

J A E R I - M  
89-114

JRR-3改造炉の冷中性子源装置のための  
二重管式閉ループサーモサイフォン実験(II)

1989年9月

熊井 敏夫・工藤 三好・坂本 正誠・坪 長・高橋 秀武

日本原子力研究所  
Japan Atomic Energy Research Institute

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。  
入手の問合せは、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, Tokaimura, Naka-gun, Ibaraki-  
ken 319-11, Japan.

© Japan Atomic Energy Research Institute, 1989

編集兼発行 日本原子力研究所  
印 刷 日青工業株式会社

JRR-3 改造炉の冷中性子源装置のための二重管式閉  
ループサーモサイフォン実験 (II)

日本原子力研究所東海研究所研究炉管理部

熊井 敏夫・工藤 三好・坂本 正誠<sup>+</sup>

坪 長・高橋 秀武

(1989年8月4日受理)

JRR-3 改造炉に設置される冷中性子源装置では、クライオスタッフ内にある減速材容器、液体水素減速材等の核発熱及び真�断熱槽からの入熱（合計約 900 W）を除去しながら減速材容器内に一定量の減速材を安定して貯留するために、二重管式閉ループサーモサイフォンを使用している。

本報告は、この二重管式閉ループサーモサイフォンの特性のうち、運転上必要となる熱輸送特性、減速材容器の貯液特性等を把握するために行った実験について述べたものである。

実験では、サイフォン回路内の流体の状況を観察できるガラス製の実験装置（コンデンサ、サイフォン管及び容積 800 cc の蒸発器で構成する。）にサイフォン流体としてフロン 113 を充填してサーモサイフォンを運転した。サーモサイフォンの特性として、流体の脈動の発生領域、熱輸送限界、蒸発器の液レベル及びボイド率をサイフォン回路に充填する充填液量と熱輸送量をパラメータとして測定した。その結果、充填液量はサイフォン流体の脈動やドライアウトの発生に対して重要な調整要素であり、充填液量を調節することによって脈動やドライアウトのない安定なサイフォンの運転が可能になること、また、充填液量は蒸発器の貯液量及びボイド率にも影響を与え、充填液量を多くすると蒸発器の貯液量は多くなりボイド率は小さくなることが分かった。

実験結果に基づく検討から、水素をサイフォン流体とする冷中性子源装置の運転においても充填液量を調節することによって脈動やドライアウトの発生のない安定な運転ができるここと、また、ボイド率も調節できることが明らかになった。

Fundamental Experiment on the Closed Circuit Type  
Thermosyphon with Concentric Tubes for the JRR-3  
Cold Neutron Source (II)

Toshio KUMAI, Mitsuyoshi KUDO, Masanobu SAKAMOTO<sup>+</sup>  
Cho AKUTSU and Hidetake TAKAHASHI

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

(Received August 4, 1989)

An experimental study has been performed to understand the characteristics of the closed circuit type thermosyphon with concentric tubes by using Freon-113 as working fluid on the full scale model of the JRR-3 cold neutron source whose thermosyphon system has roles to maintain the liquid hydrogen in the moderator cell and to remove the heat produced in the cryostat.

The purposes of this experiment were focussed on observing flow pattern of the working fluid and measuring the heat transfer limitation, the liquid level and the void ratio in the moderator cell as a function of the charged liquid volume and heat input.

In conclusion, the following main items are made clear.

1. The volume of the charged liquid is very important factor to prevent the thermosyphon from oscillation and dryout. If the volume of the charged liquid is more than the critical volume which depends on the size, shape and volume of the syphon circuit, the oscillation and dryout phenomena may not occur.

---

+ Department of Physics

2. The volume of stored liquid and the void ratio in the moderator cell are controlled by regulating the volume of the charged liquid.

These results show that the thermosyphon in the JRR-3 cold neutron source can be controlled properly by adjusting the volume of the charged liquid.

**Keywords:** JRR-3, Thermosyphon, Freon-113, Flooding, Dryout, Cold Neutron Source

## 目 次

1. まえがき .....	1
2. 実験 .....	2
2.1 実験装置 .....	2
2.2 実験方法 .....	3
3. 実験結果 .....	4
3.1 流動状況 .....	4
3.1.1 第1安定流動領域 .....	5
3.1.2 不安定流動領域 .....	5
3.1.3 第2安定流動領域 .....	6
3.2 セルの液レベル .....	7
3.3 セル内のボイド率 .....	7
4. 検討 .....	8
4.1 安定流動領域の検討 .....	8
4.2 热輸送限界値の検討 .....	8
4.3 大きな気泡の上昇に基づく不安定流動範囲の検討 .....	9
4.4 セルの液レベル及びボイド率の検討 .....	9
4.5 充填液量の検討 .....	10
5. まとめ .....	10
謝辞 .....	11
参考文献 .....	11

## Contents

1. Introduction .....	1
2. Experiment .....	2
2.1 Apparatus .....	2
2.2 Procedures .....	3
3. Experimental result .....	4
3.1 Flow pattern .....	4
3.1.1 1st stable flow zone .....	5
3.1.2 Unstable flow zone .....	5
3.1.3 2nd stable flow zone .....	6
3.2 Liquid level in the cell .....	7
3.3 Void ratio in the cell .....	7
4. Discussion .....	8
4.1 The stable flow zone .....	8
4.2 The heat transport limitation .....	8
4.3 The unstable flow zone caused by the big bubbles .....	9
4.4 The liquid level and the void ratio in the cell .....	9
4.5 The volume of the charged liquid .....	10
5. Conclusion .....	10
Acknowledgement .....	11
Reference .....	11

## 1. まえがき

本報告は、JRR-3に設置する冷中性子源装置（以下「CNS」という。）の二重管式閉ループサーモサイフォンの熱流力特性を把握するために行った実験〔1〕<sup>1)</sup>に引き続いで、CNSの最適な運転条件を検討するために行った実験について述べたものである。実験〔1〕では構造の簡単な直管縮小モデルの単管式及び二重管式実験装置を用いて、フラッディング臨界入力がWallisの相関式と合致していること及び二重管式のフラッディング臨界入力は単管式の値より大きくなることを明らかにした。今回報告する実験では CNS で水素を循環させる回路（以下「サイフォン回路」という。）とほぼ同じ寸法・形状である二重管式の実験装置を用いて、サイフォン流体の脈動の発生、熱輸送限界、蒸発器の液レベル及びボイド率をサイフォン回路に充填する充填液量と熱輸送量をパラメータとして測定した。

CNSにおいて冷中性子を高い中性子束で安定して発生させるためには、減速材容器（以下「セル」という。）内で熱中性子が冷中性子に減速されるのに必要な液体水素を約3cmの厚さで安定に溜める必要がある。セル内に貯留されている液体水素は核発熱及び侵入熱により沸騰・蒸発しているため、一定量の液体水素を溜めておくのには蒸発量に等しい液体水素を補給する必要がある。CNSではセルに液体水素を貯留する方法として、セルより高い位置に設置するコンデンサとセルの間を内管と外管とから構成する二重管（以下「サイフォン管」という。）で接続し、コンデンサで液化された液体水素を内管を通して重力によりセルへ流下させ、セルで蒸発する蒸気を外管を通してコンデンサに導く、いわゆる二重管式閉ループサーモサイフォン（以下「サーモサイフォン」という。）を採用している。CNSのサーモサイフォンの設計熱輸送量はセル、液体水素、サイフォン管の核発熱量 598W と真空断熱槽からの侵入熱量 297.3Wとの和に余裕を見て 900W としている。

このサーモサイフォンにおける流体の流動状況、セル内の液レベル、ミクスチャーレベル、ボイド率等の熱流力特性は、サイフォン管が二重管であること、3°の傾斜管部、曲り部、液留、伸縮継手、均圧孔等が存在するため流路が多様に変化していること等によりサイフォン回路の構造が複雑になることから、解析が難しく文献も少ない。このため我々は適切な運転条件を実験により確かめることにした。CNSとほぼ同等の寸法のサイフォン管及びセルを備えたガラス製のサーモサイフォン実験装置を製作し、サイフォン回路内に充填するフロン113液量（以下「充填液量」という。）をパラメータとして、熱輸送量（以下「コンデンサ交換熱量」という。）に対する熱流力特性を調べた。実験は充填液量としてセル容積にほぼ等しい 700cc からサイフォン流体の流動状況が第2安定流動領域であることを確認できる 2200cc までの範囲、コンデンサ交換熱量としてセルを加熱するヒータの許容量である 1600W までの範囲で行った。CNSのサーモサイフォンの概要を Fig. 1.1 に示す。

実験及び検討の結果、次のことが明らかになった。

- (1) サーモサイフォンの流動状況には充填液量及びコンデンサの交換熱量に応じて第1安定流動領域、不安定流動領域及び第2安定流動領域が存在する。

(2) 充填液量が多いほどセル内に貯留される液レベルは高い。

(3) ボイド率は充填液量が多いほど小さい。

これらのことから、冷中性子源装置の運転においても充填液量を調整することによって脈動やドライアウトの発生のない安定な運転ができるここと、また、ボイド率も調節できることが分かった。

## 2. 実験

### 2.1 実験装置

本実験で使用した実験装置は、サイフォン回路内の流体の流動状況を目視できる硬質ガラス製とし、サイフォン流体の流動状況に直接影響を及ぼすセル、コンデンサ下部の液溜及びサイフォン管の寸法・形状はほぼ CNS と同じものである。

実験装置の主要な構成機器は、サイフォン回路本体、保温フード、冷却水調整装置、計測機器、支持架台等である。以下に各構成部について述べる。Fig 2.1 に実験装置の概要を、また、Fig 2.2 に実験装置の写真を示す。

#### (1) サイフォン回路本体

サイフォン回路本体は、フロン 113 の蒸気を水により冷却して液化するコンデンサ、フロン 113 液を加熱して気化するセル、コンデンサとセルを接続して液と蒸気を循環するサイフォン管から構成している。Fig 2.3 にサイフォン回路本体の構造を示す。

コンデンサは20本の銅製の伝熱管及び1本の銅製の芯管、SUS 製の胴及びSUS 製の2枚の管板より成る胴部、液充填口と圧力センサが取り付けられているガラス製のキャップ、内管の入口と外管の間を連通するための孔（以下「均圧孔」という。）を設けたガラス製の液溜から構成する長さ約 630 mm、外径約 80 mm のシェルアンドチューブ型のものである。胴部には冷却水の出入口及びこの水温測定のための熱電対を取り付けている。キャップ、胴部及び液溜はフランジで相互に接続している。Fig 2.4 にコンデンサの胴部、Fig 2.5 に CNS のコンデンサの構造を示す。

セルは CNS で使用する減速材容器とほぼ同じ容量、同じ寸法のもので、セル内の液レベル及びボイド率を測定するための5本の細管等が側部に取り付けてある。セルの加熱はセルの外表面に塗布した透明な電導膜（以下「ネサ膜」という。）に交流を通電することにより表面全体にわたってほぼ均一に行った。Fig 2.6 に CNS の減速材容器の構造を示す。

サイフォン管は CNS で使用する低温流路管とほぼ同様の寸法のもので、その寸法は以下のとおりである。

イ) 内管内径 8 mm、内管外径 10 mm、外管内径 22 mm

ロ) 長さ：セル上部の垂直部分約 3,030 mm

3° の傾斜部分約 3,980 mm

コンデンサ下部の垂直部分約 230 mm

合計約 7,240 mm

(2) 充填液量が多いほどセル内に貯留される液レベルは高い。

(3) ポイド率は充填液量が多いほど小さい。

これらのことから、冷中性子源装置の運転においても充填液量を調整することによって脈動やドライアウトの発生のない安定な運転ができるここと、また、ポイド率も調節できることが分かった。

## 2. 実験

### 2.1 実験装置

本実験で使用した実験装置は、サイフォン回路内の流体の流動状況を目視できる硬質ガラス製とし、サイフォン流体の流動状況に直接影響を及ぼすセル、コンデンサ下部の液溜及びサイフォン管の寸法・形状はほぼ CNS と同じものである。

実験装置の主要な構成機器は、サイフォン回路本体、保温フード、冷却水調整装置、計測機器、支持架台等である。以下に各構成部について述べる。Fig 2.1 に実験装置の概要を、また、Fig 2.2 に実験装置の写真を示す。

#### (1) サイフォン回路本体

サイフォン回路本体は、フロン 113 の蒸気を水により冷却して液化するコンデンサ、フロン 113 液を加熱して気化するセル、コンデンサとセルを接続して液と蒸気を循環するサイフォン管から構成している。Fig 2.3 にサイフォン回路本体の構造を示す。

コンデンサは20本の銅製の伝熱管及び1本の銅製の芯管、SUS 製の胴及びSUS 製の2枚の管板より成る胴部、液充填口と圧力センサが取り付けられているガラス製のキャップ、内管の入口と外管の間を連通するための孔（以下「均圧孔」という。）を設けたガラス製の液溜から構成する長さ約 630 mm、外径約 80 mm のシェルアンドチューブ型のものである。胴部には冷却水の出入口及びこの水温測定のための熱電対を取り付けている。キャップ、胴部及び液溜はフランジで相互に接続している。Fig 2.4 にコンデンサの胴部、Fig 2.5 に CNS のコンデンサの構造を示す。

セルは CNS で使用する減速材容器とほぼ同じ容量、同じ寸法のもので、セル内の液レベル及びポイド率を測定するための5本の細管等が側部に取り付けてある。セルの加熱はセルの外表面に塗布した透明な電導膜（以下「ネサ膜」という。）に交流を通電することにより表面全体にわたってほぼ均一に行った。Fig 2.6 に CNS の減速材容器の構造を示す。

サイフォン管は CNS で使用する低温流路管とほぼ同様の寸法のもので、その寸法は以下のとおりである。

イ) 内管内径 8 mm、内管外径 10 mm、外管内径 22 mm

ロ) 長さ：セル上部の垂直部分約 3,030 mm

3° の傾斜部分約 3,980 mm

コンデンサ下部の垂直部分約 230 mm

合計約 7,240 mm

セル上部の外管にフランジ接続部分があり、この接続を介して内管に取り付ける液の出口ノズルの長さ、径、形状等を変えて実験できるようにしてある。Fig 2.7にCNSの低温流路管の構造を示す。

#### (2) 保温フード

実験に使用するフロン113の沸点は約48°Cであるので、サイフォン管から周囲へ熱が逃げないようにするためにサイフォン管全体をアクリル製のフードで覆い、ドライヤで温風を循環させることによりサイフォン管の周囲温度を約48°Cに保った。

#### (3) 冷却水調整装置

サーモサイフォンの運転圧力をCNSの運転圧力と同じ約1kg/cm<sup>2</sup>に制御するため、コンデンサへ流入する冷却水の温度、流量を電気ヒータ、流量調整弁等で調整した。

#### (4) 計測機器及び支持架台等

実験時の圧力、差圧、電力、温度等を測定記録するためにストレインゲージ型絶対圧力測定装置、微小差圧計、電力変換器、ペン式レコーダ、打点式レコーダ等を使用した。ガラス製の実験装置は建家の壁面に支持架台を設置し、これに固定した。

CNS及び実験装置の主要諸元をTable 2.1に示す。なお、本実験装置ではCNSの水素緩衝タンク（容積約600ℓ）は模擬していない。

## 2.2 実験方法

実験は以下に示す手順によって行った。

#### (1) 出口ノズルを取り付ける。

今回の実験では内径8mm、外径10mm、長さ100mm（セル底から出口ノズル先端までの距離240mm）、ストレート形状のノズル（コンデンサから流下する液の出口）をテフロンチューブを介して内管に取り付けた。

#### (2) ドライヤを運転し保温フード内の温度を約48°Cに加温する。

#### (3) サイフォン回路本体を油回転真空ポンプで真空引きする。

#### (4) フロン113をメスシリンドで秤量し、コンデンサキャップの液充填口からサイフォン回路本体に充填する。この時、空気が混入しないよう行う。

#### (5) コンデンサ冷却水流量を約1.0ℓ/minに調整する。

#### (6) ネサ膜に通電してセルを加熱する。

#### (7) コンデンサ冷却水の流量及び温度を調整してサーモサイフォンの動作圧力を約1kg/cm<sup>2</sup>とする。

#### (8) サイフォン流体の温度、圧力等が飽和してから、セル内の液レベル、ミクスチャーレベル、ボイド率、圧力、温度等を計測する。

#### (9) ネサ膜入力及び充填液量を変化させて(8)と同様の計測を行う。充填液量を変更する時はサイフォン流体の圧力が1.0kg/cm<sup>2</sup>以下になるようにセルの加熱量、冷却水を調整しながら液を補填する。

#### (10) ネサ膜への電気入力約100～1600W、充填液量700～2200ccの範囲で実験する。

コンデンサ交換熱量、ボイド率等は次のように求めた。

(1) コンデンサ交換熱量

コンデンサ交換熱量はコンデンサ冷却水の流量と出入口の温度差の積として求める。

(2) ボイド率

セル内のボイド率は以下に示すように、高さ方向のボイド率 $\alpha$ の分布、高さ方向の平均ボイド率 $\beta$ の分布及びセル平均ボイド率について求める。Fig. 2.8 にボイド率測定の説明図を示す。

イ) 高さ方向のボイド率 $\alpha$ の分布

高さ方向のボイド率 $\alpha$ はセルを高さ方向に5つの区分(4つの区分の幅はそれぞれ50mm)に分けた時の各区分でのボイド率である。高さ方向のボイド率 $\alpha$ は各区分の境に取り付けてある液レベル計の指示値から次のようにして求める。

区分の上下の境に取り付けてある液レベル計の指示値の差はその区分内のボイド分の高さを表すから、この液レベル計の指示値の差と区分の幅との比がその区分でのボイド率となる。区分1液レベル計の指示値と各液レベル計の指示値との差をセルの下部から順に $\Delta h_1$ ～ $\Delta h_4$ (mm) とすると各区分でのボイド率は以下の式により求める。

$$\begin{aligned}\alpha_1 &= \Delta h_1 / 50 & \alpha_3 &= (\Delta h_3 - \Delta h_2) / 50 \\ \alpha_2 &= (\Delta h_2 - \Delta h_1) / 50 & \alpha_4 &= (\Delta h_4 - \Delta h_3) / 50\end{aligned}$$

ロ) 高さ方向の平均ボイド率 $\beta$ の分布

高さ方向の平均ボイド率 $\beta$ は各液レベル計の取付高さより下の部分のボイド率である。平均ボイド率 $\beta_1$ ～ $\beta_4$ (セルの下部から順に)は下式によって求める。

$$\begin{aligned}\beta_1 &= \Delta h_1 / 50 & \beta_3 &= \Delta h_3 / 150 \\ \beta_2 &= \Delta h_2 / 100 & \beta_4 &= \Delta h_4 / 200\end{aligned}$$

ただし、区分1の液レベル計取付位置より20mm上までの範囲ではネサ膜を塗布していないためボイド率は0としている。

ハ) セル平均ボイド率

セル平均ボイド率は区分1の液レベル計の読み値に対応するセル内液量とセルの容量800ccの比として求める。

### 3. 実験結果

#### 3.1 流動状況

サイフォン回路内のサイフォン流体の流動状況は充填液量及びコンデンサ交換熱量に応じて、1 安定流動領域、不安定流動領域及び第2 安定流動領域の3つに大別して考えることができる。以下に各領域の特徴を Fig. 3.1 に示した流動状況の領域区分に従って示す。

コンデンサ交換熱量、ボイド率等は次のように求めた。

(1) コンデンサ交換熱量

コンデンサ交換熱量はコンデンサ冷却水の流量と出入口の温度差の積として求める。

(2) ボイド率

セル内のボイド率は以下に示すように、高さ方向のボイド率 $\alpha$ の分布、高さ方向の平均ボイド率 $\beta$ の分布及びセル平均ボイド率について求める。Fig. 2.8 にボイド率測定の説明図を示す。

イ) 高さ方向のボイド率 $\alpha$ の分布

高さ方向のボイド率 $\alpha$ はセルを高さ方向に5つの区分(4つの区分の幅はそれぞれ50mm)に分けた時の各区分でのボイド率である。高さ方向のボイド率 $\alpha$ は各区分の境に取り付けてある液レベル計の指示値から次のようにして求める。

区分の上下の境に取り付けてある液レベル計の指示値の差はその区分内のボイド分の高さを表すから、この液レベル計の指示値の差と区分の幅との比がその区分でのボイド率となる。区分1液レベル計の指示値と各液レベル計の指示値との差をセルの下部から順に $\Delta h_1$ ～ $\Delta h_4$ (mm) とすると各区分でのボイド率は以下の式により求める。

$$\begin{aligned}\alpha_1 &= \Delta h_1 / 50 & \alpha_3 &= (\Delta h_3 - \Delta h_2) / 50 \\ \alpha_2 &= (\Delta h_2 - \Delta h_1) / 50 & \alpha_4 &= (\Delta h_4 - \Delta h_3) / 50\end{aligned}$$

ロ) 高さ方向の平均ボイド率 $\beta$ の分布

高さ方向の平均ボイド率 $\beta$ は各液レベル計の取付高さより下の部分のボイド率である。平均ボイド率 $\beta_1$ ～ $\beta_4$ (セルの下部から順に)は下式によって求める。

$$\begin{aligned}\beta_1 &= \Delta h_1 / 50 & \beta_3 &= \Delta h_3 / 150 \\ \beta_2 &= \Delta h_2 / 100 & \beta_4 &= \Delta h_4 / 200\end{aligned}$$

ただし、区分1の液レベル計取付位置より20mm上までの範囲ではネサ膜を塗布していないためボイド率は0としている。

ハ) セル平均ボイド率

セル平均ボイド率は区分1の液レベル計の読み値に対応するセル内液量とセルの容量800ccの比として求める。

### 3. 実験結果

#### 3.1 流動状況

サイフォン回路内のサイフォン流体の流動状況は充填液量及びコンデンサ交換熱量に応じて、1 安定流動領域、不安定流動領域及び第2 安定流動領域の3つに大別して考えることができる。以下に各領域の特徴を Fig. 3.1 に示した流動状況の領域区分に従って示す。

### 3.1.1 第1安定流動領域

この領域では、セル上部のサイフォン管（以下「管」という。）にセル内の液と蒸気の混合流体（以下「ミクスチャー」という。）が吹き込まない場合と吹き込む場合によって流動に差異が生じる。

まず、充填液量が少なく、コンデンサ熱交換量が小さい場合（境界線Aの左側の範囲）には、セル内のミクスチャーは管より低いため、ミクスチャーは管に吹き込まない。コンデンサで液化した液が内管の壁面に沿って膜状に流下し、セルのミクスチャーはセルの上部で気・液に分離して蒸気のみが外管及び内管の中心部を通って上昇する。この時の流動状況は気・液が分離して定常的に循環するため、極めて安定している。また、セル内の液レベル及びミクスチャーは低いレベルで安定している。Fig 3.2(1)-aにミクスチャーが吹き込まない場合の流動状況を示す。

次に、充填液量、コンデンサ交換熱量を増加してミクスチャーが管に吹き込むようにした場合（境界線A、B、D及びEで囲まれる範囲）には、外管の下端（セルの上部に接続されている部分）からミクスチャー柱が生じる。蒸気はこのミクスチャー柱を通り抜けて上昇し、内管の液は外管のミクスチャー流及び蒸気流の圧力損失に相当する高さの液柱を生じながら流下する。内管に入り込んだ蒸気は気泡となってこの液柱の中を上昇する。液はコンデンサの液溜にほとんど溜らない。流動状況はミクスチャー柱の高さが少し変化するが、ミクスチャー柱が液溜に達するまでは大体安定している。Fig 3.2(2)-aにミクスチャーが吹き込む場合の流動状況を示す。

### 3.1.2 不安定流動領域

この領域（境界線D、B、EとCの間の部分）は、間欠的流動範囲、ドライアウト発生範囲及び大きな気泡の上昇に基づく不安定範囲に分けられる。間欠的流動範囲（境界線BとCの間）においては、外管のミクスチャー柱は液溜まで周期的に上昇し、均圧孔から液溜へ吹き出す。吹き出したミクスチャーは気・液に分離し、液は液溜に流下し、蒸気はコンデンサ伝熱管へ上昇して凝縮する。液溜及び内管に溜った液は周期的にセルへ流下する。セルではコンデンサからの冷い液が流下して温度・圧力が一時的に低下した後、激しく沸騰し、ミクスチャーを外管へ吹き込み、ミクスチャー柱は傾斜管を越えて液溜まで上昇し再び液溜に液が溜る。液溜及び内管に液が溜るとセルの圧力は上昇し、セル内の液レベル及びミクスチャーは低下し、ミクスチャーの吹き込みは停止する。内管では吹き込まれたミクスチャー中の蒸気が大きな気泡の塊となって液柱を通して液溜へ上昇する。気泡塊が液溜の液中を通り、圧力の低下しているコンデンサに抜けると、液溜及び内管に溜った液の大部分がセルへ再び急激に流下する。上記の現象は液体の循環しているサイフォン回路の一部が開放し、気体を吸い込んでブレーキするのに似ており、この現象が生じる時にはセルの圧力、液レベル及びボイド率は液の流下及び停止に合わせて周期的に大きく変動する。Fig 3.2(2)-bに上で述べたミクスチャー及び液の間欠的な流動状況を示す。ミクスチャー及び液の間欠的な不安定流動は、サイフォン回路の寸法、形状、充填液量及び熱輸送量に起因するものと考えられる。この不安定流動の発生機構の一つの説明として次のことが考えられる。セル内のミクスチャーが外管へ吹き込み液溜に液が溜りセル内のミクスチャーは低減し、セル上部で気・液が分離して外管へ蒸気のみが吹き込むと、外管の垂直管部に残溜してい

るミクスチャー柱は蒸気流に押し上げられ、ミクスチャー柱の下端が傾斜管または液溜りまで押し上げられると、ミクスチャー柱の高さが急に減少する。この時に外管でのミクスチャー流による圧力損失が急激に減少するため内管の液柱は今までの高さを保持することができます、液をセルへ流下させる。振動の周期はFig 3.3に示すように充填液量及びコンデンサ交換熱量によって異なるが、充填液量及びコンデンサ交換熱量の増加に伴って周期は小さくなり約30秒の一定値になる。

さらに、この領域での特徴として特に注目すべき現象は、ドライアウト現象及びコンデンサ交換熱量が低い時に発生する大きな気泡の上昇に基づく圧力振動現象である。セルの液がコンデンサに移行し、セルの液レベルが連続的に減少するドライアウト現象は充填液量が約1300 cc以下で、コンデンサ交換熱量が約800 W以上の範囲（境界線Eの上部）において生じるケースがある。ドライアウト時にはセルの液レベル及びミクスチャーレベルが連続的に低下するためセルの過熱破損を招く恐れがある。このドライアウト現象は気液対向二相流のフラッディングに関連して起こると考えられている。Fig 3.2(1)-bにドライアウト時の流動状況を示す。Fig 3.4にドライアウト時のセル内の液レベルの変化を示す。

大きな気泡の上昇に基づく不安定範囲（境界線DとCの間）は、充填液量が約1300～2200 cc、コンデンサ交換熱量が約600 W以下の場合である。コンデンサ交換熱量が低い時にはセル内で時々大きな気泡が発生し、この気泡が外管または内管を通してゆっくり上昇する。この時垂直管内の液は気泡により押し上げられ、傾斜管または液溜に流入する。気泡塊が傾斜管または液溜を通り抜けると傾斜管または液溜の液は急に流下して圧力振動を生じる。コンデンサ交換熱量が大きくなると気泡塊の大きさは小さくなり、その数が増してボイドの発生が安定になり連続沸騰へ移行する。ボイド率が増加してミクスチャーレベルが均圧孔を超えると、この領域は第2安定領域へ移行する。Fig 3.2(1)-cに大きな気泡上昇時の流動状況を示す。

### 3.1.3 第2安定流動領域

この領域（境界線Cより上の部分）においては、外管の垂直部は常に上昇するミクスチャーで満たされ、傾斜管部では気・液分離した液が底面に沿って波が押し寄せるように、特に、コンデンサ交換熱量が1500 Wを超えるとプラグ流のようにして上方に移動し、液溜ではコンデンサ下部の垂直部の外管を上昇してきたミクスチャーが均圧孔から吹き出す。内管の全体は流下する液で満たされ、液溜には液が均圧孔レベルを超えて常に溜っている。この時の流動状況は、あたかも閉管路中を流体が勢い良く循環する様であり、安定している。また、セルの液レベルは高いレベルで安定する。Fig 3.2(2)-cに第2安定流動領域の流動状況を示す。

Fig 3.3(1)に充填液量が1000 ccの場合の第1安定領域及びドライアウト流動時のサイフォン回路の流動特性を、Fig 3.3(2)に充填液量が1700 ccの場合の大きな気泡の上昇に基づく不安定流動、間欠流動に基づく不安定流動及び第2安定流動時のサイフォン回路の流動特性を示す。サイフォン回路の流動特性としてセルとコンデンサ間の全圧力損失、セルとエルボ（セル上の垂直管と傾斜管の接続部）間の圧力損失の全圧力損失に対する割合、セルの液レベル、圧力振動周期等を示す。

### 3.2 セルの液レベル

セルの液レベルは常時変動している。この変動は沸騰に基づくものと3.1節の流動状況で述べた不安定流動に基づくものとに分けられる。Fig 3.4にセル液レベルの記録（ボイド率測定用液レベル差及びセル液レベル）を示す。この図において充填液量1000 cc, コンデンサ交換熱量890 W時の記録に不安定流動及びドライアウト時の液レベルの変動が示されている。

沸騰に基づくものは気泡の発生及び消失に伴う小さな変動であり、不安定流動に基づく変動にも重畠して表れている。

不安定流動に基づくものはセルへの液の流入・流出に伴うもので、セルの圧力変動と同期して変化する。すなわち、液の流下によるセル圧力低下時に液レベルは上昇し、ミクスチャーが管へ吹き込むセル圧力上昇時に液レベルは低下する。特に、ドライアウト時にはセルの液がコンデンサへ移行するためセルの液レベルは連続的に減少する。

充填液量及びコンデンサ交換熱量を変化させた時のセルの液レベル及び液量の変化をFig 3.5に示す。この図から、液レベルは充填液量が多いほど高くなり、コンデンサ交換熱量が多くなるほど低くなることが分かる。

### 3.3 セル内のボイド率

セル内のボイド率は安定流動領域と不安定流動領域においてその変化の様相が異なっている。

安定流動領域におけるセル内の液及び気泡の動き（ミクスチャーの動き）は、コンデンサから内管を通してセルへ流入する液の流入位置がセル上部の中央部であるためセル内の中心部を液が降下し、セル壁に沿って気泡が上昇する型の対流が生じる。このためセル内のボイド率はセル全体で均一化される傾向にある。

一方、不安定流動領域における気泡率は、3.2節のセルの液レベルのところで述べたように、セルへの液の流入時と流出時によって大きな差異がある。すなわち、液の流入によるセル圧力低下時にはセル内の温度が低下するため気泡は消失する。液の流下が止むと、サイフォン回路内全体の圧力低下のために急激に沸騰が生じ、気泡が増加してミクスチャーレベルは上昇し管へミクスチャーが吹き込む。このように気泡の消失から急激な沸騰へと気泡率は大きく変化するため安定領域で見られるような定常的な対流は見られない。Fig 3.4に示すボイド率測定用液レベル差の記録から分かるように、コンデンサ交換熱量が700 Wの安定流動領域における各液レベル計間の差の変化は比較的小さいのに対して、コンデンサ交換熱量が890 Wの不安定流動領域（ドライアウトの発生を含む。）における変化は非常に大きくなっている。

Fig 3.6に充填液量及びコンデンサ交換熱量を変えた時の高さ方向のボイド率の分布及び高さ方向の平均ボイド率の分布を示す。この図からボイド率はセルの上部ほど高くなっていることが分かる。なお、この図中の一点鎖線は中性子導管から望まれる視野の上下限位置を示している。

Fig 3.7にセル高さ22cmまでの高さ方向の平均ボイド率とコンデンサ交換熱量及び充填液量の関係を示す。この図から22cmまでの高さ方向の平均ボイド率はコンデンサ交換熱量に比例していること、充填液量1000 ccと1300 ccのボイド率のコンデンサ交換熱量に対する変化はほぼ同じ

であること、充填液量 1700 cc と 2200 cc のボイド率は充填液量 1300 cc の値より小さくなることが分かる。例えば、コンデンサ交換熱量 900 W の場合を見ると、充填液量が 1000 cc 及び 1300 cc の時にボイド率は 34%，1700 cc の時に 21%，2100 cc の時に 14% である。これらの数値の比較から充填液量が 1300 cc の時に比べて 1700 cc 及び 2100 cc の時にはボイド率は急に減少している。これは第 2 安定流動領域及びその近くにおいては、ミクスチャーが連続的に循環するのに伴いサブクール液による熱輸送量が増加するためと、セル外に存在する液量が多くなることによってセルの圧力が高められるためと考えられる。

## 4. 檢討

実験の結果、二重管式閉ループサーモサイフォンの流動特性として、流体の流動状況には充填液量及びコンデンサ交換熱量に応じて安定流動領域及び不安定流動領域が存在することが明らかになった。CNS の運転にあたっては、安定流動領域で運転を行うが、第 1 または第 2 安定流動領域のどちらで運転するかについて、次に示すような各領域の特性、サイフォン流体の種類による熱輸送限界値、セル内の液レベル及びミクスチャーレベル、ボイド率等をさらに検討する必要がある。

### 4.1 安定流動領域の検討

第 1 安定流動領域における流動は、基本的には内管及び外管それぞれの単管における気・液対向二相流である。このため、流動の状況はサイフォン管の寸法、形状、コンデンサから外管へ流入する液量、セル内の内管の開孔位置、コンデンサ交換熱量、サイフォン管下部での核発熱等によって大きく左右され、熱輸送量が大きくなると、時にはフラッディングに基づくドライアウトが発生する。

第 2 安定流動領域での流動は液単相流に近いもので、この領域では流動はサイフォン管の寸法、形状、セル内の開孔位置、コンデンサから外管へ流入する液量等には影響されにくく、また大きな熱輸送量を得ることができる。反面、この領域に達するには熱輸送量の小さい範囲で生ずる不安定領域を通過しなければならず、また充填液量を多くすることも必要である。

異なる種類のサイフォン流体を使用した場合の流動現象については、液体窒素、液体重水素及び液体水素を使用した単管の気・液対向二相流の実験により、液体の種類によって変りがないことが報告されている<sup>2)</sup>。

### 4.2 热輸送限界値の検討

熱輸送限界値を決める基本的現象はドライアウト現象と呼ばれているセル内の液量の連続的な減少である。このドライアウト現象は、充填液量とコンデンサ交換熱量の積に比例するサイフォ

であること、充填液量 1700 cc と 2200 cc のボイド率は充填液量 1300 cc の値より小さくなることが分かる。例えば、コンデンサ交換熱量 900 W の場合を見ると、充填液量が 1000 cc 及び 1300 cc の時にボイド率は 34%，1700 cc の時に 21%，2100 cc の時に 14% である。これらの数値の比較から充填液量が 1300 cc の時に比べて 1700 cc 及び 2100 cc の時にはボイド率は急に減少している。これは第 2 安定流動領域及びその近くにおいては、ミクスチャーが連続的に循環するのに伴いサブクール液による熱輸送量が増加するためと、セル外に存在する液量が多くなることによってセルの圧力が高められるためと考えられる。

## 4. 檢討

実験の結果、二重管式閉ループサーモサイフォンの流動特性として、流体の流動状況には充填液量及びコンデンサ交換熱量に応じて安定流動領域及び不安定流動領域が存在することが明らかになった。CNS の運転にあたっては、安定流動領域で運転を行うが、第 1 または第 2 安定流動領域のどちらで運転するかについて、次に示すような各領域の特性、サイフォン流体の種類による熱輸送限界値、セル内の液レベル及びミクスチャーレベル、ボイド率等をさらに検討する必要がある。

### 4.1 安定流動領域の検討

第 1 安定流動領域における流動は、基本的には内管及び外管それぞれの単管における気・液対向二相流である。このため、流動の状況はサイフォン管の寸法、形状、コンデンサから外管へ流入する液量、セル内の内管の開孔位置、コンデンサ交換熱量、サイフォン管下部での核発熱等によって大きく左右され、熱輸送量が大きくなると、時にはフラッディングに基づくドライアウトが発生する。

第 2 安定流動領域での流動は液単相流に近いもので、この領域では流動はサイフォン管の寸法、形状、セル内の開孔位置、コンデンサから外管へ流入する液量等には影響されにくく、また大きな熱輸送量を得ることができる。反面、この領域に達するには熱輸送量の小さい範囲で生ずる不安定領域を通過しなければならず、また充填液量を多くすることも必要である。

異なる種類のサイフォン流体を使用した場合の流動現象については、液体窒素、液体重水素及び液体水素を使用した単管の気・液対向二相流の実験により、液体の種類によって変りがないことが報告されている<sup>2)</sup>。

### 4.2 熱輸送限界値の検討

熱輸送限界値を決める基本的現象はドライアウト現象と呼ばれているセル内の液量の連続的な減少である。このドライアウト現象は、充填液量とコンデンサ交換熱量の積に比例するサイフォ

ン回路内のミクスチャー量のある値を境にして発生の原因が異なる。すなわち、このミクスチャー量が第1安定流動領域内に含まれる場合には熱輸送限界値はフラッディングの発生によって決まり、第2安定流動領域内に含まれる場合にはセルとコンデンサ間に存在する液柱の高さによる圧力によって決まる。

熱輸送限界がフラッディングに基づいて決まる場合については、すでに行われている実験結果から熱輸送限界値を推定することができる。例えばフランス、グルノーブルにある原子炉HFRのCNSの設計・製作のためにR.Ewaldらによって行われた実験値<sup>2)</sup>及びR.Ewaldらの実験装置とほぼ同じ実験装置でフロン113を用いて筆者らが行った実験<sup>1)</sup>から次のことが知られている。

内径約23mmの垂直な単管内での気・液対向二相流路における熱輸送限界はフラッディング現象の発生によって決まり、その値はサイフォン流体がフロン113の時約1000W、水素の時約230Wであり、水素の熱輸送限界値はフロン113の約1/4である。フロン113、窒素、重水素及び水素のフラッディング臨界入力Qcとサイフォン管の径の関係をFig.4.1に示す。この図ではフロン113の実験値をR.Ewaldらが行った窒素、重水素及び水素の実験値に追記している。

のことから、第1安定流動領域内の充填液量の場合、サイフォン流体がフロン113の時の熱輸送限界値が約800Wであるから、水素の熱輸送限界値は約200Wと推定される。

一方、熱輸送限界がセルとコンデンサ間に存在する液柱の高さによる圧力に基づいて決まる場合については、熱輸送限界の測定値がない。本実験では1600Wが実験装置のヒータの最大容量であるため、1600W以上である熱輸送限界値の測定はできなかった。このため、熱輸送限界値は計算によって求めた。計算は外管全体がミクスチャーで満たされ、内管全体が液で満たされていると仮定して、内管の液柱の高さによる圧力と内管の液の流動抵抗及び外管のミクスチャー流の圧力損失が釣り合っているとして行うと、サイフォン流体がフロン113の時約20kw、水素の場合約3kwとなる。

以上の検討から、熱輸送限界値は第2安定流動領域内の充填液量の場合の方が第1安定流動領域内の充填液量の場合より10倍以上大きくなることが分かる。

#### 4.3 大きな気泡の上昇に基づく不安定流動範囲の検討

この範囲は、コンデンサ交換熱量が約500W以下と小さく、充填液量が約1700cc付近である。この範囲での不安定はセル内の気泡の発生が均一ではなく、局部的に大きな気泡が発生するために生じる現象である。大きな気泡の発生割合は液の粘度が大きいほど多くなる。サイフォン流体が水素の場合には、液体水素の粘度が $1.27 \times 10^{-5} \text{ kg/ms}$ <sup>4)</sup>であり、フロン113の粘度 $49.6 \times 10^{-5} \text{ kg/ms}$ <sup>5)</sup>に比べて約1/40であること、セルへの侵入熱量が常時約40Wあること等から大きな気泡の発生割合は小さくなるため、この不安定流動の範囲はフロン113の場合より狭くなると考えられる。

#### 4.4 セルの液レベル及びボイド率の検討

実験の結果、次のことが明らかになった。

(1) セルの液レベルは充填液量が大きいほど高くなり、コンデンサ交換熱量が大きいほど低くなる。

(2) ボイド率はセルの上部ほど高くコンデンサの交換熱量に比例する。

これらのことから充填液量が少くコンデンサ交換熱量が大きい場合またはドライアウト時にはセルの上部に気体のみの部分が存在することになり、このような状態が CNS で生ずると高い冷中性子束の安定な発生及びセルの外表面に施してある黒化処理膜を含めたセルの健全性維持の点からは好ましくないと思われる。

セルの液レベル及びボイド率を第1安定流動領域と第2安定流動領域について比較してみる。コンデンサ交換熱量が 750 W の時の充填液量 1000 cc (第1 安定流動領域) と 2200 cc (第2 安定流動領域) の液レベルはそれぞれ約 17.0 cm, 約 21.5 cm である。この各液レベルはセル内の液量にすると約 520 cc, 約 710 cc であり、セルの容積約 800 cc 対するセル全体の平均ボイド率はそれぞれ約 34%, 約 14% となる。このことは CNS において中性子導管がセルを望む視野の上下限間のセルの平均厚さが約 3 cm であることと冷中性子発生上適切な減速材厚さは液体水素の場合 3 cm とされていることから、冷中性子束は充填液量 2200 cc の場合のほうが 1000 cc の場合より大きくなると思われる。

#### 4.5 充填液量の検討

第2 安定流動状態を維持するためには、液溜内の液レベルが常に均圧孔より上にある必要性が実験により明らかになった。液レベルを常に均圧孔より上に保つために必要なサイフォン回路内のミクスチャー量は均圧孔より下部のサイフォン回路の容積に等しい約 3500 cc である。この量は充填液量とコンデンサ交換熱量によって決まり、コンデンサ交換熱量が零の場合に充填液量は最大で約 3500 cc であり、コンデンサ交換熱量の増加に伴って気泡率が増加し、ミクスチャーレベルが上昇するため充填液量は 3500 cc より少くてよい。

サイフォン流体がフロン 113 の場合には Fig. 3.1 に示すように第2 安定流動領域と不安定流動領域の境界線 C が液溜内の液レベルを均圧孔より上に常に保つためのサイフォン回路内ミクスチャーレベルの境界値を示している。さらに、この境界線 C から充填液量がコンデンサ交換熱量に逆比例していること及び最少充填液量が約 1700 cc であることがわかる。

#### 5. まとめ

実験及び検討により得られた事項は以下の通りである。

- (1) 二重管式閉ループサーモサイフォンの流動状況は、充填液量及びコンデンサ交換熱量に応じて、第1 安定流動領域、不安定流動領域及び第2 安定流動領域に区分できる。この区分はサイフォン回路の寸法、形状等によって決まるシステム特有のものである。
- (2) 第1 安定流動領域の熱輸送限界はフラッディングによって引き起こされるドライアウトの発

(1) セルの液レベルは充填液量が大きいほど高くなり、コンデンサ交換熱量が大きいほど低くなる。

(2) ボイド率はセルの上部ほど高くコンデンサの交換熱量に比例する。

これらのことから充填液量が少くコンデンサ交換熱量が大きい場合またはドライアウト時にはセルの上部に気体のみの部分が存在することになり、このような状態が CNS で生ずると高い冷中性子束の安定な発生及びセルの外表面に施してある黒化処理膜を含めたセルの健全性維持の点からは好ましくないと思われる。

セルの液レベル及びボイド率を第1安定流動領域と第2安定流動領域について比較してみる。コンデンサ交換熱量が 750 W の時の充填液量 1000 cc (第1安定流動領域) と 2200 cc (第2安定流動領域) の液レベルはそれぞれ約 17.0 cm, 約 21.5 cm である。この各液レベルはセル内の液量にすると約 520 cc, 約 710 cc であり、セルの容積約 800 cc に対するセル全体の平均ボイド率はそれぞれ約 34%, 約 14% となる。このことは CNS において中性子導管がセルを望む視野の上下限間のセルの平均厚さが約 3 cm であることと冷中性子発生上適切な減速材厚さは液体水素の場合 3 cm とされていることから、冷中性子束は充填液量 2200 cc の場合のほうが 1000 cc の場合より大きくなると思われる。

#### 4.5 充填液量の検討

第2安定流動状態を維持するためには、液溜内の液レベルが常に均圧孔より上にある必要性が実験により明らかになった。液レベルを常に均圧孔より上に保つために必要なサイフォン回路内のミクスチャーレベルは均圧孔より下部のサイフォン回路の容積に等しい約 3500 cc である。この量は充填液量とコンデンサ交換熱量によって決まり、コンデンサ交換熱量が零の場合に充填液量は最大で約 3500 cc であり、コンデンサ交換熱量の増加に伴って気泡率が増加し、ミクスチャーレベルが上昇するため充填液量は 3500 cc より少くてよい。

サイフォン流体がフロン 113 の場合には Fig. 3.1 に示すように第2安定流動領域と不安定流動領域の境界線 C が液溜内の液レベルを均圧孔より上に常に保つためのサイフォン回路内ミクスチャーレベルの境界値を示している。さらに、この境界線 C から充填液量がコンデンサ交換熱量に逆比例していること及び最少充填液量が約 1700 cc であることがわかる。

#### 5. まとめ

実験及び検討により得られた事項は以下の通りである。

(1) 二重管式閉ループサーモサイフォンの流動状況は、充填液量及びコンデンサ交換熱量に応じて、第1安定流動領域、不安定流動領域及び第2安定流動領域に区分できる。この区分はサイフォン回路の寸法、形状等によって決まるシステム特有のものである。

(2) 第1安定流動領域の熱輸送限界はフラッディングによって引き起こされるドライアウトの発

生によって決められ、サイフォン流体がフロン 113 の場合約 800 W、水素の場合約 200 Wである。

- (3) 第 2 安定流動領域の熱輸送限界はセルとコンデンサ間に存在する液柱の高さによる圧力によって決められ、サイフォン流体がフロン 113 の場合約 20kw、水素の場合約 3 kw である。
- (4) 第 2 安定流動領域の熱輸送限界値は第 1 安定流動領域の値の 10 倍以上である。
- (5) セルの液レベルはコンデンサ交換熱量に反比例し、充填液量に比例する。
- (6) セルのボイド率はコンデンサ交換熱量に比例し、その分布はセル高さに比例する。また、セルのボイド率は充填液量に反比例する。

CNS の運転条件の設定にあたっては、今後実施される炉外作動試験、総合機能試験、特性試験等の結果、特に特性試験時における冷中性子の強度、スペクトル、ゆらぎの測定結果等を考慮して CNS の最適な運転条件を設定していく予定である。

## 謝 辞

本報告は、研究炉開発室長大西信秋氏を初めとして JRR-3 改造に携わる方々の御協力によるものであり、ここに深甚なる謝意を表します。また、実験装置の製作をお願いした化学部分析センターの木村喜久夫氏、小原和弘氏に心から感謝の意を表します。

## 参 考 文 献

- (1) 熊井、篠津、坂本、高橋：JRR-3 改造炉の冷中性子源装置のための閉ループサーモサイフォン実験(1), JAERI-M 87-006
- (2) R. EWALD, P. PERROUD : THE FLOODING PHENOMENON IN A CRYOGENIC HEAT PIPE WITH VERTICAL COUNTERCURRENT TWO-PHASE FLOW, Cryogenic Conference, ICEC 3 Berlin (1970)
- (3) G.B. WALLIS : FLOODING VELOCITIES FOR AIR AND WATER IN VERTICAL TUBES, AEEW-R 123 (1961)
- (4) NBS MN 168
- (5) 日本機械学会「流体の熱物性値集」(昭和 58 年)

生によって決められ、サイフォン流体がフロン 113 の場合約 800 W、水素の場合約 200 W である。

- (3) 第 2 安定流動領域の熱輸送限界はセルとコンデンサ間に存在する液柱の高さによる圧力によって決められ、サイフォン流体がフロン 113 の場合約 20kw、水素の場合約 3 kw である。
- (4) 第 2 安定流動領域の熱輸送限界値は第 1 安定流動領域の値の 10 倍以上である。
- (5) セルの液レベルはコンデンサ交換熱量に反比例し、充填液量に比例する。
- (6) セルのボイド率はコンデンサ交換熱量に比例し、その分布はセル高さに比例する。また、セルのボイド率は充填液量に反比例する。

CNS の運転条件の設定にあたっては、今後実施される炉外作動試験、総合機能試験、特性試験等の結果、特に特性試験時における冷中性子の強度、スペクトル、ゆらぎの測定結果等を考慮して CNS の最適な運転条件を設定していく予定である。

## 謝 辞

本報告は、研究炉開発室長大西信秋氏を初めとして JRR-3 改造に携わる方々の御協力によるものであり、ここに深甚なる謝意を表します。また、実験装置の製作をお願いした化学部分析センターの木村喜久夫氏、小原和弘氏に心から感謝の意を表します。

## 参 考 文 献

- (1) 熊井、篠津、坂本、高橋：JRR-3 改造炉の冷中性子源装置のための閉ループサーモサイフォン実験(1), JAERI-M 87-006
- (2) R. EWALD, P. PERROUD : THE FLOODING PHENOMENON IN A CRYOGENIC HEAT PIPE WITH VERTICAL COUNTERCURRENT TWO-PHASE FLOW, Cryogenic Conference, ICEC 3 Berlin (1970)
- (3) G. B. WALLIS : FLOODING VELOCITIES FOR AIR AND WATER IN VERTICAL TUBES, AEEW-R 123 (1961)
- (4) NBS MN 168
- (5) 日本機械学会「流体の熱物性値集」(昭和 58 年)

生によって決められ、サイフォン流体がフロン 113 の場合約 800 W、水素の場合約 200 W である。

- (3) 第 2 安定流動領域の熱輸送限界はセルとコンデンサ間に存在する液柱の高さによる圧力によって決められ、サイフォン流体がフロン 113 の場合約 20kw、水素の場合約 3 kw である。
- (4) 第 2 安定流動領域の熱輸送限界値は第 1 安定流動領域の値の 10 倍以上である。
- (5) セルの液レベルはコンデンサ交換熱量に反比例し、充填液量に比例する。
- (6) セルのボイド率はコンデンサ交換熱量に比例し、その分布はセル高さに比例する。また、セルのボイド率は充填液量に反比例する。

CNS の運転条件の設定にあたっては、今後実施される炉外作動試験、総合機能試験、特性試験等の結果、特に特性試験時における冷中性子の強度、スペクトル、ゆらぎの測定結果等を考慮して CNS の最適な運転条件を設定していく予定である。

## 謝 辞

本報告は、研究炉開発室長大西信秋氏を初めとして JRR-3 改造に携わる方々の御協力によるものであり、ここに深甚なる謝意を表します。また、実験装置の製作をお願いした化学部分析センターの木村喜久夫氏、小原和弘氏に心から感謝の意を表します。

## 参 考 文 献

- (1) 熊井、篠津、坂本、高橋：JRR-3 改造炉の冷中性子源装置のための閉ループサーモサイフォン実験(1), JAERI-M 87-006
- (2) R. EWALD, P. PERROUD : THE FLOODING PHENOMENON IN A CRYOGENIC HEAT PIPE WITH VERTICAL COUNTERCURRENT TWO-PHASE FLOW, Cryogenic Conference, ICEC 3 Berlin (1970)
- (3) G. B. WALLIS : FLOODING VELOCITIES FOR AIR AND WATER IN VERTICAL TUBES, AEEW-R 123 (1961)
- (4) NBS MN 168
- (5) 日本機械学会「流体の熱物性値集」(昭和 58 年)

Table 2.1 Specification of CNS and test facility

項 目		CNS	Test facility
容 積 <i>l</i>	減速材容器	0.74	0.80 (25.5cmレベル)
	低温流路管内管	0.38	0.36
	低温流路管・内外管間隙	2.85	2.18
	コンデンサ下部液溜り	0.06	
	コンデンサ上部液溜り (均圧孔高さまで)	0.10	0.16
長 さ m	低 温 流 路 管	下部鉛直部	3.17
		傾斜管(傾斜:3°)	3.99
		全長	7.50
		伝熱管	1.2(30本)
管 サ イ ズ mm	伝熱管内径		10.0
	低 温 流 路 管	内管内径	8.0
		内管外径	9.0
		外管外径	26.9
		外管内径	23.7
			10.0(18.0:芯管)
			8.0
			10.0
			25.0
			22.0

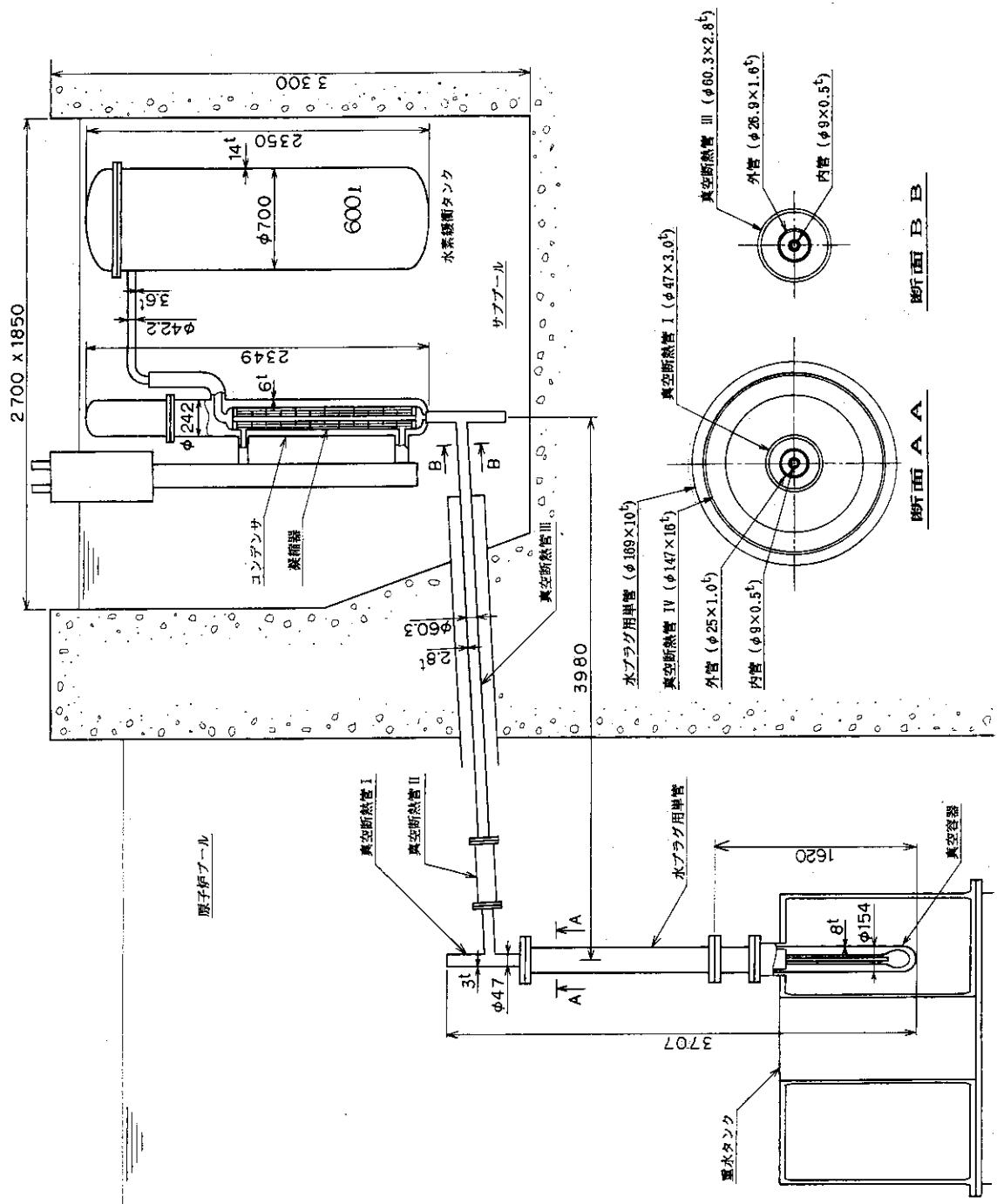


Fig. 1.1 General scheme of CNS

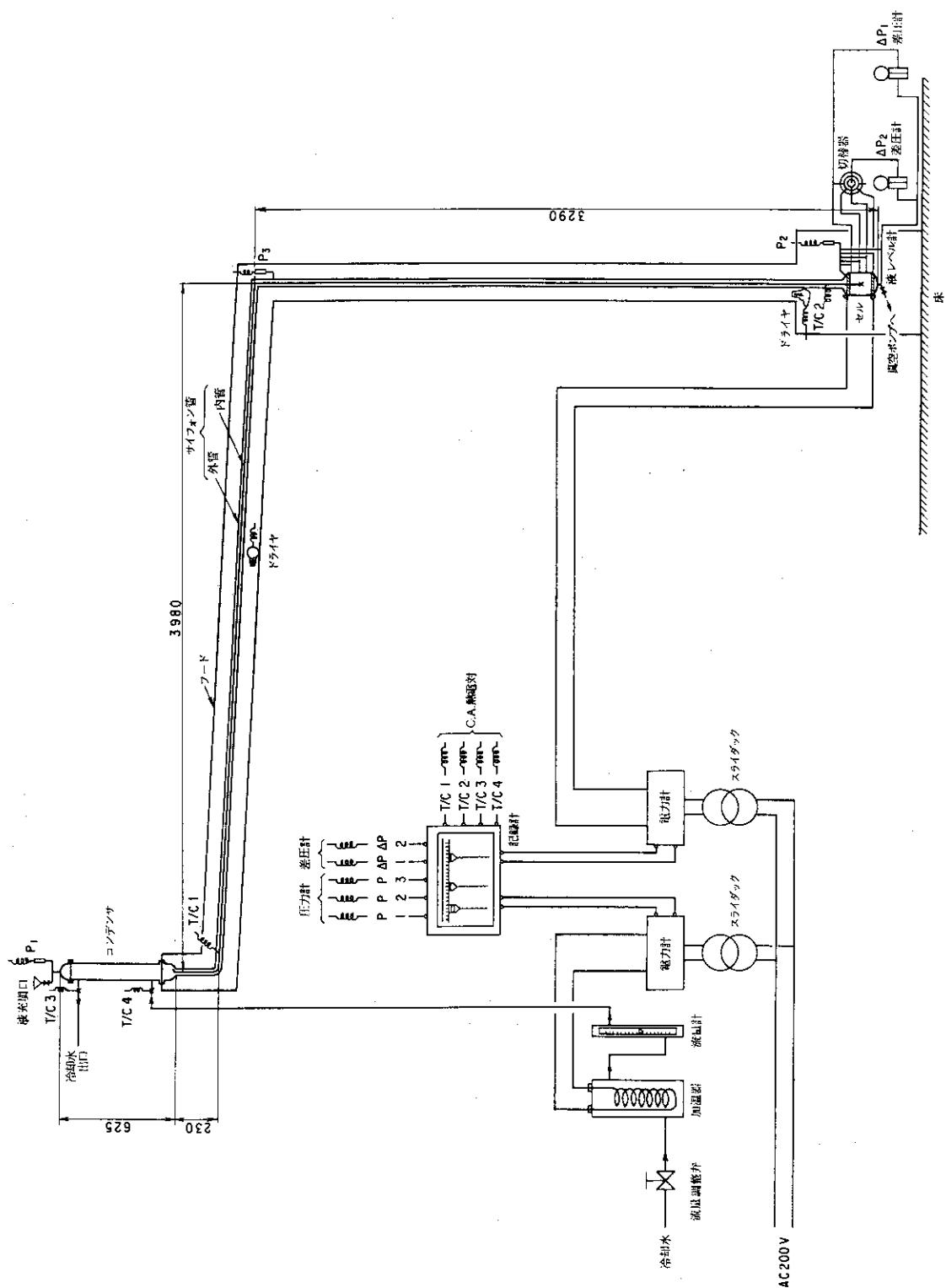


Fig. 2.1 General scheme of the test facility

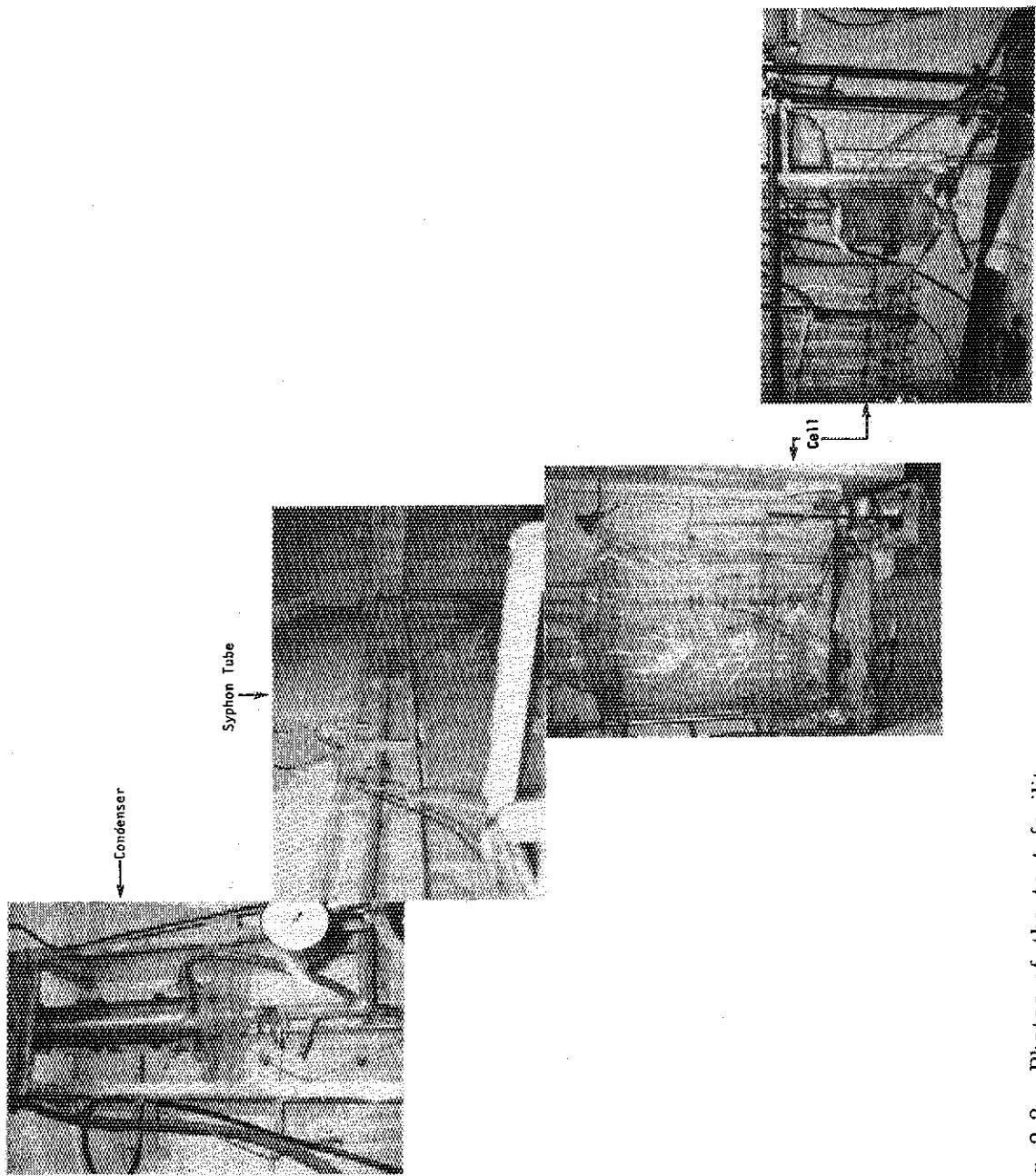


Fig. 2.2 Photos of the test facility

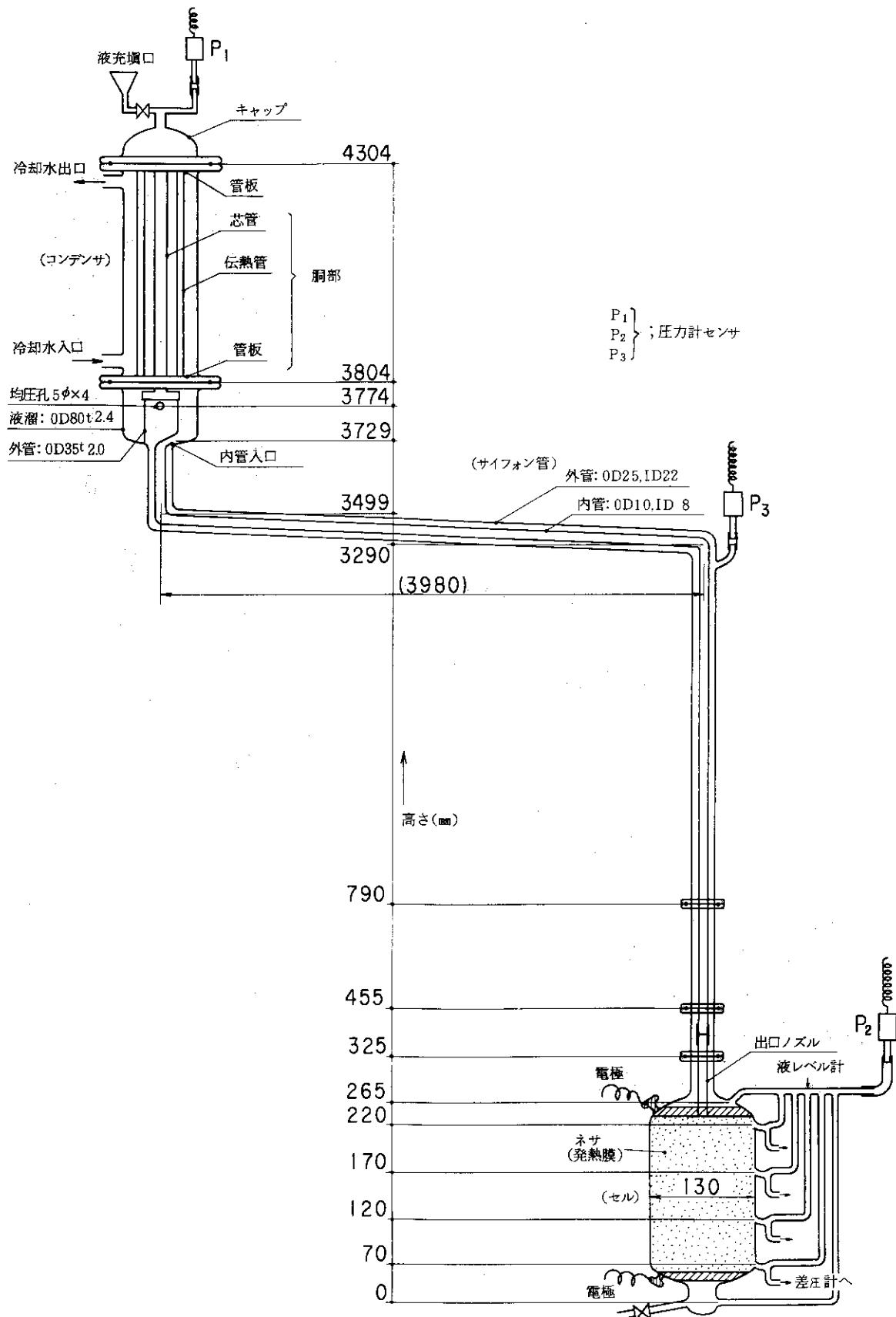


Fig. 2.3 Thermosyphon of the test facility

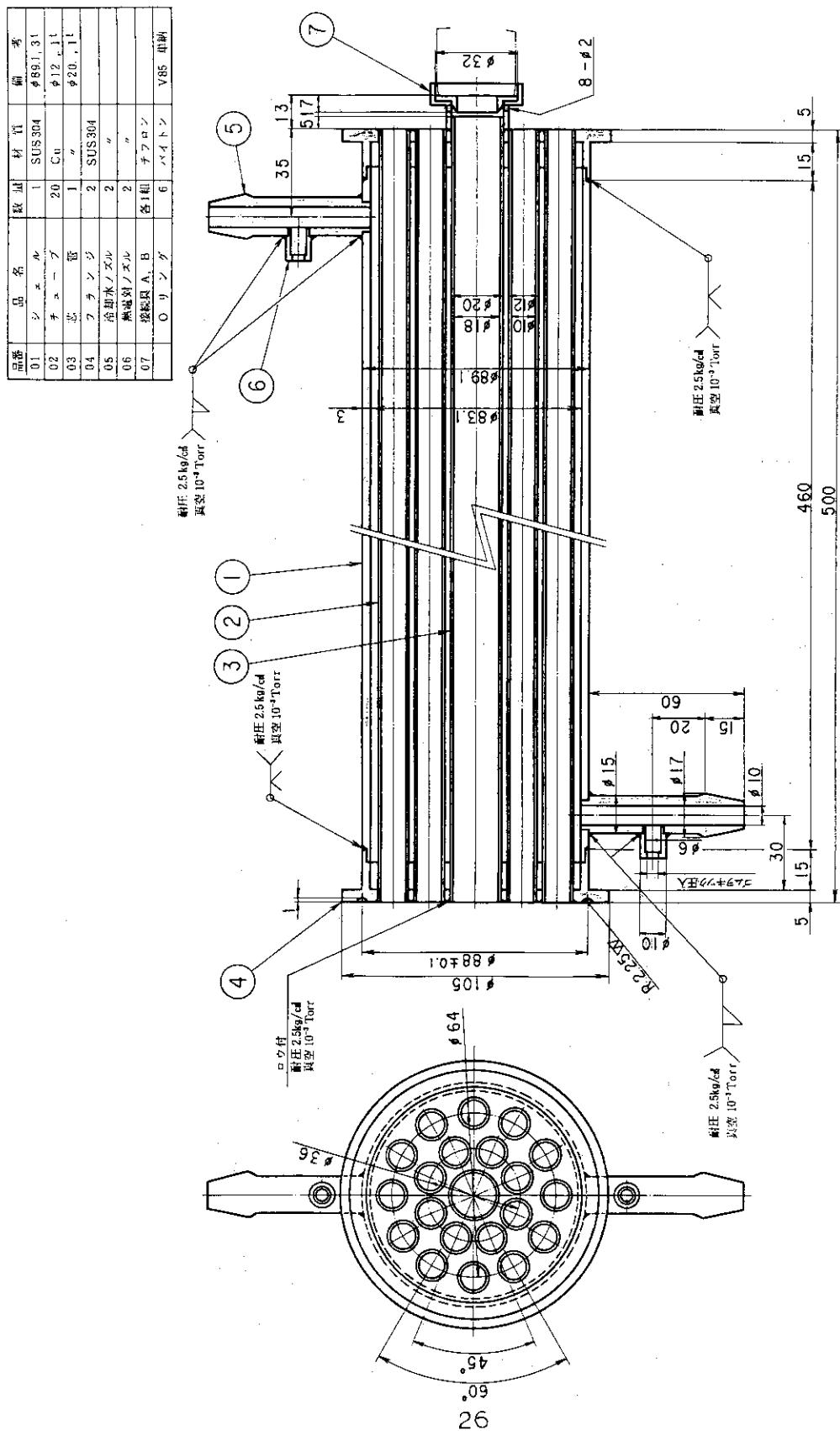


Fig. 2.4 Detail of the test condenser body

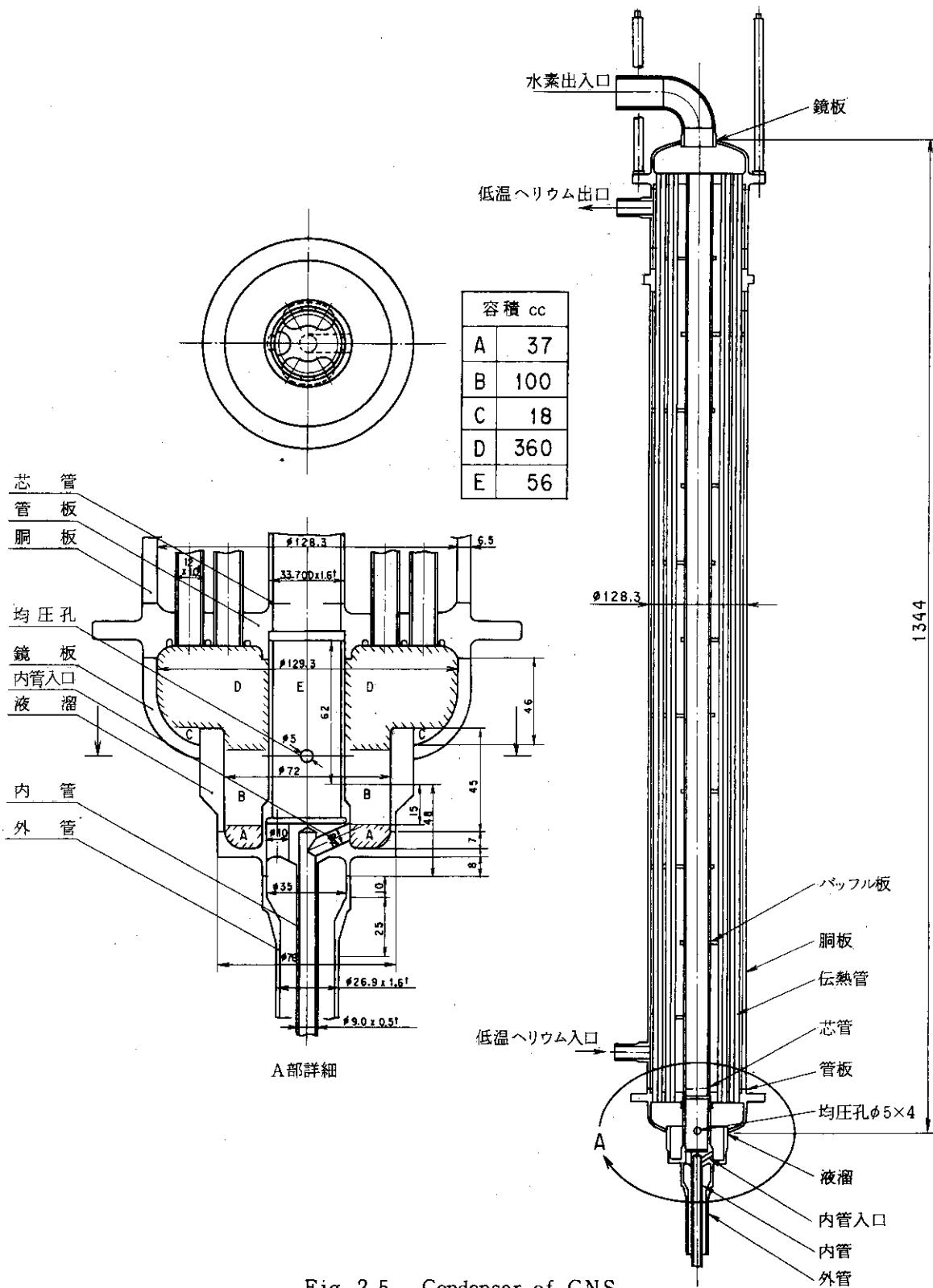


Fig. 2.5 Condenser of CNS

1	減速材容器	1	SUH660 相当 (NF Z6NCTDV25-1FB)
番号	品名	個数	材料
部品名			

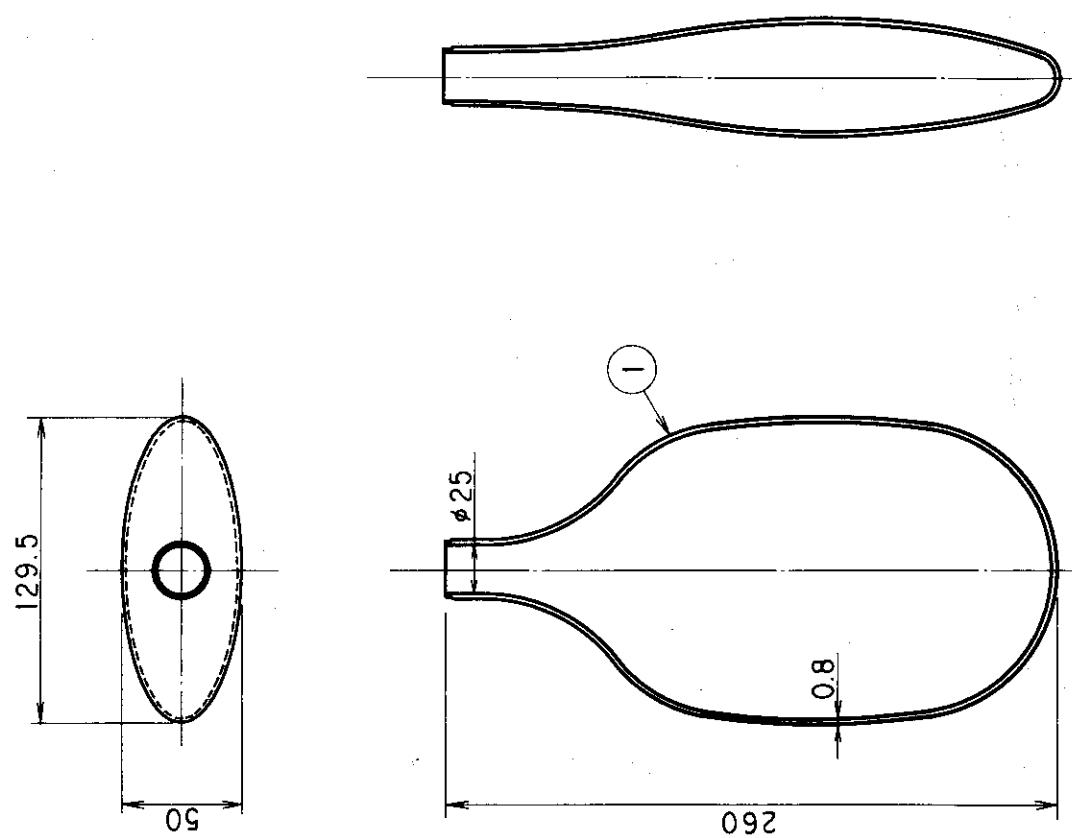


Fig. 2.6 Moderator Cell of CNS

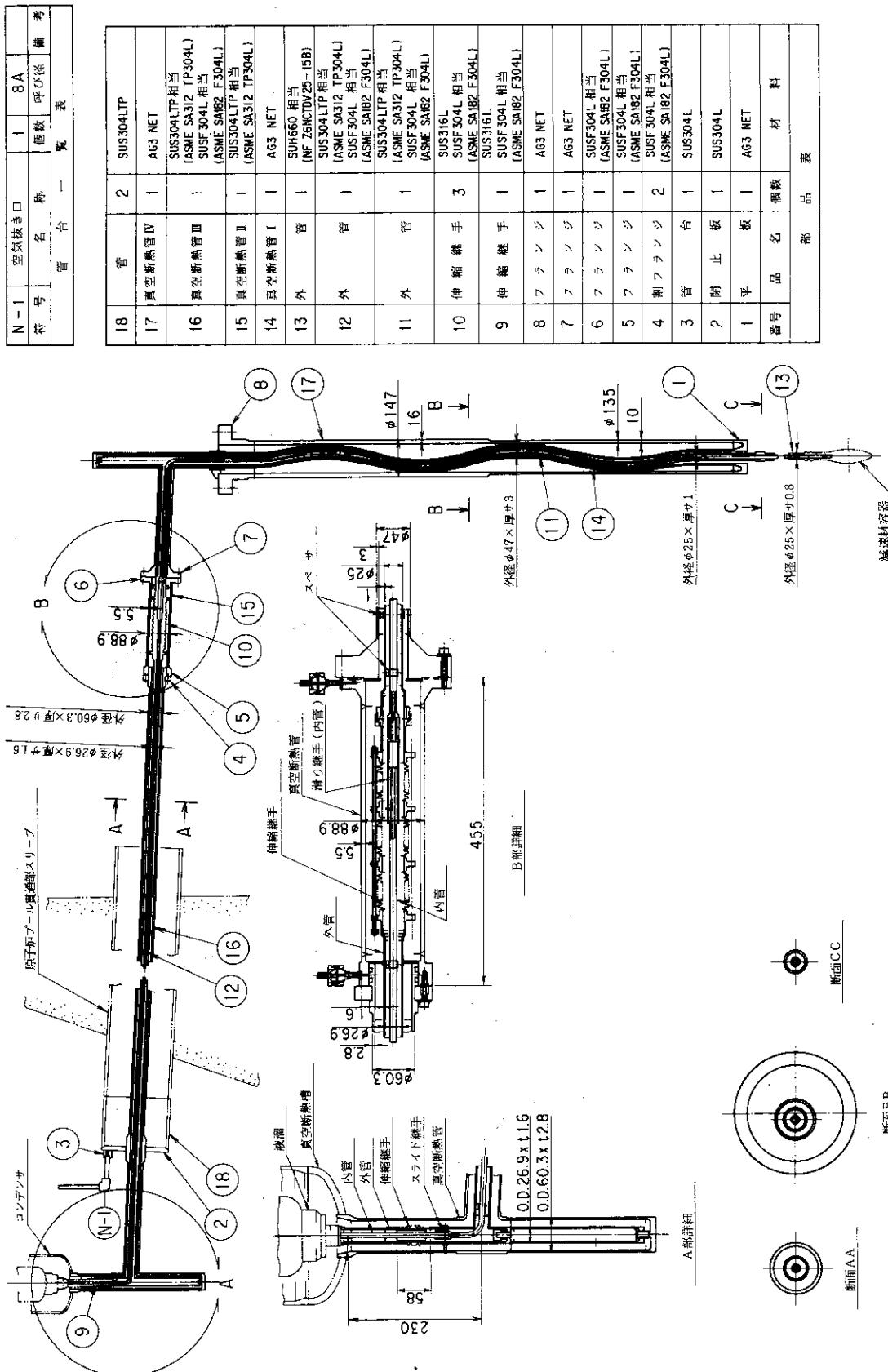


Fig. 2.7 Thermosyphon tube of CNS

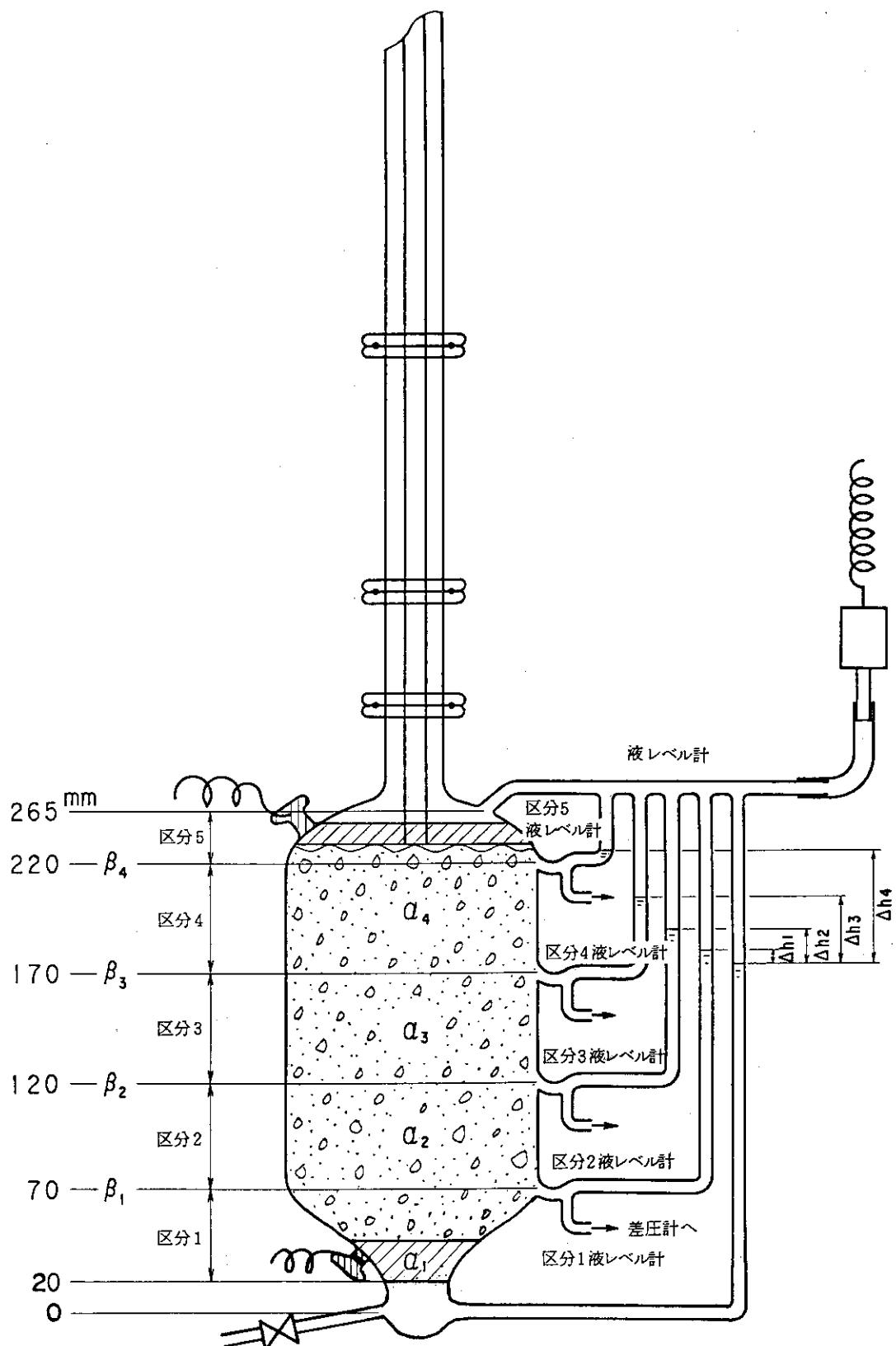


Fig. 2.8 Explanation of the void ratio in the cell

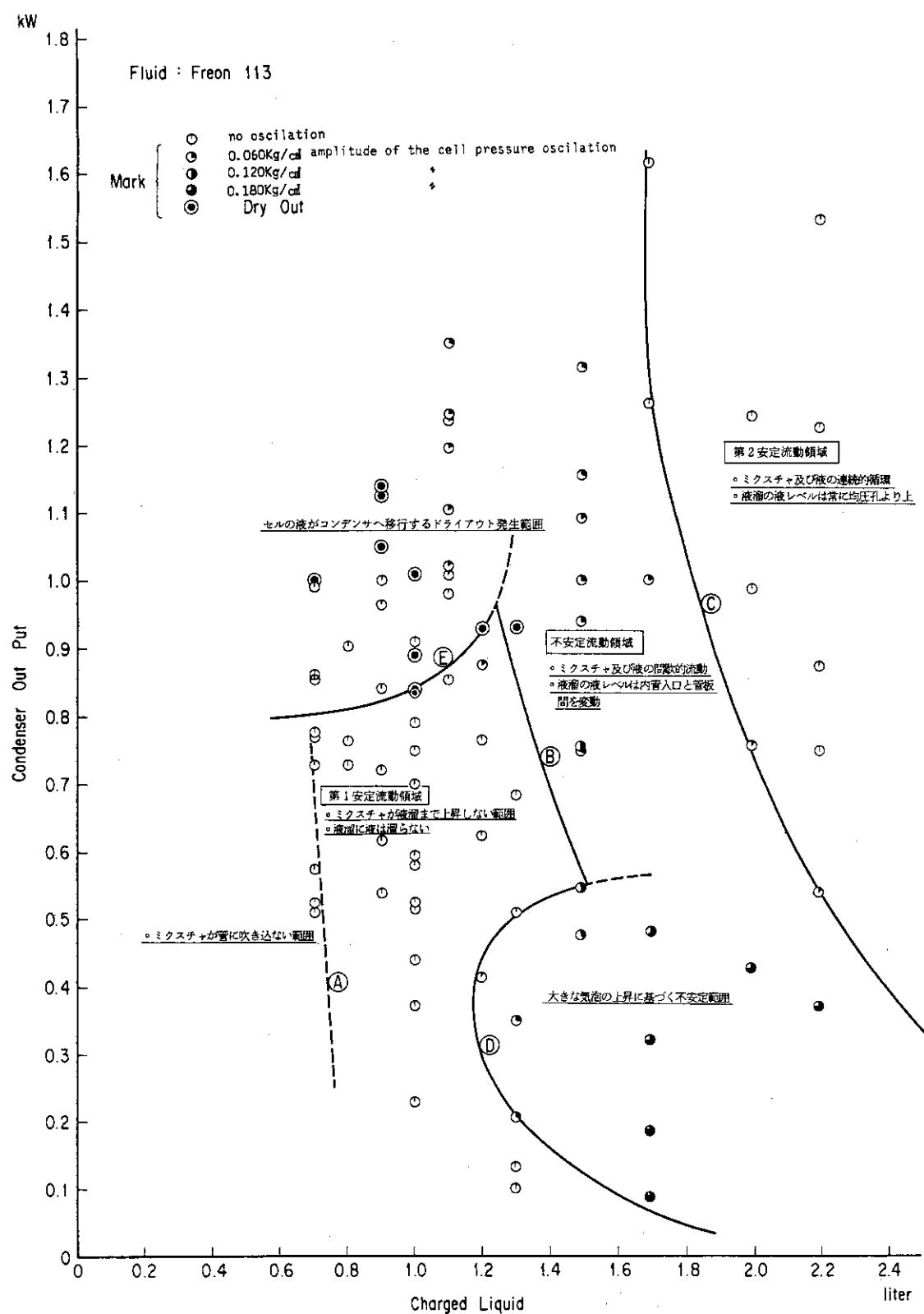


Fig. 3.1 Measured flow condition in the thermosyphon

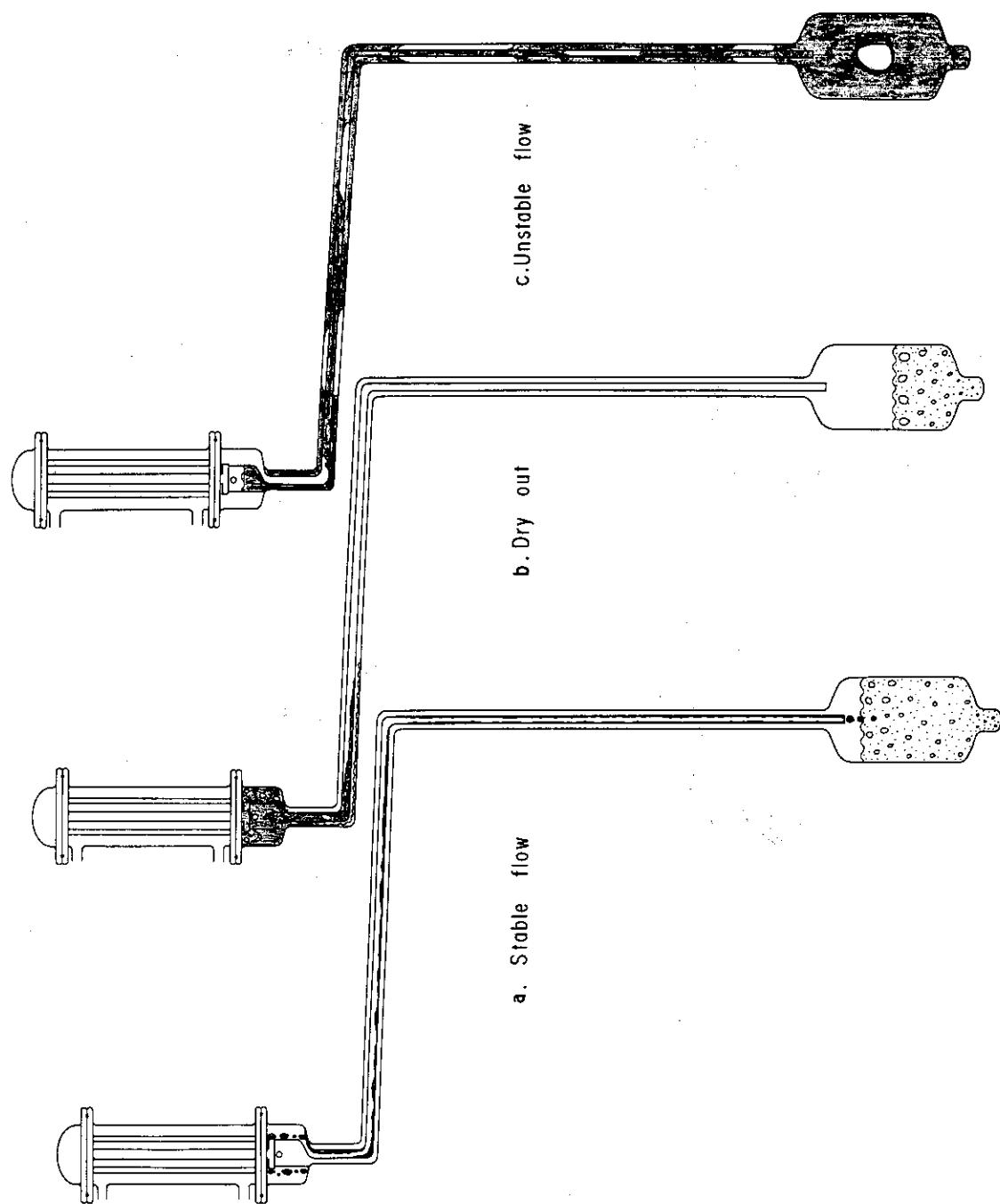


Fig. 3.2 (1) Flow pattern

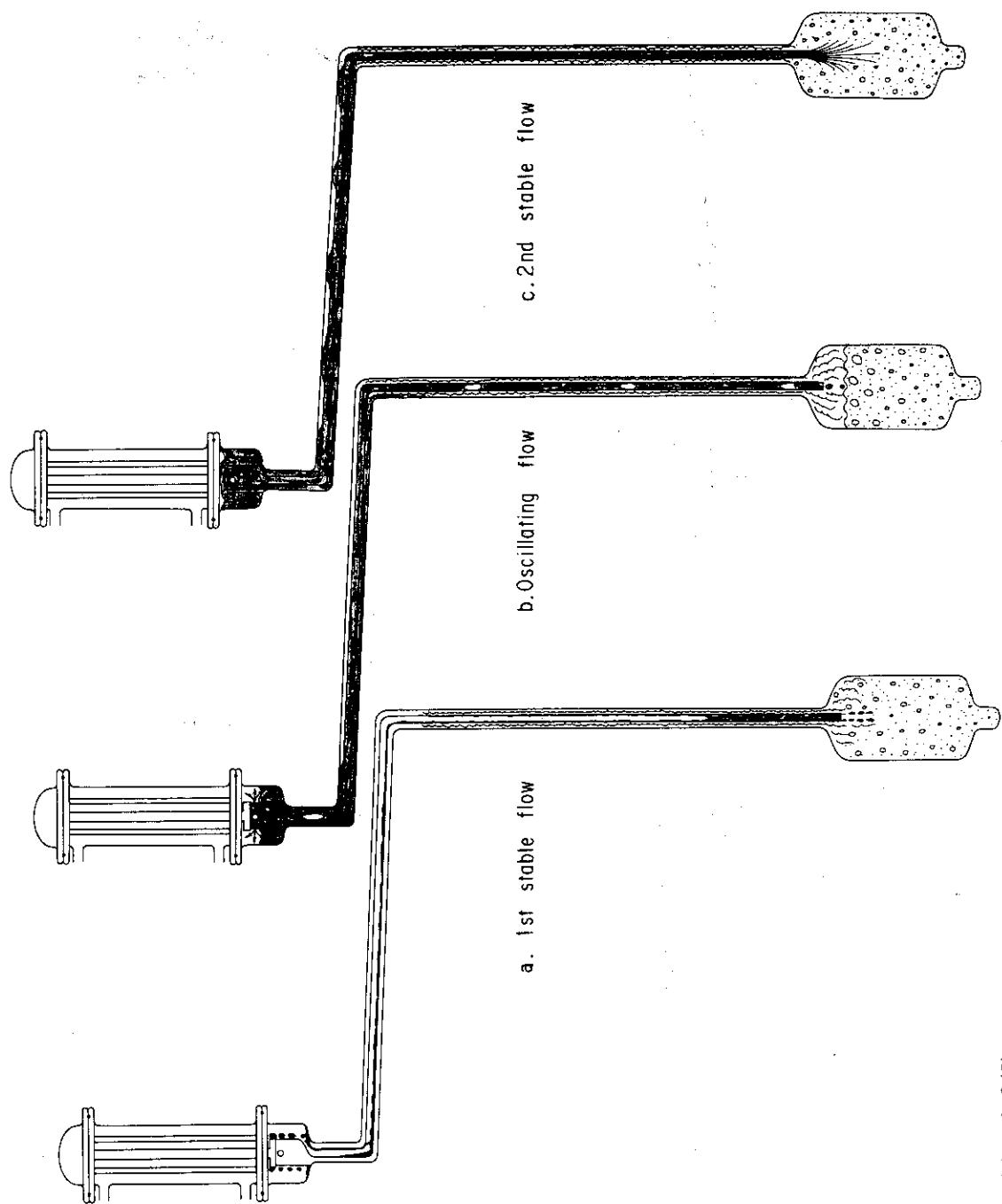


Fig. 3.2(2) Flow pattern

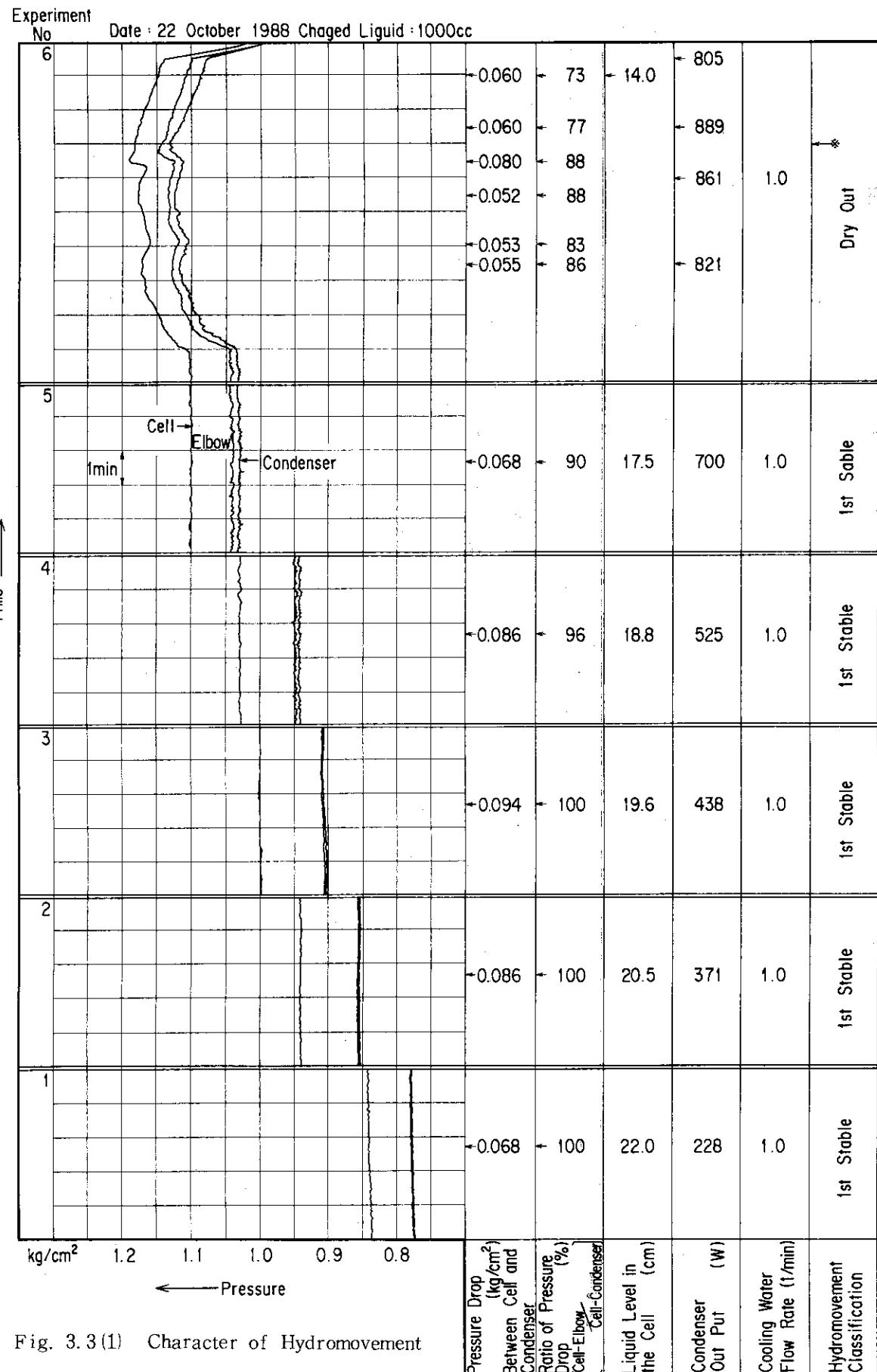


Fig. 3.3(1) Character of Hydromovement

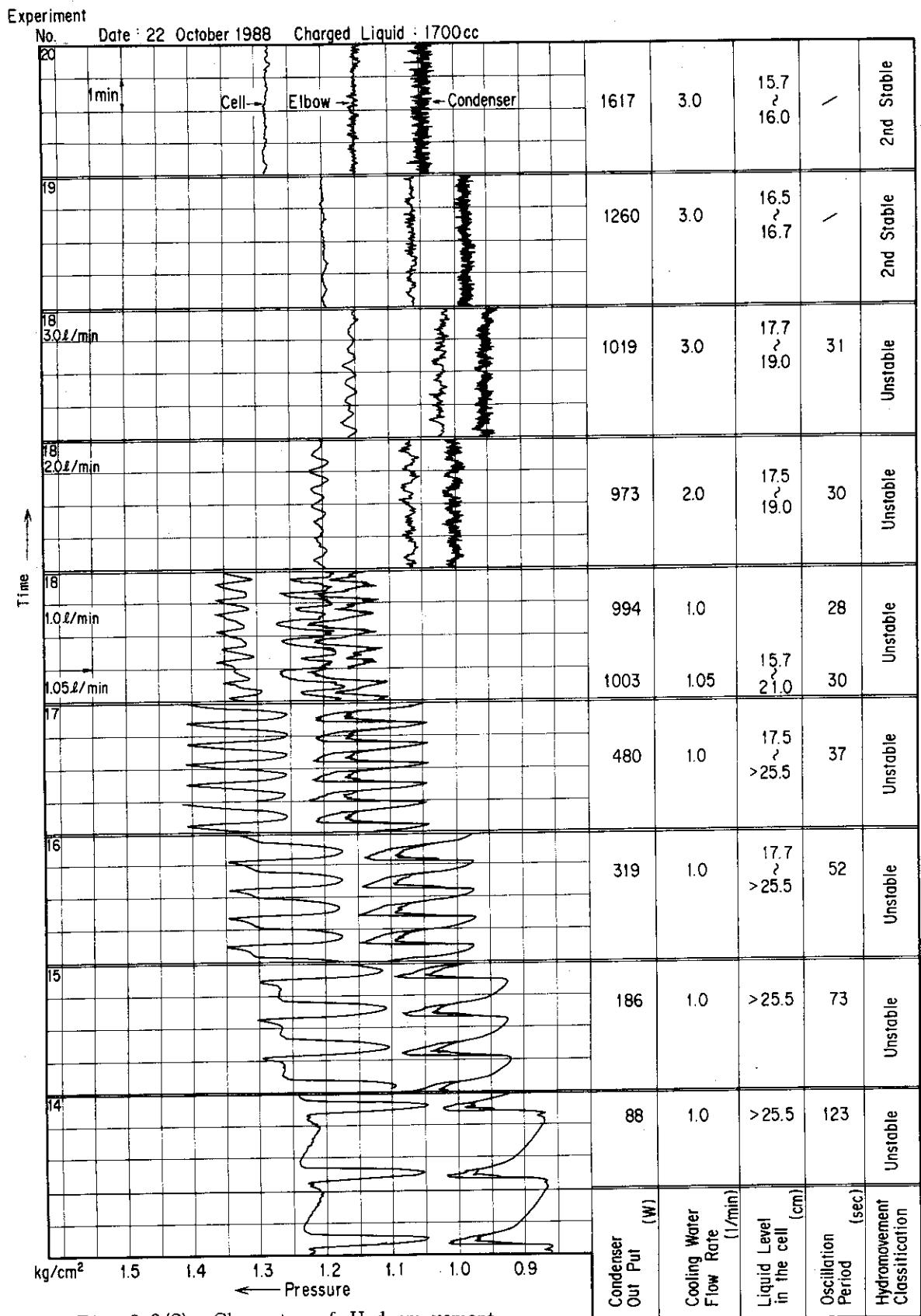


Fig. 3.3(2) Character of Hydromovement

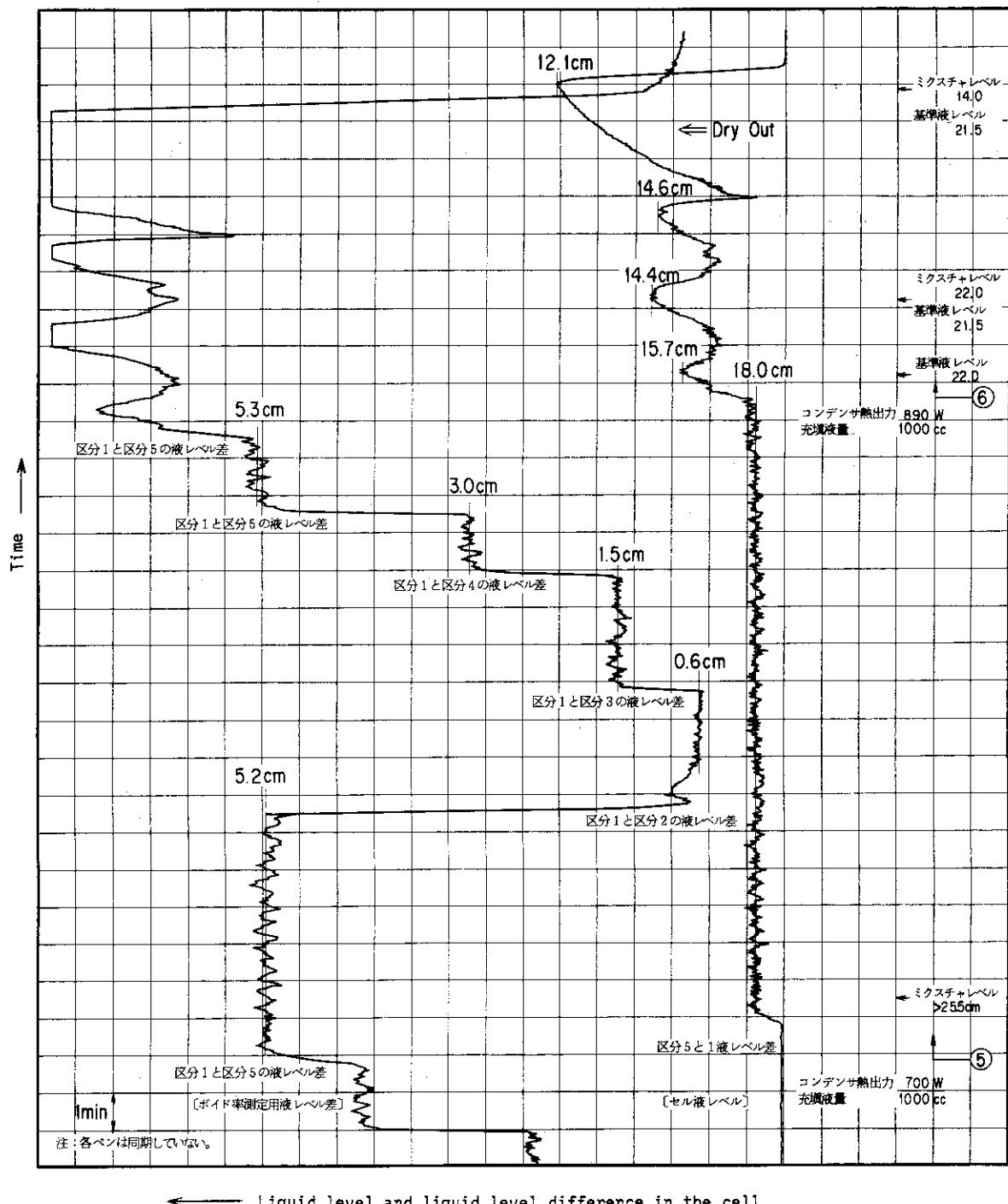


Fig. 3.4 Character of Liquid level in the cell

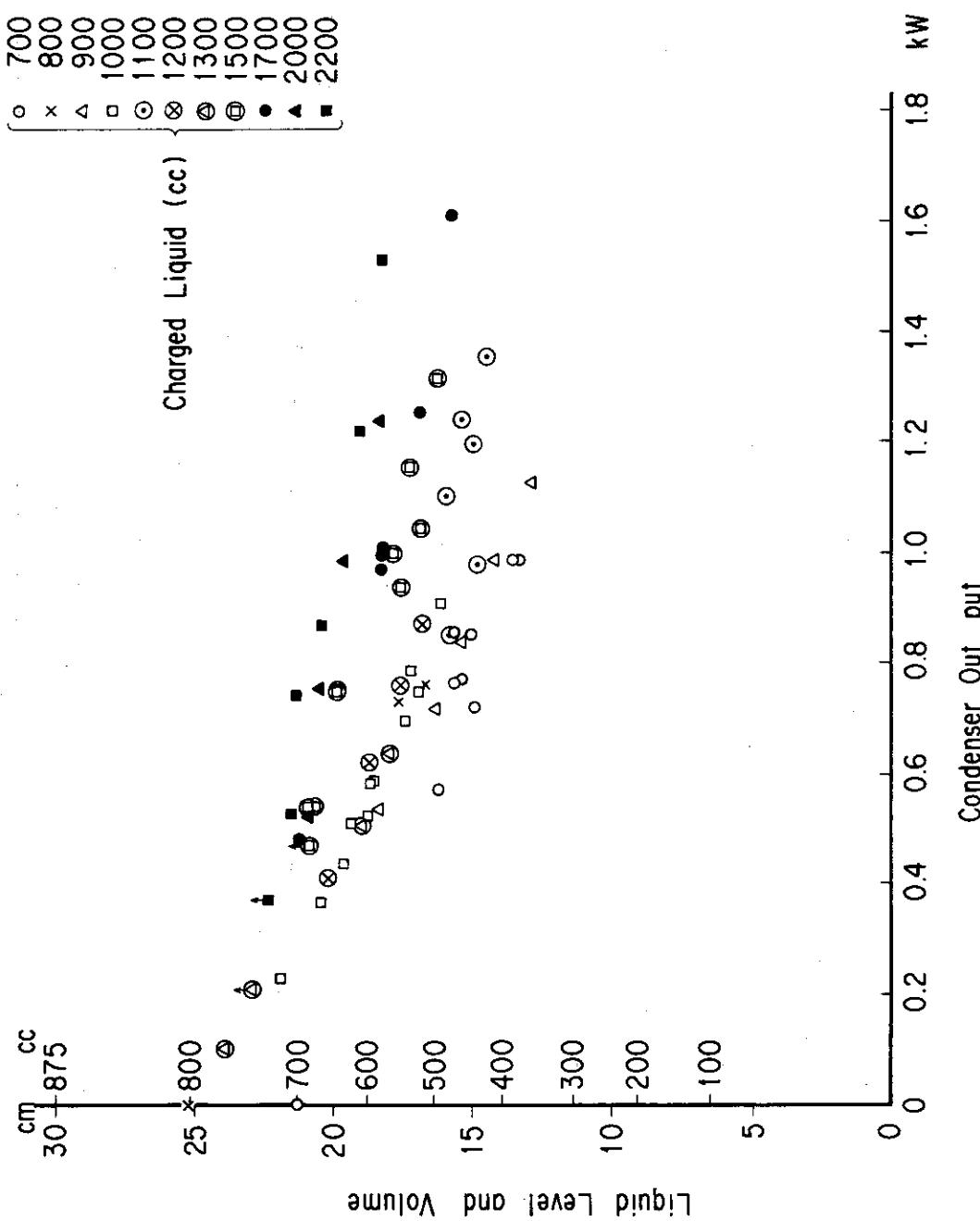


Fig. 3.5 Liquid Level in the Cell

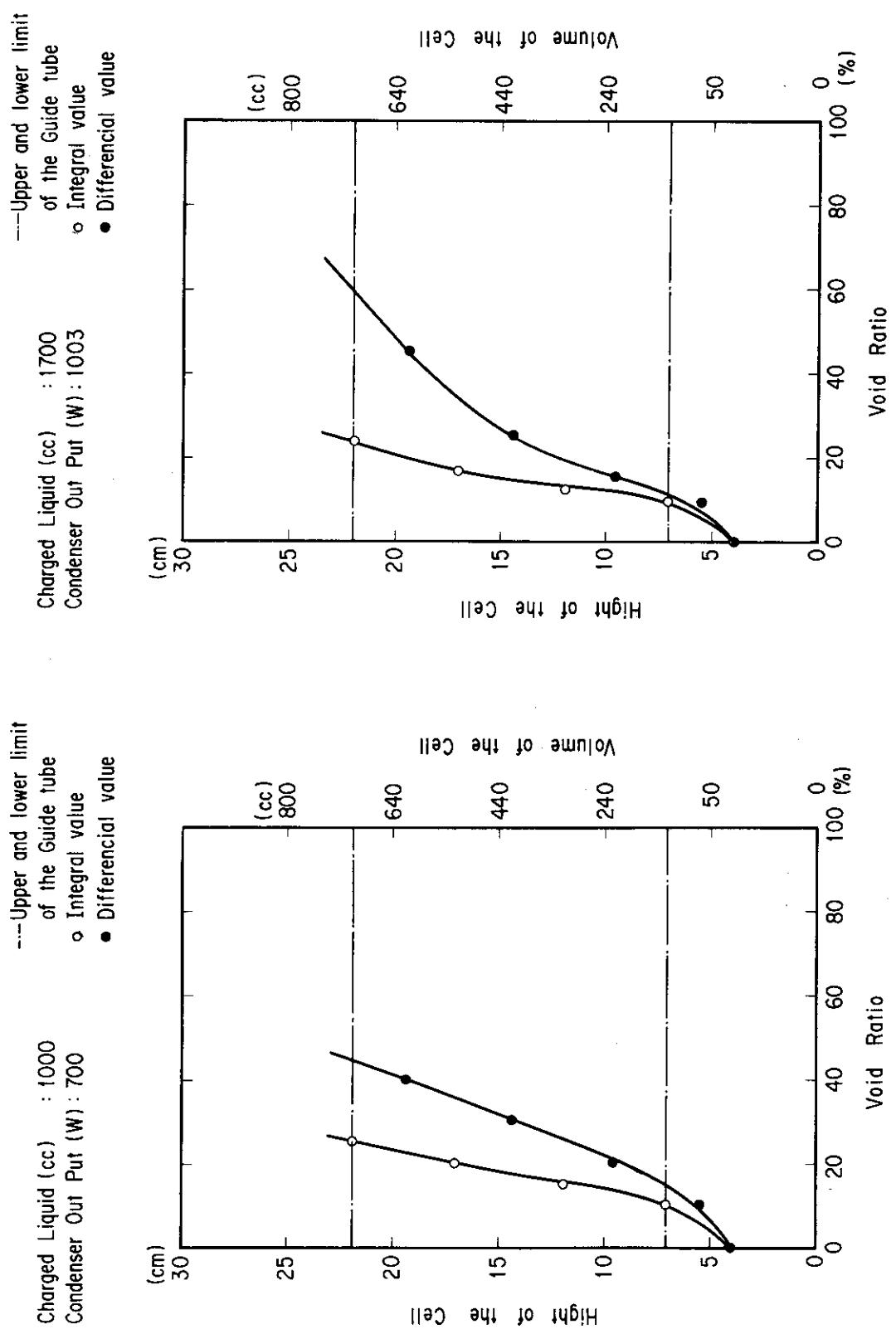


Fig. 3.6(1) Distribution of Void Ratio in the Cell

Fig. 3.6(2) Distribution of Void Ratio in the Cell

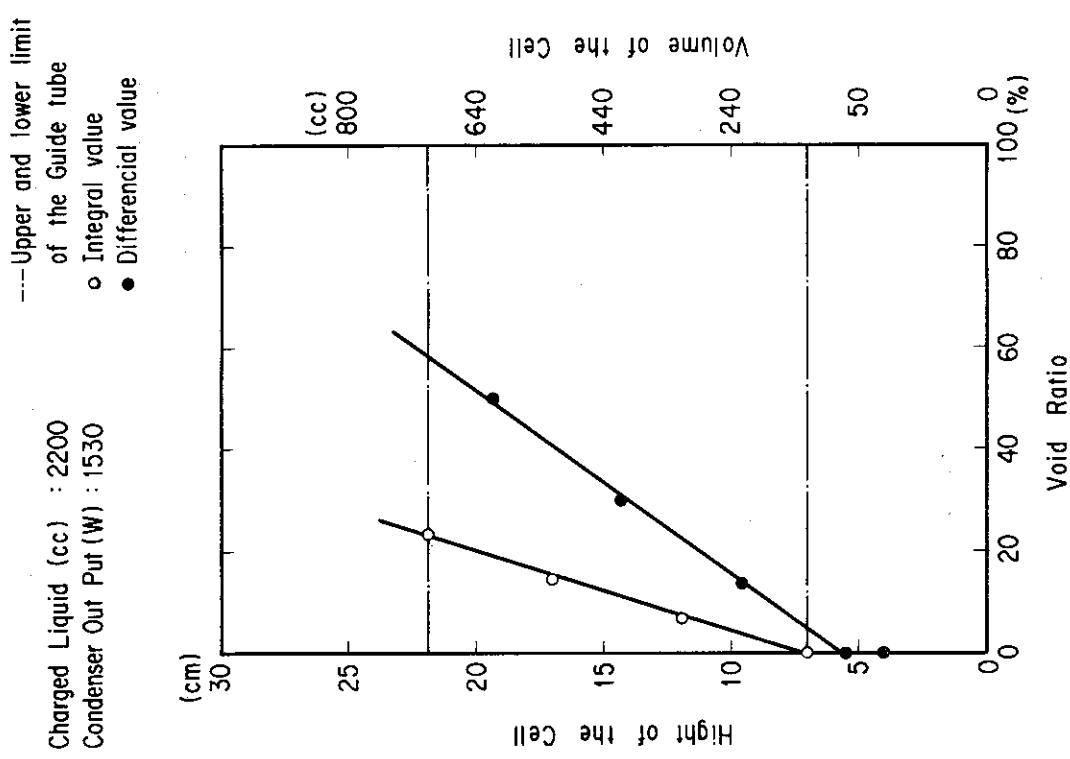


Fig. 3.6(3) Distribution of Void Ratio in the Cell

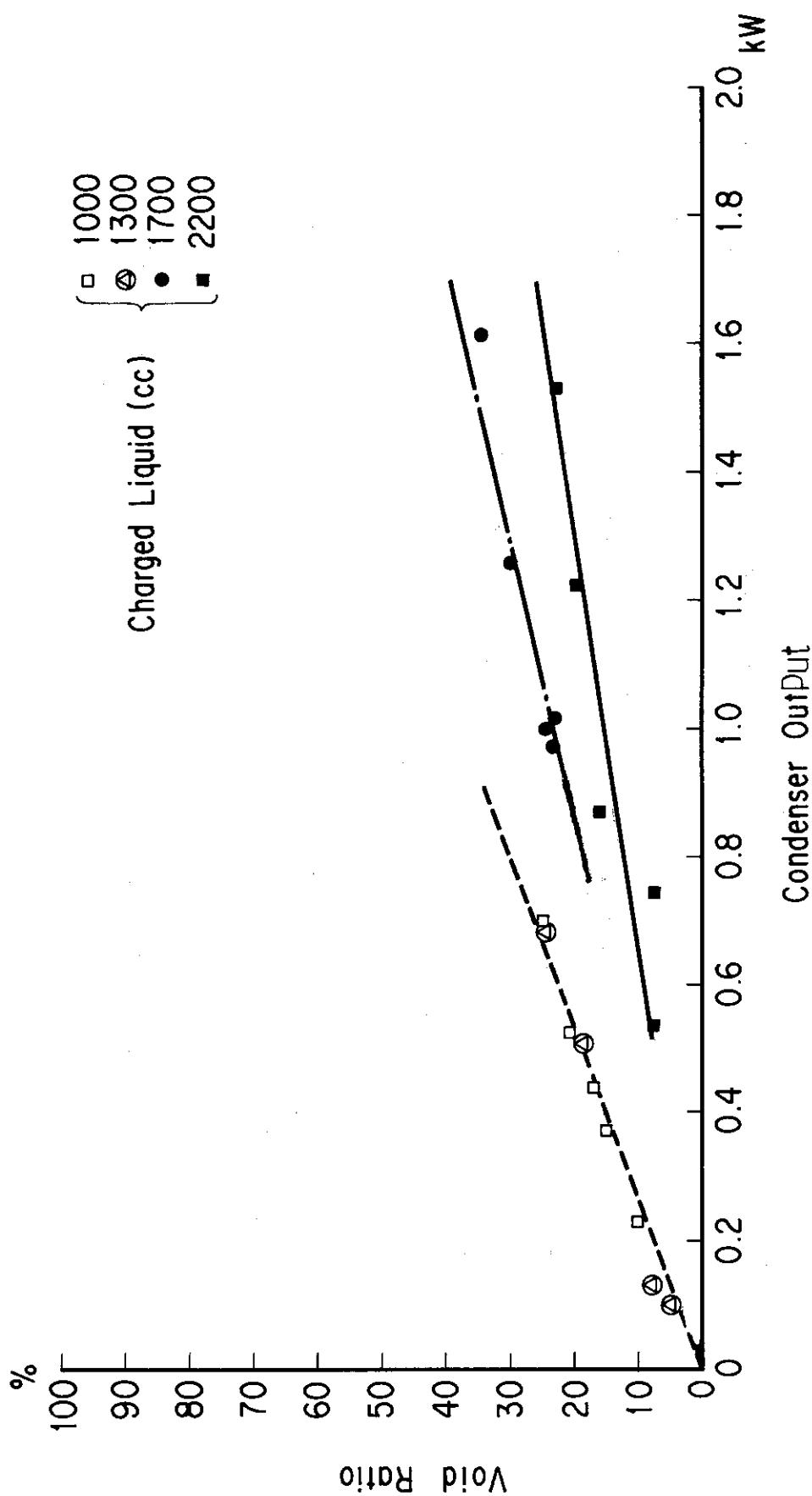


Fig. 3.7 Integral Void Ratio at 22 cm Level of the Cell

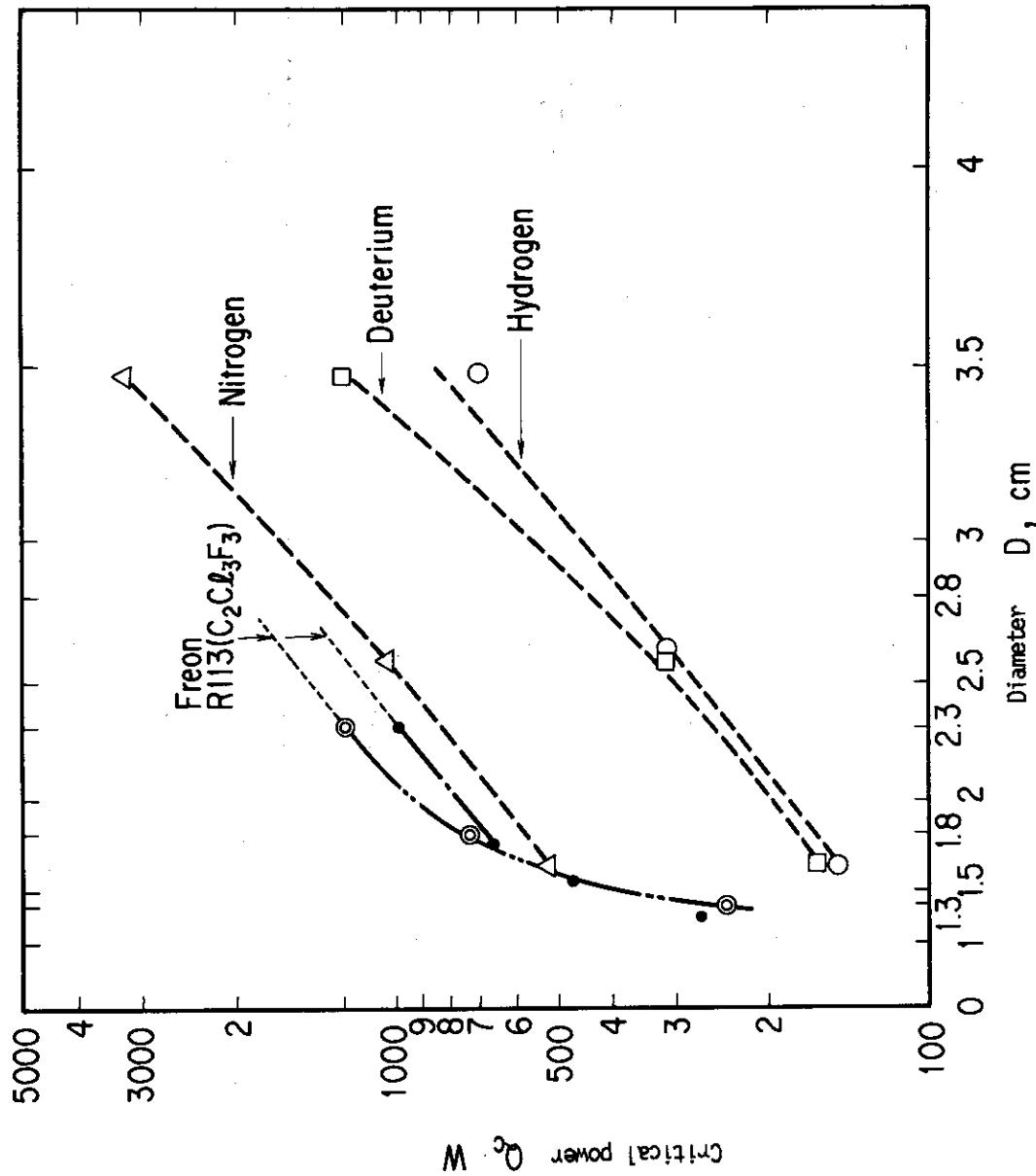


Fig. 4.1 Effect of pipe diameter on the critical power (flooding)