

高速炉燃料集合体内多次元熱流動解析への ミキシング係数モデルの適用

— 169ピン集合体定常ナトリウム試験による検証 —

1997年4月

動力炉・核燃料開発事業団
大洗工学センター

複製又はこの資料の入手については、下記にお問い合わせ下さい。

〒311-13 茨城県東茨城郡大洗町成田町4002

動力炉・核燃料開発事業団

大洗工学センター

システム開発推進部技術管理室

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

動力炉・核燃料開発事業団

(Power Reactor and Nuclear Fuel Development Corporation) 1997

公開資料
PNC TN9410 97-044
1997年4月

高速炉燃料集合体内多次元熱流動解析へのミキシング係数モデルの適用

— 169 ピン集合体定常ナトリウム試験による検証 —

西村 元彦^{*1}、三宅 康洋^{*2}、上出 英樹^{*1}

要旨

高速炉の自然循環による崩壊熱除去時の炉心部においては、集合体間およびサブチャンネル間の流量再配分、集合体間熱移行、炉心プレナム相互作用ならびにインターラッパー流れ等の様々な形態とスケールを持つ現象が複雑に影響を及ぼし合いながら伝熱流動場を形成している。これらの複雑な現象を総括して取り扱う上で、多次元熱流動解析は最も有力な評価ツールである。

これまでに動力炉・核燃料開発事業団では、大型炉プランケット集合体を模擬した 61 ピン集合体を持つ CCTL-CFR、および炉心燃料集合体を模擬した 37 ピン集合体を備える PLANDTL-DHX の 2 種類のナトリウム伝熱流動試験の解析による検証から、集合体間熱移行およびインターラッパー流れによる除熱現象を解析するためのモデル化手法を構築してきた。特に集合体内部の解析については、1 メッシュに 1 サブチャンネルを内包するスタガードハーフピンメッシュ分割を用いた多次元解析に、サブチャンネル解析で実績を持つミキシング係数モデルを導入し、定常状態および定常から自然循環崩壊熱除去へのスクラムを模擬した過渡事象に対して計測誤差と同等の精度で解析できる手法を構築した。

本研究では今後の実機体系（217 ピン集合体体系）の解析に備えて、本解析手法の大型バンドル体系による検証を行うこととした。解析対象は、比較的大型の 169 ピン部分発熱燃料集合体内冷却材混合効果試験とした。

検証の結果、ミキシング係数モデルを導入することにより、同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、集合体内部の平均レイノルズ数が 2500～55000 の広範囲にわたって試験結果をよく再現することが確認された。よって、大型バンドル体系に対する本解析手法の燃料集合体内温度分布の予測能力が妥当であることが確認できた。

*1 大洗工学センター 安全工学部 原子炉工学室

*2 株式会社エヌデーター

PNC TN9410 97-044
April, 1997

Development of Multi-dimensional Thermal-hydraulic Modeling using Mixing Factors
for Wire Wrapped Fuel Pin Bundles in Fast Reactors

— Validation through A Sodium Experiment of 169-Pin Fuel Subassembly —

M. Nishimura ^{*1}, Y. Miyake ^{*2}, H. Kamide ^{*1}

Abstract

Temperature distributions in fuel subassemblies of fast reactors interactively affect heat transfer from center to outer region of the core (inter-subassembly heat transfer) and cooling capability of an inter-wrapper flow, as well as maximum cladding temperature. The prediction of temperature distribution in the subassembly is, therefore one of the important issues for the reactor safety assessment.

Mixing factors were applied to multi-dimensional thermal-hydraulic code AQUA to enhance the predictive capability of simulating maximum cladding temperature in the fuel subassemblies. In the previous studies, this analytical method had been validated through the calculations of the sodium experiments using driver subassembly test rig PLANDTL-DHX with 37-pin bundle and blanket subassembly test rig CCTL-CFR with 61-pin bundle. The error of the analyses were comparable to the error of instrumentation's. Thus the modeling was capable of predicting thermal-hydraulic field in the middle scale subassemblies.

Before the application to large scale real subassemblies with more than 217 pins, accuracy of the analytical method have to be inspected through calculations of sodium tests in a large scale pin bundle. Therefore, computations were performed on sodium experiments in the relatively large 169-pin subassembly which had heater pins sparsely within the bundle.

The analysis succeeded to predict the experimental temperature distributions. The errors of temperature rise from inlet to maximum values were reduced to half magnitudes by using mixing factors, compared to those of analyses without mixing factors. Thus the modeling is capable of predicting the large scale real subassemblies.

*1 Reactor Engineering Section, Safety Engineering Division, O-arai Engineering Center, PNC

*2 NDD Corp.

目 次

	頁
1. 序 論	1
2. 169ピン集合体定常ナトリウム試験	3
2.1 試験概要	3
2.2 試験装置	3
2.3 試験条件	3
3. 解析条件	4
3.1 メッシュ分割図	4
3.2 多孔率および透過率の規定	4
3.3 流動抵抗要素の規定	4
3.4 伝熱構造体の規定	4
3.5 ミキシング係数モデル	4
3.6 数値解析手法	5
3.7 解析ケース	5
4. 結果と考察	6
5. 結 論	8
謝 辞	9
参考文献	10

表リスト
List of Tables

表 2.1 燃料集合体形状データ

Table 2.1 Specifications of 169-Pin Fuel Subassembly

表 3.1 バンドル部軸方向摩擦係数相関式一覧

Table 3.1 Correlation Equations of Bundle Friction Factors

表 3.2 解析ケース一覧

Table 3.2 List of Computational Cases

図リスト
List of Figures

図 2.1 169 ピンバンドル水平断面の概略図

Fig. 2.1 Horizontal Cross Sectional Schema of 169-Pin Bundle

図 2.2 169 ピンバンドル鉛直断面の概略図

Fig. 2.2 Vertical Cross Sectional Schema of 169-Pin Bundle

図 2.3 試験ループ系統概略図

Fig. 2.3 Schematic Diagram of Mixing Test Loop

図 3.1 メッシュ分割図（169 ピンフルバンドル）

Fig. 3.1 Mesh Arrangement for 169-Pin Full Bundle

図 3.2 X 方向透過率のスタガードハーフピンメッシュへの適用

Fig. 3.2 Permeability in X-direction

図 3.3 Y 方向透過率のスタガードハーフピンメッシュへの適用

Fig. 3.3 Permeability in Y-direction

図 3.4 Z 方向透過率のスタガードハーフピンメッシュへの適用

Fig. 3.4 Permeability in Z-direction

図 3.5 流動抵抗設定時のメッシュ分類

Fig. 3.5 Mesh Categorization for Friction Factor Correlations

図 3.6 169 ピンバンドル内部サブチャンネルの摩擦係数

Fig. 3.6 Inner-subchannel Friction Factor for 169-Pin Bundle

図 3.7 169 ピンバンドル周辺サブチャンネルの摩擦係数

Fig. 3.7 Outer-subchannel Friction Factor for 169-Pin Bundle

図 3.8 169 ピンバンドルコーナーサブチャンネルの摩擦係数

Fig. 3.8 Corner-subchannel Friction Factor for 169-Pin Bundle

図 3.9 ミキシング係数モデル設定時のメッシュ分類

Fig. 3.9 Mesh Categorization for Mixing Factors

図 3.10 発熱ヒータピン位置 タイプ 1 (Case : MCH7-1789ABC)

Fig. 3.10 Heating Pattern Type 1

図 3.11 発熱ヒータピン位置 タイプ 2 (Case : MCH7-12379AC)

Fig. 3.11 Heating Pattern Type 2

図 3.12 発熱ヒータピン位置 タイプ 3 (Case : MCH3-17C)

Fig. 3.12 Heating Pattern Type 3

図 4.1 水平面温度分布のトラバースライン (Case : MCH7-1789ABC)

Fig. 4.1 Temperature Traverse Lines in The Horizontal Plane

図 4.2 発熱上端部における温度分布の比較 (Case : MCH7-1789ABC-02A)

Fig. 4.2 Comparison of Temperature Distributions at The Top End of The Heated Section

図 4.3 発熱上端部におけるミキシング係数の有無による温度分布の比較 (Case : MCH7-1789ABC-03A)

Fig. 4.3 Comparison of Temperature Distributions at The Top End of The Heated Section with and without Mixing Factors

図 4.4 発熱上端部における温度分布の比較 (Case : MCH7-1789ABC-05A)

Fig. 4.4 Comparison of Temperature Distributions at The Top End of The Heated Section

図 4.5 発熱上端部における温度分布の比較 (Case : MCH7-1789ABC-08A)

Fig. 4.5 Comparison of Temperature Distributions at The Top End of The Heated Section

図 4.6 軸方向温度分布の着目サブチャンネル (Case : MCH7-1789ABC)

Fig. 4.6 Position of The Sub-channel along which Axial Temperature Profile was Plotted

図 4.7 軸方向温度分布の比較 (Case : MCH7-1789ABC-02A)

Fig. 4.7 Comparison of Axial Temperature Profiles

図 4.8 軸方向温度分布の比較 (Case : MCH7-1789ABC-03A)
Fig. 4.8 Comparison of Axial Temperature Profiles

図 4.9 軸方向温度分布の比較 (Case : MCH7-1789ABC-05A)
Fig. 4.9 Comparison of Axial Temperature Profiles

図 4.10 軸方向温度分布の比較 (Case : MCH7-1789ABC-08A)
Fig. 4.10 Comparison of Axial Temperature Profiles

図 4.11 水平断面温度分布のトラバースライン (Case : MCH7-12379AC)
Fig. 4.11 Temperature Traverse Lines in The Horizontal Plane

図 4.12 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)
Fig. 4.12 Comparison of Temperature Distributions at The Top End of The Heated Section with and without Mixing Factors

図 4.13 軸方向温度分布の着目サブチャンネル (Case : MCH7-12379AC)
Fig. 4.13 Position of The Sub-channel along which Axial Temperature Profile was Plotted

図 4.14 軸方向温度分布の比較 (Case : MCH7-12379AC-01A)
Fig. 4.14 Comparison of Axial Temperature Profiles

図 4.15 水平断面温度分布のトラバースライン (Case : MCH3-17C)
Fig. 4.15 Temperature Traverse Lines in The Horizontal Plane

図 4.16 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 : MCH3-17C-01A)
Fig. 4.16 Comparison of Temperature Distributions at The Top End of The Heated Section with and without Mixing Factors

図 4.17 軸方向温度分布の着目サブチャンネル (Case : MCH3-17C)
Fig. 4.17 Position of The Sub-channel along which Axial Temperature Profile was Plotted

図 4.18 軸方向温度分布の比較 (Case : MCH3-17C-01A)
Fig. 4.18 Comparison of Axial Temperature Profiles

記号表

D_{eb} : 燃料集合体平均の水力等価直径 (m)

k : 熱伝導率 {W/(mK)}

Nu : Nusselt 数

Pe : Peclet 数 = Re·Pr (-)

Pr : Prandtl 数 (-)

Re : 燃料集合体平均の Reynolds 数 = $V_b D_{eb} / \nu$ (-)

V_b : 燃料ピン束平均軸方向速度成分 (m/s)

ρ : サブチャンネル内冷却材の密度 (kg/m³)

ν : 動粘性係数 (m²/s)

1. 序 論

高速炉の信頼性、安全性をさらに高める上で、原子炉固有の性質を活用することは重要である。自然循環による崩壊熱除去は、冷却材温度差がもたらす浮力により冷却材を駆動して炉心の熱を冷却器へと輸送するものであり、ポンプ等の動力源を必要とする機器に依存しないことから、故障による影響を受けない利点を持っている。この自然循環を活用することにより崩壊熱除去機能の信頼性を高めることが出来る。そして自然循環による崩壊熱除去を確立する上で、燃料集合体内温度分布を高精度で予測することは、燃料被覆管の構造健全性確保の観点から重要な技術課題である。

自然循環崩壊熱除去時には、炉心通過流量が減少し流速が低下することに伴って浮力の効果が顕在化する。その結果、集合体間および集合体内サブチャンネル間の流量再配分や、ピン表面の加熱に誘起される自然対流により発生するthermal plumeによる冷却材の混合が生じる^[1]。さらに、上部プレナムに浸漬された炉内冷却器(DHX: Direct Heat Exchanger)により崩壊熱が除去される場合には、DHXから流出した低温冷却材の、低発熱集合体への潜り込みあるいは低発熱集合体における逆流の発生、およびラッパ管同士のギャップ部への沈降とインターラッパフローの発生が実験により確認されている^[2]。これらの集合体間および炉心ープレナム間の相互作用、ならびに炉心槽内の熱流動現象は、極めて複雑かつ多次元的要素を有している。従って自然循環時に発生する様々な現象を一括して評価するためには、多次元熱流動解析の適用が不可欠である。

このような背景から、炉心および上部プレナムに対する多次元解析手法開発の一環として、集合体間熱移行を伴う燃料集合体内の温度分布を高精度で模擬するための解析手法を開発してきた^{[3],[4],[5]}。これまでの研究では、単相流多次元熱流動解析コードAQUA^[6]にサブチャンネル間の混合効果を考慮するためのミキシング係数^{[1],[7]}を導入し、ナトリウム実験を対象とした検証解析を実施してきた。すなわち、60万kWe級大型炉のプランケット集合体を模擬した61ピン集合体1体および19ピン集合体2体を持つCCTL-CFR^[4]、および大型炉の炉心燃料集合体を約1/2の大きさで模擬した37ピン集合体1体および7ピン集合体6体を備えるPLANDTL-DHX^[2]の2種類のナトリウム伝熱流動試験体の実験解析を通じて解析手法の適用性を評価してきた。その結果、インターラッパフローの無い条件における定格および自然循環を模擬した定常試験および定格から自然循環へと移行するスクラム時の過渡を模擬した試験結果を高精度で再現出来ることを確認した^{[3],[4],[5]}。従って本解析手法は中規模のピン束を持つ集合体については検証済みである。

一方で、大型炉の燃料集合体は217～279ピン束程度の大きさを有しており、本手法の大型バンドル体系への適用性を評価する必要がある。そこで本研究では今後の実機評価に備えて、169ピン束からなる部分発熱燃料集合体のナトリウム実験を対象にした検証解析を実施した。解析対象とした試験体では、169本の模擬燃料ピンの内12本

を電気ヒータにより発熱させることが可能である。この部分発熱という点において、一様発熱の実機よりも冷却材の混合過程をより正確に模擬できなければ高精度の解析は不可能であり、難易度の高い解析対象と言える。本検証解析において実験と解析との一致が得られたならば、ピン配列の異なる37ピン束、61ピン束、および169ピン束について本解析手法のバンドルサイズによらない広い適用性を示すことが出来、実機にも適用可能と判断される。よって、本検証を通して実機燃料集合体熱流動解析手法の確立に資することとする。

2. 169ピン集合体定常ナトリウム試験

2.1 試験概要

本試験は動力炉・核燃料開発事業団 大洗工学センターにおいて1976年に実施された。試験体は「もんじゅ」の燃料集合体を模擬しており、試験目的は冷却材の混合効果を調べ、設計評価のための解析に使用するミキシング係数を得ることにあつた。したがつて、試験は「もんじゅ」の運転範囲を勘案して設定された。具体的な試験条件は後述するが、試験における冷却材の流動様式は低流量時は遷移域に、高流量時は乱流域に相当する。また、低流量時においてはヒーターピンの加熱による浮力と強制循環による慣性力との両者が作用する共存対流となり、高流速時には強制対流となる。この点で、解析には、遷移流一乱流、および共存対流一強制対流の複合した、かつ多種の流動様式に対応した適切なモデル化が要求される。

2.2 試験装置

試験体は実寸大ヒーターピン付模擬燃料集合体である。表2.1に集合体の形状データを、図2.1に集合体の水平断面図を、図2.2に鉛直断面を示す。本集合体はワイヤー巻き模擬燃料ピン169本からなり、ヒーターピン12本、熱電対装着ピン55本、ダミーピン102本で構成される。ヒーターピン1本当たりの発熱量は30kW/pinであり、軸方向発熱分布は一様で発熱長は930mmである。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出来るピン本数は7本までである。

図2.3に試験装置の系統図を示す。主循環ループはバルブの切り換えにより「常陽」および「もんじゅ」燃料集合体のミキシング試験が行えるようになっている。試験条件は下記のループ性能の制約を受ける。

ポンプ	: 1200 l/min
試験部設計温度	: 600°C
電磁流量計最高使用	: 500°C

試験体入口流量は直流励磁式電磁流量計により測定され、この流量計は本ループの膨張タンクを用いた落下法により絶対校正された。

2.3 試験条件

試験条件は、線出力25～267 W/cm、流量50～1200 l/minおよび入口温度200～500°C の範囲に設定された。実施された試験条件における無次元数の範囲は $Re = 2,500 \sim 55,000$ 、 $Pe = 13 \sim 280$ である。なお解析手法の検証に取り上げた試験ケースとその条件は表3.2 に解析ケースと併記したのでそちらを参照願いたい。

3. 解析条件

3.1 メッシュ分割

水平断面のメッシュ分割法に1メッシュに1サブチャンネルが内包されるスタガードハーフピンメッシュ分割を適用した^[8]。軸方向のメッシュ分割については、発熱部は熱電対の位置とメッシュ境界が一致するように、非発熱部に関してはメッシュ幅が同一になるように分割している。メッシュ分割図を図3.1に示す。

3.2 多孔率および透過率の規定

多孔率、軸方向および径方向の透過率に関しては、形状に即した値を各メッシュに設定している。各メッシュにおける多孔率および透過率を図3.2～3.4に示す。

3.3 流動抵抗要素の規定

流動抵抗要素の規定は軸方向のみとし、径方向の流動抵抗は規定しない。

燃料集合体の軸方向流動抵抗の規定は、MITから公表されている燃料集合体摩擦圧力損失の式（Cheng and Todreas の式^[7]）を各サブチャンネル毎に与えている。尚、今回、行った試験解析では、試験部の平均レイノルズ数が2500を下回るケースがないので、遷移域の式を線形補間したものと乱流の式を解析モデルに適用している。

各サブチャンネルの摩擦係数の式を表3.1に、各サブチャンネルのメッシュ分類を図3.5に示す。また、各サブチャンネルの摩擦係数とレイノルズ数の相関グラフを図3.6～3.8に示す。

3.4 伝熱構造体の規定

伝熱要素は発熱ヒーターピンに適用し、伝熱相関式は Subbotin^[9] の式、

$$Nu = 5.0 + 0.025 \cdot Pe^{0.8}$$

を使用した。

3.5 ミキシング係数モデル

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^{[1], [7]}を適用した。AQUAコードへの組み込みおよび適用の詳細は参考文献[4]に記載されている。したがって、試験から得られたミキシング係数は使用していない。

ミキシング係数モデル適用時の169ピン集合体における内部、周辺サブチャンネルのメッシュ分類を図3.9に示す。

3.6 数値解析手法

数値解析手法を以下に示す。

座 標	: デカルト座標系
時間積分	: 1次精度オイラー陰解法 (完全陰解法) ^[10]
数値計算アルゴリズム	: SIMPLEST-ANL ^[11]
離散化オプション	: 運動量計算式 · · · · Upwind ^[10] エネルギー計算式 · · · Upwind
個体壁境界条件	: Free Slip (各サブチャンネル毎に流動抵抗式を用いたため)
入口境界条件	: 水平断面内均一流速 水平断面内均一温度
出口境界条件	: 出口セルにおいて質量保存則が成り立つように 出口流速を反復計算毎に設定

3.7 解析ケース

表3.2に解析ケースを、図3.10～3.12に各ケースの発熱ヒーターピンの位置を示す。

解析対象の試験条件は定格からその5%に相当する流量条件を包含しており、流動様式としては慣性力が支配的な強制対流域から、慣性力と浮力の影響が同時に存在する共存対流域に相当する。また、一部の解析ケースについてはミキシング係数の有無による計算結果の比較を実施した。

4. 結果と考察

ミキシング係数モデルを導入したAQUA定常試験解析の結果より、各試験ケースの発熱部上端断面における温度分布および軸方向温度分布を以下の図に示す。尚、試験ケースMCH7-1789ABC-03A、MCH7-12379AC-03A、MCH3-17C-01Aに関してはミキシング係数モデルを適用しない場合の解析結果との比較も行っている。

図4.1水平断面温度分布のトラバースライン (Case MCH7-1789ABC)

図4.2発熱上端部における温度分布の比較 (Case MCH7-1789ABC-02A)

図4.3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 MCH7-1789ABC-03A)

図4.4発熱上端部における温度分布の比較 (Case MCH7-1789ABC-05A)

図4.5発熱上端部における温度分布の比較 (Case MCH7-1789ABC-08A)

図4.6軸方向温度分布の着目サブチャンネル (Case MCH7-1789ABC)

図4.7軸方向温度分布の比較 (Case MCH7-1789ABC-02A)

図4.8軸方向温度分布の比較 (Case MCH7-1789ABC-03A)

図4.9軸方向温度分布の比較 (Case MCH7-1789ABC-05A)

図4.10軸方向温度分布の比較 (Case MCH7-1789ABC-08A)

図4.11水平断面温度分布のトラバースライン (Case MCH7-12379AC)

図4.12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)

図4.13軸方向温度分布の着目サブチャンネル (Case MCH7-12379AC)

図4.14軸方向温度分布の比較 (Case MCH7-12379AC-01A)

図4.15水平断面温度分布のトラバースライン (Case MCH3-17C)

図4.16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 MCH3-17C-01A)

図4.17軸方向温度分布の着目サブチャンネル (Case MCH3-17C)

図4.18軸方向温度分布の比較 (Case MCH3-17C-01A)

試験ケースMCH7-1789ABCに関して、ミキシング係数モデルを導入した解析結果は集合体内の平均レイノルズ数が4300～53000の範囲で水平断面の温度勾配を試験結果よりもやや平坦化する傾向にあるが、径方向の部分発熱という難しい条件下にも関わらず試験結果をよく再現している（図4.2～4.5参照）。また図4.3に示すように、ミキシング係数モデル導入による効果はミキシング係数モデルを適用しない場合の径方向温度勾配の過大評価を解消し、より試験結果に近い温度分布を表している。今回の解析ケースを通して、発熱上端断面内最高温度と入口温度との差に関する解析の実験に対する誤差は、ミキシング係数有りおよび無しに対してそれぞれ、25%以下およ

び最大96%である。軸方向の温度分布についても解析は実験結果を良く再現している(図4.8~4.10参照)。ただし、図中に○で示したmesh 2の実験の温度分布において特に顕著に見られるような、ノコ歯状の温度の上下変動は解析では再現されていない。この実験の温度変動はスワールの効果によるものである。すなわち、発熱ピンで加熱された冷却材はそのピンのスペーサワイヤ下部に沿って上昇して行くためその部分が特に高温となる。他方、非発熱隣接ピンのスペーサワイヤの下部に位置する部分は低温部を形成する。実験結果のノコ歯状温度分布はこの結果である。この効果は、スワール流の水平方向成分とその方向を直接模擬しない限り解析では再現できない。本研究で採用しているMITのミキシング係数モデルでは、スワールの混合効果を等方拡散過程に置き換えて模擬しているため方向性が無く、その結果解析の軸方向温度分布は発熱部において単調増加を示している。先の水平断面温度分布における解析の誤差は、単にミキシング係数モデルが過度に温度分布を平坦化していることよりも、むしろスワールによる混合の方向性を無視したことによる起因したと考えられる。従って実機評価においては、本実験のような極端な水平断面内の発熱分布はあり得ず、ほぼ一様に発熱しているので、本検証解析結果よりも高精度の予測が可能である。

試験ケースMCH7-12379AC-03A ($Re=55000$)、MCH3-17C-01A ($Re=2650$)についても試験ケースMCH7-1789ABCと同様に、ミキシング係数モデルの導入により温度勾配を急に評価する問題が解消され、試験結果に近い温度分布を形成している。

Case MCH7-17C のTraverse Line 1 {図4.16(a)} を見ると、バンドル中心部の温度がミキシング係数モデルの導入により 10°C 程度下がり試験結果とよく一致していること分かる。また、本ケースのTraverse Line-2における誤差はミキシング係数有りおよび無しの場合に対してそれぞれ18%および44%であった。

169ピン集合体でのミキシング係数モデルを導入した解析結果は、その効果が各試験ケースで顕著に現れ、バンドル平均レイノルズ数が2,500~55,000という広範囲で試験結果をよく再現した。

5. 結 論

集合体間熱移行を伴う燃料集合体の温度分布を高精度で模擬するために、単相流多次元熱流動解析コードAQUAにサブチャンネル間の混合効果を考慮するためのミキシング係数モデルを組込み、その適用性を実験解析により評価した。これまでの研究では、37および61ピン束の模擬燃料集合体ナトリウム実験に対し、本解析手法は計測系と同程度の精度を有することを検証した。

本研究では実機規模の大型燃料集合体に対する本手法の適用性を評価するために、169ピン部分発熱燃料集合体内冷却材混合効果試験を対象に検証解析を実施した。その結果、ミキシング係数モデルを導入することにより同モデルを適用しない時に生じていた径方向温度勾配の過大評価を解消し、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よく再現することが確認できた。ちなみに発熱上端断面内最高温度と入口温度との差に関する解析の最大誤差は、ミキシング係数の使用により、使用しない場合の1/4以下となる。

また、実験結果では少数ピン発熱とスワールフローによる混合の方向性に起因するノコ歯状の軸方向温度分布が生じており、等方拡散過程により混合効果を模擬するミキシング係数モデルではこの点は再現できないが、全ピンがほぼ一様に発熱するものと見なすことができる実機ではこの差異は生じず、今回の検証解析よりも高精度の解析が可能である。

以上の結果により、これまでの37および61ピン束の中規模燃料集合体に加えて、169ピン束の実機規模燃料集合体に対しても本解析手法が有効であることが確認された。

謝 辞

本研究の実施にあたり、原子炉工学室の皆様に有益なる助言を頂きました。ここに改めて感謝の意を表します。

参考文献

- [1] Shih-Kuei Cheng, Tae Sun Ro and N.E.Todreas, " Energy Transfer Mechanism Under Mixed Convection Conditions in LMFBR Wire-Wrapped Bundles ", Proc. of the 3rd Int. Topical Mtg. on Reactor Thermal Hydraulics, Newport USA, Oct. (1985).
- [2] 桃井一光, 林謙二, 西村元彦, 上出英樹, 「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 一 炉心および主冷却系の過渡熱流動現象の解明 一」, PNC TN9410 96-280, 動燃事業団発行, 10月 (1996).
- [3] 西村元彦, 上出英樹, 「ミキシング係数を考慮した集合体内多次元熱流動評価手法の開発」, 日本原子力学会春の年会予稿集, 阪大, C23, (1996).
- [4] 西村元彦, 上出英樹, 大島宏之, 「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, 動燃事業団発行, 10月 (1996).
- [5] 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 一 過渡時の高速炉燃料集合体熱移行現象への適用 一」, 日本原子力学会春の年会予稿集, 東大, F3, (1997).
- [6] 村松壽晴, 「単相流多次元熱流動解析コードAQUAの開発と利用」, 動燃技法, 76号, (1990).
- [7] Shih-Kuei Cheng and Neil E.Todreas, " Hydrodynamic Models and Correlations For Bare and Wire-Wrapped Hexagonal Rod Bundles - Bundle Friction Factors, Subchannel Friction Factors and Mixing Parameters ", Nuclear Engineering and Design, Vol.92, pp.227-251 (1986).
- [8] T.S.Ro et al, "Porous Body Approach for Wire-wrapped rod bundle analysis", Proc.3rd International Topical Meeting on Nuclear Power Plant Thermal Hydraulics and Operations, Seoul, South Korea, Nov.,(1988).
- [9] 伝熱工学資料, 日本機会学会, p.106, (1986).
- [10] S.V. Patankar, "Numerical heat transfer and fluid flow", McGraw Hill, (1980).
- [11] H.M. Domanus, "A new implicit numerical solution scheme in the COMMIX-1A computer program", ANL 83-64, NUREG/CR-3435, (1983).

表 2.1 燃料集合体形状データ

Table 2.1 Specifications of 169-Pin Fuel Subassembly

	169 pin Bundle (mm)
燃料ピン本数	169
燃料ピン配列ピッチ	7.86
燃料ピン外径	6.5
ワイヤーの直径	1.26
ワイヤーの巻きピッチ	306
ラッパ管内対面距離	104.6
炉心長さ	930

表 3.1 バンドル部軸方向摩擦係数相関式一覧

Table 3.1 Correlation Equations of Bundle Friction Factors

サブチャンネル	摩擦係数
内部サブチャンネル	$f_{1L} = \frac{5.2764}{Re^{0.57442}} \quad Re \leq 11526.56$ $f_{1T} = \frac{0.1392}{Re^{0.18}} \quad Re > 11526.56$ $De_1 = 3.12715 \times 10^{-3} (m)$
周辺サブチャンネル	$f_{2L} = \frac{2.3620}{Re^{0.46741}} \quad Re \leq 10775.77$ $f_{2T} = \frac{0.1638}{Re^{0.18}} \quad Re > 10775.77$ $De_2 = 3.85769 \times 10^{-3} (m)$
コーナー サブチャンネル	$f_{3L} = \frac{10.7590}{Re^{0.64109}} \quad Re \leq 7318.27$ $f_{3T} = \frac{0.1778}{Re^{0.18}} \quad Re > 7318.27$ $De_3 = 2.86207 \times 10^{-3} (m)$

表 3.2 解析ケース一覧
Table 3.2 List of Computational Cases

試験ケース	ミキシング 係数モデル	総発熱量 (kW)	入口流量 (l/min)	入口流速 (m/s)	入口温度 (°C)	発熱ピン のタイプ
MCH7-1789ABC-01A	○	13.51	98.85	0.451	393.78	1
MCH7-1789ABC-03A	○ ×	27.45	198.64	0.905	392.28	
MCH7-1789ABC-05A	○	100.14	802.35	3.656	394.64	
MCH7-1789ABC-08A	○	119.18	1200.23	5.470	388.46	
MCH7-12379AC-03A	○ ×	122.90	1220.01	5.560	394.40	2
MCH3-17C-01A	○ ×	6.863	59.83	0.273	392.54	3

ミキシング係数モデル ○：使用

×：未使用

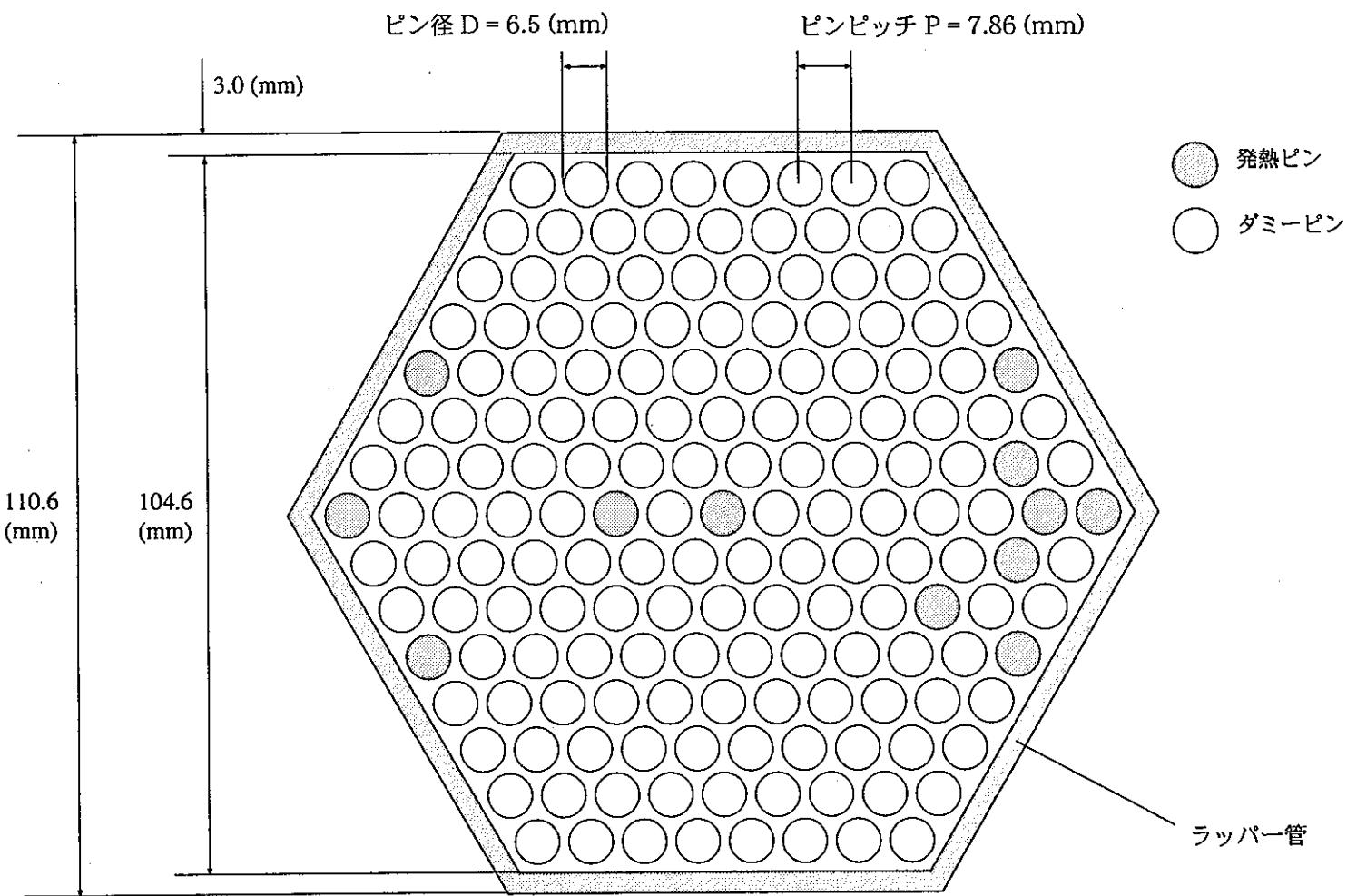


図 2.1 169 ピンバンドル水平断面の概略図

Fig. 2.1 Cross Sectional Schema of 169-Pin Bundle

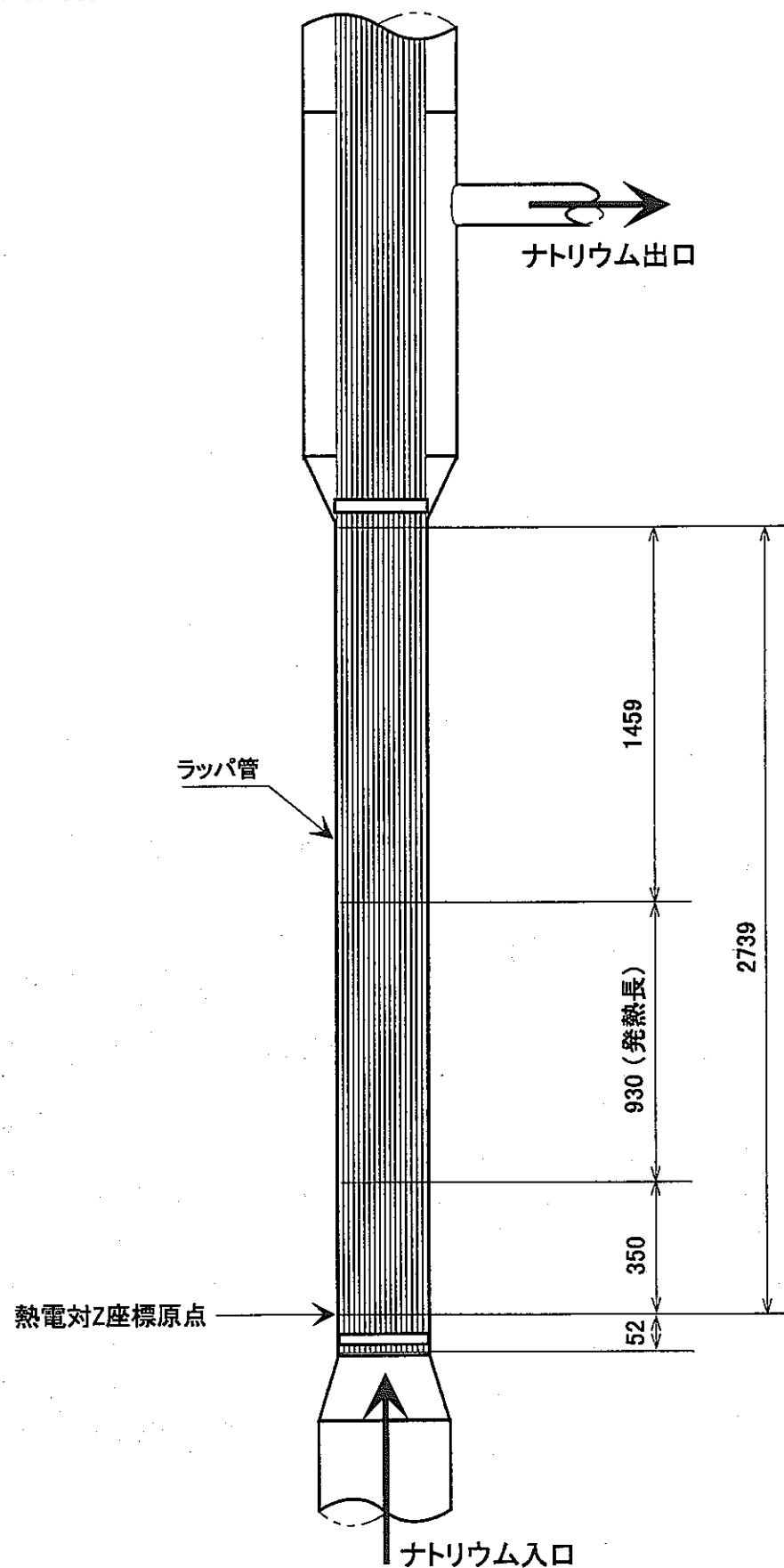


図 2.2 169ピンバンドル鉛直断面の概略図

Fig. 2.2 Vertical Cross Sectional Schema of 169-Pin Bundle

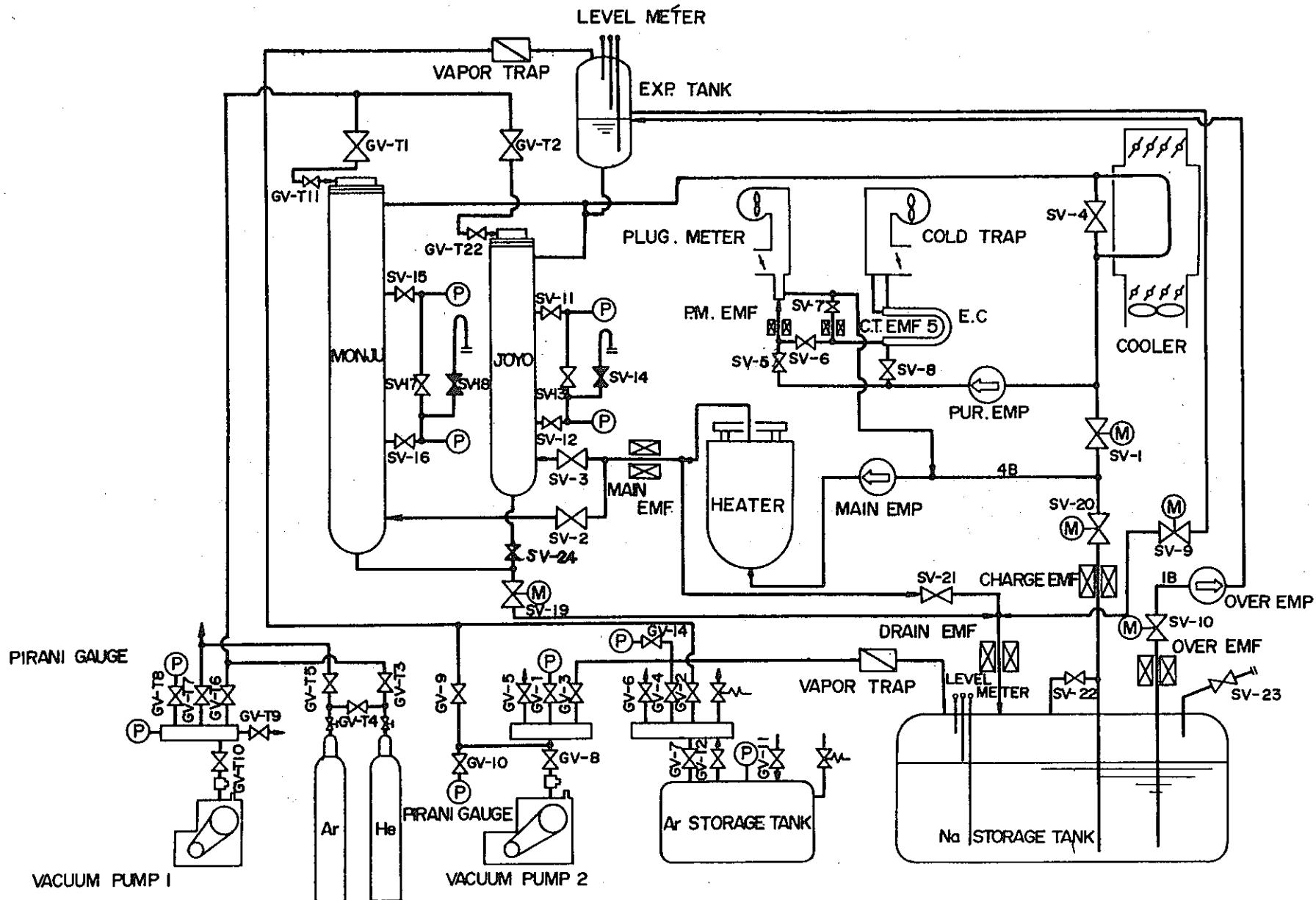
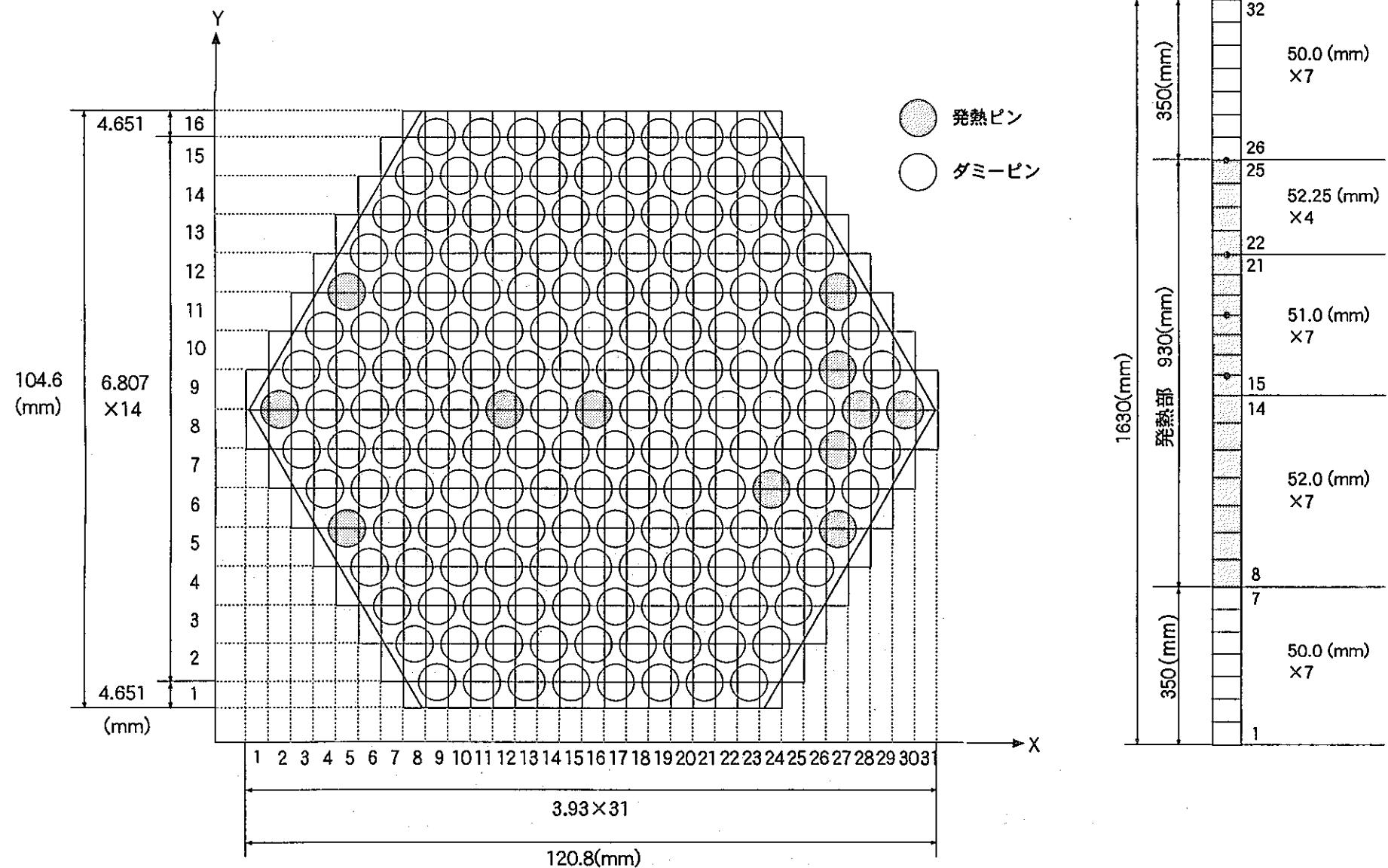


図 2.3 試験ループ系統概略図

Fig. 2.3 Schematic Diagram of Mixing Test Loop



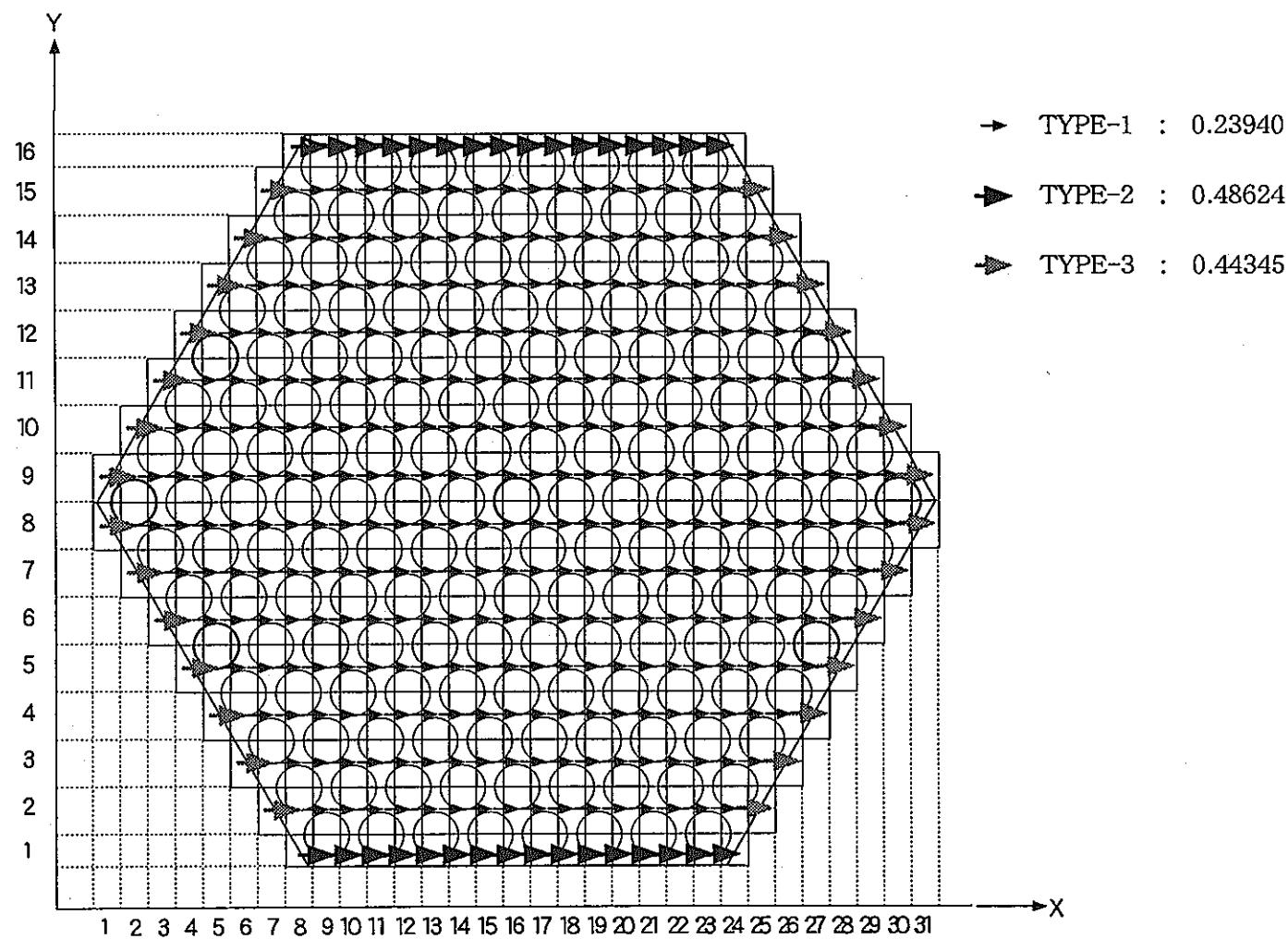


図 3.2 X 方向透過率のスタガードハーフピンメッシュへの適用

Fig. 3.2 Permeability in X-direction

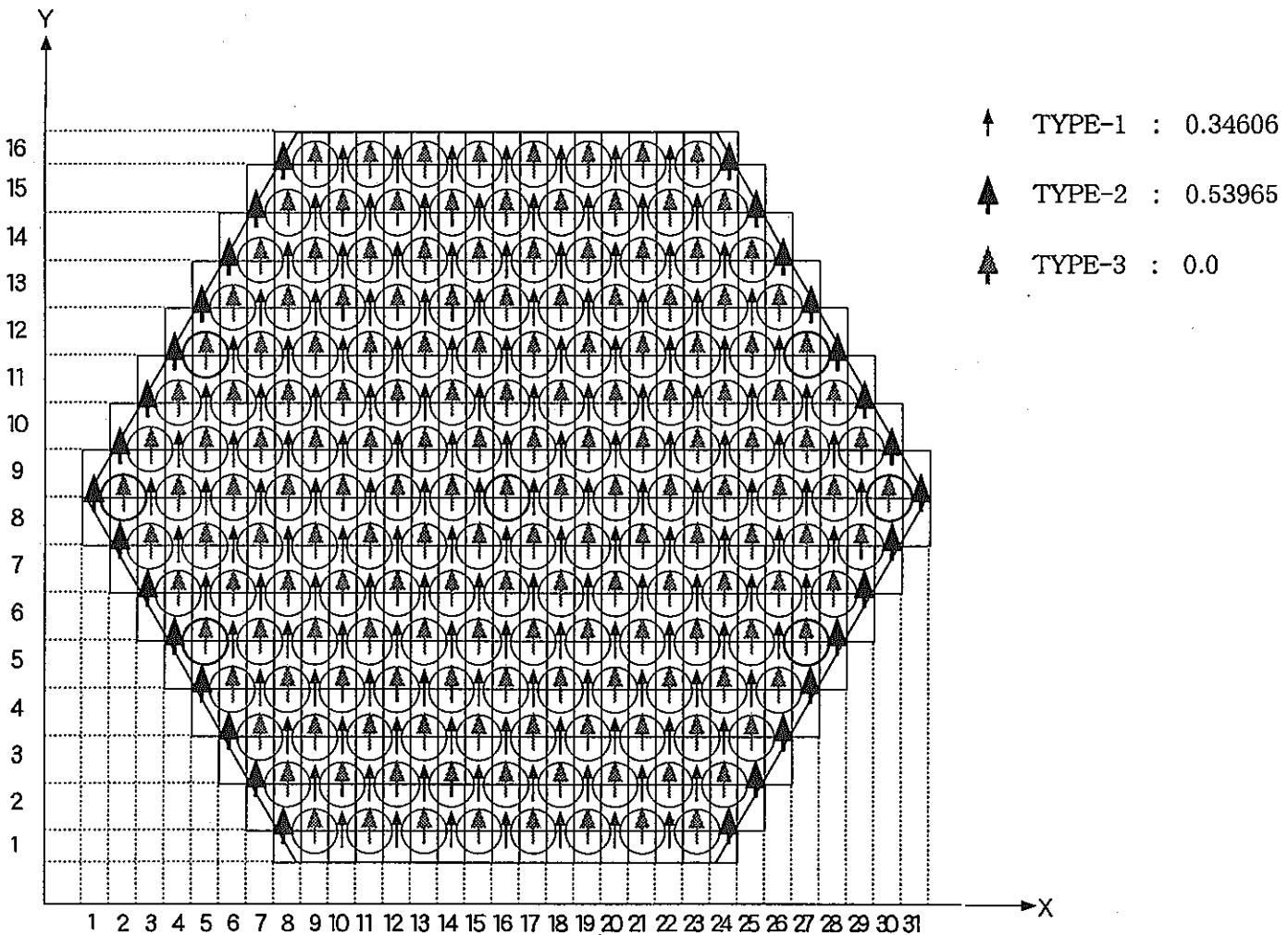


図 3.3 Y 方向透過率のスタガードハーフピンメッシュへの適用

Fig. 3.3 Permeability in Y-direction

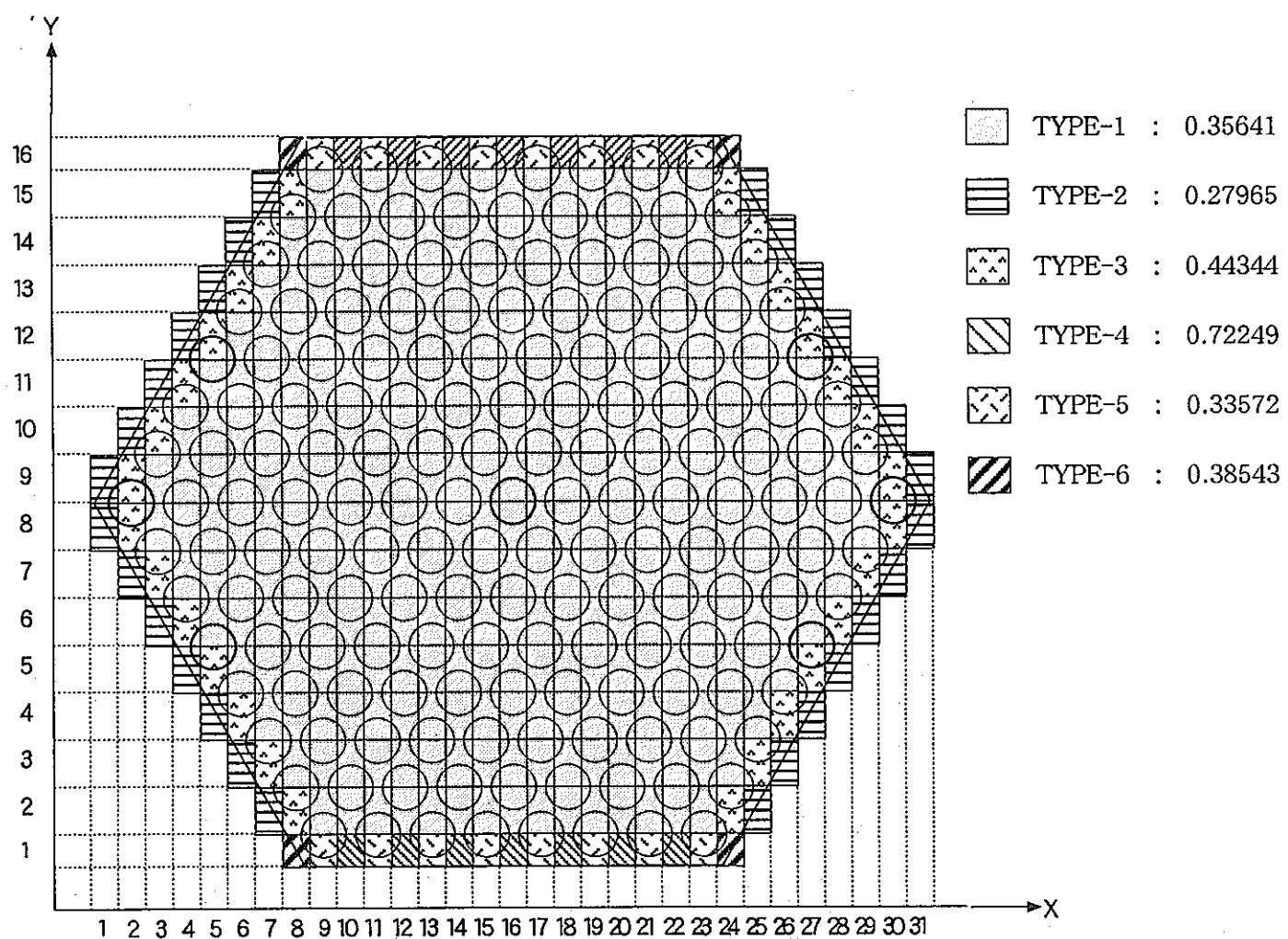


図 3.4 Z 方向透過率のスタガードハーフピンメッシュへの適用
Fig. 3.4 Permeability in Z-direction

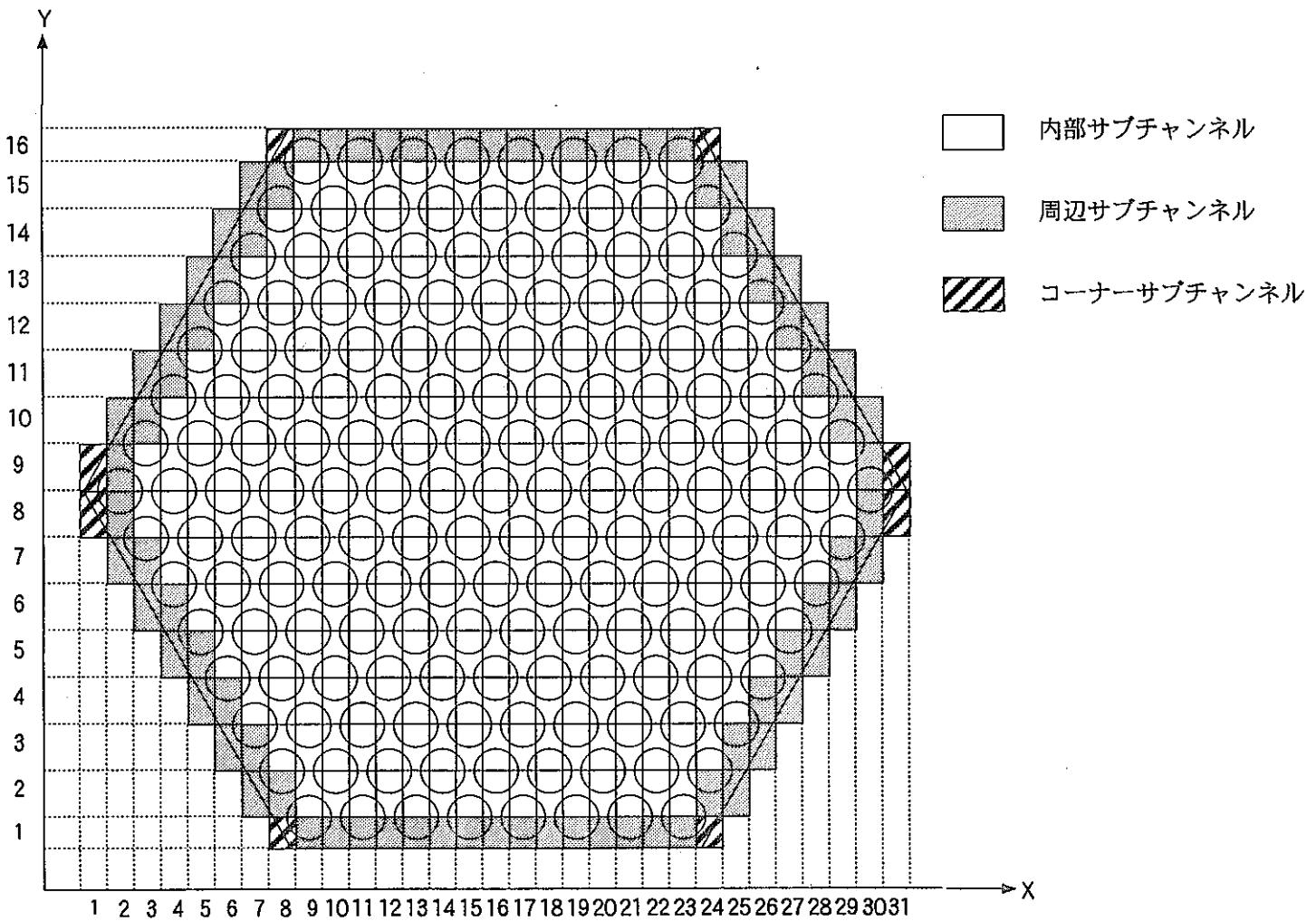


図 3.5 流動抵抗設定時のメッシュ分類
Fig. 3.5 Mesh Categorization for Friction Factor Correlations

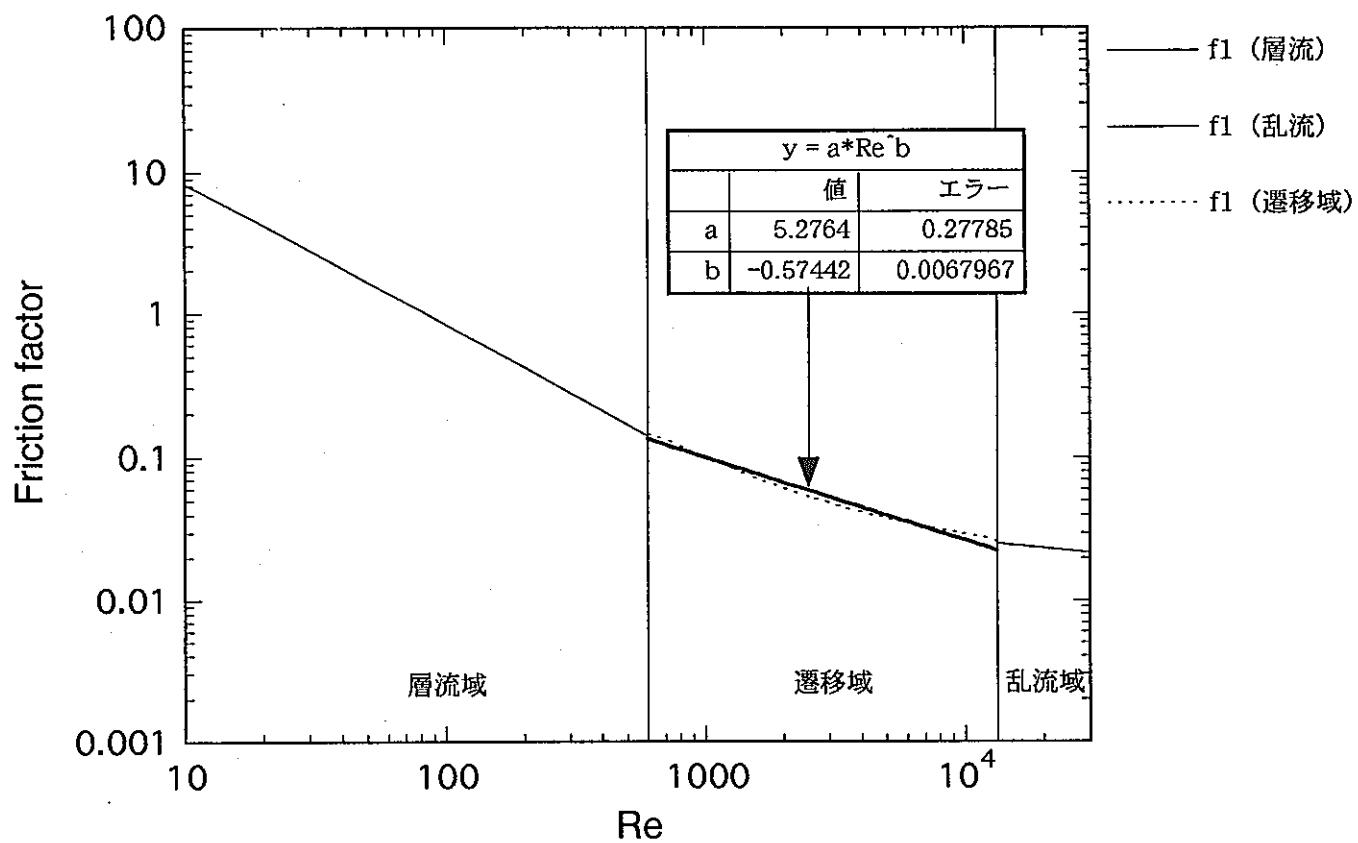


図 3.6 169 ピンバンドル内部サブチャンネルの摩擦係数
Fig. 3.6 Inner-subchannel Friction Factor for 169-Pin Bundle

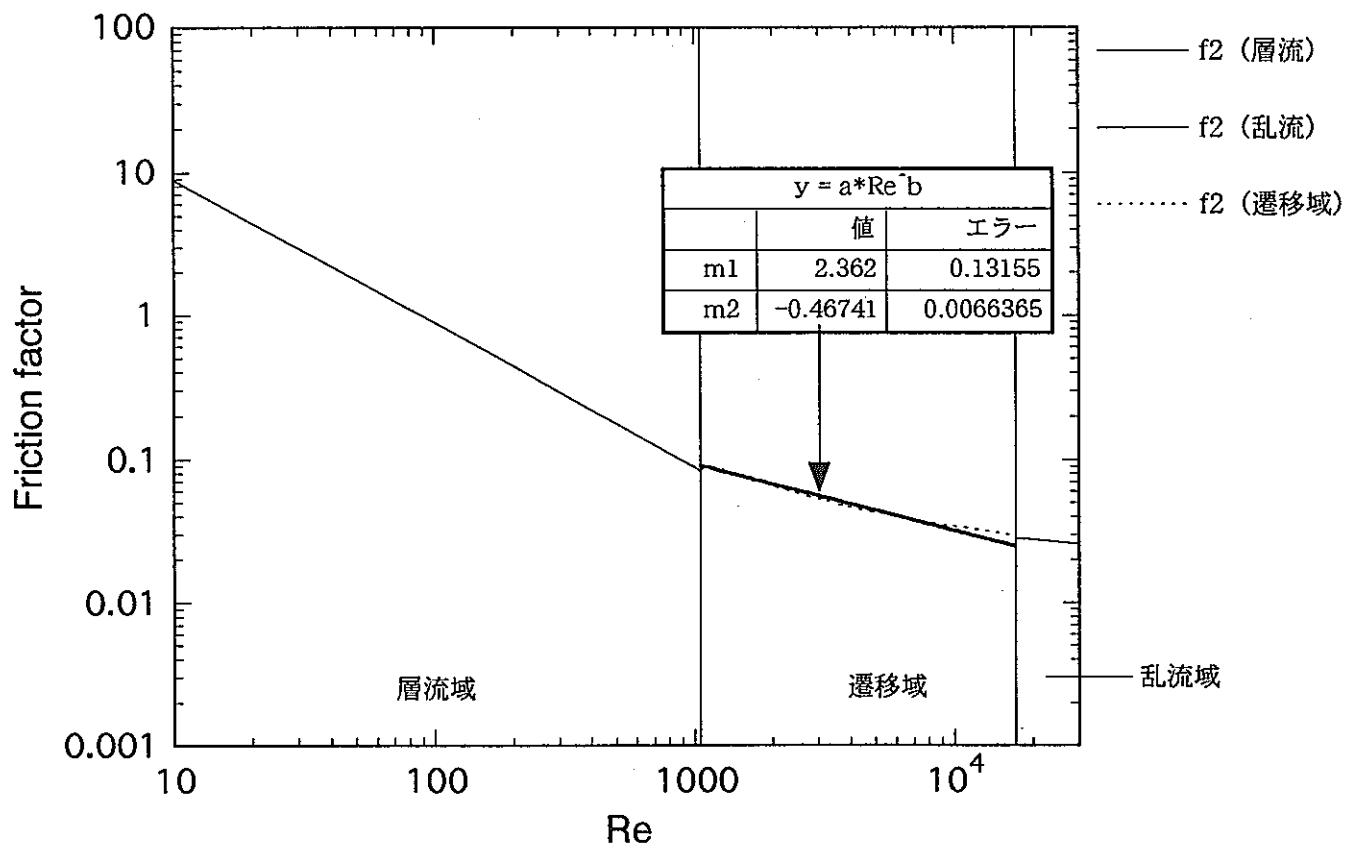


図 3.7 169 ピンバンドル周辺サブチャンネルの摩擦係数
Fig. 3.7 Outer-subchannel Friction Factor for 169-Pin Bundle

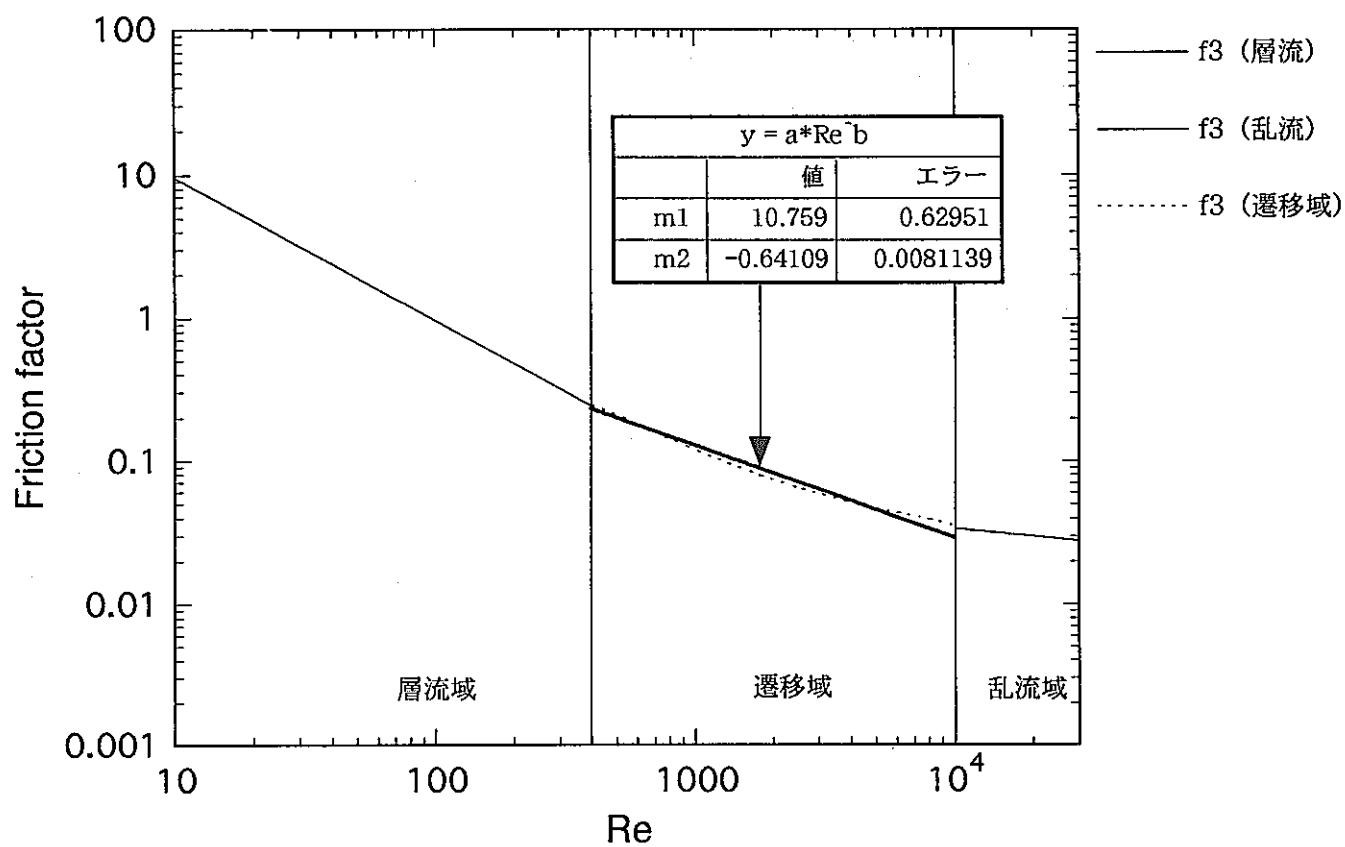


図 3.8 169 ピンバンドルコーナーサブチャンネルの摩擦係数

Fig. 3.8 Corner-subchannel Friction Factor for 169-Pin Bundle

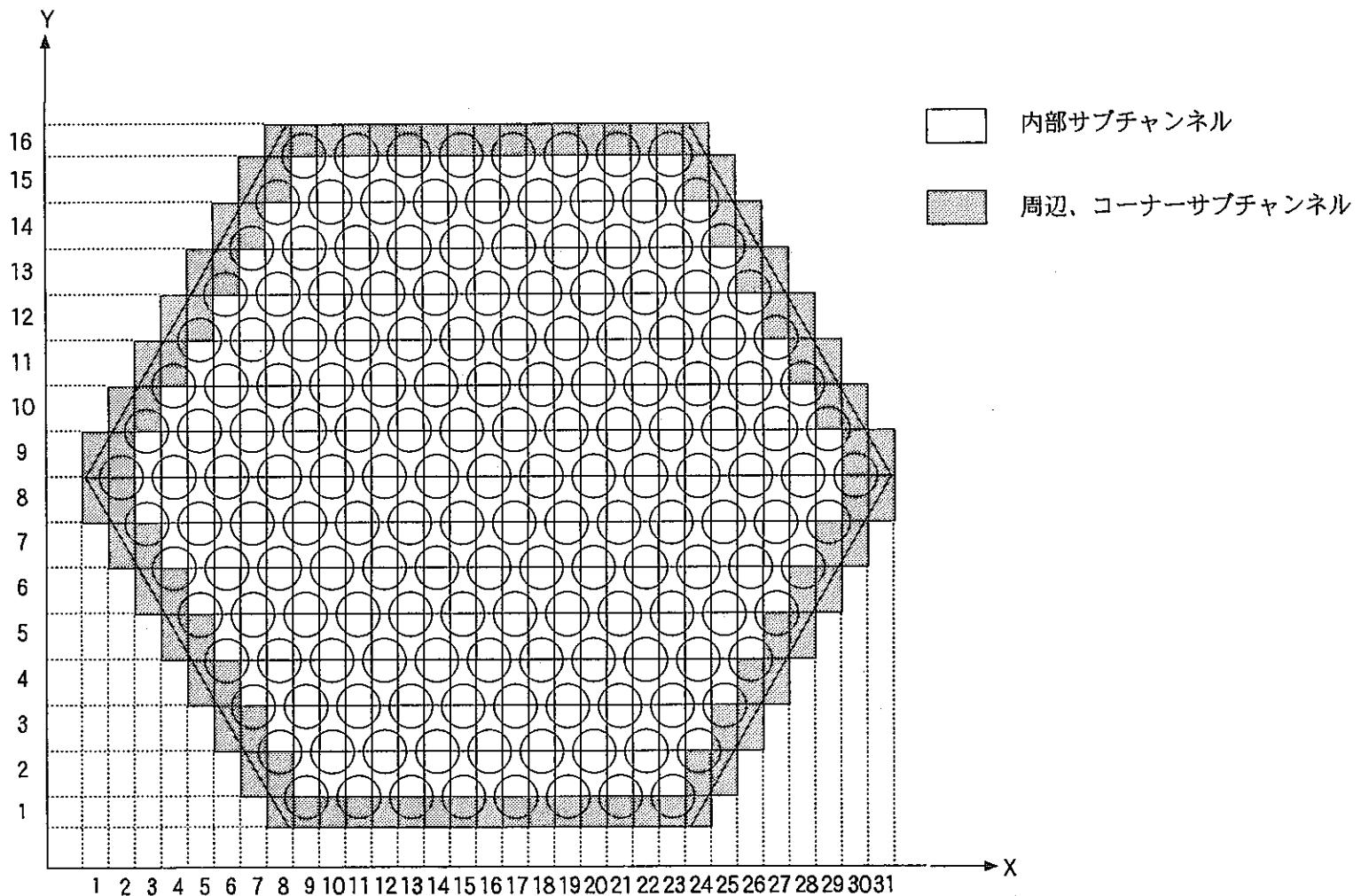


図 3.9 ミキシング係数モデル設定時のメッシュ分類

Fig. 3.9 Mesh Categorization for Mixing Factors

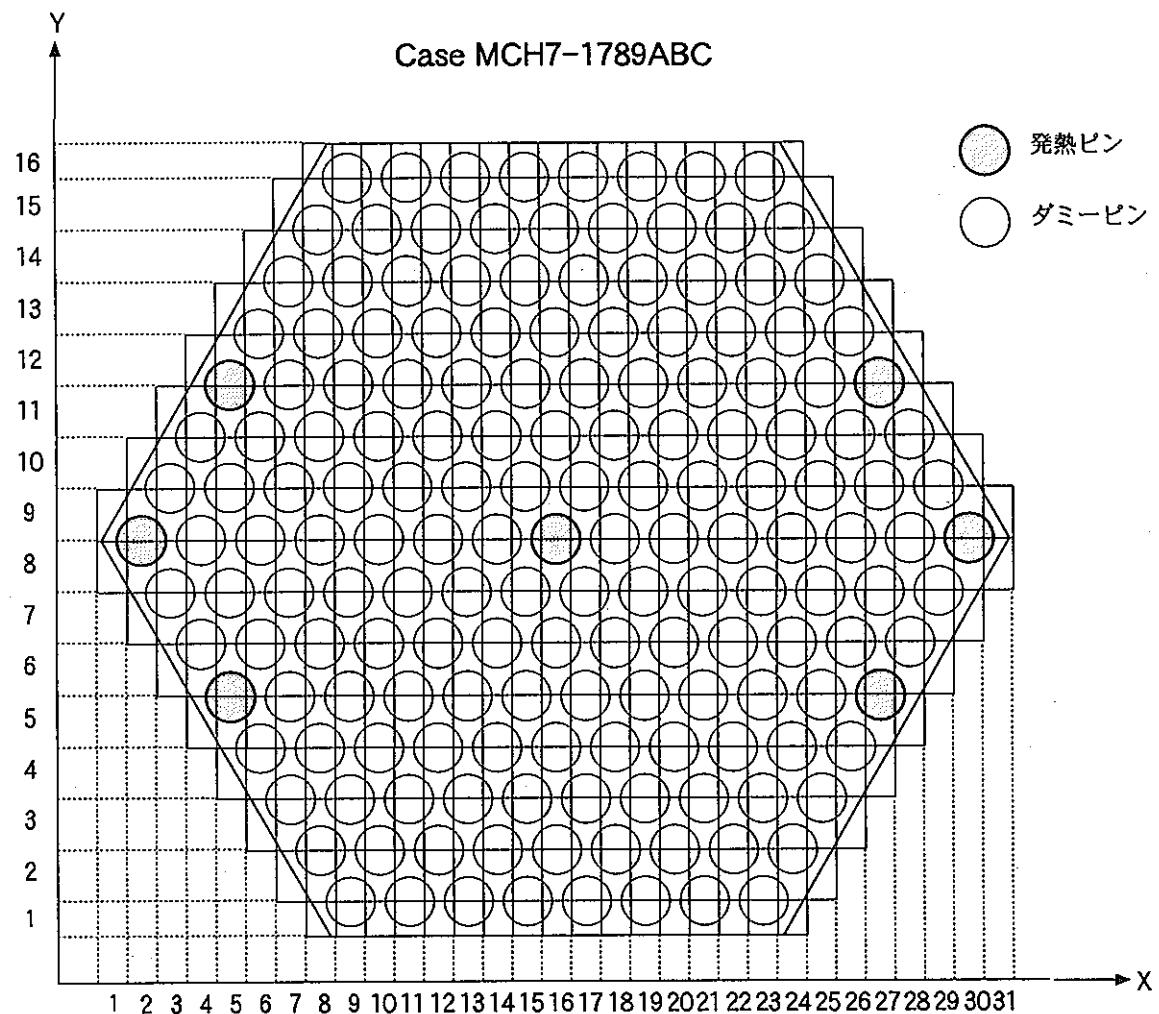


図 3.10 発熱ヒータピン位置 タイプ1 (Case : MCH7-1789ABC)
Fig. 3.10 Heating Pattern Type 1

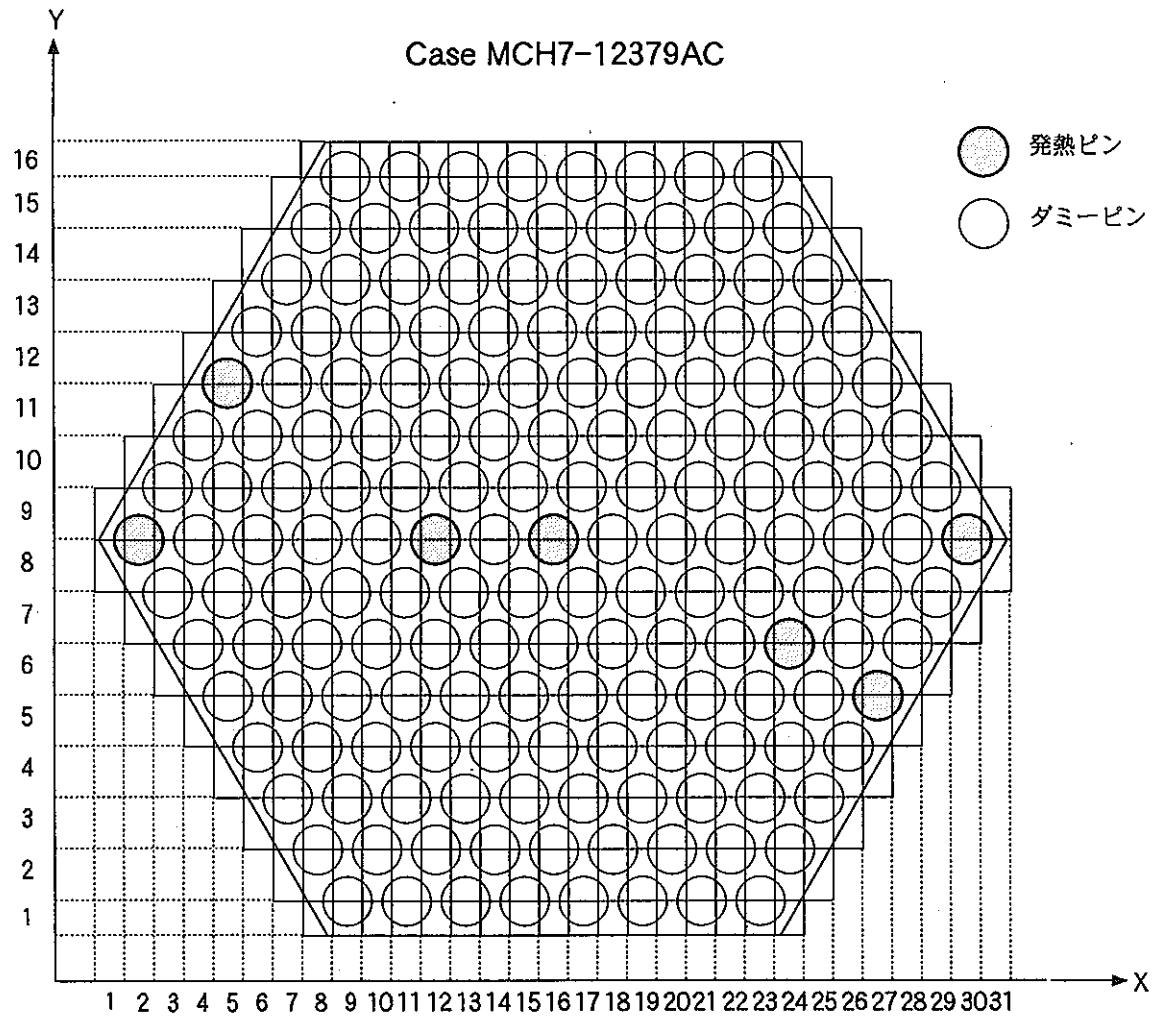


図 3.11 発熱ヒータピン位置 タイプ2 (Case : MCH7-12379AC)
Fig. 3.11 Heating Pattern Type 2

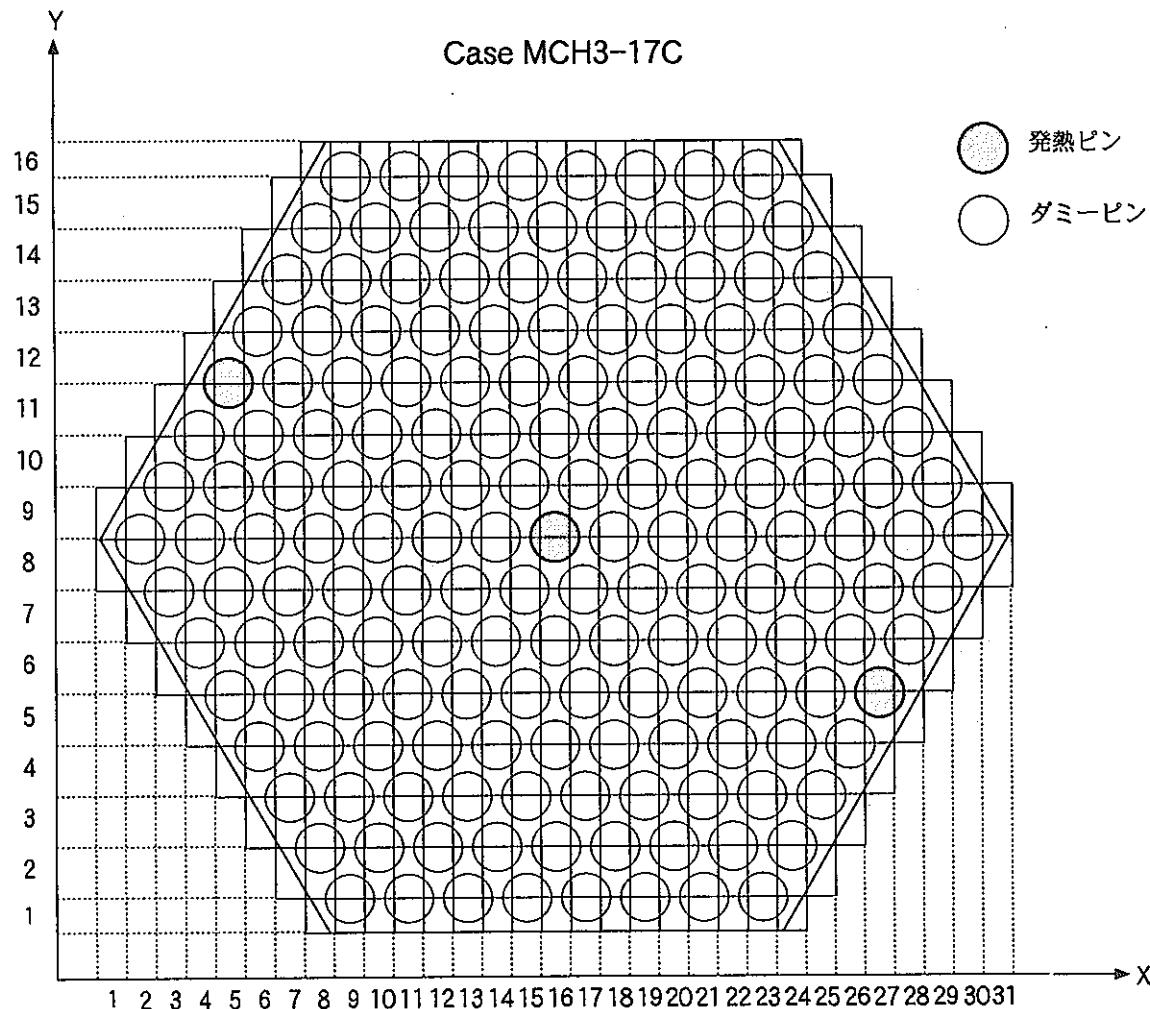


図 3.12 発熱ヒータピン位置 タイプ3 (Case : MCH3-17C)
Fig. 3.12 Heating Pattern Type 3

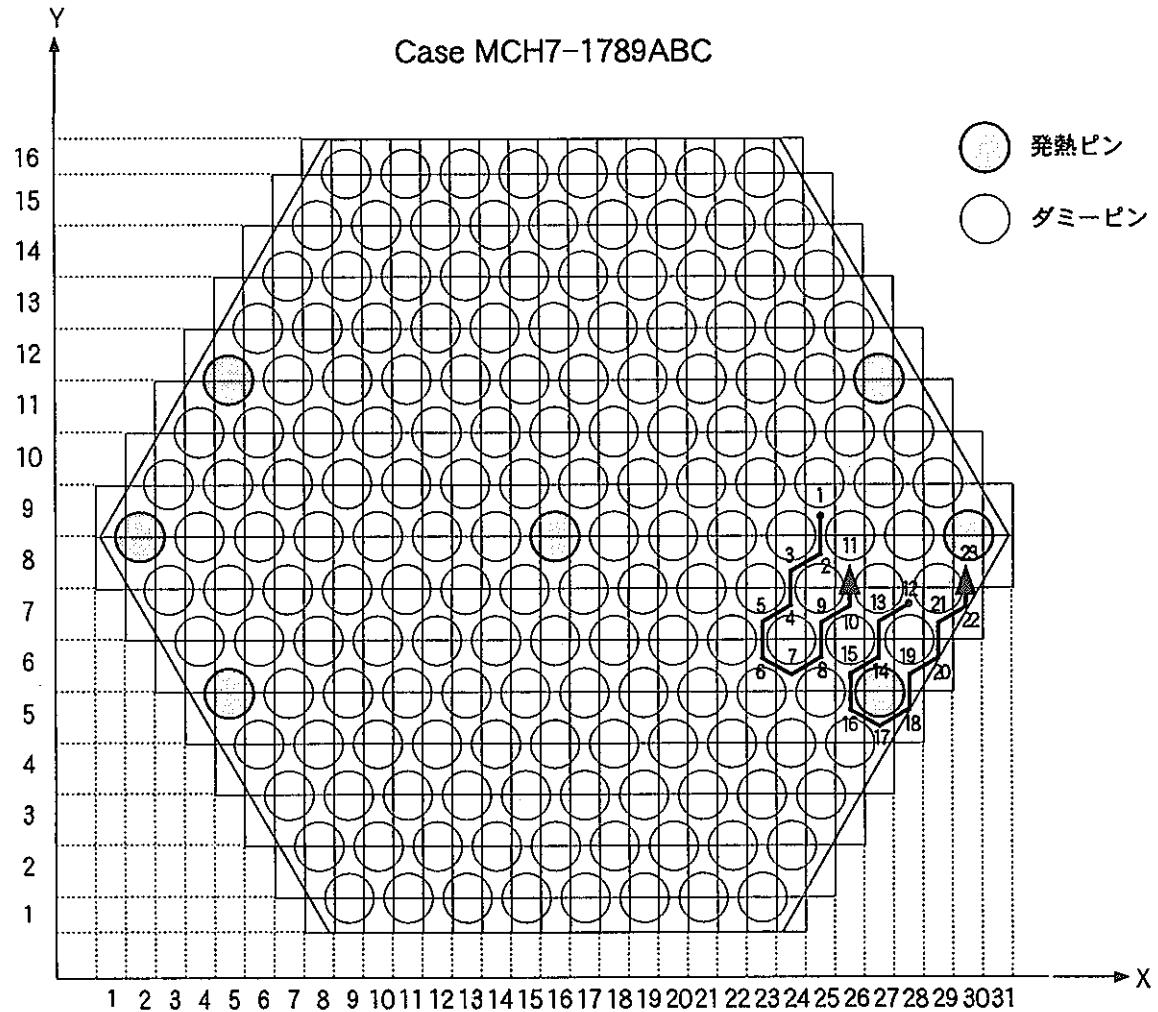


図 4.1 水平断面温度分布のトラバースライン (Case : MCH7-1789ABC)
Fig. 4.1 Temperature Traverse Lines in The Horizontal Plane

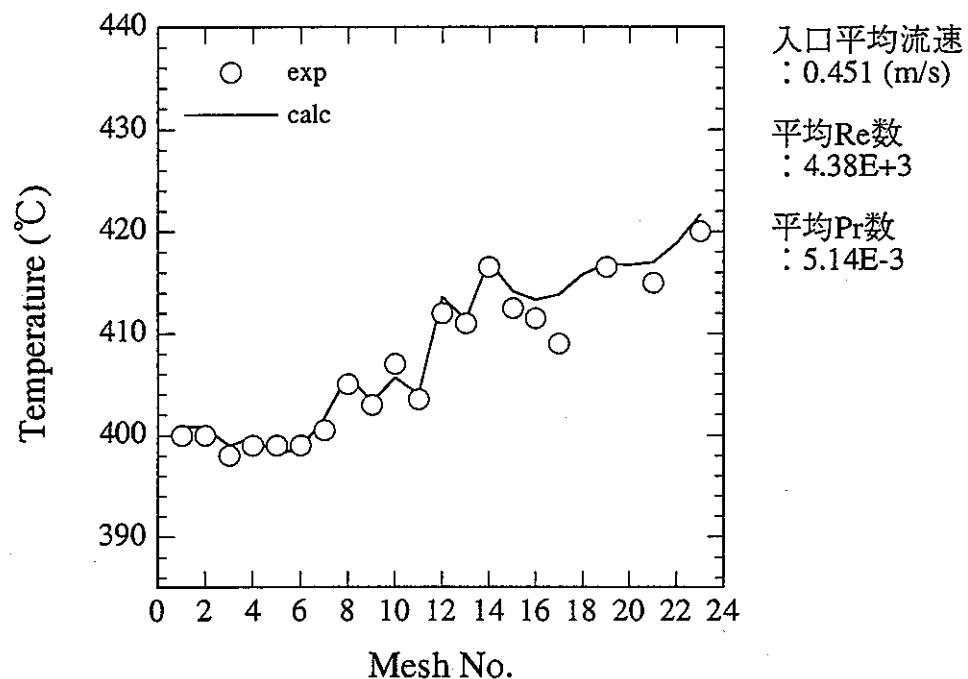


図 4.2 発熱上端部における温度分布の比較 (Case : MCH7-1789ABC-02A)

Fig. 4.2 Comparison of Temperature Distributions at The Top End of The Heated Section

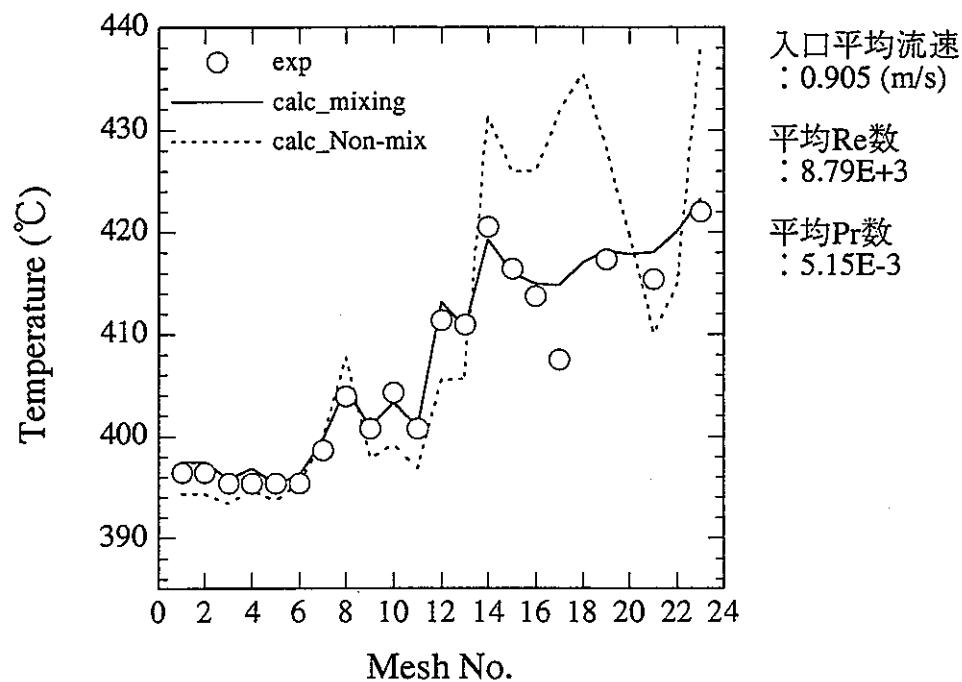


図 4.3 発熱上端部におけるミキシング係数の有無による温度分布の比較
(Case : MCH7-1789ABC-03A)

Fig. 4.3 Comparison of Temperature Distributions at The Top End of The Heated Section with and without Mixing Factors

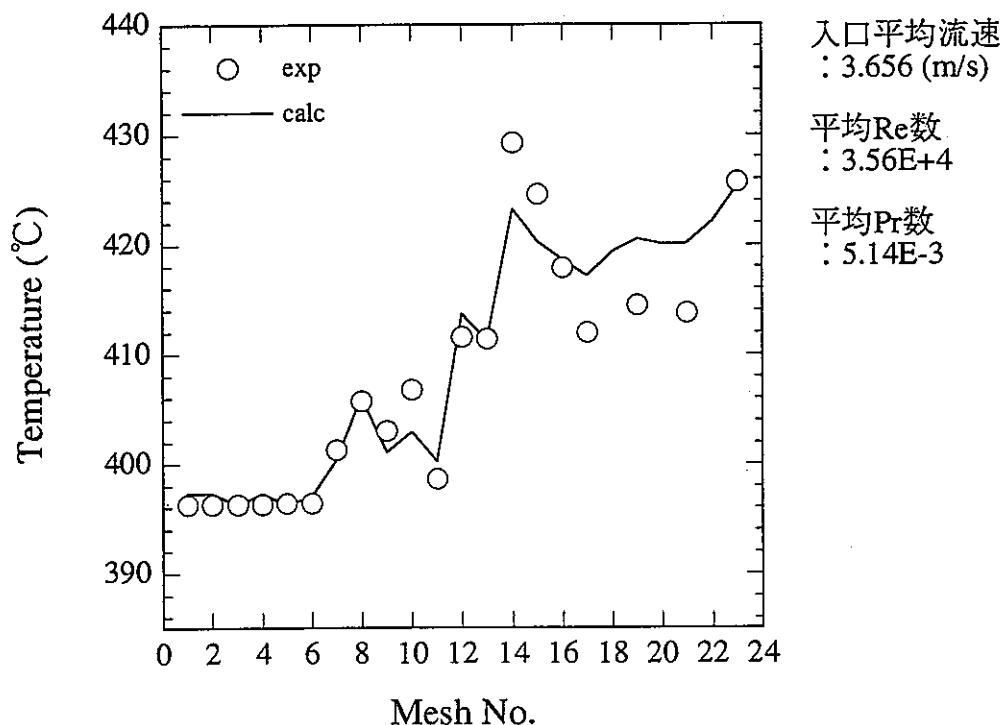


図 4.4 発熱上端部における温度分布の比較 (Case : MCH7-1789ABC-05A)

Fig. 4.4 Comparison of Temperature Distributions at The Top End of The Heated Section

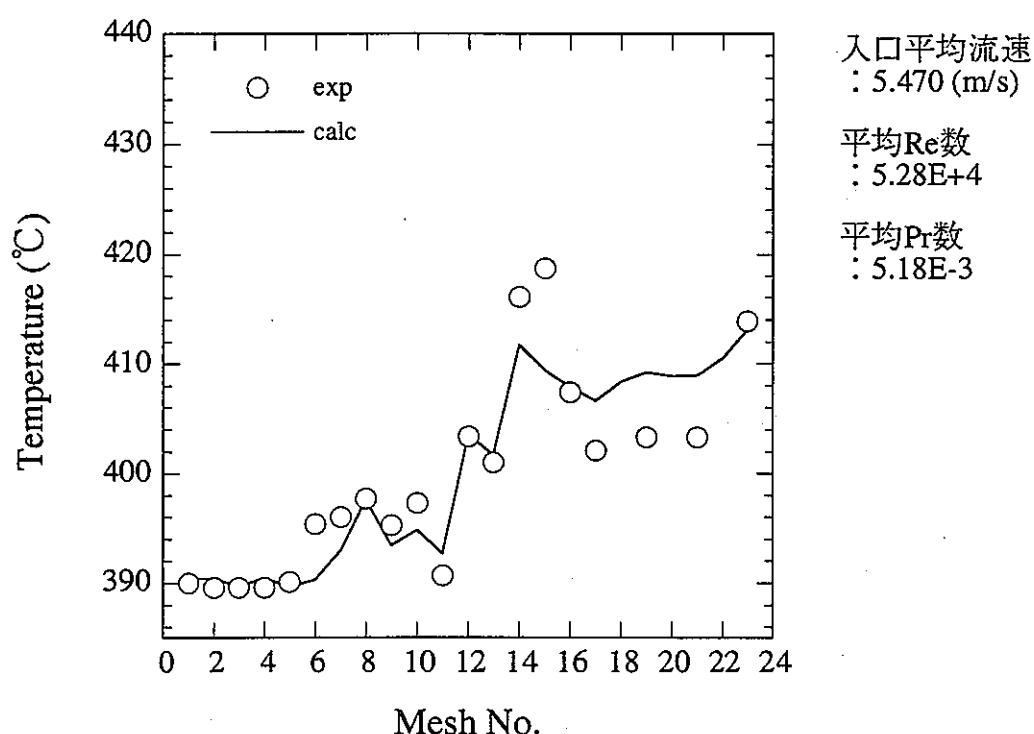


図 4.5 発熱上端部における温度分布の比較 (Case : MCH7-1789ABC-08A)

Fig. 4.5 Comparison of Temperature Distributions at The Top End of The Heated Section

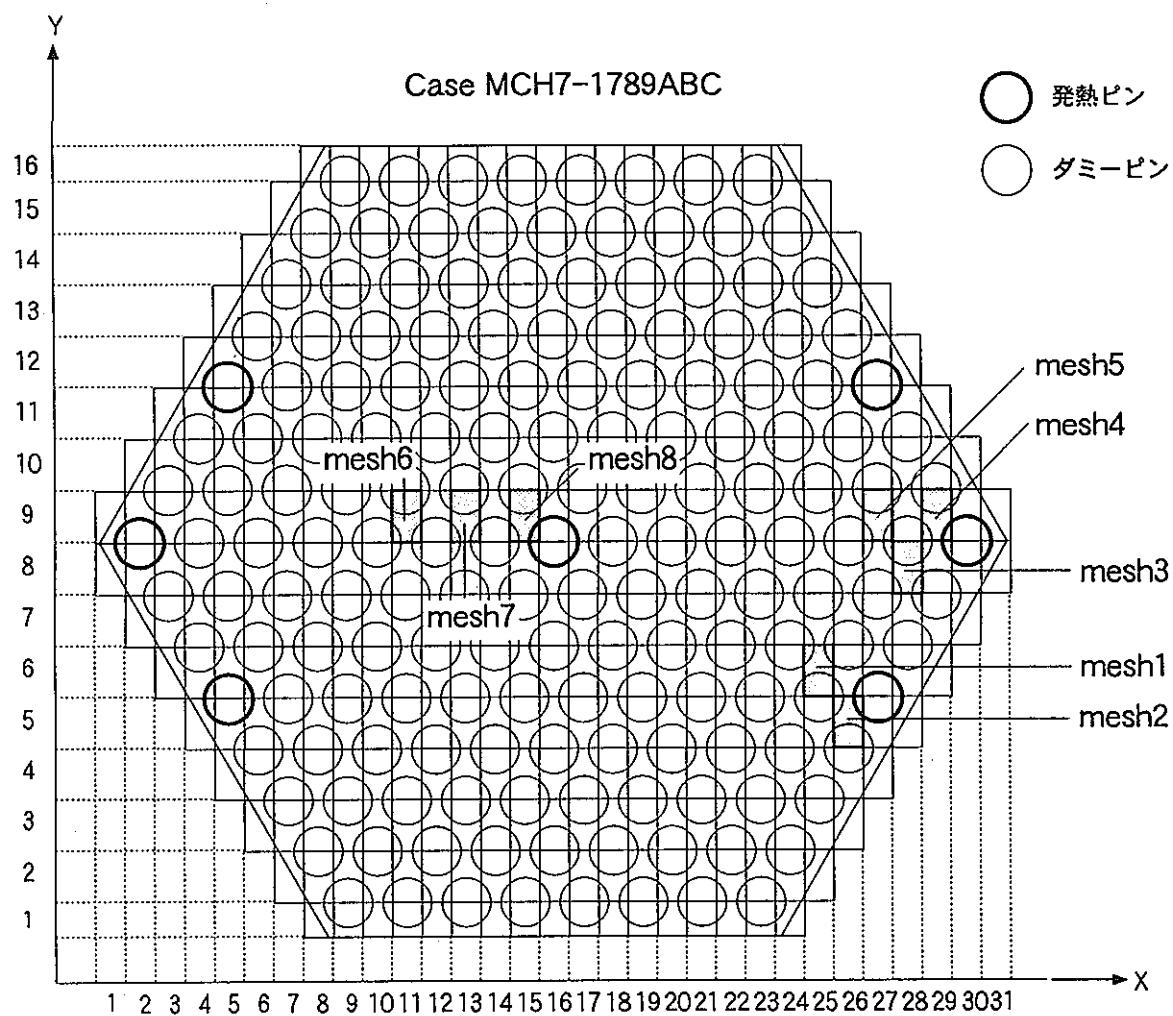


図 4.6 軸方向温度分布の着目サブチャンネル (Case : MCH7-1789ABC)
Fig. 4.6 Position of The Sub-channel along which Axial Temperature Profile was Plotted

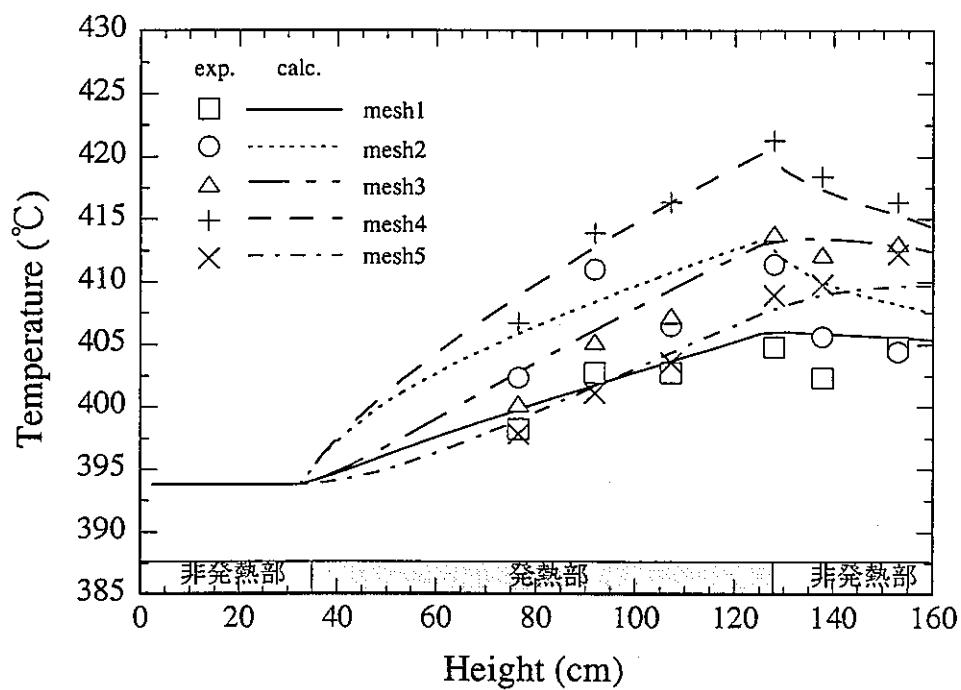


図 4.7 軸方向温度分布の比較 (Case : MCH7-1789ABC-02A)
Fig. 4.7 Comparison of Axial Temperature Profiles

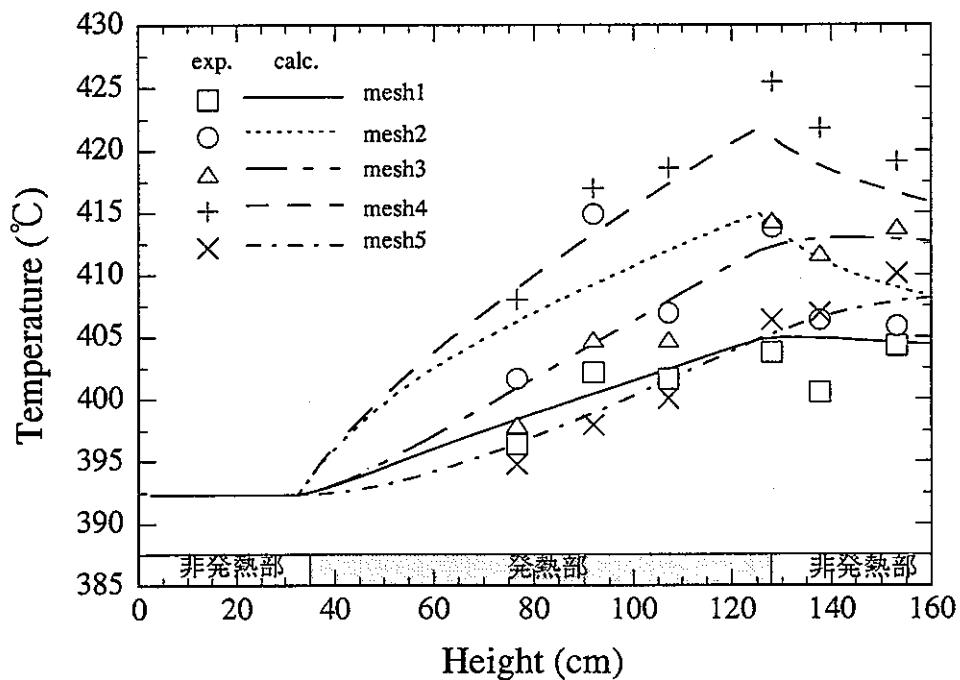


図 4.8 軸方向温度分布の比較 (Case : MCH7-1789ABC-03A)

Fig. 4.8 Comparison of Axial Temperature Profiles

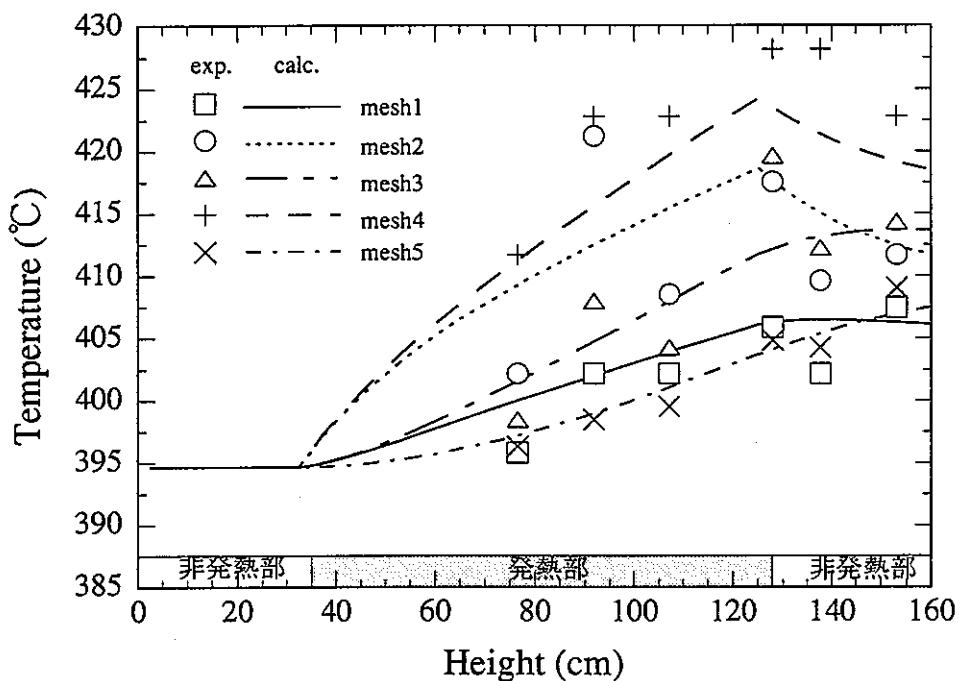


図 4.9 軸方向温度分布の比較 (Case : MCH7-1789ABC-05A)
Fig. 4.9 Comparison of Axial Temperature Profiles

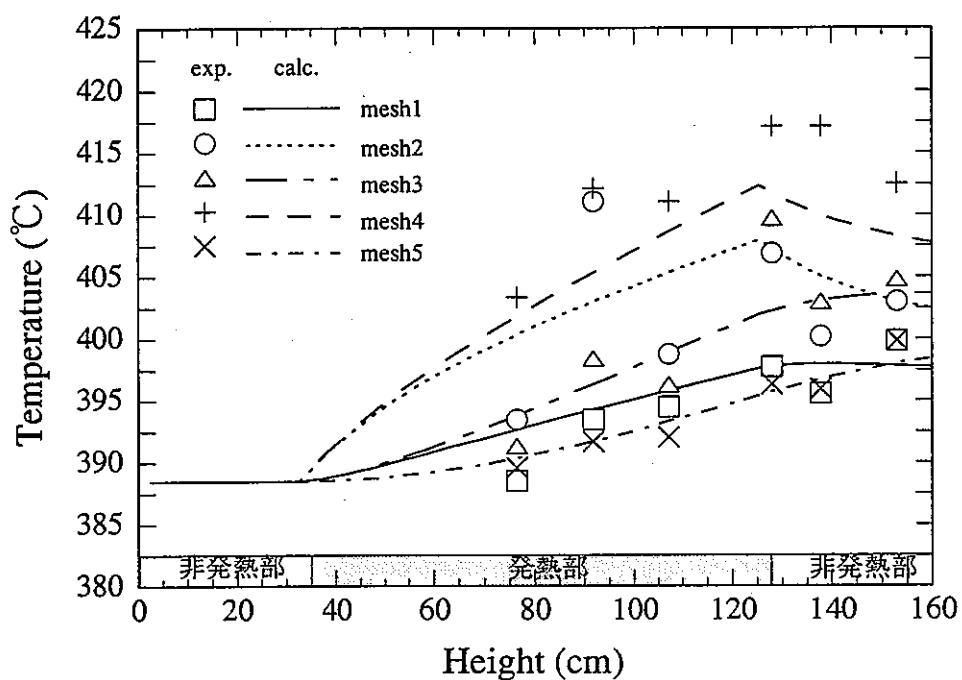


図 4.10 軸方向温度分布の比較 (Case : MCH7-1789ABC-08A)
Fig. 4.10 Comparison of Axial Temperature Profiles

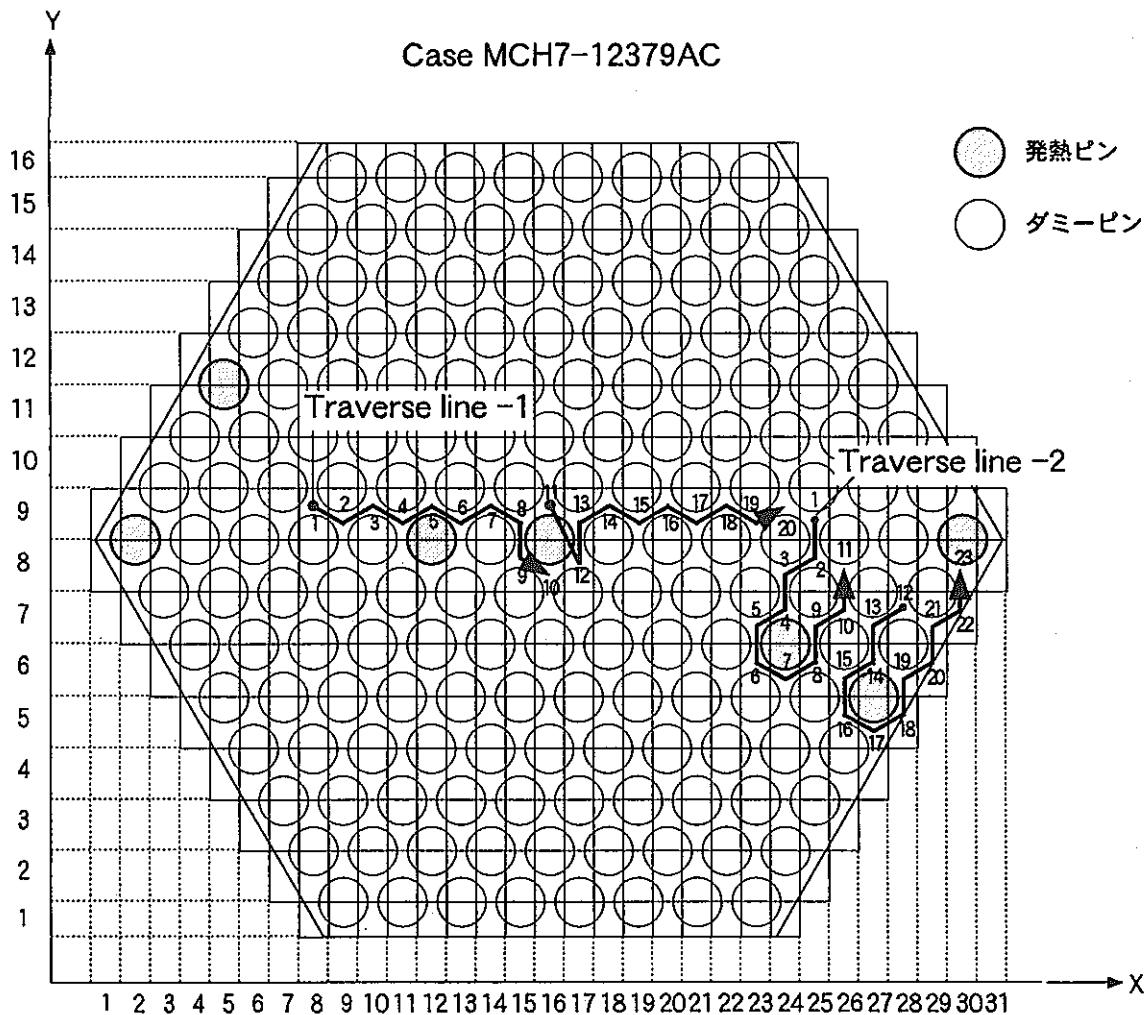
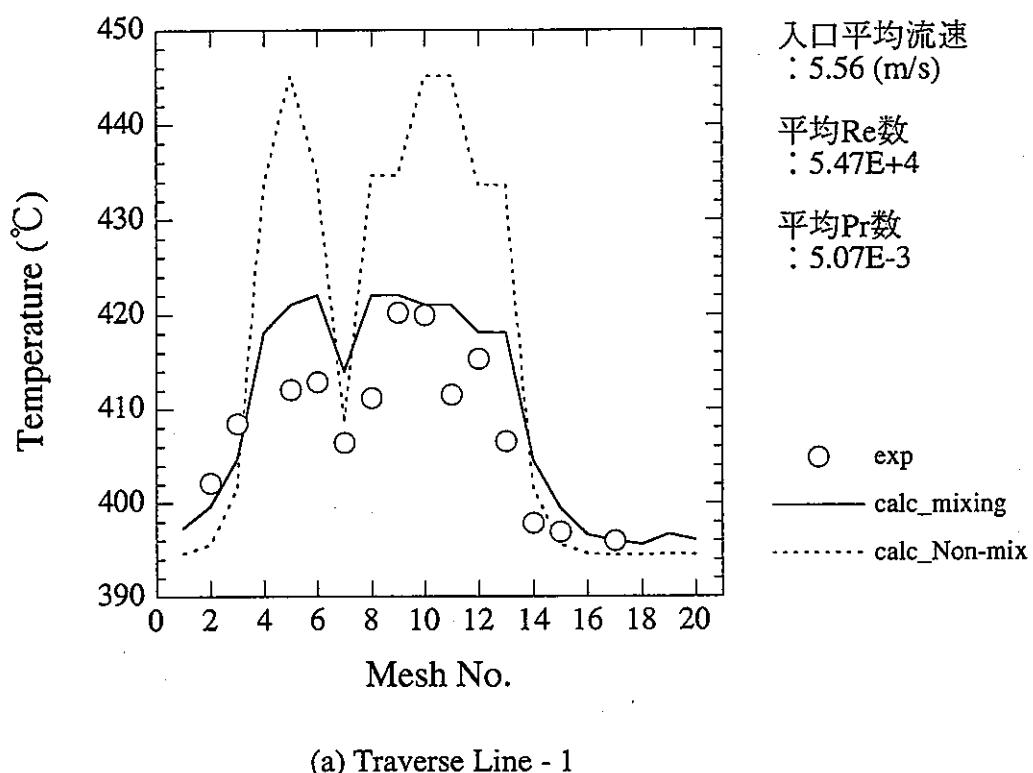
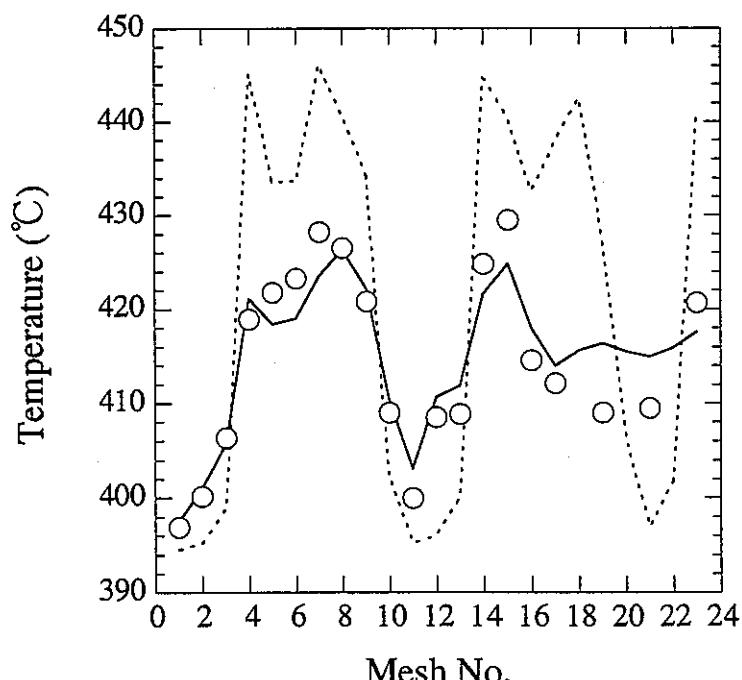


図 4.11 水平断面温度分布のトラバースライン (Case : MCH7-12379AC)
Fig. 4.11 Temperature Traverse Lines in The Horizontal Plane



(a) Traverse Line - 1



(b) Traverse Line - 2

図 4.12 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)

Fig. 4.12 Comparison of Temperature Distributions at The Top End of The Heated Section with and without Mixing Factors

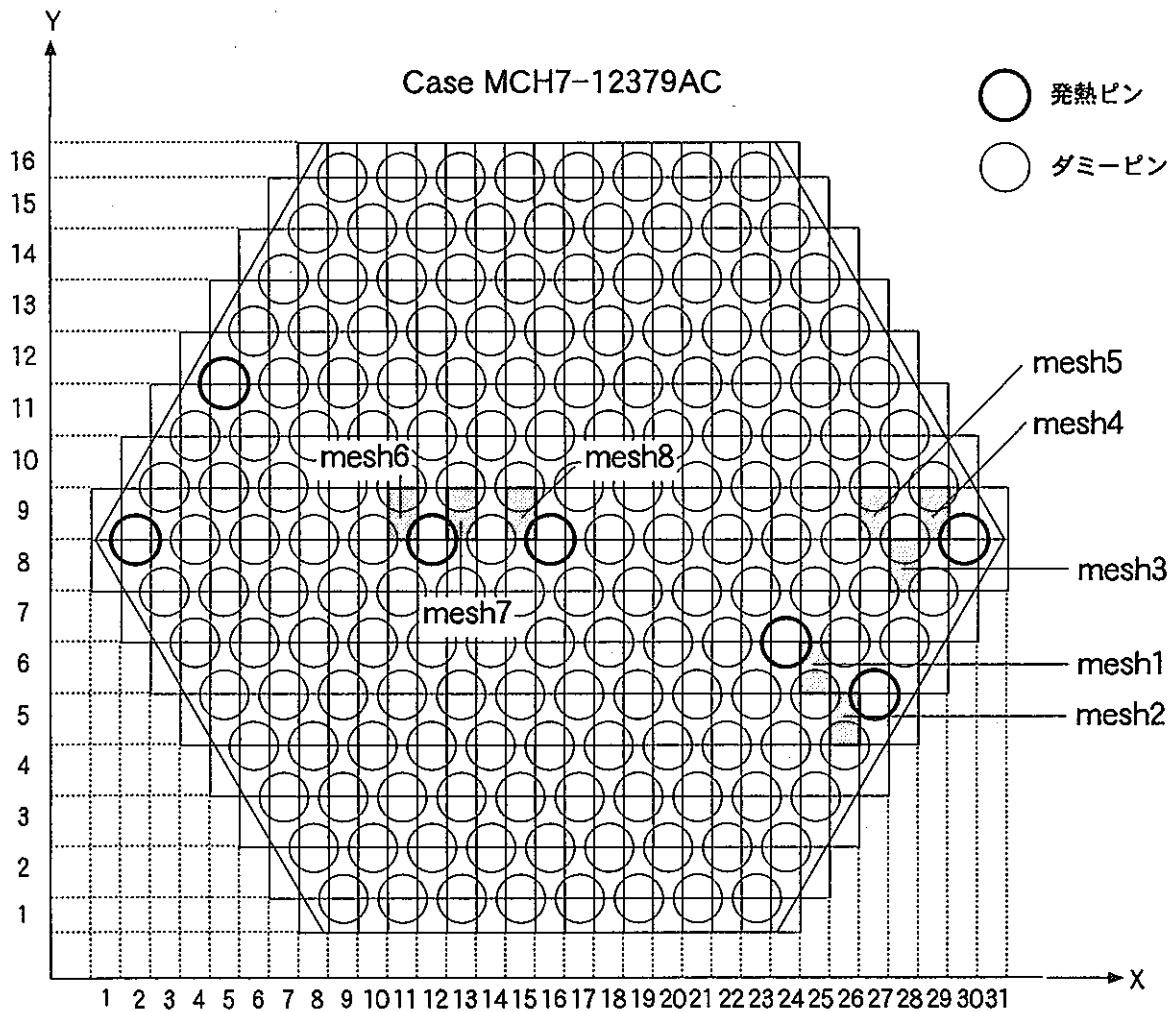
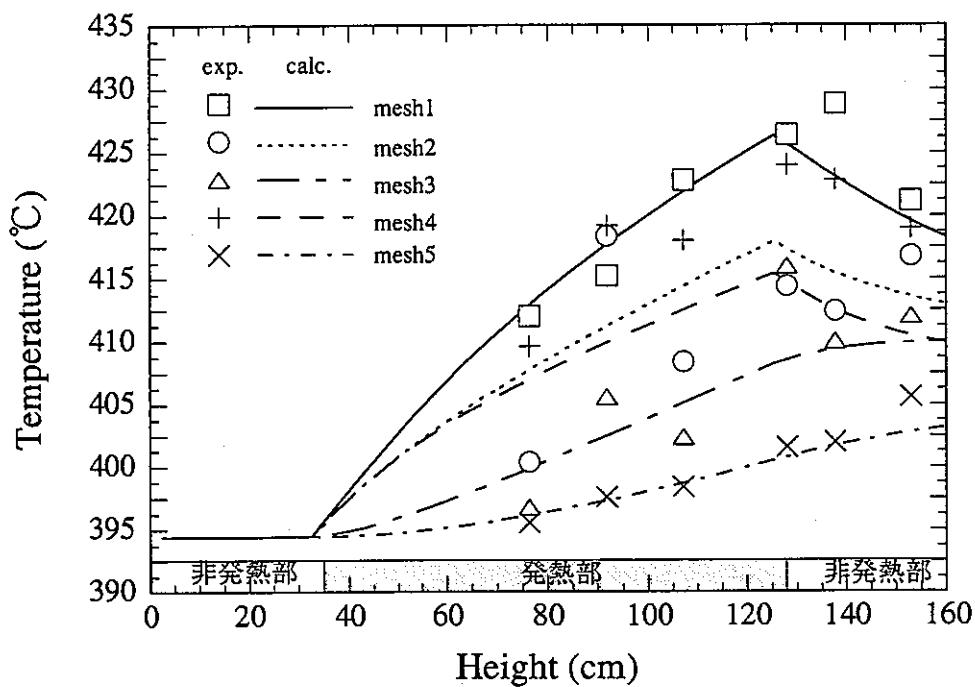
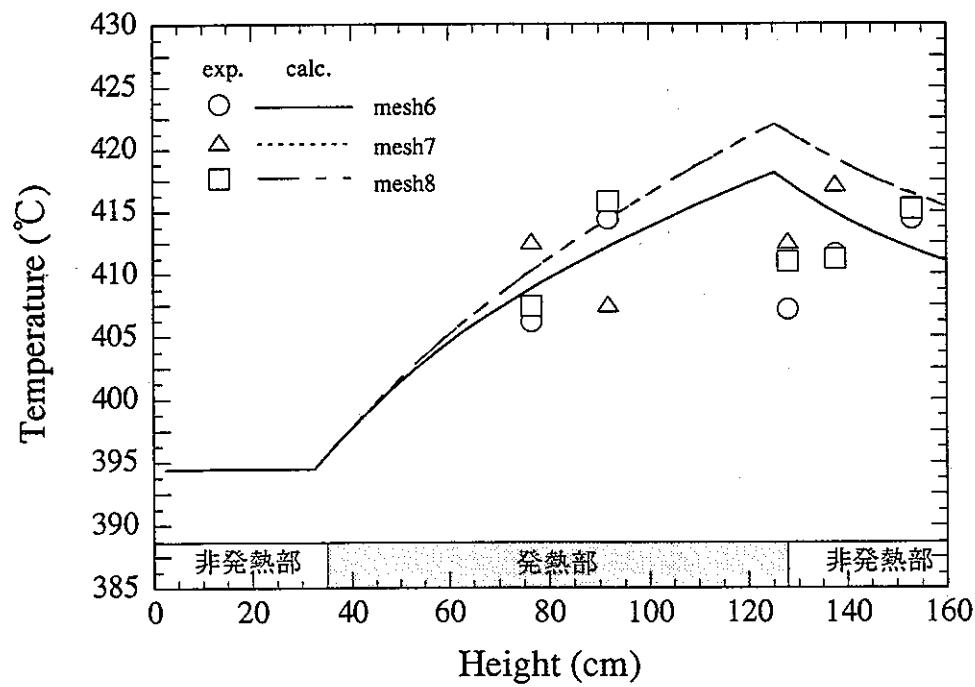


図 4.13 軸方向温度分布の着目サブチャンネル (Case : MCH7-12379AC)

Fig. 4.13 Position of The Sub-channel along which Axial Temperature Profile was Plotted



(a) mesh1~5



(b) mesh6~8

図 4.14 軸方向温度分布の比較 (Case : MCH7-12379AC-01A)

Fig. 4.14 Comparison of Axial Temperature Profiles

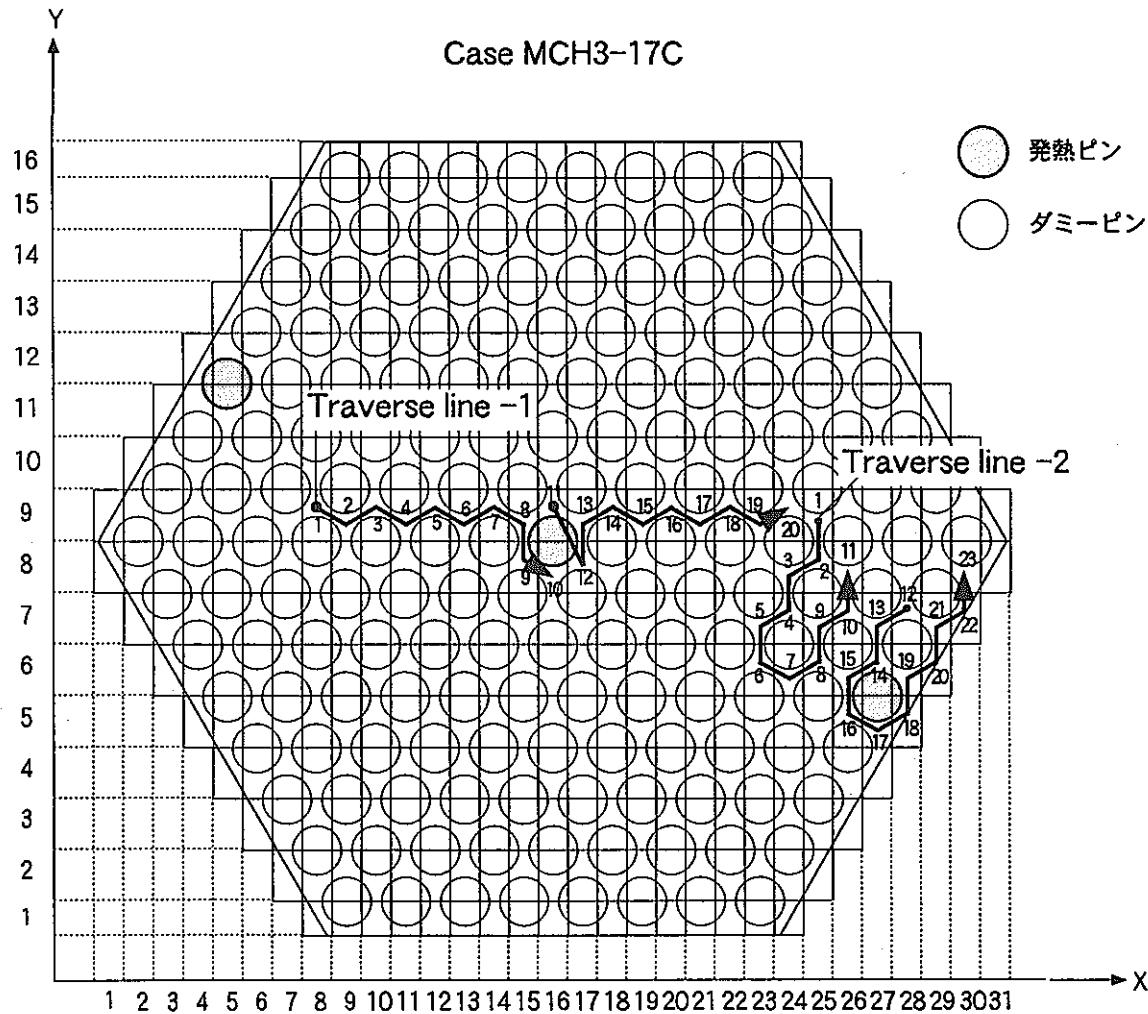
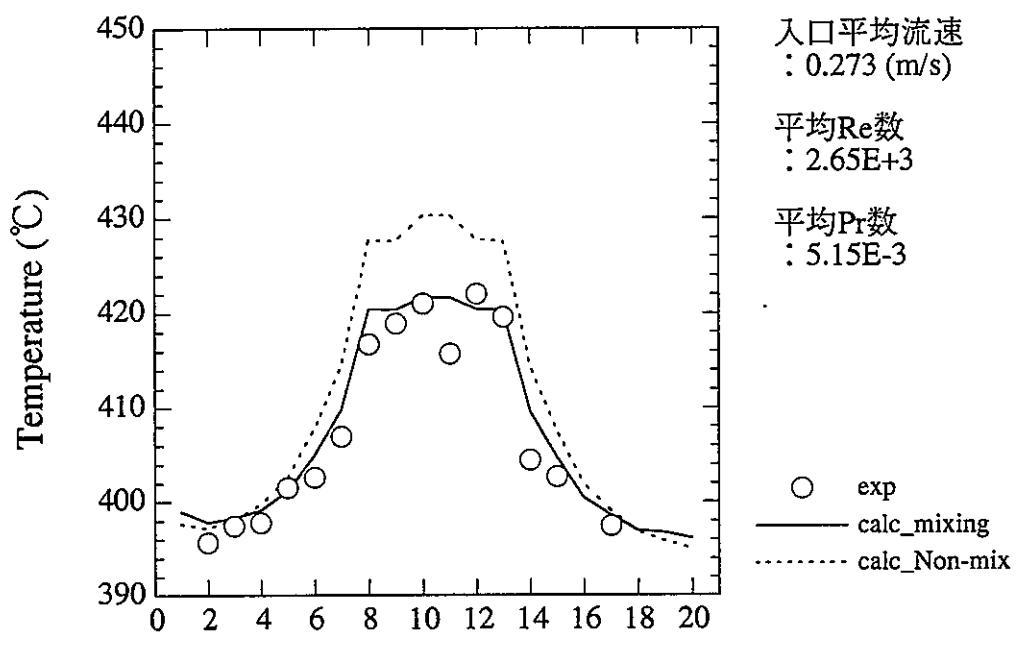
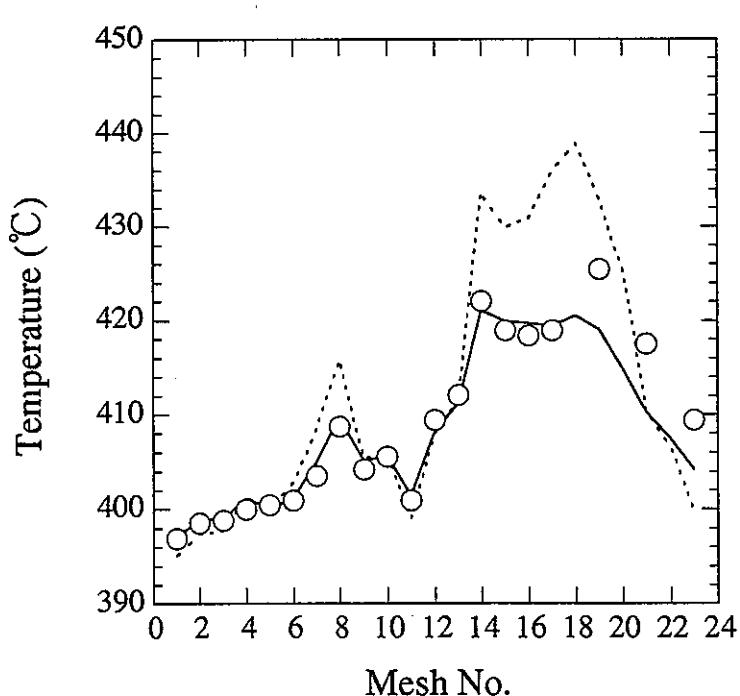


図 4.15 水平断面温度分布のトラバースライン (Case : MCH3-17C)

Fig. 4.15 Temperature Traverse Lines in The Horizontal Plane



(a) Traverse Line - 1



(b) Traverse Line - 2

図 4.16 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 : MCH3-17C-01A)

Fig. 4.16 Comparison of Temperature Distributions at The Top End of The Heated Section with and without Mixing Factors

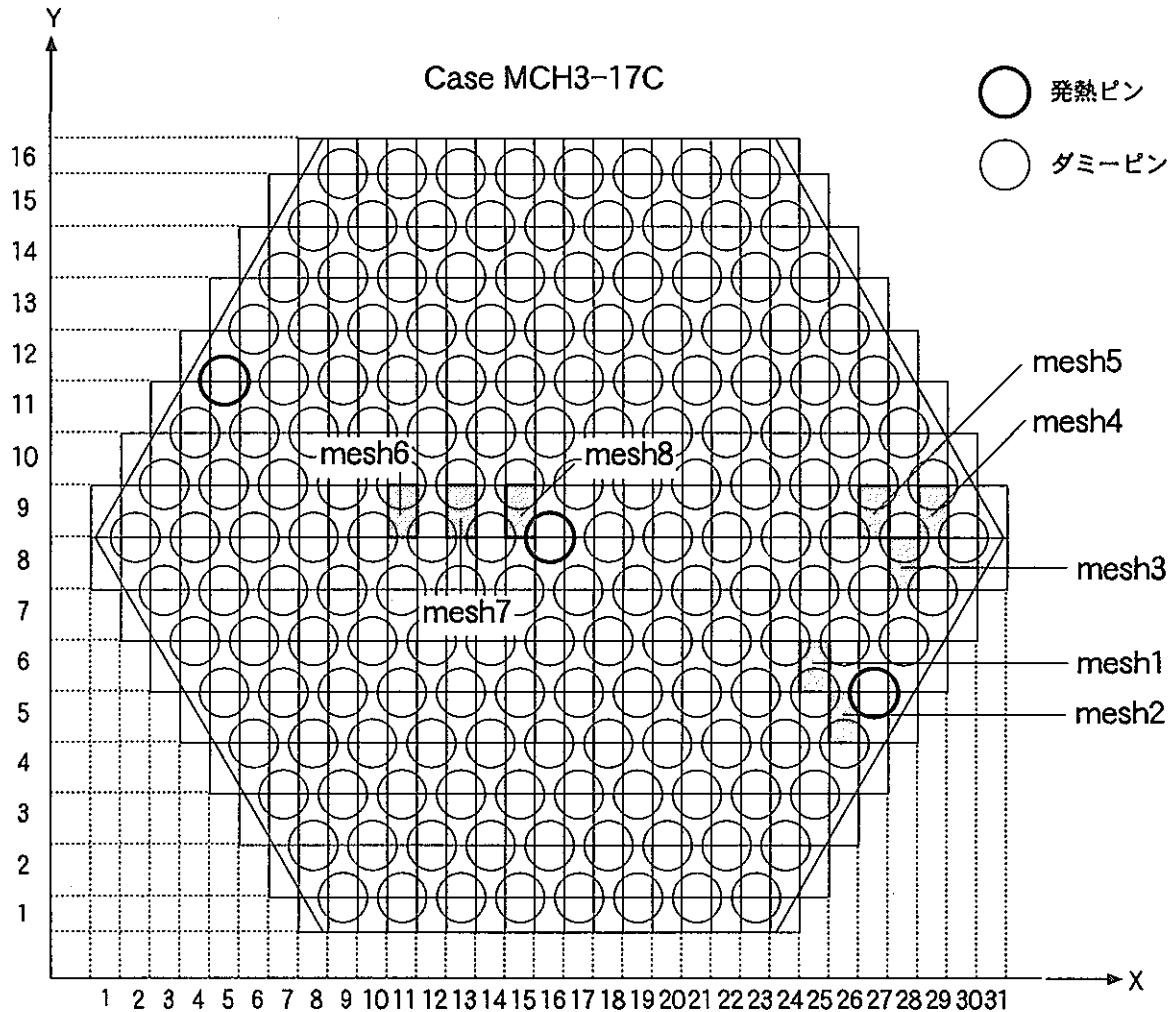
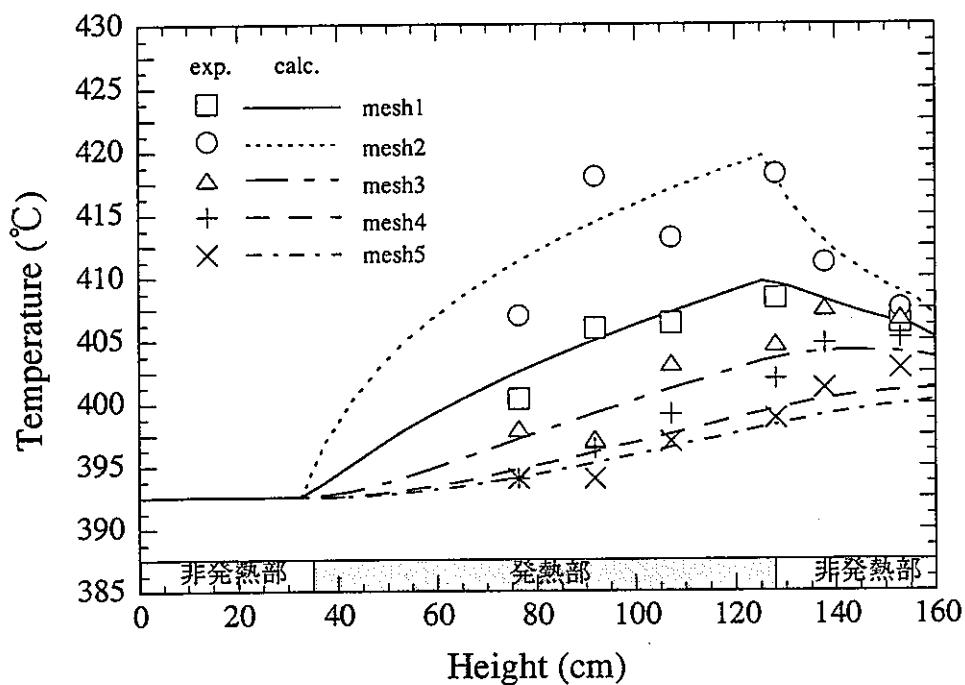
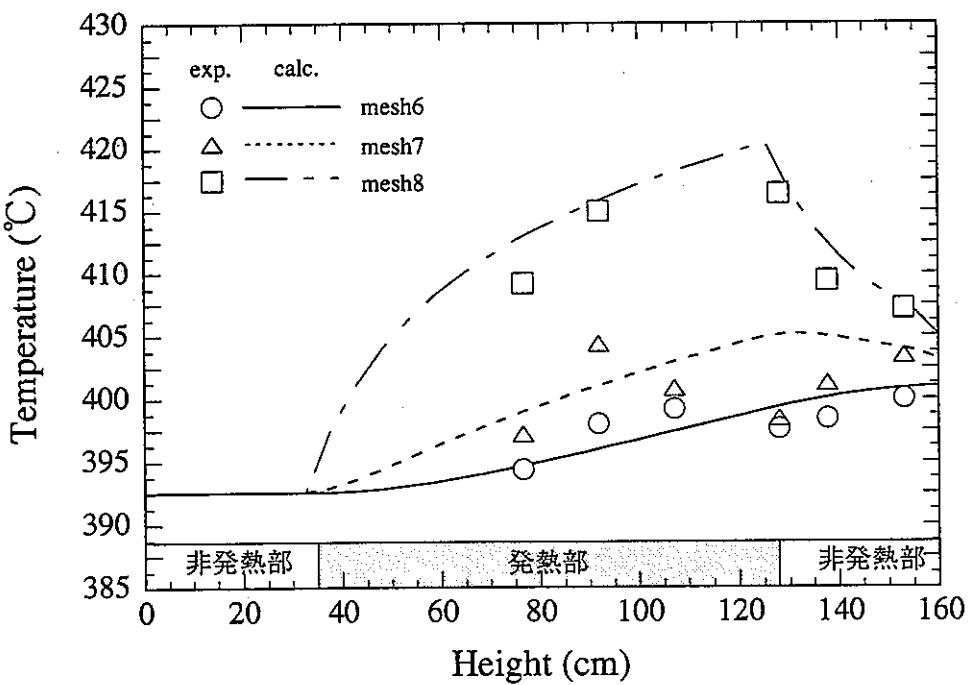


図 4.17 軸方向温度分布の着目サブチャンネル (Case : MCH3-17C)

Fig. 4.17 Position of The Sub-channel along which Axial Temperature Profile was Plotted



(a) mesh1~5



(b) mesh6~8

図 4.18 軸方向温度分布の比較 (Case : MCH3-17C-01A)
Fig. 4.18 Comparison of Axial Temperature Profiles