

数値シミュレーションを用いた高速炉設計
最適化手法の整備

引合仕様書

令和6年5月

日本原子力研究開発機構
高速炉サイクル研究開発センター
高速炉解析評価技術開発部
安全解析評価グループ

第1章 一般仕様

1.1 件名

数値シミュレーションを用いた高速炉設計最適化手法の整備

1.2 目的

日本原子力研究開発機構（以下「機構」と称する）では、ナトリウム燃焼現象に対する解析手法の整備を行っている。本件では、経済産業省からの受託である「令和5年度高速炉実証炉開発事業（基盤整備と技術開発）」の一部として、ナトリウム燃焼解析手法の高度化、妥当性補強及び汎用性向上のため、数値シミュレーションを用いた高速炉設計最適化手法の整備を行う。

1.3 契約範囲

- (1) 最適化手法の調査
- (2) 最適化精度改善方策の検討
- (3) 最適化手法高度化への適用検討
- (4) プロトタイプ of 概念設計
- (5) プロトタイプ of 基本プログラミング
- (6) 報告書の作成

1.4 提出図書

- | | |
|------------------------|----|
| (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) 打合せ議事録（打合せ後速やかに） | 1部 |
| (4) 業務従事者等の経歴（契約後速やかに） | 1式 |

※本件は機密情報を扱うため、以下の情報を記した書類を提出のこと。

契約先の資本関係、役員の情報、本契約の実施場所、氏名、所属・専門性（情報セキュリティに係る資格・研修等）・業務経験及び国籍。

- | | |
|----------------------------------|----|
| (5) 委任又は下請負届（機構指定様式）* 作業開始2週間前まで | 1式 |
| * 下請負がある場合に提出のこと | |
| (6) 報告書（作業終了後速やかに） | 1式 |
| * CD-Rを添付すること | |
| (7) 作成データ（作業終了後速やかに） | 1式 |
| * データ容量に応じたメディアを使用すること | |

（提出場所）

茨城県東茨城郡大洗町成田町 4002 番地

日本原子力研究開発機構 大洗研究所

FBR サイクル国際研究開発センター3F 安全解析評価グループ居室

1.5 納期

令和7年3月21日（金）

1.6 検収条件

提出書類の完納及び機構が仕様書の定める業務が実施されたと認めた時を以て、業務完了とする。

1.7 検査員及び監督員

検査員： 一般検査 管財担当課長

監督員： 安全解析評価グループリーダー

1.8 協議

当該作業を実施する上で疑義が生じた場合は、機構は受注者と協議の上その措置を定め議事録に記載する。受注者はその決定に従うものとする。

1.9 貸与物件

本件契約の作業上必要となる解析プログラム、文献、技術報告書、資料、データ等のうち、機構が認めたものについて、随時無償にて貸与する。ただし、作業完了後には原状回復の上で速やかに返却する。解析プログラムやデータ等については計算機システムから消去し、消去したことを証明する。

1.10 グリーン購入法の推進等

- (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が発生する場合は、調達基準を満たした物品を採用することとする。
- (2) 本仕様に定める提出図書（納入印刷物）については、グリーン購入法に該当するため、当該基準を満たしたものであること。
- (3) 受注者は、大洗研究所構内にて作業を行う場合には、大洗研究所環境方針を順守し、省エネルギー、省資源に努めること。また、大洗研究所構内に乗り入れる車両のアイドリングは極力避け、自動車排気ガスの低減に努めること。

1.11 品質管理

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。監査を実施するにあたっては、事前に通知を

行うとともに、受注者の情報管理を尊重する。

1.12 財産権等

産業財産権等の取扱いについては、別紙「知的財産権特約条項」に定められたとおりとする。

1.13 特記事項

- (1) 納入物件の所有権及び納入物件に係わる著作権（著作権法第 27 条及び第 28 条に規定する権利を含む）は、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、また機構により開示した情報等に付加させた情報（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、第三者に漏洩しないよう適切な措置を講じなければならない。
- (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、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) 貸与情報及び成果情報の目的外使用を禁止する。
- (5) 貸与情報及び成果情報の第三者使用を禁止する。
- (6) 受注者は貸与情報及び成果情報の機密保持の義務を負う。
- (7) 契約終了後は、貸与物件・情報の返還後、諸データ類の消去義務を負う。
- (8) 受注者は上記の各項目に従わないことにより生じた、機構の損害及びその他の損害についてすべての責を負うものとする。

以上

第2章 技術仕様

2.1 概要

機構では、革新的原子力システムであるナトリウム冷却高速炉を対象とし、ナトリウム燃焼やシビアアクシデント事象を一貫して解析可能な統合安全性評価シミュレーションシステム（SPECTRA コード）を開発している。

本システムの高速炉実証炉開発への適用を前提とし、ナトリウム燃焼解析手法の高度化、妥当性補強及び汎用性向上に資する各種作業を実施している。本件ではその一環として、格納容器設計の最適化を具体的検討事例とし、最適化手法の調査、概念設計、基本プログラミングに至るまでの一連の流れを通じて、高速炉設計の最適化手法を開発する。

2.2 作業内容

(1) 最適化手法の調査

機械学習、ベイズ推定に代表される従来手法に加え、近年開発された最新の手法も含めて、高速炉設計の最適化に適用可能な各種の最適化手法について文献を調査する。各手法の最適化ロジック、適用例、利点・欠点を含めた特徴を整理するとともに、高速炉設計最適化への適用性を検討する。調査の対象としては、scikit-learn に代表されるオープンソースの機械学習ライブラリやOptuna に代表される最適化ライブラリを含む。これらのライブラリを用いることで、各手法の実装や比較が容易になることが期待できる。

調査対象とするライブラリとしては、変数の種類や数、目的関数の形状を含めた高速炉設計の最適化問題の特性を考慮し、適したアルゴリズムを備えたライブラリを選ぶ。また、ライブラリの成熟度、コミュニティの活発さ、ドキュメントの充実度なども考慮する。

調査結果は、各手法の概要、適用事例、利点・欠点、高速炉設計最適化への適用可能性、推奨されるライブラリを含めて体系的に整理し、報告書としてまとめる。

(2) 最適化精度改善方策の検討

(1)の最適化手法の調査結果及び、機構の有する既存最適化手法を参照しつつ、最適化精度のさらなる向上を目指す。

既存手法に存在する課題を分析し、最適化計算の収束性や大域的最適解の発見可能性の向上、多峰性の強い最適化問題への対応を目指し、改善策を検討する。改善策の検討に当たっては、最新の機械学習ライブラリを用いて、最適化問題の特徴量を学習し、最適化アルゴリズムのパラメータを自動調整する方策を含め検討する。

以上を踏まえ、有望な改善方策を選定し、最適化精度を確保、改善するための方策を検討し、具体的な実装方法を含め、改善案としてまとめる。改善案では、実装に要する工数も見積もる。

(3) 最適化手法高度化への適用検討

ナトリウム燃焼を想定した高速炉設計最適化では、その設備対策を含めた多数の設計変数を同時に最適化する必要がある。このような多変数最適化問題に対して、(1)(2)で検討した最適化手法を多変数へ適用する場合の課題を整理する。考えられる課題としては、設計変数の増加に伴う計算量の増大、変数スケールの不統一による探索性能の劣化が挙げられる。

これらの課題への対処方策として、サロゲートモデルを用いた効率的な探索手法、変数のスケールリング手法を含めて検討する。検討に当たっては、多変数最適化に特化した既存ライブラリの活用も考慮する。課題への対処方策を複数案出し、それぞれについて多変数最適化問題への適用可能性を評価する。評価結果を踏まえ、有望な方策を選定し、多変数最適化問題に適用した場合の効果を見積もる。加えてこれらの検討結果を高速炉設計最適化へ適用する方策を検討し、案としてまとめる。

(4) プロトタイプ of 概念設計

機構の有する既存最適化手法を参照するとともに、(1)～(3)の調査・検討結果を踏まえ、高速炉実証炉に適用する最適化手法プロトタイプ of 概念設計を行う。

最適化部については、(2)(3)の検討結果を踏まえて、最適化ロジック、データの入出力構造等の基本設計を行う。最適化計算の効率化のため、機構側が提示する解析コードとの疎結合設計を指向する。

また、ユーザーの利便性向上のため、最適化条件の設定や結果の可視化機能も検討する。プロトタイプ of 全体構成を定義し、構成要素間のインタフェースを設計する。加えて主要な処理の流れを明確化し、データの受け渡し方式等を決定する。併せて、機構側が提示する解析コードに対し、そのアルゴリズム、サブルーチン構成、内部変数等を整理する。

(5) プロトタイプ of 基本プログラミング

(4)で構築した概念設計に基づき、最適化手法プロトタイプ of 基本プログラミングを行う。最適化部を構成する主要なサブルーチン of コーディングを行い、単体レベルでの動作確認を行う。

また、解析コード of データ連携部分もコーディングし、全体的な処理の流れを通すことで、プロトタイプ of 成立性を確認する。データ連携部分 of 実装には、JSON、HDF5 に代表される汎用的なデータ形式を採用し、柔軟性を確保する。

加えて基本的な入出力機能、可視化機能等もプログラミングし、ユーザビリティを確認する。これらの機能 of 実装には、pandas、Matplotlib に代表される汎用的なライブラリを活用する。

プログラミングしたプロトタイプ of 用いて、簡単な最適化問題を解き、期待通りの動作を確認することを確認する。動作確認で発見された不具合は、今後解決すべき課題として整理する。

(6) 報告書の作成

以上の作業内容をまとめて報告書を作成する。報告書の文章は WORD、図面については Excel、Power-Point（いずれも WINDOWS 版）あるいは同等互換のあるソフトで作成する。

2.3 特記事項

受注者は当該業務に関する各データ、技術情報、成果、その他のすべての資料及び情報に関して守秘義務を負い、これらを取り扱う場合は原則として大洗研究所の機構担当者が指定する場所にて作業を行う。本件の遂行においては、原子力プラントにおける機器の設計評価、および最適化技術のシステム構築に関する知見・技術力を有することが必要である。

以上

知的財産権特約条項

(知的財産権の範囲)

第1条 この特約条項において「知的財産権」とは、次の各号に掲げるものをいう。

- (1) 特許法(昭和34年法律第121号)に規定する特許権(以下「特許権」という。)、
実用新案法(昭和34年法律第123号)に規定する実用新案権(以下「実用新案
権」という。)、意匠法(昭和34年法律第125号)に規定する意匠権(以下「意
匠権」という。)、半導体集積回路の回路配置に関する法律(昭和60年法律第43
号)に規定する回路配置利用権(以下「回路配置利用権」という。)、種苗法(平成
10年法律第83号)に規定する育成者権(以下「育成者権」という。)及び外国
における上記各権利に相当する権利(以下「産業財産権等」と総称する。)
- (2) 特許法に規定する特許を受ける権利、実用新案法に規定する実用新案登録を受け
る権利、意匠法に規定する意匠登録を受ける権利、半導体集積回路の回路配置に
関する法律第3条第1項に規定する回路配置利用権の設定の登録を受ける権利、
種苗法第3条に規定する品種登録を受ける地位及び外国における上記各権利に相
当する権利(以下「産業財産権等を受ける権利」と総称する。)
- (3) 著作権法(昭和45年法律第48号)に規定するプログラムの著作物及びデータ
ベースの著作物(以下「プログラム等」という。)の著作権並びに外国における上
記各権利に相当する権利(以下「プログラム等の著作権」と総称する。)
- (4) コンテンツの創造、保護及び活用の促進に関する法律(平成16年法律第81号)
に規定するコンテンツで甲が本契約において制作を委託するコンテンツ(以下「コ
ンテンツ」という。)の著作権(以下「コンテンツの著作権」という。)
- (5) 前各号に掲げる権利の対象とならない技術情報のうち秘匿することが可能なもの
であって、かつ、財産的価値のあるものの中から、甲、乙協議の上、特に指定す
るもの(以下「ノウハウ」という。)を使用する権利

2 この特約条項において、「発明等」とは、特許権の対象となるものについては発明、実
用新案権の対象となるものについては考案、意匠権、回路配置利用権及びプログラム等
の著作権の対象となるものについては創作、育成者権の対象となるものについては育成
並びにノウハウを使用する権利の対象となるものについては案出をいう。

3 この特約条項において知的財産権の「実施」とは、特許法第2条第3項に定める行為、
実用新案法第2条第3項に定める行為、意匠法第2条第3項に定める行為、半導体集積
回路の回路配置に関する法律第2条第3項に定める行為、種苗法第2条第5項に定める
行為、プログラム等の著作権については著作権法第2条第1項第15号及び同項第19
号に定める行為、コンテンツの著作権については著作権法第2条第1項第7の2号、第
9の5号、第11号にいう翻案、第15号、第16号、第17号、第18号及び第19

号に定める行為並びにノウハウの使用をいう。

(乙が単独で行った発明等の知的財産権の帰属)

第2条 本契約に関して、乙単独で発明等を行ったときは、甲は、乙が次の各号のいずれの規定も遵守することを書面で甲に届け出た場合、当該発明等に係る知的財産権を乙から譲り受けないものとする。(以下、乙に単独に帰属する知的財産権を「単独知的財産権」という。)

- (1) 乙は、本契約に係る発明等を行ったときは、遅滞なく次条の規定により、甲にその旨を報告する。
- (2) 乙は、甲が国の要請に基づき公共の利益のために特に必要があるとして、その理由を明らかにして求める場合には、無償で当該知的財産権を実施する権利を国に許諾する。
- (3) 乙は、当該知的財産権を相当期間活用していないと認められ、かつ、当該知的財産権を相当期間活用していないことについて正当な理由が認められない場合において、甲が国の要請に基づき当該知的財産権の活用を促進するために特に必要があるとして、その理由を明らかにして求めるときは、当該知的財産権を実施する権利を第三者に許諾する。
- (4) 乙は、甲以外の第三者に委託業務の成果にかかる知的財産権の移転又は専用実施権(仮専用実施権を含む。)若しくは専用利用権の設定その他日本国内において排他的に実施する権利の設定若しくは移転の承諾(以下「専用実施権等の設定等」という。)をするときは、合併又は分割により移転する場合及び次のイからハマまでに規定する場合を除き、あらかじめ甲に通知し、承認を受けなければならない。

イ 乙が株式会社である場合、乙がその子会社(会社法(平成17年法律第86号)第2条第3号に規定する子会社をいう。)又は親会社(同法第4号に規定する親会社をいう。)に移転又は専用実施権等の設定等をする場合

ロ 乙が承認TLO(大学等における技術に関する研究成果の民間事業者への移転の促進に関する法律(平成10年法律第52号)第4条第1項の承認を受けた者(同法第5条第1項の変更の承認を受けた者を含む。))又は認定TLO(同法第12条第1項又は同法第13条第1項の認定を受けた者)に移転又は専用実施権等の設定等をする場合

ハ 乙が技術研究組合である場合、乙がその組合員に移転又は専用実施権等の設定等をする場合

- 2 甲は、乙が前項に規定する書面を提出しない場合、乙から当該知的財産権を無償で(第7条に規定する費用を除く。)譲り受けるものとする。
- 3 乙は、第1項の書面を提出したにもかかわらず同項各号の規定のいずれかを満たしておらず、かつ満たしていないことについて正当な理由がないと甲が認める場合、当該知

的財産権を無償で甲に譲り渡さなければならない。

(知的財産権の報告)

第3条 乙は、本契約に係る産業財産権等の出願又は申請をするときは、あらかじめ出願又は申請に際して提出すべき書類の写しを添えて甲に通知しなければならない。

2 乙は、前項に係る国内の特許出願、実用新案登録出願、意匠登録出願を行う場合は、特許法施行規則第23条第6項及び同規則様式26備考24等を参考にし、当該出願書類に国の委託事業に係る研究の成果による出願であることを表示しなければならない。

3 乙は、第1項に係る産業財産権等の出願又は申請に関して設定の登録等を受けた場合には、設定の登録等の日から30日以内に、甲に文書により通知しなければならない。

4 乙は、本契約に係るプログラム等又はコンテンツが得られた場合には、著作物が完成した日から30日以内に、甲に文書により通知しなければならない。

5 乙は、単独知的財産権を自ら実施したとき、及び第三者にその実施を許諾したとき（ただし、第5条第2項に規定する場合を除く。）は、甲に文書により通知しなければならない。

(単独知的財産権の移転)

第4条 乙は、単独知的財産権を甲以外の第三者に移転する場合には、当該移転を行う前に、その旨を甲に文書で提出し、承認を受けなければならない。ただし、合併又は分割により移転する場合及び第2条第1項第4号イからハまでに定める場合には、当該移転の事実を文書より甲に通知するものとする。

2 乙は、前項のいずれの場合にも、第2条、前条、次条及び第6条の規定を準用すること、並びに甲以外の者に当該知的財産権を移転するとき又は専用実施権等を設定等するときは、あらかじめ甲の承認を受けることを当該第三者と約定させ、かつ、第2条第1項に規定する書面を甲に提出させなければならない。

(単独知的財産権の実施許諾)

第5条 乙は、単独知的財産権について甲以外の第三者に実施を許諾する場合には、甲に文書により通知しなければならない。また、第2条の規定の適用に支障を与えないよう当該第三者と約定しなければならない。

2 乙は、単独知的財産権に関し、甲以外の第三者に専用実施権等の設定等を行う場合には、当該設定等を行う前に、文書により甲及び国の承認を受けなければならない。ただし、第2条第1項第4号イからハまでに定める場合には、当該専用実施権等設定の事実を文書により甲に通知するものとする。

3 甲は、単独知的財産権を無償で自ら試験又は研究のために実施することができる。甲が甲のために乙以外の第三者に製作させ、又は業務を代行する第三者に再実施権を許諾

する場合は、乙の承諾を得た上で許諾するものとし、その実施条件等は甲、乙協議の上決定する。

(単独知的財産権の放棄)

第6条 乙は、単独知的財産権を放棄する場合は、当該放棄を行う前に、その旨を甲に報告しなければならない。

(単独知的財産権の管理)

第7条 甲は、第2条第2項の規定により乙から単独知的財産権又は当該知的財産権を受ける権利を譲り受けたときは、乙に対し、乙が当該権利を譲り渡すときまでに負担した当該知的財産権の出願又は申請、審査請求及び権利の成立に係る登録までに必要な手続に要したすべての費用を支払うものとする。

(甲及び乙が共同で行った発明等の知的財産権の帰属)

第8条 本契約に関して、甲及び乙が共同で発明等を行ったときは、当該発明等に係る知的財産権は甲及び乙の共有とする。ただし、乙は、次の各号のいずれの規定も遵守することを書面で甲に届け出なければならない。(以下、甲と乙が共有する知的財産権を「共有知的財産権」という。)

- (1) 当該知的財産権の出願等権利の成立に係る登録までに必要な手続は乙が行い、第3条の規定により、甲にその旨を報告する。
- (2) 乙は、甲が国の要請に基づき公共の利益のために特に必要があるとして、その理由を明らかにして求める場合には、無償で当該知的財産権を実施する権利を国に許諾する。
- (3) 乙は、当該知的財産権を相当期間活用していないと認められ、かつ、当該知的財産権を相当期間活用していないことについて正当な理由が認められない場合において、甲が国の要請に基づき当該知的財産権の活用を促進するために特に必要があるとして、その理由を明らかにして求めるときは、当該知的財産権を実施する権利を第三者に許諾する。

2 甲は、乙が前項で規定する書面を提出しない場合、乙から当該知的財産権のうち乙が所有する部分が無償で譲り受けるものとする。

3 乙は、第1項の書面を提出したにもかかわらず同項各号の規定のいずれかを満たしておらず、さらに満たしていないことについて正当な理由がないと甲が認める場合、当該知的財産権のうち乙が所有する部分が無償で甲に譲り渡さなければならない。

(共有知的財産権の移転)

第9条 甲及び乙は、共有知的財産権のうち自らが所有する部分を相手方以外の第三者に

移転する場合には、当該移転を行う前に、その旨を相手方に通知して文書による同意を得なければならない。

(共有知的財産権の実施許諾)

第10条 甲及び乙は、共有知的財産権について第三者に実施を許諾する場合には、あらかじめ相手方に通知して文書による同意を得なければならない。

(共有知的財産権の実施)

第11条 甲は、共有知的財産権を試験又は研究以外の目的に実施しないものとする。ただし、甲は甲のために乙以外の第三者に製作させ、又は業務を代行する第三者に実施許諾する場合は、無償で当該第三者に実施許諾することができるものとする。

2 乙が共有知的財産権について自ら商業的实施をするときは、甲が自ら商業的实施をしないことにかんがみ、乙の商業的实施の計画を勘案し、事前に実施料等について甲、乙協議の上、別途実施契約を締結するものとする。

(共有知的財産権の放棄)

第12条 甲及び乙は、共有知的財産権を放棄する場合は、当該放棄を行う前に、その旨を相手方に通知して文書による同意を得なければならない。

(共有知的財産権の管理)

第13条 共有知的財産権に係る出願等を甲、乙共同で行う場合、共同出願契約を締結するとともに、出願等権利の成立に係る登録までに必要な費用は、当該知的財産権に係る甲及び乙の持分に応じて負担するものとする。

(知的財産権の帰属の例外)

第14条 本契約の目的として作成される提出書類、プログラム等及びその他コンテンツ等の納品物に係る著作権は、すべて甲に帰属する。

2 第2条第2項及び第3項並びに第8条第2項及び第3項の規定により著作権を乙から甲に譲渡する場合、又は前項の納品物に係る著作権の場合において、当該著作物を乙が自ら創作したときは、乙は、著作者人格権を行使しないものとし、当該著作物を乙以外の第三者が創作したときは、乙は、当該第三者が著作者人格権を行使しないように必要な措置を講じるものとする。

(秘密の保持)

第15条 甲及び乙は、第2条及び第8条の発明等の内容を出願公開等により内容が公開される日まで他に漏えいしてはならない。ただし、あらかじめ書面により出願申請を行

った者の了解を得た場合はこの限りではない。

(委任・下請負)

第16条 乙は、本契約の全部又は一部を第三者に委任し、又は請け負わせた場合においては、当該第三者に対して本特約条項の各条項の規定を準用するものとし、乙はこのために必要な措置を講じなければならない。

2 乙は、前項の当該第三者が本特約条項に定める事項に違反した場合には、甲に対し全ての責任を負うものとする。

(協議)

第17条 第2条及び第8条の場合において、単独若しくは共同の区別又は共同の範囲等について疑義が生じたときは、甲、乙協議して定めるものとする。

(有効期間)

第18条 本特約条項の有効期限は、本契約締結の日から当該知的財産権の消滅する日までとする。