



稠密格子体系ロッド位置変位のX線CTによる測定と
伝熱特性への影響
(共同研究)

2005年 6月

光武 徹・勝山 幸三*・三沢 丈治・永峯 剛*
吳田 昌俊・松元 慎一郎*・秋本 肇

日本原子力研究所
Japan Atomic Energy Research Institute

本レポートは、日本原子力研究所が不定期に公刊している研究報告書です。
入手の問合せは、日本原子力研究所研究情報部研究情報課（〒319-1195 茨城県那珂
郡東海村）あて、お申し越しください。なお、このほかに財団法人原子力弘済会資料センター
(〒319-1195 茨城県那珂郡東海村日本原子力研究所内) で複写による実費頒布をおこなっ
ております。

This report is issued irregularly.

Inquiries about availability of the reports should be addressed to Research
Information Division, Department of Intellectual Resources, Japan Atomic Energy
Research Institute, Tokai-mura, Naka-gun, Ibaraki-ken 319-1195, Japan.

稠密格子体系ロッド位置変位の X 線 CT による測定と伝熱特性への影響

(共同研究)

日本原子力研究所東海研究所エネルギーシステム研究部

光武 徹[※]・勝山 幸三^{*}・三沢 丈治・永峯 剛^{*}・吳田 昌俊・松元 慎一郎^{*}

秋本 肇

(2005年4月6日受理)

燃料棒と燃料棒の間隙が 1 mm 程度の稠密格子体系では、わずかなロッド位置変位でも流路面積の変化が大きくなるため、伝熱特性に影響を及ぼす恐れがある。また、稠密格子体系の除熱限界(熱的限界出力)を評価するサブチャンネル解析において、模擬燃料棒が設計通りの位置からズレた場合の影響を定量的に確認しておくことは、実験解析の予測誤差原因を検討するうえで重要である。そこで、本研究では、低減速炉心模擬燃料集合体(7 本バンドル)に対して、断面内の模擬燃料棒配置を実測し、その結果に基づいて各模擬燃料棒中心位置の変位と伝熱特性との関係について実験的に検討すると共に、サブチャンネル解析結果に及ぼすロッド位置変位の影響を評価した。測定は、核燃料サイクル開発機構大洗工学センター照射燃料集合体試験施設の高エネルギーX 線 CT 検査装置を用いて行った。

X 線 CT 装置による断面の可視化画像より、模擬燃料棒位置は設計で想定された正六角形の頂点から大きく変位していないことが確認できた。また、模擬燃料棒中心位置座標の評価結果によると模擬燃料棒位置の変位は、有効発熱部内で最大 0.5 mm、平均は 0.2 mm であった。

伝熱実験データに基づき、沸騰遷移(BT)の発生位置、沸騰遷移後(ポスト BT)の温度挙動を評価した。その結果、BT 発生はほぼ同時刻に断面全体に広がっていたことから、X 線 CT で測定された模擬燃料棒位置の変位の影響は小さかった。

X 線 CT 測定結果に基づき、サブチャンネル解析コードの入力データを作成し、熱的限界出力を評価した。限界出力計算値は、模擬燃料棒が設計位置にあるとの仮定に基づく従来の結果よりも 5%程度小さくなつたが、過大評価の程度は約 25% と依然大きかった。このことから、解析結果と実験結果との差異は、模擬燃料棒の変位(入力データの問題)だけでは説明はつかず、解析モデルの影響の大きいことがわかつた。

本研究は、核燃料サイクル開発機構と日本原子力研究所の共同研究「伝熱試験体の X 線 CT 装置によるバンドル内部構造測定」により実施した研究成果である。

東海研究所：〒319-1195 茨城県那珂郡東海村白方白根 2-4

* 外来研究員、* 核燃料サイクル開発機構

Rod Displacement Measurements by X-ray CT and its Impact on Thermal-hydraulics in Tight-lattice
Rod Bundle
(Joint Research)

Toru MITSUTAKE[※], Kozo KATSUYAMA^{*}, Takeharu MISAWA, Tsuyoshi NAGAMINE^{*},
Masatoshi KURETA, Shinichiro MATSUMOTO^{*} and Hajime AKIMOTO

Department of Nuclear Energy System
Tokai Research Establishment
Japan Atomic Energy Research Institute
Tokai-mura, Naka-gun, Ibaraki-ken

(Received April 6, 2005)

In tight-lattice simulated rod bundles with about 1mm gap between rods, a rod displacement might affect thermal-hydraulic characteristics since the displacement has a strong impact on the flow area change along the heated section. It should be important to estimate how large the rod position displacement could quantitatively affect critical power for the tight-lattice rod bundle from the point of improvement of prediction capability of subchannel analysis. In the present study, the inside-structure observation of the simulated seven-rod bundle of Reduced Moderation Water Reactor (RMWR) was made through the whole length of the test assembly. Based on the measured rod position data, the relation between the rod position displacement and the heat transfer characteristics was investigated experimentally and through the two kinds of subchannel analysis, the nominal rod position case and the measured rod position case, the effect on the predicted critical power was estimated. The high-energy X-ray computer tomography (CT) of Fuels Monitoring Facilities (FMF) at the O-arai Engineering Center in Japan Nuclear-Cycle Institute (JNC) was applied for the inside-structure observation of the test assembly.

The CT view of the cross sections within the test assembly assured the hexagonal rod position arrangement was almost the same as expected by design. The measured data with the X-ray CT facility showed that all rod displacements were small, 0.5 millimeters at maximum and 0.2 millimeters in average.

In the heat transfer experiments for the seven-rod bundle, the boiling transition (BT) position and the rod surface temperature behavior was measured. All thermocouples on the center rod downstream from the BT-onset axial height showed almost simultaneous temperature increase due to BT. And the thermocouples located on the same axial heights showed quite similar time-variation behaviors in the vapor cooling heat transfer regime. These results demonstrated the effect of the geometrical asymmetry was small on the heat transfer characteristics.

This program has been performed under joint study between JNC and JAERI.

[※]On leave from Toshiba

^{*}Japan Nuclear Cycle Development Institute

Using the displacement magnitude and direction of the rod center based on the X-ray CT measurements, the flow area and equivalent hydraulic diameter on subchannel basis and rod-rod and rod-shroud clearances were calculated. The subchannel analysis was made using the input data with the CT measured results of the rod positions. The calculated critical power with the CT measured rod position was smaller by about 5% than that with the designed rod position and still overestimated the measured critical power by about 25%. It concluded that the error in the calculated critical power with subchannel analysis was attributable not to the asymmetry in the rod position, but to the thermal-hydraulic models implemented in the subchannel analysis code.

Keywords: RMWR, Critical Power, X-ray Computer Tomography, Rod Displacement, Subchannel Analysis

This is a blank page.

目 次

1. 緒言-----	1
2. X 線 CTによる測定-----	2
2.1 X 線 CT試験体の主要構造-----	2
2.2 撮像位置の選定-----	2
2.3 模擬燃料棒位置の変位評価-----	3
3. 模擬燃料棒位置変位によるサブチャンネル流路寸法の変化-----	4
3.1 サブチャンネル流路寸法の計算方法-----	4
3.2 サブチャンネル流路面積、サブチャンネル間ギャップの計算結果-----	5
4. 模擬燃料棒位置変位の及ぼす限界出力への影響-----	6
4.1 X 線 CT 試験体を用いた伝熱実験-----	6
4.1.1 伝熱実験の測定結果-----	7
4.1.2 BT 発生位置-----	8
4.1.3 沸騰遷移後の模擬燃料棒表面温度挙動-----	8
4.2 稠密格子体系の限界出力予測誤差の原因検討-----	10
4.2.1 従来のサブチャンネル解析予測結果-----	10
4.2.2 模擬燃料棒位置の変位を考慮したサブチャンネル解析-----	11
4.2.3 今後の課題-----	13
5 結論-----	15
参考文献 -----	16
記号表-----	17
付録	
A. 模擬燃料棒間隔の変化、模擬燃料棒とシュラウド間隔の変化-----	49
B. 7 本バンドル伝熱実験 模擬燃料棒最高表面温度測定結果 -----	52

Contents

1. Introduction-----	1
2. Measurement by X-ray CT-----	2
2.1 Seven-rod Bundle Test Assembly Structure -----	2
2.2 Selection of CT Measurement Position -----	2
2.3 Measurement Results of Rod Center Position Displacement-----	3
3 Calculation of Subchannel Geometries Due to Rod Displacement-----	4
3.1 Calculation Method of Subchannel Geometries-----	4
3.2 Subchannel Flow, Hydraulic Diameter and Gap between Subchannels -----	5
4 Effect of Rod Displacement on Critical Power -----	6
4.1 Heat Transfer Experiment for Seven-rod Test Assembly -----	6
4.1.1 Experimental Results-----	7
4.1.2 Boiling Transition Occurrence Position-----	8
4.1.3 Rod Surface Temperature beyond Boiling Transition Conditions-----	8
4.2 Investigation of Prediction Error for Tight-lattice Critical Power-----	10
4.2.1 Previous Subchannel Analysis Results for Tight-lattice Critical Power -----	10
4.2.2 Subchannel Analysis with Rod Displacement-----	11
4.2.3 Issues to be Solved-----	13
5 Conclusion-----	15
Reference -----	16
Nomenclature -----	17
 Appendix	
A. X-ray CT Measurement Results of Rod-rod and Rod-shroud Clearance-----	49
B. Highest Temperature Measured Results in 7-rod Bundle Heat Transfer Experiments-----	52

図表リスト

表 2.1 JNC 高エネルギーX線 CT 装置の仕様

表 2.2 X線 CT撮像結果に基づくロッドの変位の大きさと向き 全数値化処理結果

図 2.1 7本バンドル試験体の主要部構造図

図 2.2 伝熱試験体撮像位置

図 2.3 撮像用の7本バンドル試験体下部の構造・寸法

図 2.4 撮像用の7本バンドル試験体解体図

図 2.5 X線 CT撮像結果 撮像位置⑥、⑧

図 3.1 ロッド中心位置変位によるサブチャンネル流路面積変化の計算方法

図 3.2 サブチャンネル分割とサブチャンネル番号 1～24

図 3.3 サブチャンネル分割とギャップ番号 1～30

図 3.4 中心ロッド周りのサブチャンネル流路面積変化、ギャップ幅変化 X線 CT測定結果

図 3.5 断面内のロッド位置測定結果の例 軸方向高さ 370 mm

表 4.1 精密格子模擬 7本バンドルの2つの試験体

図 4.1 7本バンドル伝熱実験 熱電対取り付け位置

図 4.2 伝熱実験測定結果(1) 中心ロッドと外周ロッド L₁、L₆、軸方向位置 970 mm圧力 7.2 MPa, 質量流束 400 kg/m²s図 4.3 伝熱実験測定結果(2) 中心ロッドと外周ロッド L₆、軸方向位置 970 mm 圧力 7.2 MPa,
質量流束 200 kg/m²s図 4.4 伝熱実験測定結果(3) 中心ロッドと外周ロッド L₆、軸方向位置 970 mm 圧力 7.2 MPa,
質量流束 100 kg/m²s図 4.5 沸騰曲線測定結果(1) 軸方向位置 970 mm 圧力 7.2 MPa, 質量流束 400 kg/m²s図 4.6 沸騰曲線測定結果(2) 軸方向位置 970 mm 圧力 7.2 MPa, 質量流束 200 kg/m²s図 4.7 沸騰曲線測定結果(3) 軸方向位置 970 mm 圧力 7.2 MPa, 質量流束 100 kg/m²s図 4.8 温度上昇の生じた熱電対位置のまとめ 圧力 7.2 MPa, 質量流束 100, 200, 400 kg/m²s図 4.9 BT 後の模擬燃料棒表面温度測定結果 中心ロッド周方向角度の依存性 圧力 7.2 MPa,
質量流束 400 kg/m²s図 4.10 BT 後の模擬燃料棒表面温度測定結果 中心ロッド周方向角度の依存性 圧力 7.2 MPa,
質量流束 200 kg/m²s

図 4.11 BT 後の模擬燃料棒表面温度測定結果 中心ロッド周方向角度の依存性 圧力 7.2 MPa,

質量流束 $100\text{kg/m}^2\text{s}$

- 図 4.12 稠密格子模擬 7 本バンドルの 2 つの試験体軸方向出力分布
- 図 4.13 限界出力測定値と解析との比較 その 1
- 図 4.14 限界出力測定値と解析との比較 その 2
- 図 4.15 模擬燃料棒変位の限界出力予測(サブチャンネル解析)に及ぼす影響 模擬燃料棒位置を
設計値で評価した場合と X 線 CT 実測値で評価した場合
- 図 4.16 クオリティ、全質量流束、液膜質量流束の軸方向分布 サブチャンネル No.24
中心ロッドピーク径方向出力分布、圧力 7.2MPa , 質量流束 $400\text{kg/m}^2\text{s}$ 模擬燃料棒位置
変位あり
- 図 4.17 径方向サブチャンネルごとの冷却材分布計算値軸方向高さ 980mm 径方向中心ロッドピー
ク出力分布、圧力 7.2MPa , 質量流束 $400\text{kg/m}^2\text{s}$

Captions of Figures and Tables

Table 2.1 Specification of High-energy X-ray CT Facility in JNC

Table 2.2 All Numerical Data of Rod Center Displacement and Direction Based on X-ray CT Imaging Data

Fig.2.1 Main Structure of 7-rod Test Assembly Specimen for Imaging

Fig.2.2 X-ray CT Imaging Position for Test Assembly

Fig.2.3 Geometry and Structure of Lower Part of 7-rod Test Assembly Specimen for Imaging

Fig.2.4 Geometry and Structure of Main Component of 7-rod Test Assembly

Fig.2.5 X-ray CT Imaging Pictures at Imaging Positions ⑥, ⑧

Fig.3.1 Illustration of Calculation Procedures for Subchannel Flow Area in 7-rod Test Assembly with Rod Displacement

Fig.3.2 Subchannel Configuration for 24 Sunchannels

Fig.3.3 Inter-subchannel Gap Configuration of 30 Gaps

Fig.3.4 Measured Results of Subchannel Flow Area, Hydraulic Diameter and Gap Width Variation along Axial Direction on the Center Rod

Fig.3.5 Measured Rod Arrangement Result at Axial Height 370 mm

Table 4.1 Two Kinds of 7-rod Test Assemblies

Fig. 4.1 Thermocouple Configuration in 7-rod Test Assembly

Fig. 4.2 Heat Transfer Experiment Results(1), Center Rod and Peripheral Rod L₁ and L₆, 970 mm in Axial Height, 7.2MPa Pressure, 400kg/m²s Mass flux

Fig.4.3 Heat Transfer Test Results(2) : Center Rod and Peripheral rod L₆, 970 mm in Axial Height, 7.2MPa Pressure, 200kg/m²s Mass flux

Fig. 4.4 Heat Transfer Test Results(2) : Center Rod and Peripheral Rod L₆, 970 mm in Axial Height, 7.2MPa Pressure, 200kg/m²s Mass flux

Fig.4.5 Boiling Curve Results(1): 970 mm in Axial Height, 7.2MPa Pressure, 400kg/m²s Mass Flux

Fig.4.6 Boiling Curve Results(2): 970 mm in Axial Height, 7.2MPa Pressure, 200kg/m²s Mass Flux

Fig. 4.7 Boiling curve results(3): 970 mm in Axial Height, 7.2MPa Pressure, 100kg/m²s Mass

Flux

Fig.4.8 Summarized Results of Boiling Transition Occurrence Positions, 7.2MPa Pressure, 400, 200 and 100 kg/m²s Mass Flux

Fig. 4.9 Post Boiling Transition Rod Surface Temperature Results for Azimuthal Variation, 7.2MPa Pressure, 400 kg/m²s Mass Flux

Fig. 4.10 Post Boiling Transition Rod Surface Temperature Results for Azimuthal Variation, 7.2MPa Pressure, 200 kg/m²s Mass Flux

Fig. 4.11 Post Boiling Transition Rod Surface Temperature Results for Azimuthal Variation, 7.2MPa Pressure, 100 kg/m²s Mass Flux

Fig.4.12 Axial Power Distributions for Two Kinds of 7-rod Test Assemblies

Fig.4.13 Comparison of Subchannel Analysis and Experiment (1)

Fig.4.14 Comparison of Subchannel Analysis and Experiment (2)

Fig. 4.15 Critical Power Prediction Results with and without Rod Displacement by Subchannel Analysis

Fig. 4.16 Calculated Axial Distribution of Quality, Mass Flux and Liquid Film Flux: Subchannel No.24 for Radially Center-rod Peaked Distribution with Rod Displacement, Pressure 7.2 MPa, Mass flux 400kg/m²s

Fig. 4.17 Calculated Radial Distribution of Quality, Mass Flux and Liquid Film Flux: 980mm in Axial Height, Radially Center-rod Peaked Distribution, 7.2MPa Pressure, 400kg/m²s Mass flux

1. 緒 言

バンドル形状の伝熱試験体では、模擬燃料棒の3次元的な配置を定量的に測定することは技術的にむずかしいことから、模擬燃料棒は設計通りの位置にあることを想定した実験評価がなされてきた。しかしながら、低減速炉⁽¹⁾炉心模擬の試験体では模擬燃料棒と模擬燃料棒の間隙が1mm程度と狭いため、わずかな変位でも流路面積の変化が大きくなり、伝熱特性に影響を及ぼす恐れがある。過去の炉心燃料開発においても、燃料棒を三角格子状に配列した7本バンドル・37本バンドルにおいて、幾何形状変化の及ぼす限界出力への影響の解明は課題のひとつとなっており、燃料バンドルと容器との偏心、ロッド曲がりの影響に関する実験と解析による評価がなされている^{(2)~(7)}。また、稠密格子体系の除熱限界(熱的限界出力)を評価するサブチャンネル解析結果によると、限界出力は実験結果に比べて約30%から40%程度高く予測され^{(8)~(10)}、その誤差の原因として、(1)解析モデルの稠密格子体系への適用性 (2)設計通りの燃料棒位置を基準とする仮定の2点が考えられていた。一方、バンドル体系の伝熱試験体が設計通り据え付けられていることを定量的に確認することは、実験の信頼性の確認という観点から重要と考えられる。そこで、本研究では、7本バンドル低減速炉炉心模擬燃料集合体⁽¹¹⁾⁽¹²⁾に対して、断面内の模擬燃料棒配置を実測し、各模擬燃料棒中心位置の変位と伝熱特性との関係について実験的に検討すると共に、サブチャンネル解析結果に及ぼすロッド位置変位の影響を評価した。

測定は、核燃料サイクル開発機構(以下、サイクル機構)大洗工学センター照射燃料集合体試験施設の高エネルギーX線CT検査装置⁽¹³⁾を用いて行い、測定結果に基づき、各模擬燃料棒中心位置の変位と伝熱特性との関係について検討した。具体的な課題を以下に示す。

1. 有効発熱部全長(1.26m)に対して、2次元燃料棒配列を多数の高さ位置で撮像する。
2. 画像を数値化処理することにより断面内の燃料棒位置を高分解能で評価する。
3. 燃料棒位置の変位と試験体の伝熱特性との関係について検討評価する。

上記、1.と2.に関しては、文献⁽¹⁵⁾に述べているが、本報でも2章に主要な結果を提示する。本報では、それに引き続き、低減速炉炉心模擬燃料集合体(7本バンドル)に対して、断面内の模擬燃料棒配置を実測した結果に基づき、各模擬燃料棒中心位置の変位と伝熱特性との関係について実験的に検討すると共に、燃料棒位置がノミナル位置からの変位を測定した結果に基づいてサブチャンネル解析を行い、限界出力測定値と比較し、測定値と計算値との偏差がどれだけ改善されるかを評価する。

2. X 線 CTによる測定

長尺・大重量の金属容器に入った模擬バンドルの内部構造を、非破壊的に定量的かつ正確に測定する手段としては、高エネルギーX線CT検査装置が唯一と考えられる。長尺の試験体を検査可能な設備は、国内ではサイクル機構大洗工学センター照射燃料集合体試験施設にあり、高速炉燃料集合体（127本、169本）の撮像を対象とする装置である⁽¹³⁾。本試験施設は、通常、実炉で照射した燃料集合体を扱うホットラボであるが、試験体を汚染なしに持ち込み・持ち出す技術、施設内搬送手順、必要な治工具類を検討した結果、汚染なしに持ち出す確実な手順が確立された。

7本バンドル試験体(長さ約2.4m、外径約70mm)は、フローシュラウド容器(対角長さ43mm)に収納されており、鉄換算の透過厚さが60mm以上と厚いことから、高エネルギーX線CT装置により内部のロット配列を精度よく観察できるかどうか、確認する必要がある。そこで、予備試験として、短尺の7本バンドルをX線CT装置で断面構造を撮像した。その結果、画像を数値化処理することにより、燃料棒中心位置(ロッド位置)のノミナル位置からの偏差(ロッド位置の変位)と偏差の向きを精度よく評価することができる事が確認された。

以上の予備的検討・評価に基づいて、7本バンドル試験体の内部を高エネルギーX線CT装置を用いて撮像することとした。表2.1に測定に用いたX線CT装置の仕様をまとめる⁽¹³⁾。

2.1 X線CT試験体の主要構造

図2.1に、撮像区間の7本バンドル試験体の主要部構造図を示す。フローシュラウドは外形が円、内形が六角格子形状であり、7本の模擬燃料棒は流路詳細図に示すように、7ヶの六角形セルの中心に配置されている。フローシュラウドは高さの異なる13ヶ(110~190mm)の要素が段積みによって組み立てられ、そのつなぎ部は、内側流路が面一になるように設計されている。フローシュラウドと一体化した7ヶのスペーサ(六角セル型)は、軸方向間隔200~300mmで配置され、模擬燃料棒と模擬燃料棒との間のクリアランスを保持している。

CT撮像は、有効発熱部1260mmを含む長さ約1980mmの区間にて、高熱流束部を中心として全76断面について行った。

2.2 撮像位置の選定

撮像された断面の位置を図2.2に示す。撮像是軸方向150mmの粗い間隔、および軸方向10mmの短い間隔の2種類で行った。軸方向10mmピッチの撮像区間は、伝熱実験で沸騰遷移(以下、BT)を観察した位置(上部MOX出口)とそれを含む高熱流束部を挟むスペーサとスペーザの間の区間(300mm)およびその上流側の低熱流束部を挟むスペーザとスペーザの間の区間(210mm)、軸方向150mmピッチの撮像区間は試験体全長にわたって、燃料棒位置を支持するスペーザ部と、スペーザ部から最も遠く離れているため、模擬燃料棒の変位が大きいと予想されるスペーザとスペーザの中間位置とした。

図2.3に、撮像用7本バンドル試験体の下部構造を示す。図中に高さ位置の原点と周方向の位置決めを行うために取り付けた金属管を示す。図2.4に、撮像用の7本バンドル試験体解体図を

示す。試験体は模擬燃料棒配置を保持するため、上部はシュラウドと下部は試験容器と一体化した状態で取り外し、外形が所定サイズ以下となるように配管・計装ノズル等を切断加工した。試験体は、撮像容器の中で上下反対の向きにすえつけられるので、図の左が下、右が上となる。撮像時の高さ位置は最下部のスペーサ下端を原点としたが、その位置は有効発熱部上端より約 500 mm 下方である。

2.3 模擬燃料棒位置の変位評価

CT 画像の例を図 2.5 に示す。撮像位置はスペーサ間中央の位置で、高さは図 2.2 の⑥と⑧である。図中、白く見える部分は、外側から、SUS 製の試験内筒(シュラウド)、模擬燃料棒被覆材(インコネル)、被覆材の内側に灰色に見える半月状の部分は発熱体(ニクロム合金)である。

CT 画像を数値化処理して得られた、模擬燃料棒 7 本の燃料棒中心位置変位と変位の向き(角度)を、有効発熱部の 68 断面について表 2.2 にまとめる。表中、軸方向高さは試験体が試験部に据え付けられた状態における有効加熱部開始端(BOH)を原点として、伝熱実験における下流側を正、BOH より上流側を負として表示した。

模擬燃料棒中心位置の評価方法は次の通りである⁽¹³⁾。

フローシュラウド内側形状の近似関数(多角形)を求め、フローシュラウド位置情報(中心座標、回転角)に基づいて燃料棒中心座標のノミナル位置を求める。次に、燃料棒外形の近似関数を求め、燃料棒中心座標に基づいて燃料棒中心位置の変位量を求める。

模擬燃料棒中心位置座標から求めた燃料棒間の最小クリアランス、および燃料棒とシュラウド内壁との間の最小クリアランスのノミナル位置からの変化を軸方向に沿って付録 A に図示した。

3. 模擬燃料棒位置変位によるサブチャンネル流路寸法の変化

模擬燃料棒中心位置(ロッド位置)の変位が伝熱特性へ及ぼす影響を検討するためには、隣り合う燃料棒位置変位の向きを考慮した評価を行う必要がある。隣り合う燃料棒が互いに近づくように変位する場合には、0.2mm程度の微小変位でも燃料棒に囲まれる流路が狭くなり、伝熱特性に重要な影響を及ぼすが、ランダムな向きに変位する場合には3本の燃料棒が同時に互いに近づく確率は小さいため、伝熱特性への影響は小さいと考えられる。

そこで、X線CT画像の数値化処理によって求められた燃料棒中心位置の測定結果に基づいて、バンドルの断面内をサブチャンネルごとに区切った流路の面積変化等を計算した。本章では、燃料棒周りのサブチャンネルの形状寸法を求める計算方法、サブチャンネル流路面積・水力直径・サブチャンネル間ギャップの計算結果を示す。

3.1 サブチャンネル流路寸法の計算方法

模擬燃料棒中心位置の測定結果から、燃料棒周りのサブチャンネルの形状寸法を以下の方法により求めた。図3.1に、燃料棒位置変位の大きさと変位の向きから燃料棒周りの流路面積、水力直径等の流路形状を計算する方法を図解した。計算では、燃料棒を囲む正六角形(仮想セル)と燃料棒に囲まれた流路を周方向60°毎に分割して1単位とした。

ロッドHの中心位置を原点とする座標系に基づいて、各燃料棒の中心、正六角形の頂点の座標を定める。次に、各線分の長さ $L_1P_1(s)$, L_1Q_1 , L_1Q_2 と線分のなす角度 α , β , θ_α , θ_β [°]を求め、それらに基づいて、燃料棒の中心位置と六角形の頂点 P_i ($i=1,6$)を三角形の2頂点とする2つの三角形の面積 S_α , S_β を次式のように算出する。ここで、 s は燃料棒中心位置と六角形の頂点までの長さを示す。

$$S_{\Delta\alpha} = s^2 \frac{\sin(\theta_\alpha \frac{\pi}{180}) \sin(\alpha \frac{\pi}{180})}{\sin((\theta_\alpha + \alpha) \frac{\pi}{180})} \times \frac{1}{2} \quad (1)$$

$$S_{\Delta\beta} = s^2 \frac{\sin(\theta_\beta \frac{\pi}{180}) \sin(\beta \frac{\pi}{180})}{\sin((\theta_\beta + \beta) \frac{\pi}{180})} \times \frac{1}{2} \quad (2)$$

各三角形に含まれる燃料棒の占める部分 Δ_α , Δ_β を差し引いて、流路面積 S_α , S_β を求める。

$$S_\alpha = S_{\Delta\alpha} - \Delta_\alpha \quad (3)$$

$$S_\beta = S_{\Delta\beta} - \Delta_\beta \quad (4)$$

$$\Delta_\alpha = \pi D_{rod}^2 \times \frac{\theta_\alpha}{360} \quad (5)$$

$$\Delta_\beta = \pi D_{rod}^2 \times \frac{\theta_\beta}{360} \quad (6)$$

三角形に含まれる燃料棒とシュラウドのぬれふち長さより水力直径 D_H を計算する。

$$P_{fa}^{rod} = \pi D_{rod} \times \frac{\theta_\alpha}{360} \quad (7)$$

$$P_{fa}^{schroud} = s \times \sin(\theta_\alpha \frac{\pi}{180}) \quad (8)$$

$$D_{H\alpha} = \frac{4 \times S_\alpha}{P_{fa}} \quad (9)$$

ロッド L₁ の場合、六角形の頂点 P₁～P₃、P₆ はシュラウド壁上の点であり、P₄、P₅ は仮想セル上の点である。六角形の頂点 P₁～P₆ と燃料棒との最小ギャップ部で囲まれる三角形(2 角夾辺:s, θ_α, α と s, θ_β, β)の面積から、燃料棒の占める扇形(中心角 θ_α と θ_β)の面積を差し引いて、流路面積を算出する。

評価結果の妥当性は、変位がない場合の六角セル内の面積と、変位があった場合のサブチャンネル面積の和が等しいことなどにより確認した。

ロッド 1-ロッド 2 の最小間隙 b₁₋₂ は、燃料棒中心同士を結ぶ線分と仮想セルとの交点までの距離 b_α などから次式のように求める。

$$b_\alpha = s \times \cos(\theta_\alpha \frac{\pi}{180}) - \frac{D_{rod}}{2} \quad (10)$$

$$b_{1-2} = b_{\alpha 1} + b_{\alpha 2} \quad (11)$$

図 3.1 に示した撮像位置④の場合、ロッド L₁ はロッド L₂ の向き(203°)、ロッド H、ロッド L₆ は共に右向き(それぞれ 14°、337°)に変位していたから、ロッド L₁ 周りの流路面積は頂点 P₃ の側の流路面積が最小、水力直径はシュラウド壁に面する P₁, P₂ の側が最小となる。

3.2 サブチャンネル流路面積、サブチャンネル間ギャップの計算結果

図 3.2、図 3.3 に、燃料棒-燃料棒、燃料棒-シュラウド間の最小間隙を境界とする標準サブチャンネル分割によるサブチャンネル番号、サブチャンネル間のギャップ部の番号を示す。

ロッド H、ロッド L₁～L₆ 周りのサブチャンネル流路面積変化、水力直径変化、燃料棒燃料棒または燃料棒シュラウド間の最小間隙(ギャップ)をノミナル値で規格化した。中心ロッド周りのサブチャンネル No.1～6 の流路面積変化、およびギャップ No. 1～6 のギャップ幅の軸方向変化を図 3.4 に示す。図 3.4(1)に示すように中心ロッド周りのサブチャンネル No.1～6 の流路面積はノミナル値の±20% の範囲にあった。また、個々のサブチャンネルの変化の特徴は、サブチャンネル No.1～4 は下半分で流路面積が狭く、上半分で流路面積が広くなる傾向を示し、他のサブチャンネル No.5、No.6 ではノミナル値を中心に小さな変化を示した。

模擬燃料棒位置変位による模擬燃料棒外径の位置を描画して図 3.5 に示す。図示した軸方向位置は軸方向高さ 370 mm で中心ロッド周りの流路面積が顕著な位置である。図より、中心ロッド H の位置はノミナル位置にあるが、外周ロッド L₁, L₂, L₃, L₄ が中心ロッド側に変位し、その結果、左斜め上 135°、左斜め下 225° の向きの流路が狭まっていることがわかる。また、外周ロッド L₅, L₆ はシュラウド側に変位し、シュラウド側のクリアランスが減少していた。

4 章では、これらの結果と、伝熱実験の BT 発生位置を対応させることにより、燃料棒位置の変位が及ぼす影響について検討する。

4. 模擬燃料棒位置変位の及ぼす限界出力への影響

X線CTによる測定を行った7本バンドル試験体を用いた伝熱実験では、BT後(ポストBT)も出力を保持して温度上昇を許容し、BT発生位置とポストBT時の模擬燃料棒表面温度挙動を観察した。模擬燃料棒の設計上の配置には断面内に60°の回転対称性があることから、BT発生位置や模擬燃料棒表面温度挙動測定結果の対称性を調べることによって、模擬燃料棒位置変位の影響について検討する。次に、今回測定した模擬燃料棒位置の実測値に基づくサブチャンネル流路面積等の入力データを用いて、上記伝熱実験解析を行い、BT発生位置や限界出力について測定値と比較する。

以上の結果に基づいて、限界出力の予測誤差に及ぼす燃料棒位置変位の及ぼす影響を評価すると共に、サブチャンネル解析の今後の課題をまとめる。

4.1 X線CT試験体を用いた伝熱実験

試験条件は、圧力7.2MPa、質量流束100、200、400kg/m²s、入口サブクール度5K、径方向出力分布は中心ロッドの出力係数(中心ロッド出力／平均ロッド出力)を1.33とした中心ロッドピーク出力分布、軸方向出力分布は図に示す軸方向に2つのピークのある二重炉心模擬(double-humped)である。

実験では、所定の圧力、入口流量、入口温度条件に設定の後、燃料棒表面に取り付けた熱電対の信号を監視しながら、7本バンドルの出力を小さなステップ幅で増加させた⁽¹²⁾。

図4.1に7本バンドル伝熱試験体の軸方向5ヶ所の径方向熱電対取り付け位置を示す。

図4.2～図4.4にループ状態量の入口/出口圧力、入口流量、入口温度、中心ロッド出力、外周ロッド出力、および代表的な熱電対測定値の時間変化を示す。本実験では、試験体保護のためのトリップ設定温度を500°Cと通常より高めに設定し、BTによる温度上昇が開始しても、さらに出力を増加させ、多数の熱電対で温度上昇を観察する多重CHF実験⁽¹⁴⁾を行なった。これにより、BTした位置とBTしない位置を明確に判別することを試みた。

今回の実験では、低質量流束100kg/m²sの条件を除いて、軸方向高さ970mm(Z3)の外周ロッドで最初の温度上昇が始まり、中心ロッドや下流側で温度上昇を示したが、より上流の軸方向高さ840mm(Z2)の最大熱流束位置では、熱電対の温度上昇は観察されなかった。

図4.5～図4.8に、熱電対測定結果を壁面過熱度 ΔT_{wall} と局所表面熱流束 q'' との関係で整理した結果を示す。図に示すように、熱流束一定条件における温度上昇に着目することにより、BTを明確に判定することができる。出力増加によってBT発生による温度上昇が生じるまでの熱伝達様式の変化は、主として以下のようにまとめることができる。

- 1) 出力増加と共に壁面過熱度が直線的に増加(核沸騰様式)
- 2) さらに出力を増加させると壁面過熱度が減少またはほぼ一定
- 3) 熱流束一定の条件での壁面過熱度の急増(沸騰遷移)

上記の2)の出力増加に対して壁面過熱度が低下し、熱伝達率が増加する変化は、文献^{(16)～(20)}にも報告され、BTの前兆現象として知られているが、メカニズム等は十分解明されていない。壁

面過熱度の低下は、BT 熱流束の 84%～93%の熱流束で生じ、低下幅は 1～2K 程度であった。本試験条件における BT 前の壁面過熱度の低下は、ロッド位置は中心ロッド、外周ロッド、質量流束は 100,200,400kg/m²s のいずれでも観察された。

入口質量流束の異なる試験ケースごとに、熱電対測定結果を BT 発生位置に着目して整理した。

4.1.1 伝熱実験の測定結果

(1) 質量流束 400 kg/m²s のケース

図 4.2 の熱電対測定値の時間変化より、軸方向高さ 970 mm (Z3)の熱電対位置における断面内の BT 位置は中心ロッド周りの 3ヶ所の熱電対 H-1, H-4, H-10 と外周ロッド L₁, L₂, L₆ のシュラウド側 L₁-2, L₂-1, L₆-10 であり、他の熱電対位置の温度上昇は観察されなかった。

文献⁽⁸⁾⁽⁹⁾で BT 判定に用いた壁面過熱度上昇 20K を越えた熱電対位置は、中心ロッド周りの H-1, H-4 であり、表面温度は H-4 で最高 450°C に達した。外周ロッド周りでは、L₁-2, L₆-10 であり、L₁-2 では最高 370°C に達した。間欠的な温度上昇は、最初に外周ロッドの熱電対位置 L₁-2(出力 106.4kW)、次に L₆-10(出力 110.2kW)で発生した。中心ロッド周りの熱電対 H-4 では 3番目に出力 113.3kW で温度上昇が生じ、出力 116.2kW で最高温度 450°C に達した。それは最初の温度上昇から約 9%高い出力であり、壁面過熱度上昇が発生してから高温に達するまでに余裕のあることを示すものである。

また、沸騰曲線で整理した図 4.5 の結果によると、中心ロッド周りの熱電対位置では熱電対位置 H-10 を含む 3ヶ所すべてにおいて、熱流束がほぼ一定の状態で壁面過熱度が上昇する熱伝達の遷移状態(BT)に達していることを示した。外周ロッドでは、シュラウド側の L₁-2, L₆-10 で BT したが、中心ロッド側 L₆-4 では BT までまだ余裕があることを示した。

また、壁面過熱度は、外周ロッドの方が中心ロッドに比べて高かった。外周ロッドの BT 発生以前の壁面過熱度は、L₆-10(12K)>L₆-4>L₁-2(7K)と最高 10K を越え、中心ロットの 5～6K に比べて高かった。高クオリティ条件での核沸騰熱伝達率 h_{TP} は、多数の実験相関式の関数形より、次式のように書けることが知られている^{(16)～(18)}。

$$h_{TP} \propto h_L \cdot (x)^b \quad (12)$$

$$h_L \propto (\text{Re}_L)^a \quad (13)$$

$$\text{Re}_L = \frac{G(1-x)D_H}{\mu_f} \quad (14)$$

ここで、 h_L は液相による強制対流熱伝達率、 x はクオリティ、 Re_L は液単相レイノルズ数、 a, b は正の定数とする。(12),(13)式より、 h_{TP} は、流量が大きいほどまたクオリティが大きいほど、大きくなることを示している。外周ロッドのシュラウド側で壁面過熱度が大きく熱伝達率が小さいことは、中心ロッド周りに比べて低質量流束、低クオリティであったと推定できる。

(2) 質量流束 100,200kg/m²s のケース

図 4.6、図 4.7 より壁面過熱度上昇が生じた熱電対位置は、質量流束 200kg/m²s では中心ロッド周りと外周ロッドのシュラウド側 L₁-2, L₅-6, L₆-10、質量流束 100kg/m²s では中心ロッド

ド周りと外周ロッドのシュラウド側 L₁–2、L₄–4、L₆–10 と中心ロッド側 L₄–11 で温度上昇が生じた。

4.1.2 BT 発生位置

図 4.5～図 4.7 の沸騰曲線平面により BT が生じた熱電対位置を判定して図 4.8 にまとめる。BT 発生は、図 4.5～図 4.7 より核沸騰域で壁面過熱度ほぼ一定の状態から、熱流束一定の条件で壁面過熱度が上昇する状態を基準として判定した。

断面内の BT 発生位置の広がりについて、以下にまとめる。

- (1) 中心ロッド H の周りでは、軸方向高さ Z3～Z5(加熱端)の区間で取り付けた熱電対のすべてでほぼ同時刻に BT が発生し、ほぼ全周に及んでいたと考えられる。
- (2) 外周ロッドのシュラウドに面する側では、軸方向高さ Z3 で 5 本の外周ロッドで BT が生じた。軸方向高さ Z4 では 1 本のロッド(L₅–10)で BT が生じた。

以上より、中心ロッド周りでは取り付けた熱電対のすべてで BT が発生し、外周ロッドのシュラウド側では、軸方向高さ Z4 で 1 本のロッドだけで BT が生じたが、最初に BT が生じた軸方向高さ Z3 では全 6 本中 5 本で BT が生じた。

以上のように、断面内での BT 位置の広がりを調べた結果、非対称性は小さかったことから、X 線 CT で測定された模擬燃料棒配置の変位の影響は小さかったと考えられる。これは二重管流路でのロッド位置の偏りの影響が低質量流束条件で小さくなる⁽²¹⁾⁽²²⁾という従来知見と矛盾しない結果と考えられる。

4.1.3 沸騰遷移後の模擬燃料棒表面温度挙動

前節では、模擬燃料棒配置の非対称性が伝熱特性へ及ぼす影響として、沸騰遷移発生位置を調べたが、本節では、沸騰遷移後のロッド表面温度測定結果について調べる。

図 4.9～図 4.11 に、質量流束 400、200、100 kg/m²s 条件における、本試験条件の中心ロッド周りの主な熱電対測定結果を壁面過熱度 $\Delta T_{wall} = T_{wall} - T_{sat}$ に整理して示す。図中に示した「BT」は温度上昇が BT 判定基準を超えた時点を示し、バンドル出力曲線に示した「BT onset」は熱電対が最も早く BT を検知した時点を示す。付録 B に熱電対が測定した最高壁面過熱度を軸方向断面位置ごとに示す。

図に示した熱電対の軸方向高さ位置は 2 ヶ所、中心ロッドに設置された熱電対は以下に示す通りである。

- (a) 下流部の軸方向高さ 1030 mm(Z4)、スペーサ位置 : H–2, H–7
- (b) 加熱端の軸方向高さ 1255 mm(Z5) : H–8, H–9, H–11

上記の(1)、(2)の熱電対は、中心ロッドの円周方向に角度の異なる位置に取り付けられているので、測定結果の差異は円周方向の変化を示すものである。軸方向高さ Z4 では、ロッドギャップ部の狭い流路に面する熱電対(H–2)と広い流路に面する熱電対(H–7)、軸方向高さ Z5(加熱端)では、ロッドギャップ部の狭い流路に面する熱電対(H–8)と広い流路に面する熱電対(H–9, H–11)である。

(1) 質量流束 $G=400\text{kg/m}^2\text{s}$

最も高い質量流束 $G=400\text{kg/m}^2\text{s}$ の条件において、加熱端(Z5)の熱電対 H-8, H-9, H-11 は、300°C以上でなめらかな温度挙動を示しており、その挙動から液膜ドライアウト後の蒸気冷却の伝熱状態にあると考えられる⁽²⁴⁾。また、ロッドギャップ部の狭い流路に面する熱電対 H-8 の温度レベルが広い流路に面する他の 2 つの熱電対 H-9, -11 に比べて約 5K 高かった。このことは、狭い流路に面する流路の熱伝達率が低く、(12)～(14)式に示したように、低質量流束・低クオリティであることを示すと考えられる。また、3ヶ所すべての熱電対位置で一体的挙動を示したことから、中心ロッド周りの流動状態は 75° 以上の円周上に沿って蒸気冷却状態にあったと推定できる。

軸方向高さ 1030 mm(Z4)に設置された熱電対 H-2, H-7 は、間欠的なドライアウトと思われる三角波状の上昇下降を繰り返しながら 300°C以上の高温レベルを維持していたが、両者は同じ挙動を示した。このように、軸方向高さ 1030 mm 以上加熱端までにおいて、中心ロッド表面は BT 状態にあった。また、本実験で設置した全熱電対がほぼ同じ挙動を示したことから、中心ロッド円周方向に特異的な挙動は観察できなかった。しかし、本試験条件では、軸方向高さ 970 mm(Z3)の中心ロッド表面において図 4.3、図 4.5 に示すように、次のような非対称な温度挙動を観察した。熱電対 H-4 で過熱度 100K 以上のほぼなめらかな高い温度レベルに達しており、蒸気冷却状態であったと考えられる。一方、他の熱電対 H-1, H-10 では間欠的な温度上昇を示し、遷移沸騰状態にあったと考えられる。

(2) 低い質量流束 $G=200,100\text{kg/m}^2\text{s}$

加熱端(Z5)の熱電対 H-8, H-9, H-11 は、 $G=400\text{ kg/m}^2\text{s}$ と同様に、なめらかな温度挙動を示しており、蒸気冷却の伝熱状態にあると考えられる。また、ロッドギャップ部の狭い流路に面する熱電対 H-8 の温度レベルが広い流路に面する他の 2 つの熱電対 H-9, H-11 に比べて高かったことから狭い流路に面する位置では、低質量流束、低クオリティの熱伝達特性であると考えられる。また、3ヶ所すべての熱電対位置で一体的挙動を示した点も、 $G=400\text{ kg/m}^2\text{s}$ と同様であった。

軸方向高さ 1030 mm(Z4)に設置された熱電対 H-2, H-7 は、 $G=400\text{ kg/m}^2\text{s}$ と異なり、加熱端と同様ななめらかな温度挙動を示しており、ほぼ蒸気冷却の伝熱状態にあると考えられる。間欠的なドライアウトと思われる三角波状の上昇下降を繰り返しながら 300°C以上の高温レベルを維持していたが、両者は同じ挙動を示した。このように、軸方向高さ 1030 mm 以上加熱端までにおいて、中心ロッド表面は BT 状態にあり、本実験で設置した全熱電対がほぼ同じ挙動を示し、中心ロッド円周方向に伝熱状態に特異的な挙動は観察されなかった。

このように、軸方向高さ 1030 mm 以上加熱端までにおいて、中心ロッド表面は BT を越えた状態にあり、本実験で設置した全熱電対がほぼ同じ挙動を示し、中心ロッド円周方向に伝熱状態に特異的な挙動は観察されなかった。

以上のように、中心ロッド周りにおける沸騰遷移後のロッド表面温度挙動の非対称性を調べた結果、X 線 CT で測定された模擬燃料棒配置の変位の影響は小さかったと考えられる。

4.2 稠密格子体系の限界出力予測誤差の原因検討

サブチャンネル解析コードを用いて稠密格子バンドル体系の限界出力を予測する研究が進められ、稠密格子模擬バンドル試験体の限界出力測定値との比較が行われている^{(8)~(10)}。燃料棒位置を設計値と仮定して算出した流路面積等を用いて行った解析では、実験結果に比べて約30%から40%程度高い除熱限界出力が予測されていた。その原因として次の2点の原因が考えられる。

- (1) 解析モデルの稠密格子体系への適用性
- (2) 設計通りの燃料棒位置を基準とする仮定

今回、新たに測定した燃料棒位置の実測値を用いて流路面積等を算出して入力データを作成して限界出力実験の解析を行い、上記の(2)の燃料棒位置変位の及ぼす影響を評価すると共に、模擬燃料棒位置変位を考慮した場合の限界出力予測誤差の変化を評価して、予測誤差の原因が模擬燃料棒位置変位にあるかどうかを判定する。

4.2.1 従来のサブチャンネル解析予測結果

サブチャンネル解析コード COBRA-TF と NASCA による計算結果と稠密格子模擬バンドル限界出力実験結果との比較結果を文献よりまとめ、予測誤差について整理した。

(1) COBRA-TF コードとの比較⁽⁸⁾⁽⁹⁾

図 4.12 に、2つの稠密格子模擬 7 本バンドル試験体[A]と [B] を示す。図 4.13(1),(2)に、稠密格子模擬 7 本バンドル限界出力測定値と COBRA-TF コードの比較を示す。図 4.13(1)は Test Section[A]、図 4.13(2)は Test Section[B] の実験解析結果である。2つの試験体 Test Section[A]、[B] の仕様を表 4.1 に示す。

図 4.13 の比較結果について、質量流束 $600\text{kg/m}^2\text{s}$ 以下の低質量流束範囲に注目すると、Test Section[A] では、計算結果は実験結果の変化を良好に再現しているのに対して、Test Section[B] では、高質量流束になると共に、解析結果は一様に測定値を過大評価した。また、実験結果では断面内の BT 位置は中心ロッドであったが、解析は外周ロッドのシュラウド側を予測した。

Test Section[A] と [B] は、有効発熱長、軸方向出力分布は次のように大きく異なっている。Test Section[A] では有効発熱長 1.8m、軸方向一様出力分布であるのに対して、Test Section[B] では有効加熱長が 1.26m、軸方向出力分布が二重炉心(ピーピング係数 2.19)である。

2つの試験体の実験解析結果より、有効発熱部が短い場合、軸方向出力分布が一様から二重炉心のような大きなピーピングが生じた場合の予測性が今後の課題であると考えられる。

(2) NASCA コードとの比較⁽¹⁰⁾

図 4.14 に、稠密格子模擬 7 本バンドル限界出力測定値と NASCA コードの比較を示す。図は、図 4.12 の Test Section[A] の実験解析結果である。図より、解析結果は測定値の変化を概略再現しているが、高質量流束で勾配が小さくなる傾向は予測できず、また、やや過大評価する傾向を示した。また、断面内の BT 位置については実験では中心ロッドであったが、解析は実験と異なり、外周ロッドのシュラウド側を予測した。

(1)と(2)の結果より、2つの解析コードに対する共通の課題として、軸方向出力分布の及ぼす効果と断面内 BT 位置に対する予測性について次のような課題があると考えられる。

① 軸方向出力分布効果の予測性

Test Section[A]と[B]を比較すると、実験では Test Section[B]の限界出力が Test Section[A]より小さかったが、解析結果(COBRA-TF コード)ではほとんど変わらなかった。代表的な質量流束条件 $G=400 \text{ kg/m}^2\text{s}$ の結果を図 4.13 から読み取って以下に示す。

- ・限界出力[kW]の実験と解析との比較

	Test Section	
	[A]	[B]
実験	90	80
解析	80	110

② 断面内 BT 位置の予測性

断面内の BT 位置は、実験では中心ロッドであったが、解析は外周ロッドのシュラウド側を予測する傾向があった。燃料棒表面の液膜流量の軸方向分布計算結果によると、中心ロッドが外周ロッドシュラウド側に比べて一様に大きかった。

上述したように、サブチャンネル解析コードを稠密格子バンドル系へ適用した結果、実験結果に比べて高い限界出力を予測した。その原因には次の2点が考えられる。

- (a) 解析コードに組み込まれた解析モデルに問題がある
- (b) 燃料棒位置が現実の燃料棒位置の変位を考慮していない

次節では、伝熱実験結果に基づき、上記(b)の燃料棒位置変位の及ぼす影響を検討する。

4.2.2 模擬燃料棒位置の変位を考慮したサブチャンネル解析

模擬燃料棒位置変位を考慮した場合、限界出力計算値がどの程度変化するかを評価し、稠密格子体系の限界出力予測誤差の原因が、模擬燃料棒位置変位にあるかどうかを判定する。

今回、測定した燃料棒位置の実測値を用いて作成したサブチャンネル解析の入力データは次の3つである。

- ・ サブチャンネル流路面積
- ・ サブチャンネル水力直径
- ・ サブチャンネル間のギャップ幅

(1) 限界出力測定値と計算値との比較

図 4.15 に、限界出力と質量流束との関係について、測定値と計算値との比較を示す。計算値は、燃料棒位置を設計値で評価した場合(Nominal position)と今回 X 線 CT による実測値で評価した場合の 2 種類を示した。図より、燃料棒位置を実測値で評価した場合の限界出力計算値は、設計値で評価した場合に比べて、質量流束 $400 \text{ kg/m}^2\text{s}$ 以上の条件で 5%程度小さくなつたが、限

界出力測定値に比べて過大評価する誤差の程度はあまり変わらなかった。図 4.16 に、BT サブチャンネル No.24 の軸方向冷却材分布(冷却材質量流束、クオリティ、液膜質量流束)計算値を示す。図より、燃料棒位置を設計位置で評価した場合と実測値で評価した場合の軸方向冷却材分布、特に液膜質量流束の差が小さいことがわかる。

図4.15に示すように、サブチャンネル解析による限界出力予測誤差の原因は燃料棒の変位(入力データの問題)によるものではなく、主に解析モデルに問題のあることがわかった。

(2) BT 発生位置の測定値と計算値との比較

限界出力と BT 位置について伝熱実験とサブチャンネル解析を比較し、その結果を以下にまとめめる。

比較量	G [kg/m ² s]	伝熱実験	解析
限界出力 [kW]	400	110.4	138
	200	74.0	82
軸方向位置／径方向 BT 位置	加熱端／中心ロッド 1030 mm／中心ロッド、外周ロッド(L ₅)		
	970 mm／中心ロッド、外周ロッド 5 本		980 mm／外周 No.24

限界出力について、サブチャンネル解析は測定値を約 25% 過大評価しているが、BT が開始した軸方向位置は測定結果と一致した。しかし、実験では、中心ロッドの軸方向のより下流側(1030 mm、加熱端)でも BT による温度上昇が測定されたが、解析では BT しなかった。解析で BT しなかったのは、下流側の低熱流束部で液膜質量流束が回復したためである。

径方向 BT 位置について、実験では外周ロッドと中心ロッド周りでほぼ同時に BT 発生が観察されたが、解析では外周サブチャンネルだけであり、中心ロッド周りのサブチャンネルには十分な液膜質量流束があった。液膜質量流束の計算値が外周ロッドに比べて、中心ロッド周りで過大になる傾向があったためと考えられる。

図 4.17 に、解析の軸方向 BT 位置(軸方向高さ 980 mm)における、径方向サブチャンネルごとの冷却材分布計算値を示す。入力データを設計値で評価した場合(Nominal position)の冷却材分布(冷却材質量流束、クオリティ、液膜質量流束)の計算結果は、3 種類サブチャンネル流路面積に対応した、3 種類の値しかとらない。3 種類のサブチャンネルグループは、中心ロッド周り(サブチャンネル流路面積 22.2 mm²)と 2 つの外周サブチャンネル(その 1:7.4 mm²、その 2:14.8 mm²)である。図は、サブチャンネルグループに分けて計算結果を示した。棒グラフは、X 線 CT の模擬燃料棒位置実測値を用いた入力データの計算結果、点線は設計値を用いた入力データを用いた場合の計算結果である。

中心ロッド周りの液膜質量流束計算結果は、サブチャンネル No.2~4 で最も液膜質量流束が小さく、BT が起こりやすい傾向は測定結果とほぼ合っていると考えられる。外周サブチャンネル(その 1)の中では、サブチャンネル No.24 でドライアウトを予測したが、そのサブチャンネル

に面する熱電対位置でも BT が生じた。また、次に液膜質量流束の小さいサブチャンネル No.21 に面する熱電対でも BT が生じた。このように、外周ロッドのシュラウドに面する 18 ヶのサブチャンネル、中心ロッド周りの 6 ヶのサブチャンネルの、それぞれのドライアウトの起こりやすさは、解析と実験でほぼ合っていたと判断できる。

限界出力予測に対して、解析結果の BT 位置が限られており、実験結果が複数の位置である場合、限界出力計算値は測定値を過小評価すると予想されるが、限界出力計算値は測定値より大きかった。この原因には、断面分布の予測誤差だけではなく、液相流量に占める液膜の割合の過大評価または液滴割合の過小評価が推定できる。

以上のことから、サブチャンネル解析は 7 本バンドル限界出力特性を予測に対して誤差があることを示したが、外周ロッドのシュラウドに面する 18 ヶのサブチャンネル、中心ロッド周りの 6 ヶのサブチャンネルの、それぞれの分布については妥当な分布を計算していたと判断できる。

4.2.3 今後の課題

燃料棒位置変位があった場合の限界出力は、燃料棒位置変位のないノミナル位置に比べてどの程度減少するかを実験により評価することは難しいので、現状では、サブチャンネル解析を用いて予測することが考えられる。

そこで、サブチャンネル解析を用いて燃料棒位置変位の影響を精度よく予測するためには、以下のようないくつかの課題を解決する必要があると考えられる。

(1) 中心ロッド周りと外周ロッドシュラウド側のサブチャンネル液膜流量分布

7 本バンドル伝熱実験では、外周シュラウド側のサブチャンネルと中心ロッド周りのサブチャンネルでほぼ同時に BT が生じた。解析では外周シュラウド周りで BT が生じたが、中心ロッド周りではまだ余裕が大きかった。解析で得られた断面内の液膜流量分布は、実験に比べて、外周シュラウド周りの流量が少なく、中心ロッド周りでは流量が多かったと考えられるので、このような断面内の流量分布の予測性改良が必要である。

(2) 軸方向の液滴沈着率

軸方向のより下流側(1030 mm、加熱端)で、実験では BT による温度上昇が測定されたが、解析では低熱流束部で液膜質量流束が回復し、BT しなかった。これは、液滴沈着率計算値が過大であることを示すと考えられる。

(3) 液相の相分布(液膜・液滴分率)

限界出力測定値に比べて、計算値は約 25%過大評価した。(1)の改良により、外周シュラウド周りの液膜流量計算値が増加すると、さらに限界出力が増加し、誤差が拡大する。現行軽水炉(BWR)の BT は液滴沈着支配(Deposition controlled BT)と言われているように、液滴量が限界出力レベルに重要な影響を及ぼすと考えられているが、本解析では、液相に占める液滴割合が非常に小さく、液滴沈着の影響がほとんどないという結果であった。そこで、BWR 条件から

低減速炉条件に変化した場合の、液相に占める液滴割合の変化の妥当性を確認し、過小評価している点を改良する必要があると考えられる。

(1),(2)の課題を解決できる直接的な高温高圧実験データはないので、バンドル体系の幾何形状をパラメータに変化させた限界出力試験データ⁽³⁾⁽⁴⁾などを検証データに用いることにより、具体的な改良点を明らかにすることができると考えられる。

5. 結論

X 線 CT により測定した低減速炉炉心模擬燃料集合体(7 本バンドル：発熱長さ 1260 mm、試験体長さ 2400 mm、外径 70 mm)断面内の模擬燃料棒位置データに基づいて、各模擬燃料棒中心位置の変位と伝熱実験で測定した BT 発生位置との関係について検討すると共に、サブチャンネル解析結果に及ぼすロッド位置変位の影響を評価した。本研究では、模擬燃料棒の変位による非対称配置の程度とそれが除熱限界(熱的限界出力)にどのような影響を及ぼすかがポイントである。

X 線 CT 装置による断面の可視化画像より、模擬燃料棒位置は設計で想定された正六角形の頂点から大きく変位していないことが確認できた。模擬燃料棒中心位置座標の評価結果によると、模擬燃料棒位置の変位は、有効発熱部内で最大 0.5 mm、平均は 0.2 mm であった。

BT 後の模擬燃料棒表面温度上昇測定データを整理して、BT 後(ポスト BT)の温度挙動を評価した。その結果、中心ロッドに設置した軸方向下流部の全熱電対でほぼ同時刻に BT が発生し、また、BT 後(ポスト BT)の模擬燃料棒表面温度は同一断面に設置した 2 または 3ヶ所の熱電対で、時間的に一体化的な挙動を示した。以上の点から、本試験体の模擬燃料棒位置変位が及ぼす、BT 位置とポスト BT 後のロッド表面温度挙動特性への影響は小さかったと考えられる。

模擬燃料棒の 3 次元的な配置を測定した結果を入力データとしてサブチャンネル解析を行い、伝熱実験で測定した除熱限界(熱的限界出力)を予測した。その結果、限界出力計算値は、模擬燃料棒が設計位置にあるとの仮定に基づく従来の結果よりも 5%程度小さくなつたが、過大評価の程度は約 25%と依然大きかった。傾向は変わらなかつた。このことから、解析結果と実験結果との差異は、模擬燃料棒の変位（入力データの問題）だけでは説明はつかず、解析モデルの影響の大きいことがわかつた。

模擬燃料棒位置の変位と伝熱特性を関連付けた実験データはまだ少ないため、大型伝熱試験体(37 本試験体：発熱長さ 1260 mm、試験体長さ約 4320 mm)を対象とした模擬燃料棒位置の X 線 CT 検査を実施し、実験データベースの蓄積を進める予定である。

参考文献

- (1) Kureta, M., et al.: Development of Predictable Technology for Thermal/Hydraulic Performance of Reduced – Moderation Water Reactors (2)– Large-scale Thermal/Hydraulic Test and Model Experiments –, Proceedings of ICAPP '04 Pittsburgh, PA USA, June 13 – 17, 2004, Paper 4056(2004)
- (2) 小堀:14MW 热ループによる実験研究・実機大規模燃料によるバーンアウト熱流束の測定、機械学会誌、78(682),811(1975).
- (3) 菅原: ATR 燃料開発に関する伝熱流動研究、日本機械学会第 68 期全国大会講演論文集 (Vol.C),1990.
- (4) Nakajima, I. et al.: A study of rod bowing effect on critical heat flux, Nuc. Eng. And Design, 42, 257(1977).
- (5) 白川、他:稠密バンドル燃料の熱水力基礎試験 ロッド曲がりの影響、日本原子力学会誌、43, 85(2001).
- (6) Bailey, N. A. and Lee, D. E.: A review of dryout data in SGHWR fuel bundle simulations, Int. Mech. Engineers, Heat and fluid flow in water reactor safety, 203(1977).
- (7) Redpath, W.: Winfrith SGHWR in-reactor dryout tests, J. Br. Nuc. Energy Soc. 13, 87-97 (1974).
- (8) 中塚、他: サブチャンネル解析コード COBRA-TF による稠密炉心限界熱流束実験の解析、日本機械学会 2002 年度年次大会講演論文集(Vol.IV),241-242(2002).
- (9) Nakatsuka, T., et al. : Subchannel analysis of CHF experiments for tight-lattice core, Proceedings of GENES4/ANP2003, Kyoto, Japan, Sep.15 – 19, Paper 1148(2003).
- (10) Nakatsuka, T., et al.: Evaluation of critical heat flux of tight lattice core with subchannel analysis code NASCA, 11th International conference on nuclear engineering, Tokyo, Japan, April 20 – 23, ICONE11 – 36172(2003).
- (11) 呉田、他: 低減速軽水炉の研究 (40) – 限界出力実験 一、日本原子力学会 2003 年春の年会 (2003).
- (12) Liu, W., et al.: Critical power in 7-rod tight lattice bundle, JSME International Journal, 47, 299(2004).
- (13) 勝山、永峯、松元: 高速炉燃料集合体用 CT 画像数値化処理システムの開発と適用結果、PNC TN9410 2002 – 012(2002).
- (14) Reddy, -D., Fighetti, -C.: Evaluation of predictability of multiple CHF events, Proc. of Int. Topic. Mtg. on Nuclear Reactor Thermal Hydraulics, American Nuclear Society, 390-397(1983).
- (15) 勝山、永峯、松元: 7 本バンドル稠密模擬燃料集合体の X 線 CT 試験結果、JNC レポート、発行予定(2005).
- (16) 植田: 気液二相流、養賢堂、261(1981).
- (17) Mitsutake, T. et al.: Boiling heat transfer experiments and neutron radiography

visualization in small diameter flow channel with plate blockage, The 6th International Conference on Nuclear Thermal Hydraulics, Operations and Safety (NUTHOS-6), Nara, Japan, October 4–8, Paper ID. N6P287(2004).

- (18) Monde, M. and Mitsutake, Y.: Critical heat flux during natural circulation boiling of saturated liquid in annulus with uniformly heated outer tube, Trans. ASME J. Heat Transfer, 122, 74-79(2000).
- (19) Bertoletti, S.: et al:Heat transfer crisis with steam—water mixtures, Energ. Nucl., 12, 121(1965).
- (20) 井上晃, 他: 燃料集合体信頼性実証試験, BWR 高燃焼度 8×8 燃料集合体熱水力試験, 原子力誌, 40[10], 784 (1998).
- (21) Levy, S., et al.: Eccentric rod burnout at 1000 lb/in² with net steam generation, Int. J. Heat Mass Transfer, 5, 595-614 (1962).
- (22) Andersen, P. S., et al.: Burn-out, circumferential film flow distribution and pressure drop for an eccentric annulus with heated rod, Int. J. Multiphase flow, 1, 585-600 (1974).

記号表

S :	流路面積
θ :	角度
P _f :	ぬれふち長さ
D _H :	水力等価直径
D _{rod} :	模擬燃料棒外径
S :	線分長さ
a,b :	2点間距離または定数
h_{TP} :	二相流熱伝達率
χ :	蒸気クオリティ
Re :	レイノルズ数
G :	冷却材質量流束
q" :	表面熱流束
μ :	粘性係数
T _{wall} :	模擬燃料棒表面温度
T _{sat} :	飽和温度
ΔT_{wall} :	壁面過熱度($T_{wall} - T_{sat}$)

表 2.1 JNC 高エネルギー X 線 CT 装置の仕様

スキャン時間	40 分 Translation pitch=0.03mm
検出コリメータ	0.3mm(W) × 2 mm(H)
X 線源 エネルギー	12MeV 以上
ノバルス幅	4.5 μ s
周波数	100Hz(周期 10ms)

表 2.2 X 線 CT 撮像結果に基づくロッドの変位の大きさと向き 全数値化処理結果

高さ [mm]	^H δ [mm]	^H θ [°]	^{L₁} δ [mm]	^{L₁} θ [°]	^{L₂} δ [mm]	^{L₂} θ [°]	^{L₃} δ [mm]	^{L₃} θ [°]	^{L₄} δ [mm]	^{L₄} θ [°]	^{L₅} δ [mm]	^{L₅} θ [°]	^{L₆} δ [mm]	^{L₆} θ [°]	^H δ [mm]	^H θ [°]	ロッド名		
1530	0.14	218.09	0.46	311.54	0.65	74.77	0.17	159.43	0.46	197.69	0.12	217.6	0.36	241.13	0.14	218.09	0.14		
1430	0.26	206.07	0.46	297.74	0.23	117.81	0.16	0.51	219.9	0.18	234.3	0.27	255.63	0.26	206.07	0.14			
1330	0.20	190.39	0.42	324.33	0.33	142.77	0.17	210.10	0.40	248.87	0.19	255.48	0.19	268.83	0.20	190.39	0.14		
1180	0.33	13.99	0.13	203.10	0.07	225.93	0.34	306.51	0.10	313.54	0.23	336.05	0.23	337.22	0.33	0.20	0.14		
1030	0.27	8.98	0.19	108.77	0.08	235.45	0.29	282.54	0.18	250.95	0.13	236.01	0.19	270.41	0.27	8.98	0.14		
880	0.11	88.57	0.38	124.13	0.09	156.41	0.09	2.83	4.96	84.54	0.15	64.31	0.11	0.11	0.11	88.57	0.14		
730	0.10	31.64	0.30	151.59	0.14	165.69	0.08	59.82	0.13	38.90	0.15	42.24	0.18	165.81	0.10	37.64	0.14		
625	0.10	356.73	0.07	150.72	0.17	40.91	0.26	109.64	0.16	114.60	0.07	227.03	0.13	218.49	0.10	350.73	0.14		
520	0.08	284.46	0.26	245.32	0.21	109.53	0.08	109.53	0.12	241.08	0.19	221.08	0.08	244.46	0.08	284.46	0.14		
370	0.22	91.34	0.26	285.01	0.33	328.99	0.26	353.81	0.17	105.87	0.08	314.40	0.20	300.26	0.22	97.34	0.14		
220	0.25	164.23	0.28	288.89	0.20	177.50	0.17	344.91	0.25	148.58	0.27	172.43	0.33	266.37	0.20	164.23	0.14		
70	0.28	178.98	0.33	306.98	0.17	34.12	0.13	55.10	0.27	155.10	0.51	172.11	0.22	271.69	0.28	178.80	0.14		
-80	0.14	282.20	0.40	307.88	0.05	156.86	0.12	54.17	0.24	205.47	0.43	193.67	0.25	307.90	0.14	228.20	0.14		
-230	0.18	305.39	0.37	309.28	0.28	185.49	0.13	151.73	0.38	241.53	0.44	289.55	0.18	310.50	0.18	305.39	0.14		
960	0.25	24.72	0.19	108.77	0.08	235.45	0.29	282.54	0.18	250.55	0.13	230.01	0.19	270.41	0.27	8.98	0.14		
950	0.20	284.43	0.27	106.99	0.06	194.19	0.10	293.04	0.10	251.54	0.06	132.07	0.06	302.99	0.19	294.3	0.14		
1010	0.31	23.40	0.25	88.12	0.04	337.07	0.28	310.45	0.09	313.13	0.06	0.10	0.10	314.60	0.38	23.40	0.14		
1000	0.35	23.97	0.24	80.40	0.05	128.5	0.25	0.09	284.80	0.02	0.02	0.13	294.42	0.10	0.05	0.14	33.45	0.14	
990	0.31	286.63	0.25	88.45	0.03	62.51	0.23	0.23	0.06	332.54	0.07	314.92	0.03	301.29	0.31	28.63	0.14		
980	0.32	26.60	0.23	74.85	0.02	32.53	0.22	0.22	0.04	285.64	0.07	0.07	0.09	306.65	0.32	26.60	0.14		
910	0.09	32.47	0.28	124.21	0.06	198.44	0.14	1.44	0.09	21.86	0.10	81.62	0.05	29.53	0.09	32.47	0.14		
900	0.18	37.59	0.30	122.83	0.07	166.95	0.14	144	0.09	21.86	0.10	81.62	0.05	30.59	0.18	37.59	0.14		
890	0.09	46.51	0.29	129.09	0.07	197.86	0.09	38.03	0.10	324.54	0.04	111.26	0.04	308.16	0.18	46.51	0.14		
880	0.11	88.57	0.38	124.13	0.09	156.41	0.09	2.83	4.96	84.54	0.07	80.7	0.10	88.57	0.14	88.57	0.14		
870	0.15	61.93	0.38	117.65	0.09	133.07	0.09	36.94	0.10	32.73	0.12	74.50	0.06	359.59	0.15	61.93	0.14		
860	0.12	61.72	0.44	127.86	0.10	179.85	0.07	356.89	0.12	7.54	0.17	67.5	0.06	66.05	0.12	67.27	0.14		
790	0.19	44.52	0.39	126.63	0.12	147.01	0.08	40.41	0.14	28.86	0.18	64.07	0.11	48.52	0.17	78.17	0.14		
840	0.21	74.44	0.45	129.36	0.11	166.37	0.09	35.10	0.14	16.02	0.22	40.95	0.10	82.35	0.21	74.44	0.14		
830	0.15	71.05	0.40	120.91	0.12	148.86	0.08	40.13	0.13	25.45	0.17	47.36	0.08	44.29	0.15	71.05	0.14		
820	0.29	58.57	0.46	111.12	0.21	96.55	0.21	53.89	0.23	34.99	0.26	42.03	0.18	47.48	0.29	58.57	0.14		
810	0.22	66.02	0.41	120.15	0.15	116.41	0.14	45.52	0.21	36.32	0.26	39.96	0.17	65.03	0.22	66.02	0.14		
800	0.19	44.43	0.41	125.76	0.11	145.49	0.10	0.61	14.87	73.73	0.12	74.50	0.12	44.43	0.19	44.43	0.14		
780	0.12	47.52	0.37	126.63	0.10	126.40	0.12	16.66	0.19	17.81	0.23	35.78	0.09	75.0	0.19	48.52	0.14		
770	0.13	38.61	0.30	129.36	0.12	151.34	0.07	32.55	0.10	14.67	0.18	32.60	0.05	95.35	0.14	47.52	0.14		
760	0.09	55.50	0.37	120.91	0.15	174.76	0.04	350.05	0.12	14.12	0.20	39.14	0.15	151.90	0.09	55.50	0.14		
750	0.11	2.00	0.25	125.76	0.12	188.89	0.05	34.19	0.12	35.09	0.12	14.51	0.12	165.19	0.09	37.59	0.14		
740	0.09	5.89	0.29	120.15	0.12	183.54	0.02	274.14	0.09	358.99	0.12	7.38	0.17	182.67	0.09	5.89	0.14		
730	0.12	31.64	0.30	123.61	0.14	165.69	0.08	59.82	0.13	38.30	0.15	42.24	0.18	76.81	0.10	37.64	0.14		
720	0.12	64.48	0.27	127	0.16	123.61	0.21	92.93	0.12	92.93	0.12	100.53	0.21	172.23	0.12	64.48	0.14		
710	0.12	8.51	0.25	0.06	174.68	0.02	14.66	0.06	83.47	0.07	26.11	0.08	356.43	0.19	187.98	0.12	8.51	0.14	
700	0.11	11.26	0.18	124.07	0.12	143.25	0.05	60.55	0.17	24.24	0.18	30.03	0.18	166.27	0.11	11.26	0.14		
690	0.12	357.89	0.17	0.07	78.51	0.14	93.04	0.06	51.26	0.12	34.95	0.15	195.18	0.12	357.89	0.14			
680	0.12	33.16	0.10	173.94	0.02	21.80	0.15	101.37	0.13	101.37	0.12	242.22	0.14	217.38	0.09	330.03	0.14		
670	0.08	32.10	0.23	172.09	0.01	242.81	0.09	0.07	52.02	0.04	24.47	0.19	190.38	0.08	327.10	0.14			
660	0.13	32.45	0.16	183.57	0.02	350.04	0.10	100.63	0.03	106.19	0.08	287.89	0.18	299.22	0.13	321.45	0.14		
590	0.11	341.88	0.11	192.37	0.15	39.18	0.19	106.24	0.13	113.35	0.03	208.12	0.10	214.02	0.12	341.88	0.14		
580	0.09	33.88	0.19	174.68	0.02	36.27	0.17	92.71	0.14	107.84	0.07	108.99	0.09	284.04	0.07	33.88	0.14		
570	0.09	33.26	0.08	214.07	0.18	28.77	0.19	107.87	0.07	107.87	0.17	214.00	0.07	255.87	0.09	33.88	0.14		
560	0.11	1.12	0.25	134.68	0.21	53.48	0.27	110.19	0.29	125.25	0.07	211.63	0.13	234.66	0.11	1.12	0.14		
620	0.09	3.20	0.11	155.30	0.17	142.77	0.17	210.10	0.40	248.87	0.19	234.3	0.05	206.07	0.12	328.59	0.14		
610	0.09	33.03	0.12	185.03	0.10	26.76	0.18	100.89	0.10	101.58	0.19	231.37	0.12	217.38	0.09	330.03	0.14		
540	0.11	33.91	0.11	248.63	0.12	43.64	0.23	108.28	0.11	80.26	0.12	34.95	0.13	288.05	0.11	330.91	0.14		
600	0.10	310.92	0.13	172.09	0.01	112.37	0.15	102.41	0.11	83.16	0.08	111.73	0.14	252.32	0.14	310.92	0.14		
530	0.08	284.46	0.19	245.32	0.21	349.51	0.08	109.53	0.12	148.86	0.09	221.08	0.19	284.46	0.08	284.46	0.14		
520	0.08	72.14	0.27	263.57	0.32	326.08	0.16	345.38	0.07	134.47	0.14	282.00	0.19	270.67	0.09	72.14	0.14		
445	0.02	314.48	0.31	310.51	0.16	314.48	0.31												

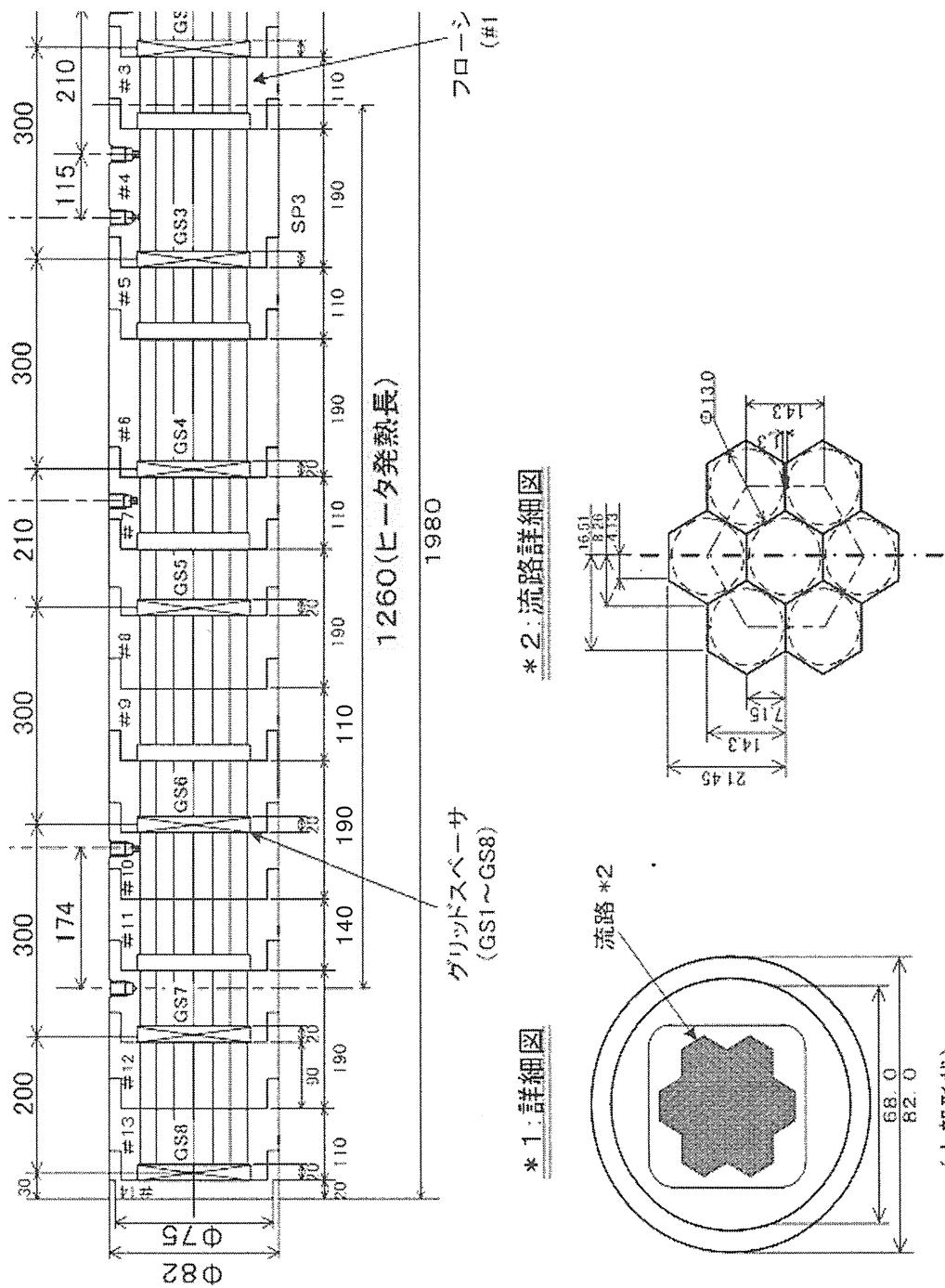


図 2.1 7 本バンドル試験体の主要部構造図

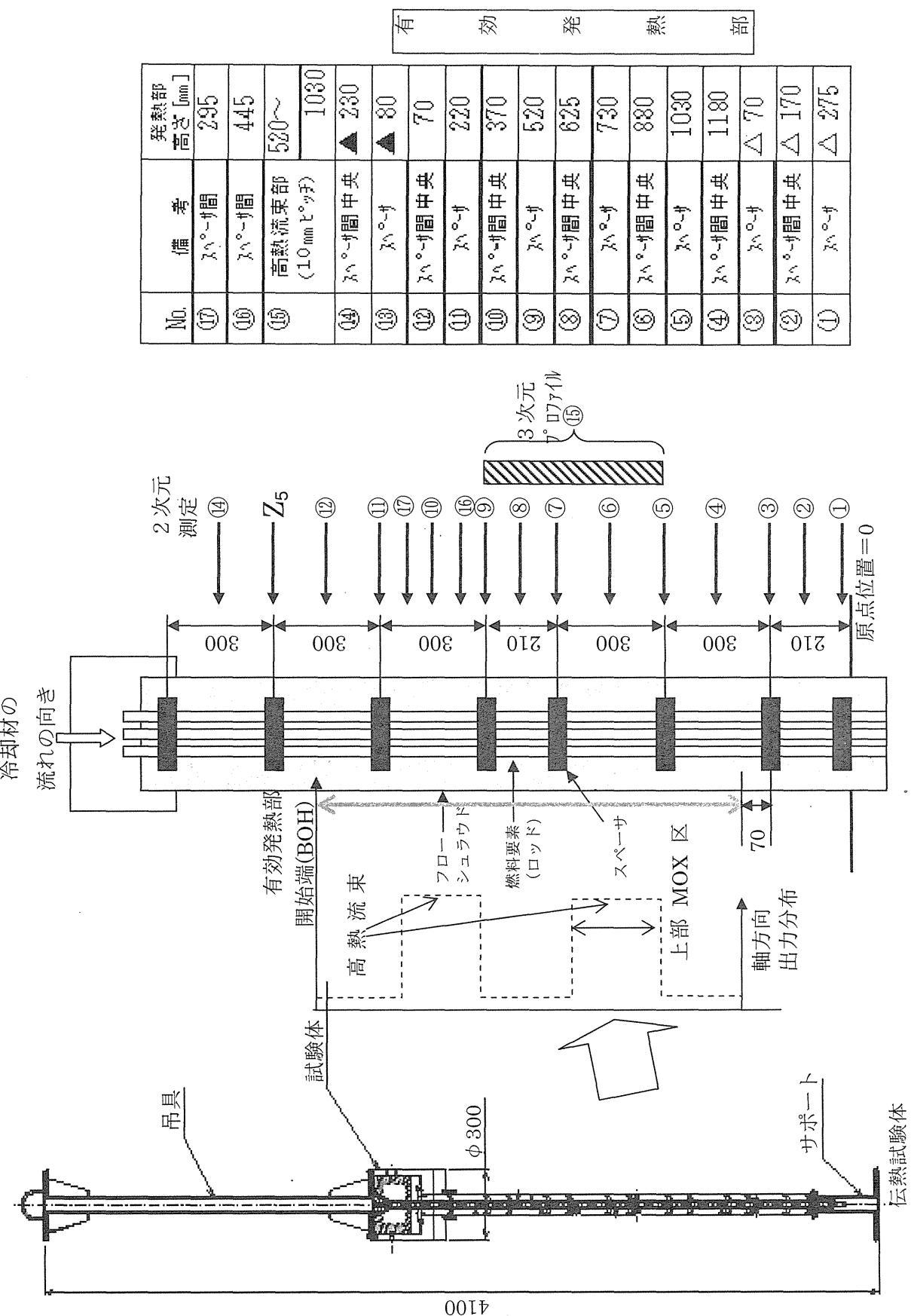


図 2.2 伝熱試験体撮像位置

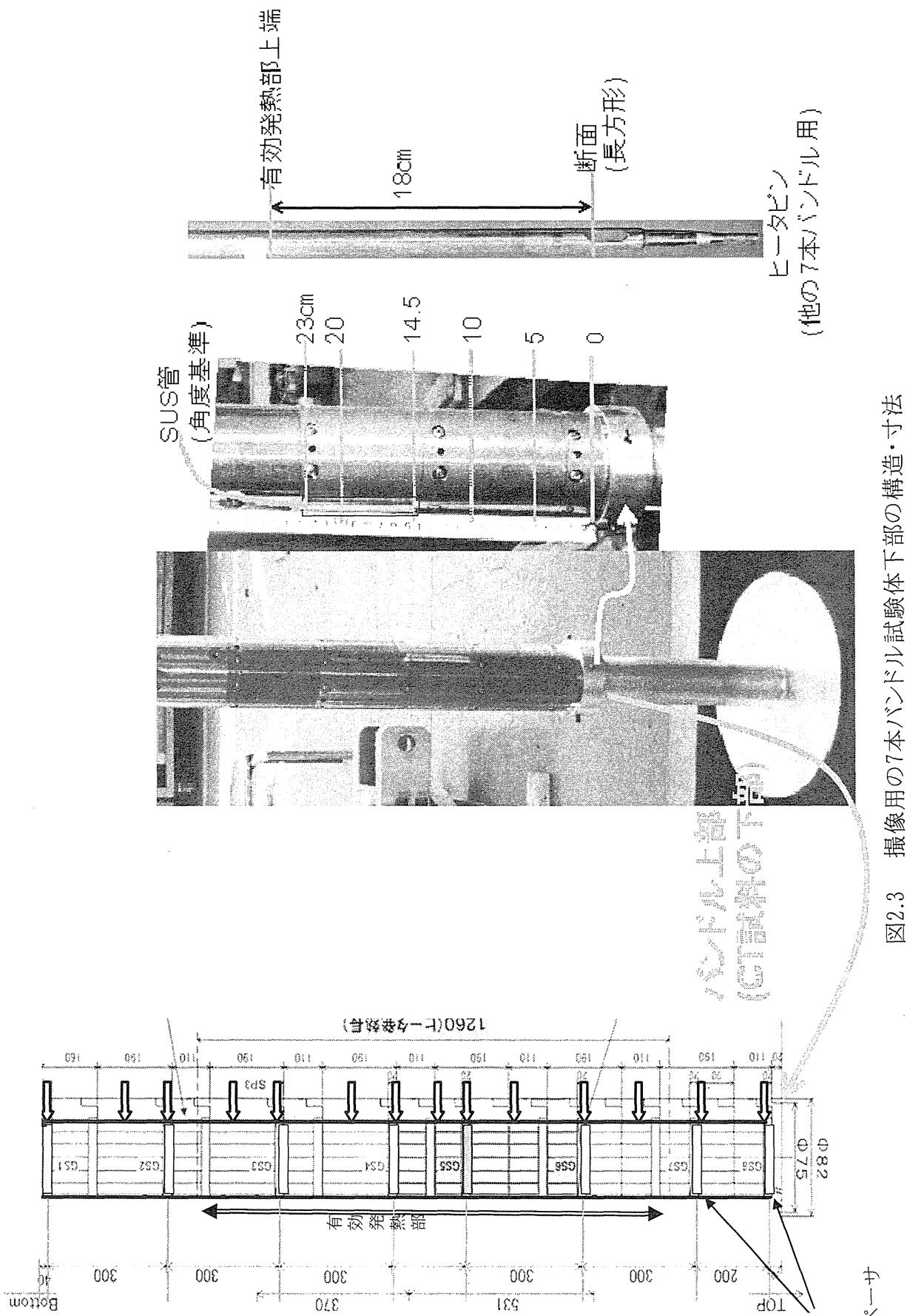
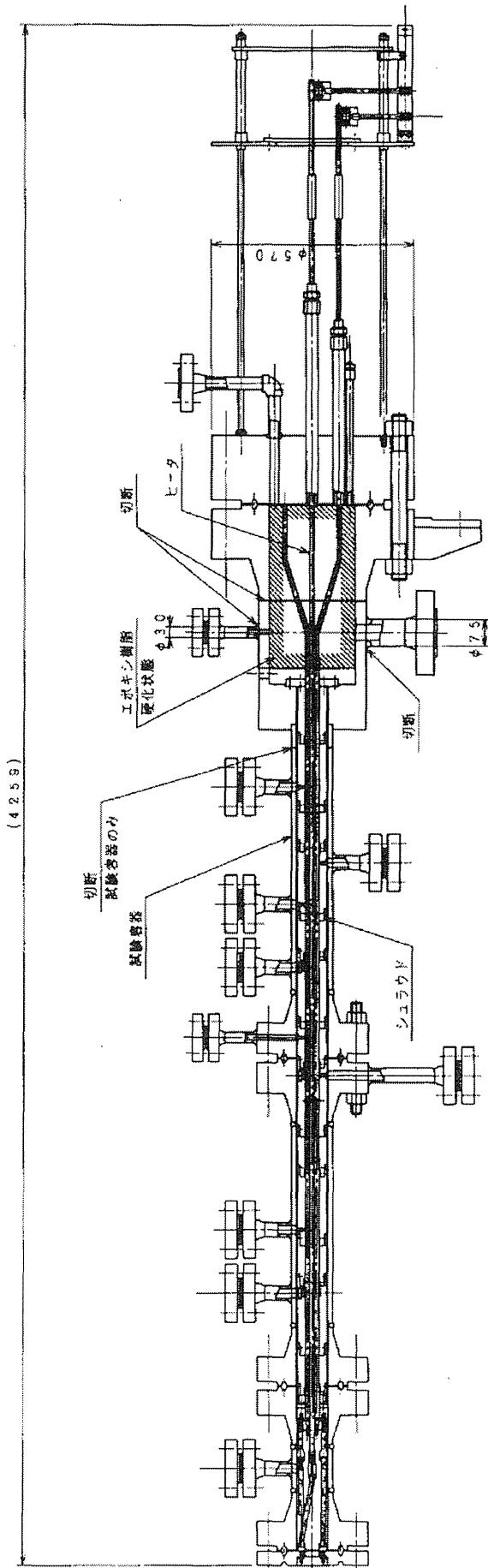


図2.3 撮像用の7本バンドル試験体下部の構造・寸法

スペーサ

切断・解体前



切断解体後

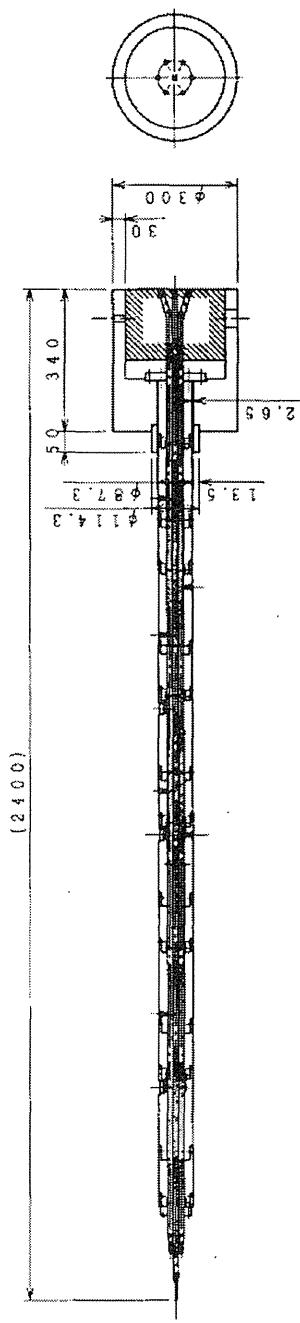


図 2.4 撮像用の 7 本バンドル試験体解体図

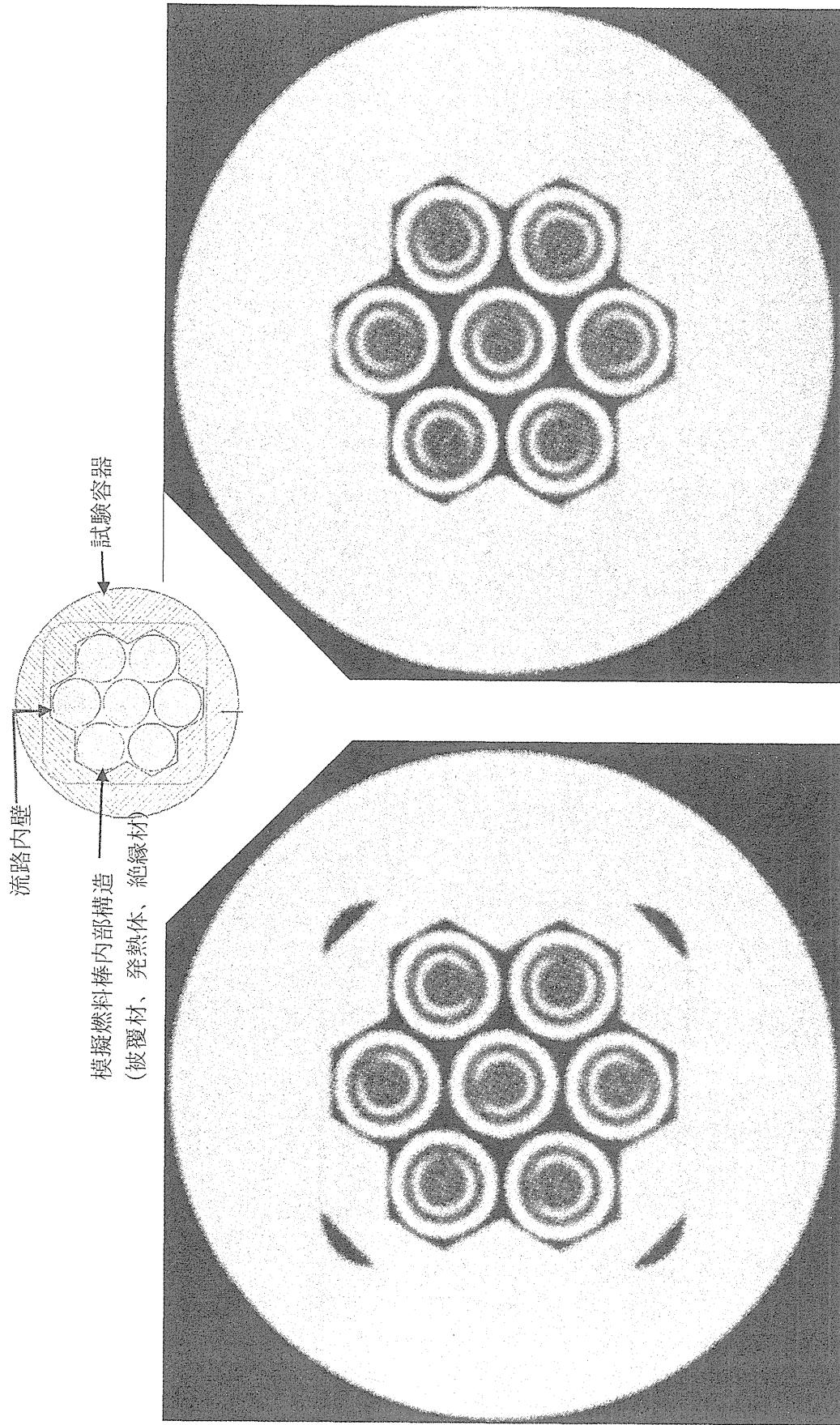
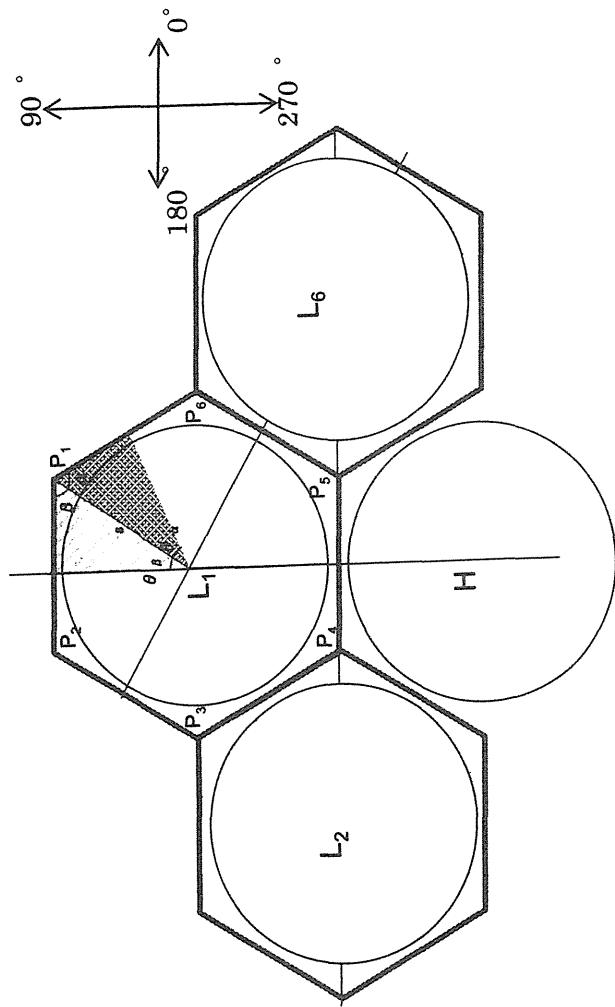


図 2.5 X線 CT撮像結果 撮像位置⑥、⑧

(a) X線CT画像の数値化結果の例

撮像位置④ ロッドNo.	変位		ロッドH との距離 mm	隣接ロッド間距離 mm	測定箇所	距離 mm
	大きさ vec	方向 deg				
H	0.33	13.99	0.00	—	—	—
L ₁	0.13	203.10	14.17	L ₁ -L ₂	14.23	
L ₂	0.07	225.93	14.56	L ₂ -L ₃	14.53	
L ₃	0.34	306.51	14.58	L ₃ -L ₄	14.15	
L ₄	0.16	313.54	14.50	L ₄ -L ₅	14.46	
L ₅	0.33	336.05	14.39	L ₅ -L ₆	14.34	
L ₆	0.23	337.22	14.12	L ₆ -L ₁	14.61	

(b) ロッド周りの幾何寸法計算方法の図解



ロッドL ₁ →P _i (i=1~6)			L ₁ -L _i (i=1~6)															
b _x -a _x	b _y -a _y	s	θ ₁	b _x -a _x b _y -a _y θ ₁	θ _α	θ _β	S _α -Δ	S _β -Δ	S-Δ									
P1 4.3	7.2	8.36	59.5	90	29	31	P ₁ →P ₂	4.1	4.0	8.2								
P2 -4.0	7.2	8.24	119.1	150	29	31	P ₂ →P ₃	3.7	3.6	7.3								
P3 -8.1	0.1	8.13	179.6	-12	-7	210	L ₁ →L ₂	30	31	P ₃ →P ₄	3.3	3.2	6.5	6.8	4.0	4.0		
P4 -4.0	-7.1	8.15	240.6	0	-14	92	L ₁ →H	30	31	P ₄ →P ₅	3.3	3.5	6.8	7.0	3.9	3.9		
P5 4.3	-7.1	8.27	300.9	13	-7	331	L ₁ →L ₆	29	30	P ₅ →P ₆	3.6	3.9	7.4	6.7	4.5	4.5		
P6 8.4	0.1	8.38	0.4			30		30	30	P ₆ →P ₁	4.1	4.2	8.2	6.7	4.1	3.0		
											17.8	18.2	22.0	22.4	44.4	40.8	24.8	2.7

図 3.1 ロッド中心位置変位によるサブチャンネル流路面積変化の計算方法

θ _α +θ _β		
D _H	P _f rod	P _f Schroud
mm	mm ²	mm ²
8.26	8.4	8.4
2.2	6.8	6.8
1.9	6.8	6.8
2.4	6.8	6.8
3.9	7.0	7.0
4.5	6.7	6.7
3.0	4.1	4.1
2.7	24.8	24.8

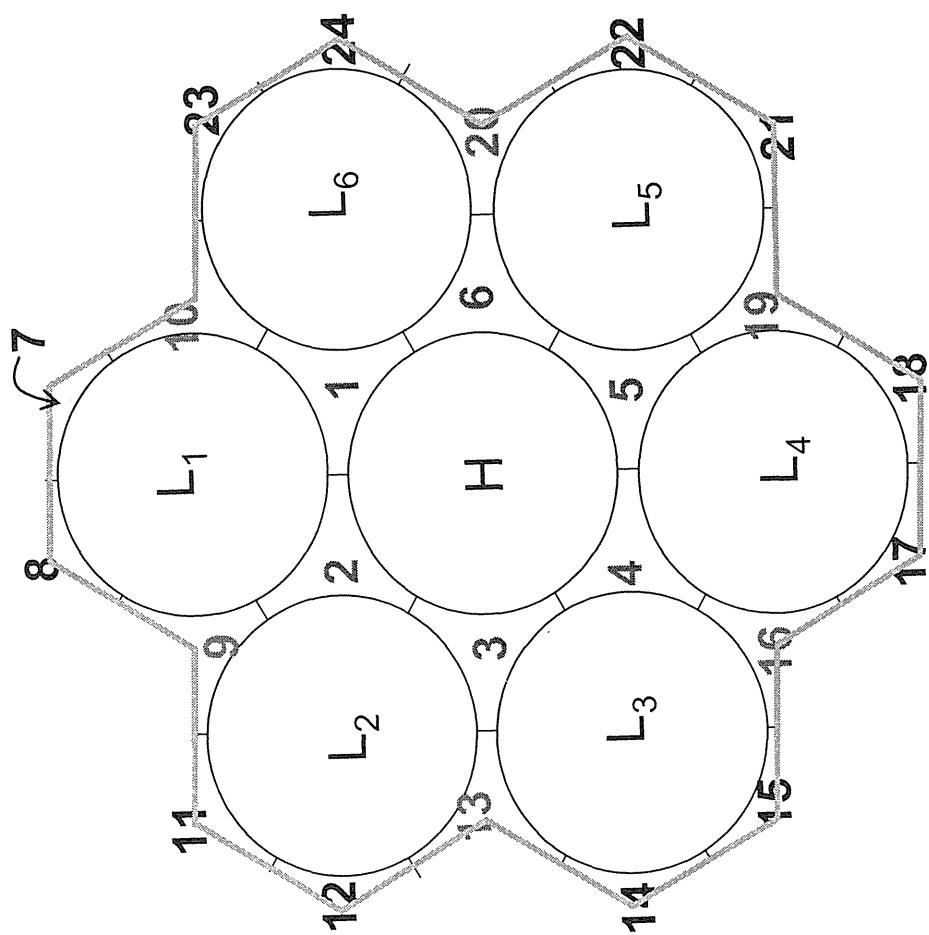


図 3.2 サブチャンネル分割とサブチャンネル番号 1 ~24

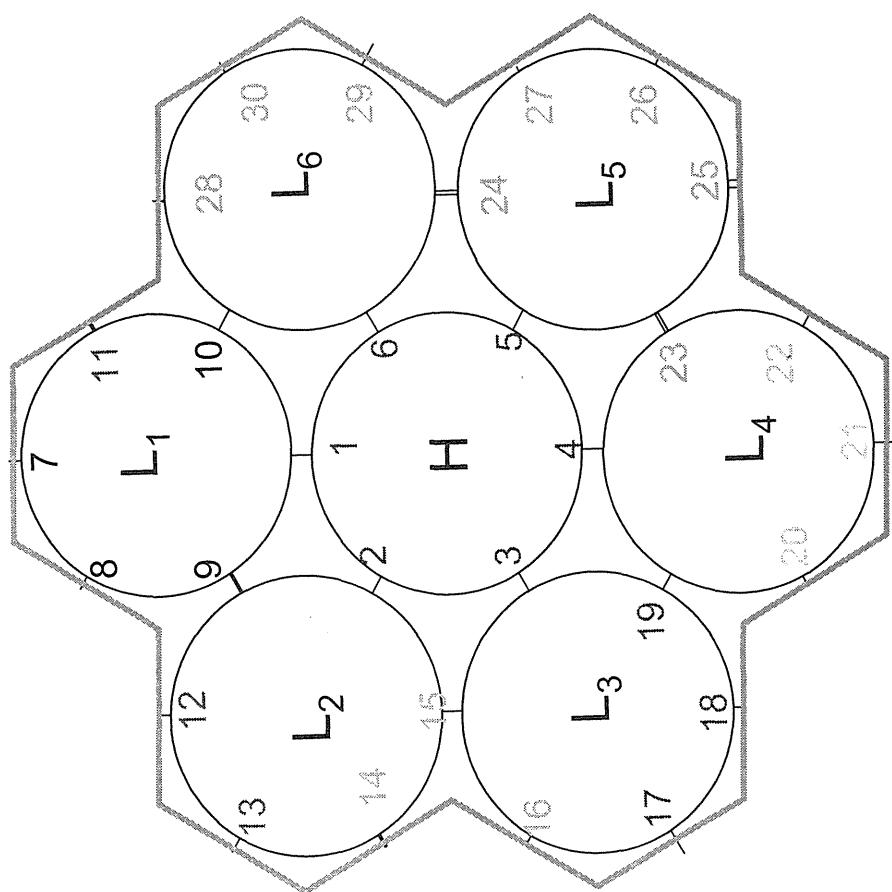
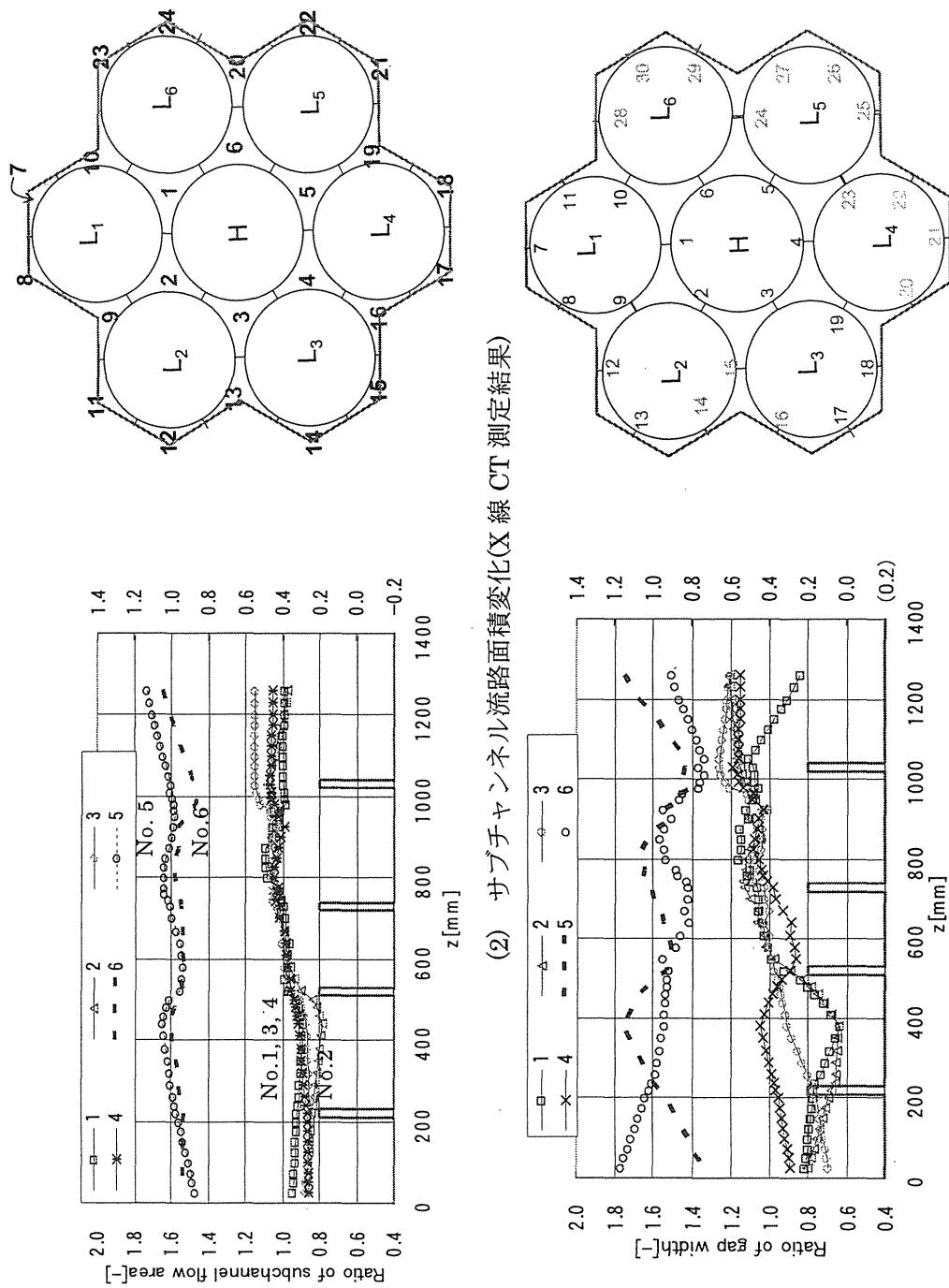


図 3.3 サブチャンネル分割とギャップ番号 1 ~30



(1) サブチャンネル間ギャップ幅変化(X線 CT測定結果)
(2) 中心口 SSD周りのサブチャンネル流路面積変化、ギャップ幅変化 X線 CT測定結果

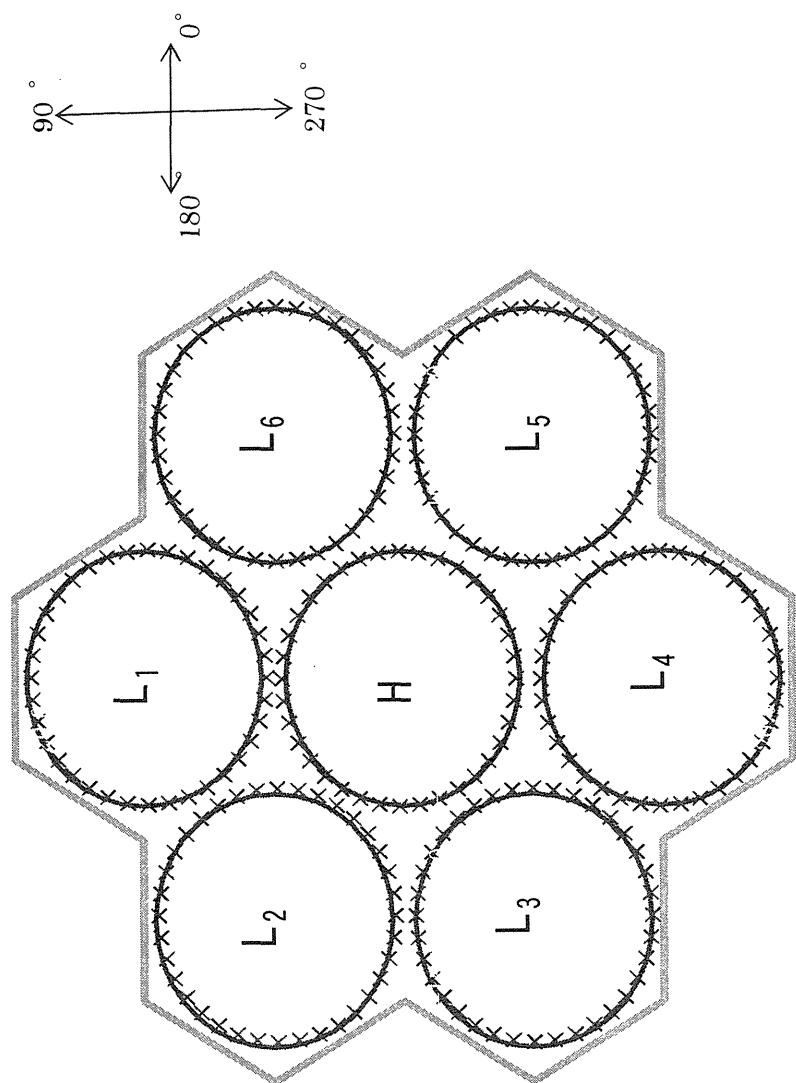


図 3.5 断面内のロッド位置測定結果の例 軸方向高さ 370 mm

表 4.1 稠密格子模擬 7 本バンドルの 2 つの試験体(3)(4)

	Test Section[A]		Test Section[B]	
模擬燃料棒	7本		六角形	
燃料棒 外径	12.3		13	
クリアランス	1		1.3	
加熱長さ	$L_H [m]$	1.8	1.26	
流動条件	P [MPa]	7.2		
出力分布	軸方向	一様	二重炉心 ピーキング	2.19
	径方向	一様～約1.4	一様～約1.2	

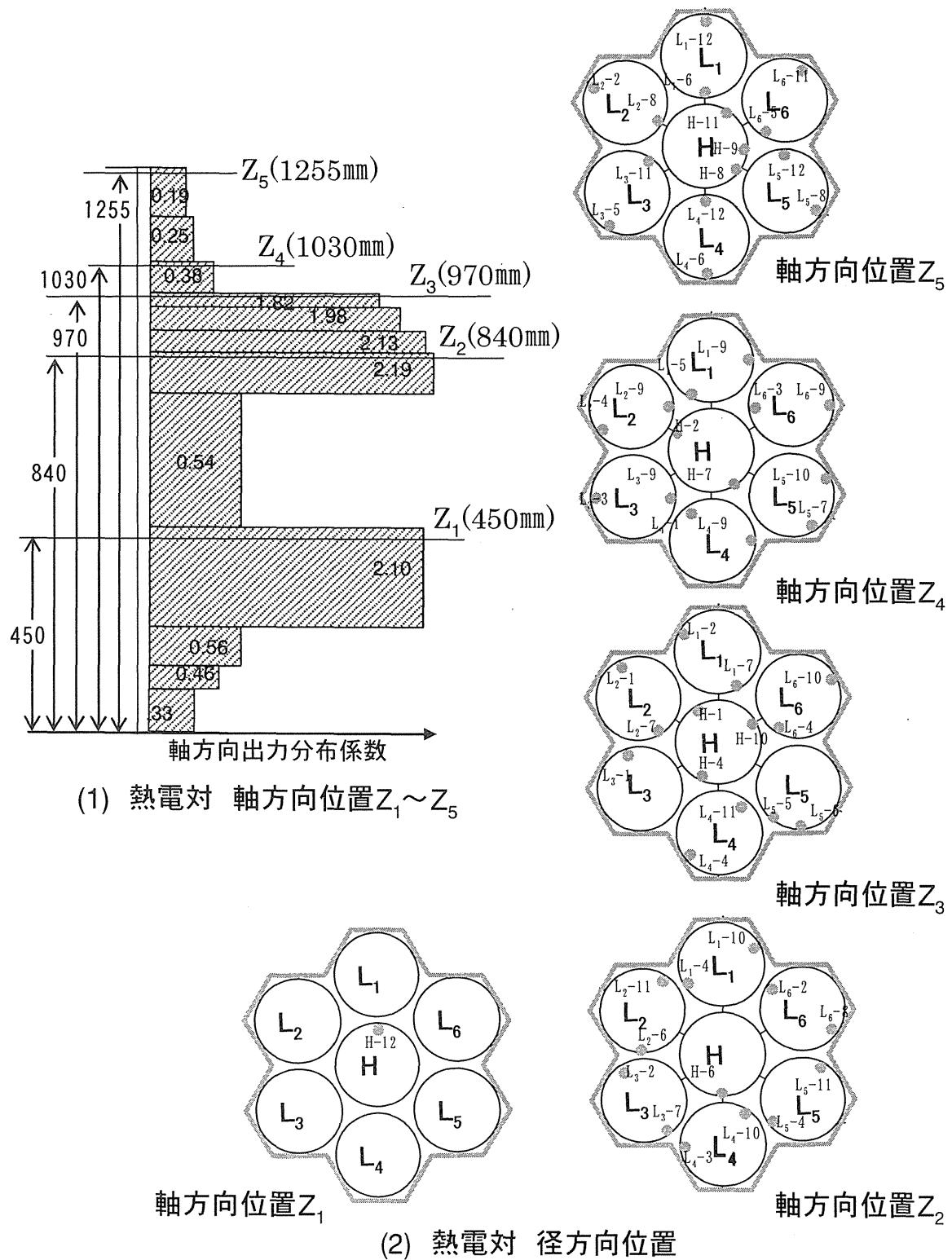


図 4.1 7 本バンドル伝熱実験 热電対取り付け位置

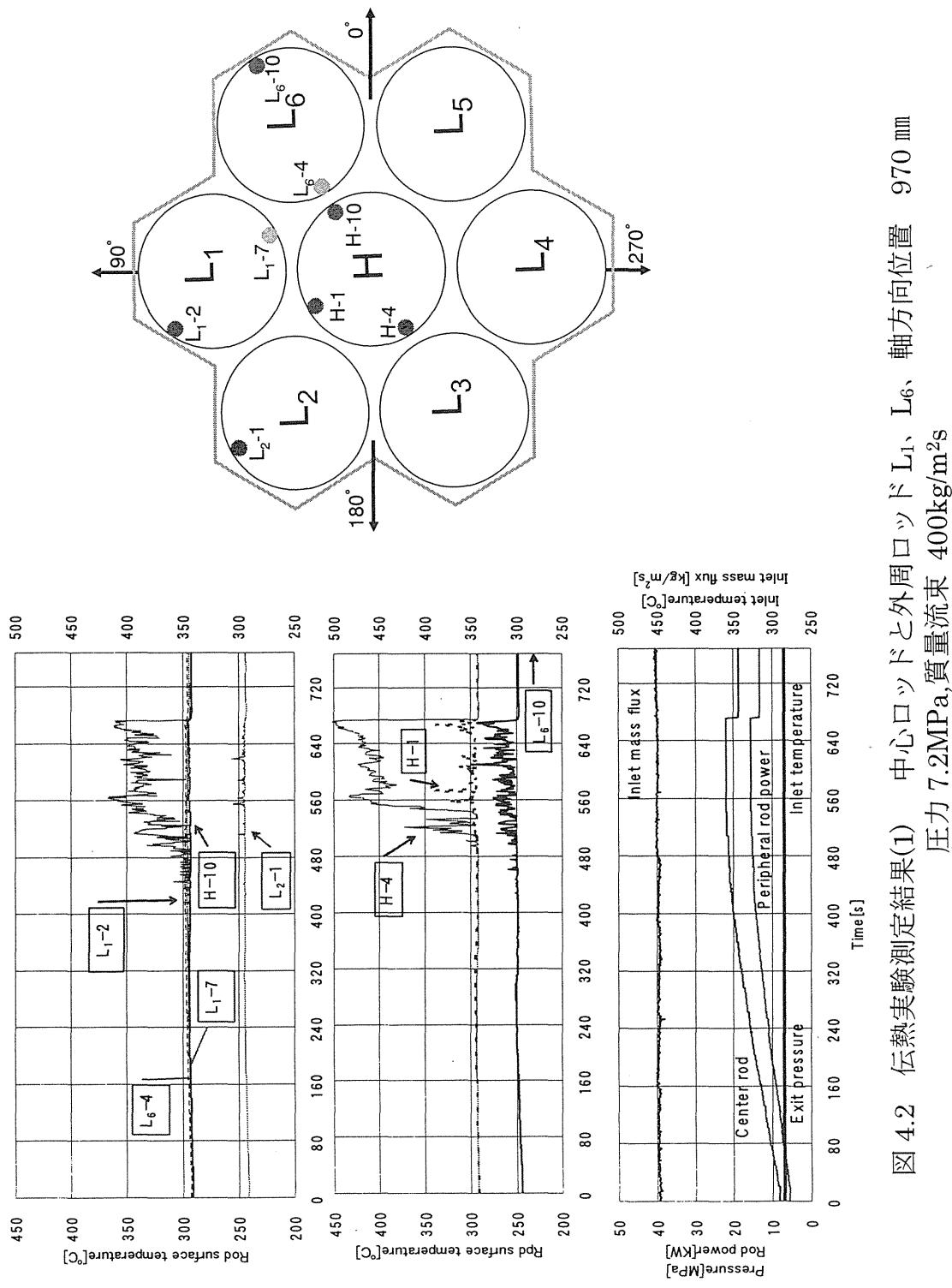


図 4.2 伝熱実験測定結果(1) 中心口ツドと外周口ツド L₁、L₆、軸方向位置 970 mm
圧力 7.2 MPa、質量流束 4000 kg/m²s

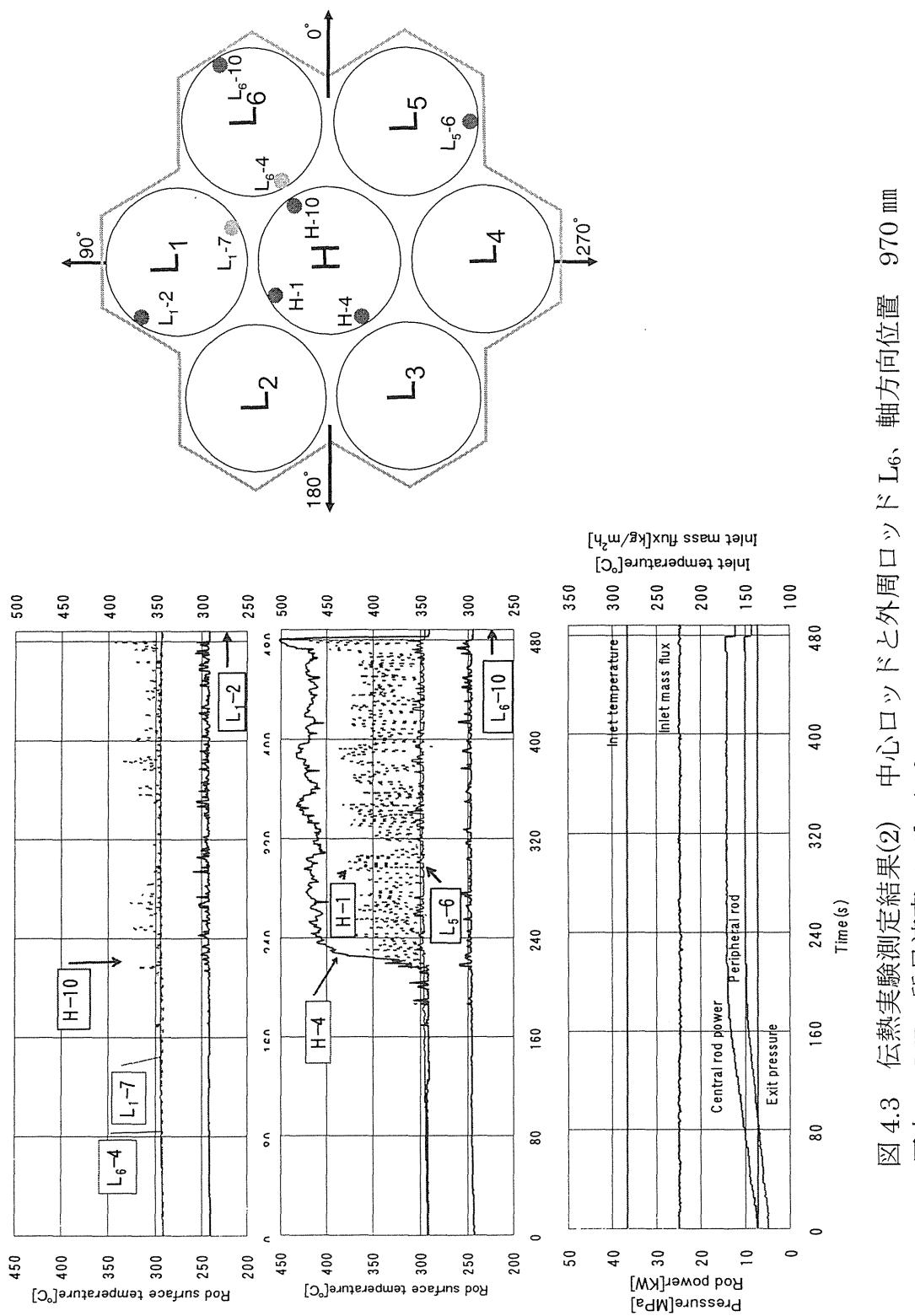


図 4.3 伝熱実験測定結果(2) 中心口 SSDと外周ロッド L₆、軸方向位置
圧力 7.2MPa, 質量流束 200kg/m²s

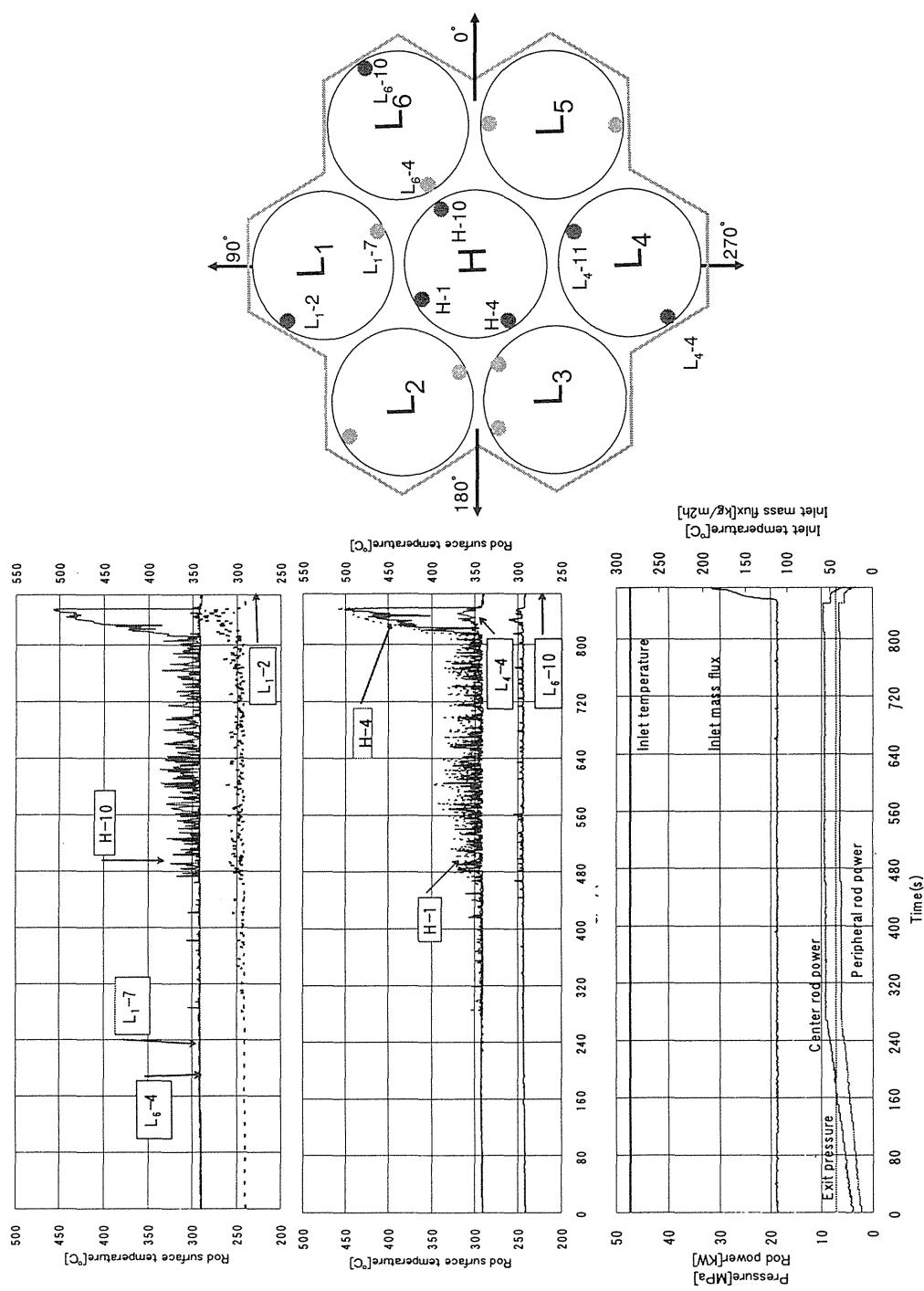
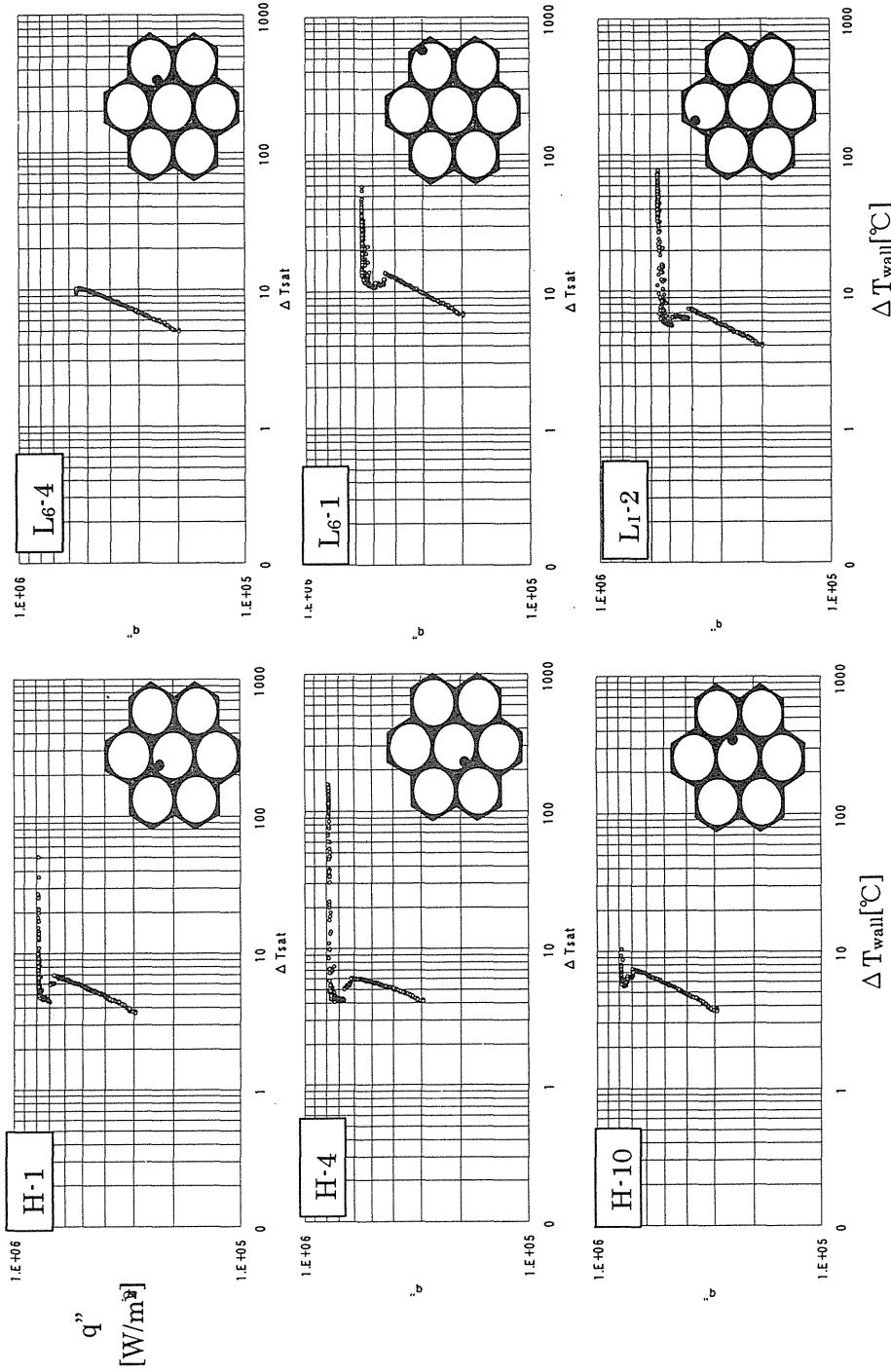
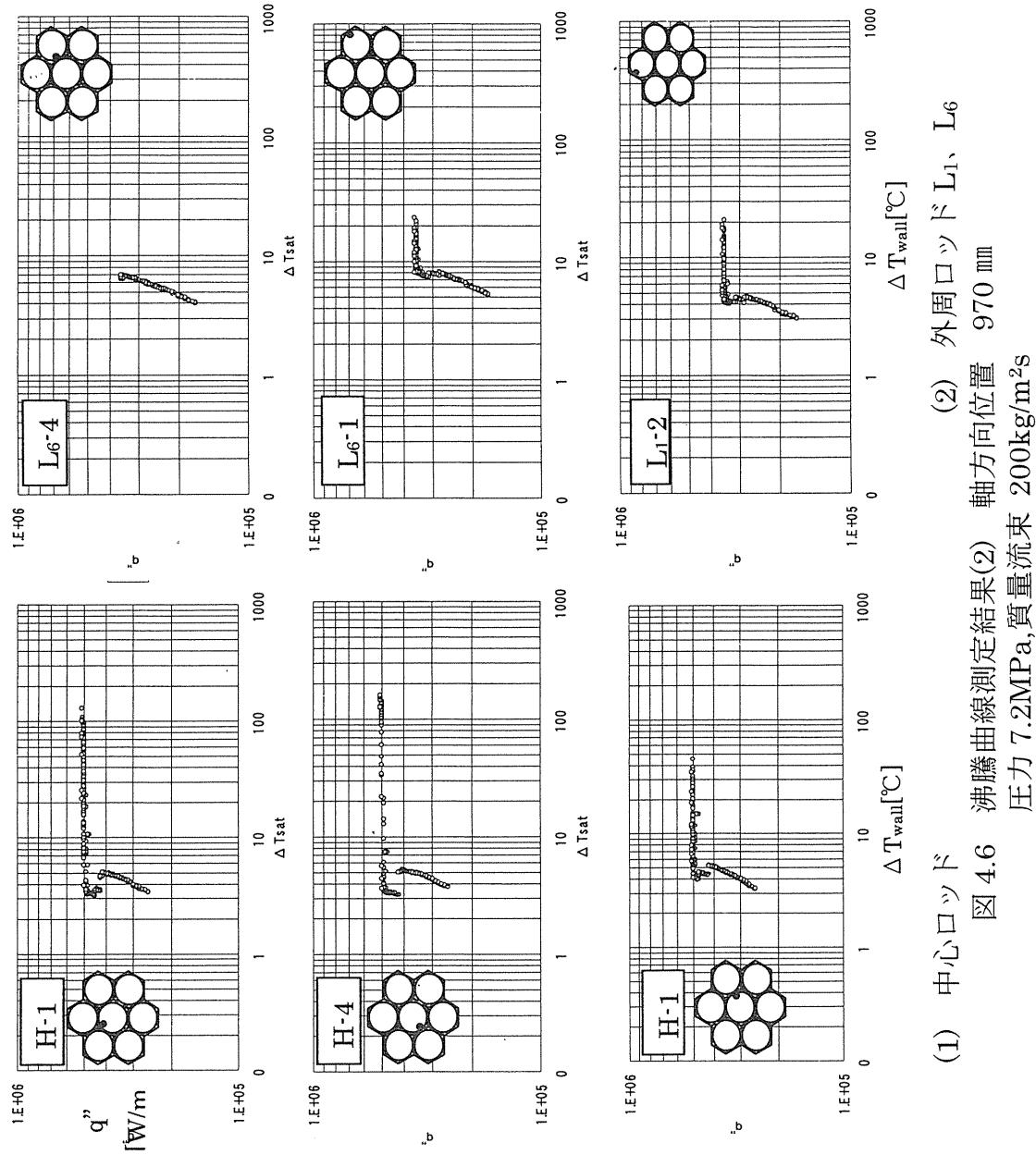
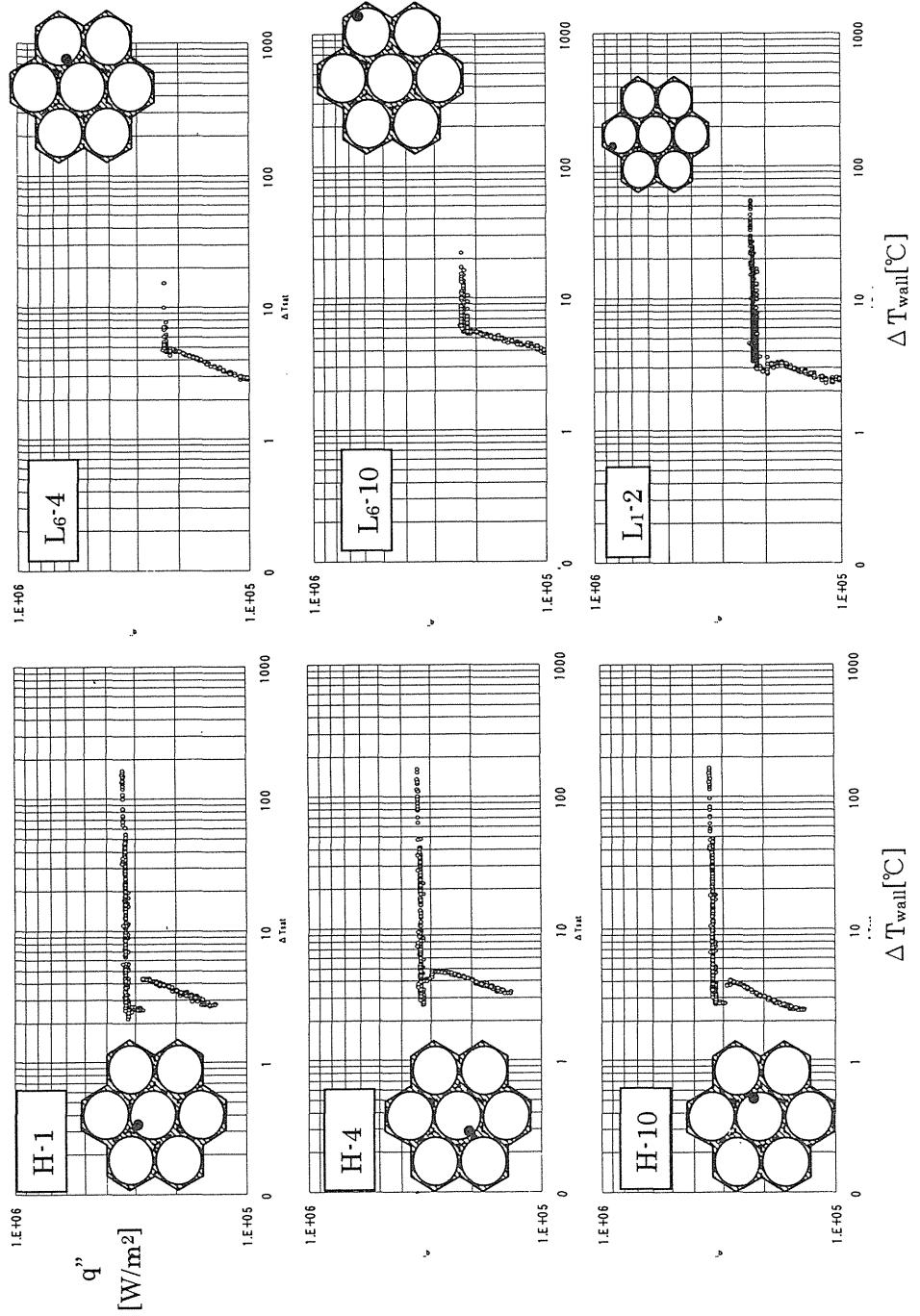


図 4.4 伝熱実験測定結果(3) 中心孔と外周孔と外周孔 L₆、軸方向位置 970 mm
圧力 7.2MPa、質量流束 100kg/m²s



(1) 中心口下
 図 4.5 沸騰曲線測定結果(1)
 圧力 7.2MPa, 質量流束 400kg/m²s
 (2) 外周口下
 軸方向位置 970 mm





(1) 中心口下
 (2) 外周口下
 図 4.7 沸騰曲線測定結果(3) 軸方向位置
 壁面温度変化 ΔT_{wall} 970 mm
 圧力 7.2 MPa, 質量流束 $100 \text{ kg/m}^2 \text{s}$

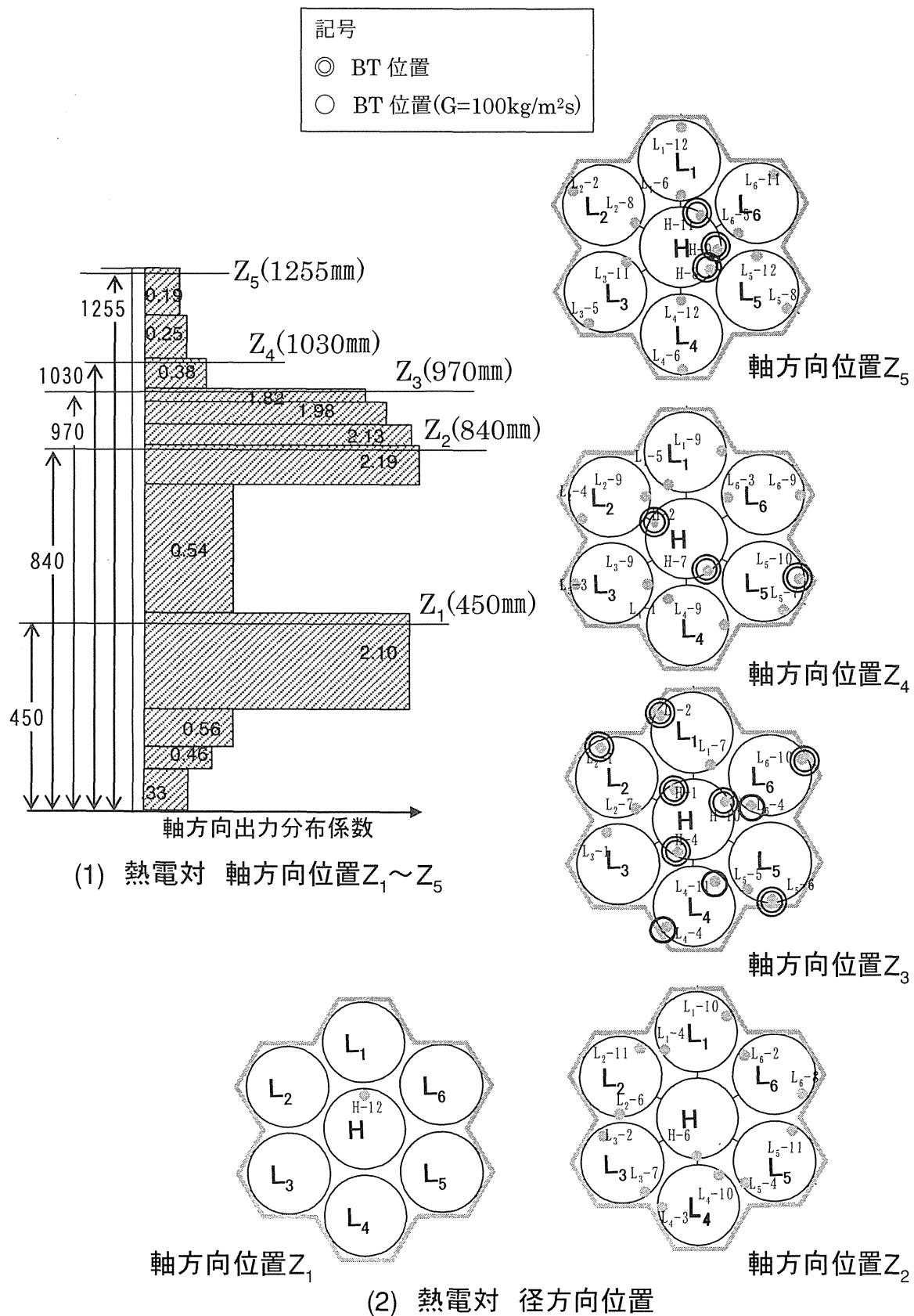


図 4.8 溫度上昇の生じた熱電対位置のまとめ
圧力 7.2MPa , 質量流束 $100, 200, 400\text{kg/m}^2\text{s}$

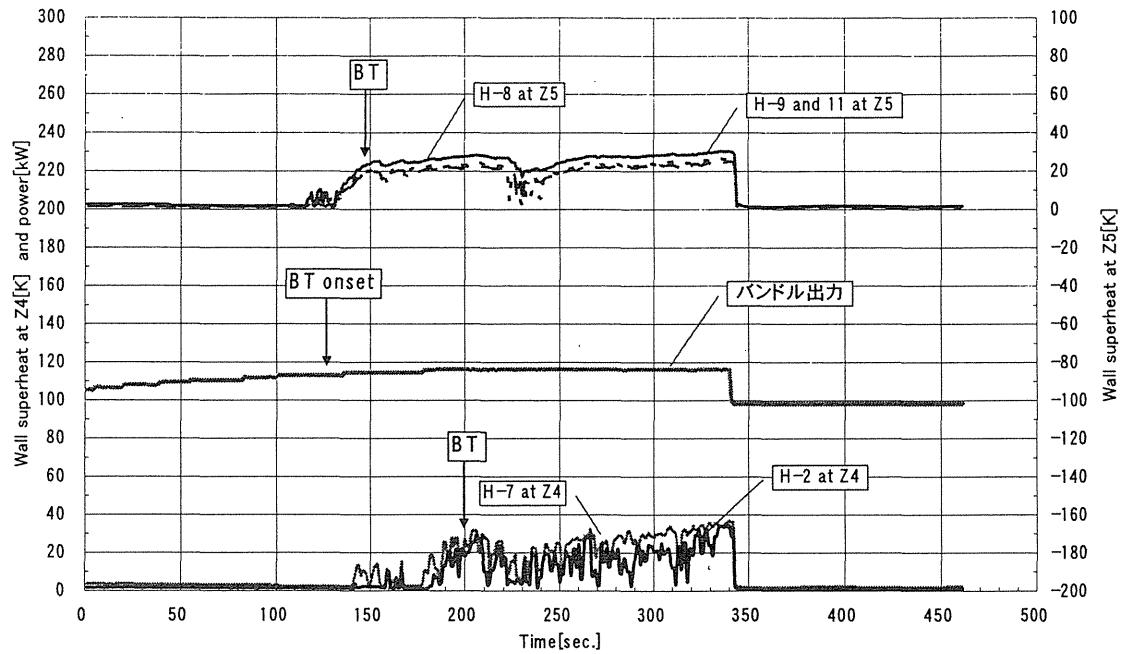


図 4.9 BT 後の模擬燃料棒表面温度測定結果 中心ロッド周方向角度の依存性
圧力 7.2MPa, 質量流束 $400 \text{ kg/m}^2\text{s}$

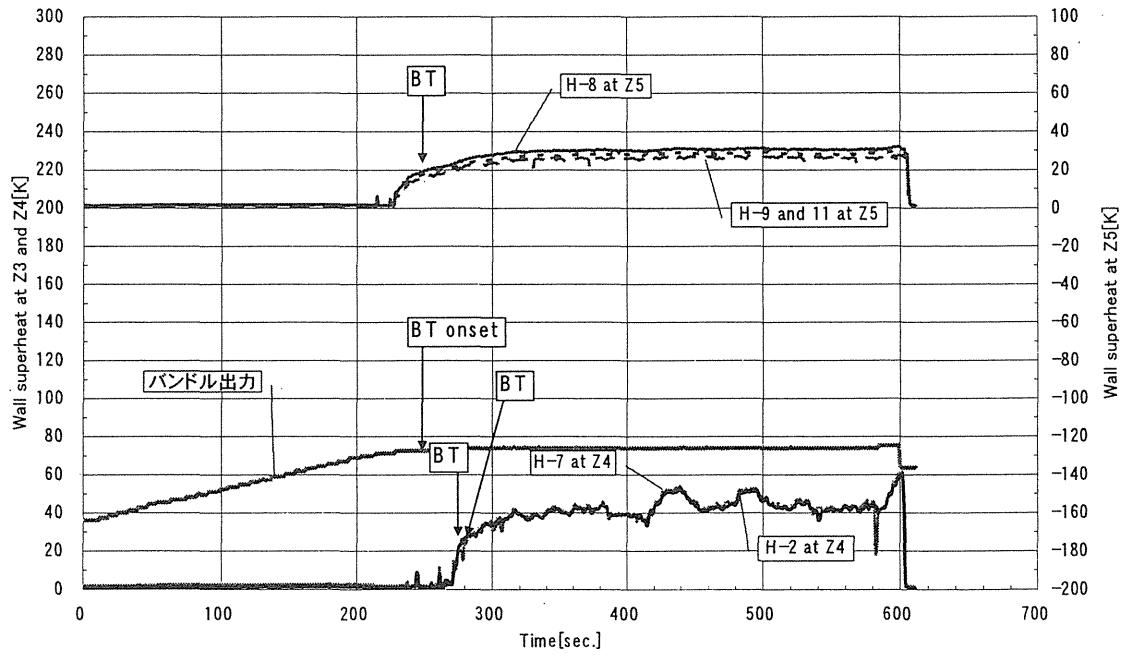
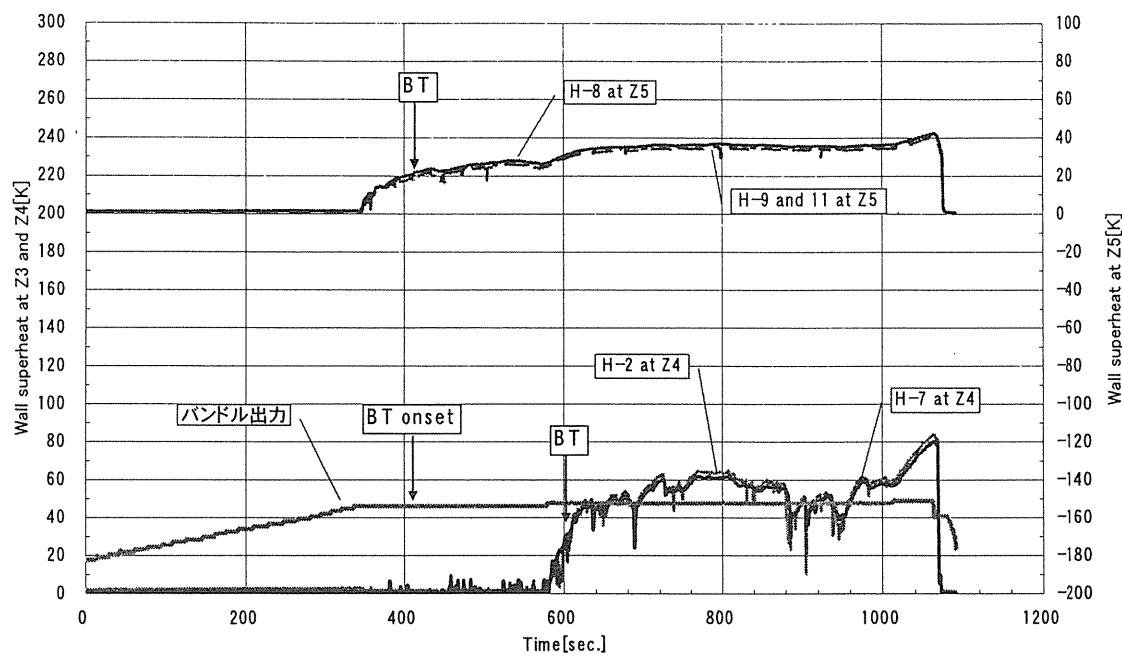


図 4.10 BT 後の模擬燃料棒表面温度測定結果 中心ロッド周方向角度の依存性
圧力 7.2MPa, 質量流束 $200 \text{ kg/m}^2\text{s}$



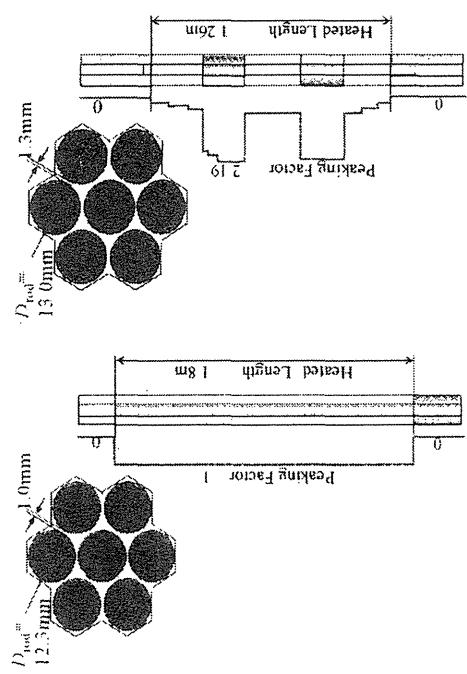


図 4.12 稠密格子模擬 7 本/ドームの 2 つの試験体軸方向出力分布(3)(4)
 (1) Test section [A] (2) Test section [B]

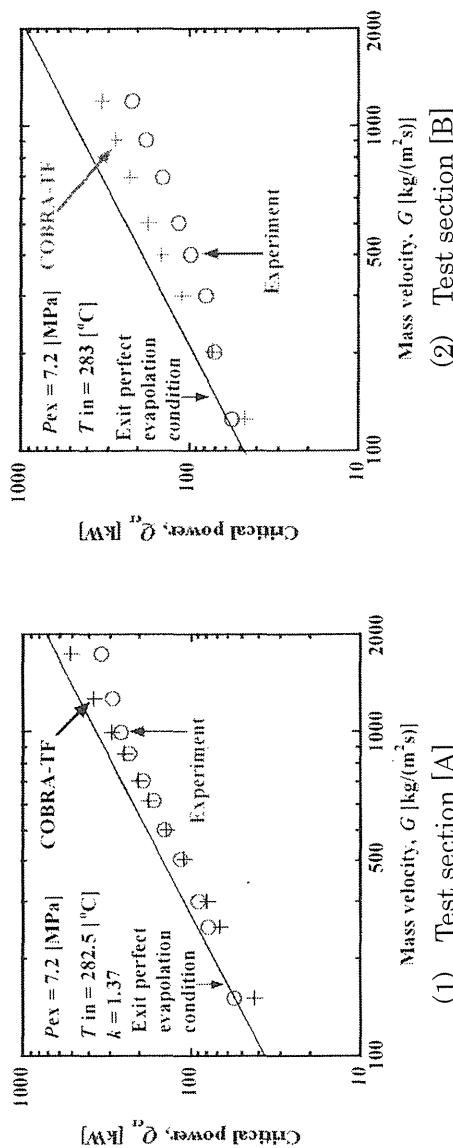


図 4.13 限界出力測定値と解析との比較 その 1(3)(4)
 (1) Test section [A] (2) Test section [B]

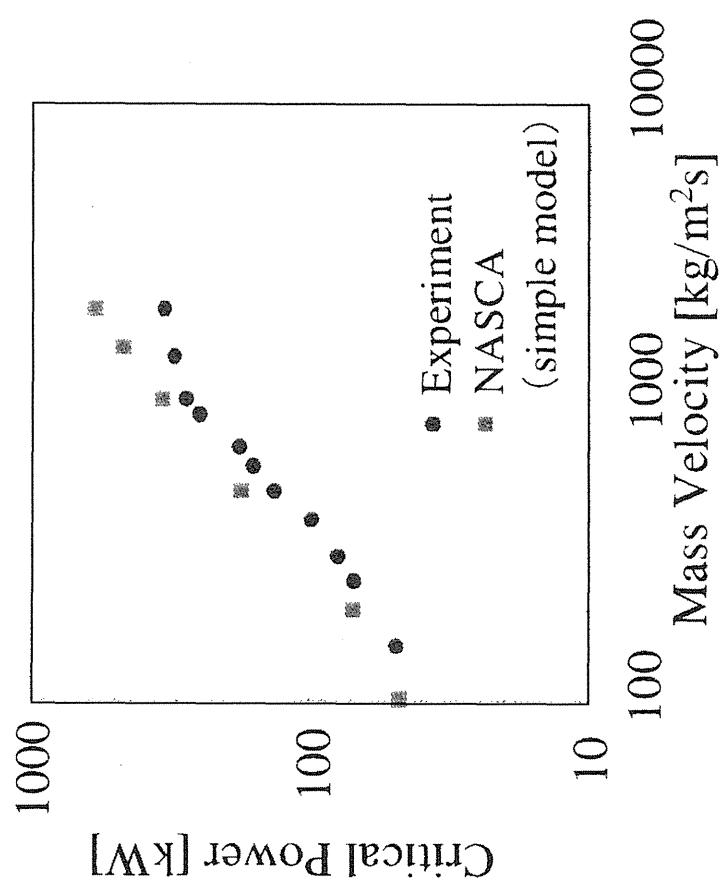


図 4.14 限界出力測定値と解析との比較 その 2 (4)

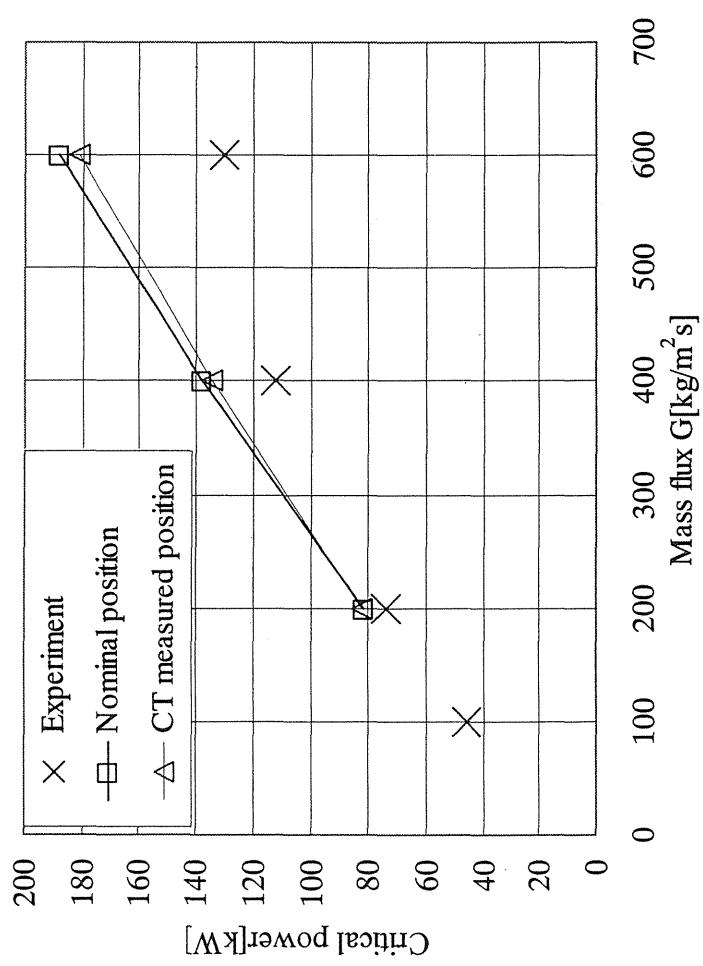


図 4.15 模擬燃料棒変位の限界出力予測(サブチャンネル解析)に及ぼす影響
模擬燃料棒位置を設計値で評価した場合と X 線 CT 実測値で評価した場合

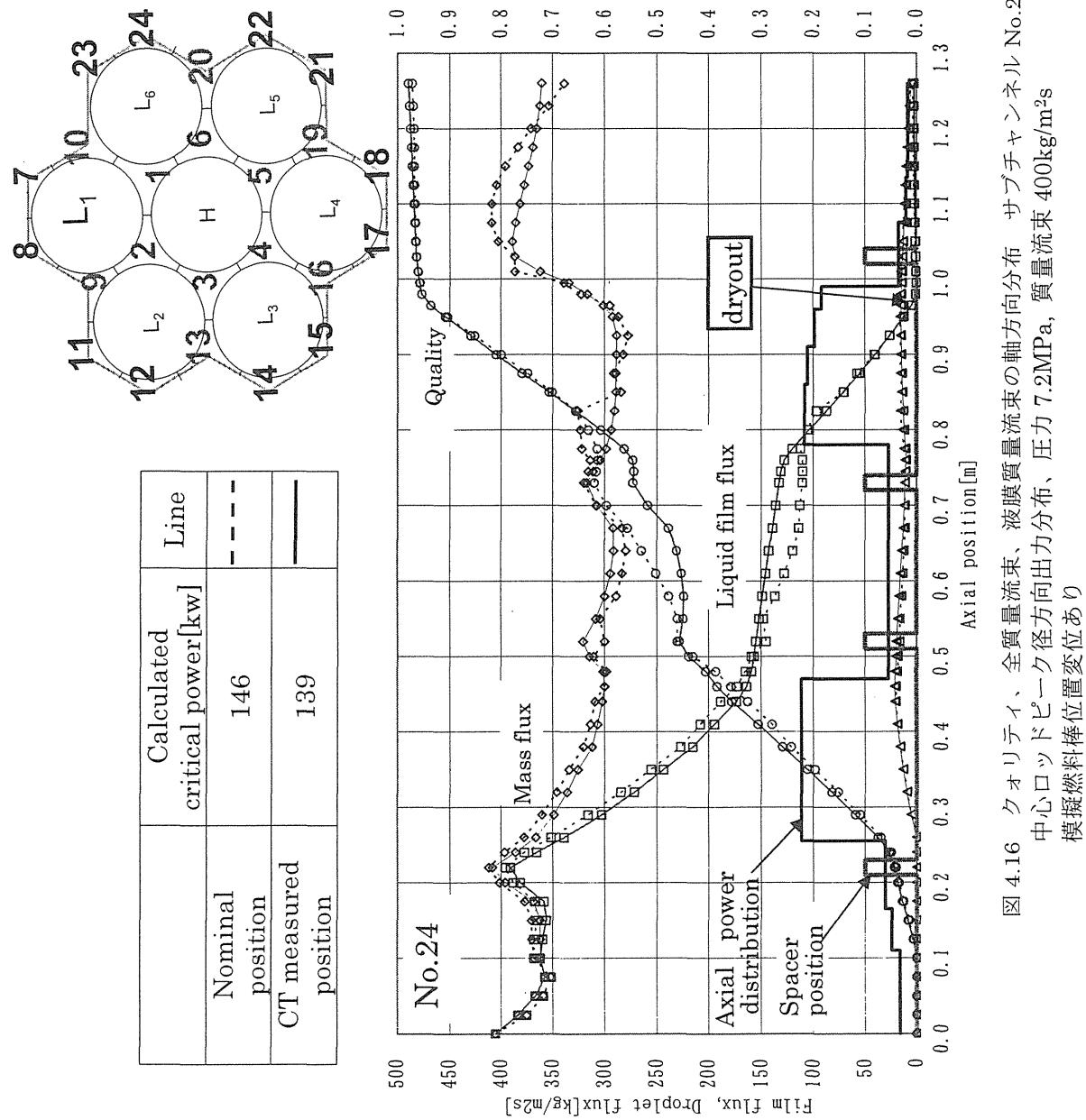


図 4.16 クオリティ、全質量流束、液膜質量流束の軸方向分布
中心口ドビーケ径方向出力分布、圧力 7.2MPa, 質量流束 $400\text{kg/m}^2\text{s}$
模擬燃料棒位置変位あり

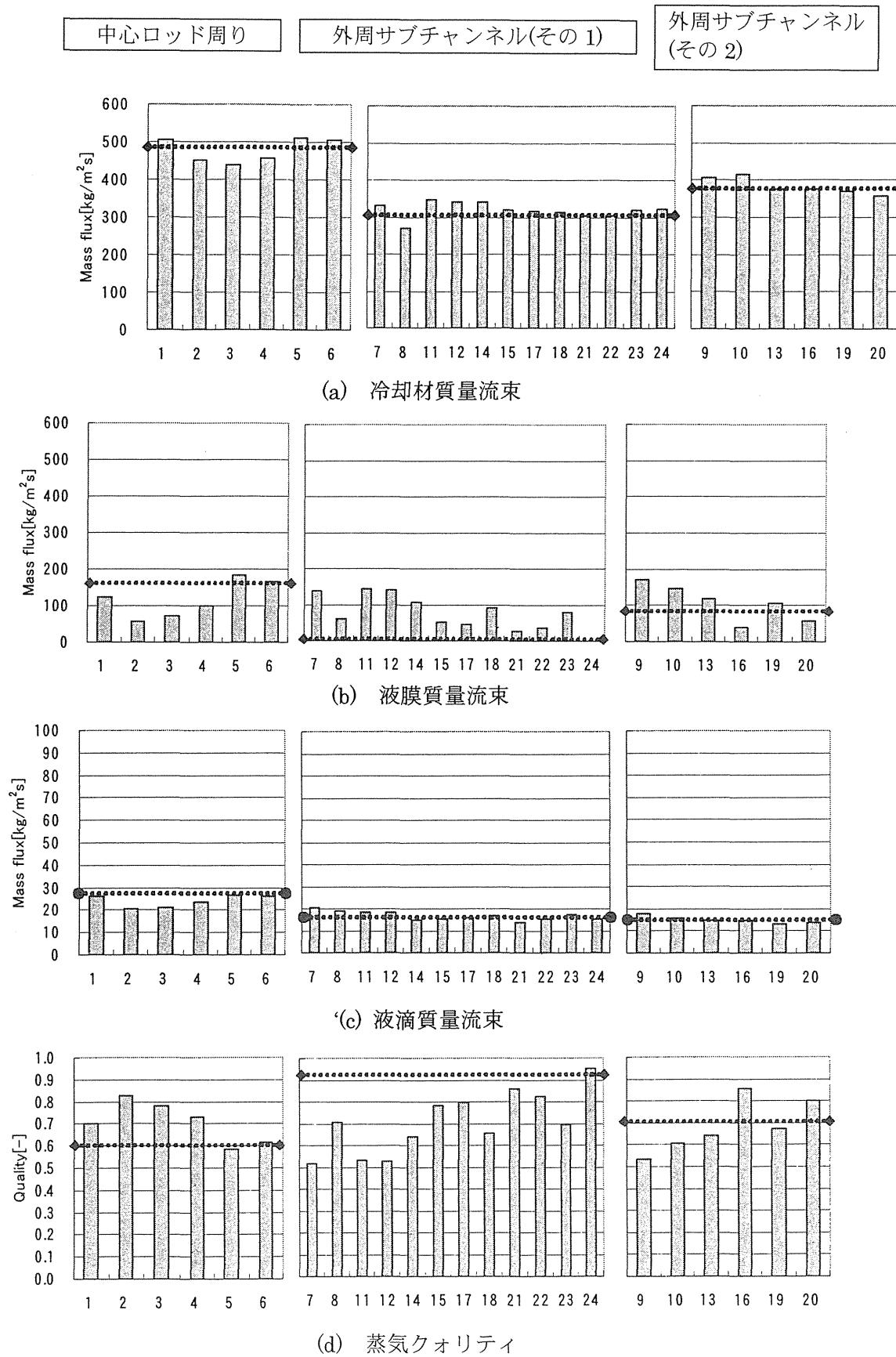


図 4.17 径方向サブチャンネルごとの冷却材分布計算値 軸方向高さ 980 mm

径方向中心ロッドピーク出力分布、圧力 7.2MPa、質量流束 400kg/m²

This is a blank page.

付録

- A. 模擬燃料棒間隔の変化、模擬燃料棒とシュラウド間隔の変化
- B. 7本バンドル伝熱実験 模擬燃料棒最高表面温度測定結果

This is a blank page.

付録 A. 模擬燃料棒間隔の変化、模擬燃料棒とシュラウド間隔の変化

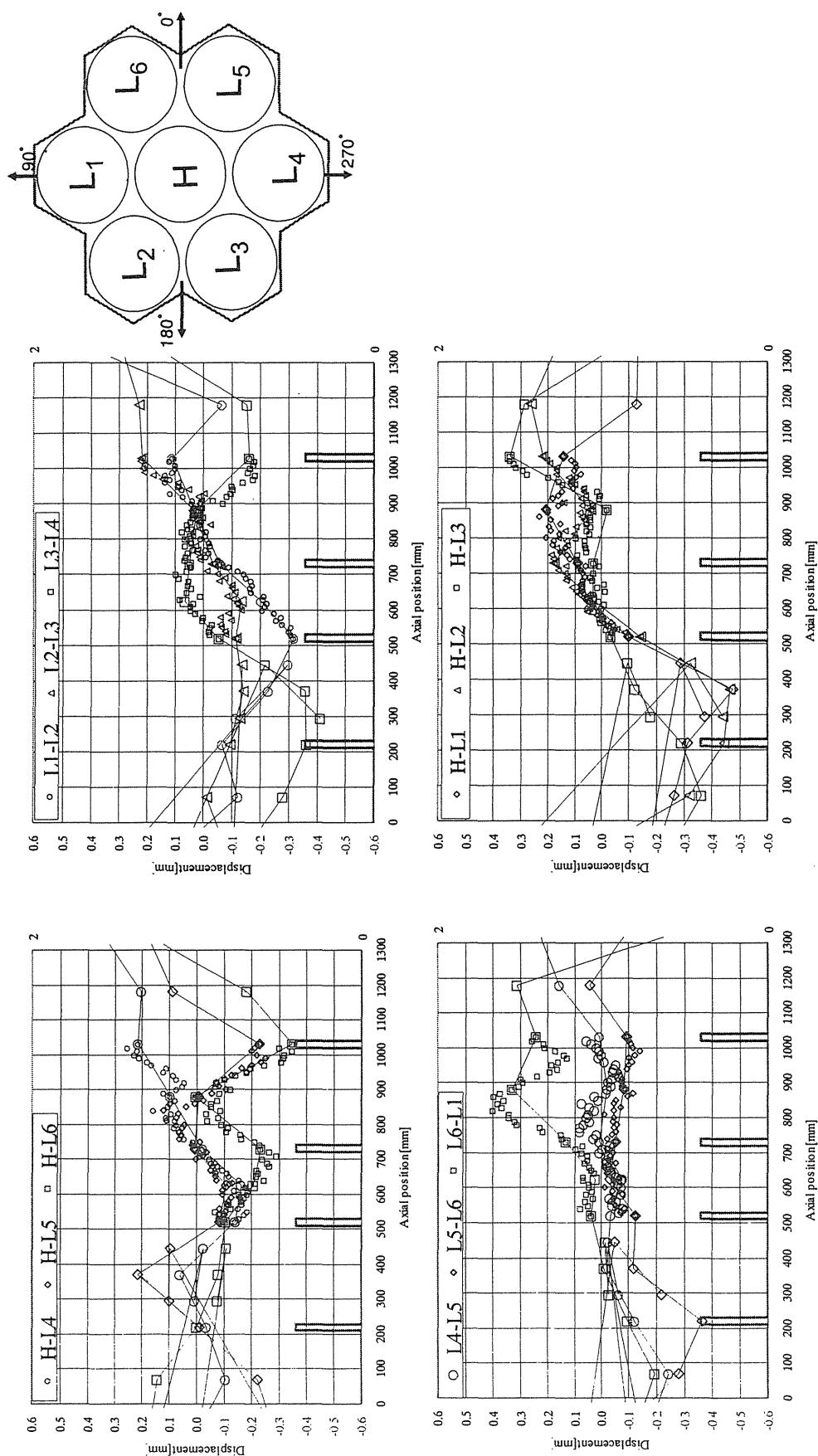


図 A-1 模擬燃料棒間の最小クリアランス変化の軸方向に沿った分布

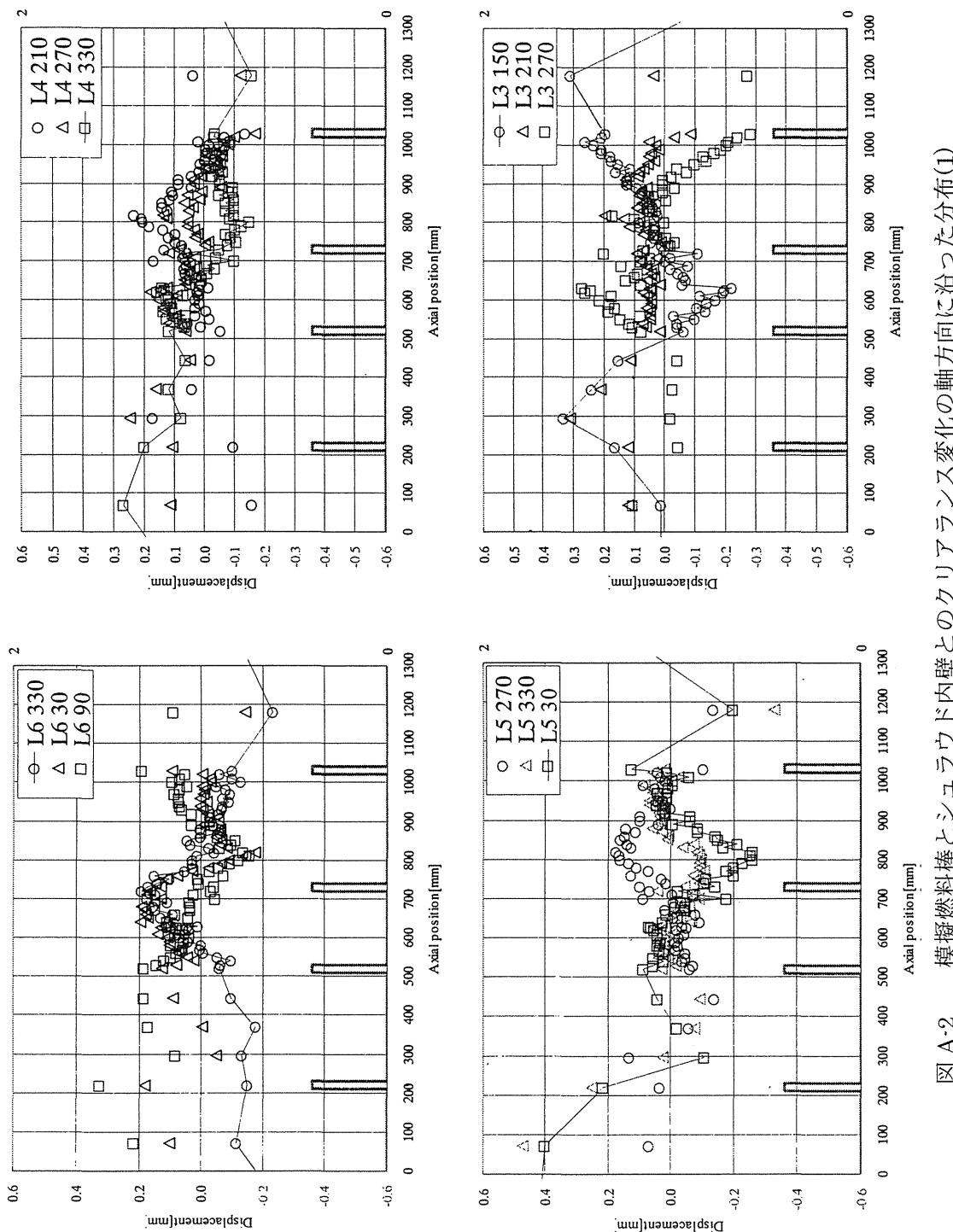


図 A-2 模擬燃料棒とシミュラウド内壁とのクリアランス変化の軸方向に沿った分布(1)

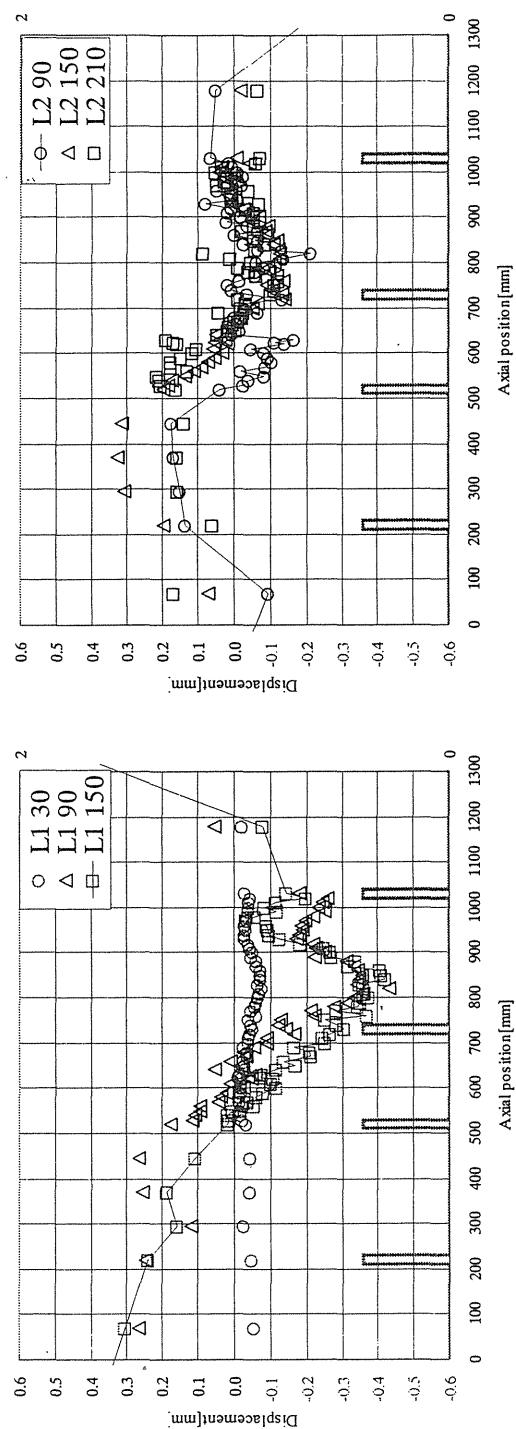


図 A-3 模擬燃料棒とシュラウド内壁とのクリアランス変化の軸方向に沿った分布(2)

付録 B 7本バンドル伝熱実験 模擬燃料棒最高表面温度測定結果

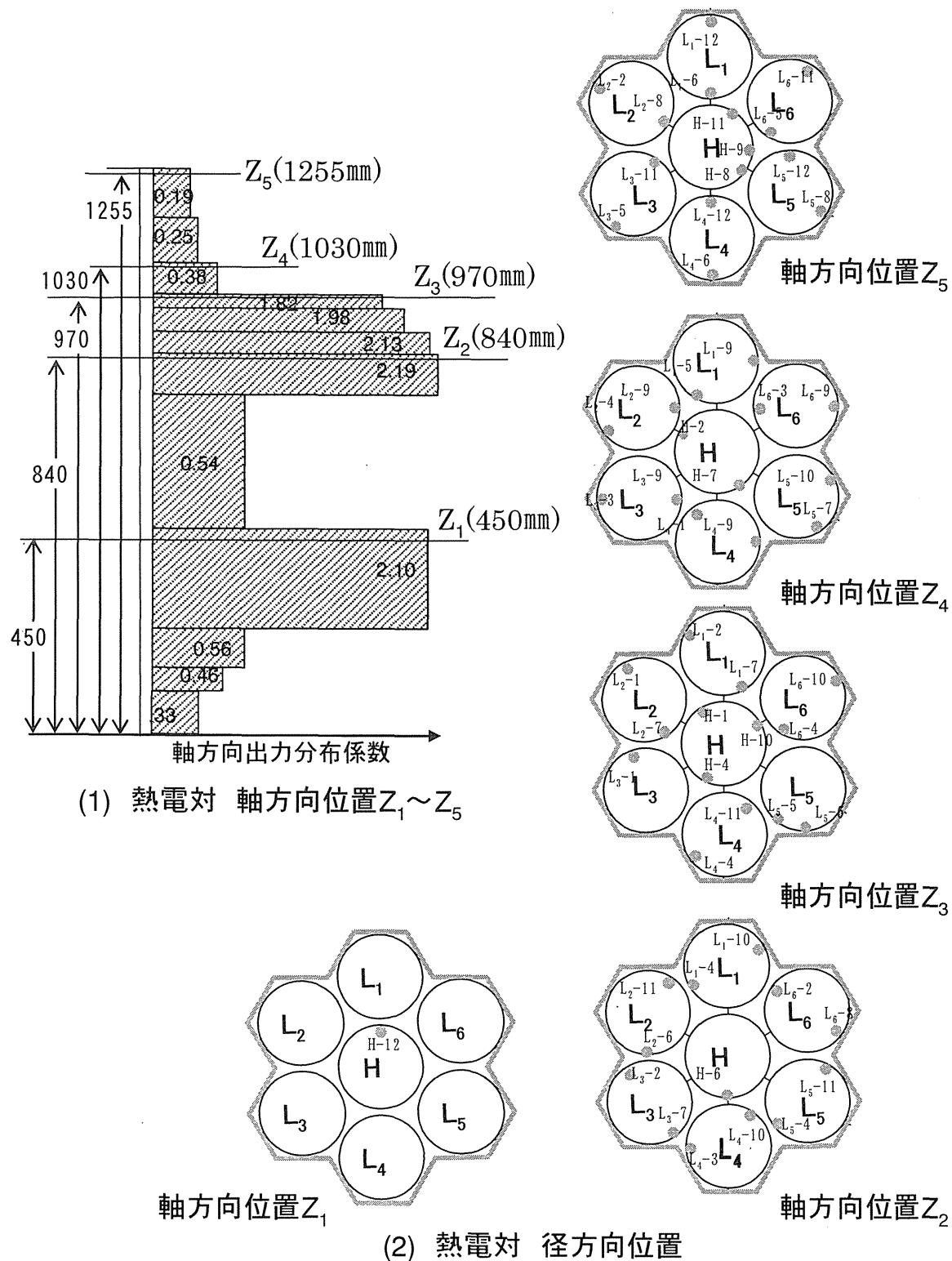
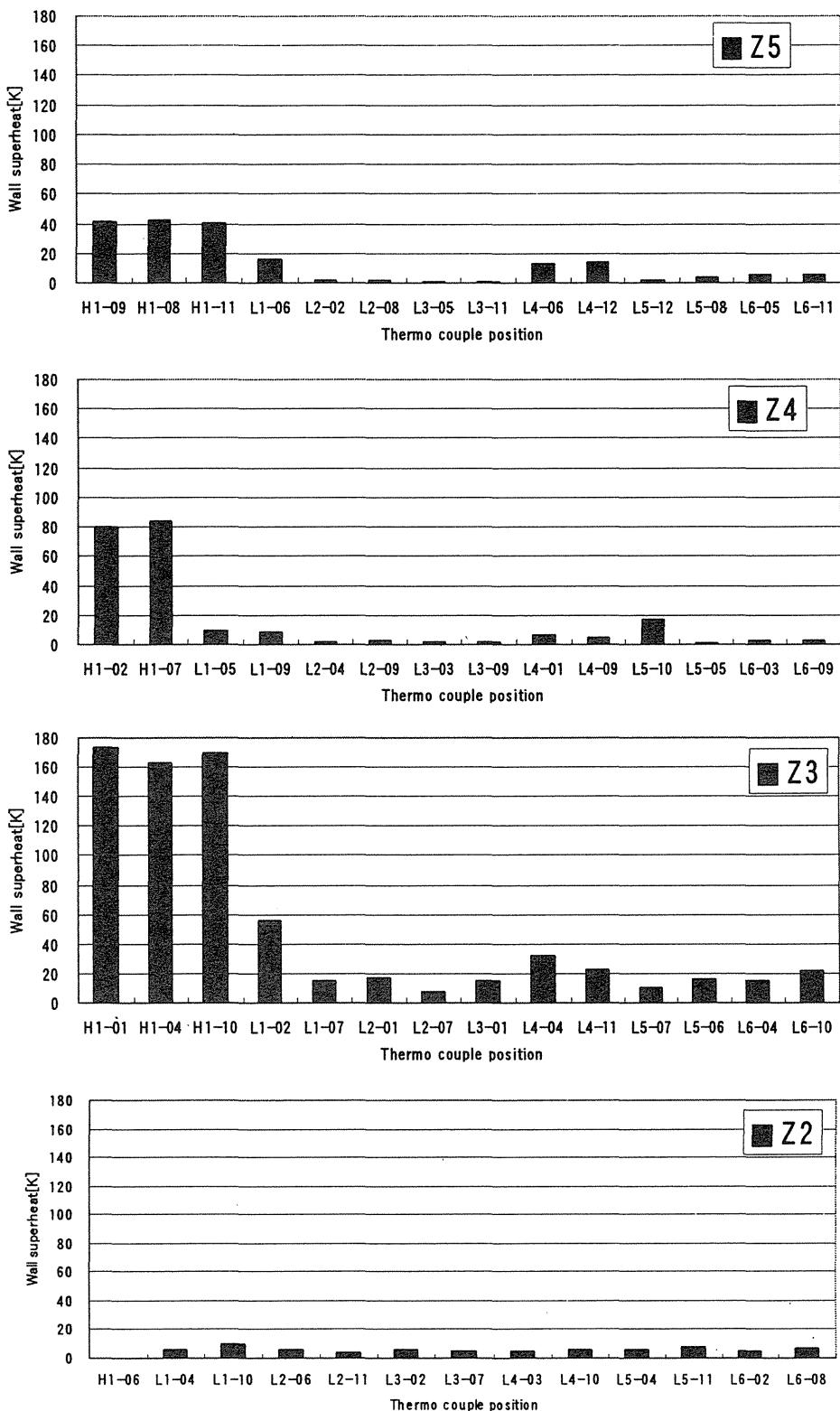
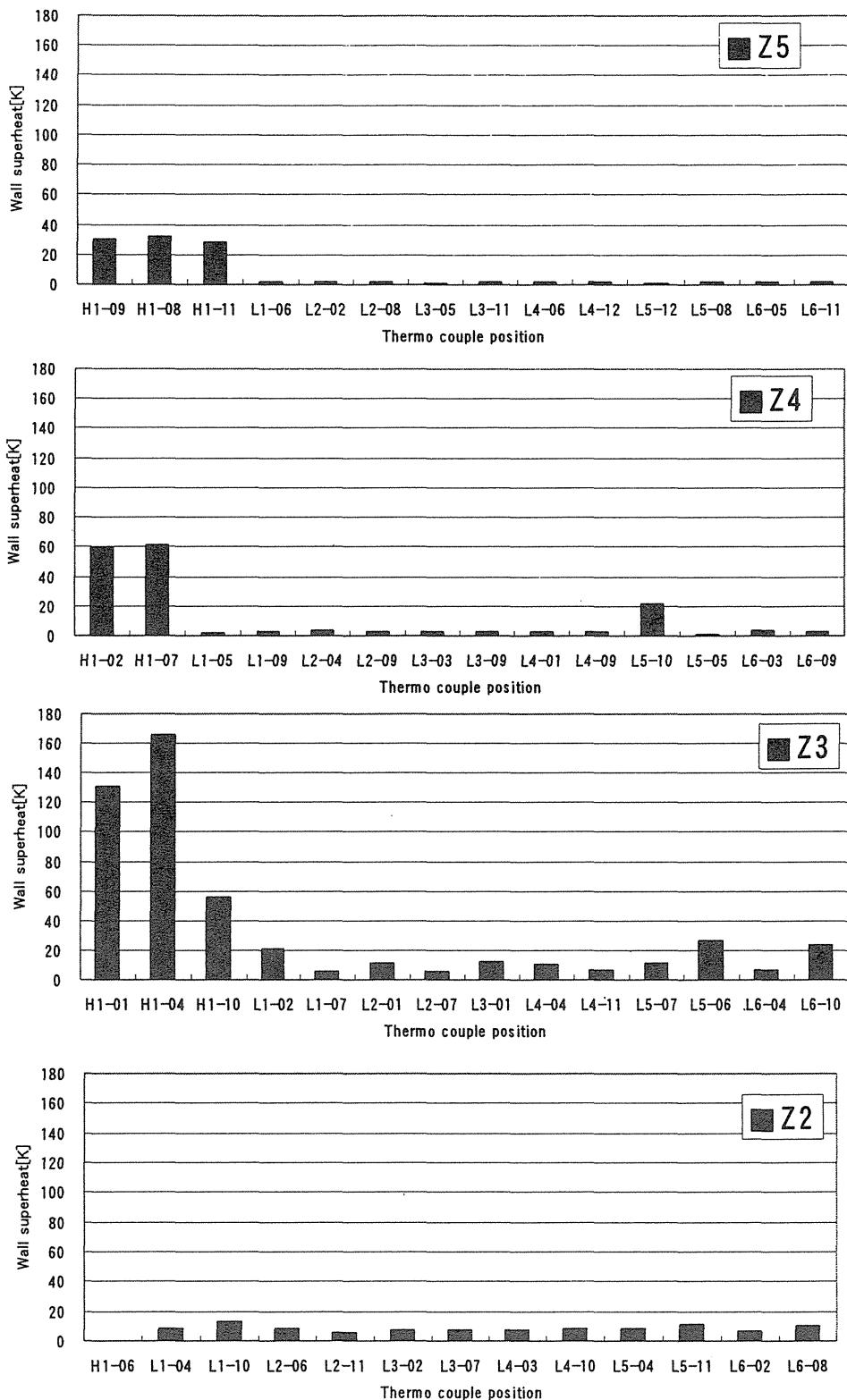
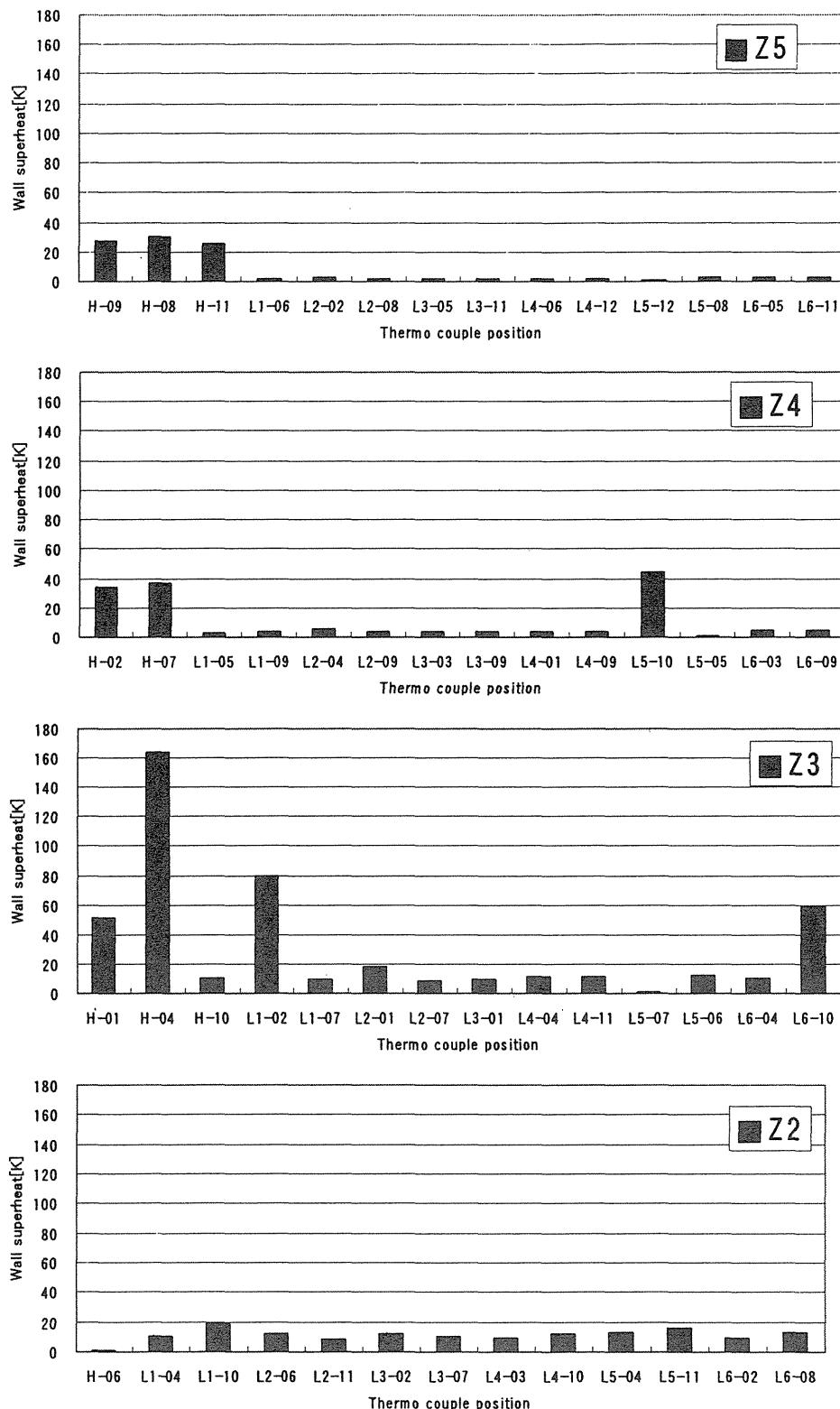


図 B-1 7本バンドル伝熱実験 热電対取り付け位置

図 B-2 热電対最高温度($\Delta T_{sat} = T_{wall} - T_{sat}$) 質量流束 $100 \text{kg/m}^2\text{s}$

図 B-3 热電対最高温度($\Delta T_{sat} = T_{wall} - T_{sat}$) 質量流束 $200 \text{ kg/m}^2\text{s}$

図 B-4 热電対最高温度($\Delta T_{sat}=T_{wall}-T_{sat}$) 質量流束 $400 \text{kg/m}^2\text{s}$

This is a blank page.

国際単位系(SI)と換算表

表1 SI基本単位および補助単位

量	名称	記号
長さ	メートル	m
質量	キログラム	kg
時間	秒	s
電流	アンペア	A
熱力学温度	ケルビン	K
物質量	モル	mol
光度	カンデラ	cd
平面角	ラジアン	rad
立体角	ステラジアン	sr

表3 固有の名称をもつSI組立単位

量	名称	記号	他のSI単位による表現
周波数	ヘルツ	Hz	s ⁻¹
力	ニュートン	N	m·kg/s ²
圧力、応力	パスカル	Pa	N/m ²
エネルギー、仕事、熱量	ジュール	J	N·m
工率、放射束	ワット	W	J/s
電気量、電荷	クーロン	C	A·s
電位、電圧、起電力	ボルト	V	W/A
静電容量	ファラード	F	C/V
電気抵抗	オーム	Ω	V/A
コンダクタンス	ジーメンス	S	A/V
磁束	ウェーバ	Wb	V·s
磁束密度	テスラ	T	Wb/m ²
インダクタンス	ヘンリー	H	Wb/A
セルシウス温度	セルシウス度	°C	
光束照度	ルーメン	lm	cd·sr
放射能	ベクレル	Bq	s ⁻¹
吸収線量	グレイ	Gy	J/kg
線量当量	シーベルト	Sv	J/kg

表2 SIと併用される単位

名称	記号
分、時、日	min, h, d
度、分、秒	°, ', "
リットル	l, L
トン	t
電子ボルト	eV
原子質量単位	u

$$1 \text{ eV} = 1.60218 \times 10^{-19} \text{ J}$$

$$1 \text{ u} = 1.66054 \times 10^{-27} \text{ kg}$$

表5 SI接頭語

倍数	接頭語	記号
10 ¹⁸	エクサ	E
10 ¹⁵	ペタ	P
10 ¹²	テラ	T
10 ⁹	ギガ	G
10 ⁶	メガ	M
10 ³	キロ	k
10 ²	ヘクト	h
10 ¹	デカ	da
10 ⁻¹	デシ	d
10 ⁻²	センチ	c
10 ⁻³	ミリ	m
10 ⁻⁶	マイクロ	μ
10 ⁻⁹	ナノ	n
10 ⁻¹²	ピコ	p
10 ⁻¹⁵	フェムト	f
10 ⁻¹⁸	アト	a

(注)

- 表1～5は「国際単位系」第5版、国際度量衡局1985年刊行による。ただし、1eVおよび1uの値はCODATAの1986年推奨値によった。
- 表4には海里、ノット、アール、ヘクタールも含まれているが日常の単位なのでここでは省略した。
- barは、JISでは流体の圧力を表わす場合に限り表2のカテゴリーに分類されている。
- EC閣僚理事会指令ではbar、barnおよび「血圧の単位」mmHgを表2のカテゴリーに入れている。

換算表

圧	MPa(=10 bar)	kgf/cm ²	atm	mmHg(Torr)	lbf/in ² (psi)
力	1	10.1972	9.86923	7.50062 × 10 ³	145.038
	0.0980665	1	0.967841	735.559	14.2233
	0.101325	1.03323	1	760	14.6959
	1.33322 × 10 ⁻⁴	1.35951 × 10 ⁻³	1.31579 × 10 ⁻³	1	1.93368 × 10 ⁻²
	6.89476 × 10 ⁻³	7.03070 × 10 ⁻²	6.80460 × 10 ⁻²	51.7149	1

$$\text{粘度 } 1 \text{ Pa}\cdot\text{s}(N\cdot\text{s}/\text{m}^2) = 10 \text{ P(ボアズ)}(\text{g}/(\text{cm}\cdot\text{s}))$$

$$\text{動粘度 } 1 \text{ m}^2/\text{s} = 10^4 \text{ St(ストークス)}(\text{cm}^2/\text{s})$$

エネルギー・仕事・熱量	J(=10 ⁷ erg)	kgf·m	kW·h	cal(計量法)	Btu	ft · lbf	eV	1 cal = 4.18605 J(計量法)
	1	0.101972	2.77778 × 10 ⁻⁷	0.238889	9.47813 × 10 ⁻⁴	0.737562	6.24150 × 10 ¹⁸	= 4.184 J(熱化学)
	9.80665	1	2.72407 × 10 ⁻⁶	2.34270	9.29487 × 10 ⁻³	7.23301	6.12082 × 10 ¹⁹	= 4.1855 J(15 °C)
	3.6 × 10 ⁶	3.67098 × 10 ⁵	1	8.59999 × 10 ⁵	3412.13	2.65522 × 10 ⁶	2.24694 × 10 ²⁵	= 4.1868 J(国際蒸気表)
	4.18605	0.426858	1.16279 × 10 ⁻⁶	1	3.96759 × 10 ⁻³	3.08747	2.61272 × 10 ¹⁹	仕事率 1 PS(仏馬力)
	1055.06	107.586	2.93072 × 10 ⁻⁴	252.042	1	778.172	6.58515 × 10 ²¹	= 75 kgf·m/s
	1.35582	0.138255	3.76616 × 10 ⁻⁷	0.323890	1.28506 × 10 ⁻³	1	8.46233 × 10 ¹⁸	= 735.499 W
	1.60218 × 10 ⁻¹⁹	1.63377 × 10 ⁻²⁰	4.45050 × 10 ⁻²⁶	3.82743 × 10 ⁻²⁰	1.51857 × 10 ⁻²²	1.18171 × 10 ⁻¹⁹	1	

放射能	Bq	Ci	吸収線量	Gy	rad
	1	2.70270 × 10 ⁻¹¹		1	100
	3.7 × 10 ¹⁰	1		0.01	1

照射線量	C/kg	R
	1	3876
	2.58 × 10 ⁻⁴	1

線量当量	Sv	rem
	1	100
	0.01	1

(86年12月26日現在)

稠密格子体系ロッド位置変位のX線CTによる測定と伝熱特性への影響（共同研究）



古紙配合率100%
白色度70%再生紙を使用しています