1 解説

LOCA に関連した気液二相流動の問題点

(日本原子力研究所) 数 土 幸 夫

軽水炉の冷却材喪失事故時の安全性評価においては、その出現が予想される気液二相流動とそれに対応した熱伝達との把握が重要であるが、近年ますます気液二相流動現象の理解が必要となってきた。そこで再冠水の問題を中心に重要と考えられる二相流動現象のいくつかを取り上げ、その基礎となる現象を紹介するとともに、実炉への適用に際し問題となる点を明らかにし、これらに共通した留意すべき点を述べる。

1. はじめに

軽水炉の仮想事故である冷却材喪失事故 (LOCA) 時の安全性評価においては、事故時に出現が予想される気液二相流動とそれに対応した熱伝達との把握が重要な役割を果たしている。従来、軽水炉の安全性評価では安全余裕を見込んだ保守的な EM (Evaluation Model) 計算に主力が置かれていたが、近年、現象の忠実な理解と把握に基づく BE (Best Estimate) 計算にも力が注がれるようになり、一層気液二相流動の正確な理解が重要となってきた。本稿では、LOCA で出現が予想される気液二相流動現象のうち、再冠水の問題を中心に重要と思われるものをいくつか取り上げ、共通の留意すべき問題点を述べることにしたい。ここに取り上げる問題は、筆者がこれまで関連してきたトピックスを中心にしており、加圧水型軽水炉 (PWR) に関するものであるが、必ずしも PWR に限定されない。なお、誌面の都合上説明が充分行き届かないことについてはご容赦願いたい。

PWR の LOCA においては、第 1 図に示すように破断口から冷却材が流出して炉容器内の圧力は急速に減

少して行く。この過程をブローダウン (Blowdown) と呼ぶ。この過程では、炉心からの流体は気液二相流となつて、ダウンカマを通過して破断口から流出するもの、炉心から上部プレナム、蒸気発生器を通り破断口から流出するもの等がある。ブローダウンの後半では、ダウンカマでは上昇蒸気流が支配的になると同時に、非常用炉心冷却水 (ECC 水) がダウンカマに注入される。ダウンカマの蒸気流が弱くなると大量の水がダウンカマを流下し、下部プレナムを満たして過熱した炉心を冠水するようになる。この冠水過程を再冠水と呼んでいる。

ここで取り上げる話題は、(1) PWR のダウンカマにおける気液二相流動、(2) 上部プレナムと炉心との境界の対向二相流動、(3) 炉心内での気液二相流動特性、である。

II. ECC 水のダウンカマ落下制限

PWR・LOCA 時のブローダウン過程の後半では、炉心から蒸気がダウンカマを通過して破断口から流出するので、ダウンカマでは上昇蒸気流となる。この時炉心を再び冠水させて過熱した炉心を冷却させるために、すでに ECC 水がコールドレグに注入され、ダウンカマを落下する。この時ダウンカマでは気液対向二相流が出現し、炉心からの蒸気流速がある値より大であると、冷却水はダウンカマを流下することができず、破断口から蒸気流とともに流出してしまうことが考えられる。この現象をダウンカマ・バイパスと呼んでいる。この現象をわかり易く示したのが第 2 図である。図で縦軸は上昇蒸気流量を示し、横軸は落下水量を示す。ここで“Complete Penetration”領域は、注入された水がすべて落下する領域であり、一方“Complete Bypass”点

第 1 図 PWR・LOCA の概念図

Remarks of Two-Phase Flow Dynamics Related to LOCAs, Yukio SUDO.

(1981年 5月1日 受理)

第2図 ECC水のダウンカマ落下制限の概念図

はこれ以上の蒸気流量では落下する水がゼロであることを示す。この現象では、Complete BypassとComplete Penetrationの開始点の把握が特に重要である。一般に、このような気液対向流下での制限現象は“Counter Current Flow Limitation (CCFL)”と呼ばれ、基礎となるのは垂直単管についての場合である。相変化が無視できる(空気・水または蒸気・飽和水)場合については、Wallisら⁽¹⁾によって(1)式が提案されている。

$$J_g^{*1/2} + mJ_L^{*1/2} = C \quad (1)$$

ここで、 J_g^* , J_L^* : 気液の見掛けの無次元流速
 m, C : 定数

これまでの単管実験結果によると、形状によって m, C は多少異なるものの、(1)式の形で整理できる。なお、 J_g^* , J_L^* の中には代表長さとして流路径 D が含まれている。

さて、(1)式の適用に際しては、ダウンカマ流路の特性から次の問題が重要となる。

(1) ダウンカマ流路は炉心を取り囲む円環流路であり、したがって、代表長さとして何を採用すべきか。一般に円環流路に対しては、内径 D_i 、外径 D_o とすると代表長さ D として次の取り方が考えられる。

$$\begin{aligned} D_1 &= D_o \text{ または } D_2 = D_i \\ D_3 &= (D_o - D_i)/2 \\ D_4 &= (D_o^2 - D_i^2)/D_i \text{ または } \\ D_5 &= (D_o^2 - D_i^2)/(D_o + D_i) = D_o - D_i \\ D_6 &= \pi(D_o + D_i)/2 \end{aligned}$$

これまでの各種の大きさの流路に対する実験データの整理を見ると、上記の内から最も整理できる D を選んで、(1)式中の定数 m, C を決めていることがわかる。この時の m, C の値は D の取り方によって異なっている。一方、上記の幾何学的形状による代表長さを用

いず、気液界面の安定性から導かれる限界波長を代表長さを用いてデータを整理する方法も提案されており、水平界面でのTaylor Instabilityの考えから、

$$D_T = [\sigma/g(\rho_l - \rho_g)]^{1/2} \quad (2)$$

を用い、 J_g^* , J_L^* の代わりにKutateladze数 K_g^* , K_L^* を用いて(1)式と同様の式

$$K_g^{*1/2} + mK_L^{*1/2} = C \quad (3)$$

ここで、 σ : 表面張力、 g : 重力加速度

ρ_g, ρ_l : 気液密度

が提案されている⁽²⁾。また垂直気液界面でのHelmholtzのInstabilityの考え方も最近提案されている⁽³⁾⁽⁴⁾。

(2) ダウンカマ流路は一般に内径が約4 mの大流路であることによる小規模実験結果の、実規模へのスケールアップの問題および2次元効果の可能性。スケールアップの問題については、これまで外国で実炉の1/30, 1/15, 1/5モデル等で実験が行われており、特にComplete Bypass点については次の知見が今のところ得られている。すなわち、飽和水が供給される場合の、落下水がゼロとなるに必要な無次元蒸気流速は、(1)式では $J_L^* = 0$ の時 $J_g^* = C^2$ となり、(3)式では $K_L^* = 0$ の時 $K_g^* = C^2$ となる。実験結果とこの2つのモデルとの比較が第3図に示してある⁽⁵⁾。規模が小さいほど K^* モデルが合っており、大きくなるほど J^* モデルが合う方向にあることがわかる。2次元効果については、大流路では水の落下する個所と蒸気の上昇する個所とが分かれる可能性があり、一方ではデータのバラツキの原因とも考えられるが、落下水量を促進する方向にあると考えてよい。

第3図 ECC水のダウンカマ落下制限におけるComplete Bypassに対するスケールの影響⁽⁵⁾

(3) 冷却水のサブクール効果。コールドレグに注入されるECC水は低温であり、ダウンカマ注入時には炉心からホットレグ、蒸気発生器を通ってきた蒸気と混

合して蒸気を凝縮させるものの、まだサブクール水である場合がある。この時には、ダウンカマを上昇する蒸気を凝縮させるので蒸気量は減少し、飽和水が注入される場合と異なり落下水量が増大する。事実、第4図に示すように、サブクール度 ΔT_{sub} が大きくなると同一の蒸気流速に対し落下する水量は格段に増大する⁽⁶⁾。また Complete Bypass 点の蒸気流速も大きく影響を受けていることがわかる。

第4図 ECC水のダウンカマ落下制限現象に与えるサブクール水の影響⁽⁶⁾

(4) 一般に落下水制限現象が問題となるブローダウン後半では、ダウンカマ流路壁温度は充分低下しておらず熱放出が継続しており、ECC水が接触すると蒸気が発生して炉心からの蒸気流に加算される。これをダウンカマ高温壁効果(Hot Wall Effect)と呼ぶ。この効果も重要であろう。

Ⅲ. 炉心への落下水の制限

上部プレナムは広い空間であるため LOCA 時に上部プレナムに水が蓄積される場合がある。特に高温の発熱体に下部から冷却水が供給される場合、炉心で発生した蒸気に伴われて水が上部プレナムに吹き上げられる場合とか、ECC水が上部プレナムに直接注入される場合等である。蓄積された上部プレナム水は炉心に落下して発熱体を上部から急冷させる原因となり、炉心の早期冷却の促進が期待できる。ところが、炉心で発生した蒸気は再冠水過程では上昇し、流路面積が極小となる上部プレナムと炉心との境界で最大流速となり、上部プレナム水の落下量が制限されることが起る。実炉ではこの上部プレナムと炉心との境界には、タイプレートと呼ばれる多孔板があり、多孔板での気液対向二相流での落下水の制限現象となる。今、前述の(1)式または(3)式をこの多孔板の問題に適用しようとする、次の問題がある。

- (1) m, C の値をどのように定めるべきか。
- (2) 代表長さとして何をを用いたらよいか。

(3) 穴の配置および形状等の形状効果をどう扱うか。

(4) 上部プレナム水位等他のパラメータの影響の評価。

(5) サブクール水の影響。

(1)~(3)の問題については、Hsieh, Bankoff ら⁽⁷⁾は、種々の孔数を有する場合と孔径を変えた場合の実験を行うとともに、代表長さ D の効果として流路径 D と(2)式との比である無次元代表長さ $D^* = D/D_i$ に対し、 $D^* > 30$ の時(3)式がよく、 $3 < D^* < 20$ では(1)式が適用できることを示し、これら2式を結び付けるものとして新しい無次元流速 H_g^*, H_t^* を導入した。実験データとの比較から $m=1$ であり、一方 C はポンド数 N_{Bo} の関数であることを示した。第5図に新しい無次元表示式

$$H_g^{*1/2}/C + H_t^{*1/2}/C = 1 \quad (4)$$

と実験結果との比較を示す。これまでのデータのバラツキをかなりの程度改善している。

第5図 多孔板でのCCFLに対して、実験結果 H^* とモデルとの比較⁽⁷⁾

(4)の上部プレナム内の水位の影響については、一般にはほとんど影響を与えないとの報告がされている。

以上見たように ECC 水のダウンカマ落下制限および炉心への落下制限は、共通の基盤と問題をもっている。① m, C をも含めた J^*, K^*, H^* モデルは、さらに統一的な無次元整理ができる可能性があること、②形状の違い、スケールの違いに関し、モデルが確立されていないこともあり、より一層の検討が必要であること、③データの不足を補うために簡便な実験方法として、空気・水系のデータを利用しようとする時、物性値の違いから、蒸気・水系のデータと同列に扱うことができないという問題もあり、検討の余地がある。

Ⅳ. 上部プレナム水の急流下(Dump)

第Ⅱ章で述べたように、LOCA時には上部プレナムに水が蓄積される場合がある。特にECC水が上部プレナムに直接注入される場合、大量の水が上部プレナムに蓄積される。この時ある条件下では、大量の水が急激に上部プレナムから炉心に流下し、炉心冷却に大きく寄与することが考えられる。このことは次のことから推測される。一様熱流束 Q の加熱管(長さ L)に下から飽和水を供給する場合を水流量 F_1 の正にとって考えると、 $F_1 > 0$ の時垂直加熱管内で発生した蒸気は水とともに上昇して並向上昇流となる。また、水が管上部から供給される時($F_1 < 0$)管内で発生した蒸気は上昇し、かつ落水水があるときには対向二相流となる。一方、 $F_1 < 0$ で大量に水が落下している場合に相当するが、管内で発生した蒸気が、水とともに下向きに流れる場合には並向下向流となる。

第6図は、これら3つの流動様式に対する水流量 F_1 と差圧との特性を示したもので、差圧は無次元差圧 $\Delta P(=(P_2 - P_1)/\gamma_f \cdot L)$ で示してある。領域〔Ⅰ〕、〔Ⅱ〕、〔Ⅲ〕はおおの並向上昇流、対向二相流、並向下向流に対応している。

第6図 垂直加熱管路における入口水流量と差圧特性の概念図

第6図からわかることは、並向上昇流および対向二相流の時は常に $P_2 > P_1$ であり、そして逆に $P_1 > P_2$ の時には($\Delta P < 0$)、並向上昇流と対向二相流は出現せず、並向下向流のみ出現することである。この時の水流量は一様熱流束 Q の関数であるが、一般に並向上昇流や対向二相流の時に比べて大量の水が落下することがわかる。この状況を実炉に置き換えてみると、第7図に示すようにブローダウン終了時には蒸気流動損失は小さく、 P_A, P_B, P_C 間の圧力差は小さく、 $P_A \approx$

$P_B \approx P_C$ である。上部プレナムに大量の水が蓄積すると、蓄水位 H_1 によって P_1 が P_2 よりも大きくなり、炉心では並向下向流となり大量の水が落下することになる。

第7図 上部プレナム水の急流下に関する概念図

ここで明らかにすべき問題は、次の問題であろう。

(1) このような上部プレナム水の急流下がどのような条件下で起るか確かめること。第6図に示した結果は最も簡単な系に対し、差圧計算で重要な摩擦損失項と重力項のうち重力項を決めるボイド率計算に対し、いわゆる Drift Flux Model⁽⁹⁾を使っているが、このモデルの妥当性も含めて発生条件を確かめる必要のあること。

(2) 第6図でもわかるように、急流下量は熱流束 Q および差圧との関数であるが、他のパラメータも含めどんなパラメータが影響するか調べること。

(3) 以上は上部プレナムに蓄積された水が飽和水の場合であるが、実際にはサブクール水が蓄積される場合がある。対向二相流の場合を考えると、炉心で発生した蒸気は上昇するが、サブクール水によって凝縮されて並向下向流が生じ易くなることがわかる。

これまで簡単な実験装置で、急流下(Dump)発生条件を調べたところ、次のことがわかっている。

(i) 第7図で $P_1 > P_2$ の時、並向下向流が発生すること、最初に並向下向流でも、 $P_2 > P_1$ となると対向二相流に移行する。

(ii) $P_2 > P_1$ の時対向二相流となり、この時の落水量は並向下向流の時と比べて小さい。

(iii) サブクール水の場合には、飽和水の時対向二相流となる条件下でも並向下向流となる場合があることが報告されているが⁽¹⁰⁾、系統的に主要パラメータの効果を調べて実炉に適用できるように定量的評価を行う必要がある。

V. ダウンカマの有効水頭

PWR では、ECC 水はコールドレグに注水されるだけで、炉心に強制的に冠水させる能力はなく、炉心への給水駆動力となるのはダウンカマに蓄水された水の静水頭のみである。しかるに前述のように、ダウンカマ流路壁温度は、再冠水開始時期までに充分低下しておらず、炉容器壁等の構造材から熱放出が続いている。したがって、ダウンカマでボイドが発生し、その結果有効水頭が減少して炉心給水駆動力を低下させる可能性がある。ダウンカマのような大流路では摩擦損失は無視できるので、有効水頭評価の鍵となるのはボイド率である。このボイド率評価では、1つは流路壁からどの程度の熱量が流体に入るかという熱的問題と、発生した蒸気量に対するボイド率の評価という流体力学的問題とがある。ここでは後者について述べる。

ボイド率評価に関しては、従来主として炉心内のボイド率を知るため、流路径が小さい場合について多く論ぜられて来た。例えば、既述の Drift Flux Model はこれまで非常に有効であることが知られている。このモデルではボイド率 α は、

$$\alpha = V_g / \{C(V_g + V_l) + V_l\} \quad (5)$$

ここで、 V_g , V_l : 見掛け気液速度、 C , V_l : 定数で表わされる。第8図に示すように、このモデルは並向上昇流、対向二相流、並向下向流いずれの場合にも適用できるが、 C が一定とすると $\alpha = 1/C$ 以上では物理的意味をなくし、推奨されている $C=1.2$ を用いると $\alpha = 0.833$ 以上のボイド率評価ができない。これは、このモデルでは気泡の存在を仮定しているのに対し、 α が大きくなると環状流、噴霧流になるためである。そのため α が大の場合には別の研究が行われている。いずれ

第8図 垂直加熱流路に対する Drift Flux Model の特徴

にしる小口径の関係式は適用できず、大口径に対する表式として Wilson ら¹⁰⁾の提案した無次元表式がある。しかし大口径の実験結果と比較してみると、再冠水で重要となる低圧力 ($< 6 \text{ kg/cm}^2 \cdot \text{ab}$) では十分でないことがわかった。そこで、口径の影響を明らかにするために、関係すると考えられるパラメータをすべて考慮して次元解析を行なった結果、影響無次元パラメータとして、代表長さとして流路径 D を含むボンド数 N_{Bo} とウェーバ数 N_{We} 、レイノルズ数 N_{Re} が得られた⁽¹¹⁾。

第9図 大流路径 ($6 < D < 50 \text{ cm}$) に対するボイド率特性⁽¹¹⁾

第9図は、空気・水、蒸気・水の系で流路径が6 cmから約50 cmのものについて無次元パラメータで整理した時の実験結果の傾向を示すものである。ここで重要な知見が3つある。

- (1) 流路径はボンド数 ($N_{Bo} = D^2(\gamma_l - \gamma_g)/\sigma$) の形で影響するが、ボイド率 α は $N_{Bo}^{-0.064}$ に比例しており流路径の影響は $D > 6 \text{ cm}$ の時小さい。
- (2) 空気・水系と蒸気・水系とは差異がある。
- (3) 流動様式の観測から AB 部分は気泡流からスラグ流に対応し、BC 部分は発達したスラグ流になっていることがわかった。図で AB と ab 部分、BC と bc 部分が平行移動することによって一致することから密接な対応関係が推察される。

以上得られた関係式を実炉に適用するに際し、代表長さとして何を用いるべきかという問題がある。しかし、再冠水時のダウンカマでの二相流動はほぼ1次元的であろうこと、および上記(1)の結果から、ある程度流路が大であると流路径の影響が小さいことから、試みに $D = D_s$ として、有効高さ5 m、流路幅1 mの実規模実験での結果と比較したところ、流路ギャップ20 cm、5 cmの実験に対し、良好な予測結果が得られている⁽¹²⁾⁽¹³⁾。

Ⅶ. 結 び

以上、簡単に4つの話題を取り上げたが、気液二相流を取り扱う上で留意すべき点がいくつか明らかになったと思う。第1に大きな問題はスケールアップの問題である。気液二相流の関係式では代表長さが重要な役割を果たしている。実炉への適用にはこの代表長さの役割について十分な検討が必要である。第2は、空気・水系と蒸気・水系とのアナロジーの成立についてであり、両者の対応関係を見極める必要がある。第3には、サブクール水の影響の評価である。炉心冷却に直接影響し炉心冷却を大きく促進する場合が多いので、重要である。

—参考文献—

- (1) WALLIS, G.B.: "One Dimensional Two-Phase Flow", (1969), McGraw Hill.
- (2) 文献(7)から引用.
- (3) COLLIER, R.P., et al.: NUREG/CR-0897, BMI-2029, (1979).
- (4) CUDNIK, R.A., et al.: "Topics in Two-Phase Heat Transfer and Flow", 107~113 (1978), ASME.
- (5) CROWLEY, C.J., et al.: CREARE TN 233, (1976).
- (6) ROTHE, P.H., et al.: NUREG/CR-0048, CREARE TN-272, (1978).
- (7) HSIEH, C., et al.: NUREG/CR-1808, (1980).
- (8) SUDO, Y., GRIFFITH, P.: NUREG/CR-1713, (1980).
- (9) ZUBER, N., FINDLEY, J.A.: Trans. ASME, Ser. C, 87 [4], 453 (1965).
- (10) WILSON, J.F., et al.: Trans. Amer. Nucl. Soc., 5, Ser. 5, 151 (1962).
- (11) SUDO, Y.: J. Nucl. Sci. Technol., 17(1), 1~15 (1980).
- (12) 数士幸夫, 村尾良夫: JAERI-M 7978, (1978).
- (13) 数士幸夫, 村尾良夫, 秋本 肇: JAERI-M 8978, (1980).

好評発売中

高融点被覆

サムソノフ他著 高融点金属と化合物の性質、被覆形成法とその技術、拡散被覆、溶射法で形成される被覆(プラズマ溶射被覆、爆裂溶射被覆)、気相から蒸着される被覆、その他の高融点被覆形成法(電気泳動電着法、複合電着法)。 ■B5判、409頁/定価16,000円

データブック 高融点化合物便覧

サムソノフ他著 酸化物以外の最も普遍的かつ有望な高融点化合物(ほう化物、炭化物、窒化物、けい化物、りん化合物、硫化物、アルミニウム化合物、ベリリウム化合物)の結晶化学的、熱的、熱力学的、電気的、磁氣的、光学的、機械的、化学的性質および耐火性に関するデータの総まとめ。 ■B5判、554頁/定価16,000円

超高融点材料便覧

カデリニコフ他著 2500℃以上の融点を持つ材料(元素と化合物)の物理機械的性質ならびに化学的性質を常温から6000℃までの広い温度域についてまとめた世界初の総合資料。 ■B5判、438頁/定価17,500円

データブック 無機ふっ化物の主要性質便覧

ラコフ他著 無機ふっ化物に関して、結晶の構造特性とX線回折特性、相転移の温度と熱力学特性、標準状態における物質の熱力学パラメータ、蒸気圧と分解圧、分子状態および熱力学的性質を0Kから5000Kまでの温度域で見易い数表にまとめた貴重なデータブック。 ■B5判、420頁/定価18,000円

希土類金属

サヴィツキー他著 エレクトロニクス、機械製作、冶金、原子力、航空機工業ならびに医学と生物学の広範な分野で技術革新の担手として脚光を浴びつつある希土類元素の理論と実地利用の最新情報。希土類金属の天然資源とその抽出・精製法、電子構造と物理・化学的性質、状態図と性質、新技術分野での利用について詳述。

■B5判、281頁/定価17,000円

超高融点金属の高温腐食と防食

ビヤロブジェフスキー他著 W, Mo, Nb, Ta, Reおよびそれらの金属の保護被覆の酸化法則と防食技術について350件以上の内外最新情報をまとめ、防食対策の基本原理解説した研究開発のための必携モノグラフ。原子力発電の安全性問題解決の鍵を握る貴重なデータの総まとめ。

■B5判、217頁/定価19,000円

超伝導材料

サヴィツキー他著 金属系超伝導材料の組織学的研究と製造、加工及び使用技術の現状分析に重点を置き、最適組成の選択基礎になる多数の状態図と組織・性質線図を集録し、有望な新超伝導材料の探究とそれらの合理的生産技術の開発や実験データの普遍化あるいは超伝導性と他の諸性質間の相関について最新情報を公開。

■B5判、298頁/定価19,000円

核物理定数便覧 中性子放射化分析用

アリエフ他著 熱中性子と核分裂中性子照射時の同位体放射化データ、14MeV近辺のエネルギーをもつ中性子の放射化断面積、放射性同位体(中性子放射化生成物)の放射線成分、その他に関するデータ集。

■A5判、323頁/定価6,000円