

FBR プラント 容器内液面ガス巻込み限界評価 に関する基礎研究

Prediction of Gas Entrainment from Free Surfaces in Vessels for FBR Plants

技 術 本 部 白 石 直^{*1} 渡 壁 寿 人^{*2}
佐 野 保^{*3}
神 戸 造 船 所 根 本 和 明^{*4}

渦によるガス巻込み限界予測手法の開発のために基礎試験と理論検討を実施した。自由液面付近の流れが流れ込み、高速下降流の渦心形成する。乱れが乗ると、渦中心のくぼみは浅くなる。下降流速は形成気泡の運搬に作用し、気泡形成はくびれ部の水平方向力のバランスで決まると考えると、試験データ間に整合性が取れることを確認した。旋回槽のガス巻込み限界水深の実験式を求めたが、ウェーバ数の影響は受けなかった。ただし、試験体系に大きく依存していると考えられる。理論から、既知の無次元量のほかに q_1/ν (半径レイノルズ数)、渦心半径とそこでの循環を考慮する必要がある、さらに、気泡形成部では強いせん断力が作用することが分かった。

In order to develop a prediction method of gas entrainment due to a vortex, two sets of experiments and analyses were conducted. The flow near a free surface goes into a vortex core and forms a down flow with high velocity. Turbulence effects the shape of the vortex. The down flow in the vortex core effects the transportation of bubbles and the force balance in the horizontal surface at the throat of the dimple determines the formation of bubbles. The experimental equation of the gas entrainment in the rotating tank was derived and found to be independent of the Weber number. The theoretical investigation shows that the radial Reynolds number, the radius and the circulation at the boundary of the core will effect bubble formation in addition to the conventional nondimensional parameter. A strong shear force should act on formed bubbles.

1. は じ め に

我が国が独自に開発を進めているトップエントリ方式高速増殖炉 (FBR) の特有課題の検討結果について既に報告したが^{(1)~(3)}、本報のガス巻込み現象は原子炉容器や中間熱交換器等の自由表面を有する機器のコンパクト化に伴い検討しておくべき課題である。ガス巻込みは炉心への反応度異常や主要計測機器 (流量計や温度計等) の誤作動、除熱性能の低下等、プラントの安全性及び運転性への障害を引起す恐れがあるので、一次系の主要機器からガスが巻込まれない構造とする必要がある。

自由表面からのガス巻込み現象は、大きく分類して“旋回渦”、“潜込み”、“砕波”の3形態に分けられ、いずれも自由表面の挙動に密接に関連している。一般機器の設計においては、空気巻込みを問題とするポンプ取水槽の模型試験の考え方の一つを踏襲し、縮尺模型試験を用いて自由表面を相似とする無次元数である“フルード数”一致条件での水流動試験から、系統内への連続的なガス巻込みを抑制することとしている。しかし、炉心への反応度異常事象のように、系統内へのガス巻込み量を定量的に評価・制限する必要があるとともに、自由表面変動が非定常的な挙動であるために、ガス巻込み量を定量的に評価できる手法が明確となっていないことから、FBR の設計では、ガス巻込みを許容しないようになった。このため、自由表面からのガス巻込み限界の評価手法が重要であり、メカニズム把握のために実施した基礎研究の概要を報告する。

2. 旋回槽中での層流渦

ガス巻込みは局所流れのメカニズムに支配された現象であるた

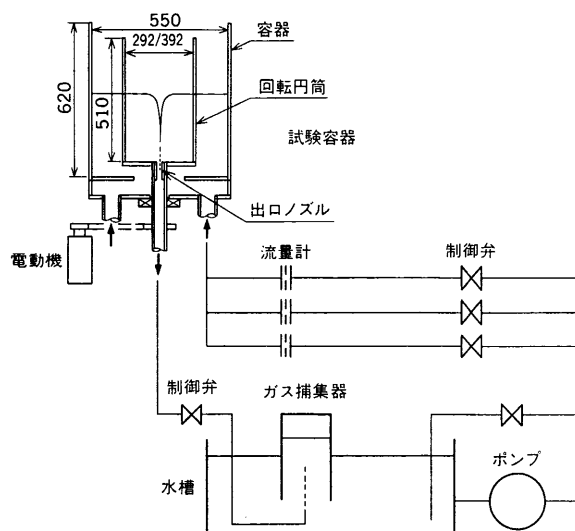


図1 旋回槽試験装置系統図 渦によるガス巻込み基本特性を把握するための試験装置。
Test apparatus of gas entrainment with rotating cylinder

め、要素的パターンについてガス巻込みの限界条件、ガス巻込み量、これらに与える流体物性の影響を実験的に調査した。図1に試験装置の系統図を示す。試験容器内に設置された透明多孔回転円筒 (内径 292/392 mm、高さ 510 mm) の外に供給された液体は回転円筒を通過するときに循環をもらって渦を作った後、底板中央の出口ノズルから流出し、配管を通過して下部水槽に導かれる。ガス巻込み渦の液面形状及び流速分布はすべてビデオや PIV (Particle Image Velocimetry) の可視化手法によって計測した。

*1 高砂研究所流体研究室主務

*3 高砂研究所原子力研究推進室

*2 高砂研究所流体研究室

*4 原子力プラント技術部新設計計画課主務

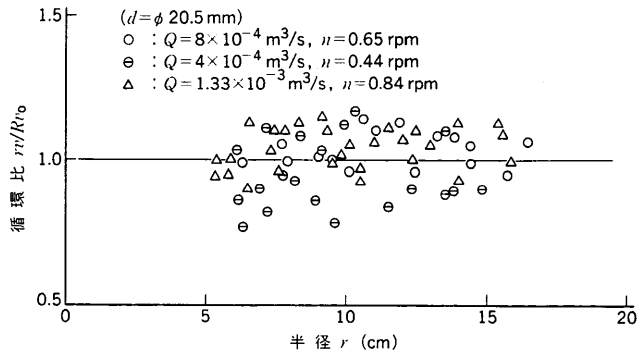


図2 循環の半径方向分布 渦の半径方向の循環分布を示す。
Circulation distribution along radius of vortex

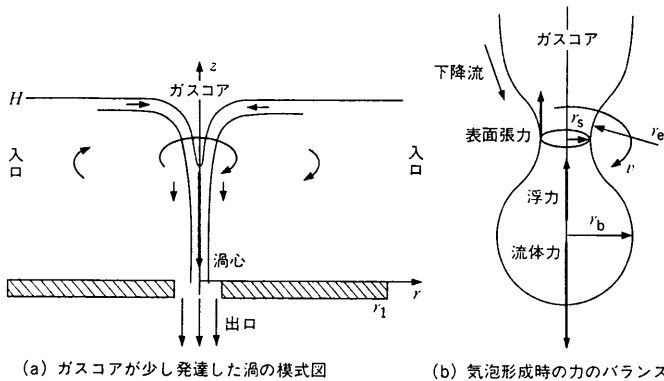


図3 ガス巻き込み渦構造の模式図 試験の観察によれば (a) 渦心には高速下降流が発生する。また、(b) ガス巻き込み形成時の力のバランスを、観察による気泡形成時の先端の模式図として示す。
Sketch of structure of flow in vortex

流体物性の影響調査試験では、特に表面張力に着目し、表面張力を半減させてガス巻き込み限界を計測した。

ガス巻き込み限界の定義は液面が渦中心で下降し、その先端から気泡が分離して間欠的にノズルに吸込まれる現象が生じた時点又は、気泡の分離は発生せず、液面の先端がノズル入口に到達した時点をもって判断した。

ガス巻き込み限界水深とノズル径との比 H/d は無次元パラメータの関数として次式のように表すのが合理的と考えられる。

$$\frac{H}{d} = f_1(R_e, Fr, R_0, W_0) \quad (1)$$

図2に液面付近の循環比 (Γ/Γ_0) の半径方向分布を示す。データのばらつきはあるがほぼ $\Gamma/\Gamma_0 = 1$ の値を取り、半径5 cm以上の領域では自由渦が形成されている。

観察により、ガス巻き込み渦の中心に早い下降流速の渦心が存在し、少し離れると非常に小さい速度となることを確認した [図3(a)]。半径方向流速 (内向き) は自由表面近傍で速く、深くなると小さい。自由表面近傍を通過して渦中心に向かう流れが渦心を通る流れを作る。渦心の定義は、(1) 最大旋回速度の半径 r_c の内側、(2) 循環一定領域までの半径 r_v の内側、の2方法が提案されている⁽⁴⁾が、上記観察結果から、(3) 下降流速が平均値 $w = (w_{\max} + w_{\min})/2$ を取る半径 r_0 の内側とする方法が考えられる。この方法では、渦心は下降流速が大きくて染料注入時に直ぐに着色される領域と対応する。

ガス巻き込み限界データを整理すると、フルード数 $Fr^* \geq 0.25$ の場合、限界水深 H/d が次式で与えられることが分かった。

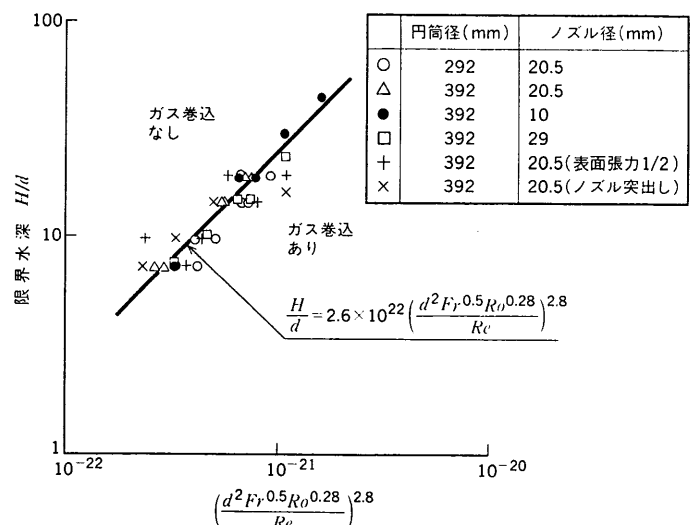


図4 ガス巻き込み限界 旋回槽でのガス巻き込み発生限界の実験式。
Critical condition of gas entrainment in rotating cylinder

$$\frac{H}{d} = 1.88 \times 10^4 \Gamma_\infty^{1.22} \quad (2)$$

$Fr^* < 0.25$ は水深が大きくかつ流速が小さくなるので安全側であり、以下では $Fr^* \geq 0.25$ のデータのみを対象とする。

そこで、限界水深を推定する関係式を求めて示したものが図4である。 C を定数 ($= 2.6 \times 10^{22}$) として次式で表される。

$$\frac{H}{d} = C \left[\left(\frac{d}{L} \right)^2 \frac{Fr^{0.5} R_0^{0.28}}{Re} \right]^{2.8} \quad (3)$$

L は模型寸法と無関係で渦に関係した寸法と考えられるが、情報不足のため、単位長さ ($L = 1$ m) を採用した。

なお、界面活性剤ラテックス (花王製品) を加えて表面張力を常温水の約 1/2 (35.2 dyne/cm, 水は 72.5 dyne/cm) に低下させたテストでも変化は認められなかった。 $\phi 20.5$ mm の出口ノズルを回転円筒底面から上方に 96 mm 延長したテストも行ったが、ガス巻き込み限界条件に対する影響は見いだされなかった。

回転円筒の直径の影響はほとんど見いだされなかったので、試験は便宜上、主に $\phi 392$ mm のものを使用した。これは図2で示したように、半径が 5 cm 以上では自由渦となることによる。したがって、ガス巻き込み渦は容器寸法が問題ではなく、循環 (Γ_∞) が問題である。

強制旋回を与えた場合のガス巻き込み限界は類似の試験結果があるので比較検討した。Baum は静止した羽根で旋回を与え、ガス巻き込み限界水深を与える実験式を求めた⁽⁵⁾。Takahashi らは羽根を回転させて旋回を与える装置で整理したところ、Baum の結果とは一致しないと述べている⁽⁶⁾。今回の試験結果はどちらの試験結果とも一致しないことが分かった。

これら三つの試験を比較すると、旋回の発生方法が互いに異なっている。このため、Baum や Takahashi らの試験装置では今回の試験装置と同じ流況になっていた保障はなく、特に、流れの構造や乱れ強さの違いが試験結果の相違の原因である可能性が考えられる。実機評価に当たっては、流況が一致していることを確認の上でガス巻き込み限界を調べ、乱れ強さを加味する必要がある。

3. 流水路でのガス巻き込み限界

二重円筒モデル (中間熱交換器本体の 1/9 縮尺 = 直径 337 mm,

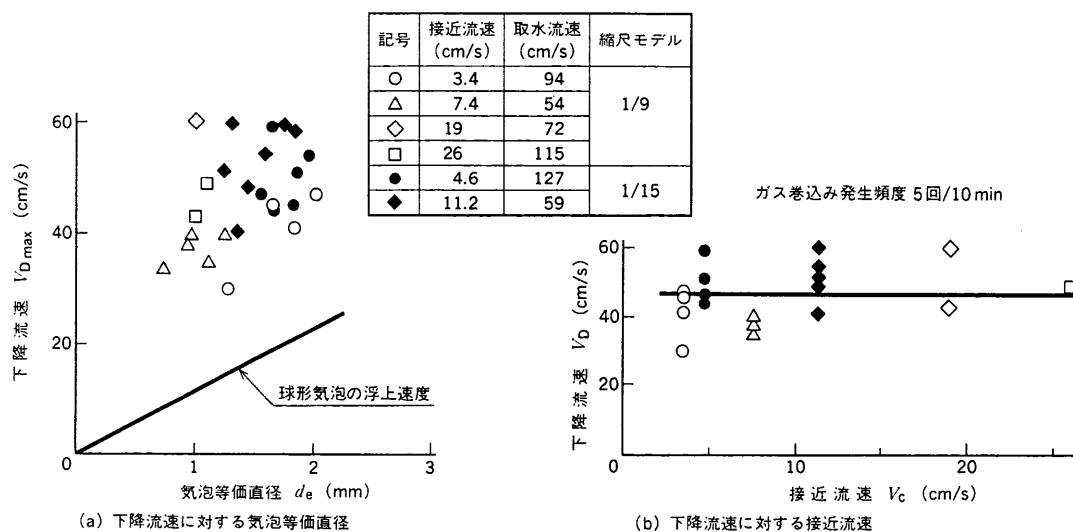


図7 下降流速に対する気泡等価直径及び接近流速

Down flow velocity with respect to equivalent radius of bubble and approaching velocity

常温水の $r_b = 1$ mm の気泡形成を考え、 $C_D = 0.5$ (球で 0.4~1 程度) と仮定すると、くびれ部半径は $r_s = 0.3$ mm となる。

一方、水平方向作用力のバランスを考え、(くびれ半径 r_s を縮小する表面張力効果) σ/r_s が (r_s を拡大する表面張力効果) $\sigma/r_e + (\text{遠心力}) \rho v^2 \ln(r_b/r_s)$ より大きくなる次式が気泡形成条件である。

$$\frac{\sigma}{r_s} > \frac{\sigma}{r_e} + \rho v^2 \ln(r_b/r_s) \quad (5)$$

$r_e = r_b$ と仮定すると、上記の条件では、旋回速度が $v = \text{約 } 0.4$ m/s となり、図 7 での $r = 2$ mm の旋回速度とはほぼ一致した。

4. ま と め

渦によるガス巻き込み限界予測手法の開発のために基礎試験と理論検討を実施し、その特性の一端を把握した。

- (1) 自由液面付近の循環は渦の外周でほぼ一定値を取る。
- (2) ガス巻き込み渦の渦心には高速の下降流が存在する。
- (3) 旋回槽でのガス巻き込み限界水深の実験式を得た。本実験ではウェーバ数の影響は受けなかった。
- (4) 下降流速は形成気泡の運搬に作用し、気泡形成はくびれ部の水平方向力のバランスで決まると考えると、データ間に整合性が取れることを確認した。
- (5) ガス巻き込み限界評価には q_1/ν (半径レイノルズ数)、渦心半径とそこでの循環も考慮する必要がある。

使 用 記 号

A_G : 中間熱交換器ギャップ面積
 B : 水路幅
 d : ノズル内径
 D : IHX 二重円筒外径
 $Fr = w_0^2/gd$, $Fr^* = w_0^2/gH$: フルード数
 H : 水深
 q : IHX 取水流量
 Q : 水路循環流量
 r : 半径
 r_b : 気泡半径

r_s : くびれ部半径
 R : 回転円筒の半径
 $Re = w_0 d / \nu$: レイノルズ数
 $Re = V_c D / \nu$: 水路レイノルズ数
 $R_0 = \Gamma_\infty^2 / g d^3$: 旋回フルード数
 u : 半径方向速度
 v : 旋回方向速度
 v_0 : 回転円筒の周速度
 $V_c = (Q + q) / (BH)$: 水路接近流速
 $V_s = q / A_G$: IHX 取水流速
 w : 軸流方向速度 (下降速度)
 w_d : ノズル内の平均流速
 $We = \rho w_d^2 d / T$: ウェーバ数
 ν : 流体の動粘性係数
 ρ : 流体の密度
 σ : 表面張力係数
 $\Gamma = rv$: 循環 (簡単のために 2π を省いた)
 $\Gamma_\infty = Rv_0$: 回転円筒の旋回 (トルクに相当)
 添字 0, 1 は r_0, r_1 での値を示す。

参 考 文 献

- (1) 藤田ほか, トップエントリシステム熱流動特性の研究; 地震時のスロッシングによる冷却機能への影響評価, 三菱重工技報 Vol.31 No.1 (1994) p.49
- (2) 白石ほか, トップエントリシステム熱流動特性の研究; 高速増殖炉過渡運転時多液面揺動の安定性評価, 三菱重工技報 Vol.31 No.2 (1994) p.126
- (3) 藤本ほか, FBR 実証炉 (トップエントリシステム) 流動特性の研究; 原子炉上部プレナム及び逆 U 字配管での温度成層, 三菱重工技報 Vol.31 No.3 (1994) p.209
- (4) 花岡, 排水時のうず特性に関する研究, 流体力学, Vol.11, No.2, p.80~89
- (5) Baum, M. R., BNES J., 13 (1974)
- (6) Takahashi, M., Inoue, A., Aritomi, M., Takenaka, Y. & Suzuki, K., Gas Entrainment at Free Surface of Liquid, (I) & (II), J. of Nuclear Science and Technology, 25[2] & [3] (1988)