九州大学学術情報リポジトリ Kyushu University Institutional Repository

自然循環BWRを模擬した並列流路における流動安定性 に関する研究

古賀,健彦 九州大学大学院総合理工学研究科エネルギー変換工学専攻

岩橋, 謙一 九州大学大学院総合理工学研究科エネルギー変換工学専攻

クンチョロ, ヘル 九州大学大学院総合理工学研究科エネルギー変換工学専攻

饒, 燕飛 九州大学大学院総合理工学研究科エネルギー変換工学専攻

他

https://doi.org/10.15017/17430

出版情報:九州大学大学院総合理工学報告. 19(1), pp.43-47, 1997-06-01. 九州大学大学院総合理工学 研究科 バージョン:

権利関係:

自然循環 BWR を模擬した並列流路における 流動安定性に関する研究

古 賀 健 彦*・岩 橋 謙 一**・ヘル・クンチョロ*** 饒 燕 飛・福 田 研 二 (平成9年2月28日 受理)

Investigation on Flow Stability in Parallel Boiling Channels Simulating Natural Circulation Boiling Water Reactors

Takehiko KOGA, Kenichi IWAHASHI, Heru KUNCORO, Yan F. RAO and Kenji FUKUDA

Recently, many concepts, in which passive and simplified functions are actively adopted, have been proposed for next-generation LWRs. Natural-circulation BWR, which uses natural-circulation to induce flow to the reactor core, is one such proposal. However, it is pointed out that flow instability may occur in a natural-circulation flow loop that includes two-phase flow, depending on structural and thermal-hydraulic conditions of the loop during a start-up process. This greatly influences the feasibility of the concept because the instability makes output power increase difficult. In this work, the effects of system pressure and non-heated riser on boiling flow instability are experimentally investigated in order to understand the mechanism of flow instability at low pressure and low heat flux conditions during the start-up process of a natural-circulation BWR. The interaction between channels is also investigated.

1. 緒 言

現在主流の軽水炉の安全性はポンプ・モーター類等 の動的機器に過度に依存しているとして、その信頼性 をさらに飛躍的に向上させ、かつ社会的に受け入れ易 く直感的にも安全裕度が高い、受動的安全性の概念を 取り入れた新しいタイプの自然循環 BWR の概念が数 多く提案されている. これらの受動的安全システムは 重力,ガス圧,熱伝導や熱放射などの自然力・自然法 則を利用し、外部からのエネルギー、信号、操作など 無しに作動するメカニズムを大幅に採用して、機器故 障や人的要因が重大事故にまで至らないような安全機 能を備える設計になっている. 自然循環 BWR は現行 の再循環ポンプを削除し、簡素化と保守・補修が容易 であることを目的としており,再循環ポンプを削除す ることにより一次冷却系を簡素化できることから、運 転時の信頼性が向上し補修時の被爆低減にも役立つと ともに、再循環配管を除去することにより、配管破断 による冷却水喪失事故の発生確率を一層低減できるこ とや,自然循環駆動力を得るために保有水量が多いこ

エネルギー変換工学専攻修士課程(現在 東陶機器) *エネルギー変換工学専攻博士課程(現在 日立製作 所) *エネルギー変換工学専攻 とから,重力落下式 ECCS などの受動的安全設備との組み合わせが可能になることなどの長所がある.

また,再循環ポンプを用いる代わりに,炉心部上部 に長い円筒(チムニー)を設置して水と蒸気の二相流 上昇部がつくられており,このチムニー部と水単相状 態の下降水路の間の密度差により循環流量が得られる. チムニー部は自然循環駆動力のほとんどを生み出し自 然循環 BWR の流動に大きな影響を与える.この点が 在来の強制循環炉と最も異なっている.

しかし,並列流路での自然循環実験で自然循環 BWR 起動時にあたる低圧,低熱流束の条件下では不 安定な流動現象が生じる可能性があるので¹¹,本研究 では自然循環 BWR 起動時の流動特性を明らかにする ため,自然循環流路を有する一体型の実験装置を用い, 系圧力・非加熱上昇管の長さが流動安定性に与える影 響および流路間の連成作用について調べた.

2. 実験 | (圧力, 非加熱上昇管の長さの影響)

2.1 実 験 装 置

実験装置は試験部,凝縮部,温度・圧力・流量等の データを取り込むための測定部,加熱用の電力供給部, 冷却水循環のための給水部とから構成されている. Fig.1に実験装置を示す.試験部は炉心及びチムニー における流動様式を可視化するため,パイレックスガ

^{*}エネルギー変換工学専攻修士課程



ラス製の二重管となっており,熱損失を抑えるため環 状部は真空引きしている.試験部の上,下部フランジ はSUS304製で,下部フランジからは加熱用ヒーター (直径16mm,長さ380nm)が3本挿入されており,下部 フランジ上部の可視部(300nm)のみが電気加熱される. ヒーターの周囲には炉心チャンネルを模擬するために, 内径32mm,長さ500mm(管M)あるいは700mm(管L)の2 種類のパイレックスガラスチャンネルを設置している. いずれの場合にもヒーター上部には非加熱上昇部が存 在する.

下部フランジの側面には,試験部内の循環流量を計 測するため,循環水の取り出し口を放射状に3カ所設 け,それぞれ断熱チューブを用いてタービン式流量計 を経てチャンネル下端に連結されている.

また,試験部上部には SUS304 製の二重円筒状の凝 縮部(長さ500mm,内径210mm)が設置されている.

温度測定には C-A 熱電対を用い,測定箇所はヒー ター(1本のみ)表面3点,チャンネル内の環状部2点, 試験部中心の軸方向に7点,下降水路部3点,凝縮部 の冷却水流路出入口各1点,流量計測のための外部取 り出し口およびチャンネル入口各1点であり,これら の温度はデータロガーへ取り込まれる.圧力測定には 凝縮部上端のフランジに設置したストレインゲージ式 圧力計を用いた.

2.2 実験方法

実験では,まず作動流体を充填し,その後,真空引 きし,冷却水の温度や流量を調節することにより,試



Fig. 2.1 Stability map for the shorter channels



験部内の圧力を設定する. そしてスライダックスによ りヒーター入力を次第に増加させていき,試験部内の 各部の温度がほぼ定常となった後,温度,圧力および 流量の測定を開始した. この際,流動様式も観察しカ メラ,ビデオによる撮影も行った. 作動流体には水を 用いた. また,実験パラメータはチャンネル長さ及び 圧力である.

2.3 実験結果および考察

実験では,加熱入力を増加させるに従いチャンネル 入口流量が振動する現象がいくつか観察された.また, 各部の温度は,どの実験パラメータにおいてもヒー ター上部,チムニー部,ヒーター下部の順で飽和温度

に近づいていく傾向がみられた.このことに留意して 本実験範囲で観察された現象を分類した結果を Fig. 2.1, 2.2 に示す. Fig. 2.1 中の振動領域とはチャンネ ル内で周期的な流量の振動が確認された領域である. なお,振動領域よりも高圧,高熱流束の部分で、ほぼ 定常な沸騰が確認され、流量に多少の変動があるもの の,周期的とは言えない場合,振動領域には入れてい ない. Fig. 2.1 より振動領域はチムニー温度が飽和あ るいは飽和に近い温度で発生していることがわかる. 一方, Fig. 2.2 では Fig. 2.1 でみられた定常的な沸騰 が観察される部分は見られず、どの系圧力でも周期的 に振動する領域が存在しており、振動領域では必ずし もチャンネル出口付近において飽和温度が確認された わけではなかった.また、管Mを使用した場合におい ても,管Lを使用した場合においても,系圧力が高い ほど、振動領域が狭くなっていることがわかる、次に、 管Mを使用した場合の系圧力が低い場合(Fig. 3.1) と高い場合(Fig. 3.2)の現象を比較する. 系圧力が 低い場合 (Fig. 3.1), チャンネル内で気泡が生成され, その気泡が急膨張し、その上昇によって流量が急激に 増加する.その後,循環力が低下しゼロ付近まで流量 は減少する、このとき、チャンネルの上下からの水の



Fig. 3.1 Flow-rate oscillations in the case of the geysering instability



Fig. 3.2 Flow-rate oscillations in the case of the density-wave instability

流入により凝縮音と思われる音の発生が頻繁に起こっ た. これに対し, Fig. 3.2 は熱流束が Fig. 3.1 の場合 とほぼ等しく系圧力が高い場合の振動例を示している. チャンネル内では常に気泡が存在し入口流量はある有 限量を保ちながら振動していることがわかる. Fig. 4.1 は Fig. 3.1 に対応する流動様式の観察結果を表し ている.まず、気泡が発生し、それがチャンネル内を 上昇するに従って静圧の減少により膨張して、ついに はスラグ気泡を形成するに至る. このとき流量は増え 始める (Fig. 4.1(a)). 気泡の下では静圧損失によっ て飽和温度が低下し自己蒸発が進む.この現象はガイ セリングの特徴であり、加速的に進む. そして、気泡 は膨張しながらチャンネル出口を抜け出ていき,これ によって流量はさらに増加する(Fig. 4.1 (b)).次に, チャンネル入口と出口とから水が流入し、チャンネル 内で気泡が凝縮する (Fig. 4.1(c)). 最終的には、チ ャンネル内の気泡はすべて凝縮してしまうが、このと きチャンネル入口流量は最大となる (Fig. 4.1 (d)).











Fig. 5 Temperature Distribution

この後、チャンネル内はサブクール水で満たされ非沸 騰状態となる. それに伴って水の循環力も低下し, 流 量はほとんどなくなる.これらの現象は周期的に起こ る.一方, Fig. 4.2 は Fig. 3.2 に対応する流動様式の 発生機構を表わしている.まず,時間平均値より高い 温度の水がチムニーを上昇していく (Fig. 4.2(a)). そして、それが下降水路を経て、チャンネル入口から 流入してきたとき時間平均より低い位置で沸騰が始ま り,比較的大きな量の蒸気を生じる (Fig. 4.2 (b)). その結果、チャンネルを流れる流速は大きくなりチャ ンネル出口では水温が低くなる(Fig. 4.2 (c)).この 水は先の沸騰開始位置に到達しても沸騰せず、より下 流で沸騰する.発生蒸気量も比較的少なく,自然循環 による駆動力も小さいため、今度はチャンネルを流れ る流速が小さくなる (Fig. 4.2(d)). そして, チャン ネル出口での水温は上昇し最初の状態に戻る. この過 程が周期的に繰り返され、また、系圧力が高いほど、 流量振動の振幅が小さくなることがわかる. この挙動 は密度波振動の特徴を有している.

このように系圧力が低い場合の振動(Fig. 4.1)は ガイセリングが支配的な現象であり、系圧力が高い場 合の振動(Fig. 4.2)は密度波振動が支配的な現象で あると考えられる²⁾.

次に,系内の温度分布と飽和温度の関係を Fig. 5 に示す.いずれの場合においても試験部中央の温度分 布はほぼ一様であり,チャンネル入口部温度とほぼ等 しい.しかし,系圧力が低い場合の方が計算で求めら れた軸方向に対する飽和温度の傾きは大きくなってお り,気泡発生,膨張に伴う静圧の減少による飽和温度 の低下幅は大きくなるといえる.さらに,系圧力が低 いほど,表面張力は大きくなることや気液の密度差が 大きくなることを考慮すれば,系圧力が低い場合の方 が大きな気泡が形成され易く,従って飽和温度の低下 幅はより大きくなる.このように系圧力が低い場合, 気泡の成長と静圧の変動との関連性が強く,ガイセ リングが発生しやすくなったと考えられる.一方, 系圧力が高い場合はチャンネル内の温度が常に飽和 温度に近く保たれており,さらに飽和温度の傾きが 小さいため,ガイセリングは生じにくいと考えられ る.

3. 実験Ⅱ (チャンネル間の連成作用)

実験Iにおいてはチャンネル間の連成作用はほとん ど見られず,唯一,ガイセリングにおいて急激に気泡 が膨張する時点で,あるチャンネルで発生した気泡が チムニー部で膨張し,この気泡が他のチャンネルでの 沸騰を誘発する現象を観察した.つまりチムニーにお ける気泡の挙動がチャンネル間の連成に関してかなり 重要な役割を担っている.

そこで実験Ⅱにおいては、このようなチャンネル間 の連成作用の発生機構を解明することを目的として実 験を行った.



Fig. 6 Experimental apparatus with the bubble gatherer

3.1 実験装置および実験方法

Fig. 6 に実験装置を示す.実験 I との違いは図に示 すように共通上昇管を設置している点である.共通上 昇管 は全てアクリル製でありチャンネル出口付近で 正三角錐の形状を有しており,さらに上部に垂直な円 筒部(共通部)を設けている。

なお,共通上昇管 は下部フランジに固定されており,三角柱の形状を有している.チャンネルには管M を用いた.他の箇所の詳細寸法等は実験 I で示した通りである.

実験Ⅱでは圧力は,実験Ⅰで流動様式の明確な違い が見られた20kPaと40kPaの条件で実験を行なった.

3.2 実験結果および考察

Fig. 7.1, 7.2 にそれぞれ熱流束がほぼ等しく,系圧 力が低い場合と高い場合の典型的な流量振動例を示す. どちらの図でも実験Iに比べ位相関係に違いがみられ, ほぼ同位相となっている.これはチャンネル内で発生 した気泡の大部分が共通上昇管の出口部分にあたる共 通部に流れ込み,全てのチャンネル内で静圧が低下す ることによると考えられる.



Fig. 7.1 Flow-rate oscillations at a lower pressure when the bubble gatherer is used



Fig. 7.2 Flow-rate oscillations at a higher pressure when the bubble gatherer is used

4. 結 言

自然循環 BWR 起動時の流動特性を明らかにすることを目的として,自然循環流路を有する一体型の実験装置を用いて実験を行い,以下の結論を得た.

(1) 系圧力が低いほど不安定な振動領域が広くなる。

(2) 非加熱上昇管が長いほどチャンネル入口流量の 振動が起こりやすく不安定になりやすい。

(3) 系圧力が低いほど,発生する蒸気体積が大きく なるために,より減圧沸騰の影響が顕著に現れる.

(4)本実験範囲で観察された振動現象はガイセリン グと密度波不安定の異なる2種類から成る.

さらに,共通上昇管を取り付けた実験により,以下 の結論を得た.

(5)気泡が発生した後、十分な体積に膨張する場合 には、チムニーにおける気泡の存在によりチャンネル 間の連成作用が生じる.

参考文献

1) 有富 他:日本機械学会論文集, 59, 565, 2621-2627 (1993) 2) H. Kuncoro 他 : Proc, Intern, Conf, Nuclear,

Z) H. Kuncoro 但, Proc, Intern, Cont, Nucle Engineering, 373-383 (1996)