

JAERI - M  
91-076

PIUS型炉における主循環ポンプのフィードバック制御

1991年5月

藤井 幹也\*・安濃田良成・村田 秀男  
与能本泰介・田坂 完二\*\*・久木田 豊

JAERI-Mレポートは、日本原子力研究所が不定期に公刊している研究報告書です。  
入手の間合わせは、日本原子力研究所技術情報部情報資料課（〒319-11茨城県那珂郡東海村）あて、お申しこしてください。なお、このほかに財団法人原子力弘済会資料センター（〒319-11 茨城県那珂郡東海村日本原子力研究所内）で複写による実費領布をおこなっております。

JAERI-M reports are issued irregularly.

Inquiries about availability of the reports should be addressed to Information Division, Department of Technical Information, Japan Atomic Energy Research Institute, Tokai-mura, Naka-gun, Ibaraki-ken 319-11, Japan.

© Japan Atomic Energy Research Institute, 1991

---

編集兼発行 日本原子力研究所  
印刷 榊原原子力資料サービス

PIUS型炉における主循環ポンプのフィードバック制御

日本原子力研究所東海研究所原子炉安全工学部

藤井 幹也\*・安濃田良成・村田 秀男

与能本泰介・田坂 完二\*\*・久木田 豊

(1991年4月3日受理)

PIUS型炉においては、1次系とポイズン系とを隔離する密度界面を安定に維持することが重要である。筆者らは、下部密度ロック部(下部ハニカム部)における差圧が密度界面の位置制御に対し有効な指標になるものと考え、下部密度ロック全長間差圧による循環ポンプ回転数のフィードバック制御システムを開発し、PIUS型炉を原理的に模擬した大気圧実験装置を使用して実験的研究を進めてきた。

本報では、ポンプ回転数を比例制御した場合(すなわち、下部密度ロック差圧の設定値からのずれに比例してポンプ回転数を増減した場合)に見られた制御の不安定性(振動挙動)に関する解析の結果、並びにこれに対処するため制御ロジックに付加した減衰項が制御性に与える影響を実験により調べた結果について述べる。

実験の結果、比例制御に伴う系の振動現象は、循環ポンプの機械的遅れに起因するU字管マノメータ振動であることがわかった。また、減衰項の付加により、この振動はほぼ完全に抑制された。この制御性の向上に伴い、定常並びにスタートアップや出力上昇といった通常運転時の操作が容易に実施できることが確認できた。更に、蒸気発生器2次側の給水喪失事故を模擬した実験では、ポンプ回転数に上限を与えることにより炉の受動的停止機能が確保できることを確認した。

Feedback Control of Primary Circulation Pump of PIUS-Type Reactor

Mikiya FUJII<sup>\*</sup>, Yoshinari ANODA, Hideo MURATA  
Taisuke YONOMOTO, Kanji TASAKA<sup>\*\*</sup> and Yutaka KUKITA

Department of Reactor Safety Research  
Tokai Research Establishment  
Japan Atomic Energy Research Institute  
Tokai-mura, Naka-gun, Ibaraki-ken

(Received April 3, 1991)

In operating the PIUS-Type reactor, it is required to keep stationary density interfaces between the primary loop hot water and the poison tank cold, borated water by maintaining pressure balance between the primary-loop and the poison-tank. The authors have developed a primary circulation pump speed control system and tested it in small-scale experiments. This control system regulates the pump speed based on measurements of the density lock differential pressure which is proportional to the elevation of the interface in the density lock. This pump speed control facilitated the normal plant operation which included core power changes.

However, the elevation of the density interface indicated oscillatory behavior when the pump speed was regulated as a linear function of the density lock differential pressure. The mechanism responsible for such oscillatory behavior was found to be manometric oscillations that could be eliminated by adding a damping term to compensate for the mechanical delay of the primary pump speed. The passive shutdown function of the reactor was retained by setting an upper limit to the pump speed. This was confirmed in a loss-of-feedwater abnormal transient test.

Keywords: Inherent Safety, PIUS-Type Reactor, Operational Transient

---

\* On leave from Sumitomo Heavy Industries, LTD.

\*\* Nagaya University

## 目 次

1. 序 .....	1
2. 実験装置概要 .....	2
3. 装置特性評価実験 .....	2
3.1 炉心部圧力損失特性実験 .....	2
3.2 自然循環特性実験 .....	3
3.3 定常運転時特性実験 .....	3
4. 循環ポンプ回転数フィードバック制御 .....	5
4.1 フィードバック制御実験 .....	5
4.2 フィードバック制御実験解析 .....	6
5. 運転操作模擬実験 .....	7
5.1 スタートアップ模擬実験 .....	7
5.2 出力変更実験 .....	8
6. 給水喪失模擬実験 .....	8
7. 実験装置の問題点 .....	9
8. 結 言 .....	9
参 考 文 献 .....	10
付録1 系内熱バランスについて .....	33
付録2 実験条件一覧 .....	34

## Contents

1. Introduction .....	1
2. Test Apparatus .....	2
3. Characteristic Test .....	2
3.1 Pressure Loss in Core .....	2
3.2 Natural Circulation .....	3
3.3 Steady State Operation .....	3
4. Feedback Control of Primary Pump Speed .....	5
4.1 Feedback Control Test .....	5
4.2 Analysis of Feedback Control Test .....	6
5. Normal Operation Simulation Test .....	7
5.1 Startup Simulation .....	7
5.2 Power Ramping Test .....	8
6. Loss-of Feedwater Simulation Test .....	8
7. Problem on Test Apparatus .....	9
8. Conclusion .....	9
References .....	10
Appendix 1 Heat Balance in Primary System .....	33
Appendix 2 Summary of Test Conditions .....	34

## 1. 序

次世代の原子炉として、PIUS (Process Inherent Ultimate Safety) 型炉<sup>(1)</sup>や I SER (Intrinsically Safe and Economical Reactor)<sup>(2)</sup>に代表される「固有安全炉」が提唱されている。PIUS型炉は、低温のボロン水で満たされたプール（以下、ボイズンタンクと称す。）に炉心及び1次系ループを沈めた構造を持つ加圧水型原子炉である。

1次系は、炉心上下の垂直部（以下、密度ロックと称す。）を介してボイズン側と接続されており、原子炉運転中は1次系循環ポンプの吐出圧を調整して1次系の差圧とボイズンタンク側の静水頭をバランスさせ、安定な密度界面を密度ロック内に形成させることにより1次系へのボイズンの侵入を阻止している。また、密度ロック内には、密度界面の擾乱による混合を抑制するために内部構造物（ハニカム構造体）が設置されている（Fig.1.1 参照）。

この炉形式は、受動的原子炉停止能力により特徴づけられる。すなわち、1次系水の異常な温度上昇が起ると1次系とボイズン系との差圧バランスが崩れ、これに伴い密度ロック部より炉心部へのボイズン流入が生じることにより炉心の反応は停止する。このように、異常時の原子炉停止が動的機器や人的操作によらず、重力による冷却水の流動のみによって達成されるため、高い安全性が期待できる。一方、スタートアップや出力上昇といった1次系水温度が経時的に変化するような運転中の操作においては、ボイズンが不用意に流入することを防ぐために、受動的停止能力を損わない範囲で循環ポンプの回転数を自動制御する手段を講じる必要がある。

筆者らは、PIUS型炉の主要構成要素を模擬した小規模実験装置を使用して、下部密度ロック差圧の計測値に基づく循環ポンプ回転数フィードバック制御の開発及びその有効性の調査を行ってきた。<sup>(3)</sup>本報では、この制御システムの適用性を、スタートアップや出力上昇及び給水喪失事故といった通常運転時の操作並びに運転時の異常な過渡変化に関して実験的に調べた結果について報告する。

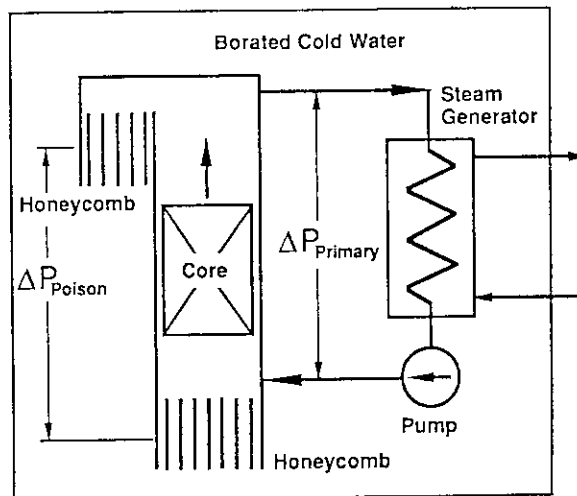


Fig. 1.1 Schematic of PIUS Reactor

## 2. 実験装置概要

実験装置の系統図をFig. 2.1に示す。本装置における圧力容器を含めた1次系総容積は0.06 m<sup>3</sup>である。炉心は外径10 mmの電気ヒーター棒28本と非加熱棒61本で構成され、内径150 mm、長さ1 mのバイレックスガラス製圧力容器内に内蔵されている。最大炉心出力は28 kWである。炉心断面概略図をFig. 2.2に示す。炉心部での流動抵抗を模擬するため、炉心入口に流路面積可変オリフィスを設置した。1次系ループは上下2つの密度ロックを介してポイズンタンクと接続されており、各密度ロック内には、密度境界における擾乱を抑制するためにハニカム構造体を設置した。下部ハニカムは、可視化観察が可能なように透明ポリカーボネイト製であり、内径31 mm、長さ300 mmの内管を9本束ねたものである。これをFig. 2.3に示す。上部ハニカムは同寸法の円管37本で構成され、内径300 mmのポイズンタンクの上部に設置されている。

実際のPIUS炉では、蒸気発生器により原子炉1次系の除熱を行うが、本実験装置では、蒸気発生器の代わりに水の強制循環による熱交換器を用いている。また、ポイズンタンク内にも熱交換器を設け温度制御を行っている。これらの熱交換器によって昇温した2次系水の最終的除熱は、クーラーユニットによって行っている。実験装置各構成機器の仕様をTable 2.1に示す。

主要な計測点はFig. 2.1に示す通りである。流量は、1次系循環ポンプ出口、ポイズンタンクと下部ハニカムを継ぐ配管及び1次系除熱タンク、ポイズンタンク内クーラーへの給水ラインにおいて測定した。差圧は、圧力容器の上下端及び下部ハニカム全長間にわたって測定した。また、1次系、ポイズン系並びに冷却水タンクの6ヶ所において温度分布を測定した。

実験は、圧力容器頂部に接続した加圧器を大気開放とし、ほぼ大気圧下において行った。各構成要素の作動流体には、すべて純水を使用しており、したがってボロンの1次系への侵入並びにこれに伴う炉心出力の変化は模擬していない。

## 3. 装置特性評価実験

### 3.1 炉心部圧力損失特性実験

実験装置において、炉心部での流動抵抗を模擬するために炉心入口部に流路面積可変オリフィスを設置した。本オリフィスは、その開口部面積を全開（内径150 mm）から全閉まで変化させることができる。

絞り面積比 $\beta = 0.1, 0.25, 0.4, 0.7$ の4通りについて、各 $\beta$ における流量と圧力損失の関係を実験により調べた。この結果をTable 3.1.1及びFig. 3.1.1に示す。圧力損失は、差



## 2. 実験装置概要

実験装置の系統図をFig. 2.1に示す。本装置における圧力容器を含めた1次系総容積は0.06 m<sup>3</sup>である。炉心は外径10 mmの電気ヒーター棒28本と非加熱棒61本で構成され、内径150 mm、長さ1 mのバイレックスガラス製圧力容器内に内蔵されている。最大炉心出力は28 kWである。炉心断面概略図をFig. 2.2に示す。炉心部での流動抵抗を模擬するため、炉心入口に流路面積可変オリフィスを設置した。1次系ループは上下2つの密度ロックを介してポイズンタンクと接続されており、各密度ロック内には、密度境界における擾乱を抑制するためにハニカム構造体を設置した。下部ハニカムは、可視化観察が可能なように透明ポリカーボネイト製であり、内径31 mm、長さ300 mmの内管を9本束ねたものである。これをFig. 2.3に示す。上部ハニカムは同寸法の円管37本で構成され、内径300 mmのポイズンタンクの上部に設置されている。

実際のPIUS炉では、蒸気発生器により原子炉1次系の除熱を行うが、本実験装置では、蒸気発生器の代わりに水の強制循環による熱交換器を用いている。また、ポイズンタンク内にも熱交換器を設け温度制御を行っている。これらの熱交換器によって昇温した2次系水の最終的除熱は、クーラーユニットによって行っている。実験装置各構成機器の仕様をTable 2.1に示す。

主要な計測点はFig. 2.1に示す通りである。流量は、1次系循環ポンプ出口、ポイズンタンクと下部ハニカムを継ぐ配管及び1次系除熱タンク、ポイズンタンク内クーラーへの給水ラインにおいて測定した。差圧は、圧力容器の上下端及び下部ハニカム全長間にわたって測定した。また、1次系、ポイズン系並びに冷却水タンクの6ヶ所において温度分布を測定した。

実験は、圧力容器頂部に接続した加圧器を大気開放とし、ほぼ大気圧下において行った。各構成要素の作動流体には、すべて純水を使用しており、したがってボロンの1次系への侵入並びにこれに伴う炉心出力の変化は模擬していない。

## 3. 装置特性評価実験

### 3.1 炉心部圧力損失特性実験

実験装置において、炉心部での流動抵抗を模擬するために炉心入口部に流路面積可変オリフィスを設置した。本オリフィスは、その開口部面積を全開（内径150 mm）から全閉まで変化させることができる。

絞り面積比 $\beta = 0.1, 0.25, 0.4, 0.7$ の4通りについて、各 $\beta$ における流量と圧力損失の関係を実験により調べた。この結果をTable 3.1.1及びFig. 3.1.1に示す。圧力損失は、差

圧計DPX-1において測定した。差圧計は零調時に差圧測定スパン(1.3m)の静水頭が付加されている状態で0を指示するように調整がなされているため、実験時の温度が零調時と異なった場合、差圧指示値に対して温度変化に伴う静水頭差を補正する必要がある(Table 3.1.1参照)。

本実験においては、ボイズンタンクと圧力容器下部プレナムとを継なく配管中のバルブCV-2を閉として、1次系ループにおいてのみ水を循環させた。

### 3.2 自然循環特性実験

ボイズン系ループ(ボイズンタンク→下部密度ロック→下部プレナム→炉心→上部プレナム→上部密度ロック→ボイズンタンク)において自然循環流れが生じた時の流動特性を調べた。1次系ループのバルブCV-1を閉とし、炉心出力を5~25kWまでステップ状に変化させ、各出力時の自然循環流量をFX-2において測定した。尚、ボイズンクーラーへの2次側冷却水は、30℃、1.5kg/s一定に維持した。本実験は、流路面積可変オリフィスの絞り面積比 $\beta$ を0.3, 0.5, 0.7の3通りに対して実施したが、自然循環流量に対する絞り面積比の有意な影響は認められなかった。 $\beta=0.7$ とした時の実験結果を及びTable 3.2.1及びFig. 3.2.1に示す。

### 3.3 定常運転時特性実験

炉心出力20kWにおける定常運転を行い、系内の差圧バランスを確認した。定常運転時には、バルブCV-1、CV-2を全開とし、冷却水の温度、流量及び炉心出力を一定としたうえで、下部密度ロック(ハニカム)全長間差圧DPX-2の設定差圧が維持されるようポンプ回転数に対してフィードバック制御を行った。フィードバック制御については次章で述べる。

実験時における流量、差圧、循環ポンプ回転数、系内温度等をFig. 3.3.1、Fig. 3.3.2に示す。また、これらのデータを系統図に記入したものをFig. 3.3.3に示す。

Fig. 3.3.4に示す各構成機器、配管の相対位置より各部での静圧を計算した。これを下部ハニカム上端との相対高さに対してプロットしたものをFig. 3.3.5、Fig. 3.3.6に示す。圧力の基準点は、大気開放された加圧器における水面である。以下に、下部ハニカム上端(EL.=0.0)におけるボイズンループ(Fig. 3.3.4での③-④-⑤-⑥-①)と圧力容器(同図③-②-①)との水頭差を計算した結果と圧力容器全長間差圧DPX-1の値との関係を示す。

Fig. 3.3.4における系内各温度 $T_1 \sim T_7$ は、系統図Fig. 2.1の熱電対番号と対応しており、以下の通りである。

- $T_1$  : 圧力容器下部プレナム(下部ハニカム下方)温度
- $T_2$  : 圧力容器上部プレナム(炉心出口)温度
- $T_3$  : ボイズンタンク下部温度
- $T_4$  : ボイズンタンク上部(上部ハニカム上方)温度

- $T_5$  : 循環ポンプ入口 (炉心入口) 温度  
 $T_6$  : 2次側給水温度  
 $T_7$  : 加圧器内温度 (室温)

これらの系内温度並びに対応する水の密度  $\rho_1 \sim \rho_7$  は以下の通りである。

$$\begin{aligned}
 T_1 = 32^\circ\text{C} \quad \rho_1 = 995.1 \text{ kg/m}^3, \quad T_2 = 81^\circ\text{C} \quad \rho_2 = 971.0 \text{ kg/m}^3 \\
 T_3 = T_1 \quad \rho_3 = \rho_1, \quad T_4 = 56^\circ\text{C} \quad \rho_4 = 985.2 \text{ kg/m}^3 \\
 T_5 = 69^\circ\text{C} \quad \rho_5 = 978.3 \text{ kg/m}^3, \quad T_6 = 32^\circ\text{C} \quad \rho_6 = 995.1 \text{ kg/m}^3 \\
 T_7 = 15^\circ\text{C} \quad \rho_7 = 999.2 \text{ kg/m}^3
 \end{aligned}$$

ポイズンループ内の温度分布 (静水頭) から求めた下部ハニカム上端での静圧 (大気圧基準)

$$\begin{aligned}
 & g \{ \rho_7 \times 3.16 - 1/2 (\rho_2 + \rho_4) \times 2.67 + \rho_4 \times 0.75 \\
 & + \rho_3 \times 0.65 + \rho_1 \times (2.15 + 0.42) - 1/2 (\rho_1 + \rho_5) \times 0.42 \} \\
 & = 39932 \text{ Pa} \qquad \text{---①}
 \end{aligned}$$

圧力容器内の温度分布 (静水頭) から求めた下部ハニカム上端での静圧 (大気圧基準)

$$\begin{aligned}
 & g \{ \rho_7 \times 3.16 + \rho_2 \times 0.105 + 1/2 (\rho_2 + \rho_5) \times 0.33 + \rho_5 \times 0.445 \} \\
 & = 39361 \text{ Pa} \qquad \text{---②}
 \end{aligned}$$

$$\text{両者の差は} \quad \text{①} - \text{②} = 571 \text{ Pa} \qquad \text{---③}$$

これは、以下に示すように、炉心 (入口オリフィスを含む) の流動圧損によるものである。

$$\text{圧力容器全長間差圧 DPX-1 (Fig. 2.1, Fig. 3.3.3 参照)} \quad 265 \text{ Pa} \qquad \text{---④}$$

この値は、水温  $10^\circ\text{C}$ 、ポンプ停止時の状態を 0 としたものである。このときの DPX-1 に加わる静水頭は、

$$999.8 \text{ kg/m}^3 \times g \times 1.33 \text{ m} = 12737 \text{ Pa} \qquad \text{---⑤}$$

一方、本実験の定常試験時の DPX-1 に加わる静水頭は、

$$\begin{aligned}
 & g \{ \rho_2 \times 0.105 + 1/2 (\rho_2 + \rho_5) \times 0.33 + \rho_5 \times 0.445 \\
 & + 1/2 (\rho_1 + \rho_5) \times 0.42 \} = 12479 \text{ Pa} \qquad \text{---⑥}
 \end{aligned}$$

したがって、DPX-1 の差圧指示値④を水温変化に伴う静水頭差  $258 \text{ Pa}$  [⑤ - ⑥] で補正すると、流動圧損は、

$$265 \text{ Pa} + 258 \text{ Pa} = 523 \text{ Pa} \qquad \text{---⑦}$$

となる。これは③にほぼ等しい。すなわち、ポイズンループと1次系との温度差 (密度差) による水頭差③が炉心の流動圧損と釣り合うことによって、ハニカム内の界面の位置が一定に保たれていることがわかる。

## 4. 循環ポンプ回転数フィードバック制御

### 4.1 フィードバック制御実験

PIUS型炉における密度ロックでの密度界面は、定常状態では1次系水とボロン水とを隔離する機能を果たしている。この時、1次系とボイズン系との差圧はポンプヘッドによりバランスが保たれているが、炉心出力変更等の過渡温度条件時には、ポンプヘッドを常に調節する必要がある。筆者らは、密度界面を安定に維持するため、下部密度ロック（ハニカム）全長間差圧信号によるポンプ回転数制御方式を開発し、その有効性を調査してきた。

下部密度ロック差圧は、密度界面の厚さが下部ハニカム長さよりも短ければ、ハニカム内の密度界面位置制御に適した指標となる。Fig. 4.1.1 に示す様に、密度界面が下部ハニカム中央部に形成されている時を定常状態とすると、この時の下部密度ロック全長間差圧（ $\Delta P_n$ ）は、密度ロック内の温度分布、すなわち密度分布から求めることができる。例えば、図の様にボロン等の低温水の侵入により密度界面が上方に移動した場合、密度分布の変化に伴って測定差圧（ $\Delta P$ ）は上昇する。本制御方式では、この時の差圧偏差（ $\Delta P - \Delta P_n$ ）をポンプ回転数にフィードバックし、回転数を上昇させることにより密度界面の位置を目標差圧に対応する位置（中立点）まで押し下げる。逆に、高温1次系水の侵入により密度界面が中立点より下方に移動し測定差圧が低下した場合には、ポンプ回転数を低下させる。

実験で使用したポンプ回転数制御は次式で表わされる。

$$\omega_{\text{con}} = \omega + K_1(\Delta P - \Delta P_n) + K_2 \frac{d\Delta P}{dt} \quad (1)$$

ここで、 $\omega$ は測定ポンプ回転数（Hz）、 $\Delta P$ は下部密度ロックでの測定差圧（mmH<sub>2</sub>O） $K_1, K_2$ はそれぞれ比例及び微分ポンプ回転数制御定数（ $K_1=0.2, K_2=1.0$ ）である。 $\Delta P_n$ は入力する目標差圧であり、密度界面が下部ハニカム中央（中立点）に位置する時の差圧に相当する。 $\omega_{\text{con}}$ は制御システムの出力値であり、この値によりポンプ回転数が調整される。

実炉において、上述の様な制御方式を適用する際には、ポンプ回転数変化に対する1次系流体密度変化の動的なシステム応答解析を行うことが必要であるが、本実験においては制御ロジックの定数はいずれも経験的に定めた。

本装置による実験の開始当初、密度ロック差圧変化に比例したポンプ回転数制御を行ったが、この場合、系の振動に対して制御の応答は不安定なものとなることがわかった。そこで、減衰項（ $K_2 \frac{d\Delta P}{dt}$ ）を付加したところ、システム応答は改善され密度界面が安定に維持されるようになった。

Fig. 4.1.2 に1次系循環流量に対するポンプ回転数とポンプヘッドの関係を示す。この時の流路面積可変オリフィスの絞り面積比 $\beta$ は0.1であり、本報で述べる一連の実験は、この絞り条件のもとで実施した。

Fig. 4.1.3 に減衰項の有無が系の制御安定性に及ぼす影響を調べた結果を示す。

本図は、定常運転時において下部密度ロック目標差圧 ( $\Delta P_{\text{ロ}}$ ) をステップ状に変化させ、中立点を保っている界面を強制的に変動させた時の下部密度ロック差圧の測定値及びポンプ回転数の挙動を示している。比例ポンプ回転数制御のみでは、外乱を与えた結果、系は増幅を伴う振動応答を示す。これに対し、減衰項を付加した場合、この振動応答がほぼ完全に抑制されているのがわかる。尚、実験は炉心出力 7.5 kW、1 次系循環流量 0.7 kg/s の条件で行い、図における下部密度ロック差圧は、系内均一温度条件 (30 °C) における差圧からの偏差で示されている。

#### 4.2 フィードバック制御実験解析

先に述べた様に、ポンプ回転数制御ロジックに減衰項を付加しないで制御した場合、下部密度ロック差圧は差圧設定値の変化に対し振動的な挙動を示した。この時の振動周波数は  $5.0 \times 10^{-3} \sim 5.7 \times 10^{-3}$  Hz であった。これらの周波数は、ポイズン系と圧力容器との間の U 字管マノメータ振動の固有周波数とはほぼ一致する。すなわち、Fig. 4.2.1 に示す系の固有振動数は次式で表される。

$$f = \frac{1}{2\pi} \sqrt{g(\rho_c - \rho_H)(1 + A_1/A_2) / \left( \rho_c \int_1^2 \frac{A_1}{A} ds + \rho_H \int_2^1 \frac{A_1}{A} ds \right)} \quad (2)$$

$$\int_1^2 \frac{A_1}{A} ds = H_1 + \frac{A_1}{A_3} L_1 + \frac{A_1}{A_2} H_2 + Z_1 - \frac{A_1}{A_2} Z_2 \quad (3)$$

$$\int_2^1 \frac{A_1}{A} ds = H_3 + \frac{A_1}{A_3} L_2 + \frac{A_1}{A_2} H_4 - Z_1 + \frac{A_1}{A_2} Z_2 \quad (4)$$

ここで  $\rho_H$ 、 $\rho_c$  はそれぞれ高温、低温側流体の平均密度である。系内の密度分布や流路面積変化は流体慣性項の計算において考慮した。上式では、流量変化に伴う高温側流体密度の変化は無視している。これは、1 次系内圧力損失の大部分を占めるオリフィス部での圧力損失に対し、流量変化に伴う 1 次系静水頭の変動は非常に小さいためである。

式 (2) で示す様に、高温側と低温側との密度差の増大は固有周波数の増加をもたらす。系の固有周波数の測定値と計算値との比較を Table 4.2.1 に示す。測定は、一定の比例制御定数を用い、減衰項を削除して行った。測定周波数に対する温度変化 (密度変化) の影響は、計算結果とほぼ一致する。測定データと計算値との相違は、計算において考慮しなかった高温側での流体温度分布に起因するものと考えられる。

結論として、下部密度ロック差圧の測定値に基づくポンプ回転数制御は、系を安定させたが、ポンプの機械的遅れに起因するU字管マンメータ振動の固有周波数を有する系特有の振動を除去することができなかった。これは、ポンプ回転数が制御信号に対して機械的な遅れを有するためである。しかし、前述のように微分項を制御ロジックに付加することにより、このような振動を抑制することができた。

## 5. 運転操作模擬実験

### 5.1 スタートアップ模擬実験

ポンプ回転数フィードバック制御システムを用いて、スタートアップ模擬実験（炉心出力を0から一定値まで上昇させる実験）を行った。下部ハニカム差圧、ポンプ回転数、炉心出力、ポイズンタンクから1次系への流量、1次系循環流量及び1次系、ポイズン系への冷却水流量をFig. 5.1.1に、また、装置内の流体温度をFig. 5.1.2に示す。

実験は、ポイズン系、1次系及び両ループクーラーへの冷却水の温度を全て30℃の均一温度条件にした状態から開始した。実験開始時の初期定常状態（炉心出力=0）においては、1次系循環ポンプは手動により最小回転数(10Hz)で運転し、フィードバック制御システムは不作動とした。この間、ポンプ回転数が0でないため、下部ハニカムを通過して1次系からポイズン系への流れが生じている。

炉心出力を7.5kWまでランプ状に上昇させた結果、1次系温度の上昇に伴い圧力容器の差圧が低下し、下部ハニカムを通過する流れが減少して行く。ここで、圧力容器の差圧は、静水頭、系内摩擦圧力損失、形状変化圧力損失の和である。一方、ポイズン系における差圧は、低温静止水の静水頭である。実験開始から15分後、両ループ間差圧の増加によって流れ方向の逆転（ポイズン系から1次系への流れ）が生じた時点で、下部密度ロック目標差圧  $-2\text{ Pa}$  を設定してフィードバック制御を行った。この結果、下部密度ロック差圧はすみやかに設定値に収束し、下部ハニカムを通過する流れは停止した。ポンプ回転数は、1次系流体温度の上昇に伴って、1次系とポイズン系との差圧バランスを保ちつつ上昇した。

密度界面を下部ハニカムの中央付近に維持するために採用されるべき下部密度ロック差圧の設定値は、密度界面がハニカム全長より十分に小さければ、高温、低温側流体密度より容易に計算できる。炉心出力7.5kW時の定常運転における下部密度ロック内の温度分布をFig. 5.1.3に示す。

本実験における目標差圧の設定は、予め予想される定常時の炉心入口温度とポイズン温度から計算した値（ $-2\text{ Pa}$ ）に基づいて行なった。この結果、Fig. 5.1.1に示すように、ポンプ回転数は急激に上昇した後一旦下降し、再び上昇して行くのがわかる。これは、制御開始時には、下部ハニカム部指示差圧と目標差圧との偏差が大きいため、ポンプ回転数がオーバーシュートし、高温1次系水が下部密度ロック差圧測定区間に占める割合が中立点を越えて大きくなった

結論として、下部密度ロック差圧の測定値に基づくポンプ回転数制御は、系を安定させたが、ポンプの機械的遅れに起因するU字管マノメータ振動の固有周波数を有する系特有の振動を除去することができなかった。これは、ポンプ回転数が制御信号に対して機械的な遅れを有するためである。しかし、前述のように微分項を制御ロジックに付加することにより、このような振動を抑制することができた。

## 5. 運転操作模擬実験

### 5.1 スタートアップ模擬実験

ポンプ回転数フィードバック制御システムを用いて、スタートアップ模擬実験（炉心出力を0から一定値まで上昇させる実験）を行った。下部ハニカム差圧、ポンプ回転数、炉心出力、ポイズンタンクから1次系への流量、1次系循環流量及び1次系、ポイズン系への冷却水流量をFig. 5.1.1に、また、装置内の流体温度をFig. 5.1.2に示す。

実験は、ポイズン系、1次系及び両ループクーラーへの冷却水の温度を全て30℃の均一温度条件にした状態から開始した。実験開始時の初期定常状態（炉心出力=0）においては、1次系循環ポンプは手動により最小回転数(10Hz)で運転し、フィードバック制御システムは不作動とした。この間、ポンプ回転数が0でないため、下部ハニカムを通過して1次系からポイズン系への流れが生じている。

炉心出力を7.5kWまでランプ状に上昇させた結果、1次系温度の上昇に伴い圧力容器の差圧が低下し、下部ハニカムを通過する流れが減少して行く。ここで、圧力容器の差圧は、静水頭、系内摩擦圧力損失、形状変化圧力損失の和である。一方、ポイズン系における差圧は、低温静止水の静水頭である。実験開始から15分後、両ループ間差圧の増加によって流れ方向の逆転（ポイズン系から1次系への流れ）が生じた時点で、下部密度ロック目標差圧  $-2\text{ Pa}$  を設定してフィードバック制御を行った。この結果、下部密度ロック差圧はすみやかに設定値に収束し、下部ハニカムを通過する流れは停止した。ポンプ回転数は、1次系流体温度の上昇に伴って、1次系とポイズン系との差圧バランスを保ちつつ上昇した。

密度界面を下部ハニカムの中央付近に維持するために採用されるべき下部密度ロック差圧の設定値は、密度界面がハニカム全長より十分に小さければ、高温、低温側流体密度より容易に計算できる。炉心出力7.5kW時の定常運転における下部密度ロック内の温度分布をFig. 5.1.3に示す。

本実験における目標差圧の設定は、予め予想される定常時の炉心入口温度とポイズン温度から計算した値（ $-2\text{ Pa}$ ）に基づいて行なった。この結果、Fig. 5.1.1に示すように、ポンプ回転数は急激に上昇した後一旦下降し、再び上昇して行くのがわかる。これは、制御開始時には、下部ハニカム部指示差圧と目標差圧との偏差が大きいため、ポンプ回転数がオーバーシュートし、高温1次系水が下部密度ロック差圧測定区間に占める割合が中立点を越えて大きくなった

結果、指示差圧が目標差圧を下回るためである。中立点を得るためにポンプ回転数は低下する。再び上昇して行くのは、先に述べたように両ループの差圧バランスを保つためである。

上述のような制御開始操作の場合、本制御ロジックでは、制御開始時の下部ハニカム部指示差圧と目標差圧との偏差が大きいほど、すなわち予想される定常時の炉心入口温度が高いほど、オーバーシュートは顕著となり、1次系水が下部ハニカムを通過しポイズン系へ流入する恐れがある。また、1次系水の定常に至るまでの温度変化に伴って密度界面位置も変化する。したがって、本制御方法に実用性を持たせるためには、差圧設定値を下部ハニカム上下における1次系炉心入口温度とポイズン温度の測定値に基づいて算出し、自動的に変化させるよう改良することが望ましい。

## 5.2 出力変更実験

スタートアップ操作により、炉心出力7.5kW、1次系循環流量0.7kg/sの定常運転状態を達成した後、炉心出力を更に20kWまで上昇させた。本操作に伴う系内挙動をFig. 5.2.1、Fig. 5.2.2に示す。ポイズンタンクと1次系間の流れは、1次系水温度の上昇にかかわらず0に維持されている。フィードバック制御システムは良好に作動し、下部密度ロック差圧は、設定差圧に対し $\pm 1.5$  Pa内の変動を保っている。この値は、密度界面の変動位に換算すると $\pm 9 \times 10^{-3}$  mに相当している。尚、下部密度ロック差圧が60分以降1Pa低下しているのは、設定差圧を $-5$  Paから $-6$  Paに変更したためである。

本ポンプ回転数制御の使用に際しては、異常過渡時において原子炉の受動的停止能力を確保するために、制御範囲に制限を施す必要がある。その方策の一つとして、最大吐出圧力が十分に小さな循環ポンプを使用することが挙げられる。次章において、ポンプの最大回転数を制限した上で、給水喪失事故を模擬した異常過渡状況での実験について述べる。

## 6. 給水喪失模擬実験

給水喪失模擬実験での系内挙動をFig. 6.1, Fig. 6.2に示す。実験は、炉心出力15kWでの定常状態を得た後、蒸気発生器を模擬した1次系クーラー2次側への給水を停止することにより行った。本実験においては、循環ポンプの最大回転数を55Hzに設定した。

給水停止と同時に1次系水温度は上昇を始め、これによるポイズン水の流入を妨げるためポンプ回転数も増大して行く。ポンプ回転数が上限の55Hzに達しても、1次系水温度の上昇に伴って両ループ間の差圧はポンプ吐出圧を上回って増大し続けるため、密度界面は上下ハニカム部において崩れ、ポイズンタンクからの低温水の流入が始まる。この結果、1次系水温度は低下する。すなわち、PIUS炉固有の受動的機構によるポイズン水の炉心への注入が達成された。なお、「序」において述べたように、本実験はすべて純水を用いて行っており、ポイズン水の注入による炉心出力低下の模擬は行わなかった。



結果、指示差圧が目標差圧を下回るためである。中立点を得るためにポンプ回転数は低下する。再び上昇して行くのは、先に述べたように両ループの差圧バランスを保つためである。

上述のような制御開始操作の場合、本制御ロジックでは、制御開始時の下部ハニカム部指示差圧と目標差圧との偏差が大きいほど、すなわち予想される定常時の炉心入口温度が高いほど、オーバーシュートは顕著となり、1次系水が下部ハニカムを通過しボイゾン系へ流入する恐れがある。また、1次系水の定常に至るまでの温度変化に伴って密度界面位置も変化する。したがって、本制御方法に実用性を持たせるためには、差圧設定値を下部ハニカム上下における1次系炉心入口温度とボイゾン温度の測定値に基づいて算出し、自動的に変化させるよう改良することが望ましい。

## 5.2 出力変更実験

スタートアップ操作により、炉心出力7.5kW、1次系循環流量0.7kg/sの定常運転状態を達成した後、炉心出力を更に20kWまで上昇させた。本操作に伴う系内挙動をFig. 5.2.1、Fig. 5.2.2に示す。ボイゾンタンクと1次系間の流れは、1次系水温度の上昇にかかわらず0に維持されている。フィードバック制御システムは良好に作動し、下部密度ロック差圧は、設定差圧に対し±1.5Pa内の変動を保っている。この値は、密度界面の変動位に換算すると $\pm 9 \times 10^{-3}$ mに相当している。尚、下部密度ロック差圧が60分以降1Pa低下しているのは、設定差圧を-5Paから-6Paに変更したためである。

本ポンプ回転数制御の使用に際しては、異常過渡時において原子炉の受動的停止能力を確保するために、制御範囲に制限を施す必要がある。その方策の一つとして、最大吐出圧力が十分に小さな循環ポンプを使用することが挙げられる。次章において、ポンプの最大回転数を制限した上で、給水喪失事故を模擬した異常過渡状況での実験について述べる。

## 6. 給水喪失模擬実験

給水喪失模擬実験での系内挙動をFig. 6.1, Fig. 6.2に示す。実験は、炉心出力15kWでの定常状態を得た後、蒸気発生器を模擬した1次系クーラー2次側への給水を停止することにより行った。本実験においては、循環ポンプの最大回転数を55Hzに設定した。

給水停止と同時に1次系水温度は上昇を始め、これによるボイゾン水の流入を妨げるためポンプ回転数も増大して行く。ポンプ回転数が上限の55Hzに達しても、1次系水温度の上昇に伴って両ループ間の差圧はポンプ吐出圧を上回って増大し続けるため、密度界面は上下ハニカム部において崩れ、ボイゾンタンクからの低温水の流入が始まる。この結果、1次系水温度は低下する。すなわち、PIUS炉固有の受動的機構によるボイゾン水の炉心への注入が達成された。なお、「序」において述べたように、本実験はすべて純水を用いて行っており、ボイゾン水の注入による炉心出力低下の模擬は行わなかった。

## 7. 実験装置の問題点

今回使用した小規模実験装置の構造とPIUS型炉とを比較した場合、最も異なっているのは、上部密度境界層と圧力容器上部プレナムの位置関係である。本実験装置においては、ポイズン側の静水頭を保持するためにポイズンタンクをFig. 3.3.4に示すように圧力容器よりかなり上方に持ち上げている。この結果、上部ハニカムと圧力容器上部プレナム間が立ち上がり配管(3<sup>B</sup>)で連結されることになり、定常運転中、この配管内には流れは生じない。したがって、実機のように上部密度界面の高温側が炉心出口温度に等しいという形にはなりにくい。すなわち、この配管内では対流に伴う熱伝達しか期待できないため、上部密度界面高温側温度(TE-4:ポイズンタンク上部)は、スタートアップ模擬実験での定常状態(Fig. 5.1.2参照)及び給水喪失模擬実験における給水喪失までの定常維持区間(Fig. 6.2参照)において、炉心出口温度(TE-2:上部プレナム)よりかなり低いものとなっている。特にスタートアップ模擬実験の場合、ポイズン温度と等しいため上部密度界面が存在していないと考えられる。また、この立ち上がり配管の存在は、4.2 フィードバック制御解析で述べた振動モデル(Fig. 4.2.1参照)においても大きな影響を与えており、装置固有の振動数をもたらしている。今後の課題として、安定な上部密度界面を形成させることにより、PIUS型炉の過渡現象をより実機に近い形で模擬するためには、現状の1次系クーラーにつながるホットレグを除去し、立ち上がり配管をホットレグとして使用し、ポイズンタンク上部プレナムを横切って高温1次系水が1次系クーラーに導かれるような配管を設ける必要があるものと考えられる。

## 8. 結 言

PIUS型炉を模擬した小規模大気圧実験装置を用いて、下部密度ロック部の差圧の計測に基づく1次系循環ポンプ回転数フィードバック制御方式に関する実験的研究を行った。この結果、本制御方式により、装置のスタートアップや出力変更といった運転時の操作を容易に行えることが確認できた。また、蒸気発生器2次側への給水喪失に伴う異常な過渡変化に対しては、循環ポンプ回転数に上限を与えることにより、炉の受動的停止機能を確保できることを確認した。

## 7. 実験装置の問題点

今回使用した小規模実験装置の構造とPIUS型炉とを比較した場合、最も異なっているのは、上部密度境界層と圧力容器上部プレナムの位置関係である。本実験装置においては、ポイズン側の静水頭を保持するためにポイズンタンクをFig. 3.3.4に示すように圧力容器よりかなり上方に持ち上げている。この結果、上部ハニカムと圧力容器上部プレナム間が立ち上がり配管(3<sup>B</sup>)で連結されることになり、定常運転中、この配管内には流れは生じない。したがって、実機のように上部密度界面の高温側が炉心出口温度に等しいという形にはなりにくい。すなわち、この配管内では対流に伴う熱伝達しか期待できないため、上部密度界面高温側温度(TE-4:ポイズンタンク上部)は、スタートアップ模擬実験での定常状態(Fig. 5.1.2参照)及び給水喪失模擬実験における給水喪失までの定常維持区間(Fig. 6.2参照)において、炉心出口温度(TE-2:上部プレナム)よりかなり低いものとなっている。特にスタートアップ模擬実験の場合、ポイズン温度と等しいため上部密度界面が存在していないと考えられる。また、この立ち上がり配管の存在は、4.2 フィードバック制御解析で述べた振動モデル(Fig. 4.2.1参照)においても大きな影響を与えており、装置固有の振動数をもたらしている。今後の課題として、安定な上部密度界面を形成させることにより、PIUS型炉の過渡現象をより実機に近い形で模擬するためには、現状の1次系クーラーにつながるホットレグを除去し、立ち上がり配管をホットレグとして使用し、ポイズンタンク上部プレナムを横切って高温1次系水が1次系クーラーに導かれるような配管を設ける必要があるものと考えられる。

## 8. 結 言

PIUS型炉を模擬した小規模大気圧実験装置を用いて、下部密度ロック部の差圧の計測に基づく1次系循環ポンプ回転数フィードバック制御方式に関する実験的研究を行った。この結果、本制御方式により、装置のスタートアップや出力変更といった運転時の操作を容易に行えることが確認できた。また、蒸気発生器2次側への給水喪失に伴う異常な過渡変化に対しては、循環ポンプ回転数に上限を与えることにより、炉の受動的停止機能を確保できることを確認した。

参考文献

- [ 1 ] Ping, C., "The SECURE heating reactor," Nucl. Technol., 79 (1987), PP. 175-185.
- [ 2 ] Wakabayashi, H., "Intrinsically Safe and Economical Reactor," Tokyo University, UTNL-R0218, (1988).
- [ 3 ] Tasaka, K. et al., "Thermal-hydraulic behavior in PIUS-Type small scale experiment," ANS Winter Meeting, Nov. 1989, San Francisco, CA., in: 5th Proceedings of Nuclear Thermal Hydraulics, PP. 403-408 (1989).
- [ 4 ] Fujii, M. et al., "Feedback control of primary circulation pump of PIUS-type reactor during startup and steady state operation," ASME Winter Meeting, Nov. 1990, Dallas, TX., in: Thermal Hydraulics of Advanced Nuclear Reactor, PP. 85-90 (1990).

Table 2.1 Specifications of components of test apparatus

(1)	圧力容器	
	材質	バイレックスガラス／ポリカーボネイト
	寸法	I.D 148.4×1515 (上・下部プレナム、ハニカム容器を含む。)
(2)	模擬炉心	
	構成	ヒーター棒28本／非加熱棒61本
	配置	正方配列 ピッチ13mm
	メーカー／型式	岡崎製作所／SH-21
	出力	28kW (1kW×28本)
(3)	ボイズタンク	
	材質	SUS304
	寸法	I.D300×1505
	容量	100L
(4)	ボイズタンク内クーラー	
	形式	ヘリカルコイル型
	材質	C1020T
	伝熱管寸法	O.D12.7×I.D10.0
	伝熱面積	0.67m <sup>2</sup>
(5)	1次系熱交換器	
	材質	SUS304
	寸法	I.D286×525
	容量	30L
(6)	1次系熱交換器内クーラー	
	形式	ヘリカルコイル型
	材質	C1020T
	伝熱管寸法	O.D12.7×I.D10.0
	伝熱面積	1.08m <sup>2</sup>

Table 2.1 (Continued)

(7)	冷却水タンク		
	材質	SUS304	
	寸法	ID500×1600	
	容量	300L	
(8)	冷却水タンク内ヒーター		
	形式	水用プラグヒーター	
	メーカー	坂口電熱(株)	
	型式	HP-10	HP-11
	出力	5kW	6kW
	数量	2基	→
	材質	SUS304	→
	発熱部寸法	O.D10×300	
(9)	チラーユニット		
	形式	空冷式チラーユニット	
	メーカー/型式	日立冷熱(株)/RCU-20A	
	冷却能力	38,000 kcal/h* <sup>1</sup> (50Hz時)	
	数量	2基	
	材質	SUS304	
	水側熱交形式	横形シェルアンドチューブ式	
	空気側熱交形式	多通路クロスフィン式	
	冷媒	フロン22	
	*1 空気側熱交入口温度35℃、冷水入口温度12℃、冷水出口温度7℃における値。		
(10)	循環ポンプ		
	形式	ラインポンプ	
	メーカー/型式	荏原製作所/40LPS6.4	
	最大吐出量	250L/min	
	口径	φ40	
	材質	SUS304	

Table 2.1 (Continued)

## (11) 流量計

TAG No.	FE-1	FE-2	FE-3	FE-4
オリフィス型式	コーナータップ	2分円	コーナータップ	→
規格	JIS Z 8762	規格なし	JIS Z 8762	→
オリフィス径	φ 21.3	φ 20.3	φ 22.0	→
配管内径	φ 42.6	φ 81.1	φ 36.7	φ 36.7
流量係数	0.627	0.840	0.655	0.655
差圧伝送器仕様				
メーカー	大倉ローズマウント (株)			
型式	1151DP4E22		1151DR2F22	
数量	3基 (FE-1, 3, 4)		1基 (FE-2)	
目盛	0~2000mmAq		-50~+50mmAq	
測定流量	0~80L/min		-50~+50L/min	
精度	フルスケールの±0.2%		±0.5%	

## (12) 差圧計

TAG No.	DPX-1	DPX-2
メーカー	大倉ローズマウント (株)	
目盛	0~2000mmAq	-50~+50mmAq
精度	フルスケールの±0.2%	±0.5%

## (13) 熱電対

TAG No.	TE-1~6
メーカー	CHINO
素材材質	E (クロメル/コンスタンタン)
階級	0.4級
寸法	φ 3.2×200

## (14) 零接点装置

メーカー/型式	熱電子工業 (株) / FP-5-20D
精度	0.05℃以下

## (15) 零接点装置用恒温水槽

メーカー/型式	高進産業 (株) / CTK-110
寸法	W190×D660×H1055
周囲温度	25℃±5℃
コントロール精度	±0.5℃

Table 3.1.1 Flow characteristics of primary loop

絞り面積比 (-)	流量 (kg/s)	指示差圧 (Pa)	温度 (°C)	零調温度 (°C)	補正後の差圧 (Pa)
0.11 (目盛52°)	0.335	-39.2	43.6	13.0	69.6
	0.501	2.9	43.7	↓	112.7
	0.667	65.7	43.6	↓	174.4
	1.000	235.2	43.4	↓	343.0
	1.334	453.7	43.2	13.0	560.6
0.25 (目盛37.5°)	0.332	32.3	11.0	10.8	32.3
	0.504	46.1	11.4	↓	47.0
	0.667	68.6	11.1	↓	68.6
	1.005	124.5	11.2	↓	125.4
	1.334	215.6	11.3	10.8	216.6
0.42 (目盛25°)	0.341	32.3	11.4	10.8	33.3
	0.504	39.2	11.5	↓	40.2
	0.664	55.9	11.6	10.8	56.8
	1.005	88.2	9.6	8.1	90.2
	1.337	159.7	9.8	8.1	161.7
0.72 (目盛10°)	0.332	29.4	10.0	8.1	31.4
	0.501	36.3	10.1	↓	39.2
	0.667	39.2	10.2	↓	42.1
	1.005	65.7	10.3	↓	68.6
	1.337	104.9	10.5	8.1	107.8



Table 3.2.1 Natural circulation flow characteristics of poison loop

炉心出力 (kw)	炉心入口温度TE-5 (°C)	炉心出口温度TE-2 (°C)	流量FX-2 (kg/s)
5	18.0	31.7	0.09
10	22.2	41.1	0.12
15	26.7	51.6	0.15
20	31.0	60.0	0.17
25	33.2	63.7	0.18

ポイズンクーラー冷却水温度 30°C  
 ポイズンクーラー冷却水流量 1.5kg/s  
 オリフィス絞り面積比 0.7

Table 4.2.1 Comparison of measured and calculated system oscillation frequencies

	密度 (kg/m <sup>3</sup> )	測定周波数 (Hz)	計算周波数 (Hz)
1	$\rho_C$ 996.1, $\rho_H$ 993.1 ( $T_C$ 29°C, $T_H$ 38°C)	$5.3 \times 10^{-3}$	$6.0 \times 10^{-3}$
2	$\rho_C$ 999.5, $\rho_H$ 990.5 ( $T_C$ 13°C, $T_H$ 44°C)	$8.0 \times 10^{-3}$	$1.0 \times 10^{-2}$

1 : Data from TEST-B2

2 : Data from DAMP20-C

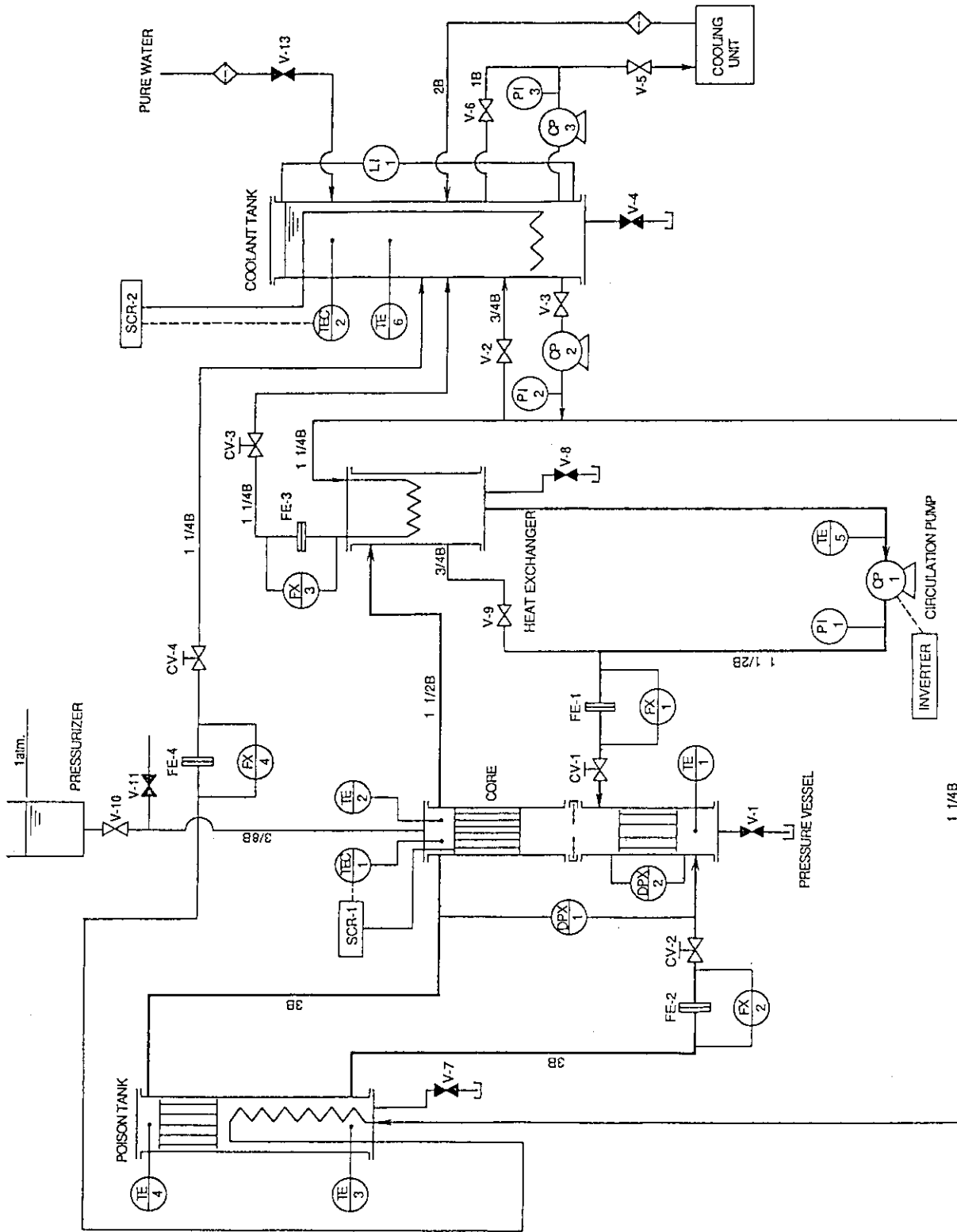


Fig. 2.1 Flow diagram of test apparatus

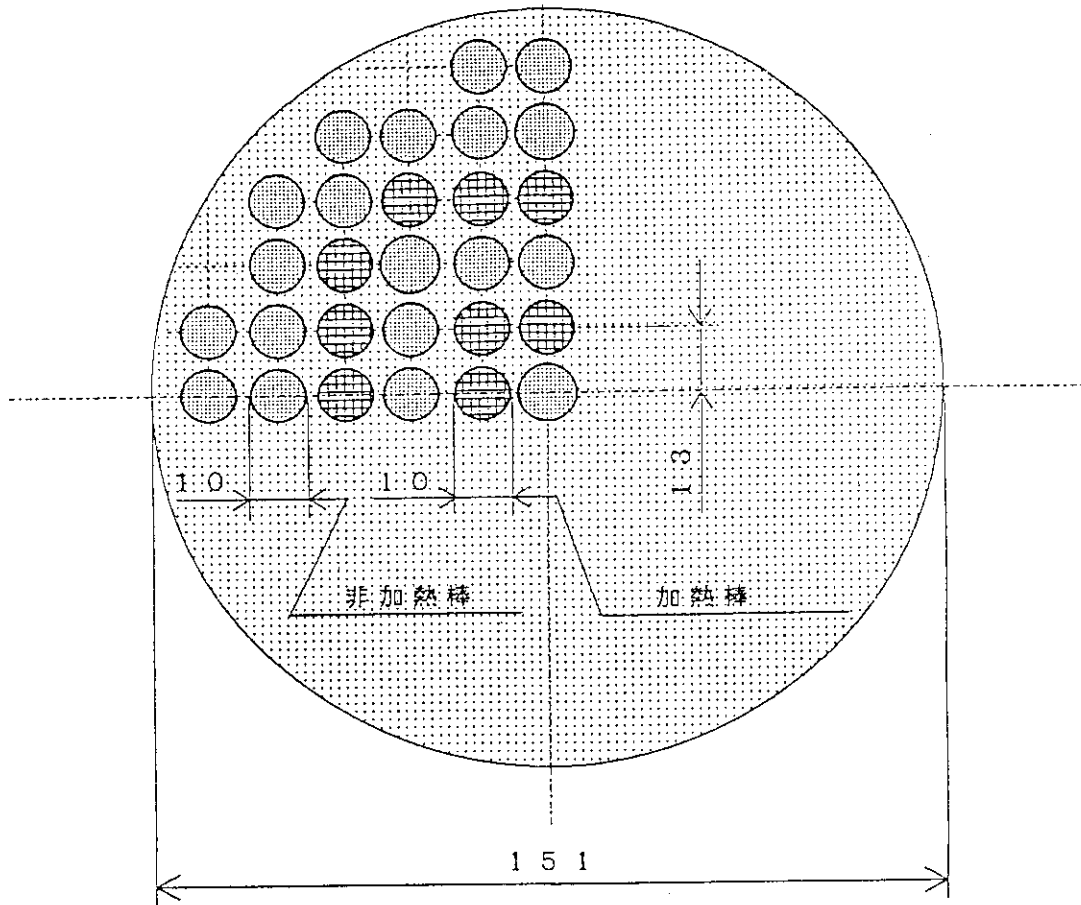


Fig. 2.2 Cross section of core

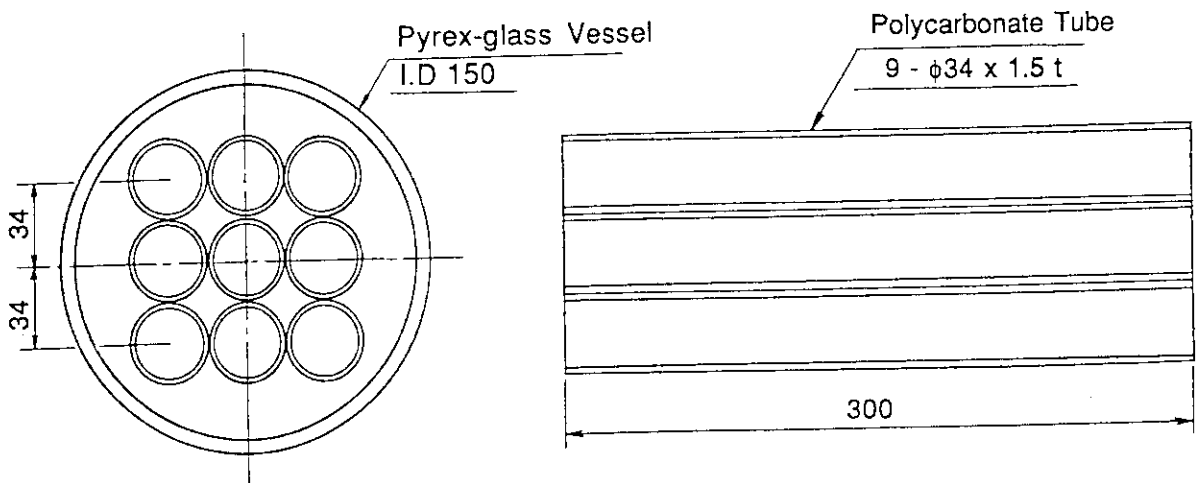


Fig. 2.3 Lower honeycomb construction

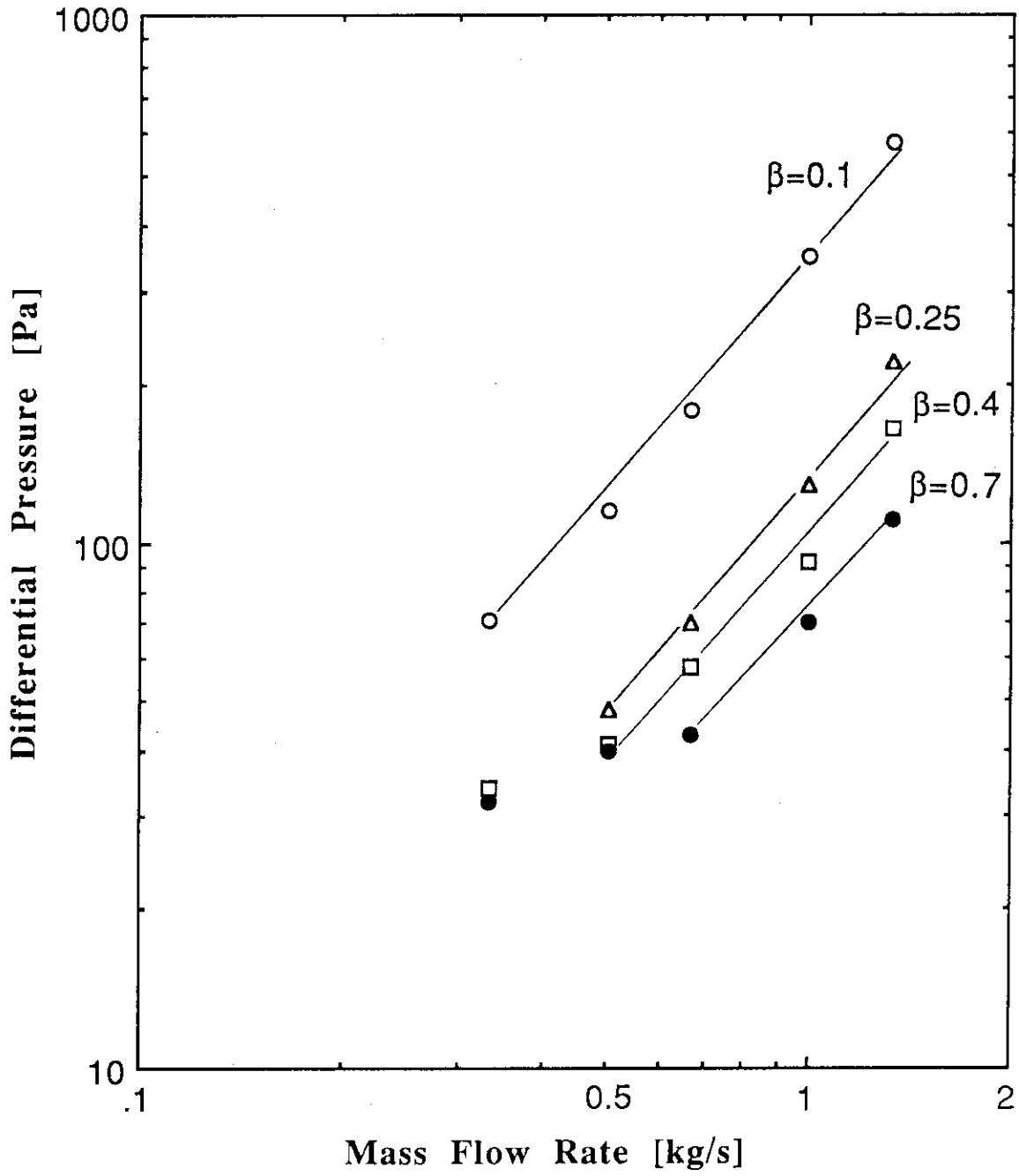


Fig. 3.1.1 Flow characteristics of primary pump

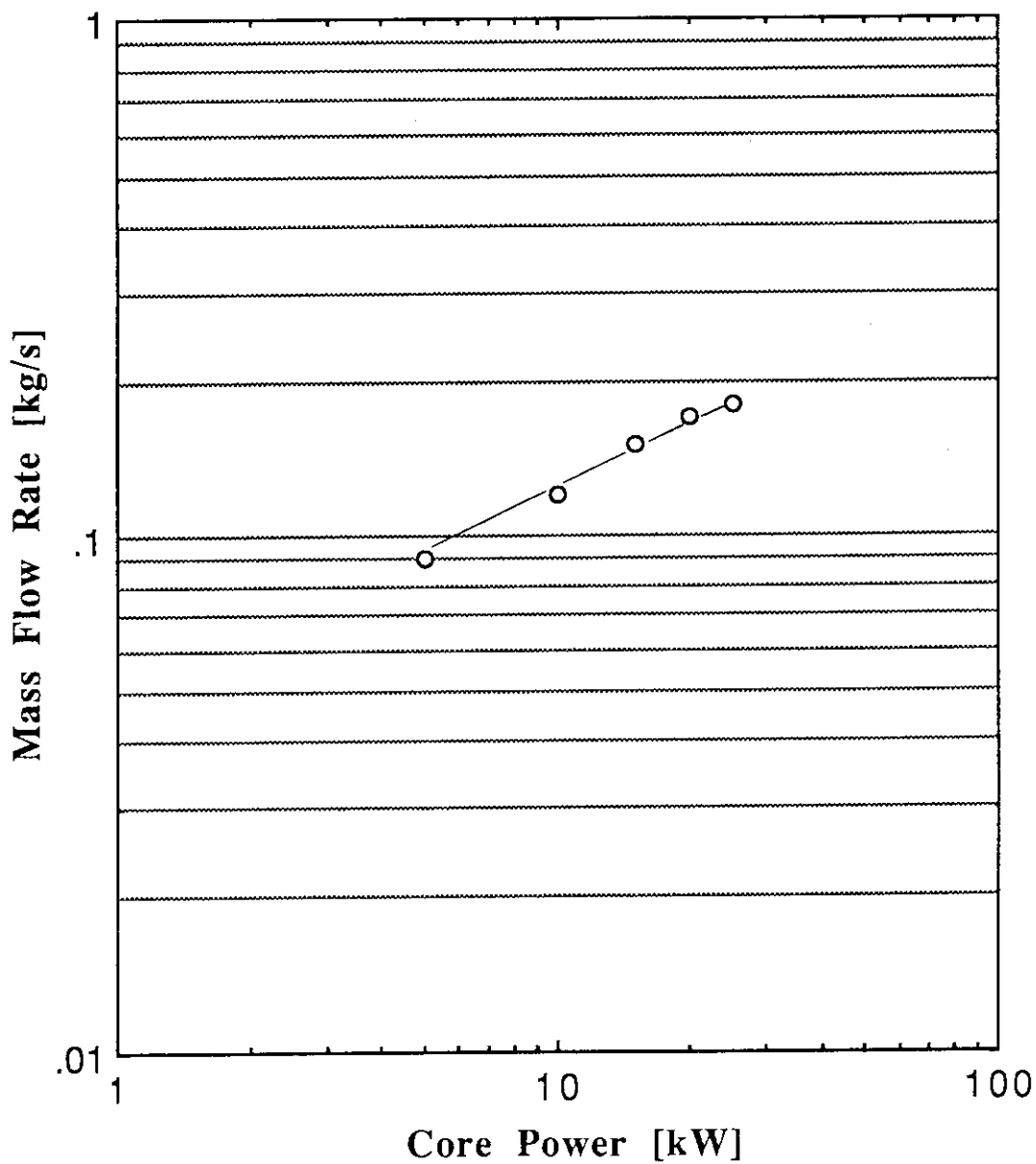


Fig. 3.2.1 Natural circulation flow characteristics of poison loop

流量, 圧カトレンドグラフ

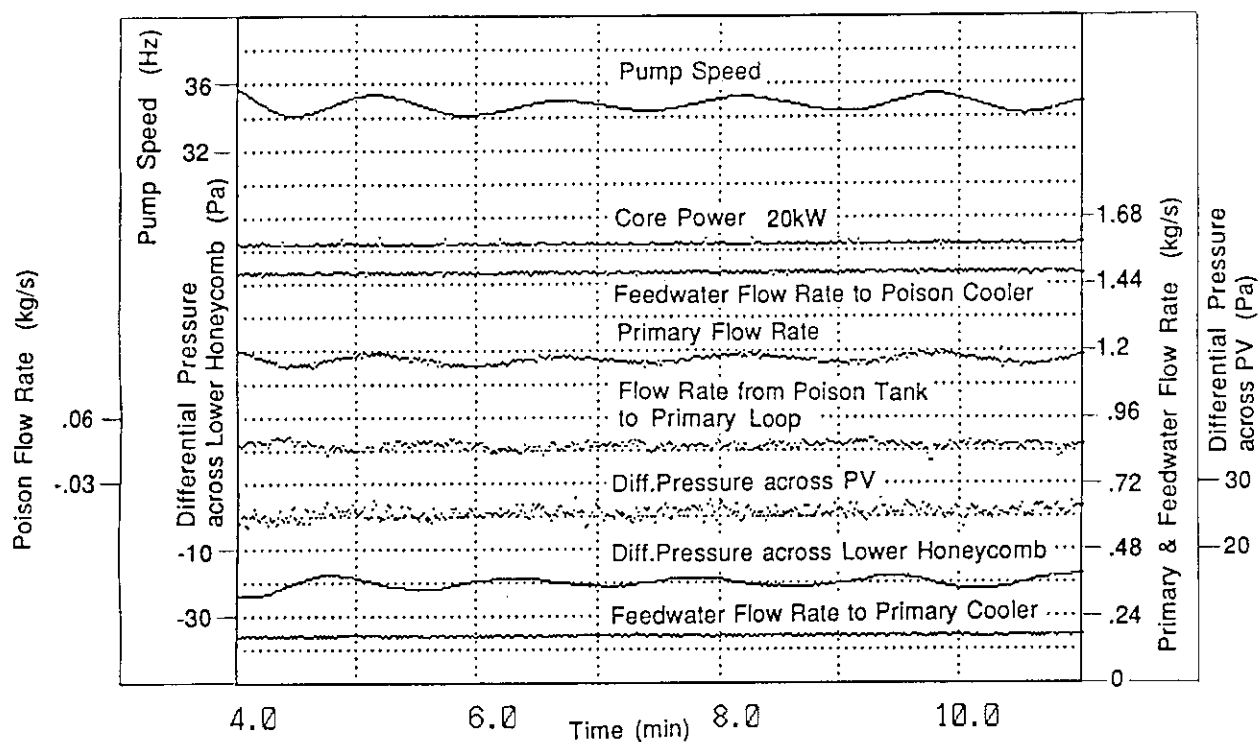


Fig. 3.3.1 Steady-state at 20 kW (Data from Run NCL-100)

温度トレンドグラフ

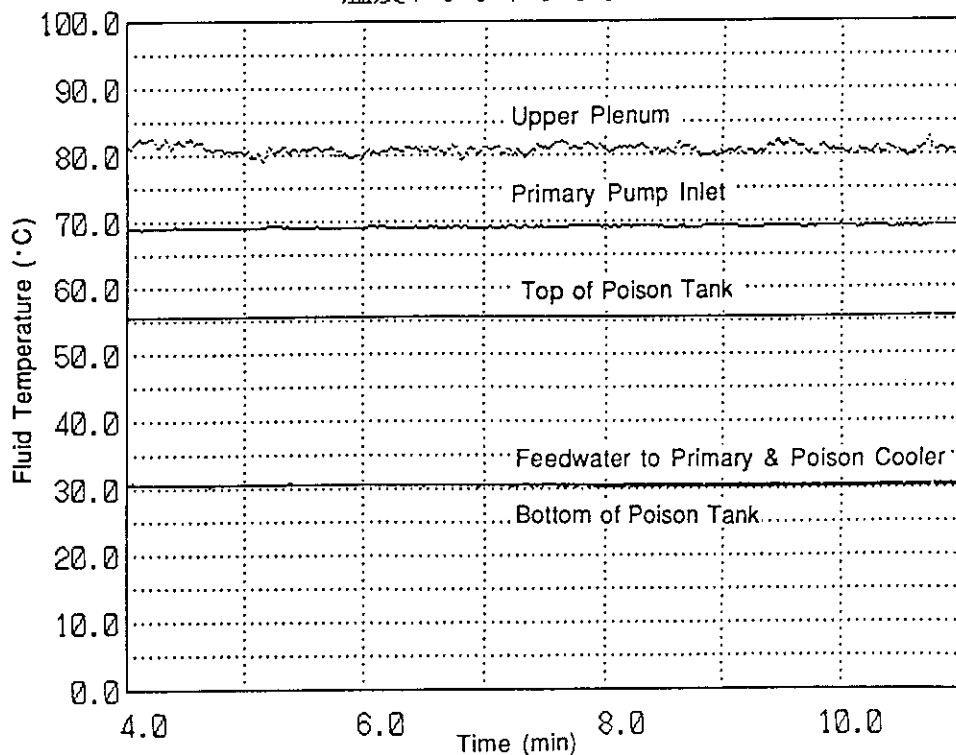


Fig. 3.3.2 Steady-state at 20 kW (Data from Run NCL-100)

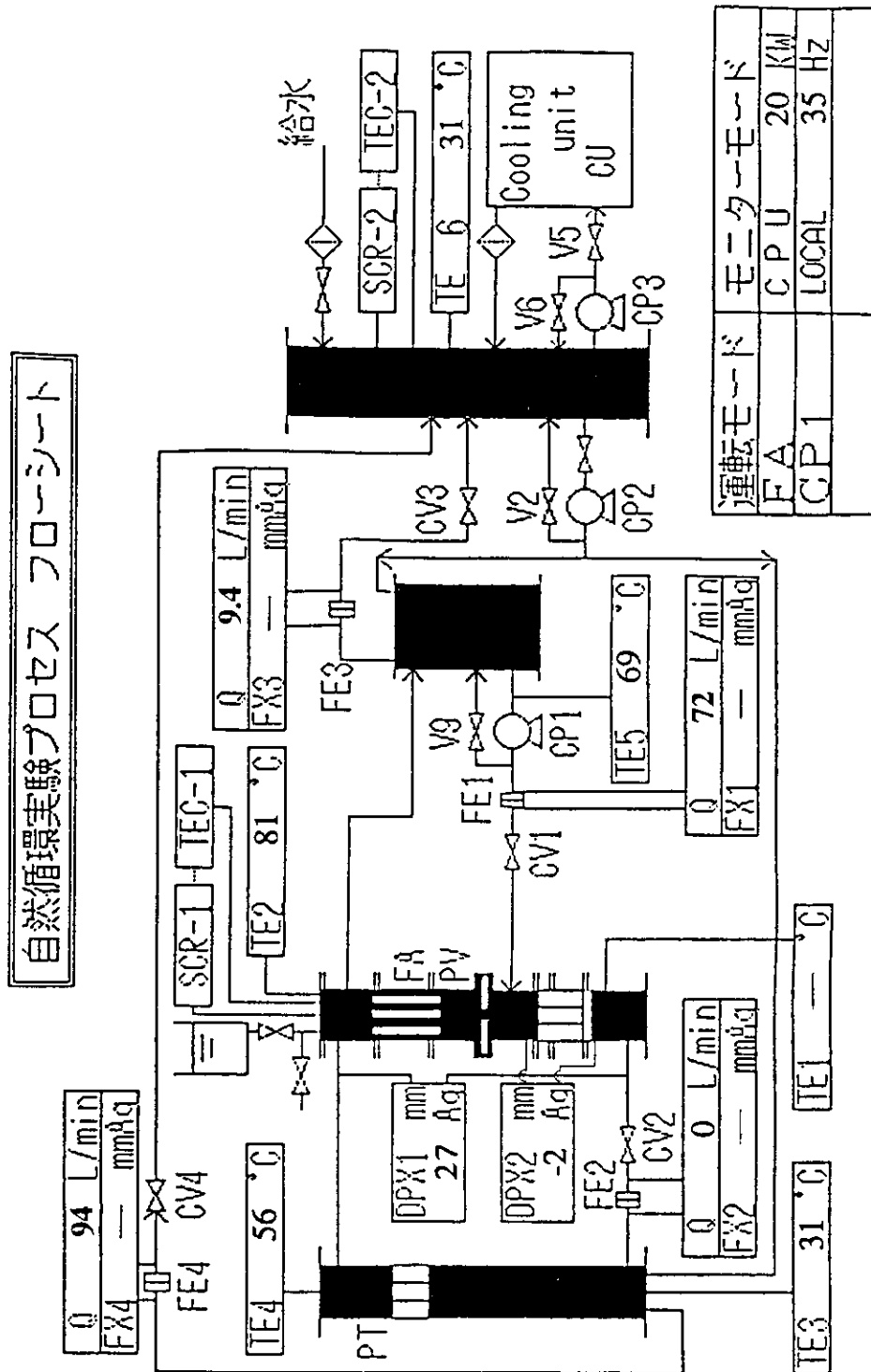


Fig. 3.3.3 System condition in steady-state operation

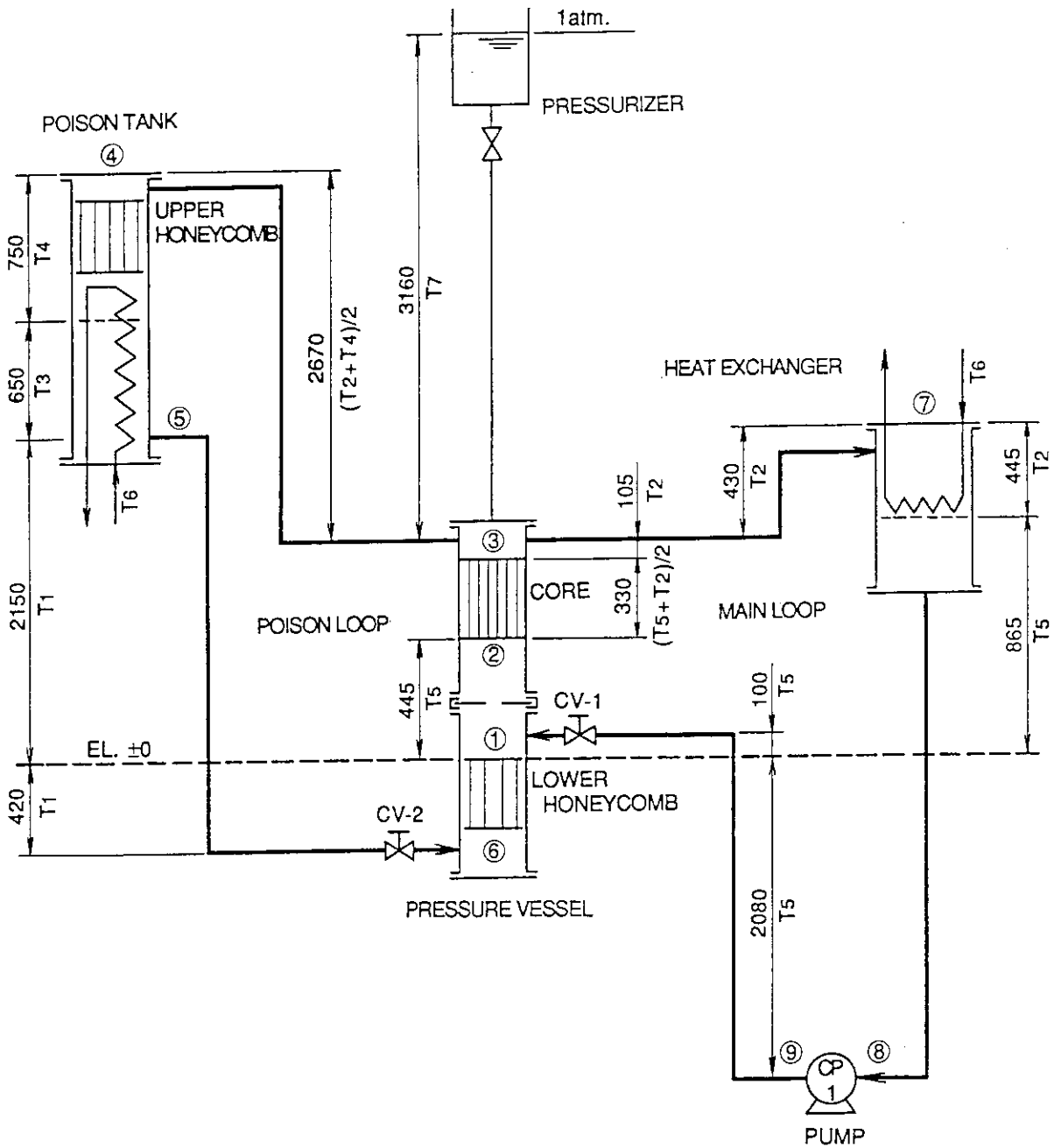


Fig. 3.3.4 Layout of test apparatus



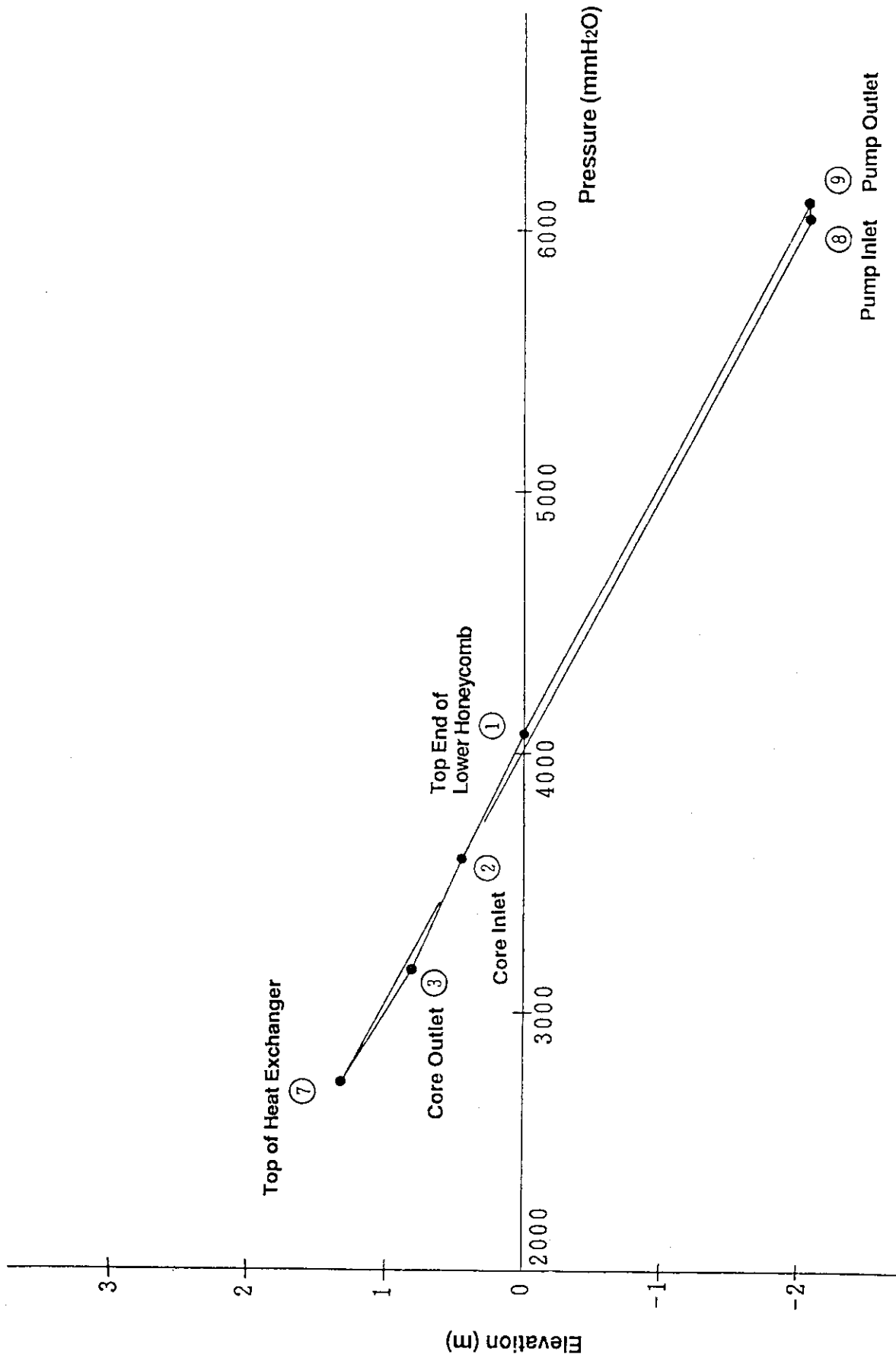


Fig. 3.3.5 Static pressure distribution in primary loop

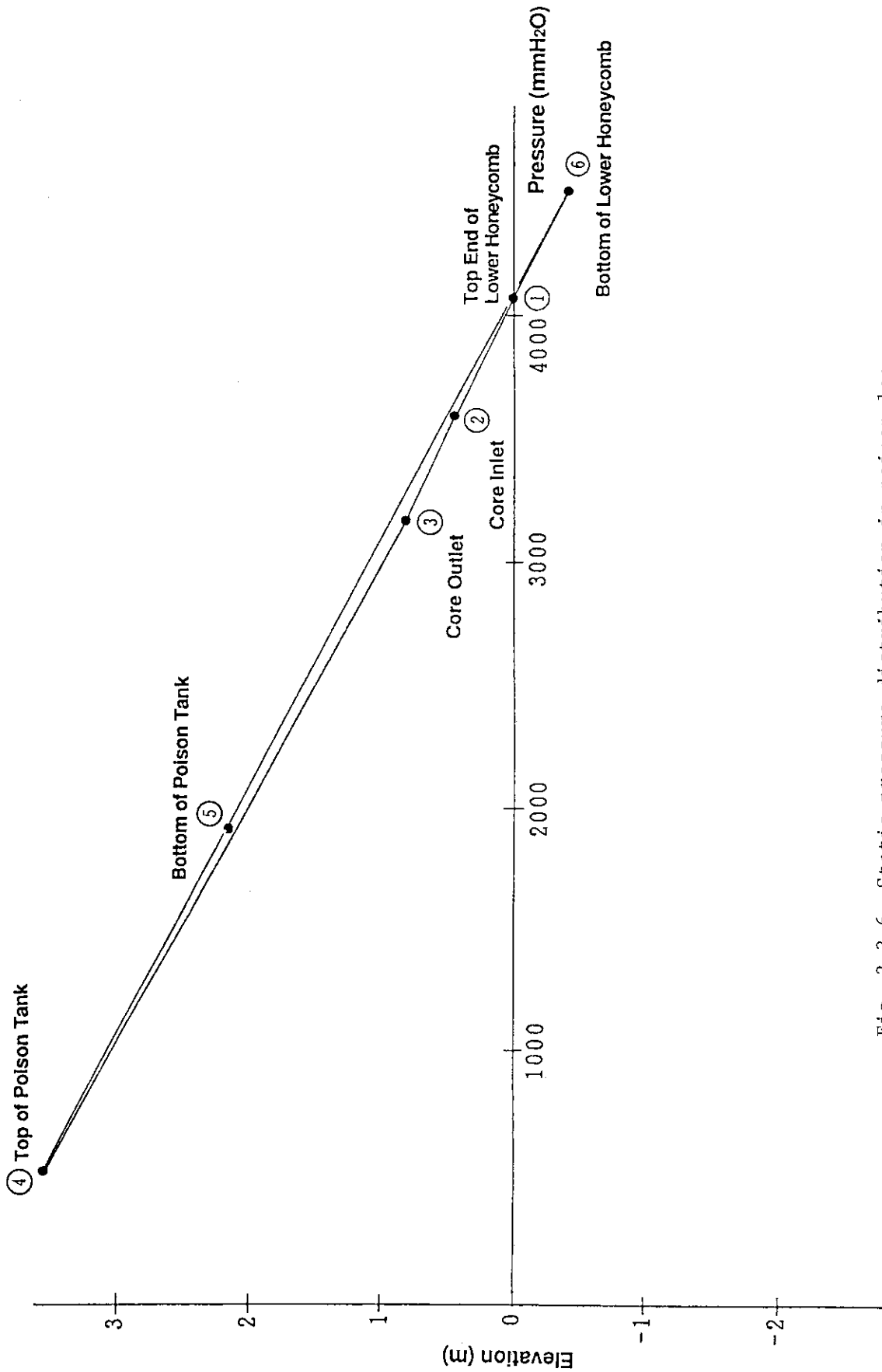


Fig. 3.3.6 Static pressure distribution in poison loop

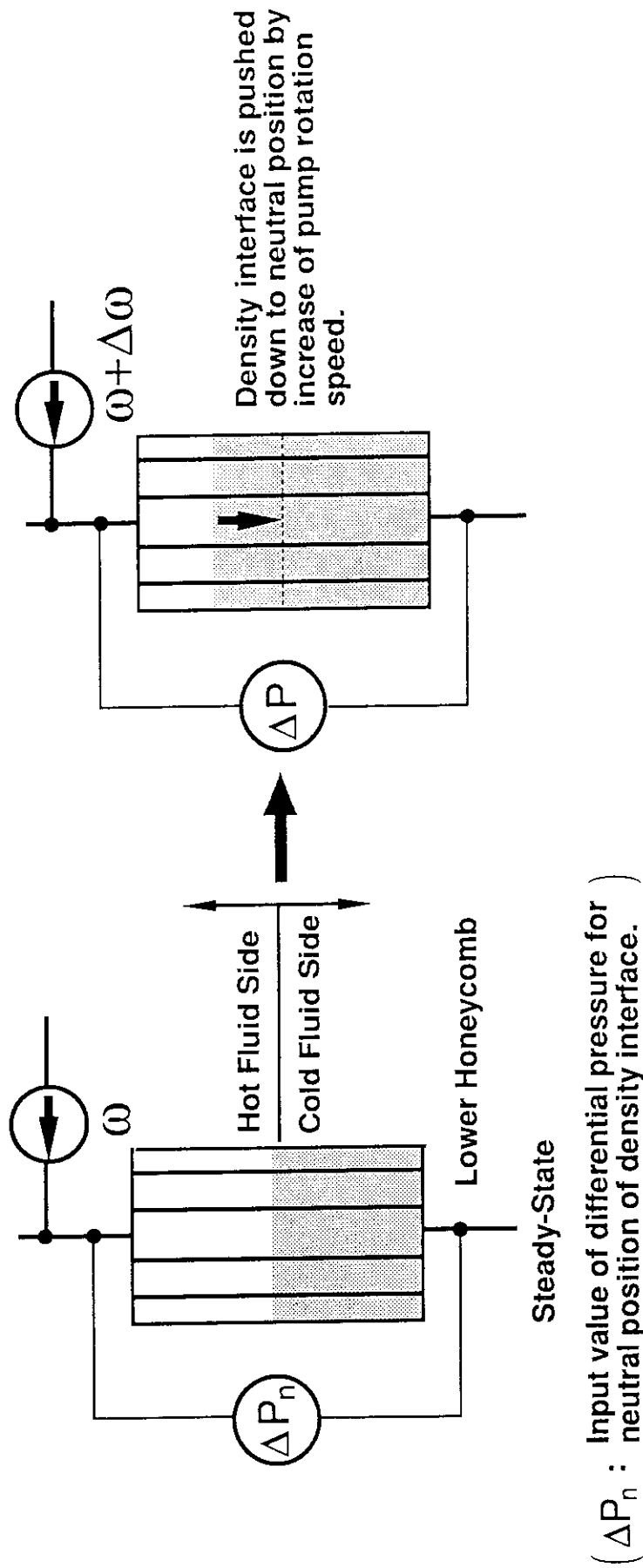


Fig. 4.1.1.1 Pump speed control based on lower density lock differential pressure

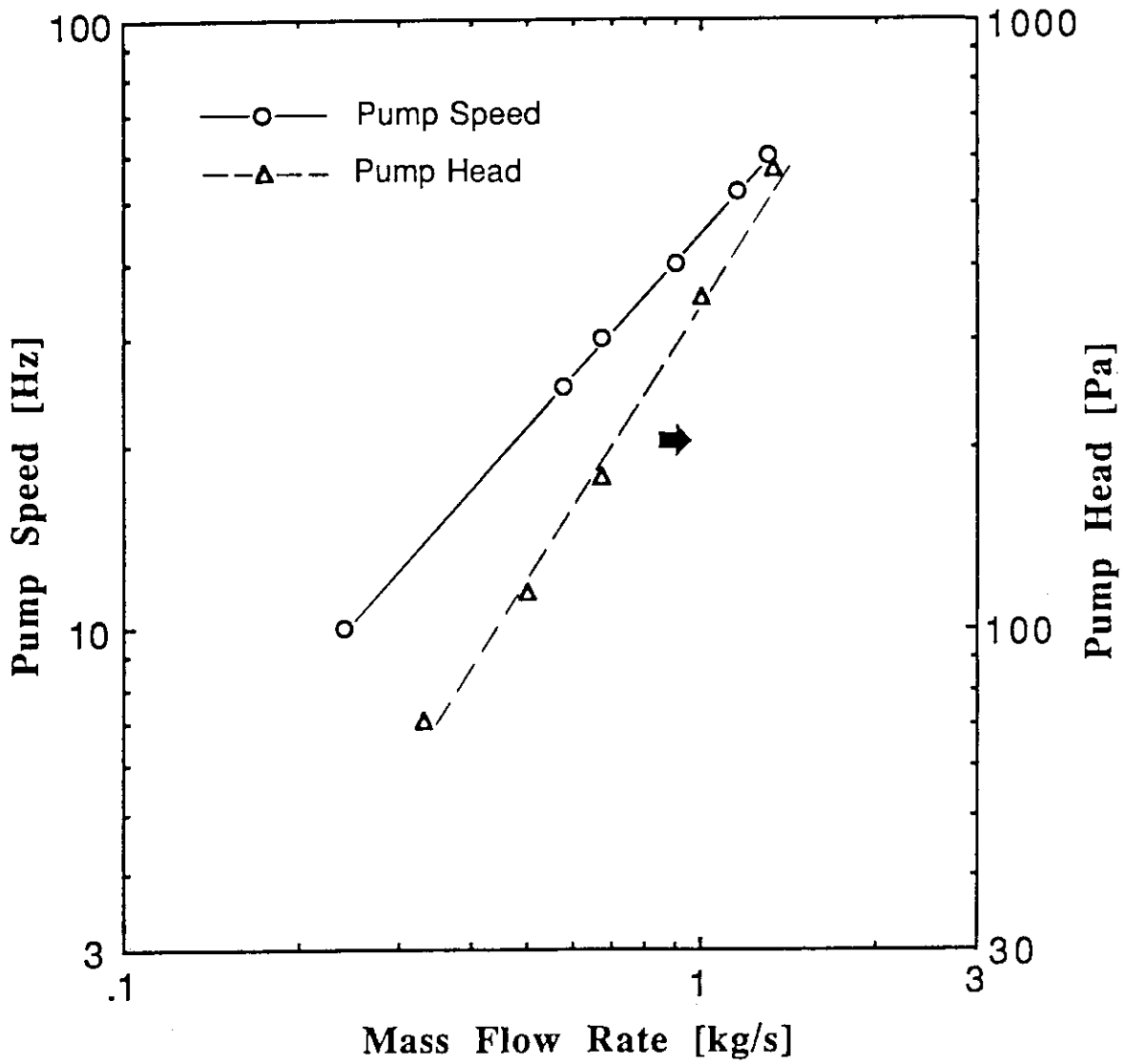


Fig. 4.1.2 Pump characteristics

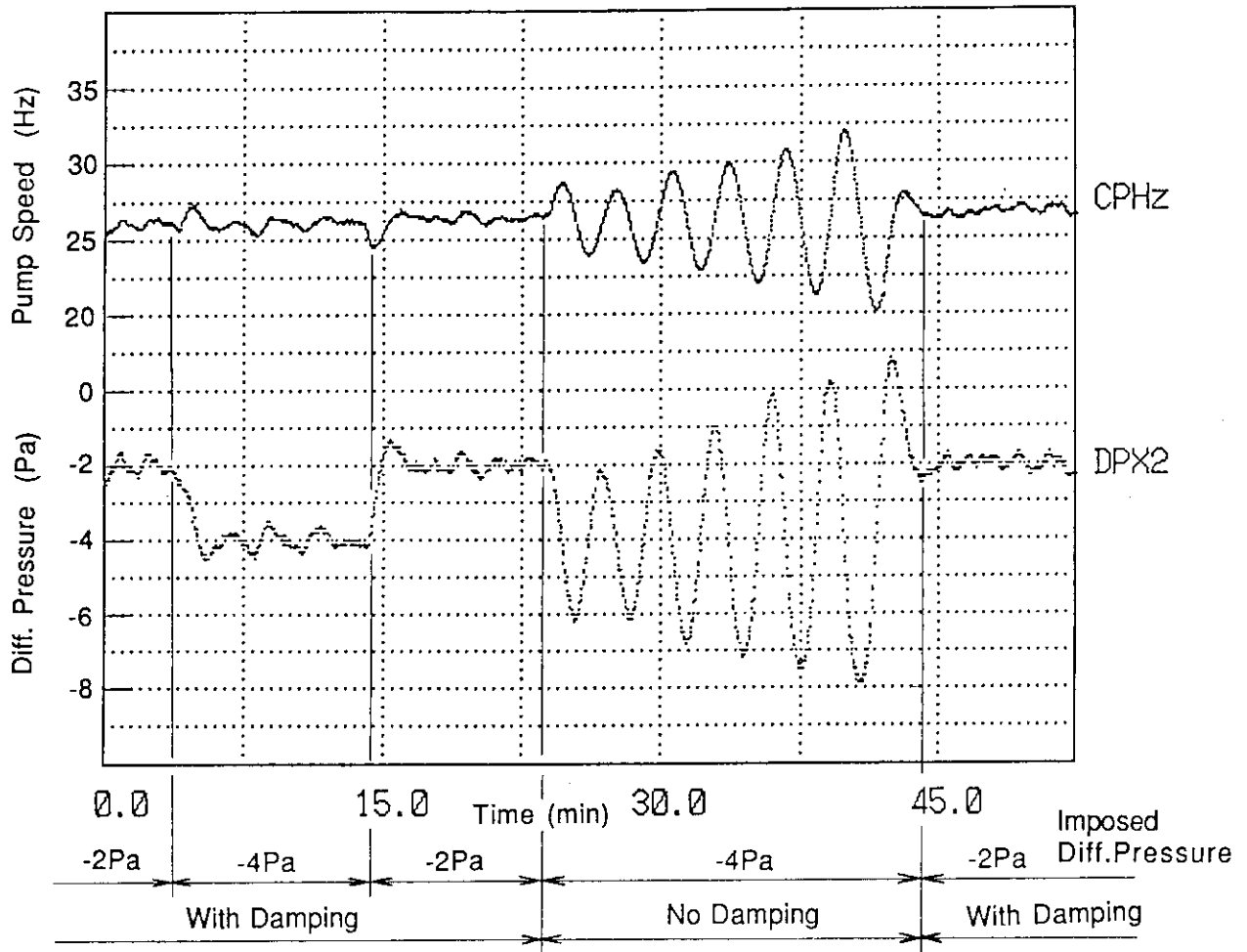


Fig. 4.1.3 Feedback control characteristics

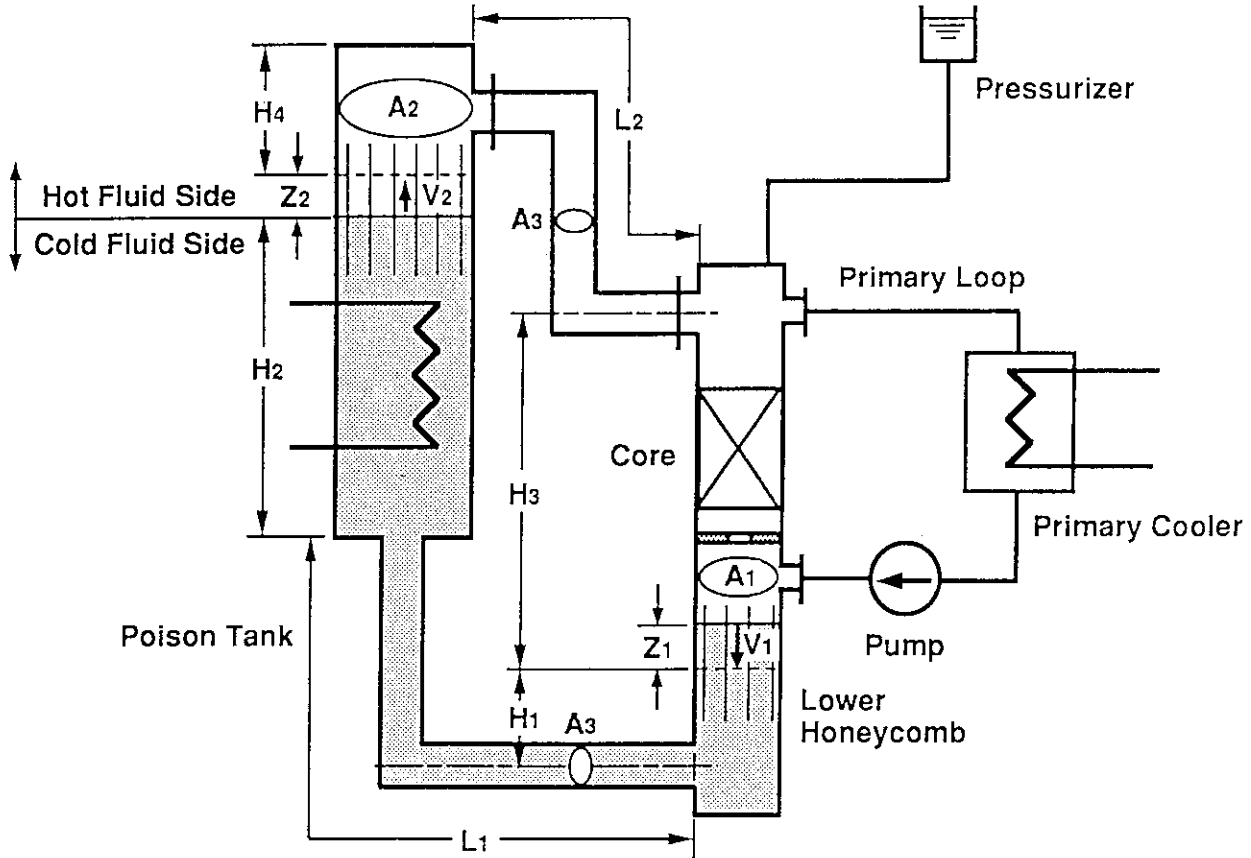


Fig. 4.2.1 Poison loop oscillation model

流量, 圧カトレンドグラフ

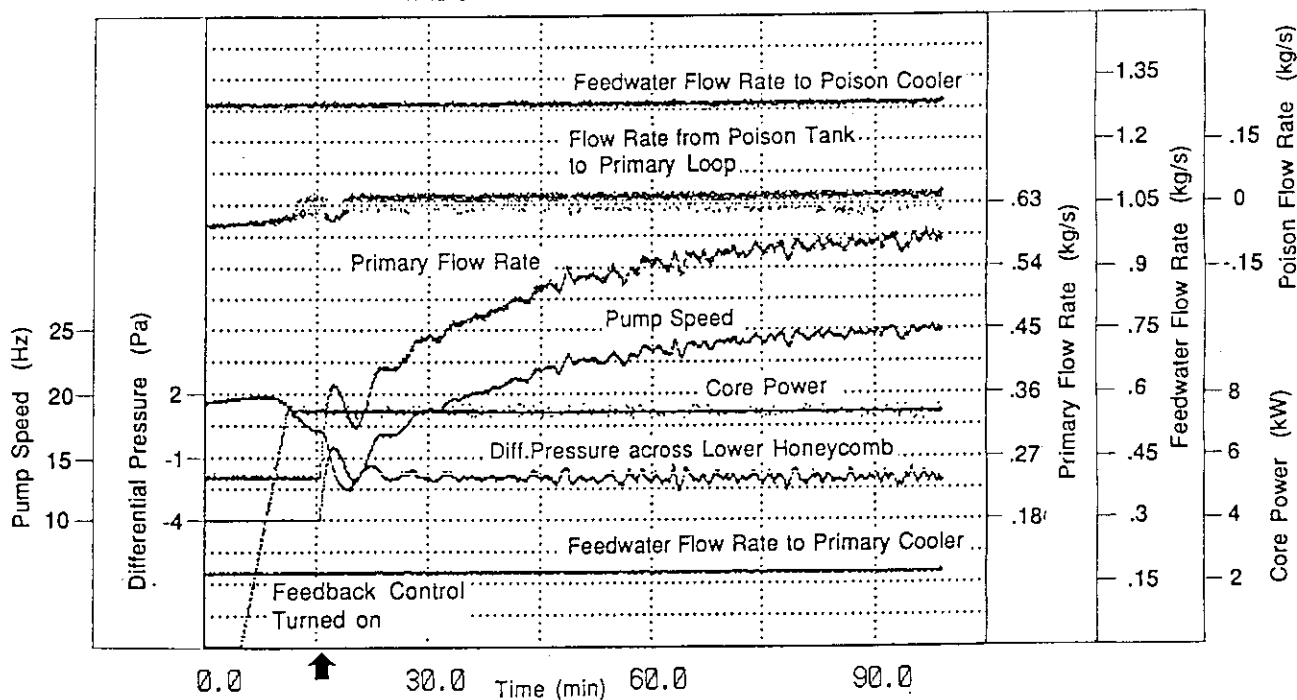


Fig. 5.1.1 Startup test (Data from TEST-A2)

温度トレンドグラフ

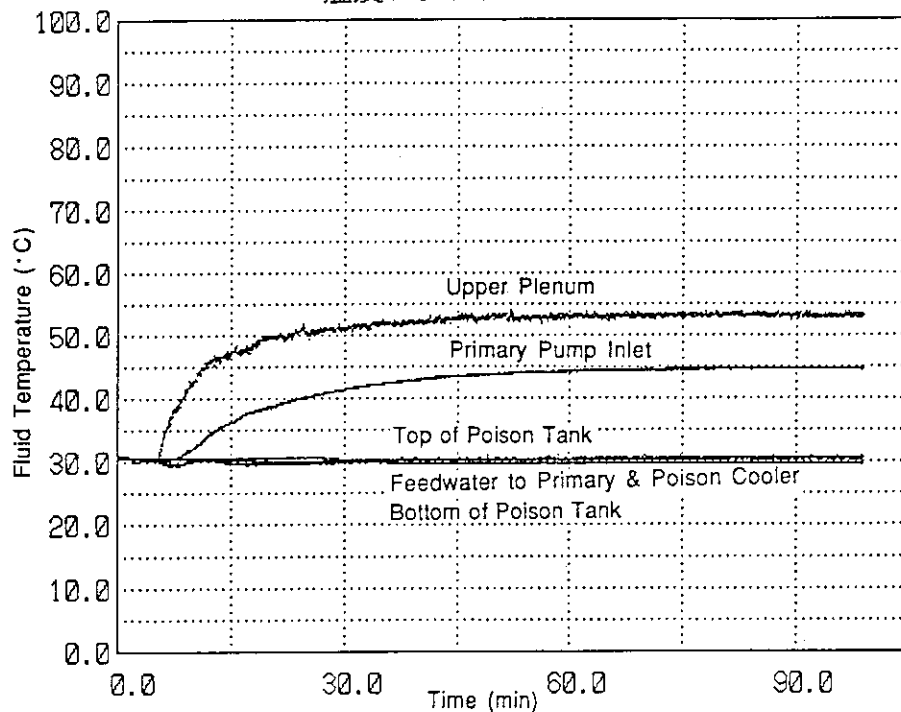


Fig. 5.1.2 Startup test (Data from TEST-A2)

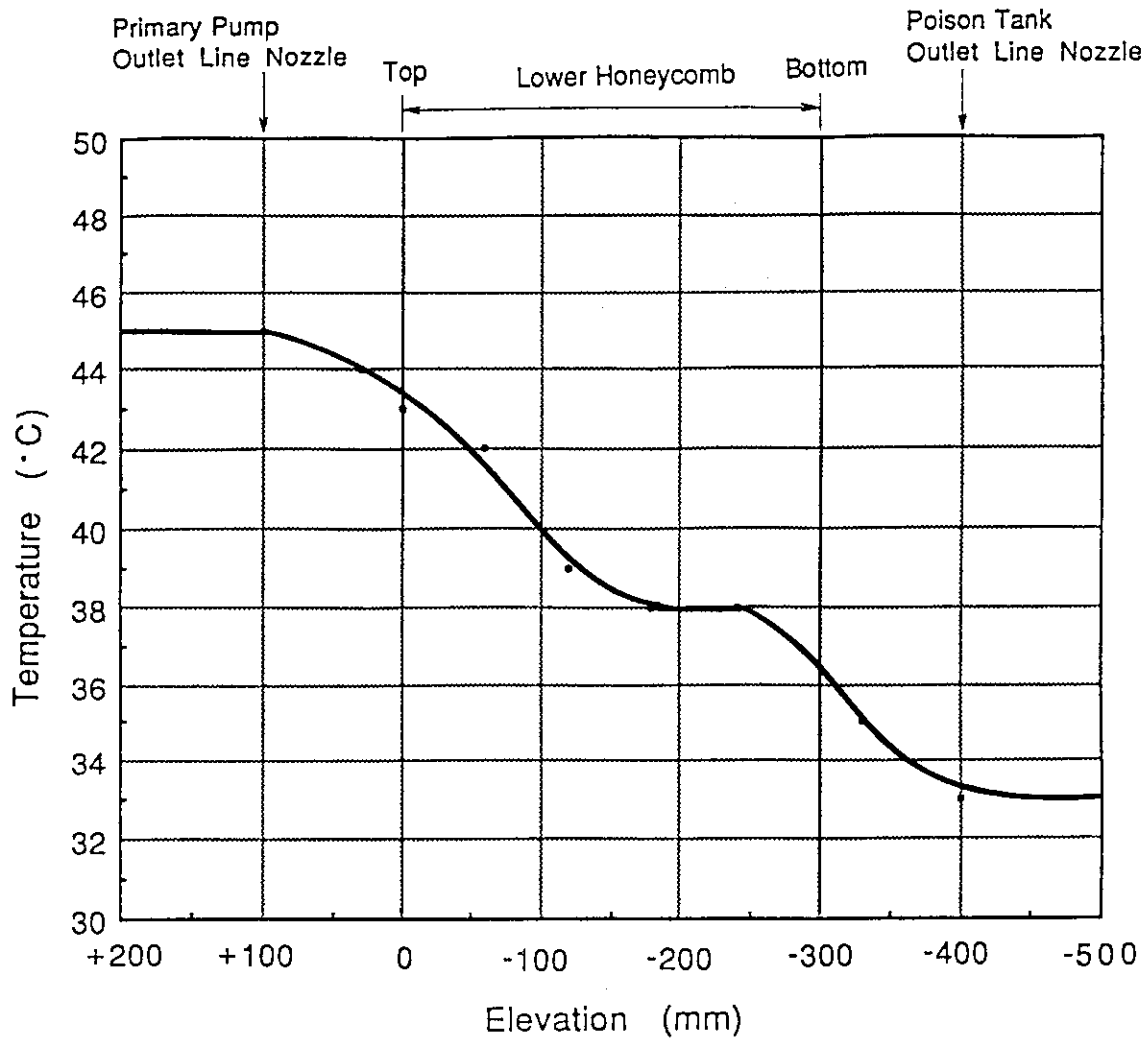


Fig. 5.1.3 Temperature distribution in lower density lock



流量, 圧カトレンドグラフ

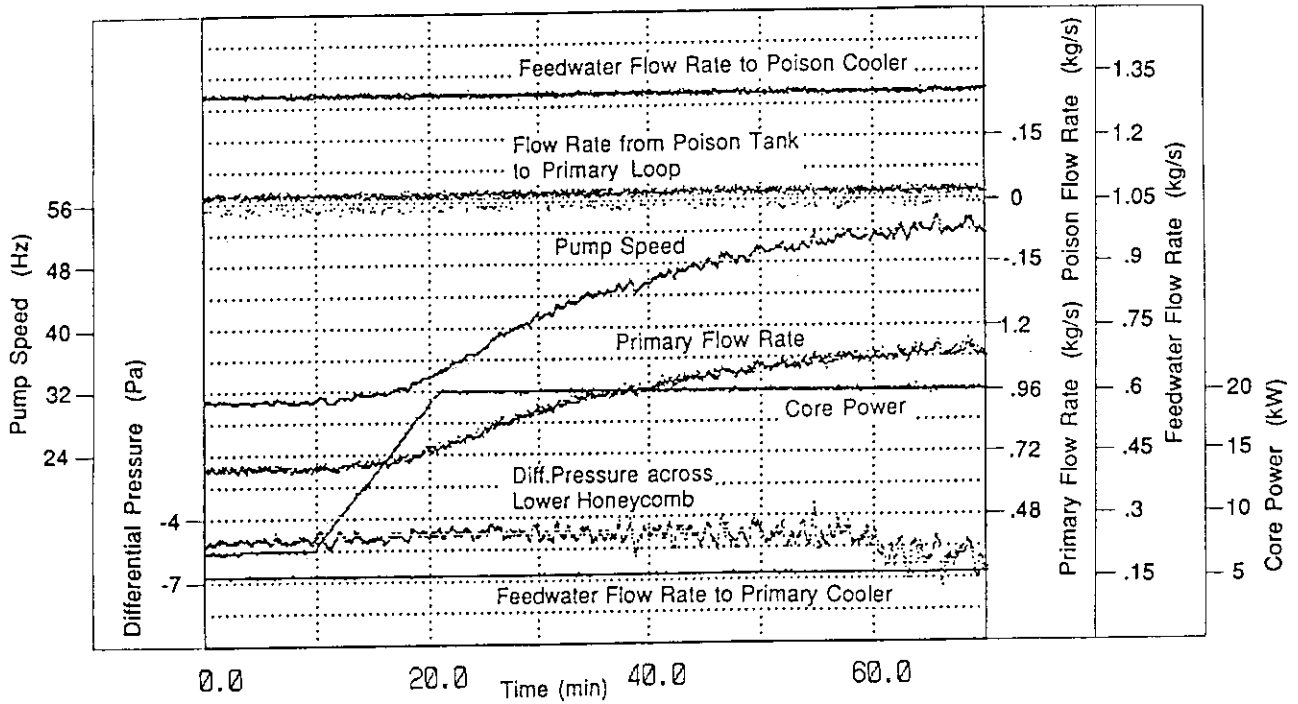


Fig. 5.2.1 Power ramping test (Data from TEST-C2)

温度トレンドグラフ

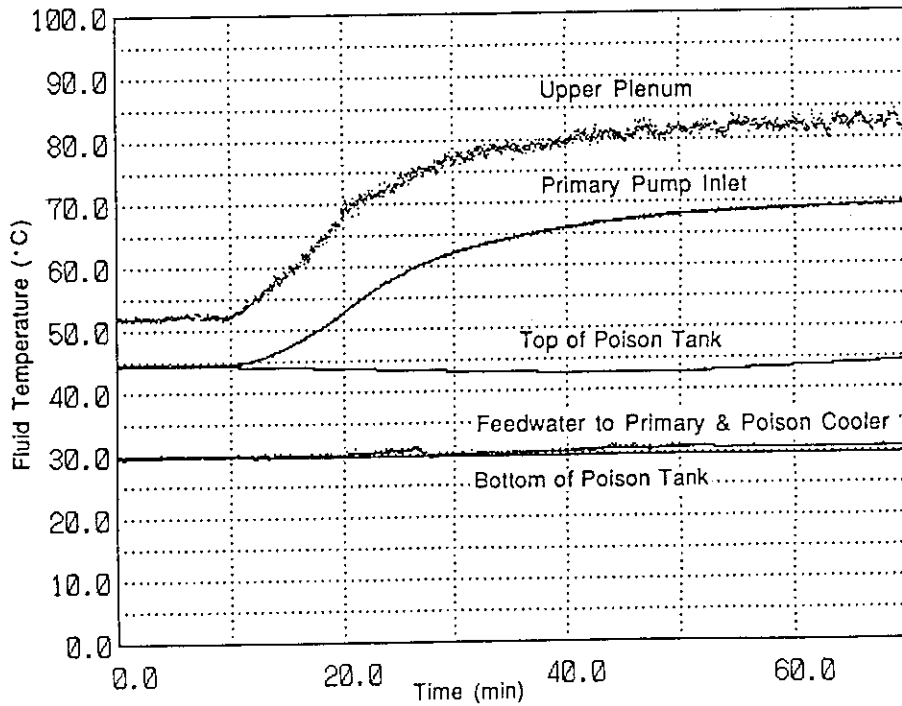


Fig. 5.2.2 Power ramping test (Data from TEST-C2)

流量, 圧カトレンドグラフ

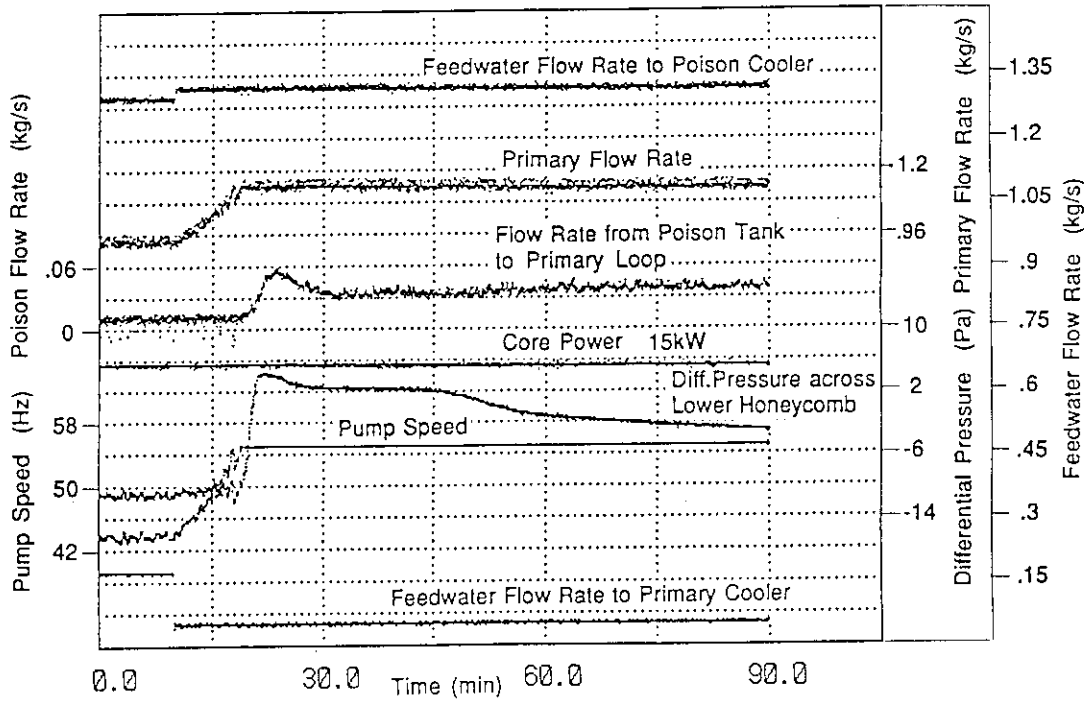


Fig. 6.1 Loss-of-feedwater simulation test  
(Data from TEST-D)

温度トレンドグラフ

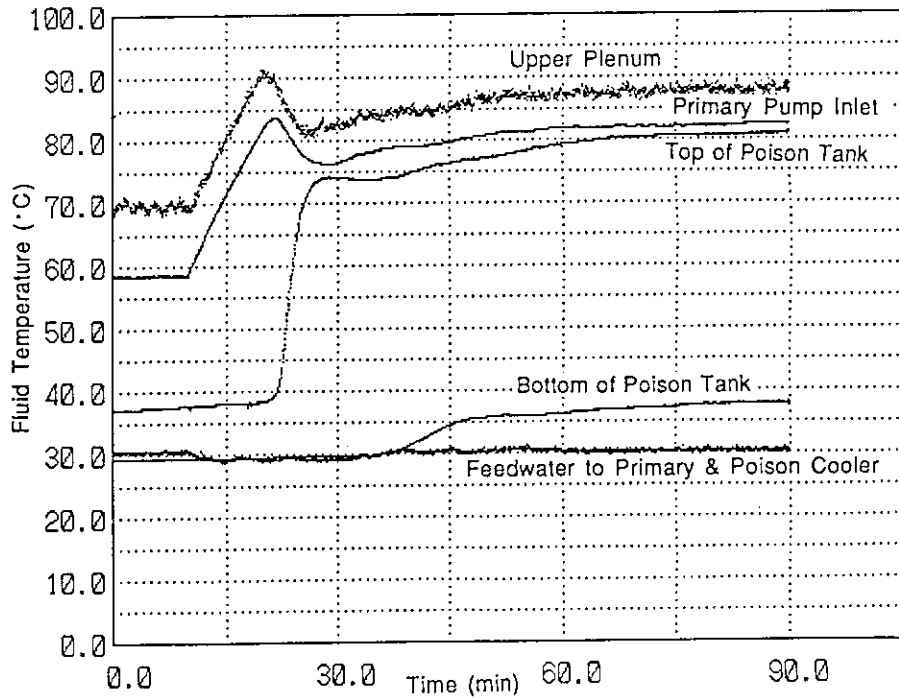


Fig. 6.2 Loss-of-feedwater simulation test  
(Data from TEST-D)

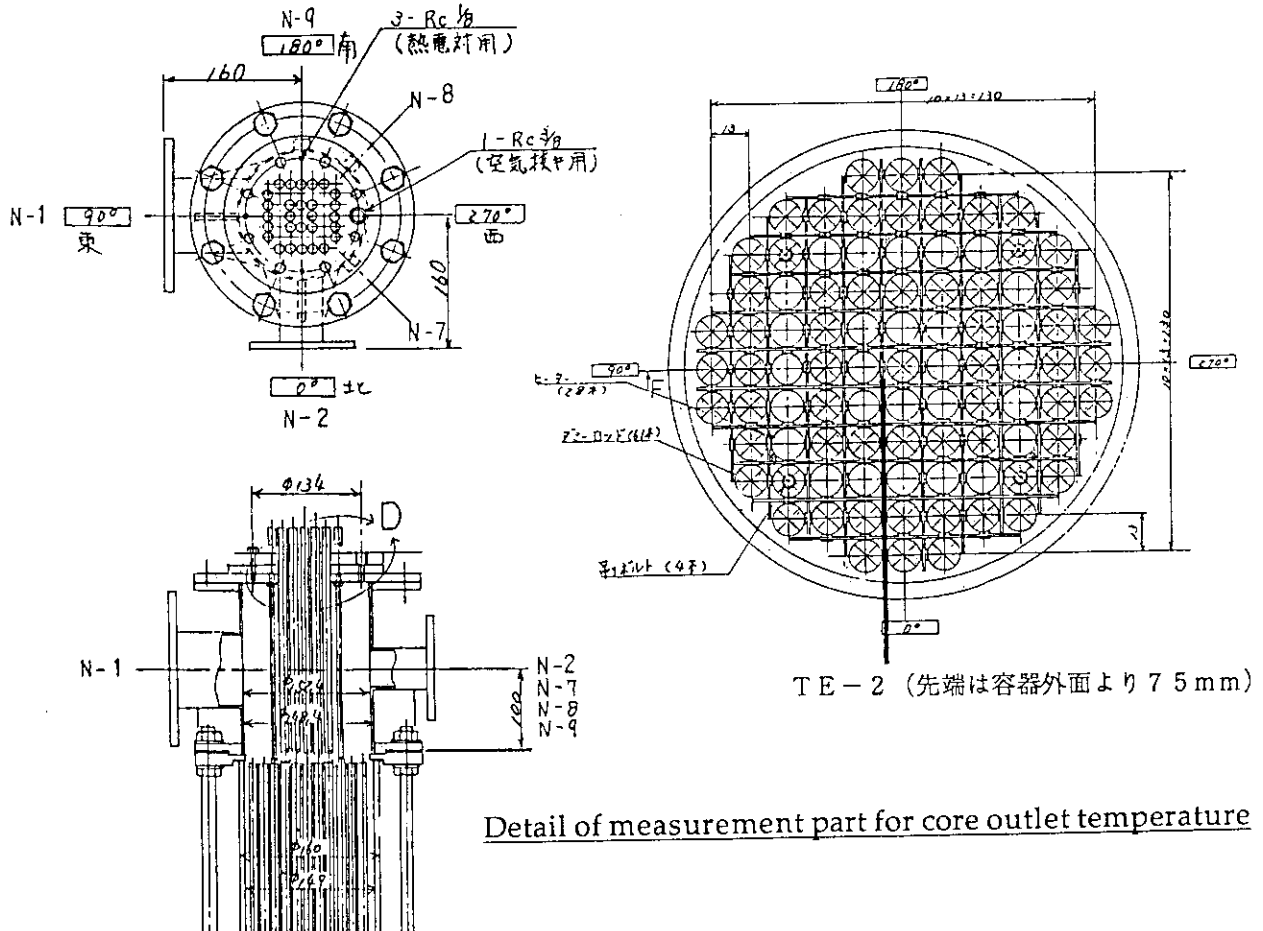
付録1 系内熱バランスについて

実験後の検討において、炉心出入口温度と1次系流量の測定値から計算される1次系水の受熱量と炉心出力との間で熱バランスが成り立たないことが判明した。この原因として、炉心出口（压力容器上部プレナム）において压力容器半径方向に温度分布がついており、熱電対 TE-2 が平均温度より高い値を示していることが挙げられる。

下図に示すように、炉心でのヒーター棒の配置より、上部プレナム部では中央部が周囲温度より高くなるものと予想されるが、熱電対は N-7 において図示する位置まで挿入されている。尚、図に示すノズル方向と炉心バンドルの装着方向は実際とは異なっており、右図は炉心バンドルに対する熱電対装着位置を示す。熱電対 TE-2 の指示値が炉心出口平均温度に対応していないことは、ホットレグ中の温度を測定し、この温度を用いて熱量計算したところほぼ炉心出力とバランスすることにより確認できた。

したがって、本報告書中の図表における熱電対 TE-2 の指示値は、炉心出口平均温度を示すものではないことに注意する必要がある。

3.3 定常運転時特性実験における静圧計算並びに 4.2 フィードバック制御実験解析での固有周波数計算値に対しても、その結果に対する上述の影響は避けられないが、各計算値に対する影響の度合いは小さいものと判断し TE-2 の値をそのまま用いている。



Detail of measurement part for core outlet temperature

## 付録2 実験条件一覧

Run No.	Date	Description
NCL-100	12/5/89	20kW定常運転
TEST-4	1/12/90	出力上昇 7.5kW → 20kW 減衰項付加
TEST-5	1/12/90	出力下降・上昇 20kW → 7.5kW → 20kW
TEST-6	1/12/90	出力上昇 2kW → 20kW 給水喪失模擬 20kW
TEST-8	1/26/90	スタートアップ模擬 7.5kW
TEST-9	1/26/90	出力上昇 7.5kW → 20kW
TEST-10	1/26/90	給水喪失模擬 15kW
STUP-1	2/28/90	スタートアップ模擬 7.5kW
TEST-A2	3/20/90	同上
TEST-B2,B3	3/20/90	ダンピング効果確認 7.5kW
TEST-A3	3/22/90	スタートアップ模擬 7.5kW
TEST-C2	3/22/90	出力上昇 7.5kW → 20kW
TEST-A4	3/23/90	スタートアップ模擬 15kW
TEST-D	3/23/90	給水喪失模擬 15kW
DAMP20-A,B	6/7/90	周波数応答特性調査 20kW
DAMP20-C	6/8/90	同上
DAMP20-D	6/21/90	同上
DAMP-20 -E,F,G,H	6/22/90	同上
NAGOYA-B	7/25/90	スタートアップ模擬 15kW
NAGOYA-C	7/25/90	出力上昇及びポンプトリップ 模擬 7.5kW → 23kW
NAGOYA-D	7/25/90	ポンプトリップ模擬 23kW