高速炉ガス巻込み現象の実規模解析*

伊藤 啓^{*1}, 功刀 資彰^{*2}, 大島 宏之^{*1}, 河村 拓己^{*3}

Real-Scale Numerical Simulation of Gas Entrainment Phenomena in Fast Reactor

Kei ITO^{*1}, Tomoaki KUNUGI, Hiroyuki OHSHIMA and Takumi KAWAMURA^{*1} Japan Atomic Energy Agency
4002 Narita, O-arai, Ibaraki, 311-1393 Japan

To evaluate gas entrainment (GE) phenomena in a large-scale sodium-cooled fast reactor, the authors are developing a high-precision numerical simulation algorithm for gas-liquid two-phase flows based on a volume-of-fluid methodology. In this simulation algorithm, the PLIC (Piecewise Linear Interface Reconstruction) algorithm is employed to achieve accurate interface-tracking. Moreover, physically appropriate formulations have been conducted on gas-liquid interfaces to eliminate unphysical behaviors. Thanks to these improvements, it is confirmed that the developed simulation algorithm can reproduce the GE phenomena in a simple experiment. In this study, the simulation algorithm is applied to a real-scale GE test to check the applicability of the algorithm to the GE phenomena in the fast reactor. The mesh resolution and boundary conditions are considered carefully to be suitable for the numerical simulation of the two-phase flow around inlet and outlet pipes. As a result, transient behaviors of the vortical flows around the pipes and the accompanied GE phenomena are simulated well. In particular, the origin of the flow which induces the GE phenomena is showed clearly. Finally, from the investigation of a lot of GE phenomena observed in the simulation result, it is verified that the GE phenomena by relatively strong vortical flows are important in terms of the GE suppression in the fast reactor.

Key Words : Gas Entrainment, Free Surface, Numerical Simulation, VOF, FBR

1. 結 言

ナトリウム冷却大型高速炉 (JSFR : Japanese Sodium-cooled loop-type Fast Reactor) の設計研究においては, 出力に比してコンパクト化した原子炉容器を採用する予定であり, それに伴う炉内冷却材高速化の影響を正しく評価する必要がある⁽¹⁾. その一環として, 炉上部プレナム部の気液界面におけるガス巻込み (液面から気泡が巻込まれる現象) の評価を実施している. 著者らは, 高精度気液二相流数値解析手法の開発とガス巻込み現象への適用性検証を実施しており, 基礎実験におけるガス巻込み現象の基本メカニズムを再現できることを確認している^(2,3).

本研究では, 原子力機構にて実施した 1/1.8 炉上部プレナム部分モデル試験⁽⁴⁾を対象とした数値解析を実施し, 実規模ガス巻込み現象への適用性を確認する.

2. 解析手法の概要

2・1 非構造格子系における高精度 VOF 法

VOF 法では, 流体率 (各格子セルにおける液相割合) 輸送方程式を解くことで気液界面の輸送を行う. その際, 気液界面の勾配を考慮することによって高精度輸送計算を行う手法 (PLIC (Piecewise Linear Interface Calculation))

* 原稿受付 2010 年 9 月 13 日

^{*1} 正員, (独)日本原子力研究開発機構 (〒311-1393 茨城県東茨城郡大洗町成田町4002)^{*2} 正員, フェロー, 京都大学大学院工学研究科^{*3} (株)NESI

E-mail: ito.kei@jaea.go.jp

法⁽⁵⁾が提案されており、本研究では、PLIC法を非構造格子系に拡張した数値解析手法を用いる。また、本数値解析手法は、気液各相の体積保存性を完全に満たすような計算アルゴリズムを有しており、非構造格子系においても高精度な界面追跡が可能であることを確認している。

2・2 気液界面における物理的に適切なモデル化

気液二相流数値解析においては、気液界面近傍における不適切な定式化により、非物理的な挙動が発生することが知られている。著者らは、気液界面における力学的釣合い条件に基づく数値モデルを開発することで、非物理的な挙動の発生を抑制している。具体的には、気液各相の運動量輸送を個別に取扱うことによって界面輸送時の非物理的な圧力発生を抑制し、また、表面張力との釣合いを考慮した圧力計算式を用いることによって偽流速の発生を抑制している。

2・3 ガス巻込み現象の再現性

ガス巻込み基礎実験⁽⁶⁾を対象とした数値解析を行った結果、ガス巻込みの発生を捕らえられること、ガス巻込み発生に関して数値解析が実験と同様のメカニズムを再現できていることを確認している。

3. 実規模ガス巻込み現象の数値解析

3・1 解析条件

図1に、1/1.8炉上部プレナム部分モデル試験体系を示す。本試験は、JSFR炉上部プレナムの気液界面部を対象としており、流出配管(Hot leg)を中心とし2本の流入配管(Cold leg)を含む1/4領域がモデル化されている。また、界面の変動を抑制するため、界面下に水平版(Dipped plate, D/P)が挿入されており、試験は、Dipped plateから上の部分を対象としている。試験においては、図中右側の水平流路入口から水が流入し、配管後流において複雑な渦流れ場を形成する。そのような流れがD/Pと配管の隙間部における吸込み(下向き)流れと干渉することによってガス巻込みが発生し、気泡がD/Pより下の領域に連行される可能性がある。試験装置の寸法は、炉容器を模した外側壁面(円形部分)の径が約5.5m、C/Lの径が0.64m、H/Lの径が0.84m、入口および出口部の幅が1.5mである。

図2に、解析格子を示す。セルサイズは、渦が発生する配管周りの領域(水平方向)および液面近傍(垂直方向)において約8mm、その他の領域において20~30mm程度であり、全セル数は約100万である。

試験において定格条件の液位(0.805m)ではガス巻込みが発生しないことを確認しているため、本研究では試験よりもガス巻込みを生じやすい条件で数値解析を実施した。即ち、液位を低くし(0.2m)、更に、境界条件として、流路入口において定格条件の約8倍、D/Pと配管の隙間部において定格条件の約4倍の流速を与えた。

数値解析アルゴリズムとしては、コロケート型変数配置に基づく有限体積法を使用し、Navier-Stokes方程式の非定常項は1次精度Euler陽解法、対流項は2次精度風上差分、拡散項は2次精度中心差分によって離散化した。また、MPI法による並列化(64並列)を用いた。

3・2 解析条件

図3に、十分発達した状態における水平方向速度分布を示す。入口から流入した流れが配管を過ぎることにより、C/L1やH/Lの後流に渦流れが形成されており、また、配管-R/V間において流路が狭くなることにより、R/V近傍での流れが加速されている。この状態において、気液界面形状は全体的に平坦であったが、流れが配管に衝突する面で液面の盛り上がりが生じていた。

図4に、C/L1-H/L間において発生したガス巻込み挙動(R/V側から見た自由液面形状)を示す。C/L1-R/V間を抜けてきた流れが、R/Vに沿ってR/V-H/L間方向へ流れる際にせん断によって渦流れを形成し、この渦流れによる界面窪みの先端から18mm程度の気泡が巻込まれている。その他にも、H/L近傍における多数のガス巻込み発生を解析することに成功した。これらを分析した結果、気泡巻込み部近傍の界面下における下降流が比較的弱いケース(主に潜り込み流れによるガス巻込み)では、巻込まれた気泡が速やかに界面から放出されるのに対し、下降流が強いケース(比較的強い渦流れによるガス巻込み)では、気泡が界面下深くまで連行されることが分か

った。即ち、D/P 以下（1 次冷却系）への気泡混入を抑制する観点からは、渦流れと下降流の干渉によって発生するガス巻込みに留意すべきであることを確認した。

Fig. 1 1/1.8th scaled partial model

Fig. 2 Simulation mesh

Fig. 3 Horizontal velocity distribution

4. 結論

高速炉ガス巻込み現象を評価できる高精度気液二相流数値解析手法開発の一環として、実規模ガス巻込み現象への適用性確認を実施した。1/1.8 部分モデル試験を対象として解析を行った結果、配管近傍における渦流れ場の非定常挙動とそれに伴うガス巻込み現象の解析に成功した。また、解析結果において観察できた多数のガス巻込

み現象を分析した結果、下降流と干渉する比較的強い渦流れによるガス巻込みに留意すべきである、ということを確認した。

Fig. 4 Simulation result (occurrence of gas entrainment)

文 献

- (1) Nagata, T., “Early Commercialization of Fast Reactor Cycle in Japan”, *Proceedings of the 16th Pacific Basin Nuclear Conference*, Aomori, Japan, Oct. 14-17, Keynote 1.2 (2008).
- (2) Ito, K. and Kunugi, T., “Appropriate Formulations for Velocity and Pressure Calculations at Gas-liquid Interface with Collocated Variable Arrangement”, *Journal of Fluid Science and Technology*, Vol. 4 (2009), pp. 711-721.
- (3) Ito, K., Kunugi, T., Ohshima, H. and Kawamura, T., “Formulations and Validations of a High-precision Volume-of-fluid Algorithm on Non-orthogonal Meshes for Numerical Simulations of Gas Entrainment Phenomena”, *Journal of Nuclear Science and Technology*, Vol. 46 (2009), pp. 366-373.
- (4) Kimura, N., Ezure, T., Tobita, A. and Kamide, H., “Experimental Study on Gas Entrainment at Free Surface in Reactor Vessel of a Compact Sodium-Cooled Fast Reactor”, *Journal of Nuclear Science and Technology*, Vol. 45 (2008), pp. 1053-1062.
- (5) Youngs, D. L., “Time-Dependent Multi-Material Flow with Large Fluid Distortion”, *Numerical Methods for Fluid Dynamics* (edited by Morton, K. W. and Baines, M. J.) (1982), pp. 273-486, American Press, New York.
- (6) Okamoto, K., Takeyama, K. and Iida, M., “Dynamic PIV Measurement for the Transient Behavior of a Free-Surface Vortex”, *Proceedings of the 4th Japan-Korea Symposium on Nuclear Thermal Hydraulics and Safety*, Sapporo, Japan, Nov. 28-Dec. 1, NTHAS4-097 (2004).