

# 高速炉の自然循環崩壊熱除去時の 冷却系統間相互作用に関する研究

—一次元ネットワークコードを用いた解析手法の検討—

1997年4月

動力炉・核燃料開発事業団  
大洗工学センター

複製又はこの資料の入手については、下記にお問い合わせ下さい。

〒311-13 茨城県東茨城郡大洗町成田町4002

動力炉・核燃料開発事業団

大洗工学センター・システム開発推進部・技術管理室

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

動力炉・核燃料開発事業団 (Power Reactor and Nuclear Fuel Development Corporation) 1997

高速炉の自然循環崩壊熱除去時の冷却系統間相互作用に関する研究  
—一次元ネットワークコードを用いた解析手法の検討—

木村 嘉之<sup>1</sup>、西村 元彦<sup>1</sup>、桃井 一光<sup>2</sup>、  
林 謙二<sup>1</sup>、上出 英樹<sup>1</sup>

要旨

高速炉の信頼性、安全性を向上させるために、固有の性質を利用することが重要である。そこで、ポンプ等の動的機器に依存しない自然循環により崩壊熱を除去することが考えられている。特に、DRACS (Direct Reactor Auxiliary Cooling System) を採用した場合、炉内冷却器からの低温ナトリウムが集合体間ギャップへ潜り込むインターラッパーフロー (IWF) 現象が炉心槽内で発生し得る。また、崩壊熱除去系、二次主冷却系等の冷却系統間での熱的相互作用が、一次主冷却系自然循環流量へ影響を与え、それに伴い、炉心部熱流動挙動も変化すると考えられる。そこで、当室では、自然循環時のシステム間相互作用の影響を把握することを目的として、DRACS および PRACS (Primary Reactor Auxiliary Cooling System) を模擬している PLANDTL-DHX 試験装置を用いた試験を実施し、炉心部熱流動現象に与える崩壊熱除去系および二次主冷却系の運転条件の影響を検討してきた。本報では、定常自然循環時の熱流動現象について、一次元ネットワークコード LEDHER を用い、IWF に相当する流路とラッパー管との熱伝達を考慮した解析モデルを作成し、解析手法の妥当性を評価した。解析は、IWF を考慮したモデルと、IWF を考慮しないモデルを作成し、一次主冷却系自然循環流量と炉心部熱流動現象について試験と解析の比較を行った。

PRACS および中間熱交換器にて除熱したケースでは、IWF が発生しておらず、両モデルとも自然循環流量、炉心部温度分布および各機器 (PRACS 用冷却コイル、中間熱交換器) の出入口温度をほぼ模擬できた。

DRACS にて除熱したケースにおいて、IWF を考慮しないモデルは、自然循環流量が実験よりも 12%程度大きくなり、集合体間ギャップ温度分布も実験で見られた中性子遮蔽体領域での温度低下を模擬することが出来なかった。一方、IWF を考慮したモデルでは、自然循環流量は実験と比較し、3%以内の差で一致し、集合体間ギャップ等の炉内温度分布も模擬することが出来た。

集合体間ギャップの温度分布が解析と実験で一致していることから、流動場についても本解析は、ほぼ実験を模擬できていると判断される。

DRACS にて除熱したケースの IWF による除熱の寄与は、模擬炉心出力が実機定格 2%の時、IWF を考慮したモデルと考慮しないモデルでの集合体内流体の温度差から、模擬炉心出力の 36%程度であることがわかった。

これらの結果から、一次元ネットワークコードにより、IWF を含めた炉内熱流動挙動および一次系自然循環流量を模擬できる見通しを得た。

1 動燃大洗工学センター、安全工学部、原子炉工学室

2 動燃大洗工学センター、安全工学部、原子炉工学室（現 京葉ガス（株））

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

## - Investigation of Analytical Methods using One-dimensional Network Analysis code -

N. Kimura<sup>1</sup>, M. Nishimura<sup>1</sup>, K. Momoi<sup>2</sup>,  
K. Hayashi<sup>1</sup> and H. Kamide<sup>1</sup>

### ABSTRACT

To enhance reliability and safety of FBR, taking advantage of its inherent properties is of importance. From this point of view, natural circulation decay heat removal (NC/DHR) has been studied in which no active components such as pumps are used.

DRACS (Direct Reactor Auxiliary Cooling System) is an option of NC/DHR systems, which causes cold coolant flow from DHX (Direct Heat Exchanger) penetrating into inter wrapper gaps: IWF (Inter-Wrapper Flow). Another option for NC/DHR is to use PRACS (Primary Reactor Auxiliary Cooling System) in which no remarkable IWF occurs.

Thermal-hydraulic behavior in the core depends on interactions among auxiliary reactor cooling system, IHX (Intermediate Heat Exchanger), and the secondary loop during NC/DHR. Such interactions have been studied with the test rig called PLANDTL-DHX equipped with DRACS and PRACS. In this study, influence of operating condition of the auxiliary cooling systems and the secondary loop of IHX were examined on the core thermal-hydraulic behaviors.

In the present paper, one-dimensional network analyses using LEDHER code are reported. The analyses were performed on steady tests using two models: a model taking account of an inter-subassembly heat transfer only, and a model simulated both IWF and the inter-subassembly heat transfer. The calculation method was validated through comparisons with the experimental results.

In the cases cooled by PRACS or IHX, two calculated models showed good agreements with the experiments regarding the natural circulation flow rate, the temperature distribution in the core and the temperature at the inlet/outlet of the heat exchangers.

However, in the case cooled by DRACS operated, the model without flow pass of IWF could not simulate the experiments with respect to the natural circulation flow rate (12% larger than experiment) and temperature profiles in the inter wrapper gaps. On the other hand, the model taking account of IWF simulated the experiments in good agreement about the natural circulation flow rate (3% larger than experiment) and the temperature distributions in the core.

The model with IWF simulated the experimental temperature well in the inter wrapper gaps. Thus the behavior of IWF can be estimated from the analysis result. In the model with IWF, the vertical velocity in the inter wrapper gaps had the maximum value in the neutron shield region, and the velocity of the cross flow gave the maximum at the position 20cm lower from the heated region top end. The maximum temperature in the core was shown at the position 10cm lower from the top of the heated region both in the analyses and the experiments. The analysis suggested that IWF penetrated to deeper position than the position of maximum temperature in the core.

In comparison of the both models, the heat removed by IWF was 36% of simulated core output under the DRACS operation.

Consequently, it was confirmed that the natural circulation flow rate and thermal hydraulics in the core were able to be simulated with one-dimensional system dynamic analysis code.

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

<sup>2</sup> Reactor Engineering Section, Safety Engineering Division, O-arai Engineering Center, PNC  
(Currently, Keyo Gas corp.)

## 目次

1. 緒言	1
2. 試験装置	2
2. 1 模擬炉心部構造	2
2. 2 上部プレナム構造	3
2. 3 中間熱交換器構造	3
2. 4 崩壊熱除去系冷却器 (DRACS、PRACS) 構造	3
2. 5 計測システム	3
3. 試験方法	5
3. 1 試験パラメータ	5
4. 解析方法	6
4. 1 解析コードの概要	6
4. 2 解析モデル	7
4. 2. 1 模擬炉心部と上部プレナム	7
4. 2. 2 模擬燃料ピンおよび模擬燃料集合体	8
4. 2. 3 補助冷却器および中間熱交換器	9
4. 2. 4 ナトリウム流路	9
4. 3 解析条件	10
5. 解析結果	11
5. 1 一次主冷却系流量および温度	11
5. 2 中心集合体軸方向温度分布	13
5. 3 集合体間ギャップ軸方向温度分布	13
5. 4 IWF 流速軸方向分布	14
6. 考察	16
6. 1 IWF による除熱量の評価	16
7. 結論	17

謝辞

参考文献

付録 1 模擬炉心部モデル化の概要

付録 2 配管およびバルブの圧力損失係数の設定方法

付録 3 等温集合体流量配分試験解析

## 表リスト

Table 2.1	Main specifications of PLANDTL-DHX Loop
Table 3.1	Conditions of Natural Circulation Steady State Experiments
Table 4.1	Boundary Conditions in Steady State Experiments and Calculations
Table 5.1	Experimental and Analysis Results (Case: PRACS-1S)
Table 5.2	Experimental and Analysis Results (Case: PRACS-2S)
Table 5.3	Experimental and Analysis Results (Case: IHX-1S)
Table 5.4	Experimental and Analysis Results (Case: DRACS-1S)
Table 5.5	Experimental and Analysis Results (Case: DRACS-2S)
Table 5.6	Experimental and Analysis Results (Case: DRACS-3S)
Table 6.1	Calculated Heat Removal Capability of IWF for The Whole Core Region under The Natural Circulation Condition
Table 6.2	Calculated Heat Removal Capability of IWF for The Heated Region of The Core under The Natural Circulation Condition

## 図リスト

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	Schematic of IHX & PRACS
Fig.2.5	Schematic of direct heat exchanger (DHX)
Fig.4.1	Analysis model for Inter-Subassemblies Heat Transfer (MODEL-A)
Fig.4.2	Partition diagram of Upper Plenum in PLANDTL-DHX (MODEL-A)
Fig.4.3	Analysis model for Inter Wrapper Flow (MODEL-B)
Fig.4.4	Partition diagram of Upper Plenum in PLANDTL-DHX (MODEL-B)
Fig.4.5	PLANDTL-DHX Heater Pin details
Fig.4.6	Power distribution of Electric Heater Pin
Fig.4.7	Analysis model details in Subassemblies
Fig.5.1.1	Comparison between Analysis Models and Experiments for Natural Circulation Flow Rate
Fig.5.2.1	Vertical temperature distribution in Center S/A (Case: PRACS-1S)
Fig.5.2.2	Vertical temperature distribution in Center S/A (Case: PRACS-2S)
Fig.5.2.3	Vertical temperature distribution in Center S/A (Case: IHX-1S)
Fig.5.2.4	Vertical temperature distribution in Center S/A (Case: DRACS-1S)
Fig.5.2.5	Vertical temperature distribution in Center S/A (Case: DRACS-2S)
Fig.5.2.6	Vertical temperature distribution in Center S/A (Case: DRACS-3S)
Fig.5.3.1	Vertical temperature distribution in Inter Wrapper Gap (Case: PRACS-1S)
Fig.5.3.2	Vertical temperature distribution in Inter Wrapper Gap (Case: PRACS-2S)
Fig.5.3.3	Vertical temperature distribution in Inter Wrapper Gap (Case: IHX-1S)
Fig.5.3.4	Vertical temperature distribution in Inter Wrapper Gap (Case: DRACS-1S)
Fig.5.3.5	Vertical temperature distribution in Inter Wrapper Gap (Case: DRACS-2S)
Fig.5.3.6	Vertical temperature distribution in Inter Wrapper Gap (Case: DRACS-3S)

- Fig.5.4.1 Comparison of Vertical Velocity Component in Inter Wrapper Gap for Outer S/A side (Outer-1)
- Fig.5.4.2 Comparison of Horizontal Velocity Component in Inter Wrapper Gap from Outer to Center S/A side (Outer-1)
- Fig.5.4.3 Comparison of Vertical Velocity Component in Inter Wrapper Gap for Center S/A side (Outer-1)
- Fig.6.1 Calculated Heat Removal Capability of IWF (Total Region in Core)
- Fig.6.2 Calculated Heat Removal Capability of IWF (Heated Region)

## 1. 緒言

高速炉の信頼性、安全性を向上させる上で、固有の性質を利用することは重要である。その一つとして、ポンプ等の動的機器に依存しない自然循環を活用し、崩壊熱除去を行うことが検討されている。自然循環時の一次主冷却系流量は定格の数%程度になるものと予測されており、このような低流量条件下では浮力の影響が顕著となり、集合体間熱移行現象、集合体間流量再配分現象などが、炉心部熱流動現象に影響する可能性が大きくなる。また、実証炉1号機では、上部プレナム内に炉内冷却器(DHX:Direct Heat Exchanger)を浸漬させ、崩壊熱除去を行うことにより、崩壊熱除去の単純化を図るシステム(DRACS:Direct Reactor Auxiliary Cooling System)の導入を計画[1]している。DRACSにより崩壊熱除去を行う体系では、炉内冷却器からの低温ナトリウムが、プレナム底部から集合体間の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側から冷却するインターラッパーフロー現象(以下、IWF現象)が発生し得る。IWF現象は、炉内最高温度の低下を促す等、炉内温度分布への影響を無視できない現象となり得る。また、集合体内では、低温ナトリウムが集合体出口部からその内部に潜り込む集合体内潜り込み現象および集合体内流量再配分現象等が発生し得る。これらの現象の発生および現象間の相互作用により、炉内熱流動現象が定格定常時より複雑化すると考えられ、各現象の炉内熱流動に与える影響を定量的に評価する必要がある。

また、一次主冷却系自然循環流量は一巡流路内の温度分布に依存するため、中間熱交換器(IHX:Intermediate Heat Exchanger)の二次系ループ、崩壊熱除去系ループでの除熱など各冷却系統間での相互作用の影響を受ける。特にDRACSにより崩壊熱除去を行う場合、IWFにより炉心が冷却される反面、上部非発熱部の温度低下に伴い、自然循環ヘッドも低下することから一次主冷却系自然循環流量が減少し、炉心部温度が低下しない可能性も考えられる。

当事業団原子炉工学室においては、これまでに炉心部熱流動現象について個々に着目し、実機の自然循環相当の流量を強制循環で模擬したナトリウム試験を実施してきた[2]~[6]。また、これらの試験とともに、各熱流動現象を把握するための解析評価手法の開発を実施してきた[7]~[9]。さらに、自然循環時の冷却系統間相互作用の影響を把握するために、DRACS、およびPRACS(Primary Reactor Auxiliary Cooling System)を崩壊熱除去系として用い、二次主冷却系を含めた各冷却系統と一次主冷却系の相互作用ならびに炉心部熱流動現象に着目したナトリウム試験を実施してきた[10][11]。

本報では、IWFによる炉心冷却と一次主冷却系自然循環流量との相互作用を含めた冷却系統間相互作用の影響を把握するための解析手法を開発することを目的とした。解析コードは、系統全体を解析対象とするため、ネットワークコードLEDHER[12]を用いた。解析手法として、IWFを考慮するために集合体間ギャップ流路に相当するフローネットワークを炉心モデルへ追加した。この解析手法の検証を行うために、当事業団原子炉工学室で実施したナトリウム試験[11]について実験解析を実施した。

## 2. 試験装置

本試験に用いた Plant Dynamics Test Loop Integrated with Direct Heat Exchanger 試験装置（以下、PLANDTL-DHX）のループ構成を Fig.2.1 に示す。本装置は、一次主冷却系ループ、二次主冷却系ループ、崩壊熱除去系ループから成り、一次主冷却系ループは、電気ヒーターにより発熱を模擬できる炉心部、上部プレナム、中間熱交換器(IHX)、主循環電磁ポンプ、下部プレナム、集合体間流量調節弁、補助系、等で構成されている。試験部は、中心集合体とそれを取り囲む 6 体の周辺集合体で形成されており、下部プレナムで 3 本に分岐した流路が、中心集合体と中心集合体の左右で分けた 3 体ずつの周辺集合体にそれぞれ接続されている。その流量配分は、各流路に取り付けている流量調節弁により、制御できる。また、ヒーター出力は、中心集合体と周辺集合体でそれぞれ独立して設定することができる。本試験装置は、ヒーター出力最大 1.2MW、主循環流量最大 1200l/min まで設定可能である。

二次主冷却系ループは、IHX、空気冷却器、電磁ポンプ、流量調節弁を備えており、IHX は、模擬炉心部の最大出力に対応する除熱能力を有する。

崩壊熱除去系は、上部プレナム内に DRACS、IHX 上部に PRACS に対応した熱交換器が設置され、空気冷却器、電磁ポンプが取り付けられている。バルブ切替により、PRACS と DRACS を選択することが出来る。

これらの機器は、デジタル計測制御システム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することにより、模擬が可能となっている。Table2.1 に本試験装置の主要な仕様を示す。

### 2. 1 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配置図を示す。模擬炉心は、中心集合体とそれを取り囲む 6 周辺集合体の合計 7 体の模擬燃料集合体から構成されている。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柱状のラッパー管から成っている。模擬炉心燃料ピンは、実機と同様のワイヤースペーサータイプとし、ピン径、配列ピッチ、ワイヤー巻きピッチを実機炉心燃料集合体とほぼ同寸法とした。集合体としては、実機 217 ピンに対し、37 ピンの部分模擬とした。また、軸方向は、実寸とし、ヒーターの出力分布は実機と同様なチョップドコサイン分布としている。周辺集合体は、7 本のヒーターピンから形成されており、中心集合体、および集合体間ギャップへの熱的境界条件を与える目的で設置してある。各集合体のラッパー管肉厚は、実機相当(4mm)としてあり、集合体間ギャップも、実機とほぼ同様の 7mm 幅としている。集合体間のギャップには、スペーサーパッドは設

けておらず、長さ 30mm の丸棒を軸方向 2 力所に設置しているだけであるため、はち巻き形パッドを採用する「もんじゅ」や現設計の実証炉 1 号機と比較して、プレナムからの流体が潜り込みやすい体系になっていると考えられる。

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、各高さでの集合体内水平断面温度分布を得られるよう熱電対を配置してある。

## 2. 2 上部プレナム構造

Fig.2.3 に上部プレナムの構造図を示す。上部プレナムは内径 2.0m、高さ 3.3m の円筒形である。炉心出口上部には、炉心上部機構(UIS :Upper Internal Structure)を模擬した中空円筒（内部は Ar ガス雰囲気）を設けてある。出口配管は、1 力所(90° 方向)であるため、出口に向かう流れの周方向依存性を低減する目的でプレナム内部に内筒を設置してある。その対称位置(270° 方向)に、崩壊熱除去系の炉内冷却器 (DHX) が設けてある。

## 2. 3 中間熱交換器構造

Fig.2.4 に中間熱交換器(IHX)の構造図を示す。IHX 上部には、崩壊熱除去系である PRACS が取り付けられている。IHX は、上部プレナムからの一次系ナトリウムは、シェル&チューブ型熱交換器（直管式）の管側に入り、胴側を流れる二次系ナトリウムと熱交換を行う。熱交換器の形状は、ダウンカマーがない等、実機を完全には模擬していないが、流路構成については実機と同様としている。

## 2. 4 崩壊熱除去系冷却器 (DRACS、PRACS) 構造

Fig.2.5 に DRACS の構造図を示す。崩壊熱除去系のナトリウムは、コイルの中心部を 5 本の直管で下降し、最下点から外径  $\phi 19.0 \times t2.0\text{mm}$  の 5 本のヘリカルコイルを通って上昇しながら熱交換を行う。

PRACS 用冷却コイルの構造を Fig.2.4 に示す。冷却コイルは IHX の 1 次側入口プレナムに設置されている。流路構成は DRACS と同様であるが、ヘリカルコイルが外径  $\phi 42.7 \times t2.8\text{mm}$  の 2 本で構成されている。

## 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 倍に増幅される。その後、13 ビットの A/D 変換器でデジタル化し、ミニコンピュータによりハードディスクに収録した。収録データは、熱電対の相対校正、流量校正の結果を基に、ワークステーションにより物理量に変換した。

計測精度として、温度は、相対校正の結果、温度測定範囲（300～500°C）で標準偏差±0.5°C以内である。また、流量については、主循環流量を測定する大流量域用（約300l/min）で±2.0%F.S.、各集合体流量を測定する小流量域用（約130l/min）で±4.7%F.S.である。ヒーターピンの発熱量としては、±0.18%F.S.の誤差である。

校正方法については、別報[10][11]にて詳細に示す。

### 3. 試験方法

#### 3. 1 試験パラメータ

本試験では、定常状態の自然循環時における炉心熱流動現象に着目し、崩壊熱除去系として DRACS、PRACS の違い、および集合体間出力差による一次系自然循環流量、炉心部最高温度位置、炉心出入口温度挙動への影響を把握する事を主眼としている。試験パラメータとして、集合体間温度差、崩壊熱除去系の運転条件（完全停止状態、強制運転状態）、IHX 二次系運転条件（完全停止状態、自然循環状態）を設定し、それぞれ補助冷却器として、DRACS 運転、PRACS 運転の両システムについて試験を実施した[11]。本試験条件について、Table3.1 にまとめた。

試験方法は、自然循環状態（ポンプ停止）に至る前に、初期条件として、模擬炉心出力、1 次主冷却系循環流量を実機定格定常時の 2 % 相当（炉心集合体内平均流速換算）に設定し、ポンプで強制循環とした。IHX と崩壊熱除去系は、Table3.1 の条件にて運転した。崩壊熱除去系の強制運転時の流量は、90l/min とした。集合体間温度差を与える試験では、初期設定時に、Table3.1 で示す温度差（30°C）となるように、周辺集合体の出力を下げて調節した。このときの出力は、集合体間熱移行を無視したエンタルピ上昇に基づく値である。初期設定の状態（強制循環）が安定した後、主循環ポンプを停止し、自然循環状態へ移行させた。データは、約 24 時間後に自然循環状態が安定していることを確認した上で、収録した。

試験ケースは、集合体間温度差無しで、PRACS を強制運転状態（DRACS 完全停止）、IHX 二次系完全停止状態の場合を基本ケース PRACS-IS とし、その他のケース名は Table3.1 に示すとおりである。

## 4. 解析方法

### 4. 1 解析コードの概要

本試験の定常、および過渡解析を行うために、当事業団原子炉工学室で開発した一次元システム動特性解析コード LEDHER( Long Term De<sub>c</sub>ay Heat Removal System Analysis Code)[11]を用いた。

本解析コードは、流動について、質量保存式、運動量保存式（流体慣性、流動抵抗、ポンプ駆動圧、自然循環ヘッドのバランス）に基づき、全てのコンポーネントの流量、圧力を一括して逆行列を用いて解く直接解法を使用している。エネルギーについては、エネルギー保存式に基づき、全ての点を一度に直接法で解いている。また、流動抵抗の評価においての流速の2乗項のうち、1乗分と、物性値については、1ステップ前の値を使用しているが、これ以外は、時間について陰解法を用いている。これにより、時間刻み幅を比較的大きく取ることにより、緩慢で長時間にわたる過渡変化についても効率良く解くことを可能としている。また、流動とエネルギーの計算では、時間刻み幅を別々に設定することが可能である。

試験装置の熱輸送系は、以下の一次元コンポーネントでモデル化される。

- 圧力定義点 : 各コンポーネントの境界に、圧力計算を行う格子点を定義
- PATH : 流動抵抗をもつ1次元の流路で STRUCTURE と熱交換可能
- VOLUME : 複数の出入口をもつプレナムをモデル化、PATH で接続可能、STRUCTURE と熱交換可能
- STRUCTURE : PATH、VOLUME と熱交換する構造物をモデル化。構造物の熱容量、熱抵抗、発熱量、流体との熱伝達率を与えることが出来る。STRUCTURE 間の熱伝達、熱伝導率の模擬も可能
- PUMP : PATH 間に置かれ、流量を時間テーブルで与える。自然循環にスイッチすることも可能
- HX : 热交換機をモデル化、1次系、伝熱管、2次系を軸方向にメッシュ分割、各熱伝達率を設定可能

試験装置の燃料集合体等の炉心構成要素や、配管等を数グループ（模擬集合体については流量配分領域毎）に分類し、各グループを上記のコンポーネント

で模擬して、定常システム解析を実施した。

#### 4. 2 解析モデル

##### 4. 2. 1 模擬炉心部と上部プレナム

本報では、模擬炉心部として、集合体間熱移行現象を重視したモデルと、インターラッパーフロー現象（以下、IWF 現象）を重視したモデルの 2 種類について解析を行い、試験結果と両モデルの比較により、炉心部熱流動現象への影響の度合を評価することを目的とした。両モデルの特徴を以下に示す。

###### （1）集合体間熱移行モデル（MODEL-A）

Fig.4.1 に集合体間熱移行を重視した解析モデル（以下、集合体間熱移行モデル）の図を示す。各集合体中の模擬燃料ピンのモデル化については、後述する。本モデルは、中心集合体を 1 流路、周辺集合体 6 体をまとめた 1 流路の計 2 流路から成る。加熱領域の中心集合体と周辺集合体間のギャップを中心集合体側と周辺集合体側に分割し、その 2 つのノード間を断熱にすることで、集合体間熱移行の効果を調べることができる。本解析では、集合体間熱移行が発生するようノード間に熱伝導率を与えた。加熱領域上部の中性子遮蔽体領域には、IWF を想定した流路をモデル化してあるが、この流路は、ラッパー管上端から加熱部上端までしか設けておらず、また、周辺集合体側の集合体間ギャップから中心集合体側の集合体間ギャップへ流れる直交流路は、加熱部上端のみに設置してある。ここでは、集合体間熱移行のみに着目したモデルとし、IWF の影響をなくすために、直交流路に大きな形状圧損係数を与え、ギャップ部への流量をほぼ零となるようにした。これにより、集合体間は、ギャップ部ナトリウムがスタグナントであるとして、ナトリウムおよびラッパー管の熱伝導による熱輸送を考慮している。上部プレナムは、Fig.4.2 のように分割した。

###### （2）インターラッパーフロー モデル(MODEL-B)

Fig.4.3 にインターラッパーフローを重視した解析モデル（以下、IWF モデル）の図を示す。本モデルは、中心集合体を 1 流路とし、周辺集合体は 3 体ずつの 2 流路の計 3 流路から成る。これは、試験装置では周辺集合体へ下部プレナムから向かう流路が周辺集合体 3 体ずつの計 2 流路となっていることを踏まえた

モデル化である。模擬燃料ピンのモデル化の方法は、集合体間熱移行モデルと同様であり、次節で記述する。炉心槽内における IWF の流動バスは、試験条件に依存する可能性があることを考慮し、周辺集合体側の集合体間ギャップと、中心集合体側の集合体間ギャップを流れる流体が、VOLUME 要素を経て、任意の位置でクロスフローとなりうる流路を設けた。上部プレナムは、集合体間熱移行モデルよりも細かく分割し、DRACS 出口からの低温ナトリウムが集合体間ギャップへ潜り込む際に、左右の周辺集合体で時間差が生じることを考慮できるように PATH を設定した。

また、IWF モデルでの集合体間ギャップの圧損係数については知見が得られていないが、ここでは、鉛直および水平方向の流路について平行平板の摩擦圧損係数を与え、水平方向のクロスフローに対応した流路の出入口部に IWF 直交流成分の分岐、合流の 0.684、および上部プレナムとの出入口に拡大流・縮流の 1.5 の形状圧損係数を設定した。集合体間ギャップを流れるナトリウムとラッパ一管の間の熱伝達の関係式は、Subbotin の式[12]を用いた。

今回の自然循環定常試験では、実機定格流量の 1.5~2.0%程度の流量範囲であった。そこで、PLANDTL-DHX 試験装置を用いた中心集合体と周辺集合体への流量配分試験[17]の結果から、実機定格の 1.8% 流量相当の 300°C 等温流強制循環時の中心集合体と周辺集合体の流量に一致するように、下部プレナムから各集合体への配管入口に形状圧力損失係数を与えた。一時冷却系全体流量は、IWF がほとんど生じていないと考えられる PRACS 運転のケース (PRACS-1S) を一致するように一次主冷却系配管 (電磁ポンプ～下部プレナムの間) へ形状圧力損失係数を与えた。

#### 4. 2. 2 模擬燃料ピンおよび模擬燃料集合体

集合体内の模擬燃料ピンの構造を Fig.4.5 に示す。模擬燃料ピンは、被覆管 (SUS316)、絶縁材 (BN)、ヒーター発熱体 (Ni-Cr)、ヒーターリード部 (Cu) で構成される。本解析では、過渡時の熱流動を模擬可能とするため、ピンの内部構造をモデル化し、模擬燃料ピンの各材質を一つの STRUCTURE コンポーネントで模擬している。また、発熱部は軸方向に十等分した。Fig.4.6 に軸方向の発熱分布を示す。発熱分布は、試験装置のチョップドコサイン分布を十分割の階段状分布で近似した。中心集合体と周辺集合体で発熱分布はわずかに異なっているが、ほぼ同一である。

模擬燃料集合体の軸方向のモデル化について、Fig.4.7 に示す。発熱部を十分割しているモデル化の詳細については、付録 1 に示した。

#### 4. 2. 3 補助冷却器および中間熱交換器

DRACS 用の DHX、PRACS 用の冷却コイルおよび中間熱交換器 (IHX) の伝熱管径、伝熱管数、有効伝熱長は、試験装置の設計値を用いた。また、一次主冷却系、および二次主冷却系の熱伝達率の関係式として、以下の式を用いた。

##### <DRACS&PRACS>

一次側（管外）：Maresca&Dwyer の式[15]

$$Nu = 6.66 + 3.126P/d + 1.184(P/d)^2 + 0.0155Pe^{0.86}$$

二次側（管内）：Subbotin の式[13]

$$Nu = 5.0 + 0.025Pe^{0.8}$$

##### <IHX>

一次側（管内）：Subbotin の式

$$Nu = 5.0 + 0.025Pe^{0.8}$$

二次側（管外）：Maresca&Dwyer の式

$$Nu = 6.66 + 3.126P/d + 1.184(P/d)^2 + 0.0155Pe^{0.86}$$

#### 4. 2. 4 ナトリウム流路

ナトリウム流路および各機器間の配管径、配管長および高低差については、試験装置の形状に合わせた。集合体内の流路断面積、水力等価直徑については、試験体の形状と MIT の関係式[16]により求めた。本解析体系では、集合体内は一流路であるため、上部プレナムからの集合体内への潜り込み現象および集合体内流量再配分現象については考慮していない。

自然循環挙動の評価において、伝熱中心高さと自然循環ヘッド（温度分布）と並んで、重要であるのが、各流路での圧力損失係数の設定である。

集合体内での圧力損失係数は、層流および乱流条件での摩擦係数を、MIT の関係式[16]を用いて与えた。また、集合体上部の中性子遮蔽体部は、縮流、管摩擦、および急拡大の圧力損失を考慮した。

配管部については、円管の摩擦圧損係数を用い、エルボ、ディフューザ、レデューサ、分岐、合流等の形状圧損係数は、各 PATH 毎に、ハンドブック等[17][18]に掲載されている値を使用した。また、配管の途中に設けられているバルブについては、バルブ開度と Cv 値を基にして、形状圧損係数を設定した。その詳細については、付録 2 に示した。

#### 4. 3 解析条件

自然循環定常試験解析は、主循環ポンプにより実機定格定常時の2%相当の流量とヒーター出力を与え、温度と流量の安定を確認後、ポンプを停止し、自然循環状態に移行させる。自然循環状態での温度・流量の安定を確認して解析と試験の比較を行った。境界条件は、実機定格定常時の二次主冷却系、崩壊熱除去系のナトリウム流量、IHX、DHX または PRACS 用冷却コイルへのナトリウム入口温度とした。本解析に用いた境界条件の一覧を Table4.1 に示す。

## 5. 解析結果

### 5. 1 一次主冷却系流量および温度

Table5.1～5.6 にシステムの自然循環流量および各機器の出入口温度に関する実験と解析の比較を示す。

Table5.1 にケース PRACS-1S の結果を示す。一次主冷却系全体の自然循環流量に関しては、このケースをリファレンスとした。各集合体の自然循環流量は、解析での中心集合体流量が実験より約 10% 小さくなっている。この理由としては、以下のように考えられる。4.2.1(2)節に示した等温強制循環時の流量配分試験では、主循環流量が実機定格流量の 2% 相当のときに、中心集合体流量と周辺集合体流量が一致するようにバルブを調節している。主循環流量が実機定格の 2% より大きくなると、中心集合体流量が周辺集合体流量よりも大きくなり、2% 未満では、中心集合体流量が周辺集合体流量よりも減少する。このように中心集合体は、周辺集合体と比較し  $Re$  依存性が大きいと考えられる。本解析では、実機定格の 1.8% 流量時に実験の流量配分と一致させるように形状圧力損失係数を調節しているため、実機定格 1.8% 流量より大きい流量時には、中心集合体流量が実験よりも低下すると考えられる。本解析体系 (Model-A) で等温強制循環時の流量配分試験について解析した結果を付録-3 に示す。PRACS-1S のケースでは、実機定格 1.8% より大きい流量であるため、解析では実験と比較し、中心集合体流量が小さく、周辺集合体流量が 2～3% 程度大きくなっている。

各機器の出入口温度差は、解析が実験と比較し、15% 程度大きくなっている。この差は、解析では、模擬炉心部発熱を PRACS で全て除熱しているのに対し、実験では、配管等の熱損失が存在するためだと考えられる。配管等での熱損失を考慮すると、各機器の出入口温度はよく一致している。PRACS の二次側温度に関しても、熱損失分を考慮すると実験とで非常によい一致を示していると考えられる。

Table5.2 にケース PRACS-2S の結果を示す。このケースは、集合体間温度差を 30°C としたものである。一次主冷却系および各集合体自然循環流量とも解析と実験の差は最大 7.5% であり、よく一致していると考えられる。また、温度に関しても、15～20°C 程度解析の方が高いが、一次元ネットワーク解析としては、実験と良く一致している。

Table5.3 にケース IHX-1S の結果を示す。本ケースでは、一次主冷却系の自然循環流量が 1.8% 以下であるため、解析での中心集合体自然循環流量が、実験より 10% 程度小さくなっている。しかし、それ以外の自然循環流量、および温度に関しては、熱損失を考慮すると、解析と実験では良く模擬されている。PRACS

で除熱した PRACS-1S に比べ、IHX で除熱した IHX-1S の方が、実験では一次主冷却系自然循環流量が 10% 小さくなっているが、解析においても 12% 小さくなつておらず、冷却系統の違いによる自然循環ヘッドの変化を介した流量の減少を良く模擬できている。

ここまで PRACS および IHX で除熱した 3 ケースについては、MODEL-A、MODEL-B 間の大きな差は見られず、両モデルともに実験を良く模擬することが出来た。

Table 5.4 にケース DRACS-1S の結果を示す。MODEL-A では、主冷却系、周辺集合体の自然循環流量が実験よりも 10% 前後大きくなっている。一方、MODEL-B は、各集合体自然循環流量とも解析と実験の差が 5% 以内であり、実験と非常に良く一致している。各機器の出入口温度に関しては、両ケースとも良く模擬されている。

Table 5.5 にケース DRACS-2S の結果を示す。このケースでは、集合体間温度差を 30°C としている。本ケースでも、DRACS-1S と同様に、MODEL-A では主冷却系および周辺集合体自然循環流量が、実験と比較して 10% 程度大きくなっている。一方、MODEL-B では解析と実験の差が 5% 以内であり、非常に良く一致している。また、温度は両ケースとも実験と良く一致している。

Table 5.6 にケース DRACS-3S の結果を示す。本ケースでは、PRACS および IHX を併用して除熱を行った。MODEL-A は、実験と比較して、主冷却系自然循環流量が 4%、周辺集合体自然循環流量が 7% 程度大きいが、MODEL-B は、実験と比較して主冷却系自然循環流量の差が 1% 程度であり、実験を良く模擬できている。また、温度に関しては、実験と比較して MODEL-A は最大 7.5%、MODEL-B は最大 5% の差であり、両ケースとも実験と一致している。

Fig. 5.1.1 に各試験ケース一次主冷却系自然循環流量の MODEL-A および MODEL-B と実験結果との比較を示す。PRACS および IHX 運転のケースでは、自然循環流量は、MODEL-A および MODEL-B とともに実験を良く模擬できている。一方、DRACS を運転したケース (DRACS-3S は IHX も併用) では、IWF を考慮していない MODEL-A は、自然循環流量を模擬できていないことがわかる。IWF を考慮した MODEL-B は、実験における冷却系統の違いによる自然循環流量の変化を模擬できていると考えられる。

## 5. 2 中心集合体軸方向温度分布

Fig.5.2.1～Fig.5.2.6 に、各ケースの中心集合体軸方向上昇温度分布を示す。温度分布は、加熱部最下端からの上昇幅により示した。実験において、中心集合体の中心サブチャンネルの温度を「center」、バンドル内の水平断面平均温度を「avg」で示した。中性子遮蔽体領域では、「center」のみを示す。加熱領域では、断面平均温度、中性子遮蔽体領域では、「center」の温度で解析と比較した。

Fig.5.2.1、Fig.5.2.2 に PRACS 運転時のケースの比較を示す。中心集合体自然循環流量が、解析の方が実験よりも小さいため、解析の温度上昇が実験結果よりも大きくなっているが、その差は 10°C 程度であり、軸方向分布形状も一致している。このことから、PRACS 運転時での定常状態では、MODEL-A、MODEL-B とも、集合体内軸方向温度分布を模擬できると考えられる。

Fig.5.2.3 に、IHX 運転時のケースの比較を示す。このケースも、PRACS 運転時と同様に、両モデル（MODEL-A、MODEL-B）とも、定常自然循環時の集合体内軸方向温度分布を非常に良く模擬できていると考えられる。

Fig.5.2.4～Fig.5.2.6 に DRACS 運転時（DRACS-3S は IHX も運転）のケースを示す。DRACS 運転での実験により得られた軸方向温度分布によると、DHX からの低温ナトリウムが集合体間ギャップに潜り込むインターラッパーフロー（IWF）により炉心が冷却されるため、中性子遮蔽体領域上端温度で、発熱部上端近傍の最高温度より 50°C 程度低下している。IWF を考慮していない MODEL-A の解析結果では、中性子遮蔽体領域での温度低下は見られない。一方、IWF を考慮した MODEL-B では、最高温度が 2°C 程度、上部プレナムへの流出温度が 15°C 程度実験より低いものの、中性子遮蔽体領域の温度分布は、実験と同様の形状である。また、炉内最高温度は、MODEL-A、MODEL-B および実験とも加熱部上端で示され、最高温度の値は両解析モデルと実験では、ほぼ同じとなる。

## 5. 3 集合体間ギャップ軸方向温度分布

Fig.5.3.1～Fig.5.3.6 に、各ケースの集合体間ギャップでの軸方向温度分布を示す。温度は、中心集合体内の加熱部最下端温度からの温度上昇幅により示した。MODEL-A は、周辺集合体 7 体を水平断面内を 1 点集中で模擬しており、そこに、集合体間ギャップを 2 流路設けてある。これら流路をそれぞれ MODEL-A(a)、MODEL-A(b) とした。また、MODEL-B および実験の Outer-1 周辺集合体の外側のギャップでの軸方向温度分布を(a)、Outer-1 周辺集合体と中心集合体の間のギャップでの温度分布を(b) とし、Outer-2 周辺集合体についても同様に(c)、(d) とした。

Fig.5.3.1、Fig.5.3.2 に PRACS 運転時 (PRACS-1S、PRACS-2S) の集合体間ギャップ軸方向温度分布を示す。MODEL-A では、中性子遮蔽体領域でのみ集合体間ギャップへの上部プレナムからのナトリウム流路を模擬しているが、形状圧力損失係数を  $1.0 \times 10^6$  としているため、上部プレナムからの集合体間ギャップへのナトリウムの流入量は事実上 0 である。(a)～(b)の各ギャップ位置での軸方向温度分布は、MODEL-A (中性子遮蔽体領域のみ) と MODEL-B は一致した温度分布を示しており、最大  $10^\circ\text{C}$  程度解析の方が実験よりも高くなっているが、温度上昇の過程はほぼ同じである。これより、両ケースとも、IWF はほとんどなく、集合体内からの熱伝達にのみ温度上昇が依存すると考えられる。そのため、MODEL-A、MODEL-B とも、実験を良く模擬できると考えられる。

Fig.5.3.3 に IHX 運転時 (IHX-1S) の集合体間ギャップ軸方向温度分布を示す。このケースも、IWF による集合体間ギャップでの温度低下はほとんどなく、両モデルと実験では、ほぼ一致した結果を示している。

Fig.5.3.4～Fig.5.3.6 に DRACS 運転時 (DRACS-1S、DRACS-2S、DRACS-3S) の集合体間ギャップ軸方向温度分布を示す。MODEL-A では、上部プレナムから集合体間ギャップへの入口 (図(a)、(c)の最上部) でのみ温度が低いが、IWF 流量がほとんどないため、すぐにラッパー管壁の温度と同じになる。一方、MODEL-B では、IWF により、集合体間ギャップの温度が大きく低下し、軸方向温度分布は、実験に近い形状となる。

MODEL-B での Outer-1 周辺集合体外側(a)での軸方向温度分布を実験と比較すると、最高温度が  $17^\circ\text{C}$  (DRACS-1S) から  $40^\circ\text{C}$  (DRACS-3S) 高くなっているが、分布形状は、実験を良く模擬できていると考えられる。また、Outer-1 周辺集合体外側ギャップと Outer-2 周辺集合体外側ギャップの温度分布は、実験では、DHX からの低温ナトリウムが各周辺集合体間ギャップへ均一には流入するこではないため、ギャップへの流入温度が異なるが、解析では、対称モデルとしているため、両周辺集合体間ギャップへの流入温度は同じとなっている。上部プレナムの分割方法を非対称モデルとすれば、この各集合体間ギャップへの流入ナトリウム温度に差を与えることができると考えられる。

## 5. 4 IWF 流速軸方向分布

Fig.5.4.1～Fig.5.4.3 に、MODEL-B を用いた解析により得られた集合体間ギャップを流れるナトリウム流速の軸方向分布を示す。また、MODEL-B は Outer-1 周辺集合体と Outer-2 周辺集合体を対称モデルとしており、解析結果も対称となっていた。そこで、ここでは、Outer-1 周辺集合体外側ギャップから中心集合体 - Outer-1 周辺集合体間ギャップへの IWF についてのみ評価した。軸方向には、

下部プレナムから集合体を通り、上部プレナムに達する流れ方向を正とした。水平方向には、周辺集合体外側ギャップから、中心集合体側ギャップに向かう流れを正方向とした。

Fig.5.4.1 に、Outer-1 周辺集合体外側ギャップを下降する IWF 流速の軸方向分布を示す。DRACS 運転条件では、PRACS、および IHX 運転条件の場合と比較して、6~15 倍程度流速の大きい IWF が発生していることがわかる。IWF 流速は、中性子遮蔽体部で最も大きくなっている。DRACS-1S と DRACS-2S では、0.15~0.17m/sec 程度の流速となっている。DRACS-3S では、最大 0.14m/sec 程度の IWF 流速である。このケースは、IHX でも除熱しているため、上部プレナム温度が下部プレナム温度より 50°C 程度高くなっている。この温度差のため、下部プレナムと上部プレナムの温度がほぼ同じである DRACS-1S、DRACS-2S と比較して、集合体間ギャップへ上部プレナムのナトリウム流入量が、他の DRACS 運転ケースよりも低下し、流速も小さくなると考えられる。

PRACS、および IHX 運転のケースでは、DRACS 運転時と比較して、IWF はほとんど発生していないことがわかる。しかし、PRACS 運転で集合体間温度差を設けたケース (PRACS-2S) では、中性子遮蔽体部で、他のケース (PRACS-1S, IHX-1S) よりも 2 倍程度大きな IWF が生じている。これについては、Fig.5.4.3 と合わせて後述する。

Fig.5.4.2 に、Outer-1 周辺集合体外側ギャップから中心集合体 - Outer-1 周辺集合体間ギャップへ向かう水平流速の軸方向分布を示す。DRACS 運転時には、PRACS、および IHX 運転時と比較して、最大値で 8 倍程度大きな流速となることがわかる。

Fig.5.4.3 に、中心集合体 - Outer-1 周辺集合体間ギャップを上昇する IWF 流速の軸方向分布を示す。分布形状は、周辺集合体外側ギャップを下降する IWF 流速の軸方向分布とほぼ同じになる。ここで、PRACS 運転で集合体間温度差を付けたケース (PRACS-2S) の流速が、PRACS-1S, IHX-1S のケースと比較し、2 倍程度大きくなっている。この原因としては、PRACS-2S では、周辺集合体よりも中心集合体の方が発熱量が大きく高温となるため、中心集合体側ギャップの方が、周辺集合体外側ギャップよりも浮力が大きくなる。そのため、中心集合体側ギャップで上昇流が発生し、集合体間温度差のないケース (PRACS-1S, IHX-1S) と比較し、IWF 流量が大きくなると考えられる。

## 6. 考察

### 6. 1 IWF による除熱量の評価

Table 6.1 に崩壊熱除去系の運転条件の違いにおける IWF による炉心槽全体の除熱量を示す。ここでは、MODEL-A および MODEL-B で得られた各集合体流量、各集合体出入口温度から、炉心槽全体（発熱部、上下の非発熱部および中性子遮蔽体部を含む）において IWF によりラッパー管外面から集合体が冷却される除熱量を求めた。すなわち、MODEL-A を IWF がないケース、MODEL-B が IWF が生じているケースとして、集合体内を流れる流体によって除熱される熱量の差により、IWF による除熱量とし、模擬燃料ピンの全出力に対する割合を求めた。

PRACS および IHX のみによる除熱のケース (PRACS-1S, PRACS-2S および IHX-1S) では、IWF による除熱量は、1kW 以下であり、模擬炉心出力に対する割合でも、1%以下であった。

一方、DRACS による除熱のケース (DRACS-1S, DRACS-2S および DRACS-3S, DRACS-3S は IHX も併用) では、MODEL-A と MODEL-B との集合体内を流れる流体による除熱量の差が 35~60kW 程度であり、模擬炉心出力に対する割合では、20~36%が IWF により除熱されていることがわかった。DRACS-3S 時では、IHX も併用しているために、上部プレナム温度が、他の DRACS 除熱のケースより 50°C 程度高いため、IWF による除熱量は、DRACS-1S と比較して 60% 程度に減少している。

Fig.6.1 に各試験ケースの炉心槽全体での IWF による除熱量の模擬炉心出力に対する割合を示す。DRACS による除熱のみのケース (DRACS-1S および DRACS-2S) では、実機定格の 2%相当炉心出力条件において、除熱量が 36% 程度で一定となっていることがわかる。

Table.6.2 に各試験ケースの加熱領域内で、IWF による除熱量を示す。除熱量は、加熱領域出入口温度差と各集合体流量から求めた。これによると、PRACS および IHX のみによる除熱のケース (PRACS-1S, PRACS-2S および IHX-1S) では、除熱量は事実上 0 である。一方、DRACS のみによる除熱のケース (DRACS-1S および DRACS-2S) では、加熱領域において IWF により 3~4kW が除熱されていることがわかる。DRACS と IHX を併用して除熱したケース (DRACS-3S) では、加熱領域の IWF による除熱量が 0.8kW であり、DRACS のみによる除熱のケースと比較して、1/4 程度に小さくなっている。

Fig.6.2 に各試験ケースの加熱領域内での IWF による除熱量の模擬炉心出力に対する割合を示す。DRACS のみによる除熱のケースでは、実機定格の 2%相当炉心出力条件において自然循環流量が 1.6%程度の時、除熱量が 2%程度で一定であった。

## 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冷却系統間の相互作用の影響を把握するために、一次元フローネットワークコード LEDHER を用いて、PLANDTL-DHX 試験装置でのナトリウム試験解析により解析モデルの検証を行った。実機定格の 2%相当の模擬炉心出力を与えた自然循環定常試験について、二種類の解析モデル（集合体間熱移行のみを考慮したモデル「MODEL-A」、集合体間熱移行に加えて IWF に相当する上部プレナムから集合体間ギャップに潜り込む流路を設け、その流路とラッパー管の間に熱伝達を考慮した「MODEL-B」）を作成して解析を実施し、以下の知見を得た。

- (1) PRACS 運転、および IHX 運転条件では、MODEL-A、MODEL-B とも、自然循環流量、炉心部温度分布、各機器の出入口温度についてほぼ実験を模擬することが出来た。
- (2) DRACS 運転条件において、MODEL-A は実験結果と比較して、全自然循環流量が 12%程度大きくなっているが、MODEL-B では、3%の誤差に留まった。また、集合体間ギャップでの温度分布について、MODEL-A は、実験で見られた中性子遮蔽体領域での温度低下を模擬することが出来なかつたが、MODEL-B は中性子遮蔽体領域での温度低下と集合体間ギャップの温度分布を模擬することができた。
- (3) MODEL-B で、集合体間ギャップ内の IWF 流速分布を求めた。その結果、最大流速は、中性子遮蔽体部で周辺集合体外側ギャップでの流速は、DRACS のみの運転のケースで、0.15m/sec 程度であった。また、周辺集合体外側ギャップから中心集合体一周辺集合体間ギャップへのクロスフロー成分は、発熱部上端よりも 20cm 程度下部で最大となつた。
- (4) MODEL-A と MODEL-B の集合体内流体の除熱量の差から、IWF による炉心槽全体の除熱量を評価すると、PRACS および IHX により除熱したケースでは、IWF による炉心槽の除熱はほぼ 0 であったが、DRACS により除熱したケースでは、模擬炉心出力を実機定格 2%相当とした条件で、炉心槽全体で炉心出力の 36%程度が IWF により除熱されていることがわかつた。

この結果から、自然循環定常状態において、一次元ネットワークコードによりインターラッパー流れを含めた冷却系統間相互作用の影響を模擬できる見通しを得た。

さらに、PLANDTL-DHX 試験装置での、スクラムから一次主冷却系自然循環状態への移行までを模擬した過渡試験においても、本解析を実施する予定である。

### 謝辞

本研究を実施するに当たり、実験の実施に多大な協力をしていただいた常陽産業（株）の方々、並びに、試験データ処理にご協力いただいた CSK（株）の安松智博氏、動燃事業団大洗工学センター安全工学部原子炉工学室の小柿信寿氏に深く感謝いたします。

## 参考文献

- [1] M. Ueta, T. Inagaki et al., "The Development of Demonstration Fast Breeder Reactor (DFBR)", Proceedings of ICONE-3, Kyoto, Japan, vol.2, p771(Apr.1995).
- [2] H. Kamide and Y. Ieda, "Multi-bundle sodium experiments for thermohydraulics in core subassemblies during natural circulation decay heat removal", Proceedings of IAEA/IWGFE Specialists' Meeting, O-arai, Japan, IWGFR/88(1993).
- [3] 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) 一集合体間熱移行試験ー, 日本原子力学会「94年春の年会」予稿集, H28, P378(1994).
- [4] 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年秋の年会」予稿集, E54, P360(1995).
- [5] 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 一PLANDTL-DHX を用いた 7 本集合体ナトリウム試験ー, 日本原子力学会「95年秋の年会」予稿集, E55, P361(1995).
- [6] 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年春の年会」予稿集, C20, P128(1995).
- [7] 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).
- [8] H. Kamide, et al., "Inter-subassembly heat transfer during natural circulation decay heat removal of FBRs - Multi-subassembly sodium experiments -", Proceedings of ICONE-3, Kyoto, Japan, vol.1, p23(Apr.1995).
- [9] H. Kamide, et al., "Benchmark exercise for multi-dimensional thermohydraulic analysis codes", Journal of hydraulic research, vol.34, No.3, P317(1996).
- [10] 桃井 一光, 林 謙二, 他: 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 一炉心及び主冷却系の過渡熱流動現象の解明ー, PNC TN9410 96-280 (1996).
- [11] 林 謙二, 桃井 一光, 他: 高速炉の自然循環崩壊熱除去時の冷却系統間相互作用に関する研究 一崩壊熱除去方式および2次主冷却系自然循環の影響ー, PNC TN9410 97-045 (1997).
- [12] 上出 英樹, 山口 彰, 他: FBR 大型炉の設計主要目に関する研究(II) (8)自然循環除熱能力の検討, 日本原子力学会「昭63年会」予稿集, F32, P282(1988.4).
- [13] 甲藤 好郎: 伝熱概論, 養賢堂(1964).
- [14] 桃井 一光, 林 謙二 他: 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 一炉心冷却効果と自然循環流量低減効果の評価ー, PNC TN9410 97-047 (1997).
- [15] Maresca, M. W. et al., Chem. Eng. Progr., 56 (1960) 180.
- [16] Shih-Kuei Cheng and Neil E. Todreas, "Hydrodynamic Models and Correlations For Bare and Wire-Wrapped Hexagonal Rod Bundles - Bundle Friction Factors, Subchannel Friction Factors and Mixing Parameters", Nuclear Engineering and Design, Vol. 92, P227-251(1986).

- [17] 富田 幸雄, 山崎 慎三 著:水力学, 産業図書(1978).
- [18] 管路・ダクトの流体抵抗出版分科会 編:技術資料 管路・ダクトの流体抵抗, 日本機械学会(1979).

**Table 2.1 Main specifications of PLANRTL-DHX Loop****Primary Loop**

## Core

Maximum power	1.2 MW
Subassembly number	7

## Upper plenum

Diameter	2.0 m
Sodium level from bottom	2.6 m
UIS diameter	0.412 m
Auxiliary heater power	0.68 kW

## 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 Natural Circulation Steady State Experiments**

Case Name	Initial State (Upper Plenum) / Steady State (Lower Plenum)					Conditions of Cooling Systems						
	Power (kW)				Flow Rate (ℓ/min)	Core inlet Temp. (°C)	DRACS System		PRACS System		Secondary Loop	
	Total	Center	Outer-1	Outer-2			OFF	ON	OFF	ON	OFF	Natural Circulation
PRACS-1S	170.3	24.5	73.3	72.5	54.3	298.7	○	—	—	Na:89.7ℓ/min	○	—
PRACS-2S	143.0	24.4	59.8	58.8	52.7	297.9	○	—	—	Na:90.2ℓ/min	○	—
DRACS-1S	170.3	24.4	73.4	72.5	45.3	301.1	—	Na:89.9ℓ/min	○	—	○	—
DRACS-2S	143.0	24.4	59.7	58.9	42.7	298.2	—	Na:90.3ℓ/min	○	—	○	—
DRACS-3S	170.1	24.4	73.3	72.4	45.9	294.9	—	Na:90.3ℓ/min	○	—	—	○ (44.3ℓ/min)
IHX-1S	170.5	24.4	73.5	72.6	48.8	295.8	○	—	○	—	—	○ (61.4ℓ/min)

**Table 4.1 Boundary Conditions in Steady State Experiments and Calculations**

Case	Cooling System	Decay Heat Removal System		Secondary Loop	
		Inlet Temperature (°C)	Flow Rate (ℓ/min)	Inlet Temperature (°C)	Flow Rate (ℓ/min)
PRACS-1S	PRACS	257.5	89.9	-	-
PRACS-2S	PRACS	261.1	90.2	-	-
DRACS-1S	DRACS	182.1	89.8	-	-
DRACS-2S	DRACS	197.1	90.3	-	-
DRACS-3S	DRACS & IHX	266.4	90.2	291.8	44.4
IHX-1S	IHX	-	-	300.7	62.2

**Table 5.1 Experimental and Analysis Results (Case: PRACS-1S)**

	Position	Results			Difference(%)	
		Experiment	Model-A	Model-B	Exp. - Model-A	Exp. - Model-B
Flow Rate	Main Loop	1.90%*	1.91%*	1.91%*	0.4	0.6
	Center S/A inlet	1.94	1.75	1.75	-9.6	-9.7
	Outer-1 S/A inlet	1.90	1.93	1.94	2.0	2.3
	Outer-2 S/A inlet	1.89		1.94		2.6
Temperature (°C)	Lower Plenum inlet	298.7	314.1	322.6		
	Upper Plenum outlet	446.1	472.9	481.3		
	Difference in R/V $\Delta T = T_{UP[out]} - T_{LP[in]}$	147.4	158.8	158.7	7.7	7.7
	Primary Loop					
Decay Heat Removal System	PRACS inlet	444.1	472.9	481.3		
	PRACS outlet	305.2	314.4	322.5		
	$\Delta T = T_{in} - T_{out}$	138.9	158.5	158.8	14.1	14.3
Decay Heat Removal System	PRACS inlet	257.5	257.5	257.5		
	PRACS outlet	341.0	352.2	352.4		
	$\Delta T = T_{out} - T_{in}$	83.5	94.7	94.9	13.4	13.7

\*Relative value corresponding to Full Flow rate for Demonstration FBR

**Table 5.2 Experimental and Analysis Results (Case: PRACS-2S)**

	Position	Results			Difference(%)	
		Experiment	Model-A	Model-B	Exp. - Model-A	Exp. - Model-B
Flow Rate	Main Loop	1.85%*	1.82%*	1.80%*	-1.6	-2.7
	Center S/A inlet	1.81	1.67	1.69	-7.5	-6.5
	Outer-1 S/A inlet	1.85	1.85	1.81	-0.3	-2.2
	Outer-2 S/A inlet	1.85		1.82		-1.9
Temperature (°C)	Lower Plenum inlet	298.9	307.0	312.0		
	Upper Plenum outlet	423.3	446.5	451.9		
	Difference in R/V	$\Delta T = T_{UP[out]} - T_{LP[in]}$	124.4	139.5	139.9	12.1
	Primary Loop	PRACS inlet	422.7	446.5	451.9	
		PRACS outlet	302.3	307.0	312.1	
		$\Delta T = T_{in} - T_{out}$	120.4	139.5	139.8	15.9
	Decay Heat Removal System	PRACS inlet	261.4	261.4	261.4	
		PRACS outlet	332.4	341.1	340.0	
		$\Delta T = T_{out} - T_{in}$	71.0	79.7	78.6	12.3
						10.7

\*Relative value corresponding to Full Flow rate for Demonstration FBR

**Table 5.3 Experimental and Analysis Results (Case: IHX-1S)**

	Position	Results			Difference(%)	
		Experiment	Model-A	Model-B	Exp. - Model-A	Exp. - Model-B
Flow Rate	Main Loop	1.71%*	1.67%*	1.67%*	-2.6	-2.5
	Center S/A inlet	1.72	1.53	1.54	-11.2	-10.4
	Outer-1 S/A inlet	1.71	1.69	1.69	-1.2	-1.3
	Outer-2 S/A inlet	1.71		1.69		-0.9
Temperature (°C)	Lower Plenum inlet	295.6	293.5	293.6		
	Upper Plenum outlet	456.0	474.5	473.9		
	Difference in R/V $\Delta T = T_{UP[out]} - T_{LP[in]}$	160.4	181.0	180.3	12.8	12.4
	Primary Loop	453.3	474.5	473.8		
	IHX inlet	298.7	293.5	293.6		
	IHX outlet	154.6	181.0	180.2	17.1	16.6
	$\Delta T = T_{in} - T_{out}$	292.5	292.5	292.5		
	Secondary Loop	428.8	432.7	432.4		
	IHX inlet	136.3	140.2	139.9	2.9	2.6
	IHX outlet					
	$\Delta T = T_{out} - T_{in}$					

\*Relative value corresponding to Full Flow rate for Demonstration FBR

**Table 5.4 Experimental and Analysis Results (Case: DRACS-1S)**

	Position	Results			Difference(%)	
		Experiment	Model-A	Model-B	Exp. - Model-A	Exp. - Model-B
Flow Rate	Main Loop	1.59%*	1.75%*	1.64%*	10.1	3.1
	Center S/A inlet	1.72	1.68	1.70	-2.2	-1.3
	Outer-1 S/A inlet	1.56	1.76	1.63	12.3	4.4
	Outer-2 S/A inlet	1.57		1.63		4.1
Temperature (°C)	Lower Plenum inlet	300.8	314.9	314.8		
	Upper Plenum outlet	311.1	314.9	314.5		
	Difference in R/V $\Delta T = T_{UP[out]} - T_{LP[in]}$	10.3	0.0	-0.3		
	Primary Loop	DRACS inlet	309.6	314.9	314.7	
		DRACS outlet	241.3	246.8	249.0	
		$\Delta T = T_{in} - T_{out}$	68.3	68.1	65.7	-0.3
	Decay Heat Removal System	DRACS inlet	183.0	183.0	183.0	
		DRACS outlet	269.2	276.2	277.1	
		$\Delta T = T_{out} - T_{in}$	86.2	93.2	94.1	8.1
						9.2

\*Relative value corresponding to Full Flow rate for Demonstration FBR

**Table 5.5 Experimental and Analysis Results (Case: DRACS-2S)**

	Position	Results			Difference(%)	
		Experiment	Model-A	Model-B	Exp. - Model-A	Exp. - Model-B
Flow Rate	Main Loop	1.50%*	1.66%*	1.54%*	10.7	2.7
	Center S/A inlet	1.57	1.61	1.64	2.4	4.4
	Outer-1 S/A inlet	1.47	1.67	1.52	13.4	3.4
	Outer-2 S/A inlet	1.49		1.53		2.3
Temperature (°C)	Lower Plenum inlet	298.0	309.7	309.1		
	Upper Plenum outlet	306.7	309.7	309.3		
	$\Delta T = T_{UP[out]} - T_{LP[in]}$	8.7	0.0	0.2		
	Primary Loop	DRACS inlet	304.8	309.7	309.3	
		DRACS outlet	246.1	249.4	251.1	
		$\Delta T = T_{in} - T_{out}$	58.7	60.3	58.2	2.7 -0.9
	Decay Heat Removal System	DRACS inlet	197.5	197.5	197.5	
		DRACS outlet	269.9	275.8	276.3	
		$\Delta T = T_{out} - T_{in}$	72.4	78.3	78.8	8.1 8.8

\*Relative value corresponding to Full Flow rate for Demonstration FBR

**Table 5.6 Experimental and Analysis Results (Case: DRACS-3S)**

	Position	Results			Difference(%)	
		Experiment	Model-A	Model-B	Exp. - Model-A	Exp. - Model-B
Flow Rate	Main Loop	1.61%*	1.68%*	1.63%*	4.4	1.1
	Center S/A inlet	1.70	1.60	1.60	-5.9	-5.7
	Outer-1 S/A inlet	1.58	1.69	1.63	7.0	3.2
	Outer-2 S/A inlet	1.60		1.63		1.6
Temperature (°C)	Lower Plenum inlet	294.6	295.5	294.4		
	Upper Plenum outlet	356.8	356.1	356.0		
	Difference in R/V $\Delta T = T_{UP[out]} - T_{LP[in]}$	62.2	60.6	61.6	-2.6	-1.0
	Primary Loop	DRACS inlet	353.1	356.1	356.0	
		DRACS outlet	305.8	305.3	306.8	
		$\Delta T_{DRACS} = T_{in} - T_{out}$	47.3	50.8	49.2	7.4
		IHX inlet	355.9	355.9	355.6	
		IHX outlet	295.8	295.6	294.3	
		$\Delta T_{IHX} = T_{in} - T_{out}$	60.1	60.3	61.3	0.3
	Decay Heat Removal System	DRACS inlet	266.1	266.1	266.1	
		DRACS outlet	325.7	328.0	328.6	
		$\Delta T_{DRACS} = T_{out} - T_{in}$	59.6	61.9	62.5	3.9
	Secondary Loop	IHX inlet	288.6	288.6	288.6	
		IHX outlet	352.0	353.7	352.6	
		$\Delta T_{IHX} = T_{out} - T_{in}$	63.4	65.1	64.0	2.7
						0.9

\*Relative value corresponding to Full Flow rate for Demonstration FBR

**Table 6.1 Calculated Heat Removal Capability of IWF for The Whole Core Region under The Natural Circulation Condition**

		PRACS-1S		PRACS-2S		IHX-1S		DRACS-1S		DRACS-2S		DRACS-3S	
		Model-A	Model-B	Model-A	Model-B	Model-A	Model-B	Model-A	Model-B	Model-A	Model-B	Model-A	Model-B
Center S/A	Inlet temperature(°C)	314.1	322.6	307.2	312.0	293.5	293.7	315.0	314.8	310.5	309.2	295.4	294.4
	Outlet temperature(°C)	474.9	482.9	452.0	458.0	476.3	475.7	489.4	467.5	466.8	447.6	476.2	462.5
	Mass Flow Rate(kg/sec)	0.10	0.10	0.10	0.10	0.09	0.09	0.10	0.10	0.10	0.10	0.10	0.10
Outer-1 S/A	Inlet temperature(°C)	314.1	322.6	307.2	312.0	293.7	293.7	315.0	314.8	310.5	309.2	295.4	294.4
	Outlet temperature(°C)	472.6	481.1	445.6	453.7	474.3	473.9	488.3	426.6	461.7	408.1	474.8	437.0
	Mass Flow Rate(kg/sec)	0.69	0.35	0.66	0.32	0.61	0.30	0.63	0.29	0.60	0.27	0.61	0.29
Outer-2 S/A	Inlet temperature(°C)	-	322.6	-	312.0	-	293.7	-	314.8	-	309.2	-	294.4
	Outlet temperature(°C)	-	481.0	-	454.2	-	473.9	-	426.5	-	408.2	-	436.9
	Mass Flow Rate(kg/sec)	-	0.35	-	0.33	-	0.30	-	0.29	-	0.27	-	0.29
Heat Quantity (kW)		167.8	167.5	9.9	141.9	167.9	167.8	167.3	107.3	140.1	90.1	167.9	132.8
Removal Heat by IWF (kW)		0.3		-1.0		0.1		60.1		50.1		35.1	
Ratio of Removal Heat by IWF to Total Heater Output (%)		0.2		-0.7		0.1		35.7		35.5		20.9	

**Table 6.2 Calculated Heat Removal Capability of IWF for The Heated Region of The Core under The Natural Circulation Condition**

		PRACS-1S		PRACS-2S		IHX-1S		DRACS-1S		DRACS-2S		DRACS-3S	
		Model-A	Model-B	Model-A	Model-B	Model-A	Model-B	Model-A	Model-B	Model-A	Model-B	Model-A	Model-B
Center S/A	Inlet temperature(°C)	314.1	322.6	307.2	312.0	293.5	293.7	315.0	314.8	310.5	309.2	295.4	294.4
	Outlet temperature(°C)	478.2	486.7	461.6	466.1	479.9	481.9	490.8	495.4	475.1	477.0	478.2	480.0
	Mass Flow Rate(kg/sec)	0.10	0.10	0.10	0.10	0.09	0.09	0.10	0.10	0.10	0.10	0.10	0.10
Outer-1 S/A	Inlet temperature(°C)	314.1	322.6	307.2	312.0	293.5	293.7	315.0	314.8	310.5	309.2	295.4	294.4
	Outlet temperature(°C)	472.1	480.6	444.4	453.5	473.7	473.6	488.1	495.5	461.0	469.0	474.4	478.6
	Mass Flow Rate(kg/sec)	0.69	0.35	0.66	0.32	0.61	0.30	0.63	0.29	0.60	0.27	0.61	0.29
Outer-2 S/A	Inlet temperature(°C)	-	322.6	-	312.0	-	293.7	-	314.8	-	309.2	-	294.4
	Outlet temperature(°C)	-	480.6	-	454.2	-	473.6	-	495.4	-	469.0	-	478.6
	Mass Flow Rate(kg/sec)	-	0.35	-	0.33	-	0.30	-	0.29	-	0.27	-	0.29
Heat Quantity (kW)		167.8	167.6	141.1	142.9	168.0	168.3	167.3	163.7	140.6	137.6	167.8	167.0
Removal Heat by IWF (kW)		0.2		-1.8		-0.3		3.6		3.0		0.8	
Ratio of Removal Heat by IWF to Total Heater Output (%)		0.1		-1.3		-0.2		2.2		2.1		0.5	

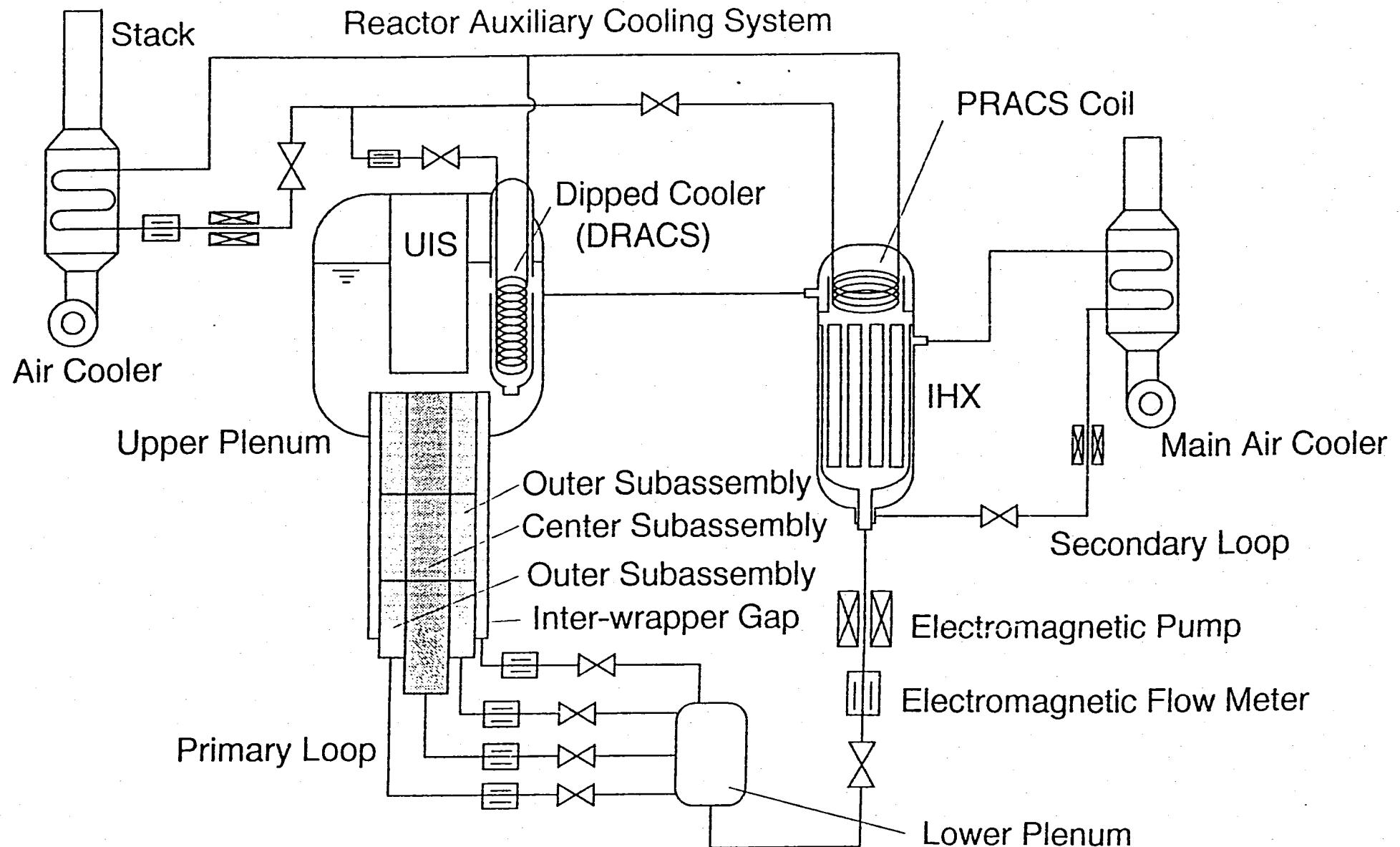


Fig. 2.1 Flow diagram of PLANDTL-DHX

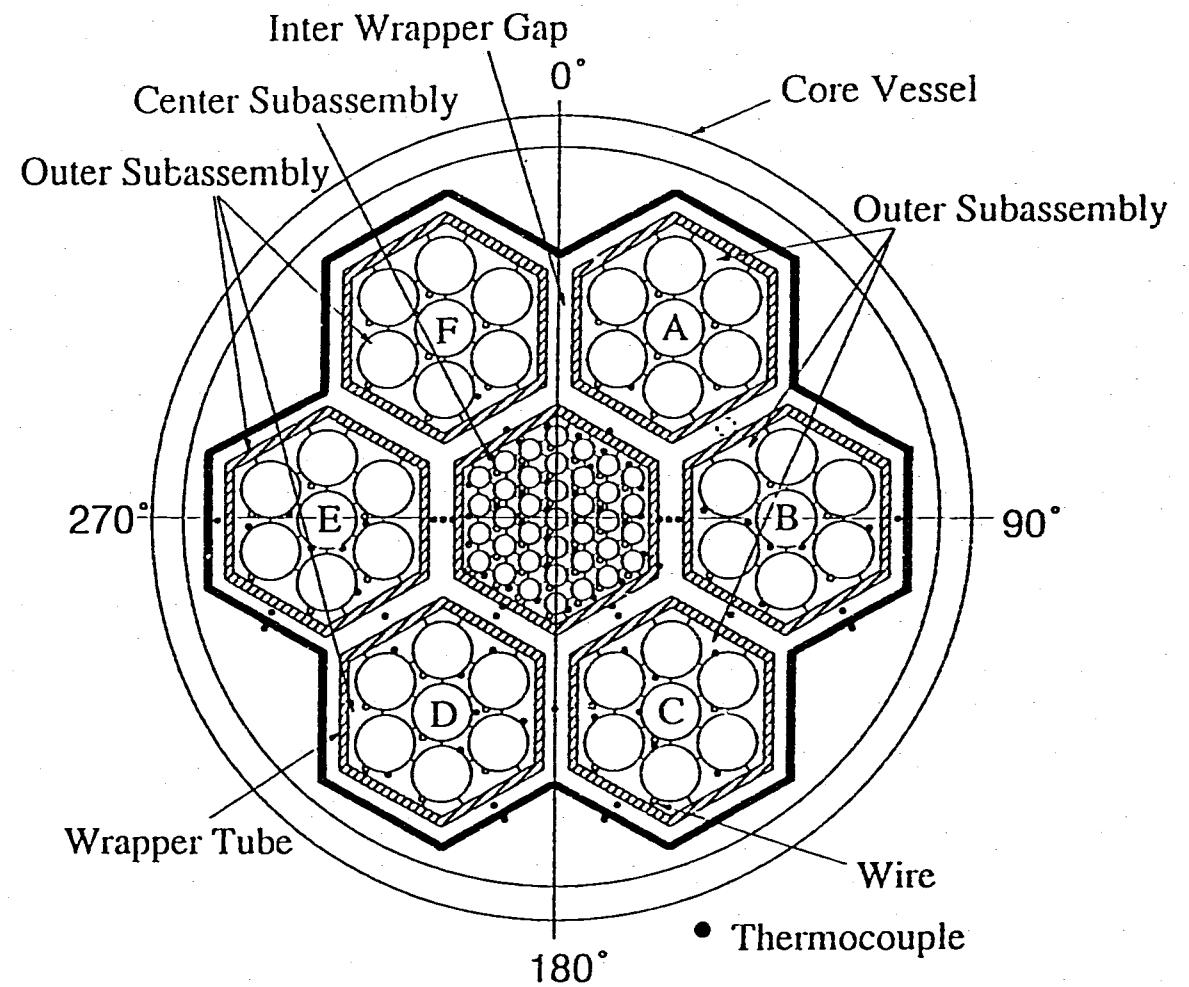
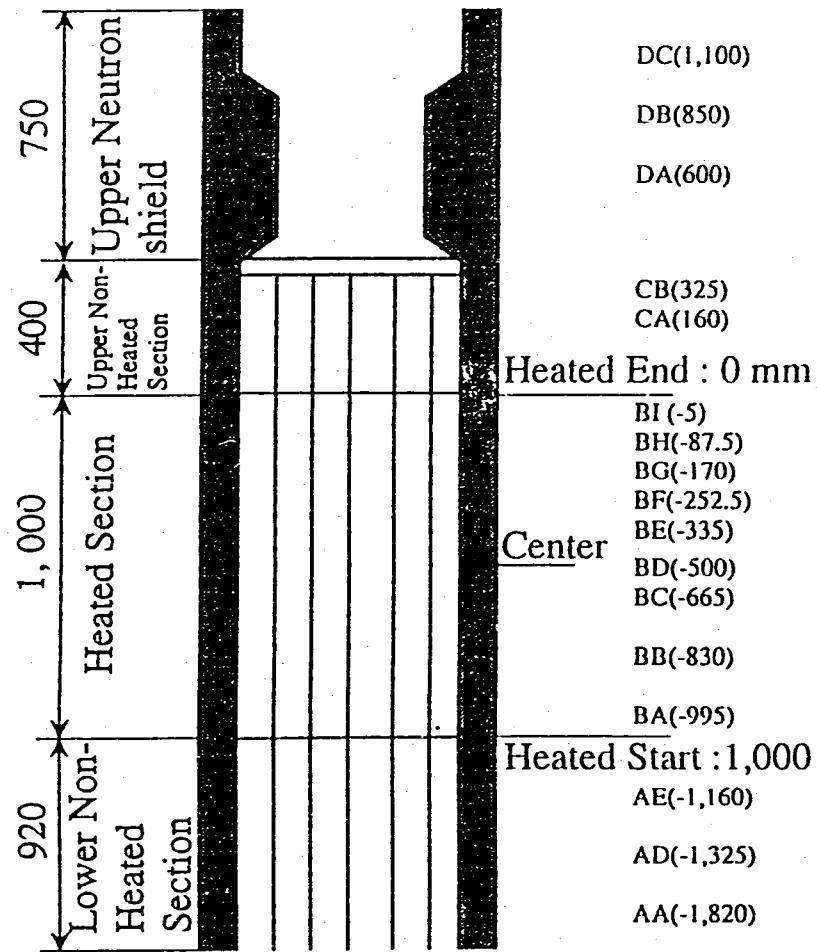


Fig. 2.2 Thermocouple Location in Test Section

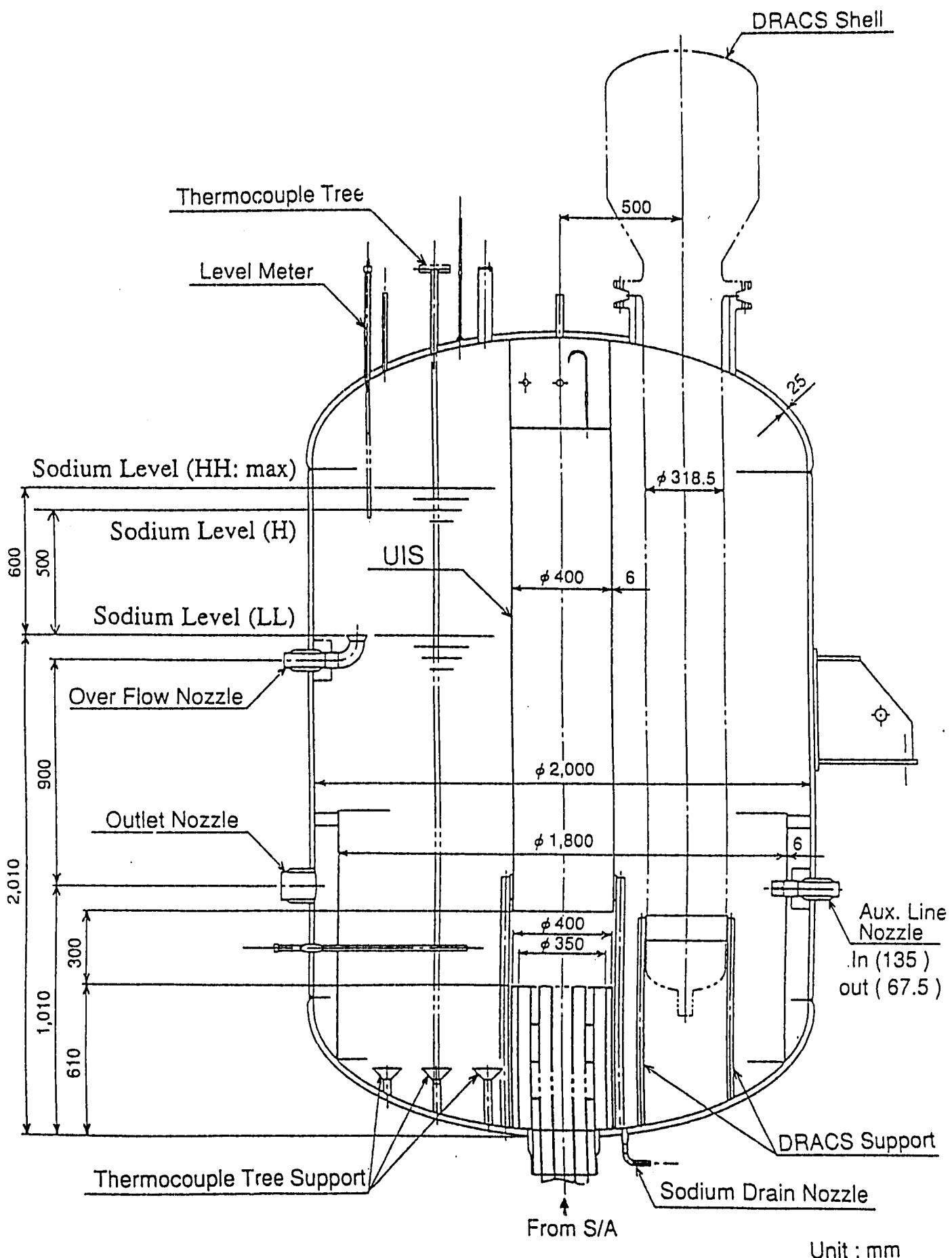
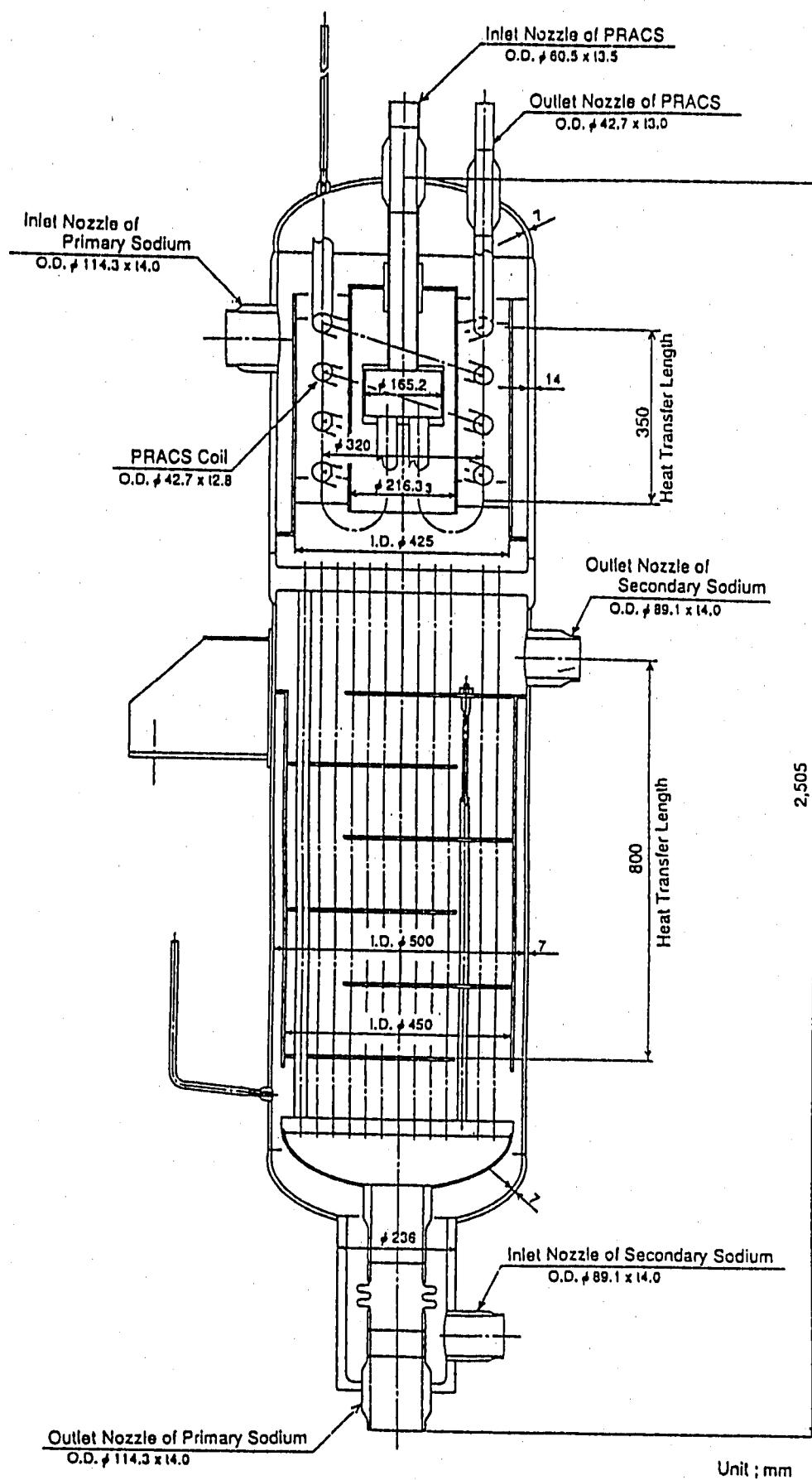
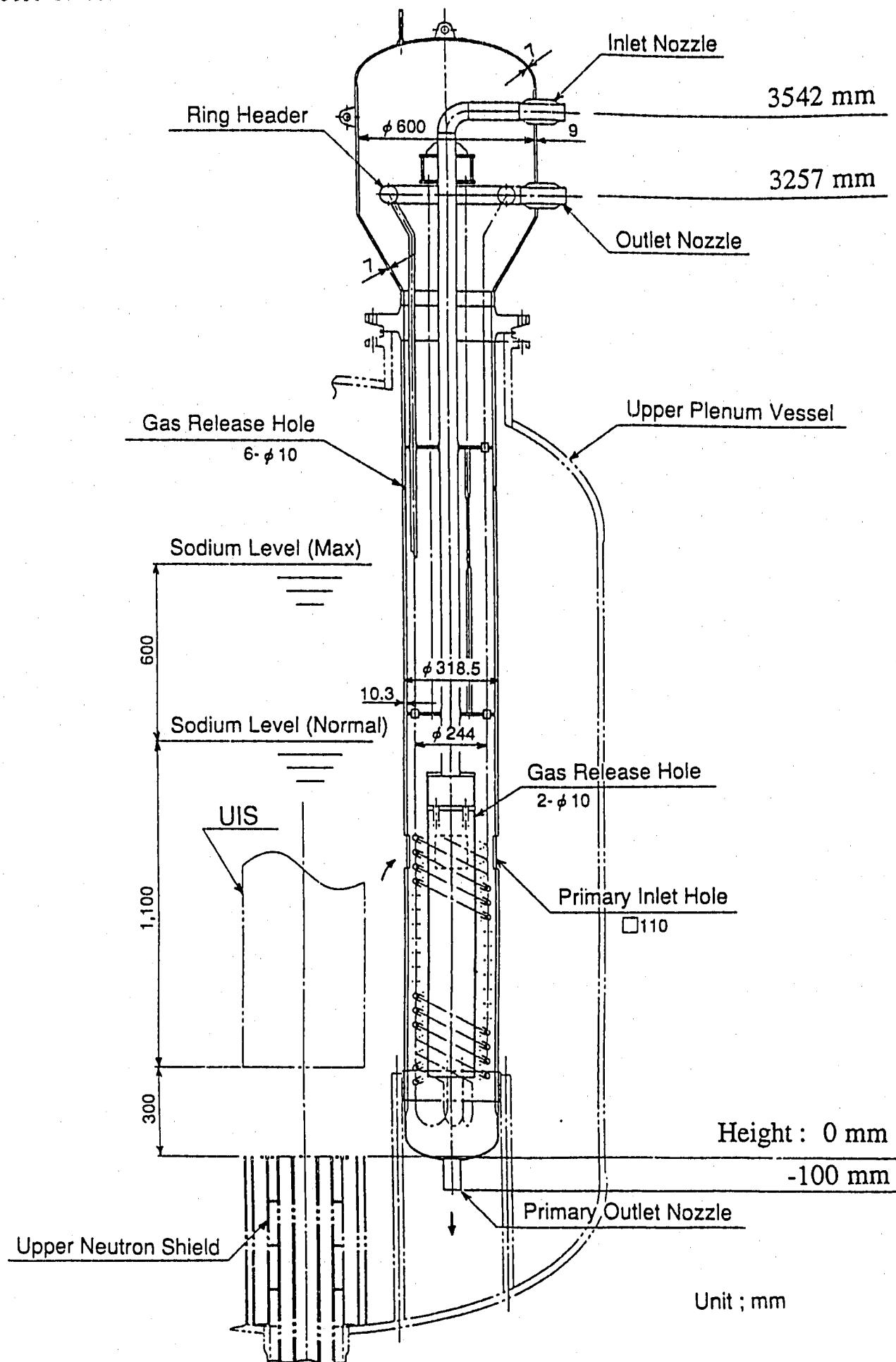


Fig. 2.3 Schematic of upper plenum



**Fig.2.4 Schematic of IHX & PRACS**



**Fig.2.5 Schematic of direct heat exchanger (DHX)**

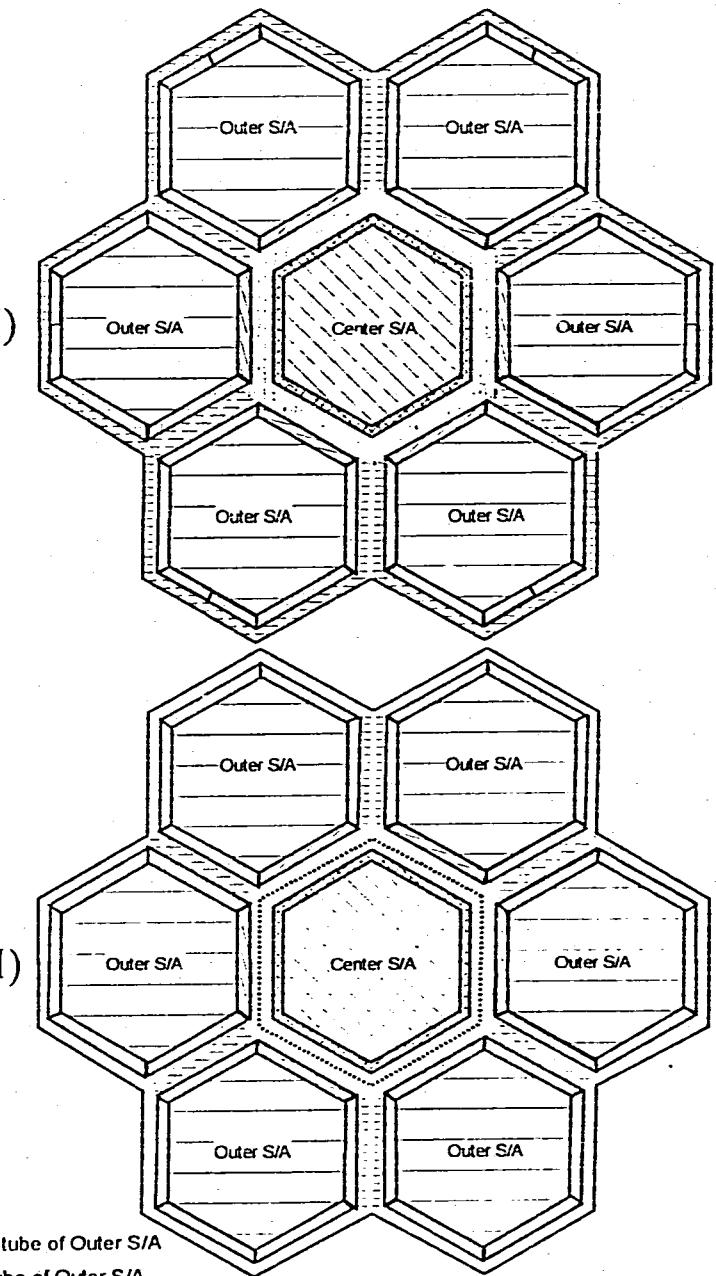
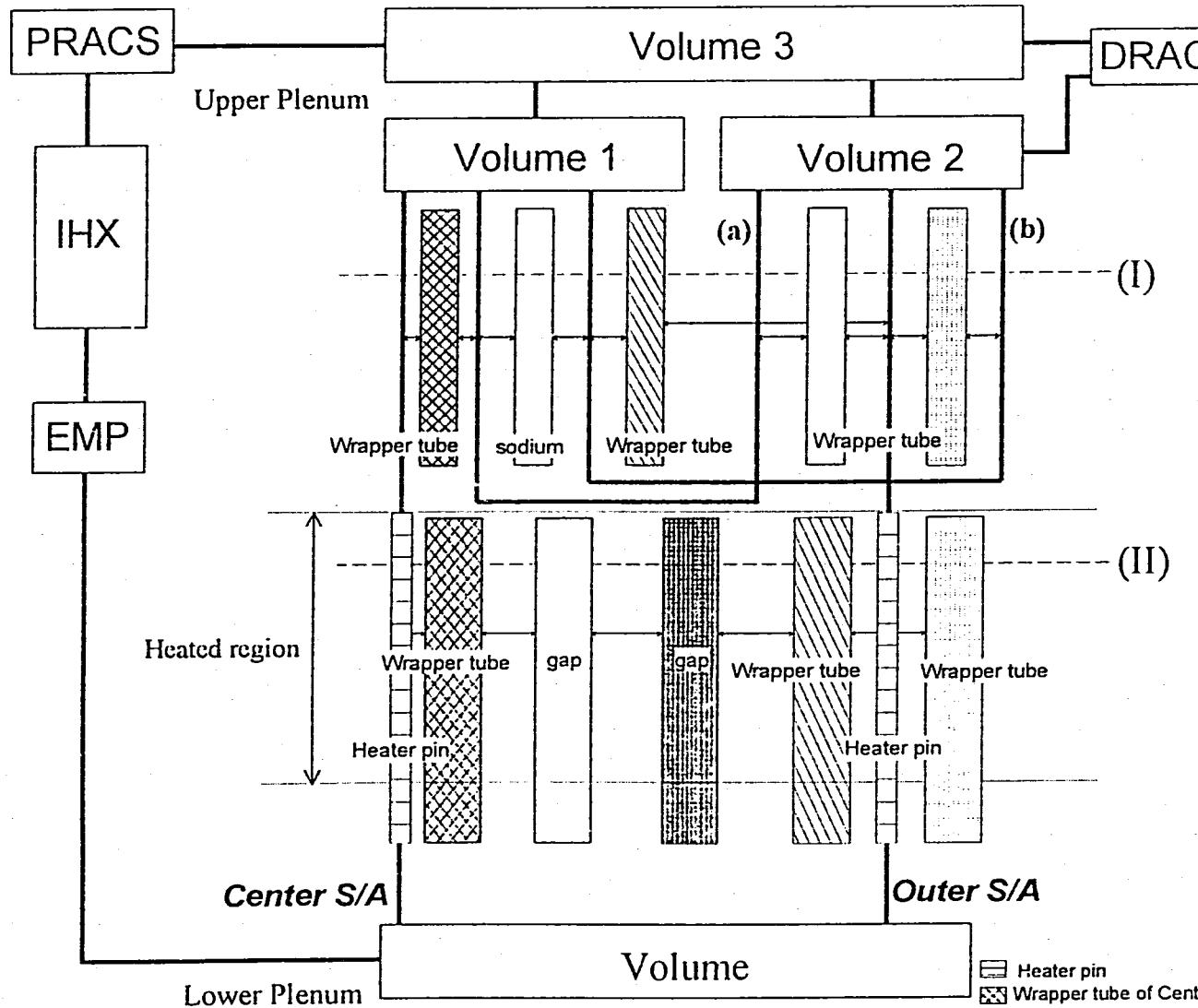


Fig.4.1 Analysis model for Inter-Subassembly Heat Transfer (MODEL-A)

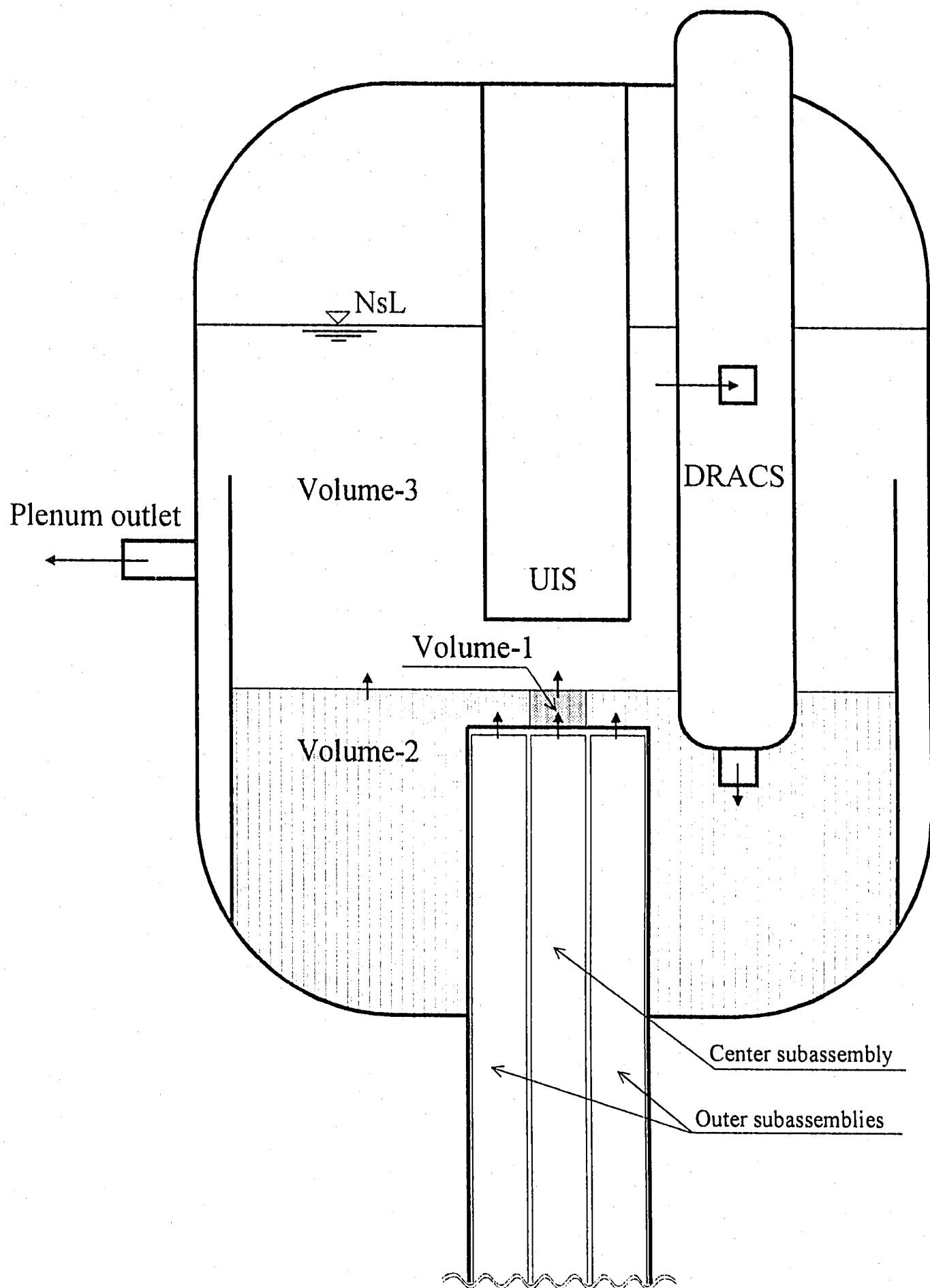


Fig.4.2 Partition diagram of Upper Plenum in PLANDTL-DHX  
(MODEL-A)

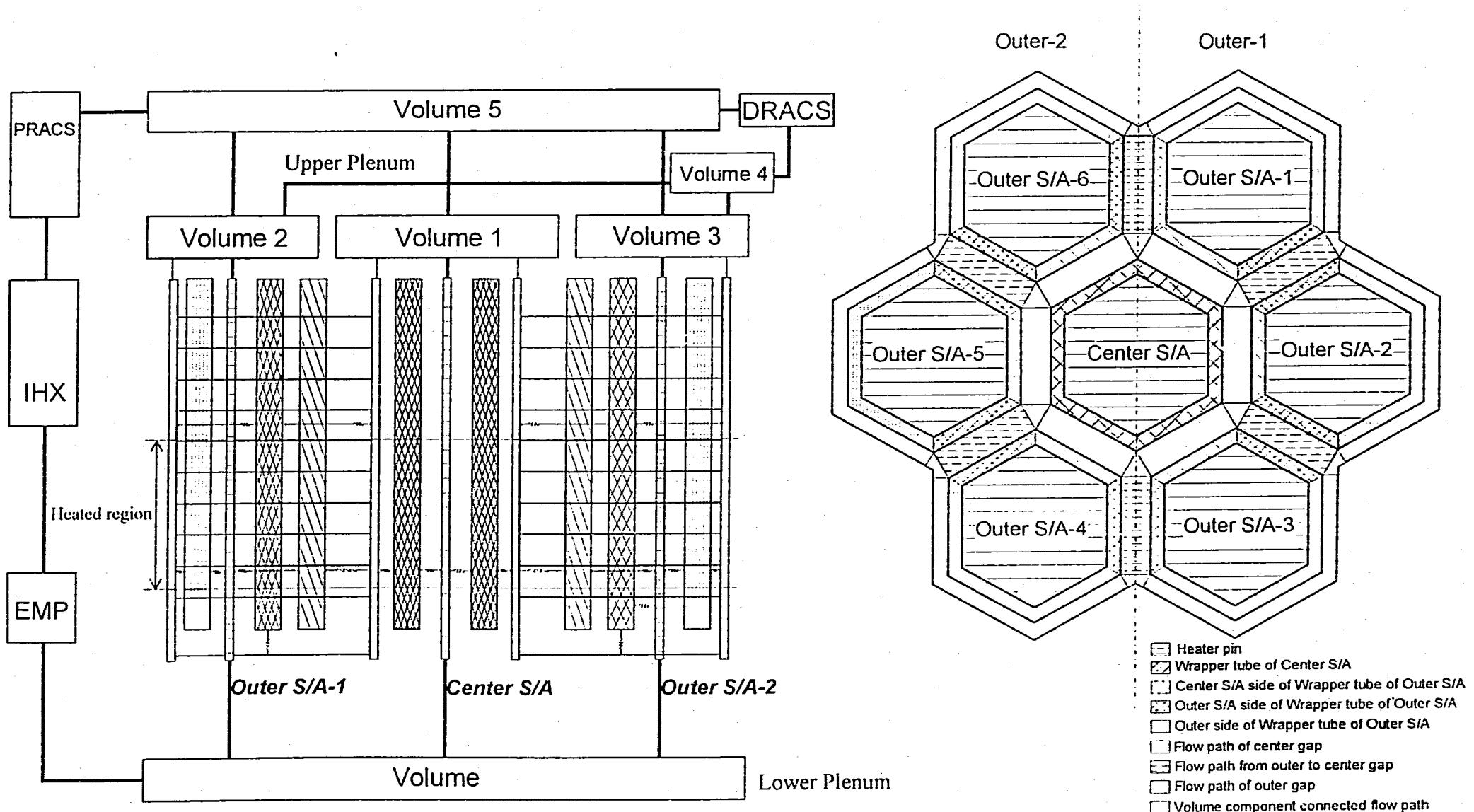


Fig.4.3 Analysis model for Inter Wrapper Flow (MODEL-B)

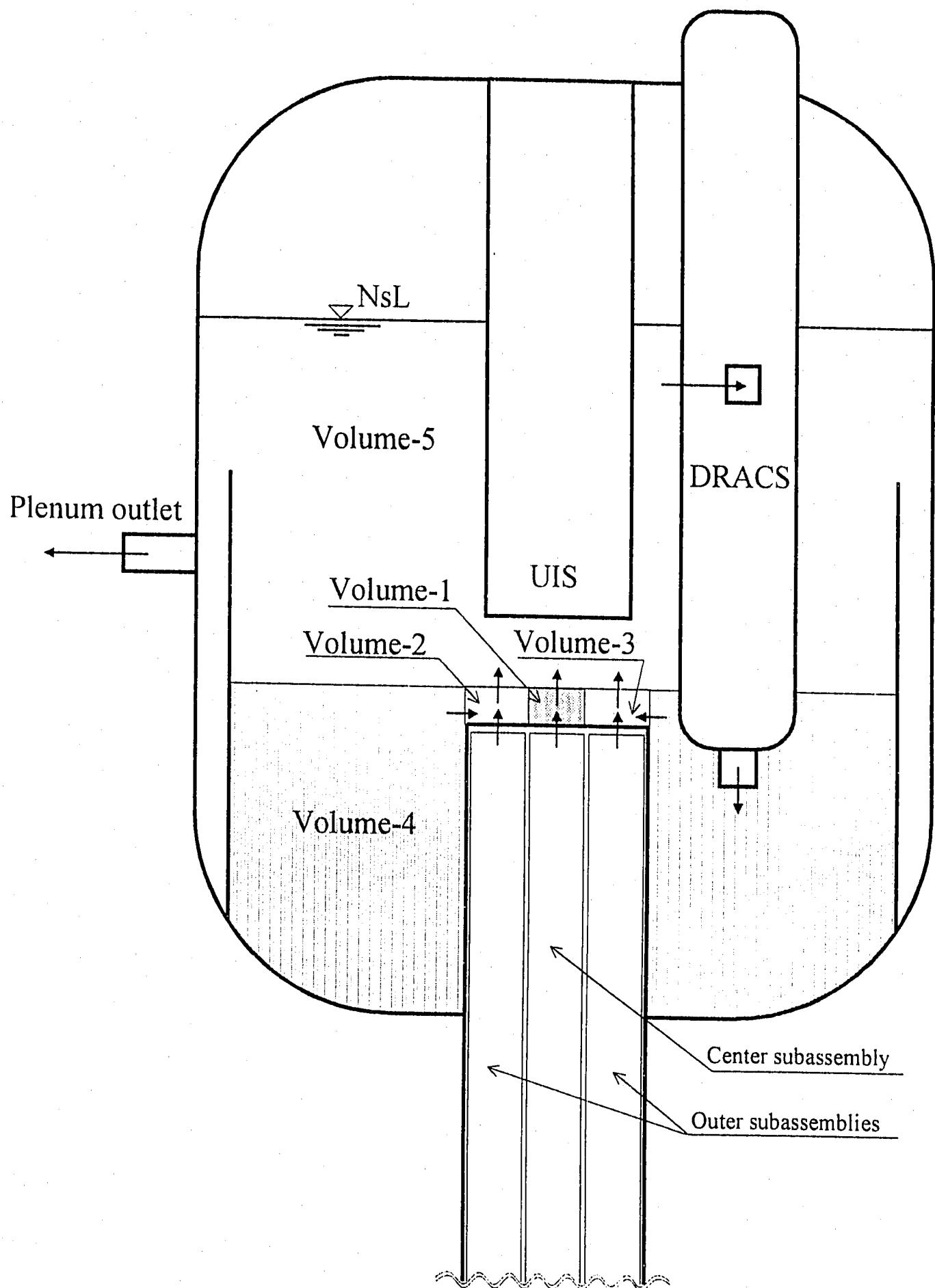


Fig.4.4 Partition diagram of Upper Plenum in PLANDTL-DHX  
(MODDEL-B)

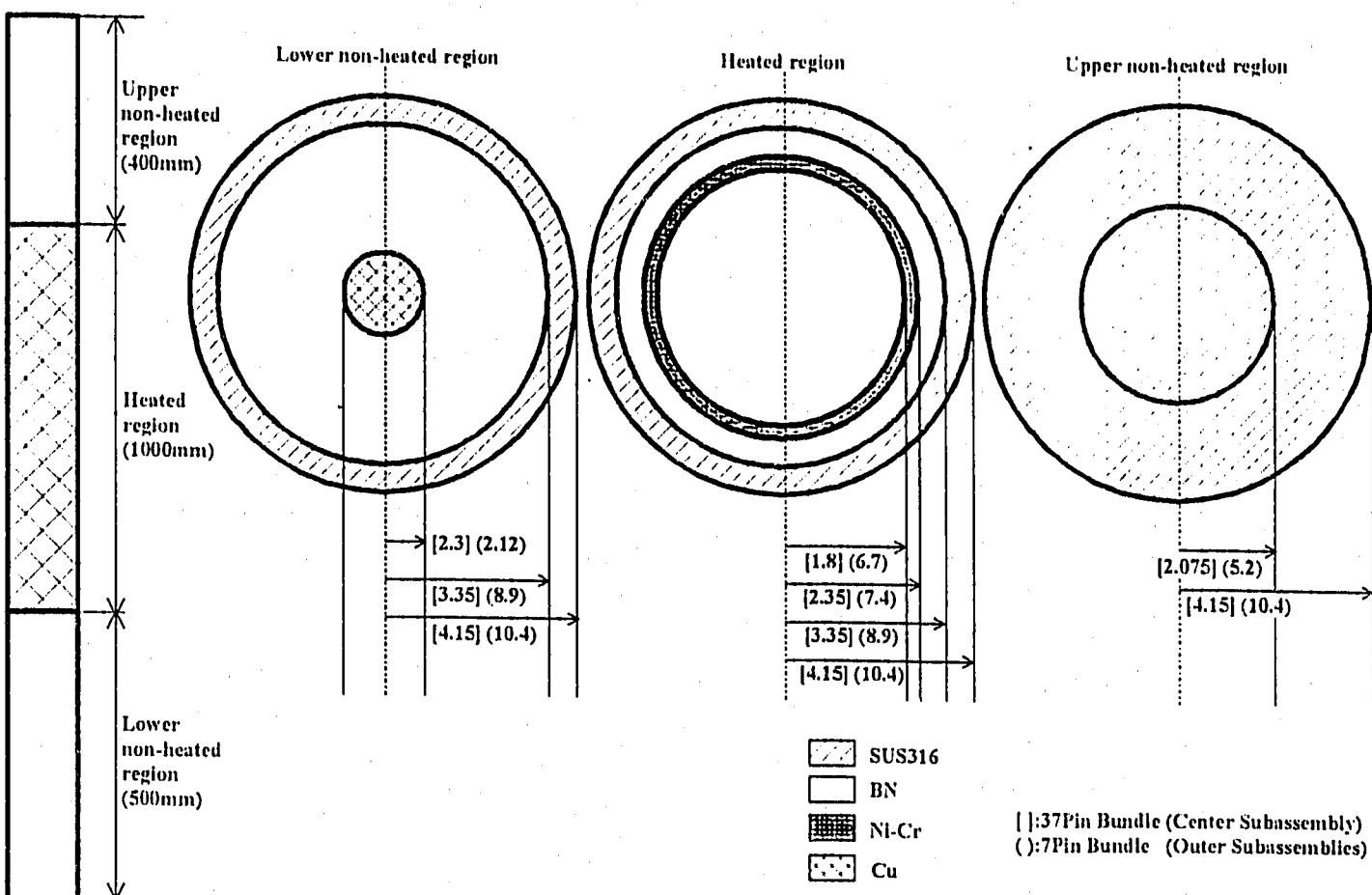
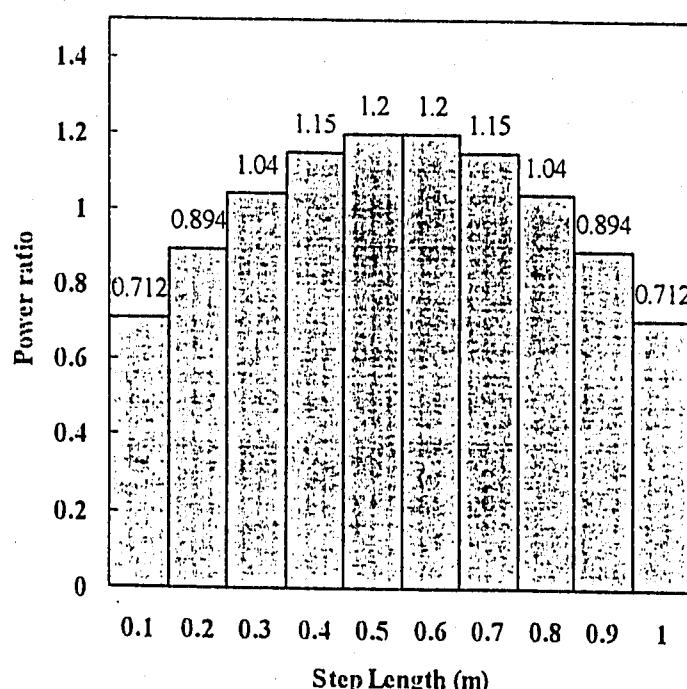
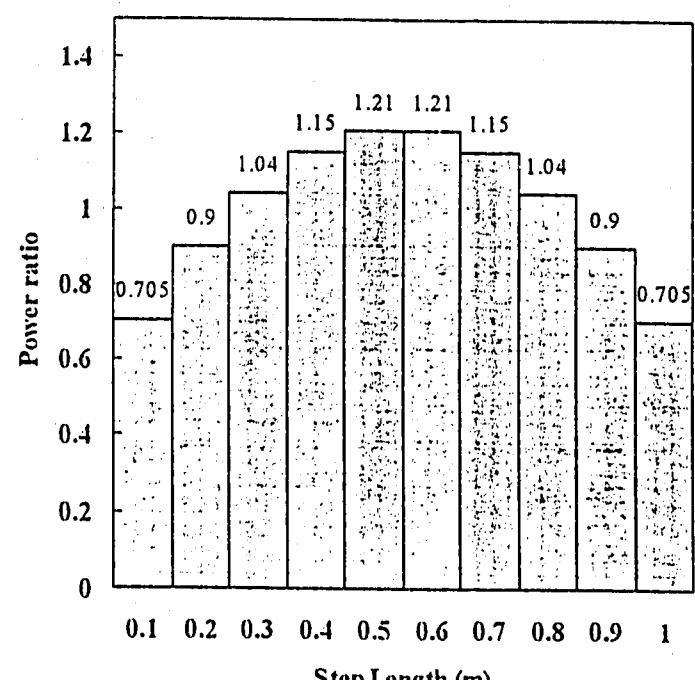


Fig.4.5 PLANDTL-DHX Heater Pin details



(a) Heater pin in Center subassembly



(b) Heater pin in Outer subassemblies

Fig.4.6 Power distribution of Electric Heater Pin

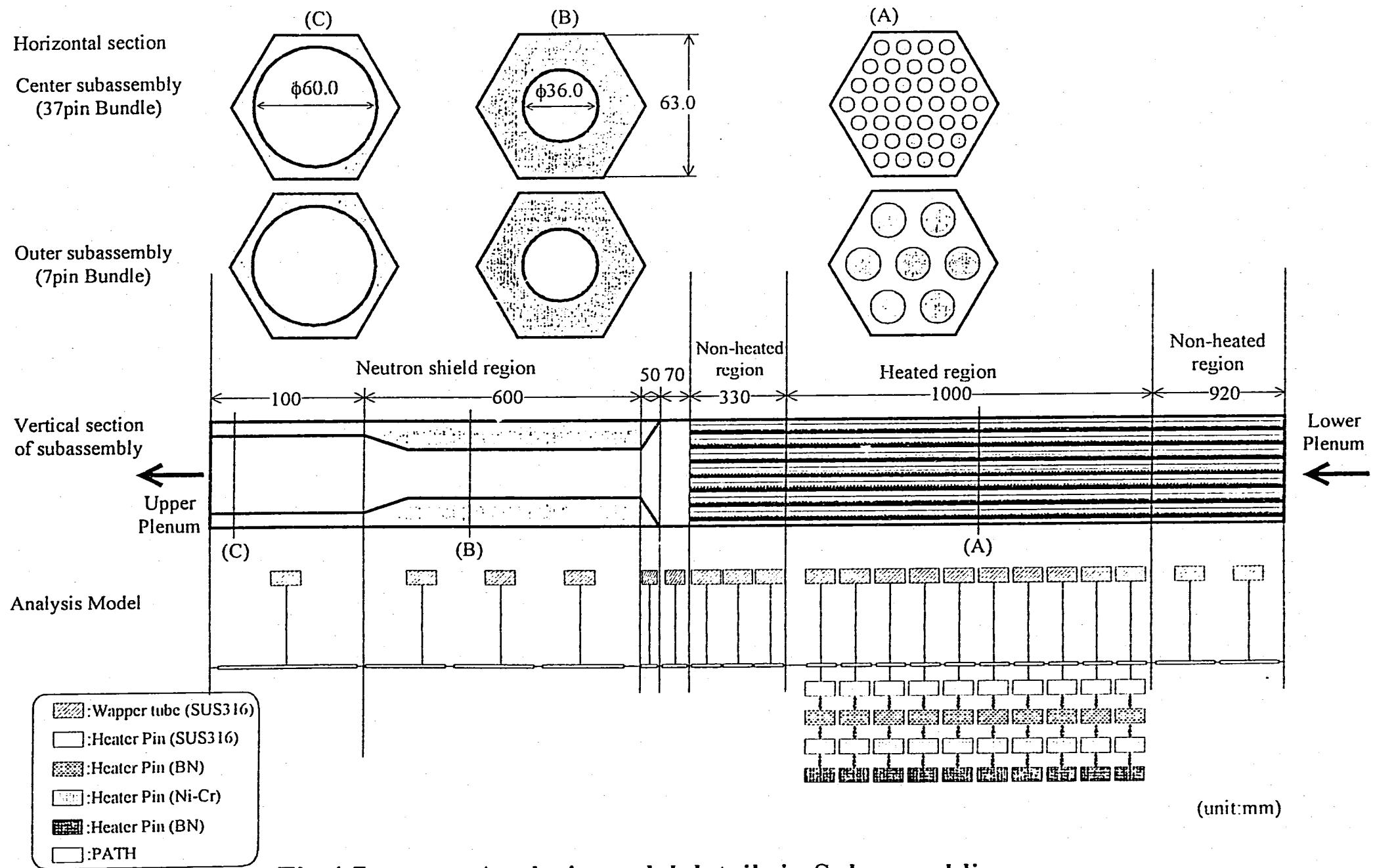
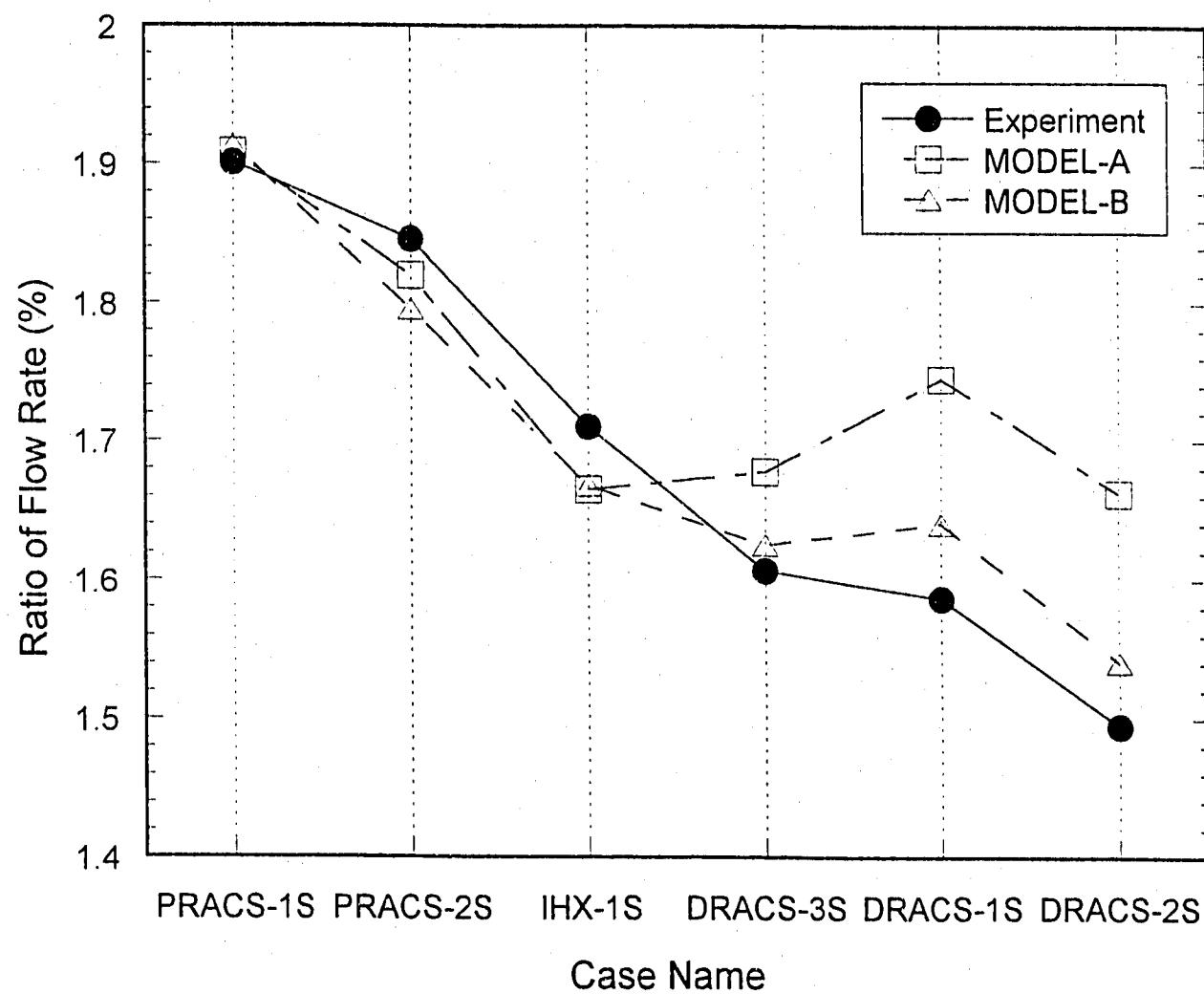


Fig.4.7

Analysis model details in Subassemblies



**Fig.5.1.1 Comparison between Analysis Models and Experiments for Natural Circulation Flow Rate**

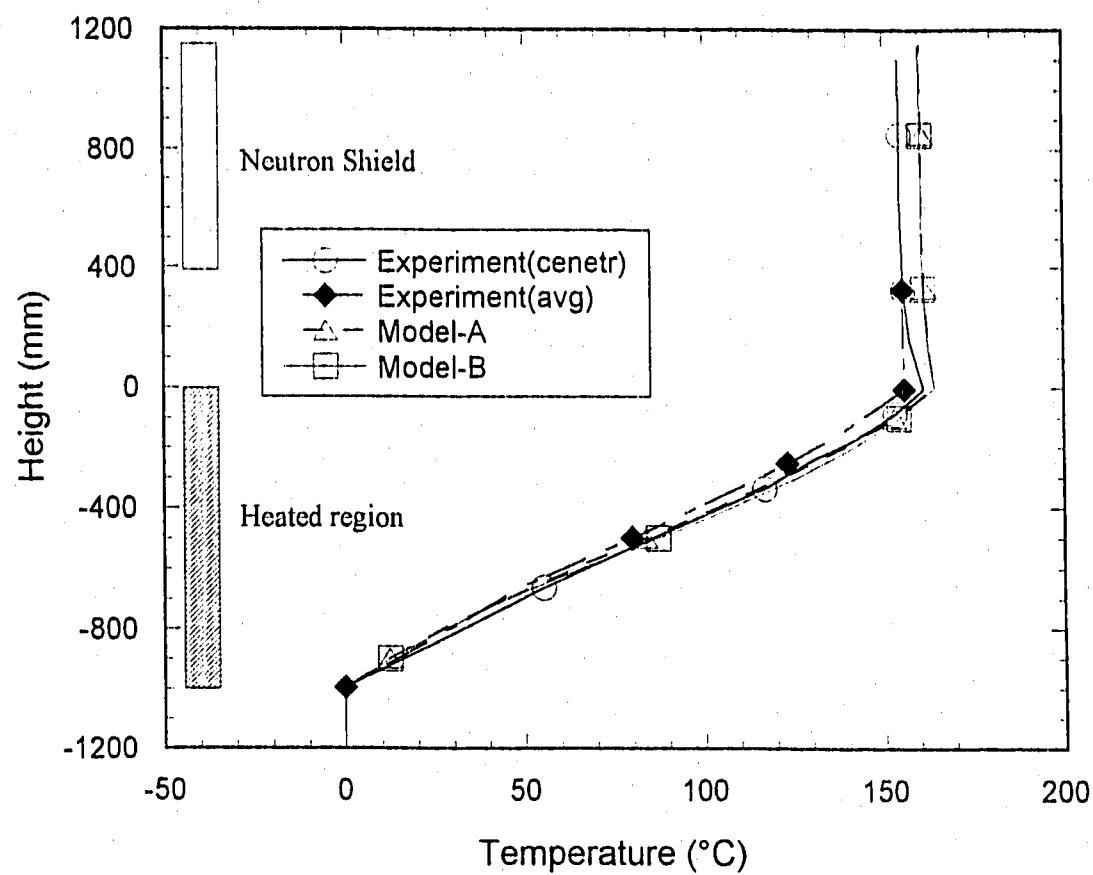


Fig.5.2.1 Vertical temperature ditribution in Center S/A  
(Case:PRACS-1S)

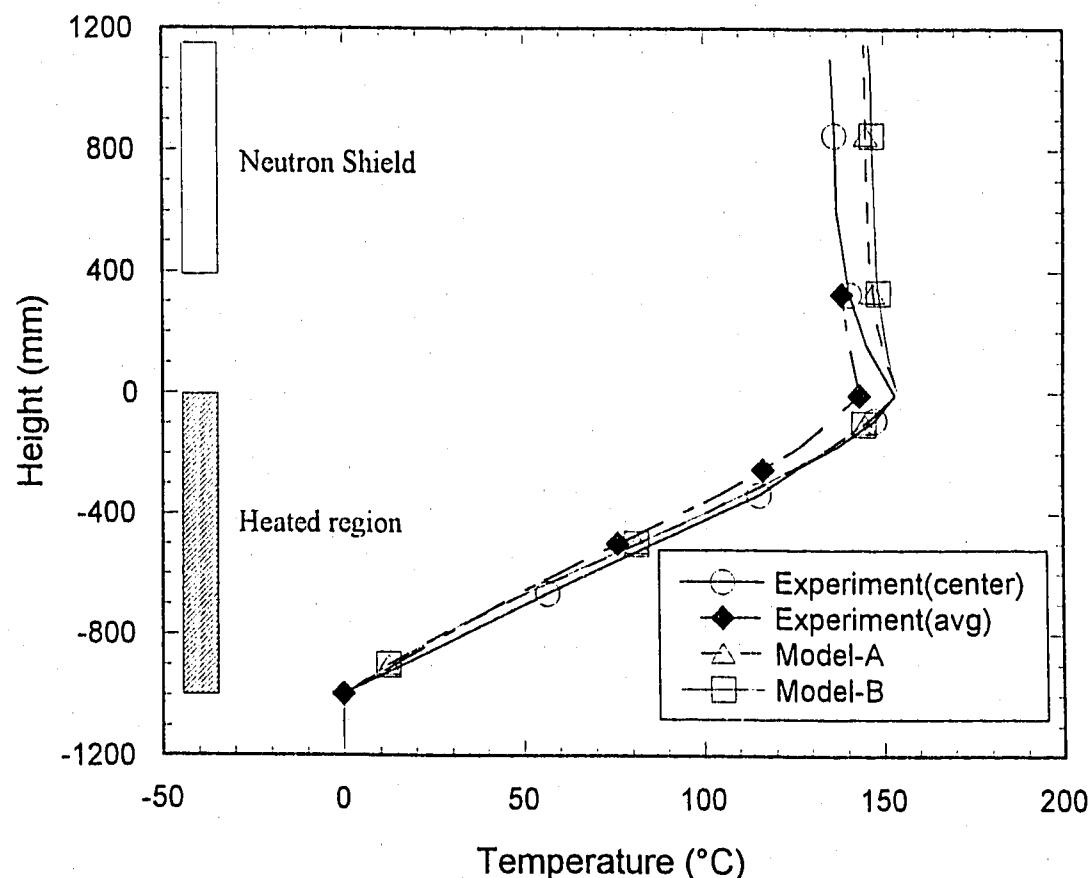


Fig.5.2.2 Vertical temperature ditribution in Center S/A  
(Case:PRACS-2S)

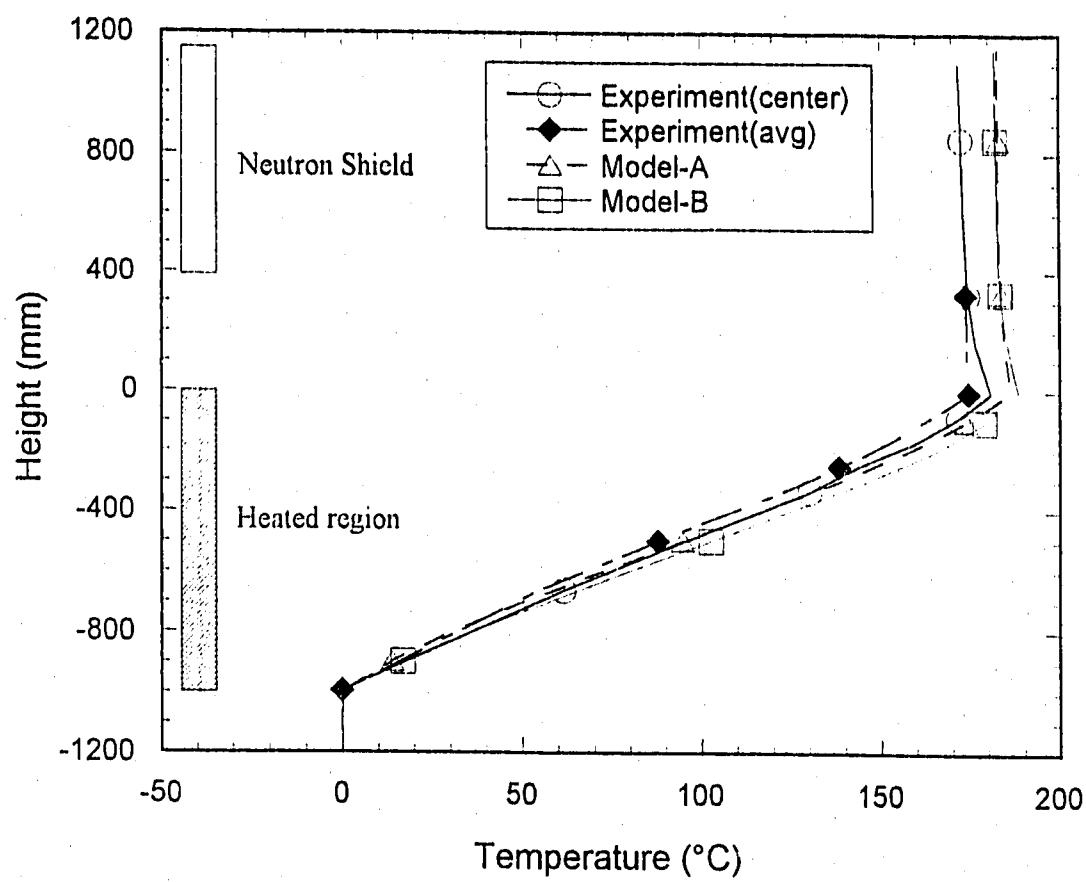


Fig.5.2.3 Vertical temperature ditribution in Center S/A  
(Case:IHX-1S)

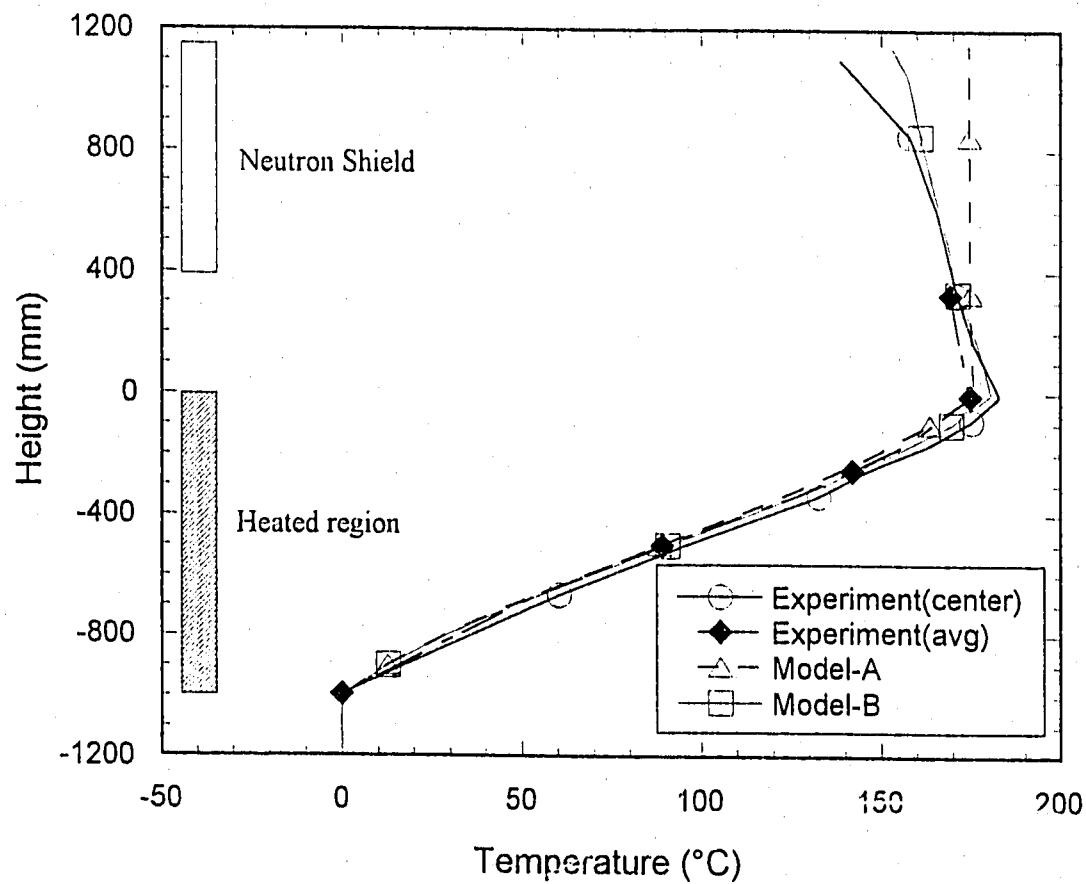
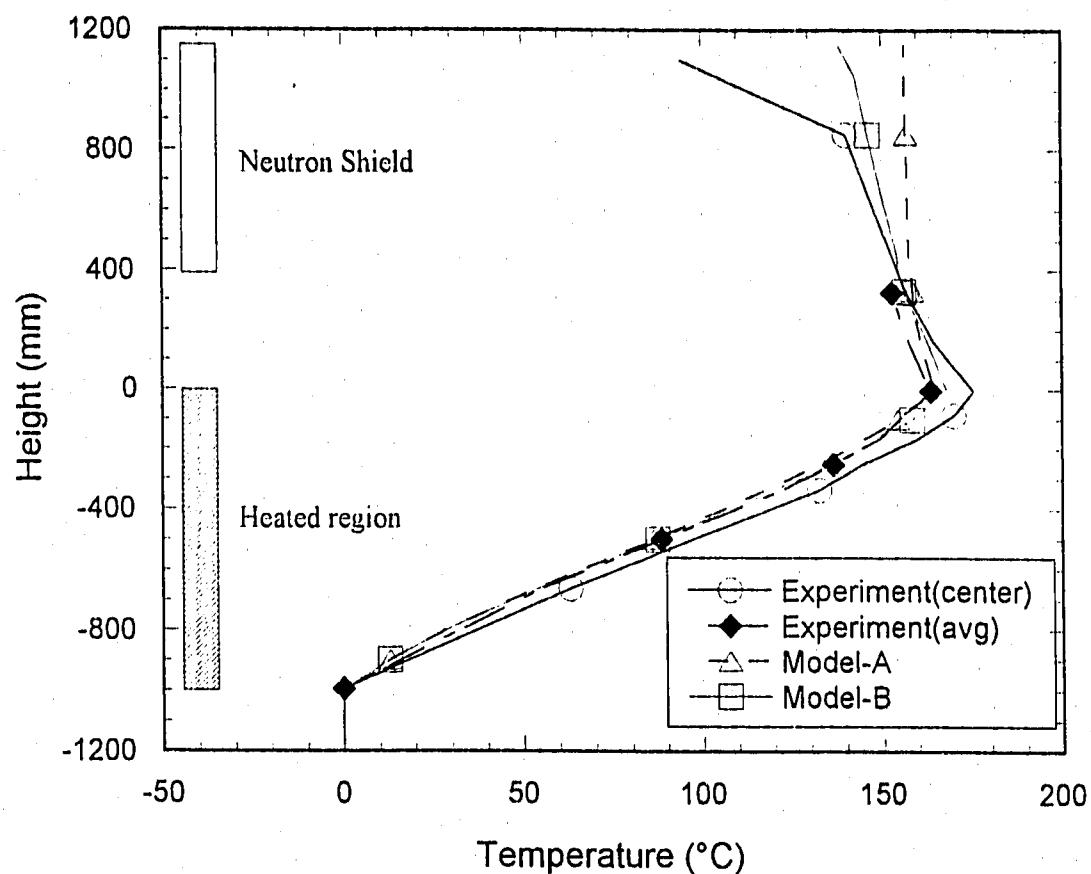
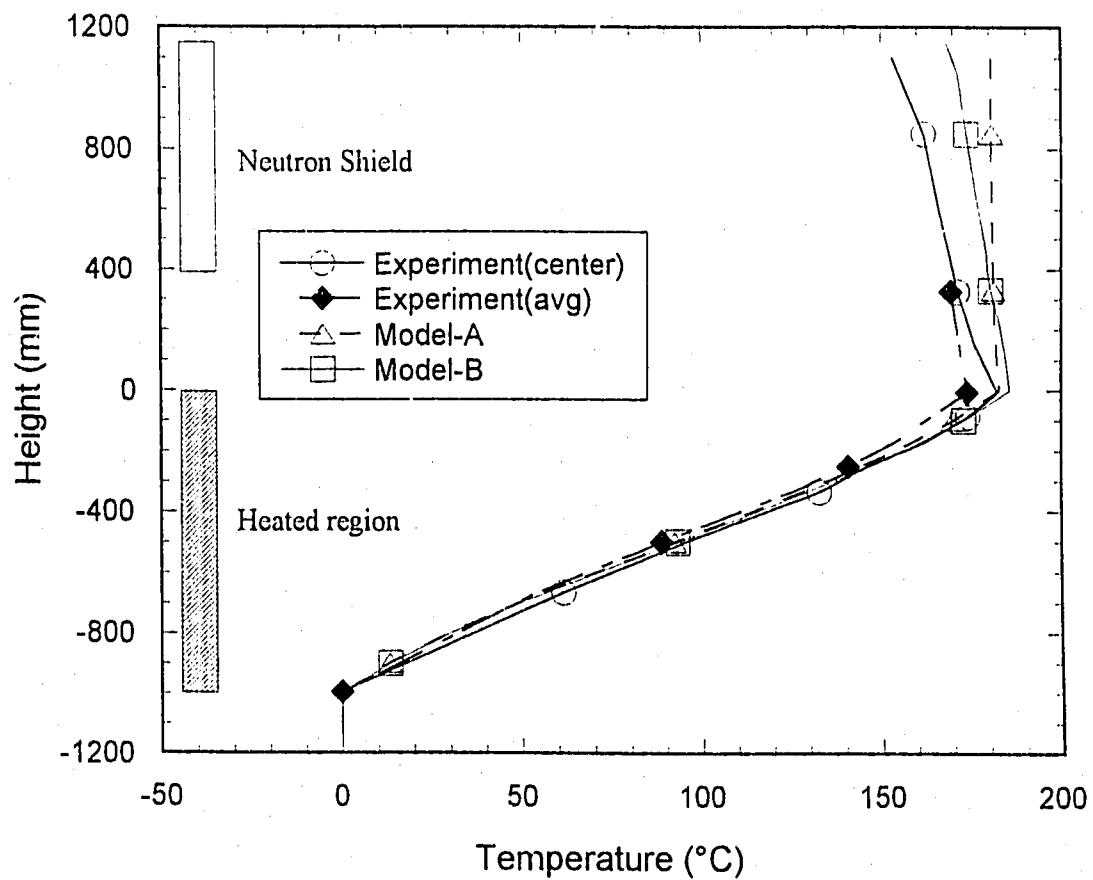


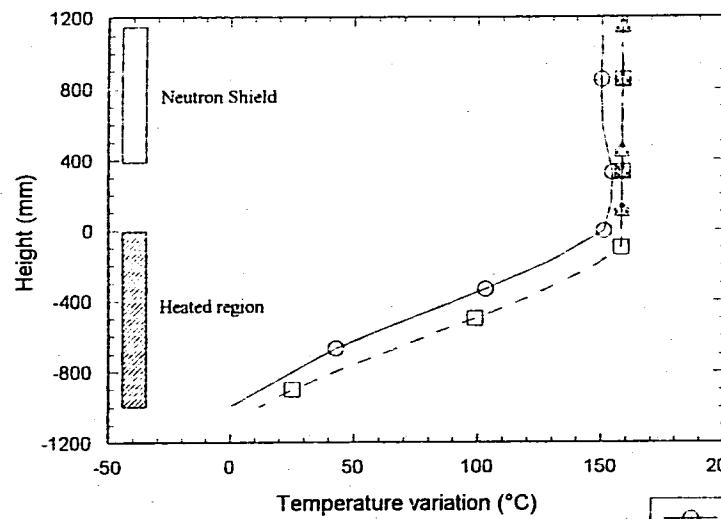
Fig.5.2.4 Vertical temperature ditribution in Center S/A  
(Case:DRACS-1S)



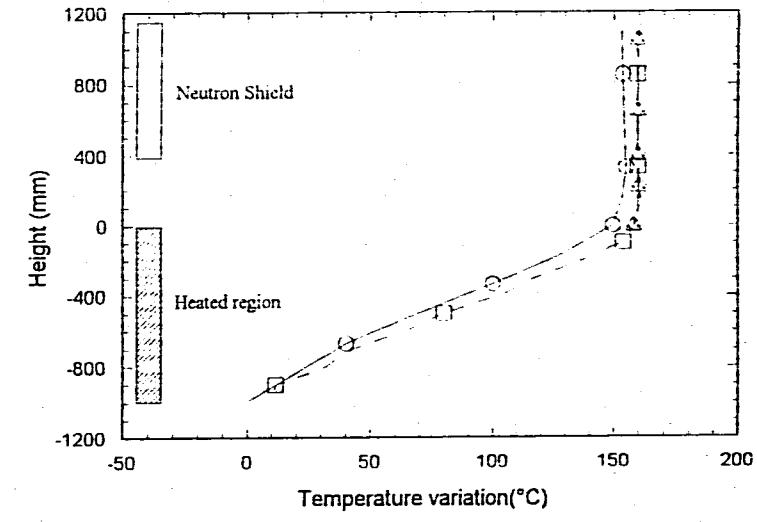
**Fig.5.2.5 Vertical temperature ditribution in Center S/A  
(Case:DRACS-2S)**



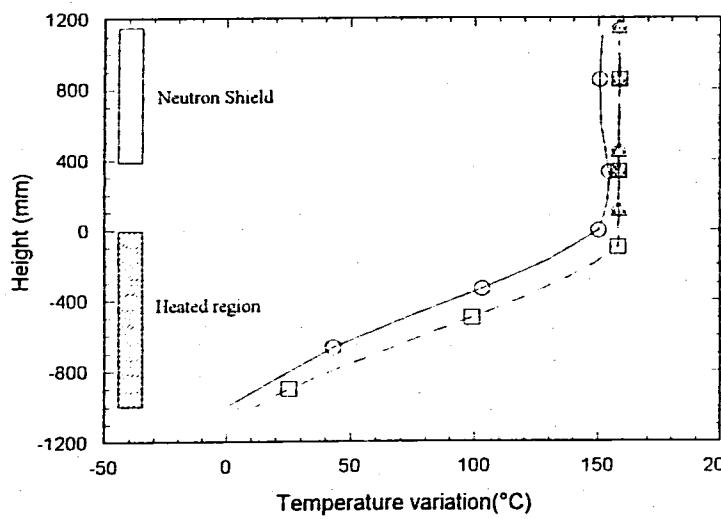
**Fig.5.2.6 Vertical temperature ditribution in Center S/A  
(Case:DRACS-3S)**



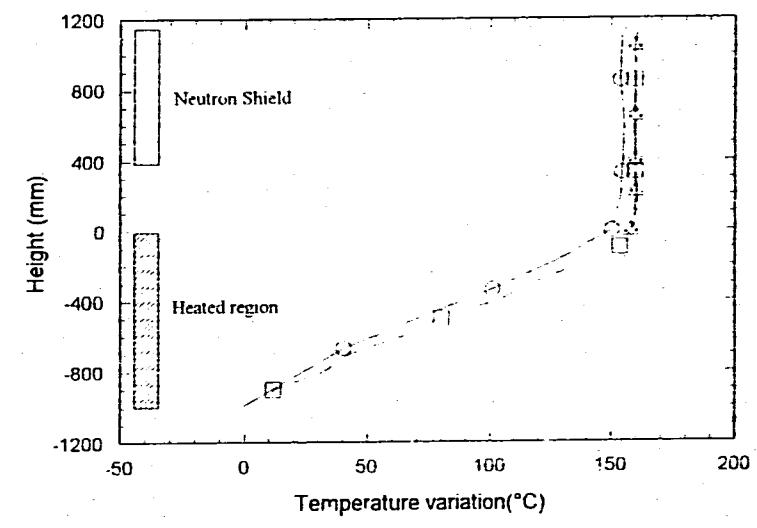
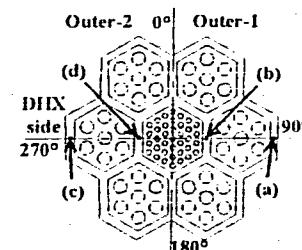
(a) Outside of Outer-1 S/A



(b) between Center and Outer-1 S/A

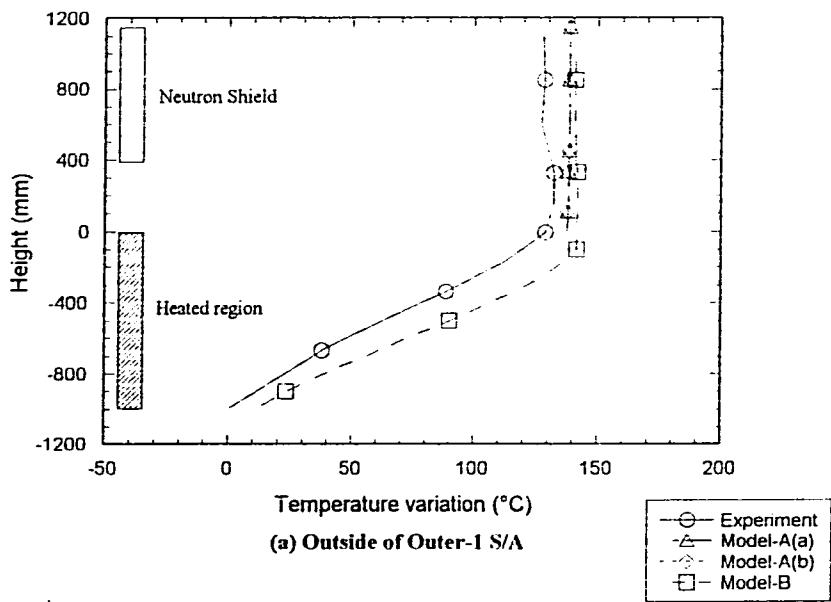


(c) Outside of Outer-2 S/A

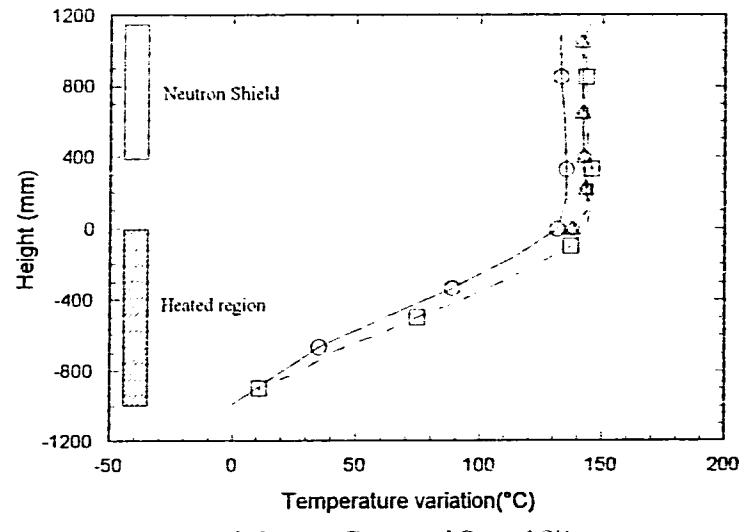


(d) between Center and Outer-2 S/A

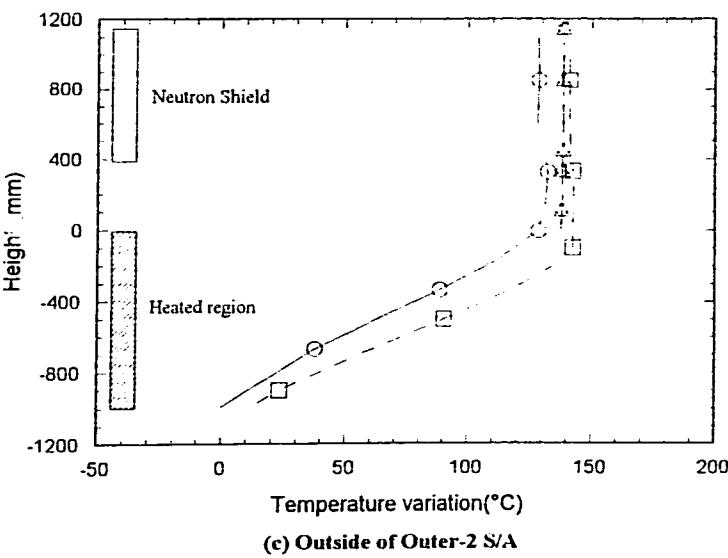
**Fig.5.3.1 Vertical temperature distribution in Inter Wrapper Gap (Case:PR/ CS-1S)**



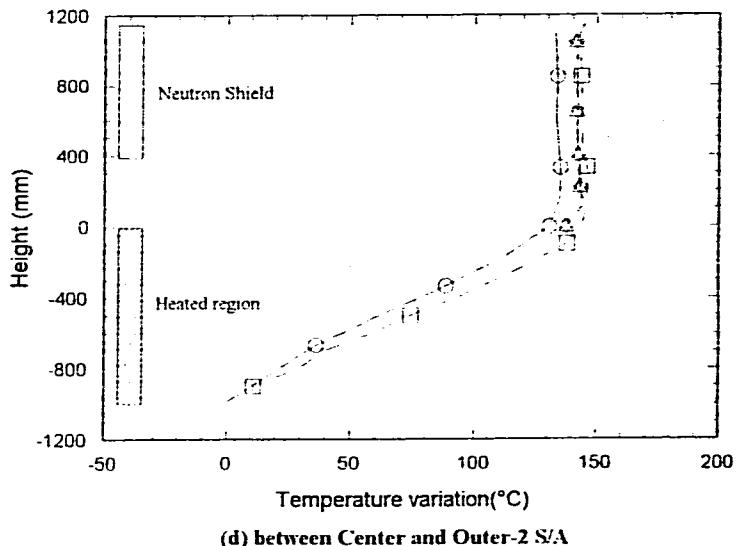
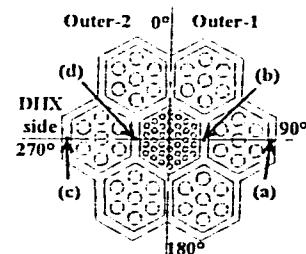
(a) Outside of Outer-1 S/A



(b) between Center and Outer-1 S/A

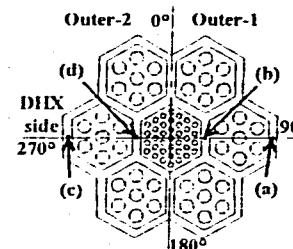
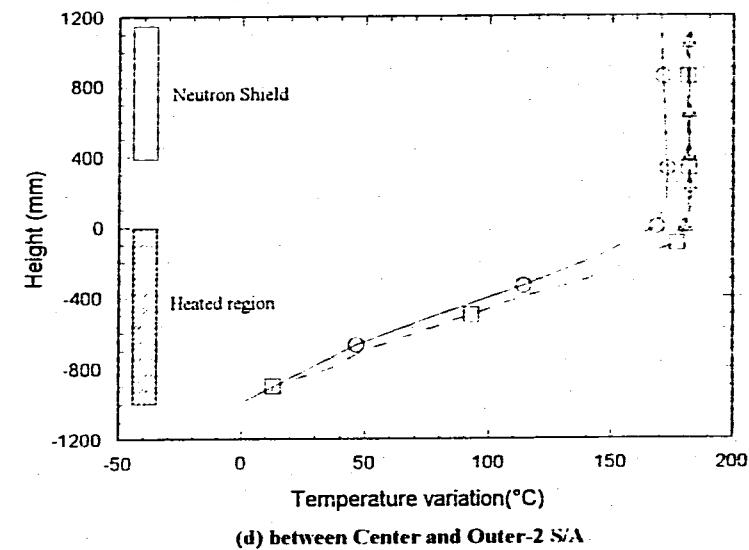
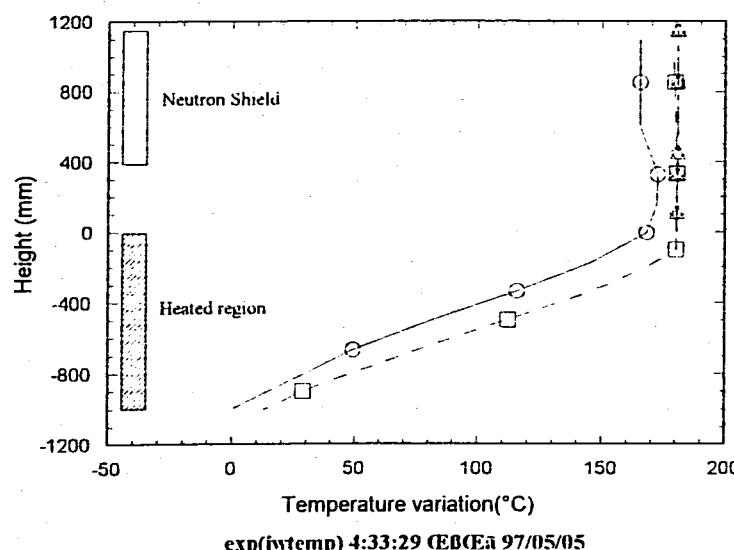
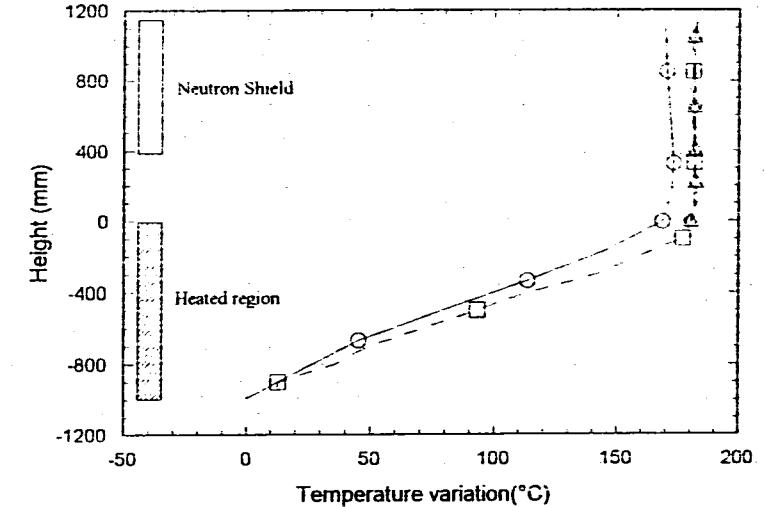
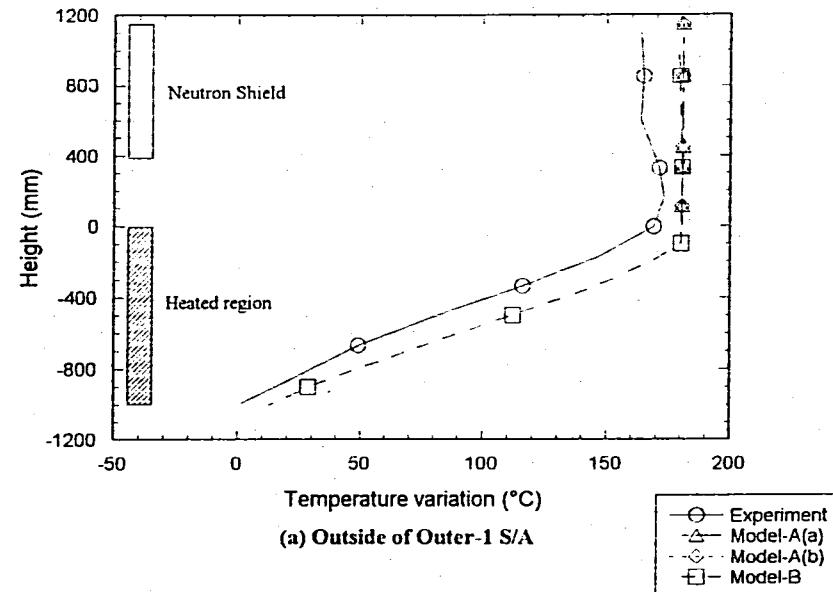


(c) Outside of Outer-2 S/A

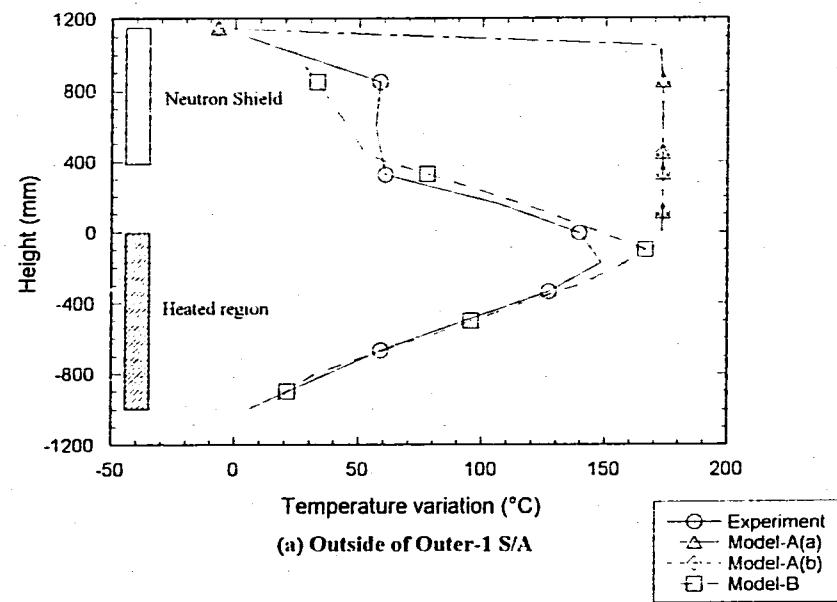


(d) between Center and Outer-2 S/A

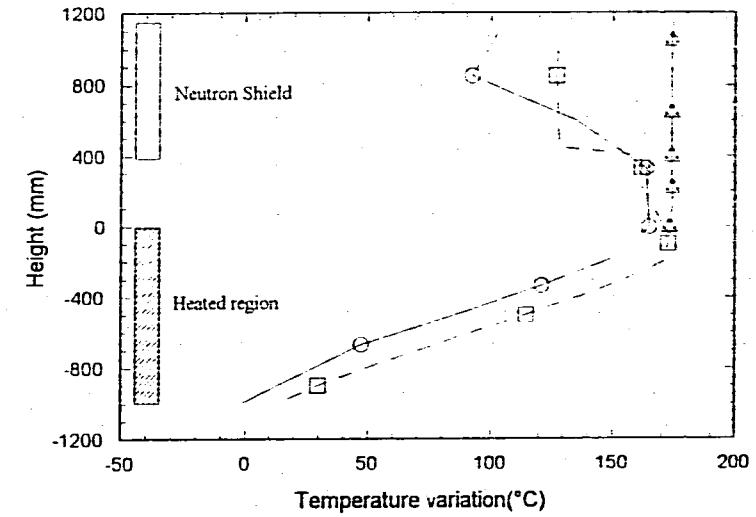
**Fig.5.3.2 Vertical temperature distribution in Inter Wrapper Gap (Case:PRACS-2S)**



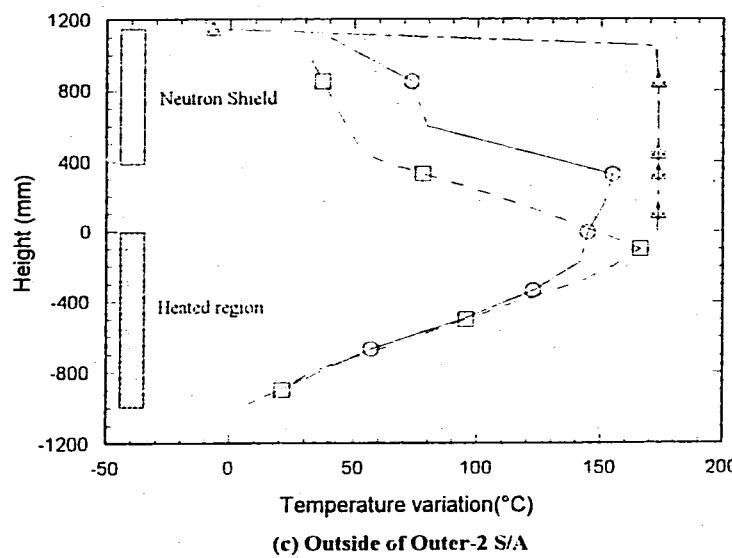
**Fig.5.3.3 Vertical temperature distribution in Inter Wrapper Gap (Case:IHX-1S)**



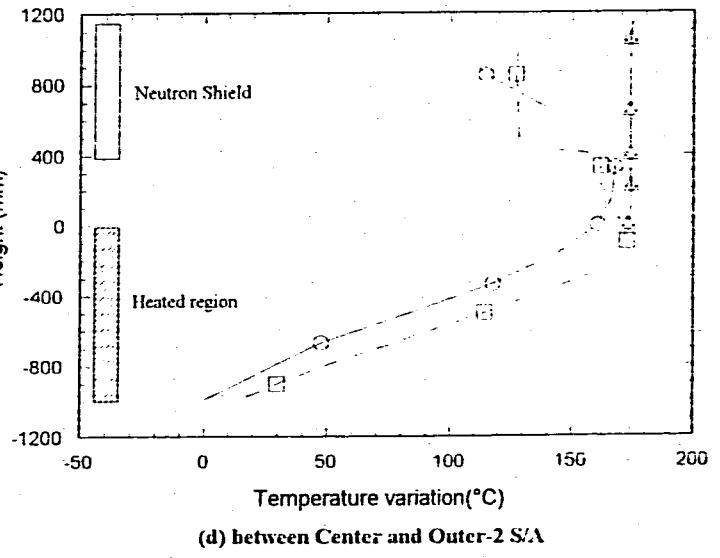
(a) Outside of Outer-1 S/A



(b) between Center and Outer-1 S/A

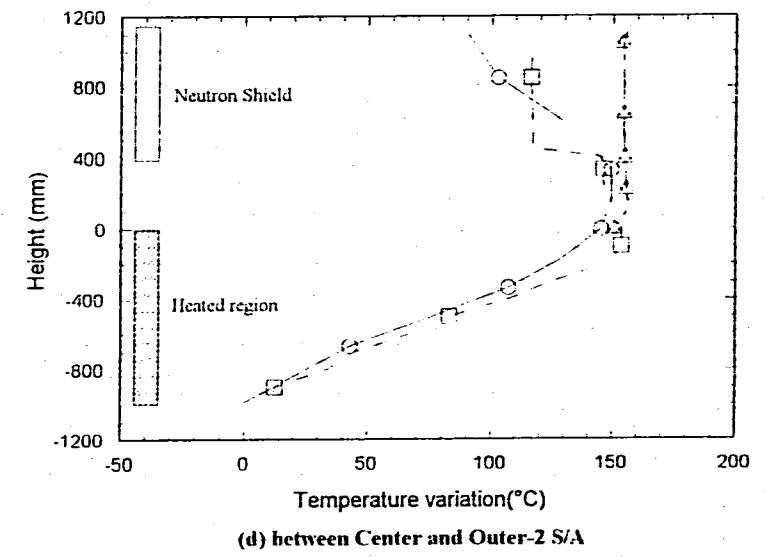
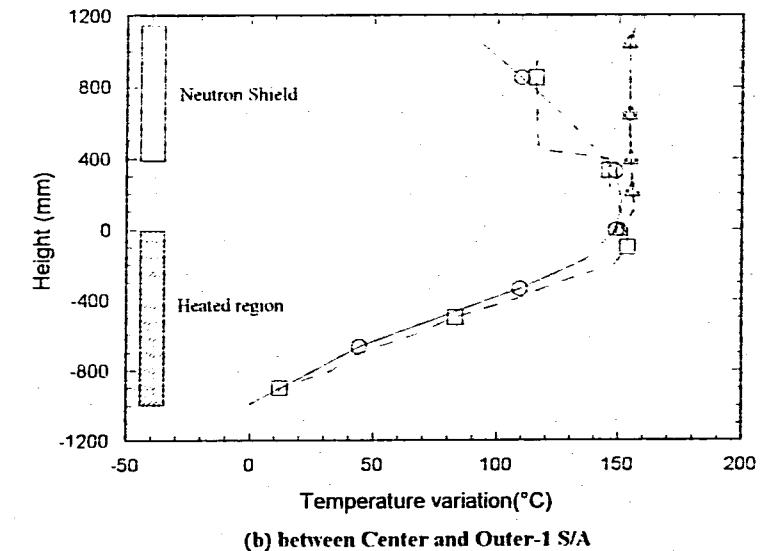
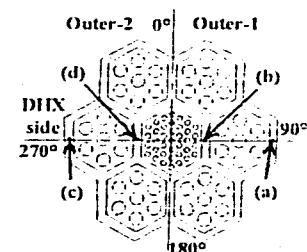
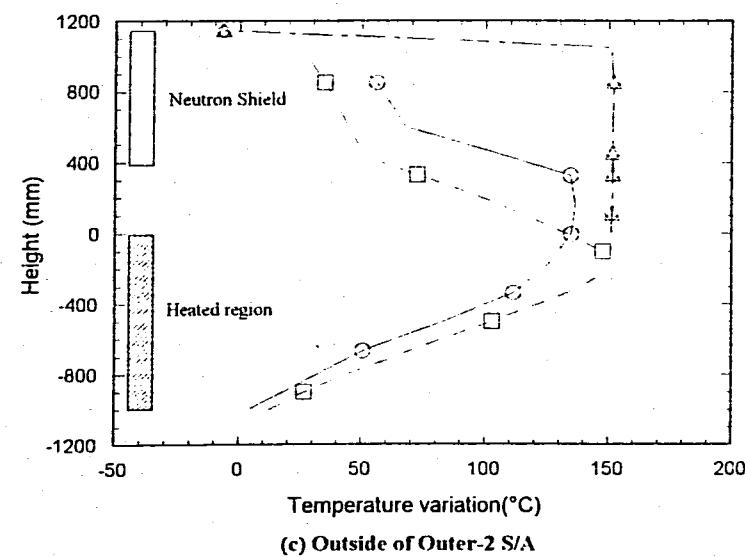
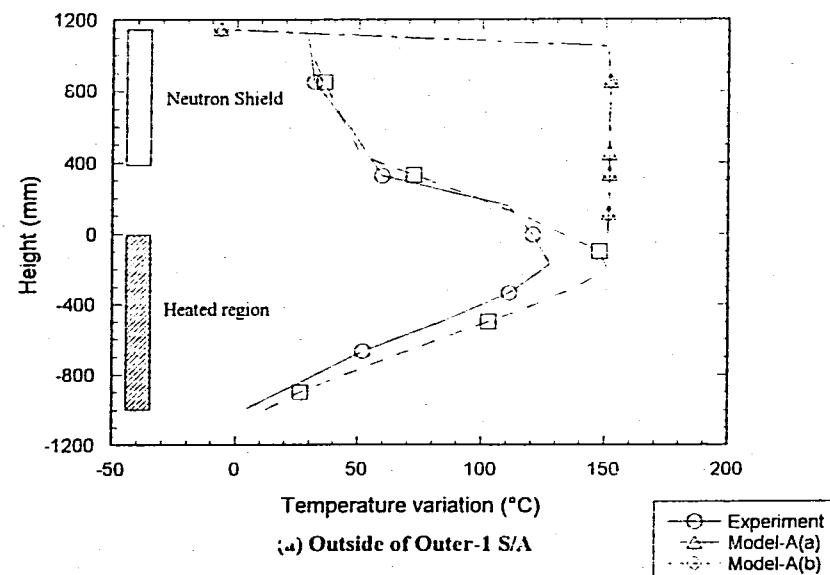


(c) Outside of Outer-2 S/A

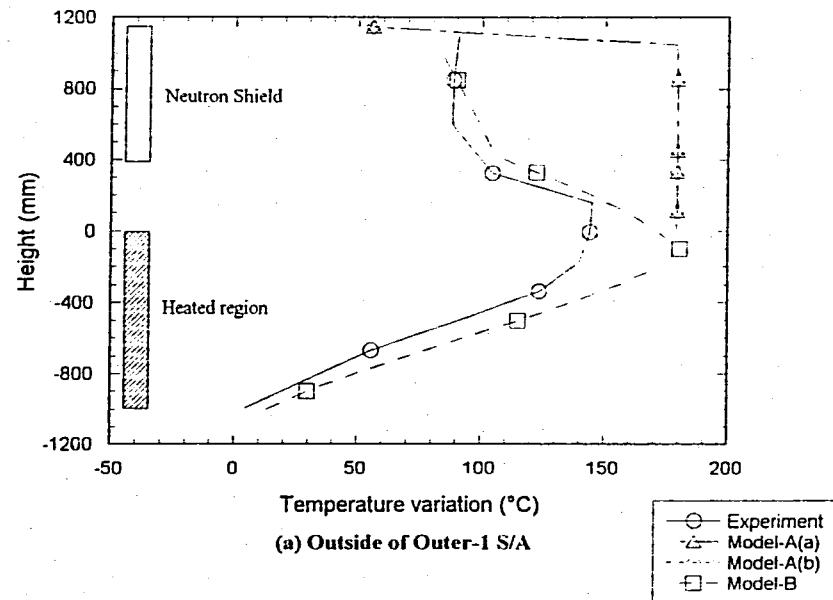


(d) between Center and Outer-2 S/A

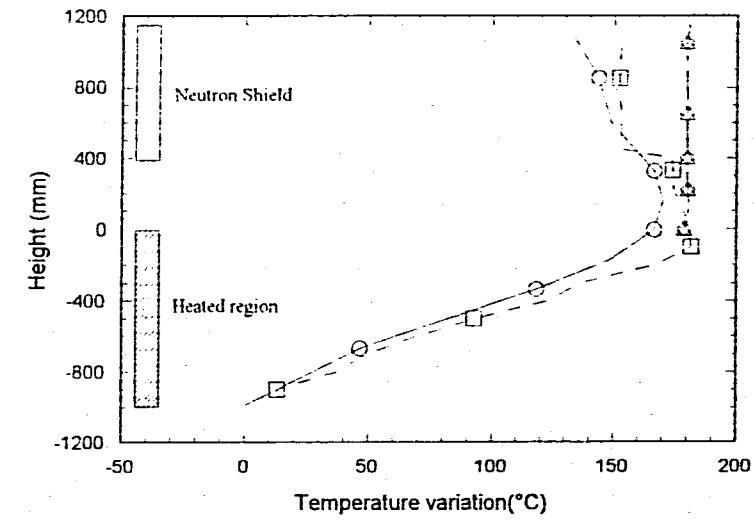
Fig.5.3.4 Vertical temperature distribution in Inter Wrapper Gap (Case:DRACS-1S)



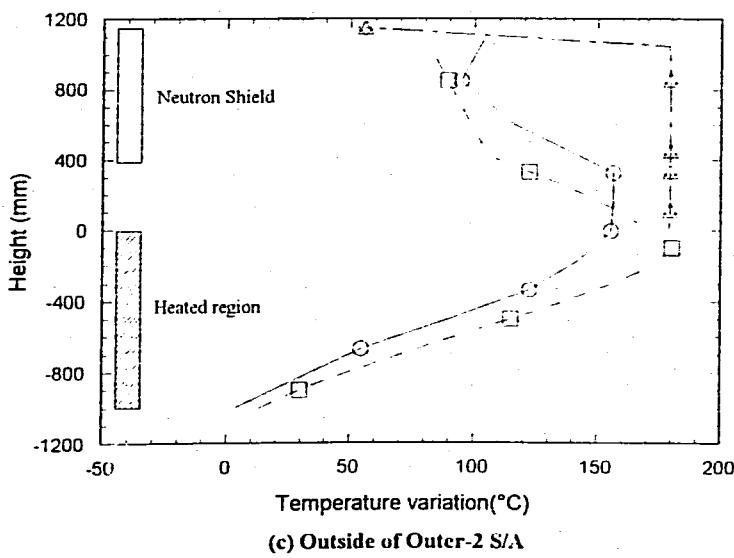
**Fig.5.3.5 Vertical temperature distribution in Inter Wrapper Gap (Case:DRACS-2S)**



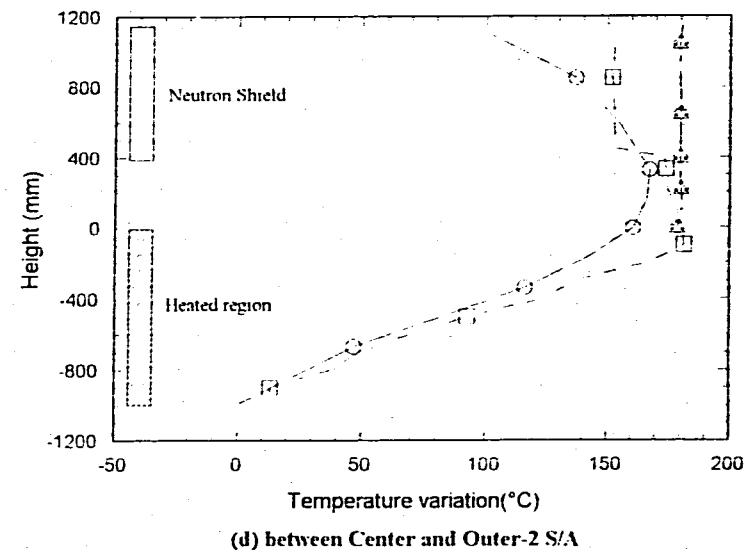
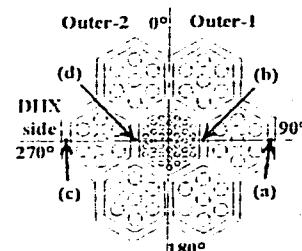
(a) Outside of Outer-1 S/A



(b) between Center and Outer-1 S/A



(c) Outside of Outer-2 S/A



(d) between Center and Outer-2 S/A

**Fig.5.3.6 Vertical temperature distribution in Inter Wrapper Gap (Case:DRACS-3S)**

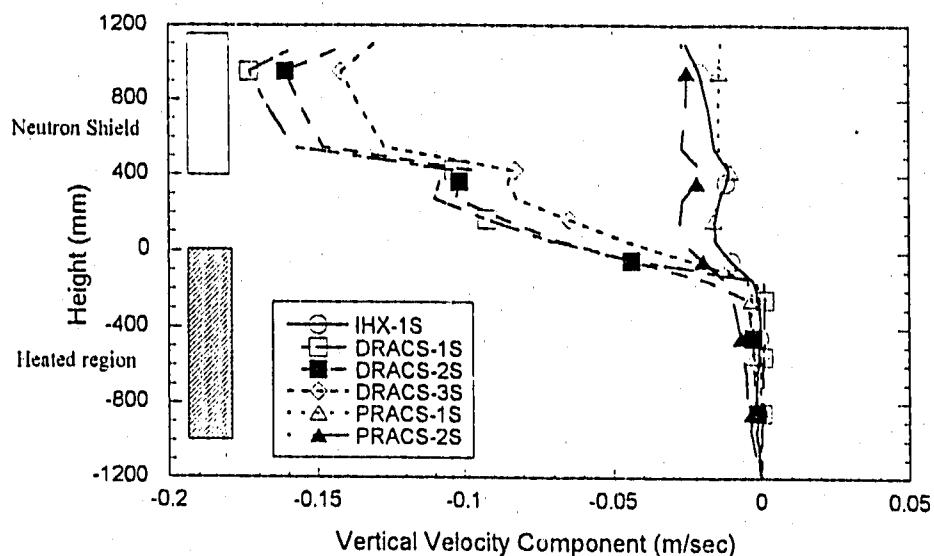


Fig.5.4.1 Comparison of Vertical Velocity Component  
in Inter Wrapper Gap for Outer S/A (Outer-1)

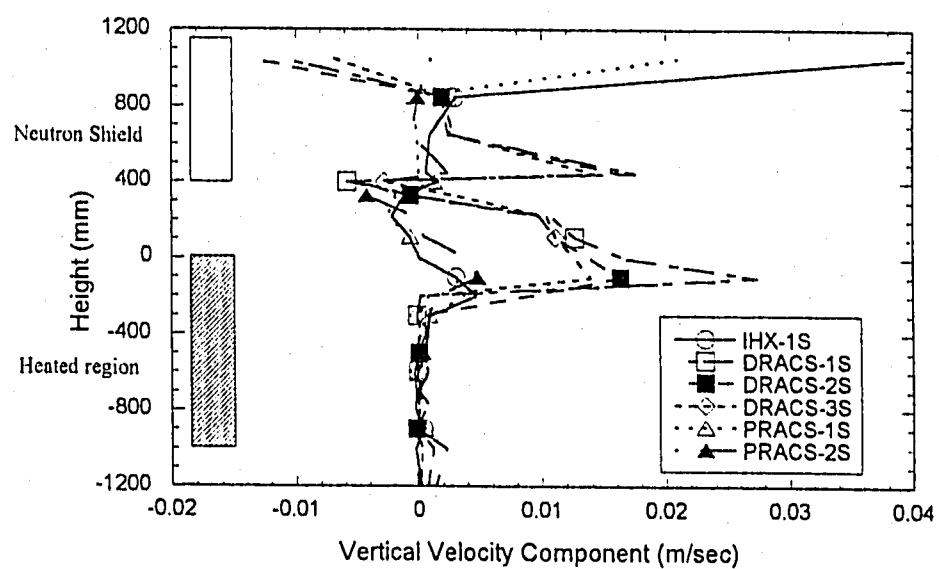


Fig.5.4.2 Comparison of Horizontal Velocity Component  
in Inter Wrapper Gap from Outer to Center S/A (Outer-1)

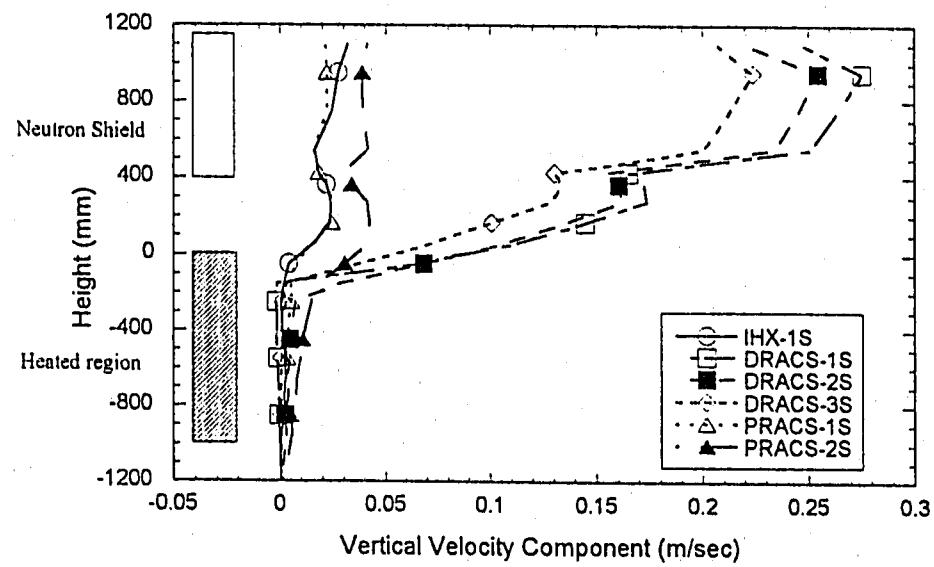
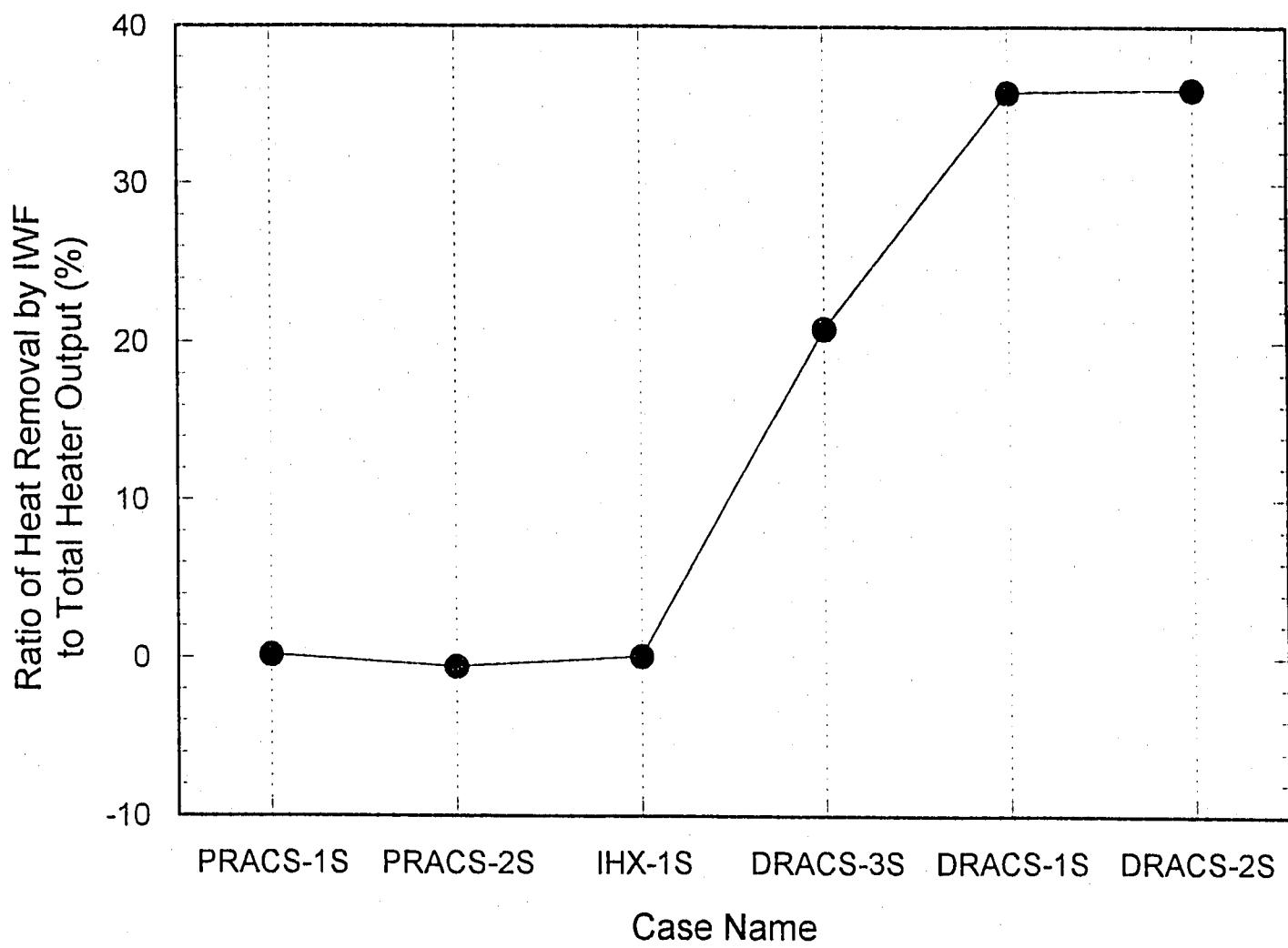
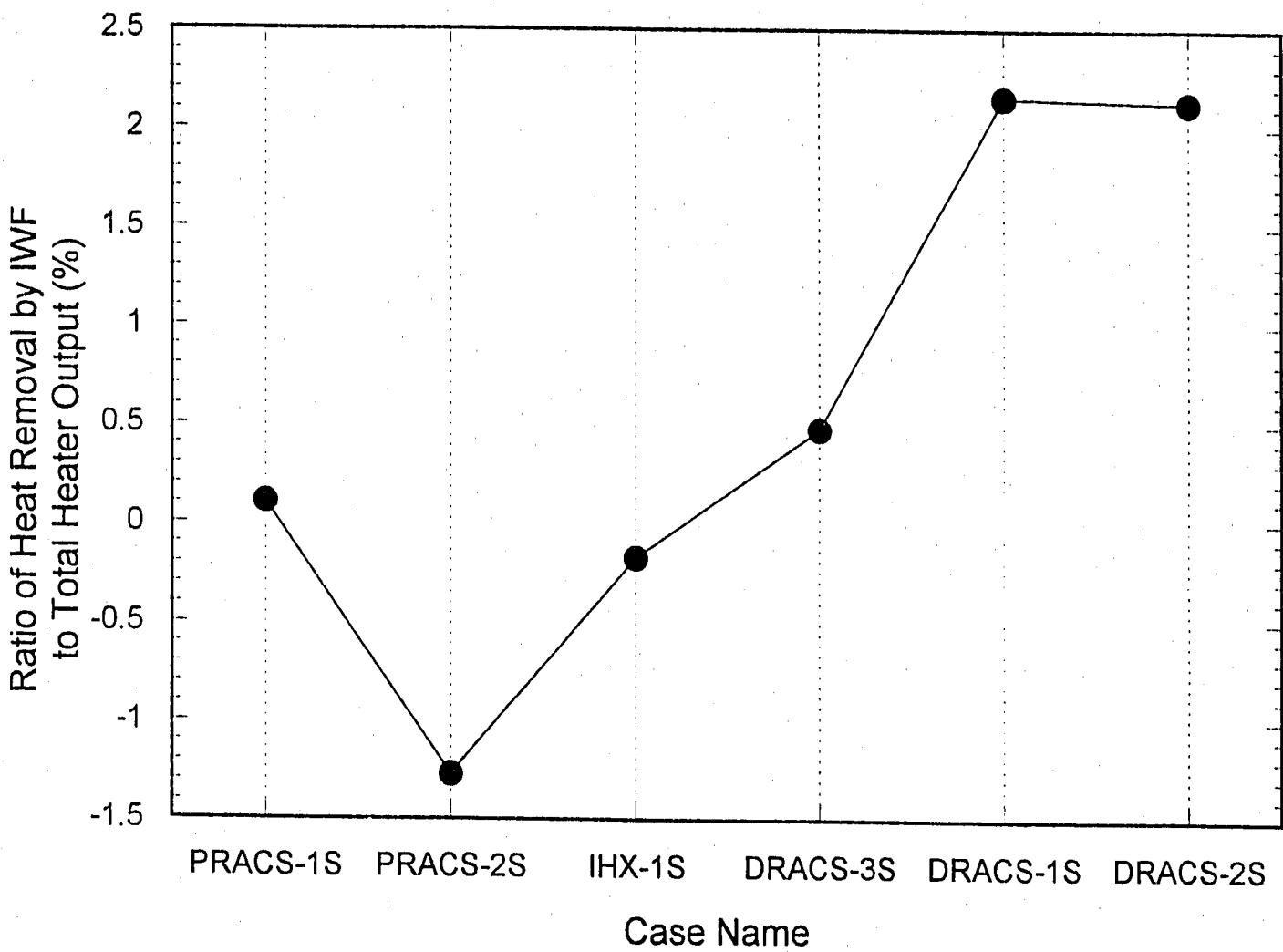


Fig.5.4.3 Comparison of Vertical Velocity Component  
in Inter Wrapper Gap for Center S/A side (Outer-1)



**Fig.6.1 Calculated Heat Removal Capability of IWF (Total Region in Core)**



**Fig.6.2 Calculated Heat Removal Capability of IWF (Heated Region)**

## 付録1 模擬炉心部モデル化の概要

### 1. STRUCTURE

#### (1) 热容量(XHCAPA)

热容量は以下の方法で求めた。

$$\text{XHCAPA} = C_p \times \rho \times V \quad (\text{体積})$$

発熱ピン構造物、およびギャップ内構造物には BN、ニクロム、SUS316、Na (集合体間热移行モデルのみ) があり、以下の式で求めた。

$$\text{XHCAPA(BN)} = 2000.9 \times 1870.0 \times V \quad (\text{体積})$$

$$\text{XHCAPA(ニクロム)} = 443.8 \times 8670.0 \times V \quad (\text{体積})$$

$$\text{XHCAPA(SUS316)} = 7718.8 \times 6040.529 \times V \quad (\text{体積})$$

$$\text{XHCAPA(Na)} = 1340.0 \times 874.0 \times V \quad (\text{体積})$$

#### (2) 伝熱面積(ACONPA)

伝熱面積は以下の方法で求めた。

$$\text{ACONPA} = A \times l \quad (\text{高さ})$$

ただし、発熱ピンに関しては1つの STRUCTURE で集合体中の発熱ピン全てを模擬しているため以下の式を用いて伝熱面積を求めた。

$$\text{ACONPA} = A \times l \times N \quad (\text{ピンの総数})$$

#### (3) 热伝達係数(AHSSA)

热伝達係数は以下の方法で求めた。

$$\text{AHSSA} = A / H \quad (\text{熱抵抗})$$

発熱ピンの熱抵抗は、以下の方法で求めた。

a-b 間の熱抵抗 (右図)

$$H = \frac{R_{a,out}}{\lambda_a} \ln \frac{2R_{a,out}}{R_{a,out} + R_{a,in}} + \frac{R_{a,out}}{\lambda_b} \ln \frac{R_{a,out} + R_{b,out}}{2R_{a,out}}$$

の式を用いた。また、ギャップの熱抵抗は平行平板と見なして、

$$H = \frac{d_{SUS316}}{2\lambda_{SUS316}} + \frac{d_{Na}}{2\lambda_{Na}}$$

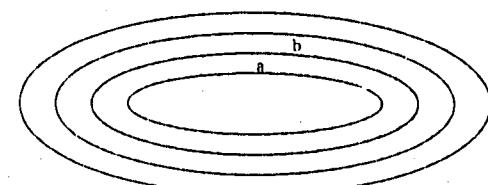
の式を用いた。

STRUCTURE-PATH 間の熱抵抗(RHEAT)は上記の熱抵抗の式で求めた。

熱抵抗の計算に用いる熱伝導度 ( $\lambda$ ) はそれぞれ以下の値を用いた。

$$\lambda_{BN} = 8.178$$

$$\lambda_{ニクロム} = 17.4$$



発熱ピン断面図

$$\lambda_{\text{SUS316}} = 11.03$$

$$\lambda_{\text{Na}} = 75.7$$

## 2. PATH

集合体の流路面積、水力等価直径の計算は MIT の計算式を用いた。

### (1) 流路面積

interior sub-channel:

$$A'_1 = \frac{\sqrt{3}}{4} P^2 - \frac{\pi D^2}{8}$$

$$A_1 = A'_1 - \frac{\pi D_w^2}{8 \cos \theta}$$

edge sub-channel:

$$A'_2 = P(W - \frac{D}{2}) - \frac{\pi D^2}{8}$$

$$A_2 = A'_2 - \frac{\pi D_w^2}{8 \cos \theta}$$

corner sub-channel:

$$A'_3 = \frac{(W - \frac{D}{2})^2}{\sqrt{3}} - \frac{\pi D^2}{24}$$

$$A_3 = A'_3 - \frac{\pi D_w^2}{24 \cos \theta}$$

Bundle average:

$$A_b = N_1 A_1 + N_2 A_2 + N_3 A_3$$

### (2) 水力等価直径

- 濡れ縁長さ

interior sub-channel:

$$P'_{w1} = \frac{\pi D}{2}$$

$$P_{w1} = P'_{w1} + \frac{\pi D_w}{2 \cos \theta}$$

edge sub-channel:

$$P'_{w2} = P + \frac{\pi D}{2}$$

$$P_{w2} = P'_{w2} + \frac{\pi D_w}{2 \cos \theta}$$

corner sub-channel:

$$P'_{w3} = \frac{\pi D}{6} + \frac{2(W - \frac{D}{2})}{\sqrt{3}}$$

$$P_{w3} = P'_{w3} + \frac{\pi D_w}{6 \cos \theta}$$

Bundle average:

$$P_{wb} = N_1 A_1 + N_2 A_2 + N_3 A_3$$

• 水力等価直径

Bundle average:

$$De_b = \frac{4A_b}{P_{wb}}$$

where

$$\cos \theta = \frac{H}{\sqrt{H^2 + (\pi(D + D_w))^2}}$$

A': Bare bundle flow area

A: Wire-wrapped flow area

P'w: Bare bundle wetted perimeter

Pw: Wire-wrapped flow area

W: Edge pitch parameter defined as (D+ gap(rod-bundle wall))

D: Rod diameter

Dw: Wire diameter

P: Rod pitch

H: Wire lead length

N: Number of each kind of subchannel in the bundle

## 付録2 配管およびバルブの圧力損失係数の設定方法

### 1. 摩擦圧力損失係数 : $\lambda$

各配管は、滑らかな円管とすることが出来、

$$\lambda = 64Re^{-1} \quad (Re < 2000)$$

$$\lambda = 0.3164Re^{-0.25} \quad (Re > 2000)$$

の式を使用した。

### 2. 形状圧力損失係数 : $\zeta$

各管路要素については、以下の値を用いた。

エルボー	0.2
ティー	1.0
レデューサ	0.5
ディフューザ	1.0
急縮小	0.5
急拡大	1.0
Y形グローブ弁	2.5

また、各流調弁の形状圧損係数は、全開時における Cv 値を基に算出した。

各流調弁の全開 Cv 値は、以下の表のようになる。

SV101M	254
SV103M	67.4
SV104M	67.4
SV105M	23

Cv 値の定義は、弁前後の差圧を 1Psi(0.07kg/cm<sup>2</sup>)に保って 60F(15.6°C)の純水が通過した流量を Gallon/min で表記したときの流量である。

--一般的に、液体の場合、

$$Cv = 1.17V \sqrt{\frac{G}{P_1 - P_2}}$$

G:液体比重

V:液体最大流量(m<sup>3</sup>/h)

P<sub>1</sub>-P<sub>2</sub>:差圧(kg/cm<sup>2</sup>)

となる。また、形状圧力損失は、以下の式で決定される。

$$\Delta P = \frac{\sum \zeta \cdot v^2 \gamma}{2g}$$

v:流速(m/sec)

$\gamma$ :密度(kg/m<sup>3</sup>)

g:重力加速度(m/sec<sup>2</sup>)

ここで、SI単位系に変換すると、

$$1 \text{ Gallon} = 3.79 \times 10^{-3} \text{ m}^3$$

これにより、Cv値の定義に基づき、1CvをSI単位系で示すと、

$$1 \text{ Cv} = 6.31 \times 10^{-5} \text{ m}^3/\text{sec}$$

各配管の断面積は、

$$4B \text{ 配管} 8.88 \times 10^{-3} \text{ m}^2$$

$$2B \text{ 配管} 2.25 \times 10^{-3} \text{ m}^2$$

である。

Cv値を断面積で除すると、流速が求められる。

よって、圧力損失の式に、各バルブのCv値から求められる流速を代入すると、バルブ全開での形状圧力損失係数が求められる。

本試験装置でのバルブ全開での形状圧損係数を以下に示す。

SV101M	4.25
SV103M	51.75
SV104M	51.75
SV105M	31.30

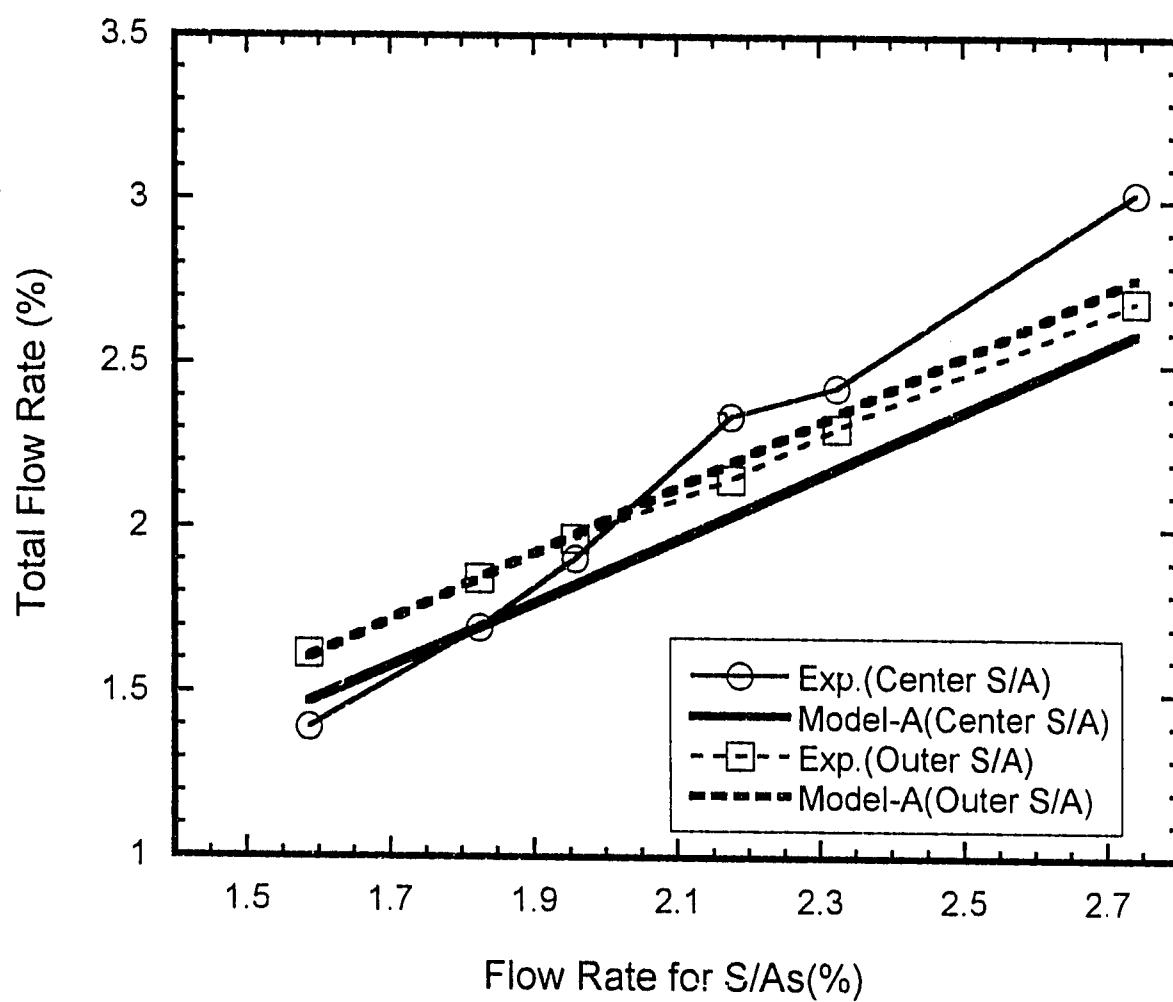
また、本装置では、Cv値はバルブ開度に比例するから、開度を変更した場合でも、以上の計算により形状圧損係数が求められる。

### 付録3 等温集合体流量配分試験解析

ここでは、強制循環時に下部プレナムから中心集合体および周辺集合体への流量配分が全流量依存性がどの程度あるかを調査した試験について、本解析体系（MODEL-B）を用いて、各集合体への流量配分の模擬性を評価したものである。

本試験は、等温  $300^{\circ}\text{C}$ で主循環ポンプにより流量を与えた。解析では、全流量が実機定格の 1.8%流量時に、実験と一致するように形状圧力損失係数を設定した。主循環系と中心集合体系に存在するバルブは 100%開度、周辺集合体系に存在するバルブは、60%開度である。この開度は、主循環系流量が実機定格の 2%時に中心集合体と周辺集合体の流量を、それぞれ実機定格の 2%流量となるように設定したものである。

Fig.1 に解析と実験の主循環流量を変化させたときの各集合体流量の変化の割合を示す。横軸は主循環流量、横軸は各集合体流量で、それぞれ実機定格に対する割合で示す。解析では、主循環流量の変化に伴い、中心集合体と周辺集合体がほぼ同じ割合で変化するのに対し、実験では中心集合体流量の変化割合が、周辺集合体流量の変化割合よりも変化勾配で 30%程度大きくなっている。今回の試験範囲は、主循環流量が実機定格の 1.5~1.9%相当であるので、解析では実験と比較して 1.5%時で 2%程度中心集合体流量を大きく評価し、逆に 1.9%時で 5.5%程度中心集合体流量を小さく評価していると考えられる。



**Fig.1 Comparison of Experiments and Analyses  
for Flow distribution to S/As**