垂直な環状流路内沸騰二相流の過渡変化時における 流動障害物近傍の加熱表面温度変動特性*

森 昌司^{*1}, 深野 徹^{*2}, 中川 哲朗^{*3}

Fluctuation Characteristics of Heating Surface Temperature near the Obstacle in Transient Boiling Two-Phase Flow in a Vertical Annular Channel

Shoji MORI, Tohru FUKANO^{*4} and Tetsuro NAKAGAWA

^{*4} Graduate School of Engineering, Kyushu University,
6-10-1 Hakozaki, Higashi-ku, Fukuoka-shi, Fukuoka, 812-8581 Japan

If a flow obstruction such as a spacer is set in a boiling two-phase flow within an annular channel, the inner tube of which is used as a heater, the temperature on the surface of the heater tube is severely affected by the existence of the spacer. In some cases the spacer has a cooling effect, and in the other case it causes the dryout of the cooling liquid film on the heating surface resulting in the burnout of the tube. But the thermo-fluid dynamics mechanism to cause burnout near the spacer is not still clear. In the present paper we discuss temperature fluctuation characteristics in relation to the change of the flow configuration near the spacer in transient boiling two-phase flow. The transient parameters are the heat flux, the mass flow rate, and the inlet quality.

Key Words: Multi-Phase Flow, Boiling, Spacer, Durnout, Bryout, Temperature Distribution
Transient

1. 緒 言

近年地球温暖化の緩和のため CO₂ 削減が緊急の課題になっており, そのため各種熱機器の高効率化が計られている. その方策として熱交換器では伝熱管支持材を伝熱促進の方策として積極的に利用している例がある⁽¹⁾. 一方電力需要の増加や火力発電所から排出される CO₂ の環境問題から原子力発電への期待は減ずることはなく, その安全性は十分検討され続けなければならない. 例えば BWR の熱設計では燃料棒支持用のスペーサ近傍での熱除去が早くから重要な問題とされているが⁽²⁾⁽³⁾, 現在もなお詳細には不明な点が多い. したがって気液二相流中の流動障害物の熱流動に与える影響⁽⁴⁾⁽⁵⁾, 特に伝熱特性に及ぼす影響を明確にしておくことは必須のことである.

著者らは既報において, BWR の燃料棒支持用スペーサ周辺の熱流動を模擬した(圧力レベルは異なる)実験装置において, 高速度ビデオを用いた詳細な観察か

ら, ドライパッチ(水膜の破断)は主としてスペーサ下部に生じること⁽⁶⁾⁽⁷⁾, スペーサ内部の温度分布の測定からスペーサは冷却効果を有していることのほか, ドライパッチの発生はスペーサ形状に強く依存していること, これらが気液二相流動状況と密接に関係していること⁽⁸⁾, ドライパッチ発生に与える上流側のスペーサの影響⁽⁹⁾, スペーサ近傍の流動, 特に加熱壁面がドライアウトに至り, 再び液膜が形成される過程と温度変動との関係⁽¹⁰⁾などを明らかにした. これらの研究はおもに定常的な流れの中におけるスペーサの基本的な特性を調査したものである.

本報では特に熱流束, 流量および供試管への流入口のクオリティをそれぞれ急変させた場合のスペーサ近傍の加熱表面温度の過渡的挙動をビデオカメラによる流動様相の観察と同時計測し, それぞれ過渡変動がスペーサ近傍の加熱表面温度変動特性に与える影響について実験的に調査した結果について述べる. なお本実験は大気圧下でなされたものであるため, 本結果が BWR の実機のように高圧下における BT(Boiling Transion)現象の本質に触れたものであるかどうかはさらなる検討が必要である.

* 原稿受付 2001 年 3 月 6 日.

^{*1} 准員, 九州大学大学院.

^{*2} 正員, 九州大学大学院工学研究院機械科学部門(☎ 812-8581 福岡市東区箱崎 6-10-1).

^{*3} 九州大学大学院.

E-mail: fukanot@mech.kyushu-u.ac.jp

2. 実験装置および方法

図1に本実験装置の概略図を示す。供試管①は、密閉された強制対流ループ内に鉛直に設置した。ポンプ⑦で圧送された作動流体(精製水)は供試管の入口に設置された圧力計⑨と予熱器⑩により、サブクール度を設定され、供試管①の下方より流入する。流量急変実験では、サブクール度をできるだけ一定に保持しつつバイパス管⑬を用いて流量を変化させ、入口クオリティ急変の実験では予熱器⑩の出力を急変させることで供試管入口のクオリティを急変させた。

供試管は図2に示すように同心の二重円管から成っており、内径 16 mm、外径 26 mm の環状流路を構成している。内管(発熱管)は、精密に製造した外径 16.0 mm、肉厚 1.0 mm のステンレス管製であり、これに直流電源を印加することにより、環状流路を通過する二相混合流体を加熱する。またこの発熱管の両端には電極としても使用される同じ外径の銅管が銀ろう付けされている。外管は沸騰流の流動様相の観察ができるようにパイレックスガラス製である。

スパーサ設置位置は過渡変動の実験では加熱開始断面から 1550 mm 下流の断面にスパーサの前縁が一致するように設定した。本研究では図3に示すガラス製リング形スパーサを使用し、スパーサすきま (Spacer Gap) 内部の液膜およびドライパッチなど流動状態の観察を可能にした。スパーサの肉厚と軸方向長さはそれぞれ 1.0 mm と 30.0 mm であり、加熱管とスパーサのすきまは管周方向に一律に 1.0 mm である。

供試管入口と気液分離器内の 2 箇所の圧力はひずみゲージ式圧力計で測定し、作動流体の入口サブクール度は供試管入口の圧力を基準として決定した。スパー

サ前縁での作動流体の状態は、上記の 2 箇所の圧力から内挿して求めた圧力を基準に決定した。

発熱管内壁温度の時間変動を測定するために、熱容量の小さい素線径 0.08 mm のクロメル-アルメル熱電対を検定、校正して使用した。基準接点として精製水と細かく砕いた氷を混合し標準温度計により正確な基準温度を得た。

これらの熱電対を図4に示すようにスパーサ上流側 40 mm の断面からスパーサ下流側 10 mm の断面まで、全体で 80 mm の範囲の管軸方向に異なる 6 点 (TC 1~TC 6) に設定した。約 0.01 mm の薄い雲母板で加熱管と絶縁し、それらをカプトンテープで挟み、さらに外径 10 mm、肉厚 1 mm のシリコンチューブを挿入し、それに約 0.2 MPa の内圧を加え熱電対を発熱管の内壁に圧着した。

Fig. 2 Test section and spacer

Fig. 1 Schematic view of experimental apparatus

Fig. 3 Shape of glass ring spacer

時間的に変動する六つの加熱管内表面の温度変動のデータをサンプリング周波数 135 Hz で読取り、データレコーダ(横河電機製—LR 12000)に同時記録した。また発熱管は肉厚が管径に比して十分薄いので一次元無限平板とみなし、一様発熱のある非定常熱伝導モデルとして数値的に解き⁽¹⁰⁾、刻々変化する管内壁の測定値 $T_{w\text{in}}$ から発熱管外表面温度 $T_{w\text{out}}$ を算定した。熱流束は発熱管に印加している電圧、電流を直接計測し、それから求められる加熱量と発熱部の表面積より時間平均熱流束を算定した。またスぺーサ近傍の流動現象を 30 フレーム/s でビデオカメラにより温度変動記録と同期して撮影した。

発熱管表面温度と流動様相を同時計測した結果、本実験の場合発熱管加熱表面温度が 160°C を超すとドライアウトした壁面をじょう乱波が通過しても再びぬられにくくなり、180°C を超すとほぼぬられず表面温度が上昇し続けるため、本論文においてはこの温度で BT (Boiling Transition) 発生と判断し、ただちに加熱を中止した。

実験条件は、スぺーサ前縁(下端)の位置で表して、気相の見掛け流速は $j_g = 0 \sim \text{約 } 40 \text{ m/s}$ 、液相の見掛け流速は $j_L = 0.1 \sim 0.25 \text{ m/s}$ であり熱流束 q は $0 \sim \text{約 } 250 \text{ kW/m}^2$ の範囲、システム圧は大気圧である。また入口サブクール度 T_{sub} は入口クオリティを変化させる場合は 10 K で供試管入口でのポイド率はほぼ零で水単相である^{**1}。

3. 実験結果および考察

3.1 熱流束急変がスぺーサ近傍の外壁温度変動特性に与える影響

本節では一定の加熱と流動条件下

Fig. 4 Location of thermocouples

で定常に作動している状態から熱流束を急増もしくは急減させたときの流動とスぺーサ近傍の過渡的挙動について述べる。

3.1.1 熱流束急増の場合 図 5(a), (b)の横軸は時間 s 、左縦軸は発熱管外壁温度°C、右縦軸に示した熱流束 kW/m^2 は図 5 中上部の「Heat Flux」でそのステップ状変化を示した実線に対応している。図 5 中右端の「OFF」はスぺーサ近傍において BT が発生したと判断し、安全のために加熱を中止した時刻を示している(以下の図中の「OFF」も同様)。熱流束の変化幅は、変化後の設定値に対して 10~50% の変化幅で実験を行った。この変化後の設定条件は各図中の枠内に記している(以下同様)。

図 5(a) は時刻 42 s で熱流束が急増した後、55 s のあたりでスぺーサ近傍で BT が発生した場合の加熱表面温度変動特性の一例であり、急変後の条件は本実験装置における定常作動時に BT が発生する場合(以下定常 BT と表記)とほぼ同条件(熱流束 $q = 225 \text{ kW/m}^2$, $j_g = 35 \text{ m/s}$, $j_L = 0.08 \text{ m/s}$)である。変化幅の異なる他のすべての実験点においても熱流束を定常 BT と同程度まで急増させると、その変化幅に関係なく BT が発生した。また図 5(a) ではまずスぺーサ上流側(TC 2)において BT が発生しているが、本実験条件($j_L = 0.08 \text{ m/s}$)では、スぺーサ上流側においてのみ BT が発生するわけではなく、その内部でも発生することもある。ただしいずれの場合もスぺーサ下流(TO 6)では BT が発生しなかった。

Fig. 5 Temperature fluctuation in case of the sudden increase of heat flux ($j_L = 0.1 \text{ m/s}$, $T_{\text{sub}} = 10 \text{ K}$)

^{**1} 本実験結果を実機に適用させる場合には物性値の違いを考慮する必要がある。

図5(b)は変化後の熱流束が定常 BT 条件よりいくぶん低い場合の加熱表面温度変動特性である。流動様相は変化前後ともに十分発達したじょう乱波流れである。この場合熱流束の変化幅によらずすべての実験点において BT は発生しなかった。これらより過渡 BT の限界出力は、定常 BT のそれと同程度であり、過渡的な要素は限界出力には影響を与えないことがわかる。

3・1・2 熱流束急減の場合 本節では定常な作動状態から急激に熱流束を低減させた場合の検討結果について述べる。図6は上下の横軸にそれぞれ熱流束急減後の見掛けの気相流速 j_G および熱流束 q_{after} 、縦軸に最大温度上昇幅を示している。熱流束急減前の条件は、すべての実験点の場合において、熱流束 $q=220 \text{ kW/m}^2$ 、 $j_G=35 \text{ m/s}$ 、 $j_L=0.08 \text{ m/s}$ で一定であり、スーパース部のクオリティ $x=0.221$ である。

この条件より熱流束をステップ状に急減させることで過渡変動させた。よって図6では右方向の実験点ほど熱流束の急減量が大である。図6より熱流束の急減量を増やしていくと、図6中(b)のようにまずスーパース内部で最大温度上昇幅が大きくなり、さらに急減量が大となるとスーパース上流側に移行していく[図6中(c)]。その変動幅は最大で約20~25 Kにも及ぶことがわかる。これよりさらに急減量を増加させると、変化後の定常熱流束が非常に小さくなるため、スーパース近傍では目立った温度上昇はなくなる。

図7は、図6における温度変動の代表的な実験点(a)~(c)における発熱管外壁面温度変動を示したものであり、全サンプル時間60 sのうち、熱流束急減の

Fig. 6 Maximum temperature-increase in case of heat flux reduction

時刻を含む10~30 sのデータを示す。図7中横軸に接した短い縦線は、その時刻にスーパース近傍をじょう乱波が通過したことを示している(以下の図中の縦線も同様)。

図7(a): 変化後においても発達したじょう乱波流れであり、じょう乱波は途切れることなく連続的にスーパース近傍を通過するため、大きな温度変動はない。

図7(b): 急減量を徐々に大きくしていくと急減後1~2 s後にスーパース内部で20 K前後の大きな温度上昇が生じる。この急減直後にはスーパース近傍で大規模のドレーニジが発生し、じょう乱波が約2.4 s間通過しなくなる。そのためその間に液膜の薄膜化が進み、スーパース前縁から破断してスーパース内部にドライパッチが急速に拡大する。このときの壁温変動と同期した流動様相の写真を図8に示す。この写真から斜線で示すドライパッチはスーパース固定用ねじと前縁より発生し急速にスーパース内部に成長するとともに上流側にも広がるのがわかる。またドライパッチが到達した時間帯に壁温が急上昇し液塊の到達とともに壁温が下降する⁽¹⁰⁾。

Fig. 7 Temperature fluctuation in case of sudden reduction of the heat flux ($j_L=0.1 \text{ m/s}$, $T_{\text{sub}}=10 \text{ K}$)

このようにスパーサ内部に急速にドライパッチが広がるのは、スパーサによるブロックで流路が狭くなることによる増速効果でスパーサ内部の膜厚がその上流側に比して薄くなり、蒸発が促進されることによることが考えられる。また図8に示すように、ドライパッチはスパーサ近傍から発生し、ある程度液膜が薄くなるとその上流側の少し離れた所においてもクレータ状に液膜が破断し、それが成長、合体して大きなドライパッチを形成する。この場合には熱流束急減後の熱流束が低いため、壁面はライデンフロスト温度まで上昇せず、じょう乱波の到達とほぼ同時にぬらされ、壁温は低下する。

図7(c)：図7(b)の場合より、さらに熱流束の急減量を大きくするとドライパッチ存在時間が長くなりスパーサ前縁で発生したドライパッチは22.5sにスパーサの上流側のTC1にまで到達する。しかしこの場合も変化後の熱流束が低いため、壁温はさほど上昇しない。そのため壁面はじょう乱波の到達(23.5s)と同時にぬらされる。またスパーサ内部がその上流側より先に温度が下降しているのはスパーサの下流側(上部)にたまっていた液体が下降することでぬらされたものである。

以上より発熱管表面温度上昇量はドライパッチ存在時間と熱流束に支配され、ドライパッチ発生ひいてはBTが発生するか否かは熱流束とじょう乱波間隔に強く影響を受けていることがわかる。また急減後にじょう乱波の通過頻度が一時的に少なくなるのは、急変後

の熱流束に対応する定常状態まで流動様相が遷移する時間が必要であり、その遅れが原因である。つまり熱流束を急減すると瞬間的に j_c が小さくなり、液膜に作用するせん断力も小さくなる。そのため液塊はある一定以上のせん断力になるまでじょう乱波として液体を輸送しない。このことは大きな壁温上昇が急減直後においてのみ発生し、定常状態に遷移した後はもはやそのような壁温上昇がないことと、熱流束の急減量が大きくなるにつれて、急変後からいったんじょう乱波が少なくなり再びじょう乱波が通過するまでにかかる時間が図7(b)では約2.4s、図7(c)では約3.0sと長くなることからわかる。

以上のことより熱流束急変によって流動様相が急変する場合、変化幅がある値を超すと急増・急減にかかわらず非常に危険な状態になることがわかる。

3.2 質量流量急変がスパーサ近傍の外壁温度変動特性に与える影響 流量急変がスパーサ近傍に与える影響を調査するため、熱流束を $q=228\text{ kW/m}^2$ 、流量を $j_L=0.3\text{ m/s}$ と一定に設定し、その状態から流量を急減させた。変化の範囲は初期設定流量の30~90%である。

図9(a)、(b)はそれぞれ流量を定常BTが発生する流量まで急減させた場合とそれより若干大きい流量まで急減させた場合の発熱管表面温度変動特性である。図9(a)のように定常BTが起こる条件まで急減

Fig. 8 Change of flow configuration around the spacer in the same case of Fig. 7(b) ($j_L=0.1\text{ m/s}$, $T_{sub}=10\text{ K}$)

Fig. 9 Temperature fluctuation in case of the sudden reduction mass flow rate ($q=228\text{ kW/m}^2$, $T_{sub}=10\text{ K}$)

させた場合には TC1, TC2 などスぺーサ上流側で BT が発生し, 図 9(b) のようにこれより流量が大きい場合には BT が発生しないことがわかる. また BT は定常 BT と同様スぺーサ内部およびその上流側においても発生するが, TC1 で最も壁温の上昇が激しい.

以上より流量急減による過渡 BT も熱流束急増の場合と同様その限界出力は, 定常 BT と同程度であり, 過渡的な要素の影響は小さいことがわかる.

3.3 入口クオリティ急変がスぺーサ近傍の外壁温度変動特性に与える影響 3.2 節までに述べた実験では供試管入口サブクール度を予熱器により一定に保った. 本節においては供試管入口におけるクオリティ x_{in} の急変, つまり流動様相の急変がスぺーサ近傍に与える影響を調査した. そのため, 供試管の熱流束と見掛けの液流速をそれぞれ $q=195 \text{ kW/m}^2$, $j_L=0.23 \text{ m/s}$ で一定に保持し, 予熱器の出力を変化させることで瞬間的に x_{in} を変化させた.

図 10(a) は x_{in} を急増させた場合であり, その変化前後の実験条件はそれぞれ, 図 10(a) 中に示しているように $x_{in}=-0.0178$, $j_G=20.8 \text{ m/s}$ と $x_{in}=0.0034$, $j_G=27.4 \text{ m/s}$ であり, 図 10(b) の実験条件は図 10(a) の場合の変化前後の値とちょうど反対である. また図 10 中の「Start」は入口クオリティ急変の開始時刻を意味する.

図 10(a) より x_{in} を急増させた場合, 急増後におい

Fig. 10 Temperature fluctuation in case of the sudden change in the inlet quality ($q=193 \text{ kW/m}^2$, $j_L=0.22 \text{ m/s}$)

てもほとんど絶え間なくじょう乱波がスぺーサ近傍を通過するため大きな温度変動は生じない. 一方図 10(b) の場合にはスぺーサ近傍で急減後に BT が発生する. それに至るまでの発熱管表面温度変動特性は以下のように説明される. すなわち x_{in} を急減してもスぺーサ近傍の流動様相は環状流のままであるが, 急減後約 4~5 s 後にじょう乱波の通過頻度が少なくなる. この遅れは, 3.1.1 項で述べた熱流束急減の場合と類似の現象であり, 流動様相の遷移する際の時間遅れによっている. それは, 急変後, 図 10(a) の壁温が定常状態に遷移するのに 5~6 s (65~66 s) 要しているが, これが図 10(b) のじょう乱波の通過頻度が特に悪くなる時間までの遅れ時間とほぼ同程度であることからわかる.

その後上述のようにじょう乱波の通過頻度が少なくなると, じょう乱波が通過する前に基底液膜が蒸発によりドライアウトし, 壁温が急上昇する. この壁温がライデンフロスト温度以上になるとじょう乱波が通過しても再びぬらされず BT へと至る. このときスぺーサ上流側の TC1 から壁温が上昇するのは, TC2 の近傍ではスぺーサによるせき止め効果により液膜が厚くなっているため⁽⁵⁾ であり, スぺーサ内部では発熱管とスぺーサとの間のクリアランスが 1 mm と狭いため表面張力により液体が保持されやすいからである. このように高流量 ($j_L=0.25 \text{ m/s}$) の場合, スぺーサ内部において BT の発生が遅れたり BT が発生しないことには再現性がある. また本実験装置には供試管の入口にエルボが存在するため気体スラグの合体による不安定流動が考えられる. そのため, 入口クオリティをさまざまに変えた定常実験を行った. その結果高流量 ($j_L=0.2 \text{ m/s}$ 以上) の場合にはそのエルボの影響はほとんどないことがわかった.

以上のことから熱流束急減時と同様に変化後の条件が定常 BT 以下の実験条件ならば, 流動様相を急激に発達させても比較的安定に遷移するが, その反対の条件への変化の場合には BT が発生することもあり, 十分な注意が必要であることがわかる.

4. 結 論

狭い環状流路内沸騰二相流中に設置した流動障害物近傍の発熱管表面温度変動特性とその流動様相とを同時計測した. 供試管の熱流束, 質量流量, 入口クオリティをそれぞれ急変する場合, その過渡変動が流動障害物近傍の壁温変動に与える影響について詳細に調査した結果, 次の結論を得た.

- (1) 熱流束急増および質量流量急減の過渡変化の

場合、過渡変化の影響は小さく変化後の条件が定常 BT とほぼ同じ条件の場合にのみ BT が発生する。また低流量の場合 ($j_L=0.1$ m/s), BT はスぺーサ下部 (上流側) かスぺーサ内部かにかかわらずいずれでも発生するが、スぺーサ下流では常に BT は発生しない。

(2) 熱流束急減による過渡変化ではその変動幅によってドライパッチがスぺーサ内部およびその上流側にまで及び、温度上昇幅も最大で 20~30 K にも及ぶ。

(3) 供試管入口クオリティを急増させる場合には安定に遷移するが、逆に急減させる場合にはじょう乱波の通過頻度が急減後に少なくなり、スぺーサ近傍で BT が発生する。

(4) 過渡変化により流動様相が急変しても、流速が速くなり、気流のせん断力が増す方向に変化する場合は比較的安定に遷移するが、その反対に速度が低下する方向に変わる場合には定常 BT 条件以下でも BT が発生することもあり十分な注意が必要である。

(5) 本報での BT 発生に対する共通の知見として、じょう乱波の通過頻度が BT 発生と密接に関係し、じょう乱波の通過間隔が長くなると BT 発生に至ることがわかった。

文 献

- (1) 椎名孝次・中村昭三・清水暢夫, 薄い平板状障害物による矩形流路内強制対流熱伝達の促進, 機論, 54-497, B (1988), 148-154.
- (2) Arai, K., Tsunoyama, S., Yokobori, S. and Yoshimura, K., Critical Power Characteristics in a Rod Bundle with Narrow Gap, *Dynamics of Two-Phase Flow*, 739-752 (1992), CRC Press.
- (3) 師岡慎一・白川健悦・木村次郎, BWR 模擬燃料集合体の限界出力についての研究, 第 31 回日本伝熱シンポジウム講演論文集, (1994-5), 175-178.
- (4) Shiralkar, B. S. and Lahey, R. T., Jr., The Effect of Obstacles on a Liquid Flow. *Trans. ASME, J. Heat Transf.*, 95-4 (1973), 528-533.
- (5) Fukano, T., Tanaka, T., Kutaragi, K. and Kanamori, M., The Effects of a Flat-Plate Type Obstacle on a Thin Liquid Film Flow, *DYNAMICS of TWO-PHASE FLOWS*, (1992), 161-183, CRC Press.
- (6) Sekoguchi, K., Tanaka, O., Furukawa, T., Esaki, S. and Fukano, T., Experimental Investigation of the Alternate Dry and Rewet (ADR) on Heated Tubes with and without an Obstruction in Flow Boiling, *Proc. 6th IHTC4*, (1978-8), 355-360.
- (7) 深野徹・後藤昭和・鶴崎勇太郎・師岡慎一, 垂直上昇沸騰二相流中の障害物による加熱管表面の液膜のドライパッチ (第 1 報, 環状流路内での流動様式とドライパッチ発生の観察), 機論, 61-587, B (1995), 2597-2604.
- (8) 深野徹・江頭竜・内藤宏治, 鉛直な環状流路内上昇沸騰二相流中の流動障害物によって生じる加熱壁面上での液膜消失 (障害物形状の影響), 機論, 64-626, B (1998), 3399-3406.
- (9) Fukano, T., Dryout of Water Film on a Heated Tube Surface Caused by an Obstruction in a Boiling Two-Phase Vertical Upward Flow in an Annular Channel (Effects of an Upstream Spacer), *Proc. of 11th Int. Heat Transf. Conf.*, 2 (1998-8), 249-254.
- (10) 深野徹・赤松志津・馬場厚・奥迫隆・森昌司, 狭い環状流路内沸騰二相流中のスぺーサ近傍での加熱表面温度変動特性とドライアウト発生との関係, 機論, 66-650, B (2000), 2704-2711.