

高速実証炉遮へい設計における VVUQ のための
高精度遮へい積分実験計画立案に関する検討

引合仕様書

令和 7 年 5 月

国立研究開発法人 日本原子力研究開発機構

大洗原子力工学研究所

高速炉研究開発部 炉心設計グループ

1. 一般仕様

1.1 件名

高速実証炉遮へい設計における VVUQ のための高精度遮へい積分実験計画立案に関する検討

1.2 目的及び概要

日本原子力研究開発機構(以下、「原子力機構」という)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)」の一環として、高速炉実証炉遮へい設計の VVUQ(検証、妥当性確認及び不確かさの定量評価)に利用する遮へい積分実験データの整備を実施している。本作業では、その1つの方策として考えられる「高精度遮へい実験の実施」について、実施内容や必要とされる費用/時間等を具体化し、その実現可能性の判断材料とすることを目的としている。高精度の遮へい実験の実施は、高速炉実証炉の遮へい設計手法における VVUQ の高度化を達成し、許認可リスクや実証炉建設費の低減につながられる可能性があり、これらの効果を最大化する遮へい実験の実施内容の具体化を目指すものである。

1.3 契約範囲

- (1) 高精度遮へい実験の実施方法の検討
- (2) 作業報告書の作成

1.4 提出図書

- | | |
|---------------------------------------|-----|
| (1) 作業実施計画書(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) 品質保証計画書(契約後速やかに) | 1 部 |
| (4) 打合せ議事録(打合せ後速やかに) | 1 部 |
| (5) 業務従事者等の経歴 ^{*2} (契約後速やかに) | 1 式 |

^{*2}提出した内容に変更が生じた場合は、その都度提出すること

※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。

- | | |
|---|-----|
| (6) 委任又は下請負届 ^{*3} [機構指定様式](作業開始2週間前まで) | 1 式 |
| ^{*3} 下請負がある場合に提出のこと | |
| (7) 作業報告書 ^{*4} (作業終了後速やかに) | 3 式 |

^{*4} CD-R 等を添付すること

(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 大洗原子力工学研究所 高速炉研究開発部 炉心設計グループ

1.5 納期

令和8年2月13日

1.6 検収条件

以下に示す項目の確認をもって検収するものとする。

- ・1.3に定める作業が完了していること。
- ・1.4に定める提出図書類が完納されていること。
- ・1.8に定める貸与品の返却が完了していること。

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：大洗原子力工学研究所 高速炉研究開発部 炉心設計グループリーダー

1.8 貸与品

本作業を実施するにあたり、受注者が必要とする解析コード及びソフト、情報及び資料等のうち、原子力機構が認めたものについて、随時無償にて貸与する。作業終了時には返却すること。

1.9 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。

1.10 品質管理

- (1) 受注者は、本件に係る品質管理プロセスを含む品質保証計画書を原子力機構に提出し、その確認を得ること。
- (2) 受注者は、契約期間中に品質保証計画書を変更した時及び不適合が発生した際に原子力機構からの要求があった場合には、立入調査及び監査に応じるものとする。

1.11 財産権等

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

1.12 機密の保持

受注者は、本業務の実施にあたり、知り得た情報を厳重に管理し、本業務遂行以外の目的で、受注者及び下請会社等の作業員を除く第三者への開示、提供を行ってはならない。

1.13 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。

1.14 特記事項

- (1) 受注者は機構が原子力の研究・開発を行う機関であるため、高い技術力及び高い信頼性を社会的にもとめられていることを認識し、機構の規程等を遵守し安全性に配慮し業務を遂行しうる能力を有する者を従事させること。
- (2) 受注者は業務を実施することにより取得した当該業務及び作業に関する各データ、技術情報、成果その他のすべての資料及び情報を当機構の施設外に持ち出して発表もしくは公開し、または特定の第三者に対価をうけ、もしくは無償で提供することはできない。ただし、あらかじめ書面により機構の確認を受けた場合はこの限りではない。
- (3) 受注者は機構構内での業務遂行に当たって、大洗原子力工学研究所防護活動措置規則など所内規程を遵守するものとし、機構が安全確保の為に指示を行ったときは、その指示に従うものとする。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。
- (4) 受注者責任者並びに作業員は、利用を許可された設備、機器、物品等は滅失破損が生じないように、使用・管理を行うものとする。
- (5) 納入物件の所有権、及び納入物件に関わる著作権（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。
- (6) 貸与物件は、契約終了後速やかに機構に返還するものとする。機構外への持ち出しは不可とする。
- (7) 実施担当者は本契約終了後速やかに貸与物件・情報及び納入物件に関わるメモ（諸データ及び作成過程における記録を含む）を消去し、諸資源（計算機出力を含む）を消却もしくは機構に引き渡さなければならない。機構外持ち出しを承認された電子物件・電子成果情報については、完全に消去されたことを確認できるエビデンスを示すこと。
- (8) 受注者は、上記の各項目に従わないこと及び作業員の資質の不足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。

2. 技術仕様

2.1 概要

高速炉で想定される構造材に含まれる主要な元素としては、鉄(Fe)、ナトリウム(Na)、ホウ素(B)等がある。これらが新たな遮へい実験実施の主要な候補となるが、鉄に関しては、近年、国内でも高精度の遮へい実験^{※)}が実施されており、本作業では、高速炉実証炉用にホウ素及びナトリウムを対象とした高精度遮へい実験の実施について検討する。

※)https://www.nra.go.jp/activity/anzen/bunya/chozou_kaiseki.html

2.2 作業内容

(1) 解析作業実施のための準備

以下(2)項の実施においては、遮へい実験の核データ感度係数や核データ起因不確かさ、高速炉炉心特性との核的相関係数を評価する。そのため、(2)項の実施に先んじて、(2)項の実施のための解析作業環境やツールの整備を行う。本項(1)の手順完了確認後に(2)項の実施に進むものとする。本項の手順が完了したことを示すため、過去に実施された遮へい実験に関して、核データ起因不確かさを算出した結果を原子力機構に提示すること。

(2) 高精度遮へい実験の実施方法の検討

1) ホウ素を遮へい材とする遮へい実験

ホウ素を遮へい材とする遮へい実験では、高速実証炉の遮へい材の候補として想定されている炭化ホウ素(B_4C)を用いることを想定する(単体のホウ素や他のホウ素化合物で積極的に利用する価値があるものがあればこの限りではない)。 B_4C 単体を利用した遮へい実験は、世界的にもこれまでに実施例がないため、本実験データを取得し、許認可等における遮へい解析/設計の妥当性を示すための根拠データとして利用することを想定する。

B_4C 遮へい体の設置は、IHX2次系放射化量、中性子計装の性能、炉内構造物の中性子照射量等の評価精度に影響する。そのため、熱外から高速中性子領域の幅広いエネルギー帯の中性子を対象とした測定を行うものとする。ホウ素は天然の同位体組成比を持つものと、同位体組成比を増減したもの両方の使用を想定する。天然の同位体組成比のホウ素を使用した実験では、遮へい体厚さを増減した実験を行うことを想定する。なお、得られた実験結果は、遮へい実験データベースSINBAD等に登録することを予定している。SINBAD等の実験データベースへの登録では、測定に関係する不確かさを厳密に、可能な限り評価することが求められるため、これが可能な実験計画を立案する。

実験内容の検討手順を以下に示す：

- (a) 実験施設や設備(線源、検出器、遮蔽体厚さ等)の候補を幅広く抽出し、個別の施設や設備を利用するにあたっての概算費用や時間を調査するとともに、それぞれの得失を整理する。
- (b) (a)の結果から、有望であると考えられる実験方法の候補を複数選定し、以下に示す実験内容の詳細化の検討を行う。

- ① 近年の高精度遮へい実験^{※)}や既往の同一遮へい材を用いた実験の調査、遮へい実験及び各種測定の実験解析の実施や結果の分析を通じて、本遮へい実験で測定すべき対象を明確化するとともに、ISO/IEC Guide98-3に基づく実験不確かさの定量化を行う。
 - ② 核データ感度係数や核データ共分散を利用した核データ起因不確かさの定量化を行う。
 - ③ 実験不確かさと核データ起因不確かさを突き合わせて、実験における制約や費用等を踏まえつつ、核データの検証の観点で好ましい実験条件を見つける。
- (c) (b)で詳細化した実験条件に対して、遮へい実験の開始(準備含む)から終了時(撤収及び廃棄物処分含む)までに要する時間や費用を詳細に算出する(実験不確かさの定量化に必要となるデータ取得も実験の一部と考える)。その際、実験機器の購入／借用先、廃棄物等の処分依頼先、実験データの分析依頼先、技術提供や協力を依頼する各種専門家／専門機関の候補や実験の実施体制についても併せて具体化する。
- (d) 詳細検討の途中で実験実施の実現可能性やメリットが相対的に乏しくなった場合には、新たな実験方法の候補について、上記(b)～(c)の手順を実施する。
- これら手順の実施にあたって、以下の事項を考慮すること。
- ・ 可能な限り費用を抑えるための工夫を行うこと(購入・製作は極力回避し、レンタルの可能性を模索する等)。
 - ・ 近年の高精度な遮へい実験^{※)}と同等以上の実験精度を目指すこと。
 - ・ 実験方法の選定においては、費用対効果の観点でそれぞれの得失を踏まえた複数の実験候補を提案すること。

2) ナトリウムを遮へい材とする遮へい実験

ナトリウムを遮へい材とする遮へい実験は、世界的に既にいくつかの実験が行われており、国際遮へい積分実験データベースSINBADにもそれらの実験情報が収録されている。しかしながら、いずれの遮へい実験も、原子炉と数メートル規模の遮へい体を用いた大規模な実験であり、核データに対する感度が大きい反面、実験不確かさも大きい。本作業では、実験室レベルでの小規模かつ高精度なナトリウム遮へい実験の実現可能性について検討する。本実験は、過去のナトリウム遮へい実験とは異なり、ナトリウムボイド反応度等の高速炉核特性の核データ起因不確かさ低減を目的に実施するものである。高速炉核特性に対するNa-23の感度は、主としてkeV～MeV領域にあるため、このエネルギー領域の核データ検証にターゲットを絞った実験を計画する。なお、得られた実験結果は、遮へい実験データベースSINBAD等に登録することを予定している。SINBAD等の実験データベースへの登録では、測定に関係する不確かさを厳密に、可能な限り評価することが求められるため、これが可能な実験計画を立案する。

実験内容の検討手順を以下に示す：

- (a) 実験施設や設備(線源、検出器、遮蔽体厚さ等)の候補を幅広く抽出し、個別の施設

や設備を利用するにあたっての概算費用や時間を調査するとともに、それぞれの得失を整理する。

(b) (a)の結果から、有望であると考えられる実験方法の候補を複数選定し、以下に示す実験内容の詳細化の検討を行う。

① 近年の高精度遮へい実験^{※)}や既往の同一遮へい材を用いた実験の調査、遮へい実験及び各種測定の特 門家からのヒヤリング、実験解析の実施や結果の分析を通じて、本遮へい実験で測定すべき対象を明確化するとともに、ISO/IEC Guide98-3に基づく実験不確かさの定量化を行う。

② 本遮へい実験における核データ感度係数の評価を行う。

③ 本遮へい実験の実験不確かさと核データ感度係数、ナトリウムボイド反応度等の高速炉核特性の核データ感度係数、核データ共分散を用いて炉定数調整等のデータ同化を行い、高速炉核特性の不確かさ低減効果を評価する。実験における制約や費用等を踏まえつつ、高速炉核特性の不確かさ低減の観点で好ましい実験条件を見つける。

(c) (b)で詳細化した実験条件に対して、遮へい実験の開始(準備含む)から終了時(撤収及び廃棄物処分含む)までに要する時間や費用を詳細に算出する(実験不確かさの定量化に必要となるデータ取得も実験の一部と考える)。その際、実験機器の購入／借用先、廃棄物等の処分依頼先、実験データの分析依頼先、技術提供や協力を依頼する各種専門家／専門機関の候補や実験の実施体制についても併せて具体化する。

(d) 詳細検討の途中で実験実施の実現可能性やメリットが相対的に乏しくなった場合には、新たな実験方法の候補について、上記(b)～(c)の手順を実施する。

これら手順の実施にあたって、以下の事項を考慮すること。

- ・ 可能な限り費用を抑えるための工夫を行うこと(購入・製作は極力回避し、レンタルの可能性を模索する等)。
- ・ 近年の高精度な遮へい実験^{※)}と同等以上の実験精度を目指すこと。
- ・ 実験方法の選定においては、費用対効果の観点でそれぞれの得失を踏まえた複数の実験候補を提案すること。

(3) 作業報告書の作成

前項(2)で得られた成果を全て報告書にまとめる。現状では、遮へい実験の予算規模や実施可能期間等が明確になっていないため、これらが明確になった際に実現可能性や実施内容をすばやく判断できる情報を提供する報告書の内容にする。すなわち、発注者が実際の予算を踏まえながら実験の実施内容を決定できるよう費用や時間については詳細な内訳を示すこと。

報告書は WORD ファイル等の電子ファイルとしても提出する。数値データに関しては、EXCEL ファイルとしてデジタルデータも提出する。解析で使 用したコードのインプット／アウトプットファイルについては、電子データとして提出すること。 以 上