JAERI-M
88-046

# ガラスモデルによるクライオポンプ内気液二相ヘリウムの流動様式の観察

1988年3月

柴沼　清・荒木　政則・大楽　正幸
小野　要一*・柴田　猛順

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　㈱高野高速印刷

# ガラスモデルによるクライオポンプ内気液二相ヘリウムの流動様式の観察

日本原子力研究所那珂研究所核融合研究部
柴沼　清[+]・荒木　政則・大楽　正幸
小野　要一[*]・柴田　猛順[++]

（１９８８年２月２日受理）

ＪＴ－６０ＮＢＩのクライオポンプは１４基のクライオポンプから構成される。各クライオポンプの水素ガスに対する排気速度は1,４００㎥／ｓｅｃであり，１４基のクライオポンプ全体の総排気速度は２０,０００㎥／ｓｅｃにも達する世界最大の排気装置である。各クライオポンプは６個のクライオポンプモジュールから構成され，６枚のクライオパネルに配管を通して液体ヘリウムが供給される。

水素ガスを安定に排気するためには６枚のクライオパネルに液体ヘリウムを十分に供給する必要がある。そこで，液体ヘリウムの液溜めによるクライオパネルの冷却法の有効性を確認するために，クライオポンプ内の液体ヘリウムの流動様式を観察するための可視化実験を行った。

クライオパネルや配管内の二相流ヘリウムの流動様式はＪＴ－６０ＮＢＩのクライオポンプを模擬した二種類のガラスモデルを用いて観察された。一方は自然循環ラインをもつガラスモデルで，他方は自然循環ラインをもたないガラスモデルである。前者のガラスモデルを用いた場合の二相流ヘリウムは，液体と気体が一様に混合した均質流であり，各クライオパネル内及び配管内をスムーズに循環した。これに反して，後者のガラスモデルを用いた場合の二相流ヘリウムは分離流であった。そのために，各クライオパネルに供給される液体ヘリウムの不均衡を引き起こし，さらに，配管同志又は配管と気液分離器が合流する部分で，対向二相流内の液体ヘリウムによって，クライオパネルからのスムーズなガス抜きを妨げる流路の断続的な閉塞が引き起こされた。

これらの可視化実験の結果により，ＪＴ－６０ＮＢＩのクライオパネルの冷却方式として自然循環方式を採用することに決定した。

那珂研究所：〒３１１－０２茨城県那珂郡那珂町大字向山８０１－１
＋　ＪＴ－６０試験部
＋＋　燃料工学部
＊　㈱日立製作所

# Observation of Flow Patterns of Vapor-liquid Two-phase Helium in Cryopump Glass Models

Kiyoshi SHIBANUMA[+], Masanori ARAKI, Masayuki DAIRAKU
Yoichi ONO[*] and Takemasa SHIBATA[++]

Department of Thermonuclear Fusion Research
Naka Fusion Research Establishment
Japan Atomic Energy Research Institute
Naka-machi, Naka-gun, Ibaraki-ken

(Recieved February 2, 1988)

The cryopump system for JT-60 NBI consists of fourteen cryopumps. The pumping speed of each cryopump is 1,400 $m^3$/sec for hydrogen and the total pumping speed of fourteen cryopumps is as large as 20,000 $m^3$/sec, which is the largest in the world. Each cryopump consists of six modules connected by pipes to supply liquid helium to the six cryopanels. It is necessary to supply liquid helium to the six cryopanels sufficiently in order to evacuate the hydrogen gas stably. We carried out visual experiments to observe the flow patterns of liquid helium in cryopumps for the purpose of confirming usefulness of the pool cooling of the cryopanels by liquid helium. The flow patterns of two-phase helium flow in cryopanels and channels were observed in two type glass models to simulate the cryopump of JT-60 NBI. One is a glass model with a liquid helium supply line for natural circulation, and the other is a glass model without a liquid helium supply line. The two-phase helium flow in the former glass model was homogenious flow, that is, liquid and gas were mixed uniformly, circulating smoothly through cryopanels and pipes. On the other hand, the two-phase helium flow in the latter glass model was separate flow. In this model, there was the unbalance in liquid helium supply to the cryopanels and also discontinuous choke in channels by

+ Depatment of JT-60 Facility
++ Department of Fuels and Materials Research
* Hitachi, Ltd.

liquid helium in the counter two-phase flow which prevented smooth release of gas helium from cryopanels at the junctions between pipes and between pipe and phase separator.

Therefore, we decided to employ the natural circulation system with a liquid helium supply line for cooling the cryopanels of JT-60 NBI.

Keywords: Cryopump, Two-phase Helium, Flow Pattern, Glass Model, JT-60 Neutral Beam Injector, Visual Experiment

# 目　　次

1. はじめに…… 1
2. 観察装置…… 2
3. 観察結果…… 3
3.1 自然循環ラインをもつクライオポンプモデル内気液二相ヘリウムの流動様式…… 3
3.2 自然循環ラインのないクライオポンプモデル内気液二相ヘリウムの流動様式…… 4
4. まとめ…… 5
謝辞…… 6
参考文献…… 6

## Contents

1. Introduction …… 1
2. Observational apparatus …… 2
3. Observational results …… 3
3.1 Flow patterns of two-phase helium in cryopump model with liquid helium supply line …… 3
3.2 Flow patterns of two-phase helium in cryopump model without liquid helium supply line …… 4
4. Conclusion …… 5
Acknowledgements …… 6
References …… 6

# 1. はじめに

ＪＴ－６０粒子入射加熱装置（ＮＢＩ）には，高速中性ビーム入射時に流れ出る３～５Ｐａ㎥／secの水素ガスを排気してビームライン内を$10^{-3}$Ｐａ程度にするために，水素ガスに対する排気速度1,４００㎥／secの液体ヘリウム使用の凝縮型大容量クライオポンプが設置されている。[1),2)] ＪＴ－６０ＮＢＩ用クライオポンプは１４基から構成され，総排気速度は２0,０００㎥／secにも達し，世界最大の排気容量を有するシステムである。図１にその１基のクライオポンプの鳥観図を示す。ＪＴ－６０ＮＢＩ用クライオポンプの場合，真空容器内にはビームダンプ，偏向磁石等の大きく複雑なビームライン機器が内蔵されているために，１基のクライオポンプは図１のように複数のクライオポンプモジュールに分割され，各クライオポンプモジュールが配管によって接続されることから，従来の小型クライオポンプでは考えられないほど複雑な構造となる。特にＪＴ－６０ＮＢＩ用クライオポンプの場合，最も重要なことは液体ヘリウムによって3.７Ｋ以下に冷却される水素ガスの排気面となる６枚のクライオパネルの安定な冷却であり，水素ガスを十分安定に排気するためには６枚のクライオパネルに液体ヘリウムを十分供給する必要がある。

各クライオパネルに十分な液体ヘリウムを供給する方式としては，①６枚のクライオパネルに液体ヘリウムを直列に圧送し冷却する強制循環方式[3)]と②クライオポンプ内に気液分離器をもち，一定量の液体ヘリウムを定常的に溜めることによって各クライオパネルを冷却する溜め込み方式[4)]の２つの方式が考えられる。ＪＴ－６０ＮＢＩクライオポンプでは，$10^{-3}$Ｐａ以下の真空度でも十分な排気速度を得るために，クライオパネル温度を3.７Ｋ以下にする必要があり[5)]，クライオパネル内の液体ヘリウムは大気圧以下の－３５cmHg 以下で供給される。しかもＪＴ－６０プラズマへのビーム入射時にクライオパネルにはＪＴ－６０トカマク本体からの漏洩磁場によるうず電流をはじめとする種々のパルス熱負荷が加わる[5)]。この場合，①の液体ヘリウムの圧送による強制循環方式によって，クライオパネルの温度を安定に冷却するためには，パルス熱負荷に対応した液体ヘリウムを常時クライオパネルに圧送する必要があるが，－３５cmHg 以下の減圧状態で大量の液体ヘリウムをクライオパネルに圧送することは極めて困難である。一方，②の溜め込み方式により液体ヘリウムが十分クライオパネル内に保有されれば，クライオパネルは常に安定に冷却されることになり，パルス熱負荷に対しても十分な抵抗をもつものと考えられる。さらに，クライオポンプの熱負荷によって蒸発した液体ヘリウム分だけ液体ヘリウムをヘリウム冷凍機よりクライオポンプに供給すればよく，クライオポンプ内の液体ヘリウムを－３５cmHg 以下の減圧状態を安定に保つことも容易である。以上の理由により，クライオパネルの冷却法として液体ヘリウムの溜め込み方式を採用することにした[5)]。しかし，この液体ヘリウムの溜め込み方式の有効性を証明するためには，ＪＴ－６０ＮＢＩ用クライオポンプを構成する６枚のクライオパネルに液体ヘリウムが十分に供給されることを確認する必要があり，そのためには，まず初めに各クライオパネルに供給される液体ヘリウムの流動様式の形態を把握する必要がある。

しかし，液体ヘリウムは大気圧で絶対温度4.２Ｋという極低温流体であり，しかも蒸発潜熱が２０Ｊ／g と非常に小さく，小さな熱負荷に対しても蒸発してしまう極めてデリケートな液体であるために取り扱いが非常に難しく，液体ヘリウムに負荷される侵入熱を低減させるために，７７Ｋの液体窒素温度の熱シールド付きで，しかも$10^{-3}$Ｐａ以下の真空容器内で液体ヘリウムの流動様式を観察する

必要がある。また，液体ヘリウムは通常飽和状態で使用されるために，液相だけの単相流ではなく，気液二相流の形態で流れるため流動様式はさらに複雑となる。これらの理由により，液体ヘリウムの流動様式の観察についての報告は最近単管のものがわずかに報告されているだけで[6),7),8)]，複数の並列の負荷を有し，また，配管の分岐や合流が存在するような複雑な配管系から構成されたシステム内での気液二相ヘリウム間の干渉を考慮した流動様式についての報告は磯部ら[9)]のもの以外ほとんど皆無である。特に，ＪＴ－６０ＮＢＩ用クライオポンプの場合，水素ガスを安定に排気するために各クライオパネルに液体ヘリウムを十分供給する必要があり，各クライオパネルに並列に供給される液体ヘリウムの流動形態と供給バランスは極めて重要であり，従来の単管又は磯部ら[9)]の簡単な並列配管内の気液二相ヘリウムの流動様式の観察だけからの情報では不十分である。そこで各クライオパネル内への気液二相ヘリウムの供給形態を把握し，液体ヘリウムの溜め込み方式の有効性を確認するために，ＪＴ－６０ＮＢＩ用クライオポンプを模擬したガラスモデルを製作し，クライオポンプ内気液二相ヘリウムの流動様式の観察を行った。

## 2. 観　察　装　置

クライオポンプ内に液体ヘリウムを一定量保有し，クライオパネルを冷却する溜め込み方式として図2に示すような二つの方式が考えられる。

(a) 自然循環ラインがある場合
（いわゆる自然循環方式）

(b) 自然循環ラインがない場合

(a)の方式は，気液分離器とクライオパネル下部を接続する自然循環ラインを設けることによって，気液分離器→自然循環ライン→クライオパネル→気液分離器という１つのループを形成し，液体ヘリウムを熱サイフォンを利用した自然循環によって各クライオパネルに供給する方式である。一方，(b)の方式は(a)の方式の自然循環ラインのない場合であり，液体ヘリウムが外部から直接クライオパネルに供給されると同時に，気液分離器とクライオパネルを接続する配管を通して，気液分離器からも液体ヘリウムがクライオパネルに供給される従来の小型クライオポンプの供給方式である。(a)の供給方式の場合，各クライオパネルに液体ヘリウムを確実に供給する可能性が高く第１候補と考えられるが，(b)の供給方式の場合，液体ヘリウムが各クライオパネルに十分供給されれば(a)の方式に比べ配管系が簡素化される利点をもつ。

これら２通りのクライオパネルへの液体ヘリウムの供給方式について，各クライオパネルへの気液二相ヘリウムの供給形態を観察するために，それぞれについて図３，図４のガラスモデルを製作した。なお，図中①～⑥で示される位置は後述する流動様式の観察（写真撮影）場所を示すものである。クライオポンプのガラスモデルはいずれもクライオポンプの対称性を考慮して，６枚のクライオパネルからなるクライオポンプの片側$P_1$，$P_2$及び$P_3$室クライオパネルの３個から構成され，３個のクライオパネル内を流れる気液二相ヘリウムの各クライオパネル間での干渉をできるだけ強調させるためと，水平配管及び垂直配管内の気液二相ヘリウムの状態を観察できるように，クライオパネルより下流側の配管を長くした。また，配管内径は実際のクライオポンプを想定しφ１１～φ１４㎜とし，３個のクライオパネル内には電気ヒータが内蔵され，熱負荷を個別に与えることができる。これらのクライ

必要がある。また，液体ヘリウムは通常飽和状態で使用されるために，液相だけの単相流ではなく，気液二相流の形態で流れるため流動様式はさらに複雑となる。これらの理由により，液体ヘリウムの流動様式の観察についての報告は最近単管のものがわずかに報告されているだけで[6),7),8)]，複数の並列の負荷を有し，また，配管の分岐や合流が存在するような複雑な配管系から構成されたシステム内での気液二相ヘリウム間の干渉を考慮した流動様式についての報告は磯部ら[9)]のもの以外ほとんど皆無である。特に，ＪＴ－６０ＮＢＩ用クライオポンプの場合，水素ガスを安定に排気するために各クライオパネルに液体ヘリウムを十分供給する必要があり，各クライオパネルに並列に供給される液体ヘリウムの流動形態と供給バランスは極めて重要であり，従来の単管又は磯部ら[9)]の簡単な並列配管内の気液二相ヘリウムの流動様式の観察だけからの情報では不十分である。そこで各クライオパネル内への気液二相ヘリウムの供給形態を把握し，液体ヘリウムの溜め込み方式の有効性を確認するために，ＪＴ－６０ＮＢＩ用クライオポンプを模擬したガラスモデルを製作し，クライオポンプ内気液二相ヘリウムの流動様式の観察を行った。

## 2. 観　察　装　置

クライオポンプ内に液体ヘリウムを一定量保有し，クライオパネルを冷却する溜め込み方式として図2に示すような二つの方式が考えられる。

(a) 自然循環ラインがある場合
（いわゆる自然循環方式）

(b) 自然循環ラインがない場合

(a)の方式は，気液分離器とクライオパネル下部を接続する自然循環ラインを設けることによって，気液分離器→自然循環ライン→クライオパネル→気液分離器という１つのループを形成し，液体ヘリウムを熱サイフォンを利用した自然循環によって各クライオパネルに供給する方式である。一方，(b)の方式は(a)の方式の自然循環ラインのない場合であり，液体ヘリウムが外部から直接クライオパネルに供給されると同時に，気液分離器とクライオパネルを接続する配管を通して，気液分離器からも液体ヘリウムがクライオパネルに供給される従来の小型クライオポンプの供給方式である。(a)の供給方式の場合，各クライオパネルに液体ヘリウムを確実に供給する可能性が高く第１候補と考えられるが，(b)の供給方式の場合，液体ヘリウムが各クライオパネルに十分供給されれば(a)の方式に比べ配管系が簡素化される利点をもつ。

これら２通りのクライオパネルへの液体ヘリウムの供給方式について，各クライオパネルへの気液二相ヘリウムの供給形態を観察するために，それぞれについて図３，図４のガラスモデルを製作した。なお，図中①～⑥で示される位置は後述する流動様式の観察（写真撮影）場所を示すものである。クライオポンプのガラスモデルはいずれもクライオポンプの対称性を考慮して，６枚のクライオパネルからなるクライオポンプの片側$P_1$，$P_2$及び$P_3$室クライオパネルの３個から構成され，３個のクライオパネル内を流れる気液二相ヘリウムの各クライオパネル間での干渉をできるだけ強調させるためと，水平配管及び垂直配管内の気液二相ヘリウムの状態を観察できるように，クライオパネルより下流側の配管を長くした。また，配管内径は実際のクライオポンプを想定しφ１１～φ１４㎜とし，３個のクライオパネル内には電気ヒータが内蔵され，熱負荷を個別に与えることができる。これらのクライ

オポンプモデルは図５に示すように気液二相ヘリウムの流動様式に悪影響を及ぼす不要な侵入熱をできるだけ軽減するために，１０$^{-3}$Ｐａ以下の真空容器内に収められ，しかもガラスモデル内の気液二相ヘリウムの流動様式を観察することのできる複数のガラス窓を除いて，ガラスモデルの周囲は，液体窒素により７７Ｋに冷却された熱シールドにより熱遮蔽が施されている。また，ガラスモデル内気液二相ヘリウムの流動様式の観察は，主に試験が最も容易である大気圧状態，すなわち液体ヘリウム温度4.2Ｋで行い，液体ヘリウム温度が3.7Ｋ以下となる－３５cmＨｇ以下の減圧状態でも試験を行った。

# 3. 観　察　結　果

## 3.1　自然循環ラインをもつクライオポンプモデル内気液二相ヘリウムの流動様式

自然循環ラインをもつクライオポンプモデルに，液体ヘリウムを供給した場合のガラスモデル内気液二相ヘリウムの流動様式の写真を写真１に示す。液体ヘリウムは最初液体ヘリウムデュワーより真空断熱配管を介して，クライオポンプモデル最下部より供給され，気液分離器内に液体ヘリウムを十分溜めてから液体ヘリウムの供給を停止する。液体ヘリウムを停止すると熱負荷により蒸発したガスヘリウムの浮力によって，気液分離器→自然循環ライン→クライオパネル→気液分離器のループを形成する自然循環が行われ，各クライオパネルに液体ヘリウムが供給される。各クライオパネルに供給される液体ヘリウムは，気液分離器内に一担溜められ，この液体ヘリウムが各クライオパネルに供給されることになり，極めてガス相分の少ない良質な気液二相ヘリウムが各クライオパネルに供給されることになる。各クライオパネルに供給される気液二相ヘリウムの流動様式は写真１の①～⑥より水平配管内，垂直配管内，分岐点，合流点のどの部分においても気相分と液相分が均一に混在した極めて生目の細かい気泡流であり，ヘリウムの4.2Ｋにおける気体と液体の物性値が非常に近いこともあって極めて質の高い均質流を形成し，この気液二相均質流が早い流速で各クライオパネルを含めた並列配管内を循環していることが確認された。また，気液二相ヘリウムの流動様式が均質流であるため，ある特定のクライオパネルだけに気体相分が多く流入するような偏流現象や配管の合流点における気相分と液相分の対向流及び不規則な振動の発生もなく，写真１の①のように配管の合流部においても気液二相の均質流ヘリウムが非常に安定に一方向に流れていることが明らかとなった。さらに，クライオパネルからのもどり配管と気液分離器が接続する部分でも，かなりの液相分を有する気液二相ヘリウムが気液分離器内に噴流状態でもどってくるためにもどり配管と気液分離器との接続部における流れの閉塞現象は全く観察されなかった。

これらの流動様式は，各クライオパネルのヒータ負荷０～１０Ｗを投入しても基本的な流動様式に差異はなく熱負荷の多少の変動に対しても各クライオポンプへの液体ヘリウムの供給は十分安定であることが観察された。さらに，クライオポンプからのヘリウムガスが大気放出される大気放出ラインを－３５cmＨｇ以下に減圧し，クライオポンプガラスモデル内の液体ヘリウム温度を3.7Ｋ以下にした状態で流動様式を観察した結果，大気圧の4.2Ｋの場合と同様の流動様式を示し，十分安定に液体ヘリウムが各クライオパネルに供給されることを確認した。

オポンプモデルは図5に示すように気液二相ヘリウムの流動様式に悪影響を及ぼす不要な侵入熱をできるだけ軽減するために，$10^{-3}$ Pa 以下の真空容器内に収められ，しかもガラスモデル内の気液二相ヘリウムの流動様式を観察することのできる複数のガラス窓を除いて，ガラスモデルの周囲は，液体窒素により77Kに冷却された熱シールドにより熱遮蔽が施されている。また，ガラスモデル内気液二相ヘリウムの流動様式の観察は，主に試験が最も容易である大気圧状態，すなわち液体ヘリウム温度4.2Kで行い，液体ヘリウム温度が3.7K以下となる－35cmHg以下の減圧状態でも試験を行った。

# 3. 観 察 結 果

## 3.1 自然循環ラインをもつクライオポンプモデル内気液二相ヘリウムの流動様式

自然循環ラインをもつクライオポンプモデルに，液体ヘリウムを供給した場合のガラスモデル内気液二相ヘリウムの流動様式の写真を写真1に示す。液体ヘリウムは最初液体ヘリウムデュワーより真空断熱配管を介して，クライオポンプモデル最下部より供給され，気液分離器内に液体ヘリウムを十分溜めてから液体ヘリウムの供給を停止する。液体ヘリウムを停止すると熱負荷により蒸発したガスヘリウムの浮力によって，気液分離器→自然循環ライン→クライオパネル→気液分離器のループを形成する自然循環が行われ，各クライオパネルに液体ヘリウムが供給される。各クライオパネルに供給される液体ヘリウムは，気液分離器内に一担溜められ，この液体ヘリウムが各クライオパネルに供給されることになり，極めてガス相分の少ない良質な気液二相ヘリウムが各クライオパネルに供給されることになる。各クライオパネルに供給される気液二相ヘリウムの流動様式は写真1の①～⑥より水平配管内，垂直配管内，分岐点，合流点のどの部分においても気相分と液相分が均一に混在した極めて生目の細かい気泡流であり，ヘリウムの4.2Kにおける気体と液体の物性値が非常に近いこともあって極めて質の高い均質流を形成し，この気液二相均質流が早い流速で各クライオパネルを含めた並列配管内を循環していることが確認された。また，気液二相ヘリウムの流動様式が均質流であるため，ある特定のクライオパネルだけに気体相分が多く流入するような偏流現象や配管の合流点における気相分と液相分の対向流及び不規則な振動の発生もなく，写真1の①のように配管の合流部においても気液二相の均質流ヘリウムが非常に安定に一方向に流れていることが明らかとなった。さらに，クライオパネルからのもどり配管と気液分離器が接続する部分でも，かなりの液相分を有する気液二相ヘリウムが気液分離器内に噴流状態でもどってくるためにもどり配管と気液分離器との接続部における流れの閉塞現象は全く観察されなかった。

これらの流動様式は，各クライオパネルのヒータ負荷0～10Wを投入しても基本的な流動様式に差異はなく熱負荷の多少の変動に対しても各クライオポンプへの液体ヘリウムの供給は十分安定であることが観察された。さらに，クライオポンプからのヘリウムガスが大気放出される大気放出ラインを－35cmHg 以下に減圧し，クライオポンプガラスモデル内の液体ヘリウム温度を3.7K以下にした状態で流動様式を観察した結果，大気圧の4.2Kの場合と同様の流動様式を示し，十分安定に液体ヘリウムが各クライオパネルに供給されることを確認した。

### 3.2 自然循環ラインのないクライオポンプモデル内気液二相ヘリウムの流動様式

自然循環ラインのないクライオポンプモデル内に液体ヘリウムを供給した場合の気液二相ヘリウムの流動様式を写真2に示す。液体ヘリウムは液体ヘリウムデュワーより真空断熱配管を介してクライオポンプガラスモデル最下部より気液分離器内の液体ヘリウム液面が一定になるように供給される。液体ヘリウムは真空断熱配管を通過する間に一部は熱負荷によって気化し，各クライオパネルへはこれらの気相分を含んだ気液二相ヘリウムの形態で供給される。クライオポンプへの熱負荷をできるだけ軽減するために配管の長さはできるだけ短くする必要があり，自然循環ラインをもつ供給方式と同様に各クライオパネルへの供給は完全な並列供給ではなく，マニホールド的存在の最下部配管を通して並列に行われる。その結果，写真2の⑤，⑥からわかるように最下部水平配管内気液二相ヘリウムは上側半分が気相，下側半分が液相である成層分離流であり，液体ヘリウムの供給管から最も近い垂直配管を有する$P_1$室クライオパネルに水平配管内の気液二相ヘリウムの気相分のほとんどが流れ込むために，$P_1$室クライオパネルのみが他のクライオパネルに比べ気相成分が多く，他の$P_2$室，$P_3$室クライオパネルへの気液二相ヘリウムの供給形態と極めて異なることが明らかとなった。さらに写真2の⑥ではガラスモデル内を十分ヘリウムガスで置換しなかったために生じた空気の凝縮粒が$P_2$室と$P_3$室への分岐点で沈殿しているのが観察された。これは$P_2$，$P_3$室と$P_1$室の各クライオパネルに供給される二相流ヘリウムの流速が極めて異なることを意味するものであり，$P_1$室に供給される二相流ヘリウムは，気相分が多いために，浮力によって流速が増加し，$P_2$，$P_3$室クライオパネルに比べ$P_1$室クライオパネルに気液二相ヘリウムが多く流れるという偏流現象を引き起こした。また，写真2の①，②，③よりクライオパネルの上部配管における水平配管内の二相流の流動様式は，それぞれ液相の波流が形成される波状流及び気相が管内中央部を流れ，液相が管壁に沿って流れる環状流であり，特に写真2の③より3個のクライオパネルからの配管が合流する領域では，$P_1$室と$P_2$室クライオパネルからのもどり配管の合流点及び$P_2$室と$P_3$室クライオパネルからのもどり配管の合流点で，互いの配管内二相流が干渉し合う現象が観察された。$P_2$室側配管と$P_3$室側配管が合流する$P_3$室側の水平配管内での二相流による干渉は顕著であり，$P_2$室側から$P_3$室側に液体ヘリウムが流れ込む逆流現象が断続的に発生した。また，$P_3$室クライオパネルからの気相ヘリウムは$P_2$室との合流部に向うために，$P_2$からの液相分と$P_3$からの気相分が対向流となり，気相分のスムーズなガス抜きが連続的に行われないために不規則な流れの閉塞現象が発生した。さらに，この影響を受けて各クライオパネルに接続されている配管内二相ヘリウムの圧力損失が断続的に変化することから，3個のクライオパネルへの液体ヘリウムの供給も不規則となることが観察された。写真2の①はクライオパネルからの配管が気液分離器と合流する付近の写真であり，気液分離器内に一担溜め込まれた液体ヘリウムが気液分離器に接続される配管を通して流れようとする下向流とクライオパネルからのほとんど気相から成る気液二相ヘリウムの上昇流との間で対向流となり，クライオパネルからの気相のスムーズなガス抜きが行われないために，ここでも配管同志の合流部と同様に不規則な閉塞現象が発生しており，液体ヘリウムを安定に各クライオパネルに供給するための妨害となる不要な振動を誘発していることが観察された。これらの流動様式は各クライオパネルへのヒータによる熱負荷0～10Wを投入した時でも，また，－35cmHg 以下にクライオポンプモデル内を減圧した時でも，基本的に同様の流動様式を示した。

# 4. まとめ

ＪＴ－６０ＮＢＩ用クライオポンプの設計に当り，水素ガスの安定な排気にとって最も重要となる６枚のクライオパネルへの液体ヘリウムの安定供給方式を確認するために，２種類のガラスモデルを用いて液体ヘリウムの溜め込み方式による気液二相ヘリウムの流動様式の観察を行った結果，自然循環ラインをもつ場合，十分な液体ヘリウムを各クライオパネルに供給できることが確認された。なお，本稿では述べていないが，自然循環ラインをもつクライオポンプガラスモデル内の二相流ヘリウムの流速を測定し，この値が自然循環による二相流ヘリウムの流動特性を解析するために作成したシミュレーションコードによる結果とほぼ一致した。さらに，このコードを用いてＪＴ－６０ＮＢＩクライオポンプに適用した場合でも，十分な液体ヘリウムが各クライオパネルに供給できるという結果が得られた[10]。これより，ＪＴ－６０ＮＢＩ用クライオポンプでは，クライオパネル冷却法として自然循環ラインをもついわゆる自然循環方式に決定した。

また，この自然循環による各クライオパネルへの液体ヘリウムの供給方式の場合，クライオポンプに供給される液体ヘリウムの制御は，気液分離器内液体ヘリウムレベルで一括して制御でき，各クライオパネルでの熱負荷によって蒸発する以上の液体ヘリウムが各クライオパネルに供給されることになり極めて有効となる。さらに，外部の真空断熱配管を介してクライオポンプに供給される気液二相ヘリウムのうち，気液分離器内で分離された気相の少ない極めて質の高い液体ヘリウムを自然循環によって各クライオパネルに供給することができる。このことは，ＪＴ－６０ＮＢＩ用クライオポンプのように全長約５００ｍの真空断熱配管を介して，液体ヘリウムが１４基のクライオポンプに供給されるような大規模システムでは，クライオポンプの位置により供給される気液二相ヘリウムのボイド率が個々のクライオポンプによって異なることから特に有効であり，クライオポンプの設置位置に関係なくどのクライオポンプにおいても，クオリティのほぼ等しい液体ヘリウムが自然循環によって６枚のクライオパネルに供給されるという利点も有している。

なお，自然循環ラインのない液体ヘリウムの溜め込み方式の場合でも，クライオパネルと気液分離器を接続するクライオパネルからのもどり配管の内径を太くすることによって，各クライオパネルからの気相ヘリウムのガス抜きと気液分離器からクライオパネルへの液体ヘリウムの供給が，同一配管内でもスムーズに行われれば１つの有効な液体ヘリウムの供給法と考えられる。しかし，その配管径を予測することは，配管が多数の合流やベントを有するために非常に難しく，また，配管径を太くすることはクライオポンプの熱負荷を増加させることになり，液体ヘリウムの供給源であるヘリウム冷凍機の冷凍能力にも影響を及ぼし，システム全体としてもあまり好ましくない。

最後に，これらのガラスモデルは，ＪＴ－６０ＮＢＩ用クライオポンプを模擬したものであるが，本稿で述べた観察結果は，分岐合流を有する一般の真空断熱配管や極低温機器内の気液二相ヘリウムの流動様式及び一般の負荷への液体ヘリウムの安定化供給を考察する上でも参考になるものと思われる。

# 謝　　辞

この研究を行っていく上で終始激励をいただいた田中正俊核融合研究部長，飯島勉ＪＴ－６０試験部長，白形弘文ＪＴ－６０第１試験室長，松田慎三郎加熱工学第１研究室長，国枝俊介ＪＴ－６０第４試験室長に感謝致します。

また，多くの有益な議論をいただいたＮＢＩグループの諸氏に感謝致します。

# 参　考　文　献

1）　K.Shibanuma et al., 11th sympo. on Fusion Engineering (1985) 1273.
2）　柴田猛順，柴沼　清，低温工学　21 (1986) 78.
3）　J.Kim, J. Vac. Sci. Technol. A 2 (1984) 1180.
4）　J.J. Thibault et al., J. Vac. Sci. Technol. 18 (1981) 1140.
5）　柴田猛順他，ＪＡＥＲＩ－Ｍ８９３５（１９８０）
6）　S.R.Breon and S.W.Van Sciver, Cryogenics 26 (1986) 682.
7）　T.Haruyama, Cryogenics 27 (1987) 450.
8）　M.Hara, K.Honda and T.Kaneko, Cryogenics 27 (1987) 567.
9）　磯部昭二他，第２２回低温工学研究発表会予稿集（１９７９）２０.
10）　柴沼　清，荒木政則，大楽正幸，柴田猛順，投稿予定.

# 謝　　辞

この研究を行っていく上で終始激励をいただいた田中正俊核融合研究部長，飯島勉ＪＴ－６０試験部長，白形弘文ＪＴ－６０第１試験室長，松田慎三郎加熱工学第１研究室長，国枝俊介ＪＴ－６０第４試験室長に感謝致します。

また，多くの有益な議論をいただいたＮＢＩグループの諸氏に感謝致します。

# 参　考　文　献

1）　K.Shibanuma et al., 11th sympo. on Fusion Engineering (1985) 1273.
2）　柴田猛順，柴沼　清，低温工学　21（1986）78.
3）　J.Kim, J. Vac. Sci. Technol. A 2（1984）1180.
4）　J.J. Thibault et al., J. Vac. Sci. Technol. 18（1981）1140.
5）　柴田猛順他，ＪＡＥＲＩ－Ｍ８９３５（1980）
6）　S.R.Breon and S.W.Van Sciver, Cryogenics 26（1986）682.
7）　T.Haruyama, Cryogenics 27（1987）450.
8）　M.Hara, K.Honda and T.Kaneko, Cryogenics 27（1987）567.
9）　磯部昭二他，第２２回低温工学研究発表会予稿集（1979）20.
10）　柴沼　清，荒木政則，大楽正幸，柴田猛順，投稿予定.

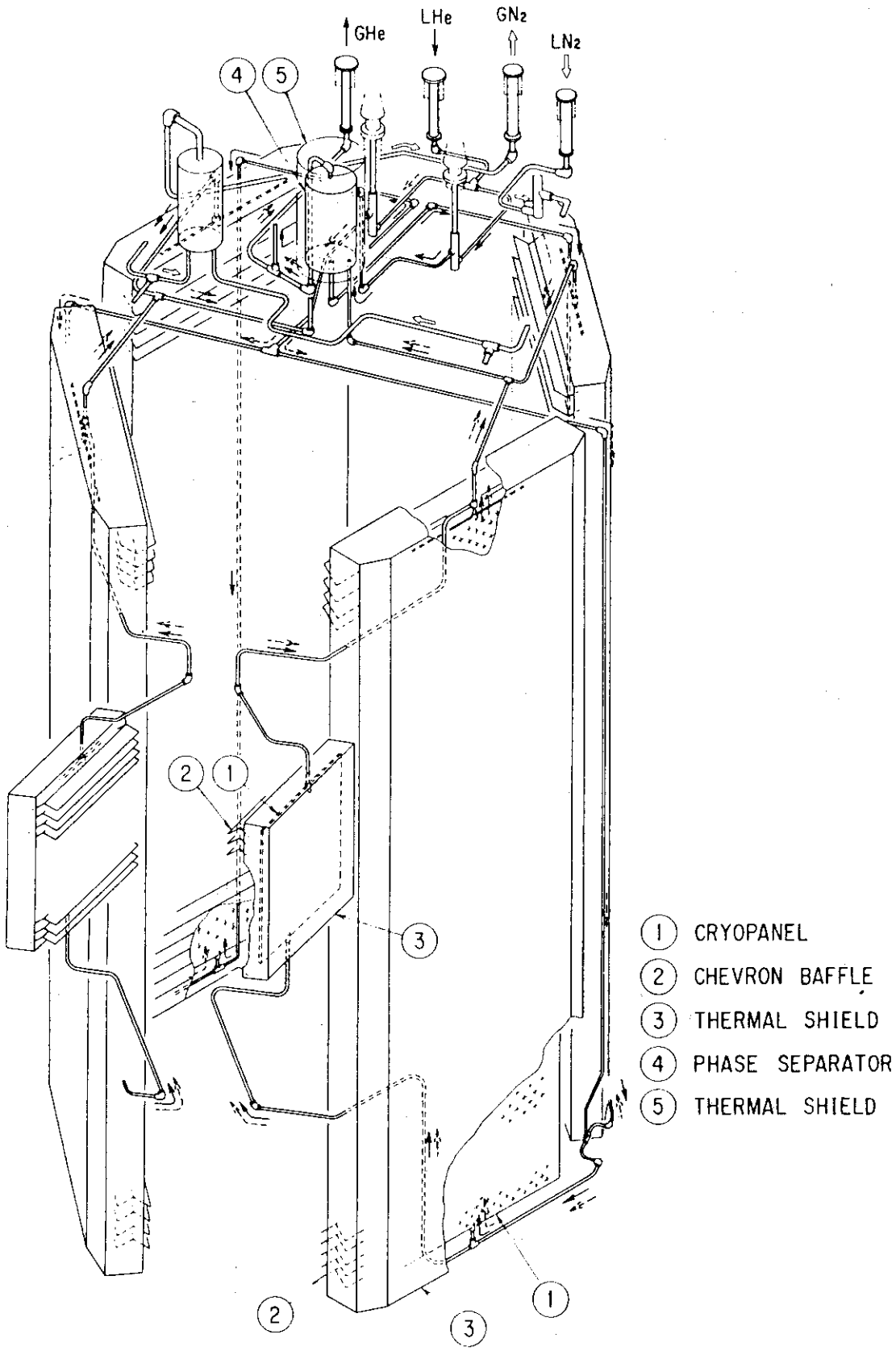



図1　ＪＴ－６０ＮＢＩ下ユニット用クライオポンプ

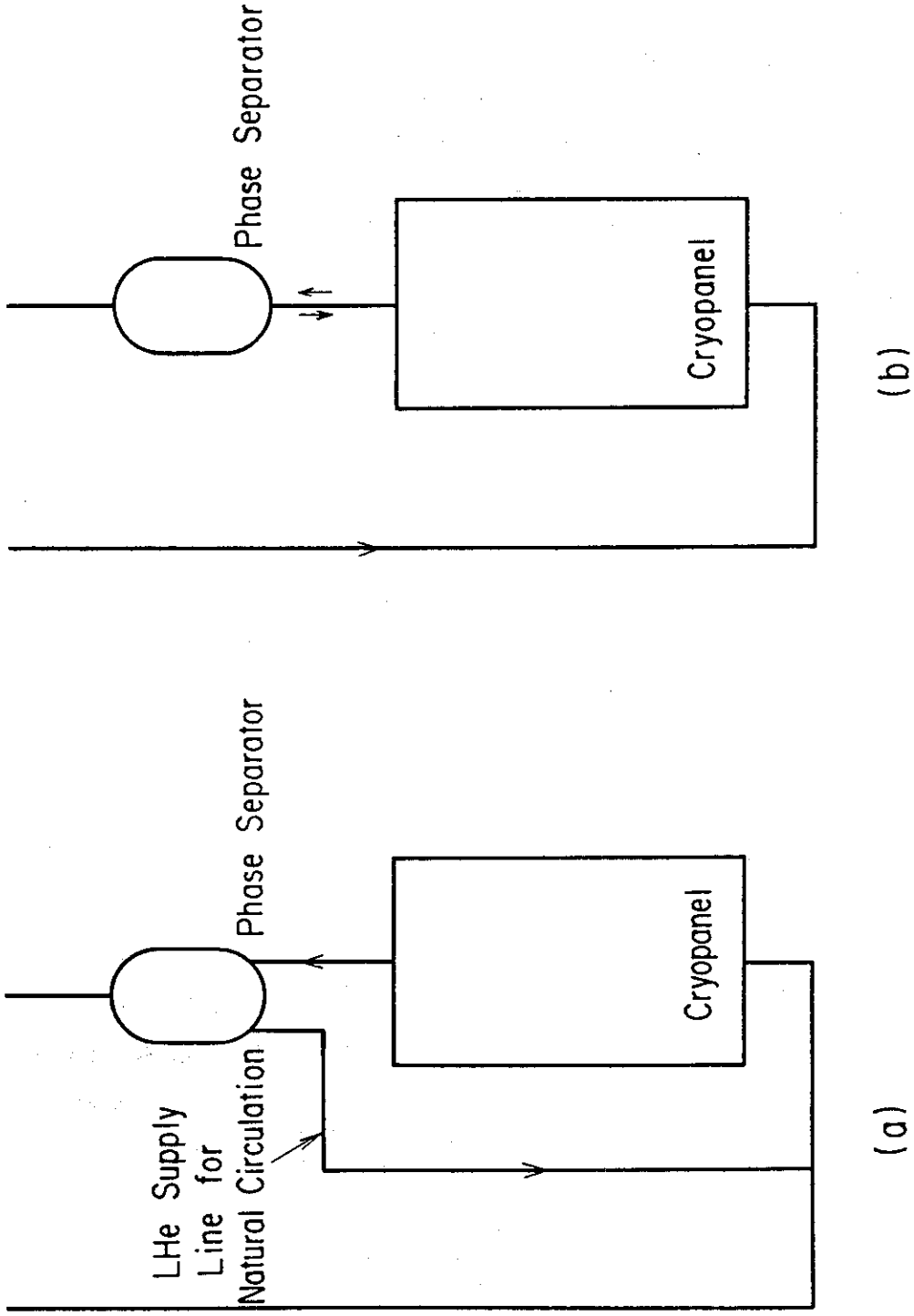



図2　液体ヘリウムの液溜め方式によるクライオパネルの冷却法

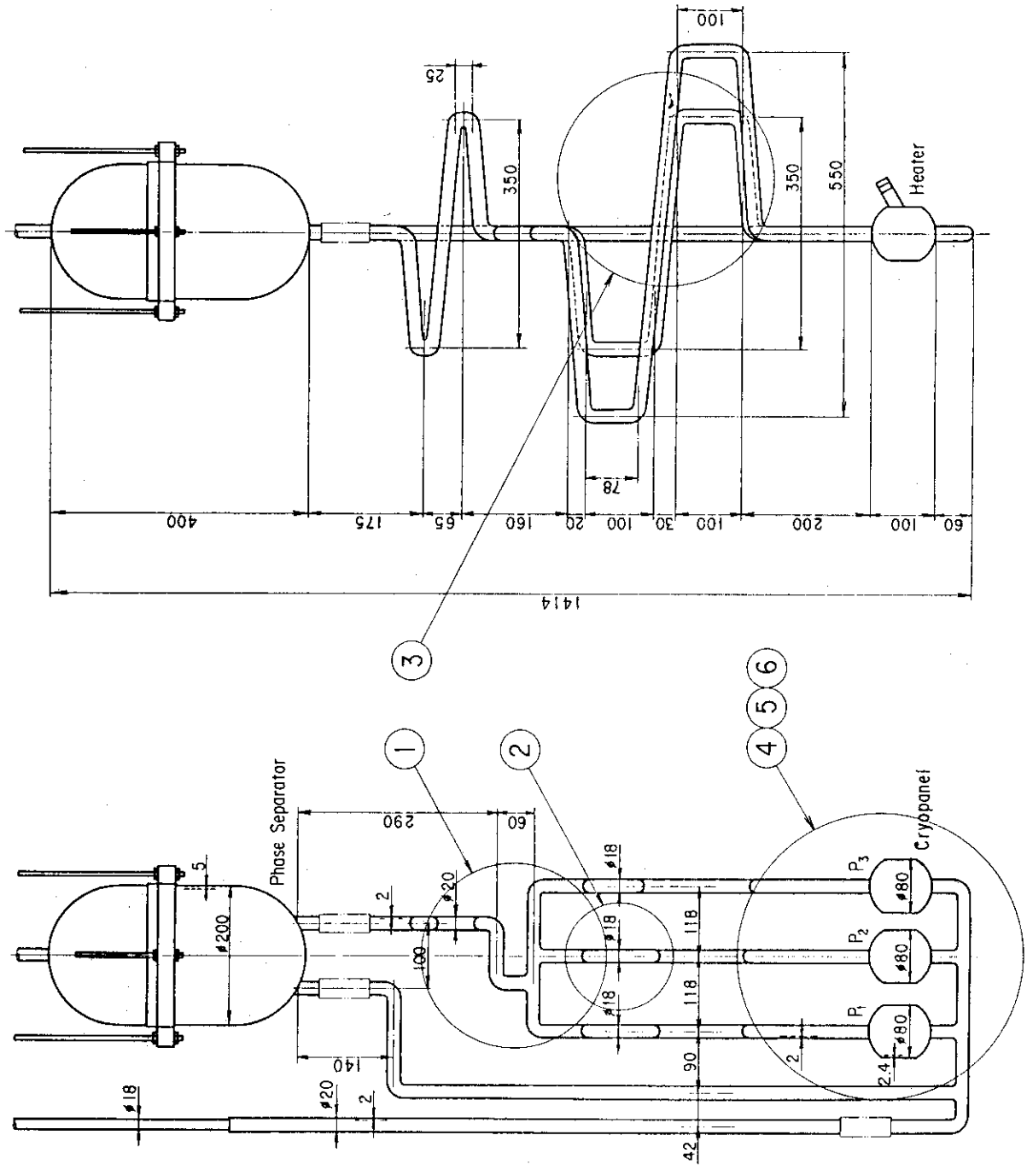



図3　自然循環ラインをもつクライオポンプガラスモデル

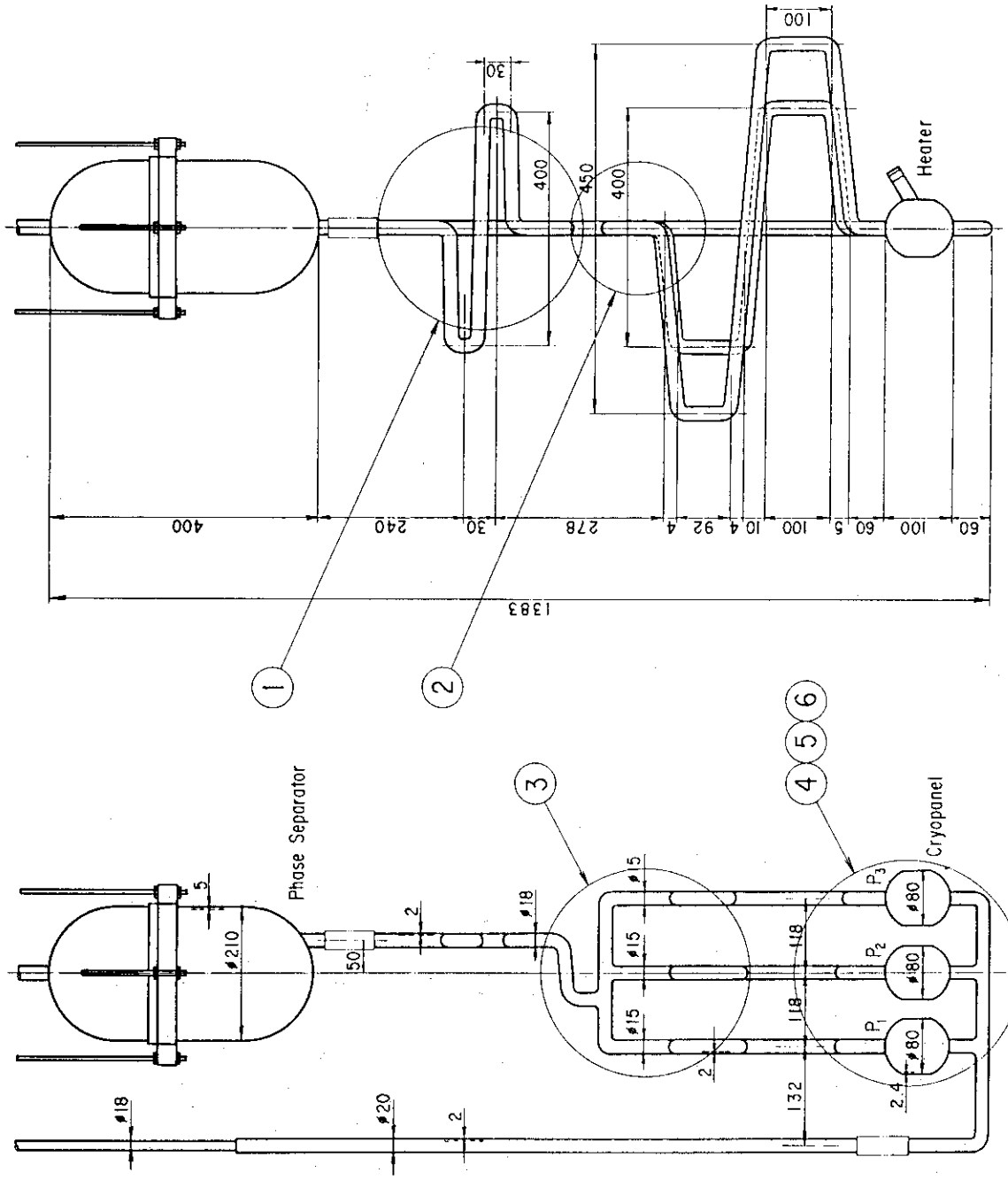



図4　自然循環ラインのないクライオポンプガラスモデル

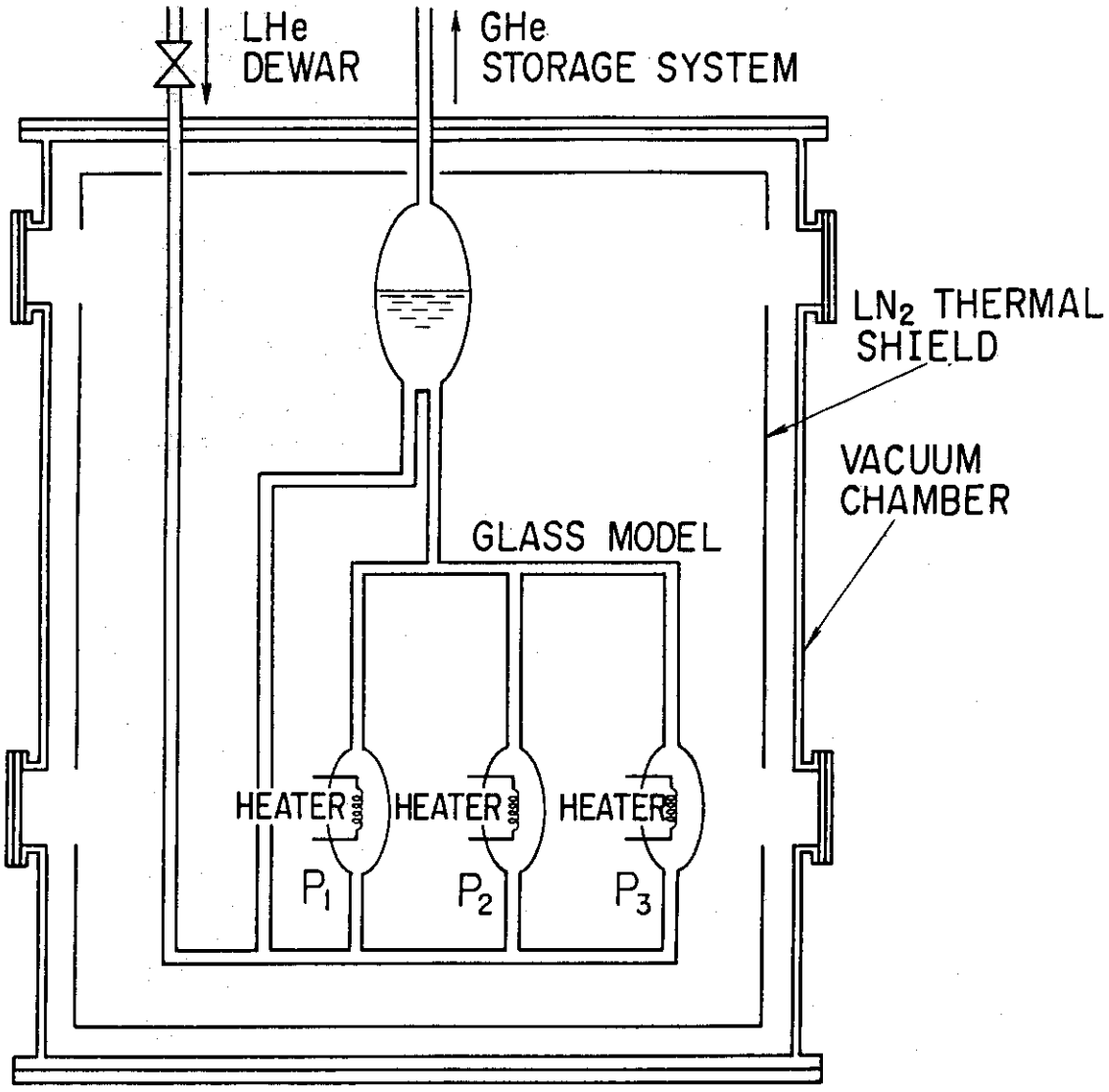

LHe
DEWAR
GHe
STORAGE SYSTEM
LN2 THERMAL
SHIELD
VACUUM
CHAMBER
GLASS MODEL
HEATER
HEATER
HEATER
P1
P2
P3

図 5　観 察 装 置

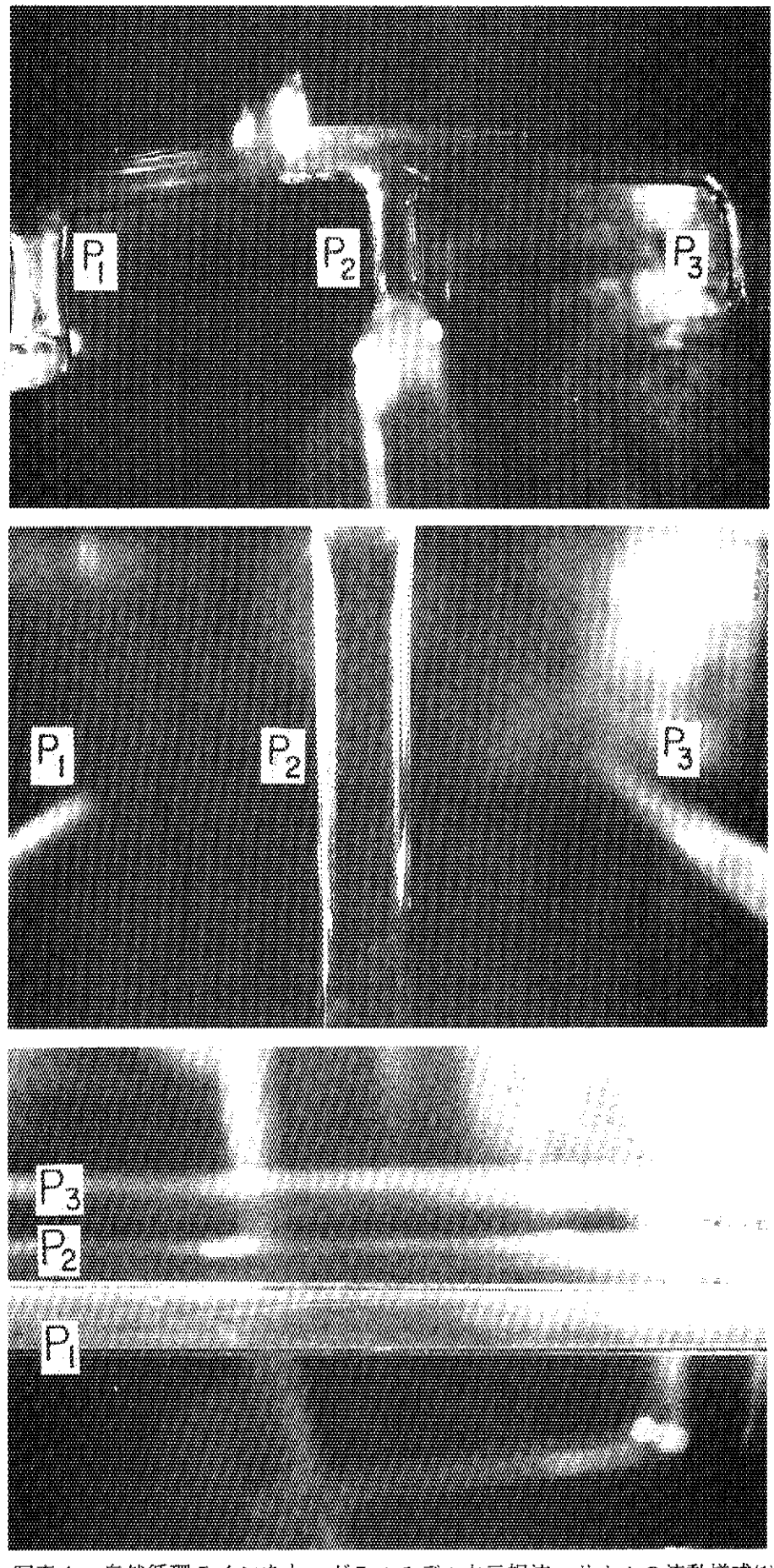



写真１　自然循環ラインをもつガラスモデル内二相流ヘリウムの流動様式(1)

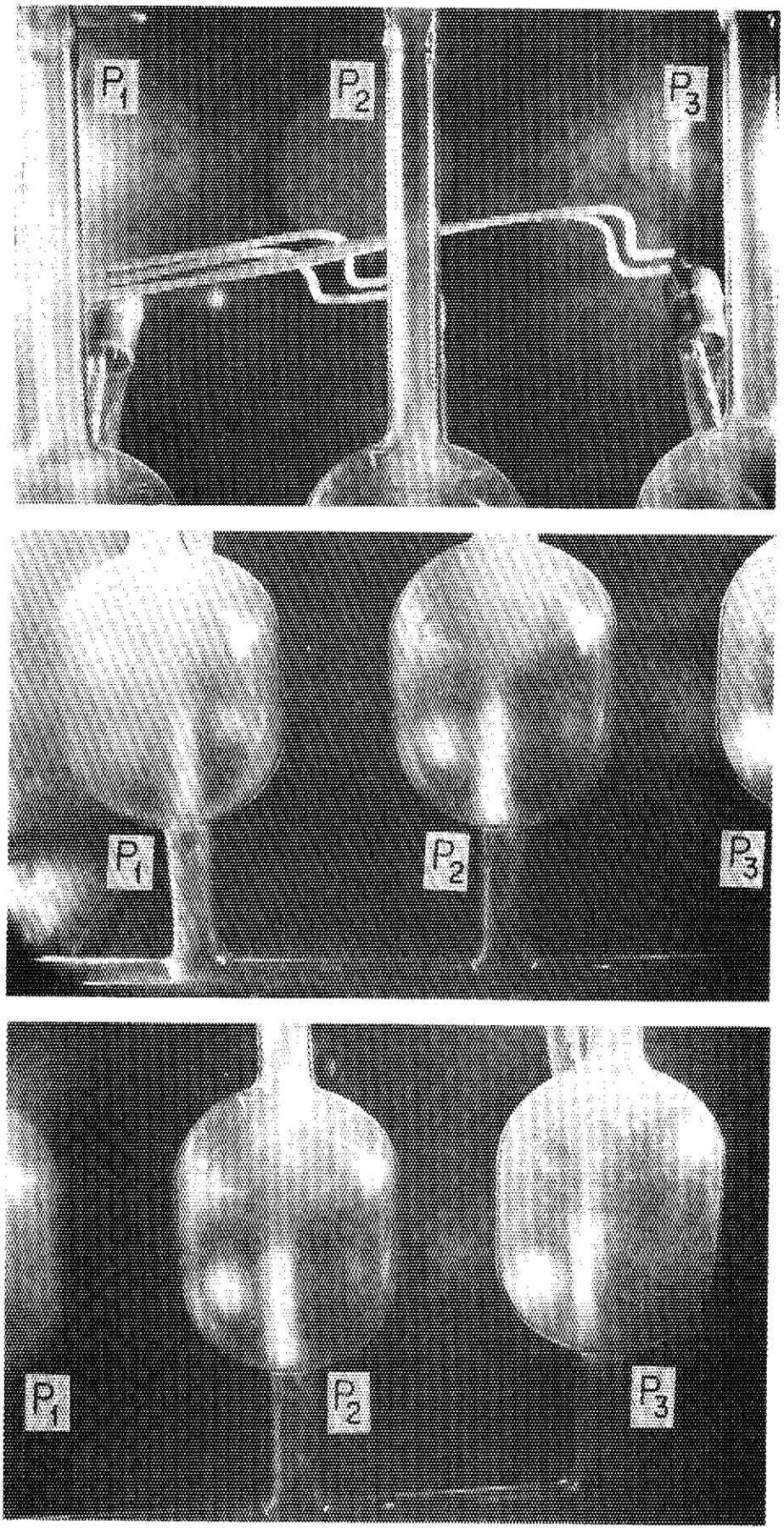
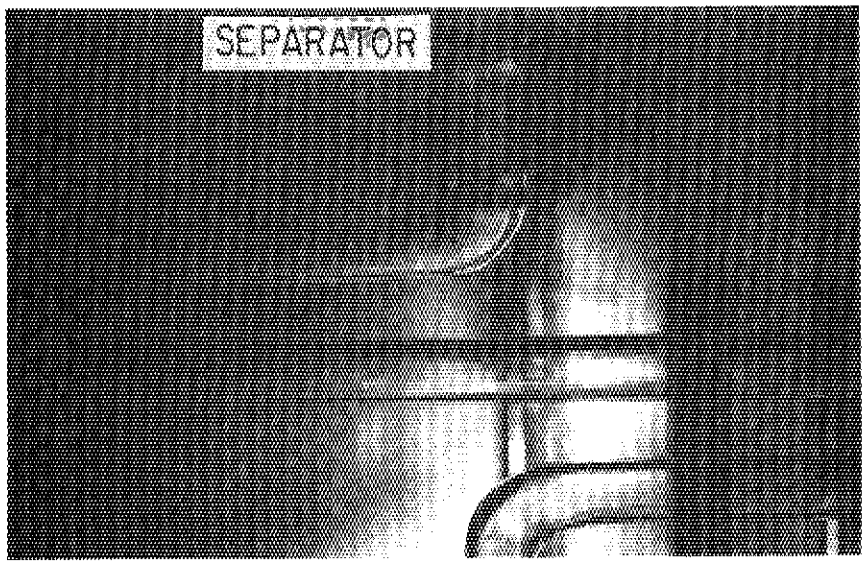
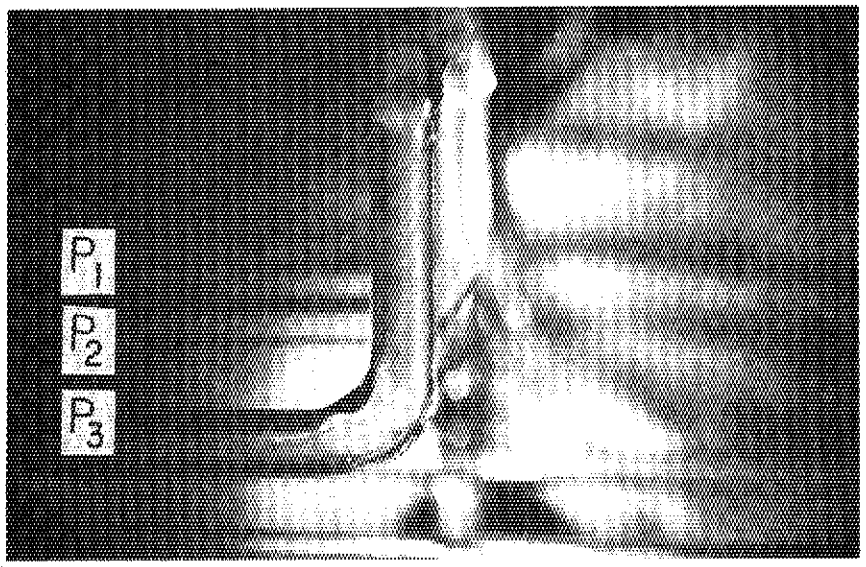


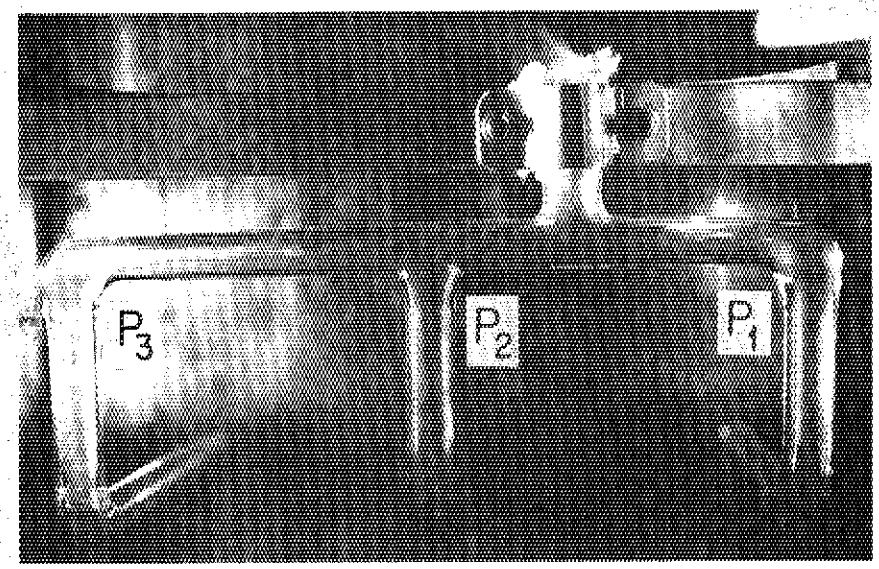

写真1　自然循環ラインをもつガラスモデル内二相流ヘリウムの流動様式(2)




①




②




③

写真2　自然循環ラインのないガラスモデル内二相流ヘリウムの流動様式(1)

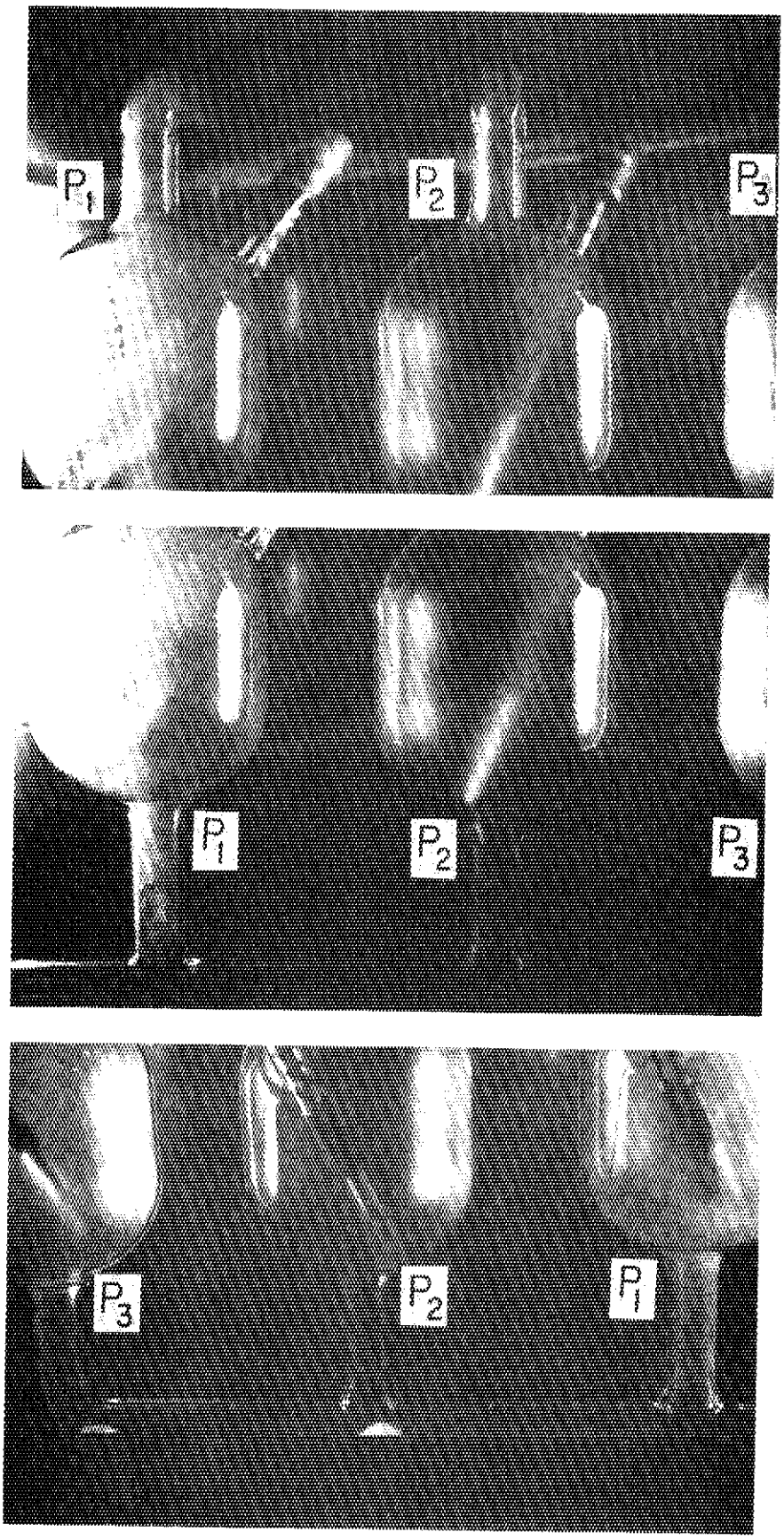



写真 2　自然循環ラインのないガラスモデル内二相流ヘリウムの流動様式(2)