

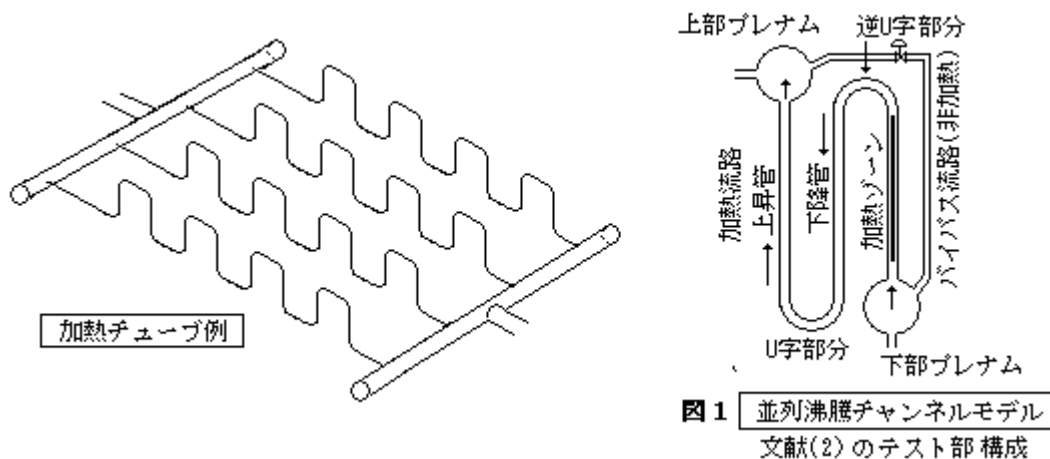
【整番】FE-19-TM-006	【標題】並列沸騰チャンネルの気泡閉塞形不安定現象に関する情報		
分類：流れ(流体振動)／種別：技術メモ		作成年月：H14.5／改訂：Ver0.1（H20.1）	作成者：N.Miyamoto

誤記/ 図 6.10、6.11 追加(H20.1.24)

全 9 枚

沸騰 2 相流に起きる不安定流動としては密度波振動や流量逸走などがよく知られているが、ここで云う気泡閉塞形不安定やスラグ逸走形不安定も沸騰 2 相流不安定パターンの一つである。これらの現象は幾つかの上昇管と下降管を 180° 曲がり管で繋いで 1 チャンネルとしてこれを複数並列に並べた加熱/蒸発/気化設備で起きる。この種の設備は一見特殊で、現象自身特異に見えるが、産業分野では決して稀れではないようである。例えば、ボイラの部分負荷運転や、LNG 気化器/温水加熱器の出口側あるいは 2 相流配管引き回しなどで出現の可能性がある。筆者も化学プラントのある蒸発設備でその種の問題が話題になったことを覚えている（そのときの調査メモが、本 TS のネタになっている）。

この不安定現象については、JSME 気液 2 相流ハンドブックに記載されている。ただ概論であるため何かもの足りない所がある。そこで原典⁽²⁾⁽³⁾を調べて多少の補足を試みた。以下、



1. 加熱流路単独のときの流動現象

(1) 多数の加熱チューブで構成される並列沸騰チャンネルを、一つのチャンネルに着目して単純化したモデルは図 1 のようである。このモデルは加熱ゾーンを持つ加熱流路(沸騰チャンネル)と加熱されないバイパス流路からなっている。ここではバイパス流路との組み合わせを排除し、加熱管路のみの挙動をみる。この場合、その挙動は以下のような逆 U 字曲がり管+下降管+U 字曲がり管の基本挙動に従う⁽¹⁾。

- (1) 曲がり管部分では、気液間の相対速度の急変と遠心力の相乗効果によって垂直管部分よりも気泡が滞留/合体してスラグ気泡が形成され易くなる。
- (2) 下降管部分では浮力によって気泡流速が液流速より遅いので気泡が合体しスラグ気泡ができ易くなる。
- (3) 曲がり管+発生したスラグ気泡には浮力が働いて流動抵抗となり流量が低下する。
- (4) スラグ気泡の成長によってボイド率が増えると水頭損失が増えて負性勾配になり易い(負性勾配ができると Ledinegg 型の不安定流動いわゆるサージングが起き易くなる)。図 1 モデルで実測された負性勾配を図 5 に示す。

実際に観察された流況を図 3 に示す。また図 1 のテストから得られた安定性判別図を図 6 に示す。

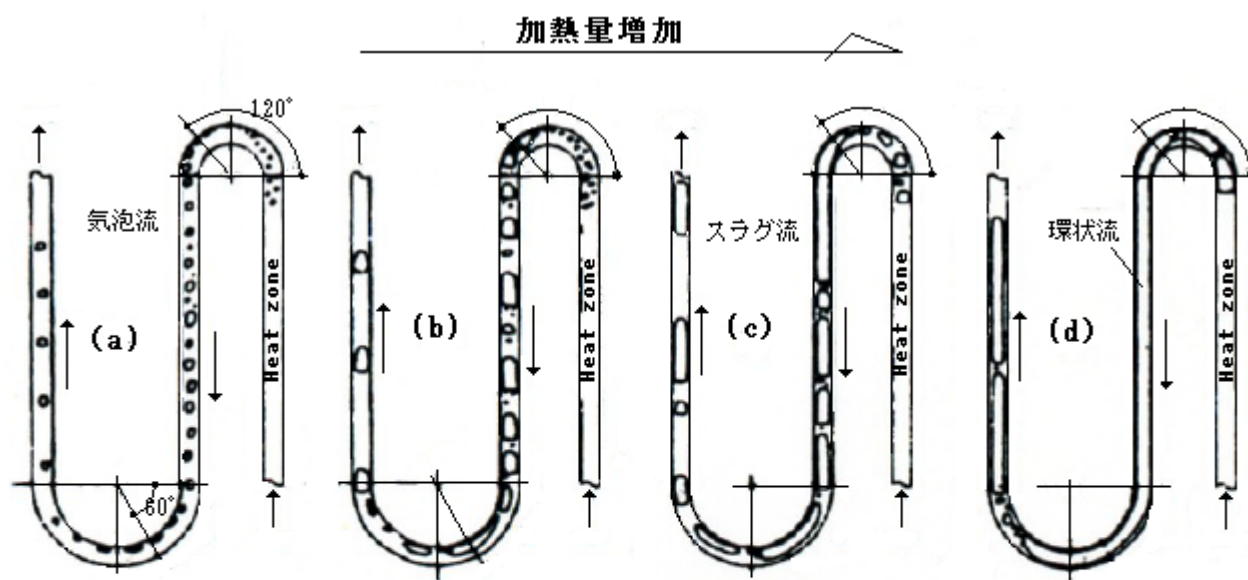


図3 観察結果の模式図(代表例)

文献(2)抜粋

- (a) 全域に気泡流、曲がり管では上面に沿って流れる。
 (b) 逆Uの120°位置で気泡の合体が始まる。
 (c) 続いてスラグ気泡ができて閉塞へ、スラグは下降管を合体したり分裂したりして流れU字管に入りそこで成長しその先端が90°を越えたと停留していた気泡がどっと上昇管に流れ出す。
 (d) 逆U字管から環状流になりUの90°部分に達するとその先端は不規則に分裂しながら上昇する。

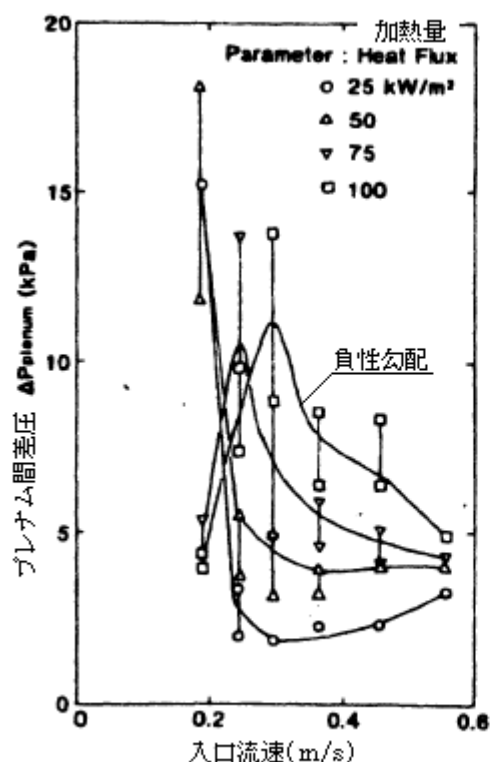


図5 単管の代表的な静特性(文献(2)より抜粋)

$$\Delta P_{\text{plenum}} = (P_1 - P_2) - \rho H$$

ここで P_1 = 入口プレナム圧力

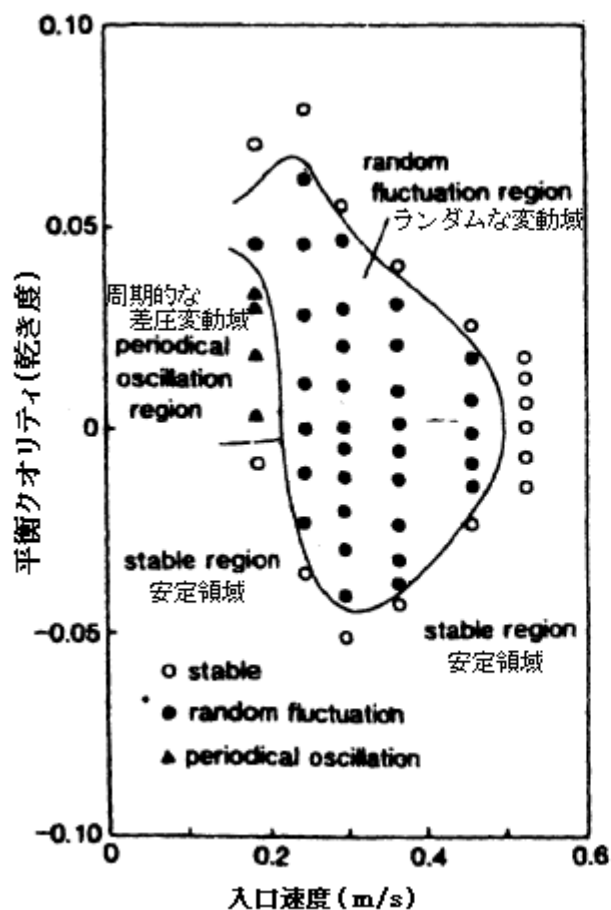
P_2 = 出口プレナム圧力

H = プレナム間の高差

ρ = 流体密度

この定義から、 ΔP_{plenum} は実質、加熱流路の2相流の圧損であると思われる。通常、負性勾配は

- ① 流速がアップすると2相流部分が縮小することがあって圧損がかえってダウンすること
- ② 細管の場合には流速がアップするとフローパターンがスラグ流から環状流に遷移することがあり摩擦損失が大幅に低下すること
- ③ 太い管の場合で入口サブクール度があり加速損失が主体になるケースでは、加速損失分がある流速で極大になることから生じる。本ケースには①②の傾向があり、これによってこの図のような負性勾配がでたものと思われる(宮本say)



低流速(乾き度 >0)域: 周期的変動域(不安定域)
 低流速(乾き度 <0)域: 安定域
 中流速域: ランダム変動域(不安定域)
 高流速域: 安定域
 高クオリティ域: 全域環状流になり差圧変動なし
 入口流速 $>0.55\text{ m/s}$: 出口上昇管への排出サイクルが
 少なくなって流速変動がなくなる

なお、この図では差圧変動 2 kPa 以上を不安定域とし、
 2 kPa 以下を安定域としている。

図6 加熱流路単独の場合の安定判別図

(2) 以上は静特性に基づいているが、下降管部分のスラグ蓄積量がこの静特性をはるか超えて増加すると、流量逸走現象(スラグ逸走形不安定)がおきる⁽¹⁾。即ち

- ・スラグ気泡が上流側に向かって急激に成長し、逆流現象を生じる。
- ・ドライアウト現象を併発すると上流に向かう蒸気流速が **CCFL**(Counter current flow limitation) 以下になるかあるいは蒸気が入口ヘッダ内に入り凝縮して下降管内の圧力が低下する。その場合今度は入口ヘッダから液が再流入して振動が起きる。なお CCFL とは、ドライアウト状態でチューブ壁から蒸気がでなくなって吹き上げ蒸気速度が失速してしまう限界を云う。

下図にスラグの成長過程を示す。

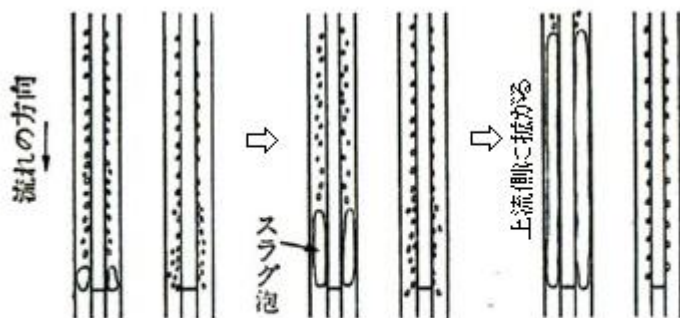


図6.9 下降管の沸騰に伴う不安定流動(スラグ逸走形不安定流動)の模式図
 < 文献(1)から引用 >

2. 加熱流路+バイパス流路のときの流動現象

(1) 基本的にバイパス流路と加熱流路の差圧は釣り合っている必要があるので、加熱量が変化して加熱流路の差圧が変化するとバイパス流路の流量(流速)も変化する。このとき

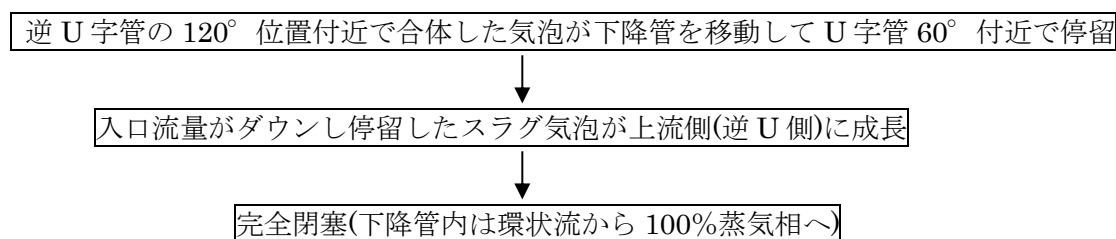
- ・加熱量変化が軽微なとき→バイパス流路の流調弁によって均衡が保てる(静特性変化で収束)。
- ・加熱量変化が大きいき→静特性変化で収束できず流量逸走(流量不均一配分)→不安定化

(2) 後者の不安定現象には次の2つのタイプがある。

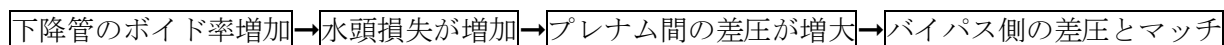
①完全閉塞形不安定： 沸騰流路の入口流速が零になるタイプ

②流量振動形不安定： 沸騰流路の入口流速がある流速まで低下即ち流量逸走した後、その流速を平衡流速として周期的な流量振動を生じるタイプ

(3) まず、完全閉塞形不安定について。現象として、まず加熱流路では、



一方、バイパス流路では、バイパス流量は増加し圧損が増えて上下プレナム間の差圧が増大する。上下プレナム間の差圧が増大すれば加熱流路側の流量が回復し閉塞は緩和する筈であるが、加熱側も



して閉塞はなかなか解除できない。即ち加熱流路側の変化をバイパス側が完全に補完するとき全閉塞形不安定は起きる(脚注を参照のこと)。

なお、実験では完全閉塞形不安定は 入口流速<~0.4 m/s で起きている(流速小かつ入熱小の場合顕著)。図5から判るようにこの流域では負性勾配の度合いが大きくなるからと考えられている。勾配がきついと押し込みヘッドとの交叉点が固まって、変動しにくいのだろう。

[一方 入口流速>0.4m/s では負性勾配がかなり緩くなって交叉点が流動的になり変動しやすくなり流量振動形不安定の方に移行する。]

実験ではこのタイプはプレナム間差圧が約 6 kPa 以下で発生している。閉塞するとなかなか戻らない。ドライアウト(バーンアウト)の恐れがある。加熱をとめても回復まで相当時間がかかる。なお敷居の 6 kPa は、出入口上昇管と下降管の水頭の差がバイパス管の水頭の 55%になる値である。

(4) 次に流量振動形不安定について。完全閉塞形はプレナム間の水頭損失増加(脚注)がバイパス摩擦圧損増加と釣り合って起きるが、この流量振動タイプは水頭損失増加<摩擦圧損増加のように釣り合いがない状態でおきる。即ち、流量逸走(入口流速低下)は起きるものの完全閉塞には至らず、下降管から U 字管に滞留していた蒸気塊が出口上昇管に抜けると再び入口流速が回復しこれが周期的に反復されて起きる。

なお 実験では流量振動形不安定は入口流速 $>0.3\sim0.4$ m/s で起きている。この流域では負性勾配が緩やかになっており、揺らぎに歯止めがかからない。実験ではこのタイプはプレナム間差圧が約 6kPa を越えた所で発生している。本ケースの場合、振動(流量逸走)発生後の平衡流速は $0.15\sim0.35$ m/s である。また振動発生後の圧力損失(プレナム差圧)は殆ど動かない。

更に細かく言えば、流量振動形不安定には次の 3 つのタイプがある⁽³⁾。下図参照。

A タイプ：完全閉塞形不安定の延長タイプ。流速が比較的低く ($0.3\sim0.45$ m/s)、加熱量が少ない時に起きる。蒸気相と液相が完全に分かれる。逆 U ベンド管から下降管は蒸気のみ。一気抜けの後、凝縮して出口プレナムから逆流する。その為バイパス流量は急激に増加する。

C タイプ：入口流速が早い場合 (0.4 m/s 以上)に起きる。逆 U ベンド管下流に高速の液膜が常在し下降管への液の流入が継続するのが特徴。上昇管の一気抜けは A タイプに同じだが液の流出は続くので出口プレナムからの逆流は起きない。

B タイプ：A タイプと C タイプの中間。常に下降管への液の流入がある。出口プレナムからの液の逆流は起きない。

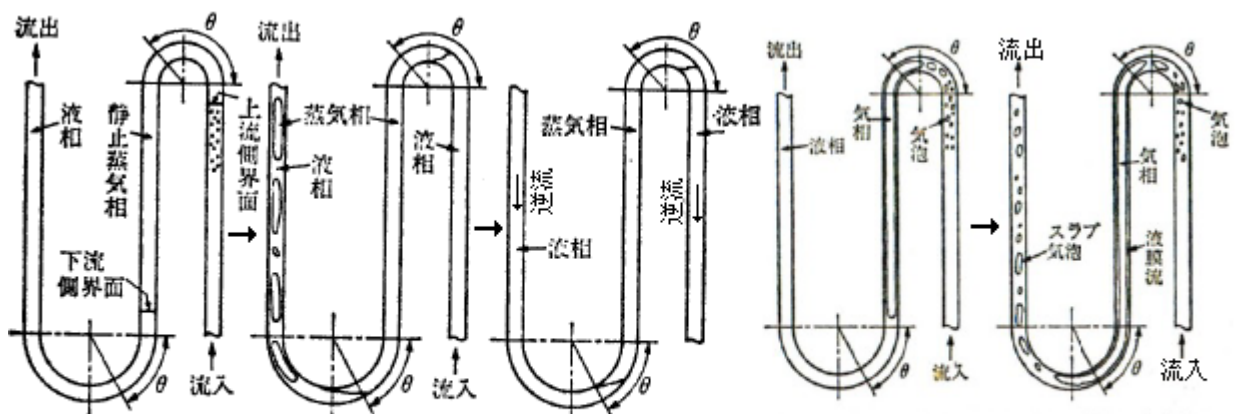


図 6.10 ベンド管内の蒸気の停留に伴う不安定流動(低流速の場合)

【文献(1)より抜粋】

Aタイプの流量振動

図 6.11 ベント管内の蒸気の停留に伴う不安定流動(高流速 - Cタイプ)

【文献(1)より抜粋】

この不安定現象の振動特性は次のようである⁽³⁾。

周期： 逆流量[蒸気発生量]に影響を受ける。発生蒸気量が増加するにつれ周期は減少する。

これは閉塞スラグ気泡の先端が逆 U ベンド管から U ベンド管の中心まで成長する時間に大体一致する。周期は 約 **5—8 sec** で長周期である。なお A タイプでは下降管長の影響がでないが、C タイプでは下降管長が長くなるほど滞留蒸気量が増加するため周期は長くなる。ベント曲率/バイパス絞りの影響は殆どない。発生蒸気量のみ依存する。

振幅比：発生蒸気量と逸走前の入口流量に依存する。両者が増加するに従い減少する。Aタイプのよう逆流現象が振動特性を支配する場合、振幅比 $[(U_{\max} - U_{\min}) / 2U_{\text{mean}}]$ は1~2とかなり大きくなり、また管長が長い程大きい。Cタイプのように顕著な逆流が起きない場合は振幅比は非常に小さくなる(0.015~0.18程度)。

- (5) 現象は異なっているが、完全閉塞形不安定も流量振動形不安定もそのメカニズムは同じであり、そのいずれも水頭損失の増加を原因としている。そして流速が遅くて負性勾配がきついとき完全閉塞、流速が早くて負性勾配が緩いとき流量振動になる。下降管のボイド率は前者が大きい。両者の安定性判別図を図6.12に示す。加熱を増す時と減じる時では差異があるので注意。

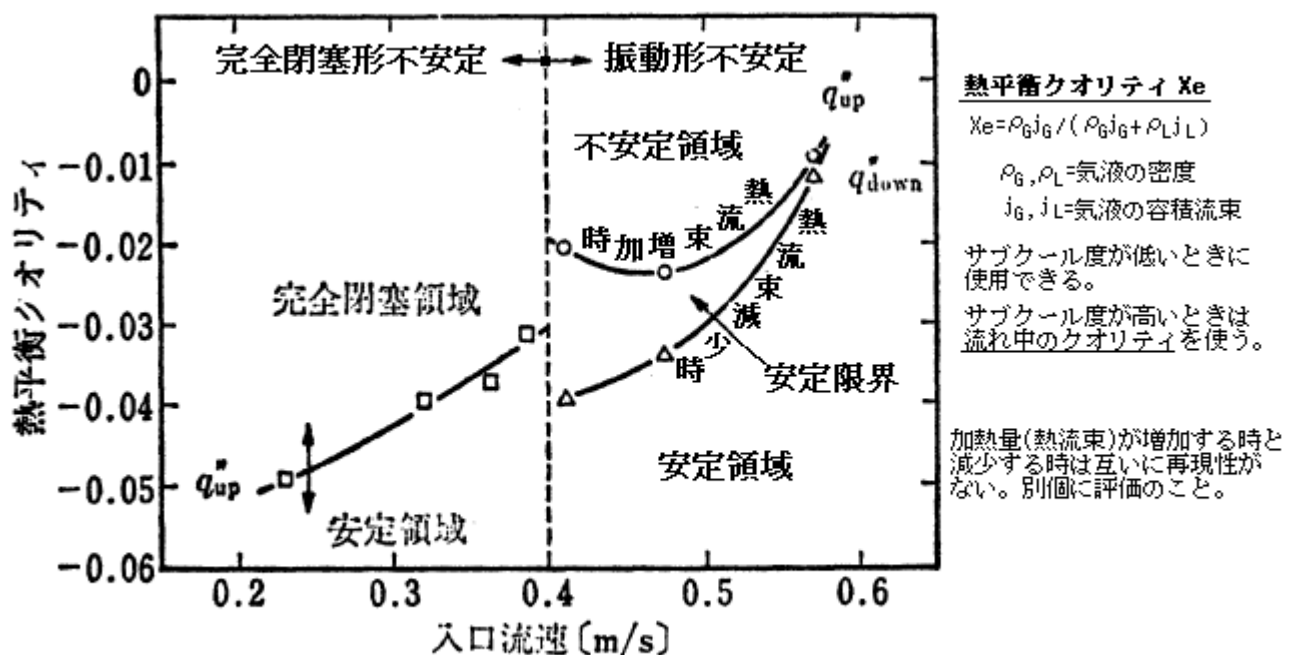


図 6.12 気泡閉塞形不安定流動の安定判別図

- (6) 他の不安定現象との比較は次のようである。

Ledinegg 形不安定： 流量逸走現象としてはよく似ているが、Ledinegg 形では完全閉塞形のような零流速に至る逸走は起きない。Ledinegg 形は静的、完全閉塞形は準静的の故にこの差異あり。完全閉塞形は加熱を停止しない限りドライアウトを起こすので Ledinegg 形より過酷な現象になる。

密度波振動： 密度波振動は入口流量の変動に対するボイド率や流速変化の遅れによる動的な不安定現象で気泡閉塞型に一見類似する。しかし気泡閉塞形は準静的の故に慣性項の影響が現れない。また振動周期も気泡閉塞形の方が一桁大きく長周期になる。

スラグ逸走形不安定： スラグ逸走形不安定はサブクール沸騰下で下降管出口近傍に生じた合体スラグ気泡が流れを閉塞してスラグ気泡が急速に上流側に成長する事によって生じる。この現象は気泡閉塞形でも観察されるので本質的に気泡閉塞形と同一。蒸気供給が、気泡閉塞形では上昇管で行なわれるが、スラグ逸走形では下降管でも行なわれる。この違いで現象が異なってくる。

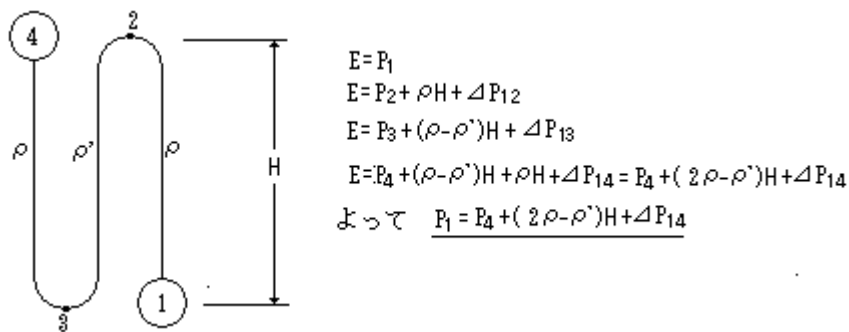
(脚注) 図1モデルの加熱流路側では下記のように、ベルヌーイ式より $P_1 = P_4 + (2\rho - \rho')H + \Delta P_{14}$ であるから、

$$\text{プレナムの実際差圧: } (P_1 - P_4) = (2\rho - \rho')H + \Delta P_{14}$$

一方バイパス流路では、

$$\text{プレナムの実際差圧: } (P_1 - P_4) = \rho H + \Delta P_{14}$$

加熱側では加熱量が変わらず入口流量が減少すると、ボイド率が増えて下降管内の見掛けの流体密度 ρ' は当初の ρ からダウンするので、**水頭損失 $(2\rho - \rho')H$ は増加する**。また流れの圧力損失 ΔP_{14} の方も図5のように負性勾配によって増加するので実際差圧 $(P_1 - P_4)$ はアップする。一方バイパス流路の方は、加熱流路の流量(流速)がダウンするので、逆に流量が増加して液流れの圧損 ΔP_{14} が増加する。加熱側の $[(2\rho - \rho')H + \Delta P_{14}]$ と、バイパス側の $[\rho H + \Delta P_{14}]$ が等量であれば、完全に補完されて全閉塞が起きることになる(宮本 say)。



3. 各管路パラメータの影響

不安定の挙動は下記の管路パラメータに影響を受ける。

下降管長： 下降管長が長くなると下降流部の停留蒸気による水頭損失が増加するため不安定になり、完全閉塞形不安定が発生し易くなる。即ち下降管が長い程、完全閉塞形と流量振動形の発生境界が高速側にシフトする。下図参照。
また逆流量の少ないC形流量振動では下降管が長くなるほど停留蒸気量が増加するため振動周期は長くなる。

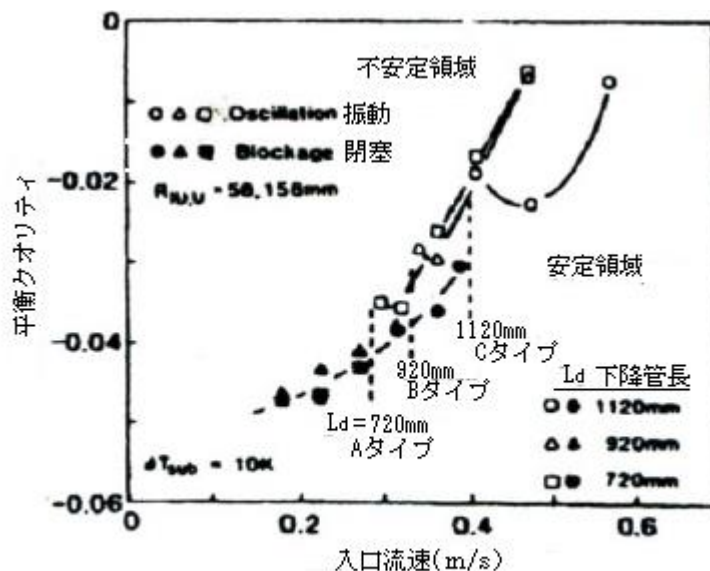


図5 安定限界(下降管長の影響)

ベント管曲率： ベント管のは完全閉塞形および逆流が顕著な流量振動形においては逆Uベント、Uベントとも曲率半径が大きくなるほど気泡の滞留が生じ易く不安定化する。逆流現象が顕著でない時は安定性に及ぼす影響は殆どない。

振動周期に対する曲率の影響はない。逆流量の大きいA形では逆Uベントの曲率が大きいかほど振幅比は大きくなる。逆流量の小さい時は振幅比は影響を受けない。

絞り： 入口絞り(バイパス絞り)を増加させると、気泡閉塞に伴うその流路の差圧増加は他の流路のわずかな流量増加によって釣り合うため流量逸走が起き難くなり系を安定化させる。この実験範囲では絞り係数(λ_B)69.7以上では完全閉塞は発生していない。下図参照。

振動周期に対する曲率の影響はない。絞りを増加させると振幅比は減少し安定化する。

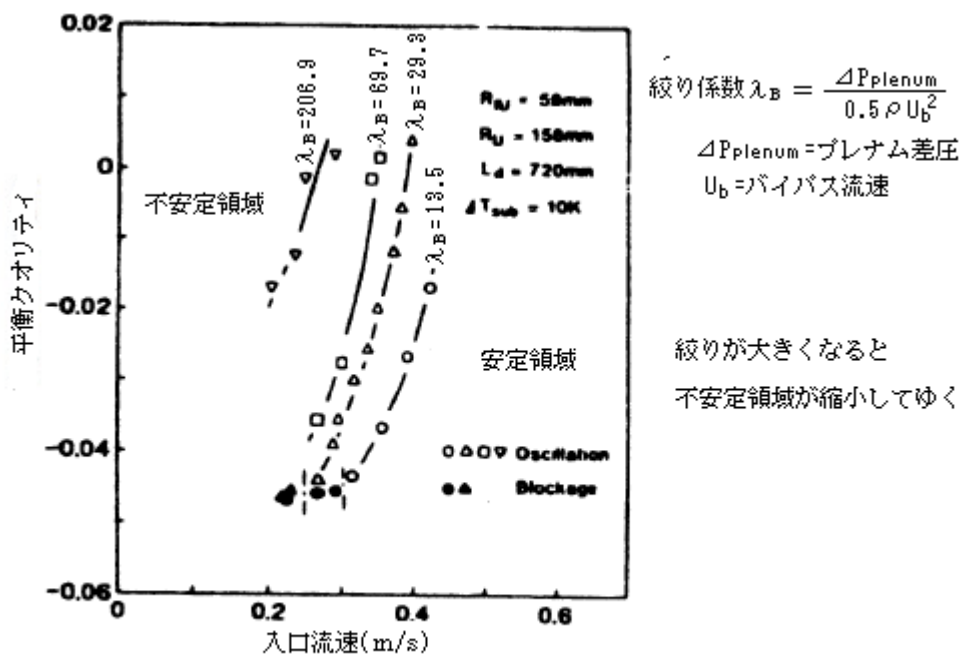


図15 安定限界(バイパス絞りの影響)

安定化のためには、下降管長を短くする、ベント曲率を小さくする。また入口絞りをきつくする。
 なお、サブクール度をあげるのもよい。

4. 実際設備への運用

- (1) ここでは文献(2)(3)の内容を要約的に紹介した。その内容は図1モデルの試験結果によるものであってあくまでも実験ベースである。従って具体的数値をそっくりそのまま運用するのは？である。ただ定性的傾向はこれに然りであり、類縁設備の設計に当たって有益な目安を与える筈である。その辺を、よく心得て運用すべきである。

- (2) 実験は沸騰流路とバイパス流路に分離しているが、実際は多数の並列流路で起きる現象である。実機において、低流速域(参考で 0.4m/s 以下)では気泡閉塞形不安定が直接発生する。高流速域では Ledinegg 形の不安定がまず生じ、低流速になった流路で気泡閉塞形不安定が誘起される複合現象が発生すると思われる。また多群並列管では各流路のわずかな流速の増加が 1 つの流路の完全閉塞現象を誘起することが考えられる。実際はどうであるか？今後とも関連情報に注目していきたい。

引用文献)

- (1) JSME「気液 2 相流技術ハンドブック」(コロナ社)

6.3.3 フローパターン遷移に起因する不安定流動

- (2) “気泡の閉塞により誘起される不安定流動(第 1 報 発生機構に関する実験結果)” 有富,井上,石田
JSME 論文集(B) 52 巻 480 号(S61-8)
- (3) “気泡の閉塞により誘起される不安定流動 (第 2 報 流路条件の影響)” 有富,井上,羽場
JSME 論文集(B) 53 巻 488 号(S62-4)