

JAERI-M
88-196

ヒートパイプ作動特性の可視化実験

1988年10月

露崎 典平・斎藤 隆・石上 信哉^{*}・河田 通敬^{*}
紺野 真信^{*}・神永 文人^{*}・岡本 芳三^{*}

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）で複写による実費頒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, 1988

編集兼発行 日本原子力研究所
印 刷 日立高速印刷株式会社

ヒートパイプ作動特性の可視化実験

日本原子力研究所大洗研究所高温工学試験研究炉設計室

露崎 典平・斎藤 隆⁺・石上 信哉*・河田 通敬*
紺野 真信*・神永 文人*・岡本 芳三*

(1988年9月10日受理)

原子炉プラントなどにヒートパイプを使用した場合、通常運転時の特性のみならず、事故時の過渡応答特性を求める必要がある。しかしながら、ヒートパイプの加熱部の温度および熱負荷が急変した場合のヒートパイプの過渡応答特性については、ほとんど研究がなされていないのが現状である。

本研究は、原子炉中性子照射装置用の冷却に用いる重力型ヒートパイプと同型の可視化模擬ヒートパイプ実験装置を製作し、これを用いて加熱部の熱負荷の過渡変化時および定常時の作動流体の流動様式や沸騰と凝縮の機構を調べた。実験の結果、蒸発部が一定の作動温度以上であれば数秒で作動開始することがわかった。

大洗研究所：〒311-13 茨城県東茨城郡大洗町成田町字新堀3607

+ 材料試験炉部

* 茨城大学

Visual Observation of a Heat Pipe Working Characteristics

Noriyoshi TSUYUZAKI, Takashi SAITO⁺, Shinya ISHIGAMI^{*}
Michitaka KAWADA^{*}, Masanobu KONNO^{*}, Fumito KAMINAGA^{*}
and Yoshizo OKAMOTO^{*}

HTTR Designing Laboratory
Oarai Research Establishment
Japan Atomic Energy Research Institute
Oarai-machi, Higashibaraki-gun, Ibaraki-ken

(Received September 10, 1988)

When the heat pipe is used in a nuclear engineering field, it is indispensable to understand transient characteristics of an accident condition as well as in a steady state at a normal operation. However there have been few informations about the transient characteristics of a heat pipe in case of rapid temperature or heat load change in an evaporator section.

The purpose of this study is to examine transient and steady state characteristics of a gravity assisted heat pipe and variable conductance heat pipe(VCHP) which will be used in a neutron irradiation capsule.

This report presents results of visual observation of boiling and condensation patterns on steady state or transient condition in a visible heat pipe made of a glass. The response time of the heat pipe is on the order of a few seconds when the temperature of the evaporator part is kept above the operating temperature.

Keywords: Visual Observation, Gravity Assisted Heat Pipe, Variable Conductance Heat Pipe, Transient and Steady State Characteristics

+ Department of JMTR Project

* Ibaragi University

目 次

1. 序 論	1
1.1 作動の原理及びその特性	1
1.2 ヒートパイプの利用状況	1
1.3 ヒートパイプの原子力への利用	2
2. 可視化模擬ヒートパイプによる過渡応答実験	3
2.1 目 的	3
2.2 実験装置	3
2.3 実験方法	3
2.4 実験結果及び考察	3
2.5 まとめ	4
3. 可視化模擬ヒートパイプによる定常実験	4
3.1 目 的	4
3.2 実験装置	4
3.3 実験方法	5
3.4 実験結果及び考察	5
3.5 まとめ	6
4. 結 論	6
謝 辞	7
参考文献	7

Contents

1. Introduction	1
1.1 Theory of working and characteristic for heat-pipe	1
1.2 Situation of utilization for heat-pipe	1
1.3 Utilization of heat-pipe to atomic power	2
2. Transient experiment using a visible model of heat-pipe	3
2.1 Objects	3
2.2 Experimental apparatus	3
2.3 Experimental procedure	3
2.4 Results and discussions	3
2.5 Conclusions	4
3. Steady experiment using a visible model of heat-pipe	4
3.1 Objects	4
3.2 Experimental apparatus	4
3.3 Experimental procedure	5
3.4 Results and discussions	5
3.5 Conclusions	6
4. Conclusions	6
Acknowledgement	7
References	7

1. 序 論

1.1 作動の原理及びその特性

ヒートパイプとは、密閉した管内に作動流体と呼ばれる気相と液相の相互に変化しやすい媒体を封入し、その相変化の潜熱を仲介にして、熱を輸送する装置である。

ヒートパイプは通常、蒸発部、断熱部、及び凝縮部から構成される。蒸発部は容器外の熱源からの熱エネルギーを容器内の作動流体に与え、これを蒸発させる部分である。断熱部は、熱源と吸熱源が離れている場合に存在し、蒸発した作動流体の移動通路を構成し、外周との熱の出入りを遮断するように工夫された部分である。凝縮部は断熱部の蒸気通路中を移動してきた作動流体としての蒸気を凝縮し、熱エネルギーを容器外の吸熱源に放出させる部分である。この凝縮部において凝縮した作動流体は、重力による自然落下や、多孔性物質よりなるウイックの毛細管圧力等を利用して、断熱部を通って蒸発部へ還流される。

蒸発及び凝縮の潜熱を利用するヒートパイプの熱輸送は、通常の熱伝導や顯熱の形で行う対流による熱輸送に比べて、同一の温度差に対し大きな熱量を輸送しうる。このため、ヒートパイプは、小型軽量の構造で大量の熱量を輸送する有益な手段の一つであると言うことができる。また、内部の流体の循環に対しては何ら外部動力を必要としないので、長期間にわたって高い信頼性を持つこともできる。近年では、広い分野で熱除去や温度の均一化等を目的として、各種のヒートパイプが使用されている。

1.2 ヒートパイプの利用状況

ヒートパイプの利用例としては、宇宙機器、太陽熱利用、排熱回収、電子、音響、電気機器等への適用があげられる。

宇宙機器の利用に関しては、熱量輸送、温度均一化、また温度制御素子などとして利用されている。熱量輸送素子としては、米国の軌道天文衛星 O A O - C の電子機器の冷却系等で利用されており、この装置では、熱入力 35 W のとき電子機器の温度を 60 °C から 22 °C に下げることに成功している。温度均一化素子としては、米国の応用技術衛星 A T S - E 等において利用されている。この衛星は、重力傾度姿勢制御方式を用いているのでスピンをしない、よって、太陽直射側が高温に、反対側が低温となる。このため、ヒートパイプを用いることにより周方向の最大温度勾配を 145 °C から 17 °C に減少させている。温度制御素子としては、NASA のスペースシャトルにおける実験機器の温度制御をするサーマルキャニスターで利用されている。このキャニスターには各側壁内面の縦方向に 4 本、横方向に 3 本のヒートパイプが使用されており、これにより、パネルの端から端までの温度差を最悪の場合でも 4 °C 内におさめることができとなっている。

太陽熱への利用に関しては、太陽熱エネルギーによる発電や、建物の冷暖房等がある。これ

らは、太陽エネルギーを集熱する集熱器の部分にヒートパイプを適用し、太陽エネルギーの吸収、交換を極めて効率よく行って熱交換器に送るというものである。Dynatherm 社で進められた開発計画では直径 9 cm、長さ 12 m のヒートパイプにより 300 °C の温度で 18 kW の集熱量を見込んでいる。

排熱回収への利用に関しては、排熱回収装置や空調用排熱回収装置がある。これらは、熱交換器にヒートパイプを利用したものであり、次のような利点がある。

- (1) 高温側から低温側への単位管断面当たりの輸送熱量を大きくとることができるので、コンパクトにすることができる。
- (2) 給排気管の低温度差における排熱回収が可能である。
- (3) 構造上、熱交換器を向流型とすることが容易であるので、排熱回収効率を大きくすることができます。
- (4) 給気側と排気側が仕切板によって完全にシールされているので、汚染した排気ガスが給気ガスと混合することはない。したがって、臭気や汚染が問題となる工場、学校、病院などの排熱回収に適している。
- (5) ヒートパイプは受動系の伝熱素子としての性格から、運転のための動力を必要としないため、運転費は不要であり、回収した熱量を、正味のエネルギーとすることができる。

電子機器への利用に関しては、IC のチップの接合温度を下げるここと、IC 回路相互の接合部間の温度差をなくすこと、音響機器への利用に関しては、パワーアンプの終段、パルス電源およびスピーカーのボイスコイルからの発生熱を放出すること、また、電気機器への利用に関しては、メタルクラッド開閉装置や直流サーボモータの発生熱を放出することなどがあげられる。

1.3 ヒートパイプの原子力への利用

ヒートパイプによる一般の原子力機器への応用は、数多くある。例えば、原子炉への直接利用、補助的核熱利用、放射性物質輸送の際の除熱、使用済み燃料貯蔵設備での除熱、放射性廃棄物の地下貯蔵タンクでの除熱、緊急時における炉心冷却、核融合炉でのブランケット冷却等である。これらは、イタリアの Ispra (Joint Nuclear Research Center)、西ドイツの Stuttgart の原子力研究所 I.K.E 及びフランスの Grenoble の核研究所で研究され、一部は実用とまでなっている。一方、日本においても、ヒートパイプを使用し、照射キャップセルの中央に挿入された試料から積極的な除熱を行う研究がなされている。

実際にヒートパイプを原子炉内で利用した場合、ヒートパイプは Table 1.1 に示すような条件下にさらされることになる。このためこの過渡変化に対するヒートパイプの応答は、原子炉の安全運転上重要となる。しかしながら、このように速い過渡応答に関する研究はほとんど行われていないのが現状である。

2. 可視化模擬ヒートパイプによる過渡応答実験

2.1 目的

ヒートパイプの壁面の過渡時の温度変化と作動流体の流動様式を調べるために、可視化模擬ヒートパイプを用いて蒸発部の熱負荷を誘導加熱により急変させ、実験を行った。

2.2 実験装置

可視化模擬ヒートパイプは、Fig. 2.1に示すように外側がガラス管、内側がステンレスパイプとセラミックで構成されている。

凝縮部は外径16 ϕ のステンレス管を用い、内側に冷却水を流した。蒸発部はステンレス管を用い、誘導加熱により熱負荷を急変できるようにした。断熱部はセラミックを使用した。

ヒートパイプのコンテナは、ガラス管を用いた。外側は内径27 mm ϕ であり、断熱性をよくするために内管と外管の間を真空にした二重構造になっている。ヒートパイプ壁面の温度は、直径0.5 mmのクロメル・アルメル(CA)熱電対を図の1, 2, 3, 4, 6の位置に埋め込み、ペンレコーダで記録した。

本実験では、Fig. 2.2に示すように歪ゲージ型圧力変換器を使用することでヒートパイプ内部の圧力も測定した。

2.3 実験方法

実験は、測定開始と同時に高周波誘導加熱を行い、ヒートパイプの壁面の温度変化及び圧力変化を測定するという手順で行った。実験は誘導加熱の出力(加熱部の熱負荷)をパラメータとした。

2.4 実験結果及び考察

実験の結果、誘導加熱の出力が小さい場合($Q = 1.1 \text{ kW}$)、12秒後に急激な沸騰(突騰)が起り、管内の作動流体は吹き上がったのち自然落下し加熱部へもどった。これは間欠的に繰返された。また作動流体が吹き上がる時、気泡の破裂音がした。

一方、誘導加熱の出力が大きい場合($Q = 1.65 \text{ kW}$)は、5秒程度で沸騰が始まり、この沸騰は絶えず激しい沸騰をし、作動流体は頻繁に上部まで達しているのが観察できた。

また、本実験における冷却部での凝縮は、膜状凝縮でなく滴状凝縮であることがわかった。

実験条件及び実験結果をTable 2.1及びFig. 2.3からFig. 2.4に示す。

同図は、縦軸にヒートパイプ壁面温度(°C)及びヒートパイプ内の圧力(kg/cm²)をとり、

横軸には実験開始からの時間をとった。Fig. 2.4 図から、誘導加熱の出力が小さい場合 ($Q = 1.1 \text{ kW}$) には、加熱直後は作動流体のサブクール度が大きいため突沸の回数は少なく、時間の経過と共にサブクール度が小さくなると、突沸の起こる回数も徐々に多くなっている。誘導加熱の出力が大きい場合 ($Q = 1.65 \text{ kW}$) には、熱負荷が大きいため、沸騰が激しく作動流体は頻繁に上部まで吹き上がっており大量の蒸気を発生し続けるため Fig. 2.5 のような結果となつたと考えられる。

突沸及び激しい沸騰が起こると、ヒートパイプからカリカリという気泡の破裂音が聞こえた。

この可視化実験から、下端が閉じ上部は自由空間になる垂直管内の流体を加熱した時に、急速な沸騰で管内の液体が吹き上げられ、そのあとを上から上部の液体が自然落下により流入し管内を再充填するガイセリングとよばれる現象と同じ現象がヒートパイプ内部で起こることがわかった。

2.5 まとめ

誘導加熱を用いた可視化実験から次のことが明らかになった。

- 1) 加熱量が少ない場合、作動流体は時間をおいて突沸を起こす。
- 2) 加熱量が多い場合、作動流体は激しくかつ安定した沸騰となる。
- 3) 沸騰開始時間は、加熱量が多くなるほど早くなる。
- 4) ヒートパイプの圧力変化は、凝縮部の温度変化に似ており、作動流体の沸騰の形式に左右される。
- 5) 加熱量が多い場合、作動流体はガイセリングの現象が起こる。

3. 可視化模擬ヒートパイプによる定常実験

3.1 目的

本実験は、可視化模擬ヒートパイプを用いての定常実験である。ヒートパイプ内の作動流体の熱流の挙動を VTR 及び写真で撮影した。

3.2 実験装置

実験に使用したヒートパイプは、前章と同じ可視化模擬ヒートパイプである。蒸発部の加熱は、Fig. 3.1 に示すように SUS パイプに鋳込んだシース型ヒータによって行った。

加熱部は、直径 16ϕ 、長さ 260 mm で、最大出力は 300 W である。このヒータは、下端から 70 mm までの部分と上端から 100 mm までの部分が非加熱部分になっており、上部の非加熱部分をヒートパイプの断熱部とした。

また、本実験は、ヒートパイプ内部の封入圧力も変化させて行った。封入ガスはアルゴンガスを使用した。

横軸には実験開始からの時間をとった。Fig. 2.4 図から、誘導加熱の出力が小さい場合 ($Q = 1.1 \text{ kW}$) には、加熱直後は作動流体のサブクール度が大きいため突沸の回数は少なく、時間の経過と共にサブクール度が小さくなると、突沸の起こる回数も徐々に多くなっている。誘導加熱の出力が大きい場合 ($Q = 1.65 \text{ kW}$) には、熱負荷が大きいため、沸騰が激しく作動流体は頻繁に上部まで吹き上がっており大量の蒸気を発生し続けるため Fig. 2.5 のような結果となつたと考えられる。

突沸及び激しい沸騰が起こると、ヒートパイプからカリカリという気泡の破裂音が聞こえた。

この可視化実験から、下端が閉じ上部は自由空間になる垂直管内の流体を加熱した時に、急速な沸騰で管内の液体が吹き上げられ、そのあとを上から上部の液体が自然落下により流入し管内を再充填するガイセリングとよばれる現象と同じ現象がヒートパイプ内部で起こることがわかった。

2.5 まとめ

誘導加熱を用いた可視化実験から次のことが明らかになった。

- 1) 加熱量が少ない場合、作動流体は時間をおいて突沸を起こす。
- 2) 加熱量が多い場合、作動流体は激しくかつ安定した沸騰となる。
- 3) 沸騰開始時間は、加熱量が多くなるほど早くなる。
- 4) ヒートパイプの圧力変化は、凝縮部の温度変化に似ており、作動流体の沸騰の形式に左右される。
- 5) 加熱量が多い場合、作動流体はガイセリングの現象が起こる。

3. 可視化模擬ヒートパイプによる定常実験

3.1 目的

本実験は、可視化模擬ヒートパイプを用いての定常実験である。ヒートパイプ内の作動流体の熱流の挙動を VTR 及び写真で撮影した。

3.2 実験装置

実験に使用したヒートパイプは、前章と同じ可視化模擬ヒートパイプである。蒸発部の加熱は、Fig. 3.1 に示すように SUS パイプに鋳込んだシース型ヒータによって行った。

加熱部は、直径 16ϕ 、長さ 260 mm で、最大出力は 300 W である。このヒータは、下端から 70 mm までの部分と上端から 100 mm までの部分が非加熱部分になっており、上部の非加熱部分をヒートパイプの断熱部とした。

また、本実験は、ヒートパイプ内部の封入圧力も変化させて行った。封入ガスはアルゴンガスを使用した。

壁面の温度は、Fig. 3.2 に示すように 1 の位置に直径 0.1 mm のクロメル・アルメル (CA) 熱電対を、2, 3, 4 の位置に直径 0.5 mm のクロメル・アルメル (CA) シース熱電対を埋め込み、ペンレコーダにより記録した。

実験装置全体の外観写真を Photo. 3.1 に示す。

3.3 実験方法

可視化ヒートパイプの蒸発部の加熱はシースヒータを用いた。定常時の壁温及び圧力の測定は、ペンレコーダを使用するとともに同時に作動流体の挙動を VTR 及び写真により撮影した。実験は、ヒータ出力、ヒートパイプ内圧力、作動流体量をパラメータとし、これらの因子がヒートパイプの作動流体の挙動に、どのように影響を与えるかを調べた。

3.4 実験結果及び考察

本実験で使用した可視化模擬ヒートパイプの基本的な実験条件及び特性曲線を Table 3.1, Fig. 3.3 及び Fig. 3.4 に示す。Fig. 3.3 は縦軸に熱流束 (W/cm^2)、横軸にヒートパイプ壁面温度をとったものである。このヒートパイプの特性を見ると、熱流束の大小にかかわらず熱電対番号 4 の位置の温度がほかに比べ高くなっている。これは、熱電対 4 の位置は作動液中にあるためと考えられる。ヒートパイプの封入圧力が低いときは作動流体の飽和温度は、作動流体の水頭の影響により作動流体の下に行くほど高くなる。これは、作動流体のヘッドにより飽和温度が高くなっていることが原因と考えられる。Fig. 3.4 に壁面過熱温度と熱流速の関係を示す。

また、作動流体の量を加熱部の長さの 50% (ヒータ下端より 115 mm), 加熱部の長さの 80% (ヒータ下端より 140 mm), 加熱部の長さの 100% (ヒータ下端より 160 mm) と変化させ、さらに封入圧力及びヒータ出力 (熱流束) をパラメータとして実験を行った。実験条件及びその結果は Table 3.2, Photo. 3.2 — Photo. 3.19 に示した。

<熱流束の違いによる作動流体の流動様式の違い>

作動流体レベル 160 mm (加熱部の長さの 100%), 内部圧力 210 mmHg の場合、熱流束が $0 \sim 1 \text{ W}/\text{cm}^2$ (K 035, Photo. 3.14) と小さい時は、作動流体が沸騰している様子は見受けられず、熱流束が $1 \sim 3 \text{ W}/\text{cm}^2$ (K 036, Photo. 3.15) と少し大きくなると、作動流体の上部の方が沸騰をし、さらに熱流束が $6 \text{ W}/\text{cm}^2$ (K 037, Photo. 3.16) と大きくなると、作動流体全体が激しく沸騰し、絶えずヒータ下端より 330 mm 付近 (以下、レベルはヒータ下端よりの距離を示す) まで飛び上がり、また蒸気もヒートパイプ上端まで激しく上昇した。のことより、熱流束が異なると沸騰の形態も異なってくることがわかる。特に熱サイフォン式ヒートパイプにおいては、気泡発泡点が少ないため突沸が起りやすいという点が特徴となっている。

<ヒートパイプ内の圧力の違いによる流動様式の違い>

熱流速 $5.87 \text{ W}/\text{cm}^2$, 作動流体レベル 160 mm (加熱部の長さの 100%) の場合を比較すると、内部圧力 210 mmHg (K 037) では作動流体はヒートパイプ最上端 330 mm まで吹上げ、

内部圧力 460 mmHg (K 040) では作動流体は 280 mmまで吹上げた。このことは他の条件でも同様に見受けられ、熱流束と作動流体レベルが同一条件ならば、内部圧力が高い方が作動流体の吹き上がる高さは低くなることがわかった。

のことより、ヒートパイプ内に非凝縮ガスを入れ圧力を高くすると、沸騰の激しさがある程度おさえられることがわかる。

＜作動流体量の違いによる流動様式の違い＞

熱流束 5.87 W/cm^2 、内部圧力 260 mmHg の場合、作動流体レベル 115 mm（加熱部長さの 50%）では、作動流体は、250 mmあたりまで吹き上がり、作動流体レベル 142 mm（加熱部長さの 80%）では、作動流体は、320 mmあたりまで吹き上がった。熱流束と内部圧力が同一条件ならば、作動液レベルが低い方が作動流体の吹き上がる高さは低くなることがわかった。

また作動流体レベルが 115 mm と加熱部長さ 160 mm の 50%程度で、かつ熱流束が $1 \sim 3 \text{ W/cm}^2$ の時、作動流体は沸騰しているが吹き上がる様子もなく、凝縮して落ちてきた作動流体の液滴の大部分が、加熱部でまた加熱され蒸発し、下部の液面まで到達できない現象がみられた。参考までにこの時の液滴の 1 つを縦軸にヒーター下端よりの距離 (mm)、横軸に時間 (sec) をとり、落下の様子を Fig. 3.5 に示した。

3.5 まとめ

ヒータ加熱を用いた可視化実験から次の事項が明らかになった。

- (1) 热流束が $1 \sim 3 \text{ W/cm}^2$ と少ない場合、作動流体は $1 \sim 5 \text{ sec}$ 程の周期で突沸を起こす。
- (2) 热流束が約 6 W/cm^2 と多い場合、作動流体は激しくかつ安定した沸騰となる。
- (3) ヒートパイプの加熱部長さの 50% と作動流体量が少なくかつ熱流束が $1 \sim 3 \text{ W/cm}^2$ と比較的小さい場合、凝縮して落ちてきた作動流体は加熱部途中で蒸発し、下までもどらない。
- (4) ヒートパイプ内の圧力が高くなるに従って、沸騰による作動流体の飛び上がる高さは低くなる。
- (5) 热流束が約 6 W/cm^2 と多い場合、作動流体はガイセリングの現象が起こる。
- (6) 热流束が $2 \sim 3 \text{ W/cm}^2$ より大きくなると、沸騰の形が変り、このためスーパーヒートは増大する。

4. 結論

誘導加熱及びヒータ加熱を用いた可視化実験から、ヒートパイプについて以下の事が明らかとなった。

- (1) 热サイフォン式ヒートパイプの壁面温度の過渡応答に関する応答時間は、銅パイプのそれと比較して加熱部温度が高温の場合約 $1/3$ 、低温の場合約 $1/10$ となっている。
- (2) ヒートパイプの加熱部温度が 95°C と高温で、あるいは熱流束が約 6 W/cm^2 と高い場合、作動流体は激しく安定した沸騰（ガイセリング）となり、また温度は定常化する。

内部圧力 460 mmHg (K 040) では作動流体は 280 mmまで吹上げた。このことは他の条件でも同様に見受けられ、熱流束と作動流体レベルが同一条件ならば、内部圧力が高い方が作動流体の吹き上がる高さは低くなることがわかった。

のことより、ヒートパイプ内に非凝縮ガスを入れ圧力を高くすると、沸騰の激しさがある程度おさえられることがわかる。

<作動流体量の違いによる流動様式の違い>

熱流束 5.87 W/cm^2 、内部圧力 260 mmHg の場合、作動流体レベル 115 mm (加熱部長さの 50%) では、作動流体は、250 mmあたりまで吹き上がり、作動流体レベル 142 mm (加熱部長さの 80%) では、作動流体は、320 mmあたりまで吹き上がった。熱流束と内部圧力が同一条件ならば、作動液レベルが低い方が作動流体の吹き上がる高さは低くなることがわかった。

また作動流体レベルが 115 mm と加熱部長さ 160 mm の 50%程度で、かつ熱流束が $1 \sim 3 \text{ W/cm}^2$ の時、作動流体は沸騰しているが吹き上がる様子もなく、凝縮して落ちてきた作動流体の液滴の大部分が、加熱部でまた加熱され蒸発し、下部の液面まで到達できない現象がみられた。参考までにこの時の液滴の 1 つを縦軸にヒーター下端よりの距離 (mm)、横軸に時間 (sec) をとり、落下の様子を Fig. 3.5 に示した。

3.5 まとめ

ヒータ加熱を用いた可視化実験から次の事項が明らかになった。

- (1) 热流束が $1 \sim 3 \text{ W/cm}^2$ と少ない場合、作動流体は $1 \sim 5 \text{ sec}$ 程の周期で突沸を起こす。
- (2) 热流束が約 6 W/cm^2 と多い場合、作動流体は激しくかつ安定した沸騰となる。
- (3) ヒートパイプの加熱部長さの 50% と作動流体量が少なくかつ熱流束が $1 \sim 3 \text{ W/cm}^2$ と比較的小さい場合、凝縮して落ちてきた作動流体は加熱部途中で蒸発し、下までもどらない。
- (4) ヒートパイプ内の圧力が高くなるに従って、沸騰による作動流体の飛び上がる高さは低くなる。
- (5) 热流束が約 6 W/cm^2 と多い場合、作動流体はガイセリングの現象が起こる。
- (6) 热流束が $2 \sim 3 \text{ W/cm}^2$ より大きくなると、沸騰の形が変り、このためスーパーヒートは増大する。

4. 結論

誘導加熱及びヒータ加熱を用いた可視化実験から、ヒートパイプについて以下の事が明らかとなった。

- (1) 热サイフォン式ヒートパイプの壁面温度の過渡応答に関する応答時間は、銅パイプのそれと比較して加熱部温度が高温の場合約 $1/3$ 、低温の場合約 $1/10$ となっている。
- (2) ヒートパイプの加熱部温度が 95°C と高温で、あるいは熱流束が約 6 W/cm^2 と高い場合、作動流体は激しく安定した沸騰 (ガイセリング) となり、また温度は定常化する。

- (3) ヒートパイプの加熱部温度が85~90℃と中温で、あるいは熱流束が1~3 W/cm²と低い場合、作動流体は1~60sec程の周期で突沸現象を起こす。
- (4) ヒートパイプの加熱部温度が65~75℃と低温で、あるいは熱流速が0~1 W/cm²と低い場合、ヒートパイプは、伝熱面の一部でしか働いていないと考えられる。
- (5) ガイセリングが起こると気泡の破裂や振動によって、音や圧力が激しく変化してヒートパイプの劣化が促進されるのではないかと考えられる。
- (6) ヒートパイプ凝縮部における作動流体の凝縮は、滴状である。
- (7) ヒートパイプの加熱部長さの50%と作動流体量が少なくかつ熱流束が1~3 W/cm²と比較的小さい場合、凝縮して落ちてきた作動流体は加熱部途中で蒸発し、下までもどらない。
- (8) ヒートパイプ内の圧力変化は、凝縮部の温度変化に似ており、沸騰形式に左右される。
- (9) 突沸現象が現われると、実験の再現性がなくなる。

謝　　辞

本研究を行うに当たり、茨城大学工学部の益子一郎先生に、御協力いただいた。また、茨城大学との協力研究を実施するに当っては、市橋芳徳照射第1課長及び材料試験炉部業務課諸氏に協力していただいた。感謝いたします。

参　考　文　献

- 1) 大島耕一, 松下 正, 村上正秀: ヒートパイプ工学: 朝倉書店, (1979)
- 2) 山西哲夫, 清水定明: ヒートパイプとその応用: オーム社, (1980)
- 3) 岡本芳三, 神永文人: ヒートパイプによる熱利用技術: 東京大学工学部附属原子力工学研究施設固有安全炉利用展開研究会, (1988)
- 4) 露崎典平, 斎藤 隆, 菅田 誠, 岡本芳三, 根岸完二: 炉内試料のヒートパイプによる除熱方法, 発明考案出願中 (62-015240).

- (3) ヒートパイプの加熱部温度が85~90℃と中温で、あるいは熱流束が1~3 W/cm²と低い場合、作動流体は1~60sec程の周期で突沸現象を起こす。
- (4) ヒートパイプの加熱部温度が65~75℃と低温で、あるいは熱流速が0~1 W/cm²と低い場合、ヒートパイプは、伝熱面の一部でしか働いていないと考えられる。
- (5) ガイセリングが起こると気泡の破裂や振動によって、音や圧力が激しく変化してヒートパイプの劣化が促進されるのではないかと考えられる。
- (6) ヒートパイプ凝縮部における作動流体の凝縮は、滴状である。
- (7) ヒートパイプの加熱部長さの50%と作動流体量が少なくかつ熱流束が1~3 W/cm²と比較的小さい場合、凝縮して落ちてきた作動流体は加熱部途中で蒸発し、下までもどらない。
- (8) ヒートパイプ内の圧力変化は、凝縮部の温度変化に似ており、沸騰形式に左右される。
- (9) 突沸現象が現われると、実験の再現性がなくなる。

謝　　辞

本研究を行うに当たり、茨城大学工学部の益子一郎先生に、御協力いただいた。また、茨城大学との協力研究を実施するに当っては、市橋芳徳照射第1課長及び材料試験炉部業務課諸氏に協力していただいた。感謝いたします。

参　考　文　献

- 1) 大島耕一、松下 正、村上正秀：ヒートパイプ工学：朝倉書店、(1979)
- 2) 山西哲夫、清水定明：ヒートパイプとその応用：オーム社、(1980)
- 3) 岡本芳三、神永文人：ヒートパイプによる熱利用技術：東京大学工学部附属原子力工学研究施設固有安全炉利用展開研究会、(1988)
- 4) 露崎典平、斎藤 隆、菱田 誠、岡本芳三、根岸完二：炉内試料のヒートパイプによる除熱方法、発明考案出願中(62-015240)。

- (3) ヒートパイプの加熱部温度が85~90℃と中温で、あるいは熱流束が1~3 W/cm²と低い場合、作動流体は1~60 sec程の周期で突沸現象を起こす。
- (4) ヒートパイプの加熱部温度が65~75℃と低温で、あるいは熱流速が0~1 W/cm²と低い場合、ヒートパイプは、伝熱面の一部でしか働いていないと考えられる。
- (5) ガイセリングが起こると気泡の破裂や振動によって、音や圧力が激しく変化してヒートパイプの劣化が促進されるのではないかと考えられる。
- (6) ヒートパイプ凝縮部における作動流体の凝縮は、滴状である。
- (7) ヒートパイプの加熱部長さの50%と作動流体量が少なくかつ熱流束が1~3 W/cm²と比較的小さい場合、凝縮して落ちてきた作動流体は加熱部途中で蒸発し、下までもどらない。
- (8) ヒートパイプ内の圧力変化は、凝縮部の温度変化に似ており、沸騰形式に左右される。
- (9) 突沸現象が現われると、実験の再現性がなくなる。

謝　　辞

本研究を行うに当たり、茨城大学工学部の益子一郎先生に、御協力いただいた。また、茨城大学との協力研究を実施するに当っては、市橋芳徳照射第1課長及び材料試験炉部業務課諸氏に協力していただいた。感謝いたします。

参　考　文　献

- 1) 大島耕一、松下正、村上正秀：ヒートパイプ工学：朝倉書店、(1979)
- 2) 山西哲夫、清水定明：ヒートパイプとその応用：オーム社、(1980)
- 3) 岡本芳三、神永文人：ヒートパイプによる熱利用技術：東京大学工学部附属原子力工学研究施設固有安全炉利用展開研究会、(1988)
- 4) 露崎典平、斎藤隆、菱田誠、岡本芳三、根岸完二：炉内試料のヒートパイプによる除熱方法、発明考案出願中(62-015240)。

Table 1.1 Power of density and coefficient of nuclear reactor

原子炉での定常出力	軽水炉 液体金属冷却型高速炉	~ 43 W/cm ² ~ 120 W/cm ²
出力変化条件	出力変化 温度変化 圧力変化	~ 100 %/sec ~ 50 °C/sec ~ 10 bar/sec

Table 2.1 Experimental conditions for visible model of heat-pipe test runs

Run No.	Figure No.	Induction heating
G3000P	Fig. 2.3	1.10 (KW)
G3001P	Fig. 2.4	1.47
G3002P	Fig. 2.5	1.65

Table 3.1 Experimental conditions for visible model of heat-pipe test runs
 (Fig. 3.3 — Fig. 3.4)

Run number	Coolant temp.(°C)	Heat flux (W/cm ²)	Inside pressure (mmHG)	Working liquid level (mm)
K041	9.9	0.07	14.0	160
K042	10.1	0.27	14.0	160
K043	10.3	0.62	13.0	160
K044	10.6	1.12	13.0	160
K045	10.6	1.77	13.0	160
K046	10.8	2.51	13.5	160
K047	11.1	3.47	16.0	160
K048	11.1	4.54	15.0	160
K049	11.3	5.75	14.5	160

Table 3.2 Experimental conditions for visible model of heat-pipe test runs
 (Photo. 3.2 — Photo. 3.19)

Run number	Coolant temp. (°C)	Heat flux (W/cm²)	Inside pressure (mmHG)	Working liquid level (mm)
K023	9.6	0.29	260	115
K024	9.6	1.18	260	115
K025	10.0	5.97	260	115
K026	10.6	0.29	560	115
K027	10.6	1.18	560	115
K028	10.3	5.97	560	115
K029	10.6	0.29	260	142
K030	10.6	1.15	260	142
K031	10.9	5.89	260	142
K032	11.1	0.28	560	142
K033	11.2	1.15	560	142
K034	11.1	5.87	560	142
K035	11.6	0.27	210	160
K036	11.6	1.15	210	160
K037	11.6	5.87	210	160
K038	11.8	0.27	460	160
K039	11.8	1.15	460	160
K040	12.1	5.87	460	160

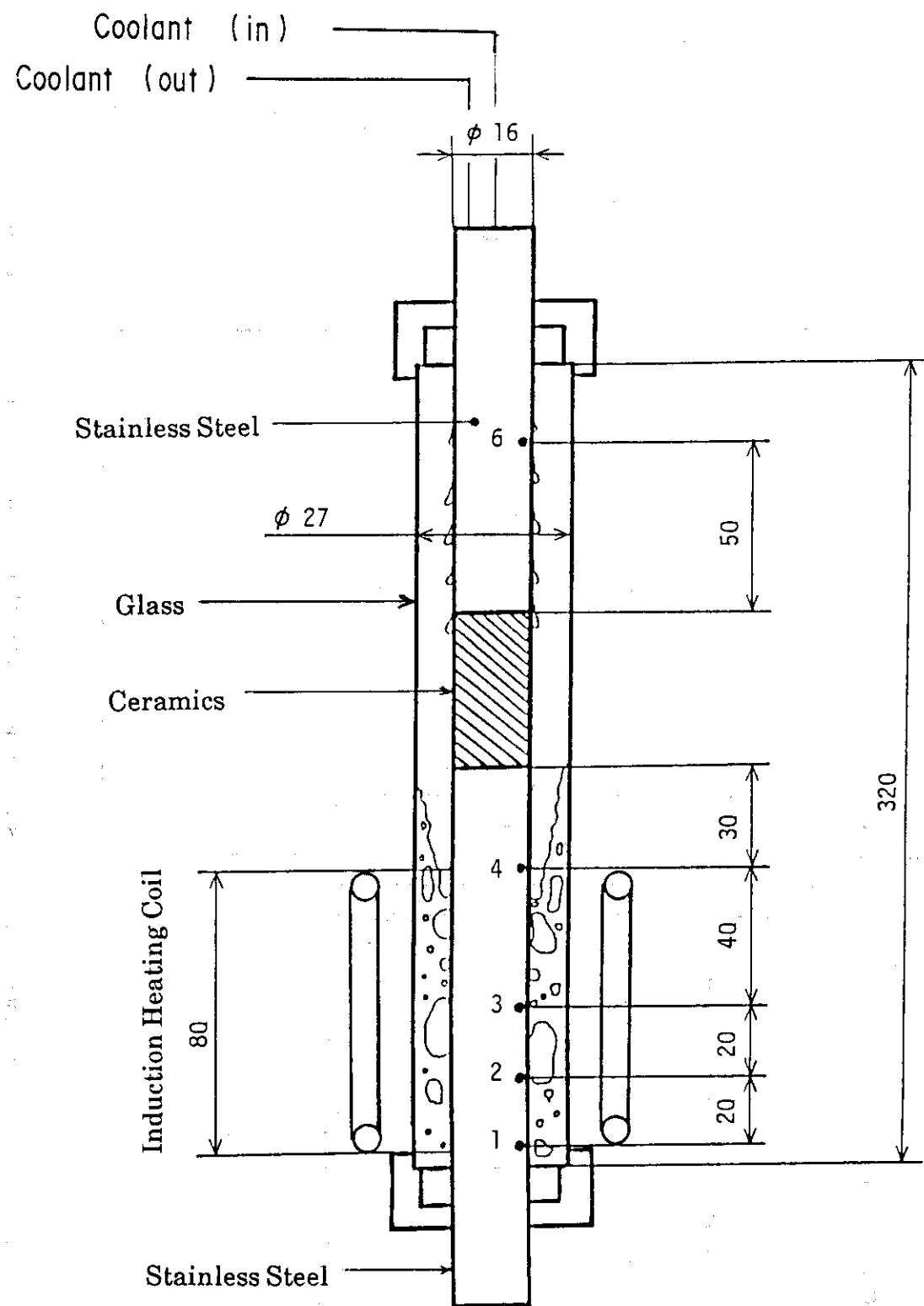


Fig. 2.1 Test section for visible model of heat-pipe (on transient condition)

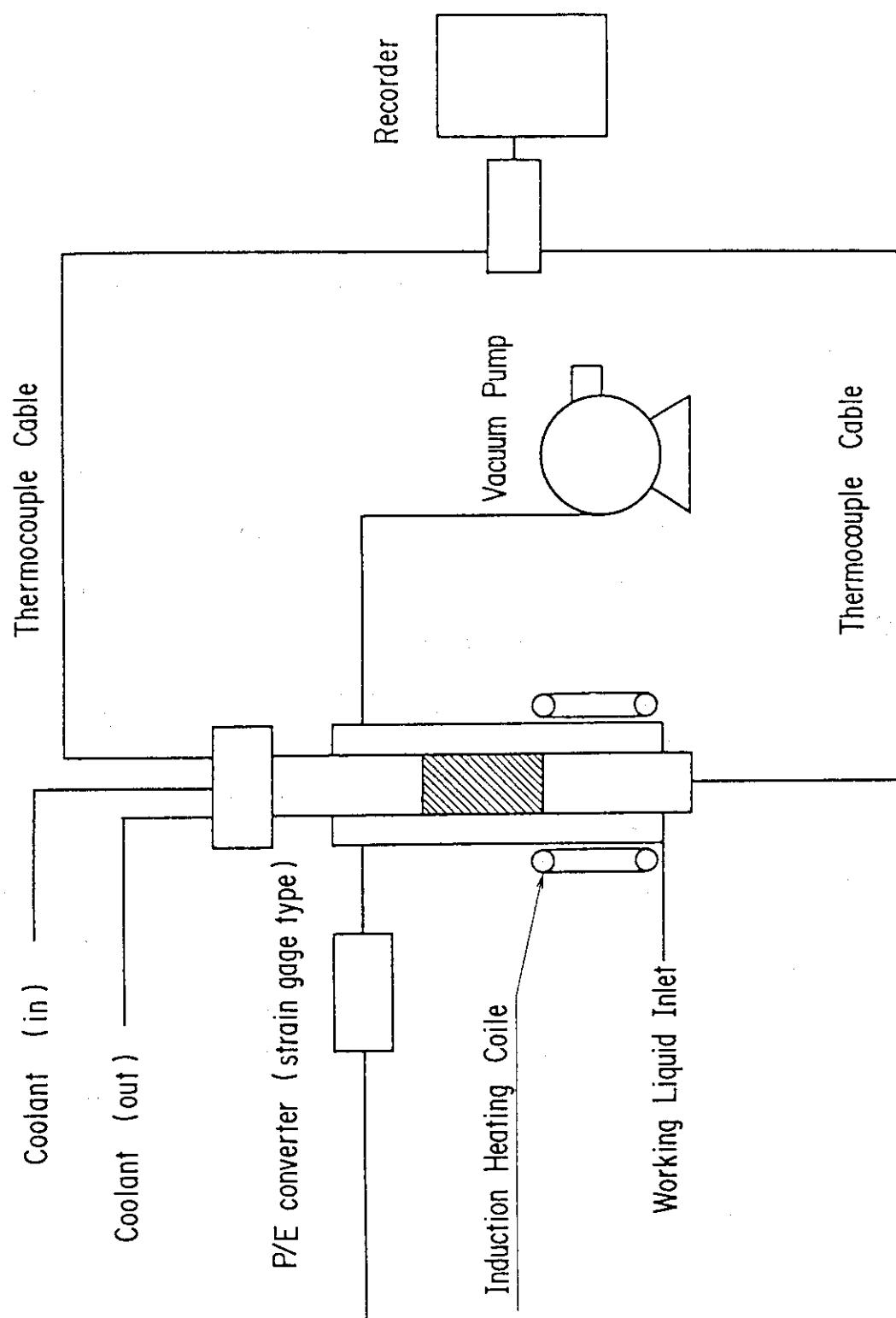


Fig. 2.2 Experimental apparatus for visible model of heat-pipe (on transient condition)

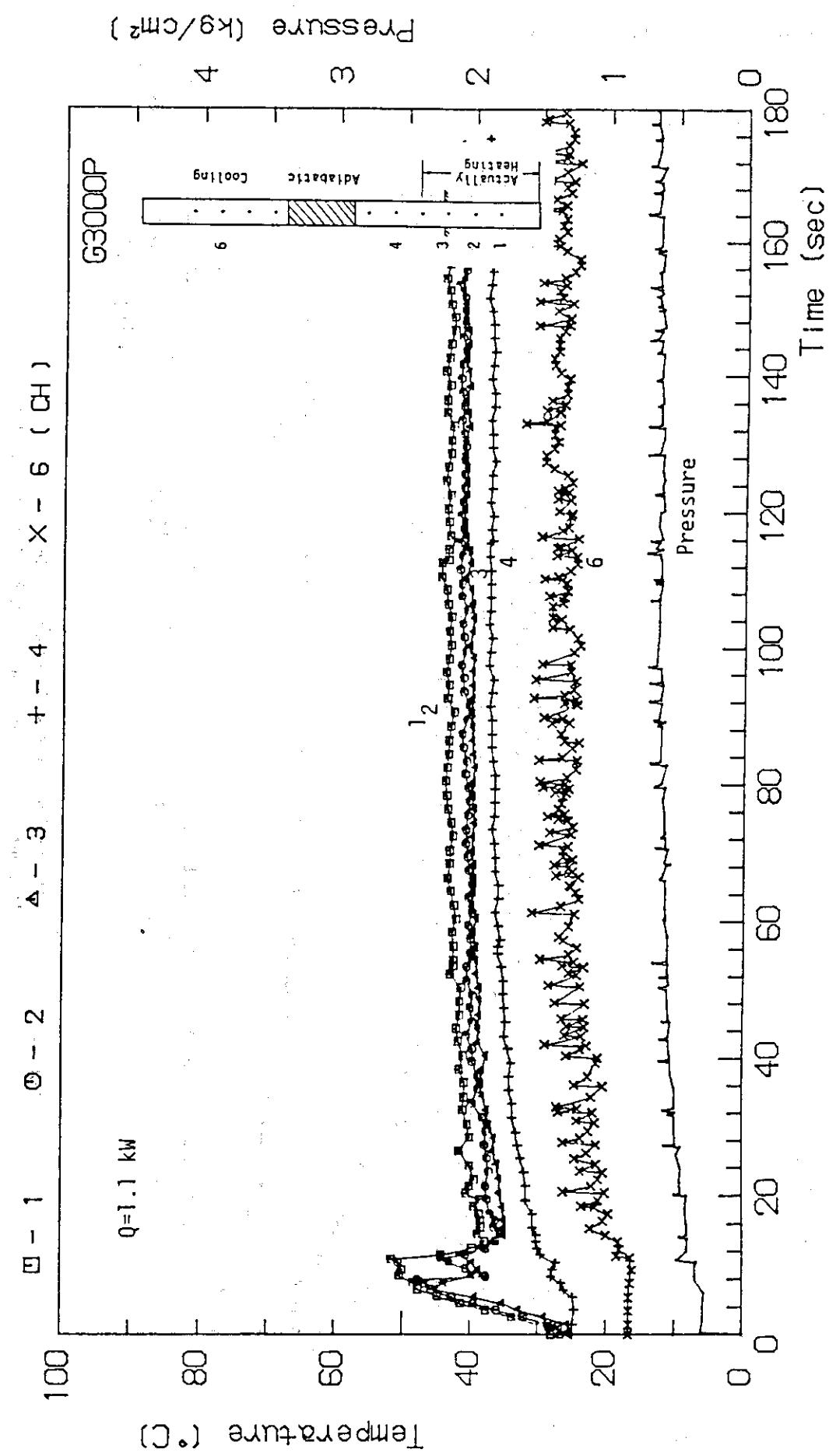


Fig. 2.3 Wall temperature of visible model of heat-pipe
(on transient condition . Induction heating = 1.10 KW)

Fig. 2.3

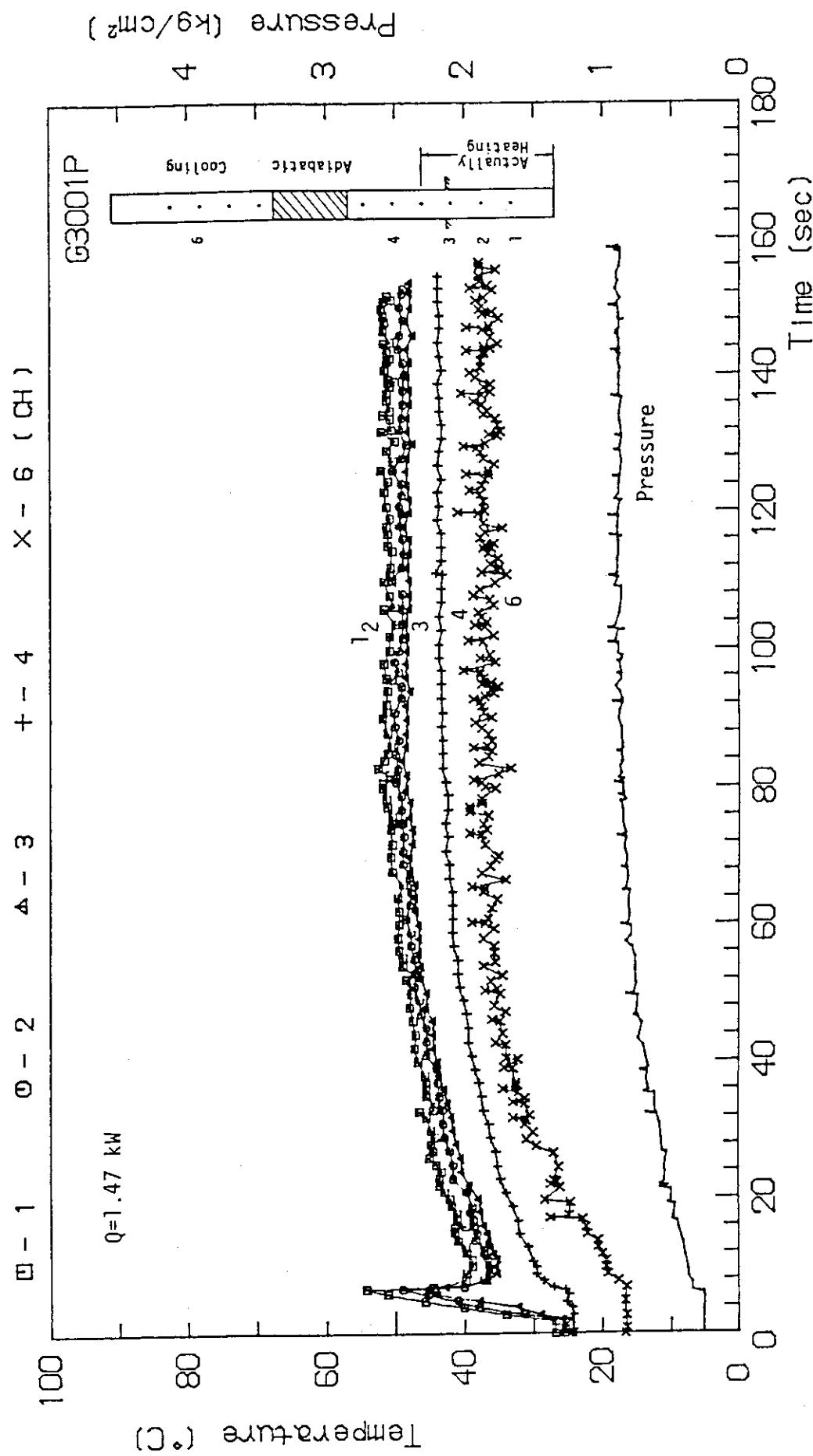


Fig. 2.4 Wall temperature of visible model of heat-pipe
(on transient condition, Induction heating = 1.47 KW)

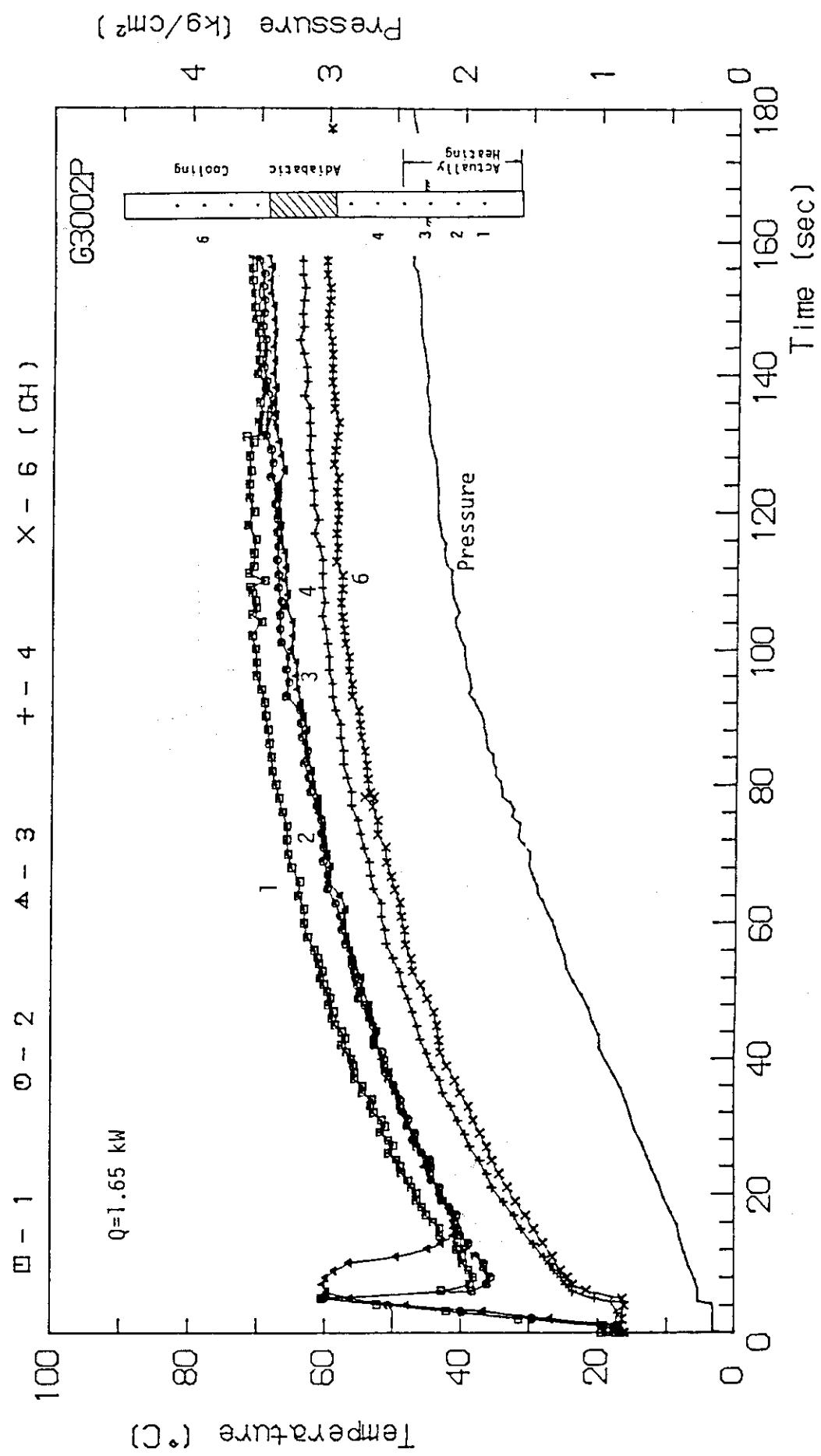


Fig. 2.5 Wall temperature of visible model of heat-pipe
(on transient condition, Induction heating = 1.65 KW)

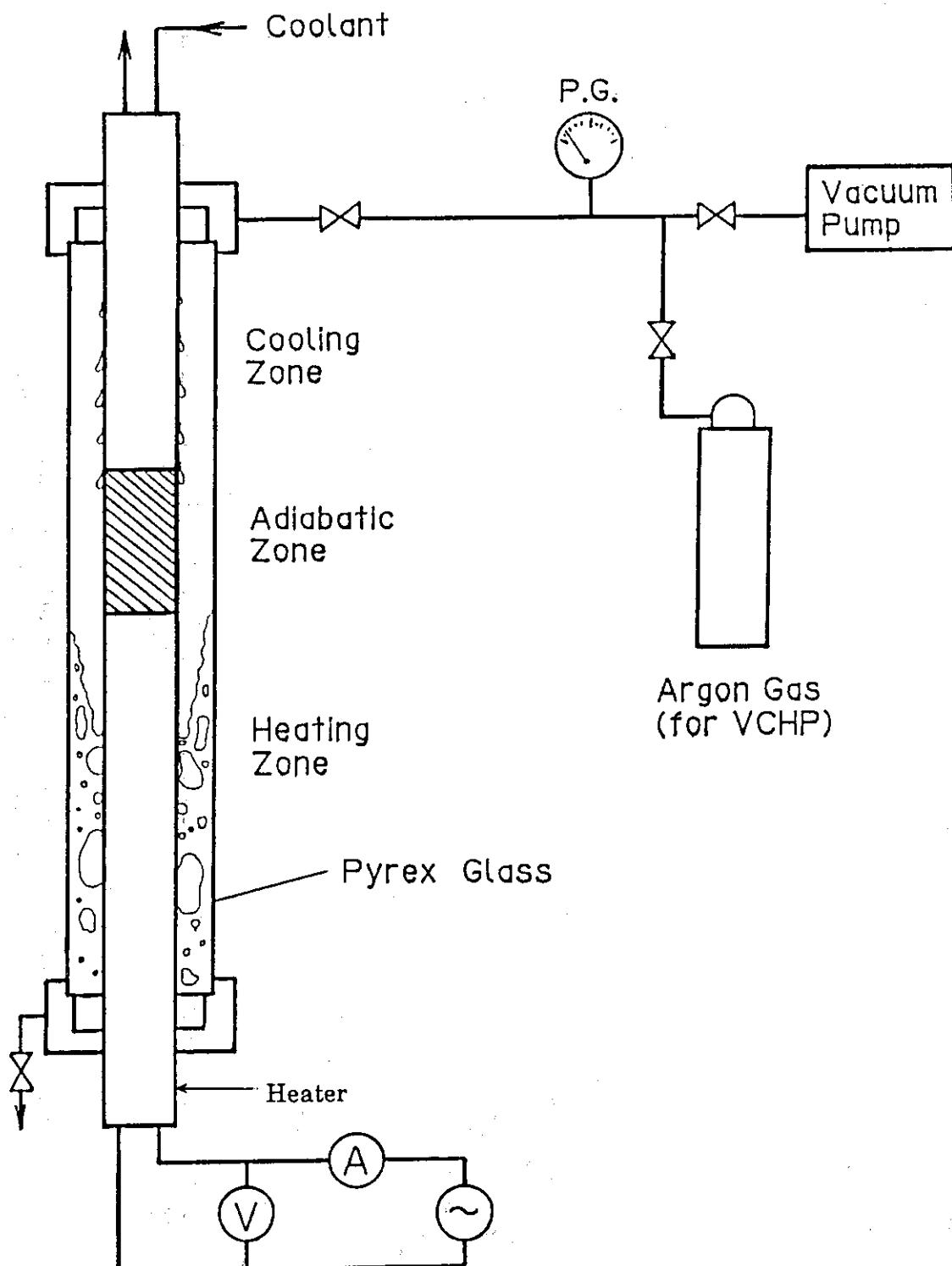


Fig. 3.1 Experimental apparatus for visible model of heat-pipe
(on steady state)

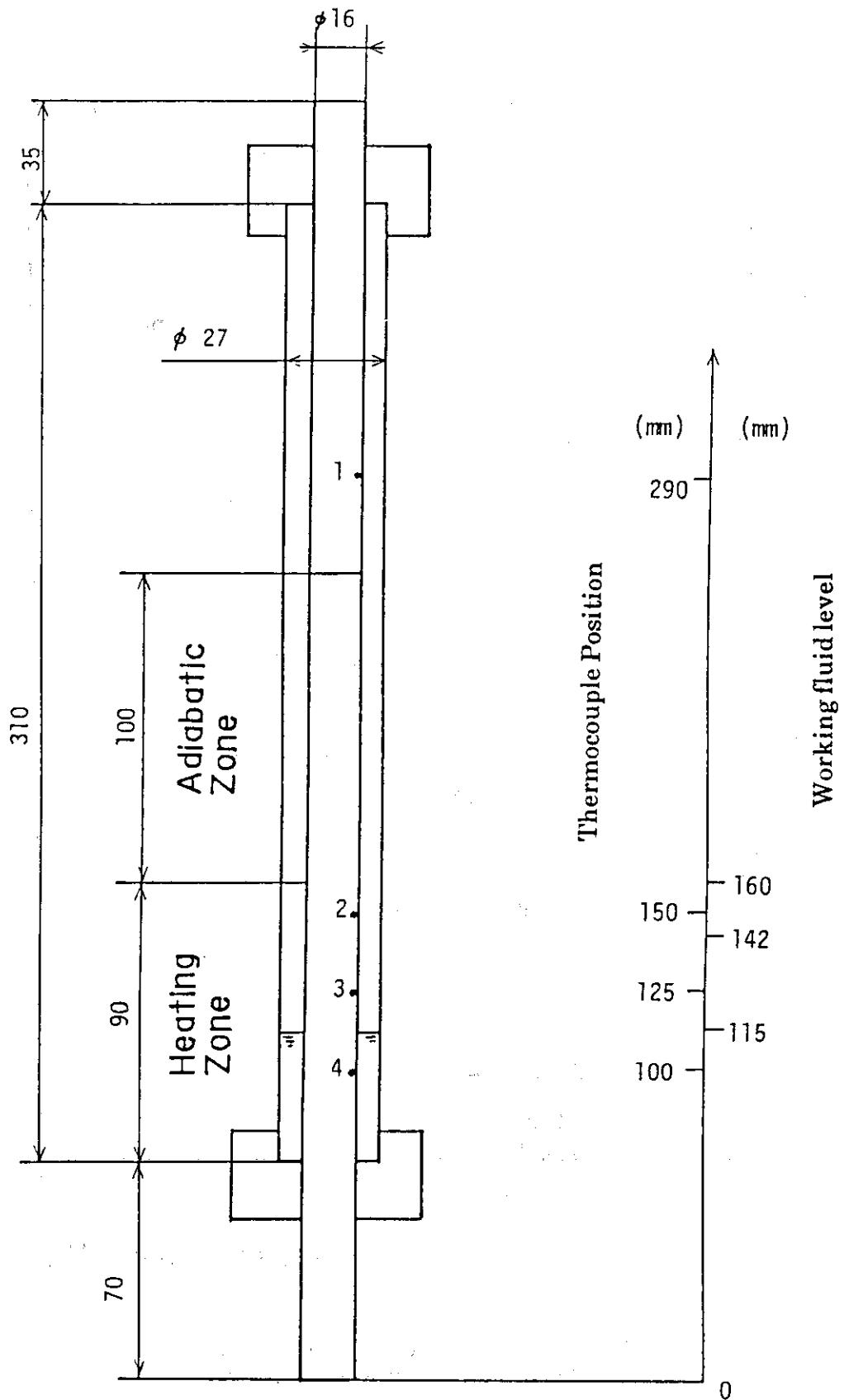


Fig. 3.2 Test section for visible model of heat-pipe
(on steady state)

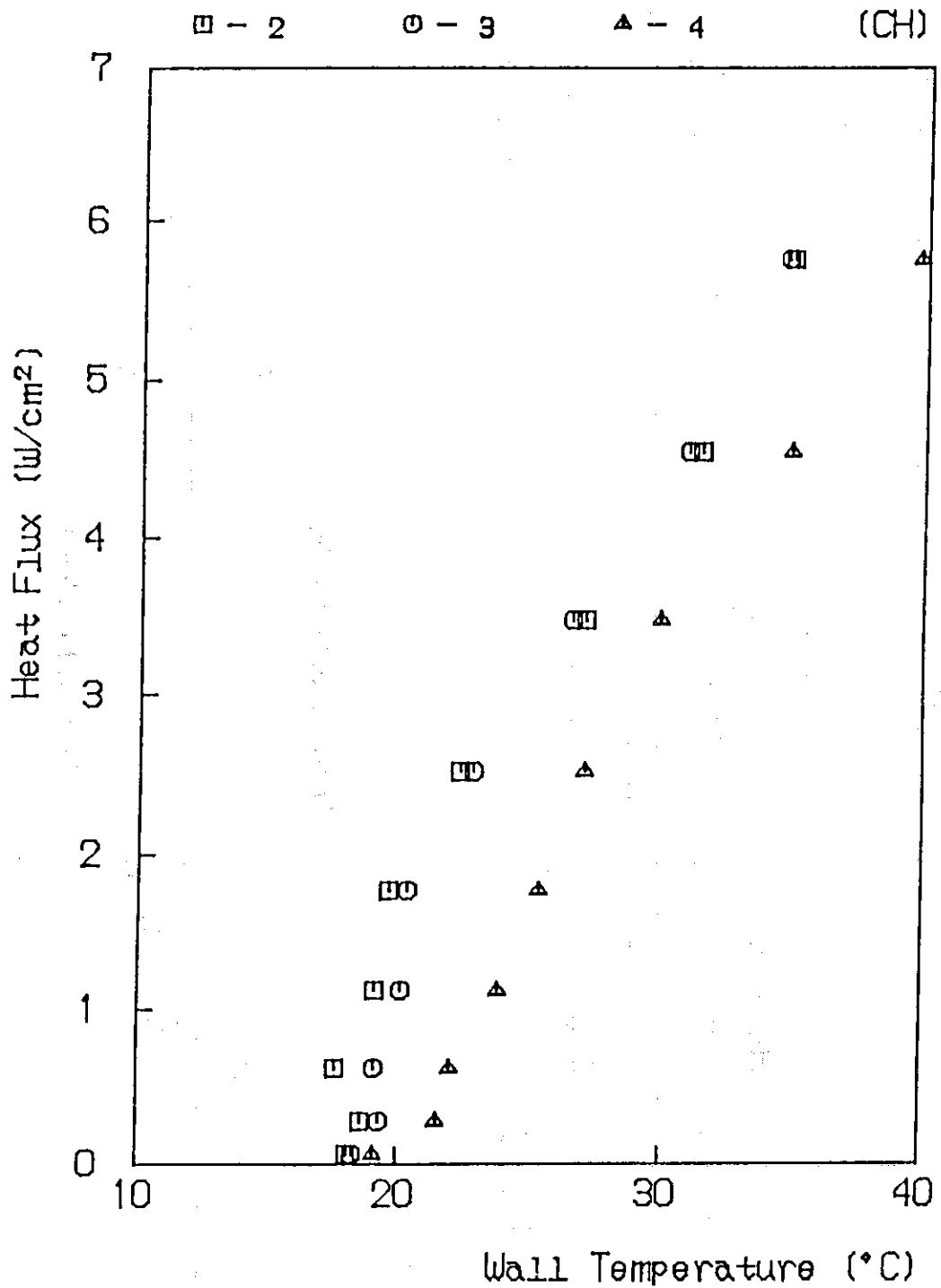


Fig. 3.3 Characteristics of the visible model heat-pipe
(on steady state, Wall temperature vs Heat flux)

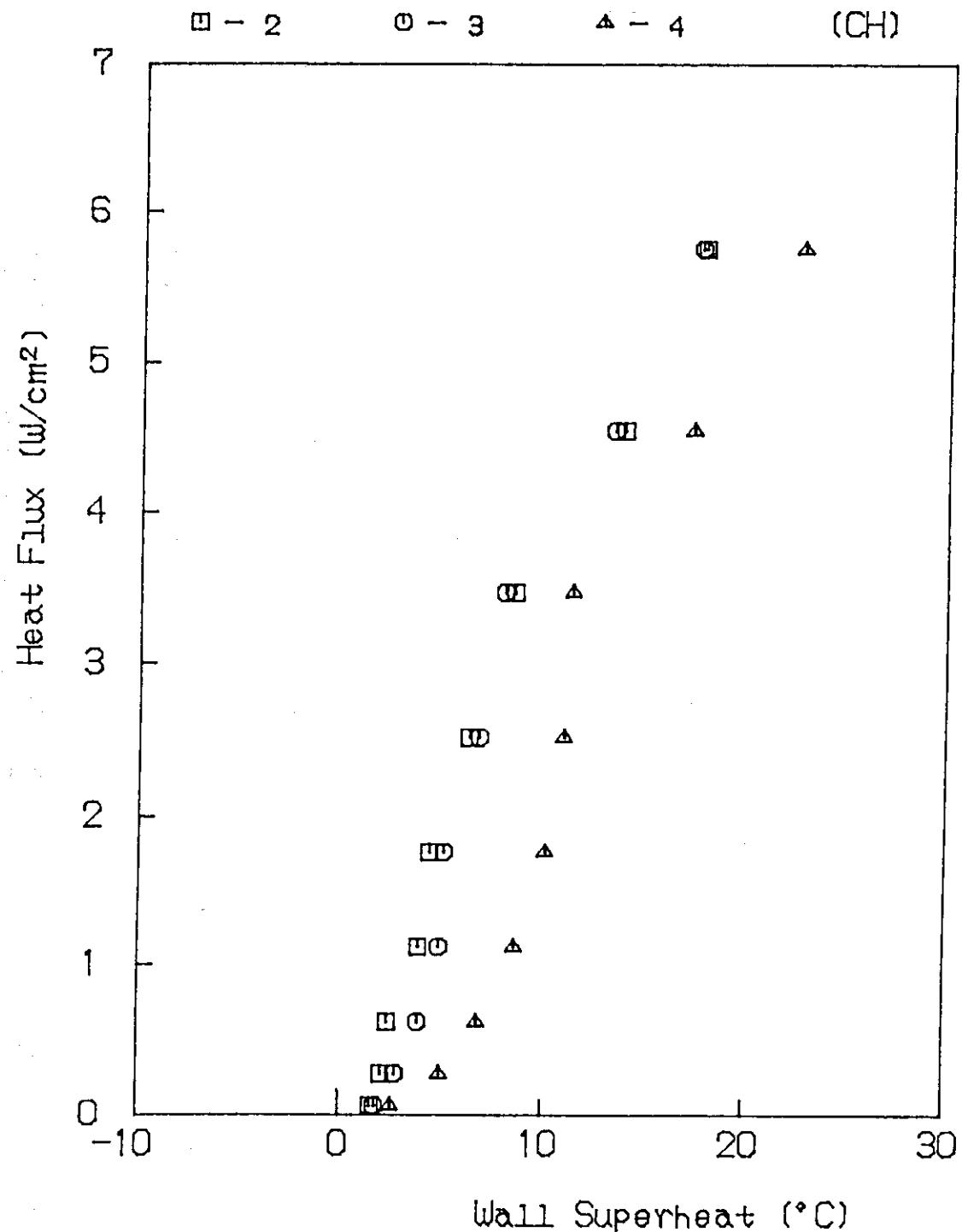


Fig. 3.4 Characteristics of the visible model heat-pipe
(on steady state, Wall superheat vs Heat flux)

Heating Zone Adiabatic Zone Cooling Zone

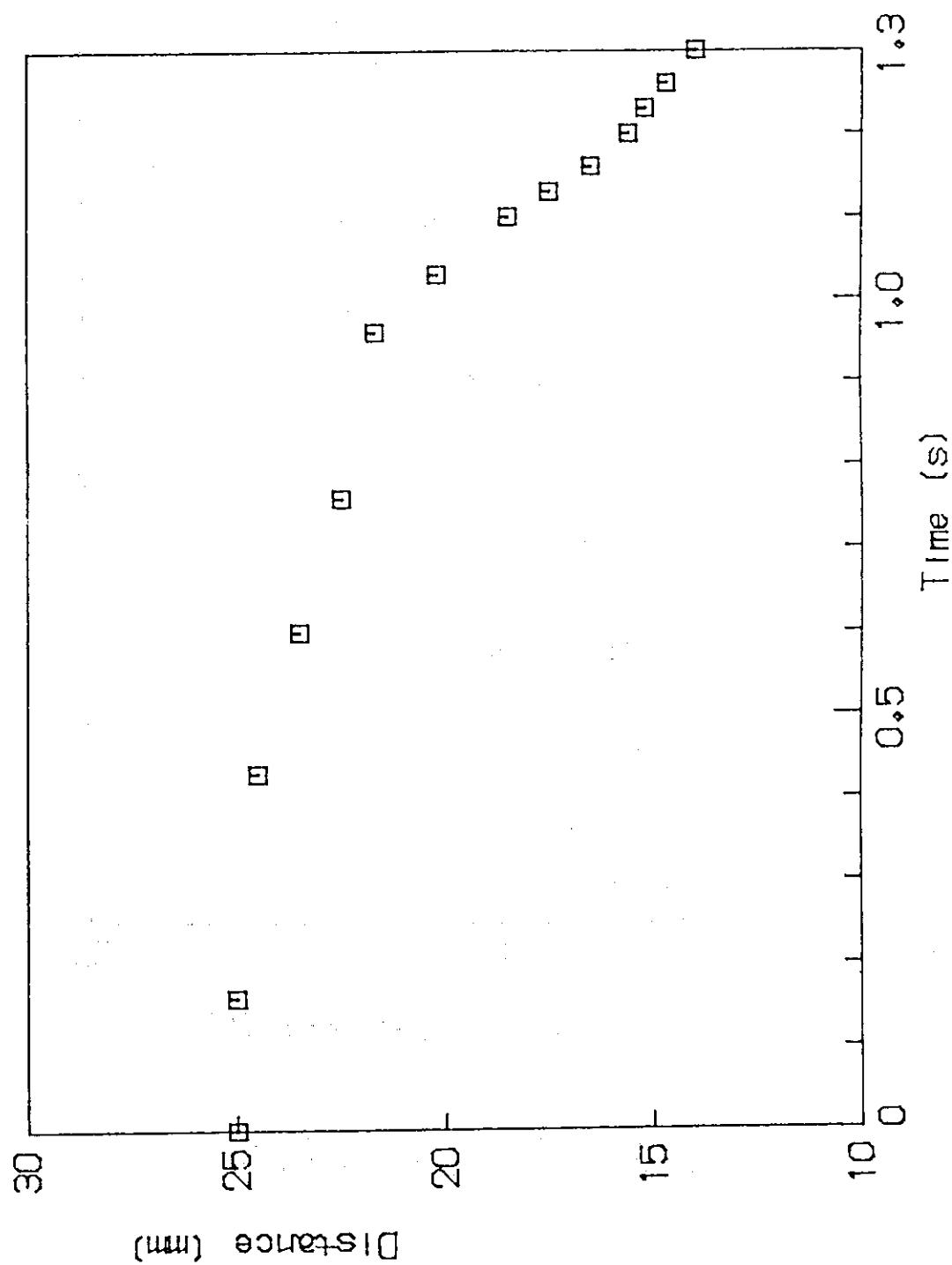
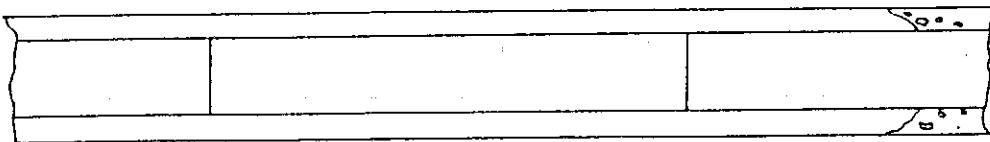


Fig. 3.5 Movement of a droplet (Heat flux = 1.18 W/cm^2 , Coolant temp = 9.6°C , Inside pressure = 260 mmHg , Working liquid level = 115 mm)

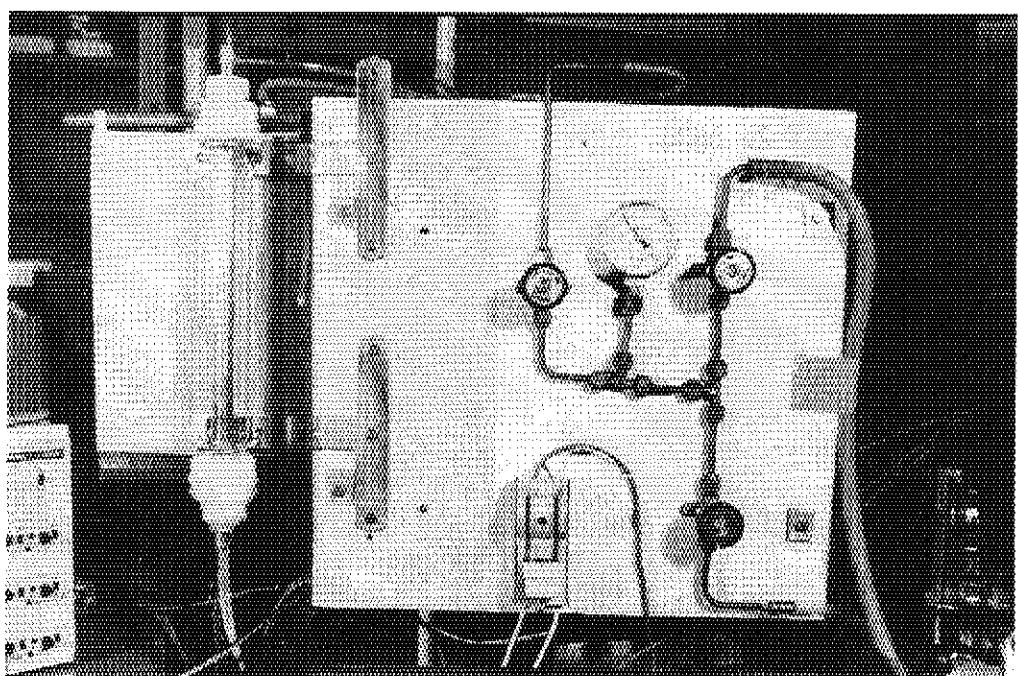


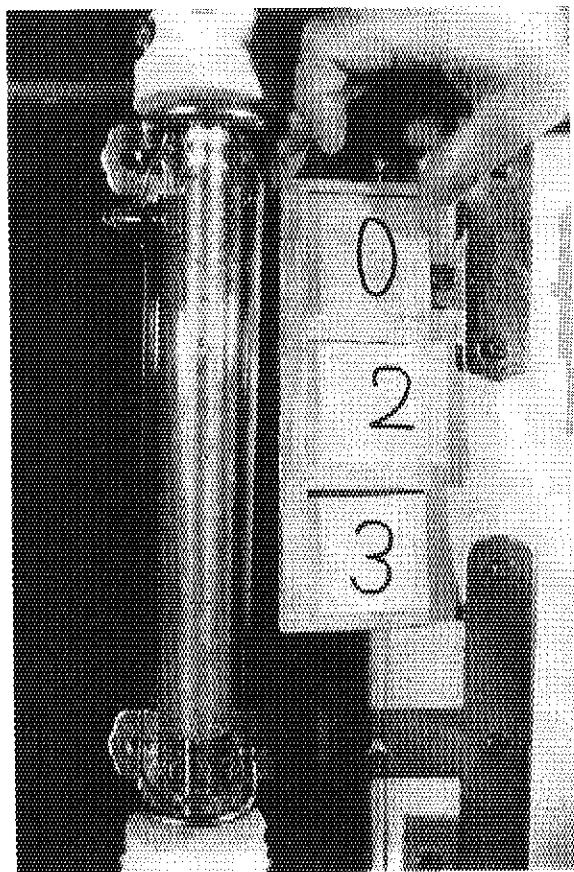
Photo. 3. 1 Experimental apparatus for visible model of heat-pipe

DATA NAME : K023

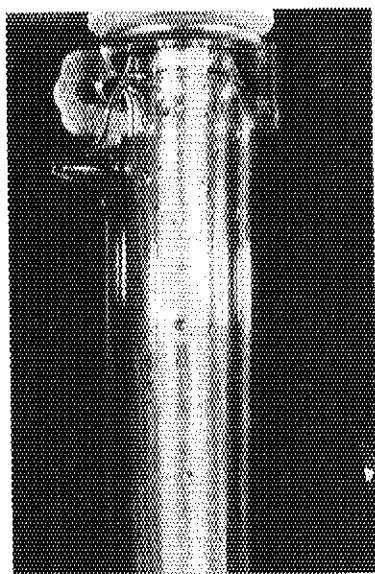
Working Liquid Level : 115 mm

Inside Pressure : 26 cmHg

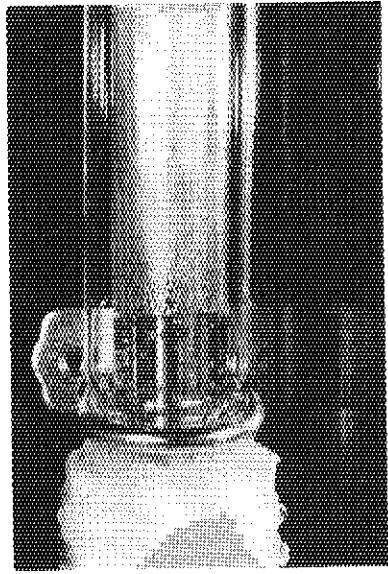
Heat Flux : 0.29 W/cm²



全体写真



凝縮部



蒸発部

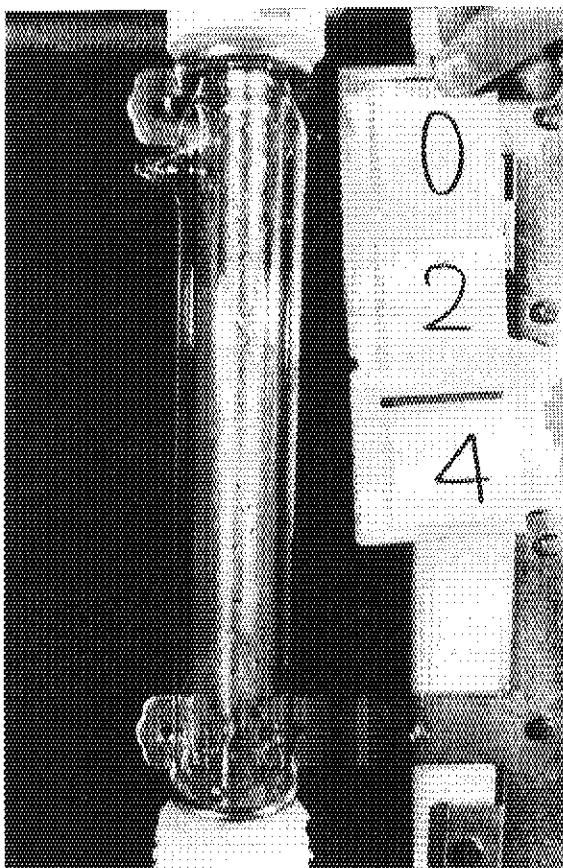
Photo. 3. 2 Steady experiment using a visible model of heat-pipe
(Heat flux = 0.29 W/cm², Working liquid level = 115 mm
and inside pressure = 260 mmHg)

DATA NAME : k024

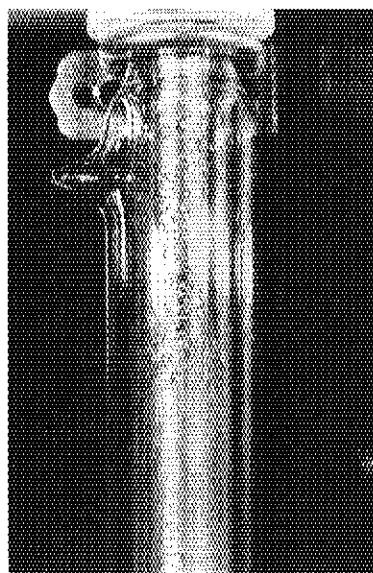
Working Liquid Level : 115 mm

Inside Pressure : 26 cmHg

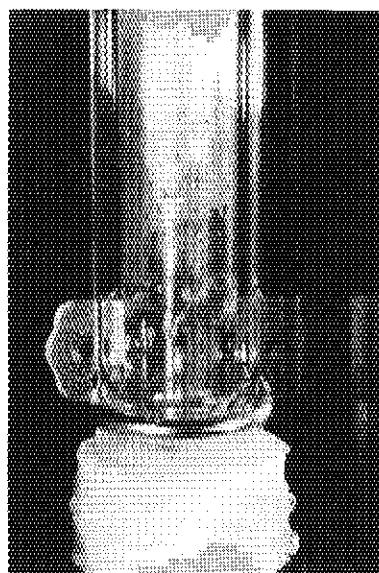
Heat Flux : 1.18 W/cm²



全体写真



凝縮部



蒸発部

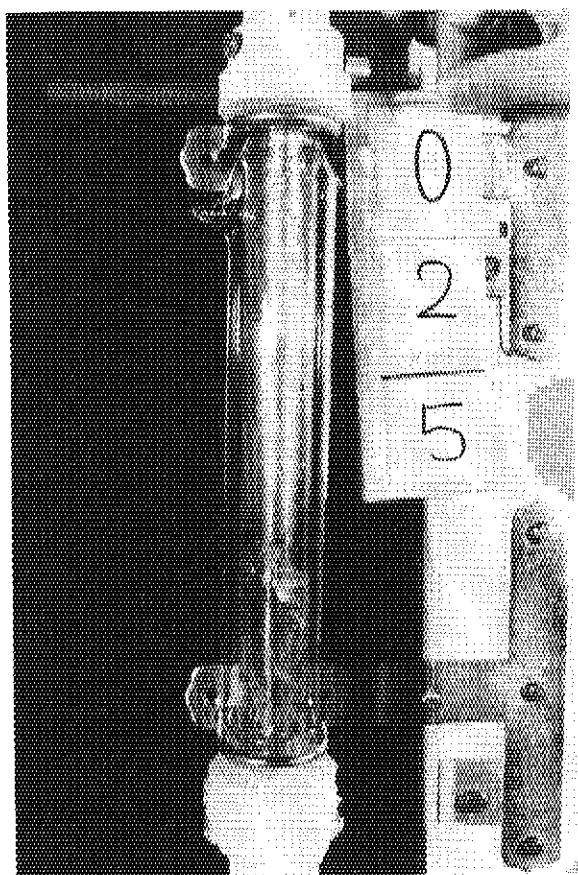
Photo. 3.3 Steady experiment using a visible model of heat-pipe
(Heat flux = 1.18/cm², Working liquid level = 115 mm
and inside pressure = 260 mmHg)

DATA NAME : K025

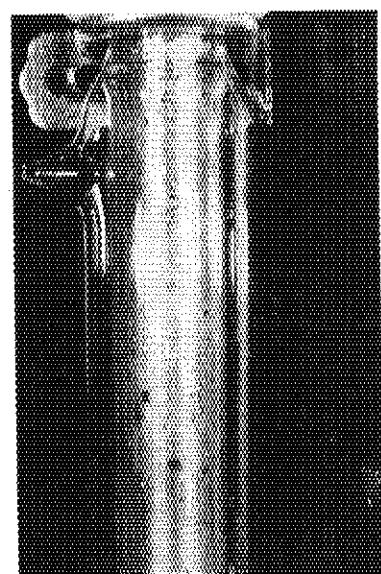
Working Liquid Level : 115 mm

Inside Pressure : 26 cmHg

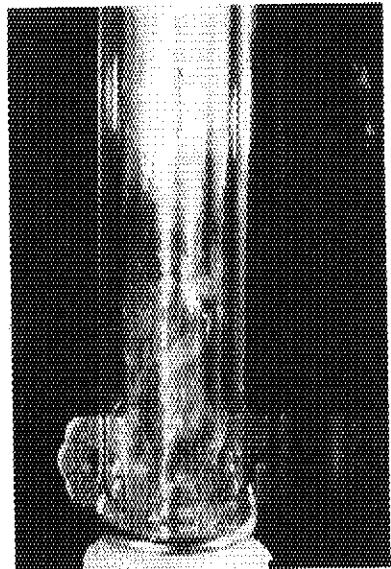
Heat Flux : 5.97 W/cm²



全体写真



凝縮部



蒸発部

Photo. 3. 4

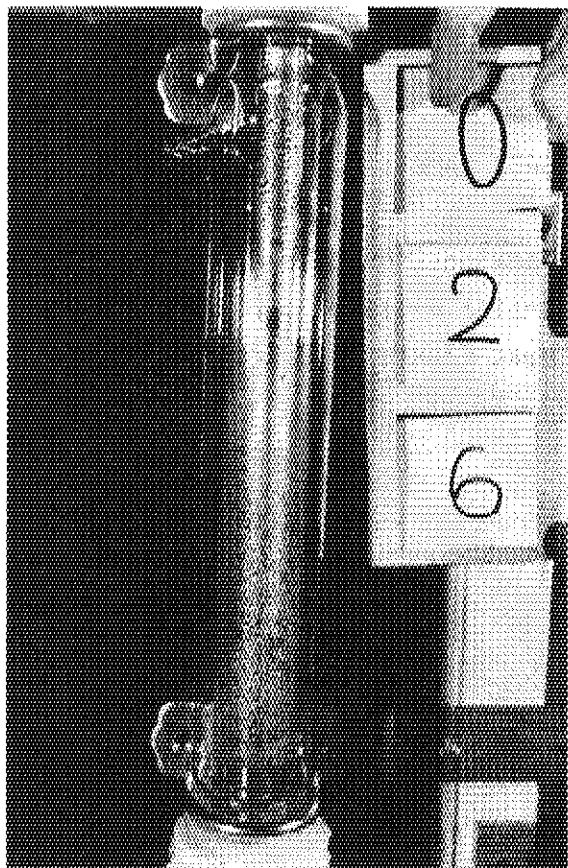
Steady experiment using a visible model of heat-pipe
(Heat flux = 5.97 W/cm², Working liquid level = 115 mm
and inside pressure = 260 mmHg)

DATA NAME : K026

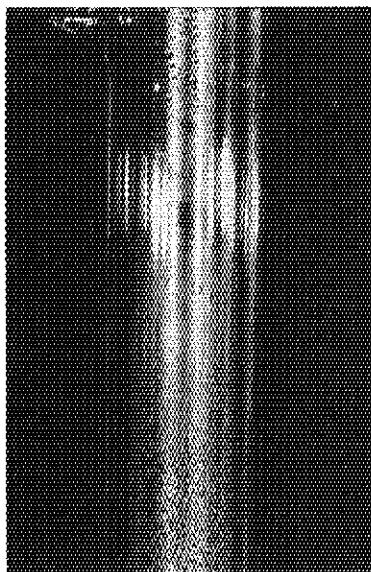
Working Liquid Level : 115 mm

Inside Pressure : 56 cmHg

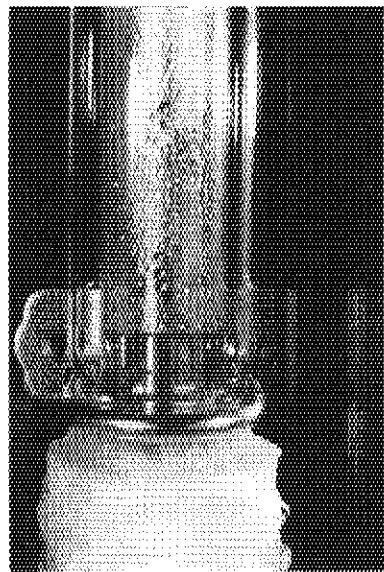
Heat Flux : 0.29 W/cm²



全体写真



凝縮部



蒸発部

Photo. 3. 5

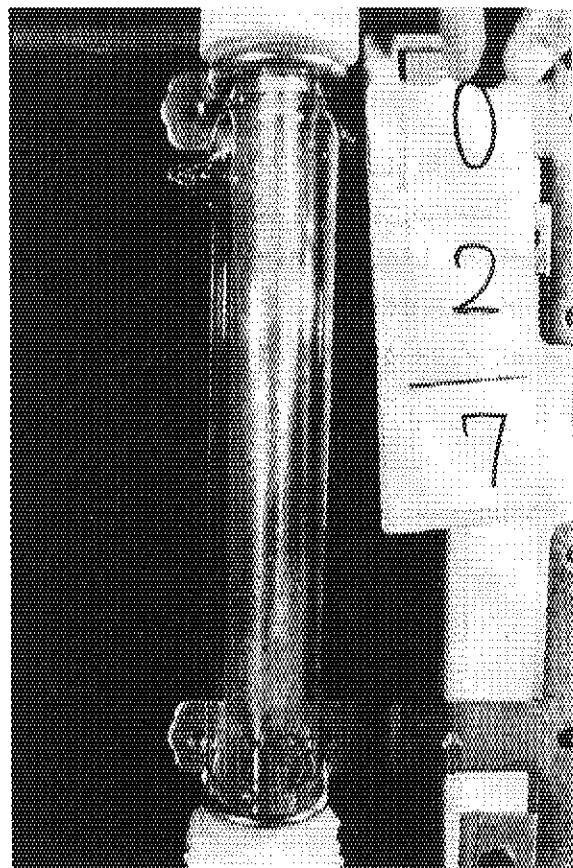
Steady experiment using a visible model of heat-pipe
(Heat flux = 0.29 W/cm², Working liquid level = 115 mm
and inside pressure = 560 mmHg)

DATA NAME : K027

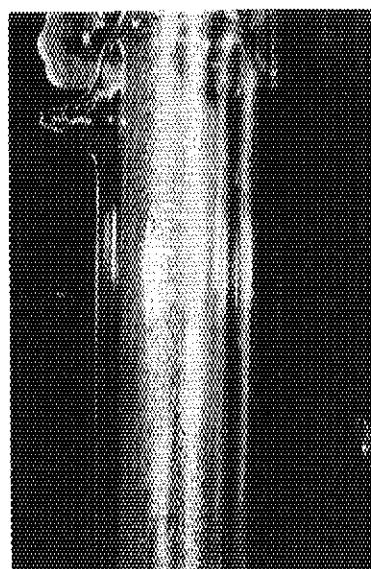
Working Liquid Level : 115 mm

Inside Pressure : 56 cmHg

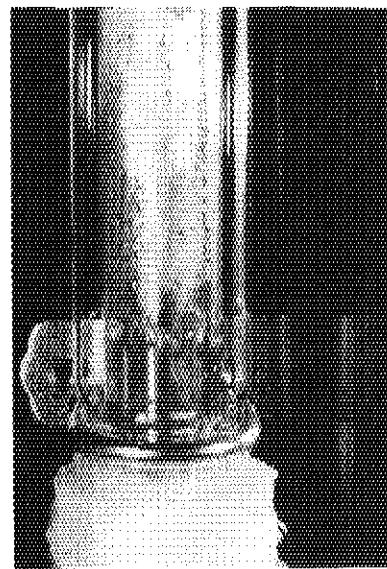
Heat Flux : 1.18 W/cm²



全体写真



凝縮部



蒸発部

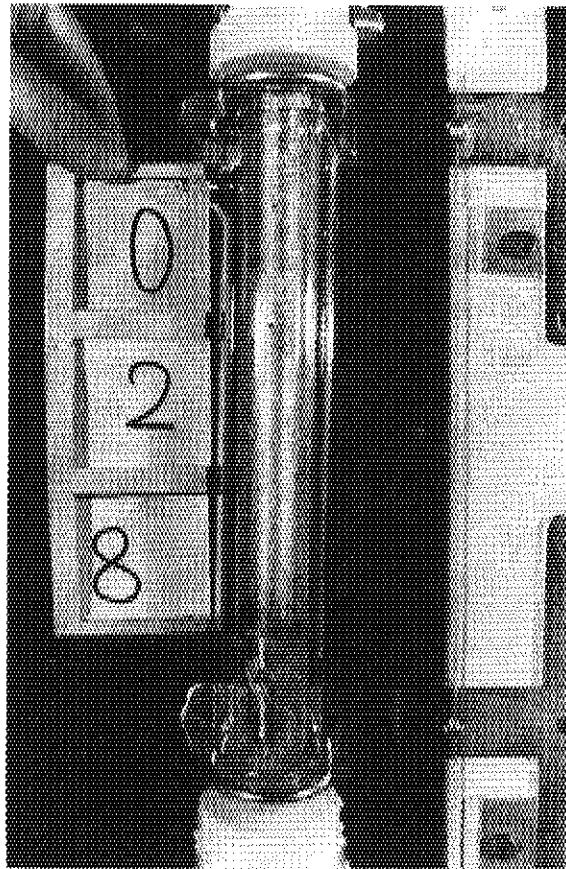
Photo. 3.6 Steady experiment using a visible model of heat-pipe
(Heat flux = 1.18W/cm², Working liquid level = 115 mm
and inside pressure = 560 mmHg)

DATA NAME : K028

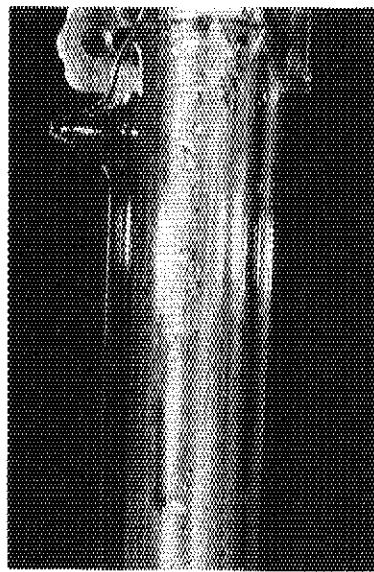
Working Liquid Level : 115 mm

Inside Pressure : 56 cmHg

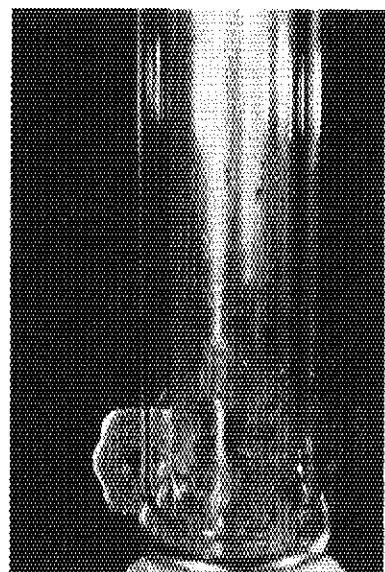
Heat Flux : 5.97 W/cm²



全体写真



凝縮部



蒸発部

Photo. 3.7

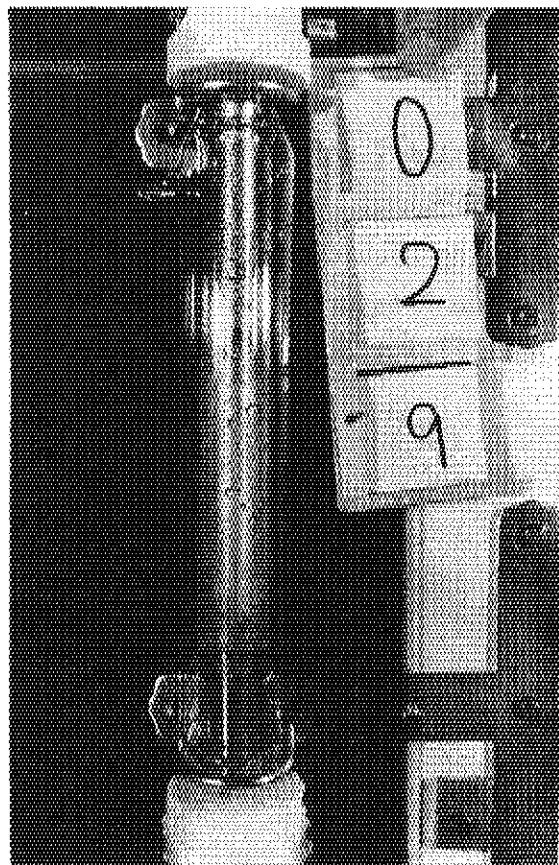
Steady experiment using a visible model of heat-pipe
(Heat flux = 5.97 W/cm², Working liquid level = 115 mm
and inside pressure = 560 mmHg)

DATA NAME : K029

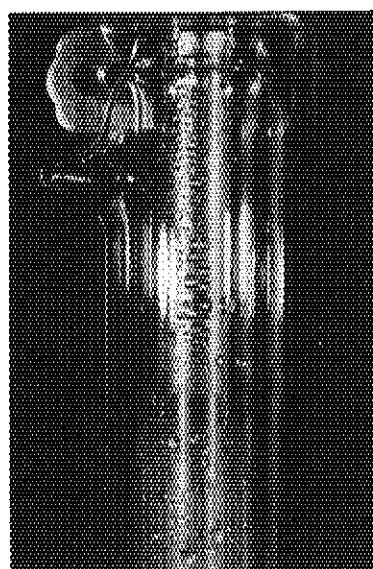
Working Liquid Level : 142 mm

Inside Pressure : 26 cmHg

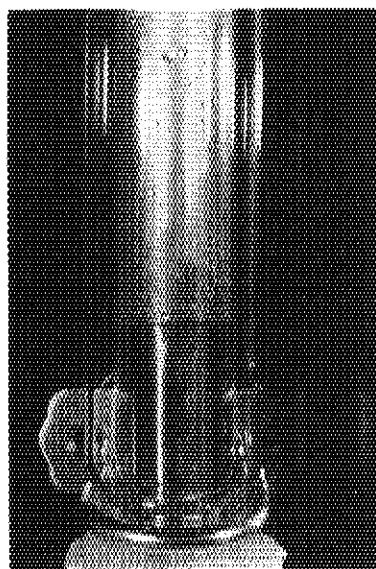
Heat Flux : 0.27 W/cm²



全体写真



凝縮部



蒸発部

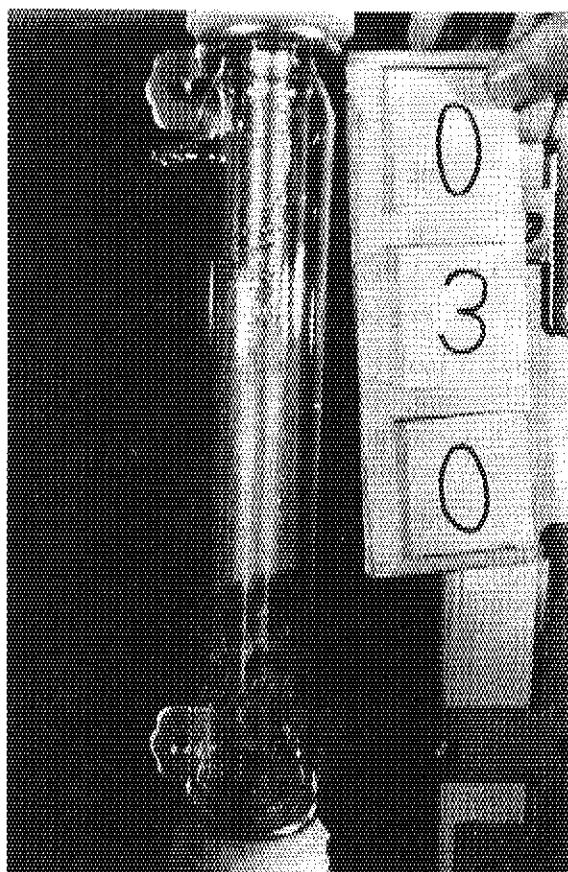
Photo. 3.8 Steady experiment using a visible model of heat-pipe
(Heat flux = 0.27 W/cm², Working liquid level = 142 mm
and inside pressure = 260 mmHg)

DATA NAME : K030

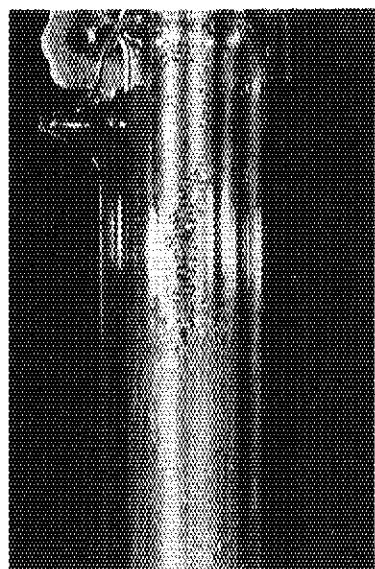
Working Liquid Level : 142 mm

Inside Pressure : 26 cmHg

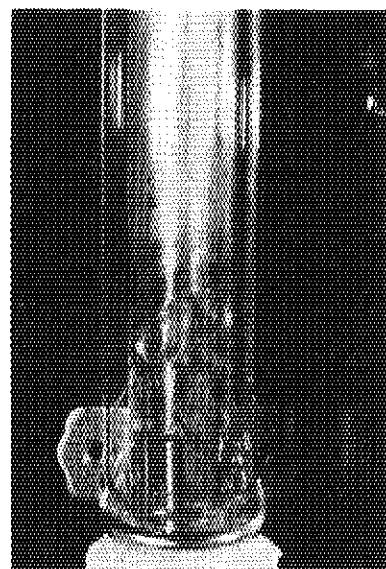
Heat Flux : 1.15 W/cm²



全体写真



凝縮部



蒸発部

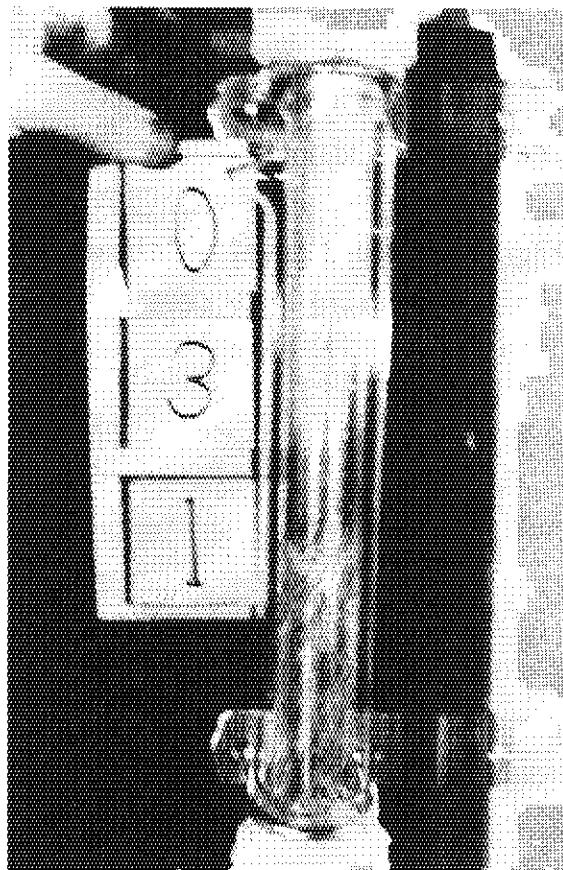
Photo. 3.9 Steady experiment using a visible model of heat-pipe
(Heat flux = 1.15W/cm². Working liquid level = 142 mm
and inside pressure = 260 mmHg)

DATA NAME : K031

Working Liquid Level : 142 mm

Inside Pressure : 26 cmHg

Heat Flux : 5.89 W/cm²



全体写真



凝縮部



蒸発部

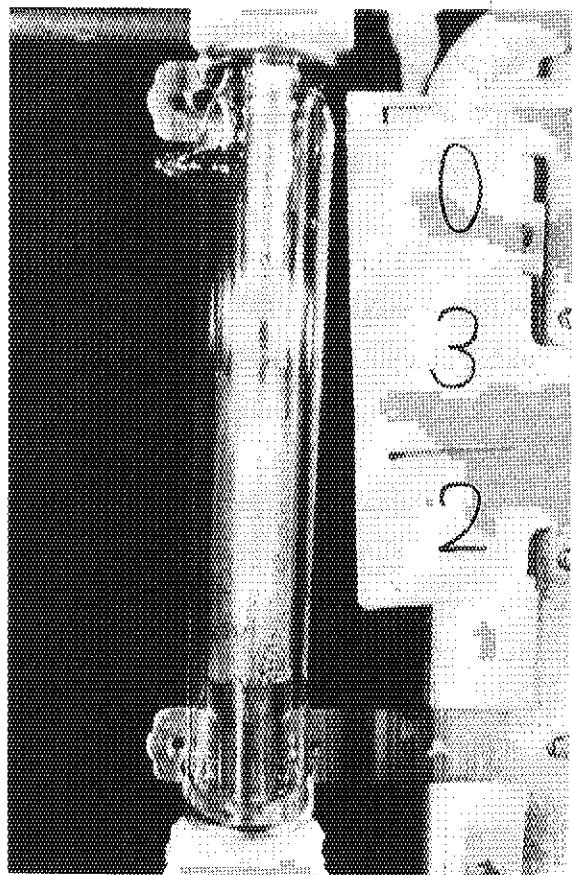
Photo. 3.10 Steady experiment using a visible model of heat-pipe
(Heat flux = 5.89W/cm², Working liquid level = 142 mm
and inside pressure = 260 mmHg)

DATA NAME : K032

Working Liquid Level : 142 mm

Inside Pressure : 56 cmHg

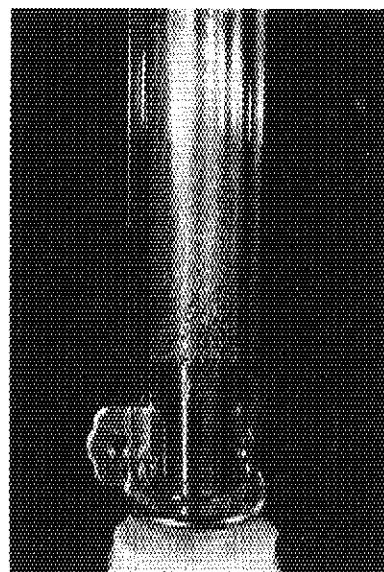
Heat Flux : 0.28 W/cm²



全体写真



凝縮部



蒸発部

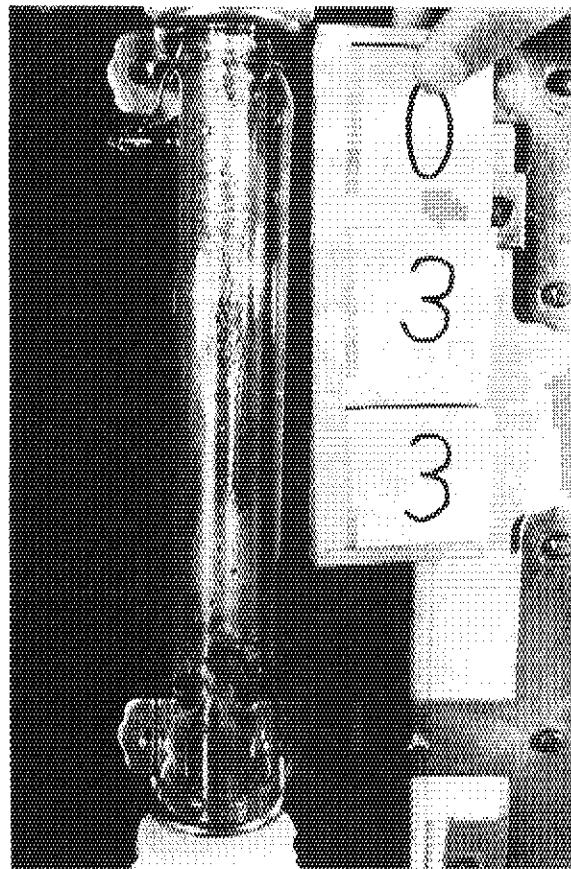
Photo. 3.11 Steady experiment using a visible model of heat-pipe
(Heat flux = 0.28W/cm², Working liquid level = 142 mm
and inside pressure = 560 mmHg)

DATA NAME : K033

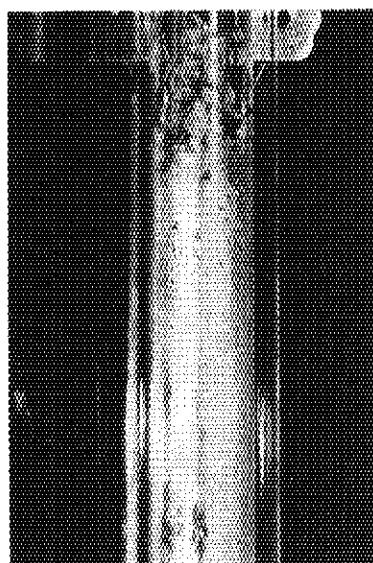
Working Liquid Level : 142 mm

Inside Pressure : 56 cmHg

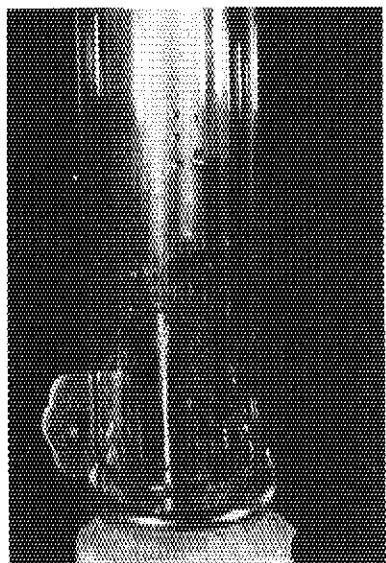
Heat Flux : 1.15 W/cm²



全体写真



凝縮部



蒸発部

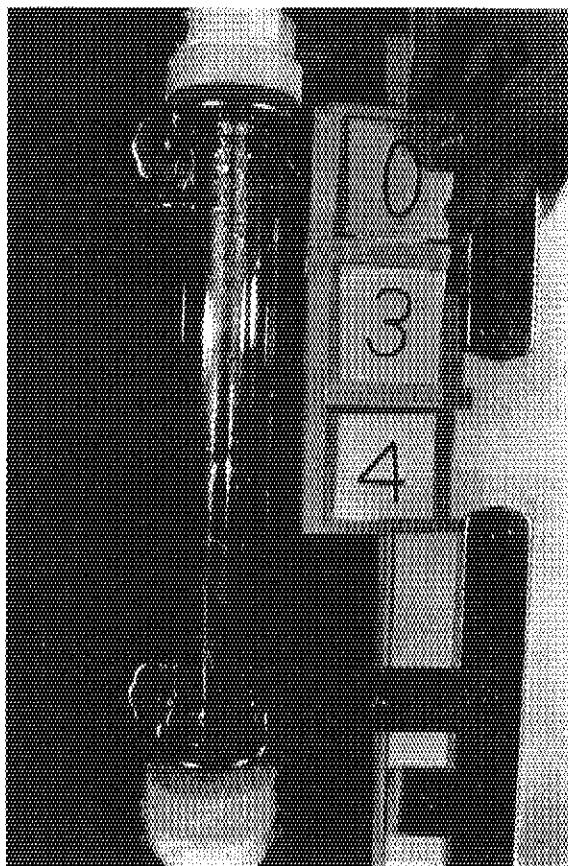
Photo. 3.12 Steady experiment using a visible model of heat-pipe
(Heat flux = 1.15 W/cm², Working liquid level = 142 mm
and inside pressure = 560 mmHg)

DATA NAME : K034

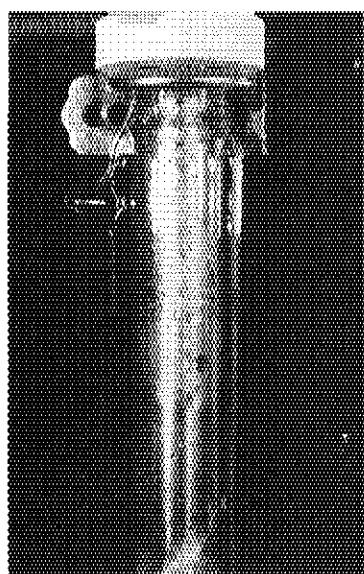
Working Liquid Level : 142 mm

Inside Pressure : 56 cmHg

Heat Flux : 5.87 W/cm²



全体写真



凝縮部



蒸発部

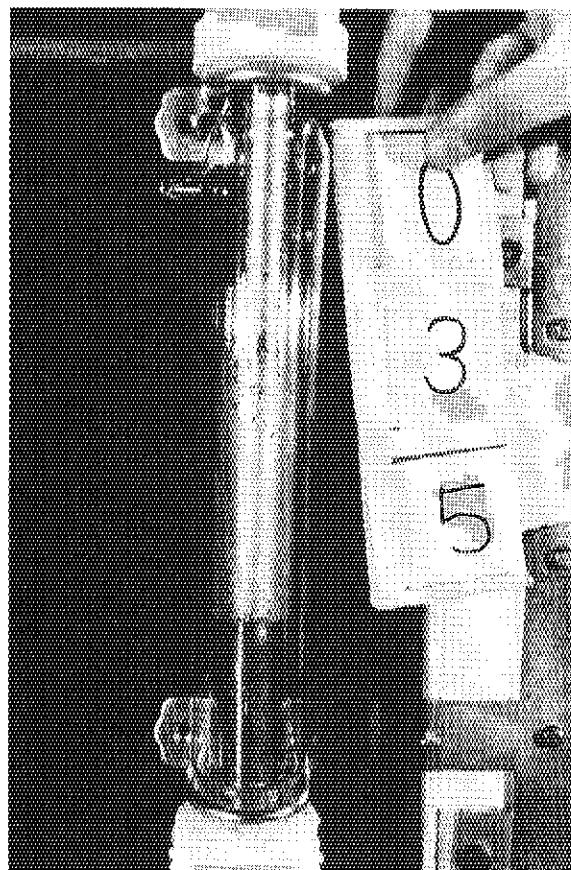
Photo. 3.13 Steady experiment using a visible model of heat-pipe
(Heat flux = 5.87 W/cm², Working liquid level = 142 mm
and inside pressure = 560 mmHg)

DATA NAME : K035

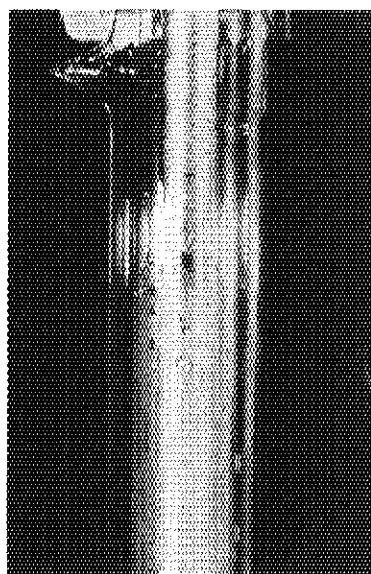
Working Liquid Level : 160 mm

Inside Pressure : 21 cmHg

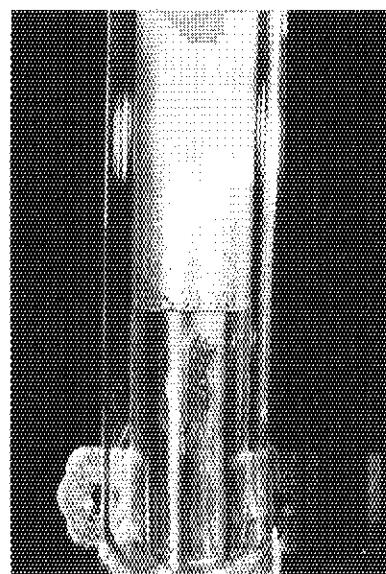
Heat Flux : 0.27 W/cm²



全体写真



凝縮部



蒸発部

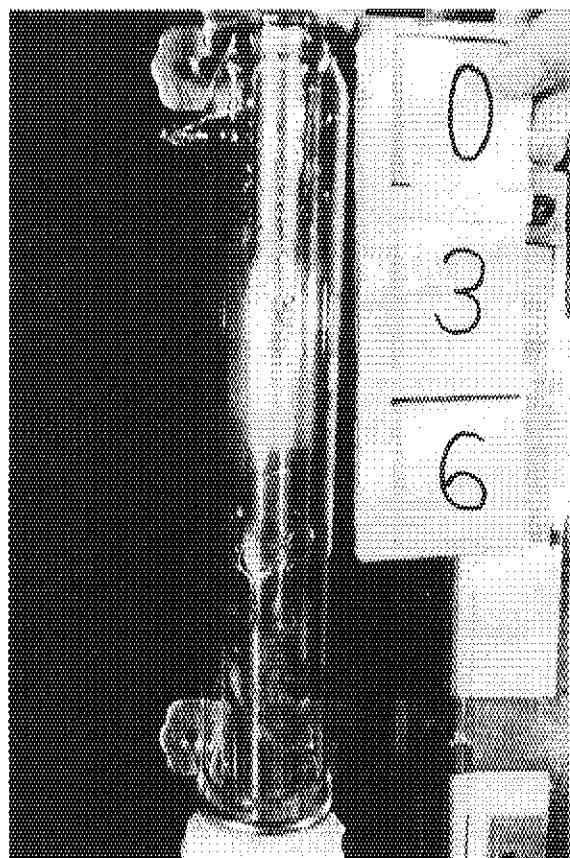
Photo. 3.14 Steady experiment using a visible model of heat-pipe
(Heat flux = 0.27 W/cm², Working liquid level = 160 mm
and inside pressure = 210 mmHg)

DATA NAME : K036

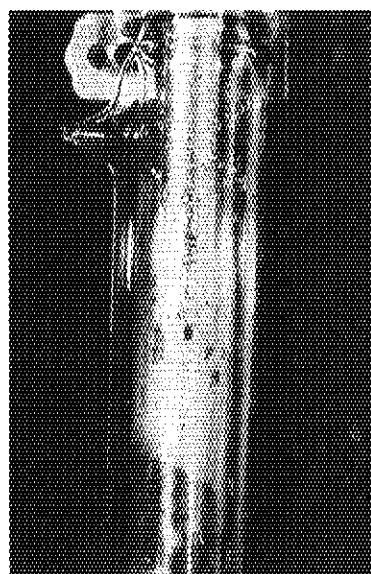
Working Liquid Level : 160 mm

Inside Pressure : 21 cmHg

Heat Flux : 1.15 W/cm²



全体写真



凝縮部



蒸発部

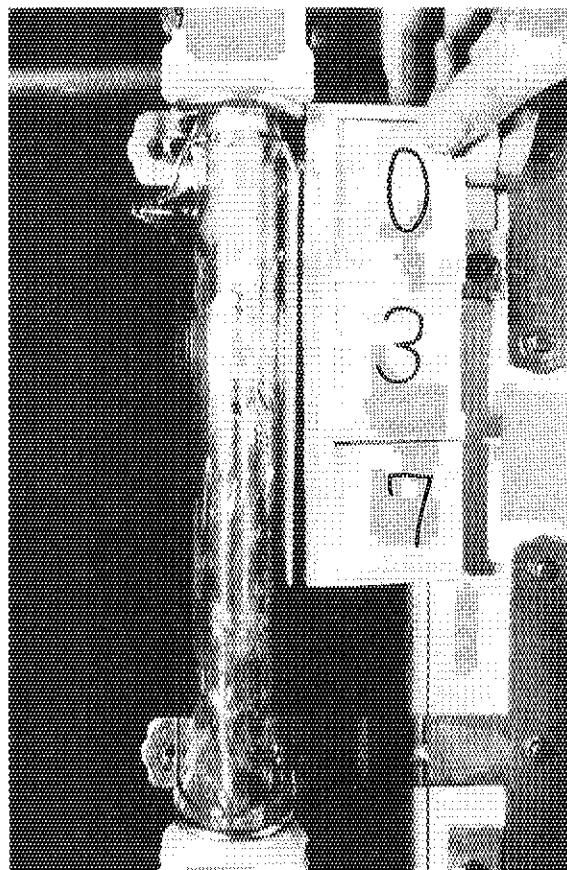
Photo. 3.15 Steady experiment using a visible model of heat-pipe
(Heat flux = 1.15W/cm², Working liquid level = 160 mm
and inside pressure = 210 mmHg)

DATA NAME : K037

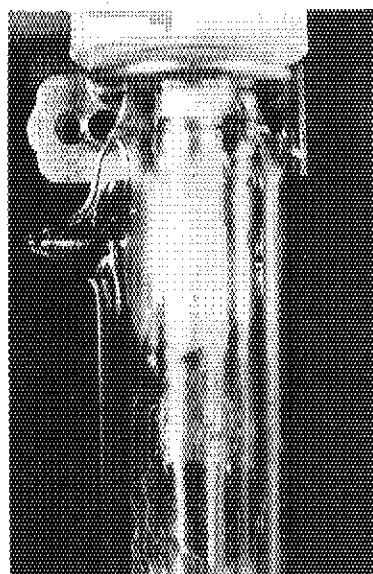
Working Liquid Level : 160 mm

Inside Pressure : 21 cmHg

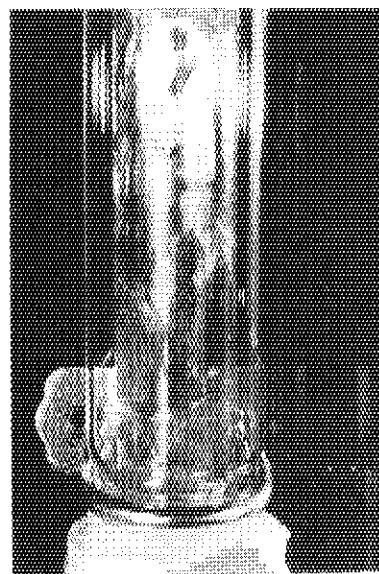
Heat Flux : 5.87 W/cm²



全体写真



凝縮部



蒸発部

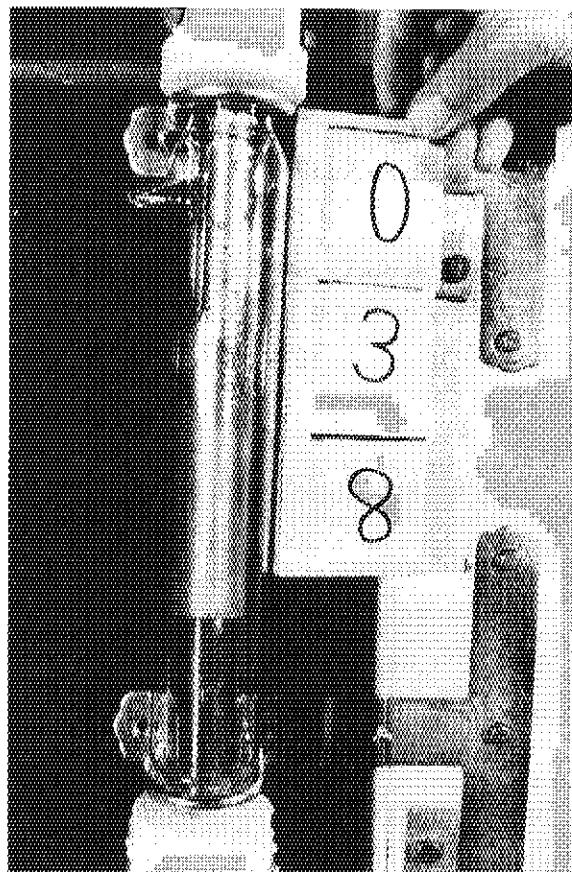
Photo. 3.16 Steady experiment using a visible model of heat-pipe
(Heat flux = 5.87 W/cm², Working liquid level = 160 mm
and inside pressure = 210 mmHg)

DATA NAME : K038

Working Liquid Level : 160 mm

Inside Pressure : 46 cmHg

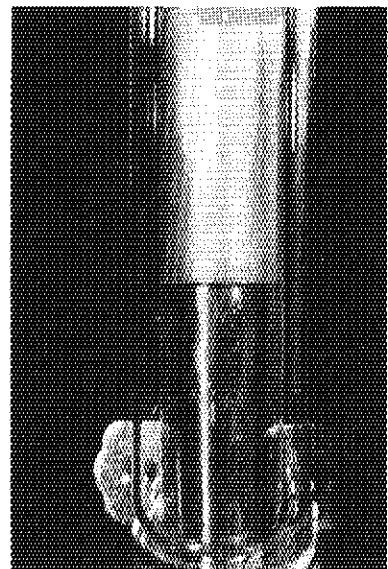
Heat Flux : 0.27 W/cm²



全体写真



凝縮部



蒸発部

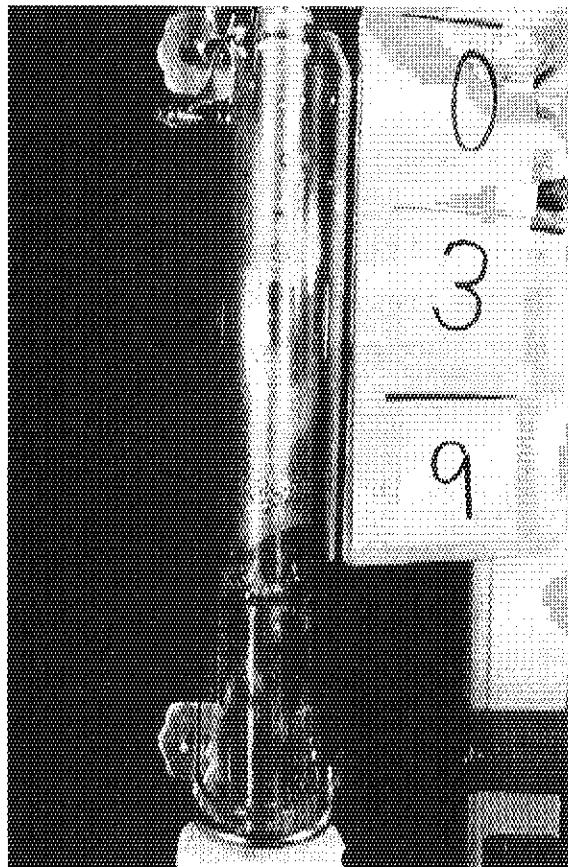
Photo. 3.17 Steady experiment using a visible model of heat-pipe
(Heat flux = 0.27W/cm², Working liquid level = 160 mm
and inside pressure = 460 mmHg)

DATA NAME : K039

Working Liquid Level : 160 mm

Inside Pressure : 46 cmHg

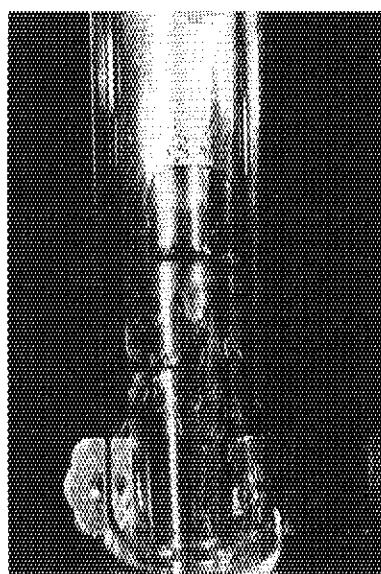
Heat Flux : 1.15 W/cm²



全体写真



凝縮部



蒸発部

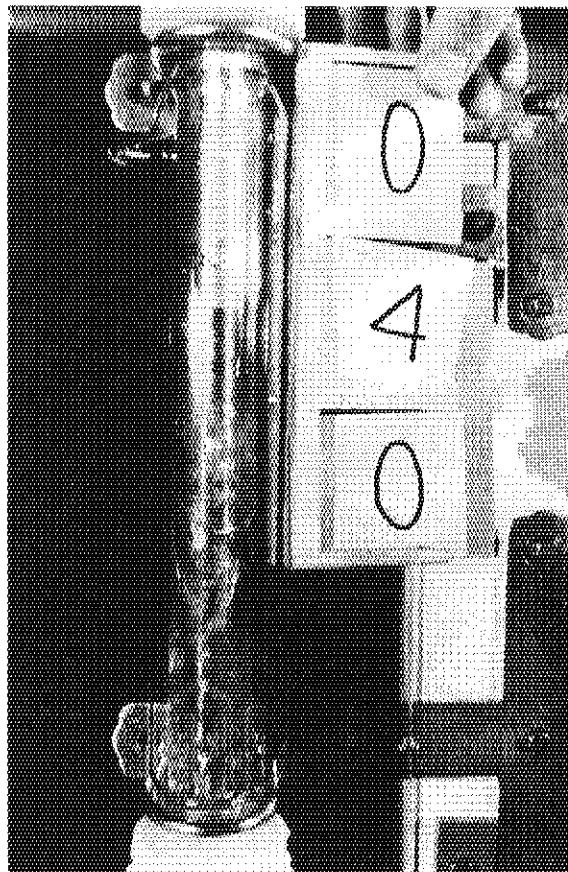
Photo. 3.18 Steady experiment using a visible model of heat-pipe
(Heat flux = 1.15 W/cm², Working liquid level = 160 mm
and inside pressure = 460 mmHg)

DATA NAME : K040

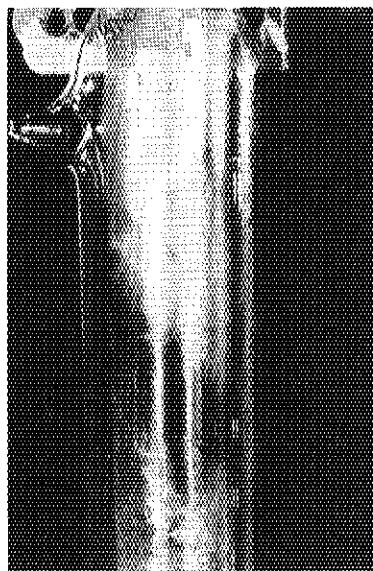
Working Liquid Level : 160 mm

Inside Pressure : 46 cmHg

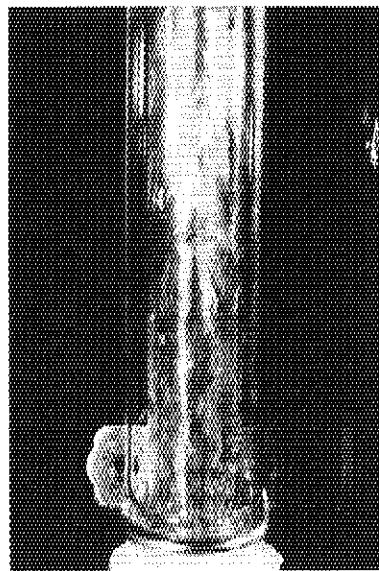
Heat Flux : 5.87 W/cm²



全体写真



凝縮部



蒸発部

Photo. 3.19 Steady experiment using a visible model of heat-pipe
(Heat flux = 5.87 W/cm², Working liquid level = 160 mm
and inside pressure = 460 mmHg)