

# 高速炉の自然循環時集合体間熱移行現象に関する 解析手法の開発

— CCTLおよびPLANDTL試験に基づく検証 —

1996年9月

動力炉・核燃料開発事業団  
大洗工学センター  
安全工学部原子炉工学室

複製又はこの資料の入手については、下記にお問い合わせ下さい。

〒311-13 茨城県東茨城郡大洗町成田町4002

動力炉・核燃料開発事業団

大洗工学センター

システム開発推進部・技術管理室

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

動力炉・核燃料開発事業団 (Power Reactor and Nuclear Fuel Development Corporation) 1996

高速炉の自然循環時集合体間熱移行現象に関する解析手法の開発  
-CCTLおよびPLANDTL試験に基づく検証-

上出 英樹<sup>1</sup>、西村 元彦<sup>1</sup>、林 謙二<sup>1</sup>、桃井 一光<sup>1</sup>

三宅 康洋<sup>2</sup>

### 要旨

高速増殖炉の信頼性、安全性をさらに高める上で、スクラム後の崩壊熱除去に自然循環を活用することは大きな効果がある。すなわち、自然循環はポンプ等の動力源を必要とする動的機器に依存しないことから、除熱量が要求を満たせば崩壊熱除去機能の信頼性を高めることができる。自然循環時の炉心部の熱流動現象は、浮力と慣性力が影響しあう混合対流条件下におかれているため、炉心部の最高温度等を評価する上で、浮力の影響を考慮する必要がある。すなわち、集合体内の流量再配分による温度分布の平坦化、炉心部径方向温度分布に伴う集合体間の熱移行、等により強制循環時に比べて炉心内の温度分布は平坦化する。自然循環による崩壊熱除去を実現する上で、このような効果を考慮した炉心部の熱流動現象の評価手法を開発することが重要である。

本報告では、自然循環時の集合体間熱移行の影響を含めた集合体内熱流動現象を解析できる手法としてAQUAコードを用い、複数の集合体を一括して解析する手法を開発し、実験解析に適用した結果について述べる。本手法では各集合体についてサブチャンネル毎に1個のコントロールボリュームをx-y-z 3次元メッシュ体系の中で割り当てるメッシュ分割方式を採用し、サブチャンネル解析コード用に開発された軸方向流動抵抗などの相関式を直接持ち込んでいる。また、各集合体を独立した計算領域としてメッシュ分割する多領域モデルにより表現し、伝熱構造体モデルにより熱的に結合する。

本手法を用いた解析結果を実験と比較することにより、集合体間に熱移行が存在する条件で、これにともなう集合体内の流量配分、再循環流などを合理的に解析できるとともに、集合体内温度分布、最高温度を評価できることを示して、開発した手法の検証を行った。

1 大洗工学センター、安全工学部、原子炉工学室

2 株式会社 エヌデーター

Calculational Method for Inter-Subassembly Heat Transfer during Natural Circulation  
in Fast Breeder Reactors  
- Verification based on CCTL and PLANDTL Sodium Tests -

H. Kamide<sup>1</sup>, M. Nisimura<sup>1</sup>, K. Hayashi<sup>1</sup>, K. Momoi<sup>1</sup>,  
and Y. Miyake<sup>2</sup>

## ABSTRACT

It is considerably effective to utilize the natural circulation on advance of reliability of the decay heat removal systems of Fast Breeder Reactors. The natural circulation dose not depend on components which needs external power sources like pumps. This increases the reliability of the decay heat removal systems. However, thermohydraulics in the core have complex characteristics under the natural circulation. Under low flow conditions, buoyancy effects and heat transfer from high temperature subassemblies to low temperature subassemblies, i.e. inter-subassembly heat transfer, will significantly modify the flow and temperature distributions in the subassemblies. Thus, development of an evaluation method for the core thermohydraulic is significant to utilize the natural circulation.

A multi-subassembly analysis method using the three-dimensional thermohydraulic analysis code, AQUA, was developed to predict thermohydraulics in the subassemblies with influence of the inter-subassembly heat transfer. In this method, each subassembly is modeled in individual mesh region of multi-region model of AQUA and the staggered half-pin mesh arrangement was applied in each subassembly. The heat transfer between the subassemblies was simulated by a thermal structure model. The analysis method was applied to two sodium experiments where three or seven subassemblies were modeled in simulated cores. The experimental analyses showed that the multi-subassembly analysis method could evaluate the thermohydraulics in the subassemblies.

---

<sup>1</sup> Reactor Engineering Section, Safety Engineering Division, O-arai Engineering Center, PNC  
<sup>2</sup> NDD Corp.

## 目次

1. 序論 .....	1
2. AQUAコードを用いた複数集合体解析手法 .....	2
3. 61ピン束3集合体体系への適用 .....	5
3. 1 実験体系 .....	5
3. 2 解析体系 .....	6
3. 3 実験解析 .....	6
4. 37ピン束7集合体体系への適用 .....	8
4. 1 実験体系 .....	8
4. 2 解析体系 .....	8
4. 3 定常実験解析 .....	9
4. 4 過渡実験解析 .....	11
5. 考察 .....	13
5. 1 集合体内温度分布のパラメータ表現 .....	13
5. 2 サブチャンネル間混合効果について .....	15
5. 3 実機集合体への適用 .....	17
6. 結論 .....	18
謝辞 .....	19
参考文献 .....	20

## List of Tables

Table 1	Main Specifications of CCTL-CFR .....	2 1
Table 2	Friction Factors in S/As of CCTL-CFR .....	2 2
Table 3	Cases of CCTL-CFR Experimental Analyses .....	2 3
Table 4	Main Specifications of PLANDTL-DHX .....	2 4
Table 5	Friction Factors in S/As of PLANDTL-DHX .....	2 5
Table 6	Parameter Analyses of Permeability between Subchannels .....	2 6
Table 7	Cases of PLANDTL-DHX Experimental Analyses .....	2 7
Table 8	Cases of PLANDTL-DHX Transient Analyses .....	2 8
Table 9	Calculated CCTL-CFR Test Cases .....	2 9
Table 10	Calculated PLANDTL-DHX Test Cases .....	3 0

## List of Figures

Fig. 1	Mesh Arrangement of 19-pin Subassembly .....	3 1
Fig. 2	Thermal Structure Model of Heater Pins .....	3 2
Fig. 3	Thermal Structure Model of Wrapper Tubes between Subassemblies .....	3 3
Fig. 4	Cross Section View of CCTL-CFR Simulated Core .....	3 4
Fig. 5	Flow Diagram of the CCTL-CFR .....	3 5
Fig. 6	Mesh Arrangement of CCTL-CFR Simulated Core in Horizontal Plane .....	3 6
Fig. 7	Mesh Arrangement of CCTL-CFR Simulated Core in Vertical Plane .....	3 7
Fig. 8	Transverse Temperature Distributions in cases where 61-pin bundle is cooled ....	3 8
Fig. 9	Calculated Velocity Field in 61-pin Bundle .....	3 9
Fig. 10	Transverse Temperature Distributions in cases where 61-pin bundle is heated ....	4 0
Fig. 11	Influence of Flow Velocity on Normalized Transeverse Temperature Distributions in cases where 61-pin bundle is cooled .....	4 1
Fig. 12	Transverse Temperature Distributions in cases where 61-pin bundle is 9% Power Conditions and cooled .....	4 2
Fig. 13	Flow Diagram of PLANDTL-DHX .....	4 3
Fig. 14	Core and Upper Plenum of PLADNTL-DHX .....	4 4
Fig. 15	Mesh Arrangement of PLANDTL-DHX Simulated Core in Horizontal Plane ....	4 5
Fig. 16	Mesh Arrangement of PLANDTL-DHX Simulated Core in Vertical Plane ....	4 6
Fig. 17	Influence of Permeability in 7-pin Subassemblies on Transverse Temperature Distributions in Case ST-072 .....	4 7
Fig. 18	Influence of Permeability in 37-pin Subassemblies on Transverse Temperature Distributions in Case ST-072 .....	4 8
Fig. 19	Transverse Temperature Distributions in Case ST-072 (2% Flow and Power Conditions) .....	4 9
Fig. 20	Transverse Temperature Distributions in Case ST-054 (2% Power and 6% Flow Conditions) .....	5 0
Fig. 21	Transverse Temperature Distributions in Case TR-049 (12% Power and Flow Conditions) .....	5 1
Fig. 22	Normalized Transverse Temperature Distributions at Top of Heated Length in Cases of 2 to 12% Power and Flow Conditions .....	5 2
Fig. 23	Transverse Temperature Distributions in Case ST-070 (Inter-subassembly Temperature Difference = 0°C) .....	5 3
Fig. 24	Transverse Temperature Distributions in Case ST-080 (Inter-subassembly Temperature Difference = +30°C) .....	5 4

Fig. 25	Normalized Transverse Temperature Distributions at Top of Heated Length in Cases of $\Delta T = -50$ to $+30$ °C .....	5 5
Fig. 26	Power and Flow Courses in Transitions .....	5 6
Fig. 27	Transverse Temperature Distributions at Initial Conditions in Case TR-043 (Ref.) .....	5 7
Fig. 28	Trends of Center Subchannel Sodium Temperatures at Middle and Top of Heated Length in Center Subassembly .....	5 8
Fig. 29	Temperature Histories at Center Subchannel at Top of Heated Length in Case TR-043 ( $\Delta T = 0$ °C) .....	5 9
Fig. 30	Axial Temperature Distributions along Center Subchannel in Center Subassembly in Case TR-043 ( $\Delta T = 0$ °C) .....	6 0
Fig. 31	Transverse Temperature Distributions at Top of Heated Length during Transition in Case TR-043 ( $\Delta T = 0$ °C) .....	6 1
Fig. 32	Temperature Histories at Center Subchannel at Top of Heated Length in Cases of $\Delta T = 0, -30$ °C .....	6 2
Fig. 33	Normalized Transverse Temperature Distributions during Transitions at Top of Heated Length in Center Subassembly in Cases of $\Delta T = 0$ and $-30$ °C .....	6 3
Fig. 34	Influence of Intra-subassembly flow redistribution on Pf, Wf in 61-pin bundle .....	6 4
Fig. 35	Influence of Inter-S/A Heat Transfer on Pf in 61-pin Bundle .....	6 5
Fig. 36	Influence of Inter-S/A Heat Transfer on Wf in 61-pin Bundle .....	6 5
Fig. 37	History of Peaking Factor during Transition from Forced to Natural Circulation in Case TR-043 ( $\Delta T = 0$ °C) .....	6 6
Fig. 38	Comparison of Normalized Transverse Temperature Distributions at Top of Heated Length in 61-pin Bundle (CCTL-CFR) .....	6 7
Fig. 39	Comparison of Normalized Transverse Temperature Distributions at Top of Heated Length in 37-pin Bundle (PLANRTL-DHX) .....	6 8
Fig. 40	Comparison of Transverse Temperature Distributions at Top of Heated Length in Case ST-070 (PLANRTL-DHX) .....	6 9
Fig. 41	Calculated Region in Real Reactor Core .....	7 0
Fig. 42	Mesh Arrangement in Single Subassembly .....	7 1

## 1. 序論

高速増殖炉の信頼性、安全性をさらに高める上で、原子炉が本来持っている性質を有効に活用することが重要である。自然循環による崩壊熱除去は、低温の流体は重く、高温の流体は軽いという自然の性質に基づいてナトリウムを循環させ、炉心の熱を輸送するものであり、ポンプ等の動力源を必要とする動的機器に依存しないことからそれらの故障による影響を受けない利点を持っている。自然循環を活用することにより崩壊熱除去機能の信頼性を高めることができる。

自然循環時には、一般に炉心通過流量は定格の3%未満程度となり、炉心部の熱流動現象は浮力と慣性力が影響しあう混合対流条件下におかれ、炉心部の最高温度等を評価する上で、浮力の影響を考慮する必要が生じる。すなわち、集合体内の流量再配分による温度分布の平坦化、集合体間の流量再配分による炉心部径方向温度分布の平坦化、炉心部径方向温度分布に伴う集合体間の熱移行、等により強制循環時に比べて炉心内の温度分布は平坦化する。自然循環時には炉心通過流量が小さく、強制循環時に比べて炉心の平均温度が上昇する。先に述べた平坦化の効果を考慮することにより、より現実的な炉心部最高温度を評価できる。特に、集合体間熱移行による炉心最内層での温度の低下については、実験炉「常陽」で行われた自然循環試験の実験解析においてその効果が確認された。<sup>[1]</sup>

従って、自然循環による崩壊熱除去を実現する上で、炉心部の熱流動現象を詳細に評価する手法を開発することが重要である。

原子炉工学室では、上記の集合体内流量再配分、集合体間流量再配分、集合体間熱移行の各現象について研究を行い、実機での現象を評価できる手法の構築を図っている。この一環として3体の模擬集合体からなるCCTL-CFR試験装置、7体の集合体からなるPLANDTL-DHX試験装置を用いてナトリウム実験を行ってきた。

CCTL-CFRでは特に定常状態に着目し、60万kWe級大型炉と同程度の大きさをもつ集合体を用い、集合体側面での熱流束を正確に押さえられるよう集合体間ギャップ領域をSUSで埋めた3集合体体系とすることにより、集合体側面からの熱移行と集合体内温度分布の相互関係を明らかにした。<sup>[2], [3]</sup>

PLANDTL-DHXでは強制循環から自然循環への過渡に着目し、集合体サイズは大型炉の1/2程度と小さいものの集合体間ギャップ領域をナトリウムが自由に流れる体系の下で、過渡時の集合体内流量再配分ならびに熱移行の効果によるピーク温度低下に関する特性を明らかにした。<sup>[4]</sup>

本報告では、このような集合体間の熱移行による熱流束の影響を含めた集合体内熱流動現象を解析できる手法としてAQUAコードを用いた複数集合体の同時解析手法を開発し、実験解析に適用した結果について報告する。本手法では各集合体についてサブチャンネル

毎に1個のコントロールボリュームをx-y-z 3次元メッシュ体系の中で割り当てるメッシュ分割方式を採用し、サブチャンネル解析コード用に開発された軸方向流動抵抗などの相関式を直接適用している。また、各集合体を独立した計算領域としてメッシュ分割する多領域モデルにより表現し、Thermal Structureにより熱的に結合する。このような方法をとることにより、集合体間の熱移行、これにともなう集合体内の再循環流などを合理的に解析できる。

上記の解析手法は熱移行の影響下での集合体内温度分布を予測できる手法であるが、集合体間熱移行は炉心全体の温度分布で決まる要素があり、熱移行量を評価するには、全炉心を解析する必要がある。しかし、全炉心での熱移行と各集合体内の温度分布のカップリングを解析するには、本手法では計算体系が膨大になりすぎて現実的ではない。そこで、1次元のネットワークコードを用い各集合体を1次元チャンネルでモデル化し、全炉心を解析する。この場合、集合体間熱移行と集合体内温度分布の相関は無視されてしまう。例えば熱移行により冷却された場合には、集合体内のラッパー管壁近傍の温度が低下して隣の集合体との実質的温度差が小さくなることが無視され結果的に集合体間熱移行を大きく評価することになる。これを防ぐため、複数集合体の同時解析手法により集合体間熱移行と集合体内温度分布の関係を相関式の形で求めておき、ネットワークコードの中に反映する。これにより集合体間熱移行による炉心部最高温度の低減効果を評価することができる。

## 2. AQUAコードを用いた複数集合体解析手法

### 2. 1 集合体内部のモデル化

#### (1) メッシュ分割

本手法では汎用3次元熱流動解析コードAQUAを用い、各集合体の内部についてサブチャンネルを1個のコントロールボリュームとしx-y-z体系の中でメッシュ分割する。このようなメッシュ分割手法はStaggered Half-pin Mesh Arrangementと呼ばれ、単一集合体をx-y-z座標系での差分法に基づくコードで解く上で有効であることが示されている。<sup>[5]</sup> また、このようなメッシュ分割手法を用いて单一バンドルに適用した結果、試験結果と良く一致したことが報告されている。<sup>[6]</sup> メッシュ分割の例として、19ピン束体系をStaggered Half-pin Mesh Arrangementで分割した計算メッシュ構成をFig. 1に示す。このようなメッシュ分割手法を用いることにより個々のコントロールボリュームが3本の燃料ピンに囲まれた内部サブチャンネルに1対1対応し、サブチャンネル解析で用いられてきた軸方向流動抵抗等の相関式を3次元解析に直接適用することができる。ただし、2本の燃料ピンとラッパー管に囲まれた壁サブチャンネルやラッパー管の角にあたるコーナーサブ

チャンネルについては3次元領域でのコントロールボリュームと1対1対応はしない。このような部分は壁サブチャンネルとしての平均的挙動が一致するように3次元側のコントロールボリュームに相関式を導入する。

軸方向のメッシュ分割ではピンバンドルの発熱部を重要な解析対象と考え、そこへの流速分布が十分発達するよう発熱下端から下方500mmの非発熱ピンバンドル部からモデル化し、上方は軸方向上部遮蔽体を含め集合体出口までをモデル化した。発熱部のメッシュ分割幅はワイヤー巻きピッチを参考に計算メッシュ数を大きくしないことに留意して設定した。

### (2) Permeability, Porosity

3次元領域として設定した体系はFig. 1に示すように実際の流路に比べ燃料ピンの占める領域だけ流路面積が大きくなっている、これを補正するためコントロールボリューム中の流体の流れ方向毎の面積ならびに流体の体積についてPermeability, Porosityを持ち込む。

軸方向のPermeabilityおよびPorosityについては計算メッシュ面積中の流路面積の割合を用いた。従って、内部サブチャンネルと壁サブチャンネル、コーナーサブチャンネルでそれぞれ異なった値をとる。壁サブチャンネルに対応したメッシュは2種類あるがこれらには実際の流路面積を保存するように同一の値を設定した。実際のピンバンドルでは内部サブチャンネルに比べ壁サブチャンネルの流路面積が約2倍大きく、流れ易いこと、流路面積当たりのピン発熱量が小さいことがここに反映される。Fig. 1中の*i*方向*j*方向のPermeabilityについてはメッシュ境界の線分の長さに対する実際の流路の長さの比を用いた。

### (3) 軸方向流動抵抗

ワイヤースペーサつき3角配列ピンバンドルの軸方向流動抵抗についてはMITのChengらが相関式の形で整理した結果が報告されている。<sup>[7]</sup> この結果が汎用的なピンバンドルの相関式として現時点ではもっとも信頼性が高いと判断し、ここではこれを用いた。相関式は内部サブチャンネルと壁サブチャンネル、コーナーサブチャンネルでそれぞれ異なる式が与えられており、Permeabilityと同様に各サブチャンネルタイプ毎に軸方向流動抵抗係数を区別して与えた。MITの相関式では、ピン径、配列ピッチ、ワイヤー径、巻きピッチ、最外周ピンとラッパー管との隙間の依存性、Re数依存性を考慮できるようになっている。Re数依存性は層流、乱流、遷移域に分けて規定されているが、AQUAコードではRe数依存性を2領域の分割でしか与えられないため、実験解析では実験ケースでのRe数範囲を2領域でフィットするように新たな相関式を求めこれを与えた。

#### (4) サブチャンネル間混合

サブチャンネル間の水平断面内の混合については、実際のピンバンドルではワイヤーに沿ったスワールフローや流量再配分によるクロスフロー、さらに流体の正味の移動を伴わない乱流混合、熱伝導等が考えられる。サブチャンネル解析では軸方向流速の値と関連させて相関式としてこのようなサブチャンネル間混合を与えていた例が多い。3次元解析では圧力分布に応じた正味のクロスフローが内部で計算される。従って温度分布と浮力による流量再配分や再循環流が表現できる。しかしワイヤーの効果や乱流混合のような現象はメッシュ内部の現象であり陽には考慮されない。これらの効果は後に述べるように相関式の形で考慮することができるが、ここまでモデル化の妥当性を明らかにするため、まずは考慮しないことにする。また、ピンバンドル内をポーラスボディで近似していることもあり、対流項に1次風上差分法、また層流モデルを用いた。また熱伝導に関しては水平方向のPermeabilityとしてメッシュ境界長さに対して流路が実際に切る長さを与え、サブチャンネル間の伝熱面積を規定している。

#### (5) ヒーターピン発熱の模擬

ヒーターピンの発熱はThermal Structureモデルを用いて模擬した。過渡試験への適用を念頭にピンの構造を含めてモデル化した。すなわち発熱時にピンの内部に保有される熱量を模擬できるようにしている。ピン内部の構造模擬の具体例をFig. 2に示す。発熱体、絶縁材、被覆管を材料の熱物性を含めてモデル化している。内部サブチャンネルに対応するコントロールボリュームについては、メッシュ分割の境界と各ピンとの関係に対応させて、1本のピンの1/3に相当する伝熱面積を割り当てる。壁サブチャンネルに対応する2種類のコントロールボリュームについてはピンの伝熱面積を保存するように同一の割合でピンと接触させた。壁サブチャンネルでは、流路面積は内部サブチャンネルの約2倍あるのに対し、ピンの伝熱面積については同一となり1本のピンの1/3に相当する面積を割り当てる事になる。コーナーサブチャンネルに対応するコントロールボリュームについても同様な考え方で割り当てた。

## 2. 2 複数集合体モデル

単一の集合体をモデル化する手法は前述の通りであるが、複数の集合体をモデル化するためには集合体間の熱移行を取り扱う必要がある。複数の集合体を集合体間ギャップを含めた位置関係を保存した上で、各集合体の内部をStaggered Half-pin Mesh Arrangementでメッシュ分割することは、1つの計算領域の中ではできない。また、炉心燃料集合体とブランケット集合体のような異種ピンバンドルが隣接した領域を考えた場合、Staggered

Half-pin Mesh Arrangementではメッシュ幅が二つのピンバンドルで異なるため集合体の位置関係を歪ませた場合でも1つの計算領域の中では扱うことはできない。

そこで、本手法ではAQUAコードの多領域モデルを用いて各集合体をそれぞれ独立した計算領域の中でメッシュ分割し、これらをThermal Structureモデルにより熱的に結合した。(Fig. 3参照) ラッパー管内壁での熱伝達係数には、subottinの式

$$Nu = 5 + 0.025 Pe^{0.8} \quad (D: \text{ピンバンドル部の水力等価直径})$$

を適用した。集合体間ギャップ部については、特にDRACSを崩壊熱除去系に用いている場合にはナトリウムが自然対流している場合も考えられるが、ここではより単純な場合としてナトリウムはスタグナントであると仮定しラッパー管を含めて熱容量、熱抵抗を厚さ方向に5点の分解能でモデル化した。このとき、熱貫流率はラッパー管(SUS)の熱伝導に支配され、ナトリウム側の対流熱伝達率の影響は小さいと考えられる。

## 2. 3 境界条件

解析の境界条件としては各集合体の入口ナトリウム温度、流量を与え、ピンバンドル断面内でそれぞれ一様な分布をもつものとした。集合体の出口部には速度が連続な出口境界を与えた。また、模擬燃料ピンの電気発熱量を軸方向の分布を含めて与えた。

## 3. 61ピン束3集合体体系への適用

### 3. 1 実験体系

前述した複数集合体解析手法をプランケット燃料集合体を中心にモデル化した61ピン束3集合体体系(CCTL-CFR装置)および炉心燃料集合体を中心にモデル化した37ピン束7集合体体系(PLANETL-DHX装置)の実験解析に適用し、定常および過渡の集合体間熱移行現象を含む集合体内熱流動への適用性について検討することとした。

ここではまず61ピン束3集合体体系への適用について述べる。実験体系をFig. 4、Fig. 5に示す。試験体はプランケット集合体を模擬した61ピンバンドルと並列する2体の19ピンバンドルからなる。径方向の熱移行に着目していることからピンバンドルの径方向の大きさを実寸大とし、面対間距離は140mmとしている。61ピンバンドルについては模擬プランケット燃料ピンはピンの直径、配列ピッチ、スペーサーワイヤーの直径、巻きピッチを実機とほぼ同等としている。19ピンバンドルについては61ピンバンドルに対して熱的境界条件を軸方向に適正に与えることを目的に設置しており、実在のピンバンドル体系を模擬した形状とはしていない。全てのピンバンドルは1.7mの発熱長(軸方向フラット発熱分布)をもち、ナトリウム流量、発熱量を任意に制御できる。61ピンバンドルについて同時加熱・冷却条件を設定することを目的として、低温のナトリウム(バンドル入口温度と同

一) を流すことのできる冷却チャンネルを61ピンバンドルに並列して設けている。

集合体間のナトリウムギャップについては、ここでは模擬せずに、無垢のステンレスの板でピンバンドルを隔てる構造とした。すなわち、ナトリウムギャップをステンレスで置き換えた構造となっている。この試験では、集合体内の温度分布と側面からの熱移行（熱流束）との関係を把握することが主目的であるため、ギャップの自然対流の影響を避け、ステンレス板の両表面温度と熱抵抗から境界条件として熱流束が明確に規定できる点を重視した。

Fig. 4に示されているように、計測は熱電対を用いて行い、各ピンバンドル内の温度分布を軸方向各断面にて計測できる。特に19ピンバンドルから61ピンバンドルを横切る線上の温度分布については密に計測し、ピンバンドル間の熱移行の影響が把握できるようにしている。

試験装置の主要スペックをTable 1に示す。出力、ナトリウム流量は自然循環状態を十分カバーできる供給能力を持たせている。

### 3. 2 解析体系

解析メッシュ配置をFig. 6, Fig. 7に示す。水平断面では、3体のピンバンドルについて、対称性から1/2体系を解析対象とした。スペーサーワイヤーによるスワールフローを考慮すると、このような対称性はなくなるが、解析モデル上はスワールフローを考慮できないことから、体系は半分としている。軸方向には発熱長を12分割して約140mm程度の分割幅としている。

ピンバンドル部に用いた軸方向流動抵抗の相關式をTable 2にしめす。ピンバンドルの形状、サブチャンネルの種類に応じて設定している。

### 3. 3 実験解析

#### (1) 解析ケース

集合体間の熱移行量（みかけの集合体間温度差）および集合体内流速をパラメータとする6ケースについて実験解析を行った。解析条件をTable 3に示す。集合体間熱移行量をパラメータとするケースでは着目する61ピンバンドルの出力、流量はそれぞれ、14.5kW, 10.3 l/minでRe数420 (3.7 cm/sec)、ピン表面熱流束は $0.3 \text{ W/cm}^2$ となり、何れも大型炉ブランケット集合体の定格運転時の2~3%に相当し、自然循環除熱状態に対応する。19ピンバンドルと61ピンバンドルとの見かけの温度差（出力／流量で決まる温度上昇幅の差）は-75 ~ +75°Cとした。ピンバンドル内Re数をパラメータとするケースでは、19ピン側の温度が低い条件で、集合体内の流速が9cm/sec、ピン表面熱流束は $0.9 \text{ W/cm}^2$ ：大型炉定格運転時

の9%に相当する条件までカバーしている。実験および解析は定常条件で実施した。

## (2) 集合体内温度分布の比較

19ピン側から61ピンバンドルが冷却される条件での集合体発熱部中央断面ならびに上端断面での19ピンから61ピンバンドルを横切る線上 (Fig. 4参照) の温度分布を実験と解析で比較した結果をFig. 8に示す。ピンバンドル間の見かけの温度差すなわち集合体間熱移行の大きさをパラメータとする2ケースともに、上端断面、中央断面の温度分布の解析結果は実験結果と良く一致している。特に、61ピンバンドル内のラッパー管に接する壁サブチャンネルでの19ピンバンドルからの冷却に伴う温度低下を、解析は非常に良く模擬していることがわかる。

これらの解析結果における61ピンバンドル内流速ベクトルをFig. 9に示す。発熱部下方の非発熱ピンバンドル部では、水力等価直径が大きく流動抵抗係数が小さいことから壁サブチャンネルの流速が大きい。発熱部では上方に行くに従って徐々にピンバンドル内部の流速が浮力によって大きくなる流量再配分が生じていることがわかる。ピンバンドル間の温度差が大きく強く冷却されている条件では、発熱部上端近傍で浮力による下向きの力が卓越し、再循環流が形成されていることがわかる。

次に19ピン側から61ピンバンドルが加熱される条件での集合体発熱部中央断面ならびに上端断面での温度分布を実験と解析で比較した結果をFig. 10に示す。解析結果は実験結果と良く一致しているが、細部についてみると、61ピンバンドル内の壁サブチャンネルにおける19ピン側からの加熱に伴う局所的な温度上昇が過小評価される傾向が見られる。ピンバンドル内のサブチャンネル間混合のモデル化について、特に加熱される条件で検討の余地があることを示している。

61ピンバンドル内流速をパラメータとし、19ピンバンドル側から61ピンバンドルが冷却されるケースについて、集合体発熱部中央断面ならびに上端断面での19ピンから61ピンバンドルを横切る線上の温度分布を実験と解析で比較した結果をFig. 11に示す。61ピンバンドルのヒーター出力を一定として、流速を振っているために温度の絶対値が大きく変化する。図では分布の形状に着目するため、断面平均温度の入口温度からの上昇幅で各位置の温度を規格化した値で比較している。流速が増加することにより無次元の温度分布が急峻になる傾向が見られ、実験と解析結果は良く一致していることがわかる。

次に出力、流量ともに実機プランケット集合体の9%に相当する条件での実験と解析の比較を示す。プランケット集合体としての自然循環状態の範囲を越えている条件ではあるが、幾何形状の違いはあるものの炉心燃料集合体の自然循環状態に相当するピン表面熱流束、流速レベルとなる。19ピン側から冷却され、さらに右側の冷却チャンネルから冷却されないケース、冷却されるケースの2ケースについて、集合体発熱部中央断面ならびに上

端断面での19ピンから61ピンバンドルを横切る線上の温度分布を実験と解析で比較した結果をFig. 12に示す。解析結果は何れのケースも集合体内温度分布をよく再現しており、比較的高い出力・流量条件でも本手法が適用可能であることを示している。

#### 4. 37ピン束7集合体体系への適用

##### 4. 1 実験体系

次に、炉心燃料集合体を中心にモデル化した37ピン束7集合体体系（PLANDTL-DHX装置）の実験解析に適用した結果について示す。ここでは、定常状態に加えて過渡時の集合体内温度分布を比較し、過渡熱流動への適用性についても検討を加える。

実験体系をFig. 13, 14に示す。試験体は炉心燃料集合体を径方向部分モデルとして模擬した37ピン集合体とこれを囲んで並列する6体の7ピン集合体からなる。先の3集合体試験装置では取り除いていた集合体間ギャップの熱流動が及ぼす影響を把握するため、ナトリウムを満たした集合体間ギャップ領域を設けた。ギャップ領域は集合体出口高さで上部プレナムと接続されている。模擬集合体の対面間距離は61mmで、大型炉燃料集合体の約1/2の大きさである。37ピン集合体について模擬炉心燃料ピンはピンの直径、配列ピッチ、スペーサーワイヤーの直径、巻きピッチを実機とほぼ同等としている。7ピン集合体については37ピン集合体に対して熱的境界条件を軸方向に適正に与えることを目的に設置しており、実在のピンバンドル体系を模擬した形状とはしていない。全てのピンバンドルは1mの発熱長（実機を模擬した軸方向チョップドコサイン発熱分布）をもち、ナトリウム流量、発熱量を過渡変化を含めて任意に制御できる。

軸方向には発熱部下方500mmから発熱部上方400mmまでのピンバンドル、軸方向上部遮蔽体からなる集合体、さらに崩壊熱除去用の炉内冷却器を内蔵した上部プレナムを模擬している。

Fig. 14に示されているように、計測は熱電対を用いて行い、各集合体内の温度分布を軸方向各断面にて計測できる。特に7ピン集合体から37ピン集合体、その反対側の7ピン集合体を横切る水平線上の温度分布については集合体間ギャップ部を含めて密に計測し、ピンバンドル間の熱移行の影響が把握できるようにしている。

試験装置の主要スペックをTable 4に示す。出力、ナトリウム流量は自然循環状態から実機定格の12%相当の強制循環状態までを十分カバーできる供給能力を持たせている。

##### 4. 2 解析体系

解析メッシュ配置をFig. 15, Fig. 16に示す。水平断面では、7体のピンバンドルについて、対称性から1/2体系を解析対象とした。スペーサーワイヤーによるスワールフローを考慮すると、このような対称性はなくなるが、解析モデル上はスワールフローを考慮でき

ないことから、CCTL-CFR試験解析と同様に解析体系を1/2とした。軸方向には発熱長を12分割して約85mm程度の分割幅としている。

ピンバンドル部に用いた軸方向流動抵抗の相関式をTable 5にしめす。ピンバンドルの形状、サブチャンネルの種類に応じて設定している。

予備解析の結果、集合体内温度分布を模擬する上でサブチャンネル間混合をモデル化する必要性が明らかになったことから、次節に示すようにサブチャンネル間のPermeabilityをパラメータとした解析を実施した。

#### 4. 3 定常実験解析

##### (1) サブチャンネル間混合の影響

予備解析の結果、2章で示した解析手法をPLANDTL-DHX試験に適用した場合、37ピン集合体内の径方向温度分布を過度に急峻な分布として解析されることが示された。これは、炉心燃料集合体体系では前章に示したプランケット集合体体系に比べ集合体内流速が大きい点、スペーサーワイヤーの径がピン直径との相対値で大きい点、巻きピッチが短い点からワイヤーによるサブチャンネル間混合の促進効果が大きくなることがその一つの原因と考えられる。また、ピン表面熱流束が大きいために、壁サブチャンネルと内部サブチャンネルの間の温度差が大きくなり、先に挙げたサブチャンネル間混合効果が顕著に現れる体系であると言える。

このようなサブチャンネル内部の構造（ワイヤーなど）による混合については、今回の3次元解析のコントロールボリューム内部の物理現象であり、直接解析できる現象ではない。従ってチャンネルの軸方向流動抵抗係数などと同様に、外から与える必要がある。ここでは、サブチャンネル間混合を多次元解析に取り入れる手法としてコントロールボリューム間の温度差に比例する項すなわち熱伝導項にかかる伝熱面積を調整することにした。具体的には径方向のサブチャンネル間Permeabilityをパラメータとして実験解析を実施した。

集合体間熱移行のある状態を模擬して37ピン集合体が周り6体の集合体から冷却される条件で、集合体内出力、流量を実機定格の2%相当に設定した場合の、37ピン集合体、7ピン集合体のサブチャンネル間Permeabilityに関するパラメータ解析をTable 6に示すように実施した。ピンバンドルの形状が中心と周辺集合体で異なるため、サブチャンネル間混合にかかる調整値も異なると考えられるため、まず中心集合体のPermeabilityを実形状に対応する値で固定し、周辺集合体のPermeabilityをパラメータとした。このときの発熱上端断面での径方向温度分布に関する実験と解析の比較をFig. 17に示す。Permeabilityを0.4としたケースが比較的良く実験結果と一致している。次に、周辺集合体についてPermeabilityを0.4で固定し、中心集合体のPermeabilityをパラメータとした場合について、

発熱上端断面での径方向温度分布に関する実験と解析の比較をFig. 18に示す。Permeabilityを0.4としたケースが温度の絶対値は過大評価であるが相対的温度分布が比較的良好く実験結果と一致していることがわかる。以上からサブチャンネル間Permeabilityを中心、周辺集合体ともに0.4とすることとした。熱伝導以外のサブチャンネル間混合にかかる調整として、径方向Permeabilityを実形状の値に比べ、それぞれ2.5倍、3.5倍大きくしたことになる。

以上は自然循環相当の出力、流速条件で中心集合体が周辺から冷却されている条件での結果であるが、一般的条件での適用性を検討するため次節に示す解析を実施した。

## (2) 解析ケース

集合体内の出力・流量条件ならびに集合体間温度差による熱移行が水平断面内温度分布に与える影響について本解析手法の模擬性を検討するため、Table 7にしめすパラメータ解析を実施した。出力・流量条件については、中心集合体が周辺集合体から冷却される条件で出力を実機定格の2%相当とし流速を2%および6%相当とした2点、出力、流量ともに実機定格の12%相当とした点の計3点実施した。みかけの集合体間温度差については、出力・流量がともに2%相当の条件で-50, 0, +30°Cの3点で検討した。

## (3) 集合体内温度分布の比較

温度分布の比較については実機炉心燃料集合体を模擬している中心集合体について着目するものとする。まず、出力・流量条件の依存性について、発熱部中央断面および上端断面での径方向温度分布を実験結果とともに示して議論する。Fig. 19に示すように、出力・流量ともに2%相当のケースでは、先のPermeabilityをパラメータとした解析において議論した通り発熱上端断面においては相対的分布は良く一致し、中央断面では絶対値においても良い一致を示している。これから流速を3倍に大きくしたケース（出力2%、流量6%相当）での結果をFig. 20に示す。両断面ともに先のケースと同様な傾向が見られる。次に出力・流量ともに12%相当としたケースの結果をFig. 21に示す。発熱上端、中央断面とともに解析結果は実験結果と良く一致していることがわかる。これらの結果の内、絶対値での実験との一致が比較的良くなかった発熱上端断面について入口からの断面平均温度までの温度上昇幅で規格化した温度分布を3ケースともに実験と解析で比較した結果をFig. 22に示す。相対的な温度分布については、本解析手法により集合体水平断面内温度分布が出力、流量条件によらず実験結果を良く再現できることがわかる。

次に集合体間熱移行による温度分布への影響について示す。集合体間温度差ゼロのケースについて発熱部中央断面および上端断面での径方向温度分布を実験結果とともにFig. 23に示す。両断面ともに解析結果は実験結果と良く一致している。中心集合体が周辺集合体

から30℃の温度差で加熱されているケースについての結果をFig. 24に示す。両断面とともに解析で得られた温度は実験結果を下回っているが相対的温度分布は比較的良好一致している。先の出力・流量依存性の検討と同様に規格化した温度分布を温度差-50, 0, +30の3ケースについてFig. 25に示す。実験と解析結果は良く一致しており、集合体間熱移行による集合体水平断面内温度分布の変化を本解析手法は良く再現できると言える。

#### 4. 4 過渡実験解析

##### (1) 解析ケース

スクラムから自然循環に移行する過渡時の集合体内熱流動に関する知見を得ることを目的として、PLANDTL-DHX装置を用いて実施された過渡試験の実験解析を実施した。試験で用いた集合体内出力、流量の過渡変化カーブをFig. 26に示す。中心の37ピン集合体について、実機定格の12%に相当するピン表面熱流束、集合体内平均流速で初期定常状態を維持した。出力は試験開始とともに、実機崩壊熱カーブを模擬して低下させた。初期の10秒間において低い値としている理由は最初の温度低下を模擬するために出力／流量比を実機と合わせることを意図し、流量が12%しかないことに対応して出力を低くしたためである。流量変化はフローコーストダウンの流量半減時間7秒とし、100%から12%まで低下する時間に相当する時間まで初期設定値を維持し、その後は実機で想定される流量変化カーブをトレースさせた。自然循環流量として2%相当を想定し、これをポンプ強制循環で与えた。

試験パラメータとして、初期定常状態での集合体出口間温度差をTable 8に示すように0℃から30℃まで変化させるように周辺集合体の出力を低下させた。過渡時の出力は中心、周辺集合体ともに同一の相対時間変化カーブを用いた。従って模擬崩壊熱量については、初期に30℃周辺集合体出口温度が低いケースでは周辺集合体の方が中心より低くなる。これにより、2次ピークにおける集合体間熱移行の影響を実験と解析で比較した。

##### (2) 実験との比較

初期定常状態での発熱部上端、中央断面内温度分布を実験と解析で比較した結果を集合体間温度差ゼロのケースについてFig. 27に示す。集合体間温度差30℃のケースについてはFig. 21に示した通りである。両ケース、両断面ともに解析結果は実験結果と非常に良く一致しており、過渡の初期において解析による集合体内温度分布の模擬は良好である。

これ以降は代表として集合体間温度差ゼロのケースについて過渡解析の結果を示す。中心集合体の発熱部上端および中央断面内中心サブチャンネル温度の時間変化を実験と解析で比較した結果をFig. 28に示す。先の温度分布で示したように、初期の温度は両断面ともに良く一致している。全体として過渡初期の急激な温度低下、その後の流量低下と模擬崩

壊熱に伴う温度上昇、2次ピークの形成、崩壊熱量の低下に伴うゆっくりとした温度低下について解析結果は実験を良く模擬している。2次ピークについては解析結果が両断面ともにわずかに過大評価している。

ここで、3次元解析の利点を考えるために、保守的な仮定をおいた1次元解析の結果と比較する。本来、集合体の断面平均温度を対象とする1次元解析において、集合体内最高温度を予測するために、初期状態での発熱上端断面内最高温度が解析値と一致するように集合体内流量を低下させた。集合体出力は実験値と等しくしている。すなわち、断面内の伝導、混合に伴う径方向の熱輸送を無視し、初期状態での集合体内流量配分効果のみで最高温度が形成されていると仮定している。過渡時には、流量の相対的時間変化カーブを実験と一致させ先に設定した初期流量から流量変化を与えた。すなわち、過渡時の集合体内流量再配分を無視している。このような仮定をおいた1次元解析はこれまで集合体内最高温度を予測するために保守的に用いられてきたものである。中心集合体発熱上端断面の中心サブチャンネル温度の時間変化について、3次元解析手法と1次元解析とで比較した結果をFig. 29に示す。実験結果と比較して1次元解析は2次ピーク温度を大きく過大評価しており、十分な保守性をもって最高温度を評価できる。これに対して3次元解析では断面内の径方向混合、過渡的な集合体内流量再配分を考慮することにより2次ピーク温度を高い精度で解析できることがわかる。

次に中心集合体内中心サブチャンネルに沿った軸方向温度分布の時間変化を3次元解析と実験で比較してFig. 30に示す。初期の全体的な温度低下、その後の発熱部で先行する温度上昇について解析結果は実験結果と良く一致している。

発熱部上端断面での中心集合体と左右の周辺集合体を含む水平方向温度分布の時間変化を3次元解析と実験で比較してFig. 31に示す。中心集合体について比較すると、初期の急峻な分布が温度低下とともに平坦となり、温度上昇とともに一旦急峻になった分布が2次ピーク(150sec)以降では再びゆるやかになっていく変化について解析結果は実験結果を良く模擬できている。

次に、初期に集合体間温度差を30°Cつけたケースの結果について示す。中心集合体の発熱上端断面中心サブチャンネル温度の時間変化を実験と解析で、また集合体間温度差ゼロのケースと比較してFig. 32に示す。集合体間温度差をつけたケースでは2次ピーク温度が集合体間熱移行により低下している点について解析結果は実験結果を模擬できている。但し、熱移行による温度低下の度合いを低めに評価する傾向があり、2次ピーク以降について全体に温度を高く評価している。

発熱上端断面の中心集合体内：平方向温度分布を集合体入口から断面平均温度への温度上昇幅で規格化した無次元温度と用いて実験と解析で比較した結果をFig. 33に示す。集合体間温度差ゼロのケースに比べ温度差30°Cのケースにおいてピーキングが大きくなっている。

る点について解析結果は実験結果を良く模擬している。

## 5. 考察

### 5. 1 集合体内温度分布のパラメータ表現

#### (1) パラメータの定義

これまで、集合体内温度分布を本解析手法によりどの程度模擬できるかについて、実際の温度で試験結果と比較することにより示してきた。しかし、集合体水平断面を1点で近似する（断面平均温度を取り扱う）ネットワークコードに集合体内温度分布の影響を反映するためには、PLANDTLでの試験結果[4]に示したように断面平均温度から最高温度ならびに壁サブチャンネル温度を導くピーキングファクター ( $P_f$ ) および壁サブチャンネルファクター ( $W_f$ ) が重要である。それぞれの定義を以下に示す。

$$P_f = \frac{T_{peak} - T_{in}}{T_{ave} - T_{in}}$$

$$W_f = \frac{T_{wall\_sub} - T_{in}}{T_{ave} - T_{in}}$$

また同時に、これら集合体内温度分布を表すパラメータを集合体内の熱流動条件および周辺集合体間の熱移行量との関係により予測するための因子として浮力パラメータ ( $Gr^*/Re$ ) および壁面熱流束比 ( $q''_{w/p}$ ) を導入した。それぞれの定義を以下に示す。

$$Gr^* = \frac{g\beta\Delta TL}{(\nu/D)^2}$$

$$Re = \frac{VD}{\nu}$$

$$q''_{w/p} = \frac{q''_{wall}}{q''_{pin}}$$

ここで、

$\Delta T$  : 入口から着目断面平均までの温度上昇幅

$L$  : 発熱下端から着目断面までの高さ

$D$  : バンドル部水力等価直徑

$V$  : バンドル部軸方向平均流速

$q''_{wall}$  : ラッパー管壁面熱流束

$q''_{pin}$  : 燃料ピン表面熱流束

断面平均温度 ( $T_{ave}$ ) は、試験では各サブチャンネルの内、同一層内にある計測サブ

チャンネルを選んで平均温度を求め、各層の流路面積を重みとして平均処理を行って求めた。解析では各サブチャンネルの温度から流路面積を重みとする平均処理を行って求めた。

ここでは $P_f$ ,  $W_f$ と浮力パラメータ ( $Gr^*/Re$ ) および壁面熱流束比 ( $q''_{w/p}$ ) との関係について、本解析手法による結果と実験結果を比較し、本解析手法の有効性を示す。

### (2) 61ピン束3集合体体系での比較

まず、61ピン束3集合体体系での定常試験で得られたデータについて解析と比較した結果を示す。61ピン集合体が2体の19ピン集合体から同時に冷却される条件 ( $q''_{w/p}=-1.7 \sim 3$ ) で61ピン集合体内の出力・流量をパラメータとして試験および解析を行い、61ピン集合体の発熱上端断面での温度分布について $P_f$ ,  $W_f$ を浮力パラメータを横軸としてFig. 34に示す。図からわかるように、解析結果は実験結果と非常に良く一致している。次に自然循環崩壊熱除去相当の出力・流量条件で61ピン集合体が2体の19ピン集合体から同時に冷却される条件ならびに加熱される条件での $P_f$ ,  $W_f$ の比較をそれぞれFig. 35, 36に示す。ここで、冷却チャンネル側のラッパー管壁での熱流束条件については、以下に示すように19ピン集合体に接する壁での熱流束との比の絶対値をとって示している。

$$|q''_{cc/19}| = \left| \frac{q''_{wall}(\text{cooling ch. side})}{q''_{wall}(19 - \text{pin side})} \right|$$

$P_f$ ,  $W_f$ とともに加熱条件から冷却条件まで解析により実験結果が良く予測されていることがわかる。

### (3) 37ピン束7集合体体系での比較

過渡時のピーキングファクターの変化について37ピン束7集合体体系での結果を示す。過渡時のピーキングファクターは断面内最高温度を時間を追ってトレースするのではなく、初期定常時および過渡時の最高温度が同一の中心サブチャンネルで観測されたことから、この中心サブチャンネルの温度と断面平均温度の関係として定義した。集合体間に温度差がつかない条件で実機定格の12%出力、流量相当条件からスクラム後、自然循環相当流量 (2%流速) へ移行させた試験ケース (TR-043) について $P_f$ の時間変化を実験と解析で比較した結果を出力、流量変化、中心集合体の発熱上端断面での中心サブチャンネル温度の変化とともにFig. 37に示す。初期定常状態から出力低下に伴うピーキングの低下、模擬崩壊熱と自然循環相当の低流量により温度が上昇する過程でのピーキングの上昇を解析

結果は良く模擬している。その後の発熱量の低下と集合体内流量再配分によるピーキングの低下については解析の方が低下スピードを過大に評価する傾向が見られる。実験では集合体間ギャップのナトリウムが対流できる体系となっており、ピーキングが低下する過程で炉心部温度が上部プレナム温度（450℃）より高くこの温度差によって低温の上部プレナム内ナトリウムが集合体間ギャップ領域に侵入・自然対流が生じている可能性がある。Fig. 31に示すように、この時間帯（～150sec）では解析結果に比べ実験結果の方が集合体間ギャップ部のナトリウム温度が低いことがわかる。この影響で実験では集合体が側面から冷却され、集合体間ギャップのナトリウムの対流を考慮していない解析結果よりもピーキングが大きくなっていると考えられる。300秒以降では、解析結果は実験でのピーキングを再び良く模擬できている。

## 5. 2 サブチャンネル間混合効果について

4.3節に示したように、本解析手法は炉心燃料集合体を模擬した37ピンバンドルについては集合体水平断面内温度分布を過大に評価する傾向が見られた。一方で、プランケット集合体を模擬した61ピンバンドル体系では非常によい一致を示した。この違いの最も大きな原因は、炉心燃料集合体ではピン表面熱流束が2～3倍大きく、軸方向流速成分も対応して大きい点が挙げられる。すなわち、ピン表面熱流束が大きければ壁サブチャンネルと内部サブチャンネルでの単位流路面積当たりの入熱量の差が大きくなり温度差が付きやすくなる。その一方で軸方向流速が大きいためにスペーサワイヤーによる乱れ、スワールフロー等を介したサブチャンネル間の混合による断面内温度分布の平坦化が起こりやすくなる。本解析手法ではワイヤースペーサの効果を取り込んでおらず、この平坦化の効果が実験との違いとしてクローズアップされたものと考えられる。

サブチャンネル解析ではこのようなワイヤースペーサの効果を始めとするサブチャンネル間混合効果を相関式の形で取り込んでいる。代表的なものにMITのTodreasらが提案した相関式がある。<sup>[8]</sup> 本解析手法では浮力による流量再配分にともなう移流およびサブチャンネル間の熱伝導による熱輸送を陽に考慮しているが、これら以外のサブチャンネル間混合効果についてはTodreasの相関式をベースとして取り入れることが可能である。本報告と前後するが、既にワイヤーによる効果、浮力に伴うプリュームの効果をTodreasの相関式をベースに本解析手法に付加する手法を開発し、自然循環相当の出力、流量条件においてプランケット集合体、炉心燃料集合体を通して集合体水平断面内温度分布を良く模擬できることを明らかにしている。<sup>[9]</sup>

ここで、サブチャンネル混合効果に及ぼす流動および加熱条件の影響を考察するため、Todreasらのサブチャンネル間混合係数相関式を用いた複数集合体3次元解析の結果

を示す。この解析において、サブチャンネル解析との整合性を重視し、径方向の Permeabilityには実際のピンバンドルの形状に対応した値を用いている。

Fig. 38 にCCTL-CFRの解析結果より、61ピンバンドル内の規格化温度分布および、熱伝導、ワイヤースペーサ、および浮力に伴うプリュームによるサブチャンネル間混合効果の内訳を示す。また、解析対象とした実験ケースの条件をTable 9に示す。被冷却および被加熱の条件においては、プリュームによる混合効果が大きく、拡散係数の総和は熱伝導による寄与の約2倍となっている。しかしながら、混合係数を用いた解析と用いない解析の温度分布を比較すると、混合係数の有無が解析結果に及ぼす影響は顕著でない。この原因には、これらの条件下では浮力の効果が大きいために、流量再配分による径方向速度成分が数mm/secのオーダを持っており、これがサブチャンネル間の混合を支配しているものと考えられる。一方、断熱のケースでは、流速が高いため、先の2ケースと比較してワイヤースペーサによる混合効果の寄与が大きくなっている。また、浮力の効果が小さくなるため、流量再配分の寄与が前2ケースの1/10以下と小さくなり、混合係数の有無による解析結果の差も顕著になっている。流量再配分の寄与は、レイノルズ数が1000以下で且つグラスホフ数が200以上の流动・加熱条件において顕在化することがChengら[7]によって報告されており、本解析結果の傾向はこれと一致する。

同様の考察をPLANDTL-DHXについても行う。Fig. 39 に混合効果の内訳を示す。解析対象の実験条件はTable 10 に示す。混合係数の有無が解析結果に及ぼす影響は顕著である。ここに取り上げた条件では、混合効果の内訳は3ケースとも同じで、プリュームの寄与が支配的である。これらPLANDTL-DHXの解析結果では、バンドル部Re数は1000を越えており流量再配分による半径方向速度成分は、CCTL-CFRの被加熱・被冷却時の1/10と小さい、このため混合係数の効果が顕著に現れたものと考えられる。

次に、Fig. 40 に径方向Permeabilityを0.4とした解析と、混合係数相関式を用いた解析の比較を示す。中心集合体については、両解析とも実験結果と良く一致している。ただし、周辺集合体については、混合係数相関式は過度に平坦化した温度分布を示している。中心集合体について、混合係数相関式の解析結果から拡散係数の内訳を分析した結果はFig. 39 に示した通りであり、拡散係数の総和は、熱伝導のみによる寄与の2.4倍となっており、径方向Permeabilityを0.4と設定した際に実験を良く再現し、この時のサブチャンネル間コンダクタンスが、熱伝導以外の混合を考慮しない場合の2~3倍になっていることと符合する。

### 5. 3 実機集合体への適用

ここまで検討により、隣り合う複数の集合体体系について集合体間の熱輸送を含めて各集合体内熱流動を同時に解く3次元解析手法を開発し、炉心燃料集合体とブランケット集合体を対象とした2つの実験体系での実験検証の結果その有効性が確認された。すなわち、本手法を実機集合体体系へ適用し実機での集合体間熱移行の影響を考慮した集合体内熱流動を予測するために用いることが可能である。ここでは実機解析の準備として、解析体系、計算規模の検討を実施した結果について述べる。

まず、解析体系について示す。炉心燃料集合体として実証炉での検討内容を踏まえて217ピンバンドルを選定した。ブランケット集合体や制御棒チャンネルの近傍を想定し、3列の集合体間の熱移行を取り扱うものとする。Fig. 41, Fig. 42に解析体系および単一集合体に対するメッシュ分割を示す。集合体3体を対象とすることにより被加熱条件、被冷却条件、同時加熱・冷却条件での集合体内熱流動を同時に解析できる。解析手順としては以下の方法が考えられる。

#### 1) 単一集合体解析

ASFRE等のサブチャンネル解析との比較による217ピン体系での解析手法間差異の確認。

出力・流量パラメータ解析：集合体内温度分布の浮力パラメータ依存性の把握。

スクラム過渡時の熱流動挙動の把握。

#### 2) 3集合体解析

集合体間温度差パラメータ解析：集合体間熱移行による集合体内温度分布の歪み特性の把握。

出力・流量パラメータ解析：上記特性の浮力パラメータ依存性の把握。

次に計算規模について検討する。単一集合体(1/2体系)での水平断面内メッシュ数は243である。軸方向メッシュ分割として炉心部1mを12分割、上下軸方向ブランケット0.3mをそれぞれ4分割、上下非発熱部をそれぞれ5分割、上部中性子遮蔽体部を3分割として33メッシュ程度必要と考えられる。従って総メッシュ数は約8,000となる。3集合体体系ではこの3倍の24,000となる。これまでのAQUAを用いた解析規模から考えて24,000メッシュは十分に現実的な計算規模であり、多数の計算ケースを必要とするパラメータ解析にも耐えられると判断できる。

## 6. 結論

自然循環時の炉心部熱流動現象の一つである集合体間熱移行が集合体内流量再配分を含む集合体内熱流動と相互に影響しあう結果として生じる集合体内温度分布を評価できる手法として、複数集合体解析手法を開発した。

本手法は複数の集合体について各集合体を独立した計算領域の中でサブチャンネルを一つの検査体積にもつようにメッシュ分割（スタガードハーフピンメッシュ分割）し、集合体間の熱輸送をThermal Structureでモデル化するものである。

自然循環時の炉心では高温の集合体から低温の集合体に熱が輸送され、高温の集合体側ではラッパー管近傍の温度が低下する一方で低温の集合体側ではラッパー管近傍の温度が上昇する。この温度分布が浮力を通して集合体内の流量配分に影響し温度分布にフィードバックする。また、ラッパー管近傍の温度の変化は集合体間の熱輸送量にフィードバックする。本手法はこのような集合体内部および集合体間の熱流動の複雑な相互作用を炉心の部分を取り出した体系（数体程度の集合体群）ではあるが、直接模擬することができる。すなわち、本手法を適用することにより集合体間の熱輸送量およびそれによる集合体内温度分布（ピーク温度、ラッパー管近傍の温度など）を評価することができる。

大型炉のプランケット集合体を模擬した61ピンバンドルを中心とする3体の模擬集合体からなるCCTL-CFR試験装置および大型炉の燃料集合体を模擬した37ピンバンドルを中心とする7体の模擬集合体からなるPLANDTL-DHX試験装置を用い、集合体間熱移行がある条件での集合体内温度分布について実施した体系的なナトリウム実験を対象に実験解析を行った結果、本手法が定常時およびスクラム過渡時の集合体内温度分布を評価する上で有效であることを明らかにした。集合体の断面平均温度からピーク温度およびラッパー管近傍の温度がどの程度離れているかを表す無次元パラメータ $P_f, W_f$ について集合体内出力・流量条件依存性、集合体間熱移行量依存性を本手法で解析した結果は実験結果と良く一致した。

実機の集合体体系に適用するまでの予備的な検討を行った結果、本手法は現状の計算機リソースの範囲で十分に実機の217ピン集合体に適用が可能であることを確認した。

## 謝辞

本報告書で紹介した解析手法の開発にあたり、川崎重工株式会社の前川 勇氏、赤松幹夫氏、戸田信一氏に有益なコメント、議論をして頂いた。ここに深く感謝の意を表します。

## 参考文献

- [1] A. Yamaguchi, et.al., "Plant wide thermal hydraulic analysis of natural circulation test at Joyo with MK-II irradiation core", Proceedings of NURETH-4, Karlsruhe, F.R. Germany, p. 398 (Oct., 1989)
- [2] S. Toda, Y. Ieda, et al., "Transverse temperature distribution in a multi-subassembly test section simulating natural circulation decay heat removal in the LMFBR", Proceedings of ANP '92, Kyoto, Japan, p.26.1-1 (Oct., 1992)
- [3] H. Kamide, et.al., "Inter-subassembly heat transfer during natural circulation decay heat removal of FBRs - Multi-subassembly sodium experiments -", Proceedings of ICONE-3, Kyoto, Japan, Vol. 1, p.23 (Apr. 1995)
- [4] H. Kamide, Y. Ieda et al., "Core-plenum thermohydraulics under decay heat removal by natural circulation - Sodium experiments for seven-subassembly model-", Proceedings of FRS '94, Obninsk, Russia, (Oct., 1994)
- [5] 日本原子力学会編、「原子炉における熱流動数値解析技術の高度化」、pp.263-278 (1990)
- [6] G. Basque "3D computation of thermal-hydraulics in a wire-wrapped rod bundle in the natural and mixed convection regimes using the TRIO VF code", Proceedings of NURETH-4, Karlsruhe, F.R. Germany, Vol. 2, p.1346 (Oct., 1989)
- [7] S.K. Cheng and N.E. Todreas, "Hydrodynamic models and correlations for bare and wire-wrapped hexagonal rod bundles - Bundle friction factors, subchannel friction factors and mixing parameters", Nuclear Engineering and Design, Vol. 92, pp.227-251 (1986)
- [8] S.K. Cheng and N.E. Todreas, "Energy transfer mechanism under mixed convection conditions in LMFBR wire-wrapped bundles", Proceedings of the 3rd Int. Topical Mtg. on Reactor Thermal Hydraulics, Newport, USA, (Oct., 1985)
- [9] 西村元彦、上出英樹、「ミキシング係数を考慮した集合体内多次元熱流動評価手法の開発」、日本原子力学会1996年春の年会、C23、(Mar. 1996)

**Table 1 Main Specifications of CCTL-CFR****Simulated Core**

Number of Subassemblies	1	2
Flat to Flat Distance (m) of Hexagonal Flow area	0.14	0.14
Number of Heater Pins	61	19
Pin Diameter (m)	0.016	0.025
Pin Pitch (m), (P/D).	0.0174 (1.088)	0.0302 (1.208)
Wire Diameter (m)	0.0014	0.0052
Wire Lead (m)	0.2	0.7
Heated Length (m)	1.7	1.7
Maximum Heater Power	50kW	50kW

**Loop**

Three individual lines into the subassemblies are available.

Flow rate in each line can be controlled and measured.

Cooling channel is set along the 61-pin subassembly.

Table 2 Friction Factors in S/As of CCTL-CFR

## a) 61-pin Bundle

Subchannel	Laminar Region		Transition Region	
	Friction Factor	Re Range	Friction Factor	Re Range
Inner Subchannel	$73 Re^{-1}$	$Re \leq 422.5$	$2.48 Re^{-0.44}$	$Re \geq 422.5$
Wall Subchannel	$70 Re^{-1}$	$Re \leq 422.5$	$2.09 Re^{-0.42}$	$Re \geq 422.5$
Corner Subchannel	$112 Re^{-1}$	$Re \leq 422.5$	$4.28 Re^{-0.46}$	$Re \geq 422.5$

## b) 19-pin Bundle

Subchannel	Laminar Region		Transition Region	
	Friction Factor	Re Range	Friction Factor	Re Range
Inner Subchannel	$82 Re^{-1}$	$Re \leq 677.2$	$2.59 Re^{-0.47}$	$Re \geq 677.2$
Wall Subchannel	$89 Re^{-1}$	$Re \leq 677.2$	$2.46 Re^{-0.45}$	$Re \geq 677.2$
Corner Subchannel	$102 Re^{-1}$	$Re \leq 677.2$	$2.49 Re^{-0.43}$	$Re \geq 677.2$

Table 3 Cases of CCTL-CFR Experimental Analyses

Case	ST167	ST165	ST169	ST171	ST178	ST180	ST16	ST17
<b>Flow rate (l/min)</b>								
61-pin	10.3	10.4	10.3	10.3	15.3	5.2	26.3	25.7
19-pin*1	13.1	13.2	13.1	13.1	13.4	13.5	27.6	26.1
Cooling Channel	0.9	1.7	1.0	1.7	5.2	1.3	0.0	0.9
<b>Flow Velocity (cm/sec)</b>								
61-pin	3.72	3.76	3.72	3.72	5.52	1.88	9.50	9.28
19-pin	3.01	3.04	3.01	3.01	3.08	3.11	6.35	6.00
<b>Heater Power (kW)</b>								
61-pin	14.5	14.5	14.5	14.5	15.0	15.5	52.0	48.3
19-pin	6.9	0.0	33.5	40.2	0.0	27.2	0.0	0.0
<b>Inlet Temperature (°C)</b>								
61-pin	251.2	251.1	251.3	251.4	250.9	252.1	251.8	257.0
19-pin	252.1	251.9	252.1	252.1	251.9	251.7	251.9	257.2
Cooling Channel	246.9	248.0	247.2	248.7	249.5	247.4	-	250.0
Temperature *2	-47.1	-75.2	63.5	91.2	-52.4	-53.1	-107.7	-102.2
<b>Difference at Heated End (°C)</b>								

\*1:Average Flow rate in two 19-pin Subassemblies

\*2: Temp.(19-pin) - Temp.(61-pin), based on Power and Flow ratio

Table 4 Main Specifications of PLANDTL-DHX

---

<b>Simulated Core</b>		
Number of Subassemblies	1	6
Flat to Flat Distance (m) of Hexagonal Flow area		0.063
Wrapper Tube Thickness (m)		0.004
Inter-wrapper Gap Width (m)		0.007
Number of Heater Pins	37	7
Pin Diameter (m)	0.0083	0.0208
Pin Pitch (m), (P/D).	0.0099 (1.193)	0.0224 (1.077)
Wire Diameter (m)	0.0015	0.0015
Wire Lead (m)	0.165	0.165
Heated Length (m)	1.0	1.0
Power Profile	Chopped Cosine	Chopped Cosine
Maximum Heater Power (kW)	150	150
<b>Loop</b>		
<b>Core</b>		
Maximum Power	1.2 MW	
Number of Subassembly	7	
<b>Upper Plenum</b>		
Diameter	2.0 m	
Sodium Level from Bottom	2.6 m	
UCS Diameter	0.412 m	
Main Pipe Diameter	4 in.	
Maximum Flow rate	1200 l/min	
<b>IHX</b>		
Heat Exchanger Type	Primary Side: Inside of tubes	
Secondary loop Air Cooler	1.5 MW	

---

Table 5 Friction Factors in S/As of PLANDTL-DHX

a) 37-pin Bundle

Subchannel	Laminar Region		Transition Region	
	Friction Factor	Re Range	Friction Factor	Re Range
Inner Subchannel	$82.7 \text{ Re}^{-1}$	$\text{Re} \leq 613.6$	$3.15 \text{ Re}^{-0.49}$	$\text{Re} \geq 613.6$
Wall Subchannel	$90.1 \text{ Re}^{-1}$	$\text{Re} \leq 1067$	$0.859 \text{ Re}^{-0.33}$	$\text{Re} \geq 1067$
Corner Subchannel	$104.4 \text{ Re}^{-1}$	$\text{Re} \leq 380.9$	$10.0 \text{ Re}^{-0.46}$	$\text{Re} \geq 380.9$

b) 7-pin Bundle

Subchannel	Laminar Region		Transition Region	
	Friction Factor	Re Range	Friction Factor	Re Range
Inner Subchannel	$69.9 \text{ Re}^{-1}$	$\text{Re} \leq 332.5$	$2.29 \text{ Re}^{-0.41}$	$\text{Re} \geq 332.5$
Wall Subchannel	$70.5 \text{ Re}^{-1}$	$\text{Re} \leq 727.2$	$0.566 \text{ Re}^{-0.27}$	$\text{Re} \geq 727.2$
Corner Subchannel	$125.6 \text{ Re}^{-1}$	$\text{Re} \leq 92.7$	$52.9 \text{ Re}^{-0.81}$	$\text{Re} \geq 92.7$

Table 6 Parameter Analyses of Permeability between Subchannels

No.	Permeability in X and Y directions	
	Center Subassembly	Outer Subassembly
1	Ref.*	0.2
2	Ref.	0.4
3	Ref.	0.6
4	Ref.	0.8
5	Ref.	1.0
6	0.1	0.4
7	0.2	0.4
8	0.4	0.4
9	0.6	0.4
10	0.8	0.4
11	1.0	0.4

\* Ref.: Permeability based on the subchannel geometry (0.14)

Table 7 Cases of PLANDTL-DHX Experimental Analyses

Run No.	ST072	ST-054	TR-049	ST-070	ST-080
Run Name	DTSFM50T	FUR24P24F	TIKO-30T	DTS8F0T-1	DTS8FP30T
<b>Flow rate (l/min)</b>					
37-pin	8.0	23.4	49.0	8.0	8.0
7-pin*1	15.3	15.3	49.0	15.3	15.3
<b>Flow Velocity (cm/sec)</b>					
37-pin	9.7	28	60	9.7	9.7
7-pin	24	24	78	24	24
<b>Heater Power (kW)</b>					
37-pin	24.0	24.0	144.0	24.0	24.0
7-pin	31.8	6.6	116.0	46.0	55.0
Inlet Temp. (°C)	300	300	300	300	300
Temperature *2 Difference at Heated End (°C)	-50	-32	-31	0	32

\*1:Average Flow rate in six 7-pin Subassemblies

\*2: Temp.(7-pin) - Temp.(37-pin), based on Power and Flow ratio

Table 8 Cases of PLANDTL-DHX Transinet Analyses

Run No.	TR-043	TR-049
Run Name	TIKO-REF	TIKO-30T
<b>Flow rate (l/min)</b>		
37-pin	49.0	49.0
7-pin*1	49.0	49.0
<b>Flow Velocity (cm/sec)</b>		
37-pin	60	60
7-pin	78	78
<b>Heater Power (kW)</b>		
37-pin	144.3	144.0
7-pin	144.3	116.0
Inlet Temp. (°C)	300	300
Temperature *2 Difference at Heated End (°C)	0	-31

\*1:Average Flow rate in six 7-pin Subassemblies

\*2: Temp.(7-pin) - Temp.(37-pin), based on Power and Flow ratio

Table 9 Calculated CCTL-CFR Test Cases

CASE NO.	TEST NO.	HEATER POWER (kW/Ass.)		FLOW RATE (l/min/Ass.)			INLET TEMPERATURE (°C)			HEAT TRANSFER TO 61pin BUNDLE
		L (61pin)	H (19pin)	L (61pin)	H (19pin)	COOLING CHANNEL	L (61pin)	H (19pin)	COOLING CHANNEL	
ST-167	GR1.06C050TR0.5	14.51	6.94	10.28	13.06	0.90	251.16	252.09	246.91	COOLED
ST-169	GR1.06H050TR0.5	14.49	33.48	10.34	13.12	1.0	251.30	252.06	247.23	HEATED
ST-174	GR0.35H000TR0.0	15.29	7.78	29.38	13.51	0.0	251.23	252.16	-	ISOTHERMAL

Table 10 Calculated PLANDTL-DHX Test Cases

CASE NO.	TEST NO.	HEATER POWER (KW/Ass.)		FLOW RATE (l/min/Ass.)		INLET TEMPERATURE (°C)	$\Delta T$ CENTER-SURROUND (°C)	HEAT TRANSFER TO CENTER BUNDLE
		CENTER	SURR.	CENTER	SURR.			
ST-070	DTS8F0T-1	24.0	23.0	8.0	7.67	300.0	0	ISOTHERMAL
ST-072	DTS8FM50T	24.0	15.9	8.0	7.67	300.0	-50	COOLED
ST-080	DTS8FP30T	24.0	27.5	8.0	7.67	300.0	-30	HEATED

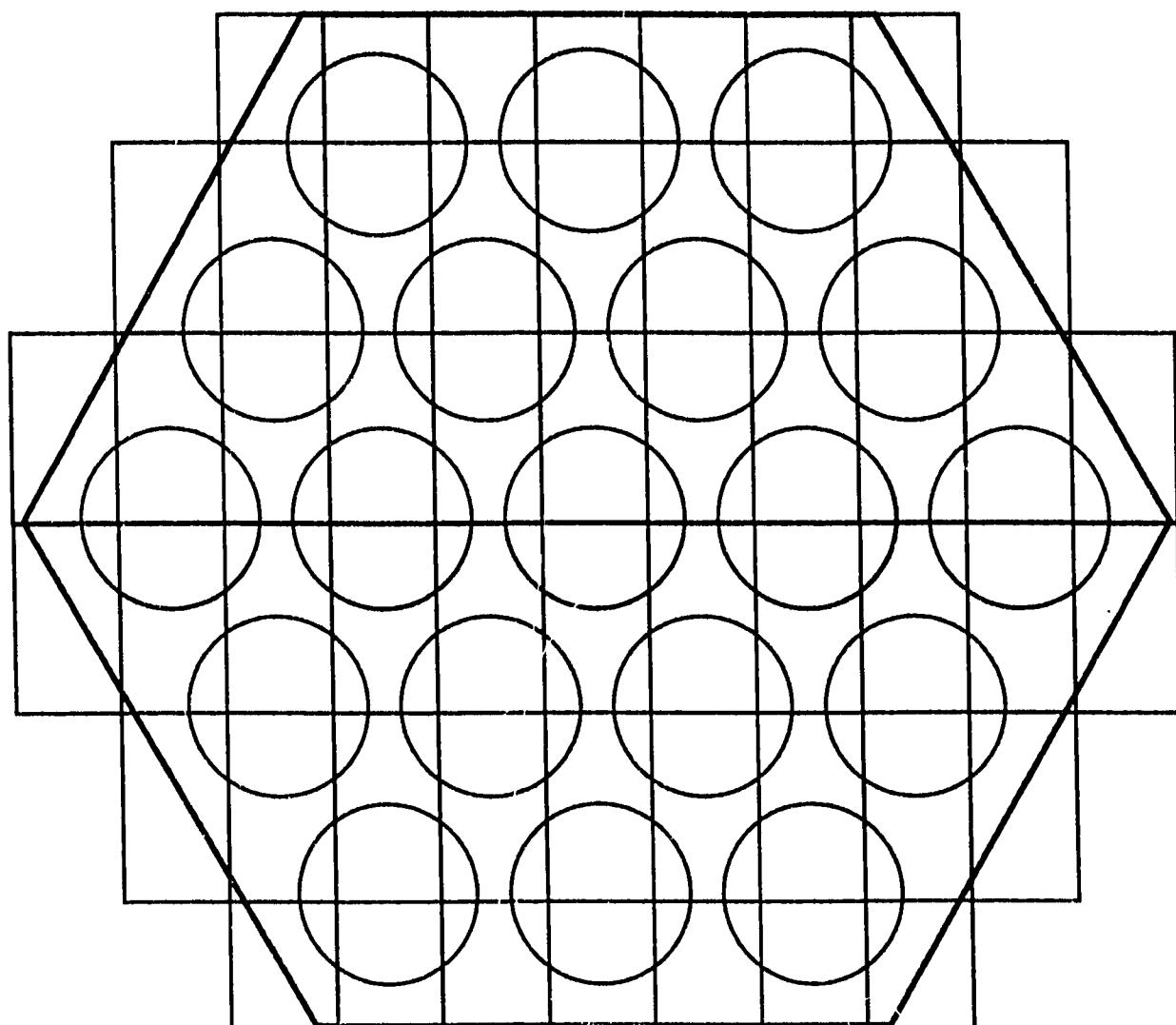


Fig. 1 Mesh Arrangement of 19-pin Subassembly

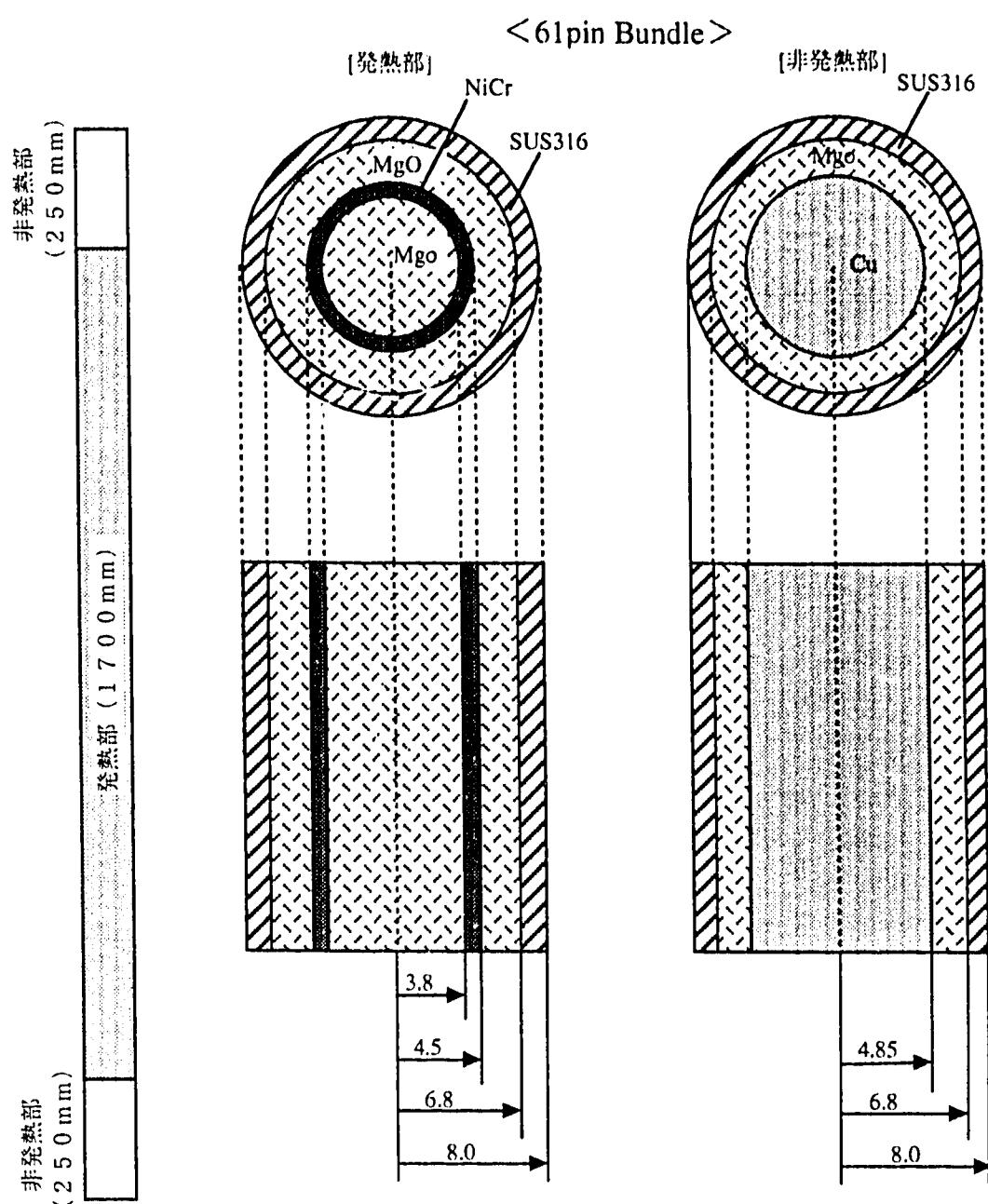
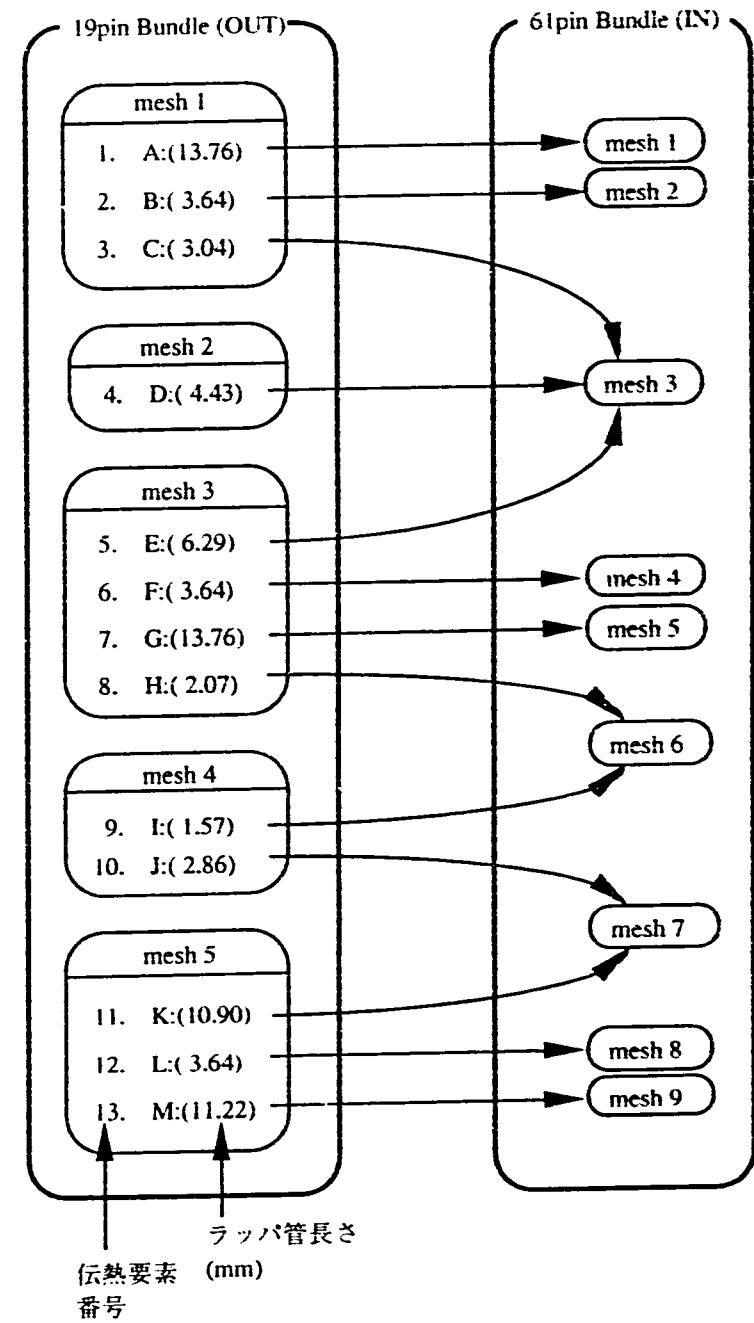
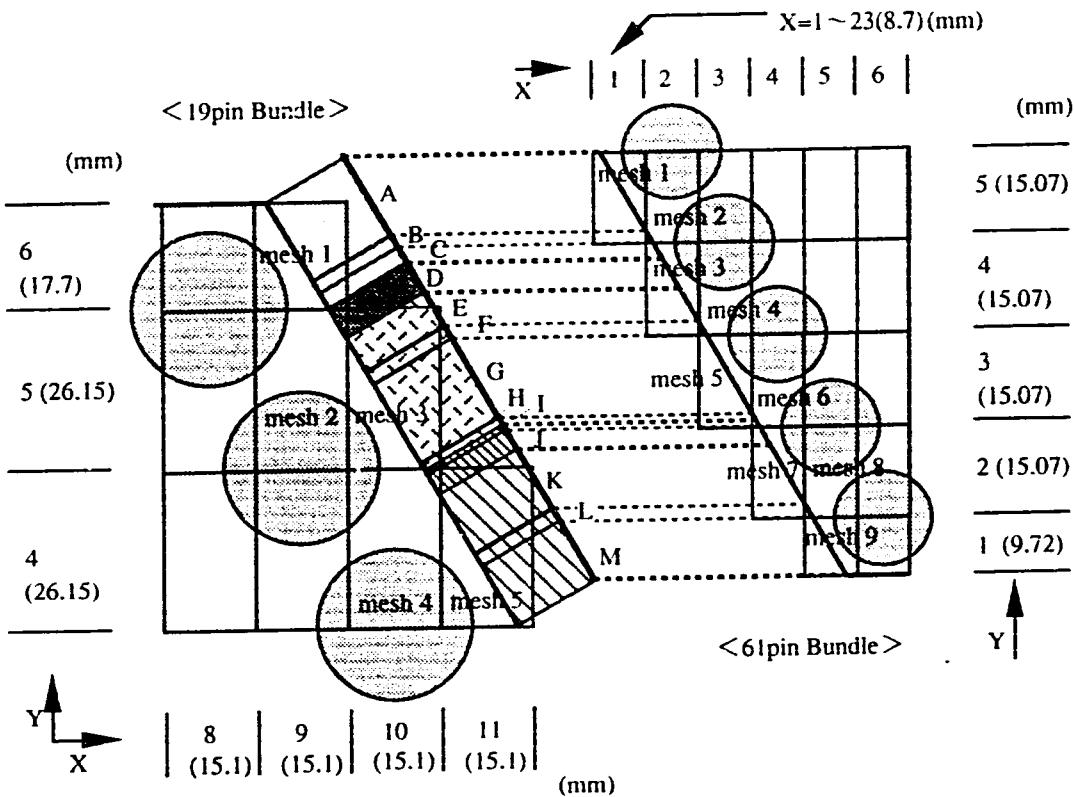


Fig. 2 Thermal Structure Model of Heater Pins



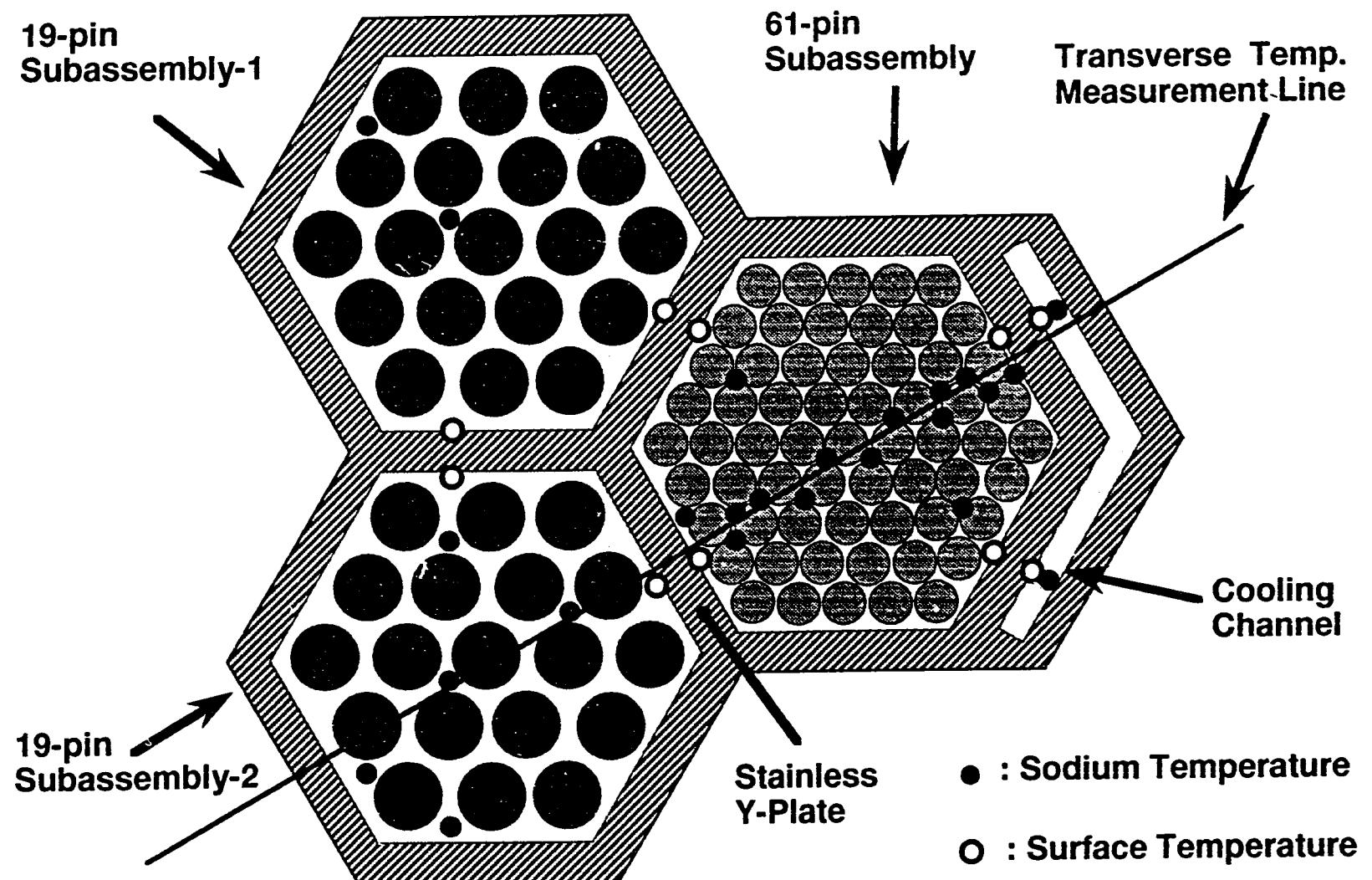


Fig. 4 Cross Section View of CCTL-CFR Simulated Core

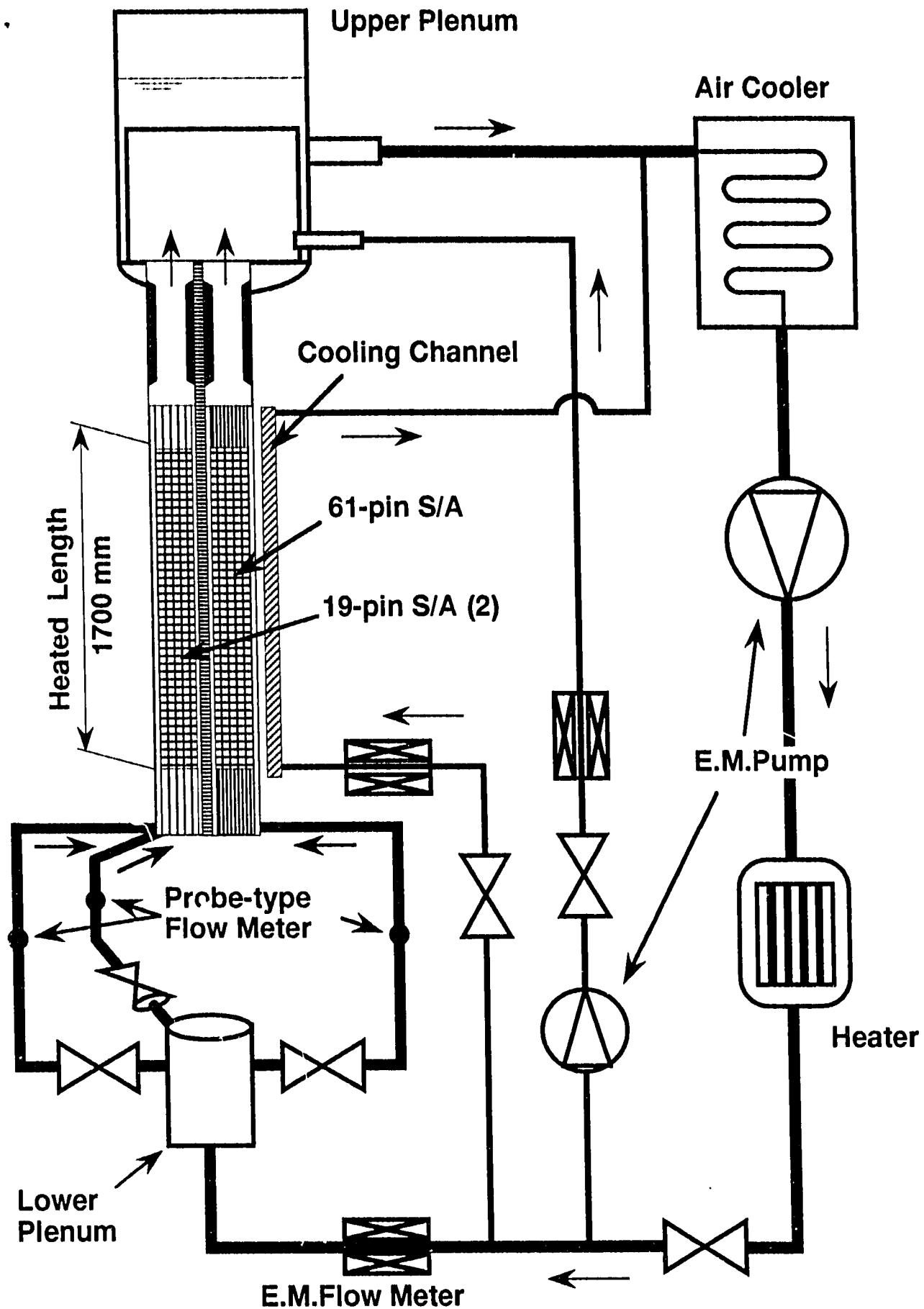


Fig. 5 Flow Diagram of the CCTL-CFR

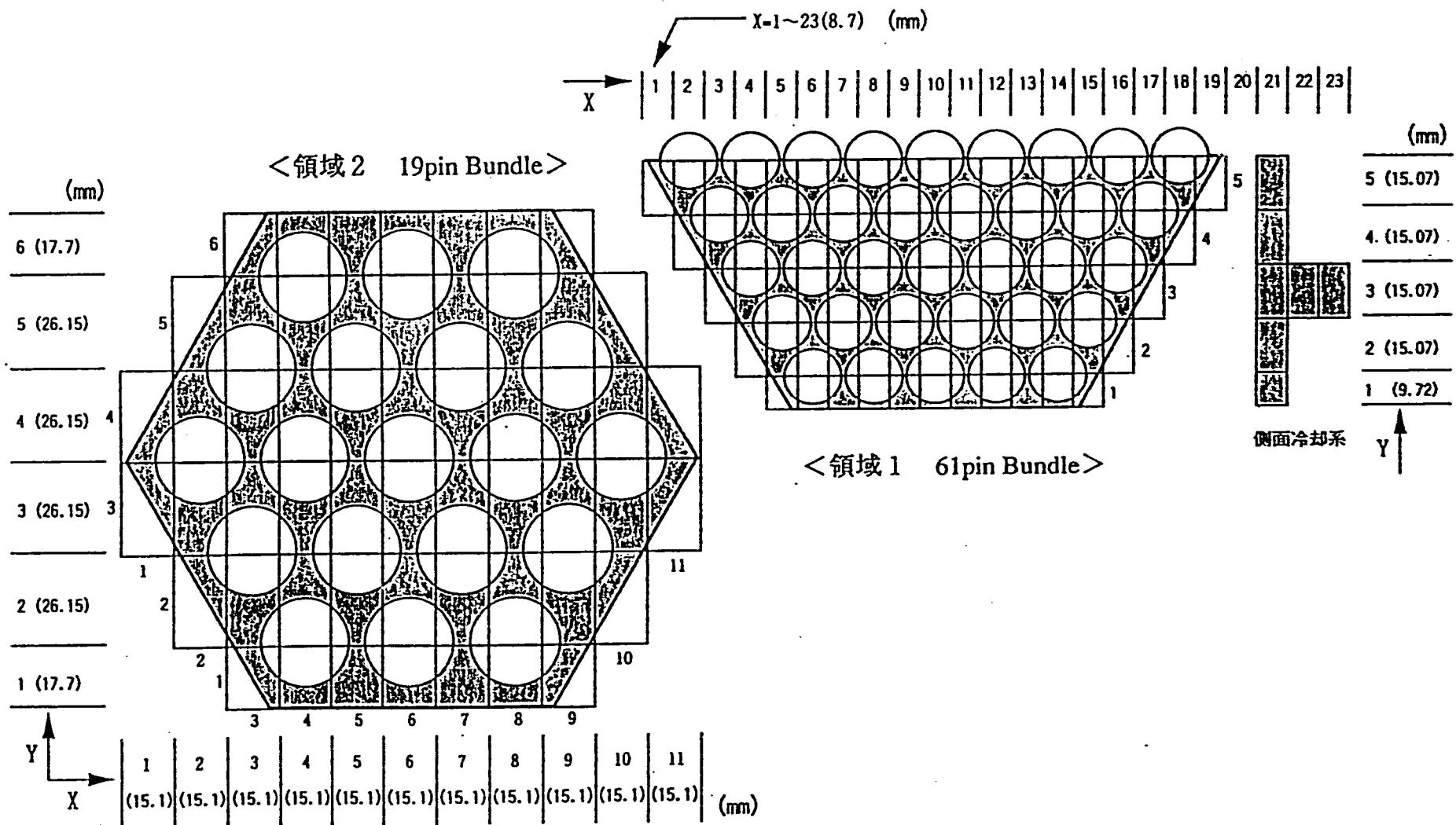


Fig. 6 Mesh Arrangement of CCTL-CFR Simulated Core in Horizontal Plane

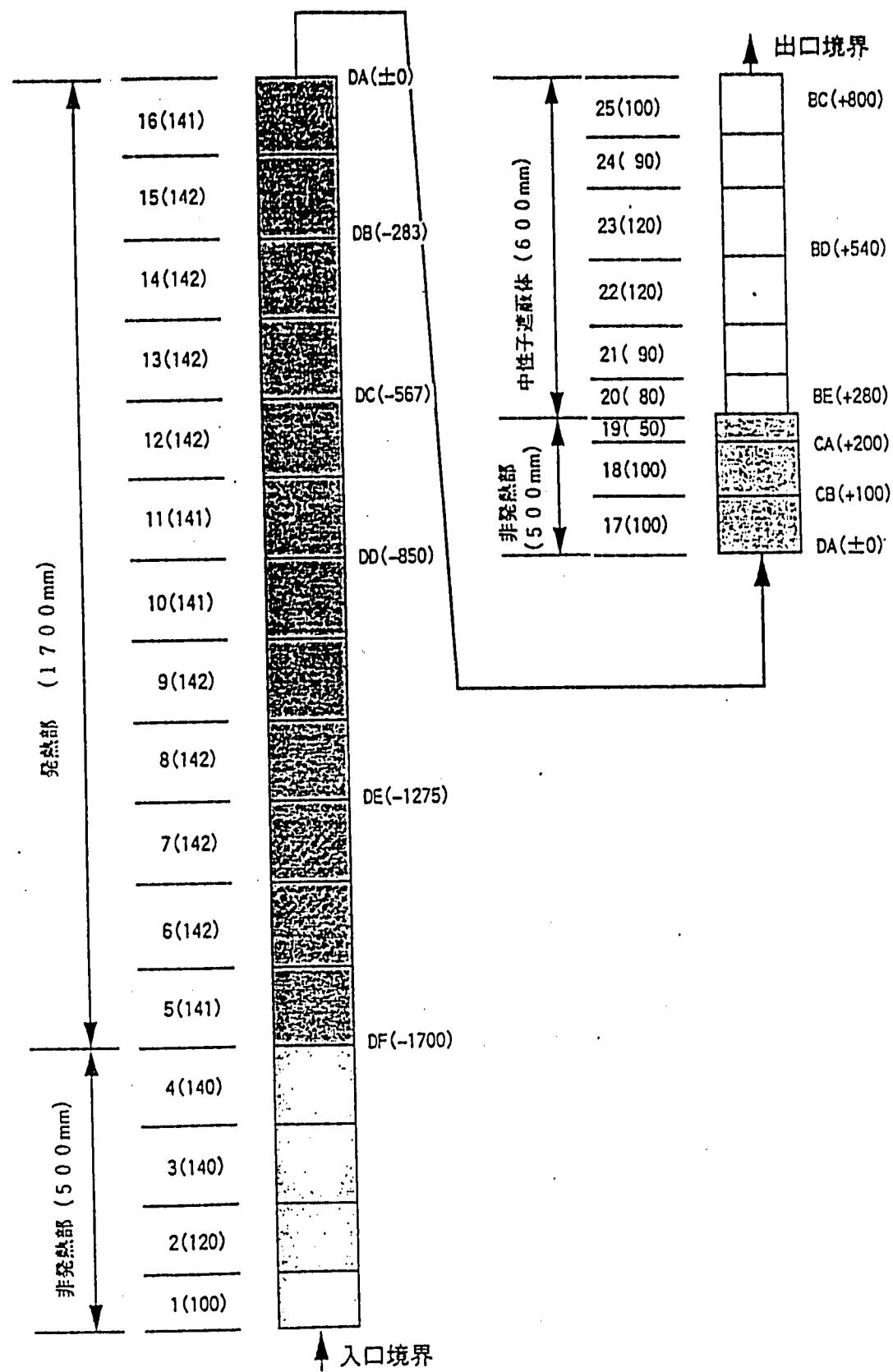


Fig. 7 Mesh Arrangement of CCTL-CFR Simulated Core in Vertical Plane

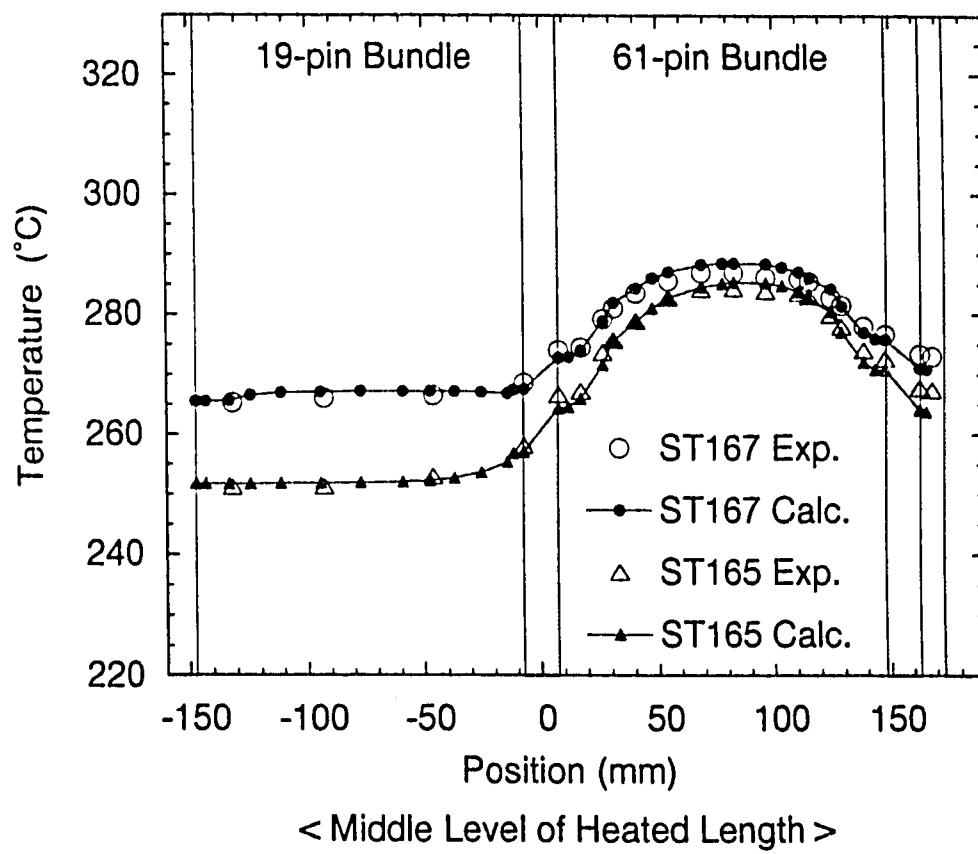
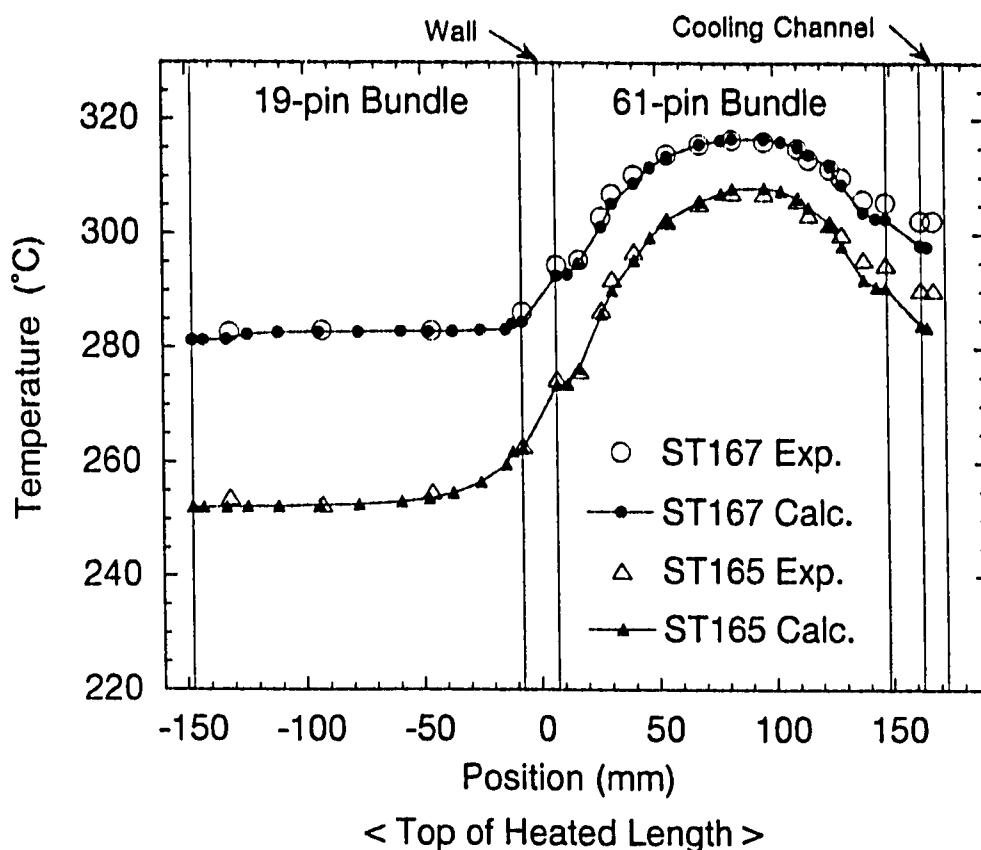


Fig. 8 Transverse Temperature Distributions in cases where 61-pin bundle is cooled

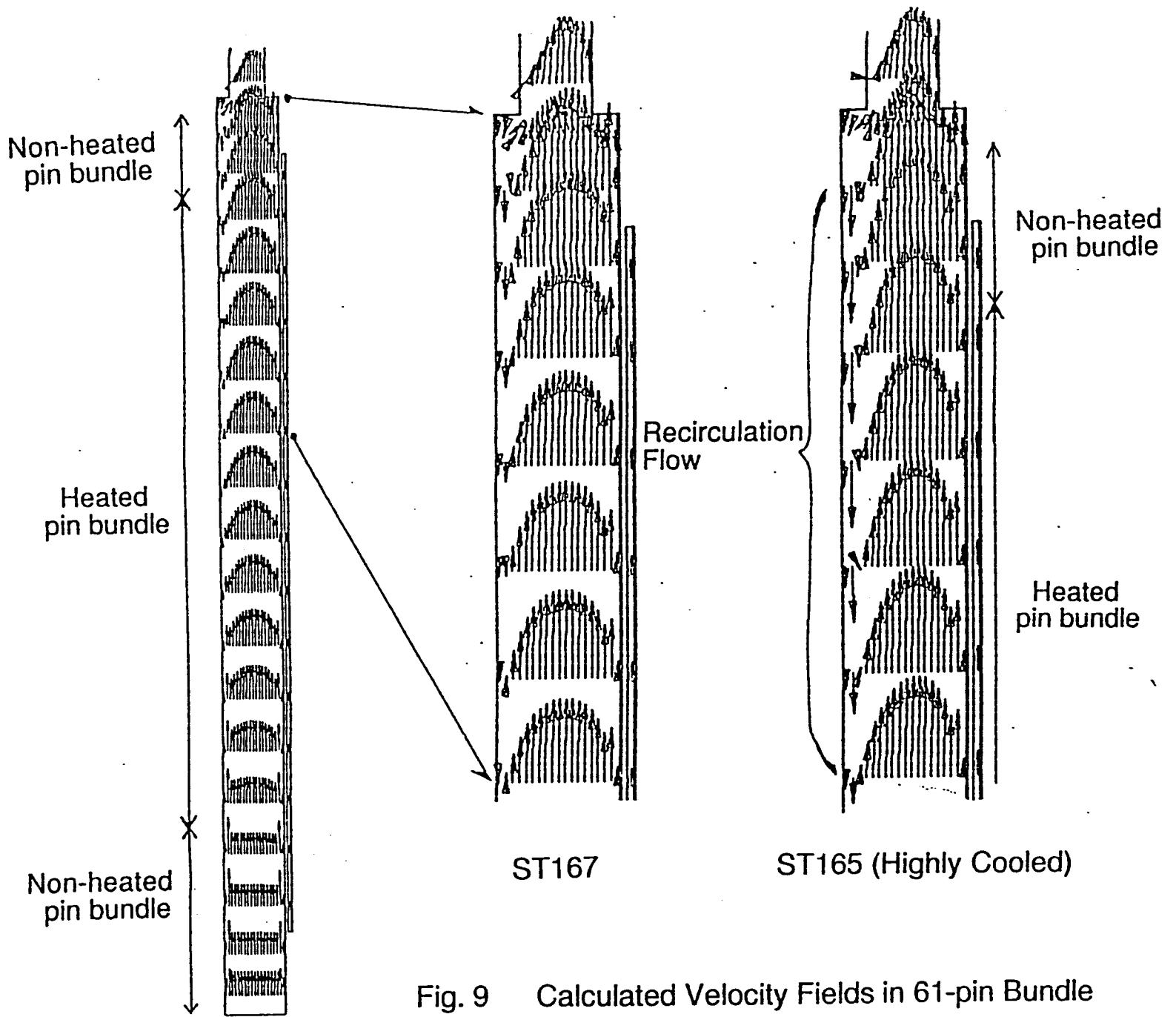


Fig. 9 Calculated Velocity Fields in 61-pin Bundle

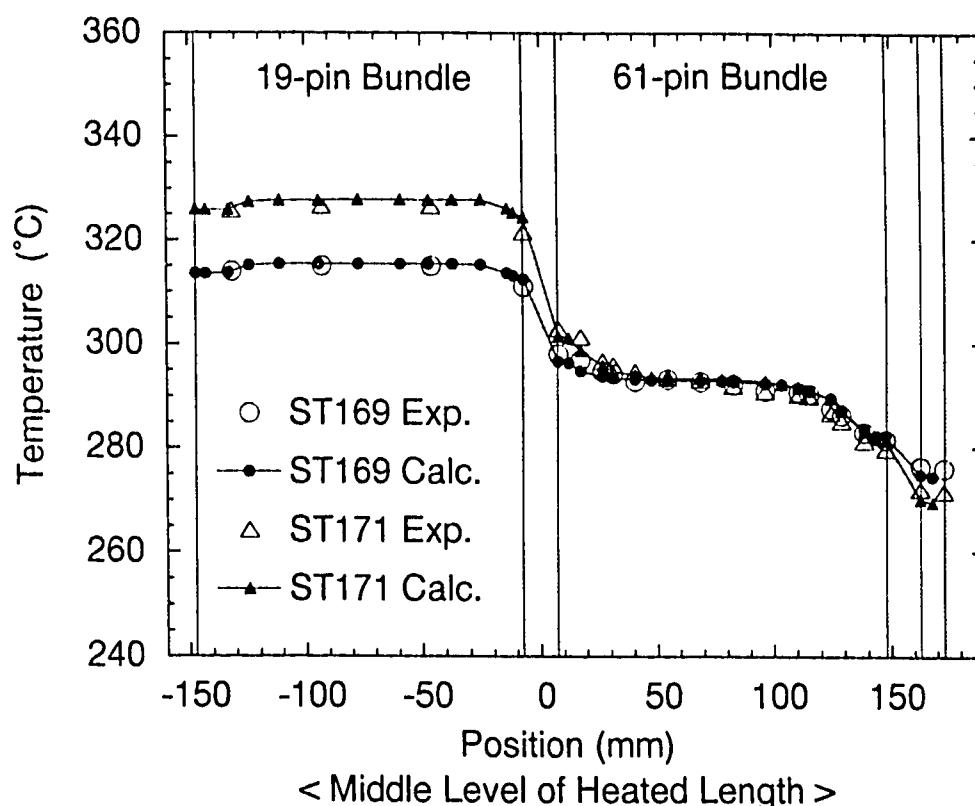
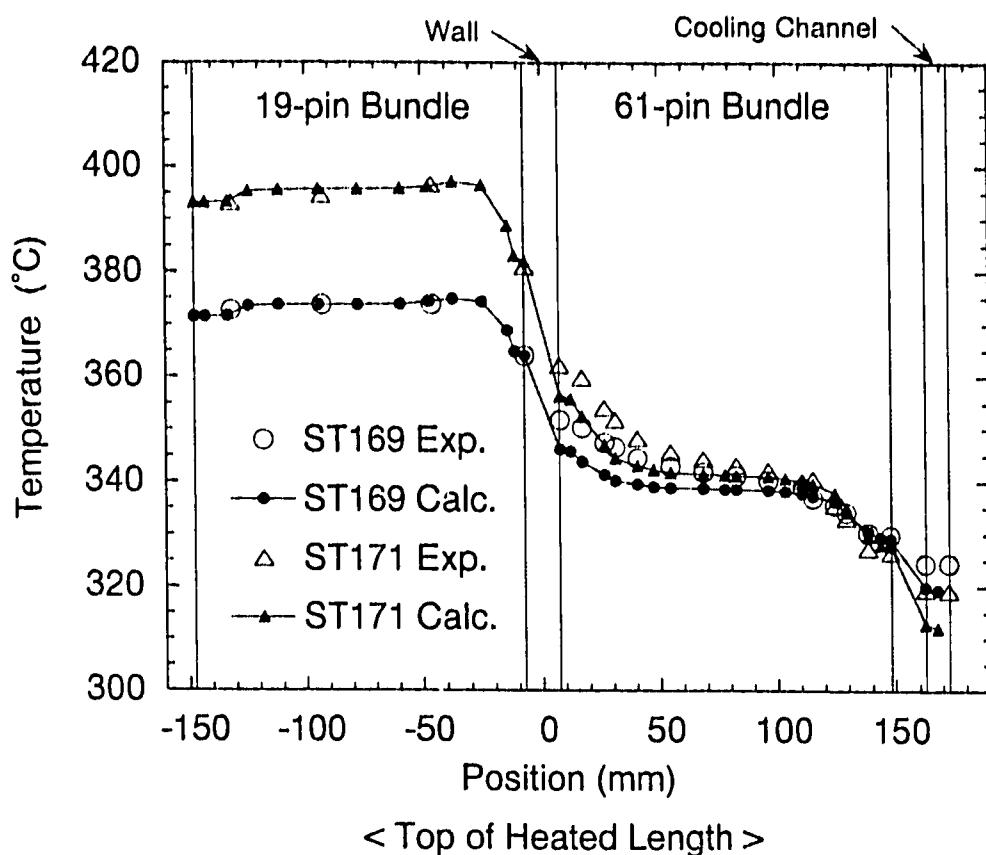


Fig. 10 Transverse Temperature Distributions in cases where 61-pin bundle is heated

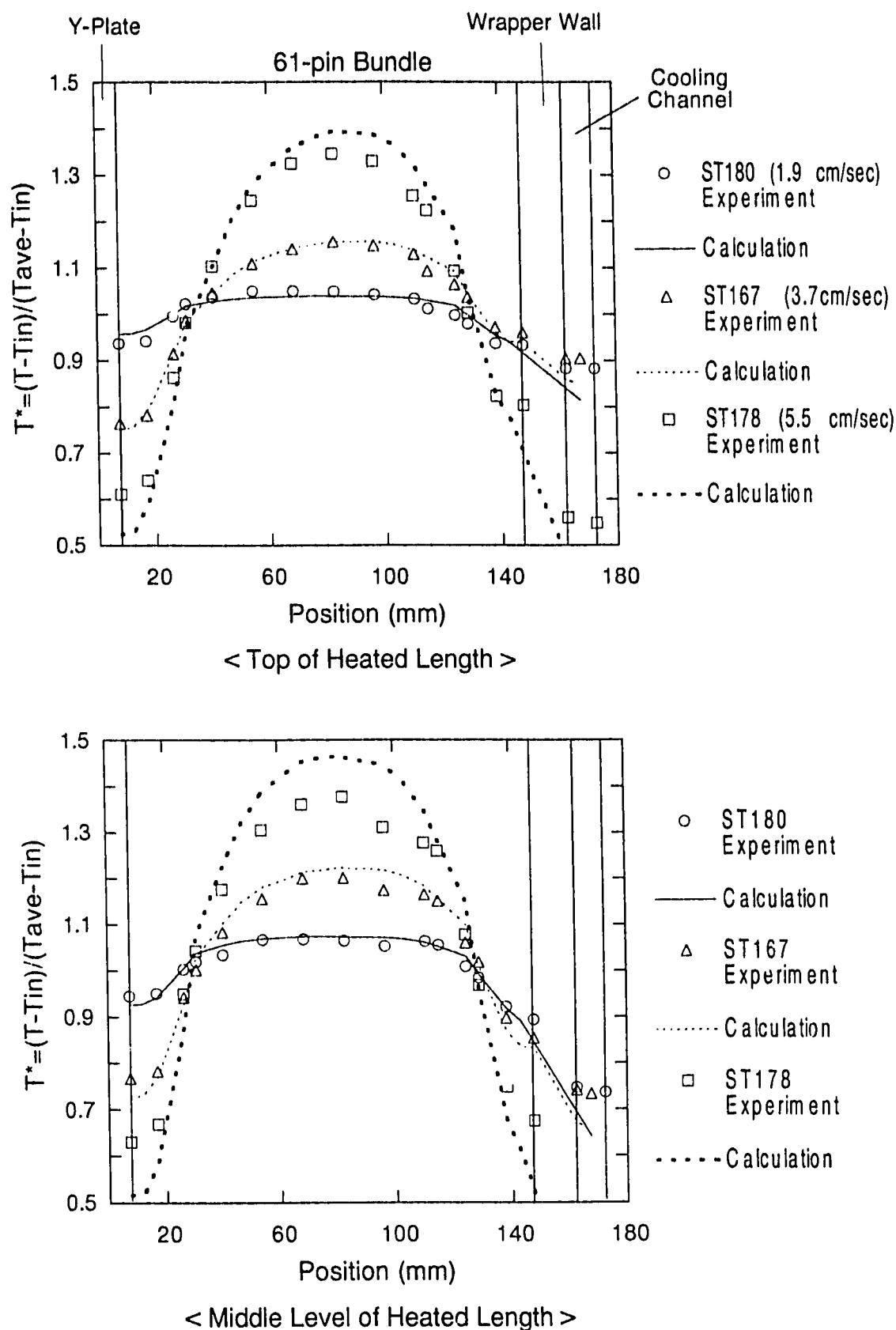


Fig. 11 Influence of Flow Velocity on Normalized Transeverse Temperature Distributions in cases where 61-pin bundle is cooled

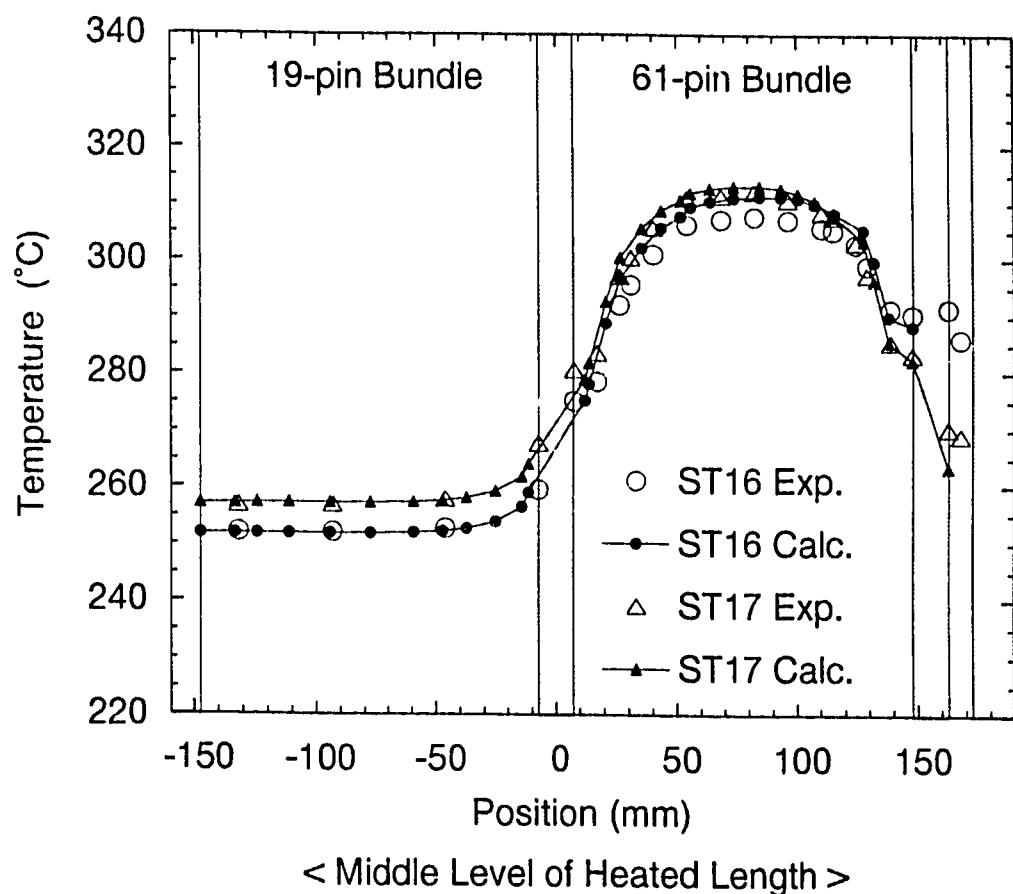
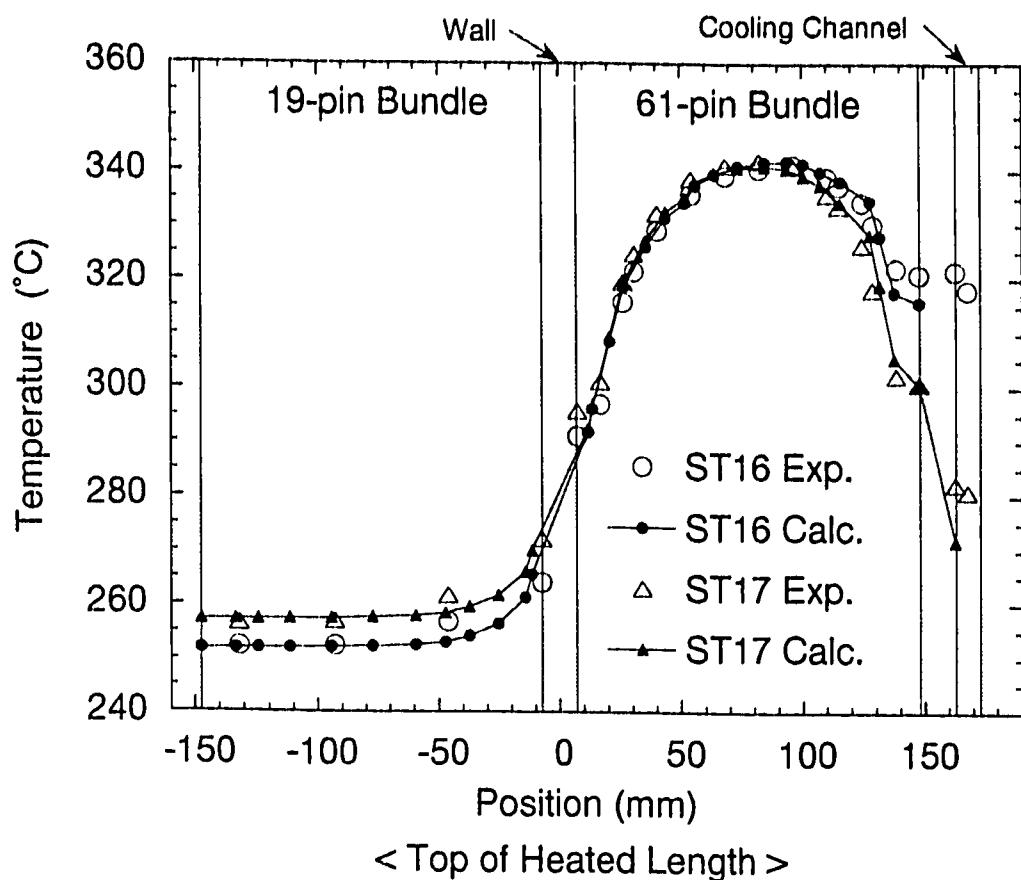


Fig. 12 Transverse Temperature Distributions in cases where 61-pin bundle is 9% Power Conditions and cooled

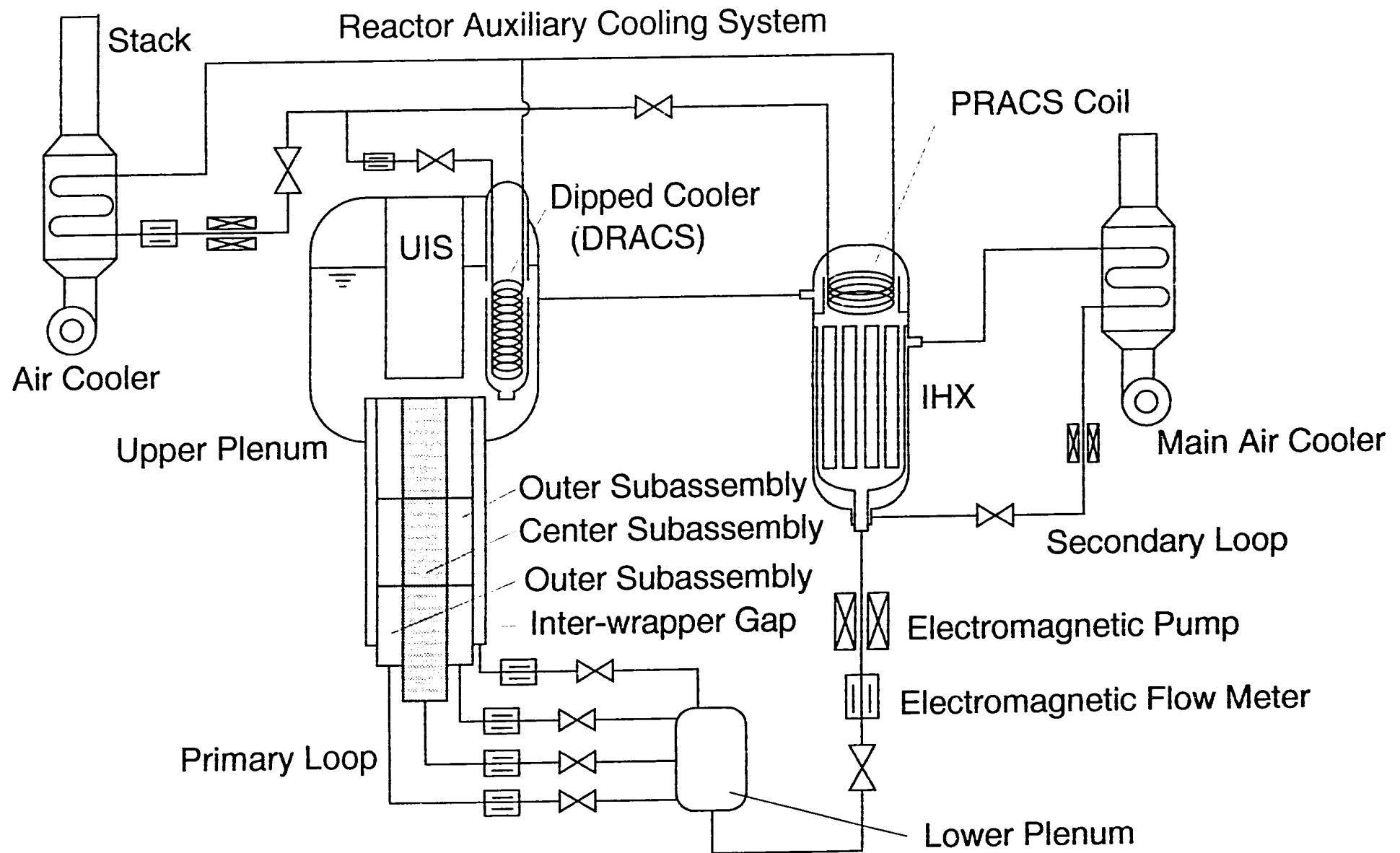


Fig. 13 Flow Diagram of PLANDTL-DHX

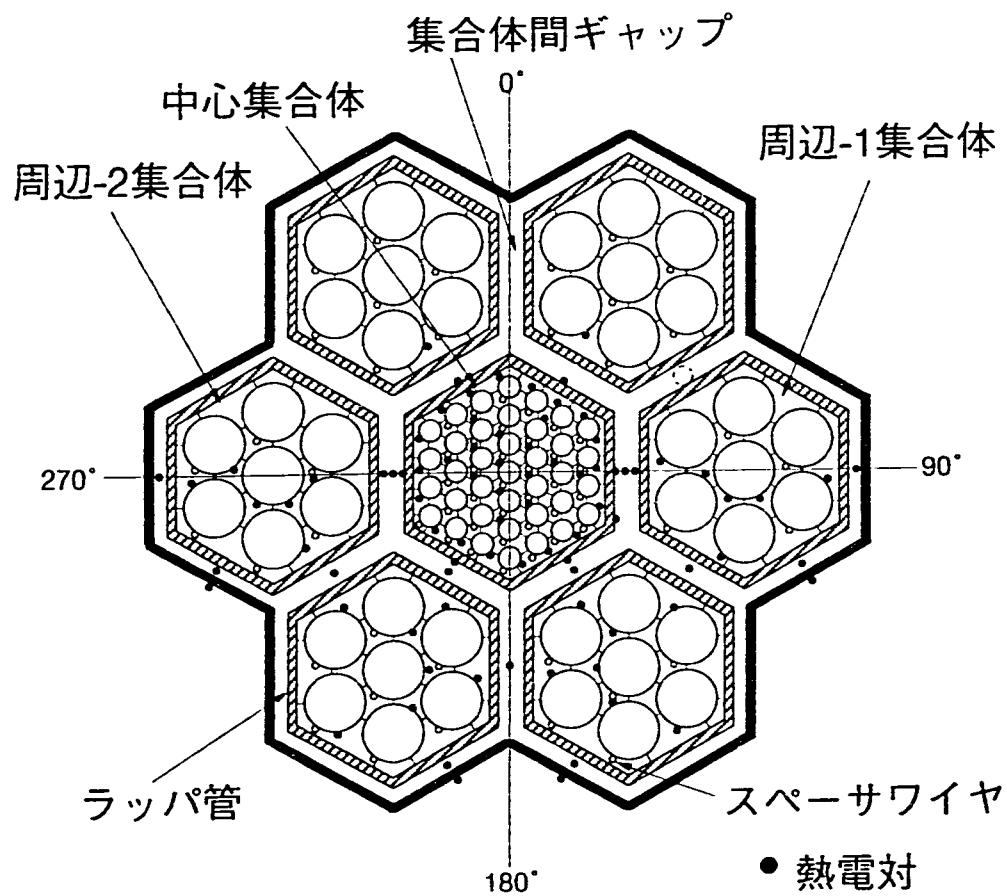


図 7 集合体試験バンドル部水平断面

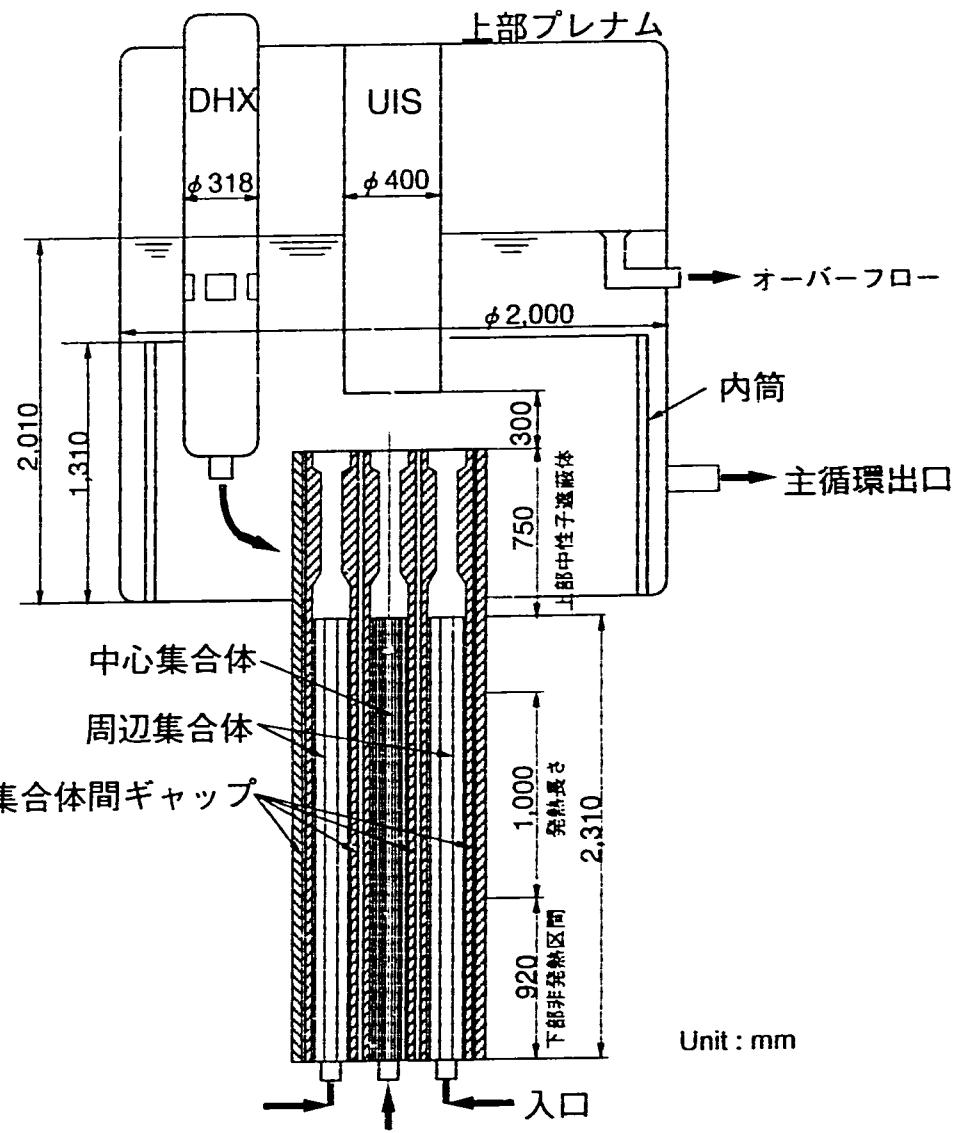


図 上部プレナム及び模擬炉心部

Fig. 14 Core and Upper Plenum of PLANDTL-DHX

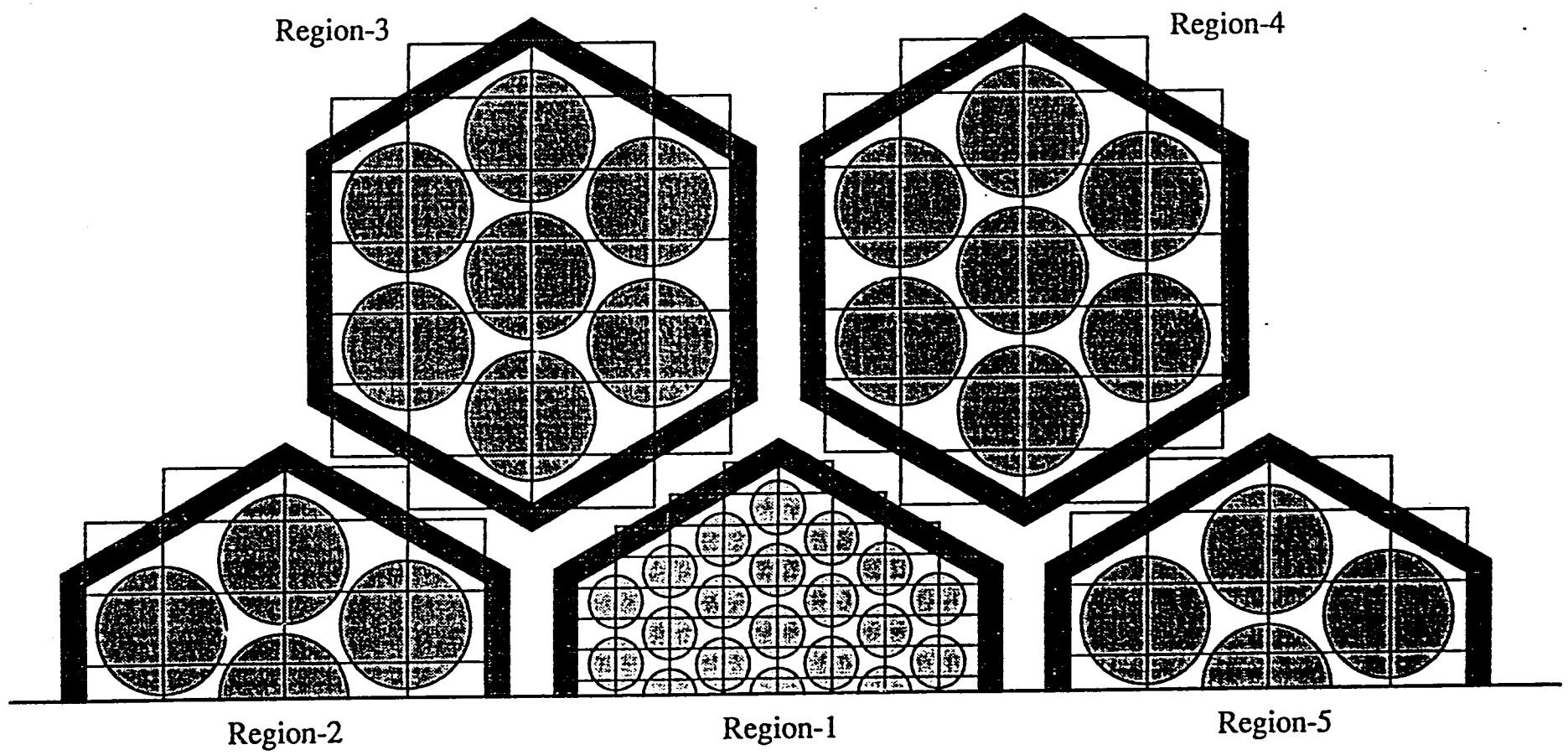


Fig. 15 Mesh Arrangement of PLANDTL-DHX Simulated Core in Horizontal Plane

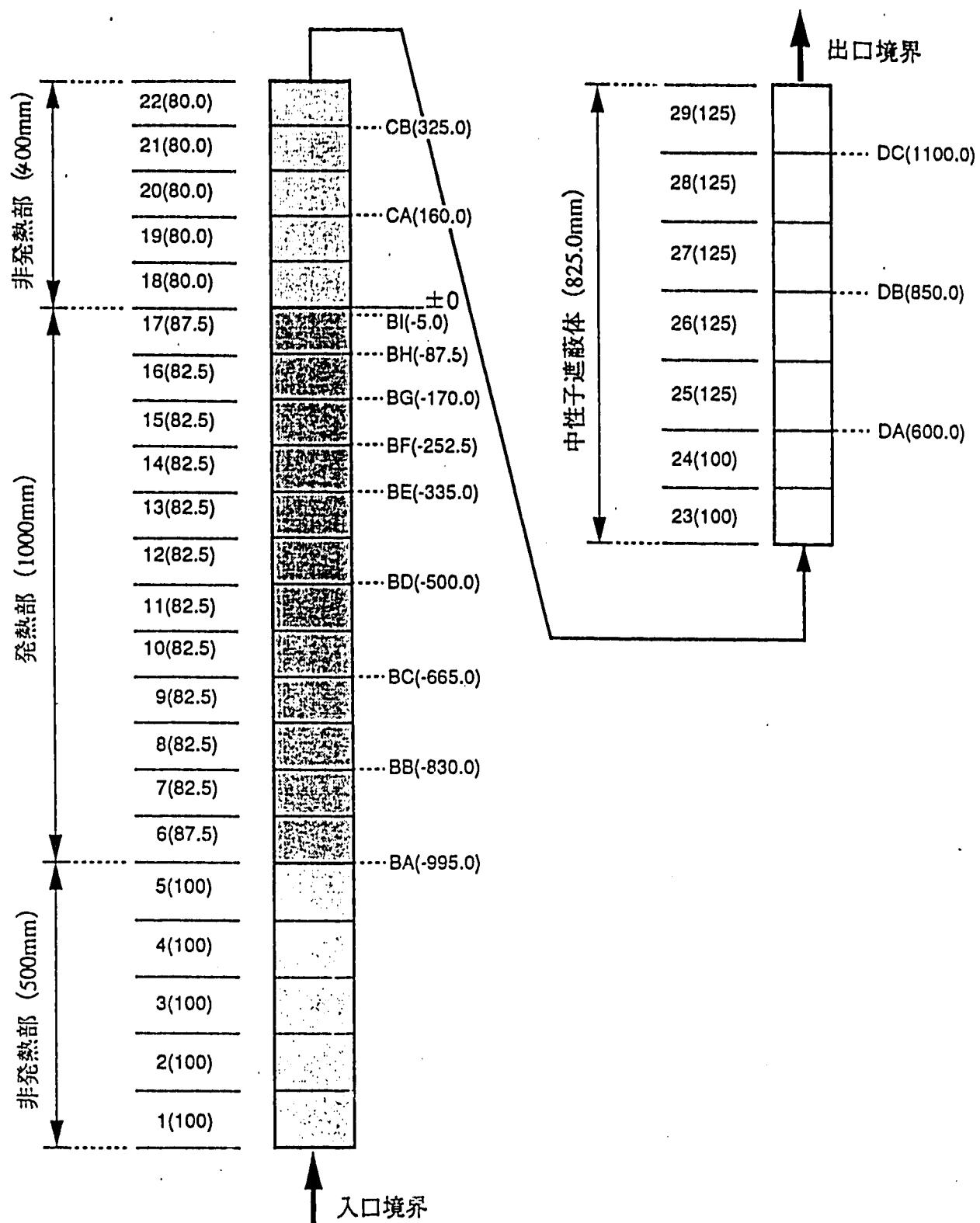


Fig. 16 Mesh Arrangement of PLANDTL-DHX

Simulated Core in Vertical Plane

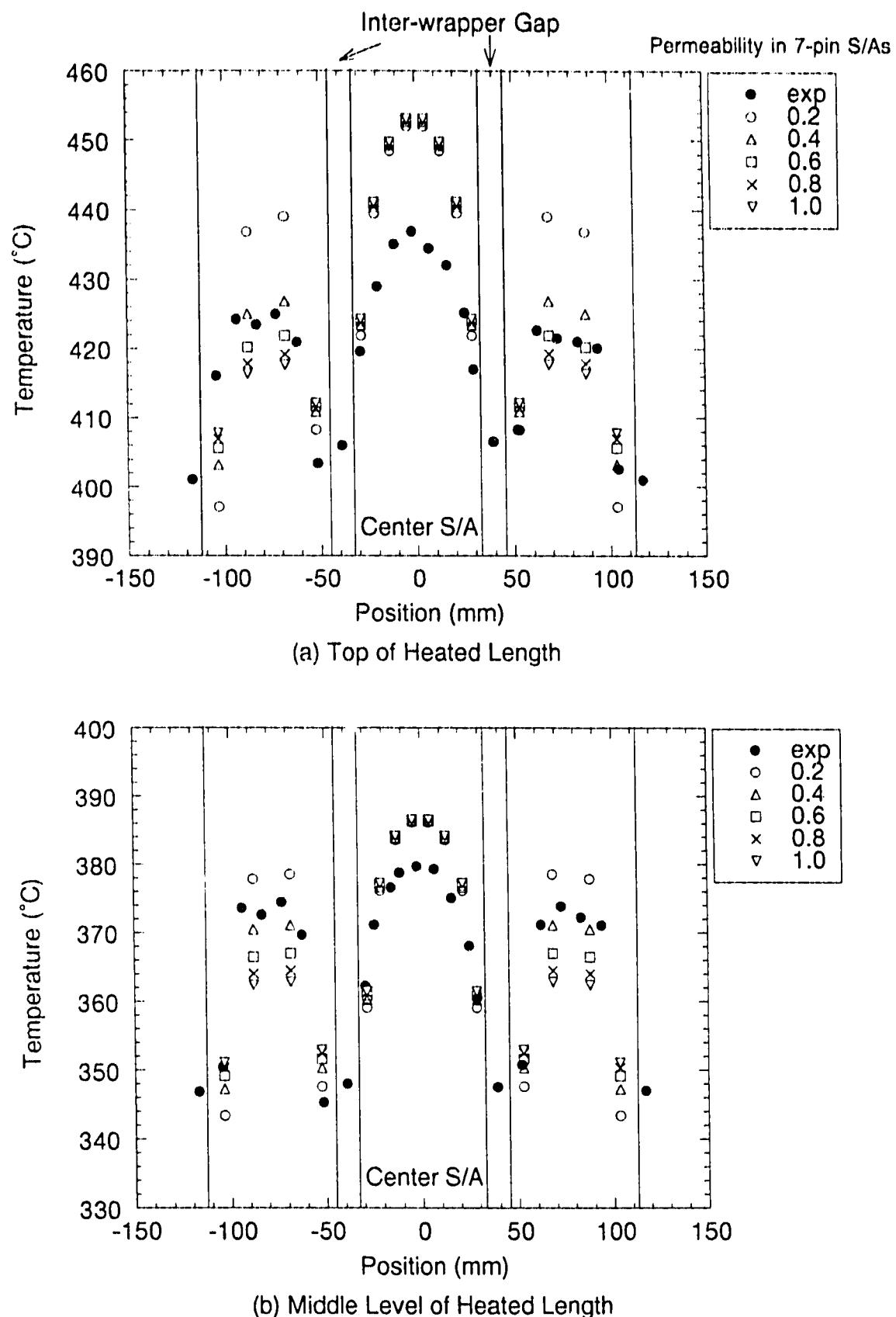


Fig. 17 Influence of Permeability in 7-pin Subassemblies on Transverse Temperature Distributions in Case ST-072

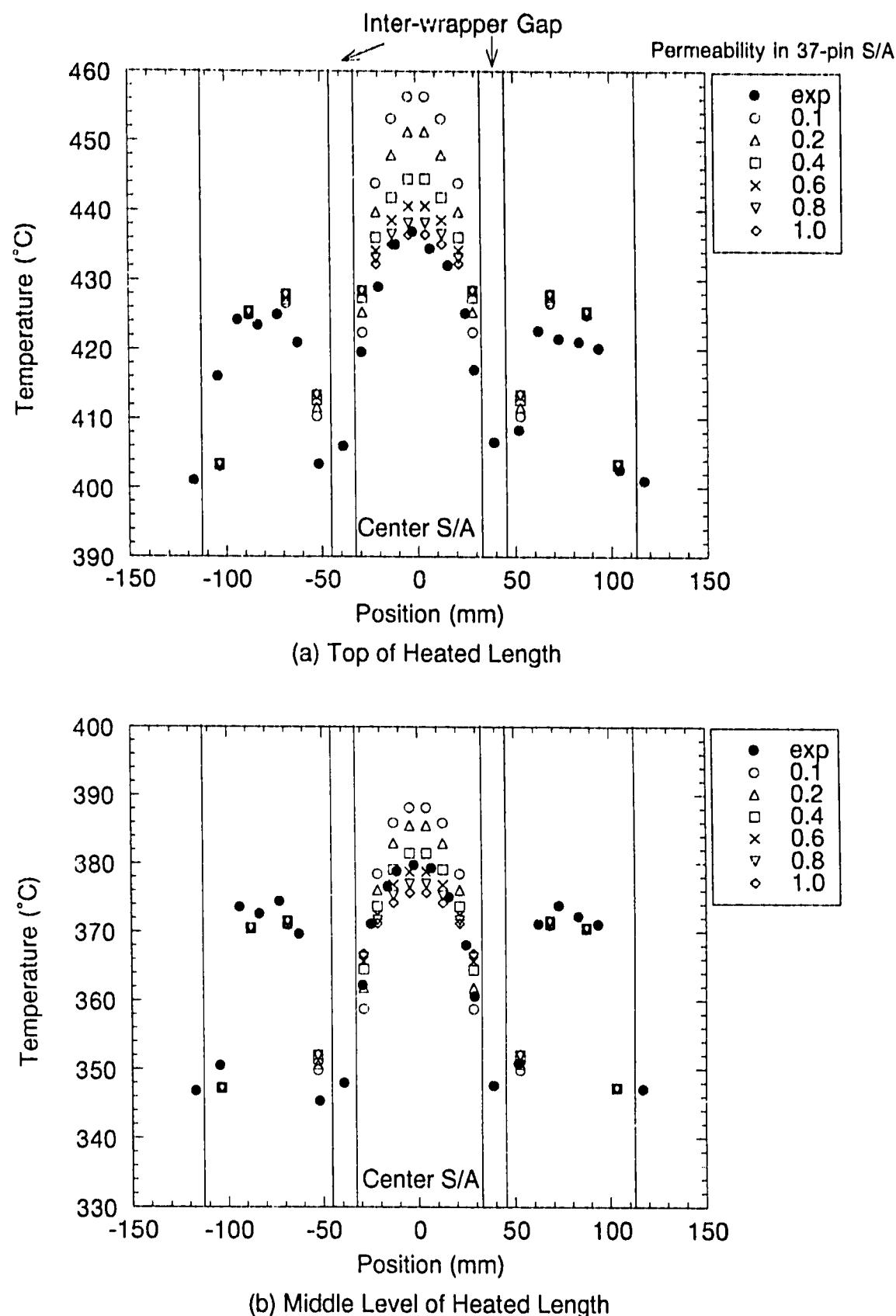


Fig. 18 Influence of Permeability in 37-pin Subassembly on Transverse Temperature Distributions in Case ST-072

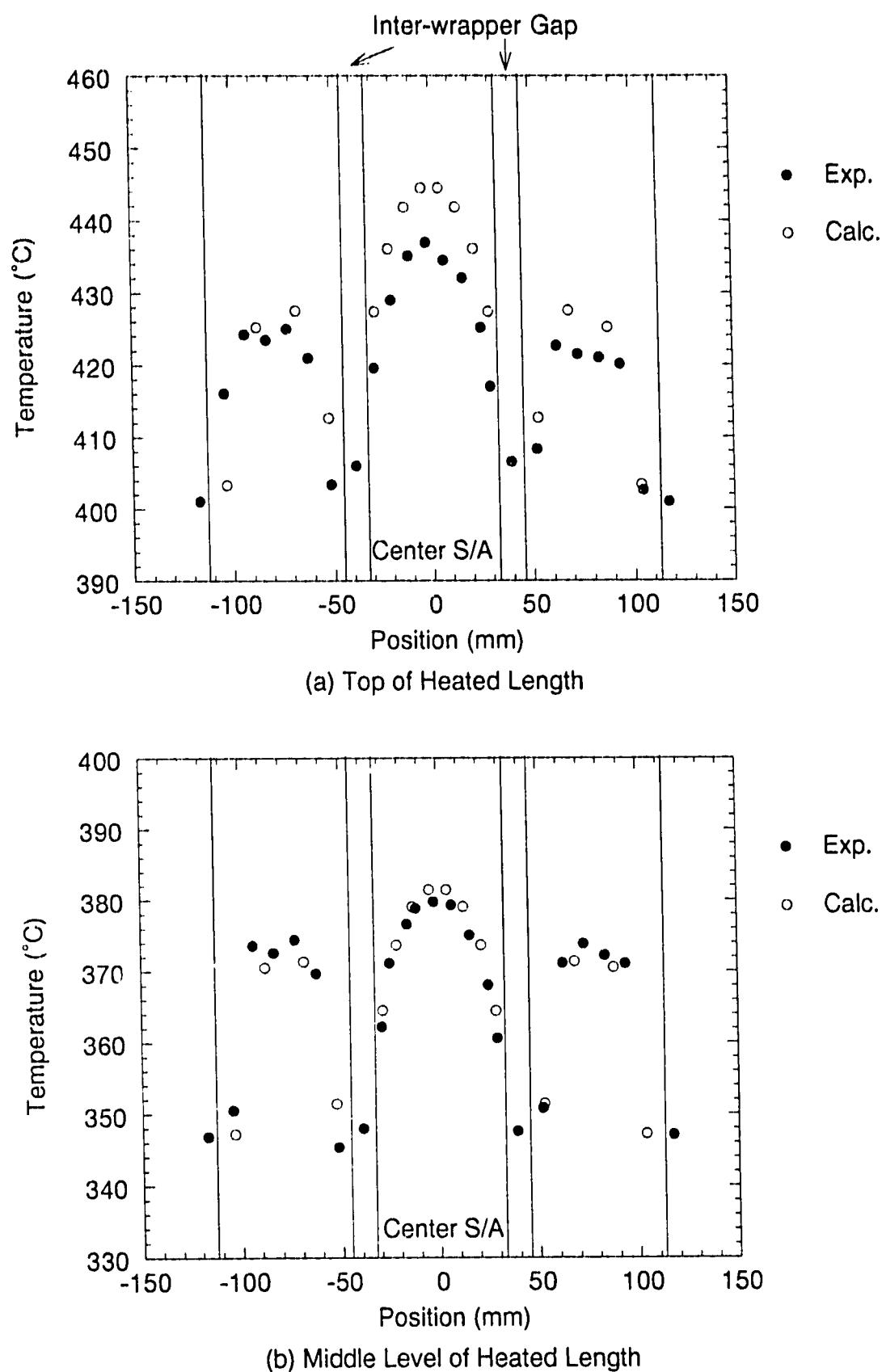


Fig. 19 Transverse Temperature Distributions in Case ST-072  
(2% Flow and Power Conditions)

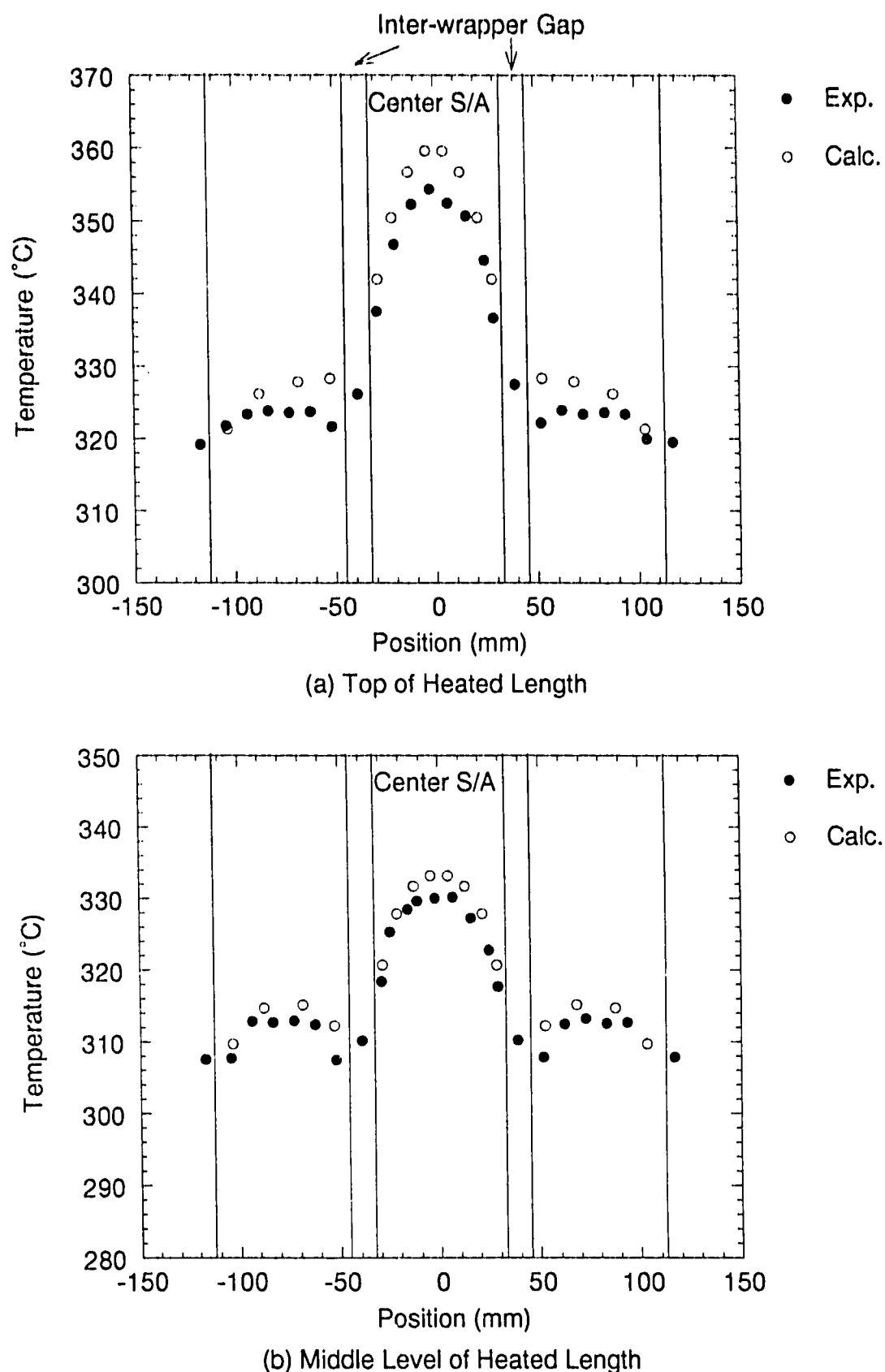


Fig. 20 Transverse Temperature Distributions in Case ST-054  
(2% Power and 6% Flow Conditions)

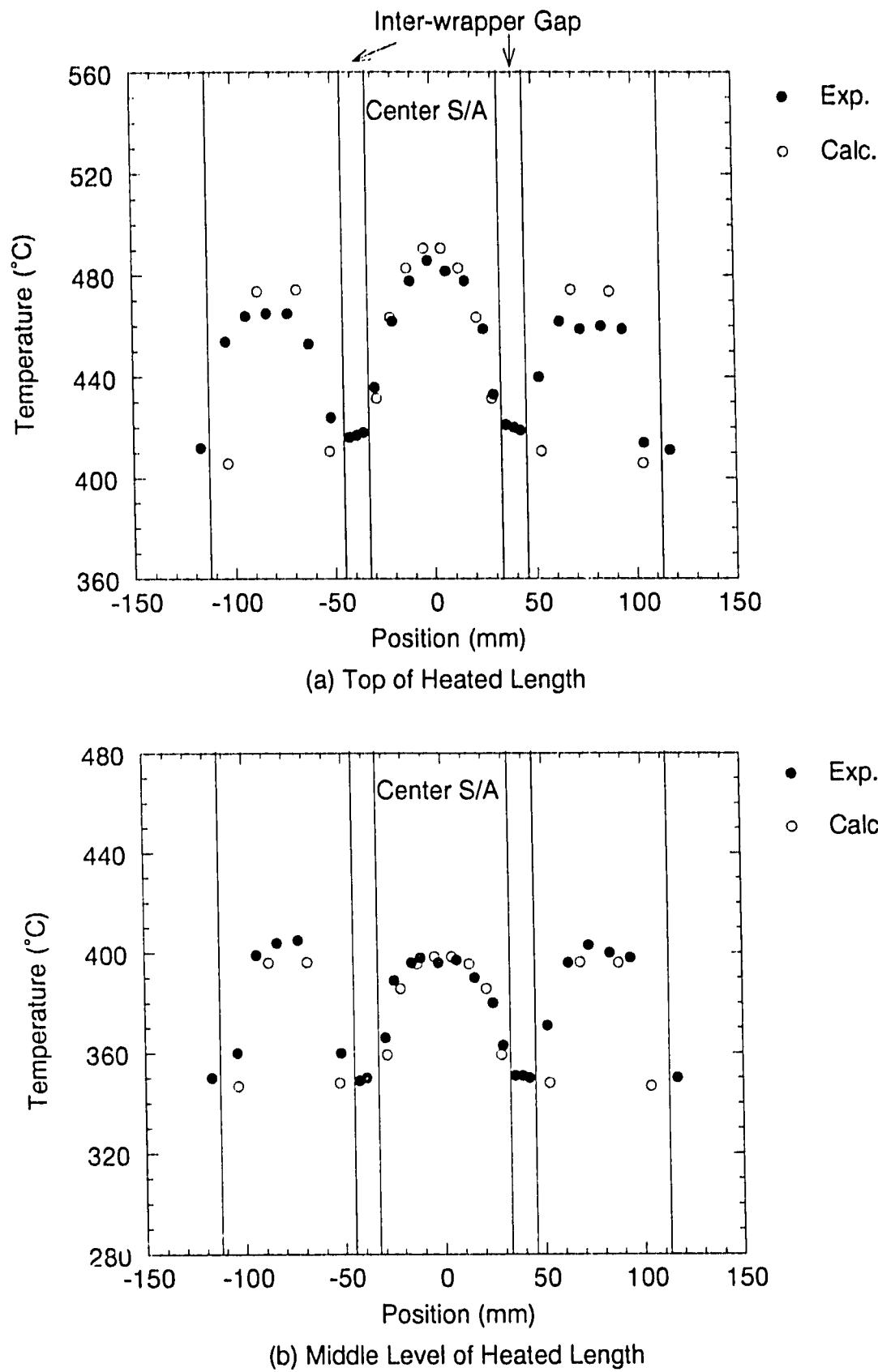


Fig. 21 Transverse Temperature Distributions in Case TR-049  
(12% Power and Flow Conditions)

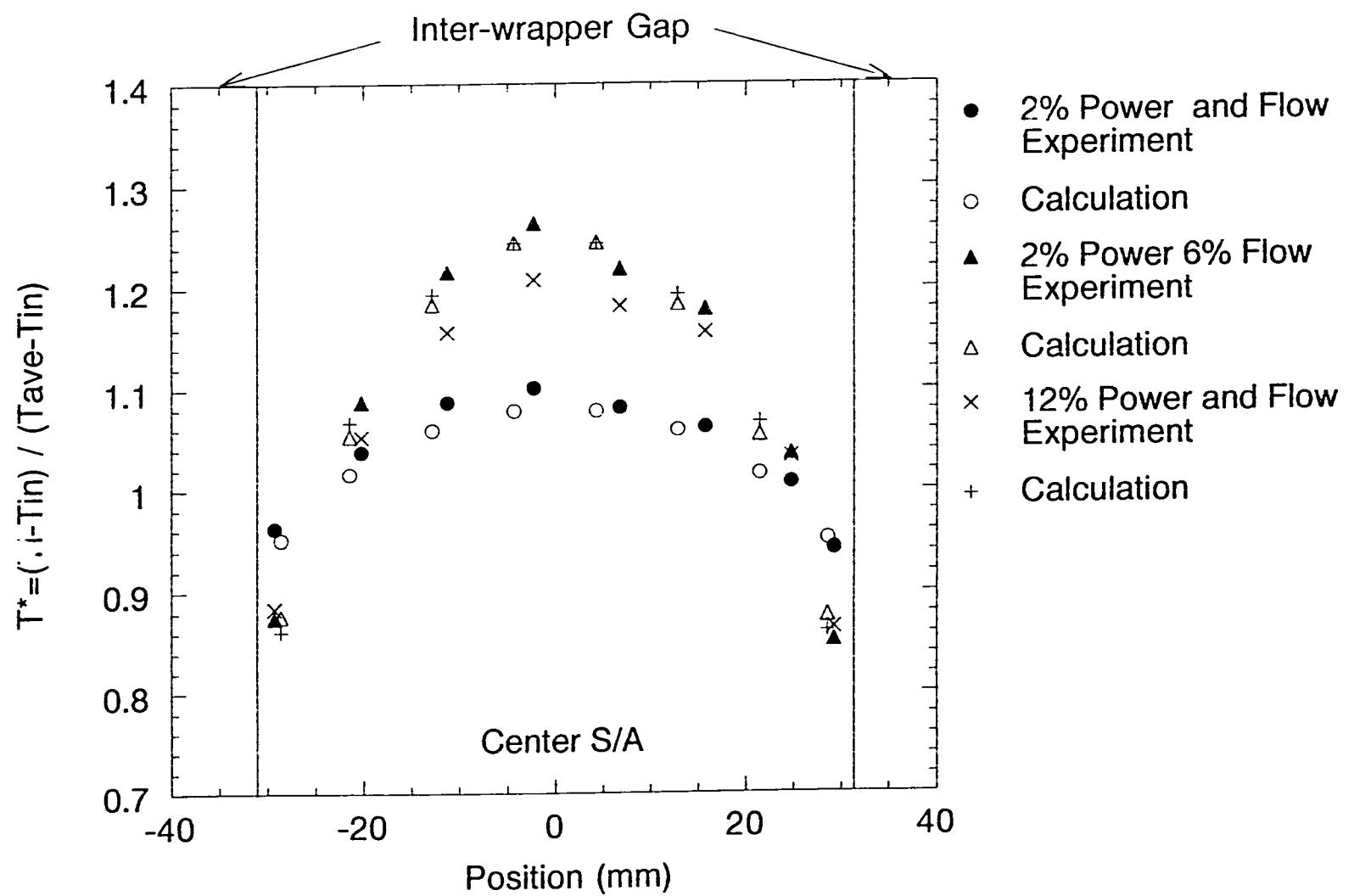


Fig. 22 Normalized Tranverse Temperature Distributions at Top of Heated Length  
in Cases of 2 to 12% Power and Flow Conditions

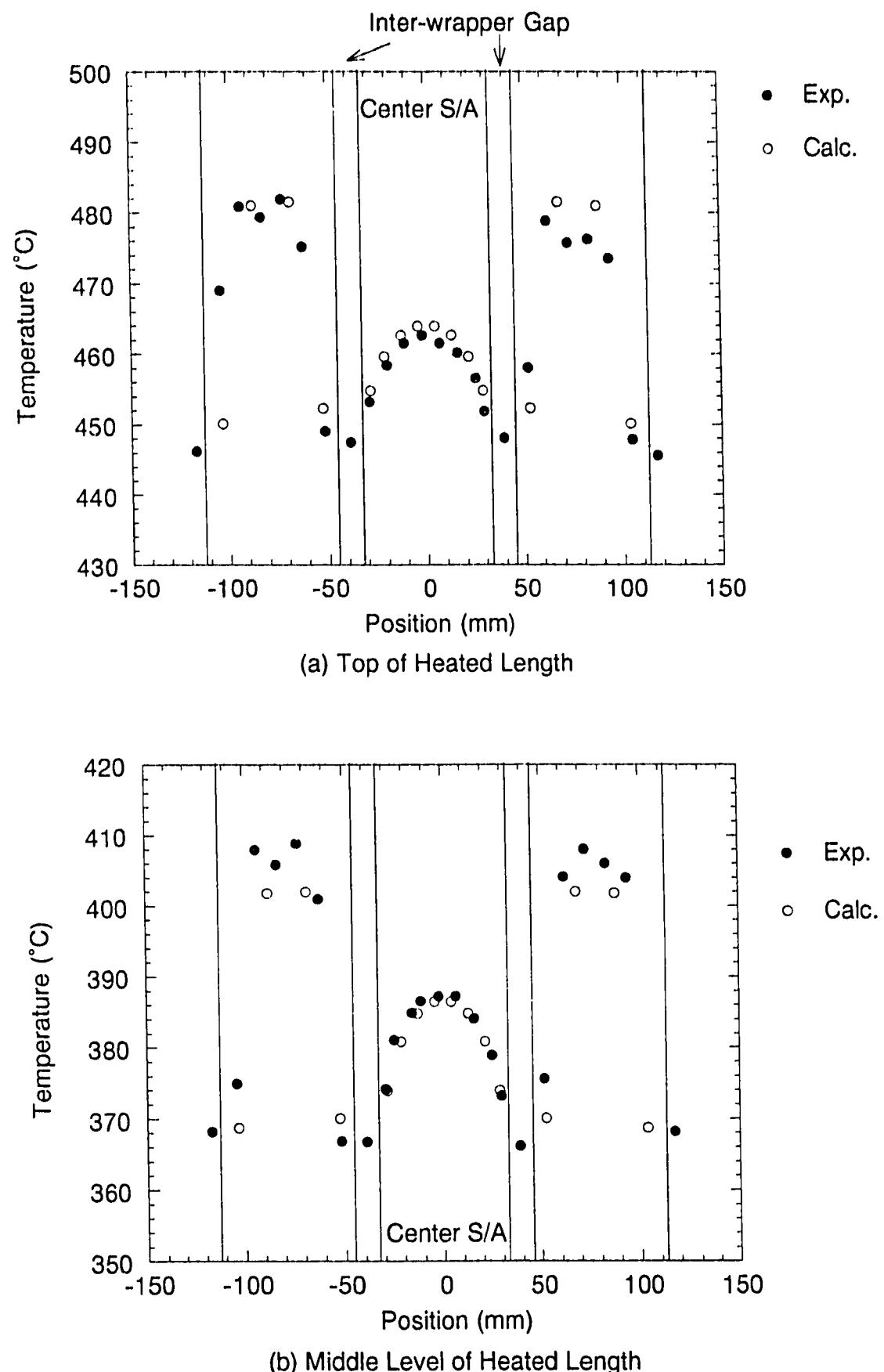


Fig. 23 Transverse Temperature Distributions in Case ST-070  
(Inter-subassembly Temperature Difference = 0°C)

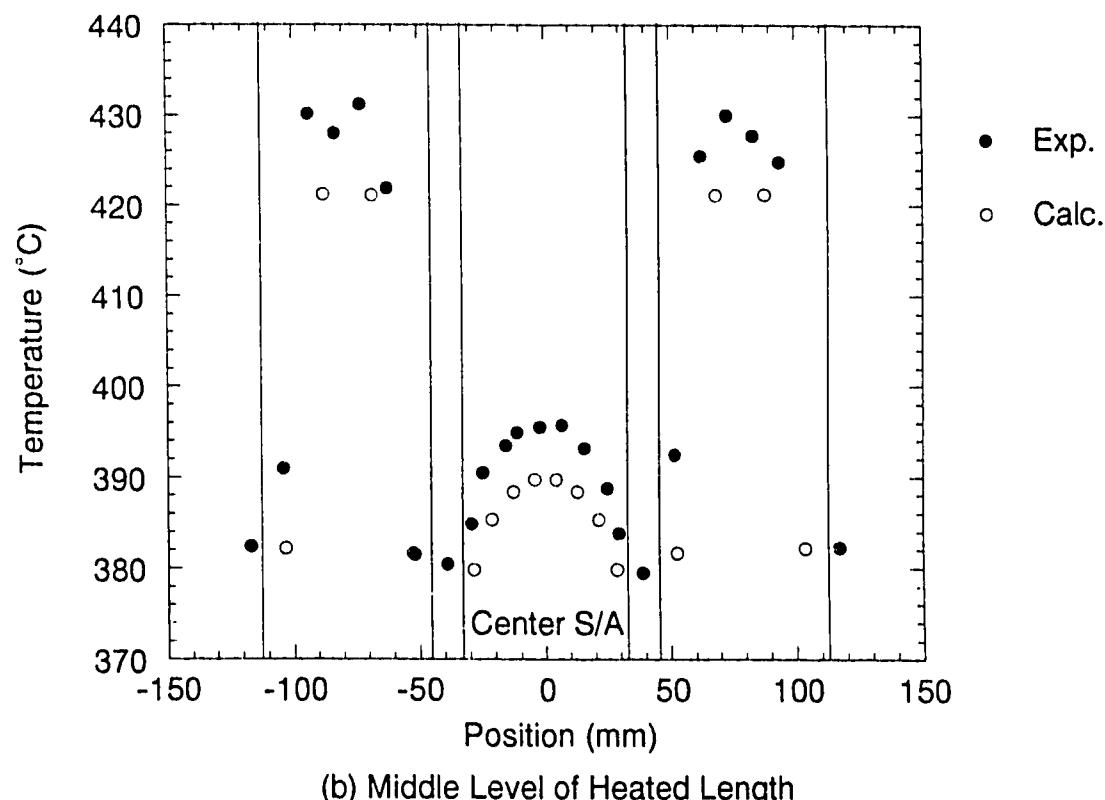
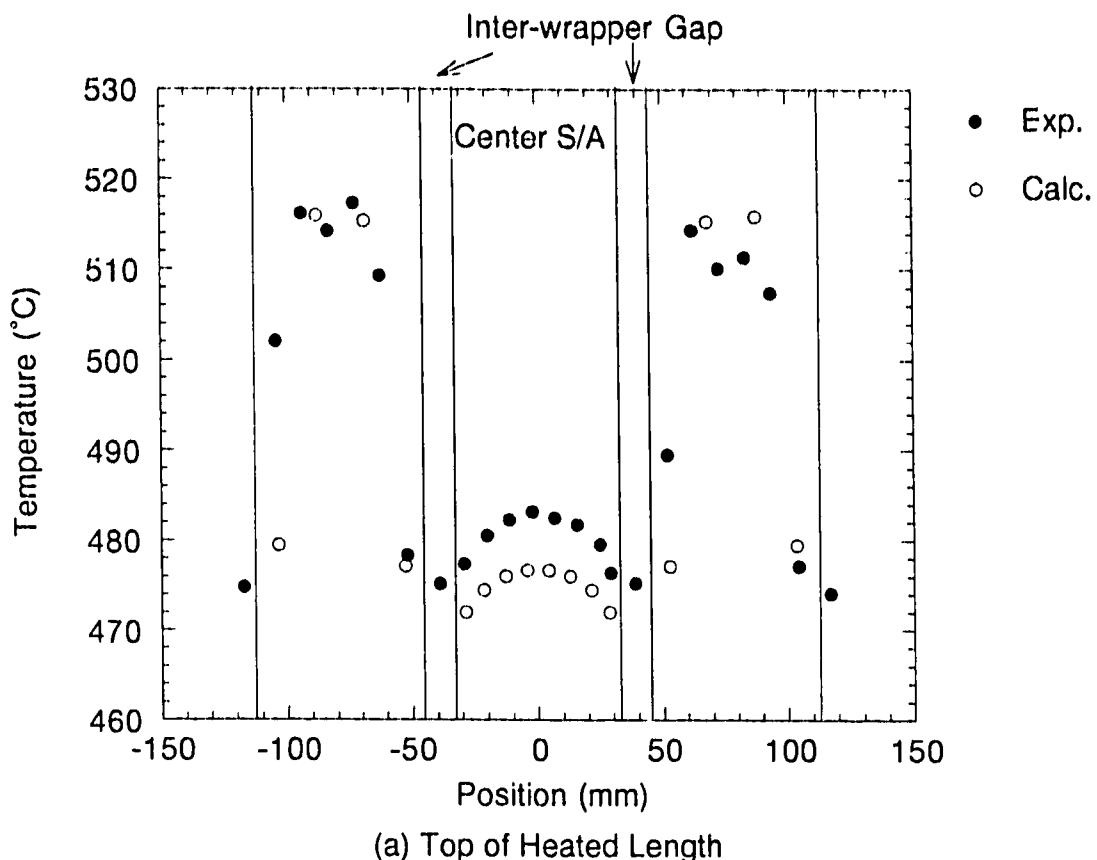


Fig. 24 Transverse Temperature Distributions in Case ST-080  
(Inter-subassembly Temperature Difference = +30  $^{\circ}\text{C}$ )

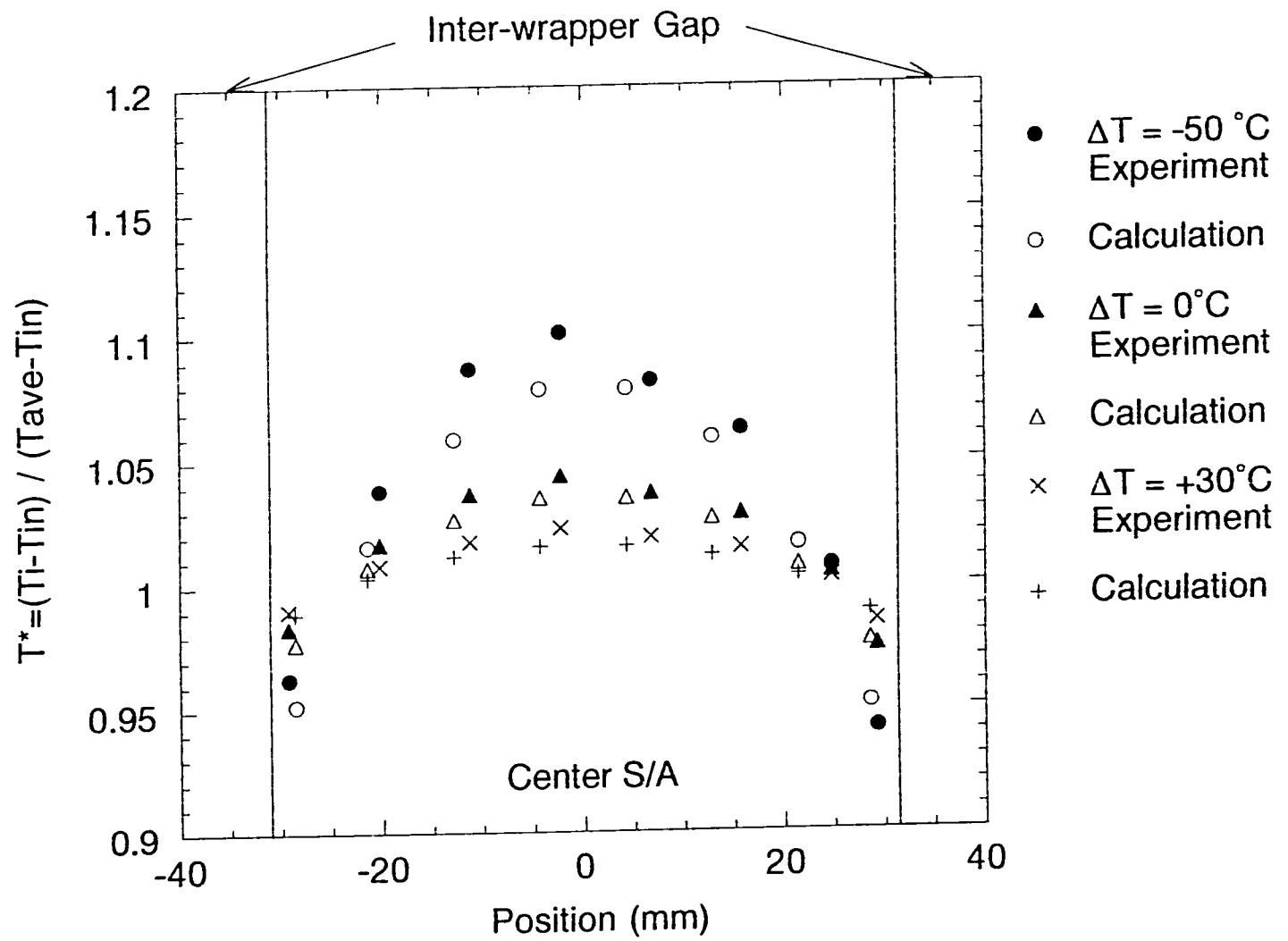


Fig. 25 Normalized Tranverse Temperature Distributions at Top of Heated Length  
in Cases of  $\Delta T = -50$  to  $+30^\circ\text{C}$

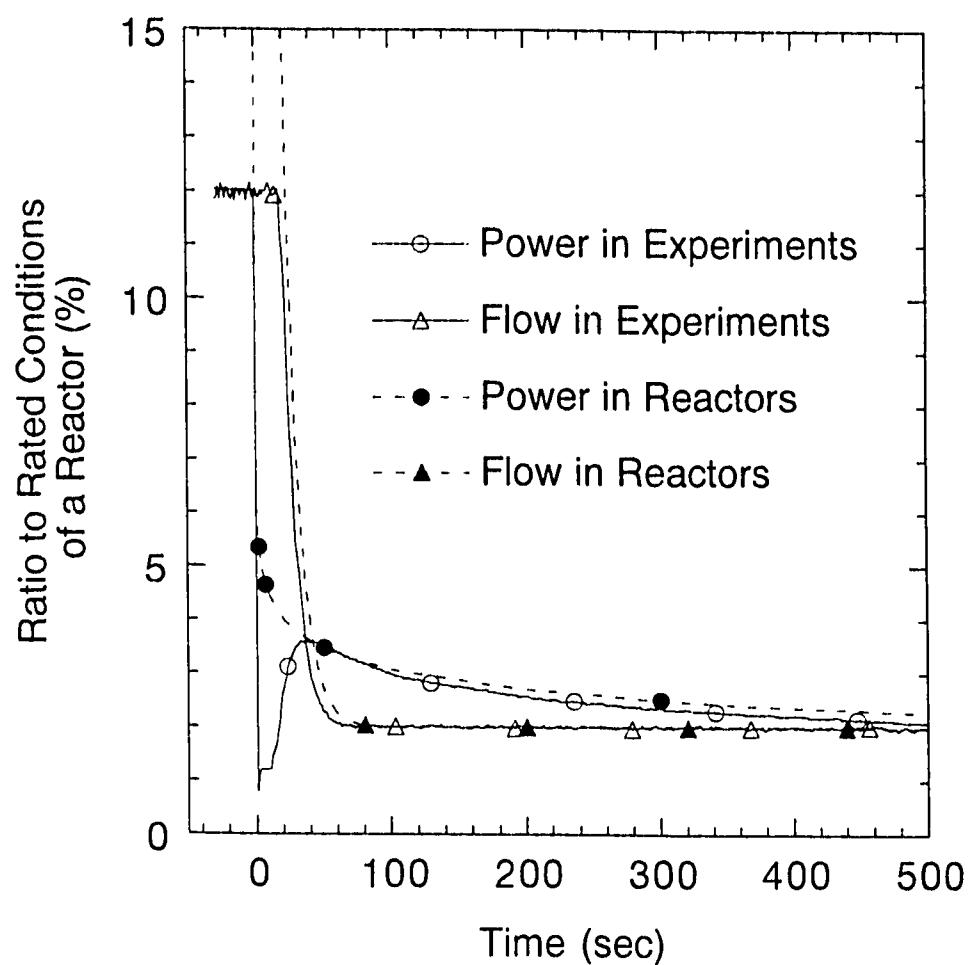
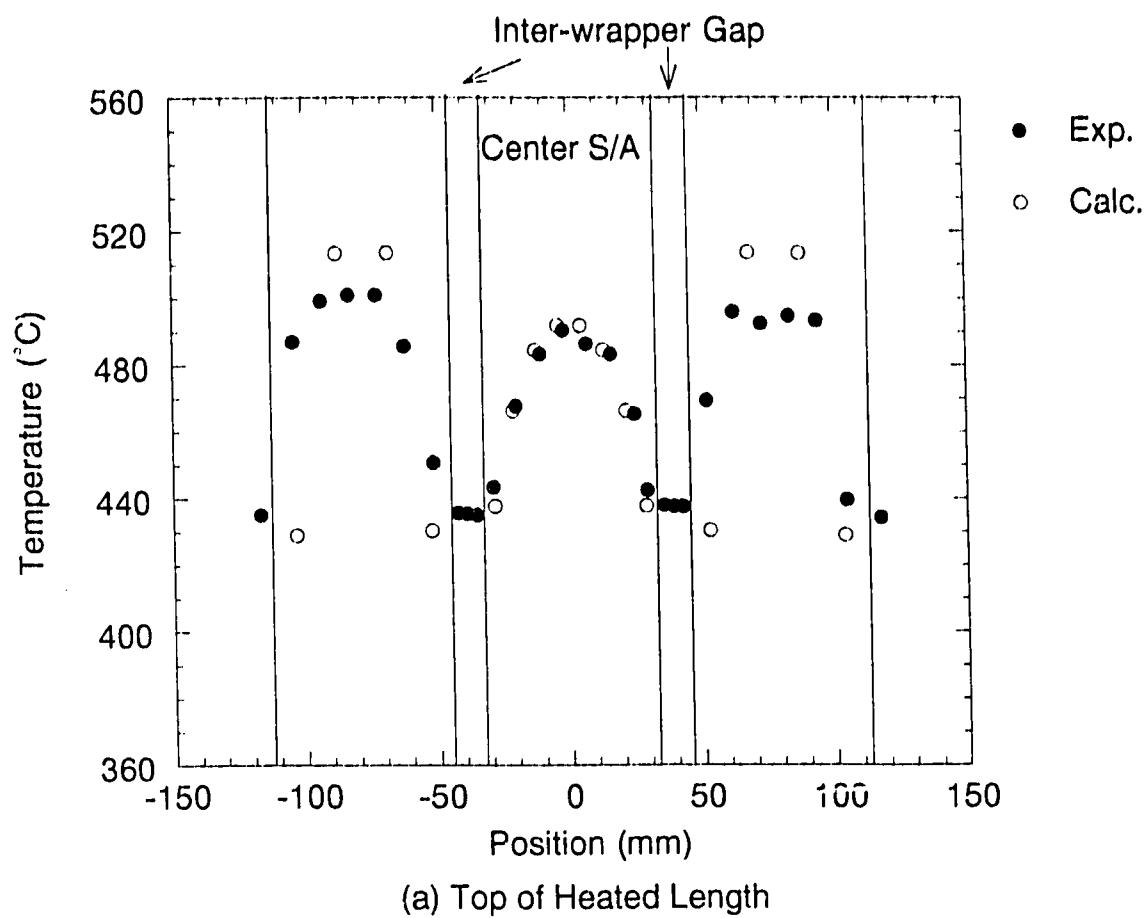
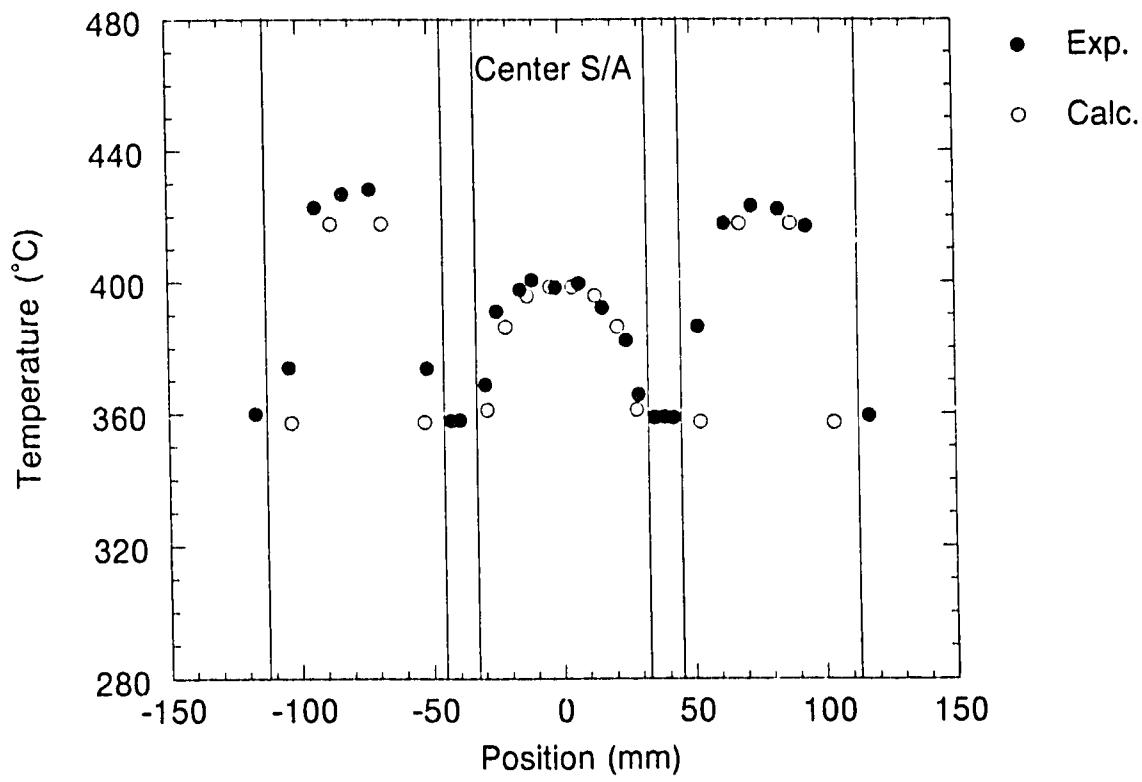


Fig. 26 Power and Flow Courses in Transitions



(a) Top of Heated Length



(b) Middle Level of Heated Length

Fig. 27 Transverse Temperature Distributions at Initial Conditions  
in Case TR-043 (Ref.)

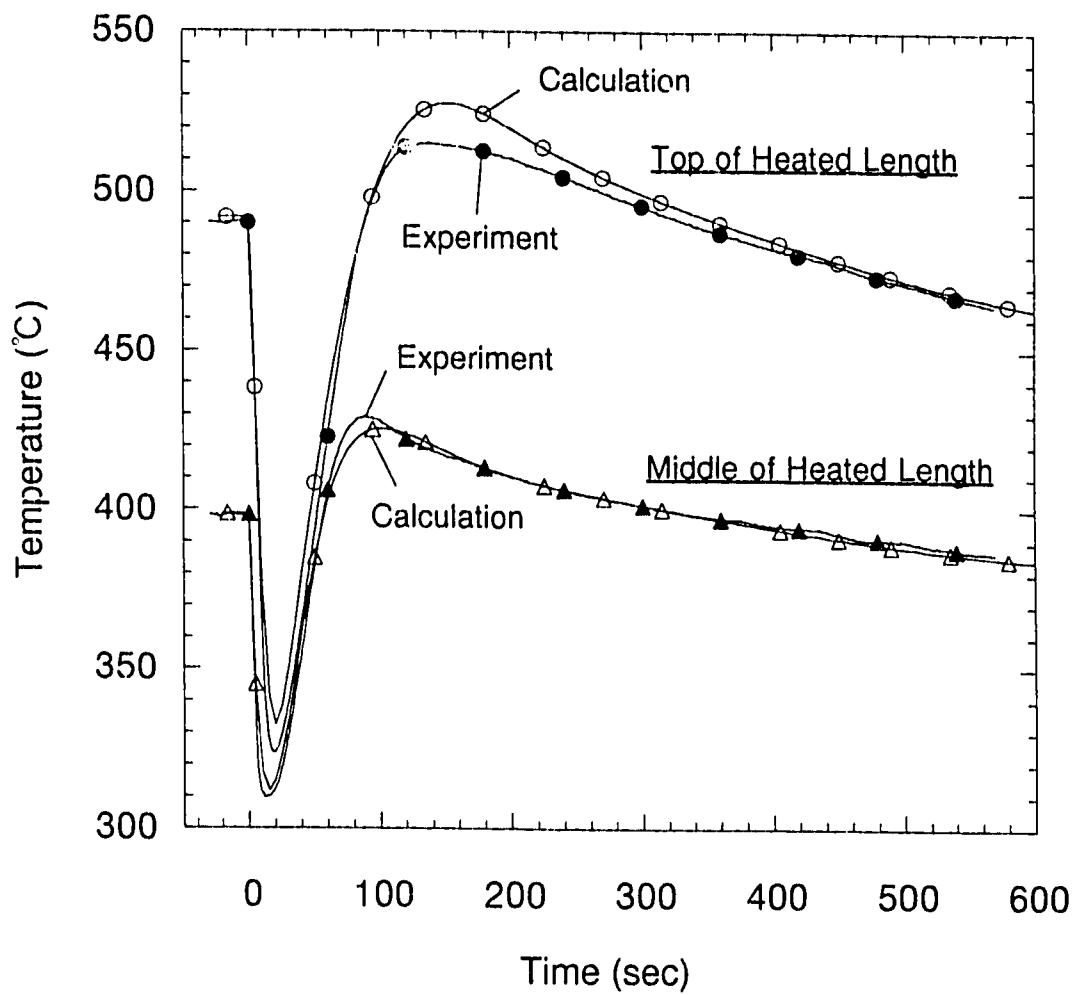


Fig. 28 Trends of Center Subchannel Sodium Temperatures at Middle and Top of Heated Length in Center Subassembly

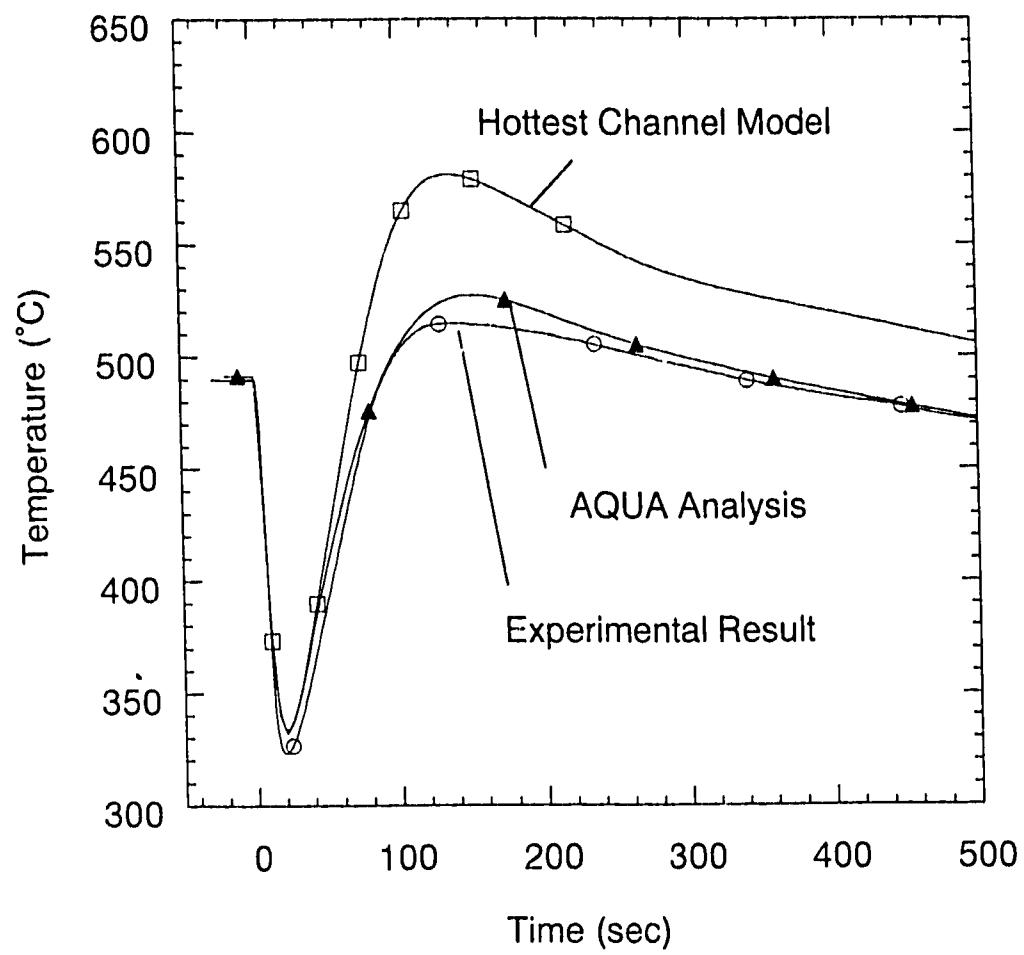


Fig. 29 Temperature Histories at Center Subchannel at Top of Heated Length in Case TR-043 ( $\Delta T=0^{\circ}\text{C}$ )

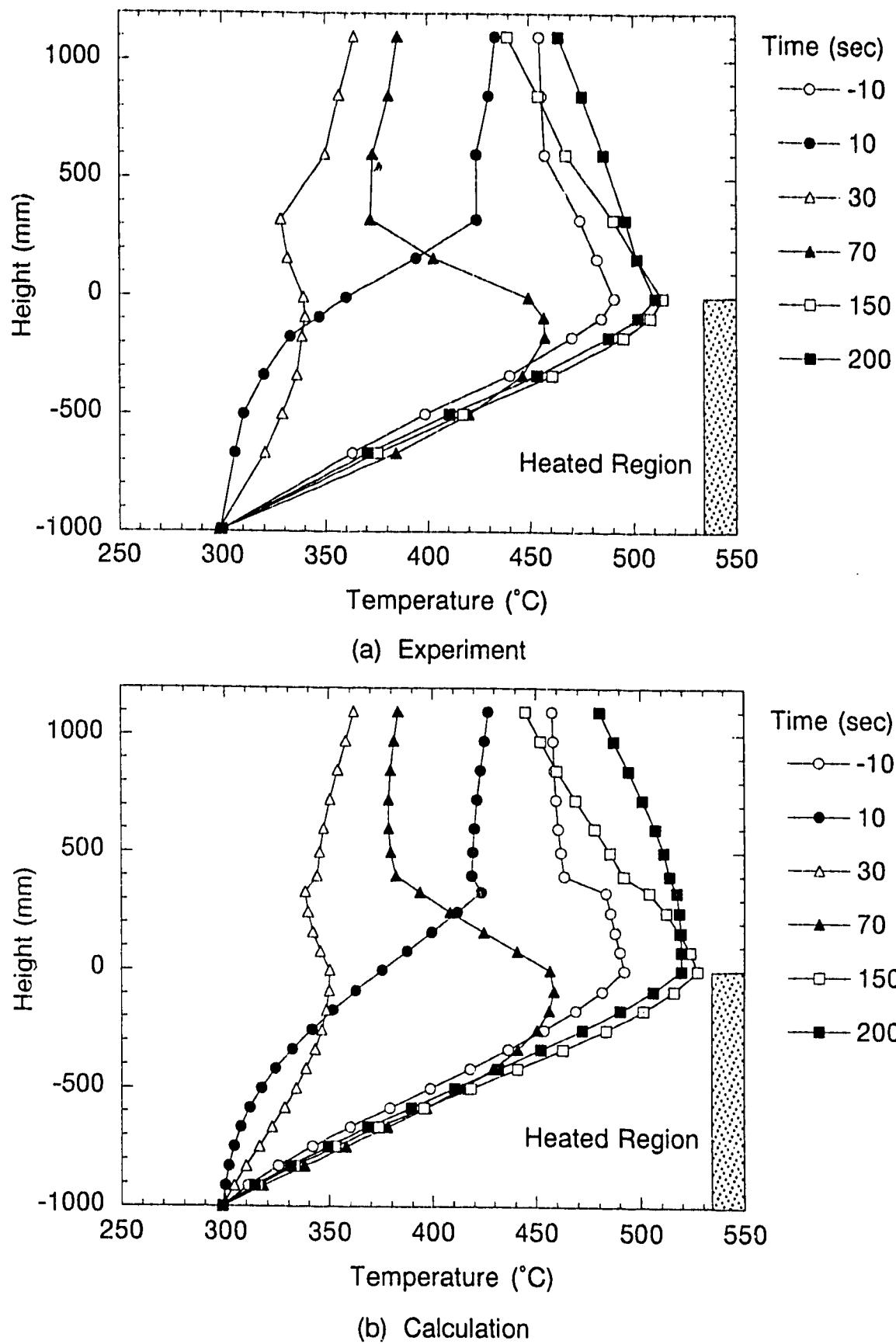


Fig. 30 Axial Temperature Distributions along Center Subchannel in Center Subassembly in Case TR-043 ( $\Delta T=0^{\circ}\text{C}$ )

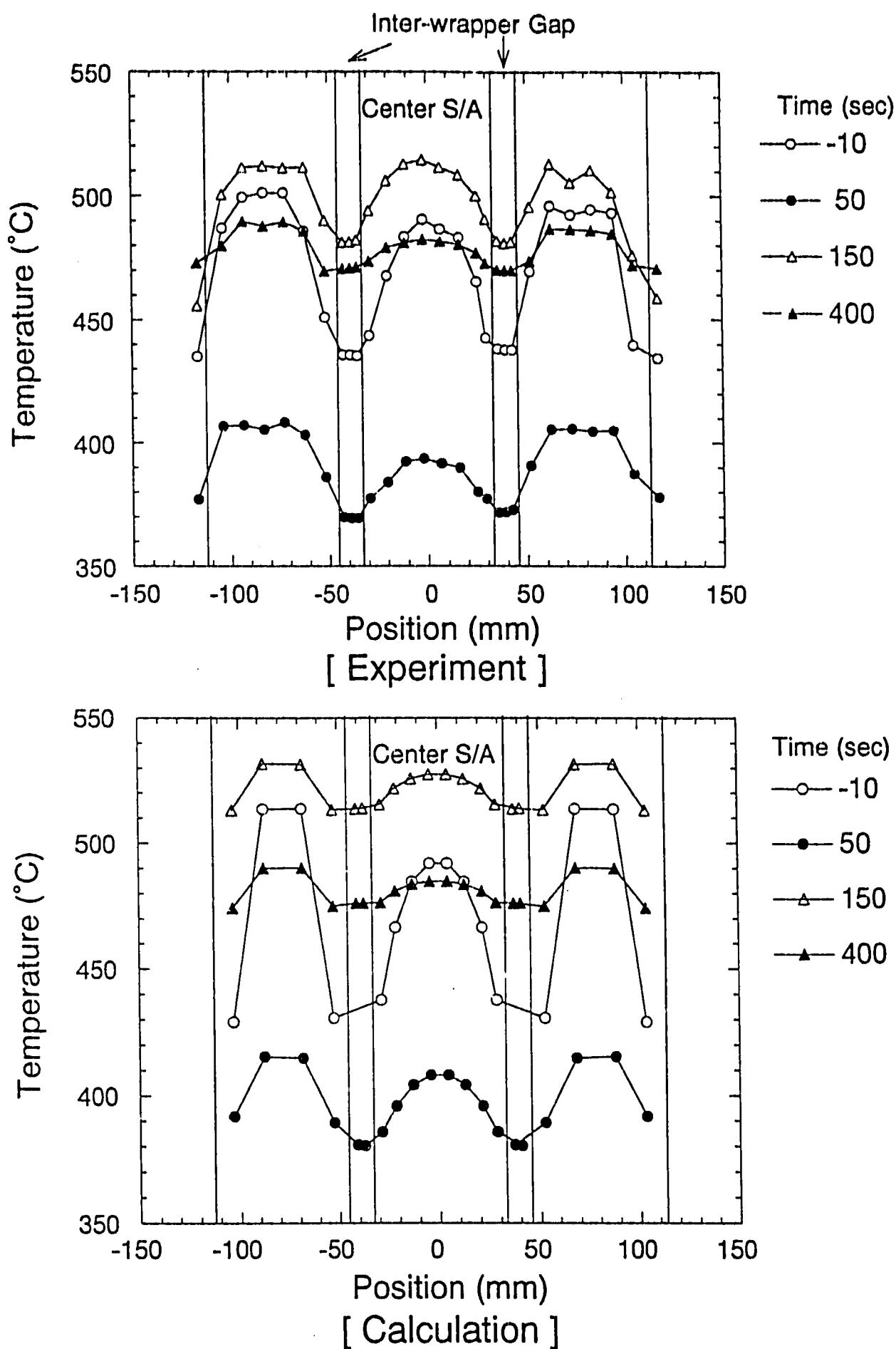


Fig. 31 Transverse Temperature Distributions at Top of Heated Length  
during Transition in Case TR-043 ( $\Delta T = 0^\circ\text{C}$ )

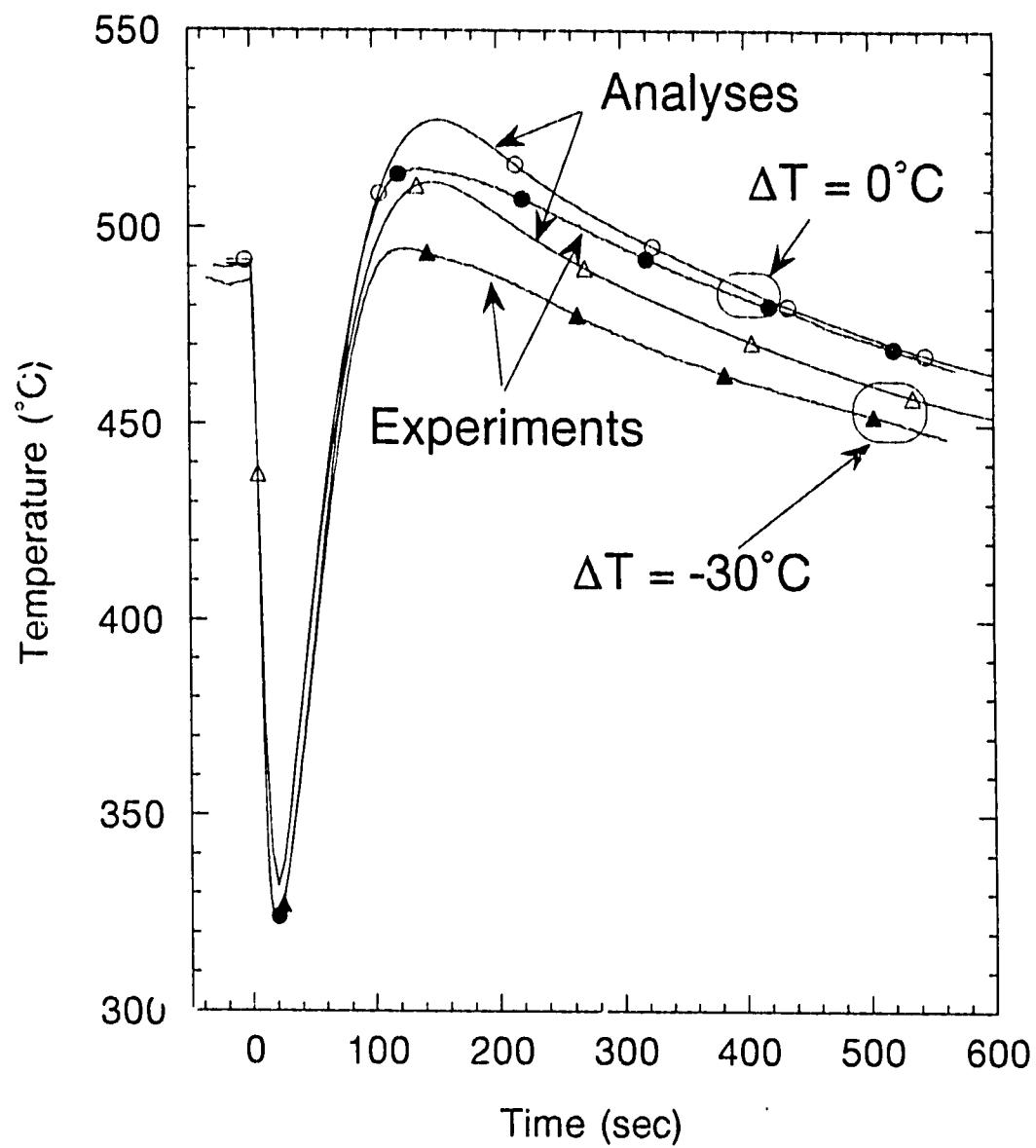


Fig. 32 Temperature Histories at Center Subchannel at Top of Heated Length in Cases of  $\Delta T=0, -30^\circ\text{C}$

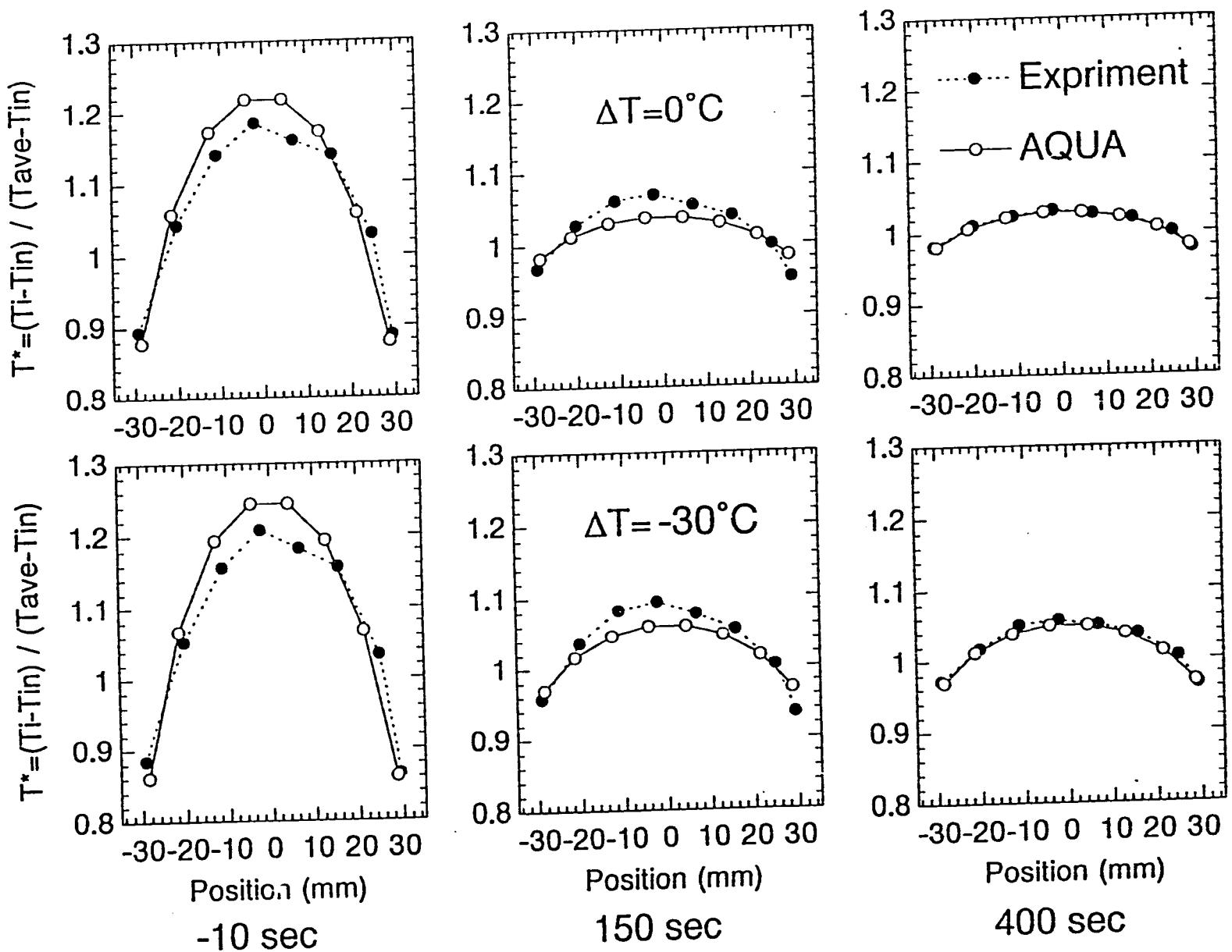


Fig. 33 Normalized Transverse Temperature Distributions during Transitions at Top of Heated Length in Center Subassembly in Cases of  $\Delta T = 0$  and  $-30^\circ\text{C}$

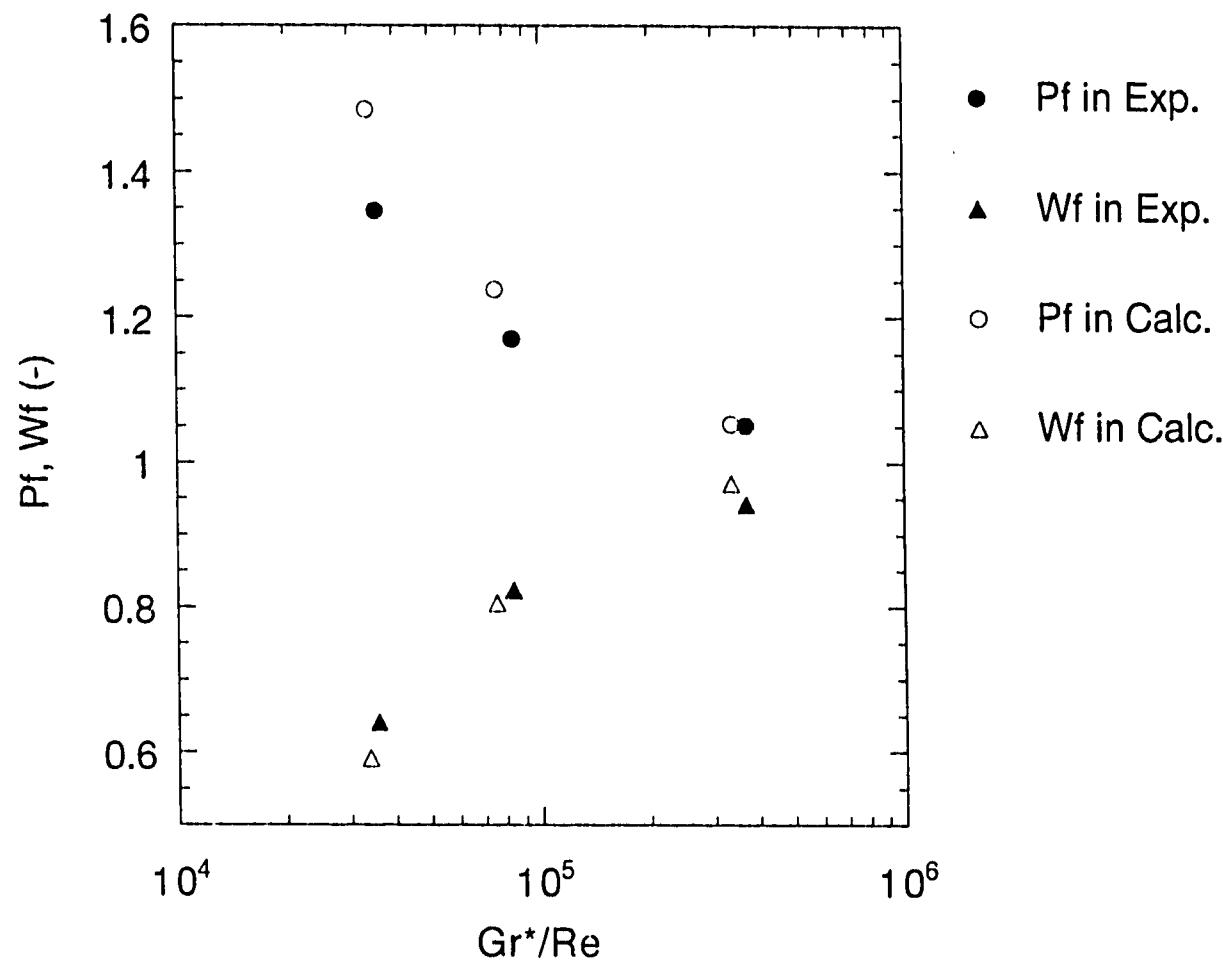


Fig. 34 Influence of inra-subassembly flow redistribution  
on  $P_f$ ,  $W_f$  in 61-pin bundle

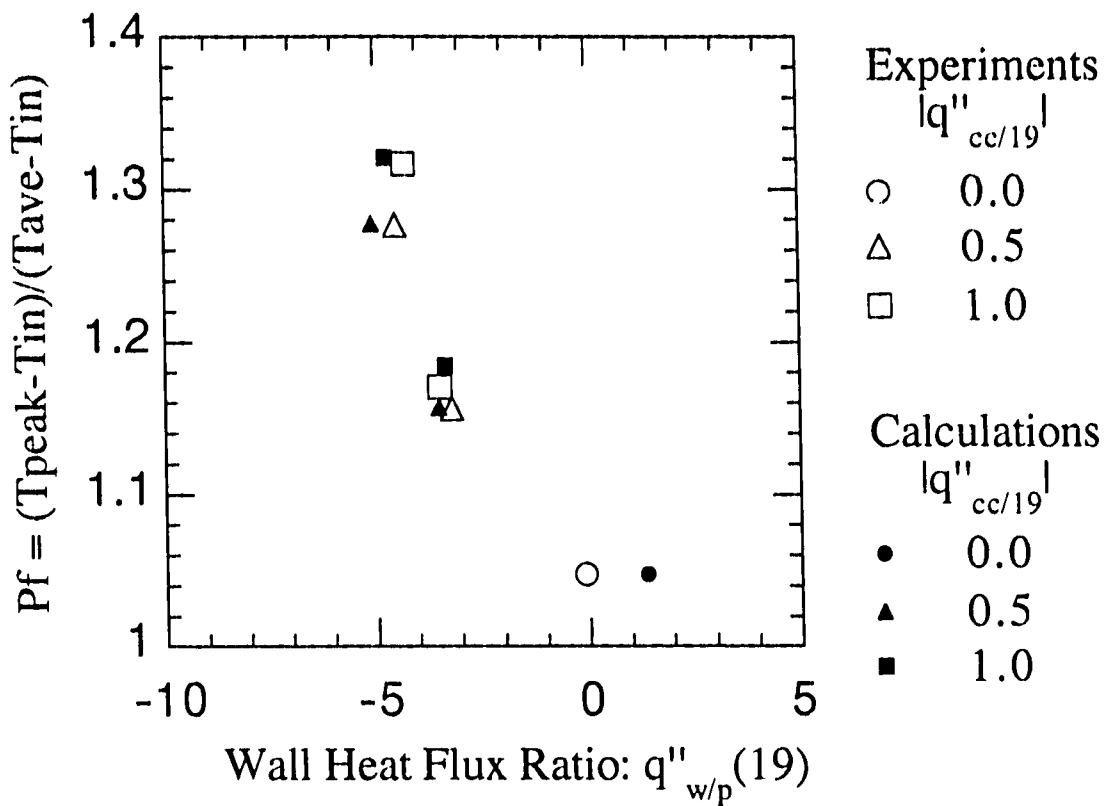


Fig. 35 Influence of Inter-S/A Heat Transfer on  $P_f$  in 61-pin Bunlde

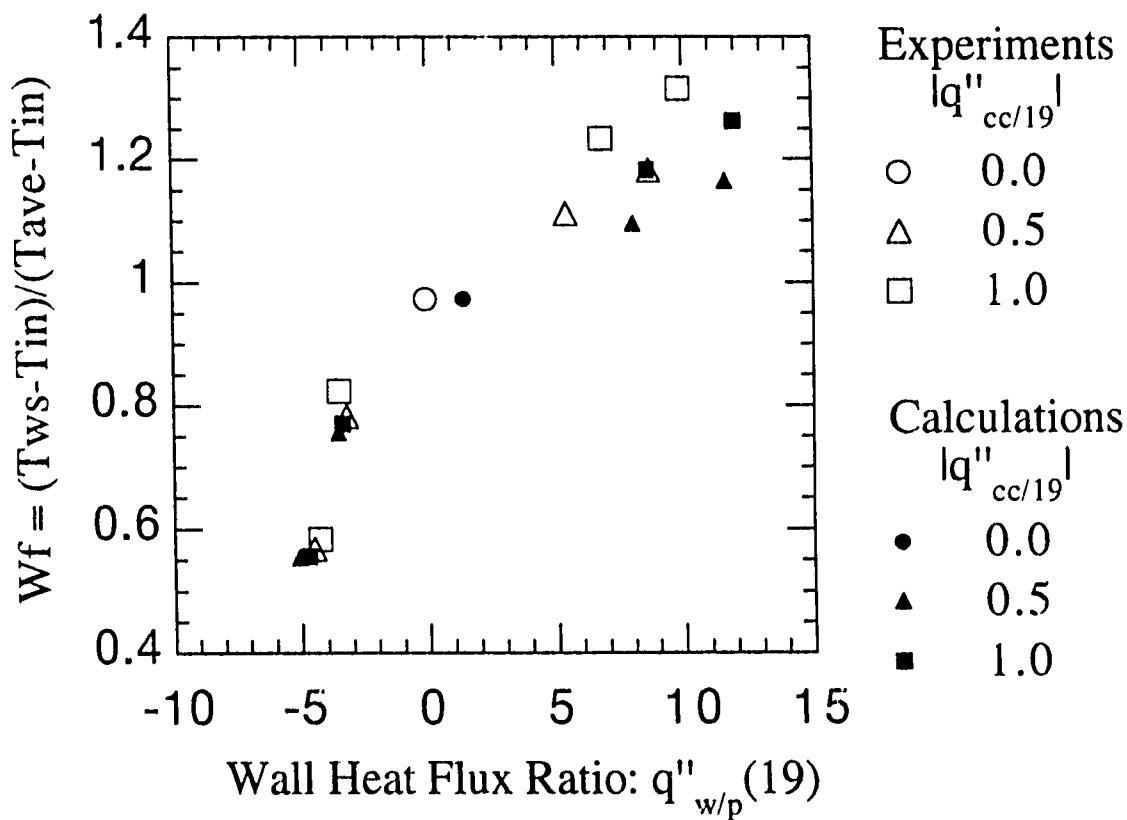
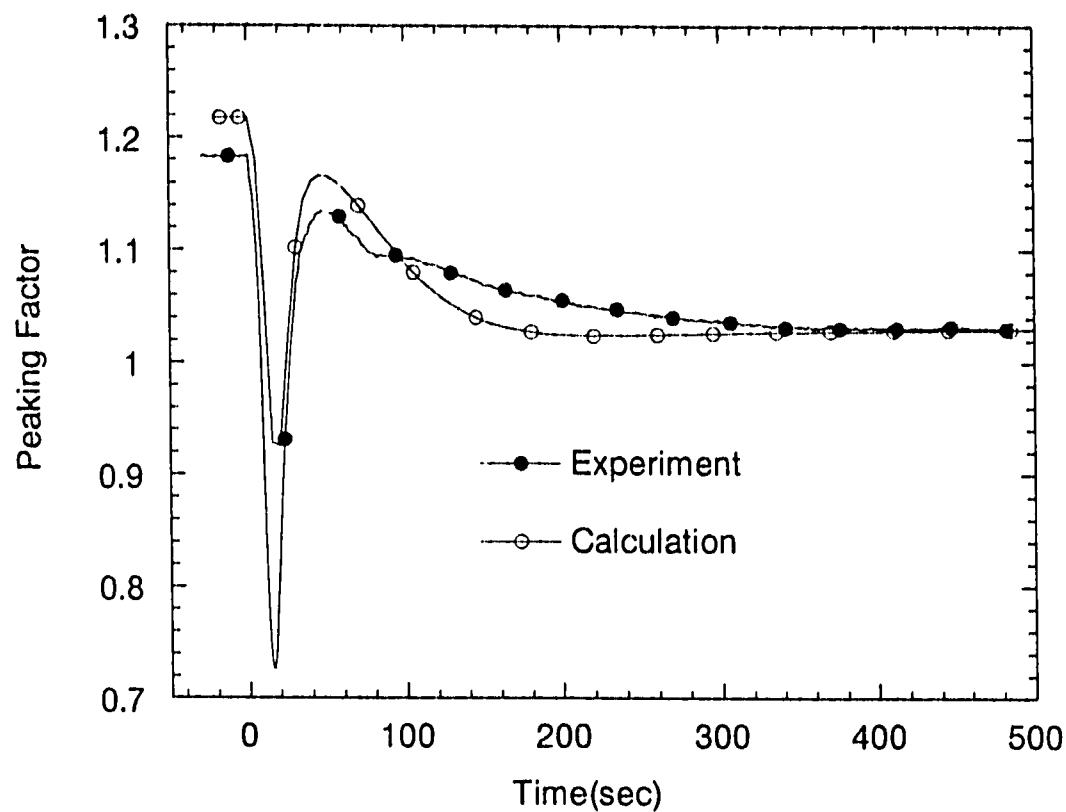
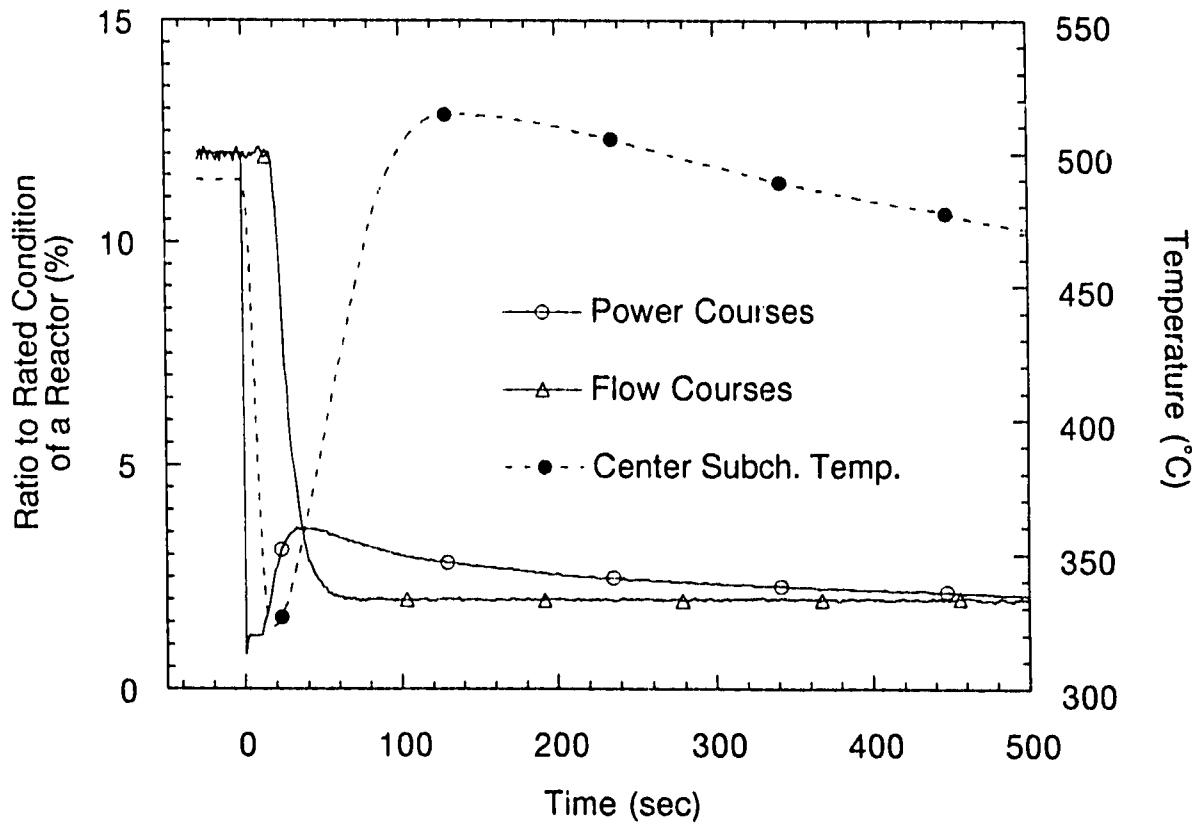


Fig. 36 Influence of Inter-S/A Heat Transfer on  $W_f$  in 61-pin Bunlde



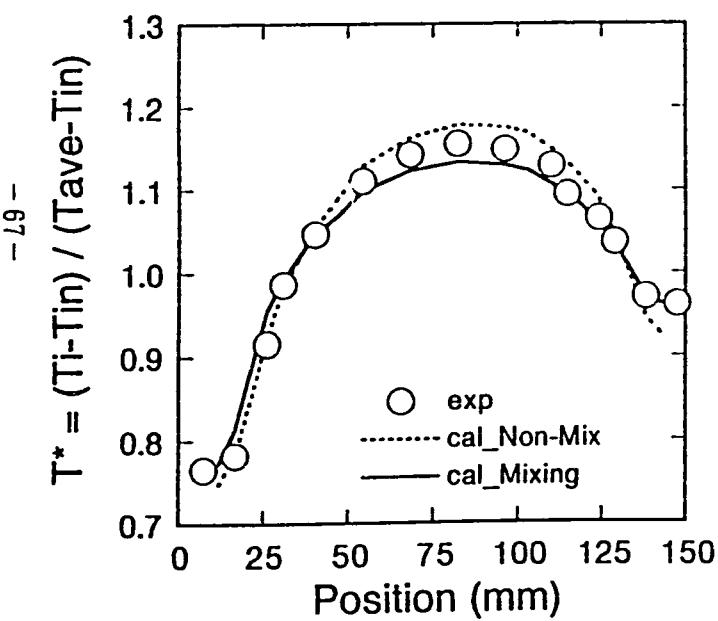
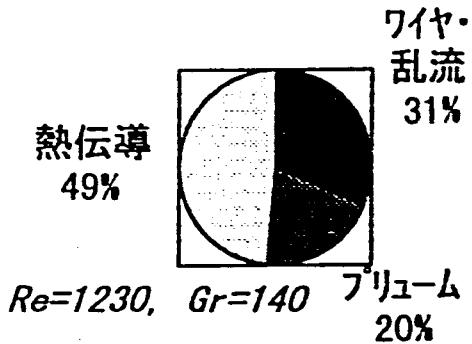
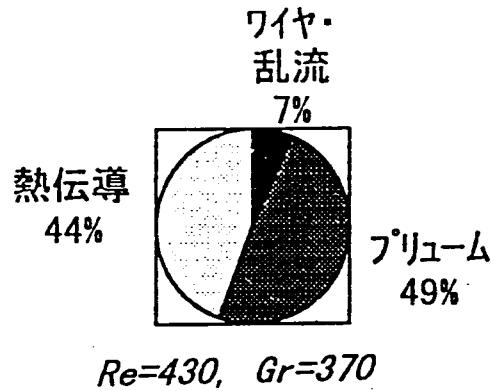
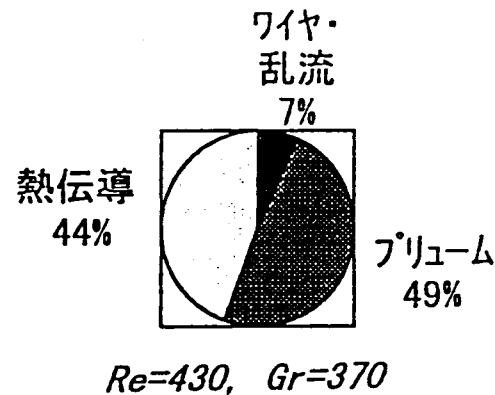
(a) History of Peaking Factor



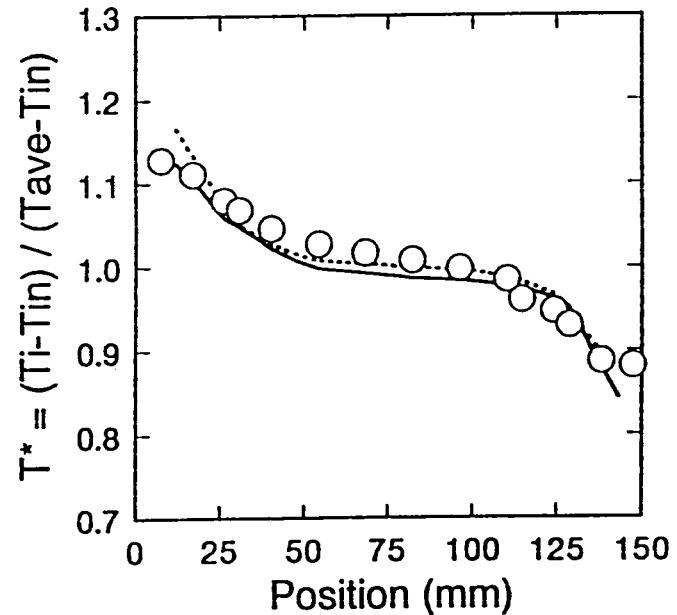
(b) Transient Curves and Peak Temperature in Experiment

Fig. 37 History of Peaking Factor during Transition from Forced to Natural Circulation in Case TR-043 ( $\Delta T=0^{\circ}\text{C}$ )

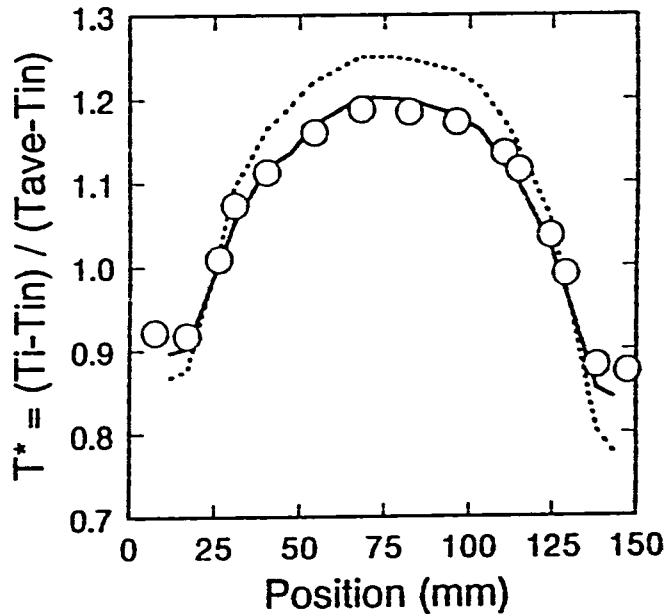
熱拡散の内訳



(a) 被冷却



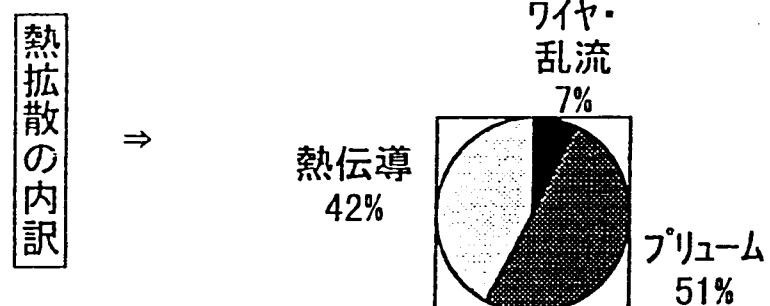
(b) 被加熱



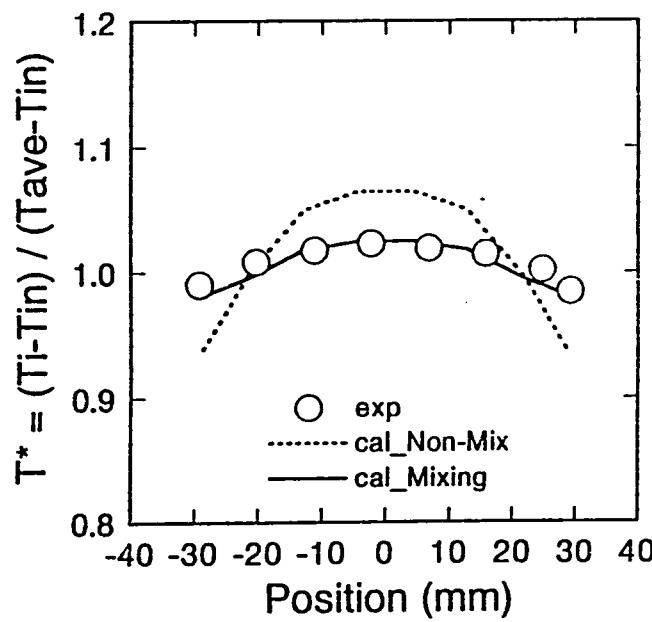
(c) 断熱

Fig. 38 Comparison of Normalized Transverse Temperature Distributions at Top of Heated Length in 61-pin Bundle (CCTL-CFR)

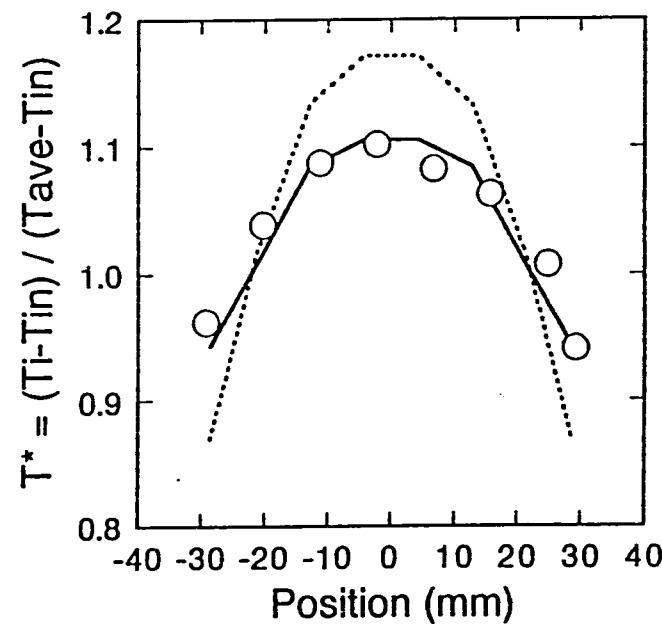
- 89 -



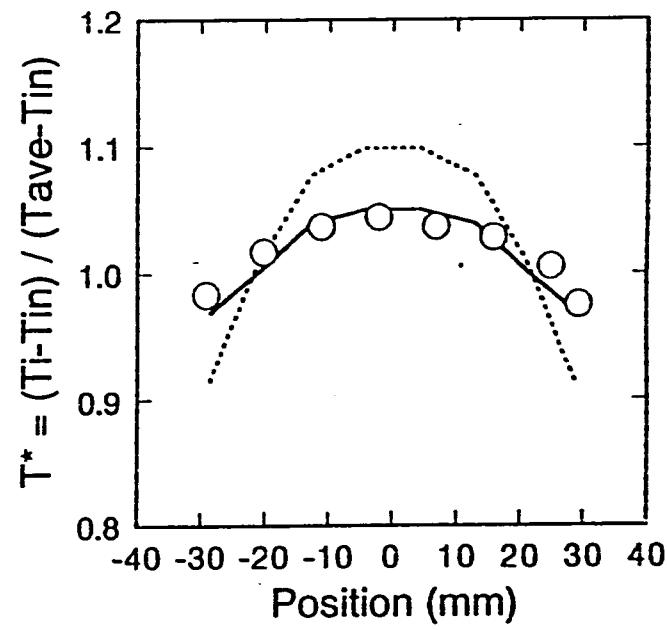
$$Re=1030, Gr=810$$



(a) 被加熱



(b) 被冷却



(c) 断熱

Fig. 39 Comparison of Normalized Transverse Temperature Distributions at Top of Heated Length in 37-pin Bundle (PLANRTL-DHX)

- 69 -

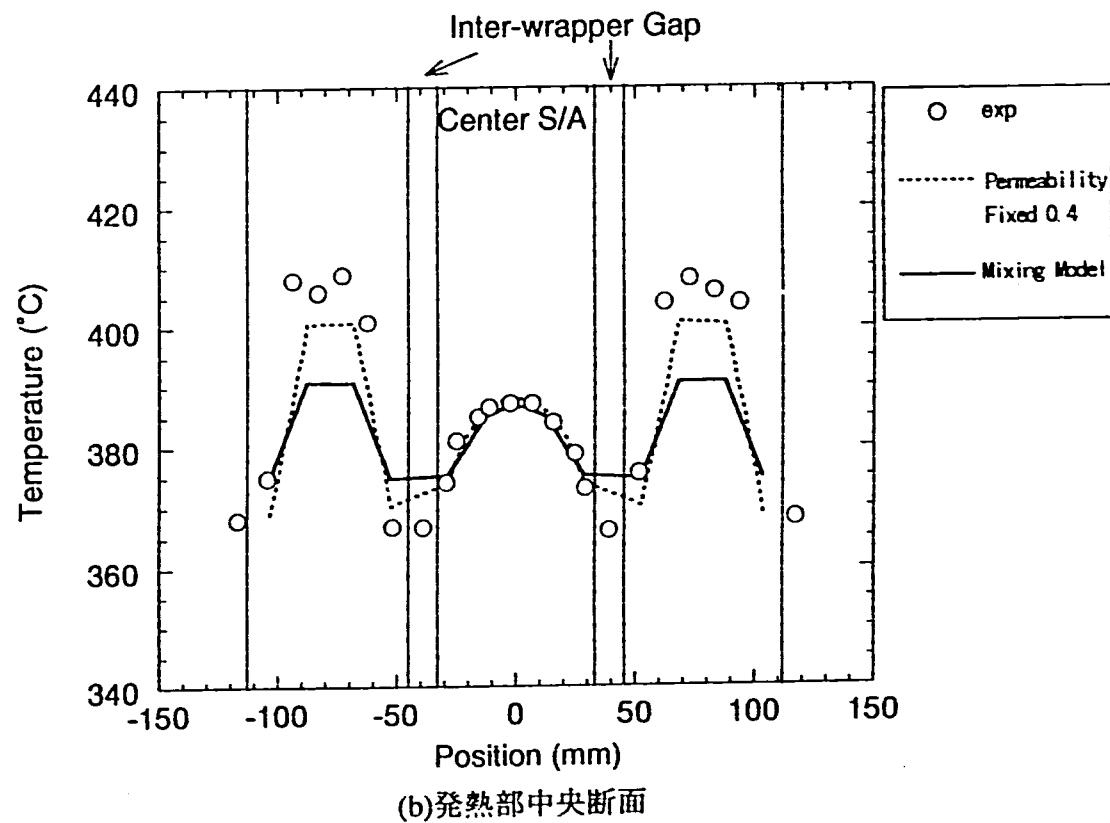
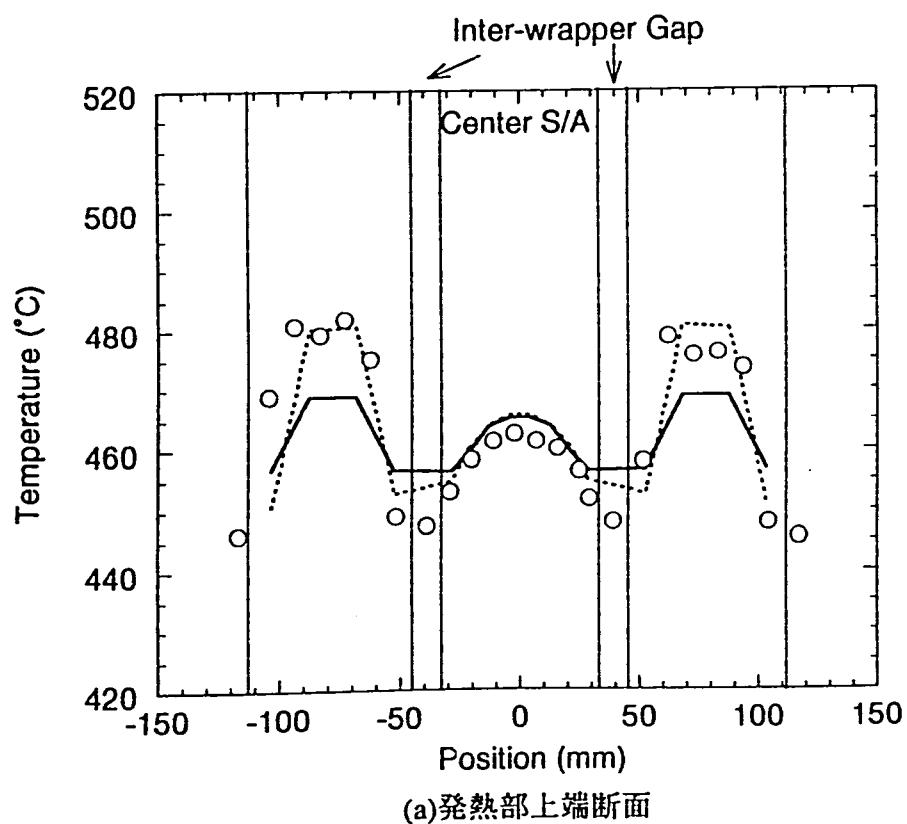


Fig. 40 Comparison of Transverse Temperature Distributions at Top of Heated Length in Case ST-070 (PLANDTL-DHX)

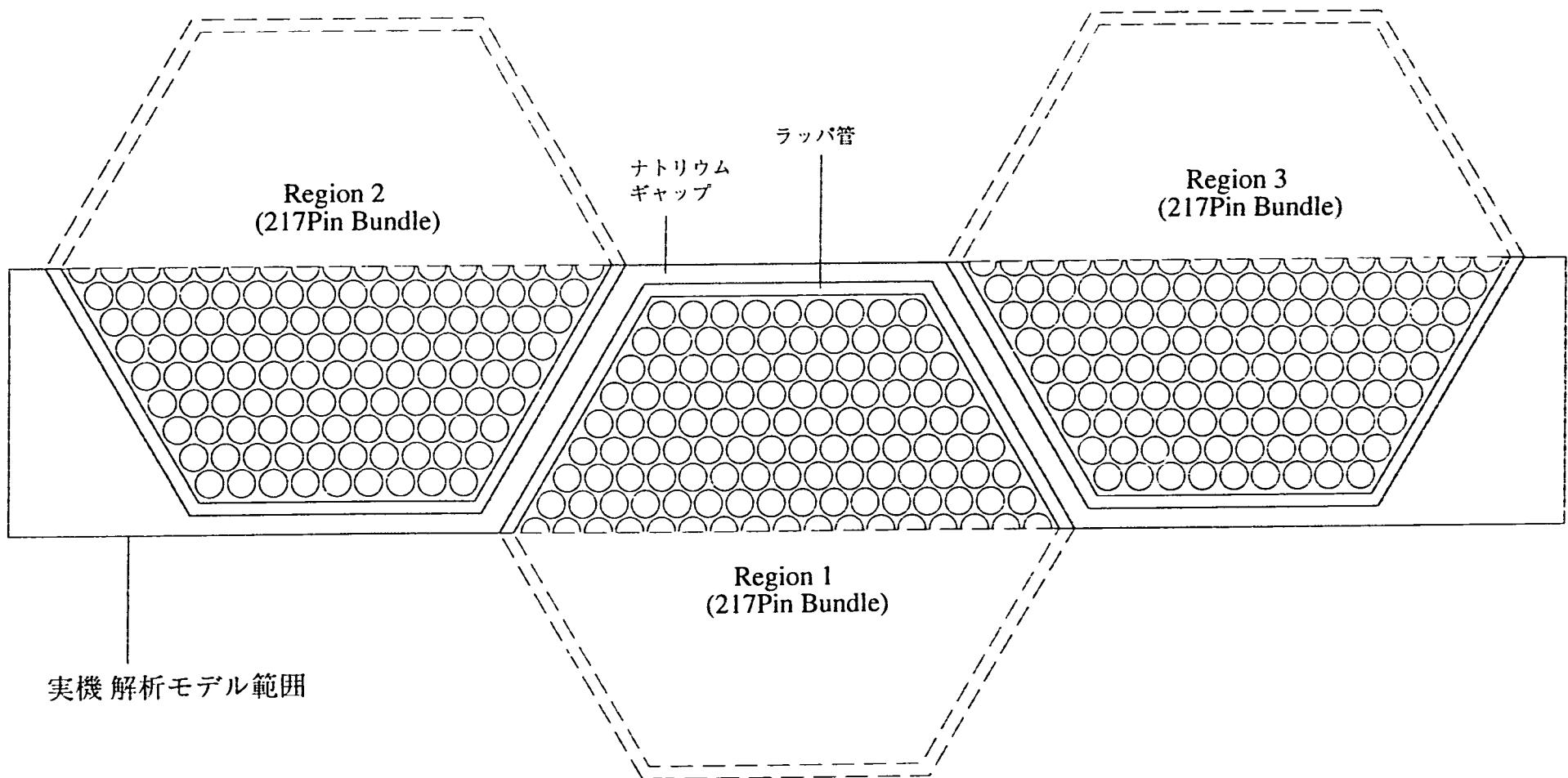


Fig. 41 Calculational Region in Real Reactor Core

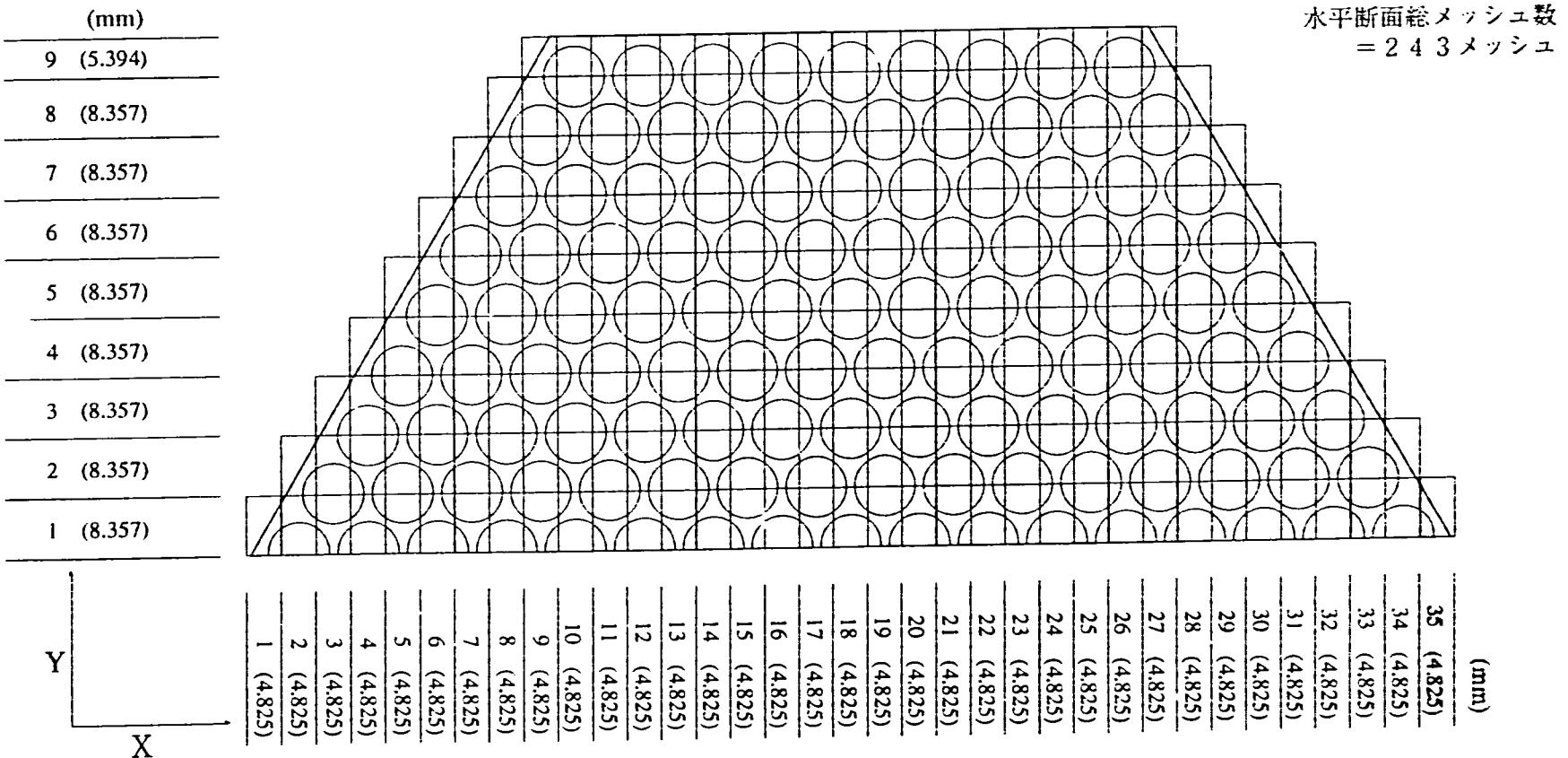


Fig. 42 Mesh Arrangement in Single Subassembly