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を観察)

深 野 徹^{*1}, 後 藤 昭 和^{*1}
鶴 崎 勇 太 郎^{*2}, 師 岡 慎 一^{*3}

Dryout of Water Film on a Heated Tube Surface Caused by an Obstruction in a Boiling Two-Phase Vertical Upward Flow (1st Report, Observation of Flow Pattern and Dryout Generation in Annular Channel)

Tohru FUKANO, Akikazu GOTO,
Yutaro TSURUSAKI and Shin-ichi MOROOKA

Both economy and safety of the nuclear power stations are strongly demanded. One of the problems in the thermal design of a nuclear reactor, especially in BWR, arises near the spacer supporting the nuclear fuel rods. The purpose of the present paper is to make clear the mechanism causing the water film breakdown which results in the burnout of heating tube near the spacer, and its relation to the flow pattern. The experimental results show that film breakdown occurs near the leading edge, i. e., just below the spacer, as well as the inside of the down part of the gap between the outer surface of the heating tube and the simulated spacer.

Key Words: Multi-phase Flow, Unsteady Flow, Nuclear Reactor, Flow-boiling, Drypatch, Dryout, Burnout

1. 緒 言

CO₂による温室効果の問題に加え, 各国でのエネルギー需要増加のため, 原子力発電の重要性はますます高まっている。それゆえ冷却材喪失事故などの重大な事故を引き起こさないように, 原子炉の安全性を確保するための研究がさらに必要である。

一方, 今日, 旧形・新形にかかわらず原子炉プラントにはともに経済的で高効率な設計が望まれている。しかし, 例えばBWRに関する熱的な設計の制約は, 燃料棒を支持するスペーサ近傍での燃料棒からの熱除去にあるということが, 大規模な装置を用いた実験から指摘されている。

BWRの炉心における冷却水の流れは, 特に熱除去の特性が問題となるのは, 通常燃料棒上を液膜の状態で行く環状流であると考えられている。それに基づいて, スペーサ近傍での熱的制約の発生機構を明確にすることを目的とした研究⁽¹⁾がなされている。著者らの一人によってなされた実験的調査によれば壁面とス

ペーサを模擬した障害物との間にすきまがない場合, ドレーニジ(液体の逆流による液膜の急激な薄膜化)が障害物上流でのドライパッチ発生のおもな原因であった⁽²⁾。この研究では密閉形障害物は加熱壁に密着されていたが, 実際のBWR内のスペーサと燃料棒の表面との間には約1 mmほどのすきまがある。

Shiralkarらは, 水平矩形ダクト底面に円柱状突起を設置し, その突起近傍でのドライパッチの発生要因について検討している⁽³⁾。また, 水平ダクト内で, 燃料棒のスペーサを模擬した平板タイプの流動障害物と高速気流に伴われる液膜流との相互作用(干渉)が詳細に調査された。その結果平板に取付けた突起部が水平ダクト内の底面で接触して液膜のドライアウトが生じることが明らかになった⁽⁴⁾。しかし, これらは水平流で成されているため気液二相流の流動現象に重要な重力の影響が不明である。

上述のような背景にたつて, 本研究ではBWR燃料の代表的なスペーサの一つである丸セルタイプのものを模擬した平板形の流動障害物を環状流路内に設置し, その近傍の液体の挙動を観察した。さらに重力の効果も検討できるように鉛直管とした。

* 原稿受付 1994年6月13日。

^{*1} 正員, 九州大学工学部 (〒812 福岡市東区箱崎6-10-1)。

^{*2} 川崎重工工業(株) (〒650-91 神戸市中央区東川崎町3-1-1)。

^{*3} 正員, (株)東芝原子力研究所 (〒235 川崎市川崎区新浮島町4-1)。

2. おもな記号

- j_G : 気体(蒸気)の体積流束 m/s
 j_L : 液体(水)の体積流束 m/s
 L : 加熱管入口からの距離 m, mm
 m : 質量速度 $\text{kg}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$
 N : ドライパッチの発生頻度 s^{-1}
 q : 熱流束 kW/m^2
 S : スペーサのすきま mm
 T_{sub} : 入口サブクーリング $^{\circ}\text{C}$
 ΔT : 加熱管表面温度と飽和温度との差 $^{\circ}\text{C}$
 U_{in} : 水の入口平均流速 m/s

流動様式

- A: 環状流
 B: 気泡流
 F: フロス流
 S: スラグ流

添字

- G: 気相
 L: 液相

3. 実験装置および方法

図1に本実験で用いた実験装置の概略を示す。供試部は同心二重管で、これが密閉された強制対流ループ内に垂直に設置されている。循環用ポンプ⑦で循環する作動流体(蒸留水)は、供試部入口での作動流体温度すなわち入口のサブクーリングを制御するための予熱器⑩を経たのち供試部①に流入する。

供試部出口からの蒸気-水二相混合体は気水分離器②で蒸気と水に分離され、循環用ポンプ内で生じるキ

ャピテーションを防ぐため、別の凝縮器⑤で飽和温度以下に冷却されたのち、貯水タンク⑥に戻される。

供試部の内管はインコネル製であり、直接通電加熱用のヒータとして用いられた。その長さは1970 mm、外径は16 mmである。内管の肉厚は1 mmになるように機械加工されている。ただし、供試部の出口近傍は出口端でのみ液膜のドライアウトが生じないように、熱流束を低減するため、上方へと肉厚は増加させている。供試部の両端には加熱用の電力供給用電極として銅板を取付けている。

一方、二重管の外管は、外径30 mm、内径26 mm、長さ1420 mmで、加熱部の流動様式が観察できるように、透明なパイレックスガラス製である。

平板形の流動障害物は、加熱開始点から下流側1225 mmの位置に設置した。それを図2の右側の円内に示している。障害物の幾何形状は、燃料棒を支持するスペーサを模擬して決定した。本報ではこの障害物をスペーサと呼ぶ。スペーサは直径3 mmの6本の鉄製のピンを用いて軸方向に異なる2断面、周方向に3点の計6点で支持してある。このピンをスペーサピンと呼ぶ。下流側のスペーサピンの先端は平たんな形状である。一方、上流側のスペーサピンの先端は三角すい状でいずれも加熱管に密着するように取付けた。

スペーサ形状として3種類のものを用いた。そのサイズを図2内の表に示す。スペーサの厚み W と軸方向長さはいずれもおおの1.0 mmと30.0 mmであるが、加熱管外表面と障害物内表面とのすきまは0.5~1.5 mmに変えた。本報ではこれをスペーサすきまと呼ぶ。また、スペーサすきまの外側にも流路があ

図1 実験装置概要

図2 供試部詳細

り,これを主流路と呼ぶ。

4本の熱電対は,図3に示すスペーサの上流側(下方)半分の,管軸方向に異なる位置で厚さ0.15mmの薄いマイカテープを介して,加熱管の内表面に押しあてられている。熱電対からの時間的に変化する四つの出力信号は,データレコーダに同時に記録された。実験では入口サブクーリングと流量をあらかじめ定めた値に設定したのち,熱流束を徐々に増加させた。

流動様式,ドライパッチの発生と消滅の過程は,1sあたり500~750フレームで高速度ビデオレコーダに記録した。また,流動を観察するためスチールカメラも併用した。実験条件は系の圧力と入口流速をのぞき,BWRの運転条件ならびに実験装置の能力を考慮して以下の条件で行った。熱流速 $q=0\sim 300\text{ kW/m}^2$,入口流速 $U_{in}=0.1\sim 0.25\text{ m/s}$,これに対応する質量速度 $m=98.2\sim 491.0\text{ kg/(m}^2\cdot\text{s)}$,入口サブクーリング $T_{sub}=10, 20^\circ\text{C}$,見掛けの蒸気流速 $j_g=0\sim 20\text{ m/s}$ である。なお,本実験結果を実機に適用する場合,

図3 熱電対取付詳細

気液密度比を始めとする物性値の違いがあることに留意する必要がある。

4. 実験結果および考察

4.1 障害物のない場合の流動様式 環状流路内の沸騰二相流の流動様式は単管内のそれに比べてより複雑であるが,著者らは図4(a)~(d)に示す四つの典型的な流動様式に分類した。流動様式の定義は次のとおりである。なお,本論文でスペーサを設置した場合のスペーサ近傍の流動様式はスペーサ流入直前の流動様式を意味する。

気泡流:蒸気泡の直径が環状流路のすきま(5mm)以下の場合[図4(a)]。

スラグ流:直径が5mm以上の蒸気泡が存在するので,液塊が流れの中に観察されない場合[図4(b)]。

フロス流:加熱管の直径以上の大気泡が存在する場合[図4(c)]。

環状流:液体はおもにガラス管の内壁と加熱管の外壁の両方を液膜として流れる場合[図4(d)]。この流れでほんのわずかの時間ではあるが,液体の逆流が頻繁に生じることに留意しなければならない。

供試部内の流動様式は加熱量にもよるが,通常水単相流から気泡流,スラグ流,フロス流さらに環状流へと,供試管内の底部から頂部へ変化する。図5に供試部に沿う流動方式の変化の一例を示す。細線は各流動様式間の境界を示している。熱流束 q の増加は蒸気の質量流量の増加に対応している。例えば図5中の一点鎖線で示すように,熱流束が与えられると,供試管内の流動様式はその線の下から上へと変化していること

図4 流動様相(スペーサなし)(写真)

を意味する。なお、供試部内管の肉厚の増加開始点を水平な点線で示している。

図5中の斜線部で示す二つの領域は、その領域でドライパッチが生じたことを示している。これらのドライパッチは、大きな(波高の高い)波の通過したあと、薄い液膜が形成されたときに発生するもので、図9に示すスペーサ周辺に発生するものに比較すれば、極めて短時間の存在であり、加熱壁面上で乾きとぬれを繰返していた。またその発生点も斜線の領域内ではあるが定まてはいない。実験に用いた加熱管は加熱領域の出口で熱流束が減少するように設計されているので、前報⁽²⁾のように出口で管が赤熱されることはなかった。

図5で明らかになるようにドライパッチの発生は流動様式、すなわちフロス流と環状流に密接に関連して

図5 流れ方向の流動様式の変化(スペーサなし)

いる。フロス流と環状流の遷移域ではドライパッチは発生しなかった。この結果は既報⁽²⁾と同じである。

4.2 スペーサが設置されている場合のドライパッチの発生 図6(a)~(d)にスペーサ近傍での流動様式を示す。基本的にはスペーサの有無による流動様式の差異はなかったが、詳細には以下に示す図6(a)~(d)の各図面から興味深い気泡の挙動や、液体の流動に注目する必要がある。図6(a)の気泡流では、直径1~2 mmの気泡群の速度は主流路におけるほうが、スペーサすきまにおける速度に比べ速く、その速度比はおおののの流路断面積の比とほぼ同等であった。

図6(b)も気泡流であるが、この場合スペーサすきまで生じた気泡は上流側すなわち下方へ成長した。図6(c)に示すように、熱流束 q が増大するとスペーサすきま内で生じた気泡は其中で急激に下方に成長し、スペーサの外側まで広がる。そのため、液体はスペーサすきまの中へ下側から流入できなくなる。図6(d)のフロス流では、小気泡のかわりにスペーサすきまは蒸気でおおわれているが、液塊も存在し、固体壁面は液膜でおおわれていた。この状況は、たとえ流動様式が環状流になっても、大きく変わることはなかった。

フロス流では、ドライパッチの初生は、図7(a)の斜線で示すスペーサすきま内のスペーサピンの周辺で観察され、その存在時間は非常に短かった。このタイプのドライパッチを本研究ではIDR(Inside Dry and Rewet)と呼ぶ。さらに熱流束を増せば、流動様式は環状流となり、ドライパッチの面積も大きくなり、図7(b)に示すようにスペーサすきまの外側にまで広が

図6 スペーサ近傍の流動様相(高速度ビデオによる)

 図 7 ドライパッチの発生例 ($T_{\text{sub}} = 20^\circ\text{C}$)

図 9 流れ方向の流動様式の変化 (スパーサあり)

図 8 スパーサ位置での流動様式マップ

る。このタイプのドライパッチを UDR (Upstream Dry and Rewet) と呼ぶ。

ドライパッチの生成とスパーサ近傍での流動様式との関連を図 8 に示す。図 8 (a) が入口サブクーリング T_{sub} が 10°C の場合で、(b) は 20°C の場合である。なお、図 8 (b) 中の ADR とは加熱壁とのすきまがない、いわゆる密閉形障害物の結果⁽²⁾で、比較のため図示した。また W は加熱壁が常時液膜で被われていること

を意味する。UDR の発生は環状流領域に限定されている。一方、すきまがない密閉形スパーサの場合、加熱管でのドライパッチ生成とぬれの繰返しが生じ、密閉形スパーサのちょうど上流の領域での液膜のドレーニジによって生じた。したがって、本実験で用いた平板形のスパーサの場合よりも低い蒸気流速条件下でドライパッチが生じている。すなわち、ADR は密閉形障害物の場合、フロス流で著しく生じ、本実験結果と異なる。

加熱管に沿うドライパッチの生成の位置を図 9 に示す。図 9 からドライパッチが生成する位置はおもに環状流という限られた流動様式で、スパーサすきまからスパーサのすぐ上流までの領域に限定されることがわかる。なお、UDR の発生と消滅の過程については 4・3 節で詳細に議論する。

4・3 UDR の発生と消滅過程 図 10 に高速度ビデオ (1 s あたり 750 フレーム) で撮影したデータを 25 フレーム間隔に抜粋した UDR の生成と消滅の一連の写真を示す。各写真の右側にはわかりやすいように説明図を付している。

その図 10 中の斜線部がドライパッチを表す。図 10 を詳細に議論する前に、UDR が顕著に生じた場合に観察した注目すべき液膜挙動について述べよう。その第 1 は、逆流すなわち重力による液体の下方への流れが環状流であっても短い時間ではあるが生じることである⁽⁵⁾。第 2 は、主流路を流れる高速蒸気流に対するスパーサの後流が死水領域としてつねにスパーサの上方に形成されていることである。

主流路を通る噴流状の主流からの液体は加熱管の壁面に衝突する。その液体は加熱管壁面上のスパーサの後流領域を下降し、スパーサすきまの中に入流する。したがって、スパーサすきまの上部領域とスパーサの

図 10 UDR の発生過程

上方領域は絶えず十分に水で満たされている。他方、スペーサすきま内の下部領域では、液膜の薄膜化が、まず下流側スペーサピンが液体の流下を妨げることで促進される、同様のことがその真下にある上流側スペーサピンでも生じるので、下降する液膜の厚さは極めて薄くなり、ドライパッチは上流側スペーサピンの周辺で最初に生じた。

図 10 の 1 フレームめでは、液塊がスペーサピンとスペーサすきまをおおっている。スペーサのすぐ上側では逆流する液体が集積しており、ドライパッチの生成はそこでは見られない。一方、上流側スペーサピンのすぐ下側でドライパッチは下方へとゆっくり成長する。その直後、液体の波が蒸気流によって 0.03 s の間に上方へ押しやられたのち、2 フレームに灰色の部分(説明図の斜線の部分)のようにスペーサの下流側の縁の近くとその下方で、かなり大きなドライパッチが瞬間的に形成される。その後 2, 3 フレームにかけて上流側スペーサピンに水が再び下降してくる。そのため、スペーサすきまのドライパッチの面積はわずかの時間やや減少するが、図 10 中の灰色に見えるドライパッチ領域は最初とほぼ同じ大きさに保たれている。4 ~ 6 フレームめにかけて、液塊は再び蒸気流により吹き上げられ、ドライパッチはスペーサの外側まで広が

り続ける。

この一連の写真のなかで、スペーサの上流にまで及ぶドライパッチは 8 フレームめで最も大きくなっている。7 ~ 9 フレームの間、主流路を通過した液体は、スペーサの下流領域で加熱管に付着し、スペーサとそのすきまによる後流領域に流下する。この液体がスペーサのすぐ下流とスペーサすきまの両方に液体を供給するので、その領域ではドライパッチは生じていない。9 フレームめでは、上方へ移動するかなり大きな波がスペーサの上流に到達している。しかし、ドライパッチはすぐに消滅しない。それは、ドライパッチが 1 フレームめから約 0.3 s のかなり長時間形成され、壁面温度が高くなっているためと考えられる。その結果、スペーサすきま内への液体の流入が妨げられ、波の波頭から多数の液滴が飛散する。しかし、このような状況は長時間継続することはない。大きな波がスペーサの回りにしばらく停滞すると、瞬時にすべてのドライパッチは消滅する。仮にもっと熱流束を増せば、加熱管のバーンアウトがスペーサのちょうど上流側すなわちスペーサの直下で発生するものと考えられる。

4・4 スペーサすきまと材質の影響 図 2 に示した Type A, B, C の 3 種類の真ちゅう製のスペーサを用いて、ドライパッチの生成に及ぼすスペーサすきま

 図 11 UDR の発生領域 ($T_{\text{sub}}=10^{\circ}\text{C}$)

 図 12 UDR の発生頻度 ($T_{\text{sub}}=10^{\circ}\text{C}$)

S の影響を調査した。UDR の生じた流動条件 (j_G, j_L) を図 11(a)~(c) に示す。図 11(a) は $S=1.0$ mm, (b) は $S=0.5$ mm, (c) は $S=1.5$ mm で, $S=1.0$ mm が実機での値に最も近い。●印は実験点で UDR が発生したことを意味しており, ○印 (W) は加熱壁面がつねに液体でぬれていることを示している。本実験範囲ではすきまが大きいほど, 瞬時におけるスぺーサすきまからの逆流が容易となり, 液体が比較的多い逆流も激しいフロース流でもドライパッチが発生するようになる。

図 12(a)~(c) に, 入口液流速 U_{in} が 0.1, 0.15, 0.20 m/s の条件下で, スぺーサすきま S の異なる場合の UDR の発生頻度を示す。最初 j_G すなわち熱流束 q の増加とともにドライパッチの発生頻度 N も増加する。また, より大きなすきまではより頻繁にドライパッチが発生する。この傾向は, 図 11(a)~(c) に示す結果と一致する。スぺーサ近傍での液体の流動の詳細な観察から, Type B のようにすきまが小さいスぺーサの場合のほうが, より多量の液体がスぺーサすき

まの加熱管壁面上に付着していることがわかった。

ドライパッチが, スぺーサすきまが大きいほど発生しやすい理由については, 次のように考えられる。前にも述べたように, ドライパッチ発生 of 必須条件は, 液体の逆流の発生, すなわち環状流領域でさえ重力による液体の下方への流れが存在することである。加熱管壁上での急激な液膜の薄膜化は, 液体が逆流することすなわちドレーニジに起因している。ドライパッチが生成するには, このほかスぺーサピンが液体の流下を妨げるという重大な役割もあるが, スぺーサ上流でのドライパッチの発生に関連する重要な因子は, 逆流の存在であろう。

高速度ビデオを用いて逆流を注意深く観察すると, 液体の流下はスぺーサすきまが大きいほど生じやすい。このことが Type C スぺーサの場合にドライパッチが最も生じやすかった理由である。また, スぺーサの上部からの逆流が 2 本のスぺーサピンで二度にわたり妨げられることに注意する必要がある。ドライパッチの発生を抑制する点からいえば, スぺーサを設計す

(a) 熱電対位置(No. 1)

(b) 熱電対位置(No. 4)

図 13 壁温特性

る場合、スぺーサピンを垂直線上に配置しないほうが、より安全であることになる。

図 13(a), (b) に加熱壁面の温度に与えるスぺーサの材質の影響を T.C No. 1 と No. 4 のデータから考察する。ΔT はシステム圧力に対応する飽和温度と加熱管の表面温度との差を表している。加熱壁面温度がアクリル製スぺーサより熱伝導率の大きい黄銅製スぺーサの場合低いことがわかる。この結果はスぺーサがドライパッチの生成を促進させる流動の障害物の役割を果たす反面、冷却フィンの機能も合せて持っていることがわかる。

なお著者の一人は同様の実験から限界出力低下に及ぼすスぺーサの効果は少ないという成果⁽⁶⁾を得ているが、この実験では上流側にスぺーサが存在する点において本実験とは異なっている。このことについてはさらに検討の予定である。

5. 結 論

BWR の燃料棒支持用スぺーサを模擬したスぺーサ

を用いて、加熱された表面上でのドライパッチの生成の状況を実験的に調査した。その結果、以下の結論が得られた。

(1) スぺーサが存在するとドライパッチは、スぺーサすきま内の上流部からその外側のスぺーサ直下の領域という限定された領域で生じる。また、流動様式も環状流に限定され、液膜が瞬時に下方へ重力によって流下した際に生じた。

(2) 本実験では大きな波がスぺーサに到達した直後にドライパッチは消滅したが、もう少し熱流束が大きくなってドライパッチ存在時間が長くなると加熱管のバーンアウトが生じる可能性がある。

(3) スぺーサピンは、上方からの液体の下降の際に、その下方への液体の供給を妨げるため、液膜の薄膜化を助長する。したがって、通常最初にドライパッチが発生するのはスぺーサピンの直下である。

(4) スぺーサピンと同様スぺーサは、ドライパッチ生成を助長させる反面、ピンと接触する点で加熱壁を冷却する効果も有している。

終わりに、本研究は平成 5 年度文部省科学研究費(一般研究 B: 05452154)によるものであることを明記し謝意を表す。

文 献

- (1) Yokobori, S., Ohta, M., Terasaka, H. and Morooka, S., A Phenomenological Study on the Dryout Mechanism in Fuel Rod, *Proc. 4th Int. Topical Meet. Nucl. React. Thermal-Hydraul.*, Nureth-4(1989), 1054-1061.
- (2) 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 IHTC*, 4(1978-8), 355-360.
- (3) 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.
- (4) Fukano, T., Tanaka, T., Kutaragi, K. and Kanamori, K., The Effect of a Flat-Plate -Type Obstacles on a Thin Liquid Film Flow, *Dynamics of Two-Phase Flow*, (1992), 161-183, Begel house Inc.
- (5) Fukano, T., Kawakami, Y., Itoh, A. and Tominaga, A., Mechanism of the Disturbance Wave Generation in a Vertical Up-and Down-Ward Gas-Liquid Two-Phase Annular Flow, *Transient Phenomena in Multiphase Flow*, (1988), 435-452, Hemisphere.
- (6) 師岡・白川・木村, 伝熱シンポジウム講演論文集, (1994-5), 175-177.