

## 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

クンチヨロ, 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・クンチヨロ\*\*\*  
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

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<sup>1)</sup>、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 I (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

\*\*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)

<sup>1)</sup>エネルギー変換工学専攻

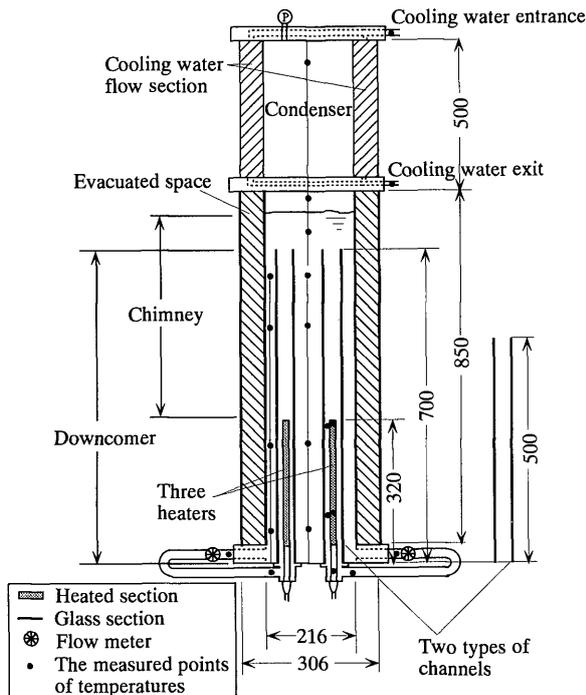


Fig. 1 Experimental apparatus

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380mm)が3本挿入されており、下部フランジ上部の可視部(300mm)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

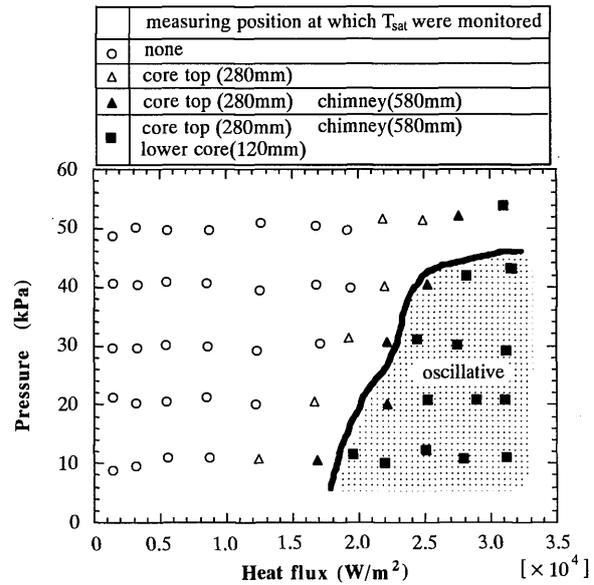


Fig. 2.1 Stability map for the shorter channels

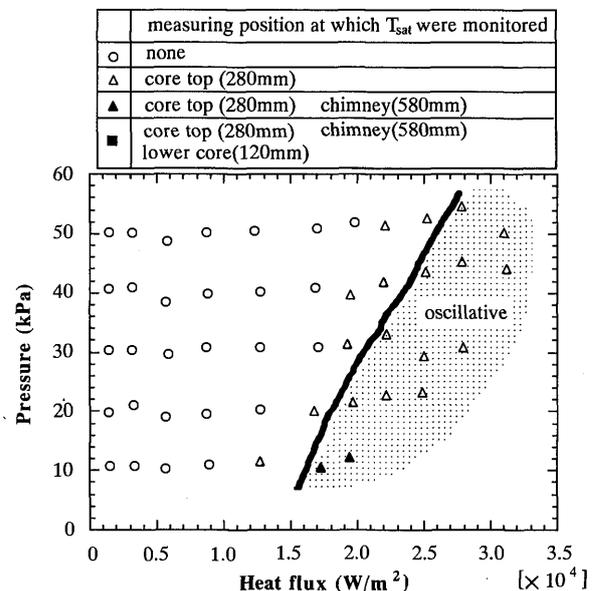


Fig. 2.2 Stability map for the longer channels

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、振動領域には入っていない。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

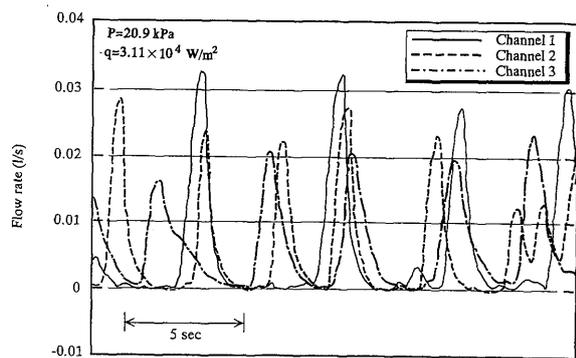


Fig. 3.1 Flow-rate oscillations in the case of the geysering instability

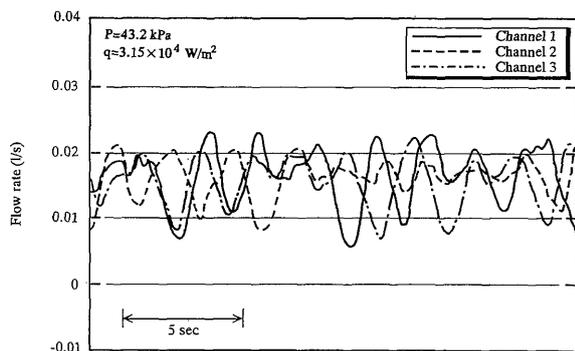


Fig. 3.2 Flow-rate oscillations in the case of the density-wave instability

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))。

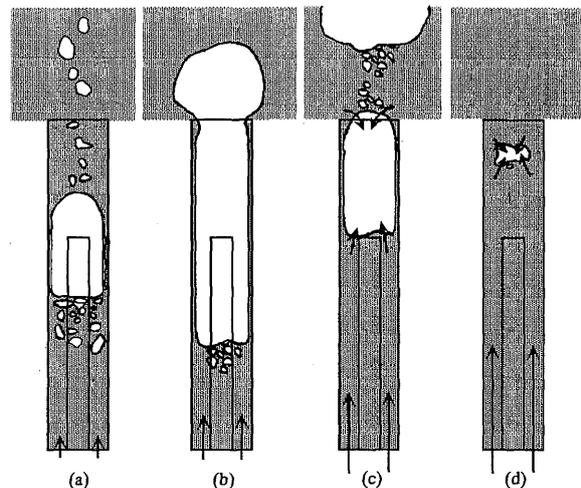


Fig. 4.1 Mechanism of the geysering instability

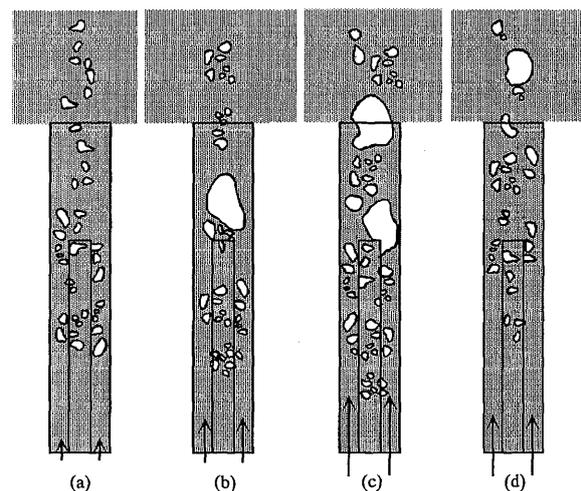


Fig. 4.2 Mechanism of the density-wave instability

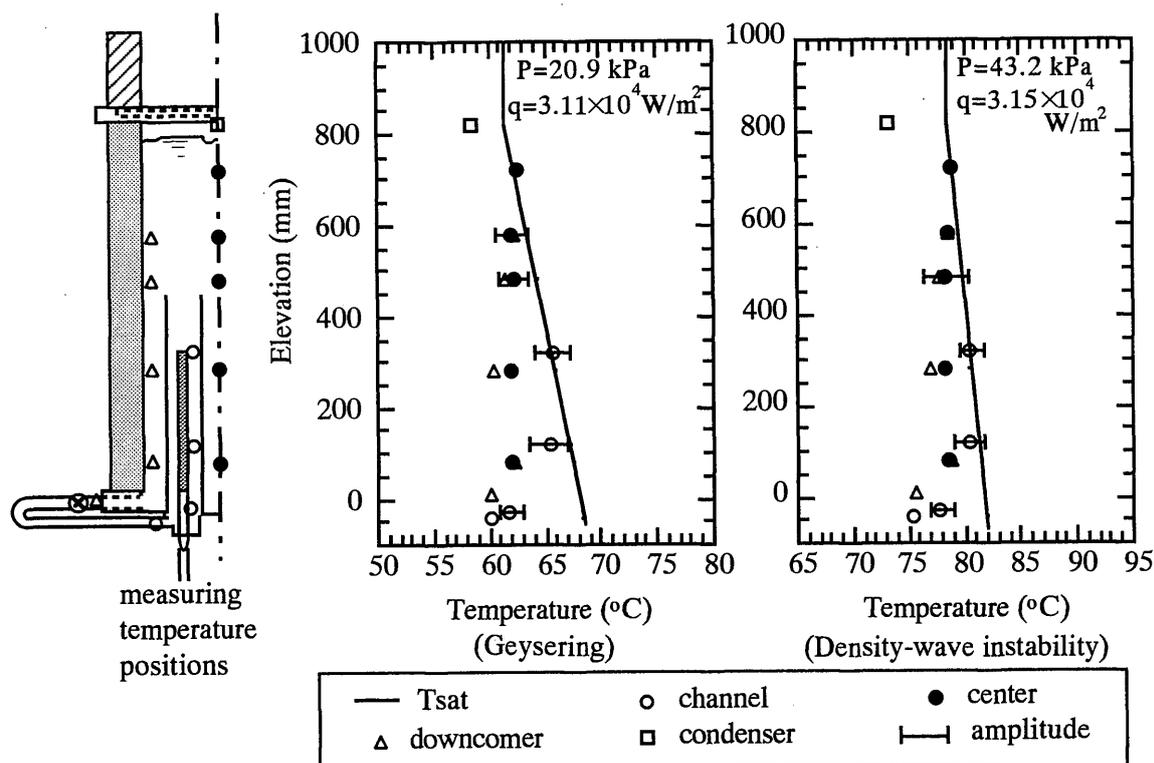


Fig. 5 Temperature Distribution

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小さく、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のがわかる。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<sup>2)</sup>。

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。

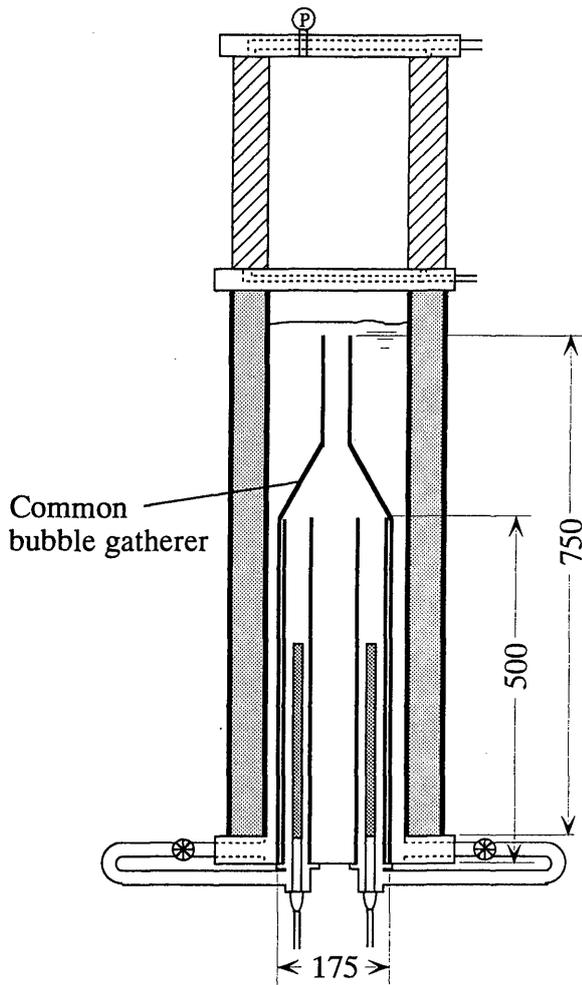


Fig. 6 Experimental apparatus with the bubble gatherer

### 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。

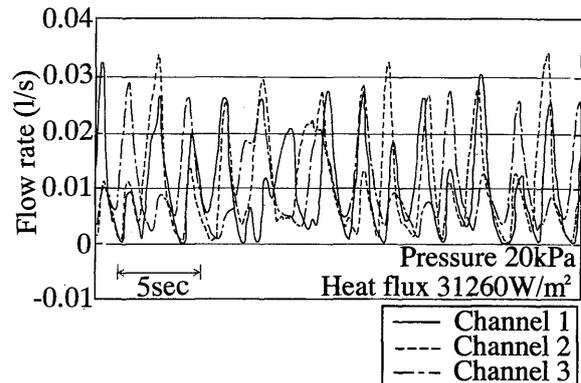


Fig. 7.1 Flow-rate oscillations at a lower pressure when the bubble gatherer is used

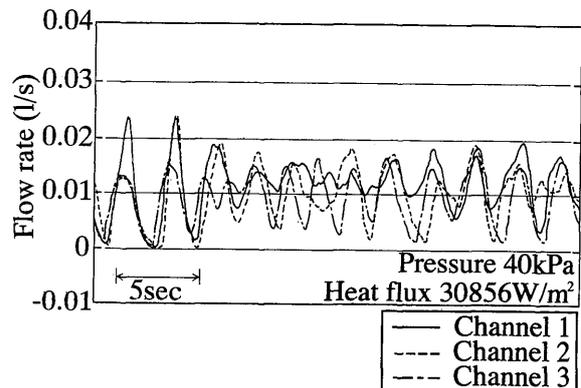


Fig. 7.2 Flow-rate oscillations at a higher pressure when the bubble gatherer is used

## 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がる。
- (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, Engineering, 373-383（1996）