

JNC TN9400 2005-004

# NETFLOW コードによるプラント挙動解析

2005 年 4 月

核燃料サイクル開発機構

大洗工学センター

本資料の全部または一部を複写・複製・転載する場合は、下記にお問い合わせください。

〒319-1184 茨城県那珂郡東海村村松 4 番地 4 9  
核燃料サイクル開発機構  
技術展開部 技術協力課  
電話：029-282-1122（代表）  
ファックス：029-282-7980  
電子メール：[jserv@jnc.go.jp](mailto:jserv@jnc.go.jp)

Inquiries about copyright and reproduction should be addressed to :  
Technical Cooperation Section,  
Technology Management Division ,  
Japan Nuclear Cycle Development Institute  
4-49 Muramatsu , Tokai-mura , Naka-gun , Ibaraki 319-1184 ,  
Japan

© 核燃料サイクル開発機構  
(Japan Nuclear Cycle Development Institute)  
2005

## NETFLOW コードによるプラント挙動解析

望月弘保\*

## 要 旨

圧力管型炉や軽水炉などの軽水単相・二相流の解析用に開発したコードをベースに、液体金属の流動体系でも解析できるコード NETFLOW が開発されている。液体金属流に関する数値解析の論理は、SSC コードを参考にしており、さらに発展させて安定的に高速で解析できるようになっている。コードの利用方法は、パソコン内に電子化されたマニュアルを見ながらデータの作成を行い、そのまま解析を行うようになっている。

本コードについては、軽水炉の体系について、個別効果試験で機能の検証を行うと共に、実プラントや実験装置の流動伝熱に対しても多くの使用実績がある。本報告では、液体金属の流動体系での試験解析を行うことにより、解析コードの適用性を評価すると共に問題点を摘出した。評価対象とした試験は、50MW 蒸気発生器定常試験、PLANDTL を用いた自然循環実験、「もんじゅ」2 次系自然循環試験、「もんじゅ」タービントリップ試験である。

解析コードは、これらの評価対象とした試験の結果をほぼトレースすることができ、液体金属を冷却材としたプラントの過渡流動伝熱を実現象より 1000 倍程度早く予測できた。しかしながら、精度を向上するためには、さらなる改良が必要であることもわかった。

---

\*大洗工学センター システム技術開発部

## Plant Dynamics Analysis using NETFLOW Code

Hiroyasu MOCHIZUKI\*

### Abstract

The NETFLOW code that can be used for liquid metal flow system has been developed on the basis of the code that can be used for a single-phase and two-phase light-water flow systems realized in pressure-tube-type reactors and LWRs. The algorithm of the code for the liquid-metal flow is developed referring to the Super System Code (SSC) in order to develop further a new code that can solve stably the thermal hydraulics with high speed. Since the electric manual of the code can be referred on a PC, one can make an input data and run on the same PC.

The functions of this code were verified by individual tests for light water systems. There are a lot of experiences in applications for power plants and thermal-hydraulic experimental loops. The present report evaluates the applicability of the code and clarifies problems. Experimental examples for the evaluation are steady state test using 50 MW Steam Generator, natural circulations experiments using the PLANDTL facility, a natural circulation experiment and a turbine trip experiment of the Monju reactor.

The code could generally trace these experimental results, and simulate the plant transient thermal-hydraulic behaviors of liquid metal coolant approximately 1000 times faster than the real phenomena. However, further modification should be necessary in order to improve the prediction accuracy.

---

\* System Engineering Technology Division, OEC

目 次

1. 緒言
  - 1.1 はじめに
  - 1.2 解析コードの概要
2. 解析対象実験の概要
  - 2.1 50MW 蒸気発生器定常試験
  - 2.2 PLANDTL を用いた自然循環実験
    - 2.2.1 実験装置
    - 2.2.2 自然循環実験
    - 2.2.3 実験結果
  - 2.3 「もんじゅ」2次系自然循環試験
    - 2.3.1 「もんじゅ」の冷却系統
    - 2.3.2 自然循環試験
  - 2.4 「もんじゅ」タービントリップ試験
3. 50MW 蒸気発生器定常試験解析
  - 3.1 解析モデル体系
  - 3.2 解析結果
4. PLANDTL を用いた自然循環実験解析
  - 4.1 解析モデル体系
  - 4.2 PRACS を用いた実験結果と解析結果の比較
  - 4.3 DRACS を用いた実験結果と解析結果の比較
  - 4.4 解析コード性能に関する検討
5. 「もんじゅ」2次系自然循環試験解析
  - 5.1 解析モデル体系
  - 5.2 解析結果と試験結果の比較
6. 「もんじゅ」タービントリップ試験解析
7. 結言

参考文献

## List of Tables

- Table 2.1 Configuration data of PLANDTL  
Table 2.2 Initial operating conditions of natural circulation experiment  
Table 2.3 Operation history of PRACS-REF and DRACS-REF tests  
Table 2.4 Operation history of PRACS-2 test

## List of figures

- Fig. 1.1 Plenum model  
Fig. 1.2 Calculation model of steam generator  
Fig. 2.1 Schematic of evaporator of the 50MW steam generator facility  
Fig. 2.2 Flow diagram of PLANDTL-DHX  
Fig. 2.3 PLANDTL primary and secondary loops  
Fig. 2.4 Sectional view of test section  
Fig. 2.5 Flow diagram of Monju  
Fig. 2.6 Bird's-eye view of "monju" cooling system  
Fig. 2.7 Monju secondary loop natural circulation test conducted on 29 March 1993  
Fig. 3.1 50MW SG calculation model  
Fig. 3.2 50MW SG evaporator axial temperature profile at 100% power  
Fig. 3.3 50MW SG super-heater axial temperature profile at 100% power  
Fig. 4.1 Calculation model of PLANDTL  
Fig. 4.2 Flow rate in PRACS-REF test  
Fig. 4.3 Temperature in primary loop in PRACS-REF test  
Fig. 4.4 Temperature in secondary loop in PRACS-REF test  
Fig. 4.5 Temperature in PRACS in PRACS-REF test  
Fig. 4.6 Flow rate in DRACS-REF test  
Fig. 4.7 Temperature in primary loop in DRACS-REF test  
Fig. 4.8 Temperature in secondary loop in DRACS-REF test  
Fig. 4.9 Temperature in DRACS in DRACS-REF test  
Fig. 4.10 Flow rate in PRACS-2 test  
Fig. 4.11 Temperature in primary loop in PRACS-2 test  
Fig. 4.12 Temperature in secondary loop in PRACS-2 test  
Fig. 4.13 Temperature in PRACS in DRACS-2 test  
Fig. 5.1 Monju calculation model  
Fig. 5.2 Flow rate behavior of air cooler system in Monju secondary loop during natural circulation  
Fig. 5.3 Temperature behavior in Monju secondary loop during natural circulation  
Fig. 6.1 Monju turbine trip test at 40% electric power

## 1. 緒言

### 1.1 はじめに

ナトリウム体系のプラント動特性解析では、Super-COPD コードが開発され、詳細な解析が行えるようになっているが、専門家以外ではデータの作成が難しく、長い解析時間を要する。そこで、専門家ではなくても簡単に軽水や重水の体系でプラントの過渡現象を高速で解析出来るネットワーク解析コード ATRECS-II<sup>[1]</sup>を発展させ、高速増殖炉の一次系、二次系、蒸気発生器の水側全てを結合して解析できる NETFLOW コードが開発されている。このコードを用いて、大洗工学センター内の実験装置や「もんじゅ」で実施された、ナトリウム体系の動特性試験を解析した。

解析コードでの液体金属の伝熱の取り扱い、軽水と異なり熱伝導が極めて良いため、流れに垂直な方向の伝熱にも十分に注意を払う必要があることであり、Super System Code (SSC コード)に用いられている論理を参考にして安定にかつ高速で解析できるようにしている。本報告では、個別に発表していた検証を取りまとめ、また新たに検証を行うことによって、今後必要な改良や機能追加部分を抽出することを目的とする。

軽水体系では、既にいろいろな機能に関しての検証を行い、圧力管型原子炉 ATR を対象にした実規模の実験装置を用いた個別効果試験結果を用いて、コードがポンプ、各種の弁、熱交換器、流量制御、熱輸送、二相流などのモデルを適切に予測できることを示すと共に、「ふげん」がスクラムした時点から、隔離冷却系を用いて冷却する長期的な挙動を、それらのモデルを組み合わせで解析できることを証明している<sup>[1]</sup>。また、コードが持つ解析のスピードと扱いの容易性から、流動振動試験解析<sup>[2],[3]</sup>、シビアアクシデント時のプラント挙動解析<sup>[4]</sup>、旧ソ連 RBMK 型炉流動解析<sup>[5]</sup>にも用いてきた。

開発した NETFLOW コードを液体金属の流れに適用した場合の精度については、過去にナトリウムループの自然循環時の系統相互作用伝熱流動実験について実施<sup>[6]</sup>しているが、そのときに問題になった点を明確にするために、追加検証問題としては、50MWSG を用いた定常試験、「もんじゅ」の空気冷却系での冷却試験などを選択し解析した。

解析対象の 50MW 蒸気発生器を用いた試験<sup>[7]</sup>は、50MW 定格の状態で蒸気発生器のナトリウム側と水側の温度分布を計測したものである。この実験で得られた、蒸気発生器蒸気器内部のナトリウムおよび水の温度分布について予測精度を検証する。

崩壊熱除去冷却システム実験については、一次系と二次系が自然循環運転された場合の系統の伝熱流動相互作用に関して研究することを目的として、大洗工学センター内の原子炉工学室にある PLANDTL(Plant Dynamics Test Loop)を用いて実施された<sup>[8]</sup>。高速増殖炉で、ポンプがトリップして強制循環から自然循環に移行した場合には、何らかの方法で崩壊熱を除去しなければならない。現在実施している高速炉の検討では、プレナムのナトリウムに直接浸漬した DHX (Direct Heat Exchanger)を用いた DRACS (Direct Reactor Auxiliary Cooling System)や中間熱交換器の上部に熱交換器を浸漬させて一次系を冷却する PRACS (Primary Reactor Auxiliary Cooling System)で、崩壊熱を除去する方式など、種々の方法を検討している。DRACS を用いた冷却方法は、原子炉容器の中に冷却器が設けられていることから一次系を直接冷却できる利点と、一次系の出口を冷却することから、一次系の自然循

環流量を減少させ、燃料集合体の間隙に逆流する流れを生じさせる等、伝熱流動現象を複雑にしてメカニズムを理解することが難しくする欠点を持っている。一方、PRACS を用いた冷却方法では、一次系の自然循環流量を確保できるため、これらの方式間の比較も実施している。この方式の欠点は、液面を持たない中間熱交換器の中に低温の熱交換器を設けることで、管板に対する熱応力を適切に評価しなければならないことである。実験で得られた結果に関しての炉心部の流動伝熱評価は、Kamide 等<sup>19)</sup>が行なっているが、循環系等をすべて模擬した解析は、開発している解析コードの制約上未実施であった。

## 1.2 解析コードの概要

解析に使用したコードは、NETFLOW (**N**umerical **E**valuation **T**ool for **L**iquid-metal or **W**ater Flow System)である。本コードは、一次元のネットワーク熱流動解析コードであり、Windows XP パソコンで原子炉の機器をモデル化した部分を組み合わせることによって任意の流動体系を形成し、一日規模の長時間の過渡解析がパソコンで簡単に実行できる。このコードの基になった ATRECS-II コードは、特に熱交換器、ポンプ、弁類が配管で複雑に接続されている補機冷却系などの解析を精度良く行うために開発されたものであり、このコードも ATRECS-II の機能は全部引き継いでいる。コードのマニュアルは、全て電子化されており、パソコン上で入力データに必要な事項を参照しながらデータを作成する。

コードでの解析体系は、実際の体系に合わせて、配管の合流点や分岐点あるいは配管形状が変化する場所にはジョイント（仮想的配管接合空間）を設け、それらはリンク（配管状の流路）で結ばれる。機器はリンクで結合され、非圧縮の流体として扱い、運動量、質量保存の式を連立させて流動計算を行ない、配管各々についてエネルギー方程式を陰解法で解いて温度計算を行なう。各々のリンクは配管の直径を変化させることが出来るサブリンクに分割でき、またサブリンクがメッシュ分割できる。強制循環流や自然循環流を、精度を大きく落とさずに解析できるようにしている。制限条件は、配管の流動を上流方向から下流側に向けて逐次解き、流量、エンタルピ、圧力の分布を計算することである。

炉心部では、燃料ペレット、被覆管は、軽方向にメッシュを設けることが出来るが、冷却材、構造材は一点近似で扱っており、発熱量を入力する方法と、1 点核動特性方程式を解いて核熱カップリングで解析する方法が用意されている。解析に用いる相関式としては、圧力損失を計算する配管摩擦に関しては Moody 線図から、また局所圧力損失係数を入力して形状の損失を計算できる。弁については、 $C_v$  値と弁開度を入力する方法、圧力損失係数を時間テーブルで与える方法を用意している。二相流圧力損失増倍係数に関しては、ATR の流路と機器を用いて計測した実験式を選択している。伝熱計算では、沸騰二相流に関しては、ドリフトフラックスモデル若しくはスリップモデルでボイド率を計算し、サブクール熱伝達が Dittus-Boelter の式、核沸騰領域が Jens-Lottes の式、膜沸騰領域が Dougall-Rohsenow 等が標準的に選択できる。

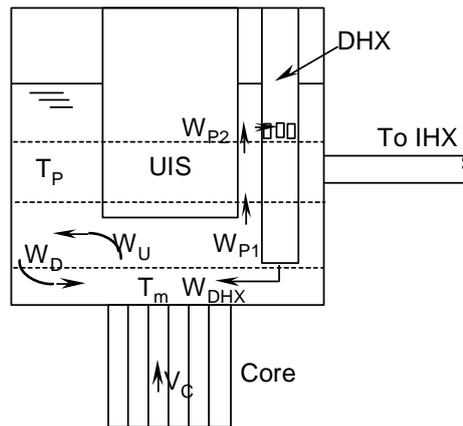
解析コードで、簡単な制御回路を模擬できる機器は、流量制御弁、流量制御ポンプ、タービン駆動ポンプ、空気冷却器ベーン・ダンパーである。制御目標値を与える項目は、予め設定されているため、制御項目が違う場合には、解析コードの内容を変更する必要がある。

高速炉の体系に関しては、軽水炉と多少異なる箇所は、蒸気発生器、炉心上部プレナム、

配管保温である。蒸気発生器に関しては、「もんじゅ」の体系と一体貫流型に対して、ダウンカマー部も含めて解析できるように整備した。高速炉特有のプレナムに関しては、熱伝導や内部の流れが生じる場合を模擬できるモデルを用意している。プレナム部のモデルを **Fig. 1.1** に示す。配管に関しては、保温材からの放熱もしくは保温ヒーターからの熱の流入を含めて解析出来るようにしている。液体金属の熱伝達に関しては、**Re** 数や **Pr** 数の巾乗の値を入力して与えることが出来るようにしており、**Rubarski-Kaufman, Seban-Shimazaki, Subbortin** の式を炉心、**IHX**, 空気冷却器等に使用する。空気冷却器の伝熱管の熱伝達に関しては、**Jameson** の式等が同様にデフォルト値として選択できる。流動に関しては、流量が無い状態が長く続くと計算誤差が蓄積して計算精度が悪くなる可能性が有るが、どのような流れでも解析出来るようにしている。また、蒸気発生器に関しては、**Fig. 1.2** に示すように、蒸発器と加熱器が分離されている場合と一体貫流型に対応できるモデルを用意している。ナトリウム系はネットワークに組み込むことが可能なようにしており、水系は単独のラインとして設け、伝熱管部については並列チャンネルとし、10 グループ以内で代表させることが出来る。

NETFLOW コードでの体系模擬上の制約で、熱交換器台数とポンプ台数の最大がそれぞれ 10 台までであるため、高速炉を解析する上でプラント全体を忠実にモデル化することは難しい場合もあるが、3 ループの主要機器を同時にモデル化して、1 ループのトリップなどの解析を行うことが出来る。解析のスピードに関しては、大略「もんじゅ」の 1 次系から 3 次系 1 ループをモデル化した体系で、1 時間の現象を数秒でシミュレートすることが出来る。

コードがナトリウム体系で検証できた後、解析コードに鉛-ビスマス合金、鉛、ヘリウム、二酸化炭素などの冷却材が選択できるように、必要な物性値を追加した。



$$WU = f \cdot WP1$$

Where,  $f = 1$  for  $Ri > 1$   
 $f = Ri$  for  $-1 < Ri < 1$   
 $f = -1$  for  $Ri < -1$

$$Ri = g \beta (Tm - TP) Dc / Vc^2$$

Fig. 1.1 Plenum model

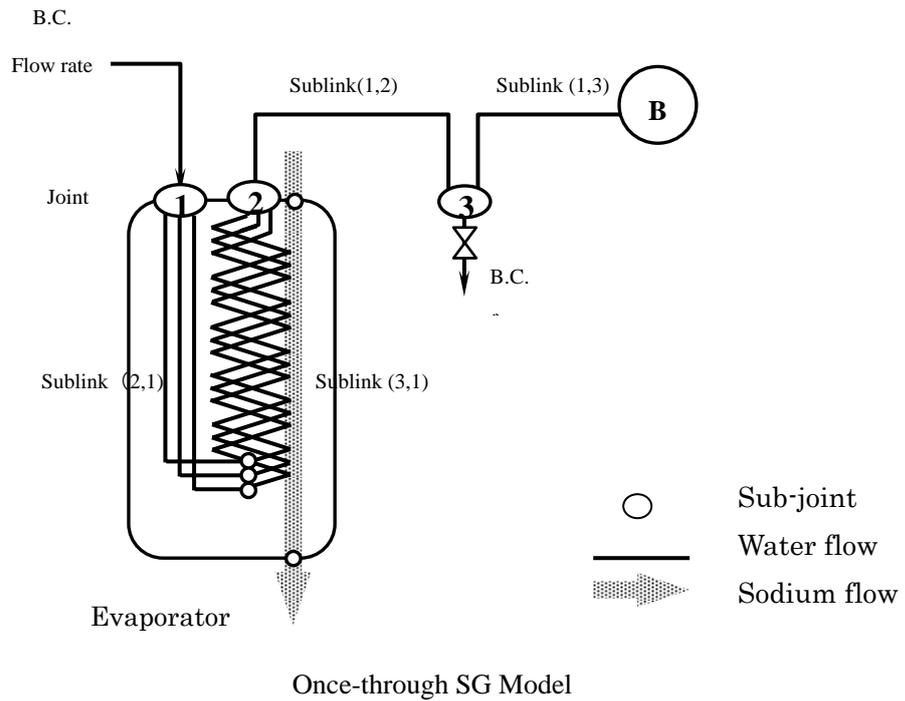
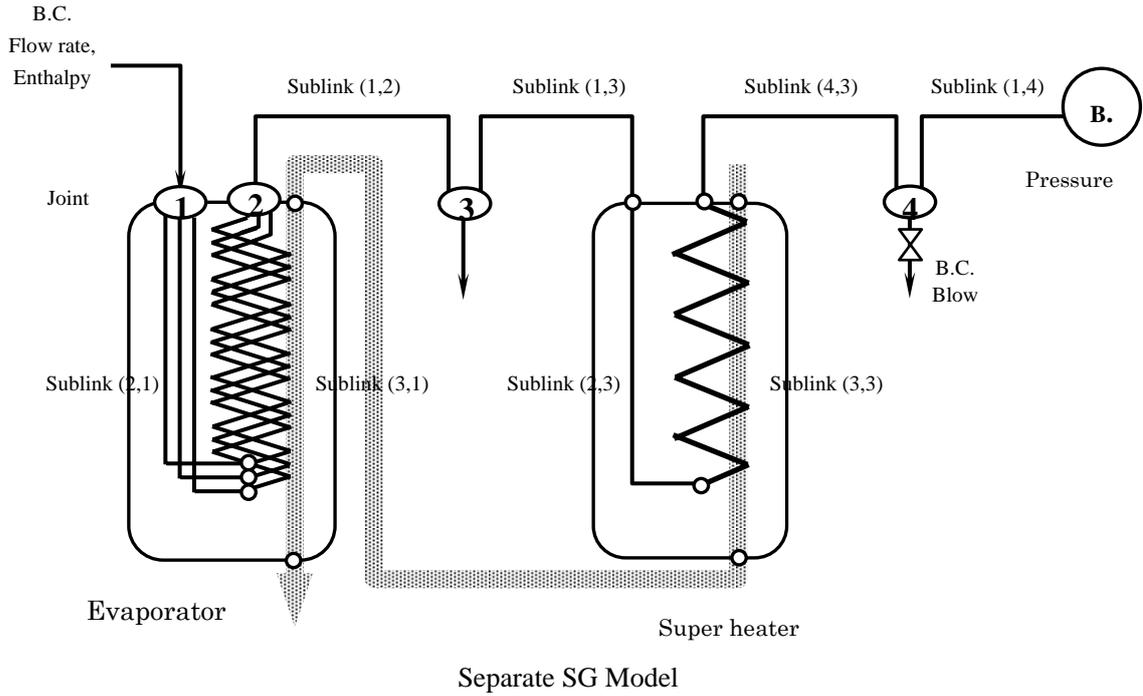


Fig. 1.2 Calculation model of steam generator

## 2. 解析対象実験の概要

### 2.1 50MW 蒸気発生器定常試験

動燃事業団は、高速増殖炉「もんじゅ」の蒸気発生器を開発するため、50MW 蒸気発生器を建設し、種々の試験を実施した。Manabe<sup>[7]</sup>等は、蒸気発生器を用いた定常試験の結果を報告している。解析コードのナトリウム冷却炉としての個別性能の代表例として、蒸気発生器の基本性能である定格出力状態での蒸気発生器内温度分布計測結果を予測し、公表されている試験結果と比較する。

#### 2.1.1 50MW 蒸気発生器

50MW 蒸気発生器の蒸発器の概略を **Fig. 2.1** に示す。50MW 蒸気発生器の一次系は、ブタンガスの燃焼によって加熱され、中間熱交換器で熱を2次系に受け渡している。水は、蒸気発生器蒸発器上部から33本の伝熱管に分配され、流動振動を防ぐため、Arガスで断熱された管を下降し、ヘリカル状にまかされている伝熱管を上昇して上部から流出し、過熱器に供給される。有効伝熱部分の高さは、6.78 m であり、有効伝熱管長さは、20.9 m である。高温のナトリウムは、まず過熱器に流入し、蒸発器でつくられた飽和蒸気を過熱してエネルギーを高める。過熱器から蒸発器に流入したナトリウムは、上管板を貫く配管で、伝熱管のヘリカル部が終わる領域の上部に設けられたリング状のヘッダーに供給され、ヘリカル部にジェット状に噴出し、下降流となって伝熱管と熱交換をしながら容器の下部から流出する。

#### 2.1.2 定常試験

解析の比較対象とした試験は、50MW 定格の定常状態で実施されたものである。以下に試験条件の代表値を示す。

ナトリウム流量	223.0 kg/s
ナトリウム入口温度	470.3 °C
ナトリウム出口温度	312.2 °C
給水圧力	13.6 MPa
給水流量	23.2 kg/s
蒸発器給水入口温度	240.0 °C
蒸発器蒸気出口温度	373.2 °C

### 2.2 PLANDTL を用いた自然循環実験

高速炉において、ポンプがトリップした場合の自然循環時の崩壊熱除去モードでの伝熱流動を明確にする事は、安全性の検討を行なう場合に必要不可欠である。高速炉の自然循環時の流量は、定格流量の約2%以下にもなってしまうため、機器各部での伝熱現象がループの各部に輸送されるのに時間がかかる。また、炉心の上部にはプレナムが存在し、温度成層化現象等も熱の輸送に影響を与える。このため、系統間の流動現象を結合して長時間に亘って調べることが必要であり、この目的のための実験を実施している。<sup>[8]</sup>

### 2.2.1 実験装置

実験装置の構成を **Fig. 2.2** に示す。実験装置は、一次系が、電磁ポンプ、下部プレナム、入口流量調整弁、炉心を模擬した発熱部、上部プレナム、中間熱交換器(IHX)等で構成されており、上部プレナムには、直接炉心冷却用の熱交換器が浸漬されている。この、熱交換器で交換された熱は、DRACS の空気冷却器で大気に捨てられる。中間熱交換器の一次系側には、コイルタイプの熱交換器が浸漬されており、PRACS を構成している。PRACS は、DRACS と同じ空気冷却器に接続されており、崩壊熱を大気に捨てる事が出来る。これらの系統は、どちらか一方を弁の切り替えで利用できるようになっている。二次系は、中間熱交換器、流量調節弁、空気冷却器、電磁ポンプ等で構成されている。二次系の熱は、空気冷却器によって大気に捨てる事が出来る。空気冷却器には、ブロワーと出入口にダンパーが設けられており、強制循環、自然循環のどちらでも運転できる。これらの系統の詳細な配管図を **Fig. 2.3** に示す。解析コードの入力データは、この図を基に作成される。

炉心を模擬した発熱部は、**Fig. 2.4** に示すように中央の 1ch., 左側 3ch., 右側 3ch. がそれぞれの入口管でナトリウムが供給されている。中央のヒーターは、37 ピンで構成されており、周辺のヒーターは太い 7 本のピンで構成されている。隣のラッパー管との間には、7 mm の隙間が存在し、プレナムが冷却された場合のインターラッパーフロー流路となる。インターラッパーフローは、流路の上部より流れ込み、流路途中で逆転して上方に抜ける複雑な流れであり、本解析の対象にはしていない。発熱部の出力は、全体で約 1.2MW である。ヒーター上部には、流動抵抗を模擬した遮蔽プラグが設けられている。

入力データを作る際に必要となる形状、圧力損失係数、容量等に関するデータを **Table 2.1** に示す。これらのデータは、全て製作図面より読み取ったものであり、現時点でのプラントの形状と特性を表している。

### 2.2.2 自然循環実験

自然循環モードでの崩壊熱除去においては、崩壊熱除去系 DRACS、PRACS や IHX の二次系の運転条件が、一次系の自然循環に影響を与える。このような系統相互の影響を把握するため、高速増殖炉実証炉の強制循環運転状態からスクラムを経て自然循環に移行させた 7000 秒に亘る過渡挙動実験を実施した。

初期状態は、チャンネル出力が約 145kW であり、入口温度約 300 °C のナトリウムが中心チャンネルに約 56 l/min で周辺チャンネル約 140 l/min の流量で供給されている。中央のチャンネルの入口弁は全開にし、周辺のチャンネル入口は、流量を合わせるため 70% 開度になっている。また、下部プレナム上流側の弁の開度は 7% に設定している。この条件では、出力と流量は定格の約 12% に相当している。二次系の流量は、電磁ポンプ下流側の弁を 17% 開度に設定して調節している。

スクラムとほぼ同時に電磁ポンプをトリップし、出力は崩壊熱特性にそって、また流量もポンプのコストダウン曲線にそって低下させ、約 100 秒後には完全に自然循環状態に移行させた。この時下部プレナム上流側の弁の開度は、30 秒時点から操作し、約 100 秒までに全開にして自然循環時の流量が確保できるようにしている。

上記以外の操作としては、二次系の空気冷却器を 15 秒後に絞り始め、40 秒後に自然循環に移行させた。二次系のナトリウム流量も、15 秒後に絞り始め、50 秒後に自然循環に移行させた。PRACS 若しくは DRACS については、60 秒後にナトリウム循環流量を強制循環させ、110 秒後に 90 l/min で運転した。また、80 秒後に空気冷却器の運転を開始し、130 秒後に風速を約 7 m/s で強制循環させた。さらに 2400 秒後に二次系の弁を閉鎖し、ループを隔離した。

上記の運転操作は、PRACS を使用した場合と DRACS を使用した場合ともほとんど同じである。PRACS を用いた試験条件に関して、Table 2.2 に運転初期条件を示す。Table 2.3 に上記試験の操作手順を示す。また、Table 2.4 には、PRACS を途中から起動した場合の実験に対する操作手順を示す。

### 2.2.3 実験結果

実験結果に関しては、桃井等[8]が詳しく報告している。本報告では、コードを用いた解析結果との比較の節で簡単に述べる。

## 2.3 「もんじゅ」2次系自然循環試験

### 2.3.1 「もんじゅ」の冷却系統

「もんじゅ」は、熱出力 714MW、電気出力約 280MW の高速増殖炉原型炉である。冷却系の概要を Fig. 2.5 に示す。1次系、2次系がナトリウムの系統であり、それぞれの系統は、中間熱交換器を介して熱が伝えられる。2次系の熱は、蒸気発生器を介して3次系の水に伝えられて蒸気を発生し、タービンを回して発電する仕組みとなっている。プラントの詳細は、公開されている設置許可申請書（[www.jnc.go.jp](http://www.jnc.go.jp) の中の高速増殖炉もんじゅ建設所のサイトに公開されている）などから得ることが出来る。

このプラントでは、プラントの種々の機能を確認するための試験が行われており、その一つとして、2次系の自然循環試験が行われた。<sup>110</sup>2次系の自然循環は、2次系に設けられている空気冷却器を作動させることによって循環ヘッドが確保されている。Fig. 2.6(a),(b) に「もんじゅ」の1次系と2次系の機器および配管配置を示す（パンフレットより）。空気冷却器に関しては、2次系の中に記載していないが、IHX 出口配管の過熱器近くの弁の手前を分岐してナトリウムを取り込み、約 12m 上方に位置する空気冷却器で冷却されたナトリウムは、蒸気発生器出口配管近くで2次系のラインに戻る。空気冷却器の位置は、2次系の循環ポンプの位置よりも上方になる。

### 2.3.2 自然循環試験

1993年3月29日に実施された2次系の自然循環試験では、原子炉は核的に加熱されていない状態であるが、1次系のポンプを運転し、ポンプ入熱によって1次系を加熱している。また、蒸気発生器は隔離されているため、除熱は行われぬ。2次系の除熱は空気冷却器で行っているが、試験での運転では、空気冷却器の配管系に設けられている弁開度を徐々に開いてゆき最終的に全開にし、空気冷却器出口ナトリウム温度がベーン・ダンパに

よって 315℃で制御されることを調べている。空気は自然循環で冷却器に取り込まれ、外気に熱が捨てられる。**Fig. 2.7** に境界条件となる一次循環系流量、空気冷却器止め弁開度、バイパス弁開度の操作状況を示す。

#### 2.4 「もんじゅ」タービントリップ試験

「もんじゅ」では、1995年12月1日に、電気出力40%、(熱出力45%)からタービンをトリップさせて空気冷却機器での冷却特性を試験している。このときの過渡応答試験結果について、宮川ら<sup>[10]</sup>が原子力学会で口頭発表している。

この試験では、タービン等に故障が発生したことを想定し、プラントが計画通りに停止することを確認している。タービンは、原子炉トリップ後、30秒で蒸気発生器止弁を全閉し、圧力の急上昇を防ぐため、タービンバイパス弁が全開して蒸気を復水器に放出した全閉する。全体の動作は約20秒以内である。トリップ信号によって、原子炉はスクラムされ、続いて1次系と2次系の循環ポンプモータがトリップし、流量コストダウンによって回転数が低下した時点で、1次系は定格流量に対して約10%の、2次系は約8%の流量が確保できるポニーモータに運転が引き継がれる。空気冷却器は、送風機が立ち上がり、冷却を開始する。

Table 2.1 Configuration data of PLANDTL (1/3)

項 目	単位	数量
炉心部		
ピン本数		37, 7
下部非発熱部長さ	m	0.92
上部ガスプレナム長さ	m	0.39
クラッド外径	m	0.0083, 0.0208
クラッド内半径	m	0.0067, 0.0178
燃料外径	m	0.0067, 0.0178
燃料内径	m	0.000001, 0.000001
有効発熱長	m	1
ワイヤー径	m	0.0015
ギャップコンダクタンス	kcal/m <sup>2</sup> hK	ギャップなし
クラッド濡れ縁長さ	m	0.9648, 0.4574
構造材濡れ縁長さ	m	0.2182
等価直径	m	0.004037, 0.00590
1ピン当たりのクラッド断面積	m <sup>2</sup>	1.885E-05
1バンドル当たりの冷却材流路面積	m <sup>2</sup>	0.00137, 0.001046
1バンドル当たりの構造材断面積	m <sup>2</sup>	0.0009284
炉心半径方向出力分布		試験条件による
燃料集合体半径方向出力分布		均一
炉心軸方向出力分布		上部からのステップ幅(mm)と出力比
		37本集合体 7本集合体
		20, 0.63 50, 0.65
		20, 0.67 50, 0.76
		20, 0.71 60, 0.86
		30, 0.76 60, 0.96
		30, 0.82 60, 1.04
		30, 0.87 95, 1.13
		45, 0.93 250, 1.21
		55, 1.01 95, 1.13
		55, 1.08 60, 1.04
		55, 1.14 60, 0.96
		55, 1.18 60, 0.86
		55, 1.20 50, 0.76
		60, 1.21 50, 0.65
		55, 1.20
		以下対称
インターラップ°ギャップ°面間距離	m	0.007
インターラップ°ギャップ°流路面積	m <sup>2</sup>	0.0063229
インターラップ°ギャップ°濡れ縁長さ	m	2.5323
下部プレナム		
プレナム Na 容量	m <sup>3</sup>	1.1
上部プレナム		
上部プレナム内径	m	2
上部プレナム高さ	m	2.9
上部プレナム Na 液深	m	2.01

Table 2.1 Configuration data of PLANDTL (2/3)

項 目	単位	数量
DRACS 本体		
伝熱管外径	m	0.019
伝熱管内径	m	0.015
長さ	m	2.4
本数		5
伝熱面積	m <sup>2</sup>	0.72
DRACS 空気冷却器(フィン付き)		
フィンの外径	m	0.0492
フィンの厚さ	m	0.0009
フィンの枚数		200 枚/m
フィン部の一段当たり長さ	m	0.71
フィン効率		約 0.8
伝熱管外径	m	0.0272
伝熱管内径	m	0.0222
伝熱管長さ	m	0.71(1 本を曲げて 4 段にしている)
本数		13
伝熱面積	m <sup>2</sup>	2.58
Na 側汚れ係数	kcal/m <sup>2</sup> hK	250000
空気側流路面積	m <sup>2</sup>	0.272
空気側等価直径	m	0.0382
一次系局所圧力損失係数		
4B 弁 SV101M		3.64 (Cv=254 リニア特性)
4B ニードル弁 SV103M, SV104M		51.7 (Cv=67.4 リニア特性)
2B ニードル弁 SV105M		31.3 (Cv=23 リニア特性)
曲がり		一個当たり 0.2
レデューサー縮小		0.5
レデューサー拡大		1
炉心部入口		1
燃料集合体		管摩擦係数のみ式で与える
炉心上部遮蔽体		内径 36mm, 750mmL, 上下内径 60mm
炉心出口		1
戻り配管入口		0.5
IHX 入口		1
IHX 出口		0.5
下部プレナム入口		1
下部プレナム出口		0.5
DHX 局所圧力損失係数		
2BY 型弁 VD1		2.5
2BY 型弁 VD2		2.5
2BY 型弁 VD3		2.5
レデューサー縮小		0.5
レデューサー拡大		1
DHX 入口		0.5
DHX 出口		1
空気冷却器入口		0.5
空気冷却器出口		1

Table 2.1 Configuration data of PLANDTL (3/3)

項 目	単位	数量
中間熱交換器		
一次側伝熱管外径	m	0.0254
伝熱管内径	m	0.023
長さ	m	1.1
本数		145
中間熱交換器 (IHX) 二次系		
胴側伝熱流路面積	m <sup>2</sup>	0.08557
濡れ縁長さ	m	12.8
流路内径	m	0.45
胴部厚さ	m	0.007
PRACS		
伝熱管本数		2
伝熱管内径	m	0.0371
伝熱管厚さ	m	0.0028
伝熱管長さ	m	約 2m (0.32m の径で 2 回コイル)
胴側流路面積	m <sup>2</sup>	0.619
胴側等価直径	m	0.0254
空気冷却器 (フィン付き)		
フィンの外径	m	0.0492
フィンの厚さ	m	0.0009
フィンの枚数		200 枚/m
フィン部の一段当たり長さ	m	1.19
フィン効率		0.6
伝熱管外径	m	0.0272
伝熱管内径	m	0.0222
伝熱管長さ	m	7.1
本数		23 (1 本を曲げて 6 段にしている)
伝熱面積	m <sup>2</sup>	11.4
Na 側汚れ係数	kcal/m <sup>2</sup> hK	250000
空気側流路面積	m <sup>2</sup>	0.8082
空気側等価直径	m	0.0382
二次系局所圧力損失係数		
4BY 型弁 SV201M		Cv 値約 200
2BY 型弁 VS1		2.5
2BY 型弁 VS2		2.5
2BY 型弁 VS3		2.5
レデューサ縮小		0.5
レデューサ拡大		1
IHX 入口		0.5
IHX 出口		1
空気冷却器入口		0.5
空気冷却器出口		1
空気冷却器入口分岐		0.8
空気冷却器出口合流		0.6

Table 2.2 Initial operating conditions of natural circulation experiment (Run24116)

Power	kW	1007
中心	kW	144
周辺 A	kW	432
周辺 B	kW	431
一次系流量	<i>l/min.</i>	336 (0.336*880.01*60/1000=17.741t/h)
中心チャンネル	<i>l/min.</i>	56 (0.056*880.01*60/1000=2.9568t/h)
周辺チャンネル A	<i>l/min.</i>	139.8 (0.14*880.01*60/1000=7.392t/h)
周辺チャンネル B	<i>l/min.</i>	140 (0.14*880.01*60/1000=7.392t/h)
下部プレナム圧力	<i>atg</i>	0.88
ポンプ差圧	<i>atg</i>	2.24
中心 S/A 入口圧	<i>atg</i>	0.94
周辺 S/A 入口圧	<i>atg</i>	0.78
T/S 入口温度	°C	中心集合体 300
	°C	周辺集合体 300
上部プレナム出口温度	°C	452.8
IHX 管入口温度(一次側)	°C	453.4
IHX 管出口温度(一次側)	°C	301.9
二次側流量	<i>l/min.</i>	350 (0.35*888.01*60/1000=18.65t/h)
IHX 胴入口温度(二次側)	°C	267.6
IHX 胴出口温度(二次側)	°C	418.9
IHX 空気冷却器入口 Na 温度	°C	409
IHX 空気冷却器出口 Na 温度	°C	266.2
空気流量	<i>kg/s</i>	6.2 (6.6m/s に相当)
IHX 空気冷却器入口空気温度	°C	26.1
IHX 空気冷却器出口空気温度	°C	204.7
PRACS Na 流量	<i>l/min.</i>	10(0.01*882.43*60/1000=0.5295t/h)→ 90l/min.(4.77t/h)
PRACS Na 入口温度	°C	289.8
PRACS Na 出口温度	°C	446.1
PRACS 空気流量	<i>l/min.</i>	0
PRACS 空気冷却器入口温度	°C	35.5
PRACS 空気冷却器出口温度	°C	308.6

Table 2.3 Operation history of PRACS-REF and DRACS-REF tests

Time (sec)	0	15	30	40	50	60	80	100	110	130	2400
Primary loop											
Heater	cut	-->decay curve									
Pump	trip	-->coastdown				stop	-->	natural circulation			
Common valve	9%		9%					100%			
Secondary loop											
Pump	350 l/min	initiation of decrease			stop						
Blower	100%	initiation of decrease		stop							
Valve	17%									17%	close
PRACS/DRACS											
Pump	10 l/min					increase			90 l/min		
Blower	0%						start			100%	

Table 2.4 Operation history of PRACS-2 test

Time (sec)	0	15	30	40	50	60	100	1620	1830	1850	1870	1890	7200
Primary loop													
Heater	cut	-->decay curve											
Pump	trip	-->coastdown				stop	natural circulation						
Common valve	9%		9%				100%						
Secondary loop													
Pump	350 l/min	initiation of decrease			stop								
Blower	100%	initiation of decrease		stop									
Valve	17%						17%	close					
PRACS													
Pump	10 l/min								flow increase		90 l/min		
Blower	0%								100%	start		100%	

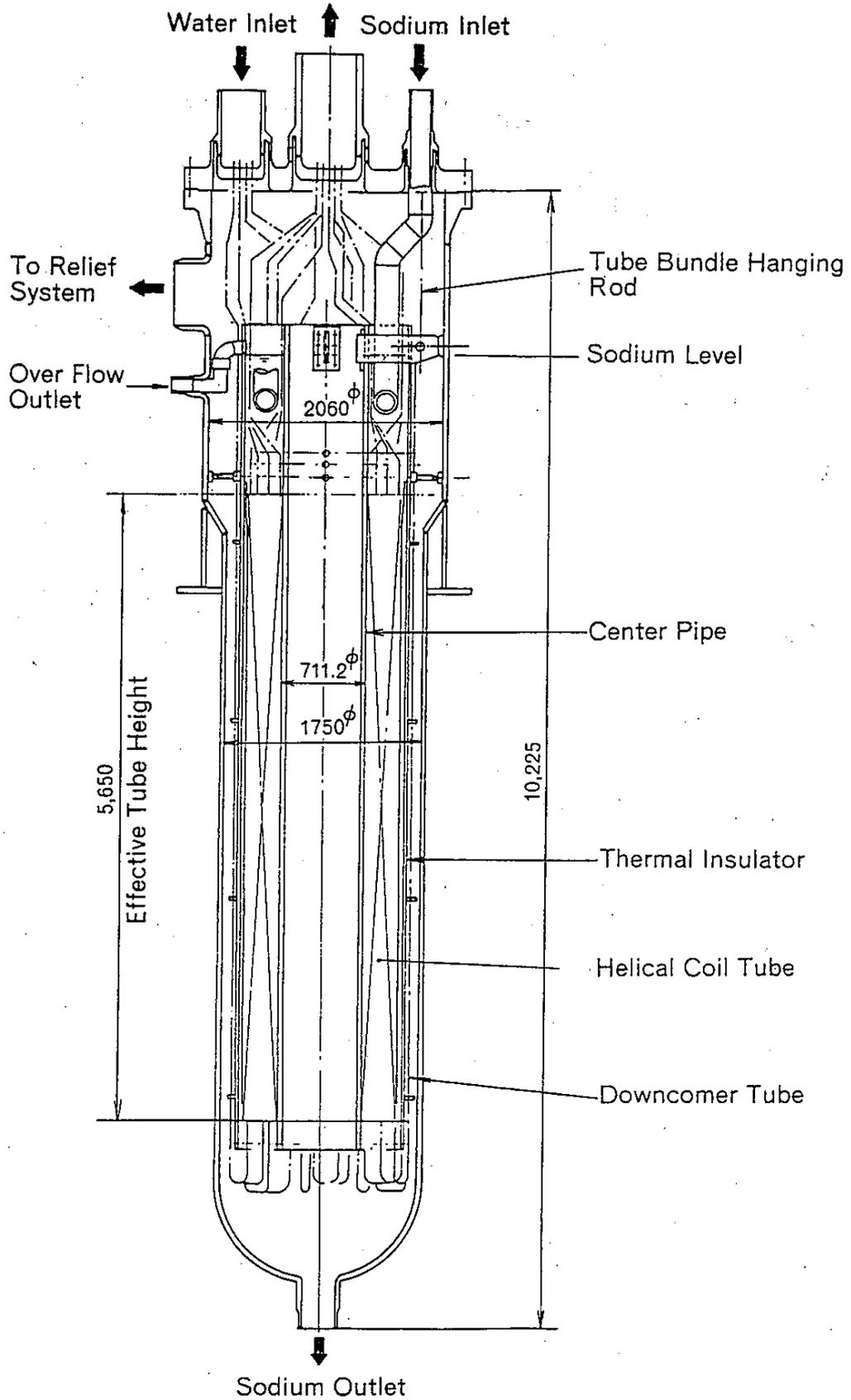


Fig. 2.1 Schematic of evaporator of the 50 MW steam generator facility (from reference [7])

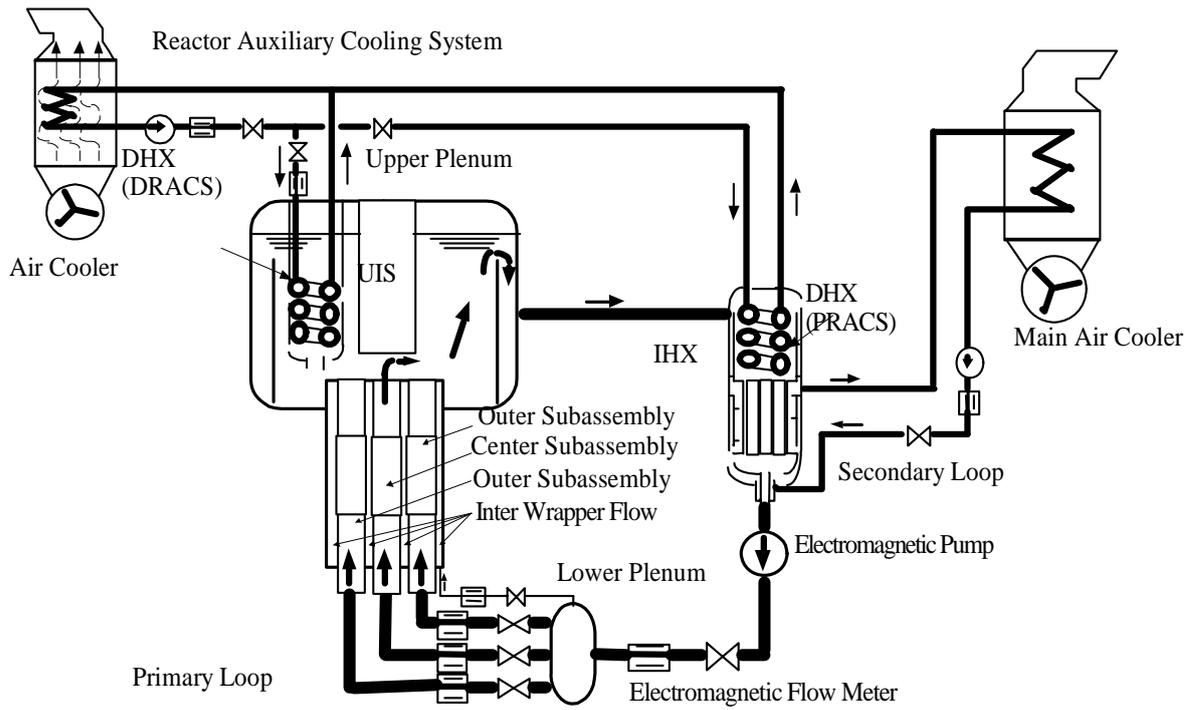


Fig. 2.2 Flow diagram of PLANDTL

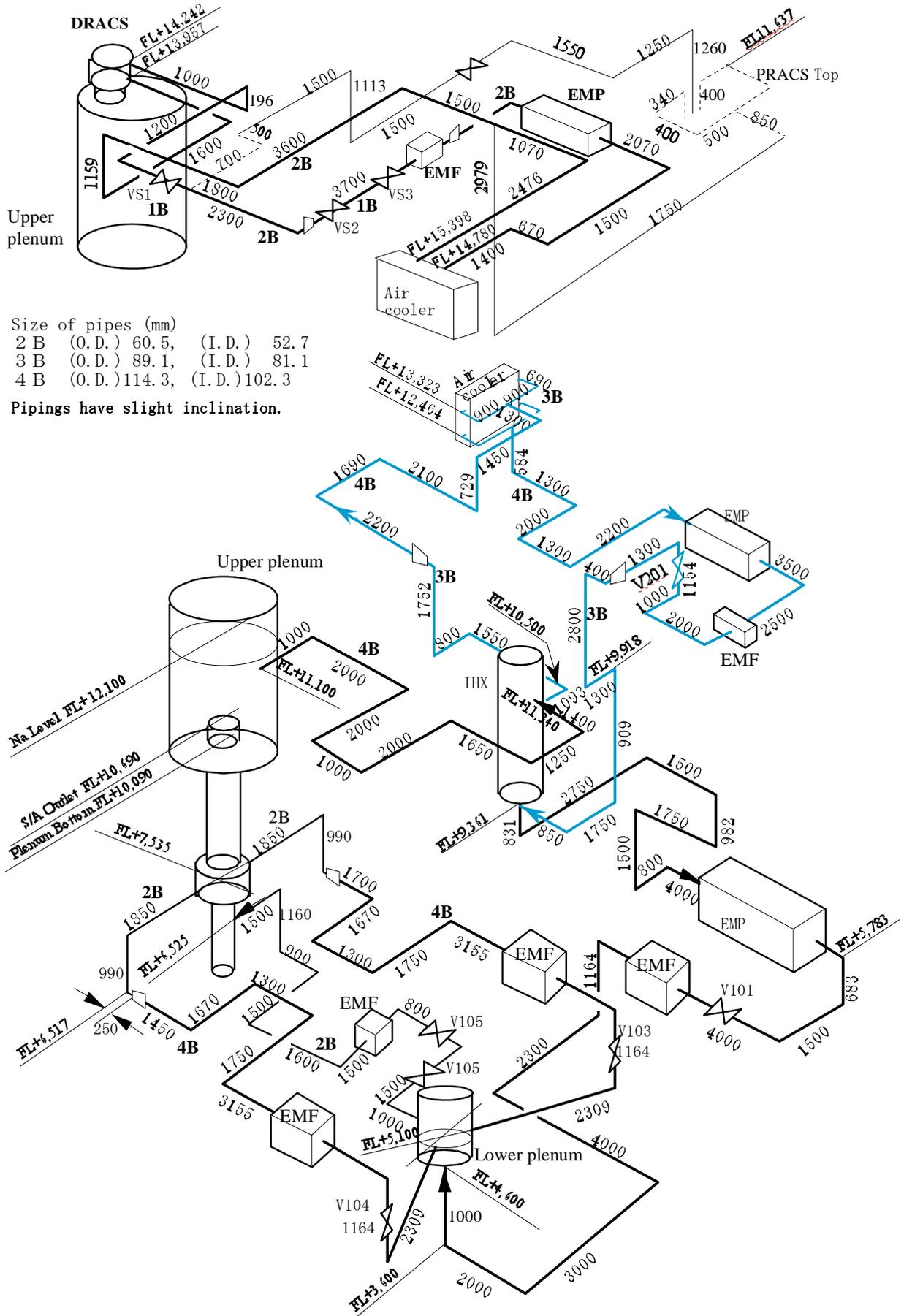


Fig. 2.3 PLANDTL primary and secondary loops

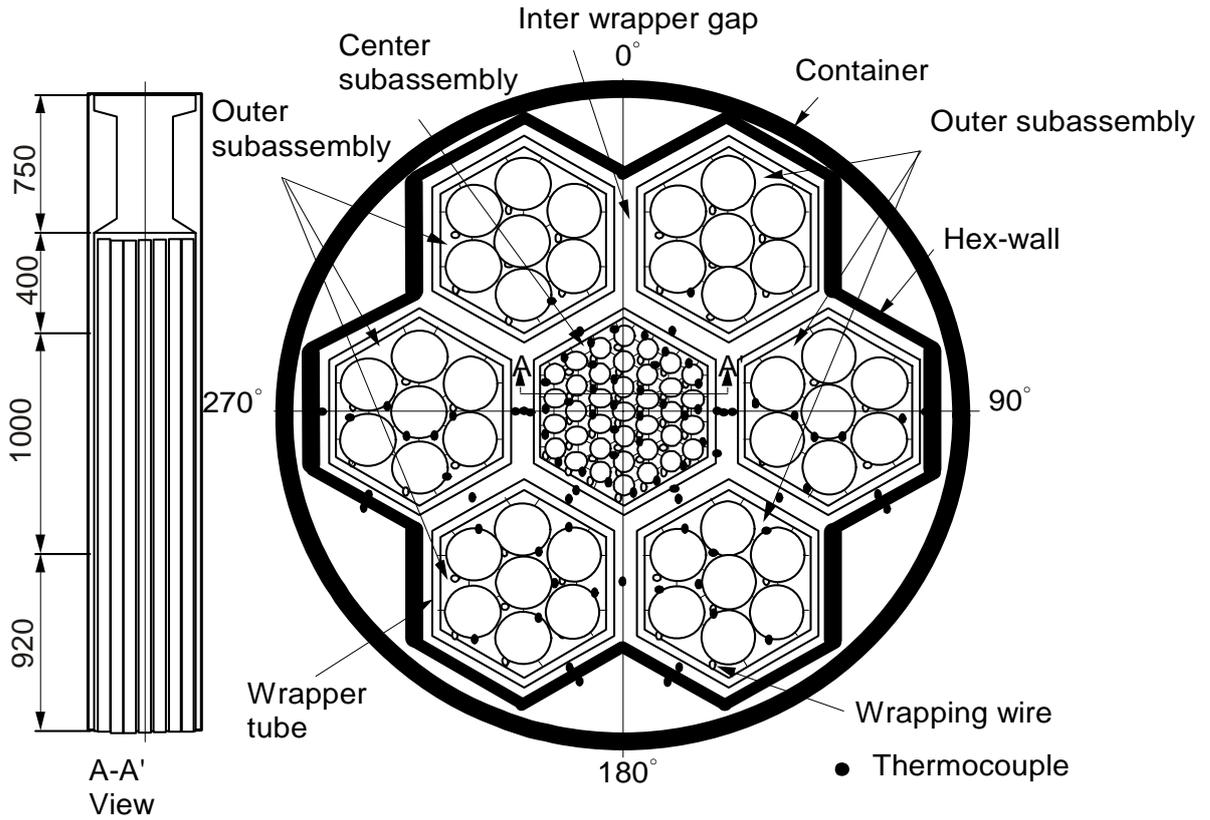


Fig. 2.4 Sectional view of test section

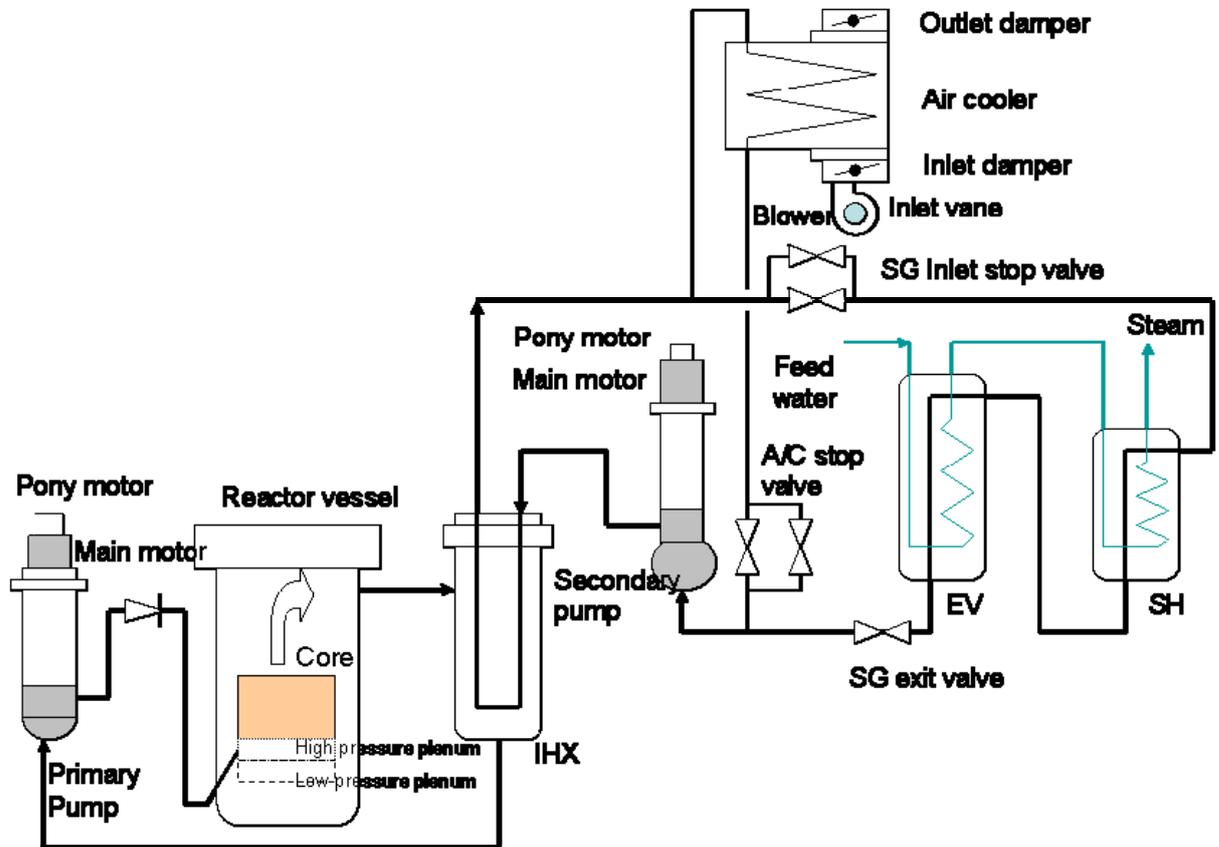


Fig. 2.5 Flow diagram of Monju

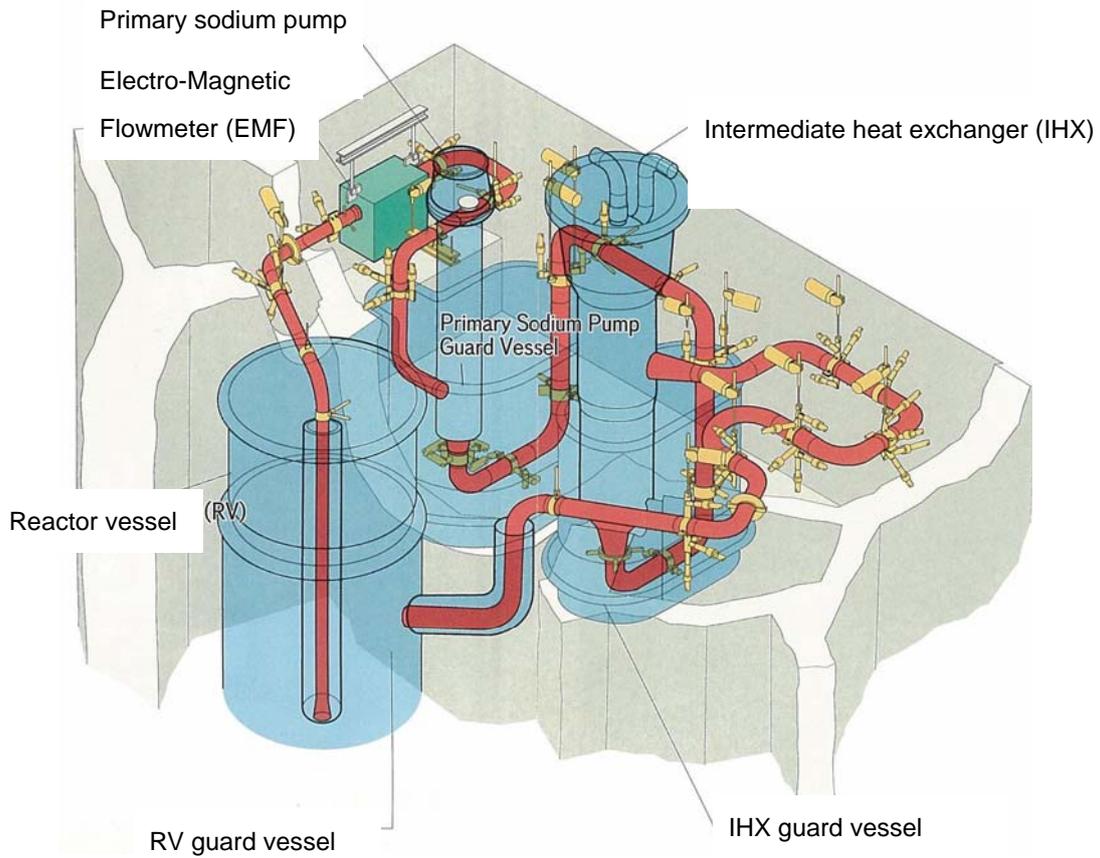


Fig. 2.6(a) Bird's-eye view of "Monju" cooling system (primary loop)

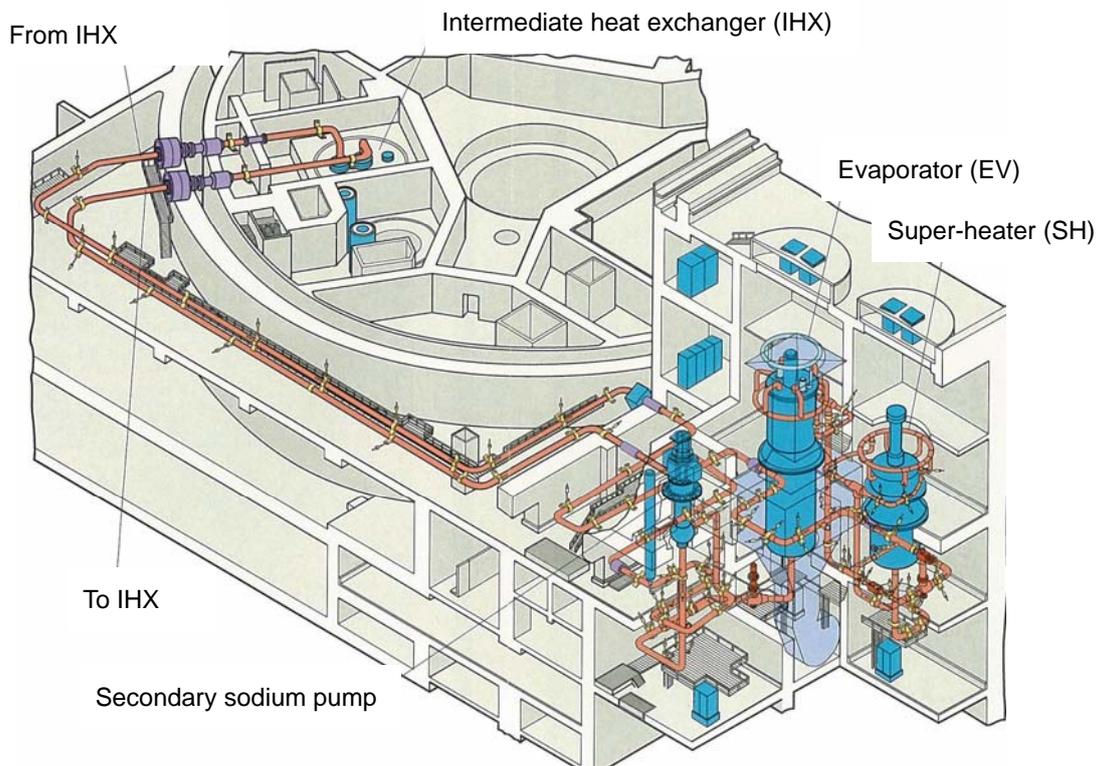


Fig. 2.6(b) Bird's-eye view of "Monju" cooling system (secondary loop)

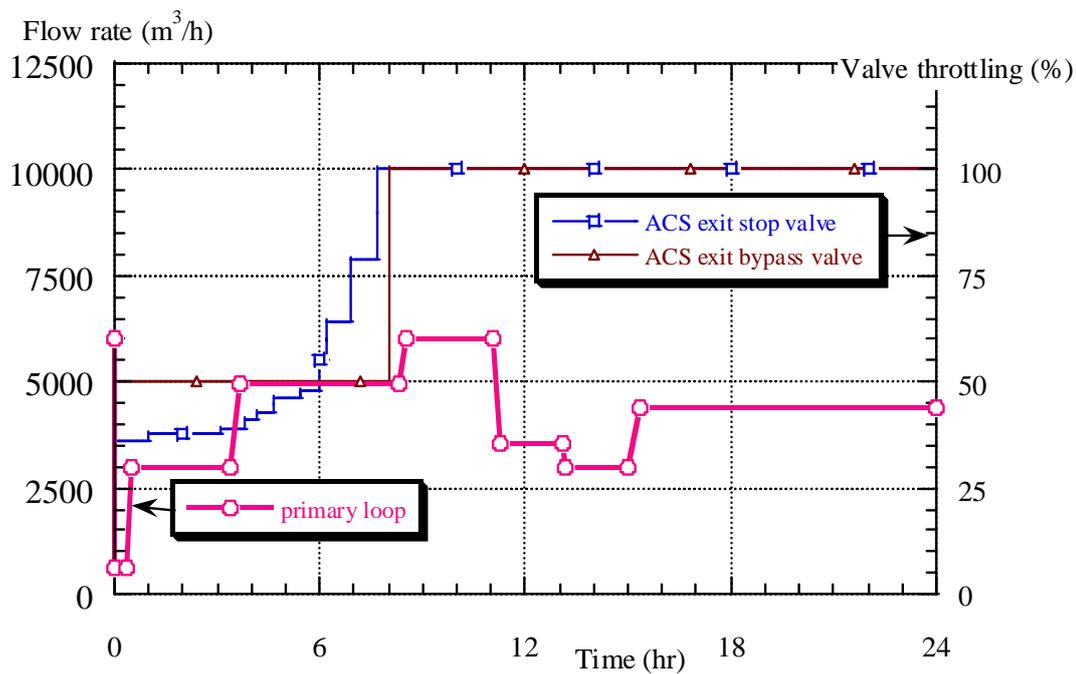


Fig. 2.7 Monju secondary loop natural circulation experiment conducted on 29 March 1993.

### 3. 50MW 蒸気発生器定常試験解析

#### 3.1 解析モデル体系

蒸気発生器は、蒸発器と加熱器に分かれているため、この部分も含めてモデル化している。蒸発器の伝熱管は、10 グループまでモデル化できるが、本解析では伝熱管を 1 グループで代表させる。解析の体系図を **Fig. 3.1** に示す。Fig. 2-3 に示した PLANDTL の系統と同じように、出来る限り配管のルートを明確にして解析コードの入力データを作成している。定常試験を予測する場合には、熱容量が過渡変化に及ぼす影響が無いため、直径、長さなどの配管形状はかなり大雑把なものを用いても問題は生じない。水/蒸気側は、流量及び圧力境界を用いて、計算できるようにしている。境界の値は、試験条件の節で述べたものをテーブルでコードに与えている。ナトリウム側の伝熱は、ナトリウムの経験から得られた熱伝達の無次元式を使い、水側に関しては、ATR の知見から得られた伝熱相関式の無次元式や、外部ファイルから読み込んで使用する蒸気表を使って解析している。

#### 3.2 解析結果

蒸発器について、定格出力状態で実施した試験と解析結果との比較を **Fig. 3.2** に示す。文献[7]の中に述べられている解析コード POPAI4 と比較すると、解析の精度は劣るものの、蒸気発生器内部のナトリウム温度分布計測値の誤差範囲にほぼ入っており、正しく計算できている事が分かる。特に、蒸気発生器上部の温度分布解析値が計測値からずれている理由は、上部でコイルが垂直な伝熱管として立ち上がる状況がうまく模擬されていないことによる。メッシュを適切に設ければ、この点は改善されるはずである。水系統に関しては、入口、ダウンカマー部と出口の値しか分からないが、この値に関してはほぼ正しく予測されていることが分かる。文献[7]の POPAI コードの予測と同じように、蒸発器の出口付近でドライアウトしていることも同様に予測されている。

過熱器に関して、計測結果と解析の比較を **Fig. 3.3** に示す。過熱器に関しても NETFLOW コードは、温度分布を適切に評価できている。このことにより、蒸気発生器の蒸発部に関しては、非定常時の構造材からの過渡的な伝熱挙動は未確認であるものの、他の構造材の伝熱と同じ論理で計算していることから、他の熱交換器の過渡変化挙動が正しく予測されれば、蒸気発生器の応答に関しても適用できると考えられる。

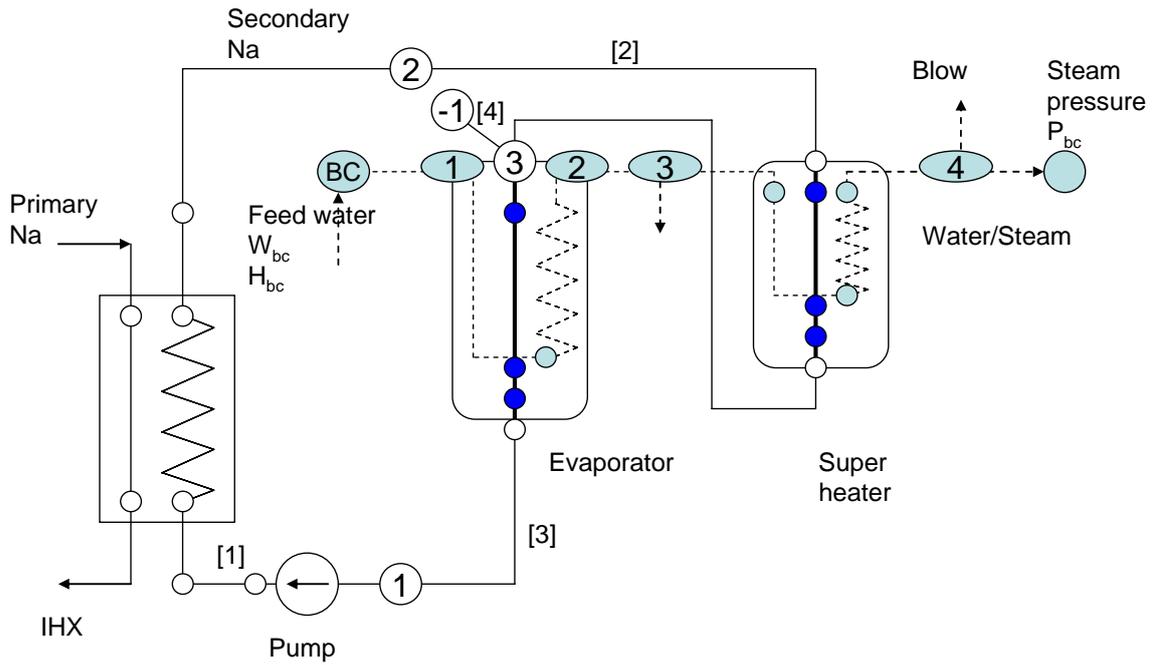


Fig. 3.1 50MW SG calculation model

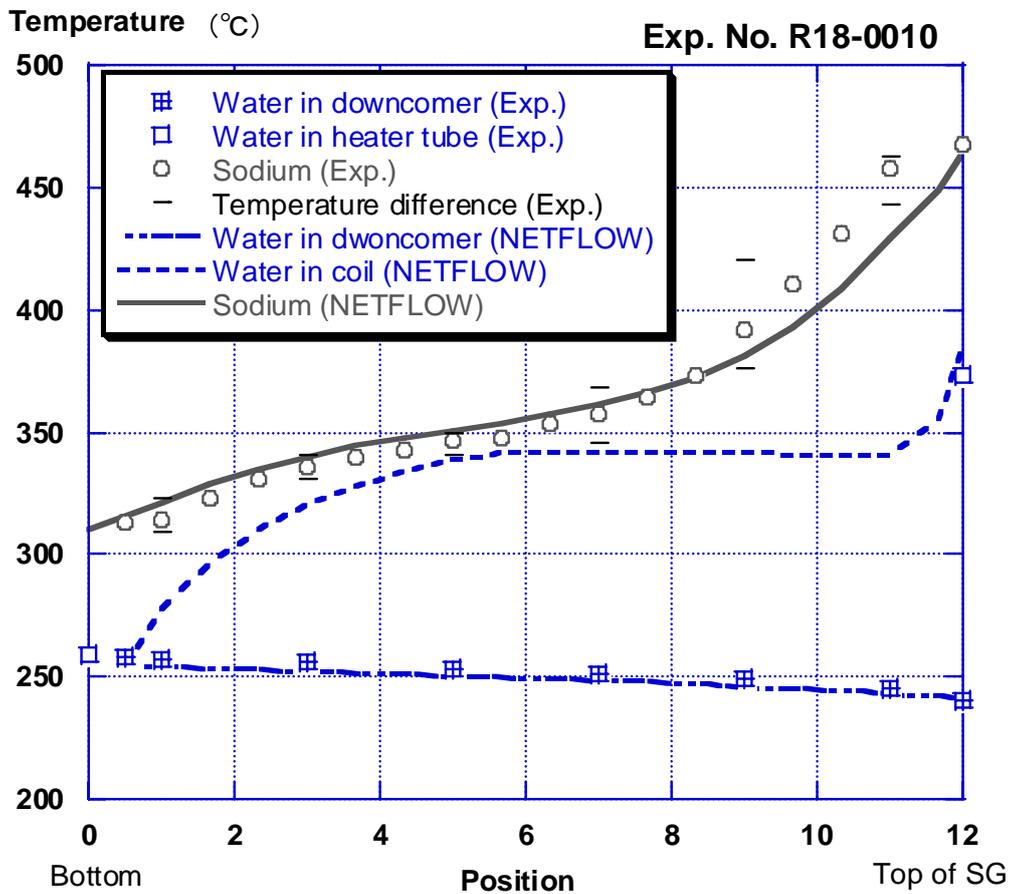


Fig. 3.2 50MW SG evaporator axial temperature profile at 100% power

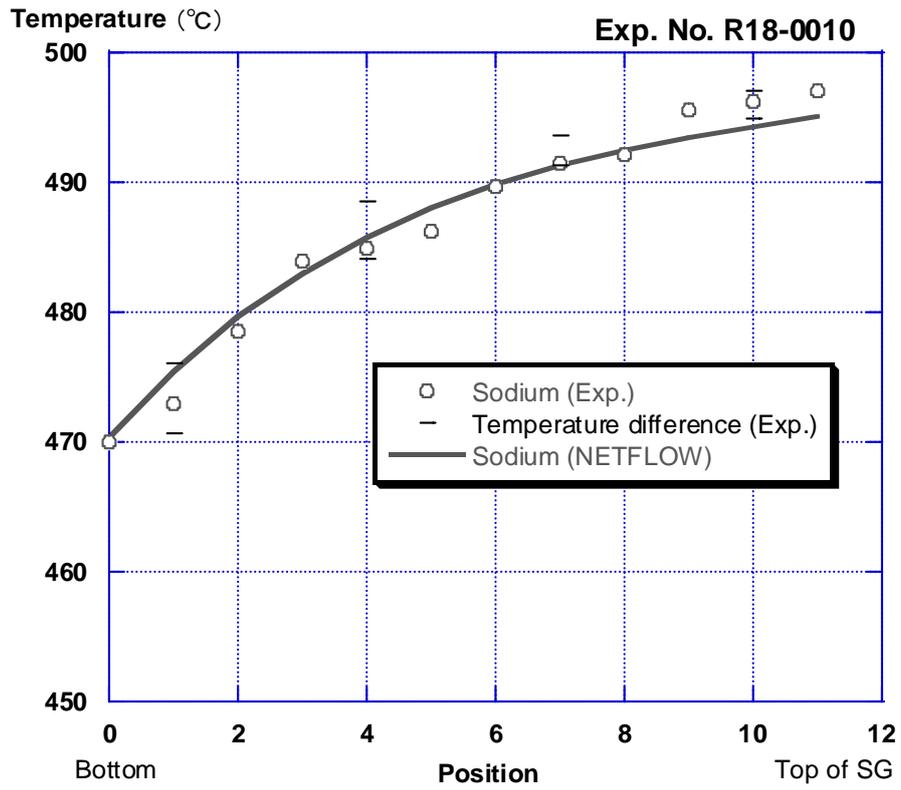


Fig. 3.3 50MW SG super-heater axial temperature profile at 100% power

#### 4. PLANDTL を用いた自然循環実験解析

試験結果を用いた解析コードの検証に関しては、既に国際会議で概略を発表<sup>[6]</sup>しているが、本報告では再度解析結果などについて述べ、解析コードに関して検討する。

##### 4.1 解析モデル体系

Fig. 4.1 は、Fig. 2.2 に示された PLANDTL の流路をモデル化したものである。この図では、崩壊熱除去系として PRACS, DRACS 両方をモデル化しているが、試験では弁の切り替えで空気冷却器を使用している。解析体系では、PHX から空気冷却器に至る破線のライン、あるいは、DHX に至る実線のラインを生かすことで、どちらかの実験に対応した体系を模擬している。番号を円で囲んだものがジョイントと呼んでいる所であり、合流・分岐等を扱える。また、圧力や流量の境界を扱う場所は、負の番号で表されている。小さな円は、サブジョイントであり、配管の直径等の形状が変化する場所に設けている。大かっこで囲まれた数字は、メインのリンクを表しており、上流側メインジョイントから下流側メインジョイントへの接続配管を表している。

一次系の炉心を模擬した発熱部は、中央は一チャンネルのみであるため、そのまま扱い、周辺の発熱部は、左右とも 3 チャンネルを一つのチャンネルとして扱った。上部プレナムの部分は、実験装置の等価直径を与え、配管として扱った。循環流量は、電磁ポンプの吐出圧を計測された値にして計算するようにした。中心のチャンネルと周辺のチャンネルの流量分布を平坦にするため、入口に流量調節用の弁を設けている。これらの弁の  $C_v$  値特性と開度は入力で与える。このときの圧力損失は、弁の  $C_v$  値や形状の圧力損失係数について Table 2.1 に書かれているように与えており、吐出圧とのバランスで流量が自然に定まるようにした。炉心を経由したナトリウムは、炉心上部で合流しプレナムに流入するようにモデル化した。一次系、二次系、DRACS 若しくは PRACS は、熱交換器を解して結合されており、系統に外乱が入った場合の相互の影響が計算できるようになっている。

PRACS を用いたケースでは、高温のナトリウムは、IHX の上部で PRACS のコイル状の熱交換器で冷却され、さらに二次系のナトリウムに熱を伝える。このため、このケースでは、自然循環時の二次系の流量が低下することになる。DRACS を用いたケースでは、高温のナトリウムは、プレナムの内部で DRACS の熱交換器(DHX)で冷却され、さらに二次系のナトリウムに熱を伝える。このため、このケースでは、一次系の自然循環流量が低下することになる。PRACS あるいは DRACS は、空気冷却器で熱を外気に捨てている。

##### 4.2 PRACS を用いた実験結果と解析結果の比較

PLANDTL の崩壊熱除去系として PRACS を用いて、強制循環から自然循環に移行させた過渡試験の結果と、その挙動を NETFLOW で解析した結果を Fig. 4.2 から Fig. 4.5 に示す。実験結果は実線で、計算結果は破線で示している。

Fig. 4.2 は、一次系、二次系、PRACS の流量を示している。一次系の流量は、実験結果解析結果とも、ポンプトリップと共に 0.5 kg/s 程度まで減少し、自然循環の形成と共に若

干の回復を示した後に少し揺らぎ、ほぼ一定の値にとどまる。一次系の流量が自然循環時にこのように一定の値になるのは、PRACS が一定運転されているからである。二次系の流量は、PRACS が起動されると、IHX の上部が冷却されるため減少しやがて流れなくなる。

**Fig. 4.3** は、一次系各部の温度挙動を示している。示している箇所は、加熱部入口、中央の集合体発熱終端、上部プレナム内、IHX 出口である。発熱部入口とプレナムの温度は、非常に緩やかに変化している。これは、上下部プレナムの容量が大きいためである。燃料集合体終端の温度は、スクラムと同時に 330 °C 付近まで減少するが、自然循環流量が形成される間での間に約 550 °C まで上昇し、自然循環の形成に伴って再び減少する傾向を示している。このような挙動が解析でも生じており、ピークや谷の値に少しの差があるものの、挙動を正しくトレースしている事が分かる。実験結果と解析結果の温度の差は約 20 °C 以内である。

**Fig. 4.4** は、二次系各部の温度挙動を示している。示している場所は、IHX 入口、IHX 出口、空気冷却器出口空気温度である。IHX 入口温度は、空気冷却器で冷却されたナトリウムが流入しているため、あまり大きく変化していないが、IHX 出口は、上部に位置する PRACS の冷却器が冷たいナトリウムを供給するため温度が低下し、やがてほぼ一定の値で推移する。空気冷却器の出口温度は、実験結果では大きく変化していないが、解析では実験結果をはさんで大きく変化している。現時点では、解析において、なぜ空気冷却器の自然循環が正しく計算されてないのか、不一致の結論は出ない。ナトリウムの温度に関しては、約 40 °C 以内の範囲で解析が実験結果をトレースしている。

**Fig. 4.5** は、PRACS 各部の温度挙動を示している。PRACS は、初期状態では極く低流量 (10l/min.) でナトリウムが循環されており、60 秒からナトリウムがまた 80 秒から空気が強制的に循環され始めた。このため PRACS 出口部の温度は初期に低下し、その後は、上部プレナムの温度の緩やかな低下に合わせて温度がゆっくりと低下している。また、入口の温度は、PRACS 作動後に少し上昇した後すぐ減少し、ほぼ一定の値で推移している。このように入口温度が僅かに上昇する理由は、PRACS が運転され始めて高温のナトリウムが循環し始めるが、すぐ空気冷却の効果が見えて温度が低下するからである。解析結果は、基本的にこのような挙動を忠実に再現しており、実験結果を約 20 °C 以内の温度差でトレースしている。

### 4.3 DRACS を用いた実験結果と解析結果の比較

PLANDTL の崩壊熱除去系として DRACS を用いて、強制循環から自然循環に移行させた過渡試験の結果と、その挙動を NETFLOW で解析した結果を **Fig. 4.6** から **Fig. 4.9** に示す。前の結果と同様に、実験結果は実線で、計算結果は破線で示している。

**Fig. 4.6** は、一次系、二次系、DRACS の流量を示している。一次系の流量は、実験結果解析結果とも、ポンプトリップと共に 0.5 kg/s 程度まで減少した後、自然循環の形成と共に若干の回復を示す。その後は緩やかに減少する。一次系の流量が自然循環時にこのように減少するのは、DRACS が運転されると、冷たいナトリウムがプレナムの底に溜り、上部遮へい体の付近まで流れ込むからである。このため、一次系の循環ヘッドが減少して、流量は次第に減少することになる。二次系の流量は、ポンプトリップ後低い値になるが、

二次系が隔離される 2400 秒時点までは、ほんの僅かの減少で推移する。この時一次系の流量は実験では漸減するが、解析では一旦減少するものの再びゆっくりと増加する傾向を示す。このように、二次系が隔離された後の一次系の流量は、本コードでは流量が復活する傾向にあり、正確に計算されていない。流量が極めて小さいことから、誤差の蓄積も考えられる。

**Fig. 4.7** は、一次系各部の温度挙動を示している。示している箇所は、加熱部入口、中央の集合体発熱終端、上部プレナム内、IHX 出口である。IHX 出口の温度は、共通チャンネル入口側の代表温度になり、自然循環に移行すると二次系側も自然循環になるため僅かに温度が上昇する。また、2400 秒で二次系が隔離されると、除熱が無くなるため温度が急に上昇し、やがてほぼ一定の値に落ち着く。計算結果も同様の傾向を示しており、約 30℃以内で実験結果を予測している。加熱部入口の温度は、下部プレナムの容量のため、二次系が隔離される間ではほぼ一定の温度を示しているが、2400 秒以降急に上昇し、プレナムの温度より高くなっている。解析では、この傾向を正確にはトレースすることが出来ていない。これは、解析コードでは、全てのチャンネルが正流であるのに対して、実験では周辺チャンネルの片側が逆流していることに起因する。上部プレナム内の実験温度結果は、DRACS の作動と共にゆっくりと低下する傾向を示している。解析での予測も同じ傾向を示しており、DRACS による崩壊熱除去が正しく評価されていることを示唆している。中央チャンネルの発熱上端温度は、ヒータートリップとともに急激に低下するが、自然循環に移行するため、再び温度上昇し、約 550℃のピークを示す。その後、熱の輸送に伴って温度が揺らぐが、2400 秒で二次系が隔離されると、再び温度が上昇し約 3600 秒で最高温度に達する。解析結果もこの傾向をほぼ再現しており、約 40℃以内の誤差で実験結果をトレースしている。

**Fig. 4.8** は、二次系各部の温度挙動を示している。示している場所は、IHX 入口、IHX 出口、空気冷却器出口空気温度である。二次系の IHX 入口は、容器の下部にあたり、二次系が隔離された後に温度が上昇している。この温度上昇は、流れが無くなっても、熱伝導あるいは対流による影響が現れていると考えられる。解析では、流れ方向の熱伝導率は無視しているため、二次系隔離後の温度はほとんど変化していない。空気冷却器の出口温度は、実験結果では大きく変化していないが、PRACS のケースと同様に解析では実験結果をはさんで大きく変化している。

**Fig. 4.9** は、DRACS 各部の温度挙動を示している。DRACS は、初期状態では極く低流量 (10l/min.) でナトリウムが循環されており、60 秒からナトリウムが、また 80 秒から空気が強制的に循環され始めた。このため DRACS 出口部の温度は初期に低下し、その後は、上部プレナムの温度の緩やかな低下に合わせて温度がゆっくりと低下している。また、入口の温度は、PRACS 作動後に少し上昇した後すぐ減少し、出口側と同様な傾向で推移している。このように入口温度が僅かに上昇する理由は、PRACS のケースと同じであり、DRACS が運転され始めて高温のナトリウムが循環し始めるが、すぐ空気冷却の効果が現れて温度が低下するからである。解析結果は、基本的にこのような挙動を忠実に再現しており、実験結果を約 30℃以内の温度差でトレースしている。

#### 4.4 解析コード性能に関する検討

以上の章に示した解析結果から明らかなように、NETFLOW コードは、原子炉がトリップされた直後に PRACS と DRACS を作動させて崩壊熱除去をしている場合の自然循環時の伝熱流動挙動をほぼ再現できることが示された。しかしながら、以下に記述するような課題も明らかになった。

PRACS を崩壊熱除去に用いた場合の NETFLOW コード適用上の問題点は、空気冷却器が自然循環運転されている場合の空気温度が正しく予測されているか否かが不明であった点である。この課題に対しては、他の空気冷却器の試験データを用いて個別特性について検討する必要がある。

また、DRACS を崩壊熱除去に用いた場合の NETFLOW コード適用上の問題点は、一時間を越える長時間にわたって自然循環で運転された場合の一次系の自然循環流量が、計測値よりも大きくなる傾向を示していることであり、この問題の解決のためには、プレナム部をもっと詳しくモデル化できるようにする必要がある。このようにすることによって、解析コードでは、全てのチャンネルが正流であるのに対して、実験では周辺試験集合体の片側が逆流していたため、炉心入口温度が正確に予測出来ていない問題を解析できるようにすることにもつながると考えられる。現在のネットワークモデルでは、冷たいナトリウムの混合が一様になるため、一方のチャンネルに冷たいナトリウムが入り込むような計算にはなっていない。一次系入口の解析温度は、実験結果と少し離れた傾向を示しているが、本来この温度とほぼ同じになるはずの IHX 出口温度は、解析が実験結果をトレースしており、上述の検討を裏付けている。

さらに、二次系が隔離された後の IHX 二次系の温度が管流れ方向の伝熱の効果によって変化している点を今後どのように解析するかも検討する必要がある。試験結果の二次系の IHX 入口は、容器の下部にあたり、二次系が隔離された後に温度が上昇している。しかしながら、空気冷却器の温度をみると実験結果、解析結果ともこの温度上昇は、流れがなくなっても、なんらかの伝熱メカニズムが現れていると考えられる。解析では、流れ方向の熱伝導率や対流は無視しているため、二次系隔離後の温度はほとんど変化していない。Fig. 4.8 には空気冷却器のナトリウム出口温度も示しているが、ナトリウムに対しては、空気冷却器から IHX へ至るまでの経路では、放熱が少し存在するだけであるため、伝熱のメカニズムが無ければ、空気冷却器のナトリウム出口温度と IHX 入口温度はほとんど同じになるはずである。しかし、実験では、温度が同じになっておらず、管軸方向の熱伝導あるいは、対流による伝熱メカニズムが存在することを示している。

次に、解析コードの適用性をさらに広い条件に対して検討するため、約 1800 秒で PRACS を運転し始め崩壊熱除去を始めた場合についても解析を試みた。Table 2.4 が運転操作の時系列である。Fig. 4.10 から Fig. 4.13 に実験結果との比較を示す。この試験では、1620 秒で二次系が隔離された後に PRACS が起動されており、Fig. 4.13 に示すように一次系の流量は、PRACS が運転された後しばらくして回復している。解析結果は、流量の回復を少し早く予測しているが、過渡が静定した後の自然循環は、実験結果をトレースしている。一次系の温度に関しては、PRACS-REF と比較すると、二次系が隔離された後に一次系の燃料

終端温度が高くなっている。過渡が生じている時間帯の解析温度は実験結果と同じように変化しているが、変化の早さと振動が生じる点において異なっている。二次系の IHX 入口温度は、二次系が隔離された後に急に上昇し、DRACS-REF のケースと同様に、熱伝導による温度上昇が考えられる。空気冷却器の温度が実験結果と解析で一致していないのは全ての解析ケースに共通している。PRACS 各部の温度は、解析の温度変化は実験結果に対してアンダーシュートしてトレースしているが、温度の予測誤差は約 30 °C 以内である。

以上のように、PRACS のような一次系の自然循環が促進されるような方式に本コードを適用した場合、長時間の過渡現象が平均して 30°C 以内の温度差で解析出来ることが明らかになった。解析時間に関しては、通常の XP システムのパソコンを用いて 1 時間の現象を解析した場合、タイムステップにも依存するが、数十秒で結果を得ることが出来る。従って、このコードを用いて、ナトリウム流動体系の検討解析が簡便に行なえる。

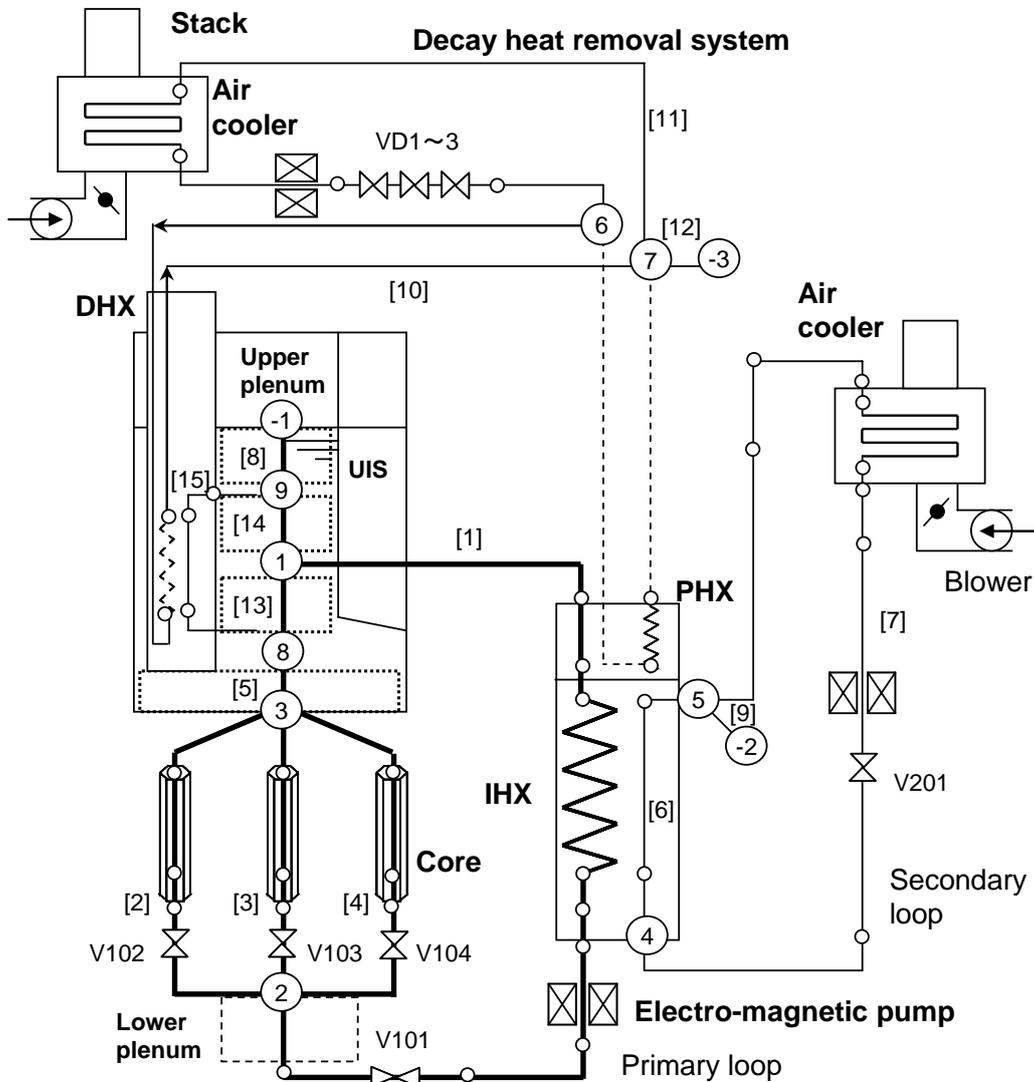


Fig. 4.1 Calculation model of PLANDTL

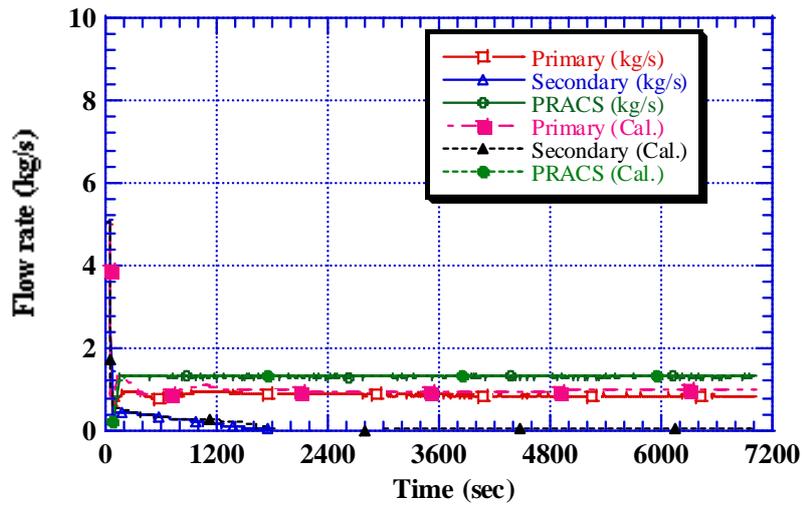


Fig. 4.2 Flow rates in PRACS-REF test

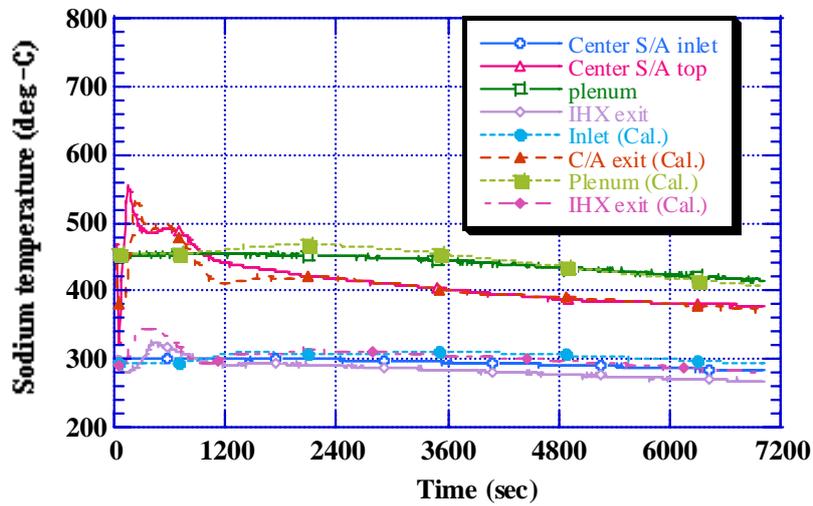


Fig. 4.3 Temperatures in primary loop in PRACS-REF test

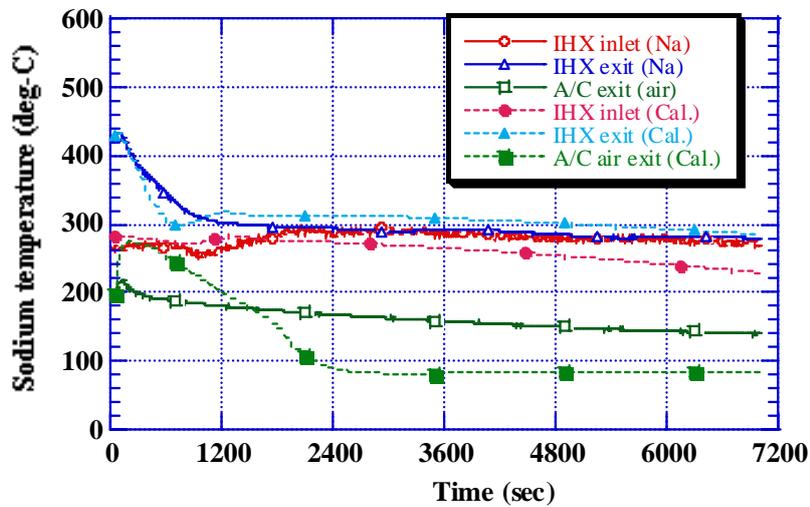


Fig. 4.4 Temperatures in secondary loop in PRACS-REF test

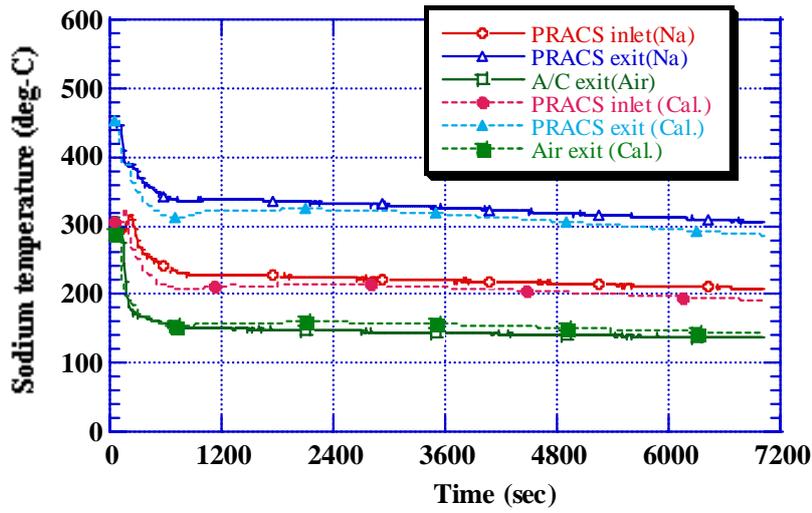


Fig. 4.5 Temperatures in PRACS in PRACS-REF test

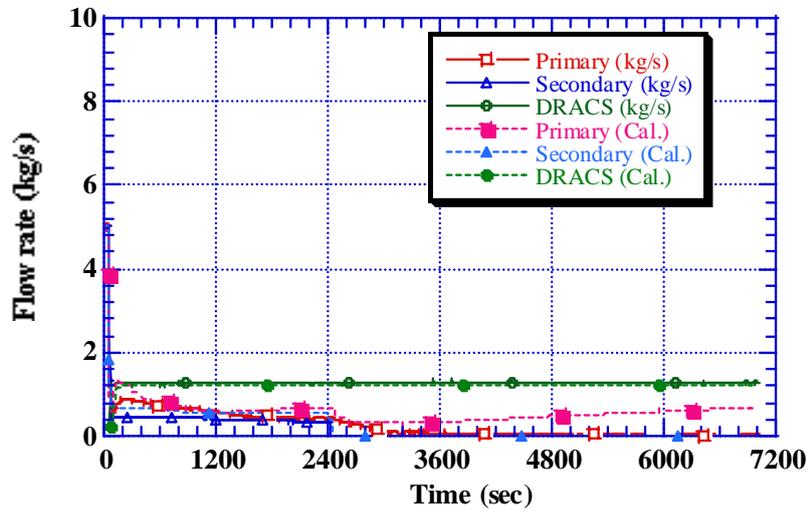


Fig. 4.6 Flow rate in DRACS-REF test

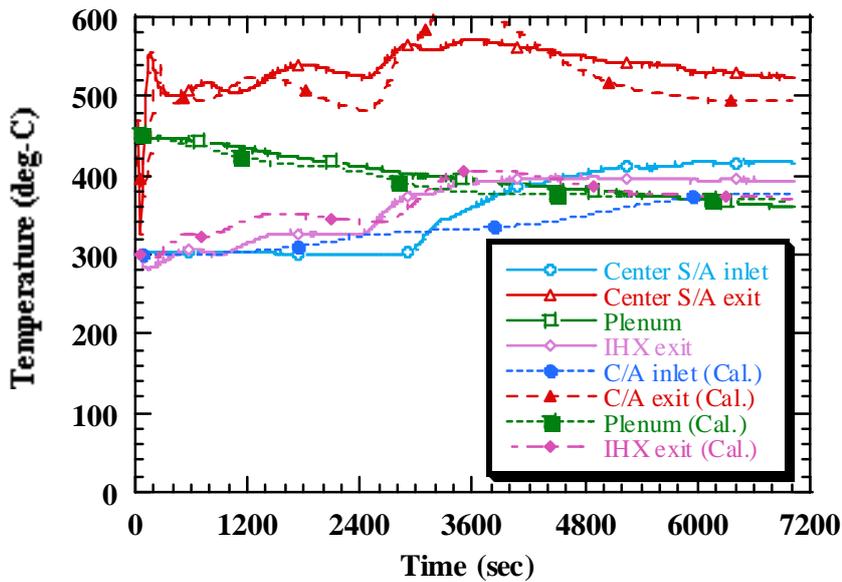


Fig. 4.7 Temperature in primary loop in DRACS-REF test

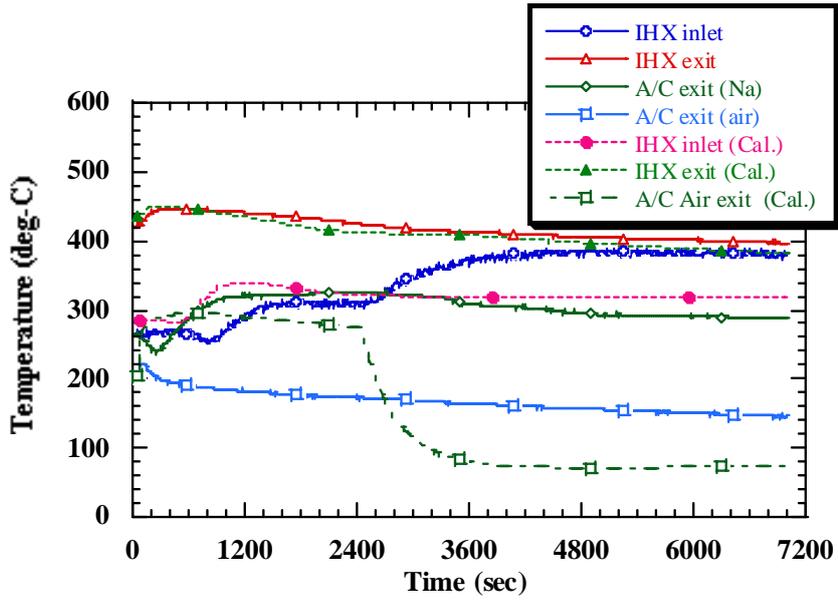


Fig. 4.8 Temperature in secondary loop in DRACS-REF test

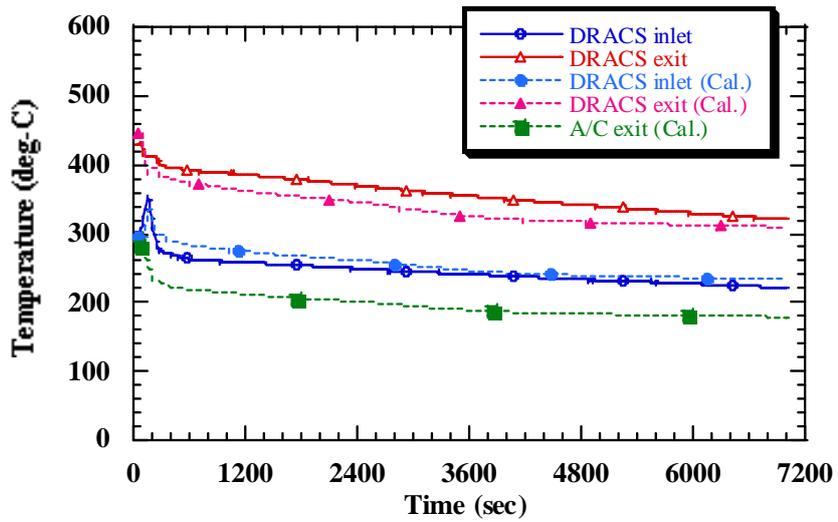


Fig. 4.9 Temperature in DRACS in DRACS-REF test

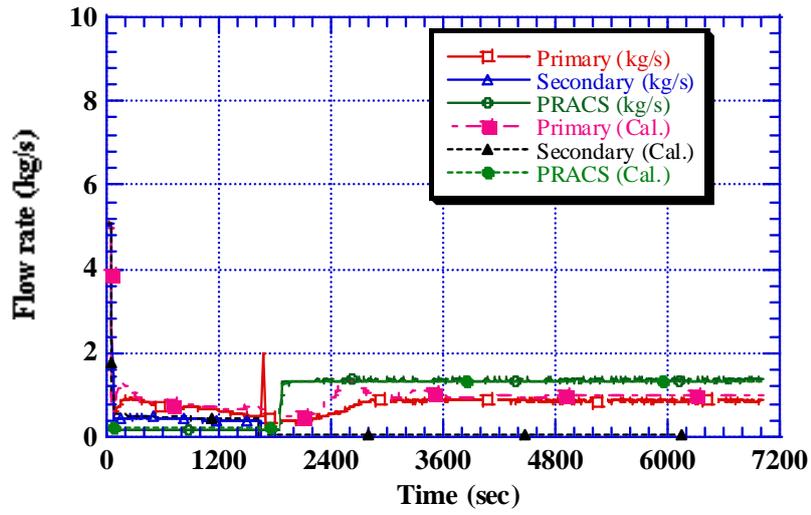


Fig. 4.10 Flow rate in PRACS-2 test

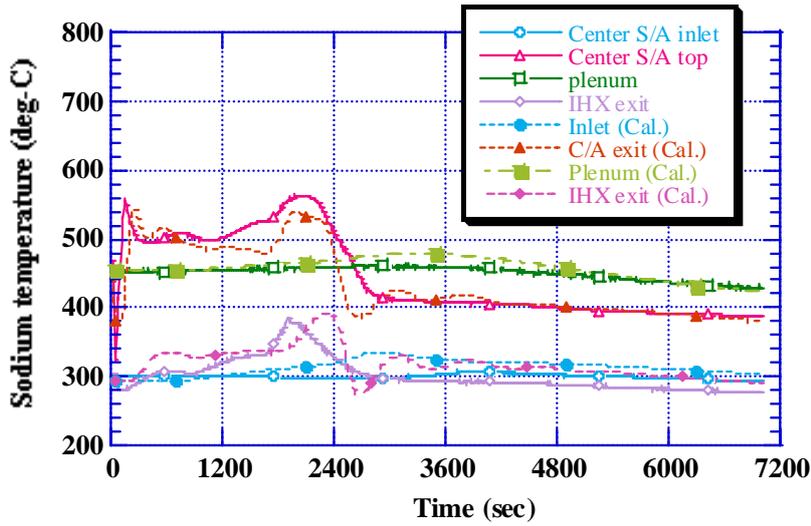


Fig. 4.11 Temperatures in primary loop in PRACS-2 test

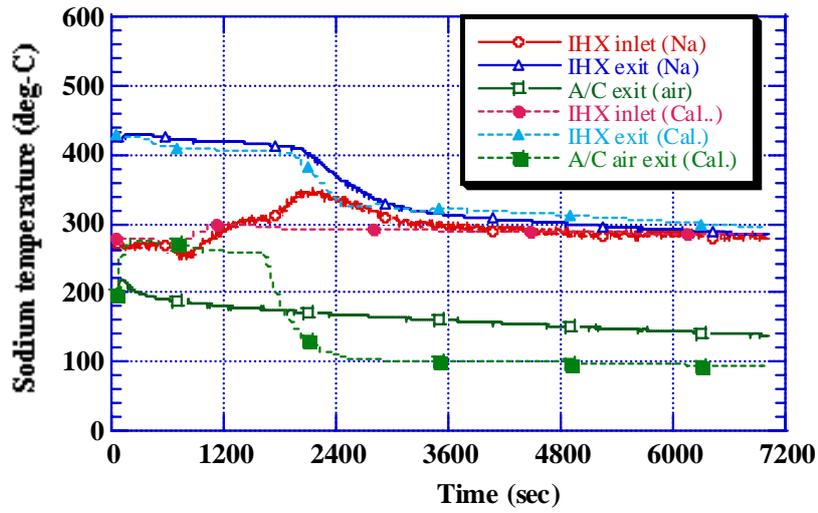


Fig. 4.12 Temperatures in secondary loop in PRACS-2 test

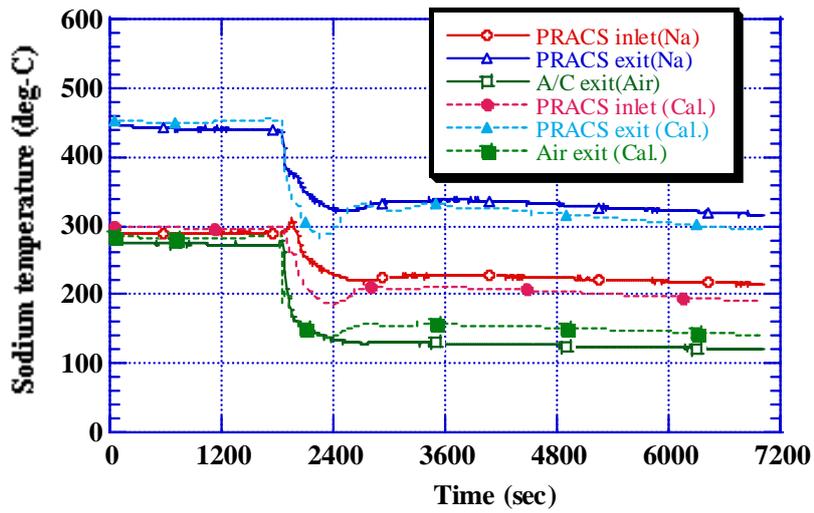


Fig. 4.13 Temperatures in PRACS in PRACS-2 test

## 5. 「もんじゅ」2次系自然循環試験解析

### 5.1 解析モデル体系

2.3 節に記したプラント体系をほぼ忠実に模擬して、プラントの挙動を解析する。**Fig. 5.1**に解析で使用したモデルを示す。「もんじゅ」の1次系と2次系は3ループのうちの1ループを模擬し、3次系はタービン系を取り去ったモデルとしている。この試験では、蒸気発生器前後の弁を全閉にしてナトリウムが流れ込まないようにしているため、蒸気発生器をモデル化する必要は無いが、配管からの放熱を考慮する必要があるため、モデルとしても残している。一次系の配管長さは、約110m、二次系配管長は最も短いBループでIHXから蒸気発生器過熱器まで約100m、蒸発器からIHXまでも約100mである。基本的には、**Table 2.1**と同じような表を準備して、解析体系の入力データとする。

空気冷却器は、通常は弁開度50%のバイパスラインを通じて、ナトリウムが約1.5m<sup>3</sup>/h流れている。また、空気冷却器は、ベーン・ダンパー開度を制御して、出口温度が325°Cになるようにしている。

解析では、前節で問題になった空気冷却器の特性が正しく予測できるのか、「もんじゅ」の循環系を解析コードがどの程度の精度で模擬できるかを検証するため、試験で操作が行われた1次系の循環ポンプ回転数、空気冷却器出口の止め弁、バイパス弁の開度について、操作情報をそのまま入力して評価した。具体的には、**Fig. 2.7**で示した条件をテーブル入力して解析コードに与えている。また、空気冷却器は、出口ナトリウム温度設定値を与えて制御されているため、解析でも試験時と同じように、試験開始から、6000秒は325°Cで、8400秒以降は315°Cの設定値をテーブルで与えている。1次系のポンプの速度が不規則に変化しているため、ポンプによる入熱も不規則となる。この値を正しくコードに与えないと、温度の挙動が大きすぎてしまう。定常計算の結果、1次系の流量が約6000m<sup>3</sup>/hの時のポンプ入熱は、1.05MWであると見積もられた。この値を基本にして、ポンプの回転数の2乗に入熱が比例するとして入力データを作成した。この温度になるように、PI制御回路を模擬してベーン・ダンパー開度を変化させ、空気の流れはプラントのダクト長さを解析コードに与え、発生する自然循環流による除熱を解析している。正確な制御定数は不明であるが、常識の範囲の値をコードに与えて解析した。

### 5.2 解析結果と試験結果の比較

**Fig. 5.2**に、空気冷却器の流量とバイパス弁の24時間の流量を示す。実線が試験結果であり、破線が解析結果を示す。定常を取得したときの流量すなわち時間0における流量は、試験の結果とほぼ同じであり、空気冷却器の弁が35%の開度を示しているときの流動が正しく再現されている。弁の開度を大きくするにしたがって、空気冷却器を通過する流量は多くなり、このときの挙動も正しく再現されているが、弁が全開したときの流量が、計測誤差を考慮しても試験の値を下回っている。弁の特性であるCv値は、「もんじゅ」に設けられているものと同じにしているため、全開時の弁の流動抵抗値が実際と変わっていることは無い。空気冷却器で生じたナトリウムの循環ヘッドは、2次系全体を循環させるわけであるが、2次系の自然循環計算に誤差が生じていると考えられる。バイパス流路の流量

に関しては、メインのラインの流量が大きくなって来ると、次第に減少してくる挙動、弁を 50%から 100%開度にしたときの流量の増加など良い精度で予測されている。

**Fig. 5.3** では、空気冷却器まわりの温度を比較している。中間熱交換器出口温度、空気冷却器出口温度、空気出口温度は 24 時間に亘って、10℃以内で試験結果をほぼ正しくトレースしていることが分かる。このため、PLANDTL の試験解析で問題になった空気冷却気の空気出口温度がうまく予測できていなかった点に関しては、問題は残るものの、実機の解析では大きな問題が無いことが分かる。

この解析では、ポンプの回転数が不規則に変化している場合の温度挙動がほぼ正しく予測されているため、温度差で生じる循環ヘッドは、ほぼ正しく予測されているはずである。このため、弁を全開したときの自然循環流量が低くなる理由は、2 次系の流動抵抗に関係していると考えられる。自然循環で流量が低下した場合の管摩擦係数は、層流の式で与えられているが、層流から乱流に遷移する特性に関して再調査する必要がある。また、蒸気発生器に向かうラインの弁のシートリークもゼロではないため、この流動によって全体の流れが増加していることも考えられる。

同じ試験に関して、SSC コードを用いての Fig. 5.3 に示す 10~13 時間に対応する解析が江沼一山口<sup>[11]</sup>によって報告されている。彼らの解析時間帯では、既に空気冷却器出口の弁操作は終了しており、ポンプの回転が定格から 60%、50%へと減速し、ポンプ入熱量が減っている状態であるが、試験結果をうまく予測できたことが報告されている。試験は、図に示すように 24 時間実施されており、弁操作によって大きな過渡が加えられており、コードの性能検証として長時間の解析をするのに適した試験であったが、上記報告では、違った観点からコードの性能を検証しようとしているため、試験の一部を解析したようである。

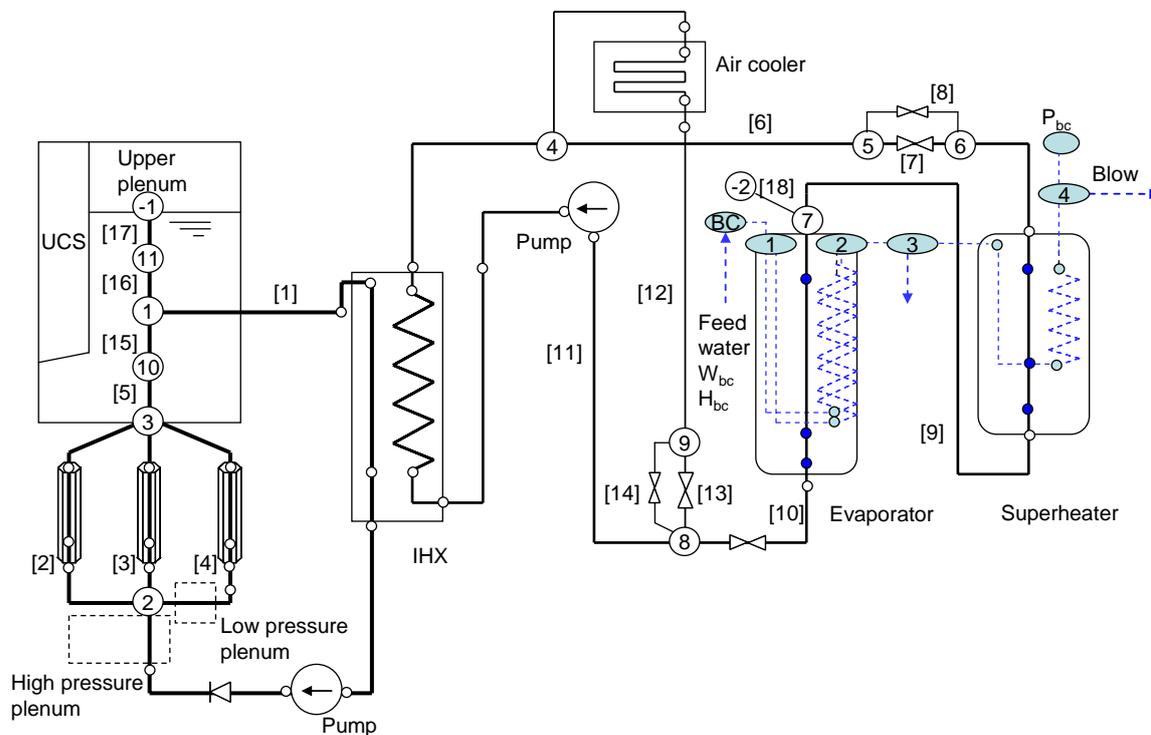


Fig. 5.1 Monju calculation model

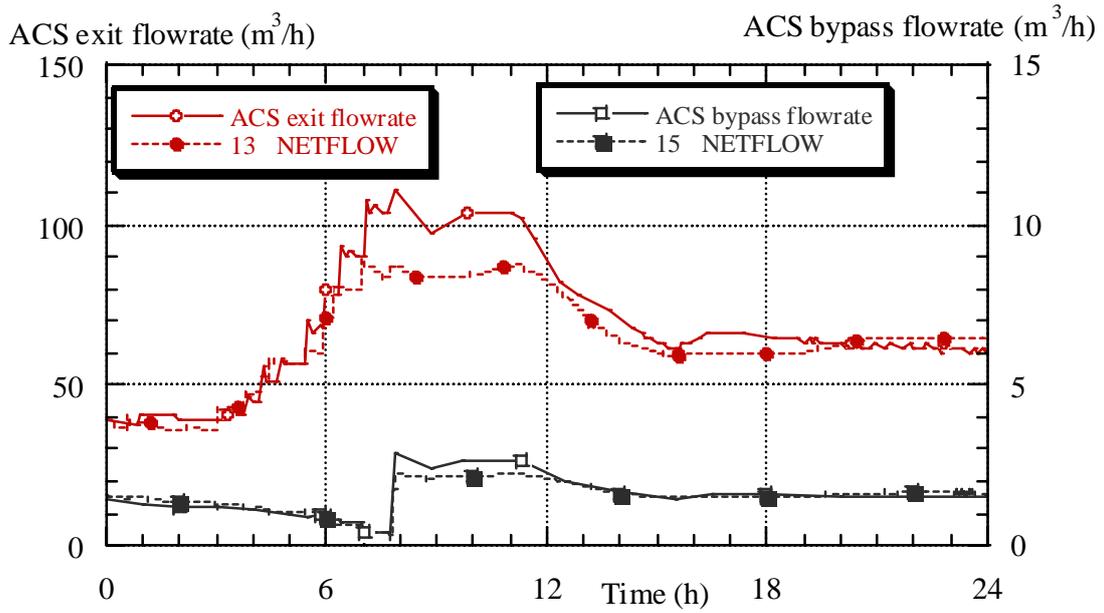


Fig. 5.2 Flow rate behavior of air cooler system in Monju secondary loop during natural circulation

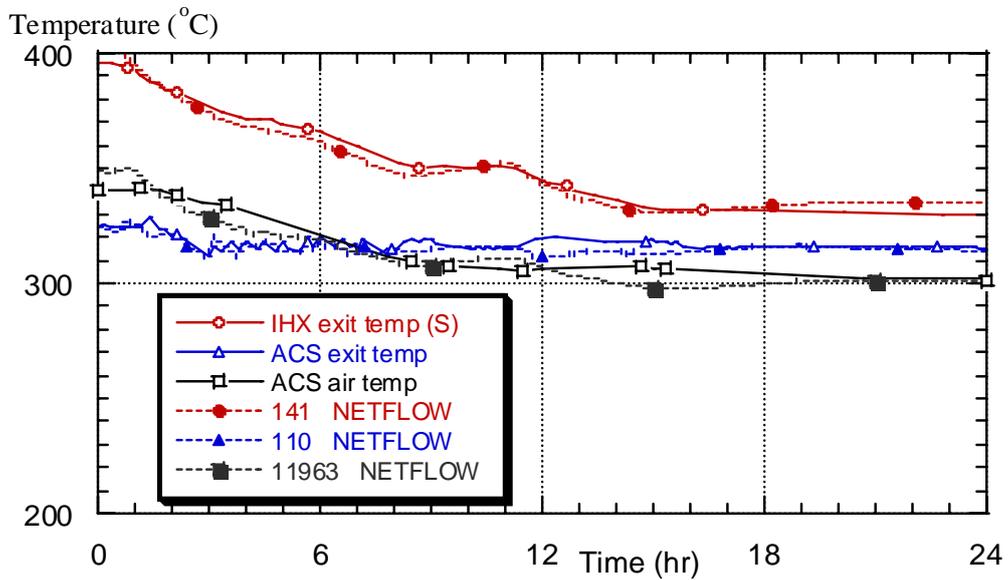


Fig. 5.3 Temperature behavior in Monju secondary loop during natural circulation

6. 「もんじゅ」タービントリップ試験解析

解析体系に関しては、前節の体系と全く同じである。初期条件が熱出力 45%であり、蒸気発生器が運転されている状況が異なる。プラントはトリップ後であっても複雑な制御がなされているが、トリップ後の流動挙動に関して、複雑な制御を考慮することなしにどの程度再現できるかの観点で実施した。タービントリップ時間、タービンバイパス弁の作動、空気冷却器の立ち上げなどは、試験のところに記載した条件を入力データとして与えた。トリップ後の崩壊熱は空気冷却器で除去され、過渡変化時の挙動に関して精度良く解析するためには、空気冷却器の制御方法に関して制御定数などを調べて入力データを作成する必要があるが、できる限り単純に解析するため、前節の解析で得た知見を基に、280℃に出口温度を制御することで模擬した。

解析結果と計測の比較を Fig. 6.1 に示す。計測結果は、塗りつぶした記号を実線で結んで示しており、解析結果は計測結果と同じ種類の記号を破線で結んでいる。P は 1 次系、S は 2 次系を表す。流量に関しては、1 次系の流量は変動まで含めてほぼ挙動を模擬しているが、2 次系の流量に関しては、主ポンプがトリップしてポニーモーターで駆動されている場合の流量制御に、解析上のノイズが入っており、この点を検討しなければならない。

温度に関しては、NETFLOW コードは、1 次系 IHX 入口温度、2 次系 IHX 出口温度計測結果を適切に予測しており、2 次系の温度が 1 次系よりもゆっくりと低下する挙動が正しく予測されている。1 次系 IHX 出口温度および 2 次系の IHX 入口温度に関しても、実測をよくトレースしている。本解析では、炉心上部プレナムの詳細化モデルは使用せず、単純に大口径の配管として扱っているが、炉心部上部が冷却されていない場合には、このモデルで十分挙動が予測できることが分かった。

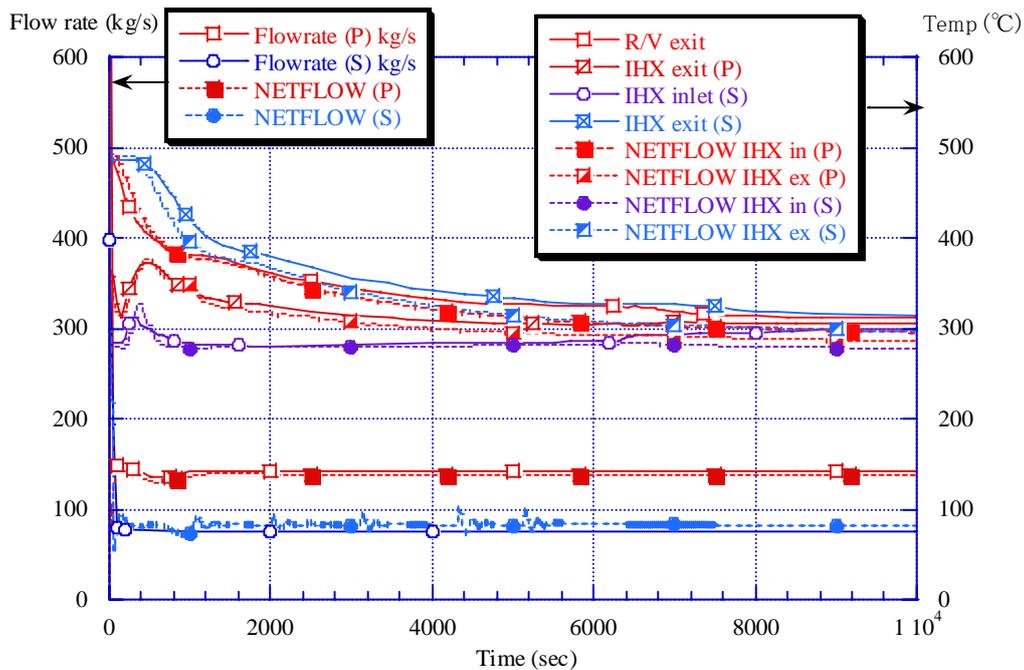


Fig. 6.1 Monju turbine trip test at 40% electric power

## 7. 結 言

軽水体系、液体金属体系どちらでも使用できる汎用の高速プラント動特性解析コード NETFLOW を 50MW 蒸気発生器での定常試験、ナトリウムループ、「もんじゅ」などを用いて行なわれた自然循環試験解析に適用し、以下の結論を得た。

(1) NETFLOW コードは、蒸気発生器内部の温度分布について、定常試験結果をほぼトレースできることが分かった。解析で明確になった点は、ヘリカルコイル部が終わった伝熱管部を適切に取り扱わないと、温度分布の精度が上がらないことである。

(2) NETFLOW コードで、高速炉の過渡流動伝熱を実験するための装置である PLANDTL の 1 次系、2 次系、空気冷却系、崩壊熱除去系を全て模擬した体系の 1 時間の過渡解析を実施した。解析された流動伝熱の結果は、実験結果をほぼトレースすることができた。しかしながら、精度を向上させるためには、ナトリウムの流れ方向の伝熱メカニズムを考慮できるモデル化を行わなければならない事も課題として明確になった。

(3) もんじゅの空気冷却器が自然循環状態で運転されている場合の弁開度を手動で調節した場合の 2 次系流量、温度の挙動をほぼ予測することができた。この解析による課題は、系統の圧力損失の評価方法について検討することである。

(4) もんじゅのタービントリップ試験を解析し、解析コードが 1 次系から 3 次系まで模擬した体系で挙動を良い精度で予測できることを示した。

(5) NETFLOW コードを用いて、もんじゅの 1 次系からタービンを除く 3 次系までをモデル化した体系を、Windows XP 1.7GHz パソコンを用いて実施し直したところ、1000 秒の現象は約 1 秒で解析でき、コードの特徴が発揮できることが明らかになった。

## 参考文献

- [1] H. Mochizuki and Y. Hayamizu, Development of Transient Analysis Code for Primary Cooling System coupled with Reactor Auxiliary Cooling Systems, NUPTHO-3, Korea, (1988).
- [2] H. Mochizuki et al., Core Coolability with Heavy Water Moderator of ATR in Situations Beyond the Design Basis Accidents, Nuclear Engineering and Design, 144 (1993), pp.293-301.
- [3] H. Mochizuki, "Flow Instabilities in Boiling Channels of Pressure-Tube-Type Reactor", Nuclear Engineering and Design, 149 (1994), pp.269-277.
- [4] H. Mochizuki, "Density Wave Oscillation Beyond Dryout Under Forced Circulation", Proc. of ICONE-4, New Orleans, USA, Vol. 1 Part A, (1996), pp.253-259.
- [5] H. Mochizuki, Safety Research Relevant to Thermal Hydraulics of the Advanced Thermal Reactor, IAEA-TECDOC-738, (1994), pp.58-68.
- [6] H. Mochizuki and M. Kishida, Network Calculation of System Integration Experiment with a Sodium Loop under Natural Circulation Condition, ICONE-6, ICONE-6127, San Diego, USA (1998).
- [7] F. Manabe et al., Experimental Studies of Heat Transfer Performance with the No.2 50 MW Steam Generator in Japan, Proc. of the Topical Meeting on R&D, Fabrication and Operating Experience on Steam Generators for LMFBR's, Genoa, Italy, (1981).
- [8] 桃井一光、他 3 名、高速炉の自然循環崩壊熱除去時のシステム間相互作用に関する試験研究 - 炉心及び主冷却系の過渡熱流動現象の解明 -, PNC TN9410 96-280, (1996).
- [9] H. Kamide, et al., Experimental Study of Core Thermohydraulics in Fast Reactors during Transition from Forced to Natural Circulation - Influence of Inter-Wrapper Flow -, NURETH-8, Kyoto Japan, (1997).
- [10] 宮川 明、他 2 名、高速増殖炉もんじゅの建設 (その 82) プラントトリップ時特性評価試験結果、日本原子力学会「1996 秋の大会」、C10、東北大。
- [11] 江沼康弘、山口彰、プラント動特性解析コード SSC の検証－自然循環解析－、日本原子力学会「1994 春の年会」、H30、筑波大。