チムニを有する沸騰自然循環ループの不安定流動に関する研究*

(第3報, 比較的高圧下における不安定流動)

古谷正裕^{*1}, 稲田文夫^{*1}, 安尾 明^{*1}

Thermal-Hydraulic Instability of Boiling Natural Circulation Loop with a Chimney (3rd Report, Instability at High System Pressure)

Masahiro FURUYA, Fumio INADA and Akira YASUO

Experiments have been conducted to investigate thermal-hydraulic instabilities at system pressure ranging from 1 to 7.2 MPa in a boiling natural circulation loop with a chimney. Stability maps in reference to the system pressure, the channel inlet subcooling, and heat flux are presented. Two different types of instabilities were observed in the facility at relatively low and high system pressures. Both of the instability mechanisms were clarified by investigation of the transient flow pattern and the response of the driving force of the circulation to momentum energy.

Key Words: Natural Circulation, Boiling Two-Phase Flow, Thermal Hydraulic Instability, Density Wave Oscillations, High Pressure

1. 緒言

加熱部出口に長い非熱鉛直部(以降チムニと呼ぶ)がある沸騰自然循環ループでは、系圧力が低い場合に加熱部を液単相で通過し、チムニ内で重力による圧力降下により自己蒸発を助長する現象(以降フラッシングと呼ぶ)が生じることがある。このフラッシングにより流動脈動が誘起される場合がある。

Fukuda ら⁽¹⁾⁽²⁾は、新型転換炉(ATR)の炉内流動に関連して、加熱部出口に水平部を含む長い非加熱部をもつ自然循環ループの不安定現象を用いた実験と線形安定性解析により、加熱部出口クオリティが低い領域で生じる重力支配の不安定現象について詳しく検討している。また有富・Chiang ら⁽³⁾⁽⁴⁾は、自然循環ループの新たな流動不安定現象機構として、気泡の停留・流出により静水頭が変動して生じる『自然循環流量振動現象』を提唱した。

自然循環 BWR の起動時の流動安定性については、Masuhara ら⁽⁵⁾によるフロンを用いた実験と線形安定性解析、Lin ら⁽⁶⁾、Yokobori ら⁽⁷⁾の二流体モデルを適用した原子炉安全解析コード(TRAC)による時間領域解析などがある。これらの研究では、不安定現象の発生条件を評価しているが、機構に関する検討は行われていない。稼働中の自然循環 BWR であるオランダの Dodewaard 炉について、van der Hagen ら⁽⁸⁾は起動時の炉心出口クオリティが低い場合に微小振幅の不安定現象を観測している。また、出口クオリティが高い場合には、系圧力が高くなるほど不安定化する傾向を述べている。

著者らは自然循環 BWR を対象に、第一報⁽⁹⁾では基礎式をフラッシングに着目して無次元化することにより相似則を導出し、フラッシングが流動安定性に及ぼす影響を評価するために、液相の飽和エンタルピーの圧力依存性を考慮した線形安定性解析を行い、振動モード等の基本特性を明らかにした。第二報⁽¹⁰⁾では代表的自然循環 BWR の熱流動を模擬するために対象炉相

* 原稿受付 1996 年 12 月 20 日。

^{*1} 正員、(財)電力中央研究所 (〒201 狛江市岩) 北 2 11 1)。

当の高さを有し、上述の相似則を考慮した設備を用いて実験を行い、比較的低圧でチムニ内のフラッシングにより生じる不安定現象の発生条件やその機構について検討した。

系圧力が高い場合にはフラッシングの影響は小さいものの、自然循環ループでは循環駆動力が流動の影響を受けやすいために、大振幅の流動振動が生じる場合がある⁽¹¹⁾。しかしながら、高圧下における自然循環ループの流動安定性について、特に低圧下で生じる不安定現象との差異については余り知られていない。

本報では、前報と同じ実験設備を用いて系圧力1.0-7.2MPaまでの実験を行い、得られた流動不安定現象の流動様式や動特性などを調べ、フラッシングにより比較的低圧で生じる不安定現象と比較し、その特徴を明らかにする。

2. 実験設備

図1に実験設備の概略を示す。チャンネル部は、管内に電気加熱式ヒーターを挿入し、二重管構造としている。チャンネル部で加熱された流体は、チムニ入口で合流し、気水分離器へと流出する。蒸気成分は凝縮器で凝縮されて気水分離器に再流入する。液体成分は、ダウンカマを通過し冷却器と予熱器で温度を調節し、チャンネル入口へ再流入する。加熱長さは1.7mで、チャンネル数は二本である。チムニ長さは5.7mである。代表的自然循環BWRの熱流動を模擬できるように、基礎式の無次元化を行い支配的な無次元数を導出し、それらが一致するように本実験設備の諸元を定めた⁽¹²⁾。

図1中の記号R1～R8は差圧計測領域を、記号Tは、温度計測位置を示している。温度計測位置は、チャンネル入口、チャンネル出口(チムニ入口)、チムニ中央部、およびチムニ出口である。またチャンネル部に挿入しているヒータの表面に外径0.5mmのType-K熱電対を埋め込んである。流量はダウンカマに設置した流量計で計測した。系圧力 P_g は気水分離器に取り付けた圧力計の支持値を参照した。

作動流体にはイオン交換水を用い、各実験前に少なくとも三時間に亘り脱気運転を行った。実験では自然循環状態でチャンネル熱流束および系圧力が一定になるように調整し、徐々に温度を上昇させて2～3°Kおきにデータを採取した。時間平均量およびr.m.s.値は、 n 周期($n \geq 4$)に亘る統計操作を行った。また、いくつかのケースについては繰り返し実験を行い、再現性を確認している。

Fig. 1 Schematic Diagram of the Test Facility

3. 実験結果と考察

3.1 不安定波形と安定判別 図2に、生じた流動不安定現象の波形の一例を示す。この図は系圧力 P_g を2MPa、チャンネル熱流束 q'' を228kW/m²、無次元チャンネル入口サブクール度 N_{sub} を5.46に保ったときに現れる不安定現象である。 N_{sub} は、気水分離器ドーム圧力(P_g)に基づくチャンネル入り口サブクール度 ΔT_{sub} を無次元化したパラメータで、次式で表される。

$$N_{sub} = \frac{C_{pl} \Delta T_{sub}}{H_{gl}} \left(\frac{\rho_l}{\rho_{ga}} - 1 \right) \quad (1)$$

ここで ρ_l は液相密度、 ρ_{ga} は気相密度、 H_{gl} は蒸発潜熱、並びに C_{pl} は液相の定圧比熱であり、これらの物性値は全て気水分離器ドーム圧力に対する値を参照している。それぞれの図は上から順に、各位置における温度、チャンネル入口流速、並びに各領域でのボイド率の時間変化を表している。図にはチムニの中央付近と出口の温度変化を示したが、チムニは断熱状態であるため両者の値は一致している。ボイド率は各領域(図1参照)の差圧と気液密度を用いて、差圧計導管内の低温水の影響および二相増倍係数を乗じた管摩擦損失およびチムニ出口オリフィスの圧力損失を考慮して計算

Fig. 2 An Example of the Instability Waves

した。前報⁽¹⁰⁾で述べたように比較的低い系圧力(0.1～0.5MPa)ではフラッシングに起因する不安定現象であるために、周期的ではあるが間欠的な流動脈動も見られた。本報告で対象とする系圧力が1～7.2MPaの場合では生じた不安定現象の波形は全て同図に示したように正弦状であった。フラッシングに起因する不安定現象の場合には、チムニ出入口の温度が逆位相であったが、図に示すように高圧の場合には温度変動はむしろ小さく、ボイド率がチムニの出入口で逆位相となることが特徴である。

3.2 各パラメータが安定性に与える影響 図3に系圧力 $P_s=2\text{MPa}$ に対する安定判別図を示す。同図は安定判別を行い、熱流束 q'' に対して無次元チャンネル入口サブクール度 N_{sub} をプロットしている。比較的低圧($P_s=0.1\sim0.5\text{MPa}$)の実験⁽¹⁰⁾では、フラッシングにより生じる比較的大振幅の流量振動であったので、安定境界は明瞭であった。本報告が対象とする高圧($P_s=1\sim7.2\text{MPa}$)では、実験パラメータの変化に対して流量振動の振幅が徐々に大きく、または小さくなっている。そこで入口流速のr.m.s.値が平均値の10%未満の場合を安定と判断し、図中に記号‘●’で、10%以上となった場合に不安定と判断し、記号‘○’で示した。

図より、高サブクール度側および低サブクール度側

Fig. 3 Stability Map at 2MPa

Fig. 4 Stability Map Ranging 1～7.2MPa

には安定領域が存在している。また同図よりある熱流束を越えると不安定が生じ、熱流束の増大とともに高サブクール度側に不安定領域は拡大している。同様に $P_s=1, 4, 7.2\text{MPa}$ についても安定判別を行いその境界を包絡線で表した。これら系圧力毎の四つの図を一つにまとめて、図4に示す。比較のために前報⁽¹⁰⁾で報告した低圧($P_s=0.1, 0.2, 0.35, 0.5\text{MPa}$)における安定判別図をまとめて、図5に示す。両図とも不安定領域の形は似ており、熱流束が大きくなるに従い不安定領域は単調に広がっている。また系圧力の増大に対し、低サブクール度側の安定境界はやや減少し、高サブクール度側の安定境界は著しく小さくなっている。従って系圧力が高くなると不安定が生じるチャンネル入口サブクール度の範囲が狭くなることが分かる。

Fig. 5 Stability Map Ranging 0.1~0.5MPa

3.3 チャンネル間の連成 本実験ではチャンネル間の連成の影響を調べるために、加熱チャンネルを並列に二体有している。図4に示した本実験範囲では、不安定が生じている場合でも瞬時局所における両チャンネルの温度(チャンネル入口およびチムニ入口)およびボイド率(R3,4およびR5,6)は同じであり、チャンネル間の連成は生じなかった。著者らによる解析研究⁽¹³⁾でも、チャンネルに対してチムニ長さが相対的に短くなるとチャンネル間で逆位相モードの不安定現象が生じやすいことを示した。これはチャンネル部の沸騰開始点の変動と比較して、チムニ部のボイド率変動の方が循環駆動力を大きく変動させ支配的な不安定要因となっているために、チャンネル間の連成が生じなかったものと考えられる。

3.4 考慮すべき流動不安定現象の種類と特徴 従来得られている知見⁽¹⁴⁾⁻⁽¹⁶⁾より、本実験体系で考慮すべき流動不安定現象について、密度波振動、流動様式遷移不安定、並びに有富ら⁽³⁾が提唱した自然循環流量振動を次節以降で検討する。

また以下の理由により、ガイセリング、圧力降下振動、音波振動は除外した。本実験条件では非沸騰状態においてもある程度の自然循環流量が得られるので激しい突沸を生じさせるほどの過熱液相が形成されず、また下流側で大きい気泡を凝縮させるほどのサブクール水が存在しない。よって、過熱液相が突沸し大きな気泡を生じて下流で凝縮するガイセリングは生じていない。圧縮空間が存在する場合には圧力降下振動を考慮する必要があるが、気水分離器内の圧力のr.m.s.値は平均値の1%以下であり、支配要因とは考えられない。

Fig. 6 Relationship between the Flow Oscillation Period and the Bubble Passing Time

また本現象の振動周期が10~18sであり圧力波の通過時間より数桁大きいために圧力波の共鳴現象である音波振動は除外する。

3.5 振動周期と通過時間 密度波振動は、流量とボイド率、および循環駆動力の変動がある時間遅れてフィードバックすることによる周期的振動現象で、その周期は流体の通過時間の1~2倍となることが報告されている⁽¹⁶⁾。

図6に気泡のチムニ部通過時間に対する振動周期を示す。気泡がチムニ部を通過するのに要する時間 $\tau_{pr,g}$ は、チムニ部体積 V_r をチムニにおける時間平均気相体積流量 $\langle Q_{g,r} \rangle$ で除した値である。気相体積流量はドリフトフラックスモデルに基づき導出した。実験で生じた不安定現象の振動周期は、気泡のチムニ部通過時間の1.1~1.8倍で、密度波振動の特徴を有している。また図2で示したように、不安定が生じているときのチムニの出入口のボイド率は逆位相になる。

以上の二点により本実験で生じた不安定現象はチャンネルで生成した気泡がチムニ部に移動して循環駆動力となるまでの時間遅れに起因する密度波振動であると考えられる。

既報では比較的低圧で生じる不安定現象について調べ、フラッシングに起因する密度波振動であると結論した。その根拠の一つは、図7に示すように、振動周期がチムニ部単相通過時間で整理できることである。ここでチムニ部単相通過時間 $\tau_{pr,sp}$ は、チムニ部体積 V_r をチャンネル入口における時間平均液相体積流量 $\langle Q_{sp,in} \rangle$ で除した値である。同図には比較のために高圧

Fig. 7 Relationship between the Flow Oscillation Period and the Single Phase Passing Time

のデータも示している。両図より、比較的低圧の場合には振動周期は13~250sであり、液単相の通過時間で整理できることに対して、高圧の振動周期は気泡の通過時間で整理できるので、振動周期は10~18sと短い。また系圧力が低くフラッシングの効果が大きい場合は、チムニ部出入口温度が逆位相であることより、チャンネル部を液単相で通過し、チムニ部でフラッシングすることにより循環駆動力を生じるまでの時間遅れに起因する密度波振動であると考えられる。

3.6 流動様式の遷移 垂直上昇流の典型的な流動様式は、気泡流(Bubbly Flow)、スラグ流(Slug Flow)、チャン流(Churn Flow)、環状流(Annular Flow)、および噴霧流(Dispersed Flow)に分類される。一般に気泡流やスラグ流ではボイド率が増加すると摩擦損失が増加する。ところがボイド率が増加し気泡流が環状流に成長すると、気液は完全に分離されて流れるために、摩擦損失が減少する。すなわちボイド率-圧力損失曲線に負性勾配がある。流量が摩擦損失によって大きく変動する強制循環系、もしくは気泡が循環駆動力となる自然循環系がこの領域で運転されると流動様式の周期的遷移に応じて流動変動を生じさせる可能性がある。これが流動様式遷移不安定の発生機構であると言われている。

流動様式を判別するために、Mishima-Ishiiの線図⁽¹⁷⁾を用いた。図2に示した不安定現象波形例と同じ流動条件 ($P_s=2\text{MPa}$, $q''=228\text{W/m}^2$, $N_{sub}=5.46$) に対する流動様式の遷移を図8に示す。座標軸である気相および液相の体積流束 (volumetric flux)、それぞれ J_g, J_l はドリ

Fig. 8 Trajectory of the Transient Flow Regime

フトフラックスモデルにより次式で与えられる。

$$J_g = \frac{(1 - \alpha C_0) G - \alpha \rho_g v_{gj}}{(1 - \alpha C_0) \rho_l + \alpha C_0 \rho_g} \quad (2)$$

$$J_l = \frac{\alpha C_0 G + \alpha \rho_l v_{gj}}{(1 - \alpha C_0) \rho_l + \alpha C_0 \rho_g} \quad (3)$$

ボイド率 α の計算は3.1節で述べた通りである。ドリフト速度 v_{gj} および分布乗数 C_0 の計算にあたってはIshiiの式⁽¹⁸⁾を用いた。図には約三周期分のデータを表示しており、それぞれ領域により異なった曲線上を三周している。この条件では流動様式が気泡流領域であることが分かる。実験を行った全てのデータに対して流動様式を調べた結果、計測やデータ整理上の誤差はあるものの、不安定現象が生じている場合の流動様式は液単相流、気泡流、またはスラグ流を遷移している。すなわち、環状流など摩擦損失が著しく変化するような流動様式には遷移しておらず、流動様式遷移不安定が不安定現象の支配要因になるとは考えられない。

3.7 循環駆動力と循環エネルギーの追従性 生じた不安定現象の動特性を調べるために、循環駆動力に対する循環エネルギーの変化を調べた。これを図9に示す。本実験体系では、チムニ内に生じた気泡による見かけの密度減少が循環駆動力となり、それは $(\rho_l - \rho_g)g\alpha_r V_r / A_r$ で表される。添字の r はチムニにおける値を示す。循環エネルギーはチャンネル入口での運動エネルギー $\rho_l u_{in}^2 / 2$ で代表させた。

図9 (a)には静特性として時間平均量をプロットした。状態が安定か不安定であるかによらず平均循環エ

Fig. 9 Response of Momentum Energy to Driving Force of the Circulation

ネルギーは平均循環駆動力に比例する。すなわち本設備の自然循環流動特性は一つの直線で表される。

図9 (b) には、動特性すなわち3.1節で波形例を示した流動条件 ($N_{sub}=5.46$) に対する瞬時値の軌跡を示す。瞬時値の軌跡は平均値 (図9(a)) での静特性直線上を往來する。これは循環駆動力の変動、換言すれば気泡量の増減に対して循環エネルギーの追従が速いことによるものである。そして循環流量とチムニ内の局所の水溫により沸騰開始点およびボイド率が定まり循環駆動力にフィードバックされる。

自然循環流量振動は、蒸気泡が停留することにより、循環流量と循環駆動力とが準静的に逆位相で変化する周期的振動現象である⁽³⁾。そのような位相遅れが生じるときには、瞬時値の軌跡 (図9(b)) は楕円形などを描きヒステリシスを示す。しかしながら本実験体系には気泡が停留するような曲管や水平管、水平部がないために、ヒステリシスはかなり小さかった。すなわち本実験で生じた不安定現象は、自然循環流量振動ではなく、チャンネルで生じた気泡がチムニに移動して循環駆動力となるまでの時間遅れに起因する密度波振動であると考えられる。

4. 結論

チムニを有する沸騰自然循環ループを対象に、系圧力 (1~7.2MPa)、チャンネル入口サブクール度、および熱流束を変化させて流動安定性を調べる実験を行い、以下の結論を得た。

- (1) 不安定現象はあるチャンネル入口サブクール度範囲で発生し、熱流束の増大と共にその範囲は拡大する。また熱流束がある値より小さい場合には不安定現象は生じない。系圧力の増加と共にその熱流束値は増大する。
- (2) 生じた不安定現象は、チャンネルで生成した気泡がチムニ部に移動して循環駆動力となるまでの時間遅れに起因する密度波振動であると考えられ、前報で論じた比較的低圧の場合にチムニ内でのフラッシングにより生じる不安定現象とは異なる特性を有する。
- (3) 流動様式や循環駆動力に対する循環エネルギーの追従性などの動特性を調べることにより、流動様式遷移不安定や自然循環流量振動等の他の不安定現象との差異を明らかにした。

文 献

- [1] Fukuda, K. and Kobori, T., *Proc. 6th Int. Heat Trans. Conf.*, FB-17 (1978).
- [2] Fukuda, K. and Kobori, T., *J. Nucl. Sci. Tech.*, **16**, 2 (1979), 95.
- [3] 有富他, 機論, **59**-565, B(1993), 21.
- [4] 有富他, 機講論, **B**, 920-17 (1992), 482.
- [5] Masuhara, Y., et al., *Proc. 2nd JSME/ASME Joint Int. Conf. Nucl. Eng.*, **1** (1993), 135-141.
- [6] Lin, J. H., et al., *Proc. 2nd JSME/ASME Joint Int.*

- Conf. Nucl. Eng.*, **1** (1993), 281-285.
- [7] Yokobori, S., *et al.*, *Proc. 5th Int. Topic. Mtg. Reactor Thermal-Hydraulics* (1992), 21.
- [8] van der Hagen, T. H. J. J. and Stekelenburg, A. J. C., *Proc. 7th Int. Mtg. Nucl. Reactor Thermal-Hydraulics, NUREG/CP-0142*, **4** (1995), 2785-2795.
- [9] 稲田, 古谷, 安尾, 機論, **61**-591, B(1995), 269.
- [10] 古谷, 稲田, 安尾, 機論, **61**-591, B(1995), 276.
- [11] Mathisen, R. P., *Symp. on Two-phase Dynamics*, Eindhoven, EUR4288e (1967).
- [12] Inada, F., Furuya, M., *et al.*, *Proc. 3rd JSME/ASME Joint Int. Conf. Nucl. Eng.*, **1** (1995), 173.
- [13] 稲田, 古谷, 大川, 電中研報告, T93061 (1994).
- [14] 日本機械学会編 (編) 「気液二相流技術ハンドブック」, コロナ社 (1991), 171-205.
- [15] 福田, 機械の研究, **43**, 5 (1991), 554.
- [16] Bouré, J. A., *et al.*, *Nucl. Eng. Des.*, **25** (1973), 165-192.
- [17] Mishima, K. and Ishii, M., *Int. J. Heat Mass Transfer*, **27**, 5 (1984), 723-737.
- [18] Ishii, M., ANL77-47 (1977).
-