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2報, フラッシングにより生じる不安定流動の 実験による現象把握)

古谷正裕^{*1}, 稲田文夫^{*1}, 安尾 明^{*1}

A Study on Thermo-Hydraulic Instability of Boiling Natural Circulation Loop with a Chimney (2nd Report, Experimental Approach to Clarify the Flow Instability in Detail)

Masahiro FURUYA, Fumio INADA and Akira YASUO

Experiments are conducted to investigate two-phase flow instabilities in a boiling natural circulation loop with a chimney induced by flashing in the chimney at lower pressure. The type of instability that occurred in the experiments is suggested to be density wave oscillations induced by flashing in the chimney. The differences from other instabilities such as geysering, flow pattern transition instability, and natural circulation oscillations are discussed on the basis of the dynamic characteristics, the oscillation period, and the transient flow resume.

Key Words: Natural Circulation, Boiling Two-Phase Flow, Thermo-Hydraulic Instability, Flashing, Density Wave Oscillations

1. 緒 言

加熱部出口に長い非加熱鉛直部(チムニ)がある沸騰自然循環ループでは、低圧かつ低熱出力条件では流体が加熱部を液単相で通過し、チムニ内で重力による圧力の降下により自己蒸発する現象(以降フラッシングと呼ぶ)が生じうる。このフラッシングにより流れが不安定となり、流量脈動が生じる可能性がある^{(1)~(4)}。

Fukuda ら⁽⁵⁾⁽⁶⁾ は、新形転換炉(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実験と線形解析により検討し、加熱部出口クオリティが比較的低い領域では重力支配の不安定が生じうることを示した。一方、有富ら^{(7)~(9)} および Chiang, 有富ら⁽¹⁰⁾⁽¹¹⁾ は、自然循環形 BWR の起動時低圧条件の流動安定性に関連して、新たな不安定発生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不安定現象を提案するとともに、この自然循環流量不安定とガイセリングの基本特性について調べている。本論文で扱う不安定現象は、重力支配という観点では Fukuda らが指摘したものに近いと考える。しかし Fukuda らの研究

を含む上記の研究では、非加熱部内の圧力降下に起因するフラッシングの効果には着目していない。

自然循環形 BWR の起動時流動安定性については、ドリフトフラックスモデルによる線形解析とフレオンによる実験⁽¹²⁾、二流体モデルを使用した原子炉安全解析コード(TRAC)による時間領域解析⁽¹³⁾⁽¹⁴⁾、オランダの小形の自然循環形 BWR である Dodewaard 発電所における運転経験⁽¹⁵⁾ などがある。これらの研究では不安定発生の有無の評価は行っているが、現象の機構に関する検討はほとんど行っていない。

著者らは第1報⁽⁴⁾で、加熱チャンネルが二チャンネルの場合について、均質流熱平衡モデルによる線形安定性解析と安定判別実験を行い、チムニ内の圧力降下によりチムニ内で沸騰開始する場合に、両チャンネルの流量が同位相のモードの不安定が発生しうること、チャンネル内で沸騰開始する場合に逆位相のモードの不安定が発生しやすいことなどの基本特性を解析的に明らかにした。

本論文では、フラッシングにより生じる不安定現象について、フラッシングが顕著となる高さの高い体系による実験により、流路各部の水温、ボイド率、振動の周期、流動様式、自然循環駆動力の特性を求め、不安定の発生機構と発生条件を検討した。

* 原稿受付 1995年1月13日。

^{*1} 正員, (財)電力中央研究所 (〒201 柏江市岩戸北2-11-1)。

2. 実験方法

図1に実験設備の概略を示す。実験設備はチャンネル部、チムニ部、気水分離器、ダウンコマ部、冷却器、予熱器からなる。チャンネル部は、管内に電気加熱式ヒータを挿入し、二重管構造としている。加熱部長さは1.7 mで、チャンネル数は2本である。チムニ長さは5.7 mである。

本実験設備の諸元は、代表的自然循環 BWR を模擬するために無次元パラメータが一致するように決定している。基礎式の無次元化および無次元パラメータの比較は文献(16)に記した。

図2に差圧計測領域および温度計測位置を示す。図2中の記号 R1~R8は差圧計による差圧計測領域を示す。本実験条件では、凝縮器は使用せず、系圧力が0.1 MPaの場合は、気水分離器上部の開放弁を開けて大気解放にし、それ以外の場合は、窒素ガスを気水分離器内に注入して所定の系圧力まで加圧した。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ある一定値に調整し、徐々に温度を上昇させ、チャンネル入口温度が1~2°K おきにデータを採取した。

3. 実験結果

3.1 代表的な流動不安定例 図3(a)~(d)に、典型的な波形を示す。図3は系圧力 $P_s=0.2$ MPa、熱

Fig. 1 Schematic diagram of the test facility

Fig. 2 Region of the measurements

流束 $q''=53$ kW/m² の場合で次式で定義した⁽¹⁶⁾ 無次元チャンネル入口サブクール度 N_{sub} を変化させた場合である。

$$N_{sub} = \frac{C_{Pl} \Delta T_{sub, in, a}}{h_{gl}} \left(\frac{\rho_l}{\rho_g} - 1 \right) \dots \dots \dots (1)$$

サブクール度 $\Delta T_{sub, in, a}$ は、系圧力(本研究で気水分離器ドーム圧力)に対応した飽和温度に基づいている。図3中のボイド率は差圧計の指示値より計算した。図3中の各線が示す物理量と、不安定な場合 [図3(b), (c)] の平均値と rms 値を表1にまとめた。

チムニ内で生じない場合 [図3(a)] は、各領域の差圧および温度は一定に維持される。ところが N_{sub} がある値より小さくなると、周期的ではあるが間欠的に脈動するようになる [図3(b)]。一定の温度でチャンネル入口に流入した流体は、流速の脈動の影響を受けて各位置の温度も周期的に振動している。ここで図3(b)は、他の図より時間軸が3倍長くなっている。さらに N_{sub} を小さくすると間欠的な脈動の周期は短くなり、波形は正弦波に近づく [図3(c)]。いずれの不安定な場合も、ボイド率はチムニ上部(R8)よりチムニ中央部(R7)のほうが位相がわずかに早く、チムニ中央部付近でフラッシングにより生じた気泡が、成長しながら循環流により下流に移行していることがわかる。またチャンネル入口温度の上昇に伴い、変動の振幅が小さくなる。 N_{sub} が零付近になると流量、差圧、および温度は定常になり、安定した循環流量が確保できるようになる [図3(d)]。

以上 N_{sub} の減少に伴い説明したが、負の N_{sub} から徐々に増加させた場合も同じ N_{sub} では同じ現象が生じ、またその安定と不安定との境界は一致した。

3.2 各パラメータが安定性に与える影響 図4に、系圧力0.2 MPaの場合に、チャンネル熱出力と無次元チャンネル入口サブクール度に対して安定判別を行い、プロットしている。図4中の記号“.”は安定な場合を示す。記号“◇”は図3(b)に示すように周期的ではあるが間欠的な流動脈動を、記号“○”は図3(c)に示すような正弦的な流動脈動を表す。

図4より、高サブクール度側および低サブクール度側に安定領域がある。間欠的な流動脈動は比較的高サブクール度の場合に、正弦的流動脈動は比較的低サブクール度の場合に発生した。しかし、チャンネル入口サブクール度に対して不安定の波形は連続的に変化する。これら二つの不安定は明確に判別できない。各領域でのボイド率の時間変化より唯一の違いは、間欠的な流動脈動の場合は表面蒸発が中心で、周期的な流動脈動の場合はそれより上流側での自己蒸発が支配的に

Fig. 3 Representative waves in various with nondimensional inlet temperature (N_{sub}) where $P_s=0.2$ MPa and $q''=53$ kW/m²

Table 1 Legend explanation of the fig. 3 and average and rms value

Legend	Property, Unit	(b)		(c)	
		Ave.	rms	Ave.	rms
—	Diff. Pressure, kPa				
—	R1,2	-0.61	1.65	-5.93	0.887
---	R3,4	0.75	0.31	0.15	0.140
----	R5,6	0.66	0.28	0.37	0.025
-----	R7	2.42	1.53	5.85	1.070
-----	R8	3.71	1.51	8.76	0.442
—	Temperature, °C				
---	Channel Inlet	105.8	0.5	120.8	0.1
----	Channel Exit	124.8	10.2	126.1	0.6
-----	Chimney Middle	121.6	3.6	123.4	0.1
-----	Chimney Exit	114.2	6.3	122.2	0.2
-----	Heater Surface	133.7	7.0	132.5	0.7
—	Void Fraction, -				
---	R3,4	0.002	0.007	0.000	0.000
----	R5,6	0.019	0.026	0.000	0.000
-----	R7	0.020	0.049	0.132	0.035
-----	R8	0.048	0.120	0.452	0.038
—	Inlet Velocity, m/s	0.236	0.190	0.767	0.057
—	System Pressure, kPa	201.9	1.92	203.3	0.21

Fig. 4 Comparison of the stability boundaries between experiments and present correlation

なっていると思われる。間欠的な流動脈動は非線形性が強く、その波形を時間領域で数値解析する予定である。

図5に系圧力0.1, 0.2, 0.35, 0.5 MPaの場合の安定判別図を一つにまとめて示す。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

狭くなることがわかる。実際に系圧力が1 MPaの場合には0.5 MPaの場合と同じ条件(チャンネル入口サブクール度と熱流束)では、不安定は生じなかった。

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が、本実験範囲では連成は生じなかった。本実験での不安定現象は、フラッシングに

Fig. 5 Effect of system pressure on the stability boundaries

よるチムニ部での差圧変動が支配的で、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および圧力は同じである。

4. 不安定現象の考察

4・1 流動不安定現象の比較 従来得られている知見^{(17)~(19)}より、流動様式遷移不安定、ガイセリング、有富らが発生の可能性を指摘した自然循環流量振動、ならびに密度波振動について考慮した。

ここで音波振動は圧力波の共鳴による発生する高周波振動であるが、生じた振動周期は13~250 s程度であり、本実験で生じた不安定現象とは異なると考えられる。圧縮空間が存在する場合は圧力降下振動も考慮する必要があるが、実験設備の気水分離器はチャンネルおよびチムニと比較して体積が大きいいため、表1に系圧力のrms値を示したように気水分離器内の圧力(系圧力)の変動は小さく、これも本実験で生じた不安定現象とは異なると思われる。

4・2 振動周期による不安定発生機構の検討 密度波振動は、流量、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不安定現象で、振動周期は通過時間の1.5~2倍となることが報告^{(17)~(19)}されている。

図6に振動周期 τ_{fo} とチムニ部通過時間 τ_{pr} との関係を示す。ここでチムニ部通過時間は、チムニ部体積を液単相時間平均体積流量で除した値である。図6より本実験範囲で生じたすべて(199点)の不安定について、振動周期は系圧力、チャンネル熱流束、およびチャンネル入口サブクール度によらず同一直線で整理でき、チムニ部通過時間の1.5~2倍になっていることがわかる。また図3で示したように、不安定が生じ

Fig. 6 Relation between the flow oscillation period and the time required to pass through the chimney region

ているときにチムニの出入口の温度は逆位相になる。これらは密度波振動の特徴である。ここで間欠的な振動と正弦状の振動が両方生じたが、振動周期が両方の現象間で連続的に変化するため、同じ現象に分類してよいと考える。

ガイセリングは沸騰遅れ、凝縮、ならびに液体の再流入過程に分類できる⁽²⁰⁾。多くのガイセリング現象の場合、沸騰遅れ時間は、凝縮および再流入過程に要する時間より長く、流量脈動周期は沸騰遅れ時間と同程度⁽⁹⁾とされている。ここで沸騰遅れ時間 τ_{bd} は、チャンネル内に流入したサブクール度 $\Delta T_{sub, in, l}$ の水が飽和温度に達するのに要する時間で、次式で表される。

$$\tau_{bd} = \frac{\rho_l C_{Pl} \Delta T_{sub, in, l} A_c l_c}{q''} \quad \dots\dots\dots (2)$$

図7に、沸騰遅れ時間 τ_{bd} に対する不安定時の流量脈動周期 τ_{fo} を示す。サブクール度 $\Delta T_{sub, in, l}$ は、チャンネル入口までの水頭を考慮した飽和温度に基づいている。水の密度 ρ_l と定積比熱 C_{Pl} はチャンネル入口温度での物性値で評価した。 A_c および l_c は加熱部の流路断面面積および長さである。

図7に示されるように、流動脈動周期は沸騰遅れ時間よりも1けた程度長い。また系圧力の上昇に伴い、沸騰遅れ時間が長いほど振動周期が長くなる。本実験条件ではチムニでのフラッシングが顕著であり、図3(b), (c)からわかるように液相の流速も遅くなく、激しい突沸を生じさせるほどの過熱液相および下流側で大きい気泡を凝縮させるために必要な量のサブクール水が存在しない。よって本実験範囲では、過熱液相が突沸し大きな気泡を生じて下流で凝縮する、ガイセリングに類似した不安定現象は生じていない。

Fig. 7 Relation between the flow oscillation period and the boiling delay time

4.3 流動様式 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こう配がある。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流動様式遷移不安定が発生する可能性があると考えられている^{(17)~(19)}。

流動様式を判別するために、Mishima-Ishiiの線図⁽²¹⁾を用いた。図8に系圧力0.2 MPa、チャンネル熱流束53 kW/m²の場合のR8(チムニ上部)における流動様式の遷移図を示す。スリップ比は圧力とボイド率を考慮した修正 Bankoff の式を用いて計算した。図8中の記号(b)~(d)は図3(b)~(d)の条件にそれぞれ対応している。低温側の安定状態はボイド率が小さいので図示できない。

間欠的な流動脈動状態では、時間とともに液单相流から気泡流を経てスラグ流の領域に達し、また気泡流を経て液单相流に戻っている。周期的な振動状態になると液单相流の領域がなくなり、約3周期分の曲線はだ円形になる。さらにサブクール度が小さくなり安定になると、曲線の右側(高液相局所体積流束側)の点を中心としてだ円形の面積を小さくする。この右側の点は(b)不安定の発生から(d)安定までほとんど移動していない。

すべての実験データを調べた結果、流動様式は気泡流もしくはスラグ流で、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ではないと考え

Fig. 8 Transient flow pattern in R8

られる。

4.4 自然循環駆動力と流量 有富ら⁽⁹⁾は自然循環状態で生じた不安定の一つの現象を自然循環流量振動と名付け、その発生機構を次のように説明している。

- (1) 蒸気発生量が不十分な場合は非加熱部配管内に大きな蒸気泡が停留する。
- (2) 流入する蒸気を吸収しながら蒸気泡が成長する。この間は水頭損失が徐々に低下する。
- (3) 循環流量が増大すると、蒸気泡は気水分離器タンク内へ流出する。
- (4) 水頭損失は増加し、自然循環流量を減少させる。この後、(1)の状態に戻る。

このように自然循環流量振動では自然循環流量と自然循環駆動力とが準静的に逆位相で変化するため、周期性を帯びた振動現象となると述べている。本実験体系は、曲管や水平管、または水平部など気泡が停留しやすい形状はなく、チムニ部は垂直管であり、流速も速く気泡は停留しない。

さらに、自然循環流量振動との差異を明確にするために、実験設備の動特性、すなわち循環駆動力に対する循環エネルギーの変化を調べる。図9に、系圧力0.2 MPa、チャンネル熱流束53 kW/m²の場合の循環駆動力に対する循環エネルギーを示す。本実験体系では、チムニ内に生じた気泡による見掛けの密度減少が循環駆動力となり、それは $(\rho_l - \rho_g)ga_r V_r / A_r$ 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自然循環静特性は原点を通る一つの直線で表される。図9(b)には、代表的な間欠的および正弦的不安定の瞬時値の軌跡を

Fig. 9 Relation between driving force of the circulation and momentum energy

示す。瞬時値の軌跡は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。自然循環流量振動では、循環駆動力と循環エネルギーとの間に位相遅れを生じるが、本実験では循環駆動力に対して循環エネルギーの位相遅れが小さいので、不安定現象は自然循環流量振動とは異なると考えられる。

4・5 高サブクール度側の安定限界 著者ら^{(1)~(4)}はこれまでに低サブクール度側の安定境界を報告した。またフラッシングを模擬するために飽和水のエンタルピーの圧力依存性を考慮した均質流モデルにより、低温側の安定境界が予測可能であることを示した。しかしながら、例えば自然循環 BWR の起動時の

Fig. 10 Stability boundaries under higher subcooling condition

運動手順⁽¹⁵⁾によっては高サブクール度側の安定境界が重要となる。

図 10 に、高サブクール度側の安定限界を示す。縦軸は無次元チムニ入口サブクール度 $N_{sub,r}$ で、境界の安定状態側は記号“●”で、不安定状態側は記号“◇”でプロットした。 $N_{sub,r}$ は系圧力に基づくチムニ入口サブクール度を式(1)と同様に無次元化した。図 10 より安定境界におけるチムニ入口サブクール度は系圧力のみ関数であることがわかる。このときのチムニ内のボイド率は数%で、サブクール度がこの境界値以下になるとチムニ内でフラッシングが顕著になる。

このとき、チムニのみを試験部として考え、チャンネルはチムニ内のボイド率に応じてチムニ入口温度を調整する温度調節器と考えることができる。そこで安定境界におけるチムニ入口サブクール度と循環流量より、チャンネル入口サブクール度をチャンネル熱流束の関数として計算できる。図 4 に、無次元チャンネル入口サブクール度を熱流束の関数として、図 10 中に直線で示した。チムニ入口サブクール度に基づくこの相関関係は、実験結果の高サブクール度側の安定境界とよく一致している。

5. 結 論

チムニを有する沸騰自然循環ループの低圧時の安定性について実験を行い、流路各部の水溫、ボイド率、振動の周期、流動様式、ならびに自然循環駆動力の特性を求め、不安定の発生機構と発生条件を検討し、以下の結論を得た。

(1) 重力による圧力の降下によりチムニ内でフラ

ッシングにより沸騰開始する体系では流れが不安定となり、流量脈動が生じることが実験により確認された。

(2) 本論文で生じたフラッシングにより誘起される不安定は、チムニ入口と出口の水温の位相と振動周期から、密度波振動に類似の特性を有していることがわかった。

(3) 本実験では、振動の周期、流動様式、自然循環駆動力の特性から、ガイセリング、流動様式遷移不安定、自然循環流量不安定は発生していないと推定した。

(4) 高サブクール度側の安定境界は、チムニ入口水温で支配され、チムニ入口水温がある値より高くなる不安定が生じることがわかった。この水温は系圧力のみ関数で、この値をチャンネル入口水温に換算して安定限界を求める相関関係を求めた。

文 献

- (1) Inada, F. and Yasuo, A., *Proc. Int. Conf. Des. Safety Adv. Nucl. Pow. Plants*, AESJ, (1992), 25, 3.
- (2) 稲田・安尾, 機講論, No. 920-93(1992), 211.
- (3) Inada, F. and Ohkawa, T. *Proc., Int. Conf. New Trends Nucl. Syst. Thermohydraul.*, Italy, (1994).
- (4) 稲田・古谷, ほか1名, 機論, **61**-591, B(1995), 4067.
- (5) Fukuda, K. and Kobori, T., *Proc. 6th Int. Heat Trans. Conf.*, (1978), FB-17.
- (6) Fukuda, K. and Kobori, T., *J. Nucl. Sci. Tech.*, **16**-2 (1979), 95.
- (7) Aritomi, M. ほか2名, *Proc. 1st JSME/ASME Joint Int. Conf. Nucl. Eng.*, **1**(1991), 87.
- (8) Aritomi, M., ほか2名, *Nucl. Safety*, **33**(1992), 119.
- (9) 有富・ほか3名, 機論 B, **59**-565, (1993), 2621.
- (10) Chiang, J. H., ほか3名, *Proc. 5th Int. Topic Meet. React. Thermal Hydraul.*, (1992), 119.
- (11) Chiang, J. H., ほか2名, *J. Nucl. Sci. Tech.*, **30**(1993), 203.
- (12) Masuhara, Y., ほか4名, *Proc. 2nd JSME/ASME Joint Int. Conf. Nucl. Eng.*, **1**(1993), 135.
- (13) Lin, J. H., ほか2名, *Proc. 2nd JSME/ASME Joint Int. Conf. Nucl. Eng.*, **1**(1993), 281.
- (14) Yokobori, S., ほか3名, *Proc. 5th Int. Topic Meet. React. Thermal Hydraul.*, (1992), 21.
- (15) Nissen, W. H. M., ほか2名, *Proc. Int. Conf. Des. Safety Adv. Nucl. Pow. Plants*, AESJ, (1992), 25, 2.
- (16) Inada, F. and Furuya M., ほか4名, *Proc. 3rd JSME/ASME Joint Int. Conf. Nucl. Eng.*, **1**(1995), 173.
- (17) 福田 (日本機械学会編), 機械の研究, **43**-5(1991), 554.
- (18) Bouré J. A., ほか2名, *Nucl. Eng. Des.*, **25**(1973), 165-192.
- (19) 日本機械学会編, 気液二相流技術ハンドブック, (1989), 171-205, コロナ社.
- (20) 中西・ほか4名, 機論, **44**-388(1978), 4252.
- (21) Mishima, K. and Ishii, M., *Int. J. Heat Mass Transf.*, **27**-5(1984), 723-737.