

高速炉の自然循環崩壊熱除去時のシステム間相互作用に関する試験研究

— 炉心及び主冷却系の過渡熱流動現象の解明 —

1996年10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

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) 1997

高速炉の自然循環崩壊熱除去時のシステム間相互作用に関する試験研究

— 炉心及び主冷却系の過渡熱流動現象の解明 —

桃井 一光*、林 謙二*、
西村 元彦*、上出 英樹*

要旨

高速炉における自然循環崩壊熱除去時の炉心部では強制循環時とは異なる複雑な熱流動現象が発生する。特に、冷却器を上部プレナム内に浸漬する方式の崩壊熱除去系DRACS (Direct Reactor Auxiliary Cooling System) を採用する場合は、炉内冷却器からの低温ナトリウムが炉心部の集合体間ギャップに潜り込み自然対流するインターラッパーフロー(IWF)現象などが炉心部で発生する。また、一次冷却系と中間熱交換器 (IHX) 二次系などの冷却系統間の熱的相互作用により一次系自然循環流量が変化する為、炉心部熱流動現象もその影響を受ける。本報では、自然循環時の炉心部熱流動現象に与えるシステム間の相互作用の影響を把握することを目的に、100万kW級大型炉のスクラム過渡から自然循環への過渡現象を模擬したシステム過渡試験を実施した。試験では崩壊熱除去系としてDRACSおよびPRACS (冷却器を IHX の上部に内蔵させる方式: Primary Reactor Auxiliary Cooling System) を模擬できるPLANDTL-DHX試験装置を用い、炉心部熱流動現象に与える崩壊熱除去系およびIHX二次系の運転条件の影響を検討した。

DRACSを用いた場合では、一次系自然循環流量に対するDRACS運転および起動遅れの影響は小さく、IHX二次系自然循環による除熱が大きく影響した。IHX二次系自然循環を停止すると、IHX出口の温度上昇と共に一次系流量は低下し、炉心部の温度が上昇した。また、一部の周辺集合体で逆流が発生した。逆流発生以降、集合体間熱移行およびIWFによる径方向からの冷却効果で炉心部の温度上昇が低下した。IHX二次系自然循環を継続した場合は、一次系流量として実機定格の約1%相当が確保された。この時、IWFによる冷却効果、逆流現象は顕著に現れず、一次系流量により炉心が冷却された。すなわち、DRACSを用いた場合には、一次系流量が低下してもIWFを含む炉内自然体流が付加的除熱パスとして機能し、炉心を冷却することが可能である。

PRACSを用いた場合では、PRACSの運転条件が一次系自然循環に大きく影響し、IHX二次系の一次系自然循環への影響はDRACSに比べ小さいことがわかった。炉心部ではDRACSを用いた場合に見られるIWFなど径方向からの冷却効果は作用せず、主に一次自然循環流量による熱輸送が支配的となる。

*動燃大洗工学センター、安全工学部、原子炉工学室

October, 1996

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

- Transient Thermohydraulics in Core and
Primary and Secondary Heat Transport Systems -

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

ABSTRACT

The complicated thermal hydraulics which was not observed in forced circulation occurs in the core during natural circulation decay heat removal in Fast Breeder Reactors (FBRs). Especially, in a FBR which has the auxiliary cooling system of DRACS (Direct Reactor Auxiliary Cooling System) type with direct heat exchangers (DHXs) immersed in the reactor plenum, cold sodium provided by the DHXs penetrates into inter-wrapper gaps in the core. This phenomena called Inter-wrapper Flow (IWF) will influence the thermal hydraulics in the core. Further, thermal-interaction between the cooling systems makes the natural circulation flow rate in the primary loop change and will influence the thermal hydraulics in the core.

The purpose of this study is to grasp the interaction between the cooling systems and its influence on the thermal hydraulics in the core during natural circulation decay heat removal in FBRs. Transient Sodium experiments which simulated transitions from forced to natural circulation in reactors were performed under several kinds of operating conditions of the IHX secondary system and of the auxiliary cooling system using PLANDTL-DHX test facility with DRACS and PRACS (Primary Reactor Auxiliary Cooling System).

In the DRACS, the heat removed by natural circulation in the IHX secondary system influenced the natural circulation flow rate in the primary loop more than the operation conditions of DRACS. When natural circulation in the IHX secondary loop was stopped, the IHX outlet temperature rapidly increased and the natural circulation flow rate in the primary loop decreased. In addition, reverse flows were detected in the outer subassemblies. The temperature rise in the heated length of the center subassembly was reduced by the cooling effect of the inter-subassembly heat transfer to the reverse flow subassemblies and IWF. When the natural circulation in the IHX secondary loop was continued, the natural circulation flow rate of 1% level of rated condition of a reactor was ensured in the primary loop. This time, phenomena such as IWF and reverse flow remarkably did not appear, and the core was cooled by the natural circulation flow rate in the primary loop. That is to say, when the DRACS was operated, the core was cooled by the effects of the furnace natural convections such as IWF and reverse flow, even if the natural circulation flow rate in the primary loop decreased.

In the PRACS, the operating conditions of PRACS greatly influence the natural circulation flow rate in the primary loop. And also, the effect of the IHX secondary system for the natural circulation flow rate in the primary loop is smaller than in the DRACS. In the PRACS, the core was cooled by only the heat transport of the natural circulation flow rate in the primary loop, and the cooling effects of the inter-subassembly heat transfer and IWF were not observed.

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

目 次

1. 序論	1
2. 試験装置	3
3. 試験方法	6
4. DRACSでの過渡試験結果	
4.1 基本ケース (DRACS-REF) の一次系自然循環流量および各部温度挙動	8
4.2 DRACS運転の有無による影響 (DRACS-REFとDRASC-1の比較)	13
4.3 DRACS起動遅れによる影響 (DRACS-REFとDRACS-2の比較)	16
4.4 IHX二次系自然循環による影響 (DRACS-REFとDRACS-3の比較)	19
5. PRACSでの過渡試験結果	
5.1 基本ケース (PRACS-REF) の一次系自然循環流量および各部温度挙動	23
5.2 PRACS起動遅れによる影響 (PRACS-REF, PRACS-1, PRACS-2の比較)	25
5.3 IHX二次系自然循環による影響 (PRACS-REFとPRACS-3の比較)	26
6. 考 察	
6.1 一次系自然循環ヘッドの推移の比較	28
6.2 炉心部冷却効果の定量的比較	32
6.3 ピーキングファクターの時間推移の比較	33
7. 結 論	35
謝 辞	37
参考文献	38
付 錄 1 : 集合体内逆流現象と自然循環ヘッドに関する追加考察	

List of Tables

- Table 2.1 Main specifications of PLANDTL-DHX loop
Table 3.1 Conditions of the Natural Circulation Transient Experiments

List of Figures

- Fig. 2.1 Flow Diagram of PLANDTL-DHX
Fig. 2.2 Thermocouple Location in Test Section
Fig. 2.3 Schematic of Upper Plenum
Fig. 2.4 Positions of Thermocouples in Upper Plenum
Fig. 2.5 Schematic of IHX and PRACS
Fig. 2.6 Schematic of Direct Heat Exchanger (DHX)
- Fig. 3.1 Operation Conditions of Secondary Loop and Auxiliary Cooling Loop
Fig. 3.2 Trends of Flows of Auxiliary Cooling Loop and Secondary Loop
(DRACS Transient Tests)
Fig. 3.3 Trends of Flows of Auxiliary Cooling Loop and Secondary Loop
(PRACS Transient Tests)
Fig. 3.4 Trends of Power and Flow in Subassemblies (Case: DRACS-REF)
- Fig. 4.1-1 Trends of Flows and Temperatures in Main Loop (Case: DRACS-REF)
Fig. 4.1-2 Variations of Vertical Temperature Distributions in Upper Plenum with Time
(Case: DRACS-REF)
Fig. 4.1-3 Time Histories of Temperatures at the Height of Core Outlet in Upper Plenum
(Case: DRACS-REF)
Fig. 4.1-4 Time Variations of Temperatures in Inter-Wrapper Gap (Case: DRACS-REF)
Fig. 4.1-5a Time Variations of Temperatures in Outer Subassembly A and B
(Case: DRACS-REF)
Fig. 4.1-5b Time Variations of Temperatures in Outer Subassembly C and D
(Case: DRACS-REF)
Fig. 4.1-5c Time Variations of Temperatures in Outer Subassembly E and F
(Case: DRACS-REF)
Fig. 4.1-6 Time Variations of Temperatures at Center Subchannels or Centers of Cross
Sections in Center Subassembly (Case: DRACS-REF)
Fig. 4.1-7 Axial Temperature Distributions along Center Subchannel in Center
Subassembly (Case: DRACS-REF)

- Fig. 4.1-8 Transverse Temperature Distributions in BI and BD Cross Sections
(Case: DRACS-REF)
- Fig. 4.1-9a Isotherms at BI Cross Section of Center Subassembly (Case: DRACS-REF)
- Fig. 4.1-9b Isotherms at BD Cross Section of Center Subassembly (Case: DRACS-REF)
- Fig. 4.1-10 Temperature Fluctuations in Center Subassembly on BI Cross Section
(Case: DRACS-REF)
- Fig. 4.1-11 Temperature Fluctuations at 90° Wall Subchannel in Center Subassembly and
90° Center Gap on BI Cross Section (Case: DRACS-REF)
- Fig. 4.1-12 Cross-Correlation Function of Temperature Fluctuations at 90° Wall
Subchannel in Center Subassembly and 90° Center Gap on BI Cross Section
- Fig. 4.2-1 Trends of Flows and Temperatures in Main Loop (Case: DRACS-1)
- Fig. 4.2-2 Trends of Flows of Subassemblies (DRACS-REF vs. DRACS-1)
- Fig. 4.2-3 Time Histories of Temperatures at the Height of Core Outlet in Upper Plenum
(DRACS-REF vs. DRACS-1)
- Fig. 4.2-4a Time Variations of Temperatures in Outer Subassembly A and B
(Case: DRACS-1)
- Fig. 4.2-4b Time Variations of Temperatures in Outer Subassembly C and D
(Case: DRACS-1)
- Fig. 4.2-4c Time Variations of Temperatures in Outer Subassembly E and F
(Case: DRACS-1)
- Fig. 4.2-5 Time Variations of Temperatures at Center Subchannels or Centers of Cross
Sections in Center Subassembly (Case: DRACS-1)
- Fig. 4.2-6 Temperature Increase from S/A Inlet at Center Subchannels of BI and BD
Cross Sections in Center Subassembly (DRACS-REF vs. DRACS-1)
- Fig. 4.2-7 Axial Temperature Distributions along Center Subchannel in Center
Subassembly (DRACS-REF vs. DRACS-1)
- Fig. 4.2-8 Transverse Temperature Distributions in BI and BD Cross Sections
(DRACS-REF vs. DRACS-1)
- Fig. 4.2-9 Time Variations of Temperatures in Inter-Wrapper Gap in BI and BD Cross
Sections (DRACS-REF vs. DRACS-1)
- Fig. 4.3-1 Trends of Flows and Temperatures in Main Loop (Case: DRACS-2)
- Fig. 4.3-2 Trends of Flows in Subassemblies (DRACS-REF vs. DRACS-2)
- Fig. 4.3-3 Time Histories of Temperatures at the Height of Core Outlet in Upper Plenum
(DRACS-REF vs. DRACS-2)

- Fig.4.3-4a Time Variations of Temperatures in Outer Subassembly A and B
(Case: DRACS-2)
- Fig.4.3-4b Time Variations of Temperatures in Outer Subassembly C and D
(Case: DRACS-2)
- Fig.4.3-4c Time Variations of Temperatures in Outer Subassembly E and F
(Case: DRACS-2)
- Fig. 4.3-5 Time Variations of Temperatures at Center Subchannels or Centers of Cross Sections in Center Subassembly (Case: DRACS-2)
- Fig. 4.3-6 Temperature Increase from S/A Inlet at Center Subchannels of BI and BD Cross Sections in Center Subassembly (DRACS-REF vs. DRASC-2)
- Fig. 4.3-7 Axial Temperature Distributions along Center Subchannel in Center Subassembly (DRACS-REF vs. DRACS-2)
- Fig. 4.3-8a Transverse Temperature Distributions in BI Cross Section
(DRACS-REF vs. DRACS-2)
- Fig. 4.3-8b Transverse Temperature Distributions in BD Cross Section
(DRACS-REF vs. DRACS-2)
- Fig. 4.3-9 Time Variations of Temperatures in Outer Subassemblies A, B, F
(DRACS-REF vs. DRACS-2)
- Fig. 4.3-10 Time Variations of Temperatures in Inter-Wrapper Gap in BI and BD Cross Sections (DRASC-REF vs. DRACS-2)
- Fig. 4.4-1 Trends of Flows and Temperatures in Main Loop (Case: DRACS-3)
- Fig. 4.4-2 Trends of Flows of Subassemblies (DRACS-REF vs. DRACS-2)
- Fig. 4.4-3 Time Histories of Temperatures at the Height of Core Outlet in Upper Plenum
(DRACS-REF vs. DRACS-3)
- Fig. 4.4-4 Time Variations of Temperatures at Center Subchannels or Centers of Cross Sections in Center Subassembly (Case: DRACS-3)
- Fig. 4.4-5 Temperature Increase from S/A Inlet at Center Subchannels of BI and BD Cross Sections in Center Subassembly (DRACS-REF vs. DRASC-2)
- Fig. 4.4-6 Axial Temperature Distributions along Center Subchannel in Center Subassembly (DRACS-REF vs. DRASC-2)
- Fig. 4.4-7a Transverse Temperature Distributions in BI Cross Section
(DRACS-REF vs. DRACS-3)
- Fig. 4.4-7b Transverse Temperature Distributions in BD Cross Section
(DRACS-REF vs. DRACS-3)
- Fig. 4.4-8 Time Variations of Temperatures in Inter-Wrapper Gap in BI and BD Cross Sections (DRASC-REF vs. DRACS-3)

- Fig. 5.1-1 Trends of Flows and Temperatures in Main Loop (Case: PRACS-REF)
- Fig. 5.1-2 Variations of Vertical Temperature Distributions in Upper Plenum with Time (Case: PRACS-REF)
- Fig. 5.1-3 Time Histories of Temperatures at the Height of Core Outlet in Upper Plenum (Case: PRACS-REF)
- Fig. 5.1-4 Time Variations of Temperatures in Inter-Wrapper Gap (Case: PRASC-REF)
- Fig. 5.1-5 Time Variations of Temperatures at Center Subchannels or Centers of Cross Sections in Center Subassembly (Case: PRACS-REF)
- Fig. 5.1-6 Axial Temperature Distributions along Center Subchannel in Center Subassembly (Case: PRACS-REF)
- Fig. 5.1-7 Transverse Temperature Distributions in BI and BD Cross Sections (Case: PRACS-REF)
- Fig. 5.1-8 Temperature Fluctuations at Shroud and Tube Plate of IHX (Case: PRACS-REF)
- Fig. 5.2-1 Trends of Total Flows and Temperatures in Main Loop (PRACS-REF vs. PRACS-1, PRACS-2)
- Fig. 5.2-2 Time Variations of Temperatures in Center Subassembly (PRASC-REF, PRACS-1, PRACS-2)
- Fig. 5.3-1 Trends of Total Flows and Temperatures in Main Loop (PRACS-REF vs. PRACS-3)
- Fig. 5.3-2 Time Variations of Temperatures in Center Subassembly (PRASC-REF vs. PRACS-3)
- Fig. 6.1-1 Flow Diagram of PLANDTL-DHX Main Loop
- Fig. 6.1-2a Density-Height Diagrams for Center Subassembly in Main Loop (Case: DRACS-REF)
- Fig. 6.1-2b Density-Height Diagrams for Outer Subassembly B in Main Loop (Case: DRACS-REF)
- Fig. 6.1-2c Density-Height Diagrams for Outer Subassembly E in Main Loop (Case: DRACS-REF)
- Fig. 6.1-3a Density-Height Diagrams for Center Subassembly in Main Loop (Case: DRACS-1)
- Fig. 6.1-3b Density-Height Diagrams for Outer Subassembly B in Main Loop (Case: DRACS-1)
- Fig. 6.1-3c Density-Height Diagrams for Outer Subassembly E in Main Loop (Case: DRACS-1)

- Fig. 6.1-4a Density-Height Diagrams for Center Subassembly in Main Loop
(Case: DRACS-2)
- Fig. 6.1-4b Density-Height Diagrams for Outer Subassembly B in Main Loop
(Case: DRACS-2)
- Fig. 6.1-4c Density-Height Diagrams for Outer Subassembly E in Main Loop
(Case: DRACS-2)
- Fig. 6.1-5a Density-Height Diagrams for Center Subassembly in Main Loop
(Case: DRACS-3)
- Fig. 6.1-5b Density-Height Diagrams for Outer Subassembly B in Main Loop
(Case: DRACS-3)
- Fig. 6.1-5c Density-Height Diagrams for Outer Subassembly E in Main Loop
(Case: DRACS-3)
- Fig. 6.1-6 Density-Height Diagrams for Center Subassembly in Main Loop
(Case: PRACS-REF)
- Fig. 6.1-7 Density-Height Diagrams for Center Subassembly in Main Loop
(Case: PRACS-1)
- Fig. 6.1-8 Density-Height Diagrams for Center Subassembly in Main Loop
(Case: PRACS-2)
- Fig. 6.1-9 Density-Height Diagrams for Center Subassembly in Main Loop
(Case: PRACS-3)
- Fig. 6.2-1 Comparison between Experimental Temperatures and $T^*_{ave}(W/(Q Cp)+T_{in})$
(DRACS Transient Tests)
- Fig. 6.2-2 Comparison between Experimental Temperatures and $T^*_{ave}(W/(Q Cp)+T_{in})$
(PRACS Transient Tests)
- Fig. 6.3-1 Time Variations of Peaking Factors on BI Cross Section

[Appendix]

- Fig. 1 Time Histories of Buoyancy Heads of Subassemblies
(Case: DRACS-REF)
- Fig. 2 Time Histories of Flows and Buoyancy Heads of Subassemblies
(Case: DRACS-REF)

1. 序論

高速炉の信頼性、安全性をさらに高める上で、崩壊熱除去にポンプ等の動的機器に依存しない自然循環を活用することは重要である。動燃大洗工学試験センター安全工学部原子炉工学室で実施した実機解析の結果によれば、実機の自然循環崩壊熱除去時の炉心通過流量は定格時の2%未満になることが示されている。このような低流量となる自然循環時の炉心部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なると考えられることから、炉心部最高温度等を評価する上では、浮力の影響を考慮する必要がある。特に、崩壊熱除去用冷却器を原子炉容器の上部プレナム内に浸漬するタイプのDRACS (Direct Reactor Auxiliary Cooling System) を採用する場合は、炉内冷却器 (DHX : Direct Heat Exchanger) から供給される低温ナトリウムが上部プレナムの底部に成層化する。この低温ナトリウムが集合体間ギャップに潜り込み、炉心槽内を自然対流して高温の集合体をラッパー管の外から冷却するインターラッパーフロー現象や低温ナトリウムが集合体の出口部からその内部に潜り込む集合体内潜り込み現象など、炉心と上部プレナム間で熱的な相互作用（炉心—プレナム相互作用）が発生することが考えられる。また、一次系ループの自然循環流量は中間熱交換器 (IHX : Intermediate Heat Exchanger) 二次系ループや崩壊熱除去系ループとのシステム間の熱的な相互作用の影響で変化し、炉心部熱流動現象もまたその影響を受ける。このように自然循環時の炉心部では、強制循環時に比べ複雑な熱流動挙動を示すと考えられる。自然循環による崩壊熱除去を活用する上で、炉心部熱流動現象とシステム間の相互作用の影響を十分に把握し、炉心部熱流動挙動を予測できる解析評価手法を開発することが重要である。

原子炉工学室では、これまでに、自然循環時の炉心部熱流動現象（集合体間径方向熱移行現象、集合体内潜り込み現象、インターラッパーフロー現象など）について個々に着目し、実機（100万kW級大型炉）の自然循環相当の流量をポンプ強制循環で模擬したナトリウム試験を実施した^{(1)~(5)}。これらの試験により、各熱流動現象を把握し、解析評価手法の開発を行ってきた^{(6)~(8)}。

本報では、自然循環時のシステム間相互作用に関する研究として、炉心部および一次冷却系の過渡熱流動現象に着目したナトリウム試験を、DRACSおよびPRACS (Primary Reactor Auxiliary Cooling System ; 冷却器をIHX上部に内蔵させる方式) を崩壊熱除去系として用いた体系について実施した試験結果を報告する。試験は全電源損失事象における自然循環崩壊熱除去を模擬したものであるが、本試験装置の崩壊熱除去系ループでは、バルブ等による圧力損失が大きく十分な自然循環流量が得

られない為、崩壊熱除去系については崩壊熱出力相当の除熱量が得られる条件で強制運転により作動させるものとした。ここでは、試験パラメータに崩壊熱除去系の運転の有無、崩壊熱除去系の起動遅れ、IHX二次系自然循環の継続時間を設定し、炉心部、一次系、IHX二次系、崩壊熱除去系の熱流動現象、相互作用について検討した。

2. 試験装置

2. 1 試験装置の構成

本試験に用いたPLANDTL-DHX (Plant Dynamics Test Loop Integrated with Direct Heat Exchanger) 装置のループ構成をFig. 2.1に示す。装置は一次系ループ、二次系ループ、崩壊熱除去系ループからなる。一次系は試験部である模擬炉心（ヒーターピンを組込んだ7本集合体）と上部プレナム、中間熱交換器（IHX）、主循環ポンプ、下部プレナム、集合体間流量配分用流量調節弁、補助加熱器等で構成されている。試験部への入口流路は3本あり、一本は中心集合体に、2本は中心集合体の左右で分けた3体づつの周辺集合体にそれぞれつながっており、流量調節弁により中心集合体と左右3体づつの周辺集合体の流量配分を調節することができる。また、ヒーター出力は中心集合体と周辺集合体で独立に設定することができる。本試験装置では模擬炉心部の熱出力を1.2 MW、一次系ナトリウム流量を1200 l/minまで設定できる。

IHX二次系には空気冷却器、電磁ポンプ、流量調節弁を備え、空気冷却器およびIHXにて模擬炉心の最大発熱量1.2 MWを除熱できる能力を有している。

崩壊熱除去系として、上部プレナム内にDRACS、並びにIHX内上部にPRACSに対応した冷却器が設置されており、系統には電磁ポンプ、空気冷却器を備えている。これらの機器はデジタル計測制御システムにより集中コントロールされ、強制循環から自然循環まで、様々な過渡変化をプログラム設定により模擬することができる。

Table 2.1 に試験装置の主要な仕様を示す。

2. 2 模擬炉心部構造

Fig. 2.2に模擬炉心部の水平断面の温度計測用熱電対の取付け位置を示す。模擬炉心は中心集合体とそれを囲む6体の周辺集合体の計7体の模擬燃料集合体で構成されている。中心集合体は炉心燃料ピンを模擬した37本の電気ヒーターピンと、それを収納する六角形状のラッパー管からなっている。模擬燃料ピンは実機（100万kW級大型炉）と同様にワイヤースペーサタイプとし、ピン径、配列ピッチ、ワイヤー巻きピッチを実機の炉心燃料集合体とほぼ同じ寸法にしてあり、実機271本ピンに対し、37本ピンの部分モデルで集合体を模擬している。また、軸方向については上部中性子遮蔽体を含め実機の実寸大とし、ヒータ出力の軸方向分布は実機のコサイン分布を模擬している。周辺の6体の集合体は7本のヒーターピンが収納されたラッパー管からなり、集合体内部の模擬度は低いが、軸方向発熱長さ、発熱分布については中心集合体と同様に実機を実寸大で模擬しており、中心集合体と集合体間ギャ

ラップ領域に熱的な境界条件を与える目的で設置されている。各集合体のラッパー管は実機とほぼ同じ厚み(4 mm)のSUS製とし、各集合体間には実機と同じ7mmのギャップ幅を設けている。ラッパー管間のスペーサは実機のような鉢巻きタイプではなく、長さ30mmの丸棒を軸方向2カ所に設けてある。このため実機よりも低温流体がギャップに入り込み易い形状になっている。

炉心部の温度計測に関しては、炉心部軸方向15断面について、それぞれの高さ位置でのピンバンドル内の温度分布を測定できるように熱電対を配置してある。特に、最も温度が高くなると考えられる発熱部上端断面(BI断面)には66点の熱電対を配置してある。

2. 3 上部プレナム構造と熱電対取付け箇所

Fig. 2.3に上部プレナムの構造を示す。上部プレナムは内径2.0 m、高さ3.3 mの円筒形である。上部プレナム内部には炉心部の出口上方に炉心上部機構(UIS)を模擬した中空円筒(内部アルゴンガス空間)を設けている。また、その270°方向には炉心補助冷却システム(DRACS)のコイル状伝熱管を内蔵した炉内冷却器(DHX)が一基設置されている。上部プレナムからの出口配管は炉内冷却器の反対側(90°方向)に一箇所だけであるので、出口に向かう流れの周方向依存性を小さくするためプレナム内部に内筒を設けてある。熱電対はFig. 2.4に示すように、30°および315°方向のUIS側壁(TUI)、プレナム中間部(TRI)、模擬炉心側壁(TCS)、プレナム容器壁(TRV)にツリー状に設置してある。

2. 4 中間熱交換器(IHX)構造と熱電対取付け箇所

中間熱交換器の構造をFig. 2.5に示す。上部プレナムからの一次系ナトリウムはシェル&チューブ型中間熱交換器(直管式)の管側に入り、胴側の二次系ナトリウムと熱交換される。熱交換器の形状はダウンカマーがない等、実機を正確に模擬していないが、流路構成は実機と同じように一次系を管側、二次系を胴側としている。管側の上部プレナムにはPRACSの冷却器を模擬したヘリカル式の冷却コイルが内挿されている。熱電対は一次系の伝熱管内に軸方向、伝熱管入口部、冷却器コイルの周辺、二次系の伝熱管外に設置してある。

2. 4 崩壊熱除去系冷却器(DRACSおよびPRACS)の構造

Fig. 2.6にDRACSの冷却コイルの構造を示す。外径 $\phi 19.0 \times t 2.0$ mmの5本のヘリ

カルコイルで、崩壊熱除去系のナトリウムはコイル配置の中央を 5 本の直管で下降し、最下点からヘリカルコイルを通り上昇してくる。PRACS も流路構成などは DRACS とおよそ同じであるが、冷却コイルが外径 $\phi 42.7 \times t 2.8$ mm の 2 本のヘリカルコイルである。

2. 5 計測システム

温度測定データは熱電対からの信号を零接点補償器を通し、直流アンプにより 200 倍に増幅し、13 ビットの A/D 変換器でデジタル化した後、ミニコンピューター（HP 製 A900）にてハードディスクに収録した。このシステムでは合計 800 点の熱電対信号の他、流量、差圧、ヒーター出力など合わせて全 880 点の信号を最速 16 msec 間隔で収録可能である。A900 で収録したデータは後述する熱電対の相対較正、流量較正等の結果を用いて、ワークステーションにより物理量に変換した。熱電対の相対較正是試験前後で測定した等温データを用いて以下のように行った。炉心部通過流量を 1000 ℥ / min に設定し、炉容器出口温度が 300°C 一定になるよう制御し、この状態を 30 分間以上保持して、試験体部を等温状態にした。この状態で試験体部に設置してある全熱電対のデータを 60 秒間、16 msec の間隔で収録した。収録した個々の熱電対のデータは時間平均し、中心集合体の AE 断面（バンドル内発熱部下端 160 mm 下方）の中央にある熱電対で測定した値を基準温度として各熱電対を相対較正した。流量計については、落下法による絶対較正を実施した。また、試験前に全てのバルブを閉じて零流量データを収録し、零点較正をした。ヒーター電力計については、計器スパンにより出力を求めるものとし、零点は零出力時のデータに基づき求めた。

3. 試験方法

3. 1 試験パラメータ

自然循環崩壊熱除去時には、崩壊熱除去系（DRACSおよびPRACS）やIHX二次系の運転条件が、一次系自然循環挙動に影響を及ぼすと考えられる。本試験では、これら系統の運転条件が炉心部および一次冷却系の熱流動現象に与える影響を把握することを目的に、実機（100万kW級）を模擬したスクラム過渡から一次系を自然循環に移行させた長時間（約7000秒）にわたるシステム過渡試験を実施した。試験パラメータは、崩壊熱除去系の種類（DRACSおよびPRACS）、運転の有無、崩壊熱除去系の起動遅れ、IHX二次系自然循環の継続時間とし、炉心部、一次系、IHX二次系、崩壊熱除去系の熱流動現象、相互作用について検討した。各試験ケースの試験条件をTable3.1に、また、IHX二次系および崩壊熱除去系の運転条件をFig. 3.1に示す。

DRACSを用いた場合では、4ケースの試験を実施した。基本ケースDRACS-REFの設定条件として、DRACSはスクラムから60秒後に起動し、循環流量を90ℓ/min、空気冷却器（A/C）風速を約7m/sで強制運転した。IHX二次系はスクラムと同時に強制循環を停止して、A/Cダンパー全開の自然循環に切り替え、2400秒後にはIHX二次系配管バルブを全閉にしてIHX二次系の自然循環を停止した。崩壊熱除去系（DRACSおよびPRACS）の初期定常時（待機状態）は、起動時の運転操作性の問題から、A/C系は完全停止（ダンパー全閉）で、Na循環系は約10ℓ/minの循環状態とした。このDRACS-REFとの比較で、DRACSを運転しないケースDRACS-1、DRACSをスクラムから1800秒後にDRACS-REFと同一条件で起動したケースDRACS-2、並びに、DRACS運転はDRACS-REFと同一条件とし、IHX二次系自然循環を試験終了まで継続運転したケースDRACS-3を設定した。

PRACSを用いた場合では、その基本ケースPRACS-REFのPRACS運転条件およびIHX二次系運転条件はDRACSを用いた場合の基本ケースDRACS-REFと同一にした。PRACS起動遅れのケースでは、1800秒にPRACSを起動しIHX二次系自然循環を2400秒に停止したケースPRACS-1と、IHX二次系自然循環をPRACS起動前（1620秒）に停止したケースPRACS-2を設定した。また、PRACSの運転条件はPRACS-REFと同一で、IHX二次系自然循環をスクラムと同時に停止したケースPRACS-3を設定した。DRACSおよびPRACSで実施した各試験ケースにおける崩壊熱除去系およびIHX二次系の流量変化をFig. 3.2 および Fig. 3.3に示す。

尚、IHX二次系自然循環の停止時間である2400秒は任意に設定したものである。

3. 2 一次系過渡条件

炉心出力および一次系流量の過渡条件は全試験ケースで同一とした。DRACS-REFのケースを例に取り、Fig.3.4に本試験で設定した出力および一次系流量の過渡条件を示す。スクラム前の初期定常状態では、装置性能上設定可能な条件として、実機定格運転時の12%相当の出力および流量を設定した。この条件で、ピン表面熱流束の軸方向平均値は 14.9W/cm^2 、ピンバンドル部平均流速は 60cm/sec となる。出力は中心集合体および6体の周辺集合体で各々同一になるように等配分している。しかし、循環流量に関しては、Fig.3.4でわかるように初期定常時では中心集合体の通過流量が周辺集合体より高く、等流量になっていない。本試験装置では模擬炉心への入口配管が3本下部プレナムから出ており、1本は中心集合体に、2本は $0-180^\circ$ 線で分けた3体づつの周辺集合体の2ブロックにそれぞれつながっている。流量は入口配管に設置してある各流量調節弁の弁開度で調節するが、各集合体の通過流量を等配分にできる弁開度が高流量時と低流量時で異なるため、高流量の初期定常から低流量の自然循環までを一貫して等配分にすることは不可能であった。従って、自然循環時の流量を重視する意図から、実機定格2%相当の低流量で等配分になる弁開度、すなわち、中心流路弁(SV105M)は全開で、2つの周辺流路弁(SV103M, 104M)は約77%開度に固定して初期定常条件を設定した。初期定常状態で、中心集合体と周辺集合体の流量配分がズレているのはその為である。なお、各流量調節弁の開度設定に関しては、圧力損失を小さく抑える意図から、できるだけ大きな開度を設定した。この初期定常状態から出力は実機平衡炉心からの崩壊熱カーブ(点線で示す)を模擬して変化させた。スクラム開始から30秒間は出力を崩壊熱カーブよりも低めに設定してあるが、この理由は実機の出力/流量比をできるだけ模擬し、初期の炉心部の温度変化を実機で想定される変化に合わせるためである。一方、一次系流量は実機のフローコーストダウンカーブをできるだけ模擬し半減時間7秒で低下させ、スクラムから約61秒後に主循環ポンプを停止し、自然循環状態に移行させた。フローコーストダウンカーブの再現性を確保するためには、一次系流路の主弁(SV101M)の開度を小さく設定する必要があるが、自然循環状態では弁開度を全開にして圧力損失を抑える必要がある。その点を考慮し試験では、スクラム開始から31秒後に主弁の開度を約7%から全開に操作した。Fig.3.4のスクラム過渡時の流量変化において、スクラム開始から約35秒前後に流量変動が生じているのは、この弁操作によるものである。スクラム過渡時の流量カーブに変動が生じるが、この操作により、流量カーブの再現性はほぼ得られ、また、自然循環時の圧力損失を抑えた。

4. DRACSでの過渡試験結果

4.1 基本ケース (DRACS-REF) の一次系自然循環流量および各部温度挙動

基本ケースでは、DRACSをスクラムと同時に起動させ、循環流量は約90 ℥/min、空気冷却器（A/C）風速は約7m/sの強制運転とした。また、IHX二次系はスクラムと一緒に強制循環を停止して、A/Cダンパーを全開にした自然循環に切り換える。スクラムから2400秒後にはIHX二次系配管バルブを全閉にして自然循環を停止した。以下に、基本ケースにおける一次系自然循環流量および各部温度の結果を示す。

(1) 一次系自然循環流量

Fig.4.1-1に基本ケースの一次系自然循環流量の時間変化（a）と上部プレナム出口温度および中間熱交換器（IHX）一次側出入口温度の時間変化（b）を示す。横軸の時間はスクラム開始時刻を0秒として表示している。循環流量は中心集合体の通過流量（Center S/A）と6体の周辺集合体を0-180°線で2分した周辺1（Outer S/A 1:90°側の3集合体A,B,C）の通過流量、並びに周辺2（Outer S/A 2:270°側の3集合体D,E,F）の通過流量をそれぞれ実機定格流量に対する比率で示してある。スクラム後、循環流量は一旦は約1%相当まで低下し、スクラム開始から61秒後に循環ポンプを停止すると、約100秒には自然循環の状態で約2%相当まで回復した。その後、自然循環流量は徐々に低下し、1400~2400秒では1.1~1.0%相当でほぼ一定している。また、1400秒頃からは中心集合体と周辺集合体の通過流量に差が生じている。IHX二次系の自然循環を停止した2400秒以降では、中心集合体の通過流量が徐々に0.6%相当まで低下するのに対し、周辺集合体の通過流量は著しく低下している。特に周辺1の流量は3000秒から負に転じ、逆流が生じている。周辺2では負の流量は示さず、周辺1の流量が負に転じると、逆に流量が増加している。約5500秒以降では両周辺の通過流量は共にゼロで一致している。

一方、IHX出入口の温度変化を見ると、上部プレナムが炉内冷却器（DHX）で冷やされるため、IHX入口温度はそれに伴い徐々に低下している。IHX出口では、IHX二次系を強制循環から自然循環に移行したことによる冷却量の低下により、段階的に温度が上昇し、IHX二次系自然循環を停止した2400秒からは急激に温度上昇してIHX入口とほぼ近い温度で一定している。一次系自然循環流量とIHX出口温度を比較すると、一次系自然循環流量はIHX出口温度に追従した変化をしており、IHX出口温度が上昇すると循環流量は減少している。これにより、一次系自然循環流量に対してIHX出口温度、すなわちIHX二次系からの除熱が大きく影響していると考えられる。

(2) 上部プレナム内温度

Fig.4.1-2に基本ケースの上部プレナム内軸方向温度分布の時間変化を示す。温度は上部プレナムの周方向30°の中間部 (TRI030) と模擬炉心槽側壁に沿った30°方向 (TCS030) および270°方向 (TCS270) の熱電対ツリーで測定した。PLANDTL-DHX装置では、DHXが270°方向に一基設置され、集合体出口高さより100mm低い位置から、冷却された低温ナトリウムが流出している。しかし、各箇所の温度分布には差が見られないことから、周方向および径方向に著しい温度分布はないと判断できる。軸方向温度分布の時間変化を見ると、500秒までは内筒上端高さ (700mm) 以下のレベルで温度が低下し、500秒以降からは700mmより上方を含めて全体の温度が徐々に低下している。軸方向温度分布形状より、DHXからの低温ナトリウムが上部プレナム底部に成層化しているのがわかる。

Fig.4.1-3は模擬炉心出口高さ位置での模擬炉心槽側壁および30°方向プレナム中間部で測定した上部プレナム内温度と模擬炉心（中心集合体）出口温度との比較である。スクラム直後は出力の低下により、模擬炉心からは低温ナトリウムが上部プレナム内に流出する為、炉心出口に近い炉心槽側壁ではプレナム中間部より温度が低下している。その後は、DHXの冷却により、各箇所の上部プレナム内温度は一致して低下している。一方、模擬炉心出口温度は上部プレナムとの温度差が大きくなるにつれて激しい温度揺らぎを示している。この温度揺らぎは、上部プレナムの低温ナトリウムが集合体内に潜り込み、集合体内の高温上昇流と混合して生じていると考えられる。

(3) 模擬炉心部温度

DRACSを用いた場合では、DHXからの低温ナトリウムが炉心部の集合体間ギャップに潜り込み自然対流するインターラッパーフロー (IWF) 現象が生じ、炉心部熱流動挙動に影響を与える。はじめに、ギャップ部の温度変化からIWFの発生状況を示す。Fig.4.1-4は模擬炉心部各断面の90°および270°方向に位置する内側および外側ギャップの温度変化である。IWFの発生はギャップの温度揺らぎとギャップ間の温度差から判断できる。中性子遮蔽体下部断面 (DA: 出口より55cm下方) の高さでは、既に400秒頃から温度揺らぎが生じ、また、内側ギャップよりも外側ギャップ温度が低く、ギャップ間に温度差が生じている。これより、DA断面では400秒頃からIWFが発生していると判断できる。DA断面より下方の発熱上端断面 (BI: 出口より1155mm下方) では、1000秒頃から温度揺らぎが生じ、ギャップ間にも温度差が生じ

ている。また、2800秒以降では90°方向内側ギャップで激しい温度揺らぎが発生している。更に、下の発熱中央断面（BD：発熱上端より500mm下方）になると、3000秒頃から温度揺らぎが発生し、ギャップ間に温度差が生じている。これにより、IWFが時間とともに下方に進展しているのがわかる。

次に、周辺集合体内の温度変化を示す。Fig. 4.1-5a~5cは各周辺集合体の中性子遮蔽体各断面の流路中央（上段）と発熱部各断面の中心サブチャンネル（下段）の温度変化である。但し、周辺集合体AとFの発熱中央断面（BD）においては熱電対が中心集合体側の壁サブチャンネルに1本だけ取り付けてあるので、そこで測定温度である。また、周辺集合体Aの入口温度は熱電対不良のため計測できなかった。集合体出口に最も近い中性子遮蔽体上部断面（DC：出口より5cm下方）の温度変化を見ると、約400秒から振幅の大きい温度揺らぎが全ての周辺集合体で生じている。DC断面より下方の、中性子遮蔽体中央断面（DB：出口より30cm下方）および中性子遮蔽体下部断面（DA）では温度揺らぎがほとんど見られないことから、上部プレナムの低温ナトリウムはDC断面あたりまで潜り込み、上界循環流と混合されて集合体出口から流出していると判断できる。周辺集合体C,DおよびEにおいては、このDC断面での激しい温度揺らぎが試験終了の7000秒まで連続して発生し、下方断面では温度揺らぎが生じていないことから、集合体内への低温ナトリウムの潜り込みの進展は認められない。それに対し、周辺集合体A,BおよびFのDC断面では、IHX二次系自然循環停止後の約2800秒から温度が急激に低下し、それと共に温度揺らぎが小さくなっている。2800秒頃からの急激な温度低下は、更に下方の発熱上端断面（BI）でも生じ、発熱中央断面（BD）の温度よりも低くなっている。また、周辺集合体BとFの集合体入口（AE断面）温度は約3000秒から急激に上昇している。同様な温度上昇は、周辺集合体Aの入口でも発生したと推察される。これらの温度挙動より、周辺集合体A,BおよびFでは2800秒頃から逆流が発生し、上部プレナムの低温ナトリウムの集合体内への流入により集合体内部の温度が低下し、また、集合体入口では発熱部で加熱されたナトリウムの逆流により温度が上昇したと判断できる。（1）項の一次系自然循環流量の結果において、周辺1の通過流量が3000秒頃から負に転じていたが、実際に逆流が発生した集合体は、周辺1側では周辺集合体AとBであり、Cでは発生していない。また、周辺2側でも、周辺集合体DとEでは逆流はしていないが、周辺集合体Fで逆流が生じていたと判断できる。尚、逆流が発生していない周辺集合体C,D,Eの集合体入口でも3000秒頃から温度が上昇しているのは、IHX出口の温度上昇に伴い高温のナトリウムが循環してくること、逆流が生じた周辺集合体の入口温度

の上昇に伴い入口プレナムの温度が上昇したこと、および集合体間熱移行により温度が上昇したためと考えられる。

次に、中心集合体内の温度測定結果を示す。Fig.4.1-6に中心集合体の上部中性子遮蔽体各断面の流路中央と発熱部各断面の中心サブチャンネルの温度変化を示す。中性子遮蔽体上部断面（DC）では1400秒頃から激しい温度揺らぎが生じているが、その下の中性子遮蔽体中央断面（DB）では温度揺らぎがほとんど見られないことより、集合体内への低温ナトリウムの潜り込みはDC断面より下方には達していない。集合体内の温度はスクラム直後に低下し、約100秒後には循環流量低下による上昇が起り、その後は一次系自然循環流量の変動とともにピーカー温度を示している。2400秒までの発熱部温度は発熱部下端から順に高くなっているが、IHX二次系の自然循環を停止した2400秒からは発熱上部の温度上昇が小さく、3000秒には発熱上端断面（BI）とその下のBG断面（発熱上端より17cm下方）およびBE断面（発熱上端より33.5cm下方）の温度が一致している。更に、5000秒からは発熱中央断面（BD）の温度まで一致している。

Fig.4.1-7に中心集合体中心サブチャンネルに沿った軸方向温度分布を示す。400秒から2800秒の軸方向温度分布では、発熱下端から発熱上端にかけて温度上昇し、発熱上端で最高温度を示している。時間の経過とともに一次系自然循環流量は徐々に低下しているため、発熱部の温度上昇勾配もそれに従い増加している。一方、発熱上端より上の非発熱ピンバンドルから中性子遮蔽体域では、温度低下の勾配が徐々に増加している。これには、発熱部の高温ナトリウムの輸送遅れも影響していると思われるが、Fig.4.1-4で示したギャップ部温度の結果より、IWFによる冷却効果が徐々に現れているためと考えられる。3000秒からは、非発熱部から中性子遮蔽体での温度低下に加えて、発熱部上部の温度上昇勾配が減少している。3200秒には発熱部のBE断面からBI断面で温度上昇がなく一定となり、更に、6000秒にはBD断面から温度上昇を示していない。

Fig.4.1-8に発熱上端断面（BI）および発熱中央断面（BD）の90 - 270° 方向温度分布を示す。この図で横軸の±40mmおよび±120mm近傍にある点は、集合体間ギャップの温度を示している。BI断面の400秒から2800秒では、集合体内温度に比べギャップ部温度がより低くなり、中心集合体内温度分布は中心サブチャンネルを頂点とするより急峻な分布に変化している。しかし、3000秒からは中心集合体の90° 方向側の温度が急激に低下し、非対称な分布形状に変化している。これは、90° 方向側の内側ギャップ温度が極端に低下していること、また、90° 方向側の周辺集合体Bの温

度が逆流により中心集合体よりも低下していることから、IWFによる冷却効果と集合体間熱移行による冷却効果が複合して作用しているためと考えられる。一方、BD断面では400秒から2800秒までは温度分布が徐々に平坦化するのに対し、3000秒からはギャップ温度が顕著に低下して中心集合体の温度分布はより急峻な分布に変化している。これにより、3000秒以降ではIWFによる冷却効果が中心集合体に作用していることがわかる。また、BD断面の周辺集合体の温度は中心集合体より低くないことから、集合体間熱移行による冷却効果は作用していないと考えられる。

Fig.4.1-9a～9bには中心集合体の発熱上端断面（BI）と発熱中央断面（BD）の断面温度分布を示す。BI断面の1200秒、2800秒では、最高温度がほぼ中心サブチャンネルの位置にあり、外側に向かって各方向一様に温度低下している。また、1200秒に比べ2800秒では等温線が密になり、中心と外側の温度勾配が大きくなっている。3600秒と6000秒では、 $315\sim90^\circ$ 側の温度低下が著しく生じ、その影響で最高温度の形成される位置が中心サブチャンネルから 210° 方向にシフトしている。これらの断面温度分布より、2800秒の中心集合体は各方向から一様に冷却されているのに対し、3600秒、6000秒では逆流が発生した周辺集合体A,B,Fが位置する $315\sim90^\circ$ 側から強く冷却されている。一方、BD断面では、BI断面のような偏った温度分布は発生せず、2800秒からは徐々に中心サブチャンネルで最高温度を示す等温線が密な分布形状に変化している。3600秒以降において、BD断面の中心集合体は径方向から均一に冷却されている。

Fig.4.1-10には中心集合体発熱上端断面（BI）の $90\sim270^\circ$ 径方向に位置するNo.1～4の各サブチャンネル温度を各時間帯で比較したものである。No.1～4は各々 90° 方向壁サブチャンネル、 90° 方向内部サブチャンネル、中心サブチャンネルおよび 270° 方向壁サブチャンネルである。2800秒の各サブチャンネルでは、ほとんど温度揺らぎが生じていないのに対して、3600秒では 90° 方向壁サブチャンネル（No.1）で温度揺らぎが顕著に生じ、6000秒には 90° 方向内部サブチャンネル（No.2）および 270° 方向壁サブチャンネル（No.4）でも生じ、温度揺らぎが集合体内部に広がっている。また、 90° 方向壁サブチャンネルの温度揺らぎ幅は6000秒になると更に大きくなっている。

Fig.4.1-11はFig.4.1-10で示した6000秒における 90° 方向壁サブチャンネルの温度揺らぎをラッパー管を介して近接する 90° 方向内側ギャップ部温度の揺らぎと比較した結果である。 90° 方向壁サブチャンネルの温度揺らぎ幅はギャップ部温度よりも小さくなっている。しかし、揺らぎの周期に注目すると、 90° 方向壁サブチャンネ

ル温度はギャップの温度揺らぎに対して約8秒遅れて同調して揺らいでいる。このことは、Fig.4.1-12に示す両者の温度揺らぎの相互相関を求めた結果からも確認でき、相互相関関数はラグタイム約8秒で最も大きなピークを示している。これらのことより、集合体間ギャップの温度揺らぎは、ラッパー管を介して集合体内に伝わり、集合体内部の温度揺らぎを誘発することがわかる。

以上の模擬炉心部の温度結果より、中心集合体の温度挙動は2800秒前後で大きく異なり、周辺集合体で逆流が発生した2800秒過ぎからは、発熱部の温度上昇が減少している。これは、2800秒過ぎから中心集合体に対して径方向から強い冷却効果が作用している為である。すなわち、発熱上端断面（BI）では315~90°方向側から、逆流で温度低下した周辺集合体からの集合体間熱移行による冷却効果とIWFによる冷却効果が複合して作用し、また、発熱中央断面（BD）においては、IWFによる冷却効果のみが作用している。

4.2 DRACS運転の有無による影響（DRACS-REFとDRACS-1の比較）

崩壊熱除去システムにDRACSを採用した場合には、炉内冷却器からの低温ナトリウムが上部プレナム底部に成層化し、更に、IWFの冷却効果により炉心部温度が低下することで、自然循環ヘッドが減少して一次系自然循環流量が低下すると指摘されている。また、IWFは炉心部の温度挙動に対して大きな影響を与える。ここでは、基本ケース（DRACS-REF）とDRACS運転をしないケースDRACS-1の一次系自然循環流量と各部温度の結果を比較し、DRACS運転の有無による影響を検討する。

尚、DRACS-1では模擬炉心最高温度（中心集合体発熱上端中心サブチャンネル）が装置許容温度（650°C）を越える恐れがあった為、試験は3000秒で中止している。

（1）一次系自然循環流量の比較

Fig.4.2-1にDRACS-1の一次系自然循環流量変化（a）と上部プレナム出口および中間熱交換器（IHX）一次側出入口の温度変化(b)をそれぞれ示す。DRASCを運転していないため、上部プレナム出口とIHX入口の温度は初期定常時の温度でほぼ一定している。IHX出口温度は基本ケースの場合と同じ変化を示し、IHX二次系の自然循環を停止した2400秒からは急激な温度上昇を示している。一方、一次系自然循環流量はIHX出口温度の上昇とともに低下し、中心集合体と周辺集合体の通過流量が2800秒頃まで一致し、その後は、周辺集合体の通過流量が中心集合体よりも低くなり、3000秒には約0.4%まで低下している。尚、DRACS-1の3000秒までの流量変化からは、

逆流の発生は認められない。

Fig.4.2-2は一次系自然循環流量の基本ケースとの比較である。両ケースの全自然循環流量を比較すると、1200秒頃までは一致し、それ以降で基本ケースの流量がDRACS-1よりも低下している。各集合体の通過流量で両ケースを比較すると、中心集合体の通過流量は2400秒までほぼ一致しているのに対し、周辺1では1000秒頃から、また、周辺2では1200秒頃から基本ケースの流量がDRACS-1よりも低下している。これにより、DRACS運転が一次系自然循環流量に与える影響は、中心集合体の通過流量よりもIWFによる冷却が作用しやすい周辺1および周辺2の通過流量に現れ、自然循環流量を低下させる。

(2) 上部プレナム内温度の比較

模擬炉心部の温度挙動に関しては、炉心出口近傍の上部プレナム内温度が影響すると考えられる為、炉心出口の高さ位置での上部プレナム内温度に注目し、DRACS運転の有無による上部プレナム内温度を比較する。Fig.4.2-3に両ケースの模擬炉心出口の高さ位置での上部プレナム内温度の時間変化を示す。両ケースとも上部プレナムの周方向および径方向で温度差がないことから、代表値として30°方向プレナム中间部で測定した温度を示す。DARCSを運転しないDRACS-1では、炉心部から流出した高温ナトリウムの影響で初期定常時の約450°Cから若干温度上昇している。それに対し、DRACSを運転した基本ケースでは、DHXから低温ナトリウムがプレナム底部に流出するため、上部プレナム内温度は徐々に低下している。3000秒では、基本ケースの温度がDRACS-1よりも約80°C低下している。

(3) 模擬炉心部温度の比較

Fig.4.2-4a～4bにDRACS-1における各周辺集合体の中性子遮蔽体各断面の流路中央と発熱部各断面の中心サブチャンネルの温度変化を示す。但し、周辺集合体AとFの発熱中央断面（BD）の温度は中心集合体側の壁サブチャンネルで測定した温度であり、また、周辺集合体Aの入口温度と周辺集合体Bの中性子遮蔽体上部断面（DC）の温度は熱電対不良により計測していない。基本ケースでは、周辺集合体A,B,Fで逆流が発生し、約2800秒から上部プレナムの低温ナトリウムが集合体内に逆流して急激な温度低下が集合体内で生じていた。一方、DRACS-1では、周辺集合体B,Cの発熱上端断面（BI）の3000秒近傍の温度が発熱中央断面（BD）と同程度の温度を示し、他の周辺集合体よりもBI断面の温度上昇が小さくなっている。しかし、基本ケース

で見られる程の温度低下は、全ての周辺集合体で発生していない。

Fig.4.2-5はDRACS-1における中心集合体の中性子遮蔽体各断面流路中央と発熱部各断面中心サブチャンネルの温度変化である。集合体出口に最も近い中性子遮蔽体上部断面（DC）では、集合体内温度が急激に上昇する2400秒頃から温度揺らぎが著しく生じている。DRACS-1ではDRACSを運転していないため上部プレナム内温度の低下はないが、集合体出口温度の上界に伴い上部プレナム内温度と相対的な温度差が大きくなり、また、自然循環流量が低下していることが起因して、上部プレナムの低温ナトリウムが集合体内部に潜り込んだと考えられる。

Fig.4.2-6に両ケースにおける発熱上端断面（BI）と発熱中央断面（BD）の中心サブチャンネル温度の時間変化を示す。縦軸は集合体入口（AE断面）からの温度上界幅（入口からの温度差）である。BI断面の両ケースの温度変化はIHX二次系自然循環を停止する2400秒までは良く一致し、それ以降で差が生じている。DRACS-1で見られる2400秒からの急激な温度上昇に対し、基本ケースでは温度上昇が小さく3000秒手前からは温度が低下している。一方、BD断面の両ケースの温度は3000秒まで一致している。

Fig.4.2-7は両ケースの中心集合体中心サブチャンネルに沿った軸方向温度分布を各時間で比較した結果である。1200秒の軸方向温度分布は両ケースでほぼ一致しているが、これ以降、両ケースの温度差は集合体出口に近い中性子遮蔽体から顕著になり、次第にその下の発熱部でも見られている。3000秒の発熱部の温度分布を比較すると、DRACS-1では発熱上端まで温度上昇し最高温度となるのに対し、基本ケースでは発熱中央より上部で温度上昇勾配が小さく、発熱上端からBE断面（発熱上端より33.5cm下方）まで温度がほぼ一定となっている。

Fig.4.2-8に両ケースの発熱上端断面（BI）および発熱中央断面（BD）の90° - 270°方向温度分布を比較して示す。両ケースのBI断面を比較すると、3000秒での分布形状に違いが見られ、基本ケースでは90°方向内側ギャップの極端な温度低下と中心集合体内の90°方向側の急激な温度低下が生じ、DRACS-1の分布形状とは大きく異なっている。これにより、基本ケースのBI断面では、DRACS-1に比べ、90°方向側から強く冷却されているのがわかる。一方、BD断面においては、両ケースの温度分布形状は、3000秒までほぼ類似している。

Fig.4.2-9に両ケースの発熱上端断面（BI）および発熱中央断面（BD）のギャップ部温度を示す。基本ケースのBI断面ギャップでは1000秒頃から温度揺らぎが発生し、ギャップ間にも温度差が生じていることより、IWFが発生している。それに対し、

DRACS-1では3000秒まで温度揺らぎはほとんど見られず、IWFは発生していない。両ケースのIWFの発生の違いは1000秒以降から見られるが、Fig.4.2-6に示した中心サブチャンネル温度の比較結果では、2400秒まで差がなくIWFの冷却効果は現れていない。これは、2400秒までの一次系自然循環流量が実機定格比で1%相当以上ある為に、IWFの冷却効果が顕著に効かない為と考えられる。これまでの定常試験の結果⁴⁾では、循環流量が実機定格比1%相当以下の時、IWFの冷却効果が顕著に現れている。一方、BD断面ギャップにおいては、基本ケースでは2800秒頃から温度揺らぎが生じているが、DRACS-2では温度揺らぎは発生していない。

これらの結果より、IHX二次系自然循環停止（2400秒）前の中心集合体内温度については、DRACS運転による影響はあまり認められない。しかし、それ以降の一次系自然循環流量低下に伴う中心集合体発熱上端断面（BI）の温度上昇に対し、DRACSを運転した基本ケース（DRACS-REF）はDRACSを運転しないケース（DRACS-1）よりも温度上昇が抑制されている。これは、DRACSを運転した基本ケースでは、2800秒頃から一部の周辺集合体で逆流が発生し、BI断面の温度低下に起因した集合体間熱移行による冷却効果とIWFによる冷却効果が中心集合体に対して作用している為である。

4.3 DRACS起動遅れによる影響（DRACS-REFとDRACS-2の比較）

実機において、軽微なトラブルにより崩壊熱除去系をスクラム直後に起動できず、修復後に起動する場合を想定し、DRACS起動遅れによる影響を検討する。ここでは、起動遅れ時間として1800秒（30分）を設定したケースDRACS-2とスクラム直後にDRACSを起動した基本ケース（DRACS-REF）に関して、一次系自然循環流量と各部温度を比較する。尚、DRACS-2のIHX二次系の運転条件は基本ケースと同一である。

（1）一次系自然循環流量の比較

Fig.4.3-1にDRACS-2の一次系自然循環流量変化（a）と上部プレナム出口および中間熱交換器（IHX）一次側出入口の温度変化（b）を示す。一次系自然循環流量においては、中心集合体と周辺集合体の通過流量が2400秒まではほぼ一致し、IHX二次系の自然循環停止後は周辺集合体の通過流量が中心集合体よりも急激に低下している。また、周辺1の通過流量は3200秒頃から負に転じ、逆流が生じている。逆流は基本ケースの場合よりも200秒ほど遅れて発生している。一方、上部プレナム出口およびIHX入口の温度は、DRACSの起動遅れにより2000秒頃から低下し始めている。

Fig.4.3-2に一次系自然循環流量を基本ケースと比較した結果を示す。両ケースの全自然循環流量を比較すると、自然循環移行初期の100～1100秒にかけて流量差が見られるが、前節のFig.4.2-2のDRACS運転をしないケースDRACS-1と基本ケースの自然循環流量の比較において、両ケースの流量差は1200秒以降で現れていることを考慮すると、この流量差はDRACSの起動条件の相違により生じたものではなく、別の要因で再現性が得られず発生したものと考えられる。一方、1200秒以降での流量差はDRACSの起動条件の相違により生じたもので、DRACSの起動が遅いDRACS-2に比べ、基本ケースの流量は低下している。しかし、3500秒頃からは両ケースの流量はほぼ一致している。各集合体の通過流量の比較では、中心集合体の通過流量は両ケースでほぼ一致しているが、周辺1および周辺2では、1200～3500秒で流量差が生じている。これにより、DRACSの起動遅れによる影響は、中心集合体の通過流量には認められないが、周辺集合体の通過流量に現れ、周辺集合体で生じる逆流現象がスクラム直後にDRACSを起動した基本ケースよりも遅れて発生している。

(2) 上部プレナム内温度の比較

Fig.4.3-3に模擬炉心出口と同じ高さ位置での上部プレナム内温度を両ケースで比較した結果を示す。基本ケースではスクラム開始後から徐々に温度が低下し、試験終了時には約335°Cまで低下している。一方、DRACS-2では、1800秒まで一定温度で推移し、DRACS起動後から温度が低下して、試験終了時には約350°Cに達している。DRACSの起動時間の相違により、上部プレナム内の温度低下に差が生じている。

(3) 模擬炉心部温度の比較

Fig.4.3.4a～4bにDRACS-2における各周辺集合体の上部中性子遮蔽体各断面の流路中央と発熱部各断面の中心サブチャンネルの温度変化を示す。前節でも記したが周辺集合体AとFの発熱中央断面（BD）の温度は中心集合体側の壁サブチャンネルで測定した温度である。また、周辺集合体Aの入口温度は熱電対不良により計測していない。各周辺集合体の温度挙動はFig.4.1-5に示した基本ケースの場合と類似している。周辺集合体A,B,Fでは、中性子遮蔽体各断面および発熱上端断面（BI）の温度が約3000秒頃から低下し、発熱上端断面の温度は発熱中央断面（BD）の温度よりも低くなっている。また、集合体入口の温度は3000秒過ぎから上昇している。これにより、逆流はこの3体の周辺集合体で発生したと判断できる。一方、周辺集合体C,D,Eでは、中性子遮蔽体各断面および発熱上端断面で温度低下が現れていないことより、逆流

は発生していないと判断できる。

Fig.4.3-5にDRACS-2における中心集合体の上部中性子遮蔽体各断面の流路中央と発熱部各断面の中心サブチャンネルの温度変化を示す。全体の温度変化は基本ケース（Fig.4.1-6）と類似しているが、IHX二次系自然循環停止後（2400秒以降）の発熱上端断面（BI）の温度がその下のBE断面の温度、更に発熱中央断面（BD）の温度と一致する時間は、基本ケースよりも100、200秒程度遅くなっている。また、集合体入口温度が上昇しはじめる時間も遅くなっている。

Fig.4.3-6は両ケースの発熱上端断面（BI）と発熱中央断面（BD）の中心サブチャンネル温度を集合体入口（AE断面）からの温度上昇幅で比較した結果である。IHX二次系自然循環停止後（2400秒以降）のBI断面では、基本ケースに比べDRACS-2の温度上昇は大きく、ピーク温度で約25°C差がついている。また、その後のDRACS-2の温度低下は、基本ケースより300秒程度遅れている。BD断面でも同様な挙動を示しているが、両ケースのピーク温度差は約45°Cあり、BI断面よりも大きい。両ケースの中心集合体の一次系自然循環流量は1000秒以降良く一致していることから、IHX二次系自然循環停止後の両ケースの温度上昇幅の違いは、循環流量の差によるものではなく、IWFの冷却効果の違いが原因として考えられる。

Fig.4.3-7にはIHX二次系自然循環停止後の温度上昇からその後の温度低下に移行する時間帯（2800～3600秒）について、両ケースの中心サブチャンネルに沿った軸方向温度分布を集合体入口からの温度上昇幅で比較した結果を示す。2800秒においては両ケースの温度分布は一致し、発熱上端でピークを示しているが、時間経過とともに発熱部上方での温度上昇は小さくなり、3600秒には両ケースともBE断面から発熱上端まで温度上昇していない。この発熱部の温度上昇の低下は、基本ケースよりもDRACS-2では遅くなっている。

Fig.4.3-8a～8bに両ケースにおける発熱上端断面（BI）および発熱中央断面（BD）での90°～270°方向温度分布をそれぞれ示す。BI断面の2800秒までの温度分布形状は両ケースで大きな違いは認められない。しかし、それ以降での中心集合体内の90°方向側の急激な温度低下が基本ケースでは3000秒で生じているのに対し、DRACS-2ではまだ発生しておらず、温度低下の発生に時間遅れが生じている。また、BD断面においては、基本ケースの中心集合体の温度分布が2800秒まで平坦化し、3000秒からは徐々に中心サブチャンネルを頂点とした急峻な分布に変化しているのに対し、DRACS-2では基本ケースよりも遅れて急峻な温度分布に変化している。

これらの結果より、DRACS-2におけるIHX二次系自然循環停止後の中心集合体内

の温度低下は、基本ケースよりも遅れて発生していることがわかる。

次に、逆流が発生した周辺集合体の温度変化とギャップ部の温度変化を両ケースで比較する。Fig.4.3-9はDRACS-2および基本ケースで逆流が発生した3体の周辺集合体A,B,Fの発熱上端断面(BI)および集合体入口(AE断面)の温度を両ケースで比較した結果である。3体の周辺集合体とも、DRACS-2の逆流によるBI断面の温度低下は基本ケースに比べ遅く、基本ケースよりも高い温度で推移している。また、DRACS-2の集合体入口温度が上昇し始める時間は基本ケースよりも遅くなっている。これにより、DRACS-2では基本ケースに比べ、集合体間熱移行の発生は遅く、中心集合体に対する冷却効果も低いと考えられる。また、Fig.4.3-10に示す発熱上端断面(BI)および発熱中央断面(BD)のギャップ部温度の比較では、DRACS-2のBI断面およびBD断面ギャップでの温度揺らぎの発生が基本ケースよりも遅く、3000秒頃から生じている。これにより、DRACS-2では基本ケースよりもIWFの発生が遅いことがわかる。以上の結果、スクラム直後にDRACSを起動した基本ケースと1800秒後に起動したDRACS-2の模擬炉心部の温度挙動は、IHX二次系の自然循環停止後以降で異なり、DRACS-2の中心集合体内の温度は基本ケースよりも高い温度で推移している。これは、DRACS-2ではDRACSの起動が遅い分、上部プレナム内の温度低下が遅くなり、それにより逆流が生じた周辺集合体からの集合体間熱移行による冷却効果とIWFによる冷却効果の発生に時間遅れが生じ、冷却効果が低下している為と考えられる。

4.4 IHX二次系自然循環による影響 (DRACS-REFとDRACS-3の比較)

ここでは、IHX二次系自然循環を試験終了まで継続したケースDRACS-3と2400秒後に停止した基本ケースの一次系自然循環流量と各部温度を比較する。

尚、DRACSは両ケースともスクラム直後に起動している。

(1) 一次系自然循環流量の比較

Fig.4.4-1にDRACS-3の一次系自然循環流量変化(a)と上部プレナム出口およびIHX一次側出入口の温度変化(b)を示す。一次系自然循環流量はIHX出口温度に追従して変化し、100秒の約2.2%相当から段階的に低下している。IHX出口温度が安定する1000秒頃からは約1%相当で一定となっている。また、中心集合体、周辺1および周辺2の入口流量はほぼ一致し、一次系自然循環流量は全時間を通じて等配分されている。

Fig.4.4-2に一次系自然循環流量を基本ケースと比較した結果を示す。両ケースの全自然循環流量を比較すると、2400秒までは良く一致し、それ以降では基本ケースの流量がDRACS-3よりも大幅に低下し、大きな流量差が生じている。各集合体の通過流量を両ケースで比較すると、2400秒以降での流量差は中心集合体でも生じ、周辺1および周辺2ではより大きく現れている。これより、一次系自然循環流量に対して、IHX二次系自然循環は大きな影響を与えることがわかる。一次系自然循環流量はIHX出口温度の上昇とともに低下する傾向を示し、IHX二次系自然循環を停止した場合は、IHX出口温度が急激に上昇して、一次系自然循環流量は著しく低下する。

(2) 上部プレナム内温度の比較

Fig.4.4-3に両ケースの模擬炉心出口と同じ高さ位置での上部プレナム内温度を比較した結果を示す。両ケースの上部プレナム内温度は3200秒頃まで一致して低下し、それ以降ではDRACS-3の方がより低い温度で低下している。3200秒以降でDRACS-3の温度が基本ケースよりも低いのは、DRACS-3の一次系自然循環流量が約1%相当で安定し、基本ケースより低い温度のナトリウムが模擬炉心出口から流出しているためである。

(3) 模擬炉心部温度の比較

Fig.4.4-4にDRACS-3における中心集合体の上部中性子遮蔽体各断面の流路中央と発熱部各断面の中心サブチャンネルの温度変化を示す。DRACS-3の2400秒以降の温度変化は基本ケースと異なり、IHX二次系の自然循環を継続することにより、一次系自然循環流量が一定している為に、各断面の温度は徐々に低下している。また、集合体入口温度は300°Cではほぼ一定している。

Fig.4.4-5に両ケースの発熱上端断面(BI)と発熱中央断面(BD)の中心サブチャンネル温度を集合体入口からの温度上昇幅で比較した結果を示す。基本ケースではIHX二次系自然循環を停止した2400秒後から、一次系自然循環流量の低下にともないBI断面およびBD断面の温度上昇幅が一旦は増加している。しかし、BI断面の温度上昇幅は2800秒頃から低下しはじめ、3200秒にはDRACS-3より小さくなっている。また、BD断面の温度上昇幅はDRACS-3より小さくはならないが、3000秒頃から徐々に減少している。両ケースの中心集合体の通過流量を比較すると、2400秒以降から基本ケースの自然循環流量がDRACS-3よりも低いことから、中心集合体が側面で断熱状態であるならば、2400秒以降の温度上昇幅はDRACS-3よりも基本ケースで大き

いことになる。従って、DRACS-3と比較して、基本ケースの中心集合体に対しては、IHX一次系自然循環停止後から集合体側面より強い冷却作用が働いている。

Fig.4.4-6に両ケースの中心サブチャンネルに沿った軸方向温度分布を集合体入口からの温度上昇幅で比較した結果を示す。2000秒では両ケースの温度分布はほぼ一致し、発熱上端で最高温度を示している。2800秒の両ケースの温度分布形状は類似しているが、基本ケースに比べDRACS-3の発熱部の温度上昇幅は小さい。これは、この時間でDRACS-3の一次系自然循環流量が基本ケースよりも大きい為である。3200秒および5000秒では両ケースの温度分布は大きく異なり、基本ケースでは発熱部のBE断面から発熱上端まで温度上昇を示していない。3200秒の基本ケースでは、発熱上端から上方の温度上昇幅がDRASC-3よりも小さくなり、5000秒になると発熱上端より更に下のBE断面から温度上昇幅がDRACS-3よりも小さくなっている。この結果より、2400秒以降の一次系自然循環流量はDRACS-3よりも基本ケースの方が低いが、基本ケースでは2800秒を過ぎた時点から、発熱部の温度上昇幅の低下が発熱上端から更に下の断面に進み、DRASC-3よりも低下しているのがわかる。

Fig.4.4-7a～7bに両ケースにおける発熱上端断面（BI）および発熱中央断面（BD）の90°～270°方向温度分布をそれぞれ示す。BI断面の温度分布を比較すると、基本ケースの3000秒以降では中心集合体の90°方向側の温度が急激に低下しているのに対し、DRACS-3では中心サブチャンネルを頂点とした左右対称な急峻な温度分布を示している。また、基本ケースの3000秒以降では90°方向側の周辺集合体Bの温度が逆流のために極端に低下しているのに対し、DRACS-3では90°方向側の周辺集合体Bで逆流による温度低下ではなく、他の周辺集合体でも逆流は発生していない。基本ケースのBI断面では、中心集合体に対して、逆流により温度低下した周辺集合体からの集合体間熱移行による冷却効果とIWFによる冷却効果が複合して作用していたが、DRACS-3では集合体間熱移行による冷却効果は作用せず、IWFによる冷却効果のみが作用している。一方、BD断面の温度分布を比較すると、基本ケースの中心集合体では、2800秒の平坦な温度分布から中心サブチャンネルを頂点とする左右対称な急峻な温度分布に変化しているが、DRACS-3では平坦な温度分布を保持している。これにより、基本ケースのBD断面では、IWFによる冷却効果が作用しているのに対し、DRACS-3のBD断面では作用していないことがわかる。これらのこととは、次に示すギャップ部の温度変化の比較からも確認できる。

Fig.4.4-8に両ケースの発熱上端断面（BI）および発熱中央断面（BD）のギャップ部温度を比較して示す。DRACS-3のBI断面では、基本ケースとほぼ同じ1000秒頃か

ら温度揺らぎが生じ、IWFが発生している。しかし、3000秒以降の温度揺らぎは基本ケースほど激しくなく、また、ギャップ間の温度差も基本ケースより小さいことから、DRACS-3のIWFの冷却効果は基本ケースよりも小さいと考えられる。一方、BD断面においては、基本ケースでは2800秒以降からIWFが発生しているのに対し、DRACS-3では試験終了まで温度揺らぎがほとんど見られず、IWFは発生していない。

以上の結果より、IHX二次系自然循環を継続したケースDRACS-3では、一次系自然循環流量の安定により、中心集合体の温度上昇幅は徐々に減少している。一方、2400秒でIHX二次系自然循環を停止した基本ケースでは、一次系自然循環流量の低下により温度上昇幅は一旦は急激に増加し、2800秒過ぎからは基本ケースの中心集合体の温度上昇幅はDRACS-3よりも急激に減少している。2800秒過ぎからの温度上昇幅の低下が両ケースで大きく異なるのは、基本ケースではIHX二次系自然循環停止後に一部の周辺集合体で逆流が発生し、温度低下した周辺集合体からの集合体間熱移行による冷却効果とIWFによる冷却効果が作用しているのに対し、DRACS-3では逆流の発生がないため集合体間熱移行による冷却効果は作用せず、また、炉心部の高温化に対応したIWFによる冷却効果も基本ケースより小さい為と考えられる。

5. PRACSでの過渡試験結果

5.1 基本ケース（PRACS-REF）の一次系自然循環流量および各部温度挙動

PRACSを用いた場合の基本ケースでは、PRACSをスクラムと同時に起動し、循環流量は約90 ℓ/min、空気冷却器（A/C）風速は約7m/sで強制循環により運転した。また、IHX二次系は初期定常時の強制循環をスクラムと同時に停止して、A/Cダンパーを全開とした自然循環に切り換え、更に2400秒後にはIHX二次系配管バルブを全閉にして自然循環を停止した。以下に基本ケースの一次系自然循環流量および各部温度の結果を示す。

(1) 一次系自然循環流量

Fig.5.1-1に基本ケースの一次系自然循環流量変化（a）と上部プレナム出口および中間熱交換器（IHX）一次側出入口での温度変化（b）を示す。全時間を通じて中心集合体と周辺集合体の入口流量は一致し、自然循環流量が等配分されている。このことは、他のケースでも同様である。スクラムから100秒後には実機定格流量比で約2.2%相当の自然循環流量が得られているが、徐々に低下して600～800秒には約1.8%相当になっている。その後は、増加して1000秒頃からは約2%相当で一定している。

一方、IHX出口温度は初期定常時の約300℃からスクラム直後に一旦は低下し、その後、上昇して400秒頃に約325℃のピーク温度を示してから徐々に低下している。一次系自然循環流量が100秒から低下するのは、このIHX出口温度の上昇が起因している。IHX出口温度が上昇している理由は、IHX二次系からの冷却が減少していること、そして、PRACSからの冷却でIHX出口温度を低下させるには、ある程度の時間を要する為と考えられる。上部プレナム出口とIHX入口の温度は、一致して初期定常時の450℃から少しずつ低下している。これは、出力の低下により炉心出口から徐々に低い温度のナトリウムが流出し、上部プレナム温度が低下した為である。

(2) 上部プレナム内温度

Fig.5.1-2に基本ケースにおける上部プレナム内軸方向温度分布の時間変化を示す。温度は30° 方向上部プレナム中間部（TRI030）と模擬炉心槽側壁に沿った30° 方向（TCS030）および270° 方向（TCS270）の熱電対ツリーで測定した。1000秒過ぎから徐々に上部プレナム底部で温度低下が生じ、上部プレナム底部の温度低下はプレナム中間部よりも、模擬炉心出口高さの炉心槽側壁で大きくなっている。

Fig.5.1-3は模擬炉心出口と同じ高さ位置での模擬炉心槽側壁（270° と 30° 方向）

および30° 方向プレナム中間部で測定した上部プレナム温度と中心集合体出口（DC 断面）温度の時間変化である。炉心出口温度はスクラム直後の急激な出力低下により一旦は低下し、その後、循環流量の低下により上昇し、上部プレナムよりも高い温度を示している。上部プレナム温度より高い状態は約1000秒まで続き、それ以降は低くなっている。これは、1000秒頃から一次系自然循環流量が約2%相当まで回復し、一定しているのに対し、出力は徐々に減衰している為である。上部プレナム温度も炉心出口温度に影響され1000秒以降から徐々に低下し、プレナム中間部よりも模擬炉心部側壁で温度低下が早く生じている。また、模擬炉心部側壁では炉心出口からの低温ナトリウムと上部プレナム内ナトリウムとの混合により温度揺らぎが生じている。

（3）模擬炉心部温度

Fig.5.1-4は中性子遮蔽体および発熱部における各断面の集合体間ギャップ部の温度変化である。中性子遮蔽体上部断面（DC）および下部断面（DA）のギャップ部温度には温度揺らぎがほとんど見られず、IWFの発生は認められない。しかし、内側ギャップと外側ギャップでは温度差が生じ、1000秒までは外側ギャップの温度が内側ギャップより低下し、それ以降では逆に外側ギャップの温度が内側ギャップよりも高くなっている。中性子遮蔽体部は模擬炉心が炉心槽を介して上部プレナム底部に露出している部分であり、この温度差は上部プレナム底部の温度に影響されて発生したと考えられる。つまり、Fig.5.1-3の結果から、1000秒までは上部プレナムの温度が炉心出口温度より低いため、炉心槽側壁から冷却されて外側ギャップ温度が低下し、1000秒以降では逆に上部プレナム温度は炉心出口温度より高いために、外側ギャップ温度が高くなつたと考えられる。一方、発熱上端断面（BI）と発熱中央断面（BD）のギャップ部では、温度揺らぎはなく、また、内側および外側ギャップの温度は良く一致している。PRACSを用いた他のケースでも、ギャップ部の温度挙動は類似しており、IWFの発生は認められない。

次に集合体内部の温度結果を示す。DRACSを用いた場合とは異なり、PRACSを用いた場合では、中心集合体と各周辺集合体の温度挙動に差は生じていない。ここでは、主に中心集合体内の温度結果を示す。Fig.5.1-5は基本ケースにおける中心集合体の中性子遮蔽体各断面の中心流路（上段）と発熱部各断面の中心サブチャンネル（下段）の温度変化である。集合体内の温度はスクラム直後に低下した後、2つのピーク温度を示し、その後、徐々に低下している。最初のピーク温度はスクラム直

後の循環流量の低下で発生したものであり、600秒付近のピーク温度はIHX温度の上昇に伴う一次系自然循環流量の低下によるものである。Fig.5.1-6は中心サブチャンネルに沿った軸方向温度分布を示した結果である。時間の経過とともに出力が低下するため、発熱部の温度上昇勾配が減少し、温度分布は低温側にシフトしている。しかし、発熱上端で最高温度を示し、その上の非発熱部からはほぼ一定温度となる分布形状は各時間で変わっていない。Fig.5.1-7には発熱上端断面(BI)および発熱中央断面(BD)の90° - 270°方向温度分布を示す。各断面の径方向温度分布は、時間の経過とともに、より平坦な分布形状に変化している。

(4) IHX内部温度挙動

PRACSを用いた場合では、IHX上部プレナムに設置された冷却器で高温ナトリウムが冷却される。そのため、冷却コイル近傍の一次系側シュラウド部や上部管板部でのサーマルストライピングが問題となる。そこで、Fig.5.1-8にPRACSコイル近傍の一次系側シュラウド部5点と上部管板の伝熱管内部3点で測定した温度の時間変化を示す。各箇所の温度はスクラム直後から温度揺らぎを伴いながら急激に低下し、1000秒以降からは徐々に低下している。1000~1200秒の温度揺らぎを見ると、各測定箇所の温度揺らぎ幅は10°C以下であり、また、シュラウド下方ほど温度揺らぎは小さくなっている。PRACSを運転した他のケースでも同程度の温度揺らぎ幅を示しており、今回の試験条件下では、サーマルストライピングが問題となるような温度揺らぎは発生していないと考えられる。

5.2 PRACS起動遅れによる影響 (PRACS-REF, PRACS-1, PRACS-2の比較)

PRACS起動遅れ時間に1800秒を設定し、IHX一次系自然循環を2400秒(PRACS起動後)で停止したケースPRACS-1と1620秒(PRACS起動前)で停止したケースPRACS-2を実施した。この2ケースの一次系自然循環流量および模擬炉心部温度を基本ケースと比較し、RPACS起動遅れによる影響を検討する。

(1) 一次系自然循環流量の比較

Fig.5.2-1に各ケースの一次系自然循環流量変化(a)およびIHX一次側出入口温度変化(b)を比較した結果を示す。PRACSを1800秒に起動したPRACS-1およびPRACS-2では、基本ケースよりも一次系自然循環流量の低下が大きく、また、2%相

当の流量に回復するまでの時間が長くなっている。また、PRACS起動前にIHX二次系自然循環を停止したPRACS-2の1800~3000秒では、PRACS-1よりも流量が低下している。IHX出口温度を見ると、基本ケースは約400秒から出口温度が低下するのに対し、PRACS-1およびPRACS-2では、PRACSの起動が遅い分、出口温度の上昇が約2000秒まで続いた後、低下している。また、PRACS-2ではPRACS起動前にIHX二次系自然循環を停止しているため、1800~2000秒付近の温度上昇はPRACS-1よりも大きい。このことより、PRACSの起動が遅れるとIHX出口温度の上昇が進むため、一次系自然循環流量が低下する時間帯は長くなり、流量低下も大きく生じる。また、PRACS起動前にIHX二次系自然循環を停止すると、IHX出口温度が更に上昇し一次系自然循環流量はより低下することがわかる。

(2) 模擬炉心部温度の比較

Fig.5.2-2に各ケースの中心集合体の中性子遮蔽体上部断面（DC）温度と発熱上端断面（BI）中心サブチャンネル温度を比較して示す。PRACSを遅れて起動させたPRACS-1およびPRACS-2においては、温度上昇している時間帯が基本ケースに比べ長く、また、ピーク温度も高くなっている。更に、PRACS起動前にIHX二次系自然循環を停止したPRACS-2では、PRACS-1よりもピーク温度が高くなっている。これら各ケースの各温度は一次系自然循環流量に対応した変化を示している。

5.3 IHX二次系自然循環による影響（PRACS-REFとPRACS-3の比較）

ここでは、スクラムと同時にIHX二次系を完全停止したケースPRACS-3の一次系自然循環流量と模擬炉心部温度を基本ケースの結果と比較し、IHX二次系自然循環による影響を検討する。

(1) 一次系自然循環流量の比較

Fig.5.3-1に両ケースの一次系自然循環流量変化（a）およびIHX一次側出入口温度変化（b）を比較した結果を示す。200秒頃から生じる一次系自然循環流量の低下は、基本ケースよりもPRACS-3で大きく生じ、1800秒からは2%相当の自然循環流量で一致している。また、IHX出口温度を比較すると、100~400秒で見られるIHX出口温度の上昇は基本ケースよりもPRACS-3の方が大きく生じている。IHX出口温度が両ケースで異なるのは、基本ケースではIHX二次系を自然循環で運転しているのに対し、

PRACS-3ではIHX二次系を完全に停止しており、この冷却量の差が影響している。IHX二次系完全停止の状態でPRACSを起動するよりも、IHX二次系自然循環の状態でPRACSを起動した方が、IHX二次系からの冷却効果によりIHX出力の温度上昇が抑制され、一次系自然循環流量の低下を抑えることがわかる。

(2) 模擬炉心部温度の比較

Fig.5.3-2に両ケースの中心集合体の中性子遮蔽体上部断面（DC）温度と発熱上端断面（BI）中心サブチャンネル温度を比較して示す。集合体内の温度は一次系自然循環流量に対応して変化し、約600秒で現れているPRACS-3のピーク温度は、基本ケースよりも高くなっている。これは、基本ケースよりも、PRACS-3の一次系自然循環流量が低下している為である。

6. 考察

6.1 一次系自然循環ヘッドの推移の比較

ここでは、各試験ケースの一次系自然循環ヘッドを形成する、流路に沿ったナトリウム密度分布の時間変化を求め比較する。Fig.6.1-1にPLANDTL-DHXの一次系ループの高低関係図を示す。図中の①～⑨は各々、①模擬炉心発熱部入口（AE断面）、②発熱中央（BD断面）、③発熱上端（BI断面）、④模擬炉心出口高さのプレナム中間部、⑤内筒上部、⑥IHX入口、⑦IHX出口、⑧下部プレナム出口、⑨模擬炉心入口を示し、ナトリウムはこの順路で一巡する。高さ位置の基準（0mm）は一次系ループの最下部配管とし、一次系ループの各箇所で測定した温度を密度に換算し高さとともに示した。自然循環ヘッド（H）は流路に沿った線積分（ $H = \int \rho g dh$ ）で表され、密度-高さ曲線において時間回りに開まれた領域の面積が正のヘッド、反時計回りに開まれた領域の面積が負のヘッドに対応する。尚、集合体内の温度には断面平均温度を用いた。以下に各試験ケースにおける一次系ループの密度-高さ曲線の時間変化を示す。

（1）DRACSを用いた各試験ケースの一次系自然循環ヘッド

基本ケース（DRACS-REF）における一次系ループの密度-高さ曲線の時間推移をFig.6.1-2a～2cに示す。それぞれの図は模擬炉心部の流路に中心集合体、周辺1側の周辺集合体B、および周辺2側の周辺集合体Eを選んだ時の密度-高さ曲線の時間変化である。横軸はナトリウム密度、縦軸は測定高さを示している。模擬炉心を上昇する方向の流れに対して、負の循環力として働く領域は黒塗りで示してある。Fig.6.1-2aに示す中心集合体における密度-高さ曲線の変化を見ると、スクラムから500秒後には、DHXによる上部プレナム温度の低下で、④上部プレナムから⑥IHX入口にかけて負の循環ヘッドが小さく存在している。しかし、IHX二次系からの冷却により⑦IHX出口温度が低く保たれている為、その他の箇所では正の循環ヘッドを示している。2000秒になるとDHXによる上部プレナム温度の低下が促進され、上部プレナムの負の循環ヘッドは増加している。また、IHX二次系からの冷却効果の低下により⑦IHX出口温度が上昇して、IHX出口下流側に負の循環ヘッドが発生している。3500秒では、IHX二次系の自然循環を完全に停止している為、IHX出口下流側の負の循環ヘッドが増加している。また、中心集合体内の温度上昇が低下している為、集合体が位置するループ中間部の正の循環ヘッドが減少している。5000秒および6000秒では、IHX出口下流側の負の循環ヘッドに減少傾向が見られるが、中心集合

体内の温度上昇が更に低下している為、正の循環ヘッドは更に減少している。一方、Fig.6.1-2bの周辺集合体Bにおける密度一高さ曲線を見ると、500秒から2000秒では、③発熱上端から集合体出口にかけての温度が徐々に低下している為、中心集合体に比べ、この部分での正の循環ヘッドが顕著に減少している。3500秒以降では、周辺集合体Bで逆流が発生していたが、集合体内の温度は②発熱中央まで上昇し、その上からは温度低下を示している。その為、集合体が位置するループ中間部の正の循環ヘッドは中心集合体よりも小さくなっている。周辺集合体では、⑨集合体入口～①発熱部入口の間に温度計測点がない為、図上ではIHX出口下流側の負の循環ヘッドが中心集合体よりも小さく描かれているが、実際は同程度と考えられる。Fig.4.1-4cの周辺集合体Eにおける密度一高さ曲線においても、周辺集合体Bほど著しくはないが、500秒から2000秒の発熱上端から集合体出口にかけての正の循環ヘッドは中心集合体よりも若干低下している。また、3500秒から6000秒の集合体が位置するループ中間部の正の循環ヘッドは中心集合体とほぼ同程度で時間の経過とともに減少している。ここで、2000秒以降にIHX下流部で形成される大きな負のヘッドについては、本試験装置における特有なものである。PLANDTL-DHX装置では、IHX出口下流側の配管が①模擬炉心発熱部入口高さより5m低い位置で引き回されているが、実機の設計ではこのような低所での配管の引き回しは見られない。本試験で得られた非常に低い一次系流量はこの配管の引き回し形状によるものである。従って、本試験は炉心冷却に対して非常に厳しい条件での結果を得ていると言える。

次に、DRACSを運転しないケースDRACS-1における一次系ループの密度一高さ曲線の推移をFig.6.1-3a～3cに示す。中心集合体と周辺集合体Eにおける密度一高さ曲線の推移は3000秒までほぼ一致している。周辺集合体Bについては、1000秒までは中心集合体とほぼ一致しているが、2000秒および3000秒では集合体内の温度が中心集合体よりも低く、その部分での正の循環ヘッドは小さくなっている。DRACS-1と基本ケースにおける密度一高さ曲線を比較すると、DRACS-1ではDHXで上部プレナムを冷却していない為、基本ケースで見られる上部プレナムでの負の循環ヘッドは現れていない。また、中心集合体および周辺集合体Eにおいては顕著に現れていないが、周辺集合体Bでは両ケースの③発熱上端から集合体出口にかけての温度低下に違い見られ、この部分での正の循環ヘッドの減少はDRACS-1よりも基本ケースで著しく生じている。これは、基本ケースではDHXからの冷却によりIWFが促進され、特に周辺集合体内の温度が低下した為である。Fig.4.2-2に示した両ケースの一次系自然循環流量の比較結果と合わせて、自然循環ヘッドの影響を考察すると、DRACSを運転

した基本ケースでは上部ブレナムに負の循環ヘッドが発生し、DRACSを運転しないDRACS-1とは異なっているが、IHX下流部での負の循環ヘッドの寄与が大きい為に、上部ブレナムでの負の循環ヘッドの影響は自然循環流量に顕著には現れていない。また、周辺集合体の通過流量はDRACS-1に比べ基本ケースで低下しているが、これは、周辺集合体Bで見られるようなIWFの冷却による集合体内温度の低下とともに正の循環ヘッドの減少が影響したものと考えられる。

Fig. 6.1-4a～4cにDRACS起動遅れのケースDRACS-2の中心集合体、周辺集合体Bおよび周辺集合体Eにおける一次系ループの密度一高さ曲線の推移をそれぞれ示す。DRACS-2ではDRACSをスクラムから1800秒後に起動しているが、2000秒まで上部ブレナムに負の循環ヘッドはなく、2000秒までの密度一高さ曲線の推移はDRACS-1の場合と類似している。3500秒以降には、DHXによる冷却の影響が現れ、上部ブレナムに負の循環ヘッドが発生し、また、集合体内の温度上昇が低下して集合体が位置するループ中間部の正の循環ヘッドが時間経過とともに小さくなっている。特に、逆流が発生した周辺集合体Bの正の循環ヘッドは中心集合体よりも小さくなっている。DRACS-2と基本ケースにおける密度一高さ曲線の推移を比較すると、2000秒まではDRACS-1の場合と同様なことが言えるが、3500秒以降ではDRACS起動遅れの影響により、同時刻におけるループ中間部の正の循環ヘッドは基本ケースよりも大きくなっている。

Fig. 6.1-5a～5cにIHX二次系自然循環を継続させたケースDRACS-3の中心集合体、周辺集合体Bおよび周辺集合体Eにおける一次系ループの密度一高さ曲線の推移をそれぞれ示す。Fig. 6.1-5aの中心集合体における密度一高さ曲線を見ると、基本ケースと同様にスクラムから500秒後には上部ブレナムに負の循環ヘッドが発生し、徐々に増加している。2000秒にはIHX出口下流側に負の循環ヘッドが発生しているが、IHX二次系の自然循環を継続している為、それ以降ではほぼ一定の大きさで推移している。また、集合体が位置するループ中間部の正の循環ヘッドに注目すると、集合体発熱上端から集合体出口における温度が徐々に低下し、更に、集合体出力の減衰により発熱部の温度上昇が減少して正の循環ヘッドが時間経過とともに小さくなっている。Fig. 6.1-5bとFig. 6.1-5cに示す周辺集合体B,Eにおける密度一高さ曲線では、中心集合体に比べ発熱上端から集合体出口における温度低下が大きく、この部分での正の循環ヘッドは更に小さくなっている。特に周辺集合体Bでその傾向が顕著に現れている。DRACS-3と基本ケースの密度一高さ曲線を比較すると、DRACS-3の3500秒以降においてはIHX出口下流側の負の循環ヘッドが、基本ケースよりも小さく抑え

られている。Fig.4.4-2の基本ケースとDRACS-3の一次系自然循環流量の比較では、DRACS-3の一次系自然循環流量が基本ケースよりも高流量で安定していたが、これは、IHX二次系自然循環の継続により、IHX出口下流側に生じる負の循環ヘッドが小さく保たれている為と考えられる。

(2) PRACSを用いた各試験ケースの一次系自然循環ヘッド

PRACSを用いた場合では、中心集合体と各周辺集合体の温度挙動に差がなく、密度・高さ曲線の推移もほぼ一致している。ここでは、代表として模擬丸心部の流路に中心集合体をとった時の一次系ループの密度・高さ曲線の推移を示す。Fig.6.1-6に基本ケースでの中心集合体における密度・高さ曲線の時間変化を示す。スクラムから500秒後では、PRACSの起動から間もない為に、IHX内部には軸方向の温度分布が生じている。また、IHX出口下流側には負の循環ヘッドが生じている。1000秒以降では、PRACSの冷却によりIHX内部の軸方向は均一に温度低下し、ループ全体が正の循環ヘッドで保たれている。

Fig.6.1-7およびFig.6.1-8にはスクラムから1800秒後にPRACSを起動したケースで、PRACS起動後の2400秒にIHX二次系自然循環を停止したPRACS-1と起動前の1620秒に停止したPRACS-2の中心集合体における密度・高さ曲線の時間変化をそれぞれ示す。両ケースの500秒および1000秒では、PRACSを起動していないのでIHX上部で温度が高く、この部分での正の循環ヘッドの拡大は生じていない。2000秒には両ケースともIHX出口下流側に負の循環ヘッドが発生し、この負の循環ヘッドはPRACS起動前にIHX二次系自然循環を停止したPRACS-2でより大きく生じている。3000秒以降では両ケースともPRACSの冷却によりIHX内部が均一に温度低下して、ループ全体が正の循環ヘッドで保たれている。Fig.5.2-1の基本ケース、PRACS-1およびPRACS-2の一次系自然循環流量の比較結果と合わせて、自然循環ヘッドの影響を考察すると、基本ケースに比べ、PRACS-1およびPRACS-2の一次系自然循環流量が大きく低下したのは、PRACSの起動遅れにより、IHX内部の温度低下が遅い為にこの部分での正の循環ヘッドが基本ケースよりも小さく、更に、IHX出口下流側で発生する負の循環ヘッドが影響している。また、2000~2800秒間でPRACS-1に比べ、PRACS-2の一次系自然循環流量が更に低下しているのは、IHX二次系自然循環からの冷却がないために、IHX出口の温度上昇が促進され、IHX出口下流側の負の循環ヘッドがPRACS-1よりもPRACS-2で大きく生じている為である。

Fig.6.1-9にスクラムと同時にIHX二次系を完全に停止したケースPRACS-3の中心集

合体における密度・高さ曲線の時間変化を示す。500秒ではIHX出口下流側に基本ケースよりも大きな負の循環ヘッドが生じている。2000秒以降では、PRACSの冷却によりループ全体が正の循環ヘッドで保たれ、基本ケースの密度・高さ曲線と一致している。Fig.5.3-1の基本ケースとPRACS-3の一次系自然循環流量の比較結果では、100～1800秒間でPRACS-3の一次系自然循環流量が基本ケースよりも更に低下していたが、これには、500秒の密度・高さ曲線で見られるIHX出口下流側での負の循環ヘッドの差が影響している。

6.2 炉心部冷却効果の定量的比較

4章のDRACSを用いた各試験ケースの模擬炉心部温度結果では、基本ケースの中心集合体発熱上端断面（BI）に対して、IHX二次系自然循環停止後の2800秒以降からIWFによる冷却効果と逆流により温度低下した周辺集合体からの集合体間熱移行による冷却効果が複合して作用していることを示し、DRACSの起動遅れのケースやIHX二次系自然循環を停止せずに継続したケースでは、これら径方向からの冷却効果が相対的に低下していることを定性的に把握した。また、5章では、PRACSを用いた各ケースの模擬炉心部温度は、DRACSを用いたケースで見られる径方向からの冷却効果の影響はなく、一次系自然循環流量に対応した変化を示すことを把握した。ここでは、より定量的に各ケースの循環流量による冷却以外の炉心部冷却効果を比較検討する。

Fig.6.2-1およびFig.6.2-2に、各試験ケースの中心集合体発熱上端断面（BI）における最高温度（ T_{max} ）と断面平均温度（ T_{ave} ）の実測値を、その時点での中心集合体の出力（W）、循環流量（Q）、ナトリウム比熱（Cp）および中心集合体入口温度、から求めた準定常断熱平均温度（ T^*_{ave} ）と比較した結果を示す。 T^*_{ave} に関しては、比較的緩やかな過渡変化を示す100秒以降について求めである。Fig.6.2-1のDRACSを用いた場合の各ケースの結果を見ると、基本ケースDRACS-REFの T_{max} および T_{ave} は、2800秒頃までは T^*_{ave} とほぼ一致した推移を示しているが、2800秒過ぎからは、 T^*_{ave} から大きく温度低下し、試験終了時の温度低下幅は約200°Cに達している。これより、2800秒までの炉心部冷却は主に循環流量による熱輸送で行われているのに対し、2800秒過ぎからは、IWFおよび集合体間熱移行による径方向からの冷却効果が炉心部冷却に大きく影響していると言える。DRACS起動遅れのケースDRACS-2でも同様なことが言えるが、 T_{max} および T_{ave} が T^*_{ave} より温度低下し始める時間は、DRACS-REFより遅く3600～3800秒頃となり、更に、試験終了時の温度低下幅は約

150°Cで基本ケースよりも減少している。また、IHX二次系自然循環を継続したケースDRACS-3では、周辺集合体で逆流が発生しない為、集合体間熱移行による冷却効果は影響せず、IWFによる冷却効果のみが作用していたが、この冷却効果により、2800秒以降の T_{max} と T_{ave} は T^*_{ave} よりも20~30°C温度低下しているのが確認できる。これらより、DRACSを用いる場合には、上部プレナムが低温になることに起因して、IWF、集合体内逆流、集合体間熱移行などの炉内自然対流除熱が、一次系ループを介する一次系流量による冷却以外の除熱バスとして期待できる。一次系流量が1%相当ある場合には、自然循環ヘッドの低下を含めて大きな影響はないが、一次系流量が大きく低下するような場合には、炉内自然対流が第二の除熱バスとして炉心を冷却し過度な温度上昇を防ぐことが可能である。

一方、Fig. 6.2-2のPRACSを用いた場合の結果では、各ケースとも、 T_{max} 、 T_{ave} および T^*_{ave} はほぼ一致した推移を試験終了まで示している。これにより、PRACSを用いた場合の炉心部は主に循環流量による熱輸送のみで冷却されていることが確認できる。

6.3 ピーキングファクターの時間推移の比較

ここでは、集合体水平断面の温度分布の指標であるピーキングファクター (P_f) の時間推移を各ケースで比較し、集合体水平断面の温度分布の相違について検討する。 P_f は一般に下記の式で定義され、 P_f が1に近づく程、断面の温度分布は平坦化し、 P_f が1よりも大きい程、断面上に急峻な温度分布がついていることを意味する。

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

P_f	: ピーキングファクター
T_p	: 断面最高温度 (°C)
T_{in}	: 集合体入口温度 (°C)
T_{ave}	: 断面平均温度 (°C)

Fig.6.3-1に中心集合体発熱上端断面 (BI) で求めたピーキングファクター (P_f) の時間推移を各ケースで比較した結果を示す。DRACSを用いた4ケースの結果を見ると、各ケースの P_f は初期定常時に約1.2を示し、スクラム直後に大きく変動した後、200~2800秒頃までは1.02~1.04ではほぼ一定している。各ケースの P_f の推移は2800秒以降で異なり、 P_f の増加は基本ケースDRACS-REFで最も大きく、次いでDRACS-2、DRACS-3の順になっている。つまり、2800秒以降の炉心部に径方向からの冷却効果

が大きく作用しているケース程、 P_f の増加が大きくなっている。一方、PRACSを用いた各ケースの P_f を見ると、PRACS-REFとPRACS-3は1000秒頃から1.04で一定しているのに対し、PRACSの起動を遅らせたPRACS-1とPRACS-2では、1000～3000秒まではPRACS-REFより低い値を示し、3000秒過ぎからはPRACS-REFと一致した値を示している。これらの P_f の推移は自然循環流量と対応した変化を示している。PRACSを用いた場合は、径方向からの冷却がなく、自然循環流量が低下するほど浮力の効果（集合体内流量再配分）が働いて、 P_f は小さくなっている。

このように、DRACSを用いた場合では、自然循環流量が小さいほど、径方向からの冷却効果の影響が強くなり水平断面により大きな温度分布を生じるが、PRACSを用いた場合は、自然循環流量が低いほど、浮力の効果で断面温度分布はより平坦化することがわかる。

7. 結論

自然循環崩壊熱除去時の炉心部熱流動現象に与えるシステム・系統間の相互作用の影響を把握することを目的に、実機を模擬したスクラム過渡から一次系自然循環に移行させた過渡試験を、PLANDTL-DHXナトリウム試験装置を用いて、炉容器上部プレナム内に冷却器を有する崩壊熱除去系DRACSおよびIHX上部に冷却器を有するPRACSを用いた場合について実施した。その結果、下記の知見を得た。

DRACSに関して、

- (1) 一次系自然循環流量に対するDRACS運転およびDRACS起動遅れの影響は、中心集合体の通過流量には顕著には見られないが、周辺集合体の通過流量に現れ、一次系ループの自然循環流量を低下させた。
- (2) IHX二次系自然循環による除熱は一次系自然循環流量に大きな影響を与える。一次系自然循環流量はIHX出口温度に追従した変化を示し、IHX出口温度が上昇すると循環流量は低下する。IHX二次系自然循環を停止すると、IHX出口温度が急激に上昇し、6体ある周辺集合体のうち3体で逆流が発生した。
- (3) 炉心部温度挙動は逆流の発生前後で異なり、逆流発生以降では中心集合体発熱部の温度上昇が抑えられた。これは、径方向からの強い冷却効果の為で、発熱部上端では、逆流により温度が低下した周辺集合体からの集合体間熱移行による冷却効果と上部プレナム内の低温ナトリウムが集合体間ギャップ領域に侵入し自然対流するインターラッパーフロー(IWF)による冷却効果が複合して作用し、また、発熱部中央では、IWFによる冷却効果のみが作用している。
- (4) DRACSの起動が遅れると炉心部冷却効果の発生が遅くなり、冷却効果は低減した。また、IHX二次系自然循環を継続した場合には、IWFによる炉心部冷却は作用しているが、その効果は低減した。
- (5) 炉心部での径方向からの冷却効果が強いケースほど、ピーキングファクターの増加が大きく、水平断面には大きな温度分布が生じる。
- (6) DRACSを用いた場合では、上部プレナムが低温になることにより、PRACSを用いた場合では見られない炉内自然対流(IWF、集合体内逆流、

集合体内熱移行)による炉心部冷却効果が発生する。炉内自然対流は集合体通過流量が大きい条件では大きな影響を及ぼさないが、何らかの原因で流量が低下した場合に、それに伴う炉心部の温度上昇に対応して、大きな冷却効果を作用させる。すなわち、炉内自然循環は一次系の自然循環による冷却を補う冷却効果を有することが示された。

また、PRACSに関して、

- (7) PRACS起動遅れにより IHX 出口温度が上昇し、一次系自然循環流量の低下が促進した。また、IHX 二次系を完全停止した状態で PRACS を起動するよりも、IHX 二次系を自然循環状態にして PRACS を起動した方が、流量低下は小さく抑えられた。
- (8) PRACS を用いた場合の炉心部では、DRACS を用いた場合で見られる径方向からの冷却効果は作用せず、自然循環流量による熱輸送のみで炉心部は冷却される。
- (9) PRACS を用いた場合は、IHX 二次系の自然循環への依存は大きくなく、一次系のみで炉心をスクラム過渡から冷却できる。

謝　辞

本研究の実施に当り、実験の実施に多大な協力をして頂いた常陽産業（株）の方々、試験データ処理に協力いただいたCSK（株）の安松智博氏に深く感謝いたします。

参考文献

- (1) H.Kamide and Y.Ieda, "Multi-blundle sodium experiments for thermohydraulics in core subassemblies during natural circulation decay heat removal", Proceedings of IAEA/IWGFR Specialists' Meeting, O-arai, Japan, IWGFR/88 (1993).
- (2) 林 謙二, 上出英樹, 他: 高速炉における自然循環崩壊熱除去に関する研究 (VI) --集合体間熱移行試験--, 日本原子力学会「94年春の大会」予稿集, H28, P378 (1994).
- (3) 林 謙二, 小松崎清美, 他: Na体系での集合体内潜り込み現象初生条件, 日本原子力学会「95年秋の大会」予稿集, E54, P360 (1995).
- (4) 上出英樹, 林 謙二, 他: 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本集合体ナトリウム試験--, 日本原子力学会「95年秋の大会」予稿集, E55, P361 (1995).
- (5) 桃井一光, 林 謙二, 他: 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「96年春の大会」予稿集, C20, P128 (1995).
- (6) H.Kamide and Y.Ieda, "Core-plenum thermohydraulics under decay heat removal by natural circulation -sodium experiments for seven -subassembly model-", Proceedings of FRS International Topical Meeting, Obninsk, Russia (1994) .
- (7) 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, vol1, p23 (Apr.1995).
- (8) H.Kamide, et.al., "Benchmark exercise for multi-dimensional thermohydraulic analysis codes", Journal of hydraulic research, vol34, No.3, P317 (1996).

Table 2.1 Main specifications of PLANDTL-DHX Loop

Primary loop

Core

Maximum power	1.2 MW
Subassembly number	7

Upper plenum

Diameter	2.0 m
Sodium level from bottm	2.6 m
UIS diameter	0.412 m
Auxiliary heater power	0.68 MW

Main pipe diameter

4 in.

IHX

Type	Primary side: Inside tube Secondary side: With baffle plate
Capacity	1.5 MW
Maximum flow rate	1200 ℓ /min

Secondary loop

Main air cooler capacity	1.5 MW
Maximum flow rate	700 ℓ /min

Auxiliary cooling system

DRACS

Type	Coil tube type
Capacity	0.15 MW

PRACS

Type	Coil tube type
Capacity	0.15 MW
Maximum flow rate	100 ℓ /min
Air cooler capacity	0.3 MW

Table 3.1 Conditions of the Natural Circulation Transient Experiments

Case Name (Run No.)	Initial State Conditions						Experimental Parameters (conditions after scram)	
	Power (kW)				Flow rate (l/min)	Core Inlet Temp.(°C)	Auxiliary Cooling loop	Secondary Loop
	Total	Center	Outer1	Outer2			Ta: Operation Start Time ²⁾ Na flow rate / A/C Air velocity	Natural Circulation ³⁾ Tsv: Valve Close Time ⁴⁾
DRACS Transient Tests								
DRACS-REF (24110)	1009.2	145.0	433.0	431.2	335.7	301.4	DRACS operation Ta: 60sec Na: 90l/min / Air \approx 7m/s	To 2400sec from SCRAM Tsv: 2400sec
DRACS-1 (24120)	1011.7	144.7	434.2	432.9	333.8	301.0	OFF ¹⁾	To 2400sec from SCRAM Tsv: 2400sec
DRACS-2 (24112)	1009.9	144.7	431.8	433.4	345.1	301.7	DRACS operation Ta: 1800 sec Na: 90l/min / Air \approx 7m/s	To 2400sec from SCRAM Tsv: 2400sec
DRACS-3 (24114)	1010.1	144.5	433.0	432.6	331.9	300.9	DRACS operation Ta: 60sec Na: 90l/min / Air \approx 7m/s	Continuous running
PRACS Transient Tests								
PRACS-REF (24116)	1006.8	144.0	431.9	430.9	336.5	301.4	PRACS operation Ta: 60sec Na: 90l/min / Air \approx 7m/s	To 2400sec from SCRAM Tsv: 2400sec
PRACS-1 (24118)	1006.4	144.4	431.2	430.8	336.9	301.6	PRACS operation Ta: 1800sec Na: 90l/min / Air \approx 7m/s	To 2400sec from SCRAM Tsv: 2400sec
PRACS-2 (24117)	1007.8	144.4	432.0	431.5	338.0	301.2	PRACS operation Ta: 1800sec Na: 90l/min / Air \approx 7m/s	To 1620sec from SCRAM Tsv: 1620sec
PRACS-3 (24115)	1009.0	144.0	434.8	430.2	333.4	302.5	PRACS operation Ta: 60sec Na: 90l/min / Air \approx 7m/s	OFF from SCRAM Tsv: 48sec

1) OFF ; DRACS loop valve : full close, A/C damper valve : full close / 2) Ta ; Operation start time from SCRAM (Compulsory drive)

3) N.C. ; Secondary loop valve: 17% open, A/C damper valve: full open , Natural-ventilation / 4) Tsv ; Valve close time from SCRAM

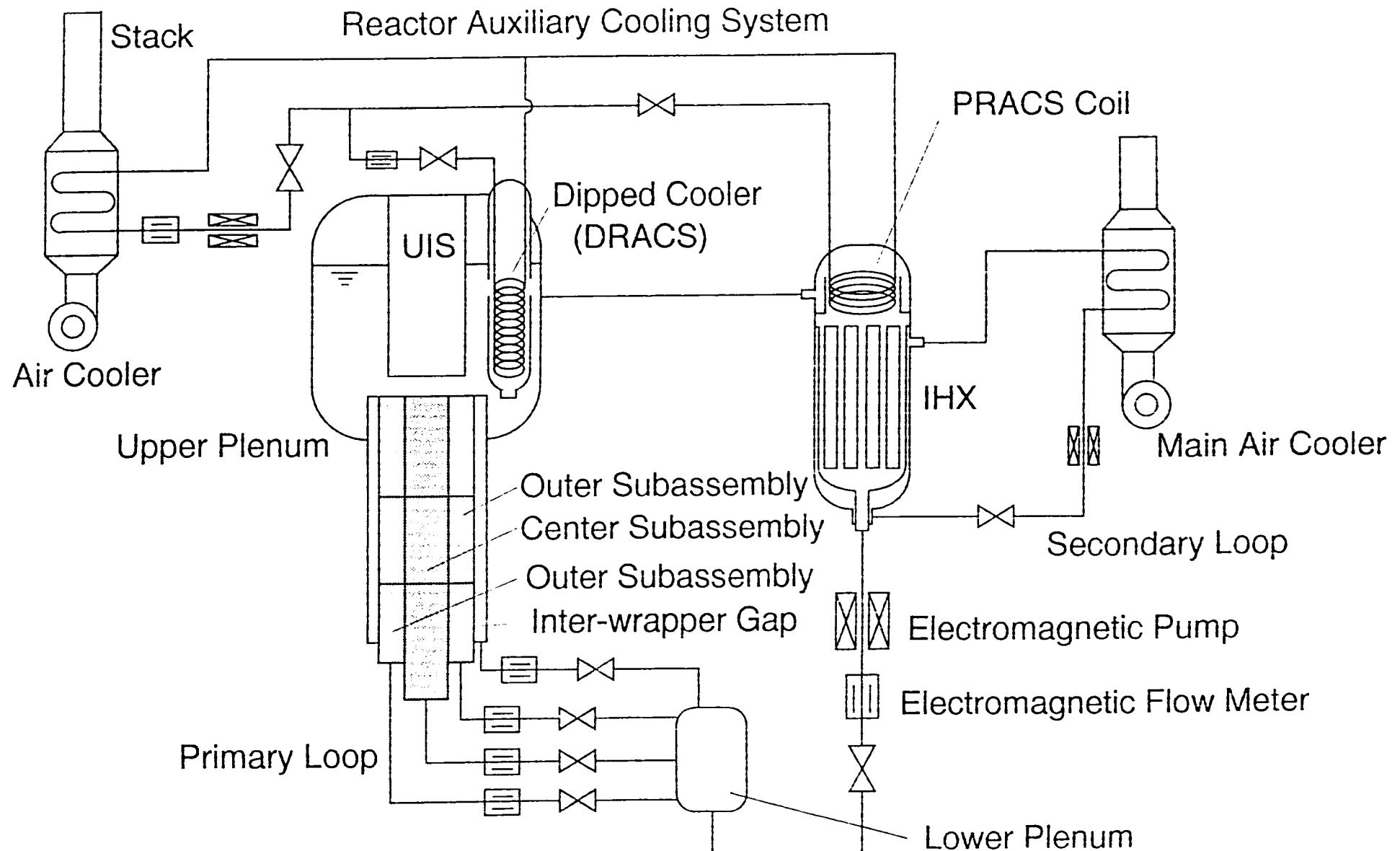


Fig. 2.1 Flow diagram of PLANDTL-DHX

- 42 -

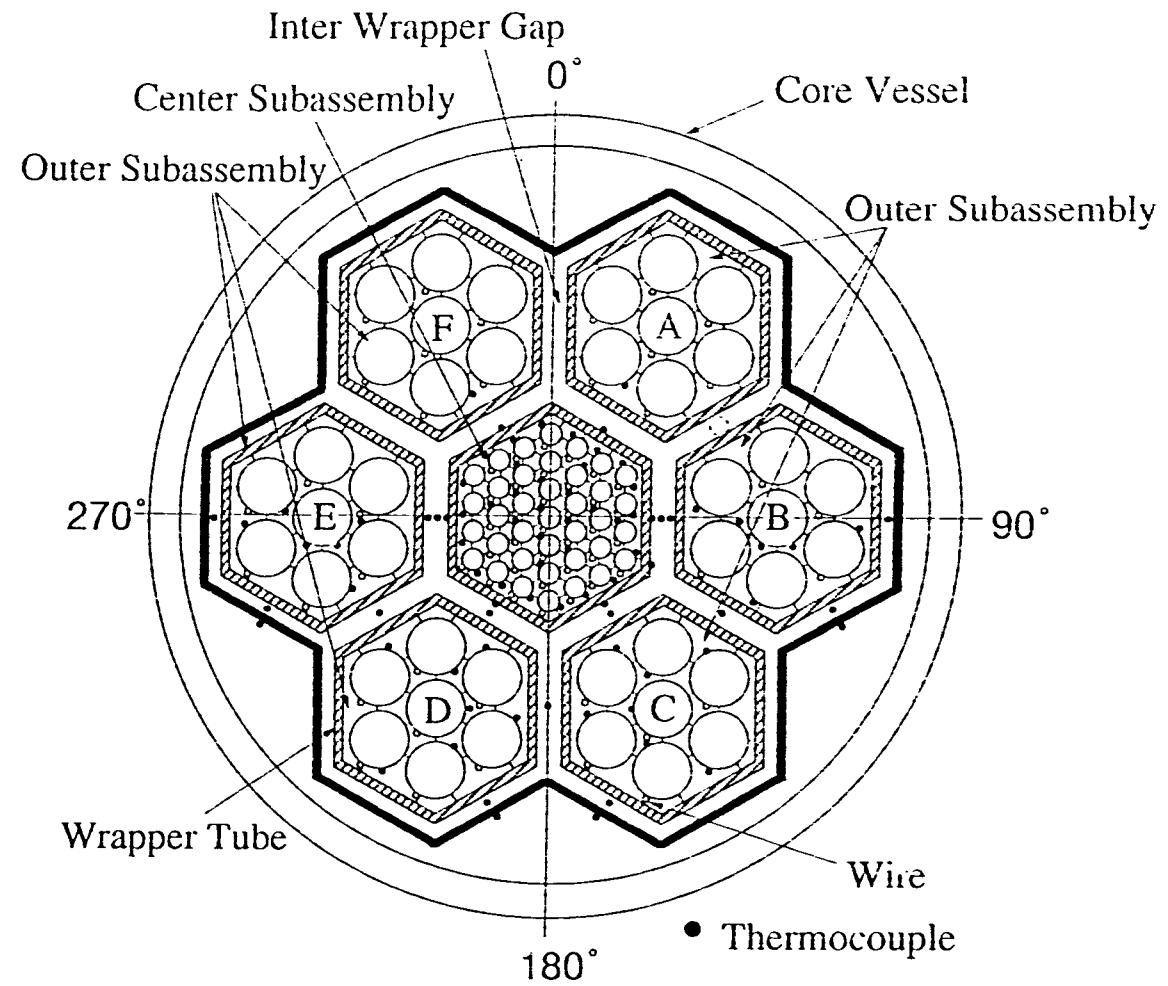
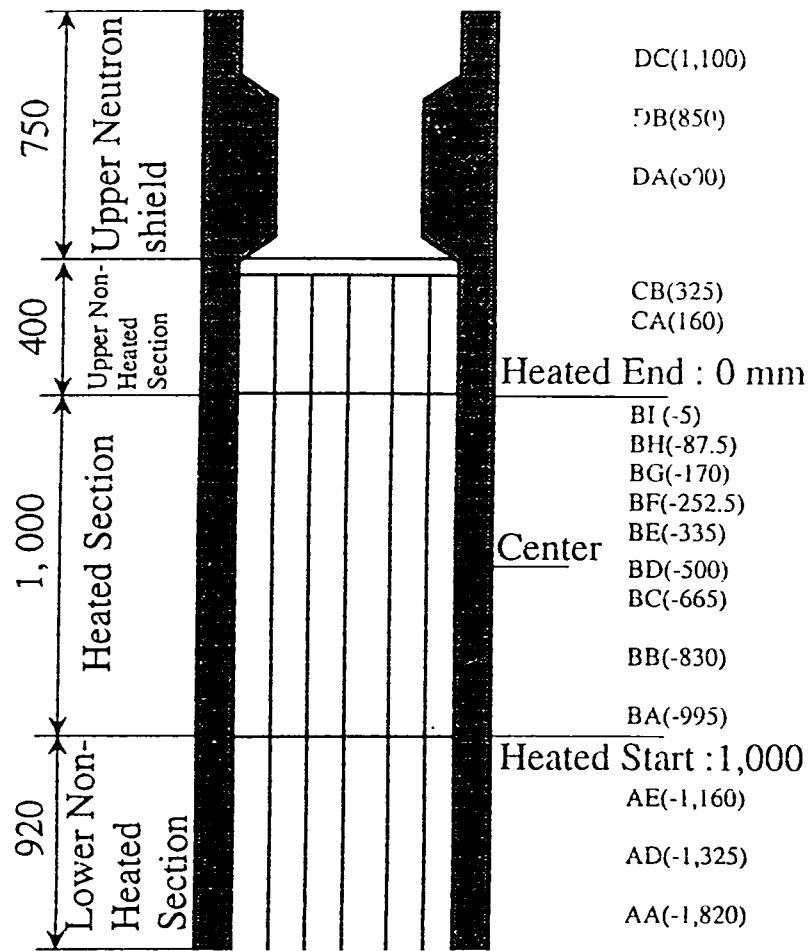


Fig. 2.2 Thermocouple Location in Test Section

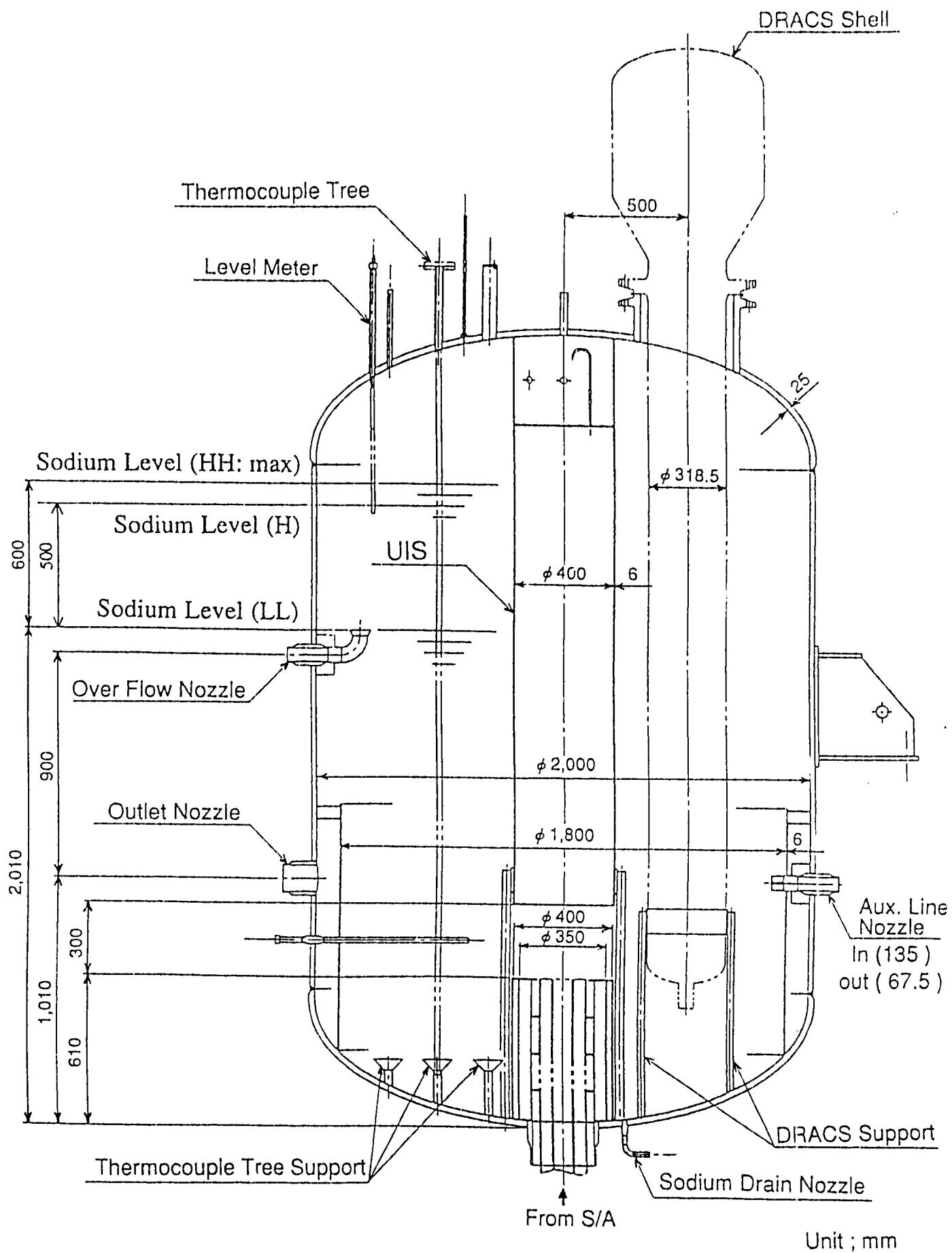
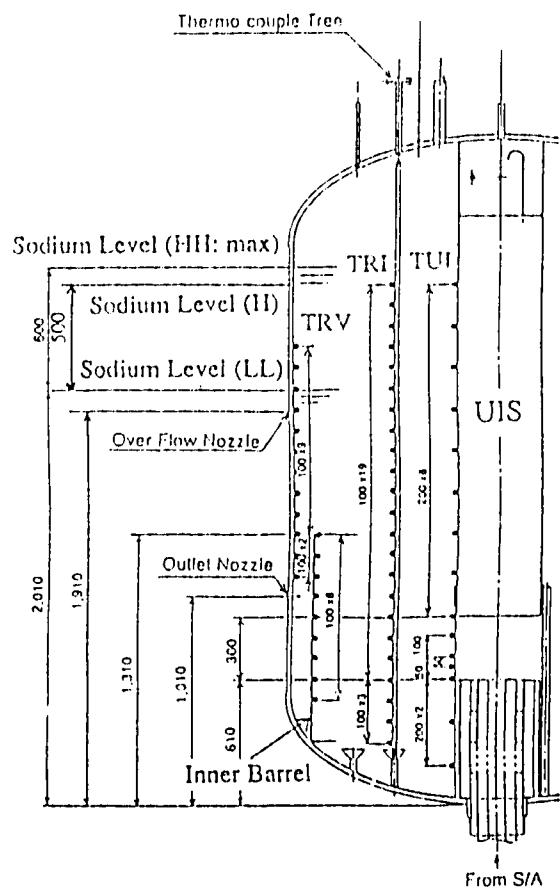
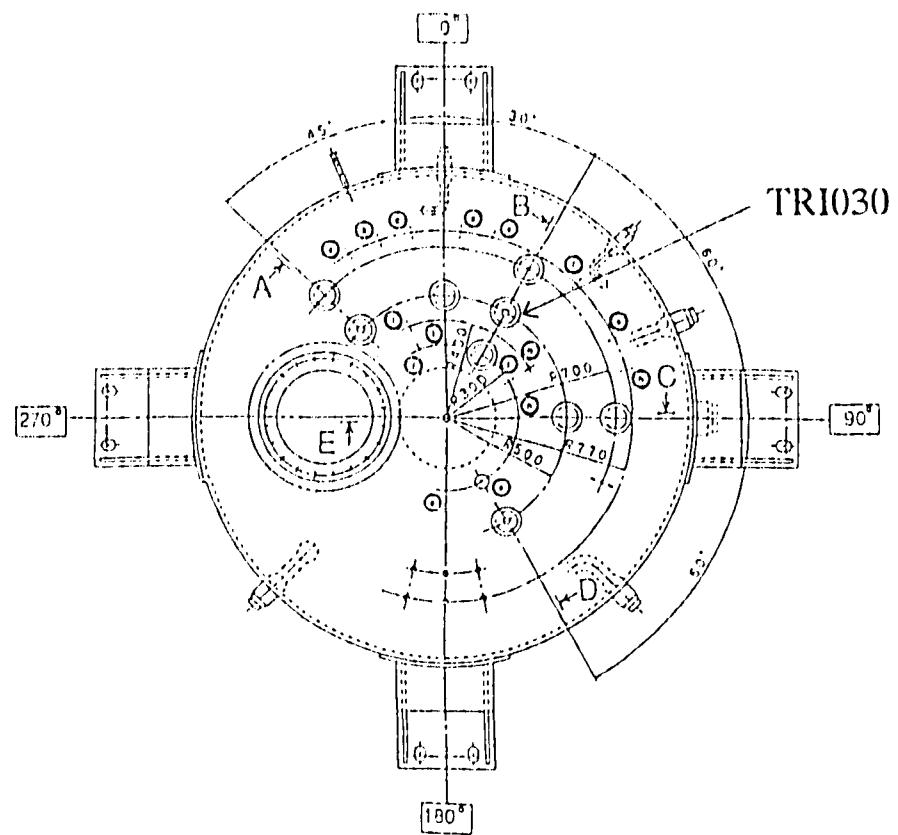
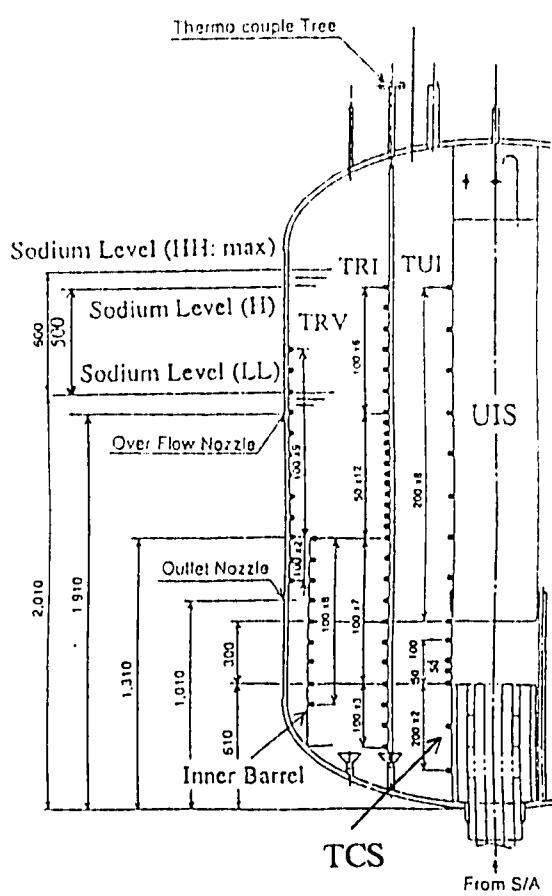


Fig. 2.3 Schematic of upper plenum



A Cross Section
 (315°)



B Cross Section
 (30°)

Fig. 2.4 Positions of thermocouples in upper plenum

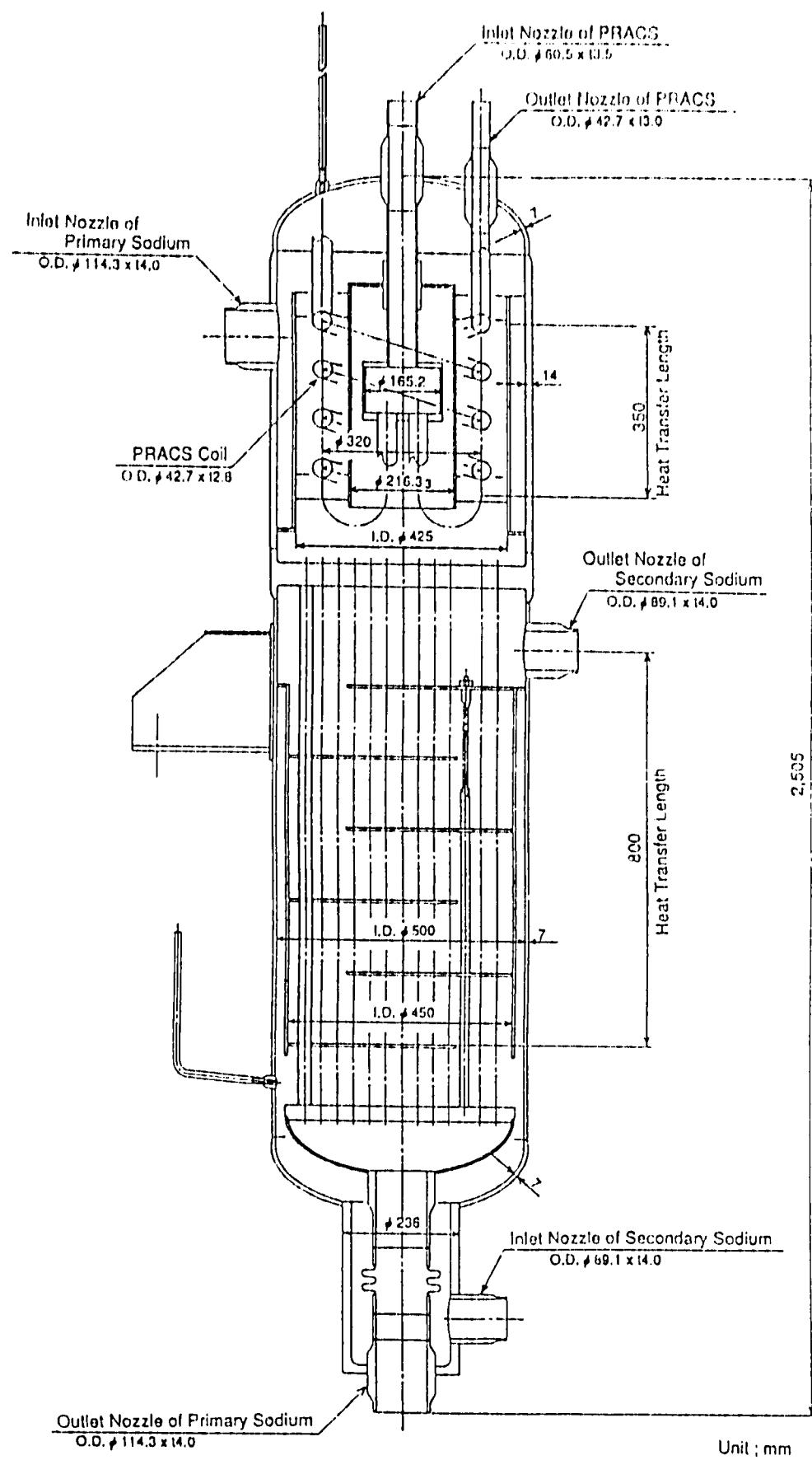


Fig. 2.5 Schematic of IHX & PRACS

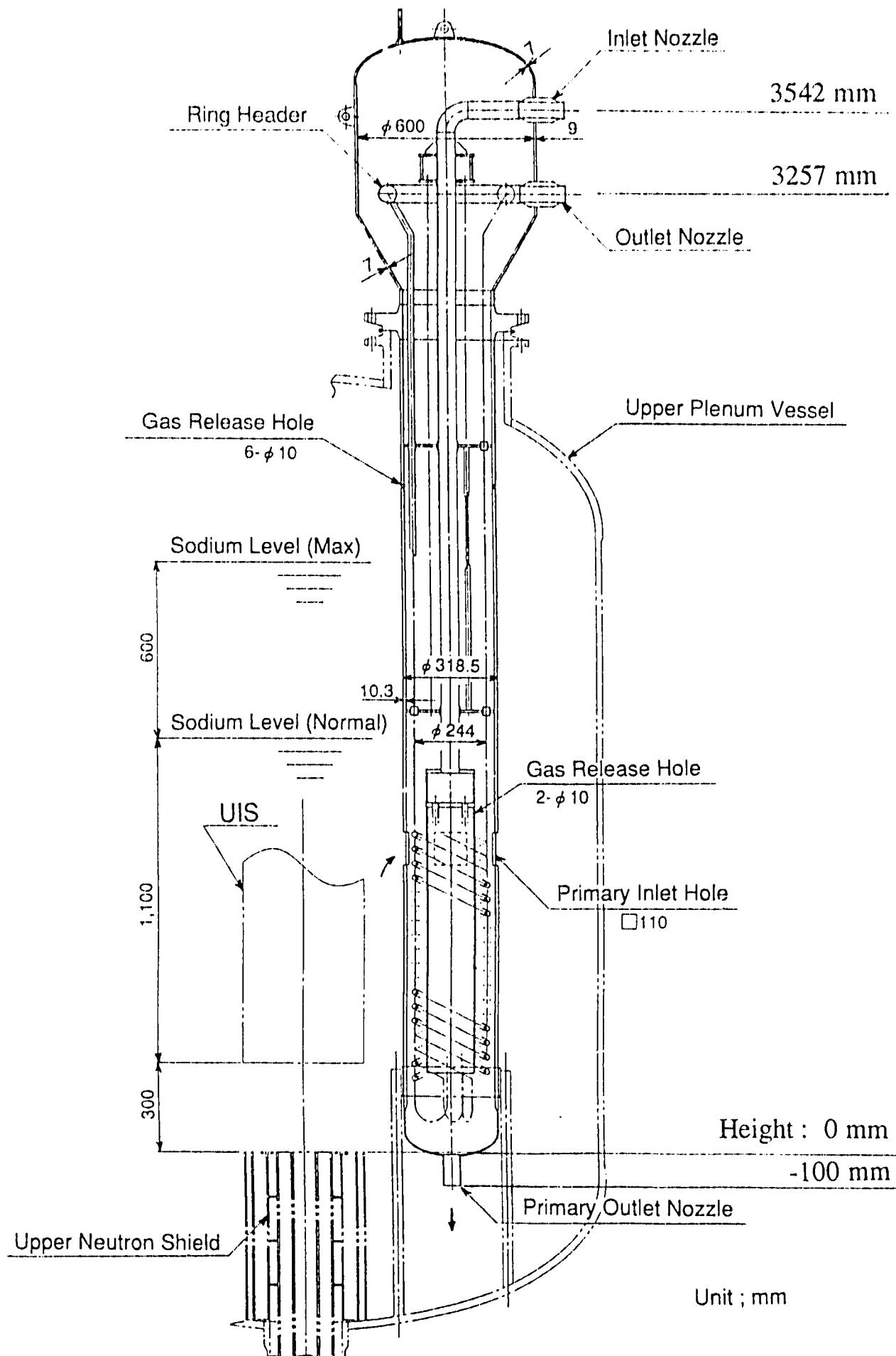
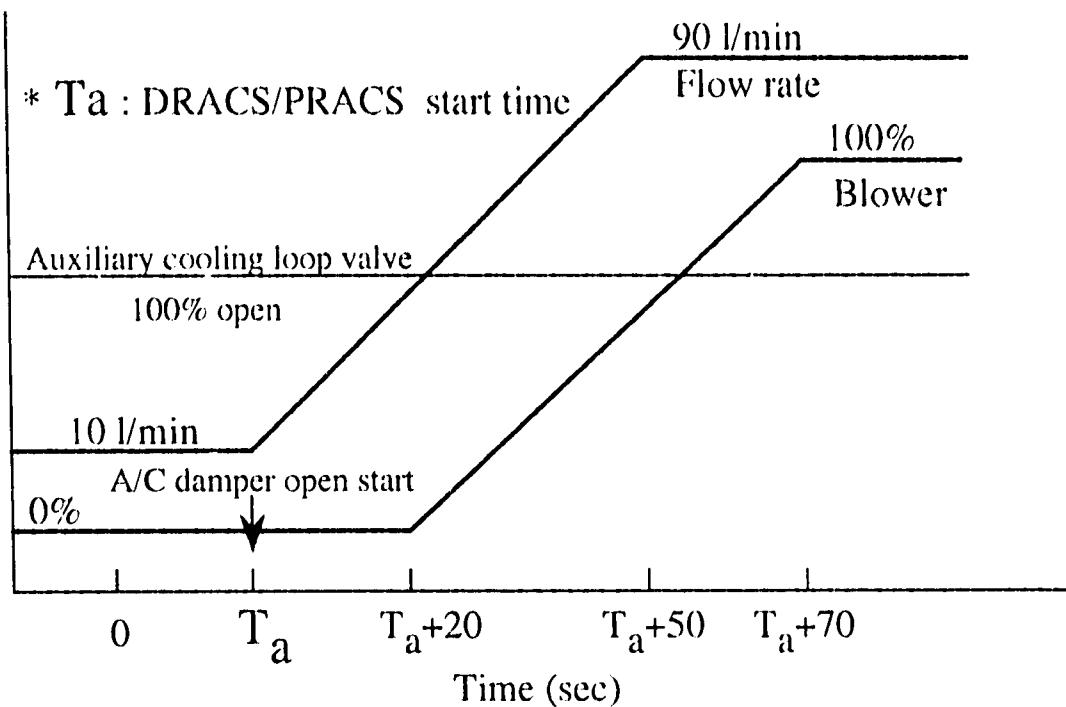


Fig. 2.6 Schematic of direct heat exchanger (DHX)

(a) Auxiliary Cooling Loop Operation Conditions



(b) Secondary Loop Operation Conditions

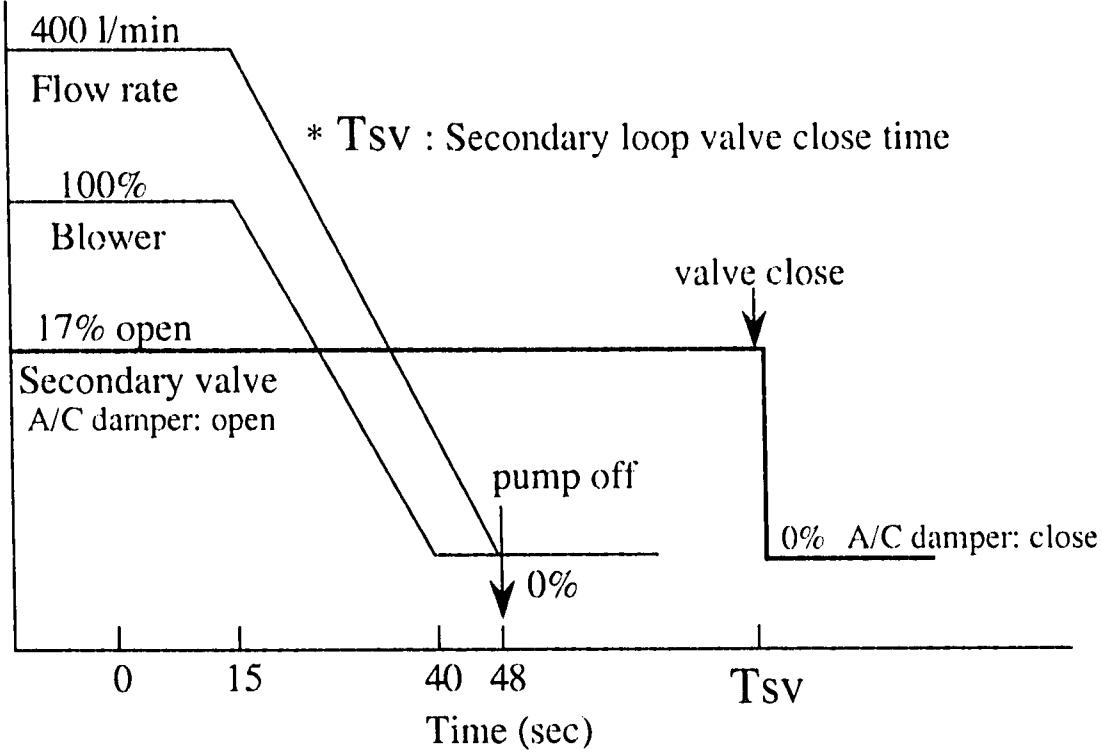


Fig. 3.1 Operation Conditions of Secondary Loop and Auxiliary Cooling Loop

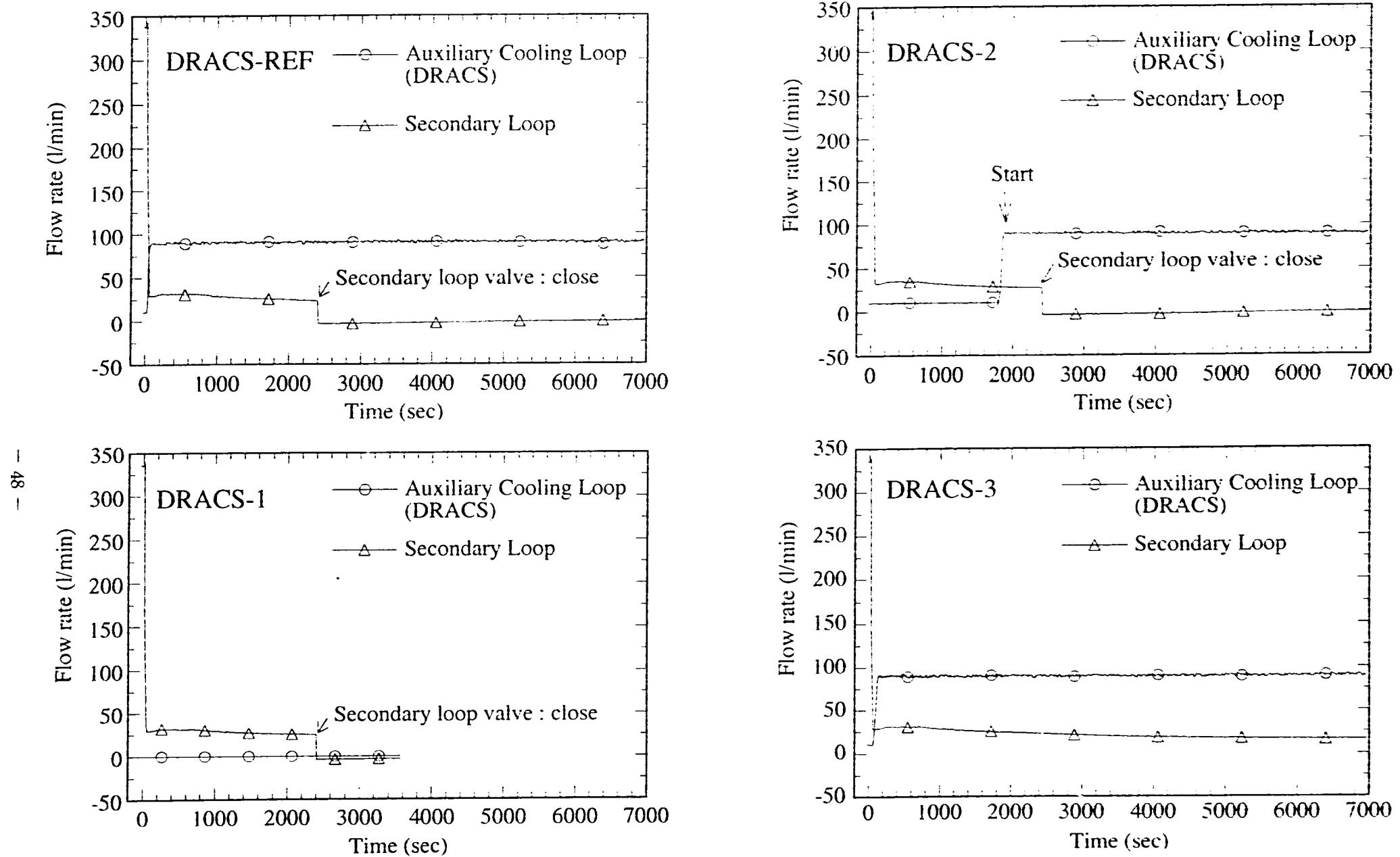


Fig. 3.2 Trends of Flows of Auxiliary Cooling Loop and Secondary Loop
(DRACS Transient Tests)

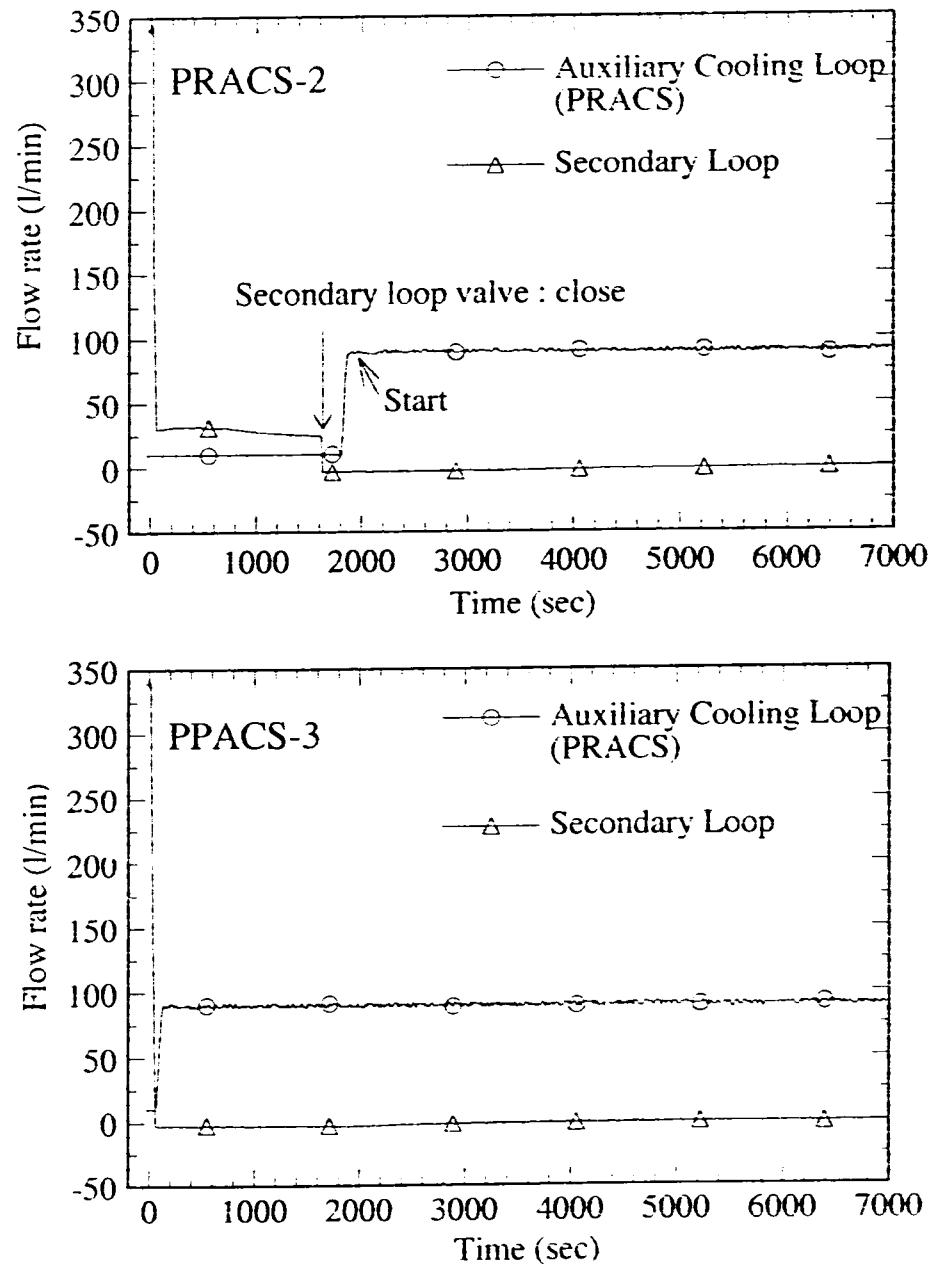
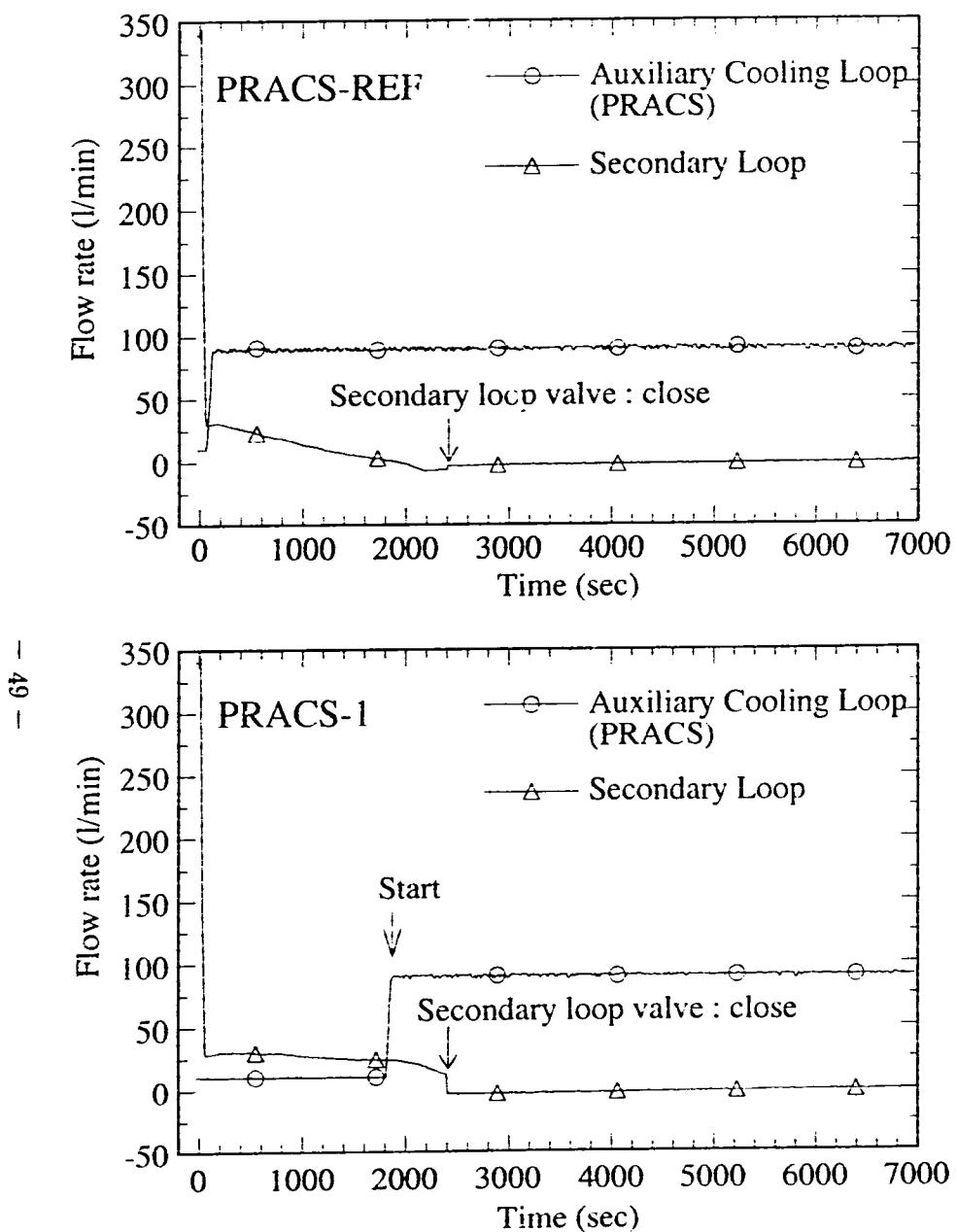


Fig. 3.3 Trends of Flows of Auxiliary Cooling Loop and Secondary Loop
(PRACS System Transient Tests)

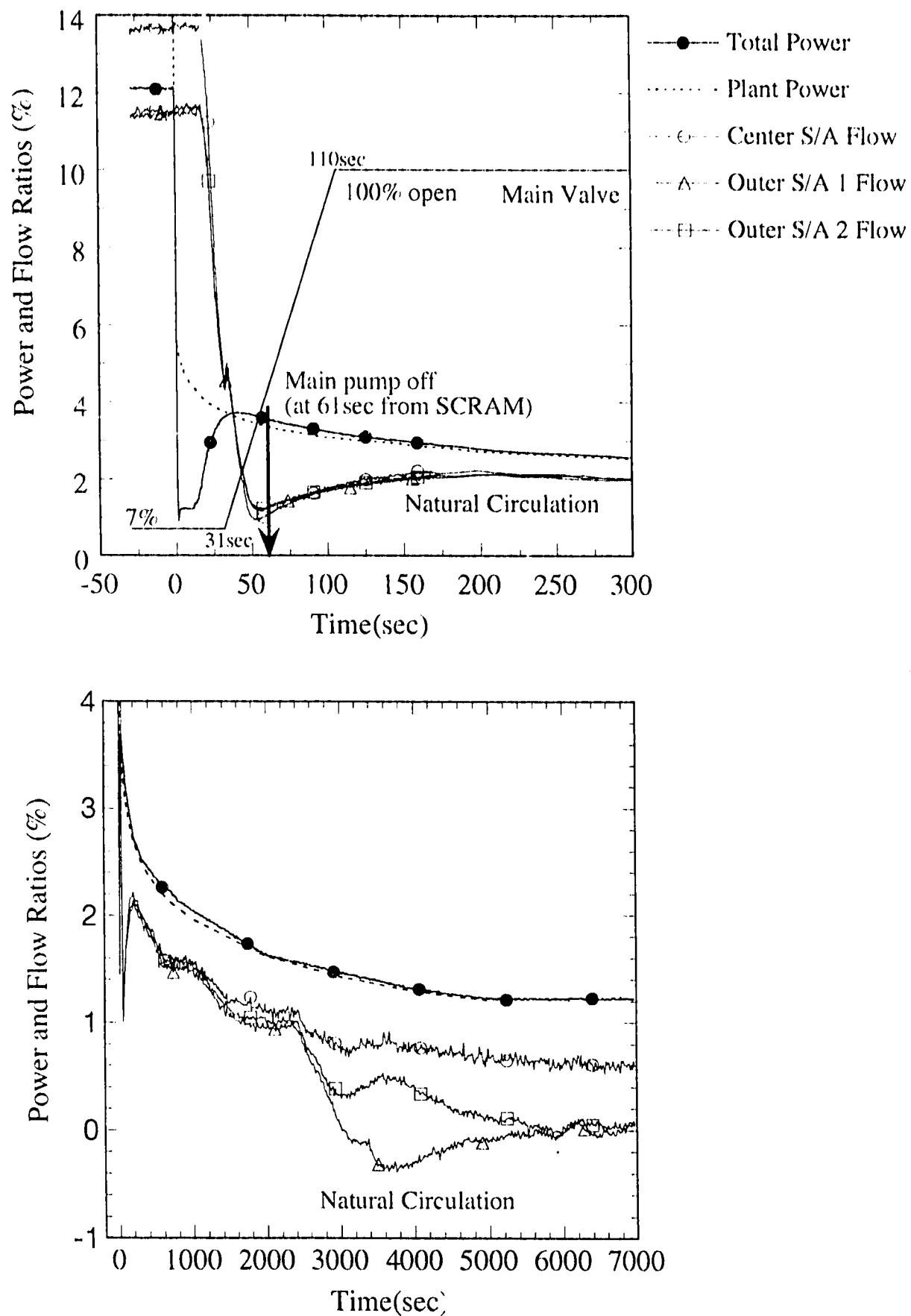
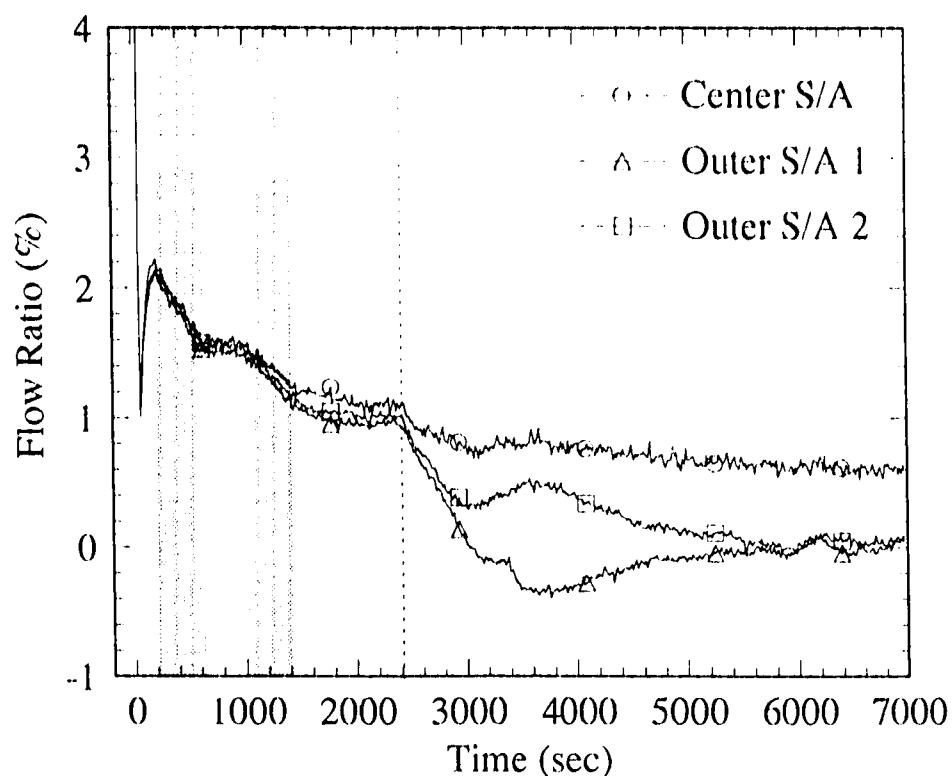
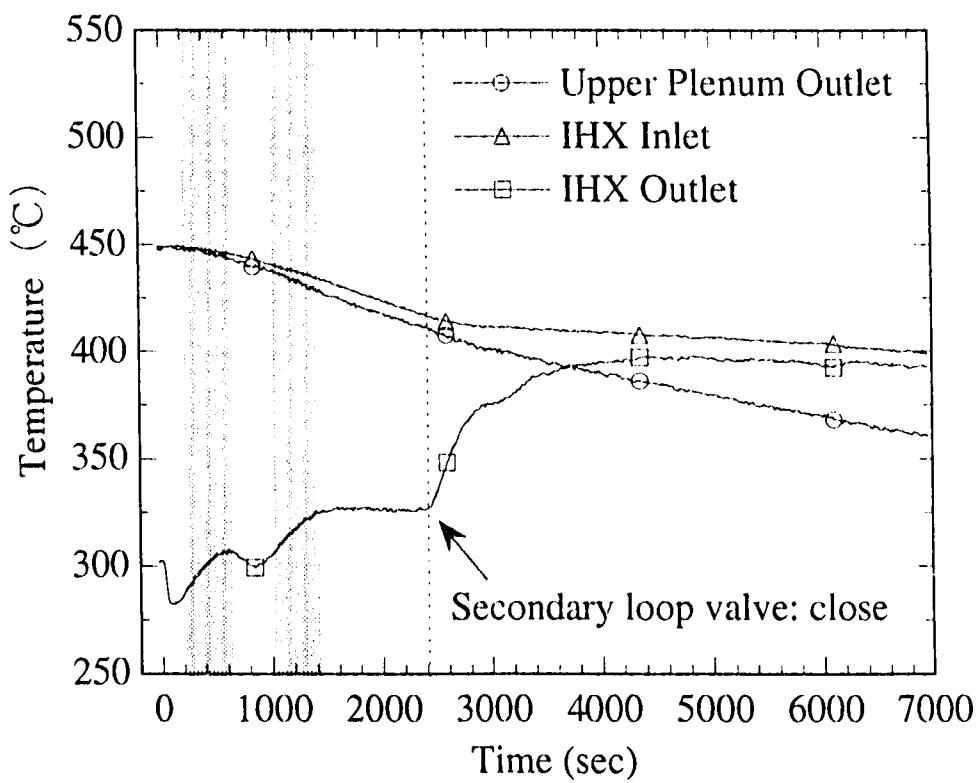


Fig.3.4 Trends of Power and Flow in Subassemblies
(Case: DRACS-REF)



(a) Flow Trends in Subassemblies



(b) Temperature Trends

Fig. 4.1-1 Trends of Flows and Temperatures in Main Loop
(Case: DRACS-REF)

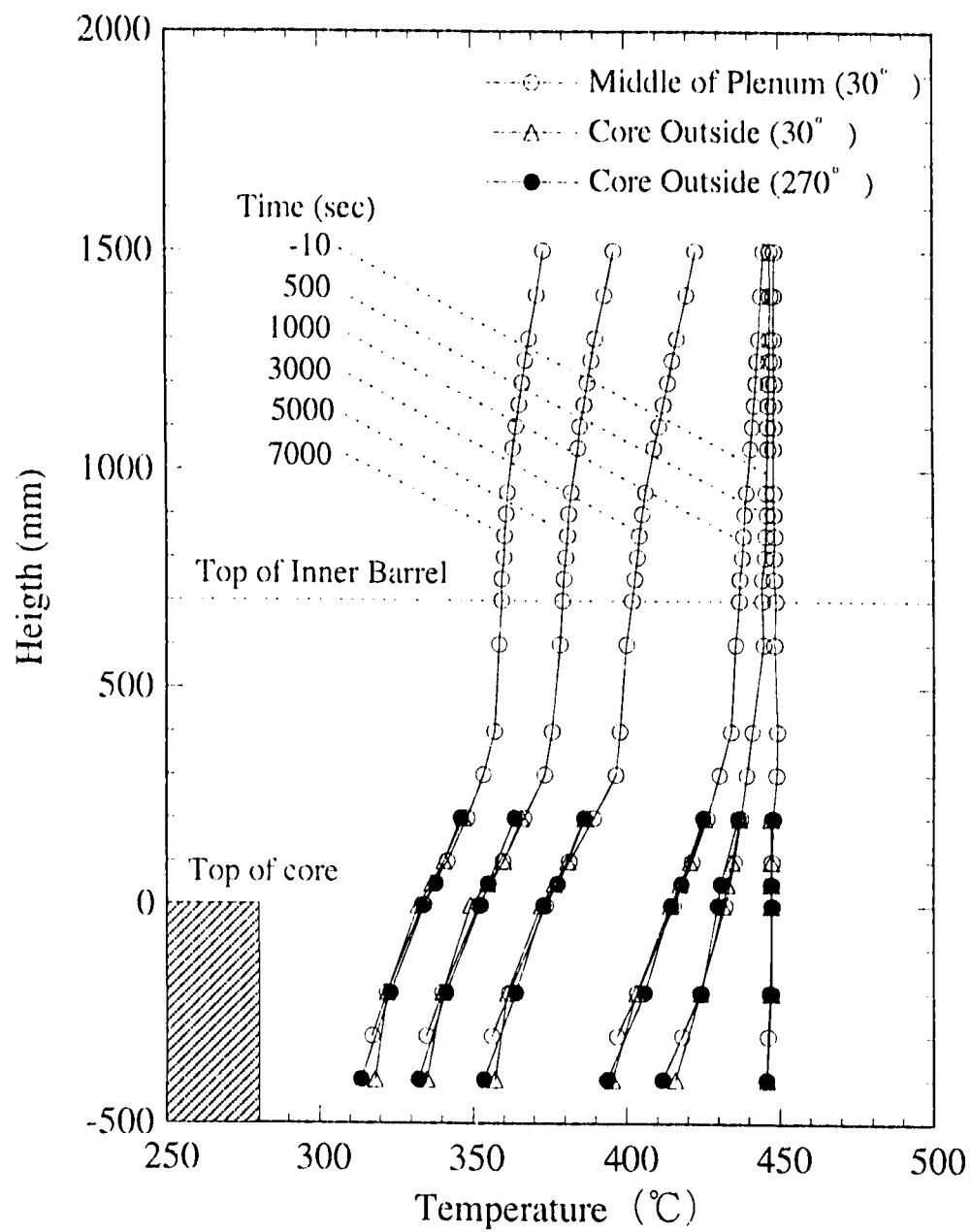


Fig.4.1-2 Variations of Vertical Temperature Distributions in Upper Plenum with Time (Case: DRACS-REF)

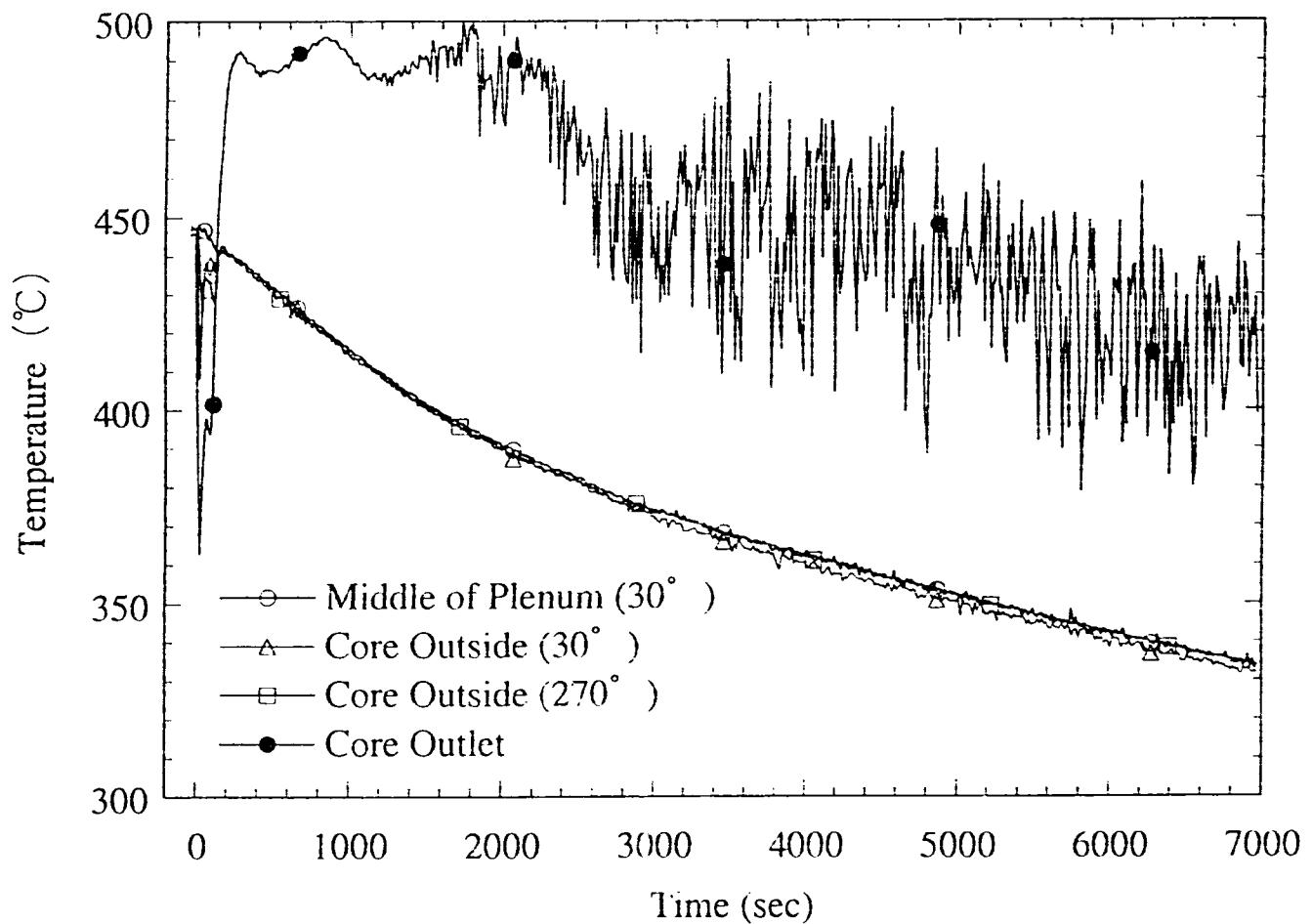


Fig.4.1-3 Time Histories of Temperatures at the Height of Core Outlet in Upper Plenum (DRACS-REF)

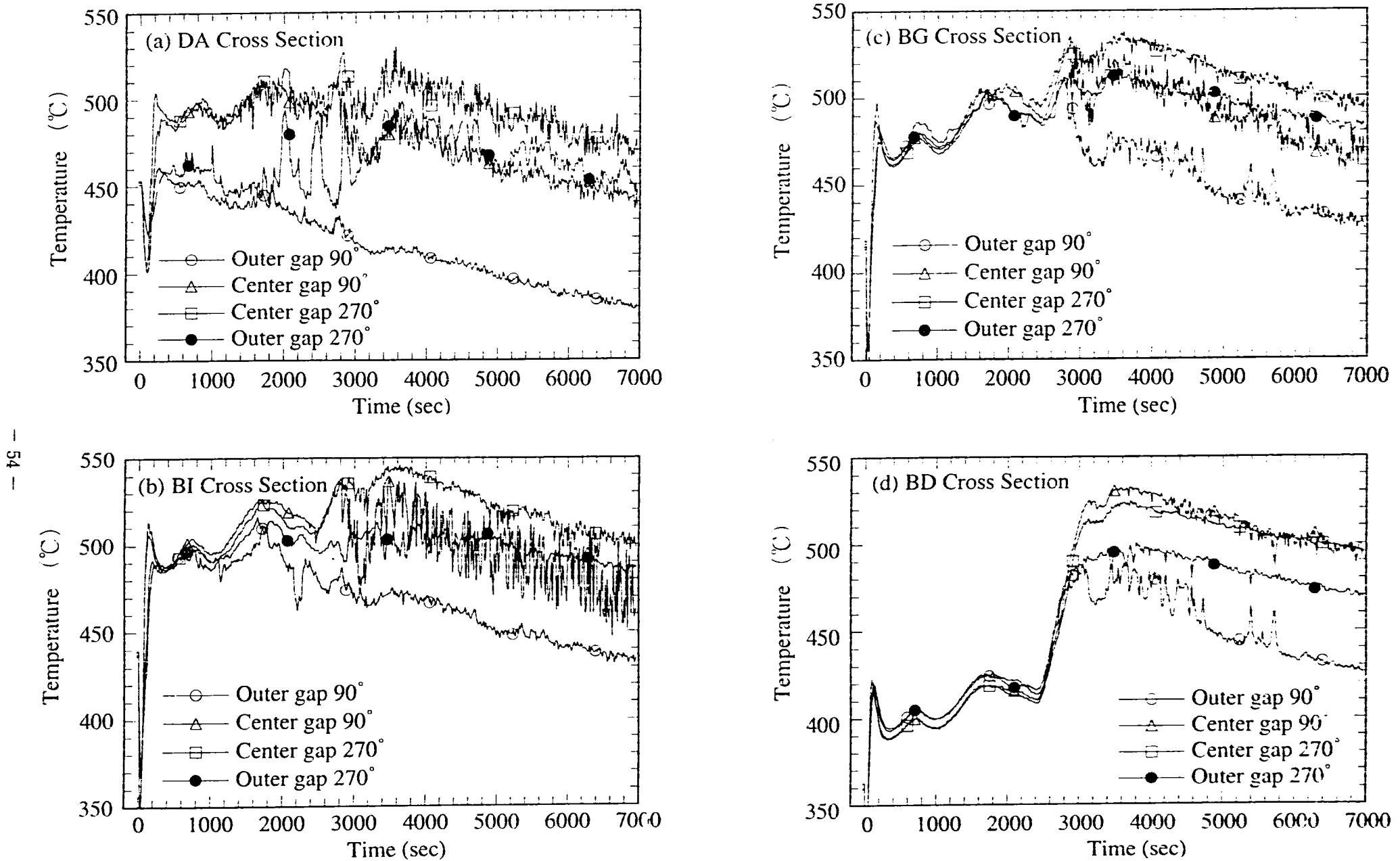


Fig.4.1-4 Time Variations of Temperatures in Inter-Wrapper Gap (DRACS-REF)

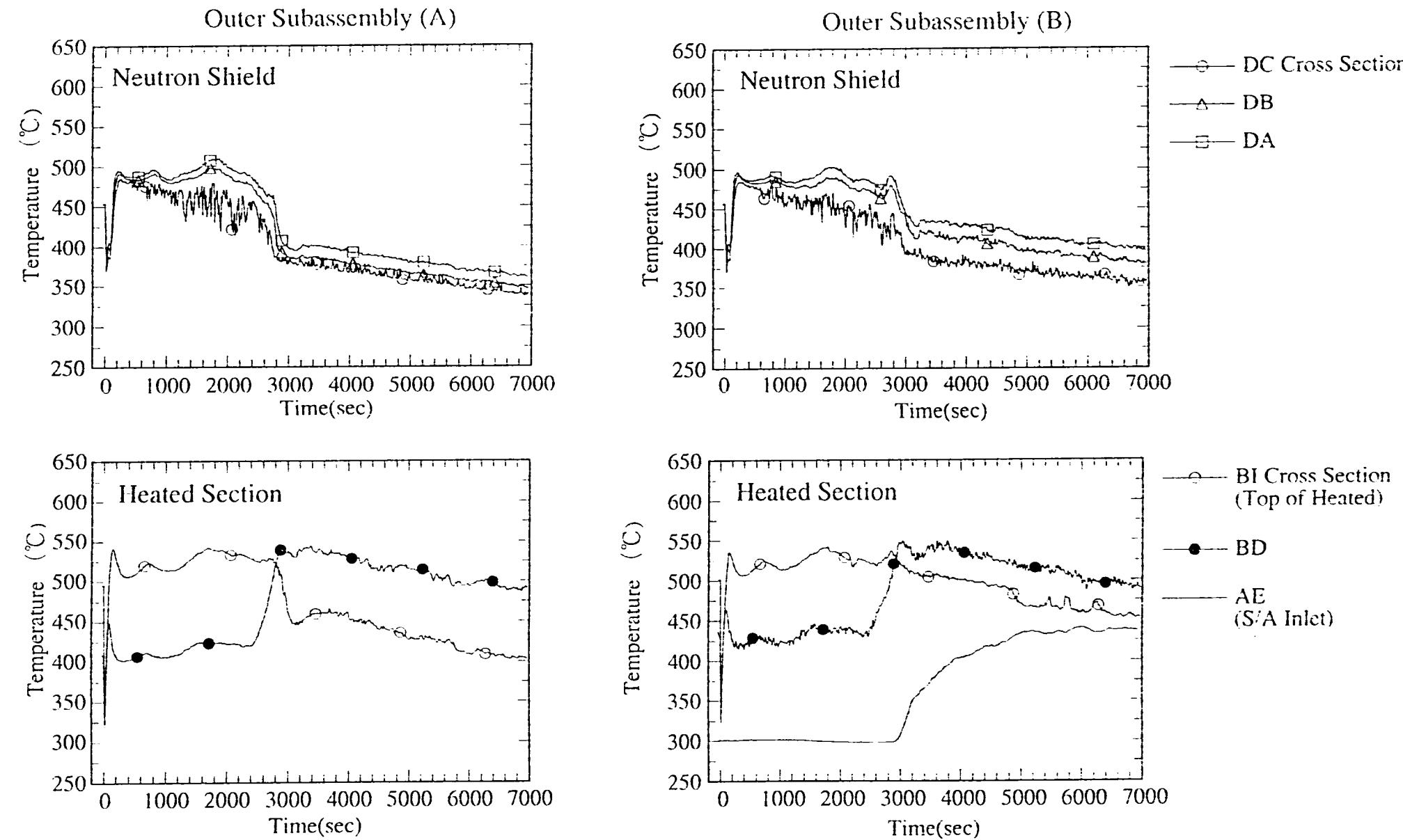


Fig. 4.1-5a Time Variations of Temperatures in Outer Subassembly A and B (Case: DRACS-REF)

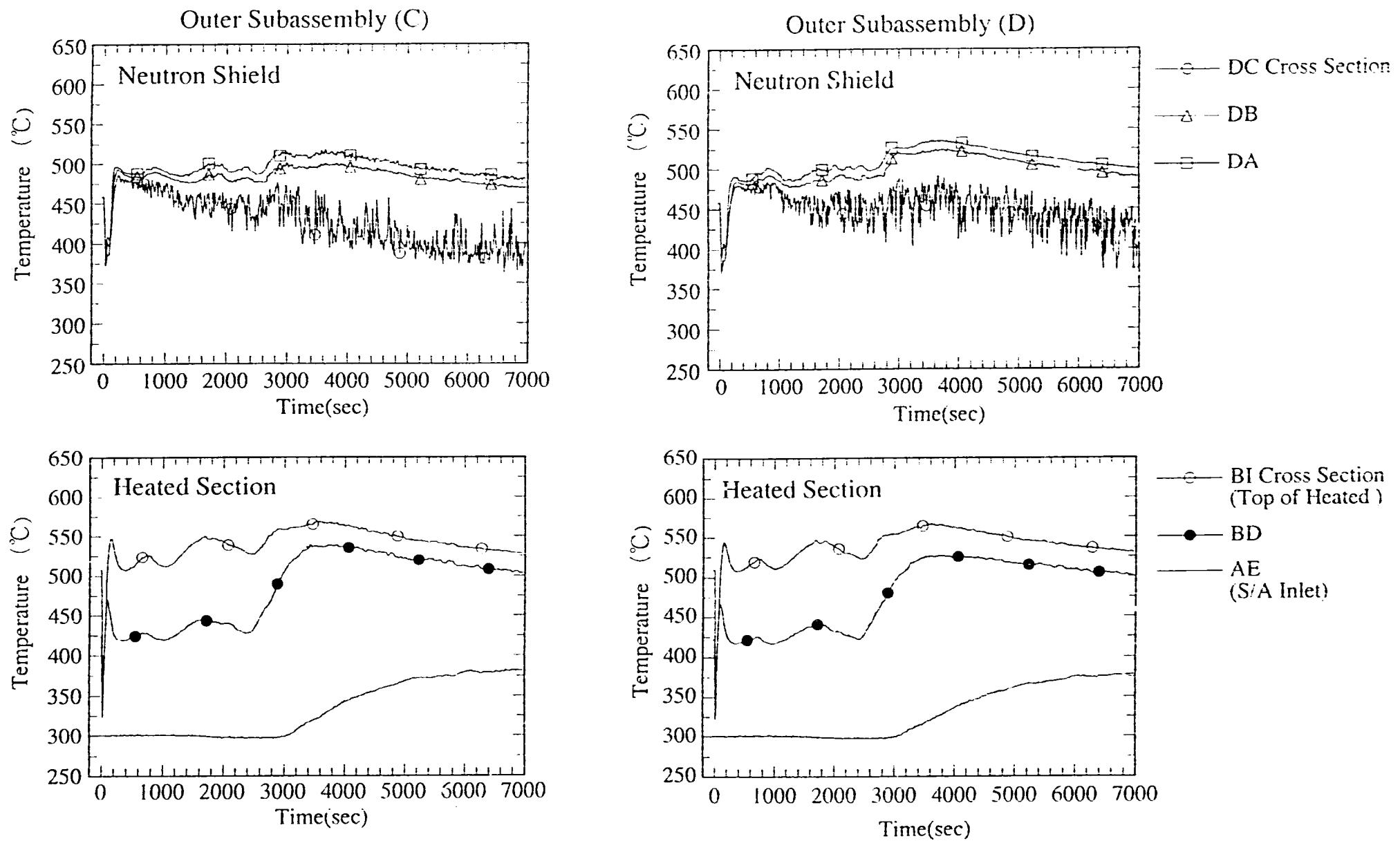


Fig. 4.1-5b Time Variations of Temperatures in Outer Subassembly C and D (Case: DRACS-REF)

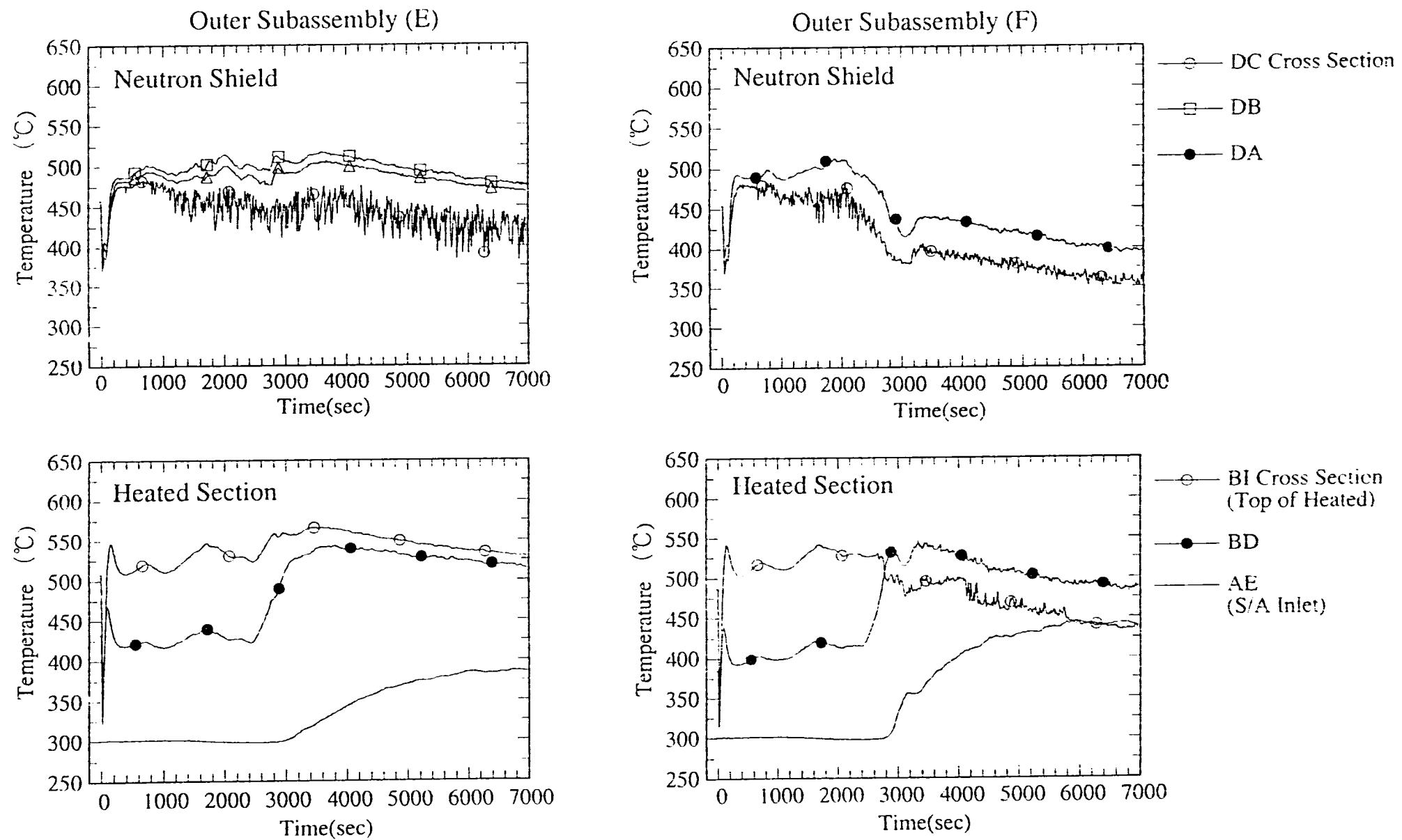


Fig. 4.1-5c Time Variations of Temperatures in Outer Subassembly E and F (Case: DRACS-REF)

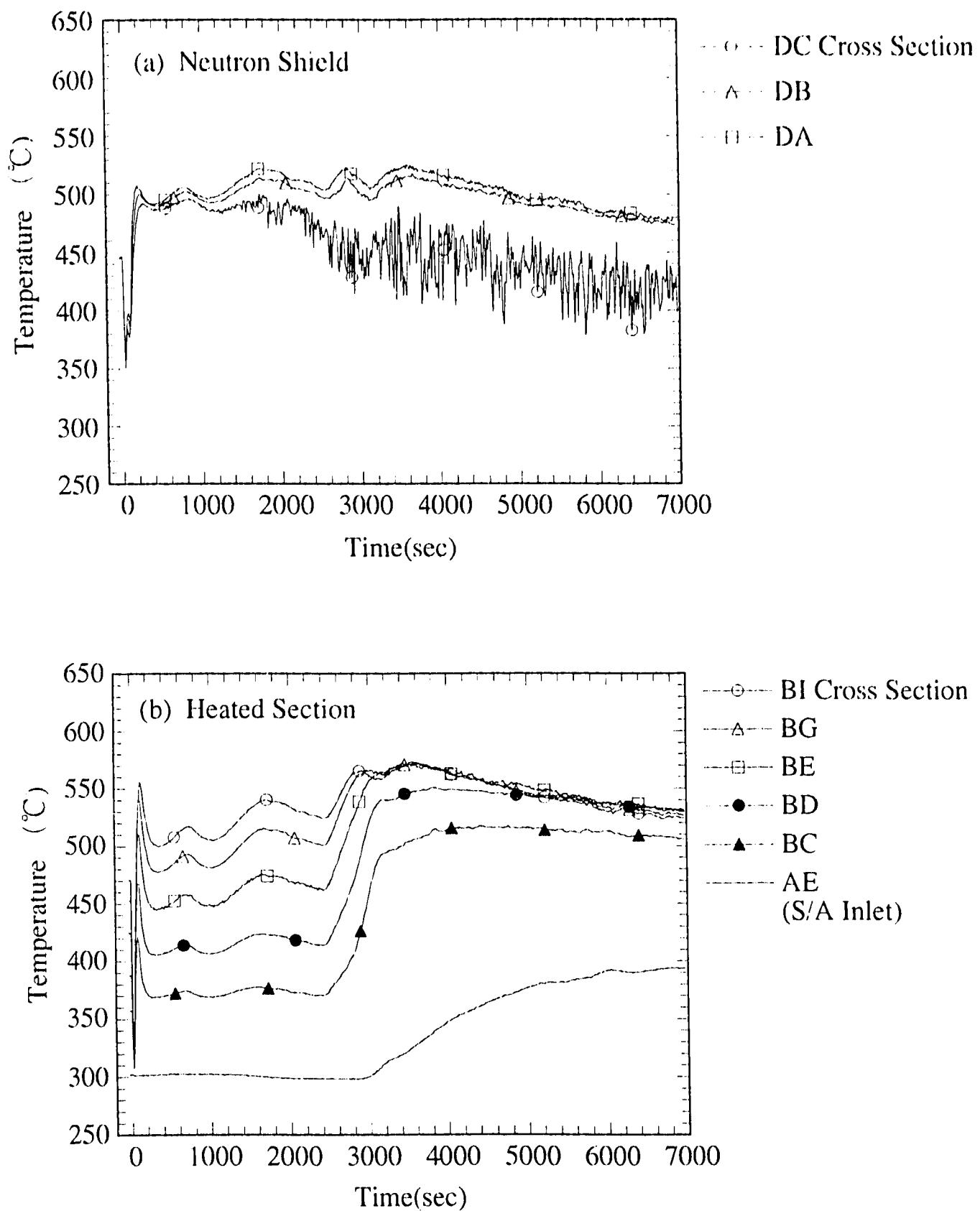


Fig.4.1-6 Time Variations of Temperatures at Center Subchannels or Centers of Cross sections in Center Subassembly (DRACS-REF)

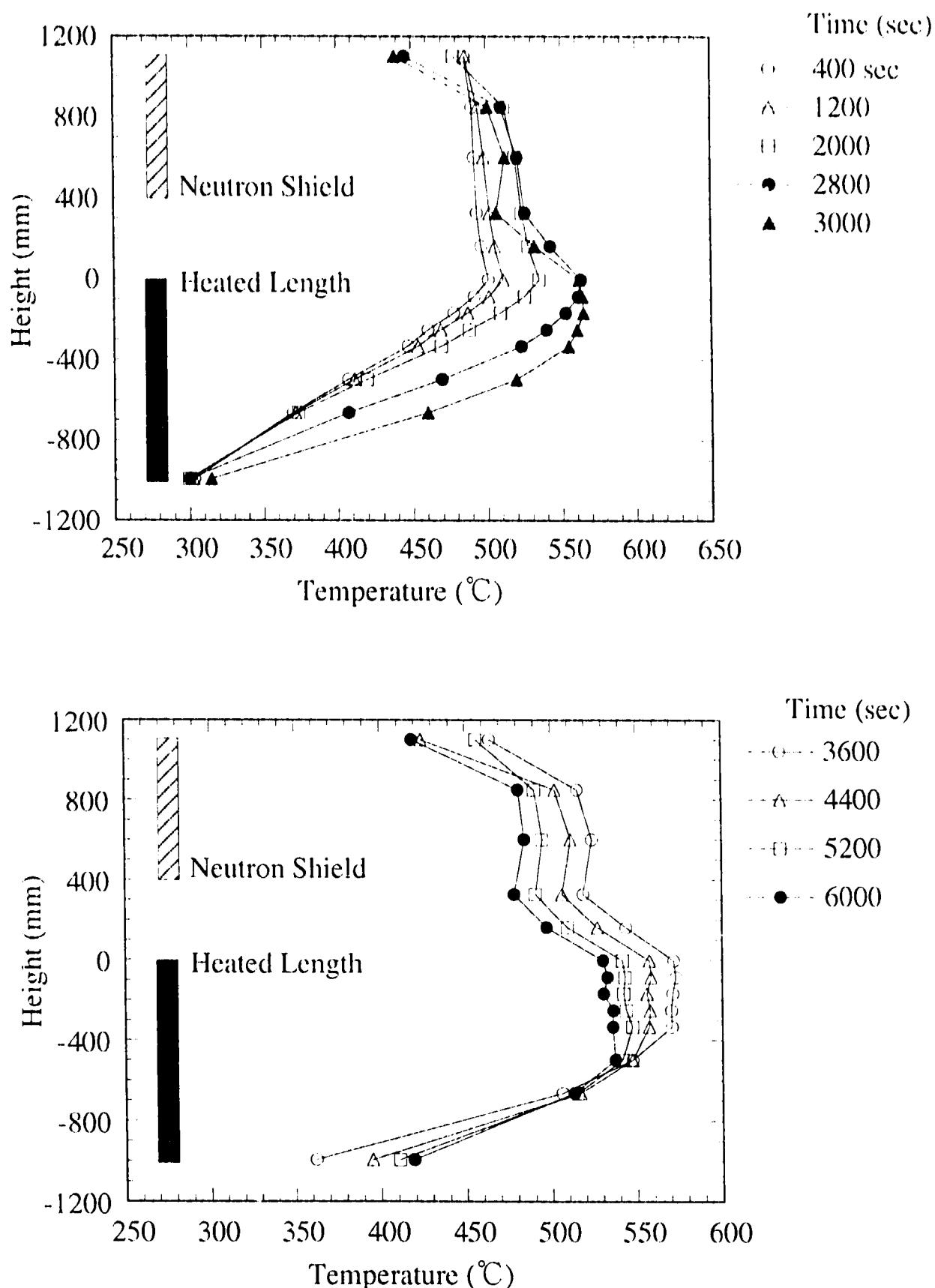


Fig.4.1-7 Axial Temperature Distributions along Center Subchannel in Center Subassembly (DRACS-REF)

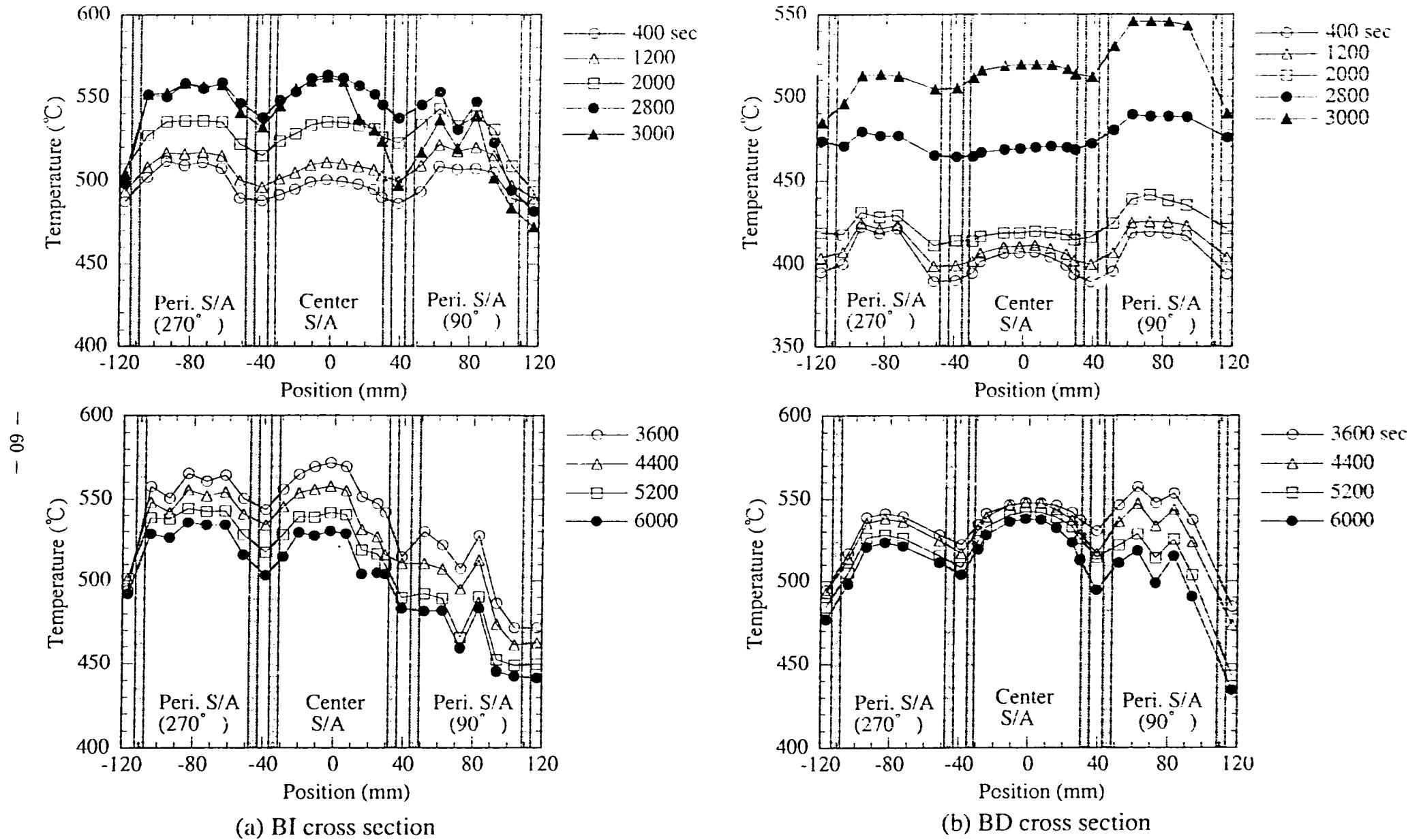


Fig. 4.1-8 Transverse Temperature Distributions in BI and BD Cross Section (DRACS-REF)

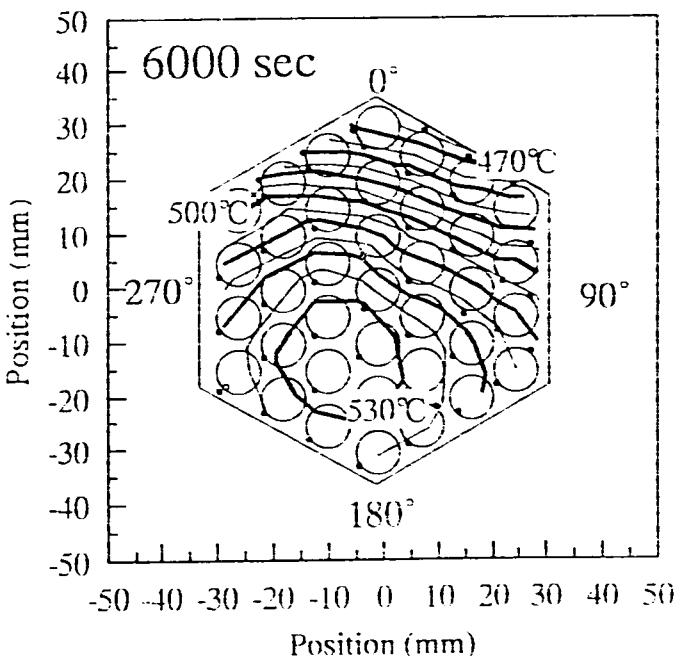
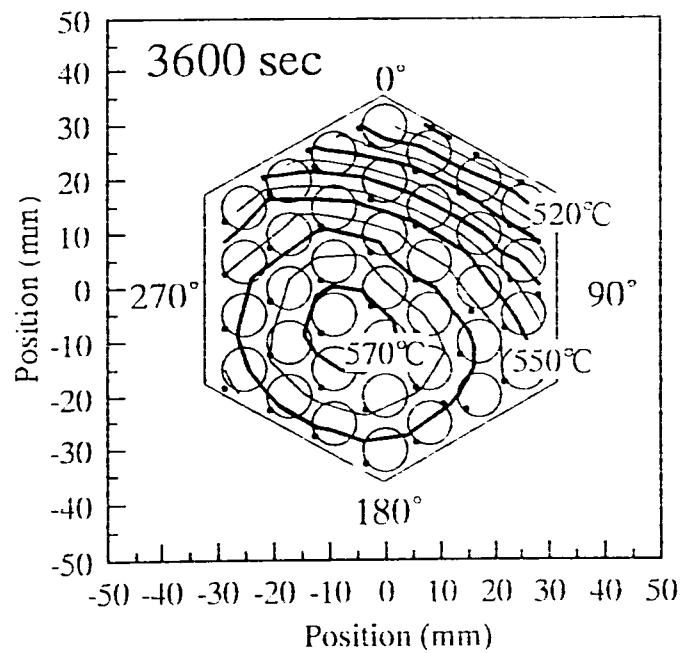
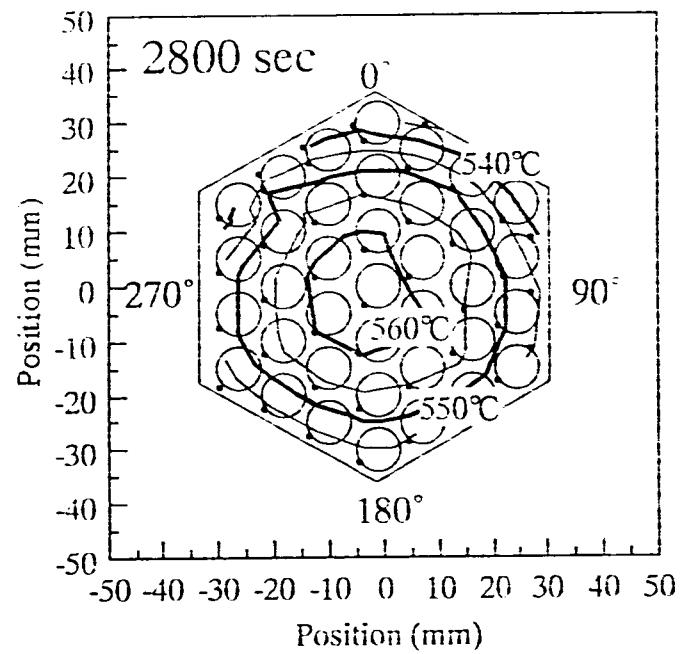
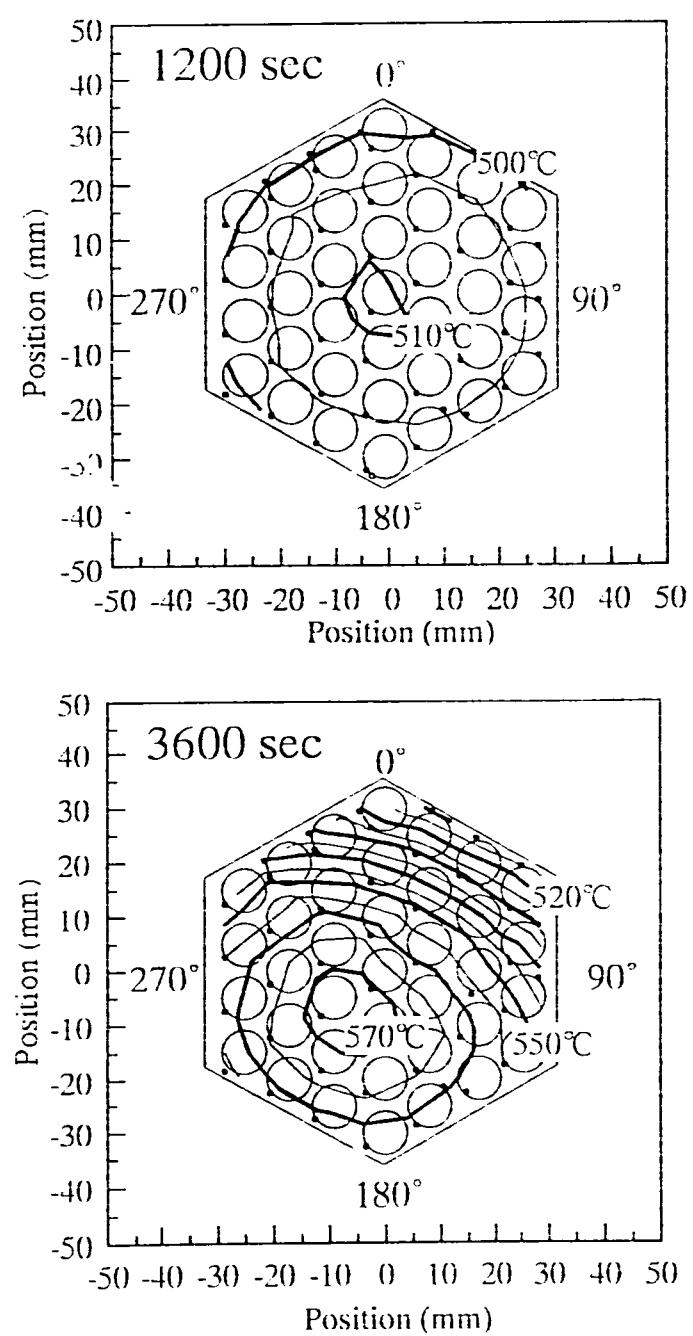


Fig.4.1-9a Isotherms at BI Cross Section of Center Subassembly (Case: DRACS-REF)

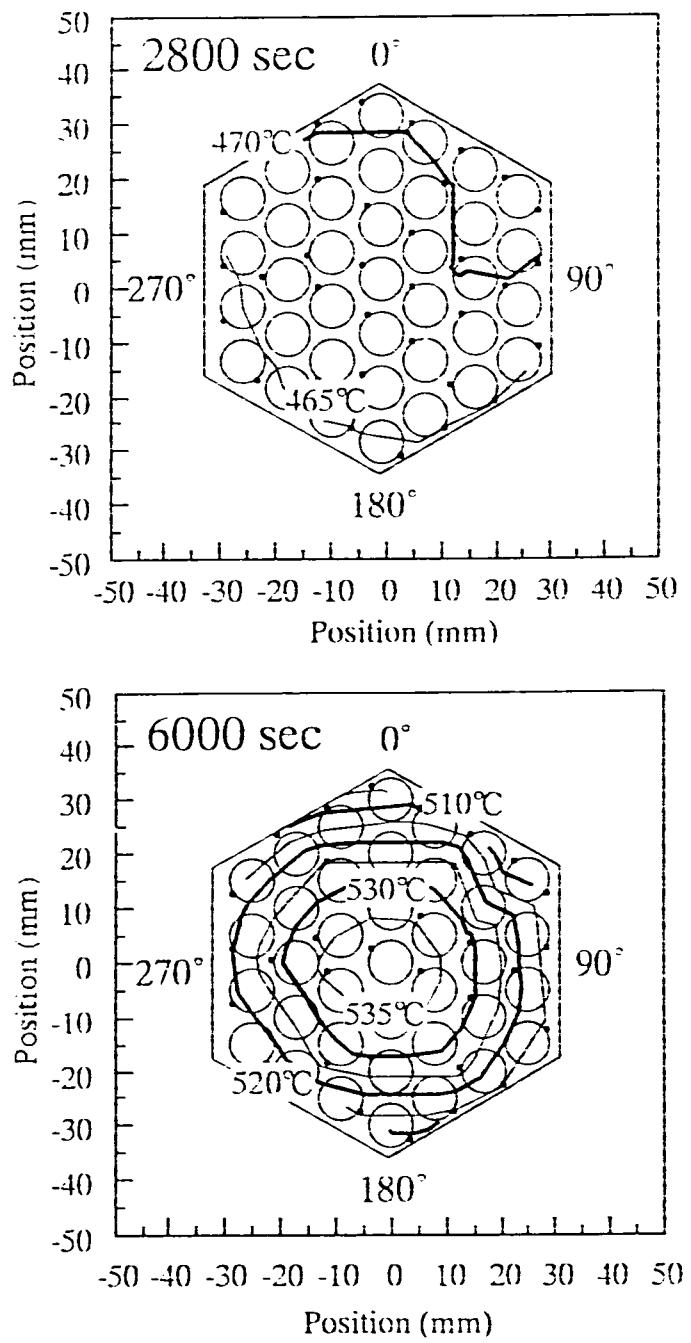
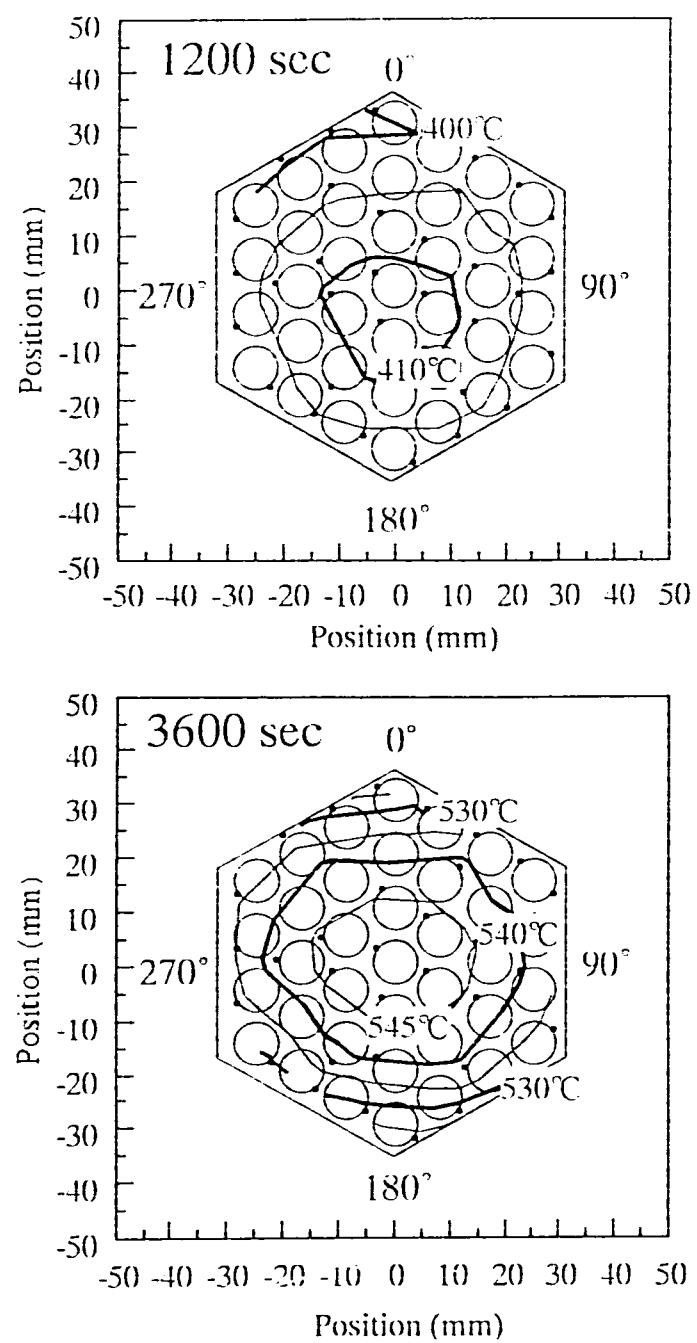


Fig.4.1-9b Isotherms at BD Cross Section of Center Subassembly (Case: DRACS-REF)

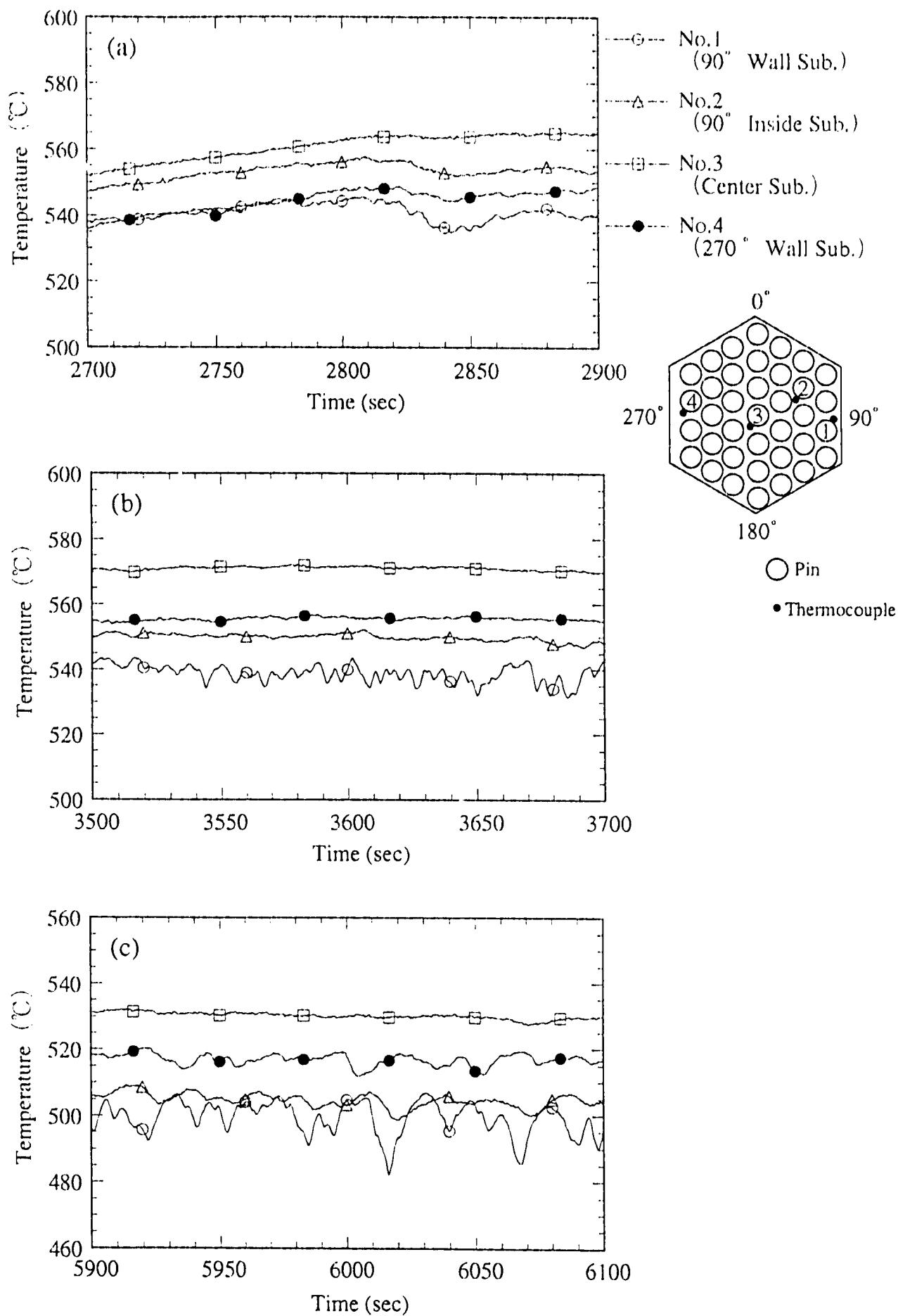


Fig. 4.1-10 Temperature Fluctuations in Center Subassembly on BI Cross Section (Case: DRACS-REF)

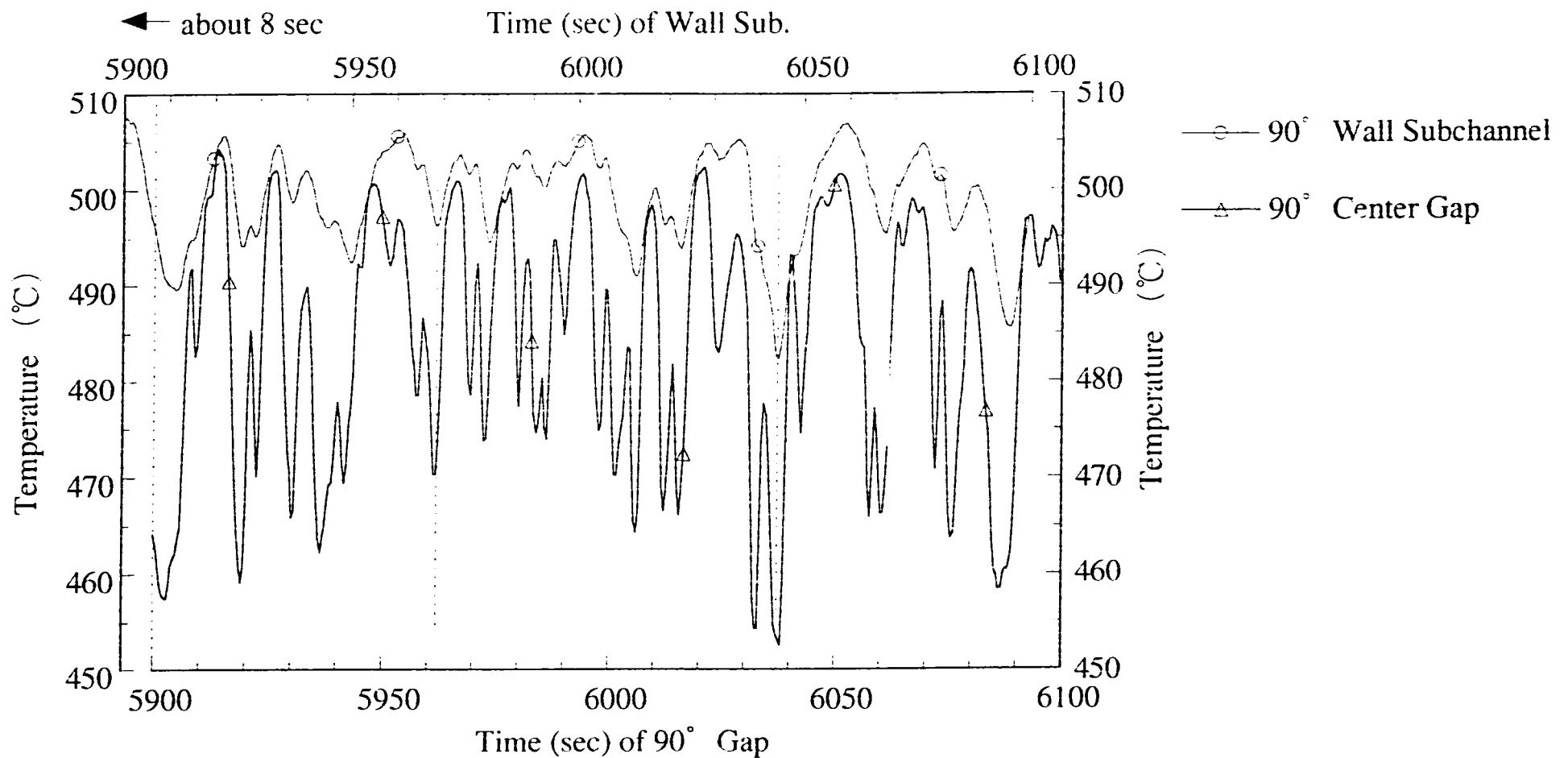


Fig. 4.1-11 Temperature Fluctuations at 90° Wall Subchannel in Center Subassembly and 90° Center Gap on BI Cross Section (Case: DRACS-REF)

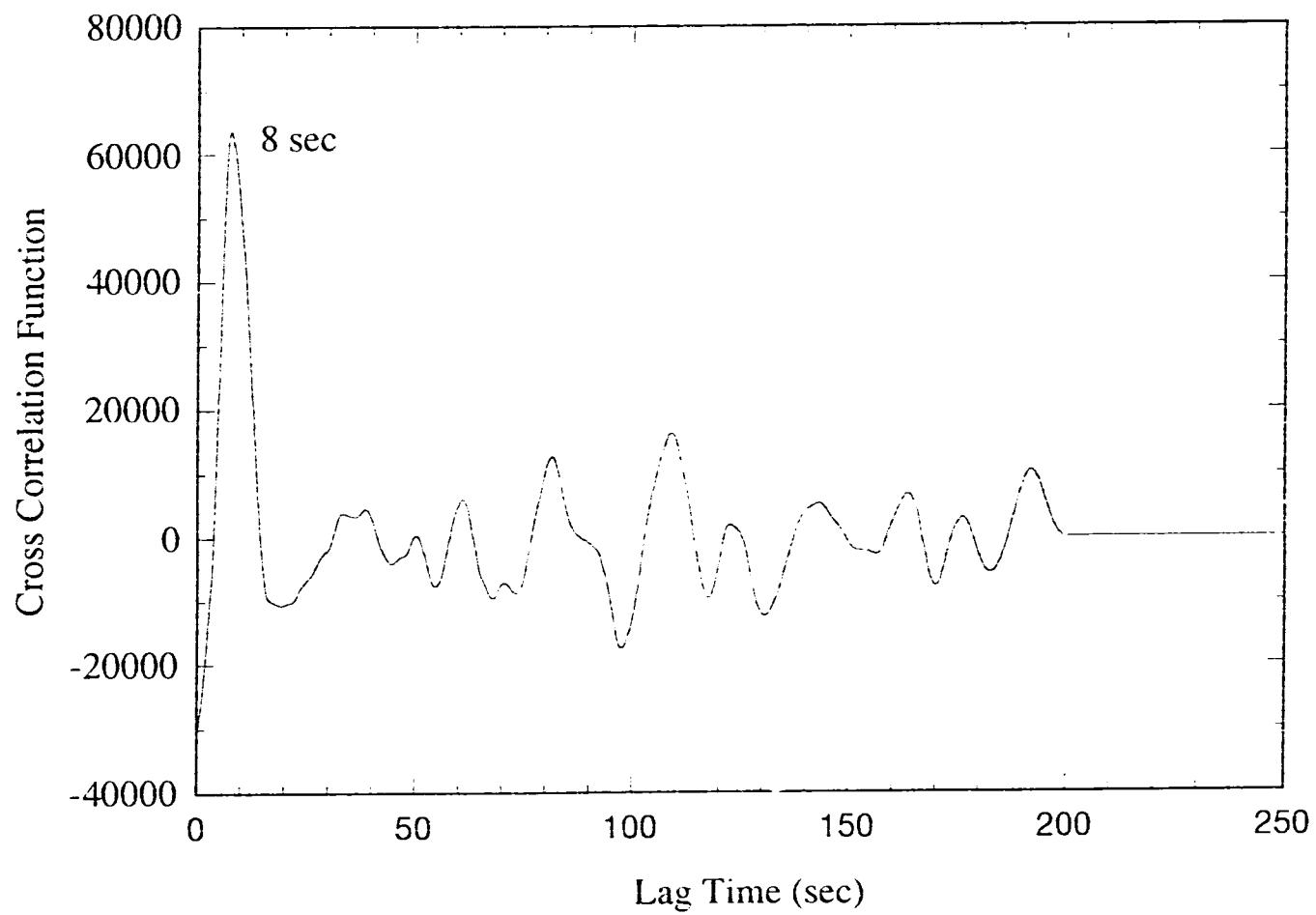
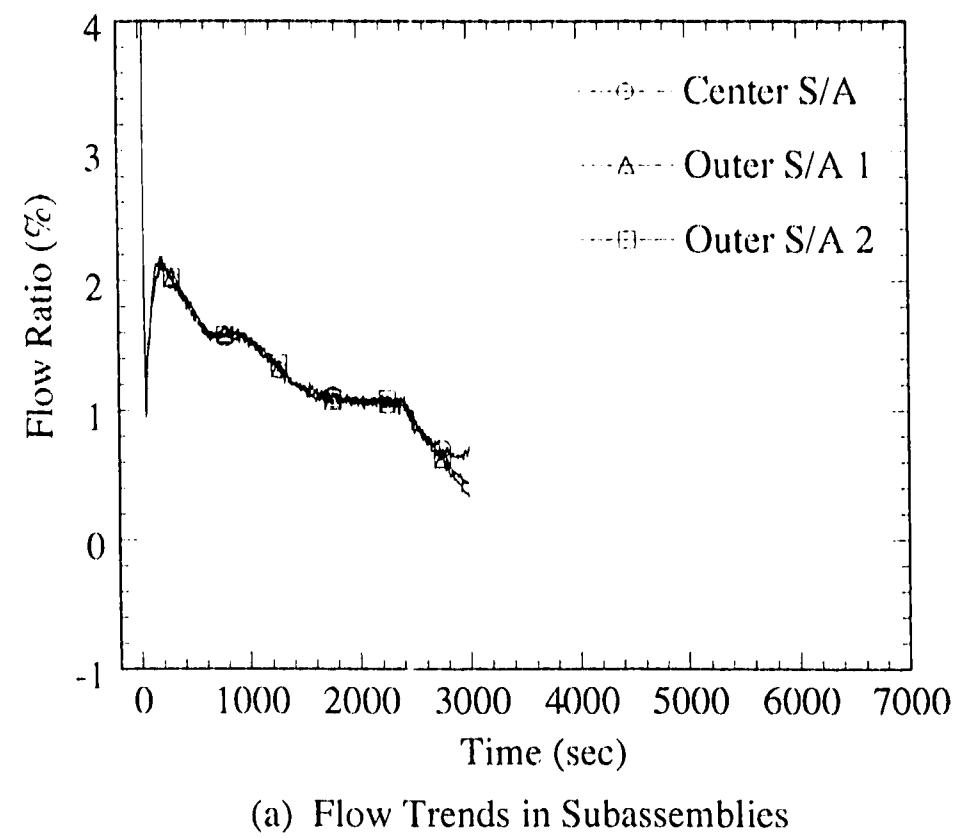
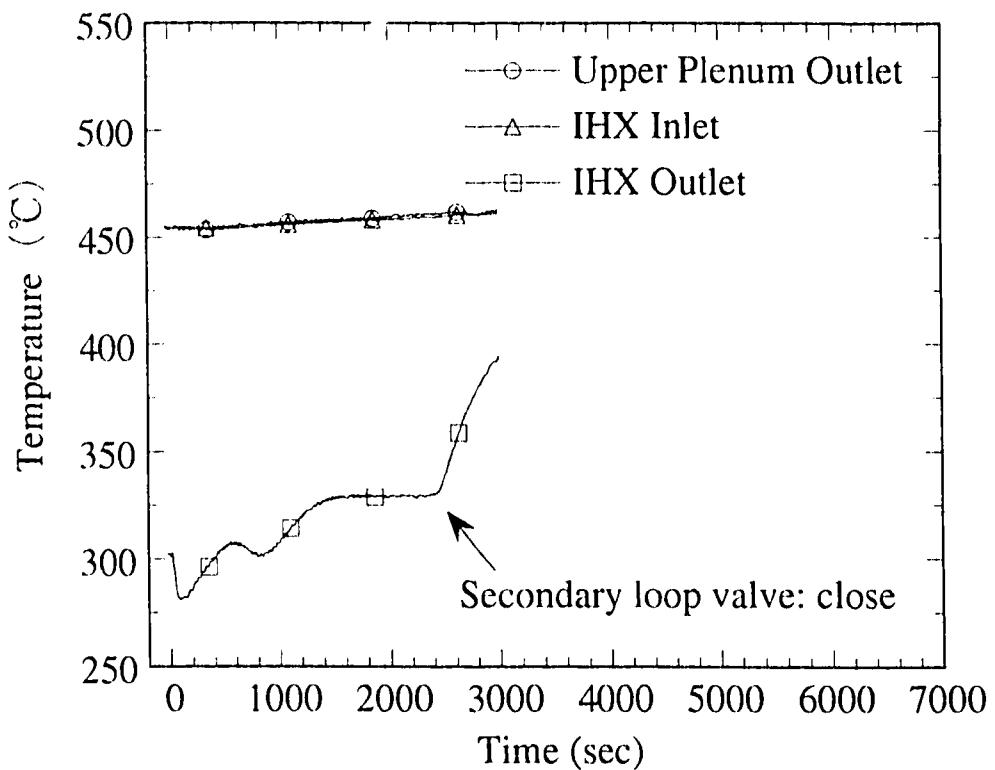


Fig. 4.1-12 Cross-Correlation Function of Temperature Fluctuations at 90° Wall Subchannel in Center Subassembly and 90° Center Gap on BI Cross Section (Case: DRACS-REF)



(a) Flow Trends in Subassemblies



(b) Temperature Trends

Fig. 4.2-1 Trends of Flows and Temperatures in Main Loop
(Case: DRACS-1)

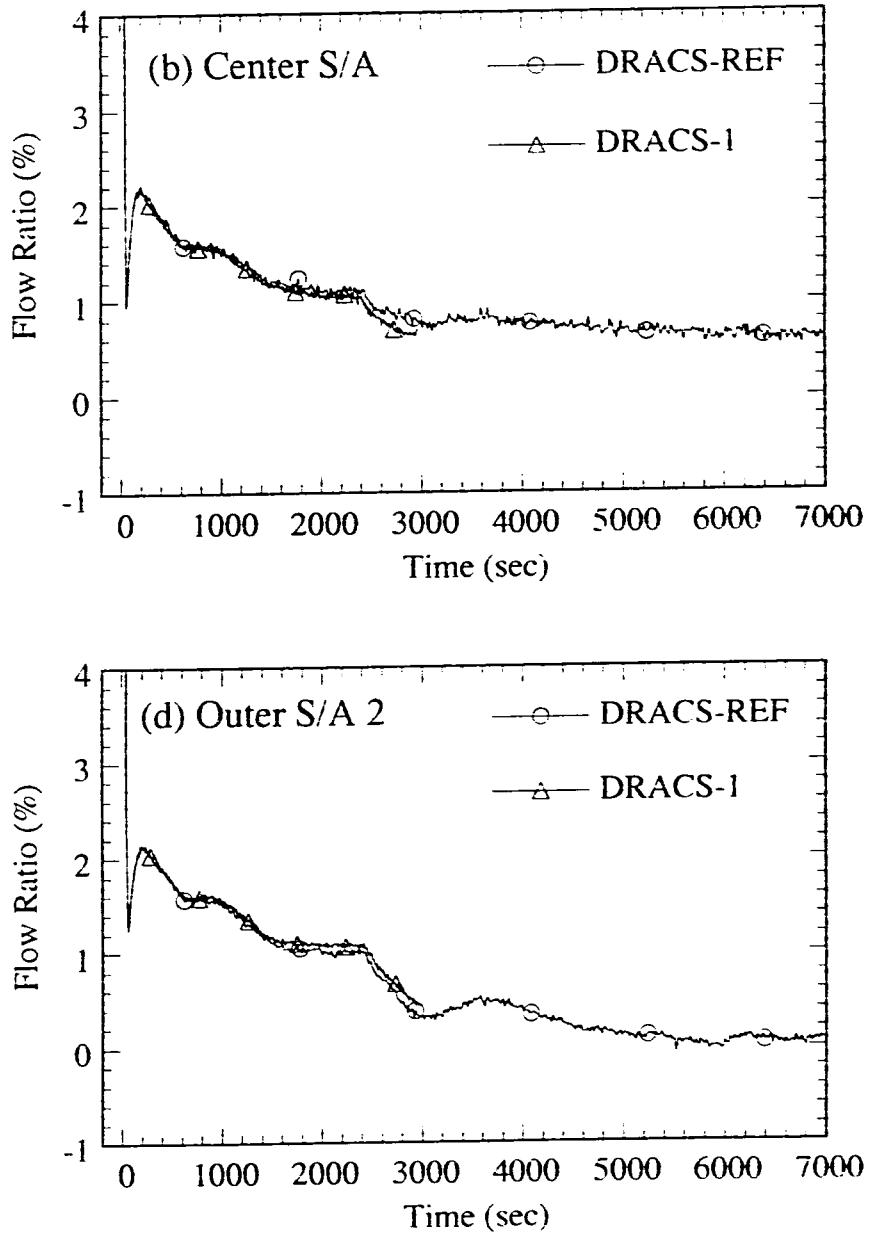
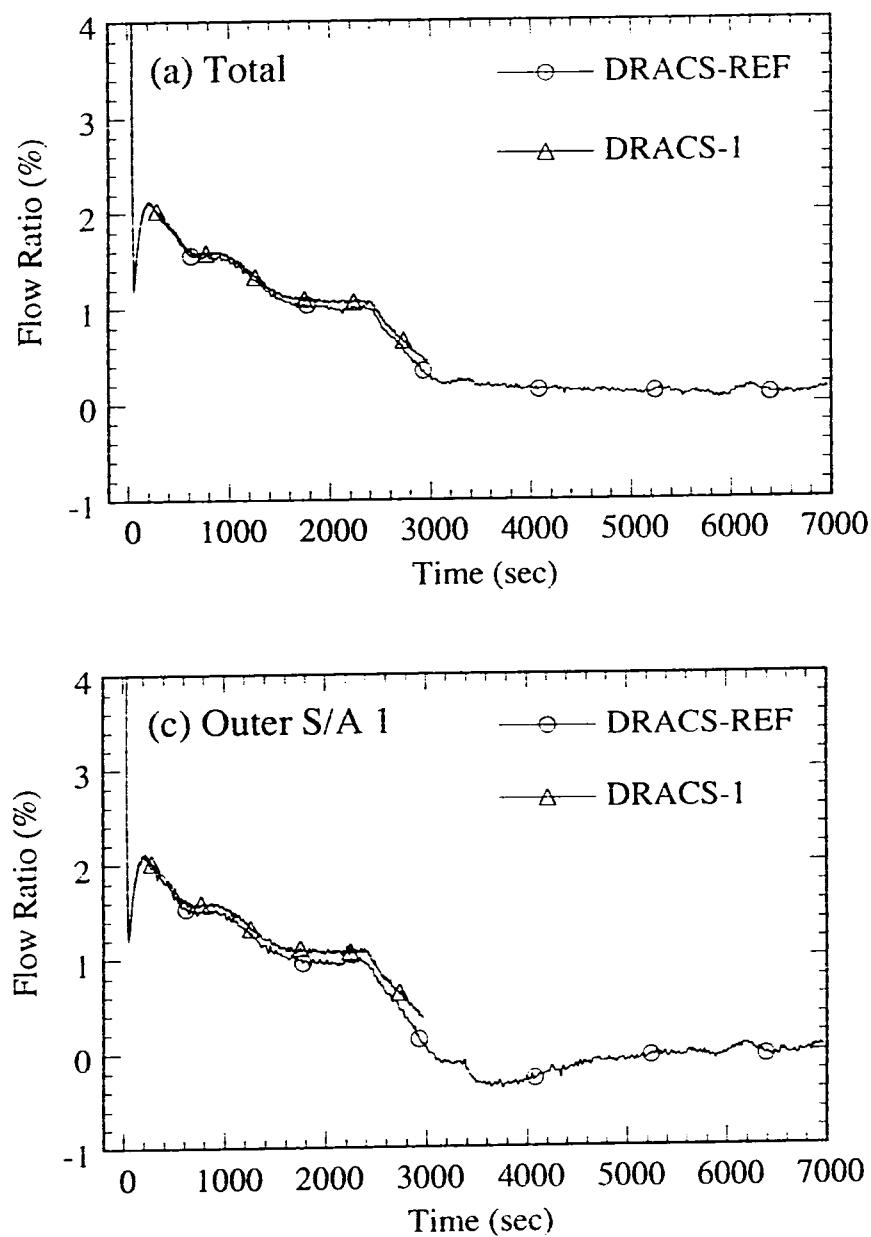


Fig.4.2-2 Trends of Flows of Subassemblies (DRACS-REF vs. DRACS-1)

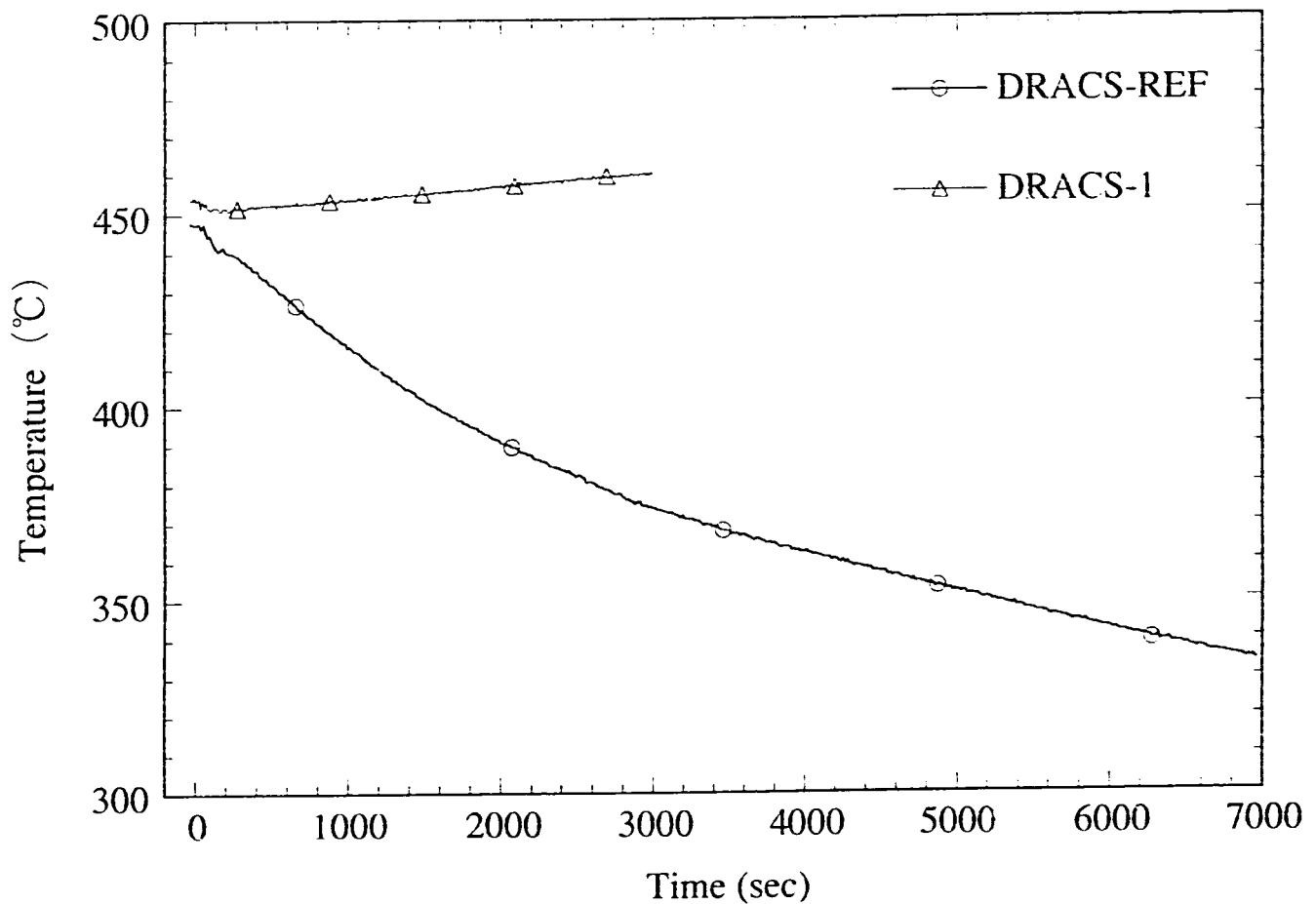


Fig.4.2-3 Time Histories of Temperatures at the Height of Core Outlet in Upper Plenum
(DRACS-REF vs. DRACS-1)

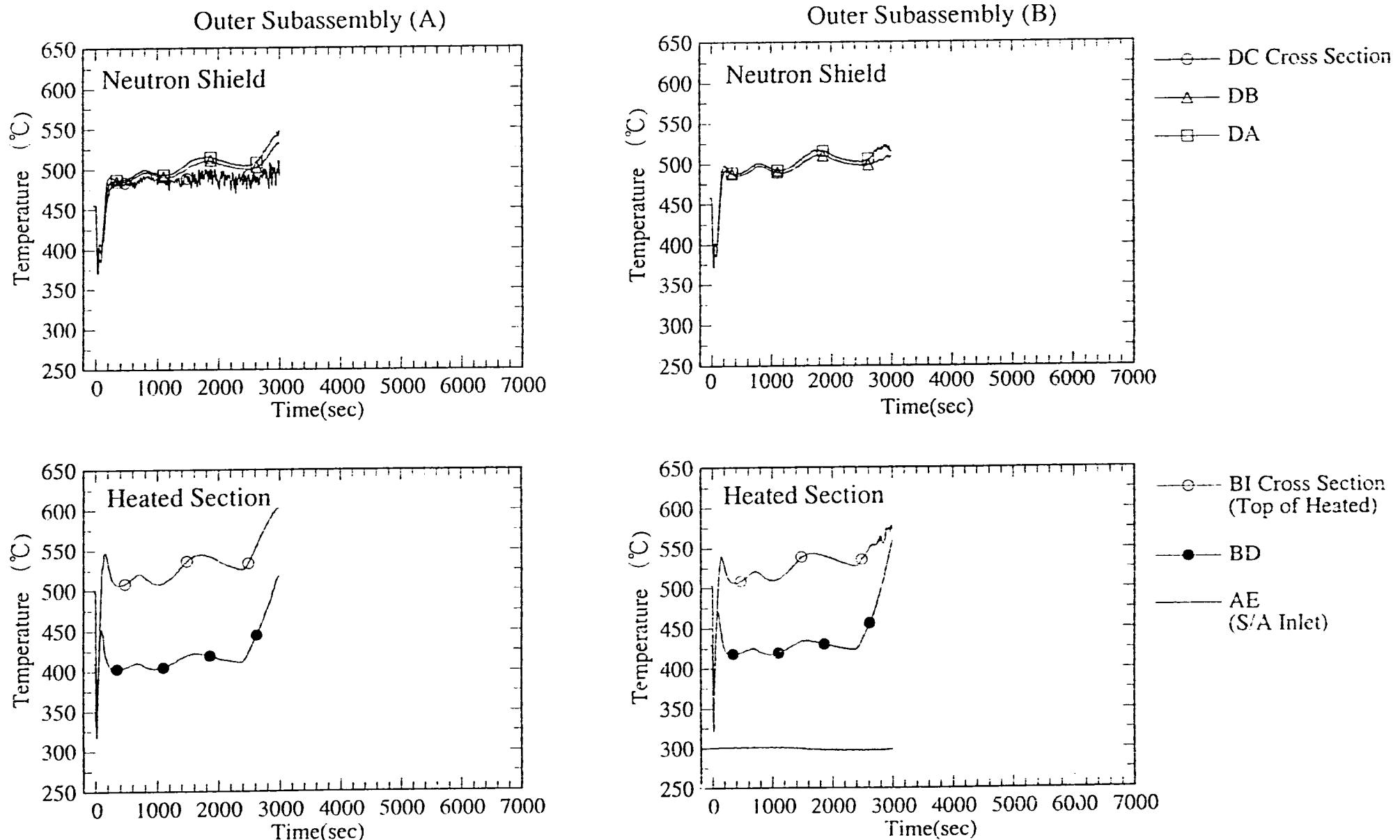


Fig. 4.2-4a Time Variations of Temperatures in Outer Subassembly A and B (Case: DRACS-1)

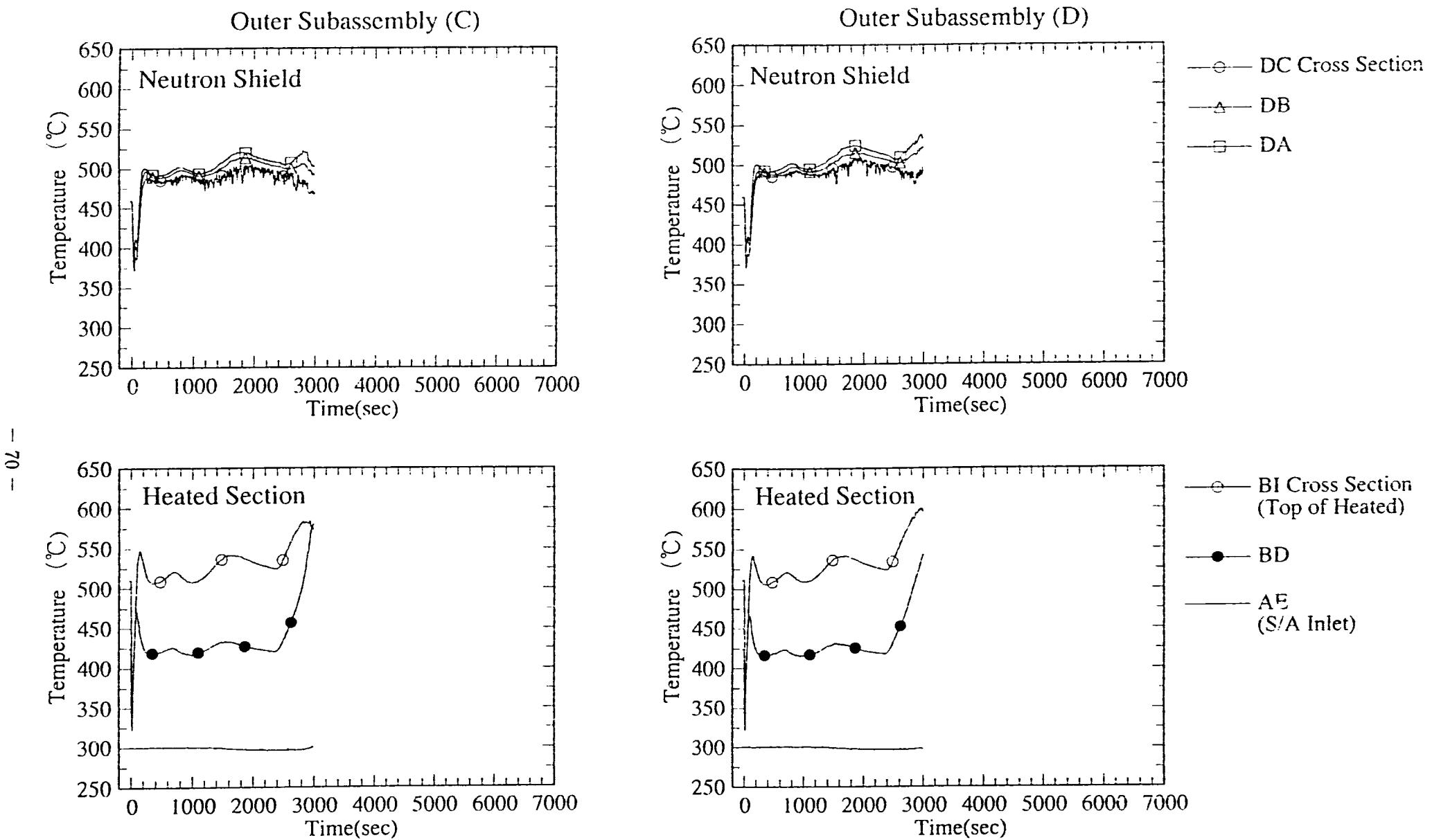


Fig. 4.2-4b Time Variations of Temperatures in Outer Subassembly C and D (Case: DRACS-1)

- 12 -

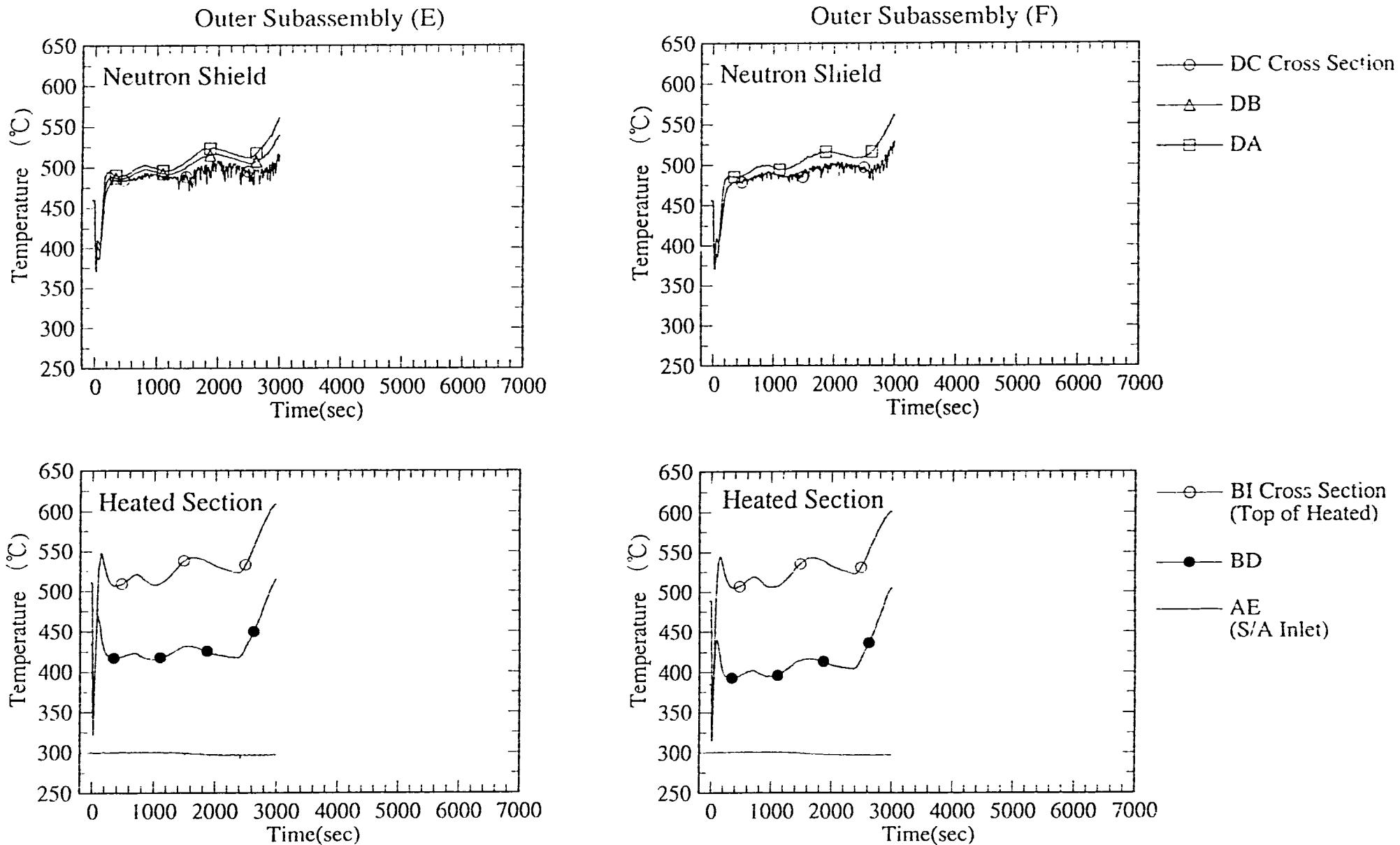


Fig. 4.2-4c Time Variations of Temperatures in Outer Subassembly E and F (Case: DRACS-1)

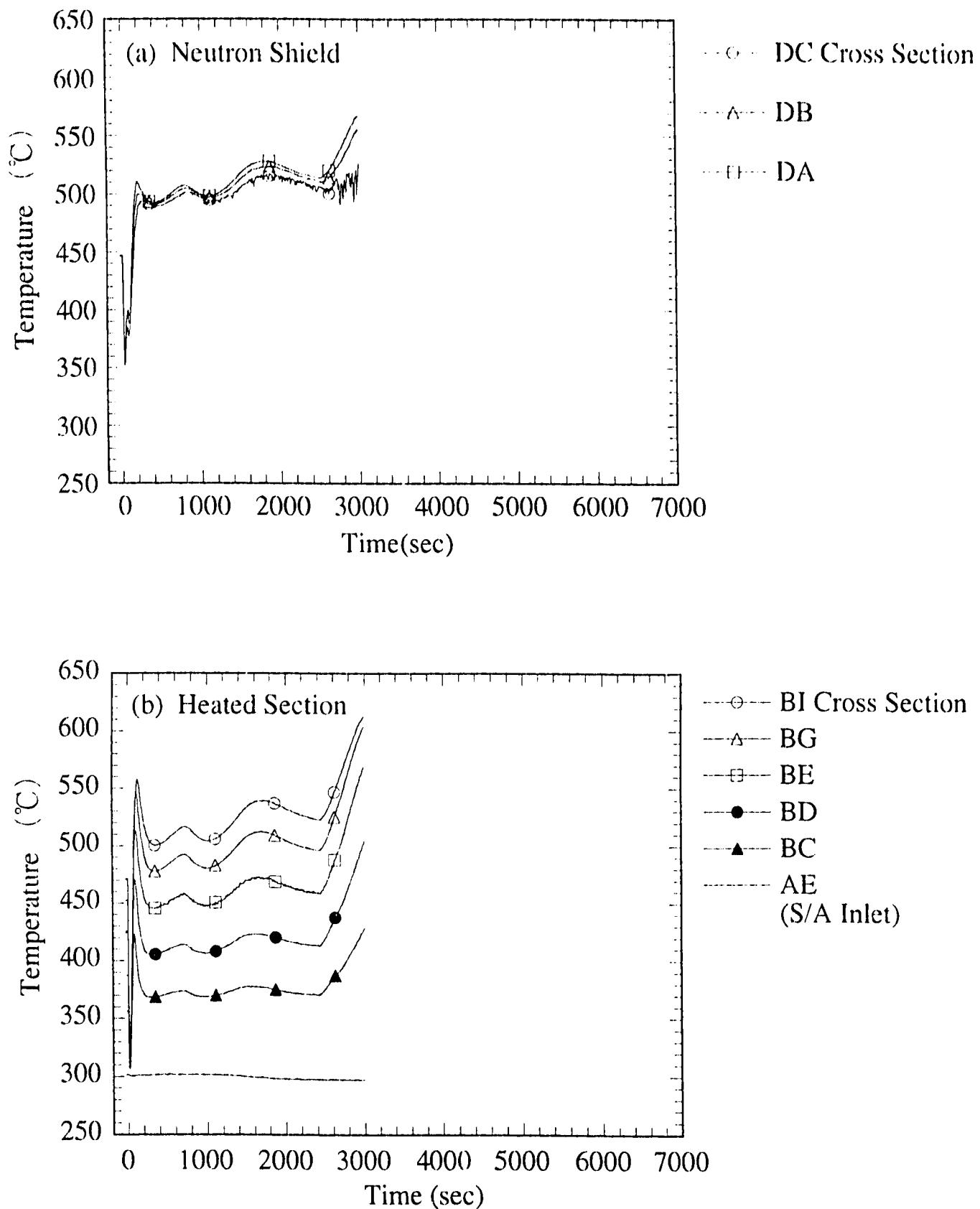


Fig.4.2-5 Time Variations of Temperatures at Center Subchannels or Centers of Cross Sections in Center Subassembly (DRACS-1)

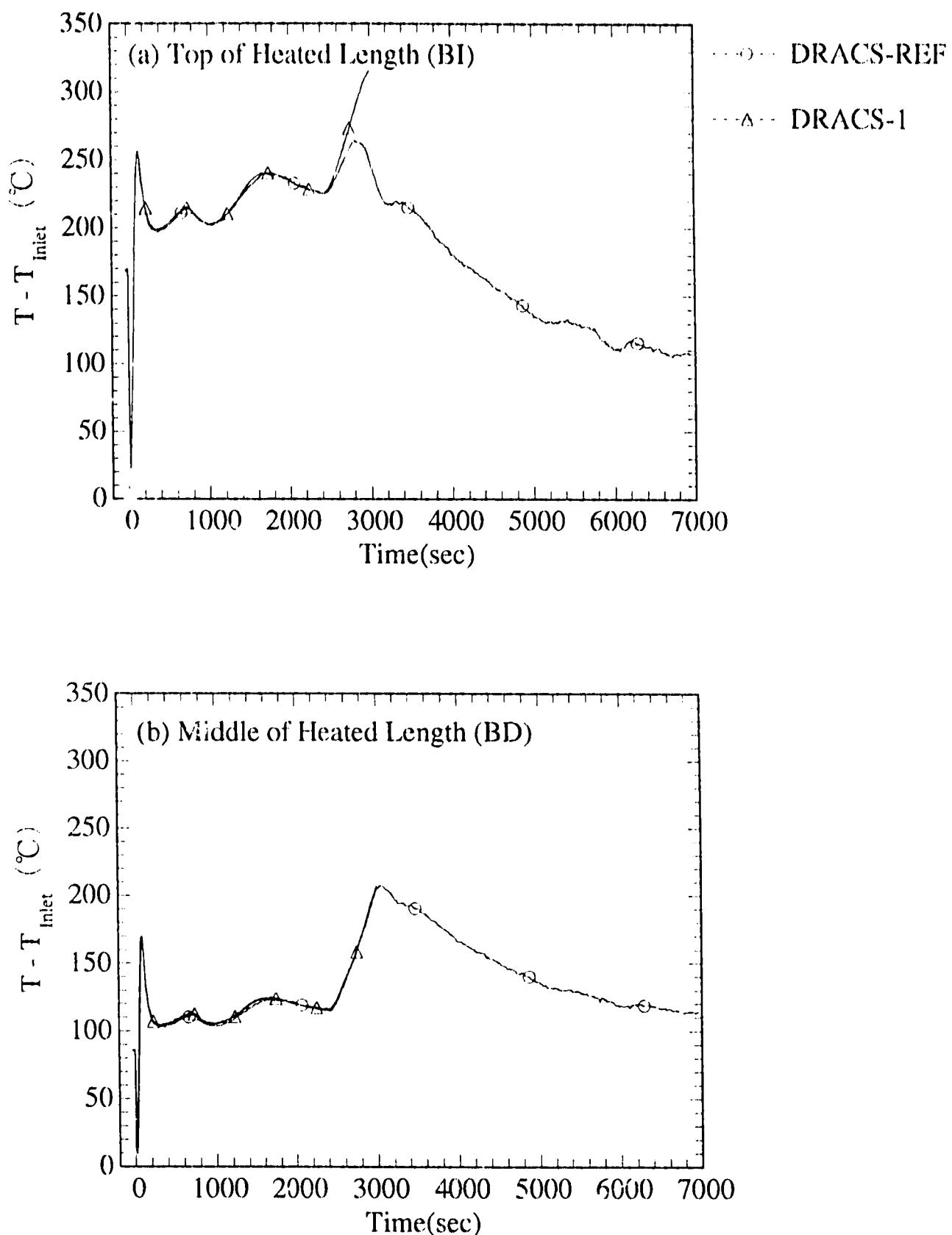


Fig.4.2-6 Temperature Increase from S/A Inlet at Center - Subchannels of BI and BD Cross Sections in Center Subassembly (DRACS-REF vs. DRACS-1)

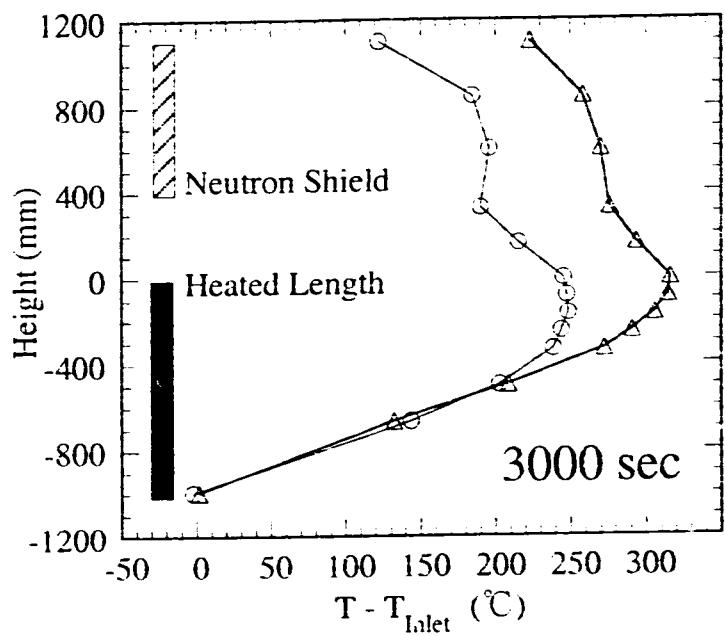
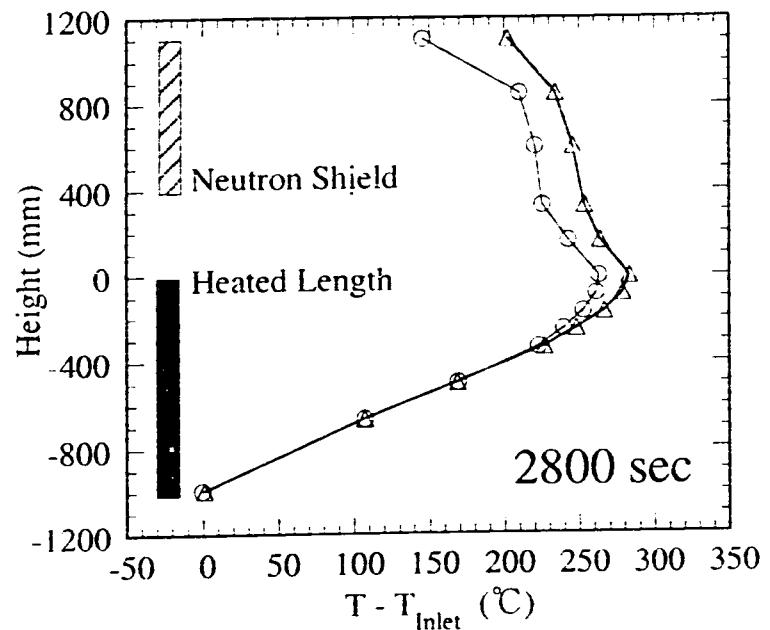
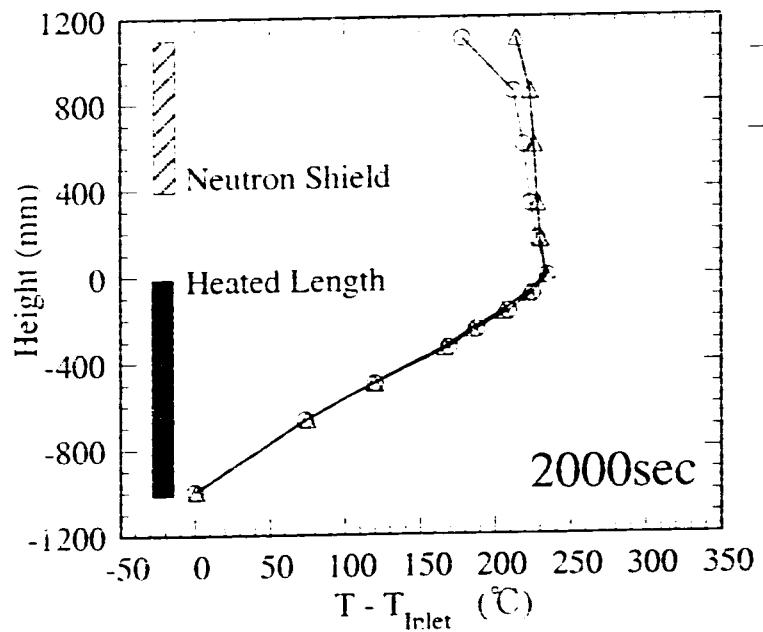
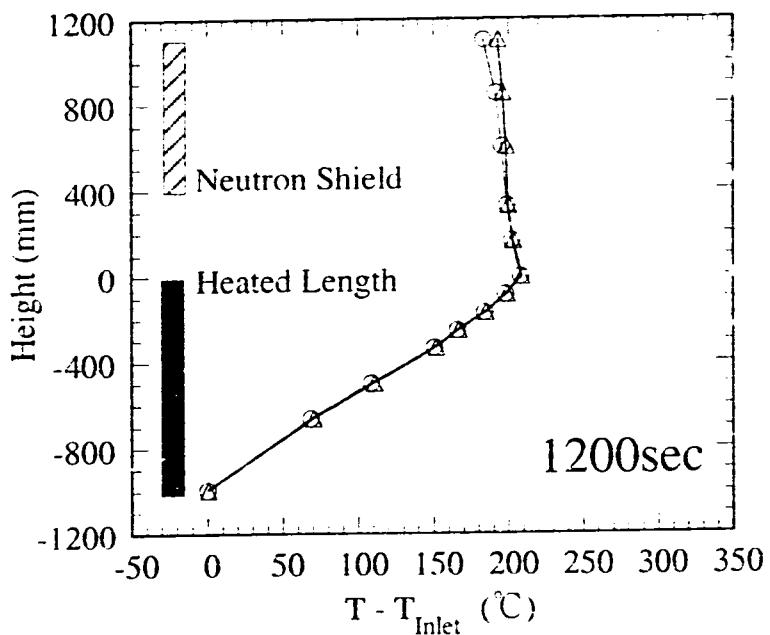


Fig.4.2-7 Axial Temperature Distributions along Center Subchannel in Center Subassembly
(DRACS-REF vs. DRACS-1)

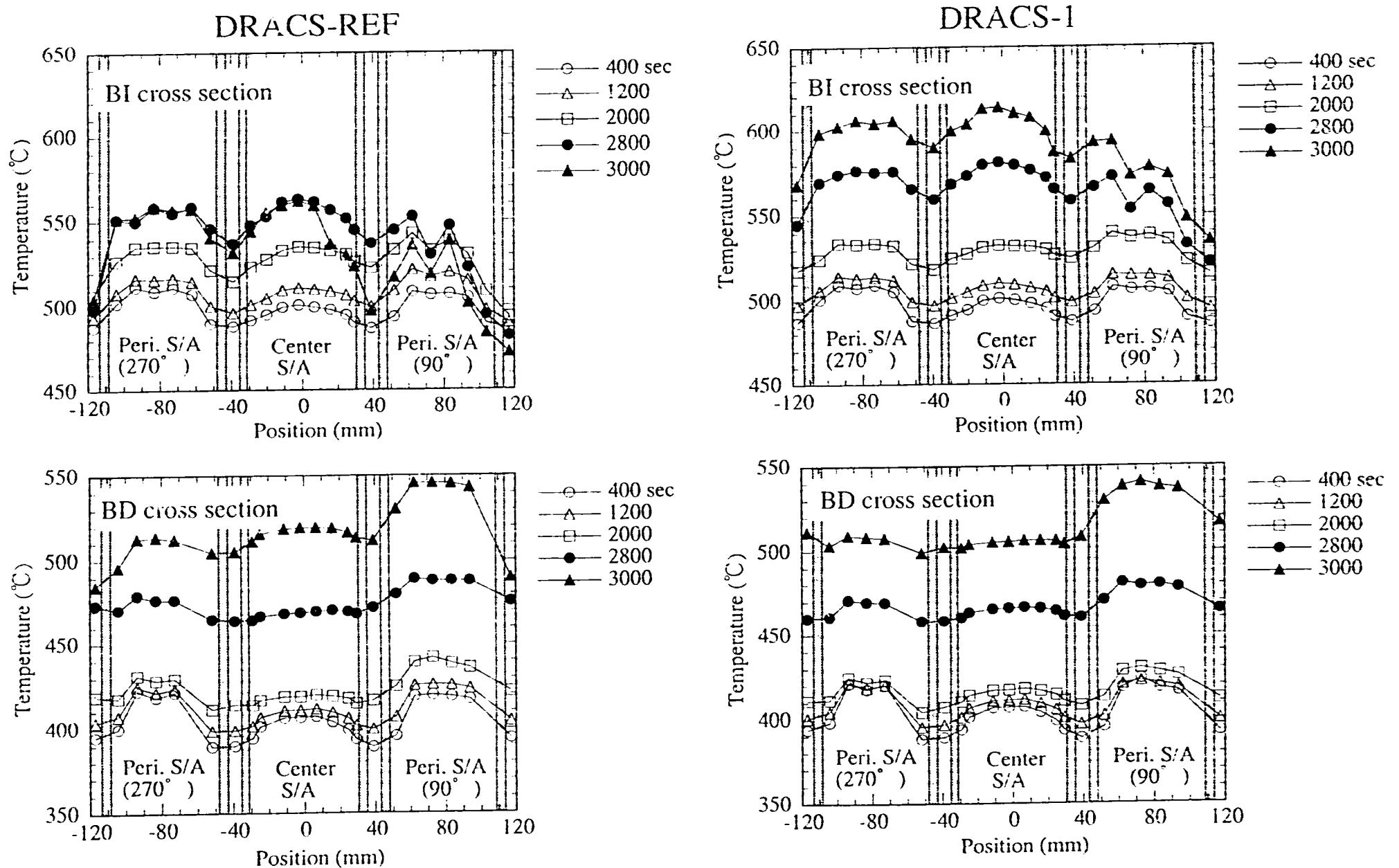
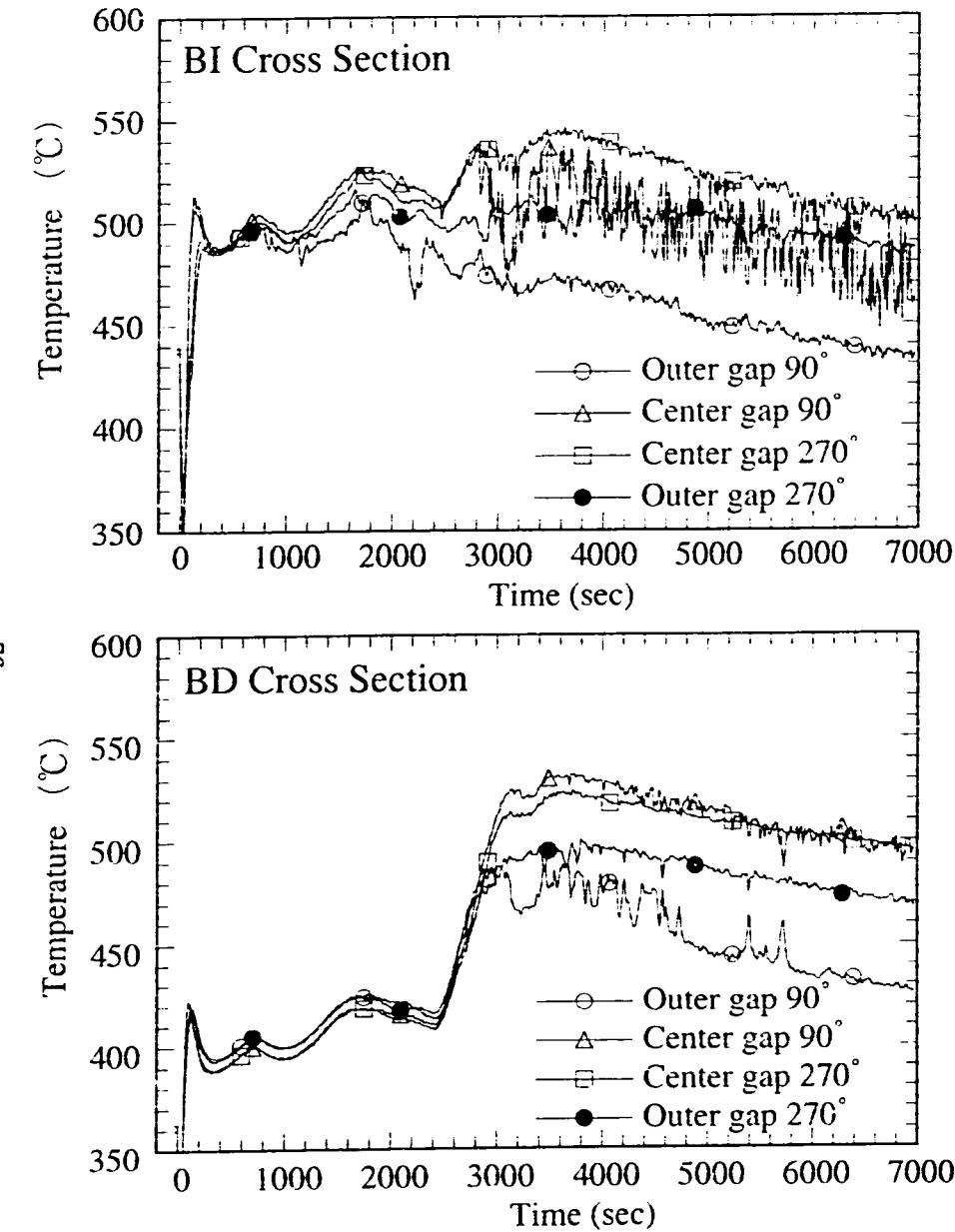


Fig.4.2-8 Transverse Temperature Distributions in BI and BD Cross Sections (DRACS-REF vs. DRACS-1)

DRACS-REF



DRACS-1

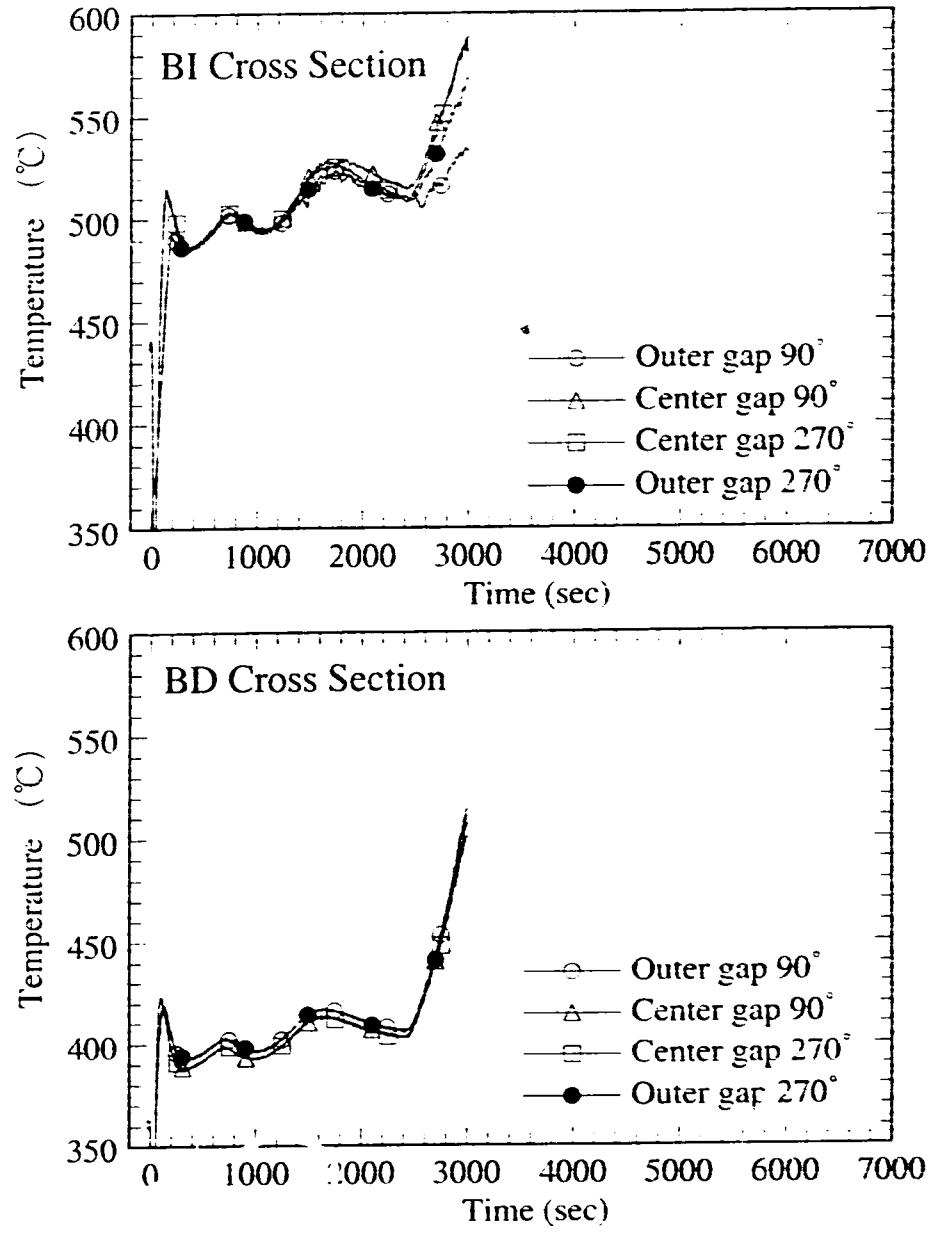
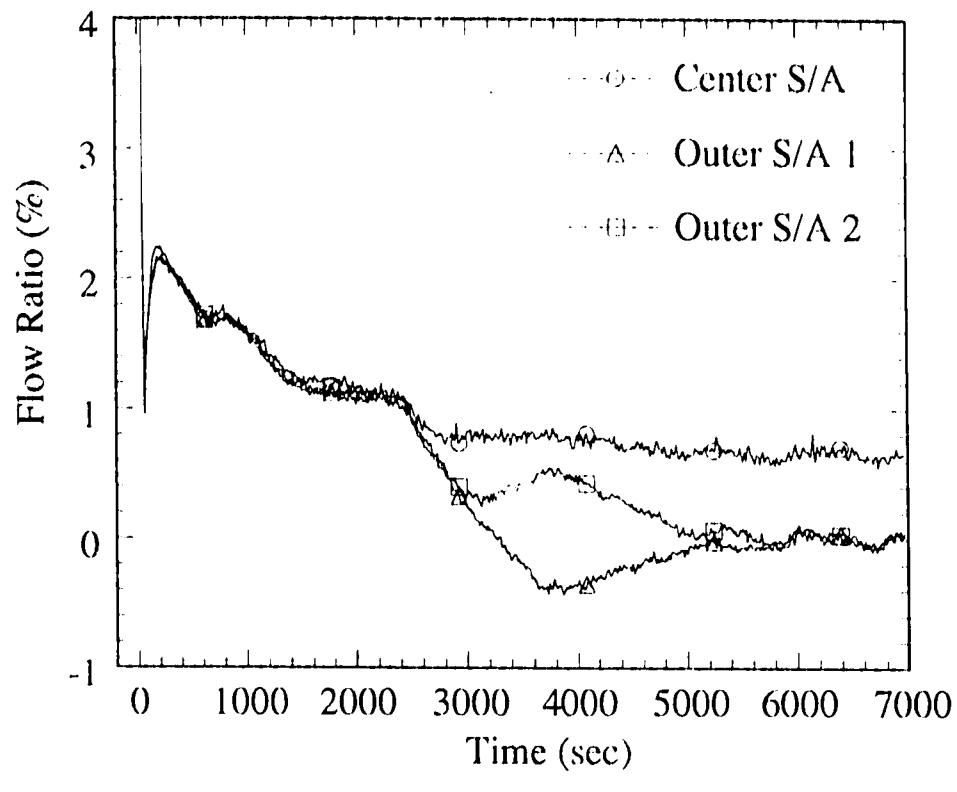
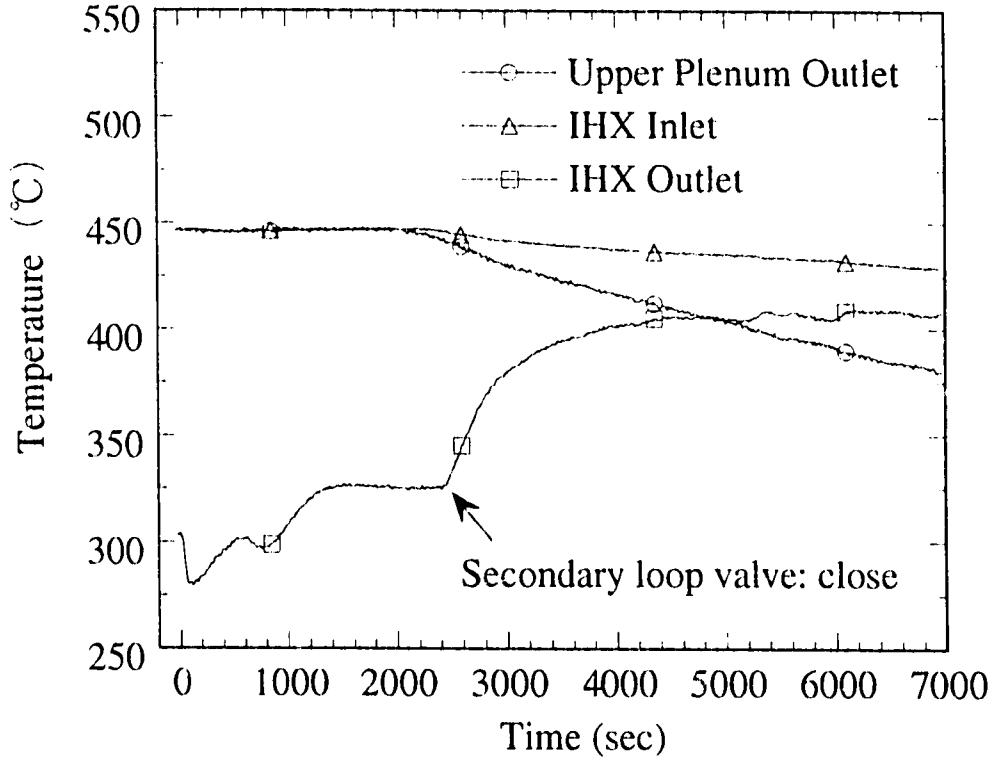


Fig.4.2-9 Time Variations of Temperatures in Inter-Wrapper Gap in BI and BD Cross Sections (DRACS-REF vs. DRACS-1)



(a) Flow Trends in Subassemblies



(b) Temperature Trends

Fig. 4.3-1 Trends of Flows and Temperatures in Main Loop
(Case: DRACS-2)

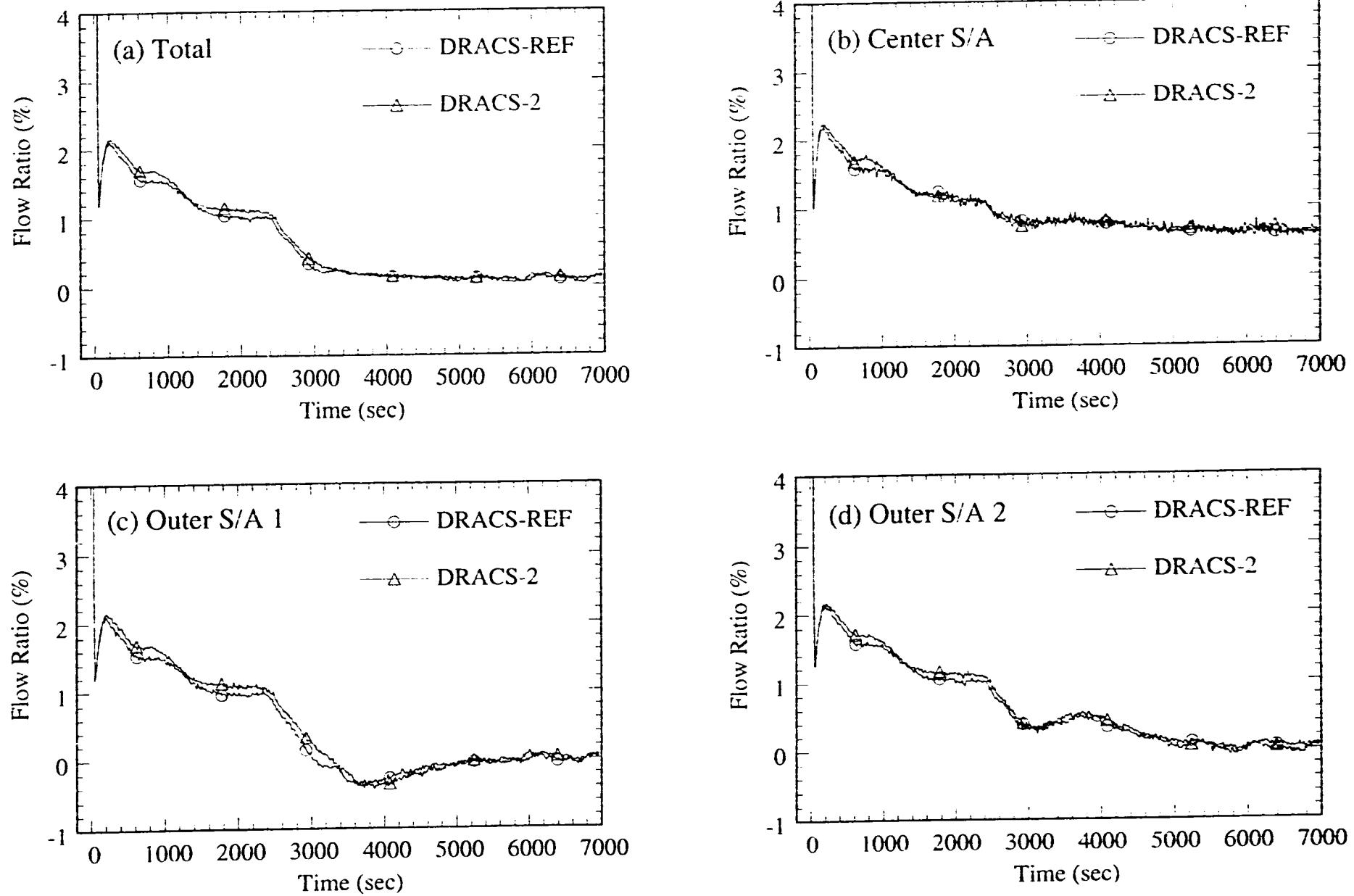


Fig.4.3-2 Trends of Flows of Subassemblies (DRACS-REF vs. DRACS-2)

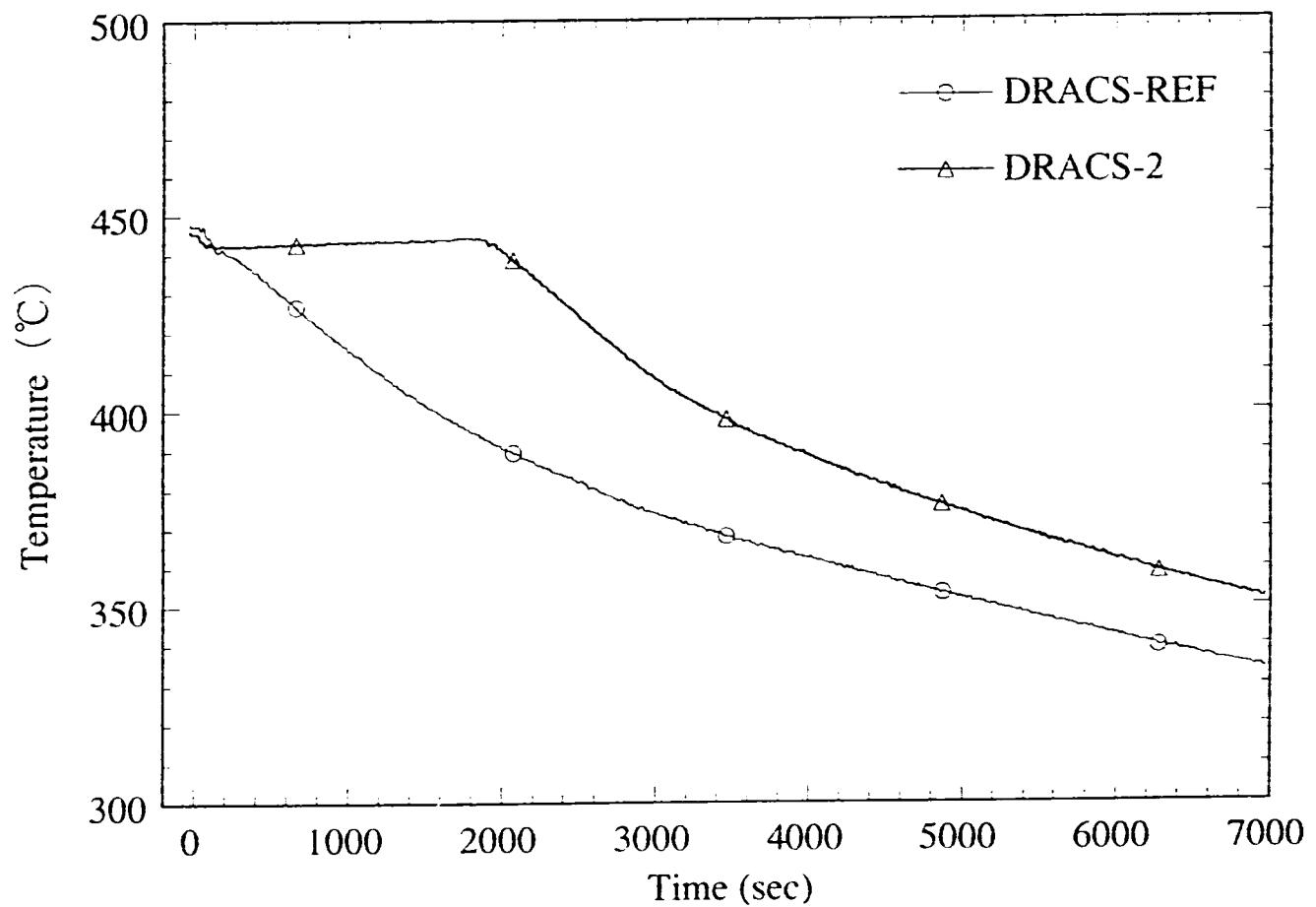


Fig.4.3-3 Time Histories of Temperatures at the Height of Core Outlet in Upper Plenum
(DRACS-REF vs. DRACS-2)

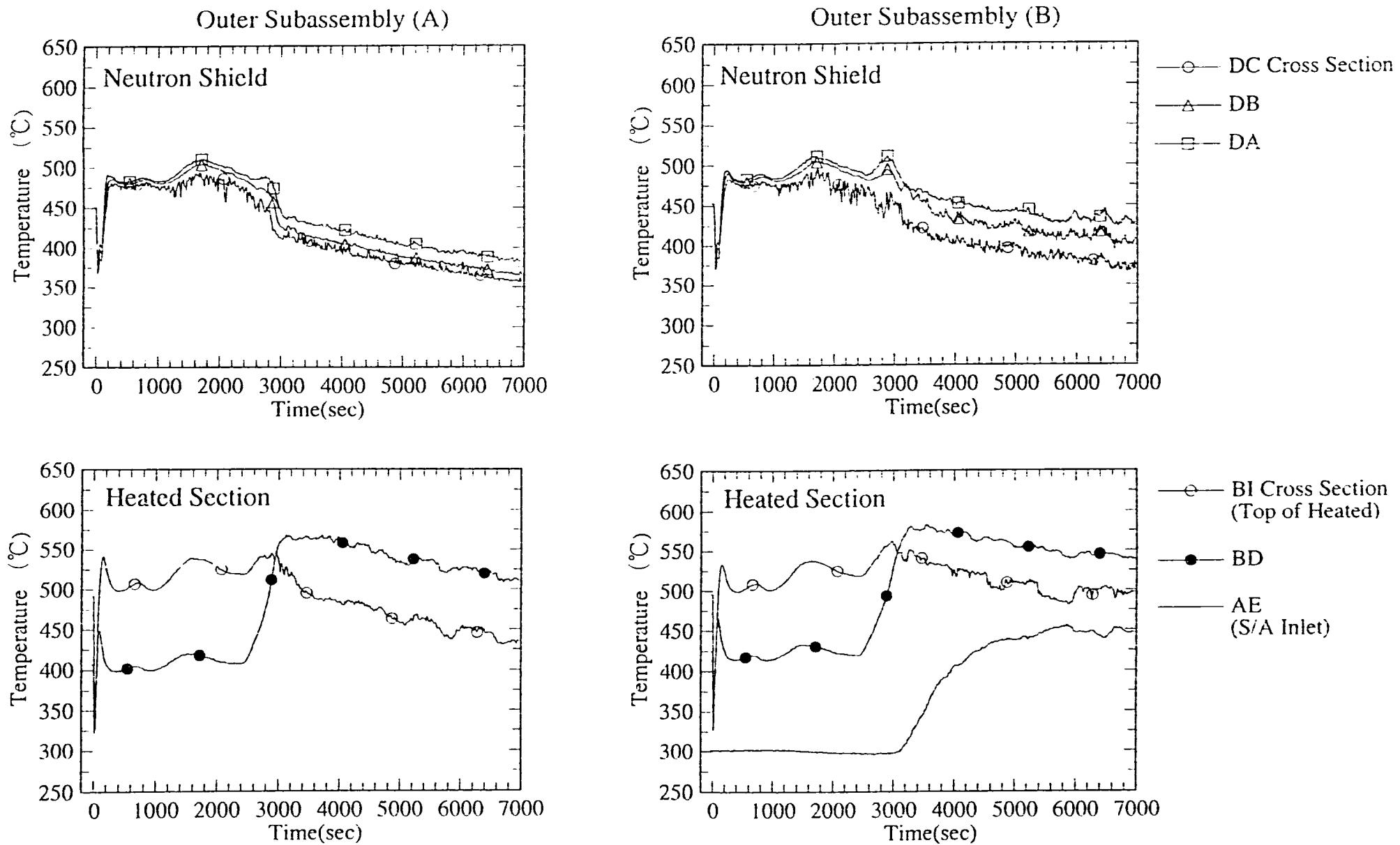


Fig. 4.3-4a Time Variations of Temperatures in Outer Subassembly A and B (Case: DRACS-2)

- 18 -

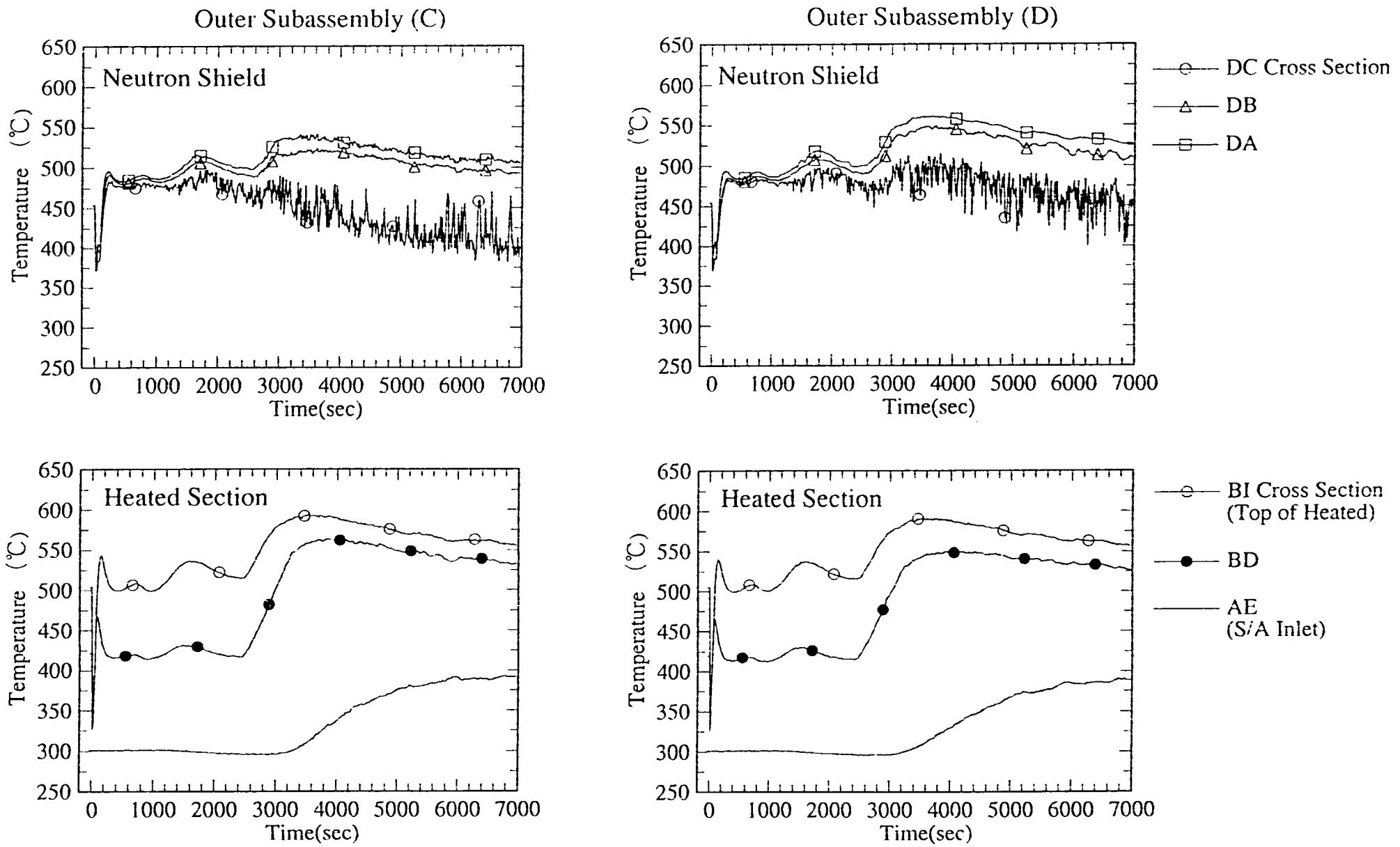


Fig. 4.3-4b Time Variations of Temperatures in Outer Subassembly C and D (Case: DRACS-2)

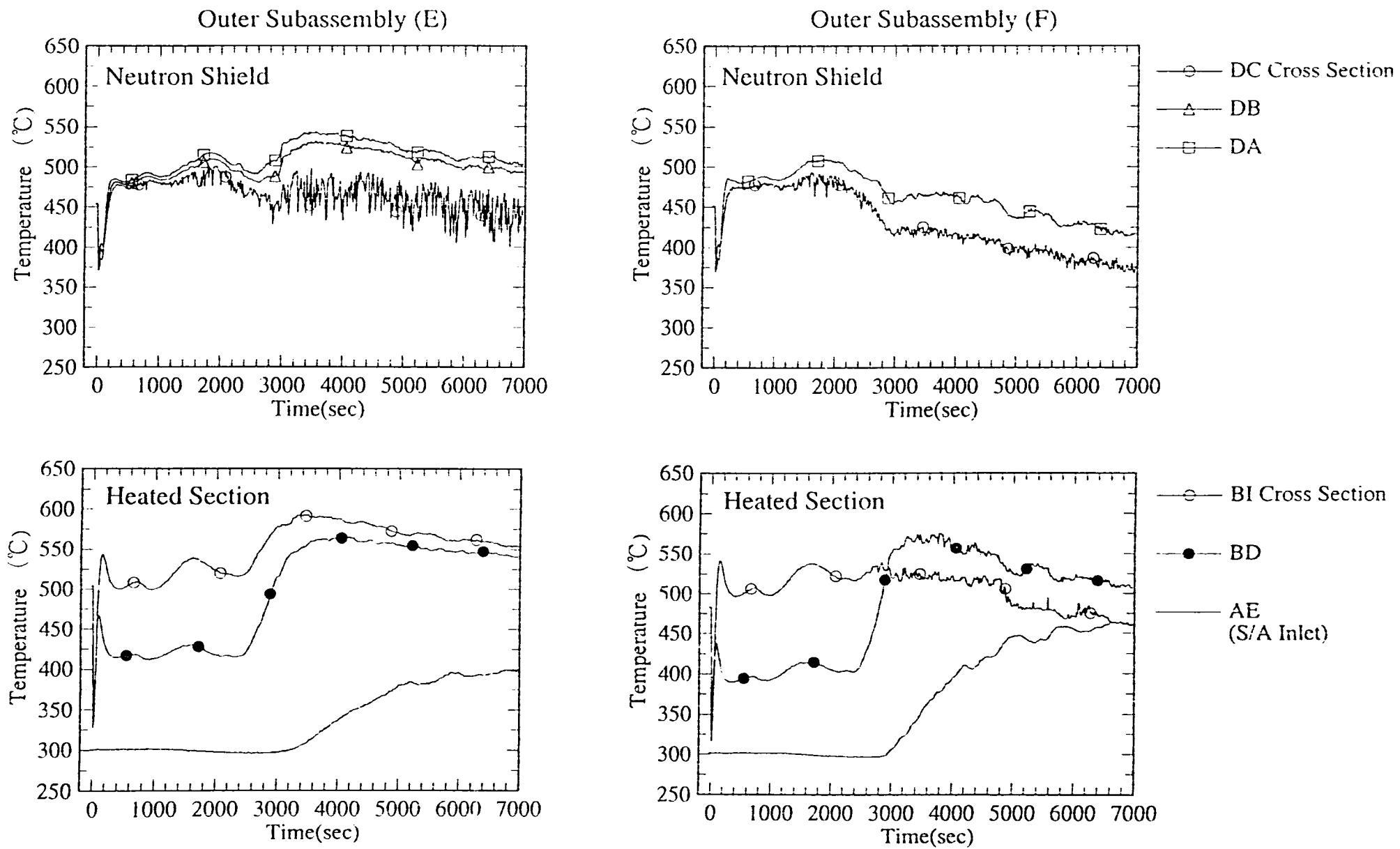


Fig. 4.3-4c Time Variations of Temperatures in Outer Subassembly E and F (Case: DRACS-2)

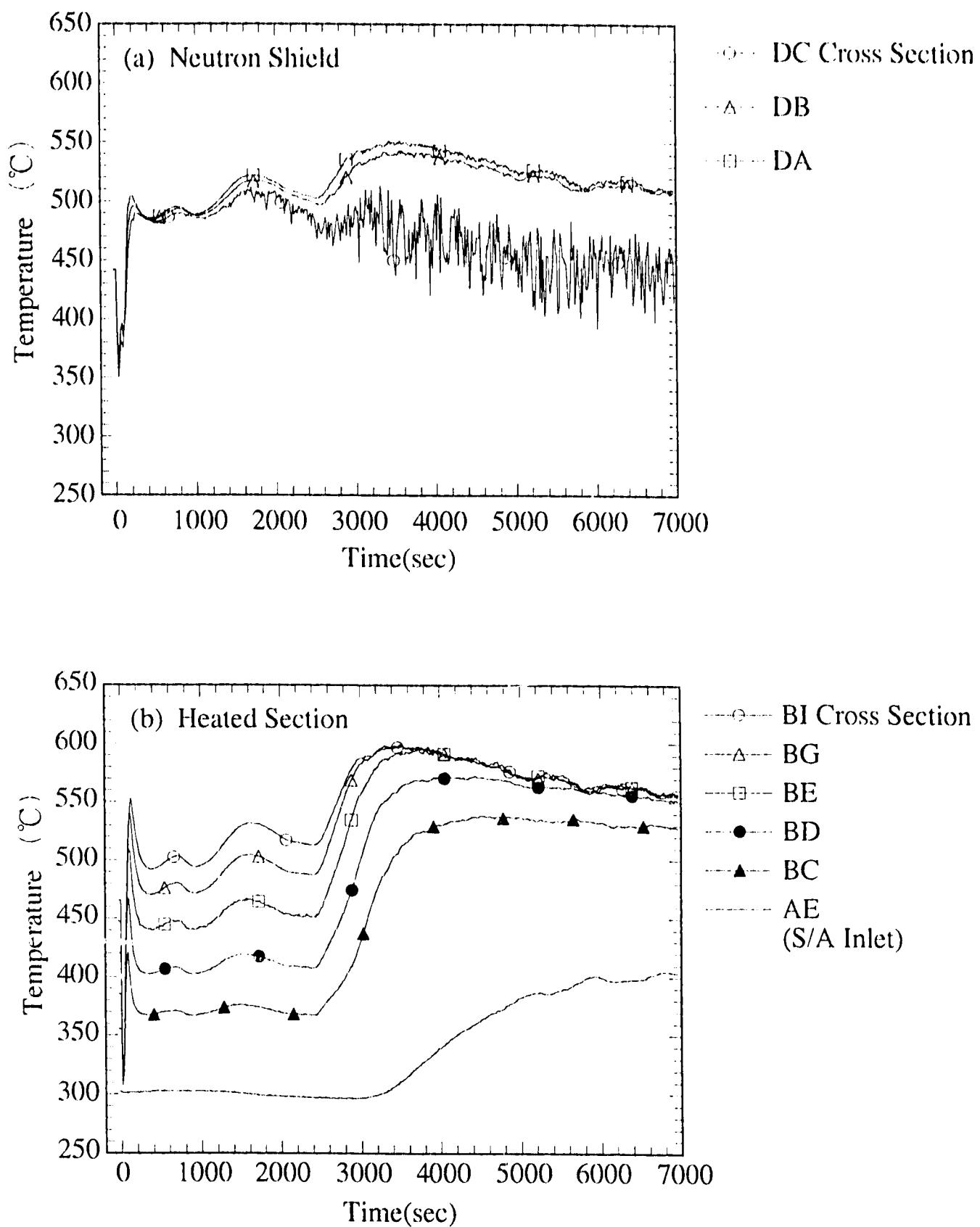


Fig.4.3-5 Time Variations of Temperatures at Center Subchannels or Centers of Cross Sections in Center Subassembly (DRACS-2)

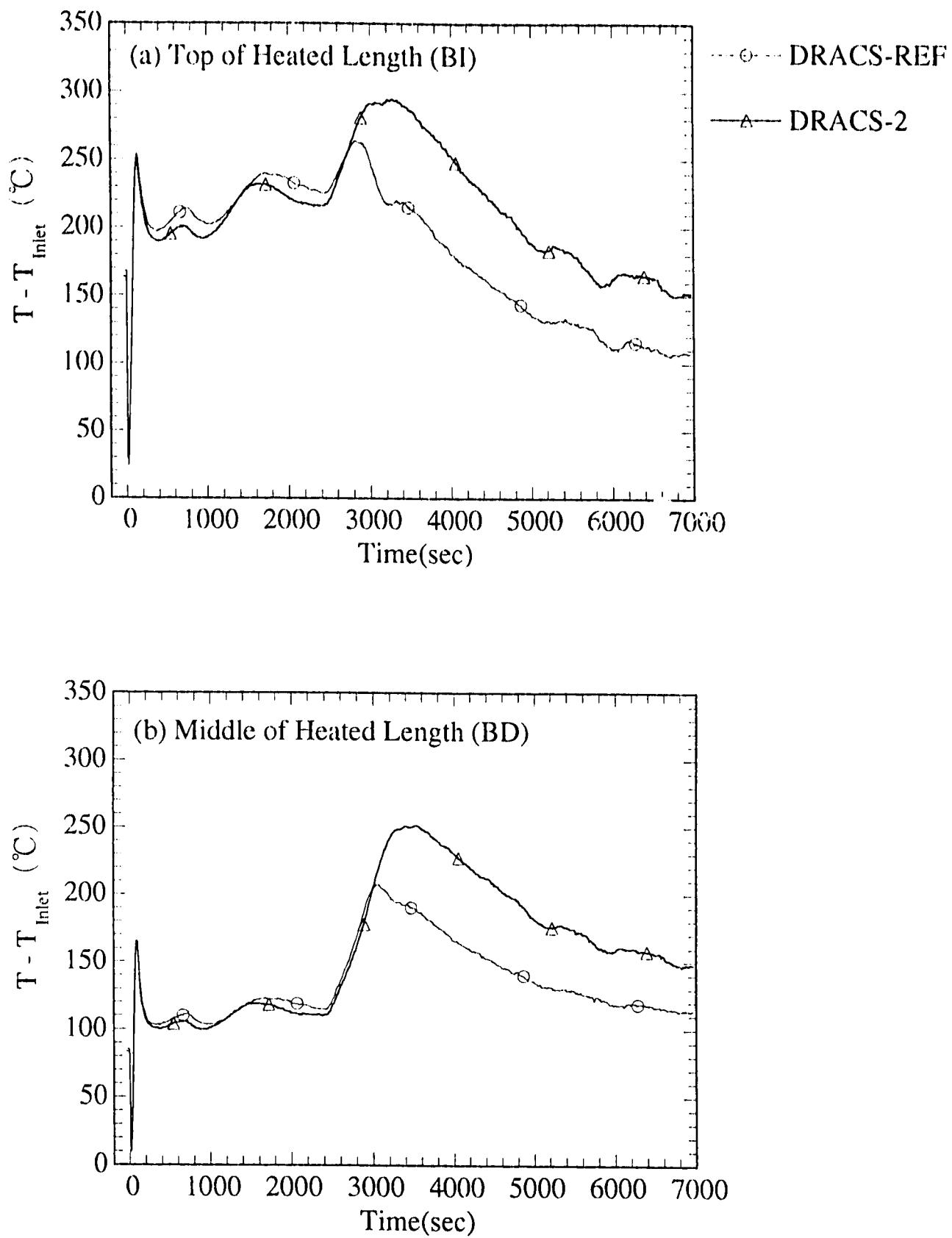


Fig.4.3-6 Temperature Increase from S/A Inlet at Center - Subchannels of BI and BD Cross Sections in Center Subassembly (DRACS-REF and DRACS-2)

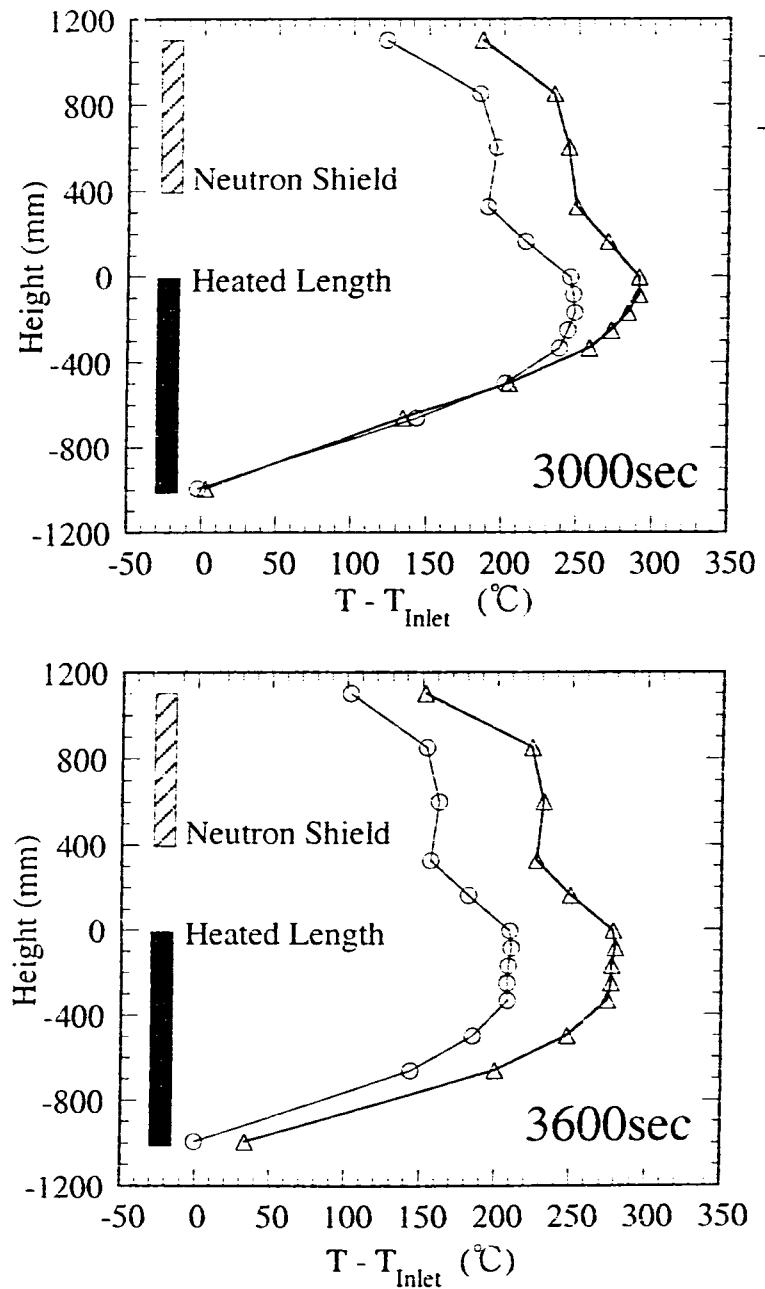
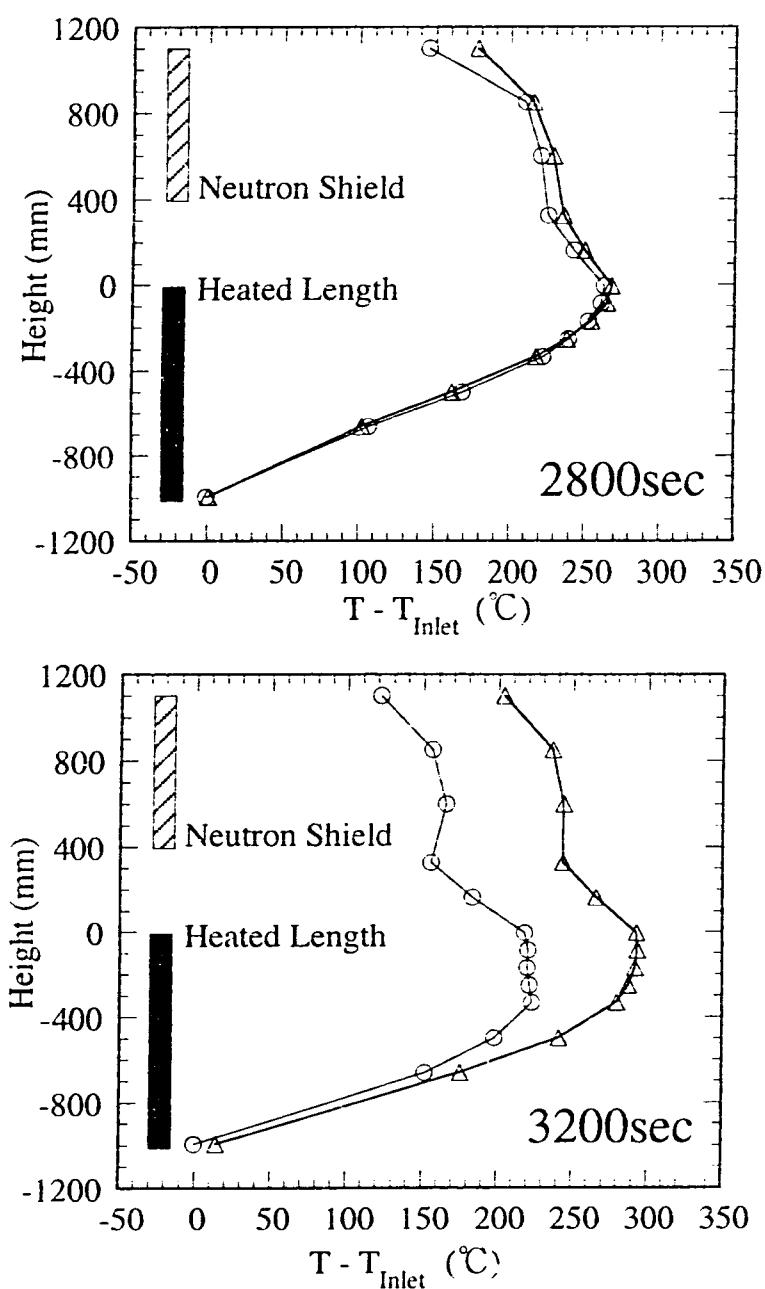
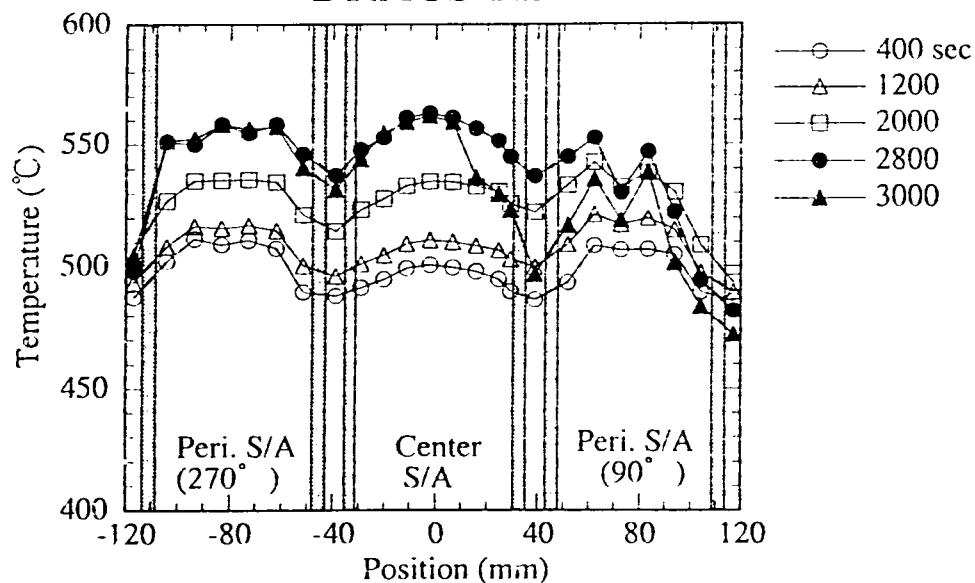
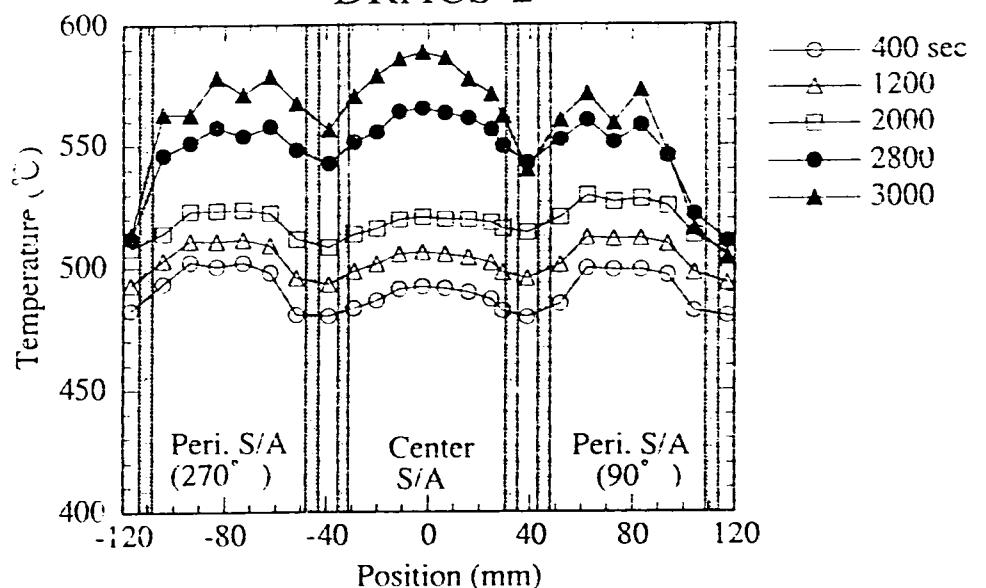


Fig.4.3-7 Axial Temperature Distributions along Center Subchannel in Center Subassembly (DRACS-REF vs. DRACS-2)

DRACS-REF



DRACS-2



- 98 -

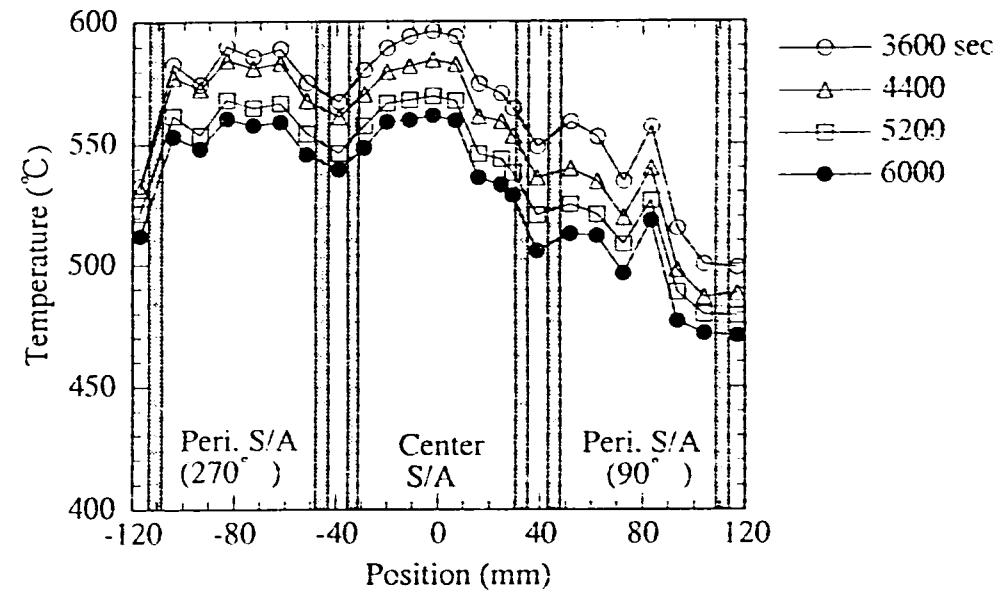
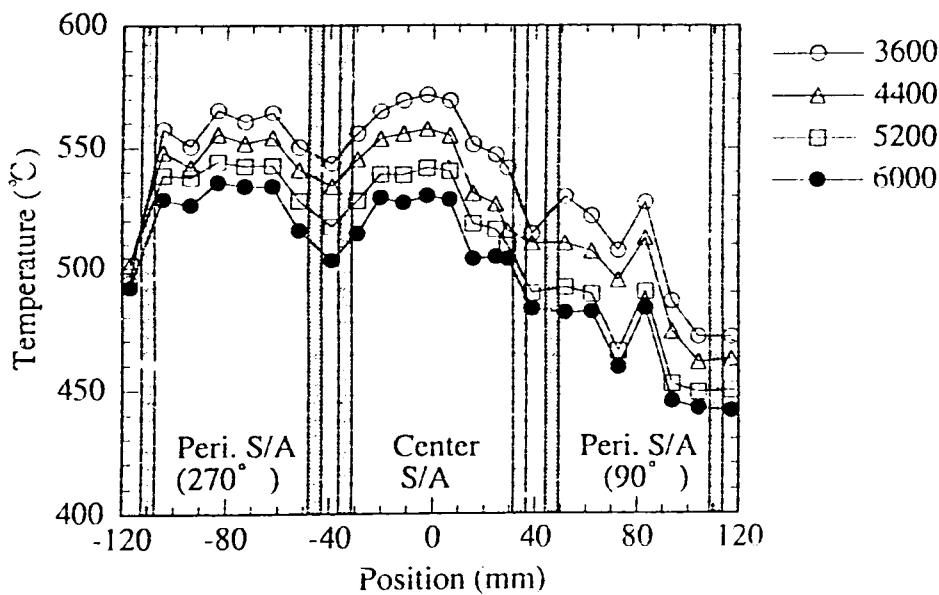


Fig.4.3-8a Transverse Temperature Distributions in BI Cross Section (DRACS-REF vs. DRACS-2)

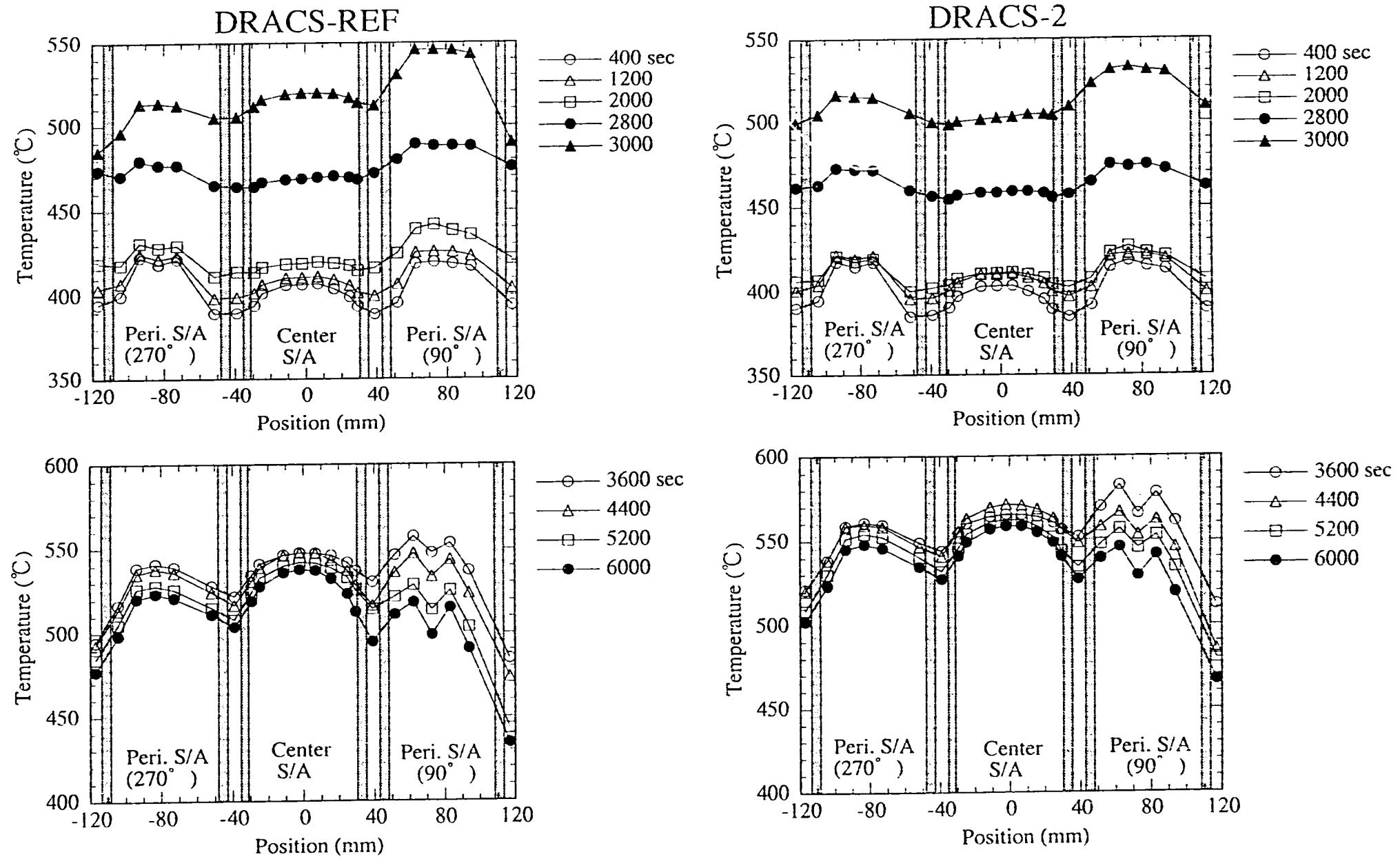


Fig.4.3-8b Transverse Temperature Distributions in BD Cross Section (DRACS-REF vs. DRACS-2)

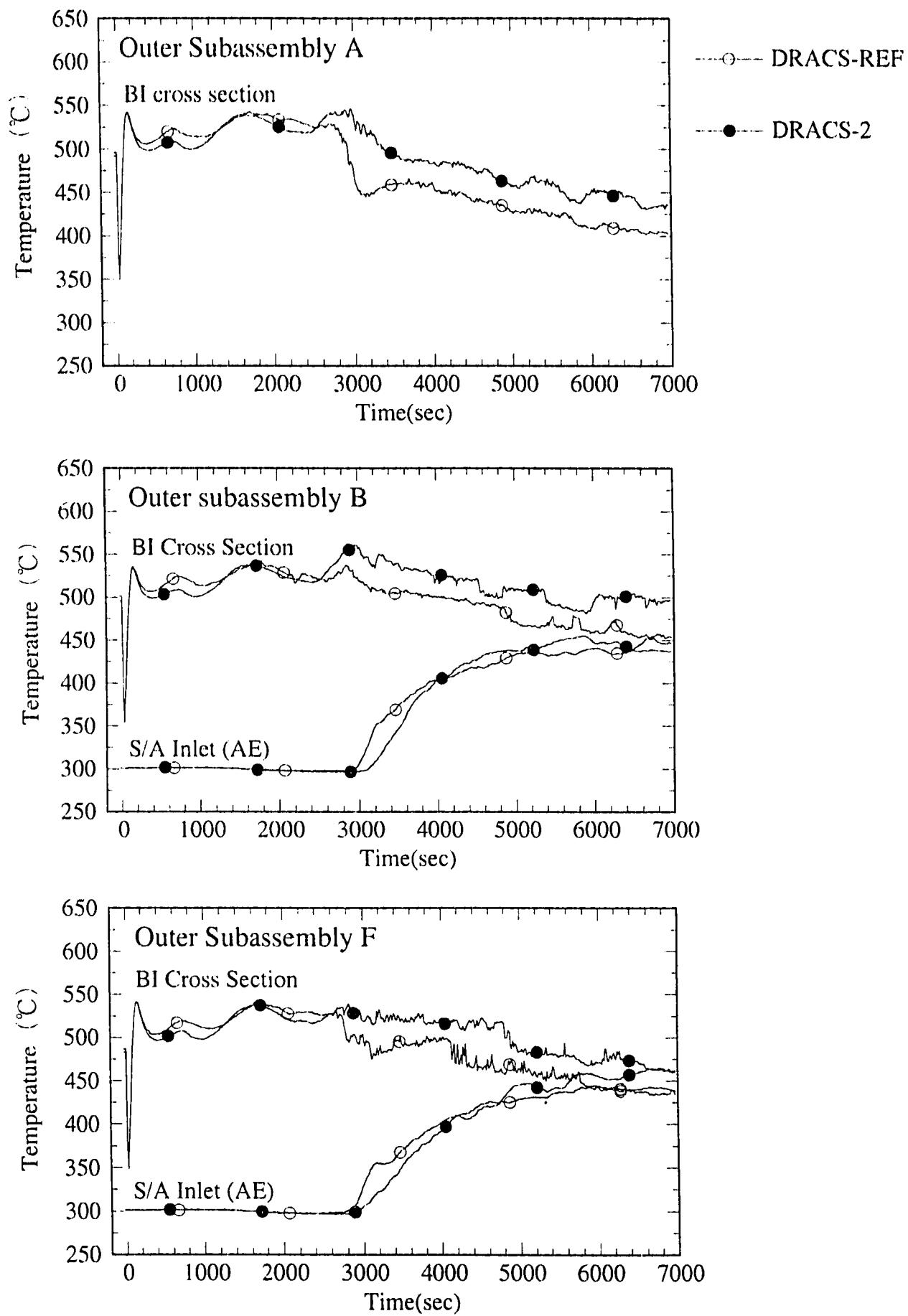


Fig. 4.3-9 Time Variations of Temperatures in Outer Subassemblies A, B, F
(DRACS-REF vs. DRACS-2)

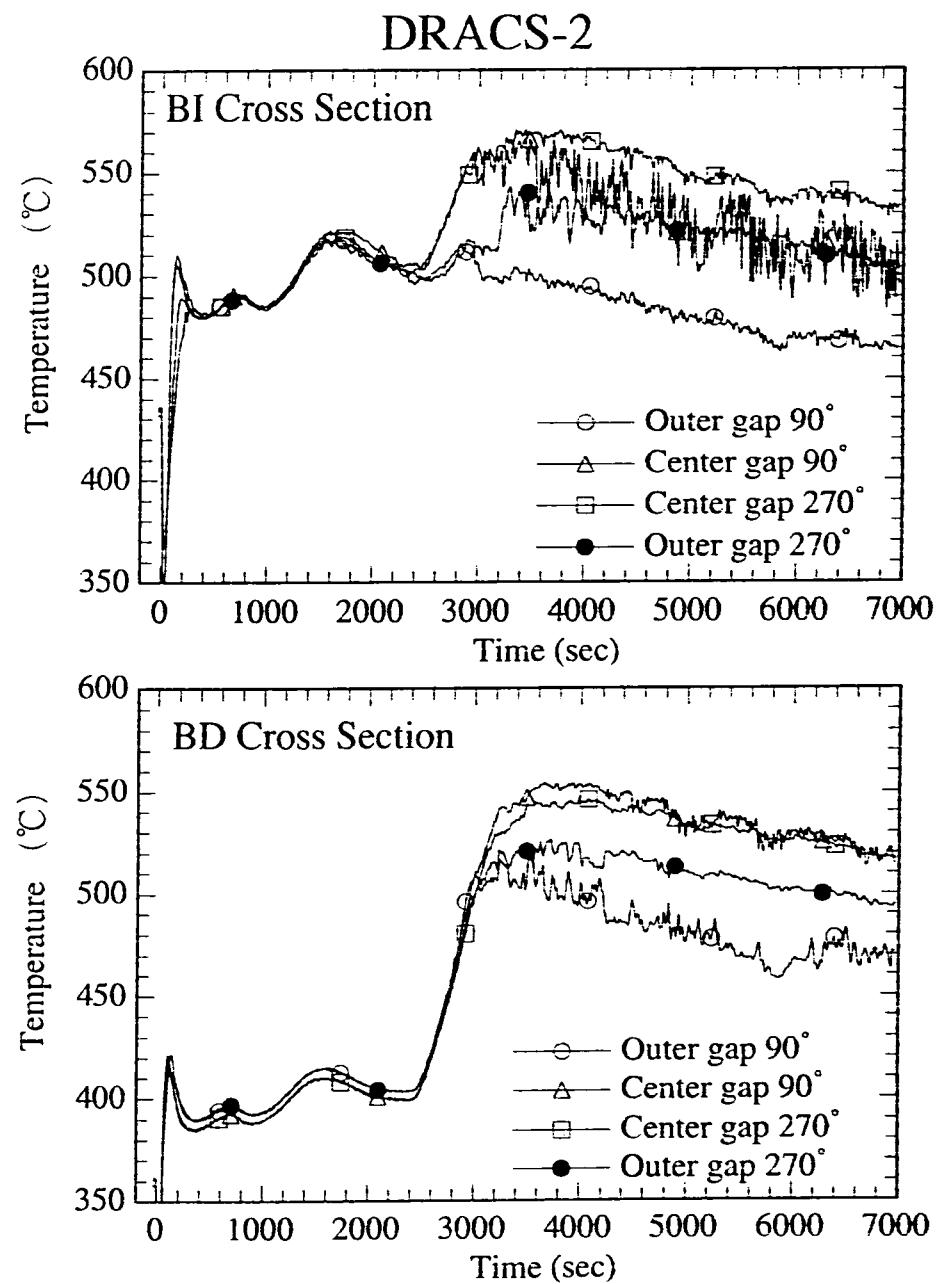
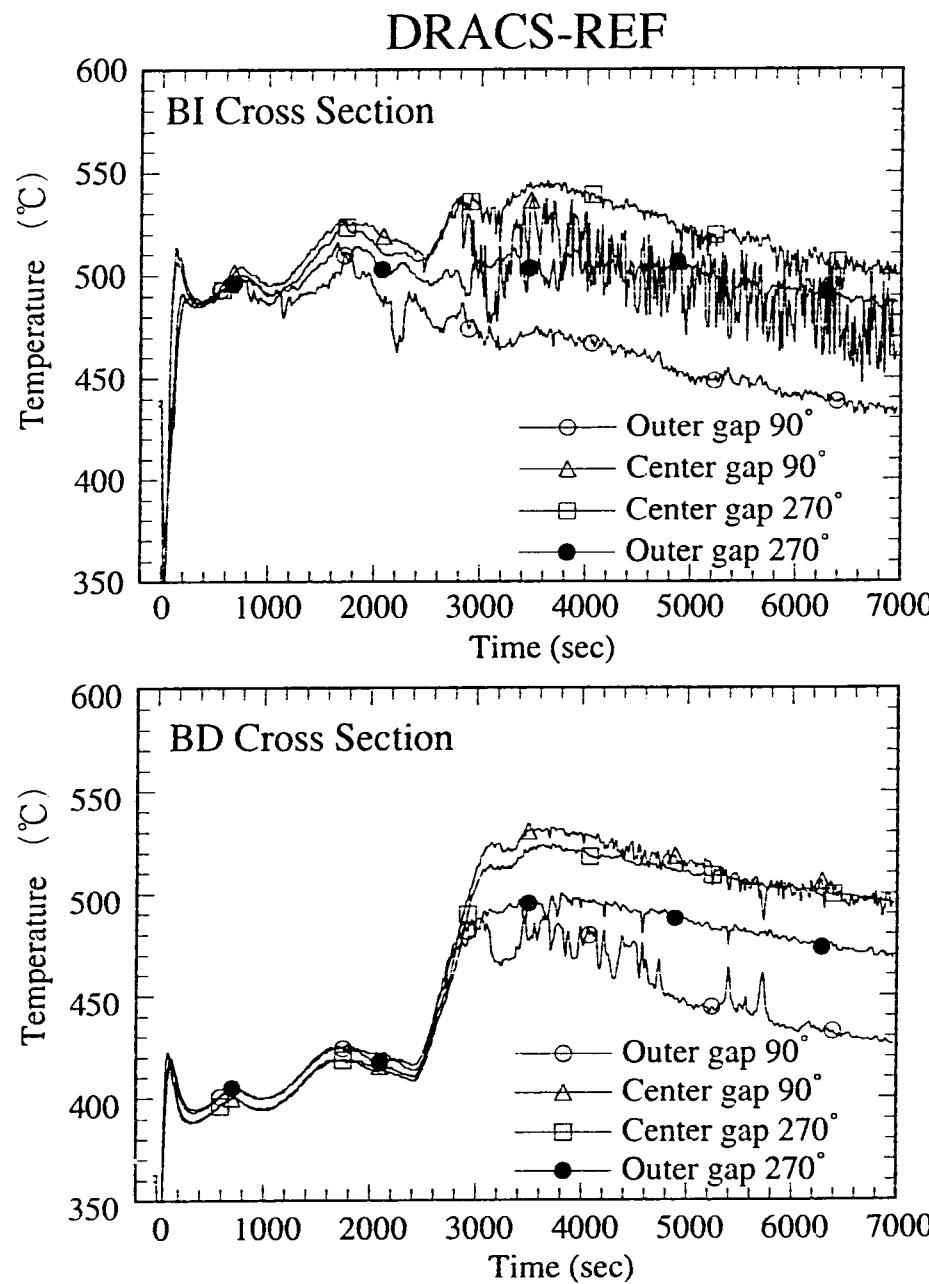
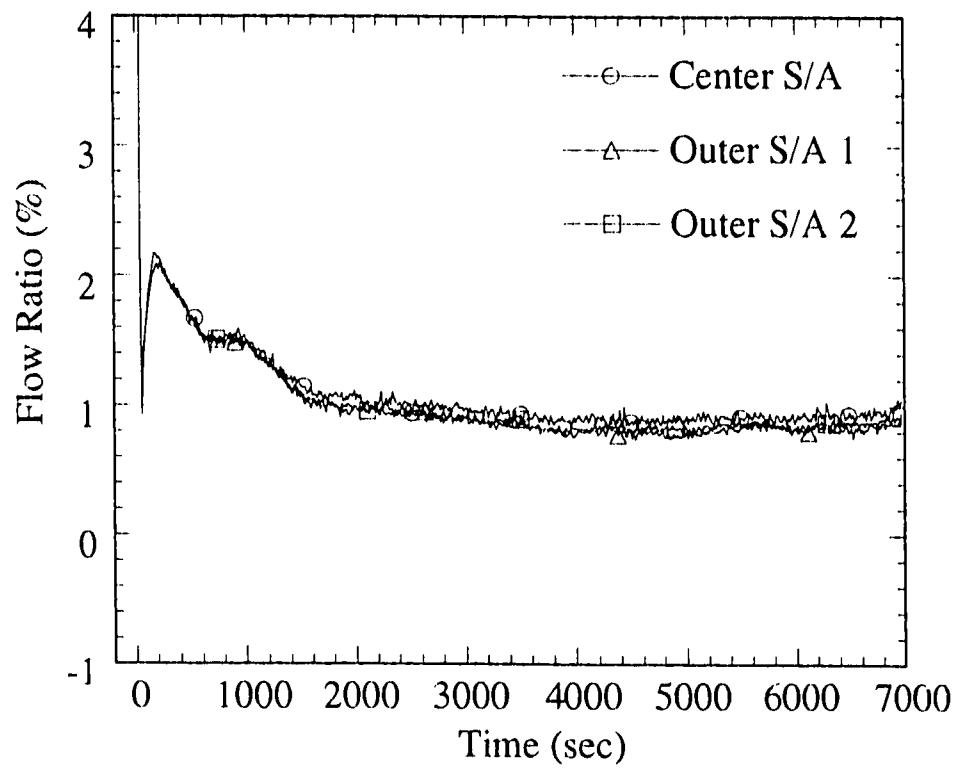
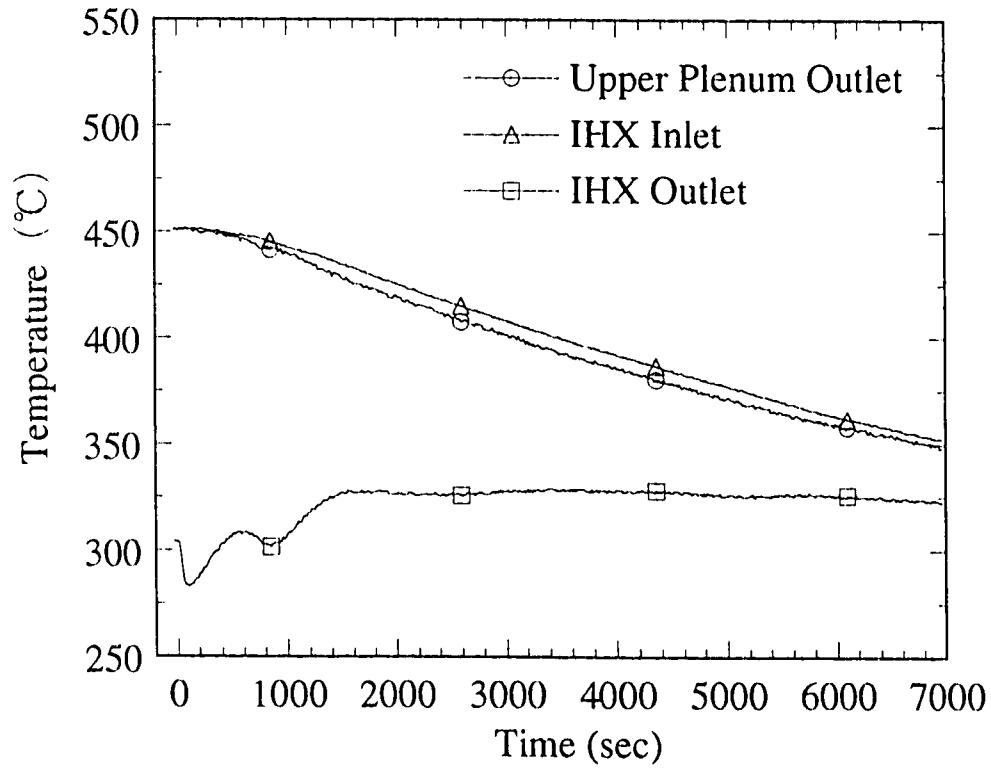


Fig.4.3-10 Time Variations of Temperatures in Inter-Wrapper Gap in BI and BD Cross Sections
(DRACS-REF vs. DRACS-2)



(a) Flow Trends in Subassemblies



(b) Temperature Trends

Fig. 4.4-1 Trends of Flows and Temperatures in Main Loop
(Case: DRACS-3)

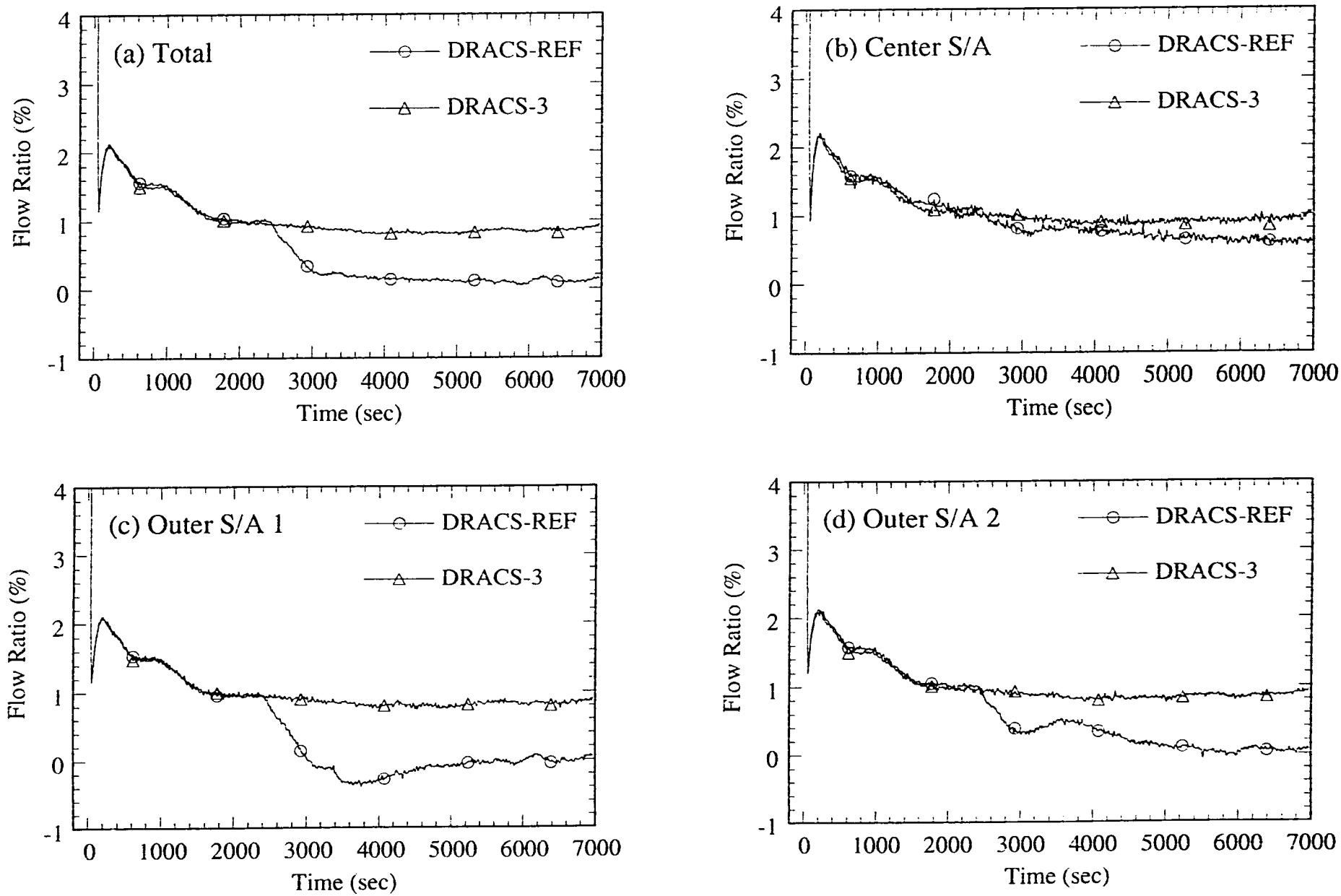


Fig.4.4-2 Trends of Flows of Subassemblies (DRACS-REF vs. DRACS-3)

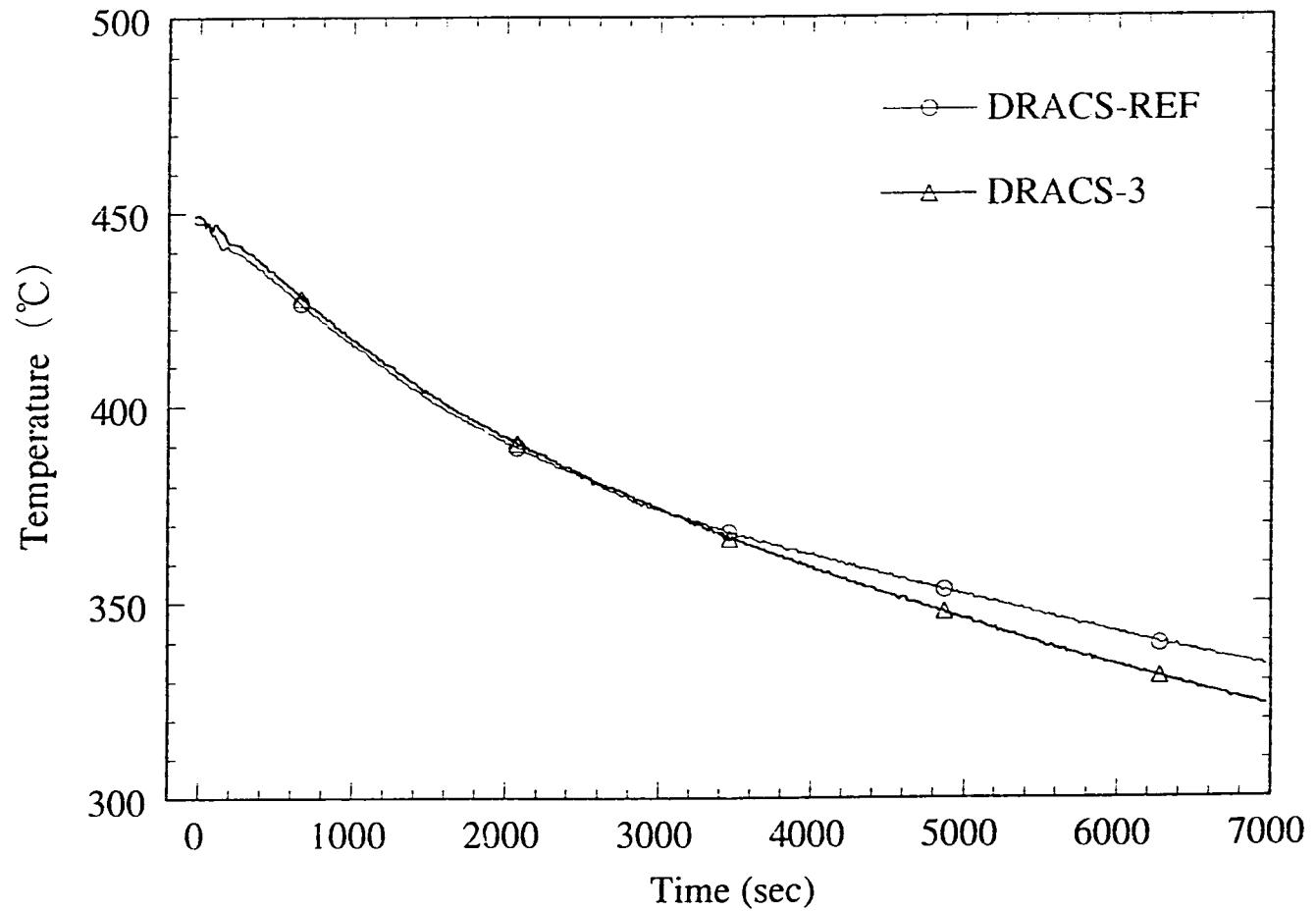


Fig.4.4-3 Time Histories of Temperatures at the Height of Core Outlet in Upper Plenum (DRACS-REF vs. DRACS-3)

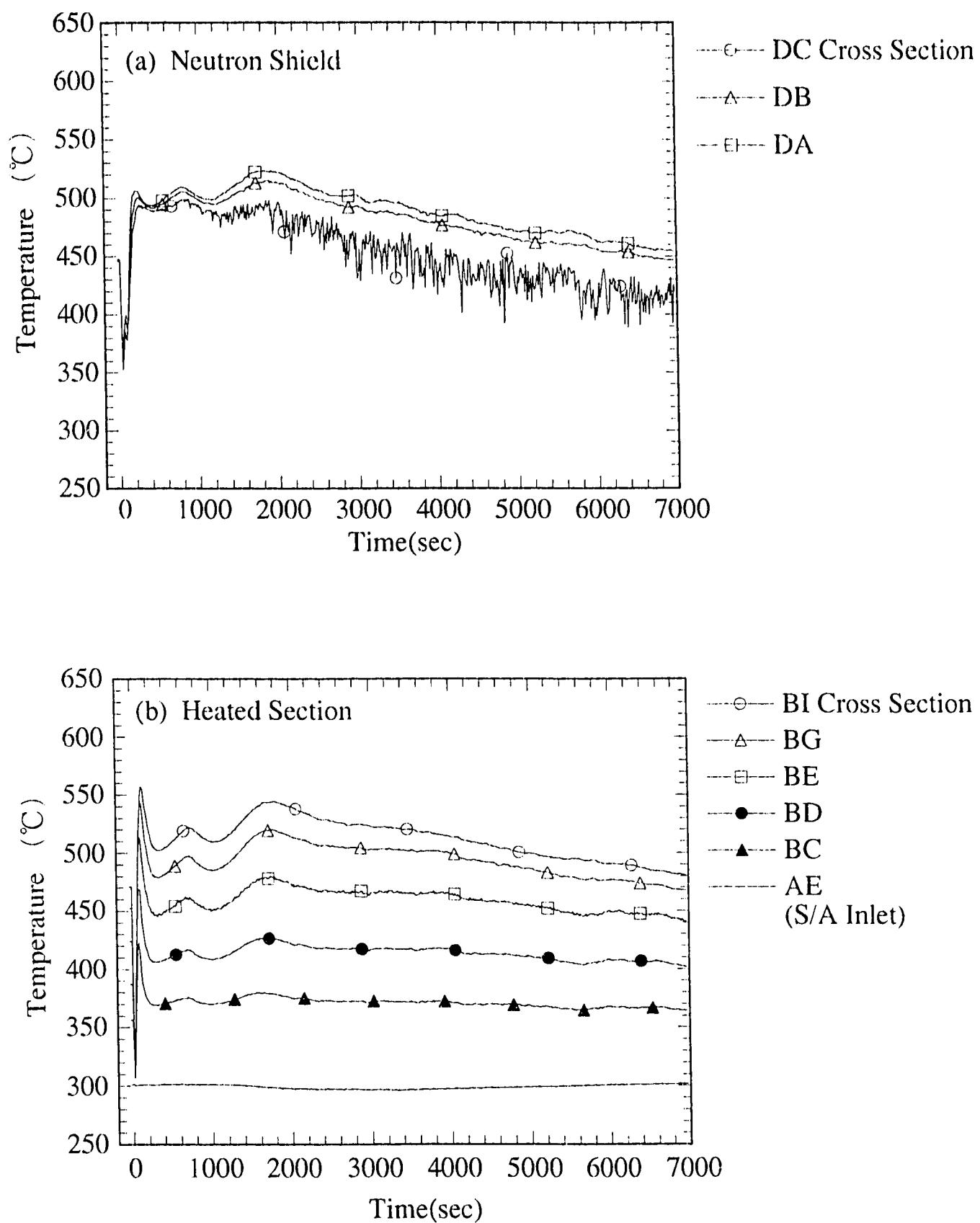


Fig.4.4-4 Time Variations of Temperatures at Center Subchannels or Centers of Cross Sections in Center Subassembly (DRACS-3)

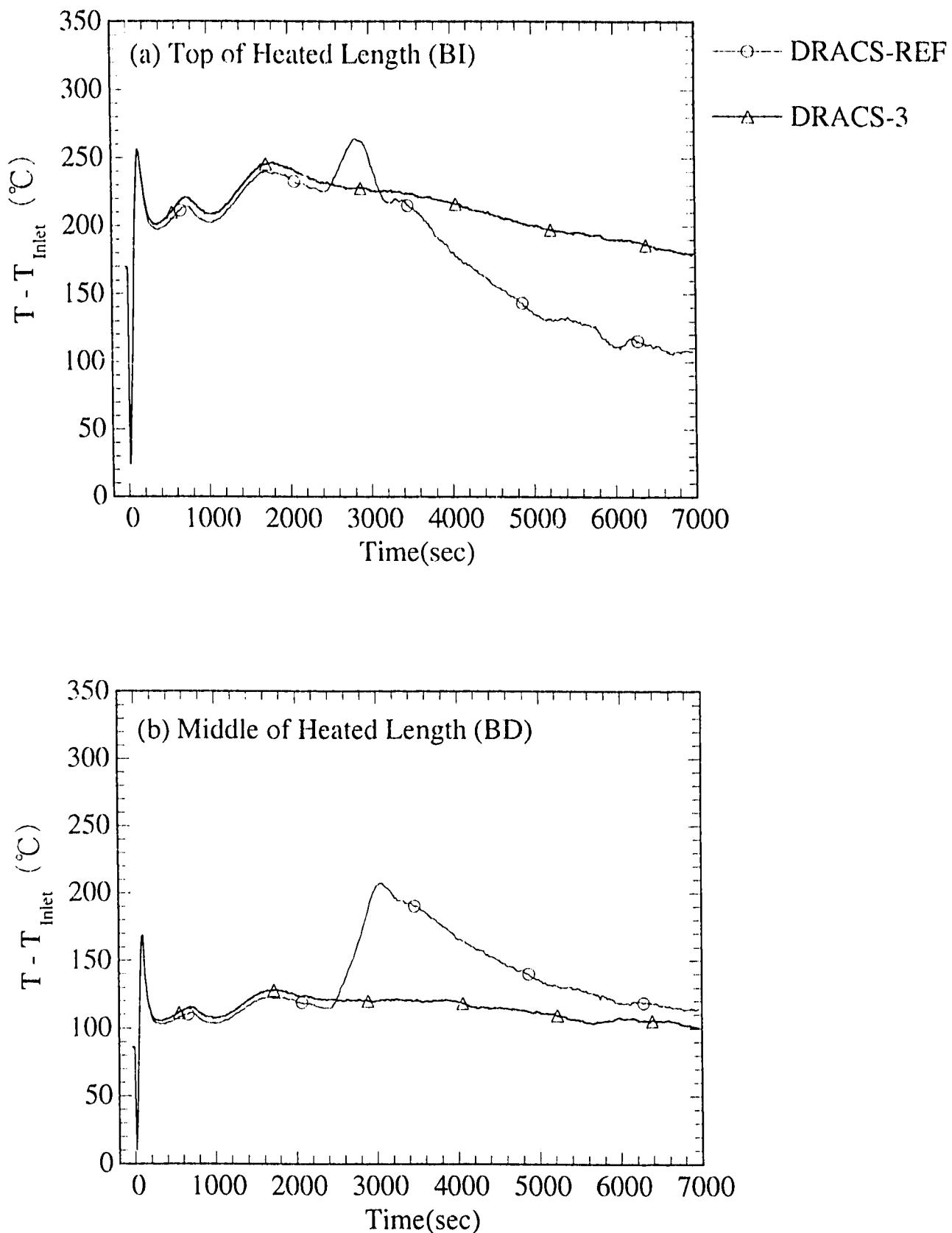


Fig.4.4-5 Temperature Increase from S/A Inlet at Center Subchannels of BI and BD Cross Sections in Center Subassembly (DRACS-REF vs. DRACS-3)

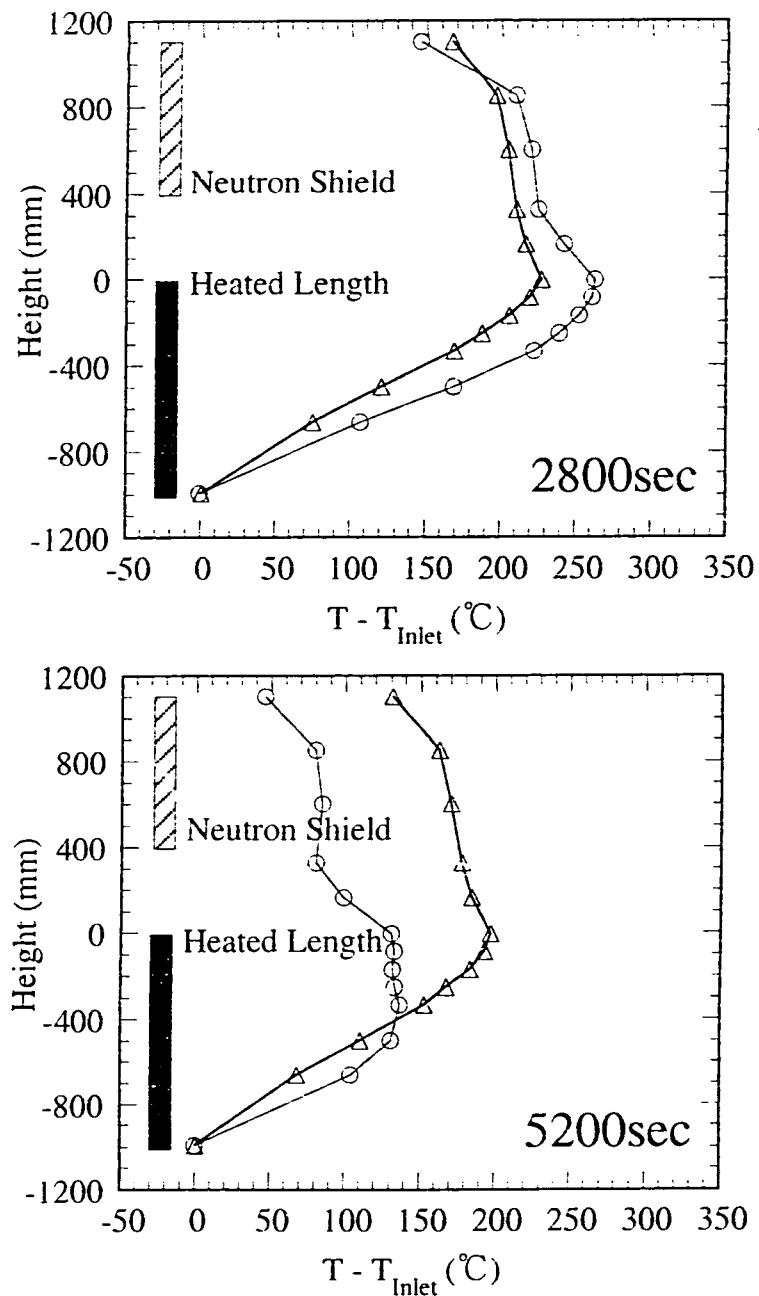
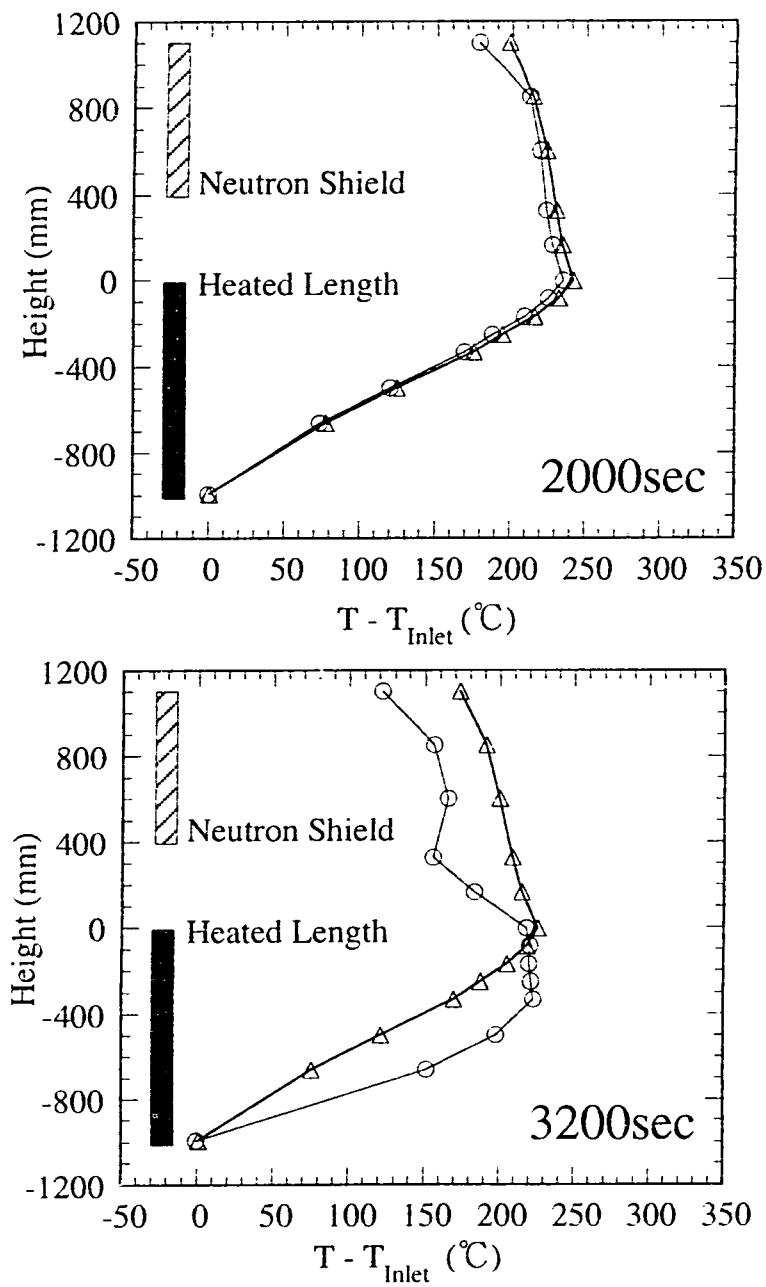
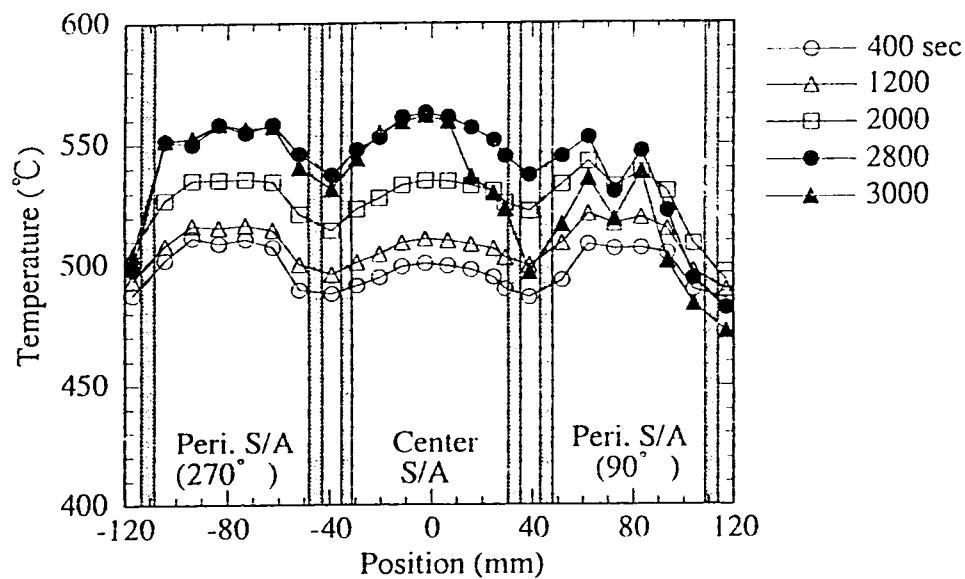
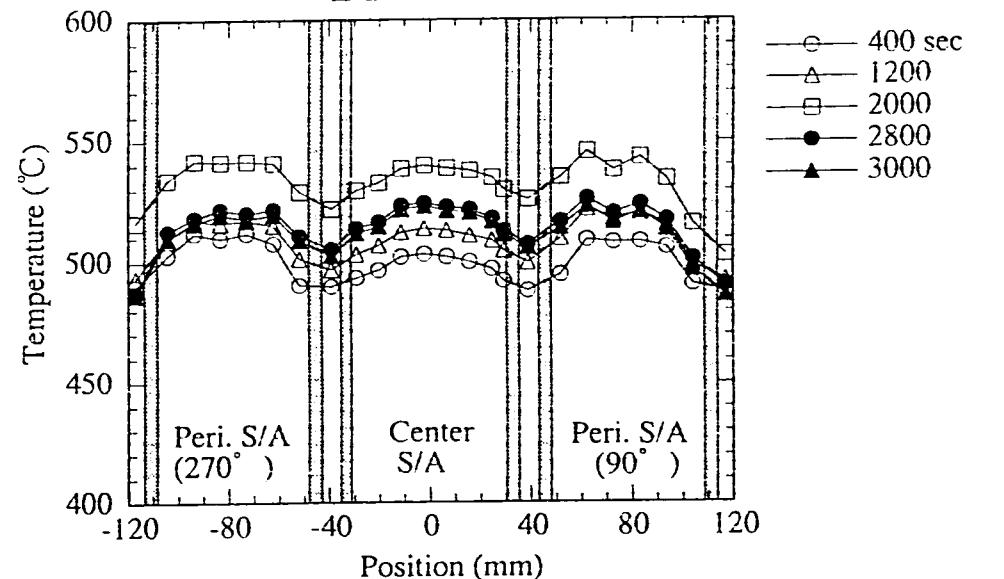


Fig.4.4-6 Axial Temperature Distributions along Center Subchannel in Center Subassembly (DRACS-REF vs. DRACS-1)

DRACS-REF



DRACS-3



- 96 -

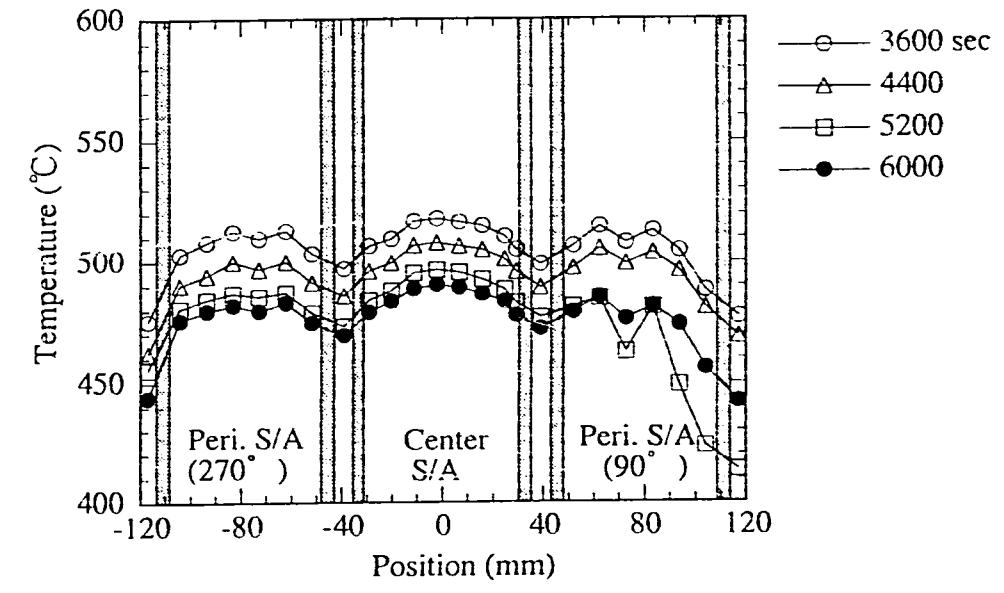
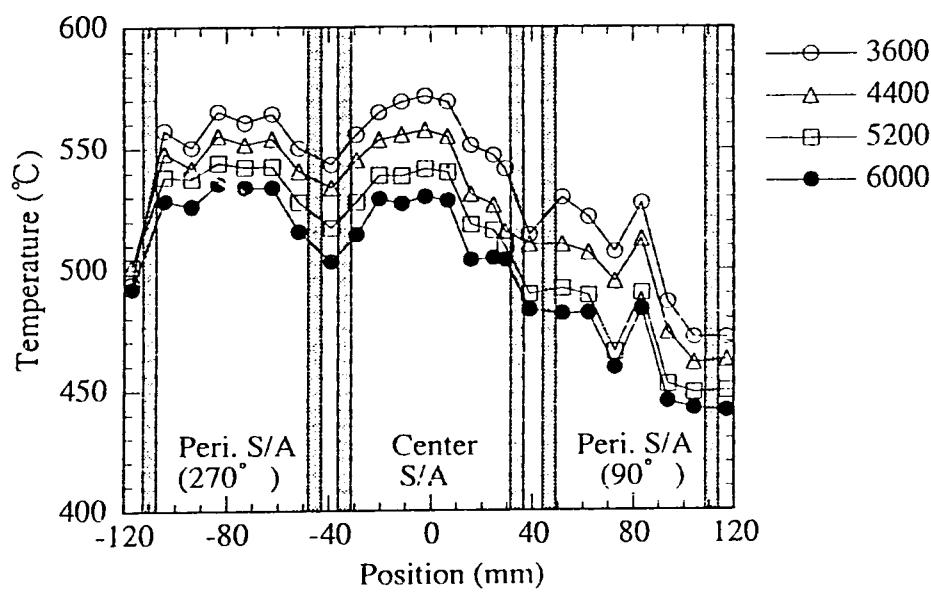


Fig.4.4-7a Transverse Temperature Distributions in BI Cross Section (DRACS-REF vs. DRACS-3)

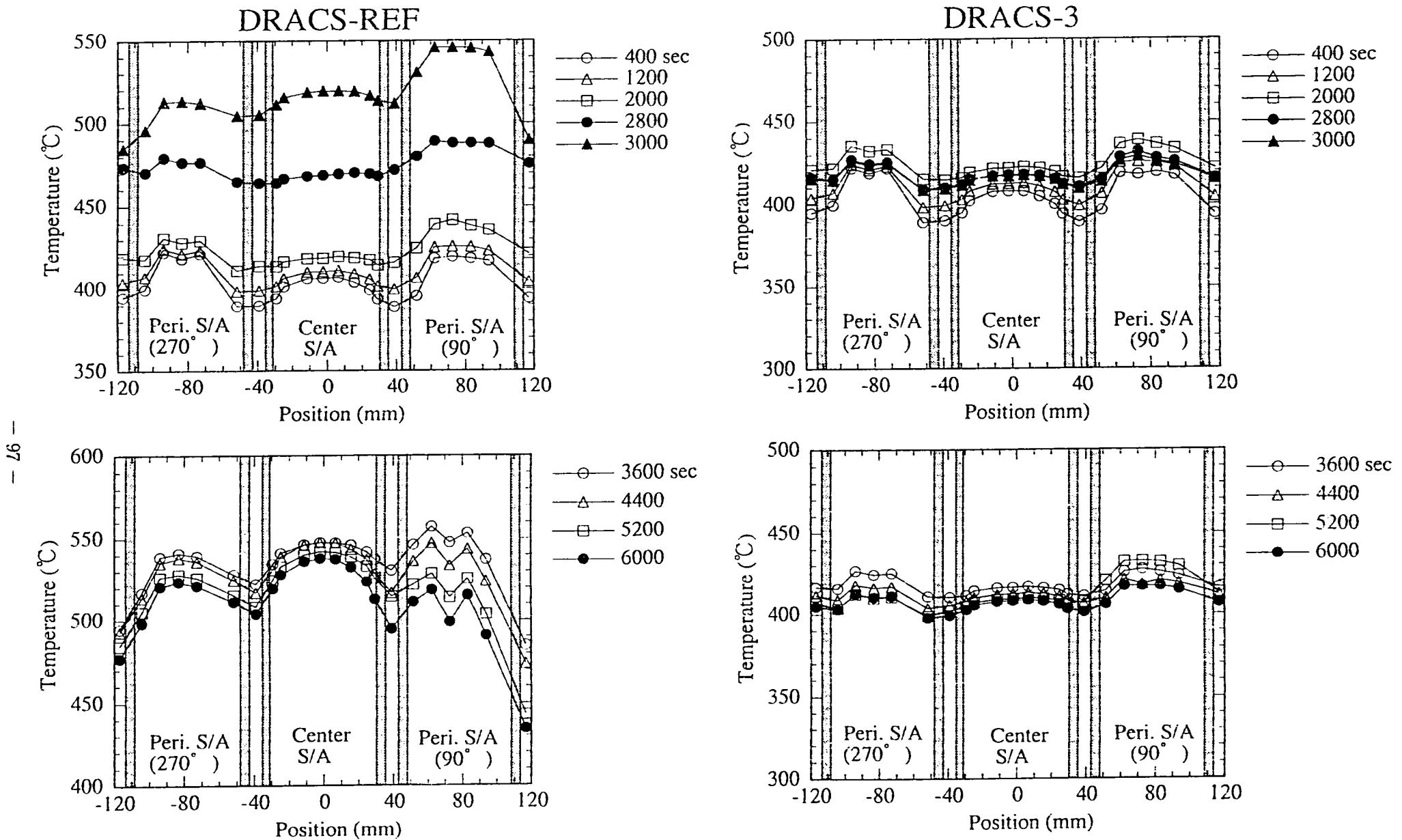


Fig.4.4-7b Transverse Temperature Distributions in BD Cross Section (DRACS-REF vs. DRACS-3)

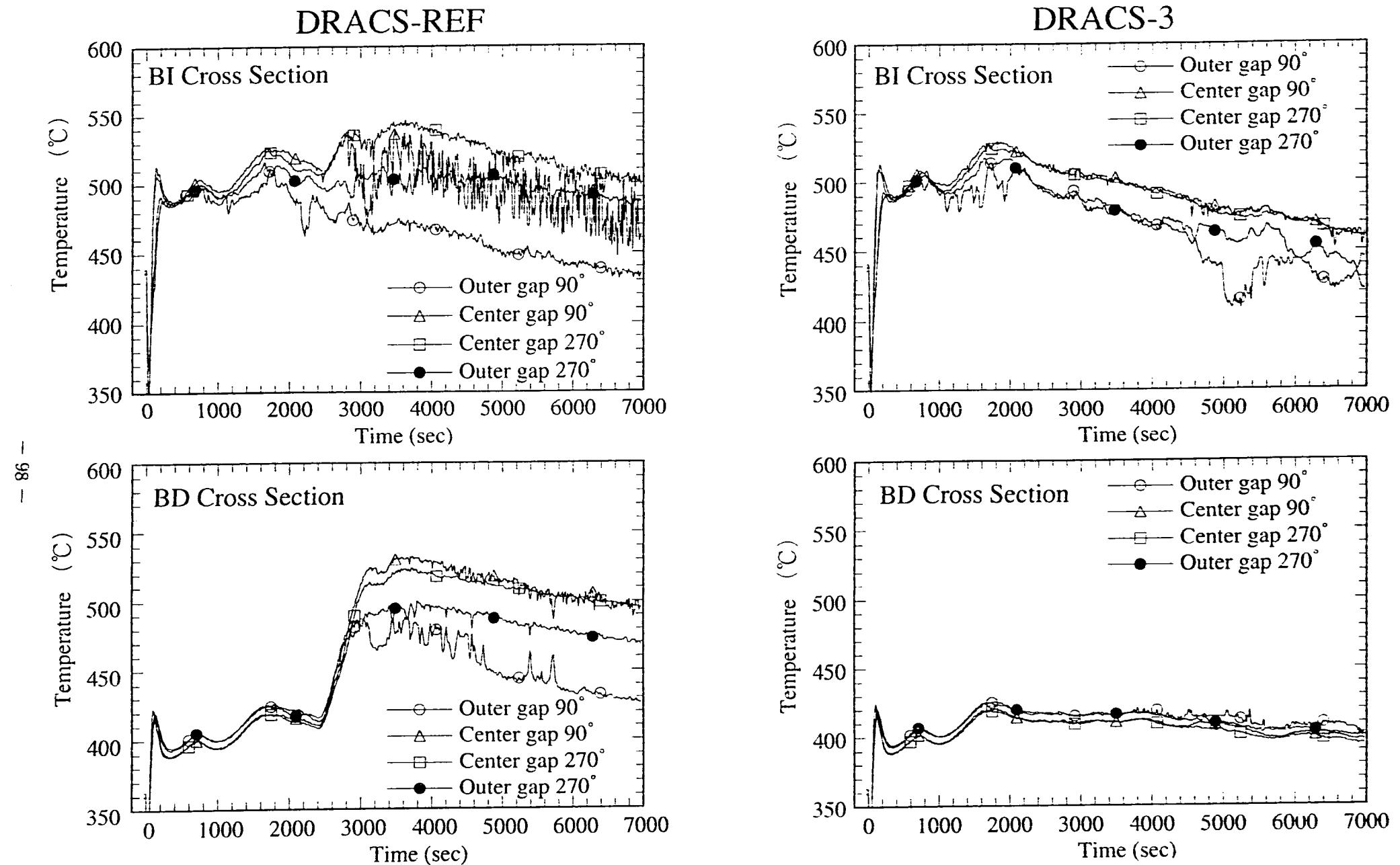
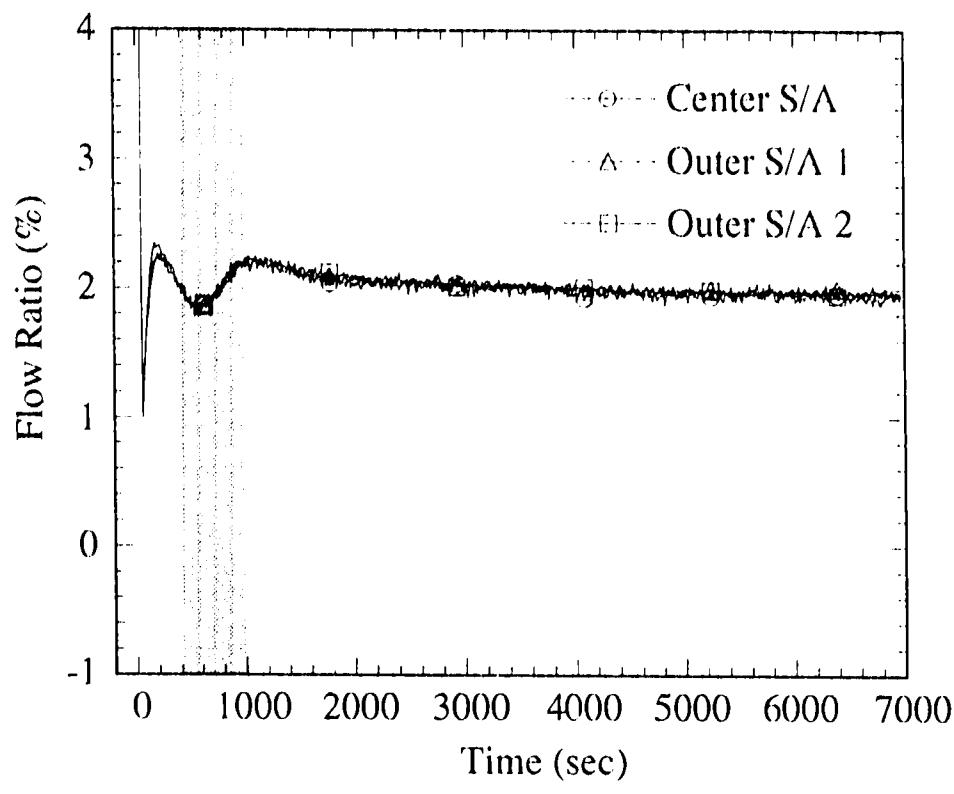
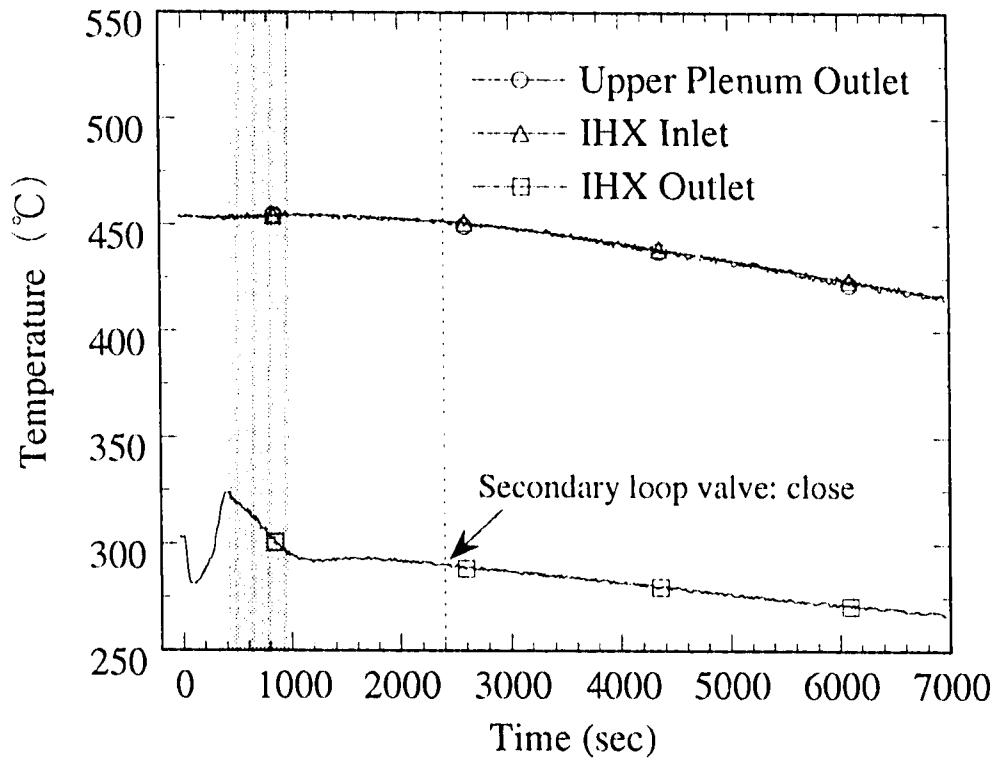


Fig.4.4-8 Time Variations of Temperatures in Inter-Wrapper Gap in BI and BD Cross Sections (DRACS-REF vs. DRACS-3)



(a) Flow Trends in Subassemblies



(b) Temperature Trends

Fig. 5.1-1 Trends of Flows and Temperatures in Main Loop
(Case: PRACS-REF)

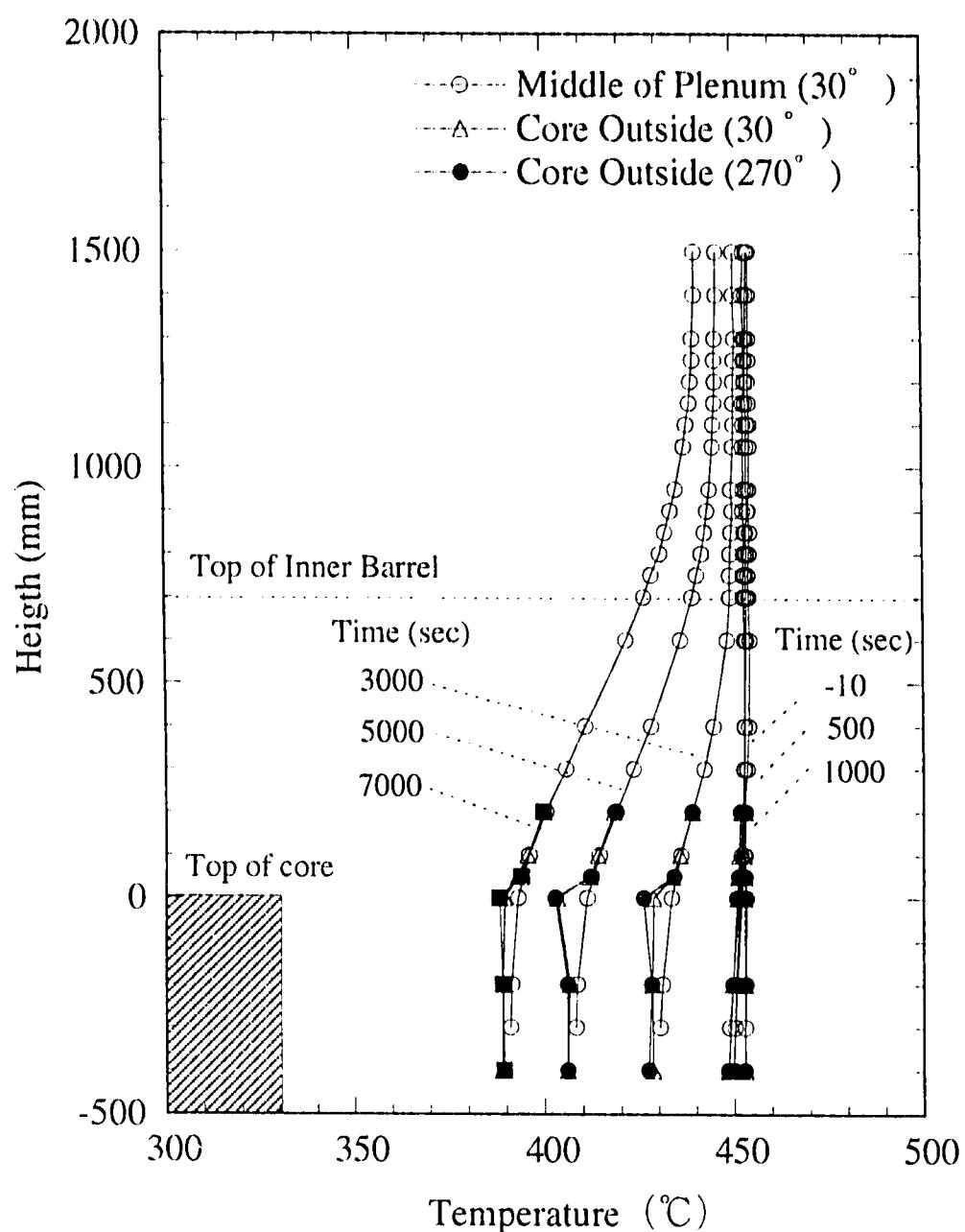


Fig.5.1-2 Variations of Vertical Temperature Distributions in Upper Plenum with Time (Case: PRACS-REF)

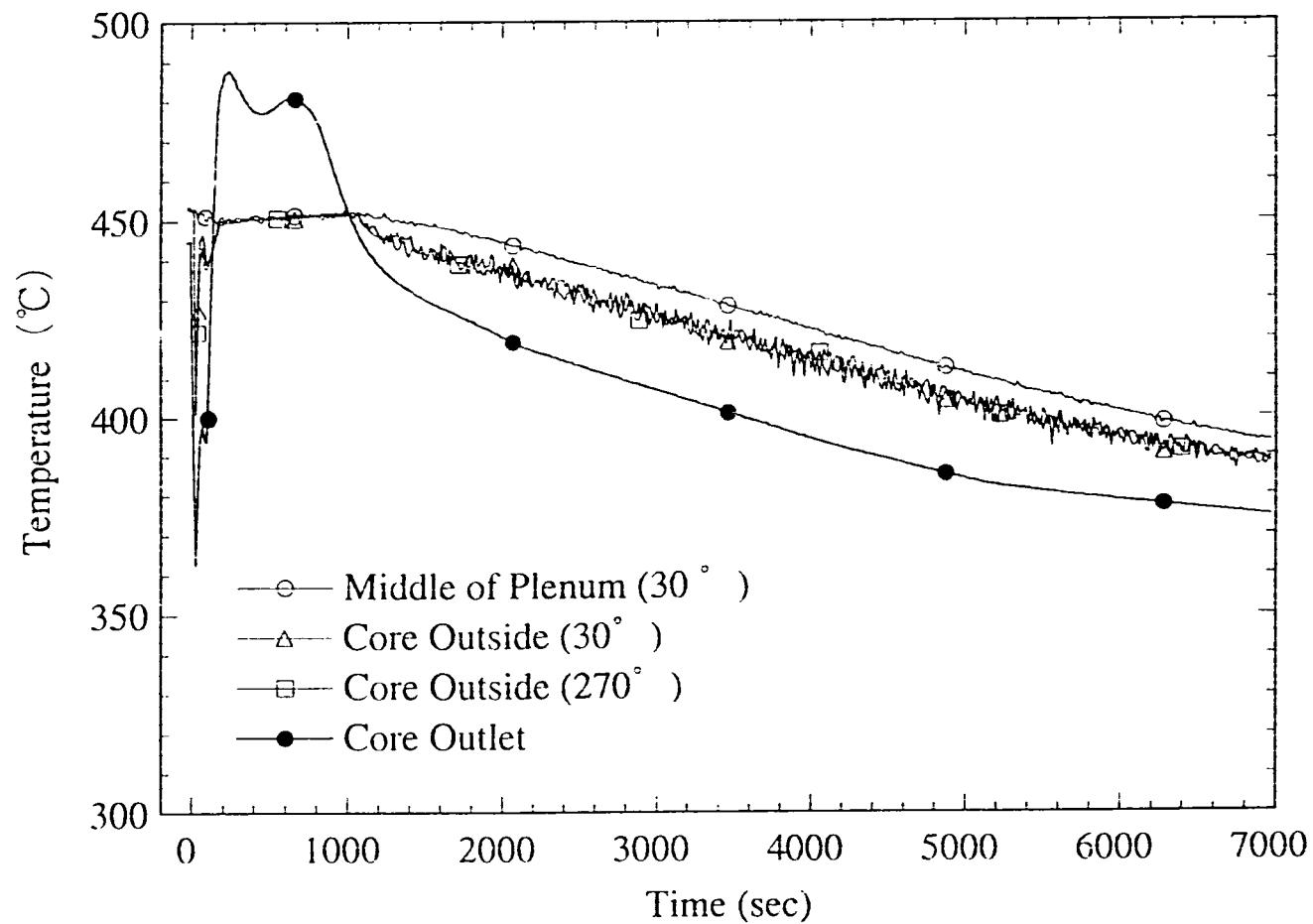


Fig.5.1-3 Time Histories of Temperatures at the Height of Core Outlet in Upper Plenum
(PRACS-REF)

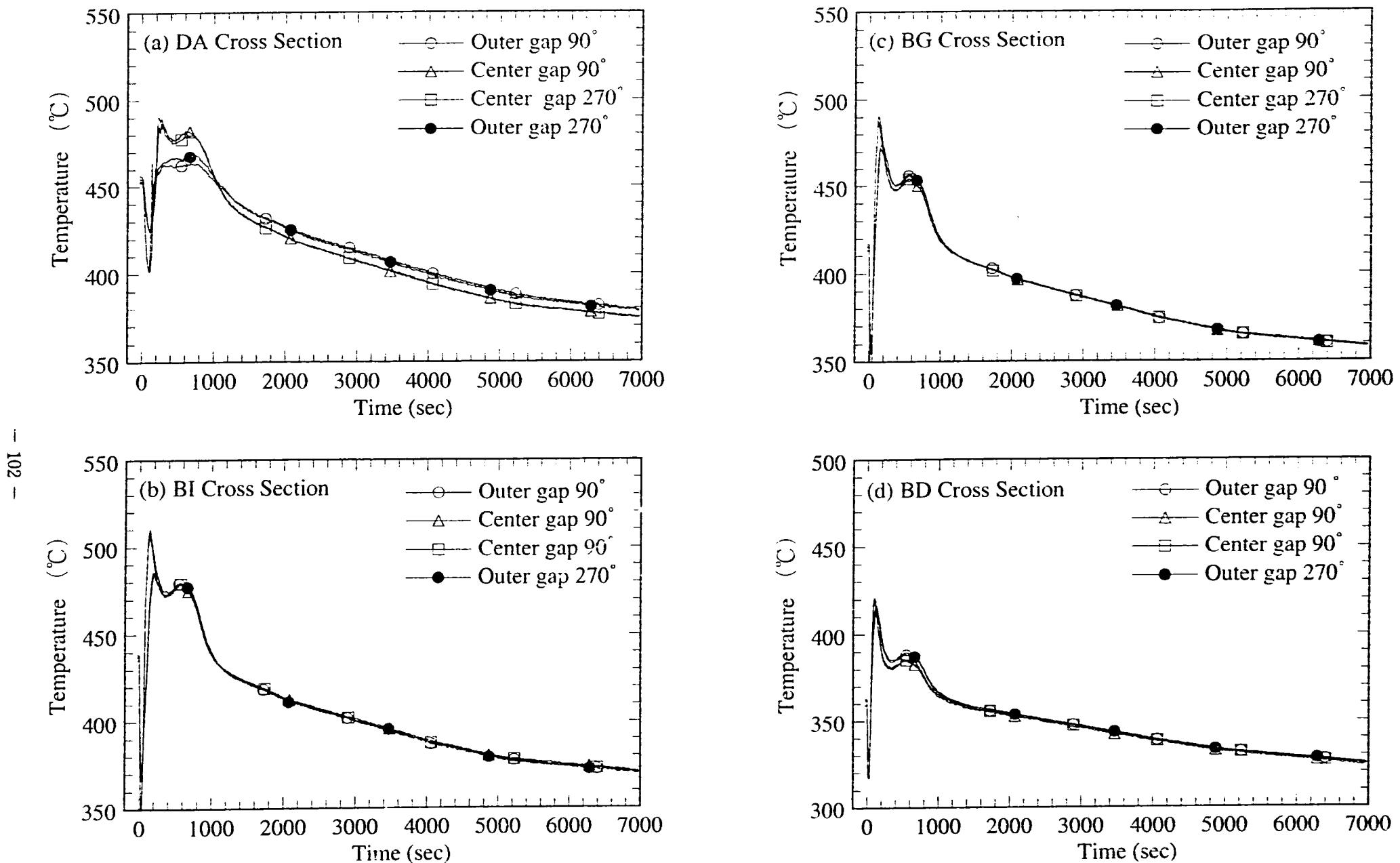


Fig.5.1-4 Time Variations of Temperatures in Inter-Wrapper Gap (PRACS-REF)

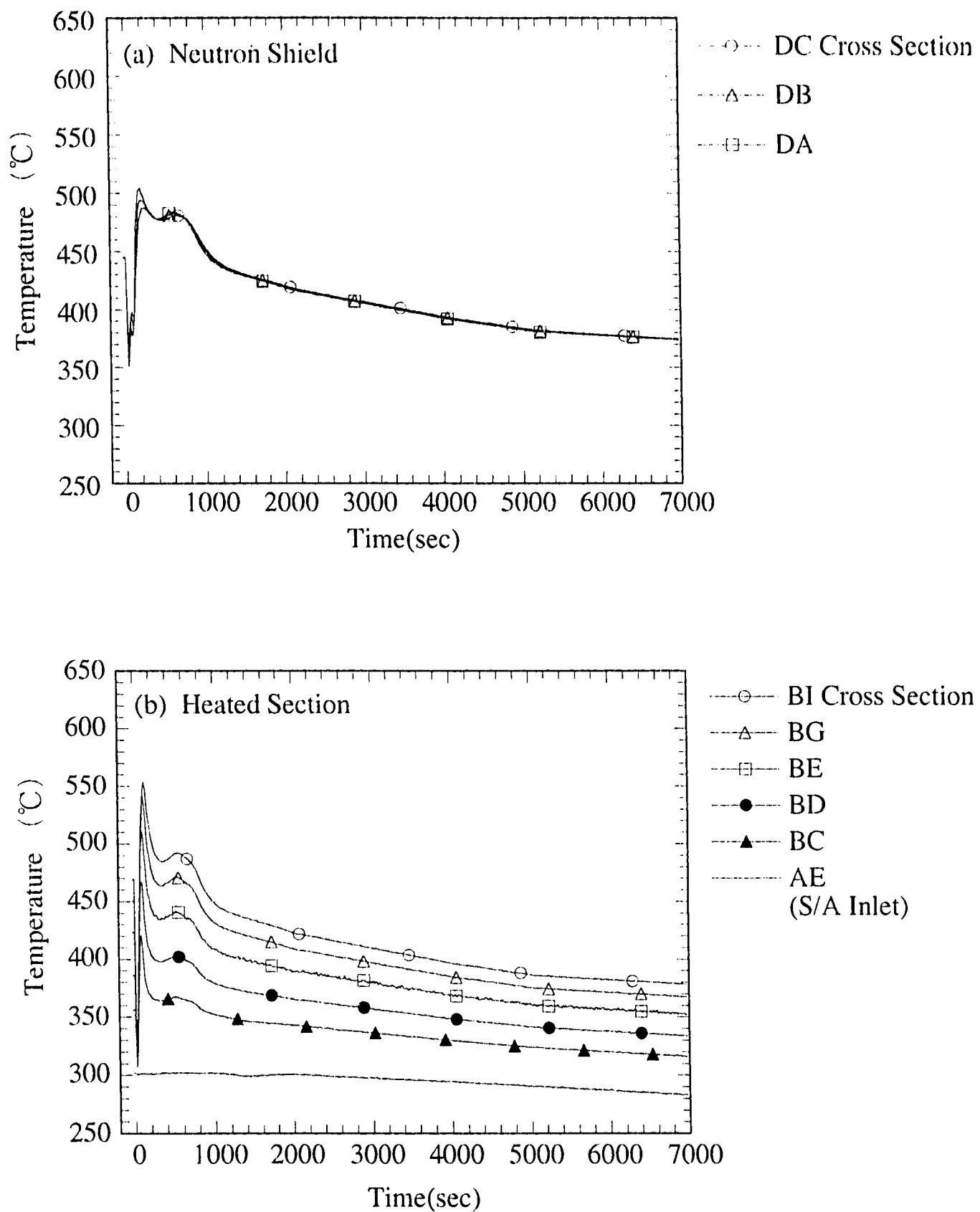


Fig.5.1-5 Time Variations of Temperatures at Center Subchannels or Centers of Cross Sections in Center Subassembly (PRACS-REF)

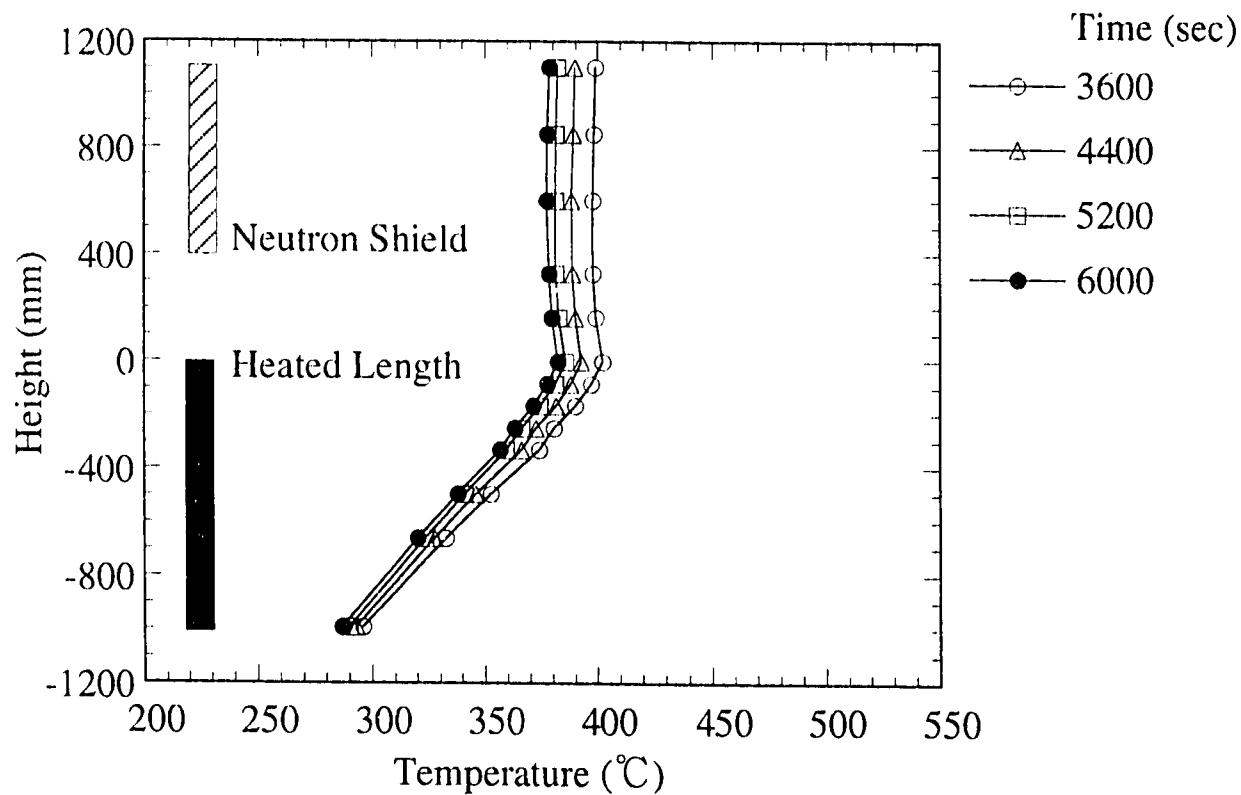
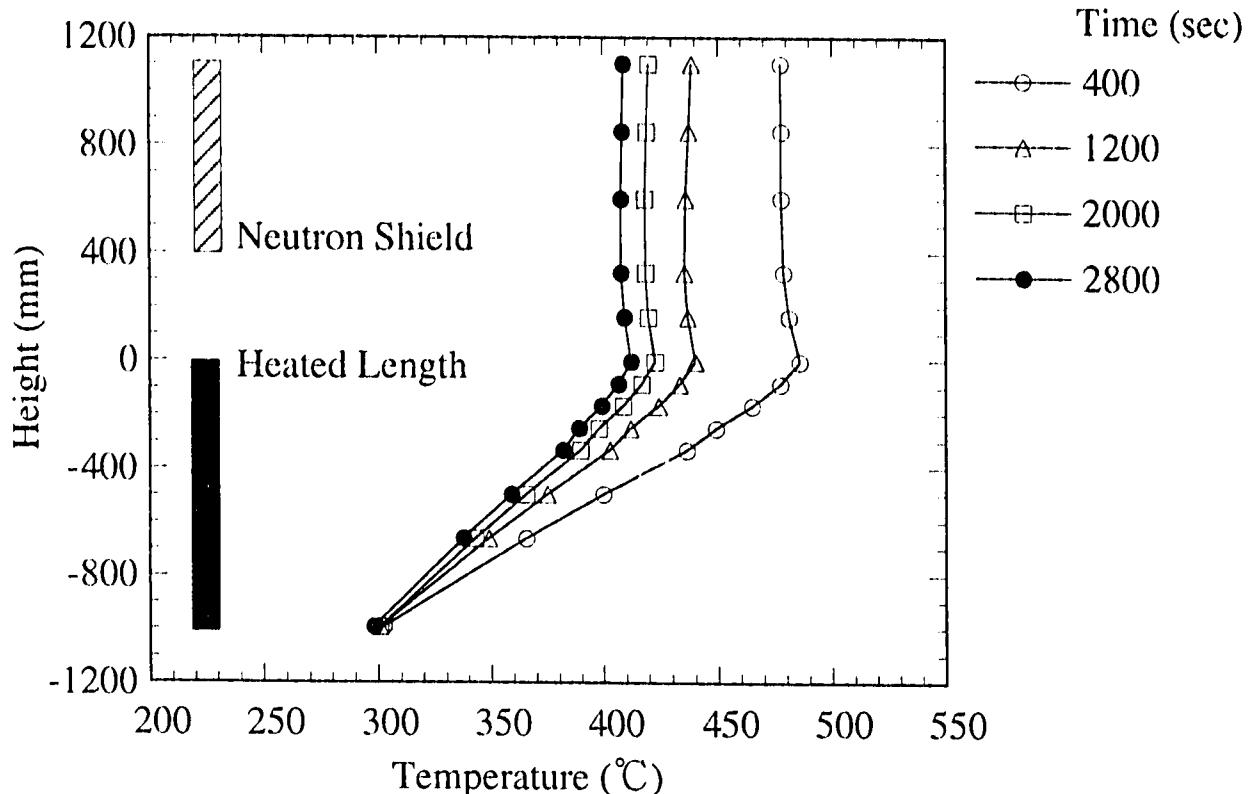


Fig.5.1-6 Axial Temperature Distributions along Center Subchannel
in Center Subassembly (PRACS-REF)

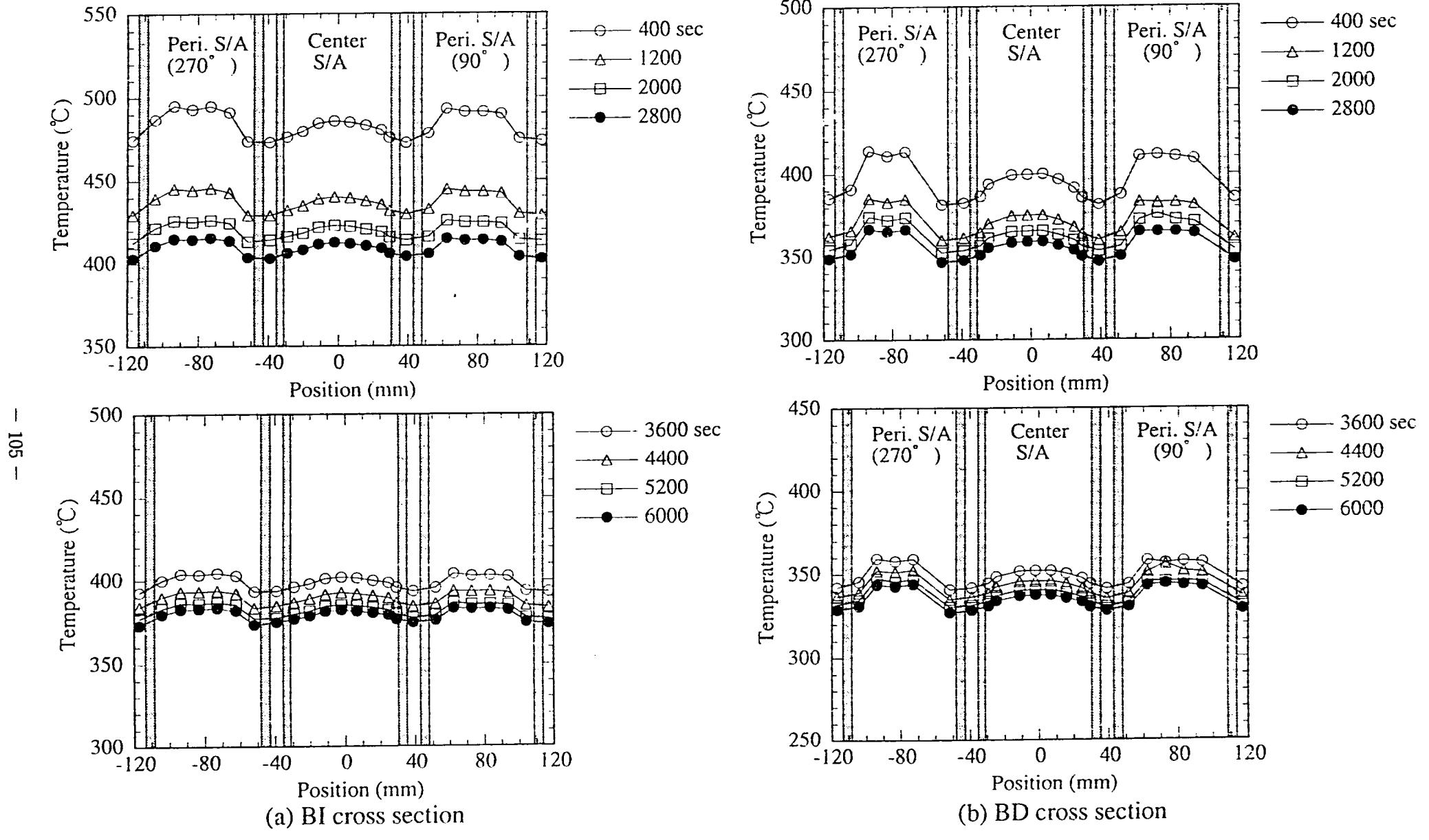


Fig.5.1-7 Transverse Temperature Distributions in BI and BD Cross Section (PRACCS-REF)

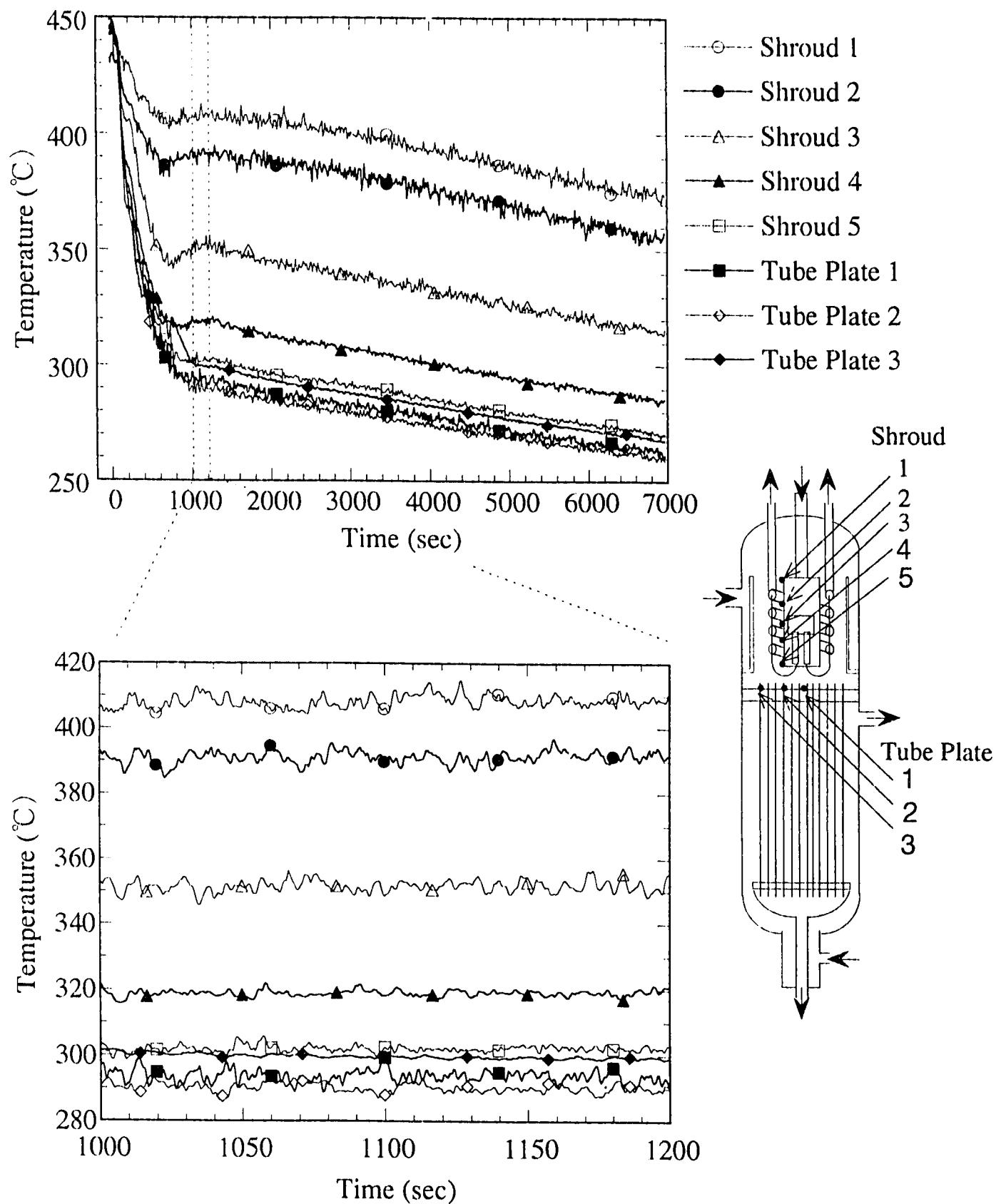
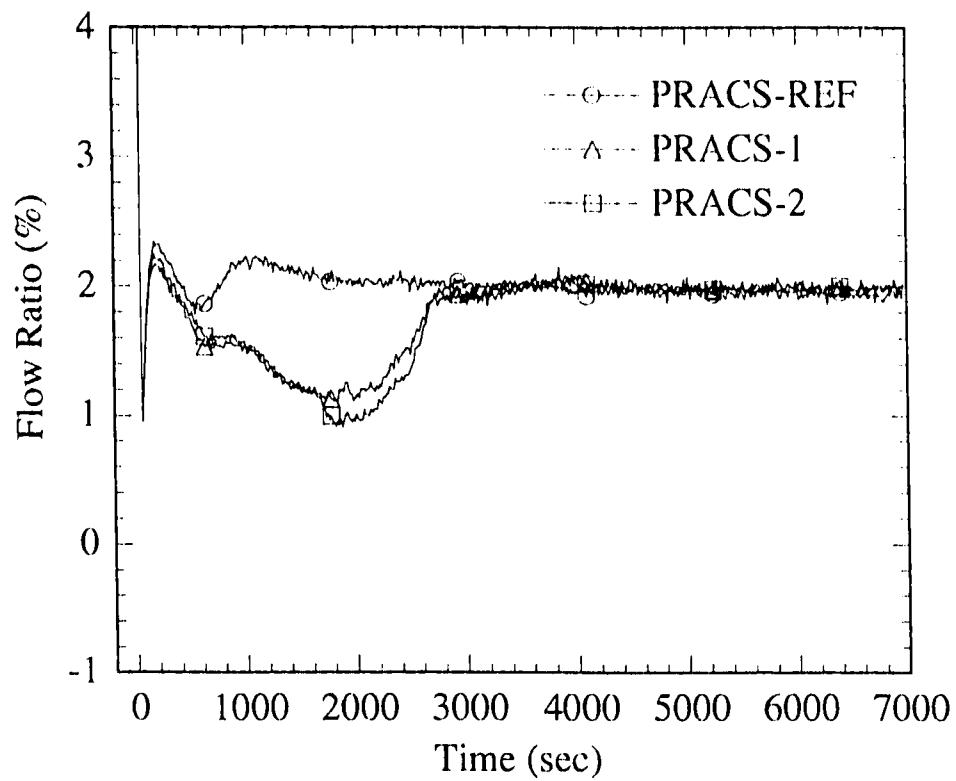
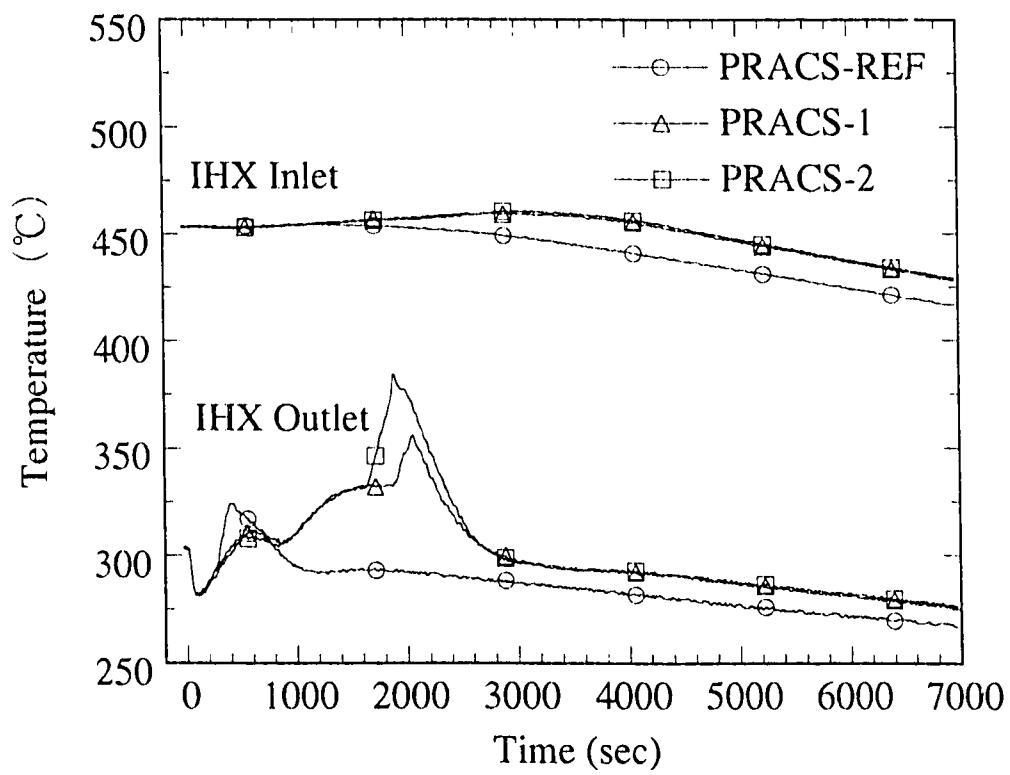


Fig.5.1-8 Temperature Fluctuations at Shroud and Tube Plate of IHX (PRACS-REF)



(a) Flow Trends in Subassemblies



(b) Temperatures at IHX Inlet and IHX Outlet

Fig. 5.2-1 Trends of Total Flows and Temperatures in Main Loop
(PRACS-REF vs. PRACS-1, PRACS-2)

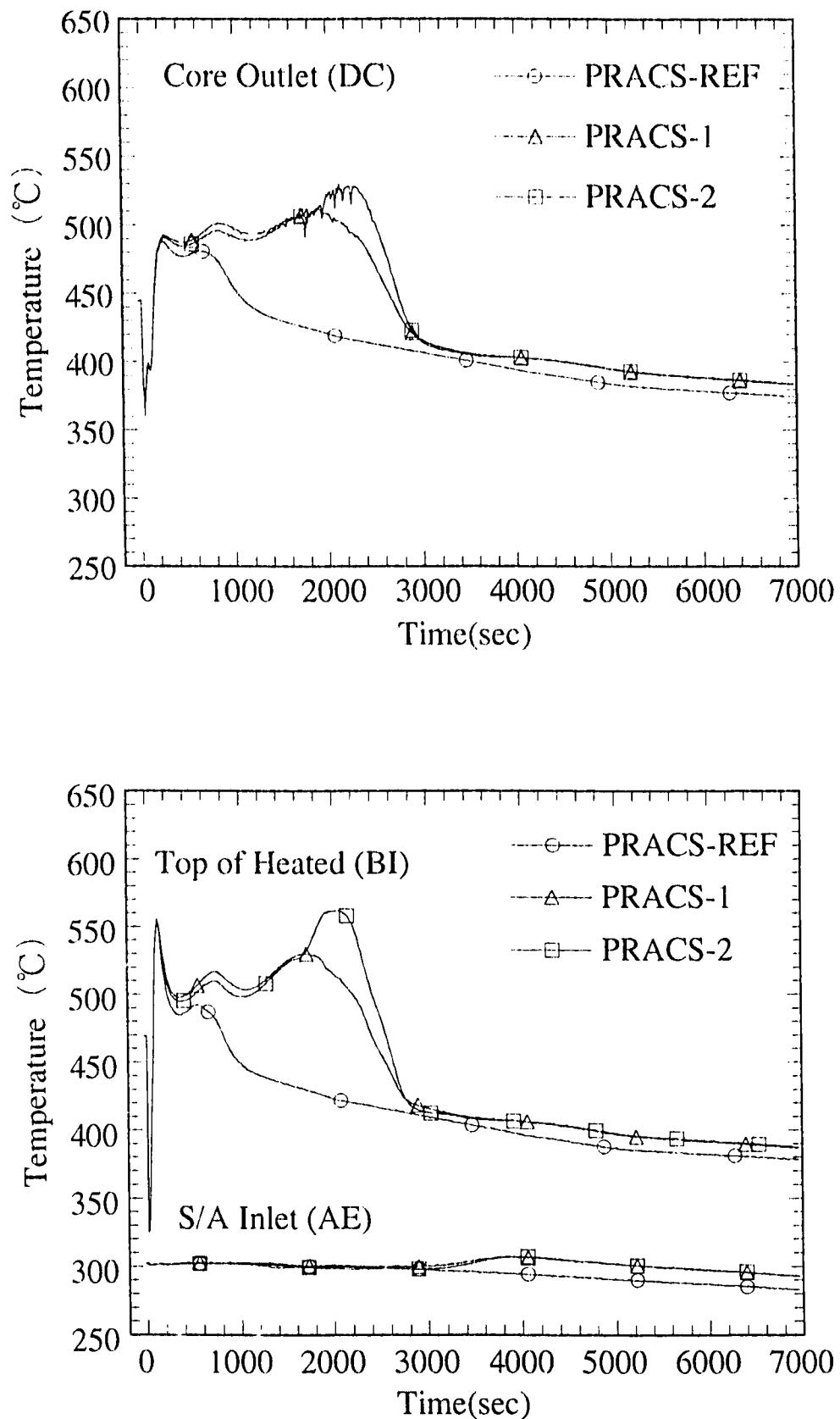
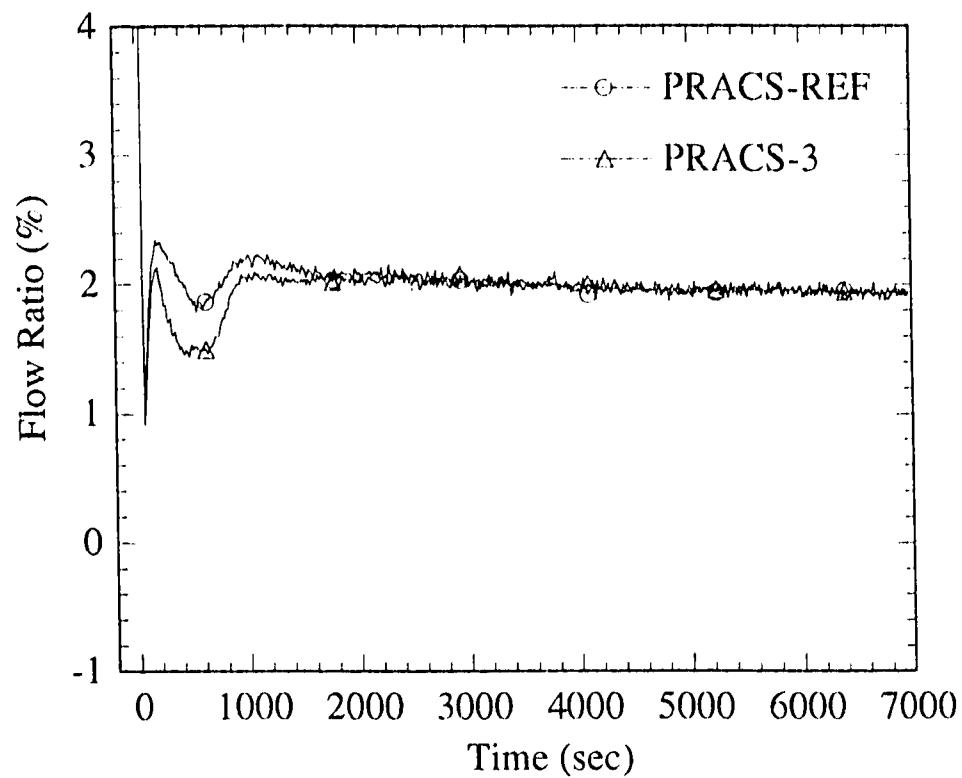
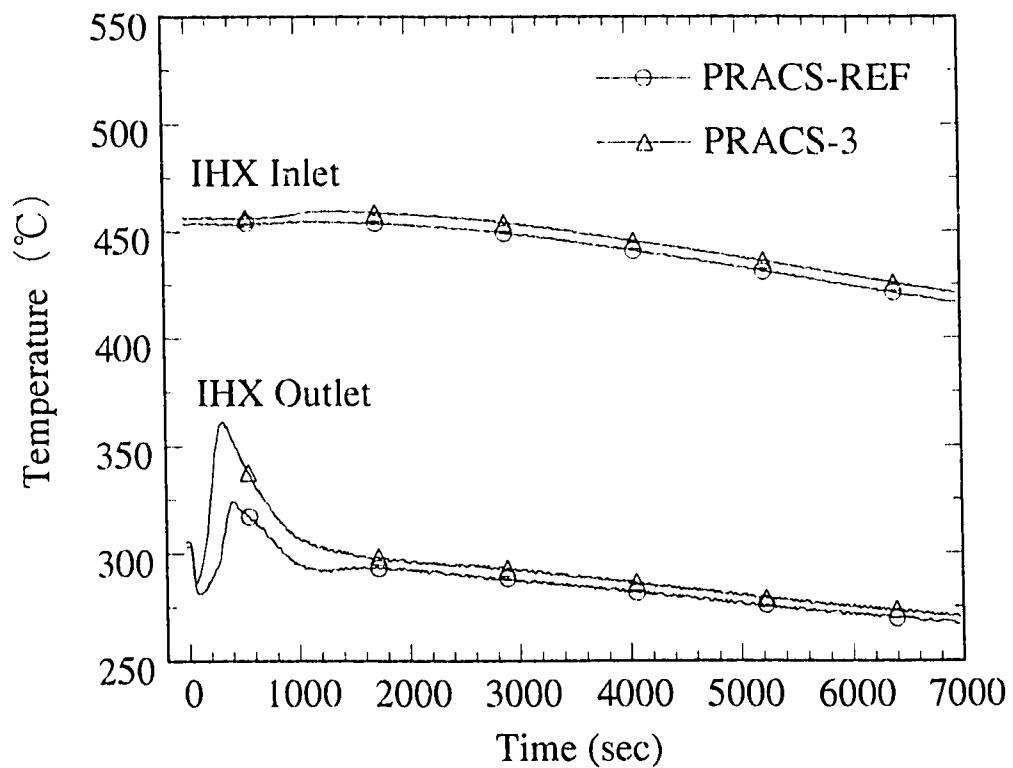


Fig.5.2-2 Time variations of Temperatures in Center Subassembly
(PRACS-REF, PRACS-1 and PRACS-2)



(a) Flow Trends in Subassemblies



(b) Temperatures at IHX Inlet and IHX Outlet

Fig. 5.3-1 Trends of Total Flows and Temperatures in Main Loop
(PRACS-REF vs. PRACS-3)

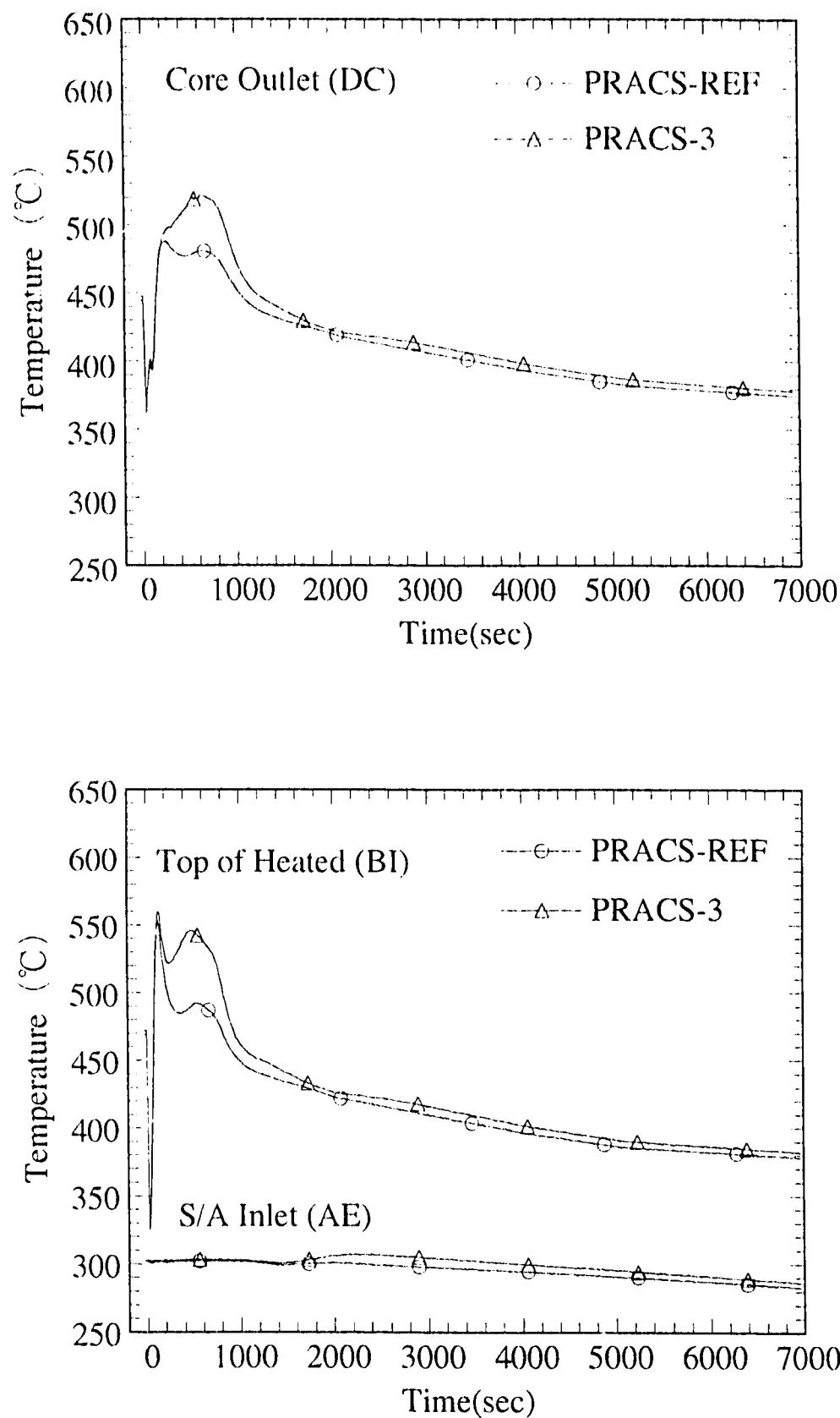
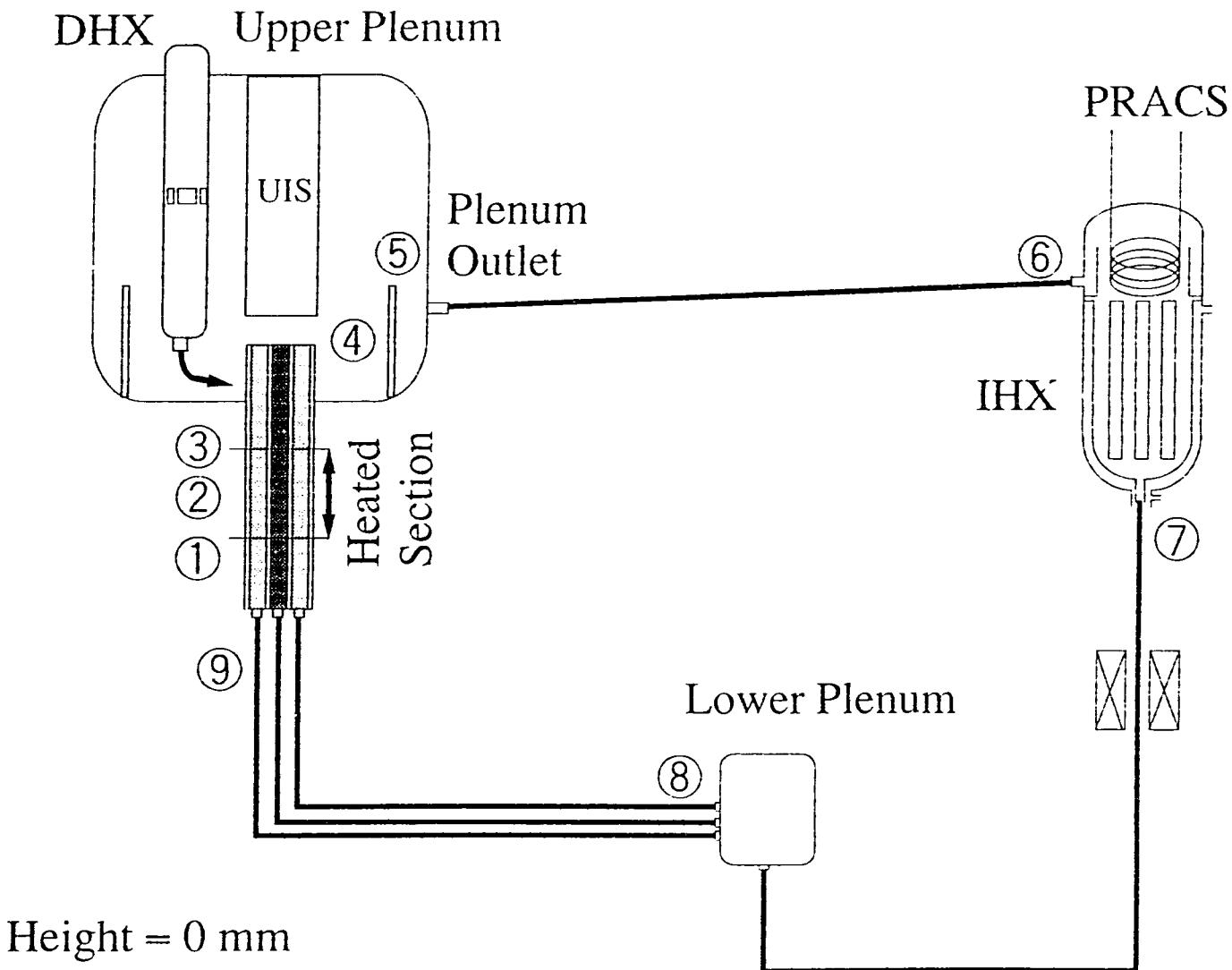


Fig.5.3-2 Time variations of Temperatures in Center Subassembly
(PRACS-REF Vs. PRACS-3)



No.	Points of Measurement	Height (mm)
(1)	Inlet of Heated Section (AE Cross Section)	4790
(2)	Center of Heated Section (BD Cross Section)	5450
(3)	Top of Heated Section (BI Cross Section)	5945
(4)	Upper Plenum at the Height of S/A Outlet	7100
(5)	Upper Plenum at the Height of Top of Inner barrel	7800
(6)	Inlet of IHX	7740
(7)	Outlet of IHX	5611
(8)	Outlet of Lower Plenum	1500
(9)	Inlet of S/A 2122 (Center S/A) 3347 (Outer S/A)	

Fig.6.1-1 Flow Diagram of PLANDTL-DHX Main Loop

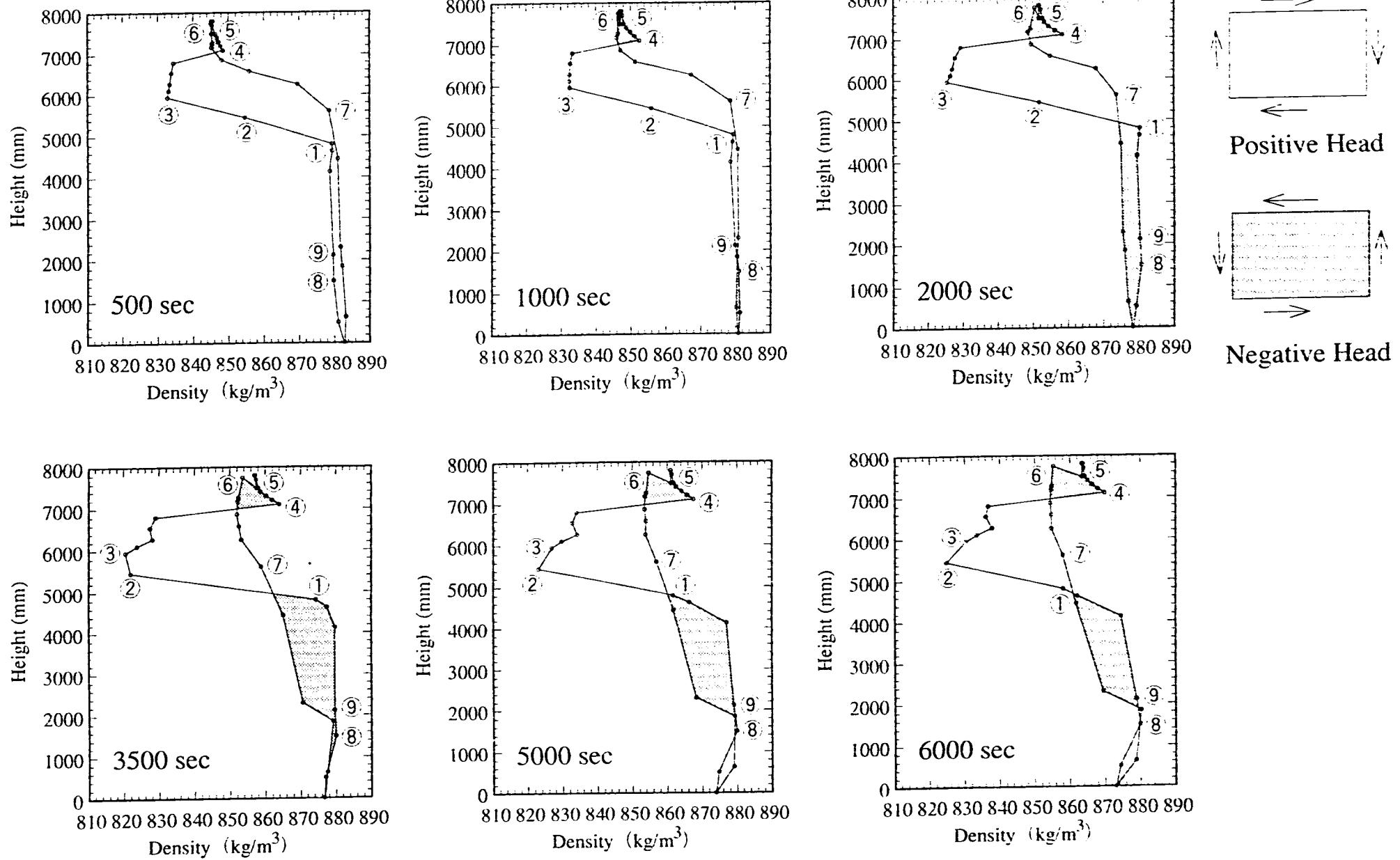


Fig.6.1-2a Density-Height Diagrams for Center Subassembly in Main Loop (Case: DRACS-REF)

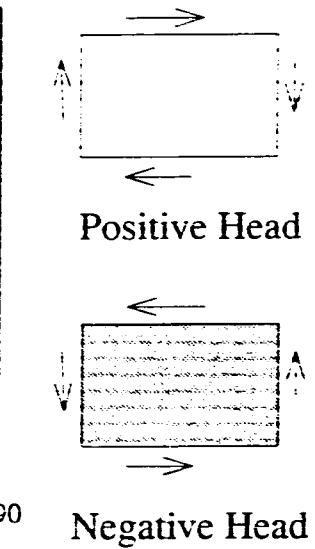
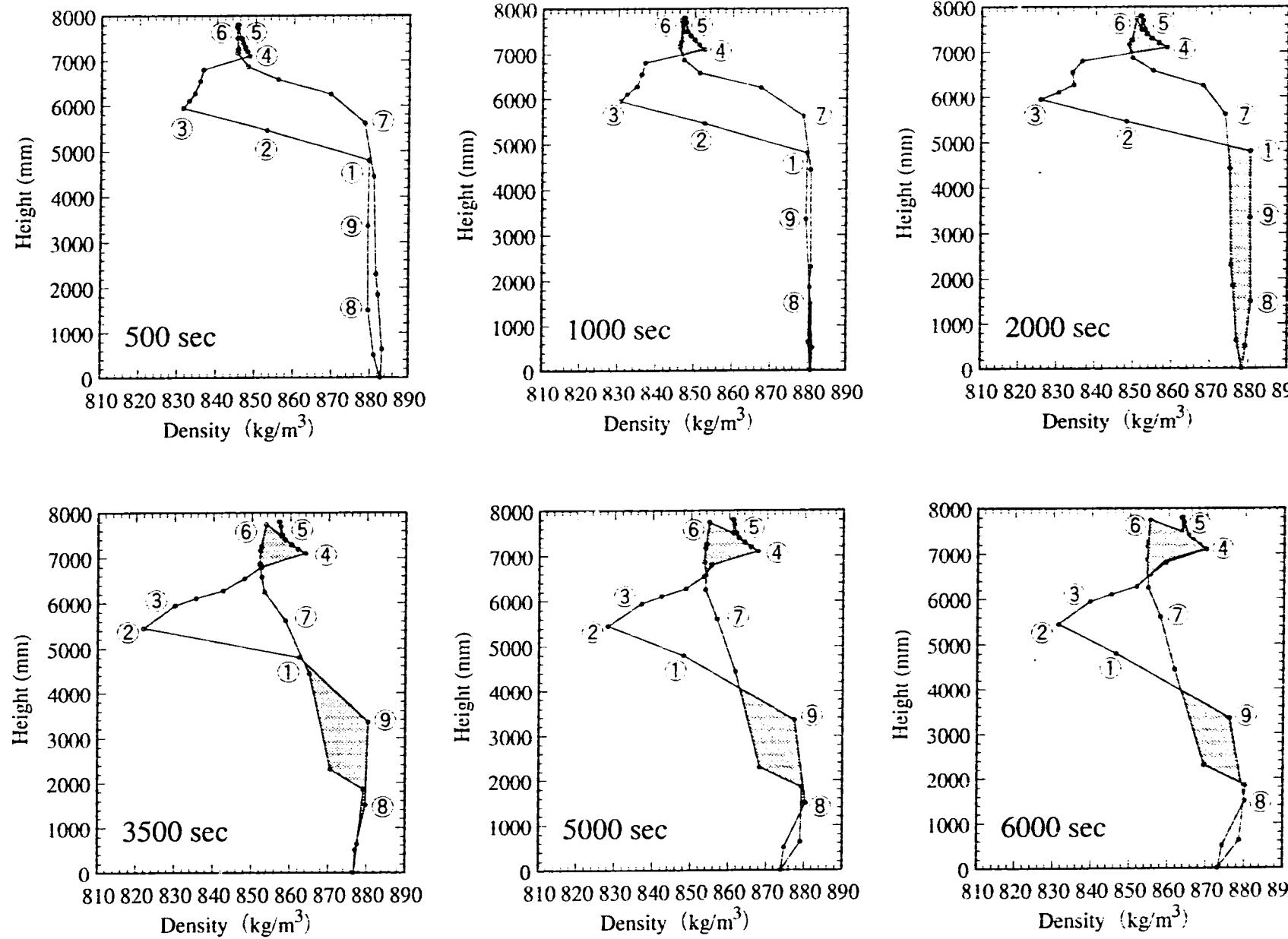


Fig.6.1-2b Density-Height Diagrams for Outer Subassembly B in Main Loop (Case: DRACS-REF)

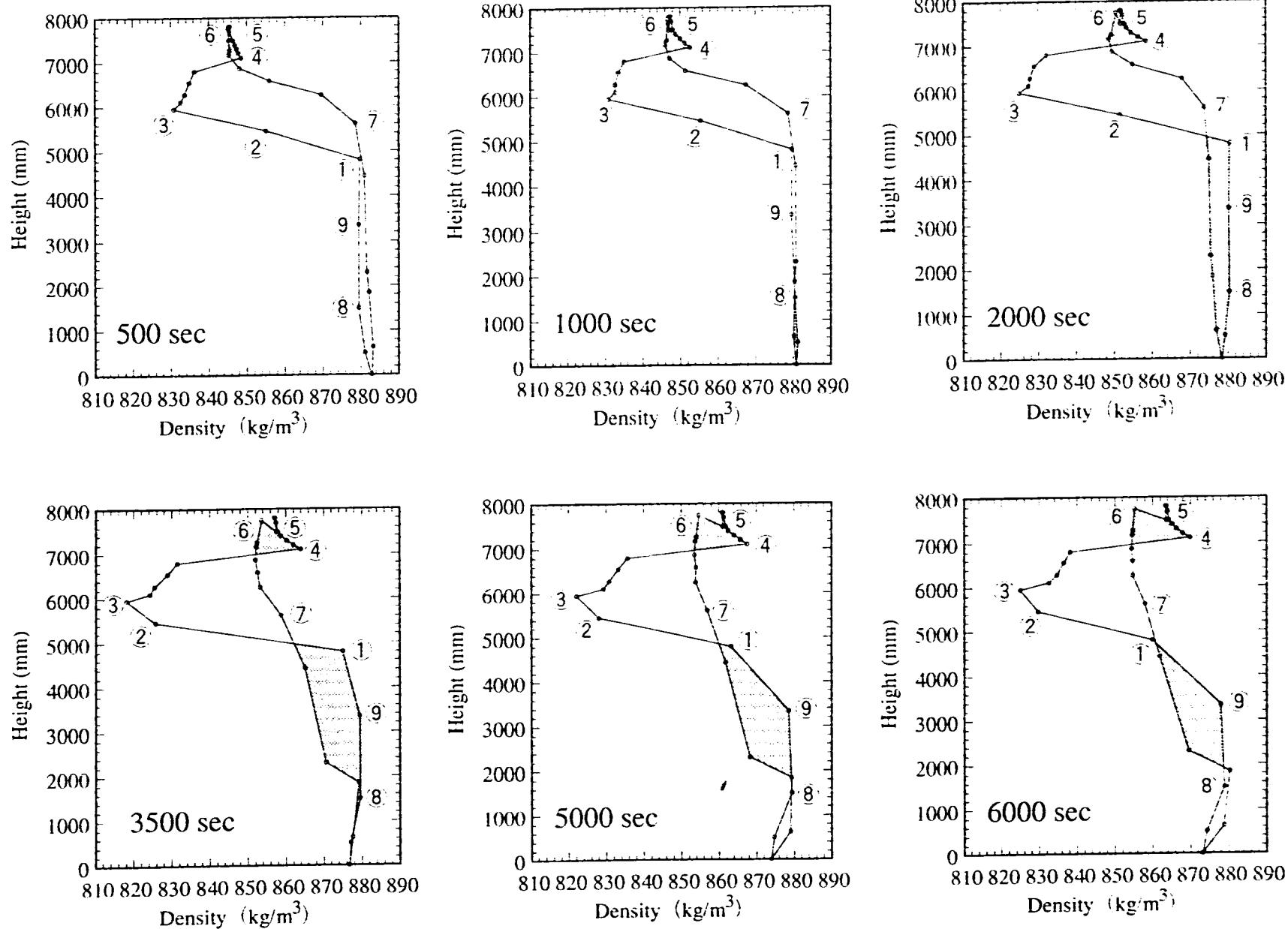
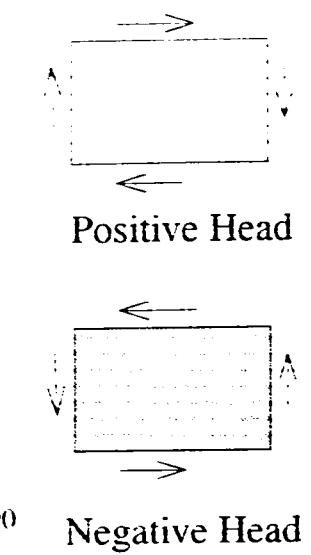


Fig.6.1-2c Density-Height Diagrams for Outer Subassembly E in Main Loop (Case: DRACS-REF)

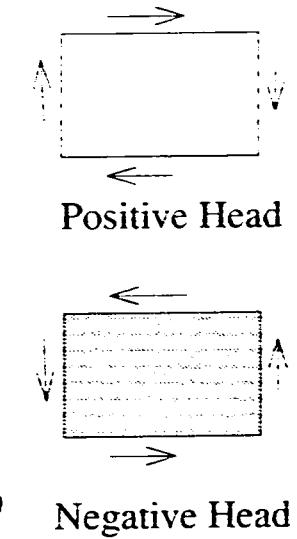
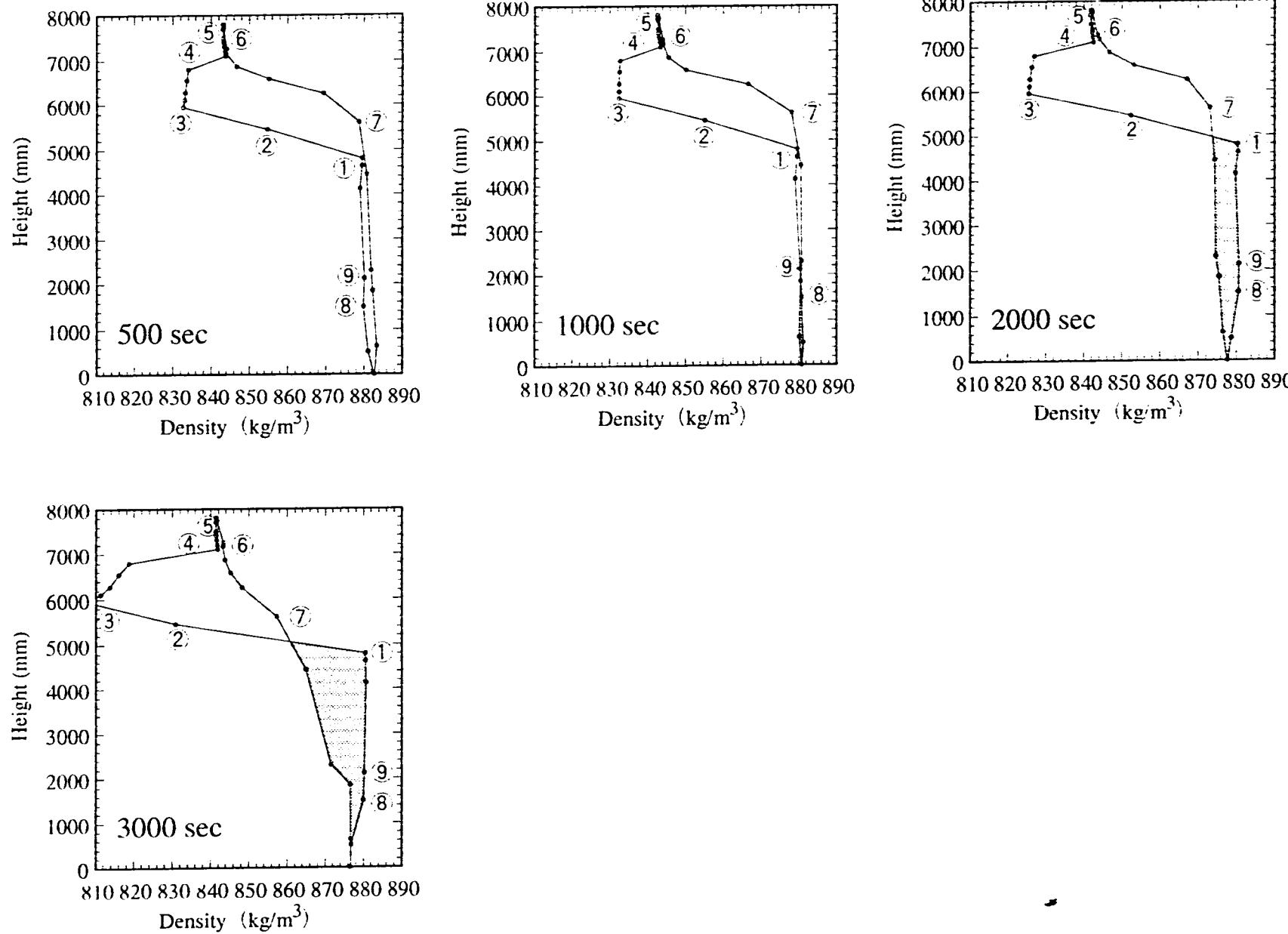


Fig.6.1-3a Density-Height Diagrams for Center Subassembly in Main Loop (Case: DRACS-1)

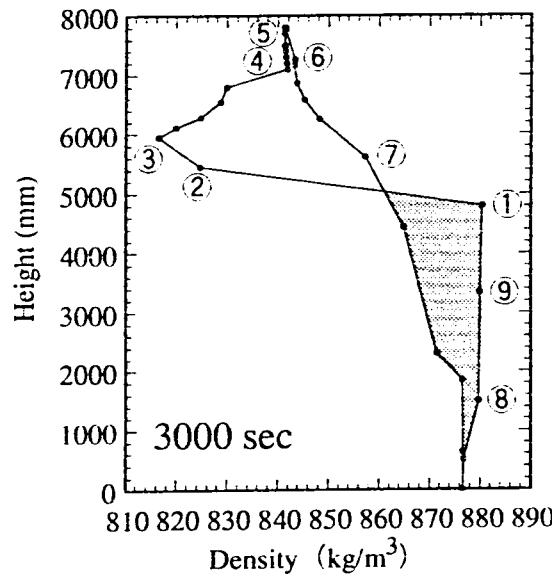
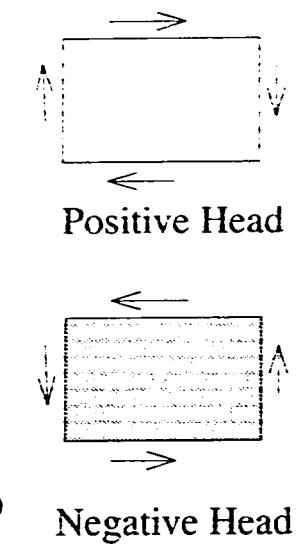
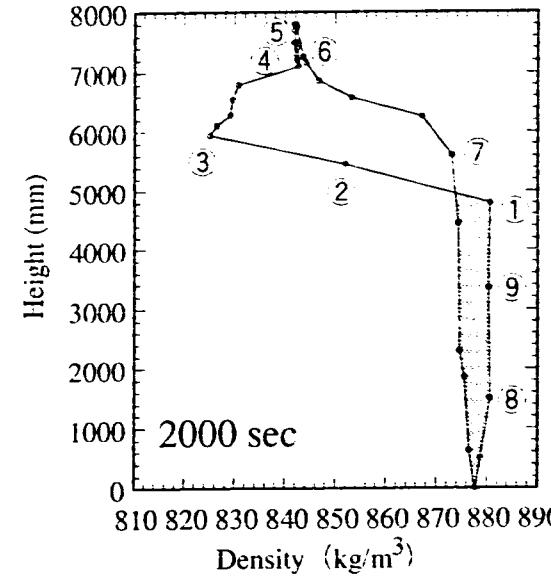
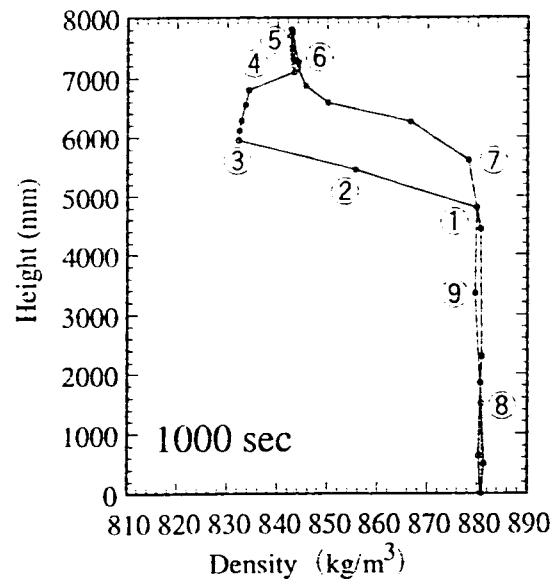
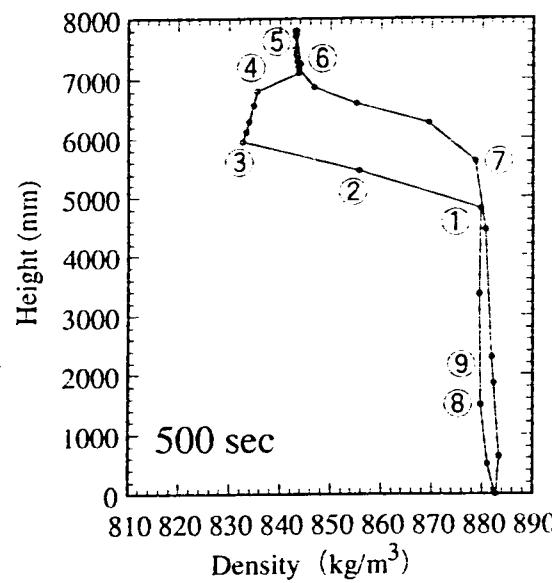


Fig.6.1-3b Density-Height Diagrams for Outer Subassembly B in Main Loop (Case: DRACS-1)

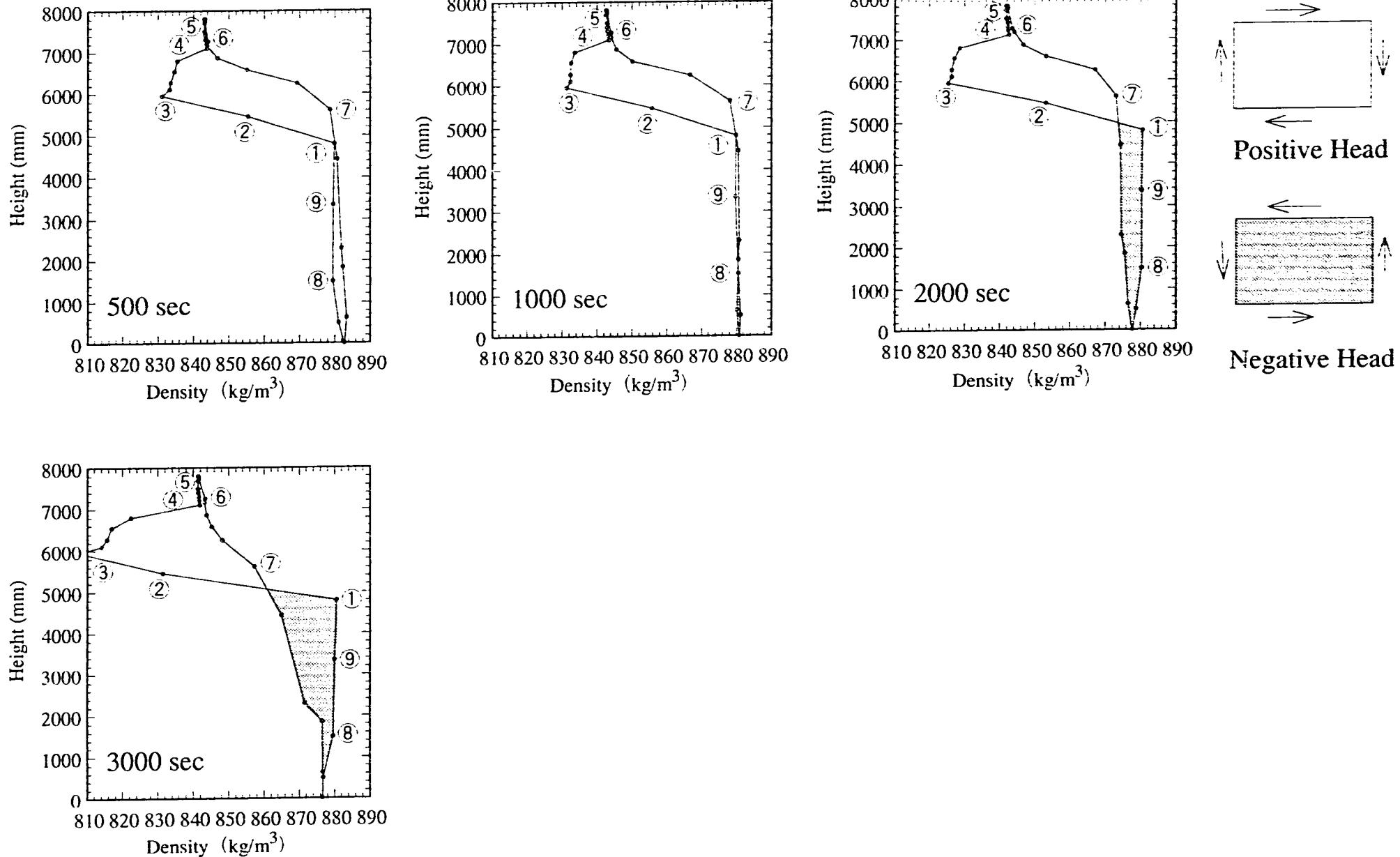


Fig.6.1-3c Density-Height Diagrams for Outer Subassembly E in Main Loop (Case: DRACS-1)

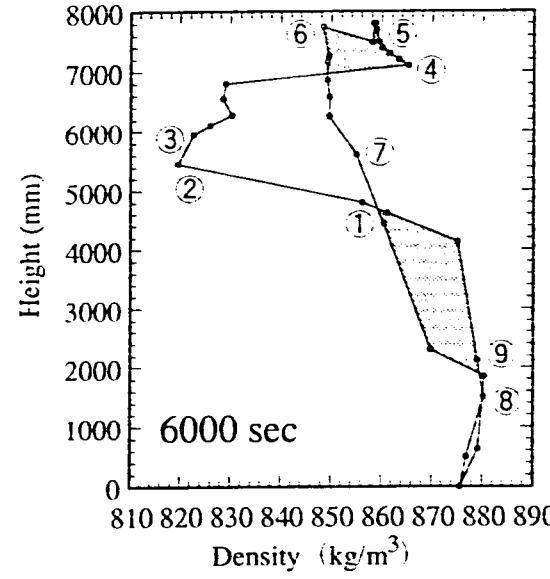
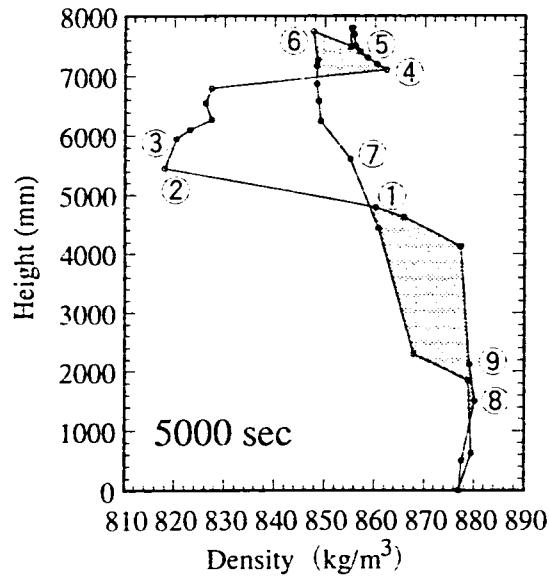
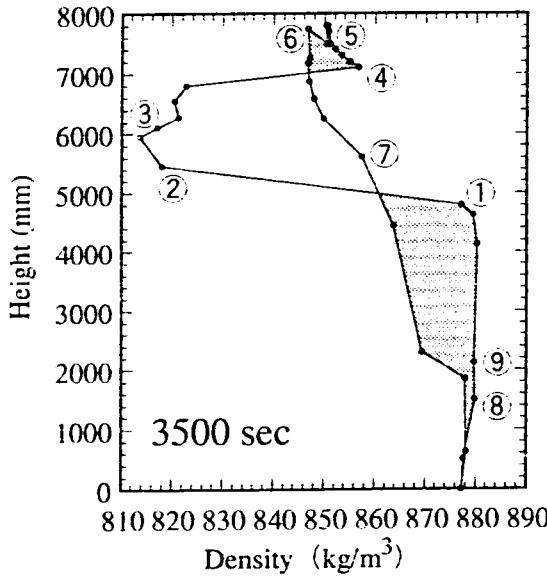
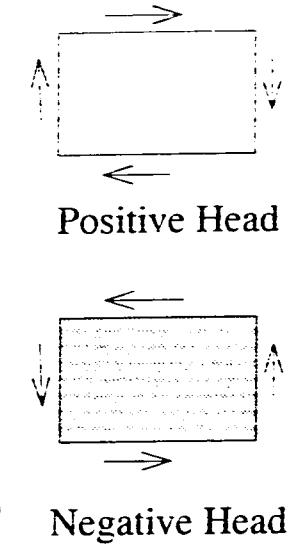
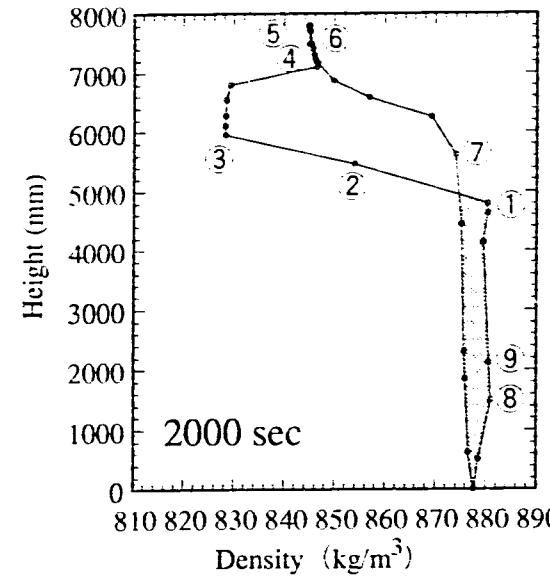
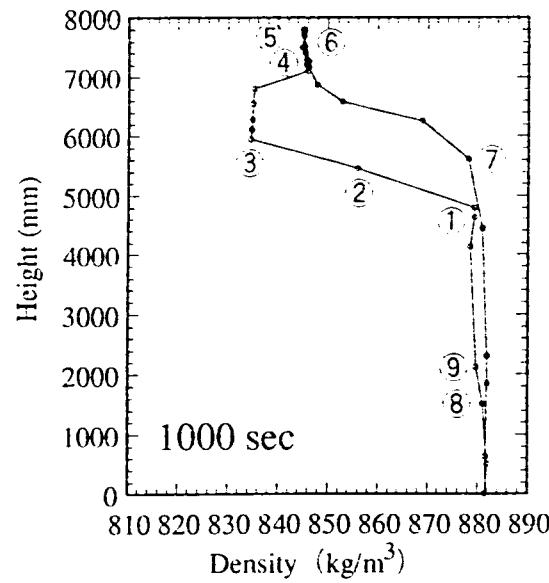
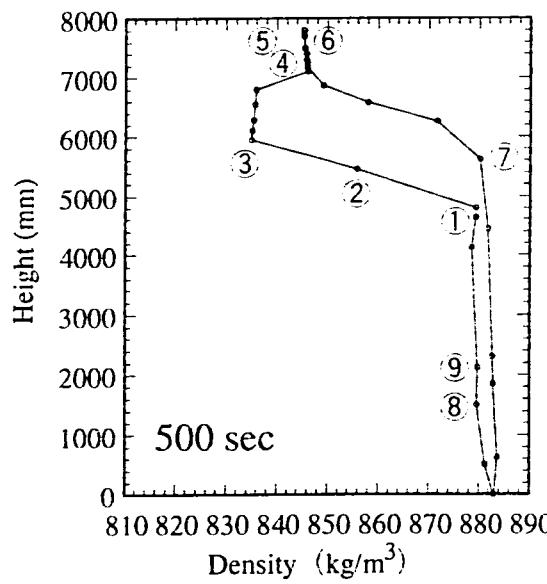


Fig.6.1-4a Density-Height Diagrams for Center Subassembly in Main Loop (Case: DRACS-2)

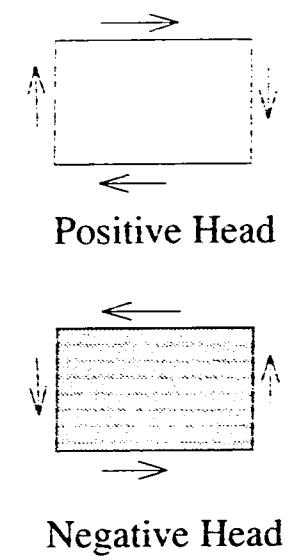
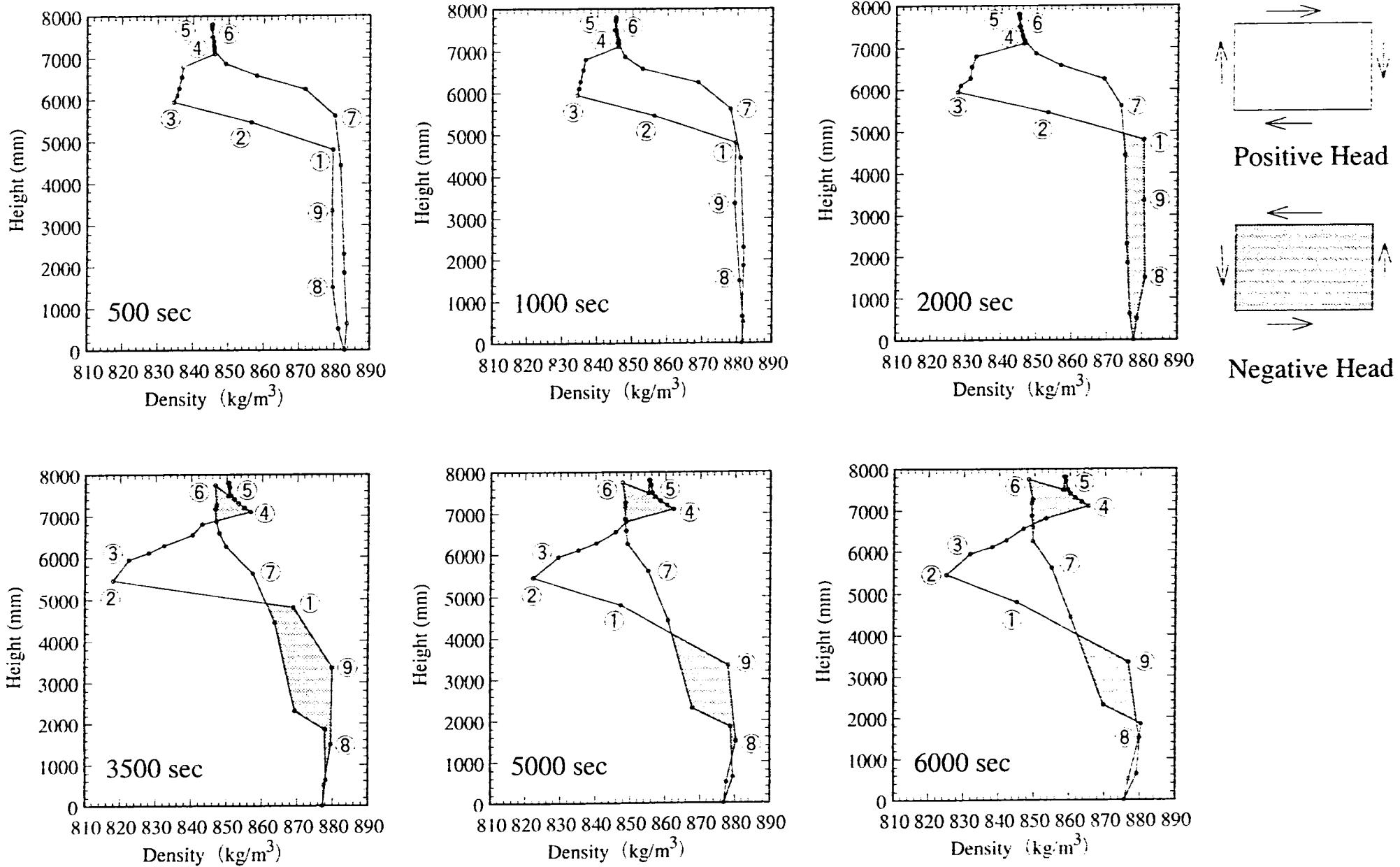


Fig.6.1-4b Density-Height Diagrams for Outer Subassembly B in Main Loop (Case: DRACS-2)

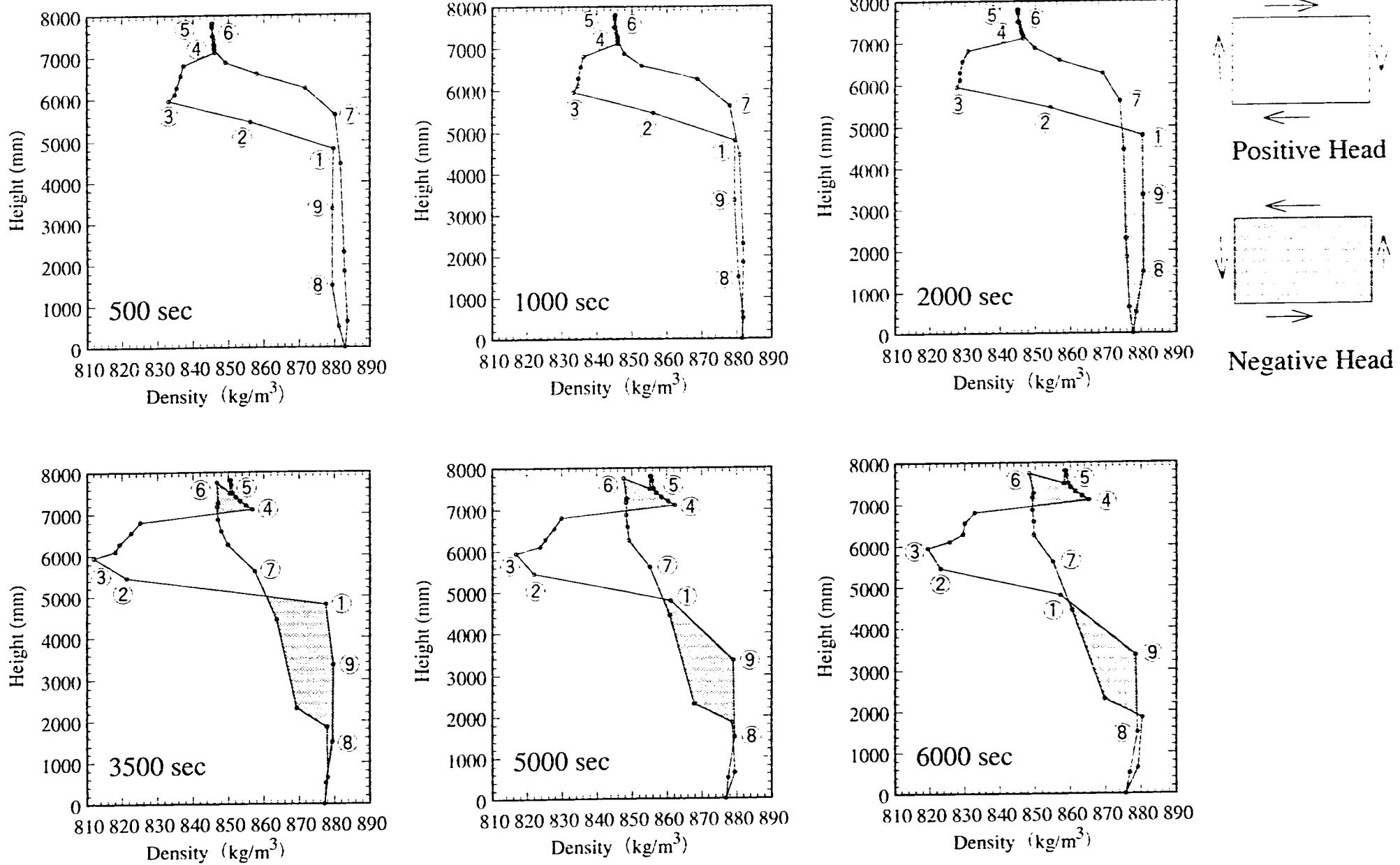


Fig.6.1-4c Density-Height Diagrams for Outer Subassembly E in Main Loop (Case: DRACS-2)

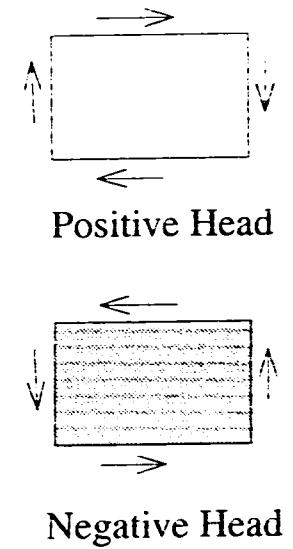
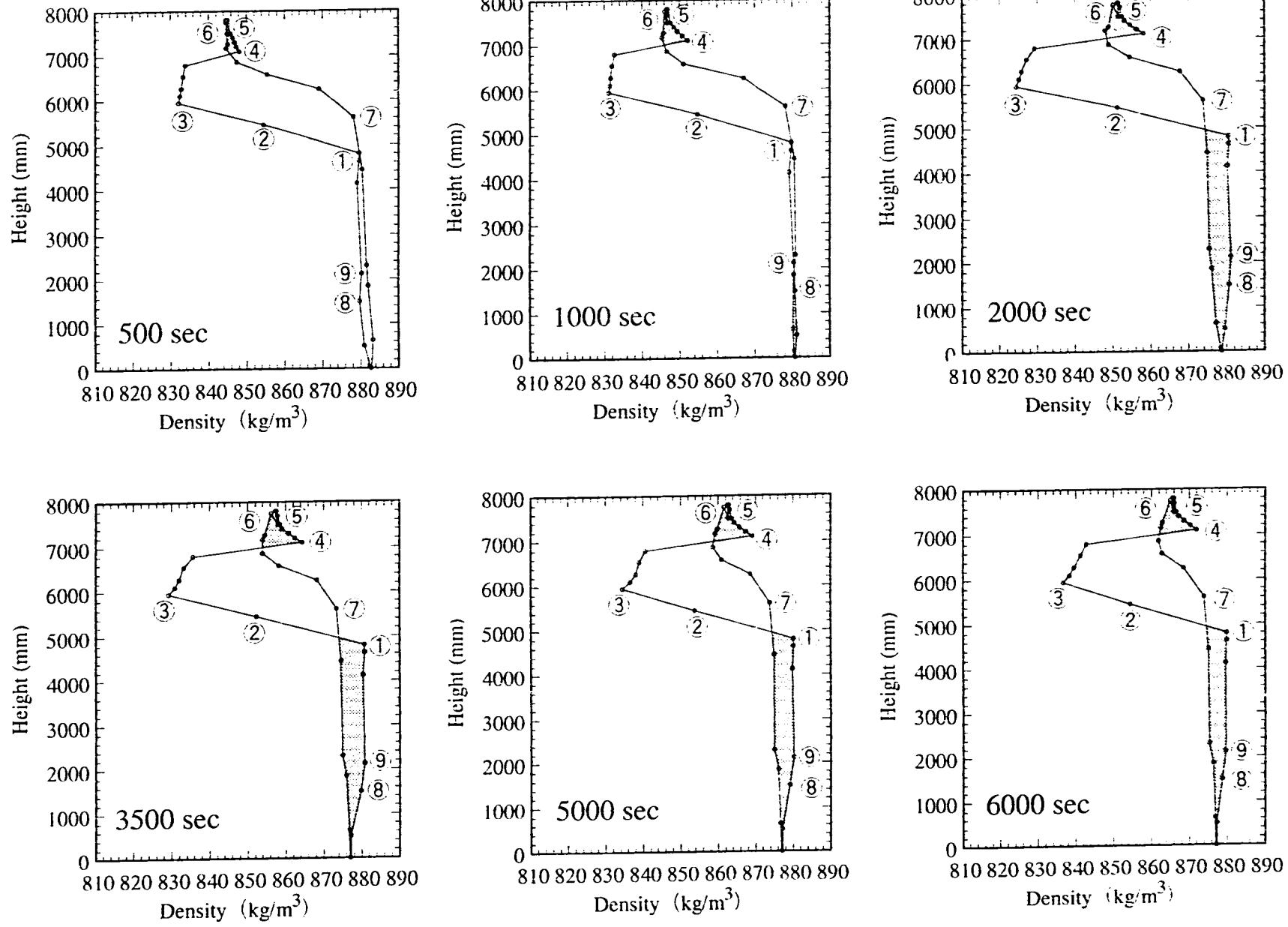


Fig.6.1-5a Density-Height Diagrams for Center Subassembly in Main Loop (Case: DRACS-3)

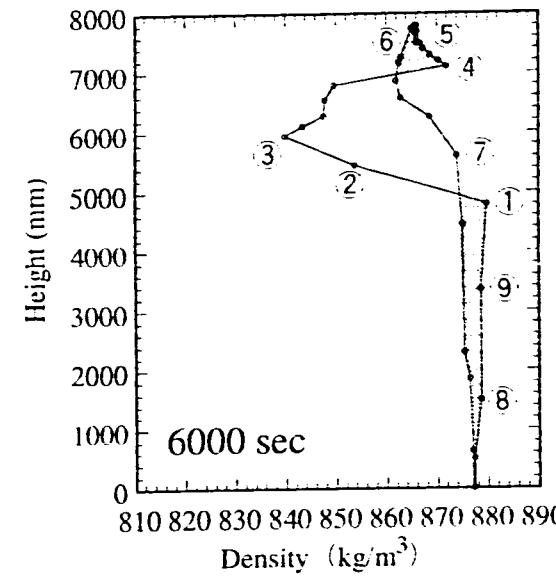
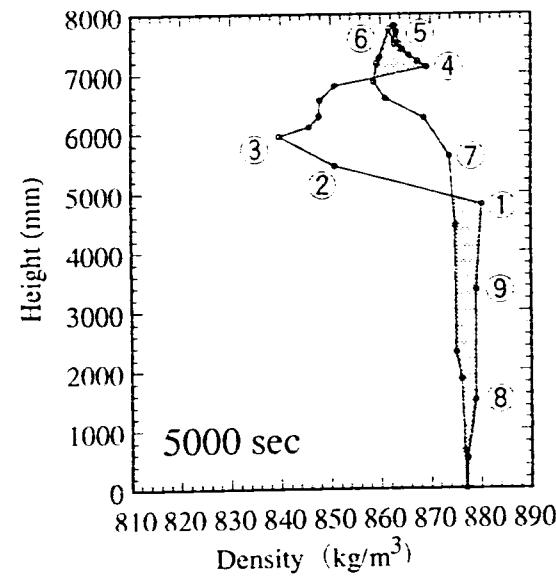
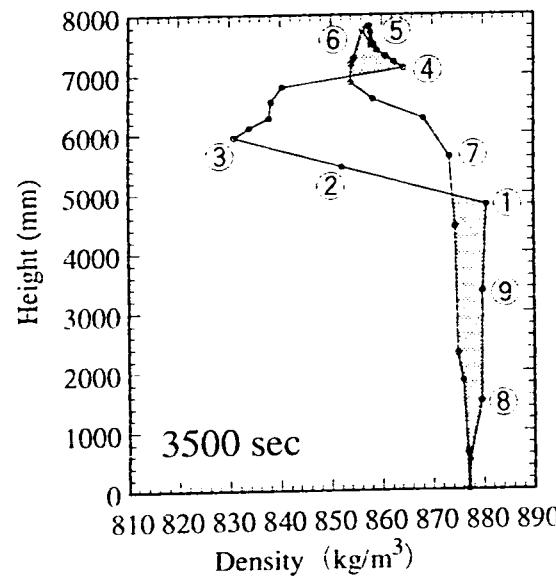
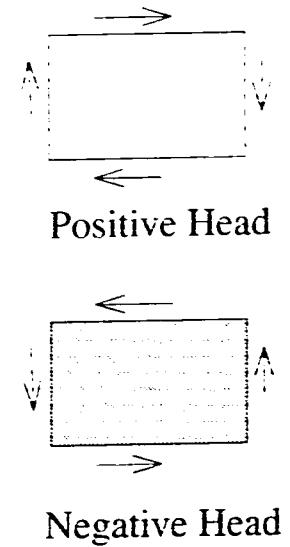
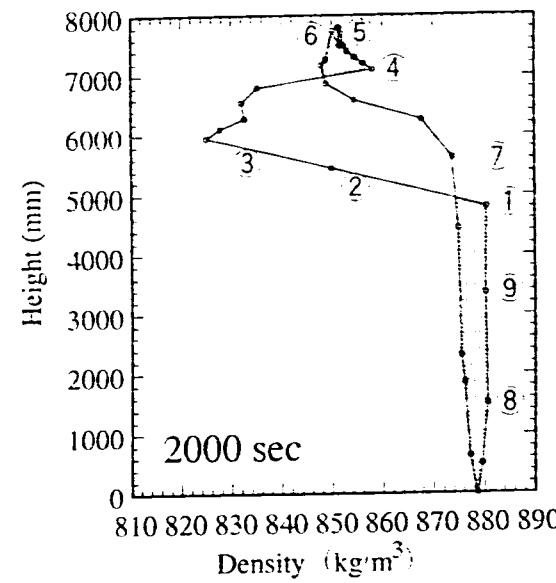
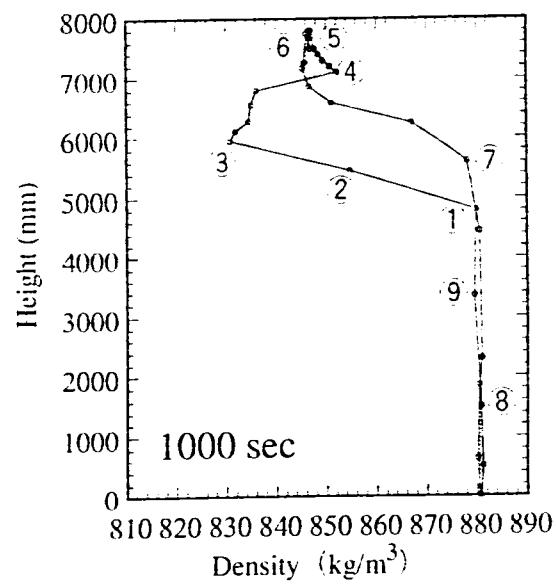
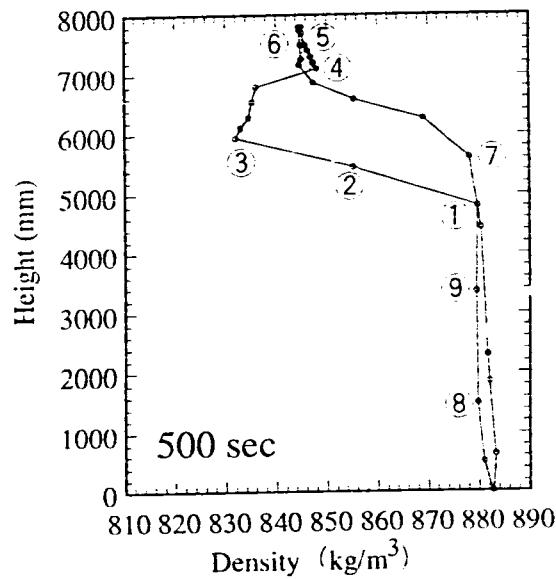


Fig.6.1-5b Density-Height Diagrams for Outer Subassembly B in Main Loop (Case: DRACS-3)

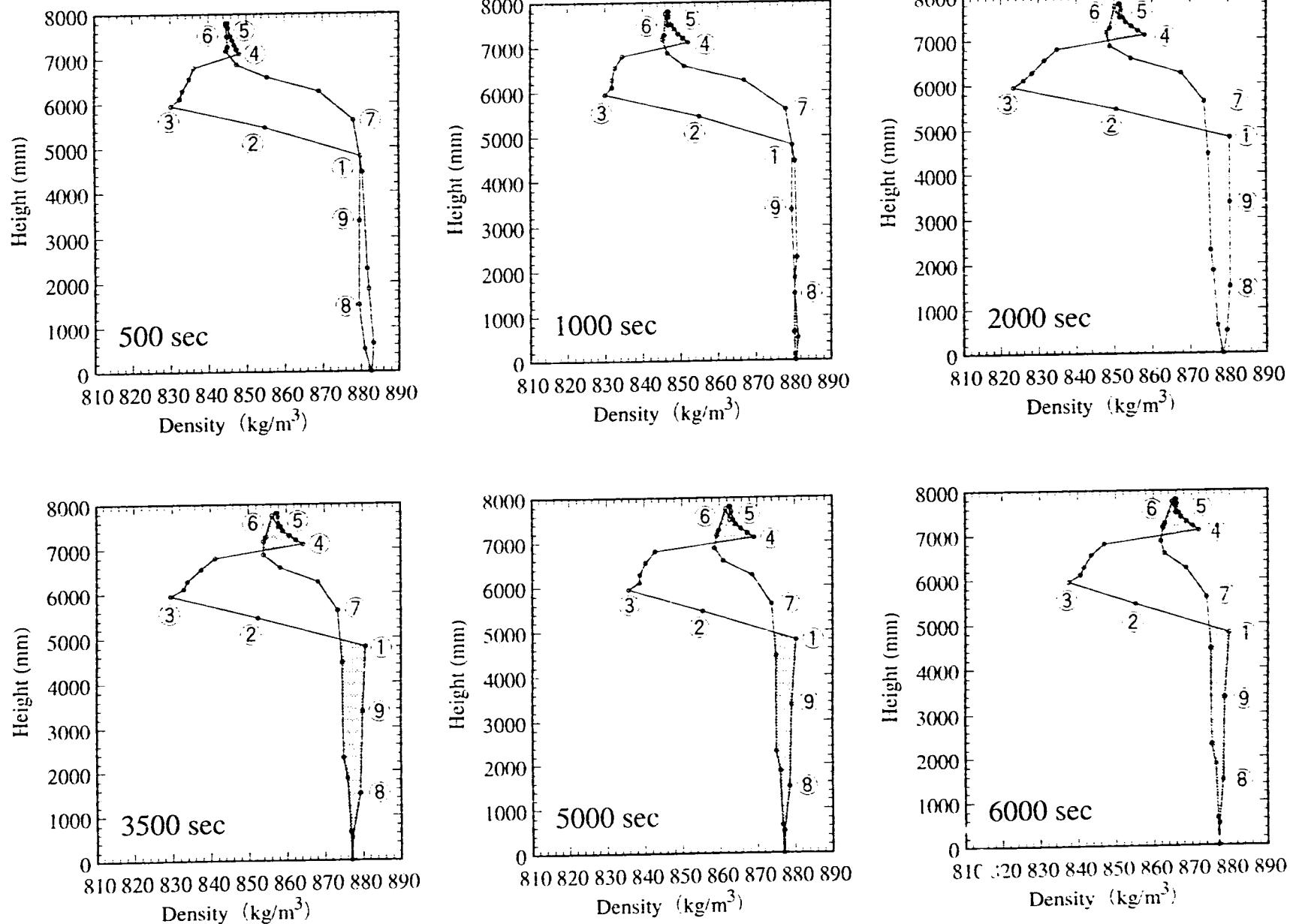
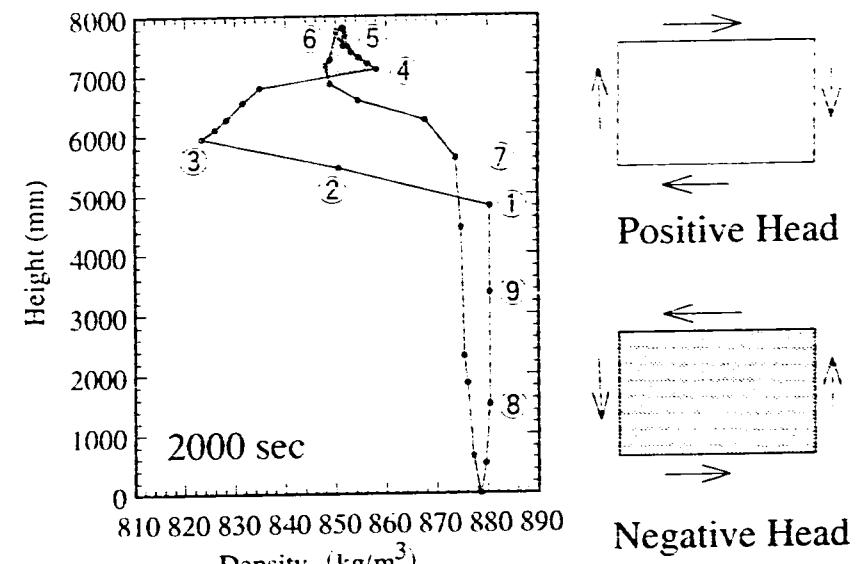


Fig.6.1-5c Density-Height Diagrams for Outer Subassembly E in Main Loop (Case: DRACS-3)



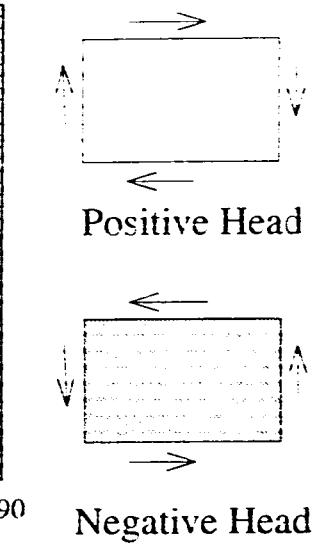
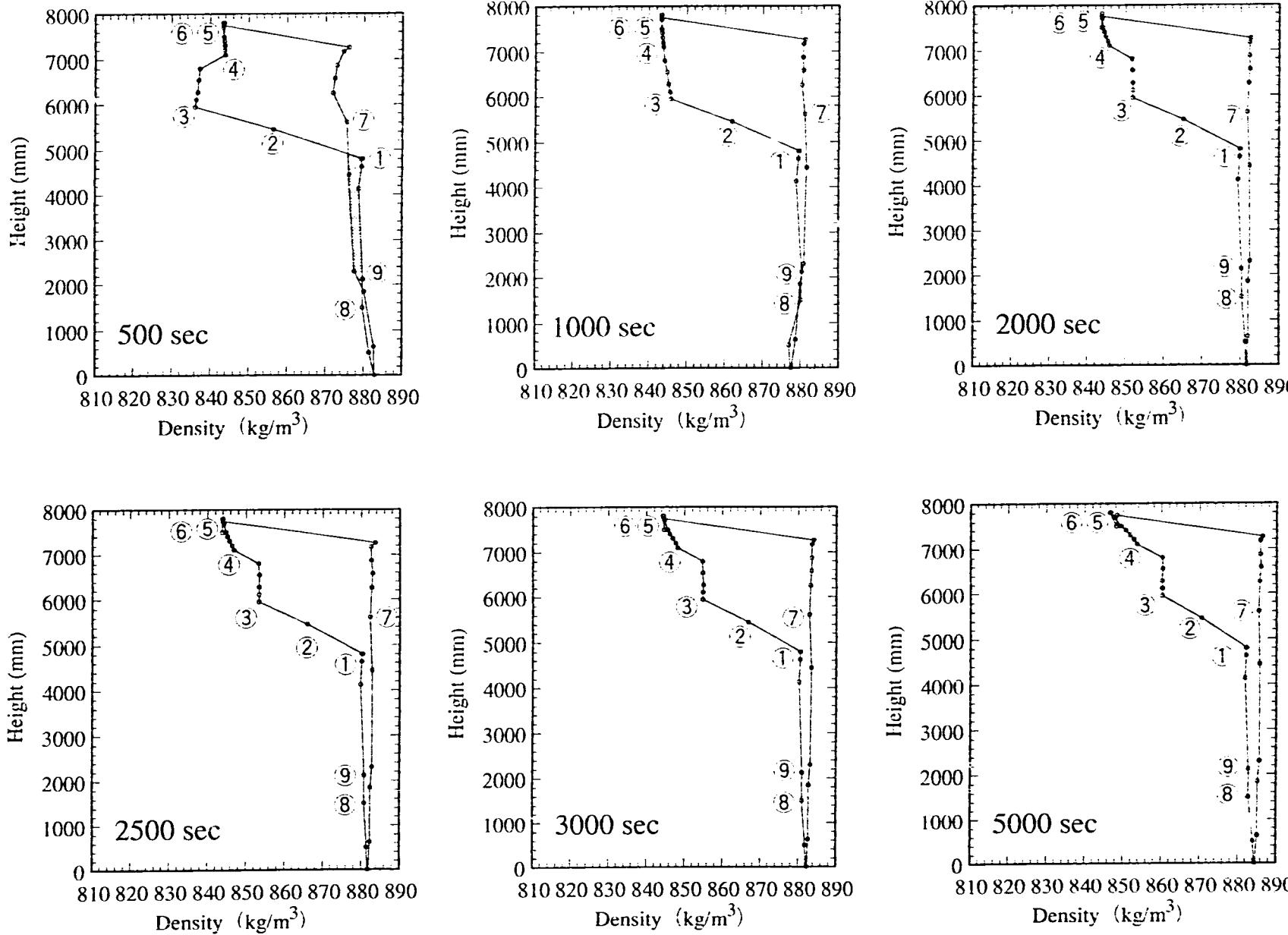


Fig.6.1-6 Density-Height Diagrams for Center Subassembly in Main Loop (Case: PRACS-REF)

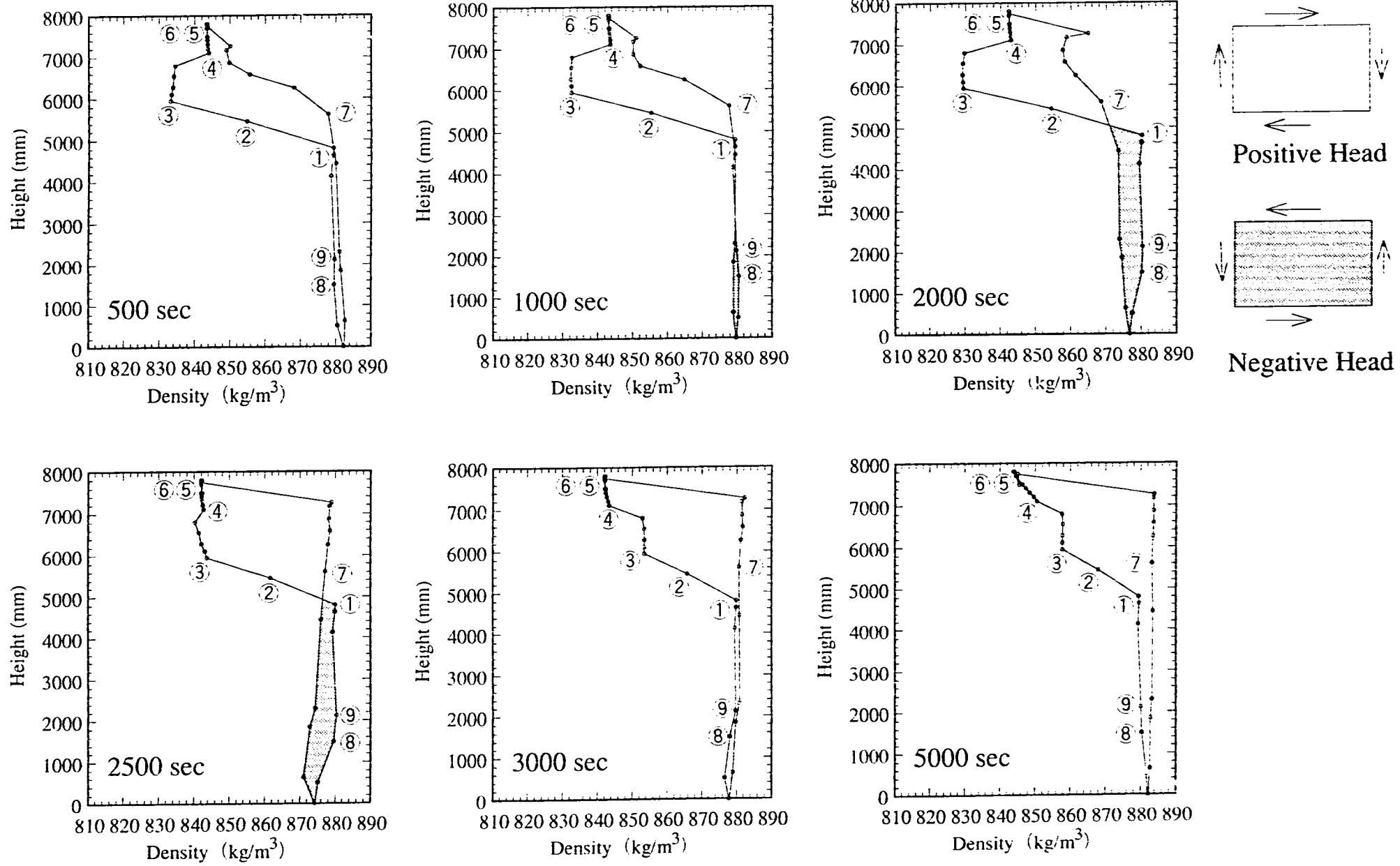
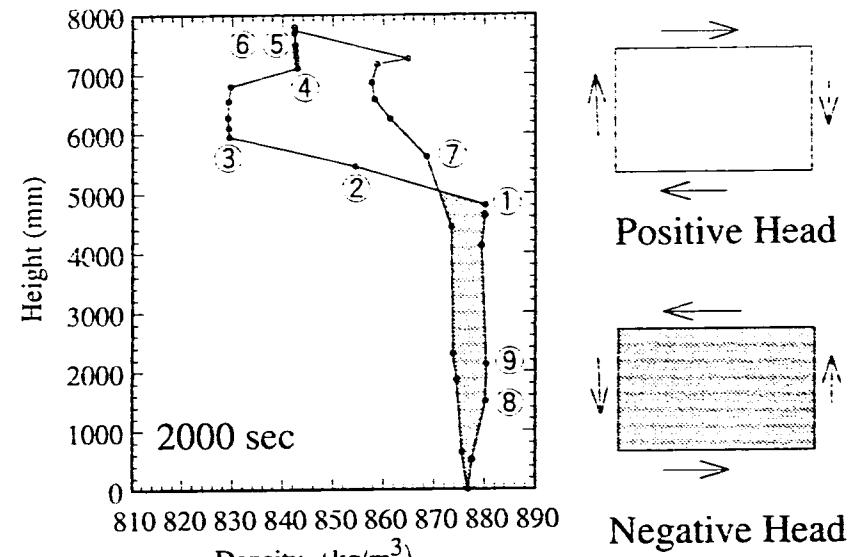


Fig.6.1-7 Density-Height Diagrams for Center Subassembly in Main Loop (Case: PRACS-1)



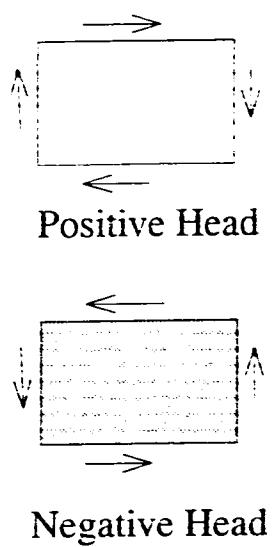
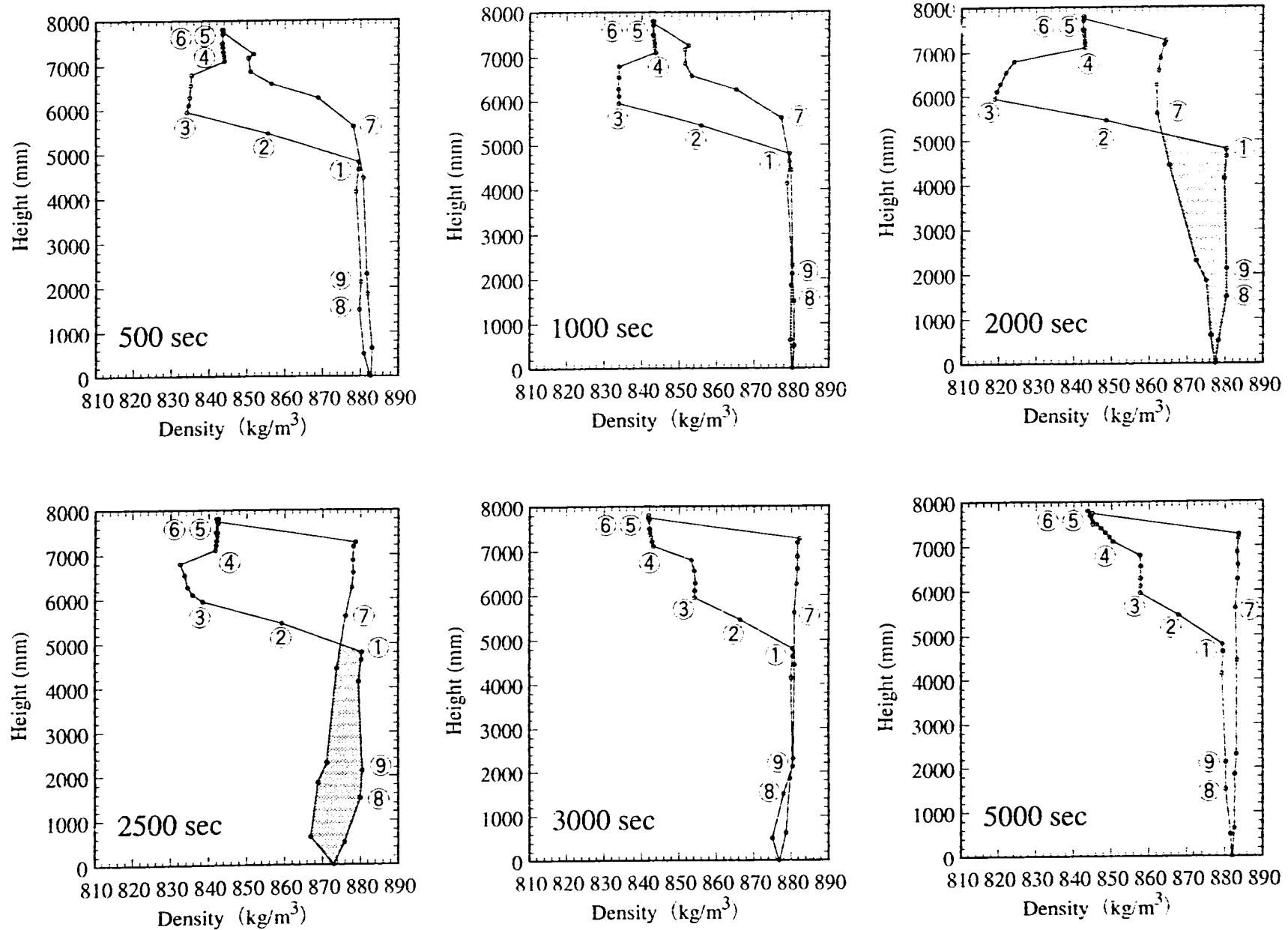


Fig.6.1-8 Density-Height Diagrams for Center Subassembly in Main Loop (Case: PRACS-2)

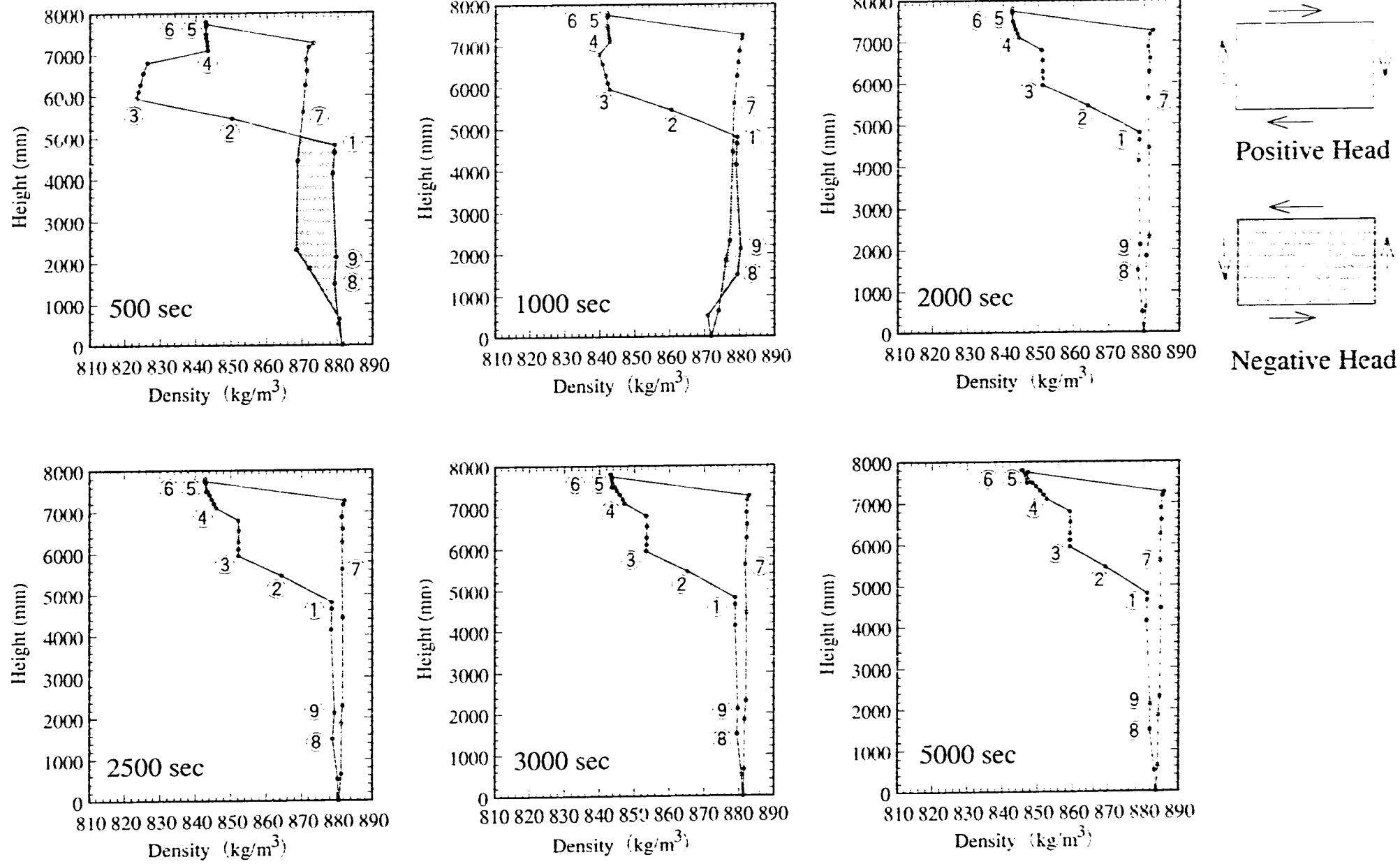


Fig.6.1-9 Density-Height Diagrams for Center Subassembly in Main Loop (Case: PRACS-3)

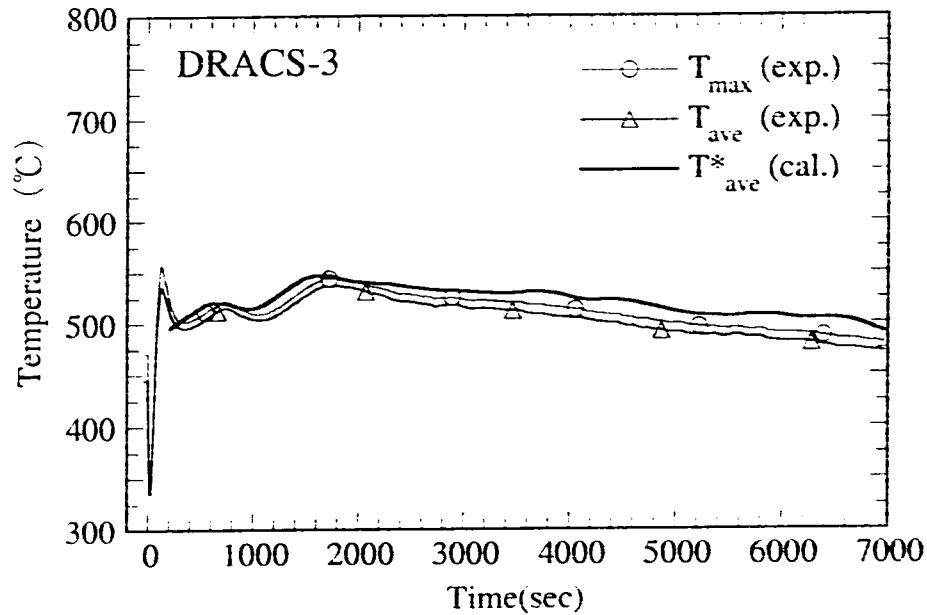
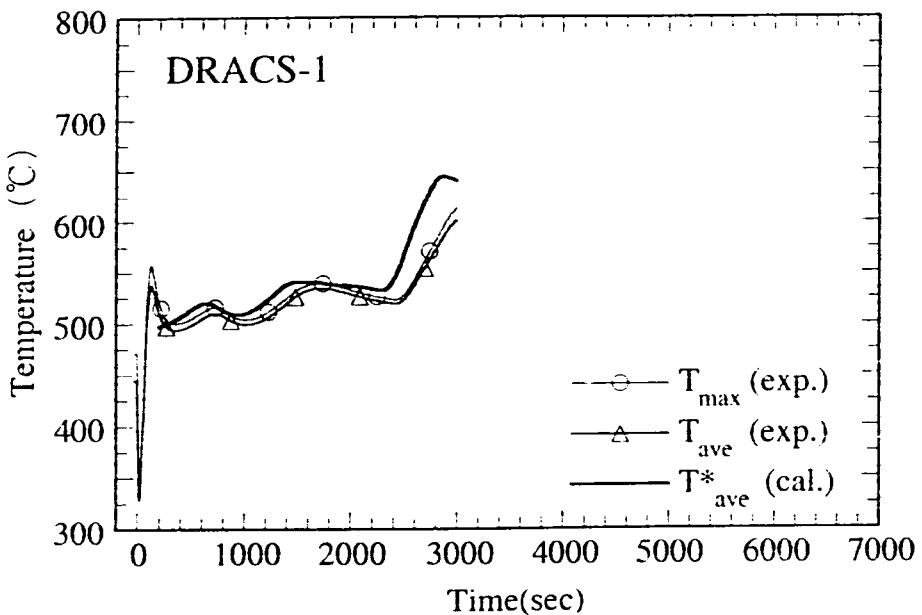
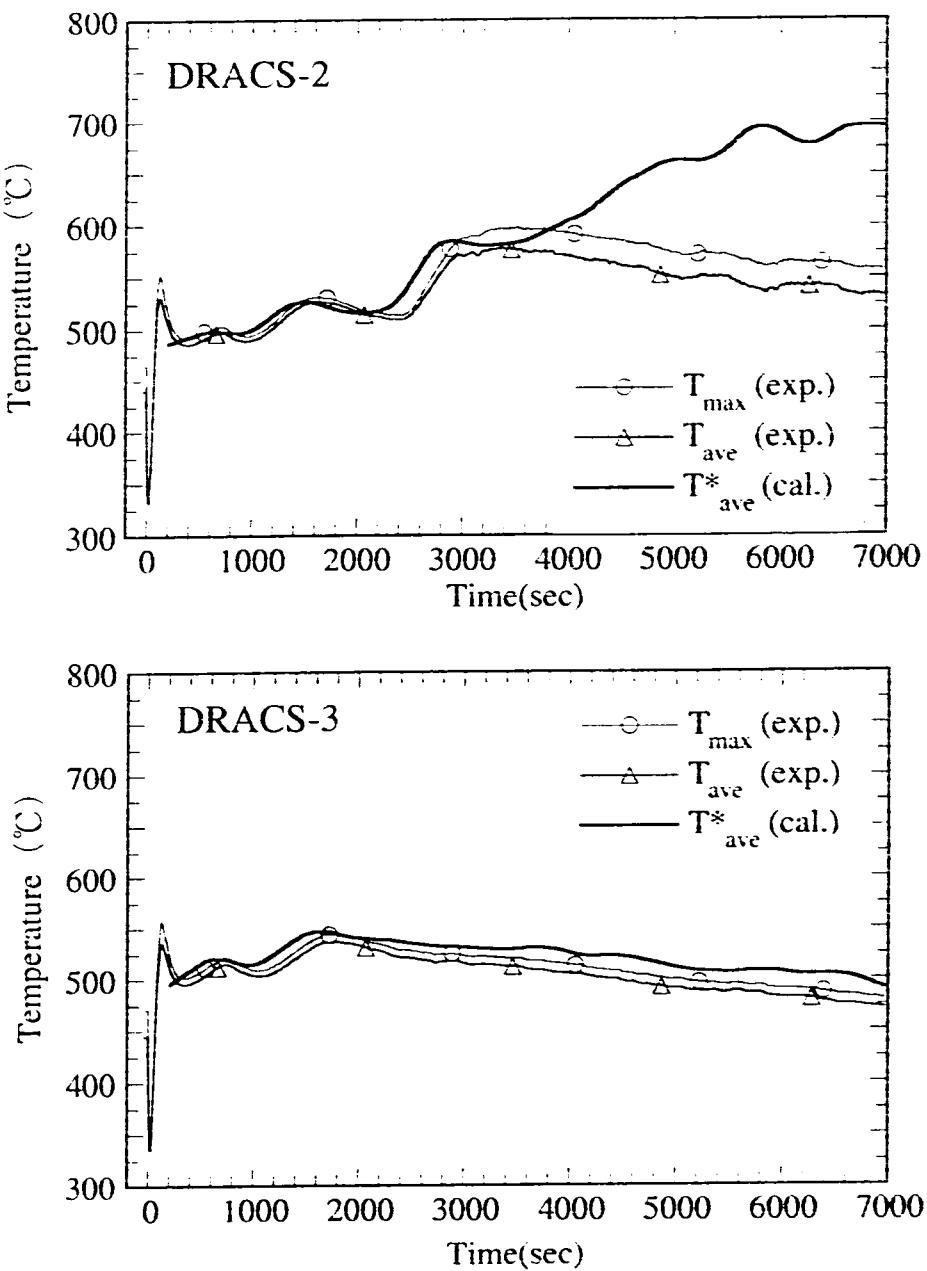
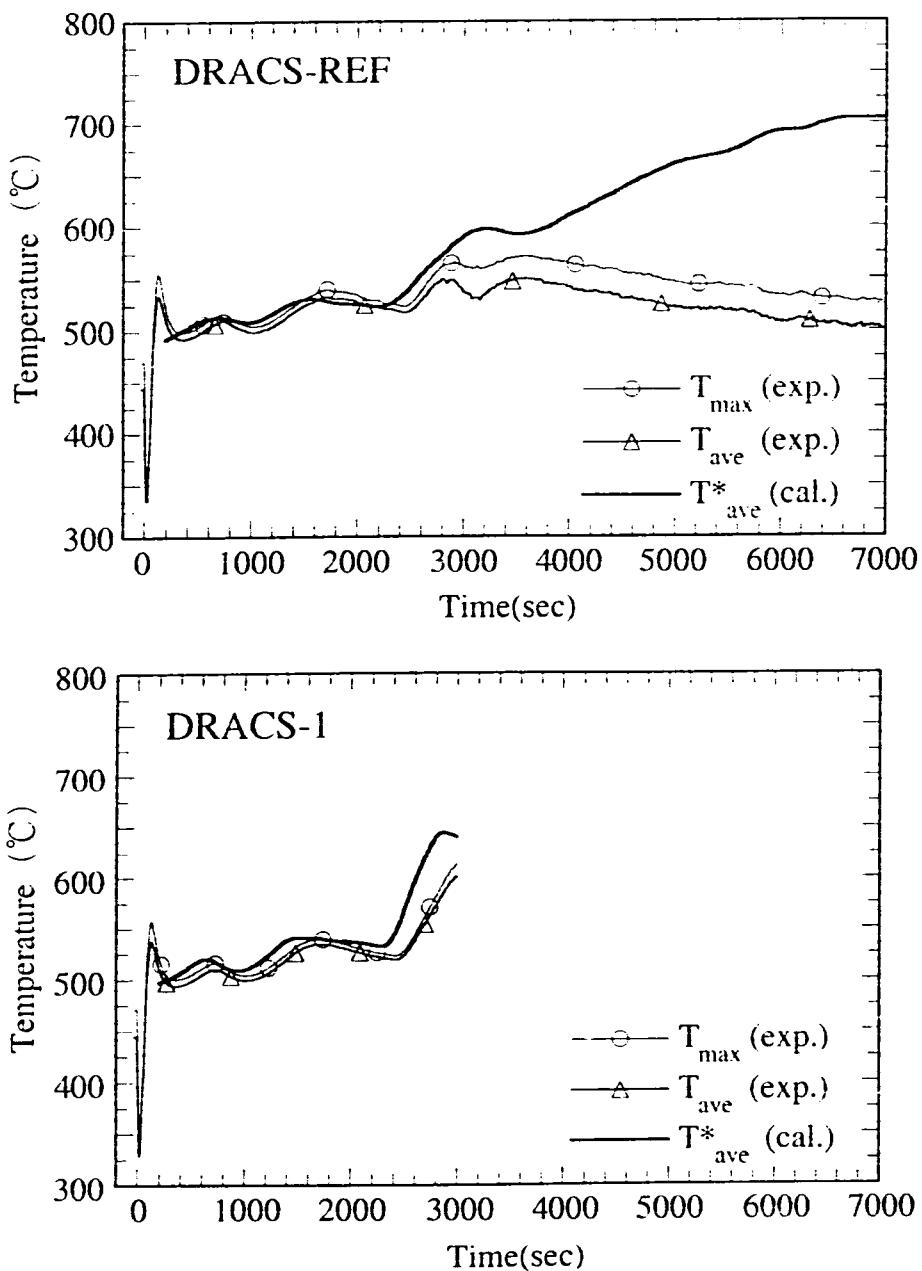


Fig.6.2-1 Comparison between Experimental Temperatures and $T^*_{\text{ave}} \left(W/(Q \cdot Cp) + T_{in} \right)$ (DRACS Transient Tests)

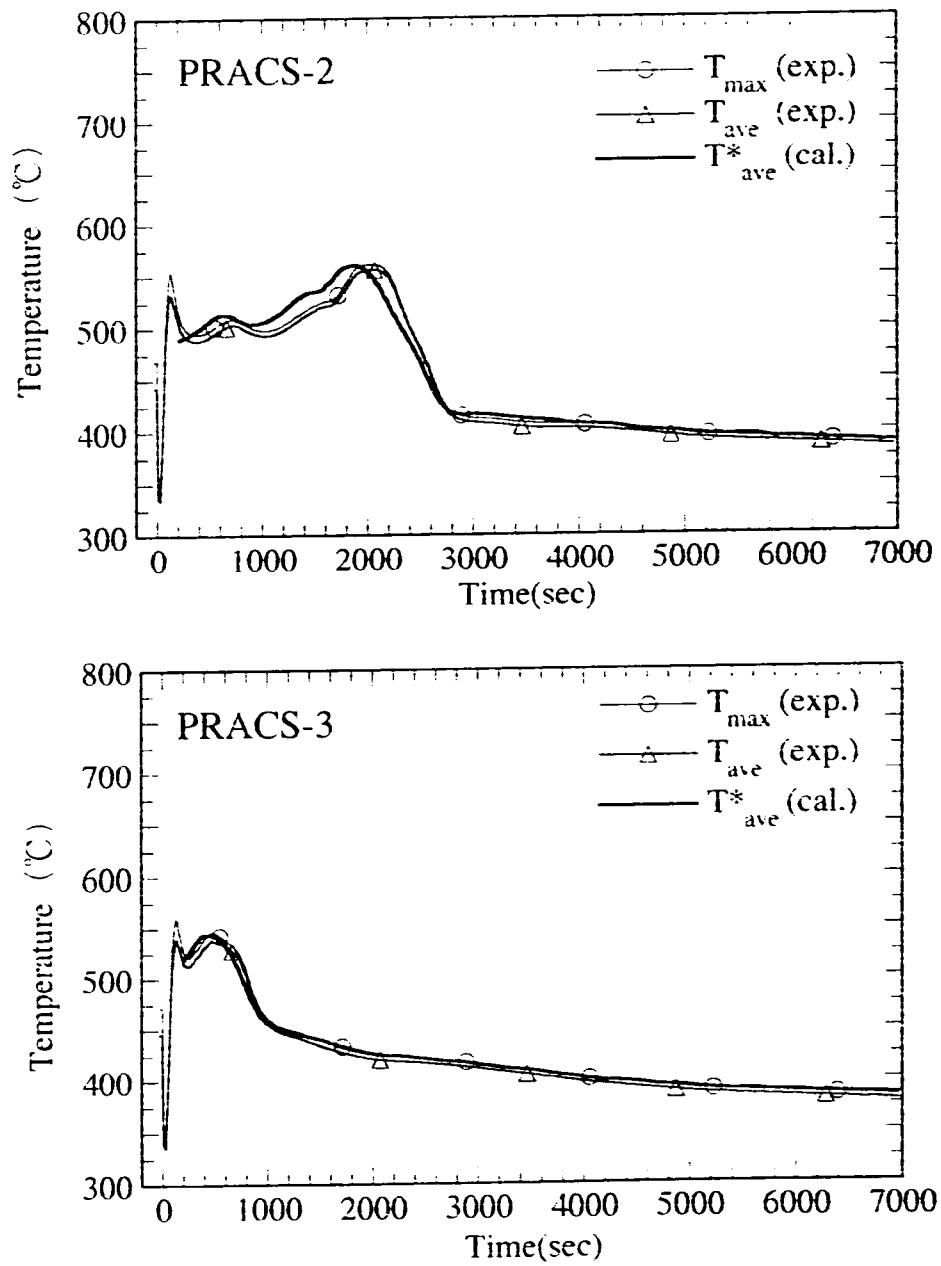
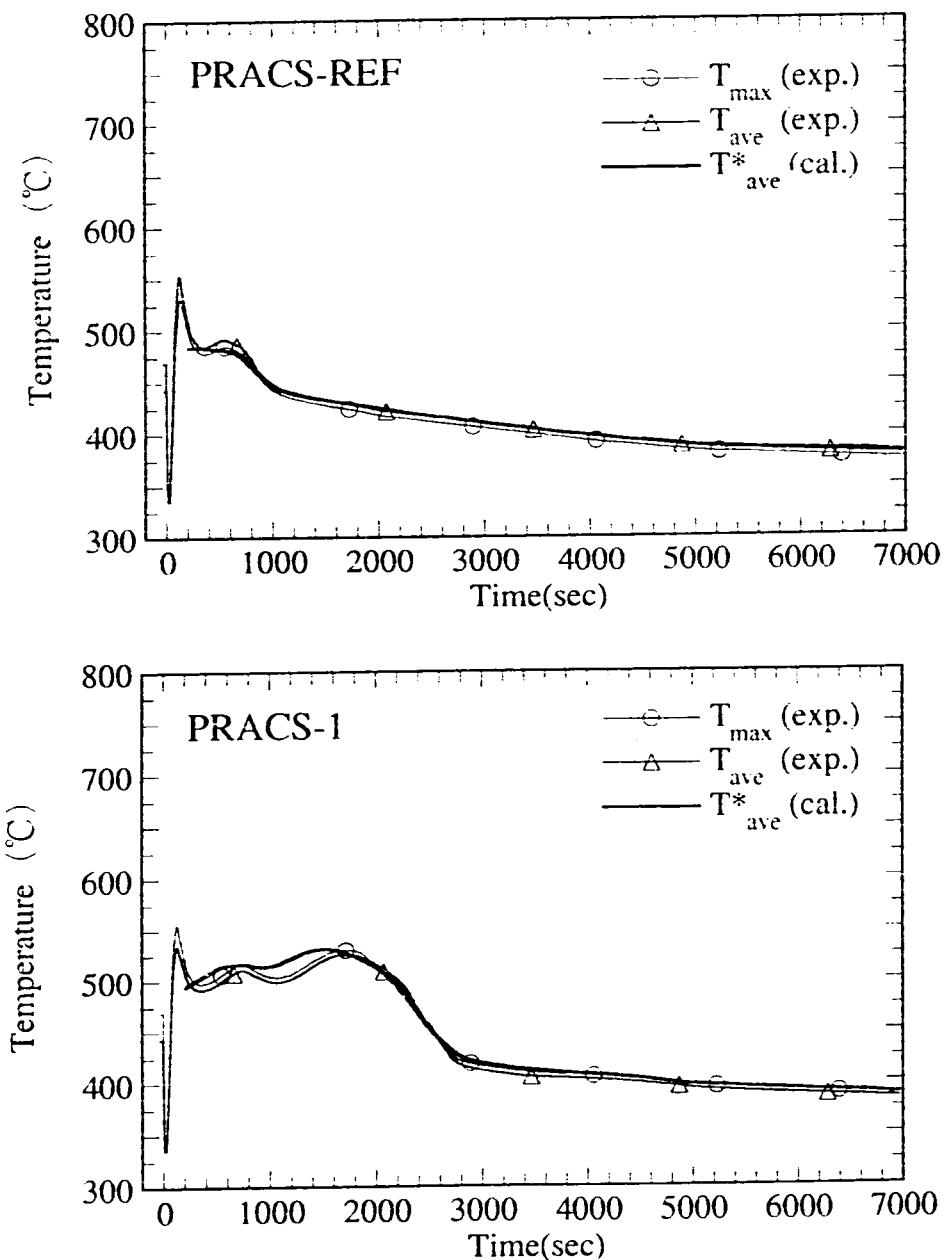


Fig.6.2-2 Comparison between Experimental Temperatures and T_{ave}^* ($(W/(Q \cdot Cp) + T_{in})$) (PRACS Transient Tests)

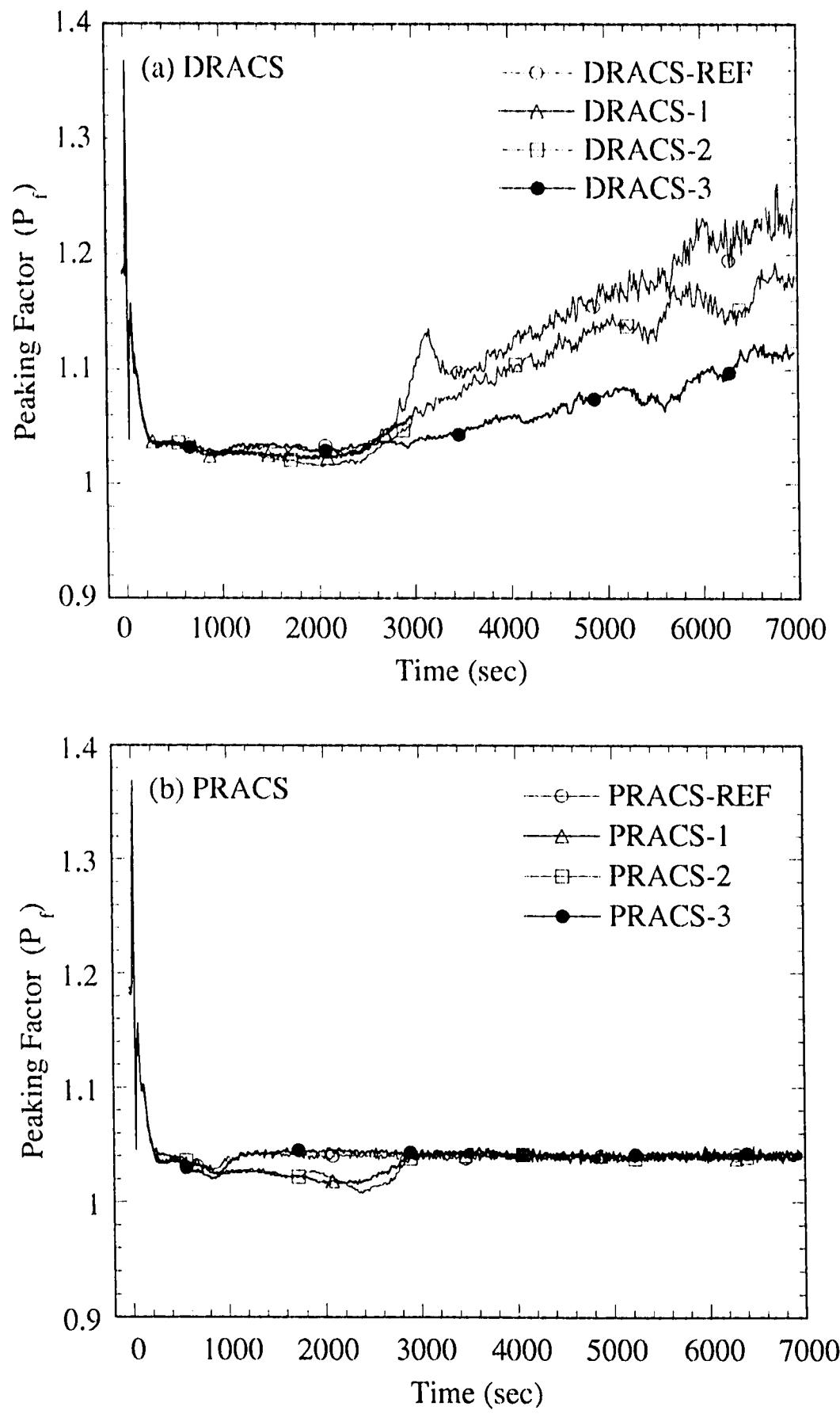


Fig.6.3-1 Time Variations of Peaking Factors on BI Cross Section

Appendix

Appendix

付録1：集合体内逆流現象と自然循環ヘッドに関する追加考察

本文4章において、DRACSを用いた過渡試験では、IHX二次系自然循環の停止に伴い、一次系自然循環流量が急激に低下し、周辺集合体で逆流現象が生じたことを示した。また、各集合体の出入口温度より、逆流現象は6体ある周辺集合体のうち、3体の周辺集合体（A,B,F）で生じたものと判断した。ここでは、更に、自然循環ヘッドの時間変化から逆流現象の発生を検討した結果を示す。

(1) 集合体内通過流速と自然循環ヘッドの関係式

右図に示すような3体の集合体からなる一次系ループのモデルを考えた場合、上昇流を正にとると、1~3の各集合体を経路とするB~T間のHot Legでのベルヌーイの式は各々次の様になる。

$$\Delta P = P_B - P_T = \zeta_1 \frac{\bar{\rho}_1}{2} |u_1| u_1 + \bar{\rho}_1 g h \quad (1)$$

$$\Delta P = P_B - P_T = \zeta_2 \frac{\bar{\rho}_2}{2} |u_2| u_2 + \bar{\rho}_2 g h \quad (2)$$

$$\Delta P = P_B - P_T = \zeta_3 \frac{\bar{\rho}_3}{2} |u_3| u_3 + \bar{\rho}_3 g h \quad (3)$$

また、同様にCold Legでは以下の様になる。

$$\Delta P = P_B - P_T = \zeta_c \frac{\bar{\rho}_c}{2} |u_c| u_c + \bar{\rho}_c g h \quad (4)$$

但し、

P_B : B点での圧力 [Pa]

P_T : T点での圧力 [Pa]

ζ : 損失係数,

u_i : 集合体*i*における通過流速 [m/s]

u_c : Cold Legでの流速 [m/s]

g : 重力加速度 [m/s^2]

h : B点~T点での高低差 [m]

$\bar{\rho}_i$: 集合体*i*を経路とするHot Legでの平均的密度 [kg/m^3]

$$\bar{\rho}_i = \frac{1}{h} \int_b^t \rho dh$$

$\bar{\rho}_c$: Cold Legでの平均的密度 [kg/m^3]

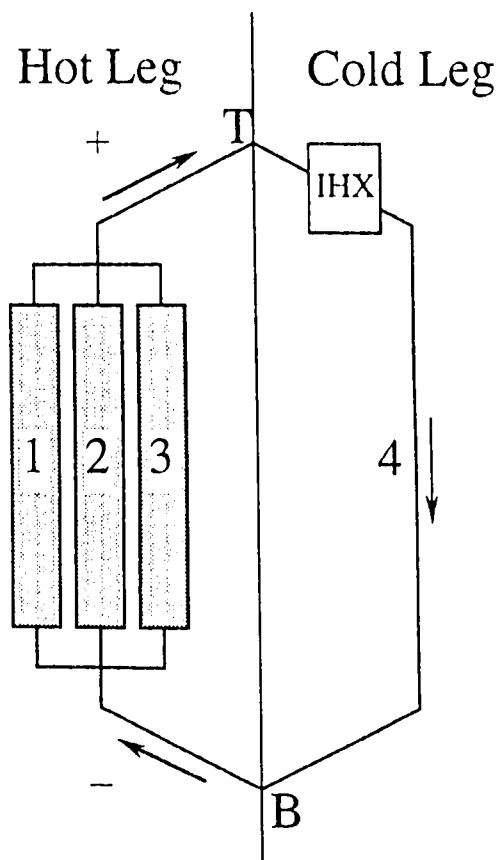


図 一次系ループモデル

ここで、例えば集合体1の経路に関しては、以下の(5)~(7)式が成り立ち、

$$\zeta_1 \frac{\rho_1}{2} |u_1| u_1 = \zeta_e \frac{\rho_2}{2} |u_2| u_2 + (\bar{\rho}_2 - \bar{\rho}_1) gh \quad (5)$$

$$\zeta_1 \frac{\rho_1}{2} |u_1| u_1 = \zeta_e \frac{\rho_3}{2} |u_3| u_3 + (\bar{\rho}_3 - \bar{\rho}_1) gh \quad (6)$$

$$\zeta_1 \frac{\rho_1}{2} |u_1| u_1 = \zeta_e \frac{\rho_e}{2} |u_e| u_e + (\bar{\rho}_e - \bar{\rho}_1) gh \quad (7)$$

(5)+(6)+(7)より、集合体1の通過流速₁について展開すると、次式を得る。

$$u_1 = \frac{2}{3 \cdot \zeta_1 \bar{\rho}_1 |u_1|} \{ \zeta_2 \frac{\bar{\rho}_2}{2} |u_2| u_2 + \zeta_3 \frac{\bar{\rho}_3}{2} |u_3| u_3 + \zeta_e \frac{\bar{\rho}_e}{2} |u_e| u_e + (\bar{\rho}_2 + \bar{\rho}_3 + \bar{\rho}_e - 3\bar{\rho}_1) gh \} \quad (8)$$

すなわち、一般化して示せば、集合体*i*の通過流速_iは次式で表すことができる。

$$u_i = \frac{2}{n \cdot \zeta_i \bar{\rho}_i |u_i|} \{ \sum_{j=1}^{i-1} \zeta_j \frac{\bar{\rho}_j}{2} |u_j| u_j + \sum_{j=i+1}^n \zeta_j \frac{\bar{\rho}_j}{2} |u_j| u_j + \zeta_e \frac{\bar{\rho}_e}{2} |u_e| u_e \\ + \sum_{j=1}^{i-1} (\bar{\rho}_j - \bar{\rho}_i) gh + \sum_{j=i+1}^n (\bar{\rho}_j - \bar{\rho}_i) gh + (\bar{\rho}_e - \bar{\rho}_i) gh \} \quad (9)$$

(9)式から、集合体*i*の通過流速_iに作用する浮力ヘッドは、集合体*i*以外の集合体を経路とするHot LegおよびCold Legの各浮力ヘッドと、集合体*i*を経路とするHot Legの浮力ヘッドとの差の総和となる。また、図1で示している浮力ヘッドおよび集合体*i*以外の経路での圧力損失の和が負になった場合に、集合体*i*で逆流が生じることになる。PLANDTL-DHX試験装置では Hot Legにおける圧力損失係数が Cold Legよりも大きいことから、全経路が順流の状態では図1内の圧力損失項は正となる。

$$\sum_{j=1}^{i-1} \zeta_j \frac{\bar{\rho}_j}{2} |u_j| u_j + \sum_{j=i+1}^n \zeta_j \frac{\bar{\rho}_j}{2} |u_j| u_j + \zeta_e \frac{\bar{\rho}_e}{2} |u_e| u_e > 0$$

従って、着目経路*i*が逆流(_i<0)となる為の必要条件は図1内の浮力ヘッドが負になることである。そこで、逆流発生の厳密な検討を行うならば、図1に示している浮力ヘッドおよび集合体*i*以外の経路での圧力損失の和の値で評価すべきであるが、上記の観点から、ここでは、浮力ヘッドのみ着目し、浮力ヘッドと一次系自然循環流量の時間変化を比較した。

(2) DRACS-REFケースの一次系自然循環流量と浮力ヘッドの時間変化の比較

逆流が発生した代表ケースとして、DRACS過渡試験の基本ケースDRACS-REFについて、各集合体に作用する浮力ヘッドの時間変化を求めた結果をFig. 1に示す。

PLANDTL-DHX試験装置は7体の集合体を有するため、(9)式の浮力ヘッドに関する

項の式に従い、中心集合体における浮力ヘッド (H_{center}) は(10)式より算出した。また、他の集合体についても同様な式より浮力ヘッドを算出した。

$$H_{center} = (\rho_A + \rho_B + \rho_C + \rho_D + \rho_E + \rho_F + \rho_{cold} - 7\rho_{center}) gh \quad (10)$$

中心集合体および周辺集合体C,Dでは全時間を通して正の浮力ヘッドを示しているが、周辺集合体A,B,Fにおいては2800秒頃から負の浮力ヘッドを示している。特に、周辺集合体Aでは負の浮力ヘッドが大きく生じている。本文4章では、各集合体の出入り温度状況から、逆流は周辺集合体A,B,Fで生じたものと判断したが、ここで算出した浮力ヘッドの時間変化より、周辺集合体A,B,Fでは逆流が発生し得る浮力ヘッドであったことが明らかに確認できる。

Fig.2にはDRACS-REFの一次系自然循環流量と浮力ヘッドの時間変化を比較した結果を示す。ここで、浮力ヘッドの周辺1は周辺集合体A,B,Cの浮力ヘッドの和であり、周辺2は周辺集合体D,E,Fの浮力ヘッドの和である。また、全浮力ヘッドは全集合体の浮力ヘッドの総和である。自然循環流量と浮力ヘッドの時間変化を比較すると、ほぼ類似した変化を示し、浮力ヘッドの変化に応じて、自然循環流量が変化している。特に、周辺1の浮力ヘッドが負に転じた2800秒頃からは、周辺1の通過流量も負に変化しているのがわかる。

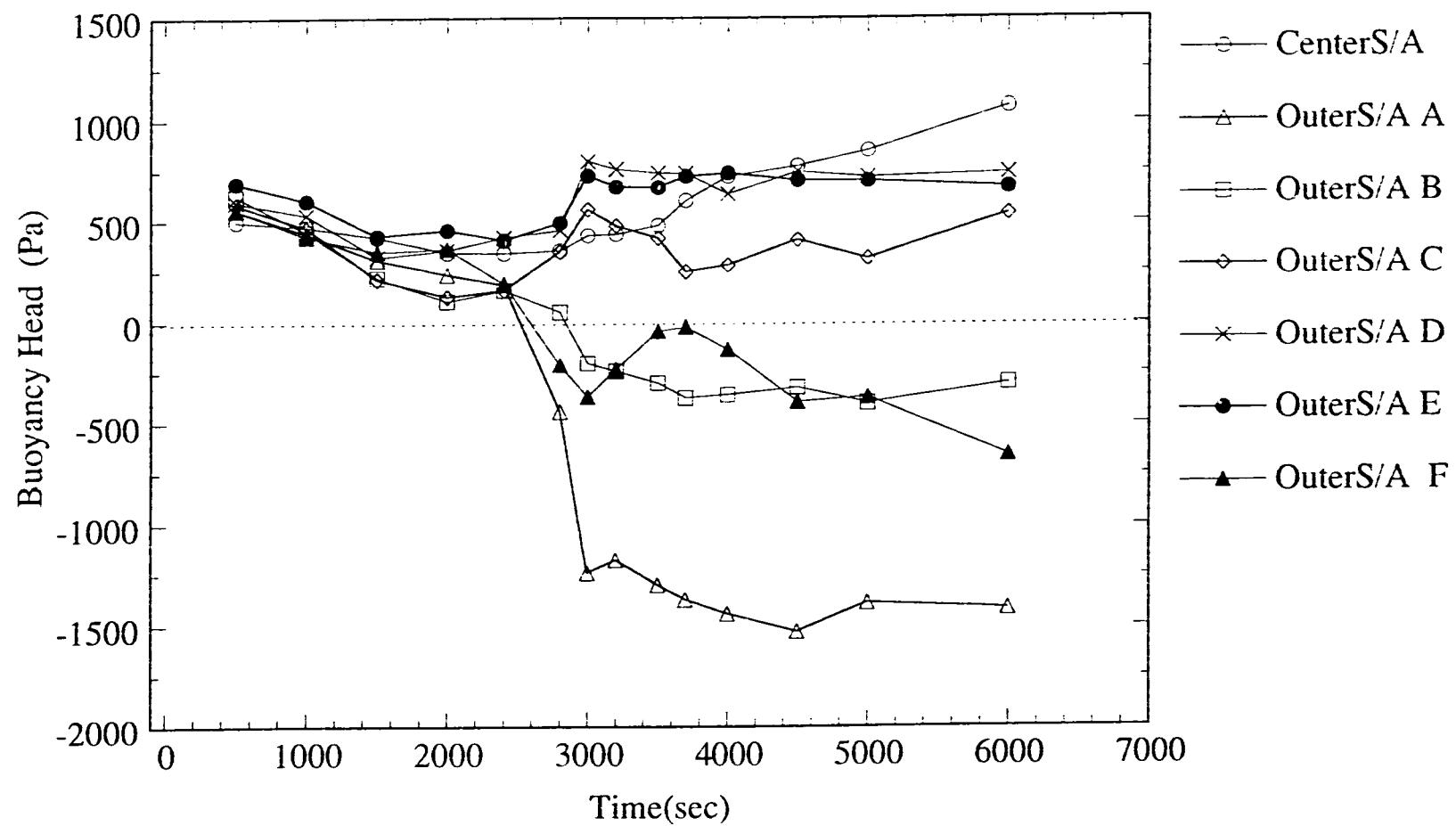


Fig. 1 Time Histories of Buoyancy Heads of Subassemblies (Case: DRACS-REF)

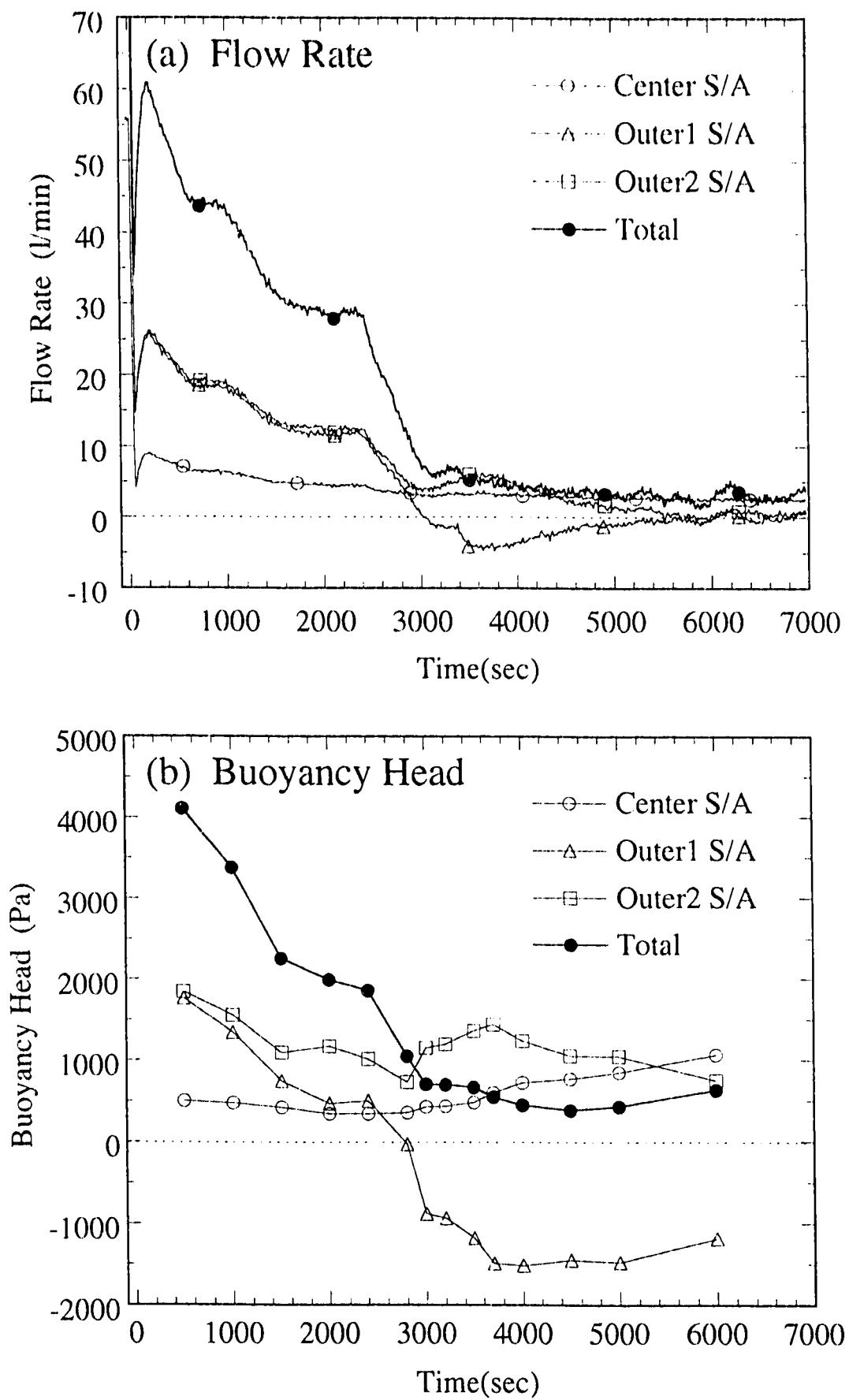


Fig. 2 Time Histories of Flows and Buoyancy Heads of Subassemblies
(Case: DRACS-REF)