

分置

本資料は 年 月 日付けで登録区分、  
変更する。

2001. 7. 31

[技術情報室]

# AQUAコードによるCCTL-CFR試験解析

1994年9月

動力炉・核燃料開発事業団  
大洗工学センター

この資料は、動燃事業団の開発業務を進めるため、特に限られた関係者だけに開示するものです。ついては複製、転載、引用等を行わないよう、また第三者への開示又は内容漏洩がないよう管理して下さい。また今回の開示目的以外のことには使用しないよう特に注意して下さい。

本資料についての問合せは下記に願います。

〒311-13 茨城県東茨城郡大洗町成田町4002

動力炉・核燃料開発事業団

大洗工学センター

システム開発推進部・技術管理室

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大字村松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)



## AQUAコードによるCCTL-CFR試験解析

報告者 三宅 康洋\*  
実施責任者 上出 英樹\*\*

## 要旨

自然循環崩壊熱除去条件での複数集合体内の熱流動現象を多次元熱流動解析コードを用いて解析する際のモデル化手法及び集合体間の熱移行がある条件での集合体内温度分布の予測手法の確立を図ることを目的として、集合体間熱移行に関するCCTL-CFR試験について、AQUAコードを用いた解析を行なった。解析の内容は以下の3点である。

1. CFR試験解析。
2. 横方向の熱の流れに関するパラメーター解析。
3. 軸方向流動抵抗分布、パーミアビリティ分布の効果の検討。

試験解析の結果、解析結果は実験結果と非常によく一致した。解析結果の傾向としては、被冷却の条件では、実機の3%~10%レベルの流速条件の範囲で集合体の温度分布が実験と非常によく一致している。また、被加熱の条件では、加熱されている壁近傍の流体温度を相対的に低く評価する傾向にある。

試験解析及びパラメーター解析の結果から、今後、AQUAコードによる集合体内熱流動解析手法として、以下を用いることが有効といえる。

- (1)メッシュ分割 - スタガードハーフピンメッシュ分割
- (2)軸方向の流動抵抗、Permeability - 内部サブチャンネルと周辺及びコーナーサブチャンネルに分類して入力する。
- (3)径方向流動抵抗及びPermeability - 感度は小さく、Permeabilityについてはメッシュ分割内の流路に対応したものを扱い、流動抵抗については用いないものとする。

---

\* 株式会社エヌデーデー

\*\*大洗工学センター 安全工学部 原子炉工学室

## 目次

1. 序論	・・・P.1
2. AQUA解析モデル	・・・P.2
2-1 メッシュ分割	・・・P.2
2-2 Permeability の規定	・・・P.3
2-3 流動抵抗要素の規定	・・・P.5
2-4 伝熱要素の規定	・・・P.15
3-5 解析モデル	・・・P.17
3. 計算条件	・・・P.17
4. 解析ケース	・・・P.18
5. 解析結果	・・・P.19
6. 考察	・・・P.20
6-1 解析条件	・・・P.20
6-2 解析結果	・・・P.23
6-3 まとめ	・・・P.24
7. 結論	・・・p.25
参考文献	・・・p.26

## 1. 序論

自然循環崩壊熱除去条件での集合体間熱移行に関するCCTL-CFR試験についてAQUAコードを用いた実験解析を行い、複数集合体のモデル化手法及び熱移行がある条件での集合体間温度分布の予測手法の確立を図る。

これまでに、CCTL-CFR試験—第3報 試験解析(1)—<sup>1)</sup>として、AQUAを用いた解析を実施して来た。これにより、熱移行量が極端に大きくない限り解析結果はよく実験結果と一致することが分かった。

ここでは、前回の解析モデルを見直すとともにモデルパラメーターの感度を明確にし、より広範囲の試験パラメーターに対して適応できる解析モデルの構築を図る。

実施内容は、

1. 潜り込みについては対象外とし、バンドル部のみに着目した新しい解析メッシュ体系の作成。
2. CFR試験解析の実施。
3. 横方向の熱の流れに関するパラメーター解析。
4. 軸方向流動抵抗分布、パーミアビリティ分布の効果の検討。

である。

## 2. AQUA解析モデル

集合体部のピーク温度、径方向熱移行等に着目した解析のため、19pin,61pin Bundle 下端から中性子遮蔽体までをモデル化、上部・下部プレナム及び下部プレナムから集合体への配管は解析モデルの範囲から外している。

尚、今回の解析では、2体の19pin Bundleについて、

(1)流路形状が同一であること。

(2)ヒーター発熱量及び流量が同一であること。

を考慮し、解析モデルを19pin Bundle 1体と61pin Bundleの半分を含む1/2対称モデルとしている。

### 2-1 メッシュ分割

AQUA多領域バージョン (Version7.2) を使用し、61pin,19pin Bundleをそれぞれ領域1, 領域2としたスタガードハーフピンメッシュ分割を適用。座標系は、x-y-zデカルト座標系を使用している。

領域1・・・61pin Bundle及び中性子遮蔽体

領域2・・・19pin Bundle及び中性子遮蔽体

水平断面 (x-y平面) におけるメッシュ分割は、ポーラスボディ近似を用いる際には最も最適とされているスタガードハーフピン配置を適用している。更に、今回のモデルは61pin,19pin Bundleを各々の領域に分けているため、各バンドル体系に合ったスタガードハーフピンメッシュ分割が可能となっている。

各々の水平断面のメッシュ分割図を以下の図に示す。

領域1 (61pin Bundle) ……図.2-1-1

領域1 (中性子遮蔽体) ……図.2-1-2

領域2 (19pin Bundle) ……図.2-1-1

領域2 (中性子遮蔽体) ……図.2-1-2

また、軸方向のメッシュ分割は熱電対の位置がメッシュの境界と一致するように分割し、その他の箇所では計算の歪みを小さくするようにできる限り等分割に分割している。軸方向のメッシュ分割は領域1, 2共に同一である。

軸方向メッシュ分割図を図.2-1-3に示す。

## 2-2 Permeabilityの規定

## a)軸方向Permeabilityの規定

バンドル部の軸方向Permeabilityの規定は、図.2-2-1 に示すように61pin,19pin共に内部サブチャンネル部と周辺及びコーナーサブチャンネルの2種類に分けている。内部サブチャンネル部に関してはメッシュの形状が同一であること、流路断面積が同一であることから形状に即した値（流路断面積/セル面積）を与えることができる。しかし、周辺,コーナーサブチャンネル部に関しては、メッシュ分割が形状を正確に模擬していないことから周辺,コーナーサブチャンネル部にあたる総流路断面積を総セル面積で除した値を軸方向Permeabilityとして均一に与えている。また、中性子遮蔽体に関しても総流路断面積を総セル断面積で除した値を均一に与えている。各軸方向Permeabilityの算出過程を下記に示す。

## [61pin Bundle 軸方向Permeability]

- ・内部サブチャンネル

$$\text{流路断面積 } A1 = 0.02978 \cdot 10^{-3} (\text{m}^2)$$

$$\text{セル断面積 } S1 = 0.0087 \cdot 0.01507 = 0.131109 \cdot 10^{-3} (\text{m}^2)$$

$$ALZ = A1/S1 = 0.227159$$

- ・周辺及びコーナーサブチャンネル

$$\text{総流路断面積 } A2 = 0.876672 \cdot 10^{-3} (\text{m}^2)$$

$$\text{総セル断面積 } S2 = (0.0087 \cdot 0.01507 \cdot 16) + (0.0087 \cdot 0.00972 \cdot 11)$$

$$= 3.027948 \cdot 10^{-3} (\text{m}^2)$$

$$ALZ = A2/S2 = 0.289527$$

- ・中性子遮蔽体

$$ALZ = 0.70996$$

## [19pin Bundle 軸方向Permeability]

- ・内部サブチャンネル

$$\text{流路断面積 } A1 = 0.138729 \cdot 10^{-3} (\text{m}^2)$$

$$\text{セル断面積 } S1 = 0.0151 \cdot 0.02615 = 0.394865 \cdot 10^{-3} (\text{m}^2)$$

$$ALZ = A1/S1 = 0.351333$$

- ・ 周辺及びコーナーサブチャンネル

$$\text{総流路断面積 } A2 = 3.911627 \cdot 10^{-3} (\text{m}^2)$$

$$\text{総セル断面積 } S2 = (0.0151 \cdot 0.0177 \cdot 14) + (0.0151 \cdot 0.02615 \cdot 16)$$

$$= 10.05962 \cdot 10^{-3} (\text{m}^2)$$

$$ALZ = A2/S2 = 0.388844$$

- ・ 中性子遮蔽体

$$ALZ = 0.530408$$

## b) 径方向Permeabilityの規定

径方向のPermeabilityについては、その効果を見るために3パターンの規定をおこなっている。

### 1) Type-1

内部サブチャンネル部と周辺及びコーナーサブチャンネル部の2種類に分け、内部サブチャンネルについては形状に即した値（流路断面積/セル面積）を与え、周辺及びコーナーサブチャンネルについては軸方向Permeabilityと同様に周辺及びコーナーサブチャンネル部にあたる総流路断面積を総セル面積で除した値を均一に与える。この方法によりX方向のPermeability(ALX)を求め、同値をY方向Permeability(ALY)にも与える。(ALX=ALY)

### 2) Type-2

1)と同様の方法でX方向Y方向Permeabilityをそれぞれ与える。

(ALX≠ALY)

### 3) Type-3

形状に即した値を1メッシュ単位でX方向,Y方向にそれぞれ与える。(流路が存在しない時はPermeability=0.0とする。)

尚、径方向Permeabilityのtype-1,2,3についてのメッシュの規定を図.2-2-2～図.2-2-4に示す。

## 2-3 流動抵抗要素の規定

## a) 軸方向流動抵抗の規定

ピンバンドル部の軸方向流動抵抗の規定は、MITから公表されているピンバンドル部摩擦圧力損失の式（Cheng and Todreas の式<sup>(2)</sup>）を使用した。これは、サブチャンネル解析コードの3種類のサブチャンネル（タイプ1:内部サブチャンネル，タイプ2:周辺サブチャンネル，タイプ3:コーナーサブチャンネル）に対して、各々の摩擦損失係数をRe数や形状パラメーターの関数として与える形式になっているため、今回のようなスタガードハーフピンメッシュ分割時には有効であると思われる。また、中性子遮蔽体部にはBlasiusの式を適用している。解析モデルにおける流動抵抗規定時の内部,周辺,コーナーサブチャンネルのメッシュの規定を図.2-3-1に示し、各々の流動抵抗式を下記に示す。

## [61pin Bundle 内部サブチャンネル]

MITから公表されている標準サブチャンネル相関式を適用し、層流域,乱流域,遷移域の流動抵抗式を規定、求めた式のRe数と摩擦係数fの関係を図.2-3-1に示す。

$$\Delta P = \frac{1}{2} \rho \zeta V^2$$

$$\zeta = f_L = \frac{72.0}{Re_b} \quad (\text{層流})$$

$$\zeta = f_T = \frac{0.2166}{Re_b^{0.18}} \quad (\text{乱流})$$

$$\zeta = f_{itr} = \frac{72.0(1-\psi)^1}{Re} + \frac{0.2166\psi^1}{Re^{0.18}} \quad (\text{遷移域})$$

$$\psi = \frac{\log Re_1 - \log 290.65}{\log 8304.01 - \log 290.65}$$

AQUAの入力データ形式では、流動抵抗の式を2領域にしか分けられないため、図.2-3-2から層流域,乱流域の式をそれぞれAQUAの層流,乱流の式に適用している。また、遷移レイノルズ数は層流の式と乱流の式の交点とする。

$$\frac{72.0}{Re_b} = \frac{0.2166}{Re_b^{0.18}}$$

$$\log 72.0 - \log Re_{btr} = \log 0.2166 - 0.18 \log Re_{btr}$$

$$0.82 \log Re_{btr} = \log 72.0 - \log 0.2166$$

$$\log Re_{btr} = 3.07521$$

$$Re_{btr} = 1189.077$$

$$Re_b \leq 1189.077 \quad f = \frac{72.0}{Re_b}$$

$$Re_b \geq 1189.077 \quad f = \frac{0.2166}{Re_b^{0.18}}$$

代表長さ  $De = 0.004347$  (m)

[61pin Bundle 周辺サブチャンネル]

内部サブチャンネルと同様にして求めた層流域,乱流域,遷移域の式のRe数と摩擦係数fの関係を図.2-3-3に示す。

$$\Delta P = \frac{1}{2} \rho \zeta V^2$$

$$\zeta = f_L = \frac{74.45}{Re_b} \quad (\text{層流})$$

$$\zeta = f_T = \frac{0.21263}{Re_b^{0.18}} \quad (\text{乱流})$$

$$\zeta = f_{tr} = \frac{74.45}{Re} (1-\psi_2)^1 + \frac{0.21263}{Re^{0.18}} \psi_2^1 \quad (\text{遷移域})$$

$$\psi = \frac{\log Re_2 - \log 758.67}{\log 16729.17 - \log 758.67}$$

図.2-3-3より、遷移域の式と乱流の式をほぼ同一であると言うことが出来ないため、遷移域の式がレイノルズ数2000～20000をカバーするような近似式を作成、この式をAQUAの入力で乱流の式として使用。近似式を下記に示す。

$$\zeta = f_{tr} = \frac{0.08858}{Re^{0.9738}}$$

また、遷移レイノルズ数は層流の式と遷移域の近似式の交点とする。

$$\frac{74.45}{Re_b} = \frac{0.08858}{Re_b^{0.9738}}$$

$$\log 74.45 - \log Re_{btr} = \log 0.08858 - 0.9738 \log Re_{btr}$$

$$0.09738 \log Re_{btr} = \log 74.45 - \log 0.08858$$

$$\log Re_{btr} = 3.24$$

$$Re_{btr} = 1737.8$$

$$\begin{aligned} \text{Re}_b \leq 1737.8 & \quad f = \frac{74.45}{\text{Re}_b} \\ \text{Re}_b \geq 1737.8 & \quad f = \frac{0.08858}{\text{Re}_b^{0.009738}} \end{aligned}$$

代表長さ  $De = 0.006054$  (m)

[61pin Bundle コーナーサブチャンネル]

内部サブチャンネルと同様にして求めた層流域,乱流域,遷移域の式の $Re$ 数と摩擦係数 $f$ の関係を図.2-3-4に示す。

$$\Delta P = \frac{1}{2} \rho \zeta V^2$$

$$\zeta = f_L = \frac{102.9219}{\text{Re}_b} \quad (\text{層流})$$

$$\zeta = f_T = \frac{0.2735}{\text{Re}_b^{0.18}} \quad (\text{乱流})$$

$$\zeta = f_{tr} = \frac{102.92}{\text{Re}} (1 - \psi_3)^1 + \frac{0.2735}{\text{Re}^{0.18}} \psi_3^1 \quad (\text{遷移域})$$

$$\psi = \frac{\log \text{Re}_3 - \log 301.19}{\log 7202.22 - \log 301.19}$$

コーナーサブチャンネルに関しては図.2-3-4から遷移域の式を使用せずに、層流の式と乱流の式をAQUAの層流,乱流の式に適用している。。また、遷移レイノルズ数は層流の式と乱流の式の交点とする。

$$\frac{102.9219}{\text{Re}_b} = \frac{0.2735}{\text{Re}_b^{0.18}}$$

$$\log 102.9219 - \log \text{Re}_{btr} = \log 0.2735 - 0.18 \log \text{Re}_{btr}$$

$$0.82 \log \text{Re}_{btr} = \log 102.9219 - \log 0.2735$$

$$\log \text{Re}_{btr} = 3.1409$$

$$\text{Re}_{btr} = 1383.25$$

$$\text{Re}_b \leq 1383.25 \quad f = \frac{102.9219}{\text{Re}_b}$$

$$\text{Re}_b \geq 1383.26 \quad f = \frac{0.2735}{\text{Re}_b^{0.18}}$$

代表長さ  $De = 0.003949$  (m)

[19pin Bundle 内部サブチャンネル]

19pin Bundleについても61pin Bundleと同様に層流域,乱流域,遷移域の式を求め、 $Re$ 数と摩擦係数 $f$ の関係を図.2-3-5に示している。

$$\Delta P = \frac{1}{2} \rho \zeta V^2$$

$$\zeta = f_L = \frac{82.65}{Re_b} \quad (\text{層流})$$

$$\zeta = f_T = \frac{0.16143}{Re_b^{0.18}} \quad (\text{乱流})$$

$$\zeta = f_{tr} = \frac{82.78}{Re} (1-\psi_1)^1 + \frac{0.16143}{Re^{0.18}} \psi_1^1 \quad (\text{遷移域})$$

$$\psi = \frac{\log Re_1 - \log 289.71}{\log 9716.55 - \log 289.71}$$

図.2-3-5より、遷移域の式と乱流域の式にほとんど差がないことを確認できるため、層流,乱流の式をそれぞれAQUAの層流,乱流の式に適用する。

また、遷移レイノルズ数は層流の式と乱流の式の交点とする。

$$\frac{82.78}{Re_b} = \frac{0.16143}{Re_b^{0.18}}$$

$$\log 82.65 - \log Re_{btr} = \log 0.16143 - 0.18 \log Re_{btr}$$

$$0.82 \log Re_{btr} = \log 82.65 - \log 0.16143$$

$$\log Re_{btr} = 3.3097$$

$$Re_{btr} = 2013.59$$

$$Re_b \leq 2013.59 \quad f = \frac{82.65}{Re_b}$$

$$Re_b \geq 2013.60 \quad f = \frac{0.16143}{Re_b^{0.18}}$$

代表長さ  $De = 0.01169$  (m)

[19pin Bundle 周辺サブチャンネル-軸方向流動抵抗]

19pin Bundleも61pin Bundle周辺サブチャンネルと同様に層流域,乱流域,遷移域の式を求め、Re数と摩擦係数fの関係を図.2-3-6に示している。

$$\Delta P = \frac{1}{2} \rho \zeta V^2$$

$$\zeta = f_L = \frac{89.9312}{Re_b} \quad (\text{層流})$$

$$\zeta = f_T = \frac{0.18103}{Re_b^{0.18}} \quad (\text{乱流})$$

$$\zeta = f_{tr} = \frac{89.93}{Re} (1-\psi_2)^1 + \frac{0.18103}{Re^{0.18}} \psi_2^1 \quad (\text{遷移域})$$

$$\Psi = \frac{\log Re_2 - \log 1543.98}{\log 11472.44 - \log 1543.98}$$

図.2-3-6より、遷移域の式と乱流の式をほぼ同一であると言うことが出来ないため、遷移域の式がレイノルズ数2000～20000をカバーするような近似式を作成、この式をAQUAの入力で乱流の式として使用。近似式を下記に示す。

$$f_{2tr} = \frac{0.03612}{Re^{0.009954}}$$

また、遷移レイノルズ数は層流の式と遷移域の近似式の交点とする。

$$\frac{89.93}{Re_b} = \frac{0.03612}{Re_b^{0.00995}}$$

$$\log 89.93 - \log Re_{btr} = \log 0.03612 - 0.00995 \log Re_{btr}$$

$$0.00995 \log Re_{btr} = \log 89.9312 - \log 0.03612$$

$$\log Re_{btr} = 3.43$$

$$Re_{btr} = 2691.54$$

$$Re_b \leq 2691.54 \quad f = \frac{89.93}{Re_b}$$

$$Re_b \geq 2691.54 \quad f = \frac{0.036124}{Re_b^{0.00995}}$$

代表長さ  $De = 0.021$  (m)

[19pin Bundle コーナーサブチャンネル-軸方向流動抵抗]

19pin Bundleも61pin Bundleコーナーサブチャンネルと同様に層流域,乱流域,遷移域の式を求め、Re数と摩擦係数fの関係を図.2-3-7に示している。

$$\Delta P = \frac{1}{2} \rho \zeta V^2$$

$$\zeta = f_L = \frac{100.6904}{Re_b} \quad (\text{層流})$$

$$\zeta = f_T = \frac{0.23133}{Re_b^{0.18}} \quad (\text{乱流})$$

$$\zeta = f_{tr} = \frac{100.69}{Re} (1 - \Psi_3)^1 + \frac{0.23133}{Re^{0.18}} \Psi_3^1 \quad (\text{遷移域})$$

$$\Psi = \frac{\log Re_1 - \log 173.85}{\log 7183.69 - \log 173.85}$$

図.2-3-7より遷移域の式と乱流域の式にほとんど差がないことを確認できるため、コーナーサブチャンネルに関しては遷移域の式を使用せずに、層流の式と乱流の式をAQUAの層流,乱流の式に適用している。また、遷移レイノルズ数は層流

の式と乱流の式の交点とする。

$$\frac{100.6904}{Re_b} = \frac{0.23133}{Re_b^{0.18}}$$

$$\log 100.6904 - \log Re_{btr} = \log 0.23133 - 0.18 \log Re_{btr}$$

$$0.82 \log Re_{btr} = \log 100.6904 - \log 0.23133$$

$$\log Re_{btr} = 3.218$$

$$Re_{btr} = 1651.96$$

$$Re_b \leq 1651.96 \quad f = \frac{100.6904}{Re_b}$$

$$Re_b \geq 1651.97 \quad f = \frac{0.23133}{Re_b^{0.18}}$$

代表長さ  $De = 0.01053$  (m)

[中性子遮蔽体]

61pin, 19pin Bundle共に円管の層流の式及びBlasiusの式を使用している。

$$Re_b \leq 2000.0 \quad f = \frac{64}{Re_b}$$

$$Re_b > 2000.0 \quad f = \frac{0.3164}{Re_b^{0.25}}$$

代表長さは遮蔽体の直径とする。  $De = 0.08$  (m)

b)径方向流動抵抗の規定

径方向流動抵抗には千鳥型配列円管群の抵抗（機械工学便覧 改訂第6版 p.8-23～p.8-24）を適用している。千鳥型円管群の抵抗係数を表.2-3-1に示す。

表.2-3-1 円管群の抵抗係数

構成	CDの定義	適用範囲		
		層流	乱流	
		Re1<100	100<Re2<20000	5000<Re3<40000
千鳥型	sT<sL'	$C_D = \frac{1}{4} \frac{\Delta P_f}{\rho V^2} \frac{1}{N_T}$	$C_D = \frac{70}{Re_1} \left( \frac{d_0}{S_T} \right)^{1.6}$	$C_D = (Re_3)^{-0.15}$ $\times \left( 0.044 + \frac{0.008 (S_L/d_0)}{\left( \frac{S_T}{d_0} - 1 \right)^{0.43 + (1.13 d_0/S_L)}} \right)$ $C_D = 0.75 (Re_2)^{-0.2}$
	sT>sL'	$C_D = \frac{1}{4} \frac{\Delta P_f}{\rho V^2} \frac{1}{N_T - 1}$	$C_D = \frac{70}{Re_1} \left( \frac{d_0}{S_L} \right)^{1.6}$	

但し、ΔPf:円管群全体の圧力降下, NT:円管群の列数,

d0:ピン径, ST,SL':ピンピッチ

$$Re_1 = \frac{d_e V}{\nu}, \quad Re_2 = \frac{(S_T - d_0) V}{\nu}, \quad Re_3 = \frac{d_0 V}{\nu}, \quad d_e = \frac{4 S_T S_L - (\pi d_0^2 / 4)}{\pi d_0} \quad \text{とする。}$$

今回解析をおこなっているCCTL-CFR試験体の試験ケースは低流速のため、Re数が5000以上になることは考えがたい。そこで、今回のAQUA解析モデルに使用する抵抗係数は層流域に関しては表.2-3-1で示した層流の式 (Re<100) を乱流域に関しては乱流の式 (100<Re<2000) のsT<sL'を適用することにする。

また、今回のモデルでは61ピン、19ピンバンドルの径方向Permeabilityを内部と周辺・コーナーサブチャンネル部の2つに分けて規定しているが、径方向流動抵抗の規定では内部サブチャンネルのPermeabilityのみを考慮して摩擦係数を求め、バンドル全域に与えている。AQUAの入力データ形式への変換過程を下記に示す。

<AQUA入力データ形式への流動抵抗式の変換>

$$C_D = \frac{1}{4} \frac{\Delta P_f}{\rho V^2} \frac{1}{N_T}$$

$$\Delta P = 2\rho V^2 C_D N_T$$

[61pin Bundle]

$$N_T = 5, S_T = 17.4 \text{ mm}, d_0 = 16.0 \text{ mm},$$

$$\Delta P = 2\rho V^2 C_D N_T = 10\rho V^2 C_D$$

層流の式

$$C_D = \frac{70}{Re_1} \left(\frac{d_0}{S_T}\right)^{1.6} = \frac{61.208}{Re_1},$$

$$Re_1 = \frac{d_e V}{\nu}$$

乱流の式

$$C_D = \frac{0.75}{(Re_2)^{0.2}} = \frac{0.21825}{(Re_1)^{0.2}},$$

$$Re_2 = \frac{(S_T - d_0)V}{\nu} = Re_1 \times \frac{(S_T - d_0)}{D_e} = Re_1 \times 0.291$$

但し、径方向Permeabilityを下記に示すように考慮する必要がある。

$$\Delta P = C_D \rho V^2$$

$$V_{AQUA} = \frac{1}{\text{Permeability}} \times V$$

$V_{AQUA}$ : AQUAでの流速

$$V = \text{Permeability} \times V_{AQUA}$$

$V$ : 流動抵抗式での流速

$$\Delta P = (\text{Permeability}^2 \times C_D) \rho V^2$$

61pin Bundle 内部サブチャンネルの Permeability=0.10896

層流の式

$$C_D = \frac{70}{Re_1} \left(\frac{d_0}{S_T}\right)^{1.6} = \frac{61.208 \times 0.10896^2}{Re_1} = \frac{0.72668}{Re_1}, Re \leq 1148.15$$

乱流の式

$$C_D = \frac{0.75}{(Re_2)^{0.2}} = \frac{0.21825 \times 0.10896^2}{(Re_1)^{0.2}} = \frac{0.00259}{(Re_1)^{0.2}}, Re \geq 1148.15$$

遷移レイノルズ数は層流の式と乱流の式の交点としている。

$$\frac{0.72668}{Re_1} = \frac{0.00259}{Re_1^{0.2}}$$

$$\log 0.72668 - \log Re = \log 0.00259 - 0.2 \log Re$$

$$0.8 \log Re = \log 0.72668 - \log 0.00259$$

$$\log Re = 3.06$$

$$Re = 1148.15$$

摩擦係数とレイノルズ数の相関図を図.2-3-8に示す。

[19pin Bundle]

$$N_T = 5, S_T = 30.2 \text{ mm}, d_0 = 25.0 \text{ mm},$$

$$\Delta P = 2\rho V^2 C_D N_T = 10\rho V^2 C_D$$

層流の式

$$C_D = \frac{70}{Re_1} \left( \frac{d_0}{S_T} \right)^{1.6} = \frac{57.947}{Re_1},$$

$$Re_1 = \frac{d_e V}{\nu}$$

乱流の式

$$C_D = \frac{0.75}{(Re_2)^{0.2}} = \frac{0.26843}{(Re_1)^{0.2}},$$

$$Re_2 = \frac{(S_T - d_0)V}{\nu} = Re_1 \times \frac{(S_T - d_0)}{D_e} = Re_1 \times 0.3579$$

61pin Bundleと同様に、内部サブチャンネルの径方向Permeabilityを考慮すると下記に示すような層流,乱流の摩擦係数の式が求められる。

$$19\text{pin Bundleの Permeability} = 0.23807$$

層流の式

$$C_D = \frac{70}{Re_1} \left( \frac{d_0}{S_T} \right)^{1.6} = \frac{57.947 \times 0.23807^2}{Re_1} = \frac{3.28428}{Re_1}, \quad Re \leq 812.83$$

乱流の式

$$C_D = \frac{0.75}{(Re_2)^{0.2}} = \frac{0.26843 \times 0.23807^2}{(Re_1)^{0.2}} = \frac{0.01521}{(Re_1)^{0.2}}, \quad Re \geq 812.83$$

遷移レイノルズ数は層流の式と乱流の式の交点としている。

$$\frac{3.28428}{Re} = \frac{0.01521}{Re^{0.2}}$$

$$\log 3.28428 - \log Re = \log 0.01521 - 0.2 \log Re$$

$$0.8 \log Re = \log 3.28428 - \log 0.01521$$

$$\log Re = 2.92$$

$$Re = 812.83$$

摩擦係数とレイノルズ数の相関図を図.2-3-9に示す。

< Nomenclature >

- A Axial average flow area
- $A_r$  Projected area of wire subchannel
- $C_f$  Friction factor constant
- D Rod diameter
- $D_e$  Equivalent hydraulic diameter
- $D_w$  Wire diameter
- f Darcy friction factor
- H Wire lead length
- L Axial length
- m Reynolds number exponent,  
1.0 for the laminar region, 0.18 for the turbulent region
- N Number of each kind of subchannel in the bundle
- $N_r$  Number of pins in the bundle
- P Rod pitch
- $\Delta P$  Pressure drop
- $P_w$  Subchannel wetted perimeter
- $Re$  Reynolds number
- W Edge pitch parameter defined as (D+gap between rod and bundle wall)
- $W_d$  Wire drag constant
- $W_s$  Wire sweeping constant
- X Flow split parameter
- $\theta$  Angle which the wire makes with respect to vertical axis
- $\Psi$  Intermittency factor

## 2-4 伝熱要素の規定

構造物内の熱伝導及び熱容量サーマルストラクチャモデルをピンバンドル部、ラッパ管、中性子遮蔽体に適用。

## (a)ピンバンドル部

ピンバンドル部のサーマルストラクチャーの規定は円筒状構造物とし、内部サブチャンネル部と周辺及びコーナーサブチャンネル部の2つに分けている。また、ヒーターピンに関しては試験装置と同様に、発熱部と非発熱部とで異なったメッシュ分割をおこなっている。内部サブチャンネル部と周辺及びコーナーサブチャンネル部のメッシュ位置を図.2-4-1に、61,19ピン内部の径方向の分割は図.2-4-2に示すとうりである。

また、ピン内部の各材質に対する物性値は以下とした。

## 1.SUS 316

密度 [kg/m <sup>3</sup> ]	AQUAコードのオプションを使用
比熱 [J/kgK]	AQUAコードのオプションを使用
熱伝導率 [W/mK]	AQUAコードのオプションを使用

## 2.NiCr

密度 [kg/m <sup>3</sup> ]	$\rho = 8670.0$
比熱 [J/kgK]	$C_p = 0.444$
熱伝導率 [W/mK]	$\lambda = 17.4$

## 3.MgO

密度 [kg/m <sup>3</sup> ]	$\rho = 3514.890*(-0.14517*T)$
比熱 [J/kgK]	$C_p = 1057.188*(0.37284*T)+(-0.00011465*T^2)$
熱伝導率 [W/mK]	$\lambda = 51.166+(-0.12636*T)+(0.000119*T^2)$ $+(-3.6277E-8*T^3)$

## 4.Cu

密度 [kg/m <sup>3</sup> ]	$\rho = 8917.735*(-0.54377*T)+(3.9234E-4*T^2)$ $+(-3.65736E-7*T^3)$
比熱 [J/kgK]	$C_p = 380.756*(0.13933*T)+(-2.10971E-5*T^2)$
熱伝導率 [W/mK]	$\lambda = 401.215+(-0.05087*T)+(-1.38486E-5*T^2)$

## (b)ラッパ管

ラッパ管は平板構造とし、横方向に3分割している。物性値は(a)のSUS316と同様である。

## (C)中性子遮蔽体

中性子遮蔽体は平板構造とし、横方向に4分割している。物性値は(a)の SUS316と同様である。

## (d)Heat Transfer (19pin, 61pin Bundle 間のラッパ管)

Heat Transferは平板構造とし横方向に3分割している。物性値は(a)の SUS316と同様である。

61pin,19pin Bundleはそれぞれ領域1,領域2に分けられ、お互いが各々のスタガード-halfピンメッシュ分割をしている。そのため、19pinと61pin Bundle間の熱伝達は異なる形状のメッシュ間でおこなわれ、1つのメッシュと複数のメッシュとの間で熱伝達をおこなう場合が生じてくる。このとき注意しなくてはいけないことは、異なる他次元領域間に伝熱要素を指定する場合、外側OUTと内側INのメッシュの個数は異なってもよいが指定する範囲の寸法は両側で一致しなければいけないということである。この規則を守るため、今回は AQUA入力データのRODFRにより微調整をおこなっている。61pin Bundleと19pin Bundle間の伝熱要素の対応を図.2-4-3及び表.2-4-1に示す。

尚、ナトリウムとラッパ管の熱伝達係数の設定は

$$\text{Nu} = 5.0 + 0.25 \text{Pe}^{0.8}, \quad \text{De} = 5.8613\text{e-}3 (61\text{pin})$$

$$\text{De} = 13.6110\text{e-}3 (19\text{pin})$$

としている。

## 2-5 解析モデル

2-1～2-4で規定してきた流動抵抗,Permeability等を組み合わせて表.2-5に示す解析モデルを作成した。

表2.5 解析モデル一覧

解析モデル	流動抵抗		Permeability	
	軸方向	径方向	軸方向	径方向
model-A	○	—	○	Type-1
model-B	○	○	○	Type-1
model-C	○	—	○	Type-2
model-D	○	—	○	Type-3

尚、メッシュ分割,伝熱要素の規定は同じである。

## 3. 計算条件

数値計算条件はメッシュ分割以外は領域1,2ともに同一である。  
計算条件を下記に示す。

座 標 : x - y - z デカルト座標系

メッシュ分割 : 領域1 (61pin) 23×5×26

領域2 (19pin) 15×5×26

時間積分法 : Implicit(SIMPLEST)

離散化オプション : 運動量計算式 . . . . . Upwind

エネルギー計算式 . . . Upwind

個体壁境界条件 : Free Slip

## 4. 解析ケース

今回の解析で解析モデルの信頼性を確かめるためのテスト計算として、平成4年度におこなったCCTL-CFR試験体AQUA試験解析と同じ試験ケース（ST-02,04,16,17の4ケース）を解析モデル検証用ケースとして使用している。

各試験ケースを表.4-1に示す。

表 4-1 試験ケース一覧

試験ケース	集合体発熱量 (kW)		集合体流量 (l/min)			集合体入口温度 (°C)	
	L(61pin)	H(19pin)	L(61pin)	H(19pin)	側面冷却路	L(61pin)	H(19pin)
ST-02	10.6923	39.8285	8.0574	21.8936	0.0	250.0	250.0
ST-04	21.0925	39.0213	8.7562	22.8795	0.0	250.0	250.0
ST-16	51.9683	0.0	26.3270	27.6270	0.0	251.801	251.857
ST-17	48.2878	0.0	25.7070	26.0930	9.8760	257.020	257.221

※側面冷却路入口温度は250.0°Cである。

各解析ケースを表.4-2に示す。

表 4-2 解析ケース一覧

解析ケース	試験ケース	解析モデル	備考
ST-02A	ST-02	model-A	リファレンスケース
ST-04A	ST-04	model-A	リファレンスケース
ST-04B	ST-04	model-B	径方向流動抵抗の効果を見る
ST-04C	ST-04	model-C	径方向Permeabilityの効果を見る
ST-04D	ST-04	model-D	径方向Permeabilityの効果を見る
ST-16A	ST-16	model-A	リファレンスケース
ST-16C	ST-16	model-C	径方向Permeabilityの効果を見る
ST-16D	ST-16	model-D	径方向Permeabilityの効果を見る
ST-17A	ST-17	model-A	リファレンスケース

尚、試験ケースST-04,ST-16については径方向流動抵抗の効果及び径方向Permeabilityの規定法の違いによる効果を確認するために解析モデルmodel-A,B,C,Dによる解析を実施している。

## 5. 解析結果

今回の解析は解析結果が試験値及び以前おこなわれた解析結果とどの程度一致するかを確認することと、径方向流動抵抗及びPermeabilityの効果を見ることの2つにある。

### a)解析モデル model-Aによる解析結果

model-Aによる計算結果と実験値及び、比較のため平成4年度に実施した上部プレナム付き解析モデル(model-1)を用いた解析結果を発熱部上端・中央断面における温度・流速分布について、図.5-a-1～図.5-a-14に示す。

各ケースの19pin Bundleの温度分布は、正確なスタガードハーフピンメッシュ分割をおこなった効果が現れ、旧モデル(model-1)に比べて実験値とよく一致しており、61pin Bundleの温度分布は19pin側から加熱されるケース(case ST-02)においては発熱部上端・中央で実験値よりも高めに評価する傾向にあるが、19pin側から冷却されるケース(case ST-04,16,17)においては、case ST-04の発熱部中央で若干高く評価しているのを除いて発熱部上端,中央で実験値とよく一致している。

また、61pin Bundleの温度分布の勾配については旧モデル(model-1)に比べて各ケースともバンドル全域で急勾配となり、case ST-04の19pinに近い箇所では温度が相対的に見て低めに評価する傾向にあるほかは実験値とよく一致している。

流速分布については径方向流速が19pin,61pin Bundleともバンドルへのナトリウム入口の形状の違いから旧モデルに比べて小さくなっている。また、61pin Bundleの軸方向流速は旧モデルに比べて温度分布が急勾配でバンドル中央とラッパ管近傍の温度差が大きくなり浮力効果が大きく働いたことと、軸方向Permeabilityの規定を内部と周辺・コーナーサブチャンネルに分離したことから、バンドル中央の流速は速くラッパ管壁近傍の流速は遅くなる傾向になった。旧モデルとの違いについては6章で考察する。

### b)径方向流動抵抗,径方向Permeabilityの効果

径方向流動抵抗及びPermeabilityの効果を確認する計算結果の発熱部上端・中央断面における温度・流速分布を図.5-b-1～図.5-b-8に示す。

case ST-04,16において、径方向流動抵抗及び径方向Permeabilityの効果を見る解析をおこなったが、軸方向流速に比べて非常に小さいため、径方向流速に若干影響を与える程度で温度分布,軸方向流速分布にはほとんど影響を与えなかった。

## 6. 考察

CCTL-CFR試験のテスト解析結果から、61pin Bundle側の温度分布について、x-y断面のメッシュ分割が同一であるにも関わらず今回の解析モデルと以前実施した上部プレナム付き解析モデルの結果で大きな差を生じた。この原因を明確にするとともに流動抵抗、Permeability等の効果を見る解析をおこない、どの要因が解析結果に影響を与えるのかを確認する。

### 6-1 解析条件

解析モデルはmodel-Aを使用し、径方向Permeabilityを20%,40%増加させたケースと軸方向流動抵抗を旧モデルのものに変更、更に軸方向Permeabilityについても旧モデルのものに変更したケースの計算を試験ケースST-04をリファレンスケースとして実施した。今回の解析モデルと旧モデルとのバンドル部に関する大きな違いは大きく3つに分けられる。

#### 1)メッシュ分割

X-Y断面のメッシュ分割については旧モデルは61pin Bundle優先のスタガードハーフピンメッシュ分割のため、19pin Bundle側は歪んだスタガードハーフピンメッシュ分割をしている。これに対して、今回のモデルは61pin,19pin Bundleを領域1,2に分割しているため両バンドルとも正確なスタガードハーフピンメッシュ分割をしている。また、軸方向のメッシュ分割は旧モデルでは熱電対がセルの中心に位置する分割になっているのに対して、今回のモデルは熱電対がセルの境界に位置するメッシュ分割になっており、分割幅も今回のモデルの方が比較的細かい分割となっている。ナトリウム入口境界については旧モデルがバンドルの横方向から流入してくる形状になっているのに対して今回のモデルはバンドル断面（Z方向）が入口境界となっている。

2)軸方向流動抵抗式

両モデルとも内部,周辺,コーナーサブチャンネルに対して軸方向流動抵抗を与えているが、異なる流動抵抗式を使用している。それぞれの摩擦係数の式を表.6-1-2に、摩擦係数とレイノルズ数の相関式を図.6-1-1～6-1-6に示す。

3)軸方向・径方向Permeability

旧モデルでは、各々のバンドル単位で軸方向・径方向Permeabilityを規定していたため、内部,周辺,コーナーサブチャンネルにあたるメッシュのPermeabilityがどれも一様であったが、今回のモデルでは各バンドルとも内部と周辺及びコーナーサブチャンネルの2種類に分けて規定している。各々のPermeability及びPorosityを表.6-1-3に示す。これらの3つの違いの内、径方向Permeability,軸方向の流動抵抗及びPermeabilityに着目した解析を実施。

表.6-1-2 摩擦係数一覧

	サブチャンネル	旧モデル	今回のモデル
61 ピン バンドル	内部	$f_L = \frac{73.0}{Re} \quad Re < 422.5$ $f_T = \frac{2.48}{Re^{0.44}} \quad Re > 422.5$	$f_L = \frac{72.0}{Re} \quad Re < 1189.08$ $f_T = \frac{0.2166}{Re^{0.18}} \quad Re > 1189.08$
	周辺	$f_L = \frac{70.0}{Re} \quad Re < 422.5$ $f_T = \frac{2.09}{Re^{0.42}} \quad Re > 422.5$	$f_L = \frac{74.45}{Re} \quad Re < 1737.80$ $f_T = \frac{0.08858}{Re^{0.097376}} \quad Re > 1737.80$
	コーナー	$f_L = \frac{112.0}{Re} \quad Re < 422.5$ $f_T = \frac{4.28}{Re^{0.46}} \quad Re > 422.5$	$f_L = \frac{102.92}{Re} \quad Re < 1383.25$ $f_T = \frac{0.2735}{Re^{0.18}} \quad Re > 1383.25$
19 ピン バンドル	内部	$f_L = \frac{82.0}{Re} \quad Re < 677.2$ $f_T = \frac{2.59}{Re^{0.47}} \quad Re > 677.2$	$f_L = \frac{82.78}{Re} \quad Re < 2013.59$ $f_T = \frac{0.2735}{Re^{0.18}} \quad Re > 2013.59$
	周辺	$f_L = \frac{89.0}{Re} \quad Re < 677.2$ $f_T = \frac{2.46}{Re^{0.45}} \quad Re > 677.2$	$f_L = \frac{89.93}{Re} \quad Re < 2691.54$ $f_T = \frac{0.03612}{Re^{0.00995}} \quad Re > 2691.54$
	コーナー	$f_L = \frac{102.0}{Re} \quad Re < 677.2$ $f_T = \frac{2.49}{Re^{0.43}} \quad Re > 677.2$	$f_L = \frac{100.69}{Re} \quad Re < 1651.96$ $f_T = \frac{0.2313}{Re^{0.18}} \quad Re > 1651.96$

表.6-1-3 Permeability, Porosity 一覧

	サブチャンネル	旧モデル				今回のモデル			
		ALX	ALY	ALZ	AL	ALX	ALY	ALZ	AL
61 ピン バンド ル	内部	0.46910	0.46910	0.27201	0.24916	0.10896	0.10896	0.22716	0.22716
	周辺&コーナー					0.32930	0.32930	0.28953	0.28953
19 ピン バンド ル	内部	0.52206	0.52206	0.42685	0.36282	0.23806	0.23806	0.35133	0.35133
	周辺&コーナー					0.45454	0.45454	0.38884	0.38884

解析ケースを表.6-1-4に示す。

表.6-1-4 解析ケース一覧

解析ケース	試験ケース	解析モデル	備考
ST-04A	ST-04	model-A	リファレンスケース
ST-04A-P1			径方向Permeabilityを20%増加させたケース
ST-04A-P2			径方向Permeabilityを40%増加させたケース
ST-04A-F1			軸方向流動抵抗の式を旧モデルの式に変更したケース
ST-04A-F2			軸方向流動抵抗及び軸方向Permeability, Porosityを旧モデルのものに変更したケース

この4ケースにより、径方向Permeabilityによる径方向の熱の流れの効果と軸方向流動抵抗及びPermeabilityの効果を確認する。

## 6-2 解析結果

発熱部上端及び中央における温度・流速分布により各々の効果を確認する。

### a) 径方向の熱の流れの効果

発熱部上端・中央における温度・流速分布を図.6-2-a-1～図.6-2-a-4に示す。

径方向の流速分布については、径方向Permeabilityを20%,40%増加させることにより遅くなっているのが分かるが軸方向流速にはほとんど影響をおよぼしていない。また、径方向の熱の移動については、径方向Permeabilityを大きくすることにより温度分布の勾配を特に熱伝導によって小さくしピーク温度を若干下げる傾向にあるが、今回のケース（ST-04）においては大きな効果は現れなかった。

### b) 軸方向流動抵抗・Permeabilityの効果

発熱部上端・中央における温度・流速分布を図.6-2-b-1～図.6-2-b-4に示す。

今回の解析モデル（model-A）と旧解析モデルとの解析結果が大きく変わった原因として、メッシュ分割の違いの他に軸方向流動抵抗と軸方向・径方向Permeabilityの規定の違いが考えられるが、今回のケースにおいて径方向Permeabilityの効果はほとんどないことが先の結果から分かる。しかし、軸方向流動抵抗及び軸方向Permeability, Porosityの効果は、図.6-2-b-1～図.6-2-b-4を見て分かるように、温度分布,流速分布に大きな影響を与えている。61pin Bundleの温度・流速分布を見ると、軸方向流動抵抗のみを旧モデルに変更したケース（ST-04A-F1）は軸方向の流速が若干遅くなり、それに伴ってピーク温度が高くなっているのが分かる。また、軸方向の流動抵抗,Permeabilityを旧モデルのものに変更したケースでは、Permeabilityがリファレンスケースよりも内部サブチャンネルで大きく、周辺・コーナーサブチャンネルで小さくなっているため、内部サブチャンネルを通過する流量がリファレンスケースに比べて多くなっている。このため、バンドル中央部の温度が低くなり、ラッパ管壁に近い箇所での温度はリファレンスケースよりも高くなっている。

これらの結果から、今回のモデルと旧モデルの温度・流速分布の違いは、径方向Permeabilityの影響はほとんど受けずに軸方向流動抵抗及び軸方向Permeabilityの規定の違いが大きく影響していたことが確認できた。

### 6-3 まとめ

今回の解析結果から、今回の解析モデルと旧モデルの温度・流速分布の違いは、径方向Permeabilityの影響はほとんど受けずに軸方向流動抵抗及び軸方向Permeabilityの規定の違いが大きく影響していたことが確認できた。しかし、軸方向の流動抵抗及びPermeabilityを旧モデルのものに変更したケースにおいても旧モデルの解析結果とよく一致しているとはいえない。この誤差は軸方向メッシュ分割の違いから起こる温度の歪みとナトリウム入口形状の違いによるクロスフローの影響が大きく作用していると思われる。

(図.6-3-1,6-3-2に発熱部上端・中央断面の流速ベクトル図を示す。)

## 7. 結論

今回作成した解析モデルにおける計算結果は、温度分布及び分布の勾配（断面中心温度で規格化した温度分布）を見る限り、実験結果をよく模擬していると考えられ、全体として非常に高い予測能力を持つことを確認できた。また、径方向流動抵抗、径方向Permeabilityについては、径方向流速が軸方向流速に比べて非常に小さいために温度分布及び軸方向の流速に当てる影響は非常に小さかった。

これらの結果から、本解析に使用する解析モデルは流動抵抗は軸方向のみ、径方向PermeabilityについてはTYPE-2（実際のメッシュ形状に則し、内部サブチャンネルと周辺・コーナーサブチャンネルに大きく2つに分けて求める）を用いたモデル（model-C）を使用することにする。

また、61pin Bundleの温度分布は旧モデルと比べて、x-y断面のメッシュ分割が同一であるにも関わらずかなりの温度差を生じた。この要因は軸方向の流動抵抗、パーミアビリティの設定の差にあることが分かった。今後用いるべきAQUAコードによる集合体内熱流動解析手法は以下のようにまとめられる。

- (1)メッシュ分割 - スタガードハーフピンメッシュ分割
- (2)軸方向の流動抵抗、Permeability - 内部サブチャンネルと周辺及びコーナーサブチャンネルに分類して入力する。
- (3)径方向流動抵抗及びPermeability - 感度は小さく、Permeabilityについてはメッシュ分割内の流路に対応したものを使い、流動抵抗については用いないものとする。

尚、軸方向の流動抵抗相関式として、MITのCHENG and TODREASの式を用いる。

参考文献

- [1] 戸田 信一 他 「自然循環時の炉心部流量再配分試験 (CCTL-CFR試験)  
—第3報 試験解析(1)—」, PNC ZN9410 94-119
- [2] S.K.Cheng and N.E.Todreas, " Hydrodynamic Models and Correlations for Bare and Wire-wrapped Hexagonal Rod Bundle Friction Factors, Subchannel Friction Factors and Mixing Parameters " , Nuclear Engineering and Design, Vol.92 (1986) pp.227-251

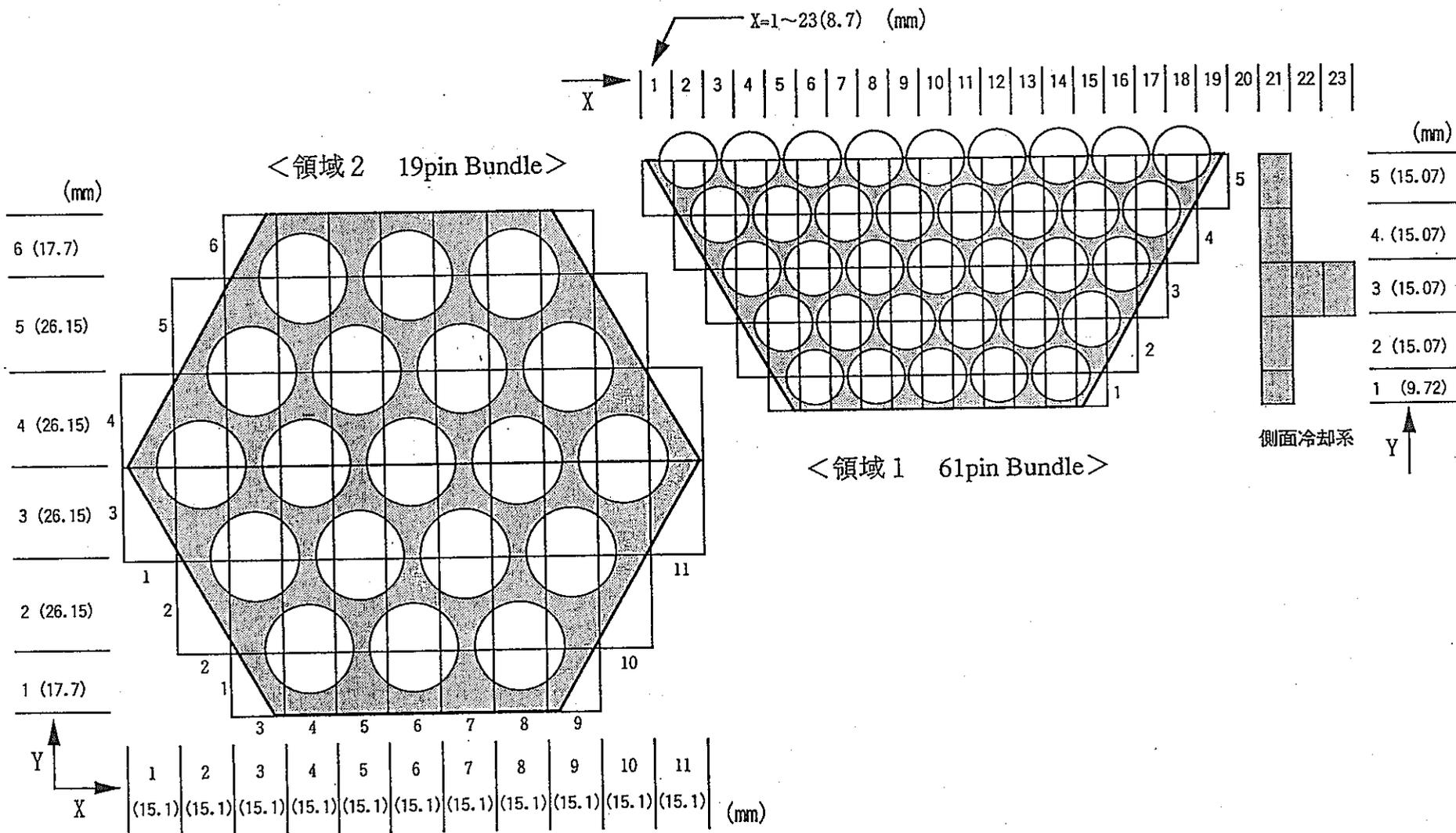


図.2-1-1 CCTL-CFR試験体 (バンドル部) AQUAメッシュ分割図

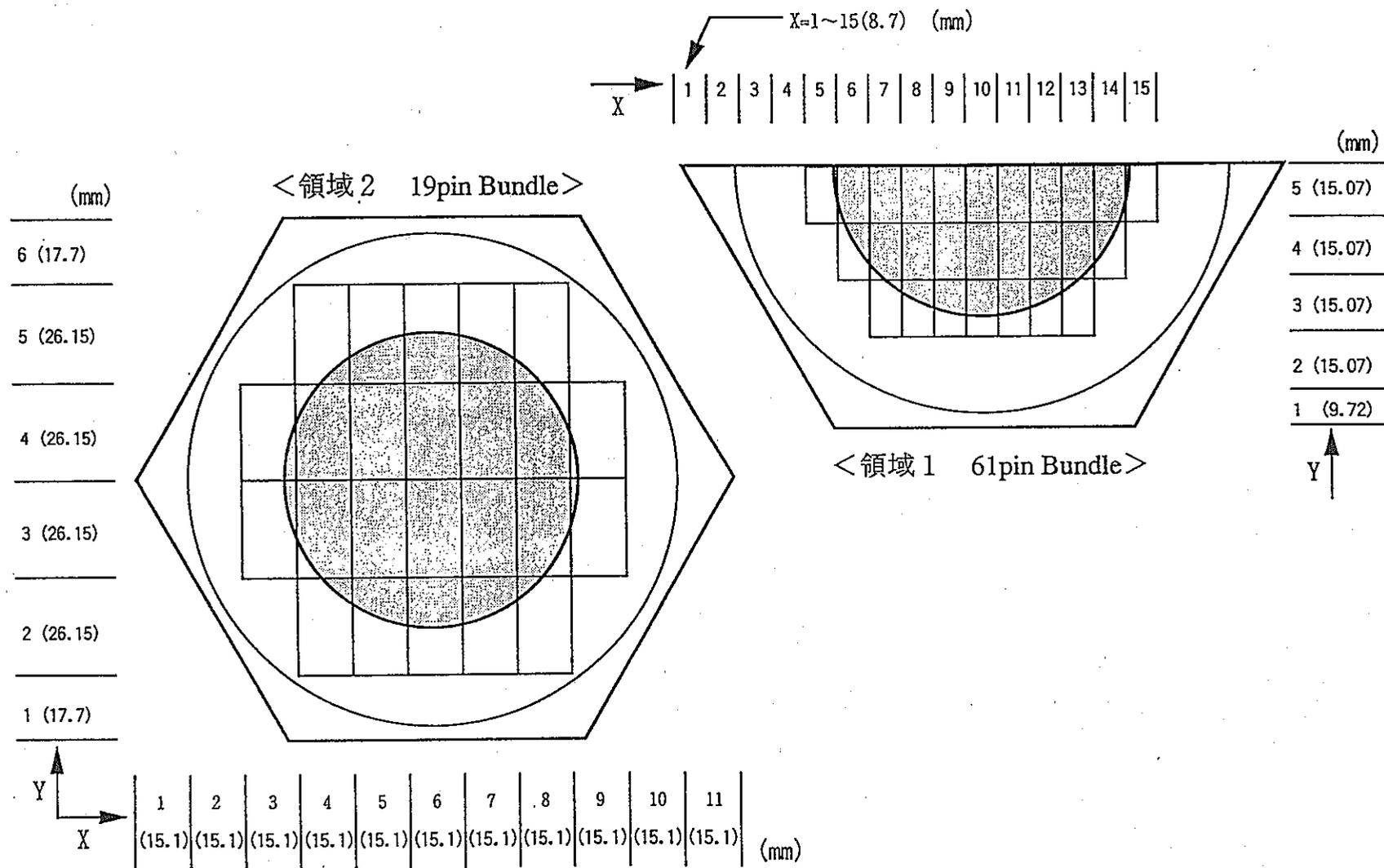


図.2-1-2 CCTL-CFR試験体（中性子遮蔽体部部） AQUAメッシュ分割図

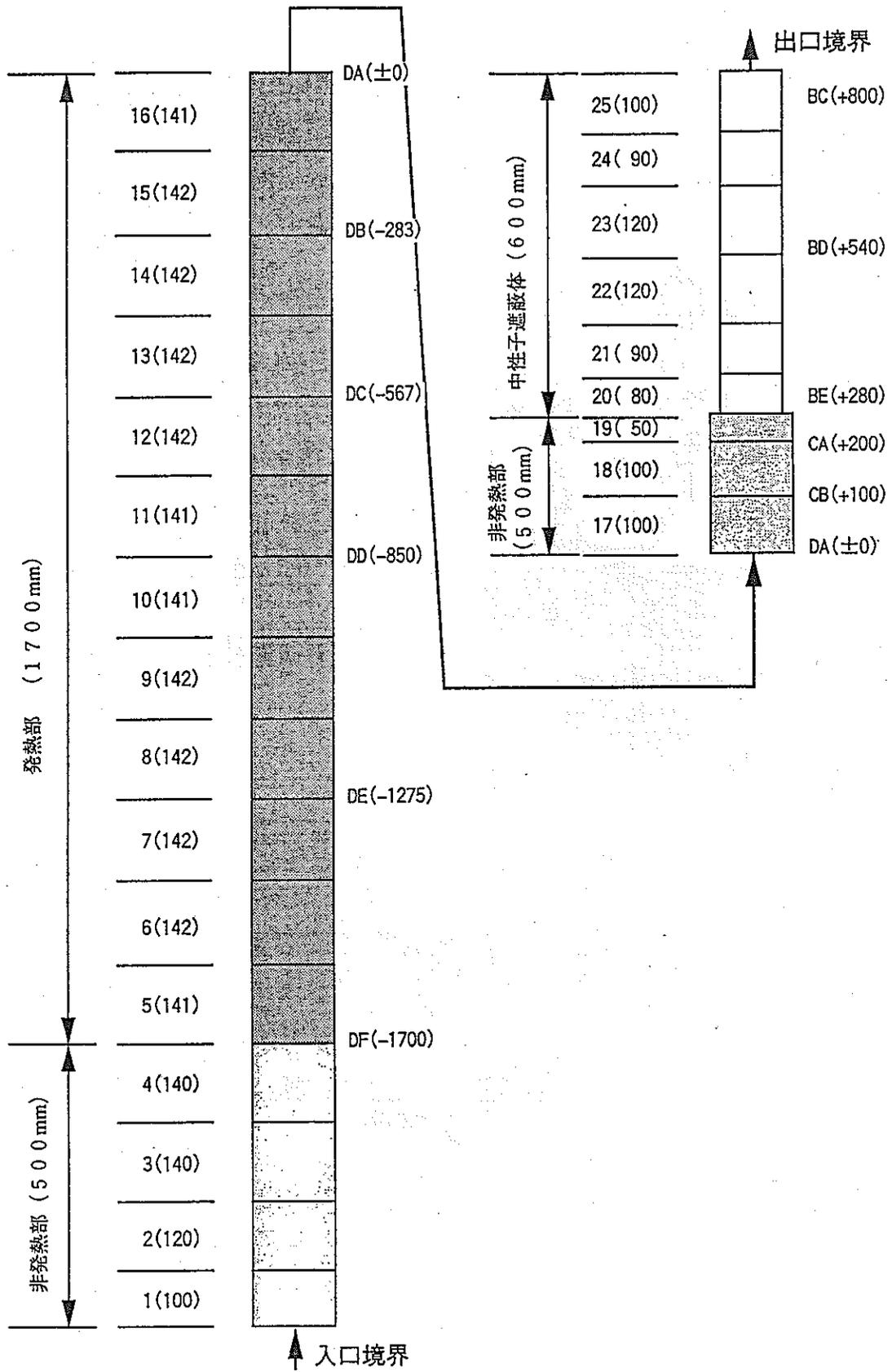


図.2-1-3 CCTL-CFR試験体軸方向AQUAメッシュ分割

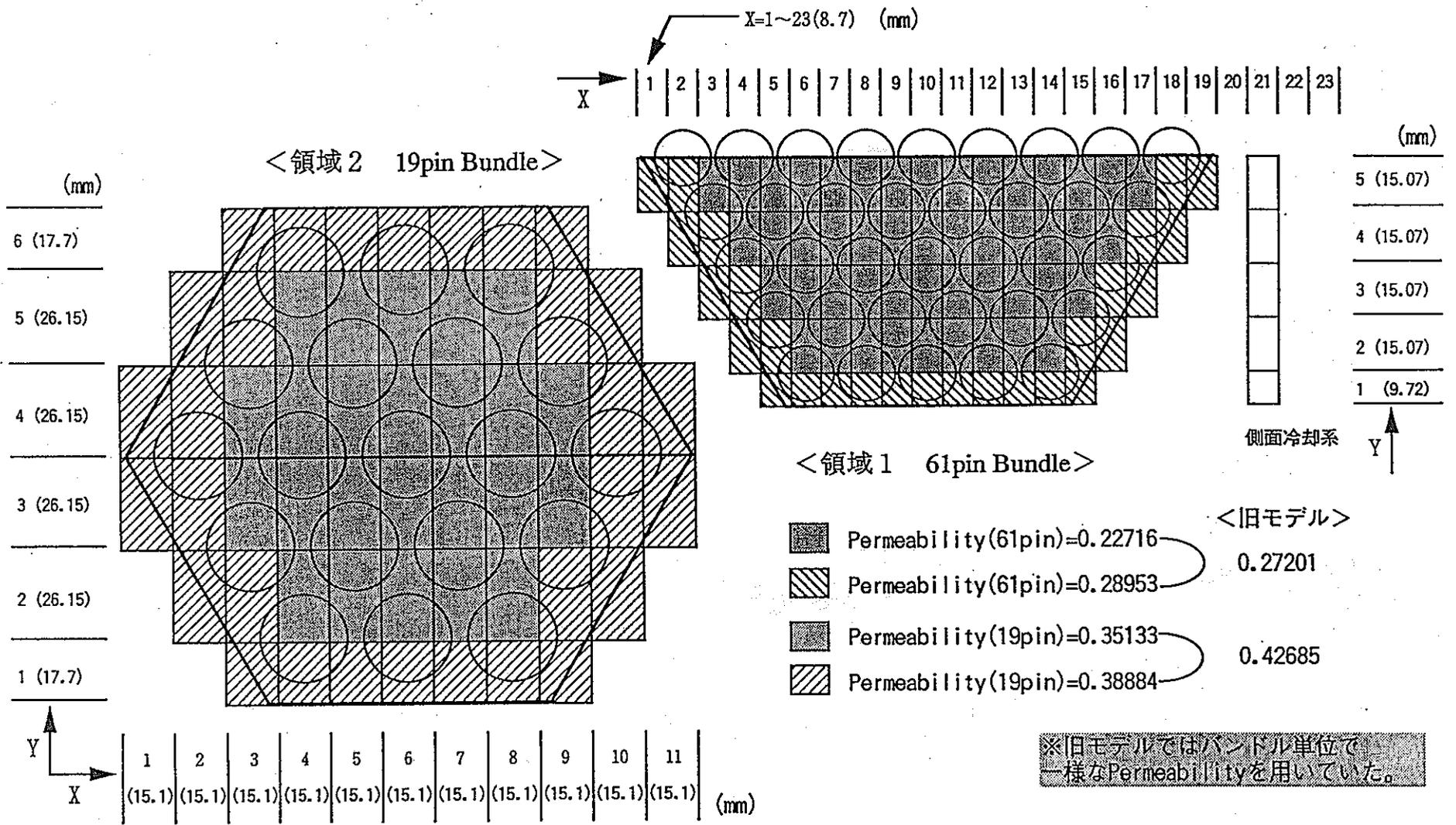


図.2-2-1 CCTL-CFR試験体 (バンドル部) 軸方向Permeabilityの規定

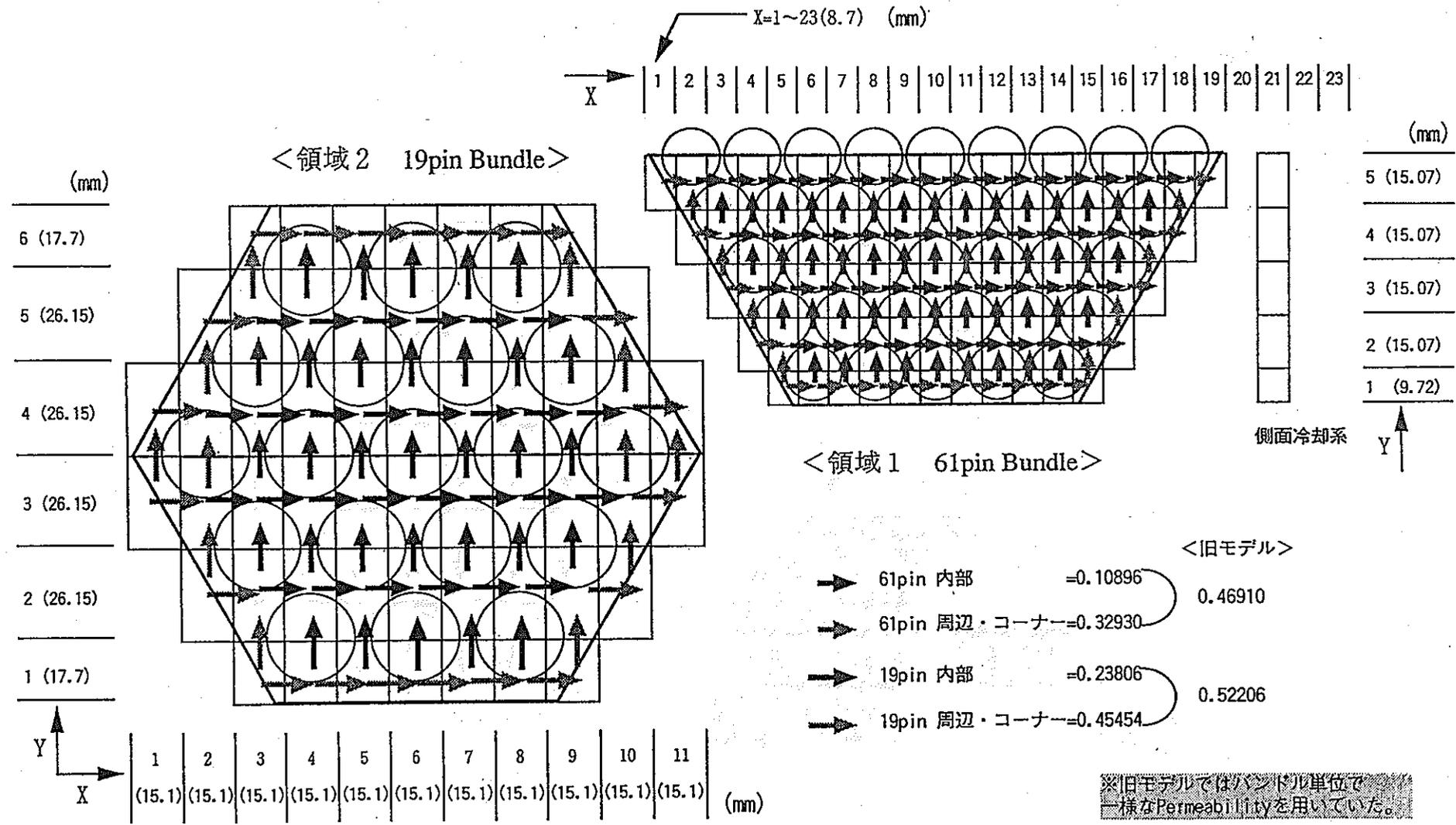


図.2-2-2 CCTL-CFR試験体 (バンドル部) 径方向Permeability (Type-1) の規定

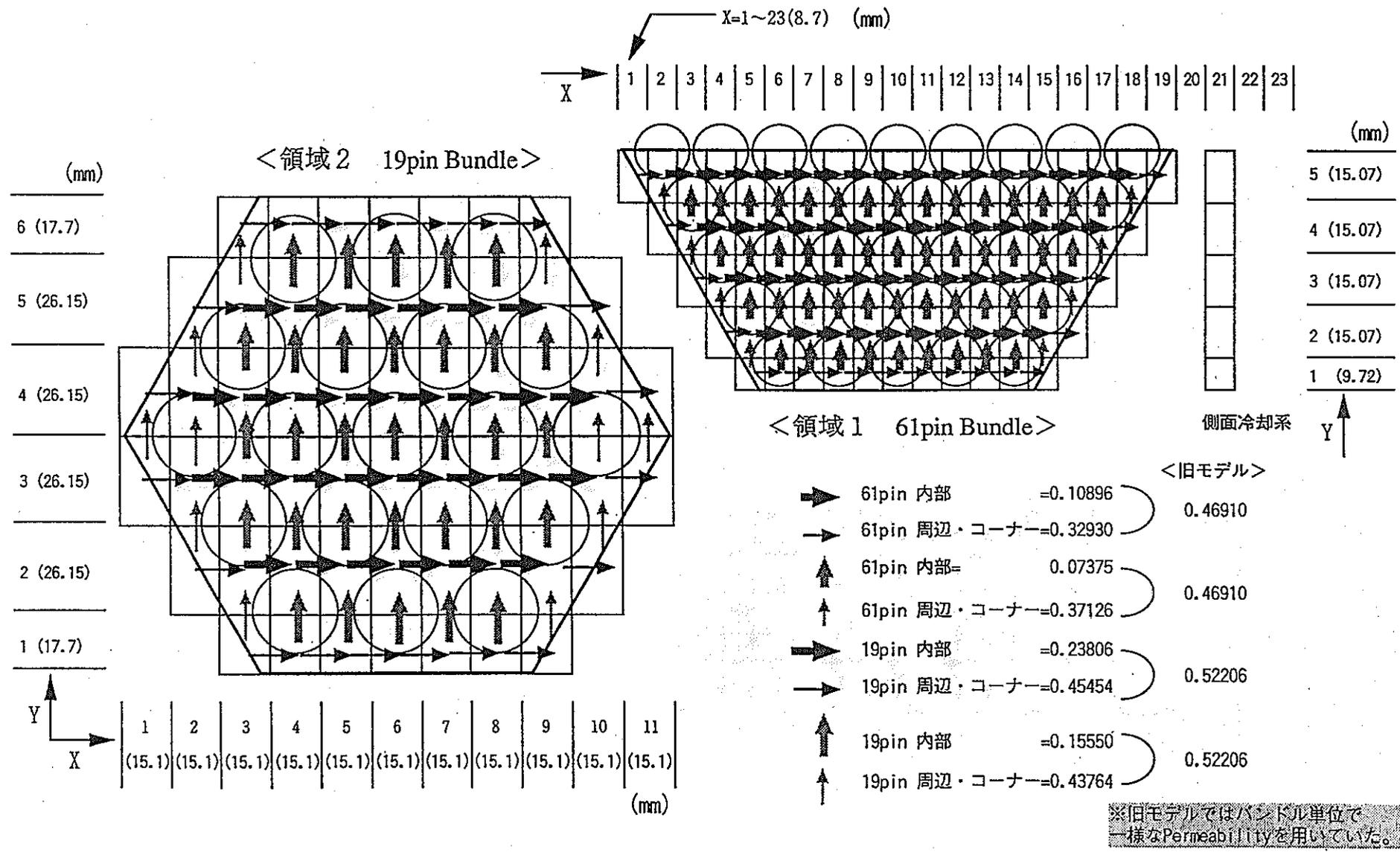


図.2-2-3 CCTL-CFR試験体 (バンドル部) 径方向Permeability (Type-2) の規定

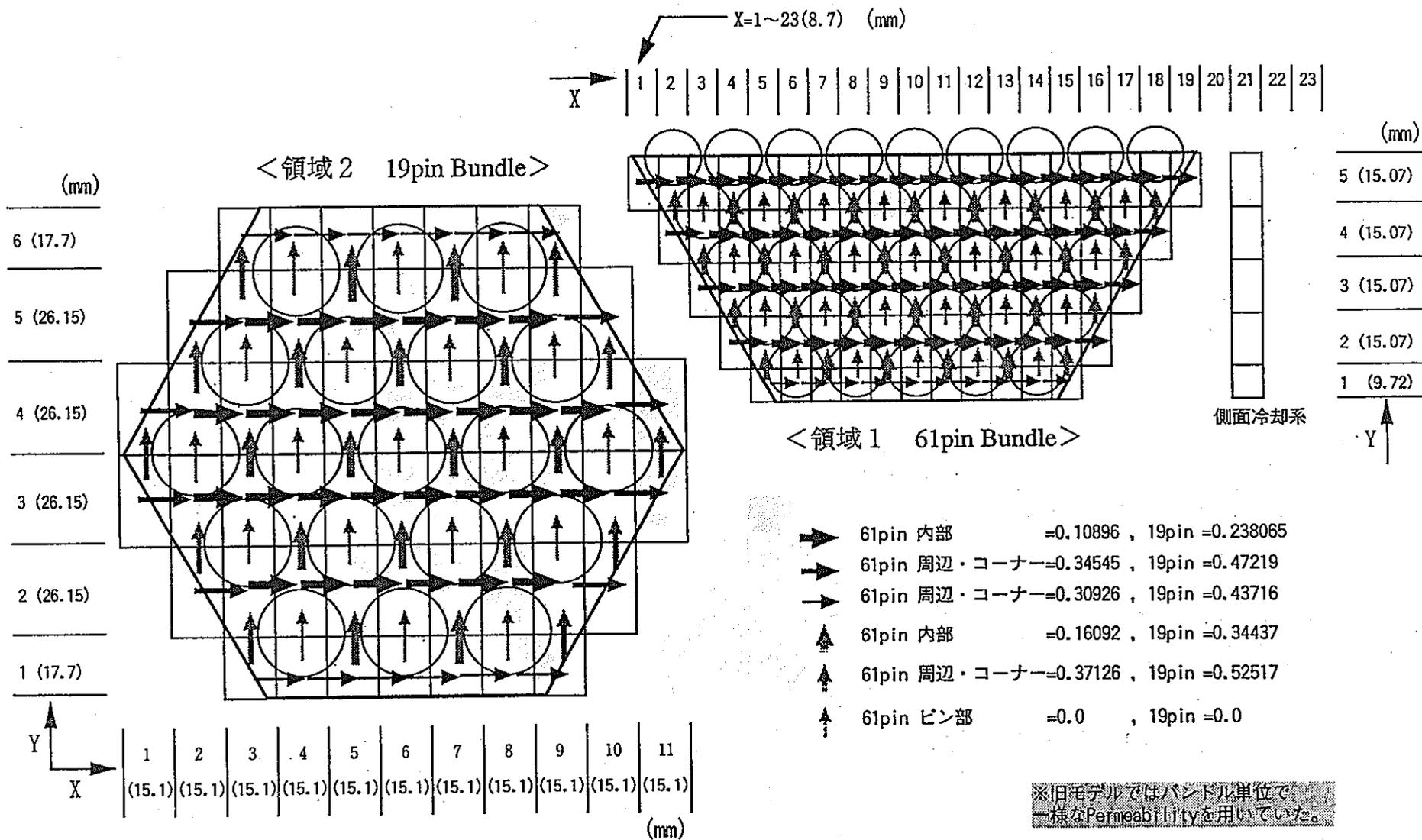


図.2-2-4 CCTL-CFR試験体 (バンドル部) 径方向Permeability (Type3) の規定

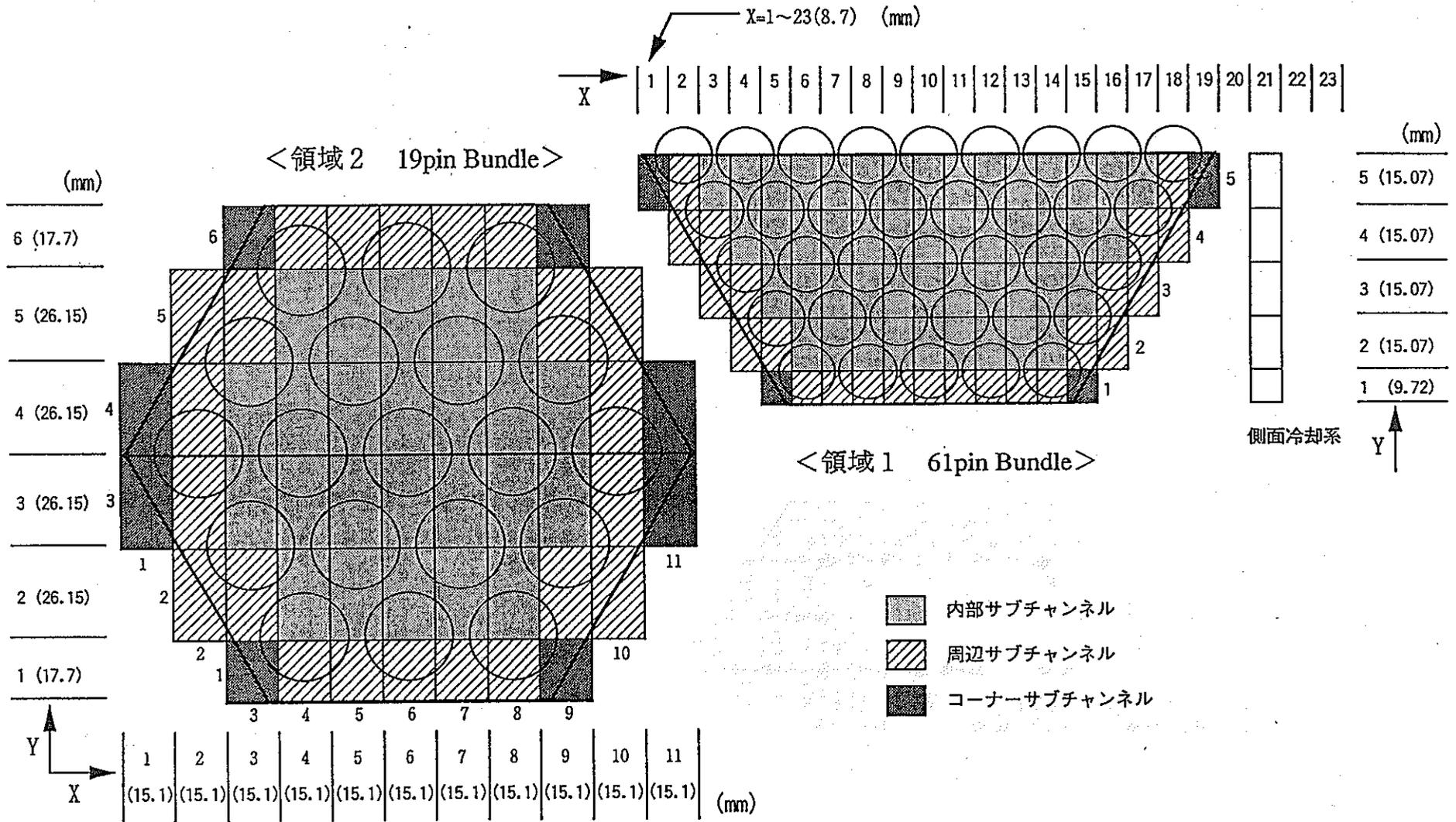


図.2-3-1 AQUA 流動抵抗規定時のメッシュの規定

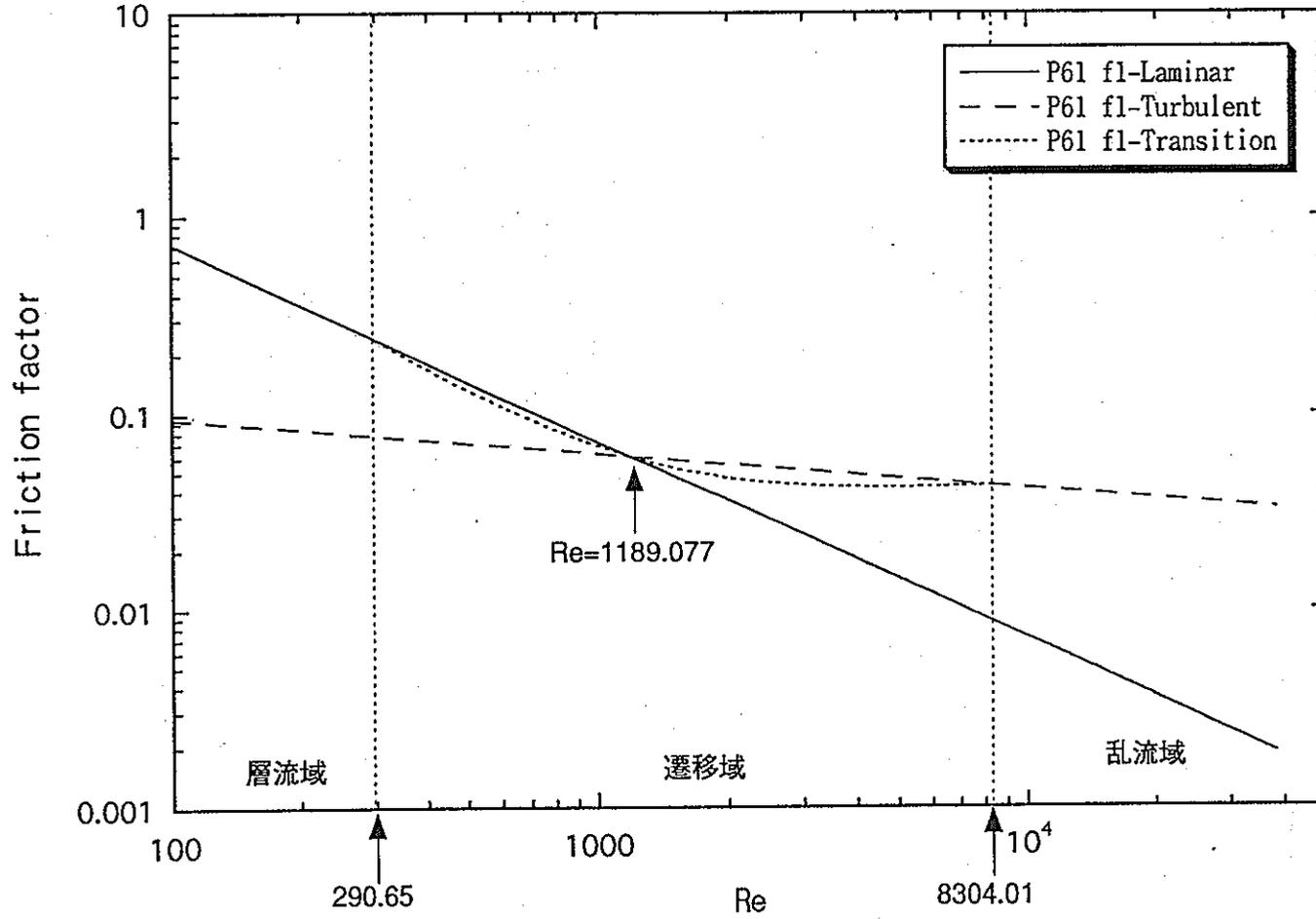


図.2-3-2 61pin Bundle 内部サブチャンネル- Friction factor 相関図

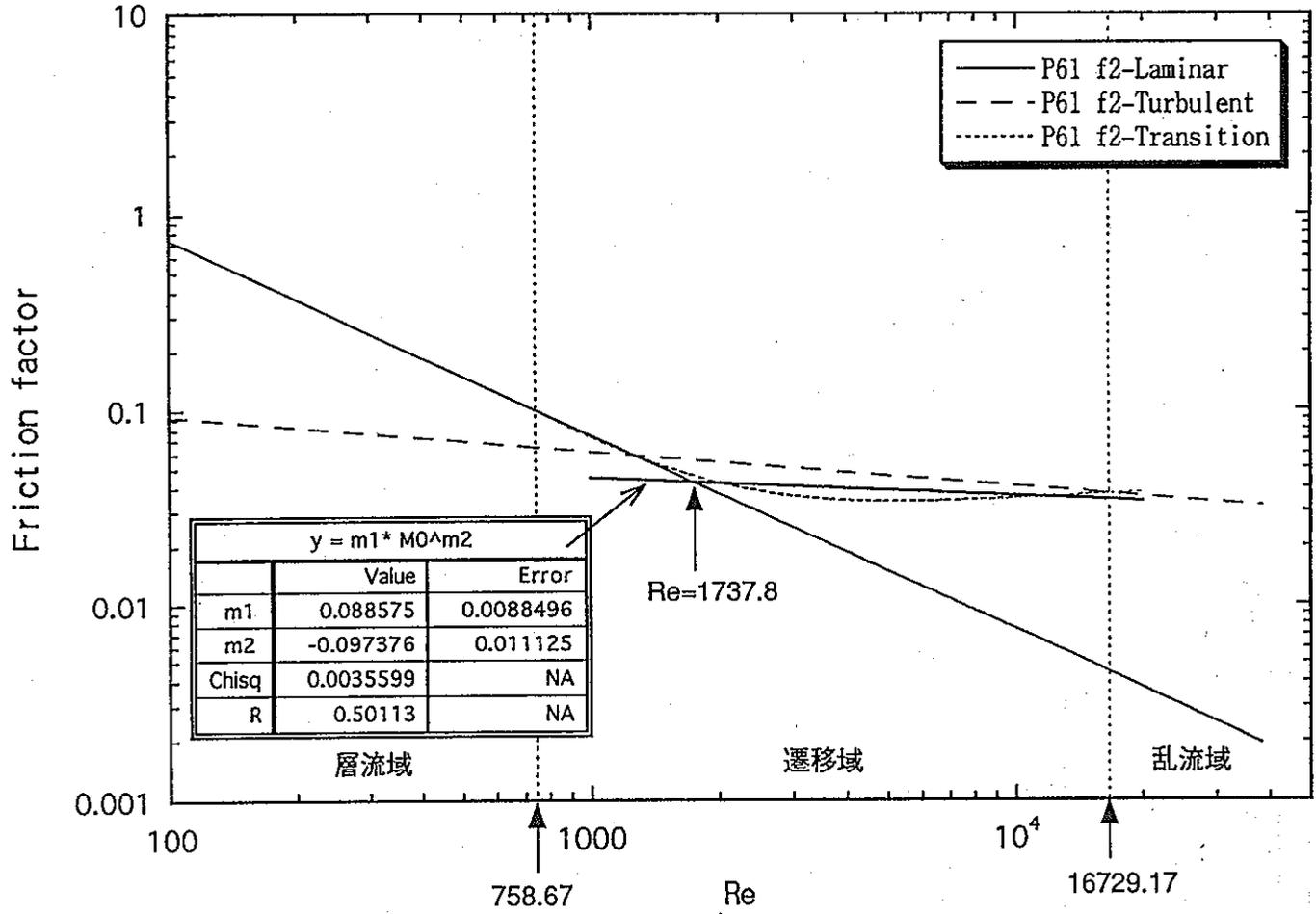


図.2-3-3 61pin Bundle 周辺サブチャンネル- Friction factor 相関図

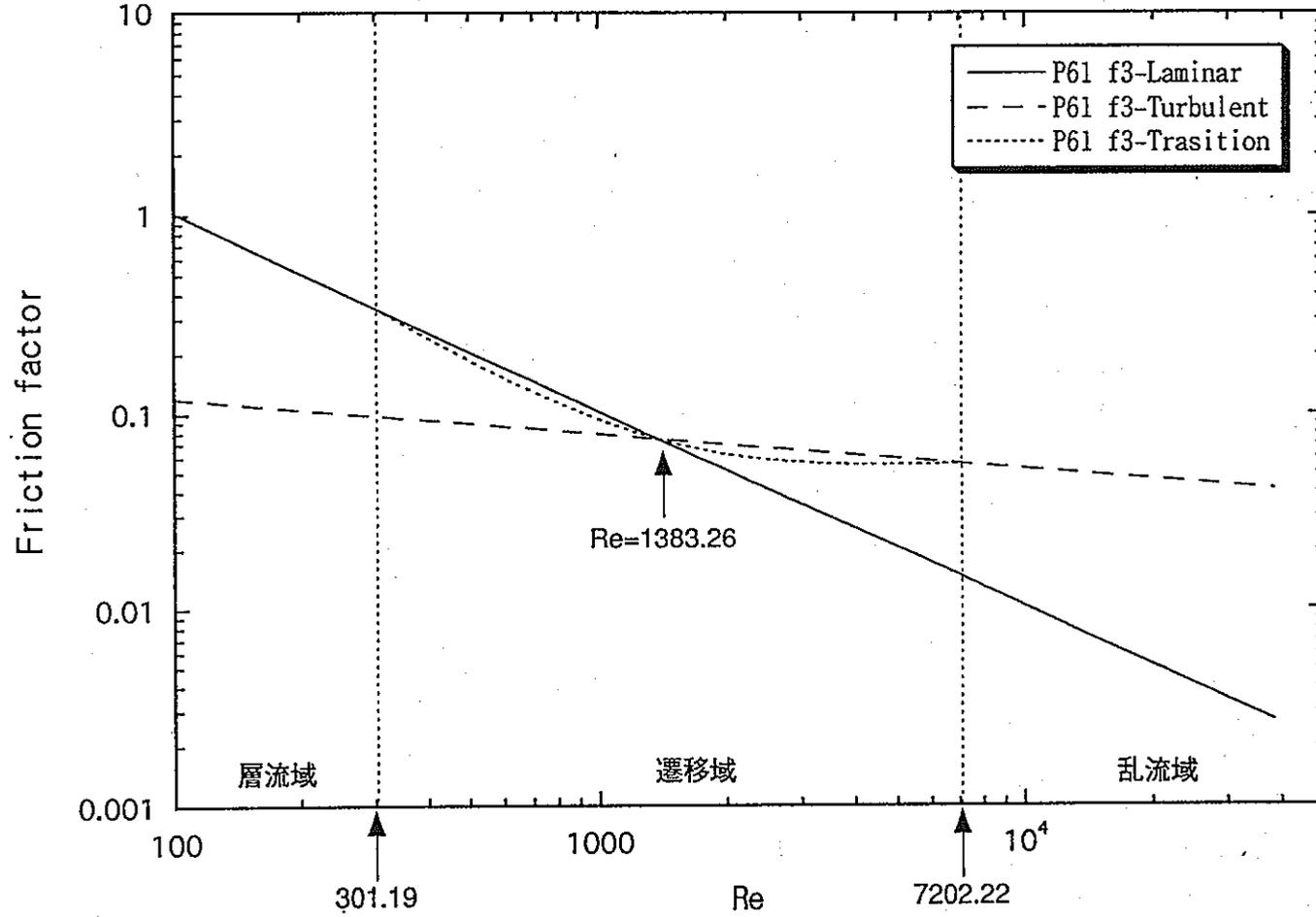


図.2-3-4 61pin Bundle コーナーサブチャンネル- Friction factor 相関図

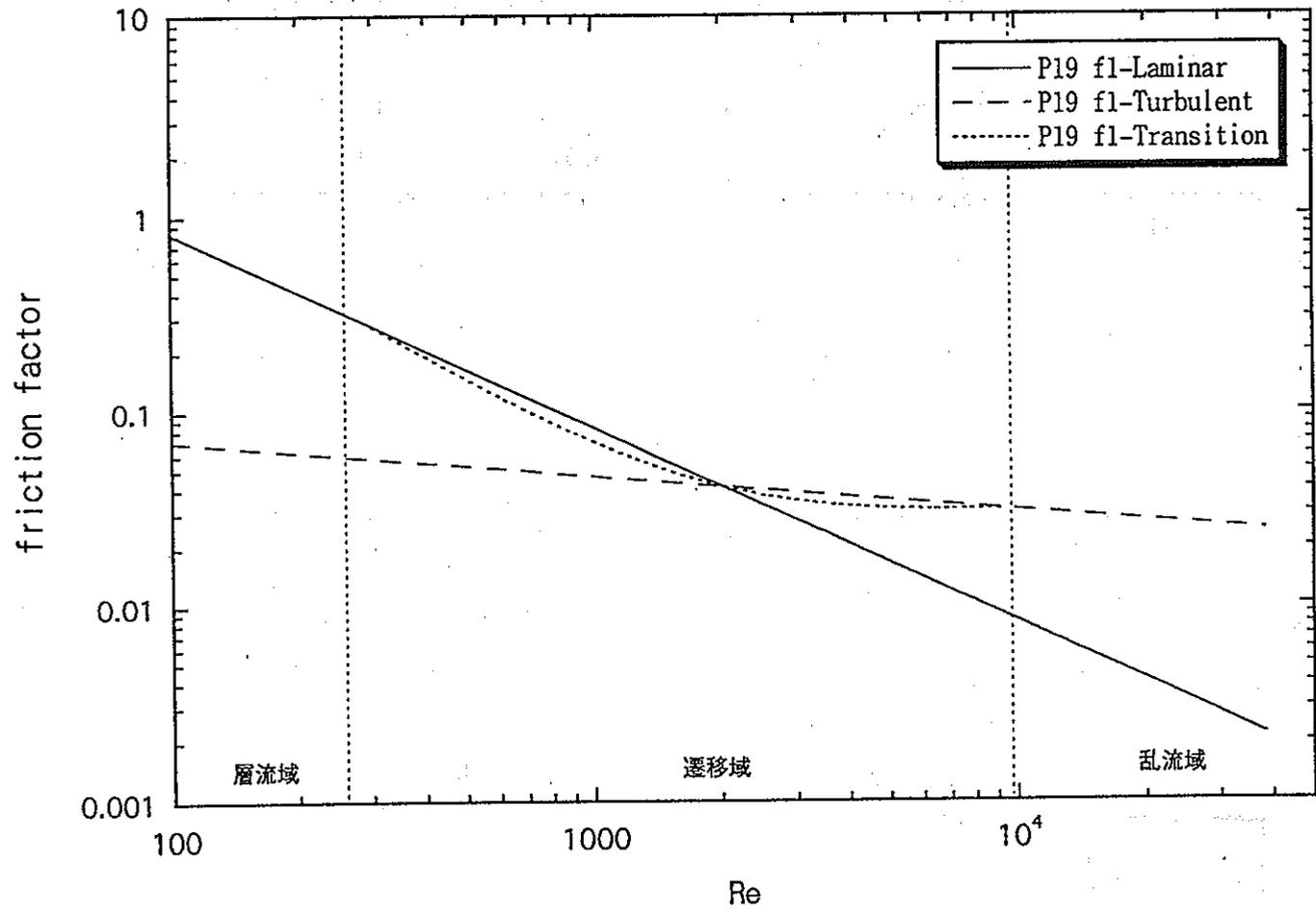


図.2-3-5 19pin Bundle 内部サブチャンネル- Friction factor 相関図

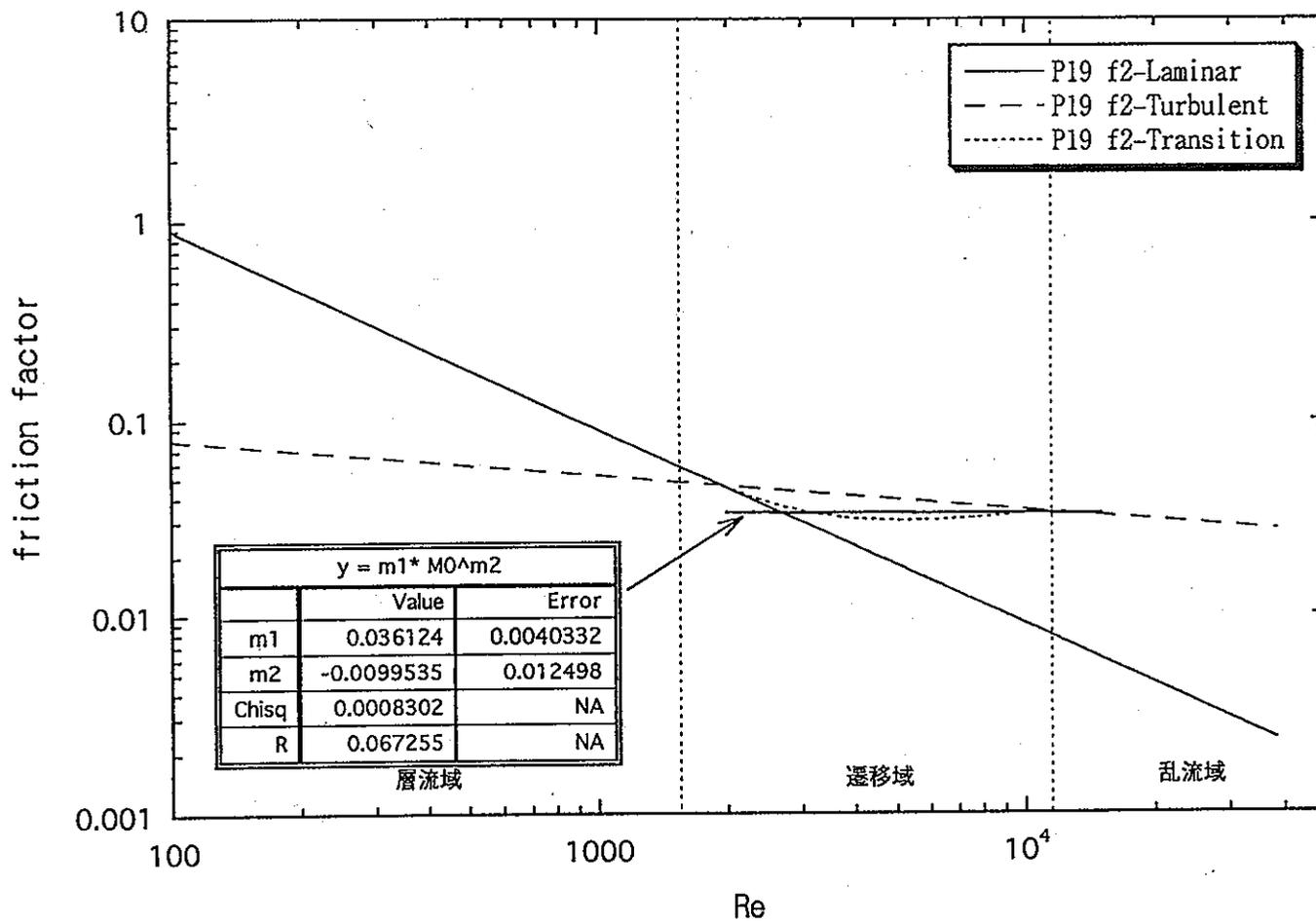


図.2-3-6 19pin Bundle 周辺サブチャンネル- Friction factor 相関図

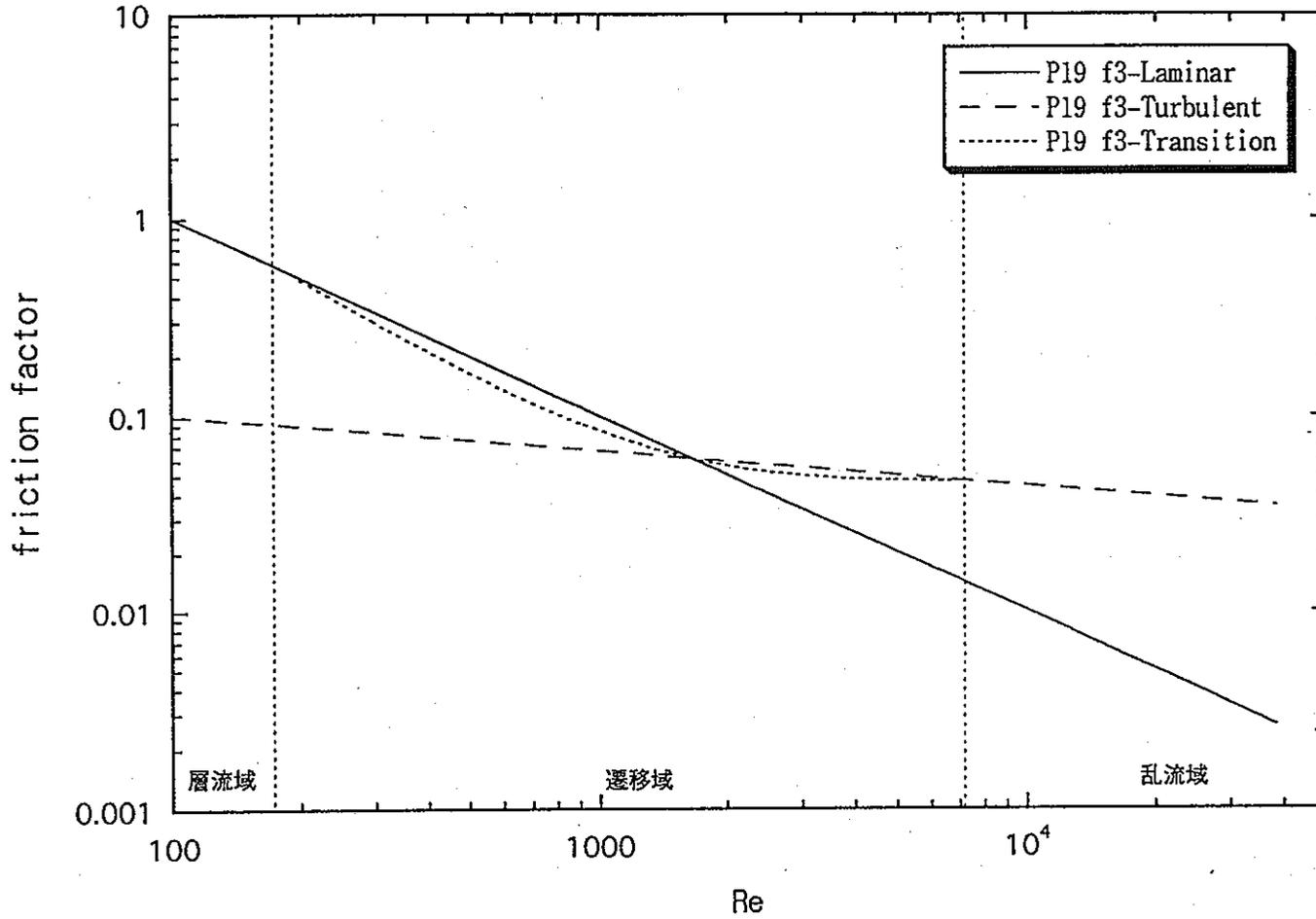


図.2-3-7 19pin Bundle コーナーサブチャンネル- Friction factor 相関図

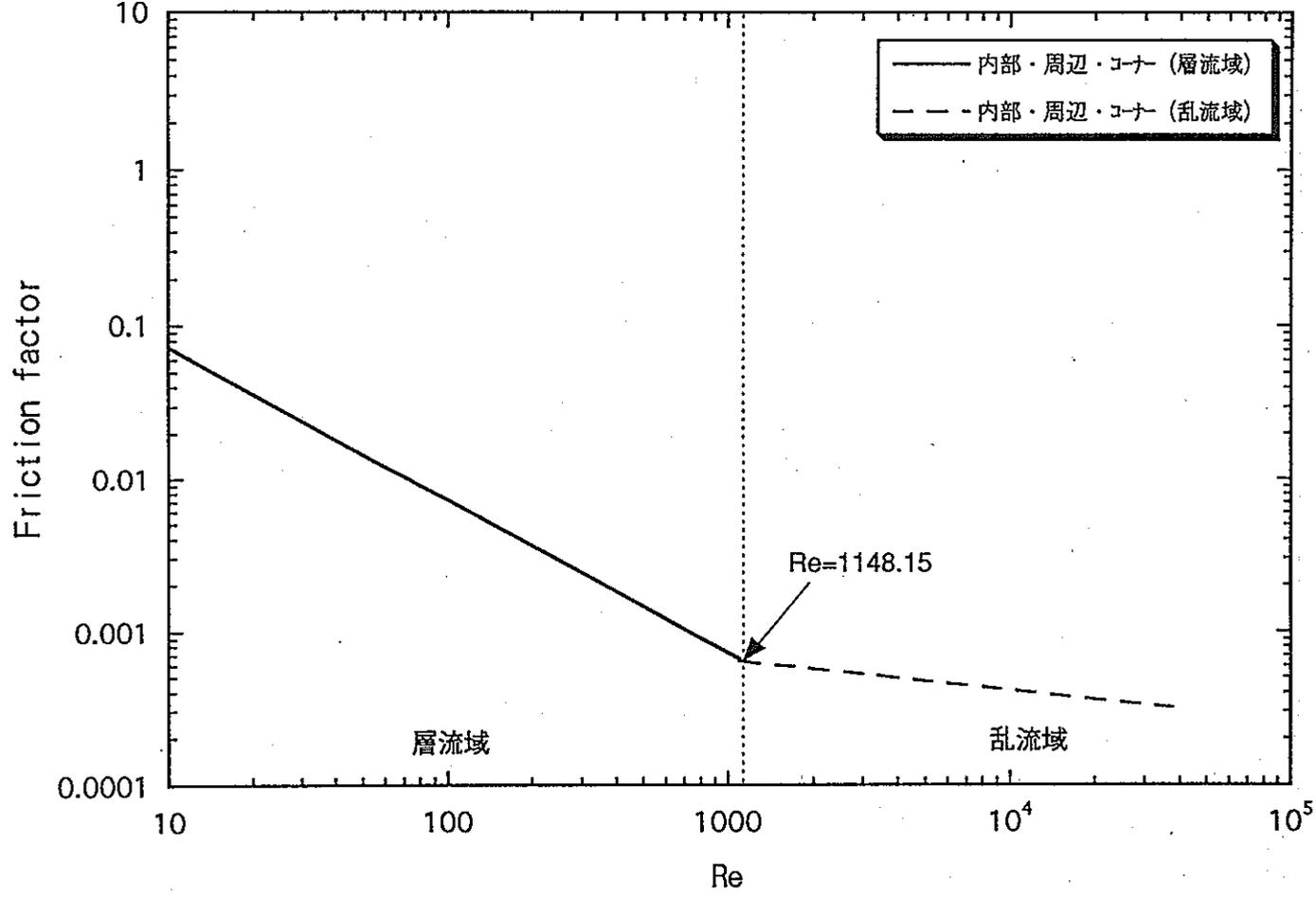


図.2-3-8 61pin Bundle - 径方向 Friction factor 相関図

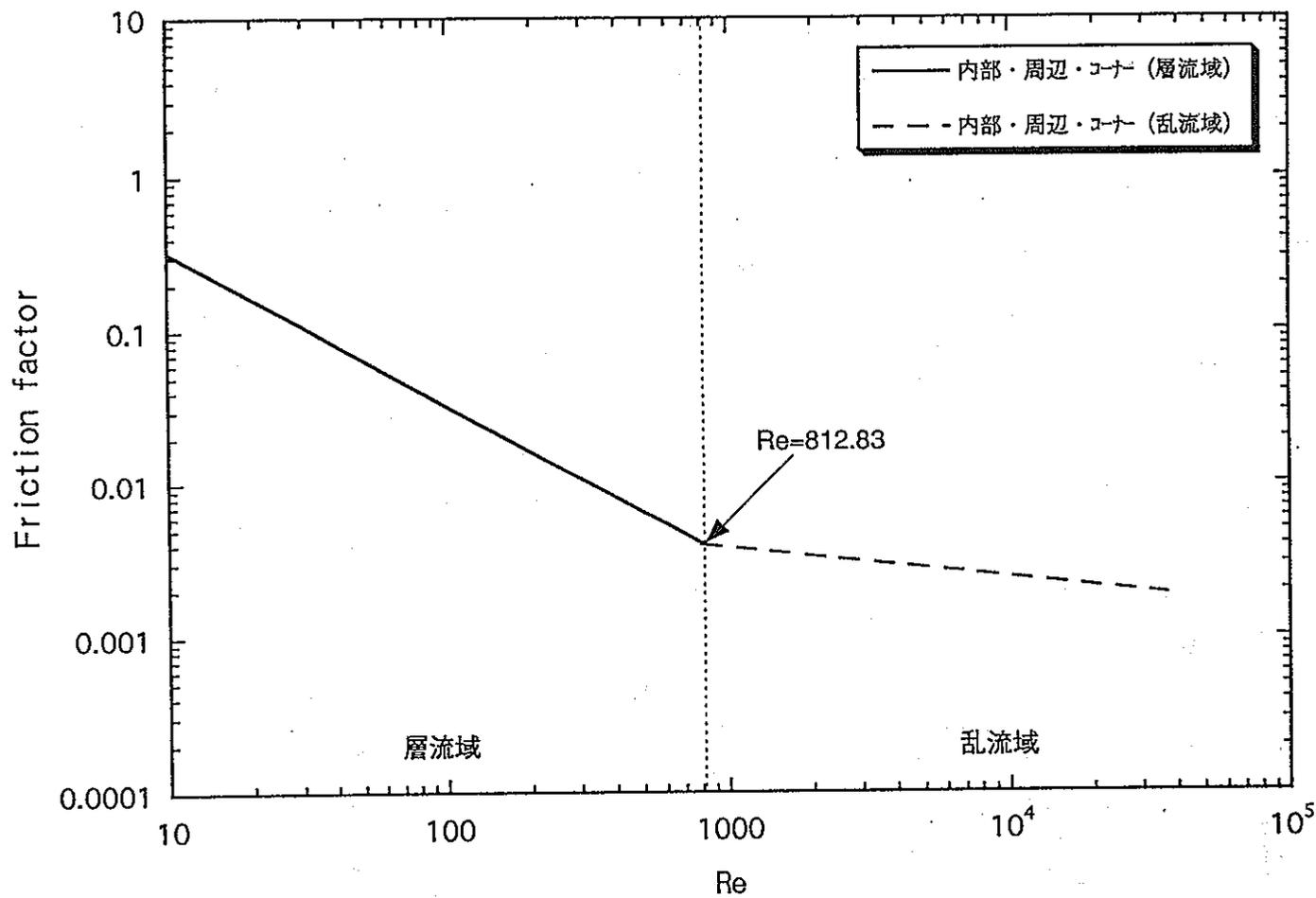


図.2-3-9 19pin Bundle - 径方向 Friction factor 相関図

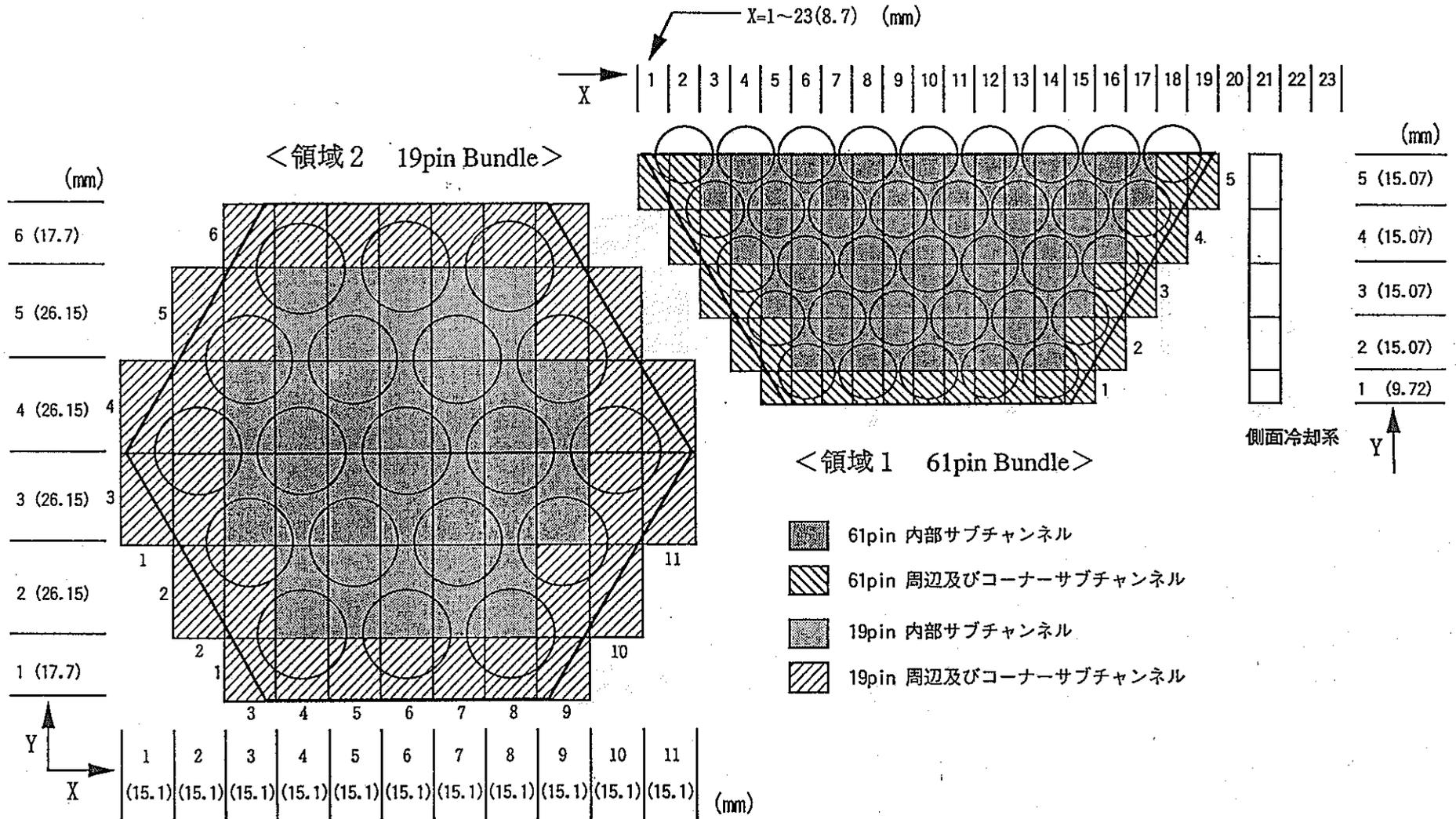


図.2-4-1 AQUA伝熱要素の規定 (バンドル部のメッシュ規定)

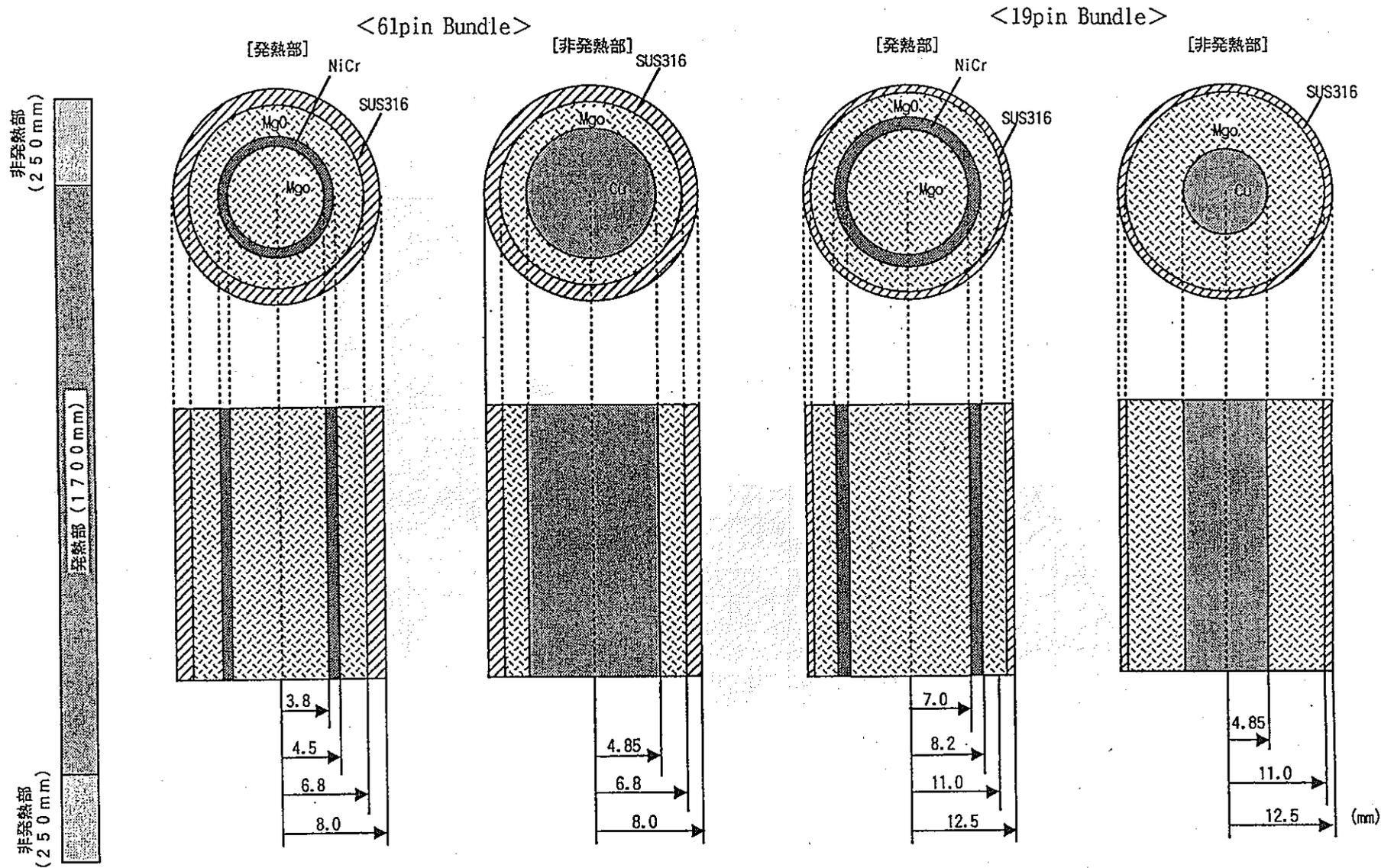


図.2-4-2 AQUA伝熱要素の規定 (ヒーターピン径方向メッシュ分割)

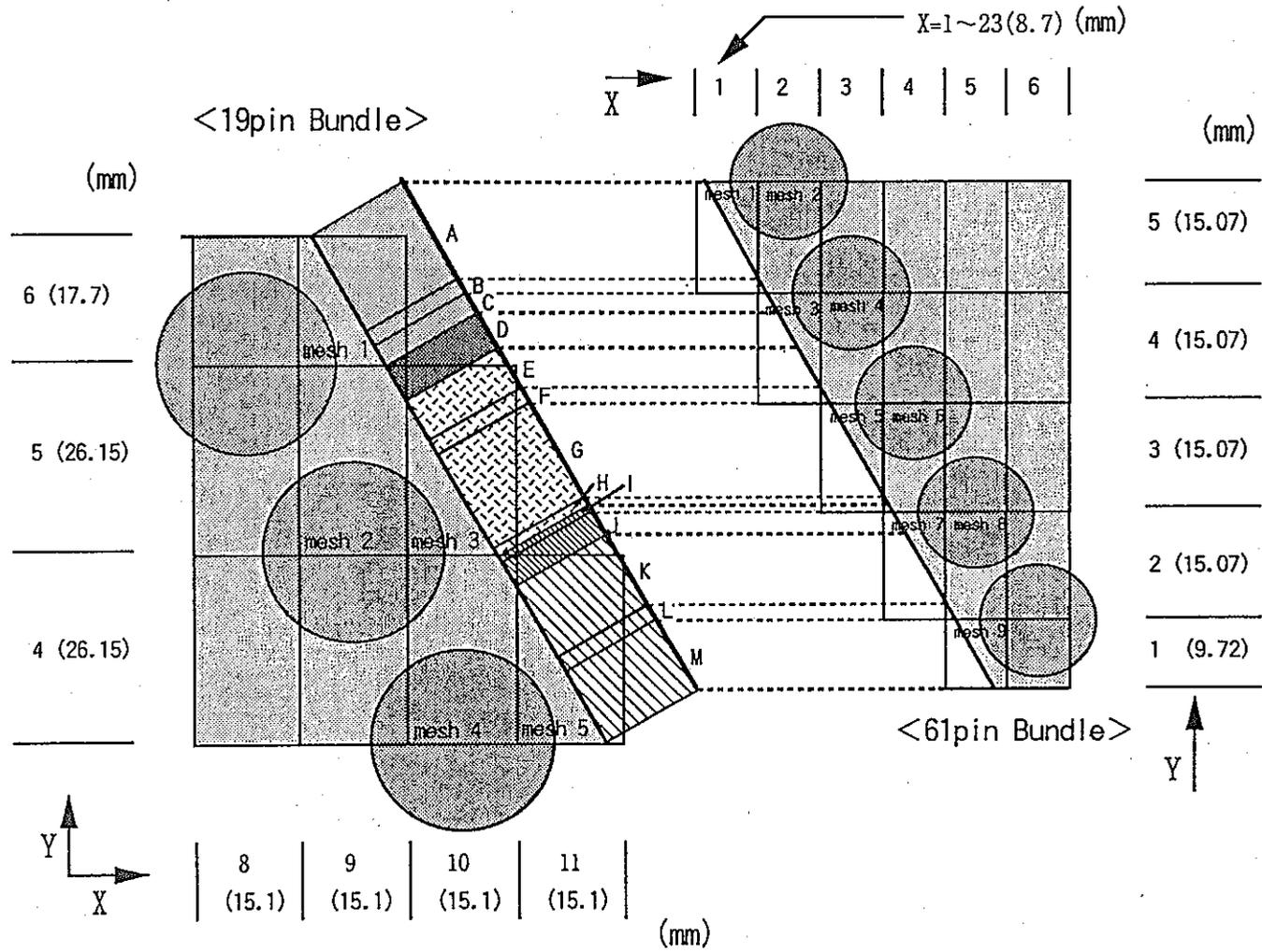


図.2-4-3 AQUA伝熱要素の規定 (19Pin-61Pin間 Heat Transfer)

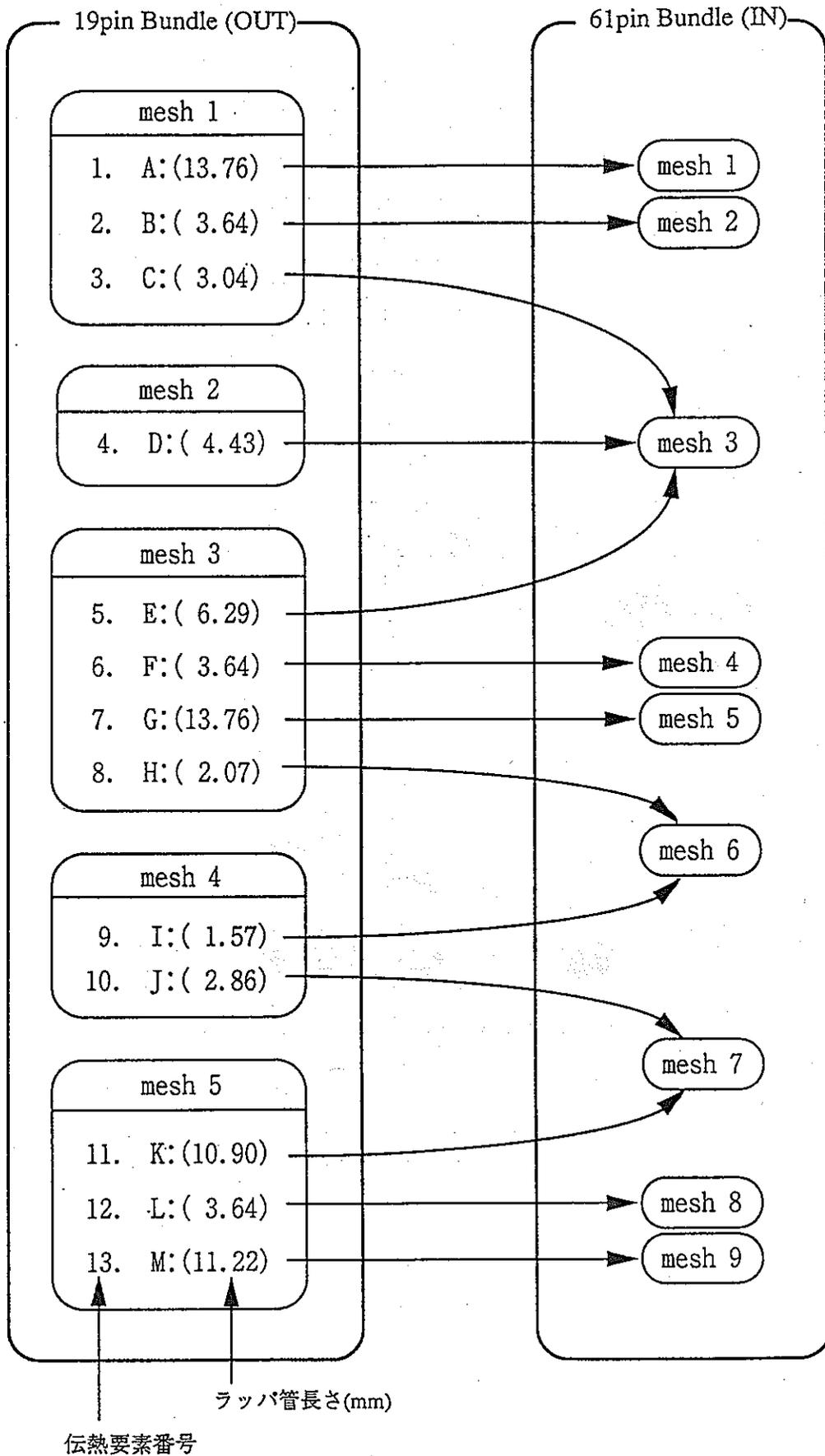
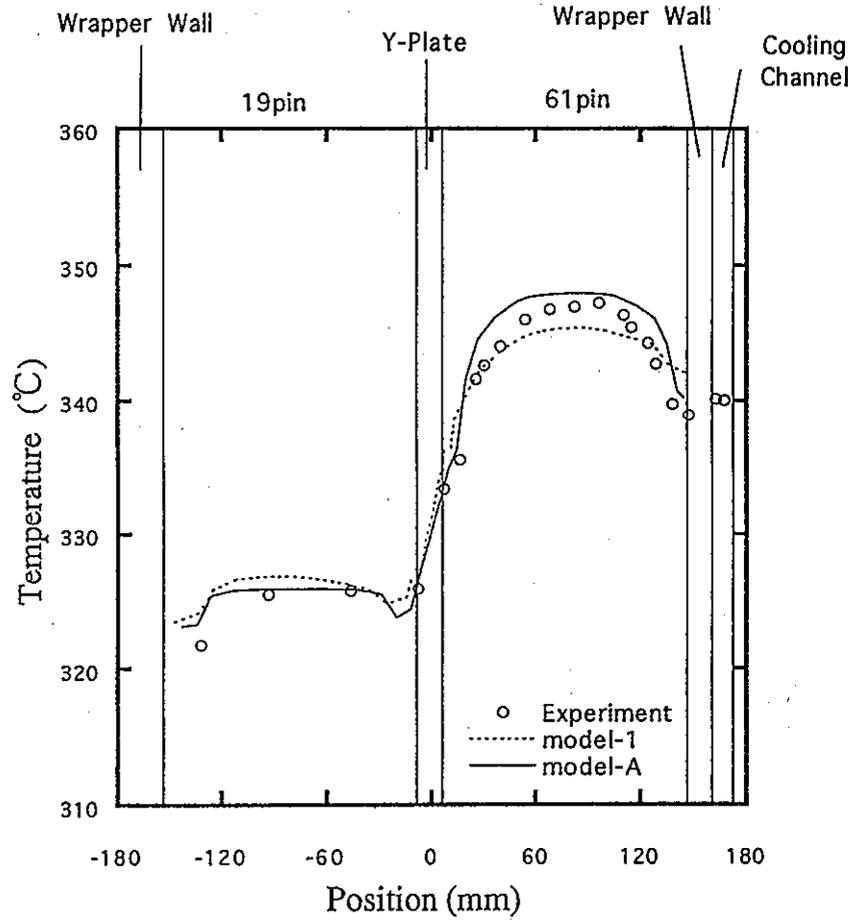
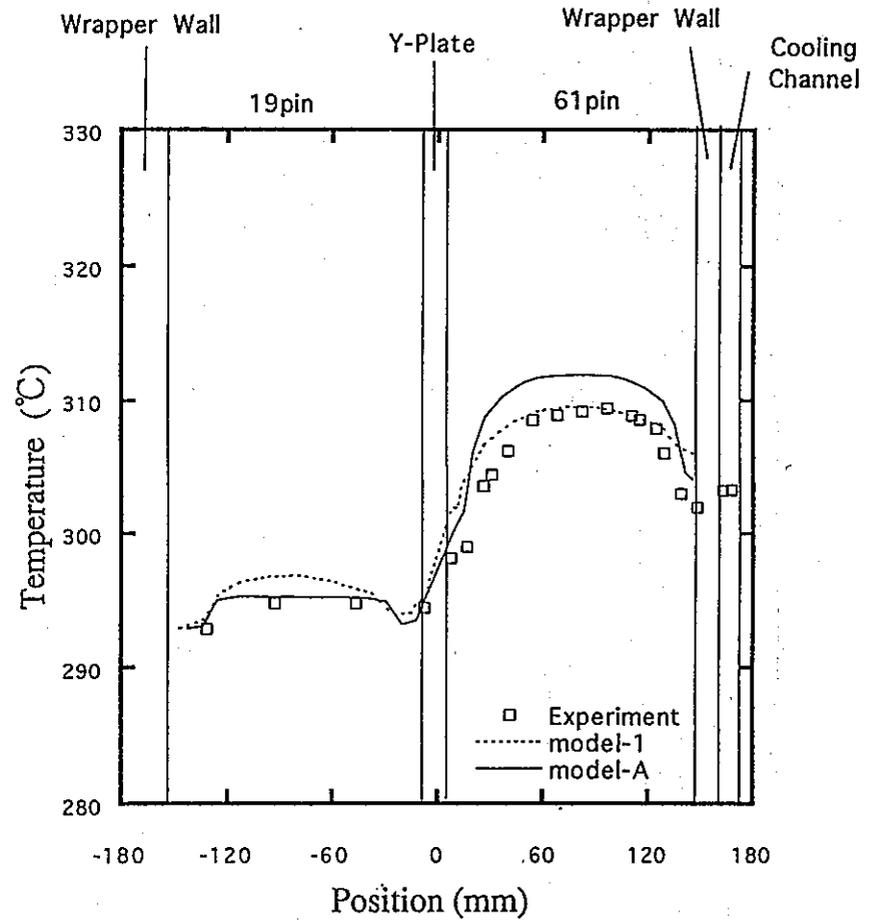


表.2-4-1 AQUA伝熱要素の規定 (19pin-61pin 間Heat Transfer メッシュの対応)

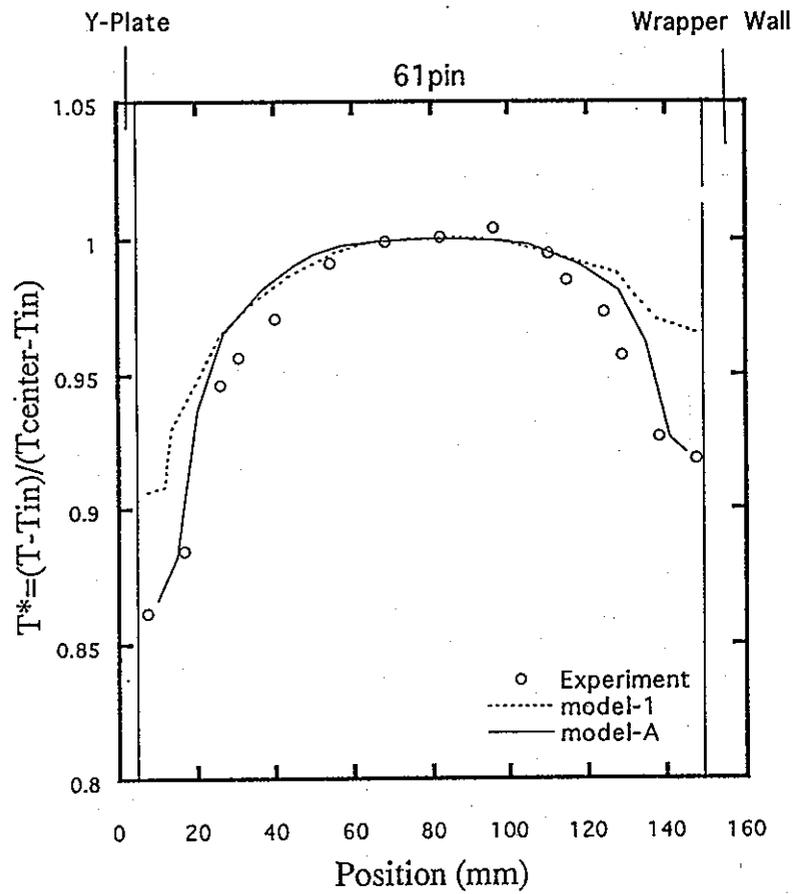


発熱部上端断面 温度散布図 (Case ST-04)

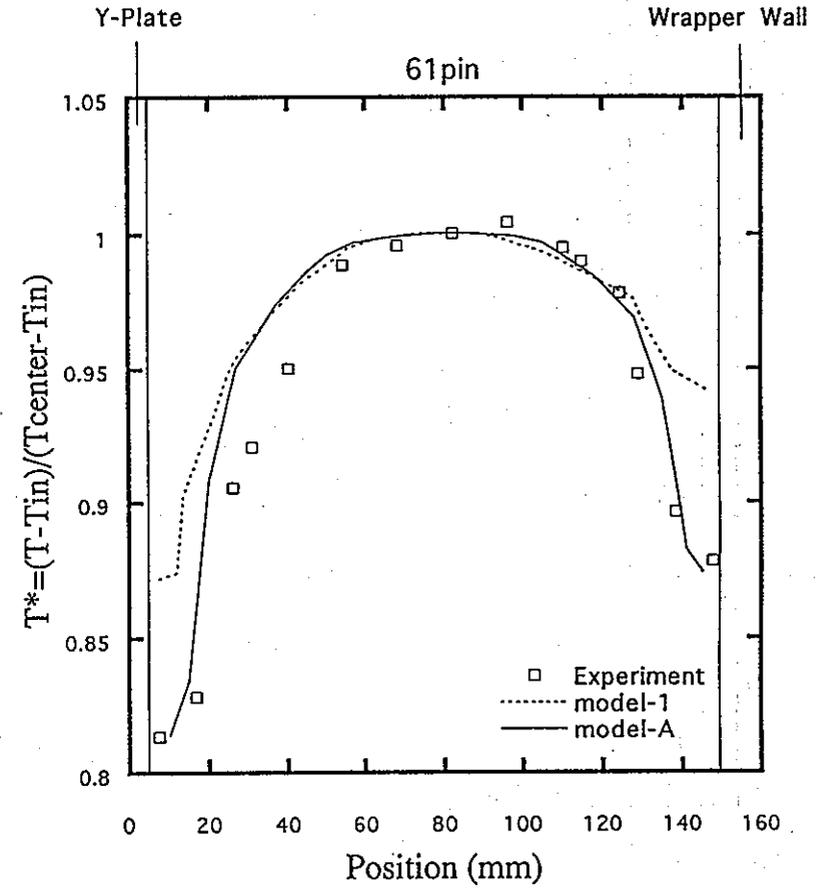


発熱部中央断面 温度散布図 (Case ST-04)

図.5-a-1 発熱部上端・中央断面 温度分布 (case ST-04)

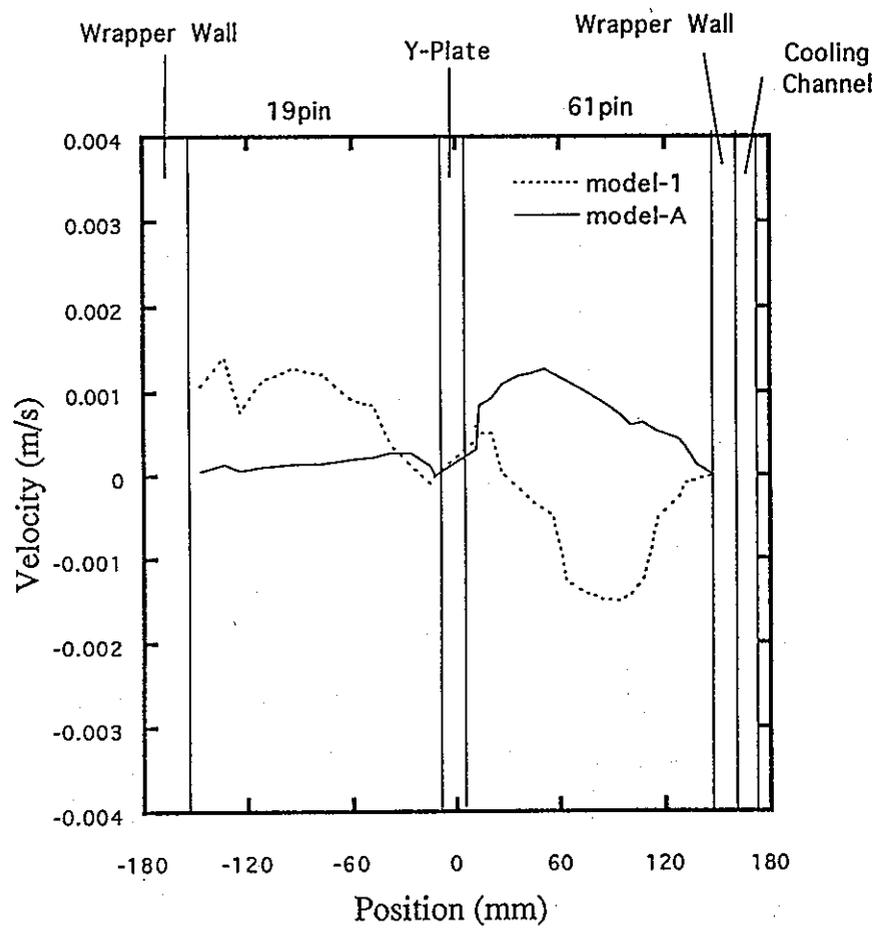


発熱部上端断面 温度散布図 (Case ST-04)

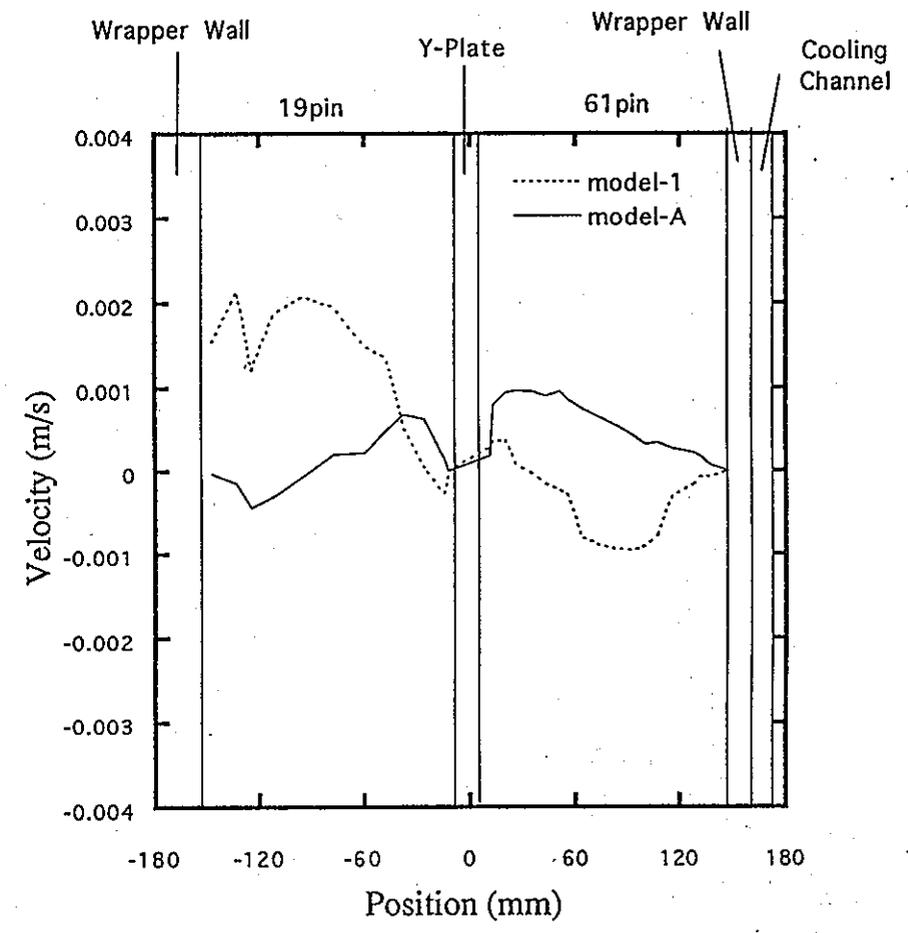


発熱部中央断面 温度散布図 (Case ST-04)

図.5-a-2 61pin 発熱部上端・中央断面 温度分布 (case ST-04)

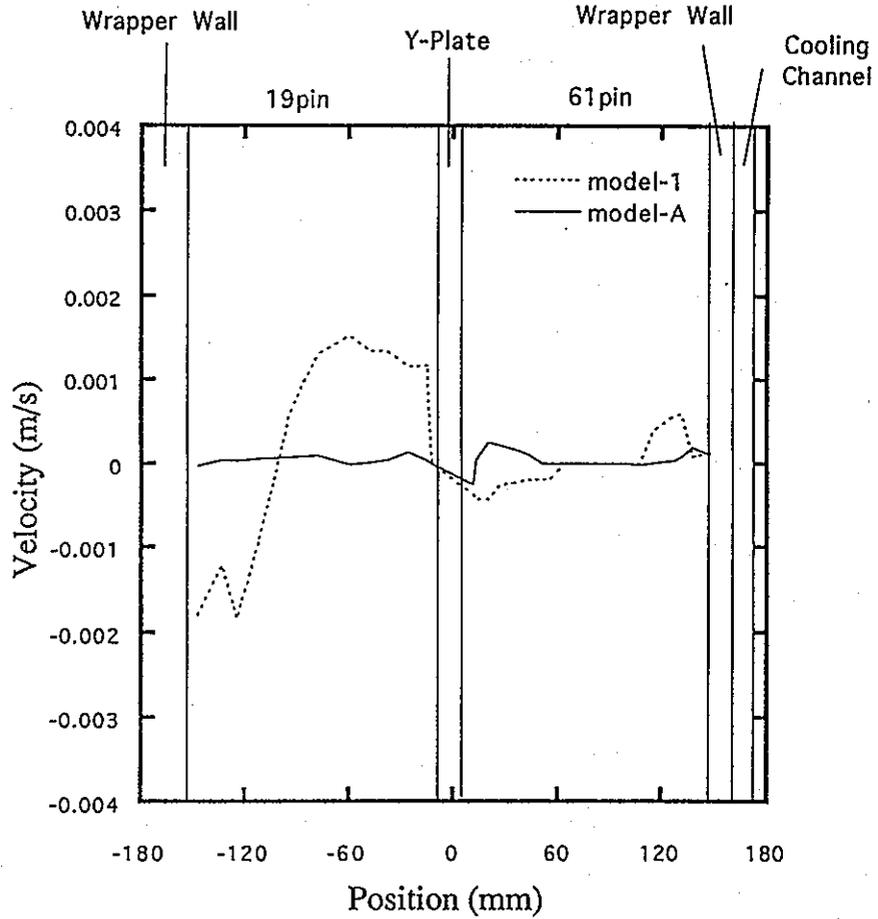


発熱部上端断面 x方向流速散布図 (Case ST-04)

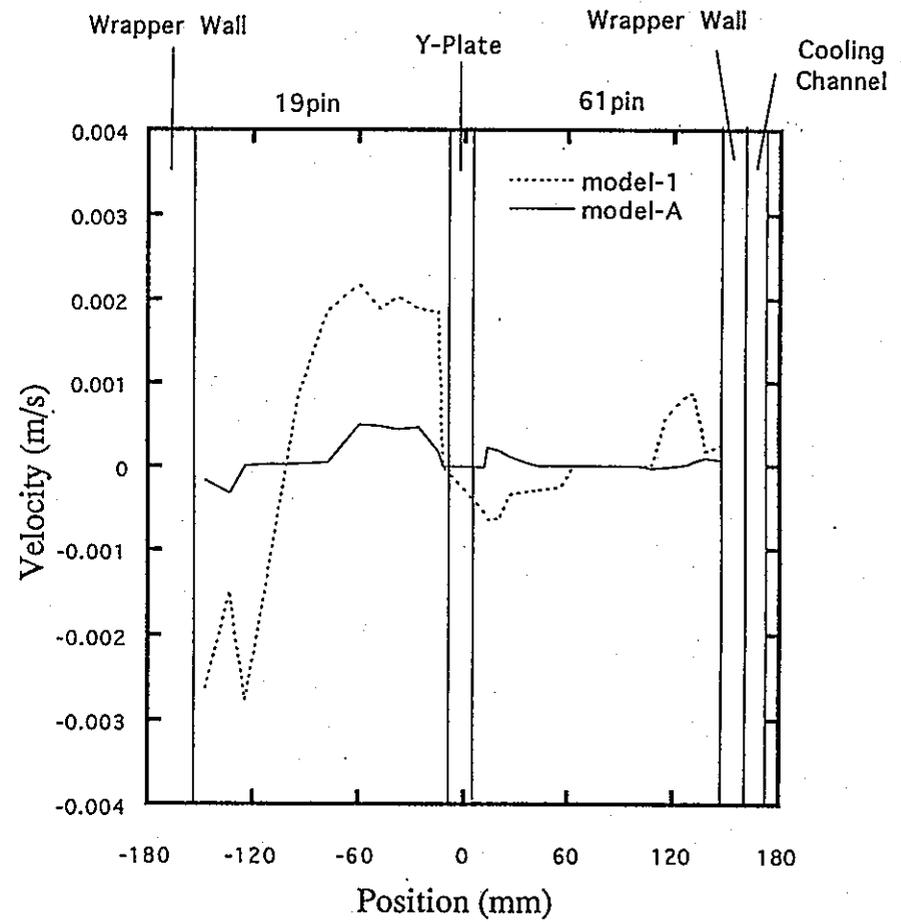


発熱部中央断面 x方向流速分布図 (Case ST-04)

図.5-a-3 発熱部上端・中央断面 x方向流速分布 (case ST-04)

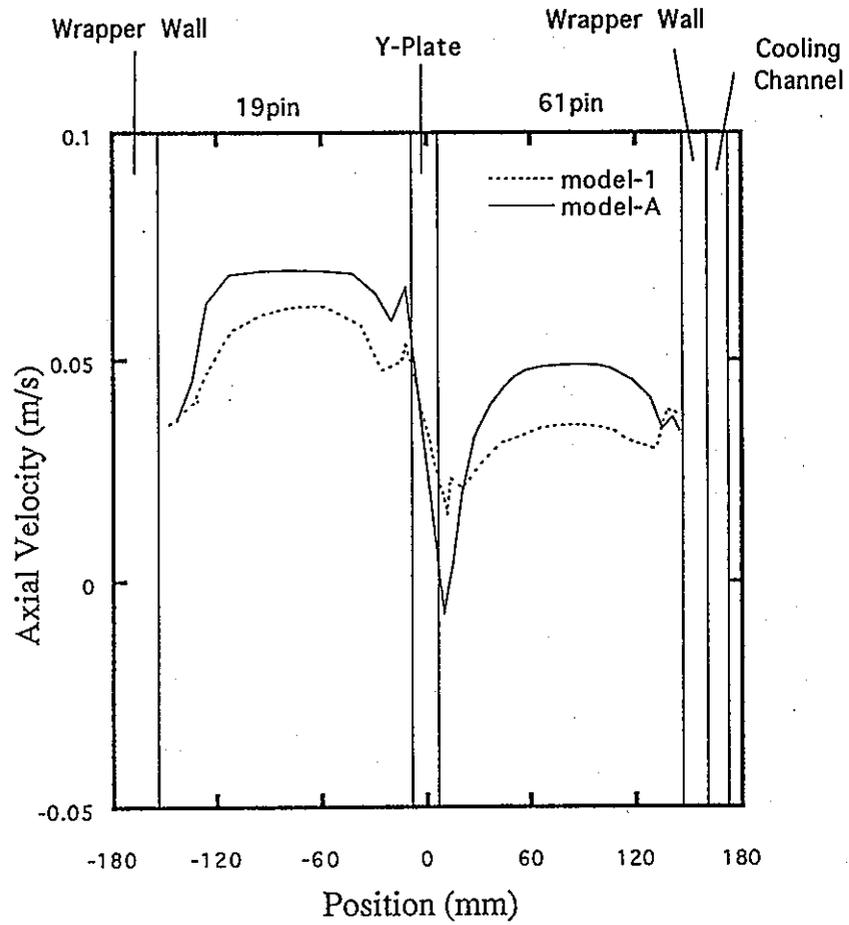


発熱部上端断面 y方向流速散布図 (Case ST-04)

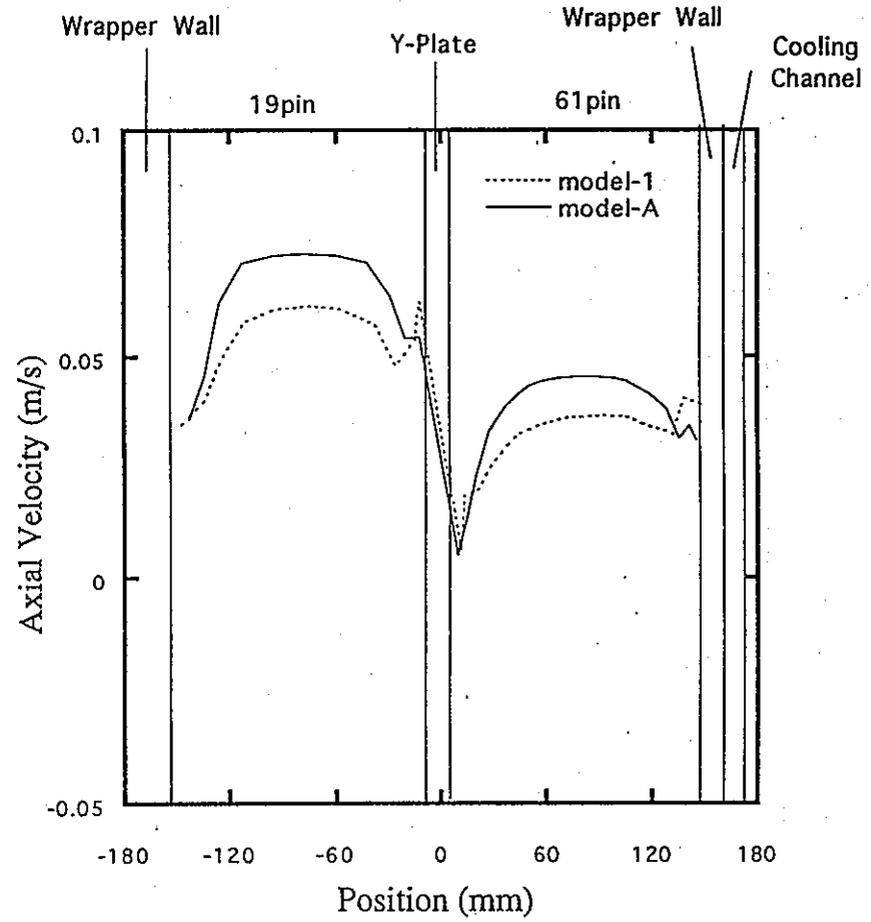


発熱部中央断面 y方向流速分布図 (Case ST-04)

図.5-a-4 発熱部上端・中央断面 y方向流速分布 (case ST-04)

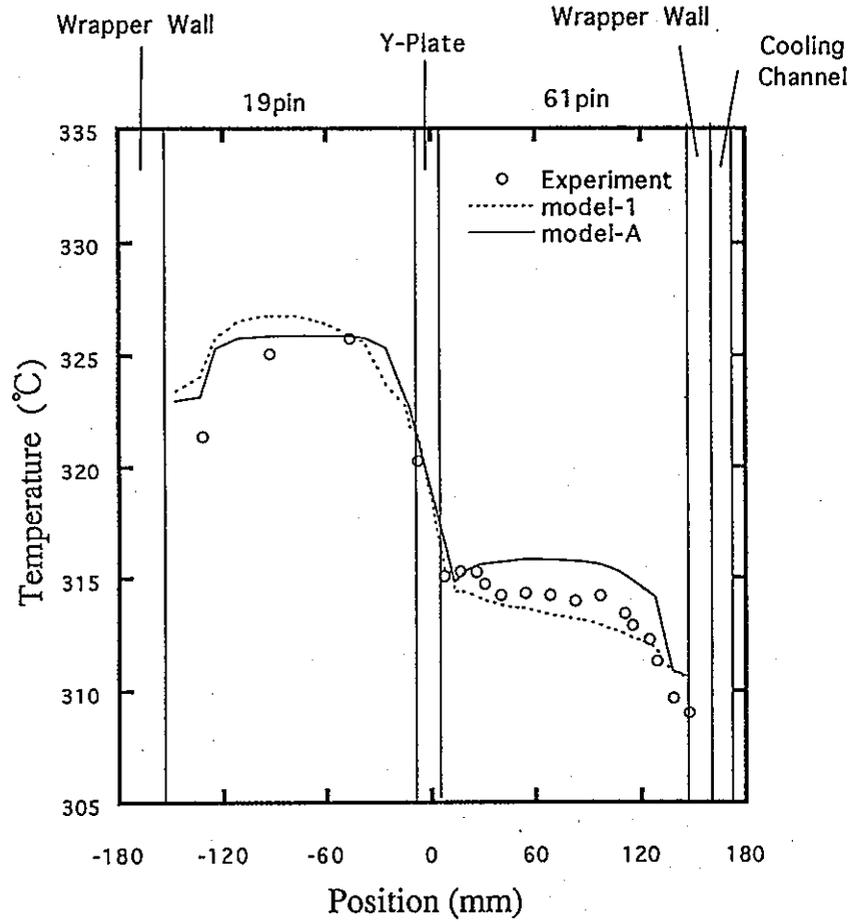


発熱部上端断面 z方向流速散布図 (Case ST-04)

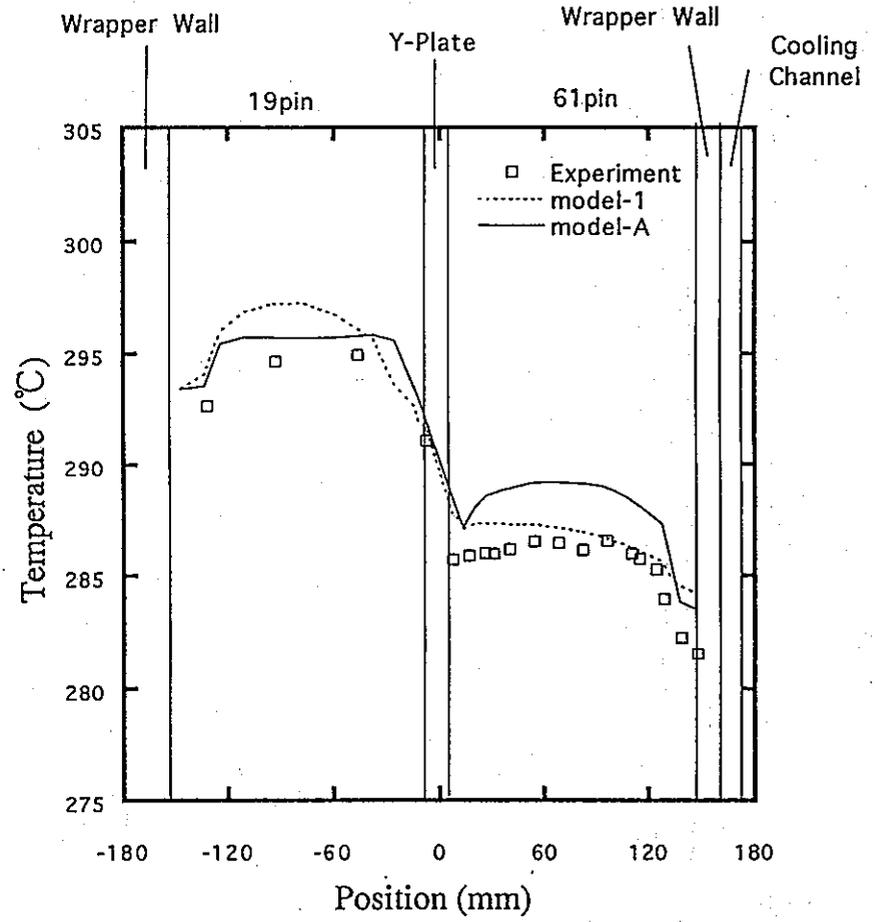


発熱部中央断面 z方向流速散布図 (Case ST-04)

図.5-a-5 発熱部上端・中央断面 z方向流速分布 (case ST-04)

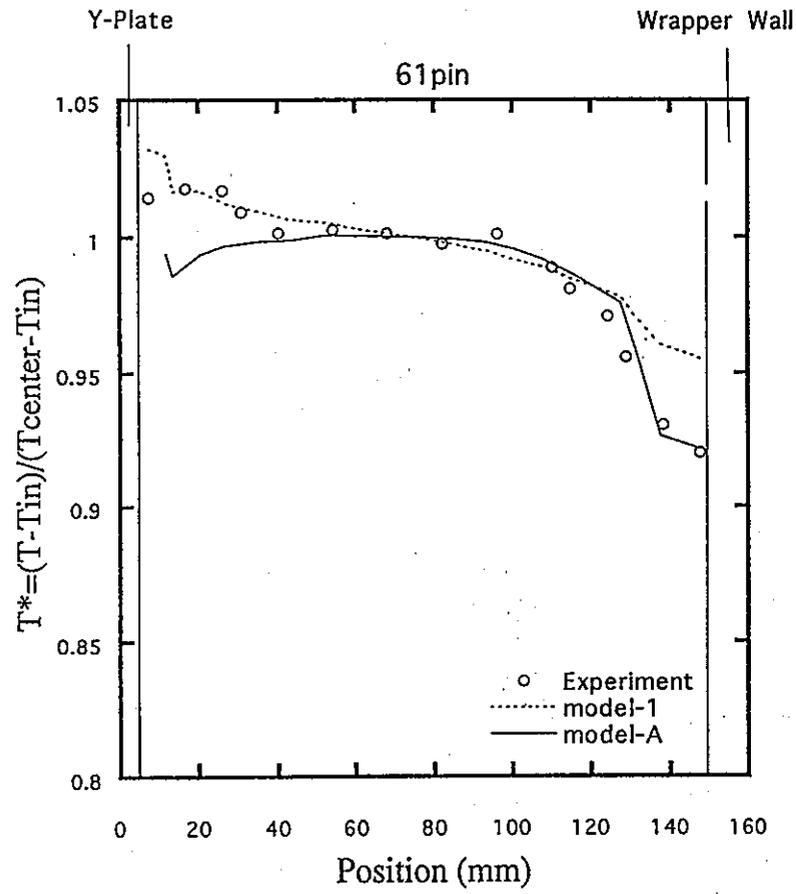


発熱部上端断面 温度散布図 (Case ST-02)

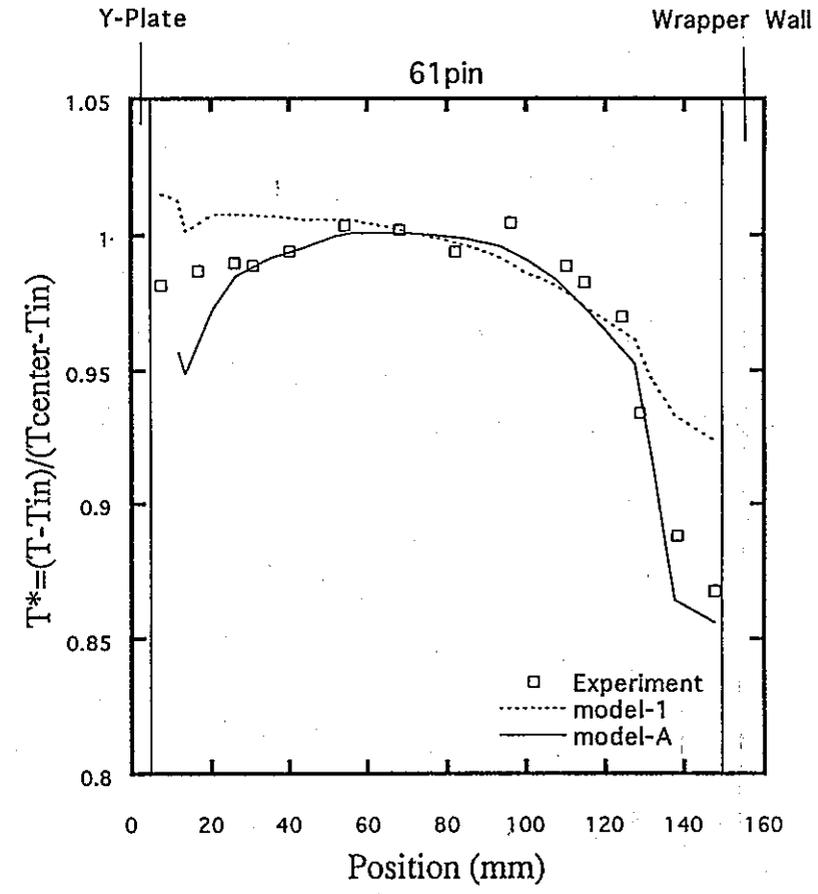


発熱部中央断面 温度散布図 (Case ST-02)

図.5-a-6 発熱部上端・中央断面 温度分布 (case ST-02)

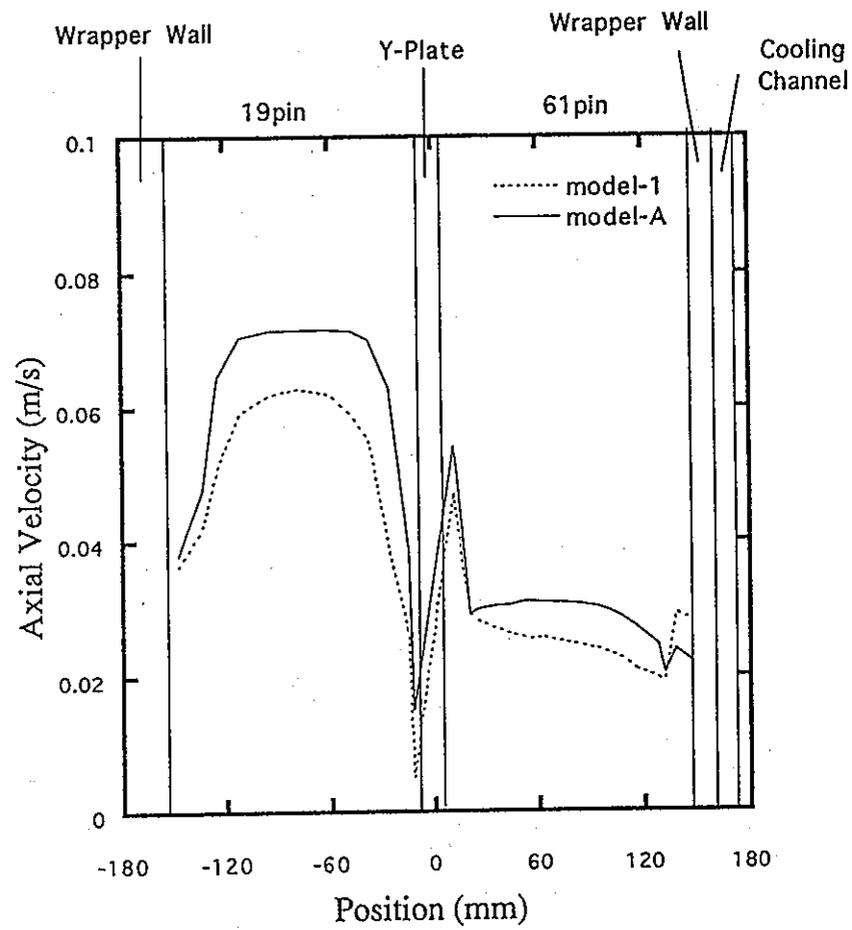


発熱部上端断面 温度散布図 (Case ST-02)

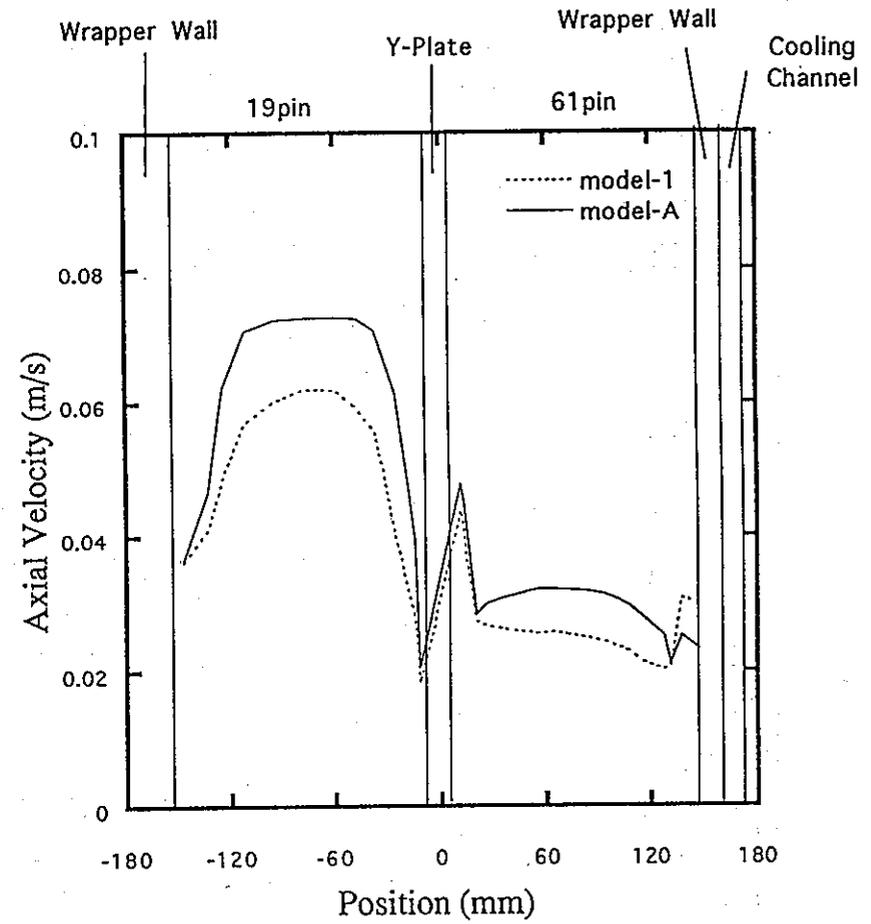


発熱部中央断面 温度散布図 (Case ST-02)

図.5-a-7 61pin 発熱部上端・中央断面 温度分布 (case ST-02)

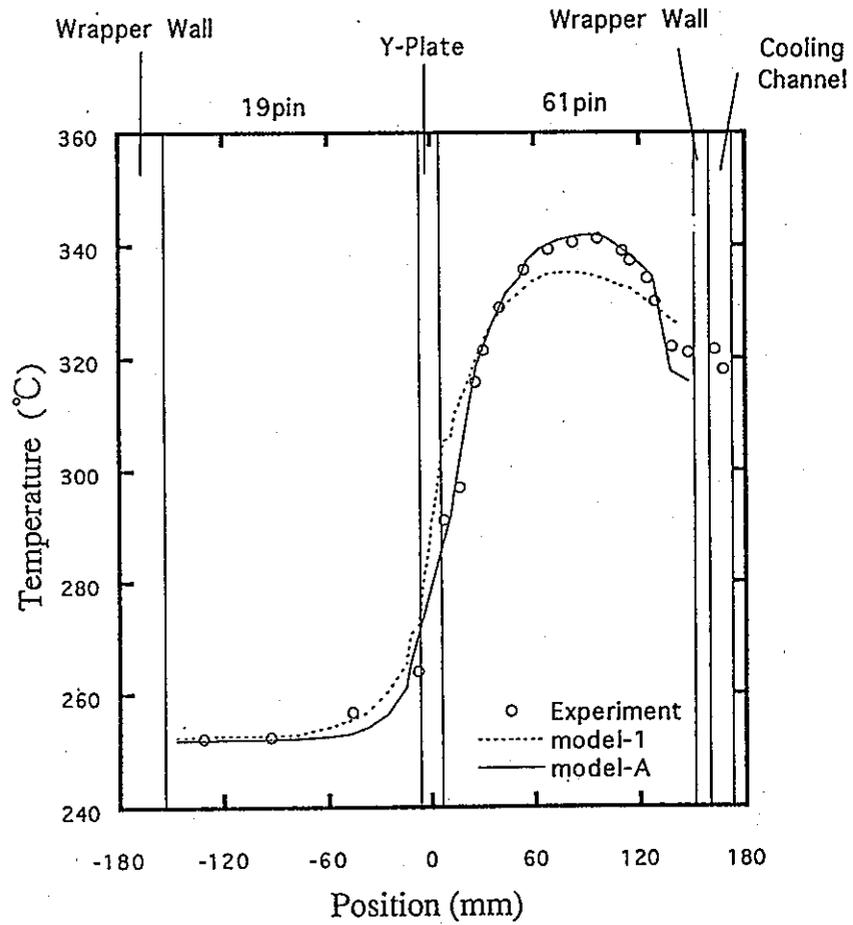


発熱部上端断面 z 方向流速散布図 (Case ST-02)

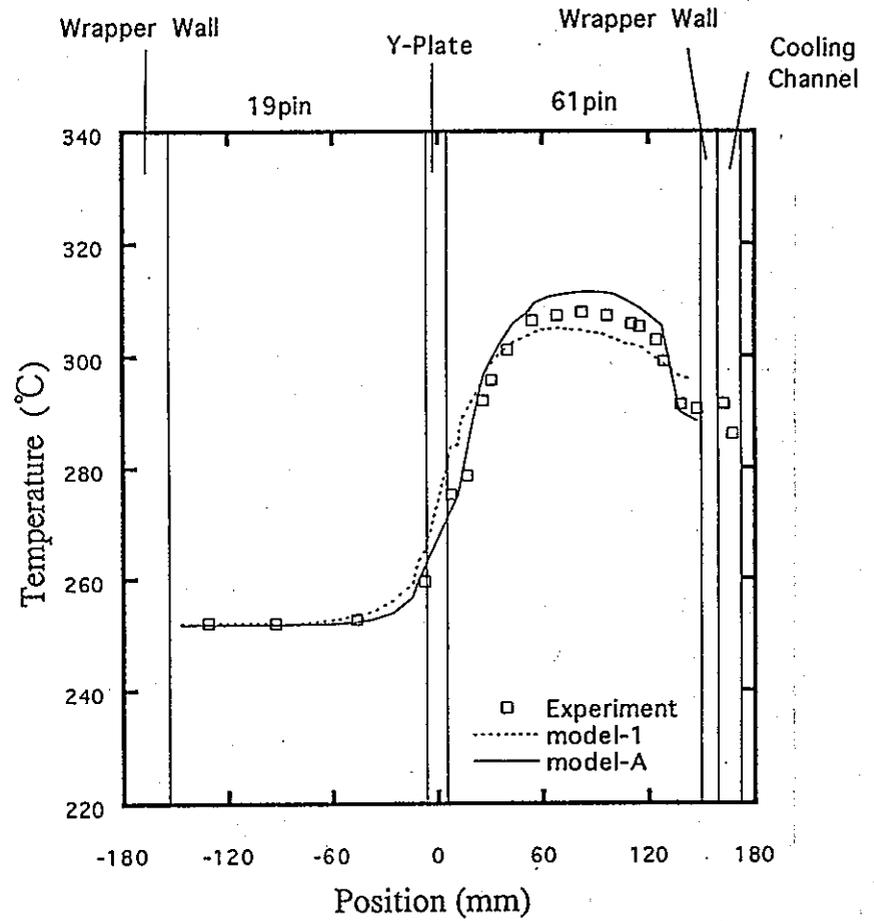


発熱部中央断面 z 方向流速散布図 (Case ST-02)

図.5-a-8 発熱部上端・中央断面 z 方向流速分布 (case ST-02)



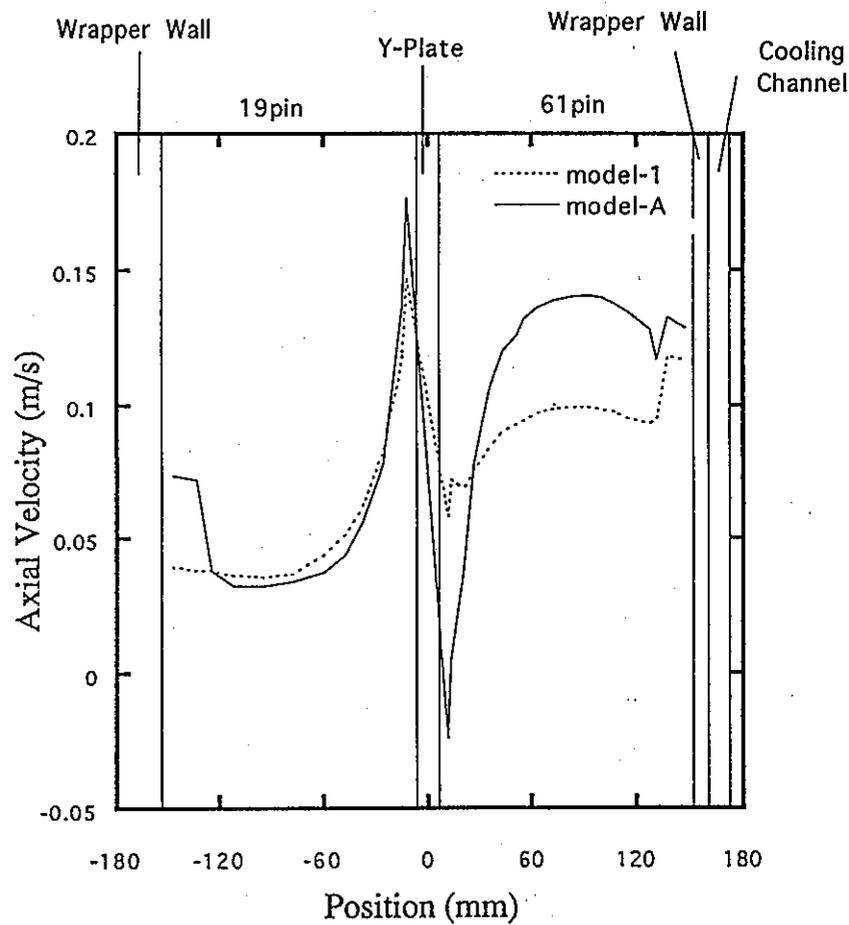
発熱部上端断面 温度散布図 (Case ST-16)



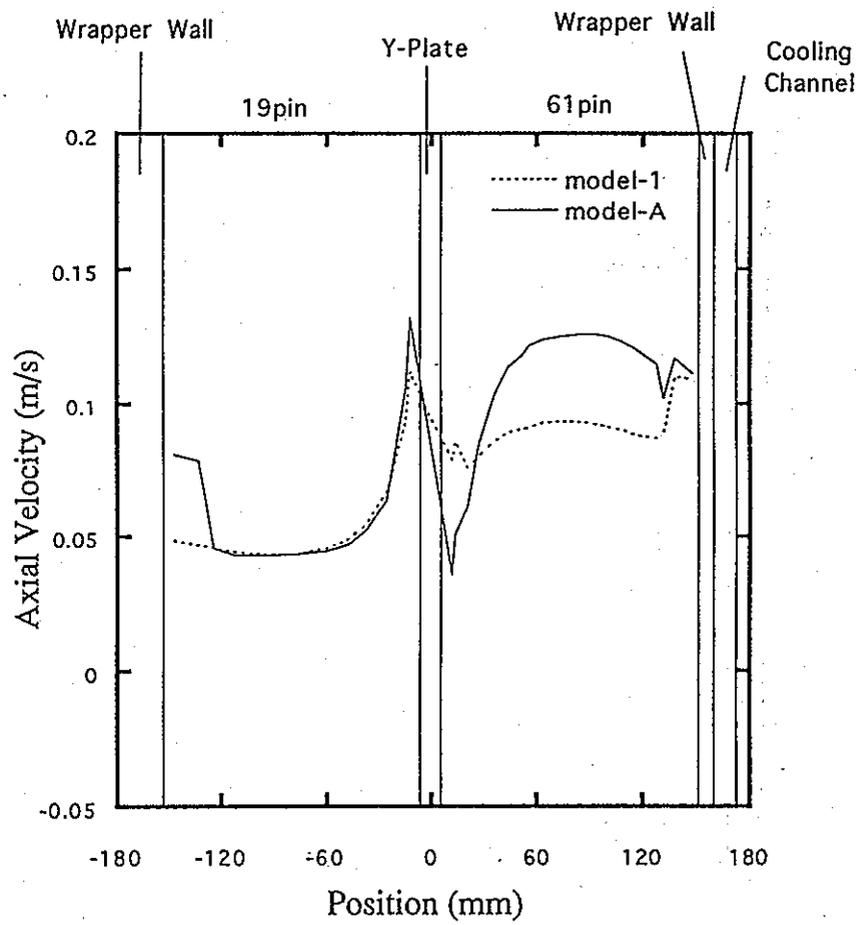
発熱部中央断面 温度散布図 (Case ST-16)

図.5-a-9 発熱部上端・中央断面 温度分布 (case ST-16)



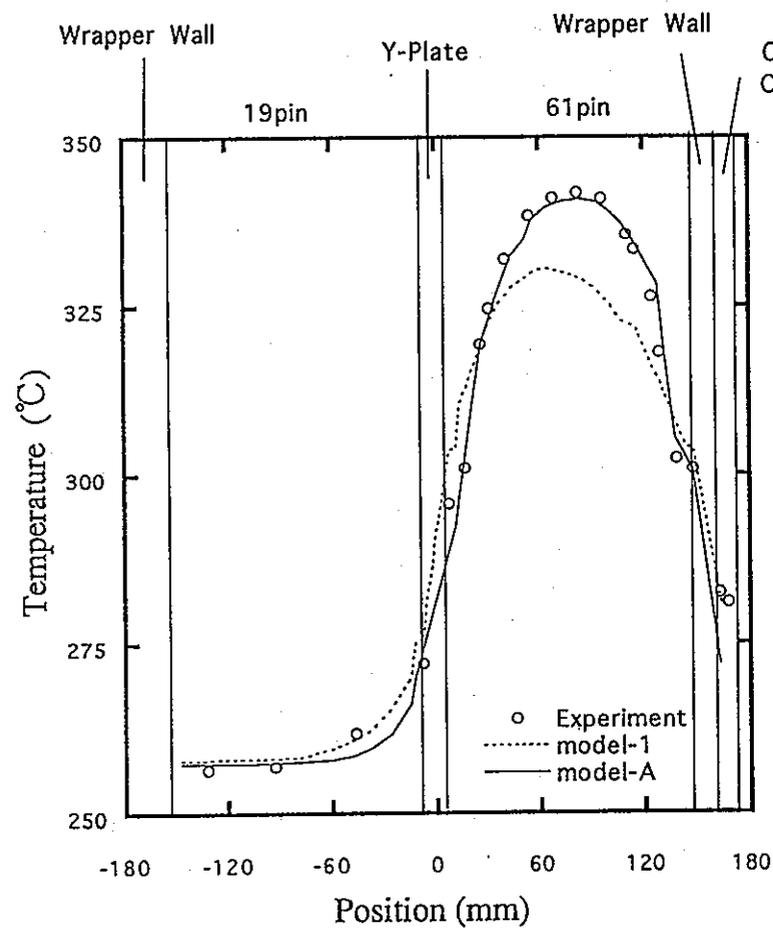


発熱部上端断面 z 方向流速散布図 (Case ST-16)

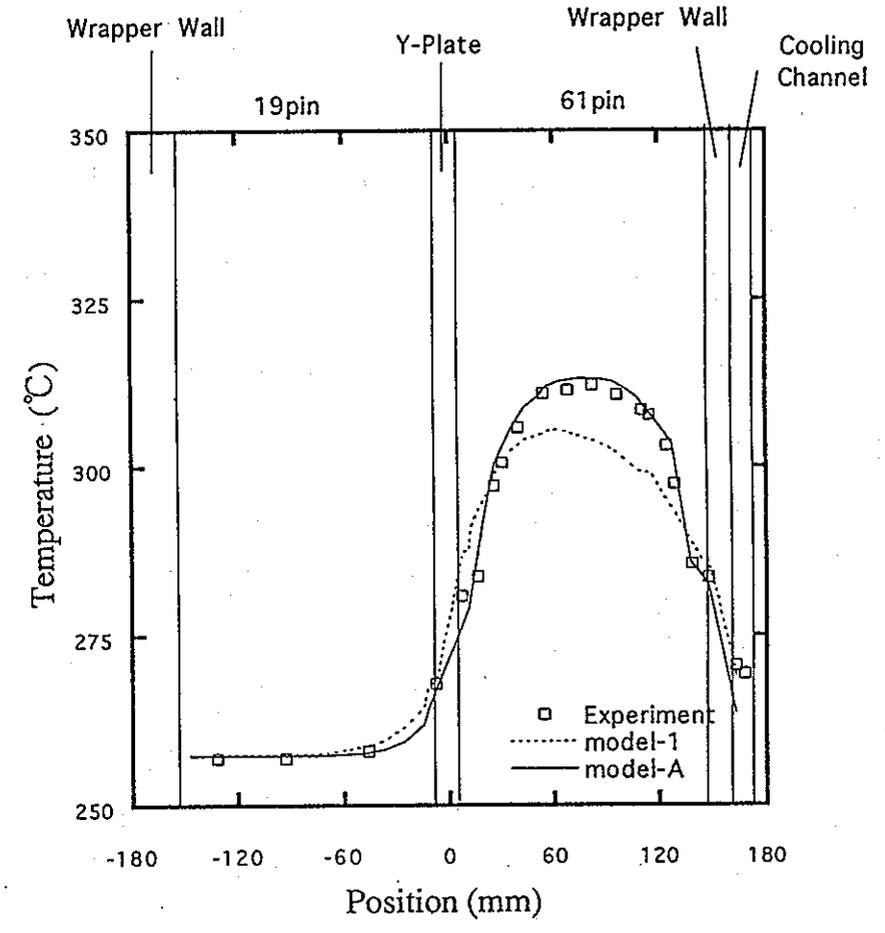


発熱部中央断面 z 方向流速散布図 (Case ST-16)

図.5-a-11 発熱部上端・中央断面 z 方向流速分布 (case ST-16)

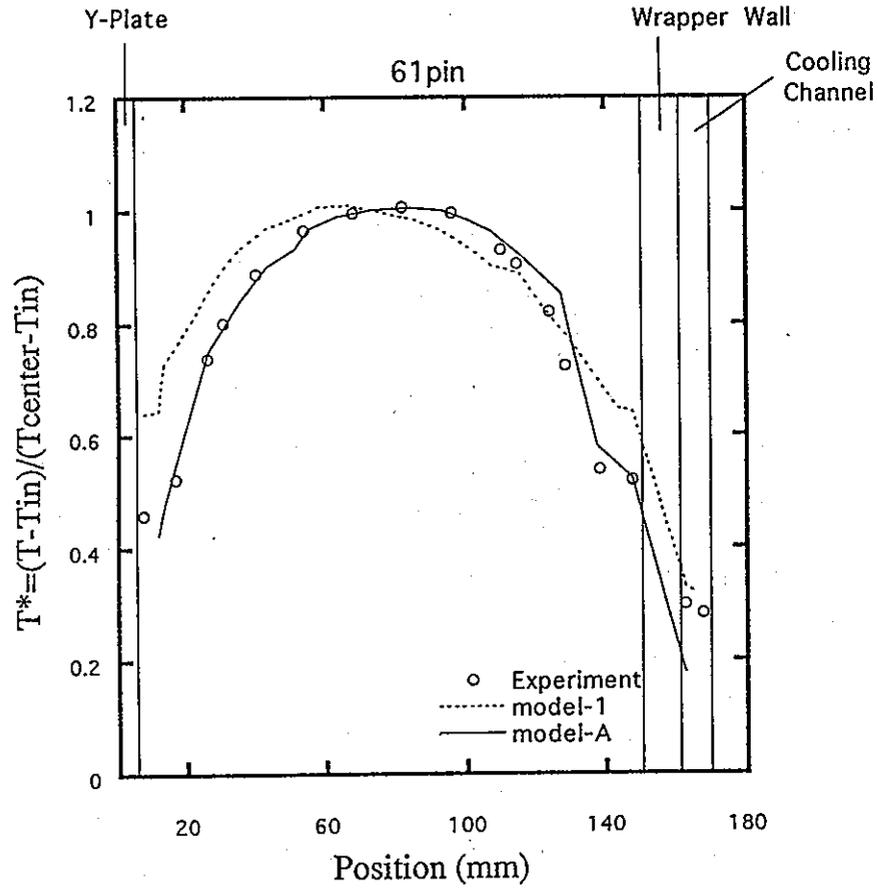


発熱部上端断面 温度散布図 (Case ST-17)

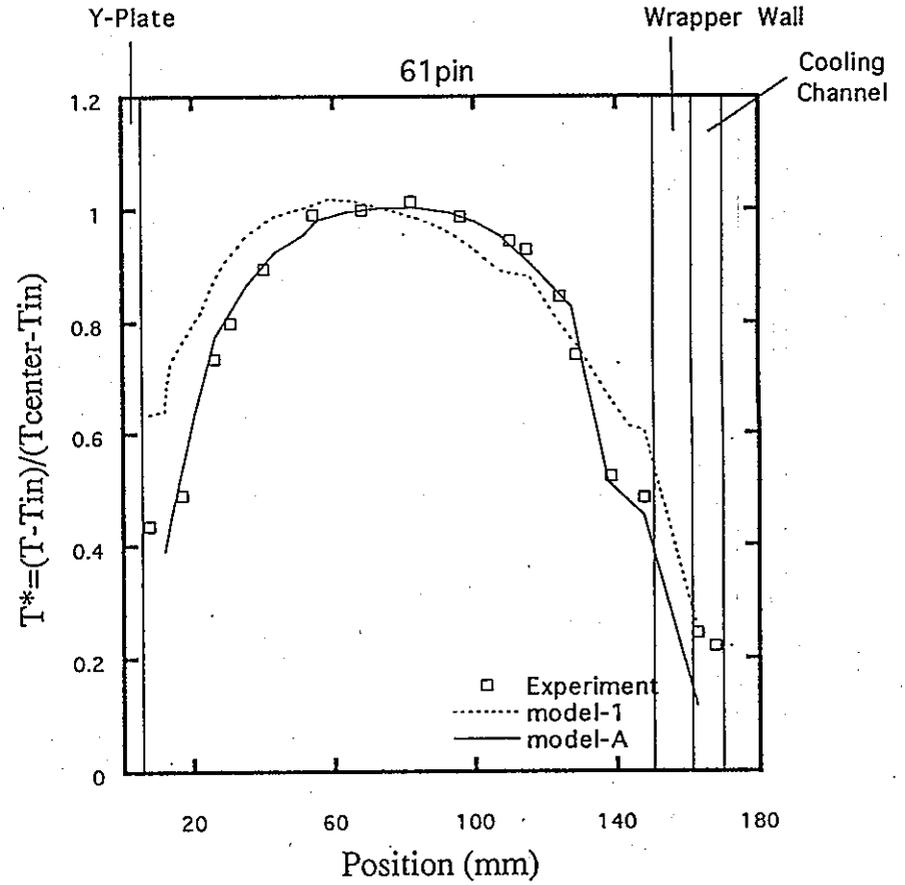


発熱部中央断面 温度散布図 (Case ST-17)

図.5-a-12 発熱部上端・中央断面 温度分布 (case ST-17)

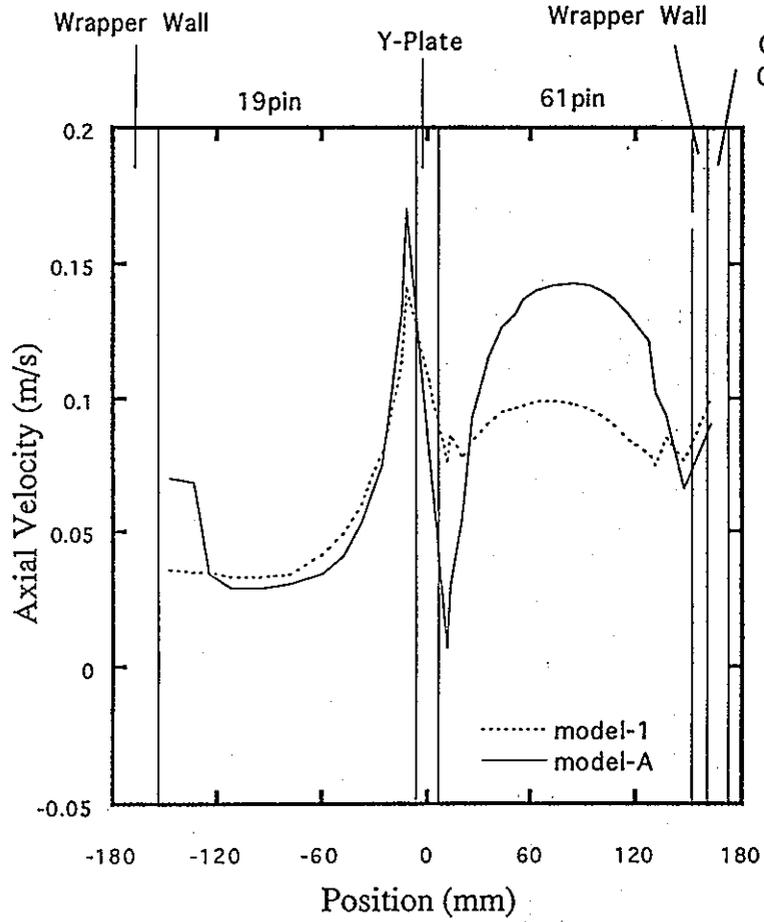


発熱部上端断面 温度散布図 (Case ST-17)

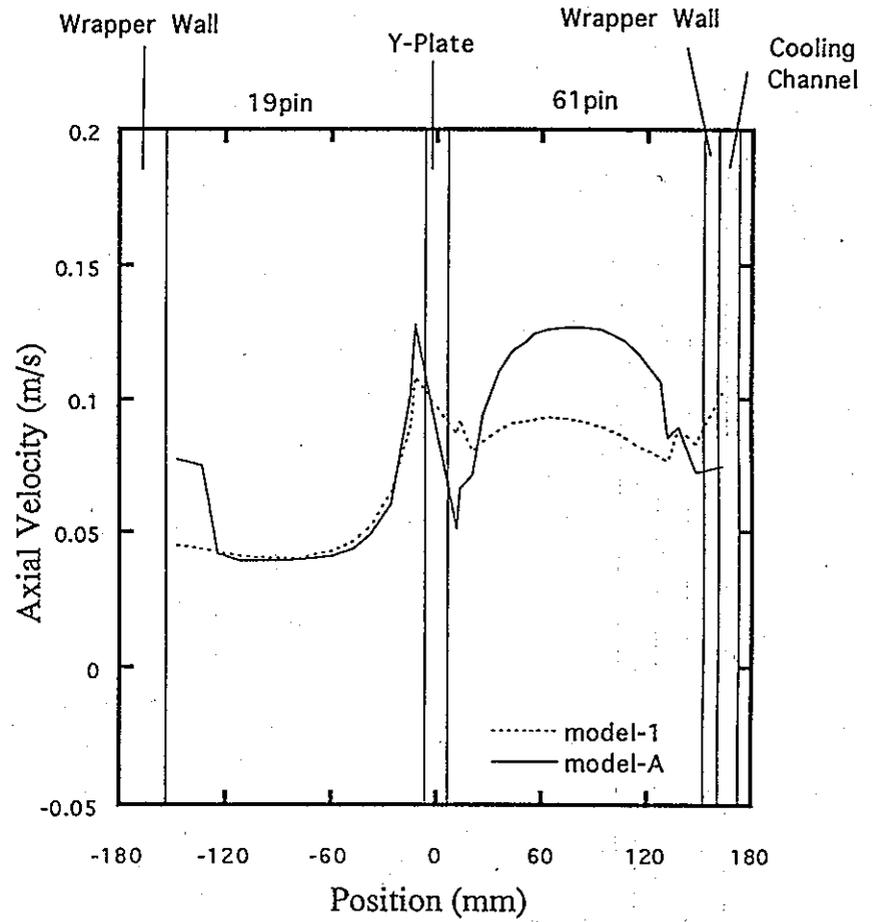


発熱部中央断面 温度散布図 (Case ST-17)

図.5-a-13 61pin 発熱部上端・中央断面 温度分布 (case ST-17)

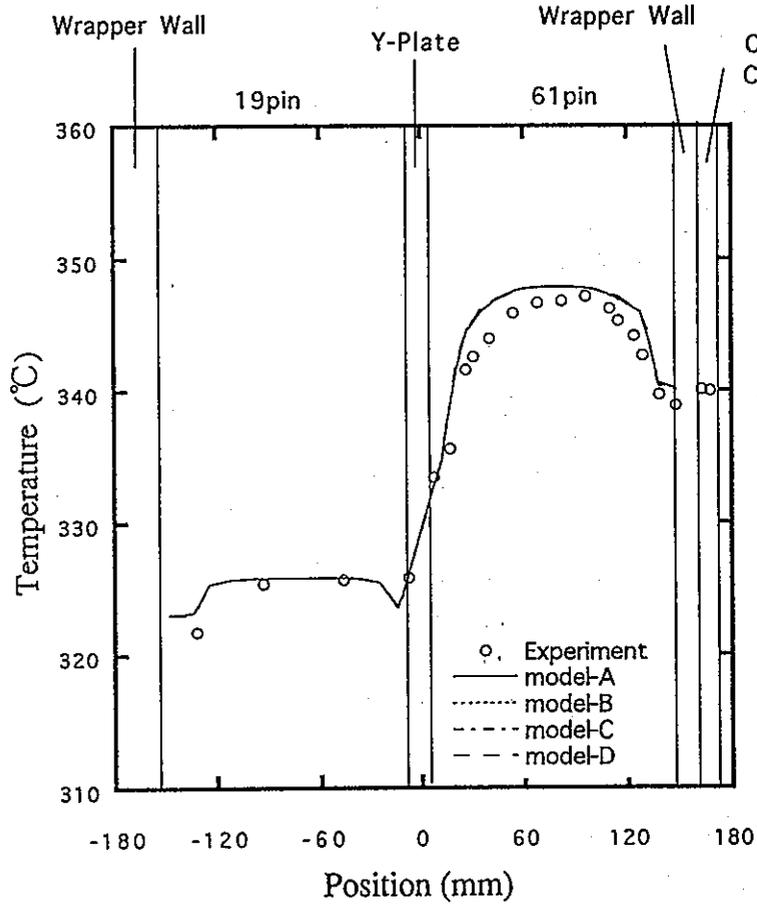


発熱部上端断面 流速散布図 (Case ST-17)

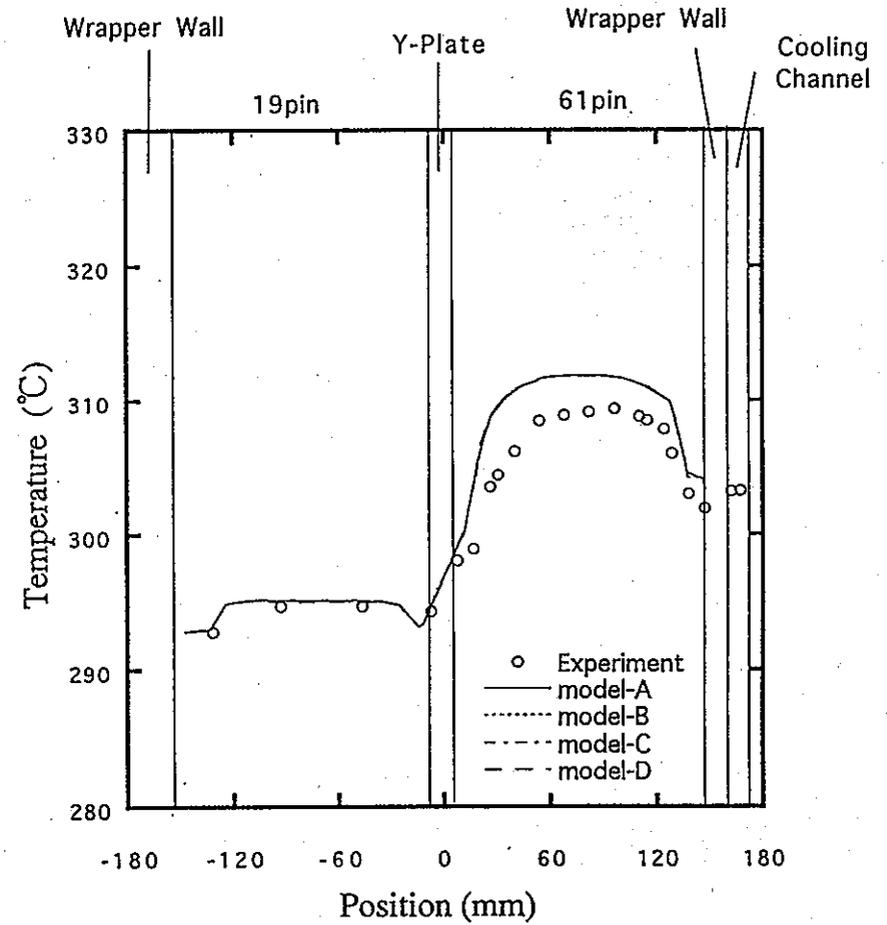


発熱部中央断面 流速散布図 (Case ST-17)

図.5-a-14 発熱部上端・中央断面 軸方向流速分布 (case ST-17)

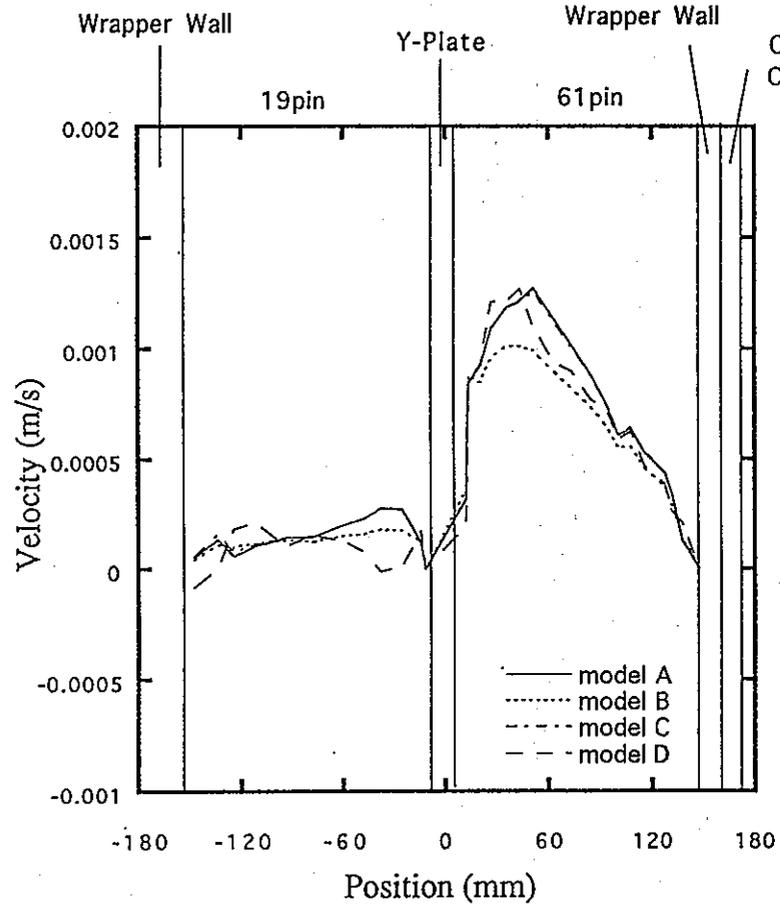


発熱部上端断面 温度散布図 (Case ST-04)

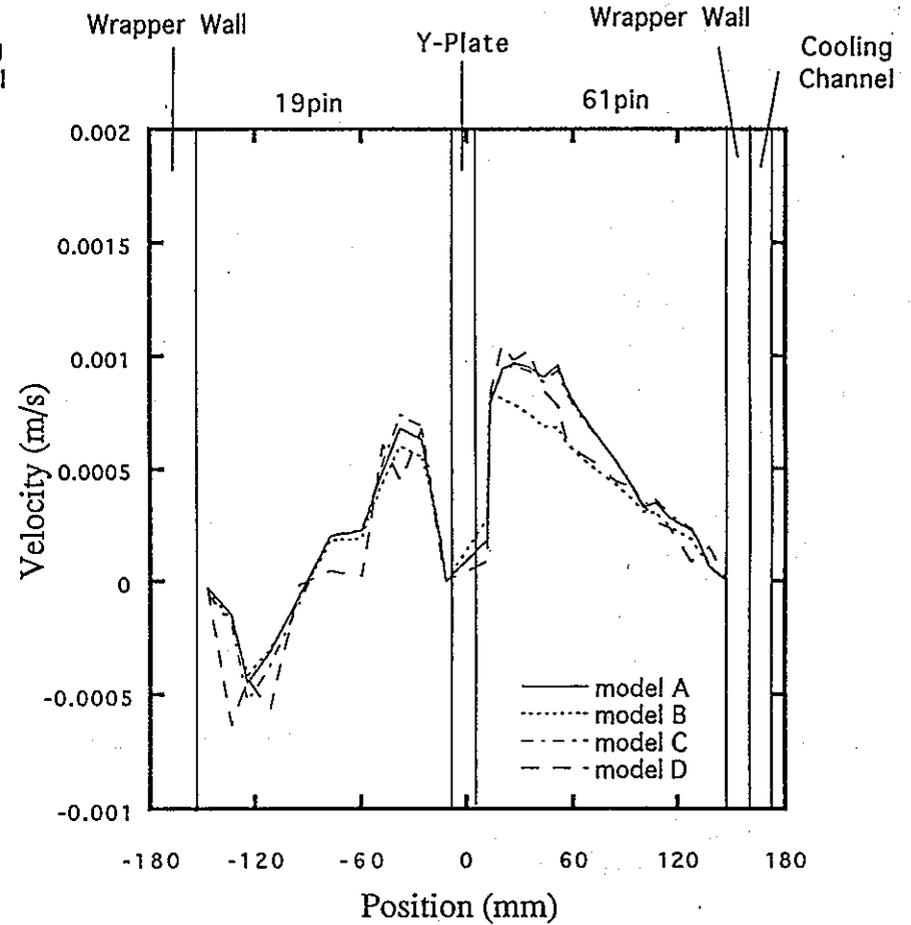


発熱部中央断面 温度散布図 (Case ST-04)

図.5-b-1 発熱部上端・中央断面 温度分布 (case ST-04)

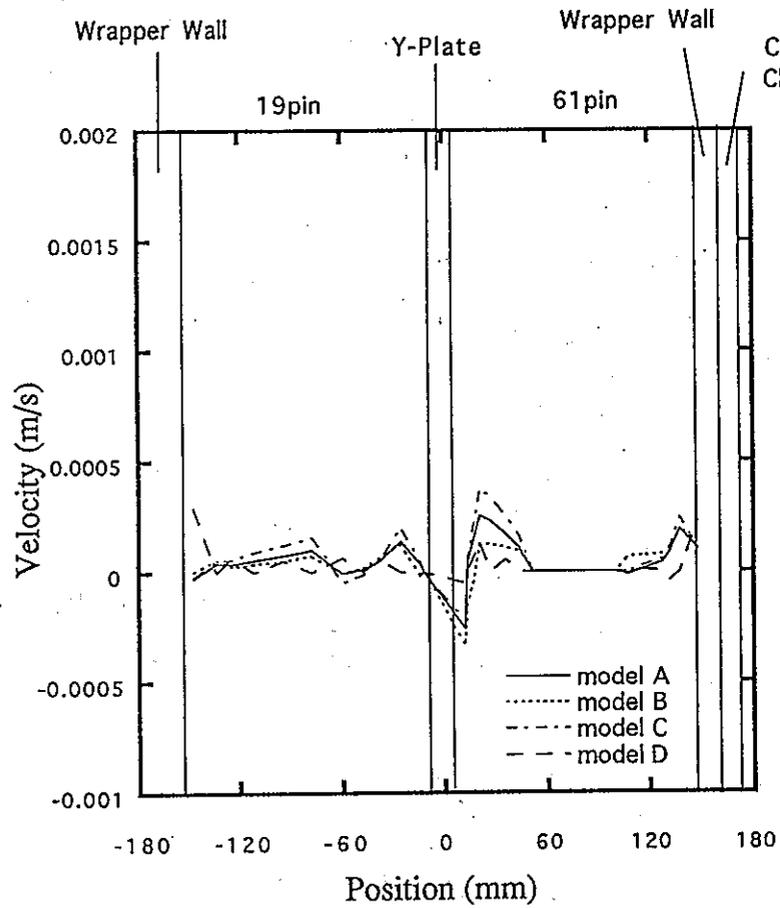


發熱部上端断面 x 方向流速散布圖 (Case ST-04)

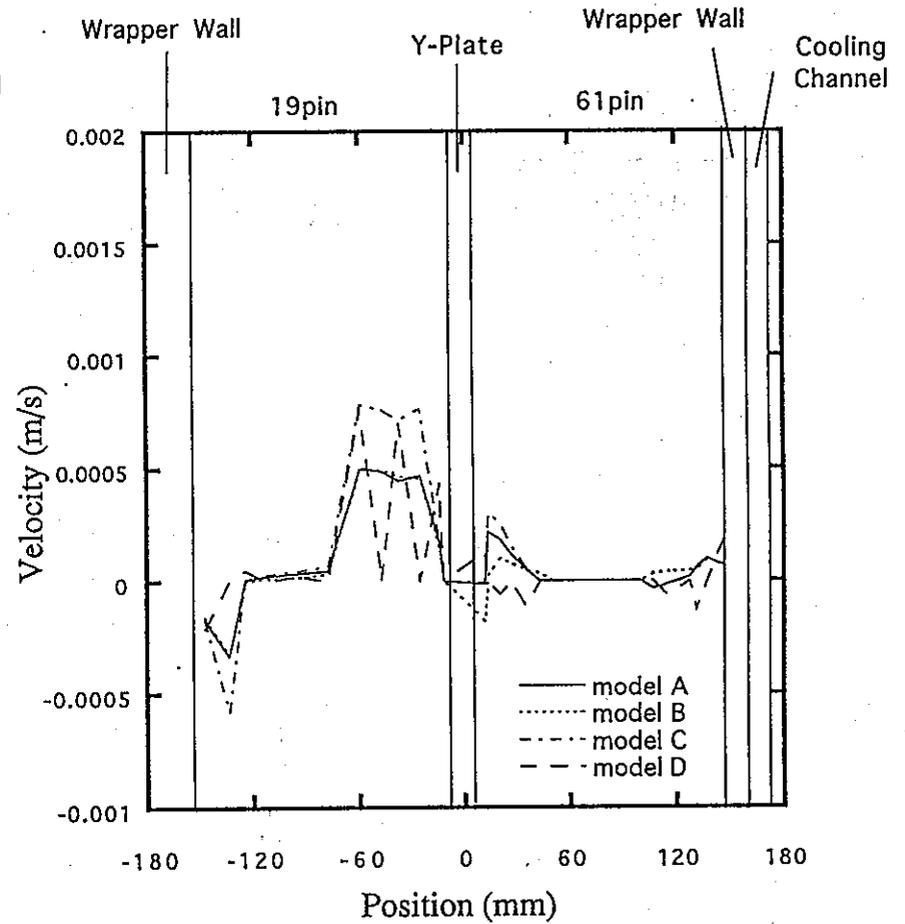


發熱部中央断面 y 方向流速散布圖 (Case ST-04)

圖.5-b-2 發熱部上端・中央断面 x 方向流速分布 (case ST-04)

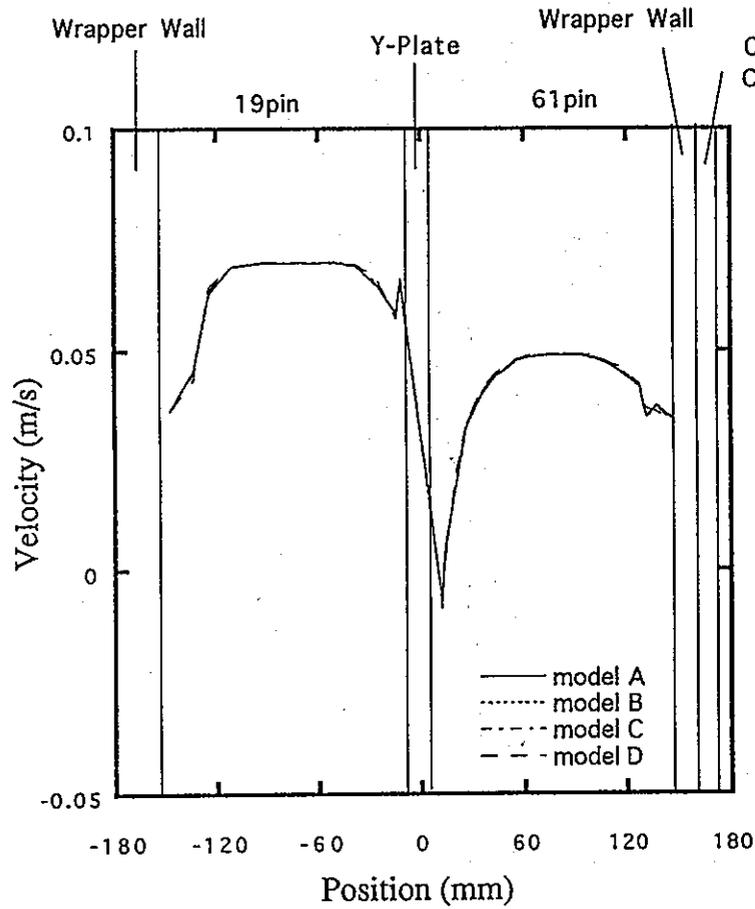


發熱部上端断面 y方向流速散布圖 (Case ST-04)

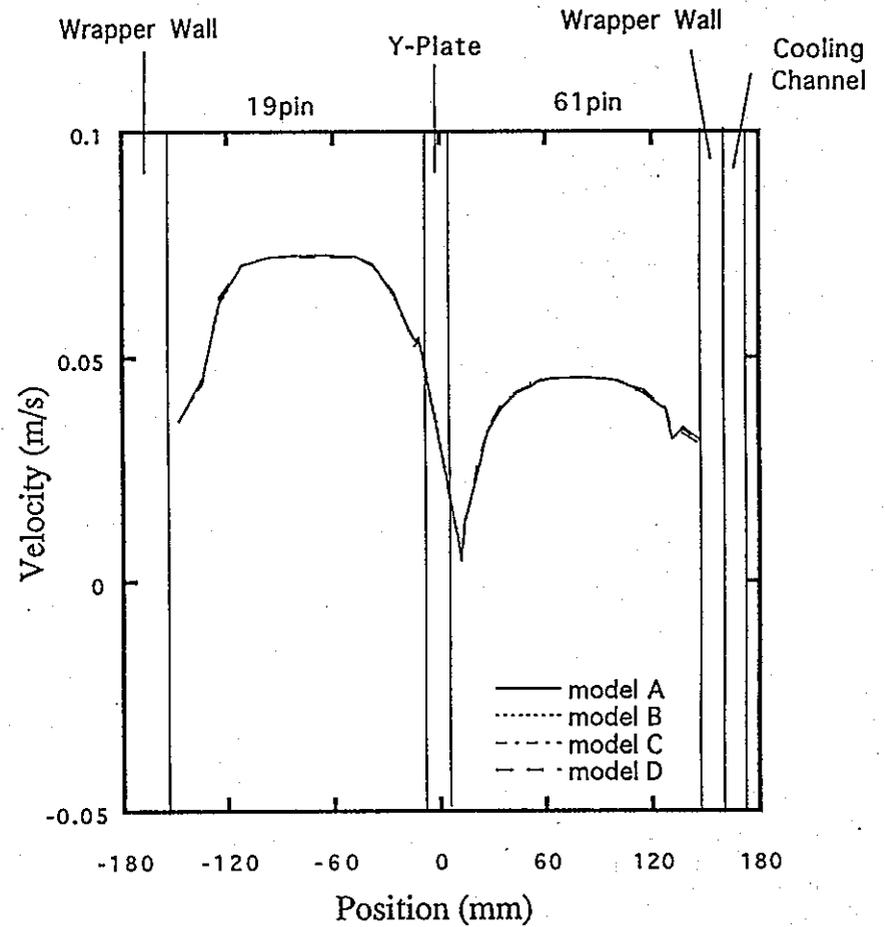


發熱部中央断面 y方向流速散布圖 (Case ST-04)

圖.5-b-3 發熱部上端・中央断面 y方向流速分布 (case ST-04)

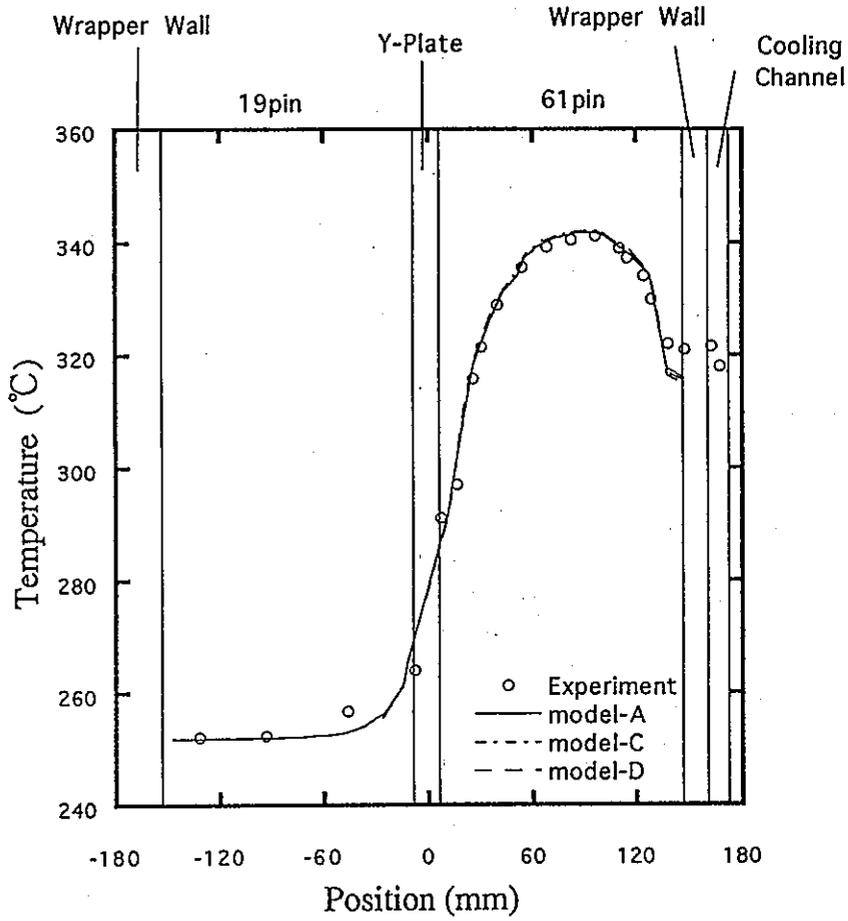


発熱部上端断面 z方向流速散布図 (Case ST-04)

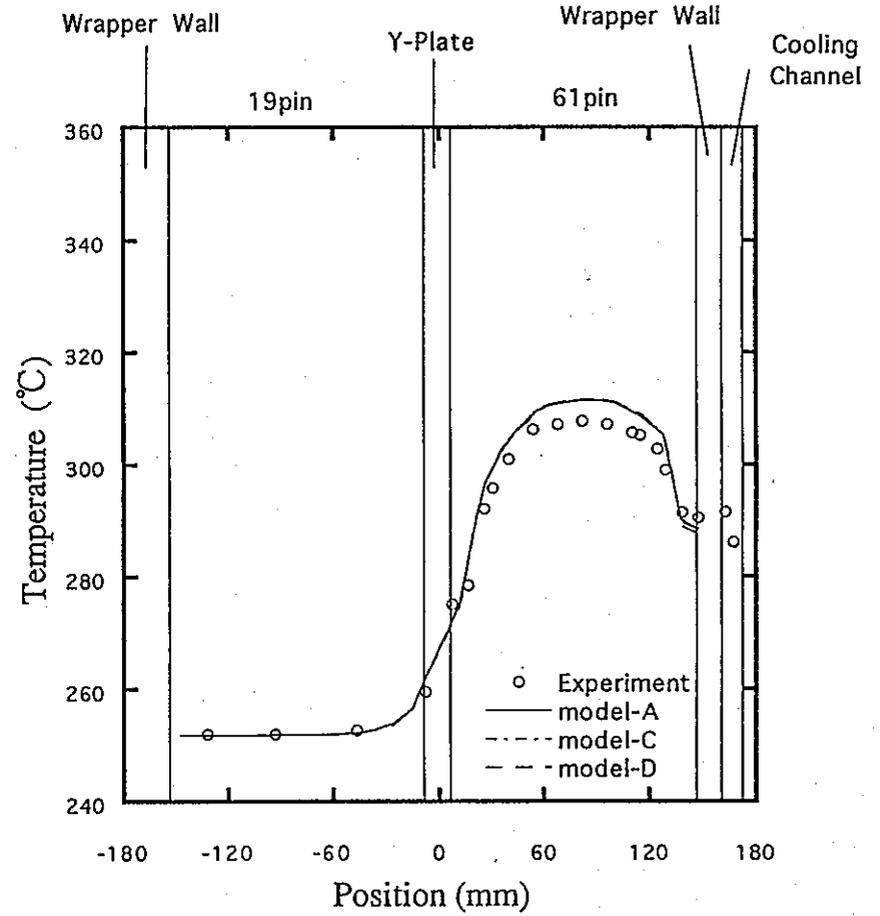


発熱部中央断面 z方向流速散布図 (Case ST-04)

図.5-b-4 発熱部上端・中央断面 z方向流速分布 (case ST-04)

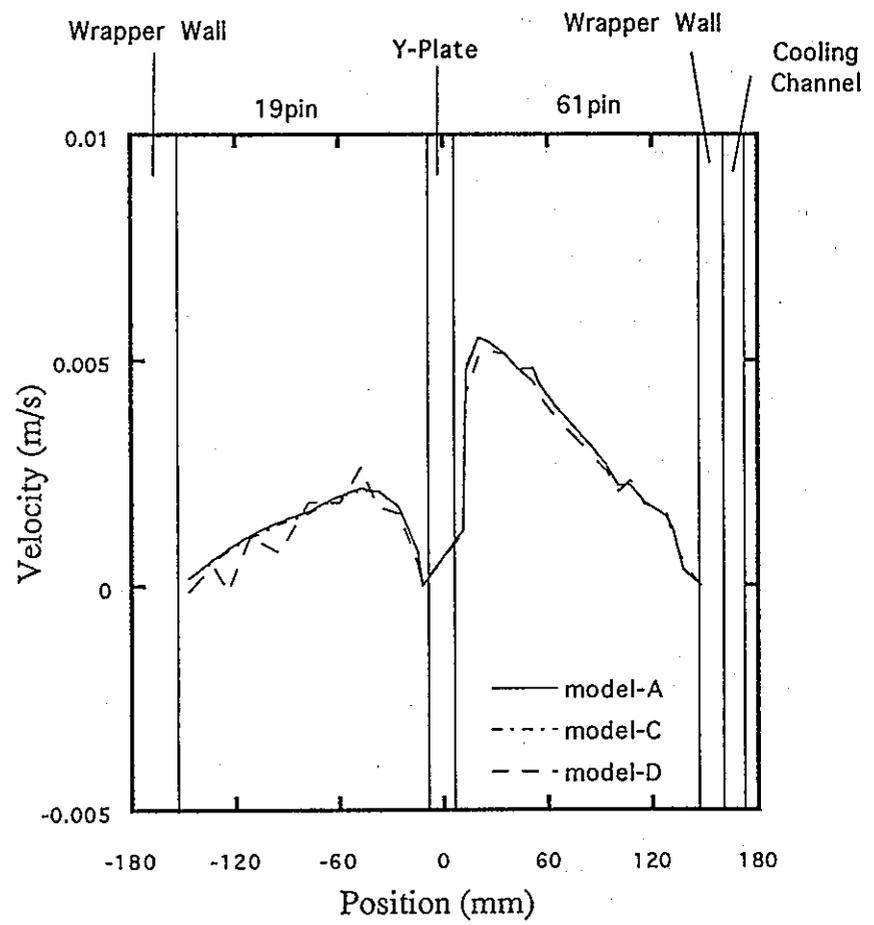


発熱部上端断面 温度散布図 (Case ST-16)

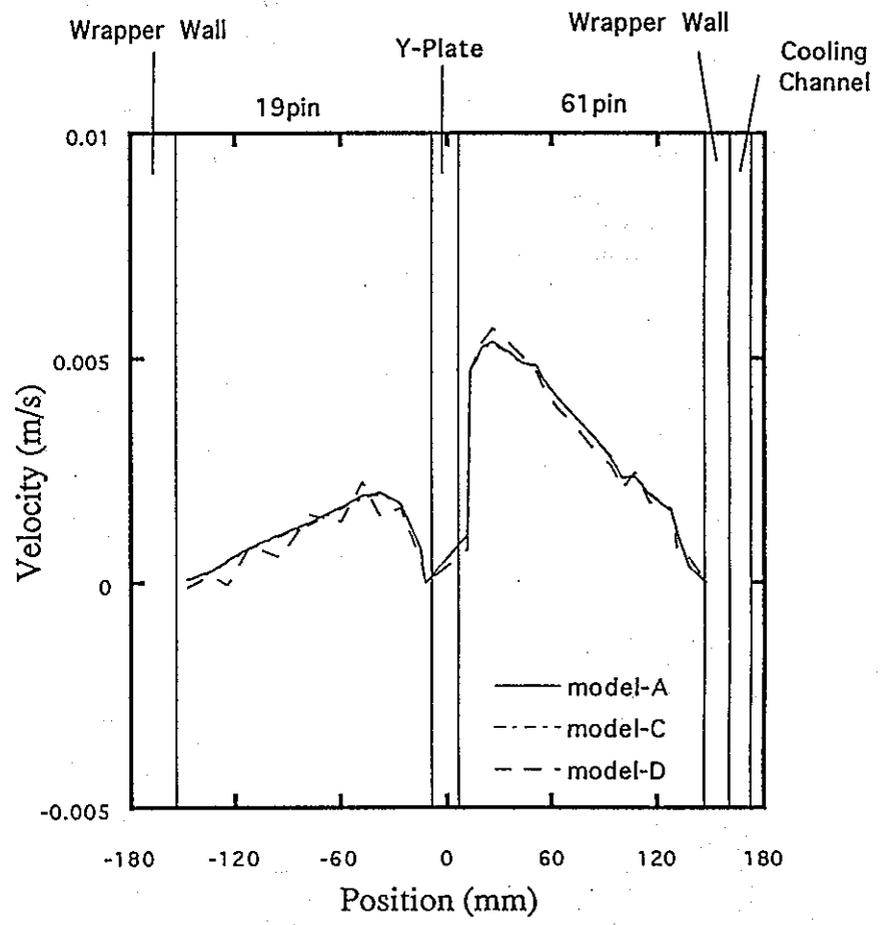


発熱部中央断面 温度散布図 (Case ST-16)

図.5-b-5 発熱部上端・中央断面 温度分布 (case ST-16)

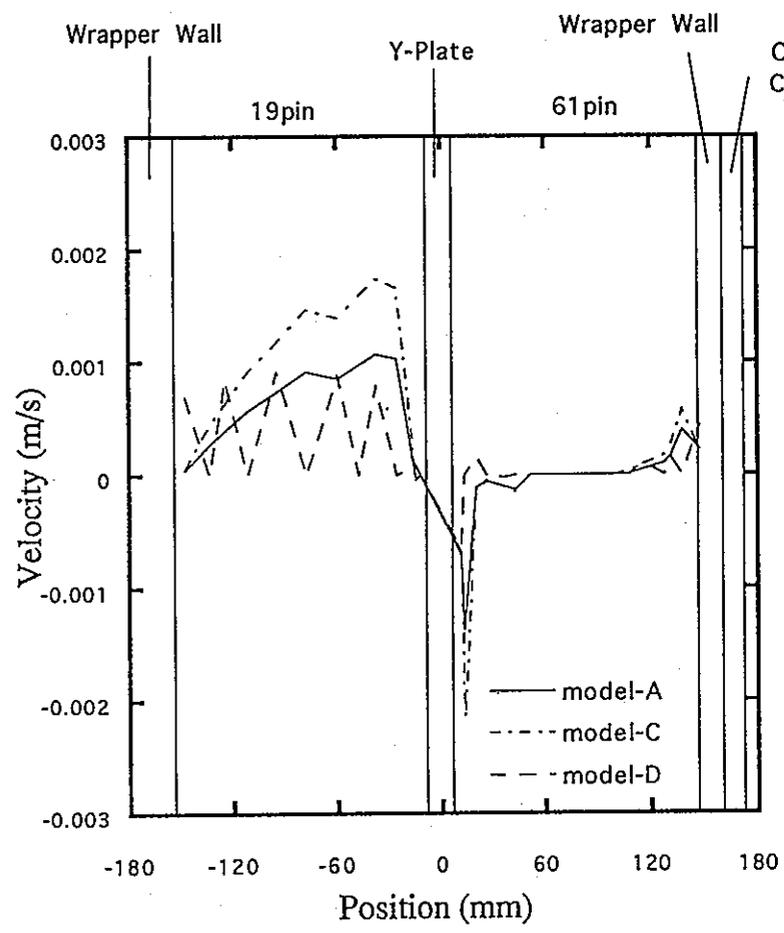


発熱部上端断面 x方向流速散布図 (Case ST-16)

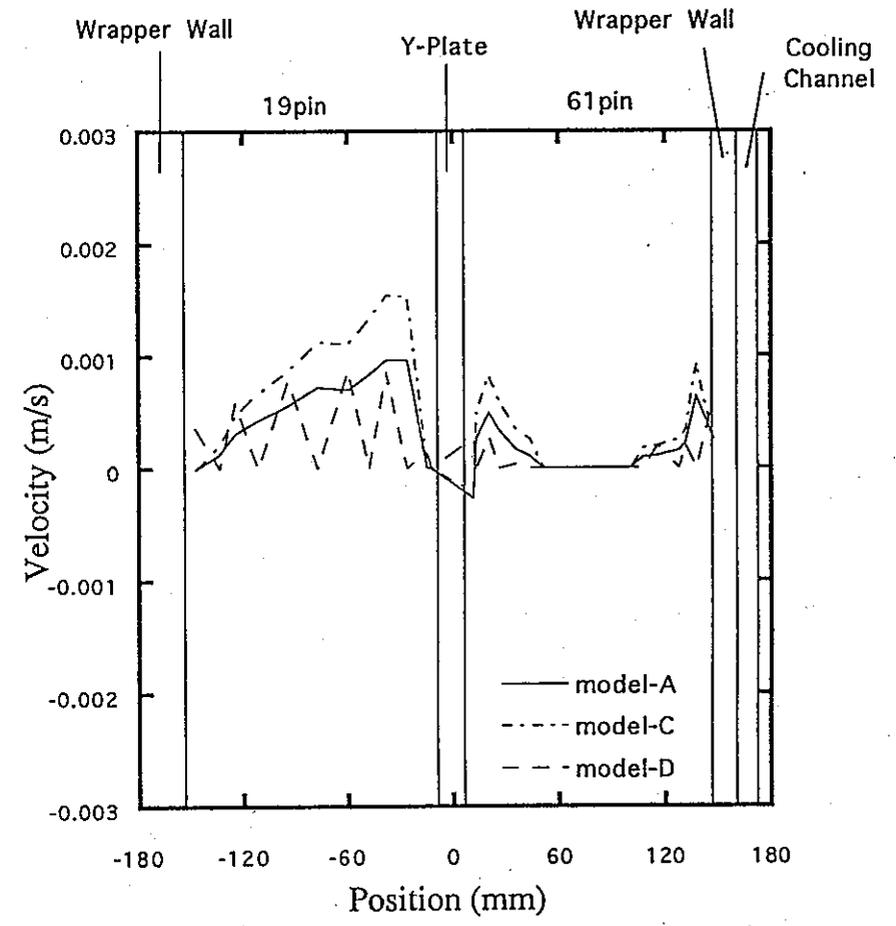


発熱部中央断面 x方向流速散布図 (Case ST-16)

図.5-b-6 発熱部上端・中央断面 x方向流速分布 (case ST-16)

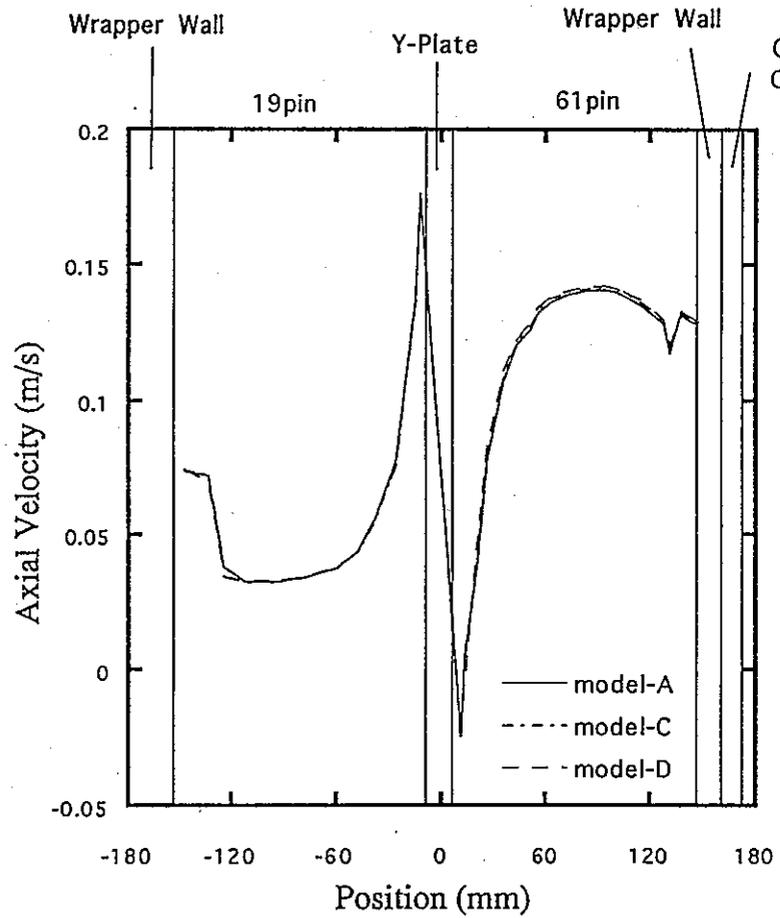


発熱部上端断面 y方向流速散布図 (Case ST-16)

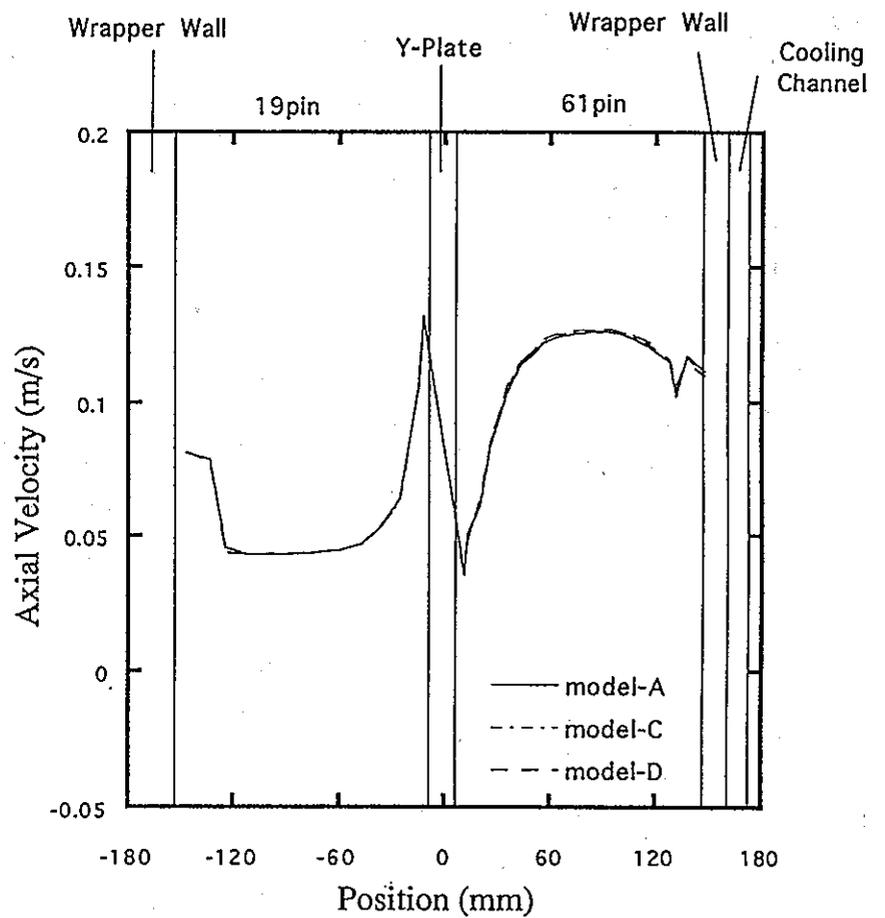


発熱部中央断面 y方向流速散布図 (Case ST-16)

図.5-b-7 発熱部上端・中央断面 y方向流速分布 (case ST-16)



發熱部上端断面 z 方向流速散布圖 (Case ST-16)



發熱部中央断面 z 方向流速散布圖 (Case ST-16)

圖.5-b-8 發熱部上端・中央断面 z 方向流速分布 (case ST-16)

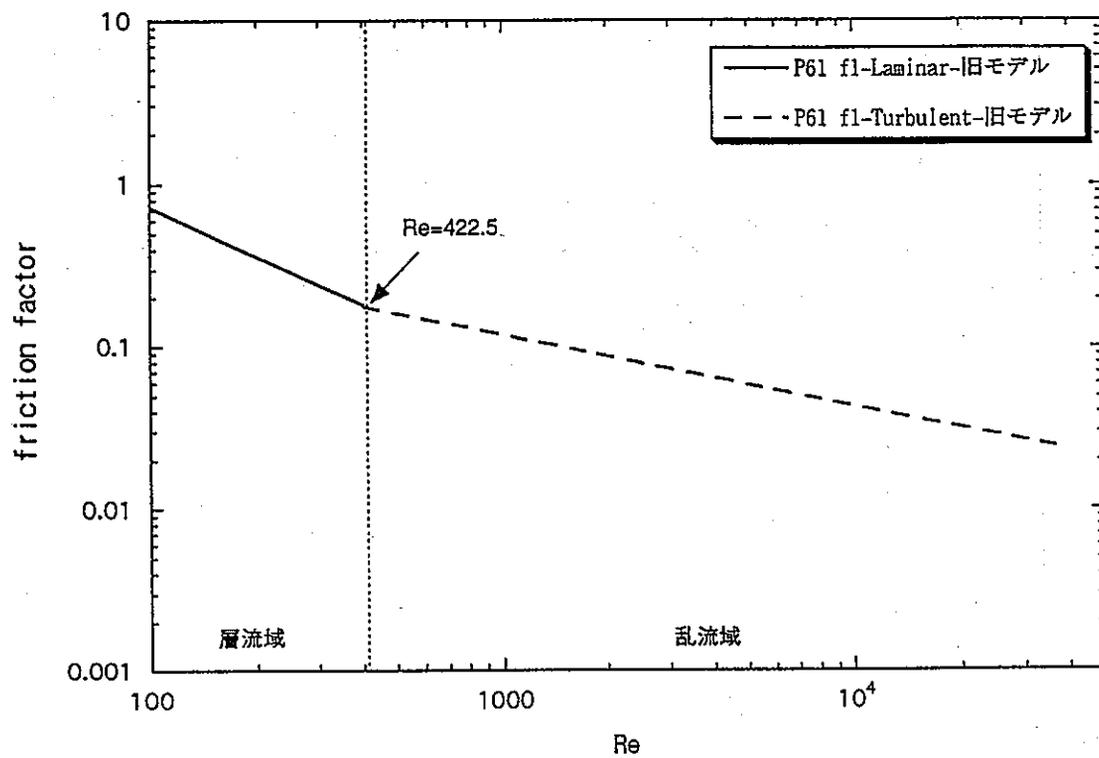
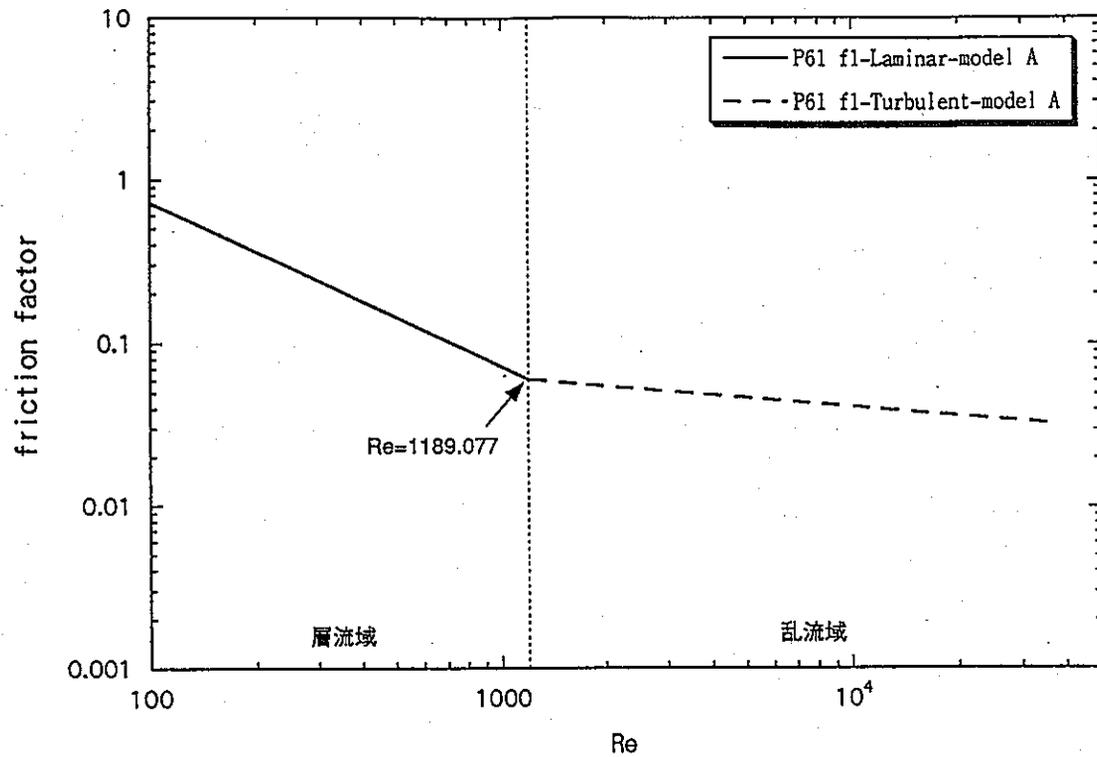


図.6-1-1 61pin Bundle 内部サブチャンネル- Friction factor 相関図

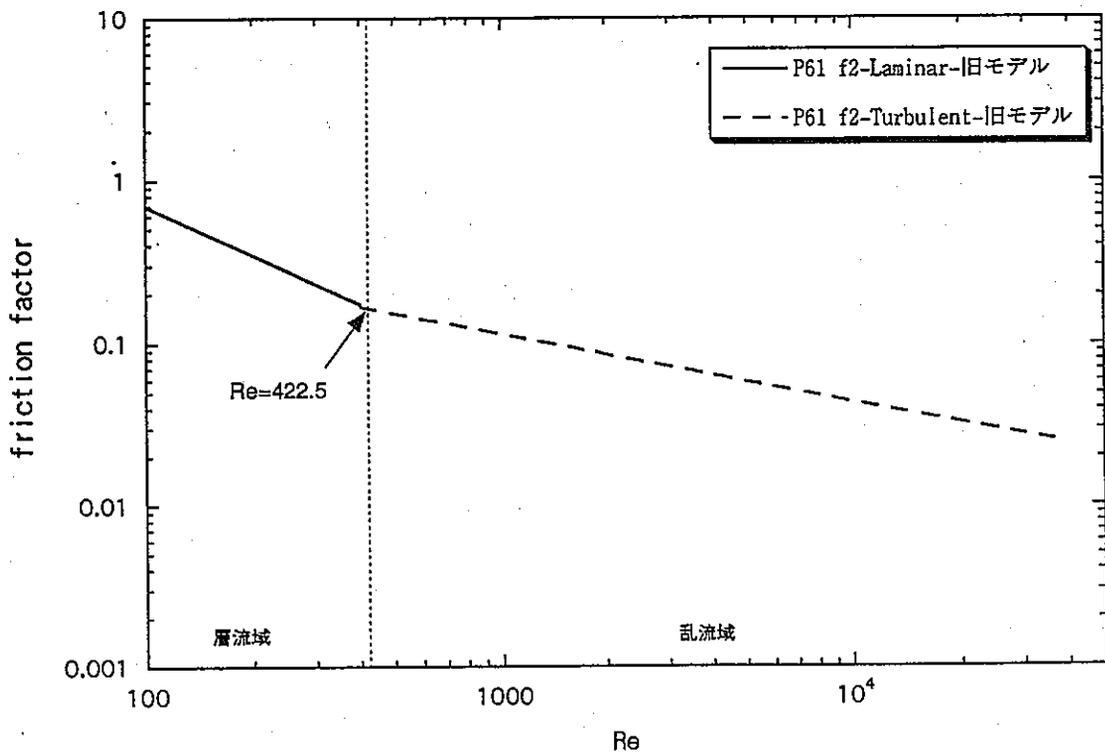
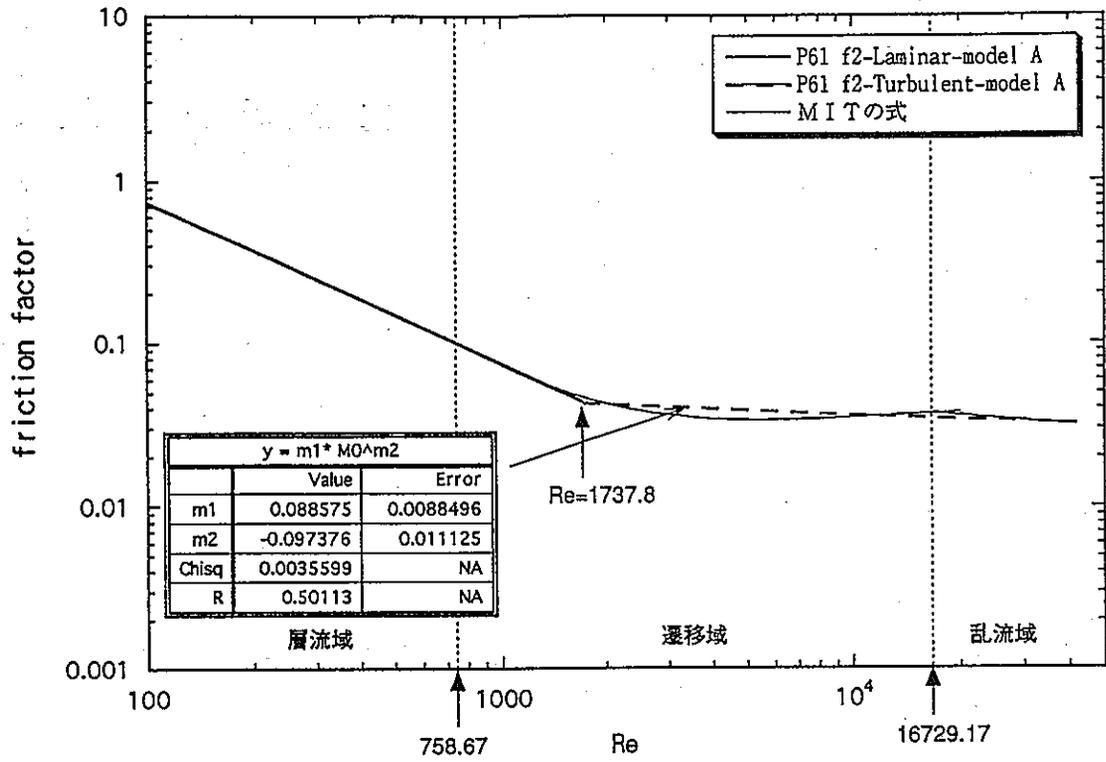


図.6-1-2 61pin Bundle 周辺サブチャンネル- Friction factor 相関図

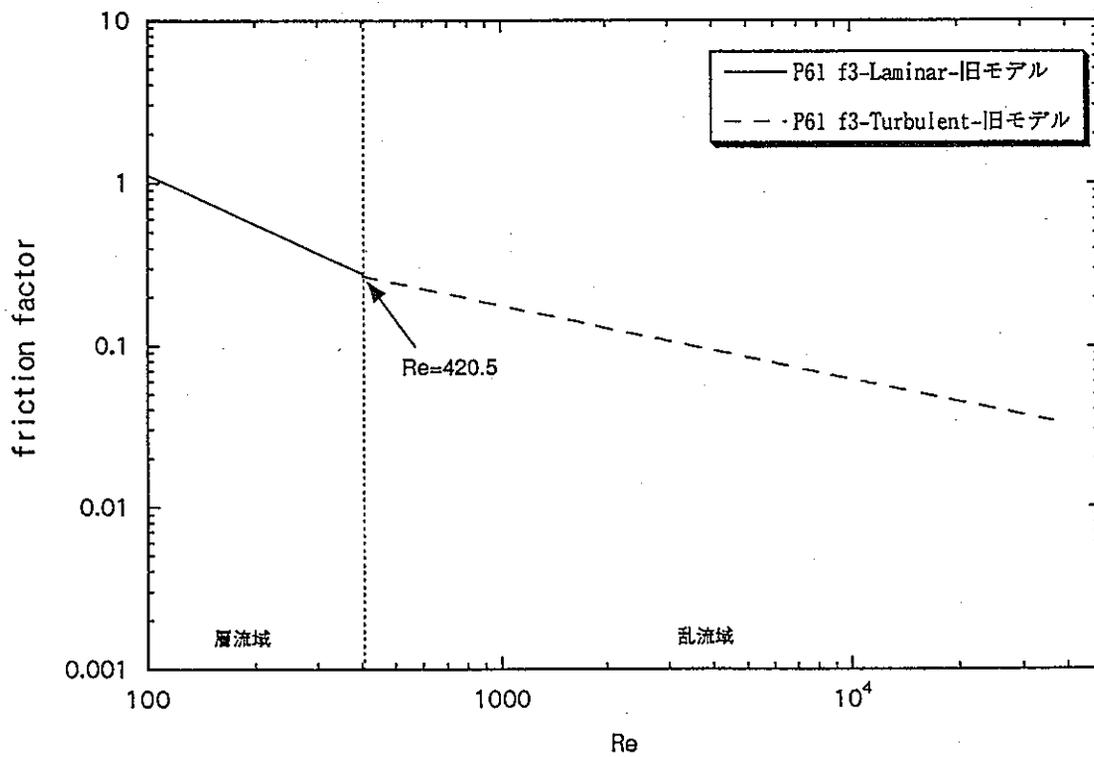
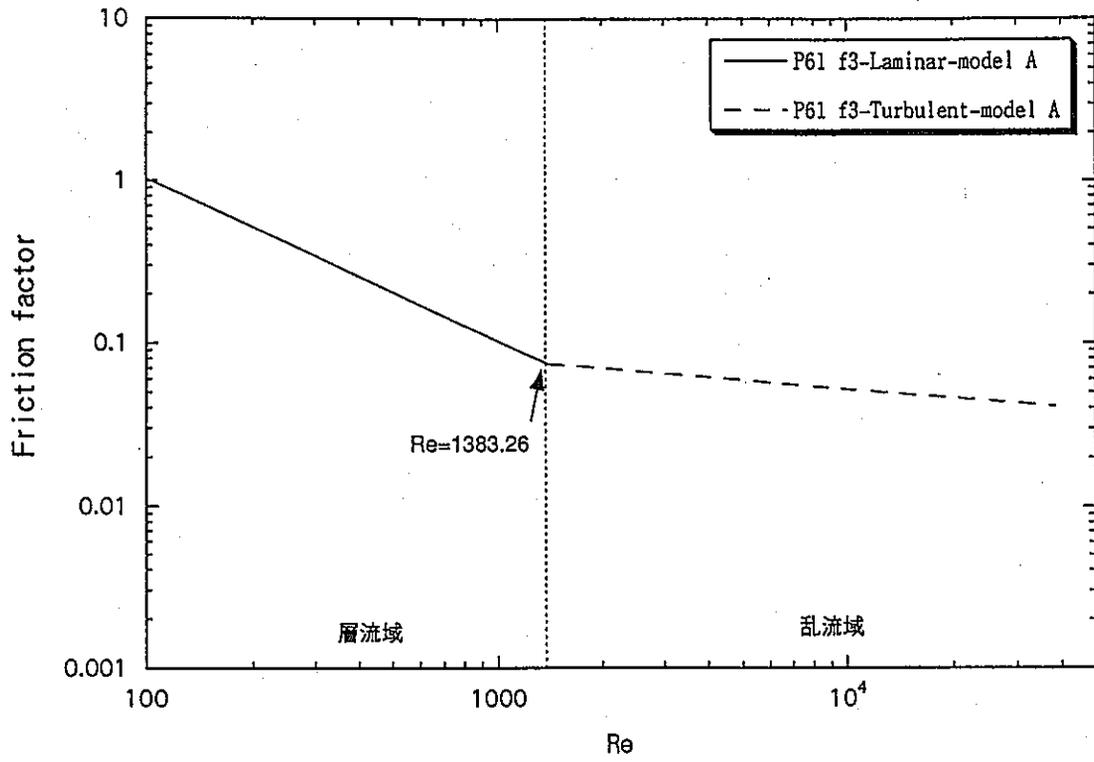


図.6-1-3 61pin Bundle コーナーサブチャンネル- Friction factor 相関図

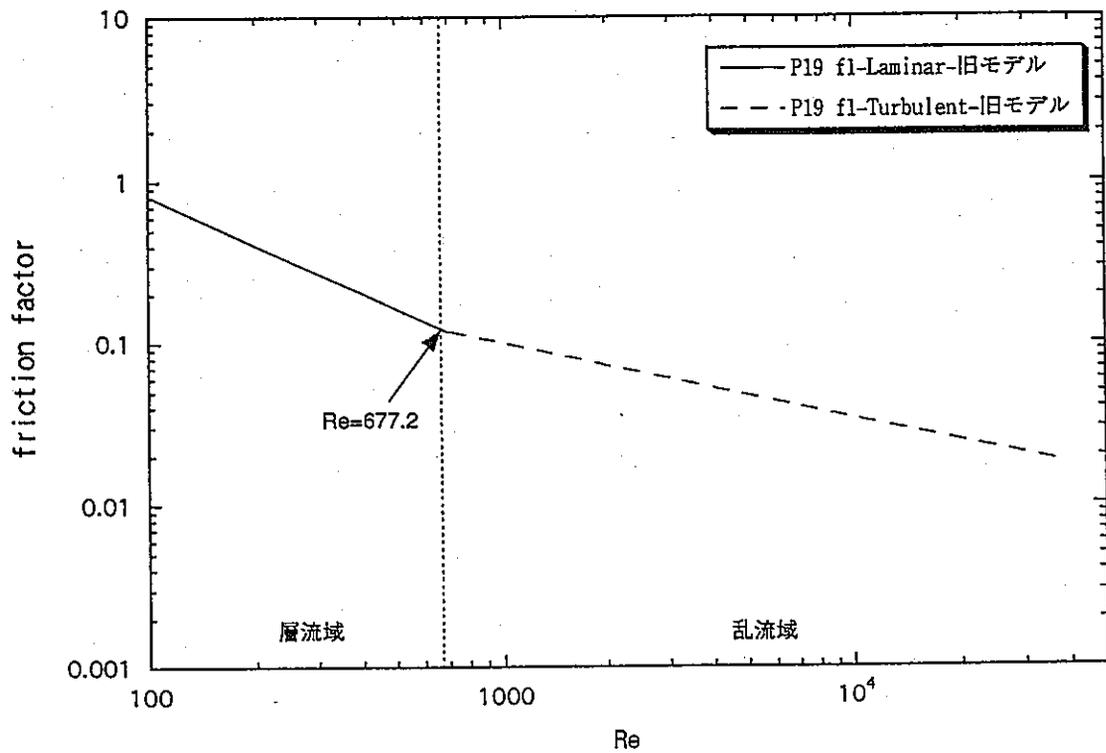
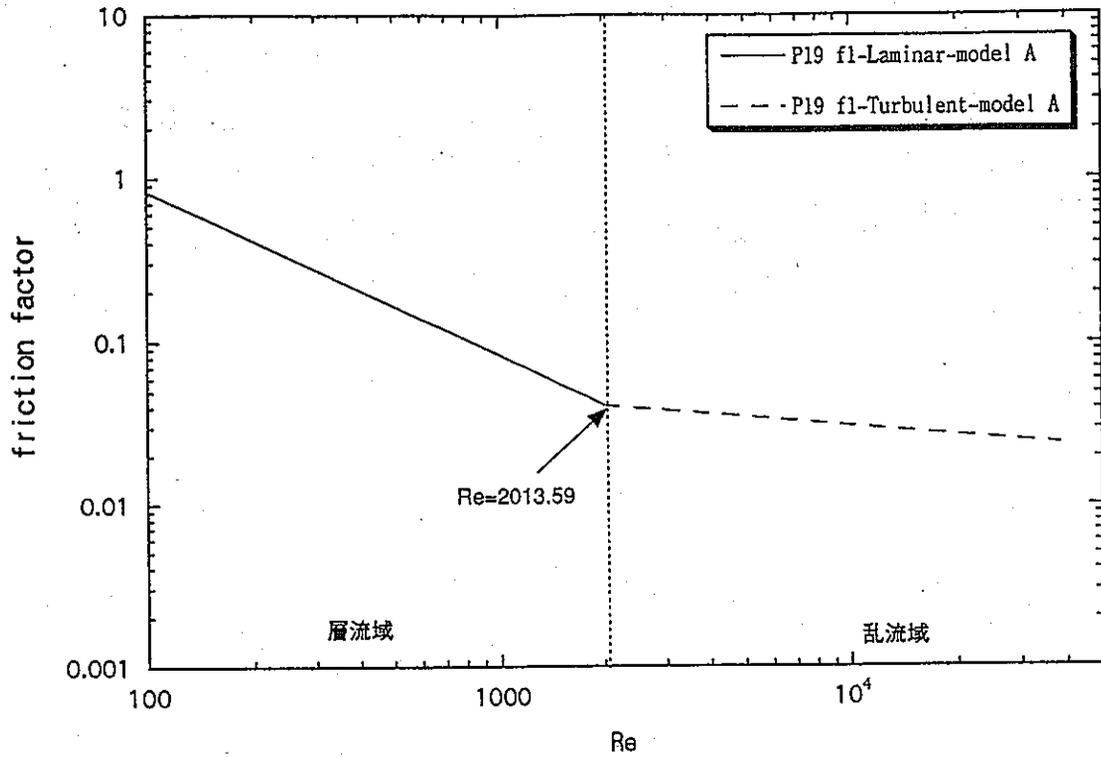


図.6-1-4 19pin Bundle 内部サブチャンネル- Friction factor 相関図

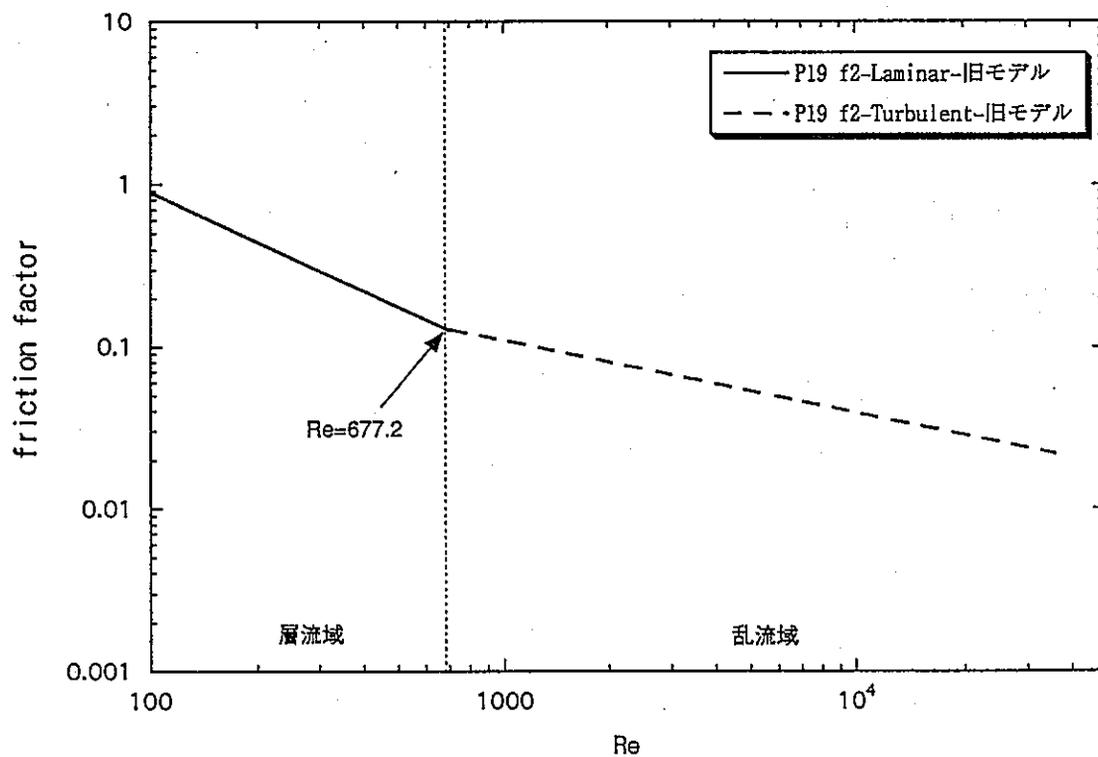
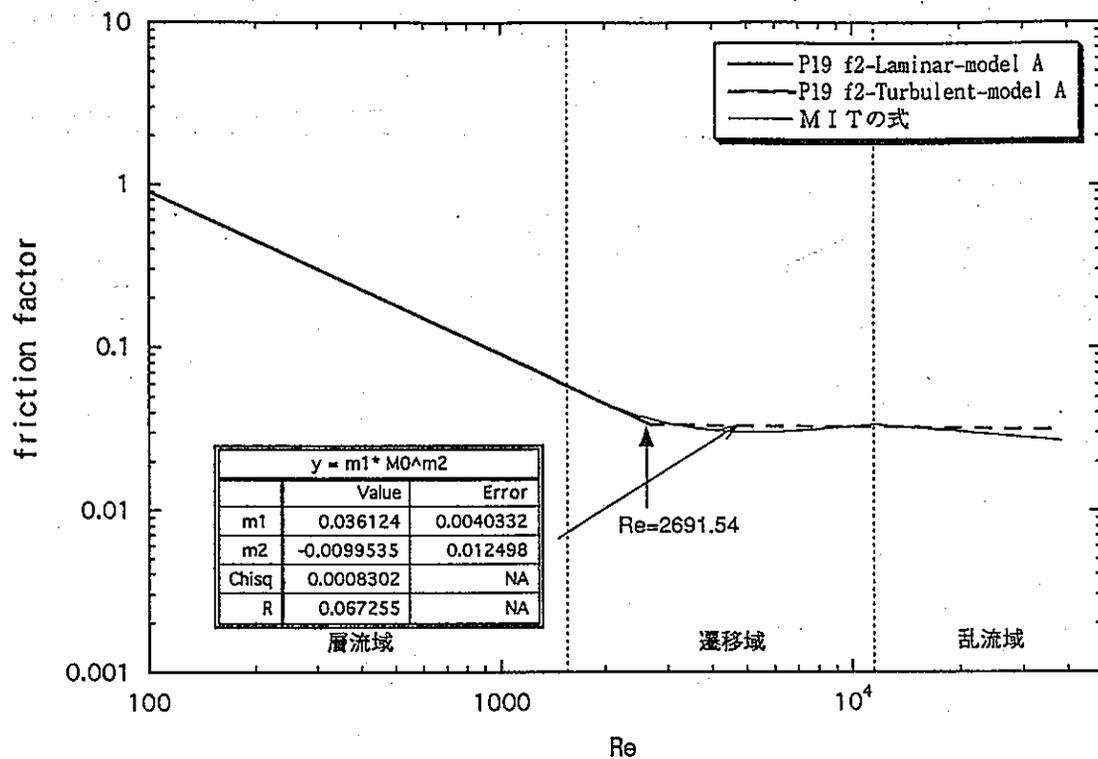


図.6-1-5 19pin Bundle 周辺サブチャンネル- Friction factor 相関図

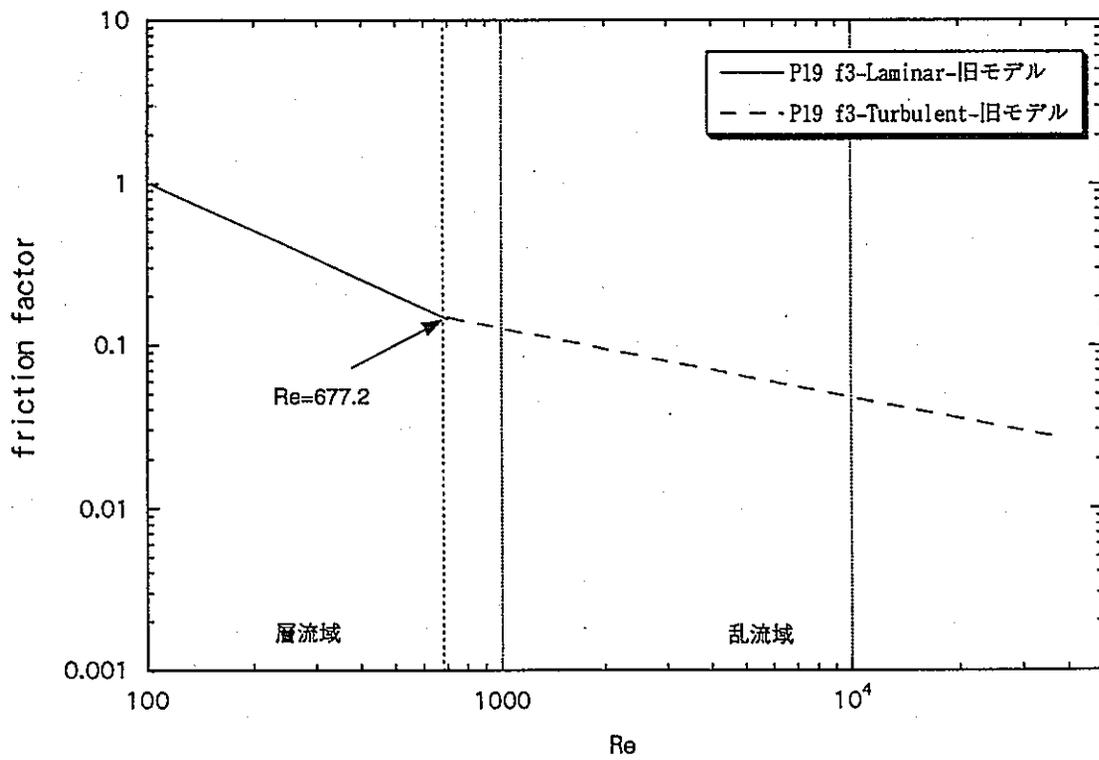
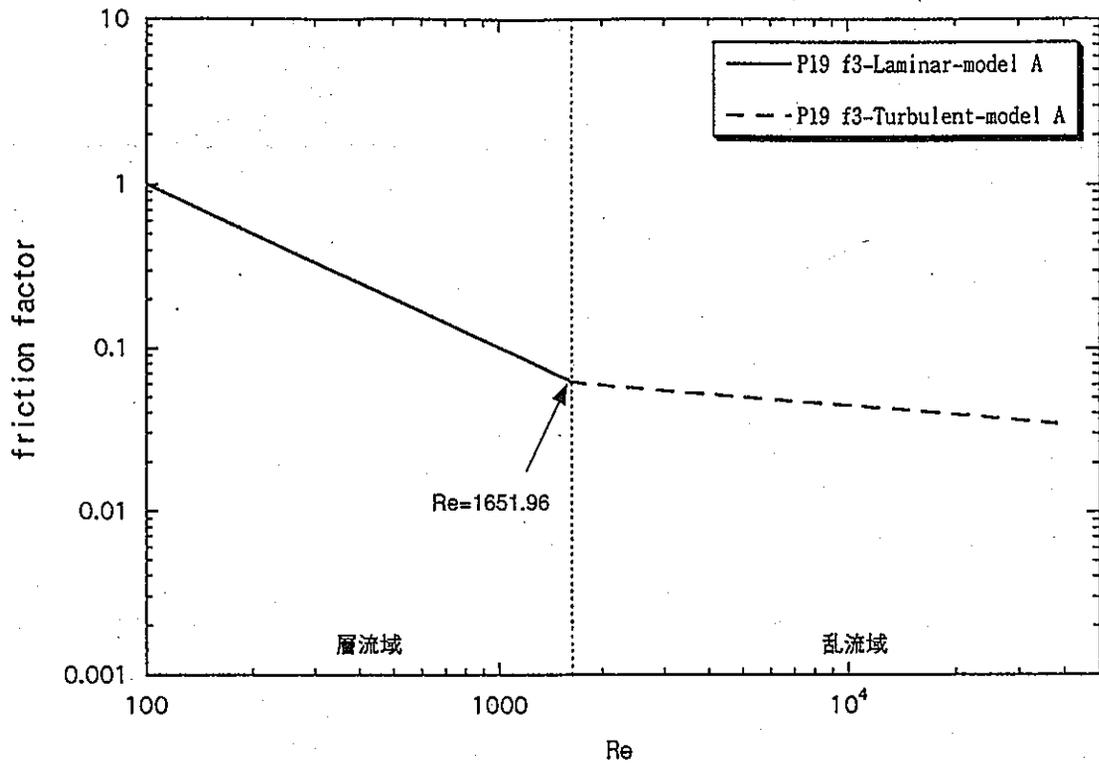
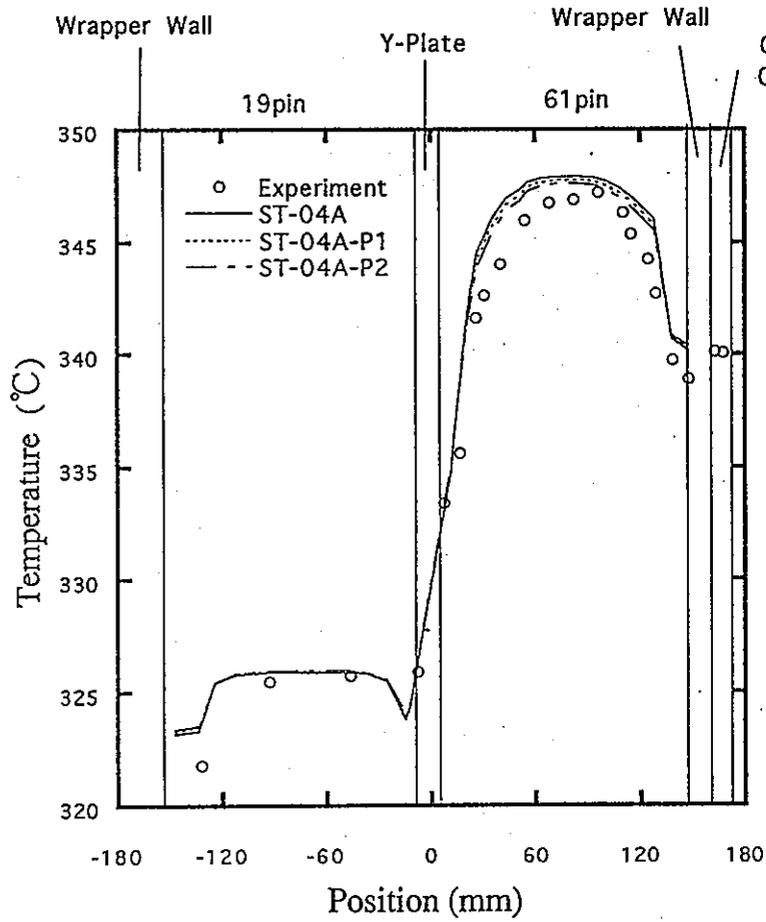
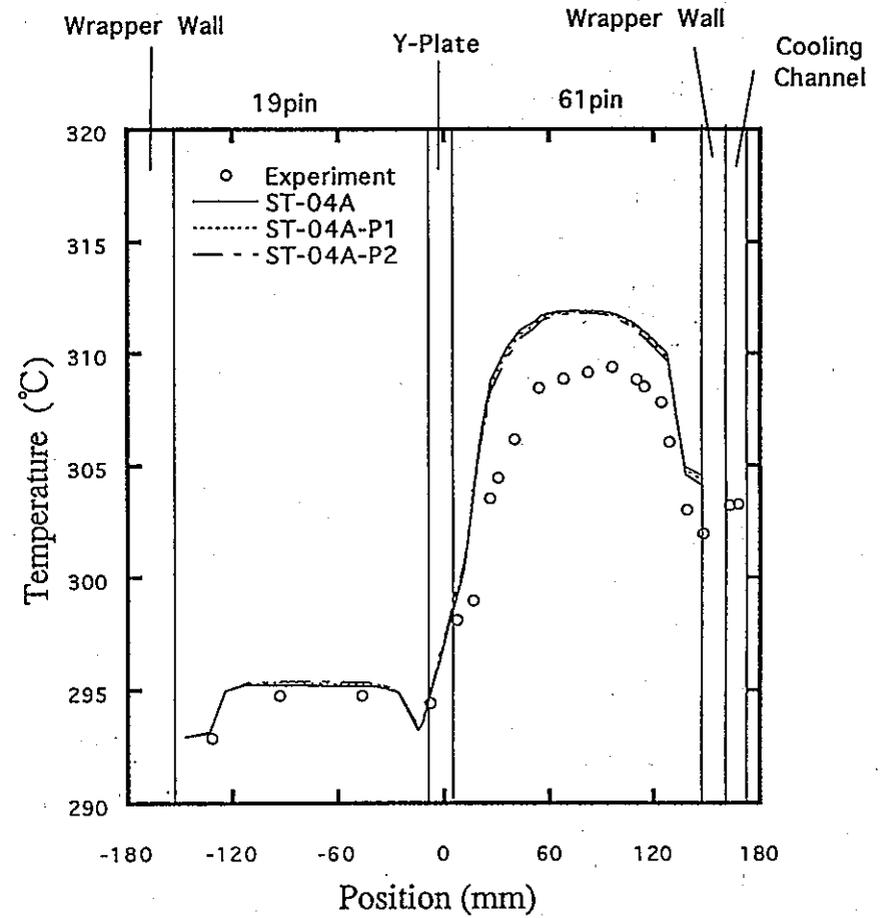


図.6-1-6 19pin Bundle コーナーサブチャンネル- Friction factor 相關図

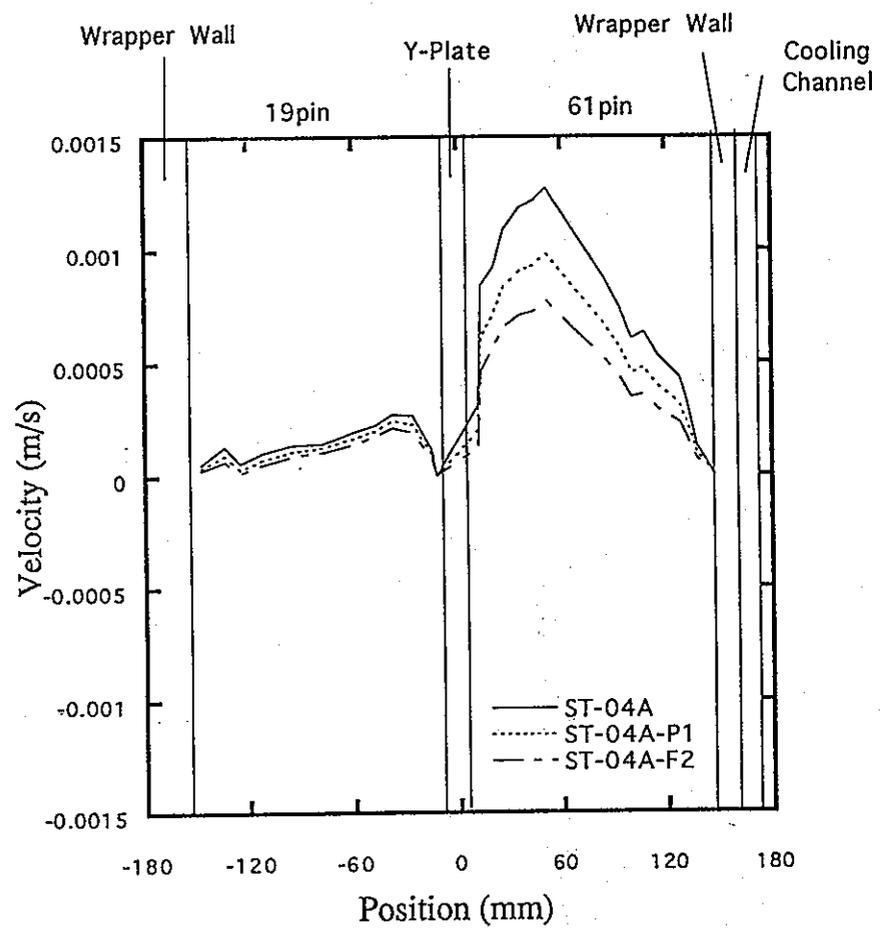


発熱部上端断面 温度散布図 (Case ST-04)

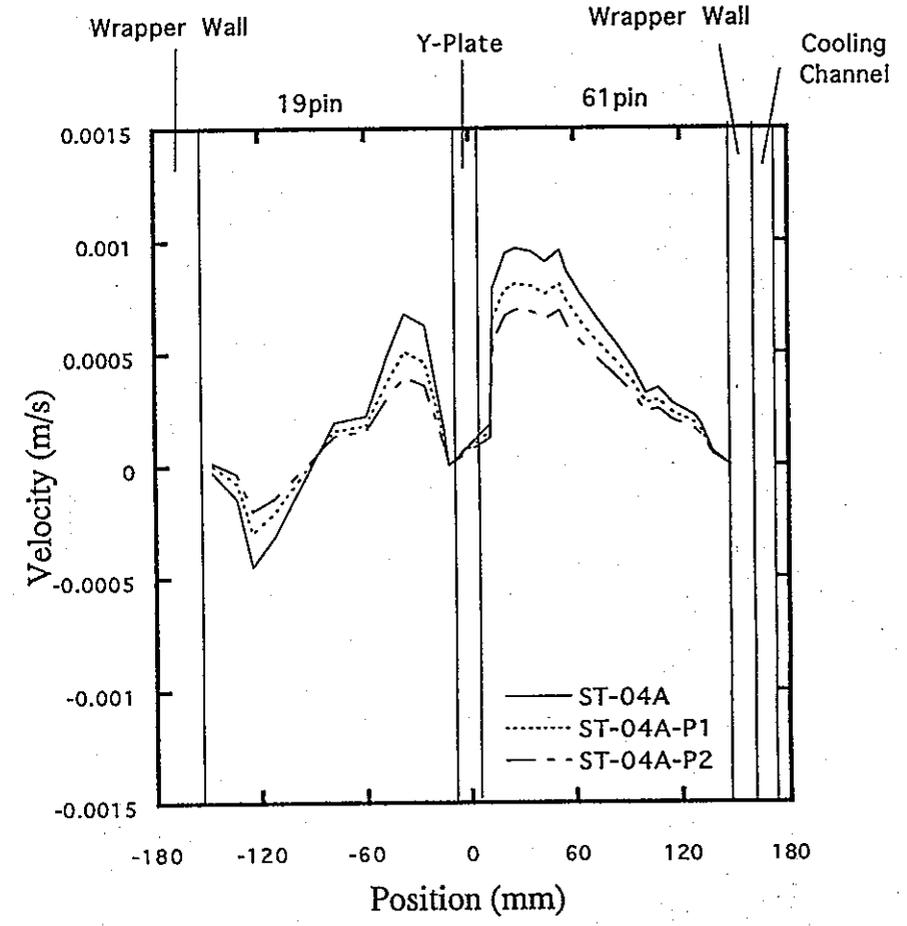


発熱部中央断面 温度散布図 (Case ST-04)

図.6-2-a-1 発熱部上端・中央断面 温度分布 (case ST-04)

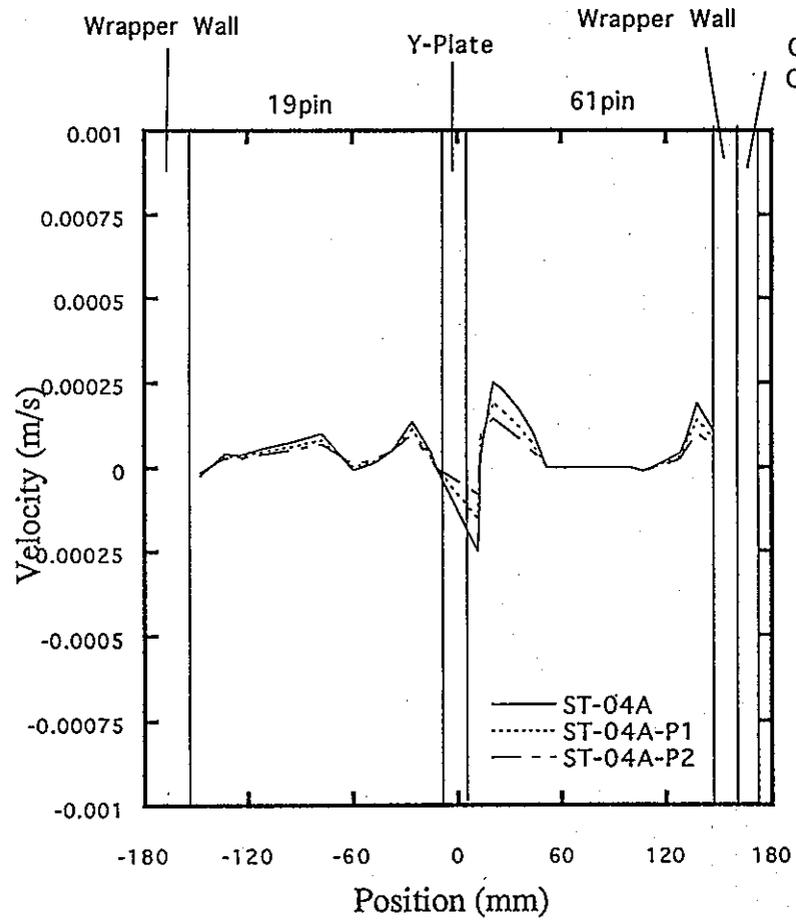


発熱部上端断面 x方向流速散布図 (Case ST-04)

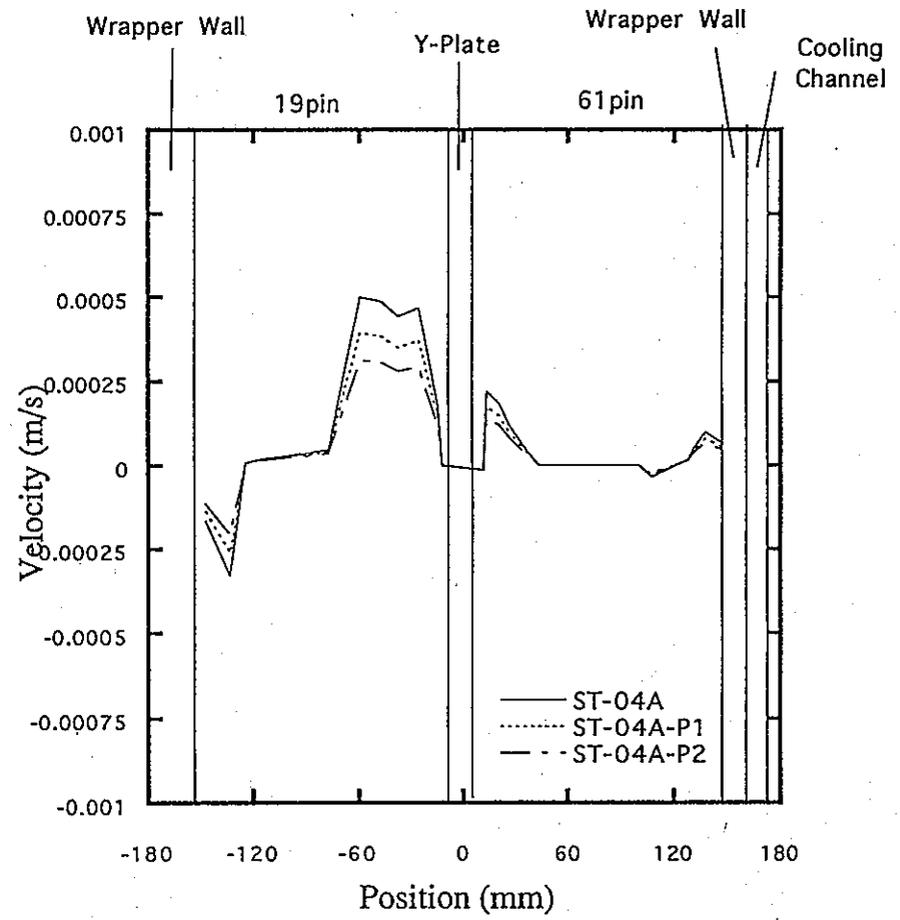


発熱部中央断面 x方向流速散布図 (Case ST-04)

図.6-2-a-2 発熱部上端・中央断面 x方向流速分布 (case ST-04)

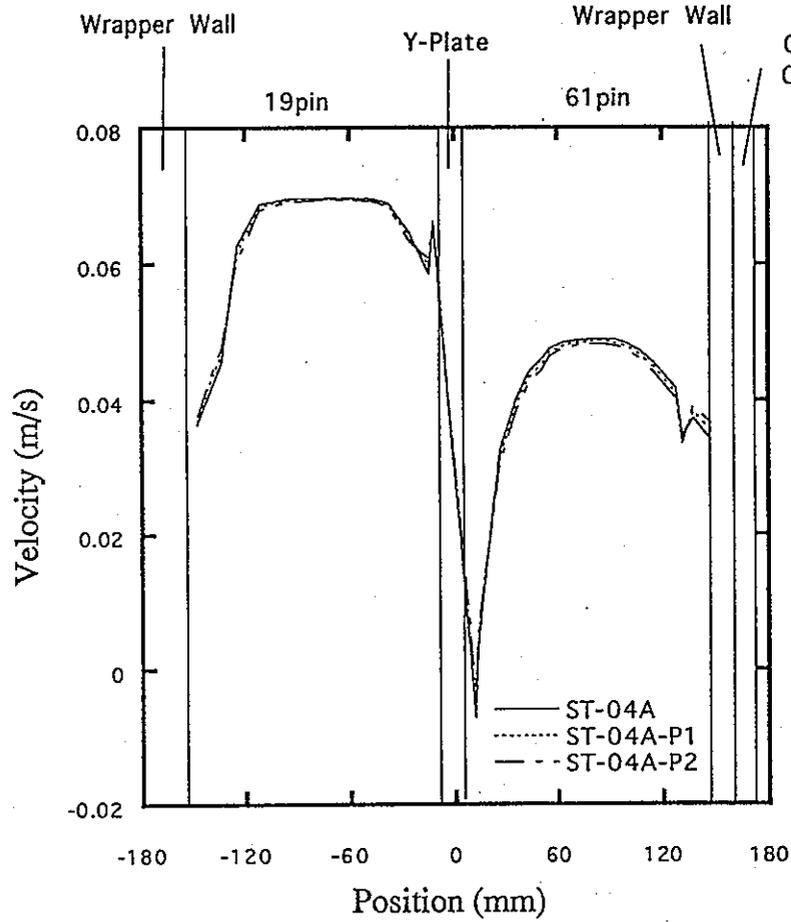


発熱部上端断面 y方向流速散布図 (Case ST-04)

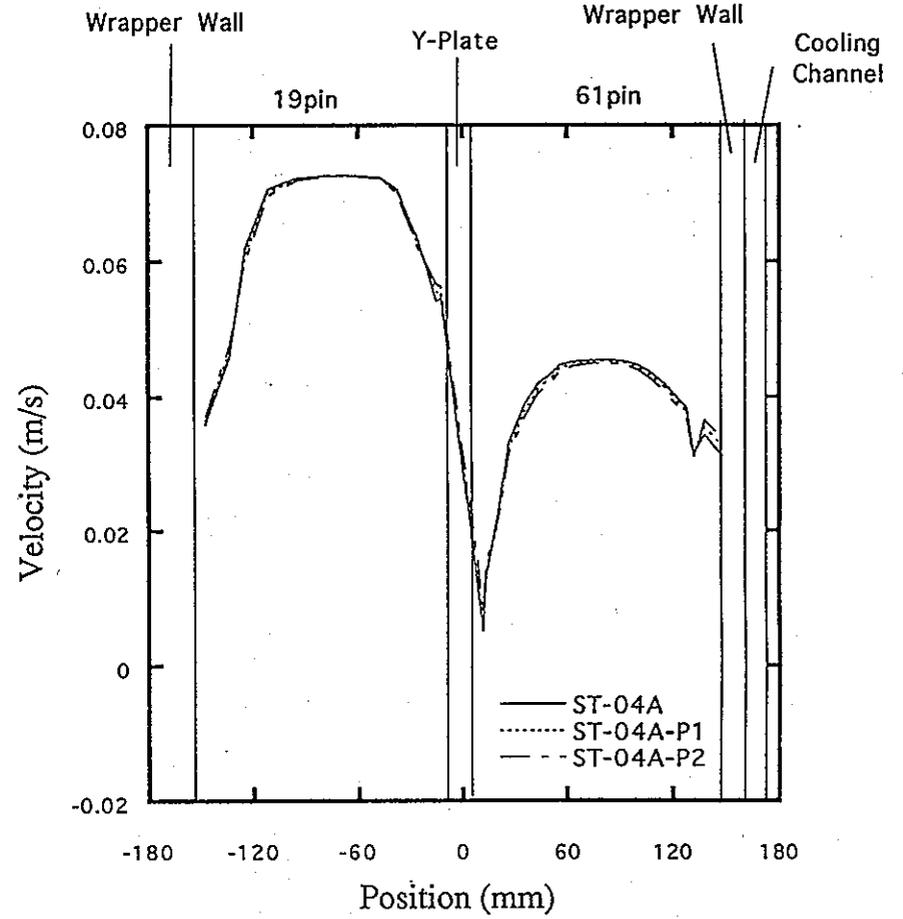


発熱部中央断面 y方向流速散布図 (Case ST-04)

図.6-2-a-3 発熱部上端・中央断面 y方向流速分布 (case ST-04)

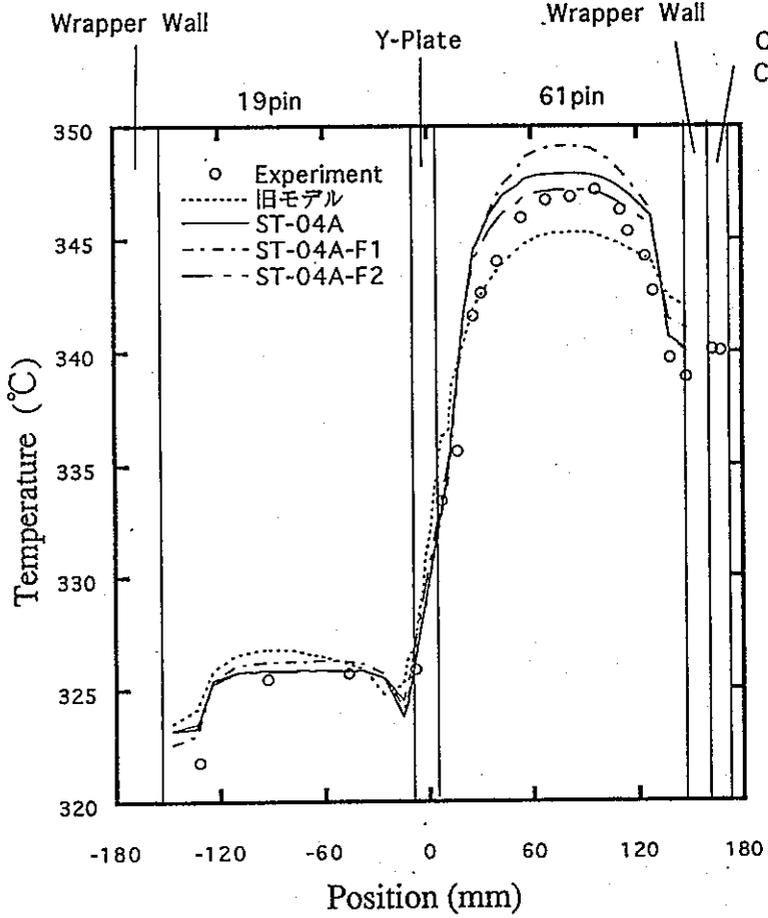


発熱部上端断面 Z方向流速散布図 (Case ST-04)

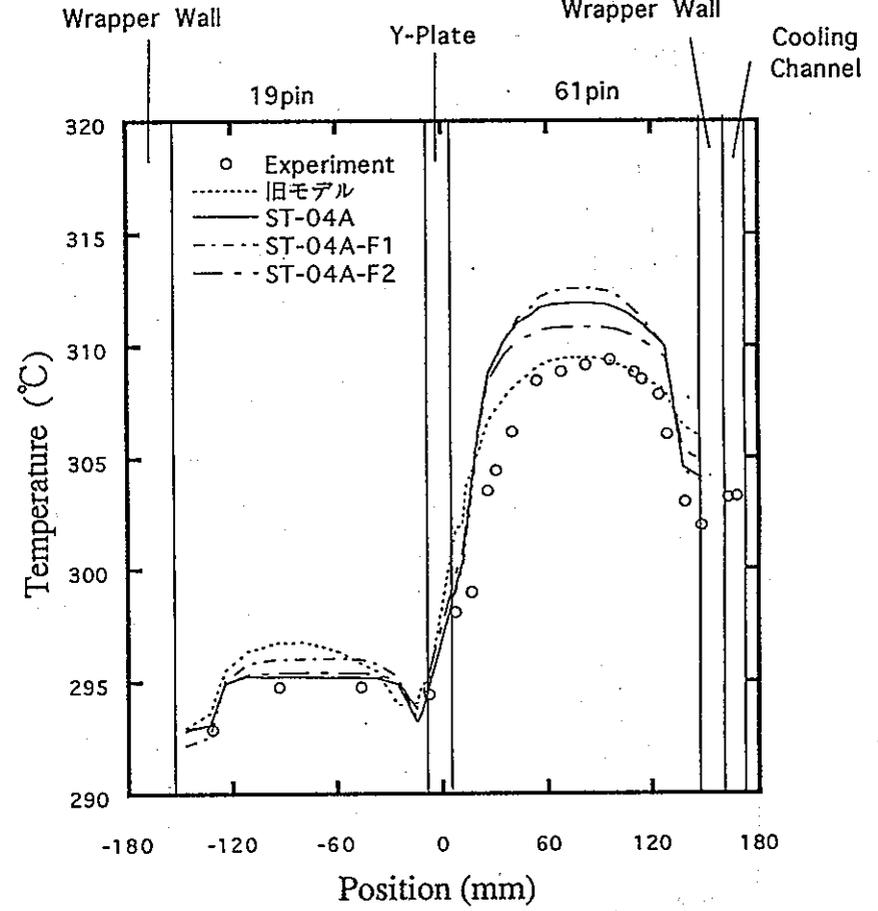


発熱部中央断面 Z方向流速散布図 (Case ST-04)

図.6-2-a-4 発熱部上端・中央断面 z方向流速分布 (case ST-04)

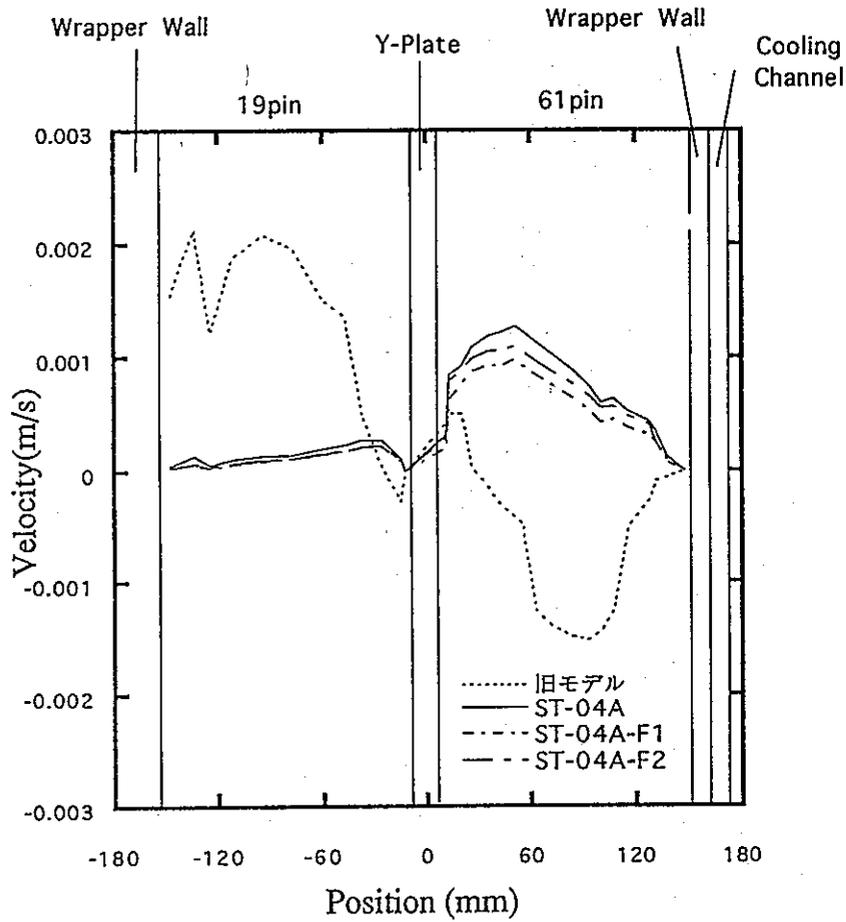


発熱部上端断面 温度散布図 (Case ST-04)

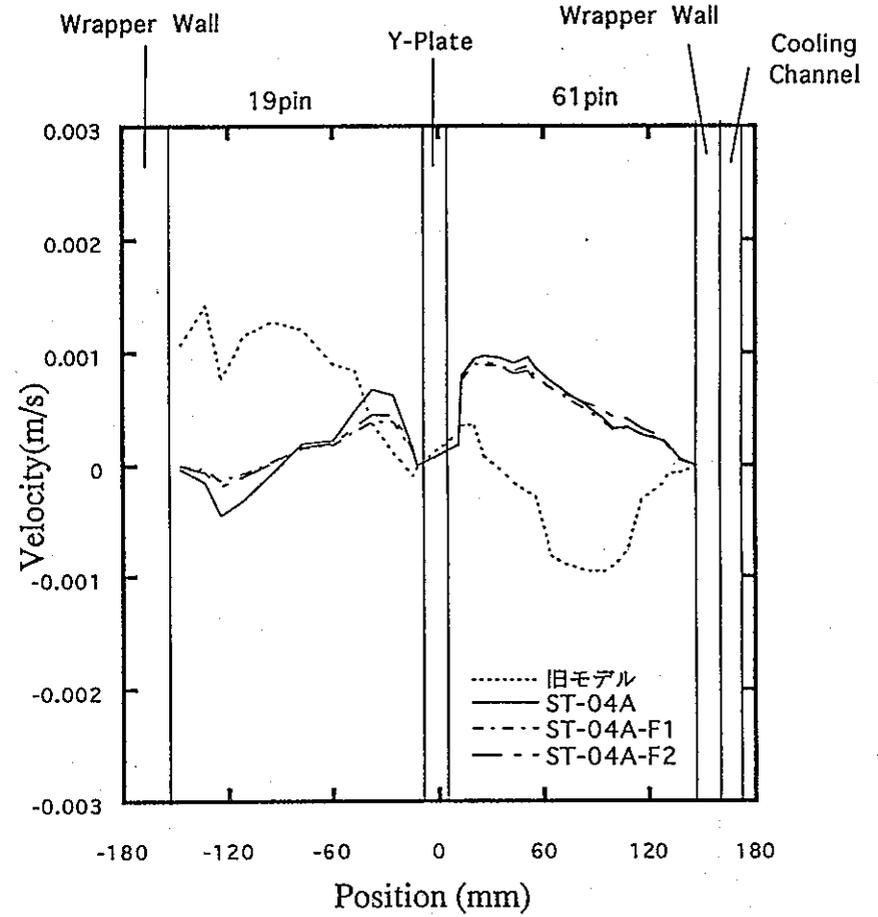


発熱部中央断面 温度散布図 (Case ST-04)

図.6-2-b-1 発熱部上端・中央断面 温度分布 (case ST-04)

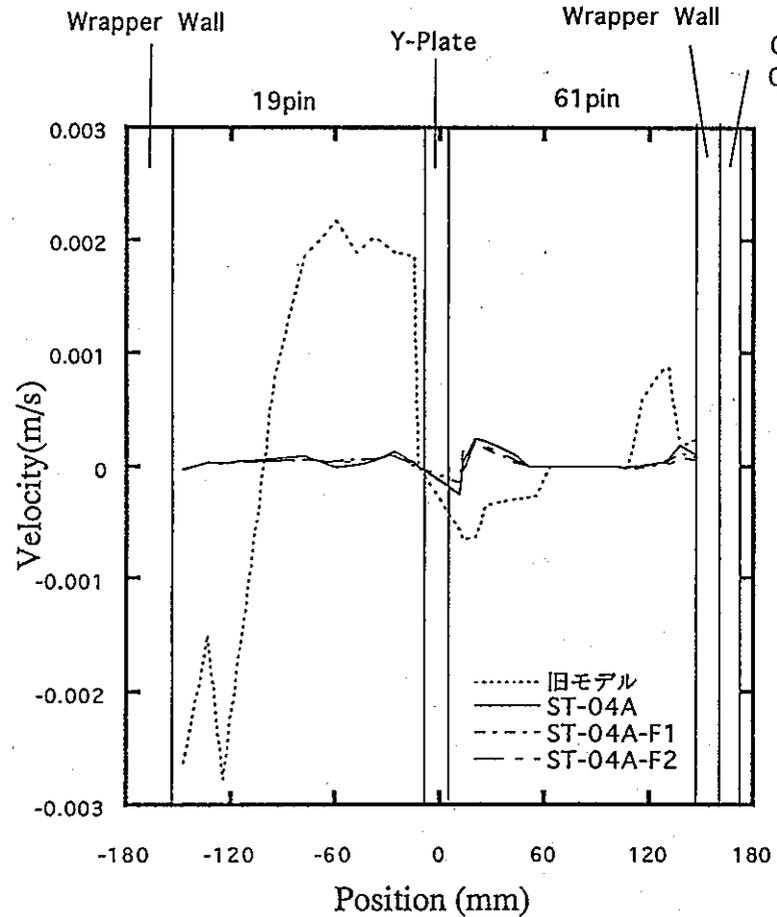


発熱部上端断面 x 方向流速散布図 (Case ST-04)

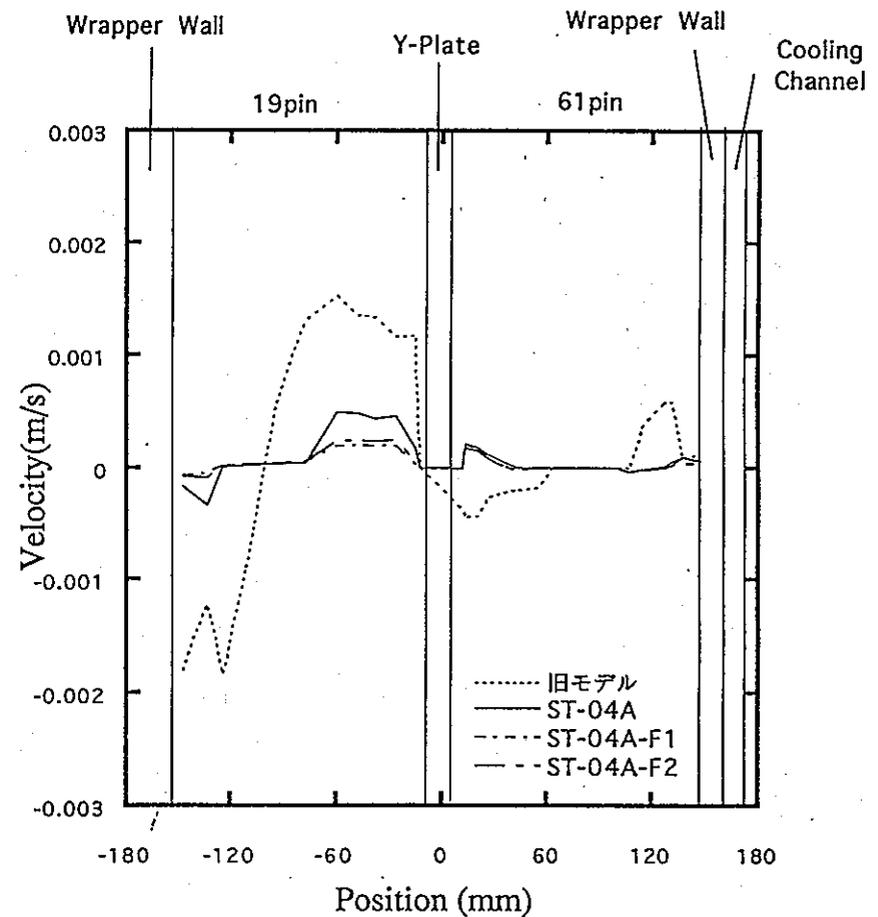


発熱部中央断面 x 方向流速散布図 (Case ST-04)

図.6-2-b-2 発熱部上端・中央断面 x 方向流速分布 (case ST-04)

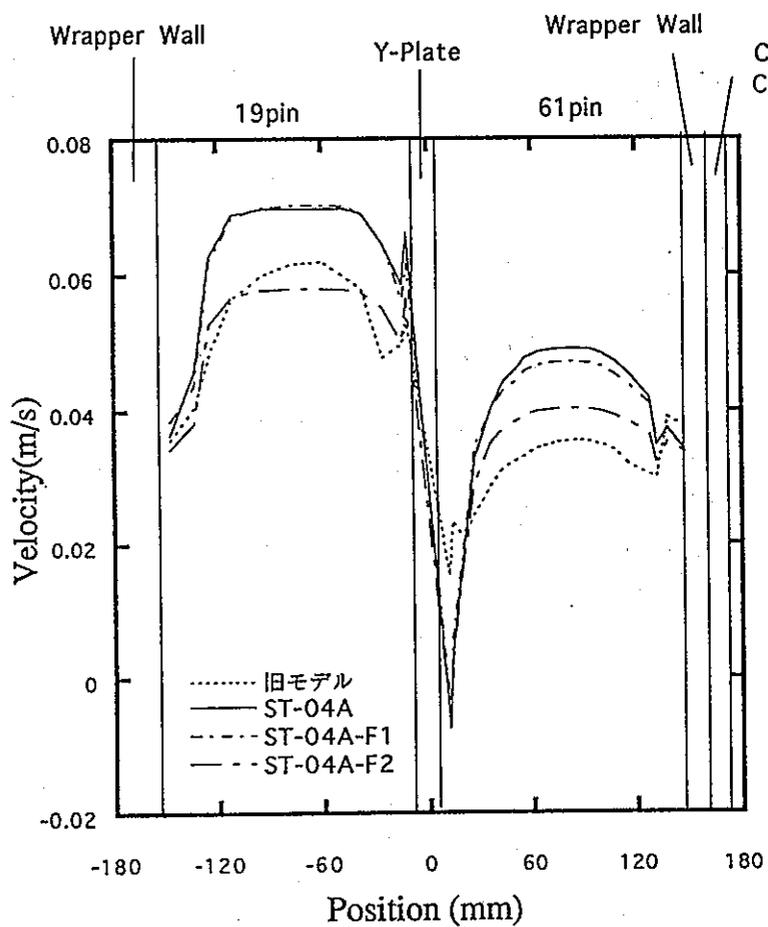


発熱部上端断面 y方向流速散布図 (Case ST-04)

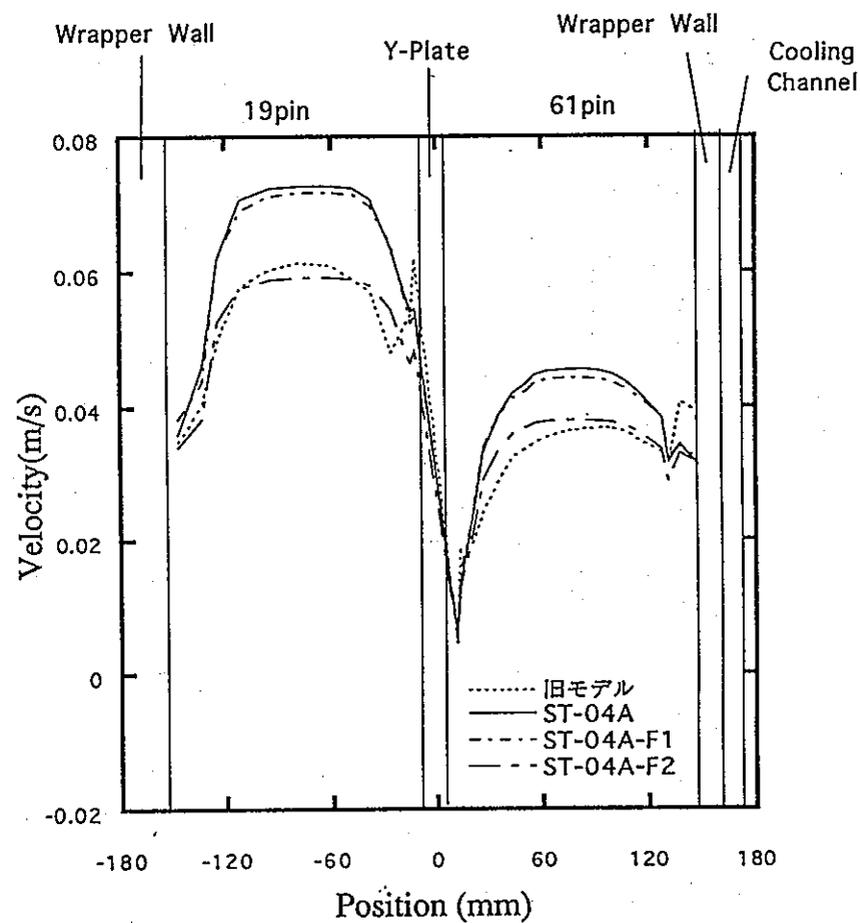


発熱部中央断面 y方向流速散布図 (Case ST-04)

図.6-2-b-3 発熱部上端・中央断面 y方向流速分布 (case ST-04)

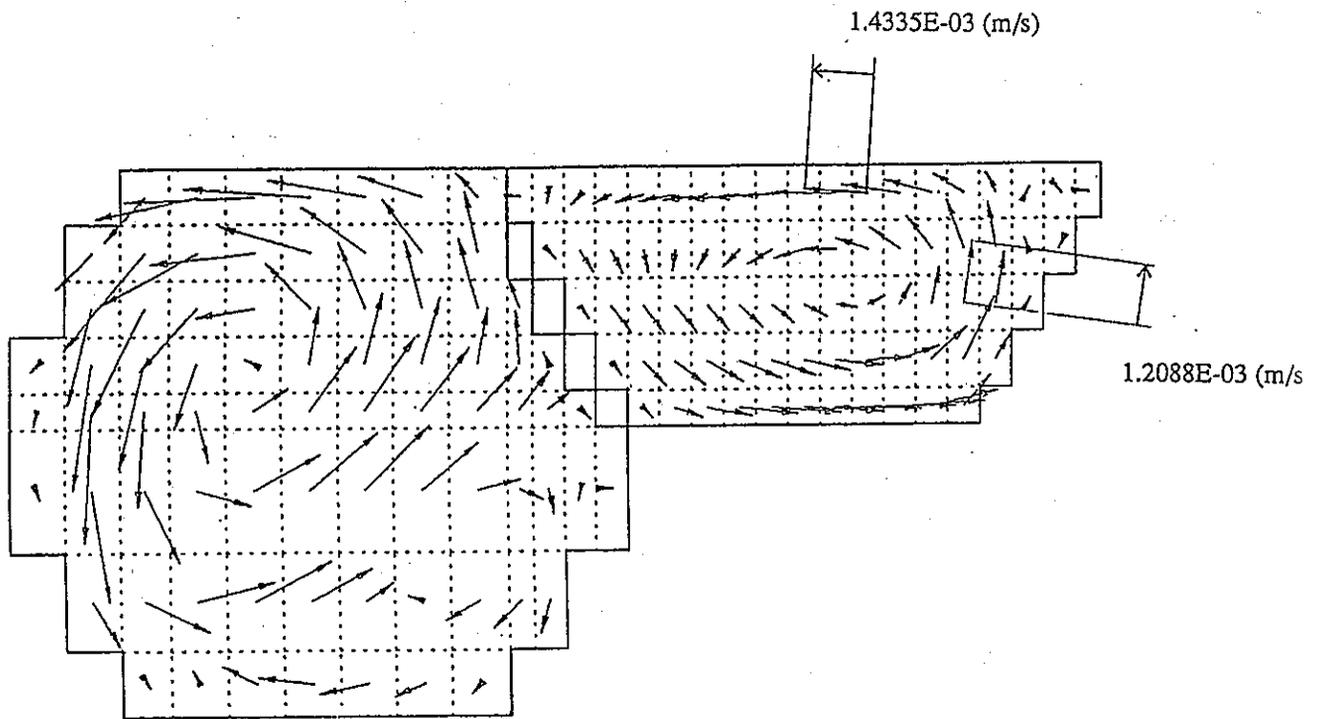


発熱部上端断面 z方向流速散布図 (Case ST-04)

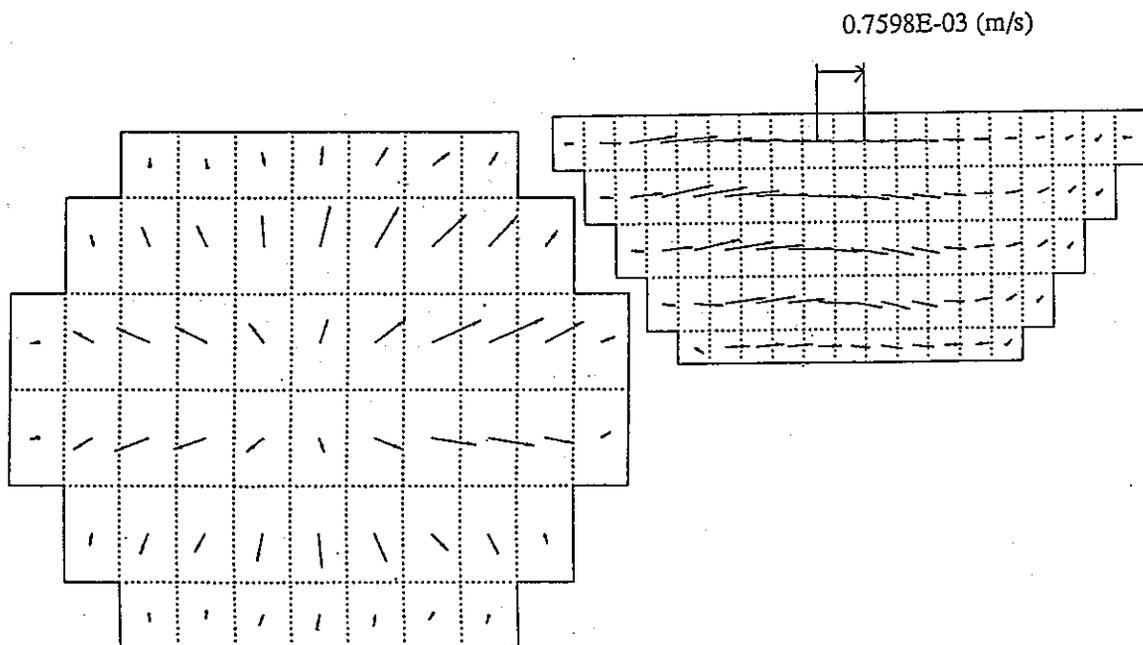


発熱部中央断面 z方向流速散布図 (Case ST-04)

図.6-2-b-4 発熱部上端・中央断面 z方向流速分布 (case ST-04)

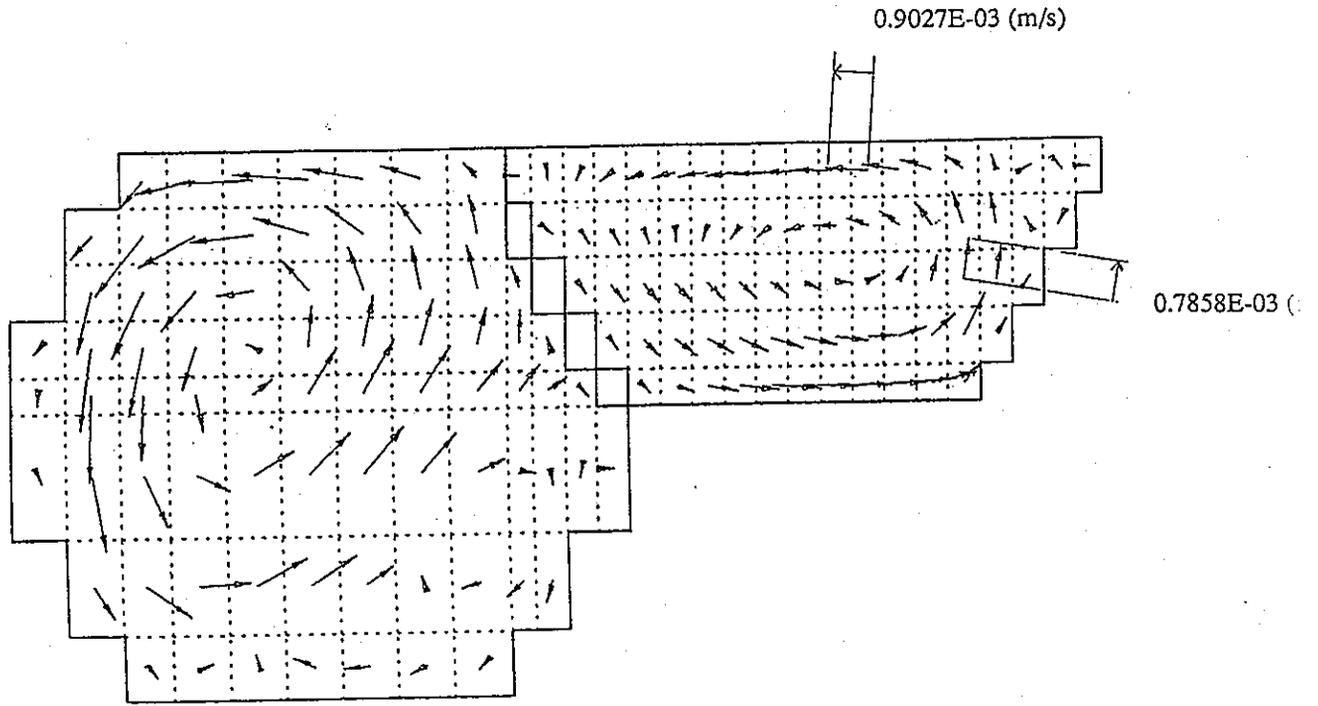


case ST-04 (旧モデル)

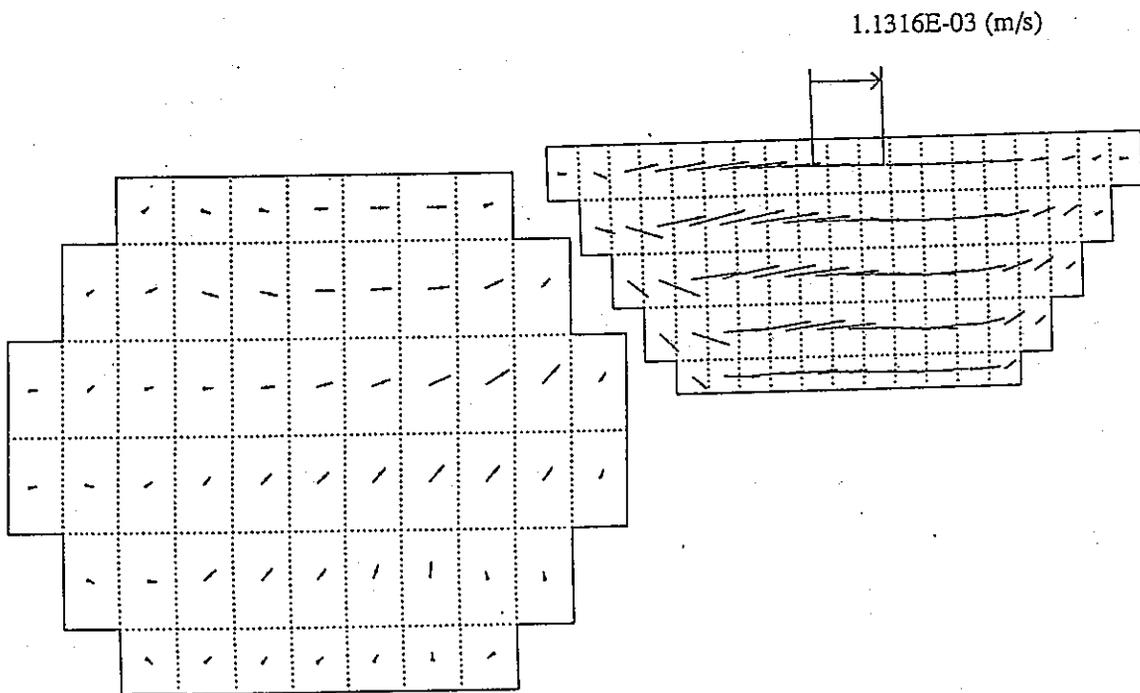


case ST-04 (model-A)

図.6-3-2 発熱部中央断面・流速ベクトル図



case ST-04 (旧モデル)



case ST-04 (model-A)

図.6-3-1 発熱部上端断面 流速ベクトル図