気泡の閉塞により誘起される不安定流動*

(第 1 報, 発生機構に関する実験結果)

有 富 正 憲**, 井 上 晃**, 石 田 裕***

Thermo-Hydraulic Instability Due to a Blockage of Vapor to Flow in a Boiling Two-Phase Flow System (1st Report, Experimental Results concerning Occurring Mechanism)

by Masanori ARITOMI, Akira INOUE, and Hiroshi ISHIDA

Thermo-hydraulic instability has been investigated experimentally in a boiling two-phase flow system composed of a vertical N-shaped boiling channel and an adiabatic bypass between an inlet and an outlet plenums, using Freon 113. The instability caused by the blockage of vapor to flow, which does not belong to Bouré's classification of two-phase flow instabilities, is observed. The flow maps in each section, the static characteristics, the stable flow limits and the characteristics of this instability have been studied under various conditions to clarify the occurring mechanism. It makes the inlet velocity decrease for a vapor slug combined in the inverted U-shaped bend to obstruct the flow. The vapor slug flowing into the downcomer with the growth rises the void fraction in the downcomer and causes the gravitational loss to increase. Therefore, flow instability is brought about.

Key Words: Two-Phase Flow, Thermo-Hydraulic Instability, Flow Map, Flow Excursion, Flow Oscillation, Blockage of Vapor to Flow, Vertical N-Shaped Boiling Channel

1. 緒 言

一般に沸騰二相流系においては, 下降流は好ましくないといわれている。しかし近年, 石油消費量の削減のために超臨界圧ボイラの亜臨界圧下における部分負荷運転や, 配管に通電加熱し温水を供給する温水器を, 構造が単純なために, 改良して動力炉のタービン起動用の補助ボイラとして使用することが検討されている。これらのプラントでは, 小形化のために上昇管と下降管の組合された曲り管から構成されるものも多い。さらに LNG 等の低温流体の蒸発器の小形化にも曲り管の採用は有望であり, 多目的高温ガス炉の補助冷却器用の伝熱管は U 字管または逆 U 字管が検討されている⁽¹⁾。垂直曲り管内の沸騰二相流においては, U ベンド管内, 逆 U ベンド管内あるいは下降管内で発生蒸気が停留し, 流れを閉塞することにより不安定流動を誘起し, パーンアウト現象やドライアウト現象を誘発して, 伝熱管の破損や伝熱性能の低下を招く危険性がある。

また加圧水型炉の蒸気発生器や新型転換炉のポンプバイパスには逆 U 字管が採用されており, 事故時の自然循環冷却モードにおいて, この逆 U 字管部に蒸気が停留すると循環力の低下を招き冷却特性に悪影響を与えることがある。

沸騰二相流の不安定流動に関する研究は 1938 年に Ledinegg⁽²⁾によって行われて以来, 密度波振動を中心に多数行われ, これらの成果は Bouré ら⁽³⁾, Lahey ら⁽⁴⁾や Bergles⁽⁵⁾らにより数多くレビューされているが, 発生蒸気の流路閉塞に起因する不安定流動は Bouré らの分類⁽³⁾にも見られず, ほとんど研究が行われていない。知る範囲では, 動力炉・核燃料開発事業団で行われた高速増殖炉用蒸気発生器の開発過程において, 1 MW 蒸気発生器で下降管を断熱しない場合に観察された不安定流動の発生機構を調べるために, U 字管用いた著者らが行った研究において, サブクール沸騰下で下降管の出口近傍で生じた合体スラグ気泡が流れを閉塞し, スラグ気泡が上流側に急成長することにより生ずる「スラグ逸走形不安定流動」の研究⁽⁶⁾と, 福田らが行った入口流速が 0.1 m/s 以下の低流速下における N 字形沸騰流路の不安定流動の研究⁽⁷⁾があるのみである。

そこで本研究では, 垂直曲り管内の沸騰二相流の不

* 昭和 61 年 4 月 1 日 第 63 期通常総会講演会において講演, 原稿受付 昭和 60 年 8 月 19 日。

** 正員, 東京工業大学原子炉工学研究所 (〒152 東京都目黒区大岡山 2-12-1)。

*** 学生員, 森ビル(株) (〒105 東京都港区虎の門 3-5-1)。

安定流動に関する基礎研究として、フロン 113 を用いて N 字形沸騰流路で生じる気泡閉塞に起因する不安定流動の実験的研究を行うことにより、その発生機構と発生限界および不安定流動の特性を解明するとともに、他の不安定流動の発生機構との差異を比較することにより気泡閉塞形不安定流動の特徴を明確にしている。

2. 実験装置と実験方法

本実験で用いた循環ループの概略図を図 1 に示す。作動流体としてはフロン 113 を用い、循環ループは大気圧下で運転される。十分なポンプ揚程とテスト部入口の流量調整弁の絞りを設けることにより、循環ループ自身の不安定流動は抑制できるように設計されている。循環流量は、オリフィスの差圧測定とこの流量調整弁を用いて所定の値に設定され、テスト部へのフロンの流入温度は二つのサブクーラと予熱器を用いて所定の値に設定される。

テスト部は出入口プレナム間の垂直な N 字形沸騰流路と非加熱バイパスから構成されており、その詳細を図 2 に示す。プラントにおいては出入口プレナム間に多数の並列沸騰流路が存在するが、本研究において 1 本の加熱流路と 1 本の非加熱バイパスから構成されるテスト部を採用する理由は、Ledinegg 形不安定流動を抑制し、かつ気泡閉塞により誘起される不安定流動の発生機構を実験的に解明する目的に対して、2 本の加熱流路を用いるよりも優れている点が多いことが予備実験から判明したためである。

N 字形沸騰流路は内径 12 mm、長さ 600 mm のバイレックスガラス製の入口上昇管、下降管、出口上昇管と各々の直管部を接続する逆 U ベンド管と U ベンド管から構成されている。各ベンド管は、内径 12 mm、直管部長さ 250 mm で曲率半径は 58 mm と 158 mm のアクリル製で作られている。入口上昇管には外径 5 mm、肉厚 0.18 mm の SUS 304 製の薄肉管が同心円

状に配置され、環状流路を形成しており、この内管は交流により直接通電加熱される。他の流路区間は本実験範囲では非加熱である。バイパス管は沸騰流路と同一内径を有し、流量調整用の流路と同一内径を有するボール弁とテスト部の流速変動計測用のオリフィスが取り付けられている。

実験は入口プレナムに内挿されている熱電対の監視により入口サブクール度を本実験範囲では 10 K に設定し、入口全流量を所定の値に設定した後に、入口上昇管の熱流束を徐々に変化させて、図 2 に示す出入口プレナム間差圧、バイパスのオリフィス差圧、逆 U ベンド部の出入口差圧と出入口温度および出口プレナム内の流体温度を測定し、cut-off 周波数 10 Hz のローパスフィルタを介し、ペンオシログラフに記録した。沸騰流路の各区間の流動様式および沸騰流路の静特性を調べる場合においては、バイパス流路を閉じて単管として実験を行い、気泡閉塞形不安定流動の発生限界および不安定領域における流動特性を調べる実験では、バイパス流量調整弁を用いて、沸騰流路とバイパス流路の流量が均一になるように調整した。

本実験で行った実験範囲および実験パラメータについては表 1 に示す。

3. 流動様式と静特性

3.1 流動様式 単管において観察された入口上昇管、下降管、U ベンド管および逆 U ベンド管内における流動様式の代表的な模式図を図 3 に示す。入口上

図 1 フロン 113 循環ループ

図 2 テスト部

昇管の加熱量を徐々に増加させると、(a)に見られるようにすべての区間にわたってサブクール下の気泡流が観察され、両ベンド管内では上面に沿って気泡が流れる。加熱量をさらに増加させると、入口上昇管では気泡流であるが、逆Uベンド管内では気泡のドリフト速度の低下から、気泡が減速され、(b)で見られるように $\theta=120^\circ$ 付近で気泡の合体が始まり、加熱量を増加させるに従いやがて、(c)に見られるようにサブクール下において、スラグ気泡が形成され流路を閉塞する。このスラグの先端が $\theta=180^\circ$ 付近まで成長すると下降管部へ流出するが、流速や発生蒸気量により流出形態は異なる。すなわちスラグ気泡は分裂したりあるいは合体成長したりしながら下降管部を流れ、Uベンド管内へ流入する。そしてスラグ気泡は、 $\theta=45^\circ$ 付近で停留して流入する気泡を吸収しながら、Uベンド管内で成長し、その先端が $\theta=90^\circ$ を超えると停留している気泡全体が一気に出口上昇管に流出する。さらに加熱量を増加させ、飽和沸騰領域となると、(d)のように上昇管内のスラグ気泡は逆ベンド管内で合体し、環状流となり、次第に下降管内を成長しながらその先端はUベンド管へと達する。 $\theta=90^\circ$ 付近まで成長するとその先端は不規則に分裂しながら、出口上昇管へ流出する。

本実験範囲において観察により得られたフローマップを図4に示す。同図から垂直N字形沸騰流路における流動様式の特徴は、前述のように逆Uベンド管内

でスラグ気泡が形成されるために、逆Uベンド管、下降管およびUベンド管内において気泡流範囲が狭くなり、サブクール下においてもスラグ流が形成される点である。なお、下降管において低流速範囲で気泡流範囲が広がる原因は、蒸気発生量が小さく下降流として流出する際に、スラグ気泡が流路程度長さの気泡に分裂するためである。

3.2 静特性 図5に単管において測定された代表的な入口流速に対するプレナム間差圧の静特性と差圧変動の値を入口上昇管の熱流束をパラメータに示す。ただし、以後の議論のためにプレナム間差圧としては次式で定義する。

$$\Delta P_{\text{plenum}} = \Delta P_{\text{true}} - \rho_l H g \quad \dots\dots\dots (1)$$

ここで ΔP_{true} は実際のプレナム間差圧で、 ρ_l は液密度、 H はプレナム間の高低差、 g は重力加速度である。N字形沸騰流路では、低流速下において静特性上大きな負性こう配が存在することがわかる。流速が0.185 m/sにおける低加熱量($q''=25, 50 \text{ kW/m}^2$)では逆Uベンド管内で生じた環状流の先端が、プレナム間差圧の増加を伴って、Uベンド管部まで成長するが、その先端がUベンド管の中心に達すると出口上昇管に吹きぬけるため差圧は急速に減少する。単管においては入口流速は一定であるが、蒸気相の圧縮性により吸収され、環状流の先端の移動速度は入口流速の

表 1 実験条件

	Single Channel Test	Parallel Channel Test
$\Delta T_{\text{sub}} \text{ (K)}$	10 (37.5°C)	
Flow Rate (m/s)	0.185~0.545	0.225~0.57
Heat Flux (kW/m ²)	0~143.6	0~129.9
R : Radius of Bend (mm)	Inverted U	58
	U	158

図 3 代表的な観察結果の模式図

図 4 各部のフローマップ

1/3 程度となり、20 秒程度の比較的周期性を帯びた差圧変動が生じた。しかし入口流速を増加させると差圧変動は周期性を失い、ランダムな変動となり、さらに流速を増すと差圧および差圧変動はともに減少する。

単管の実験では上述のように入口流速は一定であるが、蒸気の圧縮性のために環状流の先端より下流の領域では流速変動が生じる。この流速変動の絶対値は計測していないが、16 mm カメラを用いた観察結果によれば、プレナム間差圧が 2 kPa 以上変動すると顕著な流速変動を誘起することが判明したために、本報ではこの 2 kPa 以上の圧力変動をもって不安定流動の発生と定義した。この定義に基づき、本実験範囲における単管の流動状態を安定判別図としてまとめて図 6 に示す。クオリティが大きくなり、逆 U ベンド管部以降の領域がすべて環状流となると差圧変動は生じなくなる。さらに入口流速が 0.55 m/s 以上になると、逆 U ベンド管部から U ベンド管部にかけて、スラグ気泡がランダムに存在し、出口上昇管への流出サイクルも短くなり、差圧変動は非常に小さくなり、流速変動は生じなくなる。

以上のフローマップおよび安定判別図は加熱量を次第に増加させた場合の結果であり、再現性は良好であったが、逆に加熱量を減少させた場合には加熱量に対する停留蒸気の高スレシスが存在するために、フローマップ、静特性および安定判別に関する再現性は得られなかった。

図 5 単管の代表的な静特性

4. 気泡閉塞形不安定流動

4.1 発生限界と発生機構 入口上昇管の加熱量を徐々に増加させると、図 5 の静特性から判明するように、プレナム間差圧が変化するため沸騰流路とバイパス流路間に流量の不均一が生じるが、加熱量の変化が小さければこの流量分配差異は小さく、バイパス流路の流量調整弁により両流路の流量は容易に均一化ができるが、ある加熱量に達すると静特性の変化をはるかに超えた流量逸走が生じ、不均一流量分配となる。本報ではこの条件をもって安定限界と定義した。この不安定流動には次の 2 種類の現象が存在する。

- (1) 沸騰流路の入口流速が零となる完全閉塞タイプ
- (2) 沸騰流路の入口流速がある流速まで低下（流量逸走）した後、その流速を平衡流速として周期的な流量振動が生じるタイプ（流量振動タイプ）

二つのタイプの不安定流動に対する安定限界近傍の測定結果の代表例を図 7, 8 に示す。両図の ΔP_{plenum} と ΔP_{invt} はプレナム間および逆 U ベンド管の出入口の差圧を示し、 G_{bypass} はバイパスの流速変動を、 q'' は入口上昇管の投入熱流束を、 T_{in} , T_{out} は逆 U ベンド管の入口と出口の流体の温度変動を示す。

完全閉塞タイプの場合では、まず逆 U ベンド管の $\theta = 120^\circ$ 付近で気泡が合体し、スラグ気泡となり下降管へ流出し、U ベンド管の $\theta = 60^\circ$ 近傍で停留する。この現象が生じると沸騰流路の入口流速は次第に低下して

図 6 単管の安定判別図

いく。Uベンド管内に停留したスラグ気泡は流入してくるスラグ気泡を合体しながら下降管内を上流側に向かって成長する。そして完全閉塞すると下降管内は環状流または蒸気相のみの存在となってしまう。完全閉塞後は、図7に示すように入口上昇管の加熱を停止すると、入口上昇管内の気泡が浮力により上昇し、逆Uベンド管に流入する体積流量分だけ沸騰流路の流速はわずかに増加するが、次第に減速して再び完全閉塞する。流れが完全に回復するまでには、加熱終了してからかなりの時間を要する。バイパス流路に流速があり、プレナム間差圧が増大するにもかかわらず完全閉塞する原因は、下降管内のボイド率が増大し、プレナム間における水頭損失が増加して、この水頭損失の増加分とバイパス流路の流量増加に伴う摩擦損失の増加分がつりあうからである。

一方振動タイプの場合では、逆Uベンド管からUベンド管内に停留する蒸気の流動抵抗により沸騰流路における流量逸走が生じるが、下降管内のボイド率の増加に伴う水頭損失の増加分だけでは、完全閉塞に必要とするバイパス流量増加に対する摩擦損失の増加分をまかないきれないため、水頭損失の増大分に相当する摩擦損失の増加と成り得るバイパス流量の増加のみが生じて、その分だけ沸騰流路の流量逸走が生じる。流量振動が生じる原因は、完全閉塞しないために逆Uベンド管で停留するスラグ気泡が次第に下降管へ成長し、さらにUベンド管に到達するまで閉塞と水頭損失の増大により入口流速が低下して、逆Uベンド管からUベンド管に停留している蒸気塊が出口上昇管

に流出する際に沸騰流路の入口流速が増加する。そしてこの現象が周期的に生じるために流量振動を引き起こすと考えられる。

入口流速を一定に保ち、入口上昇管の加熱量を徐々に増加した際に生じた安定限界における流量逸走後の沸騰流路の入口平衡流速について、流量逸走前の入口流速で整理した結果を図9に示す。本実験体系では入口流速が0.4 m/sを境にして、それ以下の流速では完全閉塞が生じ、それ以上の流速では流量逸走後の流量振動現象が生じた。そこでこの安定限界における流量逸走前後のプレナム間差圧の変化を調べ、その結果を図10に示す。なお、同図におけるプレナム間差圧は式(1)に基づいている。すなわちこの差圧はバイパス流路の摩擦損失に相当する。流量逸走前の差圧は入口流速が0.4 m/sを境にして入口流速に対する増加傾向が異なっているが、これはバイパスの絞りの影響であり、図5に示すように沸騰流路の投入熱量に対する静特性の差異に起因し、入口流速が0.4 m/s以下は負性こう配が存在しそのこう配が大きいが、それ以上ではこう配は緩やかであるためと考えられる。最も興味深い点は、流量逸走後のプレナム間差圧であり流量振動領域ではほぼ一定値となる点である。このことは前述のように流量逸走の生じる原因が、逆Uベンド管中心からUベンド管中心までの下降領域のボイド率の増加による沸騰流路の水頭損失の増加であることを裏付けており、不安定流動の特性は異なるものの完全閉塞タイプも流量振動タイプも発生機構は同一であり、逆Uベンド管内に停留する蒸気塊が流動に対して抵抗となり、入口流速の減速を誘発し、さらに下降

図7 測定結果 (完全閉塞形)

図8 測定結果 (振動形)

管内のボイド率の増加による水頭損失の増加が相乗効果となり、流量逸走現象を引き起こすのである。このプレナム間差圧が一定となる値および二つのタイプの境界となる入口流速の値は下降管の長さに影響を受けると考えられる。この定量的な値に関する詳細は次報で報じる。

次に安定限界に及ぼす入口流速と加熱量の関係を調べ、流量逸走前の入口流速とクオリティをパラメータとしてまとめた結果を図11に示す。完全逸走領域では、図7からわかるように流量逸走後は加熱量を零にしない限り沸騰流路の流速は回復せずに、ドライアウト現象が発生してしまうが、振動領域では、発生蒸気量(加熱量)を増加させた場合 q_{up}'' と減少させた場合 q_{down}'' の安定限界に大きな差異が存在することが同図から判明する。これは3・2節で述べたように停留気泡の発生蒸気量に対するヒステリシスの存在により生じる。しかしこの安定限界の差異は入口流速の増加に伴い減少する。

図11の安定限界と図3のフローマップを比較すると、入口流速が小さい場合には逆Uベンド管内における気泡流からスラグ流への遷移点と安定限界は一致し、逆Uベンド管内でスラグ気泡が発生するとただ

ちに気泡閉塞形不安定流動が発生する。入口流速が増加するに従いスラグ気泡の発生点と安定限界との差は増大し、スラグ気泡による閉塞にはスラグ気泡の形成の外に停留させ、かつ成長させるための蒸気発生量が必要となる。

4・2 振動領域の不安定流動の特性 入口流速が0.4 m/s以上の流量振動タイプに関して不安定領域において加熱量をパラメータとして不安定流動の特性を調べた。図12には流量逸走後の沸騰流路の入口平衡流速を逸走前の入口流速との比として、入口流速および入口上昇管の熱流束をパラメータに整理した結果を示す。入口平衡流速の入口流速に対する比は加熱量のみ依存し、加熱量が増大するに従い逸走流量は小さく入口平衡流速は増加することが判明した。これは図5に見られる静特性に起因し、静特性曲線が加熱量を増加させるに伴い高流速側にシフトし、かつ負性こう配を有するためである。

流動振動の特性すなわち脈動の周期と振幅比に関し

図9 流量逸走後の入口平衡流速

図10 安定限界のプレナム間差圧

図11 気泡閉塞形不安定流動の安定判別図

図12 振動領域の入口平衡流速

て発生蒸気量をパラメータとして整理した結果を図13と14に示す。本実験体系では振動領域においては流量逸走後は加熱部出口において飽和沸騰となっている。図13から入口流速変動の周期は発生蒸気量にのみ依存し、発生蒸気量が増加するに従い周期は減少することがわかる。これは閉塞スラグ気泡の先端が逆Uベンド管からUベンド管の中心まで成長する時間とほぼ一致し、発生蒸気量が増加するに従いこの成長に要する時間が短くなるからである。本報では下降流部の長さすなわち逆Uベンド管の中心からUベンド管の中心までの長さについては1種類のみを示すが、周期はこの長さや密接な関係がある。二つのタイプの不安定流動の境界と同様にこの周期の下降流部の長さに対する定量的な議論は次報で論じる。図14から入口流速変動の振幅比は発生蒸気量と逸走前の入口流速に依存し、両者が増加するに従い減少する。これは発生蒸気量の増加は周期の減少を招き沸騰流路の流量低下の割合を減少させ、入口流速の増加はバイパス流路の摩擦損失を増大させるために少ない流速変化によっても同様のプレナム間差圧変動を生じ得ることに起因する。

5. 他の不安定流動との比較

5.1 Ledinegg 形不安定流動 圧力損失と入口流速の間の静特性上の負性こう配に起因する不安定流動としてはLedinegg形不安定流動が挙げられる。この不安定流動ではポンプ特性等の外部駆動力の特性との関係で静特性と外部特性の交点まで流量逸走現象が生じる。ある平衡点まで流量逸走が生じる点では非常に類似しているが、気泡閉塞形不安定流動においては

完全閉塞タイプの場合、下降流領域の蒸気相の蓄積により静特性では存在しない水頭損失増加が生じ、入口流速は零流速まで逸走してしまう。Ledinegg形不安定流動では零流速までの逸走は生じない。静特性曲線に従うか否かが最大の相違点であり、完全閉塞するために加熱を停止しない限り、必ずドライアウト現象を誘発する点で実機にとってはLedinegg形不安定流動以上に苛酷な現象である。

さらに加熱部の上流側にアキュムレータのような圧縮性空間を有する場合に生じるLedinegg形不安定流動の一つとして圧力降下形振動があり、気泡閉塞形不安定流動の流量振動タイプと非常に類似している。しかしこの不安定流動は静特性上の二つの正こう配間の逸走振動を繰返すが⁽⁸⁾、気泡閉塞形不安定流動は流量逸走した後の流速を平衡流速としてその平衡流速の周辺を振動する現象であり、下降流路における蒸気塊の停留および成長と上昇流路への吹き抜けが周期的に生じることによる振動現象であり本質的に異なる。

5.2 密度波振動 沸騰二相流の不安定流動の代表的なものとして密度波振動が挙げられる。この不安定流動は入口流速変動に対するボイド率や両相の流速変動に時間遅れが生じ、二相流部の圧力損失変動の入口流速変動に対する位相差が生じることにより、外部拘束条件から入口流速変動にフィードバックする動的な不安定流動である。振動現象としては気泡閉塞形不安定流動と一見類似しているが、気泡閉塞形不安定流動の振動現象は準静的に生じ、図8に見られるようにバイパス流量とプレナム間差圧の変動は同位相で、慣性項の影響がほとんど現れない点が本質的に密度波振動と異なる。さらに振動の周期も密度波振動の場合より

図13 振動領域の周期

図14 振動領域の振幅比

りもひとけた近く大きな値となっている。また密度波振動の場合は系の振動体系は外乱の性格や運転条件の履歴には全く依存せず、現在の運転条件にのみよるが⁽⁹⁾、気泡閉塞形不安定流動は、図11で明らかのように、停留蒸気の運転条件に対するヒステリシスが存在する点でも大きく異なる。

5.3 スラグ逸走形不安定流動 下降管において沸騰が伴う場合に、下降管出口近傍で生じたスラグ気泡が上昇管に流出せずに流れを閉塞して下降管内を上流側へ成長するスラグ逸走形不安定流動とは、気泡が流路を閉塞し、入口流速を減少させる機構こそ異なるが、発生機構は類似しかつ不安定流動の特性そのものもバイパス流路の流速とプレナム間差圧の変動が同位相である点および下降流部のボイド率の増加に伴い水頭損失が増大することにより流量逸走が誘起される点など類似点が多い。下降管におけるスラグ気泡の上流側への急速な成長に伴う逆流現象が本実験体系では生じていないが、これは下降流部における蒸気相への蒸気供給が上昇管から流入のみか、あるいは加熱され下降管自身で蒸気発生が行われるかの違いのみであり、スラグ逸走形不安定流動と気泡閉塞形不安定流動は本質的には同一の不安定流動として分類できると考える。

6. 結 論

作動流体としてフロン113を用い、出入口プレナム間の1本の垂直N字形沸騰流路とバイパス流路から成るテスト部で、入口上昇管のみ加熱する実験を行い以下の結論を得た。

(1) 逆Uベンド部にスラグ気泡が停留し下降管部へと成長する過程において、停留蒸気塊が流動抵抗となりかつ下降流部のボイド率の増加に伴う水頭損失

の増大により、沸騰流路の流速が低流量側へ逸走する現象が誘起される従来の沸騰二相流の不安定流動の分類には見られない「気泡閉塞形不安定流動」の存在を見出し、その発生機構を明らかにした。

(2) この不安定流動は入口流速が零流速まで逸走する完全閉塞タイプとある流速まで逸走した後に振動するタイプがある。下降流部のボイド率の増加による沸騰流路の水頭損失の増加とバイパス流路の流速増加による摩擦損失の増加との関係により完全閉塞するかどうかが決まる。

(3) 振動領域において振動の周期は発生蒸気量のみ依存し、発生蒸気量の増加とともに減少する。一方、振幅比は発生蒸気量と逸走直前の入口流速に依存し、振幅比は両者の増加とともに減少する。

本研究は文部省科学研究費補助金(一般研究C59580138)によって行われたものであることを記し、謝意を表する。

文 献

- (1) Takerura, J., ほか3名, *Proc. Japan-US seminar on Two-Phase Flow Dynamics*, (1984-7), G 6.
- (2) Ledinegg, M., *Die Wärme*, 61-8 (1938), 891.
- (3) Bouré, J. A., ほか2名, *Nucl. Eng. Des.*, 25 (1975), 165.
- (4) Lahey, Jr. R. T. and Drew, D. A., *NUREG/CR-1414*, (1980).
- (5) Bergles, A. E., ほか4名, *Two-Phase Flow and Heat Transfer in the Power and Process Industries*, (1981), 383, McGraw-Hill.
- (6) Aritomi, M., ほか2名, *J. Nucl. Sci. Technol.*, 18 (1981), 329.
- (7) 福田・長谷川, 第22回日本伝熱シンポジウム論文講演集, (昭60-5), 398.
- (8) 小沢・ほか3名, *機論*, 49-448, B (昭58), 2715.
- (9) Aritomi, M., ほか2名, *J. Nucl. Sci. Technol.*, 14 (1977), 88.

討 論

〔質問〕 赤川 浩 爾〔神戸大学工学部〕

上下屈曲管における不安定流動現象が物理現象を明らかにして解明されていることに敬意を表する。

(1) 実験装置が1本の加熱流路と1本の非加熱バイパスから構成されているが、これは多数の並列加熱流路系における不安定流動の解明の基礎として必要なステップと思われる。ところでこの系と並列管系との相違点はどのように考えられるか。

(2) 上の単管加熱路を採用された理由として、「2本の加熱流路を用いるよりも優れている点が多い

ことが予備実験から判明した」と書かれているが、少し具体的に教示されたい。

(3) 入口流速が0.4 m/sを境として不安定現象が急激に変化するが、図5の単管の静特性からはこの点の予測はできないようである。この理由はどのように考えられるか。

(4) 流量振動タイプでバイパス流量を絞って加熱流路側の流量を増加させると、不安定現象はどのようなのか。

〔回答〕 (1) 定量的な議論はできないが、低流

速域 (約 0.4 m/s 以下) では気泡閉そく形不安定流動が直接に発生するが, 高流速域では Ledinegg 形不安定流動がまず生じ, 低流速となった流路で気泡閉そく形不安定流動が誘起される複合現象が発生する。特に多群並列管では各流路におけるわずかな流速の増加が1つの流路の完全閉そく現象を誘起することが考えられる。

(2) 第1の理由は(1)で回答したような複合現象の発生を避け, 気泡閉そく形不安定流動の発生のみに着目できるテスト部を構成することである。第2の理由はベンド管部での気泡の停留現象が複雑であり, 安定限界に対する再現性が本テスト部のほうが2本の管を沸騰流路とするよりも優れていることである。第3の理由は上下屈曲管内のボイド率や圧力損失の相関式が十分に確立されておらず, 現象を解析的に解明することは困難で, 実験的に定量的な議論をするためである。1本を非加熱流路とすることにより, 圧力損失の評価を容易にできることである。

(3) 付図1に現象を模式的に示す。すなわち実線と破線は沸騰流路とバイパス流路の単管における静特性を示し, 全流路が一定で両流路面積が等しいことから, 静特性上の交点 O で運転されている場合に, 蒸気停留により下降管内のボイド率が単管の場合以上に上昇し, 単管の静特性とは異なる一点鎖線の準静的変化特性となる。そして(a)のように零流速で沸騰流路の圧力損失が優れば, 入口上昇管内の沸騰によるボイド率上昇で, 全体の水頭損失で低下し, バイパス流路の

付図1 発生機構のモデル図

値と釣り合うまで流路は閉そくされるが, (b)のようにある流速下で交点 O' が存在する際にはその交点が平衡流速となり, 下降管内の蒸気の停留と流出による流量振動現象が生じると考える。

(4) バイパス絞りの影響についての詳細は次報で報じるが, バイパスを次第に絞っていくと付図1の O' 点が次第に高流速側へシフトし, 図14に示すように振幅比は減少し, やがては流量振動はなくなり, 流動は安定化する。