

(論文内容の要旨)

本論文は、高速炉内自由液面におけるガス巻込み現象を再現することを目的として、高精度気液二相流数値解析手法の構築とガス巻込み基礎実験を対象とした検証を行い、得られた結果をまとめたものであり、7章からなっている。

第1章は序論であり、ナトリウム冷却大型高速炉(JSFR)におけるガス巻込み現象の発生条件(抑制基準)の明確化の重要性と、本研究で高精度気液二相流数値解析手法を構築・検証する必要性を述べている。

第2章では、非構造格子系における高精度気液二相流数値解析手法の構築を行っている。まず、非構造格子系における流れ場解析手法の構築と検証を行っている。次に、界面形状の追跡法として高精度Volume-of-Fluid法を採用し、任意形状の非構造格子系における新たな高精度・高効率気液二相流数値解析手法を構築している。この際、気液界面の再構築や表面張力の評価に関し、非構造格子系においても高精度計算が可能な幾何学的定式化を行っている。さらに、格子面での流体率輸送に関する物理的考察に基づき、気液各相の体積保存性を完全に満たす手法を考案している。本手法を気液界面の輸送に適用することにより、大きく歪んだ非構造格子系においても構造格子系に匹敵する解析精度を保証するとともに、非常にロバストな計算を実現している。また、非物理的な流体挙動について考察を行い、その原因が気液界面における運動量の輸送および圧力-表面張力の力学的釣合いに関する不適切な定式化にあることを明らかにし、物理的考察に基づく新たな定式化を考案している。その結果、液中上昇気泡の解析において、従来の気液二相流数値解析手法が導く非物理的な流体挙動を抑制できることを示している。さらに、圧力-外力(重力及び表面張力)に関して、気液界面における圧力勾配と表面張力の釣合いを物理的に厳密に満たす手法を非構造格子系において定式化している。その際、Laplaceの式に基づいた表面張力ポテンシャルの概念等を導入して効果的な計算手法を提案している。本手法を用いた解析の結果、偽流速の発生を完全に防止し、本定式化が高精度物理計算に対して非常に有効であることを示している。構築した高精度気液二相流数値解析手法による液中上昇気泡の解析を実施した結果、品質の低い(大きく歪んだ)非構造格子系においても高精度な解析結果が導かれることを確認している。

第 3 章では、非構造解適合格子の開発を行っている。まず、JSFR を対象とした実規模ガス巻込み解析においては、大規模体系内において発生する局所的な渦流れを精度良く再現する必要があるため、渦中心近傍の格子を自動的に高解像度化できる非構造解適合格子が必須である。このため、2 次元非構造解適合格子作成法の構築を行い、局所的に細分化されたセルと周囲セルの間に Edge 整合性を満たすように、両セル間に特殊分割を施したセルを挿入する手法を考案している。さらに、非構造解適合格子を 3 次元に拡張し、気液二相流解析に適用するため、セルの細分化に伴う物理量再配分計算の考察を行い、体積保存則や気液各相の運動量保存則を満たすような定式化を考案している。本手法を様々な検証問題に適用した結果、非構造解適合格子を用いて局所的に高解像度格子分割を行うことが可能となり、少ないセル数でも渦流れや気液界面変形挙動を高精度に解析することができること、および、気液界面からの微小液滴の飛散やガス巻込み発生を再現できることを明らかにしている。

第 4 章では、適切な前処理を含む高速行列計算法と領域分割型大規模並列化手法を高精度気液二相流数値解析手法に導入することにより、従来に比べて数十倍の高速化を実現している。

第 5 章では、渦流れによるガス巻込み現象の再現性を検証するため、ガス巻込み基礎実験を対象とした解析を行っている。解析格子や境界条件に関する検討を十分に行った上で本解析を実施した結果、構築した高精度気液二相流数値解析手法は、物体後流に発生する渦流れと吸込み流速の相互作用によるガス巻込み発生現象を再現することができ、得られた速度分布やガスコア形状は実験結果と非常に良い一致を示している。特に、吸込み流速の発達によるガスコア成長挙動に関して物理機構を正確な再現しているため、実際の高速炉ガス巻込み現象の解析への適用が期待できる。

第 6 章では、JSFR を対象とした実規模ガス巻込み解析の実現性について検討を行っている。その結果、実規模解析に必要なセル数は 1 億程度と見積もられ、現在の計算機環境では解析は困難であるが、非構造解適合格子法を用いた渦流れの高精度解析および数千個の PE を用いた大規模並列化によって、将来的に実規模ガス巻込み解析を実施できる見通しを得ている。

第 7 章では、本論文で得られた結論の取り纏めを行い、本研究の学術的意義及び今後の展望を述べている。

(論文審査の結果の要旨)

本論文は、高速炉内自由液面におけるガス巻込み現象を再現することを目的として、高精度気液二相流数値解析手法の開発とガス巻込み基礎実験を対象とした検証を行った研究成果についてまとめたものであり、得られた主な成果は次の通りである。

1. 体系の局所形状への依存性が強い高速炉ガス巻込み現象を解析可能な非構造格子系高精度気液二相流数値解析手法を構築している。その際、気液各相の体積保存性を完全に満たす手法を考案し、非構造格子系における高い解析精度と計算のロバスト性を実現している。また、物理的考察に基づいて運動量輸送式および圧力勾配式を導出し、気液界面における非物理的流体運動を抑制することに成功している。さらに、外力ポテンシャルの概念を導入することによって、気液界面における圧力勾配と表面張力の釣り合いを物理的に厳密に満たす手法を構築し、気液界面での計算上の偽流速発生を完全に防止している。

2. 高速炉体系内において発生する局所的な渦流れを精度良く再現するため、全ての隣接セル間の Edge 整合性を満足する 2 次元非構造解適合格子を実現し、3 次元へ拡張して非構造解適合格子作成方法を構築している。また、本方法を気液二相流解析へ適用する際、細分化セルにおいても体積保存則や気液各相の運動量保存則を満たす物理量再配分手法を考案し、気液界面からの微小液滴の飛散やガス巻込み発生の再現に成功している。

3. 構築した高精度気液二相流数値解析手法の高速化を行い、将来に実規模ガス巻込み解析を実施できる見通しを得ている。

4. 構築した高精度気液二相流数値解析手法によるガス巻込み現象の再現性を検証するため、ガス巻込み基礎実験を対象とした解析を実施し、物体後流に発生する渦流れによるガス巻込み発生の再現に成功し、本手法が高速炉ガス巻込み現象に適用可能であることを明らかにしている。

以上のように、本論文は、高速炉ガス巻込み現象の直接模擬を目指し、高精度・高効率気液二相流数値解析手法を構築したものであり、本研究で得られた様々な知見は一般性が高く、他分野の数値解析手法の構築にも援用できる優れた学術的成果と言える。よって、本論文は博士(工学)の学位論文として価値あるものと認める。また、平成21年7月23日、論文内容とそれに関連した事項について試問を行った結果、合格と認めた。