研究論文

896. 並列流路における沸騰下降二相流の加熱限界

福田 研二*, 堺 公明**,
近 藤 哲 也*, 長谷川 修*

(1988年 6月24日 受理), (1988年 11月18日 再受理)

*Heating Limits of Boiling Downward Two-Phase Flow
in Parallel Channels*

By Kenji FUKUDA, Takaaki SAKAI,
Tetsuya KONDOH and Shu HASEGAWA

Flow characteristics and heating limits of downward two-phase flow in single or parallel multi-channels are investigated experimentally and analytically. The heating section used is made of glass tube, in which the heater tube is inserted, and the flow regime inside it is observed.

In single channel experiments with low flow rate conditions, it is found that, initially, gas phase which flows upward against the downward liquid phase flow condenses and diminishes as it flows up being cooled by inflowing liquid. However, as the heating power is increased, some portion of the gas phase reaches the top and accumulates to form an liquid level, which eventually causes the dryout. On the other hand, for high flow rate condition, the flooding at the bottom of the heated section is the cause of the dryout.

In parallel multi-channels experiments, reversed (upward) flow which leads to the dryout is observed in some of these channels for low flow rate conditions, while the situation is the same to the single channel case for high flow rate conditions.

Analyses are carried out to predict the onset of dryout in single channel using the drift flux model as well as the Wallis' flooding correlation. Above-mentioned two types of the dryout and their boundary are predicted which agree well with the experimental results.

KEYWORDS: downward flow, two-phase flow, flow rate, dryout, instability, flooding, heating limits, reversed flow, parallel channels

I. 緒 言

LOCA 時の冷却材の熱水力学の挙動や ECCS の冷却能力の評価に関連して、蒸気と水が対向して流れる、いわゆる気液対向二相流現象の把握は重要な役割を持っている。炉心下部の配管破断を想定した時に生じる下降流や、あるいはある程度炉心が乾いた後に炉心上部より注入される ECC 水の流下は、燃料棒からの熱伝達、あるいは減圧等により発生する上昇蒸気流によって阻害される(CCFL)ことがある。この問題は、フ

ラッディングやその後の再流入、あるいは現象の間欠性などが絡んだ複雑なものである。

一方、原子炉炉心はチャンネルボックスが多数集められた並列流路系と見なすこともできるが、このような炉心内の下降流に対しては、流量分配、流れの3次元性や不安定性など並列流路系に特有な問題が関係す

* 九州大学 工学部応用原子核工学科 (Dept. of Nucl. Eng., Fac. of Eng., Kyushu Univ.)

** 動力炉・核燃料開発事業団 (Power Reactor & Nucl. Fuel Development Corp.)

る。さらに、実際の炉心内の流れは、いわゆるバイパス現象の発生⁽¹⁾や、リウェッチング開始時刻の不均一性⁽²⁾等に見られるように、一層複雑なものとなる。

ところで、これらの現象は ECCS の冷却能力の検証を目的とした研究において指摘され、かつ精力的に調べられてきたものであるが^{(1)~(3)}、現象を比較的単純化して、並列加熱管内の下降二相流の問題としてこれを取り扱った研究も多い。

Wallis ら⁽⁴⁾および村瀬⁽⁵⁾は空気-水系で実験を行い、下降二相流の多価性を指摘し、かつ気相流量などの連続的な変化に対し、各管内の流動状態が不連続的に変化する様子やその機構を明らかにしている。また、著者ら⁽⁶⁾は加熱下降管内で発生する不安定現象に着目して生じる現象を幾つかに分類した。

本研究は、既報⁽⁶⁾に引き続き沸騰下降二相流を対象としてその基礎的挙動について調べたものである。すなわち、単一流路および並列流路の場合について可視化実験装置を用いて、特に沸騰下降二相流の加熱限界とその発生機構および安定性に着目して実験を行な

た。さらに、単一流路の場合の低流量域で生じるドライアウトを対象として、ドリフトフラックスモデルを用いて解析を行い、実験結果との比較を行なった。

II. 実験装置および方法

1. 実験装置

Fig. 1 に、実験装置の概略図を示す。実験装置は強制循環ループであり、主として貯蔵タンク(1)、ポンプ(2)、加熱部(5)、蒸気ドラム(7)、凝縮器(8)、予冷器(9)で構成される。

作動流体(フロン R-113)は、貯蔵タンク(1)よりポンプ(2)によって循環され、全流量測定用タービン式流量計(3)、入口ヘッダ(4)、チャンネル流量測定用タービン式流量計を経て加熱部(5)に流入する。次に、流れは下降流となり加熱された後、出口ヘッダ(6)を経て蒸気ドラム(7)へ至る。そこで気液は分離され、蒸気は凝縮器(8)で凝縮されて蒸気ドラム(7)へ戻り、さらに予冷器(9)で冷却されて貯蔵タンク(1)に戻る。

Fig. 2 に、加熱部の詳細図を示す。加熱部の外管は内径40 mm、全長2,250 mm であり、外径27 mm、加熱長1,400 mm のシースヒータが内部に挿入されており、垂直に設置されている。加熱部の外管はパイレックスガラス製で内部の流動状態が観察できるようになっている。また、差圧測定のため圧力タップが2箇所、およびドライアウトの検出のためヒータ表面の軸方向6箇所にクロメル-アルメル熱電対が等間隔にスポット溶

Fig. 1 Schematic diagram of test apparatus

Fig. 2 Heated section

接されている。このような加熱部が並列に4本設けられている。

2. 実験方法

各加熱部の出入口に取り付けられた弁を用いて使用しない加熱部を遮断することにより、単一流路、並列2流路および並列4流路系を実現し、それぞれの場合について実験を行なった。

単一流路実験は、以下の手順により行なった。まず初めに、流量と入口温度を一定に設定し、その後加熱量を徐々に増加させ、流量、加熱部入口および出口温度、ヒータ表面温度、加熱部入口～出口間差圧などの変化をペンレコーダにより記録した。同時に、目視観察によってドライアウト発生までの流動状態を観察した。ドライアウトの発生は、ヒータ表面の目視観察およびヒータ表面温度の急激な上昇によって判定した。実験条件は入口温度を29.5℃に保ち、入口圧力はほぼ大気圧、流量は20～100 ml/s、加熱量は0～4.5 kWの範囲で実験を行なった。

並列2流路および並列4流路実験は、以下の手順により行なった。まず、全流量を一定値に設定し、次に単一流路実験で使用した流路の条件は変えずに、他の流路について出口弁を用いてそれぞれの流路を流れる流量が等しくなるように調整した。その後、流量、入口温度とも定常となったところで加熱量を徐々に増加させて、ドライアウトに至るまでの現象を観察した。入口圧力は、凝縮器冷却水温度とその流量等を調整することにより制御した。入口流体温度は基本的には加熱部入口で設定したが、実験において逆流が発生した場合にはこれは加熱部での加熱の影響を受けるので、入口ヘッダよりさらに上流側の配管においてこれを設定した。差圧は入口～出口ヘッダ間で測定した。

Ⅲ. 実験結果およびその考察

1. 単一流路実験

目視観察より、フローパターンの相違による2種類のドライアウト様式が観察された。ドライアウトに至る過程をFig. 3(a), (b)に示す。

低流量域(Fig. 3(a))では、加熱量を徐々に増加させていくと、ある加熱量で加熱部下部で沸騰が開始し、発生した気泡は液相と対向して上昇し、サブクール領域で凝縮する状態となる(Fig. 3(a)-(1))。この状態は定常に保たれる。その後の加熱量の増加に従って蒸気発生量が凝縮量を上回り、気相はテスト部上端より蓄積され始めて液位が形成される(Fig. 3(a)-(2))。このような状態になると、加熱量一定の状態、流量減少を伴

Fig. 3 Observed flow regimes in single channel experiments

いながら過渡的に液位は加熱部を下降し、加熱部全域にわたって液相がヒータ表面および管壁を流下する環状流状態となり、ヒータ下端表面において液膜が破断してドライアウトが発生する(Fig. 3(a)-(3))。以下、このドライアウト様式をType Aと称する。

一方、高流量域(Fig. 3(b))では、沸騰開始後、加熱部下部で発生した気泡は少し上昇するが直ぐに凝縮する(Fig. 3(b)-(1))。その後の加熱量の増加に従って加熱部下部において激しく沸騰するようになるが、蒸気発生量の増加によりフラッシングが発生して気泡の局所的停滞が生じ、加熱部下部のみボイド率が上昇して環状流状態になる(Fig. 3(b)-(2))。この状態はさらに時間が経過すると、流量の減少を伴いながら環状流域が加熱部上部へ広がり、やがてヒータ下端において液膜が破断してドライアウトが発生する(Fig. 3(b)-(3))。このように、最終的にはドライアウトを引き起こす流量減少の原因の違いに着目して、Type Aと区別してこのドライアウト様式をType Bと称する。

Fig. 4に、Type Aドライアウト発生時の測定例を示す。沸騰開始後、加熱量の増加に伴い液位が形成されて差圧が急激に上昇し、かつ流量は減少し、ヒータ下端表面温度が急激に上昇してドライアウトに至っている。

Fig. 4 Transients of various parameters for case of Type A dryout onset in single channel experiments

Fig. 5に、沸騰開始点およびType A, Bのドライアウト点を流量と加熱量との関係で示す。図中には第IV章で述べる解析によって求めた液位形成限界および出口オリティ $X_e=0$ のラインが示されている。沸騰開始後徐々に加熱量を増加させると、図中の水平な実線で示される大きな流量減少の後、約 50 ml/s 以下の低流量域では Type A、これより高流量域では Type B ドライアウトが発生した。

Fig. 6には、本実験での流量と加熱部入口～出口間差圧の変化のドライアウトまでの過程を、加熱量をパラメータとして示す。下降流においては重力が流れ方向に作用するため、静止状態で加熱部入口～出口間差圧は負の値となっている。ここで、流路全体が液相で

Fig. 5 Heating power at onset of dryout in single channel experiments

満たされたとしたときの静圧損失は -2.53×10^4 Pa であり、かつ流速が小さいため圧力損失の大部分は主に静圧損失で占められることに注意する必要がある。一定加熱量での流量の減少により加熱部ボイド率は増加するが、それは差圧の増加を引き起こし遂にはゼロに近づく。つまり流量-差圧特性は負勾配を示し、ポンプ特性との相関により静的不安定の影響を受ける。

Fig. 6はこの静的不安定による過渡的な流量減少の過程を示しており、変化は図中の↑印の向きに推移する。これより、Type A ドライアウトが発生する低流量域では加熱部全域において環状流となるため、差圧はほとんどゼロとなるまで上昇して、ドライアウトが発生することがわかる。

一方、Type B ドライアウトが発生する高流量域で

Fig. 6 Differential pressure drop characteristics in single channel experiments

は、加熱量の増加に従って上昇気相流量は増加するが、加熱量の相違にもかかわらず、ほぼ同じ流量-差圧のライン(破線)上に過渡的に遷移しながら、50 ml/s 付近で下部より環状流状態となりドライアウトに至る。ここで、図中の実線は第Ⅳ章で述べる計算で求めた液位形成開始時の差圧であり、●でフラッディング限界に達することを示している。また、破線についての考察は第Ⅳ-4節で行う。

2. 並列2流路実験

単一流路実験と同様に2種類のドライアウト様式が観察された。しかし、低流量域ではいずれかの流路において逆流が発生する点が単一流路での実験と大きく異なっている。

Fig. 7 (a), (b)は、並列2流路実験におけるドライアウトに至るまでの過程の目視観察結果をスケッチしたものである。低流量域(Fig. 7 (a))において、加熱量を徐々に増加させると沸騰が開始し、加熱部下部で生じた気相は下降する液相と対向して上昇し、テスト部上部のサブクールされた領域で凝縮し消滅する(Fig. 7 (a)-(1))。しかしその後、同じ加熱量かあるいはやや少し加熱量を増加させると、どちらか一方の流路において流量が減少し、それに伴い沸騰は激しくなり、ついには逆流が開始して上昇流になる。一方、下降流のままの流路では流量が全流量以上となり沸騰がおさまる(Fig. 7(a)-(2))。さらに加熱量を増加させると、上昇流と

(a) Onset of Type C dryout

(b) Onset of Type D dryout

Fig. 7 Observed flow regimes in parallel two-channel experiments

なっている流路は上端から環状流となり、ヒータ上端表面においてドライアウトが発生した(Fig. 7(a)-(3))。このように、逆流発生後ドライアウトに至る様式を以下 Type C と称する。

一方、高流量域(Fig. 7 (b))では、沸騰開始後両方の流路において発生した気相は上昇しながら直ぐに凝縮する状態にある(Fig. 7(b)-(1))。その後加熱量を増加させても逆流は発生せず、加熱量の増加に従い加熱部下部での沸騰が激しくなり、どちらか一方の流路において大きく流量が減少し、加熱部下部に気泡が滞留して環状流となり(Fig. 7(b)-(2))、ヒータ下端表面においてドライアウトが発生した(Fig. 7(b)-(3))。このように逆流の発生しないドライアウト様式を以下 Type D と称する。ここで、Type Bドライアウト(Fig. 3(b))とType Dドライアウト(Fig. 7(b))とは全く同じ様式であるとも考えられるが、単一流路系ではポンプ特性が、また並列流路系では流路間の相互作用が関係しているので、ここではこれらを区別している。

Fig. 8は、低流量域におけるドライアウト(Type C)が発生するまでの過程を、測定結果に基づいて模式的に示したものである。低加熱量ではそれぞれの流路の流量はほぼ等しいが、ある加熱量において流路2の流量が急激に減少して逆流が開始し上昇流となる。一方、流路1では逆流した流路と対称的に流量が増加し、逆流開始に伴い全流量以上となる。全流量は逆流開始後もほとんど変化しない。

Fig. 8 Schematic transients of flow rates showing occurrence of flow reversal

Fig. 9は、並列2流路実験におけるドライアウト点を流量と加熱量で示したものである。ここで、流量は全流量/流路本数、加熱量は1本の流路当りの値で示されている。図中には沸騰開始点および逆流開始点もプロットされている。また、実線は計算で求めた出口クオリティ $X_e=0$ を示し、破線は逆流開始点(S1)およびType Cドライアウト点(S2)を最小二乗法で直

線近似したものである。50 ml/s 以下の低流量域において逆流が発生し、それ以上の流量では逆流が発生しないこと、また並列2流路でのドライアウト加熱量は、Type C から Type D にドライアウト様式が変化する流量において極小値を持つことがわかる。この流量は約 50 ml/s であり、単一流路実験においてドライアウト様式が変化した流量(50 ml/s)にほぼ一致している。

Fig. 9 Heating power at initiation of dryout in parallel two-channel experiments

3. 並列4流路実験

並列4流路での実験結果は基本的には並列2流路での実験結果と同じであり、低流量域で逆流が発生するドライアウト様式(Type C)と高流量域で逆流が発生しないドライアウト様式(Type D)の2種に分類される。低流量域では沸騰開始後すべての流路で気泡が上昇し、加熱量を徐々に増加させると4流路のうちい

れか1本の流路において逆流が発生し、3本が下降流、1本が上昇流のモードとなり、下降流の流路では流量が増加するため沸騰はおさまる。さらに加熱量を増加させると、下降流であった3本の流路のうち1本について再び逆流が発生し、下降流と上昇流の流路がそれぞれ2本のモードとなる。さらに加熱量を増加させると、2本の下降流の流路のうち1本の流路で逆流が発生し、下降流1本、上昇流3本のモードになるが、直ぐに上昇流のうちの1本のヒータ上端表面でドライアウトが発生する。このように、並列4流路では並列2流路と異なり、流路本数が多いため逆流が何度も発生しモードが変化して行くが、基本的な現象は並列2流路の場合と変わりなく、低流量域で Type C ドライアウトが発生するといえる。

一方、高流量域では沸騰開始後、ある加熱量において4本の流路のいずれかにおいて流量が減少して沸騰が激しくなり、下降流のまま加熱部下部において環状流となり、環状流部が加熱部全体に広がるとともに、ヒータ表面下端においてドライアウトが発生する。この現象は並列2流路の場合と全く同じであり、Type D ドライアウトである。

Fig. 10 は、低流量域での Type C ドライアウトが発生するまでの過程を、測定結果に基づいて模式的に示したものである。ある加熱量において、流路3で流量が減少し始めて逆流し上昇流となり、他の3本の流量は増加する。この繰返して最後には1本が下降流、3本が上昇流となるが、そこで上昇流のうちの1本のヒータ上端の表面温度が急激に上昇し始めてドライアウトに至る。この間、全流量はほとんど変化しない。

Fig. 11 は、並列4流路でのドライアウト点を流量

Fig. 10 Schematic transients of flow rates for parallel 4-channel experiments

と加熱量で示したもので、沸騰開始点、逆流によるモード遷移点もプロットしている。また、図中の実線は計算による出口クオリティ $X_e=0$ を示し、破線(S1~S3)は各逆流開始点の最小二乗法による近似直線である。比較のため、流量は全流量/流路本数、加熱量はヒータ1本当りの値で示されている。50 ml/s 付近を境界として、低流量域では Type C ドライアウト、高流量域では Type D ドライアウトが発生している。また、加熱限界の極小値が Type C と Type D の境界付近の流量に現れている。これらの傾向は Fig. 9 で示した並列2流路の場合とよく一致している。

Fig. 11 Heating power at onset of dryout in parallel 4-channel experiments

さて、以上の逆流モード間の遷移は、並列2流路の実験結果からは予測できる。最初の各流路の流量 W_{e1} は、流路本数を N とすると総流量 W_t より

$$W_{e1} = W_t / N \quad (1)$$

で示される。逆流が発生する場合、逆流している流路本数を N_R 、逆流流量を $W_{e1,R}$ とすると、下降流流路での流量は

$$W_{e1} = (W_t + W_{e1,R} N_R) / (N - N_R) \quad (2)$$

となる。並列2流路の実験結果における逆流開始条件は、逆流開始時の加熱量を Q_R で示すと、Fig. 9 より S1 の最小二乗法近似による直線の方程式から、次式のようになる。

$$Q_R = C W_{e1} \quad (3)$$

(2), (3) 式より逆流開始条件は、

$$Q_R = C (W_t + W_{e1,R} N_R) / (N - N_R) \quad (4)$$

で示される。逆流流量は無視できるとし、逆流流路本数 N_R を 0, 1, 2 と変化させることにより、並列多流路での逆流モードの遷移が発生する加熱量を大略予測することができる。その結果も、Fig. 11 に合わせて示している。1点鎖線(C1~C3)はこの方法で求めた逆流

モード遷移点、破線(S1~S3)は実験結果の最小二乗法近似であるが、両者の一致は比較的良好であるといえる。

Ⅳ. 沸騰対向二相流の解析

1. 解析モデルおよび基礎式

単一流路実験において、Type A ドライアウトが発生する低流量域での沸騰対向二相流について解析を行い、液位が形成される加熱限界を求めた。

Fig. 12 に解析モデルを示す。液相は加熱部上部より供給され、加熱部下部の飽和領域で発生した気泡は液相と対向して上昇し、加熱部上部のサブクール領域で凝縮するが、凝縮が完了する以前に気泡が加熱部上端に達するとき、気相は蓄積されて液位が形成され始めると考えられる。液位の形成は静圧損失の急激な減少を引き起こして差圧は増大し、それに従い流量の減少を伴うため、さらに沸騰は激しくなり蒸気発生量は増加して液位の下降を促進する。その結果、加熱部は気泡で満たされてドライアウトが発生する。以上が、Type A ドライアウトの発生機構モデルである。よって、その引き金となるのは液位の形成であり、液位が形成される限界の加熱量を求めることによって加熱限界を知ることができるであろう。

Fig. 12 Analytical model

Fig. 12 に示すように、流路の上端に Z 座標の原点をとり、かつ下向きを正とする1次元座標系を考える。さらに、 $Z=L_{IN}$ の位置においてヒータによる断面積の変化を考慮する。加熱開始点は $Z=L_{SP}$ の位置である。また、基礎式の導出にあたり以下の仮定を用いる。すなわち、①物性値の変化は無視する。②気相は

すべて上昇する。③飽和領域において液相温度は一定とする。④サブクール沸騰は考慮しない。⑤気相の過熱は無視する。⑥飽和領域で凝縮は発生しない。

以上の仮定のもとで、質量保存則は気相、液相に対してそれぞれ次式となる。

$$\frac{d}{dZ} (\alpha \rho_0 u_0) = M_{B0} - M_{CON} \quad (5)$$

$$\frac{d}{dZ} \{(1-\alpha) \rho_l u_l\} = -M_{B0} + M_{CON} \quad (6)$$

ここで、 M_{B0} : 単位時間、単位体積当りの液相蒸発量

M_{CON} : 単位時間、単位体積当りの凝縮量
次に、エネルギー保存則は気相、液相に対してそれぞれ次式となる。

$$\frac{d}{dZ} (\alpha \rho_0 h_0 u_0) = M_{B0} h_{B0} - M_{CON} h_{CON} + q_0 \quad (7)$$

$$\frac{d}{dZ} \{(1-\alpha) \rho_l h_l u_l\} = -M_{B0} h_{B0} + M_{CON} h_{CON} + q_l \quad (8)$$

ここで、見かけ速度 $j_0 = \alpha_0 u_0$, $j_l = (1-\alpha_0) u_l$ を用いて、仮定①より(5), (6)式は次のように変形される。

$$\frac{dj_0}{dZ} = \frac{1}{\rho_0} (M_{B0} - M_{CON}) \quad (9)$$

$$\frac{dj_l}{dZ} = \frac{1}{\rho_l} (-M_{B0} + M_{CON}) \quad (10)$$

またエネルギー式(7), (8)は次のように変形される。

$$\frac{d}{dZ} (\rho_0 j_0 h_0) = M_{B0} h_{B0} - M_{CON} h_{CON} + q_0 \quad (11)$$

$$\frac{d}{dZ} (\rho_l j_l h_l) = -M_{B0} h_{B0} + M_{CON} h_{CON} + q_l \quad (12)$$

以上の各式を次の境界条件のもとで解く。

$$u_l = u_{l, in}, \quad h_l = h_{l, in}, \quad j_0 = 0; \quad Z = 0 \quad (13)$$

$$j_0 = 0; \quad Z = L \quad (14)$$

ここで、(13)式の第3式は、上昇気泡が流路入口でちょうど凝縮してしまうときが液相形成限界であるとする条件である。また(14)式は、流路出口において沸騰により発生した気相がすべて上昇する条件に対応している。

2. 各領域における関係式

(1) サブクール領域

仮定④より、 $M_{B0} = 0$ である。またエネルギー保存式(12)は(10)式を用いて次のように変形される。

$$\frac{dh_l}{dZ} = \frac{M_{CON}}{\rho_l j_l} (h_{CON} - h_l) + q_l \quad (15)$$

さらに、仮定⑥より、気相温度は飽和温度で一定であ

るので、凝縮時に伝達されるエンタルピーは $h_{CON} = h_{g,s}$ となり、(11)式は不要となる。

一方、気相の凝縮量 M_{CON} は次式で示される。

$$M_{CON} = q_{CON} / h_{gi} \quad (16)$$

ここに、 q_{CON} は凝縮時の伝達熱量で、気液界面面積率 a_i を用いて

$$q_{CON} = h a_i (T_{g,s} - T_l) \quad (17)$$

と表わされる。凝縮時の熱伝達係数 h は、福田ら⁷⁾ の蒸気-水系の直接接触凝縮実験による次式を用いる。

$$Nu = 43.78 Re^{0.5} Ja \quad (18)$$

a_i は Ishii ら⁸⁾ による式を用いるが、この式はスラグ流からチャーントービュレント流に適用される式であり、

$$a_i = \frac{4.5(\alpha - \alpha_{gs})}{D(1 - \alpha_{gs})} + \frac{3\alpha_{gs}(1 - \alpha)}{r_{sm}(1 - \alpha_{gs})} \quad (19)$$

与えられる。

ボイド率を算出するためには、真の気相上昇速度 u_0 を知る必要があるが、本解析では次式で与えられるドリフトフラックスモデルを採用する。

$$u_0 = C_0(j_0 + j_l) + V_{d,j} \quad (20)$$

$V_{d,j}$ に対しては、本解析では次式で与えられる Nicklin の式(9)を用いる。

$$V_{d,j} = -0.35(gD)^{1/2} \quad (21)$$

また、一般的に上昇流において C_0 は 1.1~1.2 程度であるとされているが、R-113 を用いた Crawford ら⁹⁾ による下降二相流の実験によれば 1.0 以下になることが報告されている。ここでは $C_0 = 1.0$ とした。

(2) 飽和領域

仮定⑥より $M_{CON} = 0$ である。液相の蒸発量 M_{B0} は仮定③より次式で表わされる。

$$M_{B0} = q_l / h_{gi} \quad (22)$$

上式において、ヒータから液相への伝達熱量 q_l については、仮定⑤より $q_0 = 0$ となるため、ヒータからの熱量はすべて液相へ伝達され、飽和領域では(9)式を積分することにより次式を得る。

$$j_0(z) = \frac{q_l(L-Z)}{\rho_0 h_{gi}} \quad (23)$$

ここで、仮定②より気相は流れと逆方向に上昇するため、負の符号が付けられている。

圧力損失については、静圧項および液相と管壁との摩擦項のみを考慮し、加速項、界面摩擦等は無視して単純化しており、サブクール領域、飽和領域とも次式で示される。

$$\frac{dP}{dZ} = \{\alpha \rho_g + (1-\alpha) \rho_l\} g - \frac{2}{D} f \rho_l u_l^2 \quad (24)$$

$$f=0.046(Du_i/\nu_i)^{-0.2} \quad (25)$$

3. 計算方法

数値計算は、まず加熱量 q_i を仮定し入口 ($Z=0$) より、4 次の Runge-Kutta 法によりサブクール領域の基礎式 (9), (10), (15), (24) 式の積分を行い、液相エンタルピーが飽和エンタルピーに達する位置、すなわち沸騰開始点 Z_b を求め、かつその位置での気相の見かけ速度 j_g を求める。これが、飽和域に対する j_g の式である (23) 式より求めた沸騰開始点での j_g の一致するような加熱量 q_i を繰返し計算で求め、これが液位形成が生じるような加熱限界であるとした。

4. 解析結果および考察

Fig. 13~16 に、入口流量が 47, 50, 53 ml/s の 3 通りについて、液位形成限界での各変数の軸方向分布を示す。気相の見かけ速度 j_g (Fig. 13), 液相の見かけ速度 j_l (Fig. 14) については、軸方向に下向きを正としている。また、液相の速度は L_{in} において急激に増加するが、これは流路の断面積変化による影響である。Fig.

16において、液相エンタルピーが飽和エンタルピーに達する位置 (↓印) が沸騰開始点であるが、気相の見かけ速度の絶対値、液相の見かけ速度およびボイド率 (Fig. 15) は沸騰開始点において最大となる。よって入口流量が増加するに従って沸騰開始点での両速度も増加して行くが、対向流であるため、ある流量において、この位置でフラッディング限界に達すると考えられる。

そこで、それぞれの入口流量での沸騰開始点における両相の見かけ速度を用いて、Wallis⁽¹¹⁾ によるフラッディング経験式 (26) によって整理を行う。

$$(j_g^*)^{1/2} + m(j_l^*)^{1/2} = C \quad (26)$$

ここで、 $m=1$, $C=0.75$ とした。その結果を Fig. 17 に示す。入口液相流量の増加に伴い、沸騰開始点での両相の見かけ流速は Wallis のフラッディング限界に接近していく。入口液相流量が 50 ml/s の場合の沸騰開始点での両相の見かけ速度の計算結果をプロットすると、Fig. 17 の ● 点となり、(26) 式と良く一致する。

Fig. 13 Analytical result for superficial gas-phase velocity

Fig. 14 Analytical result for superficial liquid-phase velocity

(↓ shows the points of boiling initiations.)

Fig. 15 Analytical result for void fraction

Fig. 16 Analytical result for liquid-phase enthalpy

したがって、この入口流量以上では気泡の上昇は制限され、液位形成は発生しないと考えられる。

Fig. 17 Plot in j_g^* vs. j_i^* plane

Fig. 5には、このようにして求めた液位形成限界およびフラッシング点が表示されている。50 ml/s 以下の低流量域では加熱量を増加させると液位形成限界に達するが、これ以上の流量では液位が形成される以前にフラッシング限界(Fig. 5の破線)に達し、Type Bの現象が発生すると考えられる。

また Fig. 6には、やはり計算による液位形成時における差圧と流量との関係を実線で示しているが、低流量域では液位が形成される Type A ドライアウトが発生することを示している。また、実験において Type B ドライアウトが発生した 50 ml/s 付近の差圧は、計算で求めたフラッシング限界でのそれ(●点)に近い値を示している。また、Type B ドライアウト発生後は、ある包絡線(破線)上に沿って差圧特性が推移することがわかるが、この包絡線はフラッシング限界におよそ対応しており、各入口流量条件においてフラッシングが発生すると、その後はポンプ特性に応じてこのフラッシング曲線上を状態が推移していくと考えられる。図中横軸との切片(120 ml/s)は(26)式で予測される $j_g^* = 0$ に対応する値($Wl_{in} = 128$ ml/s)に近いことは興味深い。

V. 結 論

単一流路および並列流路における沸騰下降二相流の加熱限界に関する研究を行い、以下のような結論を得た。

- (1) 単一流路における沸騰下降二相流のドライアウト

ト様式は、フローパターンの相違により次の2種類がある。すなわち①低流量域で液位が形成されることによって生じる Type A ドライアウト、②高流量域でフラッシングによって生じる Type B ドライアウトである。

- (2) 単一流路における Type A ドライアウトに関して、液位が形成される限界を求めた解析結果は実験結果と比較的よく一致した。
- (3) 並列流路における沸騰下降二相流のドライアウト様式は次の2種類がある。すなわち、①低流量域で逆流が発生し、下降流と上昇流の流路が同時に存在する現象のあと、逆流流路において生じる Type C ドライアウト、②高流量域で逆流現象を伴わず、フラッシングにより生じる Type D ドライアウトである。
- (4) 並列流路においては、Type C から Type D にドライアウト様式が遷移する流量付近でドライアウト加熱量が極小値をとる。
- (5) 並列流路における低流量域での逆流による流動様式のモード遷移について、並列4流路での挙動は、並列2流路での逆流開始条件より計算した結果と比較的よく一致する。
- (6) ドライアウト様式が Type A から Type B へ遷移する要因は、フラッシングによって気泡上昇が制限されるためと考えられる。これは、計算によって求めたフラッシングによる限界流量が、実験によるドライアウト様式が遷移する流量にほぼ一致することから裏付けられる。

【記 号】

- a : 気液界面面積率(m^{-1}), C : 定数
- C_0 : 分布パラメータ, D : 直径(m)
- f : 摩擦係数,
- g : 重力の加速度(m/s^2)
- h : エンタルピー(J/kg),
凝縮熱伝達係数($W/m^2 \cdot ^\circ C$)
- h_{fg} : 蒸発潜熱(J/kg)
- j : 見かけの流速(m/s)
- j^* : Wallisのパラメータ
- Ja : ヤコブ数, L : 長さ(m)
- m : 定数, M : 生成率($kg/m^3 s$)
- N : 流路本数, Nu : ヌセルト数
- P : 圧力(Pa)
- q : 単位体積当りの伝熱量(W/m^3)
- Q : 加熱量(W)
- r_{sm} : 液スラグ中に含まれる気泡の Sauter 平均

半径(m)

Re: レイノルズ数, T : 温度(°C) u : 流速(m/s), V_{aj} : ドリフト速度(m/s) W : 流量(ml/s), Z : 座標(m) α : ボイド率 α_{sl} : 液スラグ中のボイド率 ν : 動粘性係数(m²/s), ρ : 密度(kg/m³)

(添字)

 B : 沸騰開始, BO : 沸騰 ch : 流路, CON : 凝縮 g : 気相 in : 流路拡大点, 入口, l : 液相 R : 逆流, S : 飽和 SP : 加熱開始点, t : 全

本研究を進める上で、中川 清氏(九州大学工学部)ならびに三宅祥介氏(バブコック日立機)には、多大なご協力を頂いた。また、本研究は文部省科学研究費補

助金一般研究B(No. 60460235)「下降流における二相流の熱水力学的不安定性に関する研究」による援助を受けた。ここに付記して感謝の意を表します。

—参考文献—

- (1) BALL, L.J., et al.: TREE-NUREG-1210, (1978).
- (2) IWAMURA, T., ADACHI, H., SOBAJIMA, M.: *J. Nucl. Sci. Technol.*, 23[2], 123~135, (1986).
- (3) 田坂完二, 小泉安郎: 原子力誌, 29[1], 18~30 (1987).
- (4) WALLIS, G.B., et al.: *Int. J. Multiphase Flow*, 7, 1~19 (1981).
- (5) MURASE, M., et al.: *J. Nucl. Sci. Technol.*, 23[6], 487~502 (1986).
- (6) FUKUDA, K., et al.: *ibid.*, 24[4], 266~275 (1987).
- (7) 福田真一: 原子力誌, 24[6], 466~474 (1982).
- (8) ISHII, M., MISHIMA, K.: *Nucl. Eng. Des.*, 82, 107~126 (1984).
- (9) 植田辰洋: “気液二相流”, p. 57 (1981), 養賢堂.
- (10) CRAWFORD, et al.: *Int. J. Multiphase Flow*, 12[2], 219~236 (1986).
- (11) WALLIS, G.B.: “One-dimensional Two Phase Flow”, (1969), McGraw Hill.

編・集・の・仕・事・を・了・え・て ①

前任者の残り任期を引き継いだため、5人の委員長の下で4年8ヵ月も編集委員を務めてきた。その間に印象に残ったこととしては、「会議録」や「紀要」等を学術的刊行物(公開)から除外して、オリジナル原稿として扱い本学会誌へ投稿の道を開くよう「投稿規定」を変更したこと、「30周年記念特集号」の編集、特集記事の定期化、そして悪い例では最近の「欧文誌」への投稿数の激減が挙げられる。

さて、本学会は狭いサークルの上に成立しており、投稿者と査読者が顔馴染みであることも多く、情に流されて筋を曲げたくなることもあったが、これは学会誌の存立の根本に関わる問題であるので、筋を通すように努めてきたつもりである。その意味からも、査読者の筆跡から査読者名が割れやすい現行のやり方は改善すべきであり、これを次期委員会への宿題としたい。

(原研・菊池 康之)

編集委員としての長くて短かった3年、その間、二重投稿の問題、投稿数と購読者の減少に頭を痛め、同時に魅力ある学会誌作りの模索から「30周年記念特集号」の出版など編集、出版に係わるほとんどすべての事柄を、首尾は別として、経験することができた。最後に気になること2つ。研究者の労作の発表の場である学会誌としては、印刷仕上にスマートさが欠け、他誌と比べても劣っていること。また、現在総発電量の約30%を原子力に依存している電力業界が本学会に無関心を装っているのか、投稿がないこと。

(原研・菱 沼 章道)

本学会創設30周年の記念すべき時期に編集委員を拝命し、論文審査のほか、「記念特集号」の企画、編集などを通して、他分野、他機関の方々と一緒に仕事をするという得難い経験をさせて頂きました。また、原稿執筆依頼に事寄

せて、各界の著名な先生方から直接、ご指導・ご教授頂く機会も多く、振り返ると、3年の任期を短く感じています。今後共、論文の寄稿を通して、本学会および学会誌、特に「欧文誌」の一層の発展に微力を尽くしたいと思います。

(日立・内田 俊介)

本学会の編集作業に参加させて頂き、貴重な経験を得たと同時に、またいくつかの感想を持った。これまでもいくつかの学会誌編集に参加し、また今回の本学会会誌編集に参加し、いろいろ感じたことは、長年同じ編集方針が続いているとそのうちにマンネリ化し読者に飽きられてしまうということである。マンネリ化を避けるために「特集」などが組まれるが、これも単に分野間でローテーションしていくだけでは読者を引きつけるまでにはなりにくい。時にはかなり個性的な編集も必要でなかろうか。

(東大・矢川 元基)

編集の仕事を了えて正直なところほっとしているところです。編集委員の仕事は、編集委員会において「会誌」を良くするために種々の提案をすること、論文査読を行うことに分けられると思います。前者は優秀な委員の方が今後いろいろと努力して下さることでしょうし、特に今申し上げることはありませんが、後者については査読に関する判断等が編集委員と査読委員の間でかなりまちまちなのではないかと思っています。非常に簡単な査読心得がありますが、あれだけでは編集委員会として統一ある方法で各委員が査読を行うには不十分です。委員が交替する毎年の第1回編集委員会においても、査読要領等の詳細な具体的説明がありません。編集委員会で時々報告される論文投稿者とのトラブルからも、もう少し査読に関する具体的指針を明確にされる必要があると思います。優れた投稿論文が増え、「原子力学会誌」がますます充実されることを切望します。

(MAPI・嶋田 昭一郎)