



燃料集合体内ポーラス状閉塞における
温度場の特性
—37ピンバンドル体系ナトリウム試験—
(研究報告書)

1999年11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)

1999

燃料集合体内ポーラス状閉塞における温度場の特性

-37ピンバンドル体系ナトリウム試験-

(研究報告書)

小林 順*、磯崎 正*、田中正暁*、西村元彦*、上出英樹*

要旨

高速炉の特性として、炉心燃料集合体内のピンバンドルの緊密さ（流路の水力等価直徑：約3 [mm]）と出力密度の高さ（ピンバンドル部最大値：約520 [W/cm³]）が挙げられる。この特性に着目した安全評価事象として燃料集合体内局所異常事象がある。局所異常事象の起因事象の一つとして局所的な流路閉塞事象が挙げられ、その研究が進められている。既往研究では、ワイヤスペーサ型バンドル内での閉塞形態は微小粒子による厚みのあるポーラス状閉塞となる可能性が高いとされている。燃料集合体内にこのような局所的な閉塞が生じた場合における燃料ピンの健全性を評価するためには、ポーラス状閉塞物内部およびその周囲の熱流動挙動を把握するとともに、閉塞領域近傍の温度分布および最高温度を予測する必要がある。

本研究では燃料集合体内ポーラス状閉塞に関する現象の把握と解析コードの総合的な検証データの取得を目的にナトリウム実験を実施した。実験は、60万kW級大型炉の燃料ピンを模擬した電気ヒーターピンからなる37本ピンバンドルを用いて行なった。ポーラス状閉塞物はSUS球を焼結させて製作し、模擬集合体の一辺に沿った外側2列の14サブチャンネルにわたって組み込んだ。

ヒーターピン出力を試験パラメータとし、大型炉の最大線出力（～420 [W/cm]）の14%から43%の範囲で変化させた。流量条件は大型炉の集合体内定格時Re数の93%で一定とした。

試験の結果、閉塞されたサブチャンネルでかつ周囲の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面した模擬燃料ピン表面の流れ方向下流側位置において最高温度が観測された。流れ方向下流側に最高温度が観測されたことなどからポーラス状閉塞物内の温度場が内部の流動場の影響を強く受けていることがわかった。閉塞物内の温度分布形状はヒータ出力の依存性が小さく、集合体入口から最高温度点までの温度上昇幅はヒータ出力に比例して増加することが明らかとなった。

* 大洗工学センター、ナトリウム・安全工学試験部 原子炉工学グループ

Study on temperature field in porous blockage in a fuel subassembly
- 37-pin bundle sodium experiment -

J. Kobayashi*, T. Isozaki*, M. Tanaka*,
M. Nishimura*, and H. Kamide*

Abstract

Local blockage issue in a fuel subassembly is one of initiation of local fault in a fast reactor core. In existing studies, it is shown that blockage in a wire-spacer type pin bundle will consist of small particles coming through the bundle and will be porous. In order to evaluate the integrity of fuel pins covered by the porous blockage, we have to predict thermohydraulics in the blockage and also in the pin bundle.

In this study sodium experiments were carried out using a 37-pin bundle test section with a porous blockage. The fuel pins are modeled by electric heater pins of 8.5 mm in diameter (full scale). The blockage is formed by stainless steel spheres of 0.3 mm in diameter. The blockage is set in the two rows of subchannels along one side of hexagonal wrapper tube. The length of blockage in axial direction is 35 mm and corresponds to 1/6th of wire wrapping pitch.

The experimental parameters were power of the heater pins. The heater power was varied from 14% to 43% of the maximum linear heat rate of a real reactor ($\sim 420 \text{ W/cm}$). The flow rate in the subassembly was set at 430 l/min corresponding to 93% of the Reynolds number in a fuel subassembly of real reactor under full power condition.

The experimental results showed that the highest temperature was measured on the pin surface covered by the blockage and faced to the subchannel which was surrounded by the blockage. The height of peak temperature point was nearly top of the blockage. It means that the temperature field in the blockage is influenced by flow filed in the blockage significantly. The non-dimensional temperature profile in the blockage and in the pin bundle is independent on heater power.

* Reactor Engineering Group, Sodium and Safety Engineering Division,
O-arai Engineering Center

目次

1. 序論	1
2. 試験装置の概要と閉塞の設定	2
2.1 試験体概要	2
2.2 試験ループ概要	4
3. 試験ケースおよび試験方法	5
3.1 計測系の校正	5
3.2 試験条件および試験方法	5
4. 試験結果	7
4.1 試験条件の計測値およびRe数	7
4.2 ヒートバランスの確認	8
4.3 最高温度	9
4.4 軸方向温度分布	9
4.5 各水平断面の温度分布	10
4.6 閉塞物内部温度	11
4.7 ヒータピン表面温度の周方向分布	11
5. 考察	12
5.1 最高温度点	12
5.2 軸方向温度分布	12
6. 結論	13
謝辞	14
参考文献	15

付録 試験体内部熱電対配置および接続チャンネル対応図

List of Tables

Table1	Design Specification of Test Rig
Table2	Design Condition of Test Rig
Table3	Experiment Condition
Table4	Measurement Data of Experiment Condition
Table5	Measurement Temperature Data in the Porous Blockage

List of Figures

Figure 2.1	Schematic of Experimental Apparatus
Figure 2.2	Blockage Position in Cross Section of Test Section
Figure 2.3	Schematic of Blockage Position of Test Section
Figure 2.4	Flow Diagram of Core Component Test Loop
Figure 3.1	Mesh Arrangement
Figure 3.2	Calculation Result of the Maximum Temperature at Heater Pin Surface
Figure 4.1	Thermocouple Arrangement in the Porous Blockage
Figure 4.2	Pin Number and Reference Point of Vertical Temperature Distribution
Figure 4.3	Reference Line of Horizontal Temperature Distribution
Figure 4.4	Vertical Temperature Distribution at Point A
Figure 4.5	Vertical Temperature Distribution at Point B
Figure 4.6	Vertical Temperature Distribution at Point C
Figure 4.7	Vertical Temperature Distribution at Point D
Figure 4.8	Vertical Temperature Distribution at Point E
Figure 4.9	Vertical Temperature Distribution at Point F
Figure 4.10	Vertical Temperature Distribution at Point G
Figure 4.11	Vertical Temperature Distribution at Point H
Figure 4.12	Vertical Temperature Distribution at Point I
Figure 4.13	Vertical Temperature Distribution at Point J
Figure 4.14	Vertical Temperature Distribution at Point K
Figure 4.15	Vertical Temperature Distribution at Point L
Figure 4.16	Vertical Temperature Distribution at Point M
Figure 4.17	Vertical Temperature Distribution at Point N
Figure 4.18	Normalized Vertical Temperature Distribution at Point C
Figure 4.19	Normalized Vertical Temperature Distribution at Point H
Figure 4.20	Relationship between Heater Power and Temperature Increase from Inlet
Figure 4.21(a)	Thermocouple Positions along the Reference Line at BA Level
Figure 4.21(b)	Horizontal Temperature Distribution along the Reference Line at BA Level
Figure 4.22(a)	Thermocouple Positions along the Reference Line at BB Level
Figure 4.22(b)	Horizontal Temperature Distribution along the Reference Line at BB Level

- Figure 4.23(a) Thermocouple Positions along the Reference Line at CB Level
Figure 4.23(b) Horizontal Temperature Distribution along the Reference Line at CB Level
Figure 4.24(a) Thermocouple Positions along the Reference Line at CC Level
Figure 4.24(b) Horizontal Temperature Distribution along the Reference Line at CC Level
Figure 4.25(a) Thermocouple Positions along the Reference Line at CD Level
Figure 4.25(b) Horizontal Temperature Distribution along the Reference Line at CD Level
Figure 4.26(a) Thermocouple Positions along the Reference Line at DB Level
Figure 4.26(b) Horizontal Temperature Distribution along the Reference Line at DB Level
Figure 4.27(a) Thermocouple Positions along the Reference Line at DC Level
Figure 4.27(b) Horizontal Temperature Distribution along the Reference Line at DC Level
Figure 4.28(a) Thermocouple Positions along the Reference Line at DD Level
Figure 4.28(b) Horizontal Temperature Distribution along the Reference Line at DD Level
Figure 4.29(a) Thermocouple Positions along the Reference Line at DF Level
Figure 4.29(b) Horizontal Temperature Distribution along the Reference Line at DF Level
Figure 4.30(a) Thermocouple Positions along the Reference Line at DH Level
Figure 4.30(b) Horizontal Temperature Distribution along the Reference Line at DH Level
Figure 4.31(a) Thermocouple Positions along the Reference Line at DI Level
Figure 4.31(b) Horizontal Temperature Distribution along the Reference Line at DI Level
Figure 4.32(a) Thermocouple Positions along the Reference Line at DJ Level
Figure 4.32(b) Horizontal Temperature Distribution along the Reference Line at DJ Level
Figure 4.33(a) Thermocouple Positions along the Reference Line at EA Level
Figure 4.33(b) Horizontal Temperature Distribution along the Reference Line at EA Level
Figure 4.34 Axial Change in the Horizontal Temperature Distribution
Figure 4.35 Normalized Horizontal Temperature Distribution
Figure 4.36 Temperature Distribution in the Porous Blockage
Figure 4.37 Temperature Distribution on 306-Pin Surface at CC Level
- Figure 5.1 Thermocouple Arrangement of 4-Subchannel Water Experiment
Figure 5.2 Horizontal Temperature Distribution in the Porous Blockage
Figure 5.3 Vertical Temperature Distribution at Points A,B,C, and D in Case 3

1. 序論

高速炉では高エネルギー側での核分裂を効率よく生じさせるため、中性子の減速要因となる冷却材の体積割合を減少させた稠密な燃料格子構造となっている。このような高速炉の炉心燃料集合体の特質上、局所的に発熱と除熱のバランスが崩れた場合に対する燃料ピンの健全性を評価することが求められている。

局所的に発熱と除熱のバランスが崩れる要因の一つとして、燃料集合体内に何らかの原因で流入した異物が集積することによって流路が閉塞されることが想定されている。このような、燃料集合体内に局所的な閉塞が生じた場合の高速炉燃料ピンの健全性を評価するためには、閉塞領域およびその近傍の熱流動挙動を把握するとともに、閉塞領域近傍の温度分布および最高温度を予測する必要がある。

局所閉塞事象の既往研究においては、ワイヤスペーサ型集合体内での閉塞形態は、微小粒子が集積した厚みのあるポーラス状閉塞となる可能性が高いとされている。(1, 2) このようなポーラス状局所閉塞事象に対する実機評価を行う解析ツールとしてサブチャンネル解析コードASFREを適用する予定である。本コードはシステム技術開発部、熱流体技術開発グループにより開発されポーラス状閉塞モデルの整備が行なわれている。(3, 4) しかしながらポーラス状閉塞においては閉塞物内に急峻な温度勾配が生じると考えられ、サブチャンネル内に1点のみコントロールボリュームを有するサブチャンネルコードでの予測には限界がある。そこでポーラス状閉塞に対する物理モデル構築のためのツールとして3次元熱流動解析コードCASCADE⁽⁵⁾を開発し、閉塞物内の温度分布、流速分布を評価することによりサブチャンネル内1点近似に必要な解析パラメータをASFREに与えることを計画している。

ポーラス状閉塞に関する知見を得るための実験研究として、燃料集合体中の4サブチャンネルを模擬し、中心サブチャンネルにポーラス状閉塞物を設置した5倍拡大モデルを用いることにより閉塞物内の温度分布特性を明らかにする水流動試験(6, 7)およびピンバンドル内での閉塞物周りの流動状況確認のための2倍拡大モデル37本ピンバンドル水流動試験を実施してきた。また、筑波大学との共同研究により、閉塞物内の速度場の測定などポーラス状閉塞内熱流動現象に関する基礎研究を実施している。(8)

本研究では、ポーラス状閉塞の熱流動特性を総合的に評価することを目的とし、閉塞位置を集合体の周辺部に想定したナトリウム試験を実施した。実機として日本原子力発電（株）にて設計が進められた60万kW級大型炉を想定した。(9, 10) 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

とし、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（ポロシティ約40%の成形焼結金属）を組み込んだ。

本試験の実施に先立ち、水流動試験による閉塞物単体の圧力損失測定試験およびサブチャンネル解析コードASFRE-IIIによる事前解析を既に実施している。(11) 試験では、事前解析に基づいて試験条件を定め、試験体流入流量を集合体内流速で実機定格条件の108%相当の一定値とし、ヒータ出力を実機最大線出力（422 [W/cm]）の14%～43%の範囲で変化させることにより、試験体内の最高温度を低く抑えつつ、閉塞物内部を含む各部の温度分布特性及び、そのヒータ出力依存性を明らかにした。

2. 試験装置の概要と閉塞の設定

2.1 試験体概要

Figure 2.1に本試験体の全体構造図を示す。また、Figure 2.2に試験体内に設置された閉塞物の取付位置断面図、Figure 2.3に閉塞物取付位置の模式図を示す。試験体は、実機(9, 10)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り、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（ポロシティ約40%の成形焼結金属）が組み込まれている。

本試験体の主要構成要素と閉塞の設定の考え方を以下に示す。また、試験体の主要仕様をTable1に、試験体の設計条件をTable2に示す。

(1)ヒータピンバンドル部

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、ピンピッチ、ワイヤスペーサ外径、ワイヤスペーサ巻きピッチ及び最大線出力は実機と同等なものとなっている。ただし、ピン数は37本とし、ピン発熱部は軸方向に平坦な発熱分布で発熱長さは650 [mm] に縮小されている。なお、閉塞物前後には充分な発熱長（300 [mm]、水力等価直徑約3 [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。各ピンの最大出力は26.1 [kW/本]、最大線出力は400 [W/cm] である。

(2)試験容器部およびその構成品

試験部容器は、外部に対するナトリウムバウンダリとなり、六角ラップ管、上部

胴部および下部入口配管部から構成される。

(3)閉塞物の設定と考え方

Figure 2.2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。閉塞物の厚み（高さ）は日本原子力発電の炉外試験(1)(2)の知見より同一サブチャンネル内にワイヤーが連続して存在する長さとしてワイヤ巻きピッチの1/6を仮定し、35mmとした。同試験から、径方向に連続したサブチャンネルが閉塞されることなく、千鳥状に飛び飛び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、集合体周辺部での閉塞ではワイヤースペーサーに沿って回転する流れ（Swirl Flow）の影響を比較的大きく受ける可能性がこれまでの解析結果から推定されており、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想定した。

閉塞物は直径0.3mmのSUS球を焼結成形して作成した。閉塞物内のポロシティは重量／体積測定の結果40%であった。これは等大球粒子の不規則充填時の値（39%）に相当する。一方で閉塞粒子径の分布を考慮すると、さらに低いポロシティとなることも考えられる。先の試験により、閉塞を起こすには粒子がワイヤー径（1mm）程度の大きさをもつ必要があることが示されている。このような大きな粒子はピンバンドル内の流路（代表長さは粒子径の3倍程度）に均一な閉塞を作ることは考えにくい。また、ピンの表面では粒子との間に粒子径の半分程度の隙間ができる。すなわち温度が高くなるピン表面近傍ではポロシティが閉塞物内部より高くなる（約50%）。このような比較的大きな粒子が形成した閉塞にさらに小さな粒子が詰まり込むことを想定したとしても、先に述べたように大きな粒子がつくる閉塞は均一ではなく部分的に粒子が連続するのみで比較的大きな隙間が多くあると考えられ、ある大きさをもった閉塞の内部に小さな粒子がこれを均一に埋めるように詰まるここまで想定することは、閉塞物の設定として保守的すぎると考える。

本試験では、ワイヤー径の1/3の大きさとなる直径0.3mmのステンレス球を閉塞粒子として用いた。これにより空隙率は40%であるが、空隙の大きさはワイヤー径に相当する球を用いる場合より1/3程度となる。これは閉塞物内の流動抵抗を大きくし、流れによる冷却を低下させる。また、ヒーターピン表面近傍では閉塞粒子1層の厚みが1/3となるため、ポロシティの大きな領域すなわち流体が流れやすい領域の厚みが小さくなる。

以上のように、細かい粒子により高い閉塞密度（低いポロシティー）をもって連

続した広い範囲のサブチャンネルを閉塞させた設定は、炉内で想定される閉塞に対してピンの冷却阻害という観点で保守性を持つものと考える。

(4)外容器

外容器は、万一のナトリウム漏洩時の試験部容器（ラッパ管）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ものである。また、試験部容器からの放熱を防止するため、その外側には放熱防止用のヒータおよび保温材を取り付けている。

外容器の下部は、ベローズを用いて試験体入口配管との間を接続し、ナトリウムが漏洩した場合、下部側へのナトリウム流出を防止する構造としている。

(5)電極箱

電極箱外周壁にてヒータピンリード部と電源ケーブル端子とを接続する構造である。電極箱内は窒素ガス雰囲気および真空ガス置換を可能とする気密構造としている。

(6)試験体内熱電対（総数：255点）

- (a)サブチャンネル温度測定用：211点
- (b)ヒータピン温度測定用：14点
- (c)閉塞物内部温度測定用：14点
- (d)ラッパ管内外壁温度測定用：16点

2.2 試験ループ概要

局所閉塞ナトリウム試験体は、CCTL（Core Component Test Loop）試験施設を改造して据え付けた。Figure 2.4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を以下に示す。

[試験施設基本仕様]

- (1)最大循環流量： 430 [ℓ/min]
- (2)最大除熱量： 1.0 [MW]
- (3)最大出力： 1.0 [MW]

また、試験施設の設計仕様を以下に示す。

[試験施設設計仕様]

(1)ナトリウム系設計条件

①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/cm²G]

②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/cm²G]

(2)ガス系設計条件

設計温度： 常温

設計圧力： 8 [kg/cm²G]

3. 試験ケースおよび試験方法

3.1 計測系の校正

①流量計校正

膨張タンク液位計により、落下法による流量計校正を行い、電磁流量計の精度の確認を行うとともに校正係数のデータを得た。本校正で最大誤差はおよそ1.4 [ℓ/min] であった。

②熱電対校正

試験体流量を最大循環流量（約430 [ℓ/min]）にて循環運転を行い、加熱器を熱源として各系統を目標温度まで昇温し、熱電対の相対校正を行った。なお、AA断面（非加熱部：Figure 2.1参照）ピン番号202近傍に設置された熱電対を基準熱電対としている。校正は300、400、500 [°C] の3点で行った。本校正で最大誤差はおよそ0.5 [°C] であった。

3.2 試験条件および試験方法

実機の運転条件に基づいて解析コードASFRE-IIIによる事前解析(11)を実施し、この解析結果を踏まえて試験条件を決定した。

3.2.3 試験条件

試験条件は、3.2.2の実機運転条件を模擬するナトリウム試験条件および解析コードASFRE-IIIによる事前解析(11)の結果を踏まえて決定した。設定した試験条件をTable3に示す。

流量条件については、今回が本体系での最初の実験となることからヒーター出力の設定と合わせて閉塞部での温度上昇を少しでも低く抑えるため、試験装置主循環系の最大循環流量となる $430 [\ell/\text{min}]$ とした。この場合の質量流速は実機条件の 108%、Re数は55100で実機条件の92%相当となる。

ヒータピン電気出力については以下に示すようにASFRE-IIIによる事前解析結果に基づいて決定した。Figure 3.1にASFRE-IIIによる事前解析のモデルメッシュ分割を示す。事前解析では、ヒータピン表面温度はNo.8のサブチャンネルにおいて最高温度を示した。その最高温度点についてヒータピン線出力及び試験体流入流量を変化させた場合の解析結果をFigure 3.2に示す。解析結果によれば、流量 $400 [\ell/\text{min}]$ の条件では約 $300 [\text{W}/\text{cm}]$ ($720 [\text{kW}]$) で試験体の設計温度に達する。本実験シリーズでは、出力に対して非線形な温度上昇もあり得ることを考慮して低い出力までに限定することし、ヒーターピン線出力を $60, 120, 180 [\text{W}/\text{cm}]$ の3ケースとした。出力が最大のケースは、実機における燃料集合体内最大線出力の 43% に相当する。

3.2.4 試験方法

試験は、試験体流入流量を一定の状態として、試験体ヒータピン表面温度および閉塞物内部温度等がヒータピン表面温度の設計温度である $650 [\text{°C}]$ を上回らないことを監視しながら、試験体ヒーターピン出力を上昇させ、空気冷却器の除熱量とバランスをとりつつ所定の試験条件に設定する。試験体の入口及び出口温度が一定（変化率が $1 [\text{°C}/\text{時間}]$ 以下）に達したことをトレンドグラフにて確認し、試験データを計測した。試験順序はヒーター出力の低い方から実施した。試験データは各ケースともサンプリング周期 0.2秒 で 10分間 (3000点) 収録したデータの平均値として得た。

4. 試験結果

4.1 試験条件計測値およびRe数

Table4に試験条件の測定値およびピンバンドル内のRe数を示す。試験体流入流量に対するピンバンドル内のRe数は、試験体入口部AA断面の基準熱電対の示す温度での物性値で評価を行っている。また、水力等価直径は $De = 3.26 [\text{mm}]$ で、集合体流路断面

3.2.1 実機運転条件

①最大線出力

想定した実機の炉心条件の内、最大線出力は移行炉心第3サイクルBOC（径ブランケット無し）の内側炉心で、422 [W/cm] とされている。

②最大流量

最大線出力を生じる内側炉心の第1領域において流量は最大となり、30.2 [kg/s] である。入口温度395 [°C] における密度 857.4 [kg/m³] より、集合体平均流速は6.33 [m/s] となり、Re数は59700となる。なお、Re数の代表長さは、集合体流路断面積および断面周囲長から求めた値 ($De = 3.16$ [mm]) を用いた。

3.2.2 実機運転条件を模擬するナトリウム試験条件

①線出力

ヒータピンの最大線出力は401.5 [W/cm] で、実機の最大線出力（422 [W/cm]）とほぼ同等な値であり、実機定格出力条件相当を模擬できる。

②流量

閉塞物周りの温度上昇幅に着目する観点から、集合体内の平均質量流速を実証炉と一致させるものとする。このときの質量流量は以下のように5.87 [kg/s] となる。

- ・ 実機集合体流路断面積 : Ar, 5.563×10^{-3} [m²]

- ・ 試験体集合体流路断面積 : At, 1.081×10^{-3} [m²]

$$\text{試験体での質量流速} : 30.2 (\text{kg/s}) \times At / Ar = 5.87 (\text{kg/s})$$

試験では、試験体保護の観点から、試験体の設計上限温度（650°C）から試験時の最高温度までの余裕を大きくするため、試験体入口ナトリウム温度を実機条件の395 [°C] から300 [°C] に下げた。この場合の試験体の体積流量は400 [ℓ/min] となる。

集合体内のRe数について検討すると、実機定格条件では、密度、粘性係数を入口温度で評価して、Re=59700となる。一方、上記の試験体条件では、Re=51300となり、実機条件の86%となる。このとき試験体ピンバンドルの水力等価直径は3.26mmである。どちらも十分に乱流域にあると考えられ、Re数の差も20%以下と小さいことからRe数の違いが流況に及ぼす影響は小さいと考える。

試験装置主循環系の最大循環流量は430 [ℓ/min] であり、実機定格運転条件の模擬は可能である。

積および断面周囲長から求めた。平均流速は試験体流入流量を流路断面積 ($1.081 \times 10^{-3} [\text{m}^2]$) で除して求めている。なお、流路断面積を求める際にラッパ管コーナー部のRは考慮していない。ヒーターピンの電気出力については、リード部等の発熱量を除き、発熱部での値に補正している。補正量は-1.7%である。

4.2 ヒートバランスの確認

ヒートバランスの確認を、投入熱量から求めた温度と計測値を比較することによって行った。なお、試験体内部では水平断面内に温度分布があり、混合平均温度の算出が困難であるため、試験体出口配管部温度 (TIA156:281ch) で評価を行った。試験体出口温度の測定精度は $0.2 [\text{°C}]$ 程度である。ヒーターピンの出力については、リード部が試験体発熱部の上方に位置し、試験体出口配管温度計測位置に至るまでの流路に含まれていることから、リード部での発熱を補正する前の値を用いることとする。Case3についての計算結果は以下のようになる。

総発熱量	= $4.34 \times 10^5 [\text{W}]$
試験体流入流量	= $4.33 \times 10^2 [\ell/\text{min}]$
	= $7.22 \times 10^{-3} [\text{m}^3/\text{s}]$
試験体入口部基準熱電対温度 (TW-202AA : 1ch)	= $308.5 [\text{°C}]$
試験体入口部Na密度 ($308.5 [\text{°C}]$)	= $8.78 \times 10^2 [\text{kg/m}^3]$
試験体入口部Naエンタルピー ($308.5 [\text{°C}]$)	= $7.70 \times 10^5 [\text{J/kg}]$

上記の値を用いてエンタルピーの增加分を求めると、

$$\begin{aligned}\Delta h &= \text{総発熱量} / (\text{試験体入口部密度} \cdot \text{流入流量}) \\ &= 4.34 \times 10^5 / (8.78 \times 10^2 \cdot 7.22 \times 10^{-3}) \\ &= 6.85 \times 10^4 [\text{J/kg}]\end{aligned}$$

よって試験体出口部エンタルピーは

$$h_{\text{out}} = h_{\text{in}} + \Delta h = 8.38 \times 10^5 [\text{J/kg}]$$

このエンタルピー値に対応する温度は $361.4 [\text{°C}]$ 、温度上昇幅は $52.9 [\text{°C}]$ となり、計測された試験体出口温度 ($360.2 [\text{°C}]$) と約 $1 [\text{°C}]$ の差で一致する。ヒートバランスとしては98%となった。以上の結果から放熱量は十分小さく、流量、出入口温度、ヒータ

ーピン出力はそれぞれ高い精度で計測されているものと考える。Case1、Case2についてもそれぞれ出口温度は約1°Cの差で計算値と一致した。

4.3 最高温度

Table5にCB断面（閉塞物上端から17.5mm下）、CC断面（閉塞物上端から10.0mm下）CD断面（閉塞物上端から2.5mm下）の閉塞物内部に設置された熱電対の計測結果を示す。また、これらの温度計測点をFigure 4.1に示す。閉塞物内を含む閉塞領域近傍では、全てのケースにおいて、閉塞物に覆われたヒータピン表面において温度が最高となった。

閉塞物内部において最も高温に達したのは、全ケースともCD断面（閉塞物上端面から2.5 [mm] 下方）における、ピン番号306のピン表面の閉塞物に接している側（TP-306CD）であった。また、最も高温となったサブチャンネル中心点は、ピン番号306、408、409に囲まれた閉塞サブチャンネル（TB-306CD）で、ピン表面部最高温度点に接する位置であった。ピン表面温度、サブチャンネル中心温度とともに、周囲3方を閉塞物に囲まれたサブチャンネルにおいて最高温度が観測された。

4.4 軸方向温度分布

Figure 4.2に示す各サブチャンネル中心点A～Nに対して、集合体入口からの温度上昇幅の軸方向分布をFigure 4.4～Figure 4.17に示した。発熱終端部断面（DJ断面）における混合平均温度の計算値（ヒータ出力と流量から計算した断面平均温度）を一点鎖線、点線、実線で図中に示した。

健全サブチャンネル（Point-E～N）における軸方向温度分布では下流に行くにしたがって比較的単調に温度が上昇する。後述するようにバンドル水平断面での温度分布はバンドル中心部が高温となる温度分布が形成されており、バンドル中心部付近のポイント（H、I、J）においては、全ての軸方向位置（高さ）で断面平均温度を上回り、ラッパ管壁付近のポイント（L、N）においては全ての高さで断面平均温度を下回っている。

閉塞サブチャンネル領域を通るポイント（Point-A～D）のうち、Point A、Bの閉塞領域の上流側においては温度勾配が正であるのに対し、Point C、Dでは温度勾配が負となる。これは閉塞物を回避する流れのためラッパー管壁近傍の低温流体がPoint C、Dの方向に流れ込んでくるためと考えられる。続いて閉塞物内部では各ポイント（Point-A～D）ともに急激に温度が上昇し、閉塞物外部においてピークとなる。閉塞物内部の軸方向温度分布の傾向は、中心のサブチャンネルを閉塞させた4サブチャンネル体

系を用いた水流動試験結果(6)(7)とも一致している。すなわち、ポーラス状閉塞物内の温度場は熱伝導支配ではなく、ポーラス内を流れる流体の熱輸送に大きな影響を受け、下流側ほど温度が高くなっていると考えられる。閉塞物下流では健全側の比較的低温の流体との混合により温度の低下が見られるが、ピンの発熱に対応してその後発熱終端部まで温度上昇する。

各試験ケースのPoint C（閉塞領域を通る点の代表）およびH（健全サブチャンネルの代表）の軸方向分布に対して、ヒーターピンの発熱量と集合体内流量によって決まる断面平均温度上昇幅 (ΔT_c) によって正規化することによって比較した結果をそれぞれFigure 4.18、4.19に示す。

$$\Delta T_c = \frac{Q}{W \cdot Cp}$$

Q : 発熱量 (W)

W : 質量流量 (kg/s)

Cp : 比熱 (J/kg K)

これらの図から、閉塞領域内部を含む軸方向分布の形状はヒータ出力に依存せず、ほぼ同一であることがわかる。また、代表点としてCD断面 ($z = -2.5$ [mm]) におけるポイントC（閉塞物内部）およびH（同一断面の健全サブチャンネル）、DI断面 ($z = 200$ [mm]) におけるポイントC（閉塞物後流域加熱部）を選択し、これらの計測点についてヒータ出力と温度上昇幅の関係をFigure 4.20に示した。この図より、試験体入口温度からの温度上昇幅はヒータ出力に比例することがわかる。

4.5 各水平断面の温度分布

Figure 4.3に示したLine-A、Bに沿った集合体内径方向温度分布を各断面毎にFigure 4.21～Figure 4.33に示す。なお、Figure番号に(a)を付けた図に測定点を示し、(b)にLine-A、Bに沿った温度分布を示した。また、各断面におけるCase1、Case2、Case3の混合平均温度（出力、流量からの計算値）をそれぞれ、点線、一点鎖線、実線で図中に示した。

閉塞領域の上流側BA断面 ($z = -155.0$ [mm]) では、集合体バンドル中心部が高温となる温度分布が形成されている。その後閉塞物の前後で大きく分布形状が変化していることがわかる。Line-Aに沿った水平断面温度分布の軸方向変化をCase3についてFigure 4.34に示す。Figure 4.34は各断面の温度分布を混合（断面）平均温度からの差として示したもので、混合平均温度を示す水平線を断面の高さに一致させてプロットし

た。この図より、BB断面 ($z = -45$ [mm]) における閉塞物直下の温度分布はラッパー管壁から中心に向かって低下している様子が見られるが、これは壁面近傍の低温流体が閉塞物を回避する流れによって中心方向に流れ込むためと考えられる。閉塞領域 ($z = -35 \sim 0$ [mm]) に入ると閉塞領域の温度上昇により健全側との温度差が大きくなり、分布形状が歪んでくる。閉塞物内部ではサブチャンネル間の温度勾配が健全側に比べて大きいことがわかる。健全側の温度分布形状は集合体の中心より右側（閉塞物より遠い方）にピークを持った分布形状となっている。閉塞領域下流側では加熱部終端のDJ断面 ($z = 307.5$ [mm]) まで全体的に温度上昇する一方で、分布形状はバンドル部水平断面内の流体の混合により次第に平坦化し通常の分布形状に戻っていく様子がわかる。

各試験ケースのCD断面における温度分布に対して ΔT_c により正規化して比較した結果をFigure 4.35に示す。この図より各ケースはほぼ一致し、水平断面温度分布についても分布形状はヒータ出力に依存しないことがわかる。

4.6 閉塞物内部温度

CC、CD断面は閉塞物内部の温度が詳細に計測できるようにより多数の熱電対が設置されている。Figure 4.36にCC、CD断面における閉塞物内の温度計測結果を Case3について示す。本閉塞体系では閉塞されたサブチャンネルとして、1) 健全側に一方のみ面したサブチャンネル、2) 3方とも閉塞された内部サブチャンネル、3) ラッパー管壁に面し3方とも閉塞されたサブチャンネルがある。測定結果から、この内3方とも閉塞された内部サブチャンネルの温度が最も高くなること、その中では温度勾配は小さいが閉塞領域の中央部の温度が高い傾向が見られる。ピン表面温度はこれに面したサブチャンネル中心温度に比べ20°C程度高くなっていること、サブチャンネル内に大きな温度勾配がついていることがわかる。

4.7 ヒータピン表面温度の周方向分布

Figure 4.36に示したように、ピン番号305のCC断面 ($z = -10.0$ [mm]) では4本の熱電対がピン表面に取り付けられており、閉塞物に部分的に囲まれたピン表面の周方向分布を見ることができる。各ケースの測定結果をFigure 4.37に示す。なお、角度はFigure 4.1と同様に時計回りを正とした。この結果からわかるようにTP-305CC4が最も高温となるが、この位置は3方が閉塞されたサブチャンネルに面しており、健全サブチャンネルと接する面を持つ閉塞サブチャンネルに面したTP-305CC3に比べてより冷却されにくくなっているためと考えられる。この結果は今後ASFRE-IVコードの3次元ピン内熱伝導モデルの検証に活用される。

5. 考察

5.1 最高温度点

試験結果の章で述べたように、最高温度は3方を閉塞された内部サブチャンネルに面したピン表面で、流れ方向下流側の端部（閉塞領域で2.5mm内側）において計測された。ピン表面の計測点はサブチャンネル中心に向かい合う位置にあるが、ピン同士が最も接近する周方向位置でさらに温度が高くなる可能性がある。4サブチャンネル体系水流動試験では、1サブチャンネルの大きさをもつ閉塞物の水平断面内温度分布が計測されている。Fig. 5.1～5.2に計測結果の一例を示す。閉塞物内の温度分布をみるとFig. 5.2の横軸で5～10mmの位置にローカルなピークが見られ、ピン同士が接近していることにより温度が高くなっていることがわかる。ピン表面温度の分布は測定されていないが、ピン表面にも同様な温度分布が生じていることが予測される。ナトリウム試験では熱輸送現象の模擬の観点から燃料ピンを実寸大で模擬しており、熱電対の大きさ、加工の精度等の制約によりピン周りの詳細な温度分布を計測することができない。但し、Fig. 4.37に示したように60度に1点刻みで4点の周方向温度分布を計測しているデータがある。水流動試験結果ならびに本データを元に、ピン周りの詳細な温度分布を含めた解析手法を開発・検証することにより、最高温度を予測することが求められる。現在、3次元熱流動解析コードを用い、ピンバンドル体系をx-y-z直交座標系にてモデル化する手法を開発している。[5]

5.2 軸方向温度分布

Figure 4.4～Figure 4.7で既に示したように、閉塞領域の各サブチャンネル中心の軸方向温度分布では、温度ピーク点が閉塞物の後流で観測された。Case3における閉塞物内部および背後の軸方向温度分布を拡大表示したものをFigure 5.3に示す。すなわち、Figure 4.2に示されているPoint A、B、C、Dの断面CBからDFの区間での軸方向温度分布を示したものである。また、図中に各点での温度変動（10分間）の標準偏差（RMS値）を同時に示した。管壁に沿った外側サブチャンネルであるPoint A、Bでは、閉塞物内で温度が2列目のサブチャンネル（Point C、D）に比べて温度が低く、閉塞物の上部では30～40mmの範囲で温度が約20℃上昇している。2列目のサブチャンネル（Point C、D）では、閉塞物上部での温度上昇幅は5℃未満と小さく、閉塞物上端より15mm上方からは単調に温度が低下している。このような温度分布は閉塞部の上部に形成される循環流（後流）の影響と考えられる。温度変動幅に着目すると、外側サブチャンネル（Point A、B）の閉塞物上端から15～25mm高さにおいて比較的大きな変動が見られ、周囲の流体との混合が生じていることが予想される。

6. 結論

燃料集合体内ポーラス状閉塞における温度場の特性を模擬閉塞物を内装した3.7本ピン束試験体を用いたナトリウム試験により明らかにした。模擬燃料ピンは直径8.5mmで実寸大の形状、配列ピッチとし、電気ヒーターにより発熱を模擬する。閉塞物は直径0.3mmのステンレス球を焼結して製作し、孔隙率は40%とした。これを用いて6角形のラッパー管の1辺に沿った2列のヒーターピンを高さ35mm（ワイヤー巻きピッチの1/6に相当）に亘って閉塞させた。

今回が本試験体を用いた最初の試験シリーズであることから試験体保護の観点で大型炉の最大線出力（～420W/cm）の約40%の出力条件を最大として実験を実施した。これによりヒータピンの出力変化による温度分布への影響など、以下の知見を得た。

- (1) 集合体内流量一定の条件で、閉塞物内部を含む試験体内部の温度上昇幅はヒータ出力に比例して上昇するが、分布形状はヒータ出力に依存しない。
- (2) 閉塞物の水平断面内には健全サブチャンネル領域に比べ大きな温度勾配が生じ、3方を閉塞され、健全サブチャンネルに面していないサブチャンネルが高温となった。軸方向には、流れ方向下流で温度が上昇し、閉塞物内部の温度場は伝導支配でなく閉塞物内部の流れ場に大きく影響を受けていることがわかった。最高温度は、3方を閉塞されたサブチャンネルに面した模擬燃料ピン306の閉塞物上端から2.5 [mm] 内部（CD断面）におけるピン表面で計測された。しかし、ピンの周方向温度分布など計測点以外でさらに高温となる点が存在する可能性があり、今後の試験においてヒータ出力条件および流量条件を拡大した試験を実施し、高出力条件などの特性を把握するとともに、同一体系の水流動試験および詳細解析結果の両面から評価する。
- (3) サブチャンネル中心温度の軸方向分布では最高温度が閉塞物内部ではなく、閉塞物下流側の閉塞物外近傍で計測された。これは閉塞物後流域における循環流の存在によるものと考えられる。

謝辞

本試験の実施にあたり、多大な協力をして頂いた常陽産業（株）の方々に感謝いたします。また、図面の作成等でご協力いただいた安田明洋氏、データ収録・処理でご協力いただいた原子力システム（株）の安松智博氏、ASFREを用いた解析の実施およびデータ処理、図面の作成等でご協力いただいた原子力システム（株）の川島滋代さんに感謝いたします。

参考文献

- (1) 板東他、「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", FR' 91, Kyoto, P3.5, (1991)
- (3) 成田他、「サブチャンネル解析コードASFRE-IIIの整備－燃料ピン熱伝導モデルの改良－」PNC TN9410 96-116 1996年4月
- (4) 大島、「サブチャンネル解析コードASFRE-IIIの整備・改良－ポーラス状閉塞モデルの高度化－」PNC TN9410 96-128 1996年4月
- (5) 田中他、「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 1996年4月
- (6) 小林他、「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年4月
- (7) 田中他、「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年3月
- (8) 田中他、「多孔質内における熱流動現象に関する研究」PNC TY9610 98-001 1998年3月
- (9) M. Ueta, et al, "The Development of Demonstration Fast Breeder Reactor (DFBR)", ICONE-3, p771-776, (1995)
- (10) 梶原他、「大型FBRの自然循環特性評価手法に関する研究(II)－(3)集合体内の熱流動－」、日本原子力学会「1997秋の大会」予稿集、G39、(1997)
- (11) 飯塚他、「高速炉燃料集合体ポーラス状局所閉塞事象の研究-37本ピンバンドルナトリウム試験の事前サブチャンネル解析-」PNC TN9410 98-022 1998年3月

Table1 Design Specification of Test Rig

Item	DFBR	Test Rig
ピン外径 Diameter of Pin	8.5mm	←
ピン全長 Length of Pin	3,135mm	1,650mm
ピン発熱部長さ Heated Length	1,000mm (Active Core)	650mm
発熱量最大線出力 Max. Heat Flux	422W/cm (移行炉心初期)	402W/cm
発熱分布 Heat Flux Shape	Chopped Cosine	Flat
ピン数 Number of Pins	217	37
燃料ピン配列ピッチ	9.65mm	←
ワイヤスペーサ外径 Diameter of Wire Spacer	1.1mm	←
ワイヤスペーサ巻きピッチ Wrapping Pitch of Wire Spacer	200mm	←
主要部材質 Material of Main Part	SS・PNC1520 Steel	SUS316
閉塞物長さ Length of Blockage	—	35mm
閉塞物粒子径 Diameter of Particle of Blockage	—	0.3mm
閉塞物ポロシティ Porosity of Blockage	—	40%
閉塞物材質 Material of Blockage	—	SUS304

Table2 Design Condition of Test Rig

	Design Temperature	Design Pressure
ヒータピン（表面温度）	650°C (定格出力時)	8kg/cm ² G
試験容器部	最高 625°C	6kg/cm ² G (625°C時) 8kg/cm ² G (常温時)
外容器	最高 625°C	2kg/cm ² G

Table3 Experimental Condition

	ヒータピン 線出力 [W/cm]	集合体 電気出力 [kW]	試験体 流入流量 [l/min]	試験体 入口温度 [°C]
Case1	60	144	430	300
Case2	120	287	430	300
Case3	180	433	430	300

Table4 Measured Data of Experiment Condition

	ヒータピン 線出力 [W/cm]	集合体 電気出力 WI0500 (312ch) [kW]	試験体 流入流量 FIA050 (290ch) [l/min]	試験体 入口温度 TW-202AA (1ch) [°C]	試験体出口 配管温度 TIA156 (281ch) [°C]	平均流速 [m/s]	Re
Case1	60 (14%)	142 (144)*	434	297.8	314.2	6.69	55600 (93%)
Case2	120 (28%)	284 (289)*	431	299.4	333.2	6.65	55200 (93%)
Case3	180 (43%)	427 (434)*	433	308.5	360.4	6.68	55500 (93%)

* : ヒーターピン内部のリード部による発熱を補正する前の電気出力

Table5 Measured Temperature Data in the Porous Blockage

	Channel No.	Sensor Name	Case1		Case2		Case3	
Heater Power [kW]	312	WI0500	142	(60W/cm)	284	(120W/cm)	427	(180W/cm)
Flow Rate [l/min]	290	FIA050	434		431		433	
Inlet Temperature [°C]	1	TW-202AA	297.8		299.4		308.5	
			T [°C]	ΔT [°C]	T [°C]	ΔT [°C]	T [°C]	ΔT [°C]
CB (-17.5 [mm])	45	TP-307CB	312.9	15.2	330.3	30.9	355.1	46.6
	44	TB-306CB	309.8	12.0	323.5	24.2	344.3	35.8
	43	TB-305CB	307.5	9.7	318.9	19.6	337.8	29.3
	46	TB-307CB	307.2	9.5	318.5	19.2	337.2	28.7
	47	TB-409CB	305.6	7.8	315.2	15.8	332.2	23.7
CC (-10.0 [mm])	60	TS-305CC4	319.1	21.3	342.7	43.3	373.0	64.5
	63	TP-306CC	318.8	21.0	342.0	42.6	372.0	63.5
	59	TS-305CC3	316.9	19.2	338.2	38.8	366.9	58.4
	65	TP-307CC	316.8	19.0	338.1	38.8	366.5	58.0
	70	TP-409CC	315.6	17.8	335.1	35.7	361.3	52.8
	64	TB-306CC	312.4	14.6	328.6	29.2	351.9	43.4
	58	TS-305CC2	312.4	14.6	328.5	29.2	351.8	43.3
	72	TP-410CC	311.6	13.8	327.1	27.7	349.9	41.4
	57	TS-305CC1	311.5	13.7	327.0	27.6	349.7	41.2
	61	TB-305CC	311.3	13.5	326.8	27.4	349.7	41.2
	66	TB-307CC	309.7	11.9	323.9	24.5	345.5	37.0
	71	TB-409CC	308.0	10.3	320.4	21.1	339.9	31.4
	73	TB-410CC	307.8	10.0	319.3	20.0	337.7	29.3
CD (-2.5 [mm])	91	TP-306CD	322.7	24.9	349.8	50.4	384.0	75.5
	93	TP-307CD	320.2	22.4	345.1	45.7	377.4	68.9
	92	TB-306CD	317.5	19.8	339.6	40.2	368.8	60.4
	98	TP-409CD	317.3	19.6	338.6	39.2	366.5	58.0
	94	TB-307CD	314.5	16.7	333.6	34.2	360.3	51.8
	100	TP-410CD	313.8	16.1	331.7	32.3	356.4	47.9
	90	TB-305CD	312.3	14.6	328.8	29.4	352.5	44.1
	99	TB-409CD	310.7	12.9	325.4	26.0	346.9	38.5
	101	TB-410CD	308.7	11.0	321.4	22.0	340.8	32.3

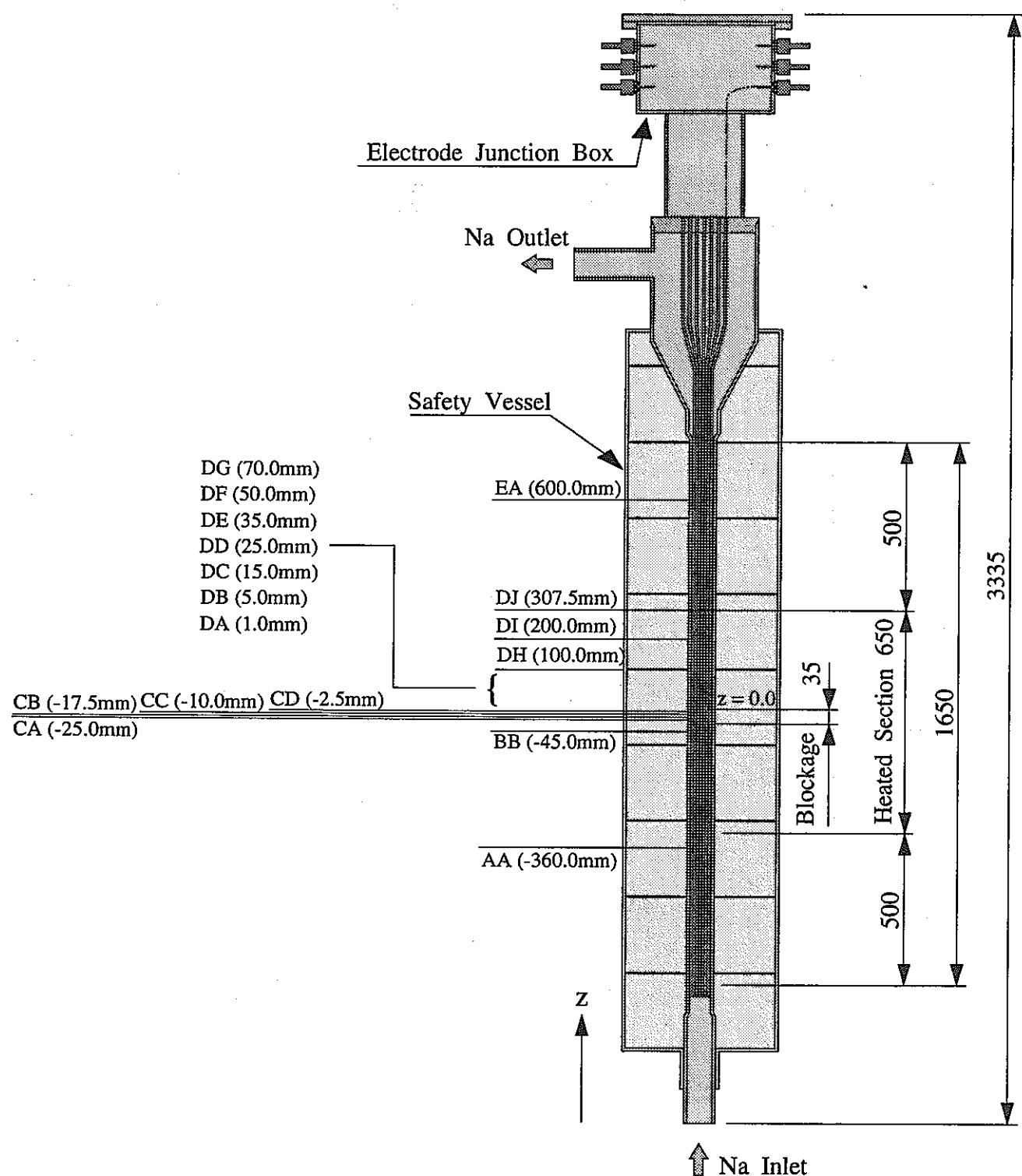


Figure 2.1 Schematic of Experimental Apparatus

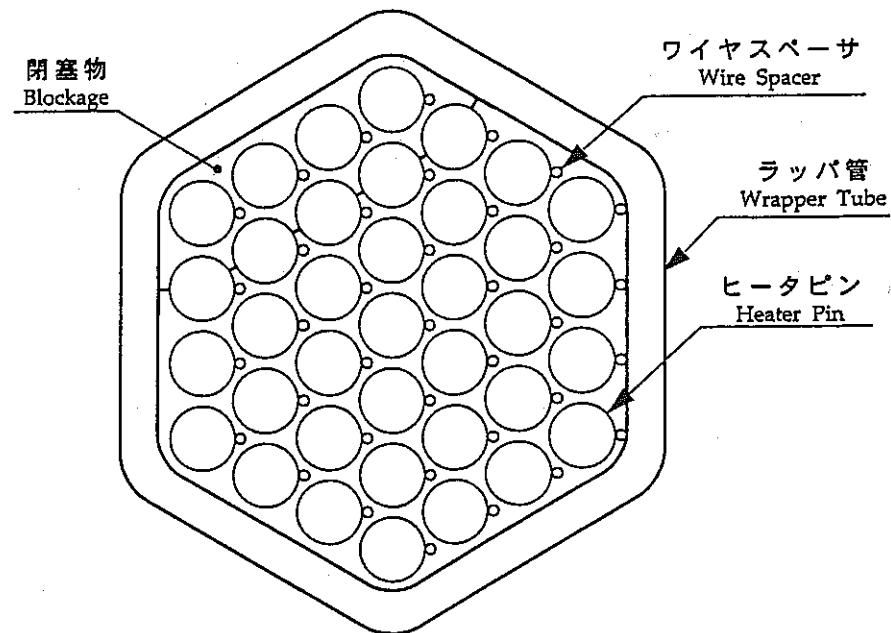


Figure 2.2 Blockage Position in Cross Section of Test Section

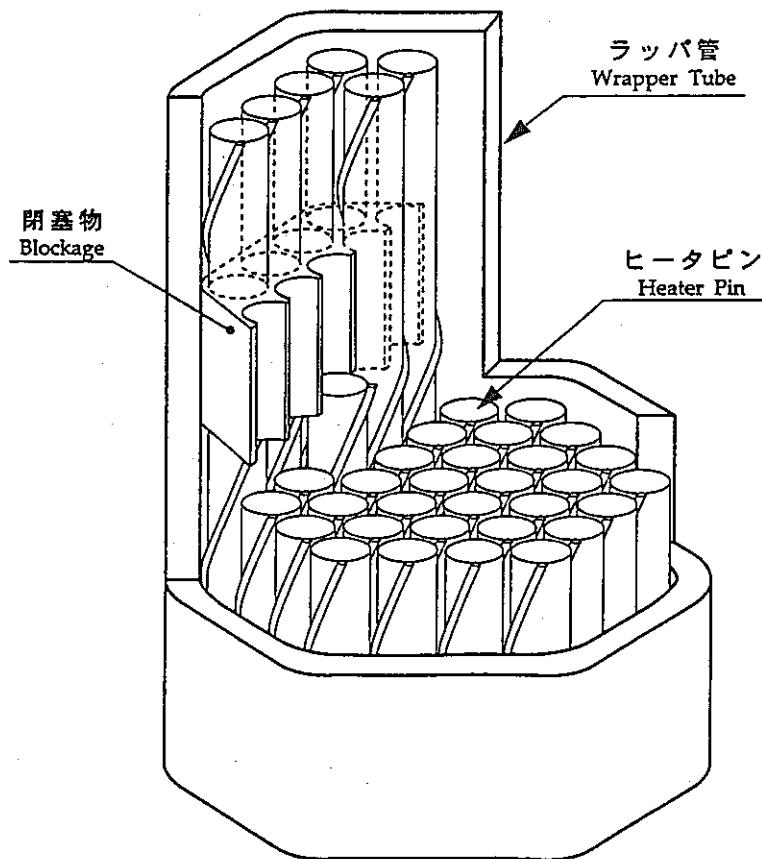


Figure 2.3 Schematic of Blockage Position of Test Section

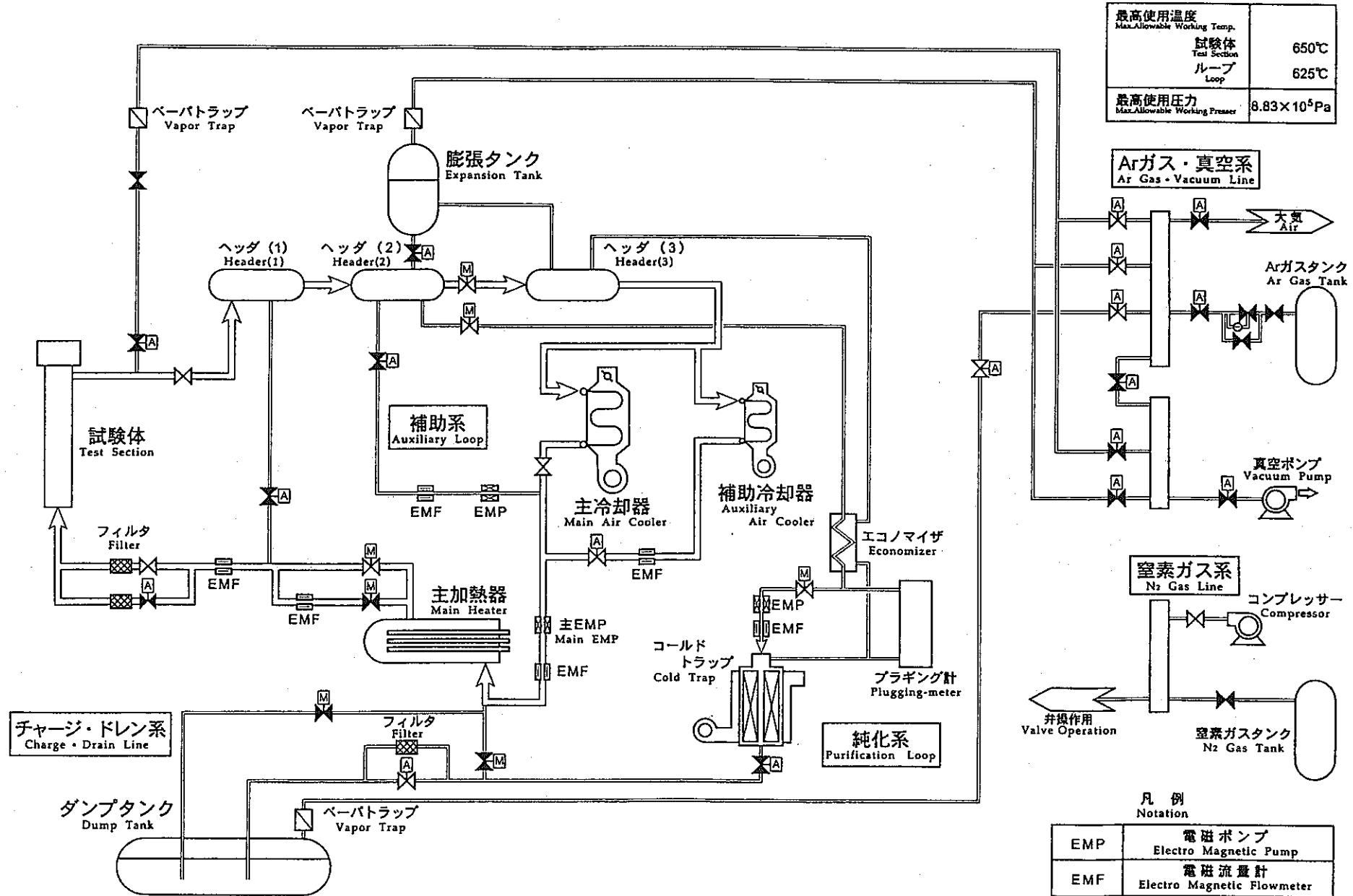
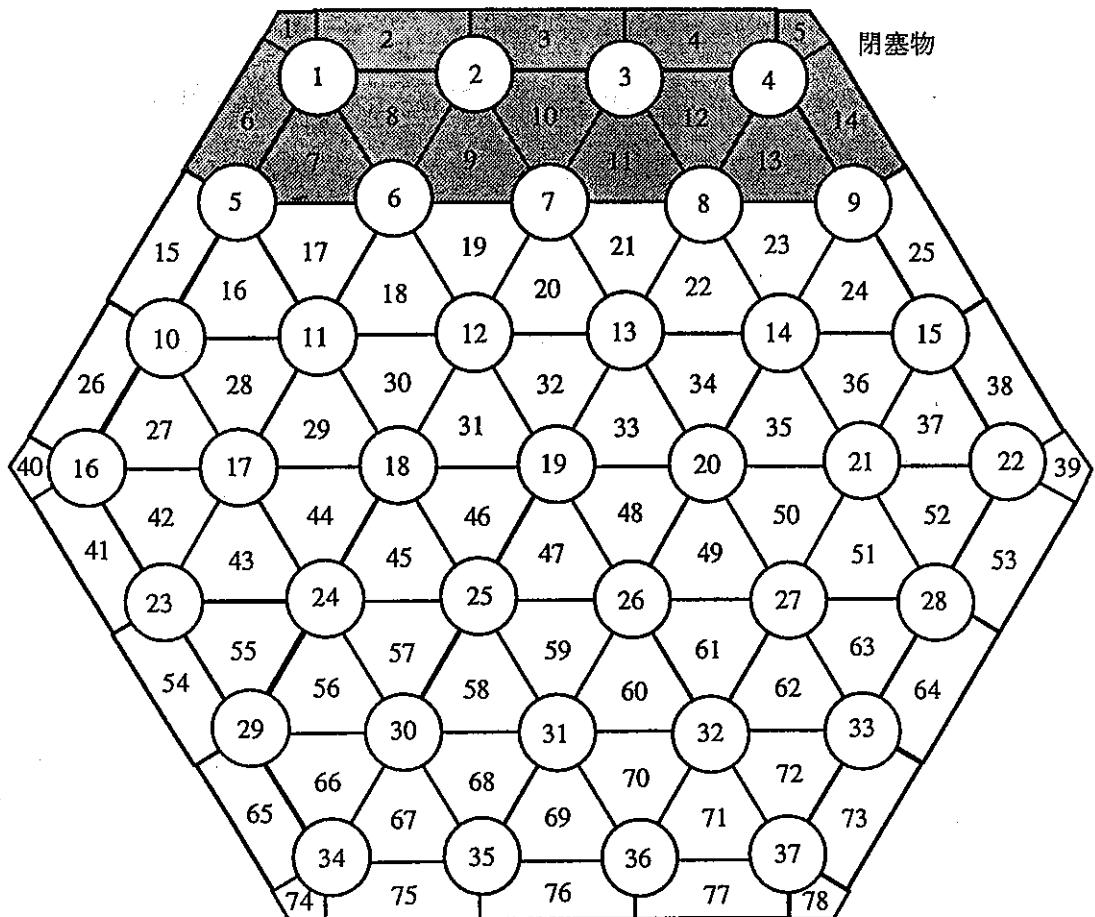
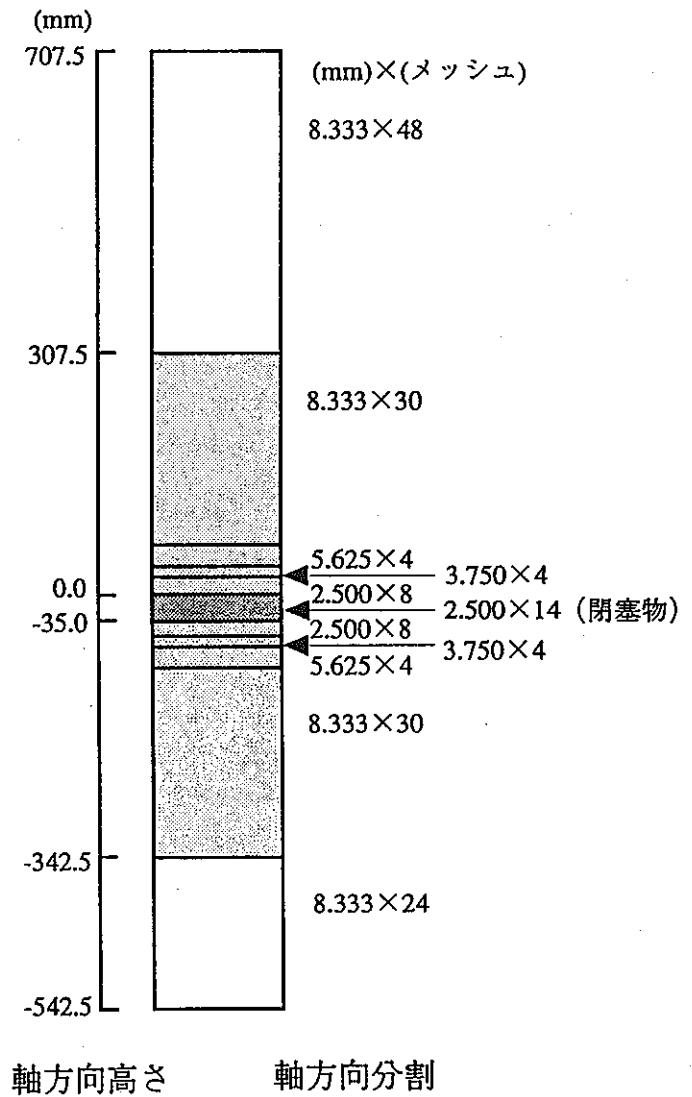


Figure 2.4 Flow Diagram of Core Component Test Loop



サブチャンネル分割



軸方向高さ

軸方向分割

Figure 3.1 Mesh Arrangement

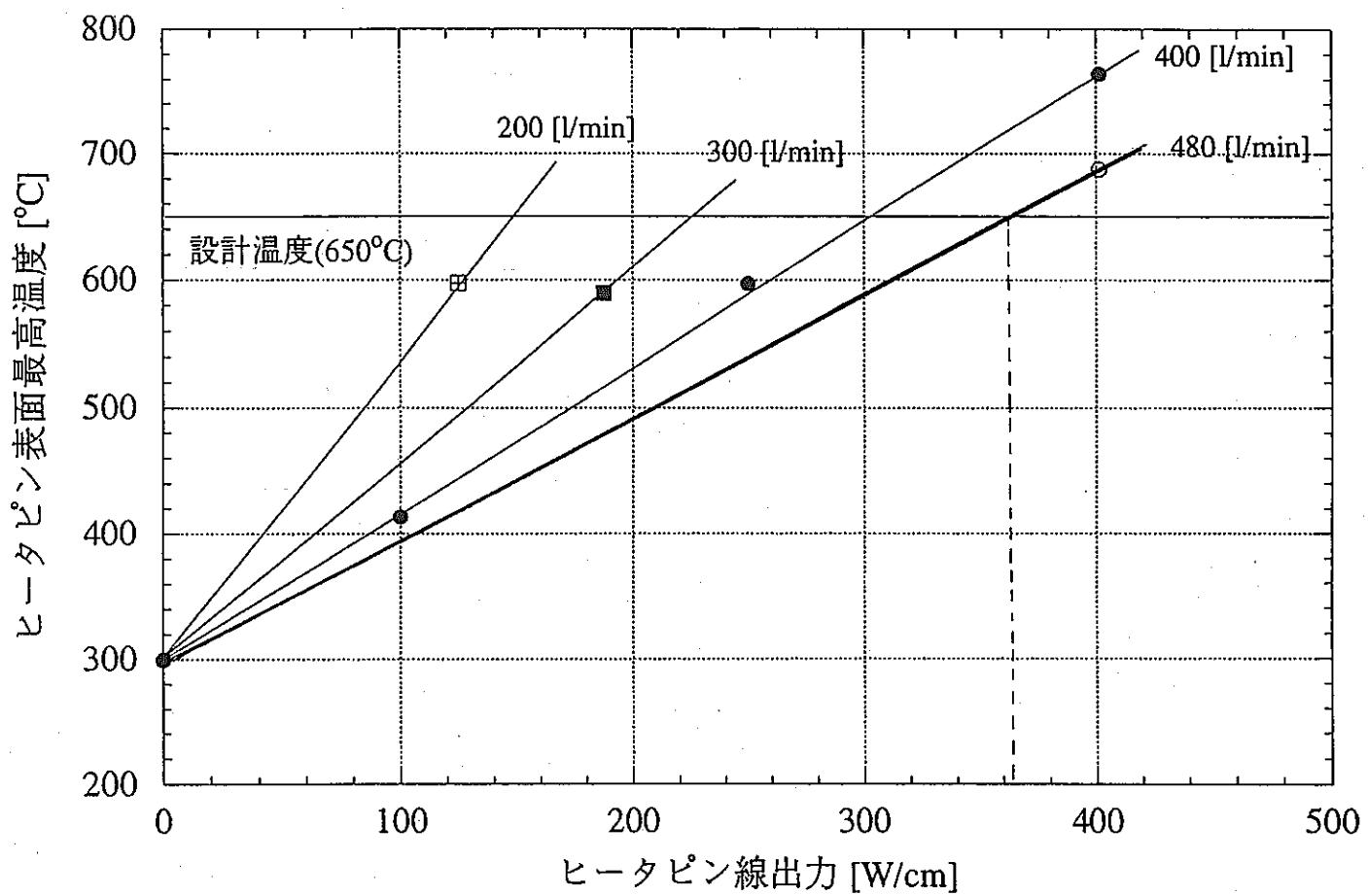


Figure 3.2 Calculation Result of the Maximum Temperature at Heater Pin Surface

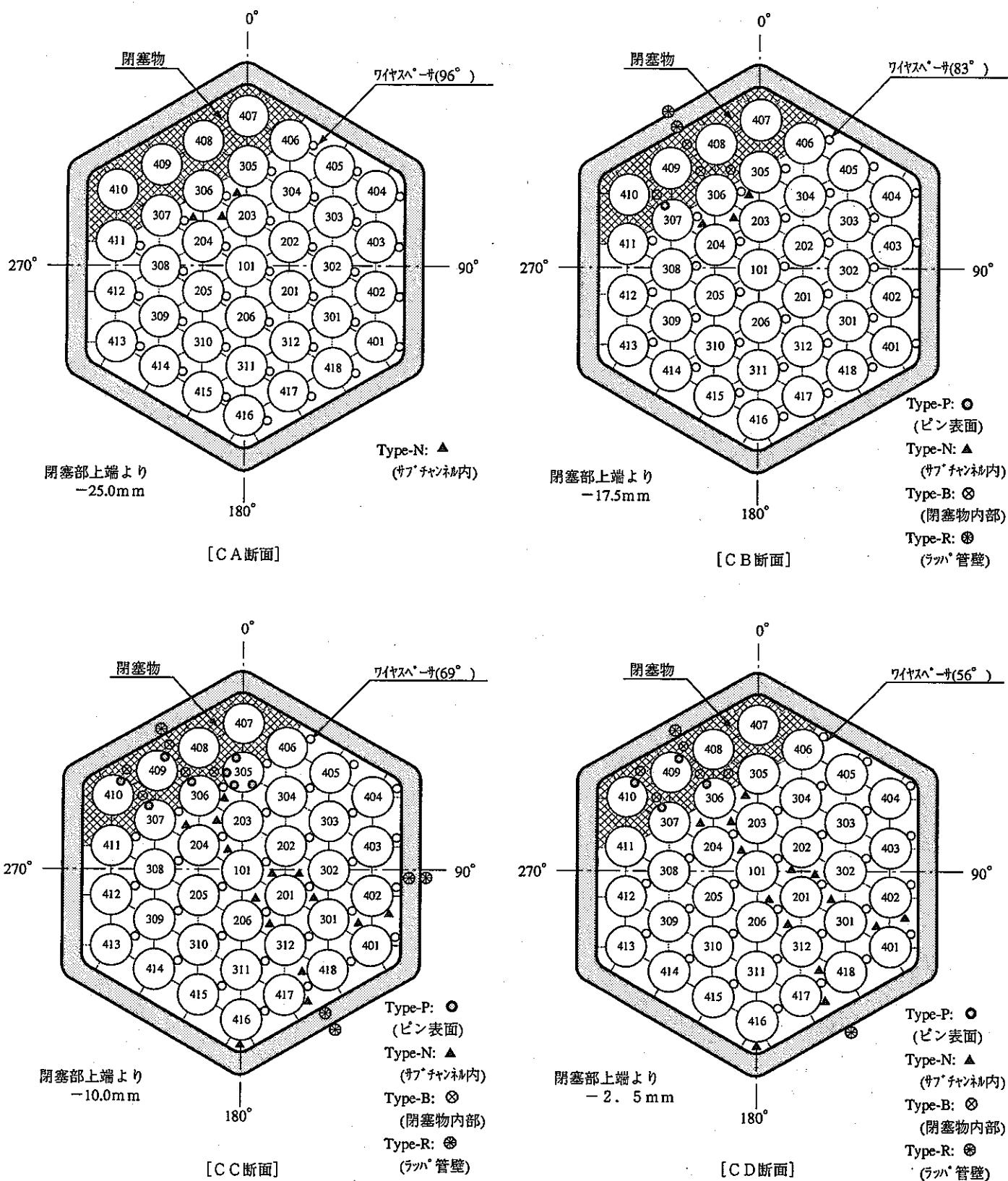


Figure 4.1 Thermocouple Arrangement in the Porous Blockage

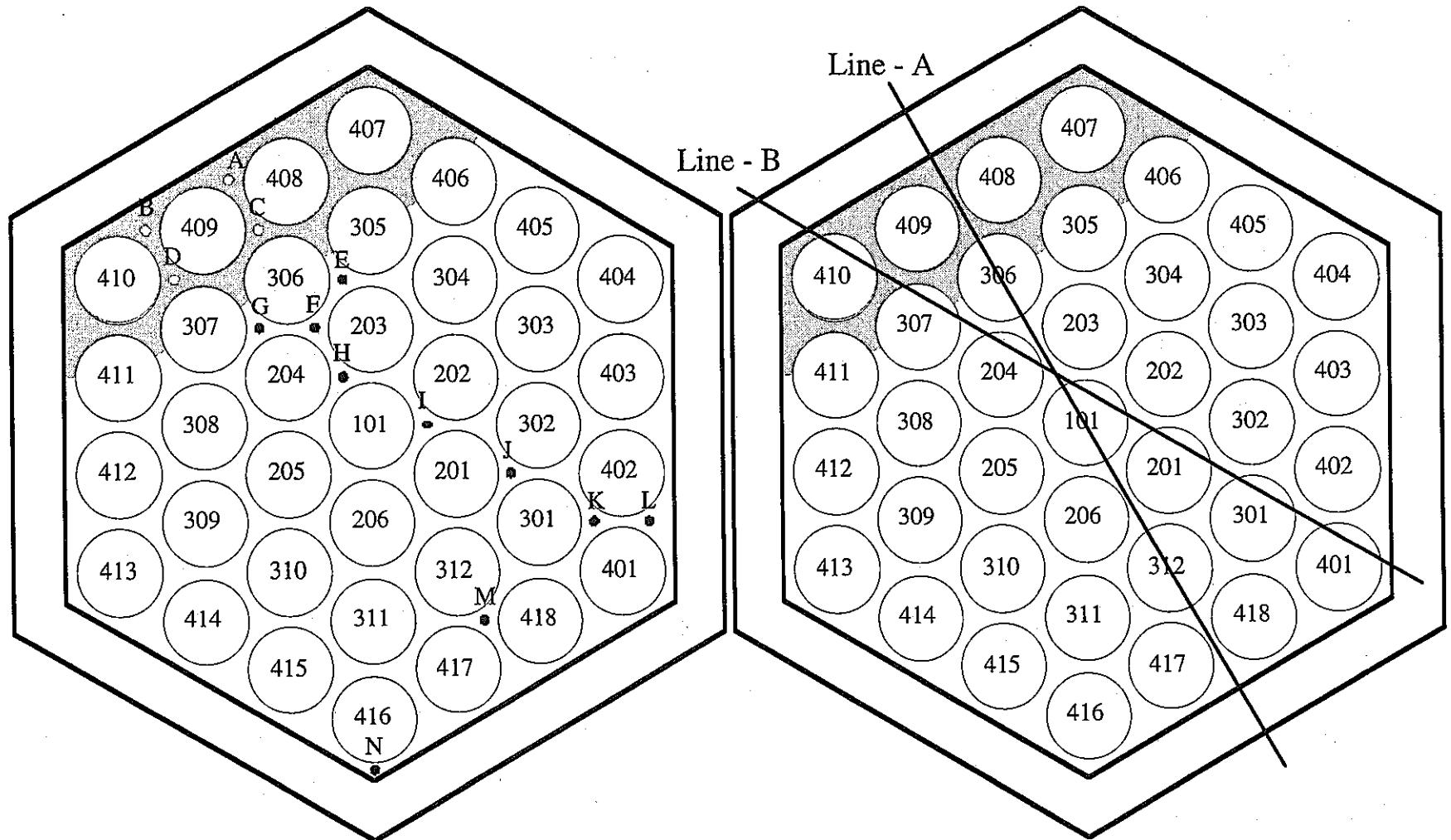


Figure 4.2 Pin Number and Reference Point of Vertical Temperature Distribution

Figure 4.3 Reference Line of Horizontal Temperature Distribution

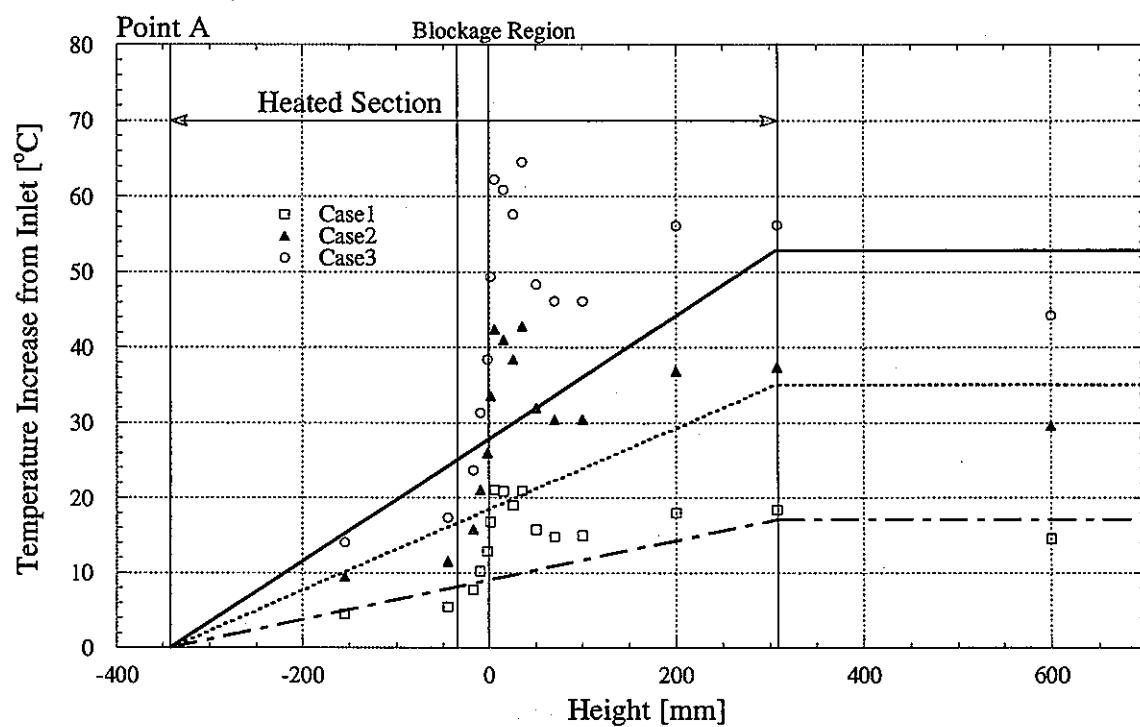


Figure 4.4
Vertical Temperature Distribution at Point A (through Blockage Region)

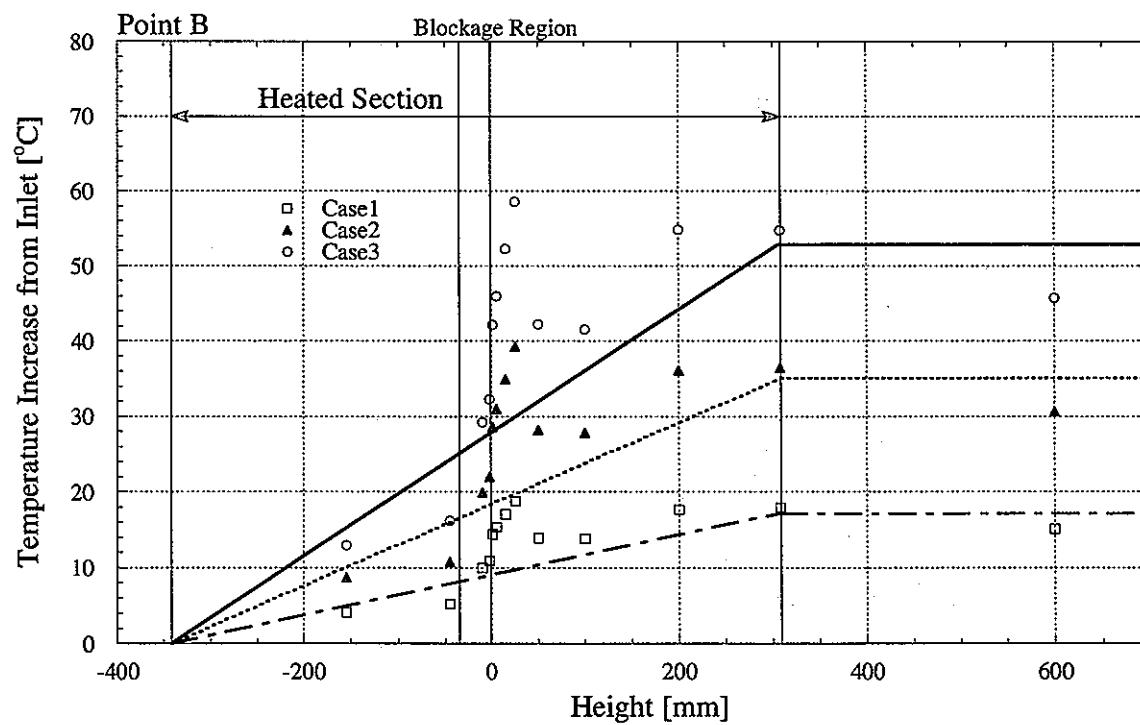


Figure 4.5
Vertical Temperature Distribution at Point B (through Blockage Region)

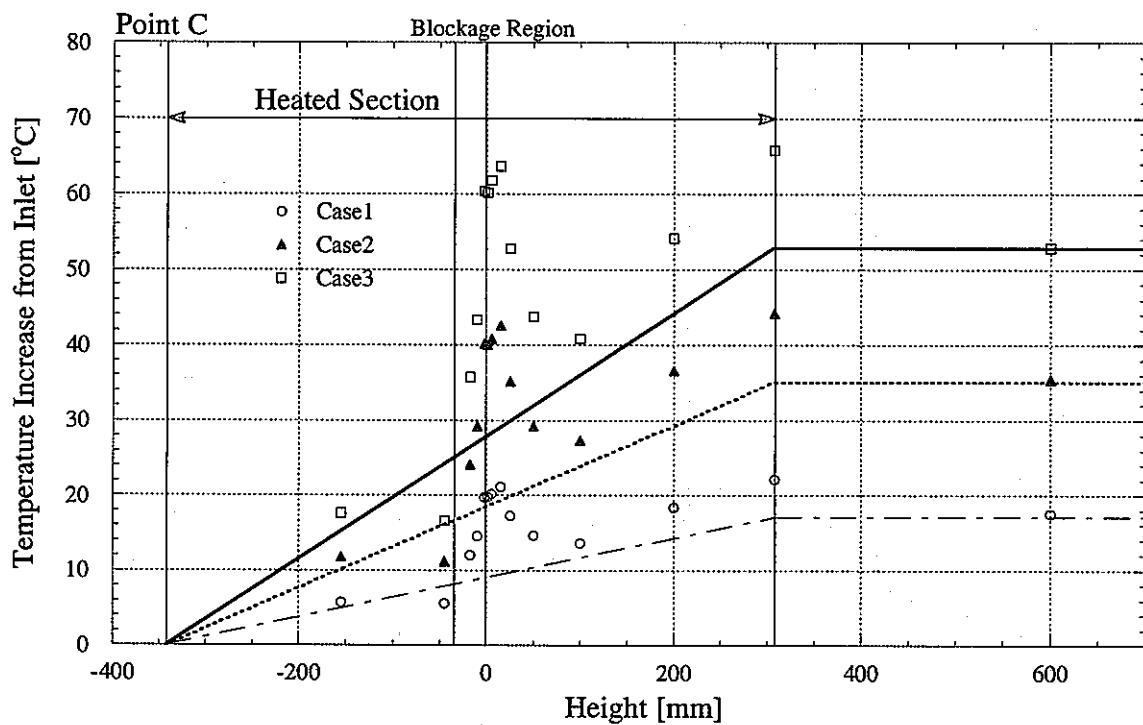


Figure 4.6
Vertical Temperature Distribution at Point C (through Blockage Region)

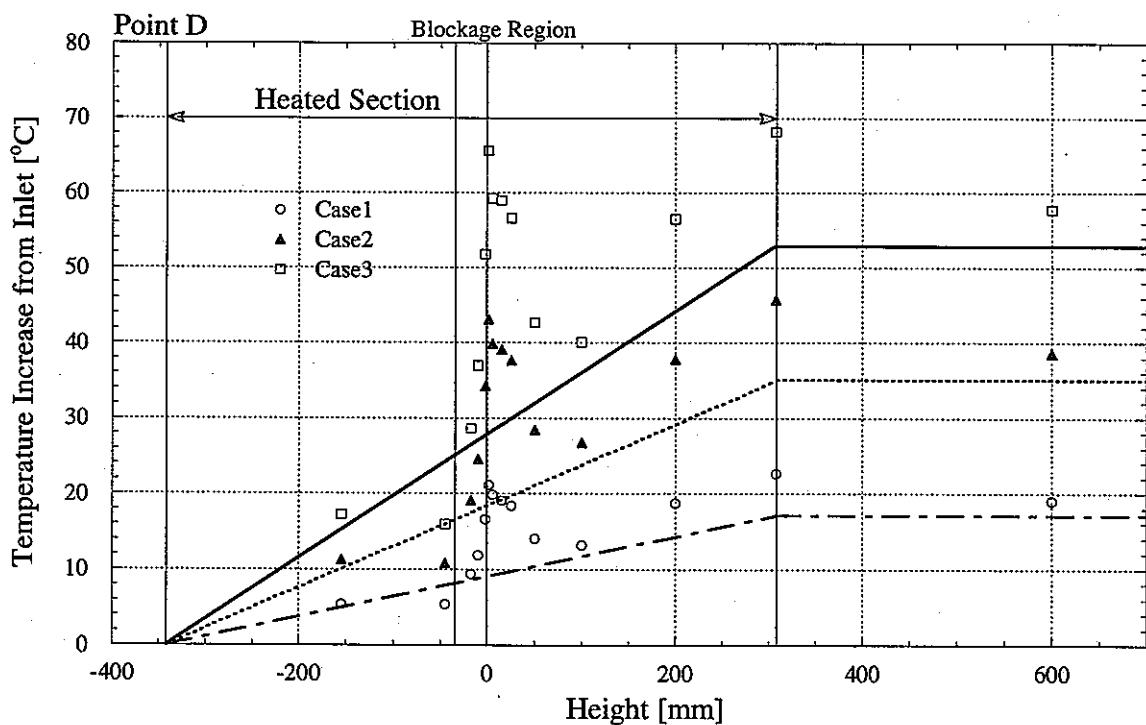


Figure 4.7
Vertical Temperature Distribution at Point D (through Blockage Region)

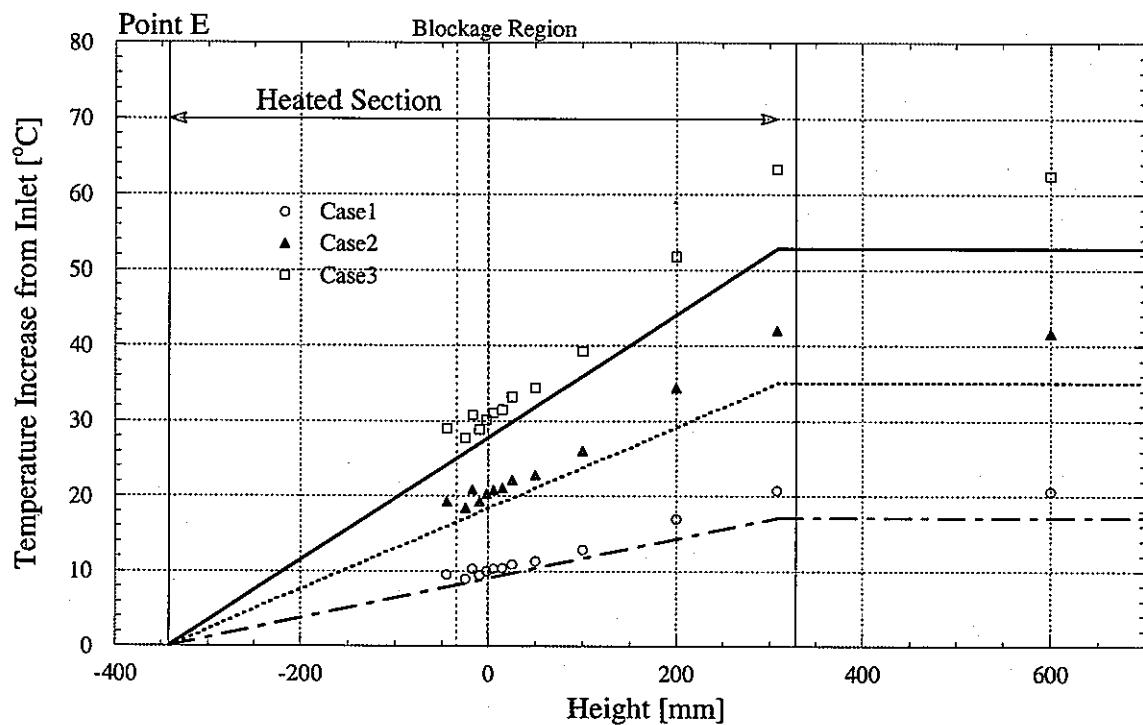


Figure 4.8
Vertical Temperature Distribution at Point E

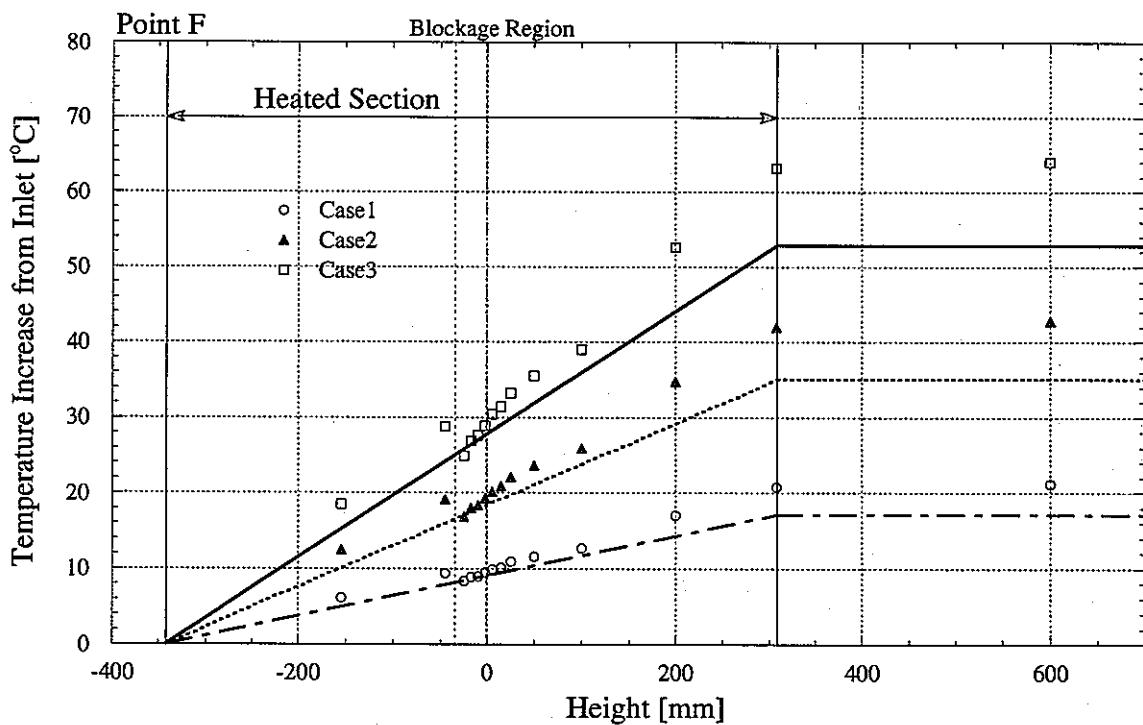


Figure 4.9
Vertical Temperature Distribution at Point F

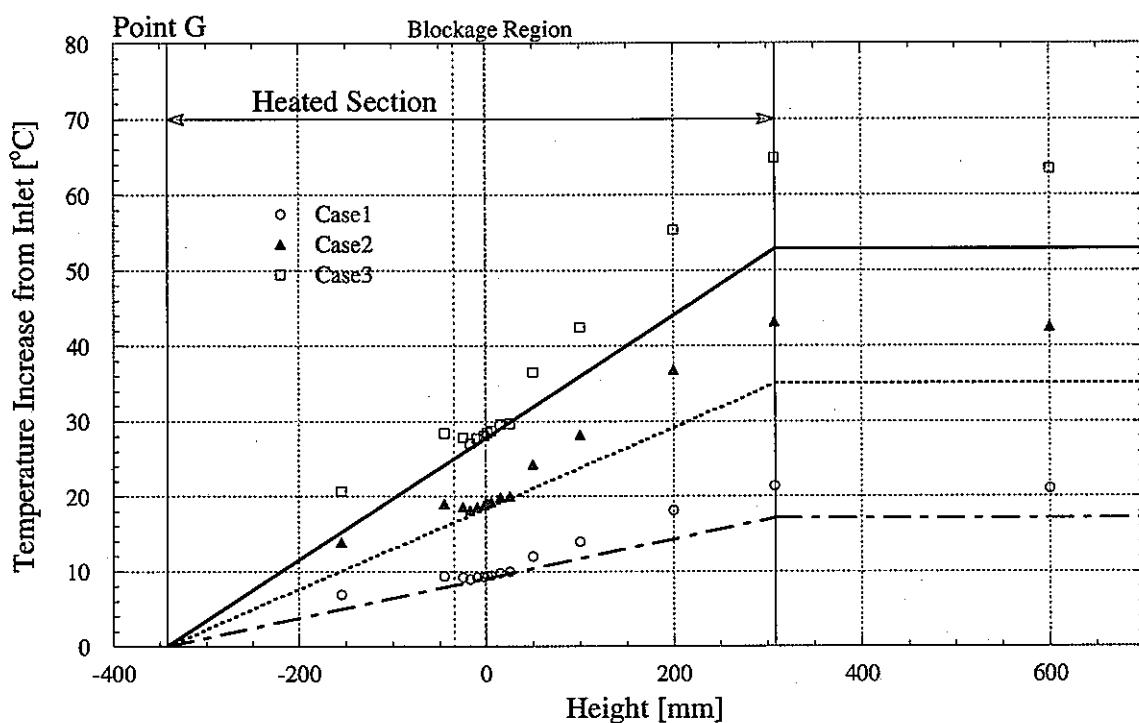


Figure 4.10
Vertical Temperature Distribution at Point G

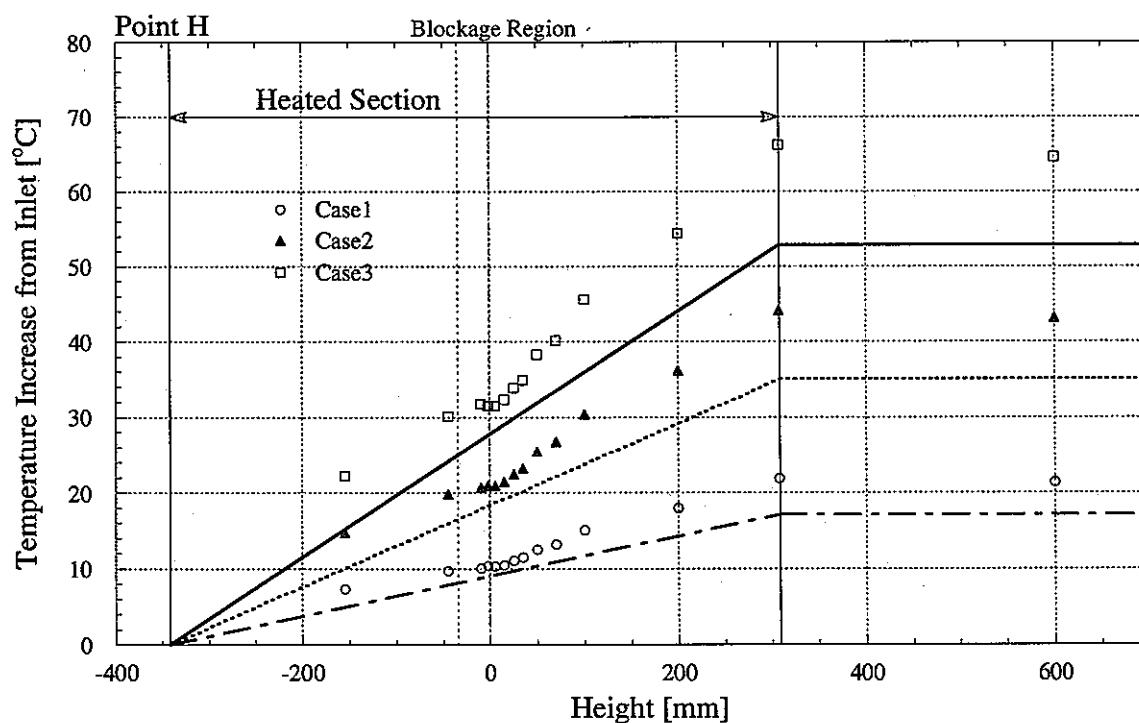


Figure 4.11
Vertical Temperature Distribution at Point H

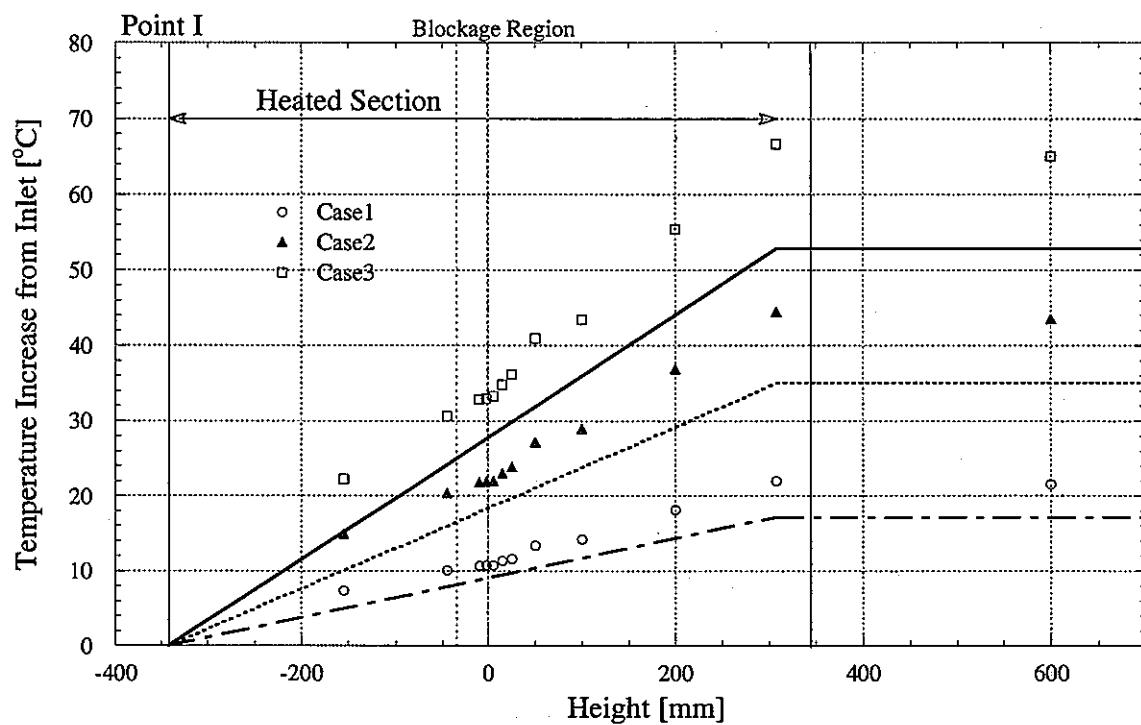


Figure 4.12
Vertical Temperature Distribution at Point I

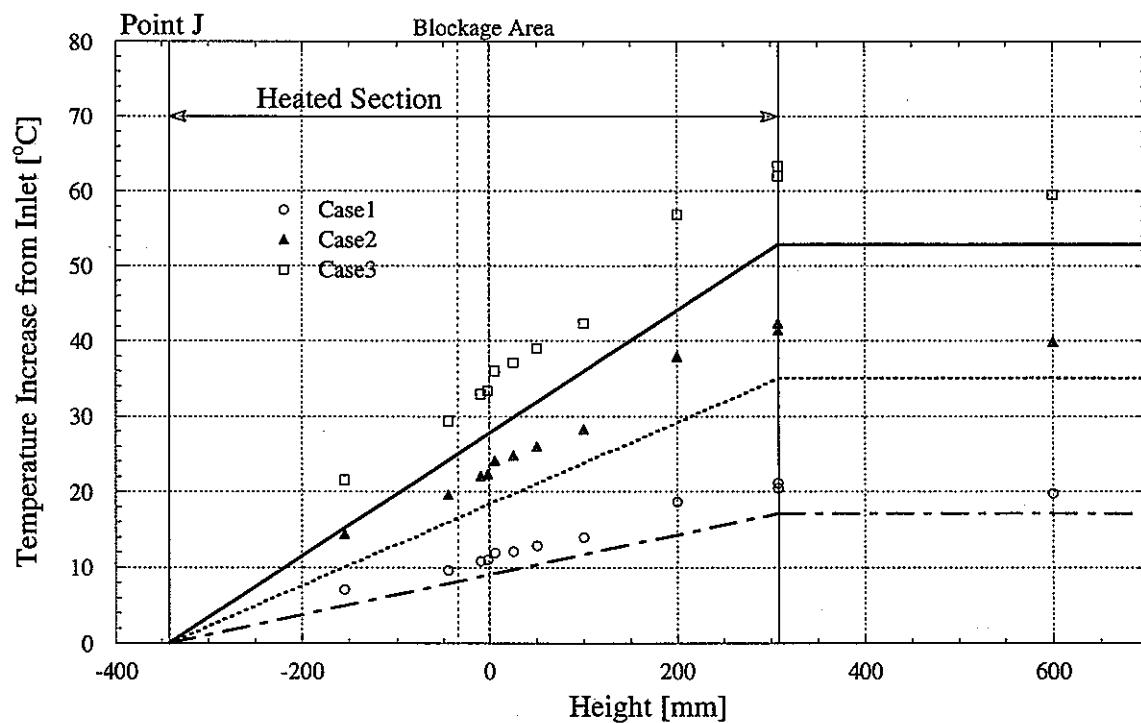


Figure 4.13
Vertical Temperature Distribution at Point J

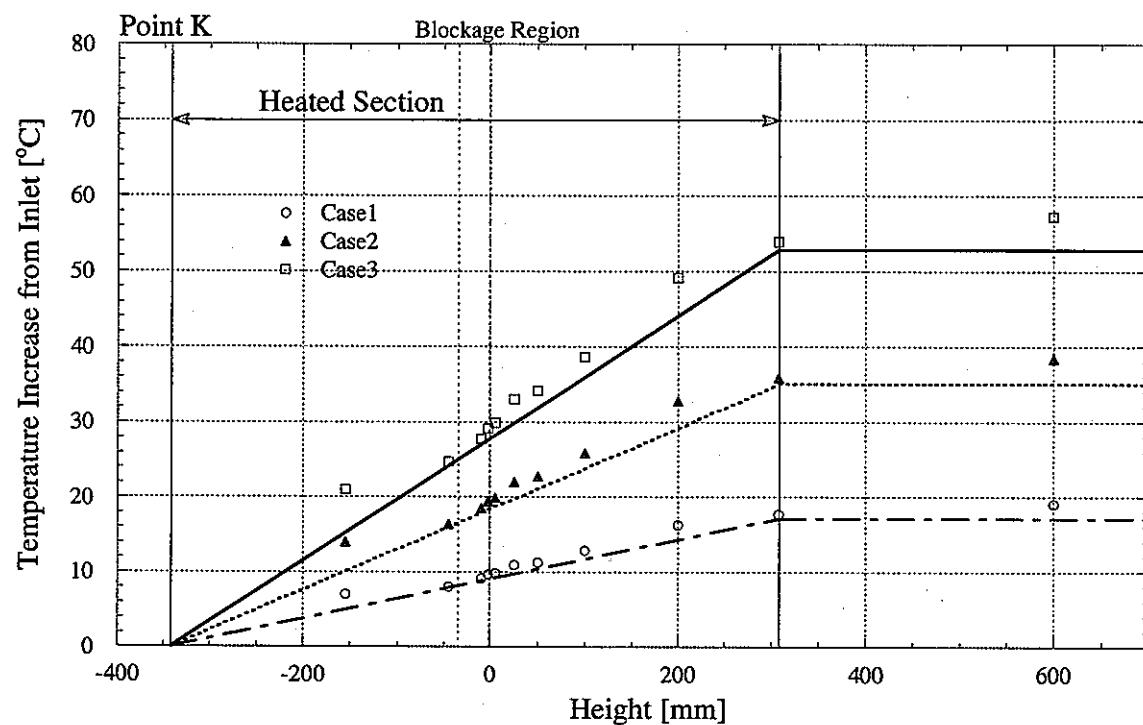


Figure 4.14
Vertical Temperature Distribution at Point K

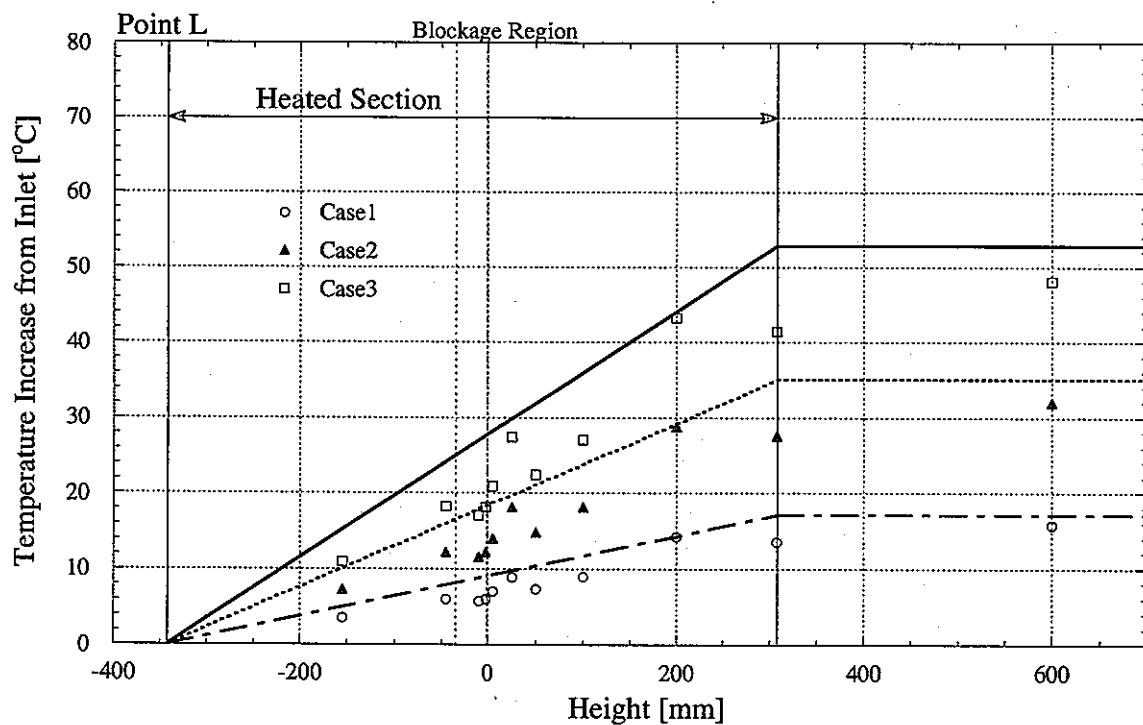


Figure 4.15
Vertical Temperature Distribution at Point L

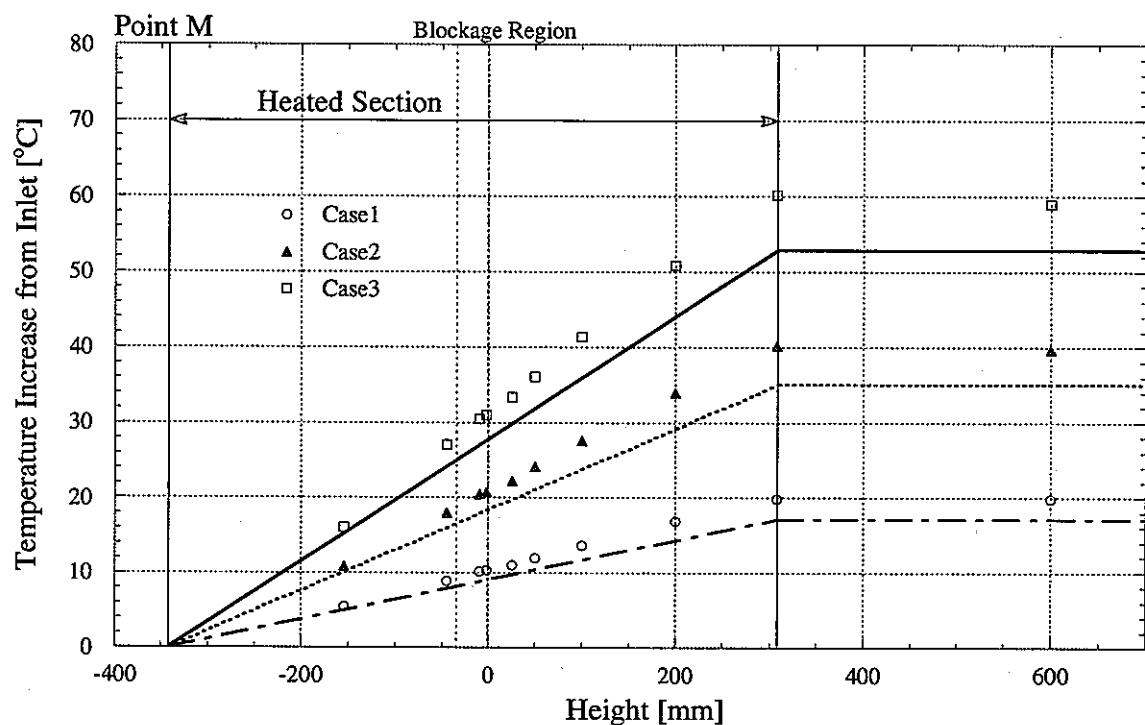


Figure 4.16
Vertical Temperature Distribution at Point M

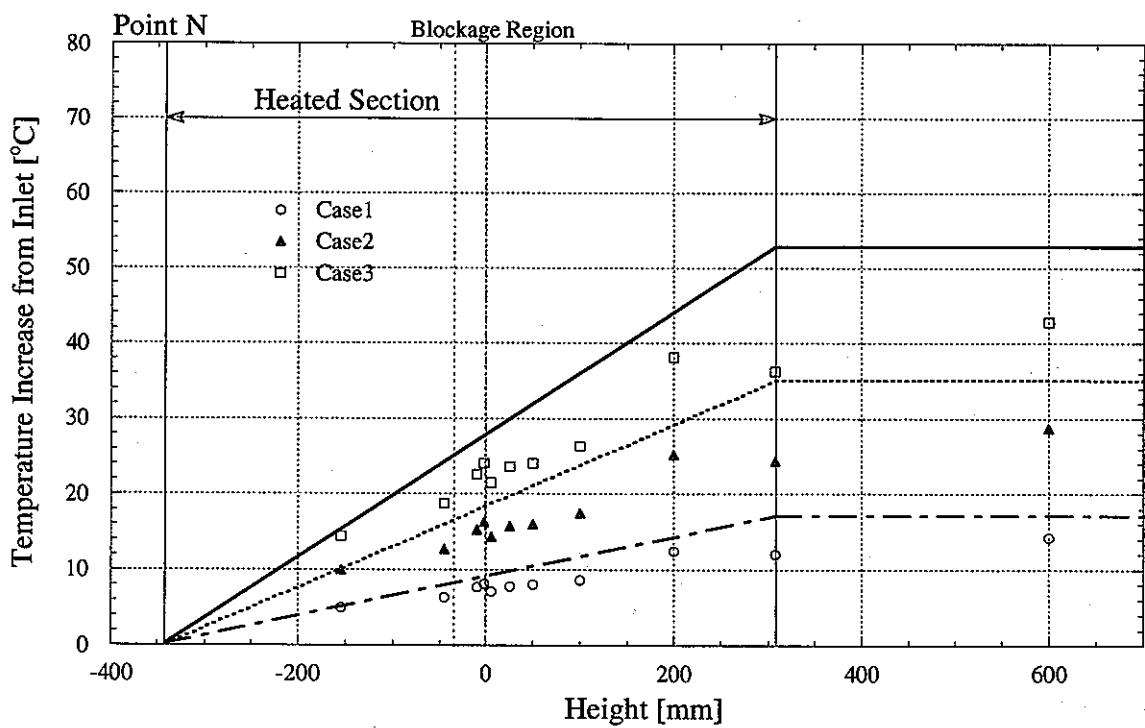


Figure 4.17
Vertical Temperature Distribution at Point N

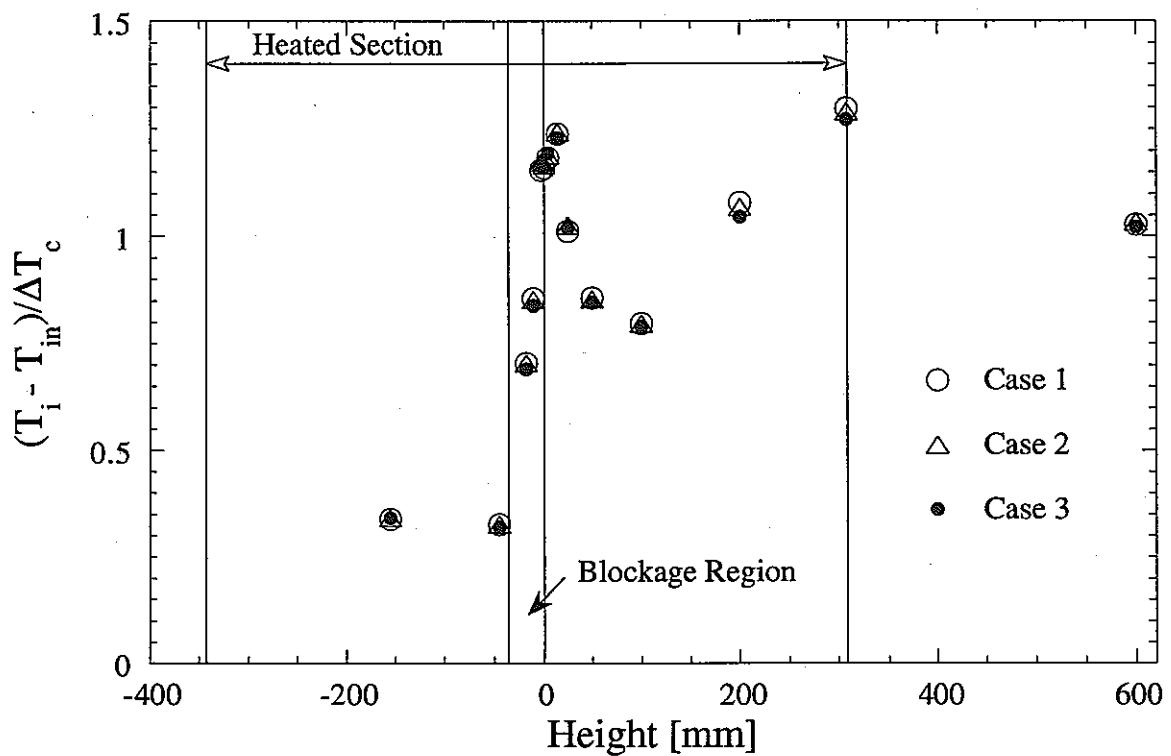


Figure 4.18 Normalized Vertical Temperature Distribution at Point C

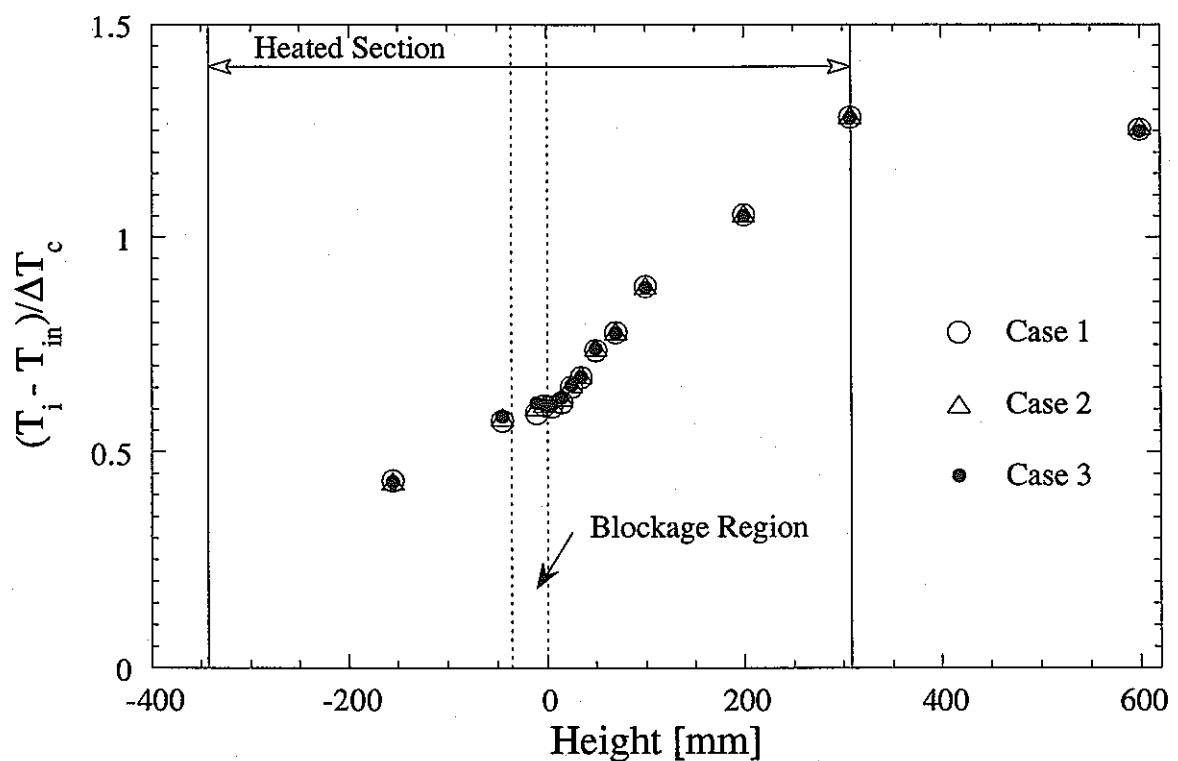


Figure 4.19 Normalized Vertical Temperature Distribution at Point H

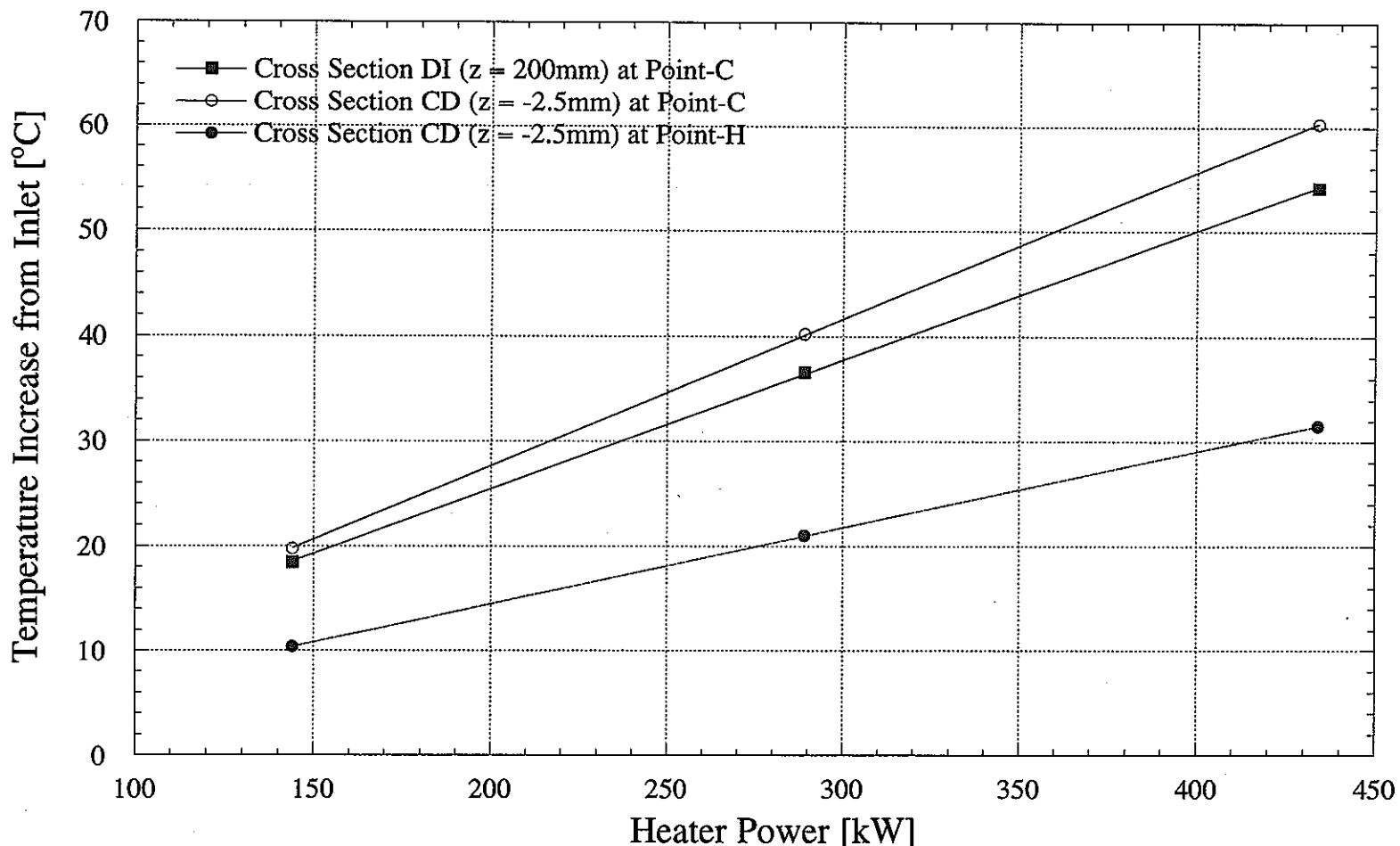


Figure 4.20
Relationship between Heater Power and Temperature Increase from Inlet

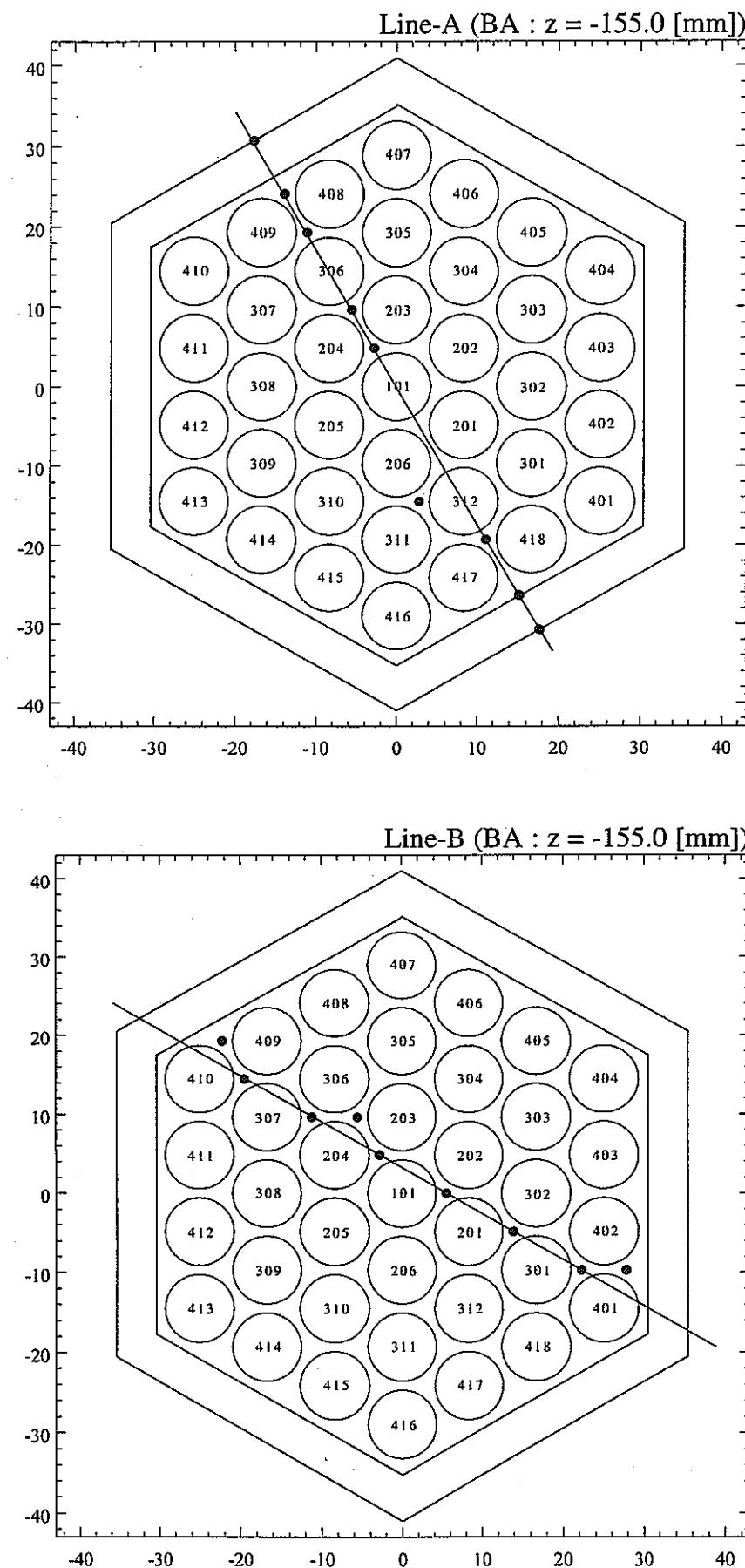


Figure 4.21(a)

Thermocouple Positions along the Reference Line at BA Level

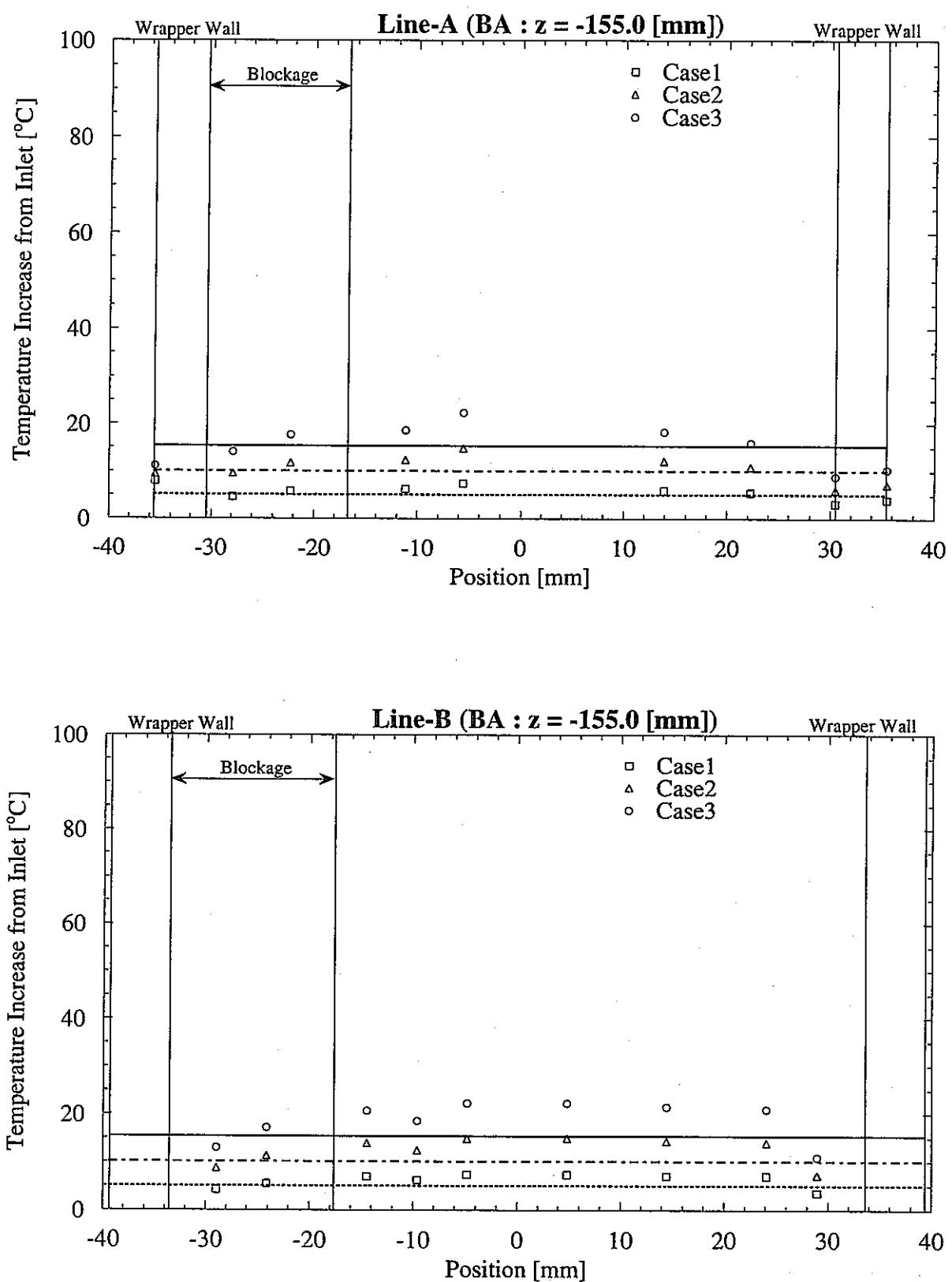


Figure 4.21(b)

Horizontal Temperature Distribution along the Reference Line at BA Level

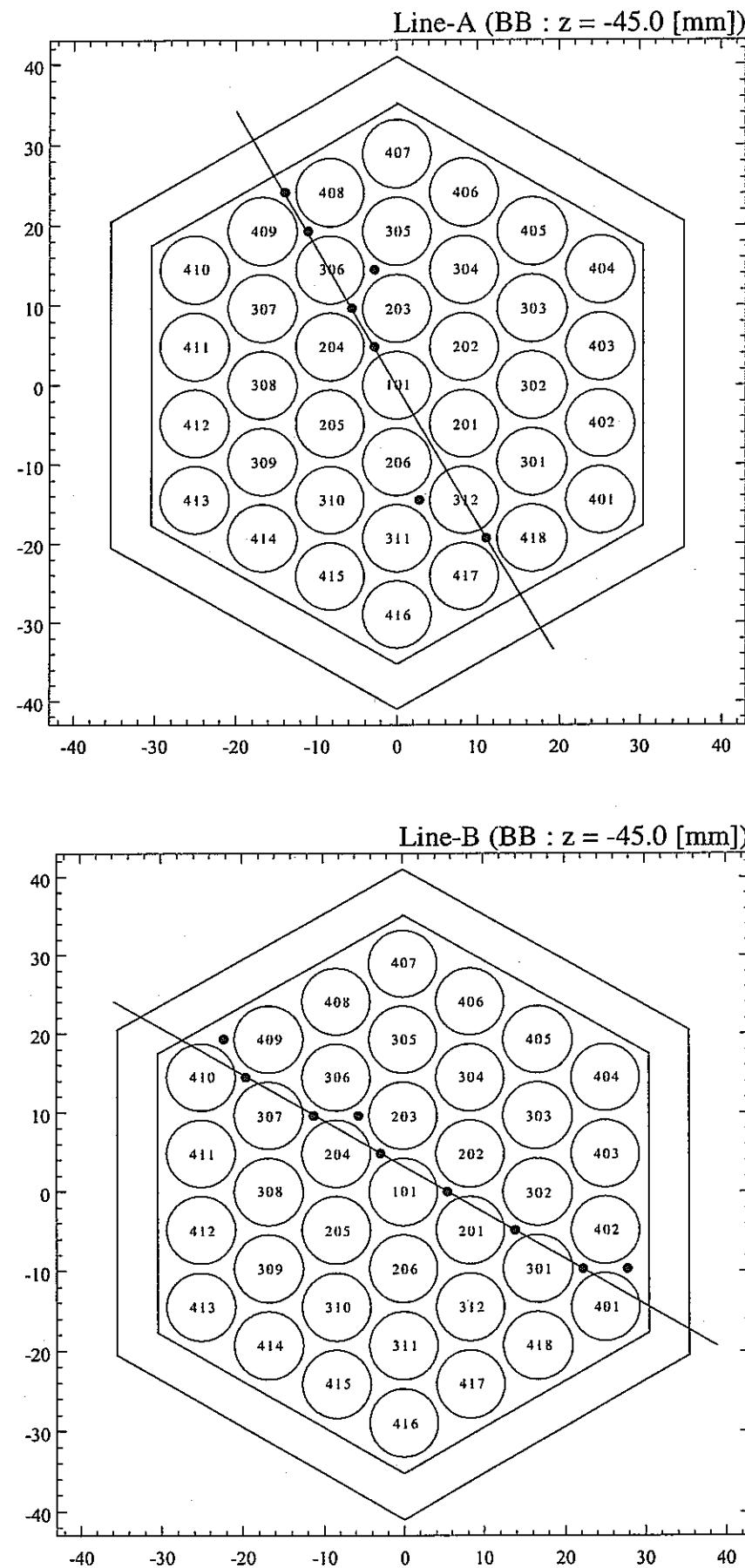


Figure 4.22(a)

Thermocouple Positions along the Reference Line at BB Level

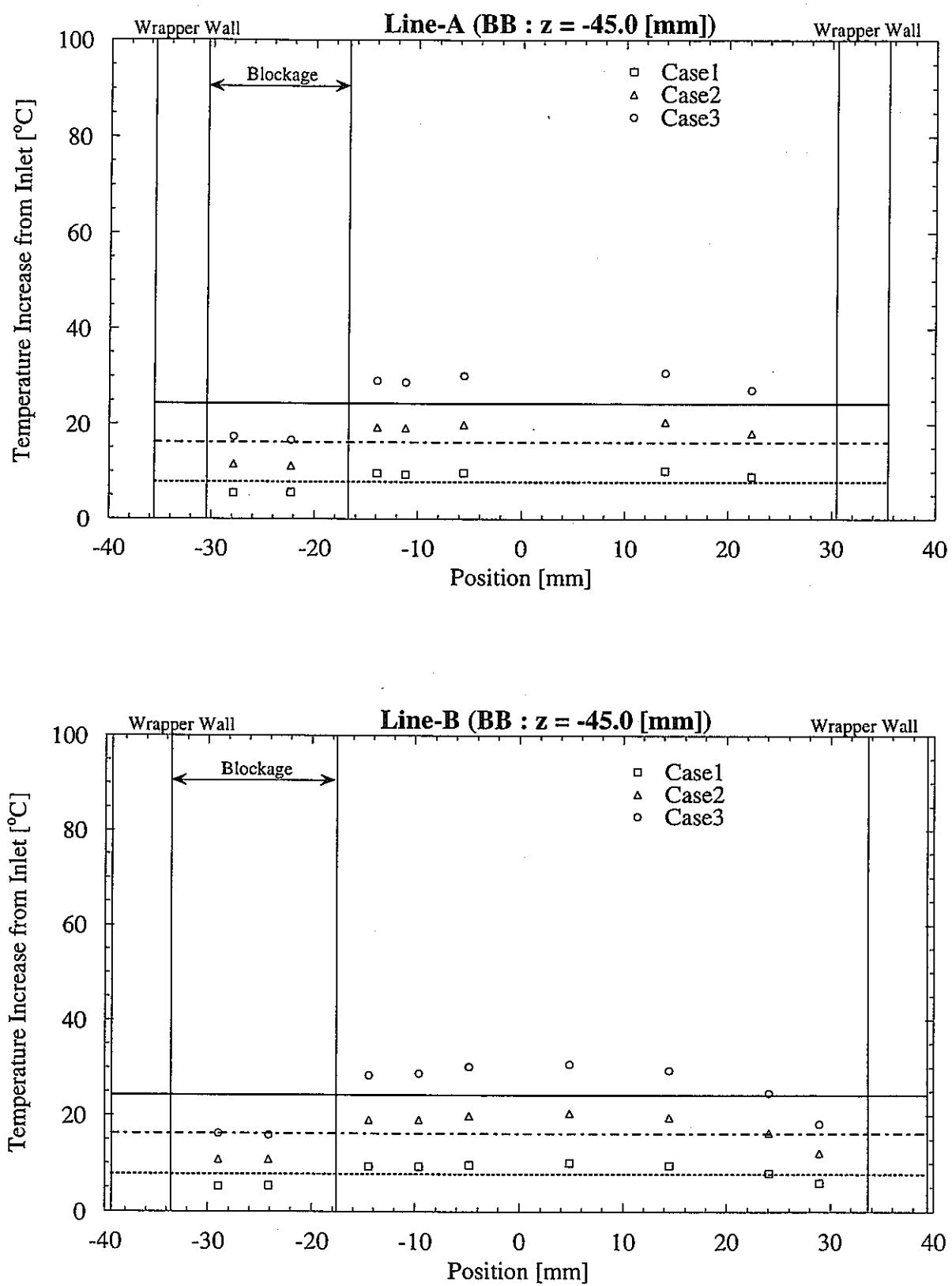


Figure 4.22(b)

Horizontal Temperature Distribution along the Reference Line at BB Level

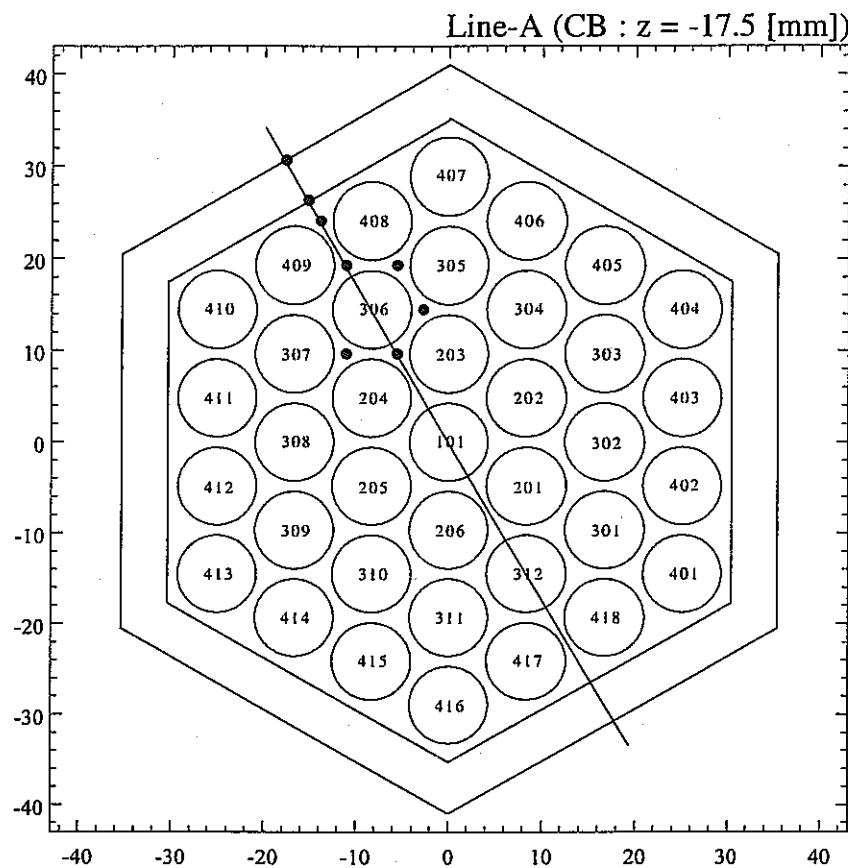


Figure 4.23(a)

Thermocouple Positions along the Reference Line at CB Level

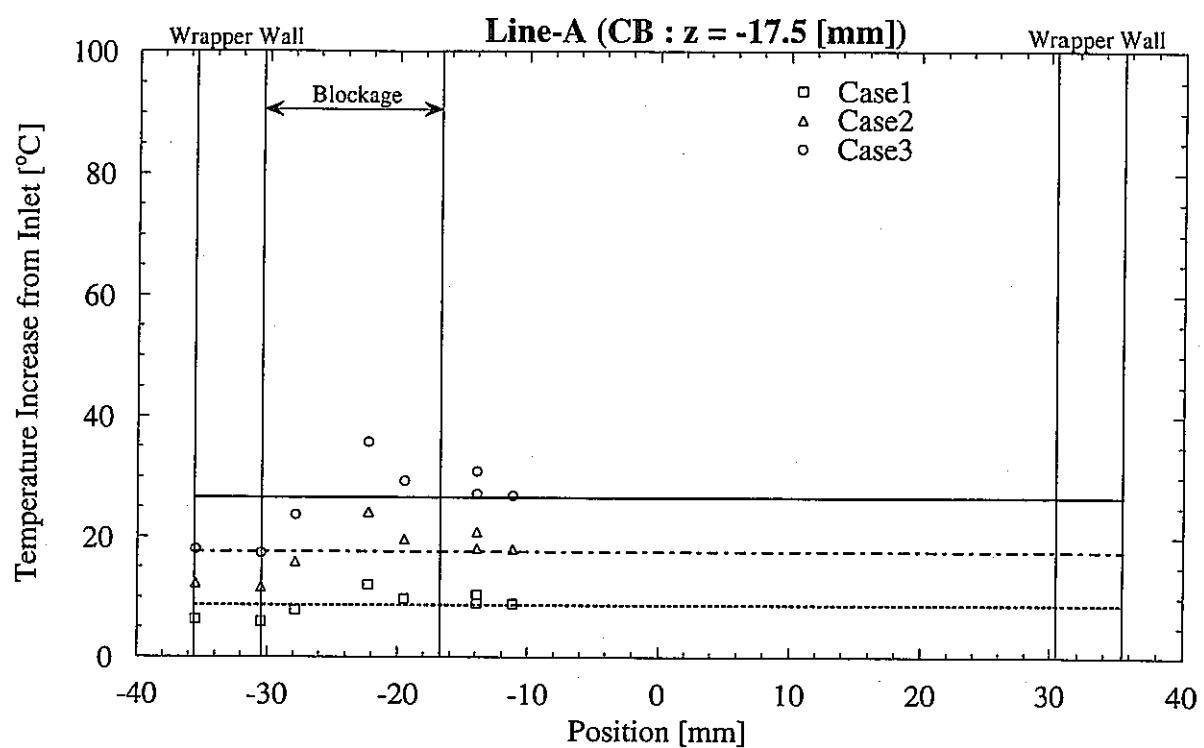


Figure 4.23(b)

Horizontal Temperature Distribution along the Reference Line at CB Level

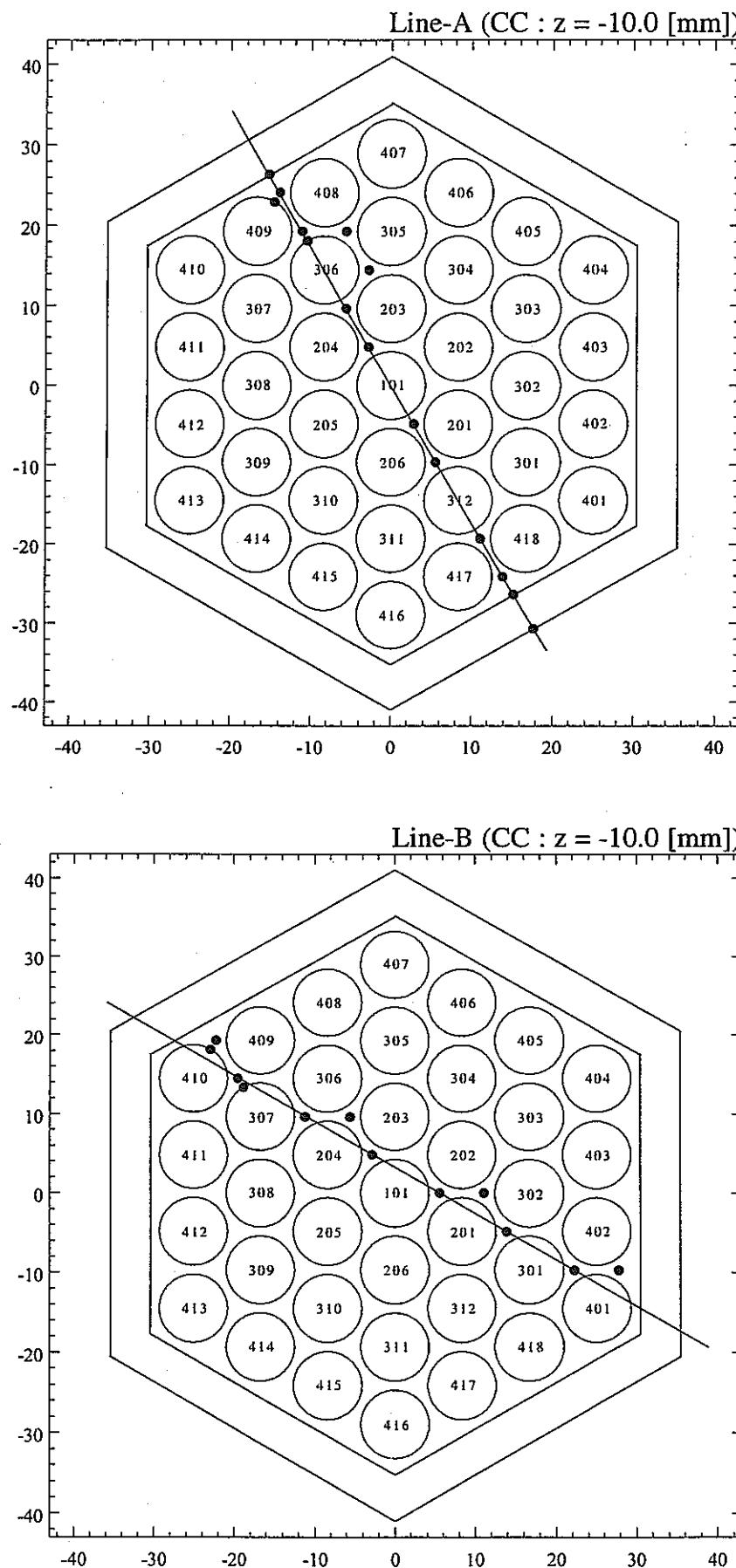


Figure 4.24(a)

Thermocouple Positions along the Reference Line at CC Level

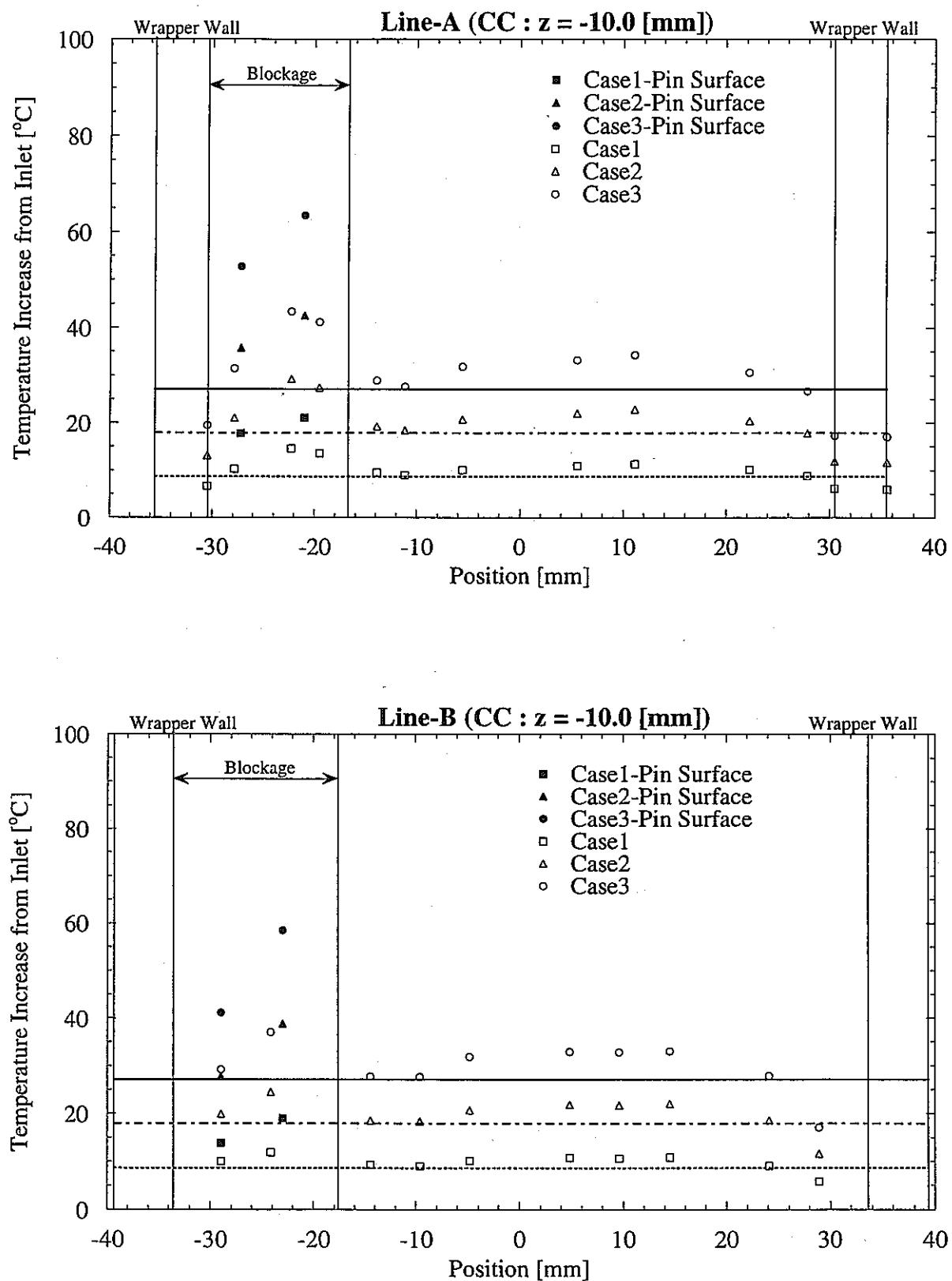


Figure 4.24(b)
Horizontal Temperature Distribution along the Reference Line at CC Level

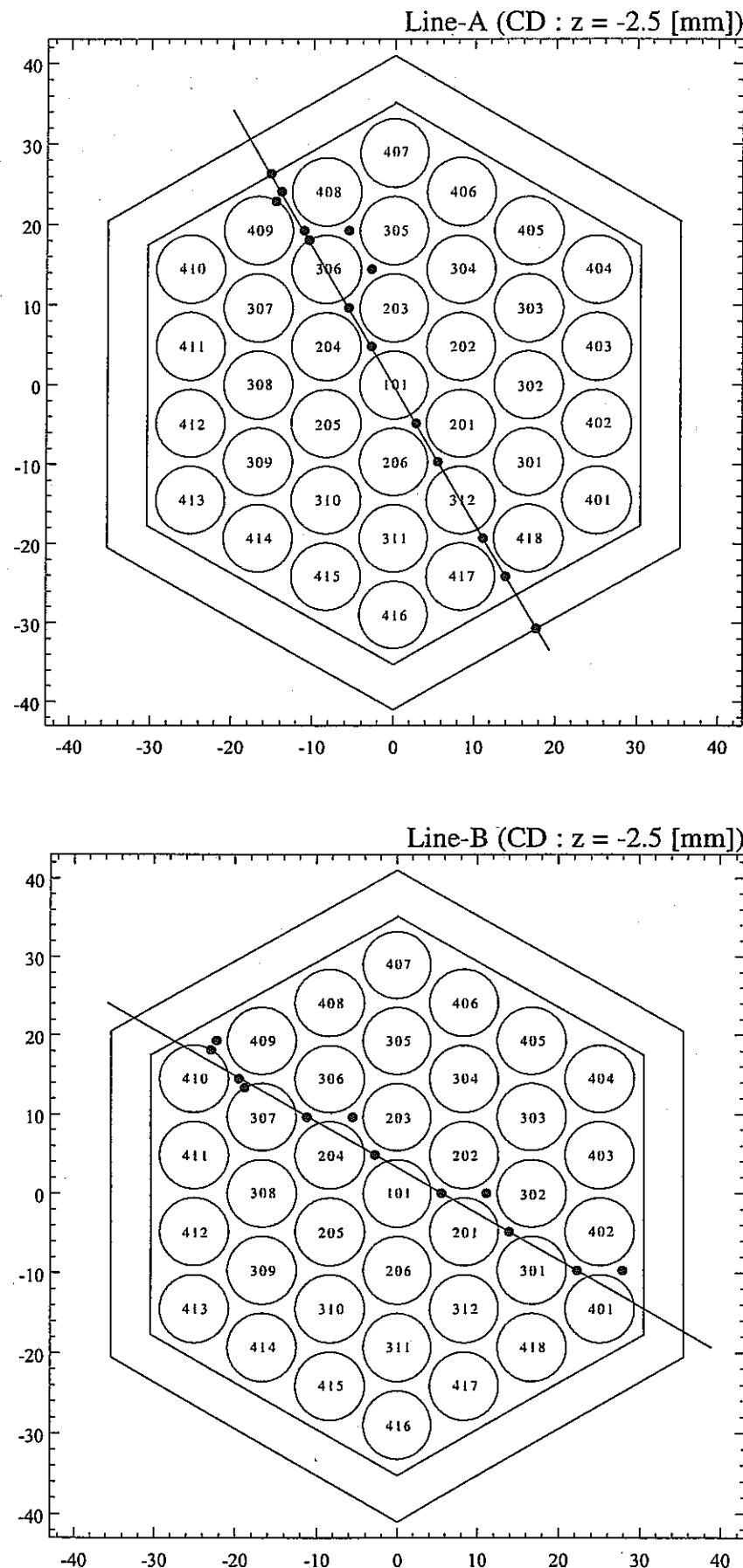


Figure 4.25(a)

Thermocouple Positions along the Reference Line at CD Level

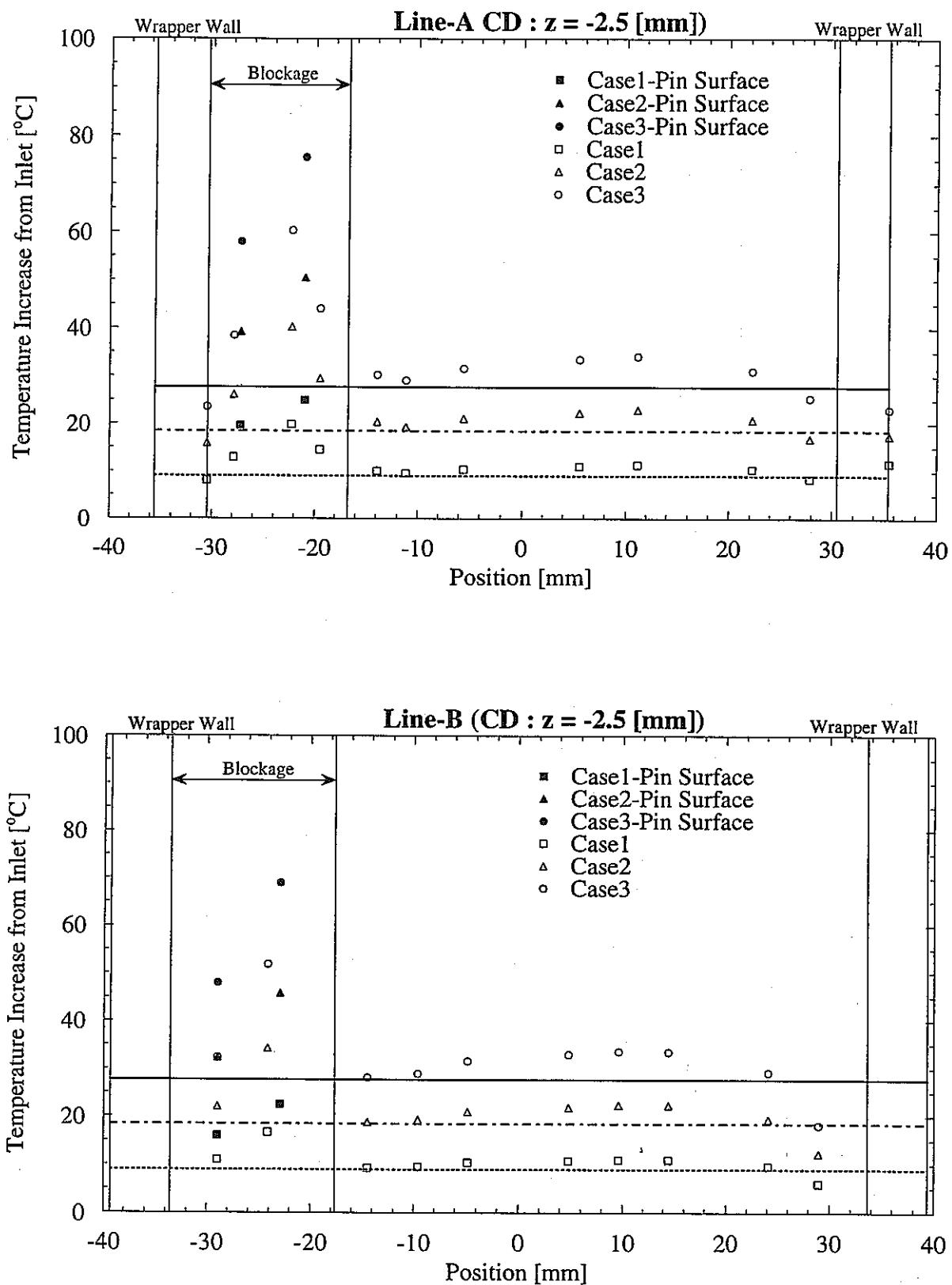


Figure 4.25(b)

Horizontal Temperature Distribution along the Reference Line at CD Level

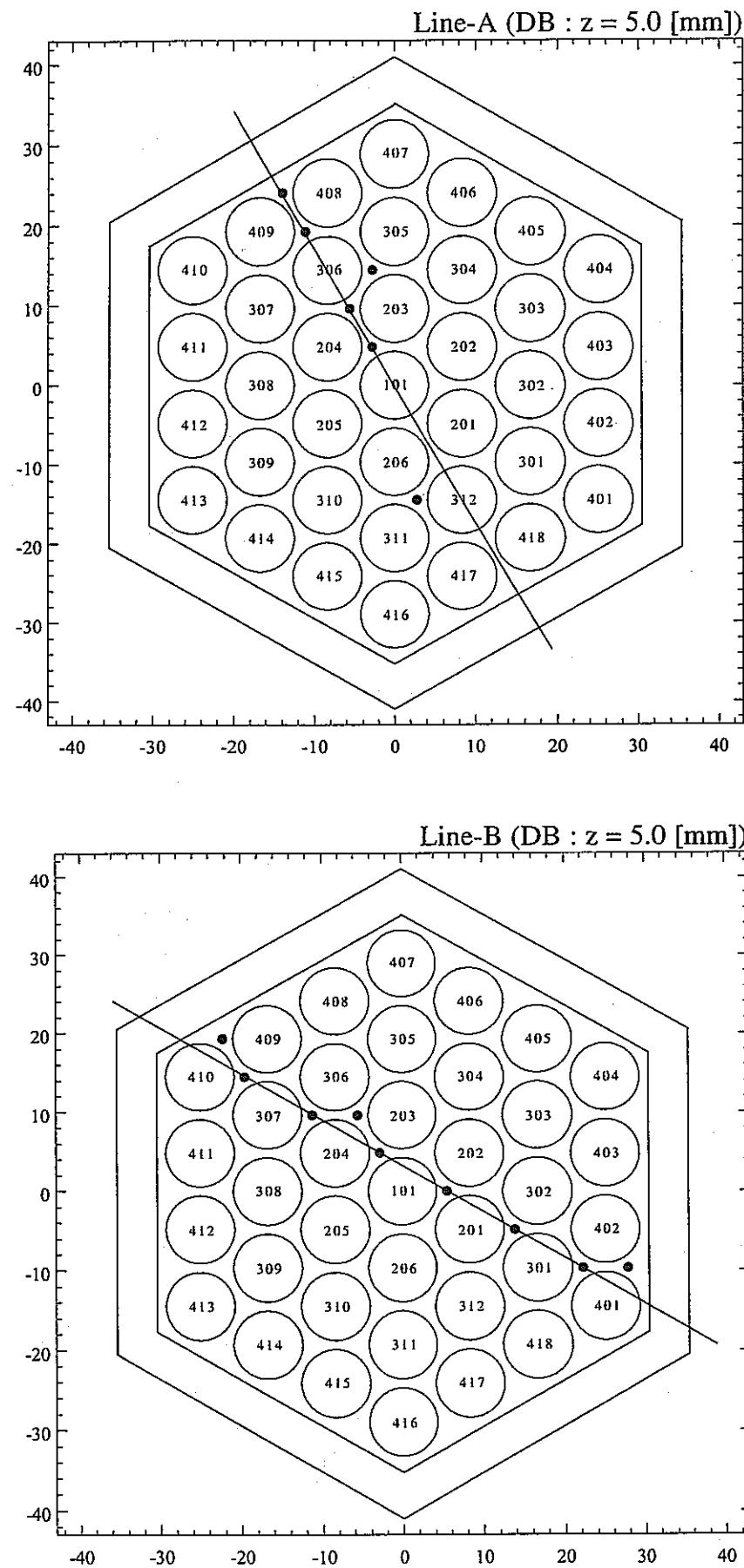


Figure 4.26(a)

Thermocouple Positions along the Reference Line at DB Level

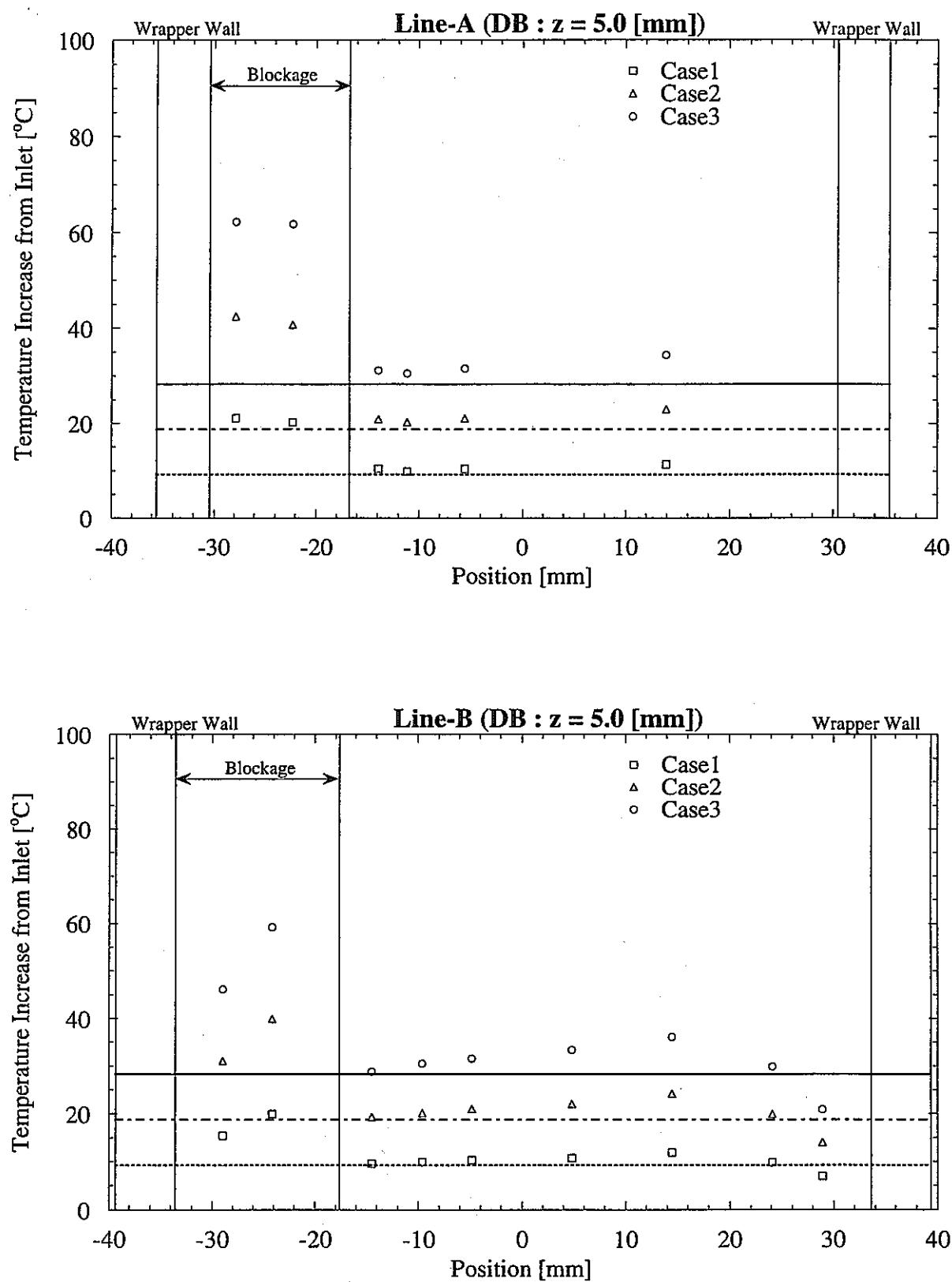


Figure 4.26(b)
Horizontal Temperature Distribution along the Reference Line at DB Level

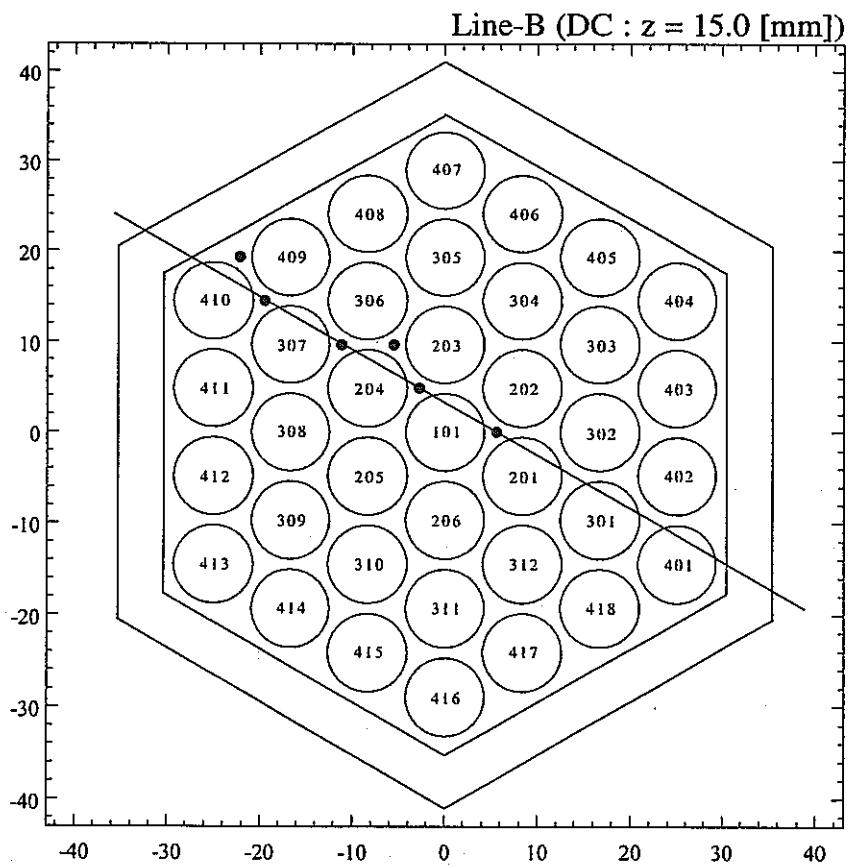
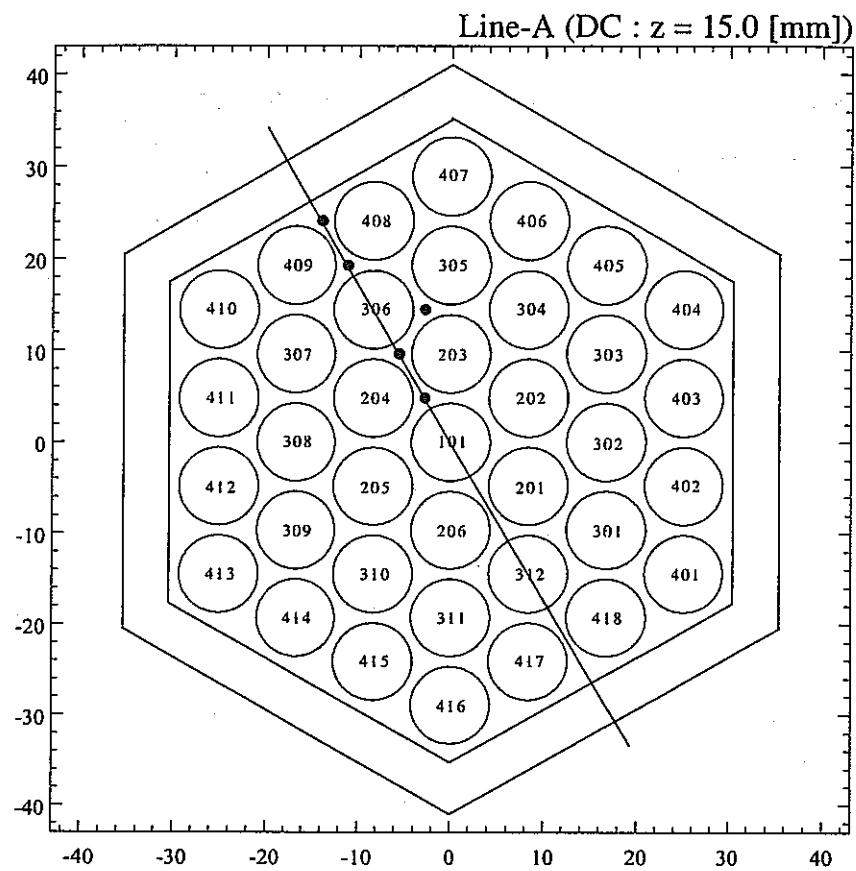


Figure 4.27(a)

Thermocouple Positions along the Reference Line at DC Level

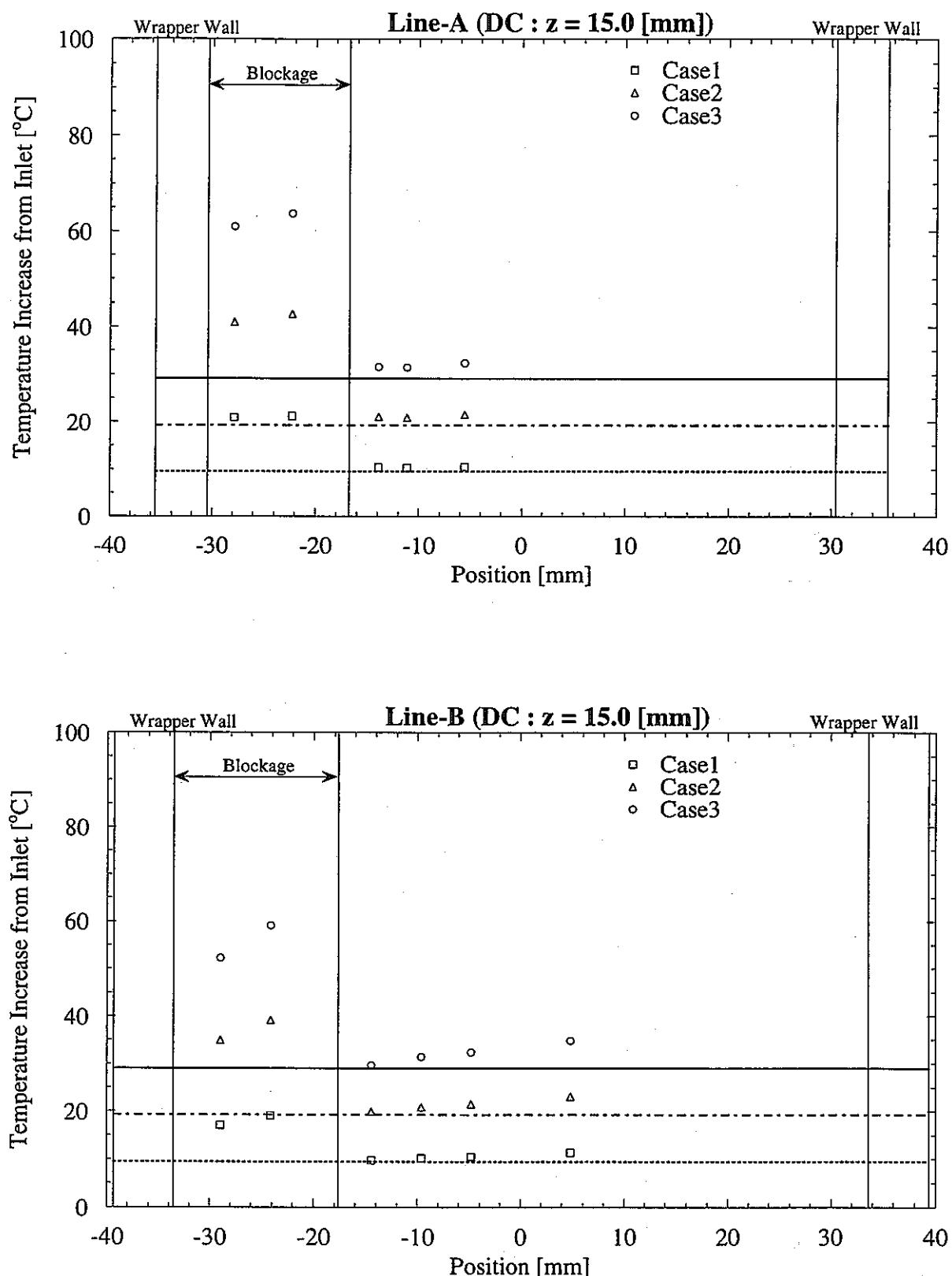


Figure 4.27(b)
Horizontal Temperature Distribution along the Reference Line at DC Level

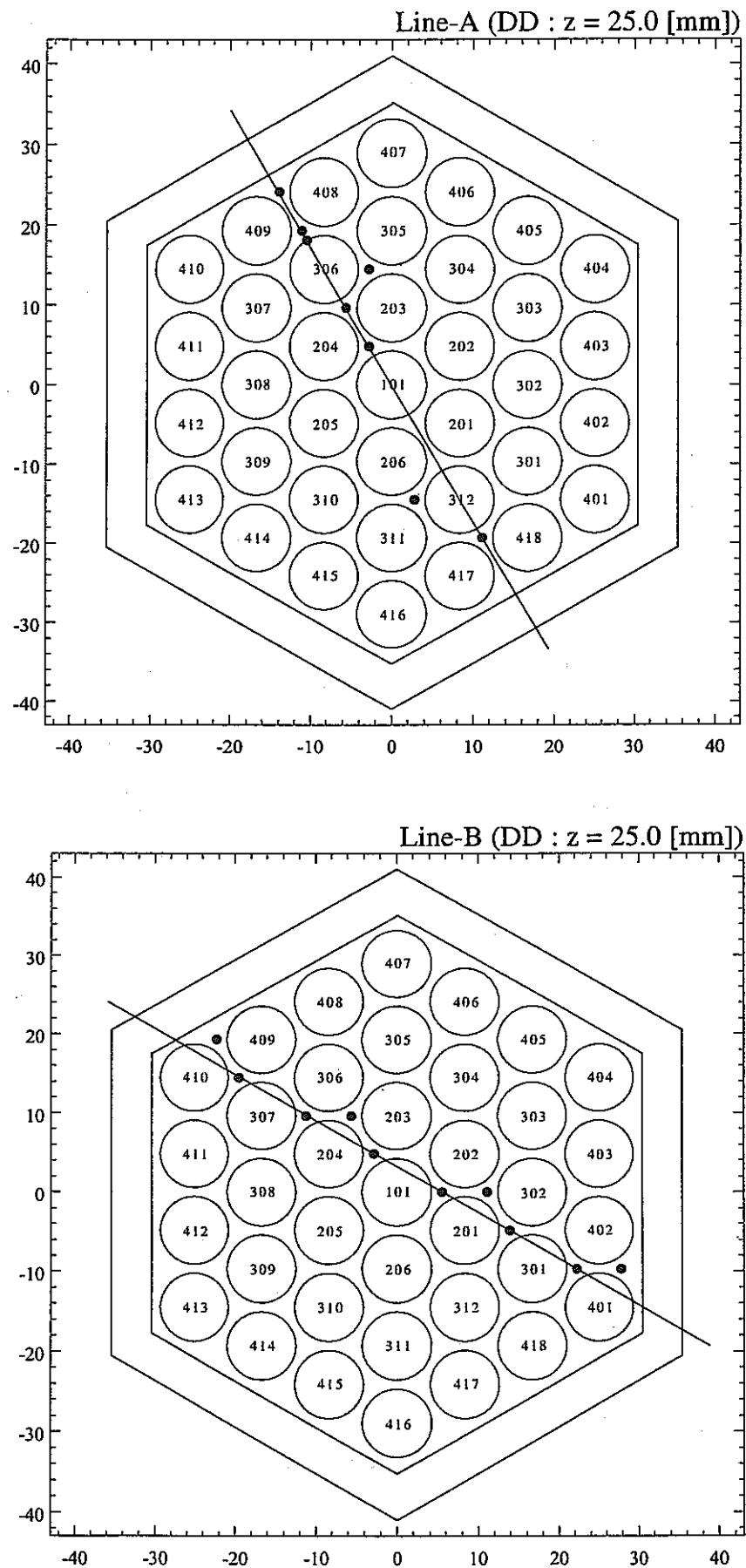


Figure 4.28(a)

Thermocouple Positions along the Reference Line at DD Level

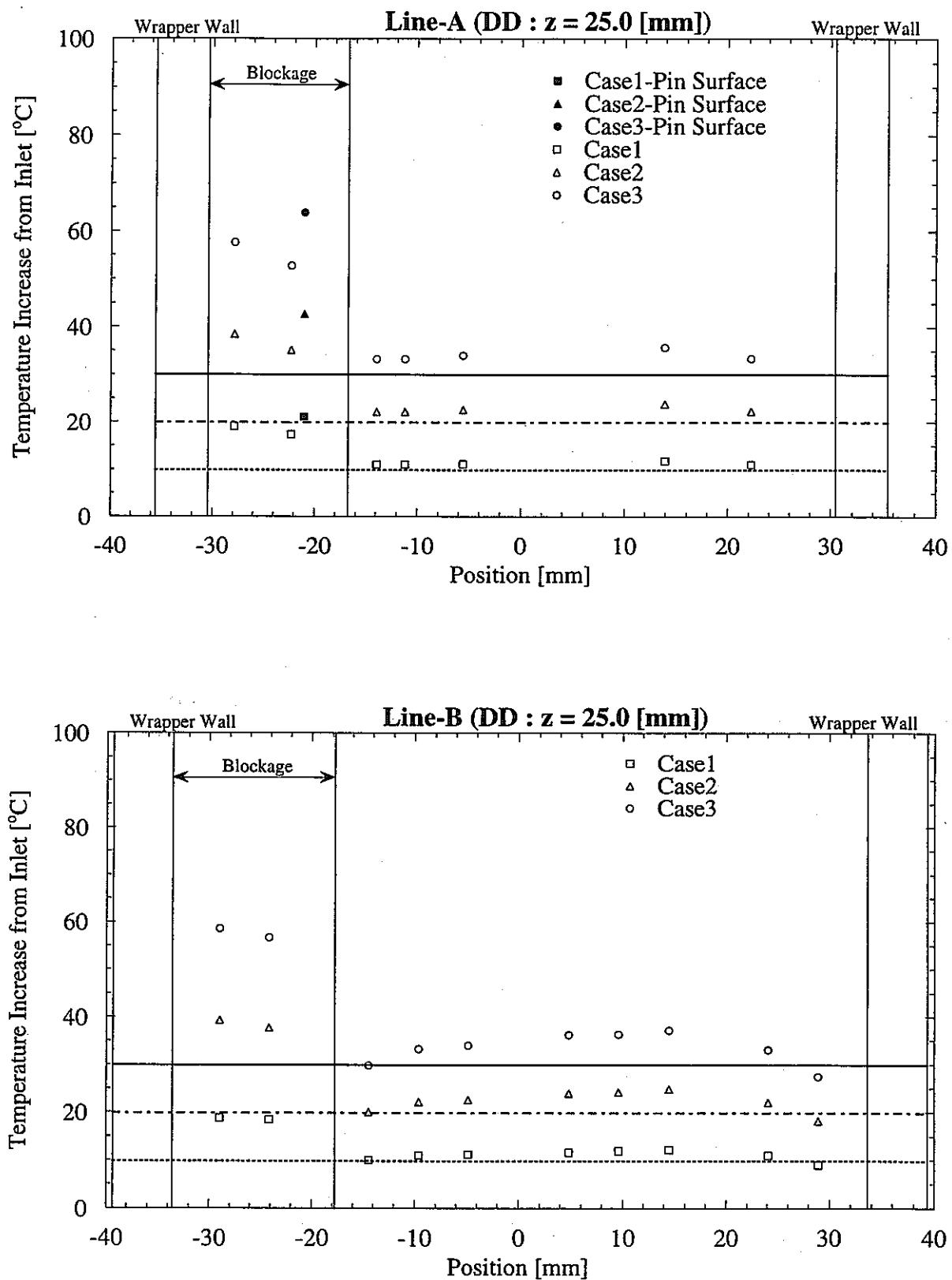


Figure 4.28(b)
Horizontal Temperature Distribution along the Reference Line at DD Level

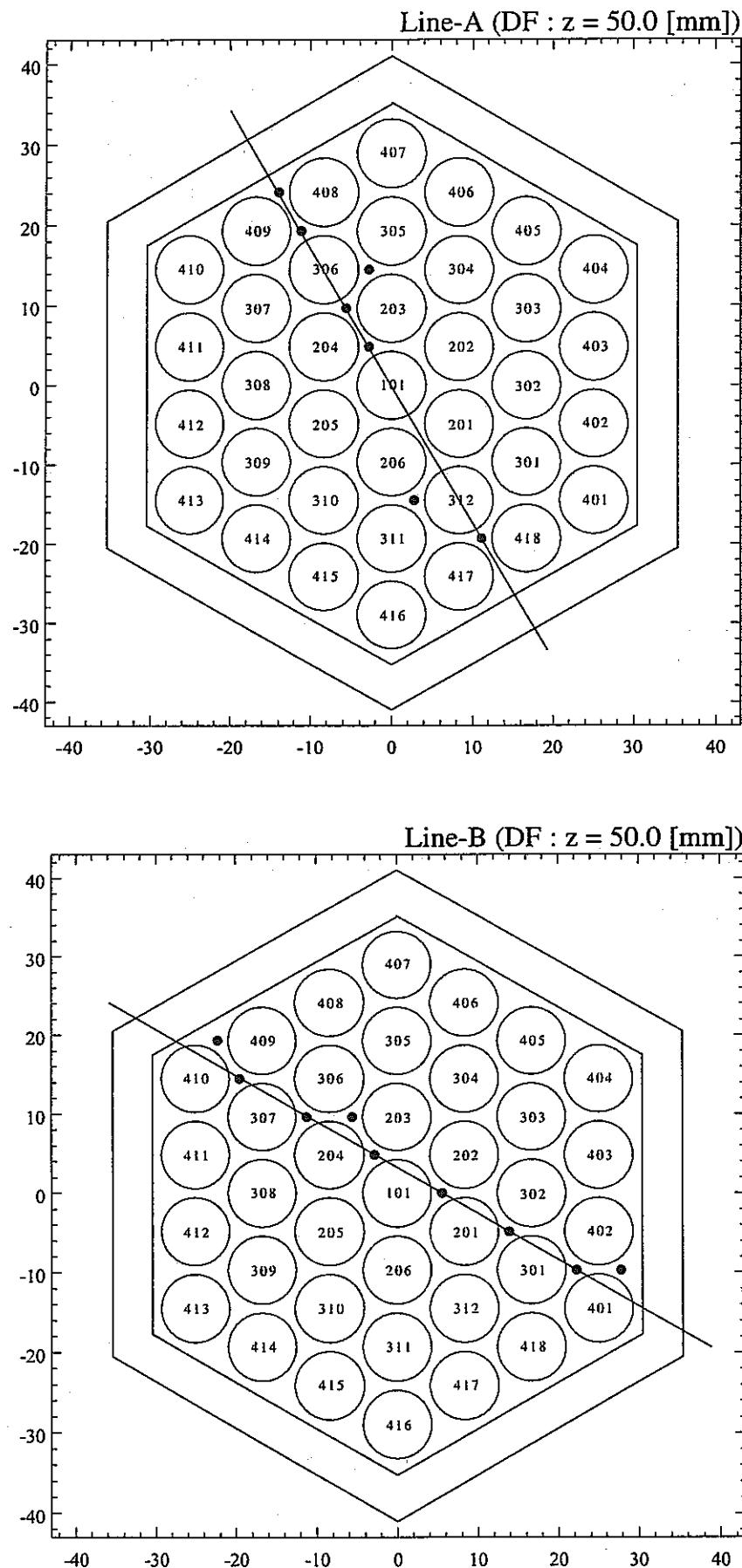


Figure 4.29(a)

Thermocouple Positions along the Reference Line at DF Level

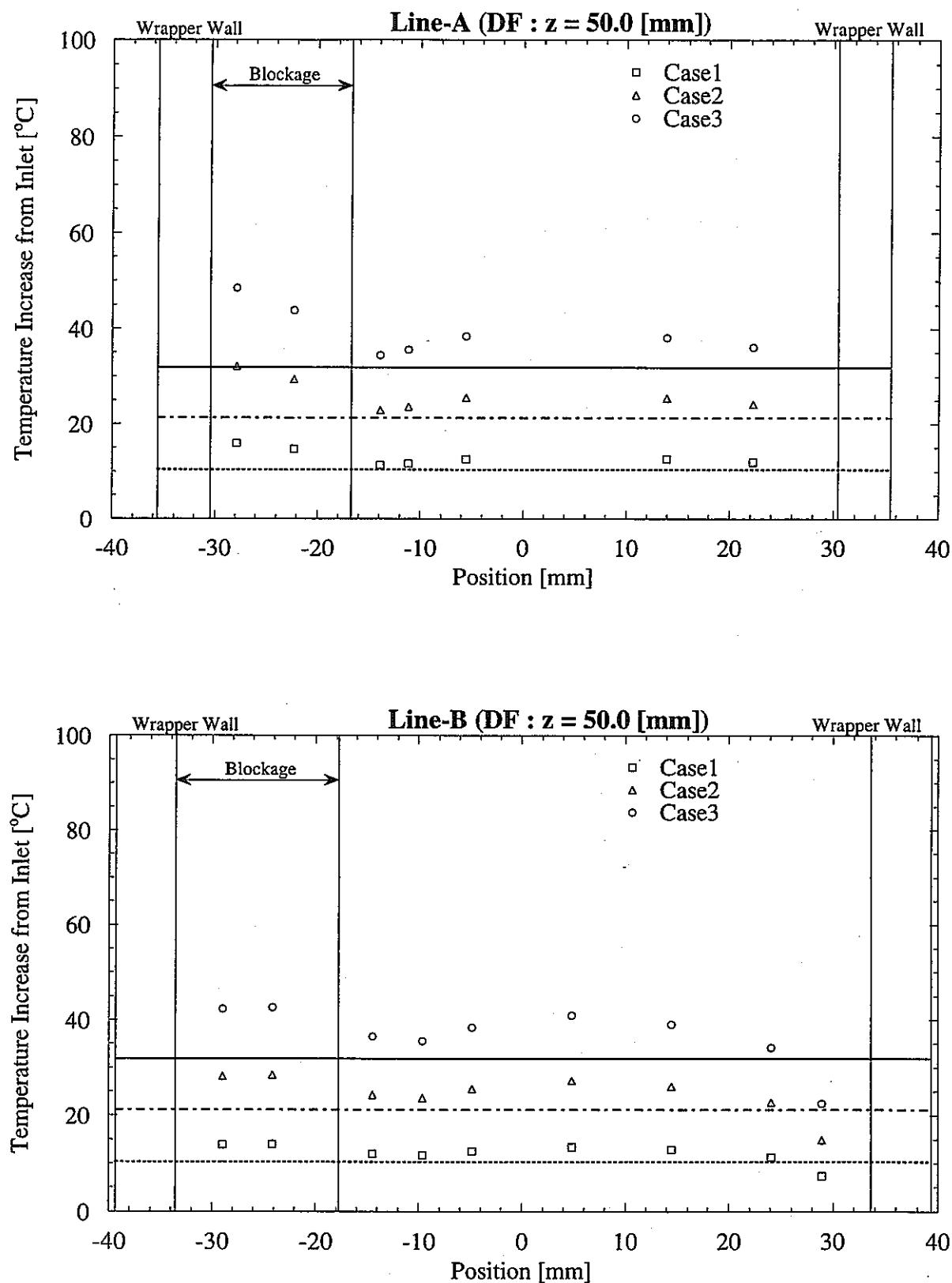


Figure 4.29(b)
Horizontal Temperature Distribution along the Reference Line at DF Level

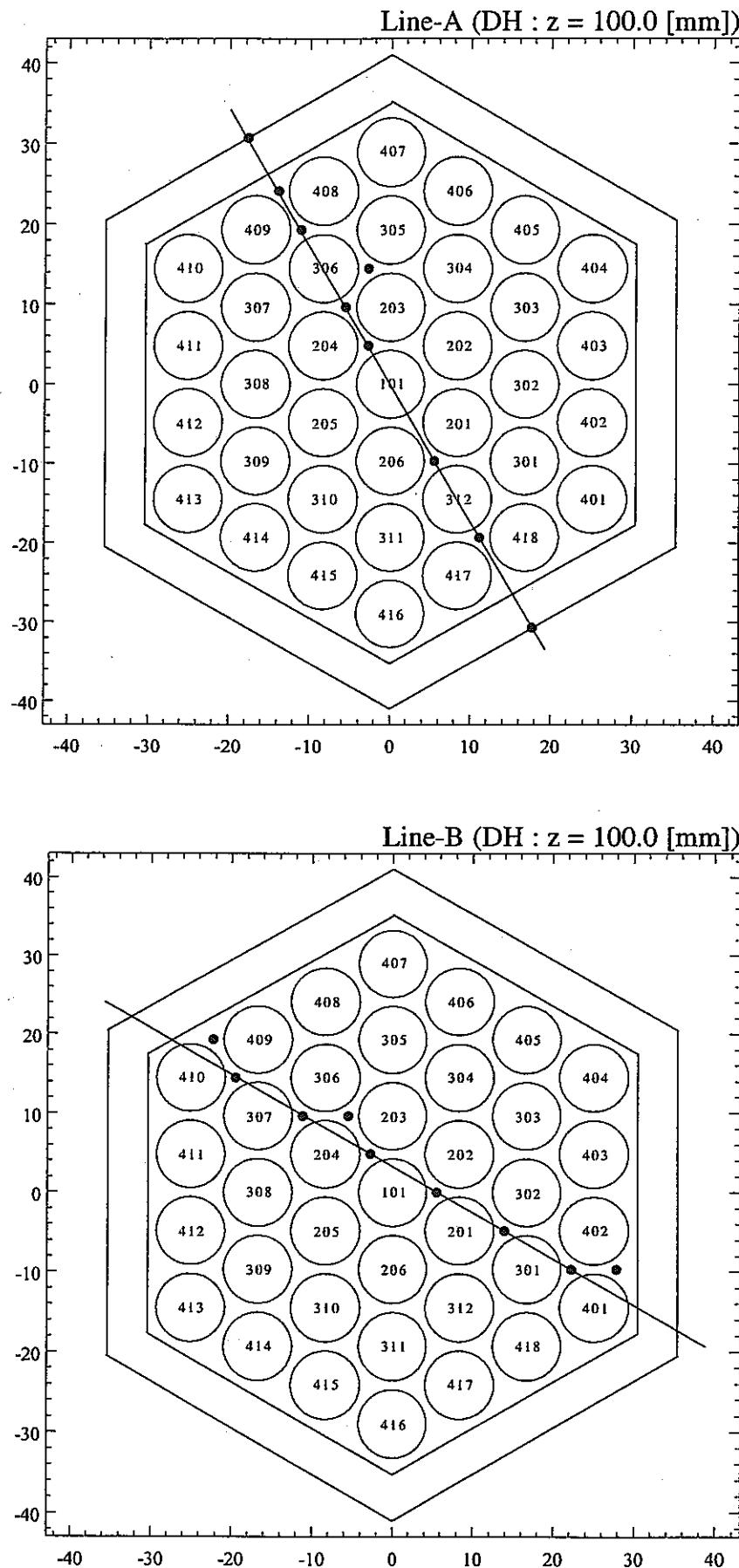


Figure 4.30(a)

Thermocouple Positions along the Reference Line at DH Level

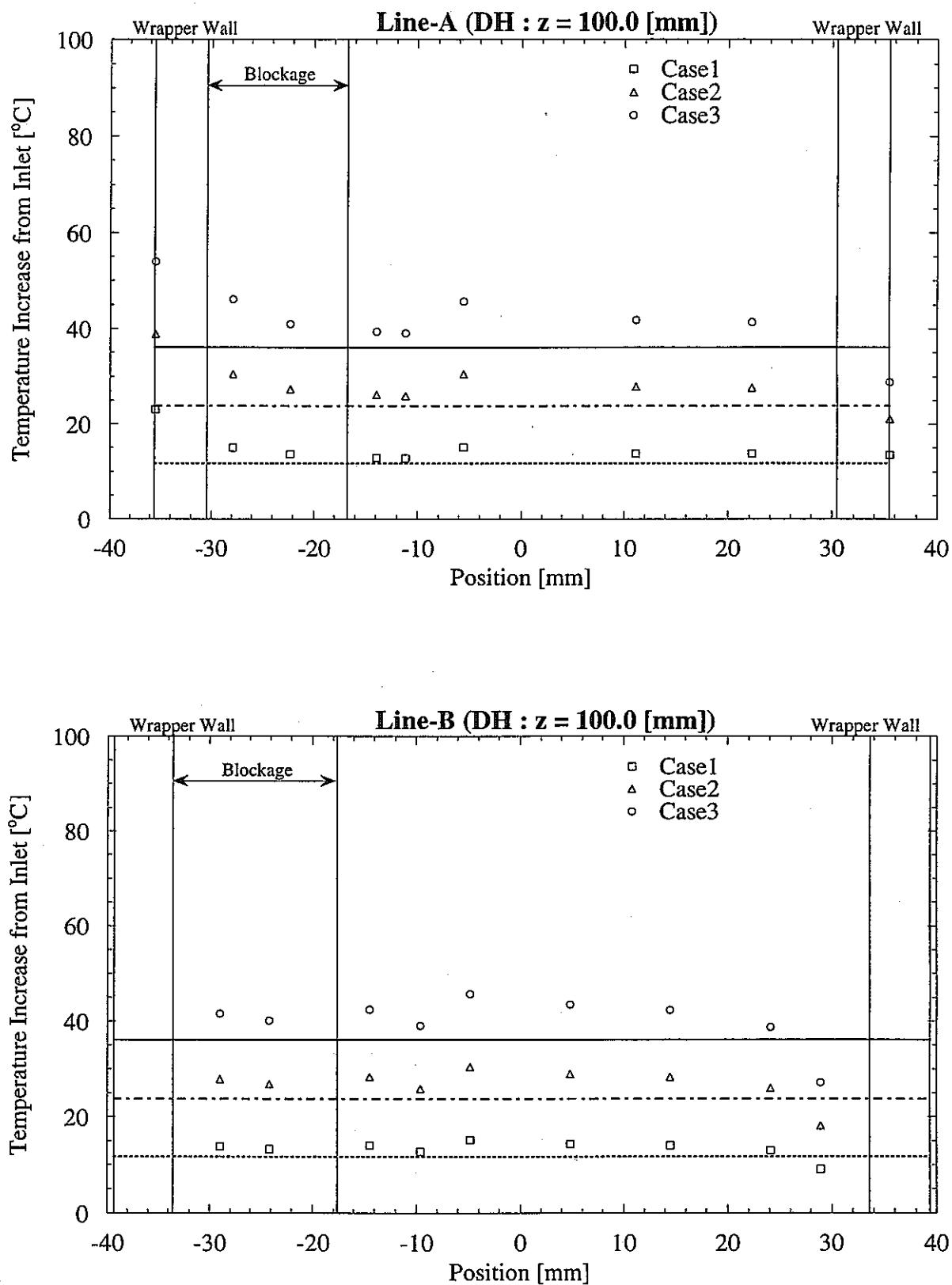


Figure 4.30(b)
Horizontal Temperature Distribution along the Reference Line at DH Level

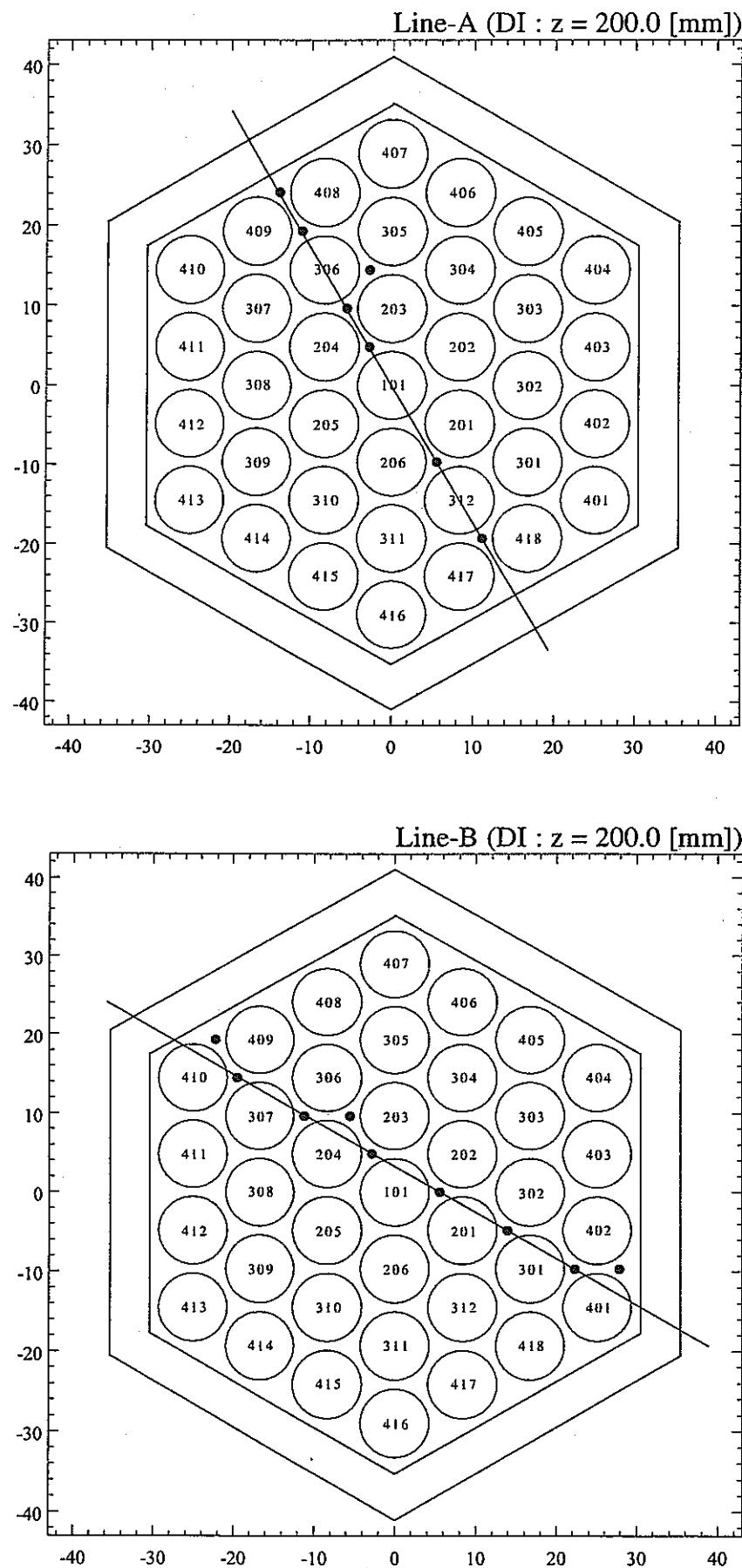


Figure 4.31(a)

Thermocouple Positions along the Reference Line at DI Level

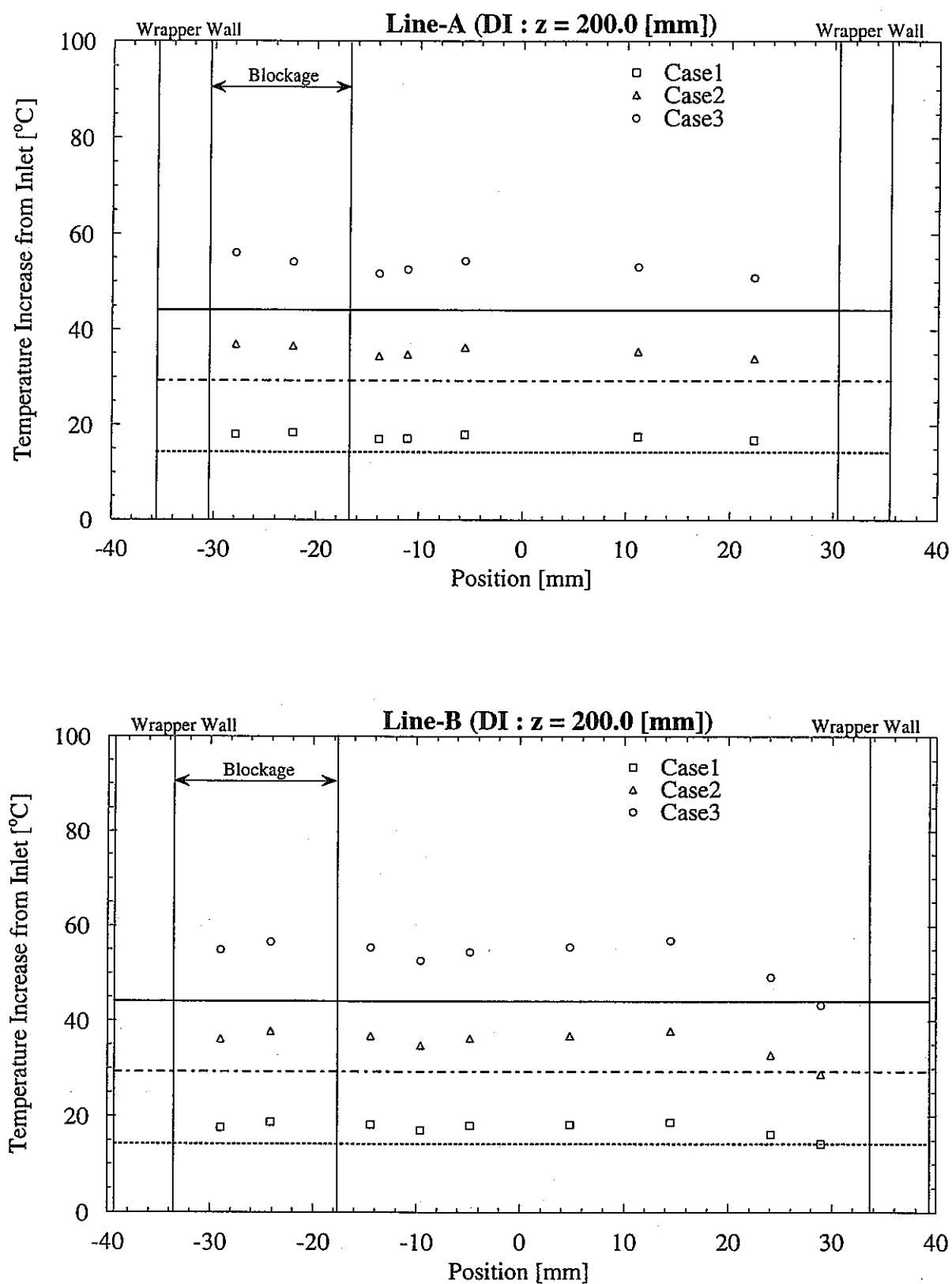


Figure 4.31(b)
Horizontal Temperature Distribution along the Reference Line at DI Level

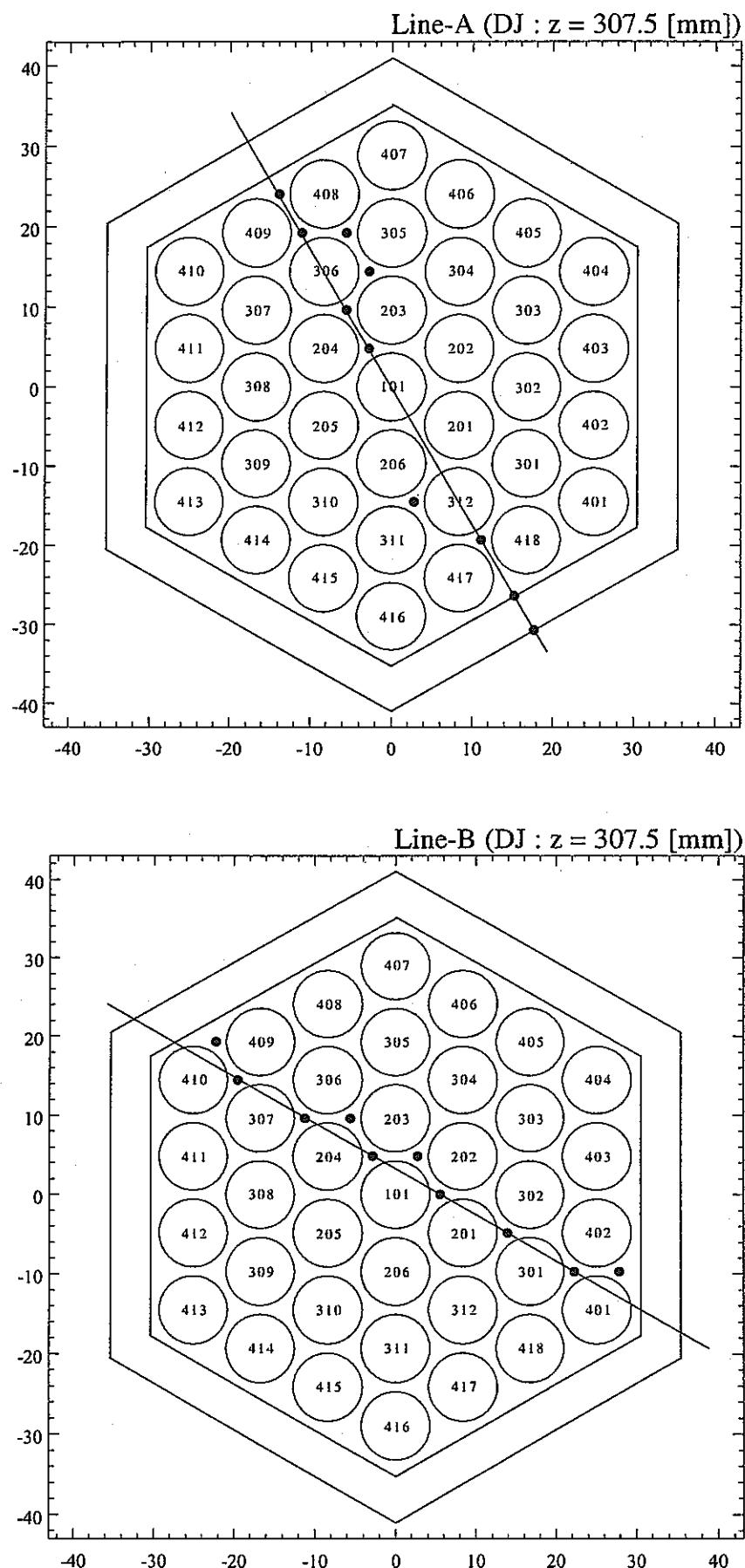


Figure 4.32(a)

Thermocouple Positions along the Reference Line at DJ Level

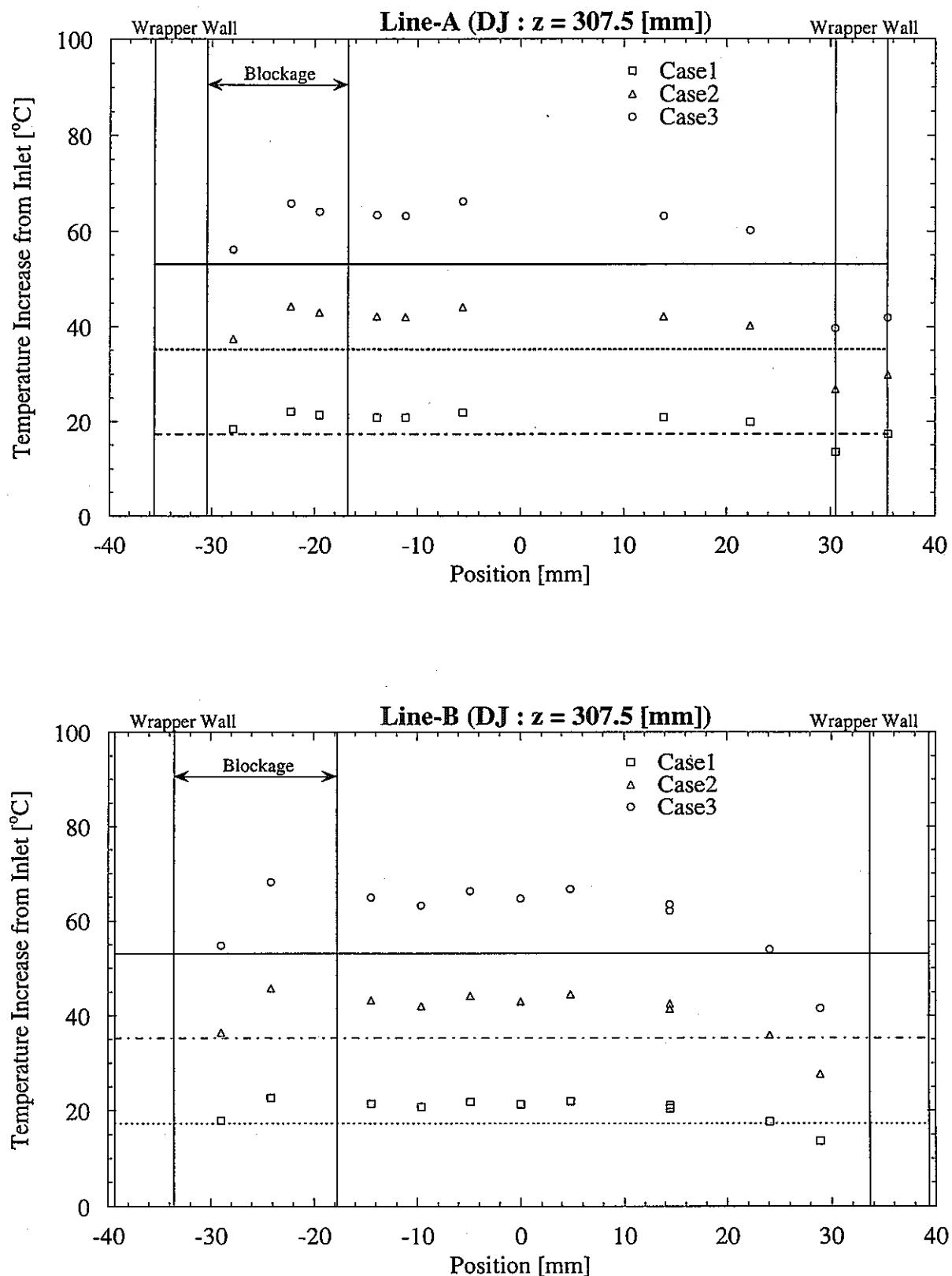


Figure 4.32(b)

Horizontal Temperature Distribution along the Reference Line at DJ Level

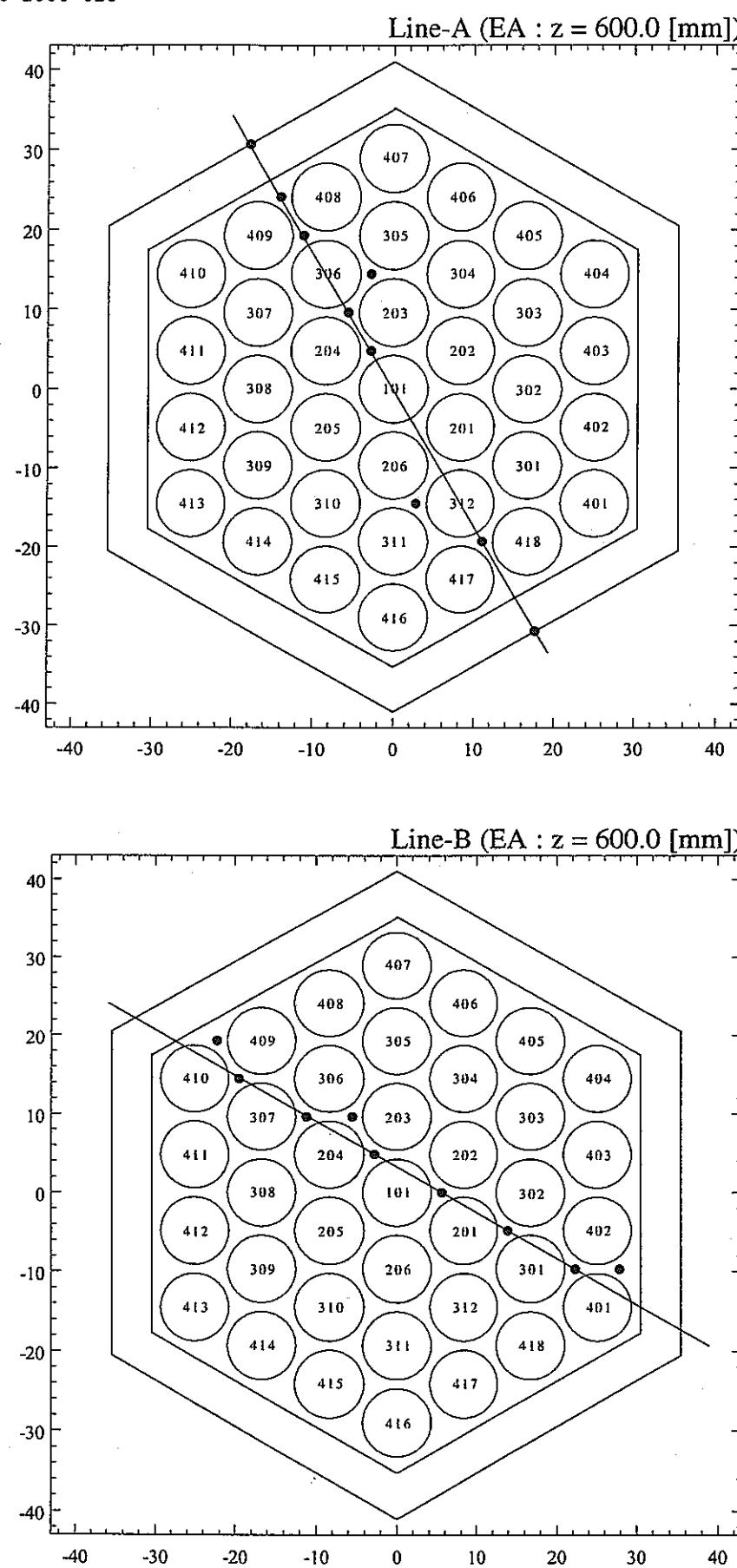


Figure 4.33(a)

Thermocouple Positions along the Reference Line at EA Level

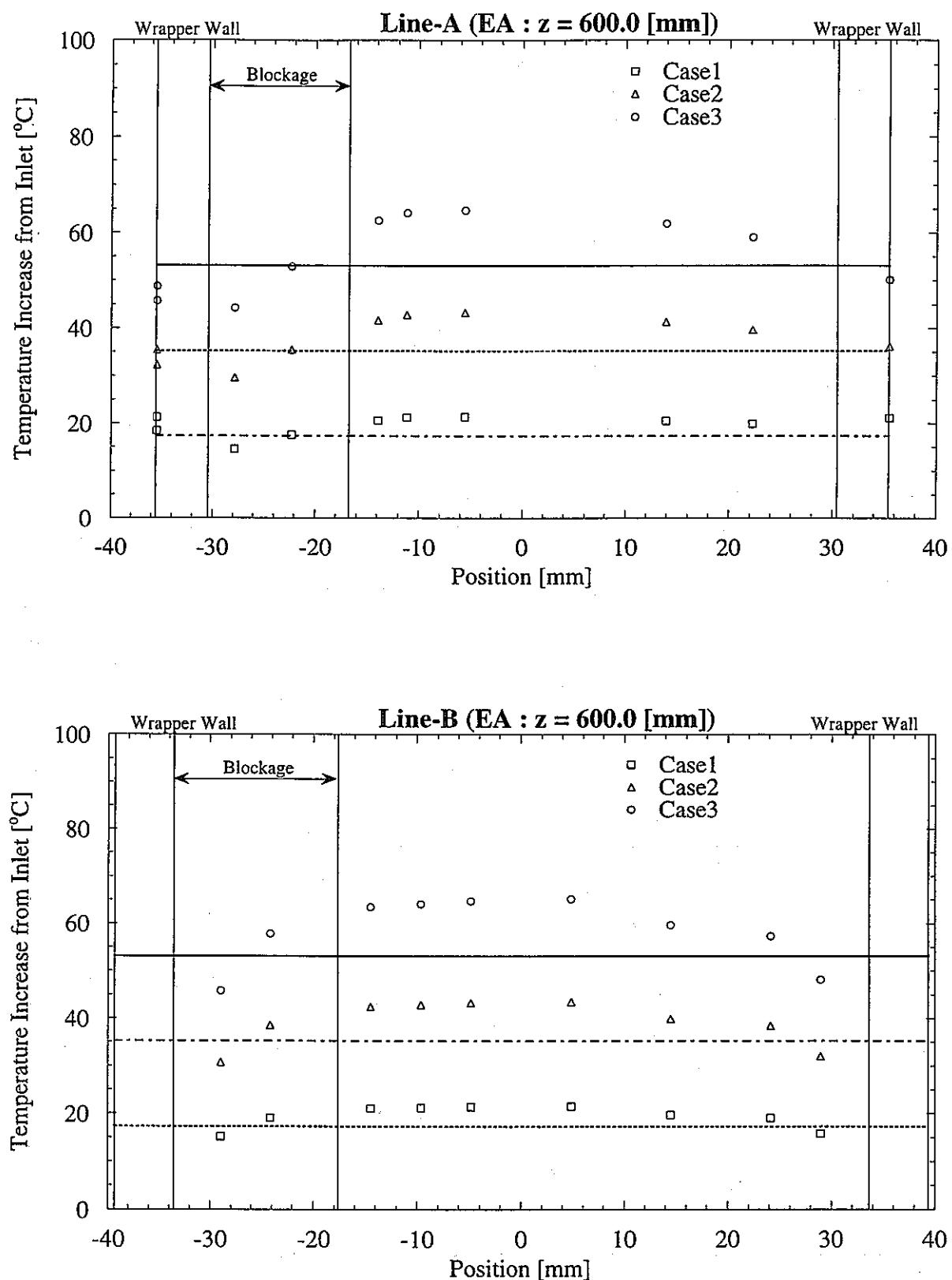


Figure 4.33(b)
Horizontal Temperature Distribution along the Reference Line at EA Level

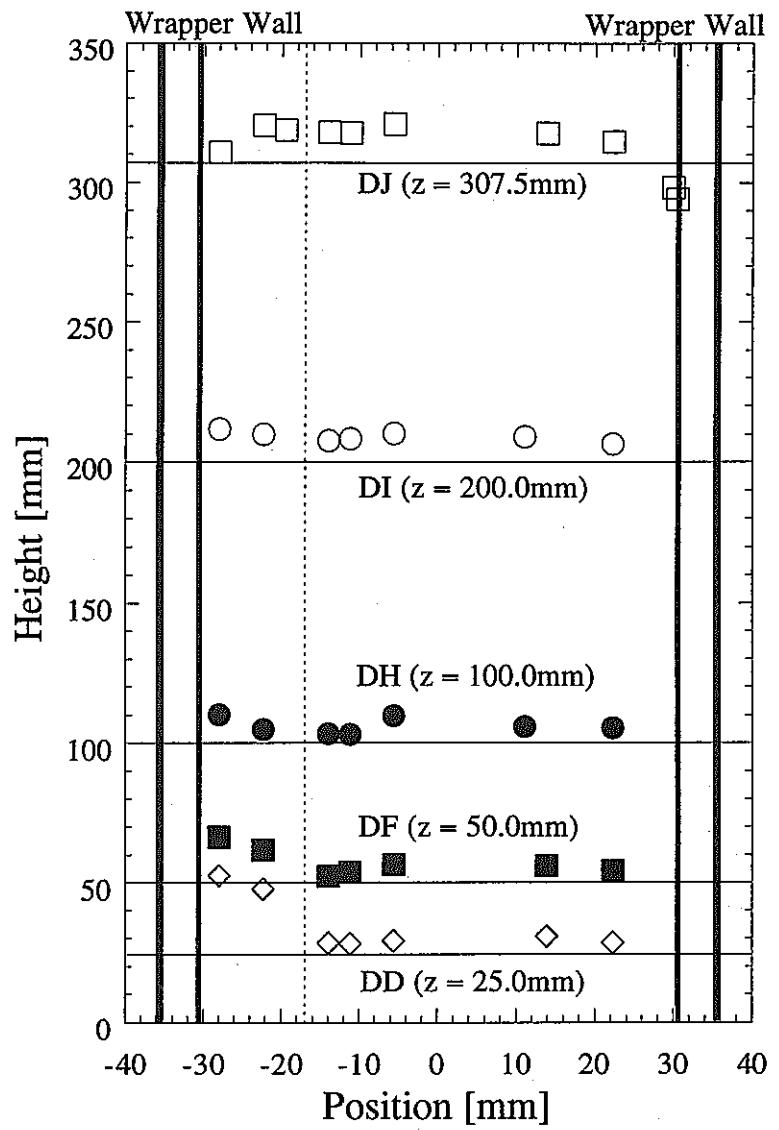
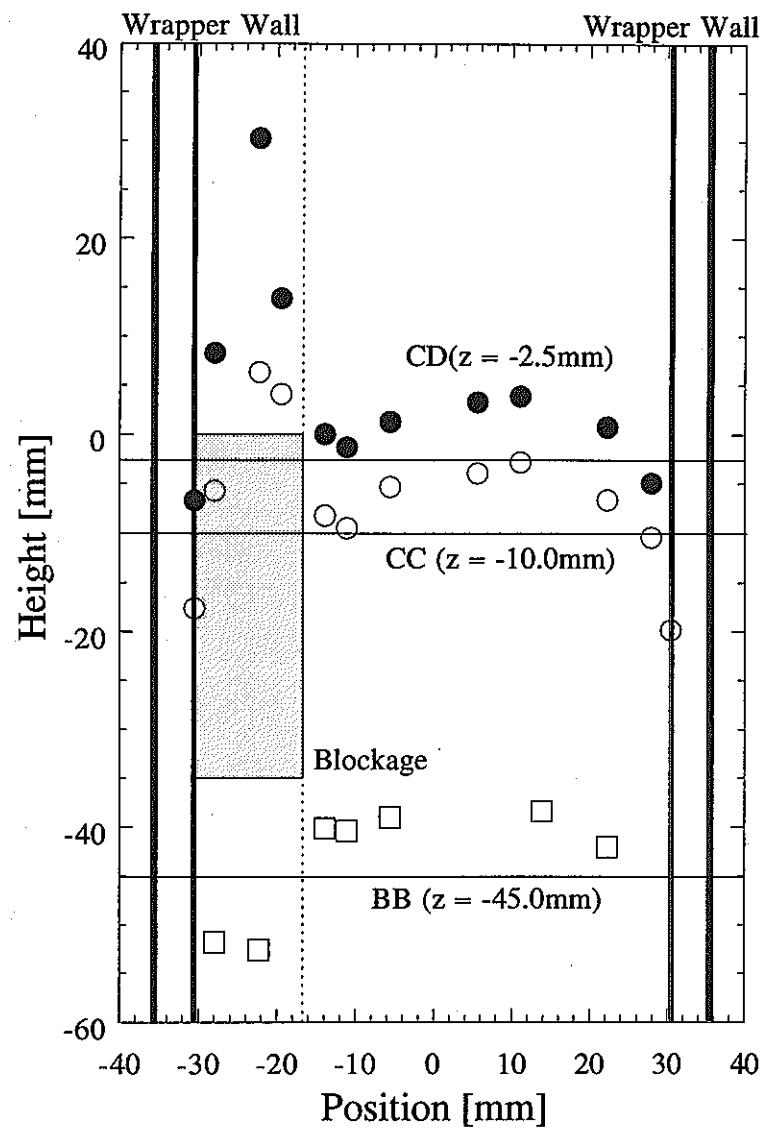


Figure 4.34 Axial Change in the Horizontal Temperature Distribution

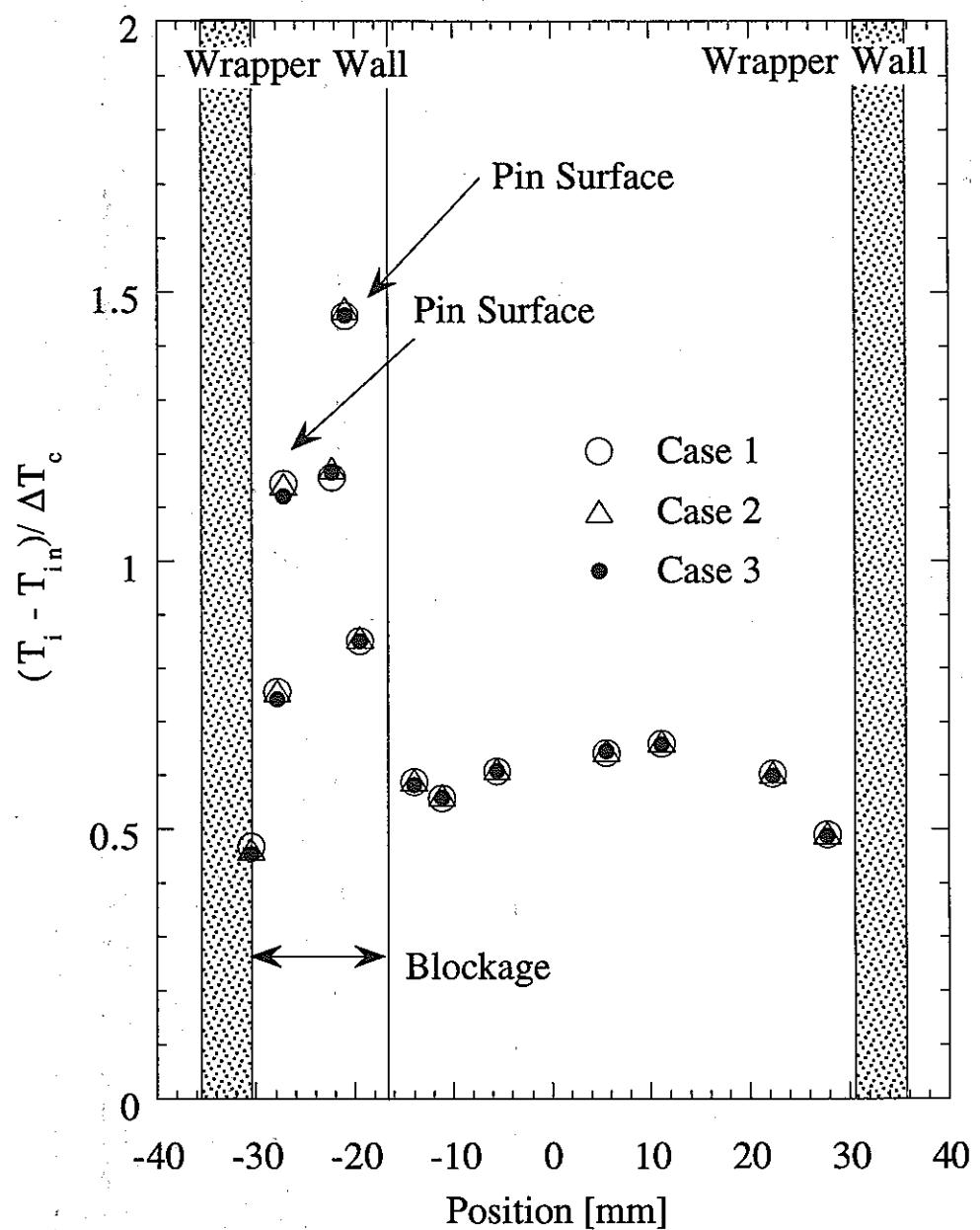


Figure 4.35 Normalized Horizontal Temperature Distribution at CD Level

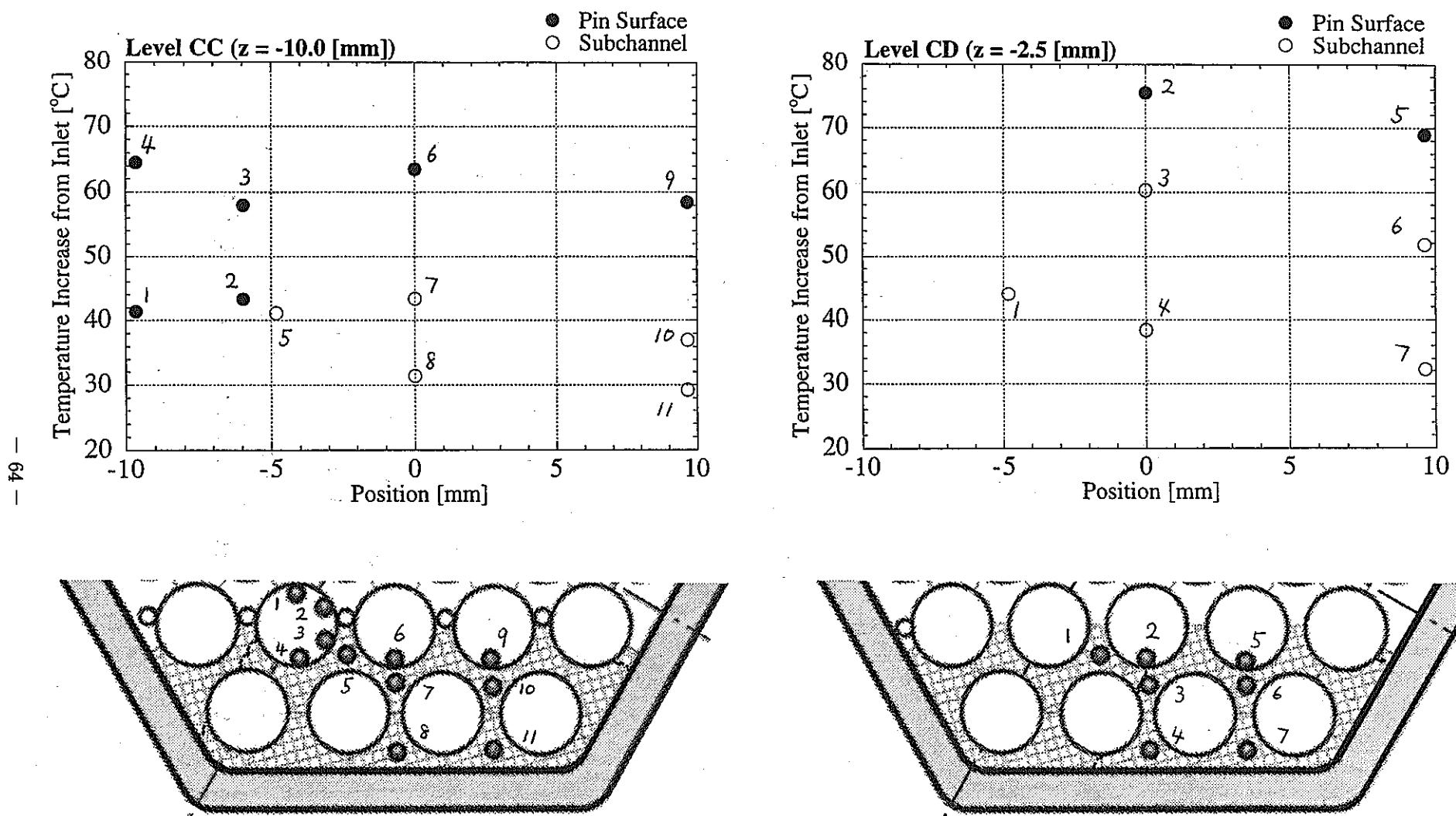


Figure 4.36 Temperature Distribution in the Porous Blockage

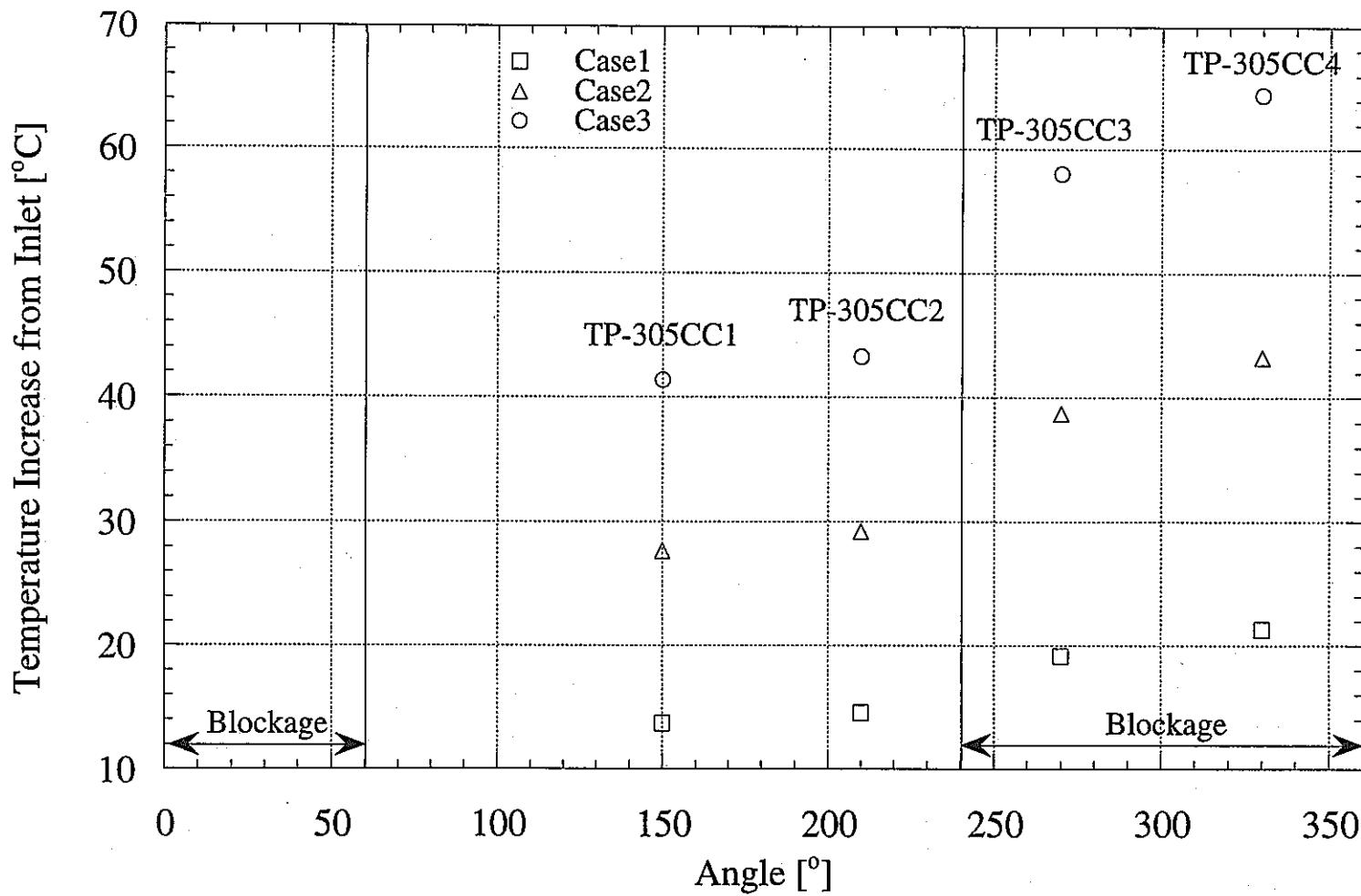


Figure 4.37
Temperature Distribution on 306-Pin Surface at CC Level

FILE NAME : AC15_S
 CALIBRATION FILE : A:\LFCAL94.APR

DATE : 94/06/08
 TIME : 14:13:27

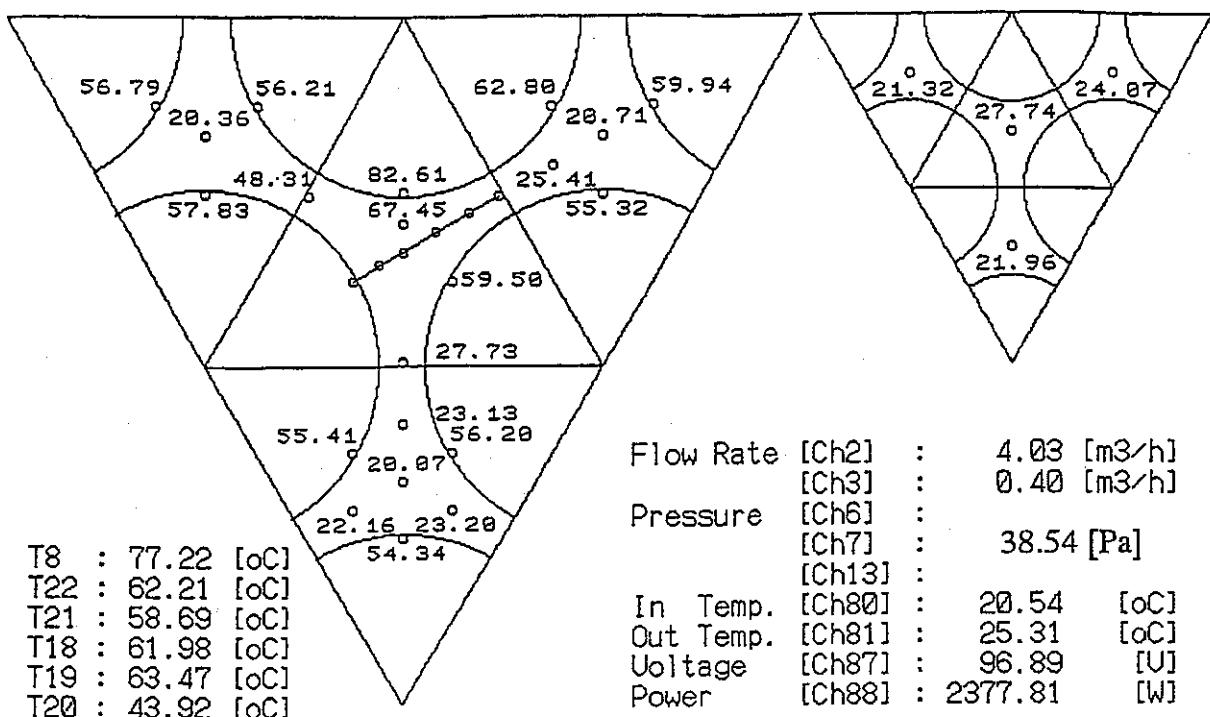


Figure 5.1 Thermocouple Arrangement of 4-Subchannel Water Experiment

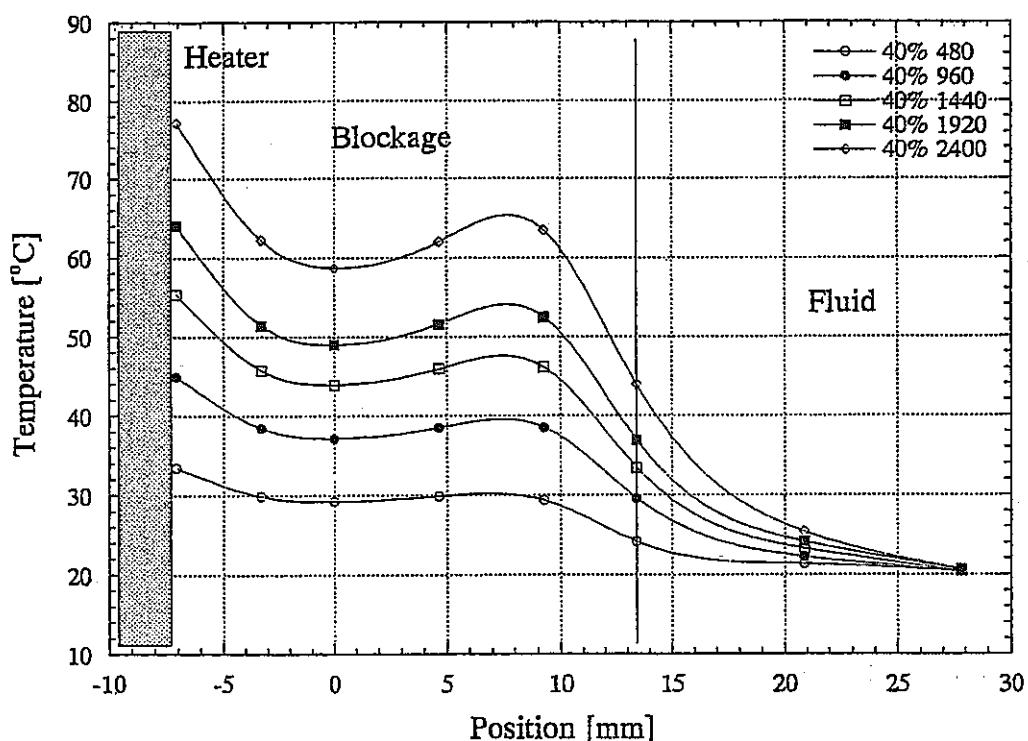


Figure 5.2 Horizontal Temperature Distribution in the Porous Blockage

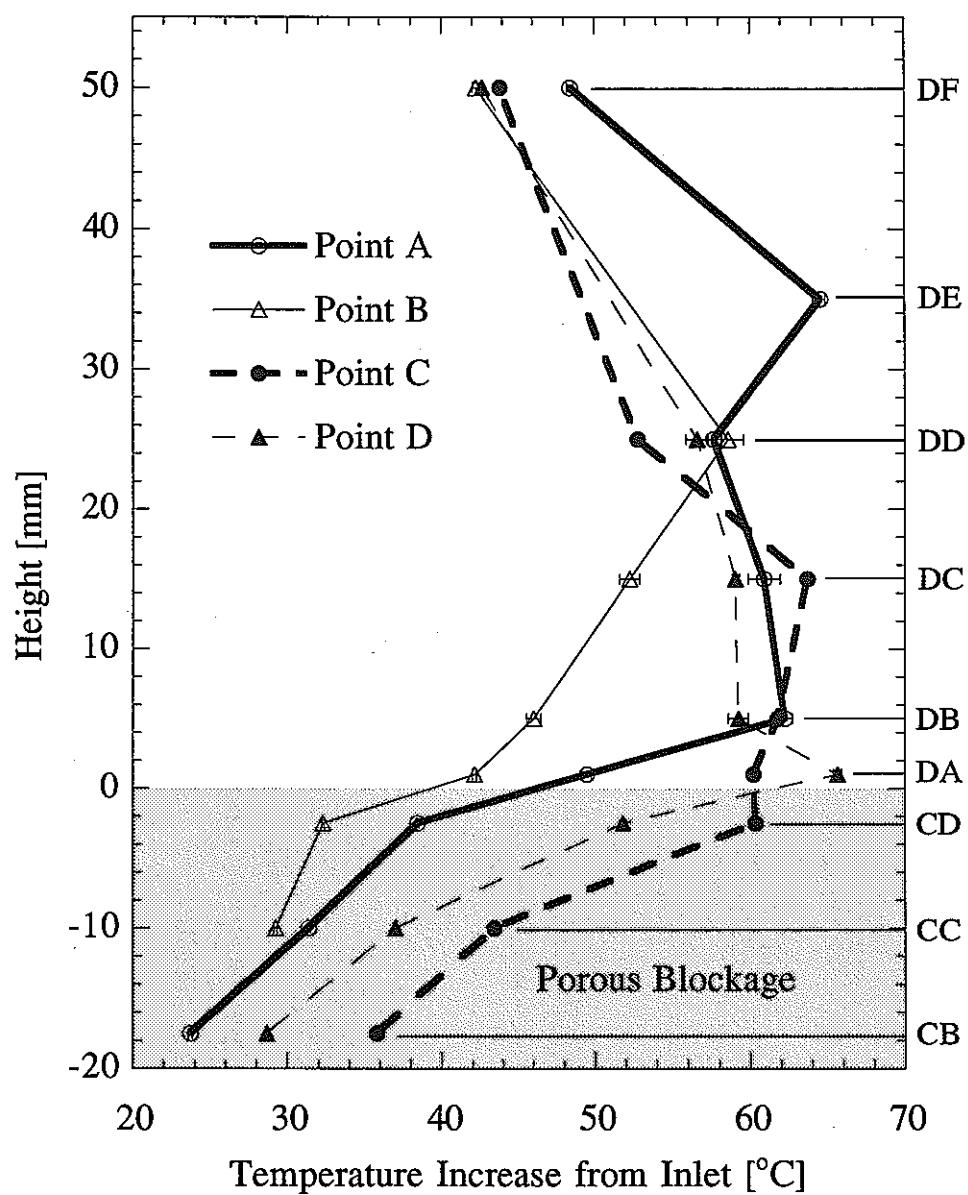
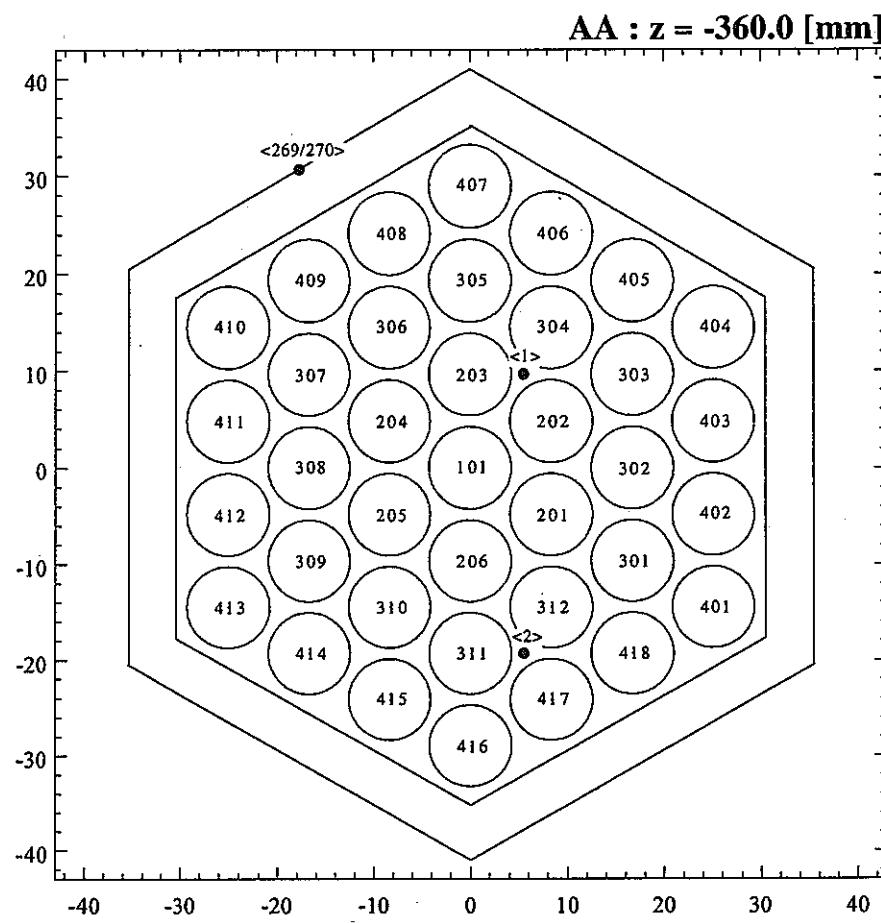
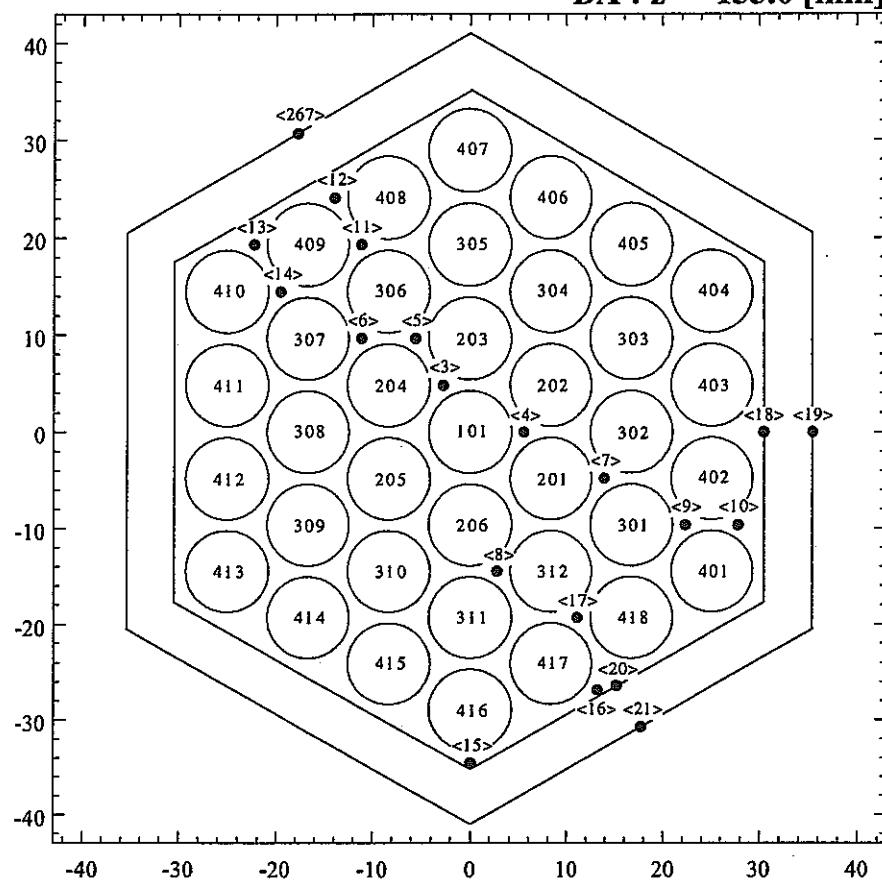


Figure 5.3
Vertical Temperature Distribution
at Point A,B,C,D in Case 3

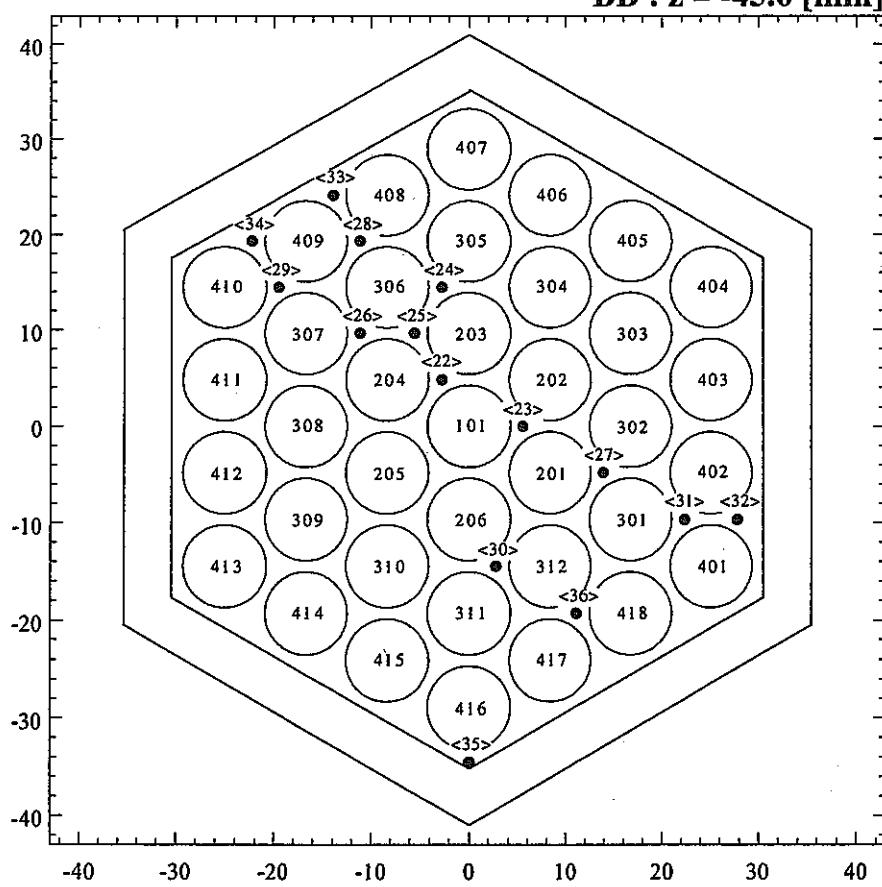
付録 試験体内部熱電対配置および接続チャンネル対応図



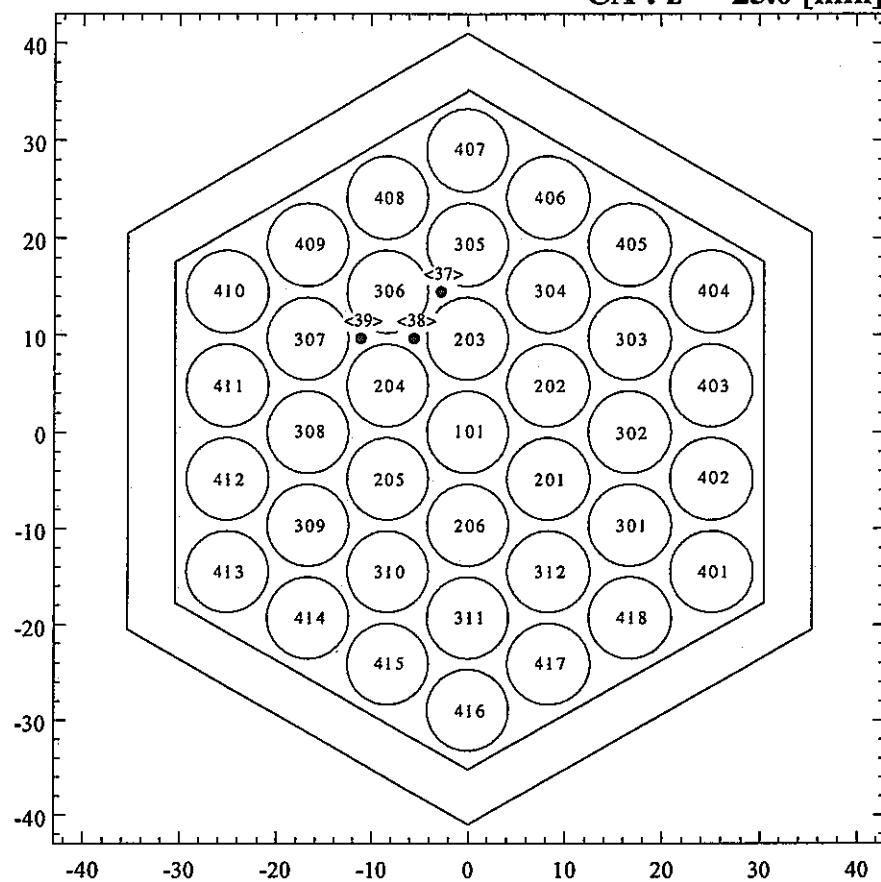
BA : z = -155.0 [mm]



BB : z = -45.0 [mm]



CA : z = -25.0 [mm]



CB : z = -17.5 [mm]

