

JUPITER コードへの簡易沸騰モデルの実装と
境界条件設定に関わる機能拡充作業

仕様書

第1章 一般仕様

1. 件名

JUPITER コードへの簡易沸騰モデルの実装と境界条件設定に関わる機能拡充作業

2. 概要

多相多成分三次元熱流動解析コード（JAEA Utility Program for Interdisciplinary Thermal-hydraulics and Engineering Research、以下「JUPITER」）に対して、沸騰を伴うバンドル内沸騰気液二相流解析のための簡易沸騰モデル（以下「SBM」）の実装作業および、ADSビーム窓における流体構造連成解析に必要な埋め込み境界法（物体表面を数値的に表現する手法）により表現された物体表面での境界条件に関わる機能拡充作業を行う。また、SBMと境界条件の実装および境界条件設定における拡充機能が適切に動作していることを確認する。

3. 契約範囲

JUPITER コードに「2. 概要」で示した機能の実装および機能確認解析を行う。また、作業内容について報告書にまとめる。

4. 貸与品

受注者は、本作業遂行上必要であると原子力機構が認めたプログラム等の無償貸与を、作業期間内に限り受けることができる。また、プログラム等は作業終了時に返却すること。

5. 納期

令和8年2月27日（金）

6. 提出書類

- | | |
|--|----|
| (1) 実施計画書（契約後速やかに） | 1部 |
| (2) 作業工程表（契約後速やかに） | 1部 |
| (3) 契約先の資本関係・役員の情報、本契約の実施場所、従事者の所属・専門性（情報セキュリティに係る資格・研修等）・実績及び国籍についての情報を記した書類（契約後速やかに） | 1部 |
| (4) 情報セキュリティ実施状況確認書（契約後速やかに） | 1部 |
| (5) 報告書（機構指定様式） | 1部 |
| (6) 報告書および解析データ（DVD-R等） | 1部 |
| (7) その他原子力機構が必要とする書類（随時） | 1部 |

(提出場所)

国立研究開発法人日本原子力研究開発機構 原子力科学研究所
原子力基礎工学研究センター 炉物理・熱流動研究グループ (第2研究棟 135号室)

7. 検収条件

内容検査の合格、「6. 提出書類」の確認並びに、原子力機構が仕様書の定める業務が実施されたと認められた時を以て、業務完了とする。

8. 品質管理

原子力機構は、受注者の品質保証活動が計画通りに実施されていることを確認するため、受注者に対して監査を行うことができるものとする。

9. グリーン購入法の推進

- (1) 本契約において、グリーン購入法（国等による環境物品等の調達の推進等に関する法律）に適用する環境物品（事務用品、OA機器等）が発生する場合は、これを採用するものとする。
- (2) 本仕様で定める提出書類（納入印刷物）については、グリーン購入法の基本方針に定める「紙類」の基準を満たしたものであること。

10. 特記事項

- (1) 納入物件の所有権および納入物件に係わる著作権（著作権法第27条および第28条に規定する権利を含む）は、原子力機構に帰属するものとする。
- (2) 受注者は、本契約により新たに発生し、また原子力機構により開示した情報に付加させた情報（但し、受注者が引合い前から自己所有していた情報を除く。以下、「成果情報」）の機密を保ち、第三者に漏えいしないよう適切な措置を講じ、措置結果とそれを証明する書類を提出すること。
- (3) 成果情報の外部発表もしくは公開、または第三者への公開は行わないこととする。但し、原子力機構の文書による承認を得た場合はこの限りではない。
- (4) 貸与物件は、契約終了後速やかに原子力機構に返還するものとする。
- (5) 貸与情報および成果情報の目的外使用を禁止する。
- (6) 貸与情報および成果情報の第三者使用を禁止する。
- (7) 受注者は貸与情報および成果情報の機密保持の義務を負う。
- (8) 契約終了後は、貸与情報の返還後、諸データ類の消去義務を負う。消去結果を証明する書類を提出すること。
- (9) JUPITER、SBMの実行環境の整備および実行は受注者の責任として実施すること。
- (10) 受注者は、上記の各項目に従わないことにより生じた、原子力機構の損害および

その他の損害についてすべての責を負うものとする。

11. 協議

本仕様書に記載されている事項および本仕様書に記載のない事項について疑義が生じた場合は、原子力機構と協議の上、その決定に従うものとする。

12. 情報セキュリティに係る遵守事項

別紙-1「情報セキュリティ強化に係る特約条項」に定められたとおりとする。

13. 大型計算機の利用について

大型計算機（SGI8600）を利用しない

大型計算機（SGI8600）を利用する

本作業を行うに当たり、受注者は原子力機構の大型計算機を使用する。ただし、CPU ノード 12,000 ノード時間、GPU ノード 6,000 ノード時間を限度とし、この時間を超える場合は別途協議の上、原子力機構が対応するものとする。また、計算機の利用に当たっては原子力機構の利用規則を遵守するものとする。なお、使用に際しての習熟等については受注者にて行うこととする。

第2章 技術仕様

1. 概要

本作業では、原子力機構で開発している最新版の多相多成分三次元熱流動解析コード JUPITER に対して、同様に原子力機構で開発している簡易沸騰モデル (SBM) の実装を行う。SBM の実装では、JUPITER および SBM に対し、連携解析のためのデータインターフェースを作成する。また、ADS ビーム窓における流体構造連成解析を実施するために、JUPITER に対して、境界条件の設定に関わる機能拡充と機能確認解析を行う。境界条件の設定に関わる機能拡充では、埋め込み境界法で表現される構造物表面に対し、温度および熱流束境界条件ならびに速度境界条件を与えることができるようにする。機能確認解析として、気泡流および二次元流体構造連成ベンチマーク問題を解析する。

2. 作業実施内容

2.1 JUPITER-SBM 連携解析のためのインターフェース作成

2.1.1 SBM と JUPITER の I/O 整備

現状では、手動で JUPITER の解析形状や境界条件に関わる入力ファイルに SBM の出力結果を記述して JUPITER-SBM 連携解析を実行している。本作業において、Fortran で書かれている SBM を外部プログラムとして JUPITER からコールし、JUPITER-SBM 間のデータを通信できるようにするための I/O (Input/Output) を整備する。今後の SBM の改良を踏まえ、I/O は保守性の高いものとする。なお、SBM のプログラムは原子力機構が提供する。

2.1.2 JUPITER-SBM 自動連携機能の確認解析

2.1.1 で SBM を実装した JUPITER を用いて、自動で連携解析ができることを確認する。

機能確認解析として、2×2 バンドル内気液二相流解析を行う。解析ケース数は 1 ケースとする。解析体系は、領域長を水平方向にそれぞれ 5 cm、軸方向に 10.08 cm、格子点数を水平方向に各軸 500 分割、軸方向に 1008 分割する。燃料棒の直径は 9.5 mm とする。計算開始から 0.05 s 後の速度場と VOF 値分布について、SBM 出力を手動で与えた場合と JUPITER 実行中に自動で与えた場合とで、diff コマンド (ファイルの差異を調べるコマンド) を用いて比較し、diff コマンドで両者に差異がないことを確認する。

2.2 構造物表面における温度境界条件設定機能

2.2.1 温度境界条件設定処理の追加

埋め込み境界法で表される固体表面において、温度境界条件を設定できるように JUPITER を改良する。また、構造体として燃料棒を設定する場合は、軸方向に対し任意の領域ごとに温度境界条件を設定できるようにする。

境界条件の種類については、温度が規定された第一種境界条件および熱流束が規定された第二種境界条件とする（熱流束 0 の場合も含む）。この変更に伴い、温度境界条件の指定がある場合は、固体内部での温度計算はスキップするものとする。

2.2.2 温度境界条件設定機能の機能確認計算

2.2.1 の機能確認計算として、直径 1 cm 長さ 20 cm の単一燃料棒周囲の熱流動解析を行う。流体は水とし、水平方向に 3 cm、軸方向に 20 cm の計算領域下部から流速 2 m/s で流入させる。格子点数は水平方向に各軸 30 分割、軸方向に 1000 分割とする。この計算条件において、第一種境界条件および第二種境界条件（熱流束 0 および有限の値）を与えた計 3 ケースの計算を行う。各ケースで固体表面の温度および熱流束の平均値が設定した値となっているかを JUPITER の統計処理機能により毎ステップで確認することとする。

2.3 構造物表面における速度境界条件設定機能

2.3.1 速度境界条件設定プログラムの作成

FrontISTR で計算された変形に伴う速度を、JUPITER における固体表面に付与する処理プログラムを作成する。仕様を以下に示す。

- FrontISTR から出力された構造物表面メッシュデータとその速度の抽出、JUPITER のリスタートデータに対する速度データの補間などの処理については、The Visualization Toolkit (VTK, <https://vtk.org/>) ライブラリを用いること。
- 処理プログラムは C 言語を用いること。
- 大型計算機（Linux OS）上での利用を前提とするため、コマンドラインで処理できるようにすること。

2.3.2 構造物変形に伴うリスタートデータ編集機能の作成

構造解析側で構造物の変形した後、流体解析をする場合、変形した箇所には真空あるいは構造物内部に流体が重なってしまう領域が発生する。これに対応するために、構造物の変形に応じてリスタートデータを編集して出力する処理プログラムを作成する。仕様を以下に示す。

- FrontISTR から出力された構造物表面メッシュデータとその速度の抽出、JUPITER のリスタートデータに対する速度および温度データの補間などの処理については、VTK ライブラリを用いること。
- 構造物の変形により生じる流体との重複箇所（あるいは真空箇所）に対する速度場の変更については、表面からの距離関数（VTK ライブラリを用いて作成）を

用いる。距離関数は界面で 0 の値をとり、界面から法線方向に遠ざかるにつれその絶対値は大きくなる性質がある。

変形により流体があった箇所に構造物が重複する場合、距離関数の値が基準値以下の距離の場合は、変形に伴う速度場として変形前の流体速度を構造物表面に沿うように再配置する。構造物表面から距離関数の値が基準値以上の領域の速度場は、変形の影響が小さくなると考えられるため、変形に伴う速度場に対し修正係数を掛けることで、その効果を表現する。基準値は 5 格子程度の距離、修正係数は距離関数の逆数とする。

変形により真空箇所が生じる場合、上述とは逆に流体速度の修正係数を距離関数の値に比例するように設定する。

- 処理プログラムは C 言語を用いることとする。
- 大型計算機 (Linux OS) 上での利用を前提とするため、コマンドラインで処理できるようにすること。

2.3.3 速度境界条件設定に関する機能確認計算

2.3.1 の機能確認計算として、Turek らが開発した流体構造連成解析のベンチマーク問題*を、JUPITER と構造解析コード FrontISTR の連成計算により行う。FrontISTR で得られた変位に伴う速度を JUPITER に渡した後、リスタート計算開始時に JUPITER から得られた固体表面速度場データを可視化および diff コマンドで直接比較することにより、FrontISTR で得られた変位に伴う速度場と一致するかを確認する。

2.3.2 の機能確認として、上記の Turek ベンチマーク計算により、FrontISTR で変形したデータを用いた JUPITER による流動計算で、真空あるいは構造物内部の流体が重なる箇所が無いかどうかを可視化処理結果から目視にて確認する。

各機能確認計算の検証ケースは 1 ケースとする。

*https://kratosmultiphysics.github.io/Examples/fluid_structure_interaction/validation/fsi_turek_FSI2/

2.4 流出境界条件の入力汎用化

現状では、JUPITER で流出境界を指定すると、自動的に圧力境界条件は固定値となる。本作業により、流出境界で圧力勾配 0 (ノイマン条件) の条件も入力ファイルで指定できるようにする。

2.5 エラー処理機能の追加

各計算格子での流体あるいは固体の存在割合を表す Volume Of Fluid (VOF) 値の設定において、固体 VOF と流体 VOF が重複して存在する計算格子がある場合はエラーを出力し強制終了させる処理を追加する。

2.6 報告書の作成

2.1 から 2.5 の作業をまとめ、報告書を作成する。なお、文章については WORD (WINDOWS 版)あるいは互換性のあるソフトで作成するものとする。電子媒体(DVD-R 等)には、解析コードから出力される一連のデータファイル(インプットデータファイル、リスタートファイル等を含む)、報告書および報告書に用いた図(表計算ソフトおよび図画作成ソフトのデジタルデータおよびファイル)を格納すること。

3. 大型計算機の利用について

本作業を行うに当たり、受注者は原子力機構の大型計算機を使用する。ただし、CPU ノード 12,000 ノード時間、GPU ノード 6,000 ノード時間を限度とし、この時間を超える場合は別途協議の上、原子力機構が対応するものとする。また、計算機の利用に当たっては原子力機構の利用規則を遵守するものとする。なお、使用に際しての習熟等については受注者にて行うこととする。

4. その他(特記事項)

- (1) 本件の遂行においては、数値流体力学および数値計算手法に関する専門的な知識を有し、C 言語による流体コード作成および改良等のプログラミング作業、数値解析の実行および評価分析に関わる技術力を有することが必要である。特に、JUPITER は一流体モデル(CLS-VOF)をベースとした自由界面を有する多相多成分熱流動解析手法であるため、これら手法開発に関わる知見・技術力を有することが必要である。また、JUPITER の環境構築、入力ファイルの作成および利用の習熟は受注者の責任にて行うこと。
- (2) 本件では、原子炉設計データに関わる情報を扱うこと、および解析コード管理および解析コードのトレーサビリティ(品質保証)確保の観点から、本作業に用いる JUPITER とデータコンバーターの原子力機構外への持ち出しは不可とする。大型計算機での開発・実行に関する環境及び作業場所については原子力機構との協議により決定する。
- (3) 本作業は、(2)と同じ理由から、全ての解析は、原子力機構で所有する大型計算機(SGI8600)で実施することとする。計算機の仕様等の情報については原子力機構から提供するが、使用に際しての習熟は受注者の責任にて行うこと。したがって、受注者は大規模な PC クラスタ計算機に係わる一般的な知識を有すること。
- (4) コード管理は、Git 及び GitHub を用いること。Git および GitHub によるコード管理の習熟は受注者の責任にて行うこと。
- (5) 「2. 作業実施内容」のうち、2.6 を除くものについては、原子力機構の大型計算機上でのみ行うこととする。また、「2. 作業実施内容」の修正が必要になる場合は原

子力機構と協議する。

- (6) ポスト処理（可視化）に関しては、汎用性、大規模データに対する優位性の観点から、parallel vtu (pvtu)フォーマット及びXDFMフォーマットを用い、Paraviewによる分散可視化で対応する。可視化対象は、バンドル内気液二相流の気泡分布、固液界面を含む計算領域内部の温度分布、流速分布とする。
- (7) 本作業で用いるFrontISTRは、<https://www.frontistr.com/download/>から入手することとし、FrontISTR用入力データの作成、JUPITER-FrontISTR連成解析に関わる実行環境整備は受注者の責任にて行うこと。
- (8) JUPITERはCMakeによりビルドすること。CMakeは<https://cmake.org/download/>から入手し、大型計算機への導入と習熟は受注者の責任にて行うこと。ビルド要件を以下に示す。
 - C99に準拠し、OpenMP3.0が使用できるCコンパイラ
 - GCCの場合は、4.3以降
 - Intel Compiler (Linux)の場合は、11.1以降で、かつGCC4.3以降
 - MPIライブラリ (MPI2.1以降の使用に準拠しているもの)
 - CMake 2.8.12以降を用い、3.6以降推奨
- (9) JUPITERのビルドには、re2c (Regular Expression to C)が必要である。re2cの入手は<https://github.com/skvadrik/re2c>から行うこと。また、大型計算機への導入は受注者の責任にて行うこと。
- (10) 受注者は異常事態等が発生した場合、原子力機構の指示に従い行動するものとする。また、契約に基づく作業等を起因として異常事態等が発生した場合、受注者がその原因分析や対策検討を行い、主体的に改善するとともに、結果について機構の確認を受けること。

以上

情報セキュリティ強化に係る特約条項

受注者（以下「乙」という。）は、本契約の履行に当たり、情報セキュリティの強化のため、契約条項記載の情報セキュリティに係る遵守事項に加え、以下に特約する内容を遵守するものとする。

（情報セキュリティインシデント発生時の対処方法及び報告手順）

第1条 乙は、情報セキュリティインシデントが発生した際の対処方法（受注業務を一時中断することを含む。）及び発注者（以下「甲」という。）に報告する手順について整備しておかなければならない。

（情報セキュリティ強化のための遵守事項）

第2条 乙は、次の各号に掲げる事項を遵守するほか、甲の情報セキュリティ強化のために、甲が必要な指示を行ったときは、その指示に従わなければならない。

- (1) この契約の業務を実施する場所を、情報セキュリティを確保できる場所に限定し、それ以外の場所で作業をさせないこと。
- (2) 業務担当者に遵守すべき情報セキュリティ対策について教育・訓練等を受講させるとともに、業務担当者には甲の情報セキュリティ確保に不断に取り組み、甲の情報及び情報システムの保護に危険を及ぼす行為をしないよう誓約させること。また、業務担当者の異動・退職等の際には異動・退職後も守秘義務を負うことを誓約させ、これを遵守させること。
- (3) 暗号化を要する場合は、「電子政府推奨暗号リスト」に記載された暗号化方式を実装し、暗号鍵を適切に管理すること。
- (4) 甲の承諾のない限り、この契約に関して知り得た情報を受注した業務の遂行以外の目的で利用しないこと。
- (5) 甲が提供する情報を取り扱う情報システムへの不正アクセスを検知・抑止するために、ログを取得・監視し全ての業務担当者についてシステム操作履歴を取得すること。
- (6) 甲が提供する情報を格納する装置、機器、記録媒体及び紙媒体について、業務担当者のみがアクセスできるよう施錠管理や入退室管理を行い、セキュアな記録媒体の使用や使用を想定しないUSBポートの無効化、機器等の廃棄時・再利用時のデータ抹消など想定外の情報利用を防止すること。
- (7) 情報システムの変更に係る検知機能やログ解析機能を実装し、外部ネットワークへの接続を伴う非ローカルの運用管理セッションの確立時には、多要素主体認証を要求するとともに定期的及び重大な脆弱性の公表時に脆弱性スキャンを実施し、適時の脆弱性対策を行うこと。

- (8) システムの欠陥の是正及び脆弱性対策について、対策計画を策定し実施するとともに、システムの欠陥の是正及び脆弱性対策等の情報セキュリティ対策が有効に機能していることの継続的な監視と確認を行うこと。
- (9) 委任をし、又は下請負をさせた場合は、当該委任又は下請負を受けた者に対して、業務担当者が遵守すべき情報セキュリティ対策についての教育・訓練等を行うこと。
- (10) 契約条項に基づき甲が乙に対して行う情報セキュリティ対策の実施状況についての監査の結果、情報セキュリティ対策の履行が不十分である場合には、甲と協議の上改善を行い、甲の承諾を得ること。
- (11) 契約の履行期間を通じて前各号に示す情報セキュリティ対策が適切に実施されたことの報告を含む検収を受けること。また、本契約の履行に関し、甲から提供を受けた情報を含め、本契約において取り扱った情報の返却、廃棄又は抹消を行うこと。