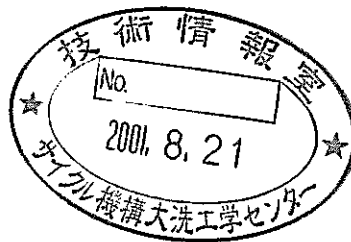


# 局所閉塞37本ピンバンドルナトリウム試験

— 一定常温度分布測定試験 —

(研究報告)



2001年2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大字村松4-49

核燃料サイクル開発機構

技術展開部 技術協力課

Inquiries about copyright and reproduction should be addressed to :

Technical Cooperation Section,

Technology Management Division,

Japan Nuclear Cycle Development Institute

4-49 Muramatsu, Tokai-mura, Naka-gun, Ibaraki, 319-1184

Japan

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

2001

局所閉塞37本ピンバンドルナトリウム試験  
— 一定常温度分布測定試験 —  
(研究報告)

田中 正暁\*、上出 英樹\*、  
小林 順\*\*、宮越 博幸\*

要 旨

局所事故の起因事象の一つとして想定されている燃料集合体内局所閉塞事象について実験研究を行った。ワイヤスペーサ型の燃料集合体の発熱部に生じる閉塞形態として、粒子状の異物が集積して流れ方向に厚みを持つポラス状閉塞物となることが想定されている。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で、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ラス状閉塞物を組み込んだ試験体を用い、物理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。流量を実機定格条件の107.5[%]から10[%]、ヒータ出力を実機最大線出力の最大60[%]まで変化させて試験を実施した。

閉塞物内部のサブチャンネル中心温度およびピン表面温度は流れ方向に急激に上昇し、周囲の3サブチャンネルが全て閉塞しているサブチャンネルに接するピン表面の閉塞物上端部において最高温度が観測された。閉塞物内部の温度分布には、特に鉛直方向の流れが大きな影響を与えていること、ワイヤスペーサによるスワールフローの影響は小さいことが明らかとなった。また、高出力・流量条件（流量30[%]以上）と低出力・流量条件（流量15[%]以下）では閉塞物内部の温度分布の傾向が異なり、高出力・流量条件においては周辺よりも内側サブチャンネルの方が温度は高く水平断面内で分布が生じるが、低出力・流量条件では閉塞物内部の水平断面内ではほぼ一様な温度分布となることが明らかとなった。本試験体系（37本ピンバンドル体系、周辺2列閉塞）において、閉塞物下流に生じる後流域は、閉塞物上端からワイヤ巻きピッチ（ $L=200[\text{mm}]$ ）の1/6の高さで消滅し、鉛直方向流れが支配的な領域となることが分かった。

実験結果を外挿して、実機条件下でのピン表面最高温度を評価した。実機で想定される閉塞よりも保守的な閉塞条件として、連続したサブチャンネルを直径0.3[mm]の粒子で均一に充填した場合であっても最高温度は670[°C]程度と推定される。試験条件の設定および温度計測に伴う不確かさ等を考慮しても700[°C]以下であることが分かった。

\*大洗工学センター 要素技術開発部 原子炉工学グループ

\*\*大洗工学センター システム技術開発部 FBRシステムグループ

Study on temperature field in porous blockage  
in a fuel Subassembly (II)  
— 37-pin bundle sodium experiment —

Masa-aki Tanaka\*, Hideki Kamide\*,  
Jun Kobayashi\*\*, Hiroyuki Miyakoshi\*

### Abstract

The 37-pin bundle sodium experiment for porous local blockage was conducted to investigate the thermal-hydraulic field in the pin bundle with porous blockage and to obtain a verification data for numerical analysis. The test section simulated a fuel sub-assembly of 37-pin bundle with pin diameter and pin pitch, which was equivalent to the large-scale reactor. The test section was included the porous blockage in 14 subchannels of 2 rows near the wrapper tube wall. As the experimental condition, flow rate was changed from 107.5 to 10[%], and heater output was also changed up to 60[%].

The maximum temperature was shown on the pin surface near the upper end of blockage, which was surrounded by the blockages on all side. The vertical flows in porous blockage affected the temperature distribution, and the swirl flow caused by wire-spacer did not have particularly influence on temperature distribution.

The profile of temperature distribution in the porous blockage was different between on the cases with high flow-rate/power (over 30[%]) condition and low flow-rate/power (less than 15[%]) condition. On the higher condition, the temperature in the porous blockage increased along horizontal direction from outer subchannel to inner subchannel. On the lower condition, the temperature distribution showed nearly flat profile on the horizontal cross-section. The wake region disappeared at the height of a 1/6 wire pitch from the upper end of porous blockage.

The maximum temperature on large-scale reactor condition was evaluated based on the experimental result. The maximum temperature was about 670[°C] under the supposed blockage condition; porosity is 40[%], in 14 subchannels of 2 rows near the wrapper tube wall, and consisted of the stainless sphere 0.3[mm] in diameter.

---

\* Reactor Engineering Group, Advanced Technology Division,  
O-arai Engineering Center, JNC

\*\* FBR System Group, System Engineering Technology Division,  
O-arai Engineering Center, JNC

## 目 次

1. はじめに	1
2. 試験装置概要	3
2. 1 試験体概要	3
2. 2 ポーラス状閉塞物	3
2. 3 試験ループ概要	4
2. 4 計測点配置	5
3. 試験条件および試験方法	7
3. 1 試験条件	7
3. 2 試験項目	8
3. 3 試験方法	11
4. 再現性確認試験	12
4. 1 校正試験	12
4. 2 ヒートバランスの確認	12
4. 3 再現性の確認	13
5. 温度分布特性試験結果	17
5. 1 サブチャンネル内温度分布特性	17
5. 1. 1 鉛直方向温度分布	17
5. 1. 2 水平方向温度分布	19
5. 1. 3 出力・流量依存性	23
5. 2 閉塞部における温度分布特性	26
5. 2. 1 鉛直方向温度分布	26
5. 2. 2 水平方向温度分布	28
5. 2. 3 周方向ピン表面温度分布	29
5. 3 温度変動特性	31
5. 4 試験部圧力損失特性	33
6. 考 察	35
6. 1 閉塞物周辺の流動場	35
6. 1. 1 閉塞物後流域	35
6. 1. 2 閉塞物側面近傍	36
6. 2 閉塞物内水平方向熱伝達特性	38
6. 3 実機条件での最高温度評価	42
7. まとめ	46
謝 辞	49
参考文献	50

## 図表リスト

### List of Table

Table 1	Specifications of Test Section.
Table 2-1	Axial Distribution of Measuring Point by Thermocouples.
Table 2-2	Transversal Distribution of Measuring Point by Thermocouples.
Table 3	Boundary Conditions for Experiment and Real Reactor.
Table 4	Experimental Conditions.
Table 5	Boundary Conditions in Confirmation Tests.
Table 6	Lists of Irregular Thermocouples.
Table 7	Uncertainty in Temperature Measurement.
Table 8-1	Maximum Temperature in Porous Blockage.
Table 8-2	Maximum Temperature in Wake Region.

### List of Figure

Figure1-1	Configuration of Porous Blockage in a Fuel Subassembly.
Figure1-2	Schematic View of Test Section for 4 Subchannel Water Experiment.
Figure1-3	Schematic View of Test Section for 2 Channel Water Experiment.
Figure2-1	Schematic View of Test Section for 37 Pin-bundle Sodium Experiment in CCTL.
Figure2-2	Illustration of Porous Blockage in Test Section.
Figure2-3	Flow Diagram of Core Component Test Loop (CCTL).
Figure2-4	Schematic View of Thermocouple and Pressure Tap Positions.
Figure2-5	Schematic View of Thermocouple Cross-sectional Positions.
Figure2-6	Thermocouple Position in Test Section.
Figure2-7	Thermocouple Position in Porous Blockage.
Figure3-1	Distribution of Experimental Condition.
Figure4-1	Heat Balance in Test Section.
Figure4-2.1	Axial Distribution of Sodium Temperature in Case1 and Case2.
Figure4-2.2	Transversal Distribution of Sodium Temperature in Case1 and Case2.
Figure4-3.1	Axial Distribution of Sodium Temperature in Case3 and Case14.
Figure4-3.2	Transversal Distribution of Sodium Temperature in Case3 and Case14.
Figure4-4	Temperature Error in Confirmation Test.
Figure5-1.1	Characteristics of Axial Distribution of Sodium Temperature at Outer Subchannel in the Blockage Region, Point-A.
Figure5-1.2	Characteristics of Axial Distribution of Sodium Temperature at Outer Subchannel in the Blockage Region, Point-B.
Figure5-1.3	Characteristics of Axial Distribution of Sodium Temperature at Inner Subchannel in the Blockage Region, Point-C.
Figure5-1.4	Characteristics of Axial Distribution of Sodium Temperature at Inner Subchannel in the Blockage Region, Point-D.
Figure5-1.5	Characteristics of Axial Distribution of Sodium Temperature at Inner Subchannel near the Blockage Region, Point-G.
Figure5-1.6	Characteristics of Axial Distribution of Sodium Temperature

- Figure5-1.6 Characteristics of Axial Distribution of Sodium Temperature at Inner Subchannel near the Blockage Region, Point-H.
- Figure5-1.7 Characteristics of Axial Distribution of Sodium Temperature at Inner Subchannel near the Blockage Region, Point-I.
- Figure5-1.8 Characteristics of Axial Distribution of Sodium Temperature at Inner Subchannel in the Center Part of Subassembly, Point-J.
- Figure5-1.9 Characteristics of Axial Distribution of Sodium Temperature at Inner Subchannel in the Center Part of Subassembly, Point-K.
- Figure5-1.10 Characteristics of Axial Distribution of Sodium Temperature at Inner Subchannel in the Opposite Side of Blockage, Point-L.
- Figure5-1.12 Characteristics of Axial Distribution of Sodium Temperature at Inner Subchannel in the Opposite Side of Blockage, Point-M.
- Figure5-1.13 Characteristics of Axial Distribution of Sodium Temperature at Inner Subchannel in the Opposite Side of Blockage, Point-N.
- Figure5-1.14 Characteristics of Axial Distribution of Sodium Temperature at Corner Subchannel in the Opposite Side of Blockage, Point-O.
- Figure5-1.15 Characteristics of Axial Distribution of Sodium Temperature at Inner Subchannel in the Opposite Side of Blockage, Point-P.
- Figure5-2.1 Characteristics of Transversal Distribution of Sodium Temperature along Traverse-A in the Upstream Side of Blockage on Cross-section BA ( $z=-155$ [mm]).
- Figure5-2.2 Characteristics of Transversal Distribution of Sodium Temperature along Traverse-A in the Upstream Side of Blockage on the Cross-section BB ( $z=-45$ [mm]).
- Figure5-2.3 Characteristics of Transversal Distribution of Sodium Temperature along Traverse-A in the Blockage Region on Cross-section CC ( $z=-10$ [mm]).
- Figure5-2.4 Characteristics of Transversal Distribution of Sodium Temperature along Traverse-B in the Blockage Region on the Cross-section CC ( $z=-10$ [mm]).
- Figure5-2.5 Characteristics of Transversal Distribution of Sodium Temperature along Traverse-A in the Blockage Region on Cross-section CD ( $z=-2.5$ [mm]).
- Figure5-2.6 Characteristics of Transversal Distribution of Sodium Temperature along Traverse-B in the Blockage Region on Cross-section CD ( $z=-2.5$ [mm]).
- Figure5-2.7 Characteristics of Transversal Distribution of Sodium Temperature along Traverse-A in the Downstream Side of Blockage on Cross-section DB ( $z=5$ [mm]).
- Figure5-2.8 Characteristics of Transversal Distribution of Sodium Temperature along Traverse-B in the Downstream Side of Blockage on Cross-section DB ( $z=5$ [mm]).
- Figure5-2.9 Characteristics of Transversal Distribution of Sodium Temperature along Traverse-A in the Downstream side of Blockage on Cross-section DC ( $z=15$ [mm]).
- Figure5-2.10 Characteristics of Transversal Distribution of Sodium Temperature along Traverse-B in the Downstream Side of Blockage on Cross-section DC ( $z=15$ [mm]).

- Figure5-2.11 Characteristics of Transversal Distribution of Sodium Temperature along Traverse-A in the Downstream Side of Blockage on Cross-section DD ( $z=25$ [mm]).
- Figure5-2.12 Characteristics of Transversal Distribution of Sodium Temperature along Traverse-B in the Downstream Side of Blockage on Cross-section DD ( $z=25$ [mm]).
- Figure5-2.13 Characteristics of Transversal Distribution of Sodium Temperature along Traverse-A in the Downstream Side of Blockage on Cross-section DF ( $z=50$ [mm]).
- Figure5-2.14 Characteristics of Transversal Distribution of Sodium Temperature along Traverse-B in the Downstream Side of Blockage on Cross-section DF ( $z=50$ [mm]).
- Figure5-2.15 Characteristics of Transversal Distribution of Sodium Temperature along Traverse-A in the Downstream Side of Blockage on Cross-section DH ( $z=100$ [mm]).
- Figure5-2.16 Characteristics of Transversal Distribution of Sodium Temperature along Traverse-A in the Downstream Side of Blockage on Cross-section DI ( $z=200$ [mm]).
- Figure5-2.17 Characteristics of Transversal Distribution of Sodium Temperature along Traverse-A at the Top of Heated Section on Cross-section DJ ( $z=307.5$ [mm]).
- Figure5-2.18 Characteristics of Transversal Distribution of Sodium Temperature along Traverse-A in the Non-Heated Section on Cross-section EA ( $z=600$ [mm]).
- Figure5-3 Characteristics of Axial Distribution of Sodium Temperature in the Blockage Region at a Constant Ratio of (Power/Flow-rate).
- Figure5-4 Characteristics of Transversal Distribution of Sodium Temperature along Traverse-A and -B at a Constant Ratio of (Power/Flow-rate).
- Figure5-5.1 Characteristics of Axial Profile of Sodium (Point-A) and Pin Surface (Point-a) Temperature at Outer Subchannel in Blockage Region.
- Figure5-5.2 Characteristics of Axial Profile of Sodium (Point-B) and Pin Surface (Point-b) Temperature at Outer Subchannel in Blockage Region.
- Figure5-5.3 Characteristics of Axial Profile of Sodium (Point-C) and Pin Surface (Point-c) Temperature at Inner Subchannel in Blockage Region.
- Figure5-5.4 Characteristics of Axial Profile of Sodium (Point-D) and Pin Surface (Point-d) Temperature at Inner Subchannel in Blockage Region.
- Figure5-5.5 Characteristics of Axial Profile of Sodium (Point-E) Temperature at Inner Subchannel in Blockage Region.
- Figure5-6.1 Horizontal Distribution of Sodium Temperature in the Blockage on Cross-section CB ( $z=-17.5$ [mm]).
- Figure5-6.2 Horizontal Distribution of Sodium Temperature in the Blockage on Cross-section CC ( $z=-10.0$ [mm]).
- Figure5-6.3 Horizontal Distribution of Pin Surface Temperature in the



- Figure5-6.4 Horizontal Distribution of Sodium Temperature in the Blockage on Cross-section CD ( $z=2.5$ [mm]).
- Figure5-6.5 Horizontal Distribution of Pin Surface Temperature in the Blockage on Cross-section CD ( $z=-2.5$ [mm]).
- Figure5-7 Circumferential Distribution of Pin Surface Temperature of the Heater Pin305 on Cross-section CC ( $z=-10.0$ [mm]).
- Figure5-8.2 Fluctuation of Sodium Temperature in the Blockage Region on Cross-section CB ( $z=-17.5$ [mm])
- Figure5-8.3 Fluctuations of Sodium Temperature and Pin Surface Temperature in the Blockage Region on Cross-section CC.
- Figure5-8.4 Fluctuations of Sodium Temperature and Pin Surface Temperature in the Blockage Region on Cross-section CD.
- Figure5-8.5 Fluctuation of Sodium Temperature in the Wake Region.
- Figure5-8.6 Fluctuation of Sodium Temperature in Downstream Region.
- Figure5-8.7 Fluctuation of Pin Surface Temperature around Heater Pin305 on Cross-section CC ( $z=-10.0$ [mm]).
- Figure5-9 Pressure Drop in the Test Section.
- Figure6-1.1 Typical Axial Distribution of Coolant Temperature.
- Figure6-1.2 Shape of Axial Distribution of Sodium Temperature at Point-B.
- Figure6-1.3 Shape of Axial Distribution of Sodium Temperature at Point-C.
- Figure6-1.4 Horizontal Distribution of Sodium Temperature in the Adjacent Subchannel to Blockage.
- Figure6-2.1 Characteristics of Pin Surface (Point-a) and Sodium Temperature (Point-A) in the Outer Region of Blockage.
- Figure6-2.2 Characteristics of Pin Surface (Point-b) and Sodium Temperature (Point-B) in the Outer Region of Blockage.
- Figure6-2.3 Characteristics of Pin Surface (Point-c) and Sodium Temperature (Point-C) in the Inner Region of Blockage.
- Figure6-2.4 Characteristics of Pin Surface (Point-d) and Sodium Temperature (Point-D) in the Inner Region of Blockage.
- Figure6-3.1 Channel Number giving the Maximum Temperature.
- Figure6-3.2 Relation between Experimental Condition and Channel Number giving the Maximum Temperature.
- Figure6-3.3 Characteristic of Maximum Pin Surface Temperature inside Blockage between Cross-section CA and CD.
- Figure6-3.4 Characteristic of Maximum Sodium Temperature in the Wake Region between Cross-section DA and DF.
- Figure6-3.5 Characteristics of Sodium Temperature (Point-d) in the Porous Blockage on Cross-section CD ( $z=-2.5$ [mm]).
- Figure6-3.6 Characteristics of Horizontal Heat Transfer in the Porous Blockage between Point-d and Point-D on Cross-section CD.
- Figure6-3.7 Estimated Pin Surface Temperature in the Blockage at Point-d, 5[mm] below the Top of Blockage (37 pin bundle).
- Figure6-3.8 Estimated Pin Surface Temperature in the Blockage at Point-d, 5[mm] below the Top of Blockage (217 pin bundle).
- Figure6-3.9 Estimated Ratio of Temperature Rise of Pin Surface in the Blockage between Point-f(TP-305CC) and Point-d(TP-306CC) on Cross-section CC ( $z=-10.0$ [mm]).

## 1. はじめに

高速炉では中性子スペクトルを硬く保ち、冷却材による中性子の減速を小さくするため、燃料ピンは密に配列されている。このような高速炉の特長に対する安全評価上の事象として、燃料ピンバンドル内に異物が混入し燃料ピン間のサブチャンネルに堆積して流路を閉塞させ、燃料ピンの冷却が阻害される冷却材流路閉塞事故が想定されている。これまでの閉塞物の形成に関する検討において、閉塞は外部からの混入物（製作時の切り粉など）、あるいは1次系または炉心で生成された異物（ポンプで粉砕されたルースパーツや離脱したスペーサワイヤなど）によって生じることが想定されている。また、燃料集合体入口部のエントランスノズルの形状やピンバンドル構造等から、10[mm]以上の比較的大きな異物が1次系バウンダリ内部に存在して、燃料集合体内のピンバンドル部に到達することは考え難く、あまりに小さな異物は流れに乗ってピンバンドル部を通り抜けてしまうことが水流動試験などから明らかとなっている。燃料集合体内で生じる閉塞は、ワイヤ径（約1[mm]）からワイヤのないサブチャンネルを通過できる最大直径（約3[mm]）までの微細な異物の集積によるものと考えられている<sup>[1,2,3]</sup>。ワイヤスペーサ型のバンドルでは、まずワイヤに沿って異物が蓄積し、Figure1-1に示すように、閉塞は一つおきのサブチャンネルに千鳥状に形成され、その形態は平板状ではなく流れ方向に厚みのあるポーラス状閉塞となることが水流動試験に基づいて予測されている<sup>[1,2,3]</sup>。

原子炉工学グループでは、このようなワイヤスペーサ型集合体におけるポーラス状閉塞内外の熱流動特性を調べるため、実験研究および解析手法の開発を行っている。これまで基礎水流動試験として、燃料集合体内の4つのサブチャンネルに着目し、中央のサブチャンネルに閉塞物を設置して、3つの健全サブチャンネルでその周囲を囲んだ4サブチャンネル基礎水流動試験（以下、4サブチャンネル水流動試験）を行い<sup>[4,5,6]</sup>、閉塞物内部流れが閉塞物内部および周辺サブチャンネル内の温度分布へ及ぼす影響を調べた（Fig.1-2参照）。4サブチャンネル水流動試験では閉塞物に金属粒子を用いており、閉塞物内部の流れ場を直接的に調べることができない。そこで、ガラス球で閉塞粒子を模擬し、サブチャンネルを透明アクリル製の矩形流路で模擬した2チャンネル水流動試験を筑波大学との共同研究として行い<sup>[7]</sup>、閉塞チャンネルと健全チャンネル間の流れ場の相互関係について調べた（Fig.1-3参照）。これら基礎試験の結果、閉塞物内部および周辺の流れ場および温度分布に関するデータを取得することができ、閉塞物周辺の流れ場が閉塞物内部の温度分布に及ぼす影響について明らかにした。しかしながら、試験では閉塞物内外の流れ場および温度分布について連続した空間分布データを得ることはできず、部分的（局所的）なデータに限られる。そこで、ポーラス状閉塞物を含む燃料集合体内での閉塞物内外の流速分布および温度分布を把握し、最高温度を評価できる手法として、多次元熱流動解析コード CASCADE を用いた詳細解析手法の開発が行われている。4サブチャンネル水流動試験を対象とした解析<sup>[8]</sup>により、閉塞物内外の流動場と温度分布との関係を調べ、現象解明に役立つ知見を得るとともに、ピン表面温度に関して実験

結果を再現できることを確認した。

これまで、水を作動流体として試験および解析を行い閉塞物内部の流れ場の影響を調べてきたが、水とナトリウムとの熱物性値の違い、試験体系（2チャンネルおよび4サブチャンネルといった局所抽出モデル）の違いから、水試験で得られた知見を直接外挿して、ナトリウムを作動流体とするバンドル体系での温度評価に用いることは難しいと考えられる。そこで、ナトリウムを作動流体とし、大型炉（以下、実機）<sup>[9]</sup>と同等のピン径およびピンピッチ、ワイヤスペーサを有するバンドル体系で閉塞物内部の温度分布を測定し、物理現象の把握と解析手法開発のための検証データの取得を目的とした37本ピンバンドルナトリウム試験（以下、37本ナトリウム試験）を実施した。流量およびヒータピン出力を試験パラメータとした本試験に先立ち、本試験で用いた閉塞物と同一ロット（粒子径 0.3[mm]、空隙率 40[%]）の模擬閉塞物を制作し、水を作動流体として閉塞物単体の閉塞物上下流間の圧力損失測定試験を行った。また、本試験体系を対象としたサブチャンネル解析コード ASFRE<sup>[10]</sup>による事前解析を実施し、試験条件の設定とバンドル内最高温度の評価を行っている<sup>[11]</sup>。局所閉塞ナトリウム試験体は、炉心・機器熱流動試験施設（Core Component Test Loop ; CCTL）を改造して据え付けたものであり、本試験は、第23回 CCTL 運転期間中（1999年9月実施）に実施した。試運転として第22回 CCTL 運転（1998年3月実施）の中で、流量を実機条件の108[%]（430[L/min]）に固定し、ヒータ出力を実機条件の14~43[%]の範囲で変化させた試験が実施されている<sup>[12]</sup>。以下では、第22回 CCTL 運転で行った試験を予備試験と呼び、第23回 CCTL 運転で行った試験結果について本試験と呼ぶ。本試験と予備試験との間には、1年半ほどの休止期間があったため、試験結果の再現性を調べる再現性確認試験を実施した。本試験では、流量条件を実機条件の107.5~10[%]、ヒータピン出力を試験装置の除熱量の制限により最大60[%]出力までとし、出力/流量依存性を検討した。

## 2. 試験装置概要

### 2. 1 試験体概要

Figure2-1 に本試験体の全体構造図を示す。試験体は、実機と同等の寸法を有する模擬燃料ピンで構成されたワイヤスペーサ型 37 本ピンバンドル体系である<sup>[12]</sup>。試験体は、燃料ピンを模擬するヒータピンバンドル部、六角ラップ管等からなる試験容器部、試験部容器（ラップ管）から外部へのナトリウムの飛散を防止する目的で設置した外容器、ヒータピンリード部と電源ケーブル端子とを接続する電極箱から構成される。Figure2-2 に閉塞物取り付け位置について示す。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模擬閉塞物（空隙率は約 40[%]）が組み込まれている。試験体の主要仕様を Table 1 に示す。

模擬燃料集合体は、実機の炉心燃料集合体の部分モデルとして設計されており、ピン外径 ( $D_{Pin}=8.5[\text{mm}]$ )、ピンピッチ ( $D_{Pitch}=9.65[\text{mm}]$ )、ワイヤスペーサ外径 ( $D_{Wire}=1.1[\text{mm}]$ )、水力等価直径  $3.24[\text{mm}]$ 、ワイヤスペーサ巻きピッチ ( $L=200[\text{mm}]$ ) および最大線出力 ( $40.15[\text{kW/m}]$ ) は実機と同等である。ただし、バンドル部を構成するピン数は 37 本とし、ピン発熱部は鉛直方向に平坦な発熱分布で発熱長さは  $650[\text{mm}]$  となっている。なお、閉塞物前後には十分な発熱長 ( $307.5[\text{mm}]$ ) を取ることによって、閉塞物周辺の熱流動条件に対する発熱分布、発熱長の影響を小さくしている。燃料ピンは、ワイヤスペーサを巻き付けた電気ヒータピンによって模擬されている。

### 2. 2 ポーラス状閉塞物

Figure2-2 に示すように、閉塞物は集合体の一辺に沿った外側 2 列の 14 サブチャンネルを閉塞し、ヒータピン発熱中央部の高さに設置されている。日本原子力発電（株）にて実施された炉外試験<sup>[1,2]</sup>の知見より、閉塞物の流れ方向の厚み（高さ）は同一サブチャンネル内にワイヤが存在する長さに限られることからワイヤ巻きピッチ ( $L=200[\text{mm}]$ ) の  $1/6$  ( $35[\text{mm}]$ ) とした。同炉外試験から、ワイヤスペーサ型バンドル体系においては連続したサブチャンネルが閉塞されることはなく、千鳥状の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格段に上昇することが予測されることから、ここでは連続したサブチャンネルの閉塞を想定した。また、集合体周辺部ではワイヤスペーサに沿って回転する流れ（Swirl Flow）の影響を受ける可能性があり、これを把握することを考慮して集合体の周辺部に閉塞を設定した<sup>[12]</sup>。

閉塞物は直径  $0.3[\text{mm}]$  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。閉塞を起こすには粒子の大きさがワイヤ径 (1[mm]) 程度の大きさからサブチャンネルの水力等価直径 (約 3[mm]) までの範囲であることが示されている。このような大きな粒子によりピンバンドル内のサブチャンネルに密に詰まった均一な閉塞が形成されることは考え難く、1 サブチャンネルに数個の粒子が閉塞するといった隙間の多い不均一な閉塞であると考えられる。本試験では、ワイヤ径の 1/3 の大きさとなる直径 0.3[mm] のステンレス球を閉塞粒子として用いている。これにより空隙率は 40[%] であるが、粒子間の空隙の大きさはワイヤ径に相当する球 (直径 1[mm]) で形成される閉塞に比べて 1/3 程度となり、閉塞物内の流動抵抗が増加し閉塞物内部の流動が抑制され冷却され難くなる。よって、本試験で得られる結果 (温度分布) はより厳しい温度条件を与えると予想される。また、ピン表面近傍では空隙率が閉塞物内部より高くなる (約 50[%]) ことが壁面効果として知られている [5,13]。実機で想定されるようなワイヤ径に相当する球 (直径 1[mm]) を用いる場合に比べて、直径 0.3[mm] のステンレス球を用いる場合には閉塞粒子 1 層の厚みが 1/3 程度となるため、壁面効果の影響が小さくより均一な閉塞を形成することができる。以上のように高い閉塞密度をもって連続した広い範囲のサブチャンネルを閉塞することにより本実験で得られる結果 (温度分布) は十分な保守性を持つものと考えた。

## 2. 3 試験ループ概要

局所閉塞ナトリウム試験体は、炉心・機器熱流動試験施設 (Core Component Test Loop ; CCTL) を改造して据え付けたものである。Figure 2-3 に CCTL 試験施設のフローシートを示す。試験施設の主な系統構成としては、ナトリウム主循環系、ナトリウム補助系、純化系、ナトリウムチャージ・ドレン系、ナトリウムベーパーライン系、ガス系、電気・計装設備等からなる。試験施設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： 8 [kg/cm<sup>2</sup>G]

・純化系及びチャージドレン系

設計温度： 425 [°C]  
 設計圧力： 8 [kg/cm<sup>2</sup>G]

・ガス系設計条件

設計温度： 常温  
 設計圧力： 8 [kg/cm<sup>2</sup>G]

[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： 8 [kg/cm<sup>2</sup>G]

・圧力計

形式： NaK 封入式  
 測定範囲： -1~8 [kg/cm<sup>2</sup>] (試験体下部)  
 -1~3 [kg/cm<sup>2</sup>] (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. 4 計測点配置

37本ピンバンドル試験体および CCTL ループには、総数 317 点の計測点が配置されている。試験体内部には温度計測点が 255 点、圧力センサーが 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、さらに模擬燃料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 (Fig.2-3 参照)。

Figure2-4 に試験体内部に配置した温度測定点の鉛直方向断面を示す。また、Table 2 に熱電対のセンサ名と取り付け角度を示す。鉛直方向の座標 z は、閉塞物上端 (z=0[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 (鉛直方向高さ H=35[mm]) は模擬燃料ピンの中央に設置されている。

集合体入口温度は、閉塞物上端から 360[mm] 上流側 (z=360[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[mm]) から閉塞物下端 (z=-35[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  $500[\text{mm}]$  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。

Figure2-5 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。 Figure2-6 にサブチャンネル中心での鉛直方向温度分布を示す位置 ( Point-A~P ) について示す。 Figure2-7 に示すように閉塞物内部ではサブチャンネル中心 ( Point-A~F ) とピン表面 ( Point-a~f ) に熱電対が設置されており、ヒータピンからサブチャンネルへの水平方向の熱移行による熱伝達率を求めることができる。ピン番号 305 には、閉塞物上端から  $10[\text{mm}]$  下方の CC 断面で、周方向ピン表面温度分布 ( Point-e~h ) が計測できる。

### 3. 試験条件および試験方法

#### 3. 1 試験条件

ヒータピン出力および試験体流入流量を試験パラメータとし、定常状態での閉塞物内部の温度分布を測定した。試験条件は、試験体の実機と同等の寸法を有するワイヤスペーサ型 37 本ピンバンドル体系であることから、実機定格運転条件を参考にして決定した<sup>[9,11]</sup>。試験体流入流量は 400[L/min]を実機相当 100[%]とした。ヒータピン出力は 1015[kW] (実機最大線出力 42.2[kW/m]) を実機相当 100[%]とした。Table 3 に実機および試験体の主要目を示す。

##### 1) 最大線出力

試験体のヒータピン出力は平坦分布であり、1 本あたりの出力は 26.1[kW/pin]、発熱長は 65[cm]であるため、線出力は 40.15[kW/m]となる。一方、実機の最大線出力は 42.2[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[kW/m]を 100[%]出力とした。

##### 2) 最大流量

最大流量は内側炉心第一領域において 30.2[kg/s]となる。実機運転条件を模擬する場合、試験体流量の設定については、以下の 2 通りが考えられる。①、②各々の流量について Table 3 に示す。試験条件は 400[L/min]を 100[%]流量とした。また、低流量側条件としてポニーモータ運転条件 (定格 15[%]) を考慮し、60.0[L/min] (15[%]流量) を基準とした条件設定とした。

①集合体入口での Re 数が実機と一致 :

$$Re=5.946 \times 10^4$$

$$W=7.157[\text{m/s}]$$

$$Q_L=460[\text{L/min}]$$

②集合体内の断面平均質量流量が実機と一致 :

$$30.2[\text{kg/s}] \times \frac{1.072 \times 10^{-3}[\text{m}^2]}{5.554 \times 10^{-3}[\text{m}^2]} = 5.83[\text{kg/s}]$$

$$W=6.178[\text{m/s}]$$

$$Q_L=400[\text{L/min}]$$



### 3. 2 試験項目

Table 4 に試験条件の一覧を示し、Figure3-1 に試験条件の分布を示す。本試験では、実機定格条件に最も近い条件（試験装置の制限のため）を含め、高出力条件下での流量低下時および過出力時における温度分布特性を把握する試験を実施した。また、流量低下時には閉塞物内部通過流量が極端に低下し、浮力の影響などにより高流量条件下とは異なる温度分布特性を示すと考えられるため、低流量条件下での温度分布特性を把握する試験を実施した。出力および流量の絶対値は異なるが（出力／流量）比が一定となる場合の温度分布特性を把握する試験を実施した。さらに、ナトリウム酸化物や異物等による空隙の閉塞や閉塞構成粒子の脱落による閉塞形状の変化等による温度分布への影響を調べる再現性確認試験を実施した。

#### 1) 試験結果の再現性を確認

第2章で述べたようにポーラス状閉塞物は 1[mm]以下の微小な空隙を有している。ナトリウム中に金属片や酸化物等の微小な異物が含まれていると、閉塞物内部の空隙や閉塞物表面の空隙に入り込み空隙率が増加する恐れがある。そこで、約1年半の間隔があいている予備試験（第22回運転、1998年3月実施）と本試験（第23回運転、1999年9月実施）の結果とを比較することにより、閉塞物の様子が増加することなく、温度分布に再現性が保たれていることを確認する。

##### 1-1) 長期経時変化

予備試験（第22回運転、1998年3月実施）と本試験（第23回運転、1999年9月実施）で、流量およびヒータ出力を同じ条件に設定して試験を行い、長期間の経時変化による試験結果の再現性を確認した。

	[L/min](%)	[kW](%)
Case-1 :	流量 : 430 (107.5) ,	出力 : 433 (42.7)
Case-2 :	流量 : 430 (107.5) ,	出力 : 287 (28.3)

##### 1-2) 短期経時変化

本試験中の運転初期（9月16日）と後期（9月22日）において、流量およびヒータ出力を同じ条件で試験を実施し、短期間の経時変化による試験結果の再現性を確認した。

	[L/min](%)	[kW](%)
Case-3, Case-14 :	流量 : 340 (85) ,	出力 : 406.0 (40)

## 2) 流量依存性

健全サブチャンネル内では出力一定の下では流量の増加に反比例して冷却材温度は低下する。しかし、閉塞物内部では流動抵抗が大きく流れは健全流路での流れに比べて緩やかで、流量条件によっては浮力の影響を受ける等して健全サブチャンネル内での温度分布特性と傾向が異なると考えられる。ヒータピン出力を一定とし、閉塞物内外の温度分布の流量依存性を調べた。

	[L/min](%)	[kW](%)
Case-16 :	流量 : 340 (85) ,	出力 : 507.5 (50)
Case-15 :	流量 : 240 (60) ,	出力 : 507.5 (50)
Case-17 :	流量 : 160 (40) ,	出力 : 507.5 (50)
Case-3 :	流量 : 340 (85) ,	出力 : 406.0 (40)
Case-9 :	流量 : 240 (60) ,	出力 : 406.0 (40)
Case-4 :	流量 : 160 (40) ,	出力 : 406.0 (40)
Case-12	流量 : 240 (60) ,	出力 : 304.5 (30)
Case-13	流量 : 160 (40) ,	出力 : 304.5 (30)
Case-11	流量 : 120 (30) ,	出力 : 304.5 (30)
Case-10 :	流量 : 120 (30) ,	出力 : 203.0 (20)
Case-6 :	流量 : 60 (15) ,	出力 : 203.0 (20)
Case-7 :	流量 : 80 (20) ,	出力 : 101.5 (10)
Case-5 :	流量 : 60 (15) ,	出力 : 101.5 (10)
Case-8 :	流量 : 40 (10) ,	出力 : 101.5 (10)

## 3) 出力依存性

流量一定の場合、健全サブチャンネル内では出力の増加に比例して冷却材温度は増加する。しかし、閉塞物内部では流速が遅く冷却能力が低下しているため、出力条件によっては浮力の影響を受けるなどして、このような比例の関係が成り立たない可能性がある。流量条件を一定とし、閉塞物内外の温度分布のヒータピン出力依存性を調べた。

	[L/min](%)	[kW](%)
Case-18 :	流量 : 340 (85) ,	出力 : 609.0 (60)
Case-16 :	流量 : 340 (85) ,	出力 : 507.5 (50)
Case-3 :	流量 : 340 (85) ,	出力 : 406.0 (40)

Case-15 :	流量 : 240 (60) ,	出力 : 507.5 (50)
Case-9 :	流量 : 240 (60) ,	出力 : 406.0 (40)
Case-12 :	流量 : 240 (60) ,	出力 : 304.5 (30)
Case-17 :	流量 : 160 (40) ,	出力 : 507.5 (50)
Case-4 :	流量 : 160 (40) ,	出力 : 406.0 (40)
Case-13 :	流量 : 160 (40) ,	出力 : 304.5 (30)
Case-11 :	流量 : 120 (30) ,	出力 : 304.5 (30)
Case-10 :	流量 : 120 (30) ,	出力 : 203.0 (20)
Case-6 :	流量 : 60 (15) ,	出力 : 203.0 (20)
Case-5 :	流量 : 60 (15) ,	出力 : 101.5 (10)

#### 4) (出力/流量) 比一定条件

健全バンドル内の流れ場が強制対流 (高 Re 数領域) であれば、(出力/流量) 比によってバンドル内部の温度分布を決定することができる。しかし、閉塞物内部においては流動抵抗が大きく作用するため、健全サブチャンネル内とは異なった流動場 (自然対流領域など) が形成されている可能性があり、閉塞物内部の冷却材温度が (出力/流量) 比では決定できない可能性がある。そこで、比較的高い出力・流量条件 (40[%]) から低出力・流量条件 (10[%]) まで変化させて温度分布への影響を調べた。

(出力/流量比=1.0)	[L/min]([%])	[kW]([%])
Case-4 :	流量 : 160 (40) ,	出力 : 406.0 (40)
Case-11 :	流量 : 120 (30) ,	出力 : 304.5 (30)
Case-8 :	流量 : 40 (10) ,	出力 : 101.5 (10)
(出力/流量比=2/3)	[L/min]([%])	[kW]([%])
Case-9 :	流量 : 240 (60) ,	出力 : 406.5 (40)
Case-10 :	流量 : 120 (30) ,	出力 : 203.0 (20)
Case-5 :	流量 : 60 (15) ,	出力 : 101.5 (10)

### 3. 3 試験方法

本試験は定常試験であり、試験体入口温度、試験体流入流量、模擬燃料ピンヒータ出力の指示をモニタし、データ収録中に値がドリフトしないことを確認している。データ収録条件は、サンプリング間隔0.2[秒]、データ点数2248[点]、収録時間450[秒]で行った。また、試験条件の設定は、以下のように行った。

- (1) 試験体流入流量を電磁流量計 EMF150 の指示にて設定する (Fig.2-3 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[°C] (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 WI050 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 時間ほど待って定常状態を確認し、データを収録する。本試験では、データ収録を約 10 分間隔で 2 回行い、2 回のデータ収録で時間平均温度が変化しないことを確認している。

試験体保護の観点から試験体内における最高許容温度を 600[°C]とした。最高温度の確認は、閉塞物内部の上部断面 (CD 断面) に設置されたピン表面温度、熱電対番号 TP-306CD および TP-307CD の温度指示による。TP-306CD は予備試験 (第 2 2 回運転) において計測点中最も温度が高くなった点である。また、TP-307CD は ASFRE コードによる事前解析の結果、最高温度を示す位置である。いずれかの温度指示が 600[°C]を越えた場合、ヒータ出力を 600[°C]以下となるように再設定し、そのヒータ出力条件でデータ収録を行う。データ収録時には、以下 6 つのチャンネルについてリアルタイムトレンドより、各温度を監視する。

① : TP-306CD (ヒータピン 3 0 6)	91ch
② : TP-307CD (ヒータピン 3 0 7)	93ch
③ : TN-101DJ (発熱上端)	200ch
④ : TN-306DJ (発熱上端)	212ch
⑤ : TI155 (入口温度)	280ch
⑥ : TI156 (出口温度)	281ch

## 4. 再現性確認試験

### 4. 1 校正試験

ループ内にナトリウムを充填する前に、Figure2-4 に示す上流側（センサ名：PI052）および下流側（センサ名：PI051）の NaK（ナトリウムとカリウムの共晶合金）式圧力計に対して、ガス圧により校正を行い校正データを得た。試験体にナトリウムを充填し、入口および出口バルブを締め切り流量ゼロとした状態で圧力を測定した結果、試験体差圧は 16.3[kPa]であった。圧力タップ間距離（1.78[m]）およびナトリウム密度（880[kg/m<sup>3</sup>]、300[°C]）から求められる静圧は 15.4[kPa]であり約 6[%]の差で一致した。

試験ループ最上部に設置されている膨張タンク液位計（Fig.2-3 参照）により、落下法による電磁流量計の校正を行い校正データを得た。本校正で生じる最大誤差は約 1.5[L/min]であった。試験時に参照する電磁流量計は EMF150 である（Fig.2-3 参照）。

試験体およびループ内の熱電対校正は、ループ内ナトリウム温度が一定となるように流量を 250[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[°C]、350[°C]、400[°C]、450[°C]、500[°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[°C]での定常状態（Case-0）で収録を行ったところ、基準温度（TW-202AA の指示値）と各熱電対との差は、最大 0.58[°C]（TN-203EA）、平均±0.15[°C]であった。

### 4. 2 ヒートバランスの確認

Figure4-1 に燃料集合体入口温度（TW-202AA）と出口温度（TIA156）の温度差について、実験結果とヒータ出力、流入流量および入口温度から求められる理論値とを比較する。出入口温度差の理論値は以下の式により求めた。

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

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

ここで、ヒータ出力  $P$ [W]、試験体流入流量  $Q_L$ [m<sup>3</sup>/s]、試験体入口温度  $T_{in}$ におけるナトリウム密度  $\rho_{in}$ [kg/m<sup>3</sup>]である。理論値  $dT_{cal}$ と実験結果（ $dT=dT_{in}-dT_{out}$ ）と

の差は、最大 8.2[°C]であった。また、エンタルピ上昇  $\Delta E$  を計算することにより試験時のヒートバランスについて考える。試験体入口温度  $T_{in}$ [°C]でのエンタルピ  $E_{in}$  [J/kg]は以下の式で求めることができる。

$$E_{in} = -0.03489 \cdot T_{in}^2 + 1264 \cdot T_{in} + 350100 \quad (T_{in}: \text{TW-202AA}) \quad (2)$$

ヒータ出力  $P$ [W]、試験体流入流量  $Q_L$ [m<sup>3</sup>/s]、試験体入口温度におけるナトリウム密度  $\rho_{in}$ [kg/m<sup>3</sup>]によりエンタルピ上昇  $\Delta E$  を求める。

$$\Delta E = \frac{P}{\rho_{in} \cdot Q_L} \quad (3)$$

$$E_{out}^* = E_{in} + \Delta E$$

また、試験体出口温度 (TIA156) により試験体出口でのエンタルピ  $E_{out}$  を求めることができる。

$$E_{out} = -0.03489 \cdot T_{out}^2 + 1264 \cdot T_{out} + 350100 \quad (T_{out}: \text{TIA156}) \quad (4)$$

式 (3) および式 (4) で求めた試験体出口でのエンタルピを、式 (5) に従って全試験ケース (39 ケース) についてヒートバランスを確認する。

$$\bar{\delta} = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N \left\{ 1 - \left( \frac{E_{out}}{E_{out}^*} \right) \right\}^2}, \quad (N=39) \quad (5)$$

以上の結果から、 $\bar{\delta}=0.011$  となり放熱量は十分小さくヒートバランスは確保されていると考えられる。

### 4. 3 再現性の確認

ポーラス状閉塞物は内部に微小な空隙を有しており、流体中の微少な異物によって空隙が閉塞し、閉塞物の様子が変化する可能性がある。そこで、試験毎に閉塞物の状態が変化せず温度分布の再現性が保たれていることを確認する。そこで、予備試験 (第 2 2 回運転) と本試験 (第 2 3 回運転) で、流量およびヒータ出力を同じ条件に設定して試験を行い、試験結果の再現性を確認した。また、本試験中の運転初期と後期においても、流量およびヒータ出力を同じ条件で試験を実施し、短期間の経時変化の程度および試験結果の再現性について確認した。Table5 に試験条件を示す。

Figure4-2 に予備試験 (第 2 2 回運転) と本試験 (第 2 3 回運転) で比較した結果 (試験条件 Case1 および Case2) について示す。縦軸は各測定点での集合体入口 (TW-202AA) からの温度上昇値  $dT (=T-T_{in})$  を、式 (1) で求めた理論値  $dT_{cal}$  で規格化した無次元温度上昇値  $dT^*$  で示す。

$$dT^* = dT / dT_{cal} = \frac{T - T_{in}}{dT_{cal}} \quad (6)$$

Figure4-2.1 に鉛直方向温度分布を示す。横軸は、閉塞物上端を高さの基準  $z=0$  とした熱電対の高さ位置  $z$  をワイヤ巻ピッチ ( $L=200[\text{mm}]$ ) で規格化して示している。Figure4-2.2 に Traverse-A に沿った水平方向温度分布を示す。予備試験と本試験では、Point-A (ヒータピン番号 410) の DD 断面 ( $z=25.0[\text{mm}]$ 、 $z^*=0.125$ ) にある熱電対 (TN-410DD) で温度勾配が異なるが、それ以外の箇所では鉛直方向および水平方向温度分布は一致しており、温度上昇値もほぼ一致している。

また、Figure4-3 に本試験中に同条件で収録したデータのうち運転初期に収録した Case-3、および後期に収録した Case-14 とを比較した結果について示す。縦軸は各測定点での温度上昇値を理論値  $dT_{cal}$  で規格化して示す。本試験の運転初期 (Case-3) と後期 (Case-14) については、鉛直方向および水平方向温度分布の傾向は一致しており、温度上昇値もほぼ一致している。

Figure4-4 に次の定義式に従って求めた無次元温度上昇値の相対差を全測定チャンネルについて示す。

$$Error = 1 - \frac{dT_{Run23}^*}{dT_{Run22}^*} = 1 - \frac{\left( \frac{T_{out} - T_{in}}{dT_{cal}} \right)_{Run23}}{\left( \frac{T_{out} - T_{in}}{dT_{cal}} \right)_{Run22}} \quad (7)$$

予備試験 (Run22) と本試験 (Run23) における各測定点で測定温度を比較したところ、集合体内に設置されている 237 本 (ラップ管壁および 40ch、201ch を除く) の熱電対のうち、Case-1 については 98[%]の熱電対が相対差  $\pm 5$ [%]以内で一致、Case-2 については 92.8[%]の熱電対が相対差  $\pm 5$ [%]以内で一致した。一部の熱電対 (10 数点) で  $\pm 5$ [%]を越え、その中でも  $\pm 10$ [%]を越えたものは数点であった。本試験 (Run23) と予備試験 (Run22) とでは約 3[%]の偏差が生じ、予備試験 (Run22) の方が温度は高くなっている。本試験の Case-3 と Case-14 で比較したところ、94.5[%]の熱電対が相対差  $\pm 5$ [%]以内で一致し、Case-1 および Case-2 との比較で生じていた偏差はなかった。この偏差は流量計校正の評価方法に原因があると考えられる。本試験 (Run23) で評価した流量計校正係数を用いた場合と、予備試験 (Run22) で評価した流量計校正係数を用いた場合とでは、基準の流量に対して約 3[%]の差が生じ、予備試験 (Run22) の方が流量を多く評価する。この差が温度評価の際に影響して、本試験 (Run23) と予備試験 (Run22) とで偏差が生じたと考えられる。同じ校正係数を使用して評価した Case-3 と Case-14 で比較するとこのような偏差は生じていないことから、流量計校正係数の当てはめによる不確かさに原因があると言える。しかしながら、偏差が 3[%]と小さく Fig.4-2 で示したように温度分布は一致しており試験結果の再現性には問題ないと判断する。

Case-1、Case-2、Case-3 および Case-14 について、相対差  $\pm 5$ [%]以上となった

熱電対を Table 6 に示す。40ch については試験準備の段階で、熱電対に不具合が見つかった。また、201ch についてもヒータ出力をゼロとして等温データの収録を行ったところ、他の熱電対に比べ入口温度からの温度差が  $14[^\circ\text{C}]$  と大きいことが判明した。よって、40ch および 201ch については評価対象から除外する。閉塞部を計測している断面は CA~CD 断面である。また、閉塞物に接しているヒータピンは、305、306、307、406、407、408、409、410、411 である。このように閉塞物内部を計測している熱電対で相対差が大きいことが分かる。ただし、鉛直方向温度分布はほぼ一致していることから、閉塞物内部の流れ場が大きく変化して温度に差が生じたとは考えられない。つまり、再現性は確保されているが、閉塞物内部の温度計測にはある程度の不確かさを含んでいることが分かる。

試験体に設置されている閉塞物は、直径  $0.34[\text{mm}]$  のステンレス球を焼結して製作している。閉塞物内部では粒子に囲まれる空隙の大きさ ( $0.3[\text{mm}]$  程度) はサブチャンネルの等価直径 (約  $3[\text{mm}]$ ) およびピン間ギャップ幅 (約  $1[\text{mm}]$ ) に比べて小さいとは言えない。閉塞物内部では流体は全ての空隙を平均して流れるのではなく、流路を選択的に流れていると考えられる。通電加熱により生じるヒータピンの変形による閉塞物とピンとの接触状態の変化、または、閉塞物を構成する球表面への不純物の付着による空隙の閉塞など、僅かな擾乱によって閉塞物内部で流路は変化すると考えられる。このように閉塞物内部を流れる流路の変化によって、測定ごとに温度差が生じたと考えられる。

熱電対の持つ不確かさについて考える。まず、各熱電対について等温状態 (Case-19,  $300[^\circ\text{C}]$ 、流量  $340[\text{L}/\text{min}]$ ) における基準温度 ( $T_{W-202AA}$ ) からの温度差の最大値  $0.46[^\circ\text{C}]$  を、熱電対のオフセット値 (正確度  $E_{B0}$ ) とする。また、各熱電対の時間平均温度まわりの標準偏差の最大値  $0.68[^\circ\text{C}]$  により精密度  $E_{S1}$  を求めた。

$$E_{B0} = \text{MAX}[T_i - T_{TW-202AA}] \quad (8)$$

さらに、校正式の当てはめによる不確かさは、各熱電対に対して校正式を求めた際の推定標準誤差 (SEE) のうち最大値  $0.35[^\circ\text{C}]$  をとった。感度係数は、各熱電対に対する校正式 (一次式) の傾きを平均した値  $1.002$  である。これにより、95[%] 信頼区間での不確かさ  $U_{RSS}$  を求めると、熱電対に対する不確かさは  $1.34[^\circ\text{C}]$  となる。ここでは、温度差および標準偏差の最大値を用いて評価しているため不確かさは大きな値となるが、全熱電対の平均値を用いて評価すると約  $0.6[^\circ\text{C}]$  となる。

次に、経時変化による不確かさとして、Case-1、Case-2、Case-3 および Case-14 について式 (9) により無次元温度差  $\delta_k$  を求め、その平均値をもって正確度  $E_{B1}$  とし、標準偏差により精密度  $E_{S1}$  を求めた。第 2 2 回運転時 (Run22) と第 2 3 回運転時 (Run23) では、各試験 (Case-1 および Case-2) の試験条件が完全に一致していない。第 2 3 回運転 (Case-3 および Case-14) においても同様である。よって、入口温度からの温度上昇値を無次元化して、試験条件の違いによる影響を含め



て経時変化による不確かさを評価している。これらの感度係数はそれぞれ1である。

$$\delta_k = [(dT^*)_{Run22} - (dT^*)_{Run23}]_k$$

$$= \left[ \left( \frac{T_k - T_{in}}{dT_{cal}} \right)_{Run22} - \left( \frac{T_k - T_{in}}{dT_{cal}} \right)_{Run23} \right] \quad (k: \text{チャンネル番号}) \quad (9)$$

$$\bar{\delta} = \frac{1}{M} \sum_{k=1}^M \delta_k \equiv E_{B1}$$

(Mはチャンネル数)

$$E_{S1} = \sqrt{\frac{1}{(M-1)} \sum_{k=1}^M (\delta_k - \bar{\delta})^2}$$

これらにより、全熱電対について95[%]信頼区間での不確かさ  $U_{rss}$  を求めると、Case-1では4.8[%]、Case-2では5.1[%]、Case-3とCase-14との比較では4.3[%]となった。本試験試験体を用いた温度計測においては、経時変化として試験体出入口温度で規格化した無次元温度差の約5[%]の不確かさを含んでいると推定される。一方、閉塞物内部の熱電対に限って不確かさを再度評価 ( $E_{S1}$ のみ再評価) すると、Case-1では6.9[%]、Case-2では7.7[%]、Case-3とCase-14との比較では11.9[%]となった。閉塞物内部では、先に述べた理由により、全熱電対の平均的な値(約5[%])の2倍程度の不確かさを含んでいると推定される。

$$U_{rss} = \sqrt{E_{Bm}^2 + (t_{st} E_{Sm})^2}, \quad (t_{st}=2.0) \quad (10)$$

$$E_{Sm} = \sqrt{\sum_{i=0}^k (\theta_i E_{Si})^2}, \quad (\theta_i \text{は感度係数}) \quad (11)$$

$$E_{Bm} = \sqrt{\sum_{i=0}^k (\theta_i E_{Bi})^2} \quad (12)$$

## 5. 温度分布特性試験結果

### 5. 1 サブチャンネル内温度分布特性

#### 5. 1. 1 鉛直方向温度分布

Figure5-1.1 から Figure5-1.14 に Point-A から Point-P までのサブチャンネル中心における鉛直方向ナトリウム温度分布を示す。Figure5-1.1 から Figure5-1.14 の上段 (a) にはヒータピン出力  $P$  を (a-1) 高出力条件 50[%]、および (a-2) 低出力条件 10[%] に固定して流量  $F$  を変化 ( $F=10\sim 85$ [%]) させた場合の流量依存性について示し、Figure5-1.1 から Figure5-1.14 の下段 (b) には流量  $F$  を (b-1) 高流量条件 60[%]、および (b-2) 低流量条件 15[%] に固定してヒータピン出力  $P$  を変化 ( $P=10\sim 60$ [%]) させた場合の出力依存性について示す。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 ( $L=200$ [mm]) で規格化した鉛直方向高さ  $z^*(=z/L)$  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) に各サブチャンネルごとに熱電対は 2 点から 3 点設置されている。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  $dT^*(=dT/dT_{cal})$  を示す。

Figure5-1.1 から Figure5-1.4 に示す閉塞物が存在する閉塞サブチャンネル Point-A (Fig.5-1.1)、Point-B (Fig.5-1.2)、Point-C (Fig.5-1.3)、Point-D (Fig.5-1.4) における鉛直方向温度分布は、閉塞物上流側 ( $z^*<0.175$ )、閉塞部 ( $-0.175<z^*<0.0$ )、そして閉塞物下流側 ( $z^*>0.0$ ) の各領域で特徴的な温度分布となっている。

閉塞物上流側 ( $z^*<0.175$ ) では、無次元温度上昇値はヒータピン出力および流量条件には依存しない。周辺サブチャンネル Point-A (Fig.5-1.1) および Point-B (Fig.5-1.2) では BA 断面 ( $z^*=-0.78$ ) から BB 断面 ( $z^*=-0.22$ ) にかけて鉛直方向の温度勾配は正となっているが、内側サブチャンネル Point-C (Fig.5-1.3) および Point-D (Fig.5-1.4) では温度勾配が負となっており傾向が異なっている。サブチャンネル解析コード ASFRE による事前解析からこのような温度分布が得られている<sup>[11]</sup>。解析結果および実験結果から、内側サブチャンネルでは集合体中心部に比べて温度の低い周辺サブチャンネル内のナトリウムが閉塞物を避ける水平方向流れによって集合体内部へ流れ込み温度が低下するために鉛直方向の温度勾配が負となり、周辺サブチャンネルでは鉛直方向流れが生じ、鉛直方向に温度が上昇するため温度勾配は正となる。

閉塞物内部 ( $-0.175<z^*<0.0$ ) では、無次元温度上昇値  $dT^*=0.3$  程度の閉塞物下端部 ( $z^*=-0.175$ ) から鉛直方向に温度が急激に上昇し、閉塞物上端部 ( $z^*\sim 0.0$ ) において出入口温度差以上の温度上昇 ( $dT^*>1.0$ ) を示している。Figure5-1.1 から Figure5-1.4 に示す高出力条件 (a-1) の場合、周辺サブチャンネル Point-A、B では

流量の違いによる無次元温度上昇値のバラツキ（依存性）は小さく、内側サブチャンネル Point-C, -D では流量の増加に伴って無次元温度上昇値は低下している。Figure5-1.1 から Figure5-1.4 の高流量条件（b-1）では、周辺サブチャンネル Point-A, -B ではヒータピン出力の増加に伴って無次元温度上昇値は低下し、内側サブチャンネル Point-C, -D では出力依存性は見られない。閉塞物内部の温度分布は断面内で一様な変化を示すのではなく、周辺サブチャンネル Point-A, -B では出力依存性があり、内側サブチャンネル Point-C, -D では流量依存性がある。

閉塞物下流側では、閉塞物近傍 ( $0 < z^* < 0.35$ ) と閉塞物から遠方 ( $z^* > 0.35$ ) で温度分布の傾向が異なる。閉塞物近傍 ( $0 < z^* < 0.35$ ) では試験条件（出力および流量条件）により温度分布が異なり、（１）閉塞物から流出した後温度が低下する場合（C型分布と呼ぶ）、（２）閉塞物を出てから温度が上昇するが、その後一旦低下し、また上昇に転じその下流で低下する場合（M型分布と呼ぶ）がある。このような特徴的な温度分布については第6.2節で検討する。一方、閉塞物から遠方の下流側 ( $z^* > 0.35$ ) ではヒータピン出力および流量条件への依存性は見られず、 $z^* = 0.35$ （DG断面）で温度上昇値は極小となり、その後鉛直方向に増加している。これは、閉塞物近傍 ( $z^* < 0.35$ ) では後流域が形成され複雑な流れ場となり流量・出力依存性を示すが、その下流側 ( $z^* > 0.35$ ) では後流域が消滅して健全サブチャンネル内と同様な鉛直方向流れが支配的な領域に変わったのが原因と考えられる。すなわち、閉塞物下流に形成される後流域の範囲は  $z^* = 0.0 \sim 0.35$ （DG断面）となり、ワイヤ巻きピッチ ( $L = 200[\text{mm}]$ ) の約  $1/6$  の高さで後流域は消滅して鉛直方向流れが支配的な流れになると判断できる。ポラス状閉塞ではなく、平板状閉塞を対象とした水流動試験により閉塞物断面の大きさ（厚さ）と流量条件（Re数）との関係が示されている<sup>[16]</sup>。本試験では閉塞物厚さ  $D_B$ （閉塞物が接する壁面から健全サブチャンネルに接する閉塞物側面までの水平距離の2倍）は  $27.514[\text{mm}] (= 2 \times 13.757[\text{mm}])$  となり、後流の影響する範囲は  $1.27 (= 35/27.514)$  となる。これは、平板閉塞で行われた実験結果（1.5~3.0）に近い値である。

Point-G (Fig.5-1.5) から Point-P (Fig.5-1.14) までの健全サブチャンネル内の温度分布について調べる。健全サブチャンネル内では温度分布に流量および出力依存性を示さない。一般に、健全サブチャンネル内の鉛直方向温度分布は集合体入口から出口にかけて、スペーサワイヤの影響により完全ではないがほぼ直線的に温度が上昇する。ところが、閉塞物に近い健全サブチャンネル Point-G (Fig.5-1.5) から Point-I (Fig.5-1.7) では鉛直方向に直線的に温度が上昇せず、閉塞物下端の高さ ( $z^* = -0.25$ ) で温度上昇値が低下して分布に段差が生じている。前述のように閉塞物下端の上流側では、閉塞物を避ける水平方向流れが存在し、周辺サブチャンネルの低温ナトリウムが集合体中心部に流入してくる。それ故、閉塞物近傍の健全サブチャンネルでも閉塞物下端の高さで温度上昇値が低下したと考えられる。閉塞サブチャンネルに接する健全サブチャンネル (Point-G~Point-I) だけでなく、集合体中心部の健全サブチャンネル Point-J (Fig.5-1.8) および Point-K (Fig.5-1.9) におい

でもこのような温度分布に段差が生じるような傾向が見られる。ただし、閉塞物から遠方の健全サブチャンネル Point-L (Fig.5-1.10)、Point-M (Fig.5-1.11)、Point-N (Fig.5-1.12) では、温度はほぼ直線的に変化しており閉塞物の影響を受けていない。

周辺 2 列が閉塞された本試験体系において、閉塞物が存在することにより温度分布に影響を受ける範囲は、高さ方向では閉塞物上流側の  $z^*=-0.5$  から閉塞物後流の  $z^*=0.35$  の範囲、水平方向で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る。

## 5. 1. 2 水平方向温度分布

Figure5-2.1 から Figure5-2.18 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。Figure5-2.1 から Figure5-2.18 の上段 (a) には出力 P を (a-1) 高出力条件 50[%] および (a-2) 低出力条件 10[%] に固定して流量 F を変化 ( $F=10\sim 85$ [%]) させた場合の流量依存性について示し、Figure5-2.1 から Figure5-2.18 (b) には流量 F を (b-1) 高流量条件 60[%] および (b-2) 低流量条件 15[%] に固定して出力 P を変化 ( $P=10\sim 60$ [%]) させた場合の出力依存性について示す。横軸は、Traverse-A についてはラッパ管の頂点間距離  $W_A=68.7$ [mm] で規格化し、Traverse-B についてはラッパ管壁の対面距離  $W_B=60.94$ [mm] で規格化して示している (Fig.2-5 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集合体中心となる。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。

Figure5-2.1 に閉塞物上端 ( $z=0.0$ [mm]) から 155[mm] 上流側の BA 断面における水平方向温度分布 (Traverse-A) を示す。集合体中心  $r^*=0.0$  に対してほぼ対称な分布となっており、断面中心部で温度が高く周辺で温度が低い。この BA 断面では下流側に存在する閉塞物の影響は見られず、無次元温度上昇値はヒータ出力および流量の変化によらず一定値となる。

Figure5-2.2 に閉塞物上端 ( $z=0.0$ [mm]) から 45[mm] 上流側の BB 断面における水平方向温度分布 (Traverse-A) を示す。無次元温度上昇値はヒータ出力および流量の変化に依らないが、BA 断面とは異なり下流側に存在する閉塞物の影響を受け、 $r^*=-1.0\sim -0.7$  の範囲で平坦な温度分布となっている。これは、第 5.1.1 項で述べたように閉塞物上流側で生じる閉塞物を避けようとする水平方向流れにより、周辺サブチャンネルの低温ナトリウムが集合体中心部へ流入するためである。高流量・出力条件 (a-1, a-2) では、集合体周辺部から中心部にかけての範囲 ( $r^*=-1.0\sim -0.7$ ) で温度勾配が負となっているのに対し、低流量・出力条件 (b-1, b-2) では温度勾配が

正となっている。つまり、高流量・出力条件の方が、低流量・出力条件に比べて閉塞物上流側に生じる水平方向流れが強く、低温ナトリウムが流入する影響を受け易いことが分かる。

Figure5-2.3 および Figure5-2.4 に閉塞物の約 2/3 の高さにある CC 断面 ( $z=-10.0[\text{mm}]$ ) での水平方向温度分布を各トラバースラインに沿って示す。Figure5-2.3 には Traverse-A に沿った水平方向温度分布を示し、Figure5-2.4 には Traverse-B に沿った水平方向温度分布を示す。

健全サブチャンネル ( $r^*=-0.42\sim 1.0$ ) では出力・流量依存性は見られないが、閉塞物に隣接する健全サブチャンネル内の温度上昇値は小さく温度分布のピークが閉塞物と反対側 ( $r^*=0.14$ ) に偏った温度分布となっている。閉塞物と健全サブチャンネルの間にピンが存在する Figure5-2.4 の Traverse-B に沿った健全サブチャンネル ( $r^*=-0.42\sim 1.0$ ) でも、温度分布のピークが閉塞物と反対側 ( $r^*=0.18\sim 0.37$ ) に偏った温度分布となっている。閉塞物により生じる水平方向流れが閉塞物に隣接する Point-H および Point-I だけでなく、ピンを越え集合体中心部の Point-J および Point-K まで影響を及ぼしていることが分かる。

閉塞物内部 ( $r^*=-1.0\sim -0.42$ ) においては、内側サブチャンネル ( $r^*=-0.7$ ) で温度上昇値が最も大きい。高出力・流量条件 (a-1,b-1) の場合、周辺サブチャンネル ( $r^*\sim -0.8$ ) の温度上昇値は健全サブチャンネル内のピーク値よりも低い値となっているが、低出力・流量条件 (a-2,b-2) の場合には健全サブチャンネルよりも高い温度上昇値を示している。高出力条件 (a-1) の場合、Traverse-A (Fig.5-2.3) および Traverse-B (Fig.5-2.4) とともに周辺サブチャンネルの温度上昇値は出力および流量条件によって変化しないが、内側サブチャンネルでは流量の増加に伴い温度上昇値が低下する。高流量条件 (b-1) の場合、Traverse-A (Fig.5-2.3) および Traverse-B (Fig.5-2.4) とともに出力増加に伴って、周辺サブチャンネルの温度上昇値は低下し、閉塞物内部の水平方向温度勾配は大きくなる。Traverse-B (Fig.5-2.6) では出力の増加に伴って内側サブチャンネルの温度上昇値が増加し、Traverse-A (Fig.5-2.5) よりも出力増加に伴う水平方向温度勾配が大きくなる傾向は強い。低流量・出力条件 (a-2,b-2) では、高出力・流量条件 (a-1,b-1) の場合よりも周辺サブチャンネルの温度上昇値は大きく、閉塞物内部の水平方向温度勾配は小さくなっている。

Figure5-2.5 および Figure5-2.6 に閉塞物上端から 5[mm] 下方の閉塞上端部にある CD 断面 ( $z=5[\text{mm}]$ ) での水平方向温度分布を各トラバースラインに沿って示す。Figure5-2.5 には Traverse-A に沿った水平方向温度分布を示し、Figure5-2.6 には Traverse-B に沿った水平方向温度分布を示す。

健全サブチャンネル内 ( $r^*>0.42$ ) の無次元温度上昇値には出力・流量依存性は見られず、CC 断面と同様に閉塞物の影響を受け、温度分布のピークが集合体中心から閉塞物の反対側に偏っている。

閉塞物内部では、CC 断面と同様に周辺サブチャンネルよりも内側サブチャンネル ( $r^*=-0.7$ ) で温度上昇値は大きくなっている。高出力条件 (a-1) の場合には

Traverse-A (Fig.5-2.5) および Traverse-B (Fig.5-2.6) とともに周辺サブチャンネルの温度上昇値には出力・流量条件に依らず、内側サブチャンネルでは流量の増加に伴い温度上昇値が低下し、閉塞物内部の水平方向温度勾配は小さくなる傾向がある。一方、高流量条件 (b-1) の場合には Traverse-A および Traverse-B とともに、周辺サブチャンネルの温度上昇値は出力の増加に伴い低下し水平方向温度勾配は大きくなる。Traverse-B では内側サブチャンネルの温度上昇値が出力増加に伴って増加しており、Traverse-A よりも出力増加に伴う水平方向の温度勾配が大きくなる傾向は強い。低流量・出力条件 (a-2,b-2) では、高出力・流量条件 (a-1,b-1) の場合よりも周辺サブチャンネルの温度上昇値は大きく、出力・流量の低下に伴って周辺サブチャンネルの温度上昇値は大きくなる閉塞物内部の水平方向温度勾配は小さくなっている。

閉塞物が存在する領域において、健全サブチャンネルでは無次元温度上昇値は出力・流量条件によって変化せず、閉塞物の影響を受けて水平方向温度分布のピークが集合体中心から閉塞物の反対側に偏った分布となっている。一方、閉塞物内部において、高出力・流量条件の場合には周辺サブチャンネルよりも内側サブチャンネルで温度上昇値が大きく水平方向の温度勾配が存在する。内側サブチャンネルでは流量の増加に伴い無次元温度上昇値は低下し、周辺サブチャンネルでは出力の増加に伴い無次元温度上昇値は低下する。低流量・出力条件の場合、周辺サブチャンネルの温度上昇値は高出力・流量条件の場合よりも大きく、閉塞物内部の水平方向温度勾配は小さくなる。

Figure5-2.7 から Figure5-2.12 に閉塞物下流側の後流域における温度分布を DB 断面 ( $z=+5[\text{mm}]$ ) から DD 断面 ( $z=+25[\text{mm}]$ ) にかけて示す。

Figure5-2.7 (Traverse-A) および Figure5-2.8 (Traverse-B) に DB 断面 ( $z=+5.0[\text{mm}]$ ) における水平方向温度分布を示す。

Figure5-2.7 には閉塞物上端から  $5[\text{mm}]$  上方の DB 断面 ( $z=+5[\text{mm}]$ ) における Traverse-A に沿った水平方向温度分布を示し、Figure5-2.8 には同じく DB 断面における Traverse-B に沿った水平方向温度分布を示す。健全サブチャンネル ( $r^*>0.42$ ) の無次元温度上昇値には出力・流量依存性は見られない。高流量・出力条件時 (a-1,b-1) において、周辺サブチャンネルの温度上昇値が閉塞物上端部の CD 断面での値から 0.2 程度増加し、閉塞物内部の CD 断面で生じていた急峻な水平方向の温度勾配が小さくなっている。Traverse-A (Fig.5-2.7) よりも Traverse-B (Fig.5-2.8) の方が流量・温度依存性は顕著であり、Traverse-B では流量の増加に対して温度勾配が小さくなり、出力の増加に対しては温度勾配が大きくなる傾向にある。低出力条件時 (a-2) には、Traverse-A および Traverse-B とともに周辺サブチャンネルの方が内側サブチャンネルよりも温度は高くなっている。低流量条件時 (b-2) には、Traverse-A および Traverse-B とともに、出力 10[%]の場合周辺サブチャンネルの方が温度は高く、出力が 20[%]になると内側サブチャンネルの方が温度は高くなり、出力条件によって後流域の温度分布が変化することが分かる。ただし、

Figure5-2.8 (Traverse-B) の (b-1) では高流量条件であっても (Case12) のように出力 30[%]で周辺サブチャンネルの方が温度上昇値は大きくなる場合がある。

Figure5-2.9 (Traverse-A) および Figure5-2.10 (Traverse-B) に DC 断面での水平方向温度分布を示す。高流量・出力条件時 (a-1,b-1) において、周辺サブチャンネルでは温度上昇値が上流の DB 断面での値から 0.2 程度増加して内側サブチャンネルの温度上昇値よりも高くなっている。また、顕著な流量・出力依存性は見られない。低出力・流量時 (a-2,b-2) においては上流の DB 断面 ( $z=+5.0[\text{mm}]$ ) と同様に周辺サブチャンネル (Point-A および Point-B) の方が内側 (Point-C および Point-D) よりも温度上昇値は高く、流量・出力の増加に伴って温度レベルが低下している。

Figure5-2.11 (Traverse-A) および Figure5-2.12 (Traverse-B) に DD 断面 ( $z=+25[\text{mm}]$ ) での水平方向温度分布を示す。高出力・流量条件 (a-1,b-1) において、Traverse-A (Fig.5-2.11) では出力・流量条件により周辺および内側サブチャンネル内の無次元温度上昇値は変化するが、明確な傾向は見られない。一方、Traverse-B (Fig.5-2.12) では、高出力条件 (a-1) に示すように Case-17 では内側よりも周辺サブチャンネルの方が温度上昇値は高いが流量の増加に伴って内側サブチャンネル内の温度上昇値は増加し、Case-16 では内側の方が高くなり流量依存性が見られる。さらに、Traverse-B の高流量条件 (b-1) では Case-12 から Case-15 にかけて出力の増加に伴って周辺サブチャンネル内の温度上昇値が低下して、温度勾配が逆転している。低出力・流量時 (a-2,b-2) には、Traverse-A では周辺と内側サブチャンネル内の温度上昇値はほぼ等しく平坦な温度勾配となり、Traverse-B では内側よりも周辺サブチャンネル内の方が温度上昇値は高く急峻な温度勾配が生じている。

Figure5-2.13 (Traverse-A) および Figure5-2.14 (Traverse-B) に DF 断面 ( $z=+50.0[\text{mm}]$ ) での水平方向温度分布を示す。Traverse-A, B とともに温度上昇値の水平方向分布には流量・出力依存性は見られず、温度分布は高流量・出力条件および低流量・出力条件でほぼ同じ分布となっている。このことから、本試験での閉塞条件 (37本ピンバンドル体系、周辺2列閉塞) では、DF 断面下流では後流域の影響はなく、健全サブチャンネル内流れと同様な流れ場に復帰していると考えられる。

Figure5-2.15 から Figure5-2.18 に Traverse-A に沿った閉塞物上端から 100[mm] 下流の DH 断面 (Fig.5-2.15)、200[mm] 下流の DI 断面 (Fig.5-2.16)、307.5[mm] 下流 (発熱部上端) の DJ 断面 (Fig.5-2.17)、600[mm] 下流 (非発熱部) の EA 断面 (Fig.5-2.18) における水平方向温度分布を示す。

閉塞物上端から 100[mm] 下流の DH 断面から 600[mm] 下流の EA 断面にかけては、閉塞物後流域で見られる様な出力・流量条件による温度分布の変化はなく無次元化した温度上昇値の水平方向分布は一致している。

閉塞物上端から 100.0[mm]下流の DH 断面 (Fig.5-2.15) では上流の DF 断面 ( $z=+50$ [mm]) と温度分布はほぼ一致している。閉塞物上端から 200[mm]下流の DI 断面 (Fig.5-2.16) では後流域が消滅し鉛直方向流れが支配的な領域と考えられる。ただし、DI 断面においては、閉塞物上端から DF 断面の間に生じていた後流域の影響から、健全流路側 ( $r^*=-0.42\sim 1.0$ ) よりも閉塞物が存在する範囲 ( $r^*=-1.0\sim -0.42$ ) で鉛直方向流れが遅く、温度上昇値の増加率が大きくなり水平方向に平坦な温度分布となったと考えられる。DI 断面の下流側では閉塞物が存在する範囲 ( $r^*=-1.0\sim -0.42$ ) の鉛直方向流れが回復するとともに、スパーサワイヤによるスワールフローにより集合体内混合が促進され、閉塞物上端から 307.5[mm]下流(発熱部上端)の DJ 断面 (Fig.5-2.17) では集合体入口部の BA 断面 ( $z=-155$ [mm]) に近い集合体中心に対して対称な温度分布に近づき、更に下流の EA 断面 ( $z=+600$ [mm]) では後流の影響のない集合体中心 ( $r^*=0.0$ ) を中心として左右対称な温度分布となったと考えられる。

### 5. 1. 3 出力・流量依存性

Figure5-3 に閉塞サブチャンネル内の Point-A から Point-D において、(出力/流量)比を実機条件に等しくした場合 ( $P/F=1$ ) について鉛直方向ナトリウム温度分布を示す。横軸はワイヤ巻ピッチ ( $L=200$ [mm]) で規格化した鉛直方向高さ  $z^*(=z/L)$ 、縦軸は式 (1) で求めた温度上昇理論値で規格化した入口温度 ( $TW\cdot 202AA$ ) からの温度上昇  $dT^*$ を示す。

閉塞サブチャンネル Point-A~D において、流量 (出力) 条件 30[%] (Case-11) と流量 (出力) 条件 40[%] (Case-11) の場合は温度分布の傾向は一致する。しかし、(出力/流量)比が同じであっても、流量 (出力) 条件 30[%]以上の場合と流量 (出力) 条件 10[%] (Case-8) の場合では温度分布の傾向が異なっている。また、試験条件だけでなく局所的にも傾向は異なり、周辺サブチャンネル Point-A および Point-B と内側サブチャンネル Point-C および Point-D では無次元温度上昇値の傾向が異なっている。閉塞物内部においては、周辺サブチャンネル Point-A および Point-B では流量 (出力) 条件 10[%]の方が流量 (出力) 条件 30[%]以上の場合に比べて無次元温度上昇値は大きく、内側 Point-C および Point-D では (出力/流量)比が一定であれば温度上昇値はほぼ一致している。閉塞物下流側の後流域では流量 (出力) 条件 10[%]の方が流量 (出力) 30[%]以上の場合に比べて温度上昇は小さく、高流量 (出力) 条件 (30[%]以上) の場合は温度上昇値がピークとなる位置が各 Point で異なりそれぞれに特徴的な温度分布となっているが、低流量 (出力) 条件の場合は閉塞物上端に近い後流域で温度がピークとなり温度は下流へ行くに従い低下するという全 Point で共通した温度分布となっている。

Figure5-4 に閉塞物内部の CC 断面および CD 断面における、(出力/流量)比



を実機条件に等しくした場合 ( $P/F=1$ ) の各トラバースライン (Traverse-A, B) に沿った水平方向温度分布について示す。横軸はラップ管頂点間距離  $W_A=68.7[\text{mm}]$  (Traverse-A) およびラップ管対面距離  $W_B=60.94[\text{mm}]$  (Traverse-B) で規格化した熱電対の位置を示している。縦軸は式 (1) で求めた温度上昇理論値で規格化した入口温度 (TW-202AA) からの温度上昇  $dT^*$  を示す。

Figure5-4 (a) に閉塞物内部の CC 断面 ( $z=-10.0[\text{mm}]$ ) での水平方向温度分布を示す。また、Figure5-4 (b) に CD 断面 ( $z=-2.5[\text{mm}]$ ) での水平方向温度分布を示す。Traverse-A および Traverse-B とともに、高出力・流量条件 (30[%]以上) で内側よりも周辺サブチャンネルの方が温度上昇値は低く閉塞物内部 ( $r^*<0.42$ ) で急峻な温度勾配が生じているが、低出力・流量条件 (10[%]以下) では周辺サブチャンネルの温度上昇値が内側サブチャンネルと同程度まで増加して閉塞物内部の温度勾配が小さくなる。また、健全サブチャンネル内 ( $r^*=-0.42\sim 1.0$ ) の温度分布は (出力/流量) 比が一定 ( $P/F=1$ ) であれば一致している。閉塞物内部 ( $r^*=-1.0\sim -0.42$ ) でも高出力・流量 (以上 30[%]) 条件であれば温度分布はほぼ一致することが分かる。

以上の結果から、健全サブチャンネルでは (出力/流量) 比が同じであれば集合体内で温度分布はほぼ一致しており、閉塞物周辺の熱流動場は (出力/流量) 比によって推定できる。

閉塞物内部において、温度上昇値は出力・流量条件への依存性に関して一定した傾向を示さず、各サブチャンネル (Point-A~D) によって局所的に傾向が異なる。高出力・流量条件の場合には、周辺から内側サブチャンネルにかけて水平方向に急峻な温度勾配が生じ、周辺あるいは内側サブチャンネルでは閉塞物の中心部に近い方が温度上昇値は高くなる。低出力・流量時 (a-2, b-2) には周辺サブチャンネルの温度上昇値は内側サブチャンネルと同程度まで増加し、高出力・流量条件で見られた周辺から内側サブチャンネルにかけての急峻な温度勾配は緩やかになる。閉塞物内部では、高流量・出力条件の場合には局所的に温度上昇値の分布特性が異なり水平断面内で温度分布が生じ内部で局所的に異なった流れ場が形成され、低流量・出力条件時には水平断面内での温度差が緩和する方向に向かうことから閉塞物内部で一様な流れ場に近づいていくと考えられる。

閉塞物下流側に生じる後流域は、DF 断面 ( $z=50[\text{mm}]$ ) の高さではほぼ消滅していると考えられ、軸方向分布で示したように DF 断面よりも上流側の閉塞物上端から 35[mm]下流側にある DE 断面までの範囲と考えられる。

閉塞物内部および後流域において、高出力・流量条件 (30[%]以上) の場合は局所的に温度分布の傾向が異なることから、閉塞物内部および後流域で断面一様な流れ場ではなく複雑な流れ場が形成されていると考えられる。通常、閉塞物を含まない健全なバンドル体系内のサブチャンネル温度は (出力/流量) 比によって決定できる。しかし、閉塞物を含む本試験体系の場合、閉塞物内部および後流域では流量 (出力) 条件によって温度分布が異なっている。実機を想定して閉塞物内部の温度

分布を調べる場合、流量（出力）30[%]以上で（出力／流量）比を1にした条件でなければ実際とは異なる温度分布となることが分かる。

## 5. 2 閉塞部における温度分布特性

### 5. 2. 1 鉛直方向温度分布

Figure5-5.1 から Figure5-5.5 に Point-A から Point-E における閉塞物内部のナトリウム温度およびピン表面温度の鉛直方向分布を示す。横軸は閉塞物上端を基準 ( $z=0.0$ ) として閉塞物高さ ( $H=35[\text{mm}]$ ) で規格化した鉛直方向位置であり、 $z/H=0.0$  は閉塞物上端、 $z/H=-1.0$  は閉塞物下端を示している。閉塞物が存在する位置 (集合体の高さ方向) により閉塞物内部の温度が異なることから、閉塞物内部の温度を議論し実機評価を行う上で閉塞物下端でのナトリウム温度と閉塞物の上下端間で生じる温度上昇幅を基準とすることとした。すなわち、縦軸は出力と流量から求められる閉塞物下端位置での温度上昇値  $dT_{bin}$ 、および閉塞物の上下端間で生じる温度上昇幅  $dT_b$  により無次元化した温度上昇値  $dT_b^*$  を示している。ここで、 $dT_{bout}$  は閉塞物上端位置での温度上昇値である。

$$dT_b^* = \frac{dT - dT_{bin}}{dT_b} \quad (13)$$

$$dT_b = dT_{bout} - dT_{bin} \quad (14)$$

$$dT = \frac{P \cdot (z / L_h)}{\rho(T_{in}) \cdot C_p(T_{average}) \cdot Q_L} \quad \begin{array}{l} (dT_{bin} : z = 0.3075) \\ (dT_{bout} : z = 0.3425) \end{array} \quad (15)$$

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

Figure5-5.1 にコーナー部に近い周辺サブチャンネル中心温度 (Point-A) およびヒータピン表面温度 (Point-a) での鉛直方向分布について示す。また、Figure5-5.2 に閉塞物中心部にある周辺サブチャンネルにおけるサブチャンネル中心温度 (Point-B) およびヒータピン表面温度 (Point-b) での鉛直方向分布について示す。

周辺サブチャンネルの Point-A, -a (Fig.5-5.1) および Point-B, -b (Fig.5-5.2) では、出力・流量条件に対する温度分布変化の傾向は一致している。

高出力条件 (a-1) の場合、実線で示すナトリウム温度上昇値には流量変化に対する依存性が見られないが、ピン表面での温度上昇値には流量の増加に伴って増加しており、ピン表面/サブチャンネル中心間の温度差は流量の増加に伴って増加している。閉塞物とピンが接するピン表面近傍では、サブチャンネル中心部に比べて空隙率が大きく局所的に流動抵抗が低下するため (壁面効果)、閉塞物中心部よりもピン表面近傍の方が流量変化の影響が大きく温度上昇値が増加したと考えられる。高流量条件 (b-1) の場合、変化量は小さいが出力の増加に伴いナトリウムおよびピン表面での温度上昇値は低下し、閉塞物内部の温度変化は出力に比例しないことが分かる。

低出力・流量条件 (a-2,b-2) の場合、ピン表面温度とサブチャンネル中心温度との温度差は高出力・流量条件 (a-1,b-1) に比べて小さくなっており、閉塞物内部では出力・流量条件が低下するに従い、水平方向断面内で一様な温度分布に近づき、鉛直方向流れが支配的な一様な流れ場になると考えられる。また、流量変化 (a-2) に対する温度変化よりも、出力変化 (b-2) に対する温度変化の方が大きい。

Figure5-5.2 (a-1,b-1) に示す Point-B のサブチャンネル中心におけるナトリウム温度は鉛直方向にほぼ直線的に上昇しており、鉛直方向流れが支配的であると考えられる。また、CB 断面 ( $z/h=0.5$ ) のとき無次元温度上昇値が負の値を示している場合がある。これは、無次元化の際に閉塞物下端における断面平均温度  $dT_{bin}$  を用いて評価していることが原因である。すなわち、集合体の周辺部ではナトリウム温度が断面平均温度に比べて低く、従って閉塞物が周辺 2 列に設置されているため閉塞物下端から流入するナトリウム温度は断面平均温度  $dT_{bin}$  よりも低くなる。閉塞物内部で温度は上昇するが、条件によっては閉塞物内部であっても局所的に断面平均温度よりも低い温度となったために負の値となっている。

Figure5-5.3 にコーナー部に近い内側サブチャンネルにおけるサブチャンネル中心温度 (Point-C) およびヒータピン表面温度 (Point-c) での鉛直方向分布を示す。また、Figure5-5.4 に閉塞物中心部にある内側サブチャンネルにおけるサブチャンネル中心温度 (Point-D) およびヒータピン表面温度 (Point-d) での鉛直方向分布を示す。

内側サブチャンネルの Point-C(-c) および Point-D(-d) では、出力・流量条件に対する温度分布変化の傾向は一致している。

高出力条件 (a-1) の場合、実線で示すサブチャンネル中心でのナトリウム温度は流量の増加に伴い低下し、破線で示すピン表面温度は増加している。また、ピン表面/サブチャンネル中心間の温度差は流量の増加に伴い増加している。高流量条件 (b-1) の場合、Point-C および -c での出力増加に伴う温度変化量は無視し得るほど小さいが、Point-D および -d では、出力の増加に伴いサブチャンネル中心におけるナトリウムおよびピン表面での温度上昇値は増加し、出力の変化に依らずピン表面/サブチャンネル中心間の温度差はほぼ一定している。高出力・流量条件 (a-1,b-1) ではヒータピン表面温度の方がサブチャンネル中心温度よりも高く水平方向に温度勾配がついており、鉛直方向には CB/CC 断面間の温度勾配に比べて閉塞物上端部の CC/CD 断面間の温度勾配の方が急峻になっている。

低出力・流量条件 (a-2,b-2) ではヒータピン表面温度と閉塞サブチャンネル中心温度との温度差は高出力・流量条件に比べて小さく、鉛直方向にほぼ直線的に温度が上昇している。

Figure5-5.5 に Point-E における閉塞サブチャンネル内温度を示す。試験条件 (出力および流量) により無次元温度上昇値は変化して流量が高い程小さくなり、出力が高い程大きくなる。

閉塞物内部では、Point-E を除き周辺サブチャンネル (Point-A, B) と内側サブチャンネル (Point-C, D) とで温度上昇値の絶対値は異なるが、温度特性は一致している。健全サブチャンネルに接する内側サブチャンネルの Point-E は、閉塞物中心温度を閉塞物側面から熱電対を挿入して測定しており、閉塞物に熱電対シース挿入のための人為的な空隙が存在している。よって、閉塞物下流からの流れの他に、この人為的な空隙を流れる閉塞物内部の流れと閉塞物周辺の流れが相互に干渉し合い、他の Point とは異なる温度分布特性を示した可能性がある。ただし、4 サブチャンネル水流動試験の結果から、閉塞物中心部よりも閉塞物と流体が接する閉塞物側面では流量変化および出力変化の影響を強く受けることは明らかである<sup>[5,6]</sup>。

## 5. 2. 2 水平方向温度分布

Figure5-6.1 から Figure5-6.5 に CB 断面から CD 断面にかけての閉塞サブチャンネル内のナトリウム温度およびピン表面温度について水平方向分布を示す。横軸はそれぞれの計測位置を並べて示している。縦軸は、式 (13) から式 (15) で示した出力と流量から求められる閉塞物下端位置での温度上昇値  $dT_{bin}$ 、および閉塞物上端位置での温度上昇値  $dT_{bout}$  を用いて無次元化した温度上昇値  $dT_b^*$  を示している。

Figure5-6.1 に CB 断面 (閉塞物中央  $z=-0.175$ ) における閉塞サブチャンネル内のナトリウム温度の水平方向分布を示す。

高出力・流量条件 (a-1, b-1) において、内側サブチャンネル (Point-C および D) の方が周辺サブチャンネル (Point-A および B) に比べ温度は高く、閉塞物中心部へ向かうにつれ、Point-A より Point-B の方、Point-C より Point-D の方が温度上昇値は増加している。スぺーサワイヤの巻き付け方向は左巻 (試験体を上から見たとき) であるから、スぺーサワイヤによるスワールフローは Pin407 から Pin410 の方向であり、Point-B (Pin409) よりも Point-A (Pin410) の方が温度は高くなると予想されていた。しかし、実験結果では Point-B および Point-D の方が温度は高く、閉塞物内部ではスワールフローの影響は無視し得る程小さいと考えられる (ただし、試験体では閉塞物内部のスぺーサワイヤを閉塞物上下端面で切断し取り外している)。Point-E では流量の増加と共に温度上昇値は減少し、出力の増加に伴って温度は増加している。Point-A から C では流量・出力に対して Point-E ほどの強い依存性はないが、Point-E に最も近い Point-D では、Point-E と同様な傾向を示している。流体と接する閉塞物側面のサブチャンネルと閉塞物内側のサブチャンネルでは温度分布の傾向が異なると考えられる。

一方、低出力条件 (a-2) では、周辺サブチャンネル Point-B での温度上昇値 (ナトリウム温度) が内側サブチャンネル Point-C および Point-D と同程度となり、高出力条件時に比べて水平方向の温度勾配は小さくなっている。低流量条件 (b-2) において高出力時 (Case-6) には水平方向に大きな温度勾配がついているが、低出力

時 (Case-5) では温度勾配は小さくなっている。

Figure5-6.2 に CC 断面 (閉塞物上部中央  $z/H=-0.286$ ) における閉塞サブチャンネル内のナトリウム温度の水平方向分布を示す。また、Figure5-6.3 に CC 断面 (閉塞物上部  $z/H=-0.286$ ) における閉塞サブチャンネルに接するピン表面温度の水平方向分布を示す。Figure5-6.2 に示す閉塞サブチャンネル内のナトリウム温度の水平方向分布は、Figure5-6.1 に示した CB 断面での温度分布と比べて、CC 断面の方が閉塞物上部に位置しているため温度上昇値は高いが、出力・流量変化に対する変化の傾向は一致している。

高出力・流量条件 (a-1,b-1) では内側サブチャンネル (Point-C および D) の方が周辺サブチャンネル (Point-A および B) に比べ温度は高く、閉塞物中心部へ向かうにつれ温度上昇値は増加し、スペーサワイヤによるスワールフローの影響は無視し得る程小さい。Point-E では他の Point-A~D とは異なり、流量の増加と共に温度上昇値は減少し、出力の増加に伴って温度は増加し強い依存性を示す。一方、低出力・流量条件時 (a-2,b-2) では、低出力時 (Power=10[%]) には水平方向温度勾配が小さく比較的平坦な温度分布となっている。

Figure5-6.4 に CD 断面 (閉塞物上端部  $z/H=-0.0714$ ) における閉塞サブチャンネル内のナトリウム温度の水平方向分布を示す。また、Figure5-6.5 に CD 断面 (閉塞物上端部  $z/H=-0.0714$ ) における閉塞サブチャンネルに接するピン表面温度の水平方向分布を示す。

Figure5-6.1 から Figure5-6.3 に示した CB 断面から CC 断面での温度分布と比べて、出力・流量変化に対する温度上昇値の傾向はほぼ一致している。ただし、高出力・流量条件 (a-1,b-1) で、CB 断面および CC 断面において Point-E の位置で温度が最も高くなる場合があったが、CD 断面では閉塞物中心部の Point-D および d で最も温度上昇値が高くなっている。一方、低出力・流量条件時 (a-2,b-2) には、低出力時 (Power=10[%]) に水平方向温度勾配が小さく比較的平坦な温度分布となっており、高出力・流量条件 (a-1,b-1) とは分布形状が異なっている。

閉塞サブチャンネル内の Point-E では健全サブチャンネルに接しているため、閉塞物側面から健全サブチャンネルへの冷却材の流入出が存在し、閉塞物内部にある他の Point よりも健全流路内流れ (流入流量条件) の影響を受け易いと考えられる。ただし、熱電対設置用の人為的な空隙による本試験固有の現象である可能性については解析結果と併せて検討する。

### 5. 2. 3 周方向ピン表面温度分布

Figure5-7 にピン番号 305 に取り付けられた閉塞物上端から 10[mm]下方 (上流側) にある CC 断面でのピン周方向温度分布を示す。

ピン表面温度は閉塞物から最も遠く健全サブチャンネル内にある Point-h で温度上昇値が最も低く、健全サブチャンネルに近い Point-e よりも内側の Point-f の方が温度上昇値は高い。閉塞物内部では健全サブチャンネルに近い Point-e と内側 Point-f との間に温度差があり、閉塞物内部で水平方向に温度分布が生じていることが分かる。健全サブチャンネルと閉塞物との境界（閉塞物側面）を挟んだ Point-e と Point-g との間には急峻な温度勾配がついている。健全サブチャンネル内にある Point-h と Point-g との温度差は小さく、サブチャンネル内で大きな温度差は生じていないことが分かる。閉塞物内部 (Point-e, f) において、低出力・流量条件 (a-2, b-2) では閉塞物内部にあるヒータ表面 (Point-f) の温度上昇値が低下して周方向の温度勾配は高出力・流量条件時 (a-1, b-1) に比べて緩やかになる。

### 5. 3 温度変動特性

Figure5-8.1 から Figure5-8.7 に各測定点での温度変動強度を式 (16) で求め、式 (14) で求められる閉塞物領域 (高さ 35[mm]) で生じる温度上昇値  $dT_b$  で規格化し、各試験条件 (出力/流量) に対して示す。

$$T' = \frac{1}{dT_b} \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (T_i - \bar{T})^2} \quad (16)$$

Figure5-8.1 に閉塞物上流側の (a) BA 断面 ( $z=-155$ [mm]) および (b) BB 断面 ( $z=-45$ [mm]) における温度変動強度を各試験条件 (出力/流量) に対して示す。閉塞物上流側の (a) BA 断面 ( $z=-155$ [mm]) および (b) BB 断面 ( $z=-45$ [mm]) では温度変動強度が (出力/流量) 比の増加に対して減少の傾向を示し、実機運転条件 (出力/流量=1.0) において温度変動強度は、閉塞物領域で生じる温度上昇値の 20[%]以下となっている。

Figure5-8.2(a)に閉塞物中央部 ( $z=-17.5$ [mm]) を通る CB 断面における温度変動特性について示す。閉塞物内部 (Point-B,-C,-D) と健全サブチャンネル内 (Point-I,-G) では温度変動強度に大きな違いは見られない。また、Figure5-8.2(b) に CB 断面における閉塞物内部のサブチャンネル中心の Point-C とピン表面での Point-c での温度変動について示す。温度変動特性に関してピン表面とサブチャンネル中心との間には大きな違いはなく、CB 断面においては閉塞物が存在することによる温度変動強度への影響はないと考えられる。

Figure5-8.3 に閉塞物上部 ( $z=-10.0$ [mm]) を通る CC 断面における温度変動特性について示す。また、Figure5-8.4 には閉塞物上端部 ( $z=-5.0$ [mm]) を通る CD 断面における温度変動特性について示す。閉塞物内部 (Point-A~D) と健全サブチャンネル内 (Point-I~N) とでは温度変動強度に大きな違いは見られず、ピン表面とサブチャンネル中心との間にも大きな違いはない。ただし、閉塞物内部では健全サブチャンネル内に比べて温度が高く、局所温度に対する相対的な温度変動強度は閉塞物内部では健全サブチャンネル内に比べて小さくなっている。

Figure5-8.5 に閉塞物下流の DA 断面から DD 断面までの後流域における温度変動特性について示す。閉塞物内部 (Fig.5-8.2~Fig.5-8.4) とは異なり、温度変動は健全サブチャンネル内 (Point-I~N) と比べて後流域 (Point-A~D) の方が大きくなっている。閉塞物上端に近い DA 断面よりも下流の DC 断面の方が温度変動強度は大きくなる傾向にある。

Figure5-8.6 に Figure5-8.5 と同じく閉塞物下流の後流域、ただし、DD 断面から DH 断面にかけての温度変動特性について示す。Figure5-8.5 (c) で見られた DC 断面における後流域内の強い温度変動は、DD 断面においてわずかに減衰するが、健全サブチャンネルに比べて温度変動強度は強くなっている。DF 断面では後流域で



生じていた強い温度変動も健全サブチャンネル内の温度変動と同程度となり、第5.1.1節で示したように後流域はDF断面では消滅していることが分かる。閉塞物が存在することにより閉塞物下流では後流域が形成され、後流域内部では流れが乱れているため温度変動が強くなると考えられる。ただし、閉塞物下流で生じる大きな温度変動は、後流域の消滅とともに健全サブチャンネルの温度変動と同等となる。

Figure5-8.7 にピン番号 305 の周囲に取り付けられた熱電対の温度変動強度について示す。Figure5-8.3 で示したようにピン表面の温度変動強度とサブチャンネル中心のナトリウム温度変動強度とは同程度であり、ピンの周方向の分布を見ても閉塞物内部および健全サブチャンネルに接するピン表面で、温度変動強度はほぼ一致していることが分かる。

## 5. 4 試験部圧力損失特性

熱電対による温度測定と同時に試験体内の圧力損失を測定した。測定位置は閉塞物上端から約 1[m] 上流側と、閉塞物上端から下流側約 760 [mm] 下流側で圧力を測定し、試験部の圧力損失を求めた。燃料集合体内の圧力損失は、Cheng と Todreas によって経験式（相関式）が求められている<sup>[15]</sup>。燃料集合体内の圧力損失相関式は層流領域、遷移領域、乱流領域に分けて種々の実験結果をもとに求められており、以下のように定義されている。

$$dP = f_i \frac{l}{D_e} \frac{\rho W^2}{2} \quad (17)$$

$$f_i = \left( \frac{dP}{l} \right) / \left( \frac{\rho W^2}{2D_e} \right)$$

ここで、 $f_i$  は抵抗係数であるが、層流領域、遷移領域および乱流領域でそれぞれ異なった値を用いる。まず、層流から遷移領域への層流遷移レイノルズ数 ( $Re_{bL}$ )、遷移領域から乱流領域への乱流遷移レイノルズ数 ( $Re_{bT}$ ) を求める必要がある。これら遷移 Re 数はピン中心間距離（ピンピッチ）とピン径で定義されており次の式で求められる。

$$\log_{10} \left( \frac{Re_{bL}}{300} \right) = 1.7(\beta - 1.0) \quad (18)$$

$$\log_{10} \left( \frac{Re_{bT}}{10000} \right) = 0.7(\beta - 1.0)$$

$$\beta = \frac{D_{Pitch}}{D_{Pin}}$$

本試験体のピンピッチは  $D_{Pitch}=9.65$  [mm]、ピン径は  $D_{Pin}=8.5$  [mm] であるから、 $\beta = D_{Pitch}/D_{Pin}=1.135$  となりこれを用いて計算すると遷移 Re 数は以下の通りになる。

$$Re_{bL} = 5.09 \times 10^2$$

$$Re_{bT} = 1.24 \times 10^4$$

本試験の入口 Re 数は  $5.45 \times 10^3 \sim 5.09 \times 10^4$  であるから、遷移領域から乱流領域にかけての範囲となる。各領域での抵抗係数は以下のように与えられる。

$$Re_{bL} \geq Re$$

$$C_{fbL} = \left\{ -974.6 + 1612.0\beta - 598.5\beta^2 \right\} \times (L/D_{Pin})^{0.06-0.085\beta} \quad (19)$$

$$f_i = C_{fbL}/Re$$

$$Re_{bL} < Re < Re_{bT}$$

$$f_i = \left( \frac{C_{fbT}}{Re^{0.18}} \right) \psi^{1/3} + \left( \frac{C_{fbL}}{Re} \right) (1-\psi)^{1/3} \quad (20)$$

$$\psi = [\log(Re) - \{1.7\beta + 0.78\}] / (2.52 - \beta)$$

$$Re \leq Re_{bT}$$

$$C_{fbT} = \left[ 0.8063 - 0.9022 \times \log_{10}(L/D_{Pin}) + 0.3526 \{ \log_{10}(L/D_{Pin}) \}^2 \right] \times \beta^{9.7} (L/D_{Pin})^{1.78-2.0\beta} \quad (21)$$

Figure5-11 に式 (19~21) から求められる圧力損失を示す。高 Re 数領域 ( $Re \geq Re_{bT} = 12400$ ) で実験の方が大きい圧力損失を示し、式 (20,21) に比べて 10[%] ほど高い値となっている。一方、低 Re 数領域 ( $Re < Re_{bT}$ ) ではほぼ式 (19) に一致している。ここで、閉塞物が存在し流路断面積が変化したことによる形状損失の効果を考える。閉塞物は高さ 35[mm]と集合体発熱長さ (650[mm]) に比べて小さいため、閉塞物をオリフィスと見なして閉塞物による形状圧力損失を見積もる<sup>[16]</sup>。周辺 2 列の閉塞物による閉塞率 (閉塞物断面積 / 全流路断面積) は 0.19 となり、健全流路断面積は閉塞物前面の約 80[%]に減少する。

$$dP = \zeta \frac{\rho W^2}{2}$$

$$\zeta = 2.7 \times (1-\sigma)(1-\sigma^2) / \sigma^2 = 0.269$$

$$\sigma = \frac{(1 - S_{blockage})}{S_{subchannel}} = 0.81$$

$$dP = \left( f_i \frac{l}{D_e} + \zeta \right) \cdot \frac{\rho W^2}{2}$$

$$dP = \left( f_i \frac{1.78}{0.00324} + 0.269 \right) \cdot \frac{\rho W^2}{2}$$

$$\frac{dP}{(\rho W^2 / 2 D_e)} = (549.4 \cdot f_i + 0.269) \quad (22)$$

よって、閉塞物をオリフィスと見なした場合の形状損失を考慮しても、考慮しない場合よりも 1~2[%]ほど圧力損失は上昇するにとどまり、実験結果よりも低い値となった。閉塞物が存在する場合、単純な流路断面積変化よりも大きな圧力損失が生じていることが分かる。

## 6. 考 察

### 6. 1 閉塞物周辺の流動場

#### 6. 1. 1 閉塞物後流域

Figure5-1.1 から Figure5-1.4 の鉛直方向温度分布で示したように、後流域では特徴的な鉛直方向温度分布 (M型およびC型) を示す。Figure6-1.1 に (出力/流量) 比が 1.0 の場合について、閉塞部 (Point-B および Point-C) における鉛直方向ナトリウム温度分布を示す。Figure6-1.1(a) は高出力・流量条件の場合 ( $P=F=40[\%]$ ) であり、Figure6-1.1(b) は低出力・流量条件の場合 ( $P=F=10[\%]$ ) である。縦軸は式 (1) で求められる出入口温度差で規格化した入口温度からの温度上昇値を示している。横軸は、BB 断面 ( $z^*=-0.225$ ) から DH 断面 ( $z^*=+0.5$ ) までを示し、 $z^* (=z/L)$  は閉塞物上端からの高さ  $z$  をスペーサワイヤの巻ピッチ  $L (=200[\text{mm}])$  で規格化した閉塞物上端からの距離を示している。

同じ (出力/流量) 比であっても、高出力・流量条件(a)の場合には Point-B (ピン番号 409) および Point-C (ピン番号 307) で、閉塞物上端から下流に行くにつれ温度が上昇し、一旦温度が低下して再度高温となる M 型の温度分布となる。一方、低出力・流量条件(b)では閉塞物上端近傍で最高温度となりその後低下する温度分布 (C型) となっている。

Figure6-1.2 に Point-B における後流域での鉛直方向温度分布を M 型および C 型に分類し、試験条件との関係を示す。低出力条件 (出力 30[%]以下) の時に C 型分布となり、高出力条件 (>30[%]) では M 型分布になるといった傾向がある。同様に Point-C における後流域での鉛直方向温度分布を M 型および C 型に分類して Fig. 6-2.3 に示す。Point-B と同じく低出力条件 (出力 30[%]以下) の時に C 型分布となりやすく、高出力条件 (>30[%]) では M 型分布になりやすい傾向がある。また、この M 型分布が熱電対の不具合による誤指示でないことは確認している。

低出力条件の場合、閉塞物内部では水平断面内で一様な温度分布に近づき、一様な鉛直方向流れとなると考えられる。一方、高出力条件の場合、閉塞物内部の周辺 (Point-A, -B) と内側 (Point-B, -C) では同じ水平方向断面内で温度差が生じ内側で温度が高くなっており、一様な流れ場とはならないと考えられる。この水平方向温度分布の違いあるいは閉塞物内部の流れ場の違いが、閉塞物下流側の後流域における特徴的な温度分布を示す原因となっていると推定される。また、後流域の閉塞物上端近傍では健全流路から閉塞流路への流入が存在し、この流れと閉塞物上端から流出する鉛直方向流れにより複雑な流れ場が形成されていると考えられる。ただし、ナトリウム試験では後流域の流速分布を測定することができないため解析により流速分布を解き、この後流域での特徴的な温度分布について検討していくこととする。

## 6. 1. 2 閉塞物側面近傍

Figure6-1.4 に閉塞物に接する健全サブチャンネル (Point-G, H, I) におけるナトリウム温度の水平方向分布を示し、(出力/流量)比が実機条件と同じ1となる試験条件について上段 (a) に高出力・流量条件 (Case-4, P=F=40[%]) および下段 (b) には低出力・流量条件 (Case-8, P=F=10[%]) の場合を示す。縦軸は入口温度からの温度上昇値であり、横軸は健全サブチャンネル (Point-G, H, I) の位置を示している。

Figure6-1.4(a)に示す高出力・流量条件 (Case-4, P=F=40[%]) の場合と、Figure6-1.4(b)に示す低出力・流量条件 (Case-8, P=F=10[%]) では温度分布形状に大きな違いは認められない。Point-G および Point-I は閉塞物に接している健全サブチャンネル中心でのナトリウム温度であり、Point-H はヒータピンを隔て Point-G と Point-I に挟まれている健全サブチャンネル中心でのナトリウム温度である。閉塞物上流側の BB 断面 ( $z=-45$ [mm]) では Point-G および Point-I よりも Point-H の方が集合体中心部に近いため温度は高くなる。閉塞物が存在する領域にある CA 断面 ( $z=-25.0$ [mm]) では、Point-H の温度が BB 断面での温度に比べて大きく低下しているのに対し、Point-G での温度低下は小さく、Point-I では僅かに上昇している。閉塞物下端では閉塞物を避ける水平方向流れによって、周辺の低温ナトリウムが集合体中心部へ流れ込むため、Point-H の CA 断面では BB 断面の値よりも温度が低下し、その後下流の CD 断面では温度が上昇し Point-G および Point-I と同等な温度上昇値を示している。一方、閉塞物に接している Point-G および Point-I においても閉塞物下端では水平方向流れによって周辺の低温ナトリウムは内側のサブチャンネルに流れ込むが、閉塞物が健全サブチャンネルに接する側面で閉塞物内部の温度の高いナトリウムが健全サブチャンネル内へ流出するため、閉塞物に接する Point-G および Point-I ではヒータピンを隔てた Point-H に比べて温度が高かったと考えられる。閉塞物下流の後流域にある DD 断面 ( $z=25$ [mm])、さらに下流の DF 断面 ( $z=50$ [mm]) では、Point-H で温度が高く Point-G および Point-I では温度が低くなっており閉塞物上流側の BB 断面と同様な温度分布を示している。閉塞物に接する健全サブチャンネル内では、閉塞物が存在することによるナトリウム温度分布への影響は、閉塞物下端から後流域が消滅する位置までの範囲であることが分かる。

水を作動流体とする4サブチャンネル試験から、閉塞物下部では閉塞物側面に渦が生じ局所的に圧力が低下して、閉塞物内部から健全流路への流出があることが明らかとなっている。本試験においても、健全サブチャンネルに接する閉塞物側面 (Point-G および I) では、閉塞物下端に衝突した流れが水平方向へ流れの向きを変え流線が急激に変化して閉塞物下端で流れがはく離して閉塞物下部側面に渦が生じていると考えられる。4サブチャンネル試験体を用いた可視化試験から側面渦の大きさ (再付着点の位置) は、以下式で評価できる。

$$\begin{aligned} z/D_B &= 1.434 \times 10^{-5} \cdot \text{Re} + 0.7902 \\ &= 1.65 \quad (\text{Re} = 6.0 \times 10^4) \end{aligned} \quad (23)$$

本ナトリウム試験条件のうち最大流量の  $\text{Re} = 6.0 \times 10^4$  では、 $D_B = 27.514[\text{mm}]$  を代入した場合  $z = 45.4[\text{mm}]$  となり、本試験で用いた閉塞物の高さ  $35[\text{mm}]$  を越える。また、最小流量  $\text{Re} = 5.5 \times 10^3$  では  $z = 23.9[\text{mm}]$  となり、閉塞物上部に再付着点が存在する。再付着点が閉塞物上端 ( $z = 35[\text{mm}]$ ) となるのは、 $\text{Re} = 3.36 \times 10^4$  の場合である。このように、閉塞物側面では閉塞物下端での流れの剥離に伴う渦が生じ、閉塞物側面では閉塞物内部から健全サブチャンネル内への流出が存在していた可能性が高い。

## 6. 2 閉塞物内水平方向熱伝達特性

4 サブチャンネル水流動試験および解析から、閉塞物内のピン表面温度および閉塞サブチャンネル内の冷却材温度はピン出力に比例し、閉塞物下端近傍では閉塞物を避ける流れが生じていることが明らかとなっている[4,5,8]。集合体入口流量の増加に従って冷却効果が増大し閉塞物内部の温度は低下するが、閉塞物内部を通過する冷却材流量は集合体入口流量に対して比例の関係ではなく、健全バンドル体系とは異なり冷却材温度は流量に対して反比例の関係にはない。そこで、閉塞物内部のピン表面温度  $T_p$  および閉塞サブチャンネル内ナトリウム温度  $T_s$  について、第5章で行った無次元化とは異なり出力条件のみで規格化し、流量条件 (Re 数) に対する閉塞物内部の温度分布の変化を調べる。

また、閉塞物に接するピン表面近傍の熱伝達は、ピン表面/冷却材/閉塞物間で相互に干渉し合う複雑な伝熱パスとなっていると考えられる[8]。これら複雑な伝熱パスを全て含みピン表面から閉塞サブチャンネル中心へのマクロな水平方向熱伝達として捉え、流動条件 (Pe 数) に対する特性を調べる。サブチャンネル解析においては、1つのサブチャンネルを1つのメッシュとし、サブチャンネル中心で物理量を代表させており、ピン表面/サブチャンネル中心間のマクロな熱伝達の評価が重要である。

Figure6-2.1 から Figure6-2.4 に、閉塞物内部の出力により規格化した無次元温度上昇値と流量との関係、およびピン表面/サブチャンネル中心間の水平方向温度差から求めた水平方向熱伝達特性について示す。

流量条件 (Re 数) に対する閉塞物内部の温度分布の変化を調べるため、閉塞物下端面において流量条件と出力条件から求められる断面平均温度  $T_{bin}$  を基準とした閉塞物内部のサブチャンネル中心およびピン表面での温度上昇値 (式 (15) 参照) を、熱伝導率  $\lambda$  [W/m] および出力条件  $P$  [W] により規格化した無次元温度上昇値  $dT_s'$ 、 $dT_p'$  (左縦軸) と流量条件 (Re 数) との関係を示す。また、無次元サブチャンネル中心温度上昇値  $dT_s'$  と無次元ピン表面温度上昇値  $dT_p'$  との温度差 (右縦軸) について示す。第 6.3 節で議論する集合体内最高温度の評価を考慮して閉塞物下端面での位置を基準とし、無次元数を求める際の物性値は基本的に閉塞物下端位置での局所温度を用いて評価している。ここで、 $q'$  はピン表面熱流束 [W/m<sup>2</sup>]、 $D_e$  [m] は水力等価直径、 $D_{pin}$  [m] はピン径、 $L_h$  [m] は発熱長、 $\mu$  [kg/(m·s)] は粘性係数、 $q$  [W/m] はピン1本当たりの線出力密度である。

$$Re = \frac{D_e \cdot \{\rho(T_m) \cdot W\}}{\mu(T_{bin})} \quad (24)$$

$$dT_p' = \frac{T_p - T_{bin}}{\frac{q'' \cdot D_{pin}}{\lambda(T_{bin})}}, \quad dT_s' = \frac{T_s - T_{bin}}{\frac{q'' \cdot D_{pin}}{\lambda(T_{bin})}} \quad (25)$$

$$q'' = \frac{P}{L_h \cdot (\pi \cdot D_{pin}) \cdot 37} = \frac{q}{\pi \cdot D_{pin}}$$

式 (24) で求められる Re 数と式 (26) により求められるペクレ数 ( $Pe = Re \times Pr$ ) に対するピン表面温度  $T_p$  とサブチャンネル中心ナトリウム温度  $T_s$  との水平方向温度差  $dT_h$ 、およびピン表面熱流束  $q''$  [ $W/m^2$ ] により求められる熱伝達特性 (ヌセルト数 Nu、式 (28) 参照) の関係について示す。低 Re 数 ( $Re \leq 10000$ ) の場合には、ヒータピン表面温度  $T_p$  よりもサブチャンネル中心ナトリウム温度  $T_s$  の方が高くなり、水平方向温度差  $dT_h$  が負の値となる場合がある。また、第 5 章で低流量条件と高流量条件では、閉塞物内部の温度分布特性が異なることを明らかにした。さらに、第 6.3 節で述べる集合体内最高温度の評価では高流量条件での熱伝達特性が重要であるから、 $Pe > 100$  の条件について式 (28) に従って熱伝達特性 (Nu 数) を評価することとした。また、基準となる位置 (閉塞物下端) での温度条件 (物性値) の違いを考慮し、Nu 数の評価に Pe 数を用いた。

$$Pr = \frac{C_p(T_{bin}) \cdot \mu(T_{bin})}{\lambda(T_{bin})} \quad (26)$$

$$Pe = Re \times Pr \quad (27)$$

$$Nu = \frac{h \cdot D_p}{\lambda(T_s)} = \frac{q''}{dT_h} \frac{D_p}{\lambda(T_s)}, \quad h = \frac{q''}{dT_h} \quad (28)$$

$$dT_h = T_p - T_s \quad (29)$$

Figure6-2.1 および Figure6-2.2 に閉塞物内部の周辺サブチャンネル中心 (Pont-A, B) およびヒータピン表面 (Pont-a, b) での無次元温度上昇値と流量条件 (Re 数) との関係、および水平方向熱伝達特性 (Nu 数) について、CC 断面 ( $z/H = -0.29$ ) および CD 断面 ( $z/H = -0.07$ ) の各断面で示す。左側のグラフ(1)には無次元温度上昇値と流量条件 (Re 数) との関係を示し、右側のグラフ(2)には水平方向熱伝達特性 (Nu 数) と流動条件 (Pe 数) との関係を示す。無次元温度上昇値と流量条件 (Re 数) との関係を示すグラフ(1)中の実線は、サブチャンネル中心での無次元ナトリウム温度上昇値の傾向を示すため、最小二乗法によって求めた近似式である。Figure6-2.1 には周辺サブチャンネル中心 (Pont-A) およびヒータピン表面 (Pont-a) について、Figure6-2.2 には周辺サブチャンネル中心 (Pont-B) およびヒータピン表面 (Pont-b) について示す。

Figure6-2.1 および Figure6-2.2 の左側のグラフ(1)に示すように、Re 数の増加に



対して閉塞物内部の周辺サブチャンネル中心 (Point-A, B) での無次元ナトリウム温度上昇値は減少する。閉塞物内部では通過流量が集合体入口での流量に対して比例していないため、温度上昇値は集合体入口流量により評価した  $Re$  数に対して反比例せず、累乗の係数は-1よりも小さくなる。ポラス状閉塞物内部の流動抵抗が閉塞物前面での流量条件に対して非線形であること、閉塞物下端に衝突する流体の圧力および閉塞物周辺に形成される渦の強さ等が原因で、閉塞物内部の通過流量が集合体入口流量に比例しないと考えられる。一方、サブチャンネル中心温度とピン表面温度との温度差について、高  $Re$  数側 ( $Re > 20000$ ) では流量の増加に伴ってほぼ単調に減少するが、低  $Re$  数側 ( $Re < 20000$ ) では高  $Re$  数側とは傾向が異なりデータが点在している。一般に、閉塞物内部の流動抵抗は、流速が遅い場合には摩擦抵抗 (流速に比例) が支配的であるが、流速の増加に伴って形状抵抗 (流速の二乗に比例) が支配的となり、閉塞物内部の流動抵抗は流量条件に対して非線形となる。つまり、 $Re = 20000$  程度が周辺サブチャンネル (Point-A, B) における、閉塞物内部の流動抵抗の遷移境界であったと考えられる。

Figure6-2.1 および Figure6-2.2 の右側のグラフ(2)に示す熱伝達特性に関して、高  $Pe$  数側 ( $Pe > 100$ ) では  $Nu$  数が  $Pe$  数の増加に伴って単調に増加する。 $Pe$  数に対する  $Nu$  数の傾向および絶対値は  $CC$  断面および  $CD$  断面でほぼ等しいことから、周辺サブチャンネル (Point-A, B) においては鉛直方向流れが支配的であり、温度差一定のまま閉塞サブチャンネル内温度およびピン表面温度が流れ方向に上昇して熱伝達特性が一致したと考えられる。

Figure6-2.3 および Figure6-2.4 に閉塞物内部の周辺サブチャンネル中心 (Pont-C, D) およびヒータピン表面 (Pont-c, d) での無次元温度上昇値と流量条件 ( $Re$  数) との関係、および水平方向熱伝達特性 ( $Nu$  数) について、 $CC$  断面 ( $z/H = -0.29$ ) および  $CD$  断面 ( $z/H = -0.07$ ) の各断面で示す。左側のグラフ(1)には無次元温度上昇値と流量条件 ( $Re$  数) との関係を示し、右側のグラフ(2)には水平方向熱伝達特性 ( $Nu$  数) と流動条件 ( $Pe$  数) との関係を示す。無次元温度上昇値と流量条件 ( $Re$  数) との関係を示すグラフ(1)中の実線は、サブチャンネル中心での無次元ナトリウム温度上昇値の傾向を示すため、最小二乗法によって求めた近似式である。Figure6-2.3 には周辺サブチャンネル中心 (Pont-C) およびヒータピン表面 (Pont-c) について、Figure6-2.4 には周辺サブチャンネル中心 (Pont-D) およびヒータピン表面 (Pont-d) について示す。

Figure6-2.3 および Figure6-2.4 の左側のグラフ(1)に示すように、内側サブチャンネル中心 (Point-C, D) における無次元ナトリウム温度上昇値は、周辺サブチャンネルと同様に  $Re$  数に対して反比例せず、閉塞物内部を通過する冷却材流量は集合体入口流量 ( $Re$  数) によって異なることが分かる。また、閉塞物中央  $CB$  断面から閉塞物上端近傍  $CD$  断面へと閉塞物の高さ方向に上昇するに従って、無次元ナトリウム温度上昇値の傾向を示す近似式の累乗の係数が小さくなっている。4サブチャンネル水流動試験および解析から、閉塞物下端から閉塞物内部に流入した冷却材が、閉塞物側面から健全サブチャンネルへ流出することが分かっている。閉塞物の高さ

方向に累乗係数が小さくなっていく、すなわち、本ナトリウム試験においても閉塞物内部で閉塞物側面から健全サブチャンネルへ流出する流れが生じ、冷却材が健全サブチャンネル側へ流出するため、閉塞物上端部では閉塞物内部を通過する流量が減少して流量に対する温度の変化量が小さくなったと考えられる。

ピン表面 (Point-c) とサブチャンネル中心 (point-C) との無次元温度差は、Re 数が 20000 程度を境界として傾向が異なっている。Re 数が 20000 よりも小さい場合、Re 数の減少に従い温度差は減少の傾向を示し、CD 断面においては水平方向の温度差が負になり、ピン表面温度よりもサブチャンネル中心温度の方が高くなる場合がある。一方、Re 数が 20000 よりも大きい場合、CB 断面および CC 断面では Re 数の増加に伴って温度差は減少していくが、CD 断面では逆に増加の傾向を示している。

Re<20000 の低流量条件の場合、冷却材は流動抵抗が比較的小さい閉塞物と構造物 (ピンおよびラップ管壁) との空隙部を選択的に流れ、ピン表面近傍のみが冷却されピン表面温度が低下して水平方向温度差が減少したと考えられる。水平方向温度差が負となる原因については、熱電対の取り付けや閉塞物の設置状態によってピンと閉塞物との接触状態が均一でなく、ピン表面の冷却が局所的にしか行われずに入熱と除熱のバランスが崩れていた可能性が考えられるが、バンドル体系を対象とした解析等により閉塞物内外の流れ場などの情報と併せて検討していく。このことは逆に、閉塞物内部の温度分布を解析する上で、閉塞物内部の空隙率分布および閉塞物とピンとの接触状態について考慮することが重要であることを示している。

Re>20000 の場合、CB 断面および CC 断面では Re 数の増加に伴って水平方向温度差は減少しているが、CD 断面では傾向が他の断面とは異なっている。先に述べた様に閉塞物内部では、閉塞物下端から流入した冷却材が閉塞物側面から健全サブチャンネルへ流出する流れが存在している。この流れは、ポラス状閉塞物内部の流動抵抗、閉塞物下端に衝突する流体の圧力および閉塞物周辺に形成される渦の強さ等の影響を大きく受ける。CC 断面および CD 断面で、閉塞物下端から流入した冷却材が閉塞物側面から健全流路への流出し、CD 断面では閉塞物内部を通過する流量が大幅に減少して他の断面と傾向が異なったと考えられる。

### 6. 3 実機条件での最高温度評価

本試験体では閉塞物が発熱部中央に設置されているが、集合体入口部に閉塞物が存在する場合、出力・流量条件によっては閉塞物内部よりも発熱部上端の方が温度が高い場合が考えられる。集合体内の最高温度を示す位置は閉塞物の存在する位置に依存するため、実験結果を外挿して任意の高さに存在する閉塞物の閉塞物内部あるいは後流域内で示す最高温度を評価する際には注意が必要である。本試験体系で閉塞物領域（CA断面からCD断面）および閉塞物下流の後流域（DA断面からDF断面）に分けて最高温度を評価し、任意の高さにおける実機条件下での最高温度を評価する。

Figure6-3.1に閉塞物内部(CA断面からCD断面)および閉塞物下流の後流域(DA断面からDF断面)の各領域において、各試験条件(出力/流量)で最高温度を示した熱電対の設置位置(計測チャンネル)を示す。また、熱電対の設置位置と最高温度を示した試験ケース数について、閉塞物内部(CA断面からCD断面)をTable 10-1に示し、後流域(DA断面からDF断面)をTable 10-2に示す。閉塞物内部では閉塞物上部のCD断面( $z=-2.5[\text{m}]$ )で最高温度を示し、全試験条件(39ケース)の約76.9[%]にあたる30ケースが閉塞物上端から2.5[mm]下方のヒータピン表面にある計測点 Point-d (TP-306CD)で最高温度を示した。後流域ではDA断面( $z=+1.0[\text{mm}]$ )からDC断面( $z=+15.0[\text{mm}]$ )までの閉塞物上端近傍で最高温度を示し高さ(熱電対の位置)は一定していない。Figure6-3.2に最高温度を示した熱電対(チャンネル番号)と試験条件との関係を示す。Figure6-3.2(a)に示す閉塞物内部では、出力が10[%]の場合に周辺サブチャンネルに接するヒータピン表面 Point-b (TP-409CD, 98ch)で最高温度となり、高出力(>10[%])の場合には内側の閉塞サブチャンネルに接するヒータピン表面 Point-d (TP-306CD, 91ch)および Point-c (TP-307CD, 93ch)で最高温度となっている。Figure6-3.2(b)に示す後流域では、最高温度を示す位置との試験条件との間に明確な関係は見られない。

Figure6-3.2で示した各試験条件で最高温度を示す熱電対(チャンネル番号)の内、他の熱電対の温度を包括し最も高い温度を示す熱電対の位置を調べる。Figure6-3.3に、式(15)で求められる閉塞物下端位置(発熱開始端から307.5[mm]上方)での温度上昇  $dT_{bin}$  および閉塞物上端位置(発熱開始端から342.5[mm]上方)での温度上昇  $dT_{bout}$  を用いて規格化して閉塞物内部の最高温度  $dT_b^*$  を試験条件(出力/流量)に対して示す。

$$dT_b^* = \frac{dT_{\max} - dT_{bin}}{dT_{bout} - dT_{bin}} = \frac{dT_{\max} - dT_{bin}}{dT_b} \quad (30)$$

Figure6-3.3に示す閉塞物内部では、Point-c (TP-307CD, 93ch) および Point-b (TP-409CD, 98ch) の温度上昇よりも Point-d (TP-306CD, 91ch) での温度上昇の方が大きいことが分かる。Figure6-3.4に後流域での無次元温度上昇値と試験条件

(出力/流量) との関係を示す。後流域での温度上昇値は Figure6-3.3 に示した Point-d (TP-306CD, 91ch) での温度上昇値を越えることはなく、全ての試験条件を包括して最高温度を示す位置は閉塞物内部のピン表面であることが分かる。従って、以降では Point-d に着目して評価を行う。

実機では 217 本ピンバンドル体系であるが、バンドルのスケール効果 (ピン本数) についての影響が明かでないため、ここでは試験体と同じ 37 本ピンバンドルとし、発熱長についてのみ試験体 0.65[m] から実機寸法と同じ 1[m] に拡張した体系とする。実機条件は最大線出力 42.2[kW/m]、入口質量流量 5.83[kg/s]、入口温度 395[°C] とする (第 3.1 節参照)。また、最大線出力 (42.2[kW/m]) と平均線出力 (34.4[kW/m]) との比 (ピーキング・ファクタ) は 1.21 とし、線出力分布については式 (31) で示すように発熱長  $L_b=1$ [m] にわたり  $\cos$  関数で実機条件を模擬している<sup>[17]</sup>。

$$q(z) = 42.2 \times \cos \left[ \frac{\pi}{1.4967} \left( z - \frac{L_b}{2} \right) \right] \quad (31)$$

$$\begin{aligned} Q(l) &= \int_0^l q(z) dz = \int_0^l \left\{ 42.2 \times \cos \left[ \frac{\pi}{1.4967} \left( z - \frac{L_b}{2} \right) \right] \right\} dz \\ &= 42.2 \times \frac{1.4967}{\pi} \left[ \sin \left\{ \frac{\pi}{1.4967} \left( l - \frac{L_b}{2} \right) \right\} + \sin \left\{ \frac{\pi}{1.4967} \frac{L_b}{2} \right\} \right] \end{aligned} \quad (32)$$

ここで、 $z, l$  は発熱開始点からの距離、 $L_b$  は発熱長 1[m]、 $Q(l)$  は発熱下端部から高さ  $l$  までの燃料ピン 1 本あたりの発熱量を示す。実機条件 (最大線出力 42.2[kW/m]、入口質量流量 5.83[kg/s]) のとき出入口温度上昇値は 175[°C] となり、集合体出口温度は 570[°C] となる。実機で生じる閉塞物条件として、本試験体と同じ閉塞物条件、周辺 2 列同時閉塞、粒子径 0.3[mm]、空隙率 40[%] を仮定する。上記の実機条件下における最高温度を示す閉塞物内上端部 (Point-d に相当する位置) でのピン表面温度の評価を行う。式 (32) および流量条件 (入口質量流量 5.83[kg/s]) から求められる健全バンドル体系での断面平均温度を求め、Figure6-2.4 に示した実験結果から、閉塞物が存在すると仮定した場合の CD 断面 Point-D に相当する位置での閉塞物内部のサブチャンネル内温度を求める。

Figure6-3.5 に実験結果から求めた閉塞サブチャンネル中心 Point-D での CD 断面における無次元温度上昇値と流量条件との関係 (式 (33)) を示す。式 (34) により実機条件下での閉塞サブチャンネル中心温度を求める (Fig.6-3.7 中の破線)。ただし、実験体系ではピンが一様発熱であるため出力密度は一定となるが、実機体系では出力密度が流れ方向に分布を持っており一定ではない。そこで、式 (35) に示すように閉塞物の高さ ( $L_b=0.035$ [m]) の範囲内での平均出力を求めて使用した。

$$dT'_s = \frac{T_s - T_{bin}}{q'' \cdot D_{pin} / \lambda(T_{bin})} \equiv A \cdot Re^{-B}, \quad Re = \frac{D_c \cdot \{\rho(T_{in}) \cdot W\}}{\mu(T_{bin})} \quad (33)$$

$$T_s = T_{bin} + \frac{q'' \cdot D_{pin}}{\lambda(T_{bin})} \times 8530.2 \text{Re}^{-0.8936} \quad (34)$$

$$q'' = \frac{Q(l_{bou}) - Q(l_{bin})}{L_b \cdot (\pi \cdot D_{pin})} \quad (35)$$

次に、Figure6-3.6 に示すように CD 断面における Point-d での熱伝達特性 (Nu 数) と流動条件 (Pe 数) との関係式を実験結果 (Fig.6-2.4 参照) から求め、式 (37) により実機条件下での閉塞ピン表面温度を推定した。

$$\text{Nu} = \frac{h \cdot D_{pin}}{\lambda(T_s)} = \frac{q''}{T_p - T_s} \frac{D_{pin}}{\lambda(T_s)} \equiv A \text{Pe}^{-B} \quad (36)$$

$$T_p = T_s + \frac{q'' D_{pin}}{\lambda(T_s)} \cdot \frac{1}{29.891 \text{Pe}^{-0.3023}} \quad (37)$$

$$\text{Pe} = \text{Re} \times \text{Pr}, \quad \text{Re} = \frac{D_e \cdot \{\rho(T_m) \cdot W\}}{\mu(T_{bin})}, \quad \text{Pr} = \frac{C_p(T_{bin}) \cdot \mu(T_{bin})}{\lambda(T_{bin})}$$

Figure6-3.7 に 37 本ピンバンドル体系における実機条件下 (最大線出力 42.2[kW/m]、入口質量流量 5.83[kg/s]) での集合体内鉛直方向温度分布について示す。細実線は健全バンドルにおける断面平均ナトリウム温度、破線は閉塞物上端から 2.5[mm]下方にある Point-D に相当する位置での閉塞サブチャンネル内ナトリウム温度、太実線は最高温度となる Point-d に相当する位置でのピン表面温度を示す。燃料集合体上部に閉塞物が生じた場合、最も温度が高くなり 638[°C]となることが推定される。第 4.2 節で示した出入口温度差で無次元化した温度上昇値に対する不確かさ 11.9[%]を考慮すると、ピン表面温度は 667[°C]となる。

Figure6-3.5 および Figure6-3.6 に示した 37 本ピンバンドル試験で得られた関係式 (34) および式 (37) を適用し、スケール効果 (ピン本数) の影響は明らかではないが、実機 217 本ピンバンドル体系での最高温度を評価する。閉塞条件は、粒子径 0.3[mm]、空隙率 40[%]で、周辺 2 列のサブチャンネルが同時に閉塞した場合を仮定する。発熱長は 1[m]、最大線出力 42.2[kW/m] (平均 34.4[kW/m])、入口質量流量 30.2[kg/s]、入口温度 395[°C]とする (第 3.1 節参照)。Figure6-3.8 に 37 ピンバンドル体系での評価 (Fig.6-3.7) と同様に、閉塞物内部の Point-d に相当する位置でのピン表面温度 (太実線) を示す。燃料集合体上部に閉塞物が生じた場合、最も温度が高くなり 658[°C]となることが推定される。

第 5 章で述べたように CC 断面においては、Point-d (ピン番号 306) よりも Point-f (ピン番号 305) の方が温度上昇値は高くなる。しかし、CD 断面では Point-f (ピン番号 305) に熱電対が設置されていないため温度を計測することはできない。ま

物が生じた場合、最も温度が高くなり 657[°C]となることが推定される。

第 5 章で述べたように CC 断面においては、Point-d (ピン番号 306) よりも Point-f (ピン番号 305) の方が温度上昇値は高くなる。しかし、CD 断面では Point-f (ピン番号 305) に熱電対が設置されていないため温度を計測することはできない。また、第 5.2 節で示したように閉塞物内部のピン表面温度は流れ方向 (鉛直方向) にほぼ直線的に上昇していることから、CC 断面における Point-d (ピン番号 306) と Point-f (ピン番号 305) での入口温度からの温度上昇値の比を用いて、CD 断面における Point-f (ピン番号 305) での温度上昇値を推定する。Figure6-3.9 に Point-d (ピン番号 306) と Point-f (ピン番号 305) での温度上昇値の比と試験条件との関係を示す。Figure6-3.3 に示した 91ch (Point-c) で最高温度となった試験条件 (39 ケース中 30 ケース) を評価対象としている。CD 断面における Point-f (ピン番号 305) でのピン表面温度は Point-d (ピン番号 306) でのヒータピン表面温度の 1.06 倍であり、最大値が 1.13 倍であることから保守側に最大値 1.13 倍で評価する。これより、37 本ピンバンドル体系における Point-d に相当する位置でのピン表面温度 636[°C]から、Point-f に相当する位置でのピン表面温度は 667[°C]と推定できる。

本試験体系 (発熱長のみ 650[mm]から 1000[mm]に拡張し実機での線出力分布、流量条件を考慮した) における実機条件下で最高温度を示すのは、閉塞物が発熱上部に生じた場合の閉塞物上端部のヒータピン表面であり、最高温度は 670[°C]程度まで上昇することが推定できた。試験条件の設定および温度計測に伴う不確かさ等を考慮しても 700[°C]を下回ることが分かった。

第 2.2 節で述べたように本試験体系における閉塞条件 (周辺 2 列同時閉塞、粒子径 0.3[mm]、空隙率 40[%) は、実機で想定される閉塞条件 (千鳥状閉塞、粒子径 1~3[mm]) よりも厳しい設定となっている。粒子径が大きくなるとピン表面と閉塞物 (粒子) との隙間部が増加し (壁効果)、冷却材がピン表面近傍を流れ易くなる。その結果、ピン表面の冷却が促進されピン表面温度を含めた閉塞物内部の温度は低下する。また、周辺 2 列同時閉塞に比べ、千鳥状閉塞の場合には閉塞物が冷却材に接する面積が増加し、健全サブチャンネル内の低温冷却材と閉塞物内部の高温冷却材との交換が活発になるため閉塞物内部の温度は大きく低下する。すなわち、本試験での閉塞条件は実機に対する想定として十分保守的な設定であり、試験結果をもとに評価した実機条件下での最高温度 700[°C]は保守側の値であると考えられる。

## 7. まとめ

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の模擬燃料集合体に、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を組み込んだ試験体を用いて、物理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。試験はヒータ出力および試験体流入流量をパラメータとし、流量条件については実機定格条件の107.5~10[%]、ヒータ出力については最大60[%]出力まで幅広く変化させて試験を実施した。その結果、閉塞物を含む燃料集合体内の熱流動場について以下の知見を得た。

### 1) 定常温度分布特性

#### 1-1) 閉塞物上流側

- ① 閉塞物を避けようとする水平方向流れにより、集合体中心部よりも温度の低い周辺サブチャンネルの低温ナトリウムが集合体中心部へ流入するため閉塞物上流側では水平方向に平坦な温度分布となる。閉塞物上流側の内側サブチャンネルでは低温のナトリウムが集合体内部へ流れ込み鉛直方向の温度勾配は負となり、周辺サブチャンネルでは鉛直方向流れがによって温度は上昇するため温度勾配は正となる。
- ② 周辺1列および内側1列の2列を閉塞された本試験体系において、閉塞物が存在することにより温度分布に影響を受ける範囲は、水平方向で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。低流量・出力条件に比べて、高流量・出力条件の方が閉塞物上流側に生じる水平方向流れが強く、低温ナトリウムが流入する影響を受け易いことが分かった。

#### 1-2) 閉塞物内部

- ① 閉塞物下端から上端にかけて温度が急激に上昇し、閉塞物上端部では集合体出口温度以上の温度上昇を示す。高出力・流量条件の場合には内側サブチャンネルで温度が高く、周辺から内側サブチャンネルにかけて水平方向に急峻な温度勾配が生じている。低流量・出力条件の場合、周辺サブチャンネルの温度は高出力・流量条件の場合よりも高く、閉塞物内部の水平方向温度勾配は小さく平坦な温度分布になる。
- ② 閉塞物内部の温度分布は水平断面内で一様な変化を示すのではなく、周辺サブチャンネルでは出力依存性があり、内側サブチャンネルでは流量依存性がある。高流量・出力条件の場合、周辺サブチャンネルでは温度は鉛直方向に直線的に上昇しており鉛直方向流れが支配的、内側サブチャンネルでは閉塞物上部

でも中心部に近い側と上端面に近い側では鉛直方向の温度勾配が異なることから各サブチャンネルごと局所的に異なった流れ場が形成されている。低流量・出力条件時には水平断面内での温度勾配が緩和する傾向にあり、ピン表面温度とサブチャンネル中心温度との温度差も小さくなり閉塞物内部で一様な流れ場に近づいていく。

- ③ 健全サブチャンネルと閉塞物に接しているピンのピン表面温度の周方向分布を調べると、健全サブチャンネルと閉塞物との境界では急峻な温度勾配が生じる。健全サブチャンネル内では温度勾配差は小さくサブチャンネル間で大きな温度差は生じていない。
- ④ 周辺および内側サブチャンネルでは、閉塞物中心部へ向かうに従い温度は上昇しておりスペーサワイヤの巻き付け方向と逆の方向に温度が高くなっている。閉塞物内部ではスペーサワイヤによるスワールフローの影響はないものと考えられる。
- ⑤ 閉塞サブチャンネル内温度は一様でなく、健全サブチャンネルに近い内側サブチャンネルでは、閉塞物周辺の流動場が大きく影響していると考えられる。一方、閉塞物の周辺部では、健全サブチャンネルから離れており閉塞物側面に生じるはく離や循環渦などの影響は小さく鉛直方向流れが支配的であると考えられる。
- ⑥ 閉塞物内部の周辺サブチャンネルでは、 $Pe$  数が 100 を境界にして温度特性は変化し、 $Pe$  数が 100 から離れるに従って無次元化したピン表面温度およびサブチャンネル中心でのナトリウム温度は増加する。内側サブチャンネルでは、 $Pe$  数の増加と共に無次元化したピン表面温度およびサブチャンネル中心でのナトリウム温度は増加する。ピン表面とサブチャンネル中心との水平方向の温度差は、 $Pe$  数の増加に伴ってほぼ直線的に増加している。

### 1-3) 閉塞物下流側

- ① 本試験の閉塞条件（37本ピンバンドル体系、周辺2列閉塞）では、閉塞物上端からワイヤ巻きピッチ ( $L=200[\text{mm}]$ ) の約  $1/6$  の高さで後流域は消滅して鉛直方向流れが支配的な領域となる。これは、閉塞物厚さ  $D_B$  (閉塞物が接する壁面から健全サブチャンネルに接する閉塞物側面までの距離の2倍) の1.27倍となり、平板閉塞を対象とした水流動試験で得られた実験結果 (1.5~3.0) に近い値である。
- ② 閉塞物下流の後流域では、特徴的な鉛直方向温度分布 (M型およびC型) を示す。同じ (出力/流量) 比であっても、高出力・流量条件の場合、閉塞物上端から下流に行くにつれ温度が上昇し、一旦温度が低下して再度高温となるM型の温度分布となり、低出力・流量条件では、閉塞物上端近傍で最高温度となりその後低下する温度分布 (C型) となる。ナトリウム試験では後流域の流速分布を測定することができないため解析により流速分布を解き、この後流域の温度分布については検討していくこととする。



## 1-4) 健全サブチャンネル

- ① 鉛直方向の閉塞物が存在する範囲において、閉塞物の影響を受けて水平方向温度分布のピークが集合体中心から閉塞物の反対側に偏った分布となるが、温度はヒータピン出力に比例し流量に反比例する。
- ② 健全サブチャンネルに接する閉塞物側面では、閉塞物下端に衝突して流線が急激に変化するため、流れがはく離して閉塞物側面に渦が生じ、閉塞物内部の流体が側面から流出していると考えられる。

## 2) 温度変動特性

- ① 閉塞物内部において、ピン表面温度とサブチャンネル中心温度との間には温度変動特性に関して大きな違いはない。ただし、閉塞物内部では健全サブチャンネル内に比べて温度が高く、局所温度に対する相対的な温度変動強度は小さくなっている。
- ② 閉塞物下流では、健全サブチャンネルと比べて後流域内部の方が温度変動は大きく、閉塞物上端近傍よりも下流側で温度変動は大きくなっている。後流域内部では複雑な流れ場が形成されるため温度変動が大きくなったと考えられる。後流域で生じる大きな温度変動は、後流域の消滅とともに健全サブチャンネルの温度変動と同等となる。

## 3) 試験部圧力損失特性

閉塞物が存在する燃料集合体内の圧力損失は、健全集合体の圧力損失よりも高  $Re$  数領域 ( $Re \geq 12400$ ) で 10[%]ほど高い値となっている。また、閉塞物による単純な流路断面積の変化を考慮した圧力損失よりも大きな値となっている。

## 4) 最高温度の評価

実機条件で最高温度を示すのは、発熱上部に閉塞物が生じた場合の閉塞物上端部のヒータピン表面であり、実機で想定されるよりも厳しい閉塞条件（周辺 2 列閉塞、粒子径 0.3[mm]）において最高温度は 670[°C]程度と推定される。試験条件の設定および温度計測に伴う不確かさ等を考慮しても 700[°C]以下であることが分かった。ただし、本試験体系（37 本ピンバンドル）を実機体系の 217 本ピンバンドルに拡大する際のスケール効果や詳細（熱電対の設置されていない箇所）な温度分布については解析と併せて検討する。

## 謝 辞

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処理に多大な御協力を頂いた。また、グラフ作成等に関して原子力システム（株）川島滋代さんに協力して頂いた。ここに深く感謝の意を表します。

## 参考文献

- [1] 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)。
- [2] 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).
- [3] K. Haga, et al., "Review and Future Needs of Experimental Studies on Local Faults", Proc. of Int. Conf. on Science and Technology of Fast Reactor Safety, Guernsey, No.90, Vol.1, p.513~518, (1986).
- [4] 小林 順、他、「燃料集合体局所閉塞冷却限界4サブチャンネル基礎水流動試験(第1報) - 温度分布測定試験 -」、PNC ZN9410 96-125、(1996)。
- [5] 田中 正暁、他、「燃料集合体局所閉塞冷却限界4サブチャンネル基礎水流動試験 - 閉塞物内温度分布への冷却材内部流れの影響 -」、PNC TN9410 98-024, (1998)。
- [6] 田中 正暁、他、「燃料集合体内局所閉塞事象における4サブチャンネル体系水流動試験 - 閉塞物周辺の流況可視化 -」、JNC TN9400 2000-026、(1999)。
- [7] 田中 正暁、他、「多孔質体内における熱流動現象に関する研究 平成11年度共同研究報告書」、JNC TY9400 2000-014、(2000)。
- [8] 田中 正暁、他、「高速炉燃料集合体ポーラス状局所閉塞事象の研究 - 多次元熱流動解析手法の検討 -」、PNC ZN9410 97-048、(1997)。
- [9] M. Ueta, et al., "The Development of Demonstration Fast Breeder Reactor (DFBR)", ICON-3, pp.771-776, (1995).
- [10] 大島 宏之、「サブチャンネル解析コード ASFRE-III の整備・改良」、PNC TN9410 96-128、(1996)。
- [11] 飯塚 透、他、「高速炉燃料集合体ポーラス状局所閉塞事象の研究」、PNC TN9410 98-022、(1998)。
- [12] 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)。
- [13] A. G. Dixon, et al., "Theoretical Prediction of Effective Heat Transfer Parameters in Packed Beds", AIChE Journal, Vol.25, No.4, pp.663-676, (1979).
- [14] 中村 寿、他、「燃料集合体局所流路閉塞水流動試験(第3報) 61本ピンバンドルにおける閉塞物後流状況の把握」、PNC ZN941 78-77、(1978)。
- [15] S. K. Cheng, et al., "Hydrodynamic Models and Correlations for Bare and Wire-wrapped Hexagonal Rod Bundles", Nuclear. Engineering and Design, 92, p.227-p.251,(1986).
- [16] 日本機械学会、「技術資料 管路・ダクトの流体抵抗」、第3章、(1979)
- [17] 林 謙二、他、「自然循環崩壊熱除去時の炉心部熱流動現象の解明」、PNC ZN9410 94-264、(1994)。

Table 1 Specifications of Test Section.

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 <sup>2</sup> ]	5.554x10 <sup>3</sup>	1.072x10 <sup>3</sup>
集合体内 水力等価直径	[mm]	3.155	3.24

Table 2-1 Axial Distribution of Measuring Point by Thermocouples.

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

Table 2-2 Transversal Distribution of Measuring Point by Thermocouples.

Traverse Line	Pin No.	Point	r*=r/W	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
				R	BA	BB	CC	CD	DB	DC	DD	DF	DH	DI	DJ	EA
A Wa: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 Wa: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	—	—	—	—	—	—	—	—

JNC TN9400 2001-062

Table 3 Boundary Conditions for Experiment and Real Reactor.

Item	Unit	Test ①	Test ②	Large scale FBR
入口温度	[°C]	300	300	395
線出力	[kW/m/pin]	40.15	40.15	42.2
炉心高さ (発熱長)	[m]	0.65	0.65	1.0
集合体 発熱量	[MW]	0.9657	0.9657	7.47
集合体 平均質量流束	[(kg/s)/m <sup>2</sup> ]	6.3x10 <sup>3</sup>	5.438x10 <sup>3</sup>	5.438x10 <sup>3</sup>
集合体 流路断面積	[m <sup>2</sup> ]	1.072x10 <sup>-3</sup>	1.072x10 <sup>-3</sup>	5.554x10 <sup>-3</sup>
Na密度 (入口温度)	[kg/m <sup>3</sup> ]	880.2	880.2	857.5
Na粘性係数	x10 <sup>-3</sup> [Pa·s]	0.3433	0.3433	0.2885
集合体 平均流速	[m/s]	7.157	6.178	6.342
集合体 流入流量	[L/min]	460.3	397.3	35.2
入口Re数	—	5.946x10 <sup>4</sup>	5.133x10 <sup>4</sup>	5.946x10 <sup>4</sup>
入口Pr数	—	5.84x10 <sup>-3</sup>	5.84x10 <sup>-3</sup>	5.06x10 <sup>-3</sup>
集合体流量	[L/min]	460	397	2,113

Table 4 Experimental Conditions.

試験ケース	流 量 [L/min] (%)	ヒータ出力 [kW] (%)	試験データ ファイル名
Case-0	0 (0)	0 (0)	CFR230200001.D CFR230200065.D
Case-1	430 (107.5)	433 (42.7)	CFR230200007.D
Case-2	430 (107.5)	287 (28.3)	CFR230200008.D
Case-3	340 (85)	406.0 (40)	CFR230200011.D
Case-4	160 (40)	406.0 (40)	CFR230200014.D
Case-5	60 (15)	101.5 (10)	CFR230200017.D
Case-6	60 (15)	203.0 (20)	CFR230200020.D
Case-7	80 (20)	101.5 (10)	CFR230200023.D
Case-8	40 (10)	101.5 (10)	CFR230200026.D
Case-9	240 (60)	406.5 (40)	CFR230200029.D
Case-10	120 (30)	203.0 (20)	CFR230200032.D
Case-11	120 (30)	304.5 (30)	CFR230200035.D
Case-12	240 (60)	304.5 (30)	CFR230200038.D
Case-13	160 (40)	304.5 (30)	CFR230200041.D
Case-14	340 (85)	406.0 (40)	CFR230200045.D
Case-15	240 (60)	507.5 (50)	CFR230200049.D
Case-16	340 (85)	507.5 (50)	CFR230200052.D
Case-17	160 (40)	507.5 (50)	CFR230200057.D
Case-18	340 (85)	609.0 (60)	CFR230200062.D
Case-19	340 (85)	0 (0)	CFR230200063.D
Case-20	0 (0)	0 (0)	CFR230200064.D



Table 5 Boundary Conditions in Confirmation Tests.

Case No.	Data No.	Flow-rate $Q_L$ [L/min]	Heater Power P [kW]	Inlet temperature $T_{in}$ [°C]
		FICA150	WI0500	TW-202AA
Case-1				
Preliminary (Run-22)	220000055	433.49	433.87	308.87
This test (Run-23)	230200007	432.01	431.79	326.99
Case-2				
Preliminary (Run-22)	220000053	430.94	289.06	299.13
This test (Run-23)	230200008	429.45	287.42	302.44
Case3/Case14				
Early term (Run-23)	230200011	331.35	404.39	308.21
Latter term (Run-23)	230200045	319.66	404.40	301.89

Table 6 Lists of Irregular Thermocouples.

Channel No.	Sensor	Channel No.	Sensor
<del>201ch</del>	<del>TN-201DJ</del>	91ch	TP-306CD
<del>40ch</del>	<del>TS-203CB</del>	92ch	TB-306CD
15ch	TS-416BA	93ch	TP-307CD
35ch	TS-416BB	98ch	TP-409CD
43ch	TB-305CB	99ch	TB-409CD
45ch	TP-307CB	102ch	TS-416CD
46ch	TB-307CB	108ch	TN-408DA1
47ch	TB-409CB	109ch	TN-408DA2
60ch	TP-305CC4	117ch	TN-306DB
65ch	TP-307CC	122ch	TN-409DB
66ch	TB-307CC	130ch	TN-306DC2
70ch	TP-409CC	133ch	TN-410DC
71ch	TB-409CC	148ch	TN-410DD
74ch	TS-416CC	219ch	TN-401DJ

Table 7 Uncertainty in Temperature Measurements.

		正確度 $E_B$	精密度 $E_S$ (閉塞物内)	感度係数	不確かさ $U_{RSS}$
経時変化	Case-1	2.40[%]	2.09[%] (3.22[%])	1.0	4.8[%] (6.9[%])
	Case-2	2.38[%]	2.24[%] (3.67[%])	1.0	5.1[%] (7.7[%])
	Case-3/14	0.21[%]	2.14[%] (5.96[%])	1.0	4.3[%] (11.9[%])
熱電対		0.46[°C]	0.35[°C]	1.002	1.34[°C]
			0.68[°C]	1.0	

Table 8-1 Maximum Temperature in Porous Blockage.

Ch	Sensor	Point	Cross-section (z [mm])	Proportion of Case Number (Number) [%]
91	TP-306CD	d	CD (-2.5)	76.9 (30)
93	TP-307CD	c	CD (-2.5)	7.7 (3)
98	TP-409CD	b	CD (-2.5)	15.4 (6)

Table 8-2 Maximum Temperature in Wake Region.

Ch	Sensor	Point	Cross-section (z [mm])	Proportion of Case Number (Number) [%]
107	TN-307DA	C	DA (+1.0)	17.9 (7)
108	TN-408DA1	C	DA (+1.0)	10.3 (4)
117	TN-306DB	D	DB (+5.0)	15.4 (6)
122	TN-409DB	B	DB (+5.0)	10.3 (4)
130	TN-306DC2	D	DC (+15.0)	2.6 (1)
131	TN-307DC	C	DC (+15.0)	15.4 (6)
132	TN-409DC	B	DC (+15.0)	10.3 (4)
133	TN-410DC	A	DC (+15.0)	17.9 (7)

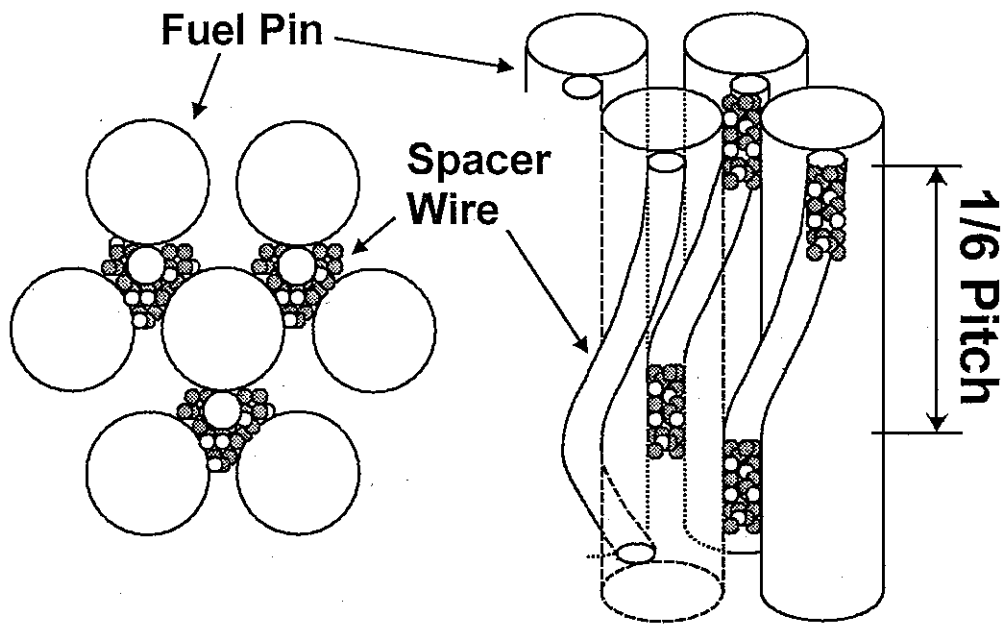
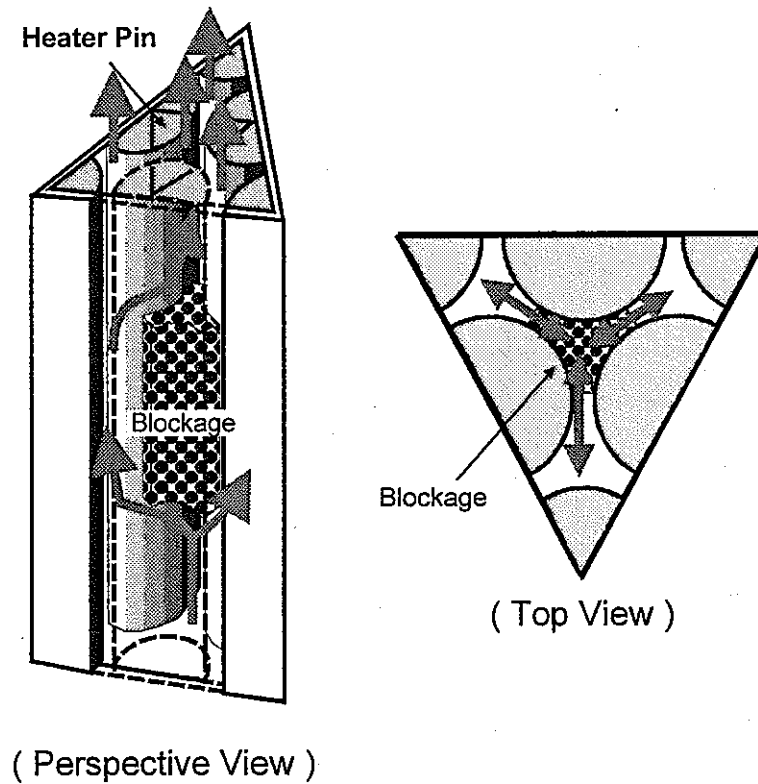


Figure1-1 Configuration of Porous Blockage in a Fuel Subassembly.



( Perspective View )

Figure1-2 Schematic View of Test Section for 4 Subchannel Water Experiment.

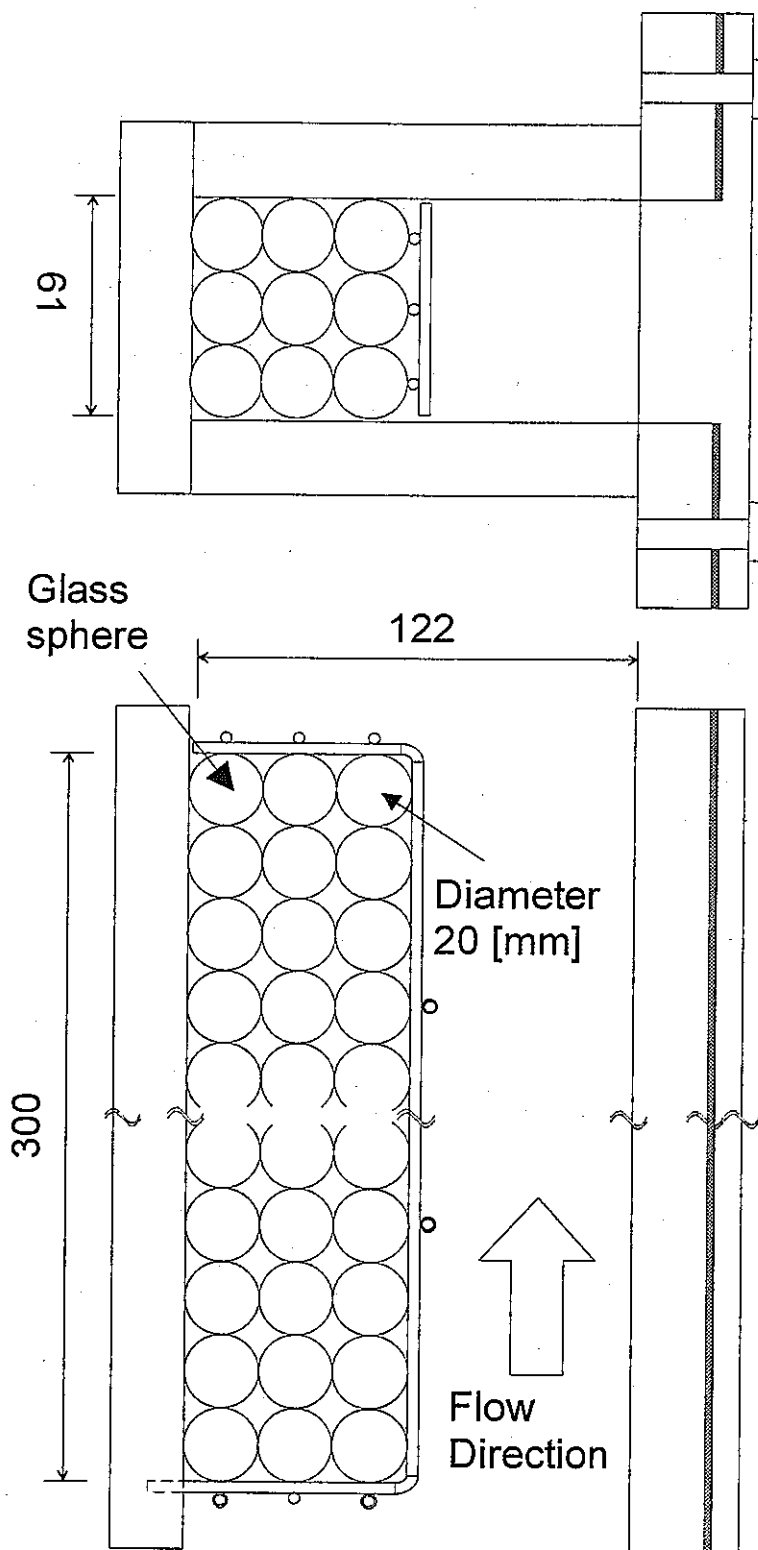


Figure1-3 Schematic View of Test Section for 2 Channel Water Experiment.

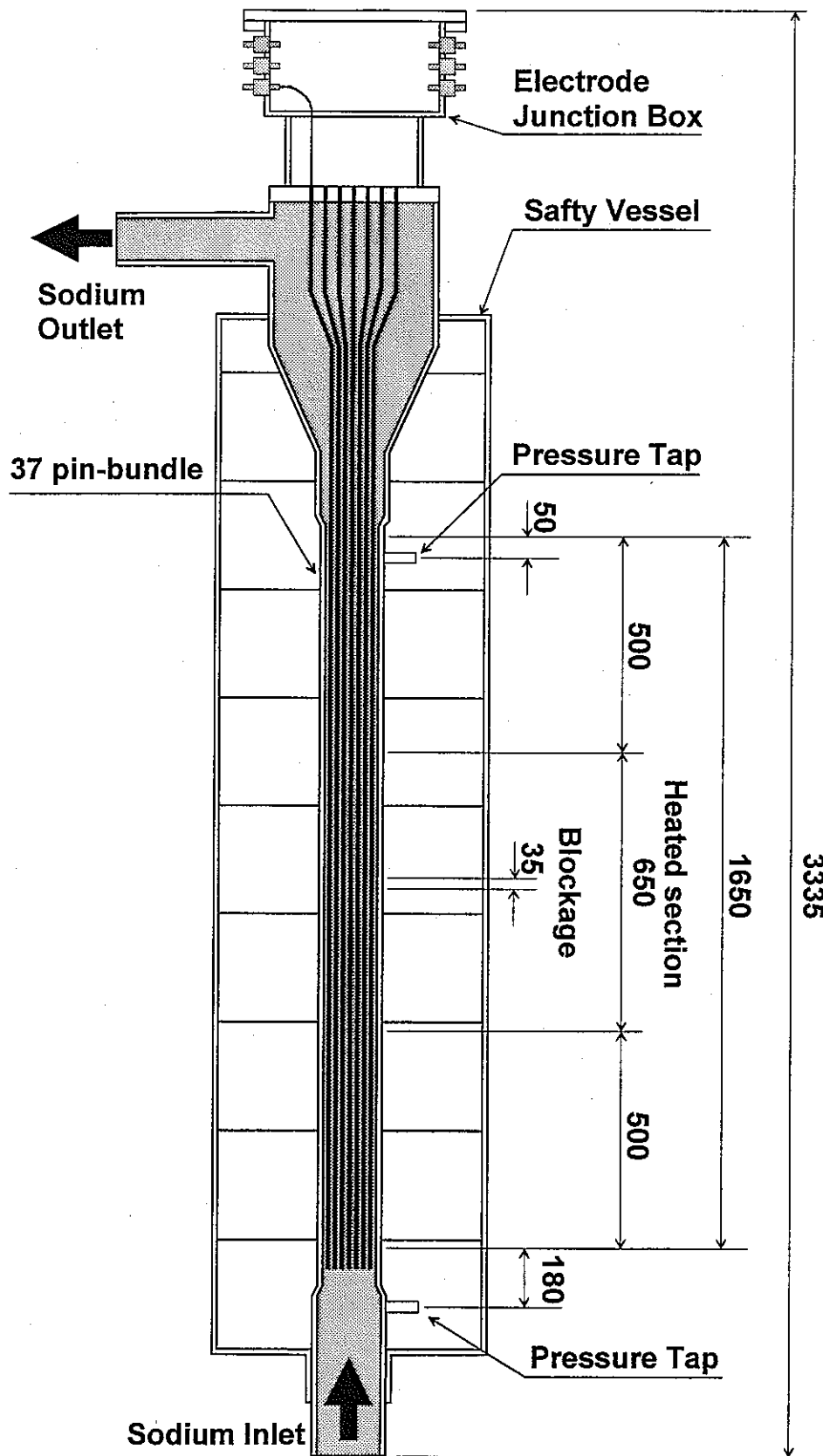


Figure2-1 Schematic View of Test Section for 37 Pin-bundle Sodium Experiment in CCTL.

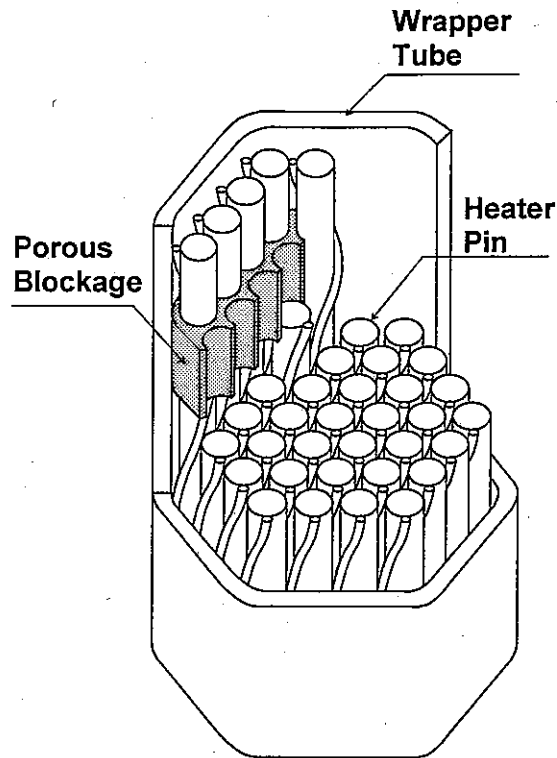


Figure2-2 Illustration of Porous Blockage in Test Section.

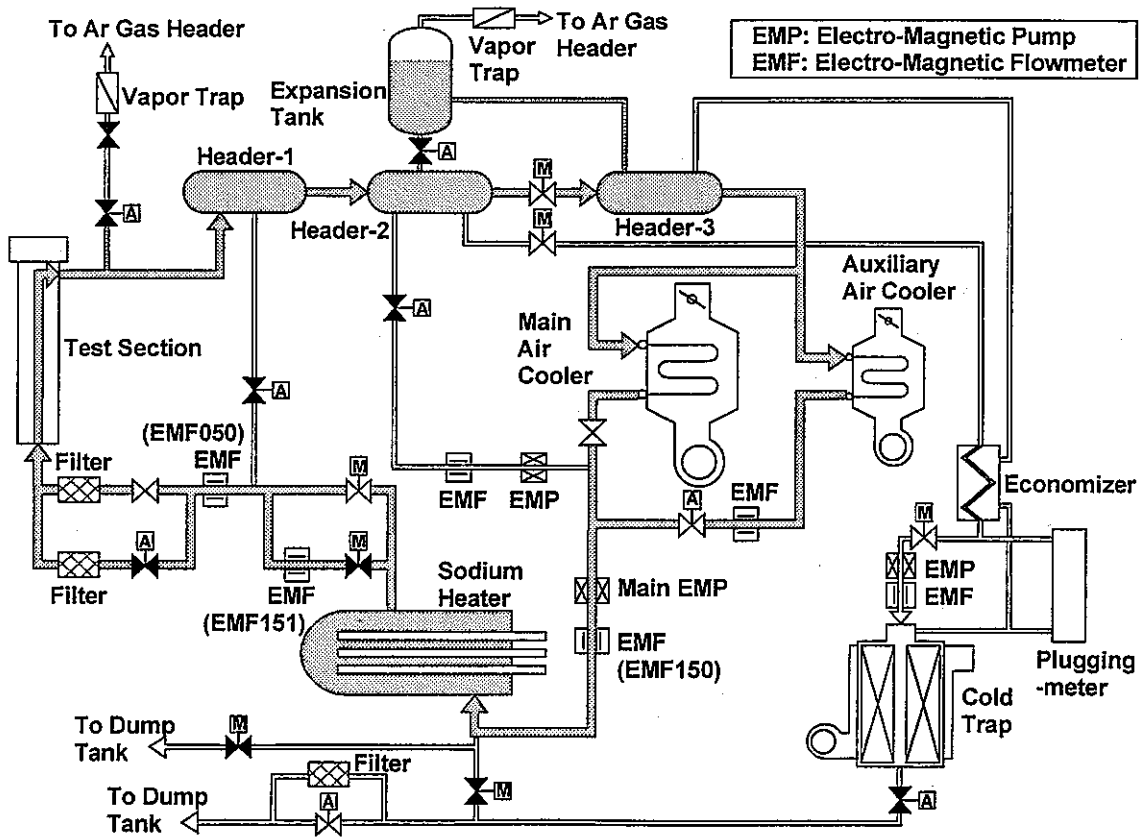


Figure2-3 Flow Diagram of Core Component Test Loop (CCTL).

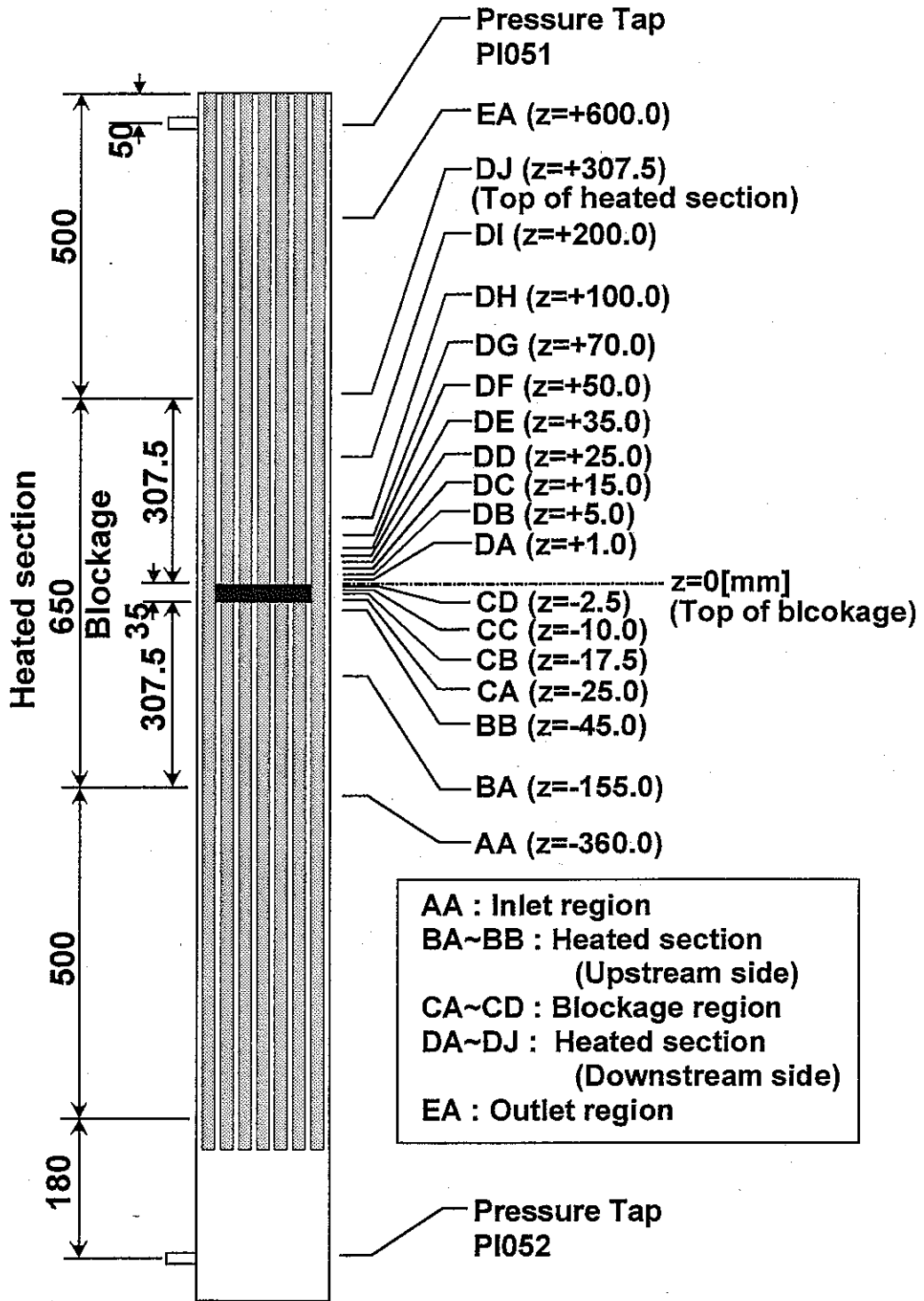


Figure2-4 Schematic View of Thermocouple and Pressure Tap Positions.



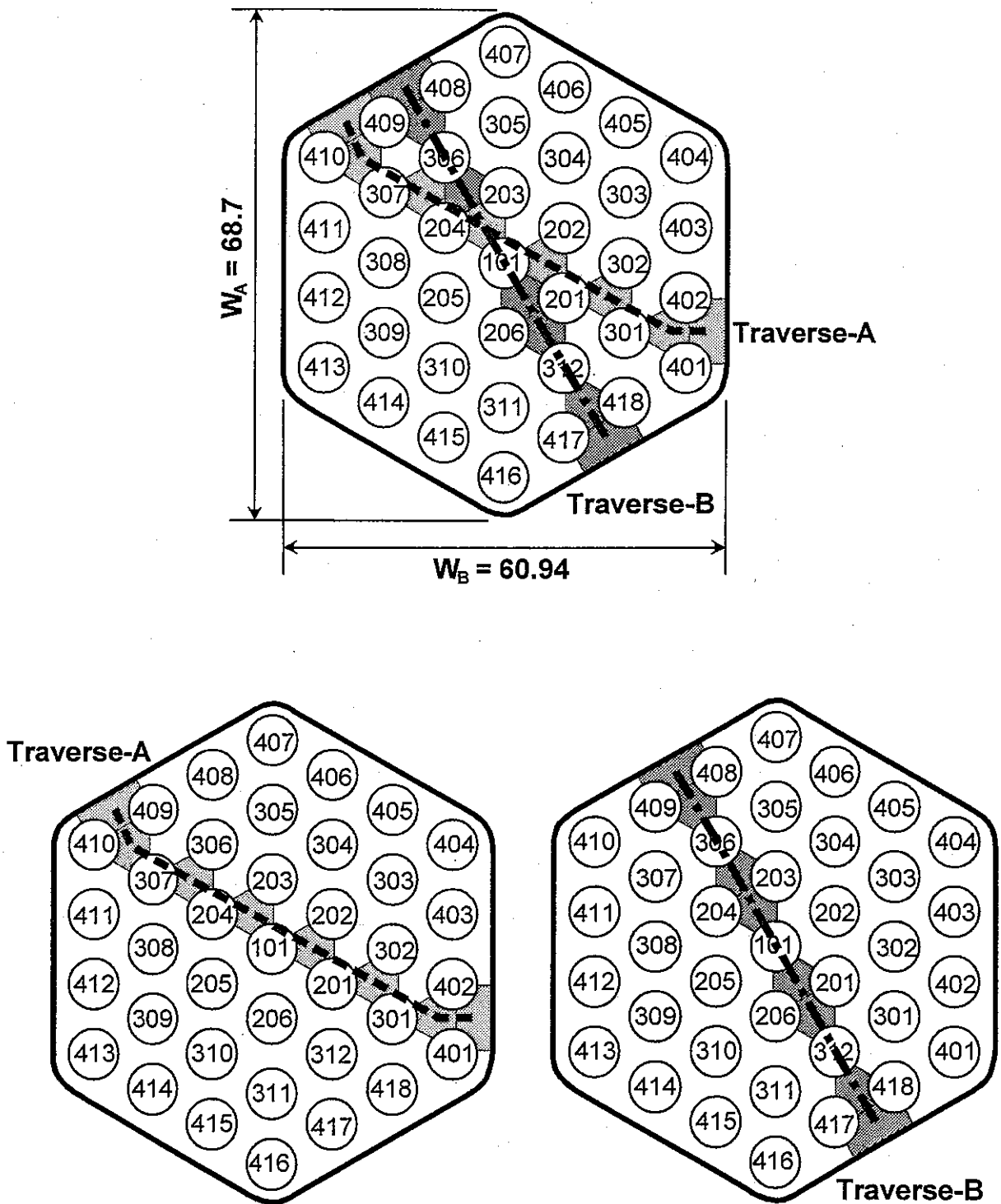


Figure2-5 Schematic View of Thermocouple Cross-sectional Positions.

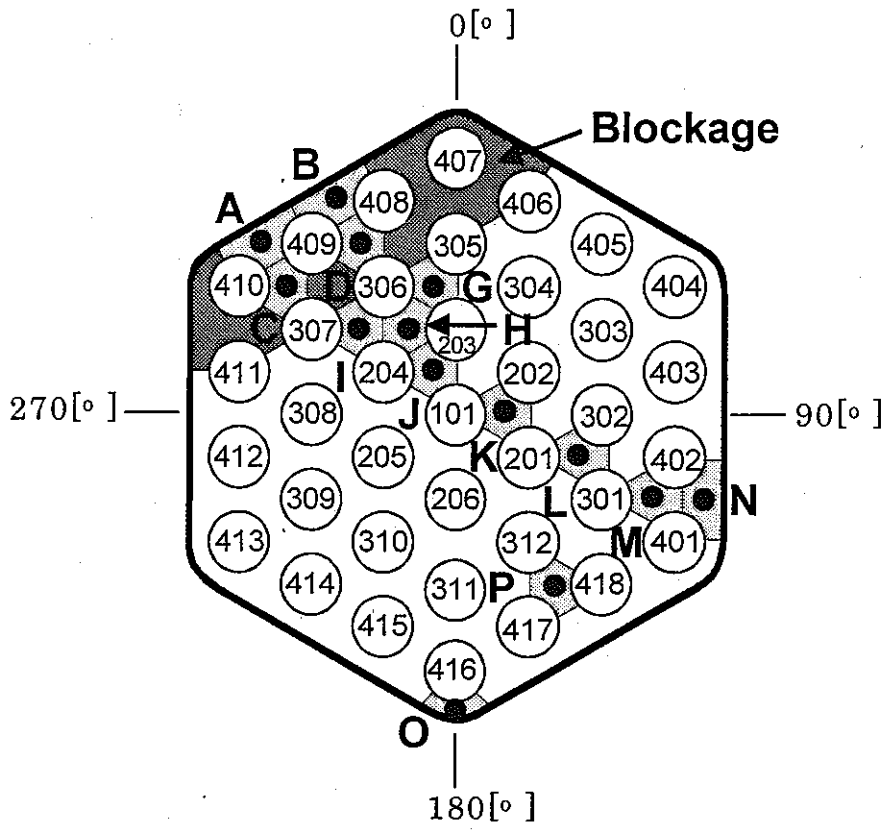


Figure2-6 Thermocouple Position in Test Section.

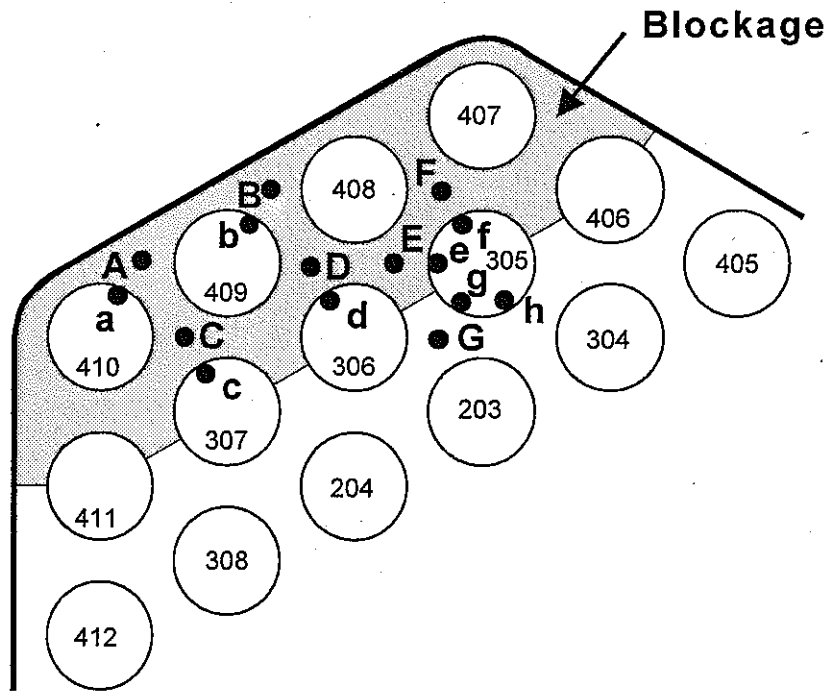


Figure2-7 Thermocouple Position in Porous Blockage.

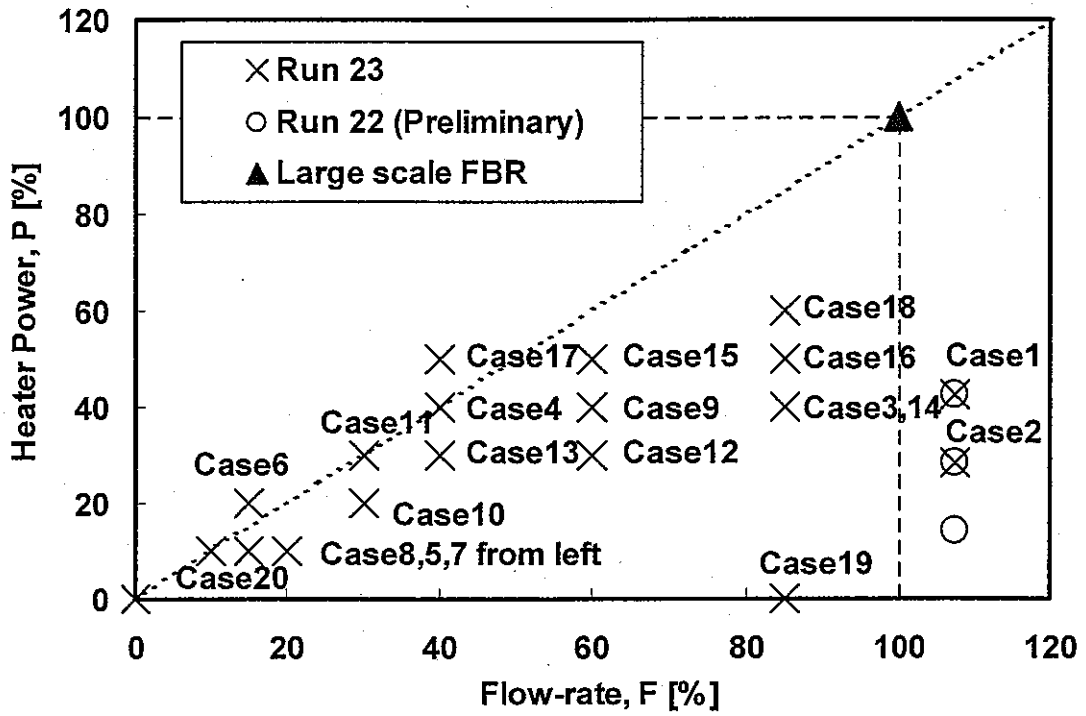


Figure3-1 Distribution of Experimental Condition.

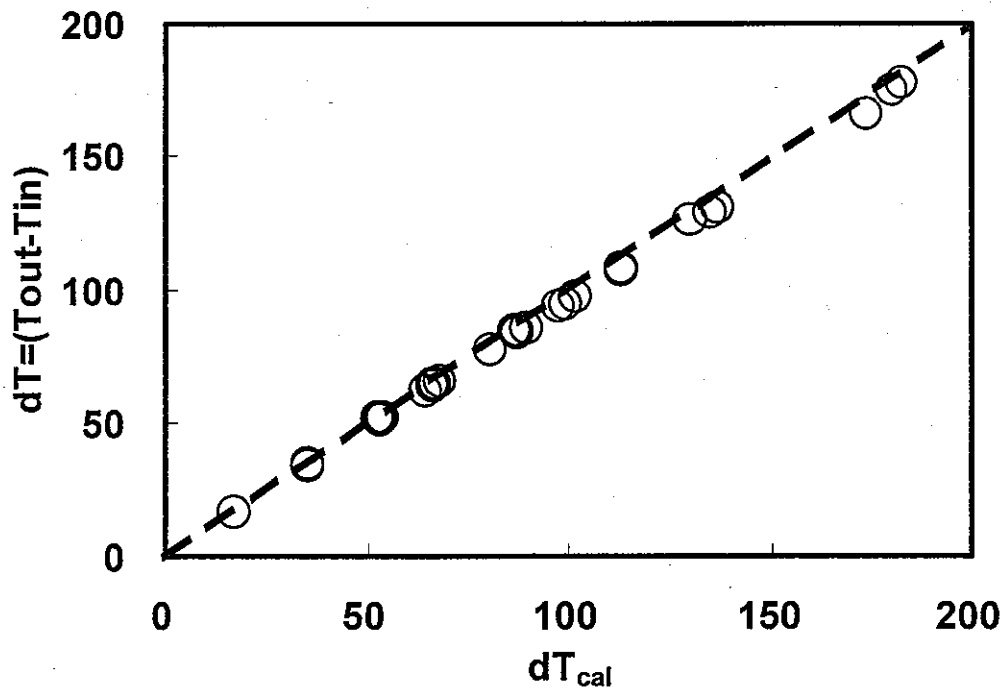
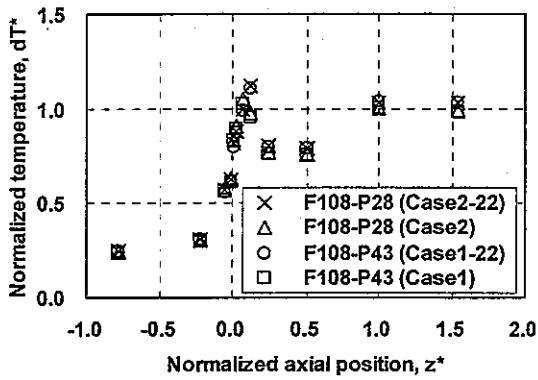
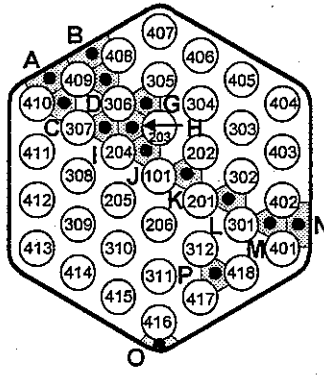
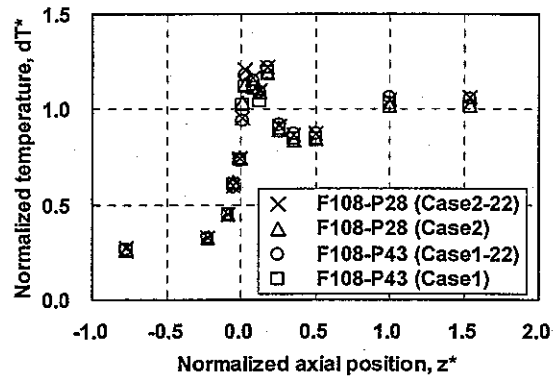


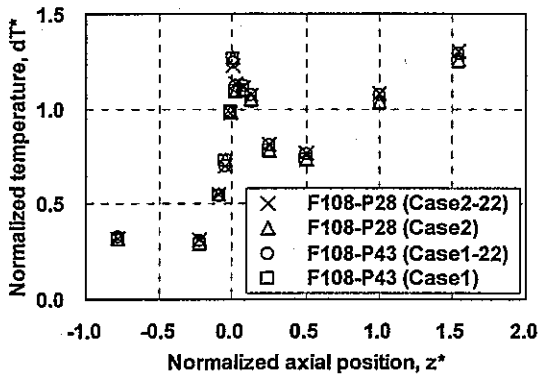
Figure4-1 Heat Balance in Test Section.



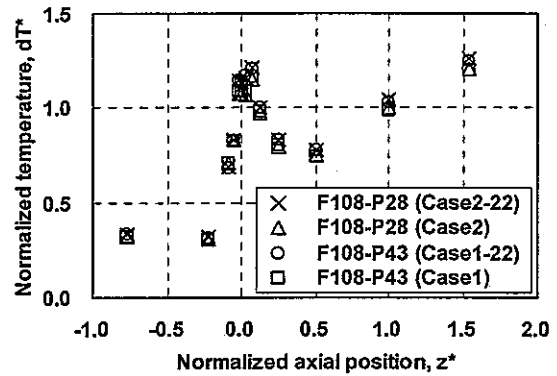
(a) Point-A (Pin410)



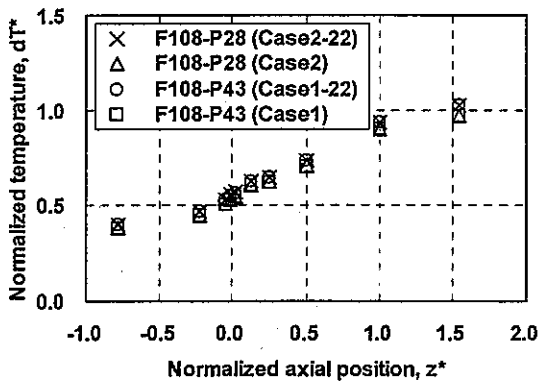
(b) Point-B (Pin409)



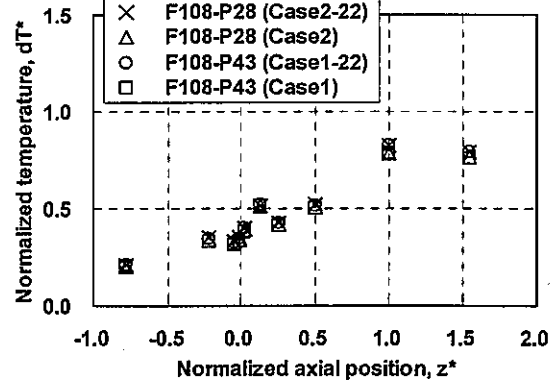
(c) Point-C (Pin307)



(d) Point-D (Pin306)



(e) Point-M (Pin401)



(f) Point-N (Pin402)

Figure4-2.1 Axial Distribution of Sodium Temperature in Case1 and Case2.

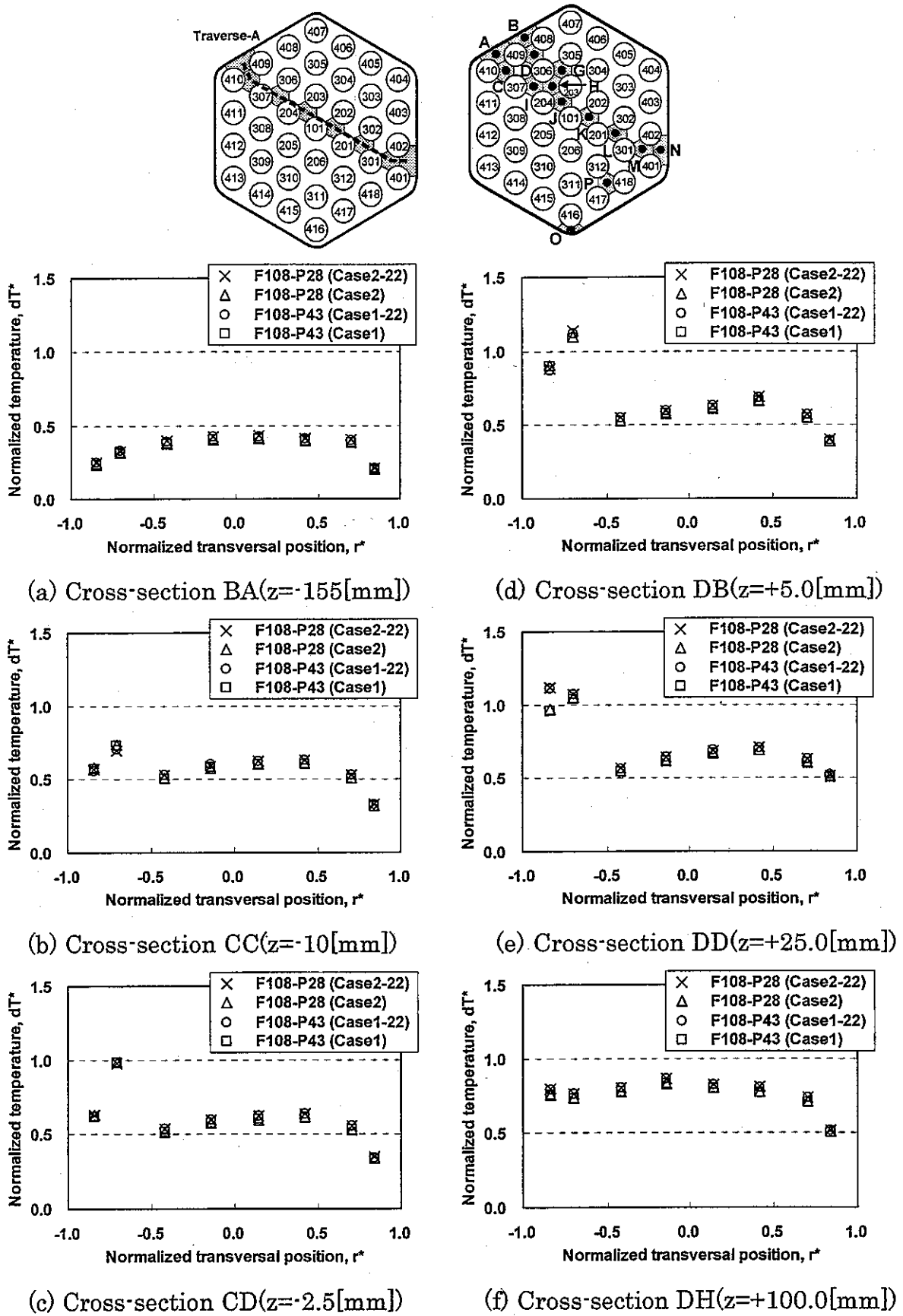
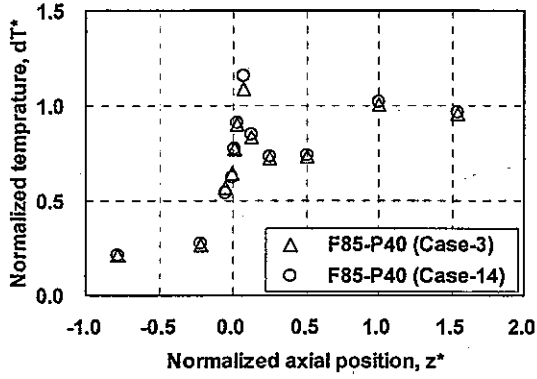
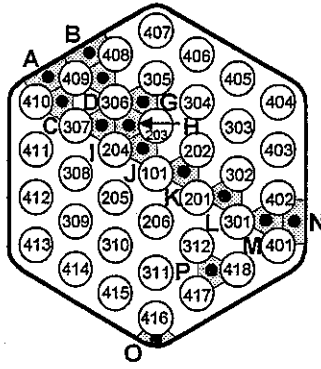
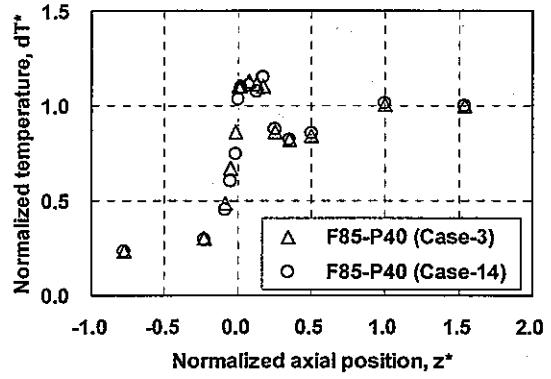


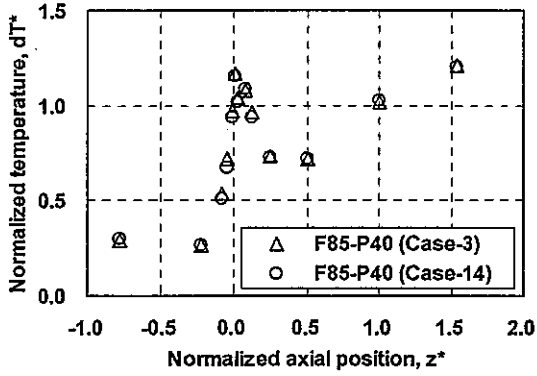
Figure4-2.2 Transversal Distribution of Sodium Temperature in Case1 and Case2.



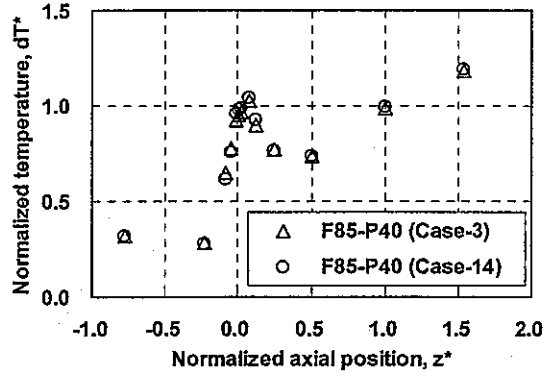
(a) Point-A (Pin410)



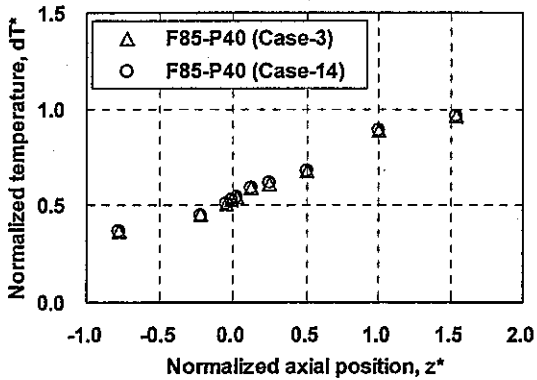
(b) Point-B (Pin409)



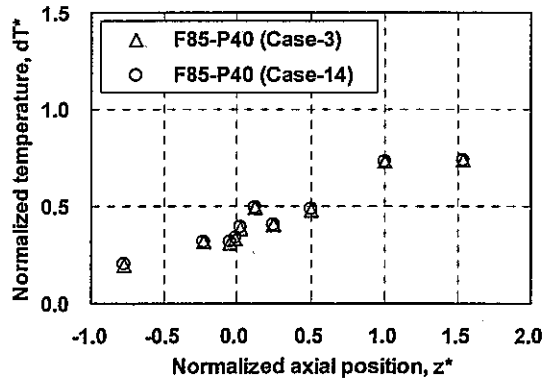
(c) Point-C (Pin307)



(d) Point-D (Pin306)



(e) Point-M (Pin401)



(f) Point-N (Pin402)

Figure4-3.1 Axial Distribution of Sodium Temperature in Case3 and Case14.

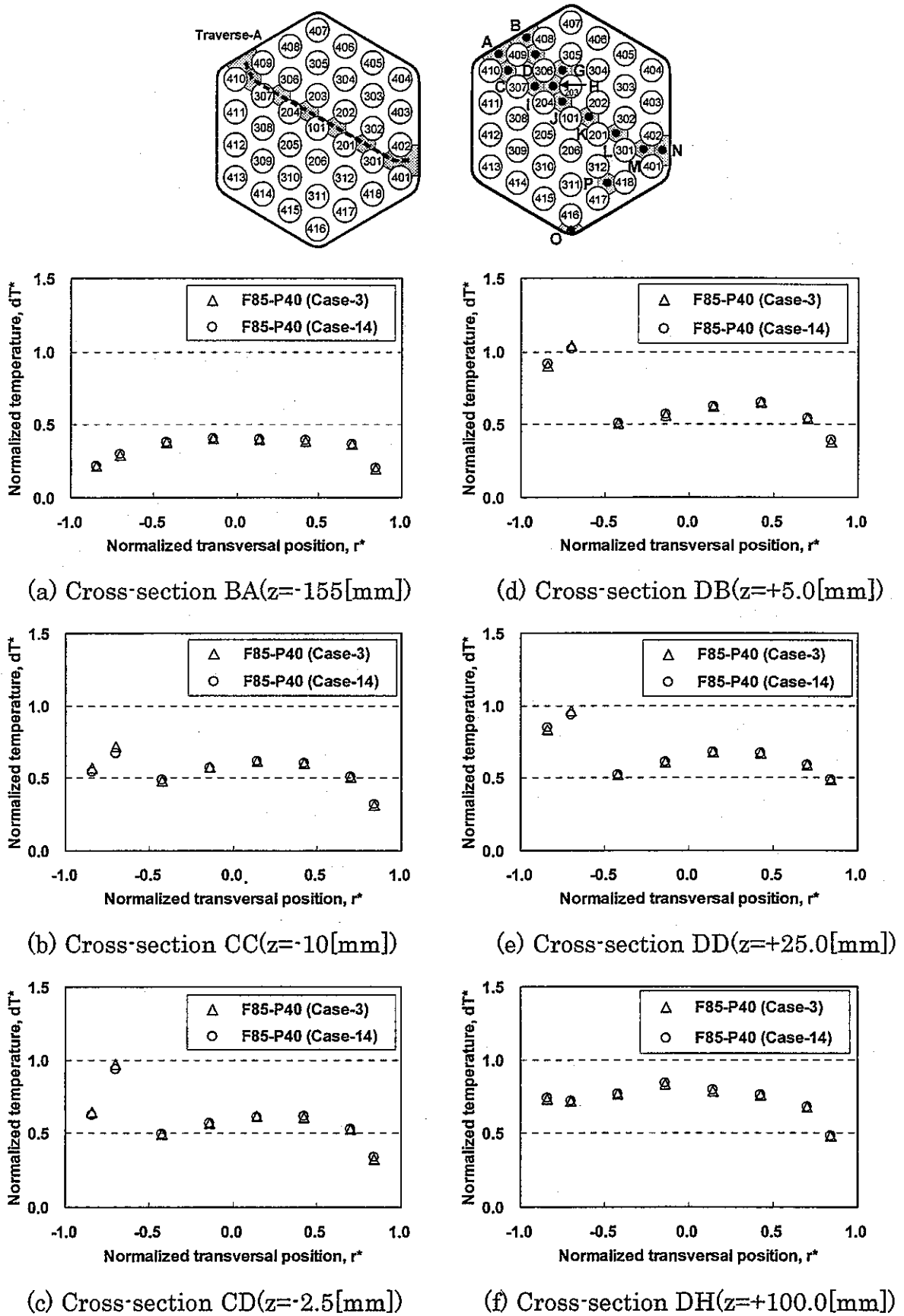
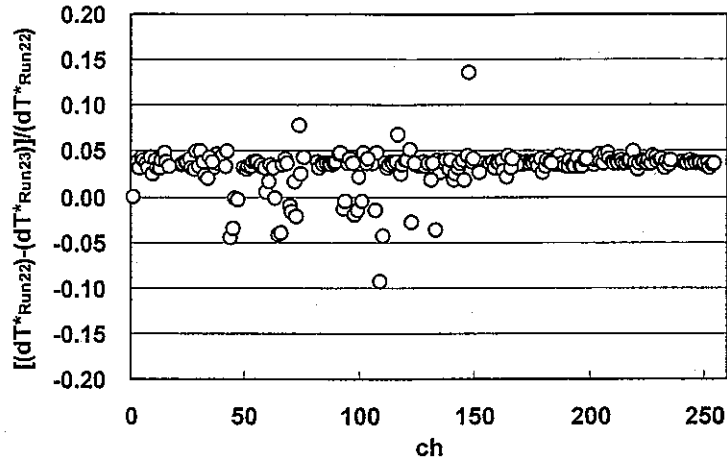
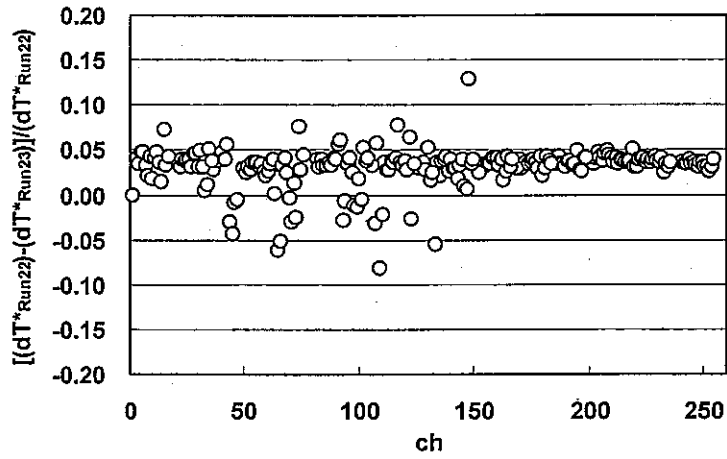


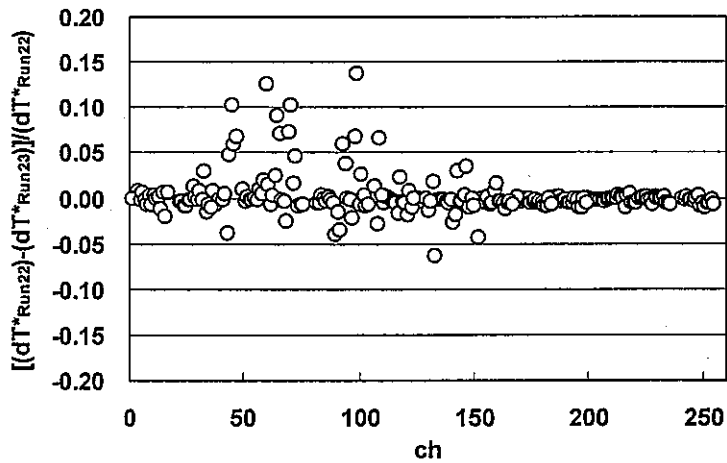
Figure4-3.2 Transversal Distribution of Sodium Temperature in Case3 and Case14.



(a) Case1 (Flow-rate:107.5[%], Power:42.7[%])



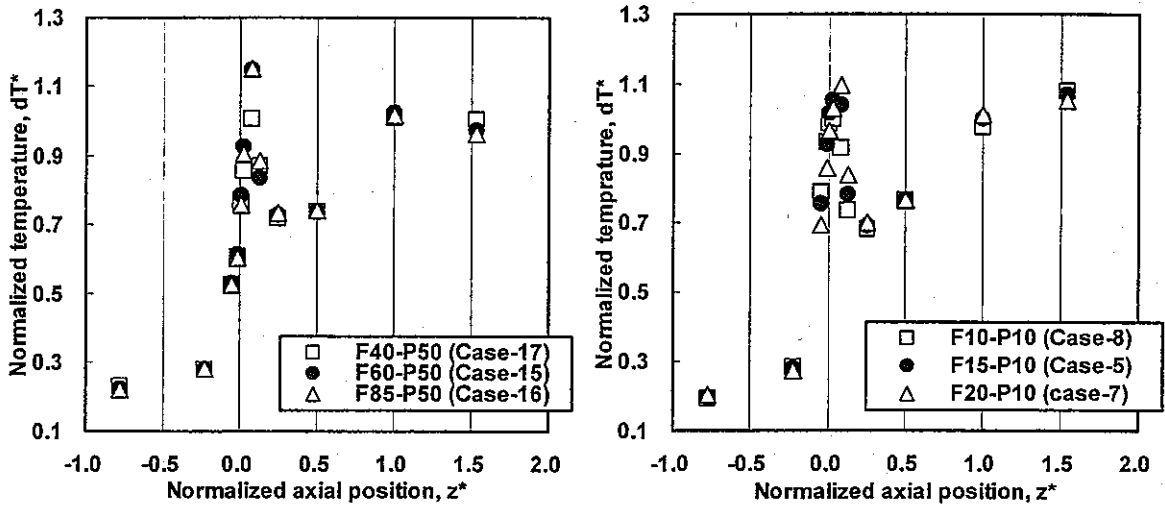
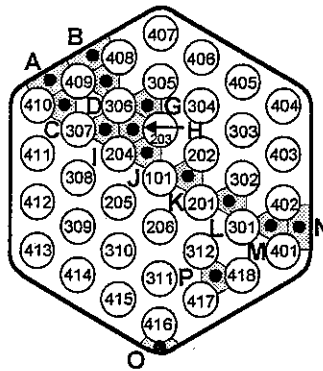
(b) Case-2 (Flow-rate:107.5[%], Power:28.3[%])



(c) Case-3/Case-14 (Flow-rate:85[%], Power:40[%])

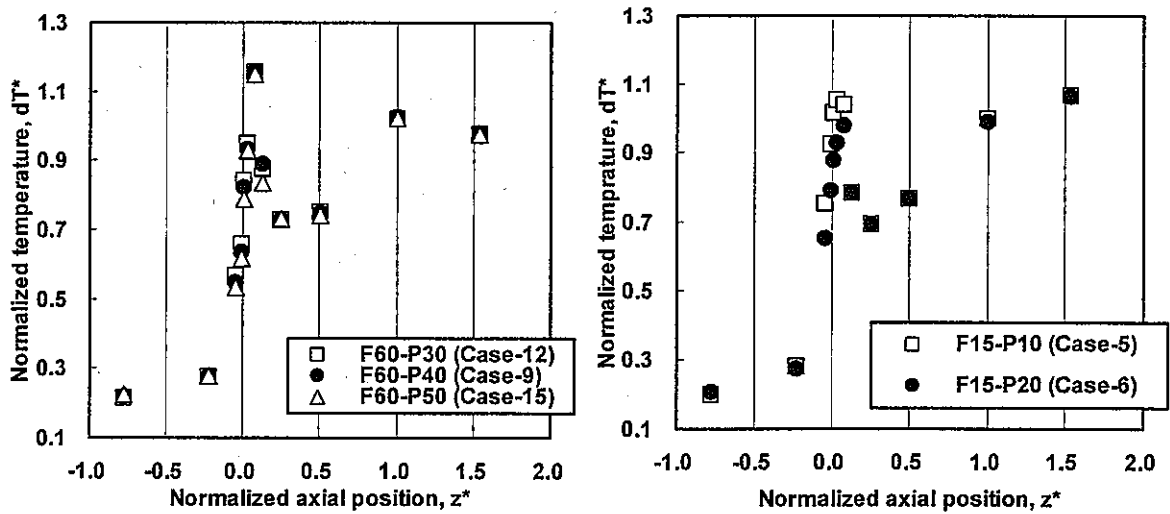
Figure4-4 Temperature Error in Confirmation Test.





(a-1) High power condition 50[%]      (a-2) Low power condition 10[%]

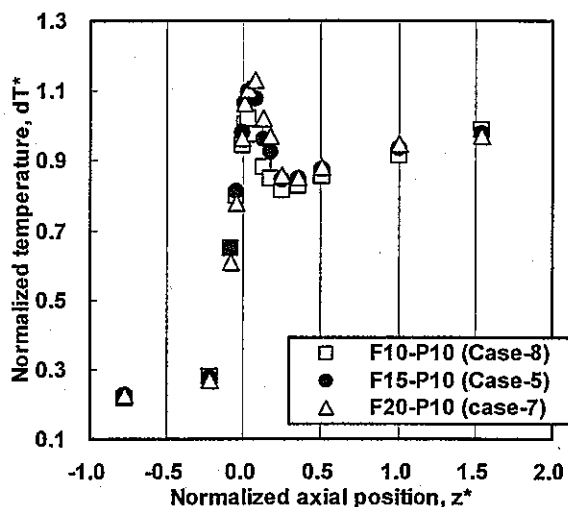
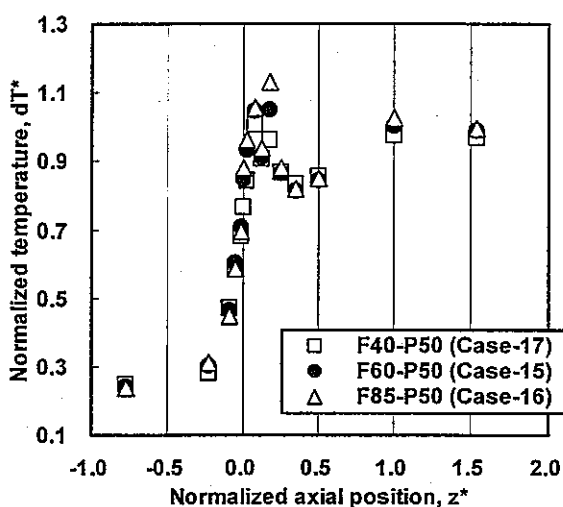
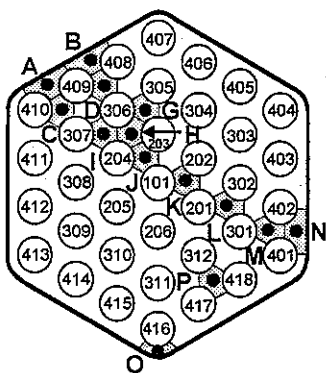
(a) Influence of flow-rate



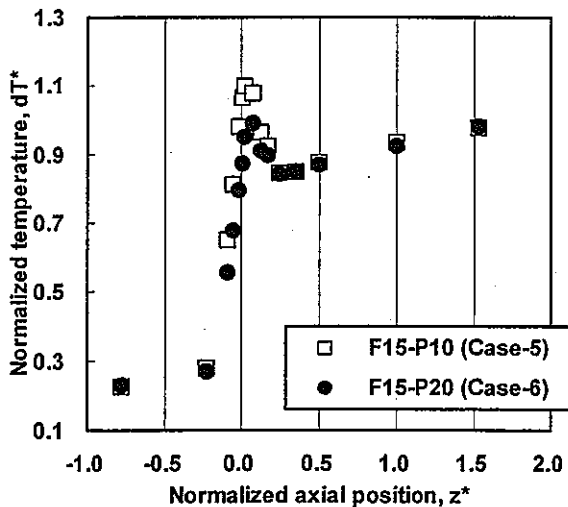
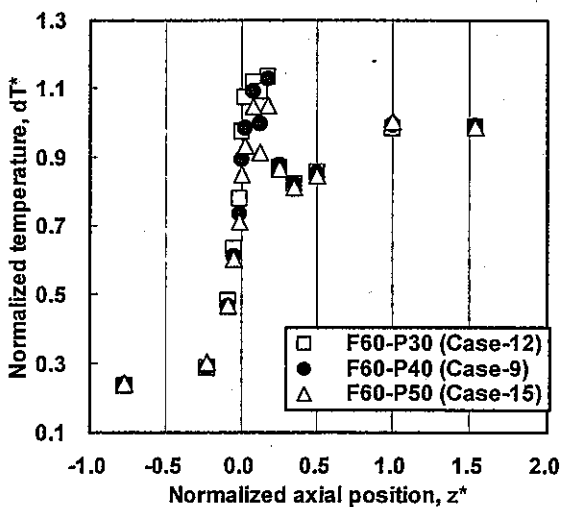
(b-1) High flow-rate condition 60[%]      (b-2) Low flow-rate condition 15[%]

(b) Influence of power

Figure5-1.1 Characteristics of Axial Distribution of Sodium Temperature at Outer Subchannel in the Blockage Region, Point-A.

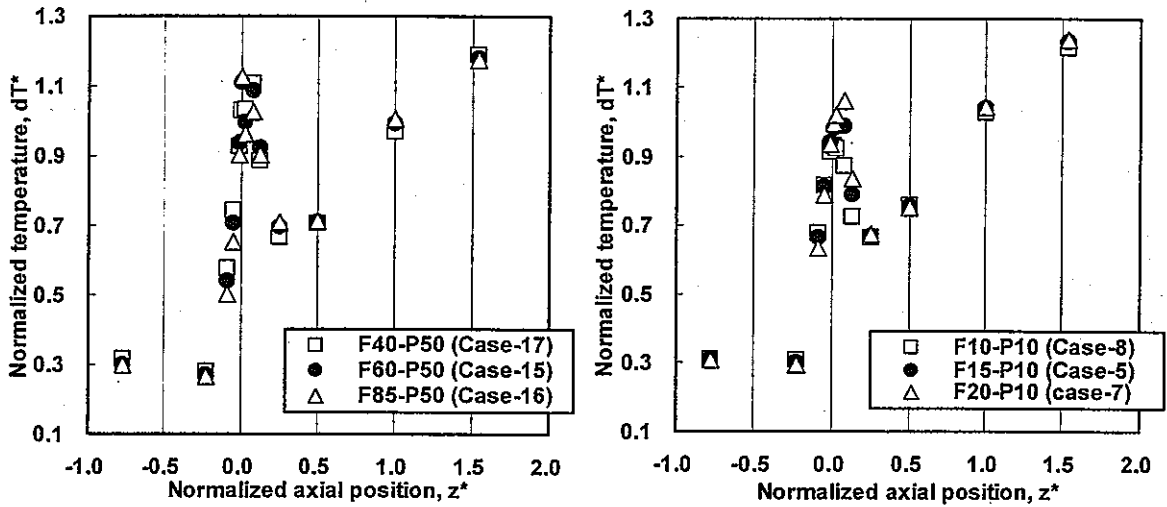
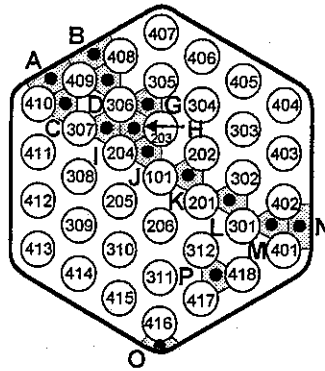


(a-1) High power condition 50% (a-2) Low power condition 10%  
 (a) Influence of flow-rate



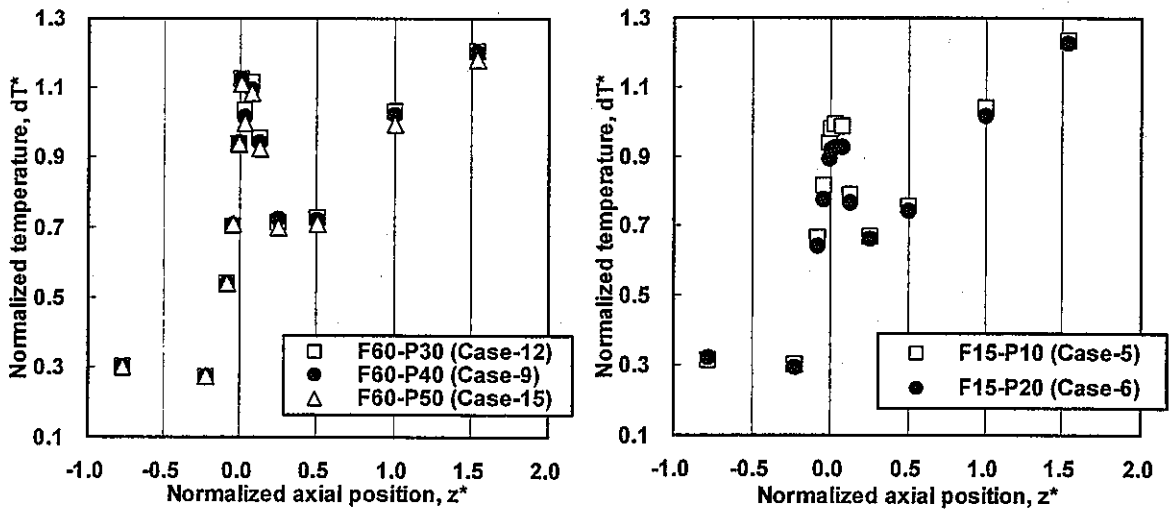
(b-1) High flow-rate condition 60% (b-2) Low flow-rate condition 15%  
 (b) Influence of power

Figure5-1.2 Characteristics of Axial Distribution of Sodium Temperature at Outer Subchannel in the Blockage Region, Point-B.



(a-1) High power condition 50[%]      (a-2) Low power condition 10[%]

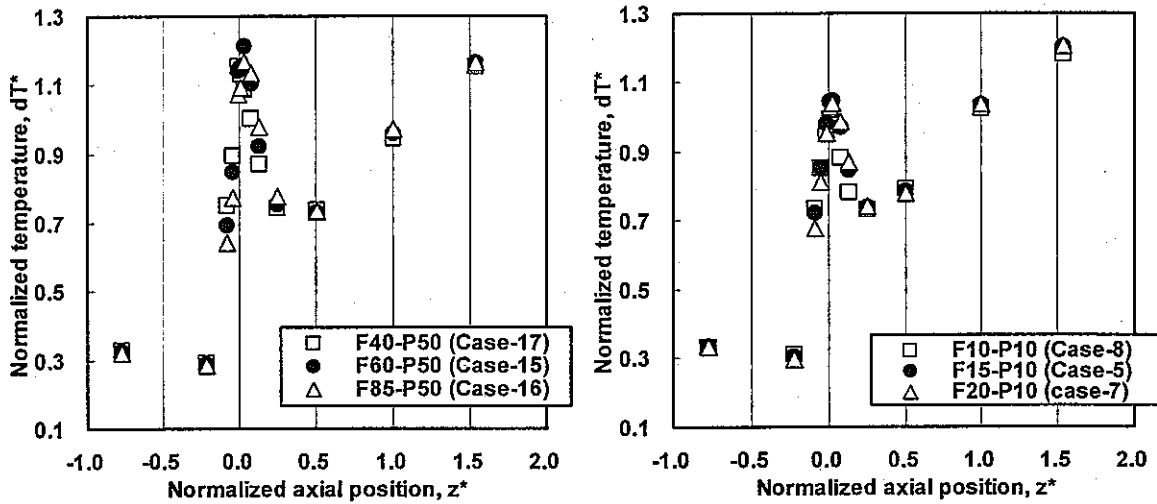
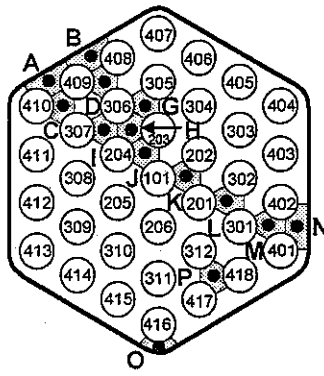
(a) Influence of flow-rate



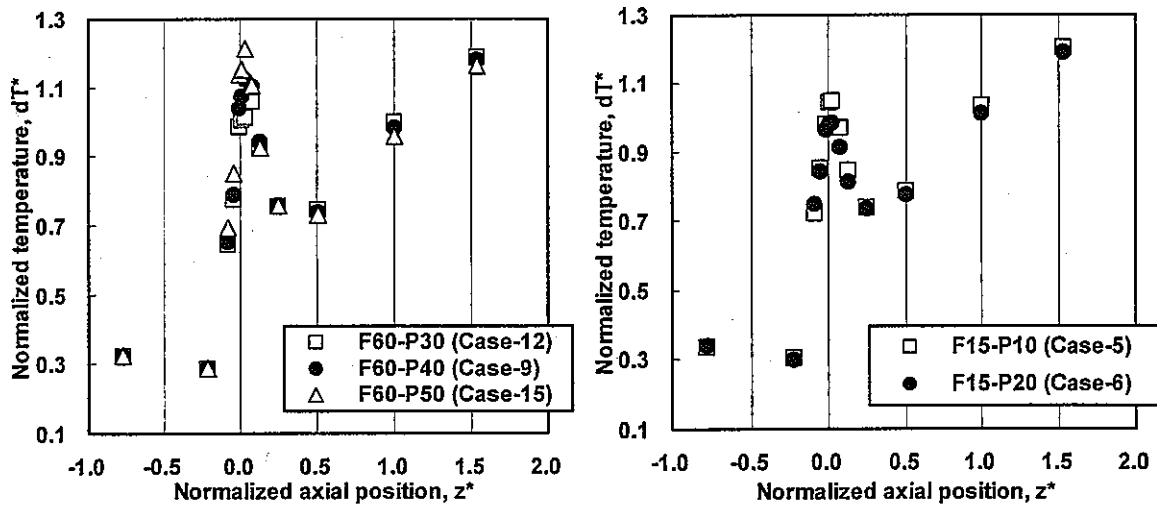
(b-1) High flow-rate condition 60[%]      (b-2) Low flow-rate condition 15[%]

(b) Influence of power

Figure5-1.3 Characteristics of Axial Distribution of Sodium Temperature at Inner Subchannel in the Blockage Region, Point-C.

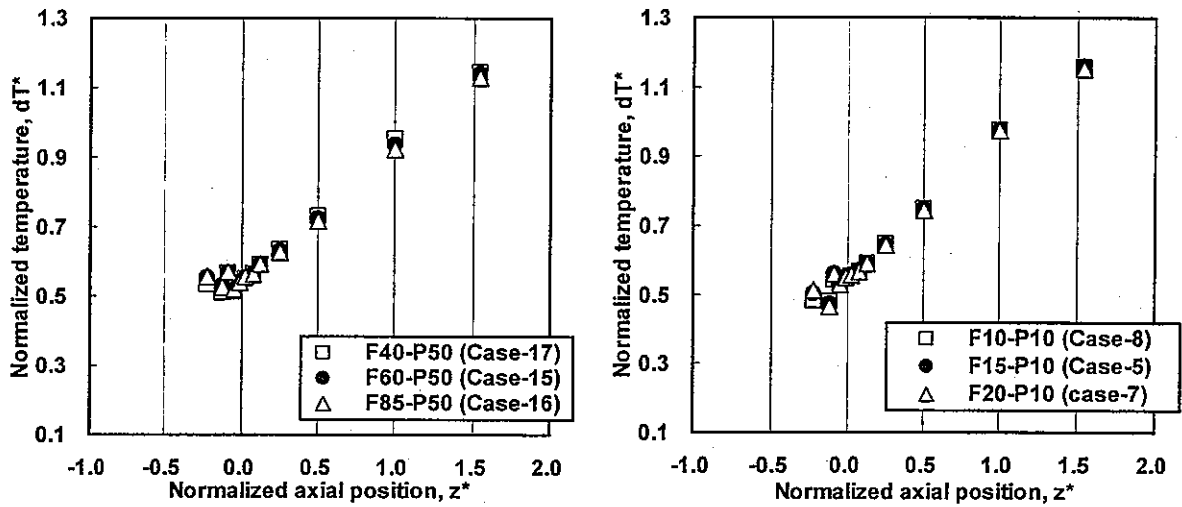
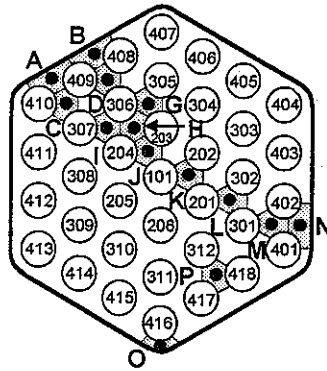


(a-1) High power condition 50%      (a-2) Low power condition 10%  
 (a) Influence of flow-rate

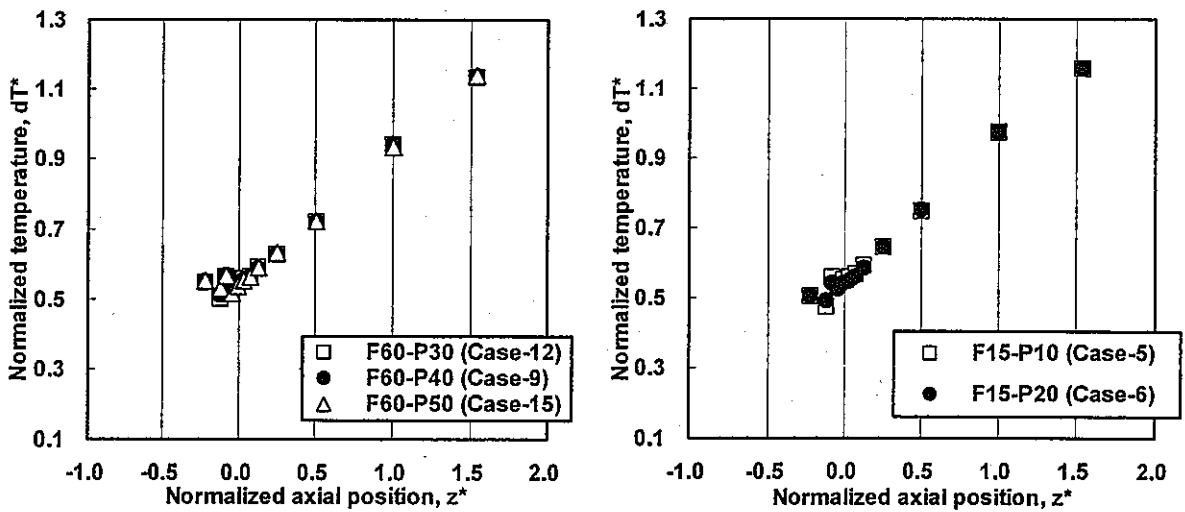


(b-1) High flow-rate condition 60%      (b-2) Low flow-rate condition 15%  
 (b) Influence of power

Figure5-1.4 Characteristics of Axial Distribution of Sodium Temperature at Inner Subchannel in the Blockage Region, Point-D.

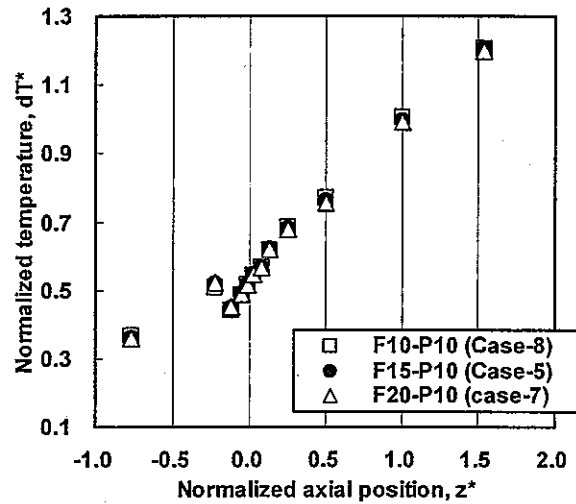
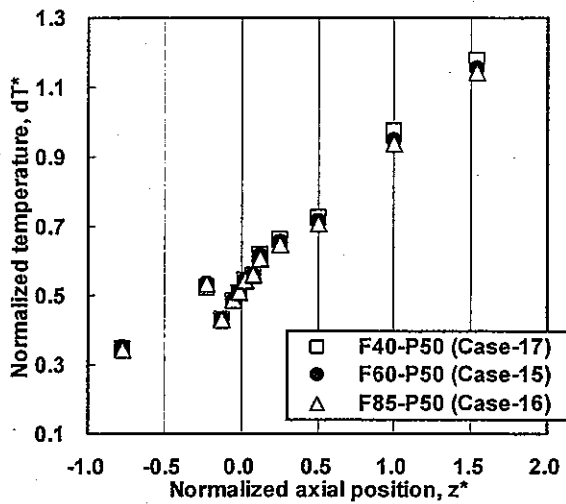
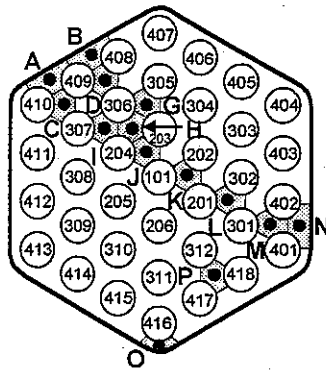


(a-1) High power condition 50[%]      (a-2) Low power condition 10[%]  
 (a) Influence of flow-rate

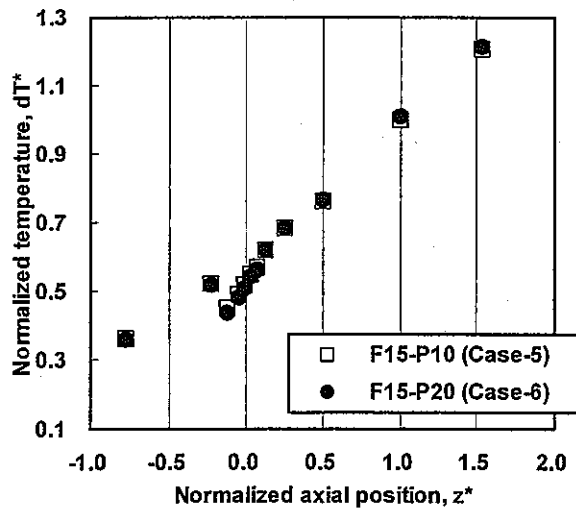
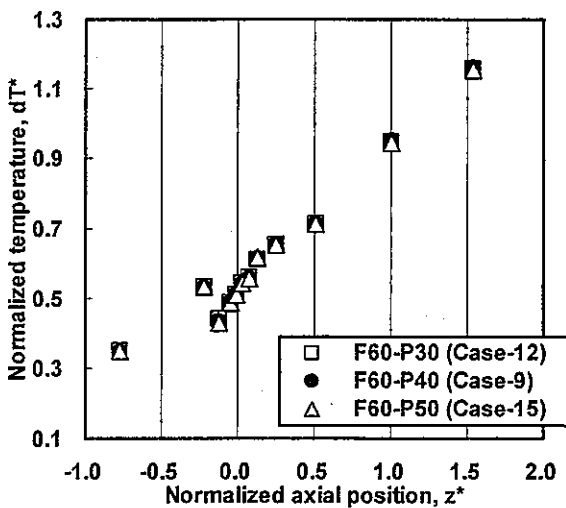


(b-1) High flow-rate condition 60[%]      (b-2) Low flow-rate condition 15[%]  
 (b) Influence of power

Figure5-1.5 Characteristics of Axial Distribution of Sodium Temperature at Inner Subchannel near the Blockage Region, Point-G.

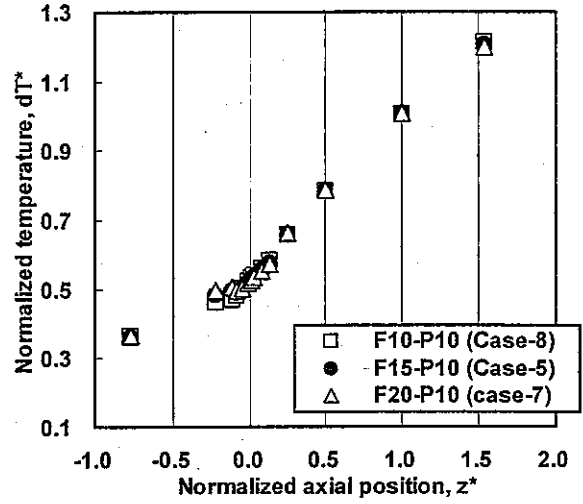
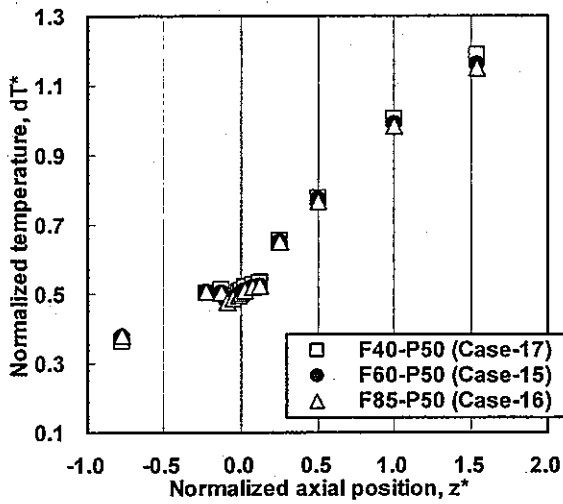
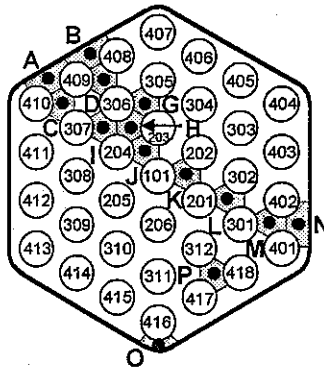


(a-1) High power condition 50[%]    (a-2) Low power condition 10[%]  
 (a) Influence of flow-rate



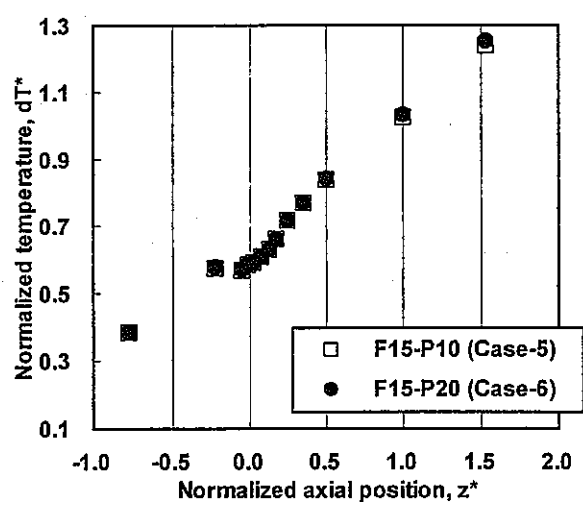
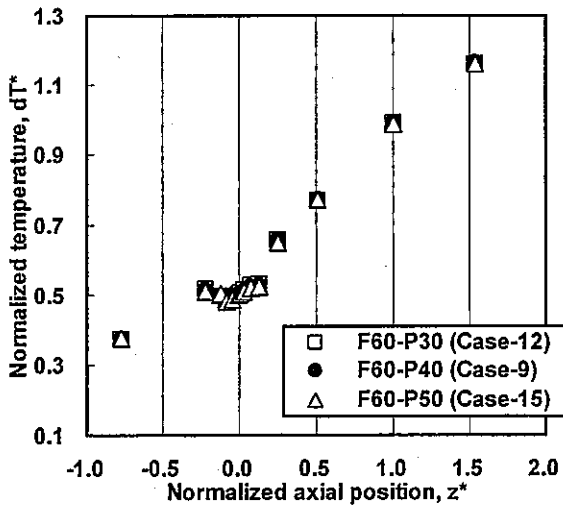
(b-1) High flow-rate condition 60[%]    (b-2) Low flow-rate condition 15[%]  
 (b) Influence of power

Figure5-1.6 Characteristics of Axial Distribution of Sodium Temperature at Inner Subchannel near the Blockage Region, Point-H.



(a-1) High power condition 50[%]      (a-2) Low power condition 10[%]

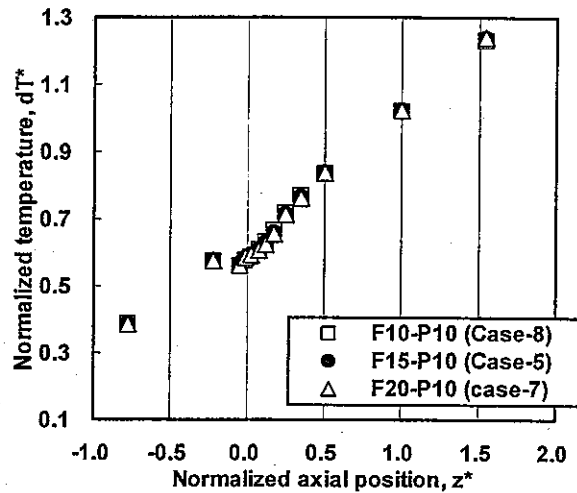
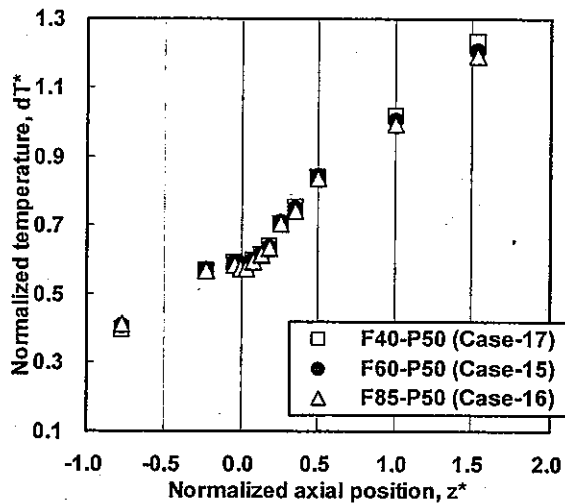
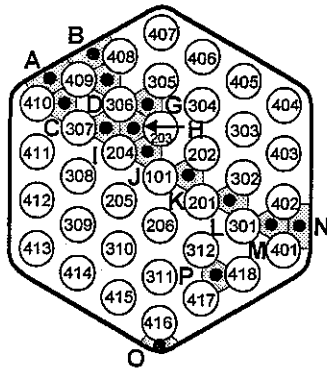
(a) Influence of flow-rate



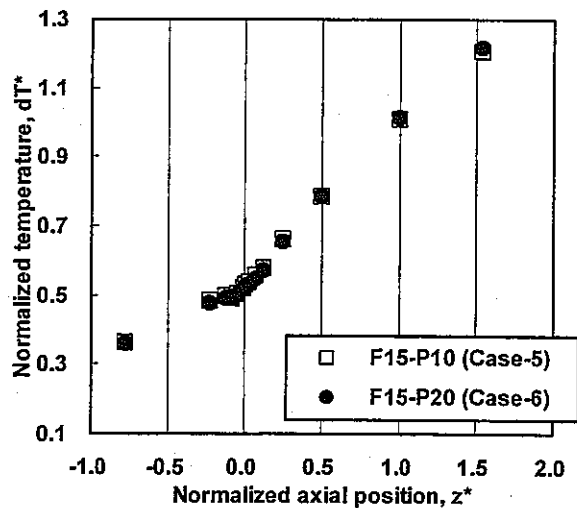
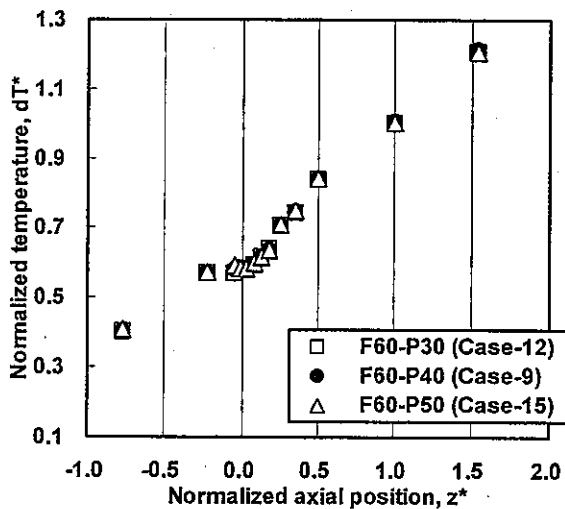
(b-1) High flow-rate condition 60[%]      (b-2) Low flow-rate condition 15[%]

(b) Influence of power

Figure5-1.7 Characteristics of Axial Distribution of Sodium Temperature at Inner Subchannel near the Blockage Region, Point-I.



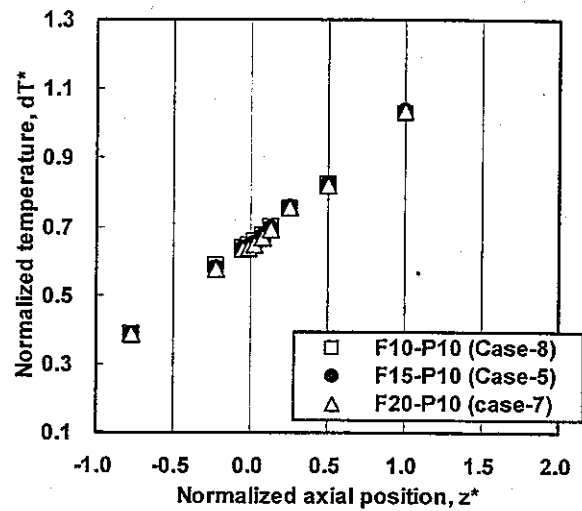
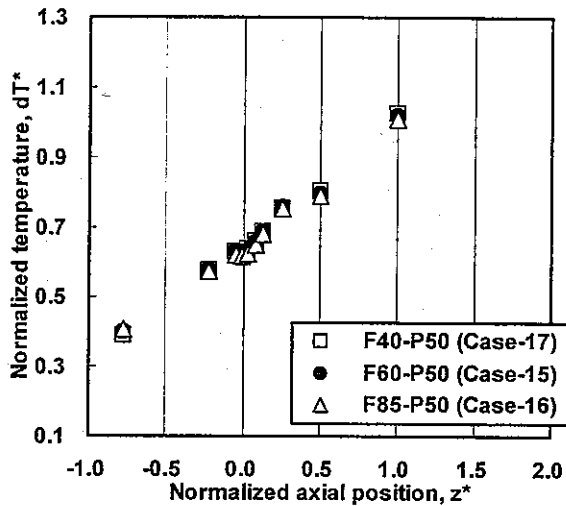
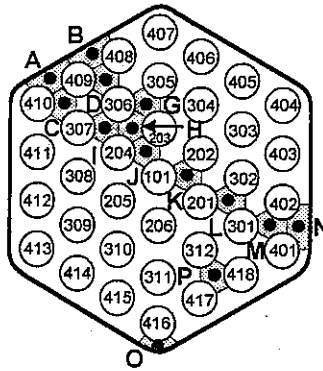
(a-1) High power condition 50[%]    (a-2) Low power condition 10[%]  
 (a) Influence of flow-rate



(b-1) High flow-rate condition 60[%]    (b-2) Low flow-rate condition 15[%]  
 (b) Influence of power

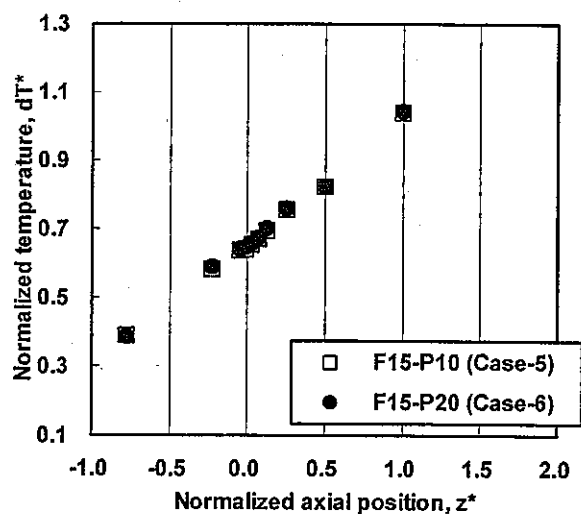
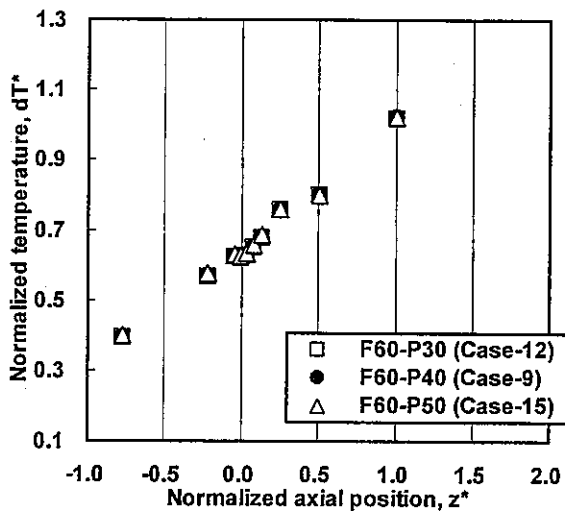
Figure5-1.8 . Characteristics of Axial Distribution of Sodium Temperature at Inner Subchannel in the Center Part of Subassembly, Point-J.





(a-1) High power condition 50[%]      (a-2) Low power condition 10[%]

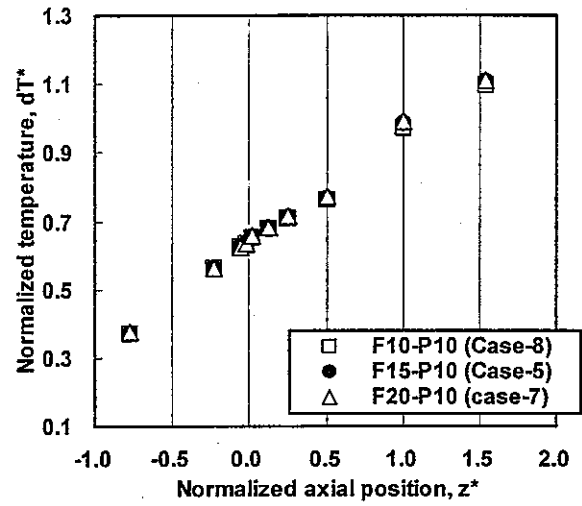
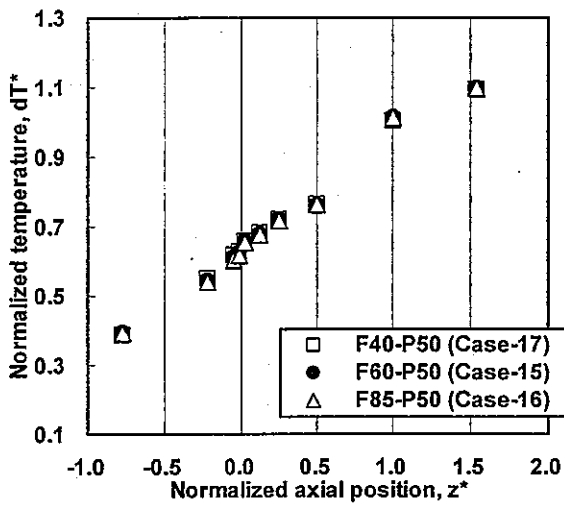
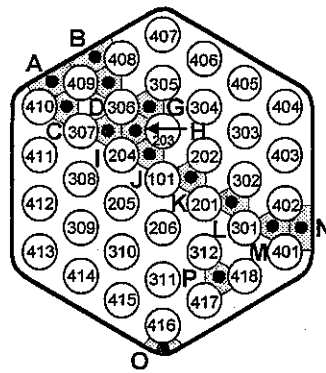
(a) Influence of flow-rate



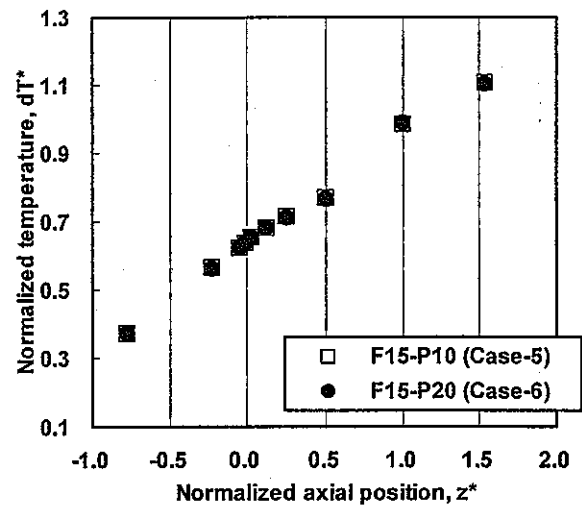
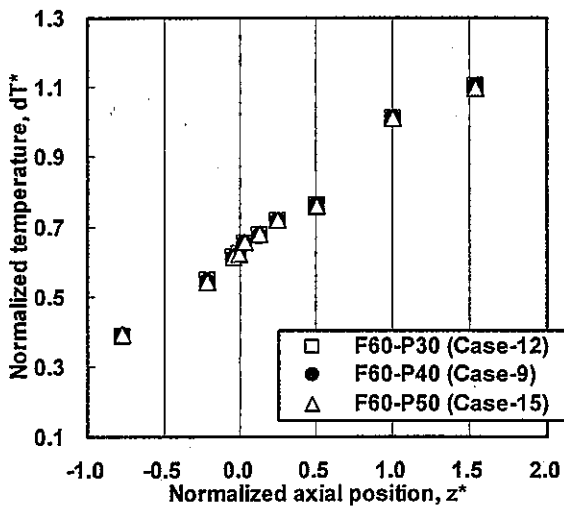
(b-1) High flow-rate condition 60[%]      (b-2) Low flow-rate condition 15[%]

(b) Influence of power

Figure5-1.9 Characteristics of Axial Distribution of Sodium Temperature at Inner Subchannel in the Center Part of Subassembly, Point-K.

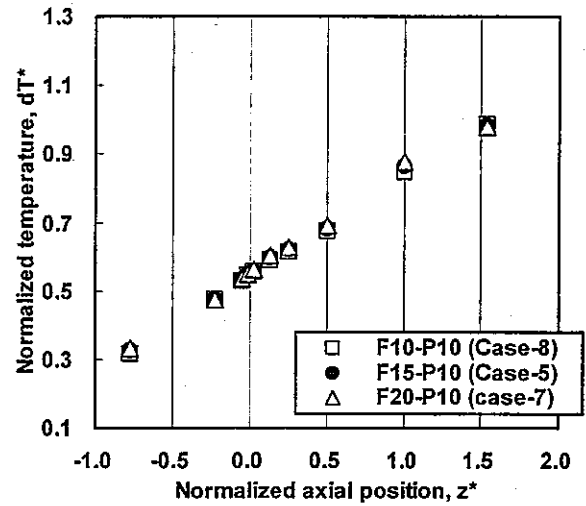
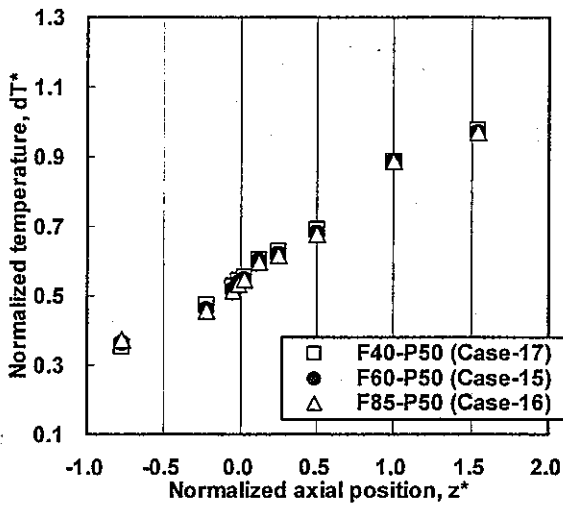
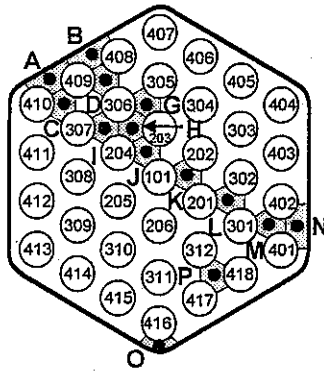


(a-1) High power condition 50% (a-2) Low power condition 10%  
(a) Influence of flow-rate

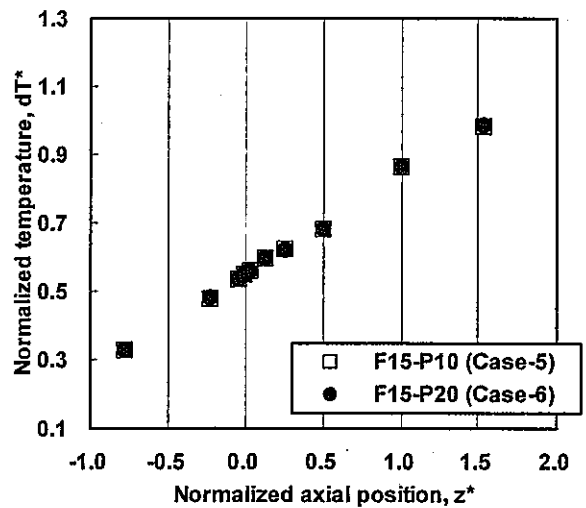
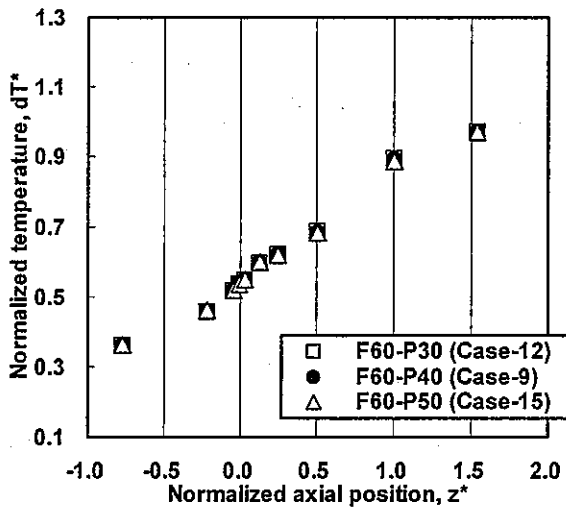


(b-1) High flow-rate condition 60% (b-2) Low flow-rate condition 15%  
(b) Influence of power

Figure5-1.10 Characteristics of Axial Distribution of Sodium Temperature at Inner Subchannel in the Opposite Side of Blockage, Point-L.

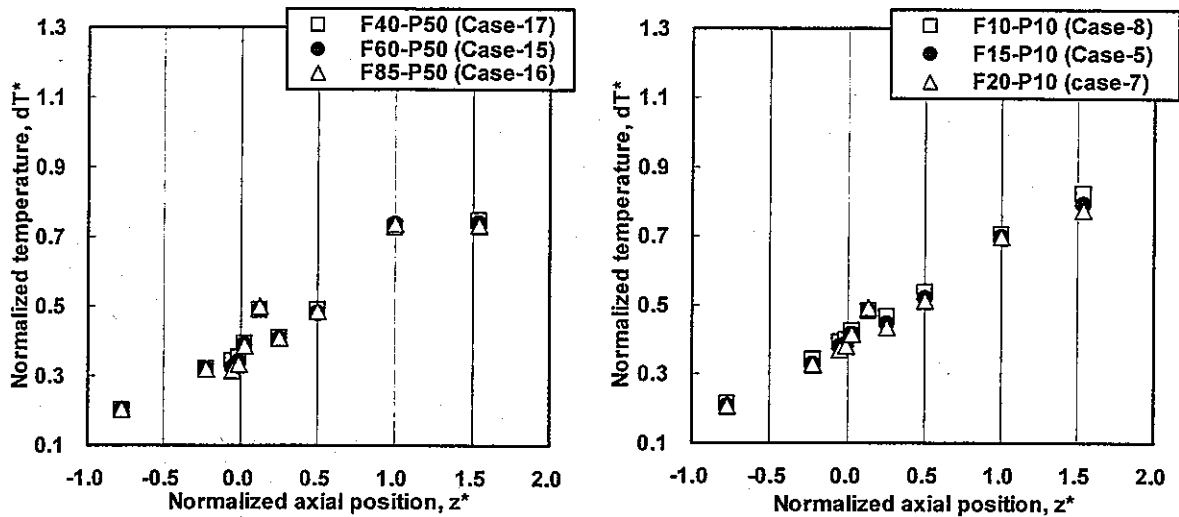
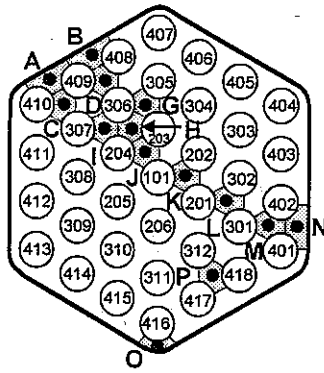


(a-1) High power condition 50[%]      (a-2) Low power condition 10[%]  
 (a) Influence of flow-rate

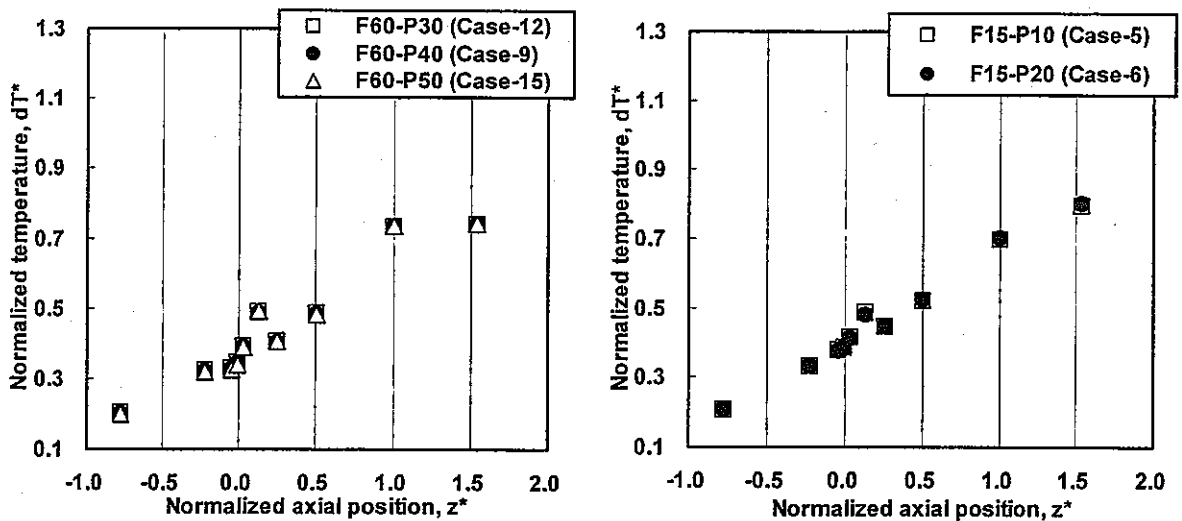


(b-1) High flow-rate condition 60[%]      (b-2) Low flow-rate condition 15[%]  
 (b) Influence of power

Figure5-1.12 Characteristics of Axial Distribution of Sodium Temperature at Inner Subchannel in the Opposite Side of Blockage, Point-M.

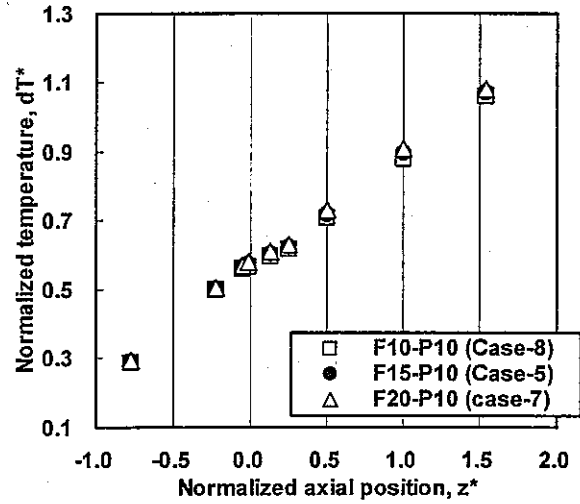
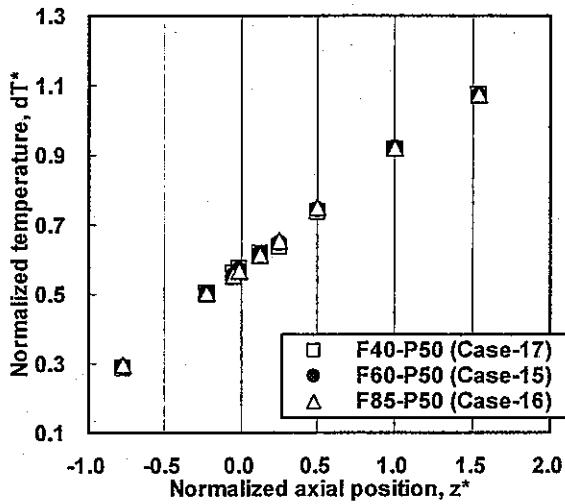
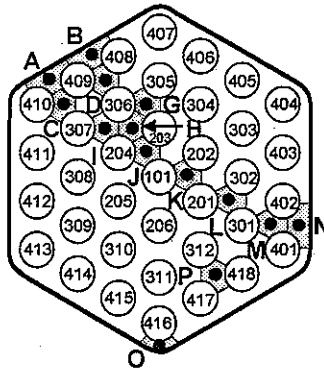


(a-1) High power condition 50[%]    (a-2) Low power condition 10[%]  
 (a) Influence of flow-rate

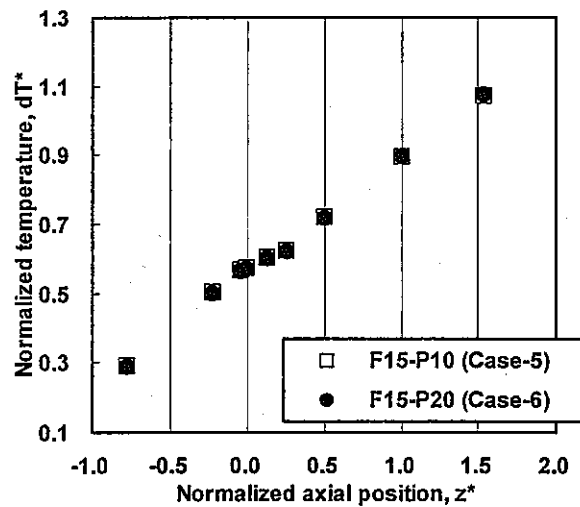
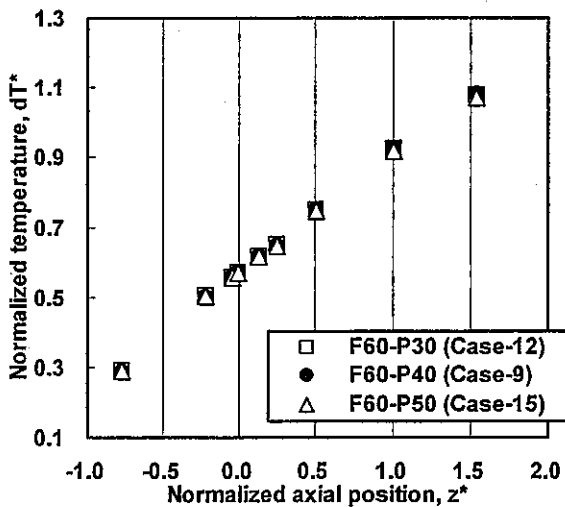


(b-1) High flow-rate condition 60[%]    (b-2) Low flow-rate condition 15[%]  
 (b) Influence of power

Figure5-1.13 Characteristics of Axial Distribution of Sodium Temperature at Inner Subchannel in the Opposite Side of Blockage, Point-N.

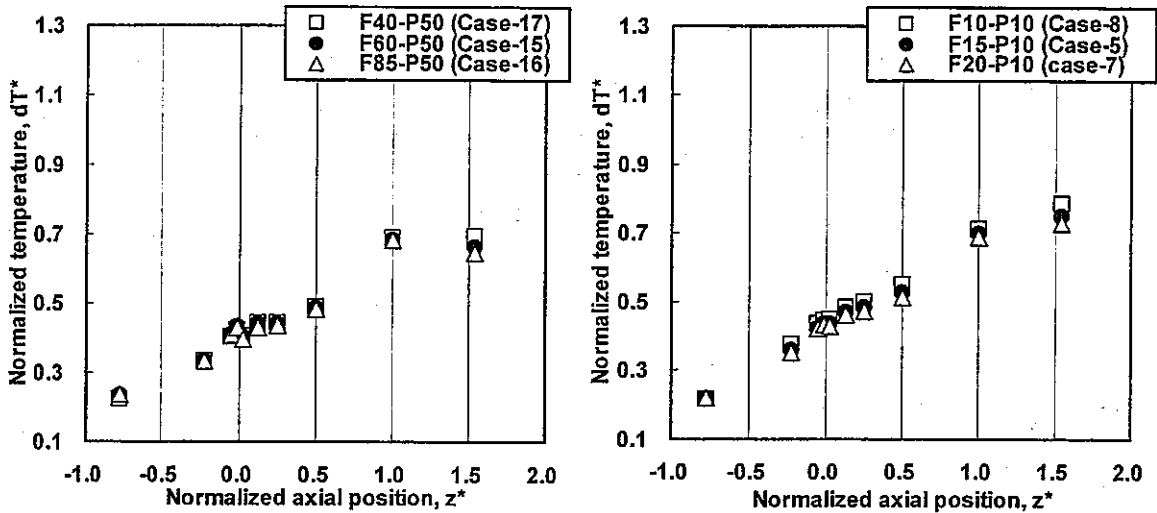
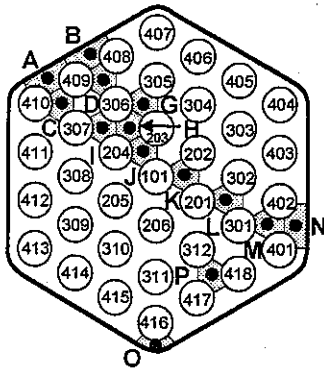


(a-1) High power condition 50[%]      (a-2) Low power condition 10[%]  
 (a) Influence of flow-rate

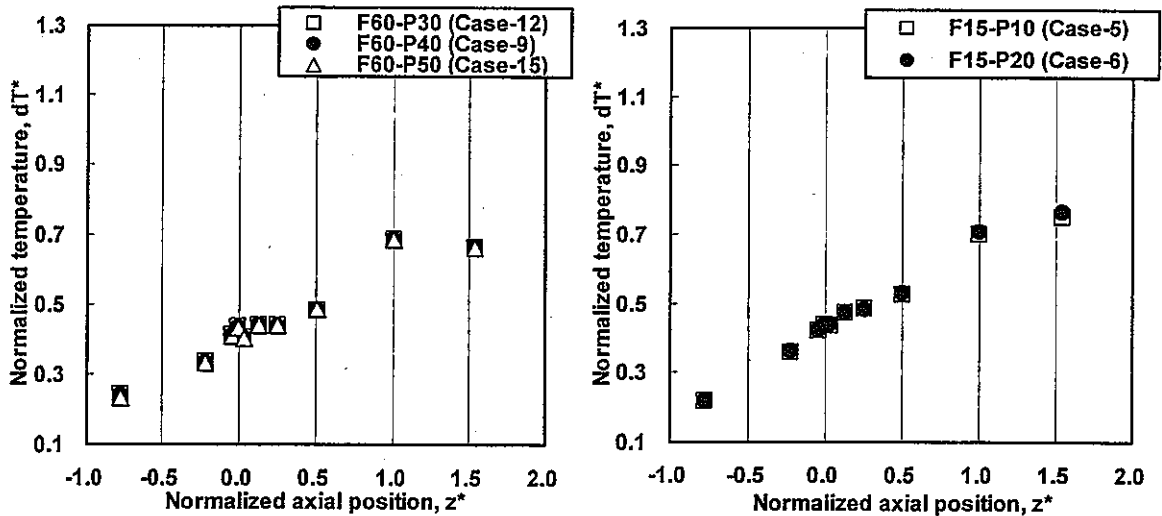


(b-1) High flow-rate condition 60[%]      (b-2) Low flow-rate condition 15[%]  
 (b) Influence of power

Figure5-1.14 Characteristics of Axial Distribution of Sodium Temperature at Corner Subchannel in the Opposite Side of Blockage, Point-O.



(a-1) High power condition 50[%]      (a-2) Low power condition 10[%]  
 (a) Influence of flow-rate



(b-1) High flow-rate condition 60[%]      (b-2) Low flow-rate condition 15[%]  
 (b) Influence of power

Figure5-1.15 Characteristics of Axial Distribution of Sodium Temperature at Inner Subchannel in the Opposite Side of Blockage, Point-P.

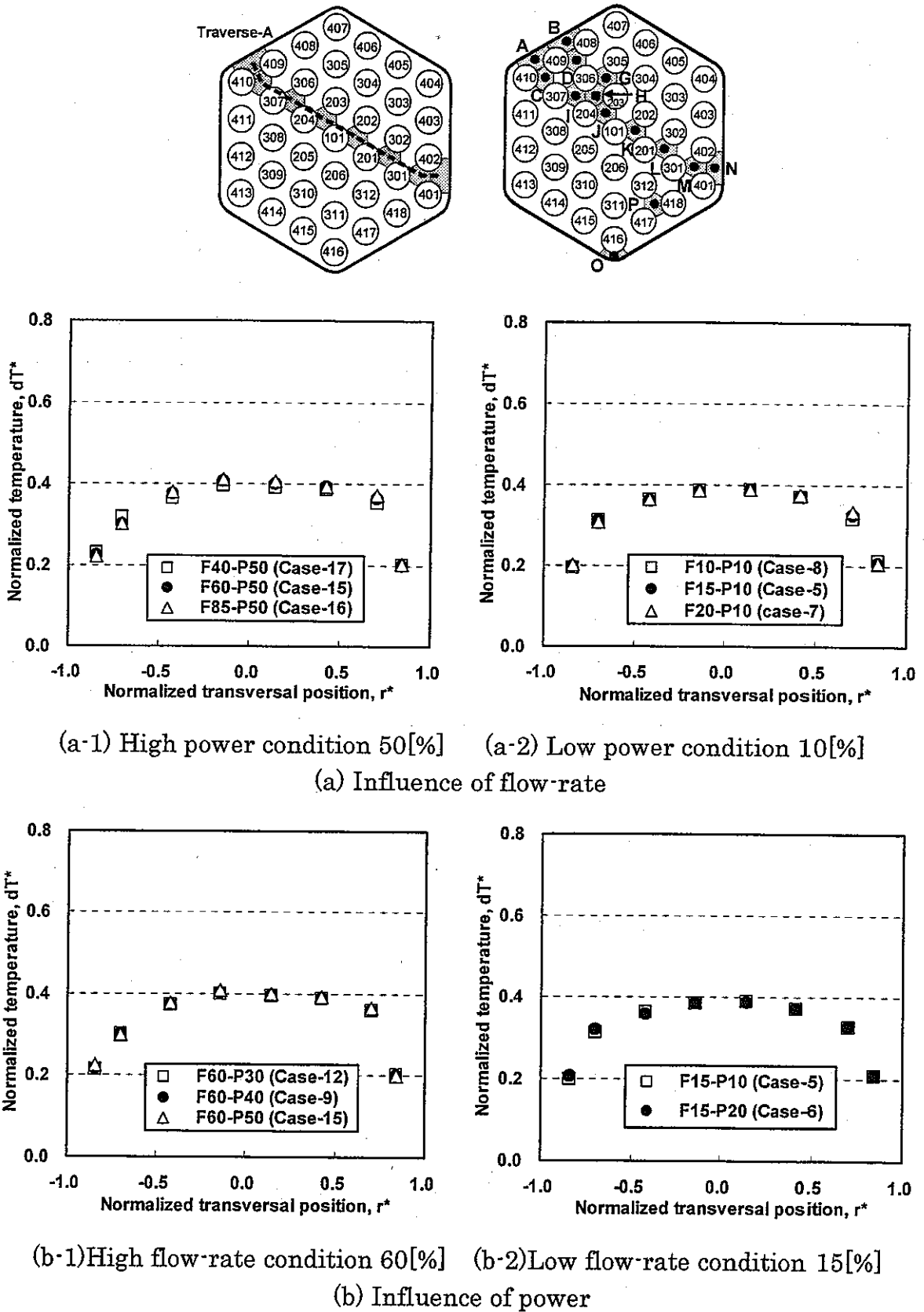


Figure5-2.1 Characteristics of Transversal Distribution of Sodium Temperature along Traverse-A in the Upstream Side of Blockage on Cross-section BA ( $z=-155$ [mm]).

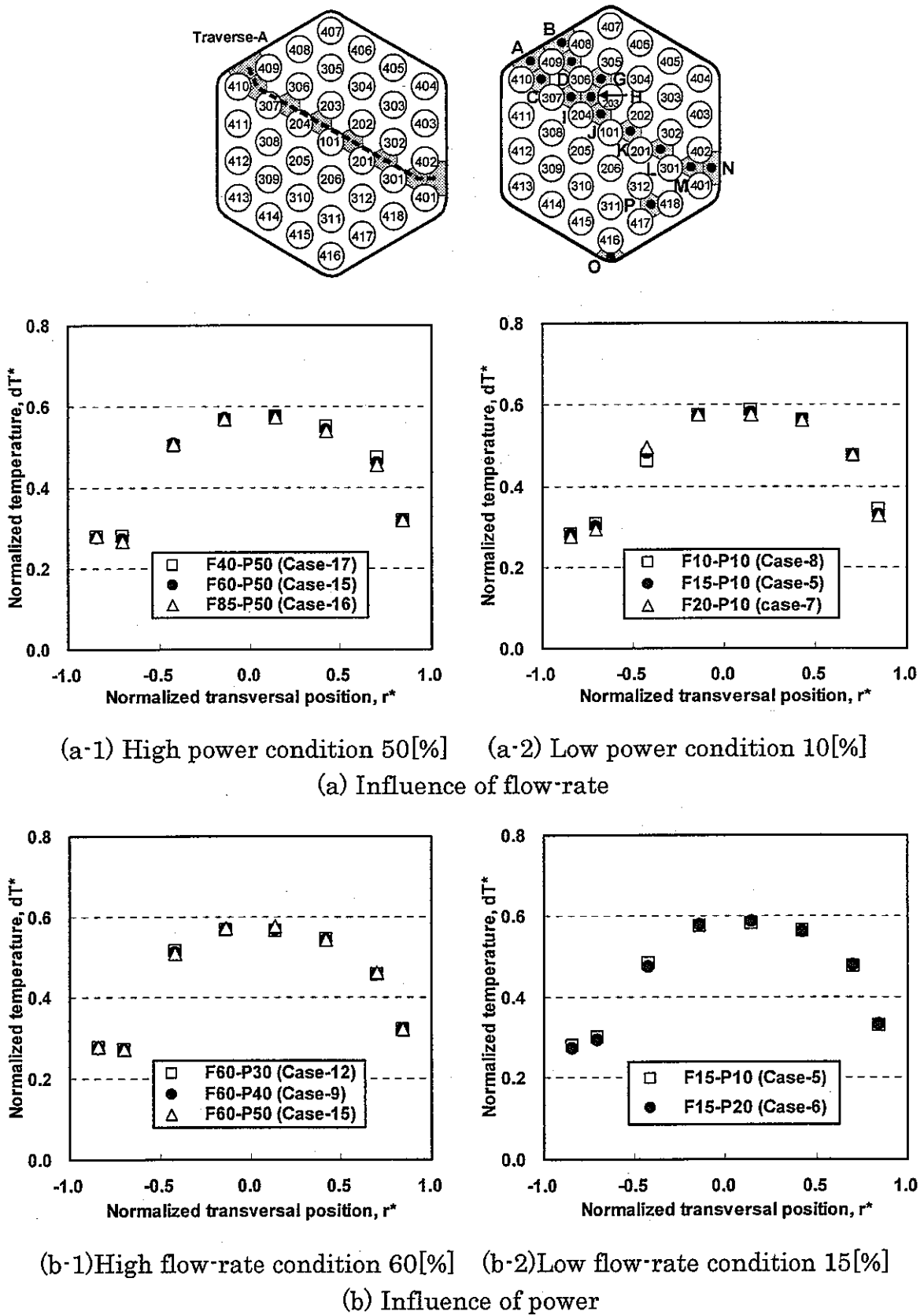
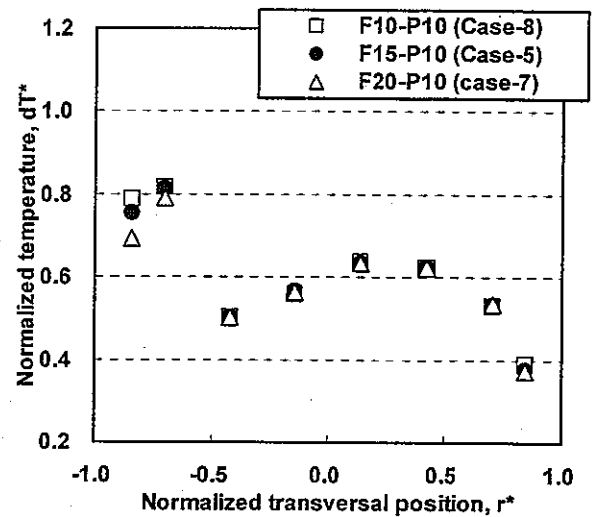
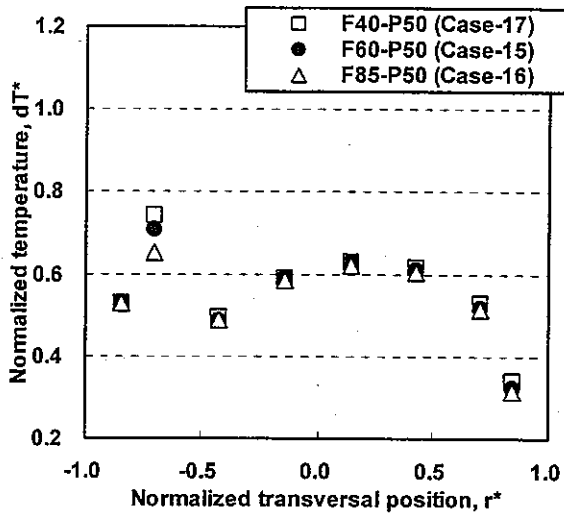
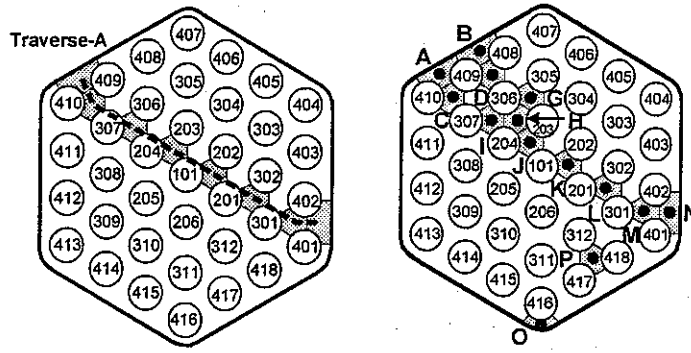
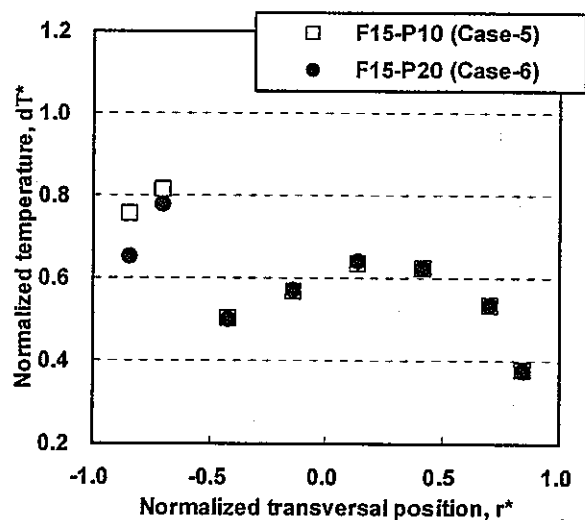
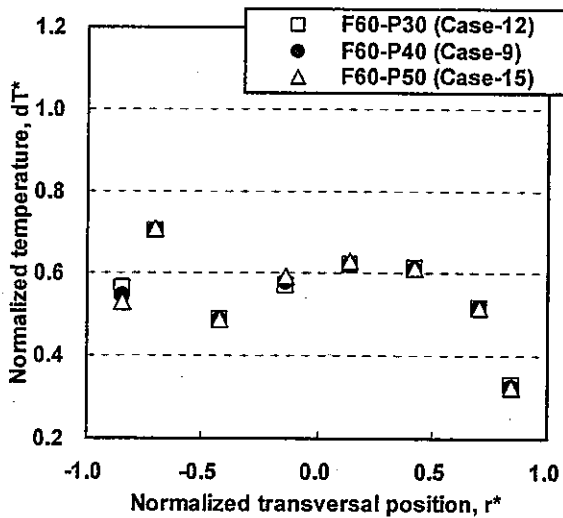


Figure5-2.2 Characteristics of Transversal Distribution of Sodium Temperature along Traverse-A in the Upstream Side of Blockage on the Cross-section BB ( $z=-45$ [mm]).



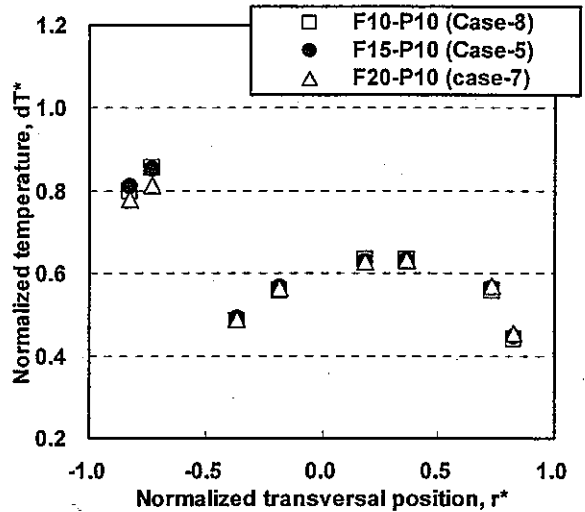
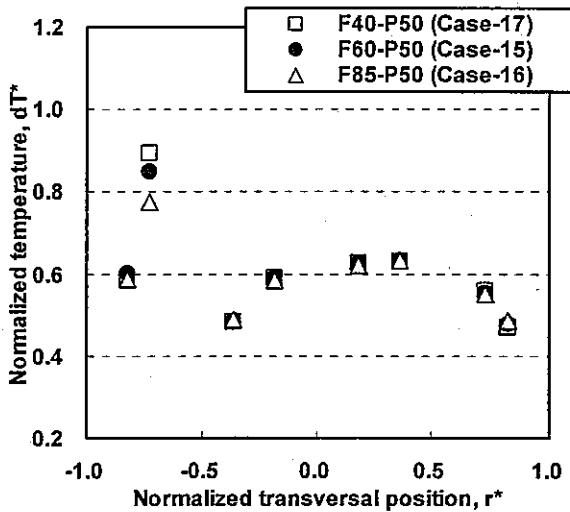
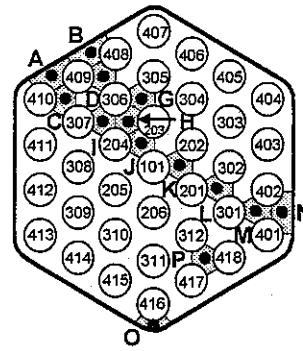
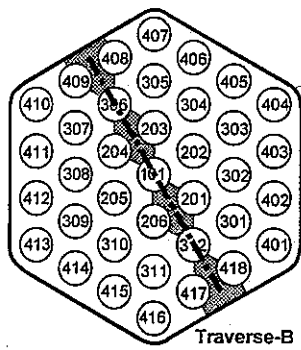


(a-1) High power condition 50[%] (a-2) Low power condition 10[%]  
 (a) Influence of flow-rate

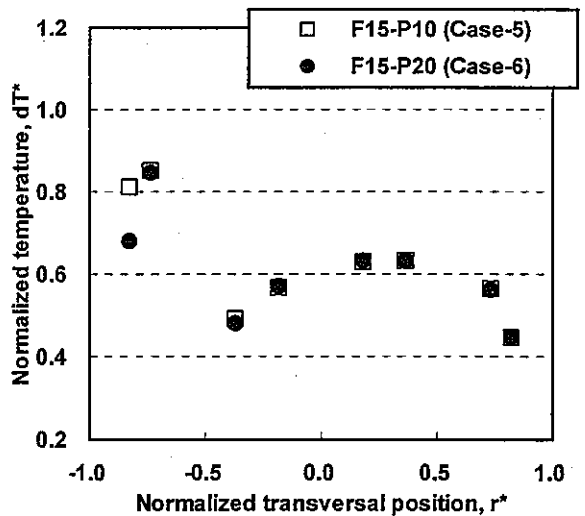
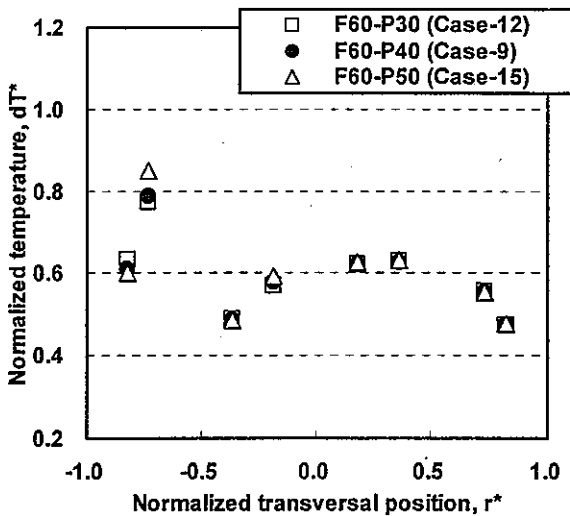


(b-1) High flow-rate condition 60[%] (b-2) Low flow-rate condition 15[%]  
 (b) Influence of power

Figure5-2.3 Characteristics of Transversal Distribution of Sodium Temperature along Traverse-A in the Blockage Region on Cross-section CC ( $z=-10$ [mm]).

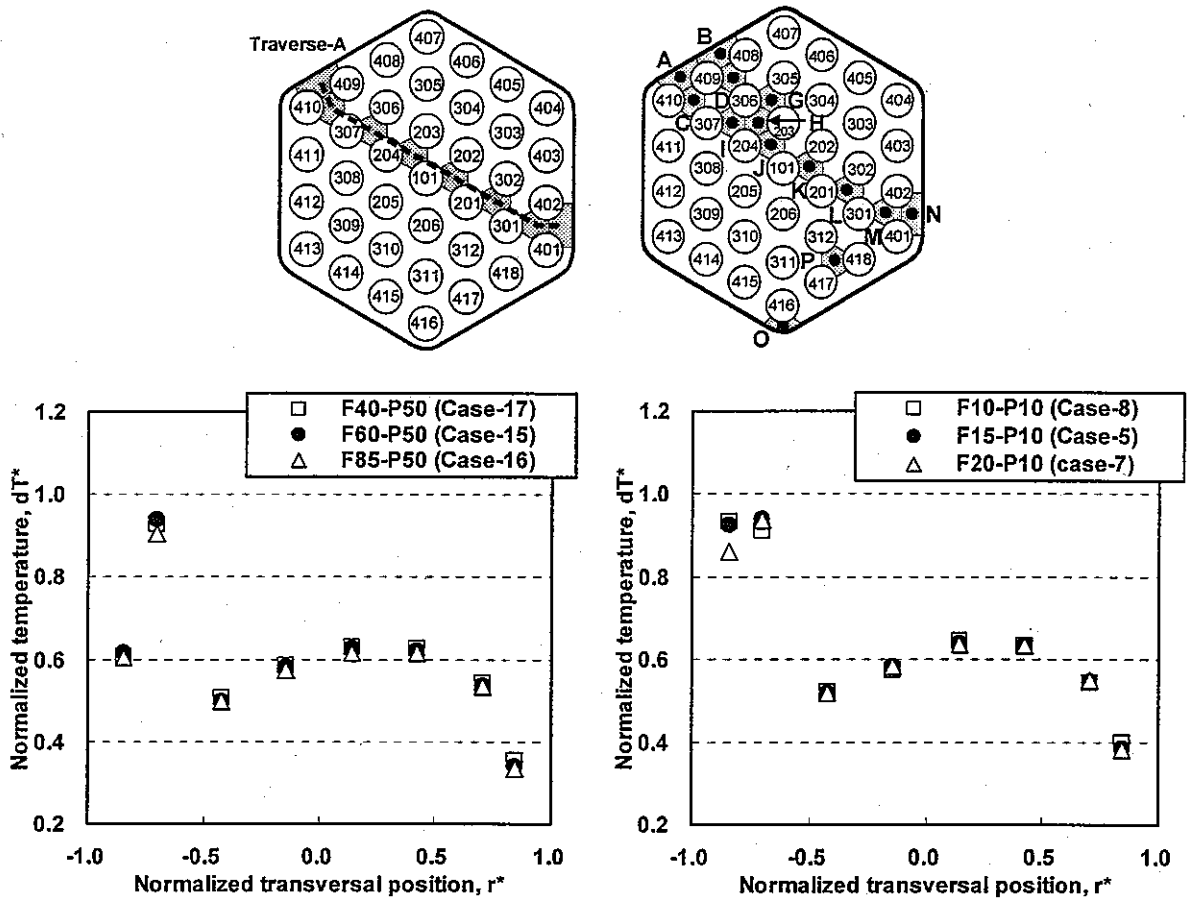


(a-1) High power condition 50% (a-2) Low power condition 10%  
 (a) Influence of flow-rate



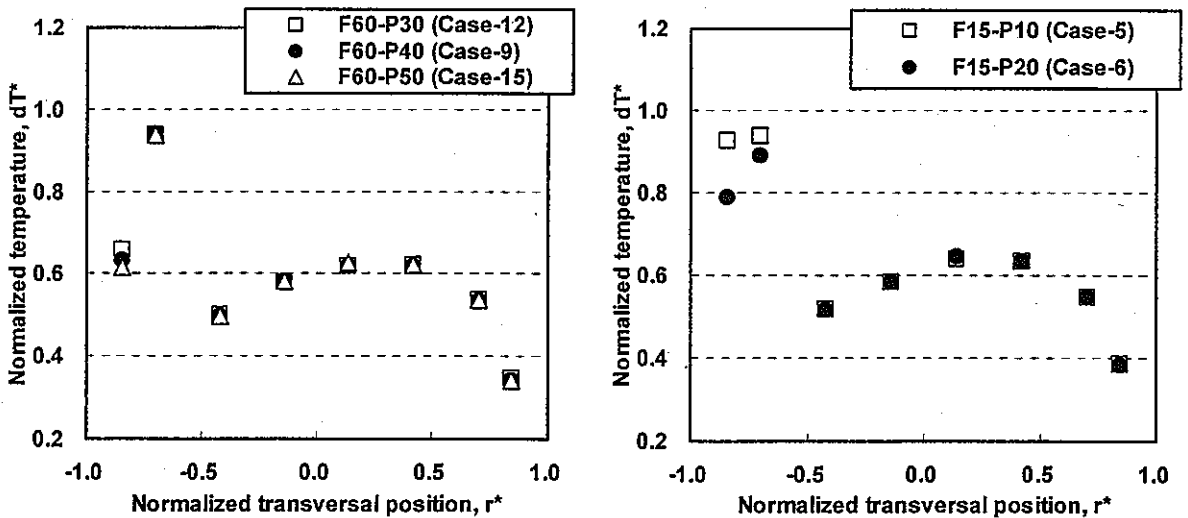
(b-1) High flow-rate condition 60% (b-2) Low flow-rate condition 15%  
 (b) Influence of power

Figure 5-2.4 Characteristics of Transversal Distribution of Sodium Temperature along Traverse-B in the Blockage Region on the Cross-section CC ( $z=-10$ [mm]).



(a-1) High power condition 50[%]      (a-2) Low power condition 10[%]

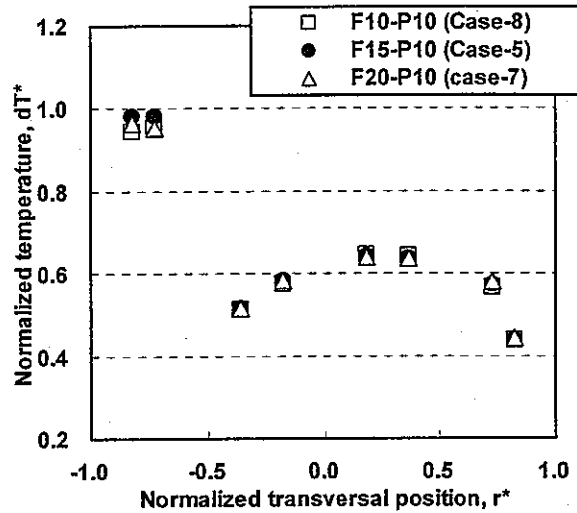
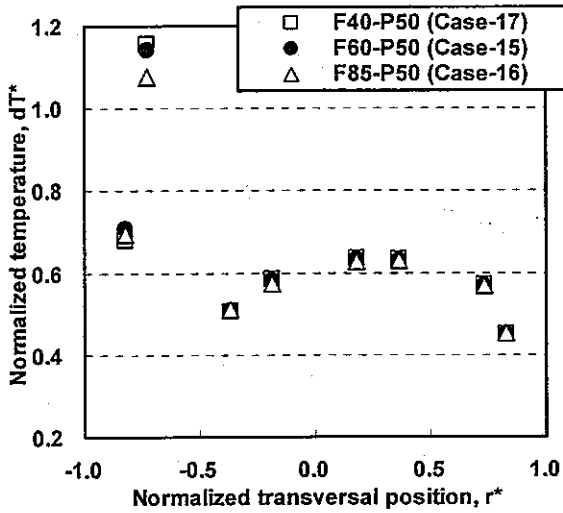
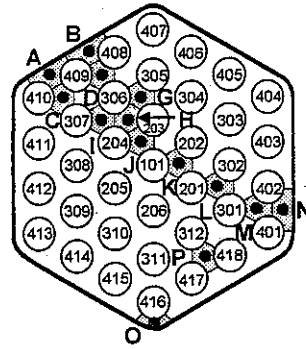
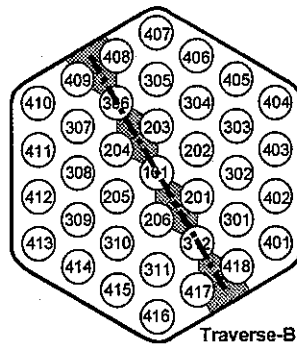
(a) Influence of flow-rate



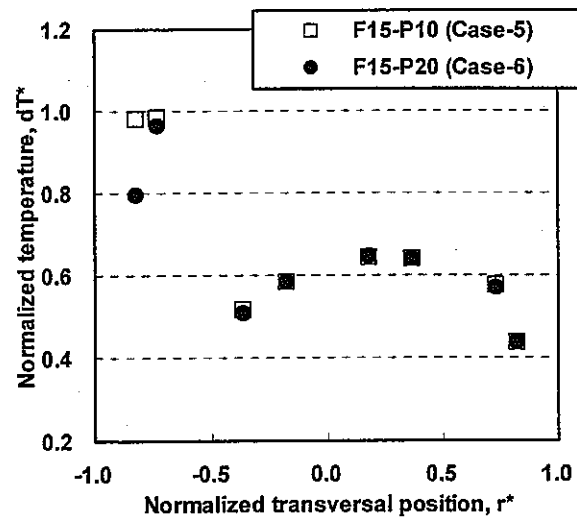
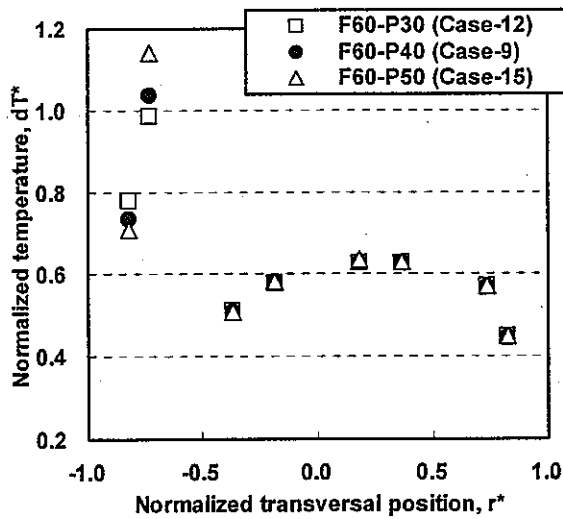
(b-1) High flow-rate condition 60[%]      (b-2) Low flow-rate condition 15[%]

(b) Influence of power

Figure5-2.5 Characteristics of Transversal Distribution of Sodium Temperature along Traverse-A in the Blockage Region on Cross-section CD ( $z=-2.5$ [mm]).

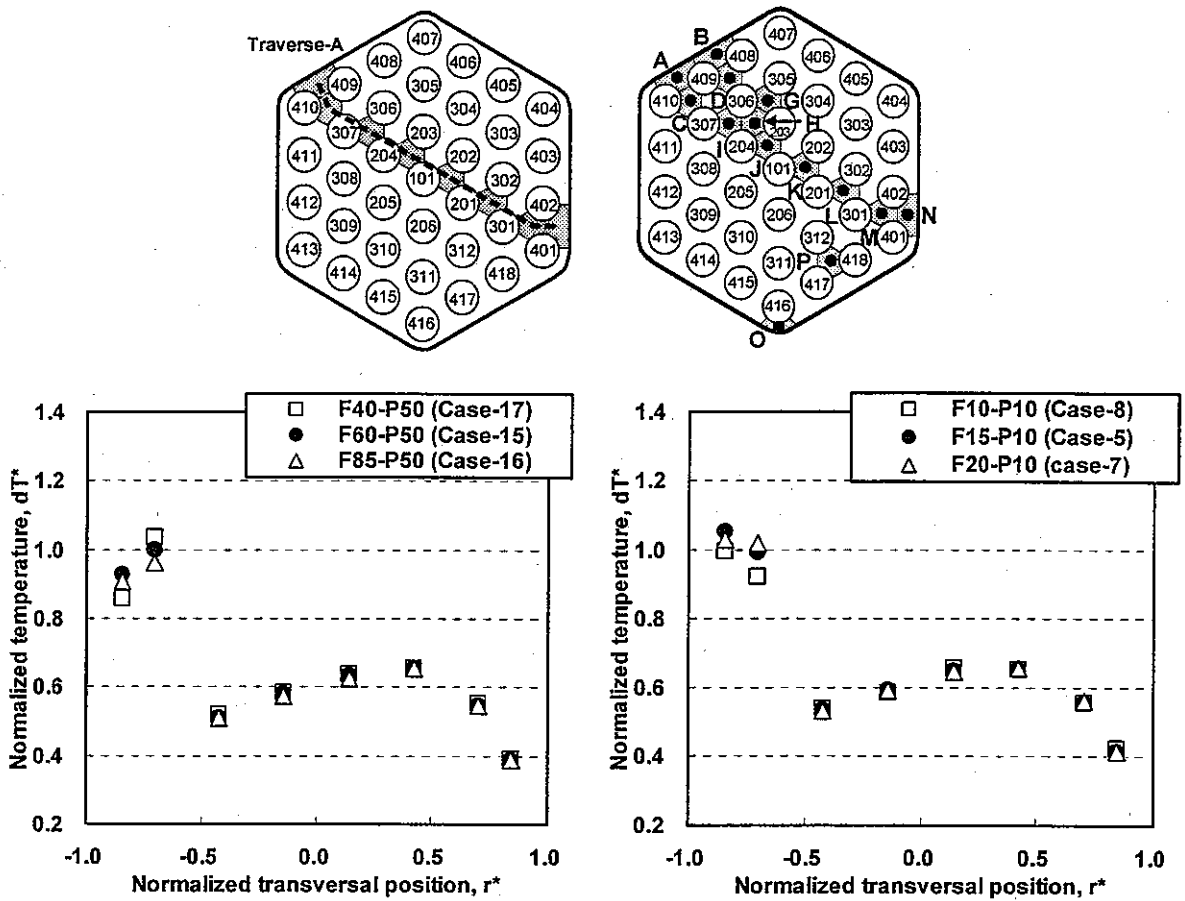


(a-1) High power condition 50% (a-2) Low power condition 10%  
 (a) Influence of flow-rate

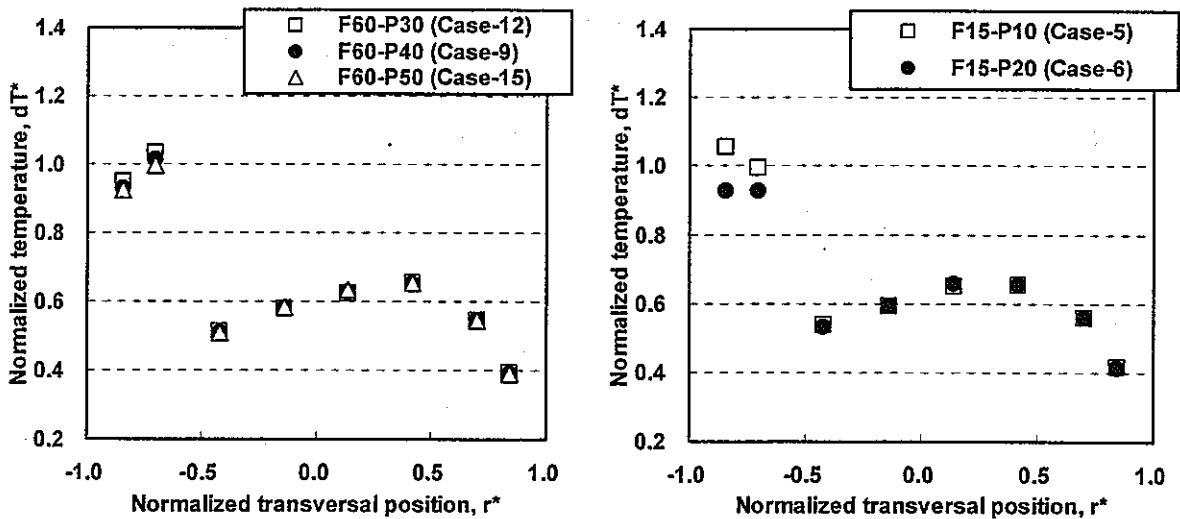


(b-1) High flow-rate condition 60% (b-2) Low flow-rate condition 15%  
 (b) Influence of power

Figure5-2.6 Characteristics of Transversal Distribution of Sodium Temperature along Traverse-B in the Blockage Region on Cross-section CD ( $z=-2.5$ [mm]).



(a-1) High power condition 50[%]      (a-2) Low power condition 10[%]  
 (a) Influence of flow-rate



(b-1) High flow-rate condition 60[%]      (b-2) Low flow-rate condition 15[%]  
 (b) Influence of power

Figure5-2.7 Characteristics of Transversal Distribution of Sodium Temperature along Traverse-A in the Downstream Side of Blockage on Cross-section DB ( $z=5[\text{mm}]$ ).

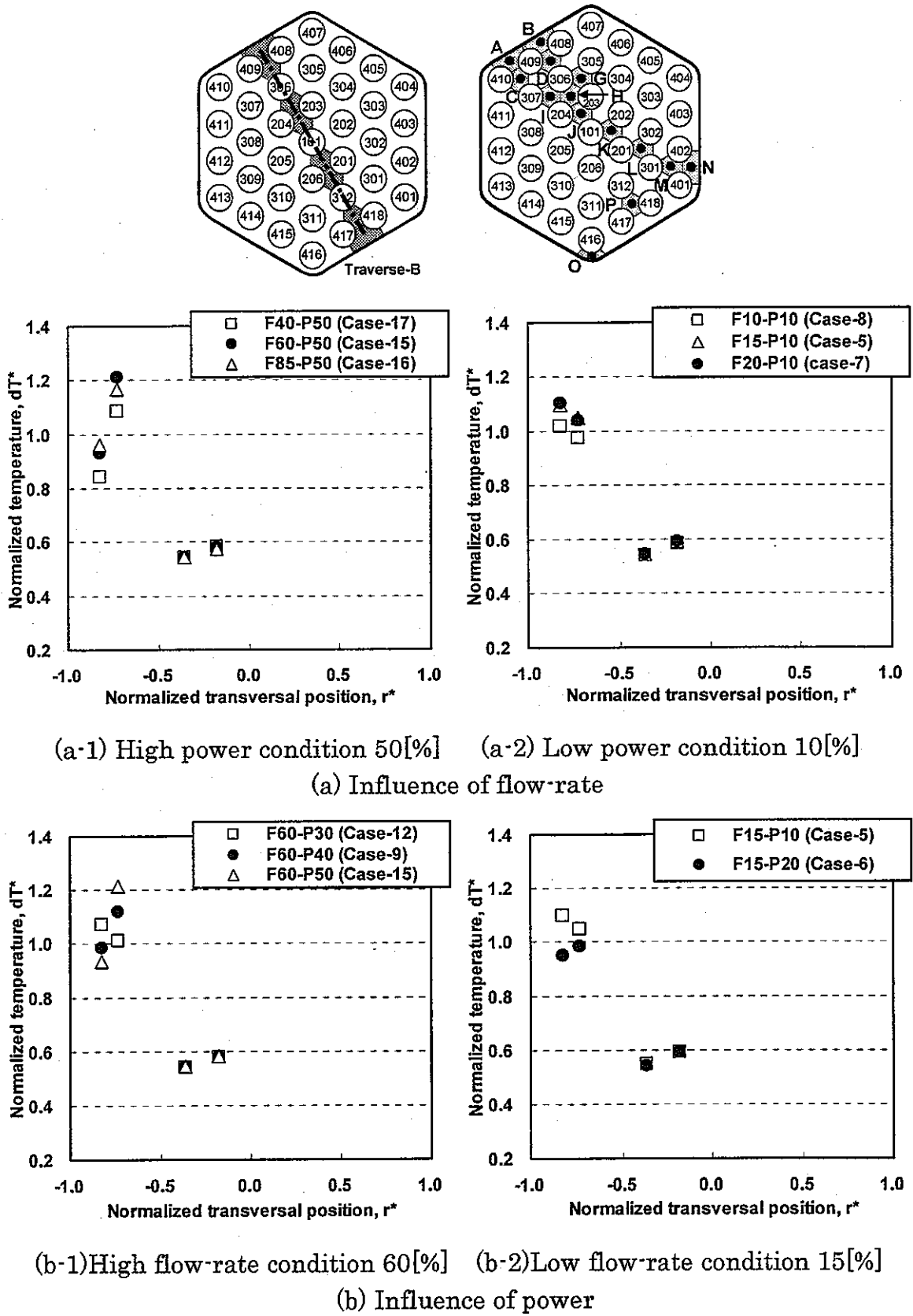
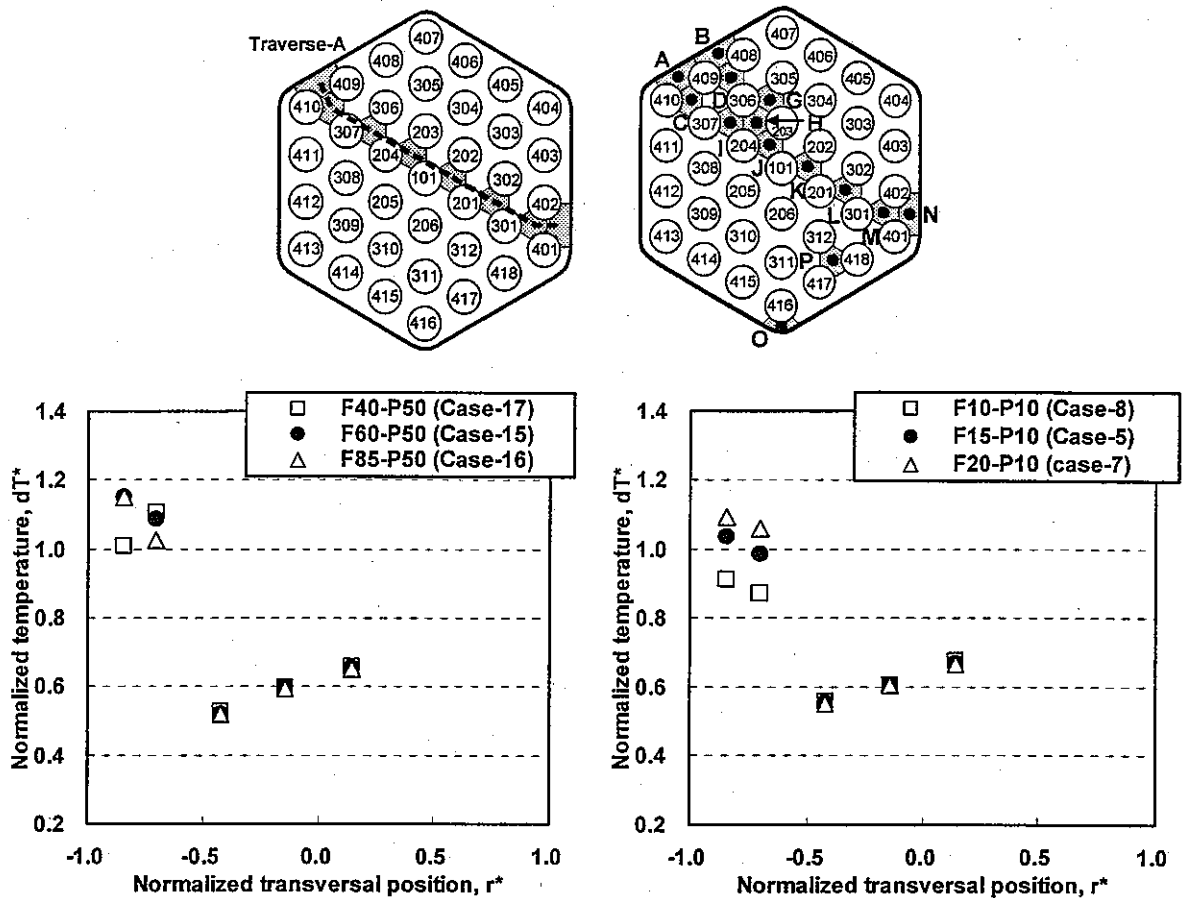
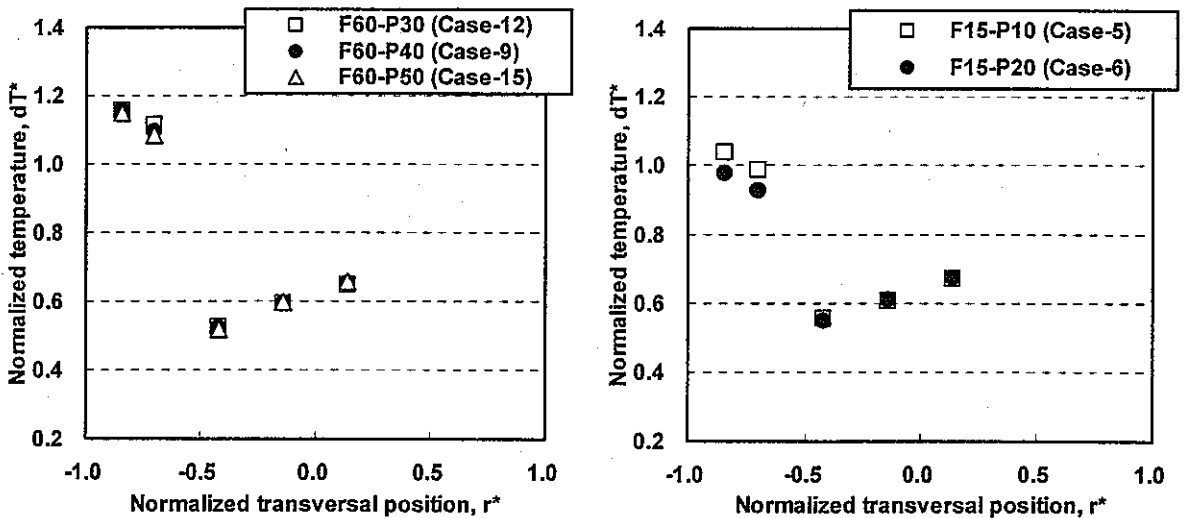


Figure5-2.8 Characteristics of Transversal Distribution of Sodium Temperature along Traverse-B in the Downstream Side of Blockage on Cross-section DB (z=5[mm]).

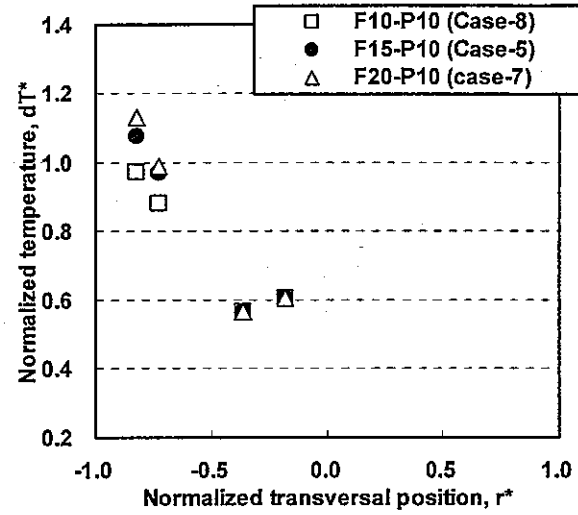
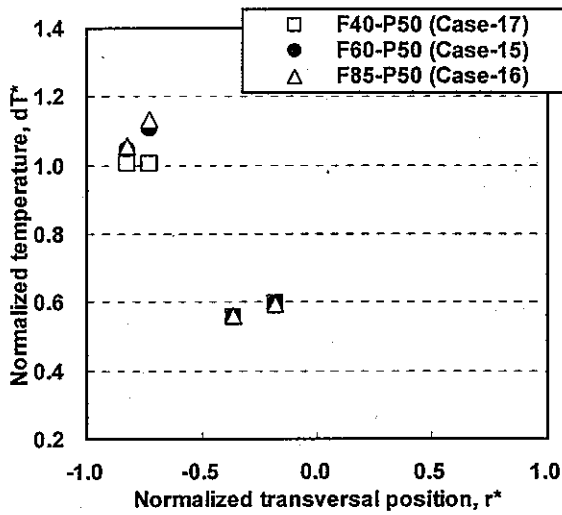
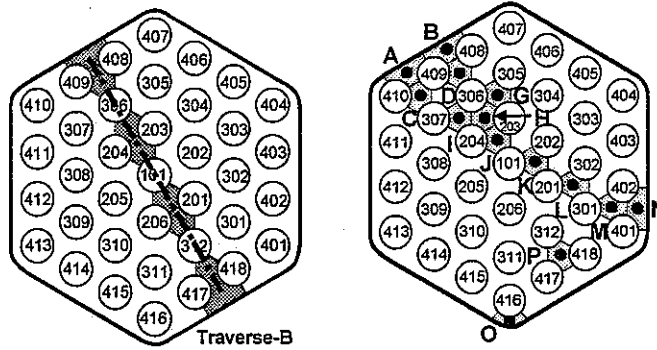


(a-1) High power condition 50[%] (a-2) Low power condition 10[%]  
 (a) Influence of flow-rate

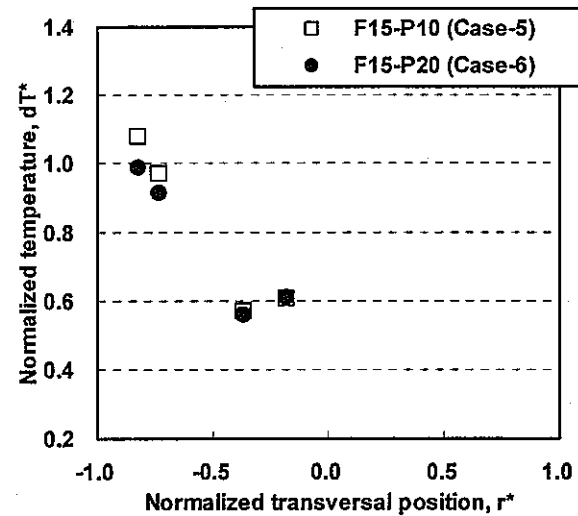
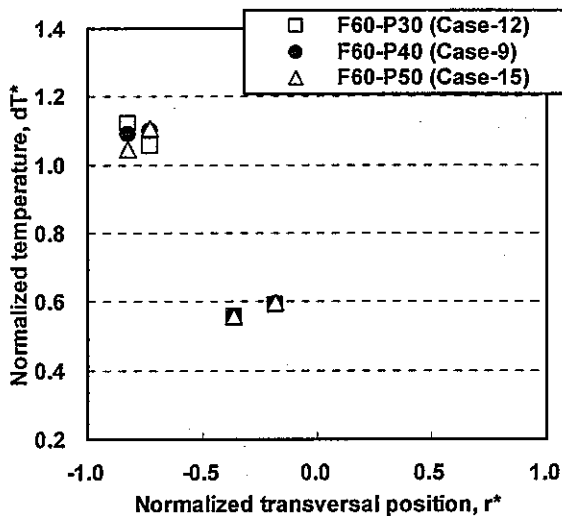


(b-1) High flow-rate condition 60[%] (b-2) Low flow-rate condition 15[%]  
 (b) Influence of power

Figure5-2.9 Characteristics of Transversal Distribution of Sodium Temperature along Traverse-A in the Downstream side of Blockage on Cross-section DC ( $z=15$ [mm]).



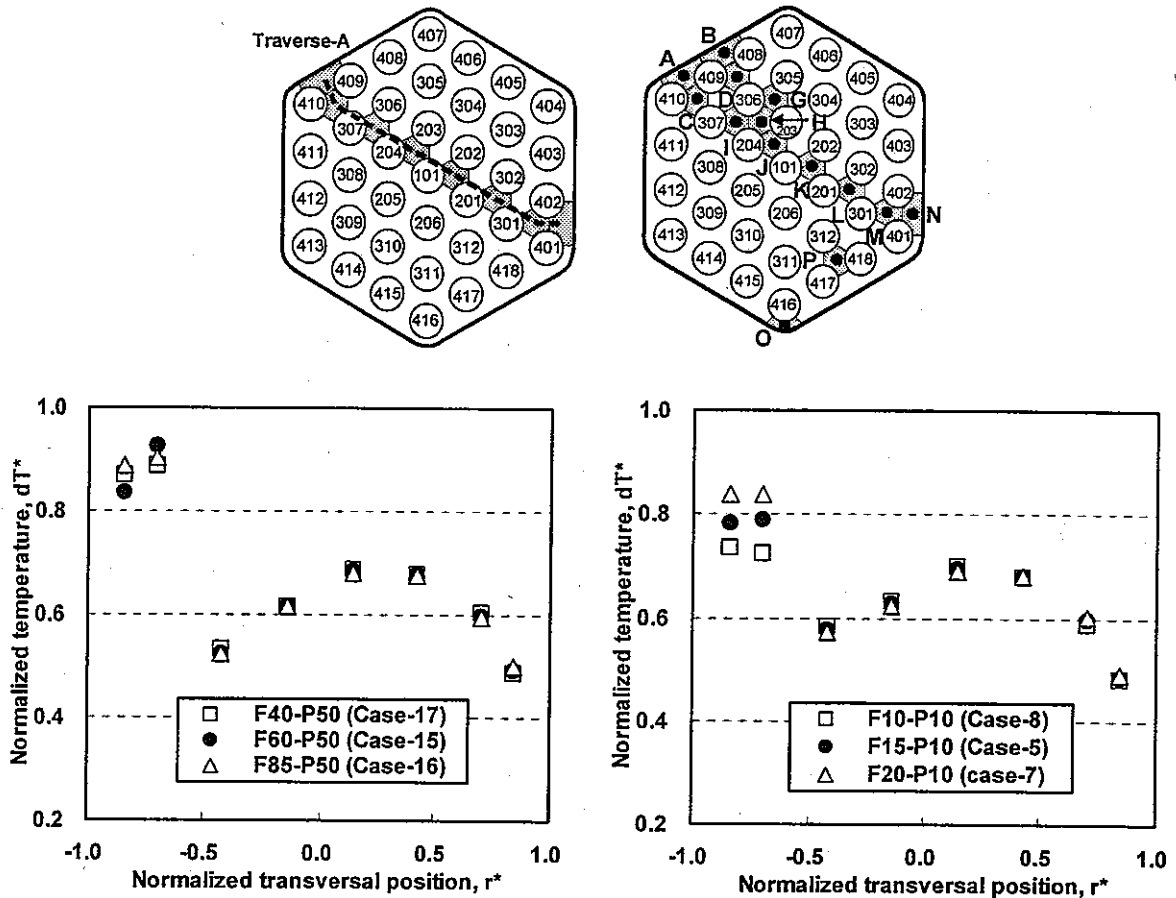
(a-1) High power condition 50% (a-2) Low power condition 10%  
 (a) Influence of flow-rate



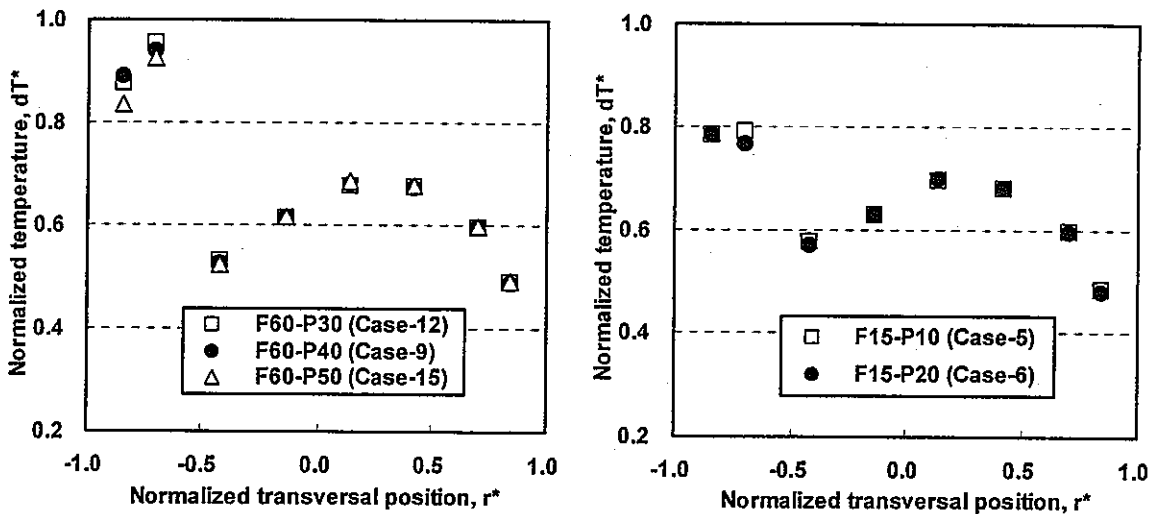
(b-1) High flow-rate condition 60% (b-2) Low flow-rate condition 15%  
 (b) Influence of power

Figure5-2.10 Characteristics of Transversal Distribution of Sodium Temperature along Traverse-B in the Downstream Side of Blockage on Cross-section DC ( $z=15$ [mm]).



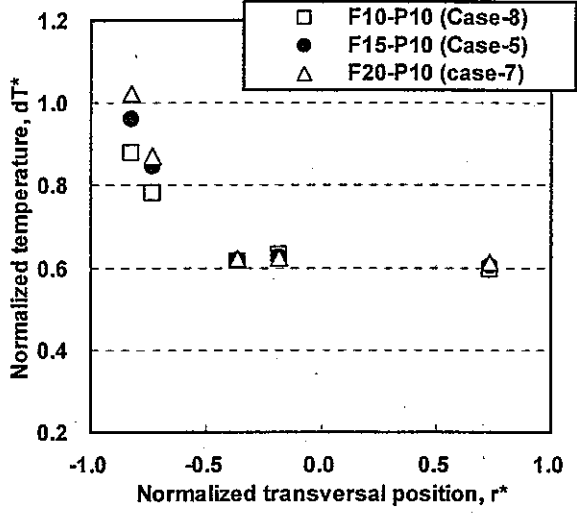
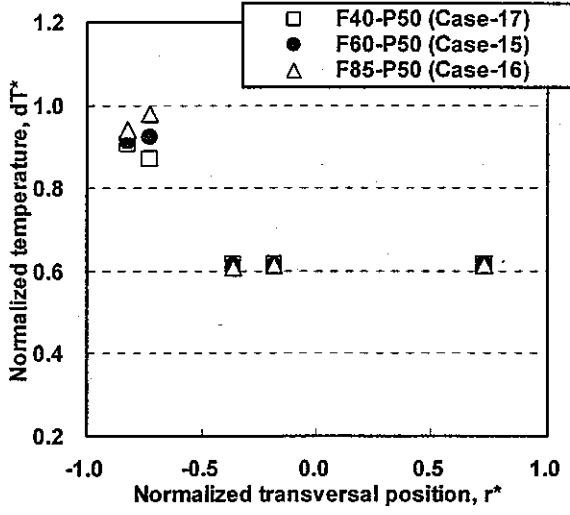
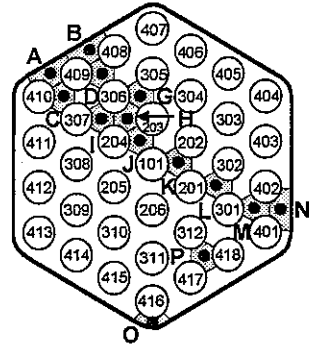
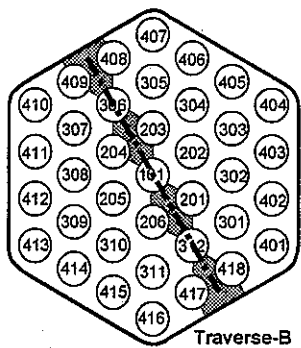


(a-1) High power condition 50[%] (a-2) Low power condition 10[%]  
 (a) Influence of flow-rate

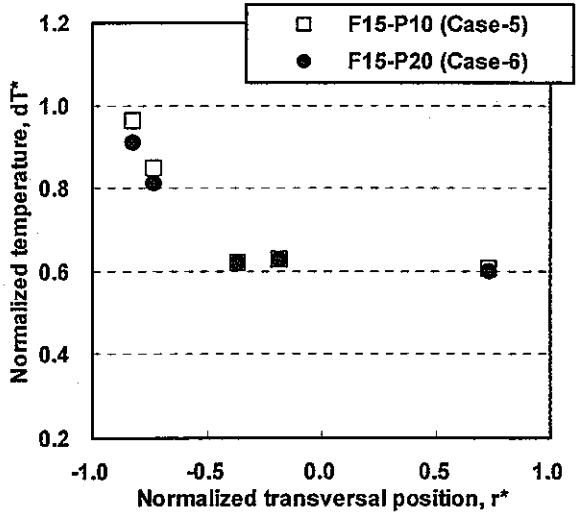
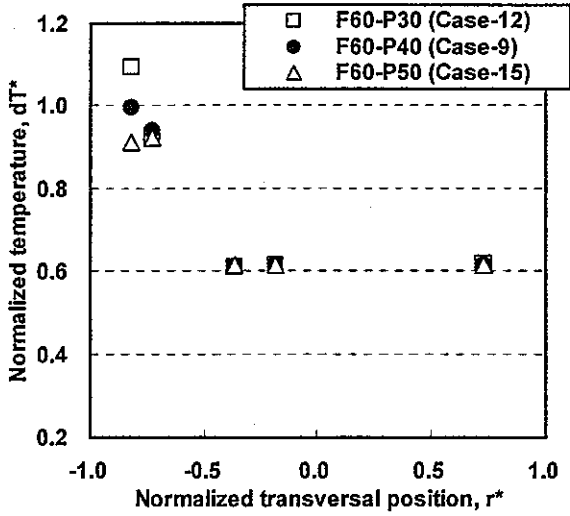


(b-1) High flow-rate condition 60[%] (b-2) Low flow-rate condition 15[%]  
 (b) Influence of power

Figure5-2.11 Characteristics of Transversal Distribution of Sodium Temperature along Traverse-A in the Downstream Side of Blockage on Cross-section DD ( $z=25[\text{mm}]$ ).



(a-1) High power condition 50[%] (a-2) Low power condition 10[%]  
 (a) Influence of flow-rate



(b-1) High flow-rate condition 60[%] (b-2) Low flow-rate condition 15[%]  
 (b) Influence of power

Figure5-2.12 Characteristics of Transversal Distribution of Sodium Temperature along Traverse-B in the Downstream Side of Blockage on Cross-section DD ( $z=25[\text{mm}]$ ).

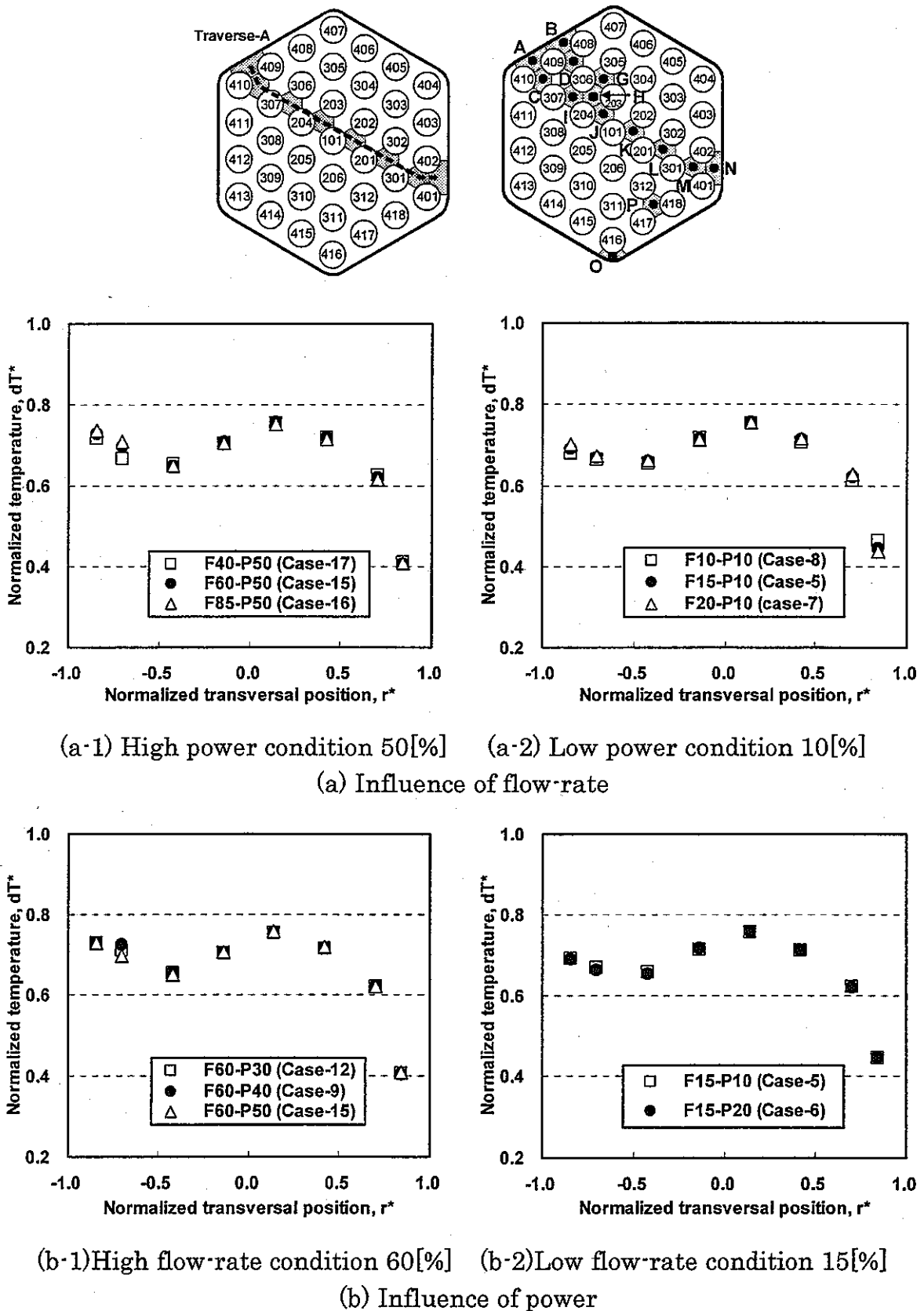
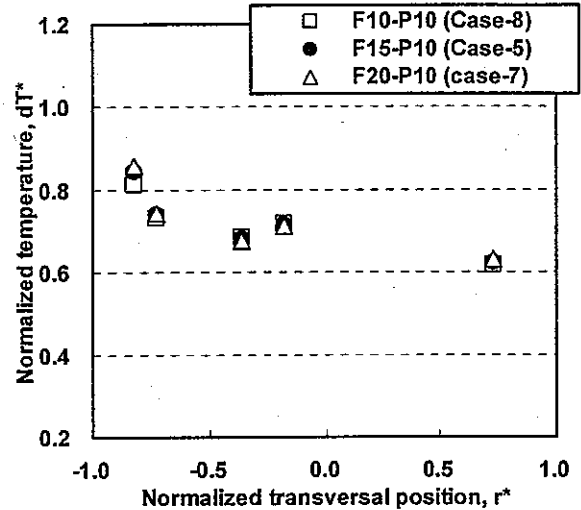
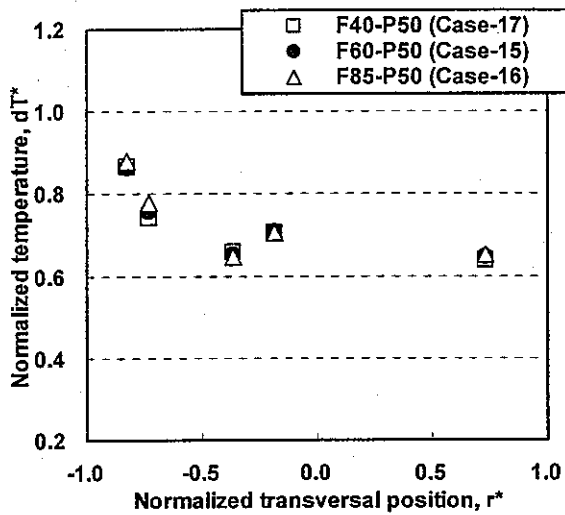
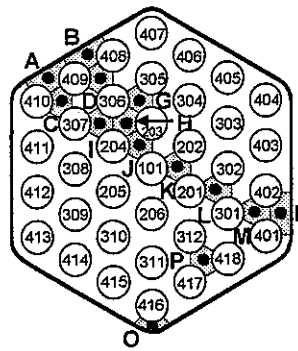
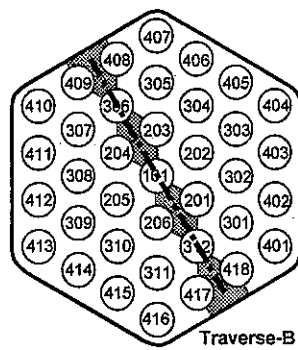
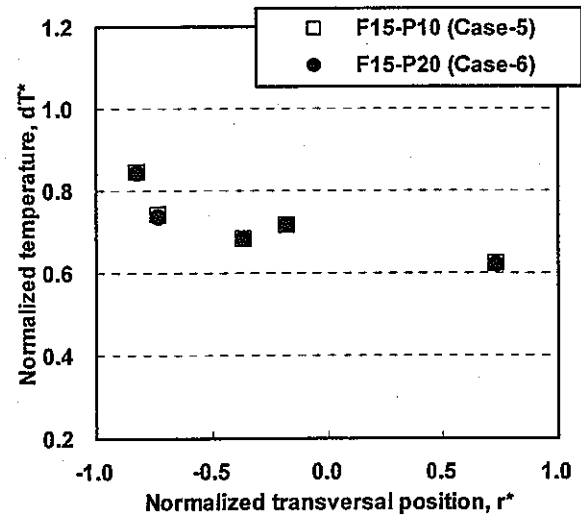
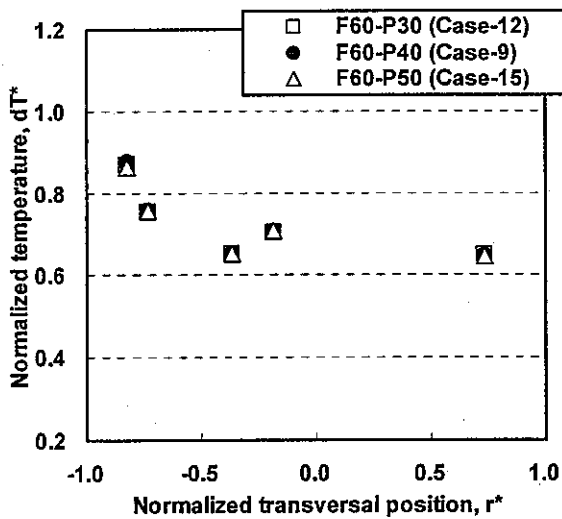


Figure5-2.13 Characteristics of Transversal Distribution of Sodium Temperature along Traverse-A in the Downstream Side of Blockage on Cross-section DF ( $z=50[\text{mm}]$ ).

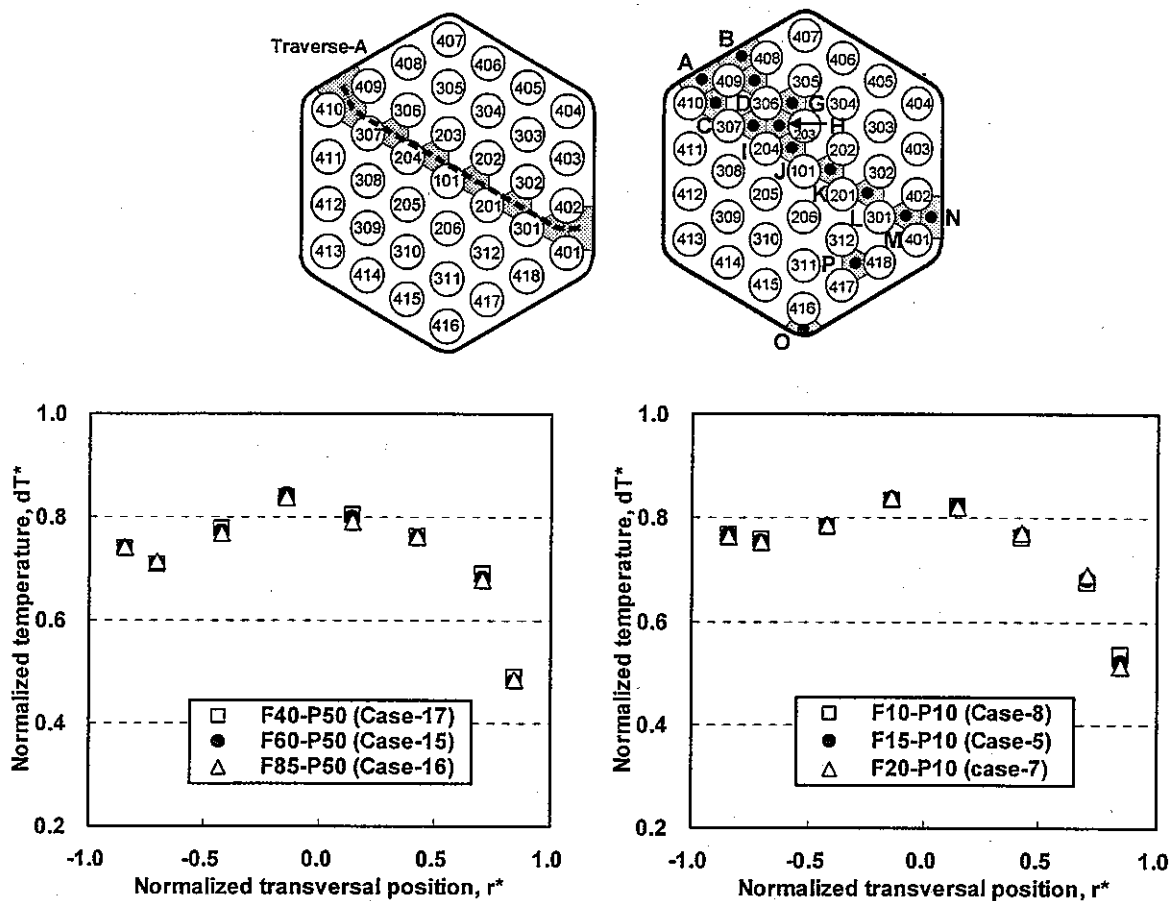


(a-1) High power condition 50[%] (a-2) Low power condition 10[%]  
 (a) Influence of flow-rate

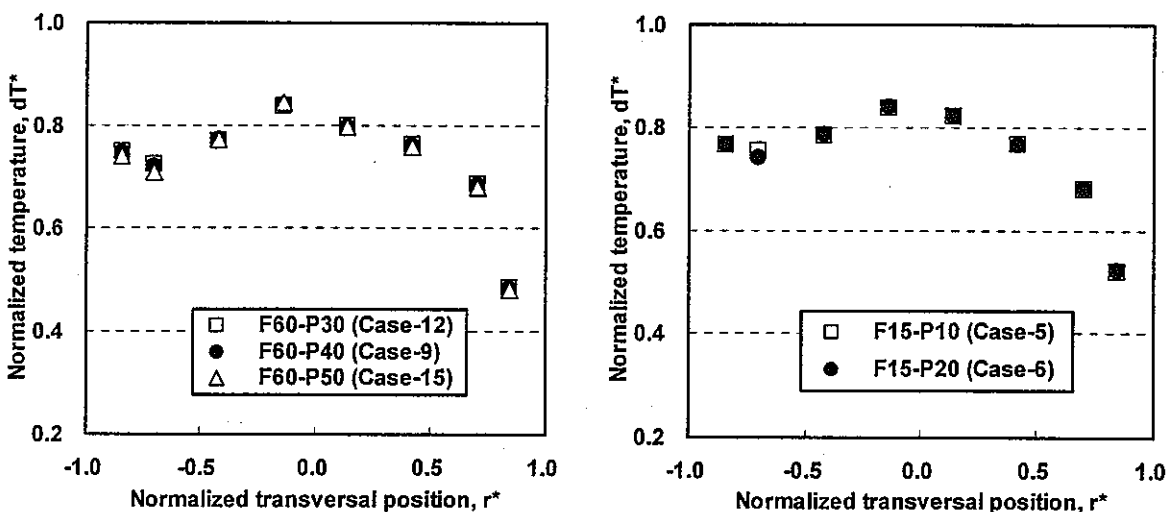


(b-1) High flow-rate condition 60[%] (b-2) Low flow-rate condition 15[%]  
 (b) Influence of power

Figure5-2.14 Characteristics of Transversal Distribution of Sodium Temperature along Traverse-B in the Downstream Side of Blockage on Cross-section DF ( $z=50$ [mm]).

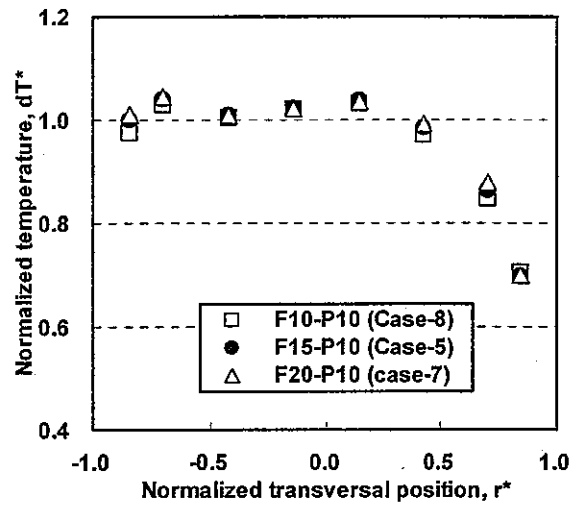
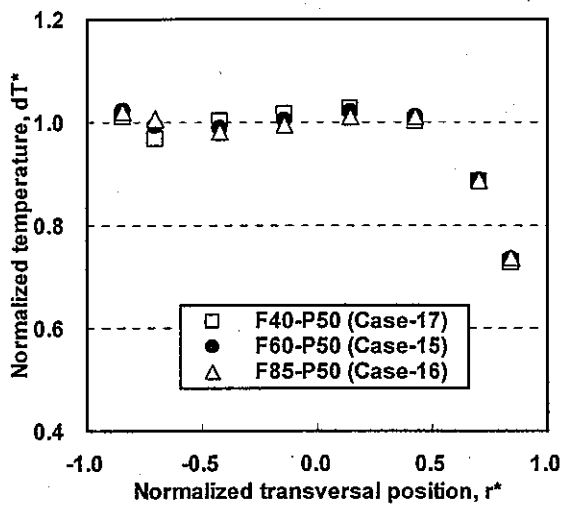
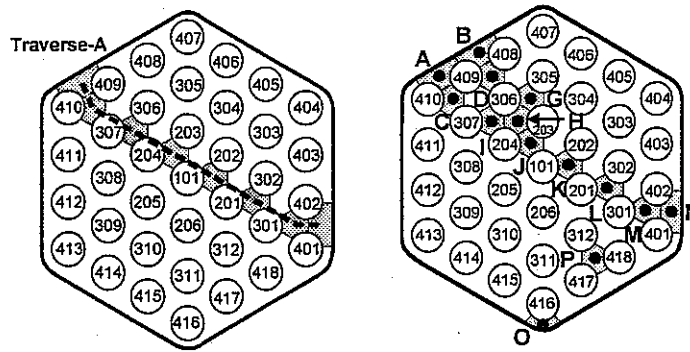


(a) Influence of flow-rate

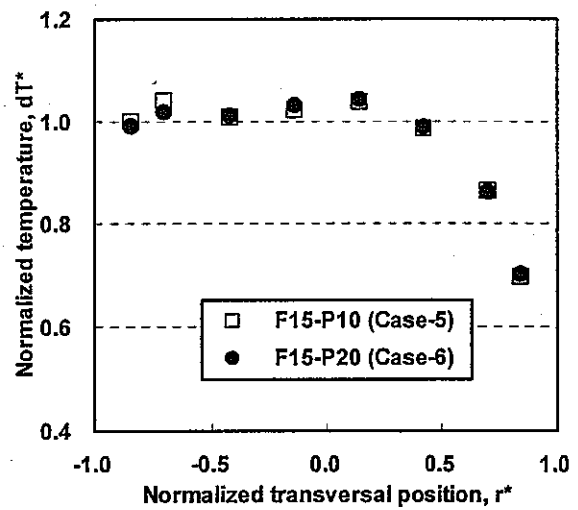
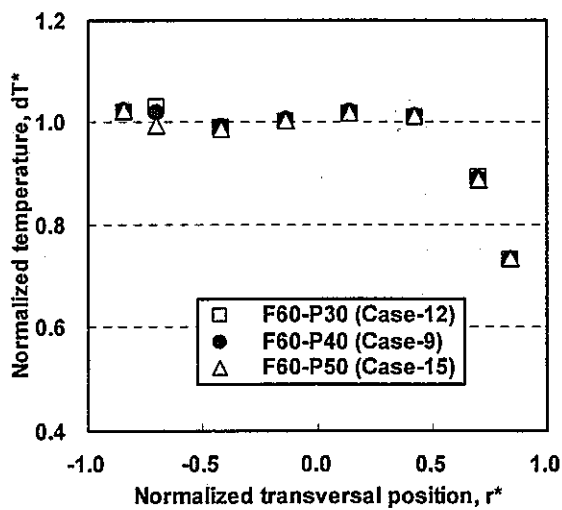


(b) Influence of power

Figure5-2.15 Characteristics of Transversal Distribution of Sodium Temperature along Traverse-A in the Downstream Side of Blockage on Cross-section DH ( $z=100$ [mm]).

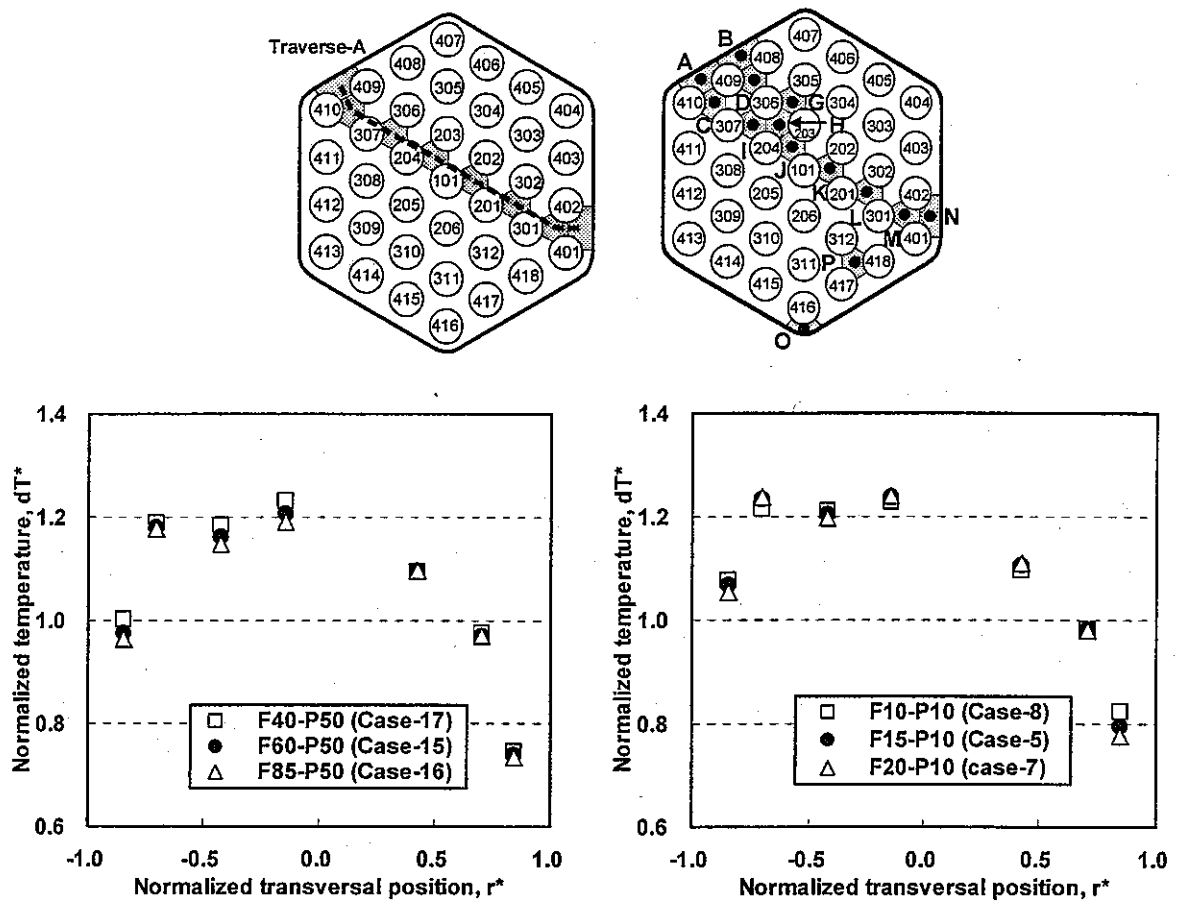


(a-1) High power condition 50[%]    (a-2) Low power condition 10[%]  
 (a) Influence of flow-rate

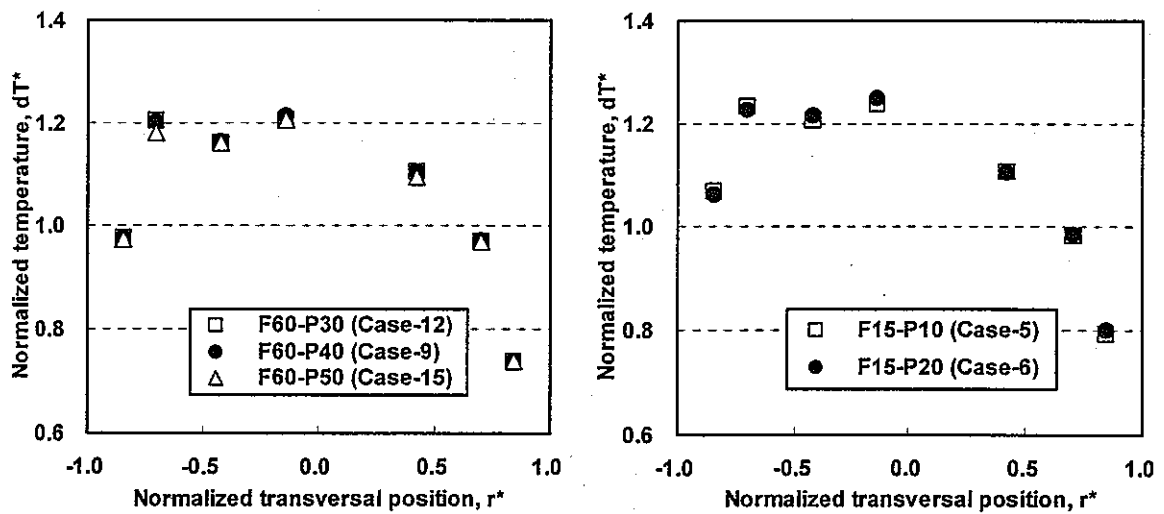


(b-1) High flow-rate condition 60[%]    (b-2) Low flow-rate condition 15[%]  
 (b) Influence of power

Figure5-2.16 Characteristics of Transversal Distribution of Sodium Temperature along Traverse-A in the Downstream Side of Blockage on Cross-section DI ( $z=200[\text{mm}]$ ).



(a-1) High power condition 50% (a-2) Low power condition 10%  
 (a) Influence of flow-rate



(b-1) High flow-rate condition 60% (b-2) Low flow-rate condition 15%  
 (b) Influence of power

Figure5-2.17 Characteristics of Transversal Distribution of Sodium Temperature along Traverse-A at the Top of Heated Section on Cross-section DJ ( $z=307.5$ [mm]).

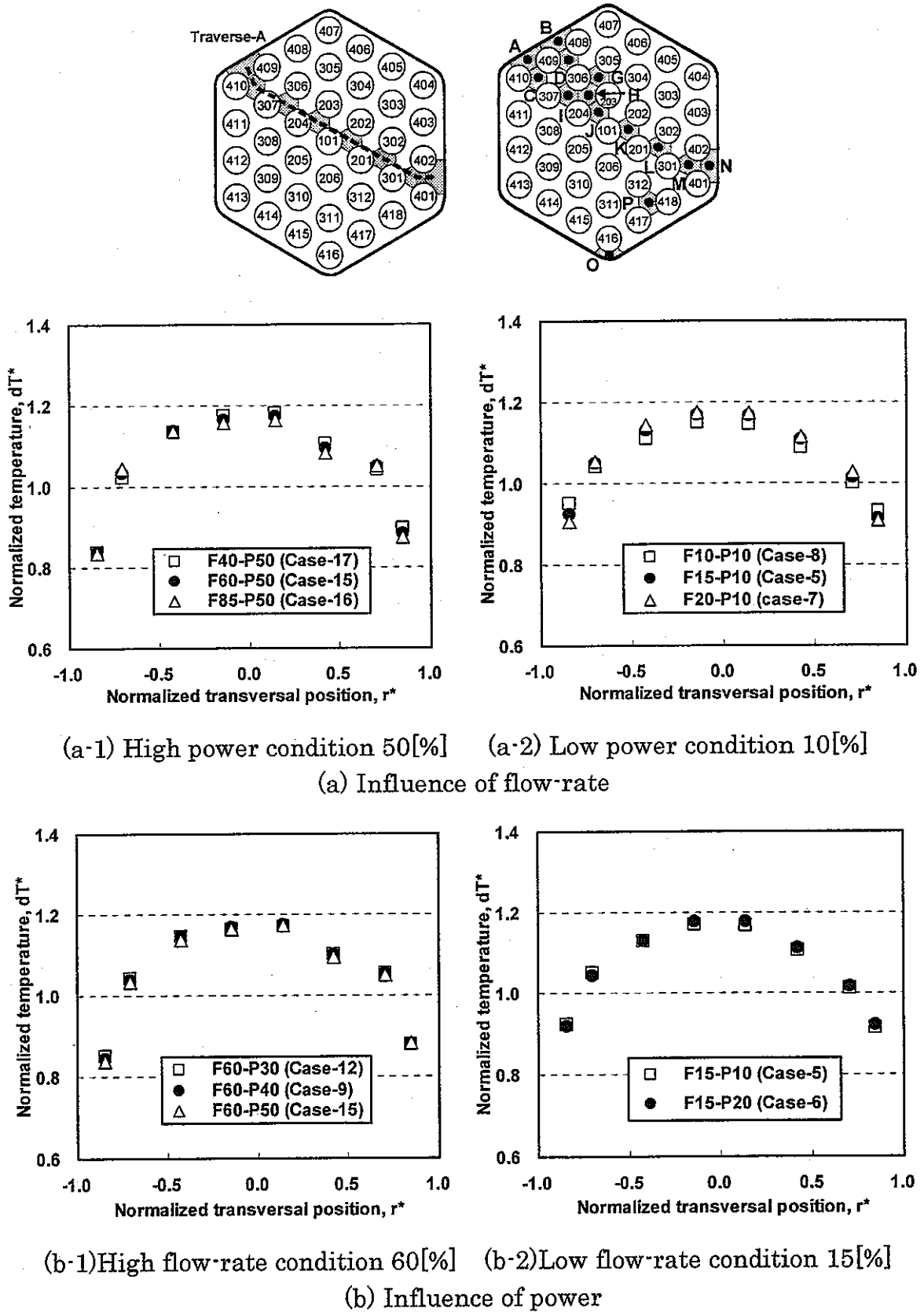
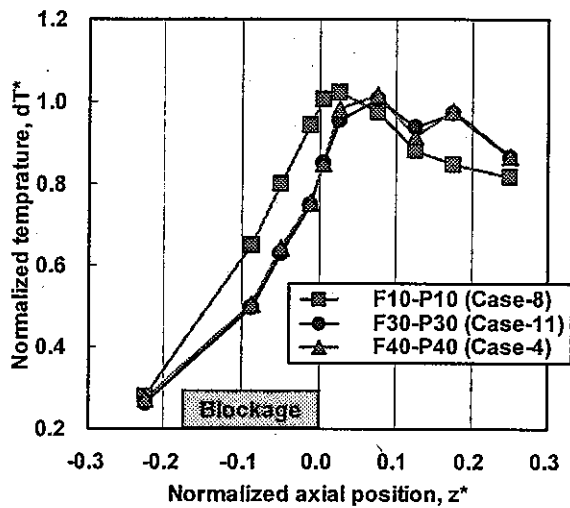
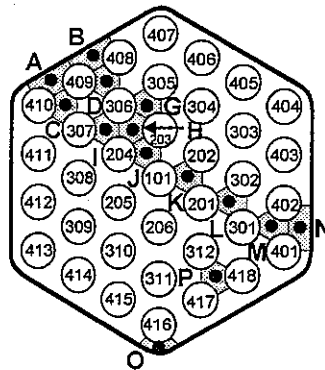
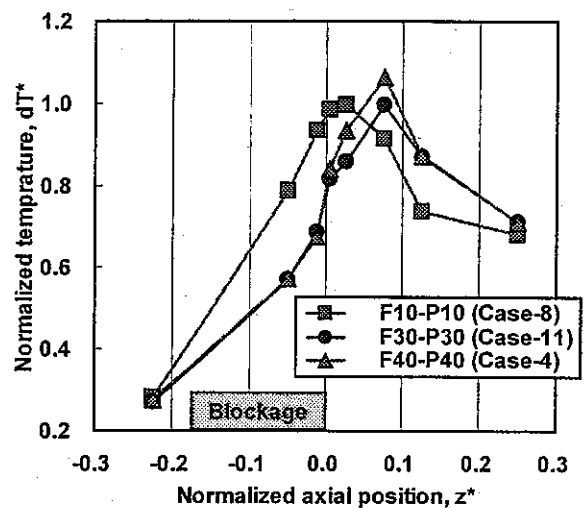


Figure5-2.18 Characteristics of Transversal Distribution of Sodium Temperature along Traverse-A in the Non-Heated Section on Cross-section EA ( $z=600$ [mm]).



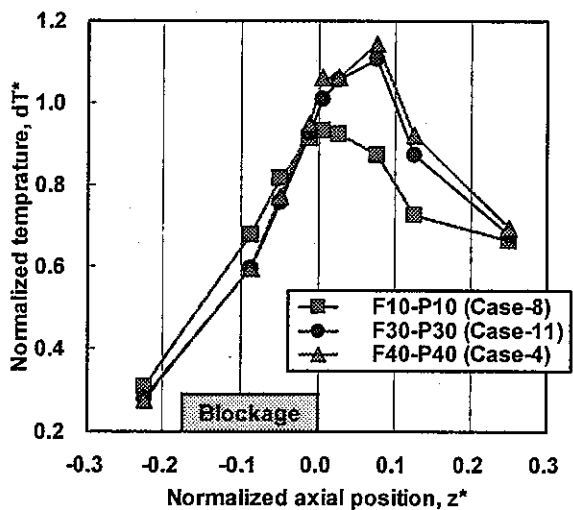


(a) Point-A

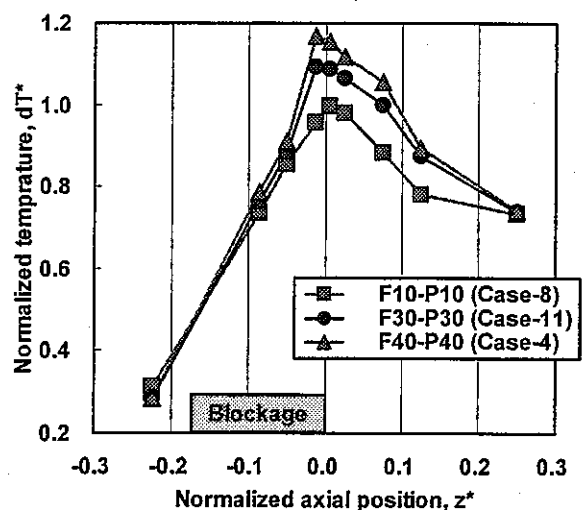


(b) Point-B

(1) Outer subchannel



(c) Point-C



(d) Point-D

(2) Inner Subchannel

Figure5-3 Characteristics of Axial Distribution of Sodium Temperature in the Blockage Region at a Constant Ratio of (Power/Flow-rate).

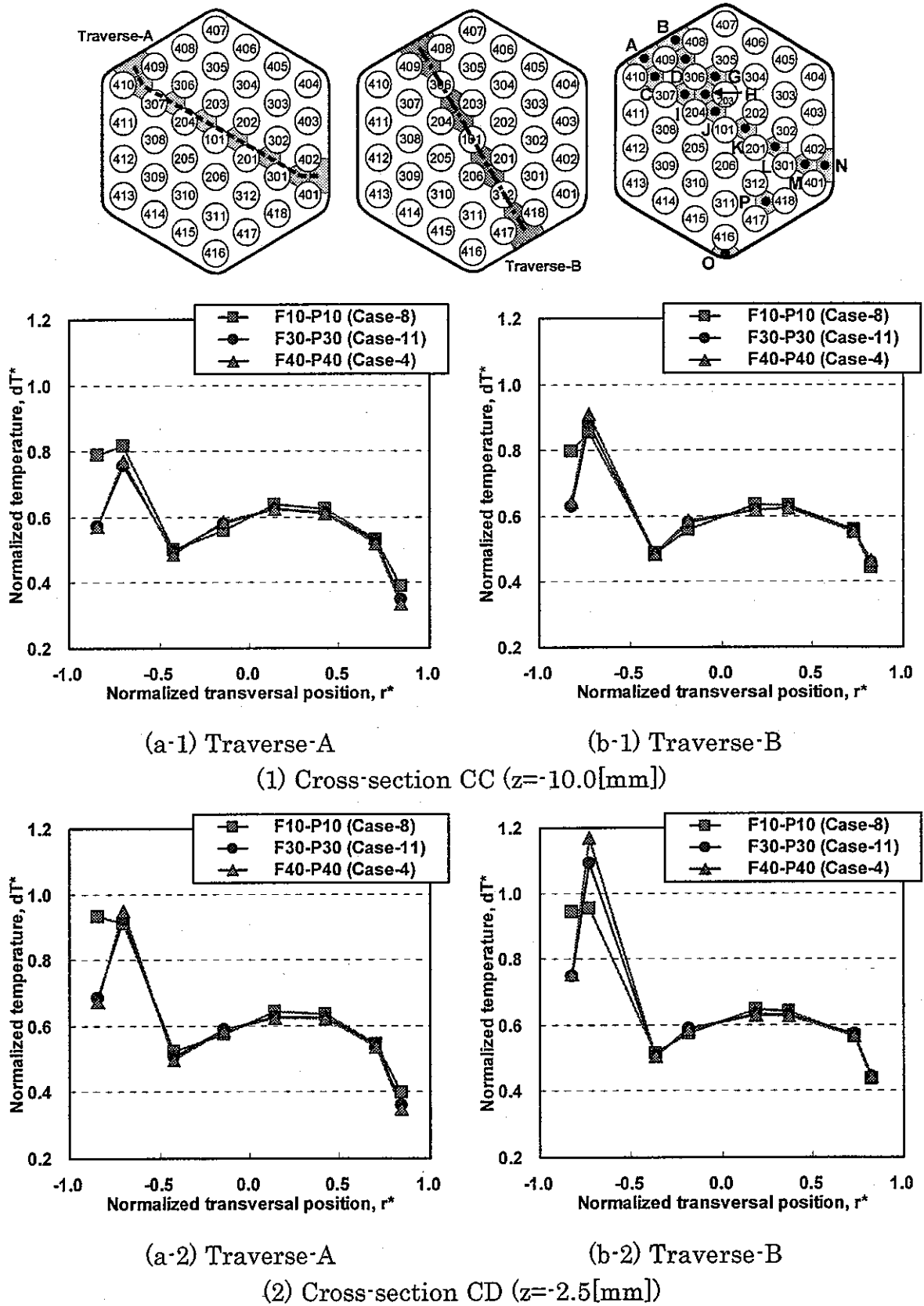
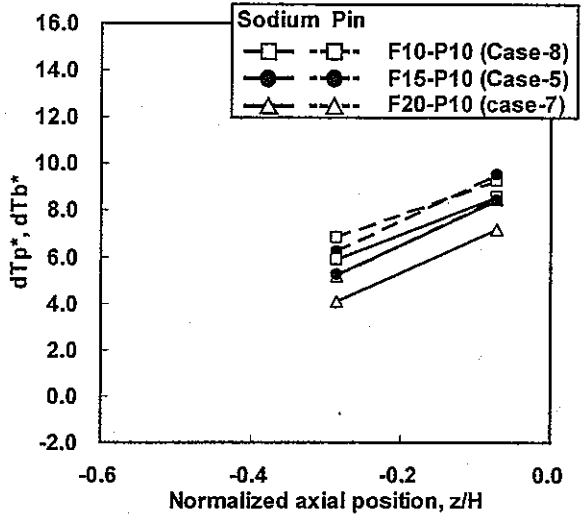
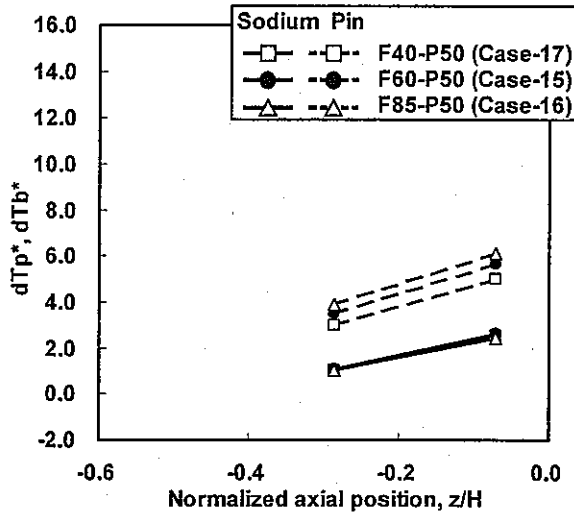
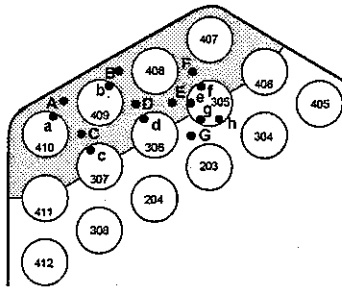
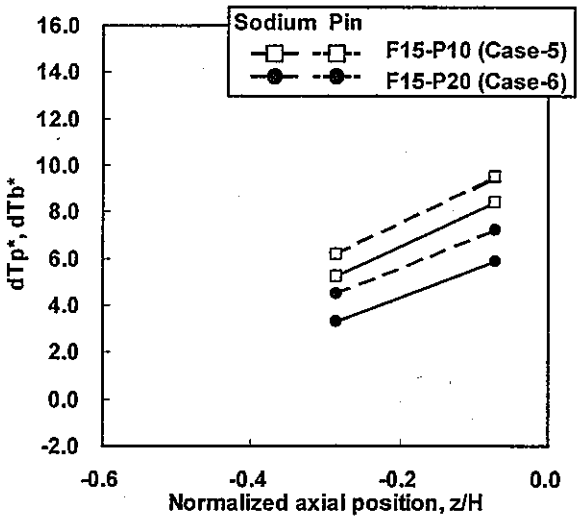
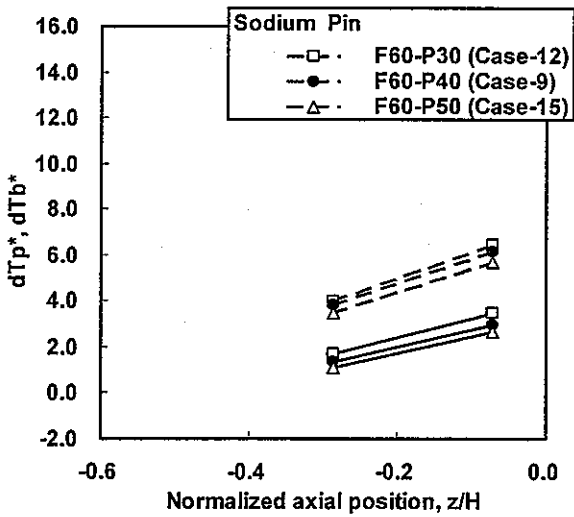


Figure5-4 Characteristics of Transversal Distribution of Sodium Temperature along Traverse-A and -B at a Constant Ratio of (Power/Flow-rate).



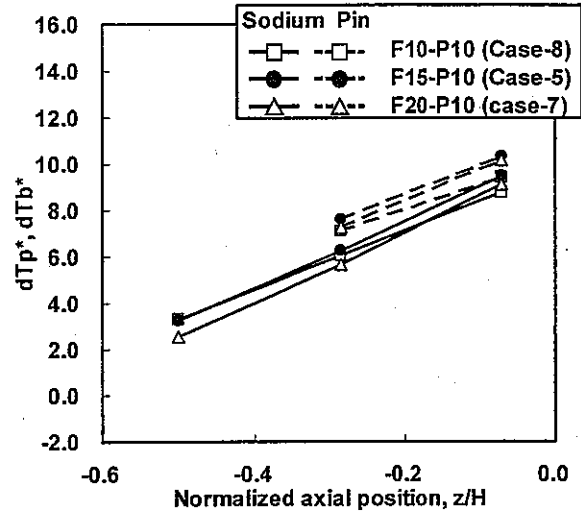
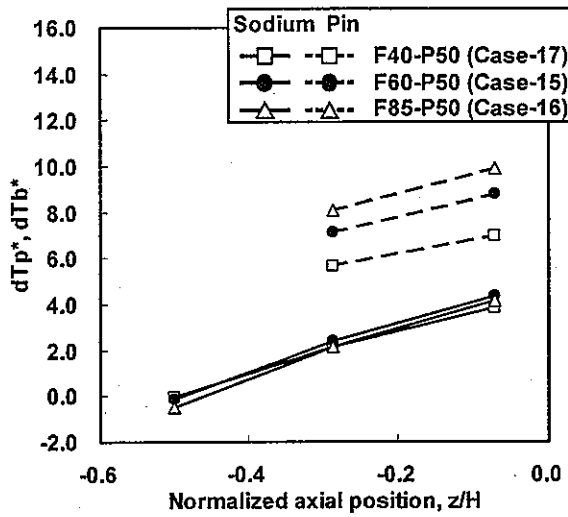
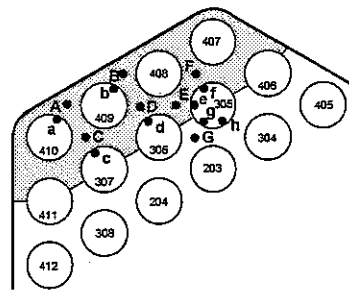
(a-1) High power condition 50% (a-2) Low power condition 10%  
 (a) Influence of flow-rate



(b-1) High flow-rate condition 60% (b-2) Low flow-rate condition 15%  
 (b) Influence of power

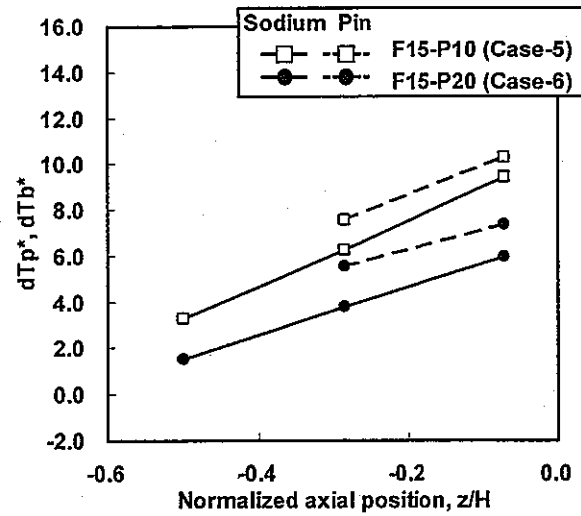
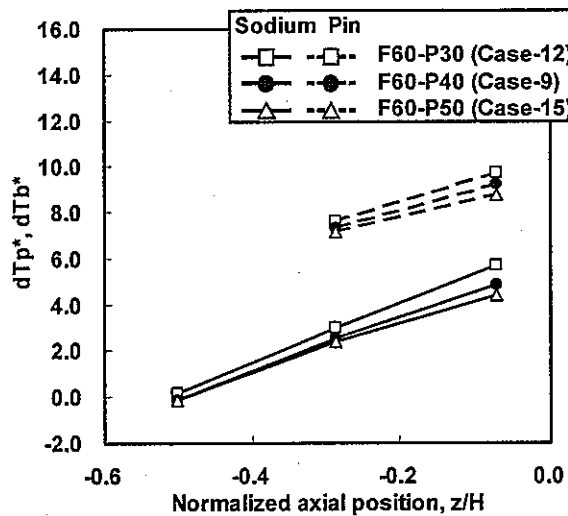
Figure5-5.1 Characteristics of Axial Profile of Sodium (Point-A) and Pin Surface (Point-a) Temperature at Outer Subchannel in Blockage Region.

True line: Sodium temperature (Point-A)  
 Dotted line: Pin surface temperature (Point-a)



(a-1) High power condition 50[%] (a-2) Low power condition 10[%]

(a) Influence of flow-rate

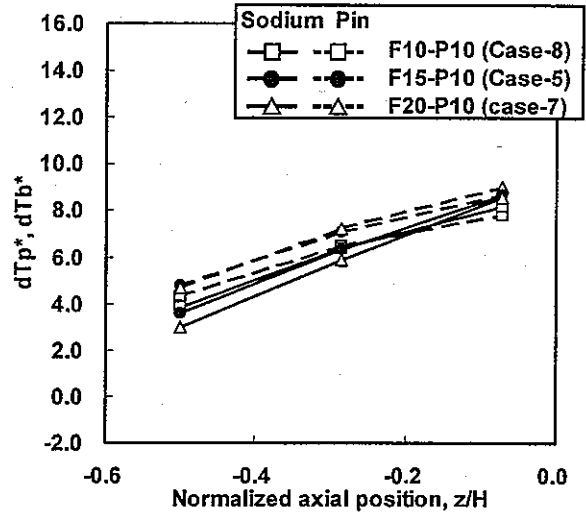
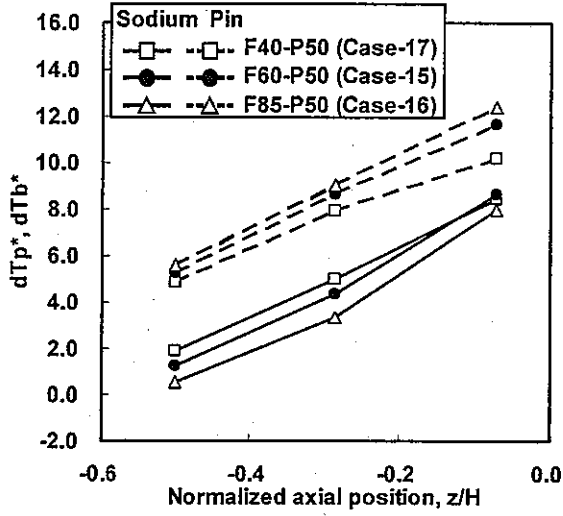
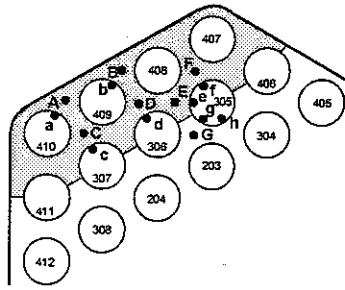


(b-1) High flow-rate condition 60[%] (b-2) Low flow-rate condition 15[%]

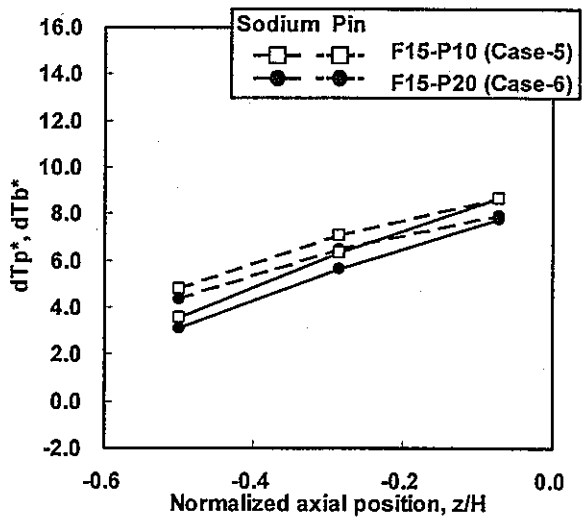
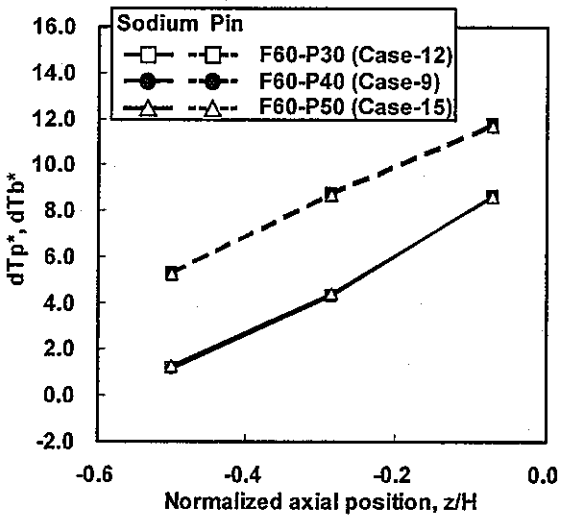
(b) Influence of power

Figure5-5.2 Characteristics of Axial Profile of Sodium (Point-B) and Pin Surface (Point-b) Temperature at Outer Subchannel in Blockage Region.

True line: Sodium temperature (Point-B)  
Dotted line: Pin surface temperature (Point-b)



(a-1) High power condition 50[%]    (a-2) Low power condition 10[%]  
 (a) Influence of flow-rate

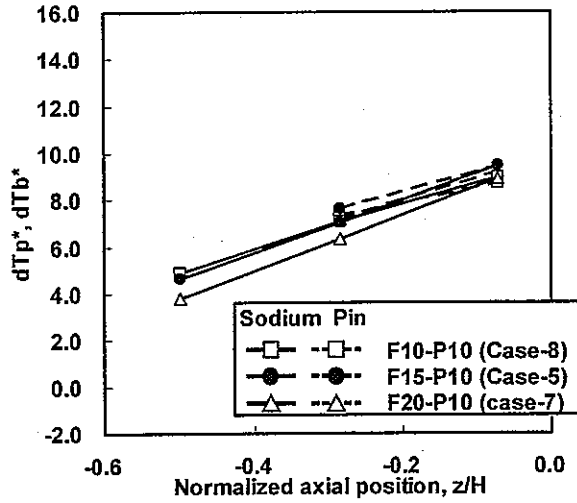
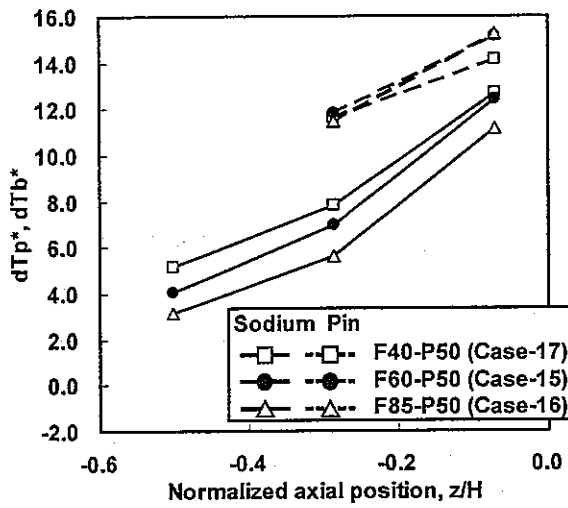
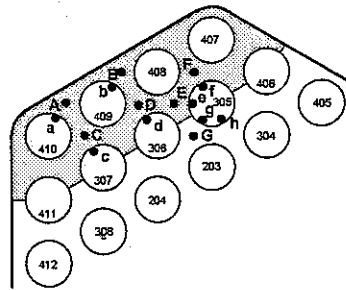


(b-1) High flow-rate condition 60[%]    (b-2) Low flow-rate condition 15[%]  
 (b) Influence of power

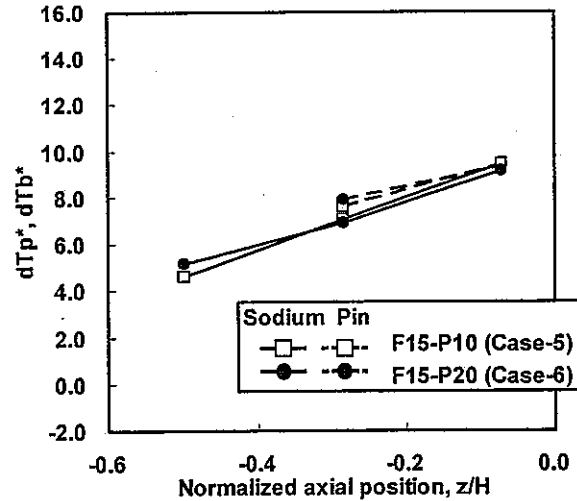
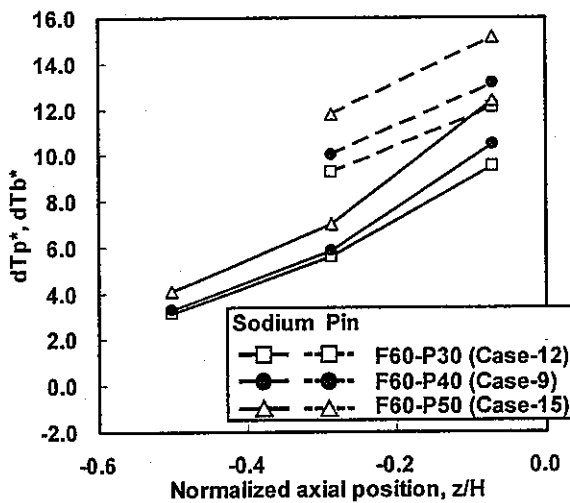
Figure5-5.3 Characteristics of Axial Profile of Sodium (Point-C) and Pin Surface (Point-c) Temperature at Inner Subchannel in Blockage Region.

True line: Sodium temperature (Point-C)

Dotted line: Pin surface temperature (Point-c)

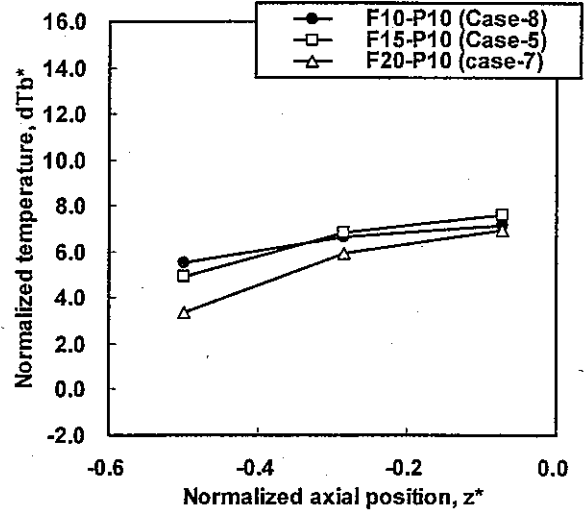
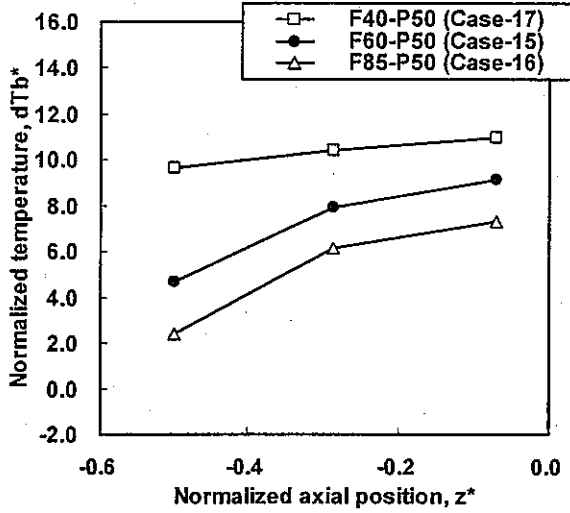
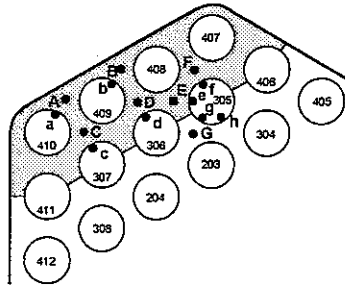


(a-1) High power condition 50[%]      (a-2) Low power condition 10[%]  
 (a) Influence of flow-rate

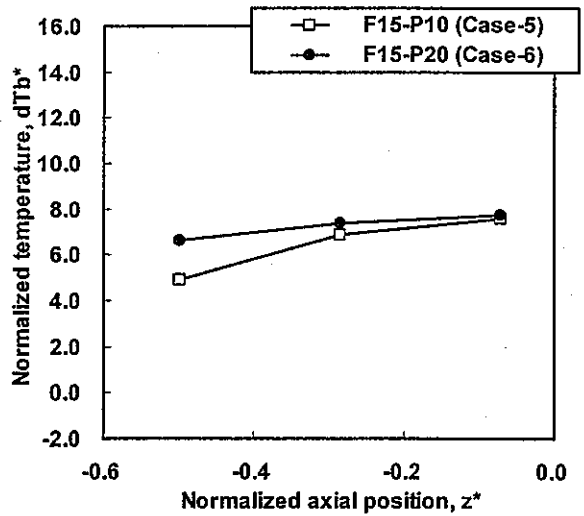
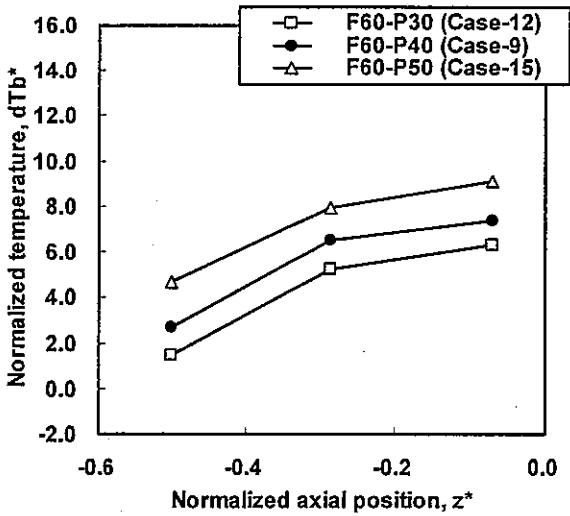


(b-1) High flow-rate condition 60[%]      (b-2) Low flow-rate condition 15[%]  
 (b) Influence of power

Figure5-5.4 Characteristics of Axial Profile of Sodium (Point-D) and Pin Surface (Point-d) Temperature at Inner Subchannel in Blockage Region.  
 True line: Sodium temperature (Point-D)  
 Dotted line: Pin surface temperature (Point-d)

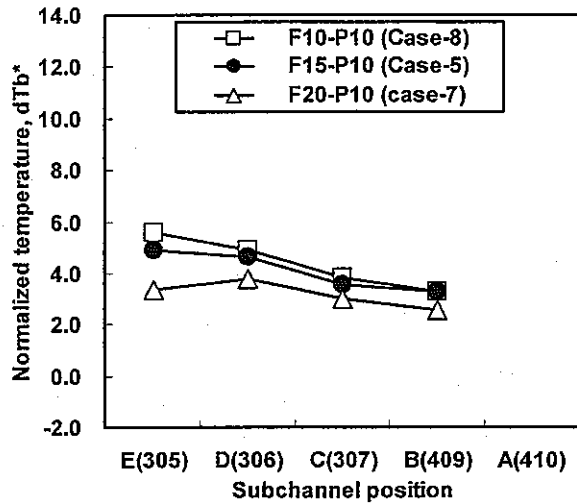
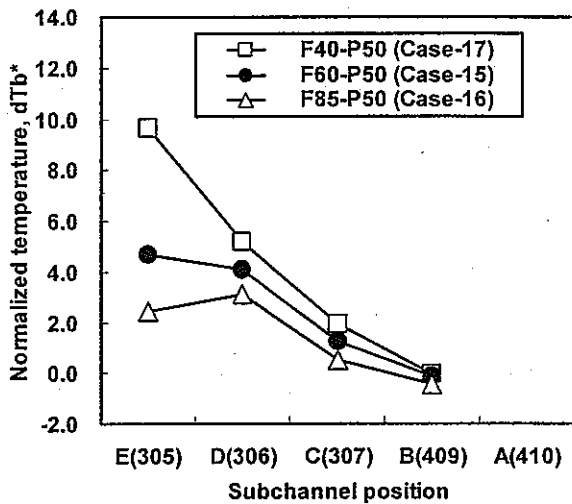
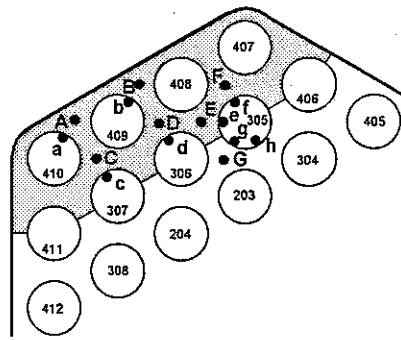


(a-1) High power condition 50% (a-2) Low power condition 10%  
 (a) Influence of flow-rate

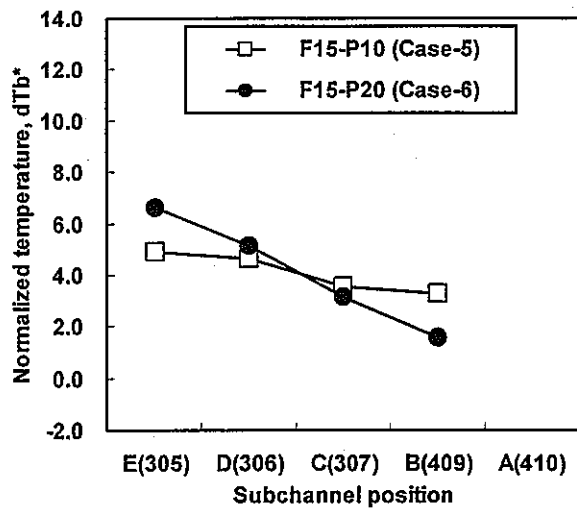
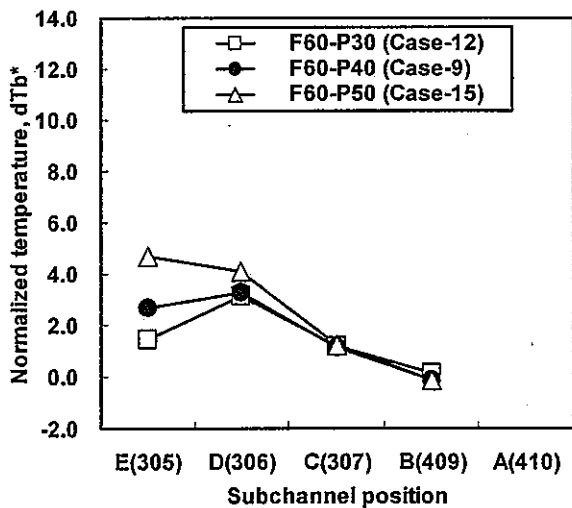


(b-1) High flow-rate condition 60% (b-2) Low flow-rate condition 15%  
 (b) Influence of power

Figure5-5.5 Characteristics of Axial Profile of Sodium (Point-E) Temperature at Inner Subchannel in Blockage Region.  
 True line: Sodium temperature (Point-E)



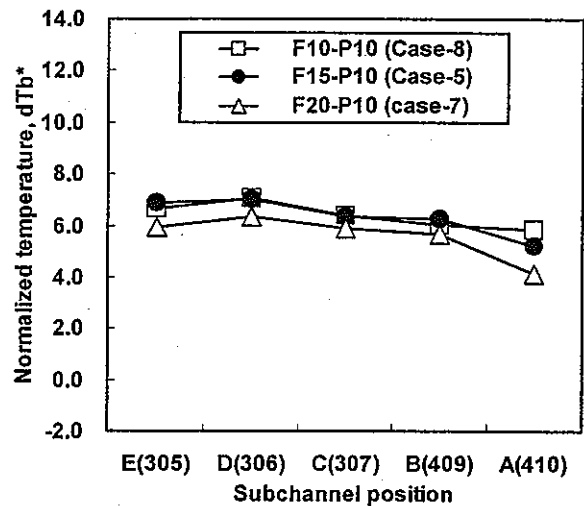
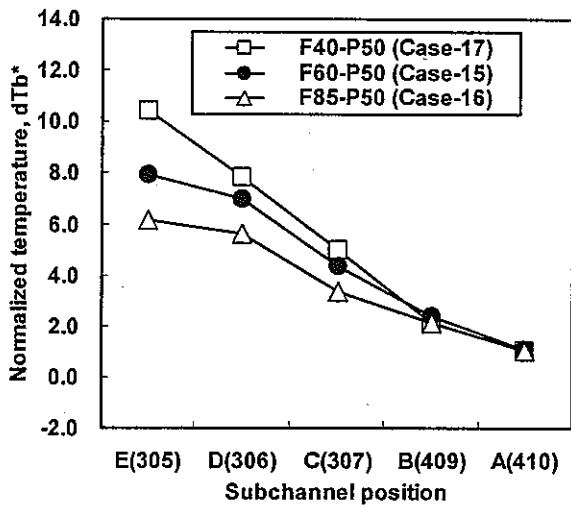
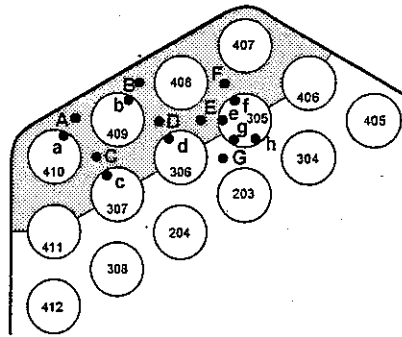
(a-1) High power condition 50% (a-2) Low power condition 10%  
 (a) Influence of flow-rate



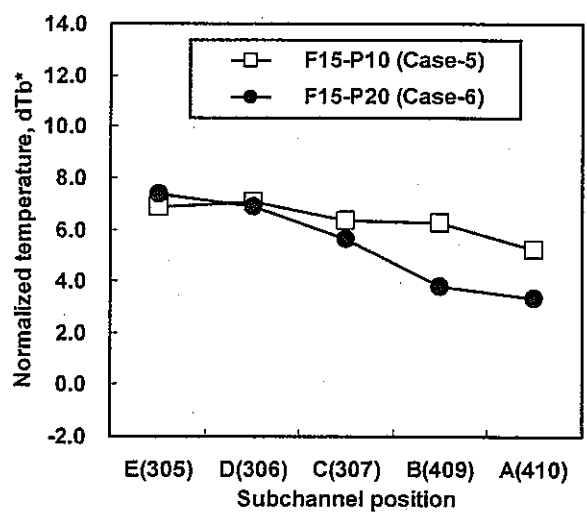
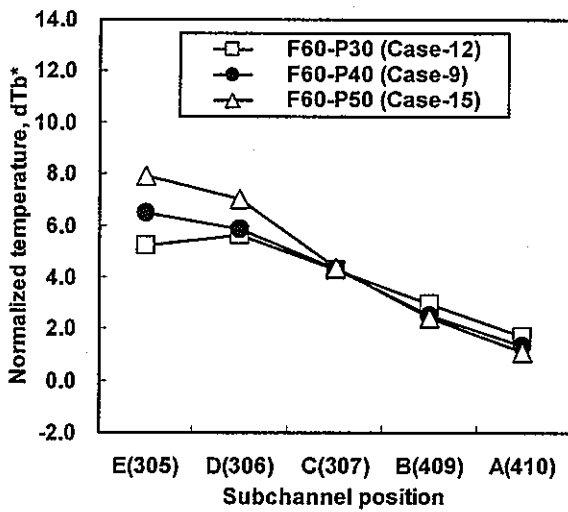
(b-1) High flow-rate condition 60% (b-2) Low flow-rate condition 15%  
 (b) Influence of power

Figure5-6.1 Horizontal Distribution of Sodium Temperature in the Blockage on Cross-section CB ( $z=17.5$ [mm]).



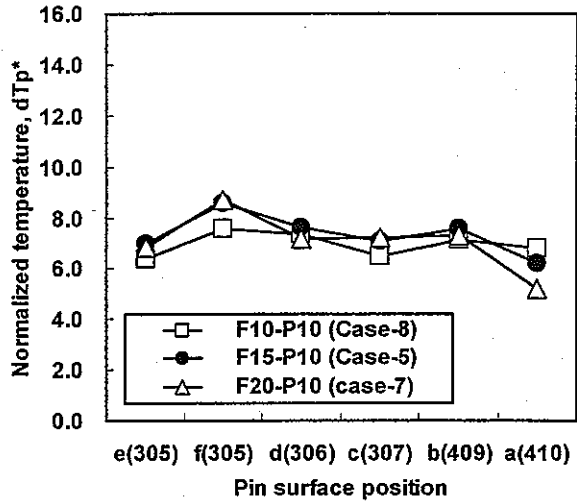
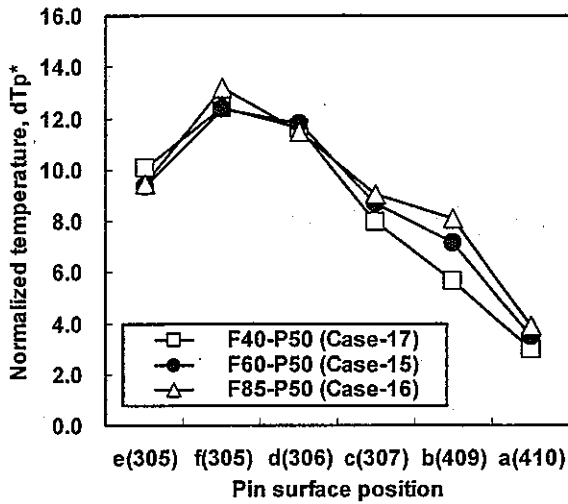
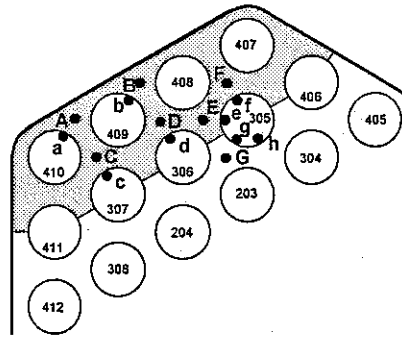


(a-1) High power condition 50[%]      (a-2) Low power condition 10[%]  
 (a) Influence of flow-rate

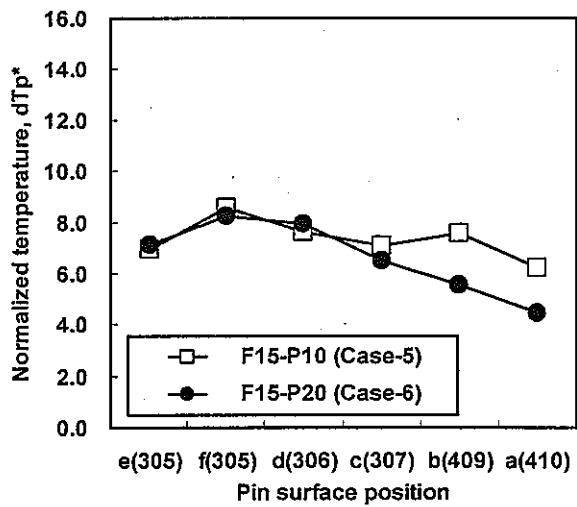
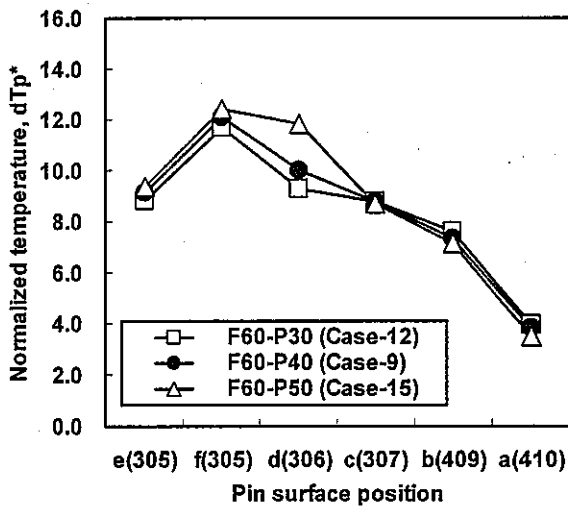


(b-1) High flow-rate condition 60[%]      (b-2) Low flow-rate condition 15[%]  
 (b) Influence of power

Figure5-6.2 Horizontal Distribution of Sodium Temperature in the Blockage on Cross-section CC ( $z=-10.0$ [mm]).

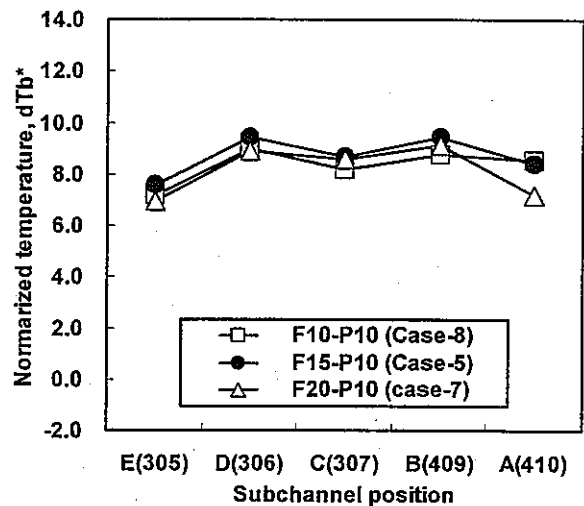
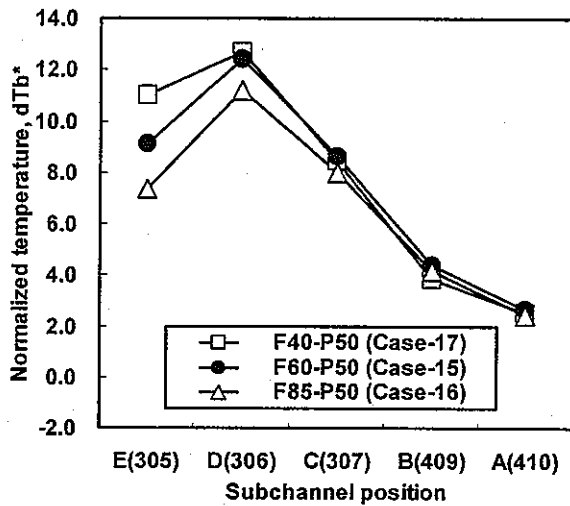
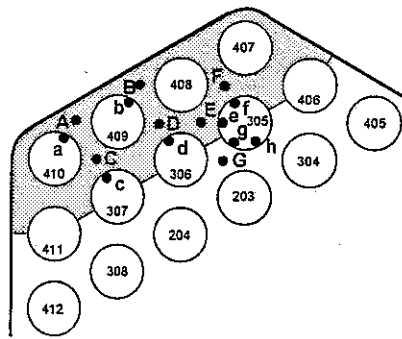


(a-1) High power condition 50% (a-2) Low power condition 10%  
(a) Influence of flow-rate

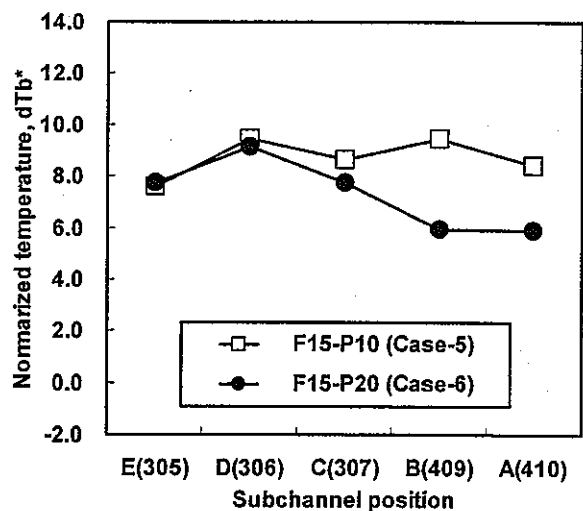
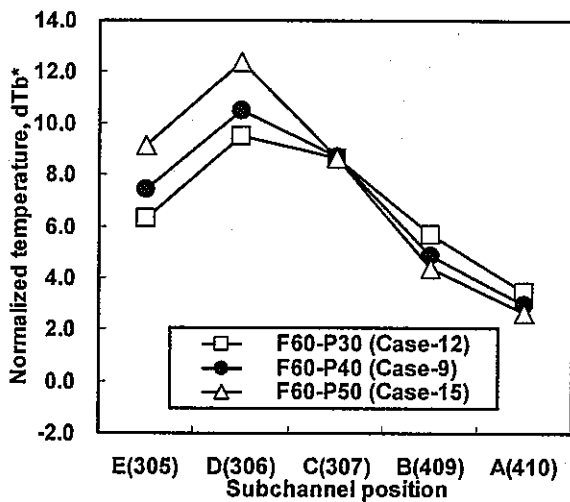


(b-1) High flow-rate condition 60% (b-2) Low flow-rate condition 15%  
(b) Influence of power

Figure5-6.3 Horizontal Distribution of Pin Surface Temperature in the Blockage on Cross-section CC ( $z=-10.0$ [mm]).

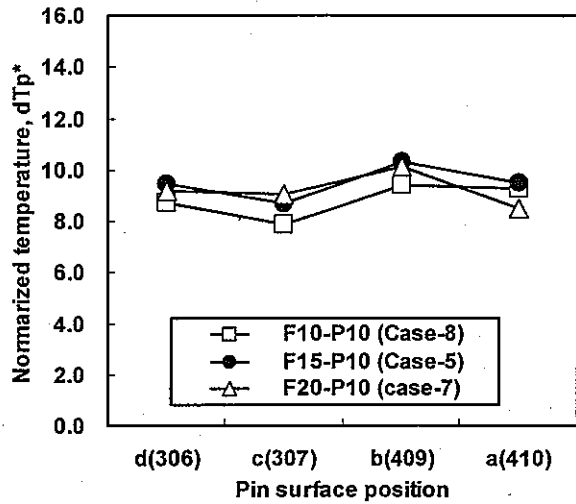
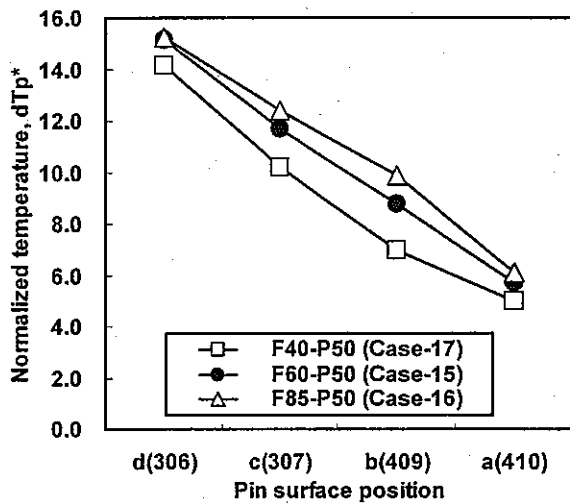
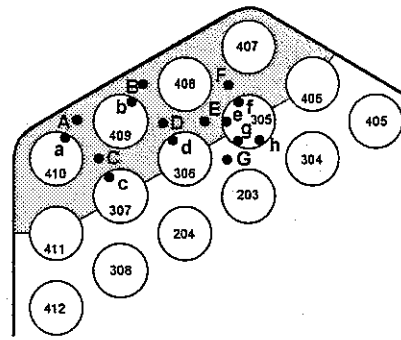


(a-1) High power condition 50% (a-2) Low power condition 10%  
 (a) Influence of flow-rate

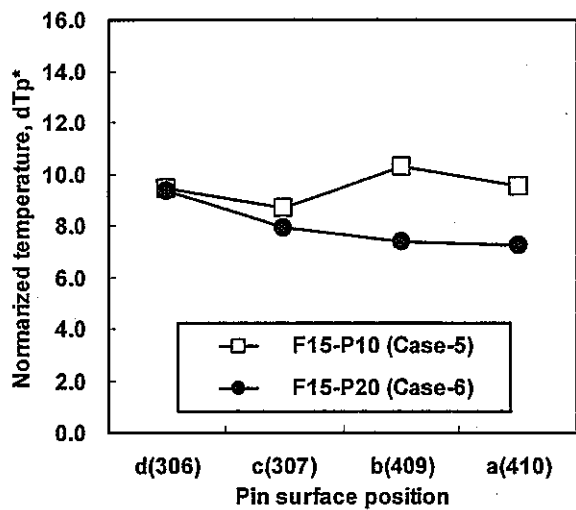
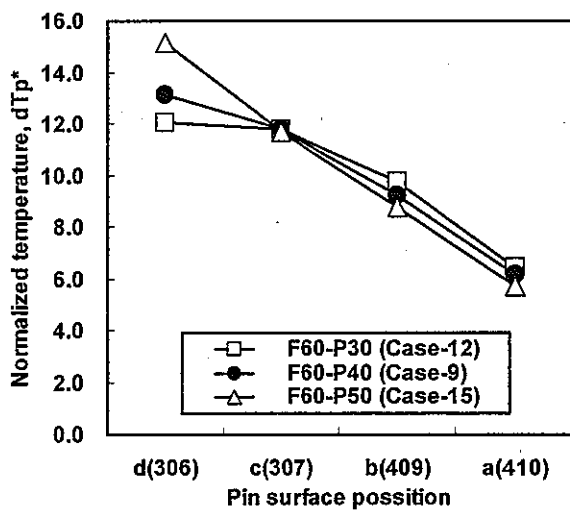


(b-1) High flow-rate condition 60% (b-2) Low flow-rate condition 15%  
 (b) Influence of power

Figure5-6.4 Horizontal Distribution of Sodium Temperature in the Blockage on Cross-section CD ( $z=2.5$ [mm]).

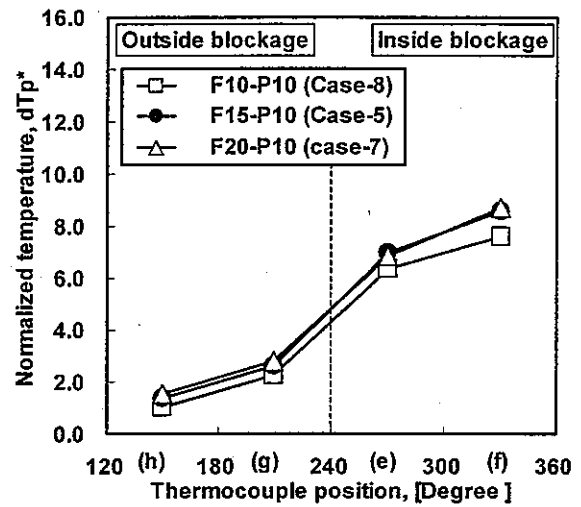
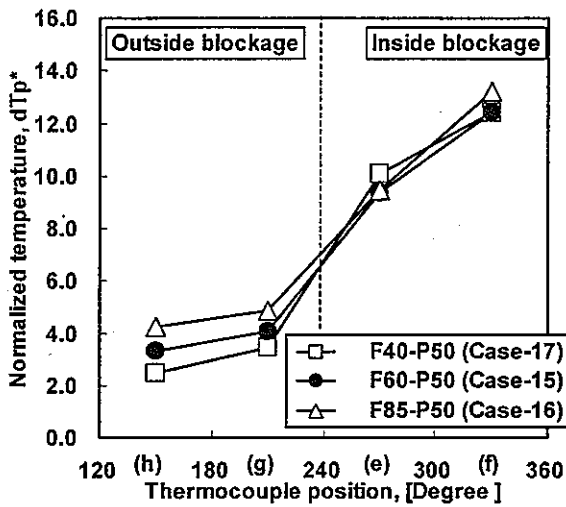
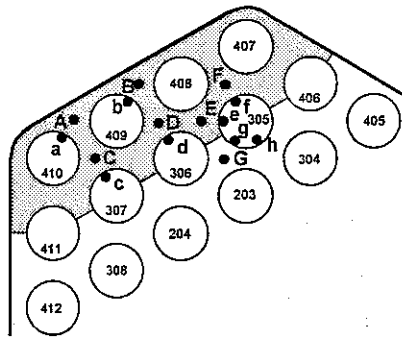


(a-1) High power condition 50% (a-2) Low power condition 10%  
 (a) Influence of flow-rate

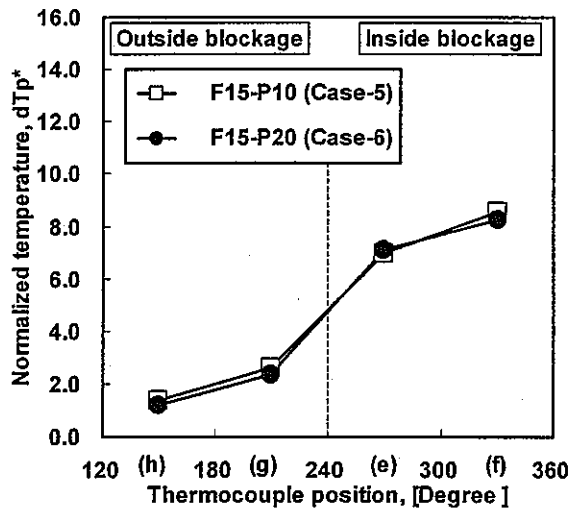
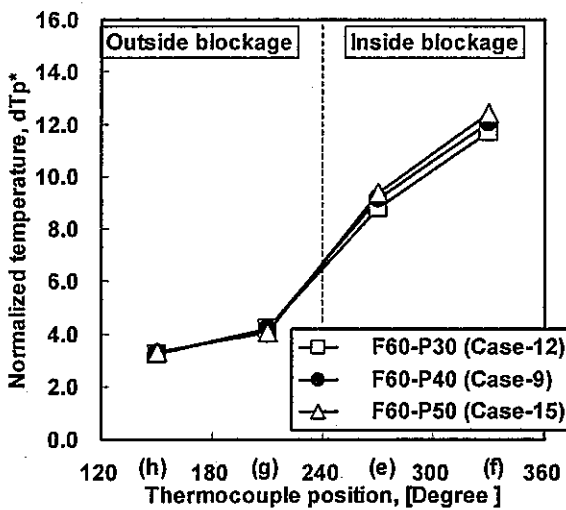


(b-1) High flow-rate condition 60% (b-2) Low flow-rate condition 15%  
 (b) Influence of power

Figure5-6.5 Horizontal Distribution of Pin Surface Temperature in the Blockage on Cross-section CD ( $z=-2.5$ [mm]).

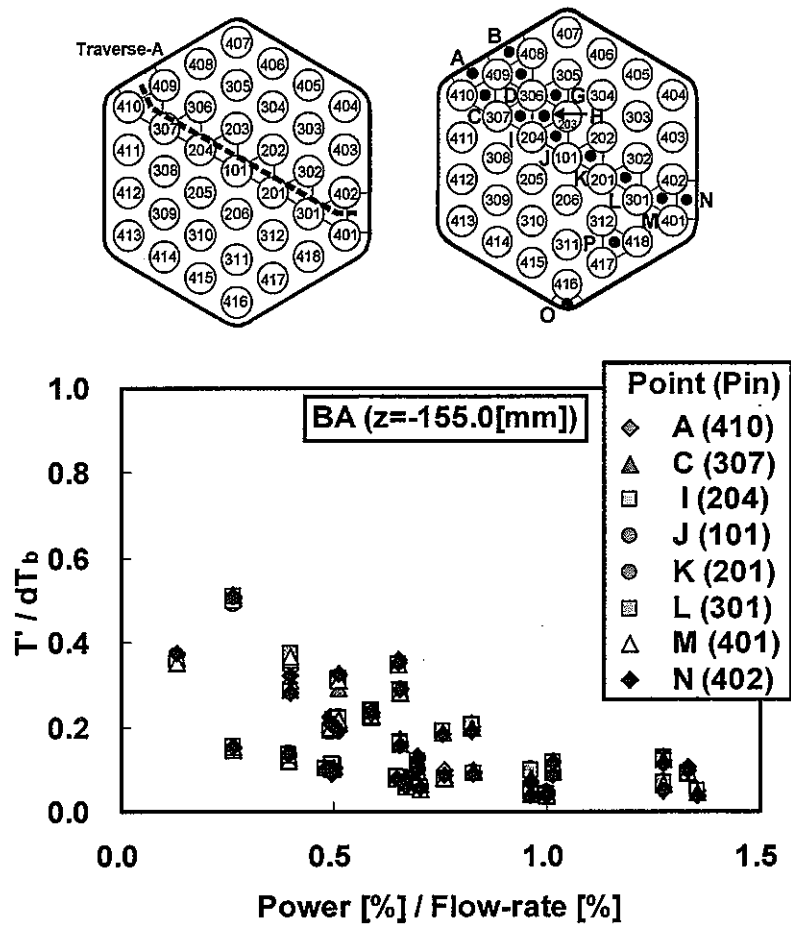


(a-1) High power condition 50% (a-2) Low power condition 10%  
 (a) Influence of flow-rate

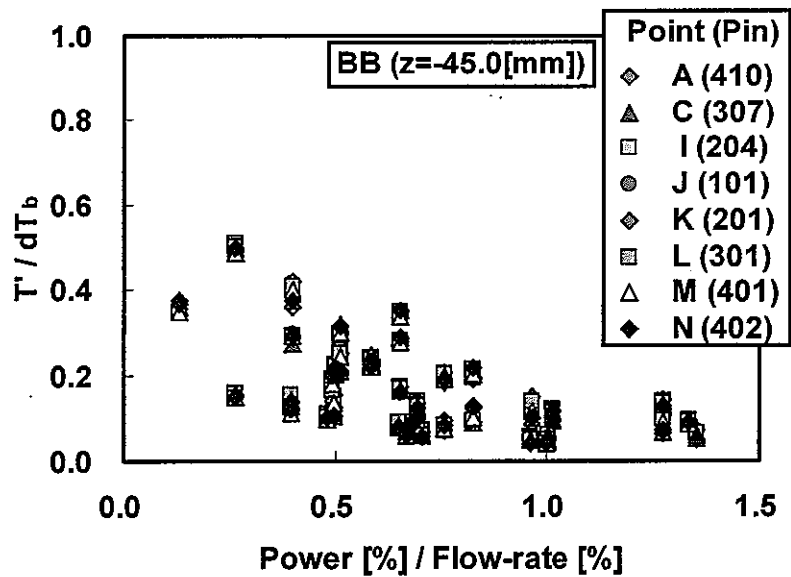


(b-1) High flow-rate condition 60% (b-2) Low flow-rate condition 15%  
 (b) Influence of power

Figure5-7.1 Circumferential Distribution of Pin Surface Temperature of the Heater Pin305 on Cross-section CC (z=-10.0[mm]).



(a) Cross-section BA (z=-155.0[mm])



(b) Cross-section BB (z=-45.0[mm])

Figure5-8.1 Fluctuation of Sodium Temperature in the Upstream Side of Blockage along Traverse-A.

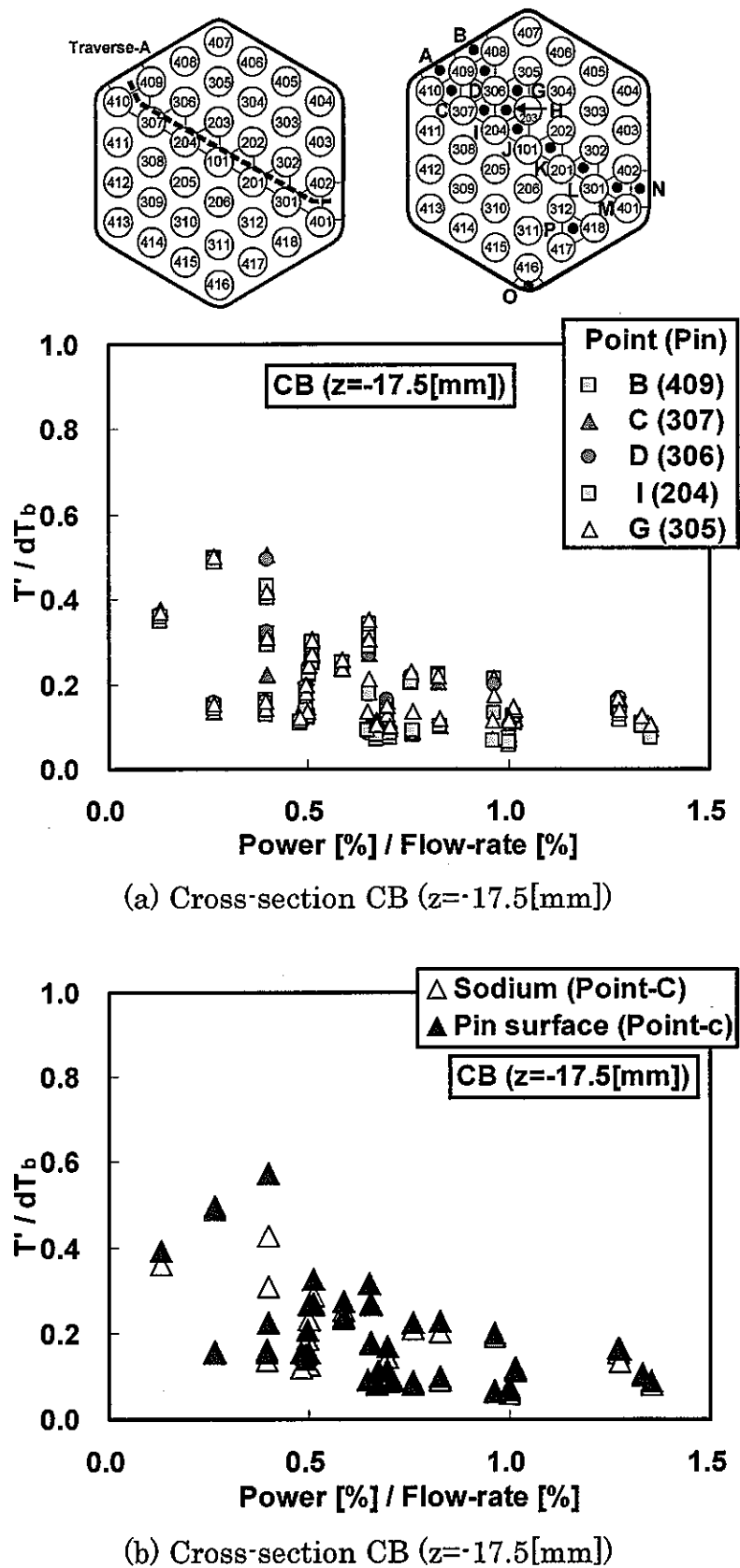
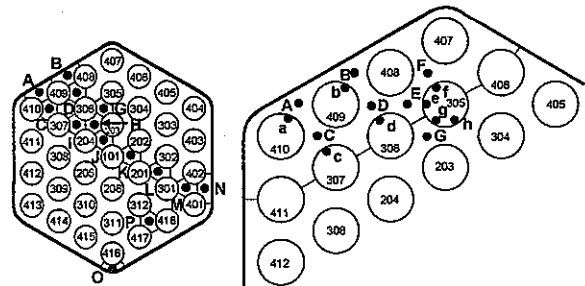
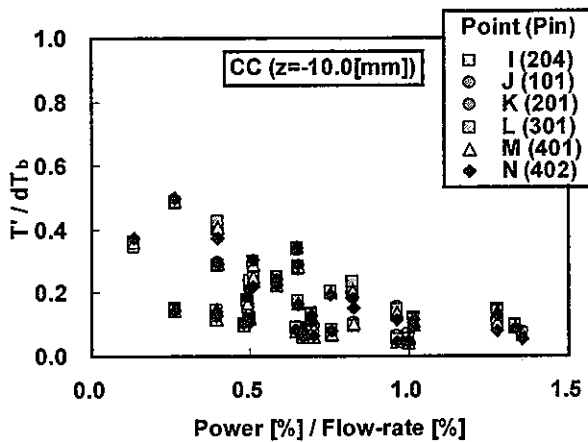
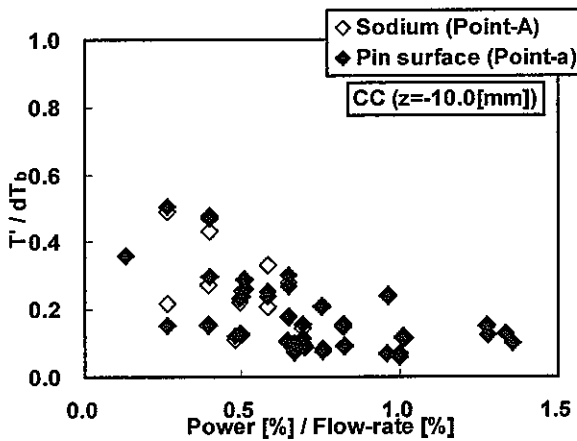


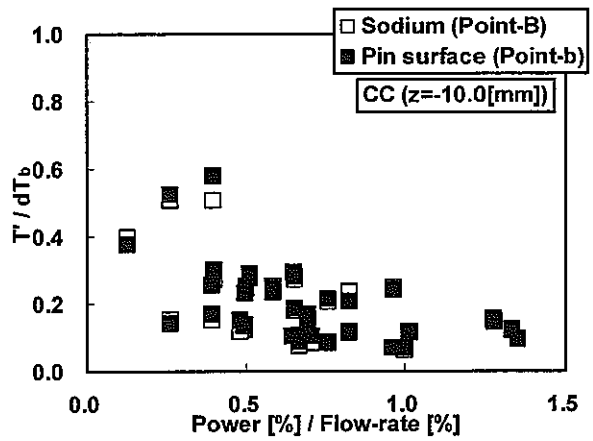
Figure5-8.2 Fluctuation of Sodium Temperature in the Blockage Region on Cross-section CB ( $z=-17.5[\text{mm}]$ )



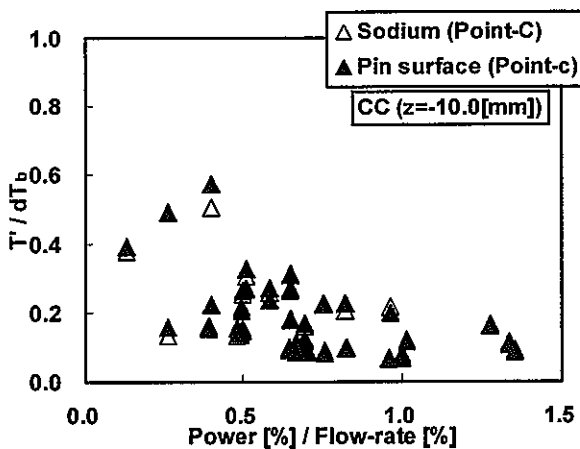
(1) Out side of porous blockage



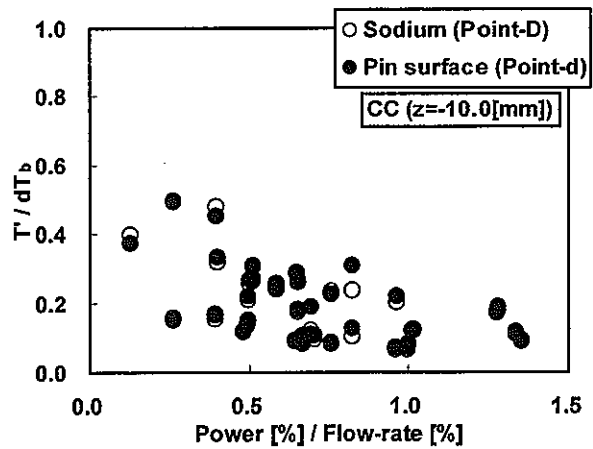
(2) Point-a and -A



(3) Point-b and -B



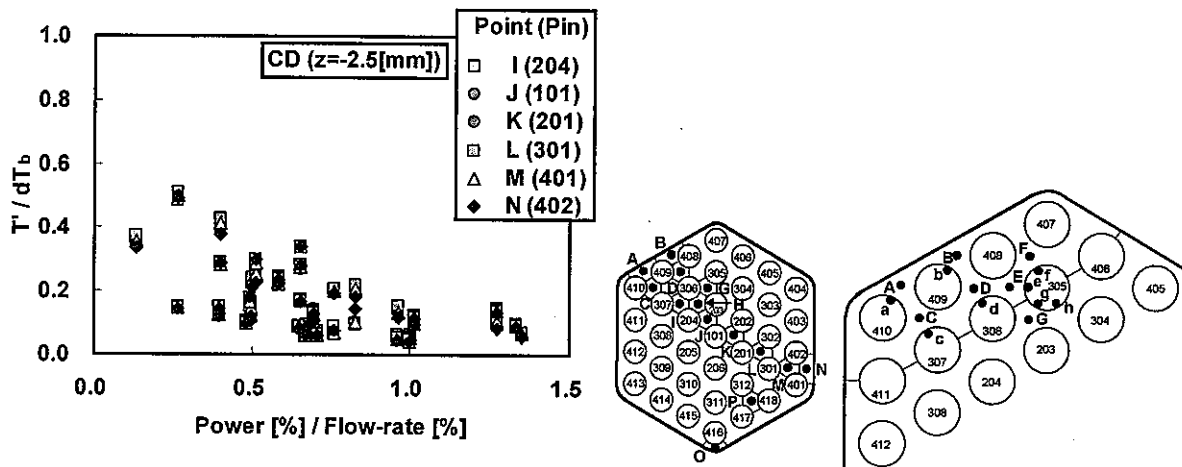
(4) Point-c and -C



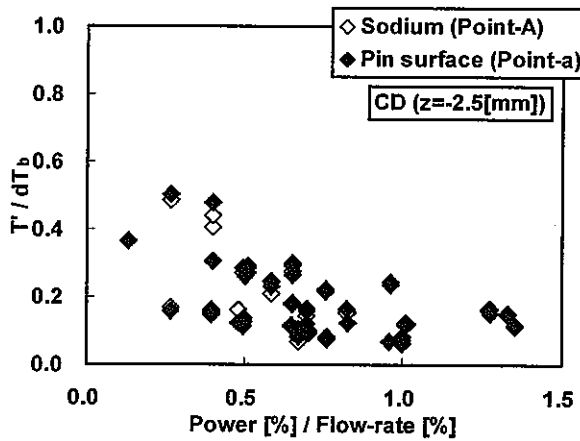
(5) Point-d and -D

Figure5-8.3 Fluctuations of Sodium Temperature and Pin Surface Temperature in the Blockage Region on Cross-section CC (z=-10.0[mm]).

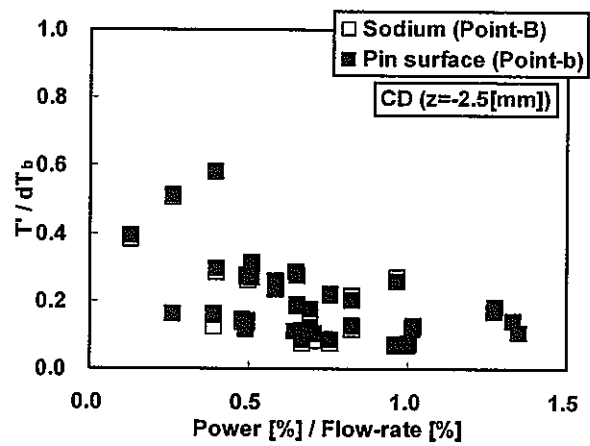




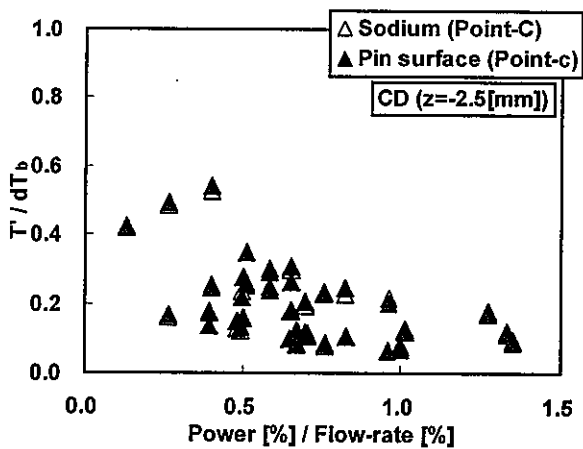
(1) Out side of porous blockage



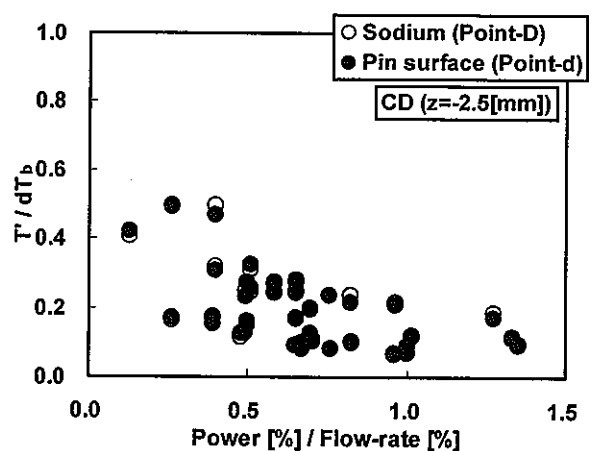
(2) Point-a and -A



(3) Point-b and -B

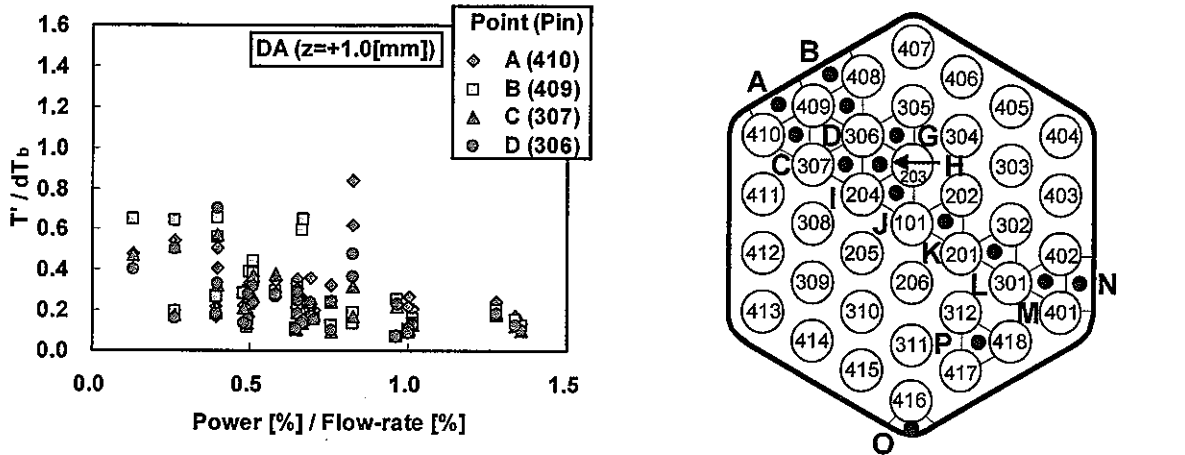


(4) Point-c and -C

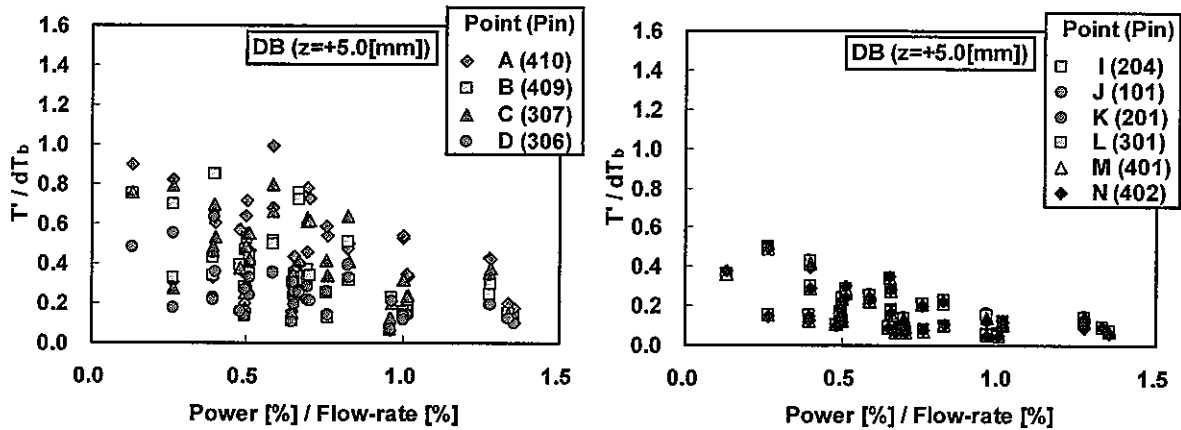


(5) Point-d and -D

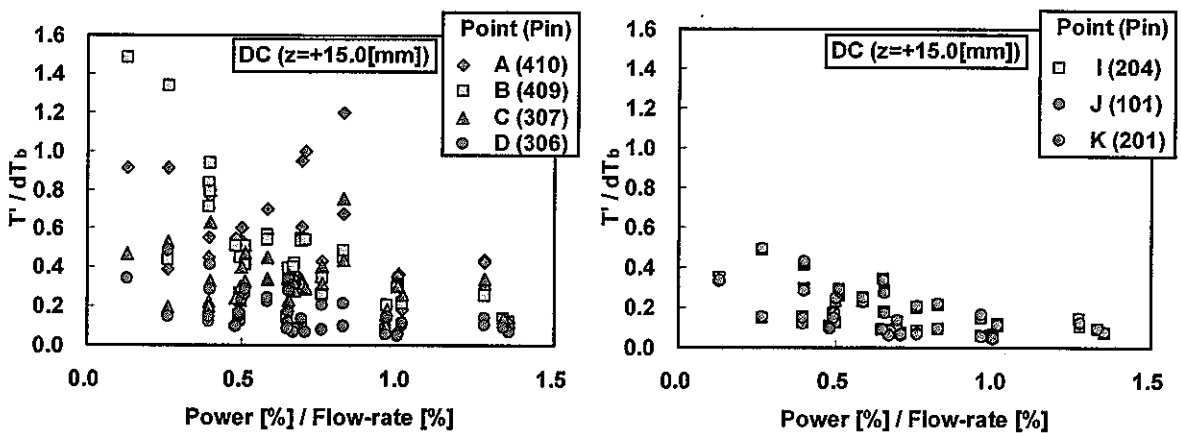
Figure5-8.4 Fluctuations of Sodium Temperature and Pin Surface Temperature in the Blockage Region on Cross-section CD (z=-2.5[mm]).



(a) Cross-section DA ( $z=+1.0$ [mm])

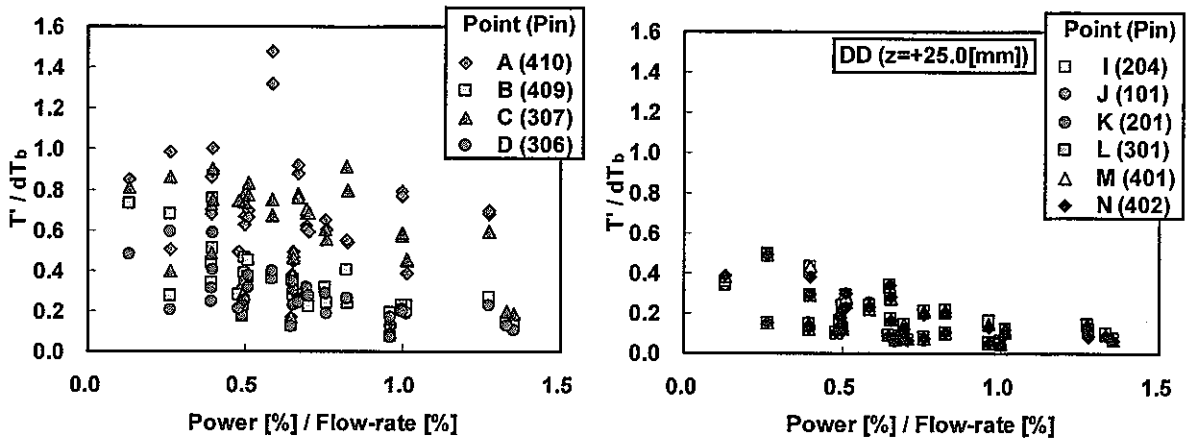


(b) Cross-section DB ( $z=+5.0$ [mm])

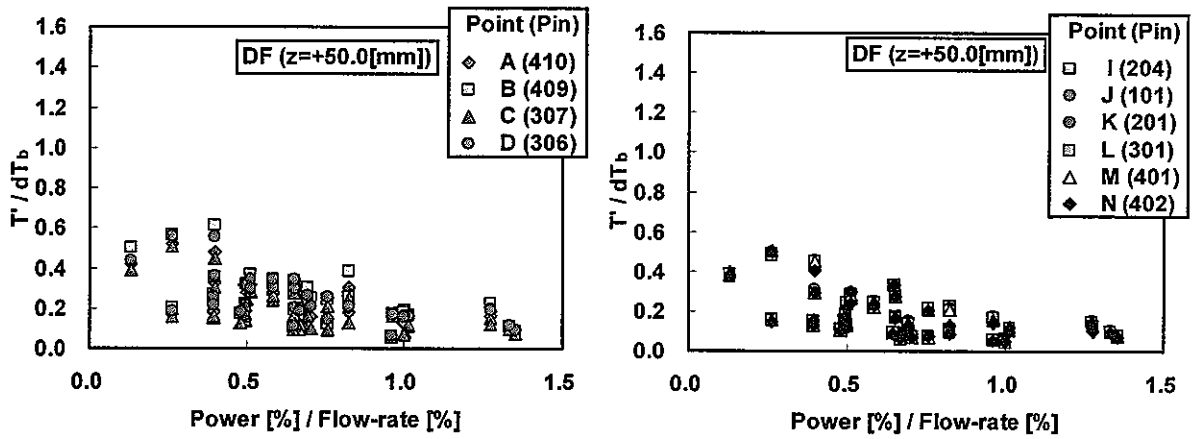


(c) Cross-section DC ( $z=+15.0$ [mm])

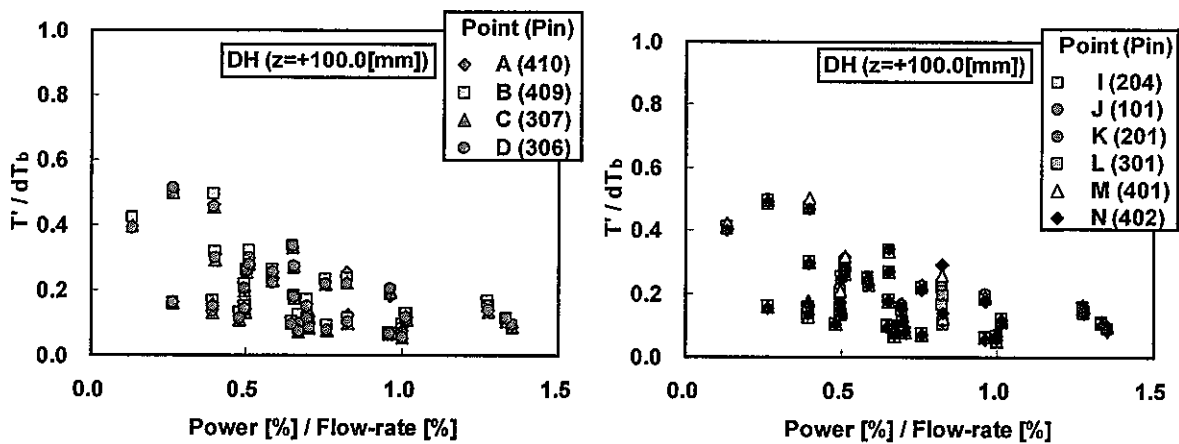
Figure 5-8.5 Fluctuation of Sodium Temperature in the Wake Region.  
(Left side: Inside Blockage, Right side: Unplugged Subchannel)



(a) Cross-section DD ( $z=+25.0$ [mm])



(b) Cross-section DF ( $z=+50.0$ [mm])



(c) Cross-section DH ( $z=+100.0$ [mm])

Figure5-8.6 Fluctuation of Sodium Temperature in Downstream Region.  
(Left side: Inside Blockage, Right side: Unplugged Subchannel)

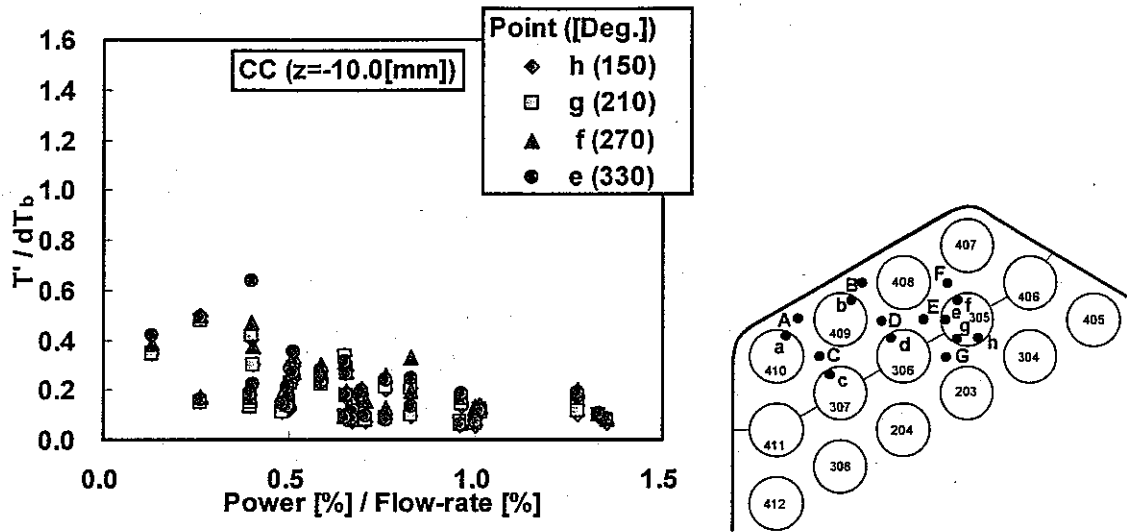


Figure5-8.7 Fluctuation of Pin Surface Temperature around Heater Pin305 on Cross-section CC (z=-10.0[mm]).

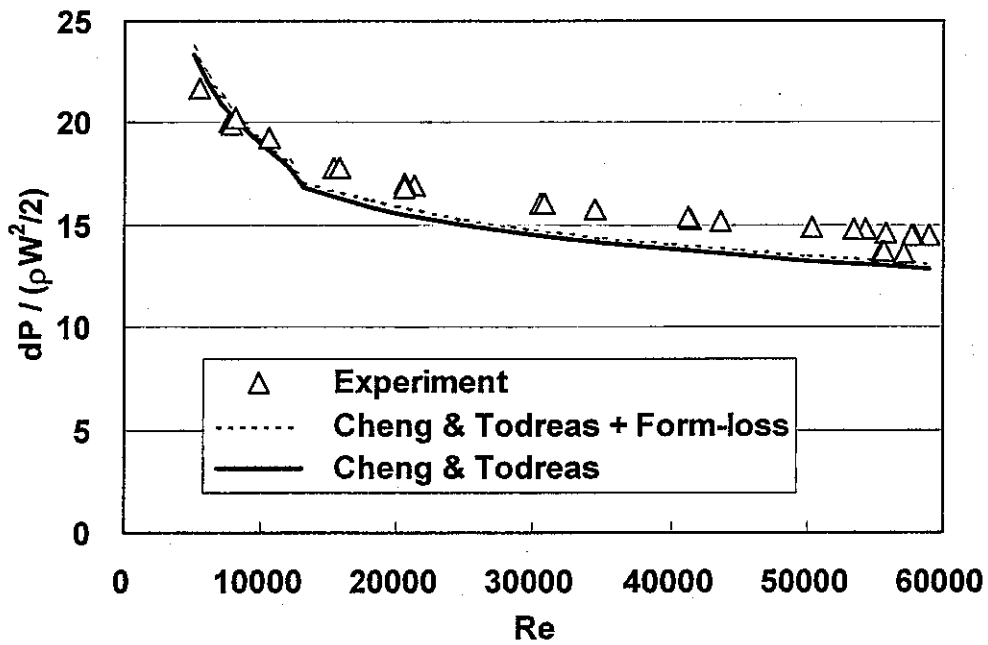
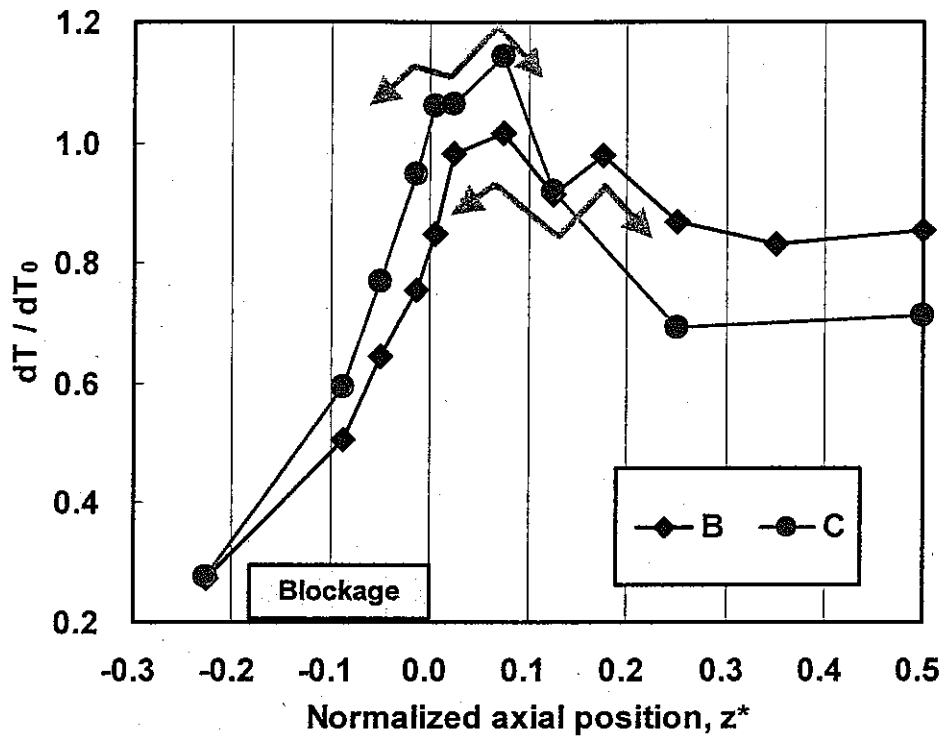
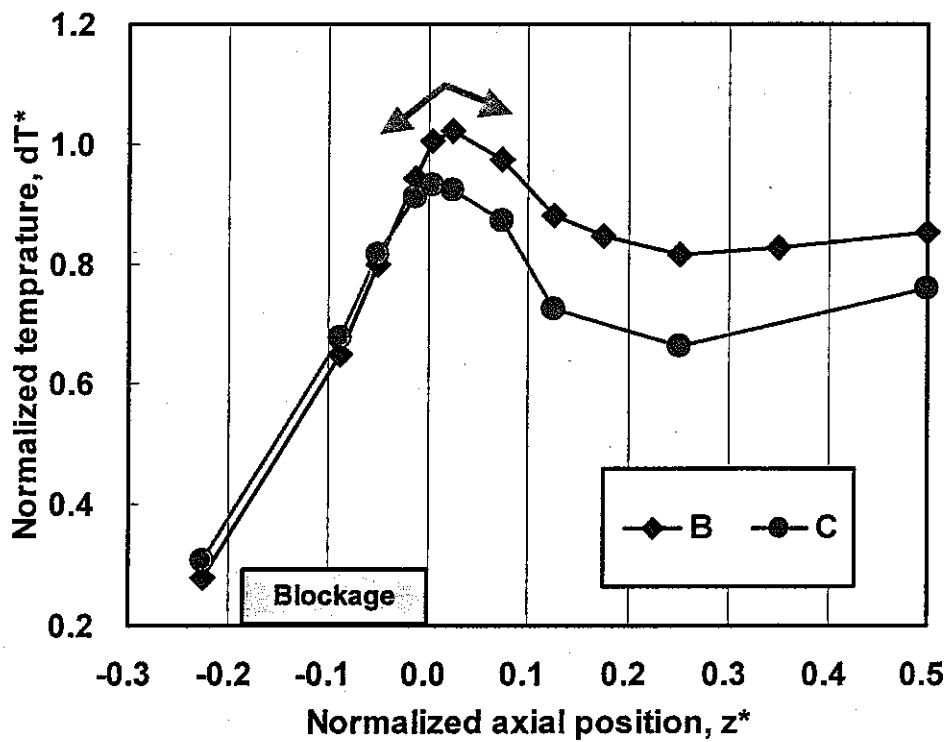


Figure5-9 Pressure Drop in the Test Section.



(a) High power and flow-rate condition ( $P=F=40\%$ )



(b) Low power and flow-rate condition ( $P=F=10\%$ )

Figure6-1.1 Typical Axial Distribution of Coolant Temperature.

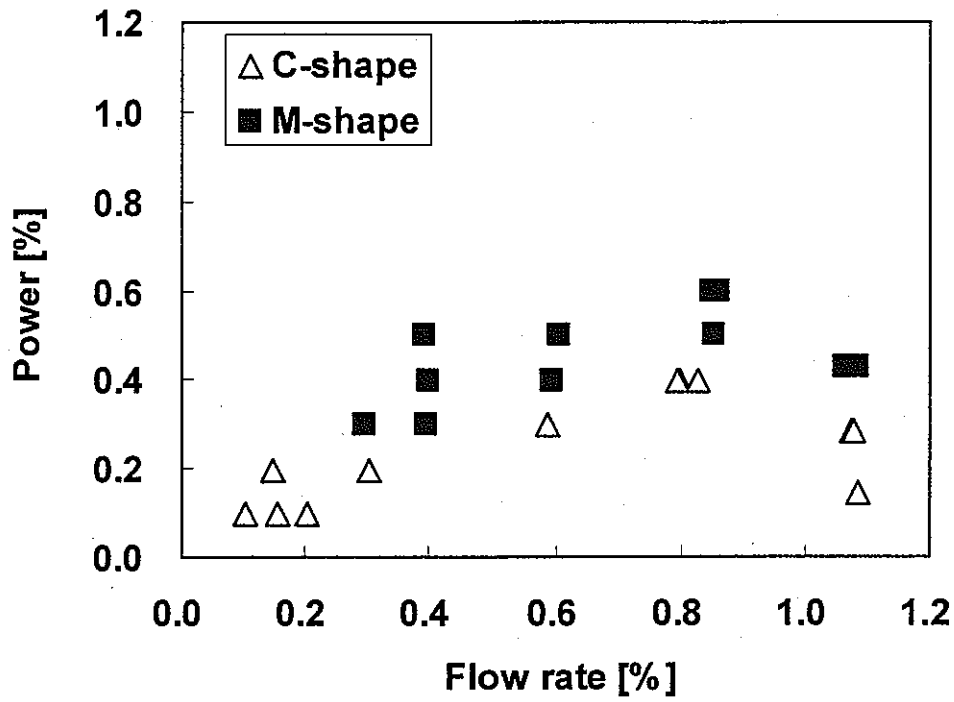


Figure6-1.2 Shape of Axial Distribution of Sodium Temperature at Point-B.

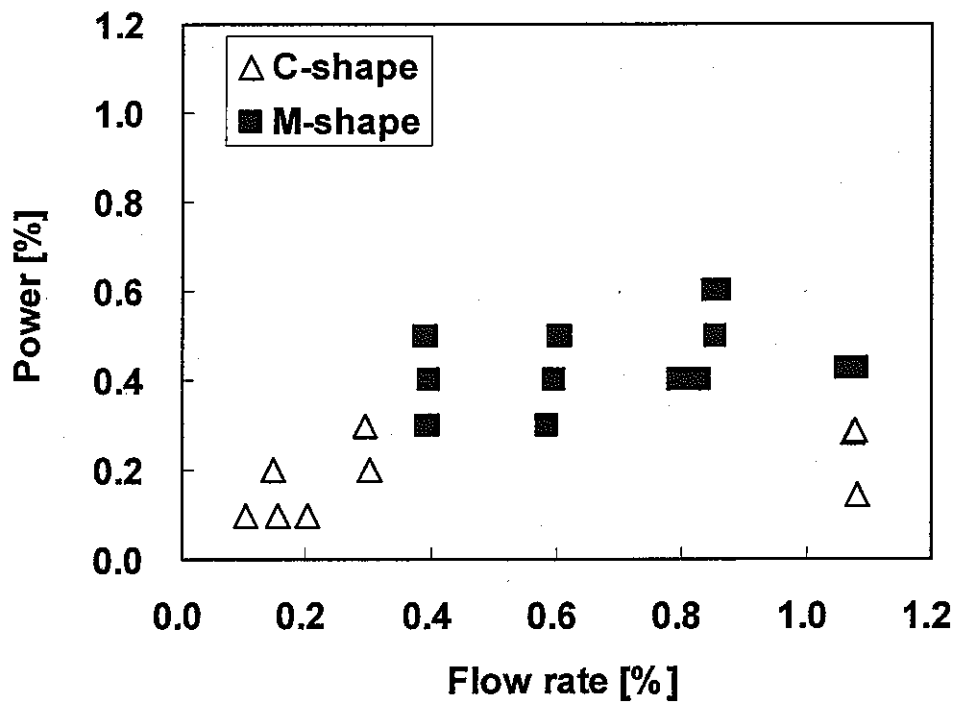
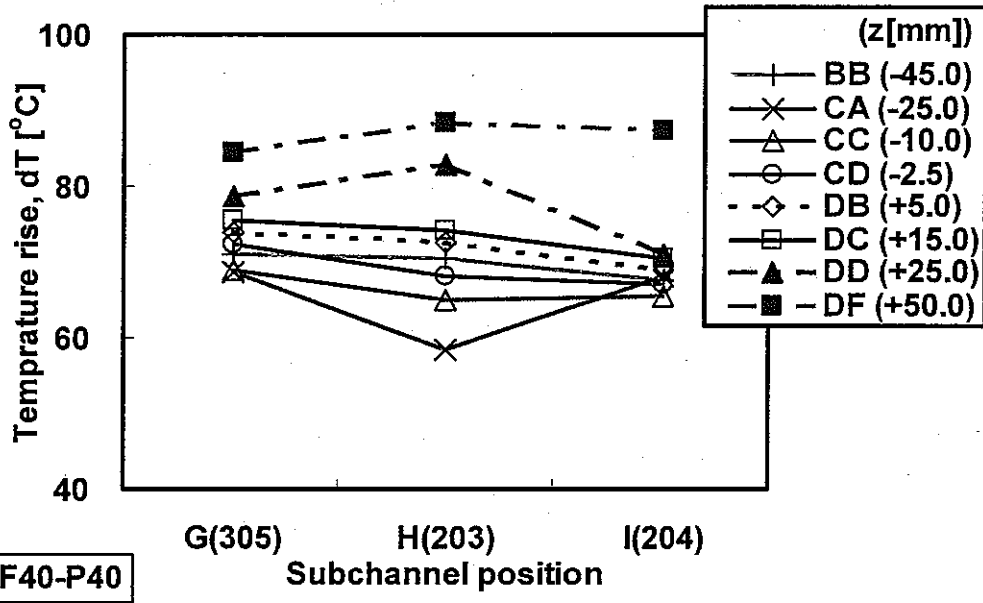
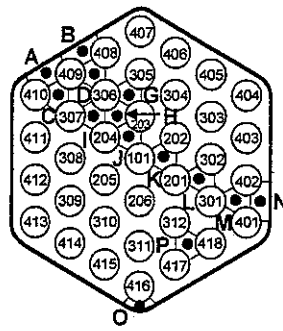
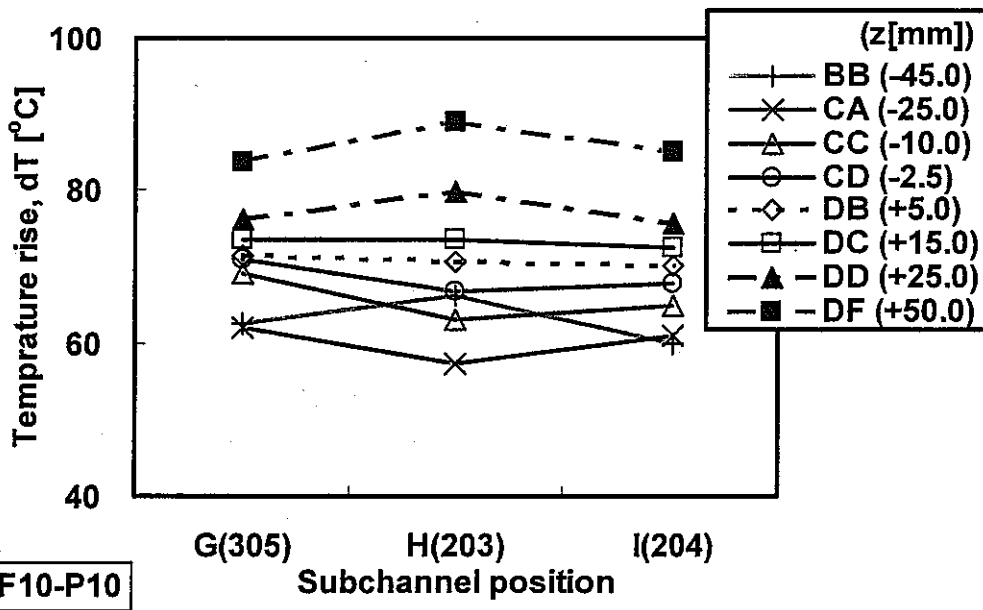


Figure6-1.3 Shape of Axial Distribution of Sodium Temperature at Point-C.

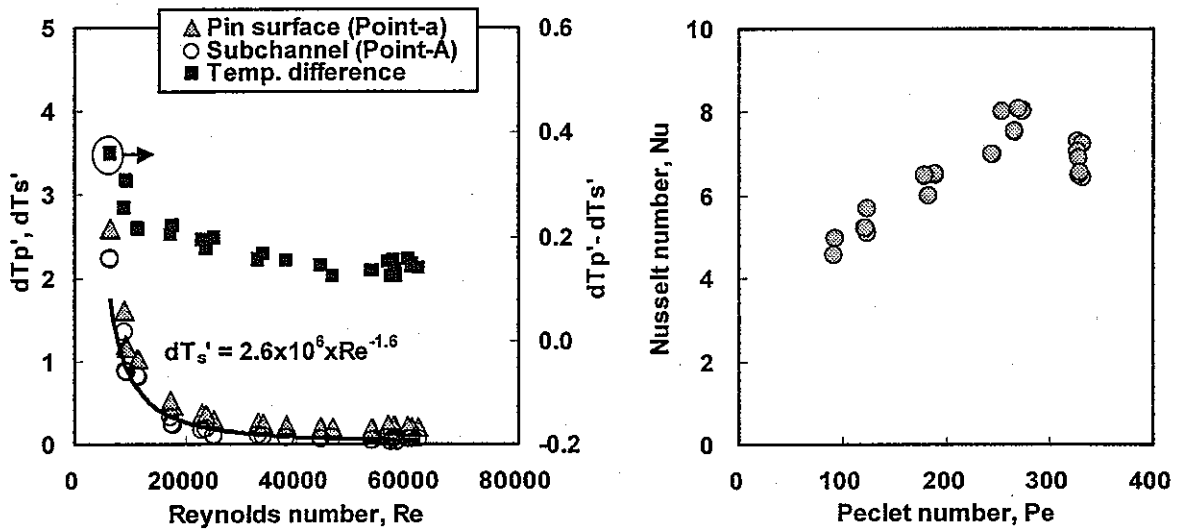
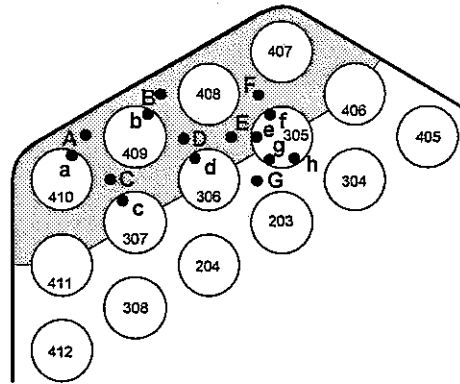


(a) High power and flow-rate condition (P=F=40[%])

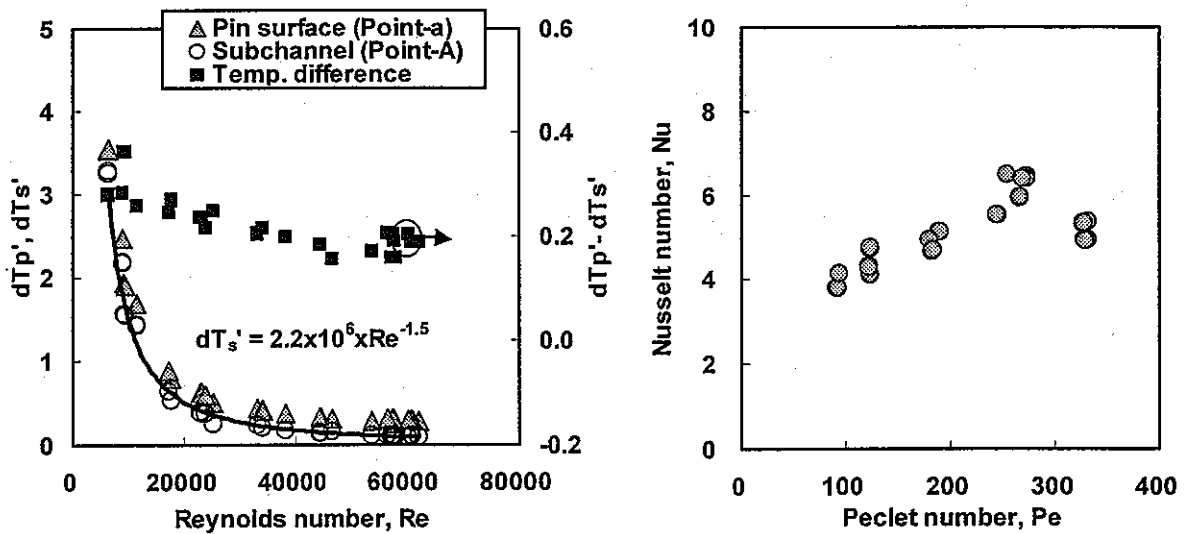


(b) Low power and flow-rate condition (P=F=10[%])

Figure6-1.4 Horizontal Distribution of Sodium Temperature in the Adjacent Subchannel to Blockage.



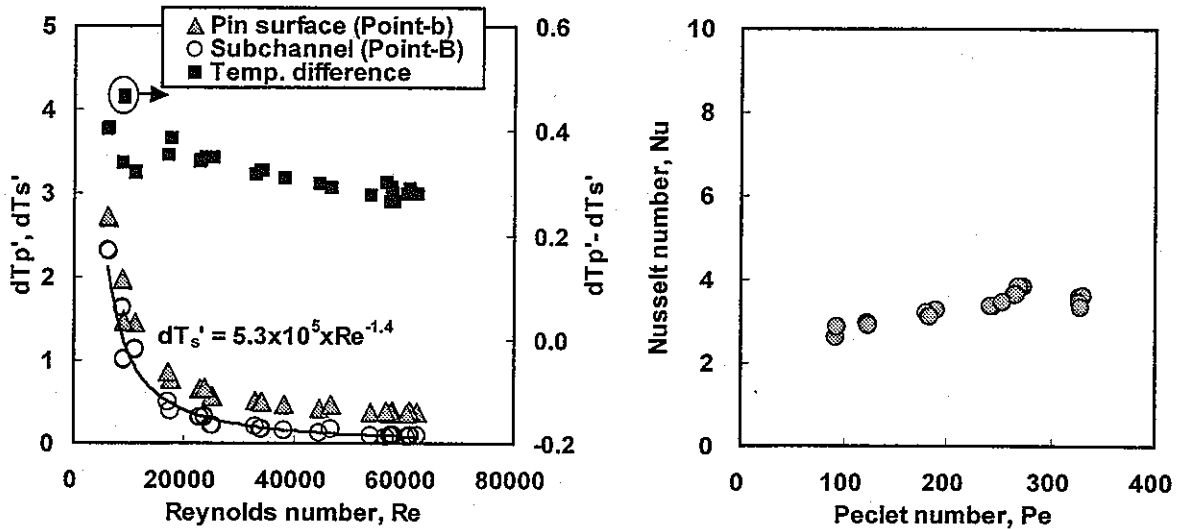
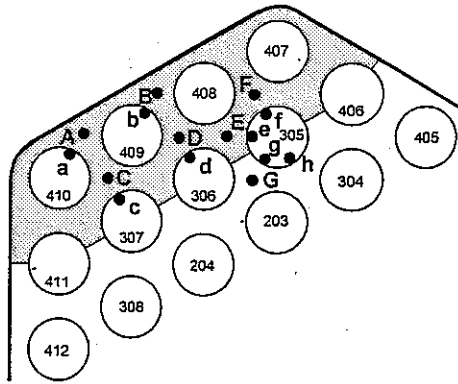
(a) Cross-section CC ( $z/H=-0.29$ )



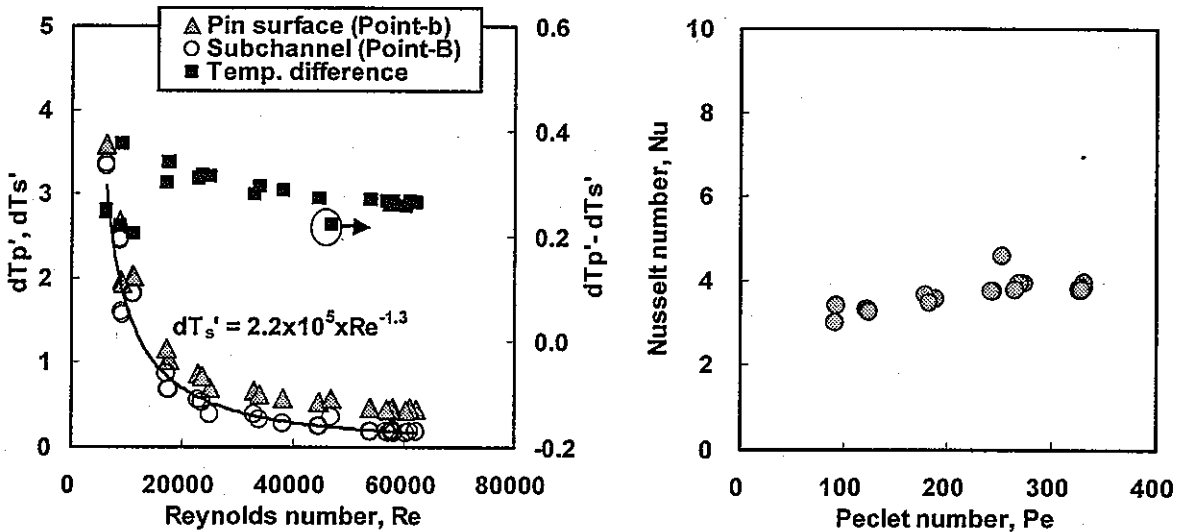
(b) Cross-section CD ( $z/H=-0.07$ )

Figure6-2.1 Characteristics of Pin Surface (Point-a) and Sodium Temperature (Point-A) in the Outer Region of Blockage.



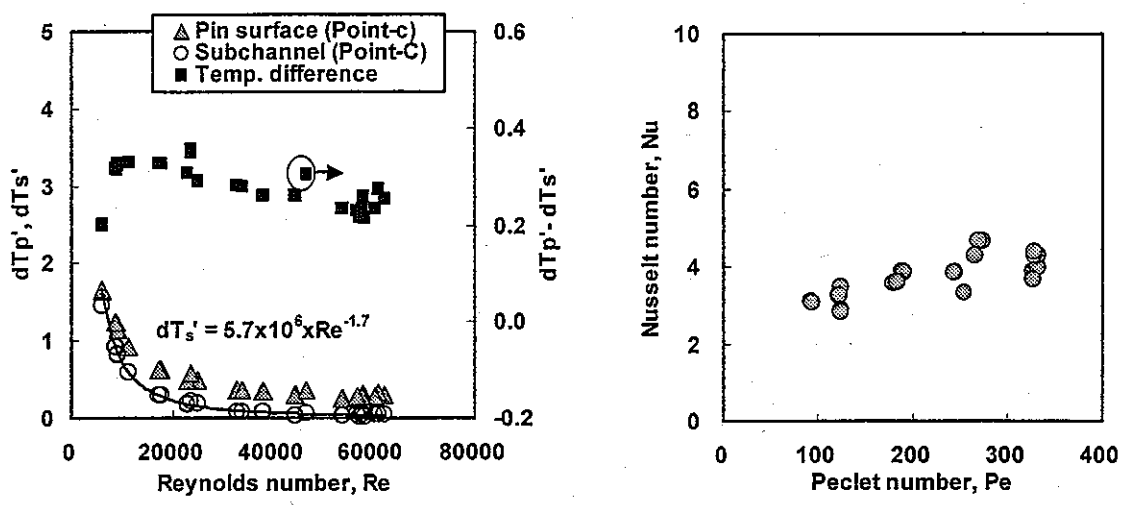


(a) Cross-section CC ( $z/H=-0.29$ )

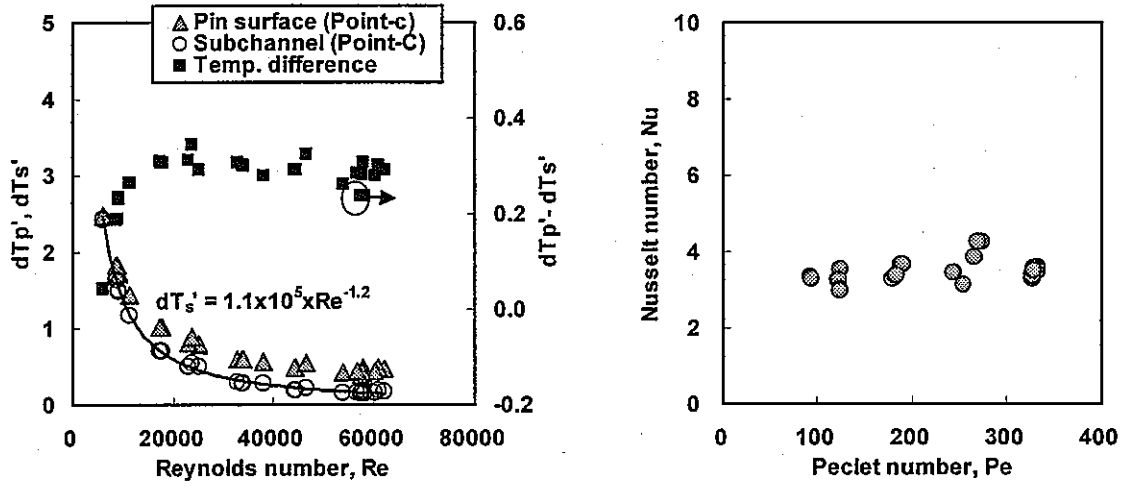


(b) Cross-section CD ( $z/H=-0.07$ )

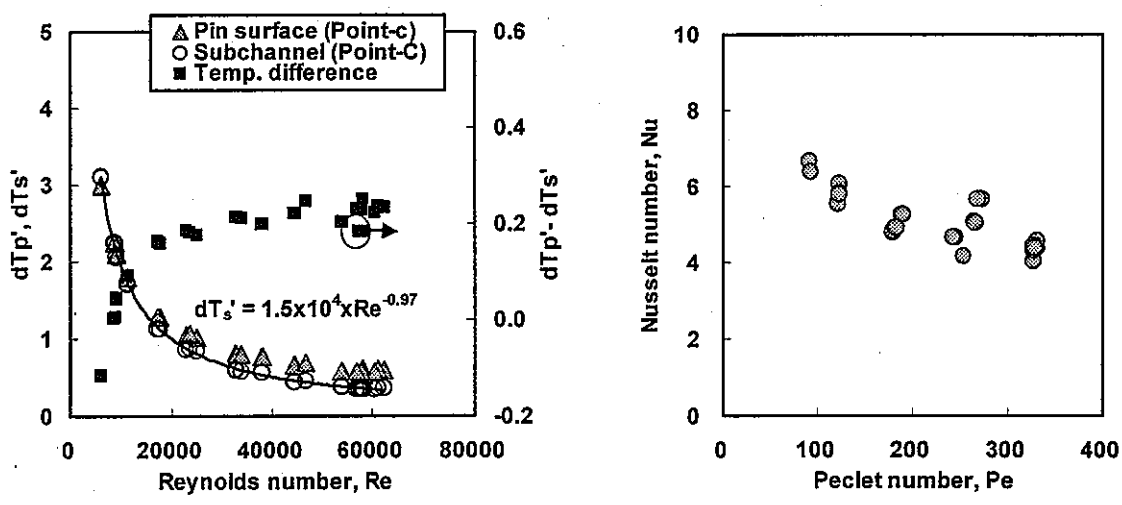
Figure6-2.2 Characteristics of Pin Surface (Point-b) and Sodium Temperature (Point-B) in the Outer Region of Blockage.



(a) Cross-section CB ( $z/H=-0.5$ )

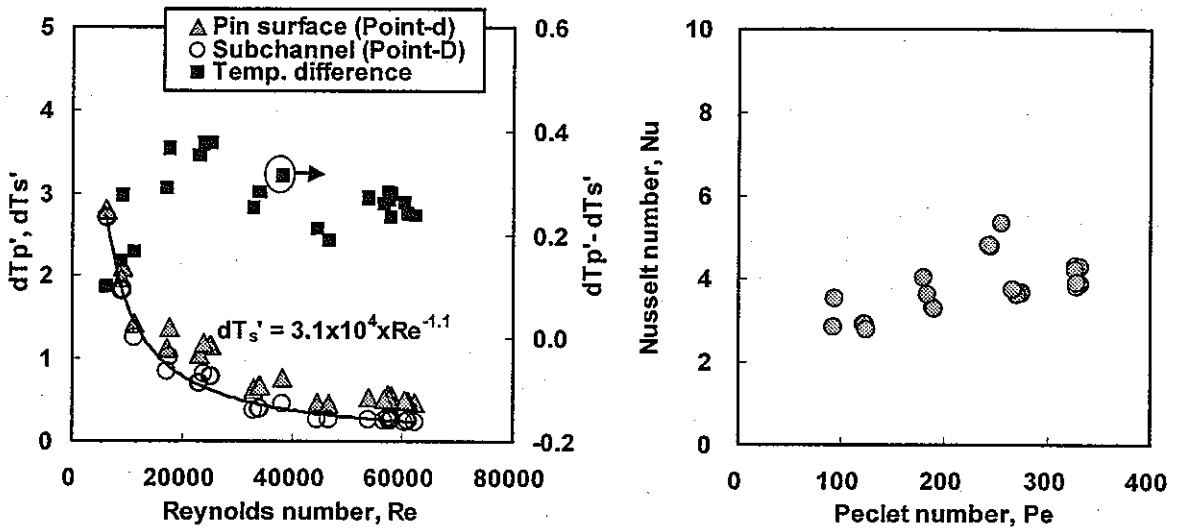
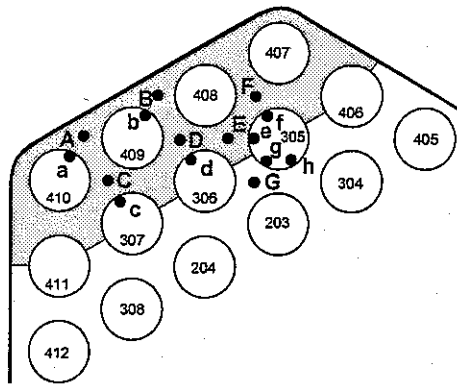


(b) Cross-section CC ( $z/H=-0.29$ )

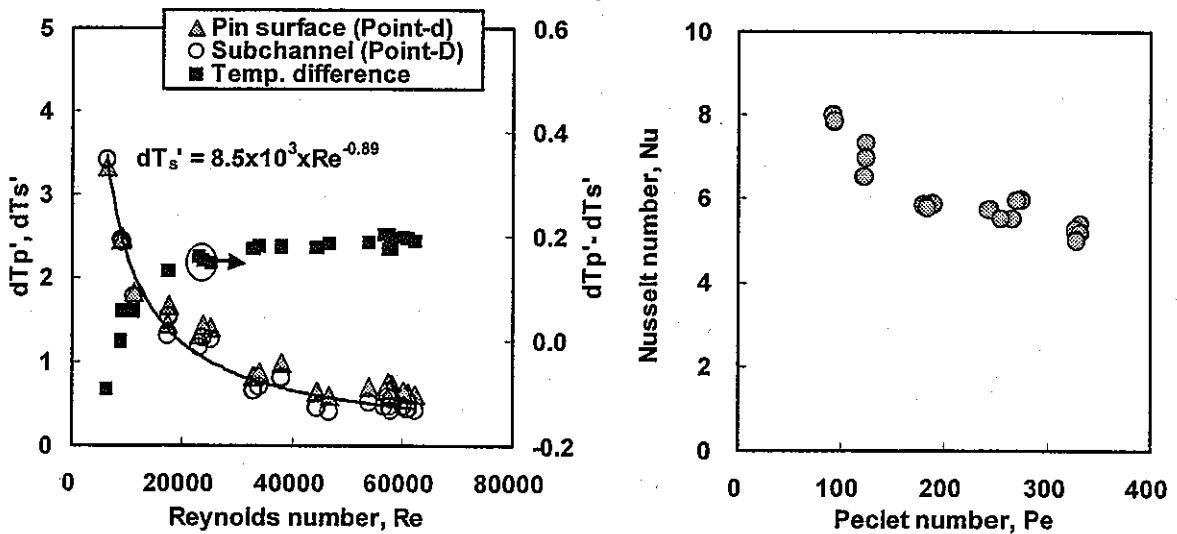


(c) Cross-section CD ( $z/H=-0.07$ )

Figure6-2.3 Characteristics of Pin Surface (Point-c) and Sodium Temperature (Point-C) in the Inner Region of Blockage.

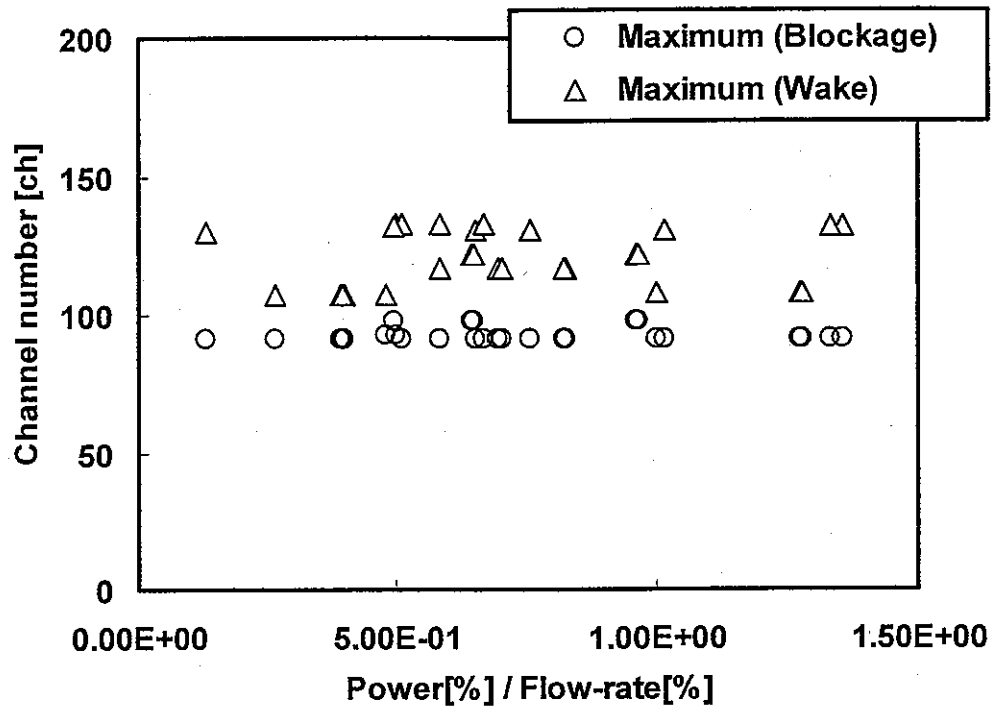


(a) Cross-section CC ( $z/H=-0.29$ )



(b) Cross-section CD ( $z/H=-0.07$ )

Figure6-2.4 Characteristics of Pin Surface (Point-d) and Sodium Temperature (Point-D) in the Inner Region of Blockage.



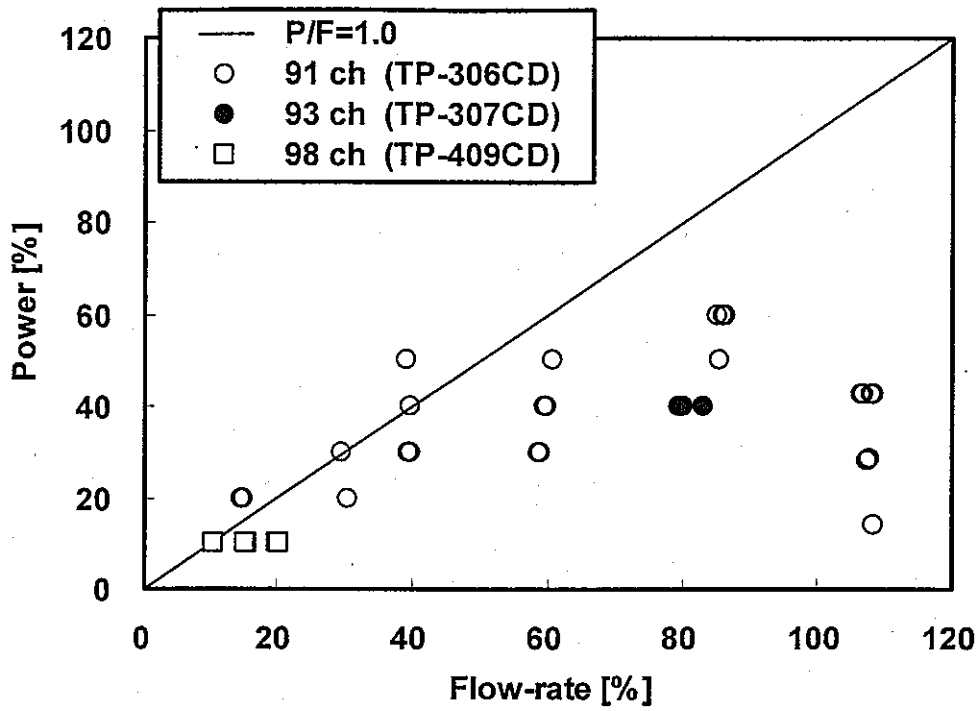
(Inside Blockage, Cross-section CA~CD)

Ch	Sensor	Temperature	Point	Cross-section (z [mm])
91	TP-306CD	Pin surface	d	CD (-2.5)
93	TP-307CD	Pin surface	c	CD (-2.5)
98	TP-409CD	Pin surface	b	CD (-2.5)

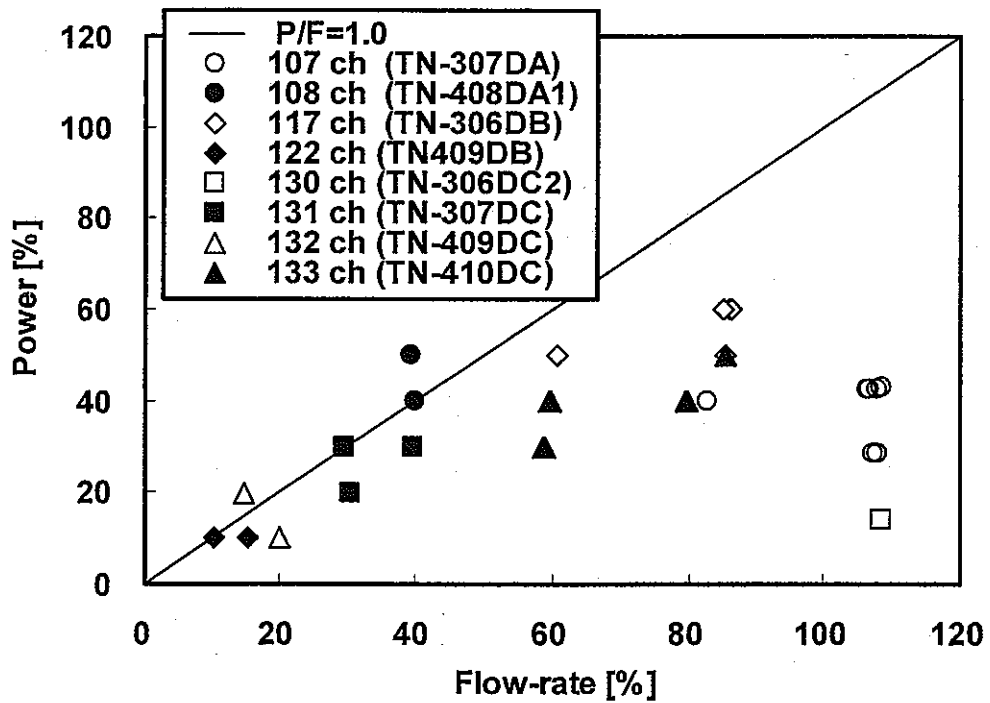
(Wake region, Cross-section DA~DF)

Ch	Sensor	Temperature	Point	Cross-section (z [mm])
107	TN-307DA	Sodium	C	DA (+1.0)
108	TN-408DA1	Sodium	C	DA (+1.0)
117	TN-306DB	Sodium	D	DB (+5.0)
122	TN-409DB	Sodium	B	DB (+5.0)
130	TN-306DC2	Sodium	D	DC (+15.0)
131	TN-307DC	Sodium	C	DC (+15.0)
132	TN-409DC	Sodium	B	DC (+15.0)
133	TN-410DC	Sodium	A	DC (+15.0)

Figure6-3.1 Channel Number giving the Maximum Temperature.



(a) Inside Blockage (Cross-section CA~CD)



(b) Wake Region (Cross-section DA~DF)

Figure6-3.2 Relation between Experimental Condition and Channel Number giving the Maximum Temperature.

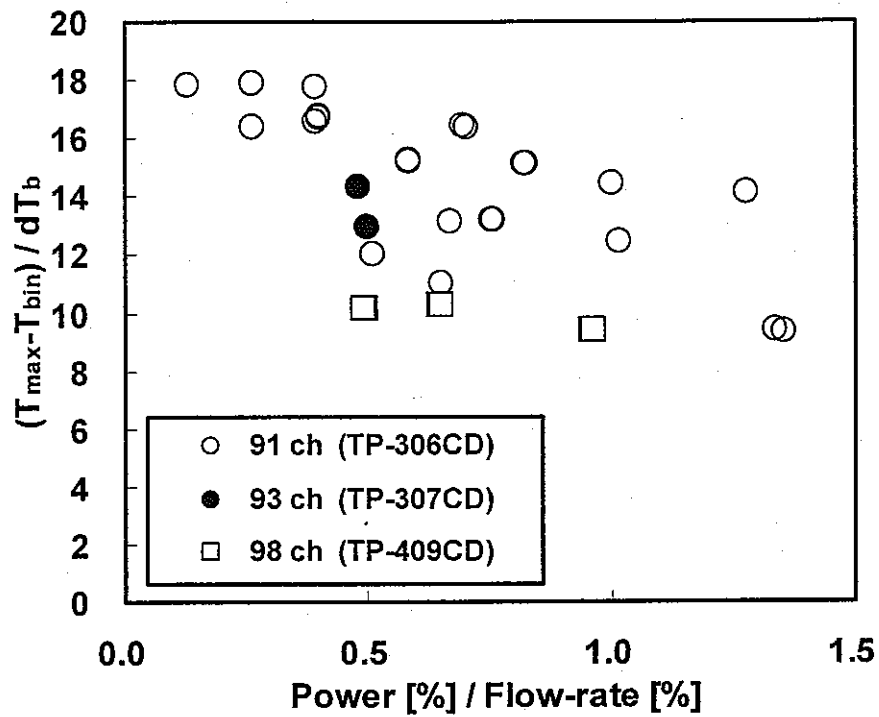


Figure6-3.3 Characteristic of Maximum Pin Surface Temperature inside Blockage between Cross-section CA and CD.

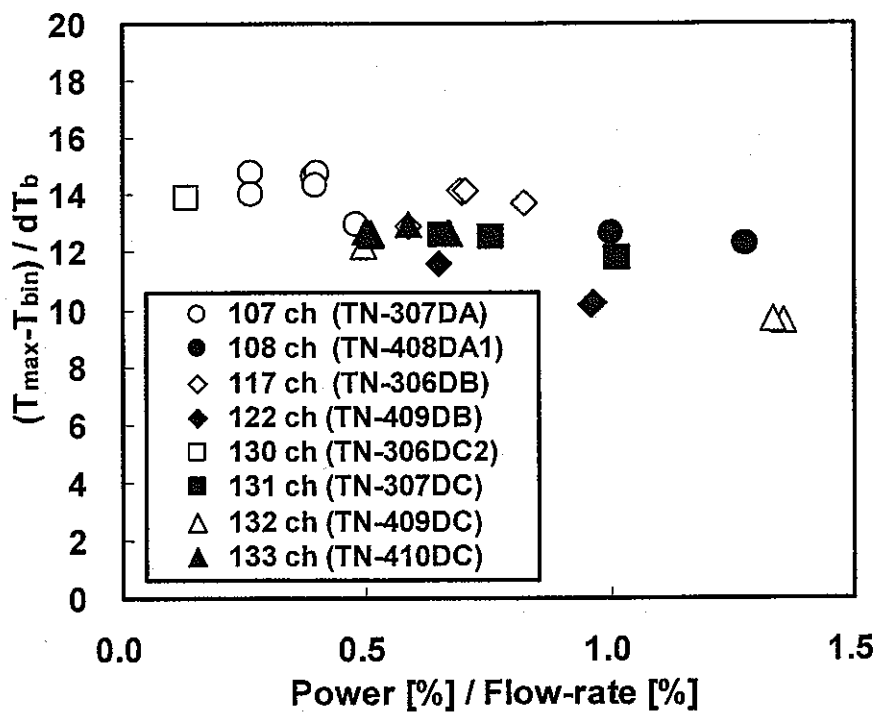


Figure6-3.4 Characteristic of Maximum Sodium Temperature in the Wake Region between Cross-section DA and DF.

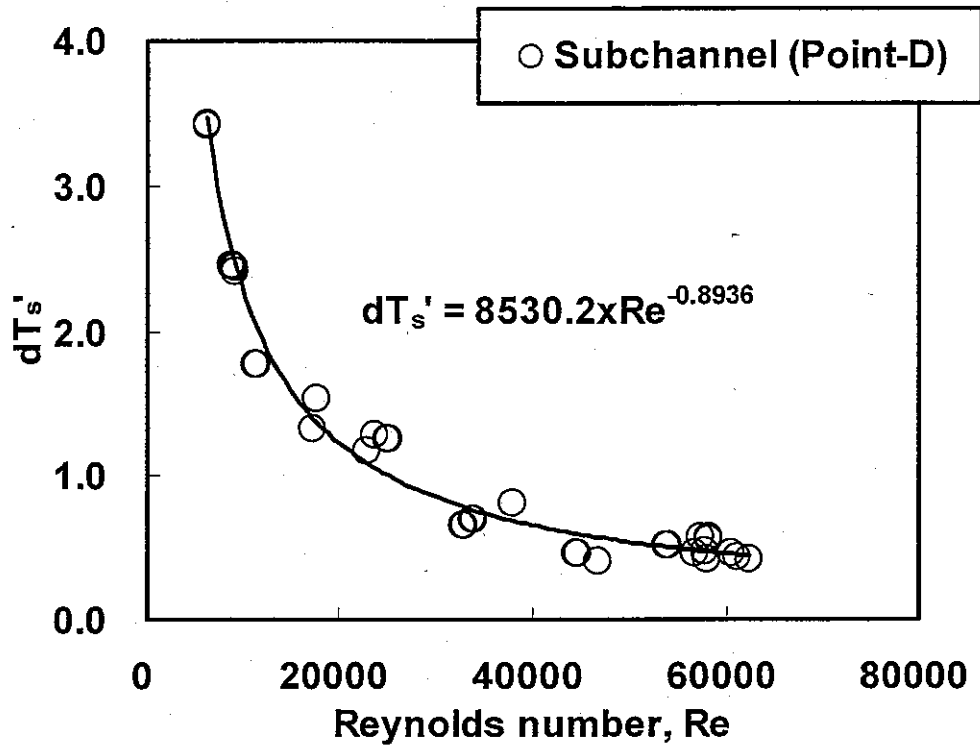


Figure6-3.5 Characteristics of Sodium Temperature (Point-d) in the Porous Blockage on Cross-section CD ( $z=-2.5$ [mm]).

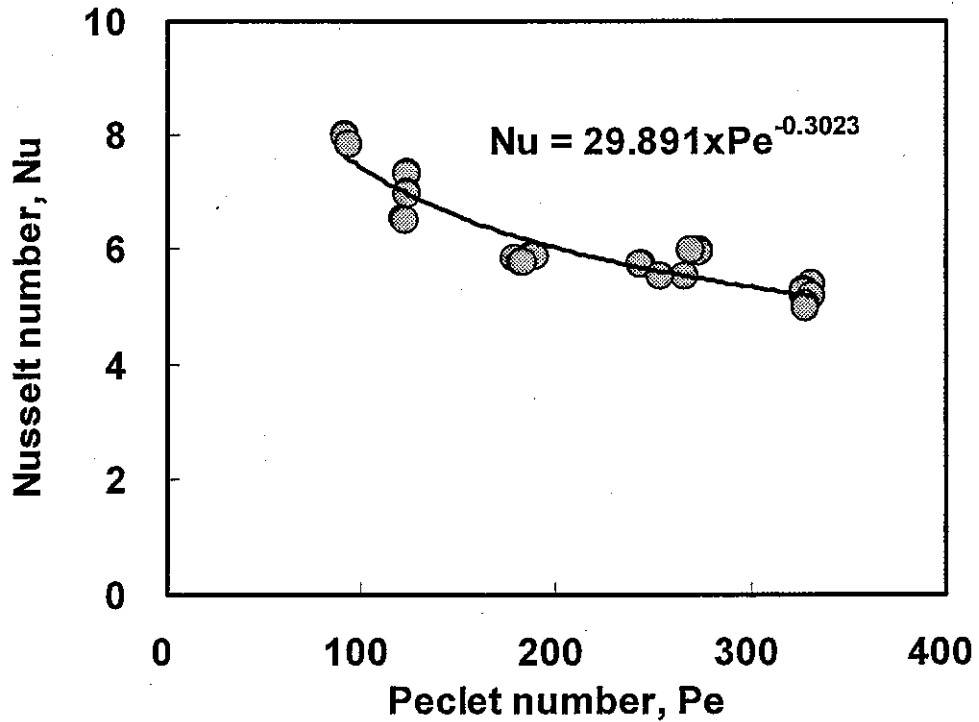


Figure6-3.6 Characteristics of Horizontal Heat Transfer in the Porous Blockage between Point-d and Point-D on Cross-section CD ( $z=-2.5$ [mm]).

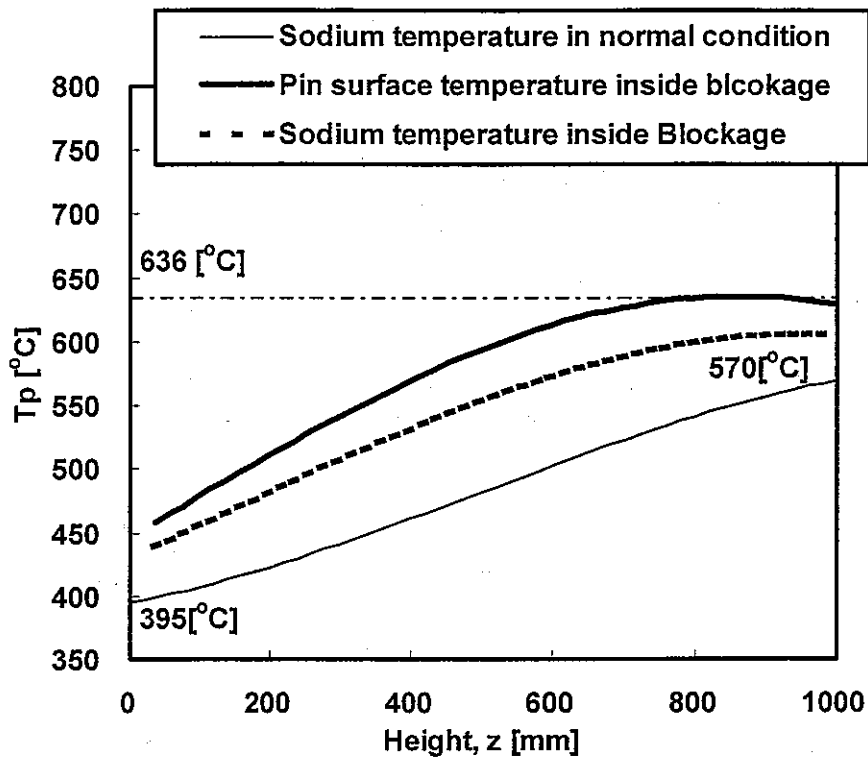


Figure6-3.7 Estimated Pin Surface Temperature in the Blockage at Point-d, 5[mm] below the Top of Blockage (37 pin bundle).

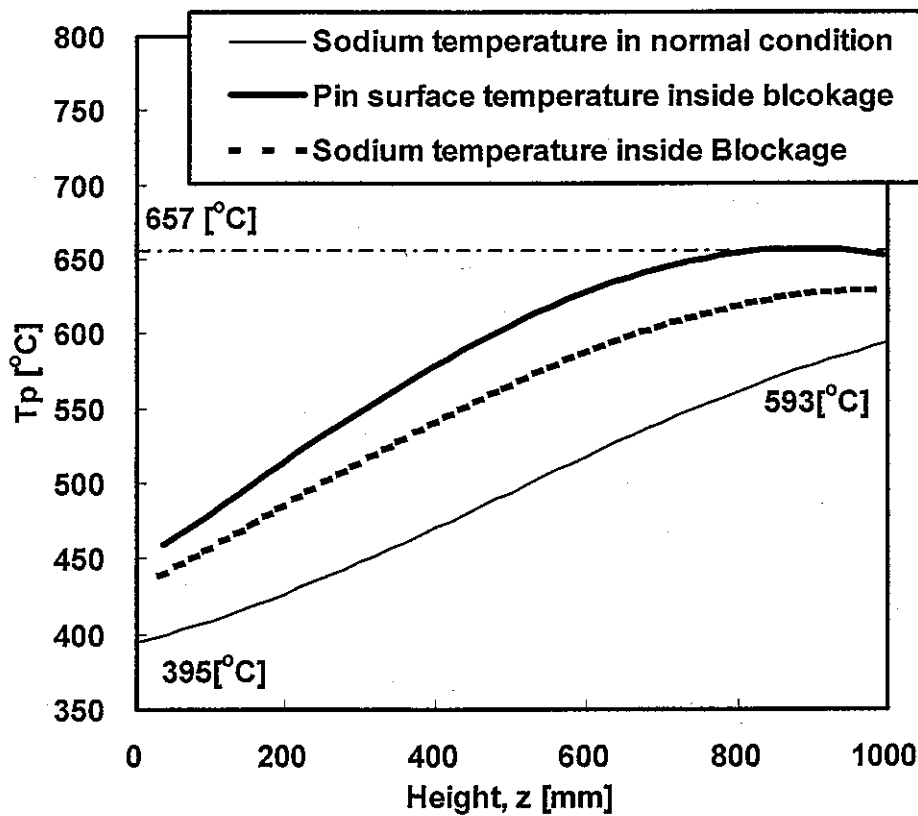


Figure6-3.8 Estimated Pin Surface Temperature in the Blockage at Point-d, 5[mm] below the Top of Blockage (217 pin bundle).



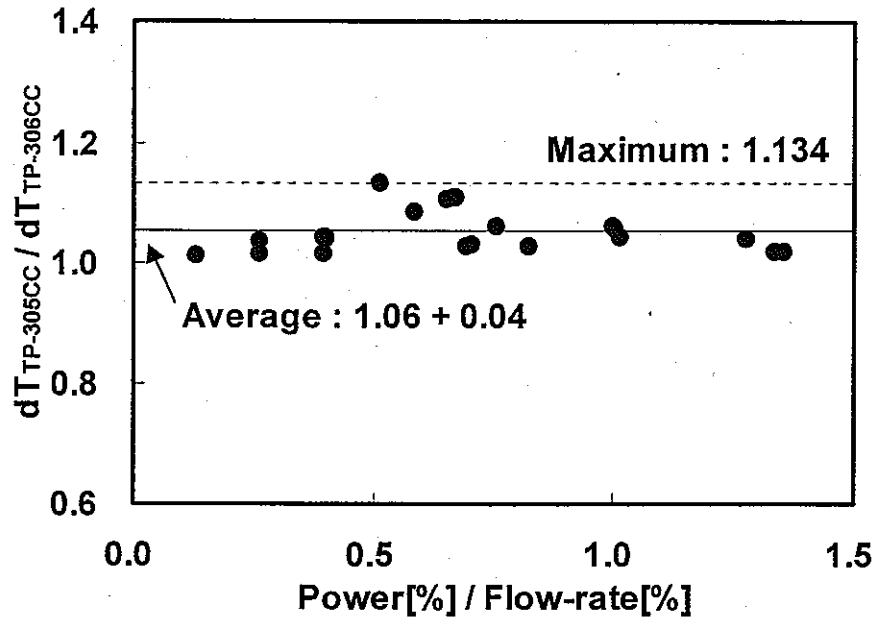


Figure6-3.9 Estimated Ratio of Temperature Rise of Pin Surface in the Blockage between Point-f(TP-305CC) and Point-d(TP-306CC) on Cross-section CC ( $z=-10.0$ [mm]).