PNC TN9410 97-047

高速炉の自然循環時インターラッパーフロー現象に関する実験研究

―炉心冷却効果と自然循環流量低減効果の評価―

1997年3月

動力炉・核燃料開発事業団
大洗工学センター

公　開　資　料
PNC TN9410 97-047
1　9　9　7 年 3 月

高速炉の自然循環時インターラッパーフロー現象に関する実験研究
－ 炉心冷却効果と自然循環流量低減効果の評価 －

桃井　一光*、林　謙二*、上出　英樹*
西村　元彦*、小柿信寿*

要　旨

高速炉の崩壊熱除去系として原子炉容器の上部プレナム内に冷却器（DHX）を設けるDRACS（Direct Reactor Auxiliary Cooling System）を採用した場合、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）が発生し、集合体内部をギャップ側から冷却し、炉心最高温度を低下させる効果が期待できる。その反面、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、更にIWFによる冷却で炉心部上部非発熱部の温度低下により、自然循環流量が減少して炉心部温度を上昇させることも考えられる。DRACSを採用する上では、IWFの冷却特性を把握しその有効性を明確にする必要がある。本報では、IWFの炉心冷却特性を自然循環状態下で把握する為、PLANDTL-DHX装置による自然循環定常ナトリウム試験を実施した。熱出力および一次系ループの流動抵抗を試験パラメータとし、DRACSを用いた体系でIWFを発生させたケースとPRACS（冷却器をIHX上部に内蔵する方式：Primary Reactor Auxiliary Cooling System）を用いた体系でIWFが発生しないケースの自然循環流量および模擬炉心部温度を比較することによりIWFの特性を把握した。

PRACSで除熱した場合に対するDRACSで除熱した場合の自然循環流量の低下は、周辺集合体通過流量で大きく現れ、中心集合体通過流量では小さい。これは、IWFによる冷却が中心集合体よりも周辺集合体で強く作用し、浮力ヘッドの違いから集合体間で流量が再配分されたと考えられる。また、一次系ループの主弁開度を15%以下にしてDRACSで除熱したケースでは、一部の周辺集合体で逆流が発生した。DRACSで除熱した場合には、自然循環流量の熱輸送による除熱の他に、IWFによるギャップ部からの冷却と逆流の発生により温度が低下した周辺集合体からの冷却が中心集合体に対して径方向から作用する。径方向からの冷却効果は自然循環流量が1%（実機定格比率）以下になってから顕著に作用し、中心集合体最高温度を低下させる。

DRACSを用いた場合では、循環流量による除熱が期待できない様な自然循環流量が極めて少ない場合の炉心冷却に対して、IWFを含む炉内自然対流による径方向からの冷却効果が有効に作用することを確認した。

* 動燃事業団、大洗工学センター、安全工学部、原子炉工学室

COMMERCIAL PROPRIETARY
PNC TN9410 97-047
March, 1997

Experimental Study on Inter-Wrapper Flow Phenomena during Natural Circulation Decay Heat Removal in Fast Reactors

- Effects on Natural Circulation Flow Rate and Core Cooling -

K. Momoi*, K. Hayasi*, H. Kamide*,

M. Nisimura*, N. Kokaki*

ABSTRACT

The evaluation of core thermohydraulics under natural circulation conditions is of significance in order to utilize passive safety features of fast reactors. When the heat exchangers of the decay heat removal system are operated in the upper plenum of a reactor vessel, cold sodium provided by the heat exchangers can penetrate into the gap regions between fuel subassemblies; this natural convection phenomenon is called inter-wrapper flow (IWF). During natural circulation decay heat removal, IWF will significantly modify the flow and temperature distributions in the subassemblies. IWF can decrease the temperature in the subassemblies. On the other hand, the natural circulation head will be reduced by temperature reduction in the upper non-heated section of subassemblies due to the IWF cooling. These positive and negative effects of IWF are our main concerns in this report.

Sodium experiments were carried out to investigate these phenomena. In a test section, seven subassemblies are bundled and connected to an upper plenum with a heat exchanger. The experiments were carried out under steady state conditions. Experimental parameters were power in the core and flow resistance in the primary loop. Decrease of natural circulation flows in the subassemblies were recognized. Inter-subassembly flow redistribution was also seen due to larger cooling in outer 6 subassemblies and smaller cooling in the center subassembly. In the extremely low flow conditions (large flow resistance in the primary loop), reverse flow was registered in 2 or 3 outer subassemblies. Cooling effect of IWF was also observed. It consisted of direct cooling through the wrapper tube, flow redistribution among subassemblies (higher flow rate for hotter subchannel), and cold reverse flow from the upper plenum.

When the flow resistance was small in the primary loop, i.e., flow rate was larger than 1% of reactor rated conditions (based on subassembly averaged flow velocity), the cooling effects and the negative effect of IWF were not significant. When the flow rate was less than 1%, the cooling effect of IWF increased and exceeded the flow reduction effects. IWF was effective on the core cooling under extremely low flow conditions.

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

目　次

List of Tables

List of Figures

Appendix

1．序論

高速炉の信頼性、安全性を高める上で、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。高速炉の自然循環崩壊熱除去時の炉心通過流量は定格時の数％程度となり、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。従って炉心部最高温度等を評価する上で、浮力の影響を考慮する必要がある。また、崩壊熱除去用冷却器を上部プレナム内に浸漬するDRACS（Direct Reactor Auxiliary Cooling System）を採用する場合は、炉内冷却器（DHX）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して、低温ナトリウムが集合体の出口部から内部に潜り込む集合体内潜り込み現象(1)や低温ナトリウムが集合体間ギャップに潜り込み自然対流して、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（IWF）現象(2)など、炉心とプレナム間で熱的な相互作用（炉心―プレナム相互作用）が生じ得る。このように自然循環時の炉心部では複雑な熱流動現象が発生すると考えられる。

動燃事業団では、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、IWF現象など）について実験、解析の両面から現象の解明、評価手法の開発を進めている。(1)～(8) IWF現象に関しては、これまでに、定常試験および実機（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、循環流量および集合体出力変化に対するIWFの基本的な特性について把握した。(4)～(5) IWF現象に関しては、集合体内部を集合体間ギャップから冷却して炉心部最高温度を低下させる効果が期待できる。その反面、DHXの除熱により自然循環流路の中で上昇パスの一部である上部プレナムが低温になること、また、IWFの発生により炉心部の上部非発熱部の温度が低下することにより、自然循環ヘッドが減少し、自然循環流量が低下することで炉心部の温度上昇を助長する方向に作用する可能性も考えられる。DRACSを用いた自然循環除熱時には、この様な相反する効果が複合して作用することから、IWFの冷却特性を十分に把握し、DRACSを用いた除熱方法の有効性を明確にする必要がある。

そこで、炉心冷却に対するIWFの特性を自然循環状態下で把握することを目的に、7本の集合体からなる模擬炉心を有するPLANDTL-DHX試験装置を用いてナトリウム定常試験を実施した。IWFに対しては、崩壊熱および自然循環流量の大きさが影響を及ぼすと考えられる。そのため、試験パラメータには集合体熱出力、並びに、一次系ループの主弁開度を選定し、主弁開度を絞ることで1次系ループの流動抵抗を変えて自然循環流量の大きさを変化させた。また、IWFによる冷却効果を明

確に把握するため各試験パラメータ条件下について、DRACSで除熱してIWFを発生させたケースとIWFが発生しないケースとしてPRACS（Primary Reactor Auxiliary Cooling System：冷却器をIHX上部に内蔵させる方式）で除熱したケースを並行して実施した。PRACSで除熱したケースでは除熱をIHX内上部の冷却器で行うため、上部プレナム内の温度と炉心出口の温度の間に大きな温度差は生じないため、IWFはほとんど発生しない。ここでは、両ケースの自然循環流量および炉心部温度挙動の比較から、炉心部冷却に対するIWFの冷却特性を把握し、DRACS除熱の有効性について検討を行った。

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 Decay Heat Exchanger）装置のループ構成をFig.2.1に示す。装置は1次主冷却系ループ、2次主冷却系ループ、崩壊熱除去系ループからなる。1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、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本はそれぞれ中心集合体の左右で分けた3体づつの周辺集合体につながっており、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独立に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左右の周辺集合体で独立に設定することができる。なお、本試験装置では模擬炉心部の熱出力は1.2 MW、ナトリウム流量は1200 ℓ/ min まで設定できる。

2次主冷却系には空気冷却器、電磁ポンプ、流量調節弁を備え、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。

崩壊熱除去系は上部プレナム内に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　模擬炉心部構造と熱電対取付け箇所

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とほぼ同じ寸法にしてあり、実機が217～271本ピンであるのに対し、37本ピンの部分モデルで模擬している。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本のヒーターピンとラッパー管からなり、集合体内部の模擬性は中心集合体に比べて高くないが、軸方向発熱長さについては中心集

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ほぼ同じ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鉢巻きタイプではなく、長さ30mmの丸棒を軸方向3カ所に設けてある。このため上部プレナム内の低温流体がギャップに上方から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、2次元の空間温度分布を把握できるようにしてある。

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、DRACSの炉内冷却器（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）に一箇所だけとし、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°方向などの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）等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

中間熱交換器はFig.2.5に示すように管内1次、2次側バッフル板つき斜交流タイプとした。上部プレナムからの1次系ナトリウムはシェル＆チューブ型中間熱交換器の直管式伝熱管の管側に入り、胴側の2次系ナトリウムと熱交換される。1次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1次系の伝熱管内の軸方向、伝熱管入口部および2次系の伝熱管外、PRACS用冷却器コイルの周辺に設置してある。

2．5　崩壊熱除去用補助冷却器（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 ϕ 19.0×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は流路構成などはDRACSと

およそ同じであるが、冷却コイルが外径ϕ42.7×t 2.8 mmの2本のヘリカルコイルである。

2．6 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、A900ミニコンピューター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16msec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、流量較正等を実施した後、EWS（Appollo）によりデータ処理プログラムを用いて処理した。熱電対の相対較正は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1000ℓ/minに設定し、炉容器出口温度が300℃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、16msec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160mm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と相対較正をあわせて実施した。今回の試験では極低流量を計測する為、一次系ループの低流量計（EMF102：～50ℓ/min）については落下法で絶対較正を行い、この流量計を基準にして3系統の集合体入口配管に設置してある流量計（EMF103,EMF104,EMF105）を0～50ℓ/minの範囲で相対較正した。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

自然循環時の崩壊熱除去系として、上部プレナム内に冷却器を浸漬するDRACS方式を用いた場合には、炉内冷却器（DHX）により上部プレナムが冷やされることで、インターラッパーフロー（IWF）現象が炉心部で発生する。IWFに関しては、炉心部の集合体間ギャップに上部プレナムからの低温ナトリウムが潜り込むため、集合体内部をギャップ部から冷却して炉心最高温度を低下させる効果が期待できる。しかし、その反面、DHXからの冷却で上部プレナム底部に低温ナトリウムが成層化し、更に、IWFの発生で炉心部の上部非発熱部の温度が低下することで、自然循環ヘッドは減少し、逆に、自然循環流量が低下して炉心部の温度上昇を助長する効果も生じると考えられる。ここでは、炉心部冷却に対するIWFの冷却特性を自然循環状態下で把握することを目的に、ナトリウムを用いた自然循環定常試験を実施した。IWFの特性に関与する因子としては、炉心槽ギャップの形状、崩壊熱レベル、自然循環流量、集合体間の温度分布、DHXによる除熱割合などが考えられる。本試験では、崩壊熱レベルおよび自然循環流量に対するIWFの特性に主眼をおき、試験パラメータには集合体熱出力および１次主冷却系ループの主弁（SV101M）開度を用いた。Table 3.1に試験パラメータを示す。集合体熱出力は実機で想定される自然循環除熱時の崩壊熱レベルに合わせ、実機定格運転時の1～2.5%相当（ピン表面熱流速換算）の出力範囲で変化させた。また、７本の集合体の出力は同一とした。１次系ループの主弁開度を試験パラメータにしたのは、１次系ループの流動抵抗を変えることで自然循環流量の大きさを変化させる為であり、主弁開度は100～5%の範囲で変化させた。これら各試験パラメータの条件下において、DRACSで除熱してIWFを発生させたケースとPRACS方式のIHX内上部の冷却器で除熱してIWFが発生しないケースを並行して実施した。尚、集合体熱出力が高く、主弁開度を絞った条件下では、模擬炉心部温度が装置許容温度（650℃）を越える場合も考えられる為、試験は温度をモニターし許容される範囲内で実施した。

3．2 試験条件

PRACSおよびDRACSで除熱した各試験ケースの試験条件をTable 3.2～3.3 に示す。試験ケース名は設定したパラメータ条件がわかるように、例えば、DRACSで除熱したケースで集合体熱出力1%、主弁開度100%のケースの場合にはD-1P100SVと付け、PRACSで除熱したケースでは先頭の文字をPにかえて示してある。

以下に試験条件の設定手順を示す。

（1）集合体入口流量調節弁の弁開度設定

試験を実施する前に、集合体入口配管に設置されている3系統の流量調節弁の弁開度の設定を行った。PLANDTL-DHX装置では、中心集合体と周辺集合体で模擬燃料ピンの外径および本数が異なり、入口配管の引き回しも異なる為、中心集合体と周辺集合体では流動抵抗に差がある。これを補正する意味で、各入口配管に設置してある流量調節弁の開度設定を行った。流量調節弁の弁開度の設定は、集合体熱出力をゼロとし、1次系ループを300℃等温状態に保持し、1次系ループの主弁を全開にして実機定格運転時の2%相当の流量をポンプで循環させた条件下において、中心集合体入口の流量調節弁（SV105M）は全開とし、周辺集合体入口の2つの流量調節弁（SV103M、SV104M）を調節して各集合体通過流量が等配分になる弁開度、すなわち、各々約60%開度程度に設定した。以後、これら集合体入口流量調節弁の弁開度の再現性を保持する為、弁開度を固定して各試験ケースを実施した。尚、試験期間の都合上、試験は2回に分けて実施している。そのため、その前後で流量調節弁の弁開度の設定を同じ手順で再設定している。従って、前期に実施したケース（主弁開度100%、20%の全ケース）と後期で実施したケース（主弁開度15%、10%、5%の全ケース）で弁開度に若干の差が生じている。

（2）1次系ループの主弁開度設定

集合体入口流量調節弁の開度は（1）で設定した条件で保持し、1次系ループの主弁開度は試験パラメータとして100～5%の範囲で変化させた。駆動機構と弁本体との遊びのため弁開度の正確な再現性を得ることが難しいことから、目的とする弁開度に設定した後は、同じ弁開度の試験ケースをDRACSおよびPRACS除熱とも全て続けて実施し、各ケースの弁開度を同一とした。また、各弁開度での1次系ループの一巡の流動抵抗特性を確認するため、試験ケースを実施する前に、300℃等温状態でポンプにより循環流量を変化させて、ポンプ前後の差圧を計測した。測定結果を付録1に示す。

（3）集合体熱出力および冷却器の条件設定

集合体熱出力条件の設定は、（2）に示した1次主冷却系ループの主弁開度の設定を行った後、実機定格運転時の2%相当の流量を循環ポンプで与えてからヒーターピンを通電して目的とする熱出力に設定した。熱出力の設定が完了した後、循環ポ

ンプを停止して１次主冷却系ループを自然循環状態にした。一方、除熱は崩壊熱除去系で行い、二次主冷却系ループはバルブを閉として停止した。冷却器の運転条件は、DRACS除熱およびPRACS除熱ともに崩壊熱除去系ループを90ℓ/minの強制循環とし、空気冷却器（A/C）の風速を調節することで炉心部熱出力を100%除熱した。これにより、集合体入口温度を約300℃で保持し、自然循環状態が定常に達するまで約２４時間安定待ちをした。また、熱出力が高い2.5%の条件では冷却器の除熱能力の制限により集合体入口温度は300℃を保持していないが、最大除熱能力で運転して自然循環状態が定常に達するまで約２４時間維持した。尚、DRACSで除熱した場合に生じる上部プレナムの温度低下および模擬炉心部の上部非発熱部での温度低下に伴う浮力ヘッドの低下による影響を見る為に、同じ試験パラメータ条件下でDRACSで除熱したケースとPRACSで除熱したケースのコールドレグ側での浮力ヘッドに差が生じない様に、IHX出口から集合体入口までの温度はできるだけ同じにした。自然循環状態が安定していることを自然循環流量の変化および上部プレナム内の上部、中間部、底部の温度変化のトレンド図で確認した後、試験データをサンプリング間隔0.16秒で300秒間で収録した。

4．試験結果

4．1　1次系自然循環流量

ここでは、PRACSで除熱した場合とDRACSで除熱した場合の1次主冷却系ループで得られた自然循環流量の結果を比較する。

Fig. 4.1-1はPRACSおよびDRACSで除熱した各ケースの全自然循環流量を集合体熱出力に対してプロットした結果である。横軸の集合体熱出力および縦軸の全自然循環流量は、実機（100万kW級大型炉）の定格運転時の出力および流量に対する比率（それぞれ炉心燃料集合体燃料ピン表面熱流速、集合体内平均流速換算）で示してある。上の図のPRACSで除熱した場合を見ると、集合体熱出力を変化させた場合は、全自然循環流量は熱出力が高くなるにつれて増加している。これは、集合体の熱出力が高い場合ほど集合体内の温度上昇幅が大きくなり、自然循環浮力ヘッドが増大している為である。また、一次系ループの主弁（SV101M）開度を変化させた場合は、弁開度が小さい場合ほどループ内の圧力損失が大きくなるため、全自然循環流量は減少している。また、熱出力に対する全自然循環流量の増加の割合も弁開度が大きい場合に比べ小さくなっている。一方、下の図のDRACSで除熱した場合ではPRACSで除熱した場合と同様な傾向を示しているが、熱出力および弁開度条件が同じケース同士で全自然循環流量を比較すると、DRACSで除熱したケースは全てPRACSで除熱したケースよりも全自然循環流量が低下している。

Fig. 4.1-2a～2bにはPRACSで除熱したケースとDRACSで除熱したケースの中心集合体および周辺集合体を通過する自然循環流量を全自然循環流量に対してプロットした結果を示す。周辺集合体の通過流量は、6体の周辺集合体を3体ずつ2ブロックに分け、各々に連結された入口配管で計測しており、周辺1（Outer S/A 1）は90°側の3集合体A,B,C（Fig. 2.2を参照）の合計通過流量であり、周辺2（Outer S/A 2）は270°側の3集合体D,E,Fの合計通過流量である。Fig. 4.1-2aのPRACSで除熱したケースの結果を見ると、一次系ループの主弁開度が100%の場合（図a）では、全自然循環流量が約1.4%の時に中心集合体と周辺集合体の通過流量が一致している。しかし、全自然循環流量がそれより大きくなると各集合体の通過流量は等配分されずに周辺集合体に比べ中心集合体の通過流量が若干大きくなっている。この様な傾向は、全自然循環流量が2%より小さくなる他の弁開度条件では見られず、全自然循環流量が2%以上になった時に顕著に現れている。100%以外の弁開度条件では、中心集合体と周辺集合体の通過流量に大きな差はなくほぼ一致している。一般に、PRACSで除熱した場合には、中心集合体の周辺集合体で流動抵抗に差がなければ、各集合体の熱

出力を同一とした条件下では自然循環流量は等配分されて各集合体を通過するものと考えられる。PLANDTL-DHX装置では中心集合体と周辺集合体で模擬燃料ピンの外径および本数が異なり、また、入口配管の引き回しも異なるため、中心集合体と周辺集合体では流動抵抗に差がある。これを補正する意味で、本試験では試験開始前に300℃等温下において2%相当の流量をポンプで循環させ、中心集合体と周辺集合体の通過流量が等配分になるように集合体入口配管にある3系統の流量調節弁の開度設定を行った。しかし、循環流量が2%相当から異なった場合には、集合体の通過流量に差が生じることが考えられる。本試験とは別に、集合体入口流量調節弁の開度を300℃等温下で2%相当の循環流量が等配分になるように設定し、ポンプで循環流量を変化させた時の集合体通過流量の配分特性を調べたところ（付録2参照）、2%流量近傍では中心集合体と周辺集合体の通過流量は一致していが、それより流量が高くなると周辺集合体よりも中心集合体の通過流量が大きくなり、逆に、流量が低いと中心集合体よりも周辺集合体の通過流量が大きくなる傾向を示すことが分かった。Fig.4.1-2aの100%弁開度で生じている中心集合体と周辺集合体の通過流量の差は、この様な装置固有の流量配分特性が影響して生じたものと考えられる。一方、Fig.4.1-2bのDRACSで除熱したケースでは、PRACSで除熱したケースとは異なり、全ての弁開度で中心集合体の通過流量が周辺集合体よりも大きくなっている。また、熱出力が高い場合ほど（全自然循環流量は大きくなるほど）その差は増大する傾向を示している。DRACSで除熱したケースで生じている集合体通過流量の差の原因は、PRACSの所で述べた試験装置固有の流量配分特性に因るものではなく、後に説明するインターラッパーフロー（IWF）によるギャップ部からの冷却効果が、中心集合体よりも周辺集合体に強く作用し、集合体間の浮力ヘッドに差が生じたためと考えられる。

Fig.4.1-3はPRACSおよびDRACSで除熱したケースの全自然循環流量と各集合体通過流量を熱出力および主弁開度条件が同じケース同士で比較した結果である。縦軸はPRACSで除熱したケースに対するDRASCで除熱したケースの自然循環流量の比であり、横軸は付録1に示した各主弁開度での1次系ループ一巡の圧力損失係数を示している。圧力損失係数は代表値として全循環流量が50ℓ/minの時の主循環ポンプの差圧と主配管平均流速から算出した値を用いている。全自然循環流量を比較した図aを見ると、流量比は圧力損失係数の増加に従い減少する傾向を示している。熱出力が1.5%～2.5%の場合では流量比がほぼ一致して低下しているが、1%熱出力の場合では他の熱出力の場合よりも圧力損失係数が小さい時（20%弁開度）から急激に流量

比が低下し、その後の圧力損失係数の増加に対しては緩やかに低下して、10%弁開度の時には各熱出力で流量比はほぼ一致している。100%弁開度時の流量比は約0.8であるが、10%弁開度時には約0.65まで低下し、PRACSで除熱したケースに比べてDRACSで除熱したケースの全自然循環流量は約35%減少している。各集合体の通過流量について比較して見ると、周辺1（図c）および周辺2（図d）では流量比の変化に若干の違いはあるが、全体的には圧力損失係数の増加（弁開度が小さい場合ほど）にともない、流量比が低下する傾向を示している。特に、周辺2でその傾向が顕著に見られている。しかし、中心集合体の通過流量については圧力損失係数の増加とともに流量比が増加する傾向を示し、周辺集合体の場合とは逆の現象を示している。特に、熱出力が1.5%および2%で弁開度を10%にしたケースでは、流量比が1より高くなり、PRACSで除熱したケースよりもDRACSで除熱したケースの方が中心集合体を通過する流量が大きくなっている。

以上の結果より、DRACSで除熱した場合は、弁開度が小さい時ほどPRACSで除熱した場合よりも全自然循環流量は減少する。しかし、集合体間では後に説明するIWFによる冷却効果の違いから通過流量に差が生じ、強く冷却される周辺集合体の通過流量は小さく、逆に、中心集合体の通過流量が大きくなる様な、集合体間での流量再配分効果が現れている。特に、主弁開度を絞り極端に全自然循環流量が減少したケースにおいては、PRACSで除熱したケースよりも中心集合体の通過流量は大きくなっている。つまり、DRACSで除熱した場合、中心集合体に対してはIWFによるギャップ部からの冷却効果の他に、この様な集合体間の流量再配分により通過流量が増加して温度上昇を抑える効果が同時に作用し得ることがわかる。

4．2 上部プレナム内温度

次に、PRACSで除熱した場合とDRACSで除熱した場合の上部プレナム内の温度を比較する。上部プレナム内の温度は周方向および径方向の数カ所に設置してある熱電対ツリーで測定したが、全てのケースにおいて各箇所で測定した軸方向温度分布はほぼ一致し有意な差は生じていない。ここでは、上部プレナムの代表として30°方向のプレナム中間部（TRI030：Fig.2.4参照）で測定した軸方向温度分布を示す。

Fig.4.2-1a～1bにPRACSで除熱した各ケースの上部プレナム内軸方向温度分布を炉心部熱出力ごとにまとめて示す。各ケースとも平坦な軸方向温度分布を示し、上部プレナムは一定温度で均一に保たれている。熱出力を一定にして一次系ループの主弁開度を変化させた場合は、弁開度が小さいケースほど上部プレナム内温度は高温

側にシフトしている。これは、弁開度が小さいケースほど自然循環流量が小さくなり、模擬炉心出口からはより高温のナトリウムが流出しているためである。一方、弁開度を一定にして熱出力を変化させた場合は、熱出力が高いケースほど上部プレナム内温度は高温になっている。

Fig.4.2-2a～2bにはDRACSで除熱した各ケースの上部プレナム内軸方向温度分布を示す。PLANDTL-DHX装置では、上部プレナム内に炉内冷却器（DHX）が一基270°方向に設置されており、模擬炉心出口高さより100mm低い位置から冷却された低温ナトリウムが流出する構造（Fig.2.3, 2.4 参照）になっている。DRACSで除熱したケースでは、DHXからの低温ナトリウムが上部プレナム底部に成層化するため、底部で温度が低く、上部で温度が高い軸方向温度分布を示している。熱出力を一定にして弁開度を変化させた場合は、1%および1.5%熱出力においてケース間で最大10℃程度の温度差が生じているが、2%および2.5%熱出力では各ケースの軸方向温度分布がほぼ一致しており、弁開度すなわち自然循環流量が異なるケース間でも上部プレナム内の温度に大きな差は生じていない。このことより、弁開度を絞り自然循環流量が小さいケースほど炉心部温度は高くなるため、上部プレナムとの間には大きな温度差が生じると考えられる。一方、熱出力を変化させた場合は、熱出力が高いケースほど上部プレナム底部と上部で温度差が大きくなっている。

4．3　模擬炉心部温度

（1）PRACSで除熱したケースの模擬炉心部温度挙動

まず、中心集合体内部の温度結果を示す。Fig.4.3-1はPRACSで除熱した各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である。横軸は集合体発熱部入口（発熱下端より160mm下方のAE断面）からの温度上昇幅を示し、縦軸の高さは集合体発熱上端を基準（0mm）として示してある。全てのケースにおいて、軸方向温度分布は発熱下端から発熱上端までほぼ直線的に温度上昇し、それより上方では一定温度となる分布形状を示している。熱出力一定条件下で一次系ループの主弁（SV101M）開度を小さくした場合は、ループの圧力損失が増大して自然循環流量が低下する為、発熱部での温度上昇が大きくなっている。また、集合体熱出力が高い場合ほど発熱部の温度上昇は大きく、温度分布は高温側にシフトしている。

Fig.4.3-2a～2bには各ケースの発熱上端断面（BI）および発熱中央断面（BD）における90 - 270°方向の径方向温度分布を示す。発熱上端断面（BI）では、各ケースの試験条件の違いにより温度レベルは異なるが、全てのケースにおいて集合体内部と

ギャップ部との間には大きな温度差はなく、中心および周辺とも集合体内部は出力が大きくなるにつれて分布がわずかに急峻になる傾向はあるものの、ほぼ平坦な温度分布形状を示している。また、発熱中央断面（BD）においても大きな違はなく、平坦な温度分布を示している。

次に、集合体間ギャップ部の温度状況を示す。PRACSで除熱した場合では、ギャップ部の温度挙動は各ケースとも同様な傾向を示していた。ここでは、代表ケースとして1%熱出力で一次系ループの主弁開度を10%、15%にしたケース（P-1P10SVとP-1P15SV）のギャップ部の温度状況を示す。Fig.4.3-3は両ケースの90 - 270°方向に位置する外側および内側ギャップでの軸方向温度分布である。両ケースとも上部中性子遮蔽体のギャップ間で温度差が若干生じ、内側ギャップに比べ両方向の外側ギャップの温度が低くなっている。PRACSで除熱した場合、定常化するのに十分な安定待ち時間をとれば炉心出口温度と上部プレナム内温度はほぼ一致すると思われるが、約24時間の安定待ち後にデータを収録した本試験の結果では、PRACSで除熱したケースでも若干ではあるが炉心出口温度と上部プレナム温度との間に約10～15℃の差が生じ、上部プレナム温度の方が低くなっている。そのため、円筒形状の炉心槽に囲まれた状態で上部プレナム底部に露出している（Fig.2.2, 2.3 参照）上部中性子遮蔽体域の外側ギャップの温度が内側ギャップより低くなったと考えられる。上部中性子遮蔽体より下方のギャップでは両ケースとも内外ギャップ部温度はよく一致している。Fig.4.3-4に両ケースの上部中性子遮蔽体各断面におけるギャップ部の温度時間変化を示す。1%熱出力で10%弁開度のケース（P-1P10SV）では、中性子遮蔽体上部のDC断面（模擬炉心出口より5cm下方）の90°方向の内側ギャップで若干緩やかな温度変動が見られるが、同じ断面の他のギャップおよび中性子遮蔽体下部のDA断面（模擬炉心出口より55cm下方）のギャップでは顕著な温度揺らぎは見られず、ほぼ一定した温度を示している。また、同様に1%熱出力で15%弁開度のケース（P-1P15SV）でも各断面のギャップ部では温度揺らぎは発生しておらず、一定した温度を示している。

以上の模擬炉心部温度の結果より、PRACSで除熱した全てのケースにおいてインターラッパーフロー（IWF）の発生がないことが確認できる。

（2）DRACSで除熱したケースの炉心部温度挙動

はじめに、中心集合体内部の温度測定結果を示す。Fig.4.3-5は中心集合体の上部中性子遮蔽体各断面の流路中央で計測した温度の時間変化である。DRACSで除熱し

た全てのケースで同様な温度状況を示しているため、ここでは代表ケースとして、自然循環流量が最も小さい5%弁開度のケース（D-1P5SVとD-1.5P5SV）の結果を示す。両ケースとも模擬炉心出口に最も近い中性子遮蔽体上部断面（DC）で激しい温度揺らぎが発生し、その下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）では温度揺らぎはほとんど発生していない。DC断面で見られる温度揺らぎは上部プレナム底部に成層化した低温ナトリウムが集合体内部に潜り込み、集合体内の高温上昇流と混合して生じたものと考えられる。この結果より、中心集合体内への低温ナトリウムの潜り込みは、集合体出口近傍のDC断面あたりで生じ、それより下には潜り込んでいないと考えられる。

Fig.4.3-6はDRACSで除熱した各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の測定結果である。横軸の温度は集合体発熱部入口（AE断面）からの温度上昇幅を示している。PRACSで除熱した場合（Fig.4.3-1参照）とは異なり、DRACSで除熱したケースでは発熱部より上の非発熱ピンバンドル部から上部中性子遮蔽体にかけて温度が低下する軸方向温度分布を示している。これは、DHXにより冷却された低温ナトリウムが、上部プレナムから集合体間ギャップ領域に、模擬炉心部出口を通って侵入し、自然対流するインターラッパーフロー（IWF）現象のためと考えられる。すなわち、IWFの発生により集合体内部が集合体間ギャップから冷却され、集合体上部ほどその冷却効果を強く受けるためである。1%熱出力の場合を見ると、一次系ループの主弁開度が100%～15%の場合では、弁開度が小さいケースほど中心集合体を通過する自然循環流量が低下しているため（Fig.4.1-2b参照）、発熱部での温度上昇は100%弁開度よりも20%および15%弁開度で大きくなり、温度分布は高温側にシフトしている。しかし、温度分布形状は３ケースとも類似しており、温度は発熱上端断面（BI）まで上昇してピーク温度を示し、それより上方では徐々に温度が低下している。20%と15%弁開度では自然循環流量にあまり差がないため、発熱部での温度上昇はほぼ一致しているが、発熱部より上では20%弁開度よりも15%弁開度の方が若干大きく温度低下している。10%弁開度になるとピーク温度は発熱上端断面（BI）より17cm下方のBG断面で生じている。発熱下端からBG断面までは10%弁開度の方が20%および15%弁開度よりも大きく温度上昇しているが、発熱上端断面（BI）では温度がほぼ一致し、それより上方の領域になると10%弁開度の方が温度低下が大きくなっている。更に、5%弁開度になると、10%弁開度よりも発熱部の温度上昇が小さくなり、ピーク温度は発熱上端より33.5cm下方のBE断面で生じている。それより上方では20%弁開度のケースよりも低い温度を示している。こ

の様に、15%弁開度を境にして、弁開度をより小さく絞ったケースほど発熱部上部およびその上の非発熱領域において温度が著しく低下している。熱出力を1.5%および2%にした場合でも、熱出力が高い場合ほど温度分布は全体的に高温側にシフトしているが、弁開度に対する軸方向温度分布の変化は1%熱出力の場合と同様に現れている。PRACSで除熱した場合は炉心部が自然循環流量による軸方向の熱輸送のみで冷却され、それ以外の冷却効果は作用していない。そのため、弁開度を絞ったケースほど自然循環流量は減少して発熱部の温度上昇が増大している。しかし、DRACSで除熱した場合は、弁開度を絞ったケース、言い換えると、自然循環流量が減少したケースほど発熱部の温度上昇が抑制されている。つまり、DRACSで除熱した場合は、自然循環流量が低下するケースほど自然循環流量による軸方向の熱輸送冷却とは異なる別の冷却効果、すなわち、IWFなどによる径方向からの冷却効果が強く作用している。

Fig.4.3-7a～7bには各ケースの発熱上端断面（BI）および発熱中央断面（BD）における90 - 270°方向の炉心部径方向温度分布を示す。Fig.4.3-7aの発熱上端断面（BI）の温度分布を見ると、1%熱出力の場合、100%および20%弁開度においては集合体内部に比べ集合体間ギャップ部の温度が低く、中心集合体内部では中心サブチャンネルを頂点とする左右対称な温度分布を示している。しかし、15%弁開度では90°方向（図中、右側）の内側ギャップの温度が大きく低下している為に、中心集合体内部では270°方向よりも90°方向側で大きく温度が低下し、非対称な温度分布を示している。更に、5%弁開度のケースになると270°方向の内側ギャップの温度が著しく低下して、中心集合体内部の径方向温度分布は大きく乱れている。熱出力を変化させた場合は、全体的に熱出力が高いケースほど集合体内部に比べギャップ部の温度低下が大きくなり、特に、外側ギャップの温度が顕著に低下している。集合体内部はこのギャップ部からの冷却により、より急峻な温度分布になっている。しかし、熱出力条件が異なっても弁開度に対する変化は1%熱出力の場合と同様であり、1.5%および2%熱出力条件下でも弁開度が小さいケースほど中心集合体内部の温度分布に非対称な特性が生じている。一方、発熱中央断面（BD）では、どの熱出力条件下においても中心集合体内部の温度分布は中心サブチャンネルを頂点とする左右対称な分布を示し、弁開度が小さいケースほど分布形状は急峻となる。発熱上端断面（BI）で見られる様な温度分布の乱れは生じていない。

Fig.4.3-8a～8bには1%および2%熱出力条件における各ケースの中心集合体発熱上端断面（BI）の温度コンターを、また、Fig.4.3-9a～9bには同じケースの発熱中央断

面（BD）の温度コンターを示す。はじめに、発熱上端断面（BI）の温度分布を見ると、1%熱出力条件下の100%および20%弁開度では、ほぼ中心サブチャンネルを最高温度にして外側に向かって各方向一様に温度が低下している。100% 弁開度に比べ、20%弁開度では等温線が若干密になり中心と外側の温度勾配が大きいことから、20%弁開度の方がギャップ部から一様に強く冷却されているのがわかる。15%弁開度では温度分布に偏りが生じ30° 方向側の温度低下か大きく、それと共に、最高温度は中心サブチャンネルから210° 方向に若干移行している。更に、10%弁開度になると温度低下は315° および30° 方向側で著しくなり、5%弁開度では更にその範囲は広がり270° から30° 方向側となっている。それに伴い、最高温度も150° 方向に移行している。2%熱出力の場合では、どのケースにおいても等温線の間隔が1%熱出力の場合よりも密になり温度勾配が大きくなっていが、弁開度に対する変化は1%熱出力の場合と同じように、15%弁開度からは温度分布に偏りが生じ、弁開度が小さいケースほど315° および30° 方向側で温度が著しく低下している。これらの結果より、中心集合体発熱上端断面においては、20%弁開度までは各方向から一様に冷却効果が作用しているが、15%弁開度からは30° および315° 方向から強い冷却効果が作用しているのがわかる。先の発熱上端断面（BI）の径方向温度分布図において、弁開度が小さいケースの中心集合体で温度分布が乱れていたのは、この様に断面温度分布に偏りが生じていた為である。次に、発熱中央断面（BD）の断面温度分布を見ると、1%および2%熱出力ともに、弁開度が小さいケースほど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を示しており、発熱上端断面（BI）で見られたような偏った温度分布は生じていない。また、1%熱出力よりも2%熱出力の方が密な等温線を示し温度勾配は大きくなっている。中心集合体の発熱中央断面（BD）においては、弁開度が小さいケースでも各方向から一様に冷却効果が作用している。

中心集合体内部の温度結果をまとめると、一次系ループの主弁開度を絞ったケース、すなわち、自然循環流量が小さいケースほど径方向から強い冷却効果が作用し、中心集合体内部の温度上昇を抑制している。冷却効果は発熱上端断面（BI）においては315° および30° 方向から強く作用し、発熱中央断面（BD）では各方向からほぼ一様に作用している。

次に、周辺集合体内部の温度結果を示す。Fig.4.3-10a～10cには1%熱出力における各ケースの周辺集合体の軸方向温度分布を示す。周辺集合体AおよびFに関しては、断面によって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、この壁サブチャンネルに沿った軸方向温度分布を示してある。また、他の周

辺集合体については中心サブチャンネルに沿った軸方向温度分布を示してある。100%弁開度（D-1P100SV）の各周辺集合体の軸方向温度分布は発熱上端まで温度上昇し、その上の非発熱ピンバンドル域から上部中性子遮蔽体部にかけては温度が低下している。周辺集合体AおよびFでは壁サブチャンネルに沿った軸方向の温度分布を示しているため、発熱部の温度は他の周辺集合体よりも低くなっている。しかし、その他の周辺集合体の発熱部温度はほぼ一致している。発熱上端より上の領域では、各周辺集合体の温度低下に差が生じている。これは、各周辺集合体に作用するIWFの冷却効果が異なるためと考えられる。同様な傾向は20%弁開度（D-1P20SV）でも見られるが、弁開度を更に絞った15%～5%弁開度になると各周辺集合体の温度分布の差はより顕著に現れ、発熱部でも生じている。特に、周辺集合体AおよびFの温度分布に特徴的な変化が生じている。すなわち、15%弁開度では周辺集合体Aにおいて発熱下端温度が集合体入口温度（約300℃）よりかなり高い値（約340℃）を示し、同じブロックの周辺集合体BおよびCより高くなっている。更に、発熱中央から集合体出口にかけては他の周辺集合体よりも大きく温度が低下している。また、周辺集合体Fにおいては、発熱下端温度は他の周辺集合体とほぼ一致した約300℃を示しているが、発熱中央から集合体出口にかけての温度低下は周辺集合体Aと同じように著しく生じている。10%および5%弁開度のケースになると、周辺集合体AおよびFの発熱下端温度は更に高温側にシフトし、それに伴い他の周辺集合体の発熱下端温度も高くなっている。発熱下端で温度が上昇していること、更に、発熱中央から集合体出口にかけて大きく温度が低下していることから、15%弁開度以下のケースでは周辺集合体AおよびFにおいて、上部プレナムの低温ナトリウムが集合体内部に逆流したと考えられる。

逆流の発生を示唆するもう一つの結果として、周辺集合体の上部中性子遮蔽体各断面で計測した温度の時間変化を示す。Fig.4.3-11a～11bには1%熱出力条件下での100%および15%弁開度のケースの結果を代表例として示す。Fig.4.3-11aの100%弁開度ケースでは、全ての周辺集合体について集合体出口に最も近い中性子遮蔽体上部断面（DC）で大きな温度揺らぎが生じ、その下の中性子遮蔽体中央断面（DB）および下部断面（DA）で安定した温度を示している。DC断面で見られる温度揺らぎは上部プレナム底部に成層化した低温ナトリウムが集合体内に潜り込んで、集合体内の高温の上昇流と混合している為に生じている。すなわち、低温ナトリウムはDC断面あたりまで潜り込んでいるが、それより下方には潜り込んでいないと考えられる。20%弁開度のケースでもこれと同じ状況が観察された。一方、Fig.4.3-11bの15%弁開

度のケースでは、周辺集合体B,C,D,およびEでは100%および20%弁開度のケースと同じようにDC断面で大きな温度揺らぎが生じているが、周辺集合体AおよびFのDC断面では温度揺らぎがほとんど発生していない。10%および5%弁開度のケースでも同様である。これらのことからも、15%～5%弁開度のケースでは周辺集合体AおよびFで逆流が発生したと考えられる。

全てのケースについて、同じように周辺集合体の温度挙動を調べ、逆流の発生の有無をまとめた結果をTable 4.3-1に示す。どの熱出力条件においても弁開度を15%以下に絞ったケースの周辺集合体AおよびFで逆流が発生が認められた。逆流の発生により周辺集合体AおよびFの内部温度は、他の集合体よりも発熱部中央より下方では高く、上方では低くなっている。15%弁開度以下のケースで中心集合体の発熱上端断面（BI）において30°および315°方向から強く冷却されているのは（Fig.4.3-8 参照）、この方向に位置する周辺集合体AおよびFの発熱上端断面の温度が中心集合体よりも極端に低下し、集合体間の熱移行効果が作用している為と考えられる。

次に、集合体間ギャップ温度の測定結果を示す。Fig. 4.3-12a～12bに代表例として1%熱出力および2%熱出力の各ケースにおける集合体間ギャップの軸方向温度分布を示す。図は90°と270°方向に位置する内側および外側ギャップの軸方向温度分布を10秒間の平均温度を用いて描画している。PRACSで除熱した場合とは異なり、DRACSで除熱した場合はIWFが発生する為、ギャップ間に大きな温度差が生じている。Fig. 4.3-12aの1%熱出力の各ケースの結果を見ると、100%弁開度（D-1P100SV）では発熱上端断面（BI）から上のギャップで温度差が生じ、内側ギャップに比べ外側ギャップの温度が低下している。しかし、発熱上端より下のギャップでは温度差は生じていない。内側ギャップに比べ外側ギャプの温度が低いのは、低温ナトリウムが外側ギャップから潜り込んでいる為であり、IWFの影響はギャップ間に温度差が生じている発熱上端断面（BI）あたりまで及んでいると考えられる。20%弁開度（D-1P20SV）になるとギャップ間の温度差は発熱上端より下のBG断面（出口より17cm下方）でも生じ、更に、10%弁開度（D-1P10SV）および5%弁開度（D-1P5SV）になると発熱中央断面（BD）より下の断面でも生じている。Fig.4.3-12bの2%熱出力の場合も1%熱出力の場合と同様に、弁開度が小さいケースほどより下の断面でギャップ間に温度差が生じている。

Fig.4.3-13a～13cおよびFig.4.3-14a～14cには1%および2%熱出力条件下の各ケースについて発熱上端断面（BI）ギャップ、発熱中央断面（BD）ギャップ、更に下方のBC断面ギャップでの温度時間変化を示す。Fig.4.3-13a～13cに示す1%熱出力の場合

では、発熱上端断面（BI）ギャップで弁開度が小さいケースほど内側ギャップで激しい温度揺らぎが生じている。発熱中央断面（BD）ギャップおよびその下方のBC断面ギャップでは、発熱上端断面（BI）ギャップほどの温度揺らぎは生じていないが、弁開度が小さいケースほどギャップ間の温度差は大きくなっている。Fig.4.3-14a～14cの2%熱出力の場合でも同じことが言えるが、1%と2%熱出力の同じ弁開度ケース同士を比較すると、ギャップ間の温度差はどの断面ギャップにおいても2%熱出力の方が大きくなっている。

これら集合体間ギャップの温度結果より、IWFは弁開度が小さいケースほど激しく生じ、その影響はより下のギャップ部へ進展している。また、熱出力が高い場合ほどIWFの影響はより顕著に生じることがわかる。

以上、模擬炉心部の温度結果より、DRACSで除熱したケースの炉心部の冷却は、自然循環流量による軸方向の熱輸送の他に、径方向からの冷却効果が作用する。中心集合体の発熱部上方においてはIWFによるギャップ部からの冷却効果と逆流が生じた周辺集合体からの冷却効果が作用している。発熱中央断面ではIWFによる冷却効果のみが作用していると考えられる。

5．考察

5．1　PRACSおよびDRACS除熱での炉心部最高温度の比較

4．3節において、PRACSによる除熱とDRACSによる除熱では模擬炉心部の温度挙動が大きく異なり、DRACSで除熱した場合では1次系一巡の自然循環流量による軸方向の熱輸送の他に、IWFによる集合体内部を径方向から冷却する効果と逆流の発生で温度が低下した周辺集合体からの熱移行による冷却効果が生じることを示した。また、それらの効果は弁開度を小さくしたケース、すなわち、自然循環流量が小さい時ほど顕著に作用することを示した。ここでは、炉心部における最高温度に着目して、PRACSとDRACSで除熱した場合を比較する。

DRACS除熱の場合、炉心部の最高温度は中心集合体で検出された。一方、PRACS除熱の場合は等出力、等流量条件であるにもかかわらず、高出力条件では周辺集合体で検出されたが、これは、ピン配置、形状のためと考えられることから、模擬性の高い中心集合体の温度を炉心部の最高温度として評価する。まず、最高温度を比較する前に、PRACSとDRACSで除熱した場合の中心集合体における中心サブチャンネルに沿った軸方向温度分布を比較し、集合体内部の温度状況の違いを整理する。Fig. 5.1-1aおよびFig. 5.1-1bは、代表例として1%および2%熱出力条件下で、熱出力と弁開度が同一のPRACSで除熱したケースとDRACSで除熱したケースの中心集合体中心サブチャンネルの軸方向温度分布を比較した結果である。PRACSで除熱した場合には、全ての熱出力および弁開度条件において、集合体内部の温度は発熱部で直線的に上昇して発熱上端でピークを示し、その上ではほぼ一定となる軸方向温度分布を示している。それに対し、DRACSで除熱した場合の軸方向温度分布は発熱上端から集合体出口にかけて温度が低下している。発熱上端より上の非発熱部での温度低下は弁開度が小さいケースほど大きくなり、同じ条件下でPRACSで除熱したケースよりも温度が低下している部分は集合体出口から下方の断面へ拡大している。DRACSで除熱したケースの発熱部の温度は、自然循環流量がPRACSで除熱したケースよりも低下してることに起因して、相対的に高くなっているが、弁開度が小さいケースほど発熱部上部での温度上昇が鈍くなり、発熱上端より下の断面でピーク温度が現れる傾向を示している。

次に中心集合体における最高温度を比較する。PRACSで除熱した全てのケースで最高温度は発熱上端の中心サブチャンネルにあるが、DRACSで除熱したケースでは前述のように弁開度が小さいケースで発熱上端より下の断面で最高温度を示している。PRACSおよびDRACSで除熱した各ケースの中心集合体における最高温度を中心

集合体通過流量（図a）、または、一次系ループ全流量（図b）に対して整理した結果をFig5.1-2に示す。縦軸には最高温度を集合体入口（AE断面）からの温度上昇巾で示してある。最高温度を中心集合体通過流量に対して整理した図aを見ると、PRACSで除熱した場合の最高温度は、熱出力一定条件下において流量の低下に伴い単調に上昇している。それに対して、DRACSで除熱した場合の最高温度は、ある流量まではPRACSで除熱した場合とほぼ同じ温度を示すが、それ以下の流量になるとPRACSで除熱した場合よりも低下し、流量が小さくなる程その差が大きくなっている。2.5%熱出力では自然循環流量が比較的大きいこともあり除熱方法の違いによる最高温度の差は認められないが、2%熱出力では流量が約1.5%以下になった時、また、1%熱出力では流量が約1%以下になった時、中心集合体の通過流量が同じであっても最高温度はPRACSよりもDRACSで除熱した場合の方が低下している。横軸である通過流量が同じ場合での比較であることから、この最高温度の低下は中心集合体に作用する径方向からの冷却効果、すなわち、IWFによるギャップ部からの冷却および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ものと考えられる。このことから、DRACSで除熱した場合に見られる中心集合体最高温度に対する径方向からの冷却効果は、自然循環流量が実機定格相当流量の約1.5%以下になった時から現れることがわかる。また、最高温度の低下が生じはじめる自然循環流量は集合体の熱出力により変化し、熱出力が高い場合ほどその時の自然循環流量は大きいことがわかる。一方、最高温度を一次系ループ全流量に対して整理した図bでは、図aの場合よりも、PRACSで除熱した場合とDRACSで除熱した場合の最高温度の差が大きく現れている。PRACSで除熱した場合では、中心集合体と周辺集合体の通過流量が等配分されているのに対し、DRACSで除熱した場合では、集合体間での流量配分効果が作用して周辺集合体よりも中心集合体の通過流量が大きくなっている。すなわち、図bで見られるDRACSで除熱した場合とPRACSで除熱した場合の最高温度の温度差には、径方向からの冷却効果に加え、集合体間の流量再配分に伴う中心集合体通過流量の増加による冷却が含まれている。

5．2　径方向からの冷却効果による中心集合体の除熱率の検討

ここでは、DRACSで除熱した場合に発生する径方向からの冷却効果により、中心集合体からどの程度除熱されているか検討する。

Fig.5.2-1はDRACSで除熱した各ケースについて、中心集合体の発熱上端断面（BI）における除熱率を中心集合体通過流量に対してプロットした結果である。縦軸の除

熱率は中心集合体に与えた熱出力と中心集合体の入口から発熱上端までの断面平均温度による温度上昇巾と集合体通過流量を用いて算出した熱量（エンタルピー上昇）との差を熱出力で割った値である。すなわち、この除熱率は発熱量に対する径方向からの冷却効果で除熱された熱量の割合を意味する。また、横軸の流量は実機定格流量に対する比率（集合体平均流速換算）で示してある。中心集合体の通過流量が1.5%より大きい場合では、除熱率はほぼ零を示し、径方向からの冷却効果による除熱は見られないが、流量が1.5%以下になると流量の低下とともに除熱率は上昇している。径方向からの冷却効果は流量が1.5%以下に低下した場合に、集合体の除熱に影響を及ぼすと考えられる。熱出力が高い場合には、除熱率が上昇しはじめる流量が大きくなる傾向を示し、流量が同じ場合では熱出力が高い場合ほど除熱率は高くなっている。これらの結果は、5．1節のPRACSで除熱した場合とDRASCで除熱した場合の中心集合体最高温度を中心集合体通過流量に対して比較した結果と一致している。これらのことから、径方向からの冷却効果による除熱は流量が小さい場合ほど、また、熱出力が高い場合ほど大きいことがわかる。これは、通過流量が小さい場合ほど炉心部の温度は上昇するが、上部プレナムとの間に大きな温度差が生じるため、IWFによる炉心槽内の自然対流がより激しく生じ、径方向からの冷却効果が増大するためと考えられる。また、熱出力が高いと炉心部の温度は高くなり、プレナムとの温度差が大きくなるため、同じように径方向からの冷却効果は増大すると考えられる。

次に、中心集合体に対する径方向からの冷却効果軸方向分布を調べた結果をFig.5.2-2に示す。横軸は集合体の入口から任意の高さまでのエンタルピー上昇巾とヒータ出力から求めた除熱率である。代表例として1%および2%熱出力の各ケースで求めた結果を示す。左図の1%熱出力の場合を見ると、100%弁開度では全体的に除熱率は小さく、中性子遮蔽体中央断面（DB）で約20%の除熱率を示しているが、下方に向かうに従い除熱率は低下し、発熱部中央断面（BD）では除熱率は零を示している。15%弁開度では、発熱上端から上の領域で100%弁開度の場合よりも除熱率は増加しているが、発熱部中央に近いBE断面（発熱中央から16.5cm上方）から下方において逆に加熱されていることがわかる。更に、弁開度を絞り10%および5%弁開度とした場合では、15%弁開度で加熱域にあった断面でも正の除熱率を示すようになり、中心集合体のほとんどの部分で除熱されている。5%弁開度における除熱率は発熱上端断面で約60%、発熱中央断面においても約30%に達している。2%熱出力の場合でも同様であり、弁開度の低下とともに中心集合体のほとんどの部分では除熱率が徐々

に大きくなっているが、15%弁開度ではBE断面より下方の部分で、また、10%弁開度では発熱中央より16.5cm下方のBC断面で逆に加熱されている。発熱部の中央から下部で加熱される原因を把握するため、Fig.5.2-3には1%および2%熱出力の各ケースについて、発熱部下部のBC断面における90 - 270°方向での径方向温度分布を比較した結果を示す。1%および2%熱出力とも同じであるが、100%～15%弁開度では、特に、90°方向に位置する周辺集合体Bの内部温度が中心集合体よりも高く、また、ギャップの温度では、内側ギャップで中心集合体内部と同程度の温度を示し、外側ギャップでは周辺集合体内部よりも高い温度を示している。周辺集合体の温度が中心集合体よりも高くなっているのは、中心集合体に比べ周辺集合体の通過流量が減少している為である。また、ギャップ部の温度が集合体内部よりも比較的高いのは上部で集合体を冷却する替わりに温度が上昇したギャップ部のナトリウムが下部に流下してきている為と考えられる。10%弁開度では顕著ではないが、5%弁開度になると周辺集合体の温度は中心集合体よりも低く、また、ギャップ部の温度も低下して中心集合体内部の温度分布は急峻な形状になっている。5%弁開度においてはBC断面でもIWFによるギャップ部からの冷却効果が顕著に作用しているのが分かる。このことから、15%弁開度で顕著に見られる発熱部中央から下の部分での加熱は、周辺集合体および高温化したギャップ部からの入熱によるものであり、弁開度を更に絞った場合には、発熱部下部においてもIWFによるギャップ部からの冷却効果が作用して除熱することがわかる。

径方向からの冷却効果による中心集合体の除熱は、弁開度が小さいケースほど、すなわち、自然循環流量が小さい場合ほど大きく、その除熱はより下の断面に及ぶことがわかった。

5．3 DRACS除熱の有効性に関する検討

DRACSを用いた自然循環除熱時には、炉内冷却器（DHX）からの低温ナトリウムが上部プレナムを冷却すること、更に、IWFの発生で炉心部の上部非発熱部の温度が低下することで、自然循環ヘッドが低下し、自然循環流量は減少する。この影響は炉心部冷却に対して負の方向に作用すると考えられるが、その一方で、自然循環流量による冷却とは別に、IWF並びに逆流の発生で温度が低下した集合体からの熱移行による径方向からの冷却効果が期待できる。ここでは、中心集合体発熱上端断面の温度測定結果からDRACS除熱の有効性について検討する。

本試験では、集合体熱出力と一次系ループの主弁開度条件を同一にして、PRACS

で除熱したケースとDRACSで除熱したケースの試験を実施した。このとき、PRACSおよびDRACSで除熱した両ケースのコールドレグ側の浮力ヘッドがほぼ等しくなる様に、IHX出口から集合体入口までの温度を両ケースでできるだけ同じ（約300℃）にした。すなわち、両ケースの自然循環流量に作用する浮力ヘッドの差はDRACSで除熱した場合に生じる上部プレナム内の温度低下と模擬炉心部の上部非発熱部の温度低下で生じた浮力ヘッドの低下分および炉心通過流量の低下による炉心内発熱部での温度上昇の差で生じる浮力ヘッドの上昇分に相当し、PRACSで除熱したケースとDRACSで除熱したケースの全自然循環流量の差はこの浮力ヘッドの差により生じたものと考えられる。Fig.5.3-1には炉心冷却に対するDRACSによる除熱の有効性について検討した結果を示す。左の図にはここでの考え方を示してある。PRACSで除熱したケースの全自然循環流量と熱出力から見積もられる温度（T_{Pf}）とDRACSで除熱したケースの全自然循環流量と熱出力から見積もられる温度（T_{Df}）との温度差（ΔT_1）は、DRACSで除熱したケースで生じた自然循環流量の低下による温度上昇巾に相当する。また、DRACSで除熱したケースの中心集合体発熱上端断面での実測断面平均温度（T_{Dex}）とT_{Df}との温度差（ΔT_2）は、IWFおよび逆流の発生で温度が低下した周辺集合体からの径方向からの冷却効果、更に、中心集合体の通過流量が周辺集合体よりも増加したことによる温度低下巾に相当する。従って、自然循環流量の低下による温度上昇巾(ΔT_1)よりも径方向からの冷却効果などで低下した温度巾(ΔT_2）が大きい場合、すなわち、($\Delta T_2/\Delta T_1$)＞1の時にDRACSによる除熱が、DRACS冷却システムのもつ本質的な特性である低自然循環ヘッドと言う負の効果を上回る付加的冷却効果を持つと考えられる。右の図はこの考え方に基づき、DRACSで除熱した各試験ケースにおける$\Delta T_2/\Delta T_1$を全自然循環流量に対してプロットした結果である。1%熱出力の場合では、全自然循環流量が0.8%以上の時は$\Delta T_2/\Delta T_1$が1よりも小さいが、全自然循環流量が0.8%より減少すると$\Delta T_2/\Delta T_1$は1よりも大きくなっている。熱出力が高い場合ほど($\Delta T_2/\Delta T_1$)＞1になる上限流量は大きくなり、2%熱出力の場合では全自然循環流量が1.2%以下になると$\Delta T_2/\Delta T_1$が1よりも大きくなっている。また、同じ流量条件下で$\Delta T_2/\Delta T_1$を比較すると熱出力が高い場合ほど大きくなっている。炉心冷却に対するDRACS除熱の炉心部熱流動現象に基づく付加的冷却効果は、自然循環流量が小さい時ほど、また、熱出力が大きい時ほど、顕著に現れることがわかる。

以上のことから、何らかの原因で自然循環流量が定格比1%より更に減少した場合の炉心冷却に対して、DRACSによる除熱が有効に作用することを確認した。

6. 結 論

炉心冷却に対するインターラッパーフロー（IWF）の冷却特性を自然循環状態下で把握することを目的に、7体の集合体で構成される模擬炉心を有するPLANDTL-DHX装置を用いて、自然循環定常ナトリウム試験を実施した。試験では、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で除熱してIWFが発生する場合と、IHX上部に冷却器を有するPRACSで除熱してIWFが発生しない場合を実施した。両ケースの自然循環流量と模擬炉心部温度挙動を1次主冷却系の流動抵抗ならびに模擬炉心の熱出力をパラメータとする試験により比較し、下記の知見を得た。

（1）DRACSで除熱した場合の一次系ループ全自然循環流量は、PRACSで除熱した場合よりも低下し、その低下率は一次系ループ圧力損失係数が大きい（主弁開度が小さい）場合ほど増加した。

（2）集合体通過流量を比較すると、DRACSで除熱した場合には、周辺集合体よりも中心集合体の通過流量が大きくなり、集合体間での流量再配分効果が発生した。IWFによる冷却効果が中心集合体よりも周辺集合体に対して強く作用し、浮力ヘッドに差が生じた為と考えられる。DRACSで除熱した場合には、高温状態にある集合体に対して、集合体間での流量再配分によりIWFで直接冷却された集合体よりも通過流量が増加することで炉心の最高温度を抑える効果が発生する。

（3）DRACSで除熱した場合の炉心部の冷却は、自然循環流量による熱輸送の除熱の他に、径方向からの冷却効果が作用する。中心集合体の発熱上端断面ではIWFによるギャップ部からの冷却効果と逆流が生じた周辺集合体からの冷却効果が作用し、発熱中央断面では、主にIWFによる冷却効果が作用している。

（4）径方向からの冷却効果による中心集合体最高温度の低下は、実機定格流量に対する比率で自然循環流量が1.5%以下の条件下で現れ、自然循環流量が小さい場合ほど最高温度は大きく低下する。

（5）径方向からの冷却効果による中心集合体の除熱率は主弁開度を絞り自然循環流量を小さくしたケースほど大きく、その除熱はより下方の断面に及んでいる。

（6）DRACSを用いて除熱した場合に生じる自然循環流量の低下による温度上昇と、IWFを含む炉内自然対流による径方向からの冷却効果および集合体間流量再配分による温度低下を中心集合体発熱上端断面で比較検討した結果、DRACSを用いた除熱方式では、何らかの原因で自然循環流量が実機定格比1%よりも減少した場合の炉心冷却に対して、自然循環ヘッドの減少による温度上昇効果を上回る付加的温度低減効果が作用することを確認した。1%以上の自然循環流量が得られている場合には、付加的温度低減効果がなくても炉心温度は十分低く保たれる。

謝　辞

本研究の実施に当り、試験装置の運転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。また、研修生として大阪大学から来られた生田康平氏には、試験の実施、試験データの整理の一部を担当して頂き、試験結果の評価について有意義な議論をすることができました。本研究への貢献に、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研究（VI）一集合体間熱移行試験一, 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 '94 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, vol.1, p.23 (Apr. 1995).

(8) H. Kamide, et al., "Benchmark exercise for multi-dimensional thermohydraulic analysis codes - Buoyancy driven penetration flow phenomena and thermal stratification -", Journal of hydraulic reserach, vol. 34, No.3, p.317 (1996).

Table 2.1 Main specifications of PLANDTL-DHX Loop

Primary loop	
Core	
Maximun 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 Parameters of IWF Experiments

Main Valve Opening (%) (SV101M)	Power Ratio (%) *			
	1%	1.5%	2%	2.5%
100%	●▲	●▲	●▲	●▲
20%	●▲	●▲	●▲	●▲
15%	●▲	●▲	●▲	
10%	●▲	●▲	●▲	
5%	▲	▲		

● : Case of Heat Removal by PRACS / ▲ : Case of Heat Removal by DRACS
* Percent Ratio to Full Condition in Large Reactor

Table 3.2 Experimental Conditions of Cases Cooled by PRACS (1/2)

Case Name (Run No.)	Power (kW)				Flow Rate (l/min)				S/A Inlet Valve Open (%)			Core Inlet (℃)	U.P. Outlet (℃)	IHX Outlet (℃)	RACS	
	Total	Center	Outer1	Outer2	Total	Center	Outer1	Outer2	Center	Outer1	Outer2				Flow (l/min)	A/C (m/sec)
Main Valve 100% Open Cases																
P-1P100SV (25015)	86.1	12.4	37.4	36.2	39.2	5.4	17.0	16.9	100	64	61	299.9	394.9	306.3	90.1	0.9
P-1.5P100SV (25016)	127.5	18.3	55.2	54.1	48.2	7.3	20.4	20.5	100	64	61	300.5	420.9	303.4	89.9	2.6
P-2P100SV (25017)	170.1	24.1	73.4	72.3	54.8	8.4	23.0	23.4	100	64	61	304.0	451.6	306.3	89.9	6.0
P-2.5P100SV (25018)	212.6	30.5	91.8	90.4	59.5	9.1	25.0	25.4	100	64	61	317.4	490.3	325.0	90.2	6.4
Main Valve 20% Open Cases																
P-1P20SV (25025)	85.2	12.2	36.8	36.1	31.9	4.5	13.6	13.8	100	64	61	300.4	417.8	308.2	89.0	0.9
P-1.5P20SV (25026)	127.6	18.3	55.1	54.2	38.1	5.4	16.5	16.2	100	64	61	301.1	454.0	307.5	90.1	2.2
P-2P20SV (25027)	169.9	24.4	73.3	72.3	42.8	6.3	18.2	18.4	100	64	61	300.6	485.7	306.0	90.0	4.2
P-2.5P20SV (25028)	212.6	30.4	91.7	90.5	46.3	6.7	19.9	19.7	100	64	61	314.2	531.9	323.2	90.0	5.6

Table 3.2 Experimental Conditions of Cases Cooled by PRACS (2/2)

Case Name (Run No.)	Power (kW)				Flow Rate (l/min)				S/A Inlet Valve Open (%)			Core Inlet (℃)	U.P. Outlet (℃)	IHX Outlet (℃)	RACS	
	Total	Center	Outer1	Outer2	Total	Center	Outer1	Outer2	Center	Outer1	Outer2				Flow (l/min)	A/C (m/sec)
Main Valve 15% Open Cases																
P-1P15SV (25052)	85.8	12.4	37.1	36.2	31.2	4.4	13.6	13.2	100	61	60	300.0	428.9	307.6	89.8	0.7
p-1.5P15SV (25054)	127.7	18.4	55.2	54.1	35.3	5.2	15.5	14.6	100	61	60	300.8	470.3	307.8	89.8	1.7
P-2P15SV (25056)	170.0	24.4	73.4	72.2	40.1	6.0	17.4	16.8	100	61	60	301.4	507.0	307.7	89.8	3.2
Main Valve 10% Open Cases																
P-1P10SV (25040)	85.6	12.4	37.0	36.2	21.5	2.7	8.9	9.9	100	61	60	298.2	475.3	307.4	89.7	0.7
P-1.5P10SV (25042)	127.7	18.5	55.1	54.1	24.6	3.6	10.5	10.5	100	61	60	298.4	530.6	307.7	89.8	1.9
P-2P10SV (25044)	170.0	24.5	73.2	72.2	27.1	4.1	11.7	11.4	100	61	60	300.0	583.2	306.7	89.7	3.0

Table 3.3　Experimental Conditions of Cases Cooled by DRACS　(1/2)

Case Name (Run No.)	Power (kW)				Flow Rate (l/min)				S/A Inlet Valve Open (%)			Core Inlet (℃)	U.P. Outlet (℃)	IHX Outlet (℃)	RACS	
	Total	Center	Outer1	Outer2	Total	Center	Outer1	Outer2	Center	Outer1	Outer2				Flow (l/min)	A/C (m/sec)
Main Valve 100% Open Cases																
D-1P100SV (25010)	85.0	12.2	36.5	36.3	30.3	4.8	12.6	12.9	100	64	61	302.6	311.4	308.8	88.3	3.3
D-1.5P100SV (25014)	127.7	18.3	55.3	54.2	38.8	6.0	16.4	16.4	100	64	61	298.7	305.9	303.4	90.0	5.3
D-2P100SV (25011)	169.8	24.4	72.9	72.5	42.0	7.0	17.3	17.6	100	64	61	299.8	309.9	306.9	90.2	13.2
D-2.5P100SV (25013)	212.8	30.4	91.9	90.6	47.3	7.7	19.6	20.0	100	64	61	316.3	328.3	325.2	90.0	18.4
Main Valve 20% Open Cases																
D-1P20SV (25021)	85.3	12.2	36.9	36.1	21.7	3.6	8.7	9.5	100	64	61	299.5	318.9	314.8	90.2	1.5
D-1.5P20SV (25022)	127.6	18.3	55.2	54.2	29.2	5.0	11.8	12.3	100	64	61	301.0	314.0	311.3	89.9	4.5
D-2P20SV (25023)	170.1	24.3	73.4	72.4	33.0	5.8	13.9	14.3	100	64	61	301.6	310.2	308.6	90.1	12.5
D-2.5P20SV (25024)	212.5	30.5	91.6	90.4	35.5	6.3	14.6	14.6	100	64	61	311.7	326.3	322.7	90.2	17.6

Table 3.3 Experimental Conditions of Cases Cooled by DRACS (2/2)

Case Name (Run No.)	Power (kW)				Flow Rate (l/min)				S/A Inlet Valve Open (%)			Core Inlet (℃)	U.P. Outlet (℃)	IHX Outlet (℃)	RACS	
	Total	Center	Outer1	Outer2	Total	Center	Outer1	Outer2	Center	Outer1	Outer2				Flow (l/min)	A/C (m/sec)
Main Valve 15% Open Cases																
D-1P15SV (25046)	85.3	12.4	36.8	36.1	20.3	3.8	8.7	7.8	100	61	60	303.1	313.6	310.3	89.9	1.2
D-1.5P15SV (25048)	127.6	18.5	55.0	54.2	24.5	4.7	10.1	9.7	100	61	60	302.0	309.6	306.7	89.8	4.2
D-2P15SV (25050)	170.2	24.5	73.5	72.3	28.2	5.7	11.1	11.4	100	61	60	302.7	310.6	308.1	89.8	11.0
Main Valve 10% Open Cases																
D-1P10SV (25034)	85.9	12.4	37.1	36.4	13.4	2.4	5.1	5.9	100	61	60	300.0	312.1	307.2	89.6	2.6
D-1.5P10SV (25036)	128.2	18.5	55.3	54.3	15.4	3.8	6.4	5.2	100	61	60	300.6	312.6	307.7	89.9	5.8
D-2P10SV (25038)	170.6	24.7	73.5	72.5	17.4	4.4	7.1	5.9	100	61	60	300.7	312.8	307.8	89.7	10.7
Main Valve 5% Open Cases																
D-1P5SV (25058)	85.5	12.4	37.0	36.2	9.1	2.0	3.0	4.1	100	61	60	303.0	310.7	303.6	89.8	1.5
D-1.5P5SV (25060)	127.6	18.3	55.1	54.1	10.2	2.8	4.7	2.7	100	61	60	300.9	313.9	306.8	89.9	3.9

Table 4.3-1 Onset of Reverse Flow in Outer Subassemblies
(Heat Removal by DRACS)

Main Valve Open (%)	Power Ratio (%)			
	1%	1.5%	2%	2.5%
100%	○	○	○	○
20%	○	○	○	○
15%	●	●	●	
10%	●	●	●	
5%	●	●		

○ : Normal Flow in All Outer Subassemblies
● : Reverse Flow in Outer Subassembly A and F

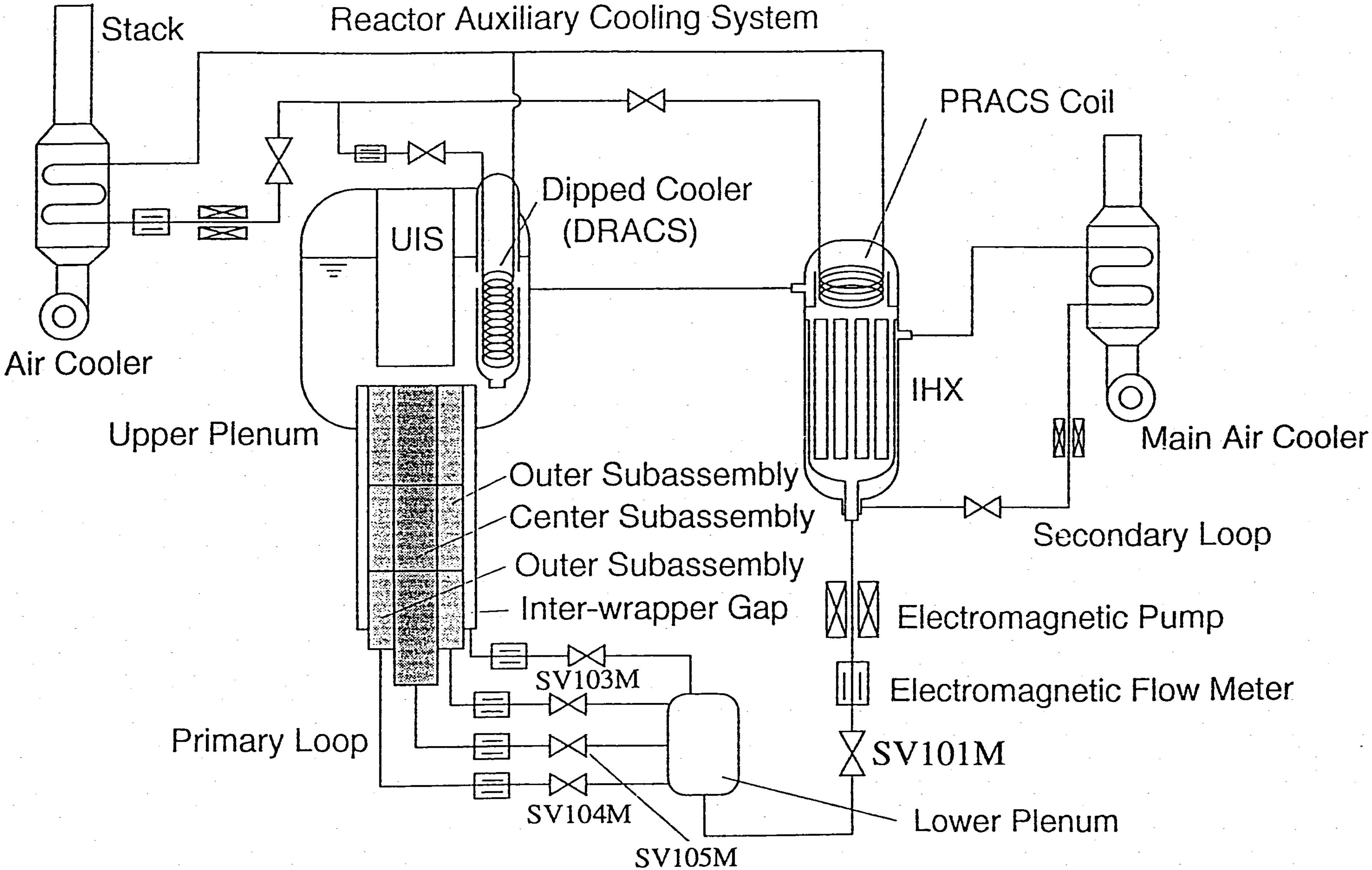


Fig. 2.1 Flow diagram of PLANDTL-DHX

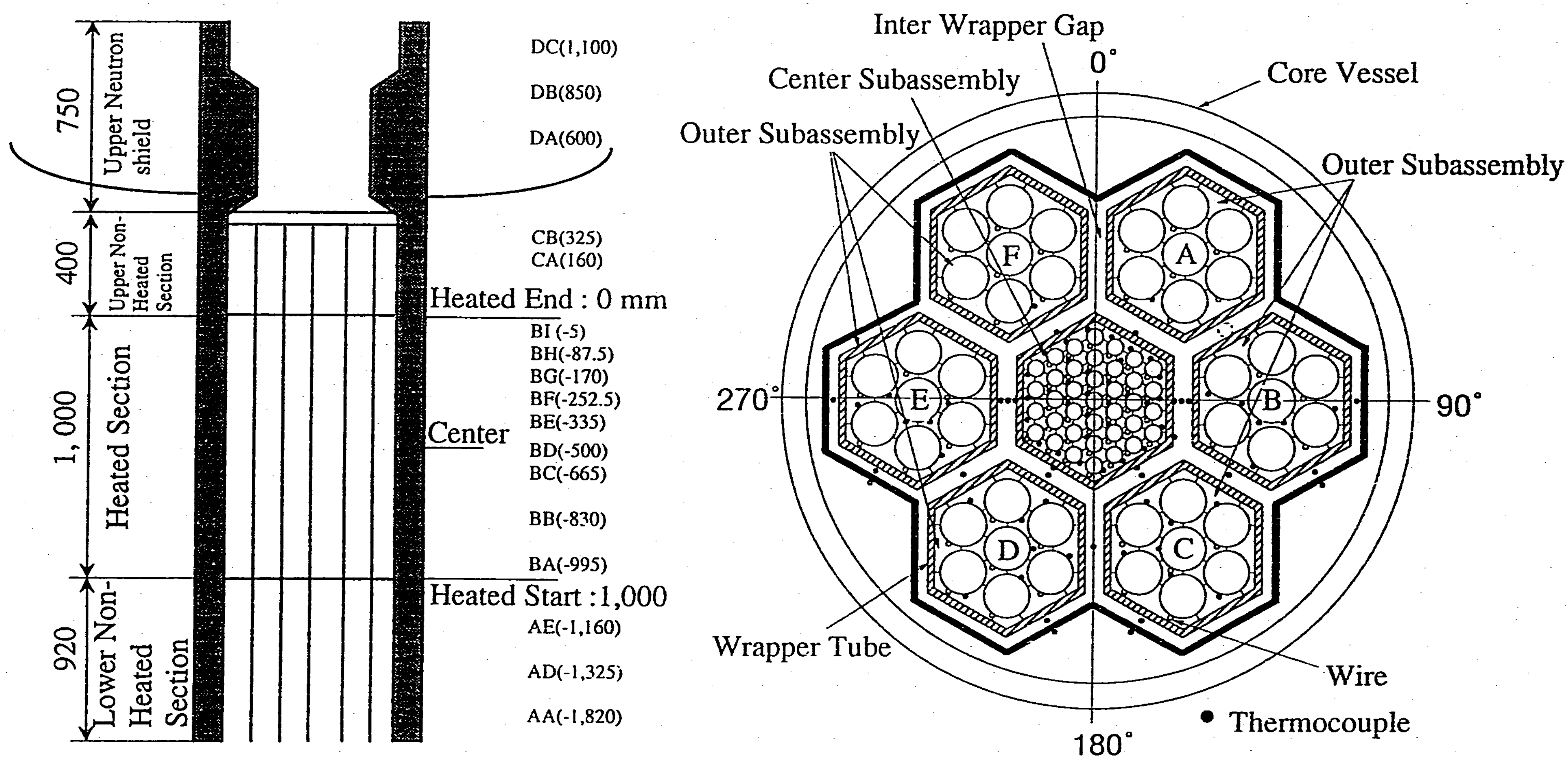


Fig. 2.2 Thermocouple Location in Test Section

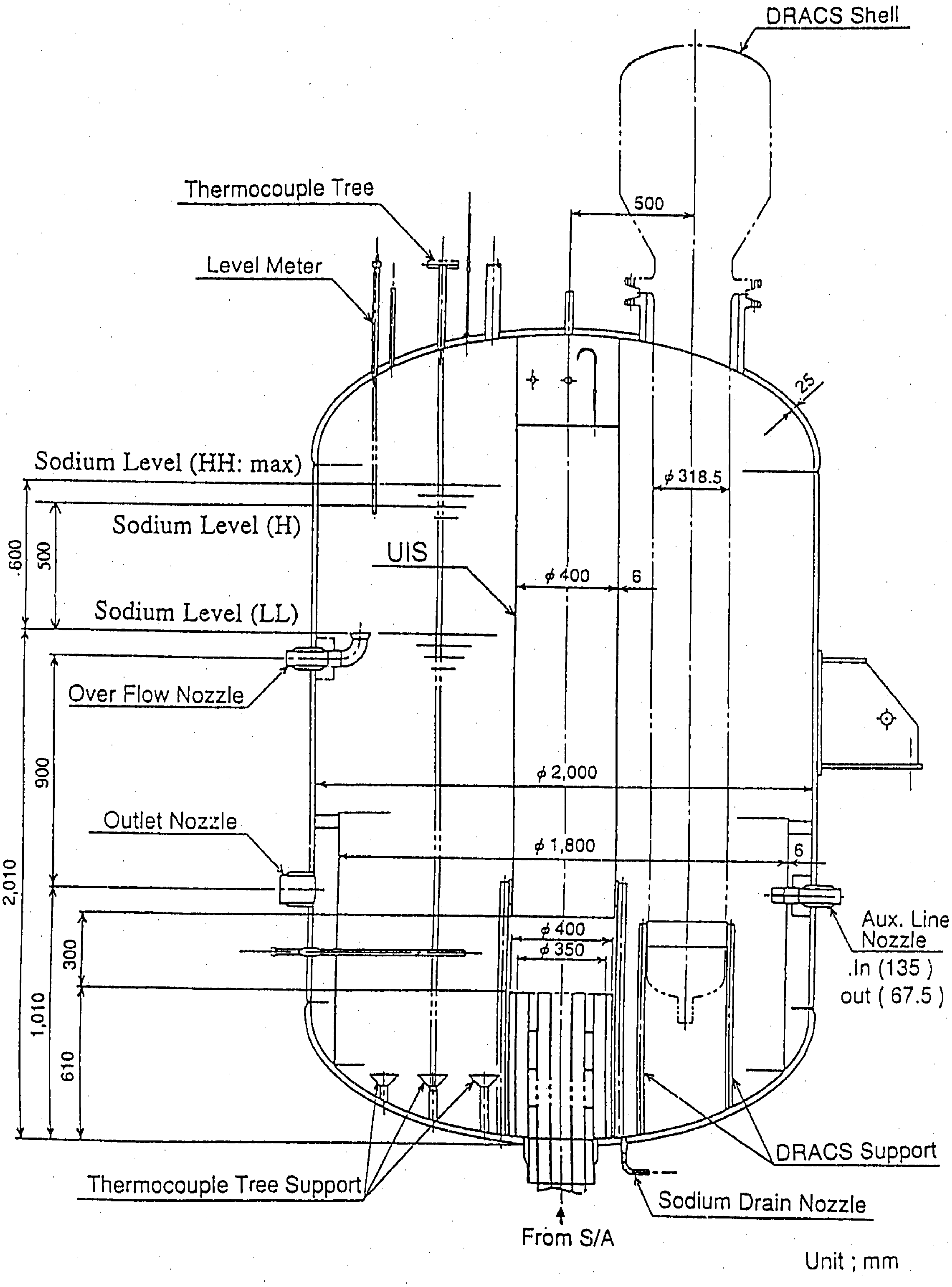


Fig. 2.3 Schematic of upper plenum

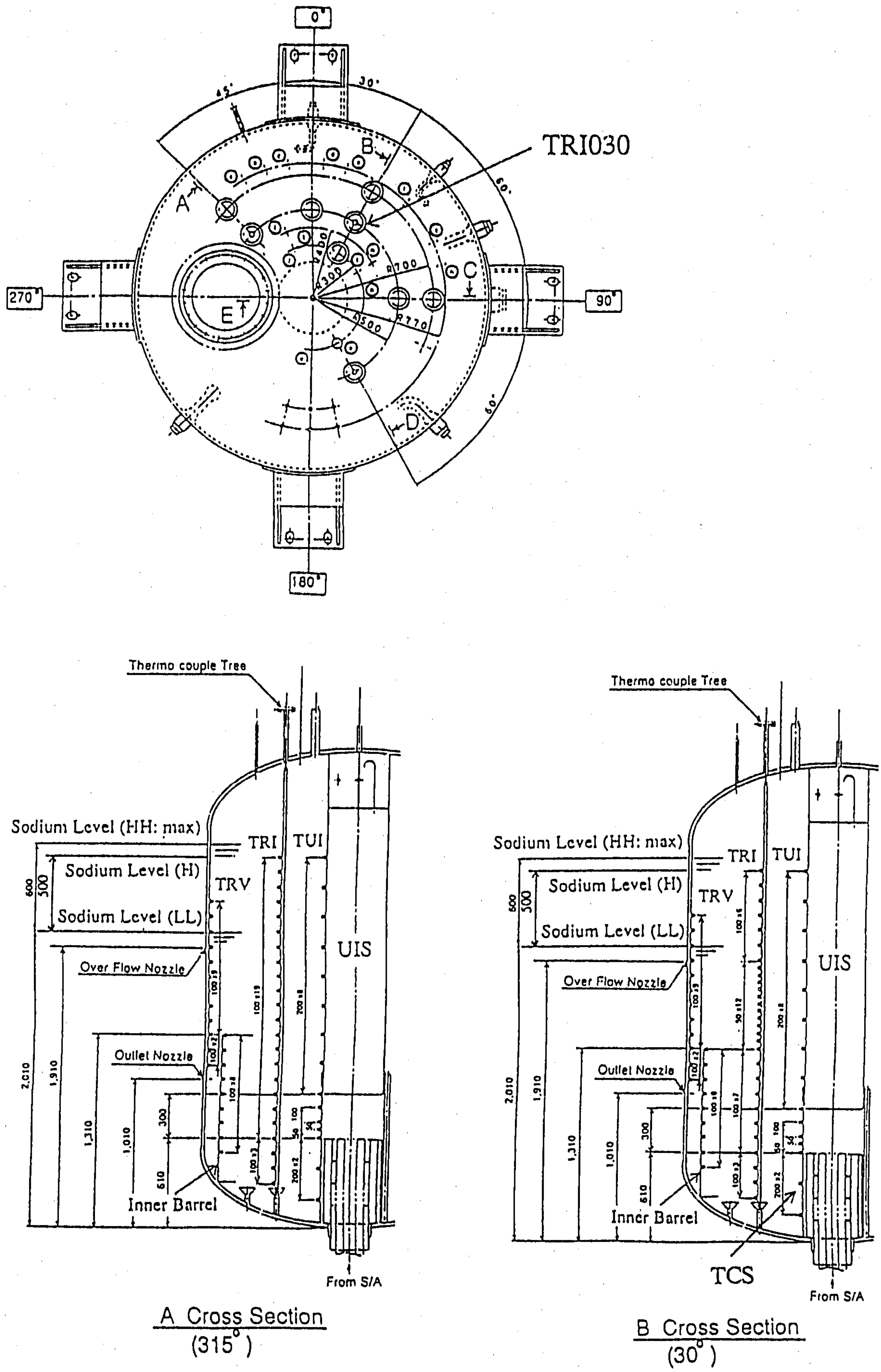


Fig. 2.4 Positions of thermocouples in upper plenum

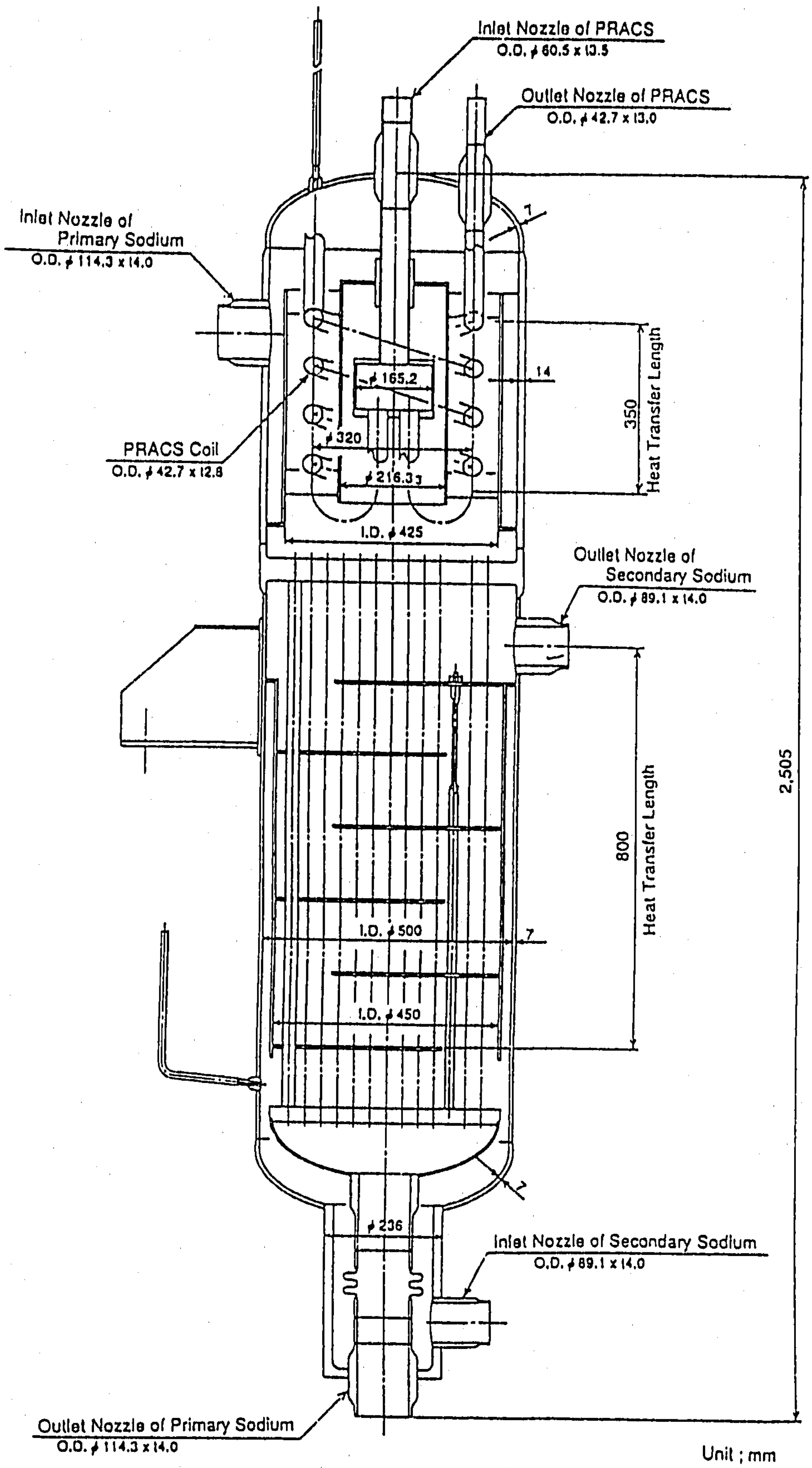


Fig. 2.5 Schematic of IHX & PRACS

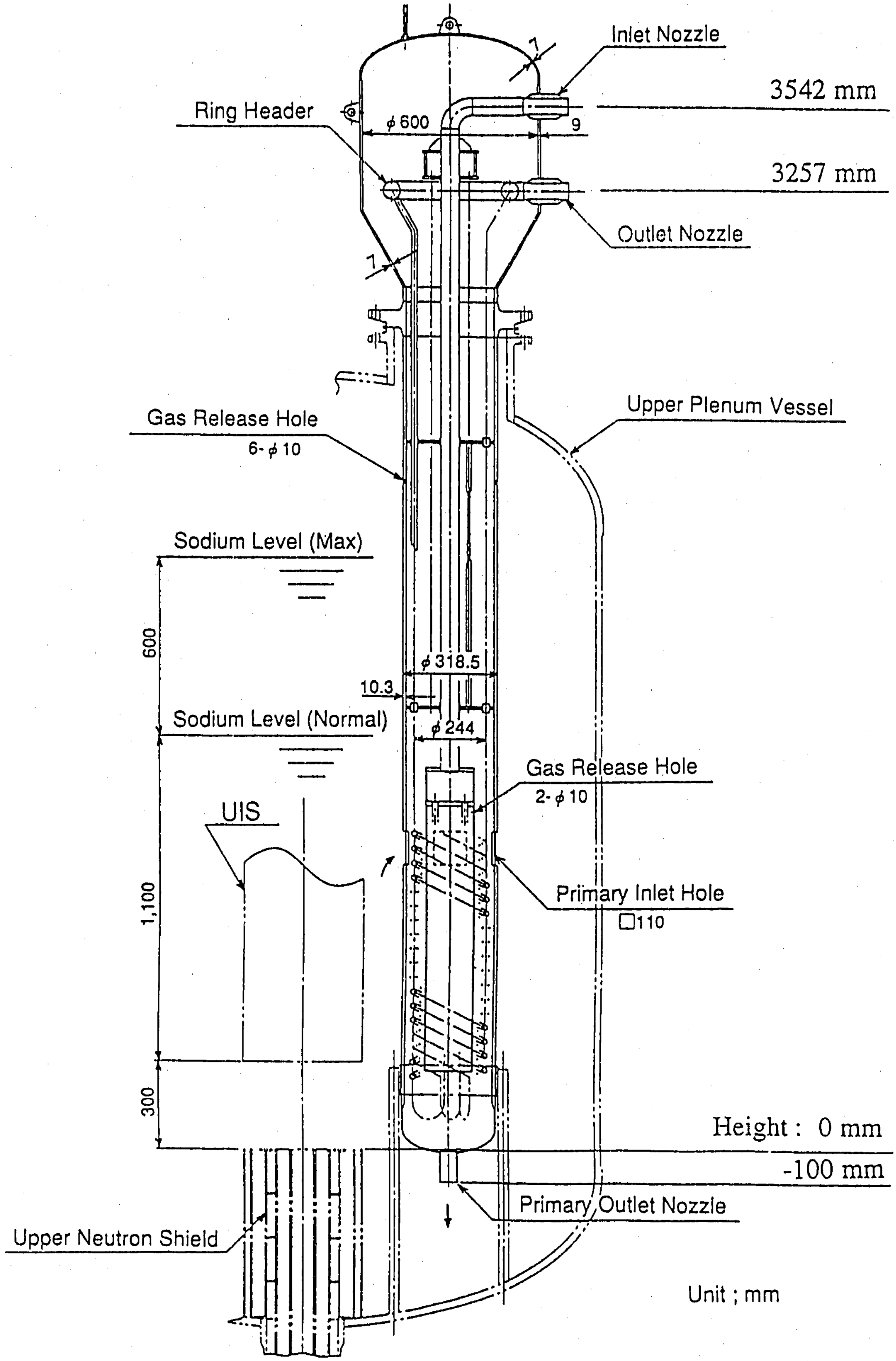
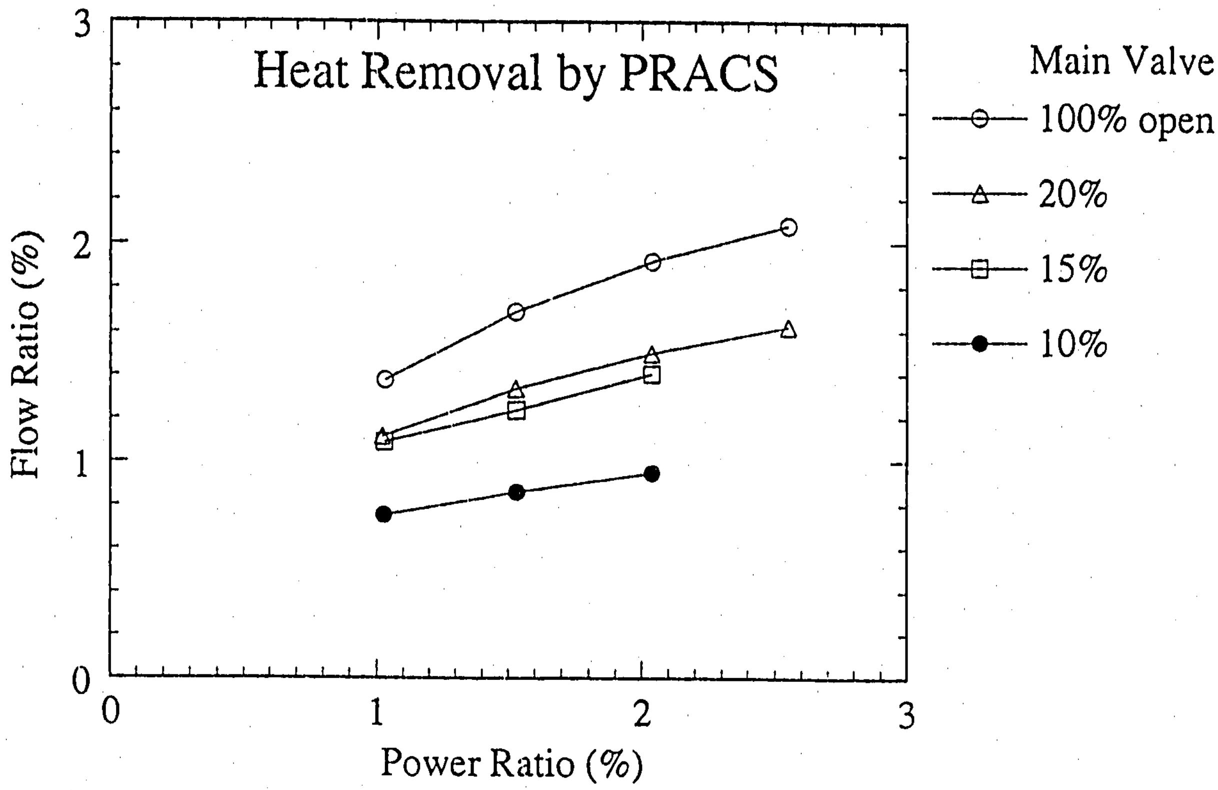


Fig. 2.6 Schematic of direct heat exchanger (DHX)



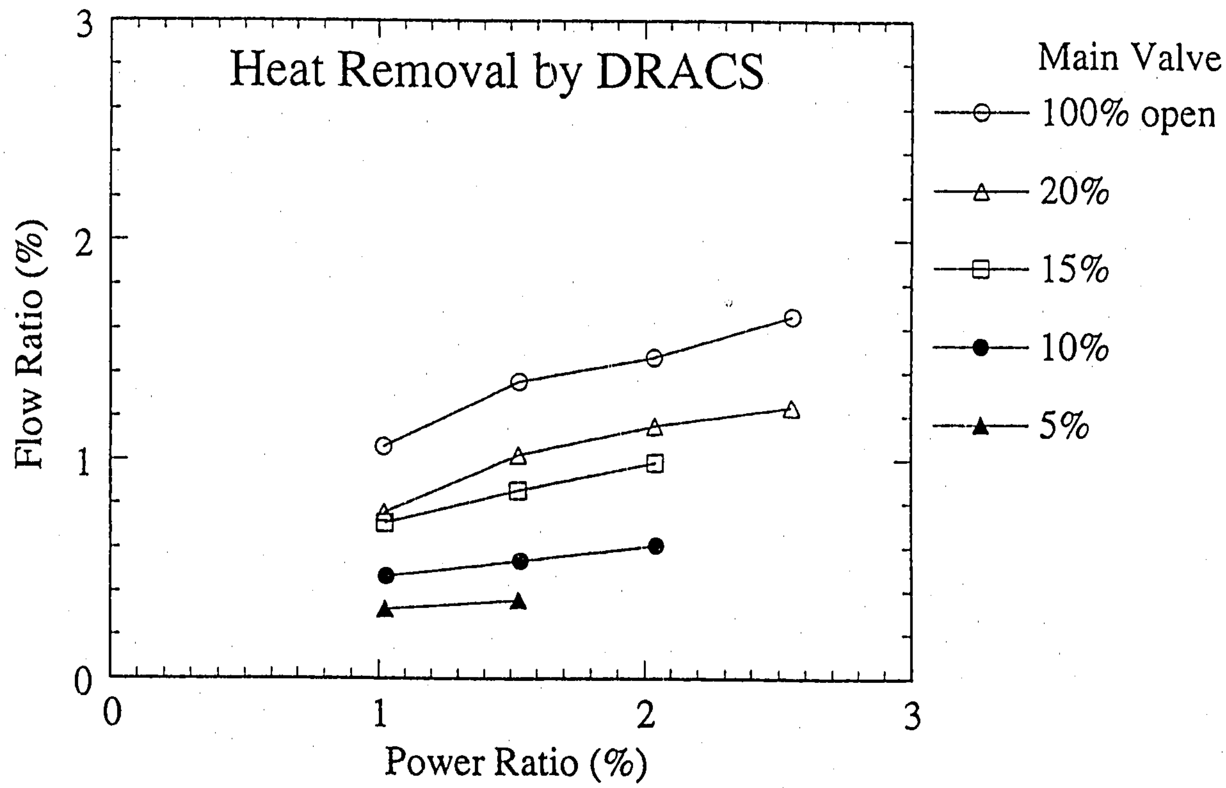


Fig. 4.1-1 Total Natural Circulation Flow Rates in Primary Loop

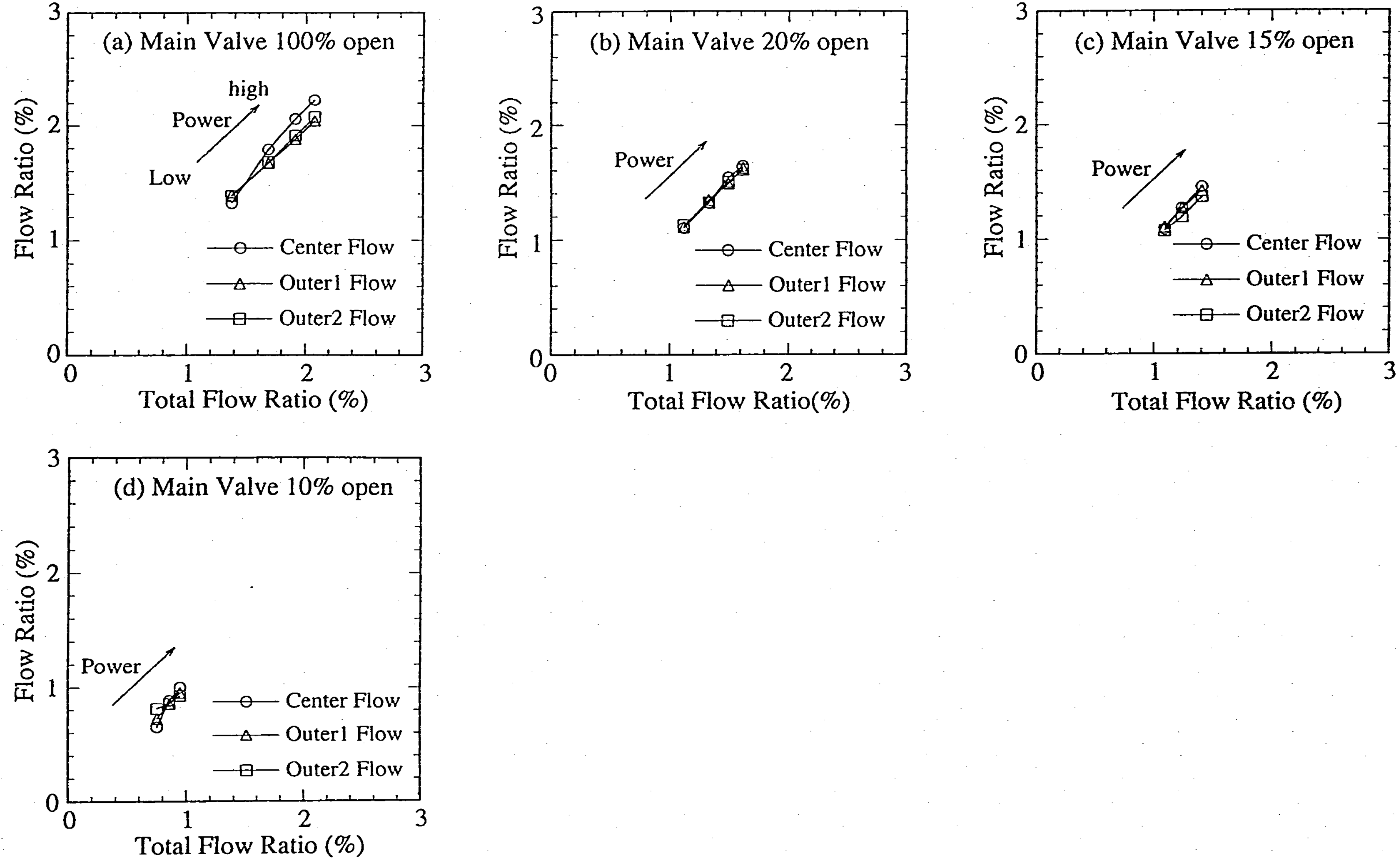


Fig. 4.1-2a Natural Circulation Flow Rates through Center and Outer Subassemblies (Heat Removal by PRACS)

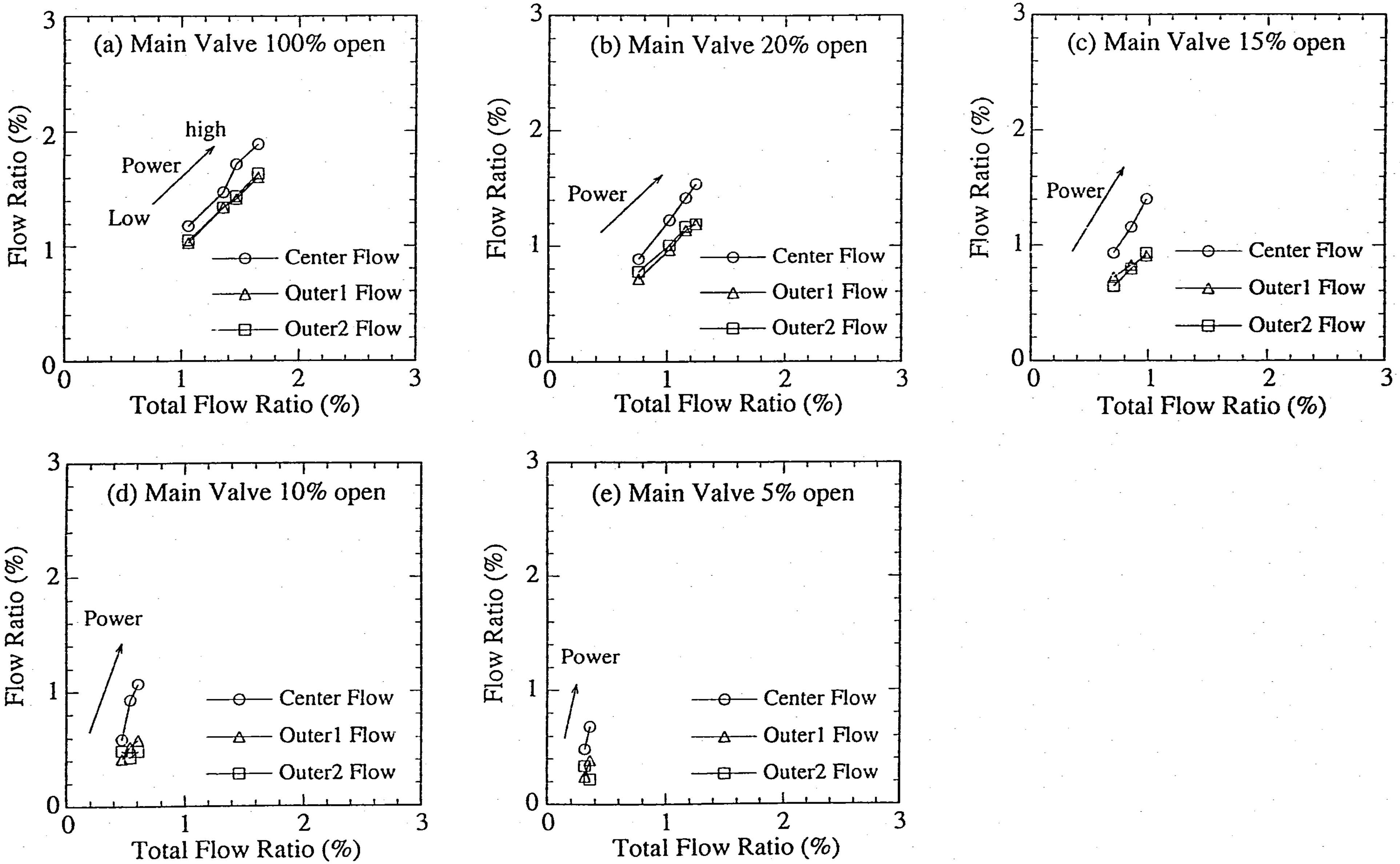


Fig. 4.1-2b Natural Circulation Flow Rates through Center and Outer Subassemblies
(Heat Removal by DRACS)

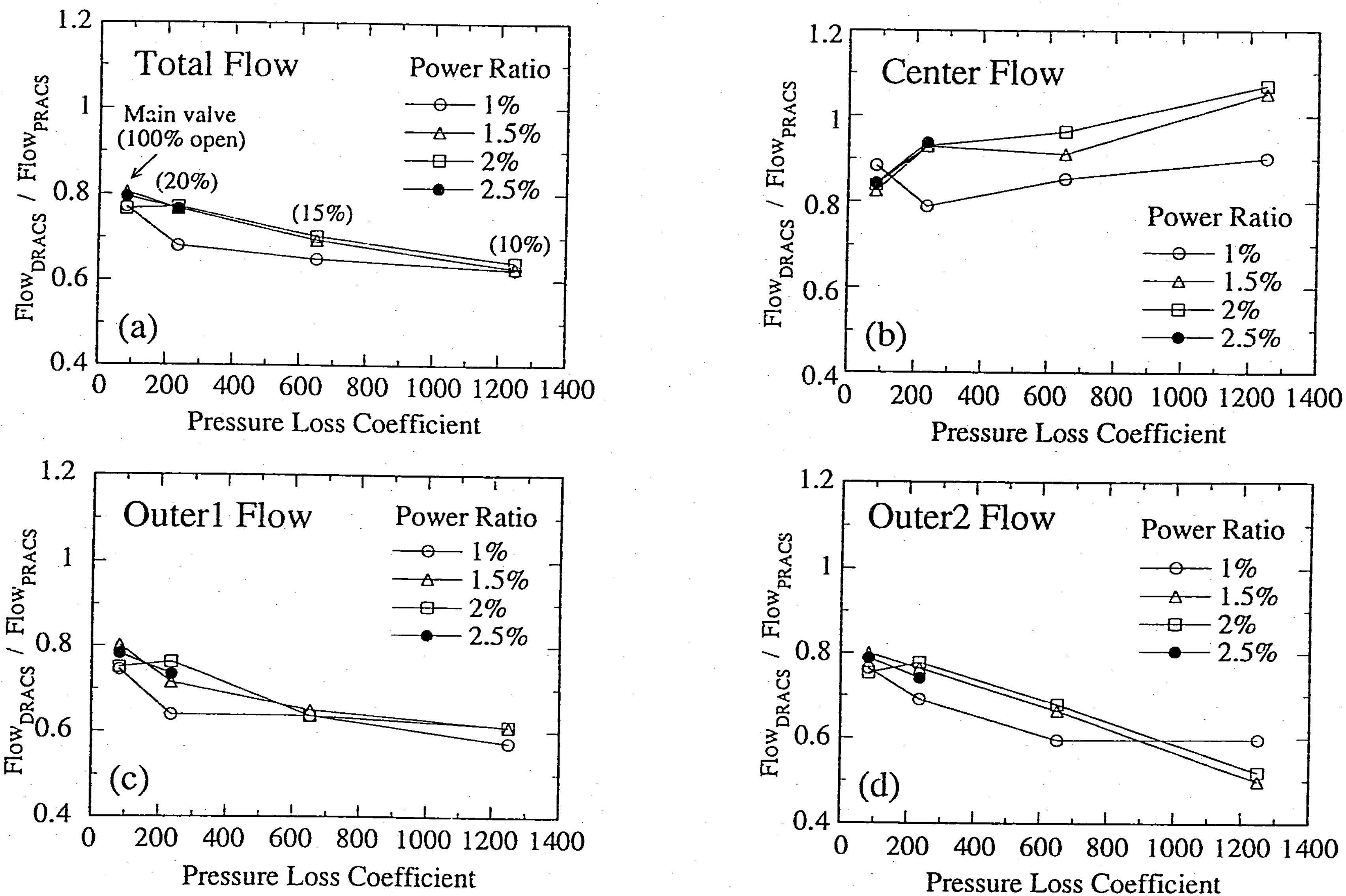


Fig. 4.1-3 Comparison of Natural Circulation Flows in Primary Loop between PRACS and DRACS

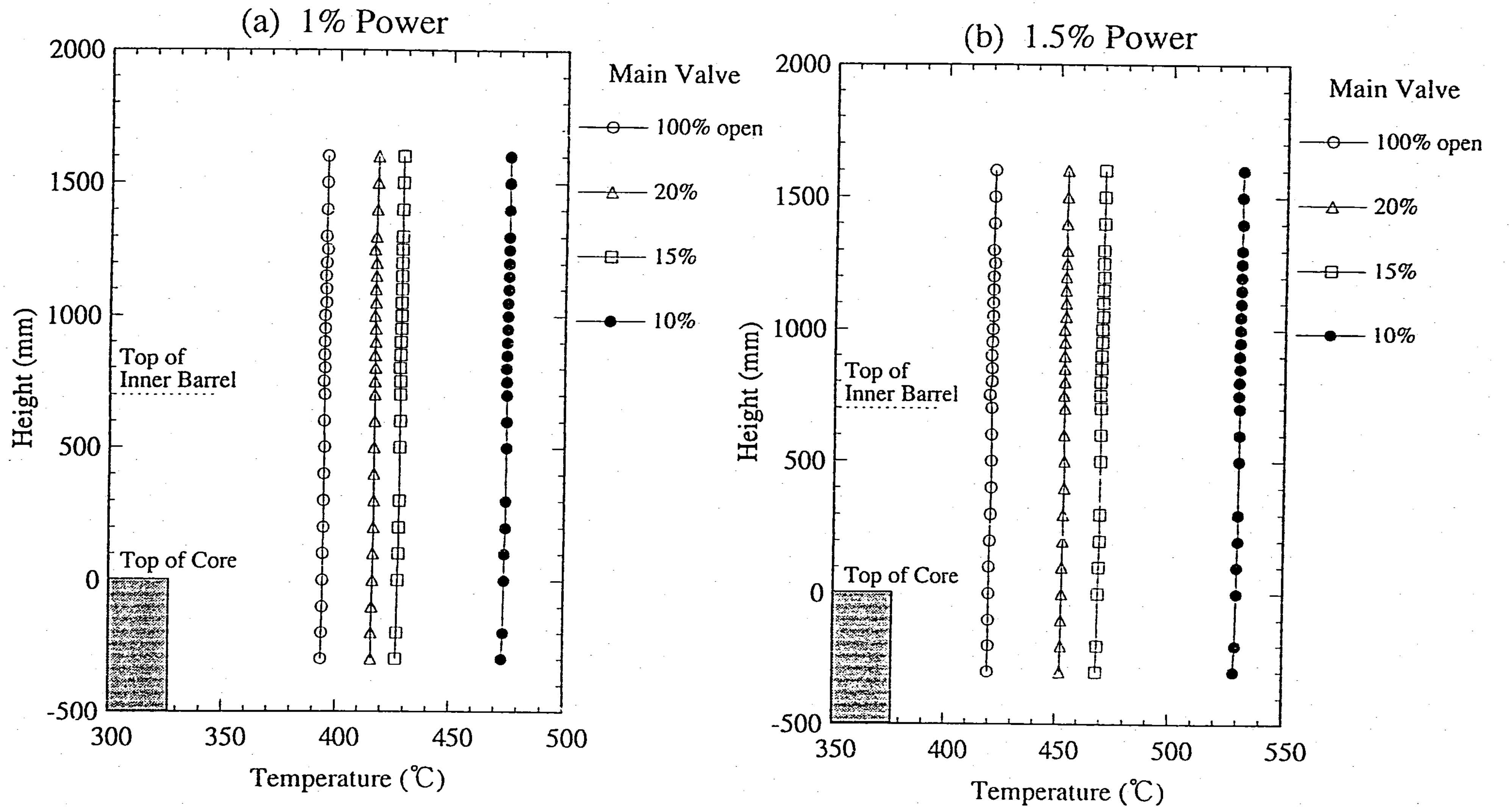
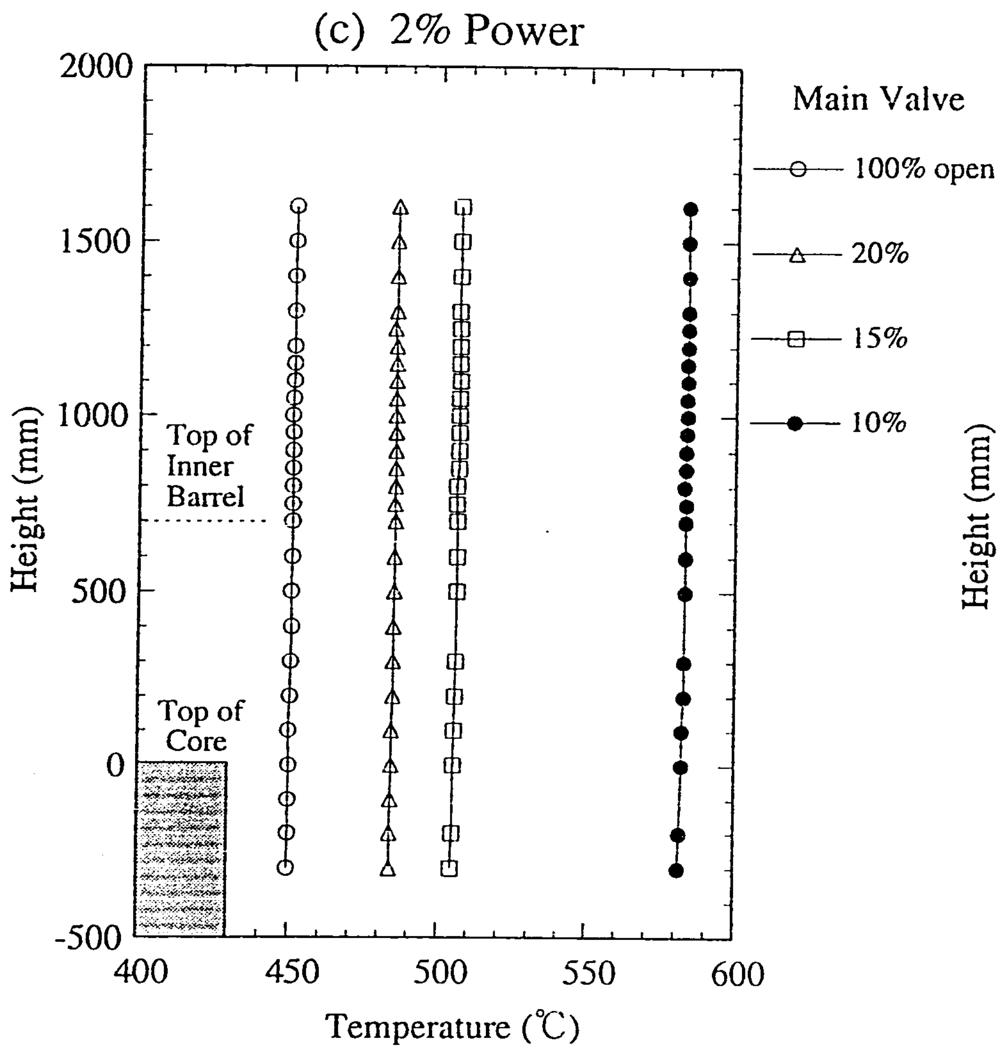


Fig. 4.2-1a Vertical Temperature Distributions in Upper Plenum (Heat Removal by PRACS)



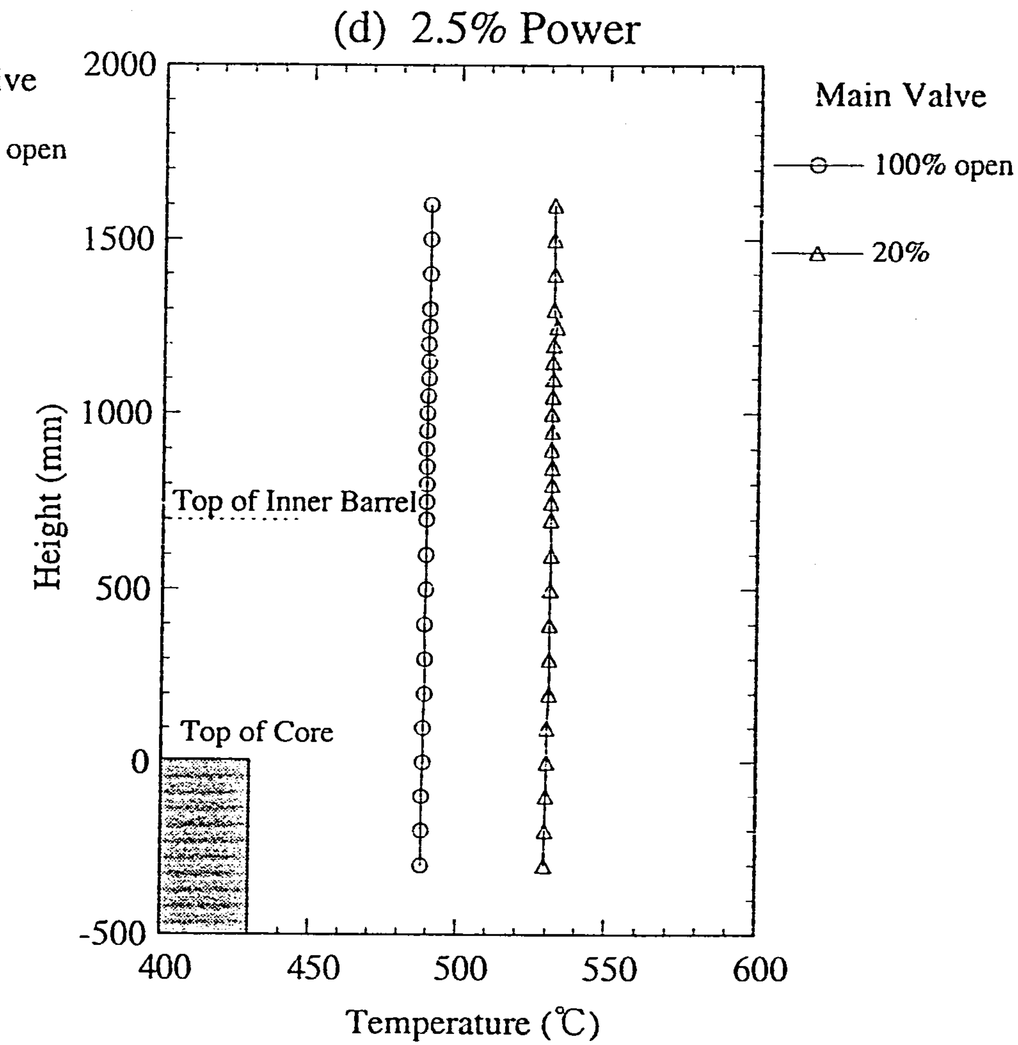


Fig. 4.2-1b Vertical Temperature Distributions in Upper Plenum (Heat Removal by PRACS)

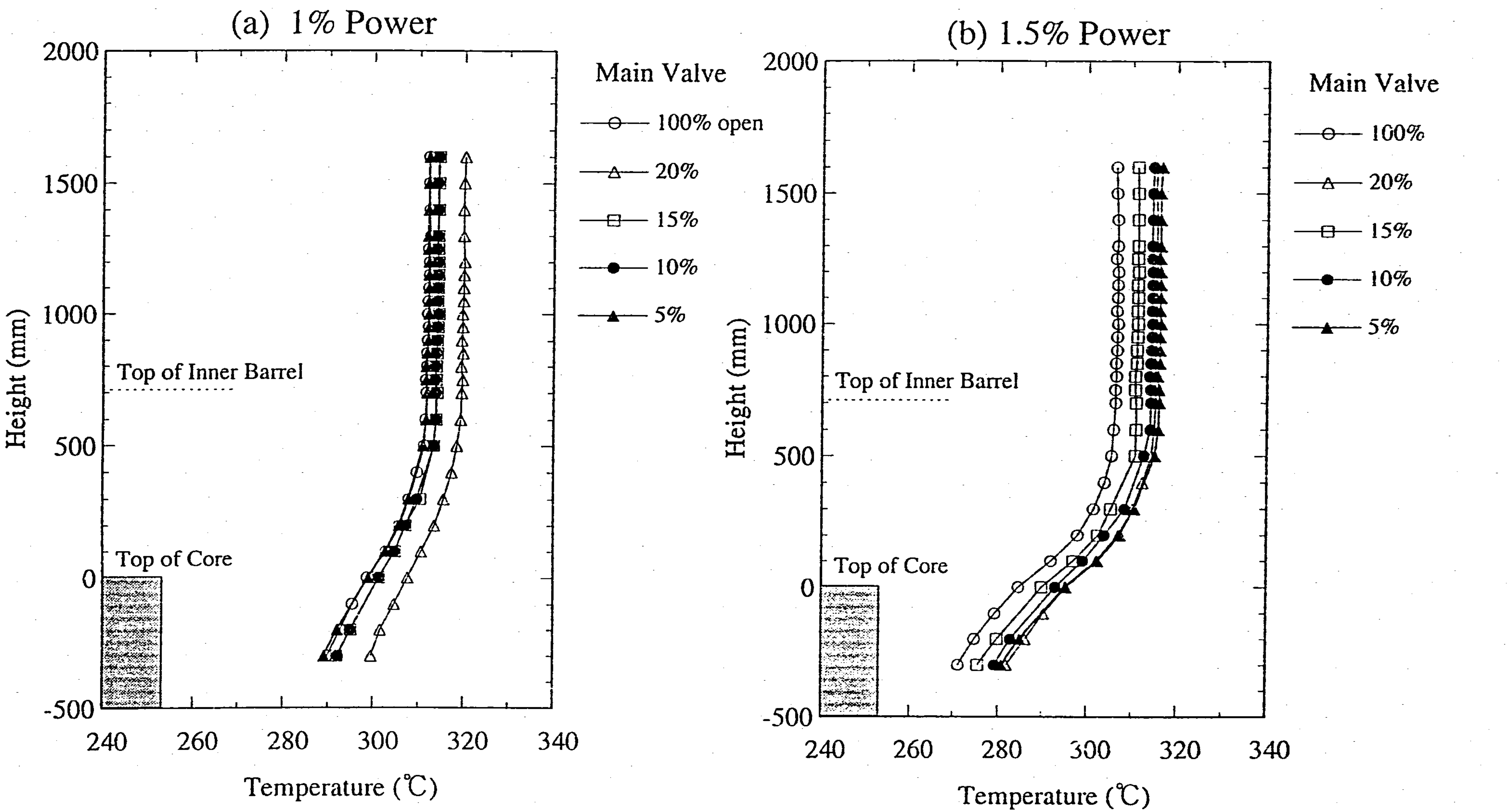


Fig. 4.2-2a Vertical Temperature Distributions in Upper Plenum (Heat Removal by DRACS)

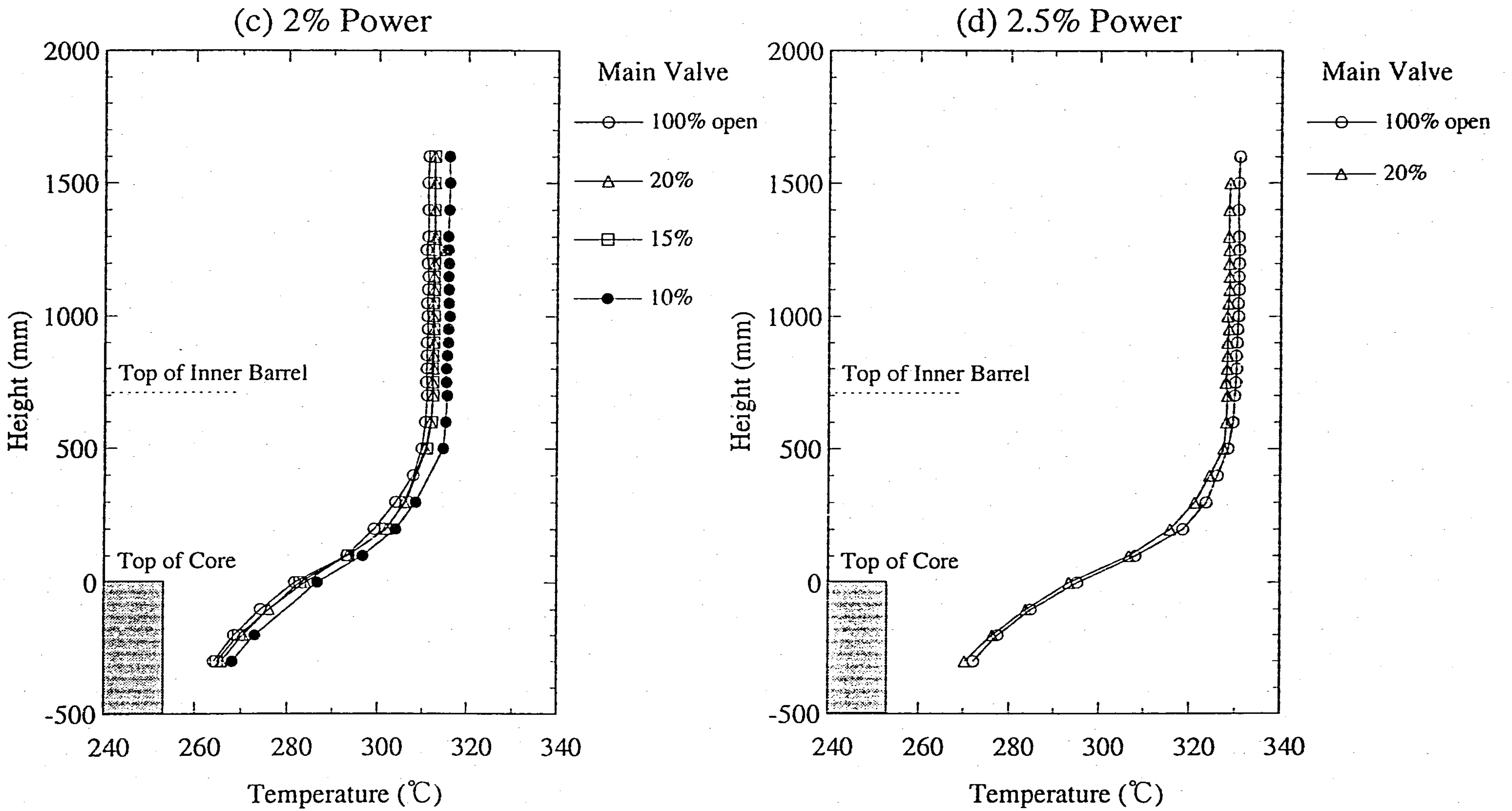


Fig. 4.2-2b Vertical Temperature Distributions in Upper Plenum (Heat Removal by DRACS)

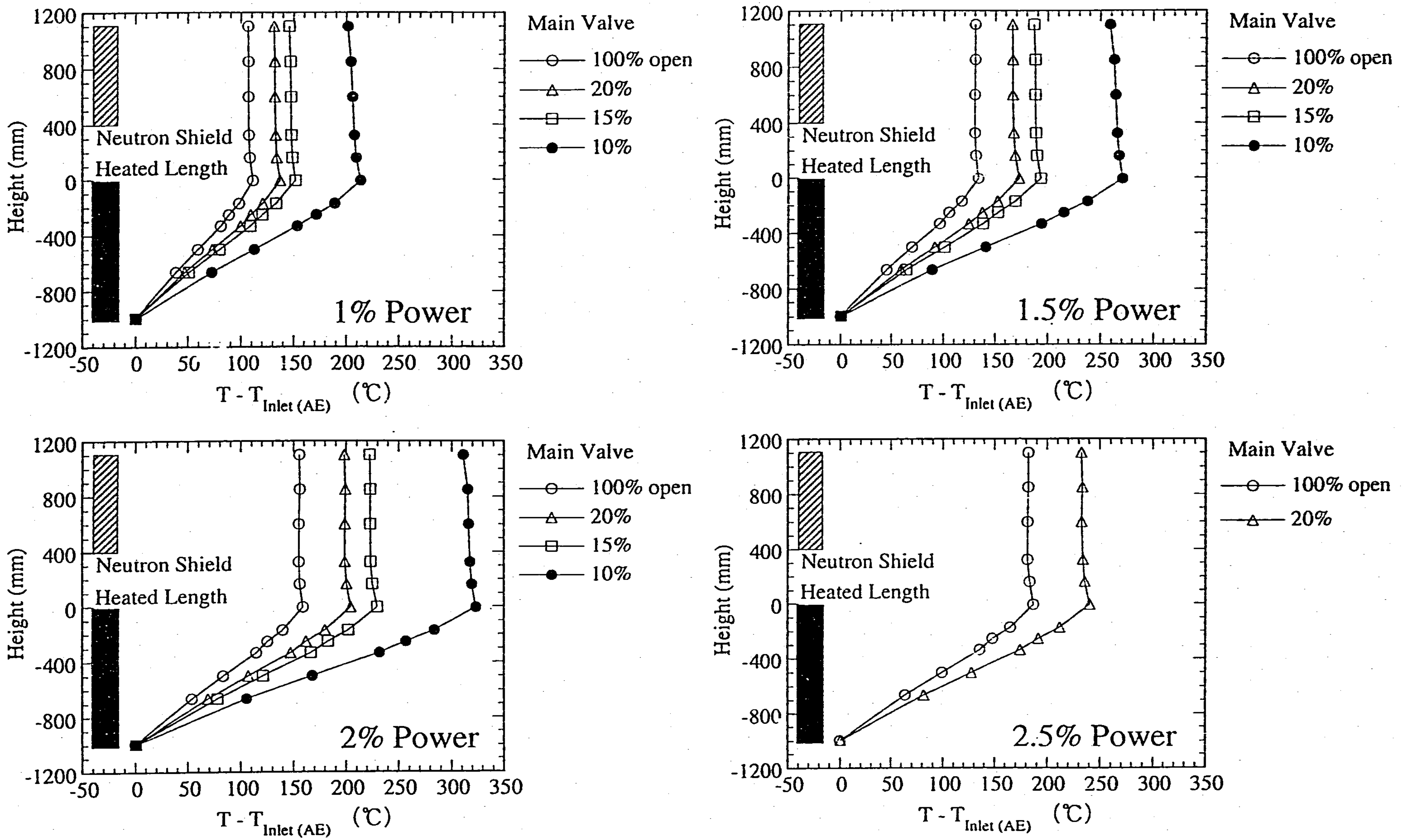


Fig. 4.3-1 Axial Temperature Distributions along Center Subchannel in Center Subassembly
(Heat Removal by PRACS)

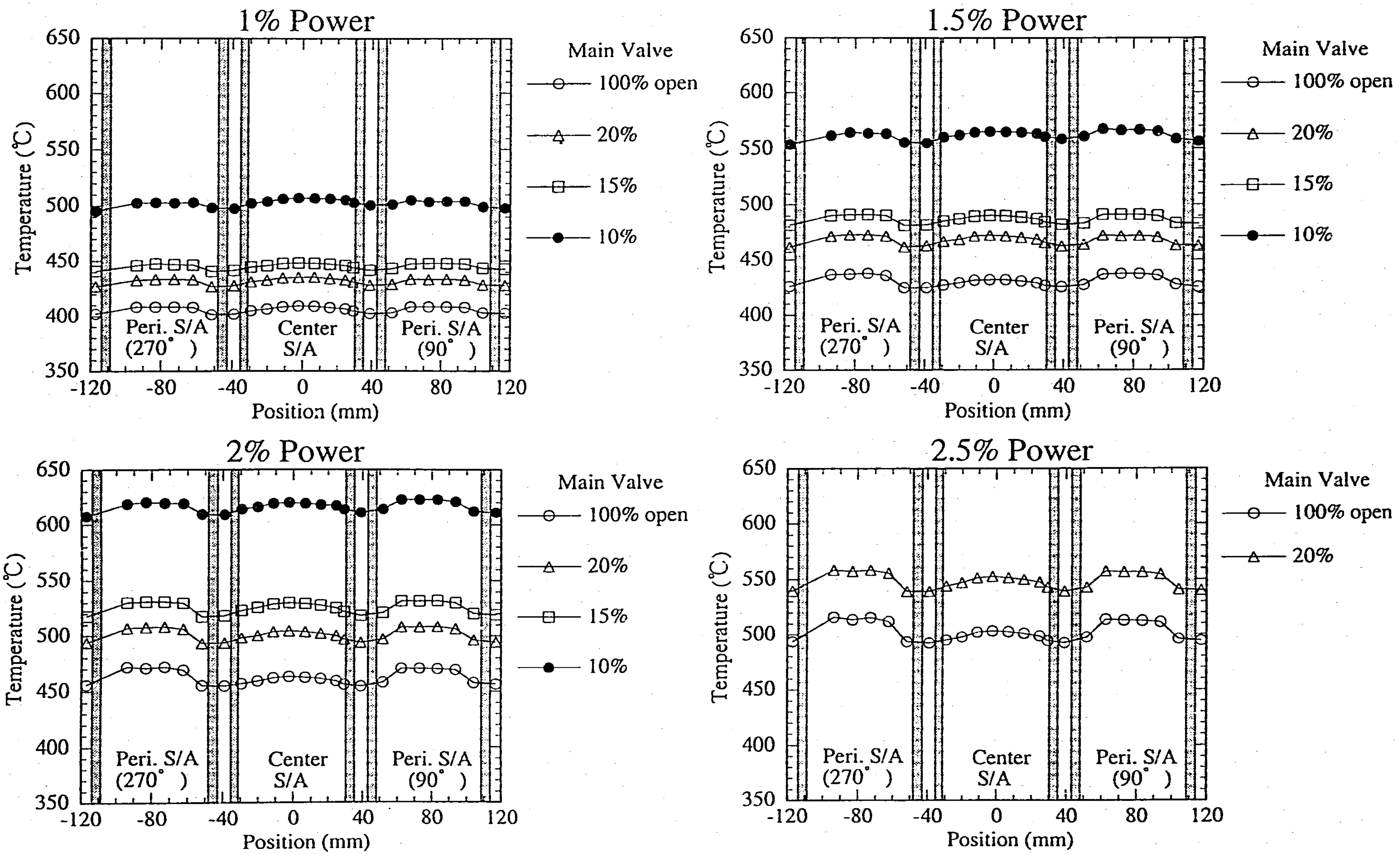


Fig. 4.3-2a Transverse Temperature Distributions in BI Cross Section (Heat Removal by PRACS)

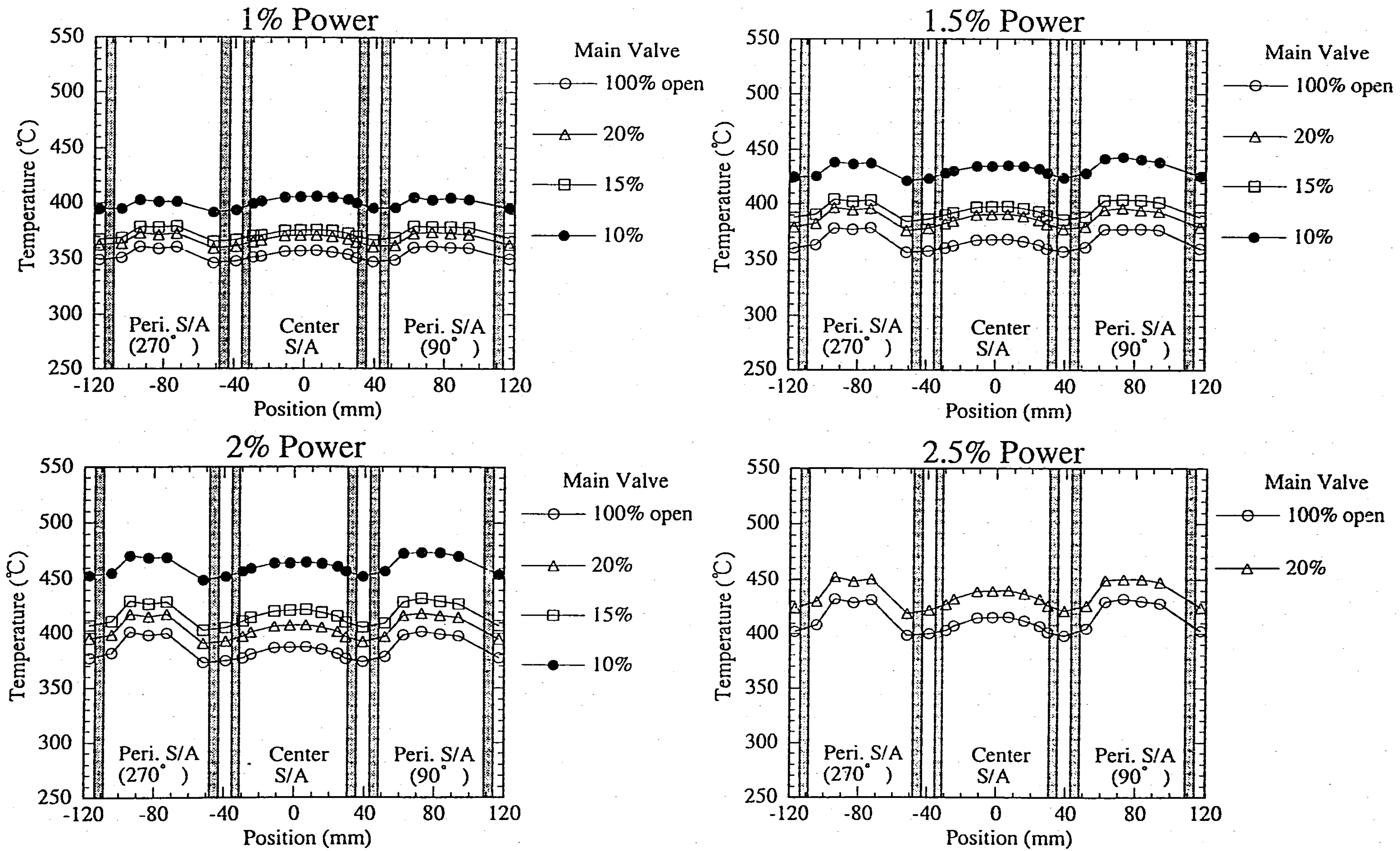


Fig. 4.3-2b Transverse Temperature Distributions in BD Cross Section (Heat Removal by PRACS)

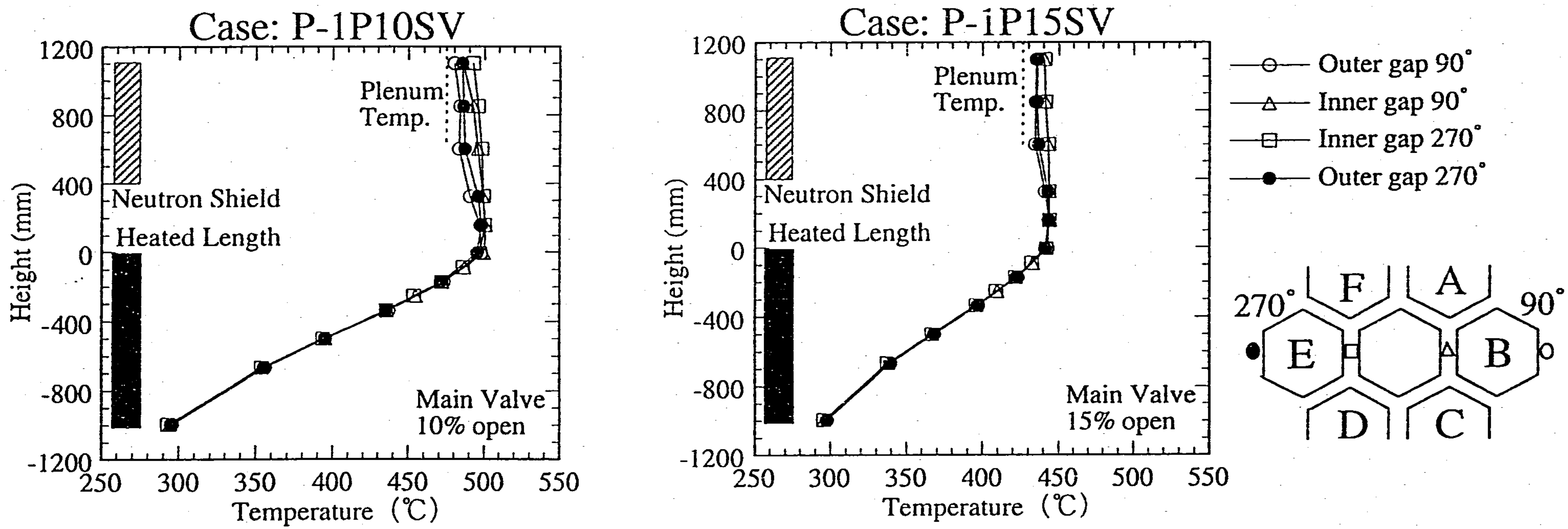


Fig. 4.3-3 Axial Temperature Distributions in Inter-Wrapper Gap under 1% Power
(Heat Removal by PRACS)

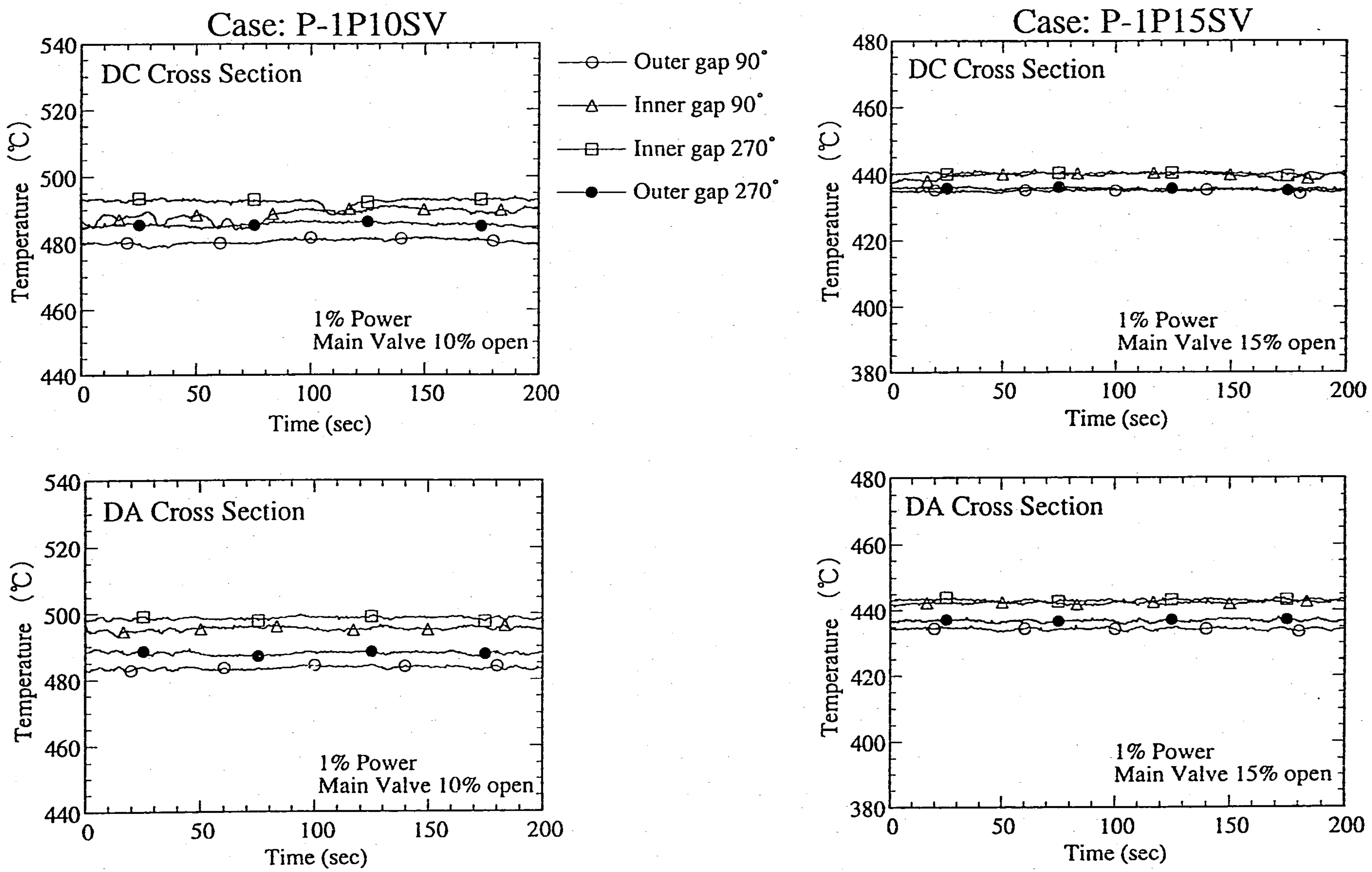


Fig. 4.3-4 Trends of Temperatures in Inter-Wrapper Gap at Neutron Shield (Heat Removal by PRACS)

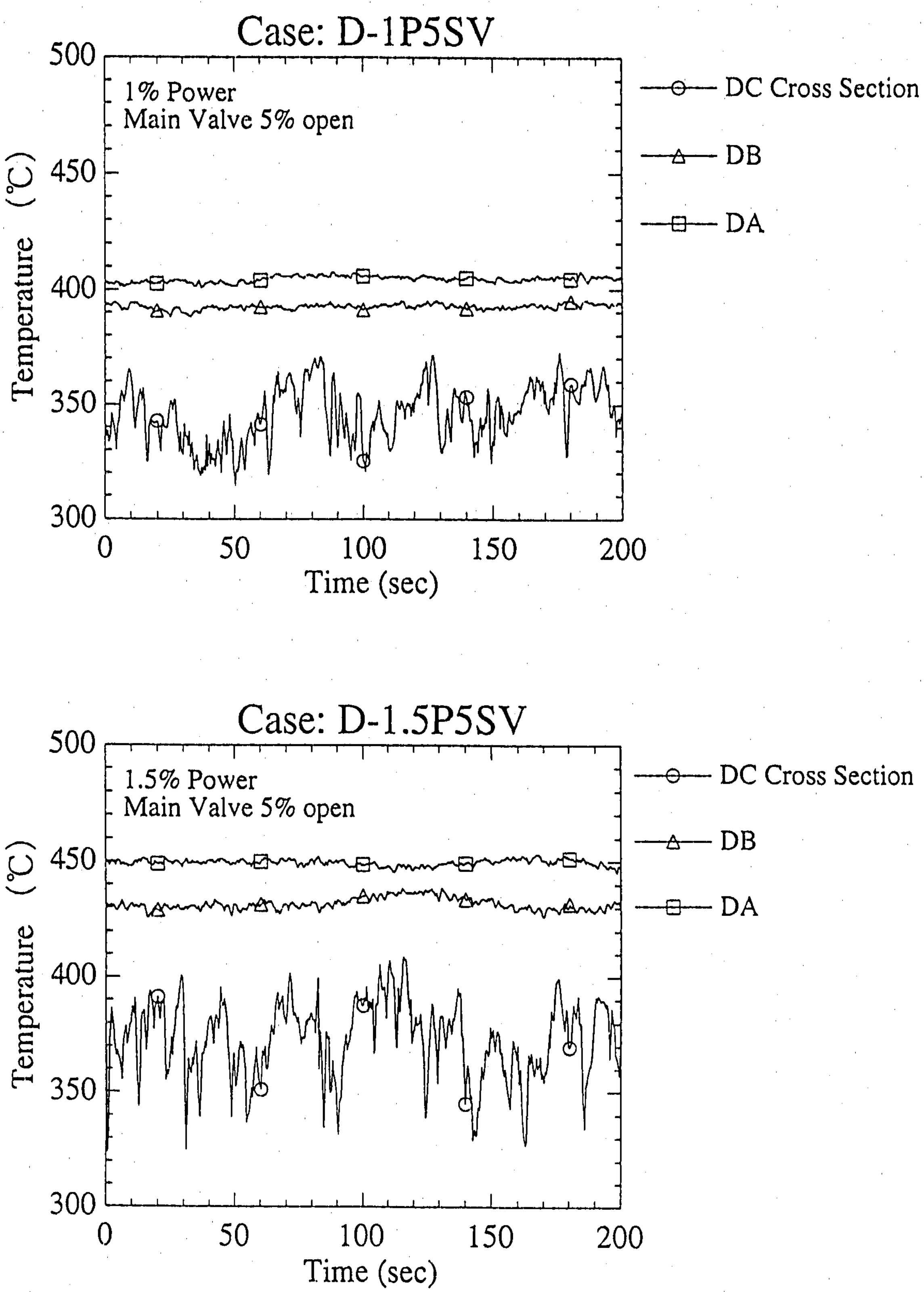


Fig. 4.3-5 Trends of Temperatures in Neutron Shield of Center Subassembly (Heat Removal by DRACS)

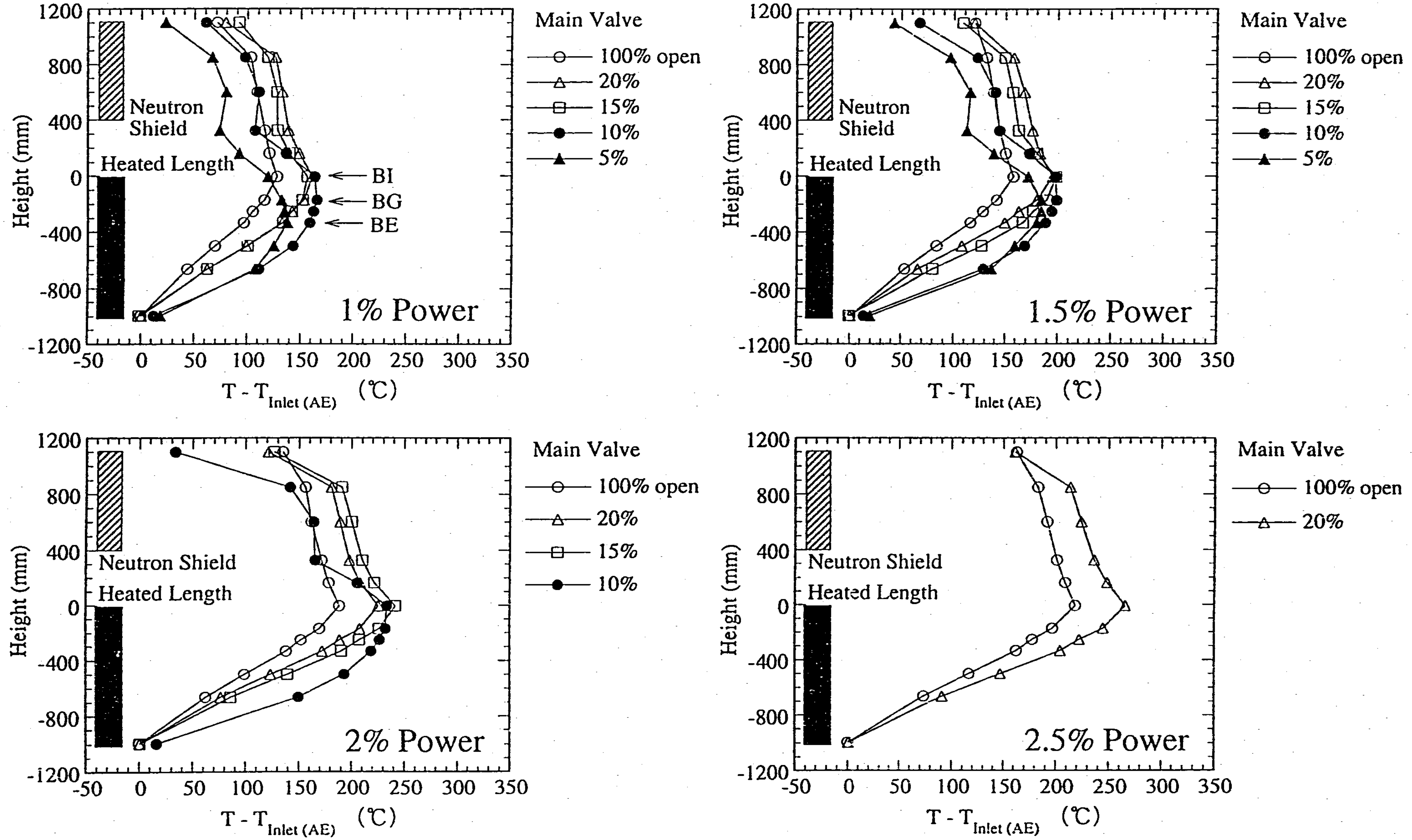


Fig. 4.3-6 Axial Temperature Distributions along Center Subchannel in Center Subassembly
(Heat Removal by DRACS)

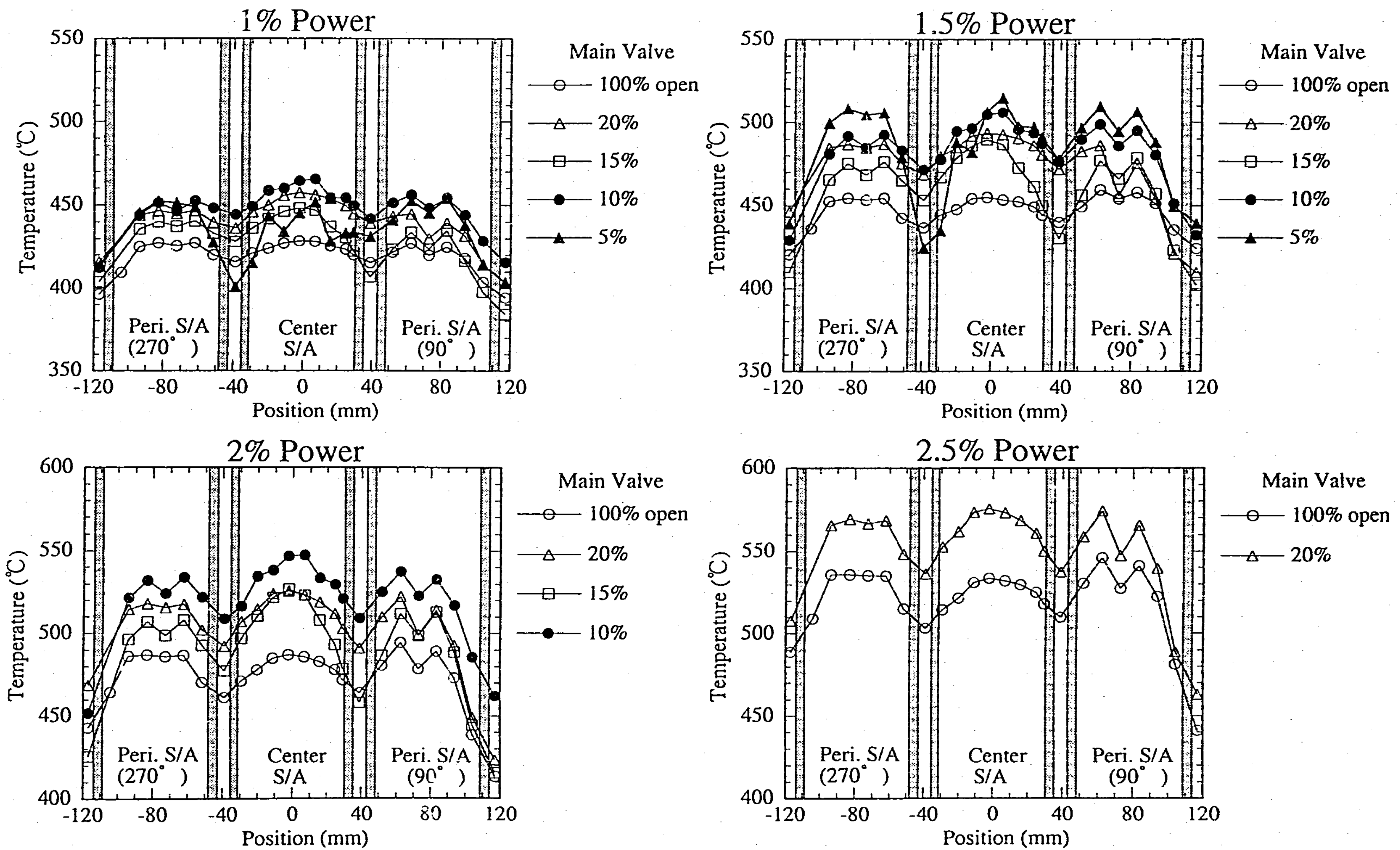


Fig. 4.3-7a Transverse Temperature Distributions in BI Cross Section (Heat Removal by DRACS)

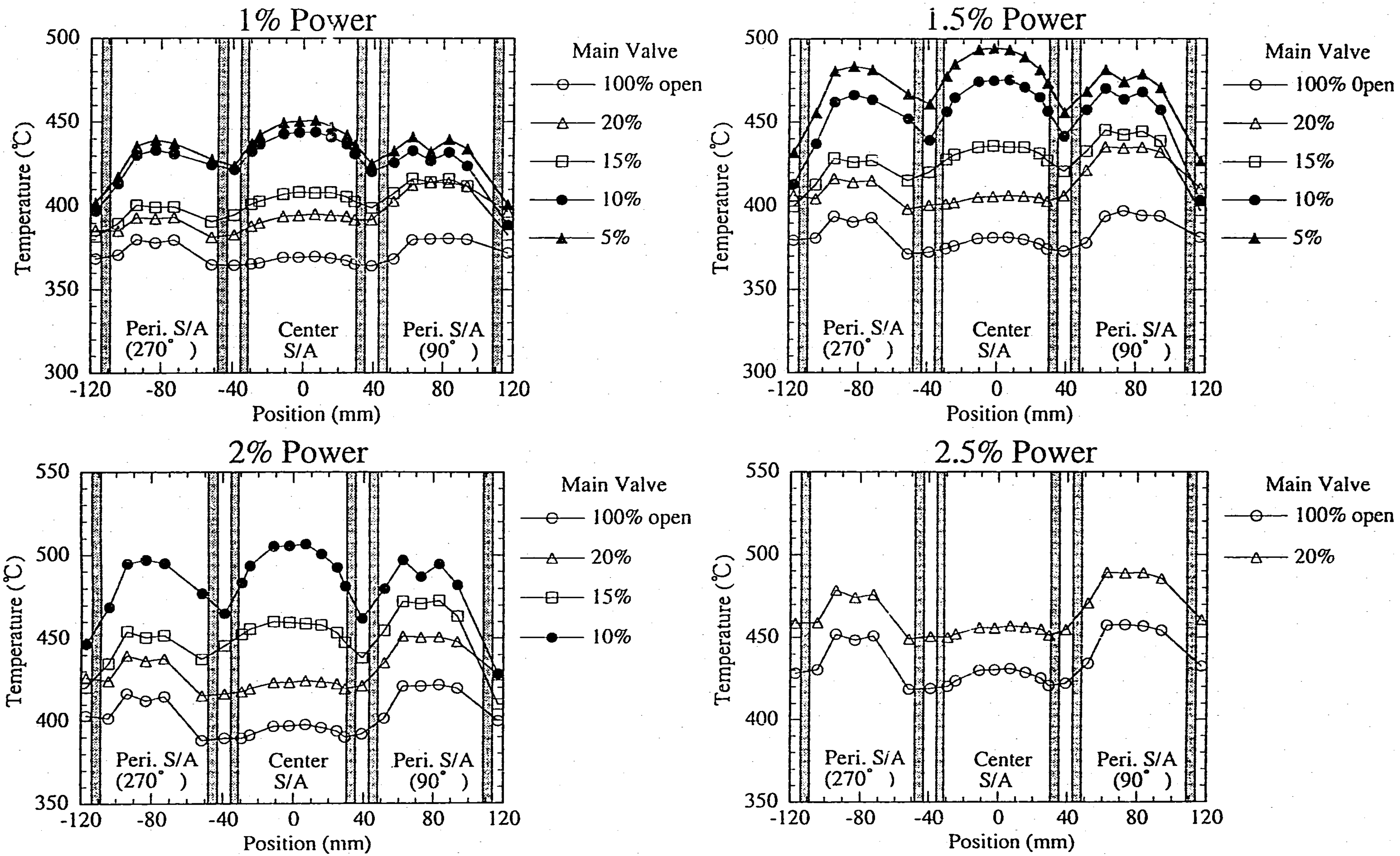


Fig. 4.3-7b Transverse Temperature Distributions in BD Cross Section (Heat Removal by DRACS)

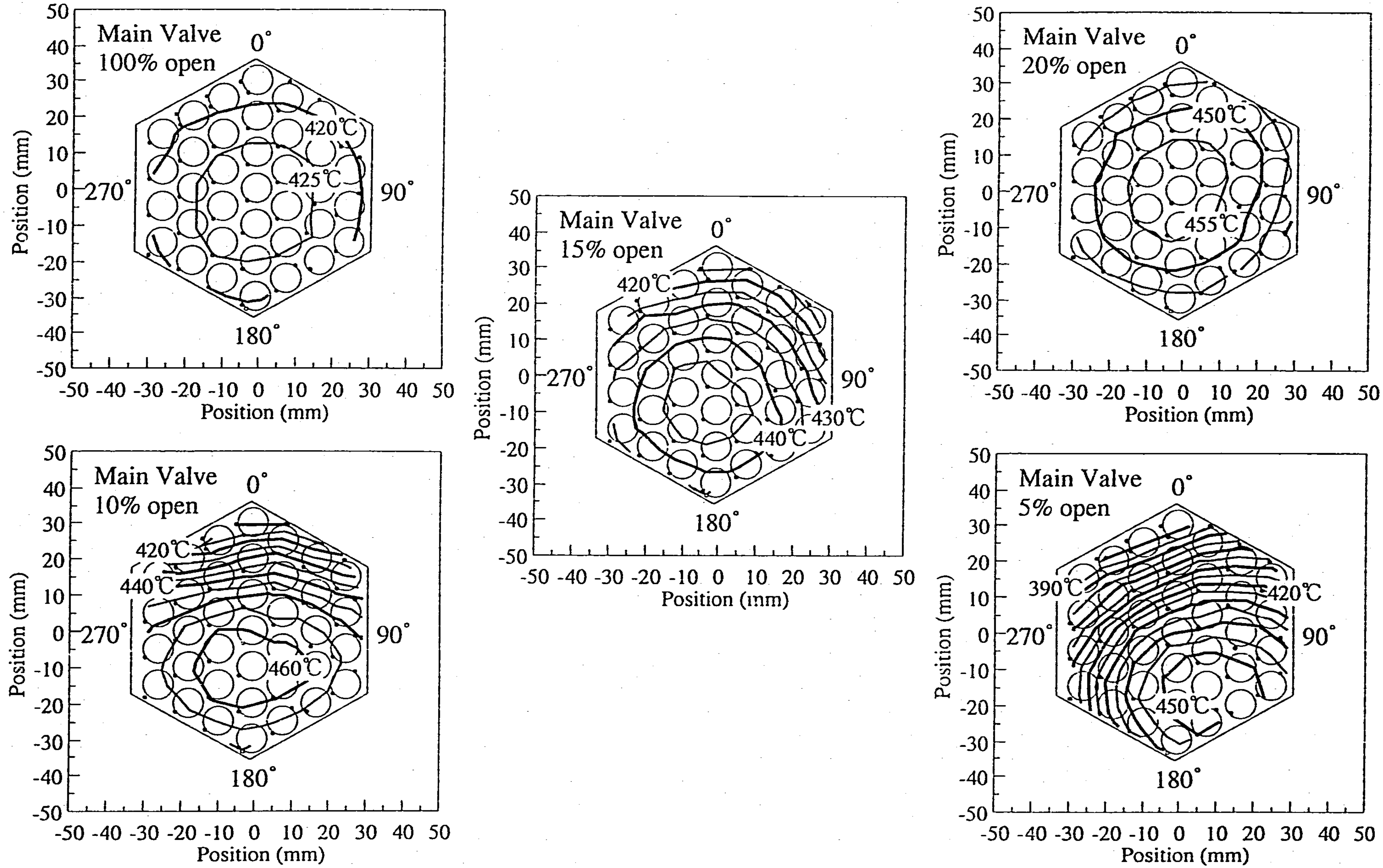


Fig. 4.3-8a. Isotherms at BI Cross Section of Center Subassembly under 1% Power (Heat Removal by DRACS)

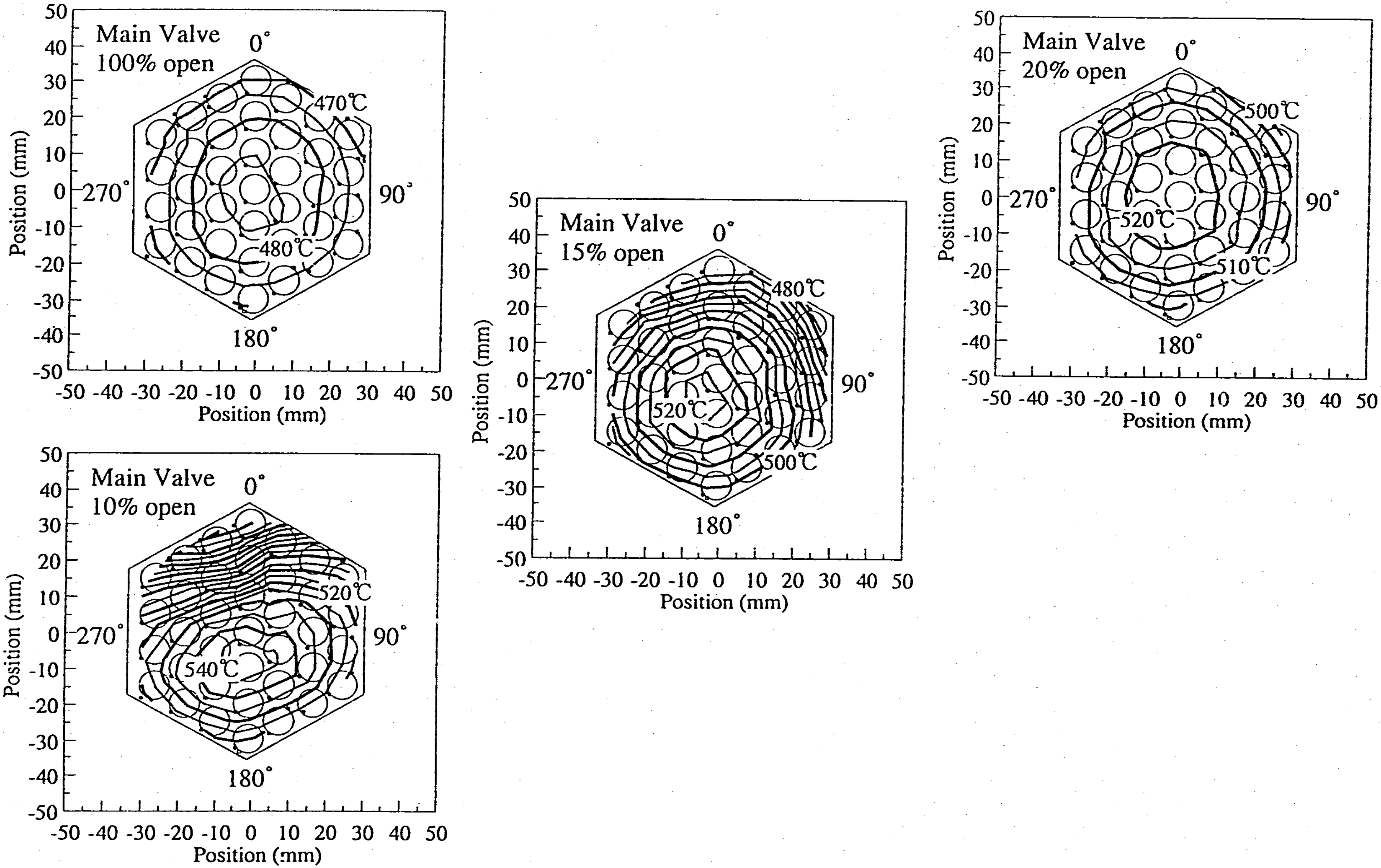


Fig. 4.3-8b Isotherms at BI Cross Section of Center Subassembly under 2% Power (Heat Removal by DRACS)

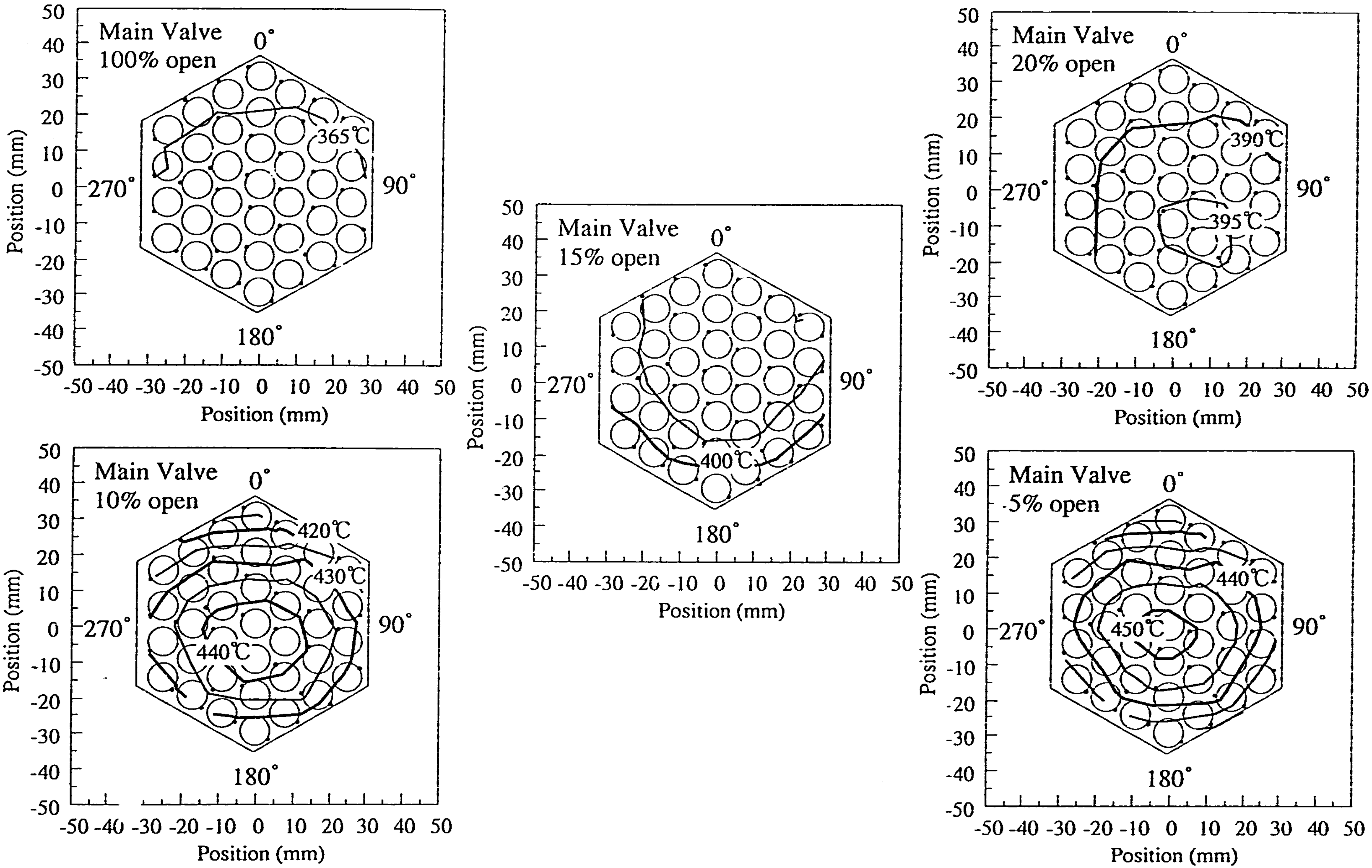


Fig. 4.3-9a Isotherms at BD Cross Section of Center Subassembly under 1% Power (Heat Removal by DRACS)

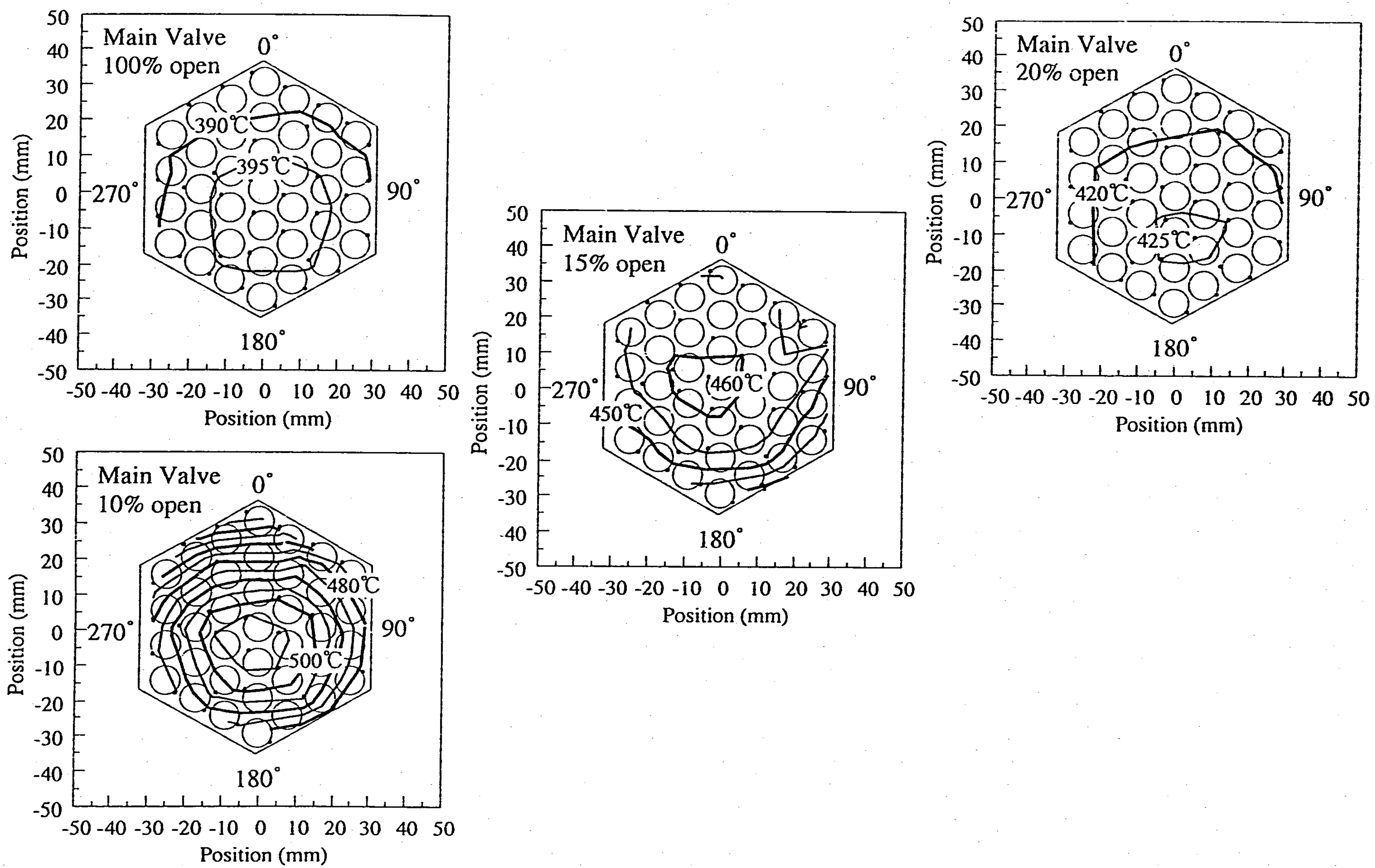


Fig. 4.3-9b Isotherms at BD Cross Section of Center Subassembly under 2% Power (Heat Removal by DRACS)

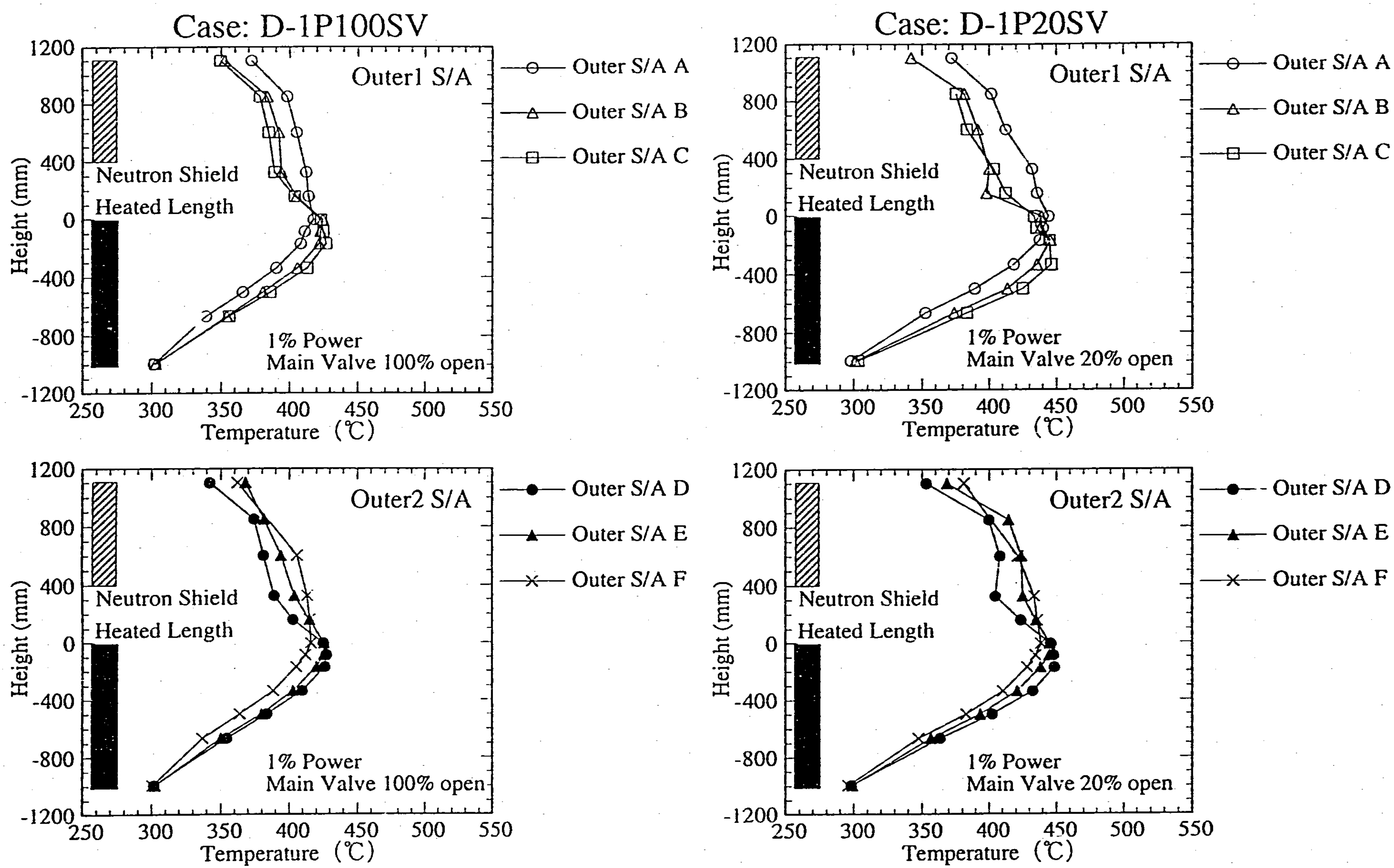


Fig. 4.3-10a Axial Temperature Distributions along Center Subchannel in Outer Subassemblies (Heat Removal by DRACS)

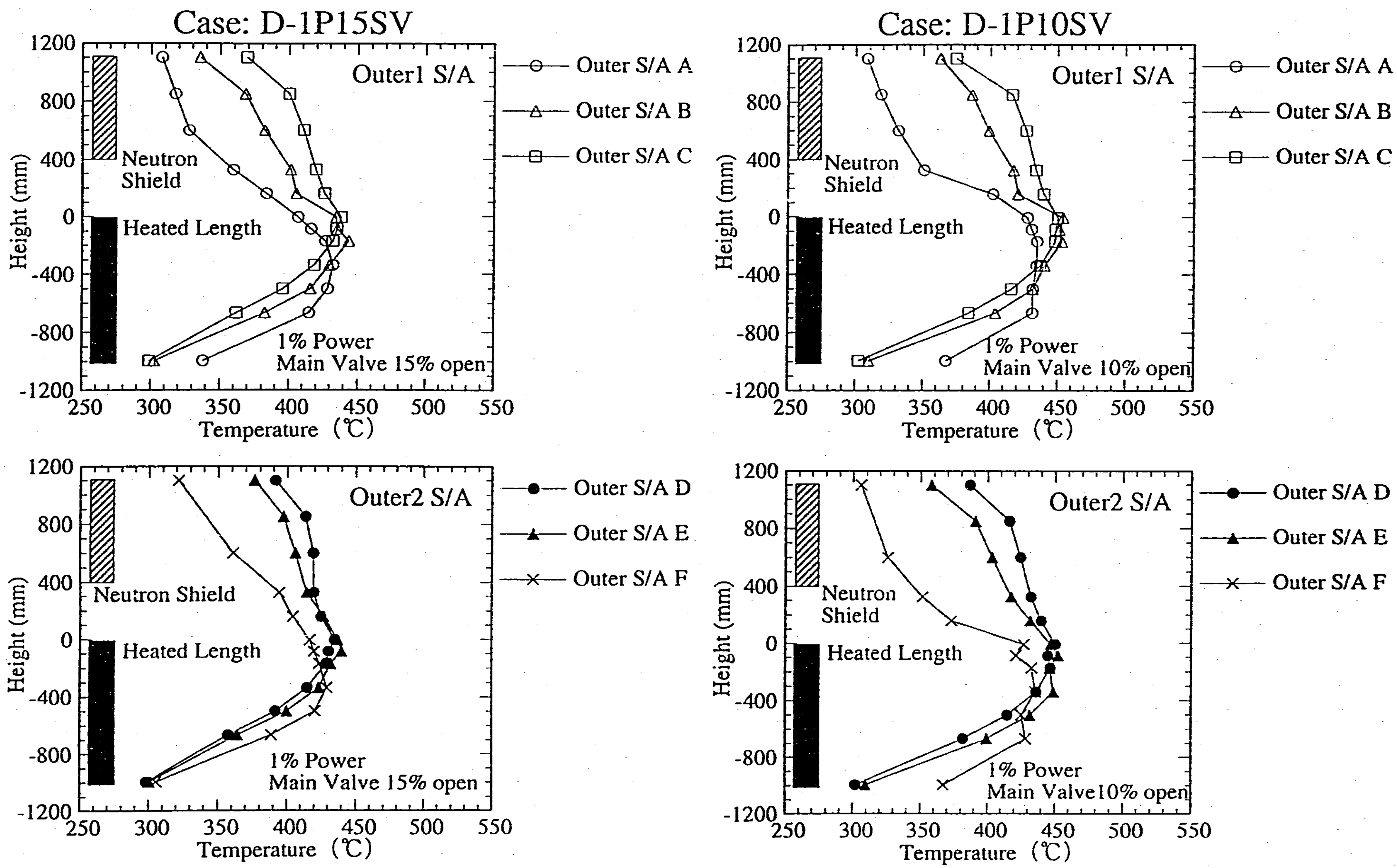


Fig. 4.3-10b Axial Temperature Distributions along Center Subchannel in Outer Subassemblies (Heat Removal by DRACS)

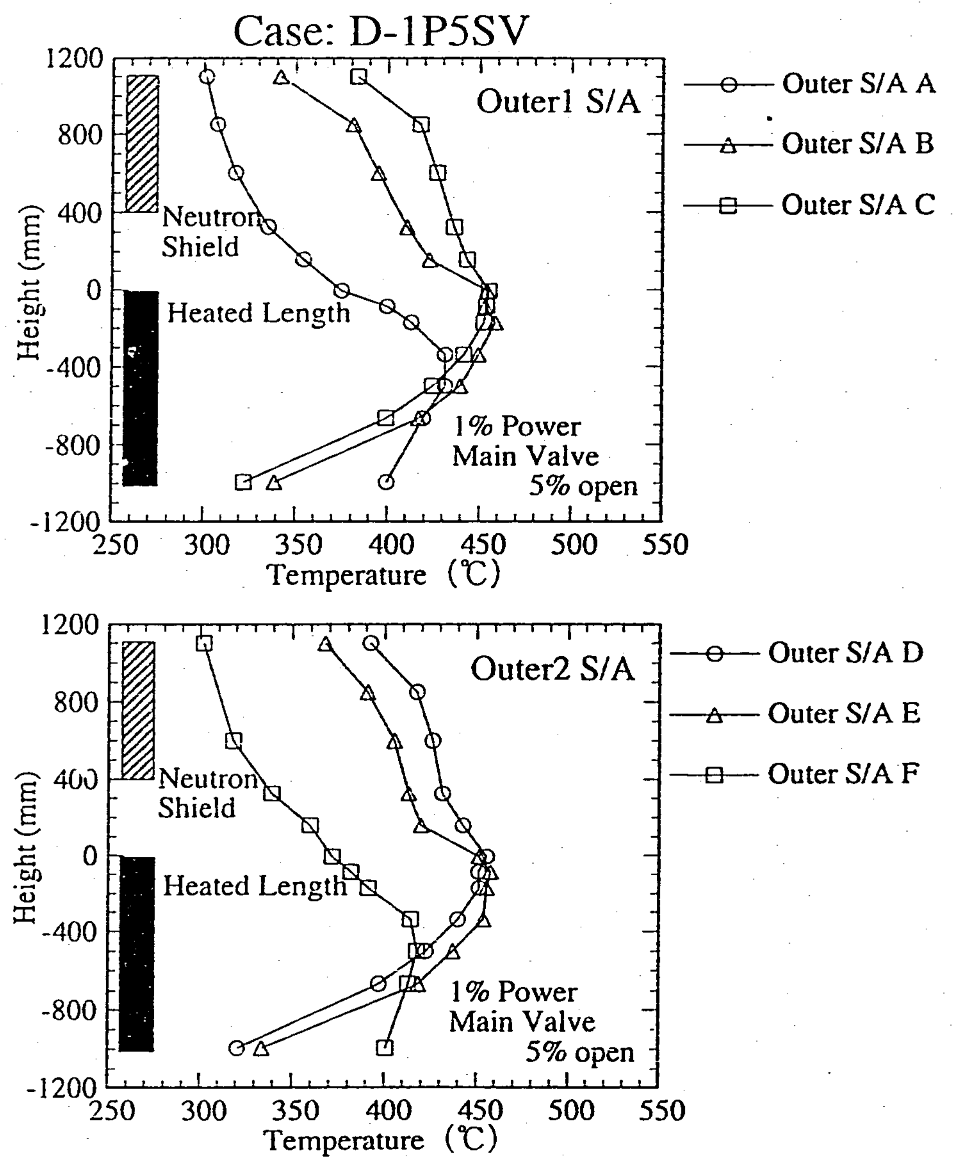


Fig. 4.3-10c Axial Temperature Distributions along Center Subchannel in Outer Subassemblies (Heat Removal by DRACS)

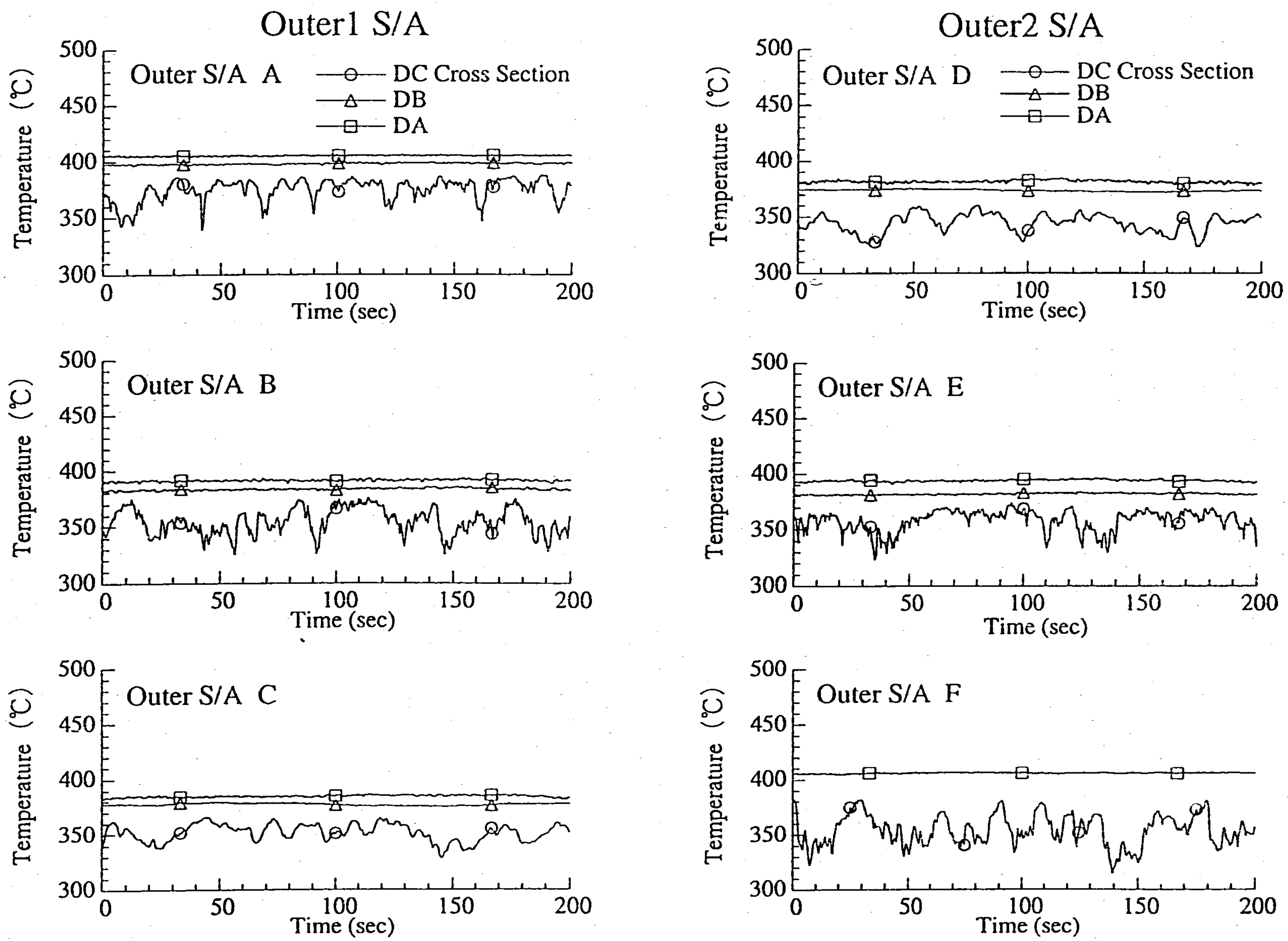


Fig. 4.3-11a Trends of Temperatures in Upper Neutron Shield of Outer Subassemblies under 1% Power and Main Valve 100% Open (Case: D-1P100SV / Heat Remval by DRACS)

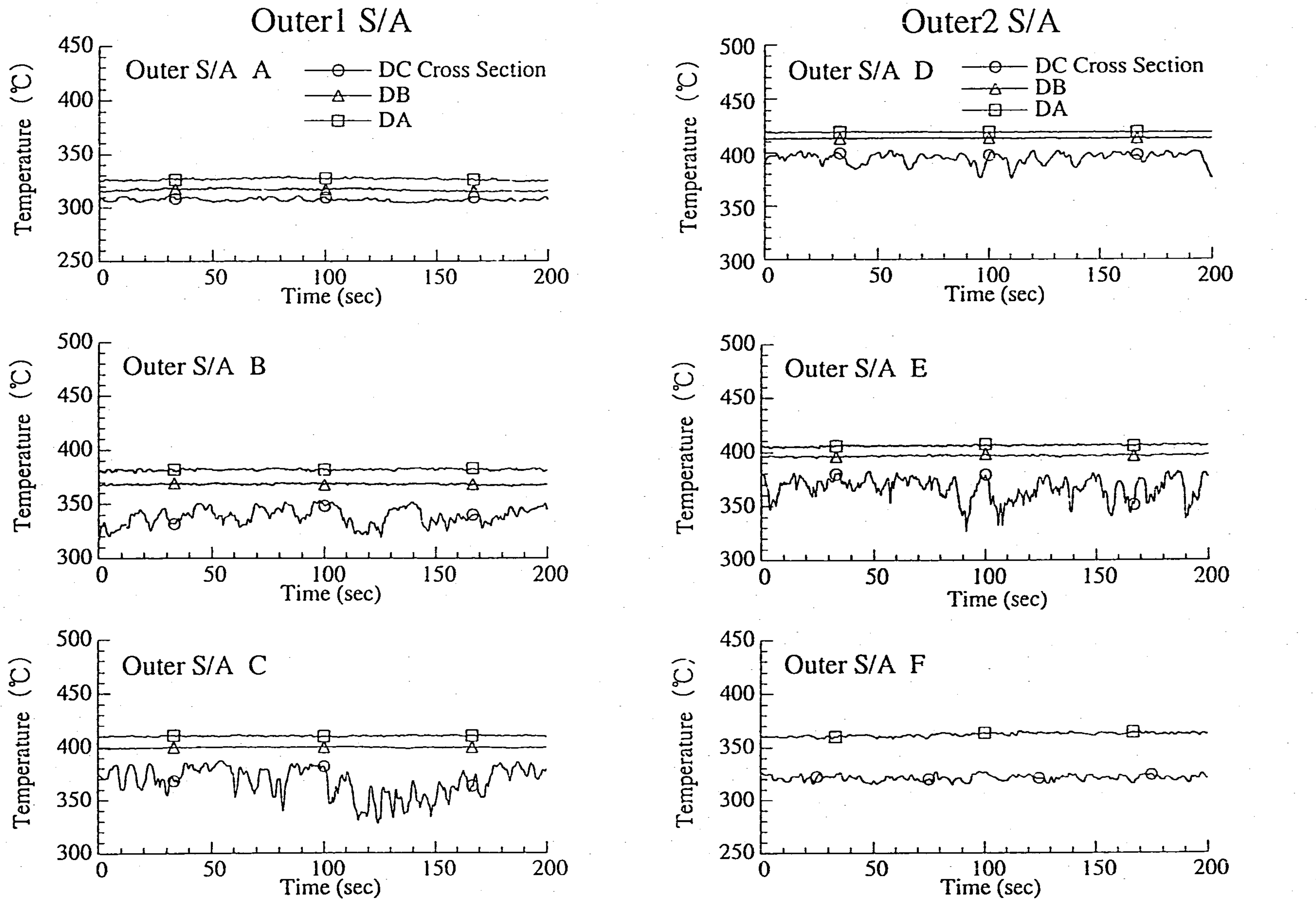


Fig. 4.3-11b Trends of Temperatures in Upper Neutron Shield of Outer Subassemblies under 1% Power and Main Valve 15% Open (Case: D-1P15SV / Heat Remval by DRACS)

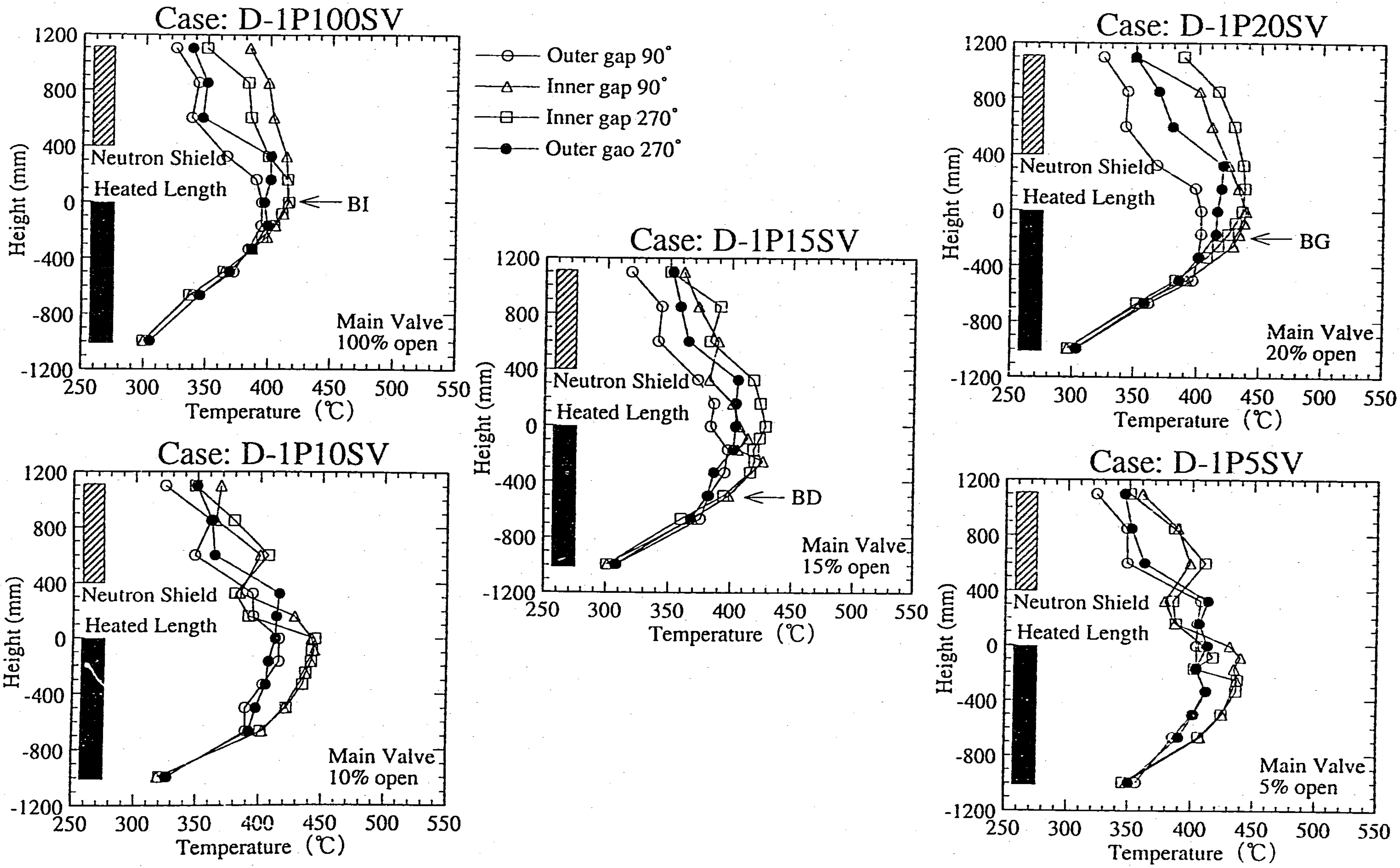


Fig. 4.3-12a Axial Temperature Distributions in Inter-Wrapper Gap under 1% Power (Heat Removal by DRACS)

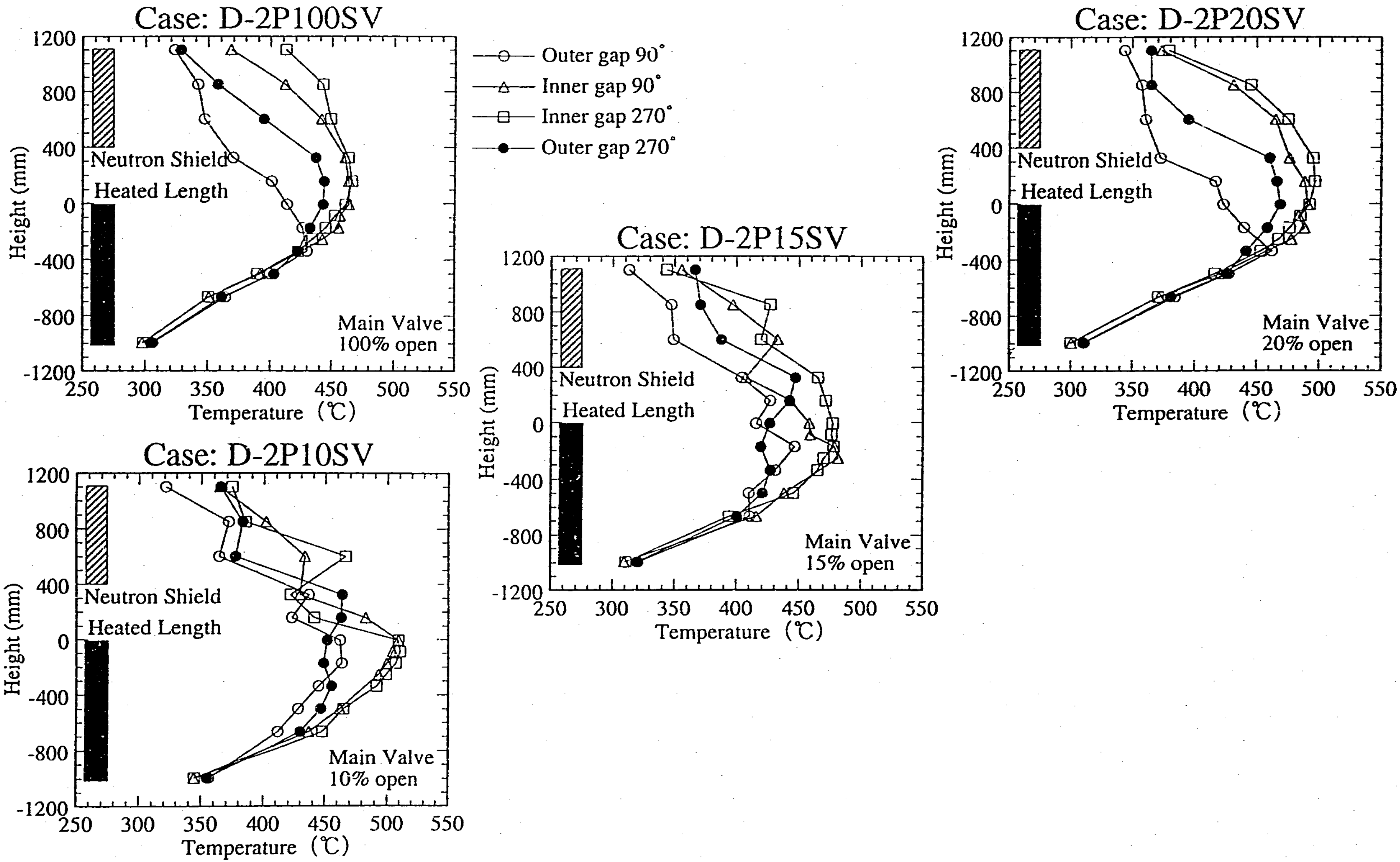


Fig. 4.3-12b Axial Temperature Distributions in Inter-Wrapper Gap under 2% Power (Heat Removal by DRACS)

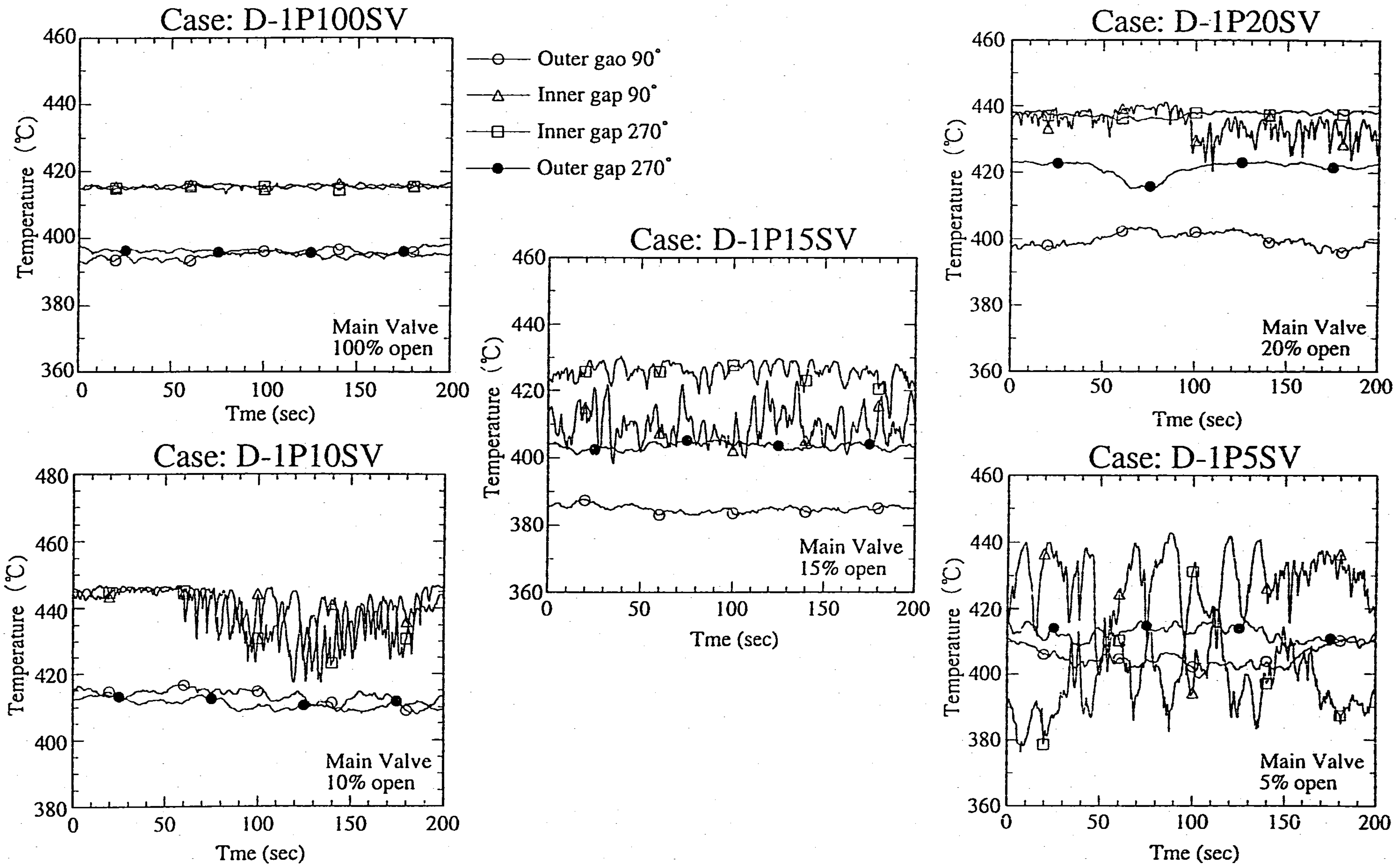


Fig. 4.3-13a Temperature Fluctuations in Inter-Wrapper Gap of BI Cross Section under 1% Power
(Heat Removal by DRACS)

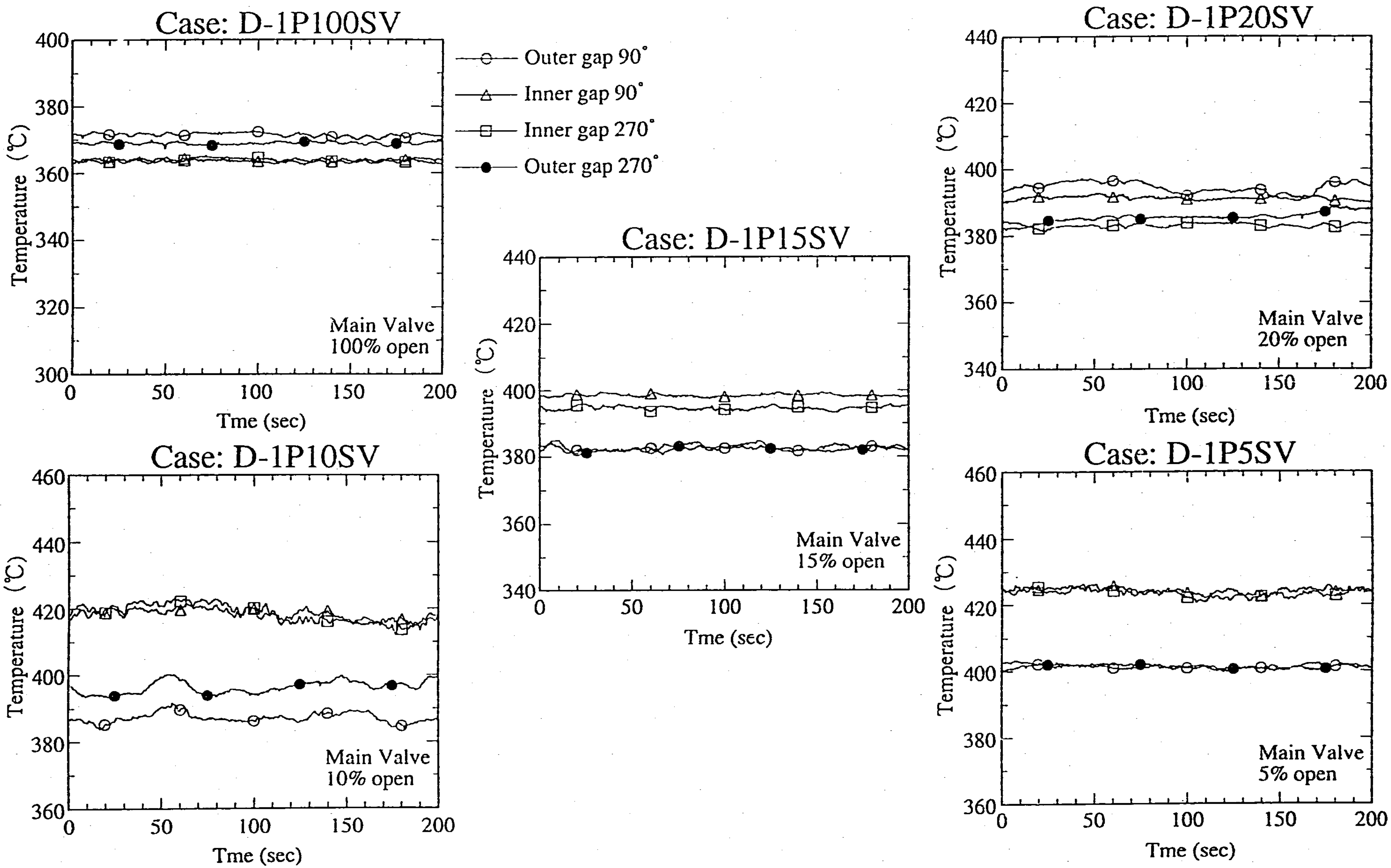


Fig. 4.3-13b Temperature Fluctuations in Inter-Wrapper Gap of BD Cross Section under 1% Power
(Heat Removal by DRACS)

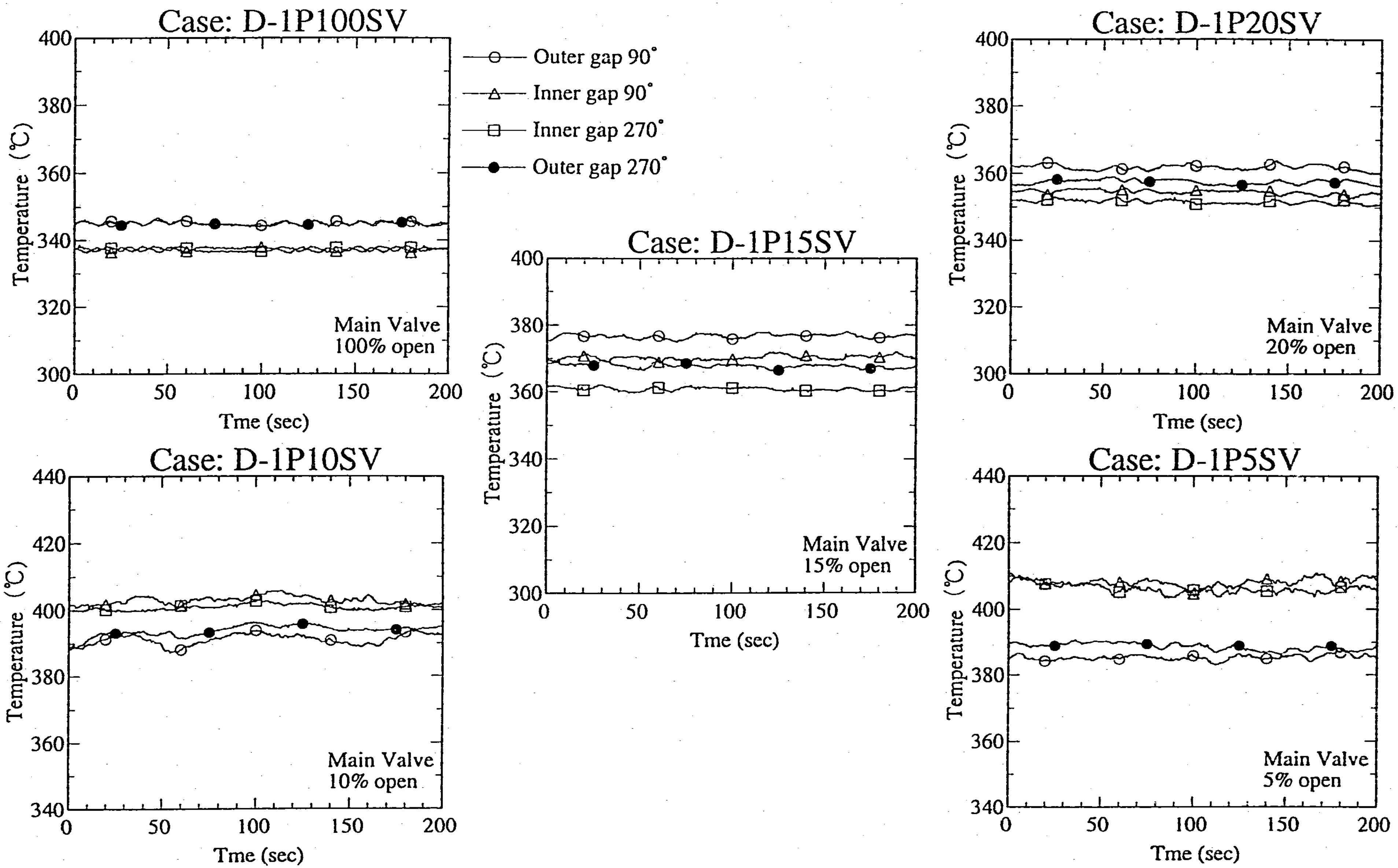


Fig. 4.3-13c Temperature Fluctuations in Inter-Wrapper Gap of BC Cross Section under 1% Power
(Heat Removal by DRACS)

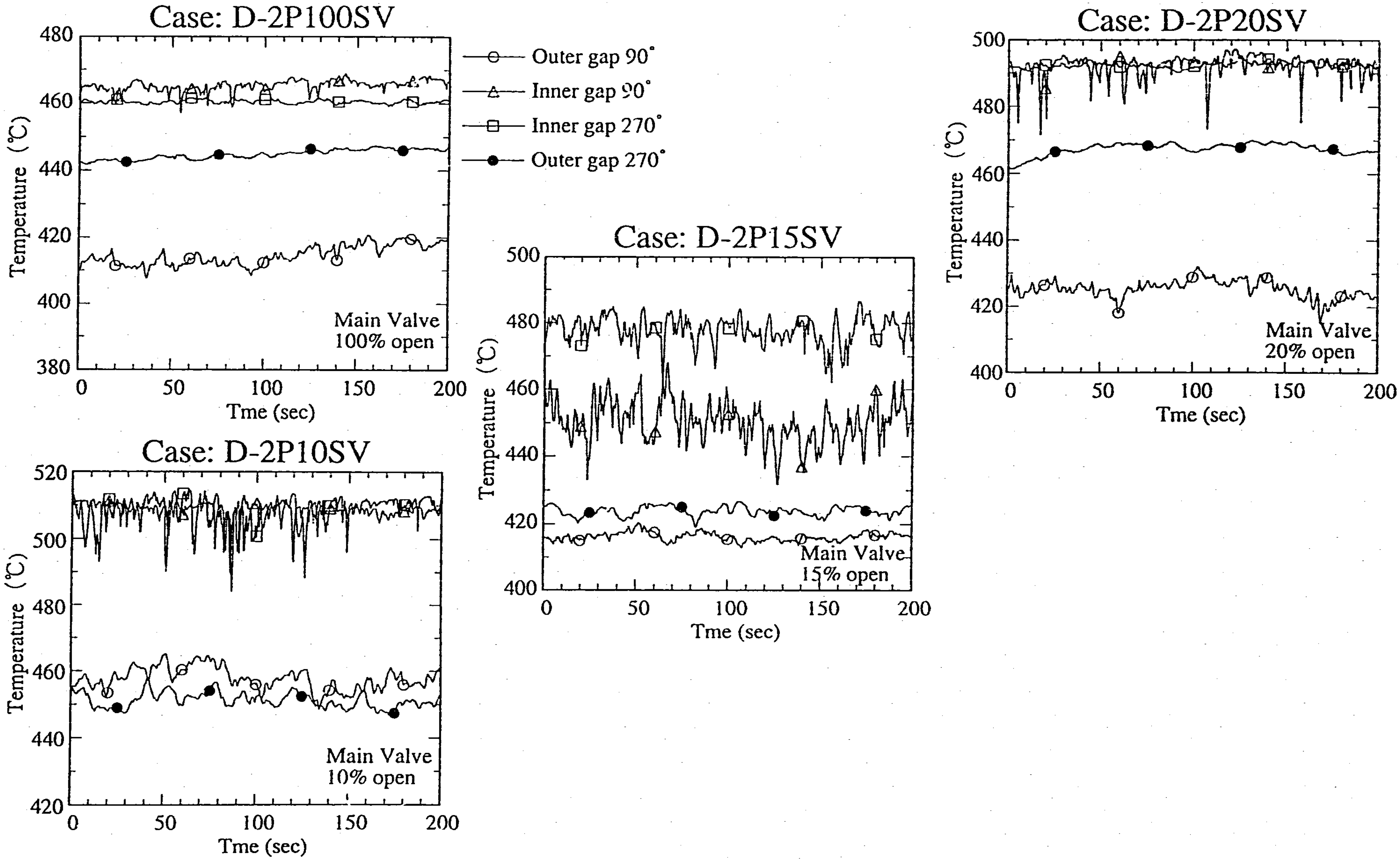


Fig. 4.3-14a Temperature Fluctuations in Inter-Wrapper Gap of BI Cross Section under 2% Power (Heat Removal by DRACS)

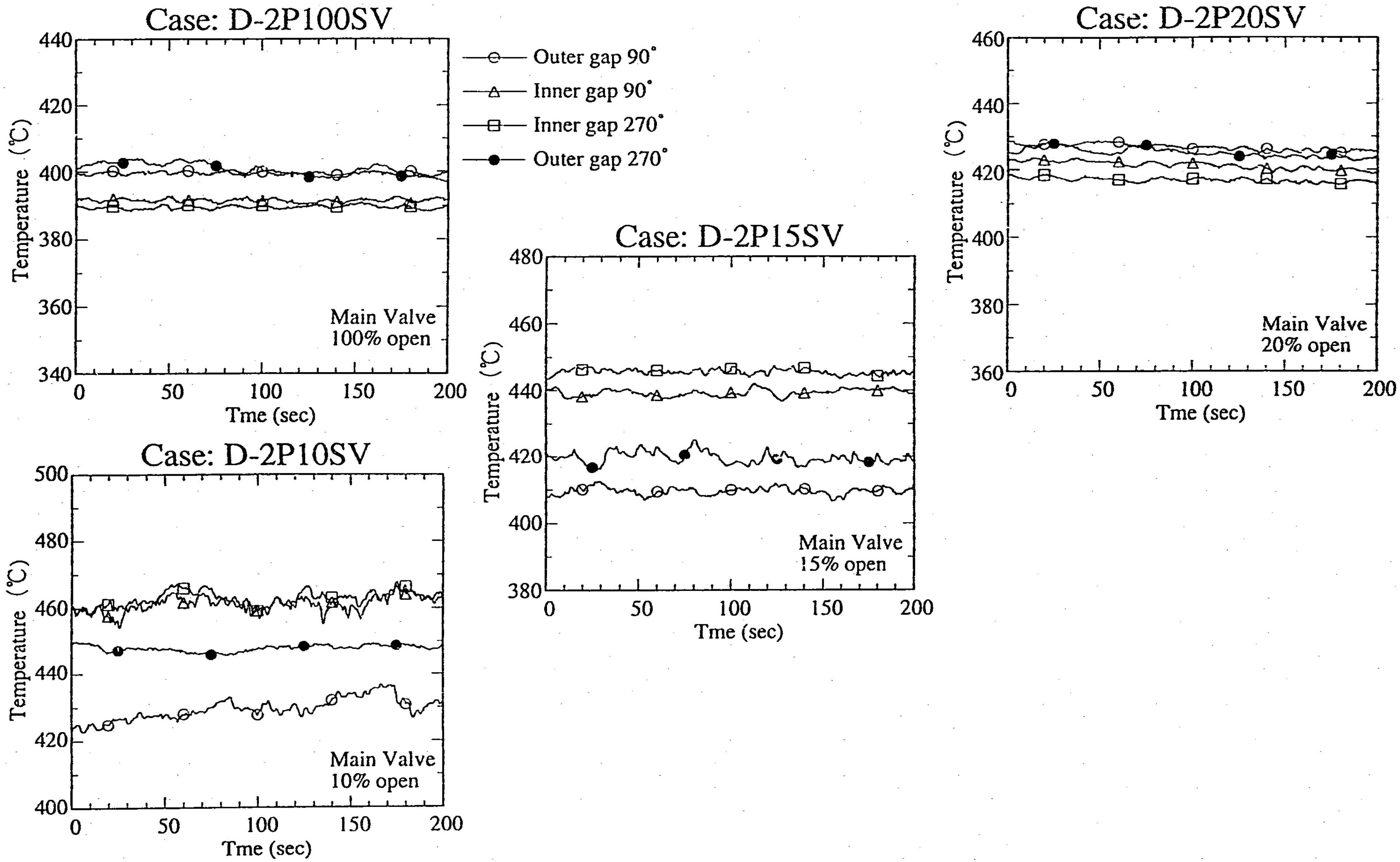


Fig. 4.3-14b Temperature Fluctuations in Inter-Wrapper Gap of BD Cross Section under 2% Power (Heat Removal by DRACS)

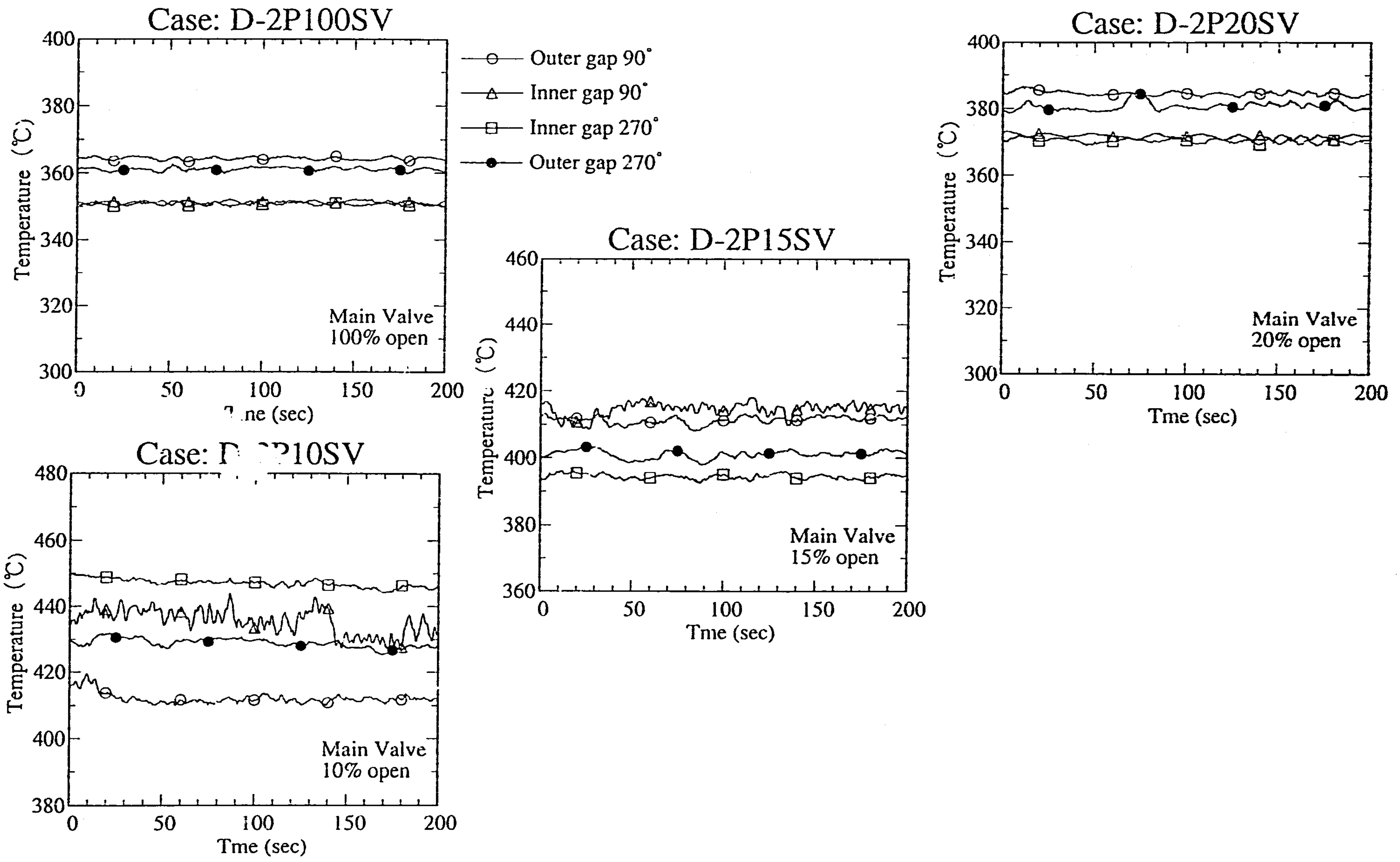


Fig. 4.3-14c Temperature Fluctuations in Inter-Wrapper Gap of BC Cross Section under 2% Power
(Heat Removal by DRACS)

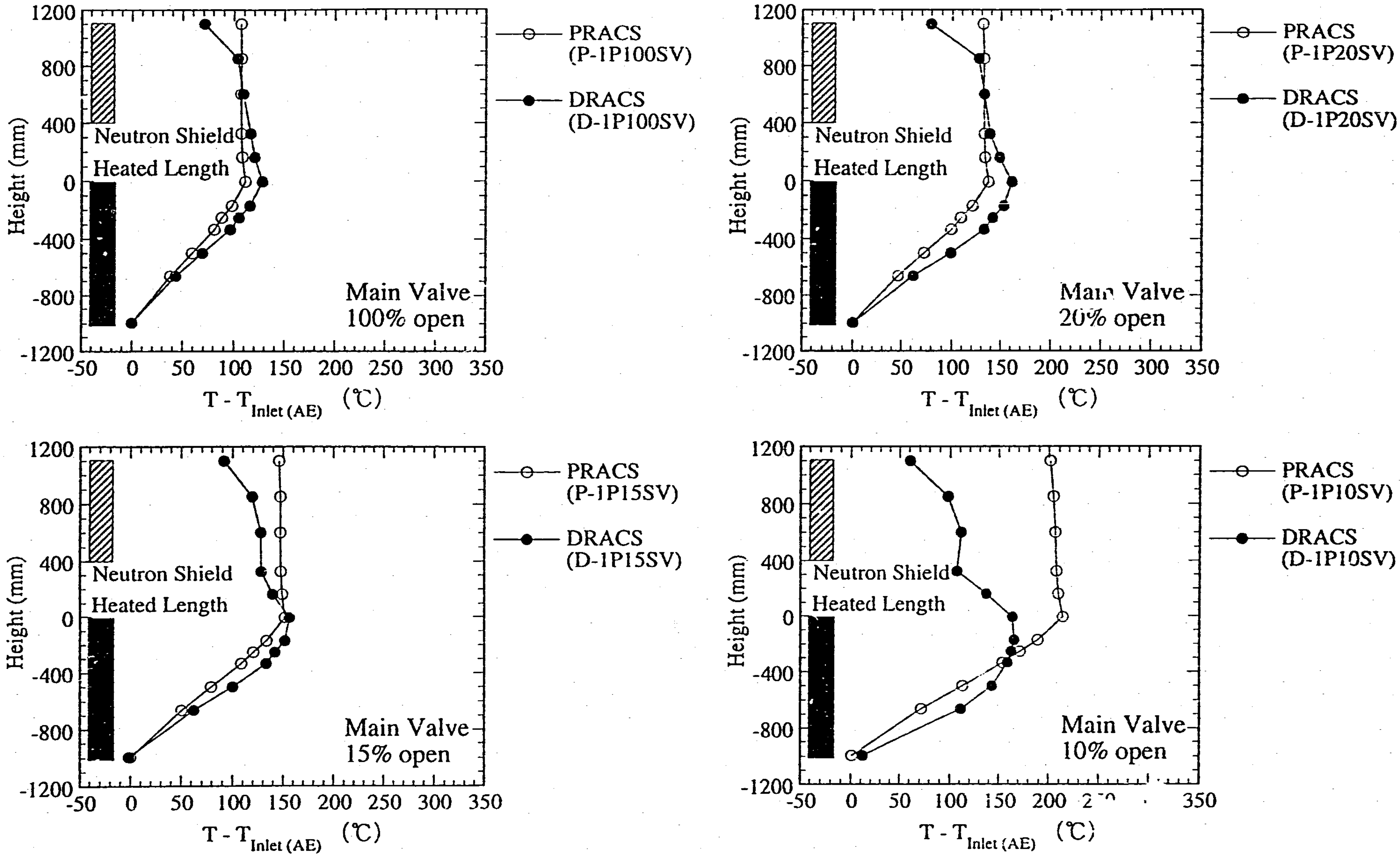


Fig. 5.1-1a Comparison of Axial Temperature Distributions along Center Subchannel in Center Subassembly under 1% Power (PRACS vs. DRACS)

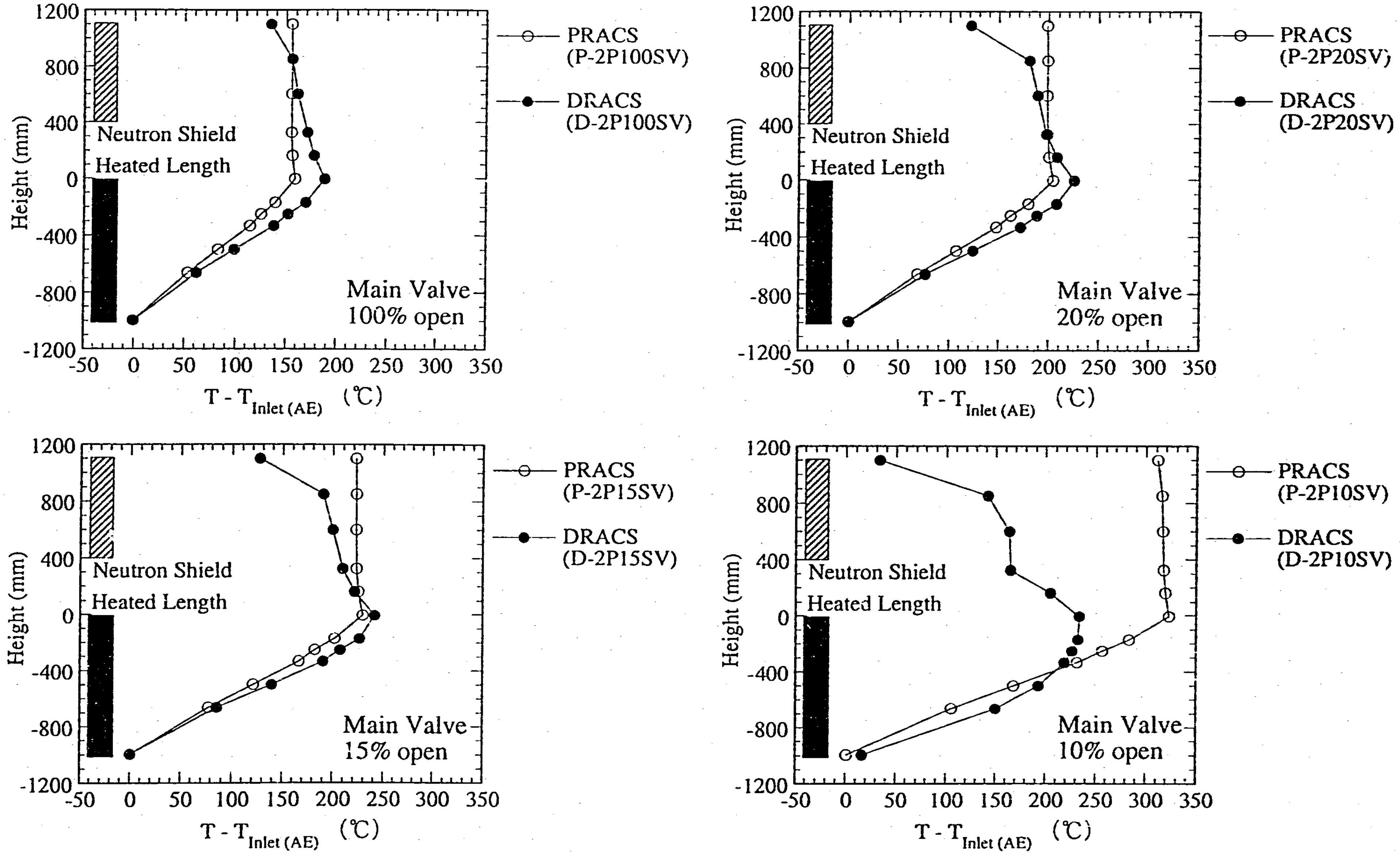


Fig. 5.1-1b Comparison of Axial Temperature Distributions along Center Subchannel in Center Subassembly under 2% Power (PRACS vs. DRACS)

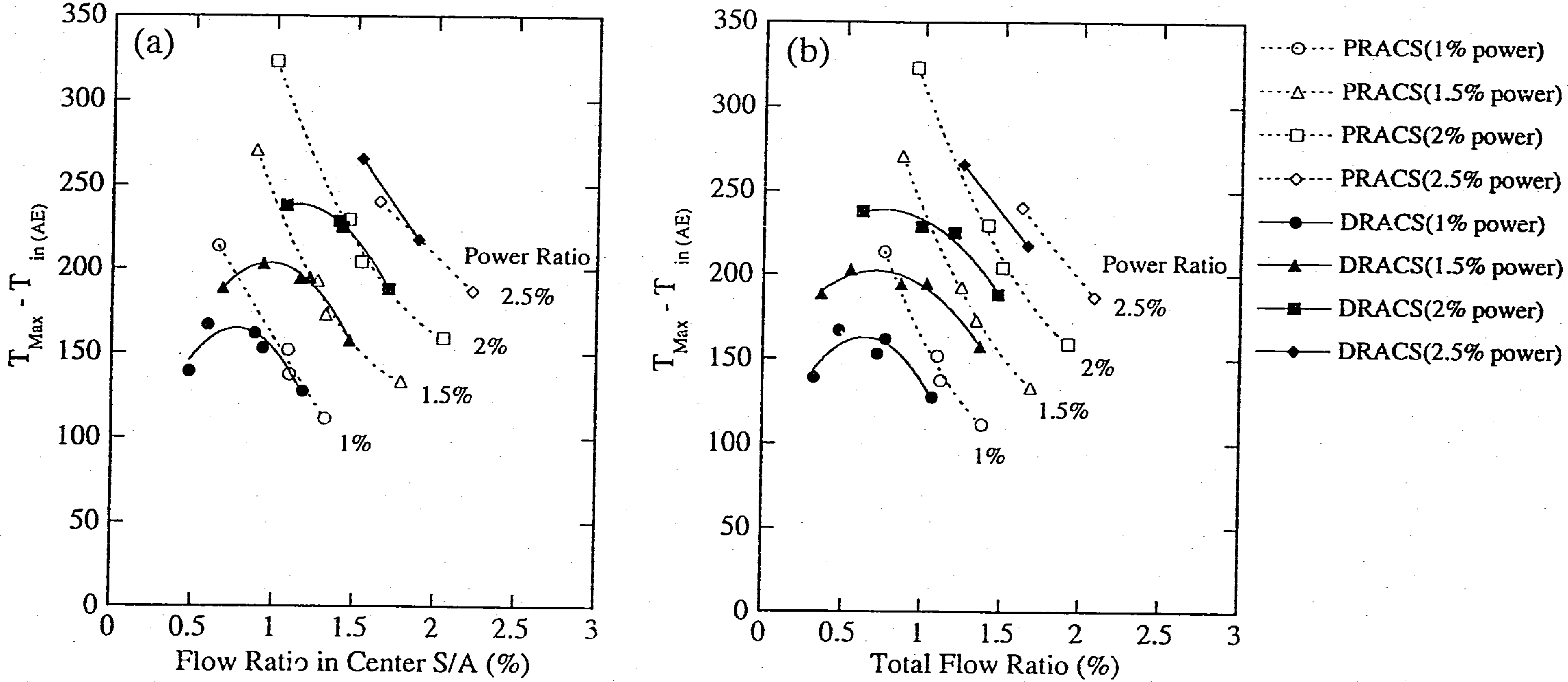


Fig. 5.1-2 Comparison of Maximum Temperature in Core between PRACS and DRACS

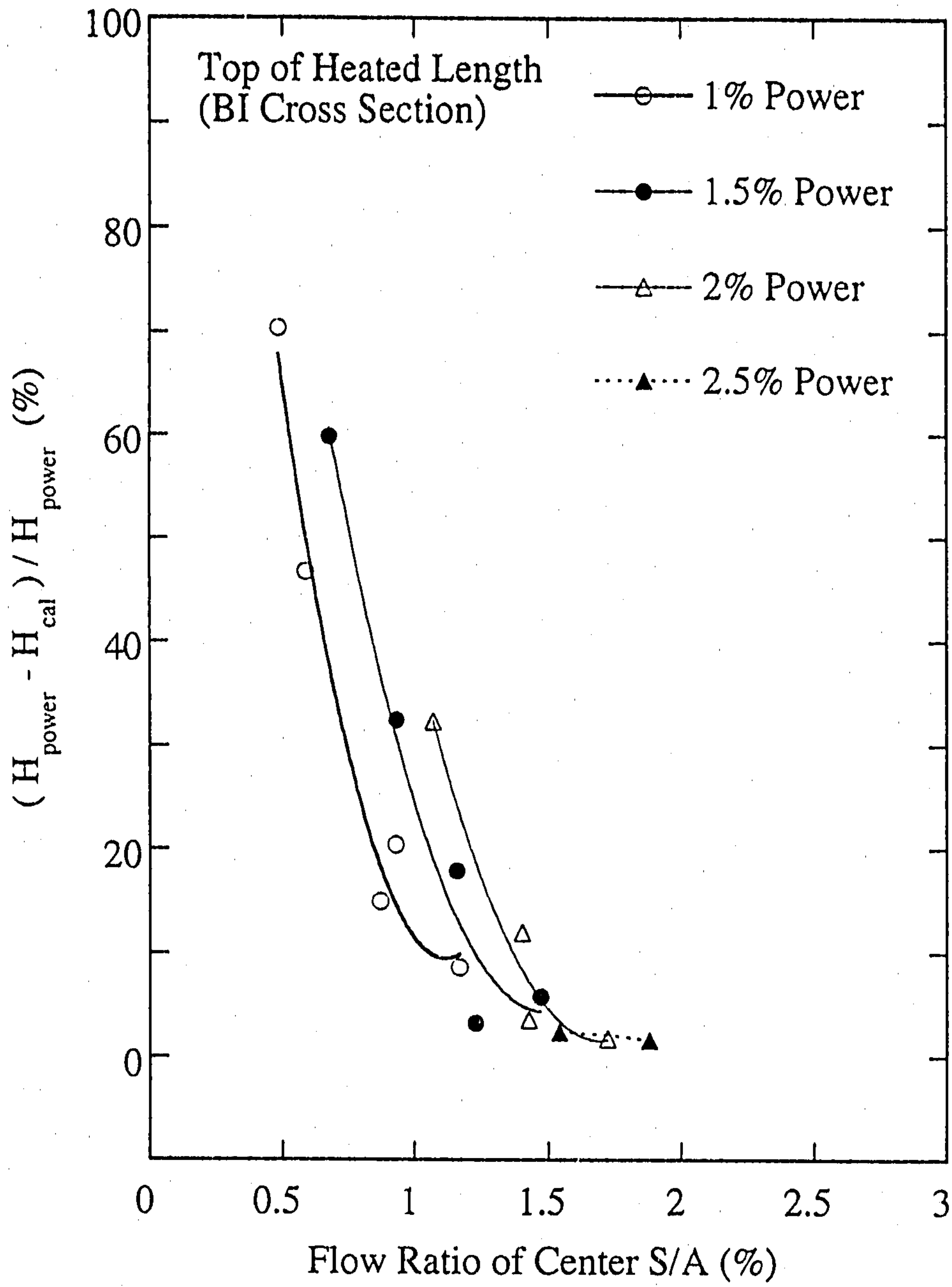


Fig. 5.2-1 Heat Removal Ratio at BI Cross Section of Center Subassembly vs. Flow Ratio of Center Subassembly (Heat Removal by DRACS)

* H_{power} : Heat power from heater pin
* H_{cal} : Calculation value from flow rate and temperature at BI cross section of center subassembly

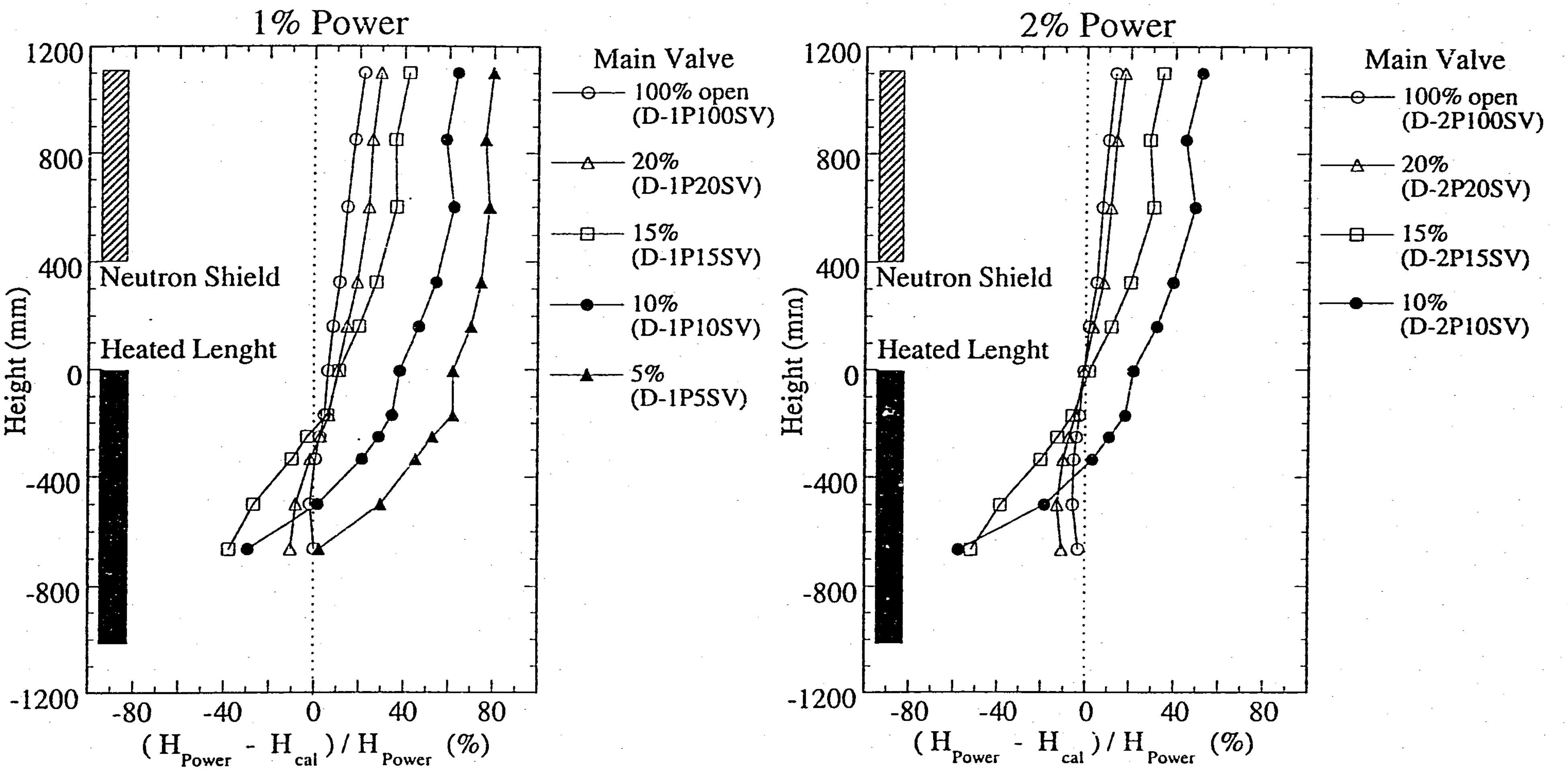


Fig. 5.2-2 Axial Distributions of Heat Removal Ratio of Center Subassembly (Heat Removal by DRACS)

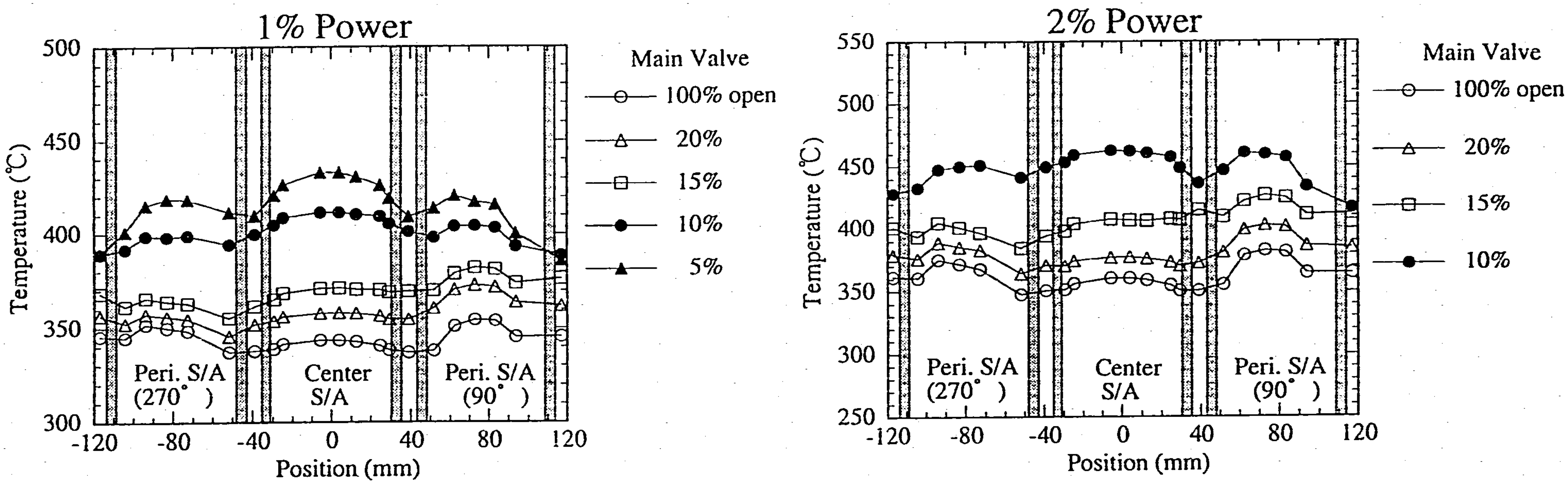
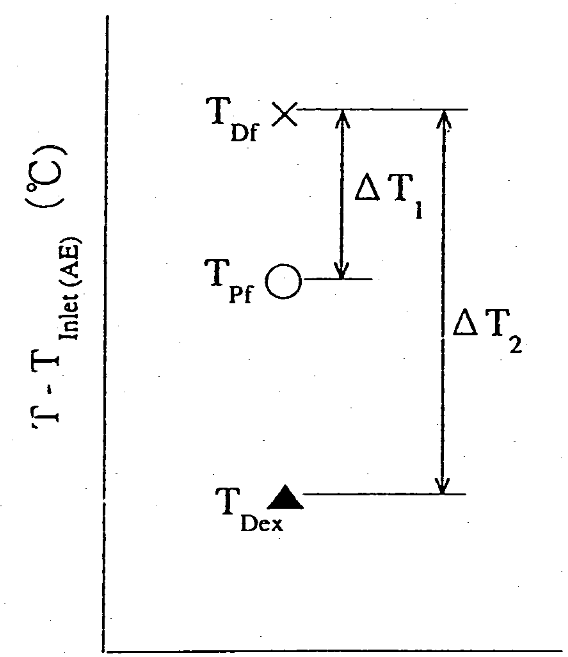


Fig. 5.2-3 Transverse Temperature Distributions in BC Cross Section under 1% and 2% Power (Heat Removal by DRACS)

* T_{Df} : Temperature calculated from power and flow of the case cooled by DRACS

* T_{Pf} : Temperature calculated from power and flow of the case cooled by PRACS

* T_{Dex} : Experimental Temperature at BI cross section of center S/A of the case cooled by DRACS



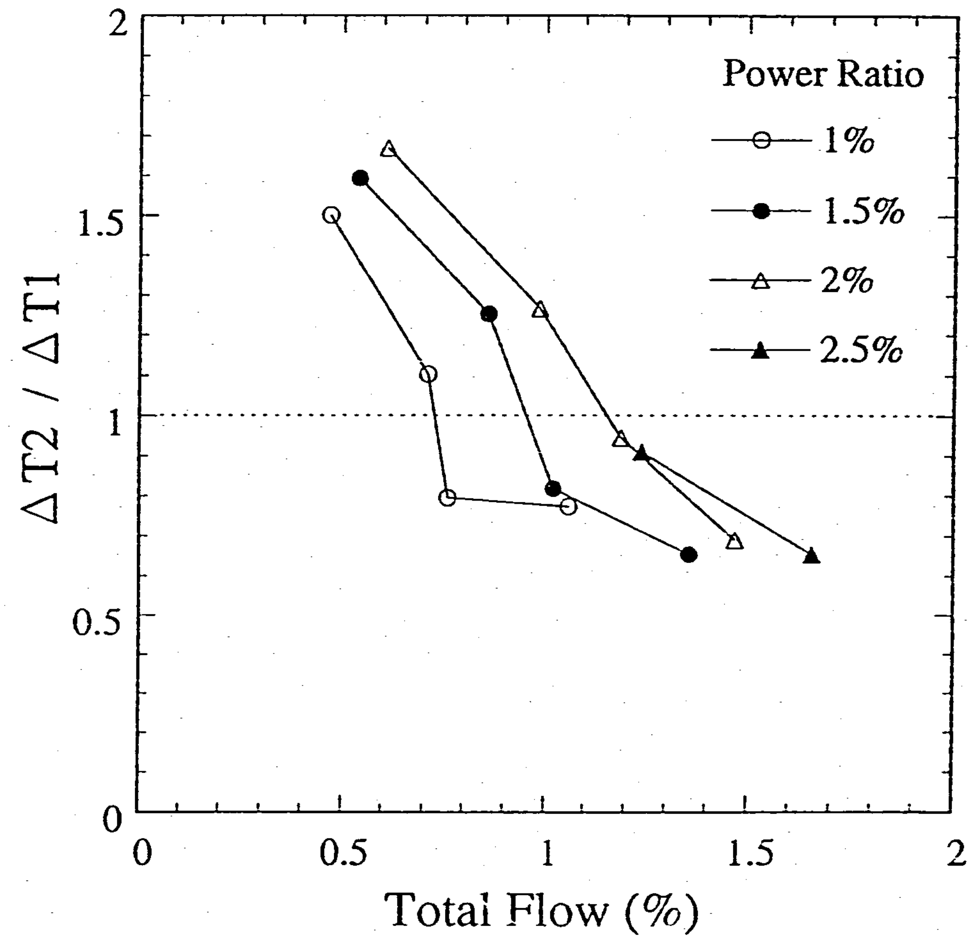


Fig. 5.3-1 Effect of Heat Removal by DRACS for Core Cooling

Appendix

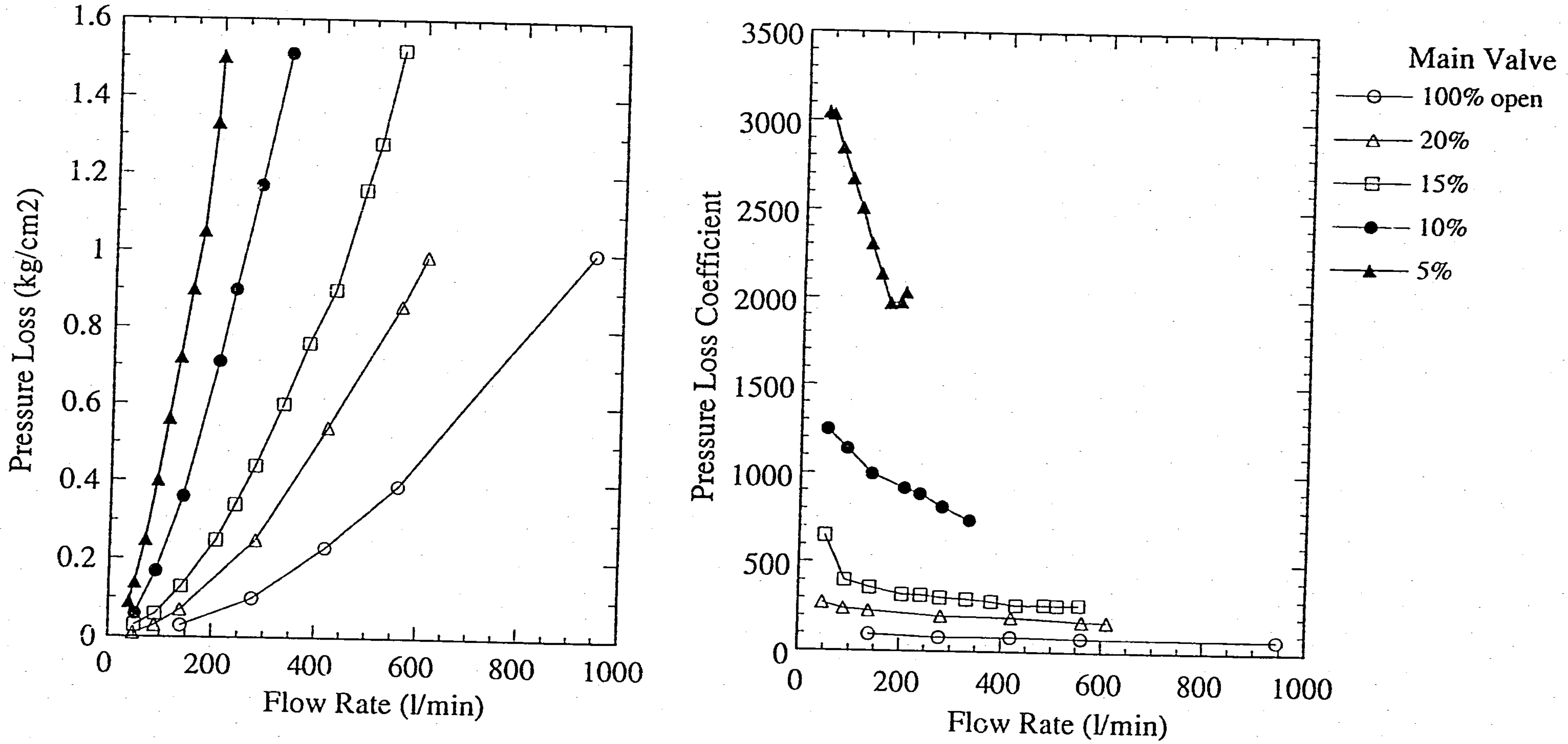
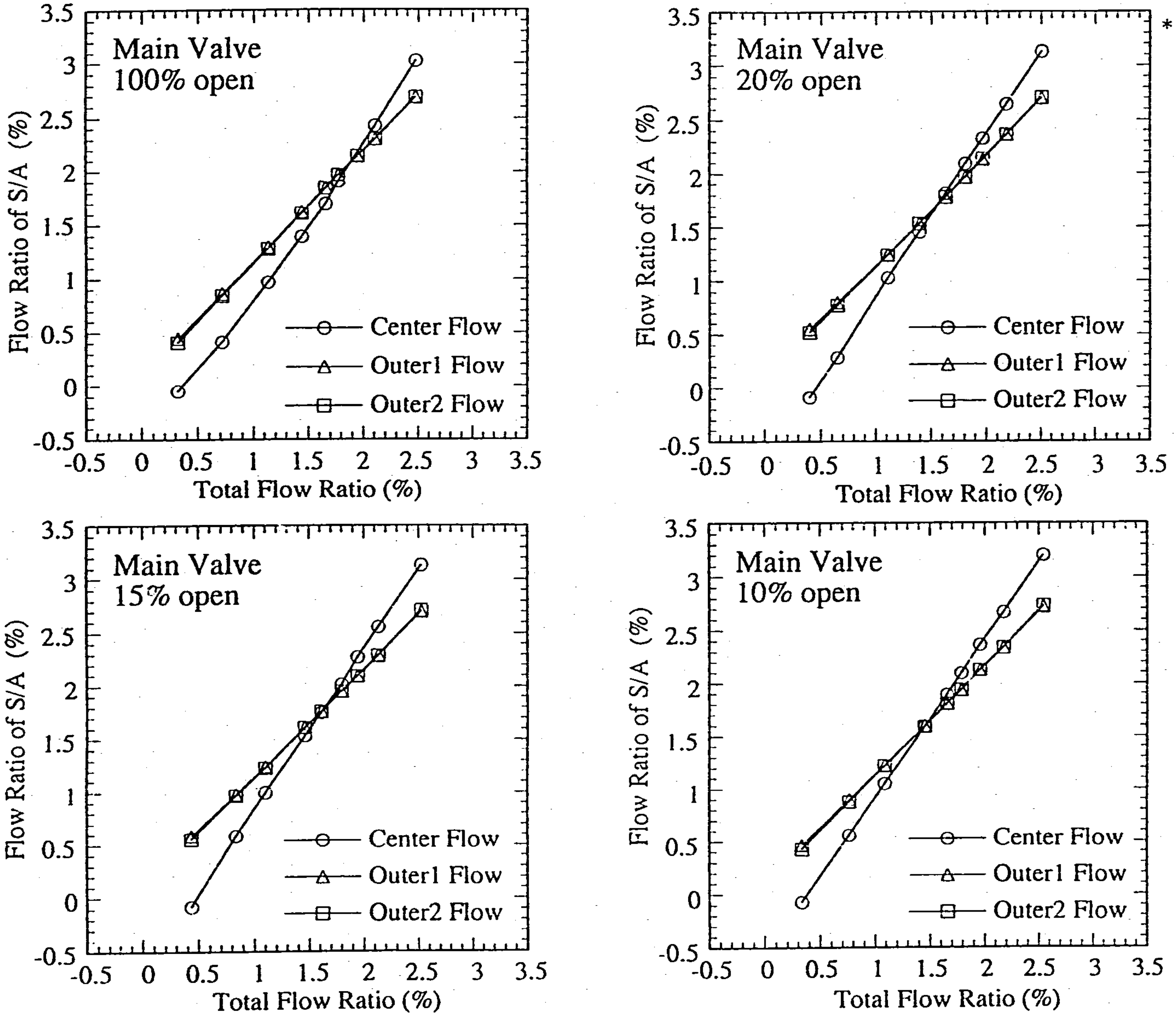


Fig. 1 Measurement Results of Pressure Loss in Primary Loop



* Test Conditions
Valve open (%)
· Center line valve (SV103) : 100%
· Outer1 line valve (SV103) : 60%
· Outer2 line valve (SV104) : 60%

Fig. 2 Results of Flow Distribution Characteristic Tests