く形ループにおける沸騰を伴う自然循環流*

忽那泰章^{*1}, 森田駿樹^{*1}, 福田勝哉^{*1}

Natural Circulation Including Boiling in a Rectangular Loop

Hiroaki KUTSUNA, Toshiki MORITA and Katsuya FUKUDA

Natural circulation of water was investigated in a rectangular loop by tripping the circulating pump of the loop, which is 2.03 m in height and 0.81 m in width and is equipped with a heater and three coolers. The plane including the loop path is situated vertically, and the cooler arrangement was changed. In our experimental conditions, flow boiling and the transition of flow pattern occurred in the riser depending on the variation of mass flow rates, which was accompanied by the oscillations of water temperatures and pressure drop in the downcomer. Three modes of the transition were distinguished for the present cooler arrangements. Irrespective of these flow instabilities, the mean values of mass flow rates were maintained at the level of the single-phase natural circulation. The photographs of flow patterns such as bubble and slug flows were analyzed by the image processing system.

Key Words: Convective Heat Transfer, Mass Flow Rate, Two-Phase Flow, Flow Pattern, Image Processing System

1. 緒 言

原子炉の一次冷却系でポンプトリップなどの事故が生じた場合には、崩壊熱を除去するための自然循環が重要である⁽¹⁾。実際の原子炉ではループが複雑となっているため、単相流においても流れは不安定となり⁽²⁾、逆流も生じることが知られている⁽³⁾。また、単純化したループにおいても不安定が生じることが解析的にも実験的にも報告されている^{(4)~(6)}。しかしながら、前報⁽⁷⁾の単純なく形ループにおいては単相流領域での不安定な現象は認められなかった。そこで、加熱入力を増加させ、クーラでの放熱量を減らすことにより二相流領域にすると、不安定になり逆流も認められた⁽⁸⁾。本報では、クーラの配置を種々に変化させたときの自然循環流量の変化や差圧の変動を二相流領域で調べ、加熱器上部で写真撮影した流動状態を画像処理した結果を報告する。この分野の研究はこれまでボイラの自然循環として古くから数多く行われてきてはいるが⁽⁹⁾⁽¹⁰⁾、クーラの配置を変化させた研究は比較的少ないと思われる。

2. 実験装置および方法

図1は実験装置の略図である。ループは主に耐熱ガラスで構成され、放熱を防ぐためにループ全体をグラスウールとアルミホイルで保温した。クーラを作動させない場合には、冷却水のみを止める。細管中の圧力損失を測定するための差圧変換器 ΔP はひずみゲージ式で、シグナルコンディショナを通して出力を読取る。加熱器およびクーラ A は内径 40 mm のガラス管で構成され、下部に外径 12 mm 有効長さ 500 mm のヒータが、上部に同じ有効長さの蛇管式クーラ（外管内径 40 mm, 蛇管外径 9 mm, 蛇管巻径 30 mm, 蛇管ピッチ 20 mm）が挿入されている。クーラ B およびクーラ C も同じ形状の蛇管式である。クーラ C を出た水は内径 8 mm のガラス細管を下降し、下方水平部のポンプ側（強制循環時）またはバルブ V-3 側（自然循環時）を通して加熱器下部に戻る。循環流量は細管内にインキを注入することにより計測した最大流速をもとに、強制循環時は乱流のため 1/7 乗速度分布を、自然循環時は層流のため放物線速度分布を仮定して求めた。測定区間はシース熱電対 T 9 と T 10 の間の 600 mm とした。なお、ヘッドタンク下のニードルバルブ V-2 を半開の状態とし、系を大気開放とした。クーラ

* 平成元年6月2日 第26回日本伝熱シンポジウムにおいて講演。原稿受付 平成元年12月25日。

*¹ 正員、神戸商船大学商船学部（〒658 神戸市東灘区深江南町5-1-1）。

の組合せは単独で作動させるタイプ A, B, C および 2 個を作動させるタイプ AB, AC, BC の 6 種類に変化させた。

実験方法としては、まず、強制循環ポンプを作動させ、ヒータに 1000~1150 W を入力し、ループ各部の水温が定常状態に達したのち、ポンプを停止して自然循環に切替えた。循環流量は停止後 10~15 min は 1 min ごとに、その後は 10~30 min ごとに測定した。熱電対 T1, T3, T6 およびシグナルコンディショナの出力はペンレコーダに連続記録させた。また、図 1 に示すように下端から 700 mm の位置にカメラを設置して、各タイプに対する流動状態を写真撮影し、それらを画像処理システム (AVIO TVIP-4100) により解析した。

3. 実験結果および考察

自然循環に切替後、周期的な変動状態になったときの流路長さ L に対する水温 T の分布をタイプ別に図 2 および図 3 に示す。ここで、 T_{in} は加熱器入口の水温である。図 2, 3 中には入力 W および加熱器入口のサブクール度 ΔT_{sub} [K] を示している。これらは 5~10 min ごとに記録したデータの 5 点の平均値であり、各クーラによる影響が明確に現れていることがわかる。本実験条件では、加熱器を含む上昇管で沸騰が生じて

いるにもかかわらず、平均温度分布は、単相流の場合の結果⁽⁷⁾とあまり相違していない。図 4 は切換直後の循環質量流量 G の変化を示したものである。時間 $t=$

図 2 ループに沿っての水温度分布 (タイプ A, B, C)

図 3 ループに沿っての水温度分布 (タイプ AB, BC, AC)

図 1 実験装置の略図

図 4 ポンプ停止後の循環流量変化

0のときの循環流量は強制循環時のデータであり、ポンプ停止直後に G は零近くまで落ち、その後急に立ち上がるが、変動も生じることがわかる。強制循環時

図5 実験中の循環流量変化 (タイプ A, B, C)

図6 実験中の循環流量変化 (タイプ AB, BC, AC)

図7 水温および差圧の変動と1周期の流動状況 (タイプ A)

の値がタイプによって異なっているのは、入力の違い、および1~2hの定常待ちの間の水温上昇による循環ポンプ特性の変化、などによると思われる。タイプ AB, BC の場合は他のタイプに比べて変動は大きかった。これは切換直後の過渡的な値であるため、その原因は明らかではないが、サブクール度の影響による可能性もある。いずれのタイプも約10min後には、 G は 5×10^{-3} kg/sあたりに落ち着く傾向がみられる。この値は単相流の場合⁽⁷⁾とほぼ同じ大きさである。

図5, 6は実験中10~30minごとに質量流量 G を測定した結果であるが、平均的には上の値を維持してはいるものの、かなりの変動が認められる。これは後

図8 水温および差圧の変動と一周期の流動状況 (タイプ C)

図9 水温および差圧の変動と一周期の流動状況 (タイプ AC)

述のように、上昇管中の流動様式の遷移によっても明らかである。切換後ほぼ周期的な変動となったときのタイプ A, C および AC における水温 No.6 (熱電対 T6) および圧力損失の変動例を図 7, 8 および図 9 に示す。水温と圧力損失の変動周期はほぼ一致していることがわかる。またこれらには、水温 No.6 の変動の一周期に対して、矢印で示した時点での流動状態の写真が示されている。流れ方向は上向きである。いずれのタイプでも、平均流量は 5×10^{-3} kg/s をほぼ維持していた。これは、実験中各タイプとも入力を図 2 および図 3 中に示すように約 1 kW とほぼ一定に保ったためであろう。タイプ A の場合には、水温変動幅も差圧変動幅も小さく、周期も約 3 min と短い。図 7 の左から 2 番めがスラグ流の状態であり、この時点で差圧がほぼ最大となっている。流動様式は、表 1 のモード I に示すように変化した。ここで、単相流というのは、気泡が完全に消える場合と完全には消えず、微小気泡を多く含んではいるが単相流に近い場合を表す。表 1 には、変動の周期も示している。図 8 のタイプ C では、水温変動幅も差圧変動幅も大きくなり、後者はタイプ A の場合よりほぼ 1 けた上がり 3~6 kPa に達していることがわかる。この差圧変動はあらかじめ求めておいた細管内の圧力損失と流量の関係からみて、図 5 の流量変動にはほぼ対応していた。また、変動周期も約 20 min と長くなっている。同様に一周期の流動状態の写真を示す。スラグ流が一周期中に二度出現し、流動様式は表 1 のモード II のように複雑に変化した。タイプ B では、タイプ C ののはじめのスラグ流の後に単相流が入り、表 1 のモード III のようなより複雑な流動様式の遷移がみられた。このような流動様式の遷移はインキ注入法による目視観察ではとらえられない流量の急激な変化を示唆している。図 8 の左から 2 番めと 4 番めの写真がスラグ流であるが、はじめのスラグ流は弱く、差圧変動もほとんどみられない。最高水温付近で流量は少なくなり、図 8 中に示した時点で逆流現象がイン

キの動きによって認められた。このあたりで差圧の変動も大きくなっている。図 9 にはタイプ AC の例を示す。このタイプにおいても図 9 中に示した位置で逆流現象がみられた。水温変動はタイプ A に類似しているが、差圧変動はタイプ A より激しくなっている。また、タイプ BC でも逆流現象がみられた。このように、クーラ C を含むタイプ C, AC, BC では不安定な逆流現象が観察された。この原因は明らかではないが、クーラ C を含むタイプでは、クーラ B の上部に気泡が滞留し、それが圧縮性容量となって振動系を形成すること、およびクーラ C における凝縮の不安定現象や蒸発管中のガイセリング現象⁽¹⁰⁾などが複雑に絡み合っていることなどにより不安定な循環流動特性が生じるものと考えられる。表 1 には実験したすべてのタイプの流動様式の遷移を三つのモードに分類した結果をそれぞれの変動周期とともに示している。周期はタイプ C の 20 min を除けば、いずれも数 min のオーダーであった。このような周期の相違が何によっているかは現在のところ明らかではないが、タイプ C の逆流は他のタイプのものより激しかったので、逆流現象もその一因であると思われる。

画像処理システムによって写真の一部(タイプ C のみは約 4 cm の、他は約 3 cm の正方形画面)を二値化し、気泡の投影面積 A 、円相当径 D_e 、円柱体積 V_{cy} の 3 項目について二値計測した。ここで、 A は対象気泡の実面積、 D_e は対象気泡の面積と等しい円の直径、および V_{cy} は対象気泡を微小厚さの回転円板に分けて積分することにより求めた体積であり、それぞれ平均値である。図 10 はタイプ A, B, C の場合の円相当径 D_e を変動の周期 τ_0 で無次元化した時間 t/τ_0 に対して示したものである。 D_e の変化はタイプ B, C では比較

表 1 流動様式の遷移

MODE	TYPE	FLOW PATTERN	PERIOD min
I	A	Single-Phase → Bubble → Slug → Bubble	2.8
	AB		2.8
	AC	→ Single-Phase	2.2
II	C	Single-Phase → Bubble → Slug → Bubble	20.1
	BC	→ Slug → Bubble → Single-Phase	3.6
III	B	Single-Phase → Bubble → Slug → Single-Phase	6.8
		→ Slug → Bubble → Single-Phase

図 10 一周期の気泡の円相当径変化

図 11 気泡の円相当径の標準偏差

的大きいタイプ A では小さく、5~10 mm の気泡径となっている。なお、タイプ B の中間での低下は表 1 の流動様式の遷移で述べたように単相流が生じることによっている。

図 11 は気泡の円相当径 D_e のばらつきの標準偏差 σ_D を同様に無次元時間に対してプロットしたものである。タイプ A, B の傾向は図 10 とあまり変化していない。しかし、タイプ C では図 11 の両端近くのスラグ流の部分で D_e とは異なった傾向がみられる。

画像処理によって得られた円柱体積 V_{cv} を用いて、ボイド率 β [%] を次式により計算した。

$$\beta = 400(N \cdot V_{cv}) / (\pi D^3) \quad \dots\dots\dots (1)$$

ここで、 N : 気泡数、 D : 視野の一辺長さである。

図 12 はボイド率 β を無次元時間に対してプロットした結果である。タイプ C には二値化前の処理用画像も同時に示している。二つのスラグ流の間には図 8 の例よりも小径で多数の気泡を含む流動状態がみられる。タイプ A, B ではボイド率がタイプ C よりも低めに出ている。ボイド率 β の一周期の挙動は図 12 中の処理用画像や図 11 の標準偏差 σ_D の挙動にもよく対応している。気泡流、スラグ流などの流動様式の判定も不可欠ではあるが、本研究で用いた画像処理システムは自然循環時の二相流の特徴を把握するために有用であることが明らかとなった。

4. 結 言

原子炉の一次冷却系を単純化したく形ループにおけるクーラ配置が、沸騰が生じる場合の自然循環の流動特性に及ぼす影響を実験的に調べた結果、次のことが

図 12 ボイド率変化および流動状況
(B: 気泡流, S: スラグ流)

明らかとなった。

(1) 強制循環から自然循環に切換えた後の循環流量は変動するが、平均的には単相流の場合と同じ値を維持する。

(2) クーラ A を含むタイプでは水温変動や差圧変動は比較的緩やかであるが、クーラ C を含むタイプでは変動が激しく、逆流を伴った不安定な流動状態が生じる。

(3) クーラ配置のタイプにより流動状態は異なるが、本実験条件では流動様式の遷移を三つのモードに分類できた。

(4) ボイド率と気泡径の標準偏差の間には相関があり、画像処理システムが有用である。

文 献

- (1) 原子力安全委員会、日本学術会議、「米国スリー・マイル・アイランド原子力発電所事故の提起した諸問題」報告書、(1980)、160、大蔵省印刷局。
- (2) Zvirin, Y., ほか 4 名, *Trans. ASME, J. Heat Transf.*, **103**-4 (1981), 645.
- (3) 赤川・ほか 4 名, 機論, **52**-475, B (1986), 1277.
- (4) Creveling, H. F., ほか 3 名, *J. Fluid Mech.*, **67** (1975), 65.
- (5) Bau, H. H. and Torrance, K. E., *J. Fluid Mech.*, **106** (1981), 417.
- (6) Hart, J. E., *Int. J. Heat Mass Transf.*, **27**-1 (1984), 125.
- (7) 忽那・ほか 2 名, 機論, **54**-500, B (1988), 948.
- (8) Kutsuna, H., ほか 2 名, *Prep. 3rd Int. Heat Pipe Symp. -TSUKUBA*, (1988), 173.
- (9) 石谷・赤川, ボイラの水循環, (1953), 46, コロナ社。
- (10) 日本機械学会, 気液二相流技術ハンドブック, (1989), 171, コロナ社。