

燃料集合体内の混合特性に関する実験研究

—径方向流れが強調された体系での加熱ピン廻りの温度場—

(研究報告)



2002年3月

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)
2002

燃料集合体内の混合特性に関する Na 実験研究
 一径方向流れが強調された体系での加熱ピン廻りの温度場—
 (研究報告)

宮越 博幸*、上出 英樹*、
 田中 正曉**、山本 和弘*

要 旨

高速炉の経済性を向上させる方策として燃料の高燃焼度化が挙げられる。しかし、燃料の高燃焼度化に伴う燃料ピンやラッパ管の照射変形が集合体内の熱流動特性に及ぼす影響については、検討がまだ十分ではない。本研究では、変形ピンバンドル内の熱流動評価手法の確立の一環として、大型炉と同等のピン径およびピンピッチを有するワイヤスペーサ型の 37 本ピンバンドル体系模擬燃料集合体の一辺に沿って周辺 2 列の 14 サブチャンネルにポーラス状閉塞物が組み込まれた試験装置を用いて、径方向流れが強調された体系での、集合体内混合現象の把握と解析手法開発のための検証データを得ることを目的としたナトリウム試験を実施した。

試験では、集合体内の閉塞物との相対位置が異なる 7 本のピンを個別に加熱した場合の温度場、ならびに試験体流入流量とピン発熱量をパラメータとして出力・流量条件の依存性を確認した。

試験の結果、閉塞物上流にはこれを避ける水平方向流れが生じ、この流れが集合体内の温度分布に大きな影響を及ぼすことが分かった。閉塞物を避ける水平方向流れは、閉塞物設置断面 ($-0.125 \leq z^* \leq -0.0125$) から閉塞物下流 ($z^* > 0.0$) を試験体中心に向かって斜めに上昇する。この水平方向流れで温度分布に影響を受ける範囲は、閉塞物側面からピン 3 列程度までの範囲となり集合体全面に影響が及ぶことはなく閉塞物周辺の領域に限定されることが分かった。

加熱ピン周囲のサブチャンネルの軸方向温度分布から閉塞物を避ける流れとワイヤスペーサに沿うスワールフローがともに温度分布に影響を与えていたことが分かった。

試験でパラメータとした 50% と 15% の出力・流量条件では、集合体内の温度分布に与える影響は限定的なものであった。

ここで得られた試験データは、燃料集合体内熱流動解析評価手法の開発・検証に反映される。

*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

**現 文部科学省 研究開発局 核燃料サイクル研究開発課

March, 2002

**Experimental study on fluid mixing in a fuel subassembly
of a fast reactor
—Temperature field around heated pin with cross flow—**

Hiroyuki Miyakoshi*, Hideki Kamide*,
Masa-aki Tanaka**, and Kazuhiro Yamamoto*

Abstract

High burnup of the core is one of means to reduce the cost of a fast reactor and fuel cycle system. However, it is not enough to investigate thermohydraulics in the core, in which fuel and wrapper tube are deformed due to irradiation under high burnup condition. In this study, sodium experiment was performed to investigate fluid mixing in a wire-wrapped 37-pin subassembly model, which had local blockage and cross flow around the blockage. Such cross flow is one of elements of thermohydraulics in a deformed subassembly. The experimental results is useful to develop numerical simulation method for the deformed subassembly.

Seven pins, each had different relative position to the blockage, were heated individually in the experiments. Temperature field in the subassembly was measured. Influences of the flow rate and heater power were also examined.

A horizontal cross flow occurred in upstream region toward the blockage. It was observed that the temperature field was influenced by this cross flow. The measured temperature field showed that there was a bypass flow around the blockage, which flowed toward the center of subassembly. The cross flow due to the bypass flow reached the 3rd row of pins from the blockage. The swirl flow, resulted from the spacer wire, also influenced the temperature field.

The obtained experimental data will be used to develop and verify a numerical simulation method for a deformed fuel subassembly.

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

** Nuclear Fuel Cycle Research and Development Division,
Research and Development Bureau, MEXT

目 次

1. 序 論.....	1
2. 試験設備	3
2. 1 試験装置	3
2. 2 試験体概要.....	4
2. 3 計測システム	5
3. 試験条件および試験方法	7
3. 1 試験条件	7
3. 2 試験方法	7
4. 試験結果	9
4. 1 軸方向温度分布.....	9
4. 2 水平方向温度分布	13
5. 考 察.....	17
5. 1 閉塞物によるクロスフローの影響.....	17
5. 2 ワイヤスペーサの影響	18
5. 3 出力・流量条件の影響	18
6. 結 論.....	19
謝 辞.....	20
参考文献	21

表リスト

- 表 2.2・1 模擬燃料集合体の主要仕様
表 2.3・1 模擬燃料集合体軸方向の熱電対位置
表 2.3・2 模擬燃料集合体水平方向の熱電対位置
表 3.1・1 試験条件一覧
表 3.1・2 実機および試験体の主要目
表 4.1・1 模擬燃料集合体内温度測定結果一覧 (Case-1)
表 4.1・2 模擬燃料集合体内温度測定結果一覧 (Case-2)
表 4.1・3 模擬燃料集合体内温度測定結果一覧 (Case-3)
表 4.1・4 模擬燃料集合体内温度測定結果一覧 (Case-4)
表 4.1・5 模擬燃料集合体内温度測定結果一覧 (Case-5)
表 4.1・6 模擬燃料集合体内温度測定結果一覧 (Case-6)
表 4.1・7 模擬燃料集合体内温度測定結果一覧 (Case-7)
表 4.1・8 模擬燃料集合体内温度測定結果一覧 (Case-8)
表 4.1・9 模擬燃料集合体内温度測定結果一覧 (Case-9)

図リスト

- 図 2.1-1 炉心・機器熱流動試験装置系統図
図 2.2-1 試験体の概要
図 2.2-2 模擬閉塞物取り付け位置の模式図
図 2.3-1 模擬燃料集合体軸方向の熱電対位置
図 2.3-2 模擬燃料集合体水平断面における温度分布の比較位置図
図 2.3-3 模擬燃料集合体水平断面における熱電対位置
図 4.1-1 模擬燃料集合体軸方向温度分布 (Case-1)
図 4.1-2 模擬燃料集合体軸方向温度分布 (Case-2)
図 4.1-3 模擬燃料集合体軸方向温度分布 (Case-3)
図 4.1-4 模擬燃料集合体軸方向温度分布 (Case-4)
図 4.1-5 模擬燃料集合体軸方向温度分布 (Case-5)
図 4.1-6 模擬燃料集合体軸方向温度分布 (Case-6)
図 4.1-7 模擬燃料集合体軸方向温度分布 (Case-7)
図 4.1-8 模擬燃料集合体軸方向温度分布 (Case-8)
図 4.1-9 模擬燃料集合体軸方向温度分布 (Case-8)
図 4.2-1 模擬燃料集合体水平方向温度分布 (Case-1)
図 4.2-2 模擬燃料集合体水平方向温度分布 (Case-2)
図 4.2-3 模擬燃料集合体水平方向温度分布 (Case-3)
図 4.2-4 模擬燃料集合体水平方向温度分布 (Case-4)
図 4.2-5 模擬燃料集合体水平方向温度分布 (Case-5)
図 4.2-6 模擬燃料集合体水平方向温度分布 (Case-6)
図 4.2-7 模擬燃料集合体水平方向温度分布 (Case-7)
図 4.2-8 模擬燃料集合体水平方向温度分布 (Case-8)
図 4.2-9 模擬燃料集合体水平方向温度分布 (Case-9)
図 5.1-1 模擬燃料集合体軸方向温度分布 (Case-6)
図 5.1-2 模擬燃料集合体軸方向温度分布 (Case-7)
図 5.1-3 発熱ピンの閉塞側サブチャンネルの軸方向温度分布
図 5.1-4 発熱ピンの閉塞反対側サブチャンネルの軸方向温度分布
図 5.2-1 ワイヤによるスワールフローが軸方向温度分布に及ぼす影響
図 5.3-1 出力・流量条件が閉塞物近傍の温度場に及ぼす影響 (Point-B)
図 5.3-2 出力・流量条件が閉塞物近傍の温度場に及ぼす影響 (Point-D)
図 5.3-3 出力・流量条件が閉塞物近傍の温度場に及ぼす影響 (Point-B)
図 5.3-4 出力・流量条件が閉塞物近傍の温度場に及ぼす影響 (Point-D)

1. 序 論

高速炉の実用化を図る上で、高い経済性と安全性の両立が課題となっている。その一つの方向として炉心の高燃焼度化による燃料コスト、再処理コストの低減がある。しかし、高燃焼度化に伴う燃料ピンやラッパ管の照射変形が集合体の熱流動特性に及ぼす影響については、検討がまだ十分ではない。

変形ピンを有する燃料集合体内熱流動特性を評価するためには、照射変形挙動の把握・カテゴリ化、熱流動評価手法の開発、そして評価手法開発・検証に用いる流動試験データの整備が必要である。

燃焼にともなう燃料ピンの変形挙動の把握については、サイクル機構大洗の照射燃料試験施設にて集合体の断層写真をX線コンピュータトモグラフィー(CT)を用いて非破壊で撮ることが可能となり、高速実験炉「常陽」の使用済み燃料集合体について燃料集合体から発生するγ線環境下で良好な画像が得られることが確認されている。^[1] また、炉外試験として、スエリング等による燃料ピンの膨れを相対的に模擬する観点から燃料集合体を径方向に圧縮した際のピンバンドルの変形挙動が測定されている。^[2] 今後、「常陽」や原型炉「もんじゅ」の照射済み燃料における変形の知見が、X線 CT を用いて蓄積される見通しである。一方、これらと並行に燃料ピンの変形挙動を評価する手法として3次元ビーム要素モデルを用いた解析コード「BAMBOO」が整備されてきている。^[3] 上記の X 線 CT を用いた集合体圧縮時変形データによりコードの検証が進められており、燃料ピンのオーバル変形(ピンの断面が楕円状となる変形)が燃料集合体内ピンバンドルの変形評価に重要であることなどが指摘されている。試験データとあわせて、この解析手法により変形モードのカテゴリ化が可能になると思われる。

燃料ピン変形時の熱流動挙動については、これまでにワイヤースペーサタイプ^[2] 271 ピン大型燃料集合体を対象に水流動試験として、集合体を径方向に圧縮することで相対的に変形を模擬し、集合体内部の混合特性を温度と濃度拡散のアナロジーを元に塩水と電導度計にて測定した研究が行われた。^[4] 試験では集合体の変形(BDI、Bundle-Duct Interaction)をパラメータとして集合体内部のサブチャンネル間混合係数が評価されたが、圧縮量(ワイヤスペーサ直径 dw を基準に通常バンドル形状から 3dwまでの範囲)と混合係数の間には非線形の依存性がみられた。

燃料集合体内熱流動解析手法に関する検討として、サイクル機構の大島らが有限要素法に基づく詳細熱流動解析手法と3本の燃料ピンに囲まれたサブチャンネルを要素として解析するサブチャンネル解析手法を組み合わせることにより、変形バンドル全体の熱流動解析を行うことを計画している。^[5] これまでに局所詳細非定常解析コード「SPIRAL-II」を開発し、乱流バックステップフローなどいくつかの基本的な体系で流動に関して十分な予測精度を持つことが確認されている。本コードを用いて変形バンドルの一部を取り出した詳細解析を行い、得られた結果からモデルパラメータを導出、サブチャンネルコードに渡すことによりバンドル全体の熱流動挙動を求めることが可能となる。

本研究は、変形バンドル内の熱流動評価手法の確立の一環として、基礎試験を通して現象の把握およびモデル開発・検証のためのデータベースを構築することが目的である。ここでは、37ピンバンドル集合体モデルを用いたナトリウム試験により、これまで計測された例のない径方向流れが強調された体系での加熱ピン廻りの温度場を詳細に把握した。照射変形が進んだ場合に、燃料ピンバンドルの一部で流路が狭まり、集合体の軸方向の流速分布が歪むことが考えられる。そのような場合の熱流動特性を評価する上で、ピンバンドルを径方向に横切る流れが卓越した条件での混合特性を高い精度で評価することが求められる。試験では、局所閉塞を伴う集合体内の最高温度に関する研究を行った37ピンバンドル試験体を用い、閉塞領域をさせてピンバンドル内を径方向に横切る流れが生じている条件で、模擬燃料ピンの1本を加熱することでその周囲にどのような温度場が形成されるかを測定した。

これにより、当該模擬燃料ピンを横切る流れがある場合の温度混合特性を評価することができる。また、加熱ピンの位置を変えることにより様々な強さの径方向流れの条件で実験データを得ることができる。また、この実験データは、熱流動解析評価手法の開発／検証に利用される。

本報では、試験シリーズの第一段階として37ピンバンドル集合体内の、閉塞物との相対位置が異なる7本のピンを個別に加熱した場合の温度場ならびに流量条件依存性について測定した結果を示す。

2. 試験設備

2. 1 試験装置

試験は、炉心・機器熱流動試験装置(CCTL;Core Component Thermal-Hydraulics Test Loop)の一部に試験体を設置して実施した。図2.1-1にCCTLのフローシートを示す。装置は、主循環系、純化系、補助系、チャージ・ドレン系、ガス系などで構成されている。

CCTLの基本仕様および設計仕様を以下に示す。

[試験施設基本仕様]

- ・循環流量 : 600 [L/min]
- ・最大出力 : 1.0 [MW]

[試験施設設計仕様]

- ・ナトリウム系設計条件
- ・ナトリウム系（純化系の一部及びチャージ、ドレン系を除く）
 - 設計温度 : 625 [°C]
 - 設計圧力 : 0.78 [Mpa]
- ・純化系及びチャージ・ドレン系
 - 設計温度 : 425 [°C]
 - 設計圧力 : 0.78 [Mpa]
- ・ガス系設計条件
 - 設計温度 : 常温
 - 設計圧力 : 0.78 [Mpa]

[計装設備]

- ・電磁流量計 (EMF150)
 - 流量範囲 : 300~600 [L/min]
 - 最高使用温度 : 625 [°C]
 - 最高使用圧力 : 0.78 [Mpa]
- ・圧力計
 - 形式 : NaK封入式
 - 測定範囲 : -0.1~0.78 [Mpa] (試験体下部)
 - : -0.1~0.29 [Mpa] (試験体上部)
- ・試験体内熱電対 (総数: 255 点)
 - サブチャンネル温度測定用 : 211 点
 - ヒータピン温度測定用 : 14 点
 - 閉塞物内部温度測定用 : 14 点

ラッパ管内外壁温度測定用： 16 点

2. 2 試験体概要

図 2.2-1 に試験体の全体構造図を示す。試験体は、電気ヒータピン 37 本を六角ラッパ管内に収納した模擬燃料集合体、万が一のナトリウム漏洩時に模擬燃料集合体から外部へのナトリウムの飛散を防止するための安全容器、およびヒータピンへの電源供給を行う電極箱から構成される。

1) 模擬燃料集合体

模擬燃料集合体は、60 万 kWe 級ナトリウム冷却高速炉（以下、実機^[8]）実機炉心燃料集合体の部分モデルとして設計されたもので、ピン外径、ピンピッチ、ワイヤスペーサ外径、ワイヤスペーサ外径およびワイヤスペーサ巻きピッチは、実機と同等なものとなっている（表 2.2-1 参照）。ヒータピンの被覆管は、外径 8.5[mm] の SUS316 管であり、Ni-Cr 系合金の発熱体と絶縁材（BN,MgO）が充填されている。ヒータピンの発熱は、軸方向に平坦な分布で、一本当たりの最大出力は 26.1[kW] である。また、発熱長は燃料ピンの最大線出力を実機と同等とするため 650[mm] に縮小されている。

ヒータピン発熱部の中央には、集合体内局所異常による流路閉塞を模擬するためのポーラス状閉塞物が組み込まれている。閉塞物は、直径 0.3[mm] の SUS 球を焼結成形して製作し、閉塞物内の空隙率は 40[%] である。図 2.2-2 に模擬閉塞物取り付け位置の模式図を示す。模擬閉塞物の流れ方向の厚み（高さ）は、日本原子力発電（株）の炉外水試験^[7,8]の知見より 35[mm] としている。また、同試験から、径方向に連続したサブチャンネルが閉塞されることなく、千鳥状に一つおきのサブチャンネルが閉塞するとの知見が得られている。しかし、連続したサブチャンネルが閉塞された場合には温度が著しく上昇することが予想されること、および集合体周辺部での閉塞では、ワイヤスペーサに沿って回転する流れ（Swirl Flow）の影響を比較的大きく受ける可能性があることから、ここでは同図に示すような集合体の一辺に沿った外側 2 列の 14 サブチャンネルの閉塞を設定した。^[9]

2) 安全容器

安全容器は、径方向 2 分割のフランジ接続型円筒容器（外径 457.2[mm]）で、模擬燃料集合体外側に設置される。安全容器はベローズを介して模擬燃料集合体下部に接続され、両者の空隙部には保温材が充填されている。安全容器は、万一のナトリウム漏洩時の模擬燃料集合体から外部へのナトリウムの飛散および外部への流出を防止する他、模擬燃料集合体からの放熱防止を目的に設置したものである。放熱防止は、安全容器外側に設置したマイクロヒータの加熱量を安全容器内の保温材温度と模擬集合体外表面温度をできるだけ近づけるよう制御する方法で行った。マイ

クロヒータによる加熱は、軸方向に4分割の制御が可能で、ある程度の軸方向温度分布に対応できるようになっている。また、安全容器内での空気の軸方向対流を防止するために、軸方向8箇所に仕切板を取り付けている。更に安全容器の外側に保温を施し、安全容器の温度を安定に保てるようにしている。

3) 電極箱

電極箱は、外径約400[mm]の円筒形密閉構造容器で、その外周にはヒータピンリード部と電源ケーブルを接続するための端子が設置されている。電極箱はヒータピンの絶縁劣化を防止するために必要であり、これを通じて絶縁材の吸着成分を真空引きし、その後窒素ガスと置換する機能を備えている。

2. 3 計測システム

1) 計測点配置

試験体およびCCTL試験ループには、総数317点の計測点が配置されている。模擬燃料集合体内部には温度計測点が255点、圧力センサが2点配置されており、ループ側には温度計測点34点、流量計測点5点、圧力計測点5点、さらにヒータピン用の電圧、電流および電力計が配置されている。

図2.3-1に模擬燃料集合体内部に配置した温度測定点の軸方向断面を示す。また、表2.3-1および表2.3-2に熱電対のセンサ名と取り付け角度を示す。軸方向の座標 z は、閉塞物上端($z=0[\text{mm}]$)を基準にしている。模擬燃料ピンの発熱部は閉塞物上端の342.5[mm]上流側から、その307.5[mm]下流側(DJ断面)までの650[mm]であり、閉塞物(軸方向高さ $H=35[\text{mm}]$)は模擬燃料ピンの中央に設置されている。

模擬燃料集合体入口温度は、閉塞物上端から360[mm]上流側($z=-360[\text{mm}]$)のピン非発熱部に配置されたAA断面にある熱電対(TW202-AA)を参照した。AA断面下流のピン発熱部下端($z=-342.5[\text{mm}]$)から閉塞物下端($z=-35[\text{mm}]$)までの間に、BA断面($z=-155[\text{mm}]$)、BB断面($z=-45[\text{mm}]$)の2断面でナトリウム温度が計測できるようになっている。スペーサワイヤは、ピン発熱部下端の500[mm]上流から巻かれている。

閉塞物内部(閉塞物高さ $H=35[\text{mm}]$)では、閉塞物下端近傍のCA断面($z=-25.0[\text{mm}]$ 、 $z/H=-0.714$)、閉塞物の中央に位置するCB断面($z=-17.5[\text{mm}]$ 、 $z/H=-0.5$)、CC断面($z=-10[\text{mm}]$ 、 $z/H=-0.286$)およびCD断面($z=-2.5[\text{mm}]$ 、 $z/H=-0.0714$)の各断面で閉塞物内外のナトリウム温度を計測することができる。

閉塞物下流では、閉塞物上端($z=0[\text{mm}]$)からピン発熱部上端($z=307.5[\text{mm}]$)までの間に、DA断面($z=1[\text{mm}]$)、DB断面($z=5[\text{mm}]$)、DC断面($z=15[\text{mm}]$)、DD断面($z=25[\text{mm}]$)、DE断面($z=35[\text{mm}]$)、DF断面($z=50[\text{mm}]$)、DG断面($z=70[\text{mm}]$)、DH断面($z=100[\text{mm}]$)、DI断面($z=200[\text{mm}]$)、DJ断面($z=307.5[\text{mm}]$)に熱電対が配置されている。さらに下流のピン非発熱部にあるEA断面($z=600.0$)においても温度を計測することができる。

図 2.3-2 に各断面内の水平方向温度分布のトラバースライン (Traverse-A および Traverse-B) を示す。Traverse-A は六角形の集合体断面の向き合う頂点間を結ぶ線であり頂点間距離 $W_A=68.7[\text{mm}]$ である。Traverse-B は向き合う面の中心を結ぶ線であり対面間距離 $W_B=60.94[\text{mm}]$ である。図 2.3-3 にサブチャンネル中心での軸方向温度分布を示す位置 (Point-A~P) について示す。

2) データ収録システム

データ収録システムは、16bit の AD 分解能を有するデータロガー (HEWLETT PACKARD 3852A) および収録を制御するためのホストコンピュータ (HEWLETT PACKARD 382) から構成される。計測信号は、前述した温度、圧力、ヒータピン電圧、電流および電力計である。温度信号は熱電対からの起電力信号を零接点補償器に通し、直流アンプにより増幅した後に、データロガーにより収録を行った。その他の計測信号については信号変換器からの信号を直接ロガーに接続して収録した。

3. 試験条件および試験方法

3. 1 試験条件

試験条件を表 3.1-1 に示す。試験では、37 ピン束模擬燃料集合体内の閉塞物との相対位置が異なるヒータピンをそれぞれ個々に加熱した場合の集合体内温度分布を、ヒータピン出力および集合体流入流量をパラメータに測定した。表中の集合体入口流量およびヒータピン出力の括弧内の数値は、以下に示す実機定格条件に対する比率を示したものである。表 3.1-2 に実機および試験体の主要目を示す。

1) ヒータピン出力

試験体のヒータピン出力は平坦分布であり、1 本あたりの最大出力は $26.1[\text{kW/pin}]$ 、発熱長は $65[\text{cm}]$ であるため、線出力は $40.15[\text{kW/m}]$ となる。一方、実機の最大線出力は $42.2[\text{kW/m}]$ であり、試験体の最大線出力とほぼ同等である。よって試験条件として実機条件 $42.2[\text{kW/m}]$ を $100[\%]$ 出力とした。

2) 試験体流入流量

実機における最大流量は内側炉心第一領域において $30.2[\text{kg/s}]$ となる。実機条件を模擬する場合、試験体入口でのレイノルズ数を一致させる場合と、試験体内の平均質量流量を一致させる場合が考えられる。本試験条件の設定においては、後者を採用することとし、 $400[\text{L/min}]$ を $100[\%]$ 流量とした。

3. 2 試験方法

本試験に先立ち、試験体入口に設置した電磁流量計 (EMF050) および試験体内に設置した熱電対の校正を行った。電磁流量計は試験ループ最上部に設置されている膨張タンクのナトリウムを自然落下させて、そのときの落下したナトリウムの体積と落下に要した時間から平均流量を求め、流量計の出力電圧と比較する方法（容積法）により校正した。容積法により求めた流量校正曲線に基づき算出した流量と実流量との差は、最大 $0.4[\text{L/min}]$ であった。

試験体内的熱電対校正は、ループ内ナトリウム温度が一定となるように流量を $250[\text{L/min}]$ に固定し、試験体バンドル入口部に設置されている熱電対 (TW-202AA) の指示値を基準温度として $300[\text{°C}]$ 、 $350[\text{°C}]$ 、 $400[\text{°C}]$ 、 $450[\text{°C}]$ で実施した。ループ内のナトリウム温度は、試験体入口の上流側にあるナトリウム加熱器を用いて試験体入口温度 (TI155) を所定温度となるように制御した。温度校正結果を反映させて入口温度 $300[\text{°C}]$ 定常状態での収録データを処理したところ、基準温度 (TW-202AA の指示値) と各熱電対との差は、最大 $0.27[\text{°C}]$ であった。

電磁流量計および熱電対の校正が終了した後、試験を開始した。試験条件の設定

は、以下の手順で行った。

- (1) 試験体流入流量を電磁流量計 EMF050 の指示にて設定する(図 2.1-1 参照)。
- (2) 電磁流量計の上流側に設置されたナトリウム加熱器および空気冷却器により、試験体入口温度を 300[℃] (温度センサ TI155) に設定する。
- (3) 模擬燃料ピンヒータ出力を電力値 WI0500 の指示にて設定する。
- (4) ヒータピンの投入により変化した試験体入口温度をナトリウム加熱器および空気冷却器により調整する。
- (5) 条件を設定した後、約 1 時間保持し、定常状態を確認した後、データを収録する。

なお、本試験のデータ収録条件は、サンプリング周期 0.1[秒]、データ点数 6000[点]、収録時間 600[秒]で行った。

4. 試験結果

各試験ケースの温度計測結果を表 4.1-1 から表 4.1-9 に示す。また、試験時の集合体流入温度、流量およびヒータピン出力を表 3.1-1 の試験条件に合わせて示す。

4. 1 軸方向温度分布

図 4.1-1 から図 4.1-9 に Point-A から Point-P までのサブチャンネル中心における軸方向ナトリウム温度分布を示す。図の上段(a)は閉塞物が存在する領域のサブチャンネル (Point-A,-B,-C,-D) 、(b)は閉塞物に接近している健全サブチャンネル (Point-G,-H,-I) 、下段(c)は閉塞物から離れた健全サブチャンネル (Point-J,-K,-L,-M) 、(d)は閉塞物から離れたラッパ管壁近傍サブチャンネル (Point-N,-O,-P) の温度分布を示している。図の横軸は閉塞物上端位置を基準 ($z=0$) としてワイヤ巻ピッチ ($L=200[\text{mm}]$) で規格化した軸方向高さ $z^*(=z/L)$ を示す。閉塞物 (高さ 35[mm]) は $z^*=-0.175$ (閉塞物下端) から $z^*=0.0$ (閉塞物上端) の範囲にあり、この範囲 (CB 断面から CD 断面) の各サブチャンネルには 2 点から 3 点の熱電対が設置されている。図の縦軸は下式 (1) で求めた温度上昇理論値 dT_{cal} で規格化した入口温度 (TW-202AA) からの無次元温度上昇値 $dT^*(=dT/dT_{cal})$ を示す。

$$dT_{cal} = \frac{37 \cdot P}{\rho(T_{in}) \cdot C_p(T_{average}) \cdot Q_L} \quad (T_{in}: \text{TW-202AA}, T_{out}: \text{TIA-156}) \quad (1)$$

$$T_{average} = \frac{T_{in} + T_{out}}{2}$$

ここに、

P : ヒータ出力 [J/s]

Q_L : 試験体流入流量 [m^3/s]

ρ : 試験体入口温度 T_{in} [K]におけるナトリウム密度 [kg/m^3]

C_p : 試験体平均温度 $T_{average}$ [K]におけるナトリウム比熱 [J/(kg/K)]

1) 閉塞内部外周発熱 (Case-1,-2)

閉塞物が設置されているサブチャンネル内に配置されたヒータピン (ピン番号 408) を発熱したケースで、試験体流入流量およびヒータピン出力は第 3.1 項で定める実機定格条件に対して Case-1 がそれぞれ 50[%]、Case-2 がそれぞれ 15[%] となっている。

Case-1 の試験結果を図 4.1-1 に示す。閉塞物が存在する閉塞サブチャンネル (図 4.1-1(a)) の上流側 (BA 断面: $z^*=-0.775$) では発熱ピンに近い Point-B および Point-D の温度上昇がほかに比べ顕著である。閉塞物下端から 10[mm] 上流 (BB 断面: $z^*=-0.225$) までの温度変化を比較すると、周辺サブチャンネル Point-B と内側サブチャンネル Point-D に温度上昇割合の差異が見られる。内側サブチャンネル Point-D に比べ冷却材の配分割合の大きい周辺サブチャンネル Point-B では温度上昇の割合

が緩慢となっている。一方、周辺チャンネル Point-A では、同様の位置に属する Point-B に比べ温度上昇の割合が大きくなっている。このような温度分布は、発熱ピン周辺の高温流体が下流に存在する閉塞物の影響で上流側に比較して Point-A 領域により多く配分されるためと考えられる。

閉塞物内部 ($-0.175 \leq z^* \leq 0.0$) では、閉塞物下端部 ($z^* = -0.175$) から軸方向に温度が急激に上昇している。温度上昇の特性は、周辺サブチャンネルと内側サブチャンネルで異なっている。周辺サブチャンネル Point-A および Point-B の閉塞物内部温度は閉塞物上端付近 ($z^* = -0.0125$) で最大値を示すとともに、軸方向に対して正の温度勾配をもつ。一方、内側サブチャンネル Point-C および Point-D では閉塞物内で上昇した温度が閉塞物上端付近 ($z^* = -0.0125$) で一旦低下した後、再び上昇する傾向を示している。閉塞物上端付近における温度低下は、隣接する健全サブチャンネル内の低温流体が当該領域に流入するためと考えられる。

閉塞物を流出した後温度は低下するが、周辺サブチャンネル Point-B では DE 断面付近 ($z^* = 0.175$) に顕著な温度上昇が観察される。

閉塞物近傍の健全サブチャンネルの温度分布（図 4.1-1(b)）では、発熱ピンに最も近い Point-Gにおいて、閉塞物の中心にあたる CB 断面 ($z^* = -0.0875$) で温度上昇が観察される。この温度上昇は、閉塞物内部を流れる高温流体の一部が健全サブチャンネル側に流出することにより生じたものと考えられる。一方、発熱ピンから離れた Point-I では、閉塞物の下端から 10[mm] 上流 ($z^* = -0.125$) で顕著な温度低下が見られる。この温度低下は、閉塞物を避ける水平方向流れに健全サブチャンネル側の低温流体が巻き込まれることにより生じたものと考えられる。

その他の健全サブチャンネル（図 4.1-1(c),(d)）では、中心ピンの閉塞物側に位置するサブチャンネル（Point-J）の閉塞物設置断面付近に約 0.05 の無次元温度上昇が認められており、前述した閉塞物を避ける水平方向流れが集合体中心付近まで及ぶことが分かる。一方、閉塞物からより離れたヒータピン 101 から閉塞物の反対側に位置する健全サブチャンネル（Point-K）では、軸方向の無次元温度上昇値に変化は認められない。

Case-2 の試験結果を図 4.1-2 に示す。Case-2 は Case-1 と試験体流入流量とヒータピン出力の比は同じであるが、絶対値をそれぞれ Case-1 の 30[%] としている。

無次元温度上昇値の分布は Case-1 と概ね一致しているが、外周サブチャンネル Point-B の閉塞物下流において両者に差異が見られる。Case-1においては、閉塞物を流出した後低下した温度が DE 断面付近 ($z^* = 0.175$) で一旦上昇する分布を示すが、本ケースにおいては同断面付近での温度上昇傾向は認められず、出力・流量条件に対して依存性を示す結果となっている。低出力・流量条件では、閉塞物後流域での流動場の乱れは小さく、閉塞物の下流の流れに影響は及ばないものと考えられる。

一方、中心ピンの閉塞物側に位置するサブチャンネル（Point-J）の無次元温度上昇値は、Case-1 とほぼ同様の分布を示しており、出力・流量条件に対する依存性は閉塞物下流側ほど顕著ではない。

2) 閉塞内部内周発熱 (Case-3,-4)

閉塞物に隣接するヒータピン（ピン番号 306）を発熱したケースで、試験体流入流量およびヒータピン出力は第 3.1 項で定める実機定格条件に対して Case-3 がそれぞれ 50[%]、Case-4 がそれぞれ 15[%] となっている。

Case-3 の試験結果を図 4.1-3 に示す。発熱ピンに接する Point-D の閉塞物下流側における温度変化を見ると、閉塞物を避ける水平方向流れの影響と見られる複雑な温度分布が閉塞物下端近傍に生じている。

閉塞物上端より下流側では Point-B および Point-D に温度上昇が見られる。この温度上昇は閉塞物下流域に当該サブチャンネル内をラッパ管壁側に横切る水平方向流れが存在することを示唆している。

健全サブチャンネル側では中心ピンの閉塞側に位置する Point-J の閉塞物上流側断面 ($z^*=0.225$) において、前述した閉塞物を避ける水平方向流れの影響と見られる温度上昇が確認できる。また、Point-J から約 10[mm] 離れた Point-K においても同様の影響による温度上昇が確認でき、水平方向流れの影響は試験体中心よりさらに外側まで及ぶことが分かる。

Case-4 の試験結果を図 4.1-4 に示す。Case-4 は Case-3 と試験体流入流量とヒータピン出力の比は同じであるが、絶対値をそれぞれ Case-3 の 30[%] としている。

無次元温度上昇値の分布は Case-3 と概ね一致しているが、外周サブチャンネル Point-D の閉塞物下流において両者に僅かな差異が見られる。Case-3 においては、閉塞物の直後 ($z^*=0.005$) において顕著な温度低下が認められるが、本ケースでは低下の度合いは小さい。

3) Case-5 (集合体中央部発熱)

Case-5 は試験体中央のヒータピン（ピン番号 101）を発熱したケースで、試験体流入流量およびヒータピン出力はそれぞれ 3.1 項で定める実機定格条件の 15[%] となっている。試験結果を図 4.1-5 に示す。

閉塞物が存在するサブチャンネル (Point-A,-B,-C,-D) に温度変化が生じるのは閉塞物上端から 50 [mm] ($z^*=0.25$) 下流で、これより上流側では無次元温度上昇値に変化は認められない。発熱ピン周辺の閉塞物側サブチャンネルに位置する Point-J の閉塞物下端近傍断面 ($z^*=-0.225$) では、閉塞物を避ける水平方向流れの影響と見られる温度低下が生じている。また、閉塞物の下流 ($z^*\sim0.5$) では比較的急峻な温度勾配が見られる。同様な温度上昇が一つ閉塞物側のサブチャンネル (Point-I) でも見られる。これらは閉塞物を廻り込む流れの影響と考えられる。

一方で加熱ピンに対して閉塞物の反対側にある Point-K では、閉塞物下流 ($z^*\sim0.5$) で、温度が低下しており、さらに外側の非加熱サブチャンネルからの低温なトリウムがスワールフロー効果と合わせて径方向に流れ込んできていることが分かる。

4) 閉塞内部非発熱 (Case-6~9)

Case-6 から Case-9 は試験体の健全チャンネルに配置されるヒータピンを発熱したケースで、各ケースともに試験体流入流量およびヒータピン出力はそれぞれ 3.1 項で定める実機定格条件の 50[%] および 80[%] となっている。試験結果を図 4.1-6 から図 4.1-9 に示す。

中心ピンの 1 列外側で閉塞物が存在する側に位置するヒータピン（ピン番号 204）を発熱させた Case-6 の試験結果を図 4.1-6 に示す。ヒータピンの発熱が当該ピン廻りのサブチャンネル Point-H、Point-I および Point-J の温度上昇に最も寄与しており、無次元温度上昇値の最大は Point-I の発熱部上端断面 ($z^*=1.5375$) で約 0.27 に達している。これらのサブチャンネルの閉塞物上流 ($z^*=-0.225$) で閉塞物を避ける水平方向の流れによる温度低下が見られる。閉塞物下流における温度分布を見ると、Point-H および Point-J ではスワールフローの影響（周囲のサブチャンネルからワイヤに沿ってクロスフローが入り込む）と見られる温度の上がり下がりが確認されるのに対して、閉塞物と接する Point-I ではこのような分布は示さず温度は単調に上昇している。特性に差異が見られる。Point-I は閉塞物の上方に向かう水平方向流れに対して、加熱ピンの下流にあたるため、常に高温となっていると考えられる。

発熱ピン廻りのサブチャンネル Point-J の閉塞物上流断面 ($z^*=-0.225$) においては、閉塞物を避ける水平方向流れの影響と見られる温度低下が生じている。

中心ピンの 1 列外側で閉塞物の反対に位置するヒータピン（ピン番号 201）を発熱させた Case-7 の試験結果を図 4.1-7 に示す。ヒータピンの発熱が当該ピン廻りのサブチャンネル Point-K および Point-L の温度上昇に最も寄与しており、無次元温度上昇値の最大は Point-L の DI 断面 ($z^*=1.0$) で約 0.22 に達している。

発熱ピンの閉塞物側にあたる Point-K では $z^*=0.5$ から 1.0 にかけて低下する傾向を見せており、Case-6 の同配置にあたる Point-I に比べ、水平方向の流れの影響が小さくなっている。

中心ピンの 2 列外側で閉塞物の反対に位置するヒータピン（ピン番号 302）を発熱させた Case-8 の試験結果を図 4.1-8 に示す。ヒータピンの発熱が当該ピン廻りのサブチャンネル Point-L の温度上昇に最も寄与しており、無次元温度上昇値の最大は発熱部上端断面 ($z^*=1.5375$) で約 0.23 に達している。軸方向の分布を見るとスワールフローの影響と見られる温度の上がり下がりは確認されるものの、閉塞物を避ける水平方向流れによる閉塞物下端近傍断面の温度分布への顕著な影響は認められない。

閉塞物の反対に位置するヒータピン（ピン番号 418）を発熱させた Case-9 の試験結果を図 4.1-9 に示す。ヒータピンの発熱が当該ピン廻りのサブチャンネル Point-P の温度上昇に最も寄与しており、無次元温度上昇値の最大は約 0.18 に達している。発熱ピンにより加熱された高温流体は、スワールフローにより反時計回り（試験体

を上方から見た場合) の方向にあるサブチャンネル Point-M および Point-N に輸送されることが温度分布から確認できる。また、両者の温度分布の差から、高温流体はラッパ管に沿うサブチャンネル Point-N により多く配分されることが分かる。

また、これらの閉塞物反対側の外周に位置するサブチャンネルでは、閉塞物を避ける水平方向流れによる閉塞物下端近傍断面の温度分布への顕著な影響は認められない。

Case-1 から Case-9 の軸方向温度分布から、37 本ピン束模擬燃料集合体の周辺 2 列を閉塞した体系では、閉塞物の上流側には閉塞物を避けようとする水平方向流れが、閉塞物の後流域にはラッパ管壁に向かう流れが存在し、これらの流れが集合体内の温度分布に影響を及ぼすことがわかった。これらの流れにより影響を受ける範囲は、水平方向では閉塞物側面から中心ピン周囲のサブチャンネル (Point-K) 近傍までの範囲、高さ方向では流速条件により差異はあるが閉塞物上流側の $z^*=-0.225$ から閉塞物後流の $z^*=0.25$ までの範囲であり、集合体全面に影響が及ぶことはなく閉塞物周辺の領域に限定されることがわかった。

4. 2 水平方向温度分布

図 4.2-1 から図 4.2-9 にトラバースライン (Traverse-A,-B) に沿ったサブチャンネル中心におけるナトリウム温度の水平方向分布を示す。図番の末尾の A が Traverse-A、B が Traverse-B の試験結果を示す。図の横軸は、Traverse-A についてはラッパ管の頂点間距離 $W_A=68.7[\text{mm}]$ で規格化し、Traverse-B についてはラッパ管壁の対面間距離 $W_B=60.94[\text{mm}]$ で規格化して示している (図 2.3-2 参照)。よって、横軸の $r^*=-1.0$ は閉塞物が接している壁面、 $r^*=1.0$ は閉塞物と反対側の健全な壁面を示す。 $r^*=0.0$ はピン番号 101 の中心を示しており試験体中心となる。図の縦軸は、式 (1) で求めた温度上昇理論値 dT_{cal} で規格化した入口温度 (TW-202AA) からの無次元温度上昇値 dT^* を示す。

1) 閉塞内部外周発熱 (Case-1,-2)

Case-1 の試験結果を図 4.2-1 に示す。Traverse-A の試験結果 (図 4.2-1A) から、無次元温度上昇値の変化は閉塞物の反対側 ($r^*>0$) の健全サブチャンネルで生じることはなく、閉塞物が存在する側 ($r^*<0$) のみに生じることが分かる。閉塞物側の無次元温度上昇値は、閉塞物の下端近傍断面を除き試験体の外側から中心側に向かって徐々に低下しており、ヒータピンで加熱された高温流体が周辺サブチャンネルにより多く配分されることが分かる。閉塞物に隣接する Point-I ($r^*=-0.421$) の閉塞物下端近傍 (BB 断面) には閉塞物を避ける水平流れの影響による温度上昇が、CC 断面には同影響による温度低下が確認できる。CC 断面における温度低下は、閉塞物を避ける水平方向流れが、健全サブチャンネル内の低温流体を巻き込むことよ

り生じるものと考えられる。

発熱ピンのより近傍を通過する Traverse-B の試験結果(図 4.2-1B)においても、無次元温度上昇値の変化は閉塞物の存在する側 ($r^*<0$) のみに生じている。閉塞物下端近傍(BB 断面)の閉塞サブチャンネルでは、閉塞物を避ける水平方向流れの影響で試験体中心側に正の温度勾配が生じている。閉塞物内の無次元温度上昇値は、周辺サブチャンネル Point-B では CC 断面($z=-10.0[\text{mm}]$)から CD 断面($z=-2.5[\text{mm}]$)で約 0.05 上昇しているのに対し、内側サブチャンネル Point-D では顕著な温度変化は認められず、健全サブチャンネル側に熱が移行していることが分かる。閉塞物下流における同サブチャンネルの温度変化を見ると、DC 断面 ($z=15[\text{mm}]$) より上流側においては試験体中心方向に正の温度勾配が生じているのに対し、これより下流では温度勾配が負に転ずる。温度勾配が負に転ずるのは、閉塞物後流域に生じる流れ場により影響を受けた試験体外周での旋回流が回復することにより、周辺サブチャンネル Point-B への高温流体の配分割合が増大したためと考えられる。

Case-2 の試験結果を図 4.2-2 に示す。Traverse-A の無次元温度上昇値の分布(図 4.2-2A) は、Case-1(図 4.2-1A) とほぼ同じ傾向を示しており、高出力・流量条件と低出力・流量条件の試験結果に顕著な差は認められない。

Traverse-B の試験結果(図 4.2-2B)を見ると閉塞物内部の無次元温度上昇値の分布傾向は、高出力・流量条件の Case-1 と一致しているが、試験体中心側に向かう負の温度勾配が低出力・流量条件である Case-2 のほうが大きくなっている。閉塞物下流の無次元温度上昇値の分布は、DD 断面 ($z=25.0[\text{mm}]$) 以降で試験体中心に向かう温度勾配が負に転じる Case-1 に対して、Case-2 では同様傾向を示す領域がより上流側の DC 断面 ($z=15[\text{mm}]$) に生じている。このことから閉塞物がこの後流域の温度変動特性に及ぼす影響は、高出力・流量条件 (Case-1) に比べ低出力・流量条件 (Case-2) のほうが小さいことが分かる。

2) 閉塞内部内周発熱 (Case-3,-4)

Case-3 の試験結果を図 4.2-3 に示す。Traverse-A の試験結果(図 4.2-3A)によれば、試験体上流側(BA 断面)では発熱ピン位置 ($r^* = -0.42$) をピークとした温度分布を示すが、閉塞物下端近傍の BB 断面 ($z=-45[\text{mm}]$) から DC 断面(閉塞物上端から 15[mm]下流)では温度分布のピークが試験体中心側に偏っている。この偏りは、閉塞物を避ける水平方向流れが、発熱ピン近傍の高温流体を試験体中心方向に輸送することにより生じるものと考えられる。閉塞物を避ける水平方向流れの影響は、閉塞物下端近傍 ($z=-45.0[\text{mm}]$) に最も顕著に現れるとともに、その範囲は中心ピン周辺に位置するサブチャンネル Point-K ($r^*=0.14$) にまで及ぶことが分かる。

発熱ピンを通過する Traverse-B の試験結果(図 4.2-1B)においても、閉塞物を避ける水平方向流れの影響と見られる温度上昇の範囲が、閉塞物下端近傍(BB 断面)の中心ピン周辺サブチャンネルに及ぶことが分かる。一方、閉塞物上端より下流側の温度上昇値は、発熱ピン位置より試験体外周側にピークが偏る分布となって

いる。閉塞物を廻り込んで、加熱ピンより外側に向かう流れの影響を受けていると考えられる。閉塞物近傍での温度分布のピーク値は、閉塞物内上端 ($z=-2.5[\text{mm}]$) で最大を示し、閉塞部上端から 5[mm] 下流で一旦低下した後再び上昇する傾向を示している。

Case-4 の試験結果を図 4.2-4 に示す。Traverse-A の無次元温度上昇値の分布（図 4.2-4A）は、Case-3 とほぼ同じ傾向を示しており、高出力・流量条件と低出力・流量条件の試験結果に顕著な差は認められない。

一方、Traverse-B の試験結果（図 4.2-4B）を見ると閉塞物近傍の閉塞物内部サブチャンネル Point-D の温度上昇特性に差異が見られる。Case-3 では閉塞物上端から 5[mm] の位置で温度が一旦低下するのに対して、Case-4 では閉塞物内上端 5[mm] 下流から 100[mm] 下流までの無次元温度上昇値は、ほぼ同じ値を示している。本結果から、低出力・流量条件においては高出力・流量条件に見られるような閉塞物のすぐ下流の温度分布に影響を及ぼす流れは存在しないことが分かる。

3) Case-5 (集合体中央部発熱)

図 4.2-5A (Traverse-A) および図 4.2-5B (Traverse-B) に Case-5 の試験結果を示す。試験体上流 (BA 断面) では発熱ピン位置 ($r^*=0.0$) 近傍をピークとした温度分布を示すが、閉塞物下端近傍の BB 断面 ($z=-45[\text{mm}]$) から DC 断面 (閉塞物上端から 15[mm] 下流) では、閉塞物を避ける水平方向流れの影響により分布のピークが、発熱ピン周辺で閉塞物の反対側に位置するサブチャンネル Point-K ($r^*=0.14$) 近傍に偏っている。また無次元温度上昇値は、このピークを中心軸としてほぼ左右対称な分布となっている。温度分布中心軸の偏りは下流に行くに従い解消され、DH 断面 ($z=100 [\text{mm}]$) より下流側では試験体中心 ($r^*=0.0$) を中心軸とした左右対称の分布となっている。また、発熱ピン近傍の無次元温度上昇値は、下流に行くに従い大きくなっている。これらの温度分布から、DH 断面より下流では閉塞物の影響を受けることはなく、軸方向の流れが支配的になっていると考えられる。

4) 閉塞内部非発熱 (Case-6～-9)

図 4.2-6A (Traverse-A) および図 4.2-6B (Traverse-B) に Case-6 の試験結果を示す。各軸方向水平断面の温度は、発熱ピン近傍にピークをもつ分布となっている。閉塞物近傍の断面における温度分布のピークは、閉塞物を避ける水平方向流れの影響で発熱ピン中心位置 ($r^*=-0.28$) から閉塞物の反対側に偏っている。このピークの偏りは閉塞物から下流に行くに従い解消され、DF 断面 ($z=50.0[\text{mm}]$) より下流では発熱ピンを中心としたほぼ左右対称な温度分布となっている。温度分布のピーク値は下流に行くに従い上昇する傾向を示しており、発熱部上端に位置する DJ 断面では約 0.27 に達する。

各軸方向水平断面の発熱ピンによる温度上昇範囲を見ると、DC 断面 ($z=15.0 [\text{mm}]$) より上流側においては、発熱ピン周囲とその 1 列外側のサブチャンネル ($-0.42 \leq r^* \leq 0.14$) に限定されることが分かる。温度上昇範囲は、試験体を上昇するに従

い拡大され、発熱部上端では発熱ピンから 3 列外側 ($-0.42 \leq r^* \leq 0.42$) に及んでいる。

図 4.2-7A (Traverse-A) および図 4.2-7B (Traverse-B) に Case-7 の試験結果を示す。各軸方向水平断面の温度は、発熱ピン近傍にピークをもつ分布を示しているが、Case-6 の閉塞物近傍断面に見られるような温度分布ピーク位置の顕著な偏りは認められず、発熱ピンの中心位置 ($r^*=0.28$) をピークとした分布となっている。温度分布のピークは、発熱部上端の上流に位置する DI 断面で最大 (約 0.22) となっている。

各軸方向水平断面の発熱ピンによる温度上昇範囲を見ると、DC 断面 ($z=15.0$ [mm]) より上流側においては、発熱ピン周りのサブチャンネル ($0.14 \leq r^* \leq 0.42$) に限定されることが分かる。温度上昇範囲は、試験体を上昇するに従い拡大され、発熱部上端では発熱ピンから 3 列外側 ($-0.42 \leq r^* \leq 0.42$) に及んでいる。

図 4.2-8A (Traverse-A) および図 4.2-8B (Traverse-B) に Case-8 の試験結果を示す。各軸方向水平断面の温度は、発熱ピン近傍にピークをもつ分布を示しているが、その左右で分布特性に違いが見られる。発熱ピンの中心位置 ($r^*=0.42$) から試験体中心側では温度の上昇が小さく、ピークを示す位置との間に比較的大きな温度勾配が生じているのに対して、試験体外側での温度は放物線を描くように徐々に低下している。これらの温度分布は発熱ピン廻りの高温流体が、スワールフローの影響を受け、試験体中心に比べ試験体外側により多く輸送されることにより生じると考えられる。

各軸方向水平断面の発熱ピンによる温度上昇範囲を見ると、DC 断面 ($z=15.0$ [mm]) より上流側においては、発熱ピン廻りのサブチャンネルと外周チャンネル ($0.42 \leq r^* \leq 0.702$) に限定されることが分かる。温度上昇範囲は、試験体を上昇するに従い拡大され、発熱部上端では発熱ピンから 3 列外側 ($-0.14 \leq r^* \leq 0.702$) に及んでいる。

図 4.2-9A (Traverse-A) および図 4.2-9B (Traverse-B) に Case-9 の試験結果を示す。各軸方向水平断面の温度は、発熱ピンが位置する試験体外周近傍にピークをもつ分布を示している。各軸方向水平断面の発熱ピンによる温度上昇範囲を見ると、DF 断面 ($z=50.0$ [mm]) より上流側においては、試験体外周および外周から 1 列内側のサブチャンネル ($0.702 \leq r^* \leq 0.902$) に限定されることが分かる。温度上昇範囲は、試験体を上昇するに従い拡大されるが、発熱ピン廻りのサブチャンネルの 1 列外側 ($0.421 \leq r^* \leq 0.702$) に止まり、他ケース比べ制限される。Case-6 から Case-8 に比較して温度上昇範囲が制限されるのは、発熱ピン廻りの高温流体がスワールフローによって主にラッパ管に沿ったサブチャンネルに流れ込んでいるためと考えられる。

5. 考 察

5. 1 閉塞物によるクロスフローの影響

健全サブチャンネルに配置されるヒータピンで閉塞物からの位置が異なる Case-6 および Case-7 における発熱ピン近傍サブチャンネルの軸方向温度分布を図 5.1・1 および図 5.1・2 に示す。

Case-6 は閉塞物の比較的近傍に当たるヒータピン（ピン番号 204）を発熱している。試験結果（図 5.1・1）によれば、発熱ピン（ピン番号 204）廻りの閉塞物側に位置するサブチャンネル Point-I の閉塞物上流 ($z^*=-0.225$) には、閉塞物を避ける水平方向流れにの影響と見られる温度低下が観察される。閉塞物の反対に位置するサブチャンネル Point-J においても温度低下は見られるが、閉塞物側に比べると温度低下割合は小さくなっている。閉塞物の反対側で、発熱ピンからさらに離れたサブチャンネル Point-K では、発熱ピンにより加熱された高温流体が、閉塞物上流に生じた水平方向流れによって輸送されたと思われる温度上昇が確認できる。閉塞物からさらに離れたサブチャンネル (Point-L, Point-M) には、水平方向流れの影響と思われる温度変化は観察されず、閉塞物上流側に生じる水平方向流れの影響は、試験体の中心近傍までに限定されることが分かる。

Case-7 は閉塞物から比較的離れたヒータピン（ピン番号 201）を発熱している。試験結果（図 5.1・2）によれば、Case-6 と同様、発熱ピン廻りのサブチャンネルの閉塞物上流 ($z^*=-0.225$) には、閉塞物を避ける水平方向流れにの影響と見られる温度低下が観察され、この低下割合が発熱ピンの閉塞側とその反対側で異なる傾向を示している。

Case-6 および Case-7 の発熱ピン廻りの閉塞物側に位置するサブチャンネル Point-I および Point-K の軸方向温度分布を図 5.1・3 に、閉塞物の反対に位置するサブチャンネル Point-J および Point-L の軸方向温度分布を図 5.1・4 に示す。これらの試験は試験体流入流量およびヒータピン出力条件が一致（表 3.1・1）しているとともに、ヒータピンの配置も対称な位置にあることから、閉塞物の影響がなければ同様の温度分布を示すと考えられる。

閉塞物上流側 ($z^*=-0.225$) での温度低下は、閉塞物から離れたピンを加熱した Point-K (図 5.1・3) および Point-L (図 5.1・4) が僅かに小さくなる傾向が見られるが顕著な差は認められない。一方、閉塞物下端から下流において Case-6 と Case-7 の温度分布を比較すると、閉塞物に近い側のサブチャンネルでは閉塞物設置断面 ($-0.125 \leq z^* \leq -0.0125$) に、閉塞側と反対のサブチャンネルでは閉塞物上端より下流 ($z^*>0.0$) に温度分布の差異が見られる。これらの温度分布から閉塞物を避ける水平方向流れは、ヒータピン 204 の領域を閉塞物設置断面 ($-0.125 \leq z^* \leq -0.0125$) から閉塞物下流 ($z^*>0.0$) に向かって斜めに上昇すると考えられる。

5. 2 ワイヤスペーサの影響

燃料集合体内の燃料ピンはラッパ管内に正三角形状に配列して収納されており、隣接する燃料要素間の間隔は、燃料要素にスパイラル状に巻き付けたワイヤスペーサで保持されている。ワイヤスペーサは燃料要素の下方から上方に時計回りに巻き付けられており、燃料要素にはこれに沿った流れ（スワールフロー）が形成され、隣接する燃料要素の冷却に影響を及ぼす。ここでは、閉塞物による影響が比較的小ないと判断される、閉塞物の反対側に位置するサブチャンネル Point-L に隣接するヒータピン 201 およびヒータピン 302 を同一条件で発熱させた Case-7 および Case-8 の軸方向温度分布を比較することでワイヤスペーサの影響を確認した。

図 5.2-1 にサブチャンネル Point-L の軸方向温度分布およびワイヤスペーサの位置を示す。サブチャンネルの 270 度側に位置するヒータピン 201 を発熱させた Case-7 では、ワイヤ巻き付け角度が 180 度近傍から上昇傾向を示す温度が零度付近を境に低下に転じ、180 度近傍で再び上昇するワイヤ角度との相関が強い温度分布特性を示している。一方、サブチャンネル Point-L の 30 度側に位置するヒータピン 302 を発熱させた Case-8 では、ワイヤ巻き付け角度が 180 度近傍から低下傾向を示す温度が零度付近を境に上昇に転じ、180 度近傍で再び低下するワイヤ角度との相関が Case-7 とほぼ位相が反転する温度分布特性を示している。これらの温度変化は、隣接する非発熱ピン廻りに生じるスワールフローの影響に起因するもので、サブチャンネル解析におけるサブチャンネル間の混合係数の妥当性評価や燃料集合体内熱流動解析評価手法の開発・検証をする上で重要なデータと考えられる。

5. 3 出力・流量条件の影響

第 4.1、4.2 項で示したように出力・流量条件を実機定格条件の 50% と 15% に設定し、同一ヒータピンを発熱させたケース (Case-1 と Case-2 ならびに Case-3 と Case-4) について規格化した温度分布を比較すると、閉塞物のすぐ下流を除いて出力・流量の大小はほとんど温度分布に影響を与えていない。15%程度の出力・流量では、閉塞物を迂回する流れを含めて浮力の影響は限られたものといえる。閉塞物上端から下流にかけて差異が見られたサブチャンネル (Point-B,-D) について、ケース間の軸方向温度分布を比較した結果を図 5.3-1 から図 5.3-4 に示す。閉塞領域内最外周のピン 408 を発熱させた Case-1 と Case-2 の比較では、加熱ピンに沿った周辺サブチャンネル Point-B において高出力・流量条件の Case-1 のみに、閉塞物の直下流に不規則な温度の上昇・下降が見られる。また、閉塞領域内の内側ピン 306 を発熱させた Case-3 と Case-4 の比較では、加熱ピンに沿ったサブチャンネル Point-D において、やはり高出力・流量条件の Case-3 にみに、不規則な温度分布が見られる。高い流量条件では、閉塞物を廻り込んだ流れが閉塞物の後流に合流する過程で複雑な流れ場を形成していることが示唆される。

6. 結 論

60万kWe級大型炉と同等のピン径およびピンピッチを有する37本ピンバンドル体系模擬燃料集合体の一辺に沿った外側2列の14サブチャンネルにポーラス状閉塞物が組み込まれた試験装置を用い、閉塞物を廻り込む流れにより変形集合体内で予想される径方向流れが生じる体系での集合体内混合現象の把握と解析手法開発のための検証データを得ることを目的としたナトリウム試験を実施した。試験では閉塞物との相対位置が異なる7本のピンを個別に加熱し、当該ピン周囲にどのような温度場が形成されるかを測定した。また、一部の加熱ピンでは試験体流入流量とヒータピン出力条件を変えた試験を行い、この依存性を確認した。これらの試験で得られた結果を以下に示す。

六角集合体の1辺に沿った周辺1列および内側1列の2列を閉塞された本集合体系においては、閉塞物上流で閉塞物を避ける水平方向流れが生じ、この流れが集合体内の温度分布に影響を及ぼす。閉塞物を避ける水平方向流れは、閉塞物設置断面($-0.125 \leq z^* \leq -0.0125$)から閉塞物下流($z^* > 0.0$)を試験体中心に向かって斜めに上昇すると推定される。この水平方向流れで温度分布に影響を受ける範囲は、閉塞物側面からピン3列程度までの範囲となり集合体水平断面の全面に影響が及ぶことはなく閉塞物周辺の領域に限定されたことが分かった。

また、加熱ピン周囲のサブチャンネルの軸方向温度分布から閉塞物を避ける流れとワイヤスペーサに沿うスワールフローとともに温度分布に影響を与えていたことが分かった。

試験でパラメータとした50%と15%の出力・流量条件では、集合体内の温度分布に与える影響は限定的なものであった。

これらの温度分布データならびに試験条件は、データベースとして集合体内熱流動解析コードの開発・検証に使用できるよう整備された。

謝 辞

本研究の実施にあたり、熱流体技術開発グループの大島宏之研究主幹には有益なコメントを頂いた。本試験の実施にあたり、常陽産業（株）の運転員の方々にはナトリウムループの運転および試験データの収録に多大な御協力を頂いた。また、試験データ処理に関して原子力システム（株）中根茂氏に協力を頂いた。ここに深く感謝の意を表します。

参考文献

- [1] 永峯 剛、木村和浩、中村保雄、松本慎一郎、照射後試験用 X 線 CT 検査装置の開発－「常陽」使用済み炉心燃料集合体を用いたホット試験－、サイクル機構報告書 JNC TN9410 99-020 (1999).
- [2] 永峯 剛、照射済み燃料集合体の非破壊検査技術の開発－X線 CT 技術の適用－、Isotope News、2000 年 2 月号 (2000) .
- [3] Tomoyuki UWABA and Kosuke TANAKA, Development of a fast breeder reactor fuel bundle-duct interaction analysis code -BAMBOO: Analysis model and validation by the out-of-pile compression test, Nucl. Tech., Vol.136, pp.14-23 (2001) .
- [4] 堀 公明、古川鉄利、菅原 悟、塩化カリウム水注入法による大型バンドルの熱流動特性評価、サイクル機構報告書 PNC ZN9410 93-087 (1993) .
- [5] 大島宏之、今井康友、高速炉燃料集合体内詳細熱流動解析手法の開発（1）、サイクル機構報告書 JNC TN9400 2001-064 (2001) .
- [6] Ueta, M., Inagaki, T., Shibata, Y., Tarutani, K., and Okada, K., 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 (1995), p.771-776.
- [7] 板東文夫、他、「異物流入閉塞模擬試験による燃料局所閉塞の研究」、日本原子力学会「1990 秋の大会」予稿集、F45、(1990) .
- [8] K, Koyama, et al., "Study on Local Blockage in FBR Fuel Subassembly", Proc. of Int. Conf. on Fast Reactors and Related Fuel Cycles, Vol. III, P3.5-1~P3.5-10, (1991).
- [9] 小林 順、他、「燃料集合体内ポーラス状閉塞における温度場の特性」、JNC TN9400 2000-025、(1999).

表 2.2-1 模擬燃料集合体の主要仕様

Item		Large Scale FBR	Test section
集合体内 燃料要素数	[pin]	217	37
ラッパ管内 対面幅	[mm]	144.5	60.9
被覆管外径	[mm]	8.5	8.5
ワイヤ直径	[mm]	1.1	1.1
燃料要素 配列ピッチ	[mm]	9.65	9.65
集合体内 流路面積	[mm ²]	5.554×10^3	1.072×10^3
集合体内 水力等価直径	[mm]	3.155	3.24

表 2.3-1 模擬燃料集合体軸方向の熱電対位置

z/L		-0.775	-0.225	-0.125	-0.088	-0.050	-0.013	0.005	0.025	0.075	0.125	0.175	0.250	0.350	0.500	1.000	1.538	3.000
z [mm]		-155.0	-45.0	-25.0	-17.5	-10.0	-2.5	1.0	5.0	15.0	25.0	35.0	50.0	70.0	100.0	200.0	307.5	600.0
Cross-section		BA	BB	CA	CB	CC	CD	DA	DB	DC	DD	DE	DF	DG	DH	DI	DJ	EA
Pin No. (Point)	101 (J)	TW-101BA	TS-101BB	—	—	TS-101CC	TS-101CD	—	TN-101DB	TN-101DC	TN-101DD	TN-101DE	TN-101DF	TN-101DG	TN-101DH	TN-101DI	TN-101DJ	TN-101EA
	201 (K)	TW-201BA	TS-201BB	—	—	TS-201CC2	TS-202CD	—	TN-201DB	TN-201DC	TN-201DD	—	TN-201DF	—	TN-201DH	TN-201DI	—	TN-201EA
	203 (H)	TS-203BA	TS-203BB2	TS-203CA2	TS-203CB	TS-203CC	TS-203CD	—	TN-203DB	TN-306DC1	TN-203DD	—	TN-203DF	—	TN-203DH	TN-203DI	TN-203DJ	TN-203EA
	204 (I)	TW-204BA	TS-204BB	TS-204CA	TS-204CB	TS-204CC	TS-204CD	TN-204DA	TN-204DB	TN-204DC	TN-204DD	—	TN-204DF	—	TN-204DH	TN-204DI	TN-204DJ	TN-204EA
	301 (L)	TW-301BA	TS-301BB	—	—	TS-301CC	TS-301CD	—	TN-301DB	—	TN-301DD	—	TN-301DF	—	TN-301DH	TN-301DI	TN-301DJ	TN-301EA
	305 (G)		TS-203BB1	TS-203CA1	TS-305CB	TS-306CC	TS-305CD	—	TN-305DB	TN-305DC	TN-305DD	—	TN-305DF	—	TN-305DH	TN-305DI	TN-305DJ	TN-305EA
	306 (D)	TS-408BA	TS-306BB	—	TB-306CB	TB-306CC	TB-306CD	TN-408DA1	TN-306DB	TN-306DC2	TN-306DD	—	TW-306DF	—	TN-306DH	TN-306DI	TN-306DJ	TN-306EA
	307 (C)	TS-410BA2	TS-307BB	—	TB-307CB	TB-307CC	TB-307CD	TN-307DA	TN-307DB	TN-307DC	TN-307DD	—	TW-307DF	—	TN-307DH	TN-307DI	TN-307DJ	TN-307EA
	312 (P)	TS-312BA	TS-312BB	—	—	—	—	—	TN-312DB	—	TN-312DD	—	TN-312DF	—	—	—	TN-312DJ	TN-312EA
	401 (M)	TW-401BA	TS-401BB	—	—	TS-401CC	TS-401CD	—	TN-401DB	—	TN-401DD	—	TN-401DF	—	TN-401DH	TN-401DI	TN-401DJ	TN-401EA
	402 (N)	TS-402BA	TS-402BB	—	—	TS-402CC	TS-402CD	—	TN-402DB	—	TN-402DD	—	TN-402DF	—	TN-402DH	TN-402DI	TN-402DJ	TN-402EA
	409 (B)	TS-409BA	TS-409BB	—	TB-409CB	TB-409CC	TB-409CD	TN-408DA2	TN-409DB	TN-409DC	TN-409DD	TN-409DE	TN-409DF	TN-409DG	TN-409DH	TN-409DI	TN-409DJ	TN-409EA
	410 (A)	TS-410BA1	TS-410BB	—	—	TB-410CC	TB-410CD	TN-410DA	TN-410DB	TN-410DC	TN-410DD	—	TN-410DF	—	TN-410DH	TN-410DI	TN-410DJ	TN-410EA
	416 (O)	TS-416BA	TS-416BB	—	—	TS-416CC	TS-416CD	—	TN-416DB	—	TN-416DD	—	TN-416DF	—	TN-416DH	TN-416DI	TN-416DJ	TN-416EA
	418 (P)	TS-418BA	TS-418BB	—	—	TS-418CC	TS-418CD	—	—	TN-418DD	—	TN-418DF	—	TN-418DH	TN-418DI	TN-418DJ	TN-418EA	

表 2.3・2 模擬燃料集合体水平方向の熱電対位置

				z/L	-0.775	-0.225	-0.050	-0.013	0.025	0.075	0.125	0.250	0.500	1.000	1.538	3.000
				z [mm]	-155.0	-45.0	-10.0	-2.5	5.0	15.0	25.0	50.0	100.0	200.0	307.5	600.0
Traverse Line	Pin No.	Point	$r^*=r/W$	R	BA	BB	CC	CD	DB	DC	DD	DF	DH	DI	DJ	EA
A $W_a:34.4$ [mm]	410	A	-0.843	-29.0	TS-410BA1	TS-410BB	TB-410CC	TB-410CD	TN-410DB	TN-410DC	TN-410DD	TN-410DF	TN-410DH	TN-410DI	TN-410DJ	TN-410EA
	307	C	-0.702	-24.1	TS-410BA2	TS-307BB	TB-307CC	TB-307CD	TN-307DB	TN-307DC	TN-307DD	TW-307DF	TN-307DH	TN-307DI	TN-307DJ	TN-307EA
	204	I	-0.421	-14.5	TW-204BA	TS-204BB	TS-204CC	TS-204CD	TN-204DB	TN-204DC	TN-204DD	TN-204DF	TN-204DH	TN-204DI	TN-204DJ	TN-204EA
	101	J	-0.140	-4.83	TW-101BA	TS-101BB	TS-101CC	TS-101CD	TN-101DB	TN-101DC	TN-101DD	TN-101DF	TN-101DH	TN-101DI	TN-101DJ	TN-101EA
	201	K	0.140	4.83	TW-201BA	TS-201BB	TS-201CC2	TS-202CD	TN-201DB	TN-201DC	TN-201DD	TN-201DF	TN-201DH	TN-201DI	—	TN-201EA
	301	L	0.421	14.5	TW-301BA	TS-301BB	TS-301CC	TS-301CD	TN-301DB	—	TN-301DD	TN-301DF	TN-301DH	TN-301DI	TN-301DJ	TN-301EA
	401	M	0.702	24.1	TW-401BA	TS-401BB	TS-401CC	TS-401CD	TN-401DB	—	TN-401DD	TN-401DF	TN-401DH	TN-401DI	TN-401DJ	TN-401EA
	402	N	0.843	29.0	TS-402BA	TS-402BB	TS-402CC	TS-402CD	TN-402DB	—	TN-402DD	TN-402DF	TN-402DH	TN-402DI	TN-402DJ	TN-402EA
B $W_a:30.5$ [mm]	409	B	-0.914	-27.9	TS-409BA	TS-409BB	TB-409CC	TB-409CD	TN-409DB	TN-409DC	TN-409DD	TN-409DF	TN-409DH	TN-409DI	TN-409DJ	TN-409EA
	306	D	-0.732	-22.3	TS-408BA	TS-306BB	TB-306CC	TB-306CD	TN-306DB	TN-306DC2	TN-306DD	TW-306DF	TN-306DH	TN-306DI	TN-306DJ	TN-306EA
	203	H	-0.366	-11.1	TS-203BA	TS-203BB2	TS-203CC	TS-203CD	TN-203DB	TN-306DC1	TN-203DD	TN-203DF	TN-203DH	TN-203DI	TN-203DJ	TN-203EA
	101	J	-0.183	-5.57	TW-101BA	TS-101BB	TS-101CC	TS-101CD	TN-101DB	TN-101DC	TN-101DD	TN-101DF	TN-101DH	TN-101DI	TN-101DJ	TN-101EA
	206	-	0.183	5.57	—	—	TS-206CC	TS-206CD	—	—	—	—	—	—	—	
	312	-	0.366	11.1	—	—	TS-312CC	TS-312CD	—	—	—	—	TN-312DH	TN-312DI	—	
	418	P	0.732	22.3	TS-418BA	TS-418BB	TS-418CC	TS-418CD	—	—	TN-418DD	TN-418DF	TN-418DH	TN-418DI	TN-418DJ	TN-418EA
	417	-	0.914	27.9	—	—	TS-417CC	TS-417CD	—	—	—	—	—	—	—	

表 3.1・1 試験条件一覧

試験ケース	ファイル名	集合体入口条件		ヒータピン発熱条件	
		温度 [°C]	流量 [L/min] ([%])	発熱ピン 番号	出力 [kW] ([%])
Case-1	LF-MIX05	300	200 (50)	408	13.72 (50)
		300.4	198.6		13.49
Case-2	LF-MIX06	300	60 (15)	〃	4.11 (15)
		301.5	58.8		3.51
Case-3	LF-MIX07	300	200 (50)	306	13.72 (50)
		302.6	198.7		13.45
Case-4	LF-MIX08	300	60 (15)	〃	4.11 (15)
		303.6	60.6		3.48
Case-5	LF-MIX10	300	60 (15)	101	4.11 (15)
		301.5	59.0		3.71
Case-6	LF-MIX11	300	200 (50)	204	21.95 (80)
		302.6	198.8		21.65
Case-7	LF-MIX12	300	200 (50)	201	21.95 (80)
		302.9	198.5		21.80
Case-8	LF-MIX13	300	200 (50)	302	21.95 (80)
		302.0	197.8		21.79
Case-9	LF-MIX14	300	200 (50)	418	21.95 (80)
		303.0	198.8		21.71

条件欄の下段は試験結果に基づく値を示す

表 3.1-2 実機および試験体の主要目

Item	Unit	Test section	Large scale FBR
入口温度	[°C]	300	395
最大線出力	[kW/m/pin]	40.15	42.2
炉心高さ (発熱長)	[m]	0.65	1.0
集合体発熱量	[MW]	0.9657	7.47
集合体 平均質量流束	[kg/s]/m ²	5.438 × 10 ³	5.438 × 10 ³
集合体 流路断面積	[m ²]	1.072 × 10 ⁻³	5.554 × 10 ⁻³
Na密度 (入口温度)	[kg/m ³]	880.2	857.5
Na粘性係数	× 10 ⁻³ [Pa·s]	0.3433	0.2885
集合体 平均流速	[m/s]	6.178	6.342
集合体 流入流量	[L/min]	397.3	35.2
入口Re数	—	5.133 × 10 ⁴	5.946 × 10 ⁴
入口Pr数	—	5.84 × 10 ⁻³	5.06 × 10 ⁻³
集合体流量	[L/min]	397	2,113

表 4.1-1 模擬燃料集合体内温度測定結果一覧 (Case-1)

単位 [°C]

Subchannel No.	AA 断面	BA 断面	BB 断面	CA 断面	CB 断面	CC 断面	CD 断面	DA 断面	DB 断面	DC 断面	DD 断面	DE 断面	DF 断面	DG 断面	DH 断面	DI 断面	DJ 断面	EA 断面	
1																			
2 (Point-A)		302.5	313.6			317.8	318.8	319.5	319.6	316.0	309.8		306.3		306.1	326.9	318.3	312.7	
3 (Point-B)		313.1	319.6			335.8	346.2	351.6	351.7	343.6	325.2	333.8	340.0	324.6	323.5	325.8	332.1	328.2	308.9
8 (Point-C)		300.6	307.5			315.4	315.6	314.3	311.7	313.9	315.6	309.8		306.1		304.5	307.1	307.7	312.6
9																			
10 (Point-D)		308.6	320.5			336.3	345.8	344.5	355.9	349.9	334.2	322.1		312.6		313.0	321.1	325.6	313.0
11						338.1	340.1	336.4										320.5	
12																		314.9	
15																		303.7	
19 (Point-I)		300.9	313.0	303.3	305.7	306.0	306.3	306.2	306.5	305.9	断線		305.8		304.2	304.9	304.5	310.7	
20 (Point-H)		300.8		312.4		312.1	311.9		311.3	310.7	304.8		305.2		308.1	306.5	305.7	309.2	
21 (Point-G)			314.1	317.9	321.1	316.8	317.7		317.0	315.8	316.0		309.8		308.4	309.0	306.5	308.6	
23																		305.0	
26																		302.5	
28																		301.2	
32 (Point-J)		300.4	305.2			307.1	305.1		304.2	303.9	304.6	304.8	303.9	302.1	302.1	301.6	302.7	302.4	304.1
33																		302.4	
34	300.4																	302.6	
36																		301.9	
40																		303.0	
41																		302.0	
42																		300.6	
44		300.3																300.6	
47						301.0													
48 (Point-K)			300.5			300.7	300.9		300.9	301.0	301.0		301.1		300.7	301.2	断線	301.6	
49						301.1	301.6			301.6								301.0	
50																		300.7	
52																		301.2	
54																		300.4	
55																		300.5	
57																			
58		300.4	300.4				300.4		300.4		300.4		300.3					300.4	300.9
59							300.4	300.9							300.3	300.4			
61 (Point-L)		300.4	300.4			300.4	300.4		300.4		300.3		300.4		300.4	300.5	300.4	301.1	
63																		300.5	
66																		300.3	
68	300.4																		
69 (Point-P)		300.4	300.4			300.4	300.4			300.4		300.4		300.4	300.4	300.4		300.7	
72 (Point-M)		300.4	300.4			300.4	300.5		300.4		300.3		300.4		300.4	300.4	300.3	300.6	
73 (Point-N)		300.4	300.4			300.3	300.3		300.4		300.4		300.4		300.3	300.3	300.3	300.6	
74 (Point-O)		300.4	300.4			300.4	300.3		300.4		300.4		300.4		300.4	300.4	300.7	301.6	
76		300.4				300.4	300.4											300.6	

表 4.1-2 模擬燃料集合体内溫度測定結果一覽 (Case-2)

Subchannel No.	AA 断面	BA 断面	BB 断面	CA 断面	CB 断面	CC 断面	CD 断面	DA 断面	DB 断面	DC 断面	DD 断面	DE 断面	DF 断面	DG 断面	DH 断面	DI 断面	DJ 断面	EA 断面
1																		
2 (Point-A)		304.3	313.1			319.8	320.8	319.5	317.9	313.8	309.7		307.6		308.3	321.6	320.1	314.3
3 (Point-B)		312.6	317.0		336.5	343.1	345.6	343.6	333.5	326.6	323.3	323.3	321.3	322.4	324.1	327.0	326.7	310.2
8 (Point-C)		302.2	309.2		315.3	316.2	315.8	315.1	314.1	313.1	309.1		307.5		307.1	311.8	312.7	315.0
9																		
10 (Point-D)		310.7	319.0		332.7	338.3	337.5	342.2	334.5	323.1	318.5		314.0		316.1	321.6	324.7	313.3
11					334.3	336.1	335.7										320.0	
12																	314.5	
15																	305.7	
19 (Point-I)		302.1	313.9	307.1	309.3	309.3	309.6	309.6	310.0	309.2	断 線		306.7		306.1	307.1	307.1	311.4
20 (Point-H)		302.2		312.8		312.6	312.2		311.3	311.2	307.4		306.3		307.6	307.0	307.2	309.9
21 (Point-G)			313.1	318.1	319.7	317.2	317.3		316.4	315.5	314.4		310.6		308.2	310.6	308.7	309.9
23																	305.7	
26																	303.6	
28																	302.9	
32 (Point-J)		301.6	307.0			308.1	307.2		306.7	306.3	306.5	306.0	305.0	304.0	303.8	304.6	304.2	306.4
33																	303.8	
34	301.5																303.8	
36																	302.8	
40																	303.4	
41																	302.5	
42																	301.9	
44		301.5															302.0	
47					302.4													
48 (Point-K)			301.9			302.9	302.9		302.8	302.8	302.7		302.4		302.1	302.8	断 線	303.5
49						302.5	302.8				302.6							
50																	302.1	
52																	301.7	
54																	301.9	
55																	301.5	
57																	301.7	
58		301.5	301.4			301.5		301.5		301.5		301.5					301.6	302.2
59						301.6	302.3							301.5	301.7			
61 (Point-L)		301.5	301.5			301.5	301.6		301.6		301.5		301.5		301.5	301.7	301.4	302.3
63																	301.6	
66																	301.4	
68	301.5																	
69 (Point-P)		301.4	301.4			301.5	301.5				301.5		301.5		301.4	301.4		301.8
72 (Point-M)		301.5	301.8			301.4	301.4		301.4		301.4		301.4		301.4	301.4	301.4	301.7
73 (Point-N)		301.4	301.4			301.4	301.4		301.4		301.4		301.4		301.4	301.4	301.4	301.6
74 (Point-O)		301.4	301.3			301.4	301.4		301.4		301.4		301.4		301.4	301.3	301.7	302.3
76		301.4				301.4	301.4										301.6	

表 4.1-3 模擬燃料集合体内温度測定結果一覧 (Case-3)

単位 [°C]

Subchannel No.	AA 断面	BA 断面	BB 断面	CA 断面	CB 断面	CC 断面	CD 断面	DA 断面	DB 断面	DC 断面	DD 断面	DE 断面	DF 断面	DG 断面	DH 断面	DI 断面	DJ 断面	EA 断面
1																		
2 (Point-A)		302.8	305.6			304.8	305.0	305.2	305.2	305.3	306.2		306.4		308.1	316.0	311.9	310.9
3 (Point-B)		306.3	304.4		304.3	304.7	305.4	306.1	305.8	306.6	312.5	322.4	323.6	323.6	322.7	316.0	318.9	307.9
8 (Point-C)		303.4	303.9		304.9	305.3	306.0	305.7	305.4	306.2	306.8		309.8		313.6	314.5	325.5	318.9
9																		
10 (Point-D)		314.3	305.0		314.9	314.0	332.3	317.7	315.1	327.8	326.5		331.5		325.2	335.8	338.8	315.7
11					308.8	315.9	322.5										328.6	
12																	309.6	
15																	305.1	
19 (Point-I)		311.6	320.4	308.4	309.4	309.5	310.1	310.2	311.2	310.1	断線		318.6		315.1	324.1	325.8	321.2
20 (Point-H)		308.9		316.1		318.1	318.1		318.0	319.8	314.4		313.5		316.9	319.4	324.9	320.4
21 (Point-G)			324.5	317.1	317.6	319.6	317.4		316.5	316.6	314.2		313.4		312.0	325.1	317.5	315.8
23																	306.1	
26																	304.0	
28																	303.8	
32 (Point-J)		304.7	321.6			316.3	315.4		314.1	312.9	313.4	313.2	310.4	308.7	307.5	309.9	308.8	312.7
33																	306.6	
34	302.6																305.7	
36																	304.0	
40																	303.9	
41																	303.4	
42																	302.9	
44	302.6																303.7	
47						308.7												
48 (Point-K)			303.6			305.3	306.8		307.8	308.1	307.9		306.6		304.0	305.5	断線	306.1
49							306.9	308.6			307.4							
50																	303.4	
52																	302.8	
54																	302.9	
55																	302.7	
57																	303.5	
58	302.6	302.6					302.9		302.8		302.7		302.6				303.1	304.1
59						303.0	307.9								302.7	303.2		
61 (Point-L)	302.6	302.6				302.7	302.9		302.7		302.8		302.8		302.7	303.0	302.7	303.8
63																	302.7	
66																	302.6	
68	302.6																	
69 (Point-P)		302.6	302.5			302.6	302.6				302.6		302.6		302.6	302.6		303.2
72 (Point-M)		302.6	303.0			302.6	302.6		302.6		302.5		302.5		302.5	302.5	302.5	303.0
73 (Point-N)		302.6	302.5			302.5	302.6		302.6		302.5		302.5		302.5	302.5	302.5	302.8
74 (Point-O)		302.6	302.5			302.6	302.6		302.6		302.5		302.5		302.5	302.5	302.8	303.2
76		302.6				302.6	302.6										302.8	

表 4.1-4 模擬燃料集合体内温度測定結果一覧 (Case-4)

単位 [°C]

Subchannel No.	AA 断面	BA 断面	BB 断面	CA 断面	CB 断面	CC 断面	CD 断面	DA 断面	DB 断面	DC 断面	DD 断面	DE 断面	DF 断面	DG 断面	DH 断面	DI 断面	DJ 断面	EA 断面	
1						307.1	307.9	308.2	308.3	308.4	308.3		308.0		310.2	314.6	314.7	311.6	
2 (Point-A)		304.2	306.2																
3 (Point-B)		306.6	305.1		307.0	308.6	310.5	311.1	310.5	311.1	313.4	317.0	318.8	318.8	318.1	314.5	315.4	309.0	
8 (Point-C)		305.3	306.0		307.0	307.9	308.7	308.6	308.8	310.4	309.0		310.1		313.6	315.5	321.4	315.6	
9																			
10 (Point-D)		314.3	306.7			314.4	315.0	321.8	318.3	321.7	321.7	321.6		322.9		322.0	328.4	328.7	313.4
11						313.6	317.3	319.6										321.8	
12																		310.4	
15																		307.3	
19 (Point-I)		311.2	316.1	309.9	311.0	311.4	312.1	312.4	313.3	312.6	断 線		314.6		316.1	320.7	324.0	316.3	
20 (Point-H)		310.7		313.9		315.2	315.4		315.4	316.9	313.5		312.3		315.0	319.0	321.6	315.7	
21 (Point-G)			319.6	313.2	314.9	316.9	315.4		315.2	315.2	314.4		313.0		311.8	321.9	317.5	314.0	
23																		307.0	
26																		305.4	
28																		305.7	
32 (Point-J)		305.5	318.7			314.4	313.9		313.4	312.8	312.6	312.0	310.6	309.3	308.7	310.8	310.1	312.5	
33																		307.5	
34	303.6																	306.7	
36																		304.8	
40																		305.1	
41																		304.4	
42																		304.2	
44		303.7																305.1	
47						308.4													
48 (Point-K)			305.5			308.2	308.4		308.4	308.4	308.0		306.6		305.4	306.4	断 線	307.6	
49						307.1	307.5				307.0								
50																		304.5	
52																		303.8	
54																		304.0	
55																		304.0	
57																		304.6	
58		303.6	303.7			304.2		304.0		303.8		303.8						304.3	
59						304.3	308.0								304.0	304.5			
61 (Point-L)		303.6	303.7			304.1	304.2		304.0		304.1		304.0		303.9	304.3	303.9	305.1	
63																		303.8	
66																		303.7	
68	303.6																		
69 (Point-P)		303.5	303.5			303.6	303.6				303.6		303.6		303.6	303.7		304.3	
72 (Point-M)		303.6	304.1			303.5	303.6		303.6		303.5		303.6		303.6	303.6	303.6	304.1	
73 (Point-N)		303.6	303.5			303.5	303.5		303.6		303.5		303.5		303.5	303.5	303.5	303.9	
74 (Point-O)		303.5	303.5			303.5	303.5		303.5		303.5		303.5		303.5	303.5	303.9	304.4	
76		303.5				303.5	303.6											303.8	

表 4.1-5 模擬燃料集合体内温度測定結果一覧 (Case-5)

単位 [°C]

Subchannel No.	AA 断面	BA 断面	BB 断面	CA 断面	CB 断面	CC 断面	CD 断面	DA 断面	DB 断面	DC 断面	DD 断面	DE 断面	DF 断面	DG 断面	DH 断面	DI 断面	DJ 断面	EA 断面
1																		
2 (Point-A)		301.5	301.5			301.4	301.5	301.4	301.5	301.5	301.6		301.6		302.1	302.6	303.2	303.5
3 (Point-B)		301.5	301.2		301.4	301.5	301.5	301.4	301.5	301.5	301.6	301.7	301.9	302.3	302.5	302.5	303.2	303.1
8 (Point-C)		301.5	301.5		301.4	301.5	301.2	301.5	301.5	301.6	301.7		301.9		303.5	303.6	305.0	305.1
9																		
10 (Point-D)		301.5	301.5		301.4	301.5	301.5	301.5	301.5	301.7	301.7		302.5		304.2	304.5	305.7	304.7
11					301.5	301.5	301.6										306.0	
12																	303.5	
15																	303.1	
19 (Point-I)		302.7	301.8	301.8	301.7	301.7	301.7	301.7	301.8	301.9	断 線		304.9		311.4	307.6	311.9	308.4
20 (Point-H)		306.5		301.7		301.9	302.2		303.0	303.4	307.1		311.4		309.4	311.9	313.7	310.3
21 (Point-G)			302.0	301.6	301.6	301.7	301.8		301.9	302.1	302.6		304.4		306.5	306.7	308.9	308.6
23																	303.7	
26																	302.4	
28																	304.4	
32 (Point-J)		316.7	304.0			306.4	307.3		307.8	308.8	310.7	313.2	318.5	320.9	322.0	322.2	326.9	313.4
33																	318.0	
34	301.5																309.0	
36																	303.5	
40																	302.2	
41																	302.1	
42																	302.9	
44		312.8															308.9	
47						316.7												
48 (Point-K)			312.9			316.9	317.3		318.5	318.1	317.9		315.0		312.2	324.1	断 線	314.1
49						310.9	310.9			311.0								
50																	305.2	
52																	302.3	
54																	302.3	
55																	303.7	
57																	309.0	
58		302.0	306.2				311.5		308.7		305.8		305.4				307.7	310.1
59						311.6	316.5								307.6	310.0		
61 (Point-L)		302.8	304.6			307.1	307.5		308.3		308.6		307.2		305.2	306.9	304.4	309.0
63																	302.9	
66																	303.4	
68	301.5																	
69 (Point-P)		301.6	302.0			302.8	302.9			303.0		302.8		303.0	303.9			305.7
72 (Point-M)		301.6	302.3			301.9	302.0		302.1		302.4		302.4		302.6	303.0	302.8	304.9
73 (Point-N)		301.5	301.5			301.5	301.5		301.6		301.7		301.6		301.7	302.0	302.2	303.4
74 (Point-O)		301.5	301.4			301.6	301.6		301.6		301.6		301.6		301.7	302.0	302.4	302.8
76		301.4				301.7	301.7										302.6	

表 4.1·6 模擬燃料集合体内温度測定結果一覧 (Case-6)

単位 [°C]

Subchannel No.	AA 断面	BA 断面	BB 断面	CA 断面	CB 断面	CC 断面	CD 断面	DA 断面	DB 断面	DC 断面	DD 断面	DE 断面	DF 断面	DG 断面	DH 断面	DI 断面	DJ 断面	EA 断面	
1																			
2 (Point-A)		302.6	302.7			302.7	302.7	302.8	302.8	303.0	303.7		304.7		308.4	308.4	308.3	307.3	
3 (Point-B)		302.6	302.6		302.6	302.7	302.7	302.7	302.9	303.2	303.5	305.0	309.0	312.2	312.1	307.7	310.1	305.3	
8 (Point-C)		302.9	302.7		302.7	302.8	302.7	303.3	303.1	303.1	304.1		308.6		324.6	316.8	329.3	319.4	
9																			
10 (Point-D)		303.0	302.7		302.7	302.8	303.1	302.9	302.9	304.4	306.5		313.6		317.4	319.3	318.0	312.1	
11					302.7	303.1	303.8										314.5		
12																	305.8		
15																	308.2		
19 (Point-I)		331.2	307.0	311.2	309.4	309.7	310.7	312.0	314.3	318.7	断線		333.2		340.3	349.1	359.0	326.1	
20 (Point-H)		334.3		307.2		310.4	313.2		318.9	319.1	330.3			328.0		316.2	341.1	334.5	326.5
21 (Point-G)			308.8	305.4	304.8	305.4	305.2		305.4	306.0	306.7		309.9		310.1	313.1	313.8	318.5	
23																	304.7		
26																	305.2		
28																	309.3		
32 (Point-J)		321.7	317.5			326.0	327.5		326.9	325.7	327.0	325.9	319.9	323.7	320.1	352.6	331.3	327.7	
33																	312.8		
34	302.6																307.8		
36																	303.8		
40																	304.7		
41																	304.4		
42																	304.7		
44		305.1															310.3		
47					330.1														
48 (Point-K)			305.8			317.8	321.0		325.9	326.3	325.0		313.4		306.3	311.9	断線	318.1	
49						308.8	309.7				309.6								
50																	303.9		
52																	302.7		
54																	303.3		
55																	304.4		
57																	308.7		
58		302.6	303.2				306.5		307.8		303.9		304.5				306.1	311.6	
59						307.3	327.6								304.8	307.3			
61 (Point-L)		302.5	302.7			303.4	303.7		303.7		304.2		304.1		303.4	304.5	303.1	306.0	
63																	302.8		
66																	303.6		
68	302.6																		
69 (Point-P)		302.6	302.5			302.7	302.7				302.7		302.7		302.7	303.3		305.2	
72 (Point-M)		302.6	303.0			302.5	302.5		302.5		302.6		302.6		302.6	302.8	302.7	304.0	
73 (Point-N)		302.5	302.5			302.5	302.5		302.5		302.6		302.5		302.5	302.6	302.6	303.1	
74 (Point-O)		302.6	302.5			302.6	302.5		302.5		302.5		302.5		302.6	302.7	303.1	304.3	
76			302.5				302.6	302.6									303.0		

表 4.1-7 模擬燃料集合体内温度測定結果一覧 (Case-7)

単位 [°C]

Subchannel No.	AA 断面	BA 断面	BB 断面	CA 断面	CB 断面	CC 断面	CD 断面	DA 断面	DB 断面	DC 断面	DD 断面	DE 断面	DF 断面	DG 断面	DH 断面	DI 断面	DJ 断面	EA 断面
1																		
2 (Point-A)		302.9	302.8			302.9	302.9	302.8	302.8	302.8	302.8		302.8		302.9	302.9	303.2	303.5
3 (Point-B)		302.9	302.8		302.8	302.9	302.9	302.8	302.8	302.8	302.8	302.8	302.8	302.8	302.9	302.9	303.3	303.5
8 (Point-C)		302.9	302.9		302.8	302.9	302.5	302.9	302.8	302.8	302.9		302.8		302.8	303.0	303.6	303.9
9																		
10 (Point-D)		302.8	302.8		302.8	302.9	302.9	302.9	302.8	302.8	302.8		302.8		303.0	303.1	304.1	304.1
11					302.9	302.9	302.9										304.6	
12																	303.6	
15																	303.3	
19 (Point-I)		302.9	302.8	302.9	302.8	302.9	302.8	302.8	302.9	302.8	302.8	断 線	302.9		306.0	304.5	306.3	306.2
20 (Point-H)		302.9		302.8		302.8	302.9		302.8	302.9	302.9		303.5		304.7	306.4	306.8	308.1
21 (Point-G)			302.9	302.8	302.8	302.8	302.8		302.8	302.8	302.8		303.1		304.6	304.7	306.8	307.9
23																	304.1	
26																	303.1	
28																	303.3	
32 (Point-J)		305.0	303.0			303.0	303.0		303.0	303.0	303.1	303.5	310.1	313.9	320.1	308.1	324.7	314.6
33																	324.0	
34	302.9																317.4	
36																	305.6	
40																	303.1	
41																	303.1	
42																	303.3	
44		335.6															308.0	
47						306.0												
48 (Point-K)			308.5			319.9	316.9		313.6	315.3	319.7		334.7		344.1	340.3	断 線	328.1
49						311.5	312.2				323.6						314.2	
50																	304.7	
52																	303.2	
54																	304.6	
55																	314.0	
57																		
58		303.6	318.0				323.2		311.2		310.6		310.0				334.6	318.5
59							325.6	309.2								332.0	332.4	
61 (Point-L)		321.7	319.7			330.0	328.6		338.4		341.3		335.4		328.3	350.9	321.2	327.7
63																	308.1	
66																	306.0	
68	302.9																	
69 (Point-P)		303.4	308.0			311.6	311.4				312.6		310.8		314.0	316.0		318.6
72 (Point-M)		304.9	305.9			305.8	306.3		306.7		309.7		308.7		309.5	315.9	311.3	323.4
73 (Point-N)		302.9	303.2			303.6	303.6		303.9		304.8		303.7		304.1	306.2	306.4	310.3
74 (Point-O)		302.9	302.8			302.9	302.9		302.9		302.9		302.9		302.9	303.3	303.4	303.7
76		302.8				305.6	305.1										304.4	

表 4.1-8 模擬燃料集合体内温度測定結果一覧 (Case-8)

単位 [°C]

Subchannel No.	AA 断面	BA 断面	BB 断面	CA 断面	CB 断面	CC 断面	CD 断面	DA 断面	DB 断面	DC 断面	DD 断面	DE 断面	DF 断面	DG 断面	DH 断面	DI 断面	DJ 断面	EA 断面	
1																			
2 (Point-A)		302.0	301.9			302.0	302.0	302.0	302.0	302.0	301.9		302.0		302.0	302.0	302.3	303.6	
3 (Point-B)		302.0	301.9		301.9	302.0	302.0	301.9	301.9	301.9	301.9	301.9	301.9	302.0	301.9	301.9	302.4	304.3	
8 (Point-C)		302.0	302.0		301.9	302.0	301.6	302.0	301.9	301.9	302.1		301.9		301.9	302.0	302.1	302.7	
9																			
10 (Point-D)		302.0	301.9		302.0	301.9	302.0	301.9	301.9	301.9	301.9		301.9		302.0	302.1	302.7	303.7	
11						302.0	302.0	302.0									303.2		
12																	303.0		
15																	302.2		
19 (Point-I)		302.0	302.0	302.0	301.9	302.0	302.0	301.9	302.0	302.0	断 線		302.0		302.4	302.3	302.8	303.5	
20 (Point-H)		302.0		301.9		302.0	302.0		301.9	301.9	301.9			302.0		302.4	303.3	303.9	304.9
21 (Point-G)			302.0	301.9	301.9	302.0	301.9			301.9	301.9	302.0		302.1		303.3	303.4	305.1	305.7
23																	304.4		
26																	302.2		
28																	302.0		
32 (Point-J)			302.1	302.0			302.0	302.0		301.9	302.0	302.0	302.0	302.9	303.1	304.7	303.0	308.3	307.4
33																	313.6		
34	302.0																321.5		
36																	312.5		
40																	302.2		
41																	302.2		
42																	302.0		
44		304.6															302.6		
47						302.4													
48 (Point-K)				307.1			304.2	303.6		302.8	302.7	303.1		309.4		321.1	310.9	断 線	317.4
49							305.6	305.6			310.9								
50																	349.8		
52																	313.7		
54																	302.2		
55																	302.1		
57																	303.7		
58		301.9	303.6				305.2		302.4		302.6		302.6				309.3	306.0	
59							305.6	302.8							307.6	307.3			
61 (Point-L)		321.8	342.7			329.2	327.0		322.0		318.4		326.4		338.9	326.9	352.0	331.5	
63																	329.5		
66																	302.4		
68	302.0																		
69 (Point-P)		302.0	304.0			303.8	303.9				303.6		303.6		307.8	307.7		308.4	
72 (Point-M)		304.5	324.2			321.1	318.9		318.6		315.9		318.5		323.8	321.4	317.5	320.3	
73 (Point-N)		303.4	303.9			306.0	306.4		308.4		315.4		307.1		306.5	313.1	306.6	312.0	
74 (Point-O)		302.0	301.9			302.0	301.9		301.9		302.0		301.9		302.0	302.0	302.2	302.3	
76		301.9				303.1	302.8									302.5			

表 4.1-9 模擬燃料集合体内温度測定結果一覧 (Case-9)

単位 [°C]

Subchannel No.	AA 断面	BA 断面	BB 断面	CA 断面	CB 断面	CC 断面	CD 断面	DA 断面	DB 断面	DC 断面	DD 断面	DE 断面	DF 断面	DG 断面	DH 断面	DI 断面	DJ 断面	EA 断面
1						303.0	303.0	303.0	303.0	303.0	303.0	303.0	303.0	303.0	303.0	303.0	303.0	303.8
2 (Point-A)		303.0	303.0			303.0	303.0	303.0	303.0	303.0	303.0	303.0	303.0	303.0	303.0	303.0	303.3	303.8
3 (Point-B)		303.0	303.0		303.0	303.0	303.0	303.0	303.0	303.0	303.0	303.0	303.0	303.0	302.9	302.9	303.3	304.4
8 (Point-C)		303.1	303.0		303.0	303.0	302.7	303.0	303.0	303.0	303.1		303.0		302.9	303.0	303.0	303.3
9																		
10 (Point-D)		303.0	303.0		303.0	303.0	303.0	303.0	303.0	303.0	303.0	303.0	303.0	303.0	303.0	303.0	303.0	303.6
11					303.0	303.0	303.0										303.3	
12																	303.3	
15																	303.3	
19 (Point-I)		303.1	303.0	303.0	303.0	303.0	303.0	303.0	303.0	303.0	303.0	断線	303.0		303.0	303.0	303.0	303.4
20 (Point-H)		303.0		303.0		303.0	303.0		303.0	303.0	302.9		303.0		303.0	303.1	303.1	303.4
21 (Point-G)			303.0	302.5	303.0	303.0	303.0		303.0	303.0	303.0		303.0		303.0	303.1	303.1	303.4
23																	303.2	
26																	303.2	
28																	303.0	
32 (Point-J)		303.1	303.0			303.0	303.0		303.0	303.0	303.0	302.9	303.0	303.0	303.3	303.1	303.5	303.8
33																	303.5	
34	303.0																303.3	
36																	303.5	
40																	303.3	
41																	303.2	
42																	303.1	
44	303.1																303.8	
47					303.0													
48 (Point-K)			303.0			303.1	303.1		303.0	303.0	303.1		303.5		304.1	303.9	断線	306.5
49						303.0	303.0				303.3						305.3	
50																	309.6	
52																	303.3	
54																	303.8	
55																	306.0	
57																		
58		303.6	307.1				304.5		303.9		307.8		307.3				313.1	308.4
59						304.5	303.1								313.1	308.1		
61 (Point-L)		304.5	303.2			303.6	303.7		304.7		304.5		304.5		304.9	309.0	313.4	311.4
63																	317.0	
66																	306.3	
68	303.0																	
69 (Point-P)		323.0	337.5			329.7	331.1				327.6		335.5		340.3	339.0		318.4
72 (Point-M)		310.9	304.8			306.5	308.6		308.9		312.6		310.2		308.6	318.7	326.4	325.4
73 (Point-N)		305.1	315.1			313.6	313.6		312.3		310.3		317.4		321.8	322.5	337.1	326.2
74 (Point-O)		303.0	303.1			303.3	303.3		303.3		303.4		303.2		303.3	303.9	303.5	303.8
76		303.7				334.3	330.7										307.2	

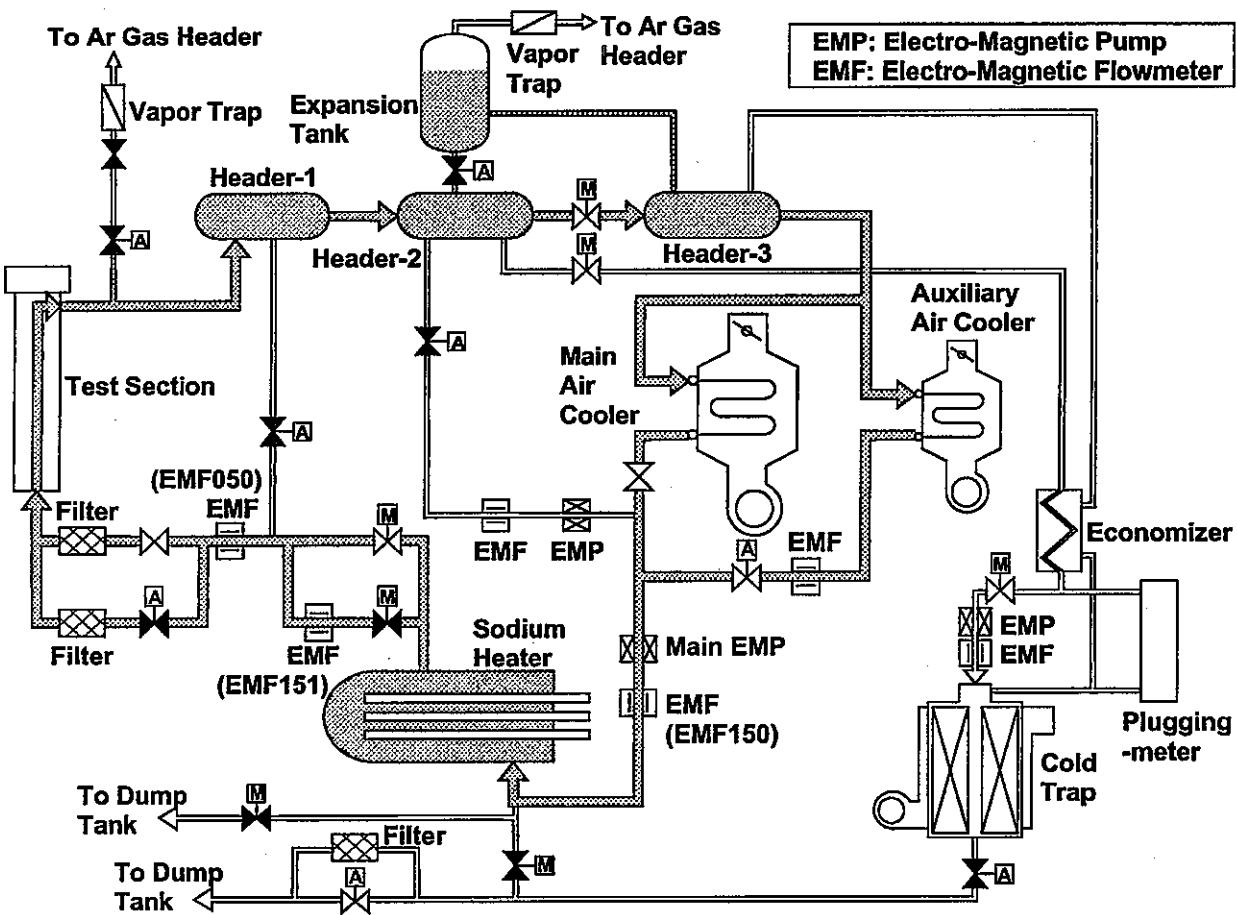


図 2.1-1 炉心・機器熱流動試験装置系統図

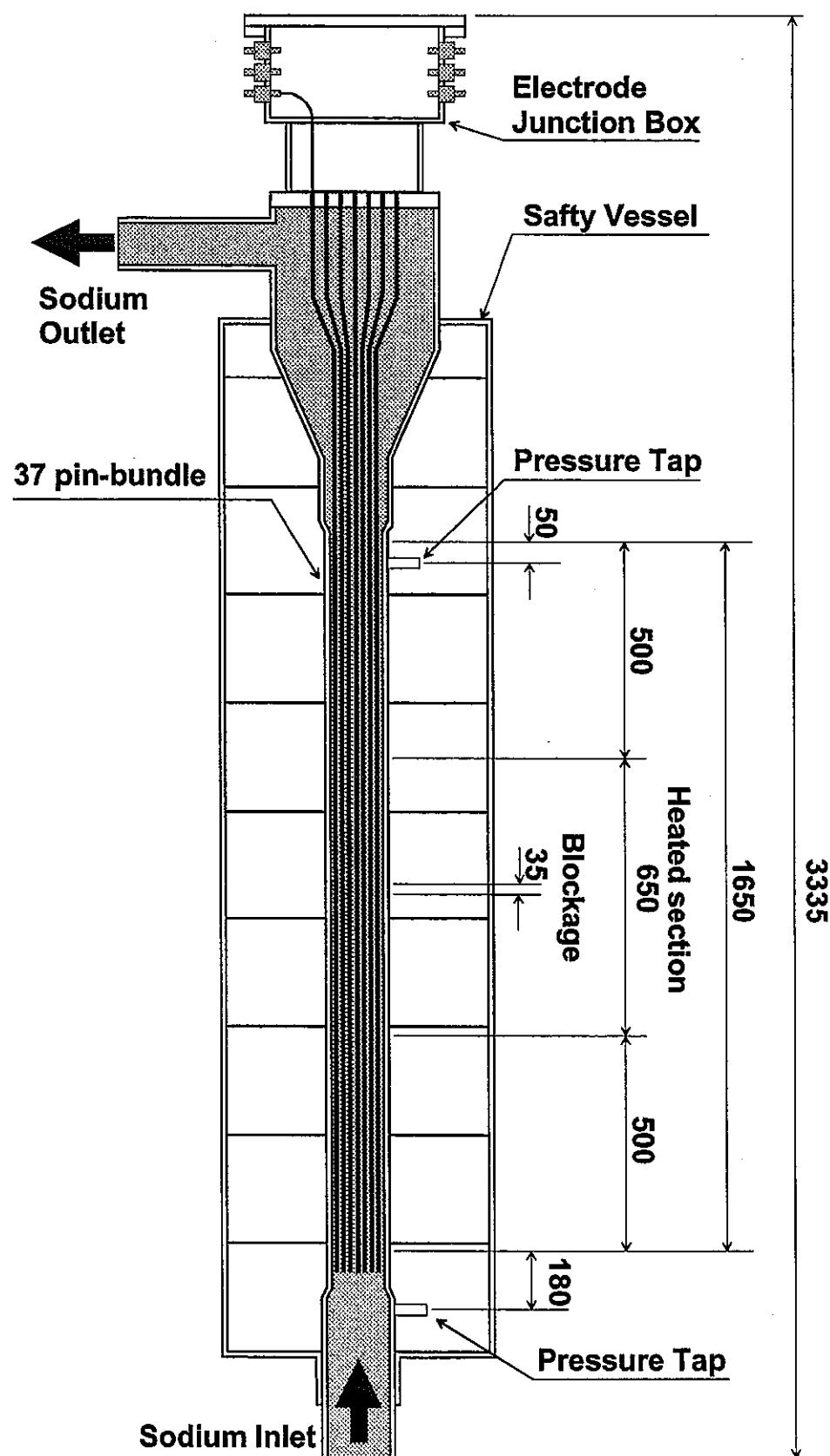


図 2.2-1 試験体の概要

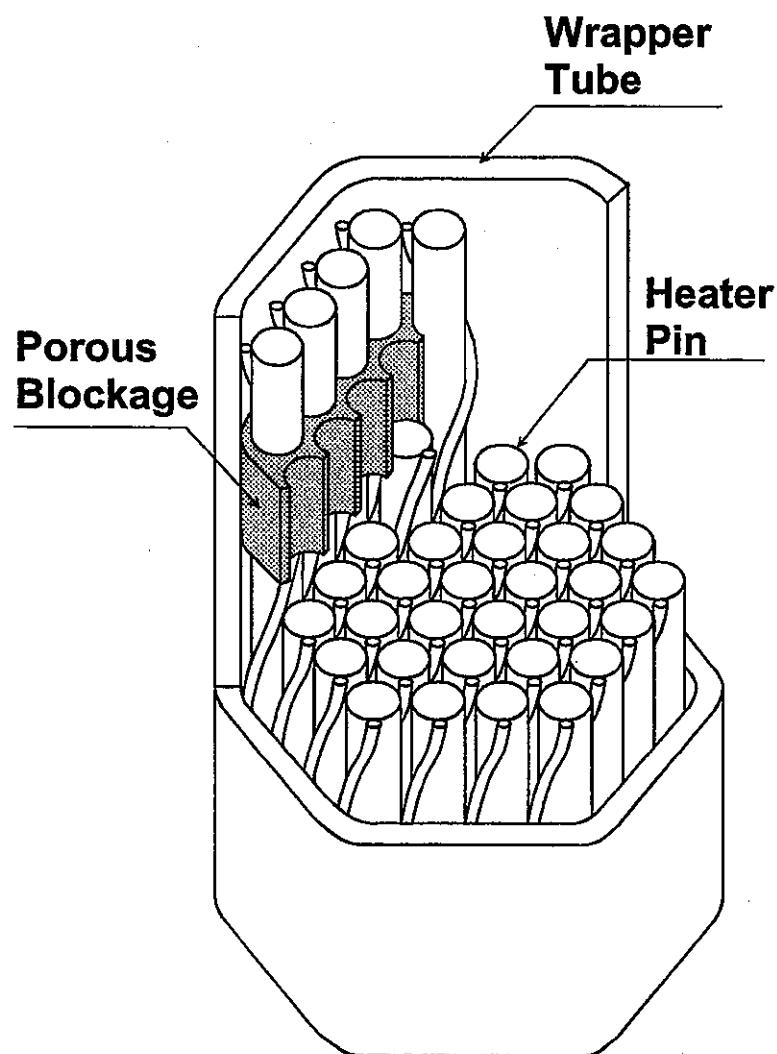


図 2.2-2 模擬閉塞物取り付け位置の模式図

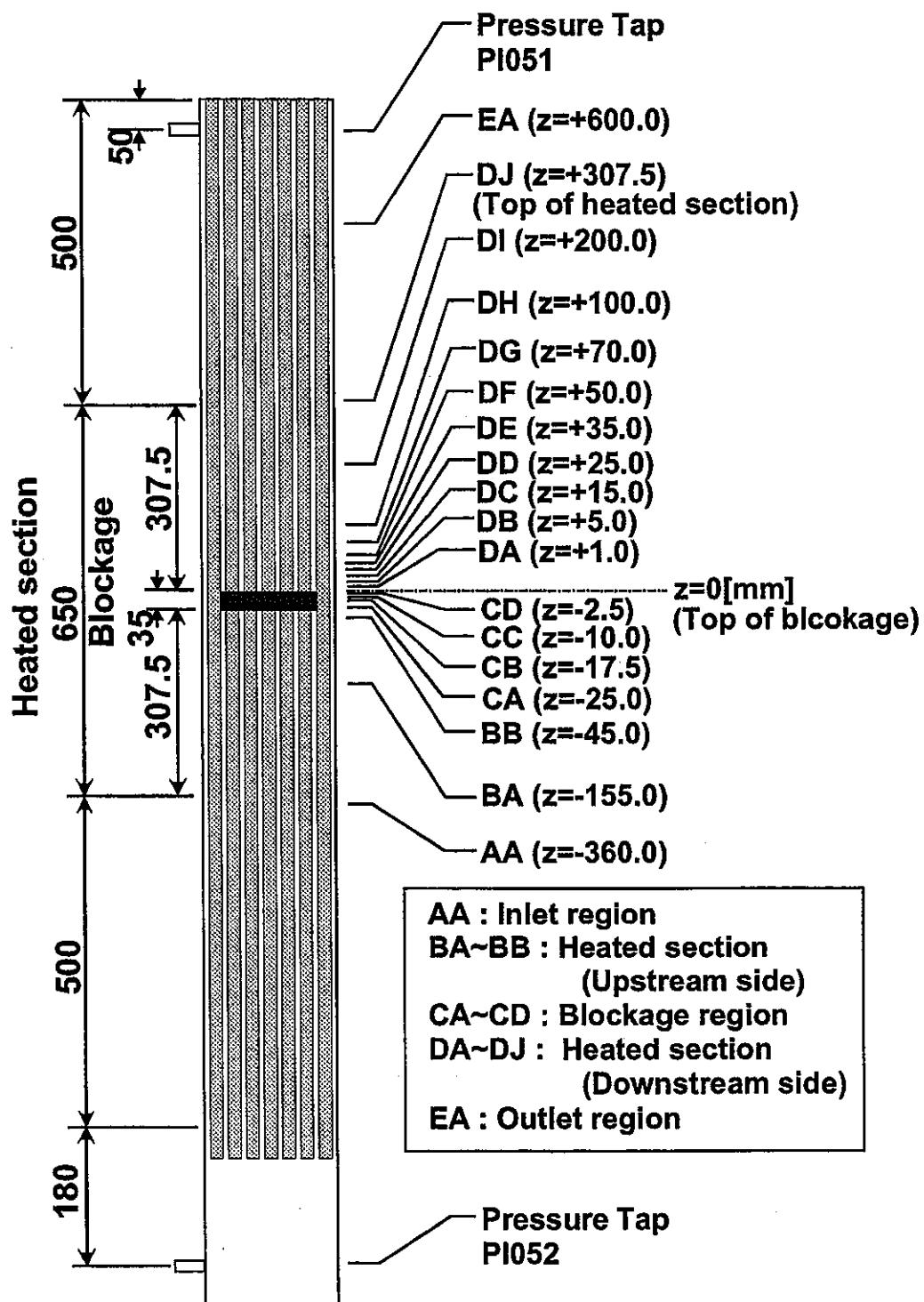


図 2.8-1 模擬燃料集合体軸方向における熱電対設置位置

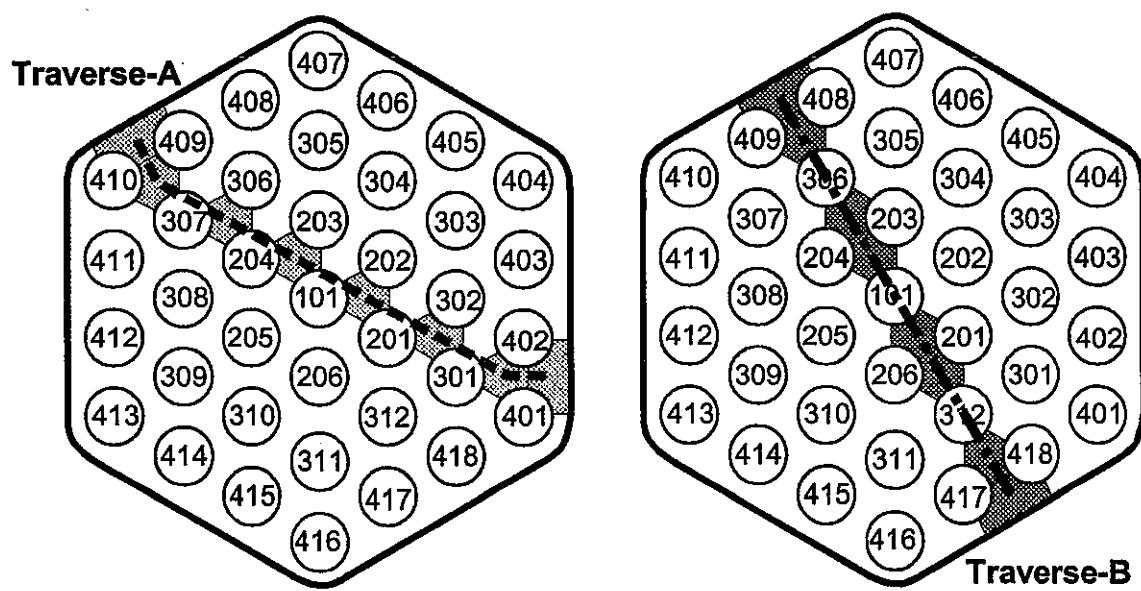
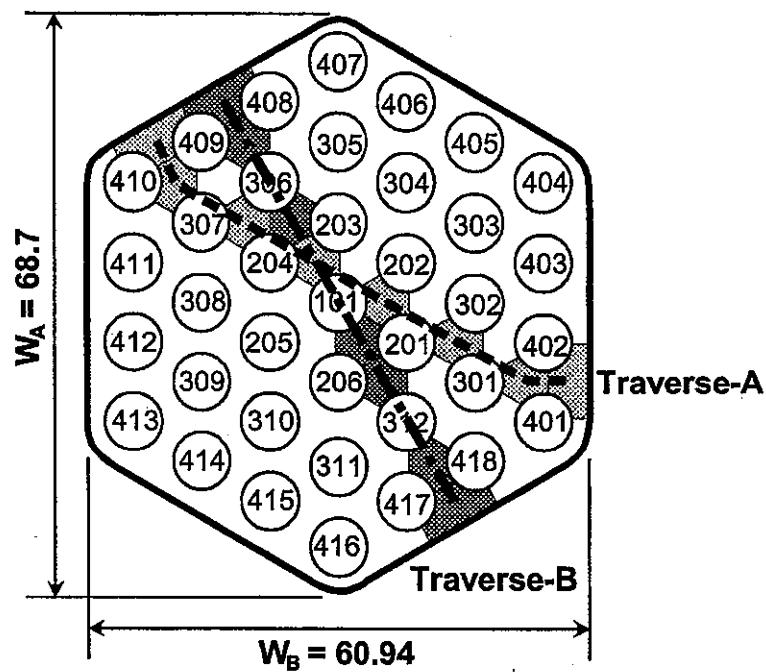


図 2.3-2 模擬燃料集合体水平断面における温度分布の比較位置図

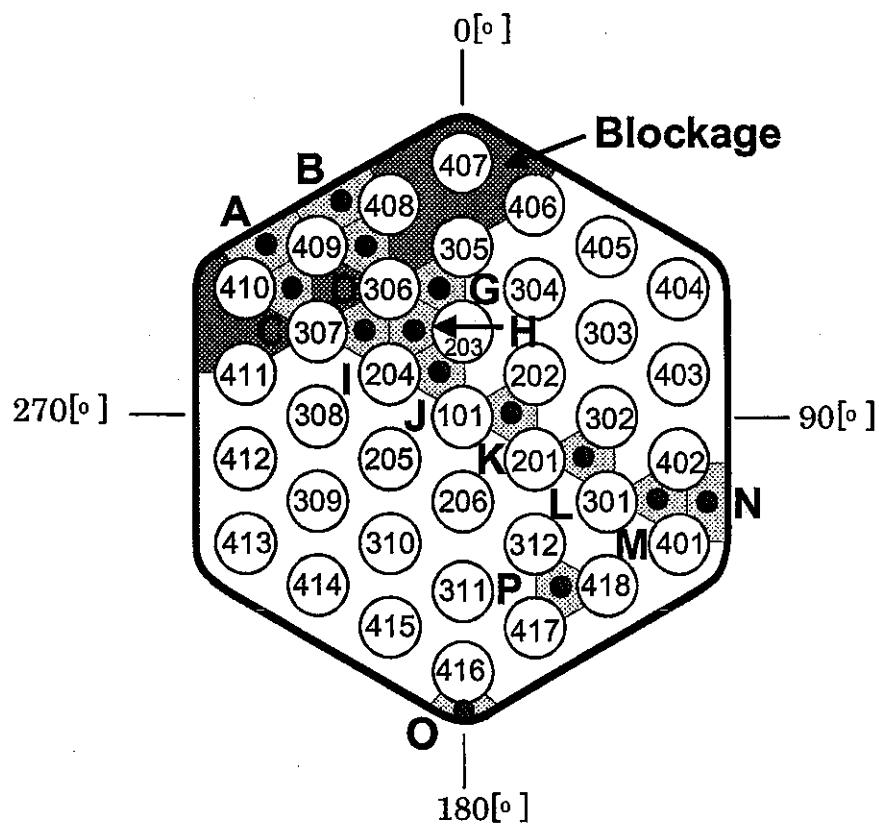
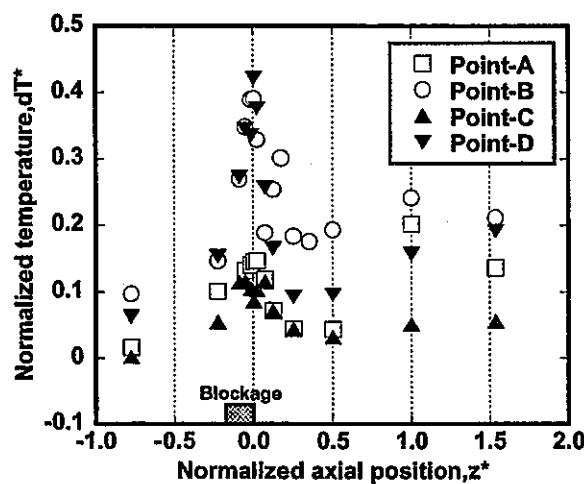
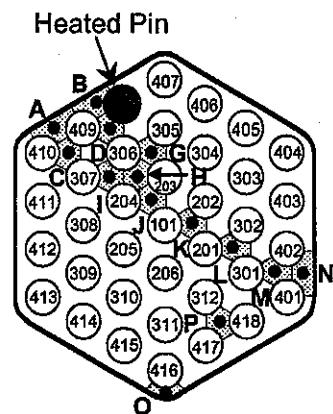
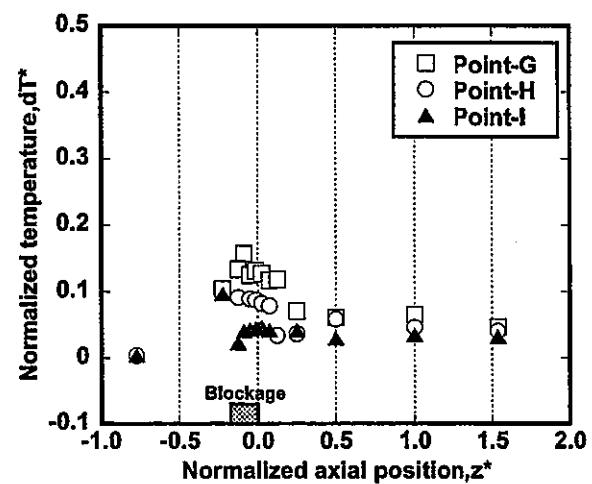


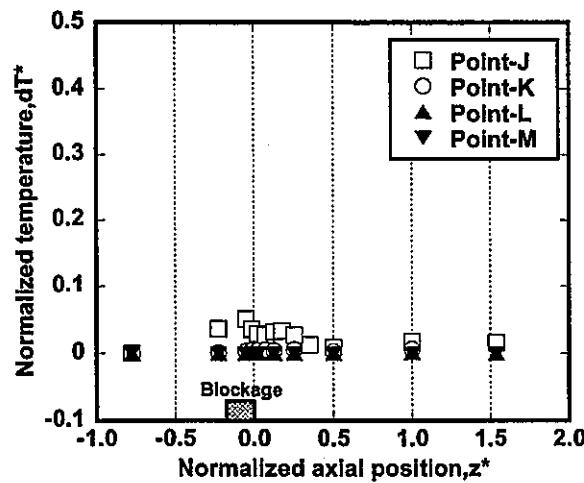
図 2.3-3 模擬燃料集合体水平断面における熱電対位置



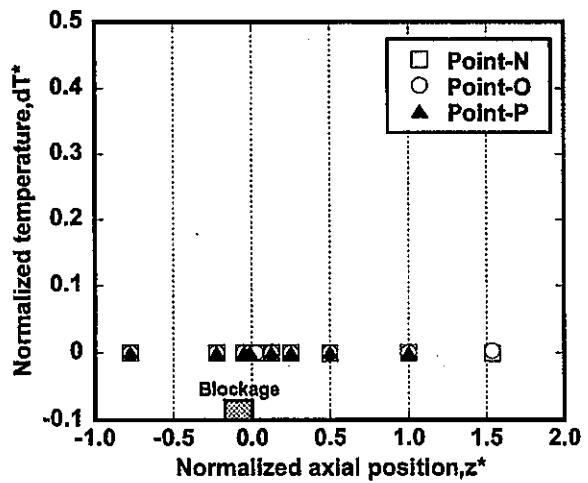
(a) Point-A,B,C,D



(b) Point-G,H,I

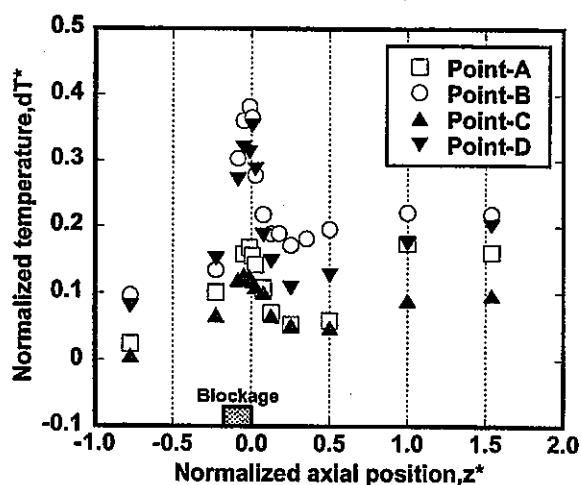
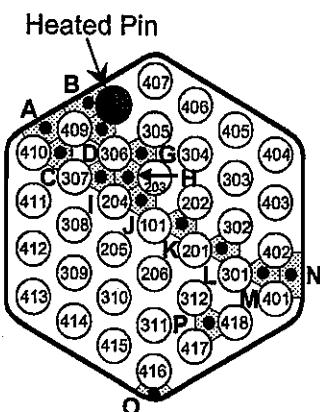


(c) Point-J,K,L,M

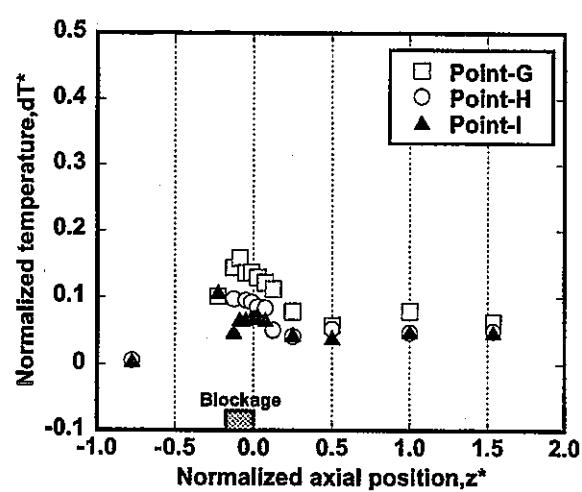


(d) Point-N,O,P

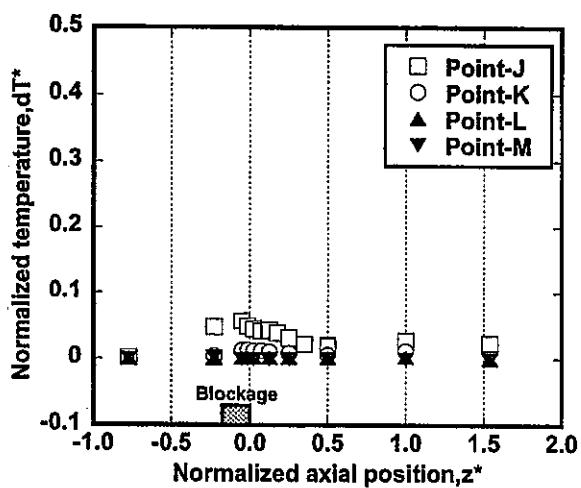
図 4.1.1 模擬燃料集合体軸方向温度分布 (Case-1)



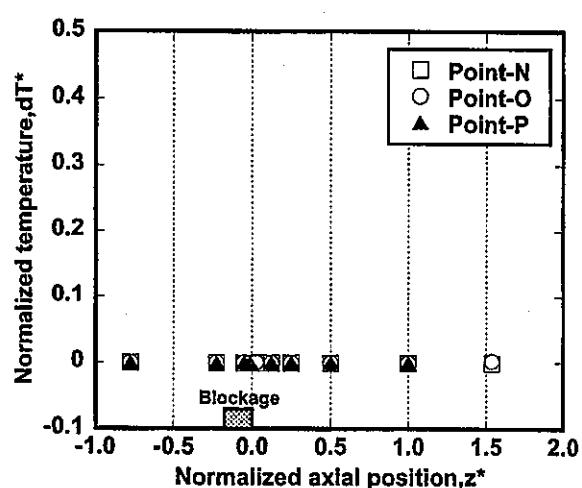
(a) Point-A,B,C,D



(b) Point-G,H,I



(c) Point-J,K,L,M



(d) Point-N,O,P

図 4.1・2 模擬燃料集合体軸方向温度分布 (Case・2)

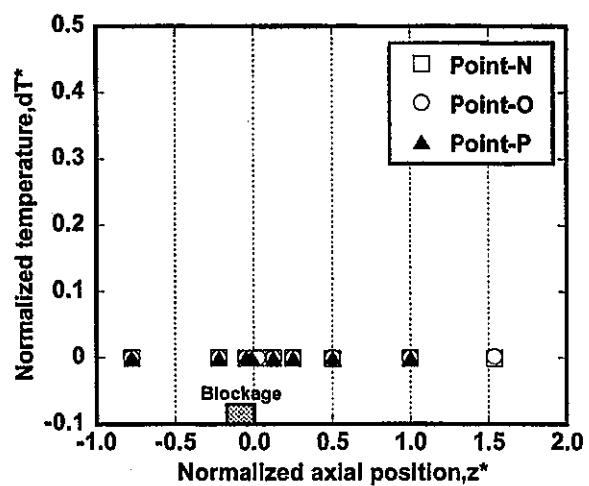
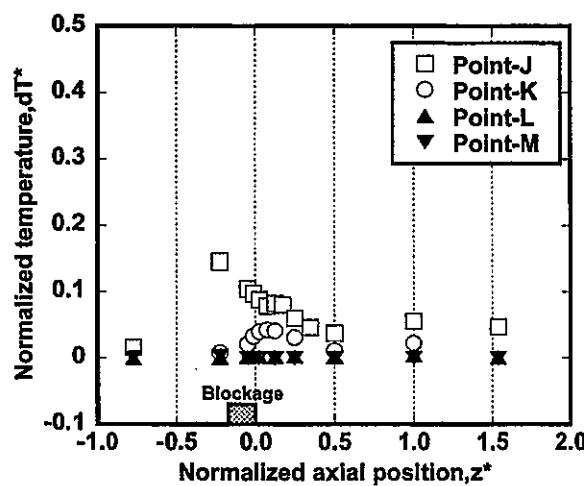
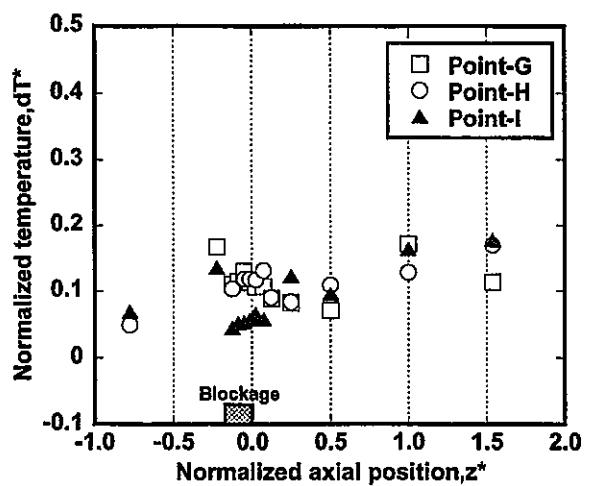
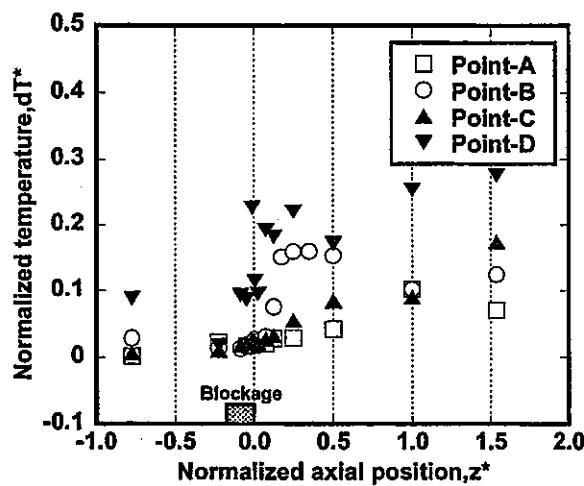
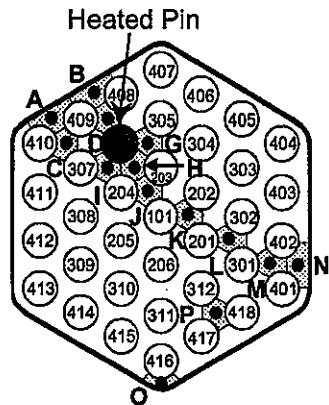


図 4.1.3 模擬燃料集合体軸方向温度分布 (Case-3)

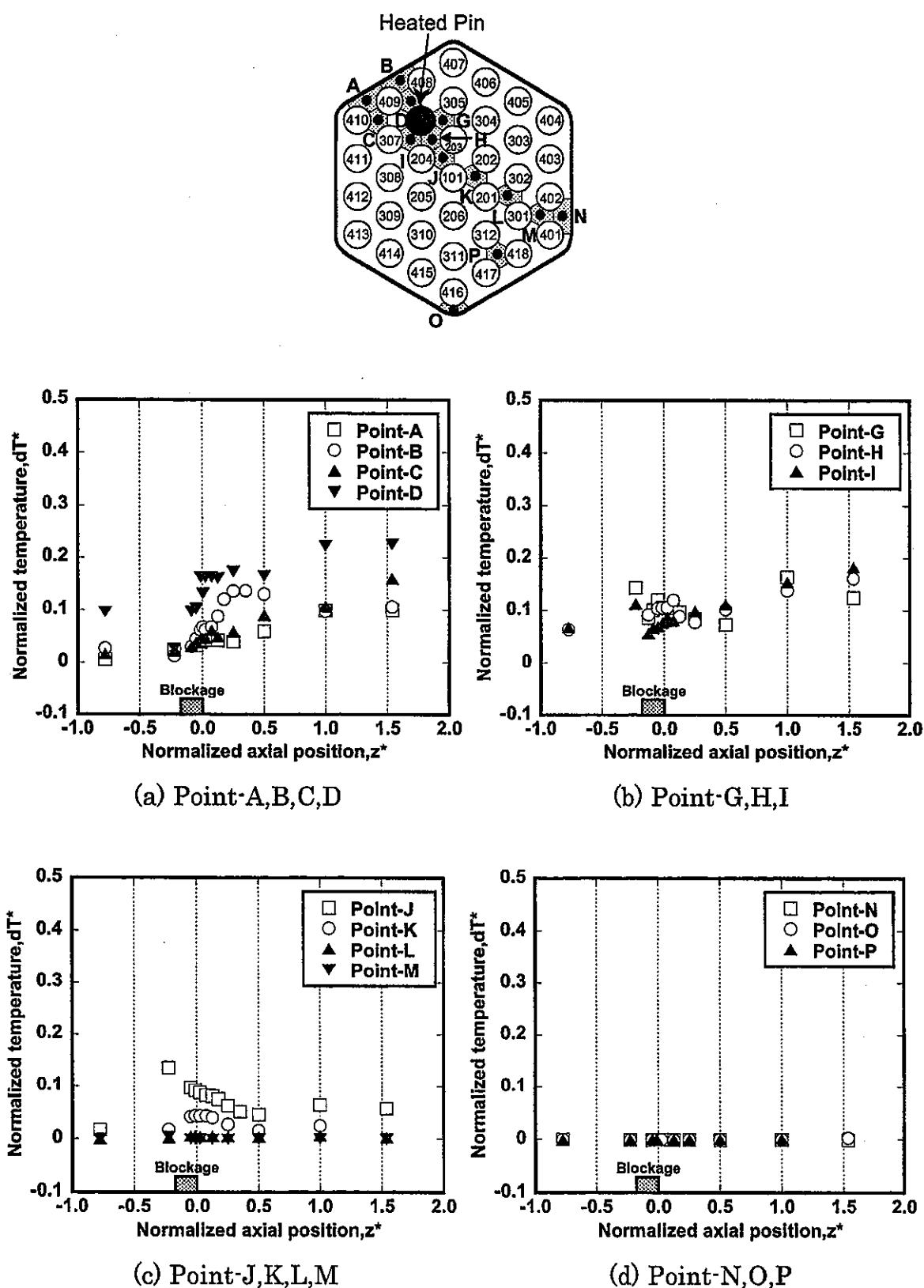
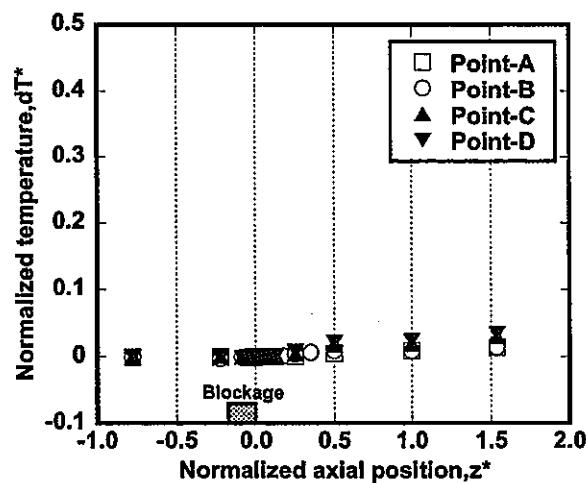
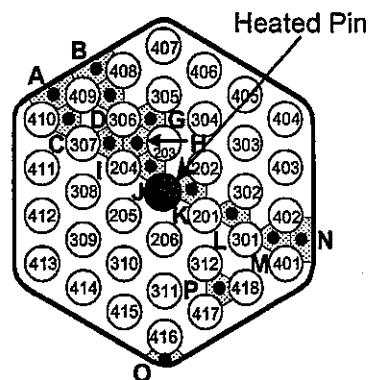
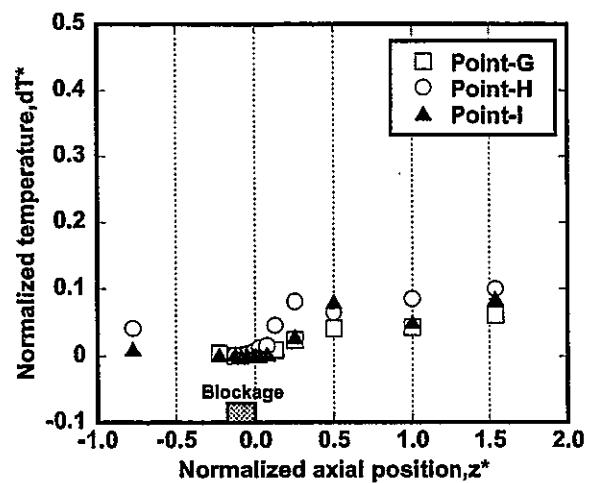


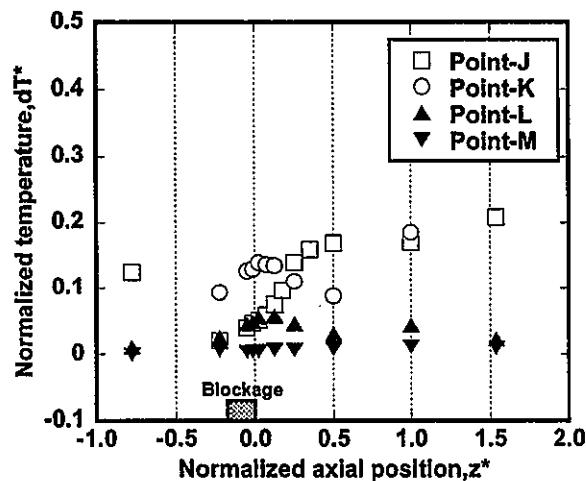
図 4.1-4 模擬燃料集合体軸方向温度分布 (Case-4)



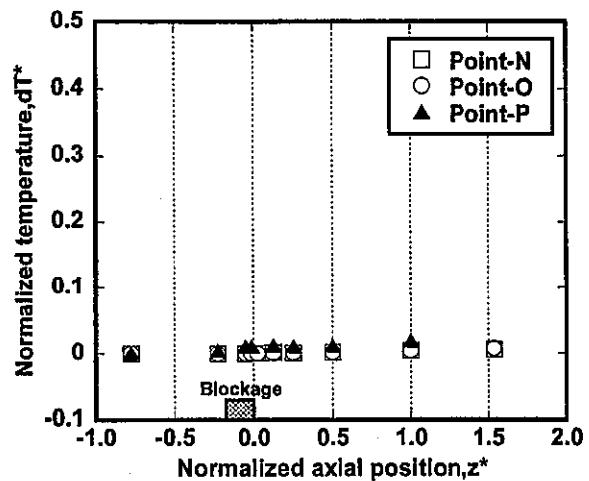
(a) Point-A,B,C,D



(b) Point-G,H,I

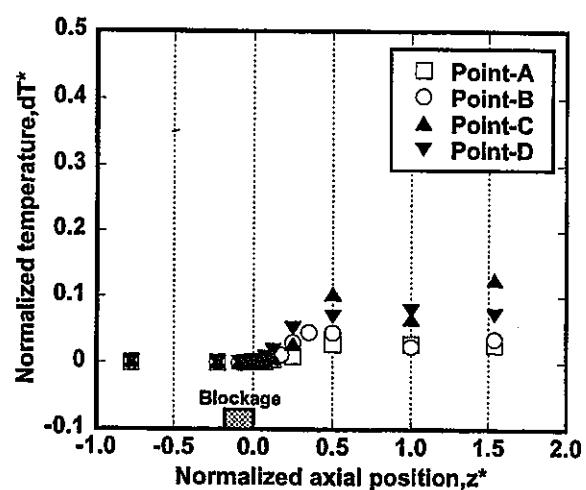
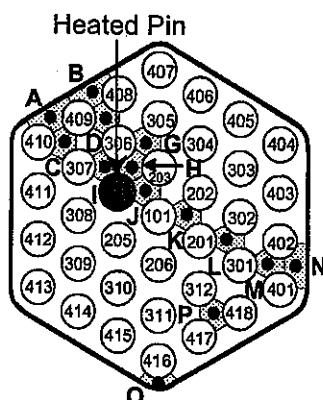


(c) Point-J,K,L,M

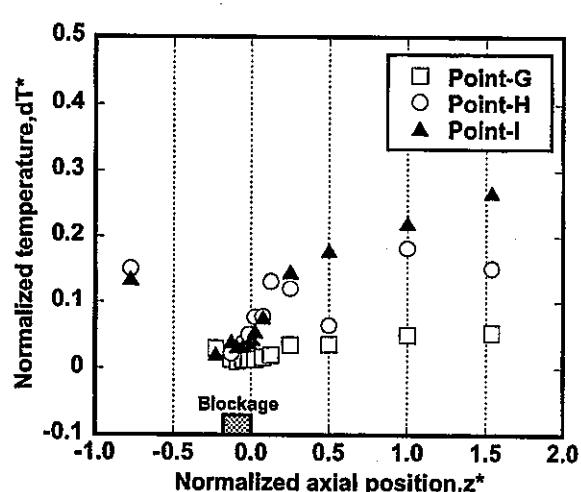


(d) Point-N,O,P

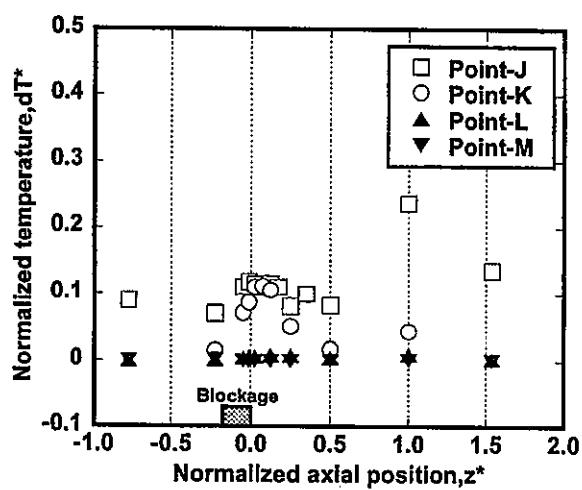
図 4.1-5 模擬燃料集合体軸方向温度分布 (Case-5)



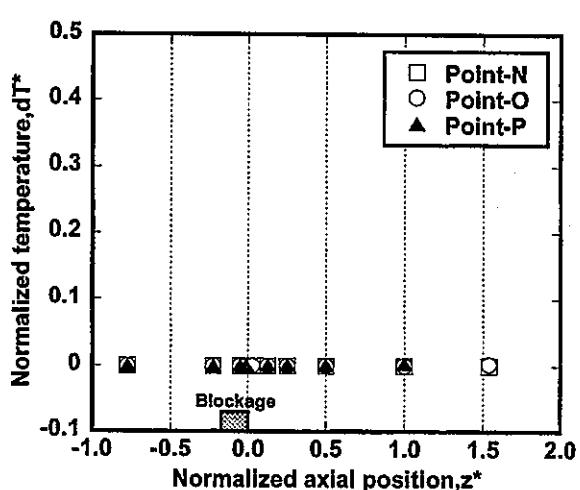
(a) Point-A,B,C,D



(b) Point-G,H,I

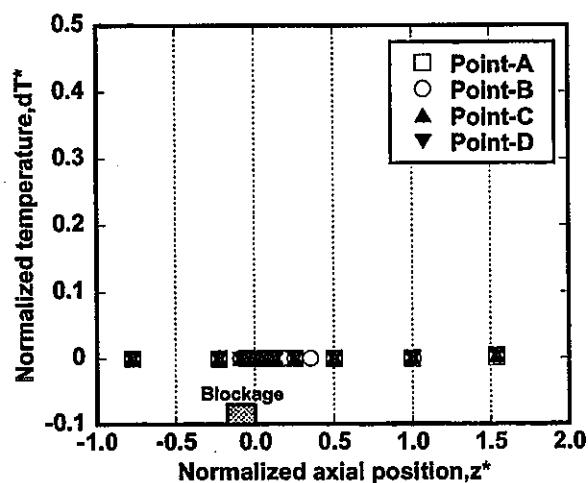
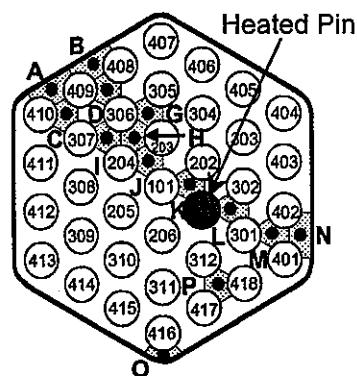


(c) Point-J,K,L,M

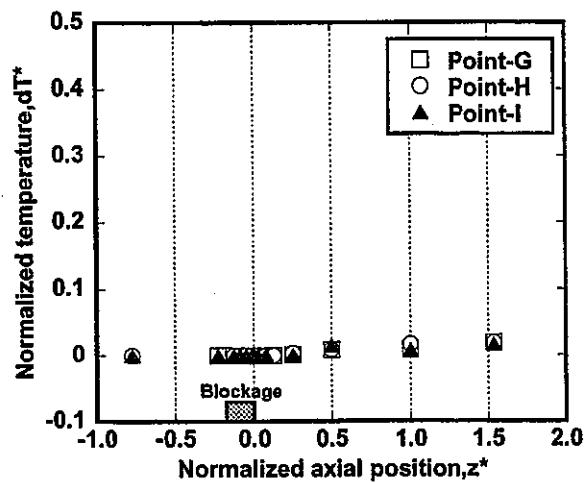


(d) Point-N,O,P

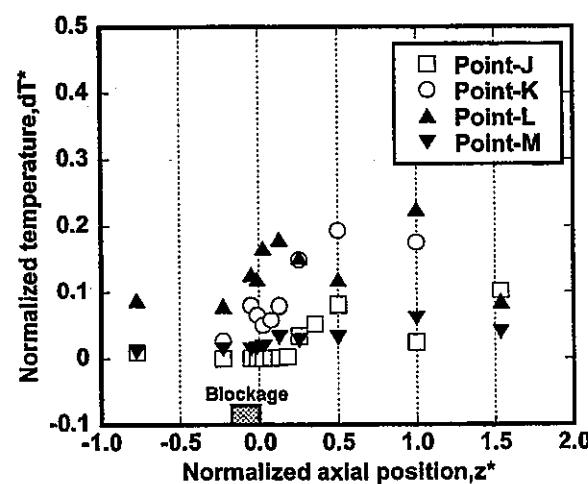
図 4.1-6 模擬燃料集合体軸方向温度分布 (Case-6)



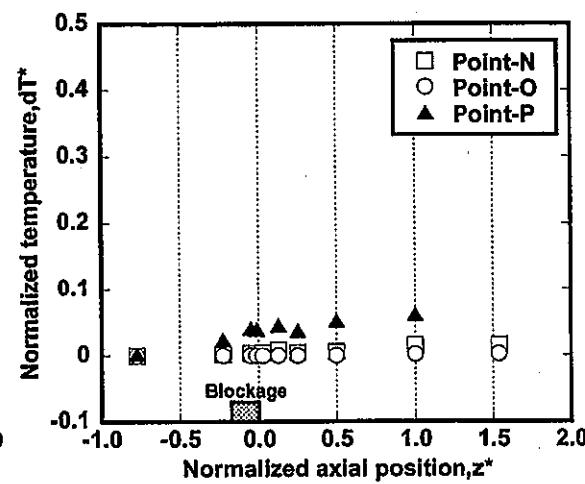
(a) Point-A,B,C,D



(b) Point-G,H,I

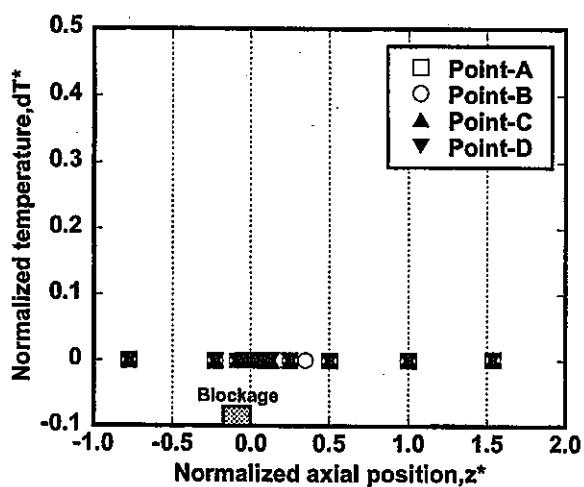
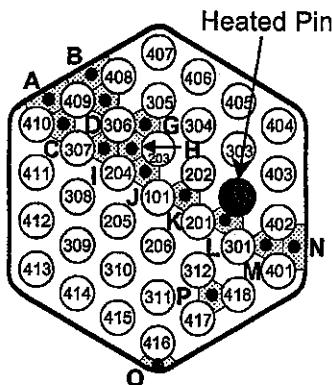


(c) Point-J,K,L,M

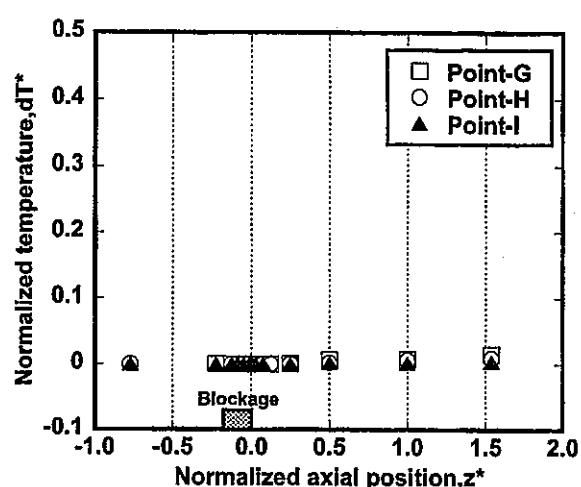


(d) Point-N,O,P

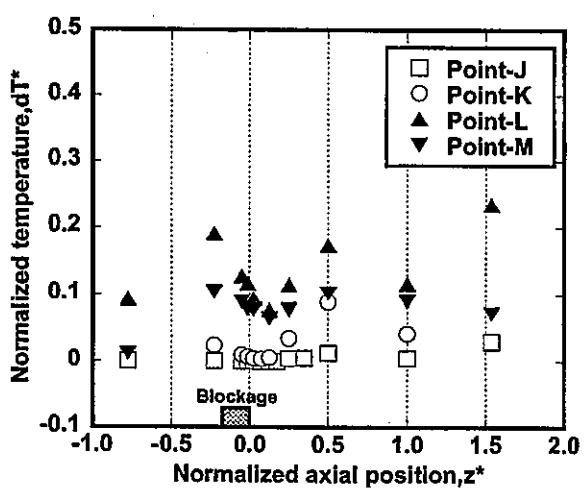
図 4.1-7 模擬燃料集合体軸方向温度分布 (Case-7)



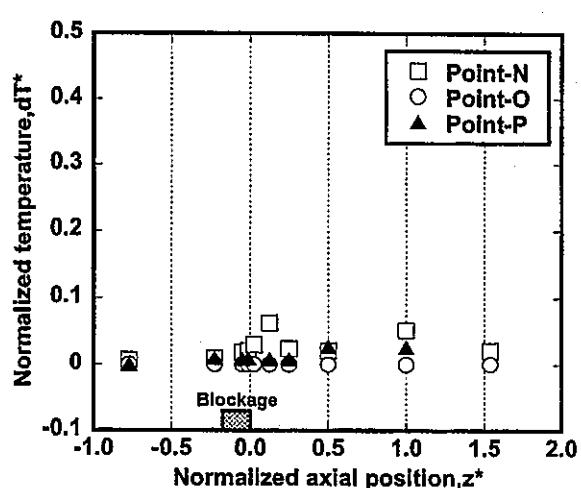
(a) Point-A,B,C,D



(b) Point-G,H,I

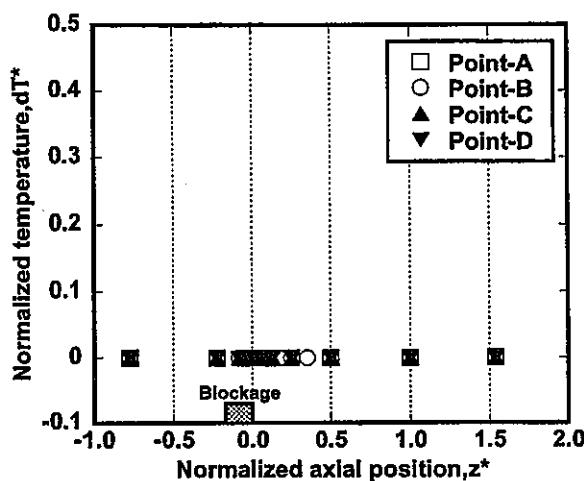
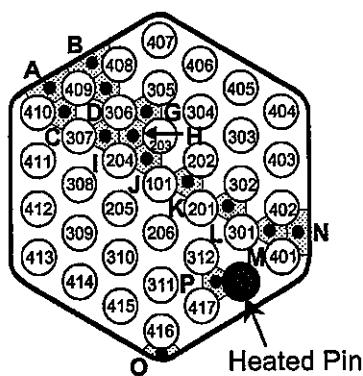


(c) Point-J,K,L,M

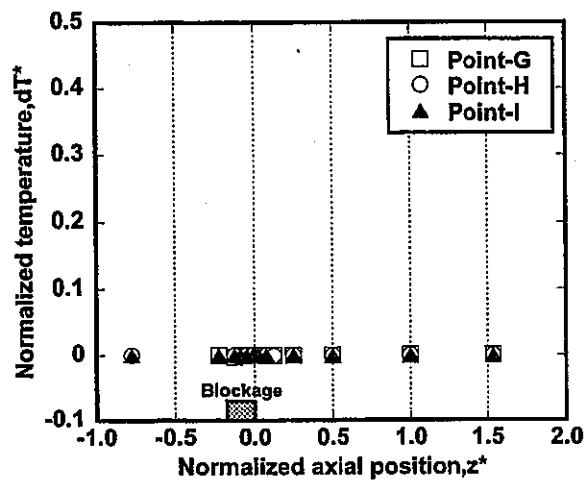


(d) Point-N,O,P

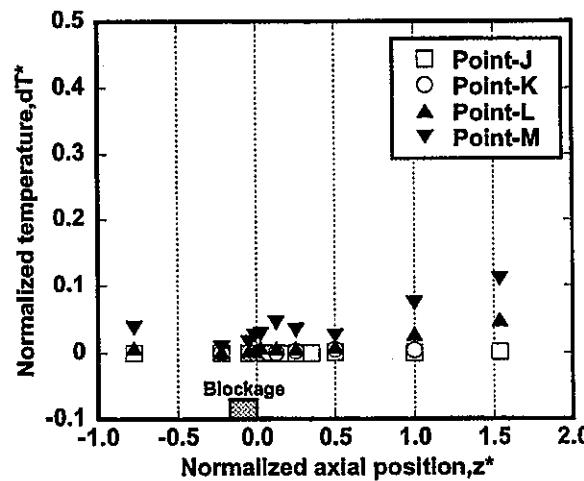
図 4.1-8 模擬燃料集合体軸方向温度分布 (Case-8)



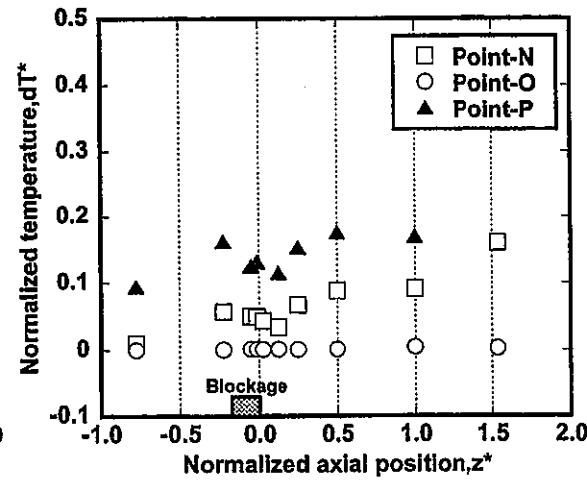
(a) Point-A,B,C,D



(b) Point-G,H,I



(c) Point-J,K,L,M



(d) Point-N,O,P

図 4.1-9 模擬燃料集合体軸方向温度分布 (Case-9)

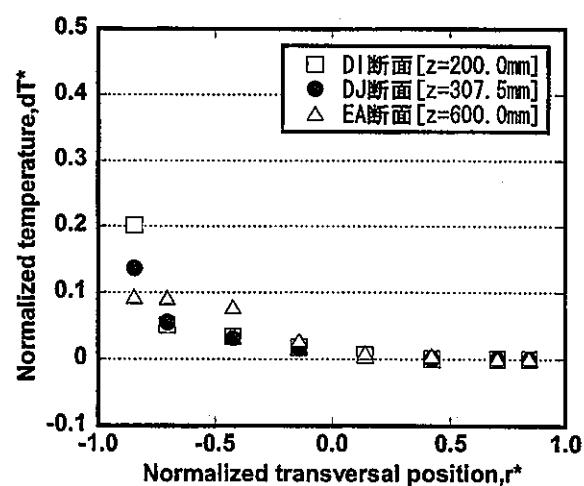
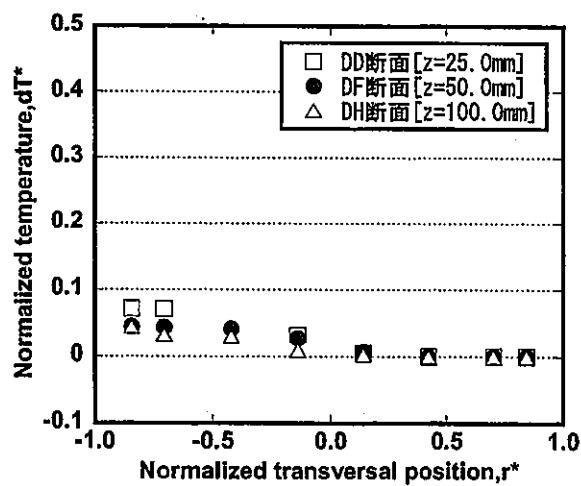
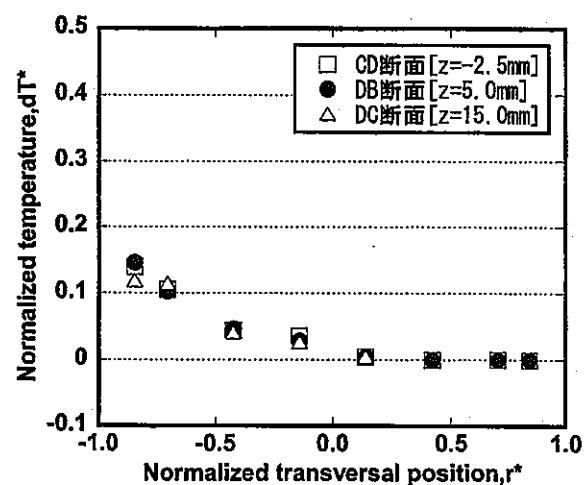
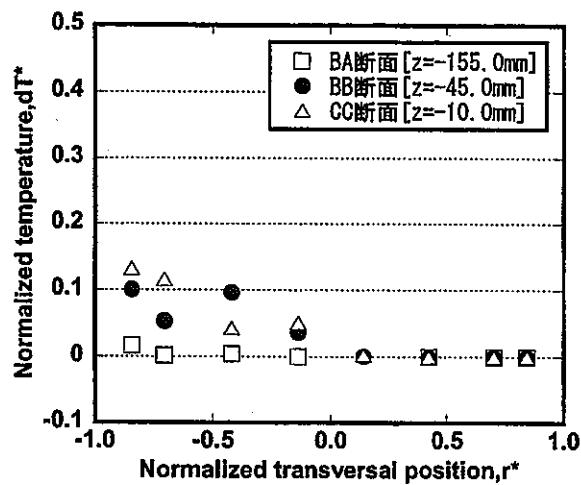
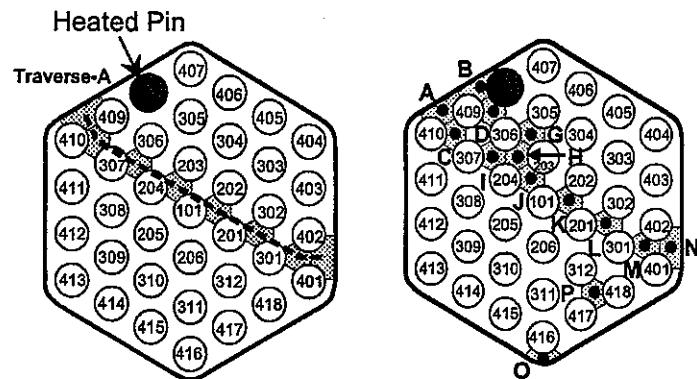
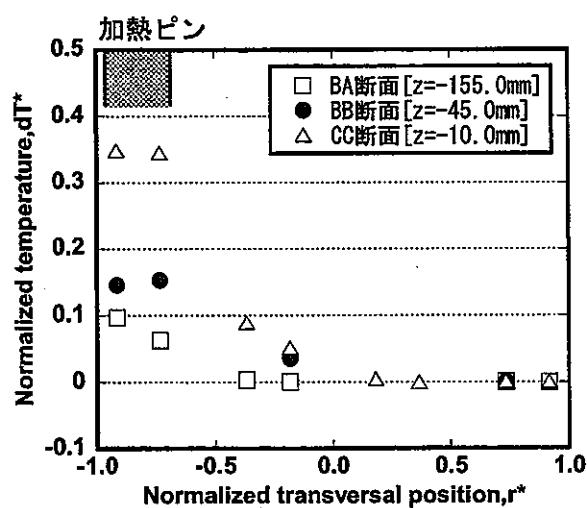
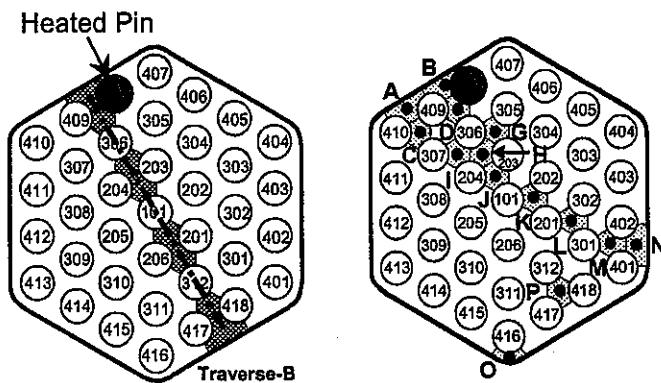
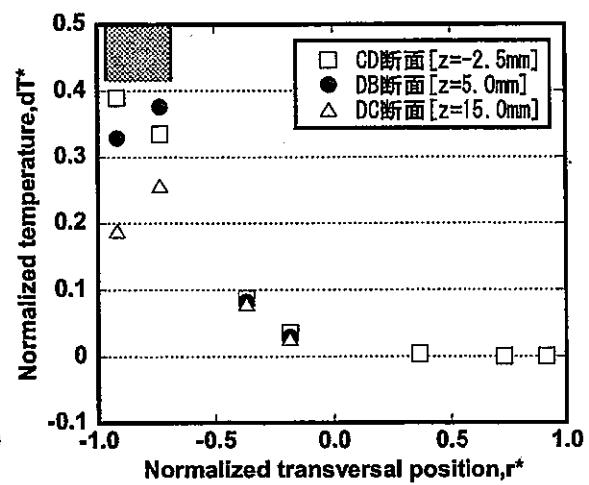


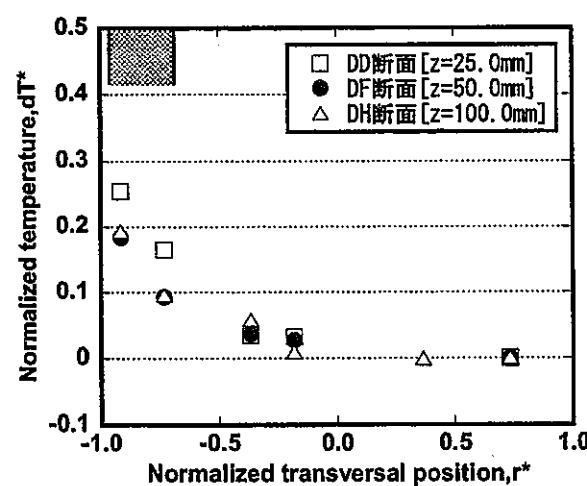
図 4.2-1A 模擬燃料集合体水平方向温度分布 (Case-1)



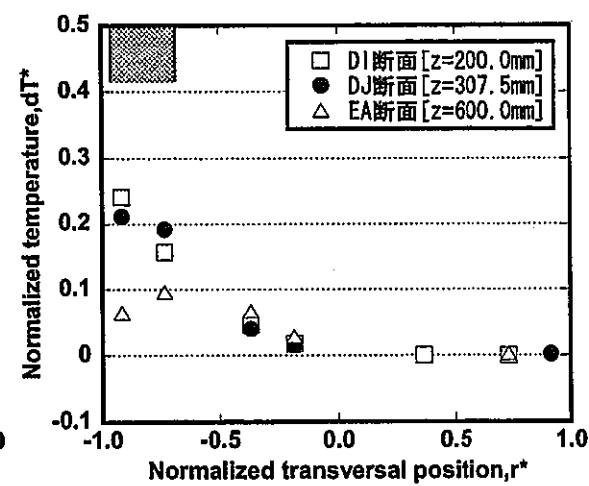
(a) Cross-section BA, BB, CC



(b) Cross-section CD, DB, DC

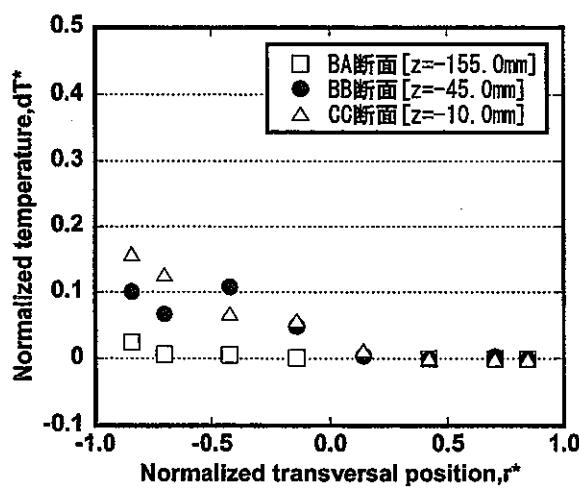
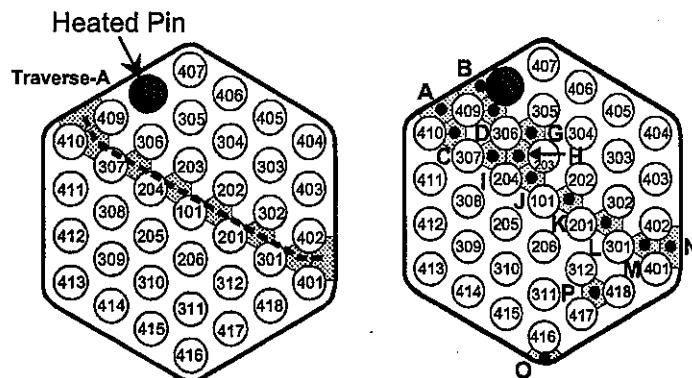


(c) Cross-section DD, DF, DH

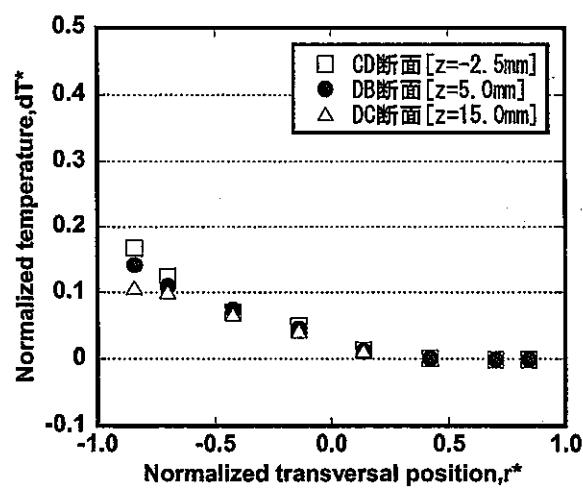


(d) Cross-section DI, DJ, EA

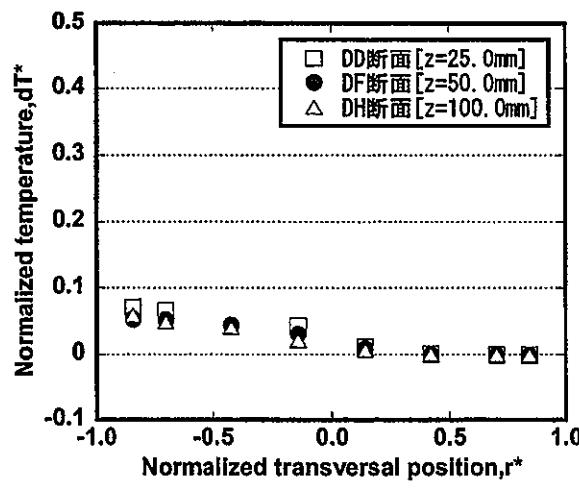
図 4.2-1B 模擬燃料集合体水平方向温度分布 (Case-1)



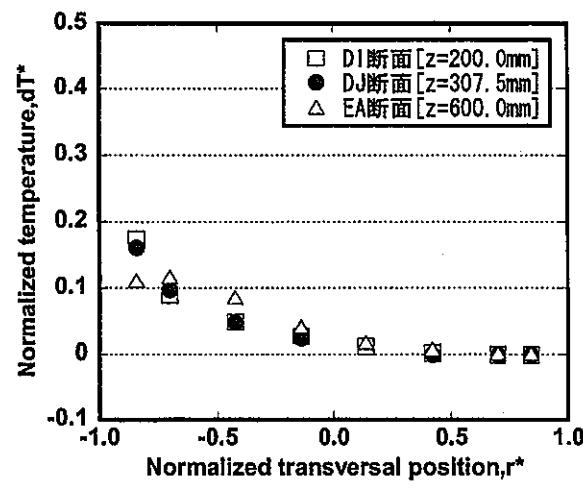
(a) Cross-section BA, BB, CC



(b) Cross-section CD, DB, DC

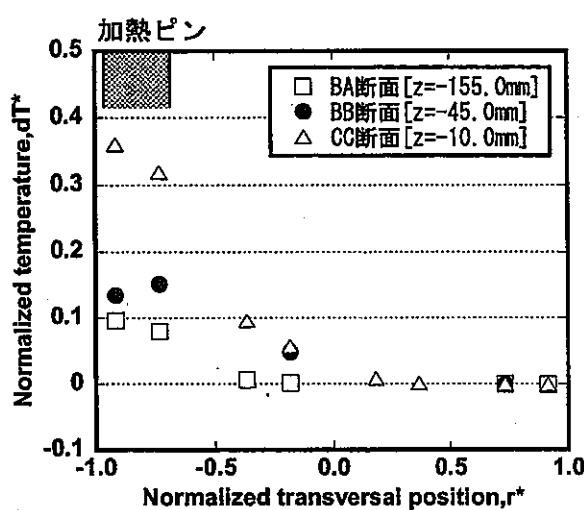
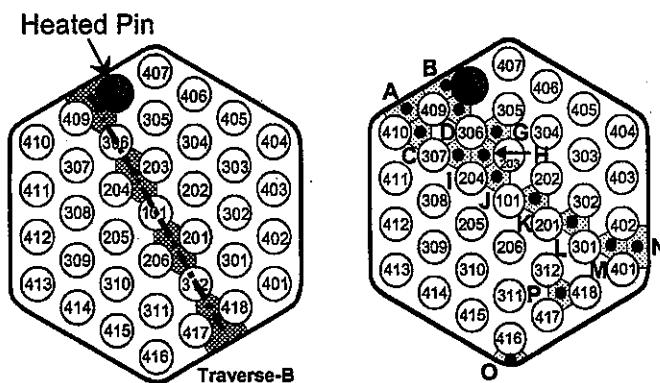


(c) Cross-section DD, DF, DH

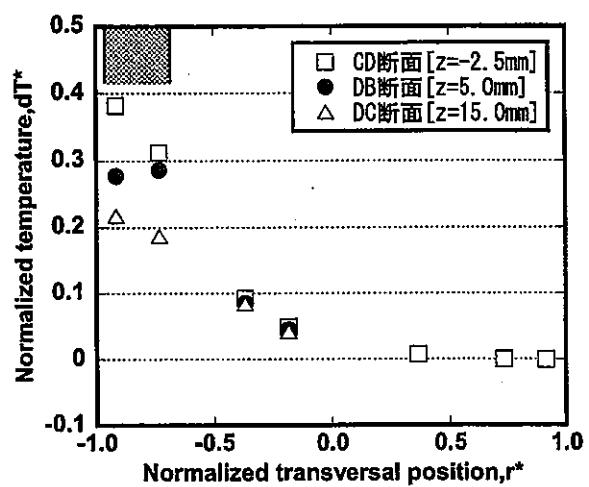


(d) Cross-section DI, DJ, EA

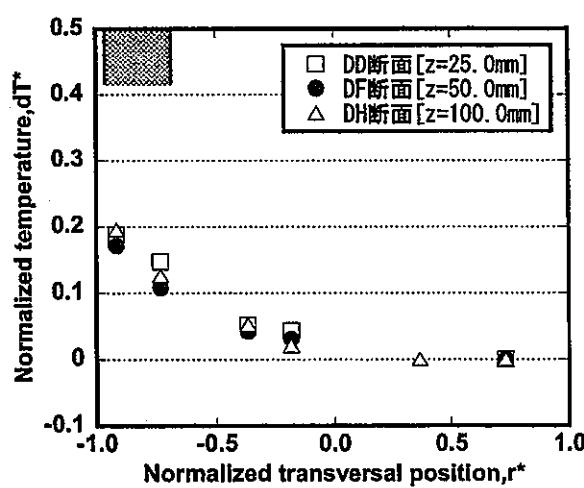
図 4.2-2A 模擬燃料集合体水平方向温度分布 (Case-2)



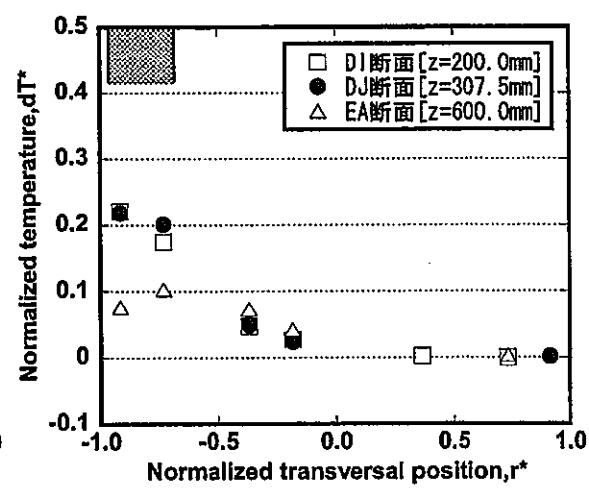
(a) Cross-section BA, BB, CC



(b) Cross-section CD, DB, DC



(c) Cross-section DD, DF, DH



(d) Cross-section DI, DJ, EA

図 4.2-2B 模擬燃料集合体水平方向温度分布 (Case-2)

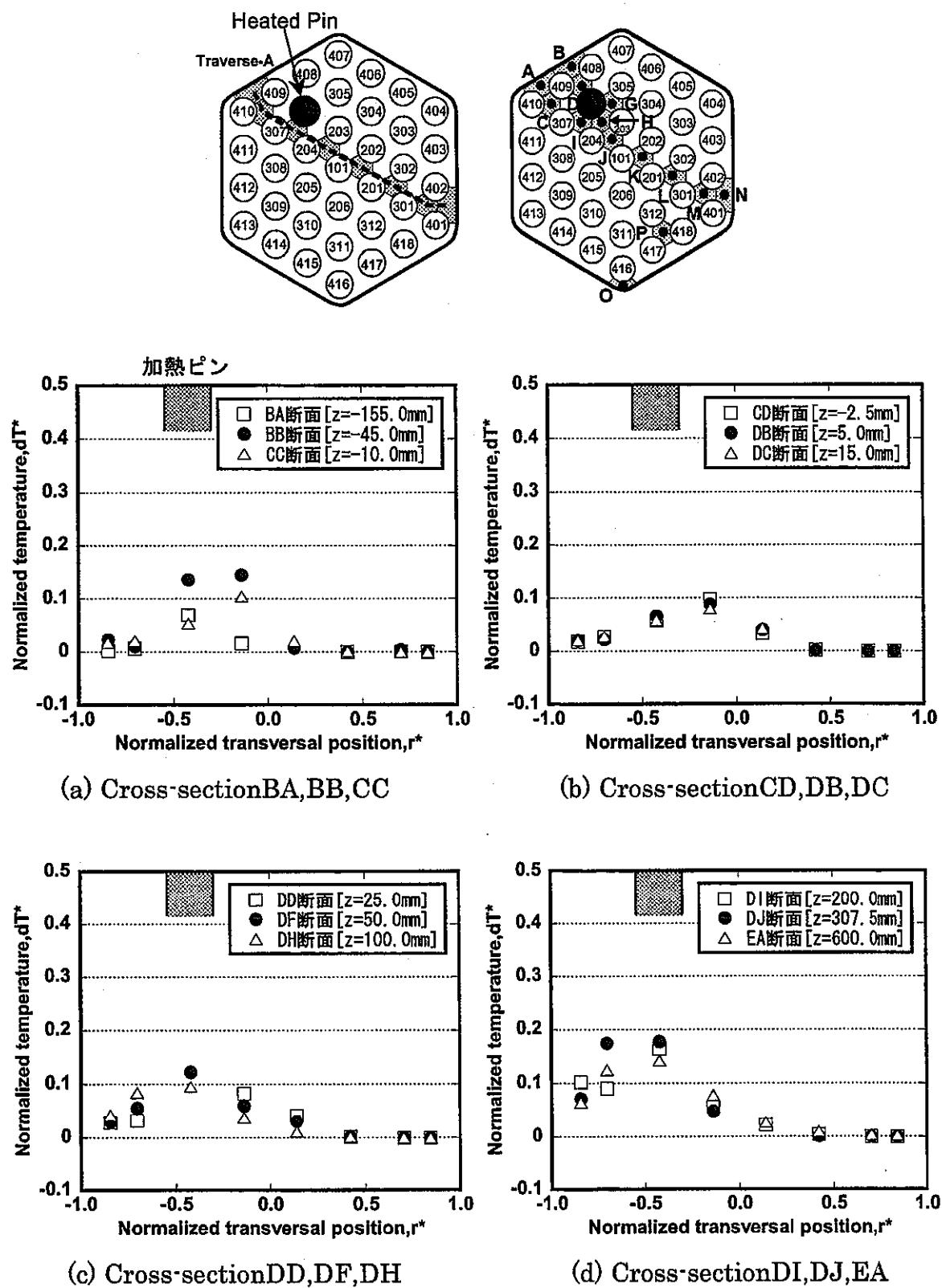
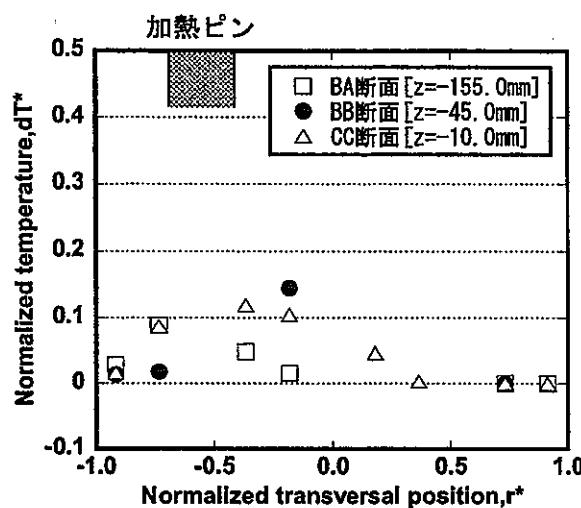
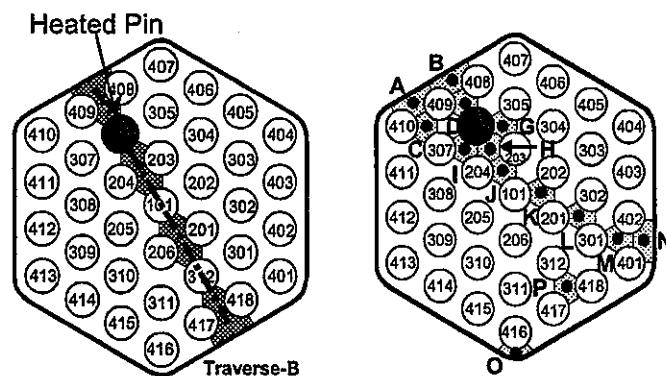
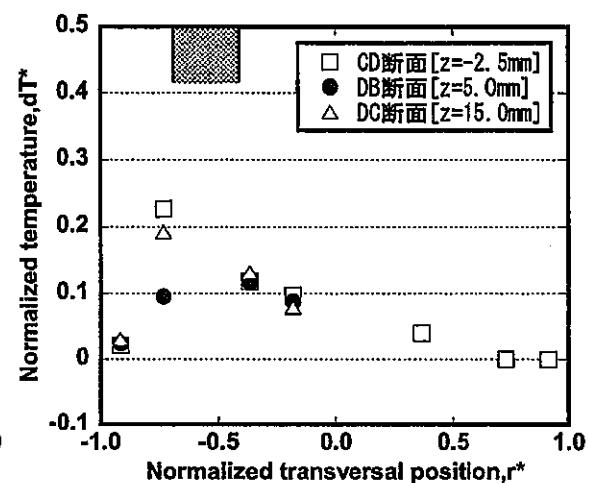


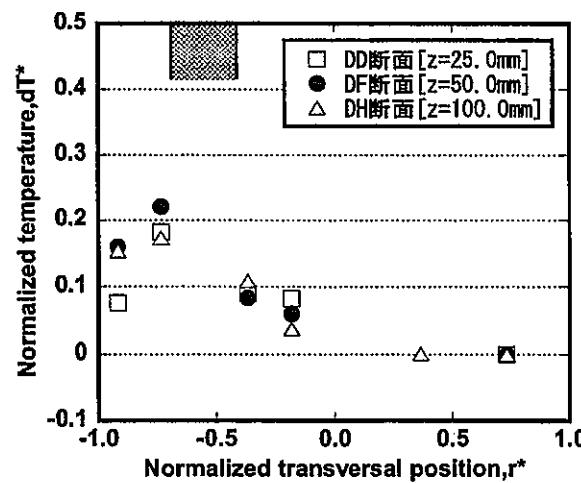
図 4.2-3A 模擬燃料集合体水平方向温度分布 (Case-3)



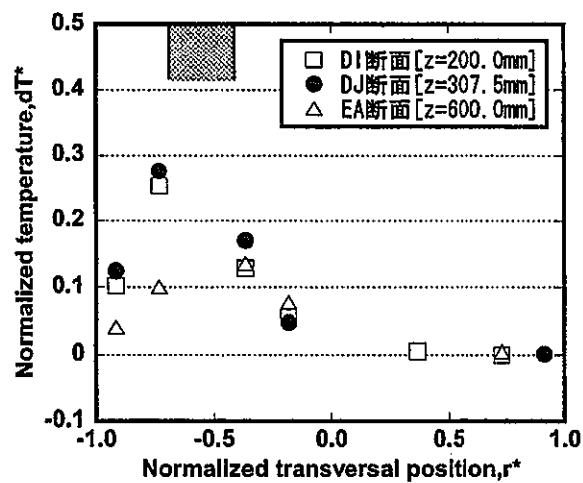
(a) Cross-section BA, BB, CC



(b) Cross-section CD, DB, DC

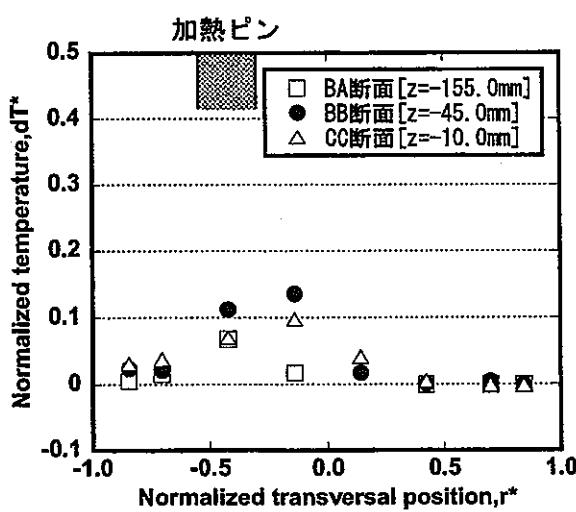
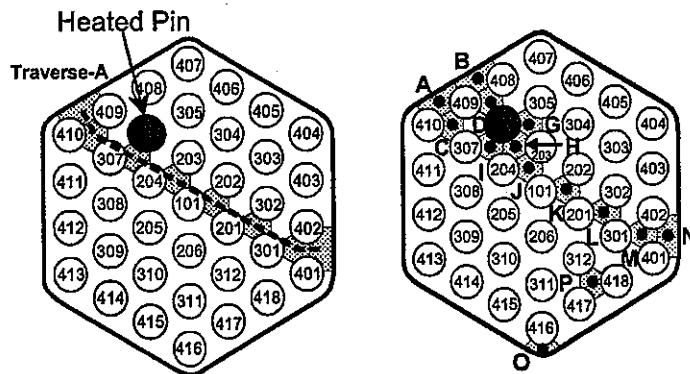


(c) Cross-section DD, DF, DH

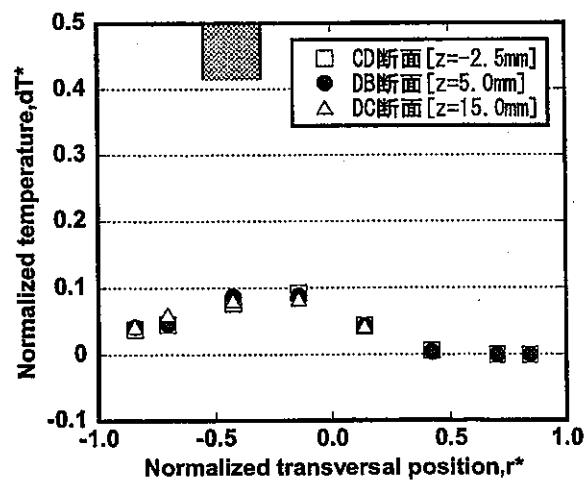


(d) Cross-section DI, DJ, EA

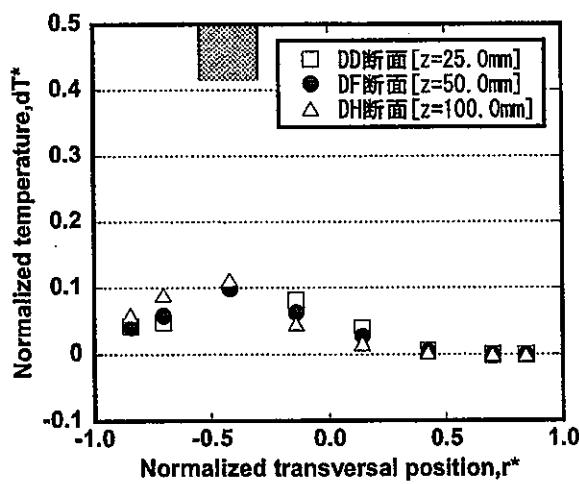
図 4.2-3B 模擬燃料集合体水平方向温度分布 (Case-3)



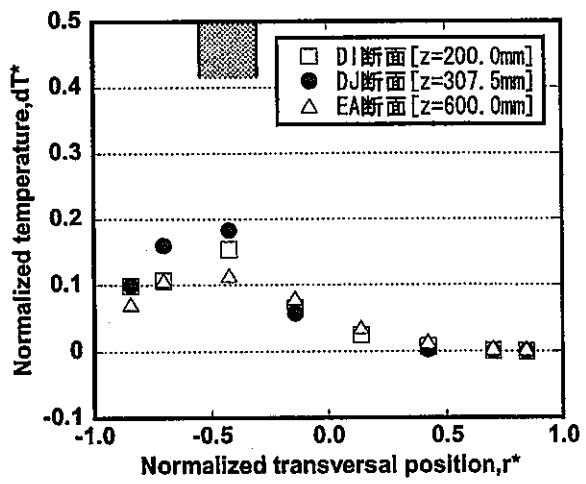
(a) Cross-section BA, BB, CC



(b) Cross-section CD, DB, DC

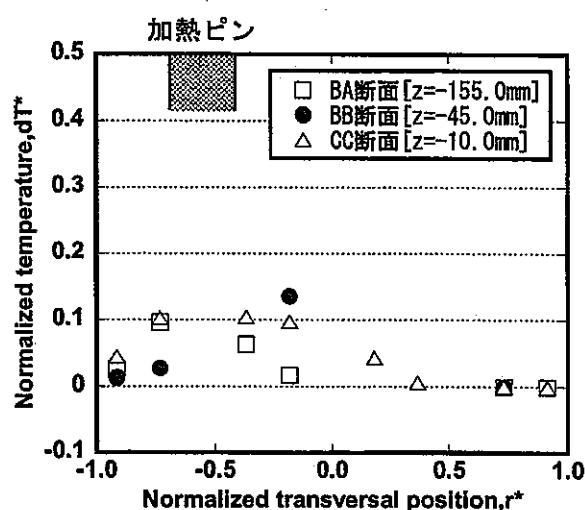
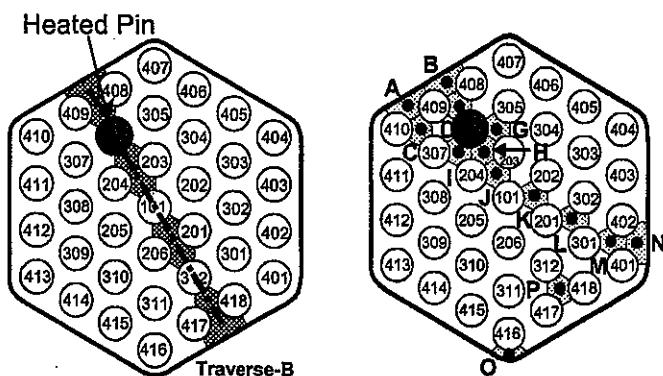


(c) Cross-section DD, DF, DH

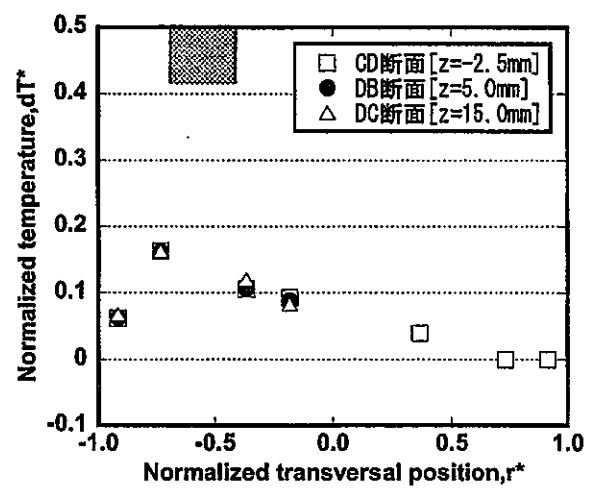


(d) Cross-section DI, DJ, EA

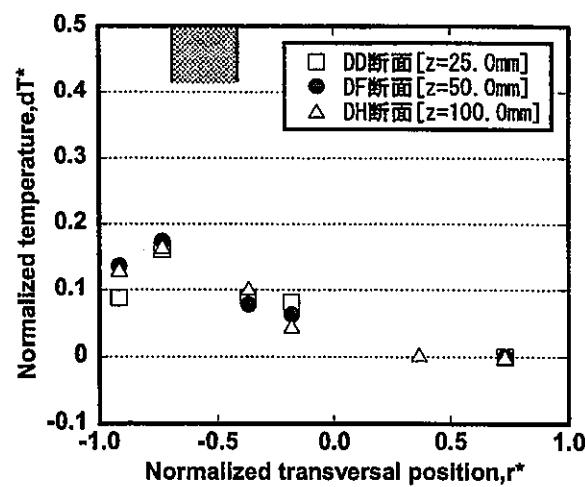
図 4.2-4A 模擬燃料集合体水平方向温度分布 (Case-4)



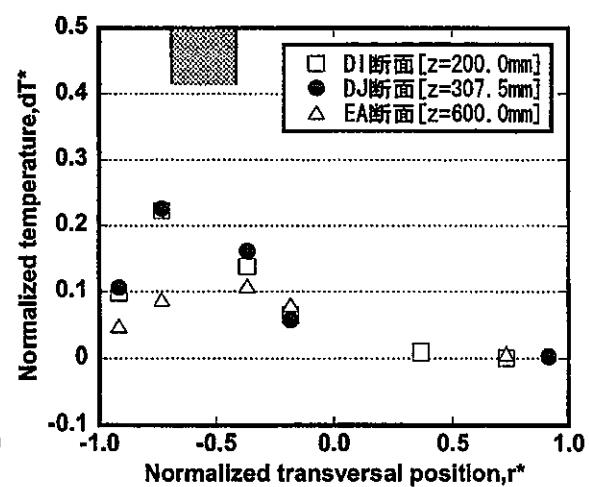
(a) Cross-section BA, BB, CC



(b) Cross-section CD, DB, DC

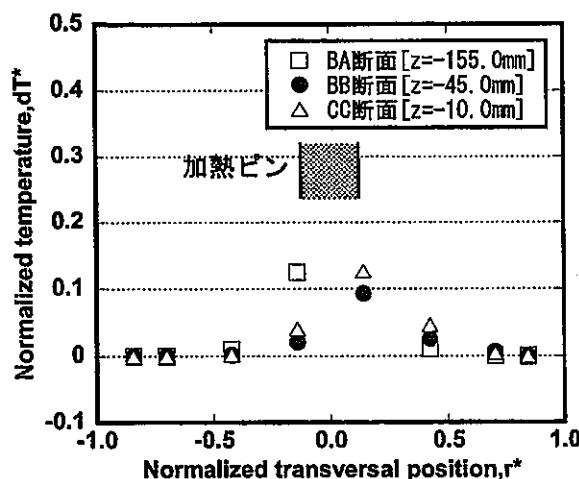
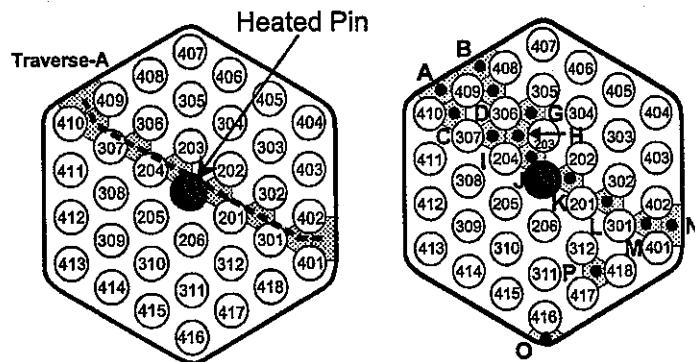


(c) Cross-section DD, DF, DH

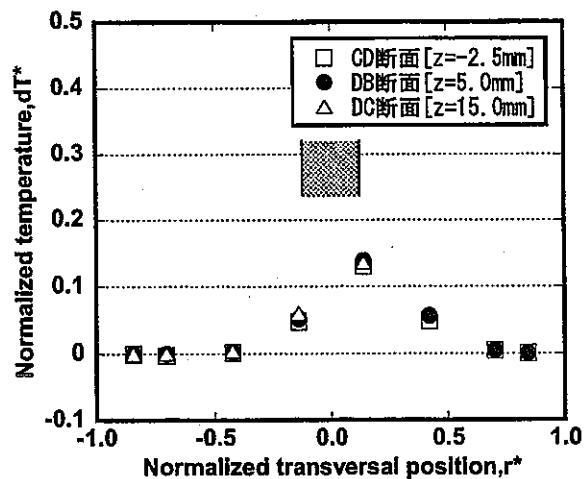


(d) Cross-section DI, DJ, EA

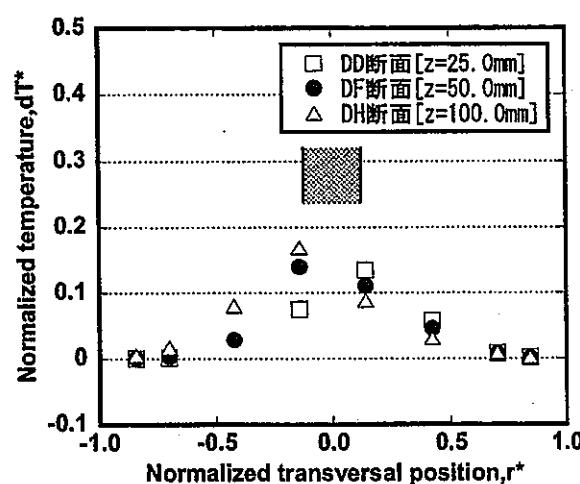
図 4.2-4B 模擬燃料集合体水平方向温度分布 (Case-4)



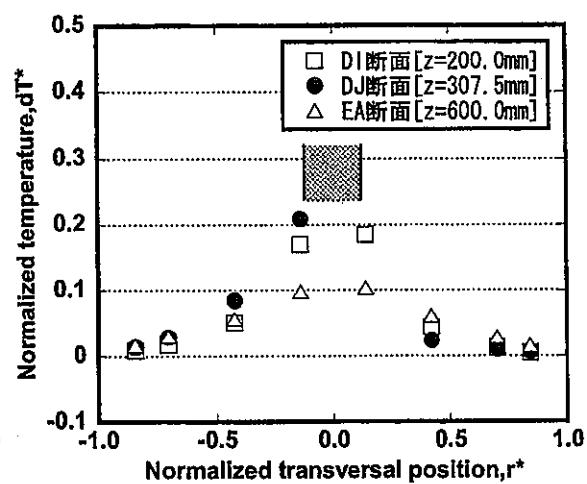
(a) Cross-section BA, BB, CC



(b) Cross-section CD, DB, DC



(c) Cross-section DD, DF, DH



(d) Cross-section DI, DJ, EA

図 4.2-5A 模擬燃料集合体水平方向温度分布 (Case-5)

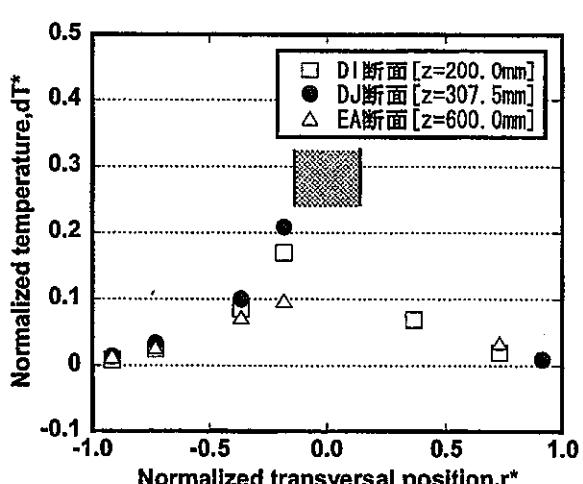
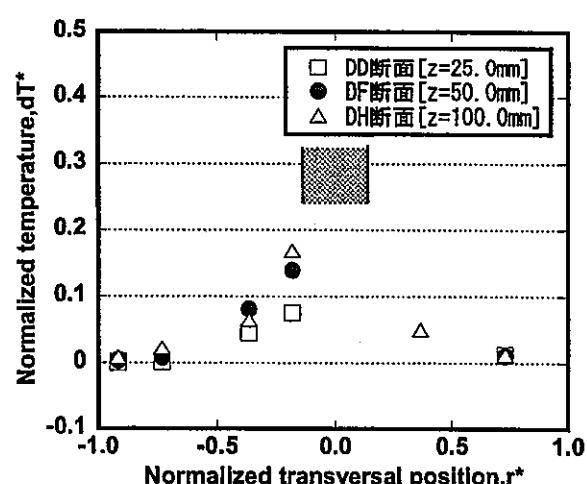
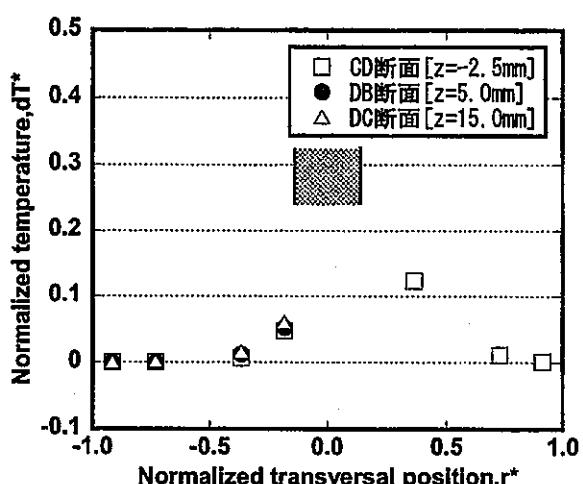
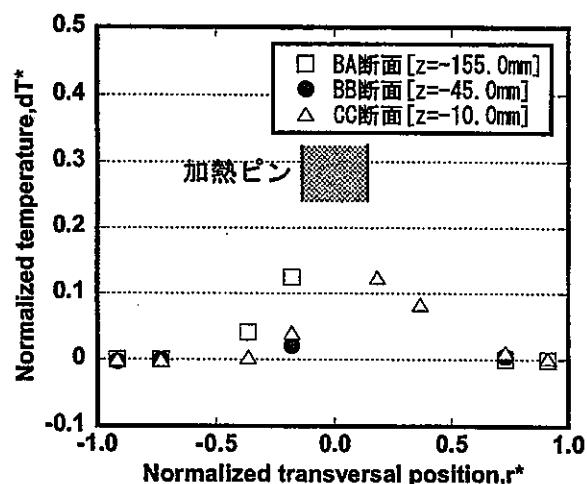
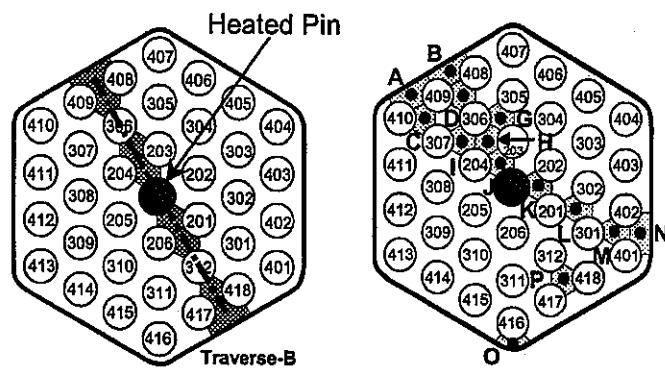


図 4.2-5B 模擬燃料集合体水平方向温度分布 (Case-5)

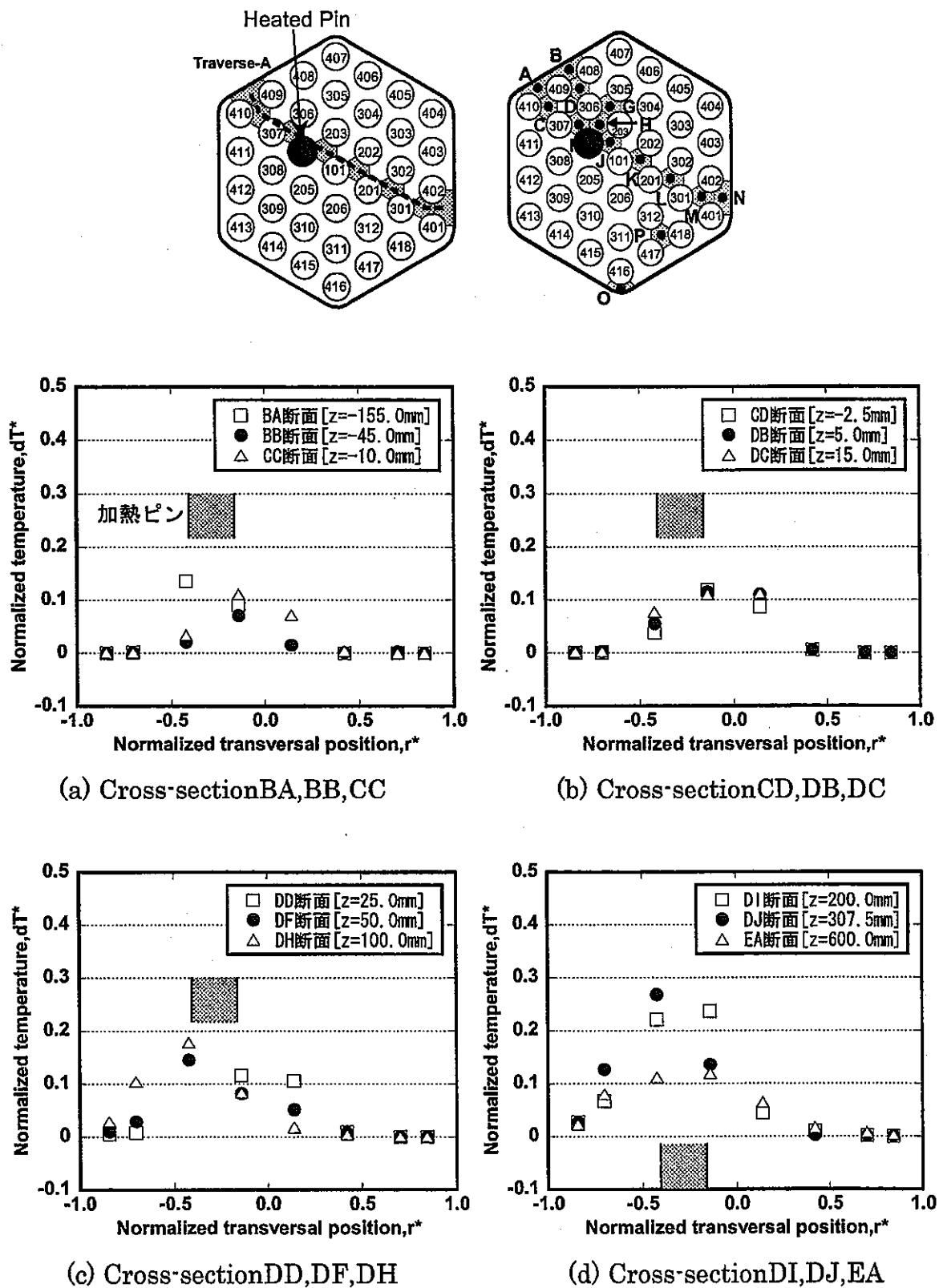
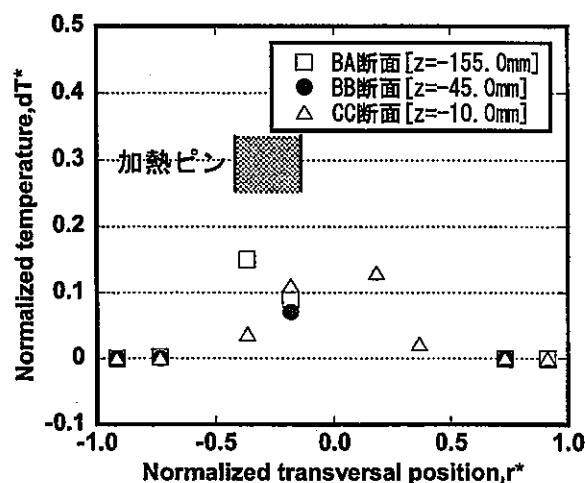
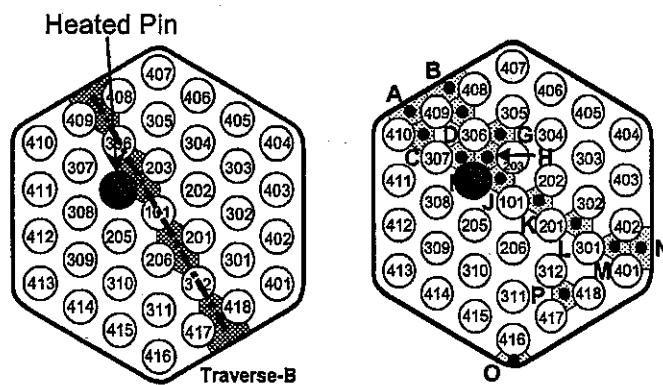
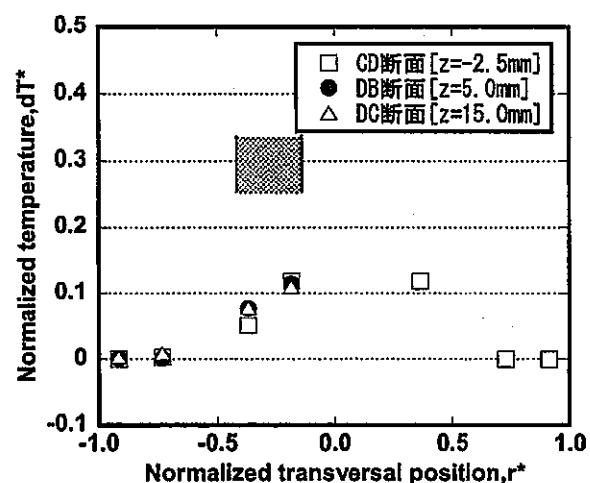


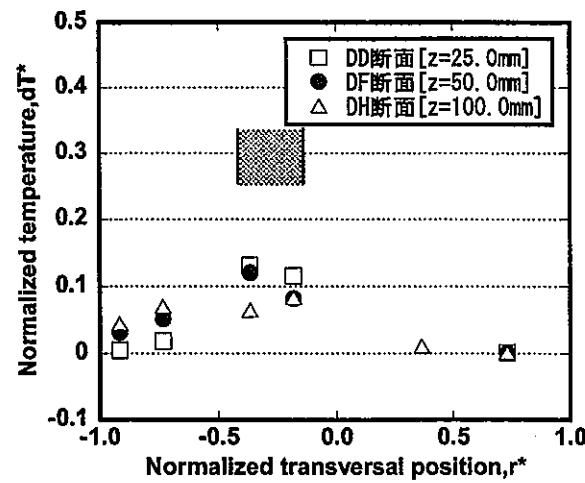
図 4.2-6A 模擬燃料集合体水平方向温度分布 (Case-6)



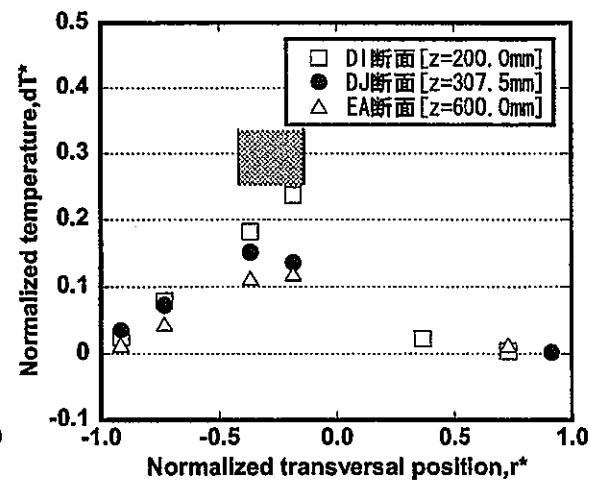
(a) Cross-section BA, BB, CC



(b) Cross-section CD, DB, DC

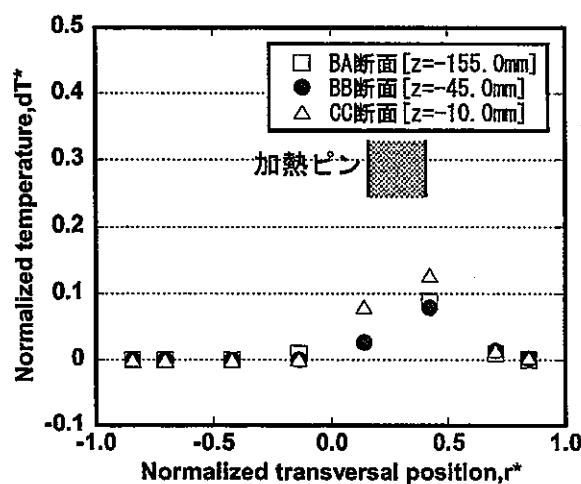
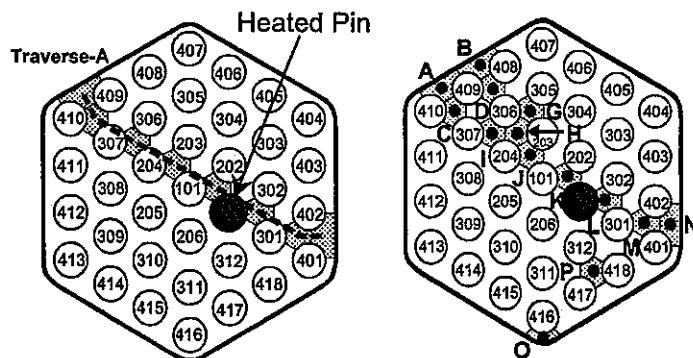


(c) Cross-section DD, DF, DH

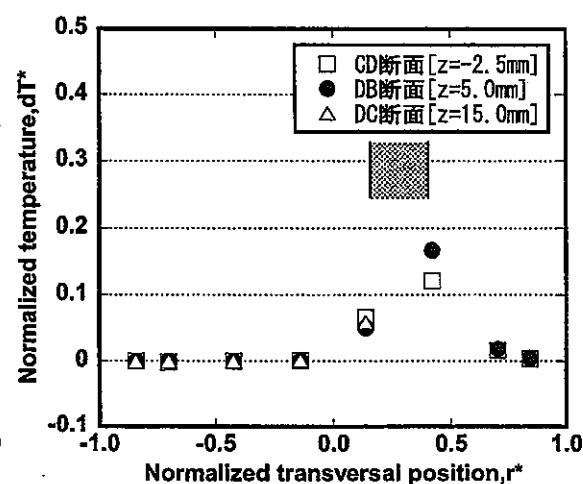


(d) Cross-section DI, DJ, EA

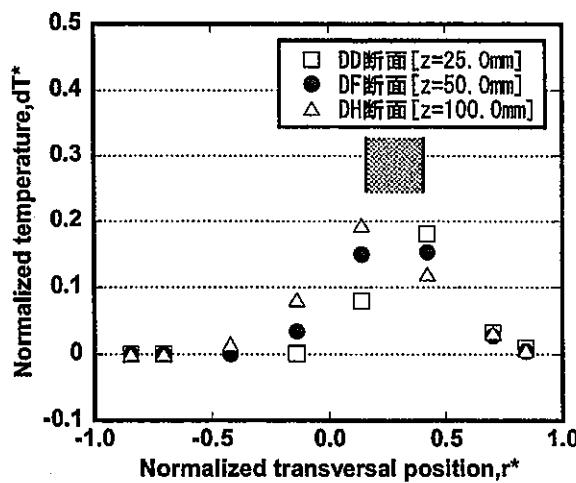
図 4.2-6B 模擬燃料集合体水平方向温度分布 (Case-6)



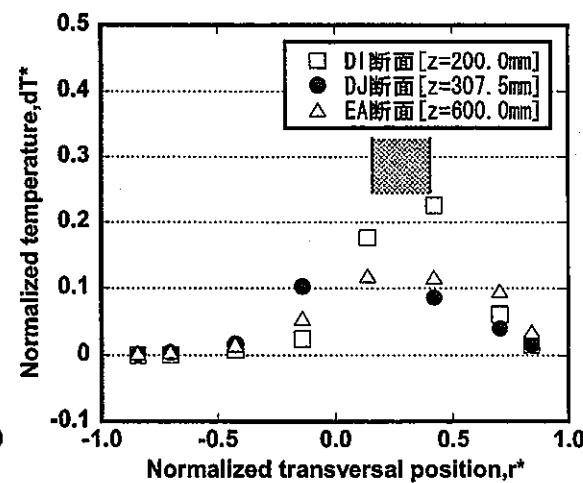
(a) Cross-section BA, BB, CC



(b) Cross-section CD, DB, DC

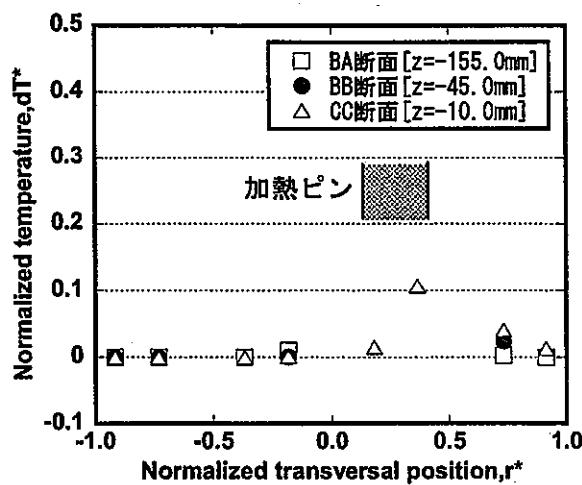
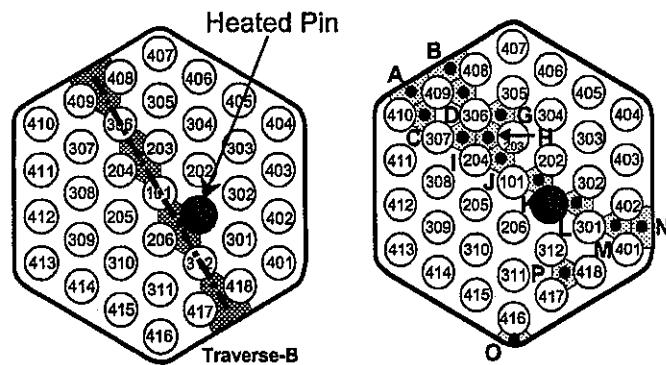


(c) Cross-section DD, DF, DH

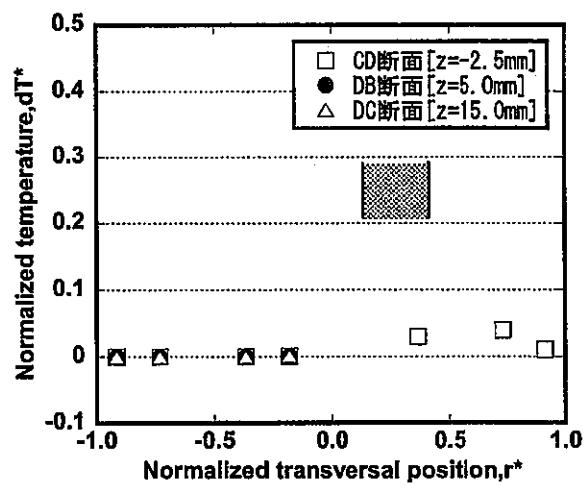


(d) Cross-section DI, DJ, EA

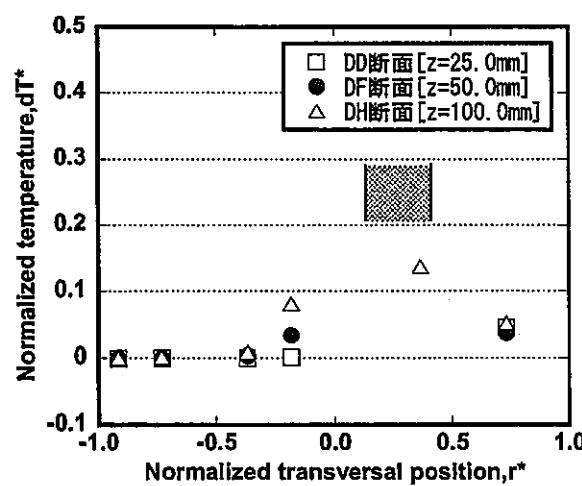
図 4.2-7A 模擬燃料集合体水平方向温度分布 (Case-7)



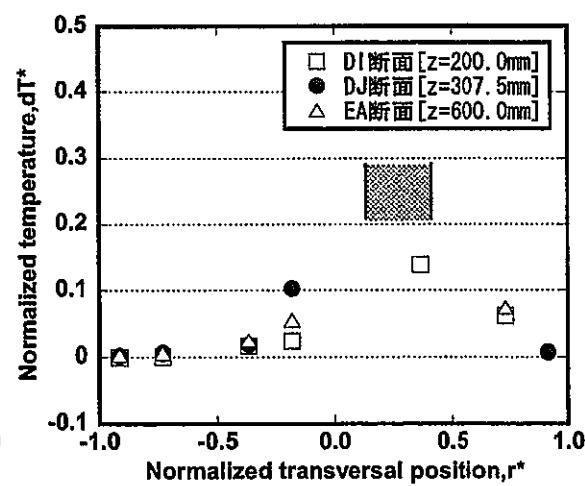
(a) Cross-section BA, BB, CC



(b) Cross-section CD, DB, DC

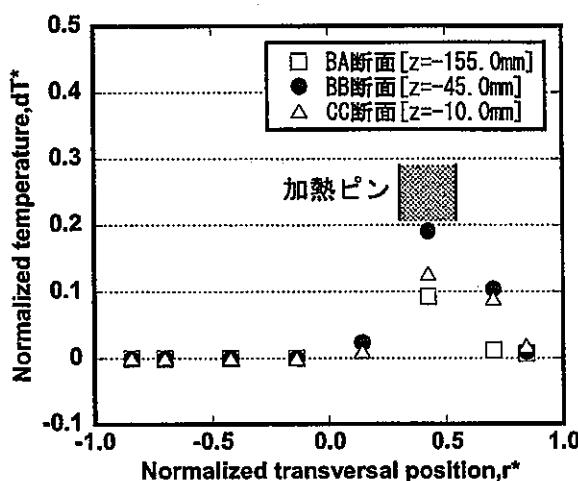
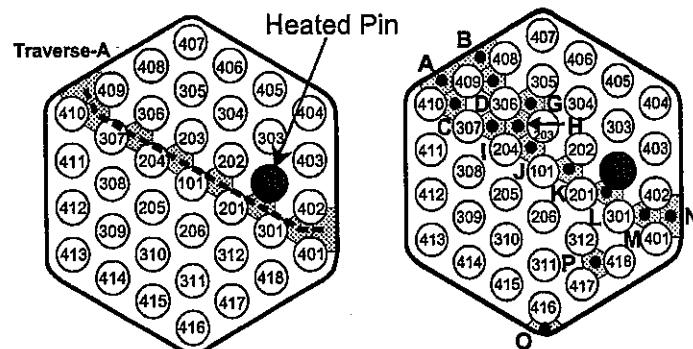


(c) Cross-section DD, DF, DH

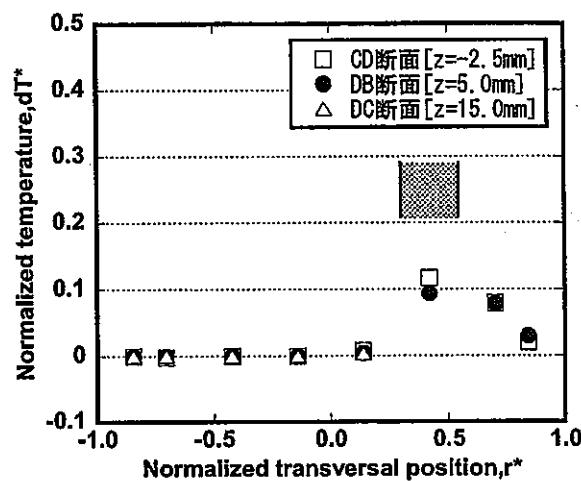


(d) Cross-section DI, DJ, EA

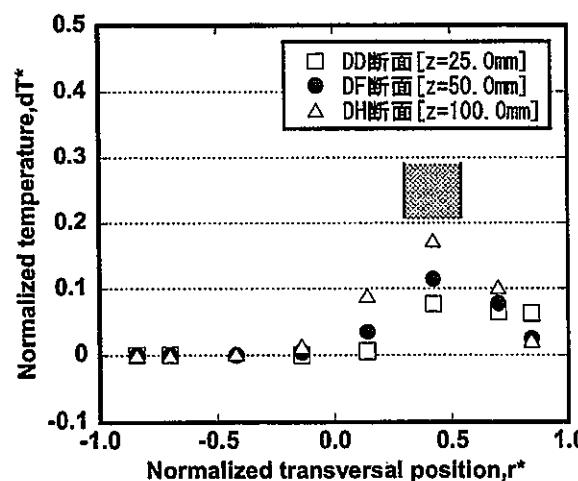
図 4.2-7B 模擬燃料集合体水平方向温度分布 (Case·7)



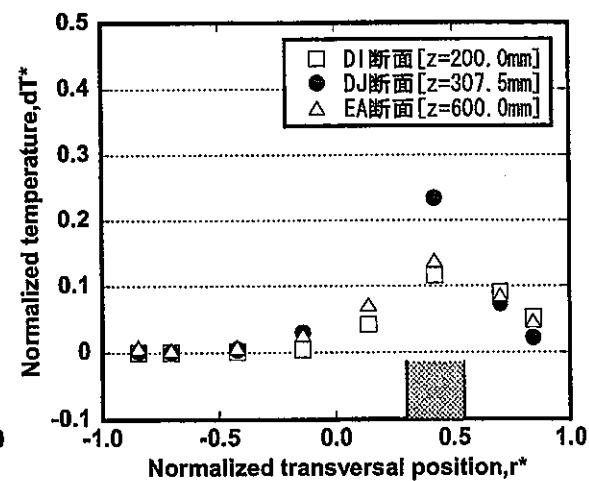
(a) Cross-section BA, BB, CC



(b) Cross-section CD, DB, DC

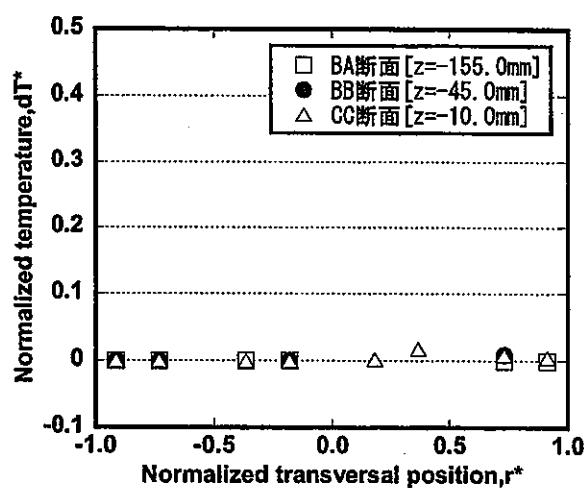
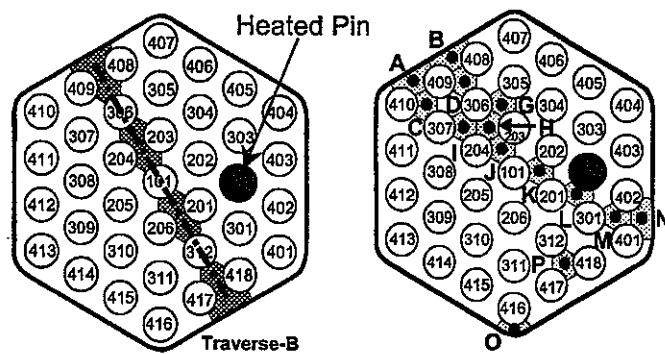


(c) Cross-section DD, DF, DH

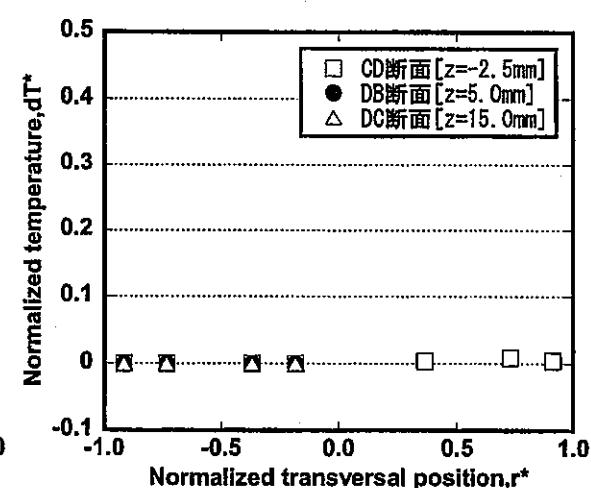


(d) Cross-section DI, DJ, EA

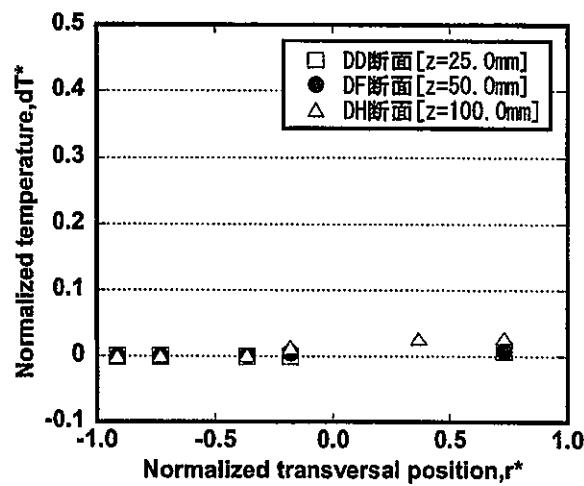
図 4.2-8A 模擬燃料集合体水平方向温度分布 (Case·8)



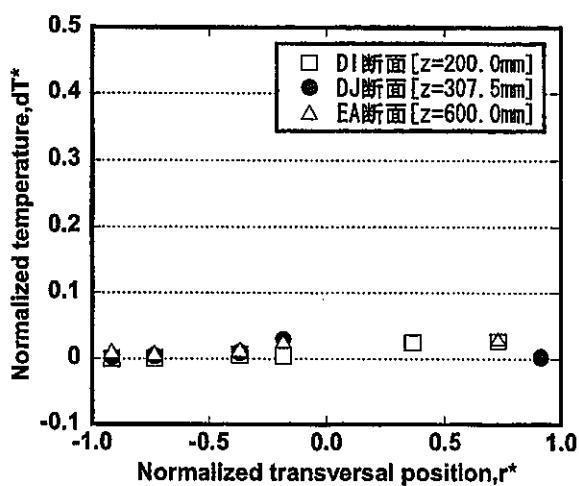
(a) Cross-section BA, BB, CC



(b) Cross-section CD, DB, DC

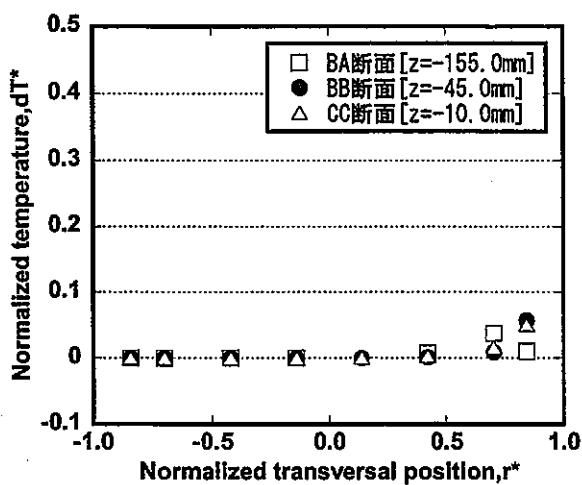
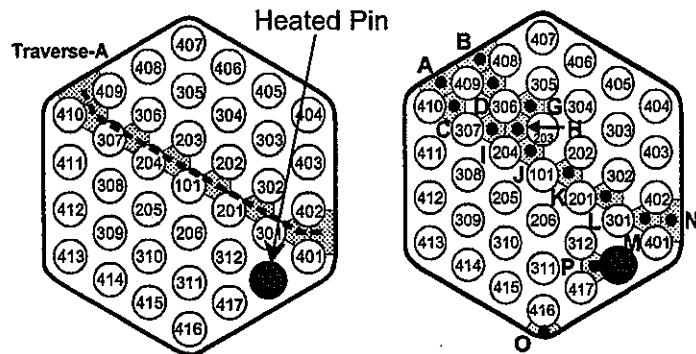


(c) Cross-section DD, DF, DH

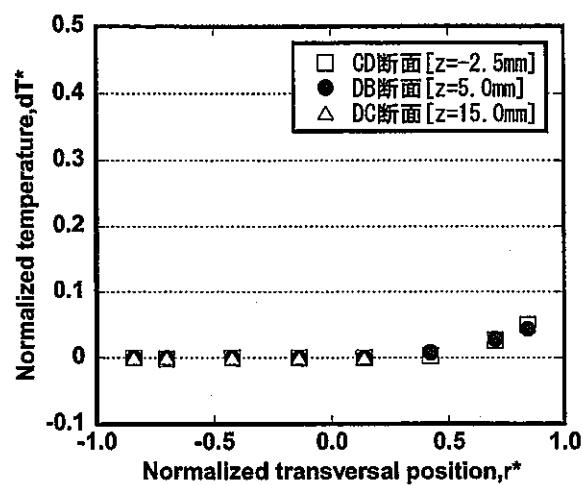


(d) Cross-section DI, DJ, EA

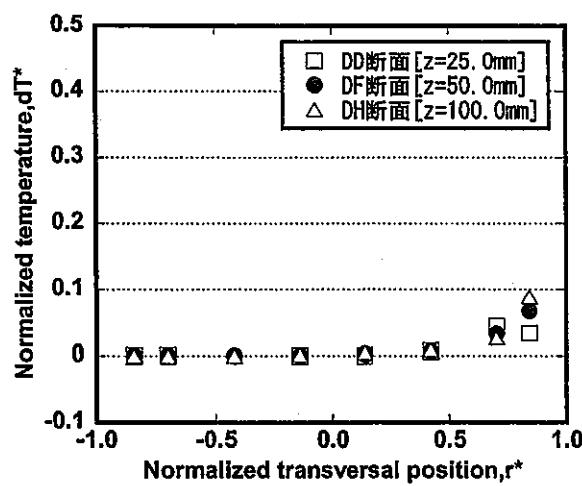
図 4.2-8B 模擬燃料集合体水平方向温度分布 (Case·8)



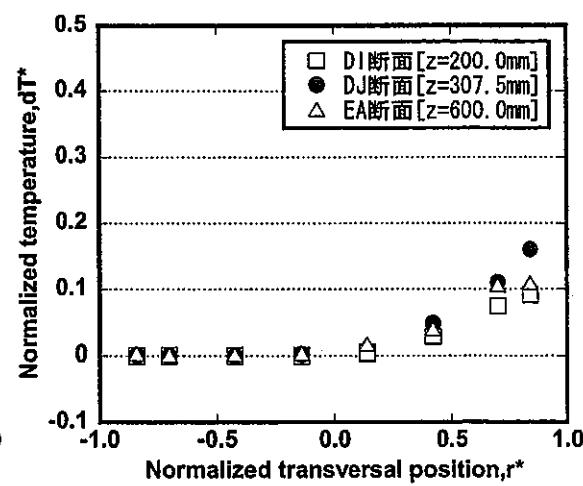
(a) Cross-section BA, BB, CC



(b) Cross-section CD, DB, DC



(c) Cross-section DD, DF, DH



(d) Cross-section DI, DJ, EA

図 4.2-9A 模擬燃料集合体水平方向温度分布 (Case-9)

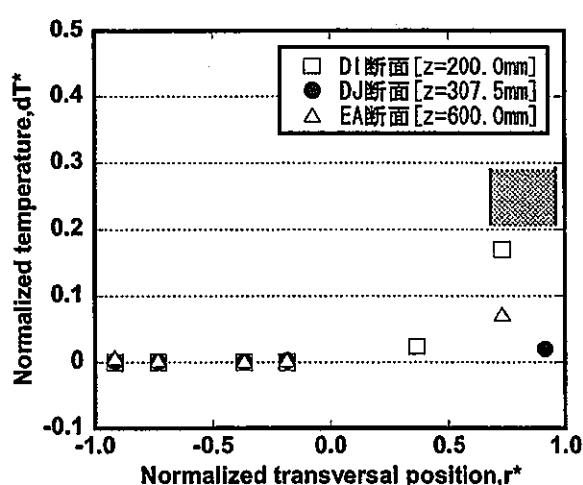
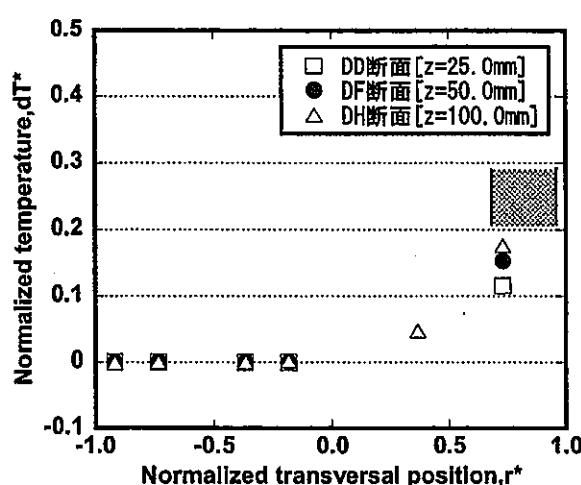
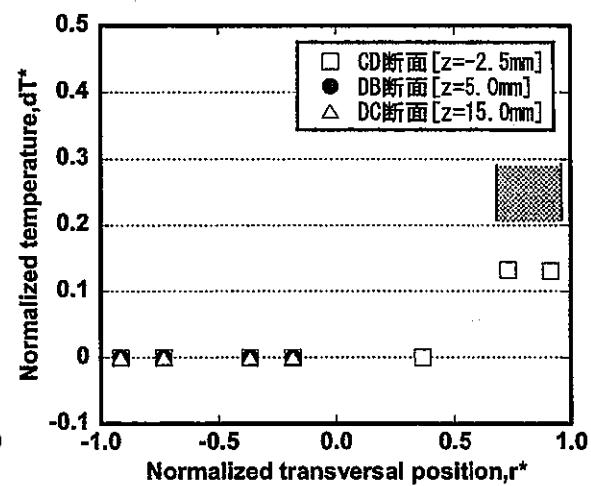
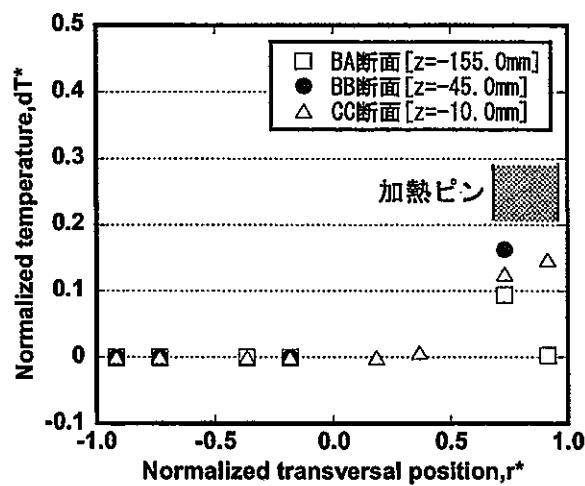
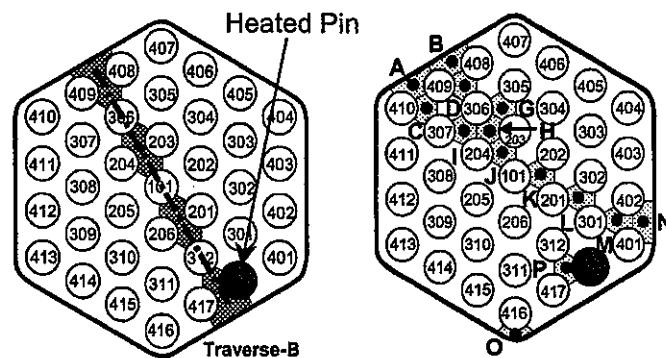


図 4.2-9B 模擬燃料集合体水平方向温度分布 (Case-9)

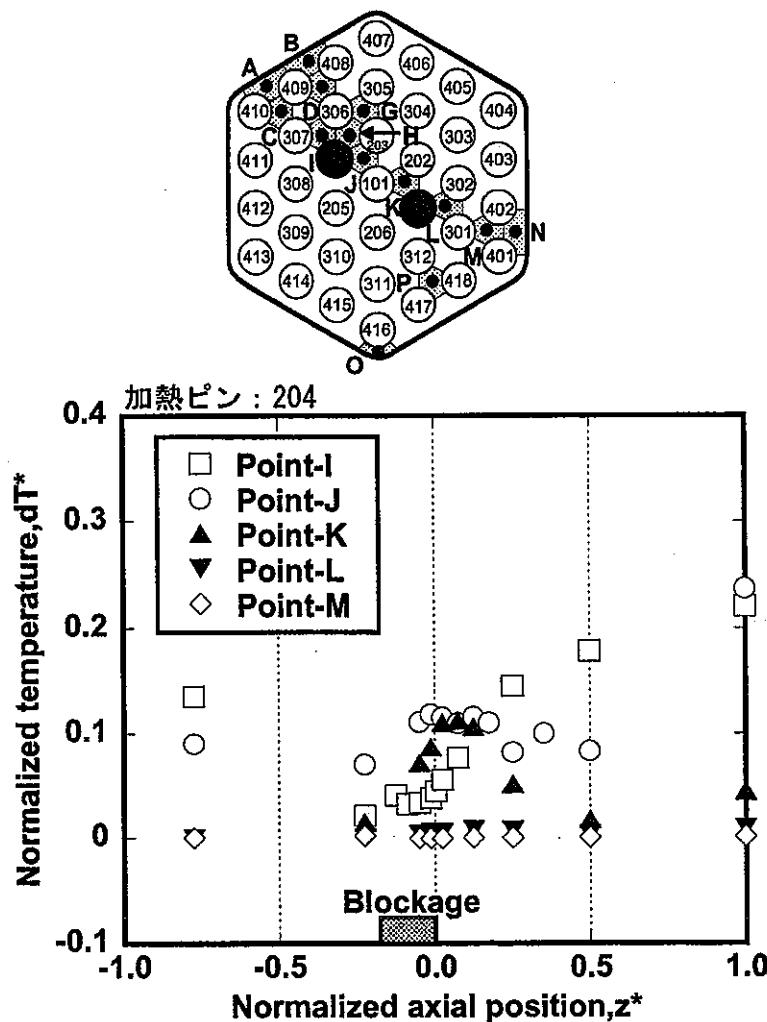


図 5.1-1 模擬燃料集合体軸方向温度分布 (Case-6)

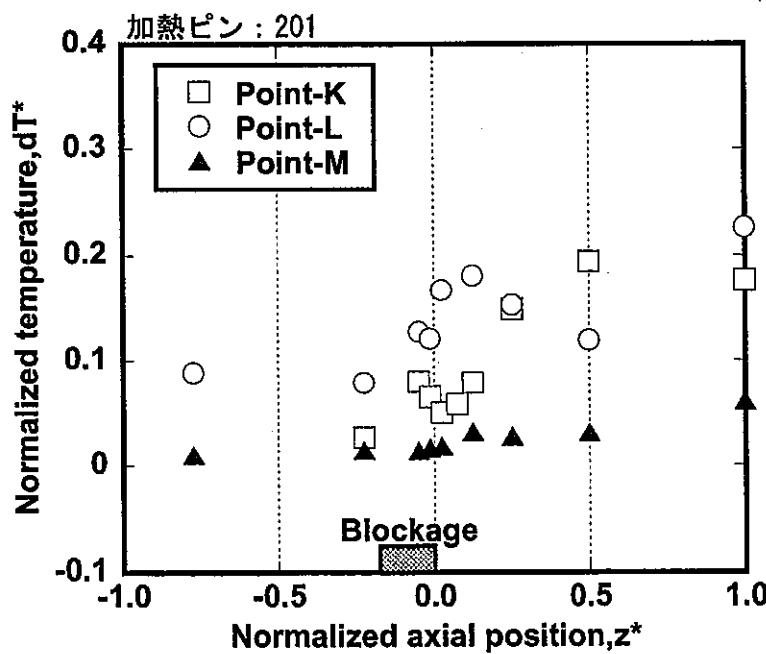


図 5.1-2 模擬燃料集合体軸方向温度分布 (Case-7)

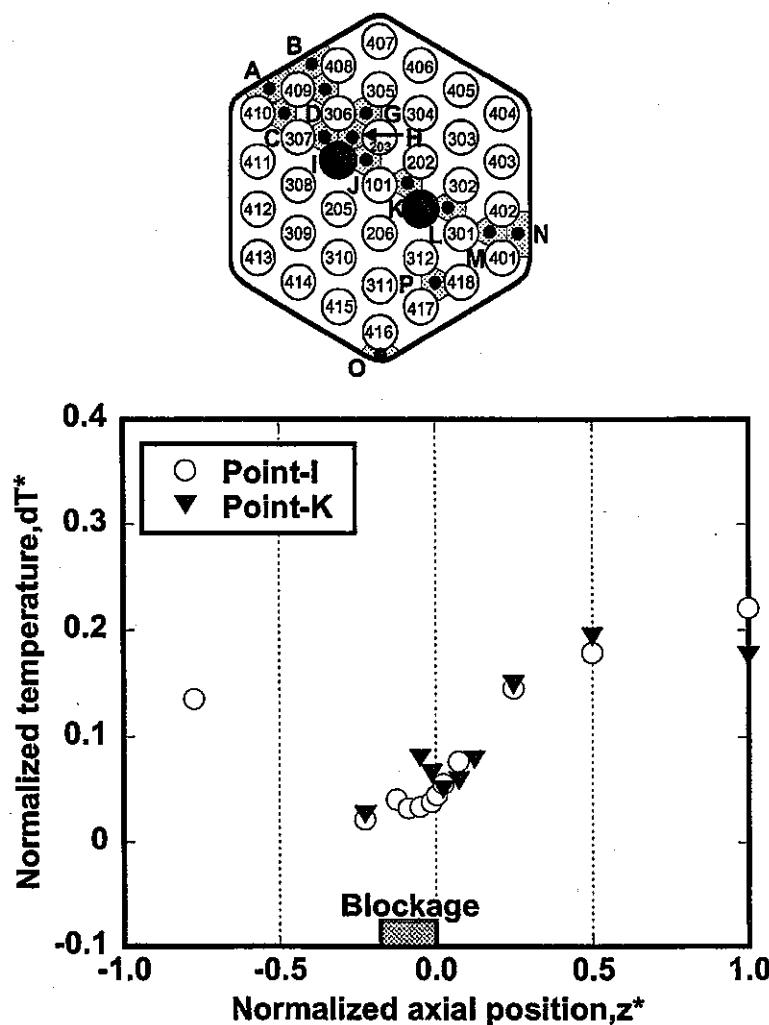


図 5.1-3 発熱ピンの閉塞側サブチャンネルの軸方向温度分布

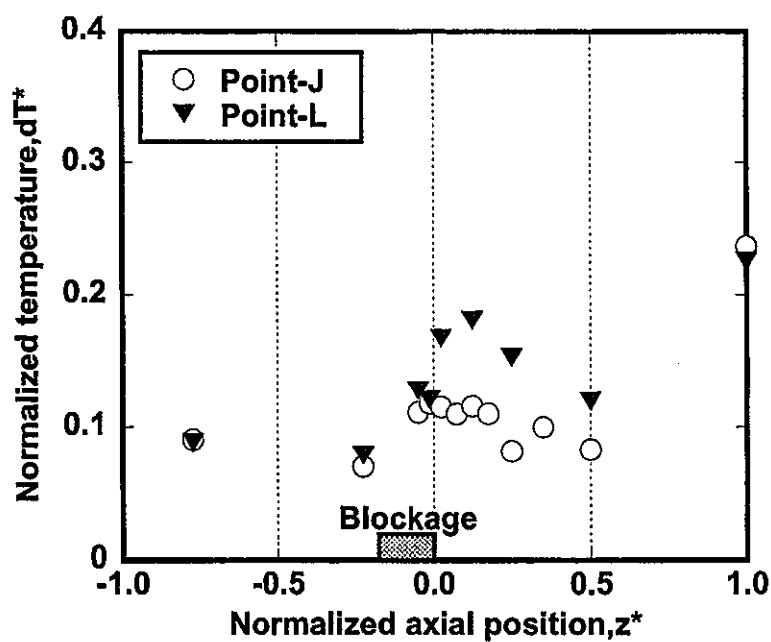


図 5.1-4 発熱ピンの閉塞反対側サブチャンネルの軸方向温度分布

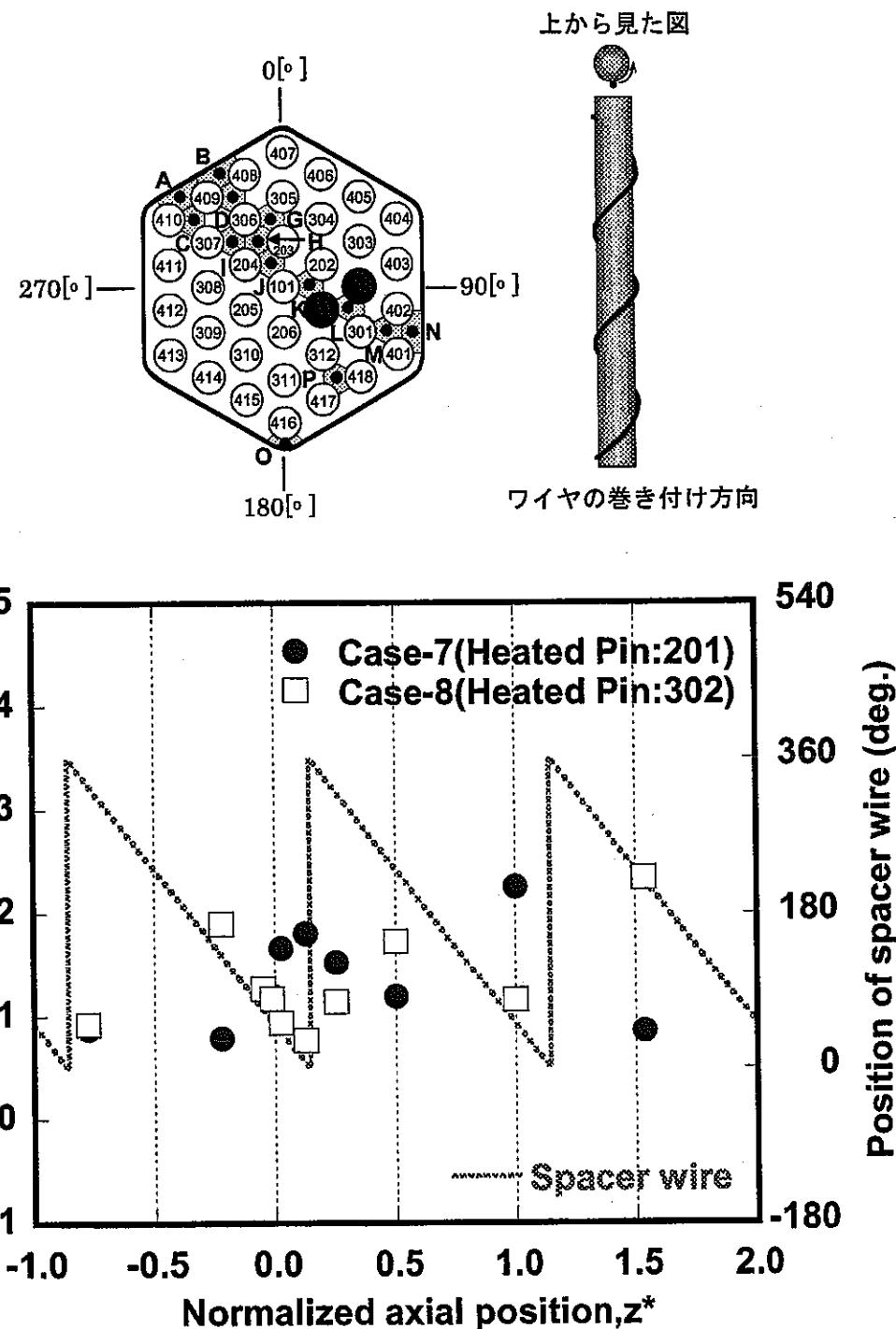


図 5.2-1 ワイヤによるスワールフローが軸方向温度分布に及ぼす影響
(サブチャンネル: Point L)

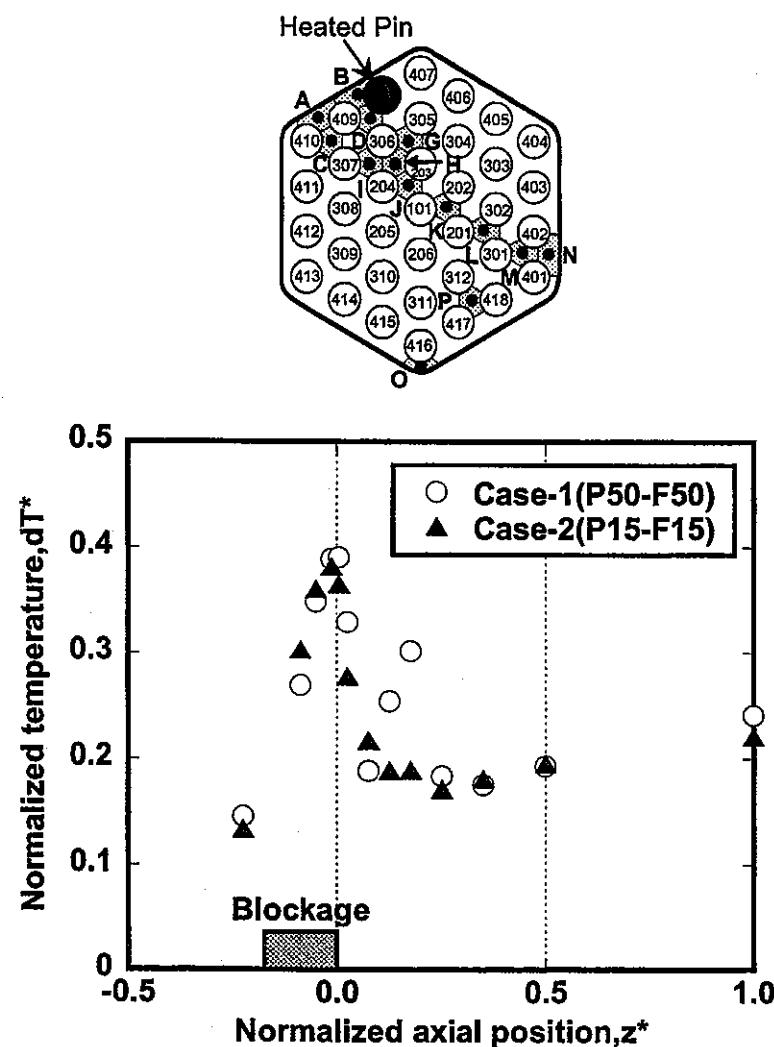


図 5.3-1 出力・流量条件が閉塞物近傍の温度場に及ぼす影響 (Point·B)

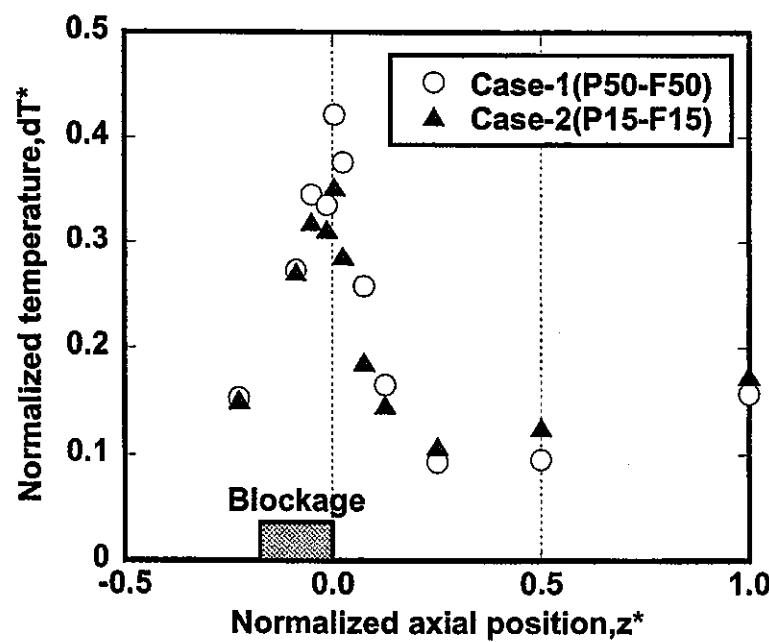


図 5.3-2 出力・流量条件が閉塞物近傍の温度場に及ぼす影響 (Point·D)

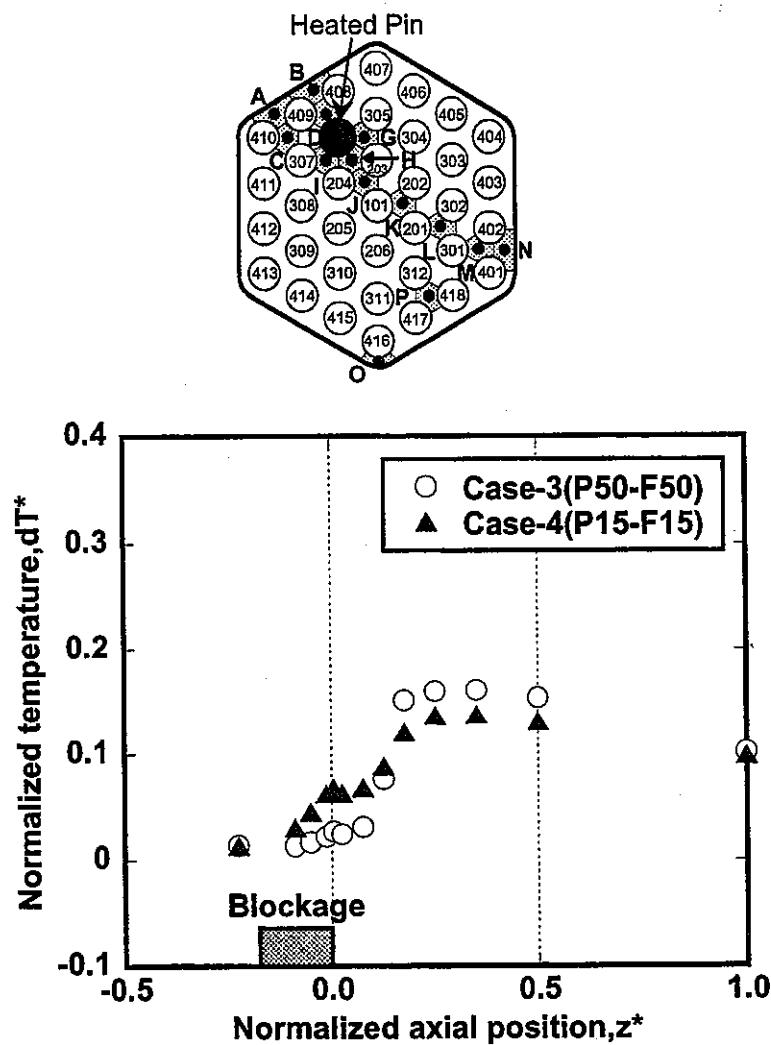


図 5.3-3 出力・流量条件が閉塞物近傍の温度場に及ぼす影響 (Point-B)

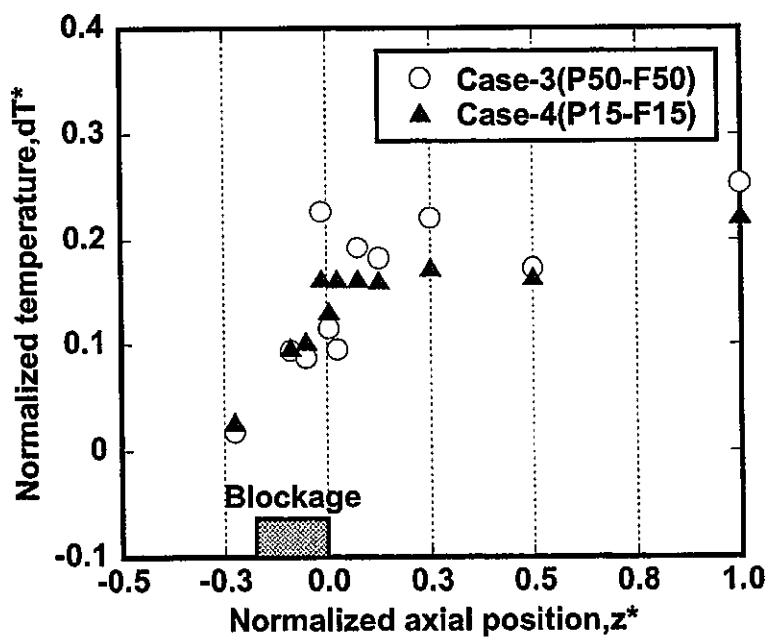


図 5.3-4 出力・流量条件が閉塞物近傍の温度場に及ぼす影響 (Point-D)