次元化した最高温度 T_p^* の壁面熱流束比依存性については、集合体の上半分の除熱であっても壁面熱流束比で整理できる。

謝 辞

本研究の実施にあたり、計算モデルやインプットデータの作成について、（株）エヌデーターの三宅康洋氏に多大なるご協力を頂きました。ここに改めて感謝の意を表します。

参考文献

- [1] M. Ueta, T. Inagaki, et al., "The Development of Demonstration Fast Breeder Reactor(DFBR)," Proc. 3rd JSME/ASME Joint Int. Conf. on Nucl. Eng., Kyoto, Japan, April 23-27, 1995, Vol.2, pp.771-776, Japan Society of Mech. Eng. (1995).
- [2] D. Weinberg, K. Rust, H. Hoffmann, H. Hayafune, and K. Hain, "Transient NEPTUN Experiments on Passive Decay Heat Removal," Proc. 3rd JSME/ASME Joint Int. Conf. on Nucl. Eng., Kyoto, Japan, April 23-27, 1995, Vol.1, pp.519-524, Japan Society of Mech. Eng. (1995).
- [3] D. Weinberg, H. Hoffmann, K. Rust, H.H. Frey, K. Hain, W. Leiling, and H. Hayafune, "Summary Report of NEPTUN Investigations into the Transient Thermal Hydraulics of the Passive Decay Heat Removal," FZK report FZKA 5666, Forshungszentrum Karlsruhe, Germany (1995).
- [4] H. Kamide, K. Hayashi, et al., "Investigation of Inter-wrapper Flow in Fast Reactors During Natural Circulation Decay Heat Removal -Seven-subassembly Sodium Experiments-," Proc. Int. Mtg. on Advanced Reactors Safety (ARS '97), Orlando, Florida, June 1-5, p.1141 (1997)
- [5] H. Kamide, K. Hayashi, et al., "Experimental Study of Core Thermohydraulics in Fast Reactors during Transition from Forced to Natural Circulation - Influence of Inter-Wrapper Flow," Proc. 8th Int. Top. Mtg. on Nuclear Reactor Thermo-Hydraulics (NURETH-8), Kyoto, Japan, Sep. 30-Oct. 4, Vol.2 p.922 (1997)
- [6] M. NISHIMURA, H. OHSHIMA, et al., "The Status of Studies on Fast Reactor Core Thermal-hydraulics at PNC", Proc. of IAEA IWGFR Technical Committee Meeting on Method and Codes for Calculations of Thermohydraulic Parameters for Fuel, Absorber Pins and Assemblies of LMFRs with Traditional and Burner Cores, Obninsk Russia (1998)
- [7] H. Kamide, N. Kimura, et al., "Experimental Study on Inter-wrapper flow during Natural Circulation in Fast Reactors - Influence on Natural Circulation Flow and Core Temperatures-," Proc. 6th Int. Conf. on Nuclear Engineering (ICON-6), San Diego, California, May 10-14, ICON-6197 (1998).
- [8] M. Nishimura, H. Kamide, et al., "Transient experiments in fast reactor core thermal-hydraulics and its numerical analysis - Inter-subassembly heat transfer and inter-wrapper flow under natural circulation conditions -," Journal of Nuclear Engineering and Design, Vol.200, pp.157-175 (2000).
- [9] H. Kamide, K. Hayashi, et al., "Investigation of core thermohydraulics in fast reactors, interwrapper flow during natural circulation," Journal of Nuclear Technology, Vol.133 pp.77-91 (2001).
- [10] 桃井一光他、「Na過渡試験による自然循環時の炉心部熱流動現象に関する研究」, 日本原子力学会 1997 年春の年会, (1997)
- [11] 木村暢之、西村元彦他、「高速炉の自然循環崩壊熱除去時の炉内熱流動現象に関する研究—1次元ネットワークコードによる解析手法の検討—」、原子力学会 1997 年秋の大会 (1997)
- [12] 上出英樹、林謙二他、「高速炉の自然循環除熱特性に関する研究—インターラッパーフローが炉心の温度・流量へ及ぼす影響—」、原子力学会 1998 年春の年会 (1998)

- [13] 桃井一光他、「高速炉の自然循環崩壊熱除去時のシステム間相互作用に関する試験研究－炉心および主冷却系の過渡熱流動現象の解明－」、PNC TN9410 96-280 (1996)
- [14] 林謙二、上出英樹他、「高速炉の自然循環崩壊熱除去時の冷却系統間相互作用に関する研究－崩壊熱除去方式及び2次主冷却系自然循環の影響－」、PNC TN9410 97-045 (1997)
- [15] 木村暢之、西村元彦他、「高速炉の自然循環崩壊熱除去時の冷却系統間相互作用に関する研究－1次元ネットワークコードを用いた解析手法の検討－」、PNC TN9410 97-046 (1997)
- [16] 桃井一光、林謙二他、「高速炉の自然循環時のインターラッパーフロー現象に関する実験研究－炉心冷却効果と自然循環流量低減効果の評価－」、PNC TN9410 97-047 (1997)
- [17] H. Kamide, K. Hayashi, et al., "An experimental study of inter-subassembly heat transfer during natural circulation decay heat removal in fast reactors," Journal of Nuclear Engineering and Design, Vol.183, pp.97-106 (1998).
- [18] M. Nishimura and H. Kamide, et al., "Inter-subassembly Heat Transfer during Natural Circulation Decay Heat Removal - Experimental Transient Behavior from Forced to Natural Circulation and its Multi-dimensional Analysis with Mixing Model -," Proc. 8th Int. Top. Mtg. on Nuclear Reactor Thermo-Hydraulics (NURETH-8), Kyoto, Japan, Sep. 30-Oct. 4, Vol.2 p.903 (1997).
- [19] M. NISHIMURA, H. OHSHIMA and H. KAMIDE, "Fast Reactor Core Thermal-hydraulic Analyses during Transition from Forced to Natural Circulation," Proc. of IAEA IWGFR Technical Committee Meeting on Method and Codes for Calculations of Thermohydraulic Parameters for Fuel, Absorber Pins and Assemblies of LMFRs with Traditional and Burner Cores, Obninsk Russia (1998)
- [20] 西村元彦他、「ミキシング係数導入による多次元解析の高度化 - 過渡時の高速炉燃料集合体間熱移行現象への適用 -」、日本原子力学会 1997 年春の年会 (1997)
- [21] 西村元彦、上出英樹、「ミキシング係数導入による多次元解析の高度化-高速炉 169 ピン束燃料集合体ナトリウム実験による検証-」、日本原子力学会 1997 年秋の大会 (1997)
- [22] 上出英樹他、「高速炉の自然循環時集合体間熱移行現象に関する解析手法の開発 - CCTL および PLANDTL 試験に基づく検証」, PNC TN9410 96-268 (1996)
- [23] 西村元彦他、「高速炉燃料集合体内非定常多次元熱流動解析へのミキシング係数モデルの適用」, PNC TN9410 96-289 (1996)
- [24] 西村元彦、上出英樹、「高速炉燃料集合体多次元熱流動解析へのミキシング係数の適用 -169 ピン集合体定常ナトリウム試験による検証-」, PNC TN9410 97-044 (1997)
- [25] 西村元彦、上出英樹、「多次元解析へのミキシング係数モデル導入による燃料集合体内熱流動評価精度の向上 - I. 定常解析 - 」, PNC ZN9410 95-285 (1995)
- [26] 村松壽晴、「単相多次元熱流動解析コード AQUA 乱流モデル利用手引書」, PNC TN9460 94-003 (1994)
- [27] 林謙二、上出英樹他、「自然循環崩壊熱除去時の炉心部熱流動現象の解明 - 7 本集合体による集合体間熱移行定常試験 -」, PNC ZN9410 94-264 (1994)
- [28] 林謙二、上出英樹他、「自然循環崩壊熱除去時の炉心部熱流動現象の解明 - 集合体内の浮力パラメータ効果試験 -」, PNC ZN9410 96-217 (1996)

Table 3.1 217本燃料集合体の形状

1. 水平断面データ

ピン本数	:	217	本
燃料ピン径	:	8.5	mm
燃料ピン配列ピッチ	:	9.65	mm
ラッパー管内対面距離	:	144.5	mm
ワイヤ外径	:	1.1	mm
ワイヤ巻きピッチ	:	200	mm
ラッパー管板厚	:	3.9	mm

2. 軸方向データ

炉心長さ (発熱部)	:	1000	mm
軸ブランケット長さ (上部)	:	350	mm
(下部)	:	350	mm

Table 4.1 解析条件一覧表

ピン表面熱流束 $q''_{pin}=7.43\text{kW/m}^2$			ピン表面熱流束 $q''_{pin}=14.85\text{kW/m}^2$			ピン表面熱流束 $q''_{pin}=29.71\text{kW/m}^2$		
入口流速 $V_{in}(\text{m/s})$	壁面熱流束 $q''_{wall}(\text{kW/m}^2)$	壁面熱流束比 $q''_{wall}/q''_{pin}(-)$	入口流速 $V_{in}(\text{m/s})$	壁面熱流束 $q''_{wall}(\text{kW/m}^2)$	壁面熱流束比 $q''_{wall}/q''_{pin}(-)$	入口流速 $V_{in}(\text{m/s})$	壁面熱流束 $q''_{wall}(\text{kW/m}^2)$	壁面熱流束比 $q''_{wall}/q''_{pin}(-)$
0.2	0	0	0.2	0	0	0.2	0	0
	-5	0.67		-5	0.34		-5	0.17
	-10	1.35		-10	0.67		-10	0.34
				-20	1.35		-20	0.67
0.15	0	0	0.15	0	0	0.15	0	0
	-5	0.67		-5	0.34		-5	0.17
	-10	1.35		-10	0.67		-10	0.34
				-20	1.35		-20	0.67
0.1	0	0	0.1	0	0	0.1	0	0
	-5	0.67		-5	0.34		-5	0.17
	-10	1.35		-10	0.67		-10	0.34
				-20	1.35		-20	0.67
0.075	0	0	0.075	0	0	0.075		
	-5	0.67		-5	0.34			
	-10	1.35		-10	0.67			
0.05	0	0	0.05	0	0	0.05		
	-5	0.67		-5	0.34			
	-10	1.35		-10	0.67			

Table 5. 1 無次元量の算出

$$1. \text{ ピーキングファクター } P_f = (T_p - T_{in}) / (T_{ave} - T_{in})$$

$$\text{壁サブチャンネルファクター } W_f = (T_w - T_{in}) / (T_{ave} - T_{in})$$

最高温度 T_p = 評価断面の最高温度 °C

壁サブチャンネル温度 T_w = 評価断面の壁サブチャンネル温度 °C

集合体入口温度 T_{in} = 450 °C

平均温度 T_{ave} = 評価断面の平均温度 °C

$$2. \text{ 壁面熱流束比 } q''_{wall/pin} = q''_{wall} / q''_{pin}$$

壁面熱流束（除熱量） $q''_{wall} = 0.0, -5.0, -10.0, -20.0 \text{ kW/m}^2$

ピン表面熱流束（発熱量） $q''_{pin} = 7.43, 14.85, 29.71 \text{ kW/m}^2$
(発熱長1.0m の平均値)

$$3. \text{ レイノルズ数 } Re = v \cdot D_h / \nu$$

入口流速 $v = 0.05, 0.075, 0.1, 0.15, 0.2 \text{ m/sec}$

水力等価直径 $D_h = 3.15339 \times 10^{-3} \text{ m}$

動粘性係数 $\nu = 3.13 \times 10^{-7} \text{ m}^2/\text{sec}$ (450°C の値)

$$4. \text{ 修正グラスホフ数 } Gr^* = (g \cdot \beta \cdot \Delta T^A \cdot L^A) / (\nu^2 / D_h^2)$$

重力加速度 $g = 9.8 \text{ m/sec}^2$

膨張係数 $\beta = 2.85 \times 10^{-4} \text{ 1/°C}$ (450°C の値)

評価断面Aまでの代表温度差 $\Delta T^A = T_{ave} - 450 \text{ °C}$

平均温度 T_{ave} = 評価断面Aの平均温度 °C

発熱長 L^A = 評価断面Aまでの長さ m

動粘性係数 $\nu = 3.13 \times 10^{-7} \text{ m}^2/\text{sec}$ (450°C の値)

水力等価直径 $D_h = 3.15339 \times 10^{-3} \text{ m}$

$$5. \text{ 浮力パラメータ } Gr^*/Re$$

connected to Air Cooler

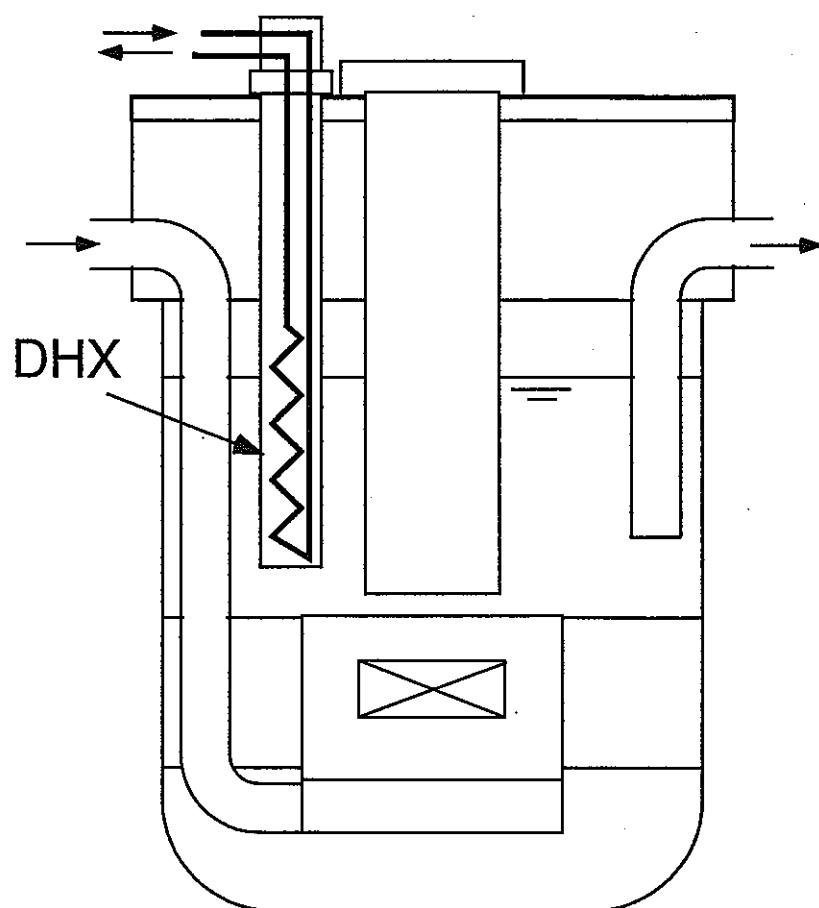


Fig. 1.1 直接炉心辅助冷却系

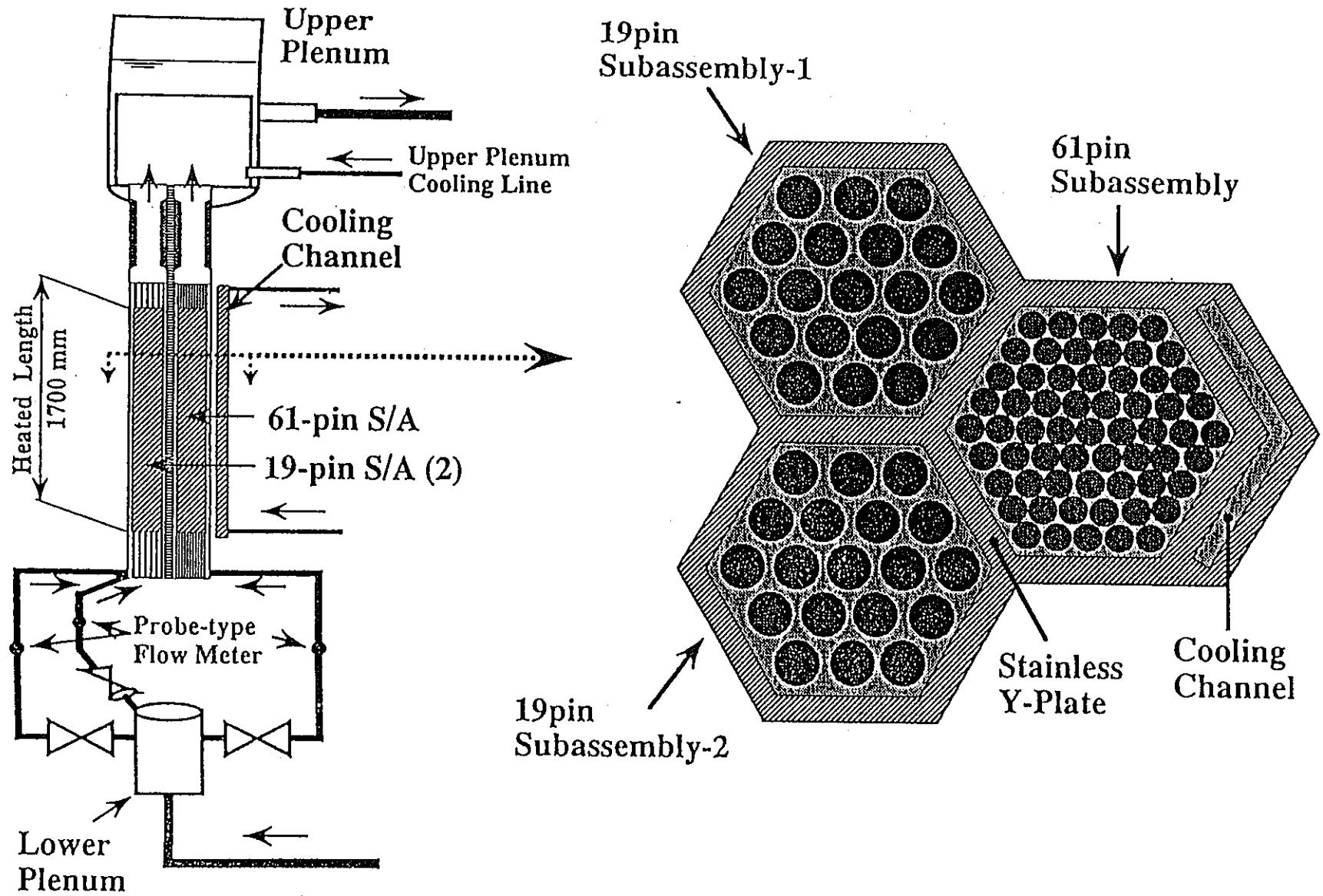


Fig. 2.1 CCTL-CFR 試験体概略図
Schema of The Test Rig CCTL-CFR

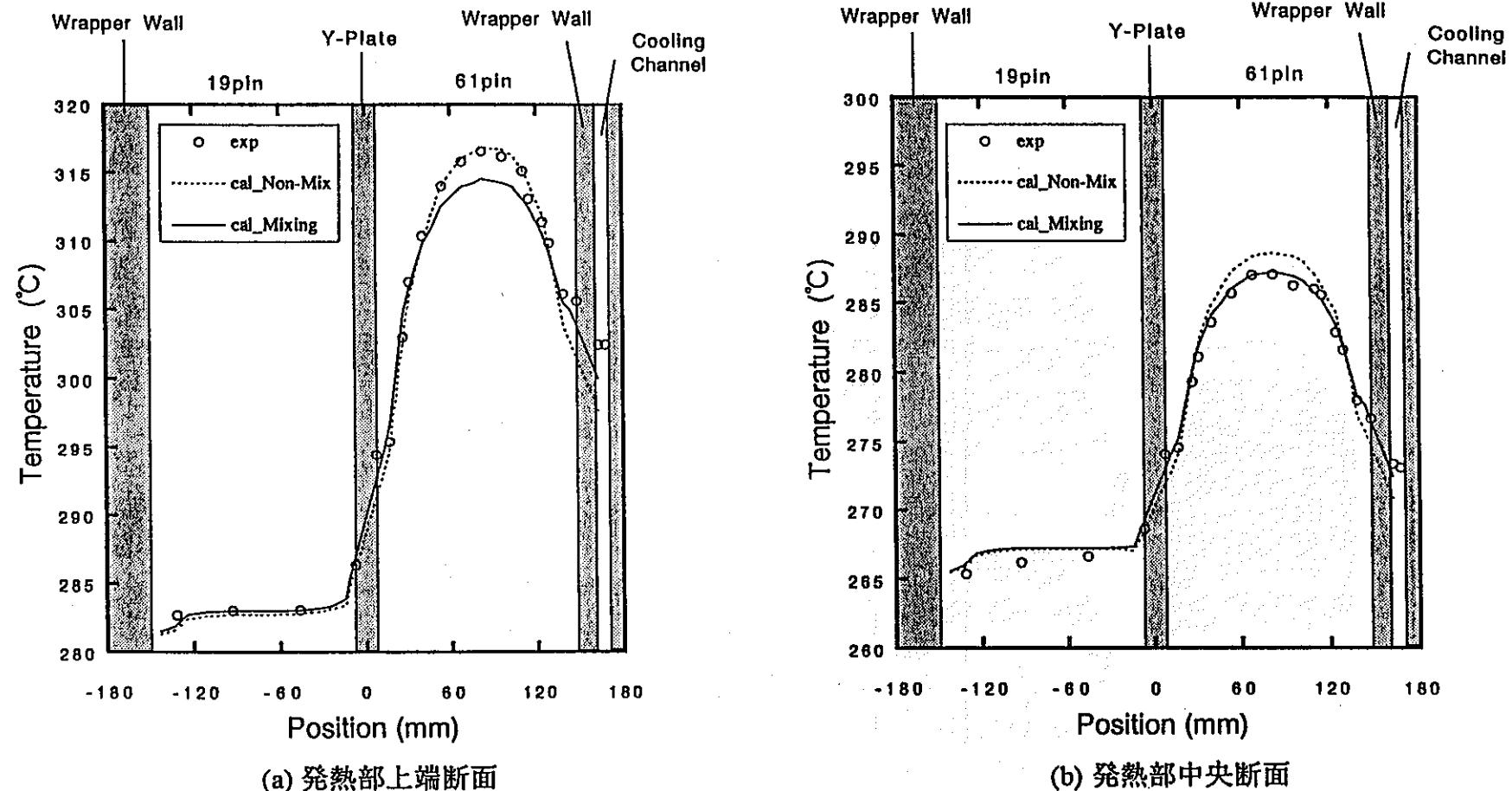


Fig. 2.2 CCTL-CFR 発熱部上端部および中央断面における温度分布の比較 (解析ケース : ST-167)
Comparisons of Temperature Profiles in CCTL-CFR(CASE NO. ST-167)

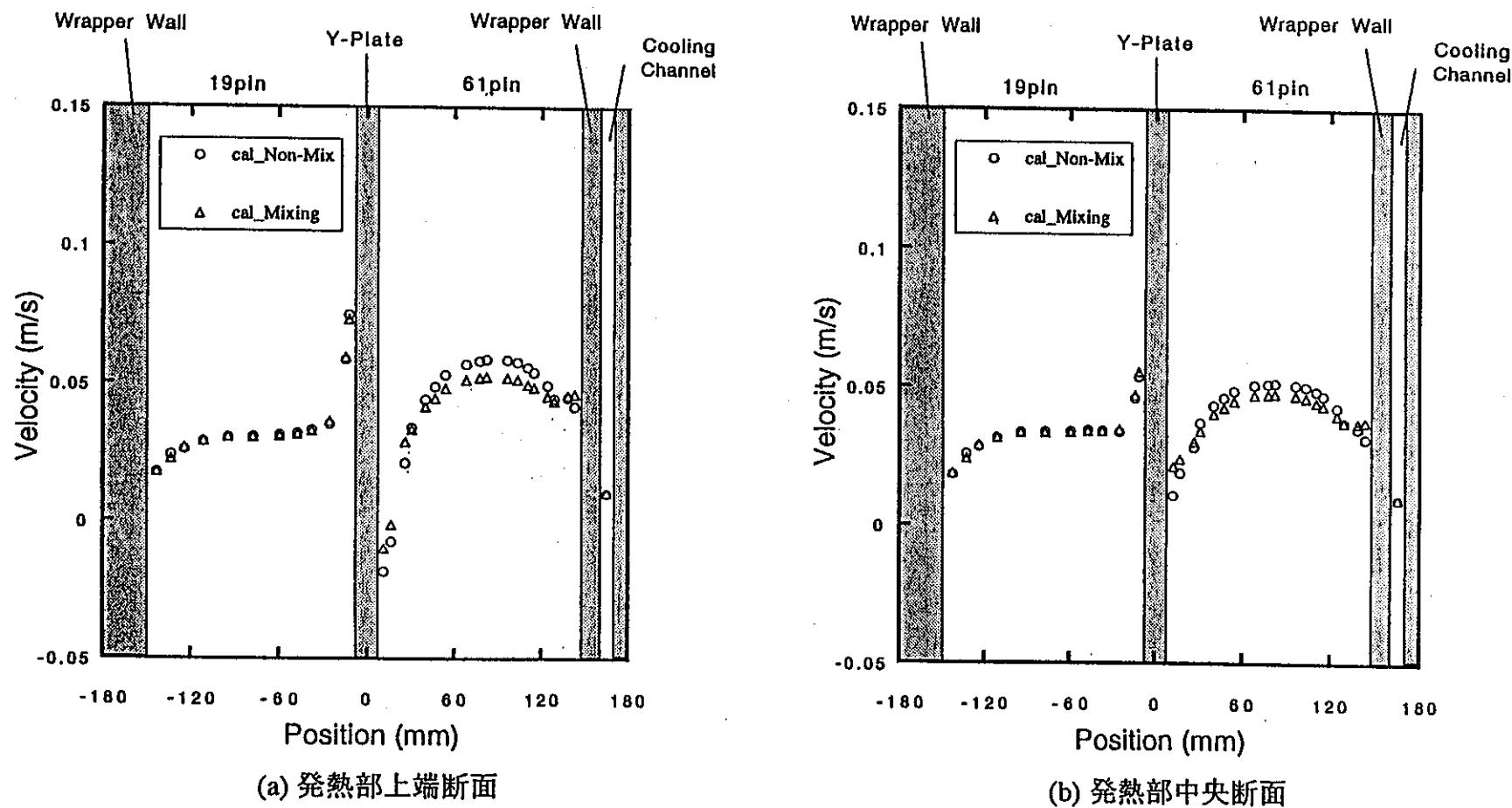


Fig. 2.3 CCTL-CFR ミキシング係数の有無による速度分布の比較 (解析ケース : ST-167)
Effect of Mixing Factors on Velocity Profiles in CCTL-CFR(CASE NO. ST-167)

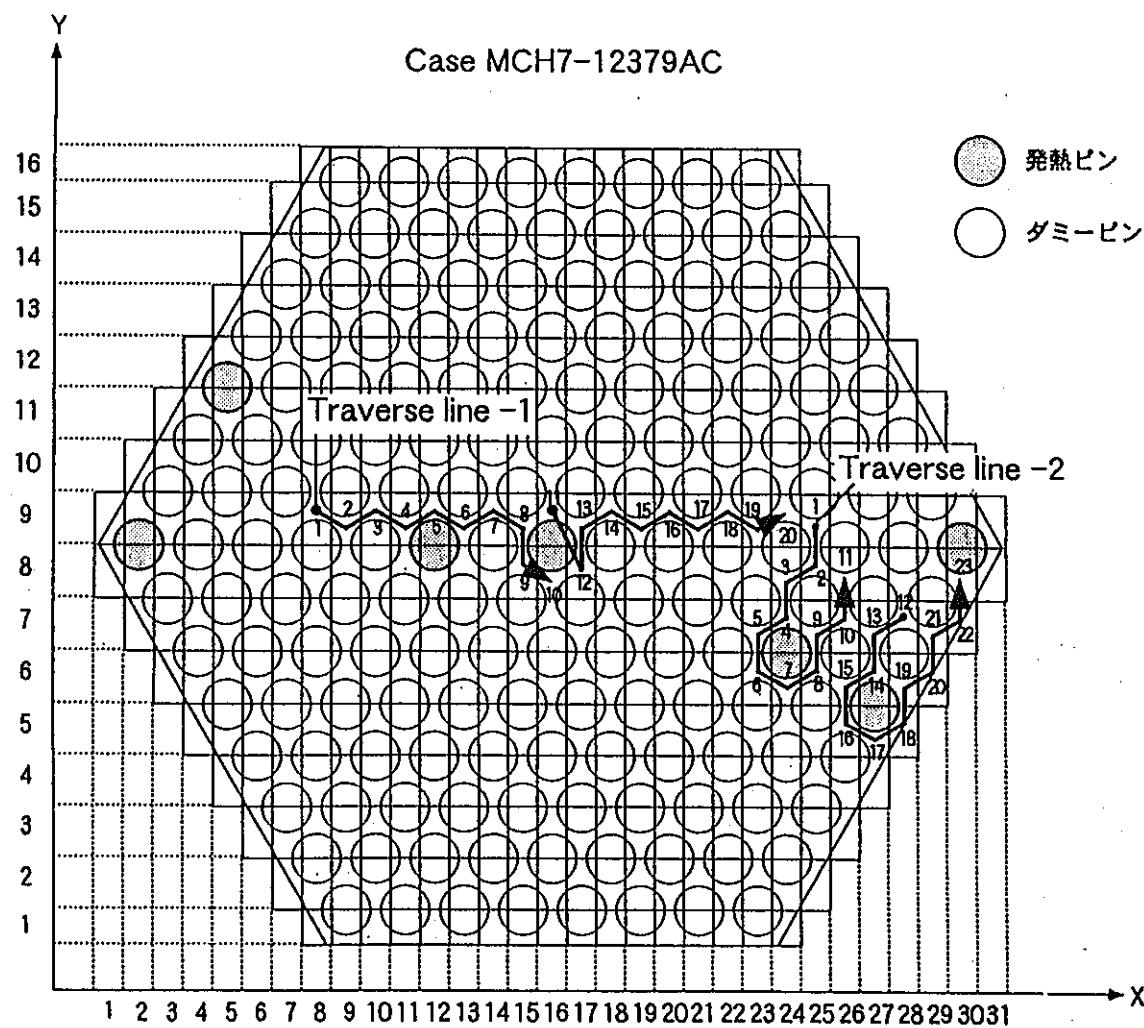


Fig. 2.4 水平断面温度分布のトラバースライン (Case : MCH7-12379AC)
Temperature Traverse Lines in The Horizontal Plane

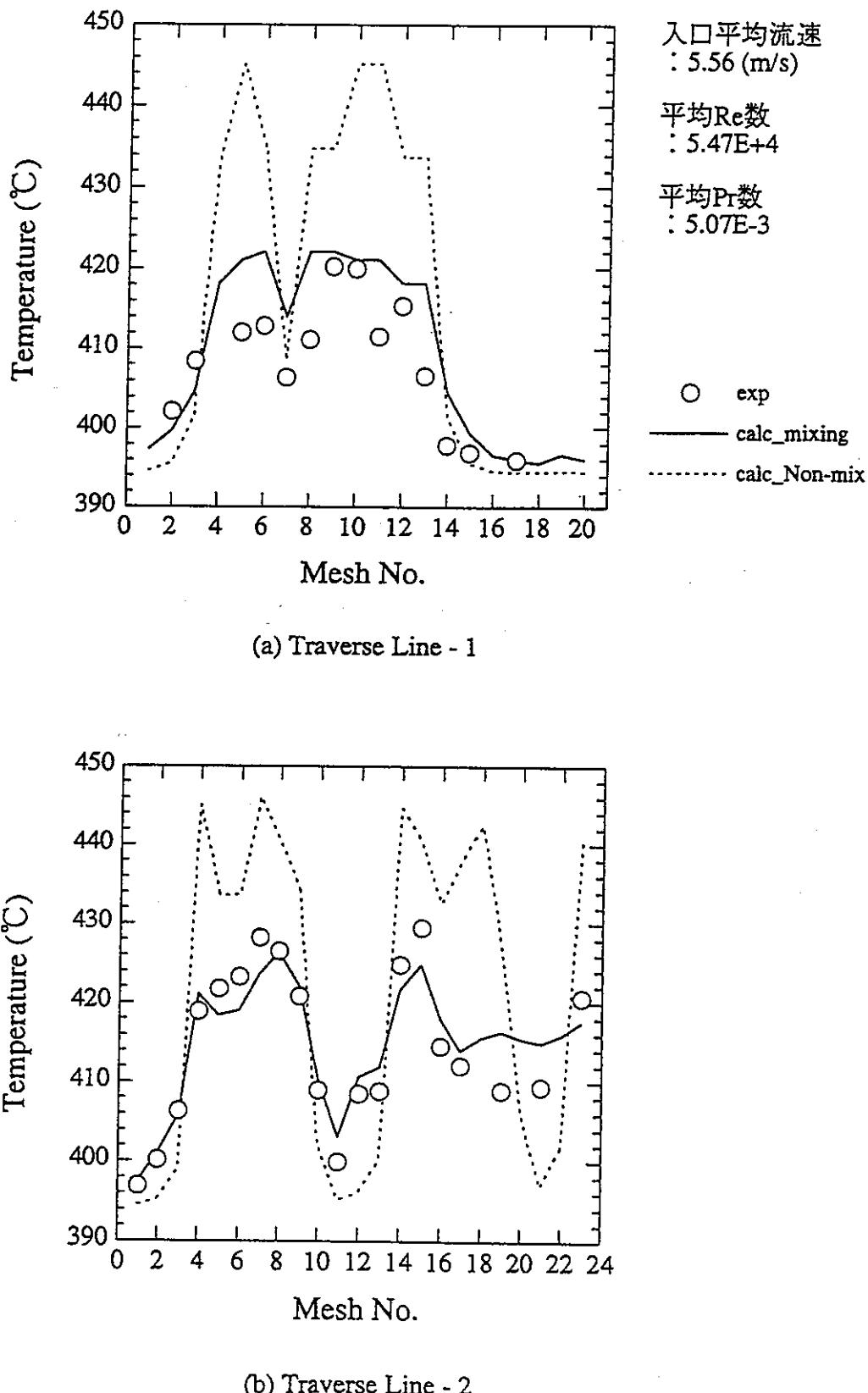


Fig. 2.5 発熱上端部におけるミキシング係数有無による温度分布の比較
 (Case : MCH7-12379AC-03A)
 Comparison of Temperature Distributions at The Top End of The Heated Section
 with and without Mixing Factors

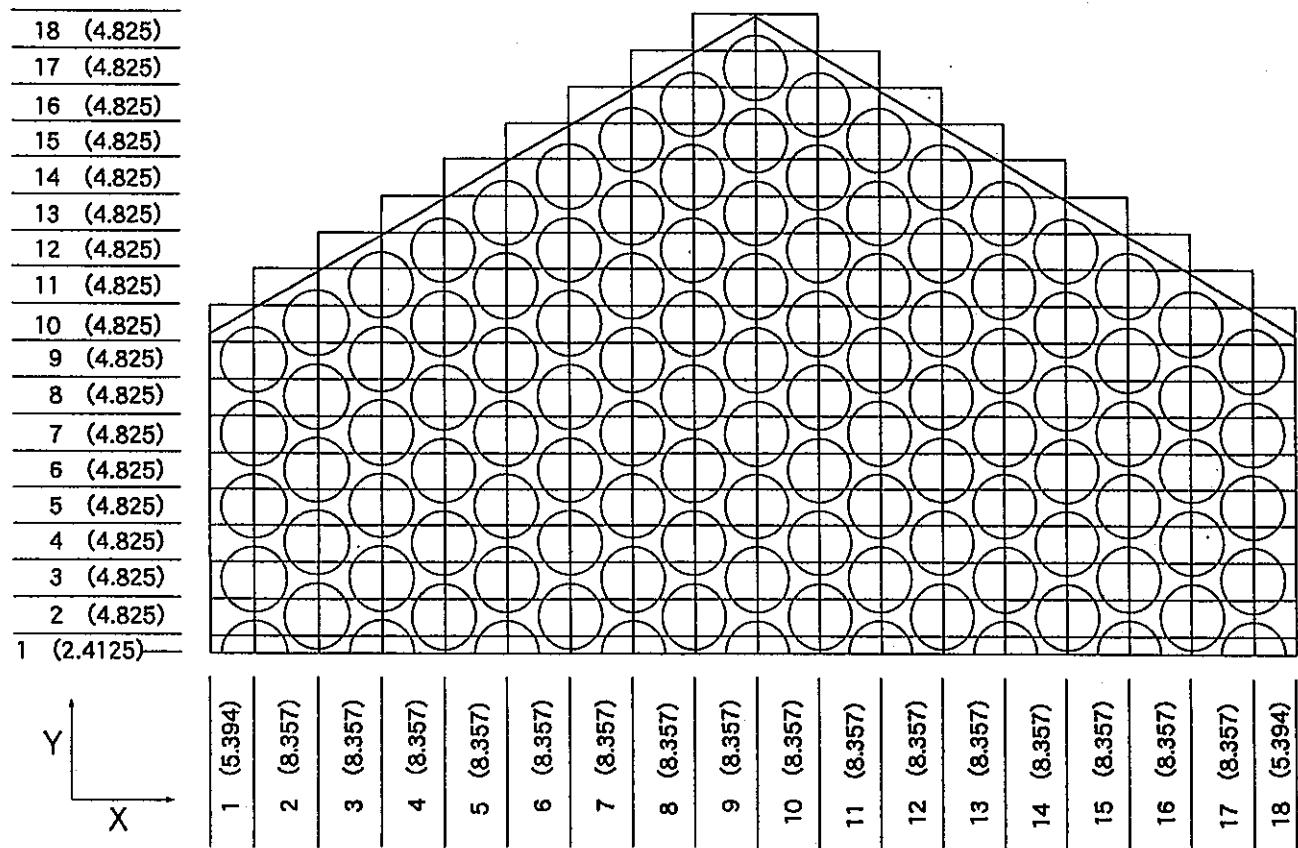
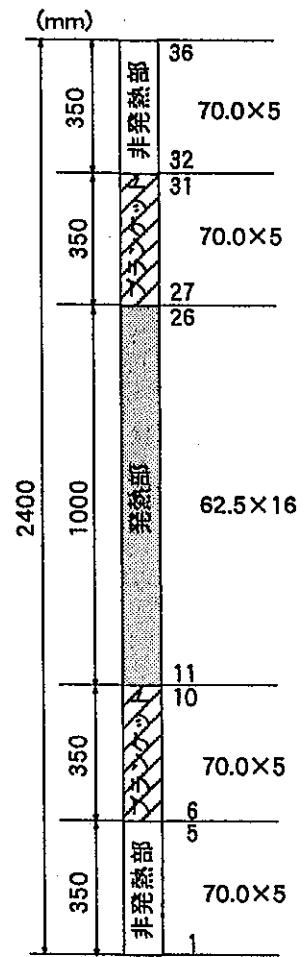


Fig. 3.1 217ピンバンドルAQUAコード解析モデル

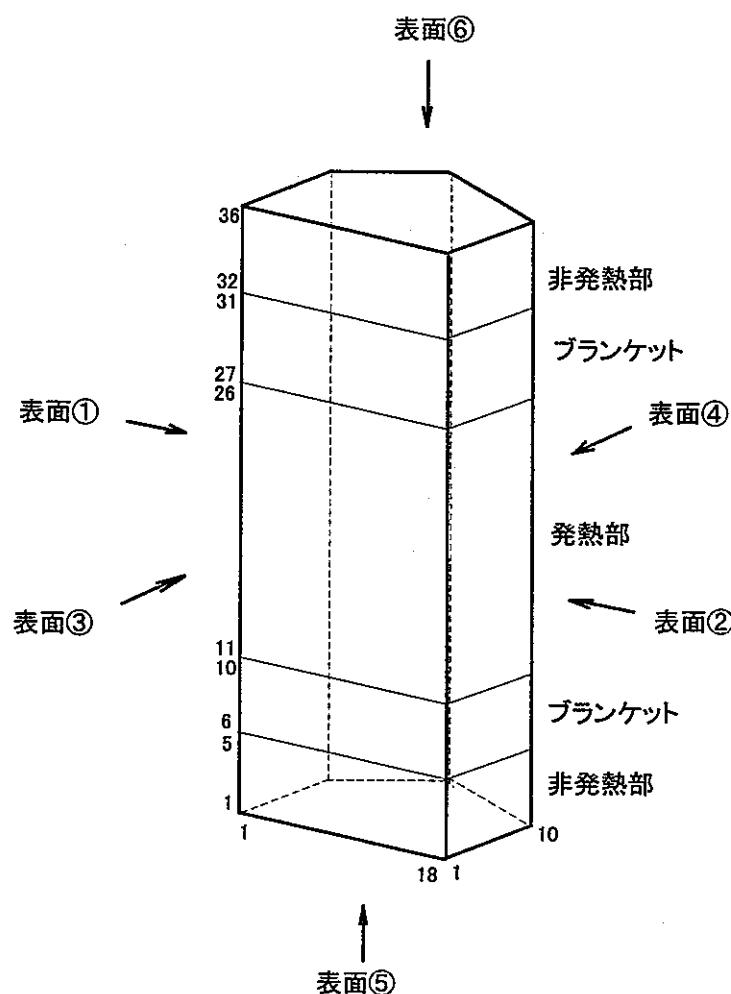


Fig 3 . 2 メッシュ分割図

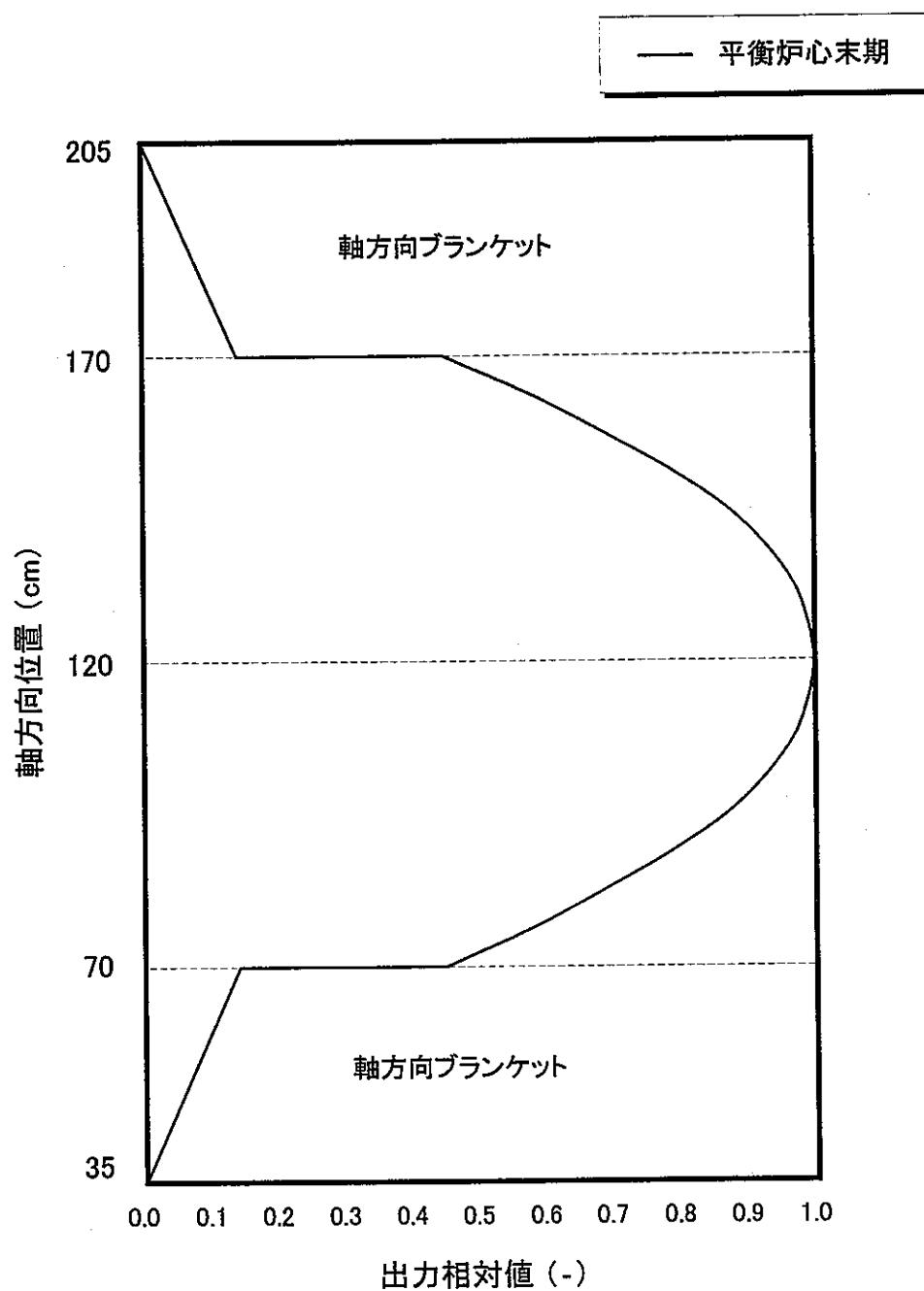


Fig. 3.3 集合体の軸方向出力分布

REG -1.0000000	18	18	1	10	1	36	2	1	-X
REG -1.0000000	1	18	1	1	1	36	3	1	+Y
REG 0.00021013	1	1	10	10	1	36	4	1	-Y
REG 0.00032556	18	18	10	10	1	36	4	1	-Y
REG 0.00032556	2	2	11	11	1	36	4	1	-Y
REG 0.00032556	17	17	11	11	1	36	4	1	-Y
REG 0.00032556	3	3	12	12	1	36	4	1	-Y
REG 0.00032556	16	16	12	12	1	36	4	1	-Y
REG 0.00032556	4	4	13	13	1	36	4	1	-Y
REG 0.00032556	15	15	13	13	1	36	4	1	-Y
REG 0.00032556	5	5	14	14	1	36	4	1	-Y
REG 0.00032556	14	14	14	14	1	36	4	1	-Y
REG 0.00032556	6	6	15	15	1	36	4	1	-Y
REG 0.00032556	13	13	15	15	1	36	4	1	-Y
REG 0.00032556	7	7	16	16	1	36	4	1	-Y
REG 0.00032556	12	12	16	16	1	36	4	1	-Y
REG 0.00032556	8	8	17	17	1	36	4	1	-Y
REG 0.00032556	11	11	17	17	1	36	4	1	-Y
REG 0.00032556	9	9	18	18	1	36	4	1	-Y
REG 0.00021013	10	10	18	18	1	36	4	1	-Y
REG 0.00001147	9	9	2	16	1	1	5	1	TYPE-1 Z
REG 0.00001147	10	10	2	16	1	1	5	1	TYPE-1 Z

Fig. 3 . 4 除熱量の調整方法

```
KFLOW(1) = -3, -3, -3, -3, 1, -6,  
KTEMP(1) = 200, 200, 400, 200, 1, 400,  
VELOC(1) = 0.0, 0.0, 0.0, 0.0, 0.100, 0.0,  
TEMP(1) =-10000., -10000., 0.0, -10000., 450., 450.,
```

Fig. 3 . 5 热流束境界のインプットデータ

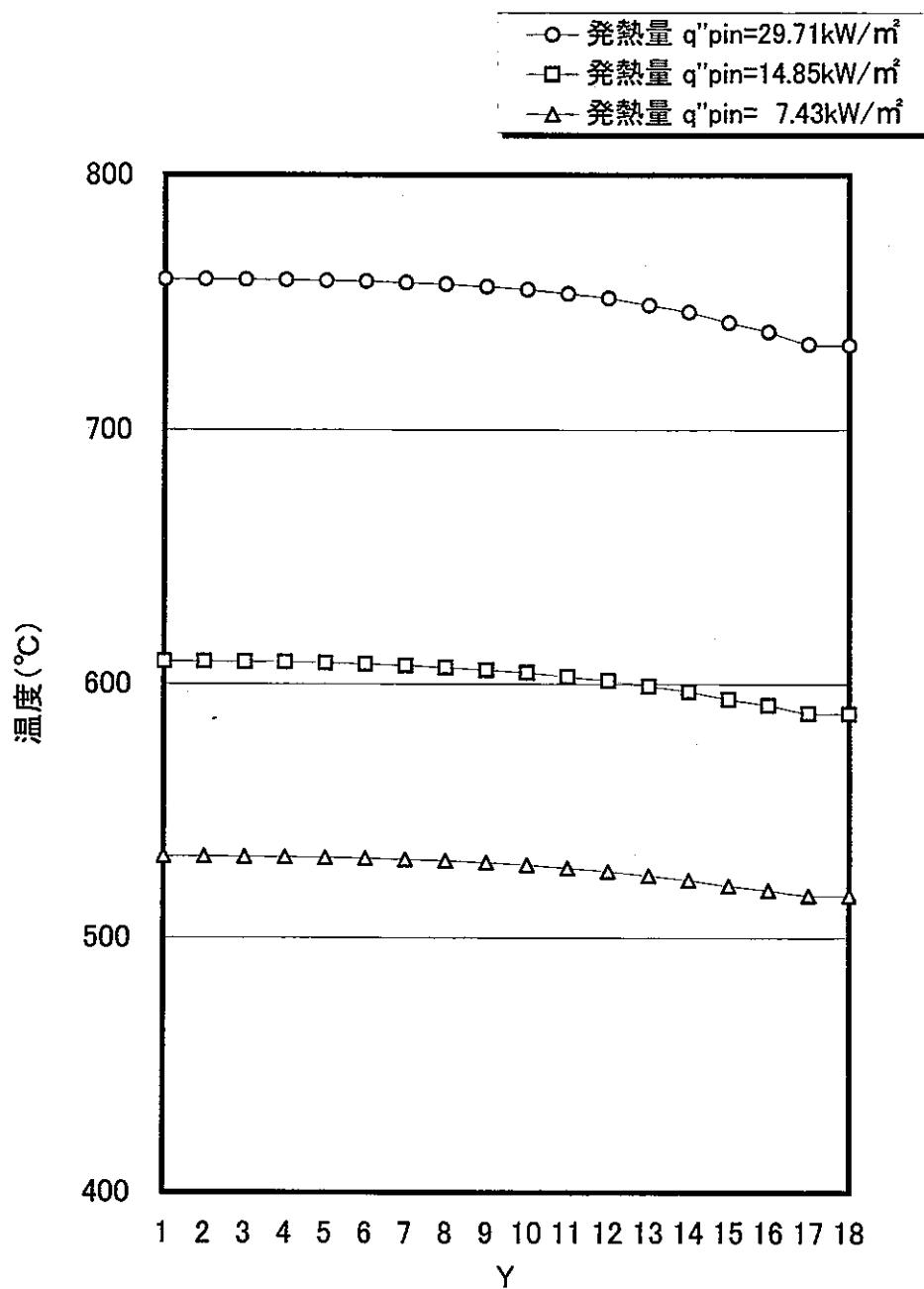


Fig. 5.1.1 断面温度分布の発熱量依存性
($q''\text{wall}=0.0$, $V_{in}=0.1\text{m/s}$, $Z=26$)

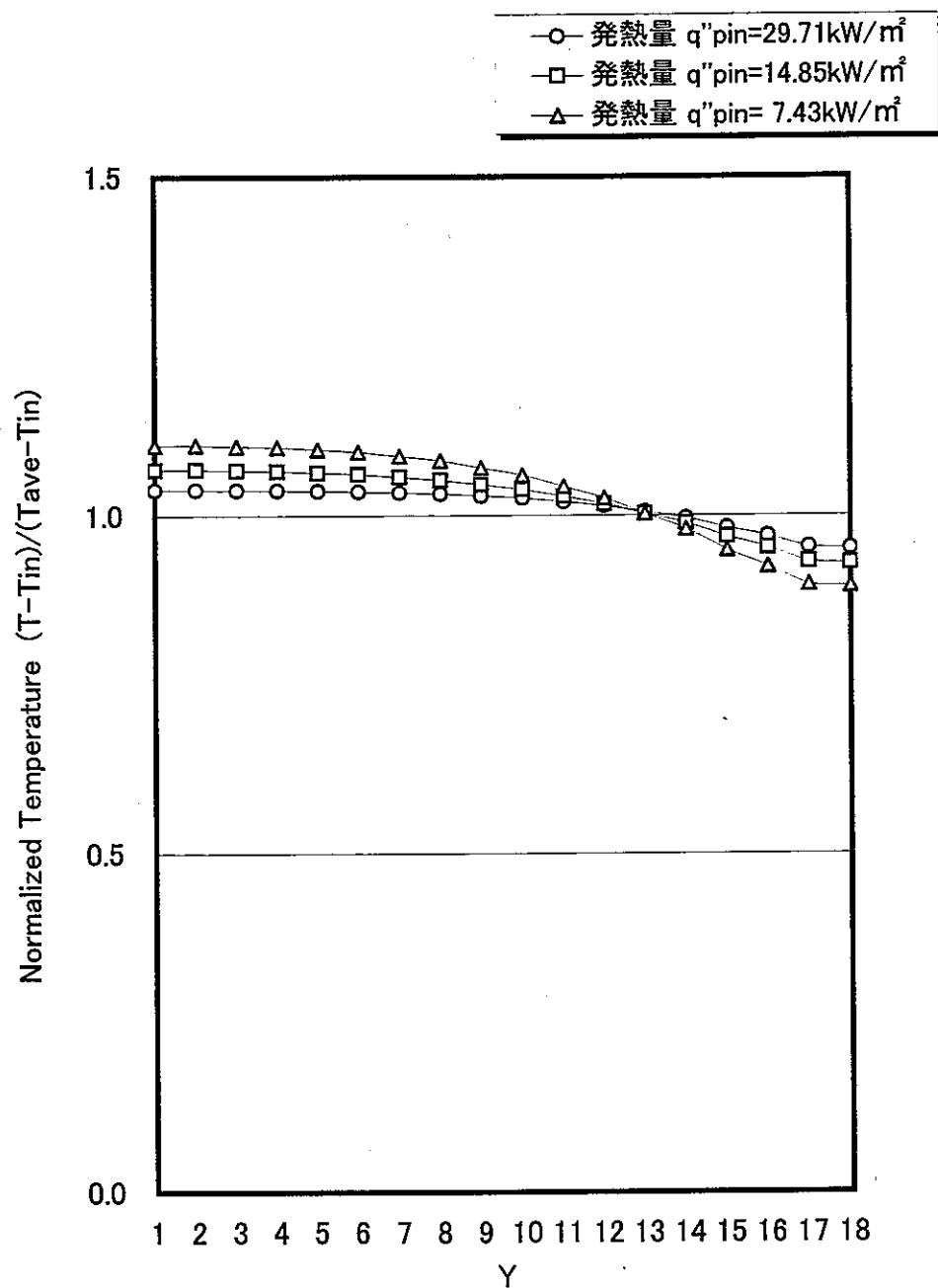


Fig. 5.1.2 規格化温度分布の発熱量依存性
($q''_{wall}=0.0$, $V_{in}=0.1\text{ m/s}$, $Z=26$)

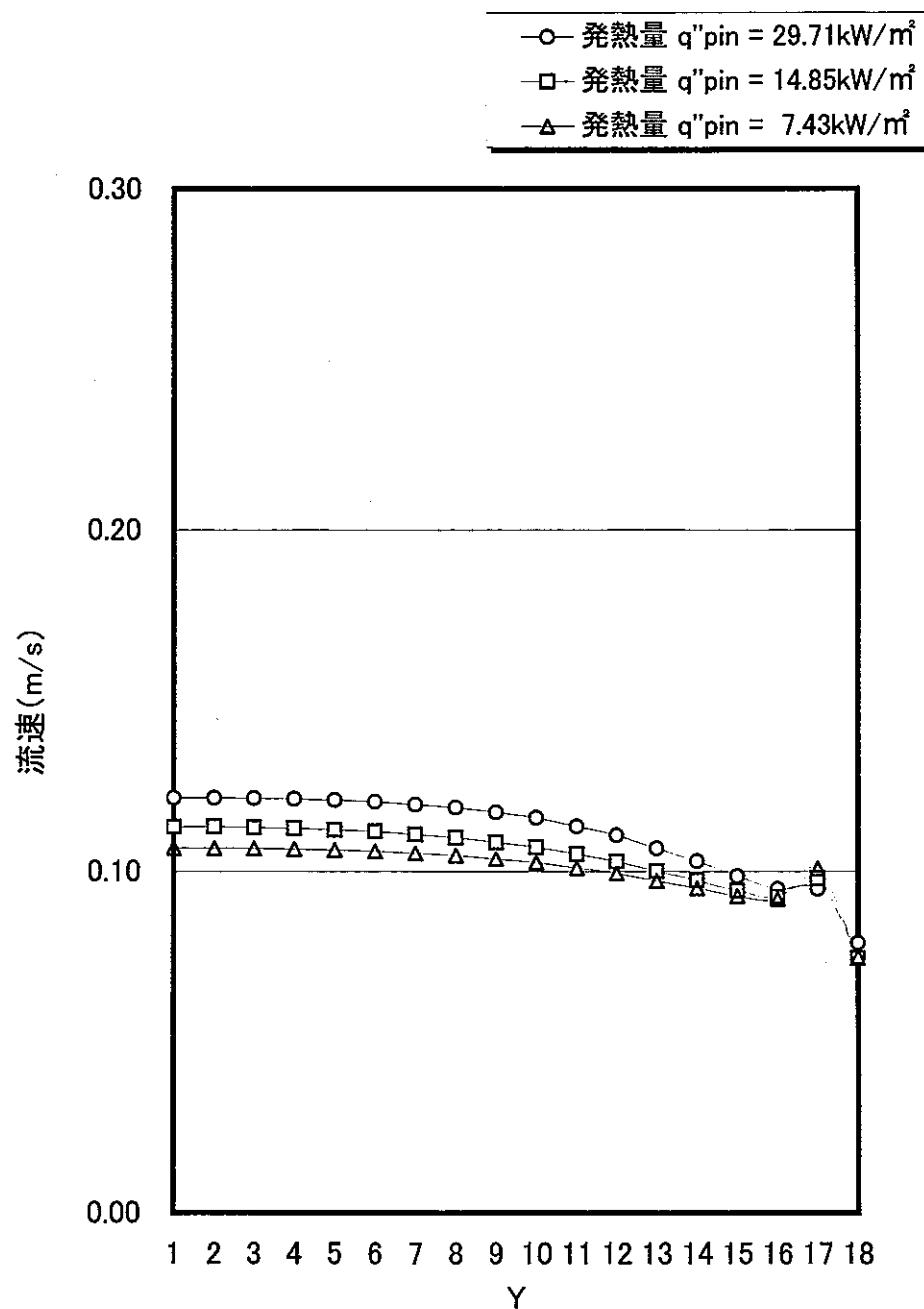


Fig. 5.1.3 流速分布の発熱量依存性
($q'_{wall}=0.0$, $V_{in}=0.1 \text{ m/s}$, $Z=26$)

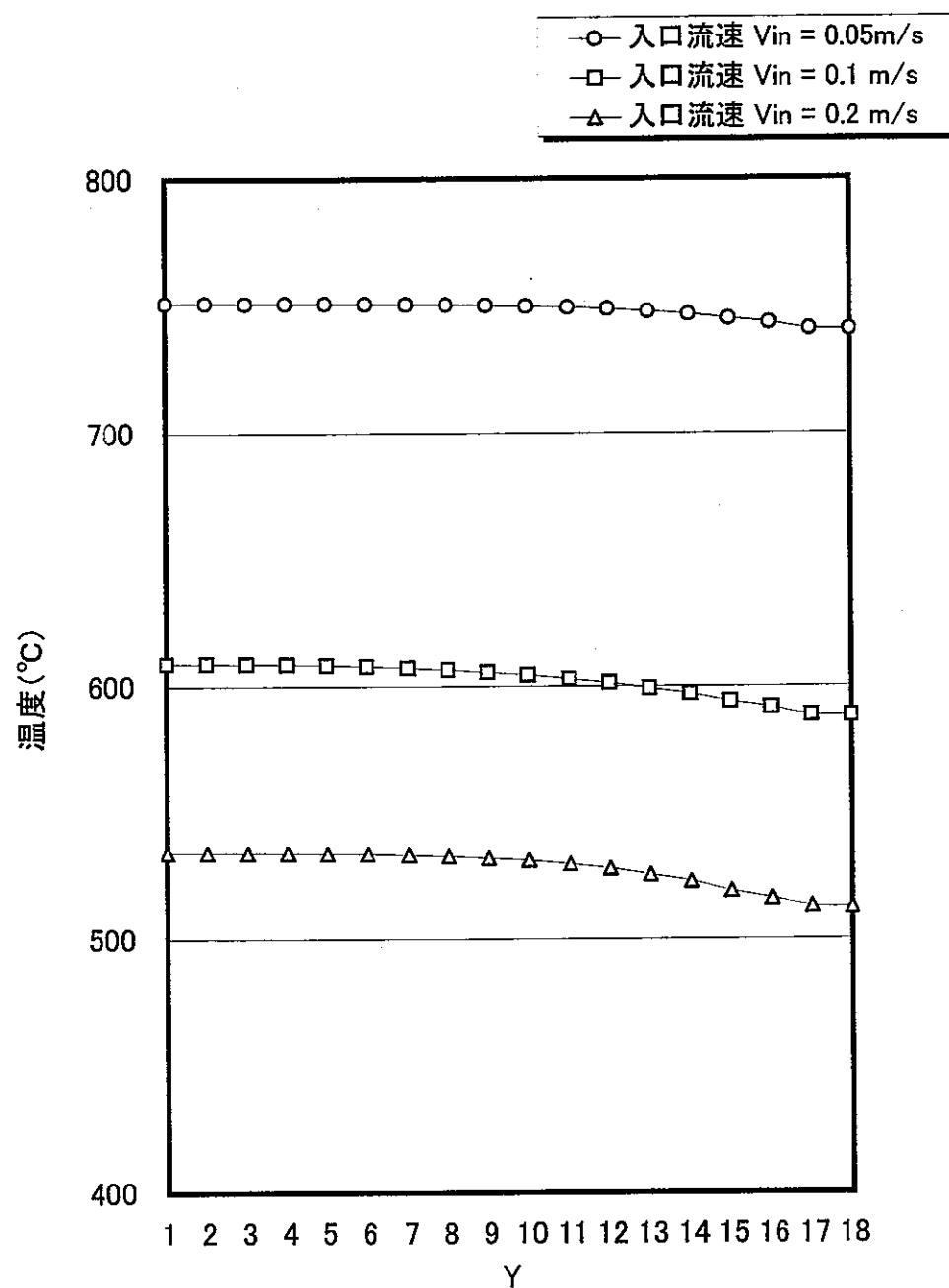


Fig. 5.1.4 断面温度分布の入口流速依存性
($q''_{wall}=0.0$, $q''_{pin}=14.85\text{kW/m}^2$, 断面Z=26)

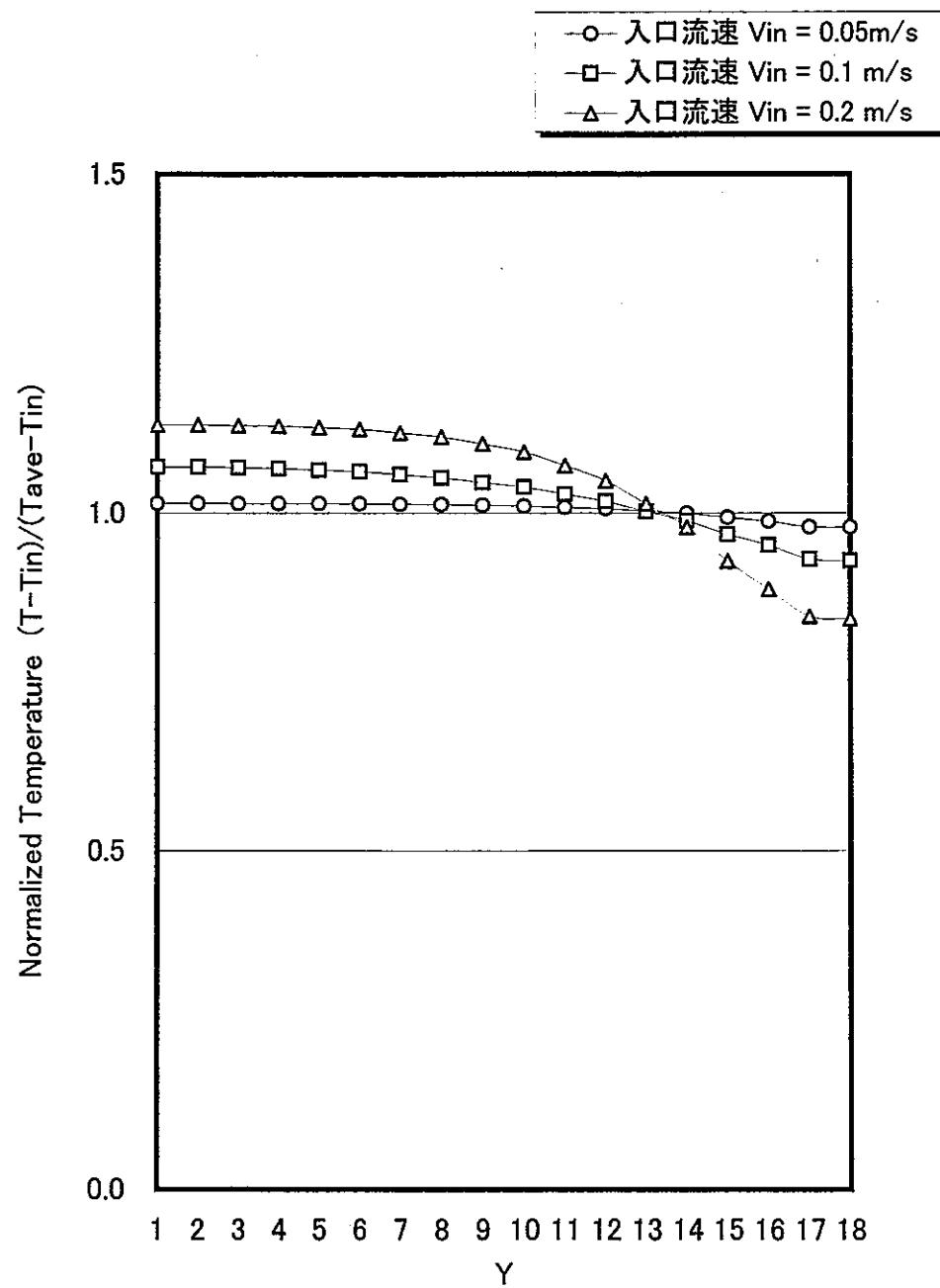


Fig. 5.1.5 規格化温度分布の入口流速依存性
($q''_{wall}=0.0$, $q''_{pin}=14.85\text{kW/m}^2$, 断面Z=26)

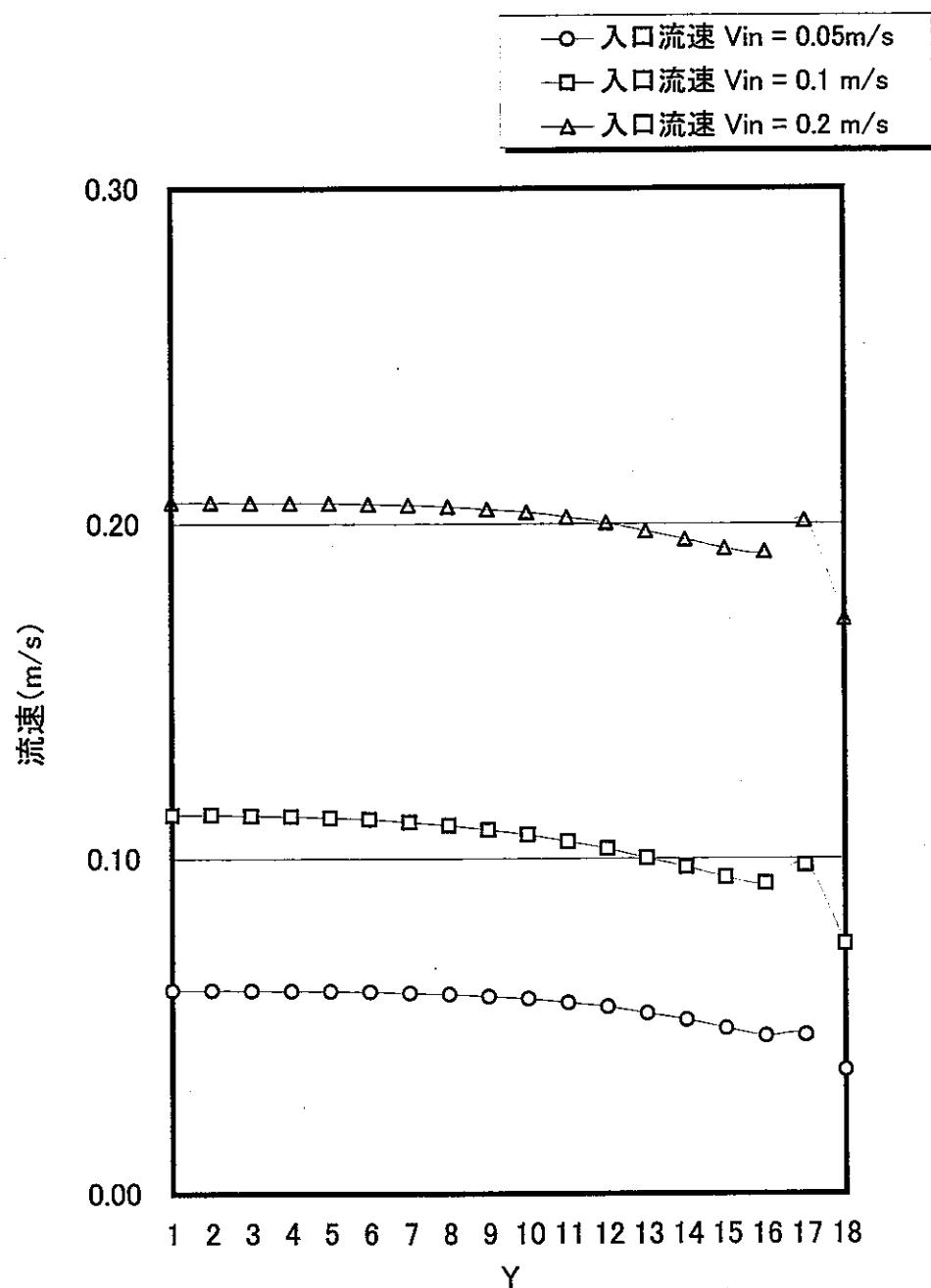


Fig. 5.1.6 流速分布の入口流速依存性
($q''_{wall}=0.0$, $q''_{pin}=14.85\text{kW/m}^2$, $Z=26$)

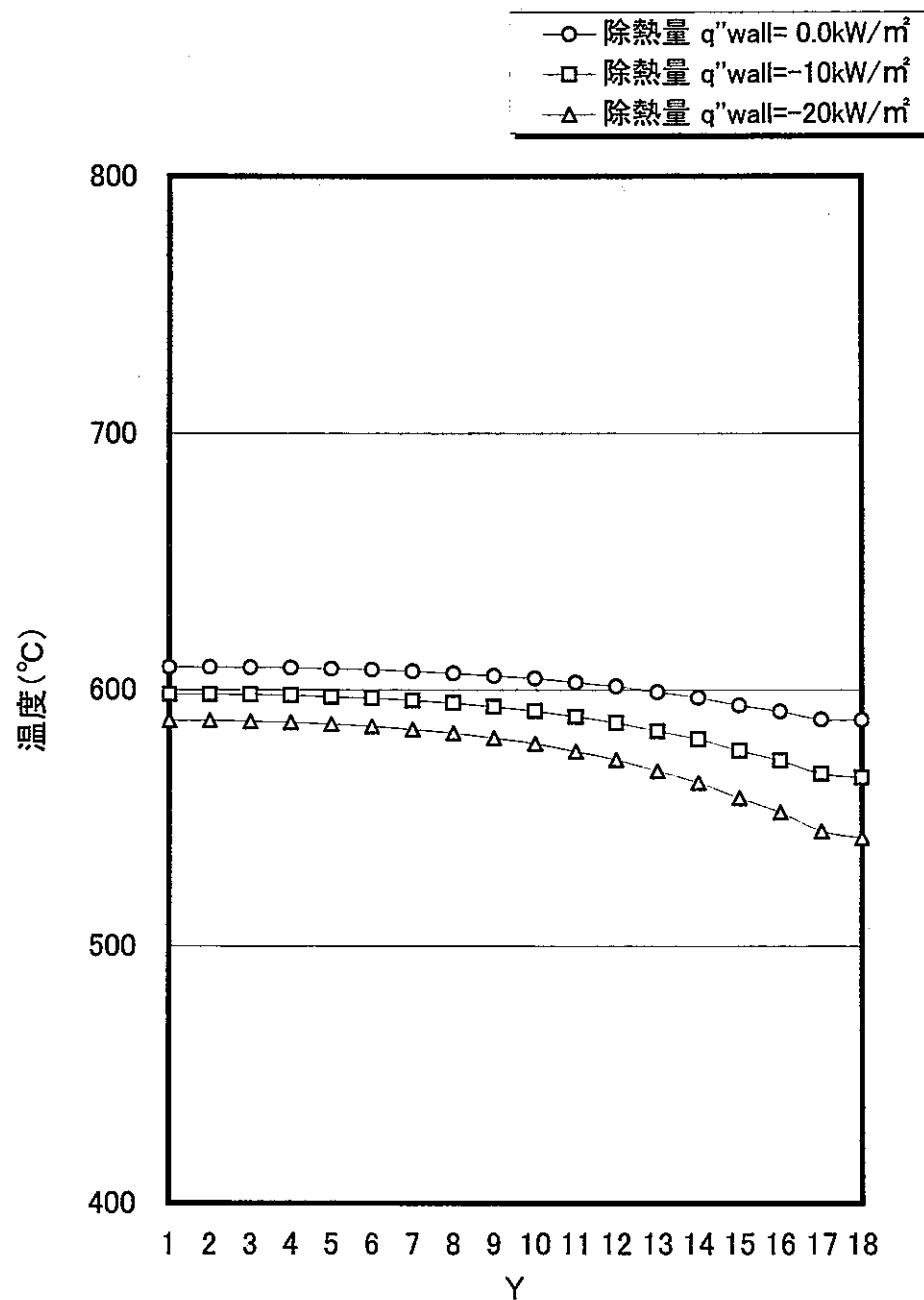


Fig. 5.1.7 断面温度分布の除熱量依存性
($q''_{pin}=14.85 \text{ kW/m}^2$, $V_{in}=0.1 \text{ m/s}$, $Z=26$)

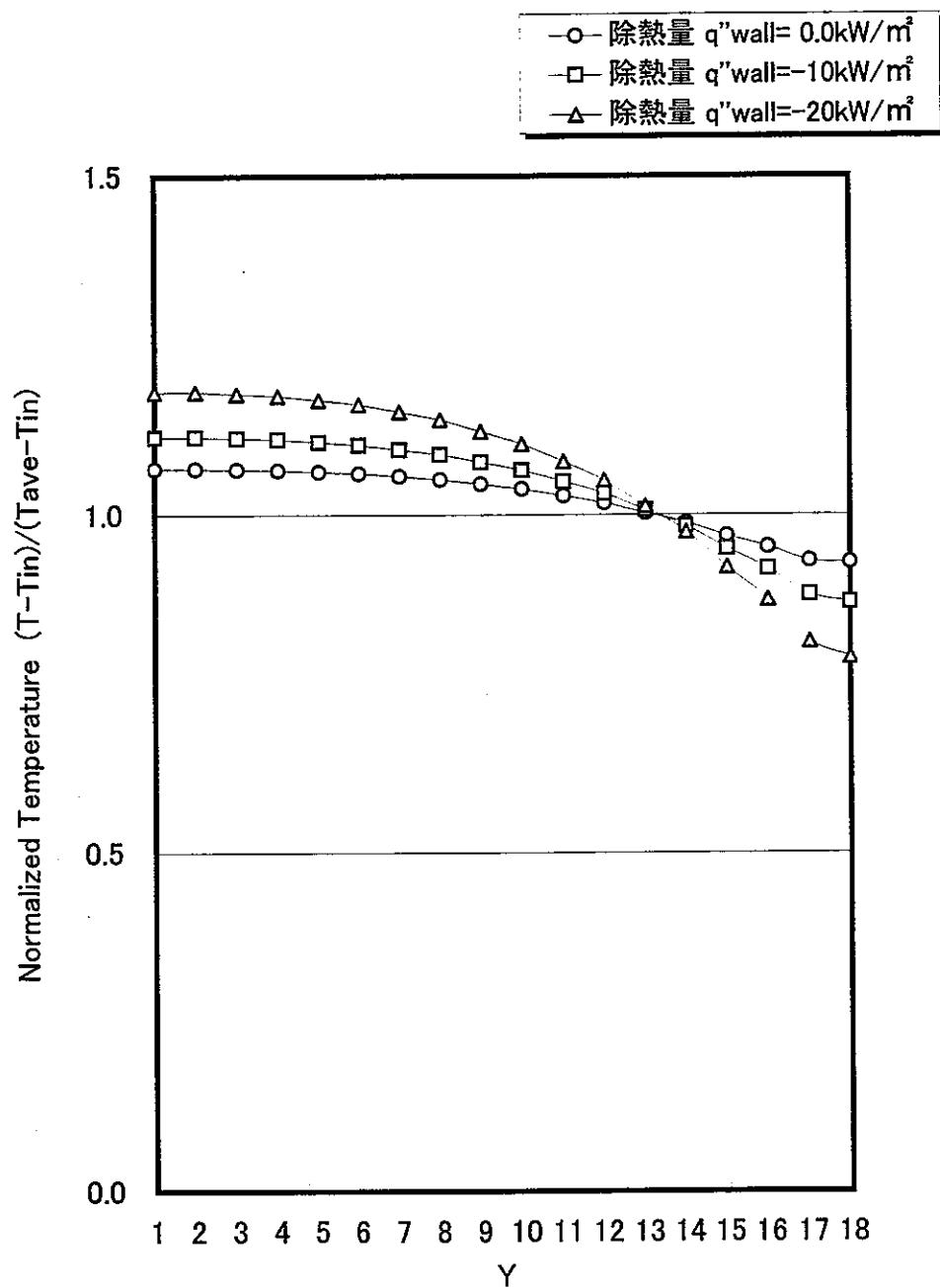


Fig. 5.1.8 規格化温度分布の除熱量依存性
($q''_{pin}=14.85 \text{ kW/m}^2$, $V_{in}=0.1 \text{ m/s}$, $Z=26$)

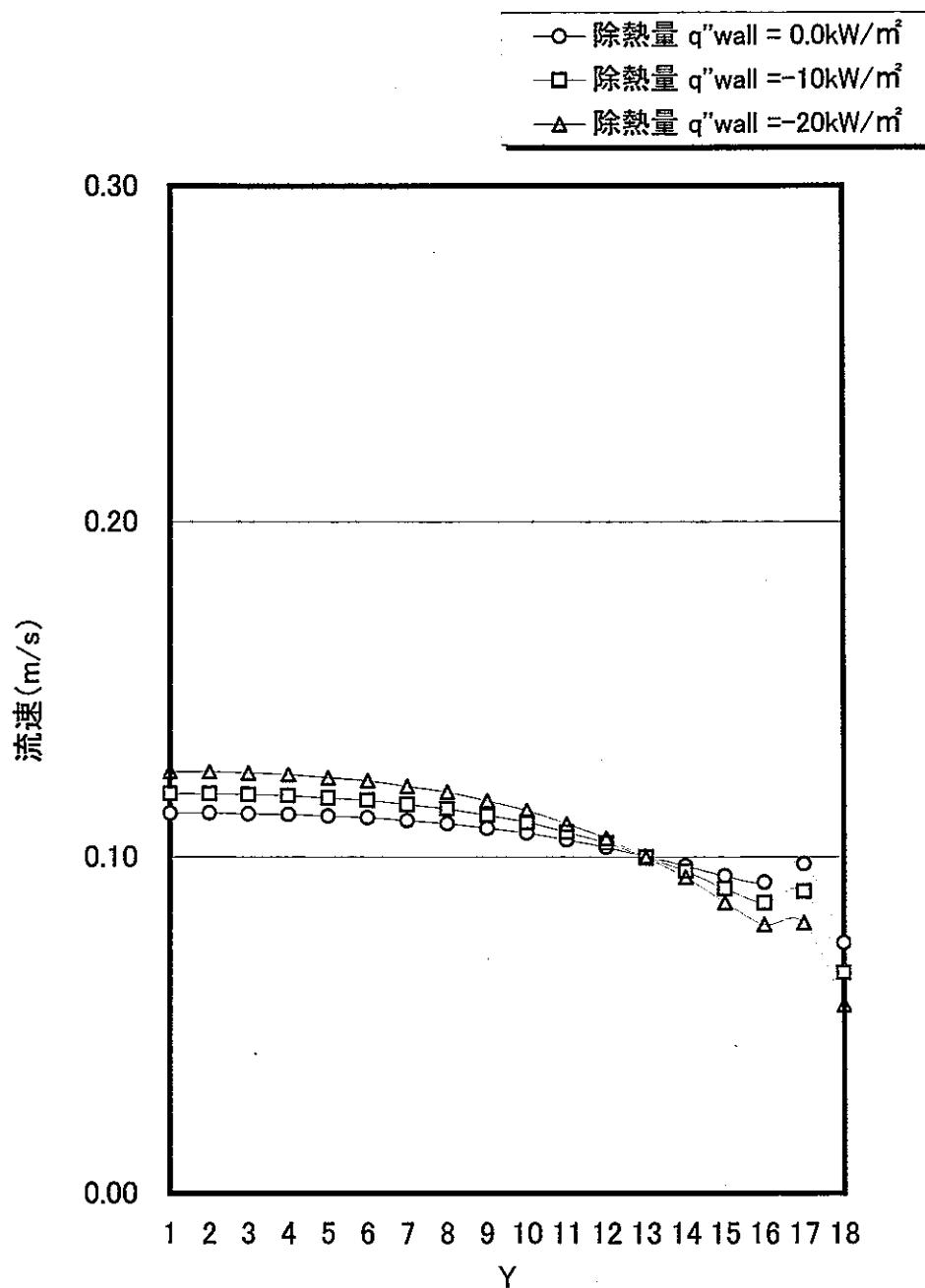


Fig. 5.1.9 流速分布の除熱量依存性
($q''_{pin}=14.85 \text{ kW/m}^2$, $V_{in}=0.1 \text{ m/s}$, $Z=26$)

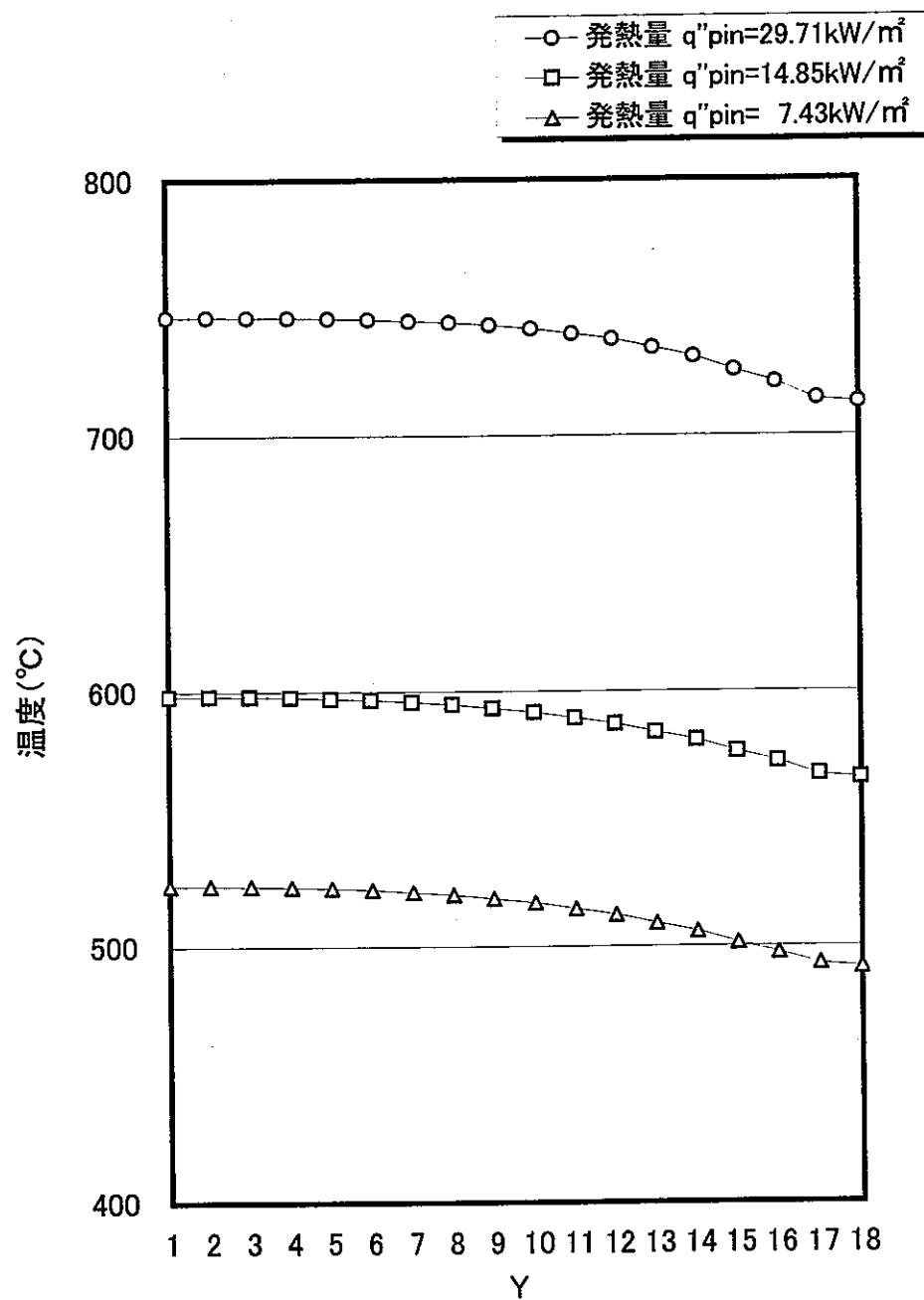


Fig. 5.1.10 断面温度分布の発熱量依存性
($q''\text{wall}=-10\text{kW/m}^2$, $V_{in}=0.1\text{m/s}$, $Z=26$)

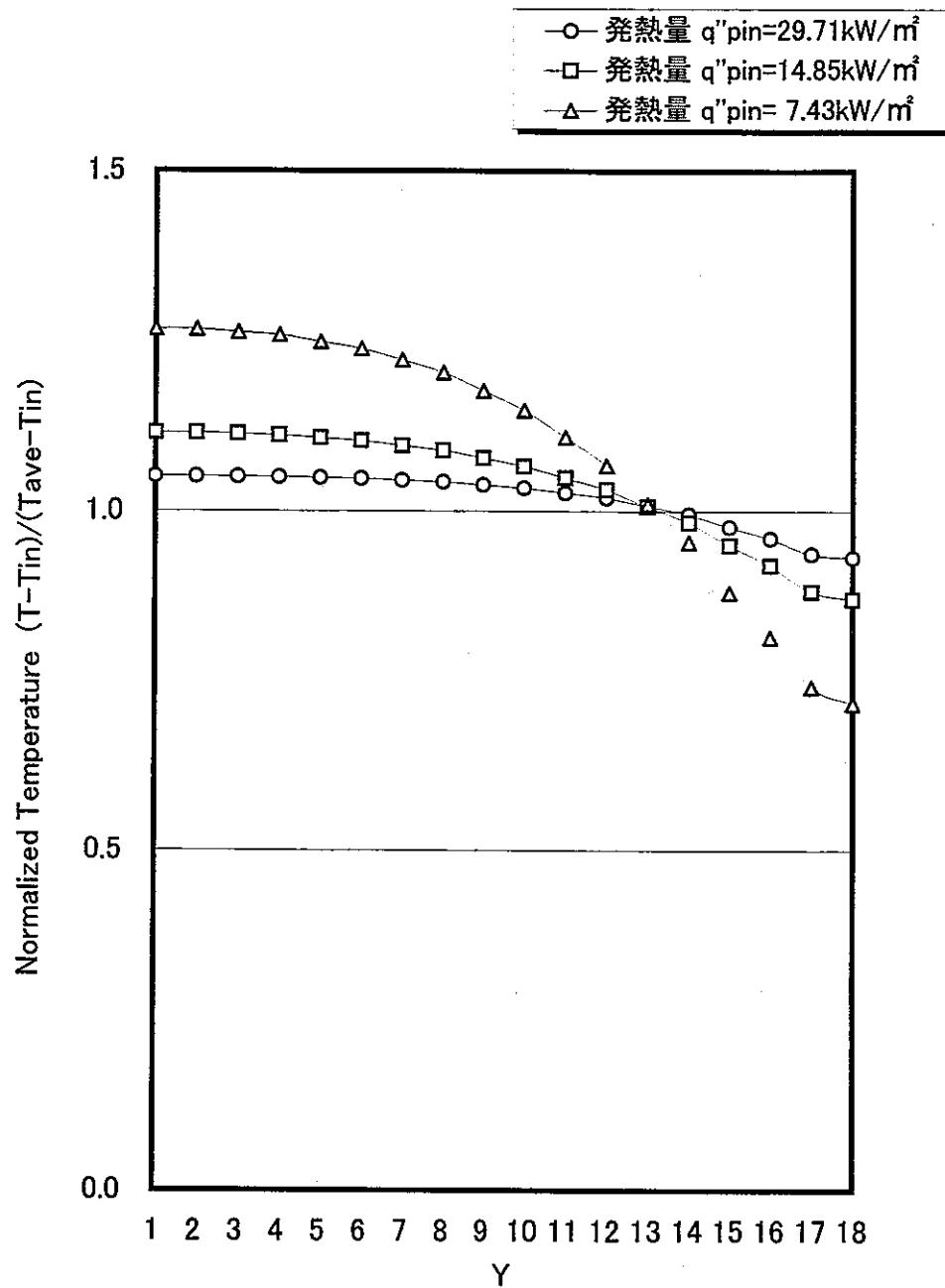


Fig. 5.1.11 規格化温度分布の発熱量依存性
($q''_{wall}=-10\text{ kW/m}^2$, $V_{in}=0.1\text{ m/s}$, $Z=26$)

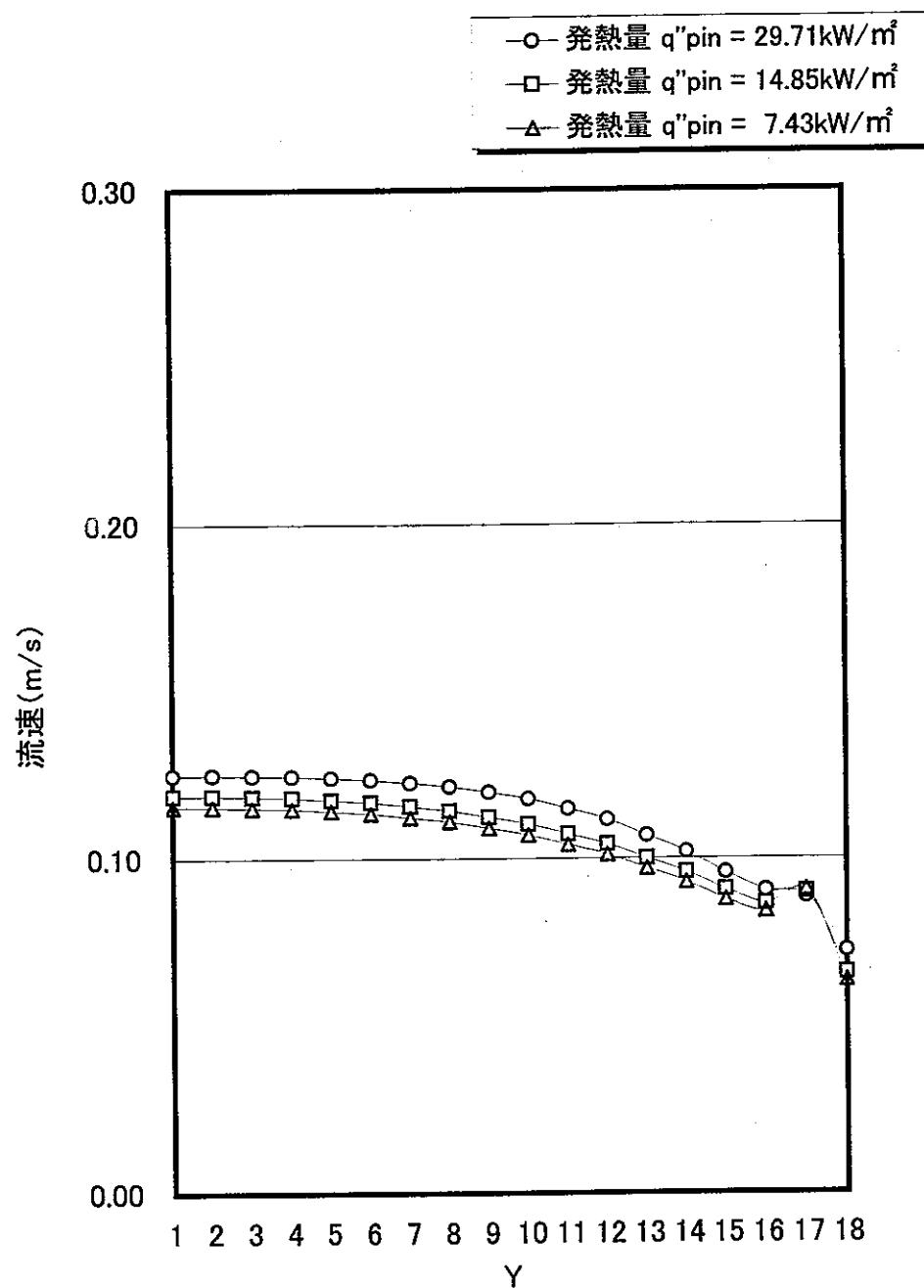


Fig. 5.1.12 流速分布の発熱量依存性
($q''_{wall}=-10 \text{ kW/m}^2$, $V_{in}=0.1 \text{ m/s}$, $Z=26$)

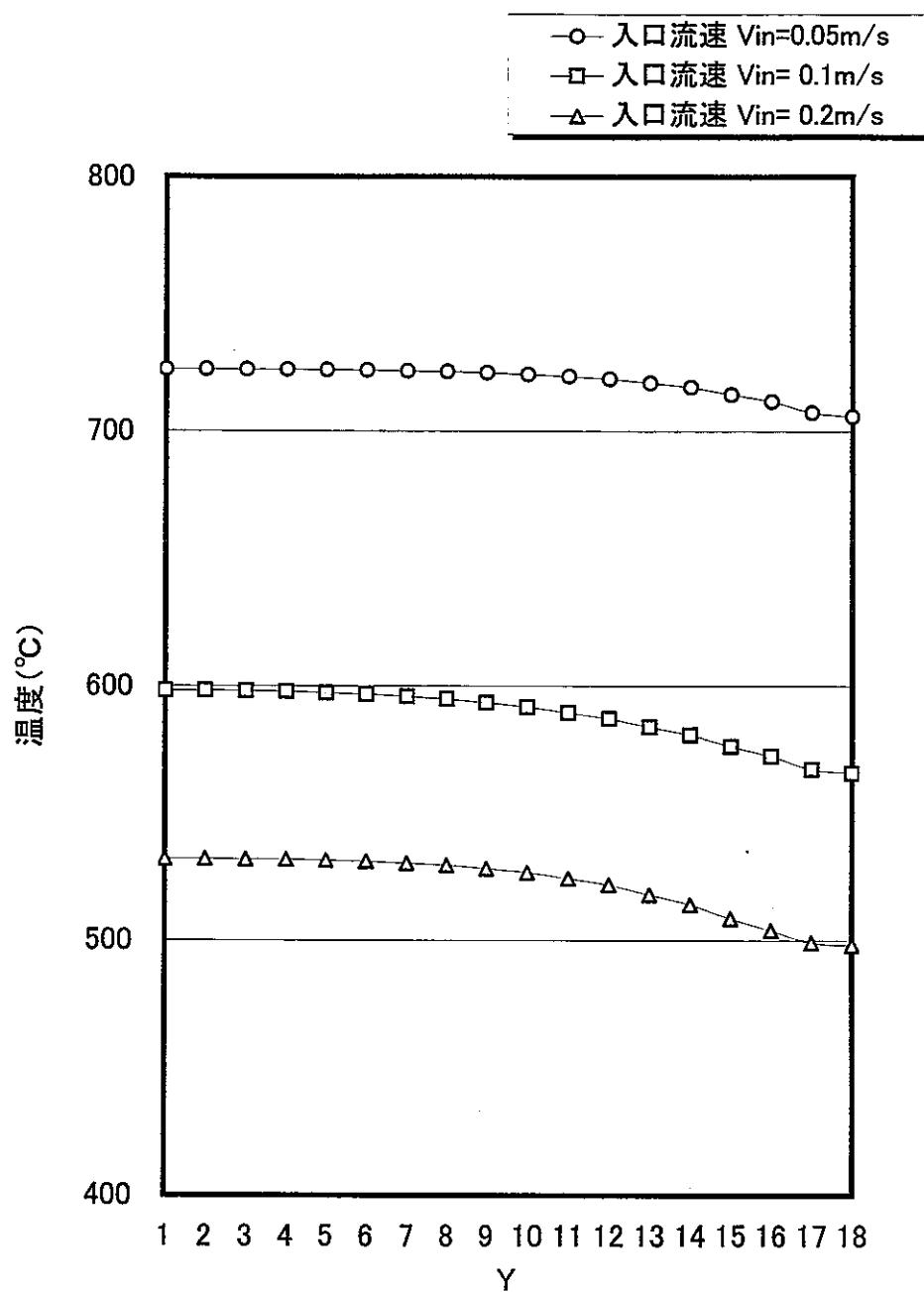


Fig. 5.1.13 断面温度分布の入口流速依存性
($q''_{pin}=14.85\text{kW/m}^2$, $q''_{wall}=-10\text{kW/m}^2$, $Z=26$)

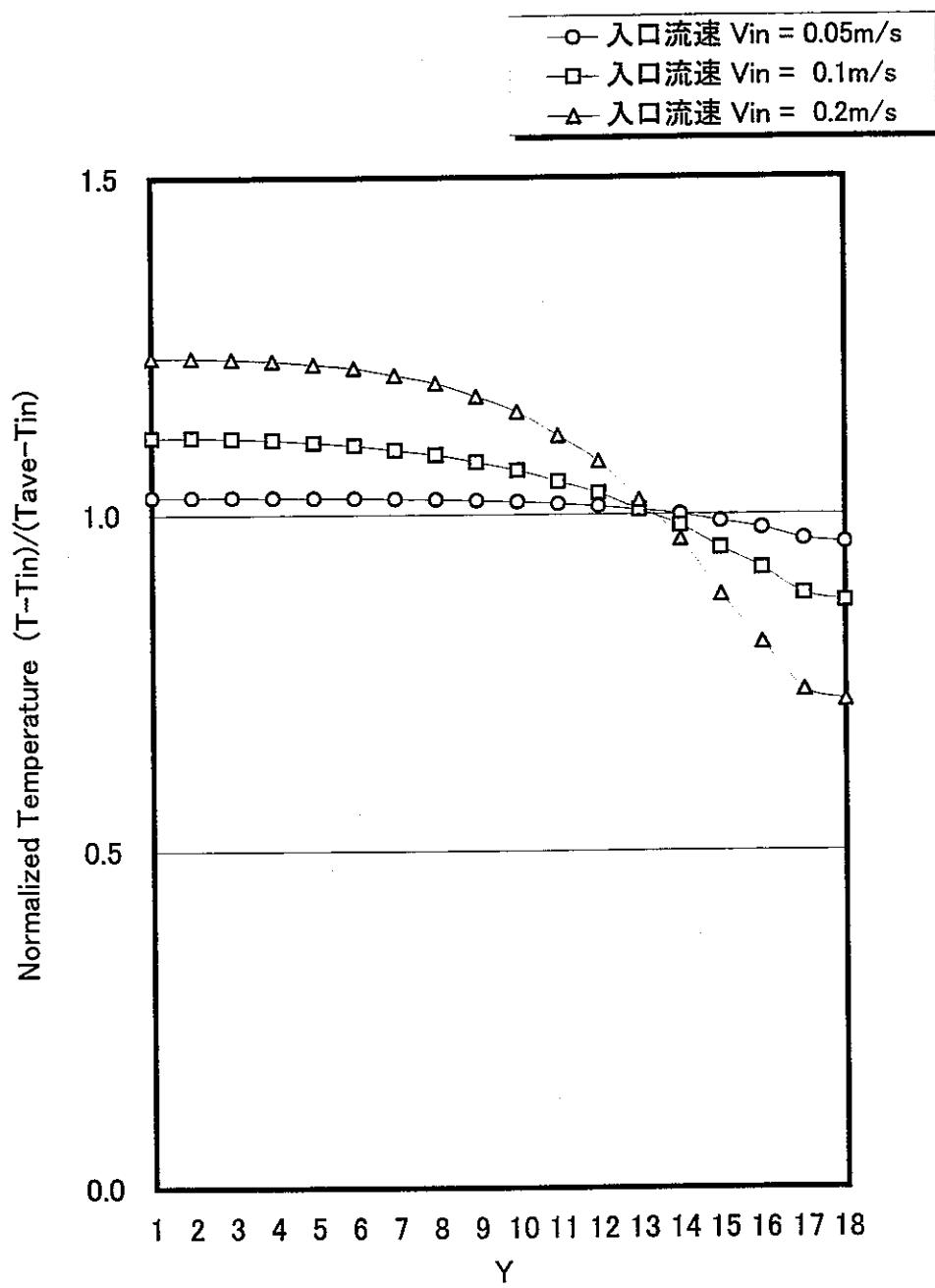


Fig. 5.1.14 規格化温度分布の入口流速依存性
($q''_{pin}=14.85\text{kW/m}^2$, $q''_{wall}=-10\text{kW/m}^2$, $Z=26$)

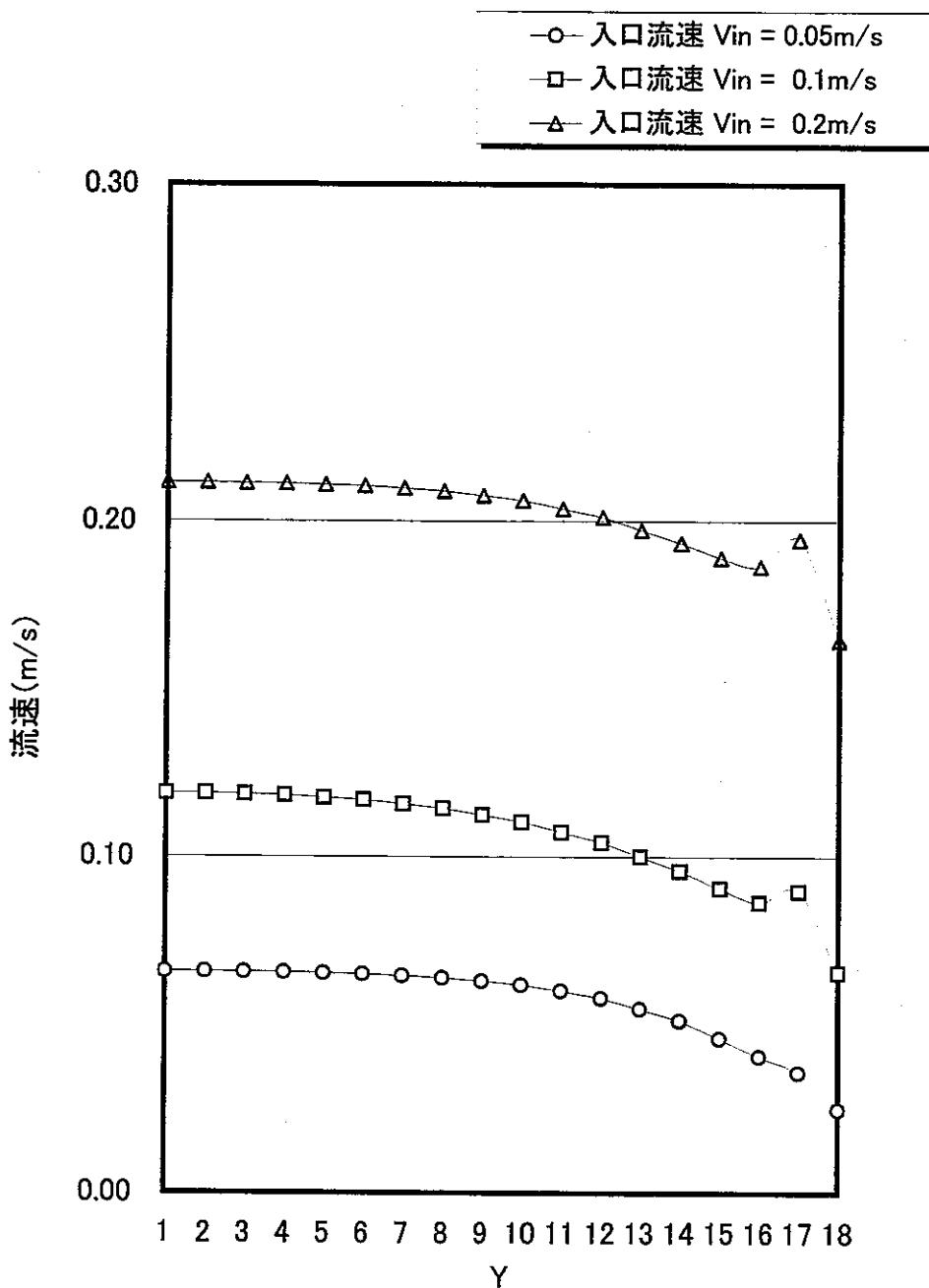


Fig. 5.1.15 流速分布の入口流速依存性
($q''_{pin}=14.85\text{kW/m}^2$, $q''_{wall}=-10\text{kW/m}^2$, $Z=26$)

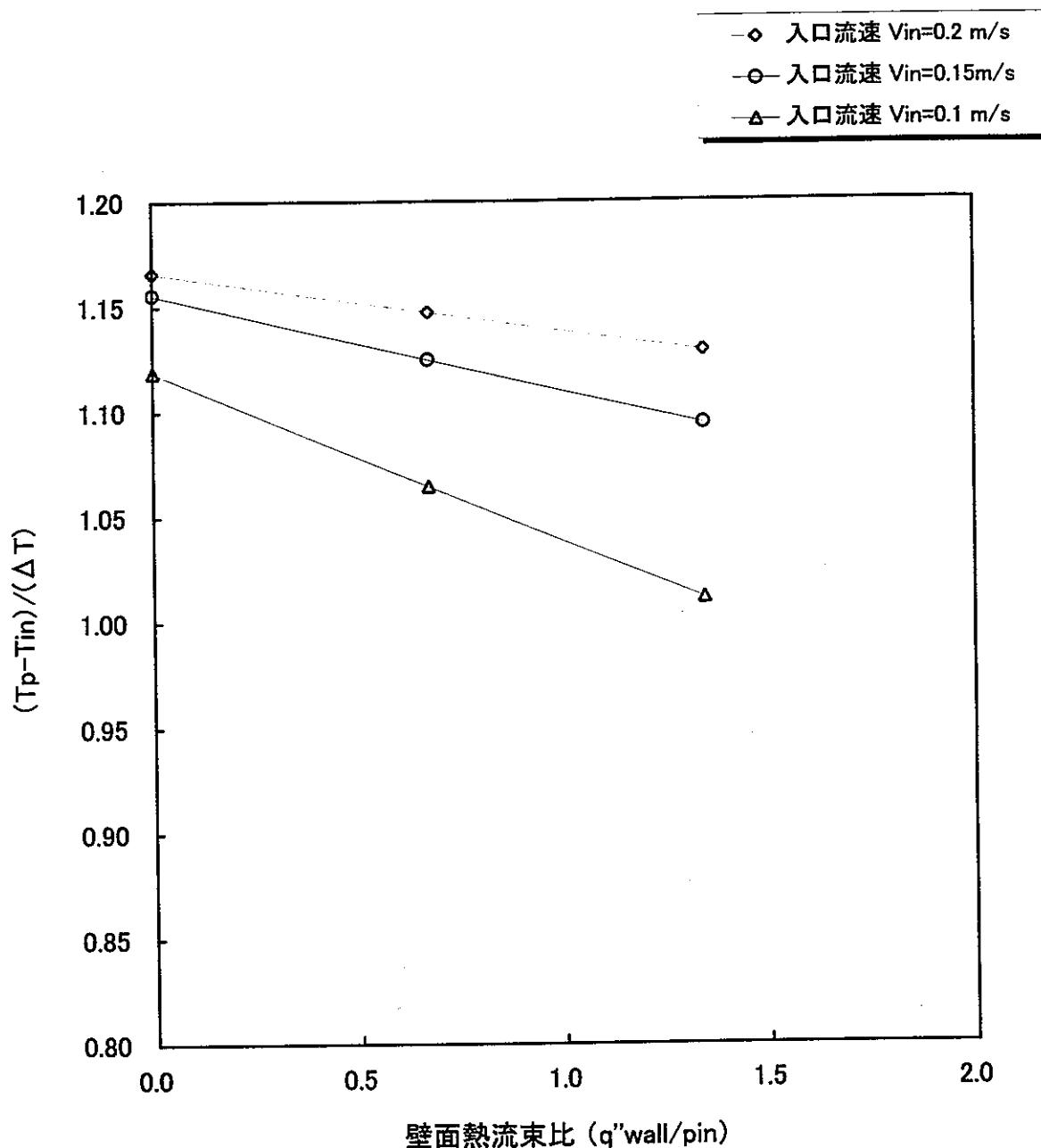


Fig. 5.2.1 最高温度の壁面熱流束比依存性
(発熱量 $q''_{pin}=7.43 \text{kW/m}^2$)

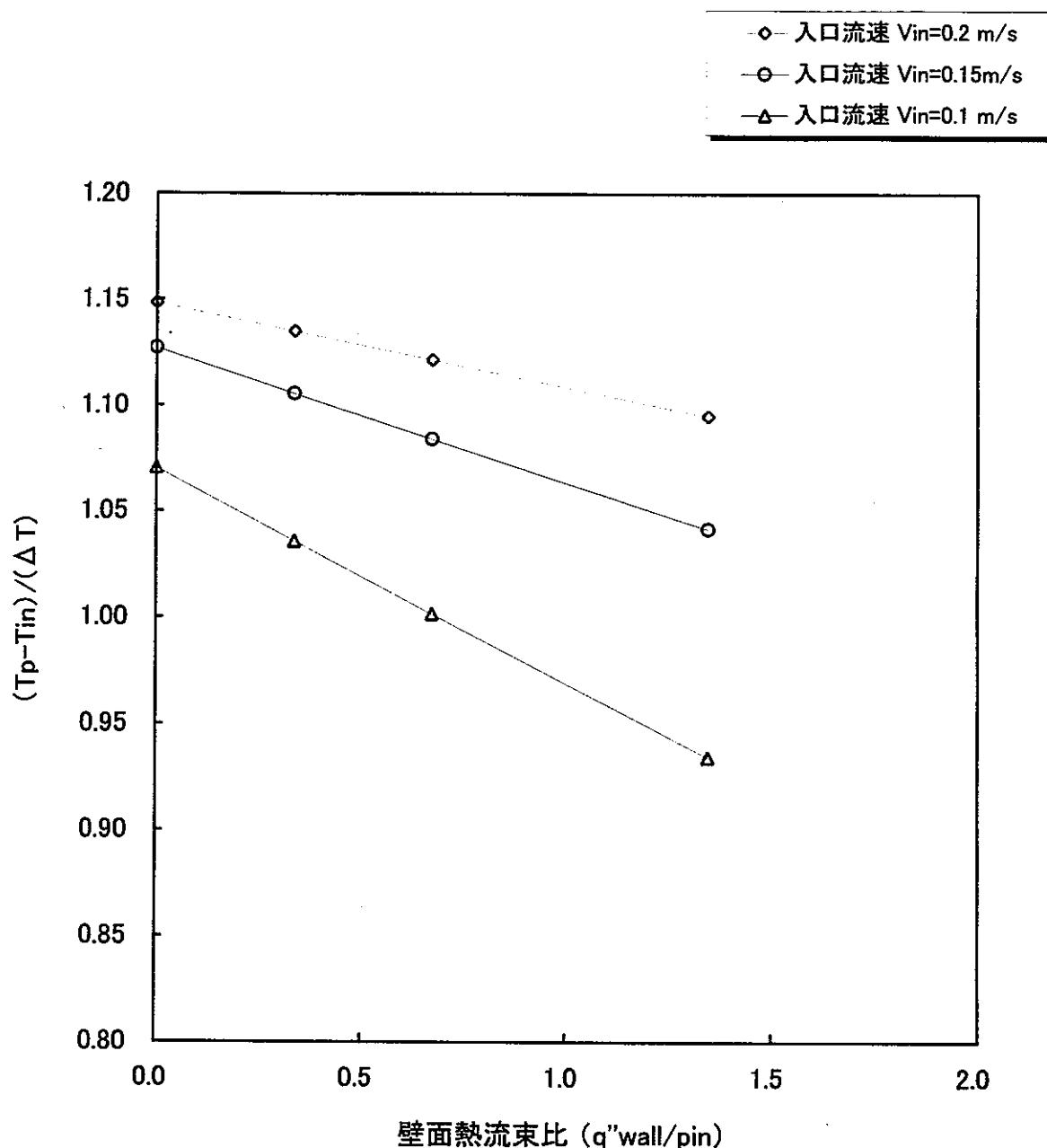


Fig. 5.2.2 最高温度の壁面熱流束比依存性
(発熱量 $q''_{pin} = 14.85 \text{ kW/m}^2$)

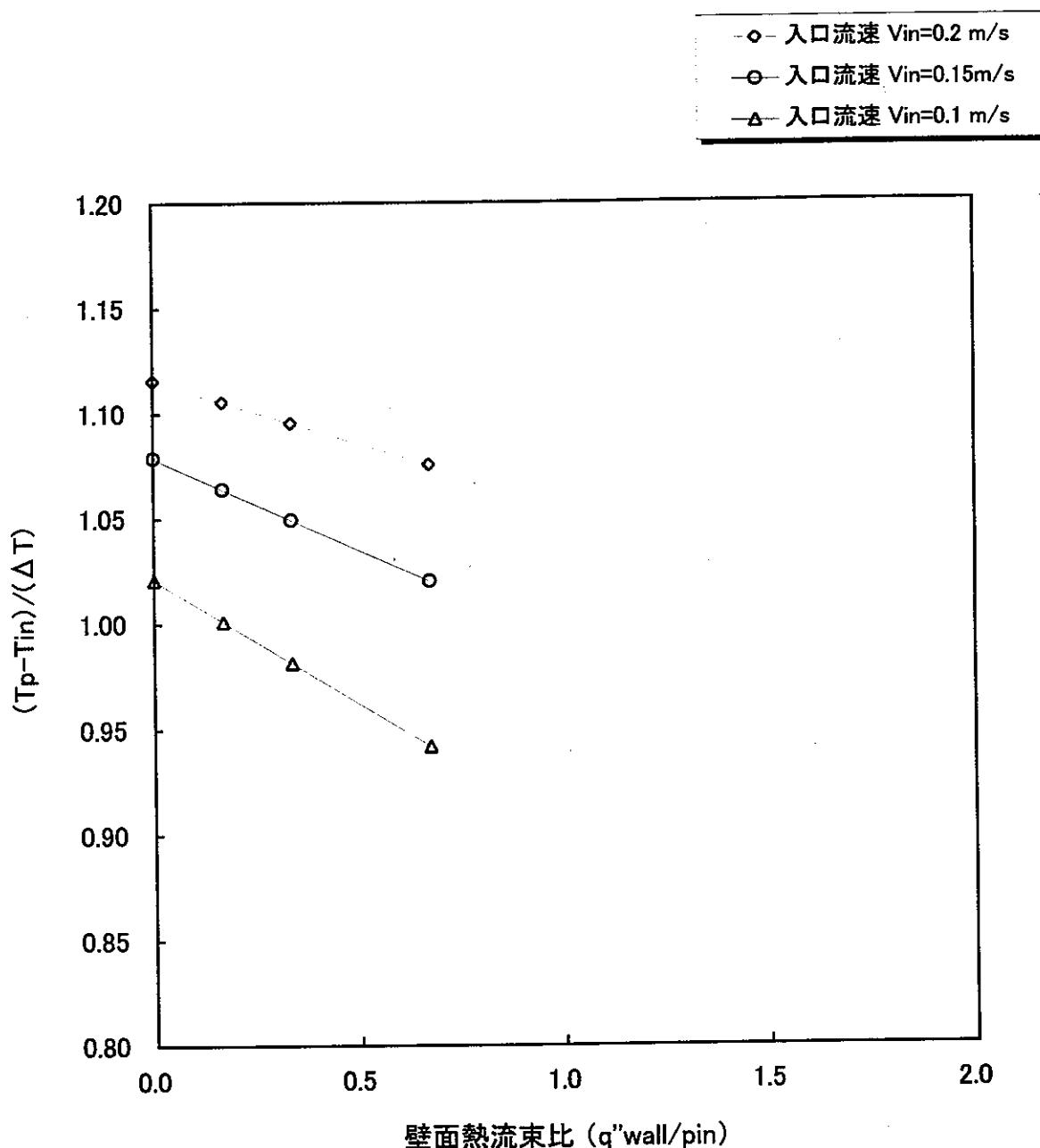


Fig. 5.2.3 最高温度の壁面熱流束比依存性
(発熱量 $q''_{pin} = 29.71 \text{ kW/m}^2$)

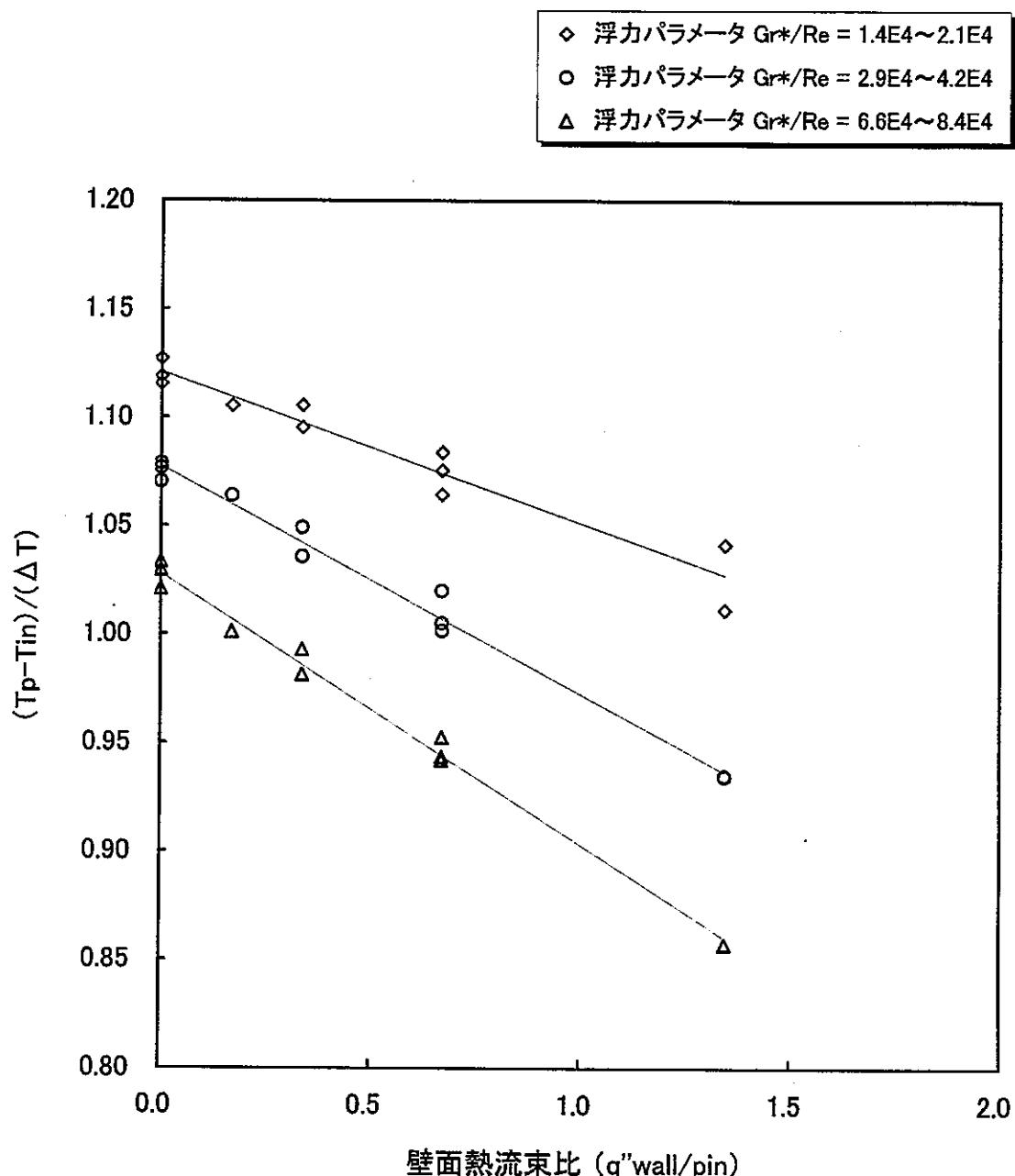


Fig. 5.2.4 最高温度の壁面熱流束比依存性
—浮力パラメータの違いによる比較—

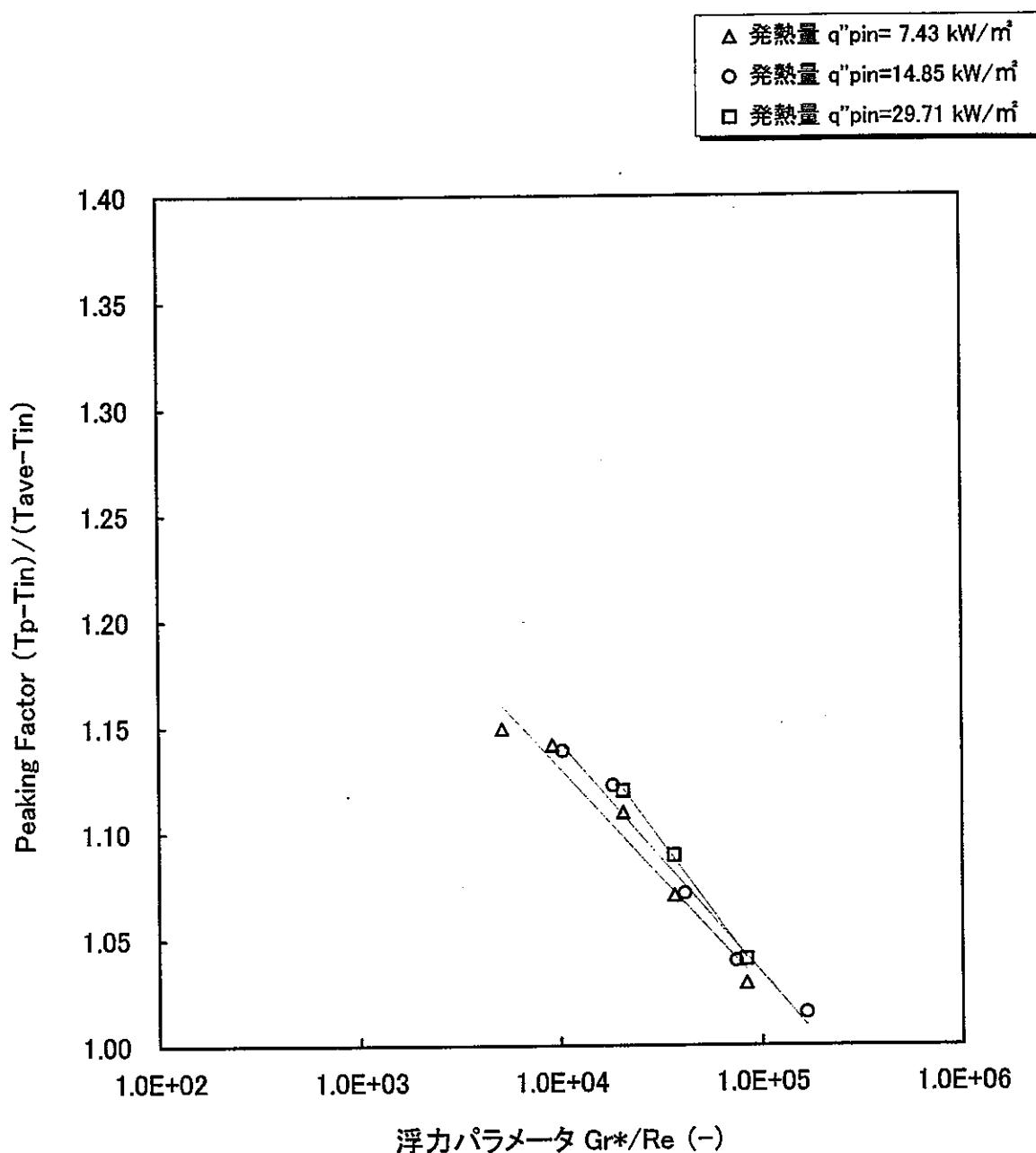


Fig. 5.3.1 ピーキングファクタの浮力パラメータ依存性
(除熱量 $q''_{wall} = 0.0 \text{ kW/m}^2$)

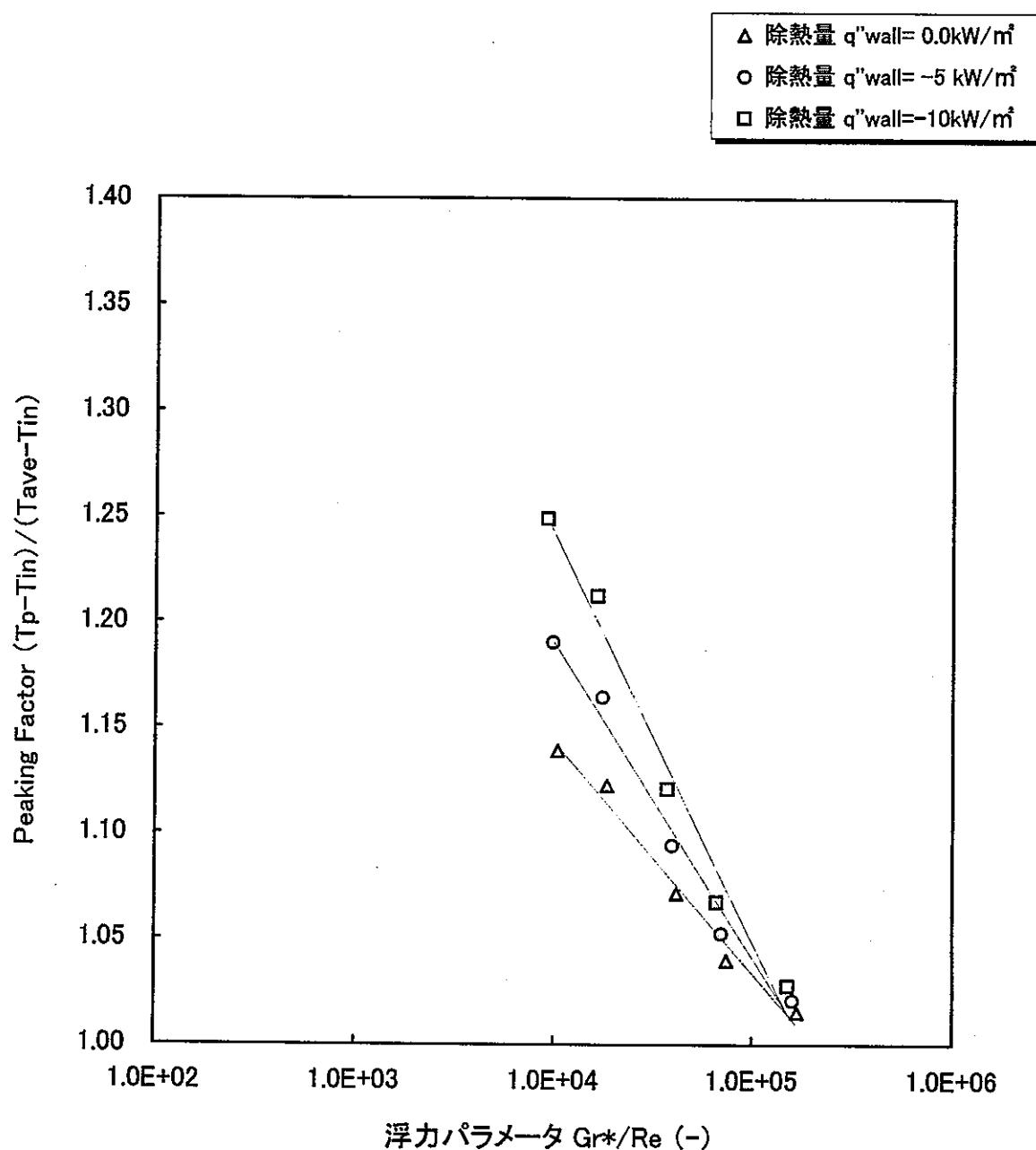


Fig. 5.3.2 ピーキングファクタの浮力パラメータ依存性
(発熱量 $q''_{pin} = 14.85 \text{ kW/m}^2$)

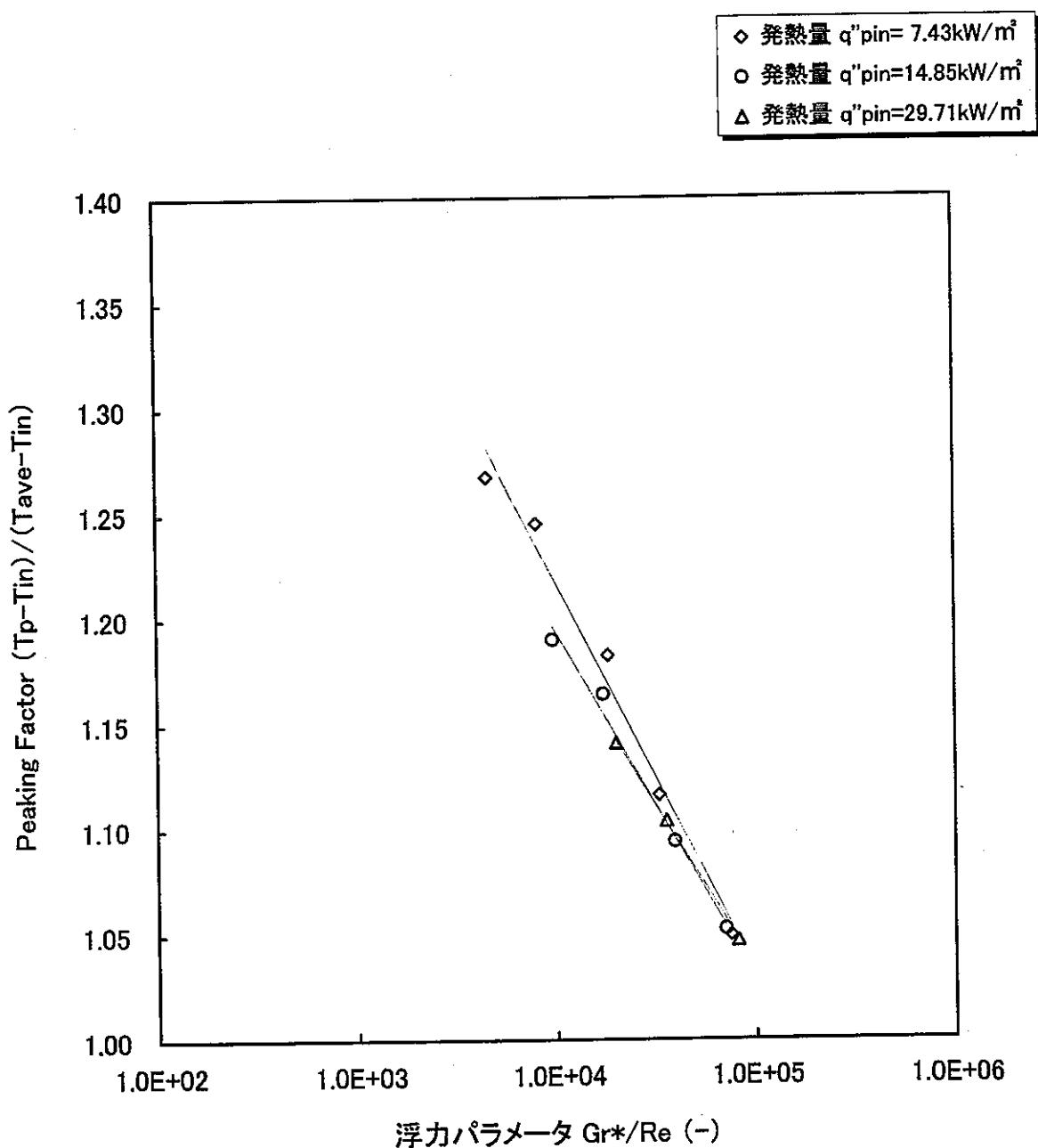


Fig. 5.3.3 ピーキングファクタの浮力パラメータ依存性
(除熱量 $q''_{wall} = -5 \text{ kW/m}^2$)

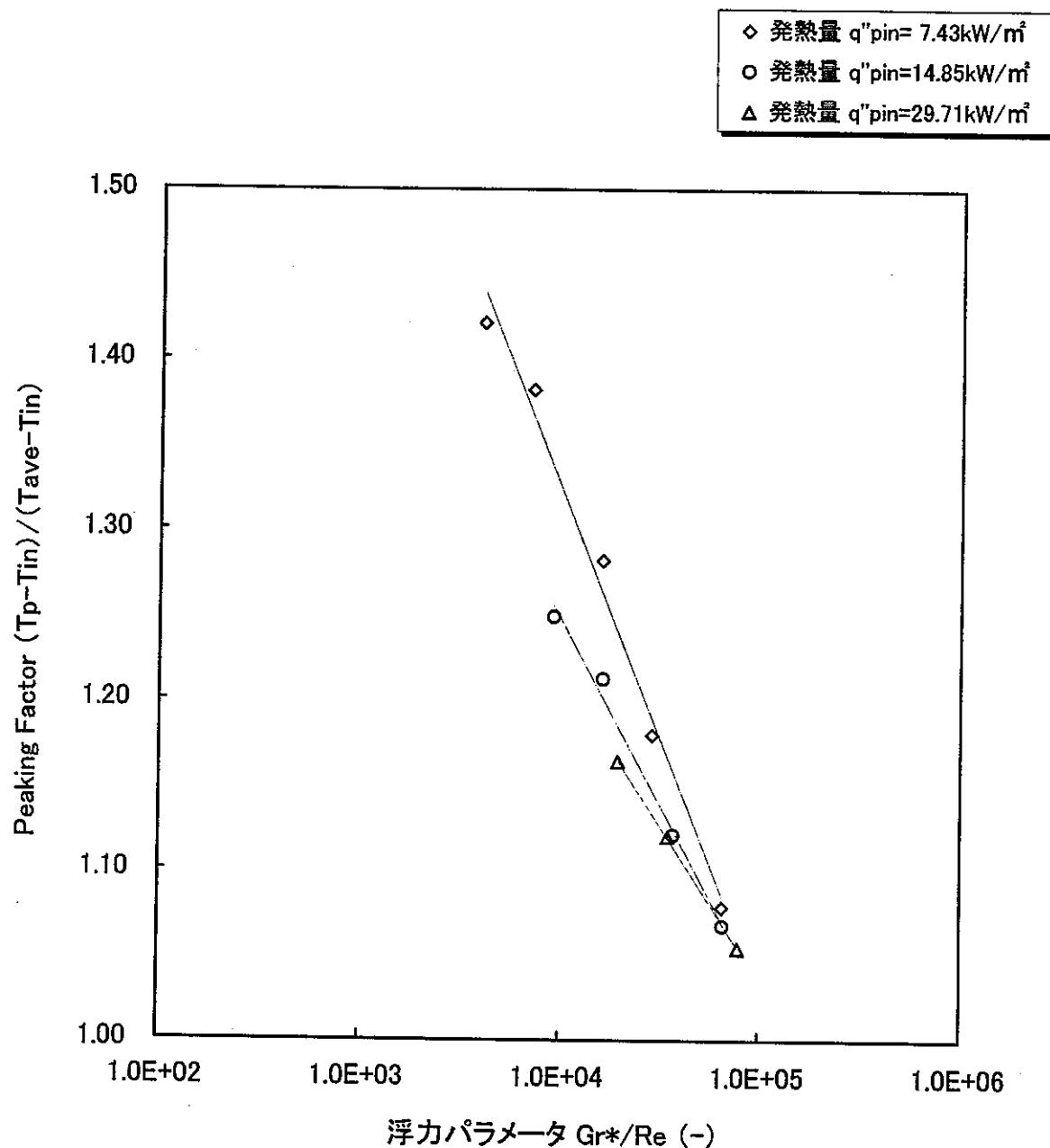


Fig. 5.3.4 ピーキングファクタの浮力パラメータ依存性
(除熱量 $q''wall = -10 \text{ kW/m}^2$)

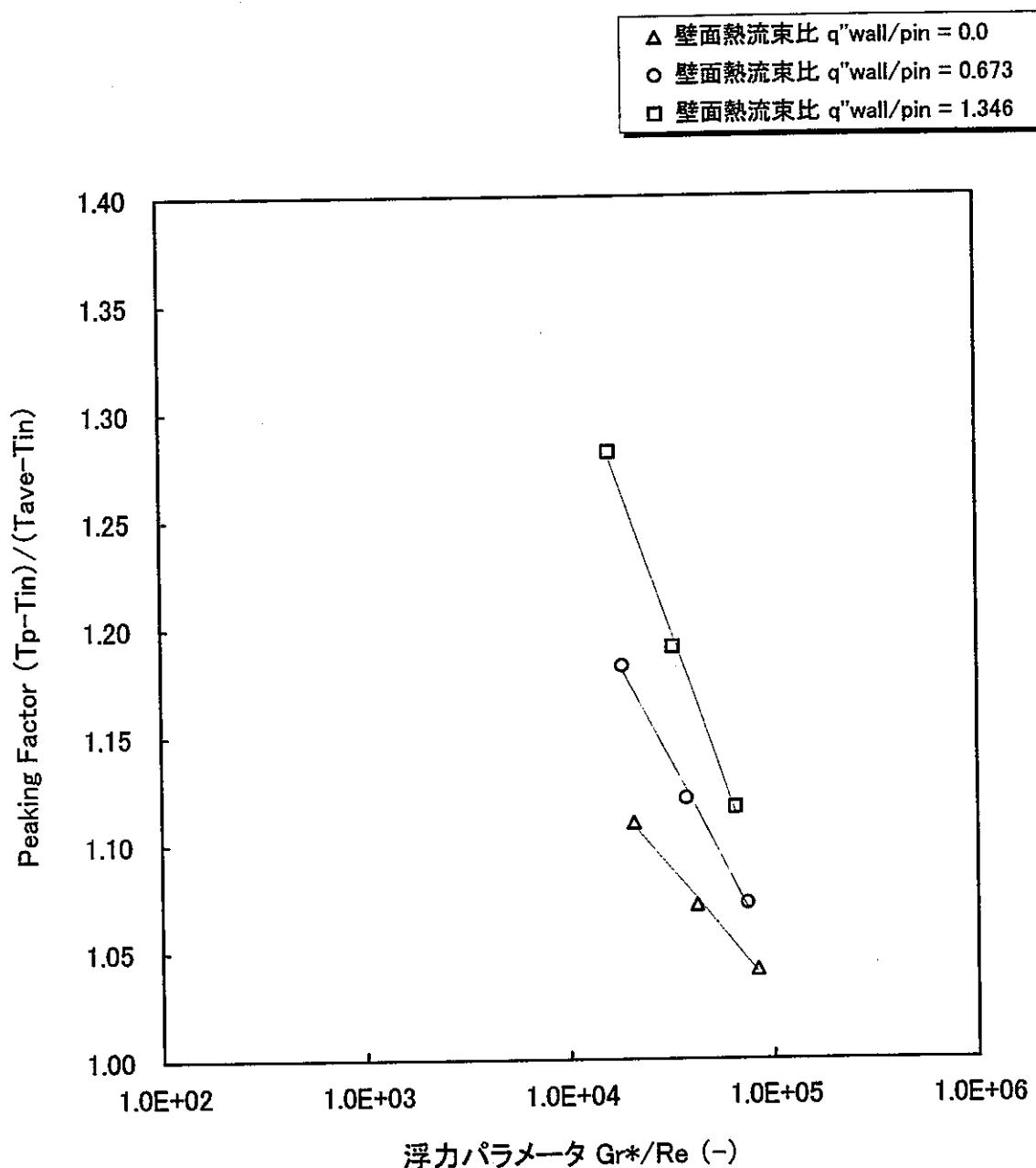


Fig. 5.3.5 ピーキングファクタの浮力パラメータ依存性
(入口流速 $V_{in}=0.1\text{m/s}$)

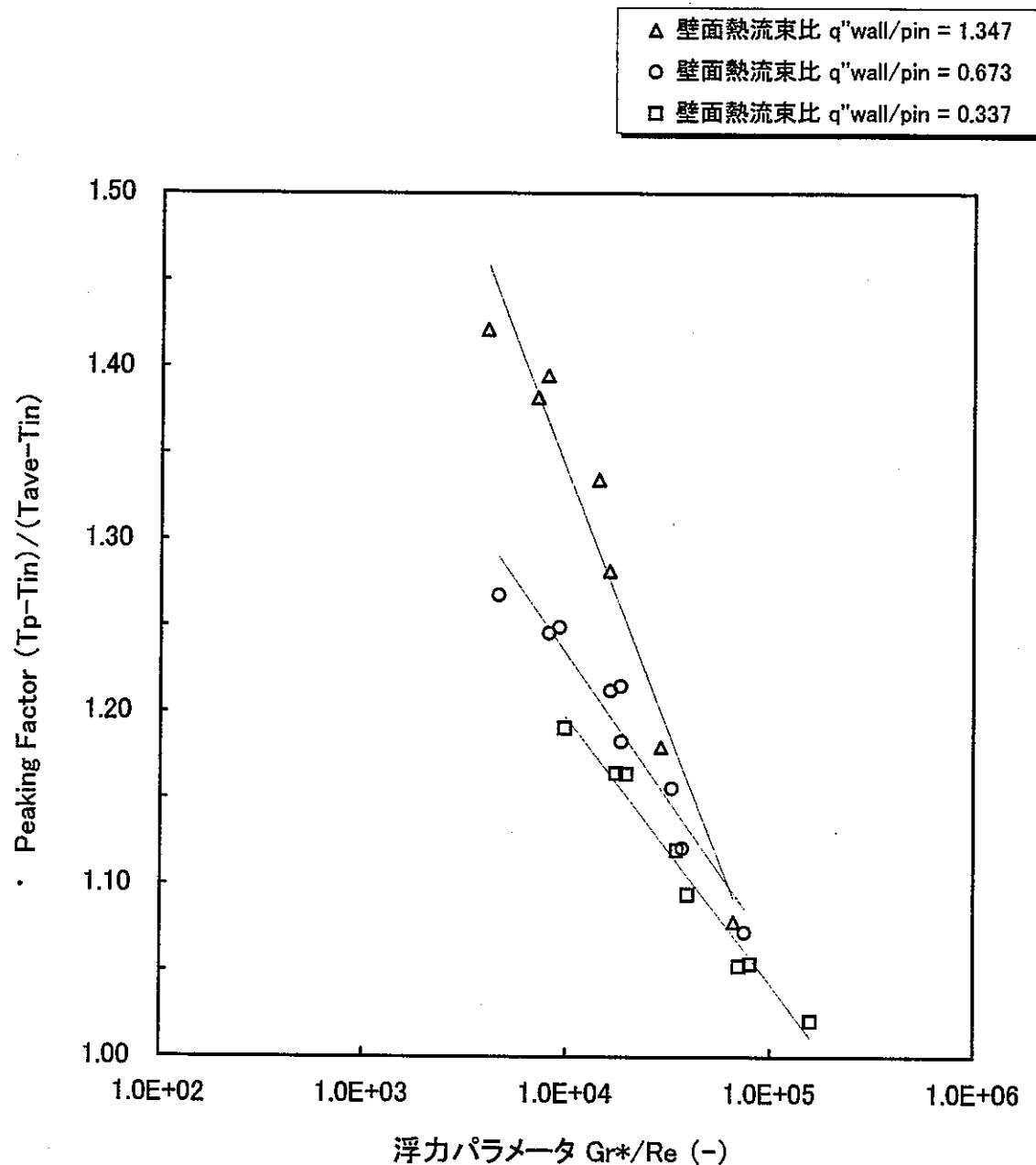


Fig. 5.3.6 ピーキングファクタの浮力パラメータ依存性
— 壁面熱流束比の違いによる比較 —

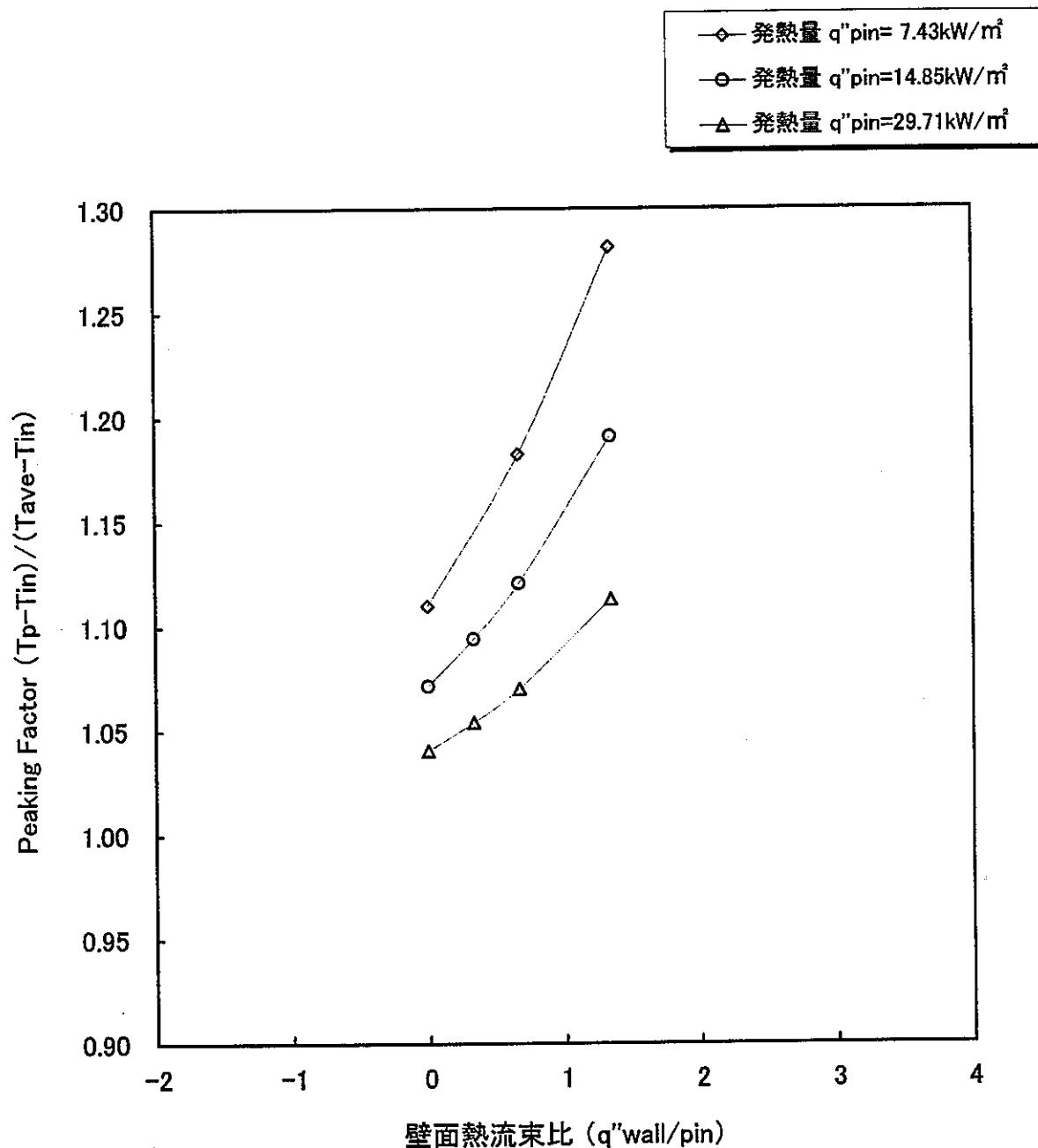


Fig. 5.3.7 ピーキングファクタの熱流束比依存性
(入口流速 $V_{in}=0.1 \text{ m/s}$)

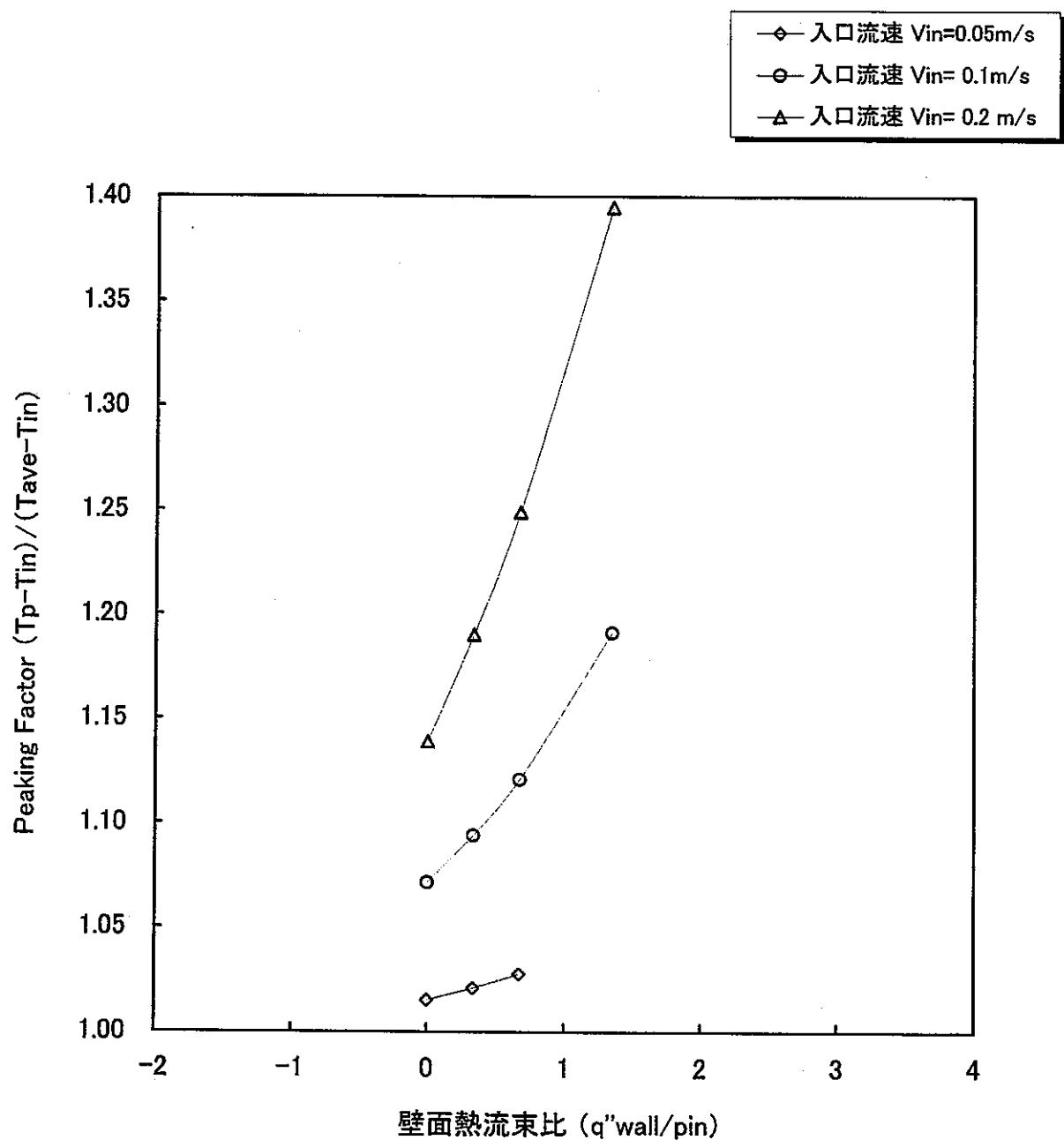


Fig. 5.3.8 ピーキングファクタの壁面熱流束比依存性
(発熱量 $q''_{pin}=14.85 \text{ kW/m}^2$)

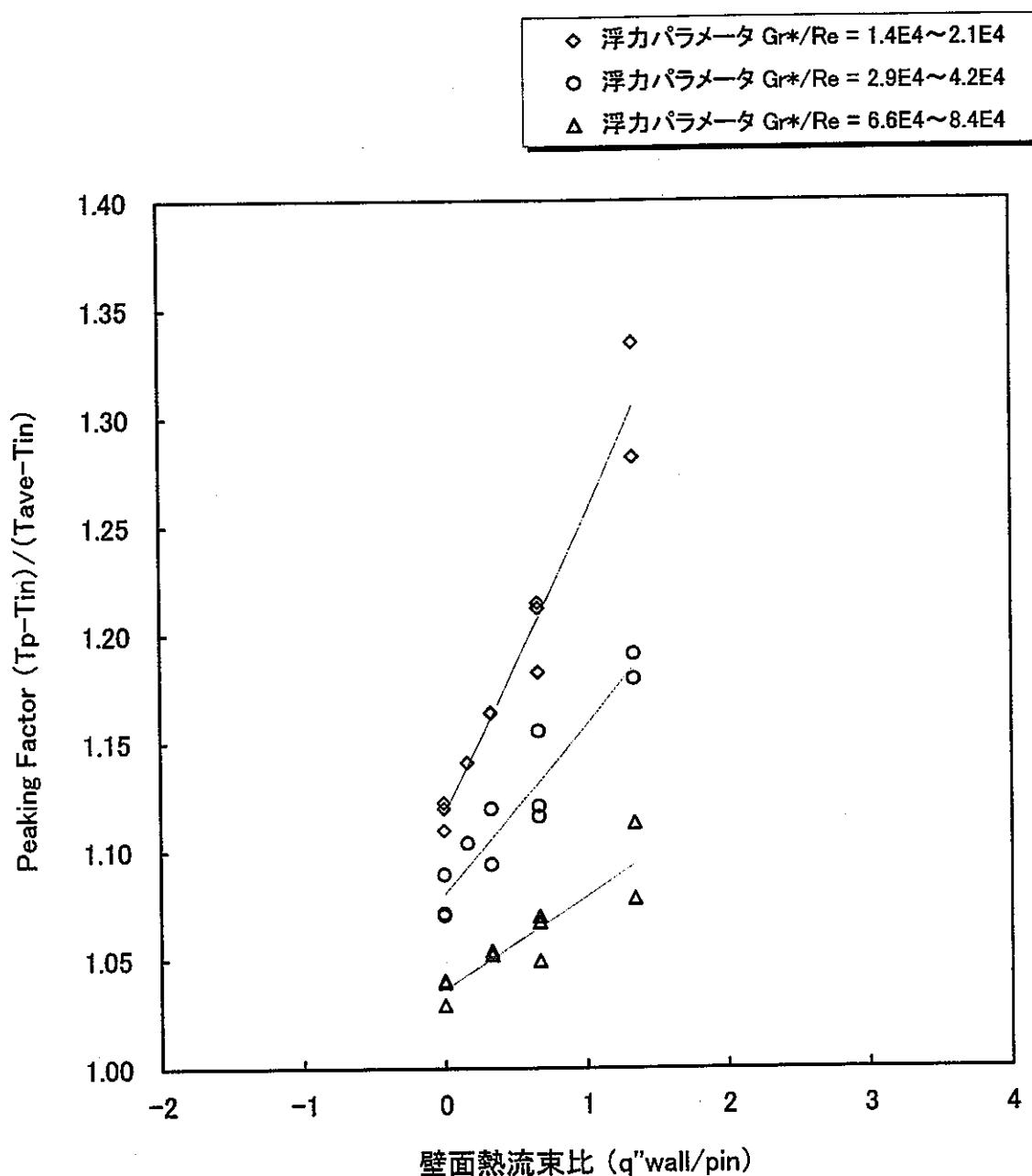


Fig. 5.3.9 ピーキングファクタの壁面熱流束比依存性
—浮力パラメータの違いによる比較—

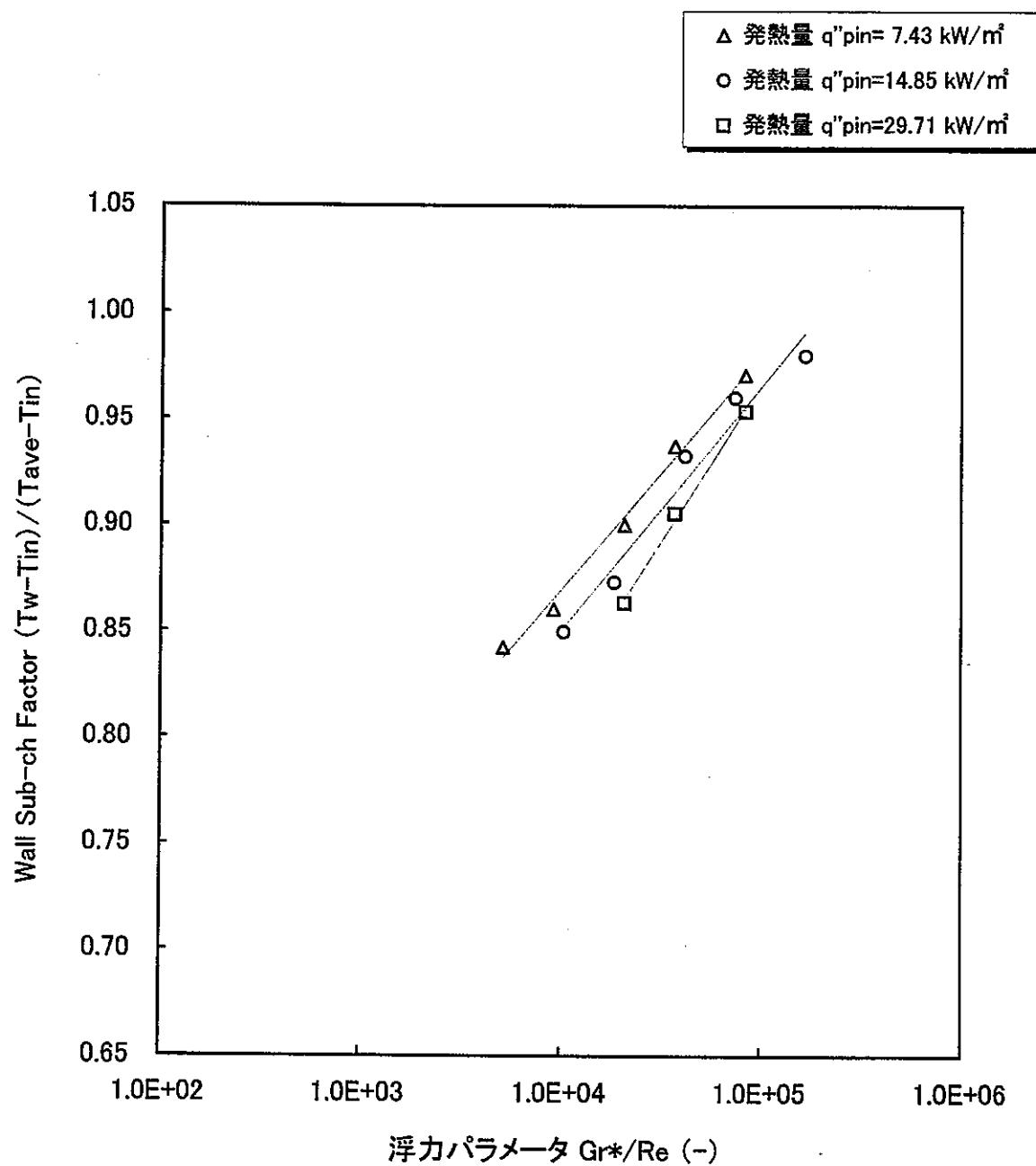


Fig. 5.4.1 壁サブチャンネルファクタの浮力パラメータ依存性
 (除熱量 $q''_{wall} = 0.0 \text{ kW/m}^2$)

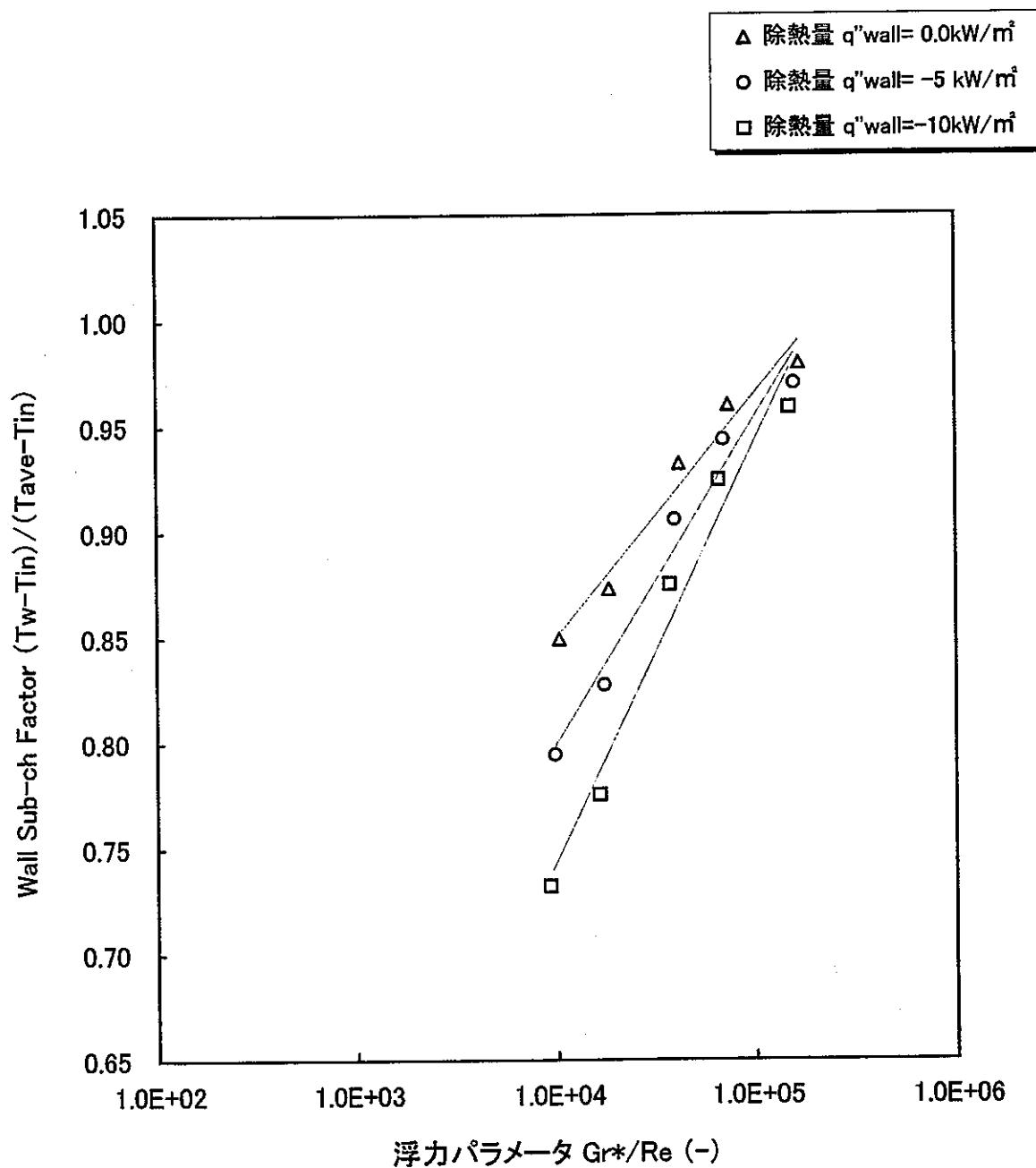


Fig. 5.4.2 壁サブチャンネルファクタの浮力パラメータ依存性
(発熱量 $q''_{pin} = 14.85 \text{ kW/m}^2$)

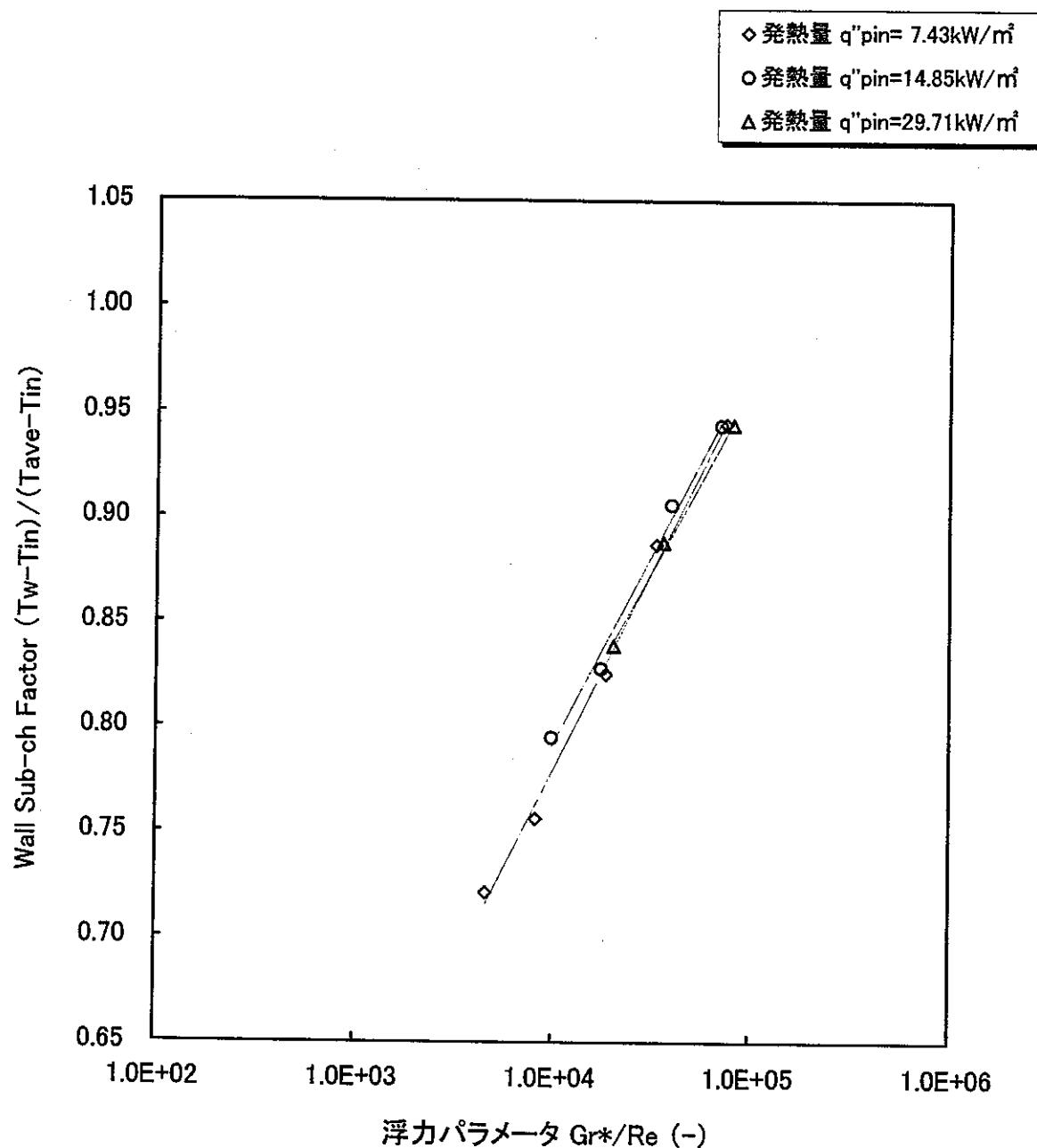


Fig. 5.4.3 壁サブチャンネルファクタの浮力パラメータ依存性
 (除熱量 $q''_{wall} = -5 \text{ kW/m}^2$)

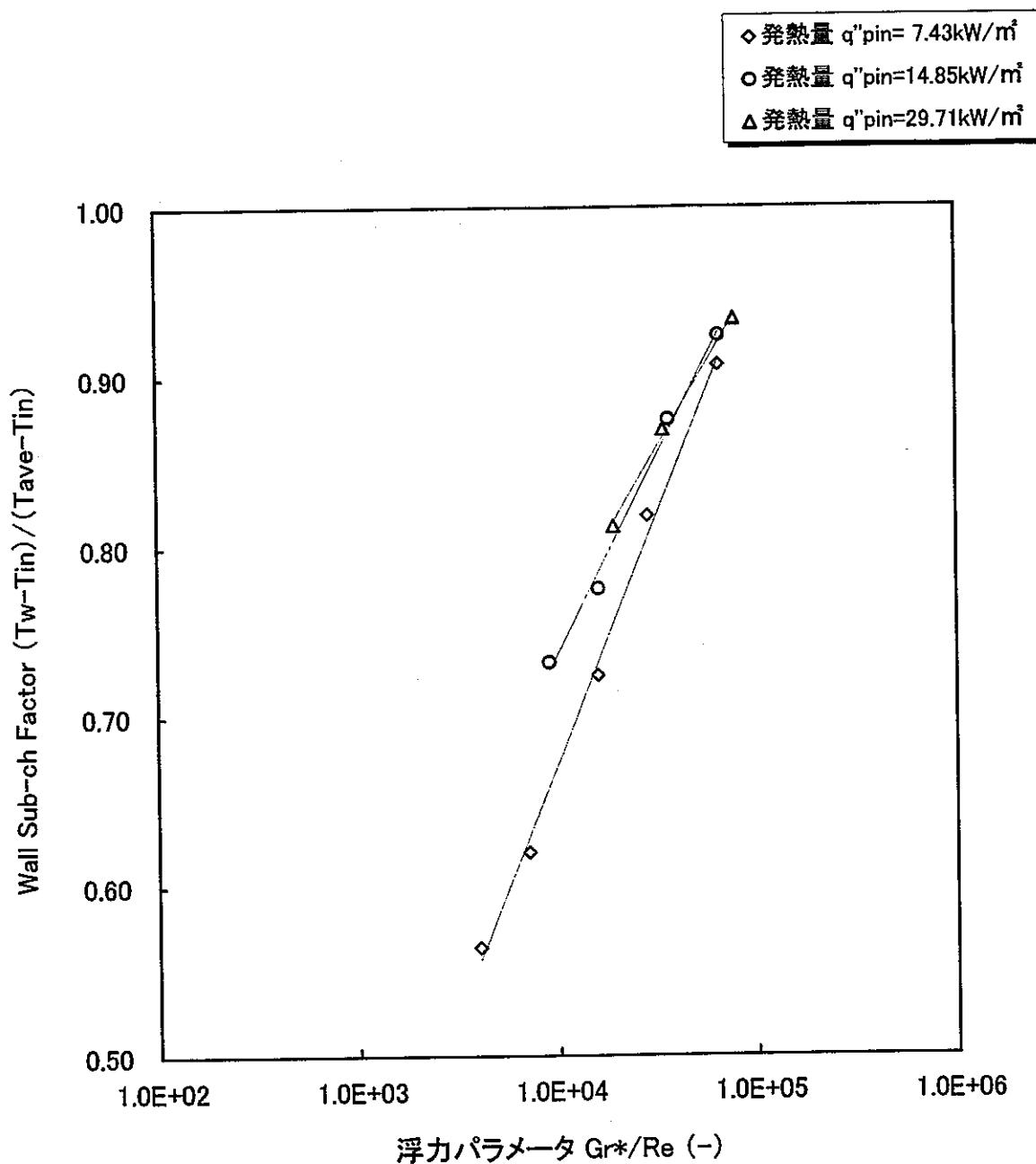


Fig. 5.4.4 壁サブチャンネルファクタの浮力パラメータ依存性
(除熱量 $q''_{wall} = -10 \text{ kW/m}^2$)

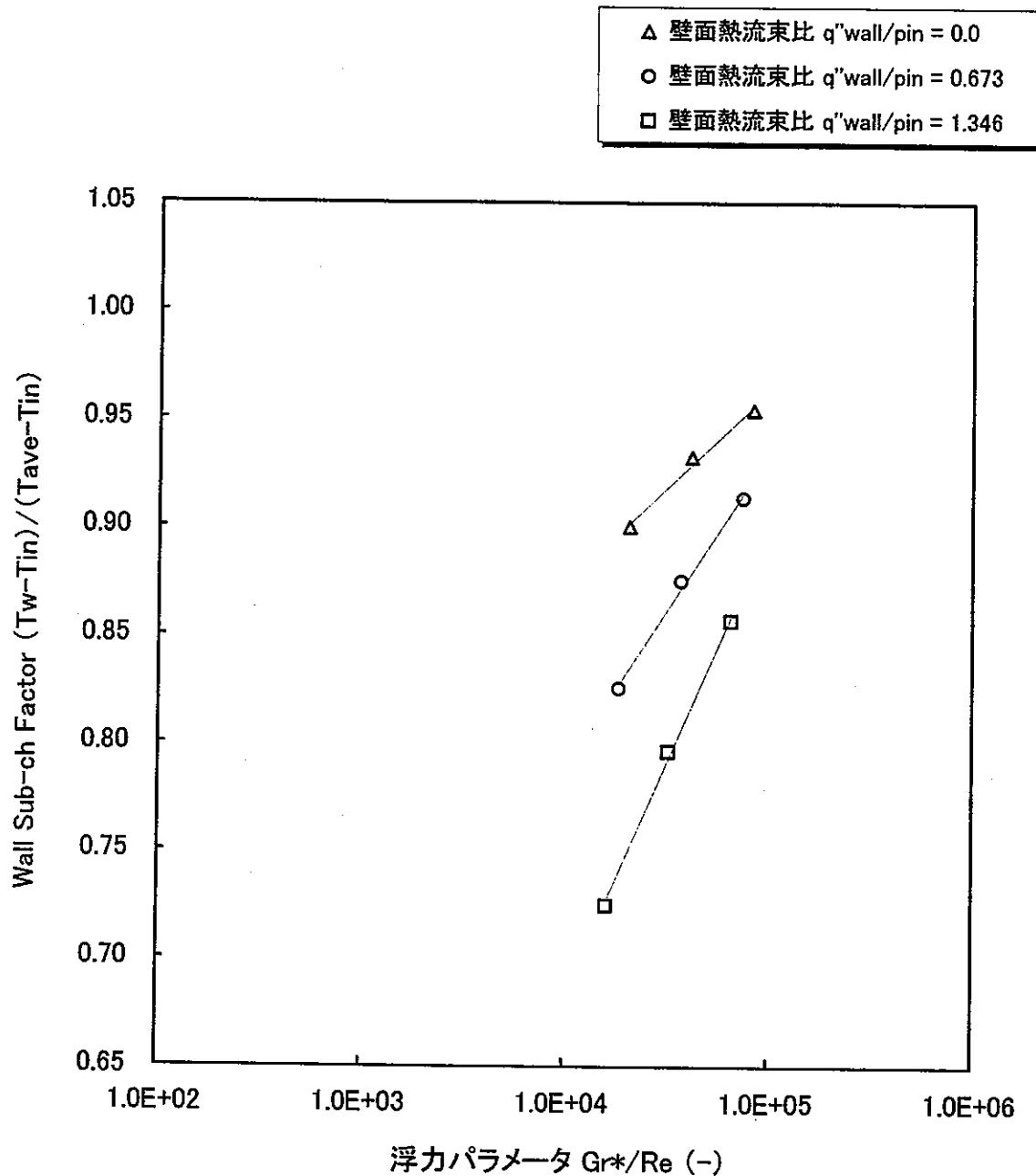


Fig. 5.4.5 壁サブチャンネルファクタの浮力パラメータ依存性
(入口流速 $V_{in}=0.1\text{m/s}$)

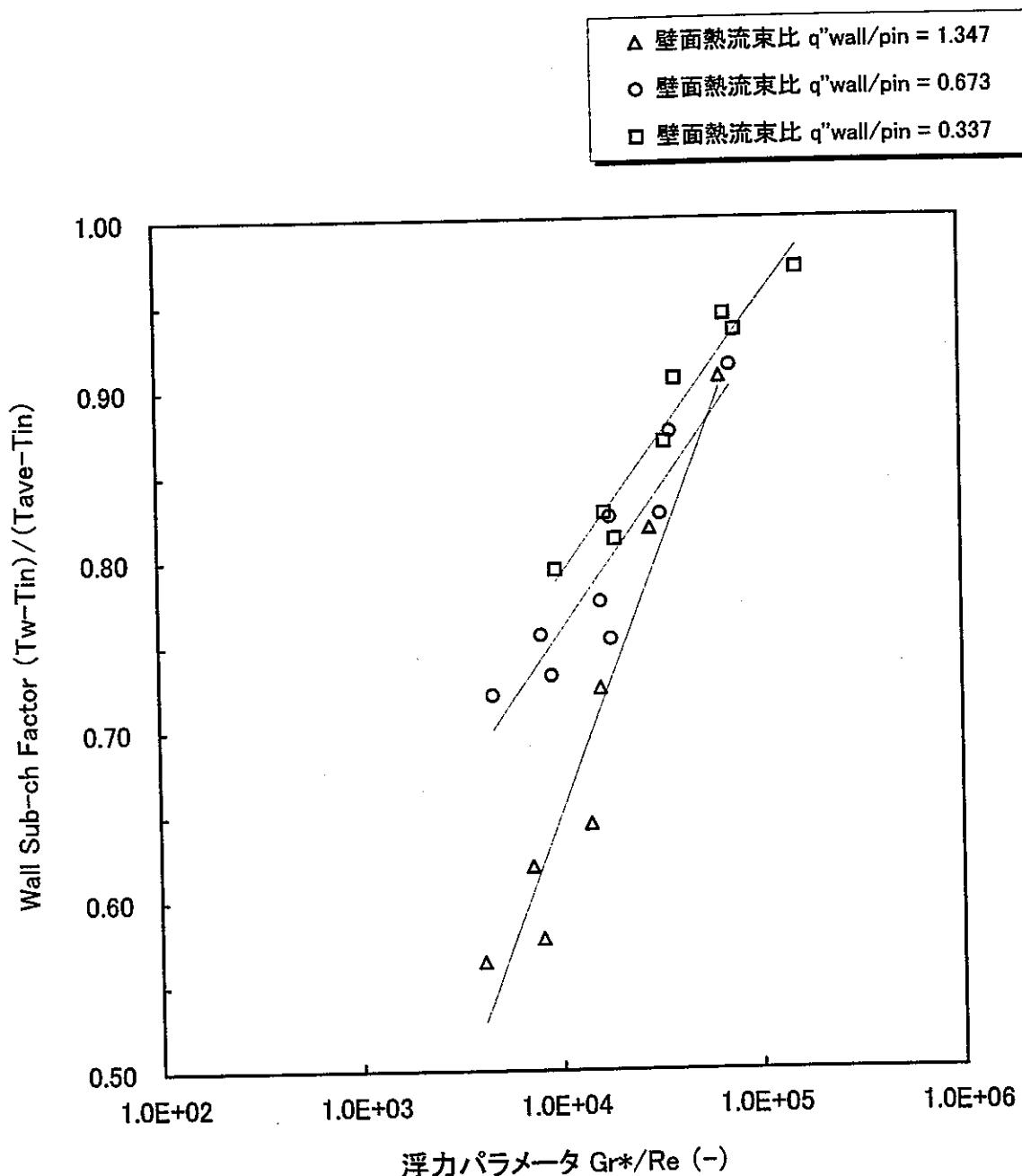


Fig. 5.4.6 壁サブチャンネルファクタの浮力パラメータ依存性
—壁面熱流束比の違いによる比較—

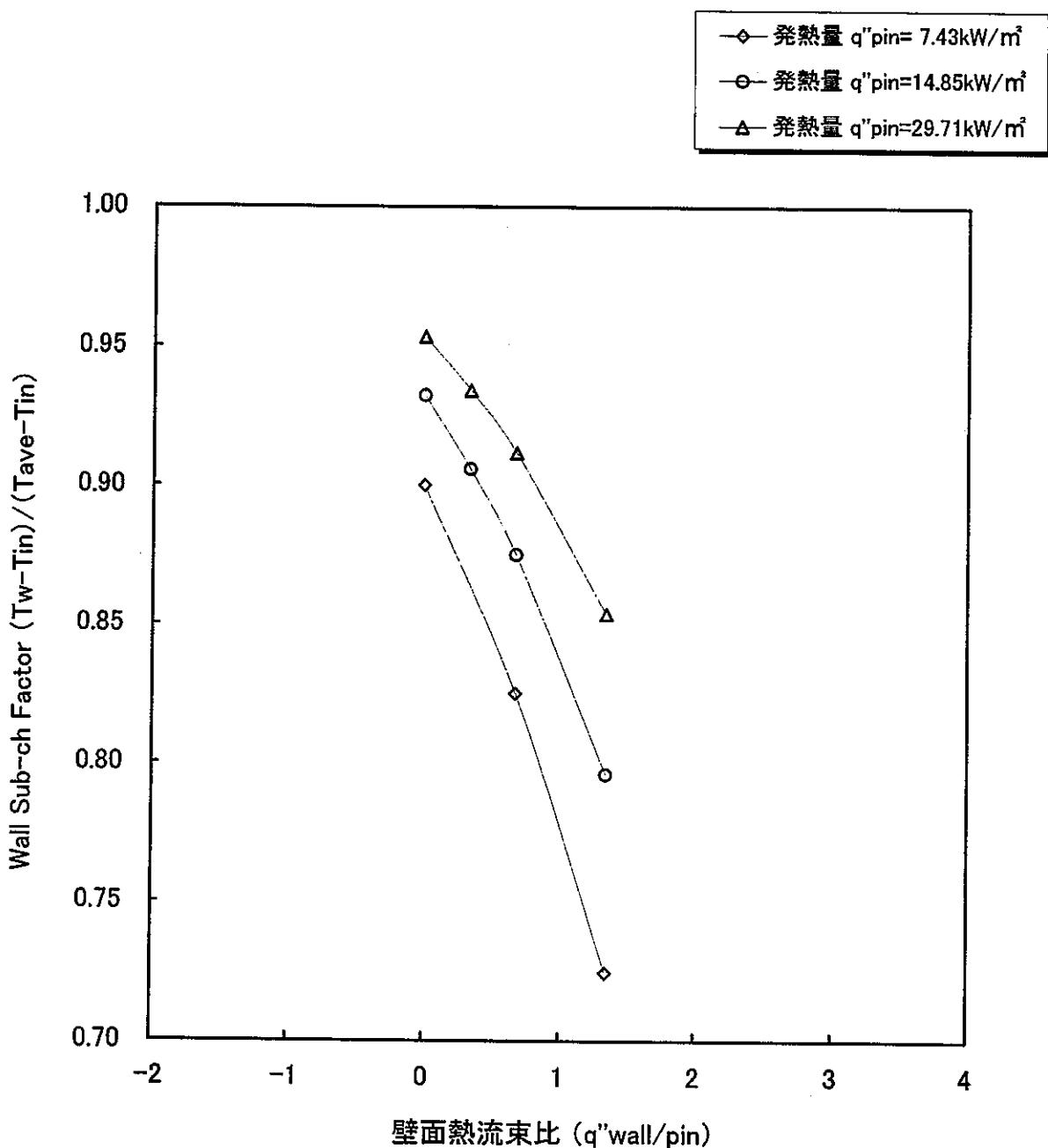


Fig. 5.4.7 壁サブチャンネルファクタの壁面熱流束比依存性
(入口流速 $V_{in}=0.1\text{ m/s}$)

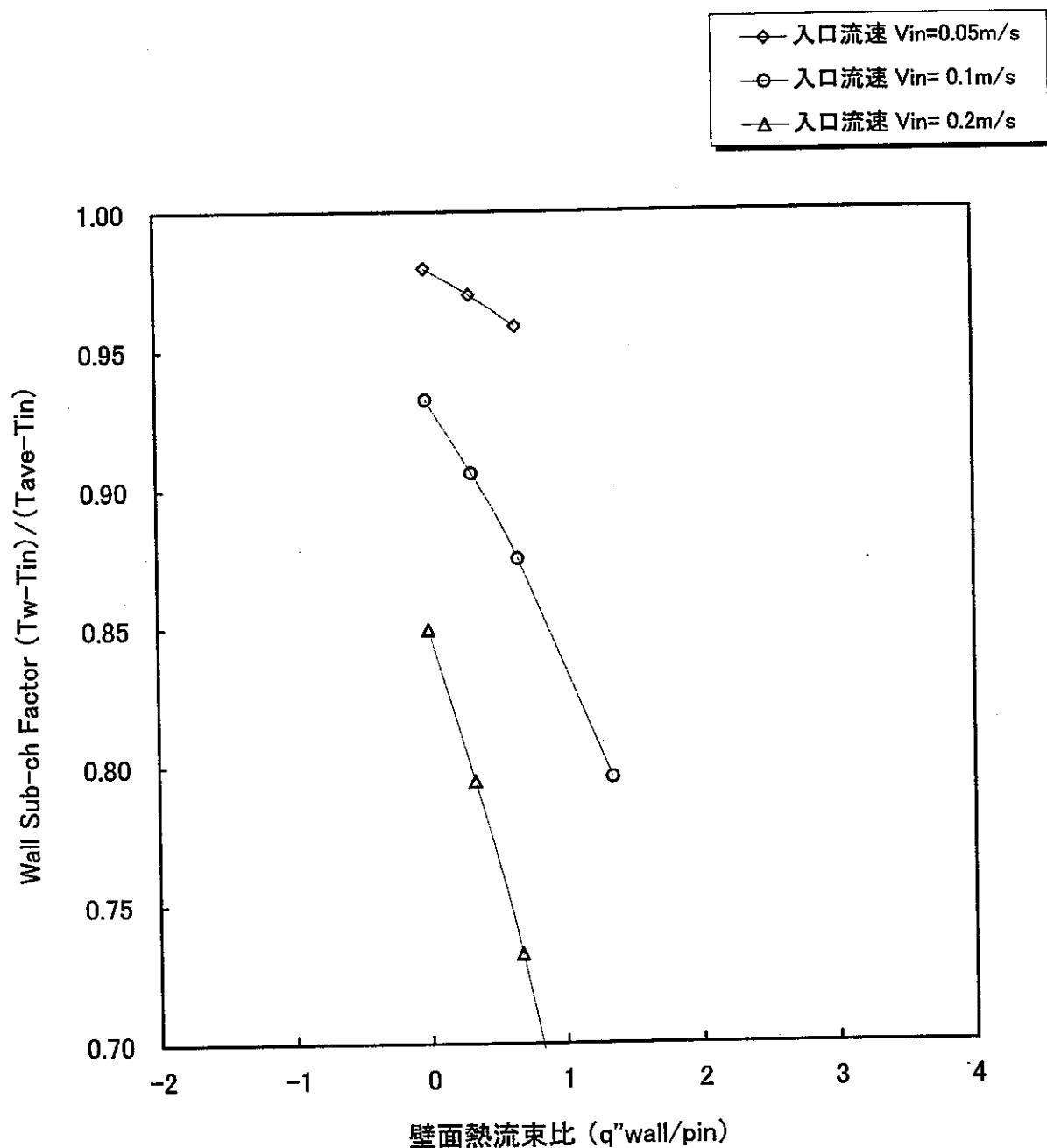


Fig. 5.4.8 壁サブチャンネルファクタの壁面熱流束比依存性
(発熱量 $q''_{pin}=14.85 \text{ kW/m}^2$)

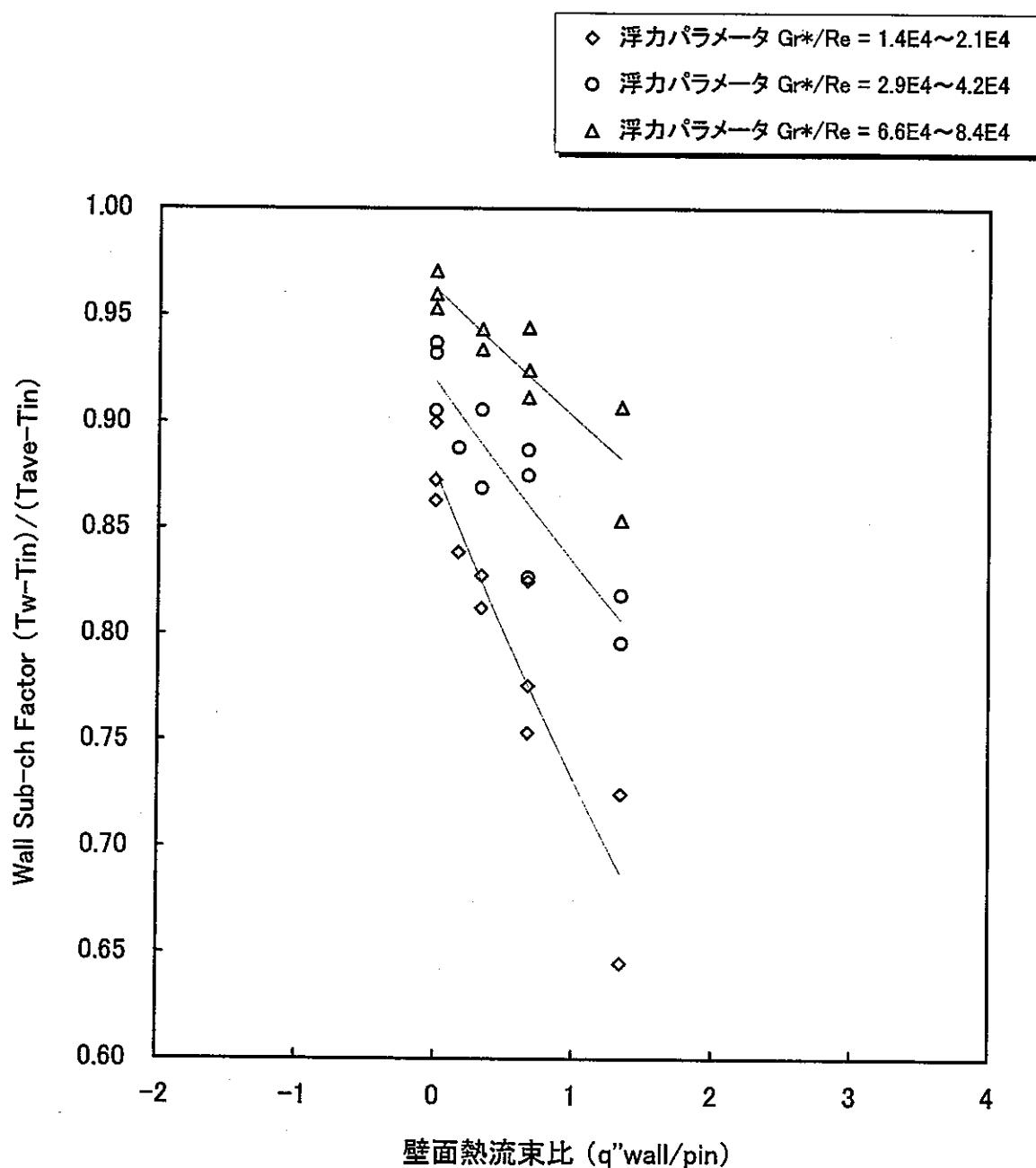


Fig. 5.4.9 壁サブチャンネルファクタの壁面熱流束比依存性
—浮力パラメータの違いによる比較—

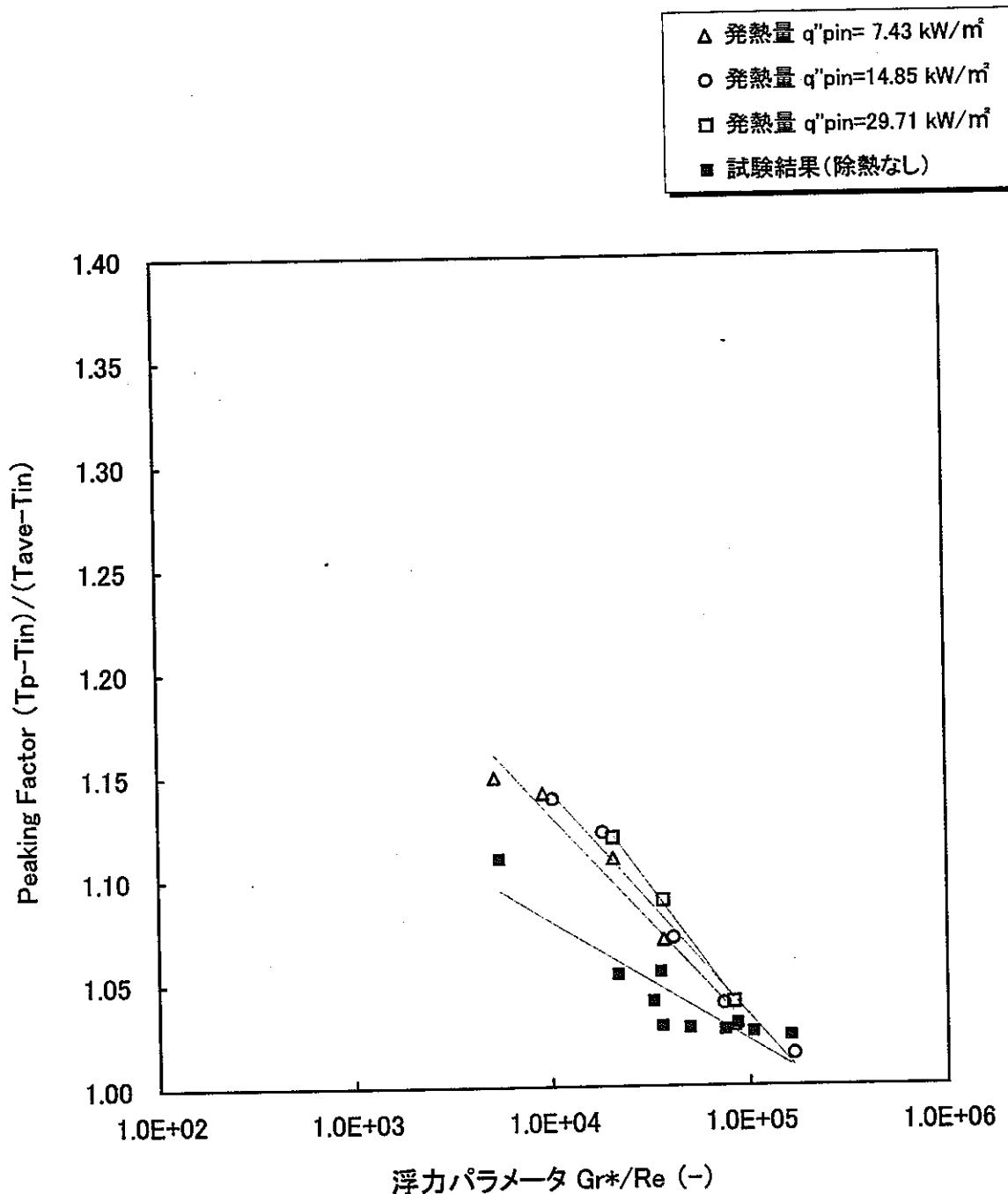


Fig. 6.1.1 ピーキングファクタの浮力パラメータ依存性
 (除熱量 $q''_{wall} = 0.0 \text{ kW/m}^2$)

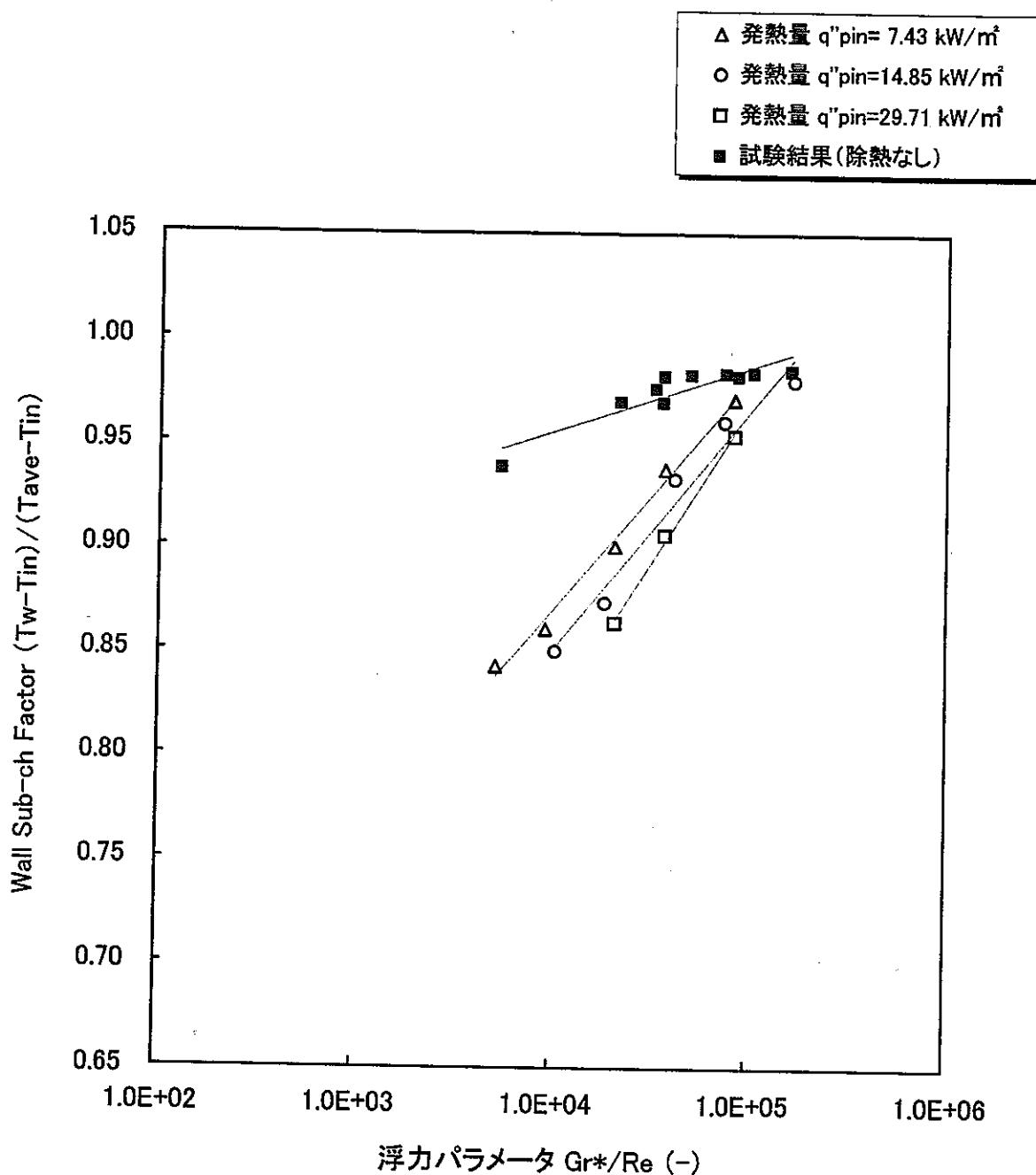


Fig. 6.1.2 壁サブチャンネルファクタの浮力パラメータ依存性
(除熱量 $q''_{wall} = 0.0 \text{ kW/m}^2$)

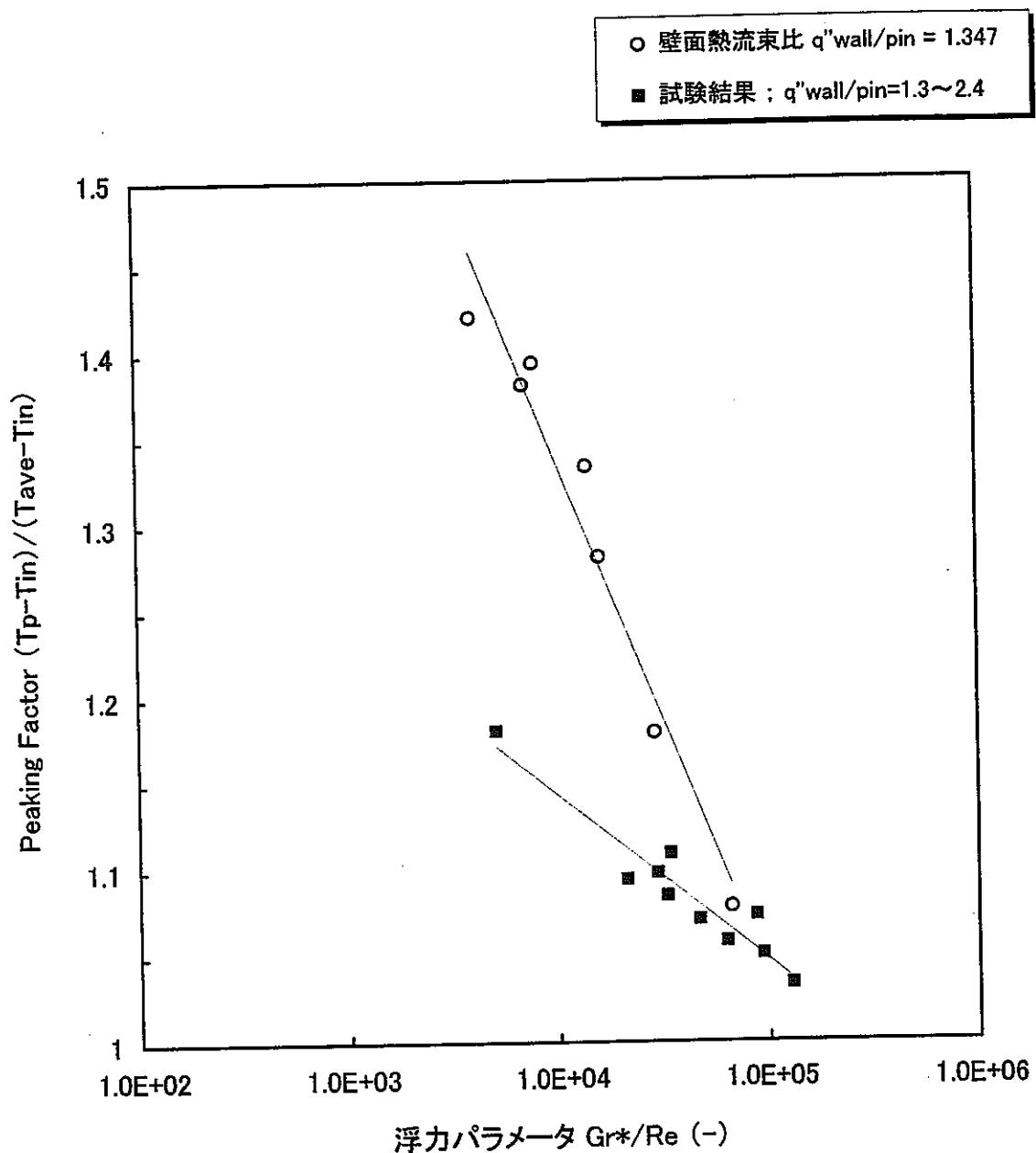


Fig. 6.1.3 ピーキングファクタの浮力パラメータ依存性
— 37本ピンバンドル試験結果との比較 —

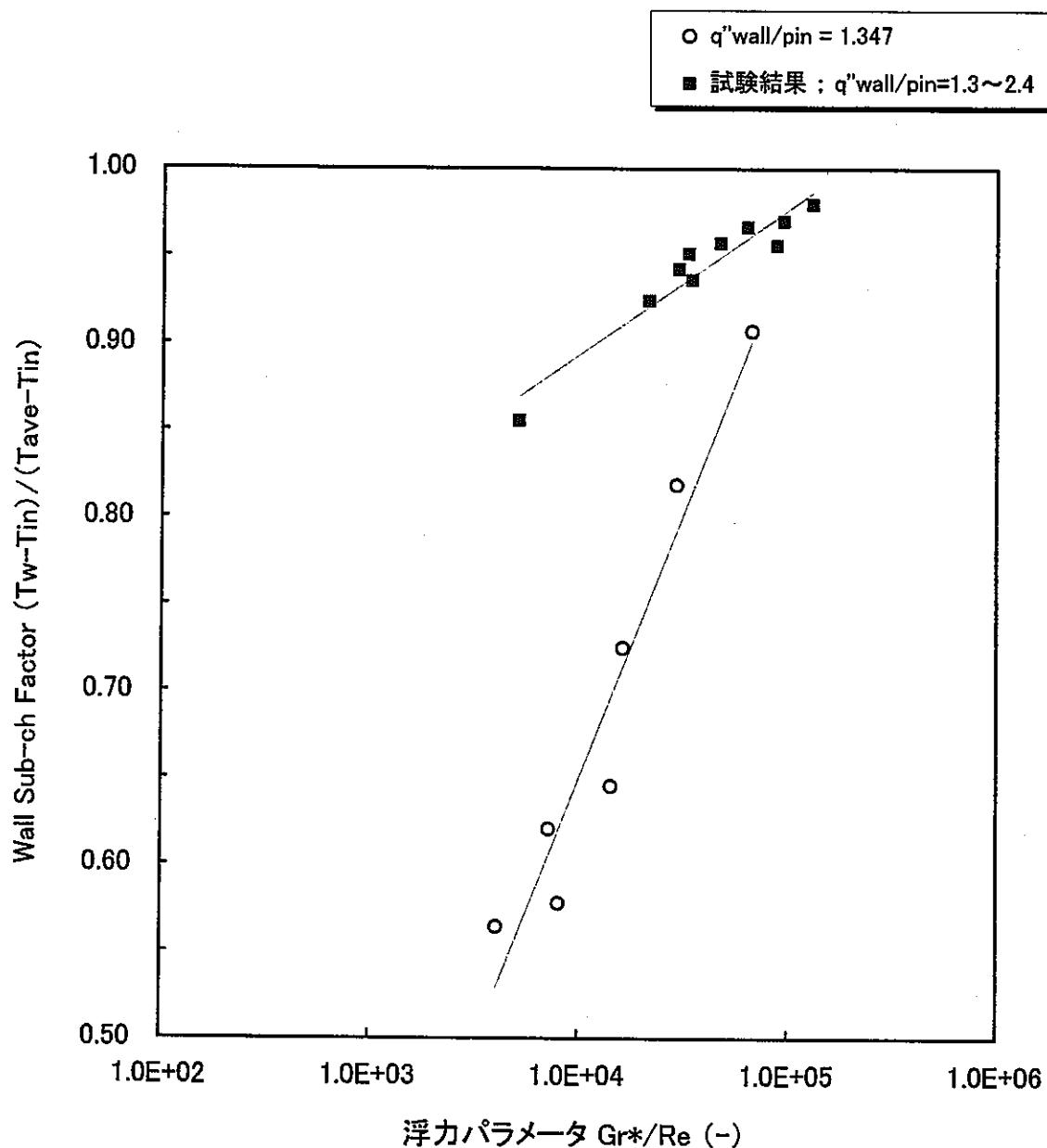


Fig. 6.1.4 壁サブチャンネルファクタの浮力パラメータ依存性
— 37本ピンバンドル試験結果との比較 —

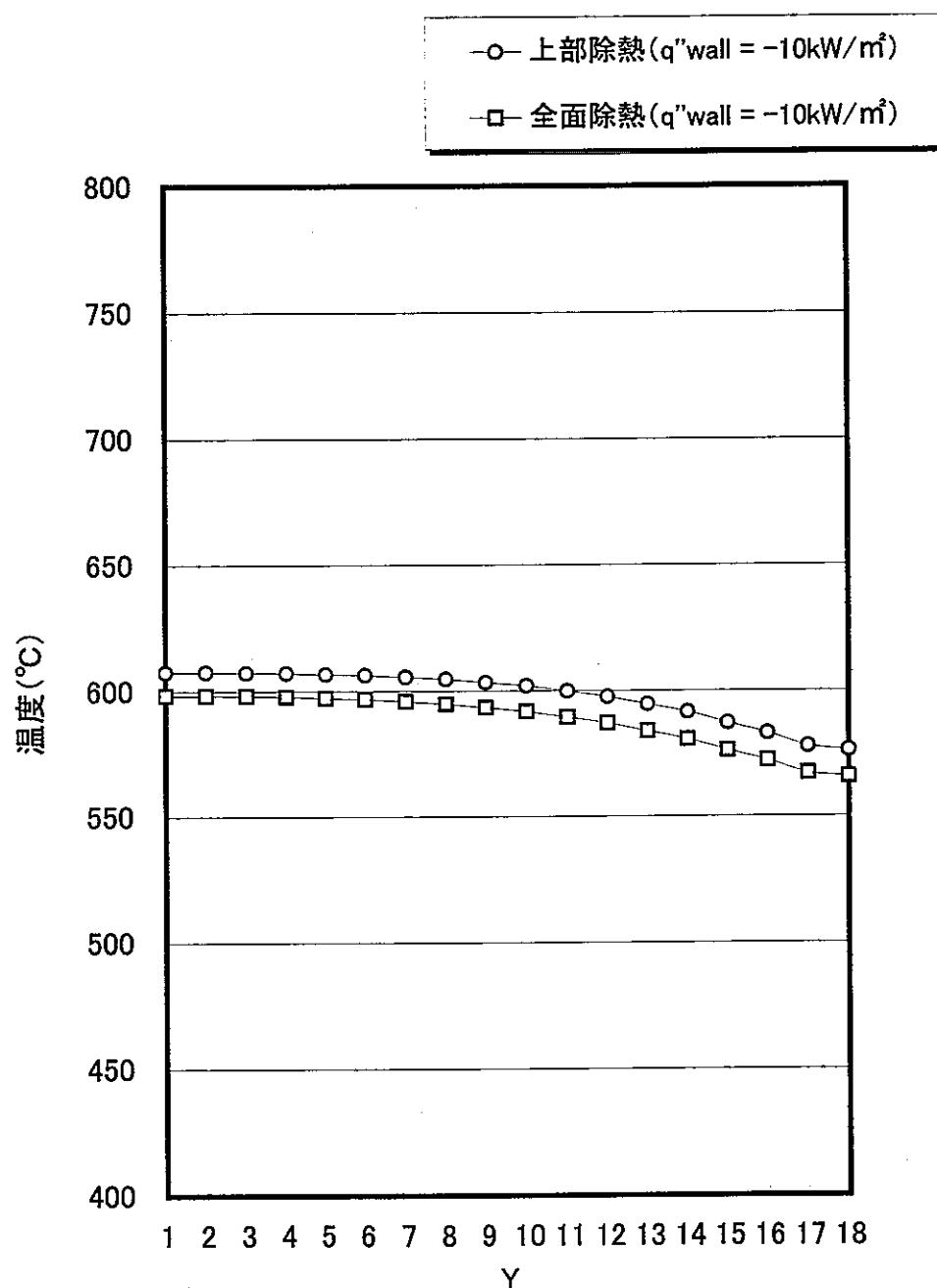


Fig. 6.2.1 断面温度分布の除熱条件依存性
($q''_{pin}=14.85 \text{ kW/m}^2$, $V_{in}=0.1 \text{ m/s}$, $Z=26$)

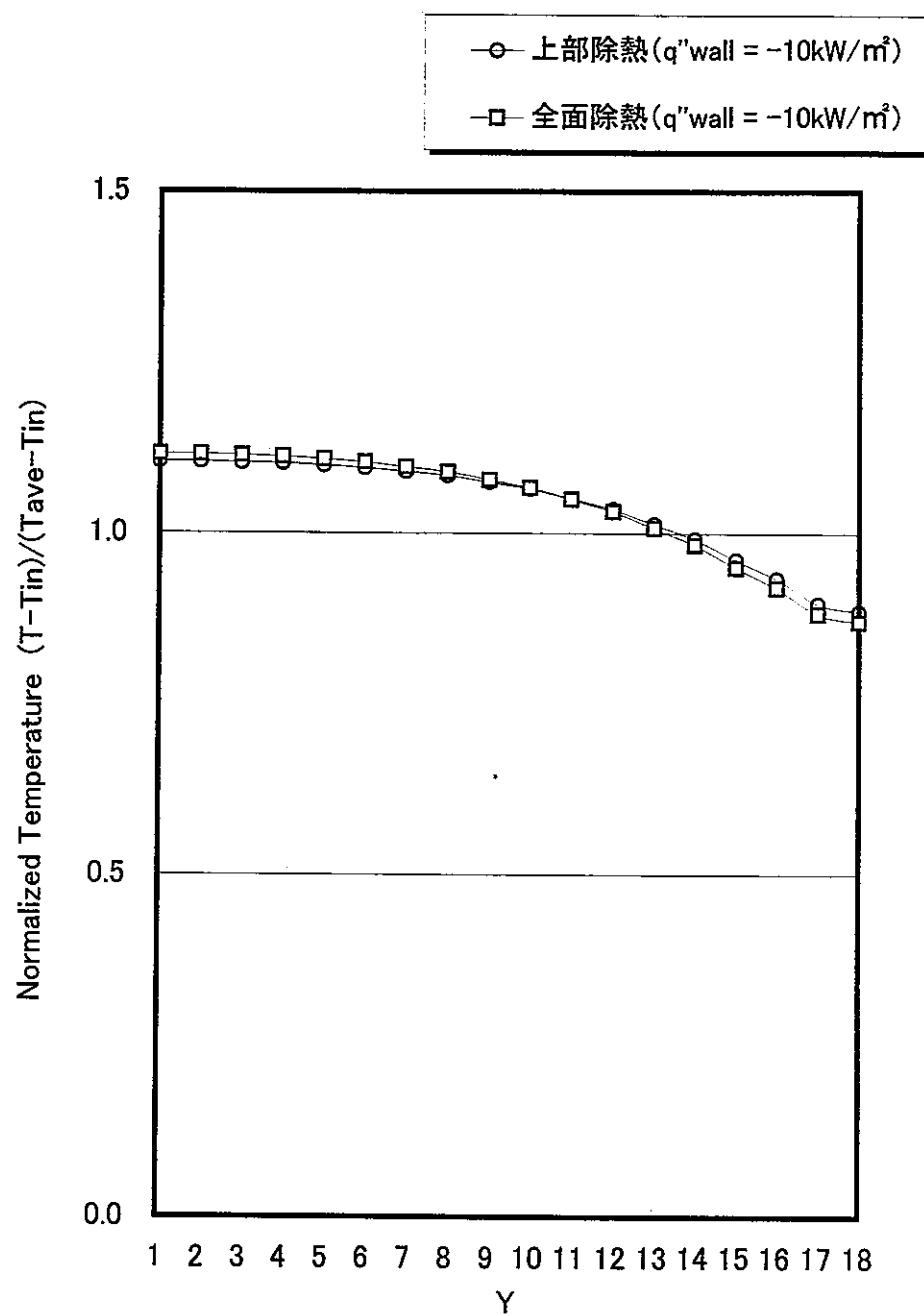


Fig. 6.2.2 規格化温度分布の除熱条件依存性
($q''_{pin}=14.85 \text{ kW/m}^2$, $V_{in}=0.1 \text{ m/s}$, $Z=26$)

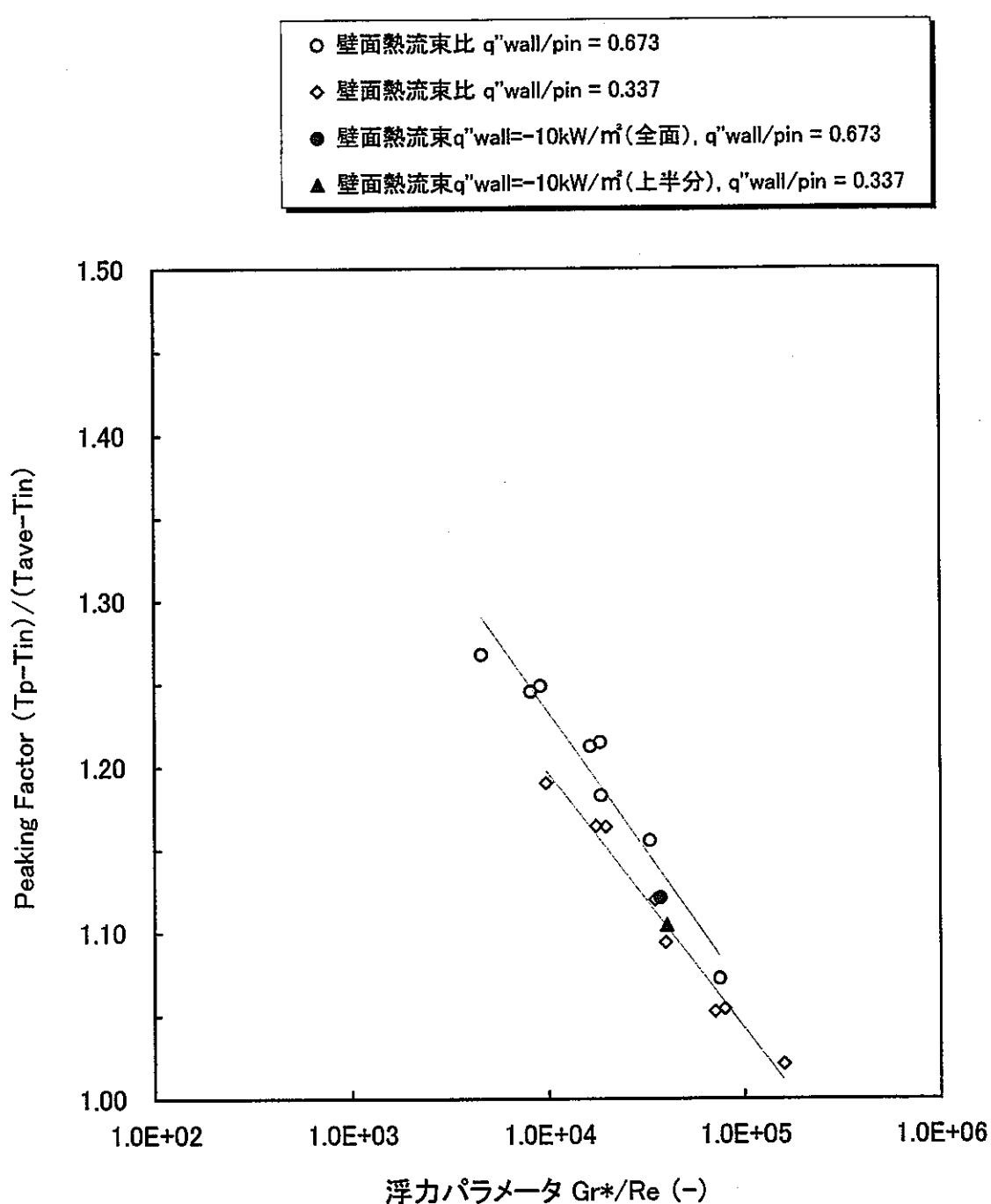


Fig. 6.2.3 ピーキングファクタの浮力パラメータ依存性
 —除熱条件の違いによる比較—

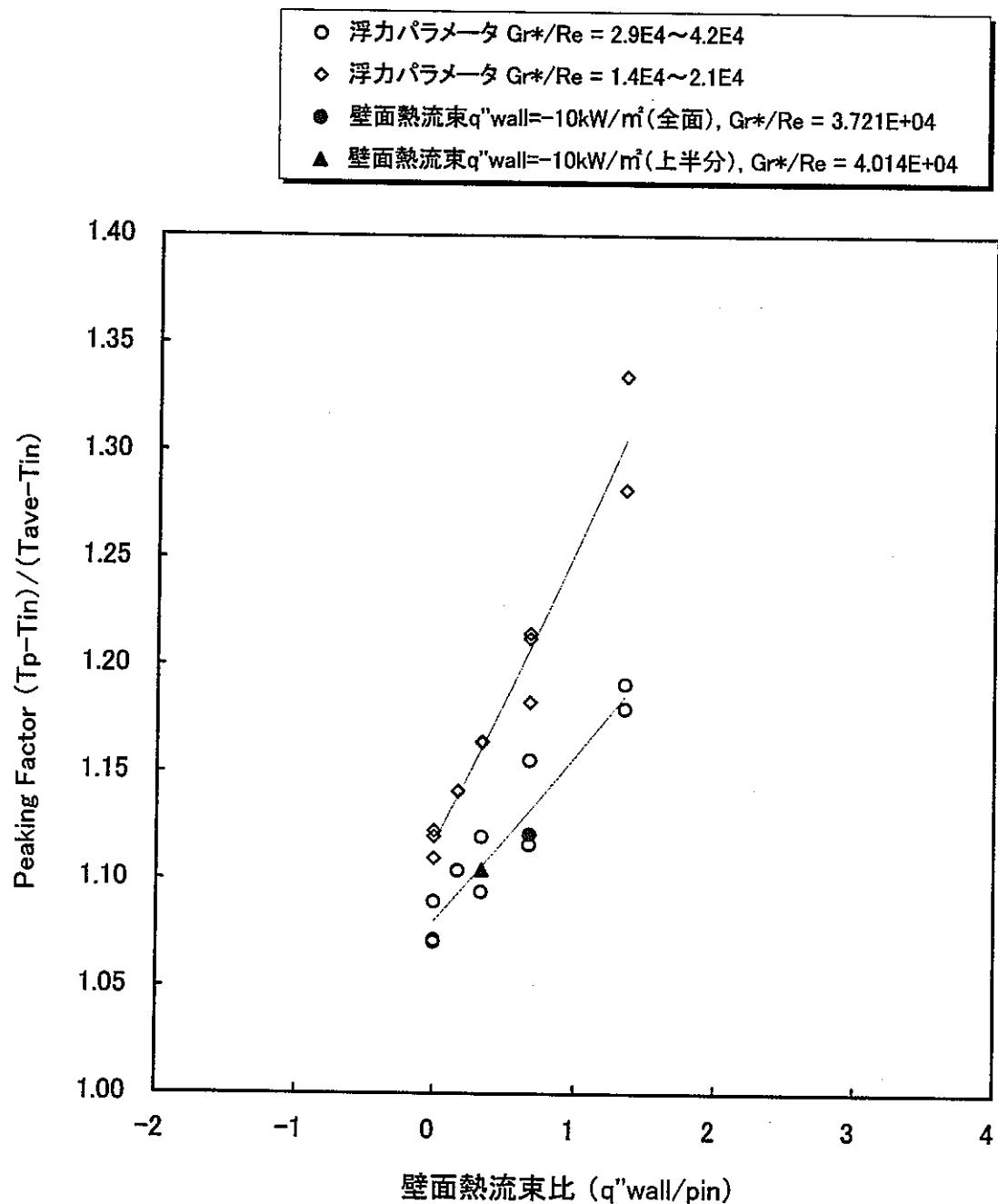


Fig. 6.2.4 ピーキングファクタの壁面熱流束比依存性
 —除熱条件の違いによる比較—

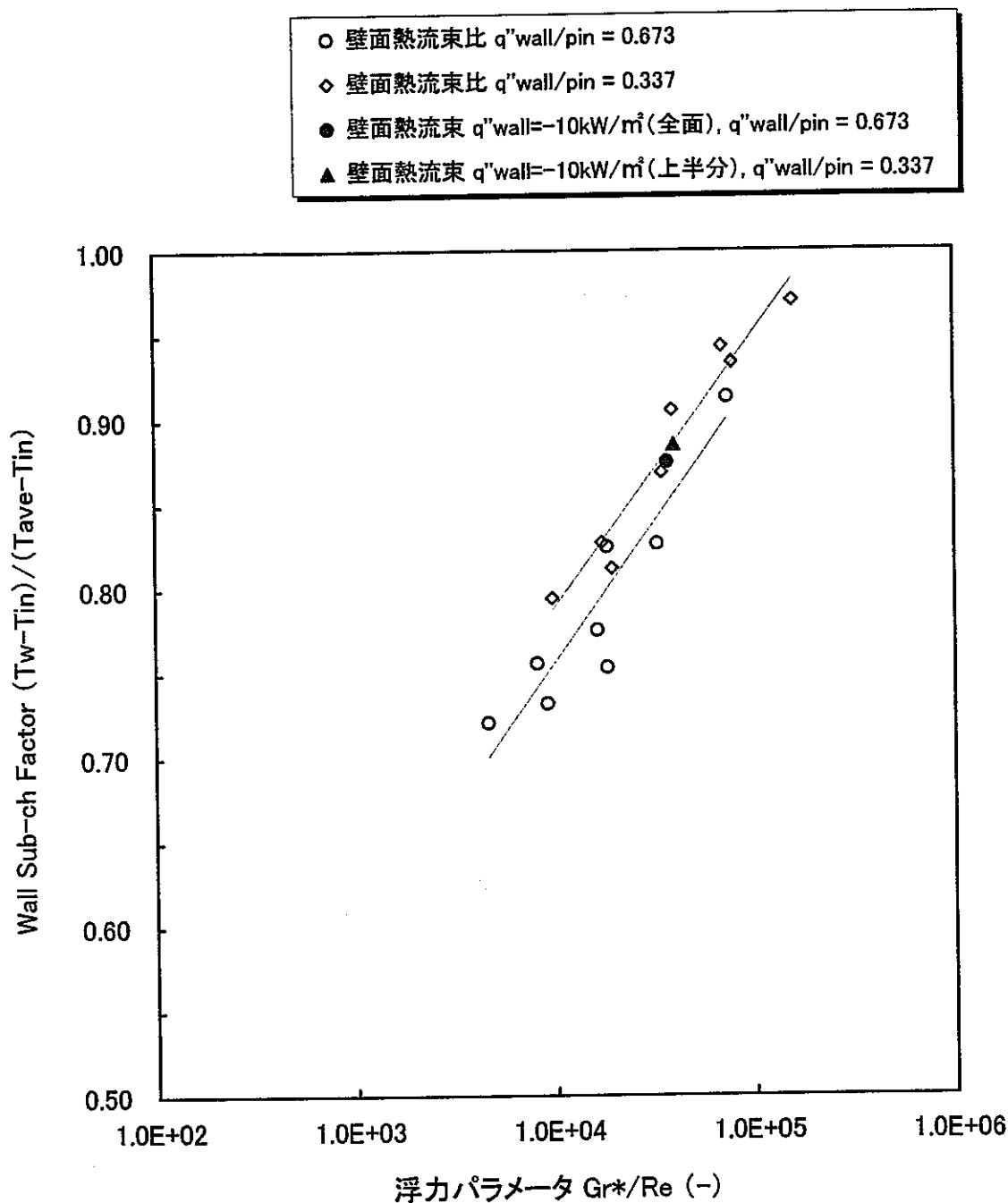


Fig. 6.2.5 壁サブチャンネルファクタの浮力パラメータ依存性
— 除熱条件の違いによる比較 —

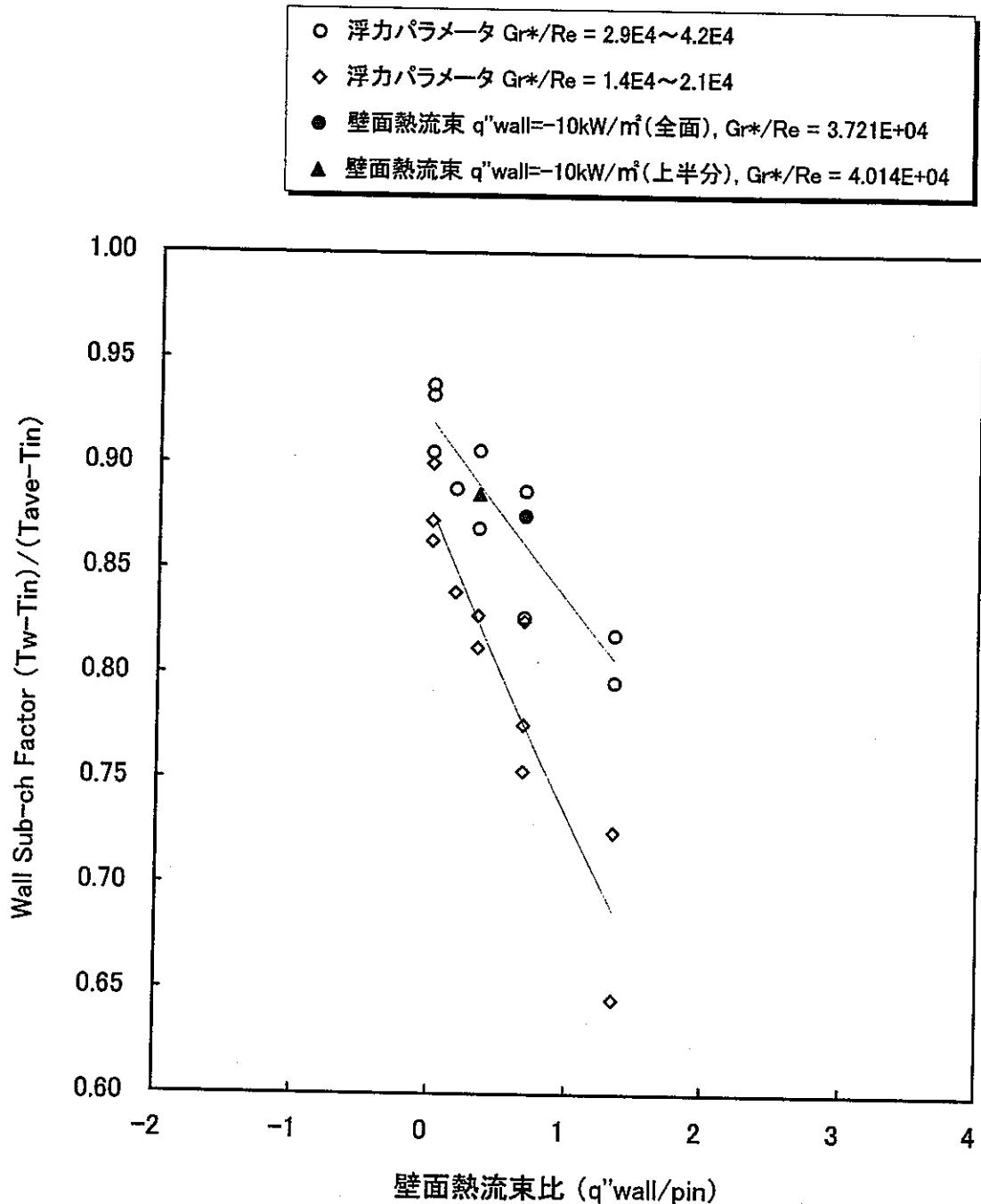


Fig. 6.2.6 壁サブチャンネルファクタの壁面熱流束比依存性
—除熱条件の違いによる比較—

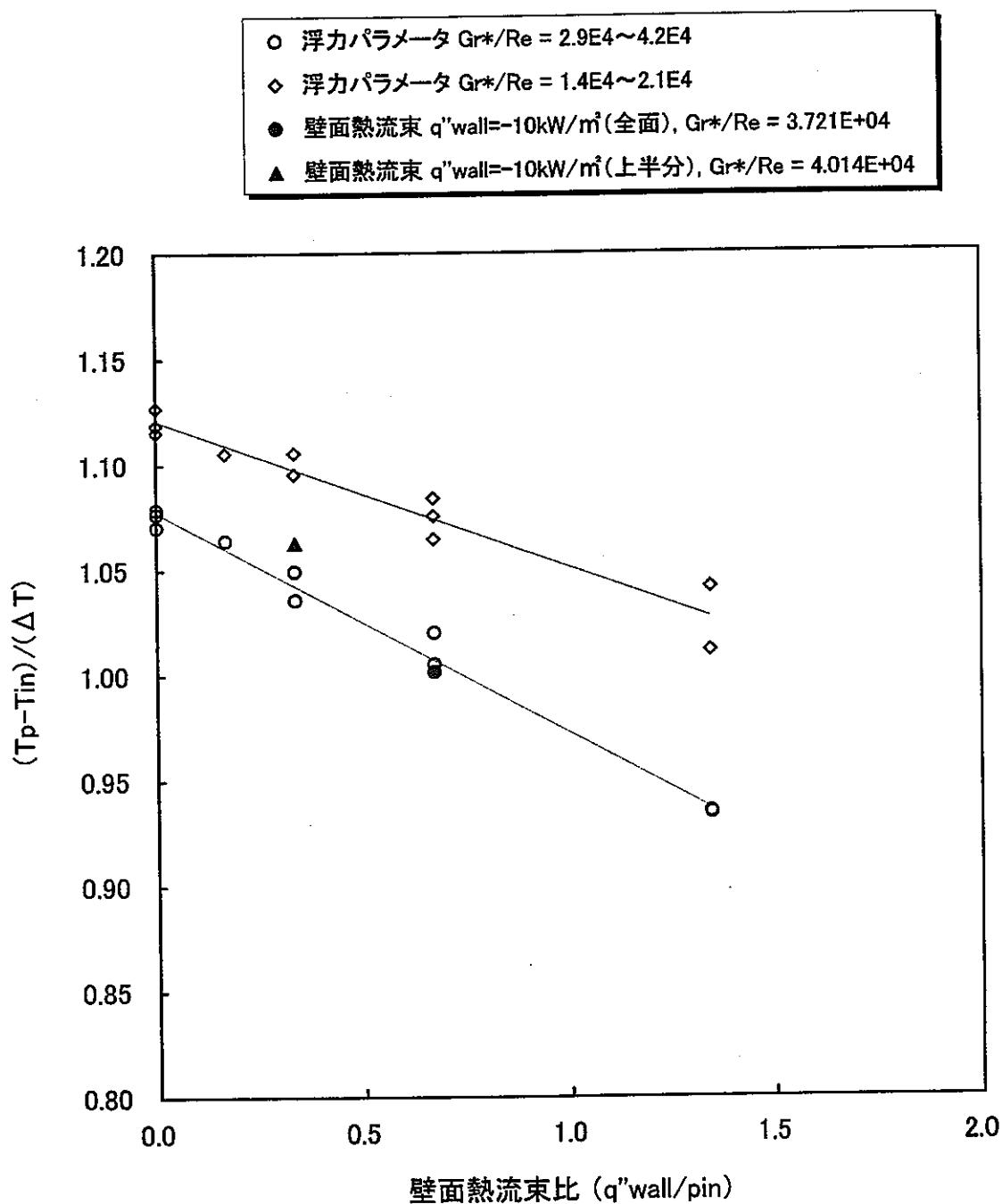


Fig. 6.2.7 最高温度の壁面熱流束比依存性
—除熱条件の違いによる比較—