高温ガス炉使用済燃料の再処理技術確立に向けた開発に伴う支援作業(II)

仕様書

１．件名

高温ガス炉使用済燃料の再処理技術確立に向けた開発に伴う支援作業(II)

２．目的及び概要

現在、日本原子力研究開発機構では、高温ガス炉再処理技術の実証を目的として、実機の使用済燃料を用いて、将来の商用炉再処理と同じ方式による前処理工程の実証試験を計画する。この研究開発は、経済産業省、資源・エネルギー庁からの受託事業である高温ガス炉実証炉開発事業（超高温を利用した水素大量製造技術実証事業）の一部として行う。軽水炉再処理施設の前処理工程を軽水炉使用済燃料に対する前処理工程から、高温ガス炉燃料に適した前処理工程に置換して高温ガス炉使用済燃料を再処理する。そのため、将来の商用再処理では、商用規模の軽水炉再処理施設に見合った高温ガス炉使用済燃料前処理工程を設置する必要がある。そのため、将来の商用再処理の開発及び社会実装を見据えつつ技術開発を行い、前処理工程の一部に対し実機の使用済燃料を用い、ホットセル内で実証するための概念検討及び開発計画の検討のための支援を行う。

本役務においては下記を行う。

・前処理工程の候補の要素試験
・確証試験施設概念検討及び計画立案の支援
・実用前処理施設概念の整理
・全体計画の改定の支援

３．提出物

３．１ 提出図書

(1)	作業工程表	3部（契約後速やかに）
(2)	実施計画書	3部（契約後１か月を目途に）
(3)	作業報告書	3部（納入時）
(4)	打合せ議事録	3部（打合せの都度）
(5)	以上、(1)～(3)を収納したメディア	3式（納入時）

なお、受注者は作業報告書ドラフトの電子ファイルを令和8年2月9日までに提出し、発注者の確認を受けること。

提出先：エネルギー研究開発領域　高温ガス炉プロジェクト推進室
高温ガス炉設計グループ

３．２ 納品物

(1) SiCサンプル　１式（納入時）

SiCサンプル：　10個

仕様：等方性黒鉛基材に、シリコン成分と炭素成分を含むガスを原料とした化学蒸着法によりSiCを被覆し、SiCサンプルを製作する。

(2) 溶融塩電解装置　　1台（納入時）

仕様：ステンレス製上部フランジと、無機材料系断熱材、フランジと断熱材を組付けるためのボルト、溶融塩の漏洩を防ぐステンレス製保護容器から構成する。なお、電気炉、チラー、電解電源などの周辺機器は受注者の所有物（本仕様の範囲外）を使用すること。

納品先：受注者敷地内

４．納期

令和8年3月19日

５．納入場所

提出図書：

茨城県東茨城郡大洗町成田町4002番地　国立研究開発法人日本原子力研究開発機構

納品物：

受注者敷地内

６．検収条件

実施した調査検討結果が７章で示した調査役務に関する仕様を満たしていることを確認するとともに、３章で示した納入品の確認をもって検収する。

７．作業内容

＜作業条件＞

高温ガス炉燃料の前処理工程は、図１に説明するように、使用済燃料を解体し、被覆燃料粒子から燃料核を取り出し、溶解・清澄工程を経て、溶液組成が調整された後、再処理施設の分離・精製工程に投入する。この例は、粉砕機(ハードディスククラッシャー)によるSiC層破砕の例であるが、本手法には限らない。これらの技術の商用化を意識して検討・選定し、そのモックアップ試験としてのHTTR使用済燃料を用いた実証試験を計画し、その装置の設計する。そのうち、本役務のを以下の様に実施する。

尚、調査・整理にあたっては、機構が提示する既往検討情報を参考にすること。

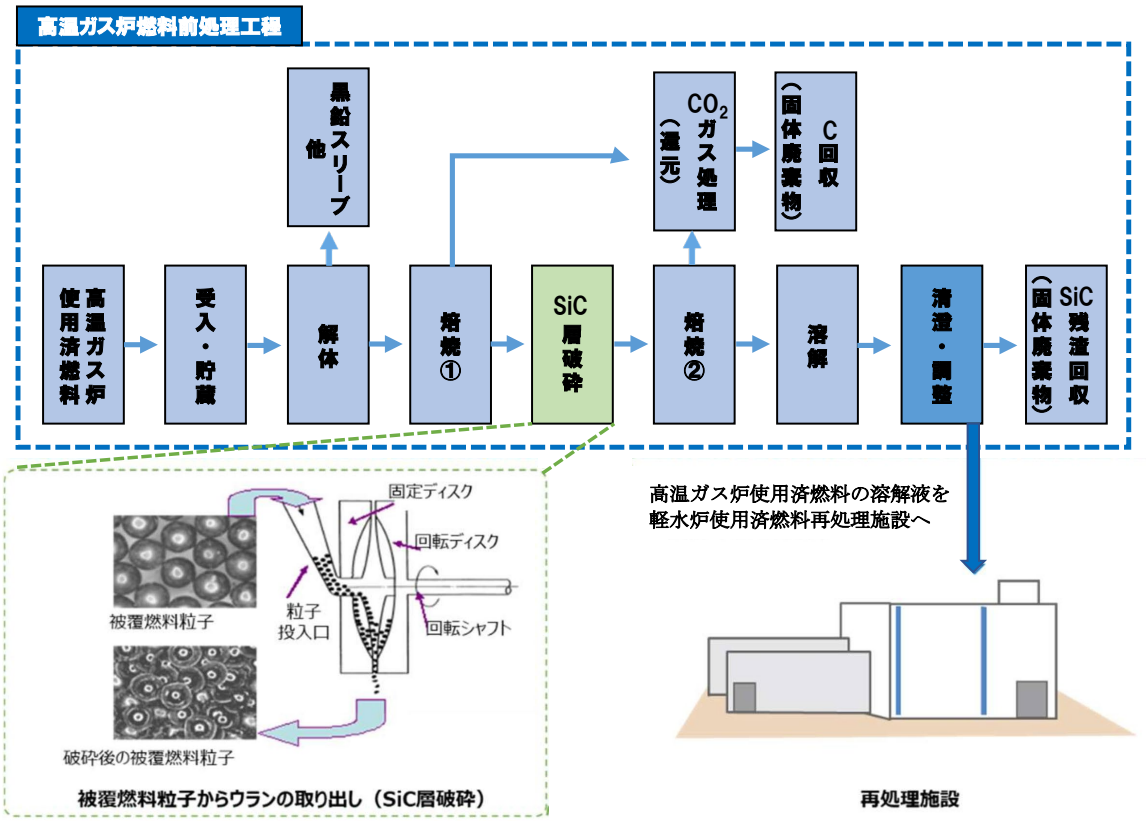

図１　高温ガス炉使用済燃料前処理工程（案）

７．１　前処理工程の候補の要素試験

高温ガス炉使用済燃料の前処理工程は、図1に示したように、使用済燃料を受入・貯蔵後、解体・分解し燃料要素を取り出す。取り出された燃料要素から複数の被覆層を物理的もしくは化学的に取り除いて燃料核を取り出す。取り出された燃料核を溶解し、清澄工程により不溶解性残渣を取り除き、溶液組成を調整した後に、既存再処理施設の分離工程に導入する、という工程となる。

燃料要素から燃料核を取り出す工程（図１における焙焼①から清澄・調整まで）には複

数の候補プロセスが考えられその要素技術確立を目指す。

具体的には、貸与品である報告書の昨年度の検討結果を受けて、焙焼プロセス（大気雰囲気、CO_2雰囲気、二酸化炭素固定化、炭素析出）、SiC焙焼プロセス（空気雰囲気）、溶融塩電解プロセス（高密度熱分解炭素層、炭化ケイ素層）、SiC層の機械的破壊（ハードディスククラッシャー法）があり、この要素試験を行う。

これらのデータは、それぞれの手法の適用性を判断するために必要であり、7.2章、7.4章での計画の見直しのインプットとなる。

７．１．１　焙焼プロセス

(1) 焙焼（大気雰囲気、CO_2雰囲気）

燃料コンパクトの炭素をガス化して除去する手法として、大気雰囲気またはCO_2雰囲気での焙焼プロセスがある。大気雰囲気では大気中の酸素が炭素と反応して二酸化炭素となりガス化する。CO_2雰囲気では、ブードア反応（$C+CO_2=2CO$）により二酸化炭素と炭素が反応して一酸化炭素となりガス化する。本役務ではそれぞれの手法の差を確認するため、大気雰囲気またはCO_2雰囲気で、熱重量分析法を用いて炭素の重量変化によりガス化挙動の確認する。炭素の燃焼特性に関する基礎的検討として、まず1000℃程度までの温度範囲において燃焼挙動の温度依存性を評価する予備試験を実施する。得られた結果をもとに、燃焼速度試験に適した温度条件を選定し、選定温度下での燃焼速度を定量的に評価する。

それを受けて、以下を提出すること。

- 燃焼時の条件（炭素形状、触媒量、温度）
- 重量変化及び温度プロファイル
- プロセスへの適用性に関する考察

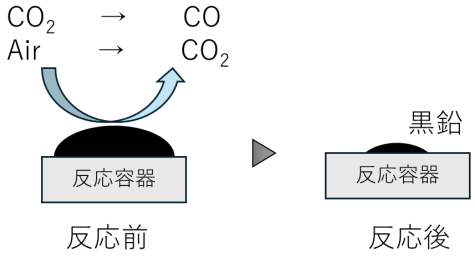

図２　焙焼プロセス（空気雰囲気、CO_2雰囲気）試験の概要

(2) 炭素固定（二酸化炭素固定化、炭素析出）

ガス化する際の雰囲気によってガス化後の炭素種が異なるため、それぞれの炭素種に応じた炭素の固定化の文献調査を行う。

二酸化炭素では、二酸化炭素固定化を想定し検討する。アルカリ金属を用いた二酸化炭素の吸収及び炭酸カルシウムとしての固定の調査結果を纏める。

一酸化炭素の炭素析出を想定した検討を行う。昇温反応（TPR）を用いてブードア反応（$2CO=C+CO_2$）の炭素析出反応を確認するために、反応後のガス組成を測定及び反応後の炭素を観察して、炭素析出挙動を確認する。炭素の析出特性に関する基礎的検討として、

まず1000℃程度までの温度範囲において析出挙動の温度依存性を予備試験にて評価する。得られた結果をもとに、析出速度試験に適した温度条件を選定し、選定温度下での析出速度を定量的に評価する本試験を行う。

それを受けて、以下を提出すること。

- 炭素種に応じた固化法の調査結果（二酸化炭素固定化、炭素析出）
- 炭素析出試験時の条件（炭素析出）
- ガス組成の測定結果（炭素析出）
- プロセスへの適用性に関する考察（二酸化炭素固定化、炭素析出）

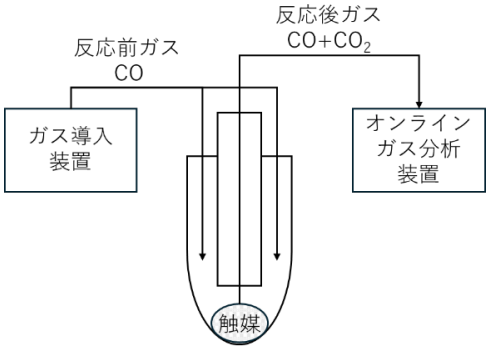

図３ 炭素固定（炭素析出）試験の概要

７．１．２ SiC焙焼プロセス（空気雰囲気）

SiCを空気雰囲気で焙焼してSiO_2被膜を形成することにより、表面改質できることを把握した。この事象によりSiC被膜の一部が破壊され、SiC被膜内部の炭素や燃料核が露出することを期待する。アルカリ金属との共存により、SiCとSiO_2界面でSiOやCOのガス生成反応が促進され、改質を促進する触媒効果を期待する。このためアルカリ金属を触媒として共存させ大気中で焼成することでSiCの一部を除去できることを期待する。

本試験では、SiC単体を用いて空気雰囲気での焙焼試験を実施する。試験方法としては、熱重量分析法を用いて図４に示すように、SiC単体をそのまま空気雰囲気で加熱するものと、触媒と共に加熱することにより、その反応の違いを測定する。

SiCの焙焼特性に関する基礎的検討として、まず1450℃程度までの温度範囲において焙焼挙動の温度依存性を評価する予備試験を実施する。得られた結果をもとに、焙焼速度試験に適した温度条件を選定し、選定温度下での焙焼速度を定量的に評価する本試験を行う。

それを受けて、以下を提出すること。

- 燃焼時の条件（SiC形状、触媒量、温度）
- 重量変化及び温度プロファイル
- プロセスへの適用性に関する考察

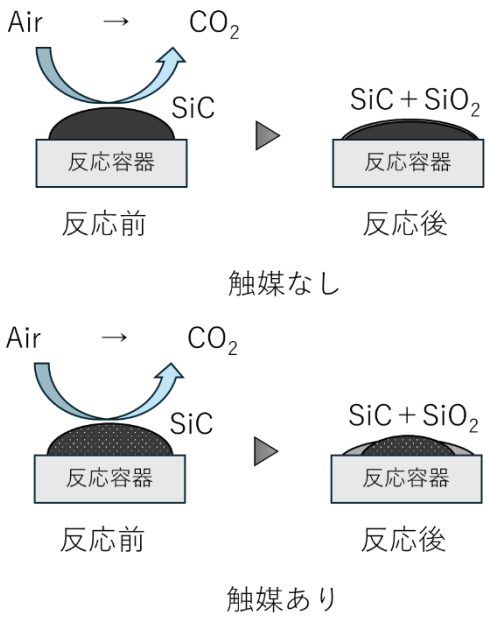

図４　SiC焙焼プロセス（空気雰囲気）試験の概要

７．１．３ 溶融塩電解

溶融塩電解によるPyC層、SiC層の除去について試験的に確認する。そのため、溶融塩中でのPyCサンプル、SiCサンプルの電気化学的挙動を確認のため試験する。初めに、PyC、SiCサンプルを製作する。サンプルは炭素基板上にCVDでPyCまたはSiCを成膜して製作する。PyCサンプル製作には、炭化水素ガスを原料とした化学蒸着法により熱分解炭素を被覆し、SiCサンプル製作にはシリコン成分と炭素成分を含むガスを原料とした化学蒸着法によりSiCを被覆する。PyCサンプルは、本試験用に20個製作する。SiCサンプルは、本試験用に3個、納品用に10個製作する。

また、電気化学的挙動の確認試験を行うための溶融塩電解装置を製作する。溶融塩電解装置は電極を固定する上部フランジ、上部フランジの昇温を防ぐための断熱材、溶融塩が入ったるつぼが割れた際に装置外に溶融塩が漏れるのを防ぐ保護容器などから構成する。その構造概念図を図5に示す。上部フランジを通じてるつぼ内の溶融塩中に製作したサンプルを浸漬し溶融塩電解試験を行う。使用する塩は文献調査などの机上検討で選定し、電解温度は塩の融点～900℃までの範囲とする。溶融塩電解によるサンプル変化の有無を調べるためにラマン分光を測定する。電解前後のサンプルを顕微ラマン分光装置で測定し、サンプル中の炭素状態を調べる。溶融塩電解試験、ラマン分光測定などで得られたデータを基に溶融塩電解法の適用可否の観点から技術的問題整理を行い、原子力機構と協議の下、評価を行う。

それを受けて以下を提出すること。

- 試験装置の外観写真

- 溶融塩電解試験の条件
- 溶融塩電解試験の結果およびラマン分光測定結果
- 技術的問題の整理
- プロセスへの適用性に関する考察
- SiCサンプル（3.2 納品物参照）
- 溶融塩電解装置

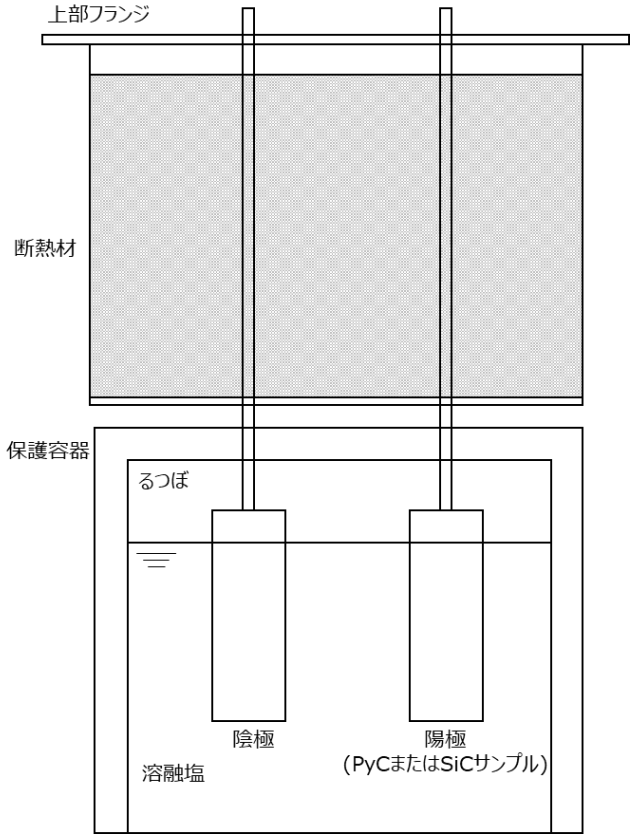

図５　溶融塩電解装置の構造概念図

７．１．４ 機械的破壊（ハードディスククラッシャー法）

図6に示すSiC破砕を機械的に行うハードディスククラッシャー装置の設計及び開発計画を詳細化する。具体的には、線量などの環境条件や処理量などの要求条件を評価し、機器設計仕様の作成を進める。全体の装置設計を行うためには前後プロセス機器の具体化が必要であるが、現状では未定のため、今年度は装置の中核的なパーツである粉砕機と振動フィーダーを検討をする。

粉砕機及び振動フィーダー自体は、モーター等の汎用品の組み合わせたため、用いるべき各機器の決定、サプライチェーン候補を選定する。それらの機器に対しての耐放射性、防爆化、崩壊熱の程度によっては、耐熱化が必要となる。必要な技術課題を抽出し、原子力機構の協議のもと設計をまとめる。

また、運転条件を考慮した性能要求を検討する。ただし、検討条件としては、あくまでも商用利用ではなく確証試験を想定するため、ハードディスククラッシャー装置が正常に動作する、最低限の処理量を算出する。最低限の処理量が特に決まらない場合は、他の工程における最低処理量を設定する。それでも最低処理量が決まらない場合は、HTTR燃料コンパクト１個分の被覆燃料粒子とする。処理速度に関しても現実的な試験期間でその処理量が処理できればよい。

ディスクのサイズ、モーターを決定すれば、単位時間当たりの処理量はほぼ決まることから、モーターの機種を、入手性、耐放射性、耐熱性、メンテナンス性の観点から決定し、それが、決定した処理量を現実的な試験期間で処理が可能であることを確認する。また、試験を実施する際の破砕の状況確認に用いる基準、臨界安全について整理する。

また、装置の遠隔操作、メンテナンス対策を考慮した設計項目の具体化及び試作・試験の計画・実施体制につき原子力機構と協議のもとまとめる。

それを受けて、以下を提出すること。

- 装置の構成部品のリスト
- 各部品のサプライヤーのリスト
- 耐放射化、防爆化、耐熱化等に対する課題の抽出・整理
- 本役務における設計終了時の設計仕様・構造図
- 装置運転時の性能要求
- 来年度以降の設計項目及び試作・試験計画

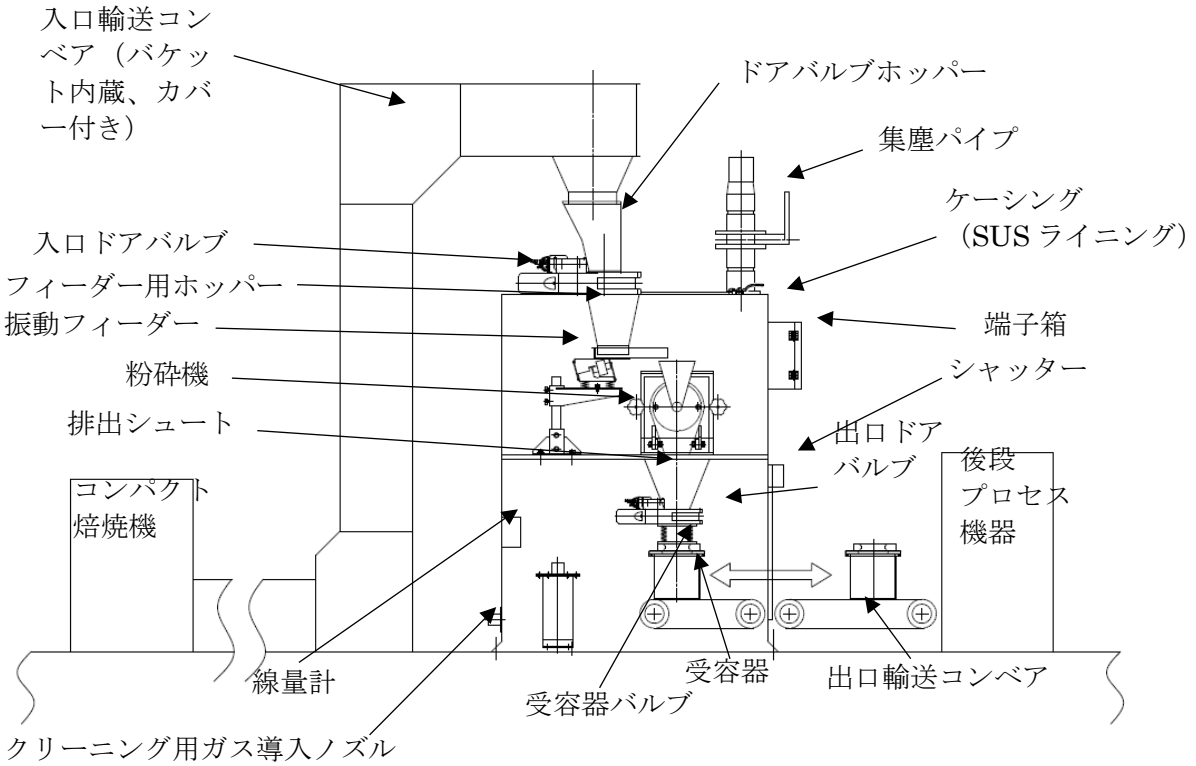

図６　ハードディスククラッシャー装置の構造概念図

７．２　確証試験施設概念検討及び計画立案の支援

本試験計画では、最終的にHTTR使用済燃料を用いた前処理技術確証試験をおこなう。ここでは、その確証施設概念検討の支援を行う。この検討では、7.1章の結果を受けて、確証試験実施検討のための、工程ごとの必要試験物量と試験項目の整理を行う。ただし、今後のサイト検討により、今回の検討の結果は、主に、物理的な空間の制約により、実施が困難なものも出てくる恐れがある。必要試験物量には、HTTRの使用済燃料も含まれ、臨界性も関係するため、原子力機構からはHTTRの使用済燃料組成を提供する。（貸与品：技術メモ「HTTR使用済燃料の組成」）また、工程ごとの処理量に関する制約も考慮し、確証試験時の現段階における処理量及び試験項目を原子力機構が決定するのに必要な情報を整理する。これを受けて、以下を提出すること。

- 工程ごとの必要試験物量
- 工程ごとの試験項目等

７．３　実用前処理施設概念の整理

確証試験において実施する項目を決定するには、まず、実用前処理概念を整理し、課題を抽出する必要がある。そのために、貸与品である令和６年度の検討結果が記載された報告書の内容をインプットとし、実用前処理概念を整理し、以下について提出すること。

- 前処理施設の物質収支の評価
- 主要廃棄物発生量の評価
- 主要機器の処理能力検討
- 臨界管理の方針の整理
- 主要機器のセル内配置

７．４　全体計画の改定の支援

現在、図７のように商用炉前処理施設概念、模擬燃料試料作製、要素試験（燃料コンパクト処理、被覆燃料粒子処理、燃料核処理）、確証試験に関し計画を立てる。7.1章の検討結果から、各要素技術の性能の概要及び、技術的成熟度が判断でき、今後の開発計画のビジョンが鮮明となり、各要技術の開発計画の変更、それを受けての全体計画の変更が可能となる。本役務の進捗を受けて、原子力機構と協議の下全体計画を改定すること。

それを受けて以下を提出すること。

- 計画案の改定版

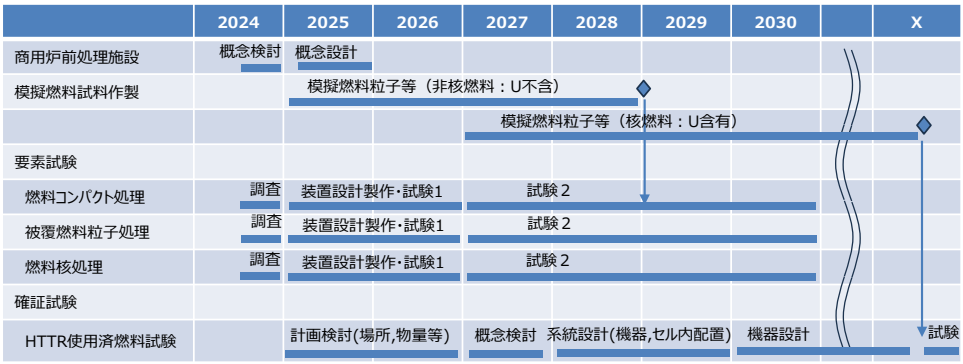

図７　現状における全体計画

８．支給物品及び貸与品

８．１支給品

なし

８．２貸与品

技術メモ「HTTR使用済燃料の組成」

R6作業報告書「高温ガス炉使用済燃料の再処理技術確立に向けた開発に伴う支援作業」

９．特記事項

本仕様書に記載されている事項及び本仕様書に記載のない事項、もしくは、作業の実施

において不明な点が生じた場合には、別途、原子力機構との協議の上で決定する。受注者は本作業で得られた内容・結果を第三者に漏らしてはならない。また無断で論文等に引用してはならない。貸与品に関しては、作業が終了し次第、速やかに破棄するものとする。

１０．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。

１１．検査員及び監督員

（１）検査員

一般検査　管財担当課長

（２）監督員

作業報告書検査　高温ガス炉設計グループ員

以上