

**原子力システム研究開発事業 – 基礎研究開発分野 –**  
**若手対象型 事後評価総合所見公表用フォーマット**

研究開発課題名（研究機関名） 計算科学的手法を駆使した高精度・シームレス物理シミュレータの開発 – 高速炉ガス巻き込み評価を対象として –（国立大学法人名古屋大学）	
研究開発担当者 機関名：国立大学法人名古屋大学                      総括代表者：山本義暢 機関名：国立大学法人京都大学                        代表者：功刀資彰 機関名：日本原子力研究開発機構                      代表者：伊藤啓	
研究期間及び予算額 平成17年度～平成19年度（3年計画）      82,551 千円	
項目	要 約
1. 当初の目的・目標	<p>○想定した革新的原子力システムと問題点：高速増殖炉サイクルの実用化のために現在、原子炉容器をコンパクト化し、主冷却システムを2ループ化したナトリウム冷却高速炉が設計検討されている。本設計概念では炉容器コンパクト化にともない容器内での流速が増加するため、容器内自由液面におけるガス巻き込み現象の増加が懸念されている。またガス巻き込み量の増加は炉心反応度等へ影響を及ぼす可能性もあることから、ガス巻き込み現象の定量的評価は重要である。高速炉の設計において適切な裕度を定めるためには、1) ガス巻き込み現象の解明とそれに伴う気泡の巻き込み量の定量化、2) 原子炉システム内気泡挙動の評価、が必要である。現象解明の観点から考えると、現在の実験・測定技術は、現象の局所的な測定精度及び時空間同時測定に限界があり、直接的に現象を解明する手法としては課題が残されている。一方気液二相流数値解析は現象の詳細な情報を得ることが可能であり、実験の代替手段として有力であると考えられるが、現在の解析技術は、原子炉内現象（形状模擬性の問題）を再現する段階まで至っていない。また、システム内気泡挙動評価においては、実験による評価は困難であり、現在用いられているシステム解析手法はモデル定数等の検証が不十分であり十分な解析精度が得られない。従ってガス巻き込み現象評価のためには、計算力学的解析手法の高精度・高度化が不可欠である。</p> <p>○研究開発目標：熱流体運動特有の非線形現象及び複雑・複合形状を伴う各種多重相関現象として出現する原子炉内ガス巻き込み現象等を解析対象として、最新計算科学的手法を駆使することで基礎的な気液界面現象から原子炉実規模気液界面現象までを解析対象とした高精度・シームレス物理シミュレータの開発を目標とする。</p> <p>○全体計画：計算科学的手法に基づき基礎気液界面現象から原子炉実規模気液界面現象を対象とした、高精度・シームレス物理シミュレータの構築を目標とし、以下の事業項目を対象とした研究開発を実施する。</p> <p>(1) 気液界面・体積追跡法の検討・評価          高速炉内・ガス巻き込み現象における基礎物理現象（層状性及び分散性</p>

気液混相乱流場)を対象とし、直接数値計算法としての気液混相乱流場の計算手法(Multi Interface Advection and Reconstruction Solver、以下 MARS 法と標記する)の検証(界面・体積輸送精度、セル間の体積輸送量のコンシステンシー、各種保存性)を実施する。また得られた DNS データベースをもとに基礎物理現象の解析を実行する。

(2)原子炉各構成要素を直接模擬できる格子体系の検討(非構造格子系)・(3)非構造格子体系下での気液界面・体積追跡法の高精度・高度化の検討

上記(1)の MARS の計算手法を参照しながら複雑体系への適用を目的として、非構造格子系における解析手法の開発を行う。また非構造格子系において効率的に高精度の解を得るために、流れ場の解析手法及び気液界面・体積追跡法の改良及び高精度化を実施する。結果として MARS の高い計算効率を維持した上で、非構造メッシュ系において高精度な解析を行うことができる解析手法を確立する。

(4)超並列コンピューティングを駆使した大規模容量化・高速化の検討・評価

高速炉・ガス巻き込み現象及びその基礎物理現象を高精度に数値予測するには、超並列コンピューティングを駆使した大規模容量化(領域分割)、並列化に基づく高速化及びデータ通信の高効率化が不可欠である。具体的には大型計算機システム(数百 CPU を用いた領域分割及び並列化)上でメモリ量数百 GB 程度の演算を高効率に実行できることが必要となる。そこでベクトル化率 95%以上、並列化効率 50%以上での高速・高効率演算が可能な計算コードの開発を行う。

(5)各種統計解析処理コードの開発

乱流モデル解析及びガス巻き込みシステムコード等で用いられる経験式・モデル式の評価を行うために、開発コードにより得られる 3 次元非定常の物理情報(速度、圧力、温度、界面情報等)の統計処理を行うポスト処理コードを開発する。

(6)基礎実験データとの比較検討

高精度・シームレス物理シミュレータのガス巻き込み現象への適用性を確認するため、高速炉上部プレナム部をモデル化した基礎実験体系における解析を実施し、実験データとの比較を行い、解析精度を評価する。上記(1)により本解析手法により高速炉ガス巻き込み現象に関する基礎物理現象を高精度に解析可能であることを検証し、(2)及び(3)により複雑形状への拡張を図り開発シミュレータの主要部とする。また原子炉実機規模解析に対応すべく、(4)により開発シミュレータの大規模容量化及び高速化・高度化を実施する。さらに(5)により開発シミュレータで得られた数値データのポスト処理を行う。最後に開発シミュレータの検証として(6)の基礎実験データとの比較検討を実施する。

## 2. 研究成果

- ・当初予定の成果
- ・特筆すべき成果
- ・副次的な成果
- ・論文、特許等

### 【事業項目1】気液界面・体積追跡法の検討・評価

#### ①気液混相乱流場における統一的直接数値計算手法の開発

- ・高速炉内ガス巻き込み基礎物理現象の一つである高フルード数開水路乱流場における MARS 法に基づく直接数値計算を実行した。また平均速度分布及び乱流統計量分布に関して、室内実験結果と比較検討し定性的・定量的によく一致することを確認した。その結果、高速炉上部プレナム部における実機条件におけるフルード数を十分包括した、開水路乱流場の直接数値計算が可能であることを示した。
- ・同様に高速炉内ガス巻き込み基礎物理現象の一つである分散性気液混相乱流場（気泡乱流場）への拡張を行った。ミニマムチャンネル流を対象としたテスト計算を実行し、発達乱流場を得ることに成功した。また格子依存性等に関する検討を行い気泡周りの乱流変調を解像するために必要な格子解像度に関する指針を得た。

以上当初の目標通り、MARS 法により高速炉ガス巻き込み基礎物理現象（層状性及び分散性気液混相乱流場）の直接数値計算が可能であることを実証した。特に高フルード数開水路乱流場の直接数値計算の成功は、世界初であり学術的観点からも非常に有益であると考えられる。

#### ②界面・体積輸送精度に関する解析

- ・気液界面・体積追跡法（MARS 法）に関して、体積保存性に関しては計算タイムステップ幅を十分小さくとれば、原子炉システム内気泡挙動を解析する上での基礎的な物理現象が解析可能であることを示すとともに、気泡流動場におけるタイムステップ幅に関する指針を得た。また界面物質輸送の高精度化と密接に関連する、計算格子セル間における表面張力の算定精度については運動学的条件を考慮するのみではその高精度化に限界があることを明らかとした。

以上当初の目標通り、MARS 法によりガス巻き込み現象を解析する上での必要時間分解能及び空間格子分解能に関する知見を得た。

- ・運動学・力学的条件に基づく界面曲率・表面張力算出に関する評価・検討及び、気液界面における熱力学的条件を考慮した場合における界面曲率の算定精度及び表面張力効果への影響の評価・検討を実施した。その結果、界面における自由エネルギーの界面追跡法との整合性を検討し、新たな界面モデルに関して考察を行った。その結果、界面の電気二重層的效果を取り入れた界面自由エネルギーを導出した。そして、得られた自由エネルギーを運動方程式に組み込み、界面の効果を考慮した、新たなモデル流体方程式を構築した。

以上当初の目標通り、熱力学的条件に基づき、気液界面における運動学・力学的条件の評価を実施した。しかし当初の想定とは異なり、対象とする原子炉容器内ガス巻き込み物理現象の物質輸送問題へ拡張するには空間スケールのオーダーが異なり困難であることが判明した。一方で今回導出した界面自由エネルギー効果を適切に評価することにより、

沸騰・凝縮現象といった相変化問題に対し、核生成・膨張・収縮等への拡張が期待できると考えられる。

③ガス巻き込み現象・基礎物理現象における DNS データベースの構築とその詳細解析

- ・ 高フルード数開水路乱流場における DNS データベースを構築し、そのデータを用いて自由界面近傍の乱流構造・界面変形効果に伴う乱流変調に関する詳細解析を実行した。その結果、界面変形効果に伴う気液界面近傍の乱流強度分布及び散逸率等の変化特性を明らかにした。以上により、界面変形を伴う自由表面乱流場における乱流モデルの必要条件及びモデリングに関する指針を得た。
- ・ 気泡乱流場の DNS データベースを構築し、そのデータベースを用いて気泡周りに非定常の渦運動を確認すると共に、これまで実験的手法では得ることのできなかった平均速度・乱流統計量分布及び変形を伴う気泡に働く抗力に関するデータベースを取得した。これによりガス巻き込みシステムコードの高精度化においては特に気泡に働く抗力係数の修正が必要であることがわかった。

以上当初の目標通りガス巻き込み基礎物理現象を対象とした詳細解析を実施し、乱流モデル及び抗力係数等の経験式の評価が可能となった。得られた知見は、原子炉ガス巻き込み解析にとどまらず気液界面現象を伴う各種流動場においても非常に有益であると考えられる。

**【事業項目 2】** 原子炉各構成要素を直接模擬できる格子体系の検討  
単相流を対象とした非構造格子体系における 3 次元非定常熱流動解析プログラムの作成及び円筒容器内渦流れ場を対象とした検証解析を実施した。その結果、本開発コードにより、単相解析において十分に高精度な計算結果が得られることを確認した。

以上当初の目標通り、原子炉各構成要素を直接模擬できる非構造格子体系化への単相流解析部分の拡張に成功した。

**【事業項目 3】** 非構造格子体系下での気液界面・体積追跡法の高精度・高度化の検討

- ・ 界面勾配の多次元性及び界面物性値の評価方法の改良及び高精度化を実施し、体積保存性の誤差を 0.1%以下に抑えることに成功した。
- ・ 非構造格子体系下における気液界面・体積追跡法を構築するために、界面セルとその周囲のセルにおける体積率(流体率、VOF 値)を用いた界面勾配の計算手法、任意形状のセル内における各相の体積計算手法、セル境界を通じた体積輸送量の計算手法を定式化した。表面張力計算については、畳み込み積分を用いる手法や、界面からの距離関数の再構築を行う手法の定式化を行った。
- ・ 上記結果を基にコード化を行い、上昇気泡を対象とした非構造格子体系下での気液界面・体積追跡法の検証解析を実施した。その際、

圧力勾配と力の釣合いが満たされるように、速度評価式及び圧力勾配評価式の改良を実施し、非物理的な流速分布の発生が抑制されることを確認した。Eotvos 数をパラメータとして解析を実施した結果、計算された上昇気泡形状は実験値と良く一致し、適切な解析が行われていることを確認した。また、非構造格子系においても構造格子系と同等の結果が得られ、非構造格子系においても高精度計算が可能であることが明らかになった。

以上当初の目標通り、気液界面体積追跡法(MARS)の高い計算効率を維持した上で、原子炉各構成要素を直接模擬できる非構造格子体系下において高精度な解析を行うことができる解析手法の確立に成功した。

#### 【事業項目 4】超並列コンピューティングを駆使した大規模容量化・高速化の検討・評価

- ・ MPI におけるメモリ分割・メモリ間データ通信方法の最適化及びスレッド並列を組み合わせることにより、186CPU・メモリ量 400GB 程度の大規模計算に対して、ベクトル化率 95%以上、並列化効率 50%以上の高速演算が可能となった。
- ・ 高次精度時間積分アルゴリズムの組み込みにより、同一精度を確保するために必要なタイムステップ幅が 10 倍程度向上した。また計算効率でも 3 倍程度の高速演算が可能となった。

以上当初の目標通り、超並列計算機上での大規模計算において高速・高効率計算が可能となった。

- ・ 乱流生成ドライバールーチンを利用して、乱流場中における気泡変形運動の過渡現象に対し、システムコード等に用いる抗力係数等の定量的評価が可能であることを確認した。

以上の乱流生成ドライバールーチンの組み込みにより、原子炉上部プレナム部のガス巻き込み評価にとどまらず、本開発コードを用いて炉心付近及び配管部での気泡挙動といった原子炉各構成要素における過渡現象解析への拡張が容易に行えると考えられ、ガス巻き込みシステムコードにおけるモデル定数等の高精度化への寄与が大いに期待できると考えられる。

#### 【事業項目 5】各種統計解析処理コードの開発

- ・ 乱流モデル解析及びガス巻き込みシステムコード等で用いられる経験式・モデル式の評価を行うために、開発コードにより得られる 3 次元非定常の物理情報(速度、圧力、温度、界面情報等)の統計処理を行うポスト処理コードの開発を行った。
- ・ またシステムコード内の気液相互作用モデルについて確認・検討を行い、気泡乱流を対象とした直接数値計算結果に対し、気液界面を通じた運動量交換モデルに改良を施した。その結果、直接数値計算結果に基づいて気泡に作用する抵抗係数を定めることで解析精度が向上し、実験結果との一致が高まることが明らかになった

以上当初の目標通り、開発コードの統計処理コード開発を行うとともに得られた結果に基づきガス巻き込みシステムコードの高精度化が可能であることを示した。

**【事業項目6】基礎実験データとの比較検討**

・開発コードを用いて、ガス巻き込み現象の基礎実験体系の解析を実施した。得られた解析結果と基礎実験データを比較し、物体後流の渦流れが正しく再現され、実験において発生したガス巻き込み現象と同様の発生機構を有するガス巻き込み現象が再現できていることが明らかになった。以上により、適切な格子解像度を確保した場合、本開発コードによりガス巻き込み現象を定量的に再現・評価可能であることを確認した。以上当初の目標通り、本開発コードによりガス巻き込み現象を定量的に再現・評価可能であることを実証した。

**【事業全体】を通じて**

・本事業の最終年度として3年間の事業の成果とその評価をまとめるために、開発コードを実規模ガス巻き試験体系(1/1.8スケールモデル)に適用しその評価を実施した。実規模ガス巻き試験を対象としたテスト計算を実施した結果、試験におけるガス巻き込み発生条件下において、渦の発生挙動及び渦中心での液面のくぼみ生成を定量的に再現できることを確認し、今後、超並列計算機上での大規模容量を確保した本計算を実行することにより、原子炉実規模ガス巻き込み現象の発生を高精度に予測できる見通しを得た。以上により、高速炉ガス巻き込み現象を対象とした、計算科学的手法に基づき基礎気液界面現象から原子炉実規模気液界面現象を対象とした、高精度・シームレス物理シミュレータの構築に成功した。

論文、特許等については、以下のとおりである。

○学会口頭発表

- 1) 日本原子力学会2007年春の年会: ガス巻き込み現象の直接数値解析に向けた手法の開発(1)  
—非構造格子系における流動解析手法の構築と検証—
- 2) 日本混相流学会年会講演会2007: 非構造格子体系における気液二相流数値解析手法の開発
- 3) 日本流体力学学会年会2007: 気泡を伴うチャンネル乱流場における気液間相互作用
- 4) 5th International Symposium on Turbulence and Shear Flow Phenomena: SURFACE DEFORMATION EFFECTS ON THE FREE-SURFACE TURBULENCE STRUCTURE IN HIGH-Fr OPEN-CHANNEL FLOW
- 5) The 12th International Topical Meeting on Nuclear Reactor Thermal Hydraulics (NURETH-12): DEVELOPMENT OF NUMERICAL METHOD FOR

	<p>SIMULATION OF GAS ENTRAINMENT PHENOMENA</p> <p>6) 第21回数値流体力学シンポジウム: 非構造格子系における気液二相流数値解析手法の適切な定式化</p> <p>7) 日本原子力学会2008年春の年会: ガス巻き込み現象の直接数値解析に向けた手法の開発(2) –非構造格子系における高精度気液二相流解析手法の開発と検証–</p>
<p>3. 事後評価</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>・目的・目標の設定の妥当性</li> <li>・研究計画設定の妥当性</li> <li>・研究費用の妥当性</li> <li>・研究の進捗状況</li> <li>・研究交流</li> <li>・研究者の研究能力</li> </ul>	<p><b>【目的・目標の設定の妥当性】</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>・本研究は1990年代にFBR実証炉設計でガス巻き込み現象の検討を開始して以来の重要なテーマであり、現時点においても本研究の目的、目標設定は適切であると判断する。また、気泡の巻き込みを対象とした計算コードは高速炉の開発上、必ず必要となるものである。</li> </ul> <p><b>【研究計画設定の妥当性、研究の進捗状況】</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>・研究途上で一部遅延もあったようだが、挽回しており研究開発は全体として当初予定通りで進捗したと判断する。</li> <li>・この研究の実施によってどこまでこの現象を定量的に扱えるようになったのか等、もう少し実用化の視点より研究を進めてもらいたかった。</li> </ul> <p><b>【研究交流、人材育成、研究者の研究能力、成果】</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>・ガス巻き込み現象の直接的な数値解析を目的とした「高精度シームレス物理シミュレータ」を、新たな物理モデル、数値解法の開発を含め構築した。この成果は当初の想定どおりであると判断する。最後の段階で1/1.8縮尺モデルを使った大規模体系への適用性を評価しており、この成果は実機評価への適用性を見通す上で重要である。これを次のステップの展開に反映し、設計評価で使用できるシミュレータとして完成させてもらいたい。</li> <li>・多岐に亘る研究を関連機関と連携し、成果を出したことで、研究代表者のスキルアップに有効であったと考える。</li> </ul>
<p>4. その他</p>	<ul style="list-style-type: none"> <li>・単純体系の解析評価を通じて一応の成果が得られたが、この成果を工学的な評価法に反映するには、まだ克服すべき多くの課題があると考え。今後、この分野の研究者に役立つように、シミュレーションによって原子炉実規模でのガス巻き込み現象を評価するにあたって残された課題を整理しておくべきと考える。</li> </ul>

5. 総合評価	<p>・新たな物理モデル、数値解法を取り入れた「高精度シームレス物理シミュレータ」を開発し、開発の初期フェーズとしての成果が得られた。しかしながら、この手法を採用することにより、工学的に活用でき、実証実験を必要としない解析コードの開発が可能であるか否かについては十分な評価が行われていない。今後はシステムの実用化に向けた研究開発が重要である。工学的に設計評価で使用してゆく視点で、実験と解析の役割分担を定めた活用提案を行い、設計評価の現場で実際に使用できるシミュレータとして完成させて頂きたい。</p> <p>A) 想定以上の成果が得られ、今後に大いに期待できる。 <b>B) 想定通りの成果が得られ、今後が期待できる。</b> C) 想定通りの成果が一部得られなかった。 D) 想定通りの成果が全く得られなかった。</p>
---------	--