

分冊

高速炉の自然循環崩壊熱除去時の 冷却系統間相互作用に関する研究

—崩壊熱除去方式および2次主冷却系自然循環の影響—

1997年3月

動力炉・核燃料開発事業団
大洗工学センター

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

Enquires about copyright and reproduction should be addressed to: Technology Management Section O-arai Engineering Center, Power Reactor and Nuclear Fuel Development Corporation 4002 Narita-chō, 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) 1997

高速炉の自然循環崩壊熱除去時の冷却系統間相互作用に関する研究

－ 崩壊熱除去方式および2次主冷却系自然循環の影響 －

林 謙二*、桃井一光*、西村元彦*、上出英樹*

要旨

高速炉の自然循環崩壊熱除去時では、1次主冷却系の温度分布が自然循環ヘッドを介して炉心通過流量と相互に影響を及ぼし合う関係にある。このとき、1次主冷却系の温度分布は崩壊熱除去系、2次主冷却系による除熱の影響をうけるため、1次主冷却系の自然循環状態は各系統の自然循環状態と密接な関係にある。このような各冷却系統間の相互作用を明らかにするためにナトリウム試験装置であるプラント過渡応答試験施設（PLANDTL-DHX：Plant Dynamics Test Loop Integrated with Decay Heat Exchanger）を用いた定常自然循環試験を実施した。

試験は中心に1体、その周囲に6体の計7体の模擬燃料集合体を炉心部として有する試験体を用い、大型炉の定格比2%相当の炉心発熱条件で1次主冷却系に自然循環を発生させ、崩壊熱除去系の型式および2次主冷却系の運転条件をパラメータとして実施した。

本試験により、炉容器上部プレナム内に冷却器を有するDRACS（Direct Reactor Auxiliary Cooling System）を崩壊熱除去系として用いる体系について以下の点を明らかにした。DRACSと2次主冷却系での自然循環を模擬し、これらを併用して除熱した場合には、DRACSの除熱分担が多いほど上部プレナムに負の自然循環ヘッドが形成され、1次主冷却系の自然循環流量が少なくなる。従って実機評価において2次系の状態を考慮することが必須となる。DRACSと炉心との間では、DRACSで冷却された上部プレナム内低温ナトリウムが集合体間ギャップ領域を対流するインターラッパーフローが生じる。インターラッパーフローは集合体の上部遮蔽体領域で顕著な除熱効果を有する。中心集合体の発熱部に対するインターラッパーフローの直接的除熱効果は小さいが、除熱量の大きい周辺集合体との間で生じる集合体間流量再配分を介して最高温度を抑制することを確認した。

IHXの上部に冷却コイルを有するPRACS（Primary Reactor Auxiliary Cooling System）を崩壊熱除去系として用いる体系では、IHX全体が低温となり自然循環ヘッドが大きくなるため、炉心通過流量は2次主冷却系のみで除熱する場合よりも約10%、DRACSのみで除熱する場合よりも約20%多くなることがわかった。

* 動燃事業団、大洗工学センター、安全工学部、原子炉工学室

Investigation of Interaction between Heat Transport Systems during the Natural Circulation Decay Heat Removal in FBRs

— Influence of Decay Heat Removal System Type and the Secondary Heat Transport System —

K. Hayashi,* K. Momoi,*
M. Nishimura,* and H. Kamide*

ABSTRACT

Steady state sodium experiments were performed to investigate interactions between the heat transport systems, i.e., the primary system, the secondary system, and the decay heat removal system, during the natural circulation decay heat removal in FBRs. The PLANDTL-DHX test rig was used for the experiments. The core model has seven subassemblies; the center assembly simulates pin bundle geometry of a core fuel subassembly in a large scale FBR and consists of 37 pins, six outer subassemblies consists of 7 pins. As the decay heat removal system, Direct Reactor Auxiliary Cooling System (DRACS) and Primary Reactor Auxiliary Cooling System (PRACS) can be selected. Experiments were carried out under natural circulation conditions in the primary loop and force convection conditions in the decay heat removal system.

In cases using DRACS, natural circulation flow rate in the primary loop was smaller by 20% than that in cases using PRACS due to the low temperature in the upper plenum and also in the upper non-heated section of the core. When natural circulation was allowed in the secondary heat transport system, the natural circulation flow rate in the primary system increased in spite of the operation of DRACS. In cases using DRACS, inter-subassembly flow redistribution occurred; the center subassembly had larger flow rate than those in outer subassemblies due to the low natural circulation head in the outer subassemblies which were cooled by the inter-wrapper flow (IWF). The highest temperature in the core was reduced by IWF via not only the direct cooling effect but also the inter-subassembly flow redistribution.

Temperature fluctuations around the PRACS cooling coil installed in the IHX were registered under the natural circulation conditions in the primary system. The amplitude of fluctuation was less than 20°C and small on the points of structural integrity.

* Reactor Engineering Section, Safety Engineering Division, O-arai Engineering Center

目 次

1. 序 論	1
2. 試験装置	2
2. 1 試験装置構成	2
2. 2 試験体	2
2. 3 計測系	3
3. 試験方法	6
3. 1 試験条件	6
3. 2 試験方法	6
4. 試験結果	7
4. 1 集合体通過流量	7
4. 2 上部プレナム温度分布	8
4. 3 集合体内軸方向温度分布	8
4. 4 集合体内径方向温度分布	9
4. 5 集合体間ギャップ軸方向温度分布	11
4. 6 集合体間ギャップ温度変動	11
4. 7 IHX内温度特性	12
5. 考 察	14
5. 1 一次主循環系の自然循環に及ぼす各冷却系統条件の効果	14
(1) 自然循環流量に対する冷却系統の影響	14
(2) 系統自然循環ヘッドに対する冷却系統の影響	14
5. 2 インターラッパーフローによる除熱効果	16
6. 結 言	19
謝 辞	20
参考文献	21

Appendix

A1. 試験時除熱分担結果一覧	59
-----------------	----

List of Tables

Table 2.1	Physical Quantity Measurement Error		22
Table 3.1	Conditions of the Natural Circulation Steady State Experiments		23
Table 4.1	Flow Conditions in Subassemblies		24
Table 5.1	Buoyancy Head of Around Primary Loop		25
Table A.1(1)	Heat Removal Ratio of Heat Exchange System		60
Table A.1(2)	Heat Removal Ratio of Heat Exchange System		61
Table A.1(3)	Heat Removal Ratio of Heat Exchange System		62

List of Figures

Fig. 2.1	Flow Diagram of PLANDTL-DHX		26
Fig. 2.2	Sectional View of Test Section		27
Fig. 2.3	Thermocouple Location in IHX		28
Fig. 2.4	Schematic of Data Logging System		29
Fig. 4.1	Flow Conditions of Primary Loop		30
Fig. 4.2	Flow Conditions of Subassemblies in Steady State		31
Fig. 4.3	Vertical Temperature Distributions in Upper Plenum		32
Fig. 4.4	Azimuthal Temperature Distributions in Upper Plenum (Case REF & DN)		33
Fig. 4.5	Azimuthal Temperature Distributions in Upper Plenum (Case DHT & DI)		34
Fig. 4.6	Azimuthal Temperature Distributions in Upper Plenum (Case PN & PHT)		35
Fig. 4.7	Axial Temperature Distributions along Center & Wall Subchannel in Center Subassembly (DRACS Operation)		36
Fig. 4.8	Axial Temperature Distributions along Center & wall Subchannel in Center Subassembly (PRACS Operation)		37
Fig. 4.9	Transverse Temperature Distributions in BI and BD Cross Section (DRACS Operation)		38
Fig. 4.10	Transverse Temperature Distributions in BI and BD Cross Section (PRACS Operation)		39
Fig. 4.11	Axial Temperature Distributions along Inter-wrapper Gap (DRACS Operation)		40
Fig. 4.12	Axial Temperature Distributions along Inter-wrapper Gap (PRACS Operation)		41
Fig. 4.13	Temperature Fluctuations in S/A Gap (Case REF)		42
Fig. 4.14	Temperature Fluctuations in S/A Gap (Case DN)		43
Fig. 4.15	Temperature Fluctuations in S/A Gap (Case DHT)		44
Fig. 4.16	Temperature Fluctuations in S/A Gap (Case DI)		45
Fig. 4.17	Temperature Fluctuations in IHX		46
Fig. 4.18	Temperature Fluctuations in IHX Tube		47
Fig. 5.1	Influence of DHX Operation on Natural Circulation Flow Rate in Primary Loop		48

Fig. 5.2 Density-Height Diagrams for Center Subassembly in Primary Loop (DRACS Operation)	49
Fig. 5.3 Density-Height Diagrams for Outer Subassembly(b) in Primary Loop (DRACS Operation)	50
Fig. 5.4 Density-Height Diagrams for Outer Subassembly(e) in Primary Loop (DRACS Operation)	51
Fig. 5.5 Density-Height Diagrams for Center Subassembly in Primary Loop (PRACS Operation)	52
Fig. 5.6 Density-Height Diagrams for Outer Subassembly(b) in Primary Loop (PRACS Operation)	53
Fig. 5.7 Density-Height Diagrams for Outer Subassembly(e) in Primary Loop (PRACS Operation)	54
Fig. 5.8 Heat Removal by Inter-wrapper Flow	55
Fig. 5.9 Heat Removal by Inter-wrapper Flow (All Subassemblies)	56
Fig. 5.10 Influence of Inter-wrapper Flow on S/A Temperature	57

1. 序 論

高速増殖炉における崩壊熱除去時の冷却材の駆動力として、自然循環力を用いることは、動的機器の故障等による機能喪失を排除できるため、その崩壊熱除去機能の信頼性が高まる。大型炉等では、この自然循環を活用した崩壊熱除去システムとして、直接炉心補助冷却システム (DRACS : Direct Reactor Auxiliary Cooling System) 、一次系配置補助冷却システム (PRACS : Primary Reactor Auxiliary Cooling System) などが考案されている。崩壊熱除去システムの安全性評価手法を確立する上では、それぞれのシステムの特性を十分に把握する必要がある。

動燃事業団では、これまで高速増殖炉の炉心部、一次主冷却系、二次主冷却系および崩壊熱除去系を模擬したナトリウム試験装置を用いて、自然循環崩壊熱除去時を想定した伝熱流動実験を実施してきた^{1)~15)}。これにより、自然循環除熱時に炉心部で生じる燃料集合体間の熱移行現象、集合体内流量再配分現象、集合体内へ上部プレナムから低温流体が潜り込む現象、集合体間ギャップ領域での自然対流現象すなわちインターラッパーフロー (IWF : Inter-Wrapper Flow) 等の把握およびその評価手法の開発を行ってきた。これらの実験では炉心部で起こる熱流動現象のみに着目したものであることから、自然循環相当の冷却材流量を電磁ポンプで強制的に流して行われた。実際の原子炉プラントの自然循環状態では、各冷却材循環系統がそれぞれに相互作用し合い、自然循環流量や温度を変化させたりすると考えられる。特に、1次主冷却系の自然循環ヘッドへの寄与が大きい中間熱交換器 (IHX : Intermediate Heat Exchanger) の二次側 (二次主冷却系) の熱容量による除熱および二次主冷却系の自然循環を考慮した場合の崩壊熱除去系、二次主冷却系と一次主冷却系間の相互作用、IHXでの除熱がある場合におけるインターラッパーフローの炉心冷却効果等を把握しておくことが重要である。

このような自然循環崩壊熱除去に及ぼす各冷却系統相互の影響を把握するためには、ナトリウム試験装置を用いた実験を行った。本報告書は、そのうちの定常自然循環試験結果についてまとめたものである。

2. 試験装置

2. 1 試験装置構成

Fig. 2.1に試験に用いた試験装置、PLANDTL-DHX(Plant Dynamics Test Loop Integrated with Decay Heat Exchanger)のフロー図を示す。本装置は高速増殖炉の炉心部、一次主冷却系、二次主冷却系および崩壊熱除去設備としてDRACSおよびPRACSを模擬した機器で構成している。炉心部を模擬した試験体は電気加熱のヒータピンで構成された7体の集合体から成っている。模擬炉心部の上部には原子炉容器の上部プレナムを模擬したプレナム容器を配置している。上部プレナムの直径は約2mで、内部には炉上部機構(UCS:Upper Core Structure)を模擬したダミー円筒、DRACSの炉内冷却器(DHX:Decay Heat Exchanger)を模擬したNa/Na熱交換器が270°方位(Fig. 2-2参照)に1基配置されている。上部プレナムの出口配管を90°方位に1本だけ設けている。プレナム内の偏流を低減するために、内筒を設け、プレナム上部の流れが周方向に均等に内筒を乗り越えてプレナム出口に向かうようにしている。一次循環系にはIHXを配置し、二次主冷却系を模擬した配管系および蒸気発生器での除熱を模擬した空気冷却を配置している。IHXの冷却材循環系統は一次系が管内、二次系が管外で、IHX上部空間にPRACSの熱交換器を配置している。一次系およびIHX二次系は自然循環により流量を確保できるが、崩壊熱除去系についてはDRACSとPRACSとで二次循環系および空気冷却器を共有しているため、DRACSとPRACSの系統切り換え弁が多数あり、系統の流動抵抗が大きく自然循環時、流量が非常に小さく、電磁ポンプによる強制循環により運転を行う。

2. 2 試験体

Fig. 2.2の右側に本試験に用いた模擬炉心部の水平断面を示す。試験体は、中心集合体を6体の周辺集合体が取り囲むように配置した合計7体の模擬燃料集合体で構成されている。入口冷却材流量の設定は中心集合体が1系統、周辺集合体は中心集合体から見て左右に3体ずつ分けた2つの系統の計3系統についてそれぞれの入口流量調節弁の開度調整により行っている。中心集合体は37本ピンバンドル、周辺集合体は7本ピンバンドルのヒータピン集合体である。集合体間にはギャップがあり、実機における集合体間ギャップ流れ(インターラッパーフロー)を想定した冷却材の流れを模擬できるよう流路が形成されている。中心集合体は、典型的な大型炉設計の炉心燃料と同じピン外径 $\phi 8.3 \pm 0.02\text{mm}$ 、ピン配列ピッチ $9.9 \pm 0.05\text{mm}$ を採用している。また、発熱長さ(炉心高さ)1,000mm、スペーサーウイヤ径 $\phi 1.5 \pm 0.02\text{mm}$ および巻き付けピッチ $165 \pm 20\text{mm}$ についても大型炉と同程度としている。周辺集合体ではヒータピン外径を $\phi 21.5 \pm 0.02\text{mm}$ 、ピン配

列ピッチを $23.1 \pm 0.05\text{mm}$ とした。発熱長さ、スペーサーウイヤ径および巻き付けピッチについては、境界条件設定に対する模擬性を考慮し中心集合体と同様な寸法としている。中心集合体および周辺集合体ヒータピンの軸方向出力分布は、疑似Chopped Cosine分布である。それぞれの模擬燃料集合体は熱出力が任意に設定でき、中心集合体と周辺集合体の熱出力分布を任意に設定できる。7体の集合体の最大総発熱量は約 1.2MWである。

2. 3 計測系

(1) 温度計測点

Fig. 2.2に集合体試験部の熱電対配置を示す。熱電対は、ピン軸方向の非発熱部および発熱部の14断面に設置している。各断面では集合体内の温度分布が十分に把握できるように、熱電対を中心集合体に密に、周辺集合体では断面を $270^\circ - 90^\circ$ で分割した場合の 180° 側の領域にその反対領域より多く配置し、詳細な温度分布の測定を可能にしている。

ナトリウム温度測定用熱電対は外径 $\phi 0.5$ と $\phi 0.4$ のものを用い、 $\phi 0.5$ のものはヒータピンに巻いているスペーサーウイヤーに沿ってピン表面を這わせ、目標の計測点と温接点部の位置を一致させて、熱電対先端のチップ部をヒータピンシース表面に点付けしている。 $\phi 0.4$ のものは、3本をまとめて外径 $\phi 1.5$ のスペーサーウイヤーに内挿して引き回している。

ギャップ部流路の熱電対はピン束部と同じ断面の $270^\circ - 90^\circ$ ラインのギャップ部ラッパ管表面と流路中央に配置している。また、 180° 領域のギャップ部ラッパ管表面と流路中央にも配置している。ギャップ部を含む試験部集合体の熱電対本数は約 700本である。

Fig. 2.3にIHX構造および熱電対配置を示す。IHXは前述のとおり一次側の上部空間にはPRACSの冷却器を模擬した冷却コイルを配置し、このコイル周辺の軸方向に熱電対を配置している。また、伝熱管内のナトリウム温度測定用に上部管板から30mm下の伝熱管の径方向に3点、中央伝熱管の軸方向に7点、その他数点の熱電対を配置している。

以上の熱電対はすべてK型一非接地型であり、試験前に $250\sim 500^\circ\text{C}$ のナトリウム温度範囲で計測システムも含めた相対較正を実施し、各熱電対の出力は標準偏差 0.5°C 以内のバラツキであることを確認している。

(2) 流量計測点

試験体の各流路のナトリウム流量は試験部の入口部にある電磁流量計により計測している。中心集合体の流量計は高流量レンジ用（-150~350 l/min）、低流

量レンジ用 (-50~50 l/min) が並列して配置されており、試験流量に合わせて計測ラインを切り替えて測定精度の確保を図っている。周辺集合体の流量計は測定レンジが 300~600 l/min で、3 体に分岐される前の流量を計測している。これらの電磁流量計は試験前に自由落下法による較正を実施し、測定精度の確保を図っている。試験の設定流量が電磁流量計の測定精度が低下しやすいフルレンジの 10% 以下の領域にかかるため、10% 以下の低流量域を対象とした較正も実施した。その結果、低流量域も高流量域に連続的な特性であることを確認した。較正式は 10% 流量を境に 2 つの流量領域の式を作成し、試験流量により使い分けている。

(3) 計測システム

Fig. 2.4 に温度、流量等のデータの計測システムの構成を示す。このシステムでは高速データ収録を行った場合の信号ノイズの影響を低減するために、直流増幅器を用い、DC 0~20mV オーダーの信号をゲイン 200 倍で DC 1 V オーダーまで増幅している。熱電対はセンサー側から補償導線で零接点温度補償器まで引き回し、室温補正を行っている。零接点温度補償器の冷接点部温度は $0 \pm 0.2^\circ\text{C}$ で制御している。零接点温度補償器～直流増幅器～データ収録器までは、ノイズ防止のために銅芯線の 2 芯ツイストシールド線を用いている。

データ収録器はミニコン (YHP : A-900 システム) をデータ処理にも併せて用いている。データ収録速度 (全 ch のデータを収録する間隔) は最高 0.016sec が可能であるが、定常試験であることから 0.16sec とし 300 秒間収録した。

(4) 計測系の精度

計測系のセンサーおよび計測機器類はその測定精度の確保および確認のために、試験前にそれぞれの較正試験を行っている。その代表的なセンサー、計測機器の較正結果を Table 2.1 に示す。

温度計測は計測系に組み込まれている零接点温度補償器や直流増幅器の誤差、熱電対が製品として持つ出力誤差等が相乗するが、全点の相対較正を実施したことにより、試験での温度測定範囲 $300\sim500^\circ\text{C}$ で標準偏差 $\pm 0.5^\circ\text{C}$ 以内のバラツキに抑えられている。

流量計測は信号変換器や直流増幅器の誤差、流量較正時に使用する温度測定の誤差、流量較正の誤差等が相乗する。流量計較正は上部プレナムのナトリウム液位の落下法により、ある 2 点のナトリウム液位計の間を液面が落下する時間とそのとき落下したナトリウム容量から流量計を通過する平均流量を求めている。基準とする落下させるナトリウム容量は、流量計の測定レンジに合わせて使用する

液位計の組み合わせを変えることにより、約300 l(大流量域用)と約120 l(低流量域用)のいずれかを選択した。本装置のように容器直径が大きなプレナムを用いた自由落下方式の校正では、液面計間のナトリウム容積の算出の誤差が精度に大きく作用する。液面計の測定誤差は約±1mmであり、2点間の距離にすると±2mmの誤差になり、ナトリウム容量の誤差は約6lである。校正後の流量計測の精度は、50~350 l/minの範囲で±2.0%、0~35 l/minの範囲で±4.7%である。

ヒータピンの発熱量は、電源設備の電圧、電流を信号変換器で変換し、それを電力変換器に入力して算出する。発熱量の計測は、これらの変換器および直流増幅器の誤差が相乗し、±0.18%F.S.の誤差がある。

3. 試験方法

3. 1 試験条件

Table 3.1に試験条件を示す。試験は、自然循環崩壊熱除去時のIHX二次系および崩壊熱除去系の運転条件が炉心部の崩壊熱除去に及ぼす影響を調べるものであり、崩壊熱除去系（DRACSおよびPRACS）とIHX二次系を用いた自然循環除熱条件において、その除熱量の分担比率を変えた定常試験を実施した。

一連の定常試験のリファレンスケースとして、崩壊熱除去系は用いずIHX二次系の自然循環によって模擬炉心部の崩壊熱相当の発熱量を除去するケース（REF）を実施した。これに対し、IHX二次系は循環を停止し、模擬炉心部の発熱量を崩壊熱除去系のDRACSまたはPRACSで除熱するケース（DN、PN）、模擬炉心部に径方向発熱分布を付けたケース（DHT、PHT）、DRACS体系においてIHX二次系の自然循環を併用して除熱を行うケース（DI）を行った。これらの試験の模擬炉心部の発熱量は、模擬炉心部に径方向発熱分布を付けたケースを除いて実機定格炉心燃料ピン線出力密度の約2%の線出力密度とし、7集合体の発熱総量は約170kWである。径方向発熱分布を付けたケースは、中心集合体発熱量を均一出力分布のケースと同条件として周辺集合体を中心集合体より約18%低い発熱量とし、発熱総量は約143kWである。

崩壊熱除去系は、DHX二次系のナトリウムを90 l/minで強制循環運転し、三次系である空気冷却器の風量を変えて除熱量を調節した。

IHX二次系については停止条件時には、系統のバルブを全閉とし、ナトリウムの循環を停止させた。IHX二次系自然循環除熱時は系統のバルブを全開とし、空気冷却器のダンパー開度およびプロワの回転数制御により、除熱量を調整した。

3. 2 試験方法

リファレンスケース（REF）の初期設定は、主循環系を集合体内流速換算で実機定格比の2%相当の流量（56 l/min）を電磁ポンプを用いて流し、かつ、各集合体の流量を均等にさせるよう模擬炉心部の入口流量調節弁を調節する。これ以降に実施する試験において試験部入口流量調節弁の開度は変更しない。流量設定後、模擬炉心部の発熱量を線出力密度換算で実機定格比の2%相当の出力に設定し、IHX二次系の電磁ポンプ、空気冷却器プロワを停止のまま主循環系のIHX出口温度が約300°Cになるようにダンパ開度および二次系弁の開度を調節しIHX二次系に自然循環を生じさせた。その後、主循環系の電磁ポンプを停止させ、自然循環に移行させた。

その他のケース（DN,DHT,DIおよびPN,PHT）についても、ケースREFと同様に定常の自然循環を生じさせた。初期条件から過渡を経て安定定常な自然循環に到達するまでに約24時間を要し、自然循環条件でデータを5分間収録した。

4. 試験結果

4. 1 集合体通過流量

(1) DRACS体系

Fig. 4.1にDRACS体系およびPRACS体系の全試験ケースにおける一次系の自然循環流量変化を示す。測定時間は安定定常状態の200秒間である。縦軸は実機定格運転時の集合体バンドル部平均流速から求めた試験装置での一次系流量に対する測定流量の比である。各ケースともに流量は安定しており、IHX二次系の自然循環による除熱のみで崩壊熱除去を行っているケースREFに対し、DRACSを用いた崩壊熱除去体系では低めに、PRACSを用いた体系では多めの流量を示している。Fig. 4.2にいくつかの試験ケースについての各集合体の通過流量変化を示す。各ケースともに一次系流量と同じように安定した流量を示しており、図示していない試験ケースについても同様な安定な流量を示していた。

Table 4.1に一次系流量および各ケースの集合体通過流量の実機定格条件との比（ピンバンドル内平均流速換算、以後では定格比と呼ぶ）を示す。ケースREFでは、IHX二次冷却系で約61 l/minの自然循環流量が確保され、模擬炉心部3系統とともに定格比約1.7%流量で一定となっており、集合体間に差はない。

ケースDNでは、中心集合体流量はリファレンスケースと大差ないが、周辺集合体1および2系統はともに中心集合体よりも定格比で約0.2%低くなり、集合体間に相対値として約10%の流量差が生じている。

ケースDHTにおける模擬炉心部の全発熱量は、周辺集合体発熱を中心集合体よりも約18%低く設定し、リファレンスケースの170kWに対し143kWである。リファレンスケースと発熱量が同じ中心集合体の流量は定格比で約0.1%低く、出力の低い周辺集合体流量はリファレンスケースより定格比で約0.2%低く、集合体間流量差が約6%現れている。

ケースDIにおける模擬炉心部の発熱条件はケースREFと同一条件である。DRACSとIHX二次冷却系の除熱割合は3：2である。中心集合体の通過流量はリファレンスケースと同じく定格比の約1.7%であるが、周辺集合体は定格比の1.6%程度であり、集合体間に約6%流量差が生じている。

以上の自然循環モードによる集合体通過流量のデータから、DRACSを起動し除熱することにより、集合体間に流量の不均衡を生じることがわかった。

(2) PRACS体系

同じようにTable 4.1に示したPRACS体系時の集合体通過流量を見ると、ケースPNの方では各集合体ともリファレンスケースよりも定格比で0.2%多く約1.9%である。ケースPNの一次系自然循環流量は、リファレンスケースと比較して約10%、ケースDNと比較して約20%多くなっている。

ケースPHTにおける試験部の発熱条件は前に示したDRACS除熱のケースDIと同じである。集合体通過流量はケースPNよりも定格比0.1%少なく1.8%になっているが、集合体間に流量差は生じていない。

PRACS除熱運転のケースでは、集合体間に約18%程度の発熱量の不均衡があったとしても、通過流量に差を生じるほどには作用しないと考えられる。

4. 2 上部プレナム温度分布

(1) 軸方向温度分布

Fig. 4.3にDRACS体系およびPRACS体系の各試験ケースにおける、上部プレナム軸方向温度分布を示す。PRACS体系の全ケース (PN、PHT) およびDHXを作動させないリファレンスケースでは、上部プレナムの軸方向の温度分布は平坦である。DRACS体系の全ケース (DN、DHT、DI) では、プレナム底部にDHXから供給される低温流体が存在することから下方の温度が低い。すなわち、集合体頂部高さの温度は上部よりも20~30°C低く、さらに下方の温度は集合体頂部高さより15~20°C低い。

(2) 周方向温度分布

Fig. 4.4~4.5にリファレンスケースおよびDRACS体系のケースにおける上部プレナム内周方向温度分布を示す。Fig. 4.4に示すDHXを作動させないリファレンスケースでは、周方向に温度分布は観られない。DHXを作動させたケースでは、集合体頂部高さ(0mm)から400mm上部までの区間において周方向に数°Cの温度差が見られる。但し、DHXに近い位置で低いというような傾向は見られない。この区間より上方および下方においては温度分布は平坦である。

Fig. 4.6にPRACSを作動させたケース (PN、PHT) における上部プレナム内周方向温度分布を示す。これらのケースではリファレンスケースと同様にどの高さについても周方向温度分布は平坦である。

これらから、DRACS作動により生じる周方向温度分布は、DHX配置の非対称性に起因したDHXからの低温流体と集合体出口から流出する高温流体のミキシングにより形成されるものであるが、数°Cの差であり、プレナム上下の温度差の10%以下に留まっている。

4. 3 集合体内軸方向温度分布

(1) DRACS体系

Fig. 4.7にリファレンスケースとDRACSを作動させた3つのケースについて、中心集合体の中心サブチャンネルおよび壁サブチャンネルに沿った軸方向温度分布を示す。リファレンスケースの中心サブチャンネルでは発熱区間で下流側に向かいほぼ

直線的に温度が上昇し、非発熱区間では集合体内径方向温度が平均化されることにより中心温度が5°C程度下がるが、上部遮蔽体を含むその上方では、軸方向にほぼ一定の温度分布になる。壁サブチャンネルでは発熱部上方の非発熱バンドル部で径方向温度分布が平坦化することにより、上方の非発熱区間の壁サブチャンネル温度が発熱部上端部よりも高くなっている。

DRACS除熱のケースDNでは、発熱区間でリファレンスケースと同様な温度上昇を示しているが、非発熱区間および上部遮蔽体で温度が大きく低下している。DRACSからの低温流体が集合体間ギャップに上部から入り込みギャップを冷却するインターラッパーフロー(IWF)が生じ、ラッパ管壁を通して集合体内の熱がギャップ側に移行しているためと考えられる。

周辺集合体の発熱量を中心集合体の発熱量より低くしたケースDHTでは、温度の高い中心集合体側から周辺集合体側に向かって熱移行があるため中心集合体通過流量が少ないにも係わらず、均一出力分布としたケースDNの結果よりも発熱区間の温度上昇幅が小さく、上部遮蔽体部での温度低下が大きい。

DHXによる除熱量の少ないケースDIでは、上部遮蔽体部での温度低下はケースDNと比べると小さい。すなわち、IWFは生じているが、その影響は小さくなっている。ケースDN, DHTおよびDIの壁サブチャンネル温度は、IWFまたは周辺集合体からの冷却の影響により、発熱部上方の非発熱部では発熱上端部よりも高くなることはない。

(2) PRACS体系

Fig. 4.8にリファレンスケースとPRACS除熱の2ケースにおける中心集合体の中心サブチャンネルと壁サブチャンネルの軸方向温度分布を示す。これらのケースでは上部プレナム内に集合体より低い温度の流体が存在しないため、IWFは生じない。リファレンスケースとケースPNおよびPHTの発熱区間での温度上昇幅および上部遮蔽体区間での温度変化に差が現れている。中心集合体の通過流量がリファレンスケースよりも多いケースPNでは、発熱区間での温度上昇幅が小さくなっている。中心集合体発熱量がリファレンスケースおよびケースPNと同じで周辺集合体発熱量が低いケースPHTでは、中心集合体の通過流量がケースPNよりも少ないにも係わらず、発熱区間で周辺集合体側への熱移行が生じることから温度上昇幅はケースPNよりも小さい。さらに、上方の非発熱区間でも周辺集合体側への熱移行により温度が低下している。

4. 4 集合体内径方向温度分布

(1) DRACS体系

Fig. 4.9にリファレンスケースとDRACS除熱のケース(DN, DHT, DI)における

模擬炉心部を 90° - 270° に横切る水平断面での集合体内径方向温度分布を示す。縦軸は集合体入口との温度差で表している。図に示した断面は、発熱部上端(BI)と発熱部中央(BD)である。また、中心集合体および周辺集合体の発熱上端断面(BI)付近に示した直線は、各集合体の発熱量と通過流量から算出した断面平均温度上昇幅である。

リファレンスケースの中心集合体では径方向温度分布は緩やかで、集合体間ギャップ温度はラッパ管内側の壁サブチャンネルの温度と差はない。ケースDN、DHT、DIでは、BI断面の周辺集合体の外周側ギャップ温度が、リファレンスケースに比べ低下しており、IWFが生じていることがわかる。

ケースDNでは周辺集合体の流量が中心集合体よりも10%低いため、計算上の断面平均温度は、周辺集合体の方が中心集合体よりも高くなっている。しかし、実際の周辺集合体内温度は、IWFにより冷却され計算上の断面平均温度よりも低くなっていることがわかる。中心集合体について見ると、BD断面では集合体内の温度分布がリファレンスケースよりも平坦である。また、その左右の集合体間ギャップ部温度がリファレンスケースよりも高い。これらから中心集合体は流量が低いことにより高温となっている周辺集合体から加熱されていると考えられる。BI断面では集合体間ギャップ部の温度が低下し、集合体内の温度分布もリファレンスケースよりも急峻になっていることから、IWFにより冷却されていると考えられる。このように、軸方向に加熱と冷却を受け、トータルとして計算上の断面平均温度とBI断面の最高温度の関係は、リファレンスケースと同一となっている。

集合体間に発熱分布を付けたケースDHTでは、他のケースと異なり周辺集合体の温度が低いことによる熱移行現象および集合体間ギャップへの低温流体の潜り込みにより、中心集合体が冷却され、BI断面内の最高温度は計算上の温度上昇値よりも約30°C低く、温度分布も急峻になっている。

(2) PRACS体系

Fig. 4.10にリファレンスケースとPRACS除熱のケース(PN、PHT)における集合体内径方向温度分布を示す。PRACS除熱のケースPNとリファレンスケースを比較するとBDおよびBI断面ともに温度分布形状は大差無いが、両ケースとも発熱量が同じであるのにケースPNの方が集合体内通過流量が多いため、両断面ともに温度レベルが低くなっている。PRACS除熱で、かつ、集合体間に発熱分布のあるケースPHTでは、集合体間ギャップの温度が隣接する集合体温度と比較して大きくは下がってはおらず、周辺集合体の温度が低いことによる集合体間熱移行現象によって中心集合体の温度が下がっていることがわかる。

4. 5 集合体間ギャップ軸方向温度分布

(1) DRACS体系

Fig. 4.11にリファレンスケースとDRACS除熱のケースにおける、集合体間ギャップの軸方向温度分布を示す。温度計測点は模擬炉心部を 90° - 270° に横切る線上の各ギャップの中央で、 90° 側周辺集合体の外周側、 90° 側周辺集合体と中心集合体の間、 270° 側周辺集合体と中心集合体の間、 270° 側周辺集合体の外周側の4点である。

リファレンスケースでは、発熱上端から200mmまではギャップのどの部分も同じように温度変化している。発熱上端より約150mm上の非発熱ピンバンドル領域では、集合体内径方向温度分布が平坦化し壁サブチャンネルの温度が高くなる (Fig. 4.7参照) ことに対応して、発熱上端高さよりもギャップ温度が高くなっている。さらに上の遮蔽体領域は上部プレナムに突き出た構造であり、上部プレナム温度が集合体出口温度よりも約13°C低かったことから、プレナム側から炉心槽を介して冷却され外周側の温度が低下し、中心側ギャップと約7°Cの差が現れている。

リファレンスケースを除くDRACS除熱のケースは、発熱区間より上方の温度が大きく下がっている。特に、外周側のギャップ温度の低下が大きく、発熱区間においても温度低下が現れている。また、外周の 90° 側と 270° 側を比べると 90° 側の温度低下が大きくなっていると想定される。これは、先に示した上部プレナム周方向温度分布がほぼ平坦であったことから、上部プレナム底部での低温流体の偏流によりギャップへの潜り込み量に周方向依存性が生じているものと考えられる。

(2) PRACS体系

Fig. 4.12にリファレンスケースとPRACS除熱のケースにおける、集合体間ギャップの軸方向温度分布を示す。リファレンスケースと他のケースを比較すると、ケースPNでは、集合体内を通過する流量が多く集合体内温度が低いためギャップ温度も低い。ギャップ上部からの低温流体の入り込みを示す温度分布は見られない。集合体間に発熱分布のあるケースPHTも集合体試験部の総発熱量が少ないためギャップの温度上昇が小さい。前ケース同様、低温流体の入り込みを示す温度分布は見られない。

4. 6 集合体間ギャップ温度変動

Fig. 4.13～4.16にリファレンスケースおよびDRACS除熱のケースにおける集合体間ギャップの温度変化を示す。温度測定位置は 90° - 270° ライン上のギャップ中央で、(a) 90° 側周辺集合体外周側、(b) 90° 側周辺集合体と中心集合体の間、(c) 270° 側周辺集合体と中心集合体の間、(d) 270° 側周辺集合体外周側の4点である。各図

には上部遮蔽体領域(DB)、非発熱ピンバンドル領域(CB)および発熱上端部(BI)の軸方向3点の温度を示している。Fig. 4.13に示したリファレンスケースではギャップの径方向並びに軸方向の温度差が10°C以内であり、どの部分にも顕著な温度の時間変動は見られない。

Fig. 4.14に示したケースDNでは外周側の上部遮蔽体領域DBで大きな温度変動が見られた。変動の周期が中心側のギャップに比べて長く、温度レベルがその下方のCB,BI高さの値に比べて低いことから、外周側から潜り込みが定常的に生じていると考えられる。特に、90°側ではCBおよびBI領域まで顕著な温度低下が見られており、90°方向からの潜り込みが主に生じている。また、外周側と中心側のDB領域の温度ゆらぎを比較すると、中心側の温度変動の振幅が約60°Cと大きく、外周側よりも温度変動の周期が短く温度レベルが高いことから、上部から集合体間ギャップに潜り込んだ低温流体とギャップ内を対流し上昇する流体とのミキシングが中心側ギャップのDB領域で生じているものと考えられる。Fig. 4.15およびFig. 4.16に示したケースDHTおよびDIについても同様の傾向が現れている。

なお、PRACS除熱ケースのギャップ部はリファレンスケースと同様の温度分布および温度変動を示しているので省略する。

4. 7 IHX内温度特性

Fig. 4.17にリファレンスケースおよびPRACS除熱のケースにおけるIHX内部温度の時間変動を示す。IHX一次側の上部プレナム内にはPRACSの冷却コイルが配置され、一次側入口ノズルから流入したナトリウムが一次側上部プレナム内を偏流するのを防ぐためにバッフル板を設けている。また、DHX冷却コイルのヘリカル部に流れを集中させるため内筒を設けている。温度測定位置は、IHX一次側上部プレナム内バッフル板の上端高さの180°と270°方位の2点(T180H, T270H)、およびDHX冷却コイルの内筒壁の5点(TS01~05)である。図の上段はバッフル板上端の温度、下段はコイル部内筒壁の温度である。リファレンスケースは両方とも450°C近傍で、2°C程度以内の変動で安定している。PRACSを作動させたケースPNでは、一次側の入口ノズルの方位(180°)のT180Hに比べT270Hは約20°C低くなり、約12°Cの振幅で変動している。流入側(T180H)では流入ナトリウムがバッフル板に衝突する箇所であるため、プレナム内の低温ナトリウムの影響を受け難く温度変動が小さ

い。前者と 90° ずれた 270° 側 (T270H) では、IHX内にある冷却コイル出口配管で冷却された低温流体がバッフル板を乗り越える流れとミキシングするため、温度が低下するとともに変動が大きくなっていると考えられる。コイル部内筒壁では上方から下方に行くに従い温度が低下し、内筒上部では約 20°C 、下方では約 5°C の変動幅の温度ゆらぎが生じている。冷却コイルでは上流側においては主流部の温度が高いため冷却コイル近傍を下降する流体と内筒壁側を下降する流体との温度差が大きく、両者がミキシングする際の温度変動は大きい。下流側ではバルクの温度が低下しコイル近傍の低温流体との温度差が小さくなることからミキシングによる温度変動幅は小さくなると考えられる。

模擬燃料集合体に発熱分布をつけたケースPHTでは、集合体発熱量がリファレンスケースよりも少ないためIHX入口温度が低い。温度分布および温度変動の形態は、ケースPNと同じ特性を示している。

Fig. 4.18にIHX伝熱管内温度の時間変動を示す。温度測定位置は伝熱管上部管板から30mm下方の伝熱管内流路中央で、伝熱管径方向に中央 (TP01)、中間 (TP02)、外周側 (TP03) の3点である。リファレンスケースでは径方向に温度分布はないが、PRACSを作動させたケースPNおよびPHTでは、冷却コイルおよび冷却コイル入口管配置の直下の伝熱管温度 (TP01、TP02) が外周側伝熱管温度 (TP03) よりも約 10°C 低い分布となっている。つまり、上部管板部の径方向に温度勾配が生じていることになる。温度変動も伝熱管内で 5°C 幅で現れている。

本装置におけるPRACSを作動させた場合の定常状態においてIHX内の冷却コイルが内挿される上部のプレナム内の構造物に対しては、 20°C 程度の温度変動が加わり続けること、および伝熱管上部管板には径方向に 10°C の温度分布が生じることがわかった。いずれも温度差は構造健全性に影響を与えるほど大きくはない。自然循環では一次系の流量が少なく、IHX上部プレナム内はPRACS冷却コイルによって水平断面内がほぼ均一に冷却されていることがわかる。

自然循環条件では冷却コイル周囲の流れが遅く、断面内の温度分布の一様化が促進されている可能性がある。今後は、流速が大きいポンーモータ運転条件での試験を実施する予定である。

5. 考 察

5.1 一次主循環系の自然循環に及ぼす各冷却系統条件の効果

(1) 自然循環流量に対する冷却系統の影響

Fig. 5.1にDRACSおよびPRACS除熱運転における冷却コイル (DHX) での除熱と IHX二次系の除熱との割合の違いが、一次主循環系の自然循環流量に及ぼす効果を示す。横軸は集合体での発熱量に対するDHXでの除熱割合 (Q_{DHX}/Q_{PIN}) で、縦軸は一次系自然循環流量を定格比として示している。DRACSを作動させないリファレンスケースでは、集合体発熱量に対するIHXでの除熱量が約91%±2%であるが、残りの数%の熱量は配管、機器表面からの放熱によるものと考えられる。リファレンスケースでは、一次系自然循環流量は大型炉定格条件の1.74% (集合体内流速換算: 約49 l/min) である。同じ発熱条件においてDHXを運転し、その除熱割合が約60%~90%の範囲で、DHXの除熱割合が高いほど一次系流量が低くなる。一次系自然循環流量はリファレンスケースに比べて、DHXの除熱割合が90%のケースDNでは8%、 DHXの除熱割合が60%のケースDIでは6%低くなっている。

PRACSで除熱しているケースPNでは一次系流量が、リファレンスケースの1.74%に対し1.95% (約54 l/min) と多くなる。PRACSで除熱した場合、IHXで除熱する場合よりもIHX内の高い位置から低温域が存在することにより下向きの循環力が大きくなるため、流量が大きくなる。

(2) 系統自然循環ヘッドに対する冷却系統の影響

a. DRACS体系

前項で述べた考察について、より分かり易くするために系統内の自然循環ヘッドで整理する。Fig. 5.2~5.4に崩壊熱除去系としてDRACSを運転したモードでの定常状態における系統のナトリウムの密度分布を示す。それぞれの図は集合体部のナトリウム密度を中心集合体、周辺集合体(b)および周辺集合体(e)の別に算出したものである。各図の縦軸は、系統配管の最下端部 (下部プレナム入口側配管) の位置を0 mmとした垂直方向高さを表し、横軸は各部の平均ナトリウム温度から求めたナトリウム密度を表している。図における自然循環時のナトリウム流れは、底部配管0mm→⑧→⑨→①→②→③→④→⑤→⑥が上昇流、⑥→⑦→0mmが下降する流れである。上昇する流れにおいて、密度が小さい方向に変化する場合にはその場に浮力が働き、自然循環ヘッドの増加として作用する。また、下降する流れにおいて密度が大きい方向に変化するときには、下向きに大きな重力が働き、これも自然循環ヘッドを増加させる方向に作用する。逆に、上昇する流れにおいて密度が大きい方向へ、下降する流れにおいて密度が小さい方向へ変化した場合には、自然循環ヘッドを減少させる方向に作用することになる。

Fig. 5.2に中心集合体を通した一次系の密度分布を示す。図中で同一高さにおいて、上昇流側の密度が小さく、下降流側の密度が大きい場合には、その高さ位置には正の自然循環ヘッドが作用している。逆に、上昇流側の密度が大きく、下降流側の密度が小さい場合には、その高さ位置に負の自然循環ヘッドが作用している。負のヘッドが作用している領域をグレーに塗りつぶしている。それ以外は正のヘッドが作用している領域であり、それぞれに、その面積がヘッドの大きさに対応している。

リファレンスケースを見ると、発熱開始点①から上部プレナム下部④にかけての上向き流れの場で密度が小さくなる方向に変化し、IHX入口⑥からIHX出口⑦にかけての下向き流れの場で密度が大きくなり、大きな正の自然循環ヘッドが作用している。IHX出口⑦から集合体の発熱開始点①にかけての系統の下部には低温領域が存在しているが、IHX出口と同じ温度でほぼ一様であるため、ヘッドとして寄与していない。DRACSを用いて除熱しているケースDNおよびDIでは、発熱開始点①から集合体出口④には正の自然循環ヘッドが作用しているが、④から上部プレナム出口⑥にかけてはリファレンスケースにはなかった負の自然循環ヘッドが見られる。また、上部プレナム出口からIHX入口が低温領域となりIHX内での下向きの自然循環ヘッドが大きくなっているが、上部プレナム部での負の自然循環ヘッドの効果が大きく作用し、系統一巡の自然循環ヘッドとしては小さくなっている。DRACSとIHX二次系を併用したケースDIでは、集合体出口④からIHX入口⑥にかけての負の自然循環ヘッドがケースDNより小さくなっている。

Table 5.1に各試験ケースについて中心集合体を通した一次系一巡の自然循環ヘッドを示している。リファレンスケースの自然循環ヘッドは622(Pa)であるのに対し、DRACSを運転することにより集合体の上部非加熱部および上部プレナムが低温となる効果で553~573(Pa)まで自然循環ヘッドが小さくなっている。

Fig. 5.3に90°側の周辺集合体(b)を通した一次系の密度分布を示す。ケースDNおよびDIでは、発熱終端部③から集合体出口部(④のひとつ手前)にかけての上部遮蔽体部での温度低下が中心集合体に比べて大きく、自然循環ヘッドを小さくしている。

Fig. 5.4の270°側周辺集合体(e)を通した自然循環ヘッドでも、90°側と同様に上部遮蔽体部の密度増加が中心集合体よりも大きくなる傾向が現れているが、周辺集合体(b)ほど極端ではない。集合体間ギャップへの低温流体の潜り込み流れの非対称性に起因した集合体ごとの自然循環ヘッドの差が現れている。これが、周辺集合体と中心集合体の流量のアンバランスに寄与している。

自然循環崩壊熱除去運転を行う場合に、DHXのみで除熱する条件とIHX二次系を併用して除熱する条件では、前者の方が上部プレナム内の負の自然循環ヘッドの作用により、一次系流量が定格比で約0.1%低くなり、相互の自然循環流量の差は約6%

となる。これらの結果は定常自然循環状態のものであり、スクラムから自然循環移行時におけるDRACS除熱とIHX二次系除熱の場合とでは、DRACSで冷却された上部プレナムの低温流体がプレナム出口以降の下向き流れの領域に達するまでDRACSによる冷却は、自然循環を促進する方向に働くないと考えられるため、両者の差は自然循環流量に顕著に現れるものと考えられる。自然循環崩壊熱時の流量確保という観点からみるとIHX二次系除熱を併用した方が、より信頼性が高いと言える。

b. PRACS体系

Fig. 5.5～5.7にリファレンスケースとPRACSを作動させたケースPNにおける自然循環ヘッドを示す。Fig. 5.5の中心集合体を通した自然循環ヘッドを観るとPRACSを作動させたケースではIHX入口⑥の直後からDHX冷却コイルにより冷却が開始されるため、⑦にかけて正の自然循環ヘッドが生じている。Fig. 5.6およびFig. 5.7に周辺集合体(b)および(e)を通しての自然循環ヘッドを示しており、集合体間に差はない。

PRACSにより除熱を行う場合には、上部プレナムの温度が高くIHXの高い位置から低温となることから正の自然循環ヘッドが形成されることがわかる。Table 5.1に示した一次系一巡の自然循環ヘッドは、リファレンスケースよりも約70(Pa)大きい。

5. 2 インターラッパーフローによる除熱効果

Fig. 5.8にDRACSによる除熱のケースにおけるDHXの除熱割合とインターラッパーフローによる中心および周辺集合体部の除熱割合の関係を示す。横軸はDHX二次系による除熱量と全集合体発熱量との比から求めたDHXによる除熱割合。縦軸は集合体の実測の流量および入口からある断面までの断面平均温度による温度上昇幅を用いて求めたエンタルピー上昇分と集合体発熱量の差を集合体発熱量で除したものである。つまり、集合体発熱量と実際にナトリウムの昇温に作用した熱量の差が、集合体部においてラッパー管外に移行した熱量であり、インターラッパーフロー等により持ち去られた熱量である。図中には発熱部上端断面(BI)、発熱上端部より160mm上方の非発熱バンドル断面(CA)、上部遮蔽体入口断面(DA)を示している。

DRACSを作動させていない場合においても集合体部で約8%の除熱があるが、集合体通過流量の計測誤差、断面平均温度計算誤差等からくる誤差によるものと考えられる。中心集合体では上部遮蔽体のDA断面でDHXの除熱分担割合が高いほどラッパー管外に移行する熱量が増えている。中心集合体に対するインターラッパーフローの除熱効果としては、DHX除熱分担率60%のときにDA断面でリファレンスケースより約6%、分担率91%のときに同じく約7%多く除熱されている。中心集合体発熱上端断面(BI)および発熱部より上方の非発熱ピンバンドル断面(CA)では、DRACSの作動・不作動による顕著な差は見られない。しかし、先に示した集合体内径方向温

度分布からBI断面では中心集合体に対し、ギャップ側から冷却が行われているのは明らかである。BD断面で見られたような集合体下部での周辺からの加熱と上部での冷却がバランスしているものと考えられる。

周辺集合体に対する除熱効果については、周辺集合体内の熱電対数が少なくピンバンドル部の断面平均温度が精度よく求められないことから、BI断面での定量的な評価が行えないが、インターラッパーフローは周辺集合体の外周側から潜り込んでくることを考慮すると周辺集合体での除熱効果は中心集合体のそれよりも大きいと考えられる。周辺集合体のDA断面で中心集合体と比較すると、およそ2倍のインターラッパーフローによる除熱効果を示している。

Fig. 5.9にすべての集合体を総合したインターラッパーフローの除熱効果を示す。図の縦軸のインターラッパーフローによる除熱割合は、各集合体の発熱量の総和およびエンタルピー上昇幅より求めた各集合体に対する除熱量の総和を用いて求めている。横軸の定義は前図と同じである。図には発熱部上方の非発熱ピンバンドル部のCA断面と上部遮蔽体入口部のDA断面での除熱効果を示している。DHXの除熱割合が60%および90%のときのインターラッパーフローによる除熱割合は、CA断面では大差なく約16%を示しており、DRACSを作動させない条件と比べて全集合体発熱量の約9%多い熱がインターラッパーフローにより除熱されている。DA断面ではDHXの除熱割合が60%および90%のときのインターラッパーフローによる除熱割合は、それぞれ22%、27%である。

Fig. 5.10に中心集合体内温度に及ぼすDRACSの運転効果を示す。図の縦軸は、中心集合体入口から任意の位置までの温度上昇幅を示す。横軸の定義は前図と同じである。図にはBI断面の平均温度上昇幅の測定値と計算値、BI断面中心サブチャンネル（最高温度計測位置）の温度上昇幅の測定値を示している。BI断面平均温度上昇幅の計算値として集合体出力測定値と一次系流量の測定値を1/7した流量を用いて求めた値を示した。BI断面の温度上昇幅の計算値は、DHXの除熱割合が大きくなるに従い一次系流量が低下しているため大きくなっている。これに対してBI断面までの温度上昇幅の平均およびBI断面に生じる集合体内最高上昇温度は、DHXの除熱量に従って上昇する傾向は見られない。また、DRACSを作動させた場合のBI断面の最高温度上昇幅の測定値と断面平均の計算値は、DRACSを作動させない場合の両者の温度差をオフセットとして差し引くと、測定値は計算値よりも11°C～13°C程度低くなっている。

中心集合体のCA断面においてFig. 5.8に示したようにインターラッパーフローによる直接的な除熱効果は顕著に現れなかつたが、Fig. 5.10に示すように明らかに断面平均温度や最高温度を抑制する効果を示している。その理由としては、インターラッパーフローが生じることによって、ラッパー管外から強く冷却される周辺集合体

の流量が低下し、中心集合体の通過流量を増やすような集合体間の流量再配分が生じ、最高温度の上昇を抑える効果として現れているためである。このように、DRACSを用いて除熱を行った場合、インターラッパーフローが直接的および間接的に炉心部を冷却し、最高温度を低減する効果があることが明らかになった。

6. 結 言

高速増殖炉の自然循環による崩壊熱除去運転時における各系統の相互作用をナトリウム定常試験により把握し、以下の知見を得た。

(1) DRACSおよびIHX 2次側を併用して除熱を行った場合、DRACSの除熱分担割合が高いほど上部プレナムの低温領域で負の自然循環ヘッドの作用が大きくなり、自然循環流量は低くなる。1次主冷却系の自然循環流量は崩壊熱をすべてIHX 2次側で除熱する場合と比較して、除熱分担割合がDRACSで60%、IHXで30%の場合には約6%、すべてをDRACSで除熱する場合は約8%低くなった。従ってDRACSを用いた体系における実機評価では、2次主冷却系の状態を考慮することが必須となる。

(2) PRACSを用いた自然循環除熱における安定定常時には、下降流路であるIHXの高い位置から低温となることにより正の自然循環ヘッドが大きく作用し、1次主冷却系の自然循環流量はIHX 2次側のみで除熱する場合に比べ約10%、DRACSのみで除熱する場合よりも約20%多くなつた。

(3) DRACS運転にともなうインターラッパーフローにより周辺集合体が中心集合体よりも冷却され、自然循環ヘッドの違いのため集合体流量は周辺集合体が低く、中心集合体が高くなり約10%の流量差が生じた。

(4) DRACSを用いた自然循環崩壊熱除去では、インターラッパーフローによる中心集合体に対する除熱効果は、発熱区間より上方の非発熱部で大きく現れた。また、発熱部においてインターラッパーフローにより直接冷却される効果は顕著でなかったが、集合体間に流量再配分が生じることにより、中心集合体の最高温度の上昇が抑制された。

(5) PRACSにより自然循環除熱した場合の安定定常時のIHX内部では、1次側入口近傍で入口側の高温流体とPRACSの冷却コイルの出入口配管で冷却された低温流体のミキシングにより、最大で約20℃幅の温度ゆらぎが生じたが、構造に影響を与えるほどの大きさではなかった。

謝 辞

本研究の実施にあたり、PLANDTL-DHX試験装置の運転および試験データの収録・整理に多大な努力を頂いた常陽産業（株）運転員の方々、およびCSK（株）安松智博氏に深く感謝致します。

参考文献

- 1) Y. Ieda, et.al., "Strategy of Experimental Studies in PNC on Natural Convection Decay Heat Removal", IWGFR Specialists' Meeting on "Evaluation of Decay Heat Removal by Natural Convection", O-arai,Japan (1993)
- 2) 家田芳明ほか, 高速炉における自然循環崩壊熱除去(I) -Na試験により解明すべき炉心部熱流動現象-, 日本原子力学会1993年春の年会D10, (1993)
- 3) 磯崎 正、上出英樹ほか, 高速炉における自然循環崩壊熱除去(II) - 自然循環移行時の炉心部過渡熱流動特性-, 日本原子力学会1993年春の年会D11, (1993)
- 4) 上出英樹、磯崎 正ほか, 同上(III) -上部プレナム内低温Naによる燃料集合体冷却効果-, 日本原子力学会1993年春の年会D12, (1993)
- 5) 戸田信一、家田芳明ほか, 同上(IV) -集合体内流量配分に及ぼす集合体間熱移行効果-, 日本原子力学会1993年春の年会D13, (1993)
- 6) 小林 順ほか, 同上(V) -炉心プレナム相互作用-, 日本原子力学会1993年秋の大会A41, (1994)
- 7) 林 謙二、上出英樹ほか, 同上(VI) -集合体間熱移行試験-, 日本原子力学会1994年春の年会H28, (1994)
- 8) 戸田信一、上出英樹ほか, 同上(VII) -炉心とプレナムの結合効果-, 日本原子力学会1994年春の年会H29, (1994)
- 9) 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 P23, April (1995)
- 10) 林 謙二、上出英樹ほか, 37本ピン束7集合体模擬炉心によるNa過渡試験(I) -集合体間熱移行が炉心ピーク温度に及ぼす影響-, 日本原子力学会1994年秋の大会 D35, (1994)
- 11) 上出英樹、林 謙二ほか, 同上(II) -フローネットワークコードによる過渡温度挙動の評価-, 日本原子力学会1994年秋の大会D36, (1994)
- 12) H. Kamide and Y. Ieda, "Core-Plenum Thermohydraulics under Decay Heat Removal by Natural Circulation - Sodium Experiments for Seven-Subassembly model -", proceedings of FRS'94, Obninsk,Russia (1994)
- 13) 上出英樹、林 謙二ほか, 高速炉の自然循環除熱時におけるインターラッパー フロー現象の評価 -PLANDTL-DHXを用いた7本集合体Na試験-, 日本原子力学会1995年秋 の大会E55, (1995)
- 14) H. Kamide, Y. Ieda, et.al., "Multi-bundle Sodium Experiments for Thermohydraulics in Core Subassemblies during Natural Circulation Decay Heat Removal Operation", Proceedings of IWGFR Specialists' Meeting, O-arai,Japan (1993)
- 15) 桃井一光、林 謙二ほか, インターラッパー フロー現象に関するナトリウム過渡試験, 日本原子力学会1996年春の大会C20, (1996)

Table 2.1 Physical Quantity Measurement Error

Physical Quantity	Error Factor
Temperature	Thermo-couple Error (Catalog Value) 0.4 % Zero Compensator Error (Catalog Value) 0.1 % Amplifier Error (Catalog Value) 0.05% Calibration Error (Relative Error of Standard Thermocouple) 0.3 %
Flow Rate	Signal Transducer Error (Catalog Value) 0.1 % Amplifier Error (Catalog Value) 0.05% Calibration Error (Large Range:50~300 l/min) 2.0 % " (Small Range: 5~35 l/min) 4.7 %
Heater Pin Power	Voltage Transducer Error (Catalog Value) 0.1 % Amperage Transducer Error (Catalog Value) 0.1 % Wattage Transducer Error (Catalog Value) 0.1 % Amplifier Error (Catalog Value) 0.05 % Total Error 0.18 %

Table 3.1 Conditions of the Natural Circulation Steady State Experiments

Run No. (Data No.)	Heater Pin Power (kW)				Flow Rate (l/min)	Core Inlet Temp. (°C)	Conditions of Cooling Systems					
	Total	Center	Outer1	Outer2			DRACS		PRACS		Secondary Loop	
							OFF ¹⁾	ON ²⁾	OFF	ON	OFF	Natural Circulation ³⁾
REF (24072)	170.5	24.4	73.5	72.6	48.8	295.8	○	—	○	—	—	○ (61.4 l/min)
DN (24076)	170.3	24.4	73.4	72.5	45.3	301.1	—	Na: 89.9 l/min Air: 11.5m/s	○	—	○	—
DHT (24086)	143.0	24.4	59.7	58.9	42.7	298.2	—	Na: 90.3 l/min Air: 8.4m/s	○	—	○	—
DI (24083)	170.1	24.4	73.3	72.4	45.9	294.9	—	Na: 90.3 l/min Air: 2.6 m/s	○	—	—	○ (44.3 l/min)
PN (24074)	170.3	24.5	73.3	72.5	54.3	298.7	○	—	—	Na: 89.7 l/min Air: 5.4m/s	○	—
PHT (24088)	143.0	24.4	59.8	58.8	52.7	297.9	○	—	—	Na: 90.2 l/min Air: — m/s ⁴⁾	○	—

1) OFF ; DRACS loop valve :full close, A/C damper valve :full close

2) ON ; Forced Convection

3) N.C. ; Secondary loop valve : full open, A/C damper valve : full open, Natural-ventilation

4) Air Velocity Meter was Failure

Table 4.1 Flow Conditions in Subassemblies

Run No. (Data No.)	Primary Loop Total	Center S/A	Outer S/A 1	Outer S/A 2
	Flow Rate(l/min)			
	Flow Ratio(%)			
REF (24072)	48.6	7.0	20.8	20.8
	1.70	1.72	1.70	1.70
DN (24076)	45.2	7.1	19.0	19.1
	1.58	1.73	1.55	1.56
DHT (24086)	42.7	6.4	18.0	18.3
	1.49	1.57	1.47	1.49
DI (24083)	46.1	6.9	19.4	19.7
	1.61	1.69	1.59	1.61
PN (24074)	54.3	7.9	23.2	23.2
	1.90	1.94	1.89	1.89
PHT (24088)	52.6	7.4	22.6	22.7
	1.84	1.80	1.85	1.85

Table 5.1 Buoyancy Head of Around Primary Loop

	Run No.			
	REF	DN	DI	PN
Buoyancy Head(Pa)	622	553	573	690

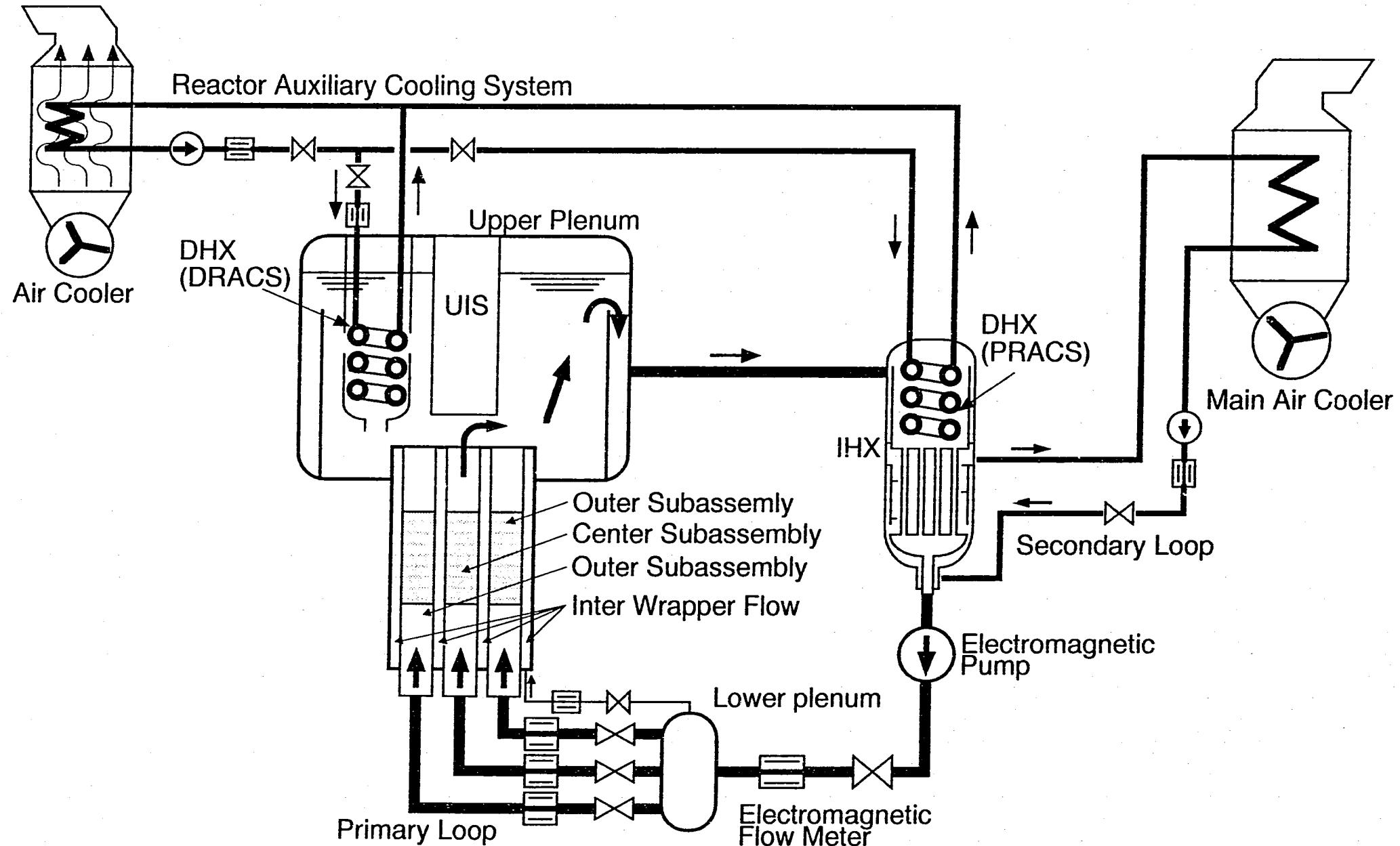


Fig. 2.1 Flow Diagram of PLANDTL-DHX

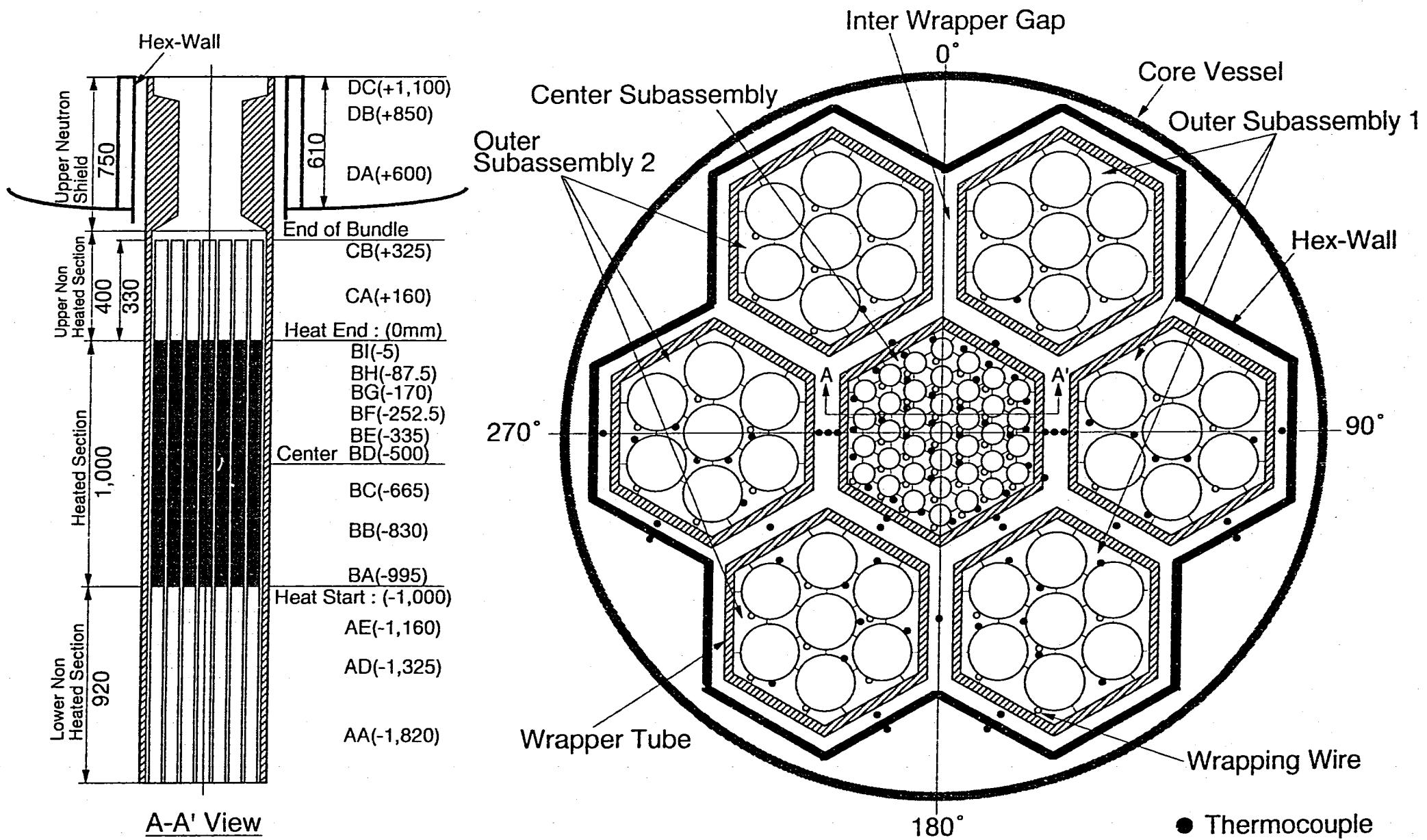


Fig. 2.2 Sectional View of Test Section

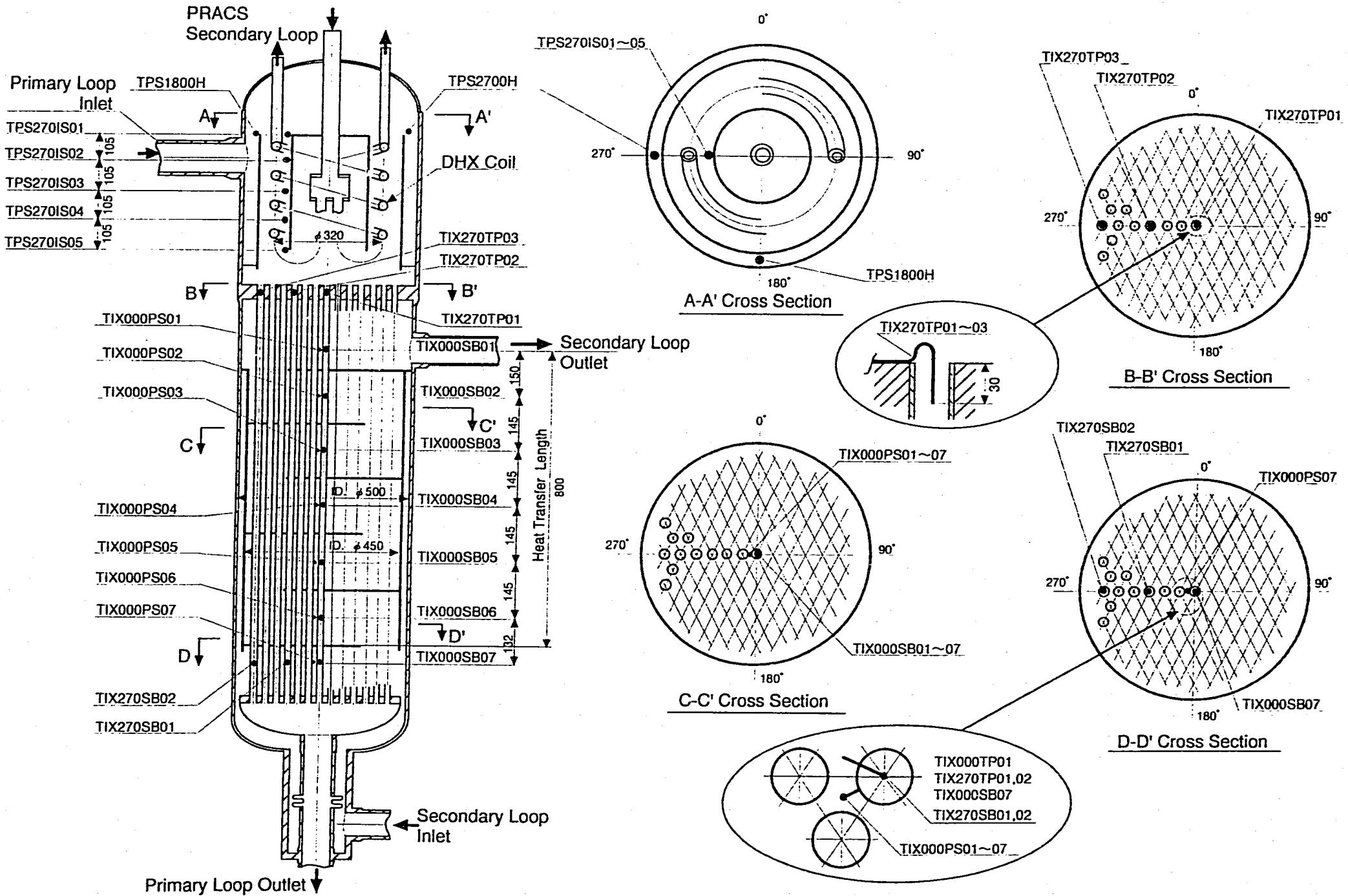


Fig. 2.3 Thermocouple Location in IHX

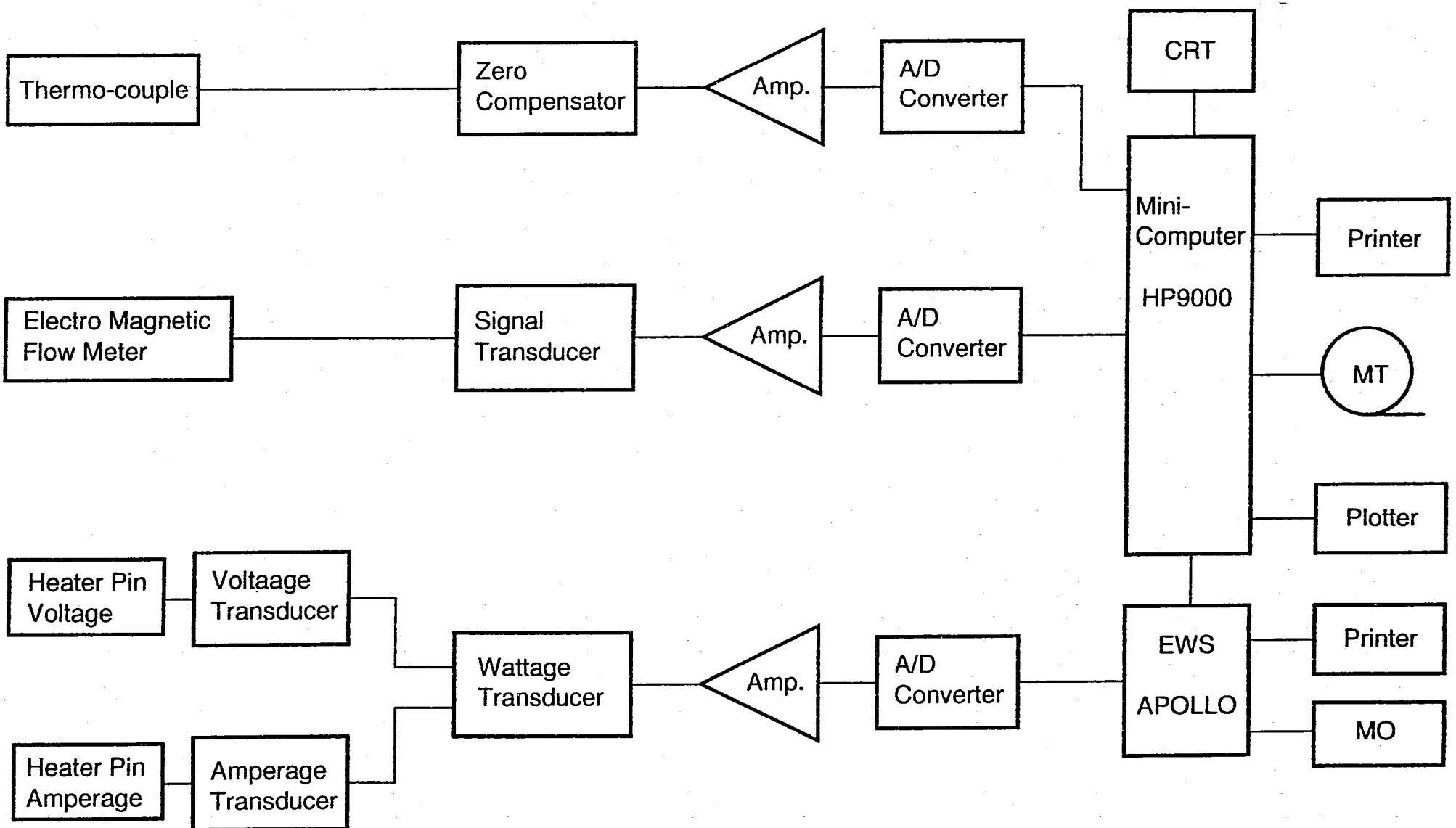


Fig. 2.4 Schematic of Data Logging System

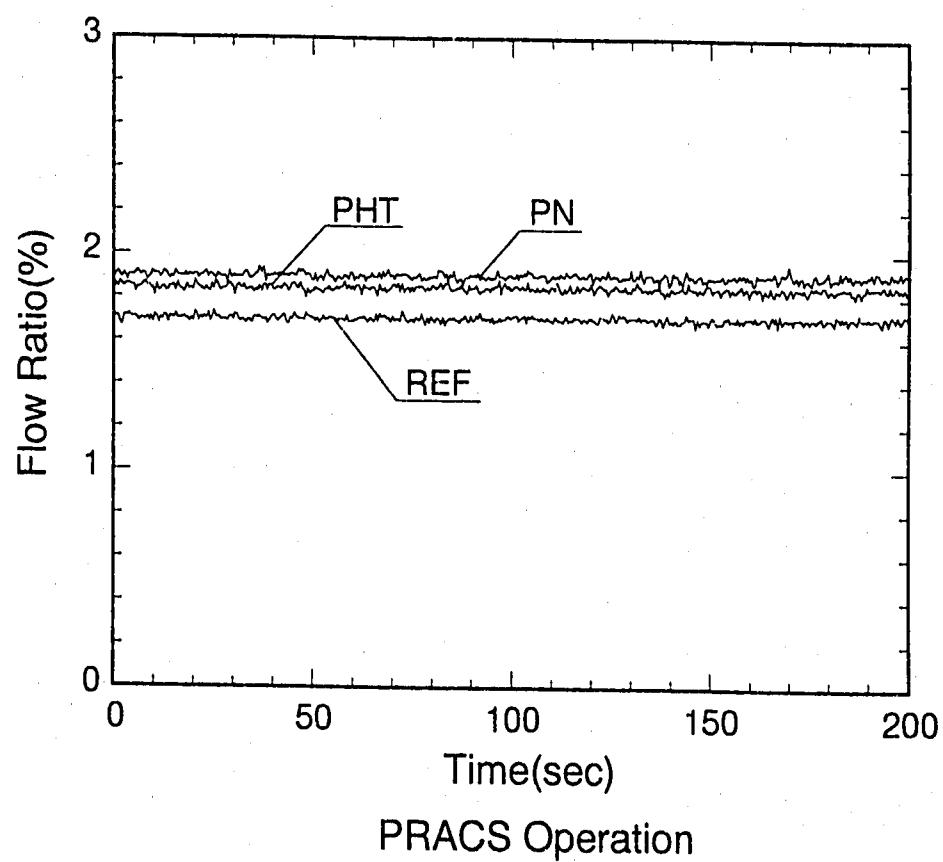
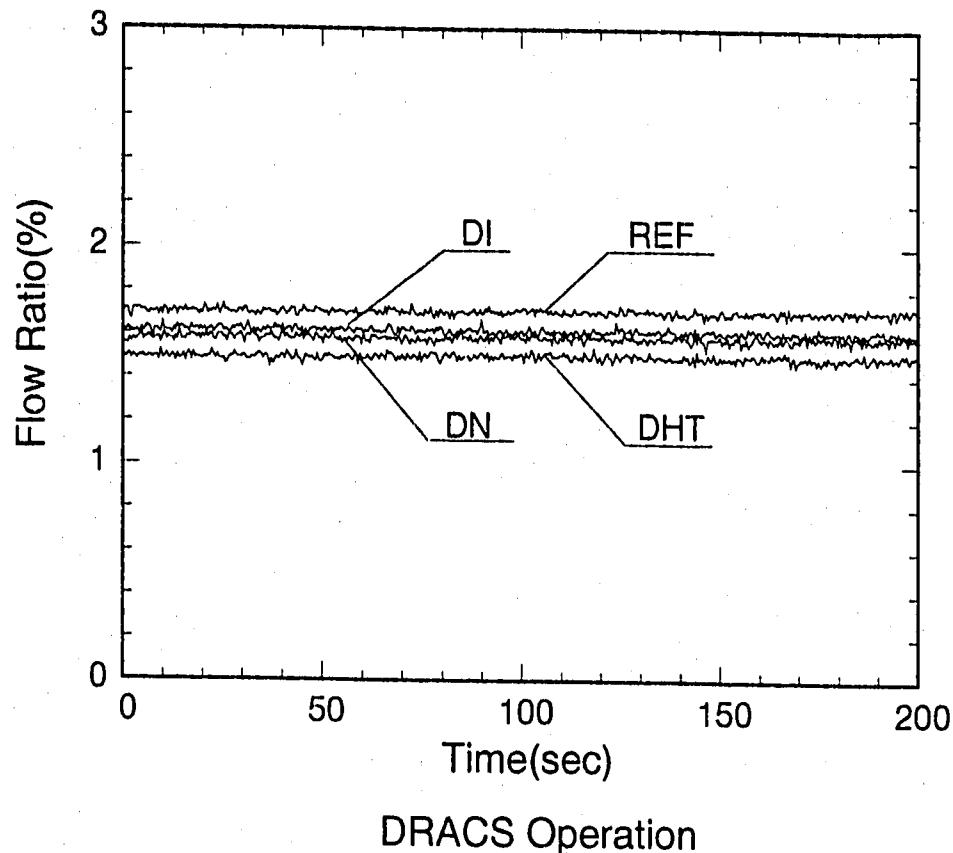


Fig. 4.1 Flow Conditions of Primary Loop

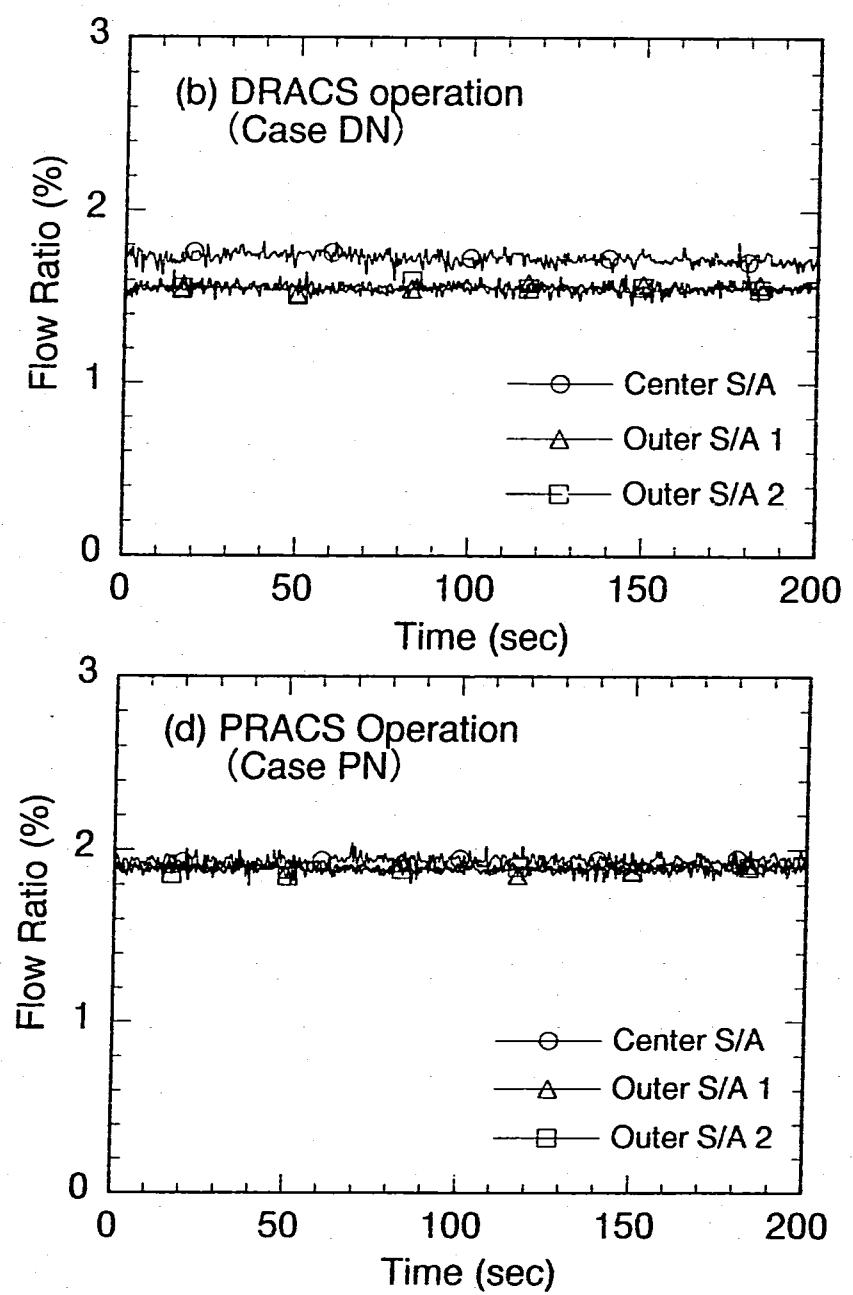
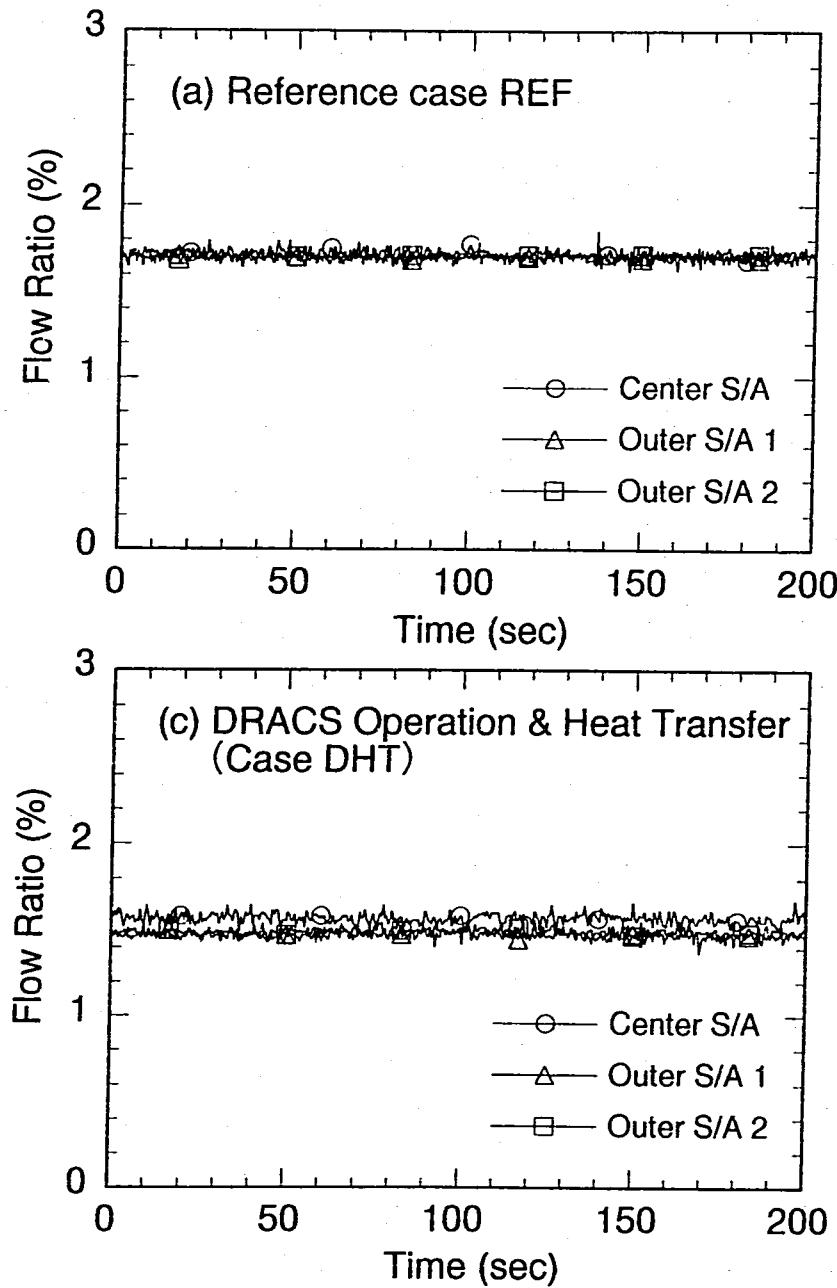


Fig. 4.2 Flow Conditions of Subassemblies in Steady State

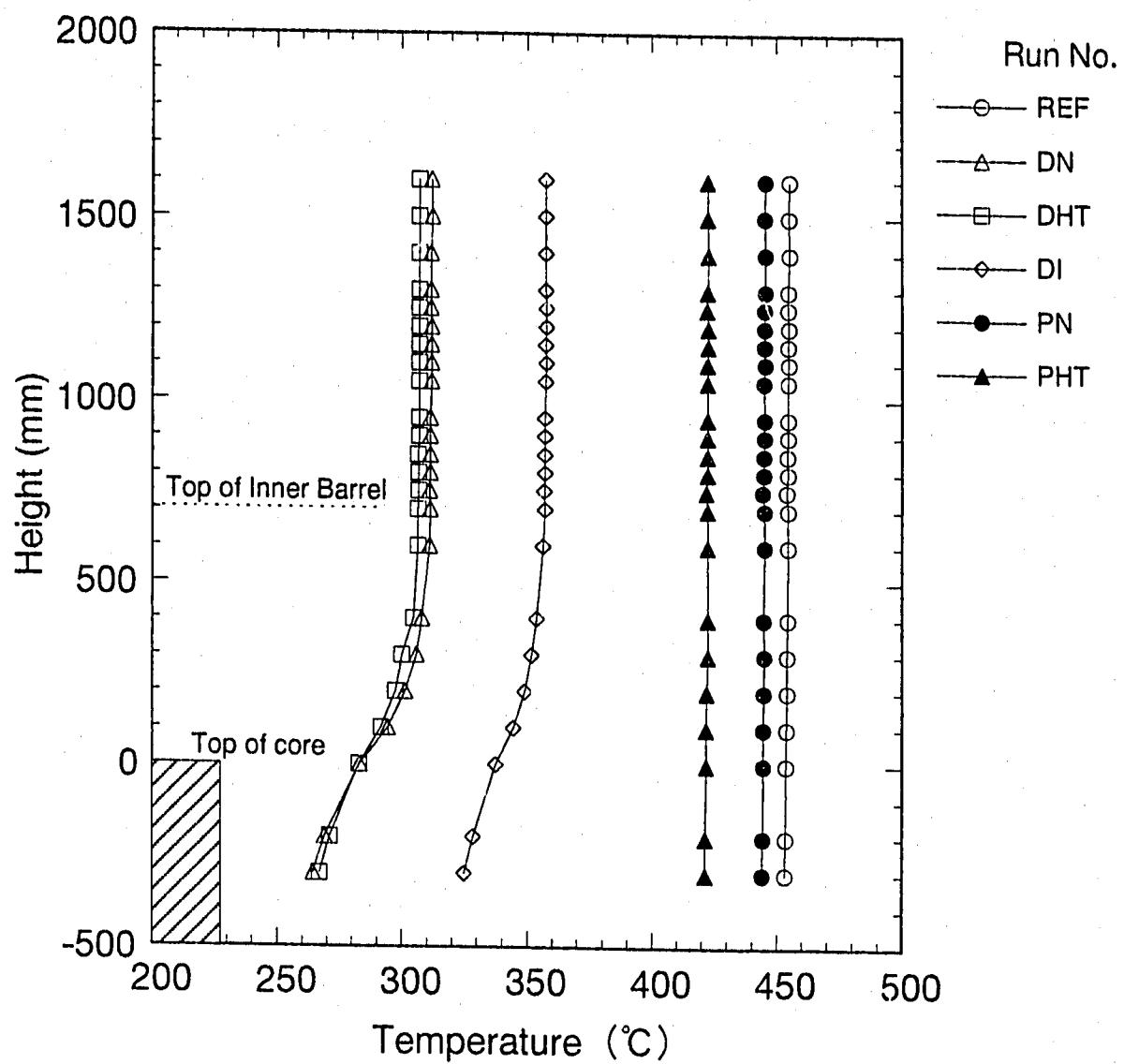


Fig. 4.3 Vertical Temperature Distributions in Upper Plenum

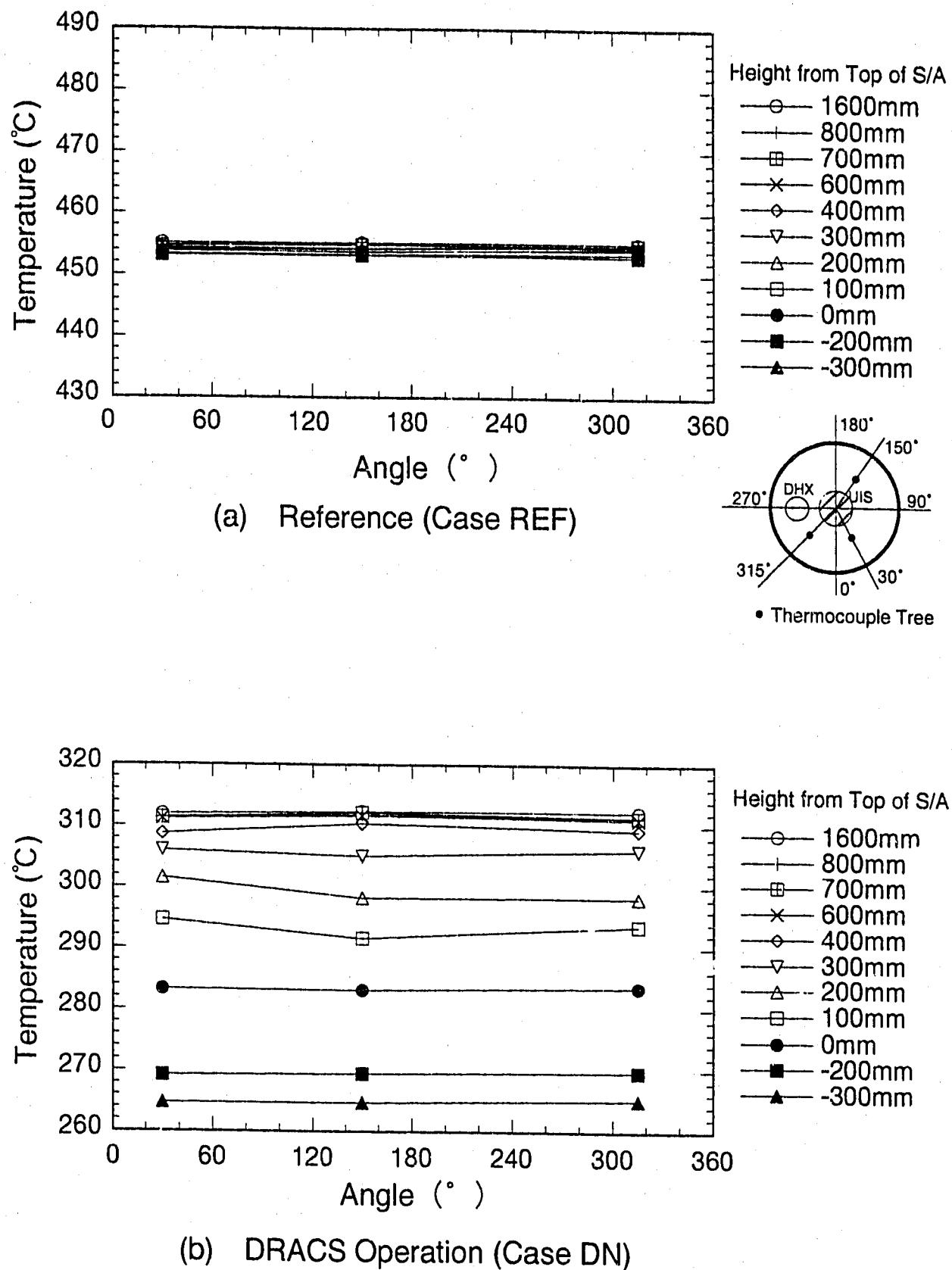
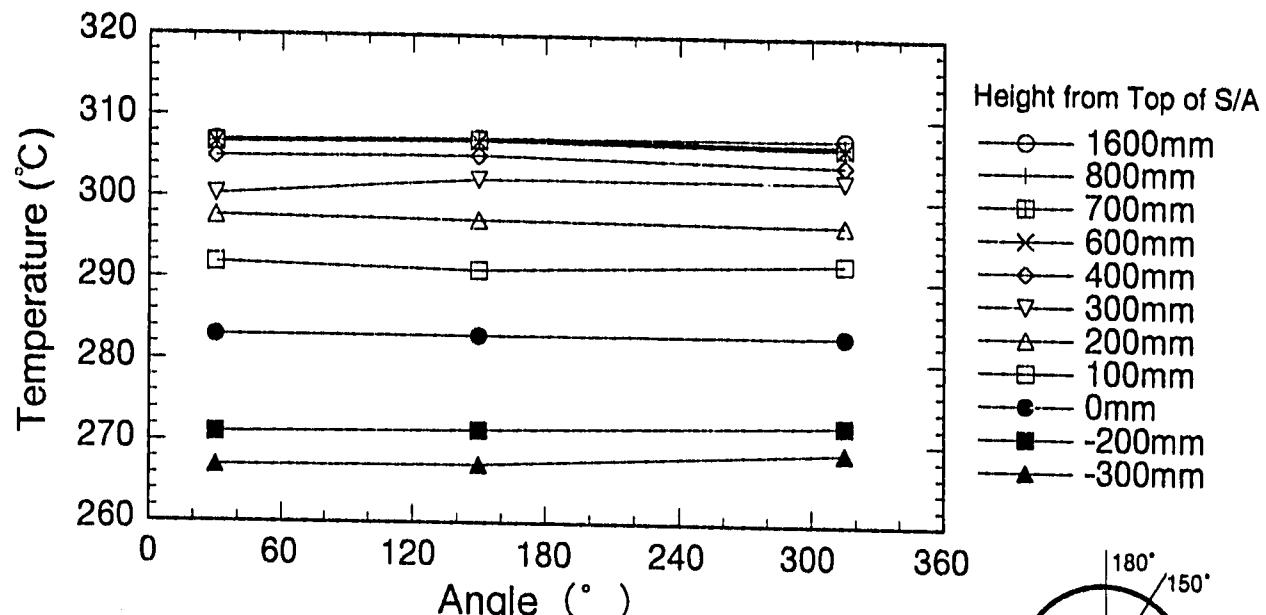
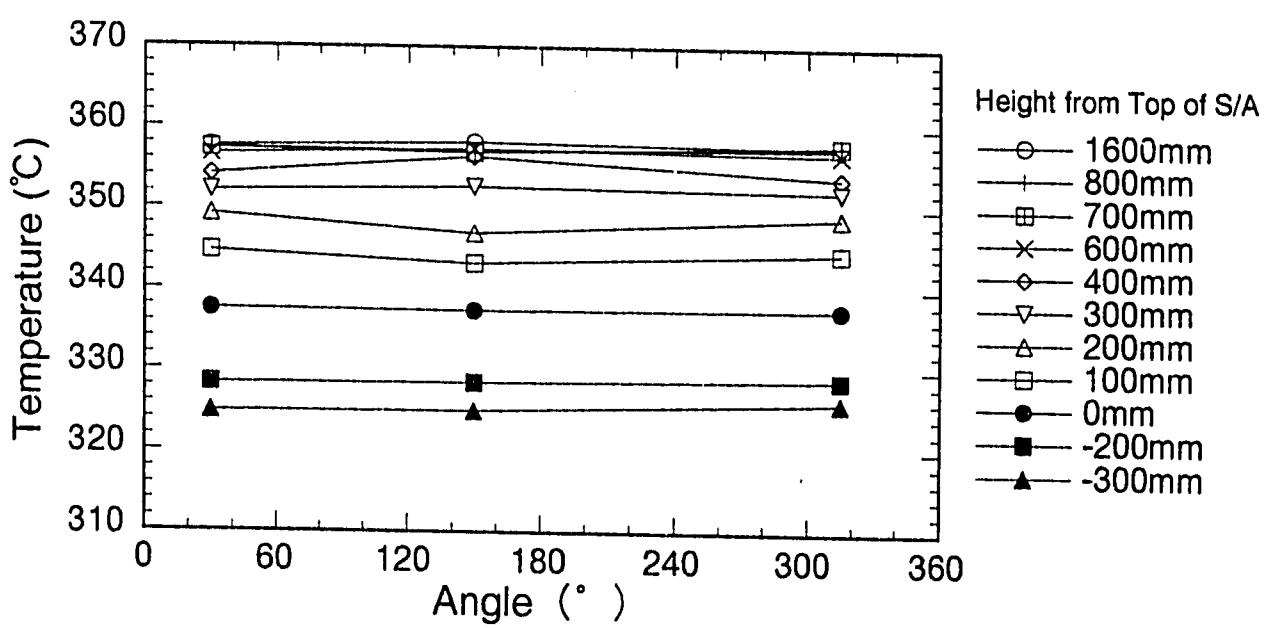
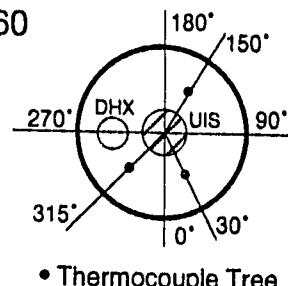


Fig. 4.4 Azimuthal Temperature Distributions in Upper Plenum
(Case REF & DN)



(c) DRACS Operation (Case DHT)



(d) DRACS & IHX Operation (Case DI)

Fig. 4.5 Azimuthal Temperature Distributions in Upper Plenum (Case DHT & DI)

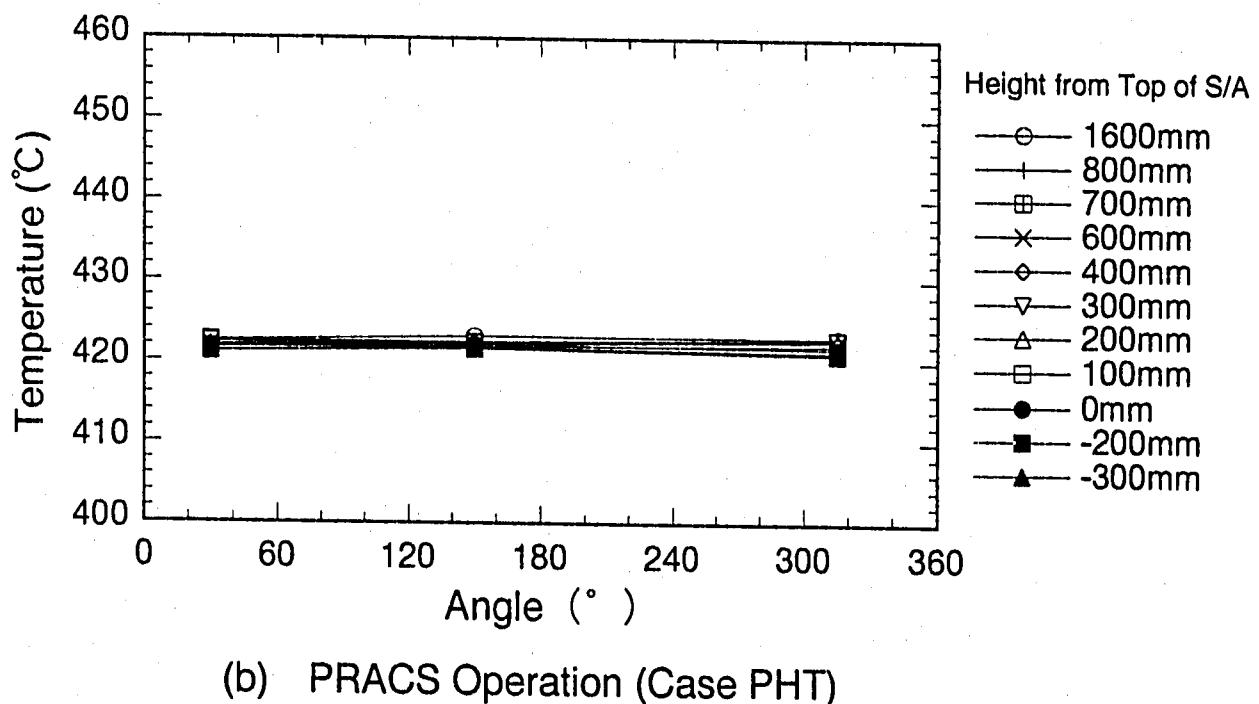
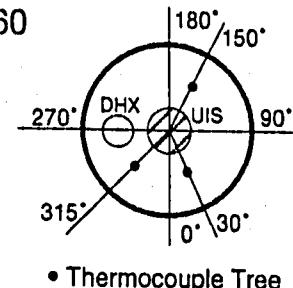
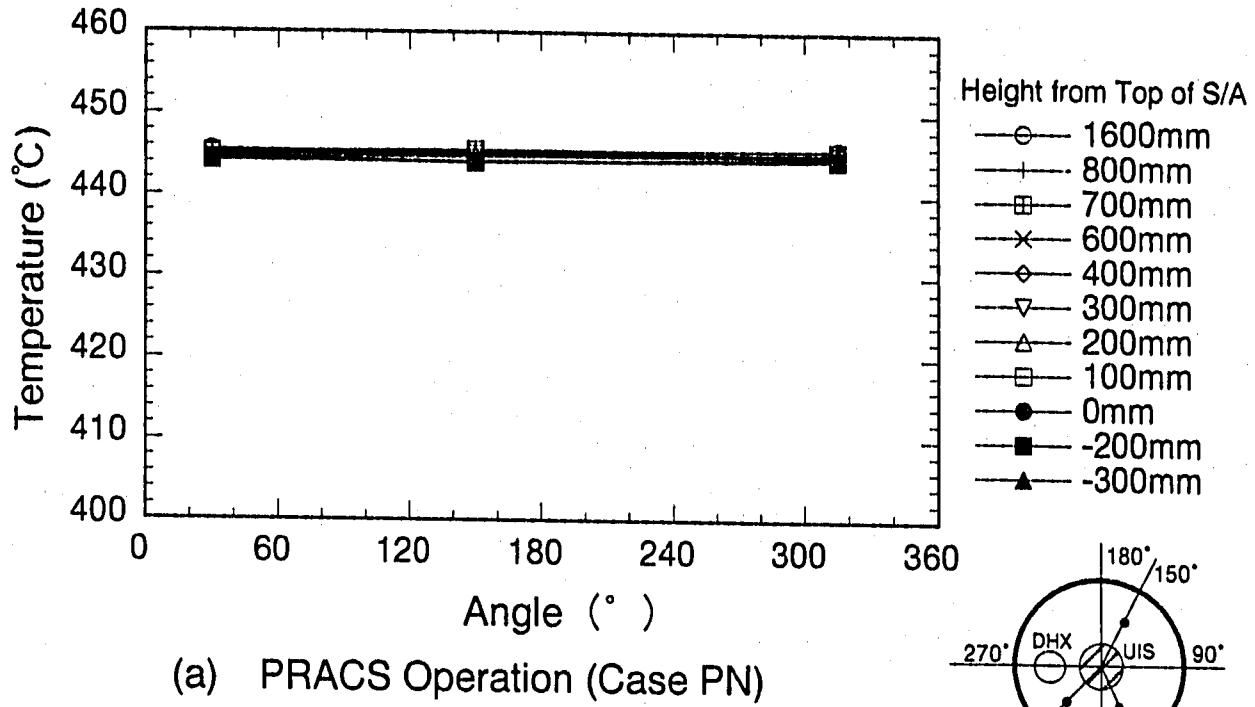


Fig. 4.6 Azimuthal Temperature Distributions in Upper Plenum
(Case PN & PHT)

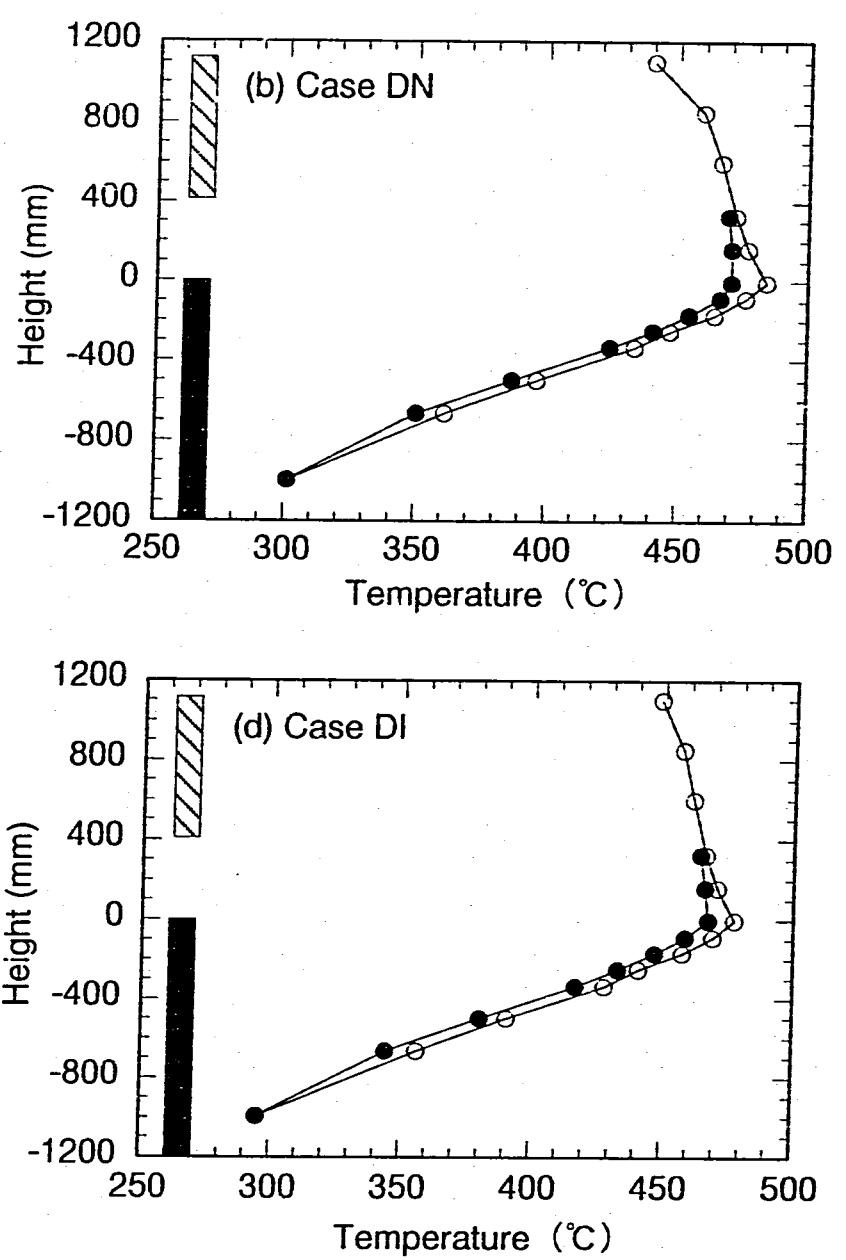
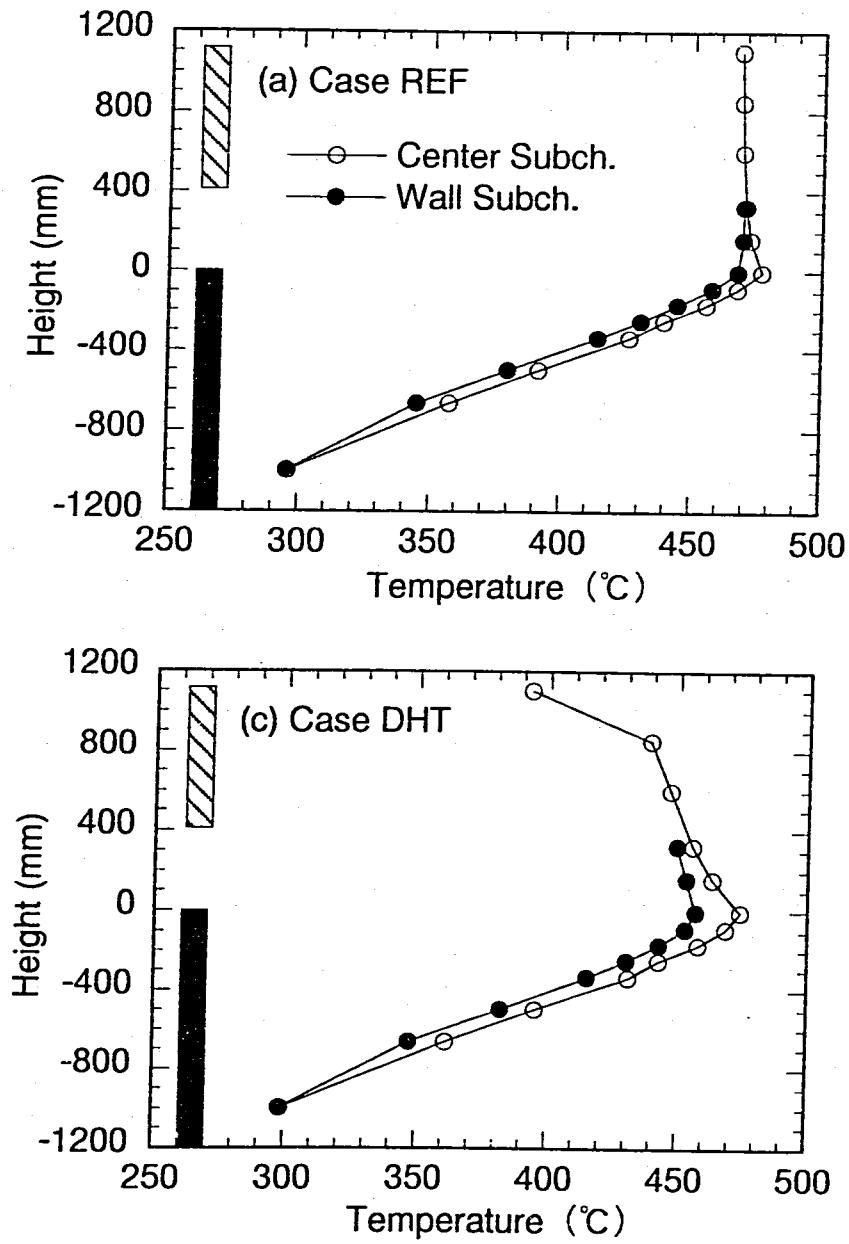


Fig. 4.7 Axial Temperature Distributions along Center & Wall Subchannel in Center Subassembly (DRACS Operation)

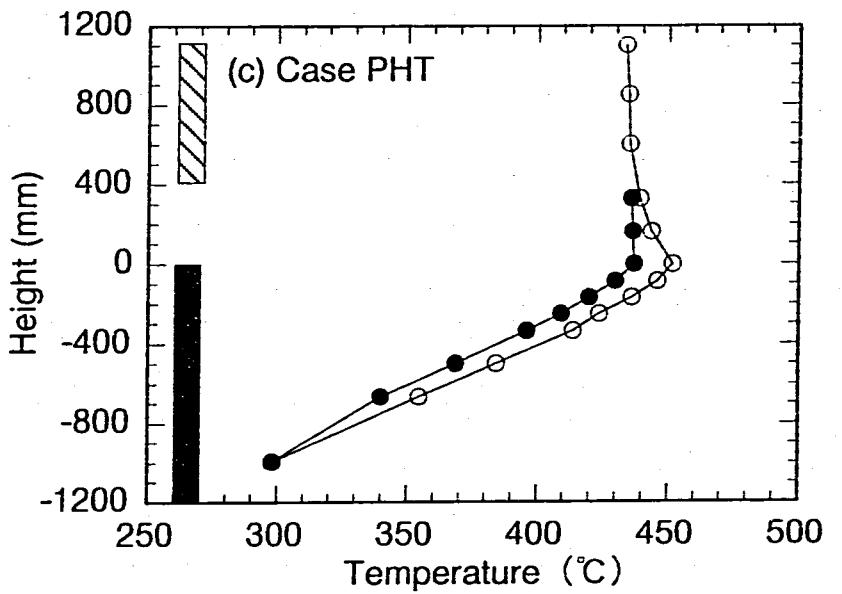
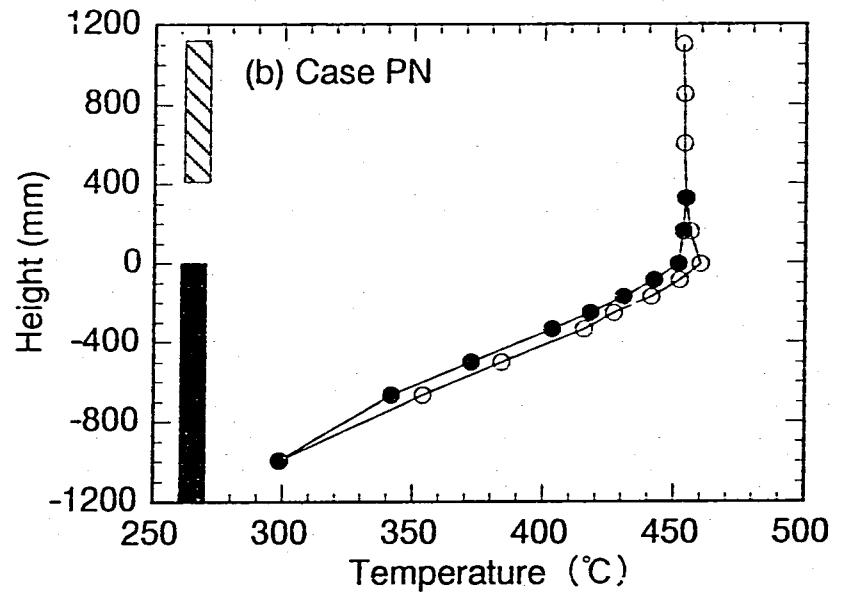
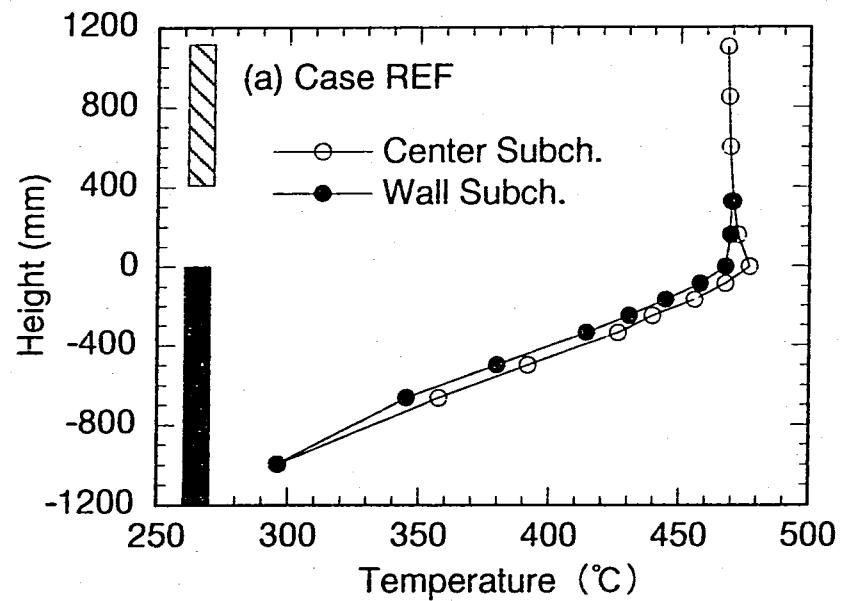
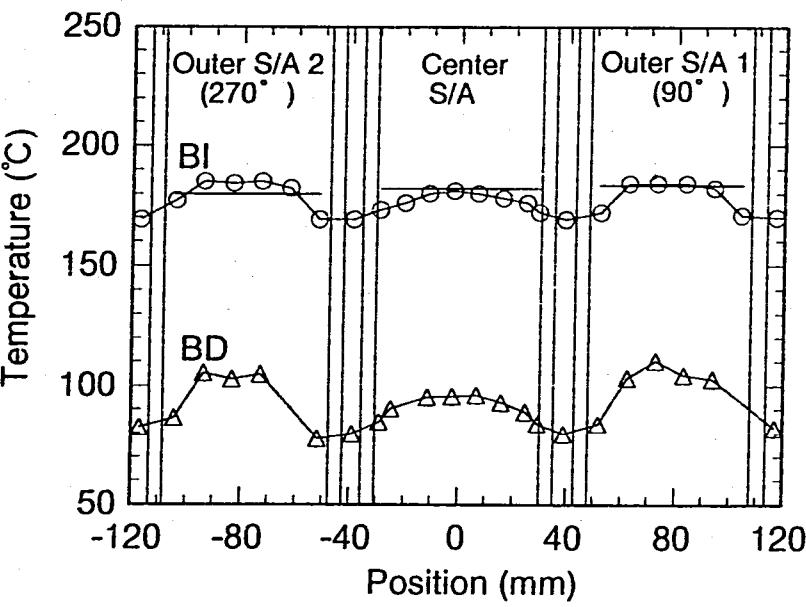
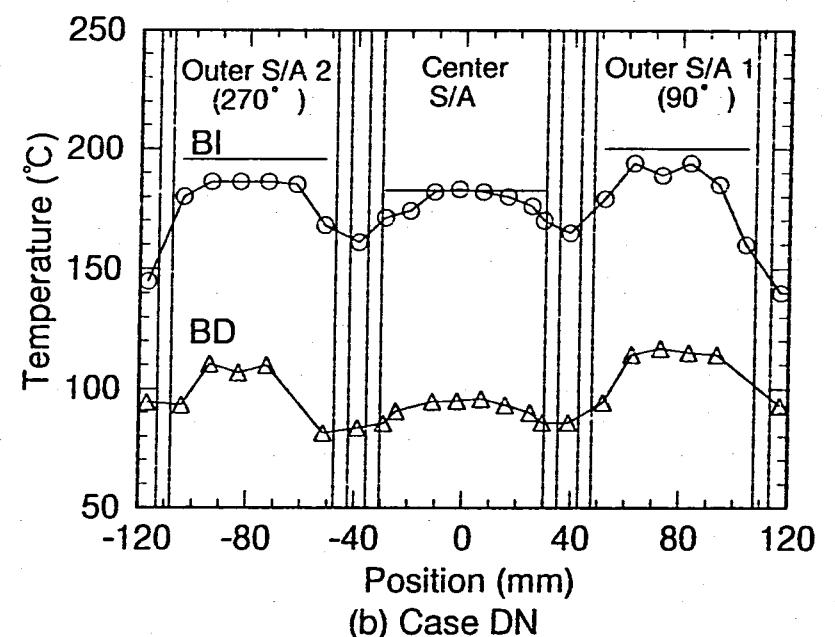


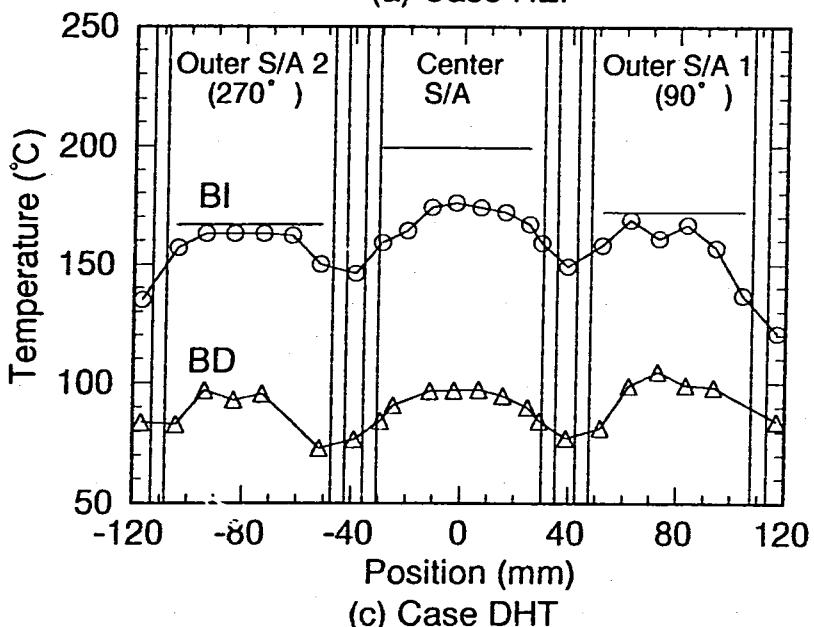
Fig. 4.8 Axial Temperature Distributions along Center & Wall Subchannel in Center Subassembly (PRACS Operation)



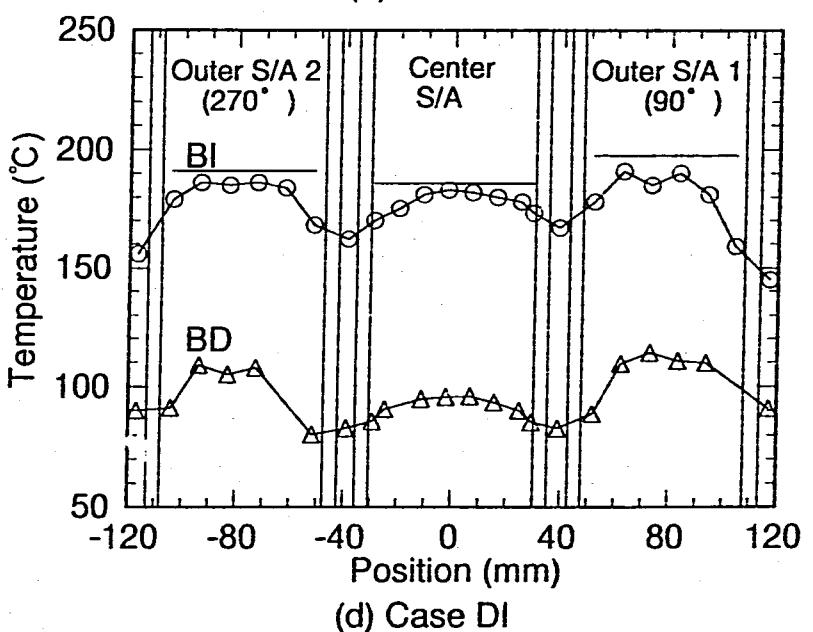
(a) Case REF



(b) Case DN

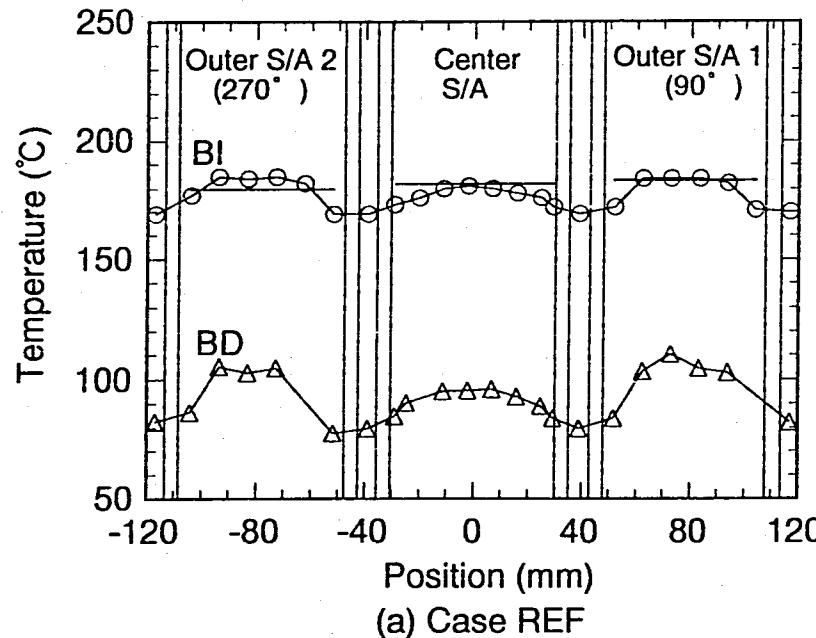


(c) Case DHT

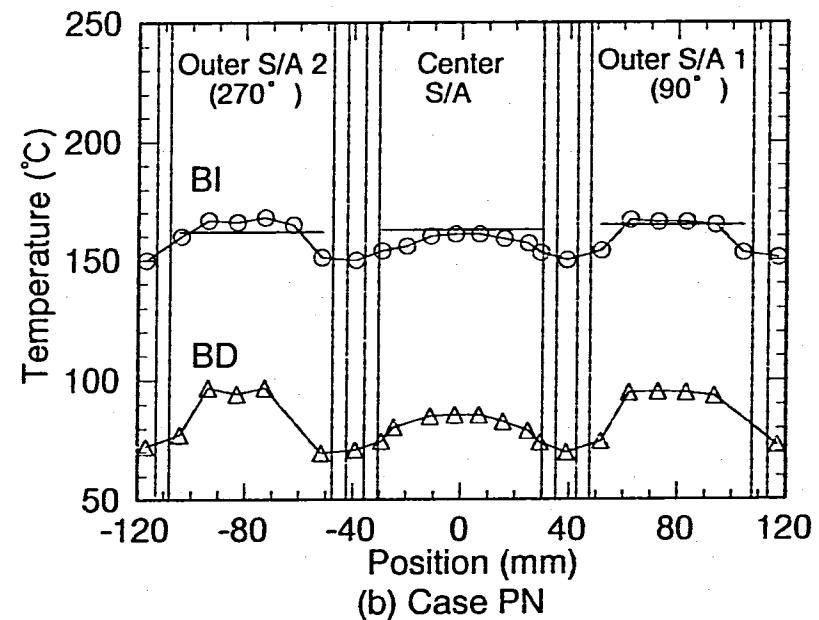


(d) Case DI

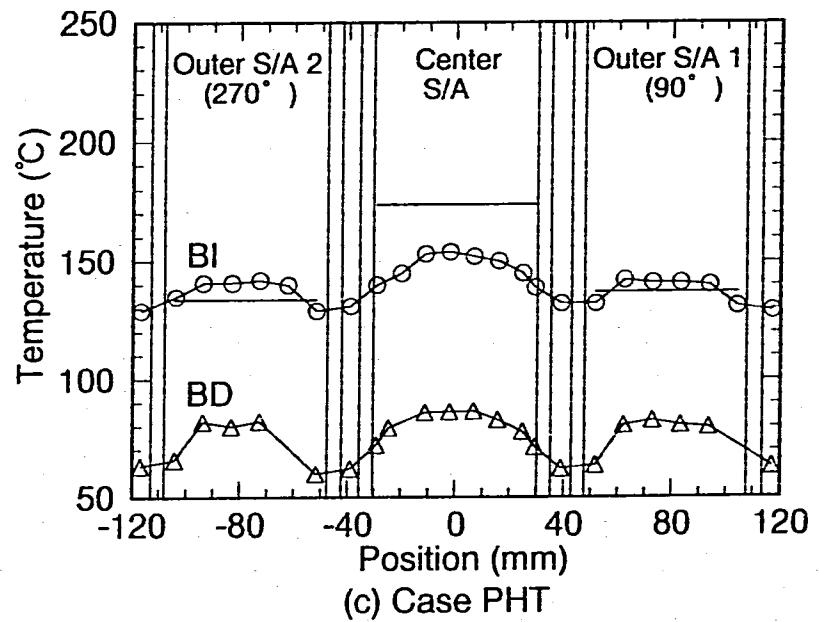
Fig. 4-9 Transverse Temperature Distributions in BI and BD Cross Section (DRACS Operation)



(a) Case REF



(b) Case PN



(c) Case PHT

Fig. 4-10 Transverse Temperature Distributions in BI and BD Cross Section
(PRACS Operation)

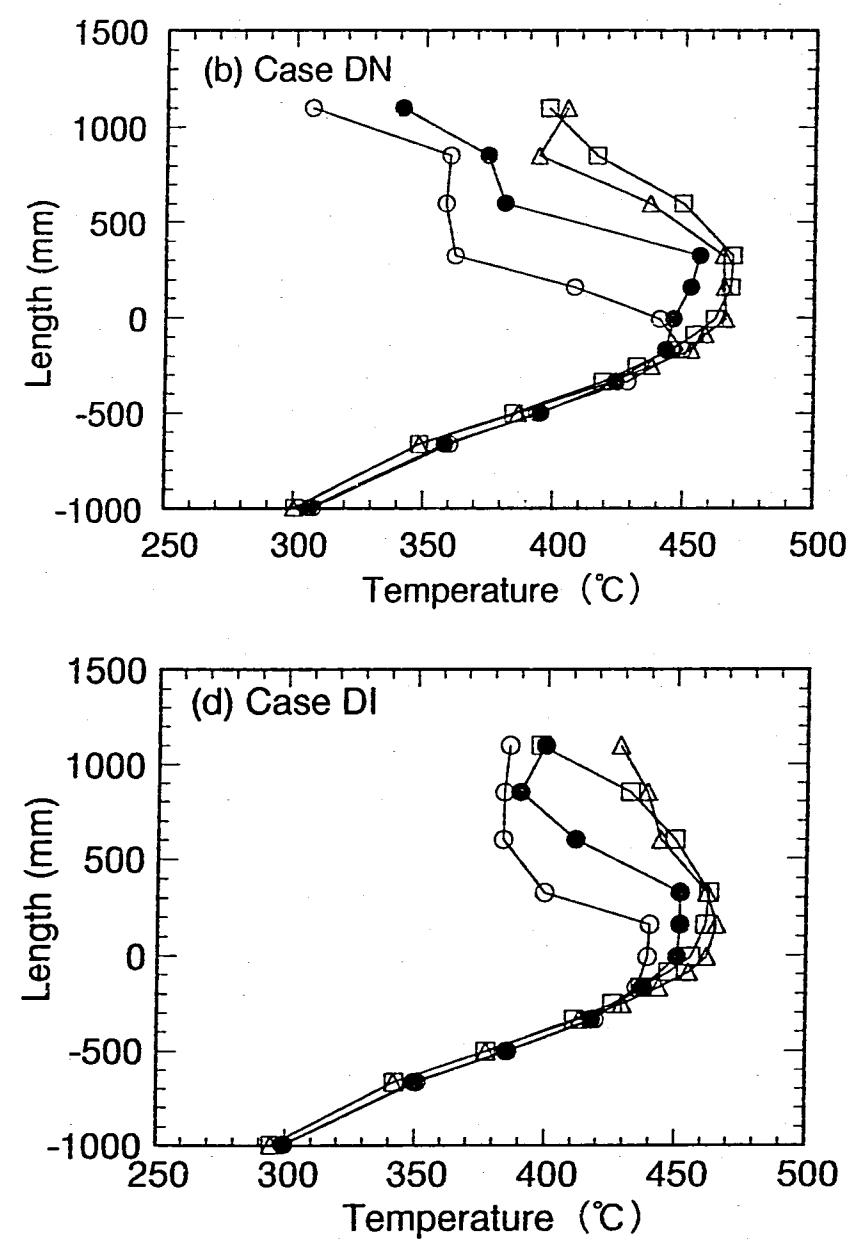
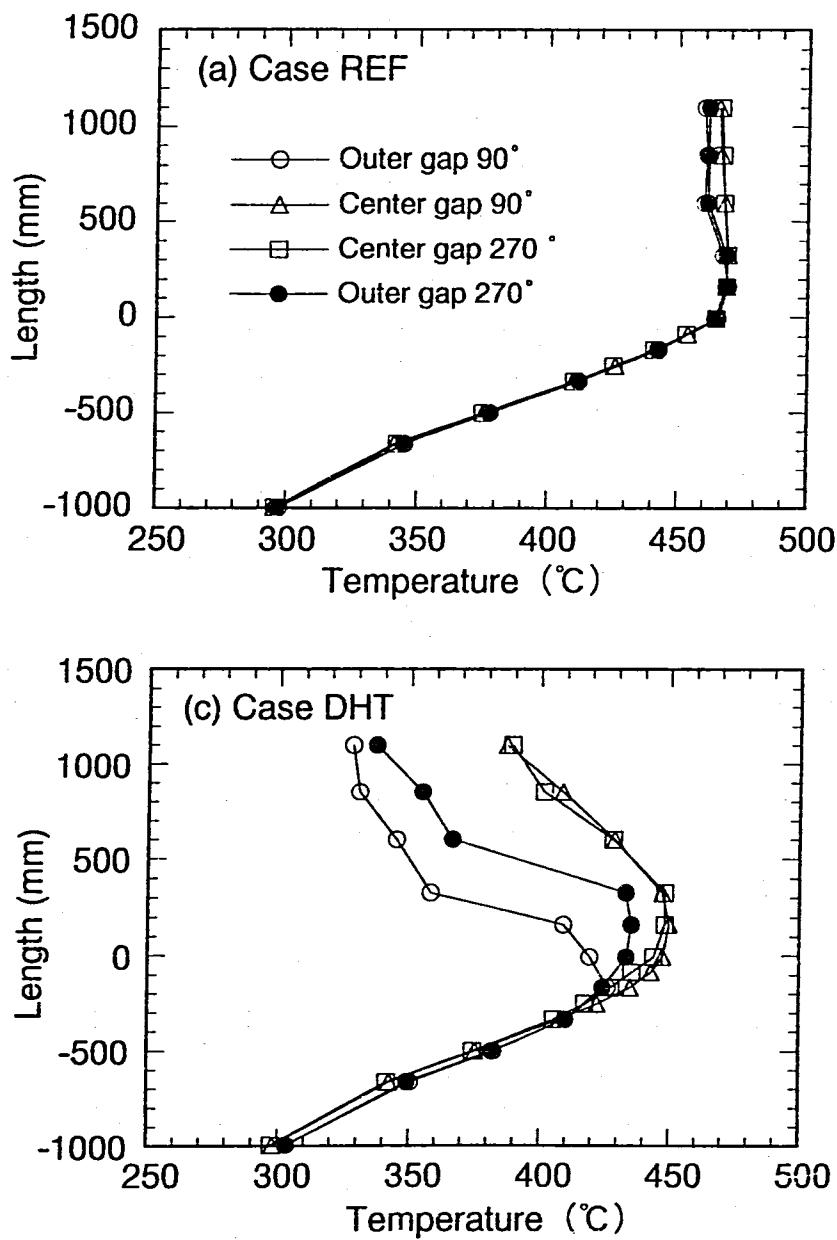


Fig. 4.11 Axial Temperature Distributions along Inter-wrapper Gap
(DRACS Operation)

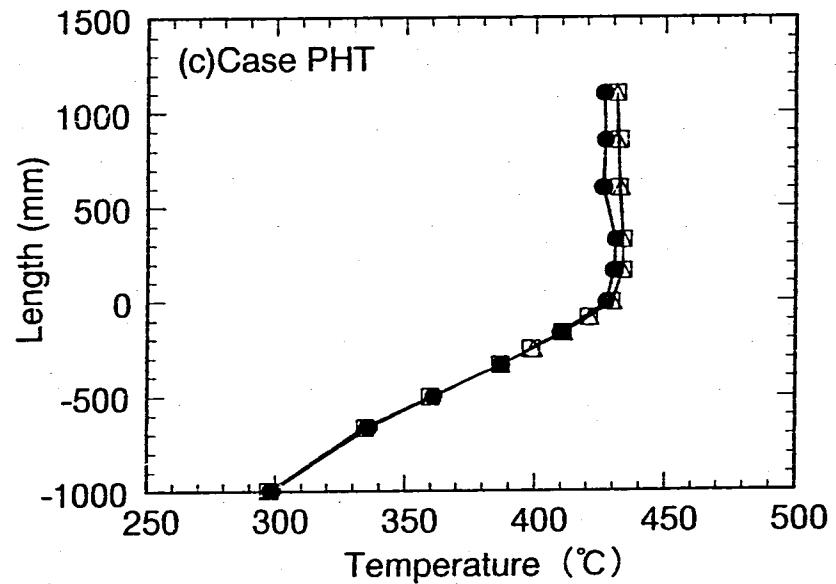
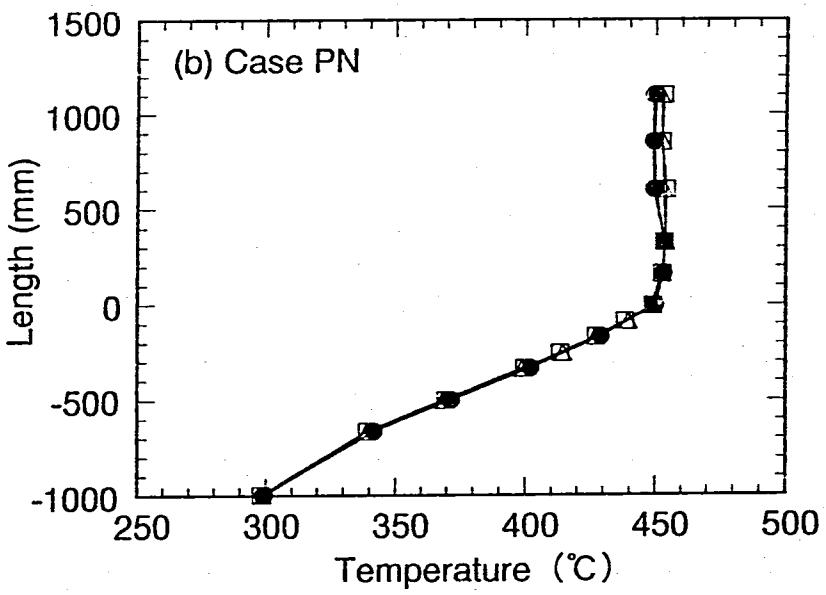
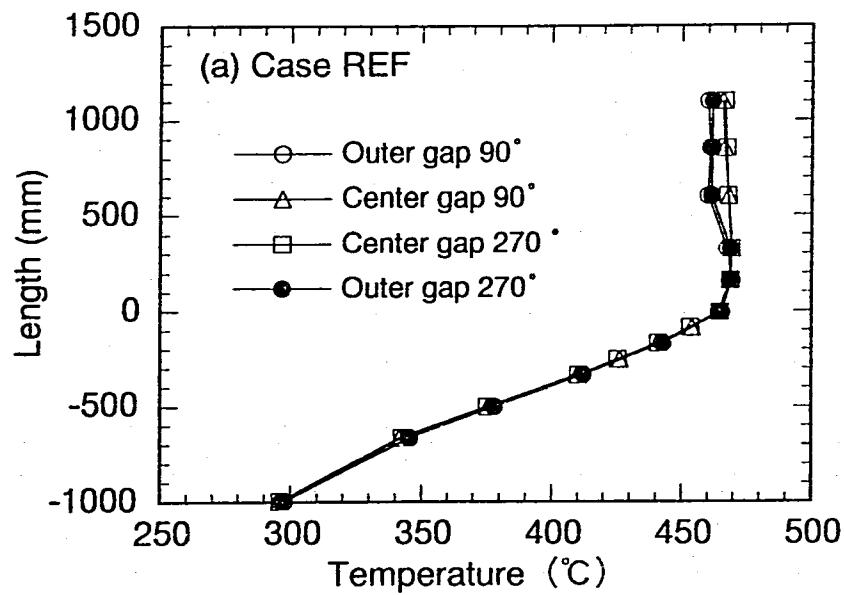


Fig. 4.12 Axial Temperature Distributions along Inter-wrapper Gap
(PRACS Operation)

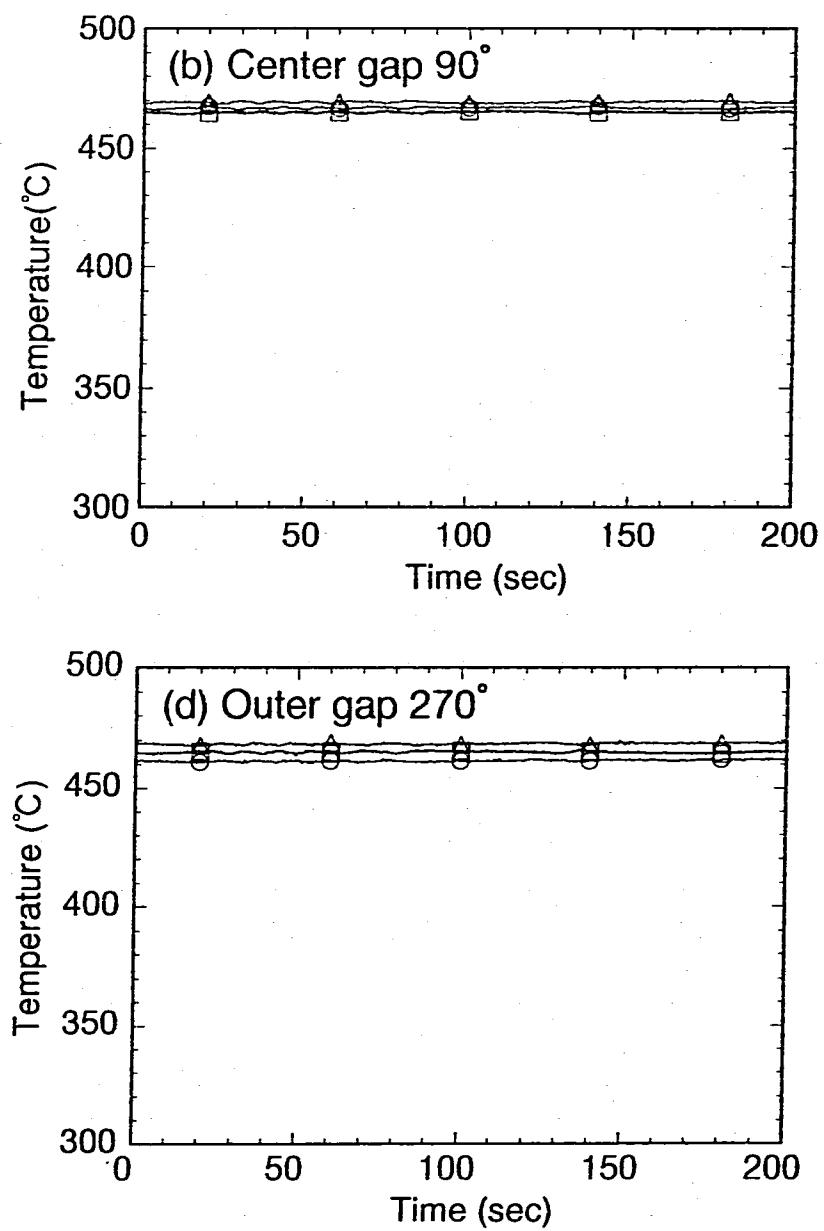
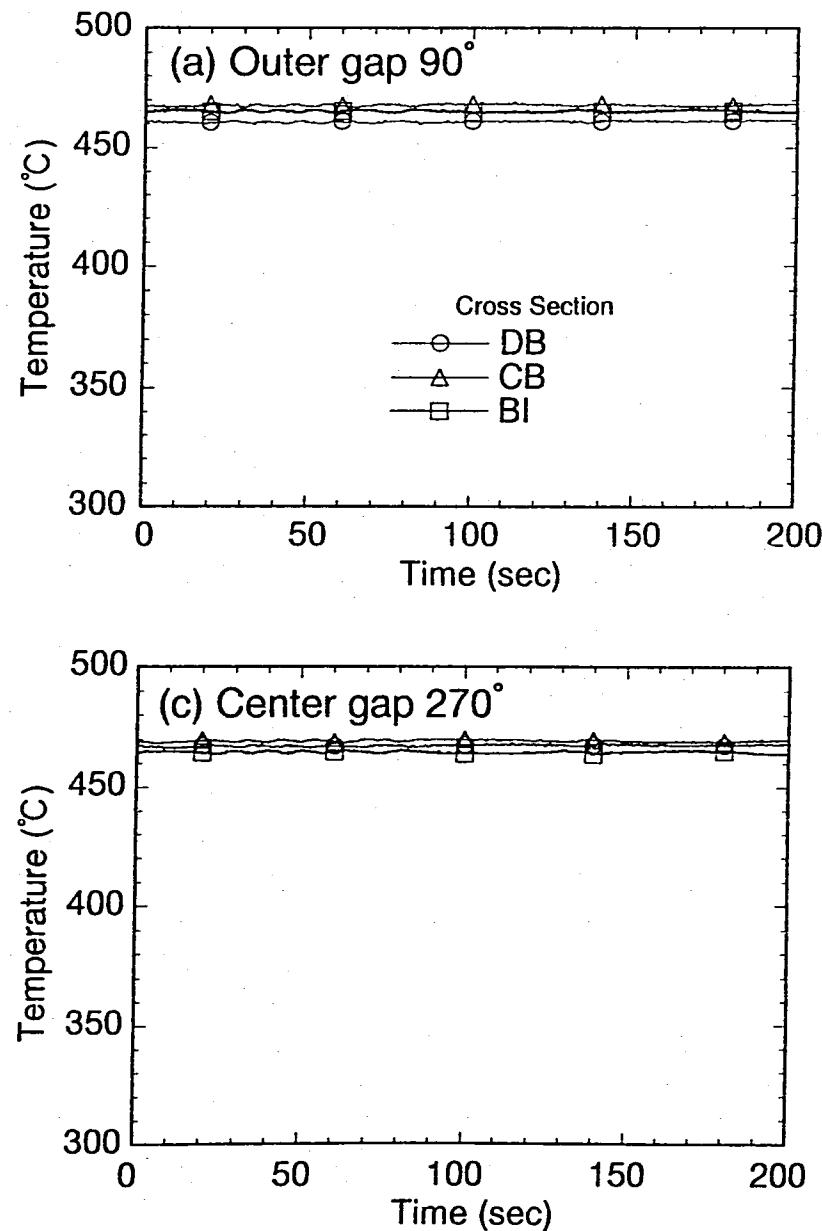


Fig. 4.13 Temperature Fluctuations in S/A Gap
(Case REF)

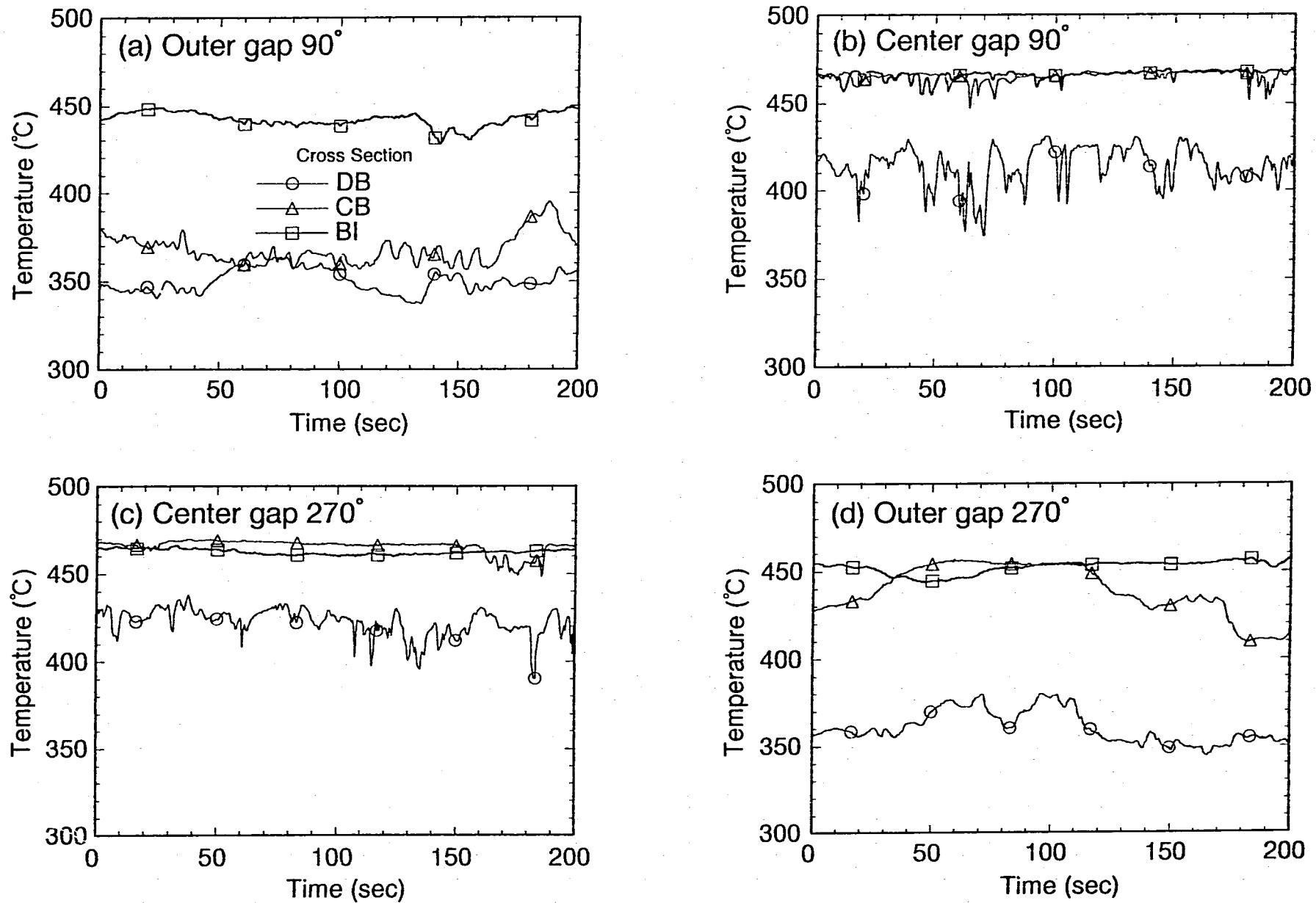


Fig. 4.14 Temperature Fluctuations in S/A Gap
(Case DN)

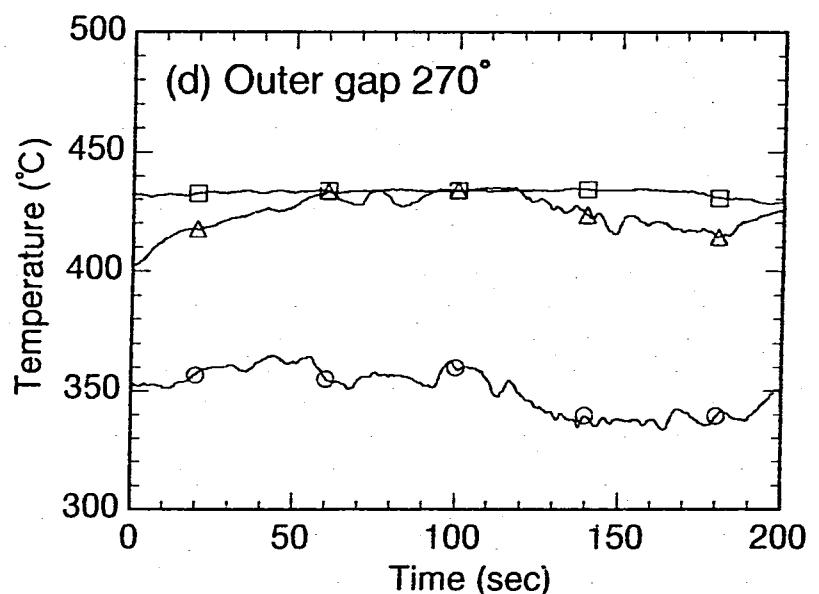
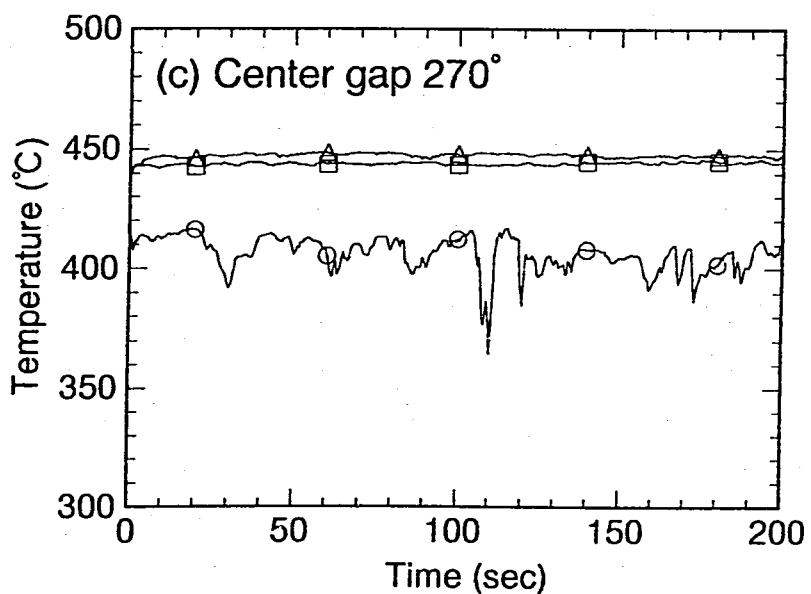
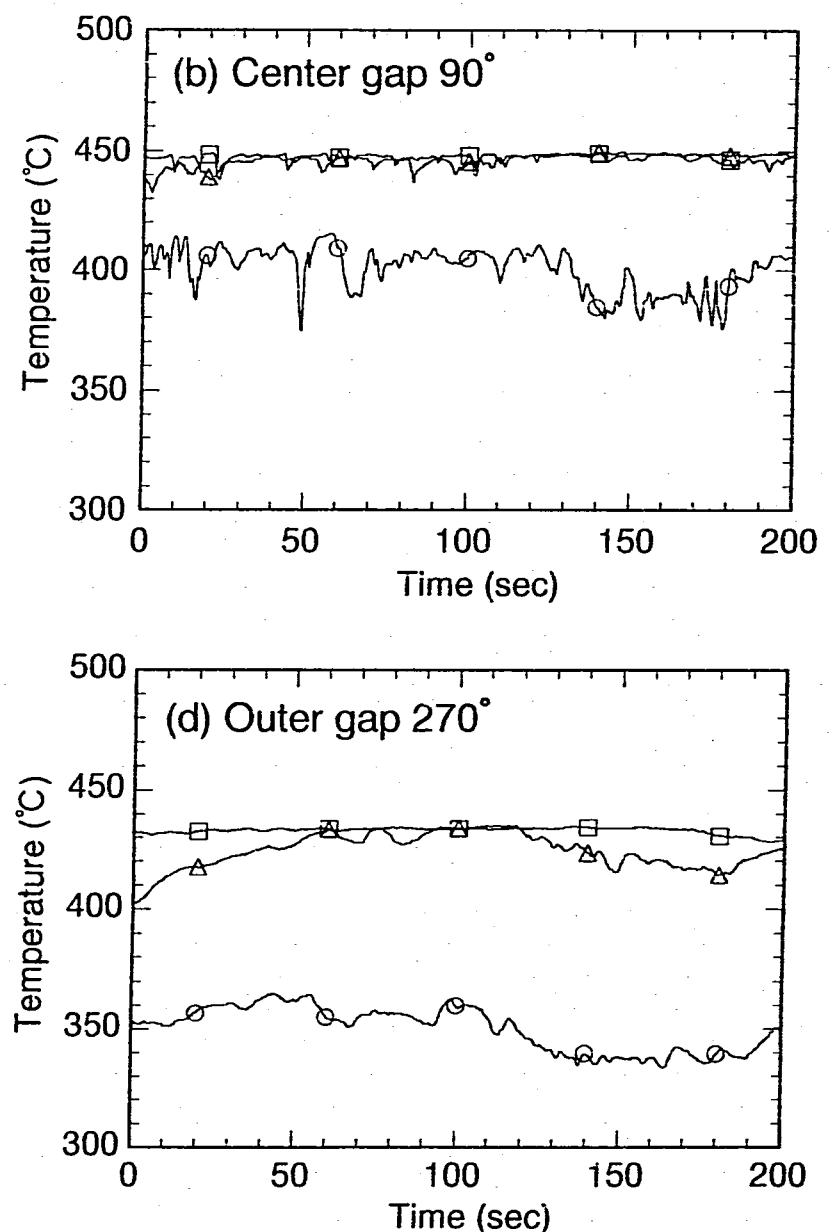
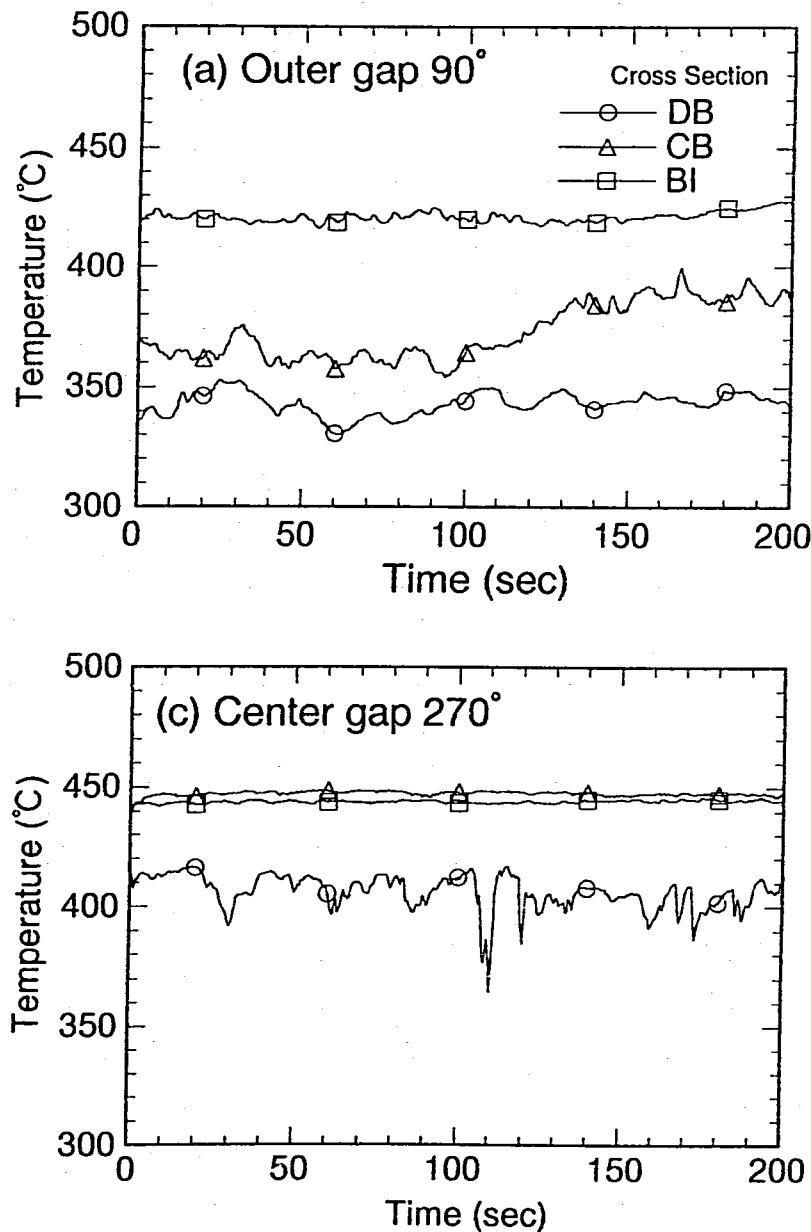


Fig. 4.15 Temperature Fluctuations in S/A Gap
(Case DHT)

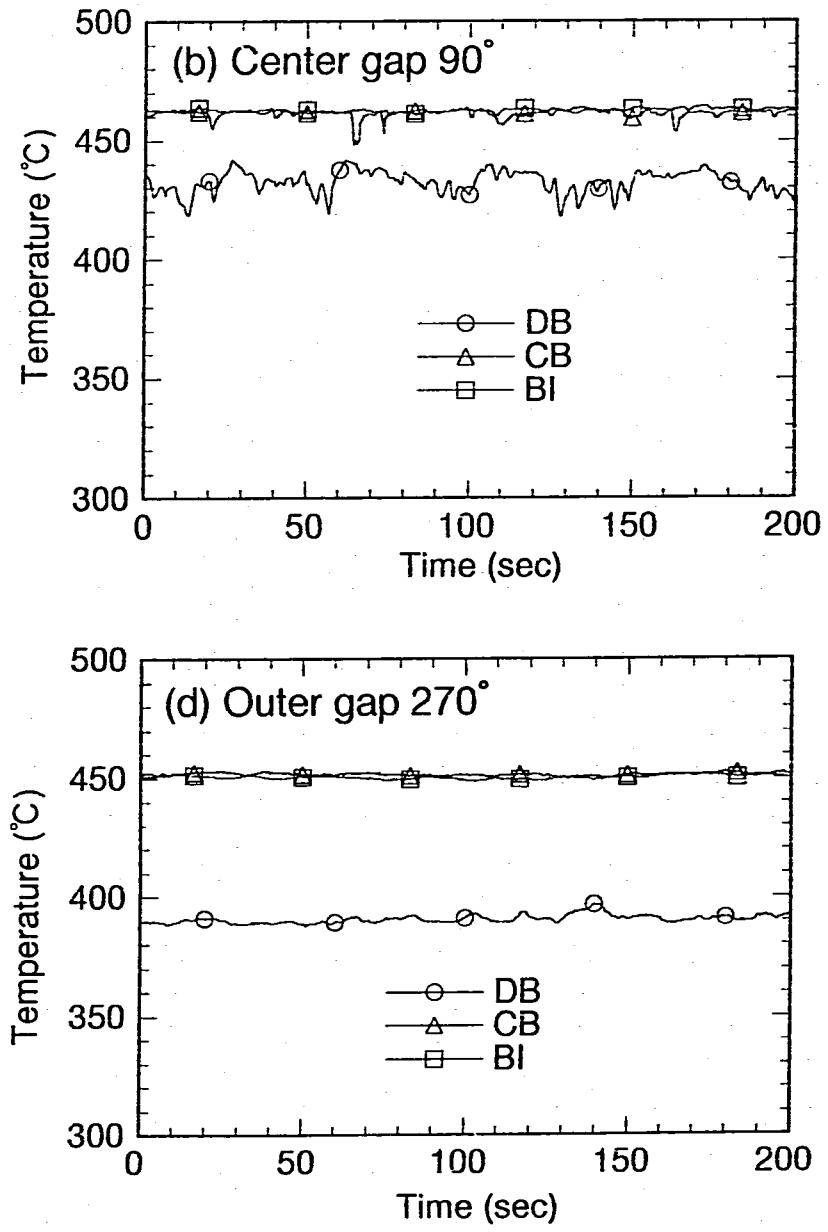
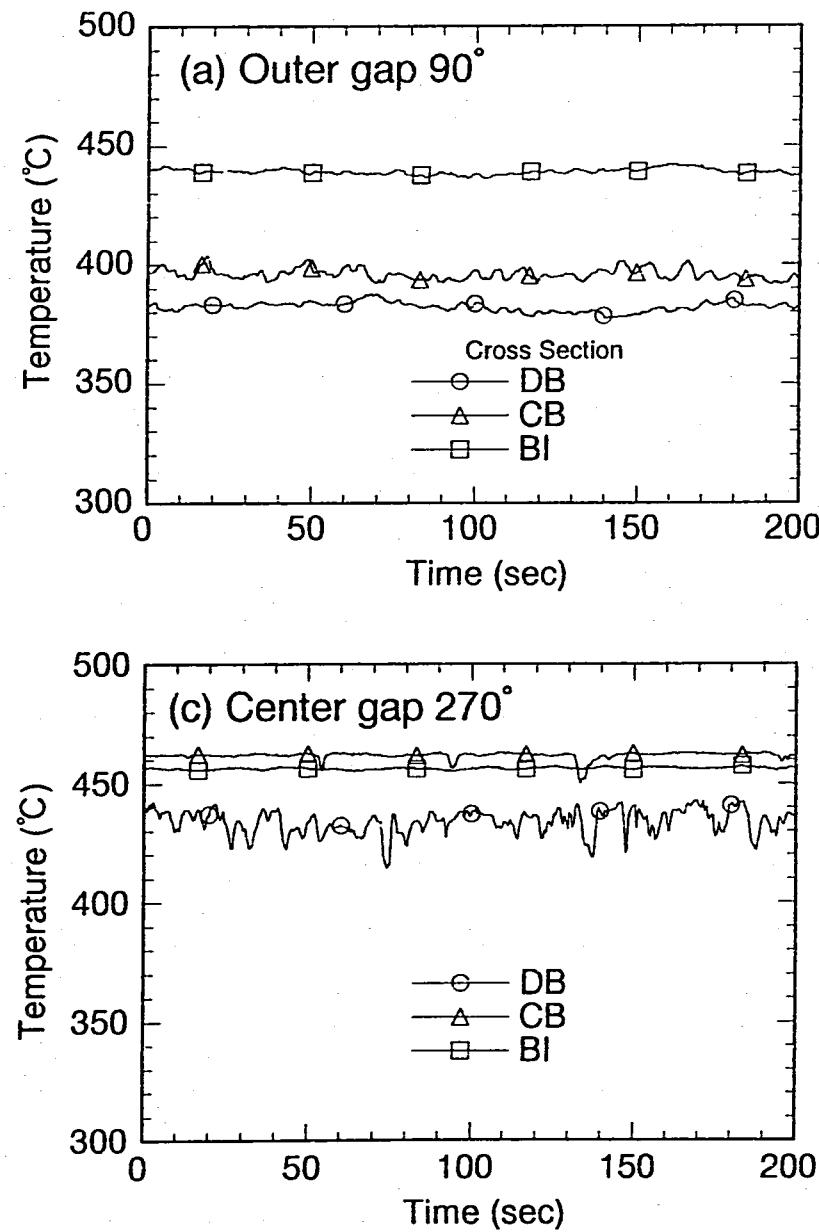


Fig. 4.16 Temperature Fluctuations in S/A Gap
(Case DI)

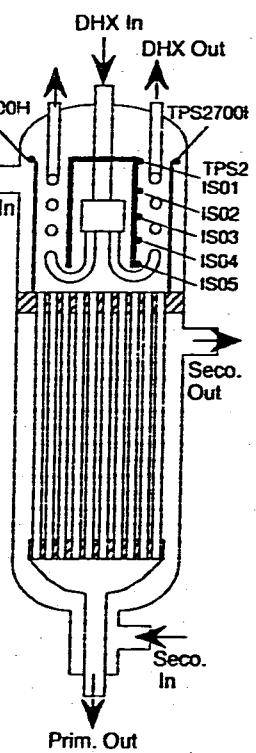
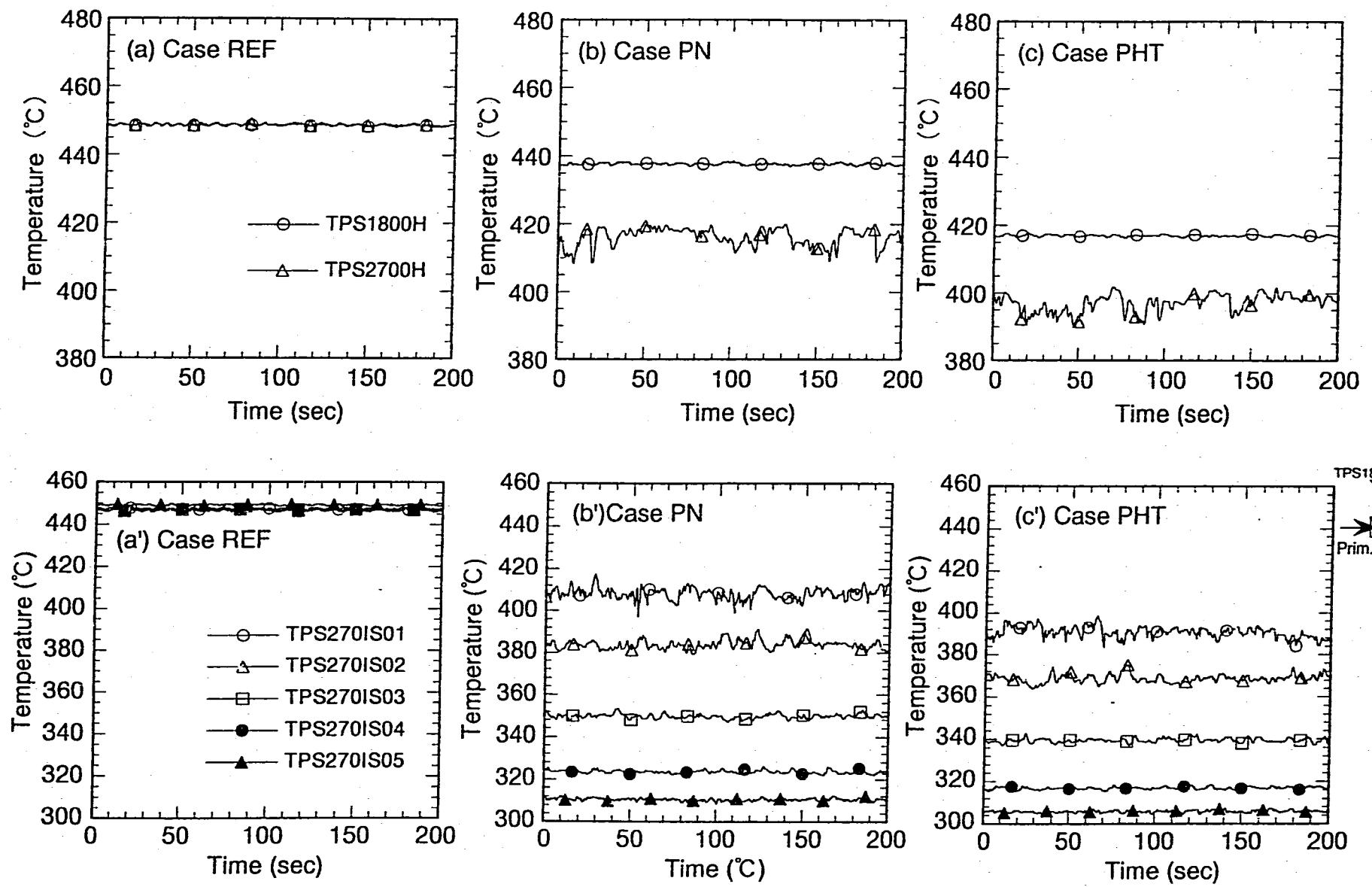


Fig. 4.17 Temperature Fluctuations in IHX

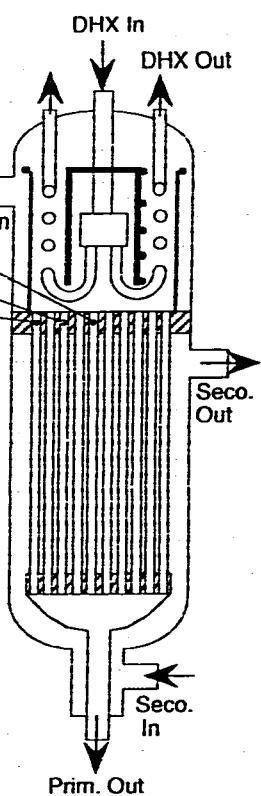
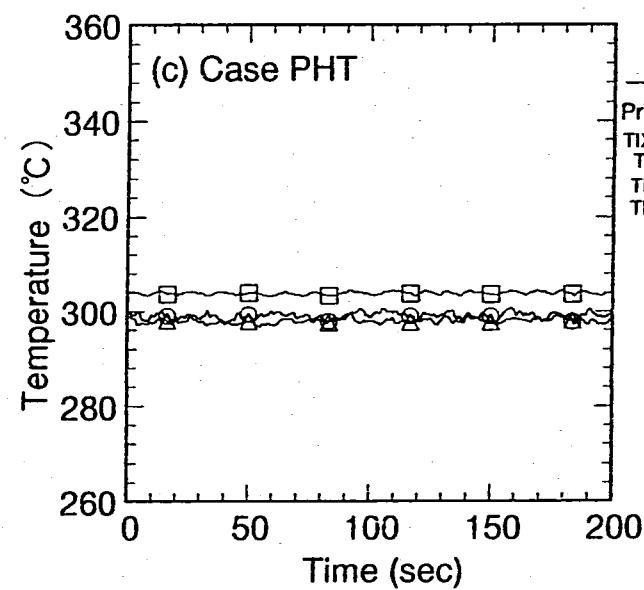
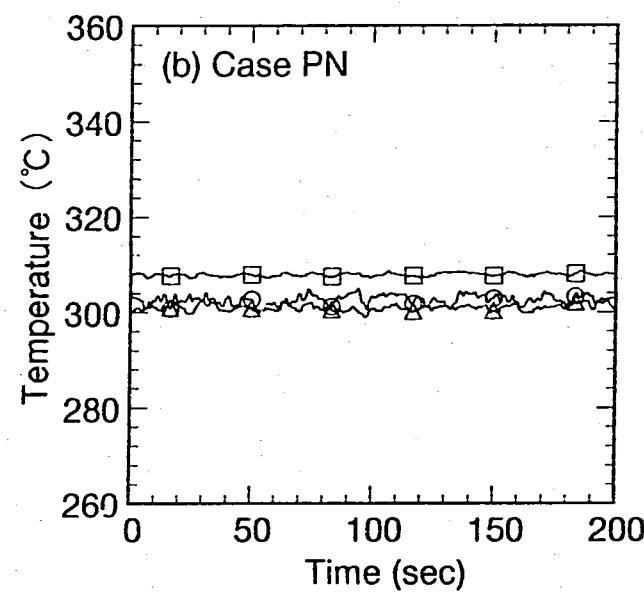
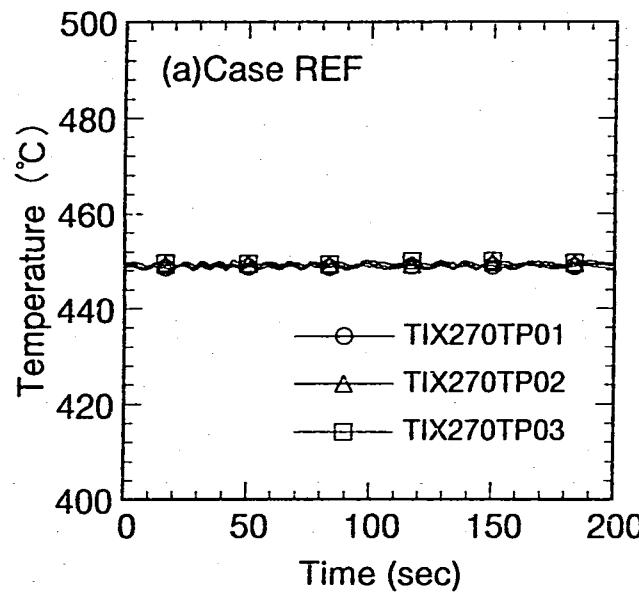


Fig. 4.18 Temperature Fluctuations in IHX Tube

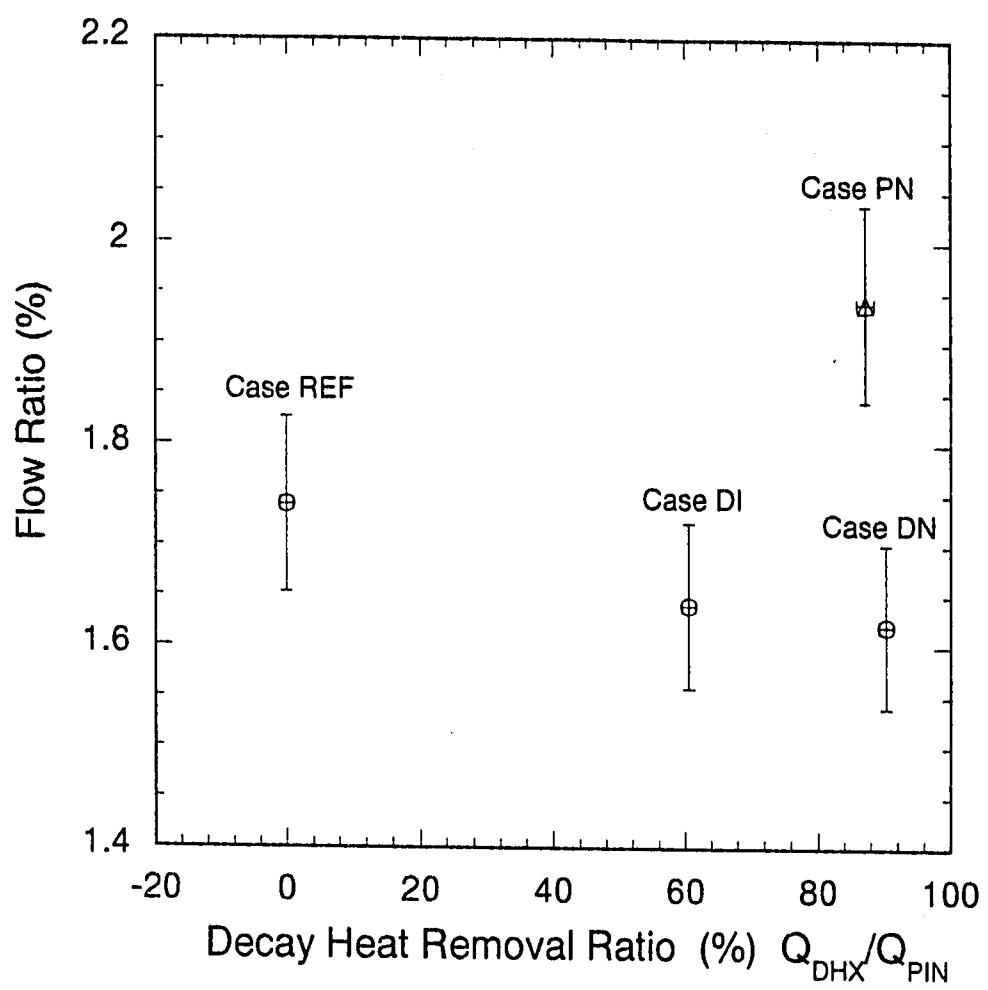


Fig. 5.1 Influence of DHX Operation on Natural Circulation Flow Rate in Primary Loop

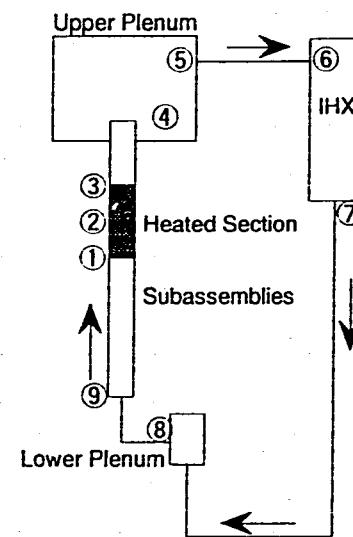
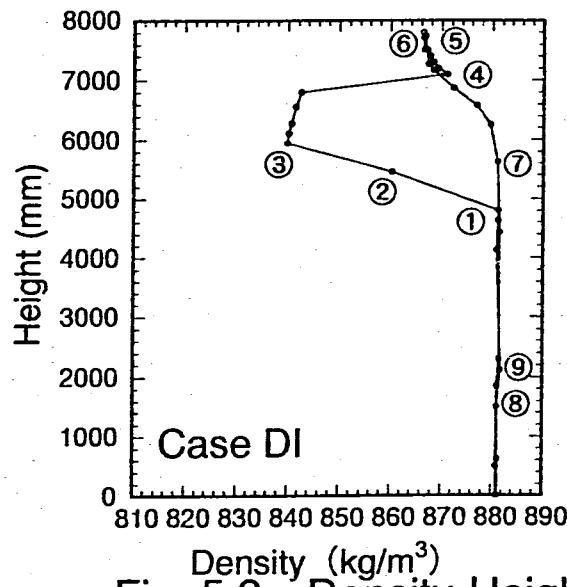
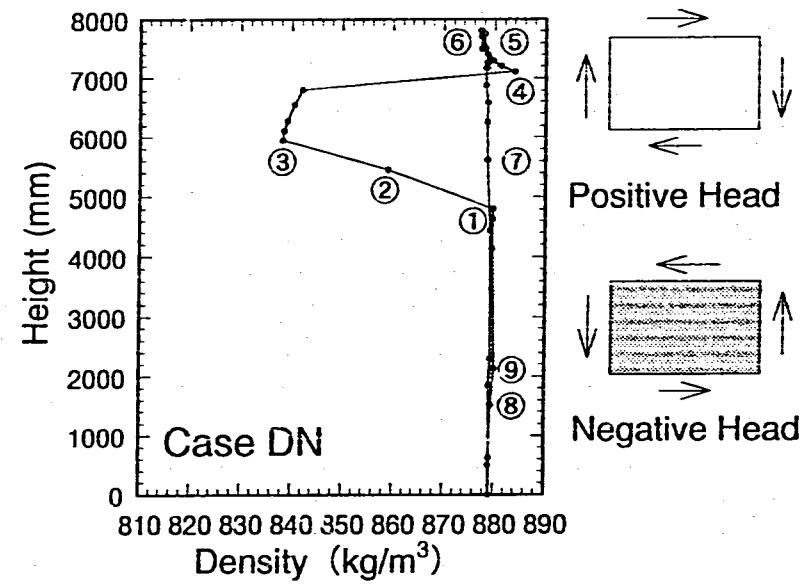
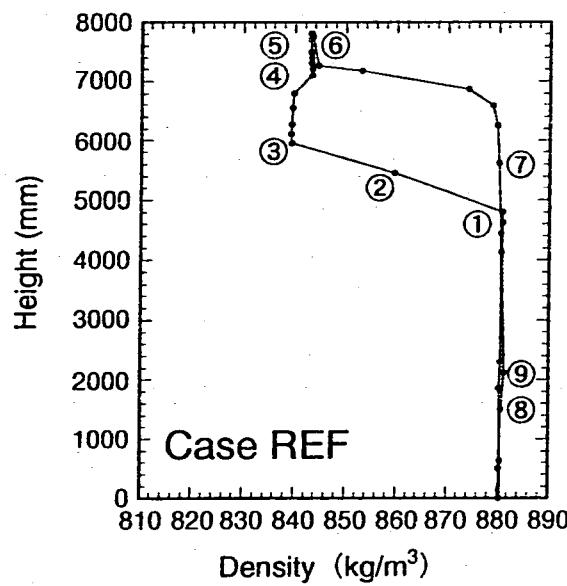


Fig. 5.2 Density-Height Diagrams for Center Subassembly in Primary Loop (DRACS Operation)

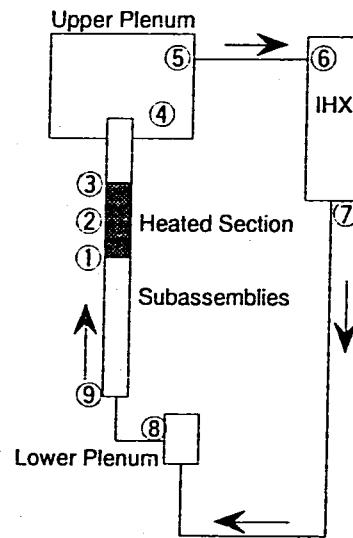
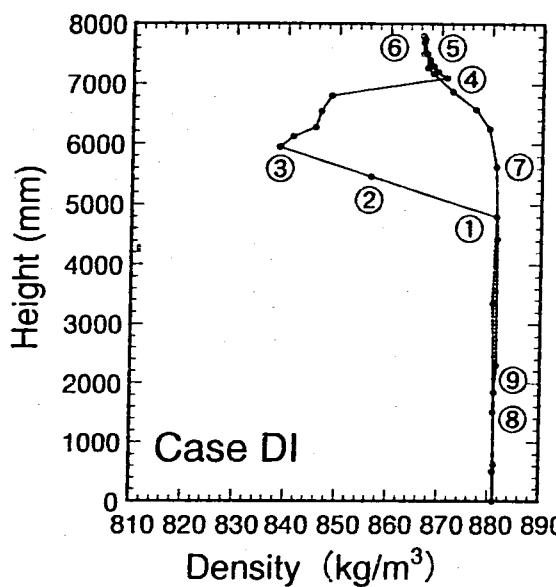
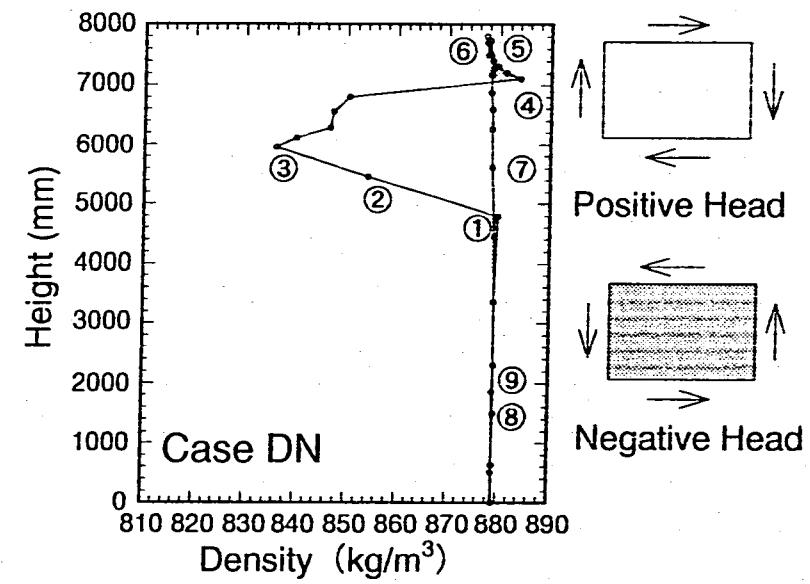
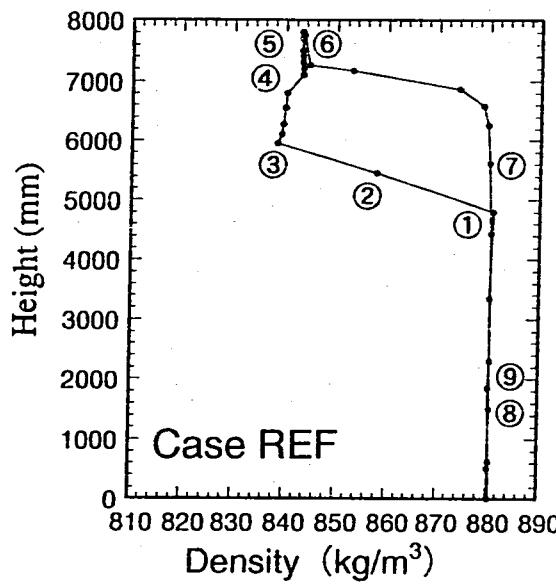


Fig. 5.3 Density-Height Diagrams for Outer Subassembly(b) in Primary Loop (DRACS Operation)

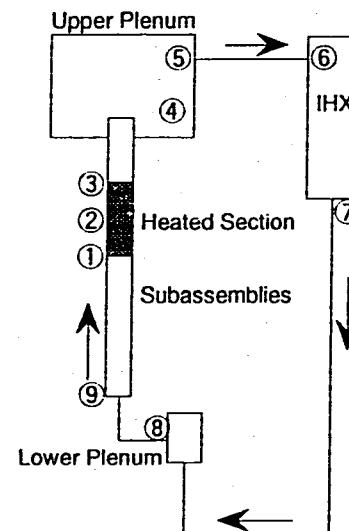
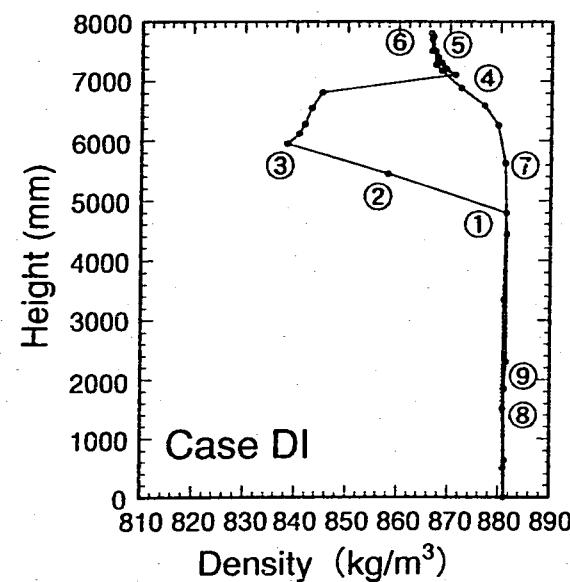
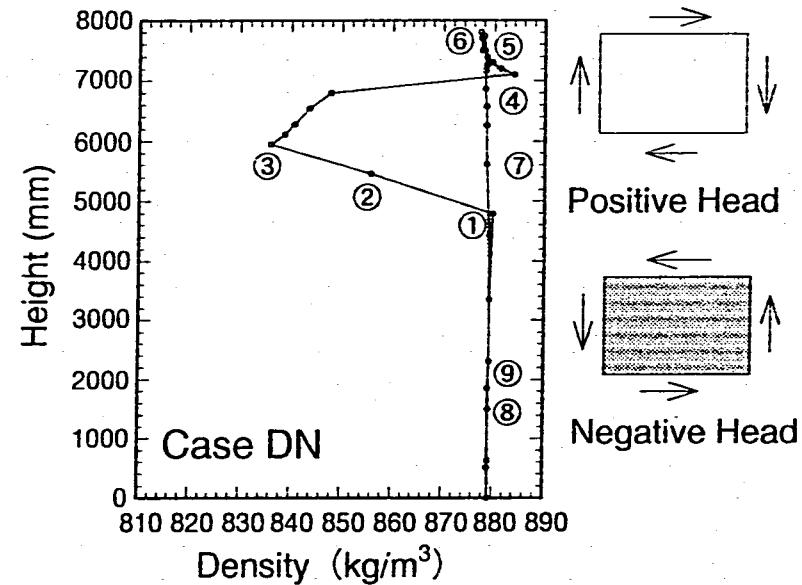
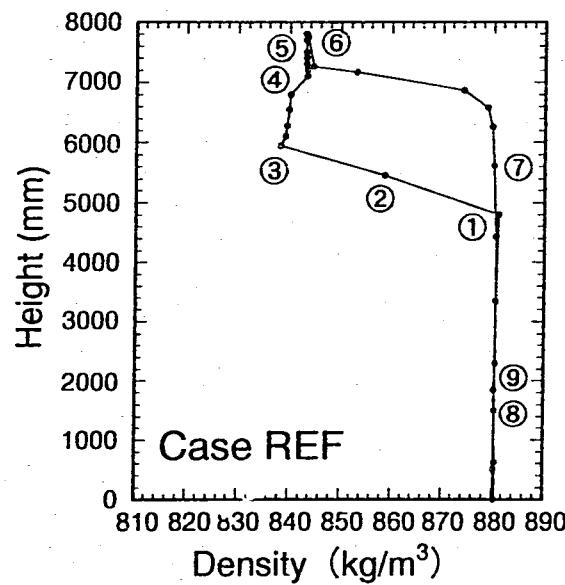


Fig. 5.4 Density-Height Diagrams for Outer Subassembly(e) in Primary Loop (DRACS Operation)

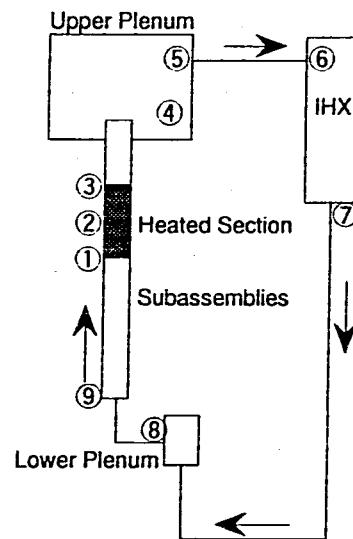
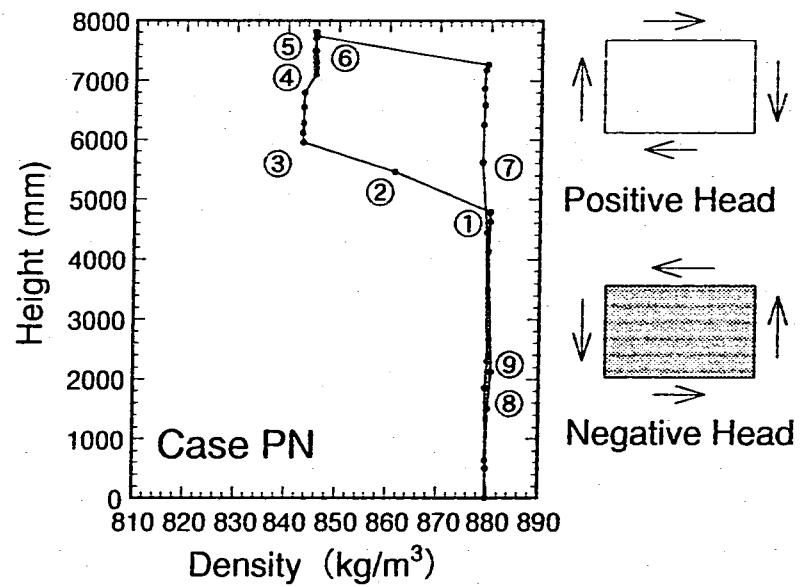
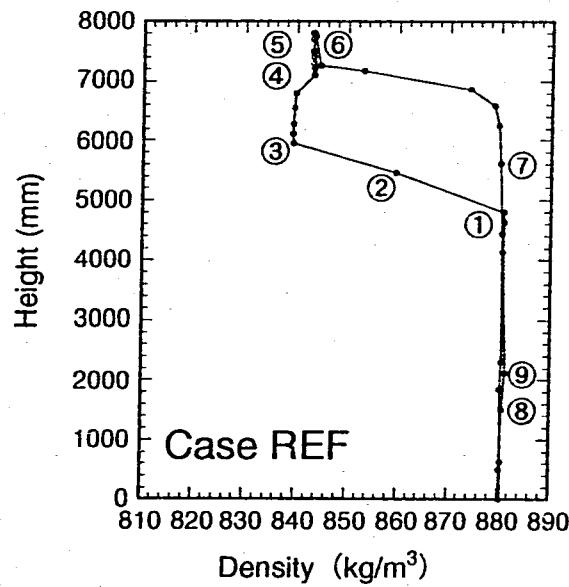


Fig. 5.5 Density-Height Diagrams for Center Subassembly in Primary Loop (PRACS Operation)

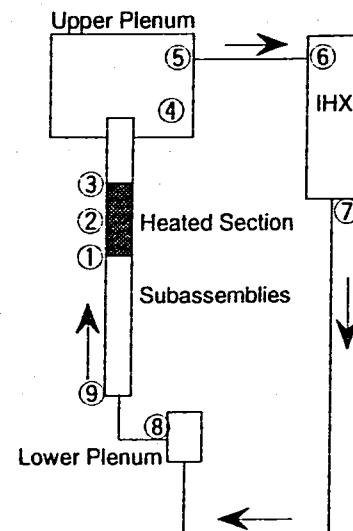
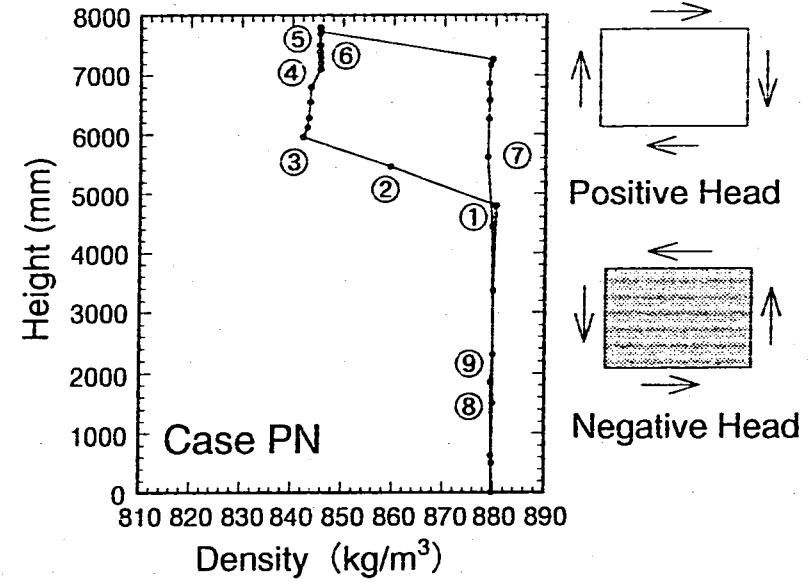
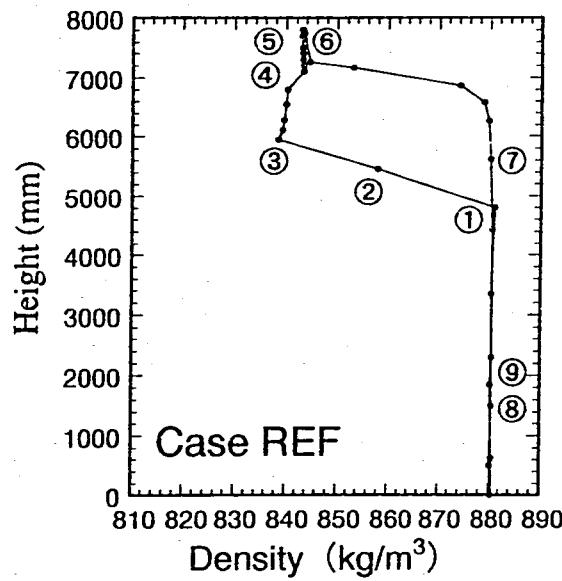


Fig. 5.6 Density-Height Diagrams for Outer Subassembly(b) in Primary Loop
(PRACS Operation)

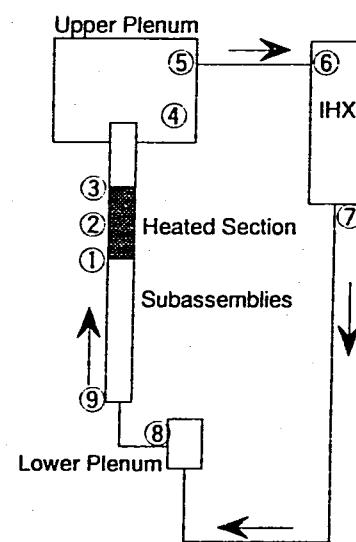
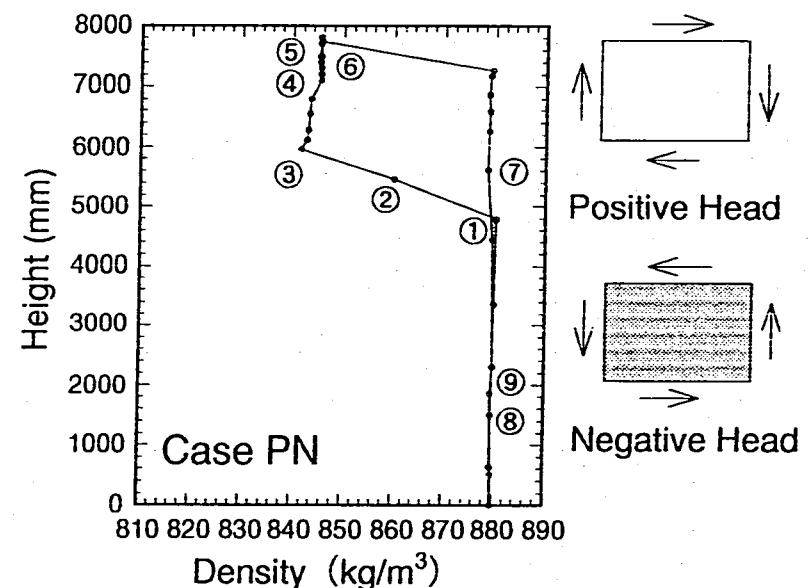
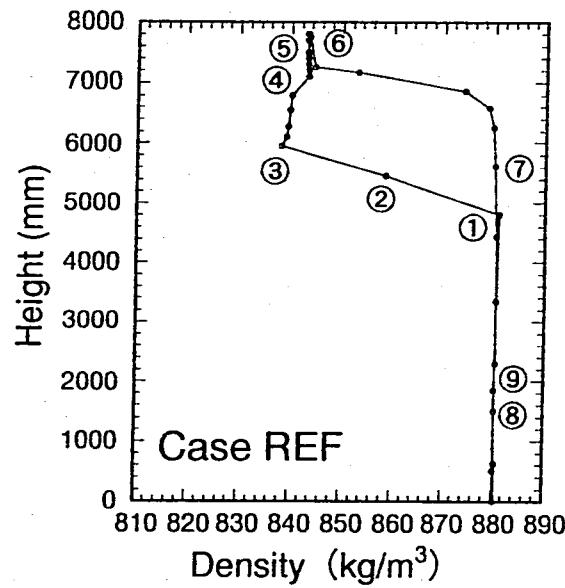


Fig. 5.7 Density-Height Diagrams for Outer Subassembly(e) in Primary Loop (PRACS Operation)

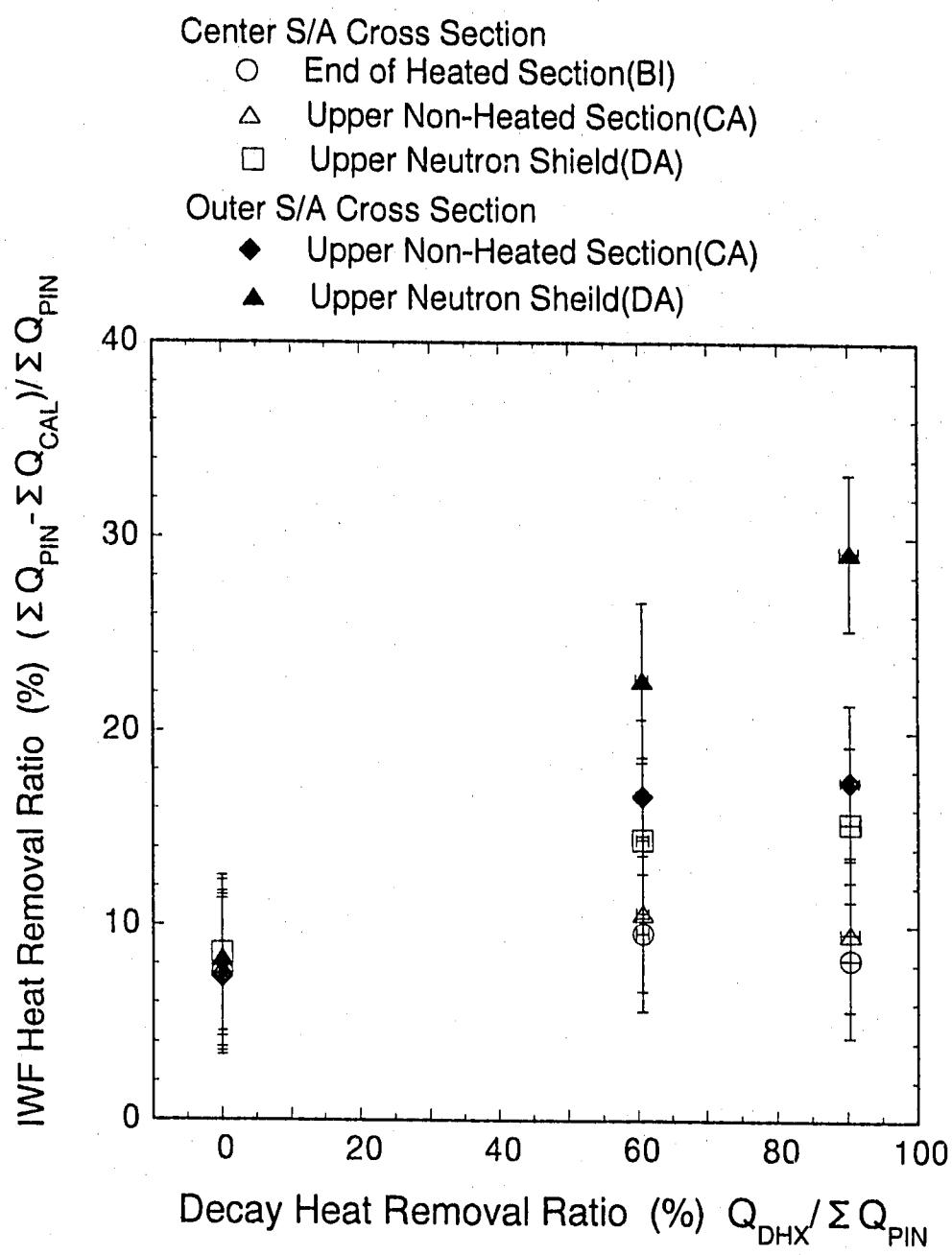


Fig. 5.8 Heat Removal by Inter-wrapper Flow

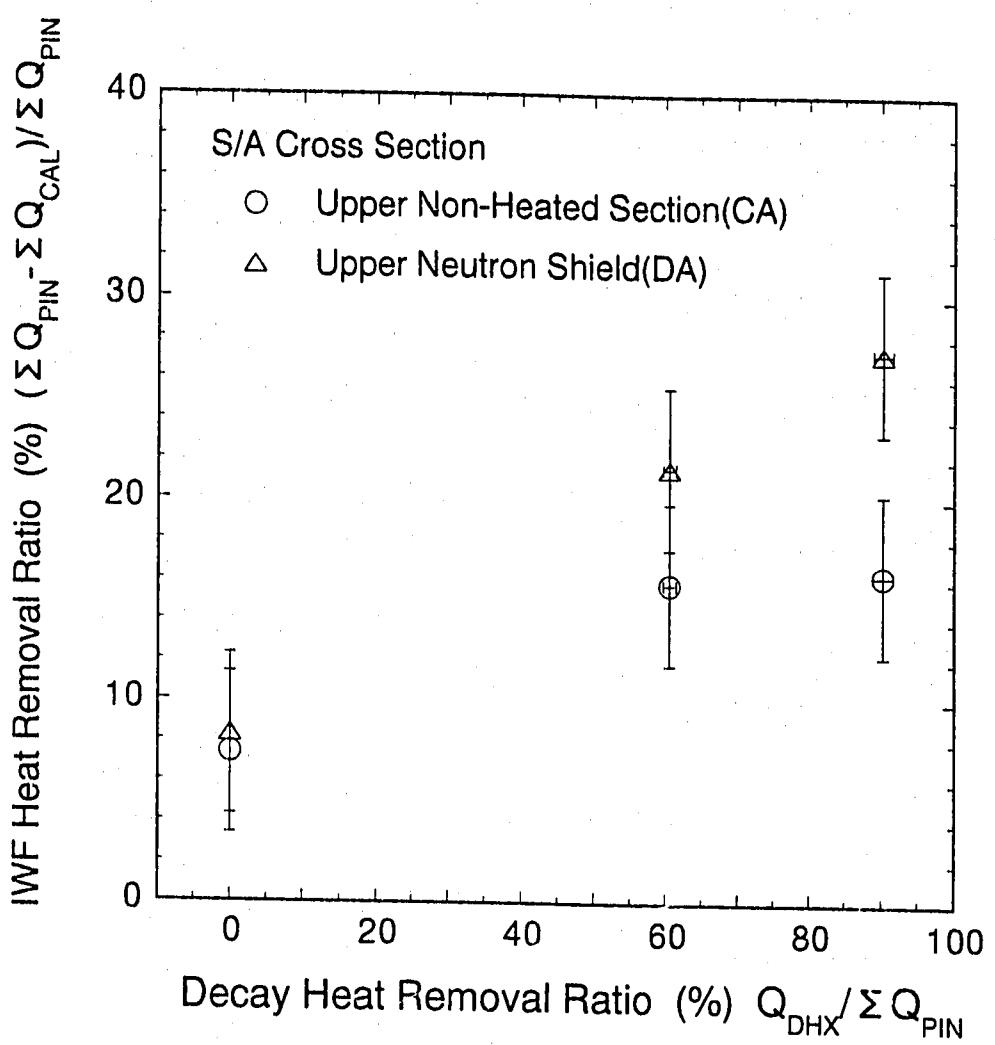


Fig. 5.9 Heat Removal by Inter-wrapper Flow
(All Subassemblies)

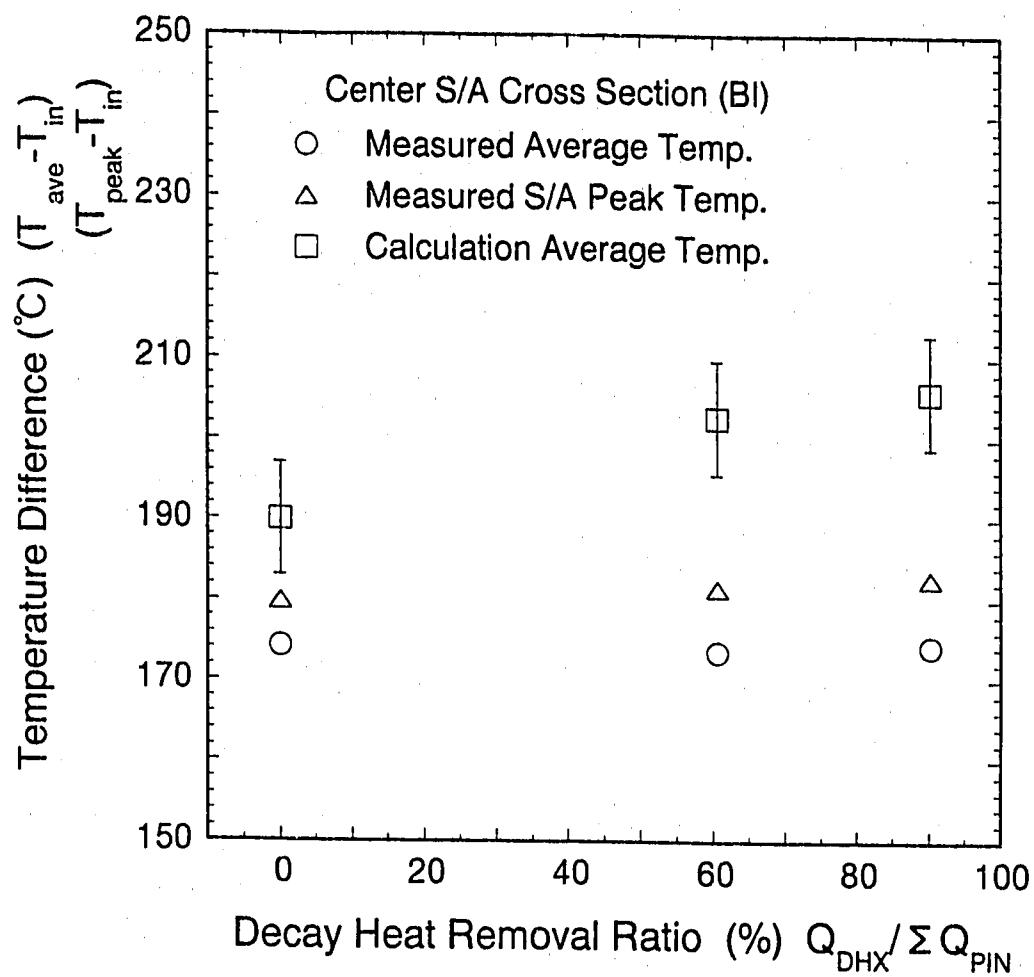


Fig. 5.10 Influence of Inter-wrapper Flow
on S/A Temperature

Appendix

Table A.1(1) Heat Removal Ratio of Heat Exchange System

Run No.	DHX Secondary	Flow Rate	Inlet Temp.	Outlet Temp.	Na Density	Heat Cap.	Heat Exchange	
		(l/min)	(°C)	(°C)	(kg/m ³)	(kcal/kg°C)	(kW)	(%)
Case REF (24072)	IHX Primary	0.00	332.52	397.08	864.61	0.30735	0.00	0.00
		48.83	453.25	298.65	861.96	0.30671	139.23	81.79
Heater Power (kW)	IHX Secondary	Flow Rate	Inlet Temp.	Outlet Temp.	Na Density	Heat Cap.	Heat Exchange	
		(l/min)	(°C)	(°C)	(kg/m ³)	(kcal/kg°C)	(kW)	(%)
170.23		61.36	292.46	428.84	865.60	0.30759	155.44	91.31

Run No.	DHX Secondary	Flow Rate	Inlet Temp.	Outlet Temp.	Na Density	Heat Cap.	Heat Exchange	
		(l/min)	(°C)	(°C)	(kg/m ³)	(kcal/kg°C)	(kW)	(%)
Case DN (24076)	IHX Primary	89.60	182.98	269.20	897.47	0.31753	153.59	90.23
		45.32	308.37	306.21	878.28	0.31105	1.87	1.10
Heater Power (kW)	IHX Secondary	Flow Rate	Inlet Temp.	Outlet Temp.	Na Density	Heat Cap.	Heat Exchange	
		(l/min)	(°C)	(°C)	(kg/m ³)	(kcal/kg°C)	(kW)	(%)
170.22		-0.41	291.76	299.72	881.02	0.31189	-0.06	-0.04

Table A.1(2) Heat Removal Ratio of Heat Exchange System

Run No.	DHX Secondary	Flow Rate	Inlet Temp.	Outlet Temp.	Na Density	Heat Cap.	Heat Exchange	
		(l/min)	(°C)	(°C)	(kg/m ³)	(kcal/kg°C)	(kW)	(%)
	Case DHT (24086)	89.99	197.51	269.86	895.68	0.31686	128.91	90.12
		Flow Rate (l/min)	Inlet Temp. (°C)	Outlet Temp. (°C)	Na Density (kg/m ³)	Heat Cap. (kcal/kg°C)	Heat Exchange	
	Heater Power (kW)	42.70	305.19	303.88	878.94	0.31125	1.07	0.75
143.05		Flow Rate (l/min)	Inlet Temp. (°C)	Outlet Temp. (°C)	Na Density (kg/m ³)	Heat Cap. (kcal/kg°C)	Heat Exchange	
	IHX Secondary	0.23	296.51	300.46	880.37	0.31169	0.02	0.01

Run No.	DHX Secondary	Flow Rate	Inlet Temp.	Outlet Temp.	Na Density	Heat Cap.	Heat Exchange	
		(l/min)	(°C)	(°C)	(kg/m ³)	(kcal/kg°C)	(kW)	(%)
	Case DI (24083)	90.12	266.10	325.73	880.98	0.31187	103.01	60.56
		Flow Rate (l/min)	Inlet Temp. (°C)	Outlet Temp. (°C)	Na Density (kg/m ³)	Heat Cap. (kcal/kg°C)	Heat Exchange	
	Heater Power (kW)	45.89	355.93	295.79	873.88	0.30978	52.12	30.64
170.10		Flow Rate (l/min)	Inlet Temp. (°C)	Outlet Temp. (°C)	Na Density (kg/m ³)	Heat Cap. (kcal/kg°C)	Heat Exchange	
	IHX Secondary	44.35	288.59	351.98	875.20	0.31015	53.24	31.30

Table A.1(3) Heat Removal Ratio of Heat Exchange System

Run No.	DHX Secondary	Flow Rate	Inlet Temp.	Outlet Temp.	Na Density	Heat Cap.	Heat Exchange	
		(l/min)	(°C)	(°C)	(kg/m ³)	(kcal/kg°C)	(kW)	(%)
Case PN (24074)	IHX Primary	90.65	257.30	342.87	879.99	0.31157	148.37	87.17
		54.28	444.05	305.17	862.28	0.30679	139.12	81.74
Heater Power (kW)	IHX Secondary	Flow Rate	Inlet Temp.	Outlet Temp.	Na Density	Heat Cap.	Heat Exchange	
		(l/min)	(°C)	(°C)	(kg/m ³)	(kcal/kg°C)	(kW)	(%)
170.21		0.47	291.56	299.78	881.04	0.31189	0.07	0.04

Run No.	DHX Secondary	Flow Rate	Inlet Temp.	Outlet Temp.	Na Density	Heat Cap.	Heat Exchange	
		(l/min)	(°C)	(°C)	(kg/m ³)	(kcal/kg°C)	(kW)	(%)
Case PHT (24088)	IHX Primary	89.90	261.40	332.37	880.75	0.31180	122.24	85.49
		52.71	422.74	302.33	865.15	0.30748	117.79	82.37
Heater Power (kW)	IHX Secondary	Flow Rate	Inlet Temp.	Outlet Temp.	Na Density	Heat Cap.	Heat Exchange	
		(l/min)	(°C)	(°C)	(kg/m ³)	(kcal/kg°C)	(kW)	(%)
142.99		0.28	297.99	307.94	879.31	0.31136	0.05	0.04