

# 次世代革新炉開発に必要な 研究開発項目 及び基盤インフラについて (高速炉燃料・高温ガス炉の再処理技術)

令和4年11月22日

国立研究開発法人日本原子力研究開発機構

我が国は、資源の有効利用、高レベル放射性廃棄物の減容化・有害度低減等の観点から、使用済燃料を再処理し、回収されるプルトニウム等を有効利用する核燃料サイクルの推進を基本方針としている

第六次エネルギー基本計画 令和3年10月 一部引用

## 再処理の利点

### (1) 資源の有効利用

原子力発電所から発生した使用済核燃料の中には、発電に再利用可能なウランやプルトニウムが残存している。再処理はエネルギー資源として有用な核燃料を分離するプロセスである。

### (2) 環境の保全

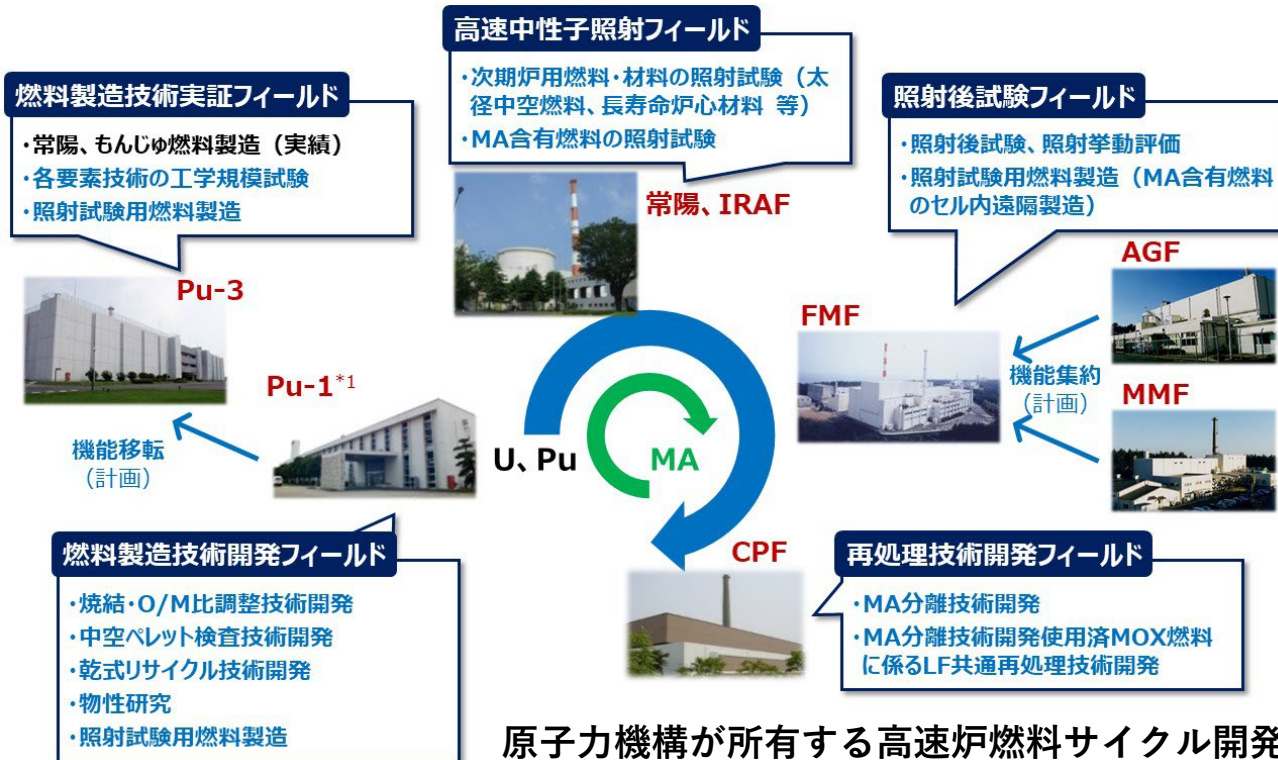
再処理により、燃料中の大部分を占めるウランとプルトニウム、さらに超ウラン元素などを取り除けば、放射性廃棄物の量を大幅に減らすことができる。

### (3) 将来への負担軽減

原子力エネルギーを利用するわが国にとって、再処理をせずに、再利用可能な核燃料物質を放射性廃棄物に回せば、廃棄物の処分場や管理の面で、将来への負担を増大させる。

- サイクル技術は研究開発のために大量のプルトニウムを扱い、ホット試験が必要となる等、民間が主体的に開発を進めるにはハードルが高いことから、当面は軽水炉サイクルとの共通技術を含めて、原子力機構がステークホルダーとの連携を図りつつ、開発の中心的役割を果たす必要がある。
- 原子力機構及び民間が研究開発を実施していくためには、原子力機構が有する、常陽、ナトリウム試験施設、ホット試験施設等のハード、及び、解析評価技術や規格基準類の基礎データといったソフトの開発基盤を、必要な時期に利用可能とする維持・整備を行うことも原子力機構の役割である。また、原子力分野の人材育成についても、大学等とともに担う必要がある。

2022年9月26日 第19回高速炉開発会議 戦略ワーキンググループ 資料1「戦略ロードマップ改訂案」一部抜粋



2022年11月10日 第3回次世代革新炉の開発に必要な研究開発基盤の整備に関する検討会 資料抜粋

日本



- **使用済 $UO_2$ 燃料の再処理技術は実用段階に到達**しており、東海再処理工場では合計1,140t（ふげんMOX 29tを含む）の再処理実績を有している。現在は主に軽水炉/高速炉共通MOX燃料再処理技術開発を実施中。
- 国際協力の現状として、湿式再処理分野は仏国との協力により、**MOX燃料再処理開発（マイナーアクチニド（MA）の分離技術含む）に係る情報交換**、乾式再処理分野は米国との協力により**廃棄物管理技術や電解還元技術の協力**を進めている。



東海再処理工場

仏国



- ラアーグ工場（UP2-800, UP3）での**使用済 $UO_2$ 燃料の商用再処理**が進められている。またUP2-400では、1980年代を中心にフェニックスの高速炉MOX燃料を希釈処理し、UP2-800では軽水炉MOX燃料60t程度を回収ウランと混合再処理した実績を有する。
- 現在では**高速炉燃料等を前処理するための新施設**（TCP : Traitement des Combustibles Particuliers 特殊燃料処理施設）の建設計画が進められている。



米国 

1960年代に金属燃料高速実験炉EBR-IIで高濃縮U金属燃料サイクル実証の実績があり、さらに1990～2000年代には**数t～10t/年規模の実証施設**において使用済金属燃料からU及びTRU回収を実証した実績を有している。



INLの乾式再処理施設FCFと電解精製装置の外観



露国 

商用再処理施設RT-1が稼働中であり、これまでに**使用済UO<sub>2</sub>燃料5,300t以上の他、高速炉燃料の再処理実績も有している**（これまでの再処理量は6,000t以上）。今後、さらに再処理容量の増強を目指し、新たな再処理施設RT-2を整備する計画としている。



ロシアの再処理施設RT-1の外観

**その他、インド、英国、中国等で再処理技術の開発が進められている**

我が国では現在、プルサーマル政策により、再処理で分離回収したPuをMOX燃料として軽水炉で利用している

Puを含有するMOX燃料では、使用済燃料の再処理にあたり、ウラン燃料に比べて**厳しい臨界管理、燃料溶解性の低下、不溶性残渣の発生量やMA量の増加**等の課題について考慮が必要

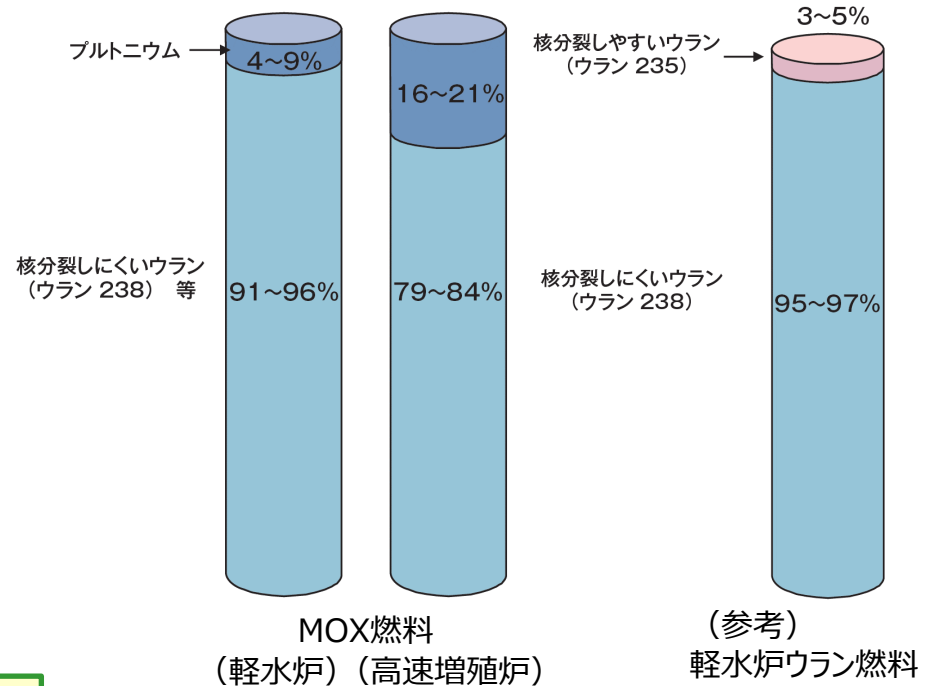


そのため、軽水炉MOX燃料再処理技術の構築に向けて、以下の開発を重点的に進めており、**技術的成立性**の見通しが得られてきている段階である。

- ✓ 燃料溶解技術開発
- ✓ 不溶性残渣を分離回収する清澄システム開発
- ✓ 抽出プロセス及び機器開発

(上記に加えて、放射性廃棄物の減容化・有害度低減の観点から、**MA分離回収技術開発**についても実施)

- 酸化物燃料再処理では、湿式再処理技術を採用しており、上記の課題は軽水炉及び高速炉MOX燃料ともに共通である。
- ただし、高速炉MOX燃料では軽水炉MOX燃料に比べて、Pu含有量や燃焼度が增大するため、課題のハードルは高い



## MOX燃料の組成

引用：原子力・エネルギー図面集

# 高速炉燃料再処理の開発に必要な 研究開発と基盤整備

	研究開発項目		研究開発に必要な施設	利用可能性	整備状況
高速炉	照射試験技術	高速中性子照射	常陽（新規基準、RI製造）	△	新規基準対応中
	炉心燃料・材料分野	ホット試験、照射後試験	グローブボックス（空気・不活性雰囲気） ホットセル（空気・不活性雰囲気） 照射後試験施設	○	CPF、Puセンター、FMFを利用した試験が可能
	安全性向上分野	シビアアクシデントやナトリウム水反応対策	溶融炉心物質挙動試験施設（MELT） 蒸気発生器安全性総合試験装置（SWAT-3）等	○	利用可能
		構造強度評価	耐震試験設備	△	大洗研中規模加振機（メカトロニクスは停止中）
	ナトリウム試験	Na大型機器試験	冷却系機器開発試験施設（AtheNa） Na中計測試験施設	△	AtheNa加熱器整備中（今後実験装置を設置予定）
	蓄熱技術開発	熱利用実証試験	Na-溶融塩間の熱交換性能試験装置	×	未整備
			Na-溶融塩化学反応試験（グローブボックス）	△	試験装置の整備が必要
	安全性実証 廃棄物減容 出力機動性 国民福祉向上 技術基盤確立	高速炉の安全性向上と新規制適合の実証 MAの集合体燃焼試験実証 蓄熱による機動性向上実証 医療用RI生産・供給 サプライチェーン再構築	新機能実証施設 ・受動的炉停止、緩和策としてのシビアアクシデント時の炉容器内事故終息機能の具体化 ・蓄熱機能を備え、ナトリウム水反応を排除できるシステム ・MA燃料の集合体レベルの照射機能 ・医療用RIを常陽とともに連続生産・供給できる機能	×	未整備
<b>MOX燃料製造・湿式再処理分野</b>	常陽MOX燃料供給 MA含有MOX製造 <b>MOX燃料溶解、再処理試験、MA分離試験</b>	新規MOX燃料加工施設 CPF、軽水炉MOX再処理試験実施中 MA分離回収実績あり	△	新規MOX加工施設（MA燃料含）の内容・コスト等検討中 集合体解体、せん断、溶解試験が必要 MA分離工学試験が必要	
<b>金属燃料・乾式再処理分野</b>	金属燃料製造 MA含有金属燃料製造 <b>乾式再処理試験</b>	FMF（金属燃料サイクル試験研究設備設置） CPF、NUCEF施設の利用検討	△	金属燃料製造は電中研が燃料研究棟にて製造実績あり、乾式再処理基礎試験は電中研がCPFにて実施中	



## 清澄

燃料溶解で発生する固体状の残渣を分離回収する技術



## コプロセッシング法

従来の溶媒抽出技術を改良したU-Pu共回収プロセス技術

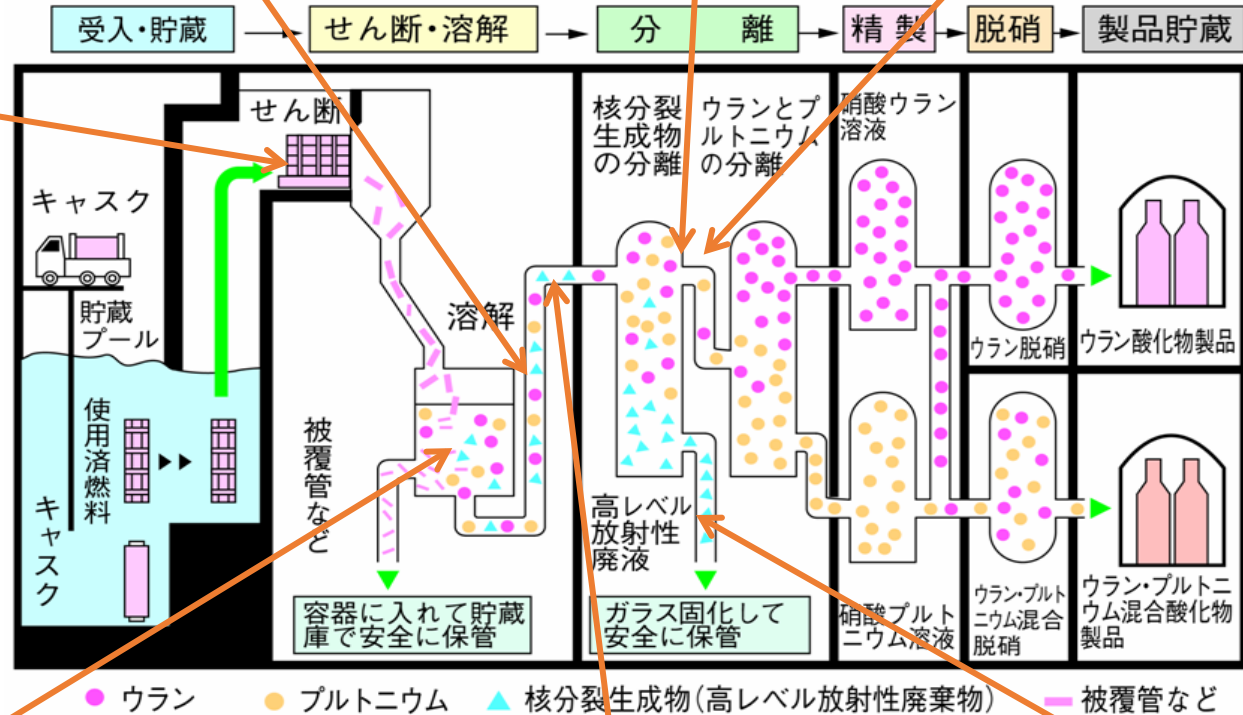
## 抽出機器

小型で高性能を有する遠心抽出器の開発



## 解体・せん断

燃料ピン束を収納するラッパ管を解体し、内部の燃料ピンをせん断するシステム技術

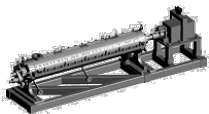


## 廃棄物低減化

濃縮操作により、全体の放射性廃液を極低レベルと高レベルに分ける技術

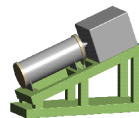
## 溶解

Pu含有量の高い高速炉燃料の溶解技術



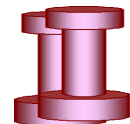
## 晶析

冷却操作で燃料溶解液からUの大半を粗分離する技術



## MA回収

高レベル放射性廃液からマイナーアクチノイド(MA)を分離回収する技術



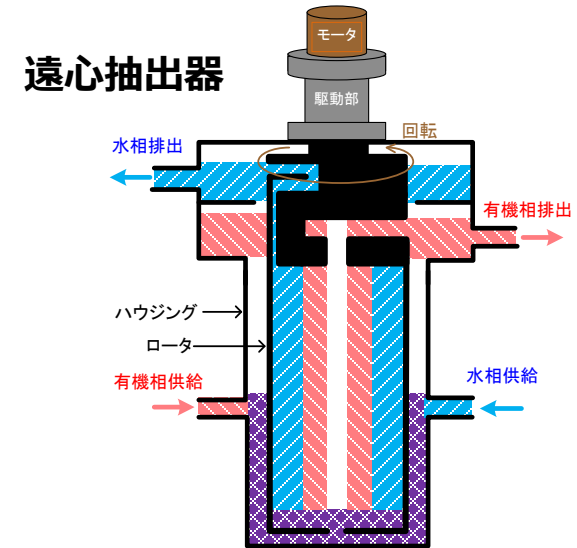
## FaCT技術

	開発の必要性
集合体解体・せん断技術	ラッパ管の切断解体は高速炉燃料再処理特有の必要不可欠な技術。短尺せん断技術は晶析技術導入の場合に開発が必要。
燃料溶解技術	Pu含有量の増大に伴う、燃料溶解性の低下や溶解装置の臨界防止対応。晶析技術導入の場合には高濃度溶解技術が必要。
晶析技術	経済性向上（溶媒抽出システムの合理化）。ただし、現状は本法の代わりにコプロセッシング法の適用を検討。
遠心抽出器技術	経済性向上（小型、稼働率）、溶媒劣化低減 他
MA分離技術	放射性廃棄物の減容化・有害度低減
廃棄物低減化	環境負荷低減性、経済性の向上

## 上記以外の軽水炉/高速炉共通MOX再処理技術

	開発の必要性
U-Pu共回収技術 (コプロセッシング技術)	核拡散抵抗性、経済性の向上
清澄技術	安全性向上（スラッジ発生量増大への対策）

- ✓ 従来のPUREX法とは異なり、抽出工程内でPuが単独で分離されないように制御した抽出プロセスの構築が**核拡散抵抗性向上**の観点から重要
- ✓ 共除染部でのFP除染性能を向上させることで、従来プロセスに設置される**精製サイクルを削除可能**⇒**経済性の向上、廃液発生量の低減**
- ✓ PUREX法の改良プロセスであり、技術的ハードルが高くない
- ✓ これまでにU, Pu溶液系での抽出データの取得やシミュレーション計算による抽出フローシートの具体化により、本法の性能見通しを得ており、抽出機器についても遠心抽出器により、本法で求められる溶液流量条件で良好な相分離処理が可能との結果を得ている。

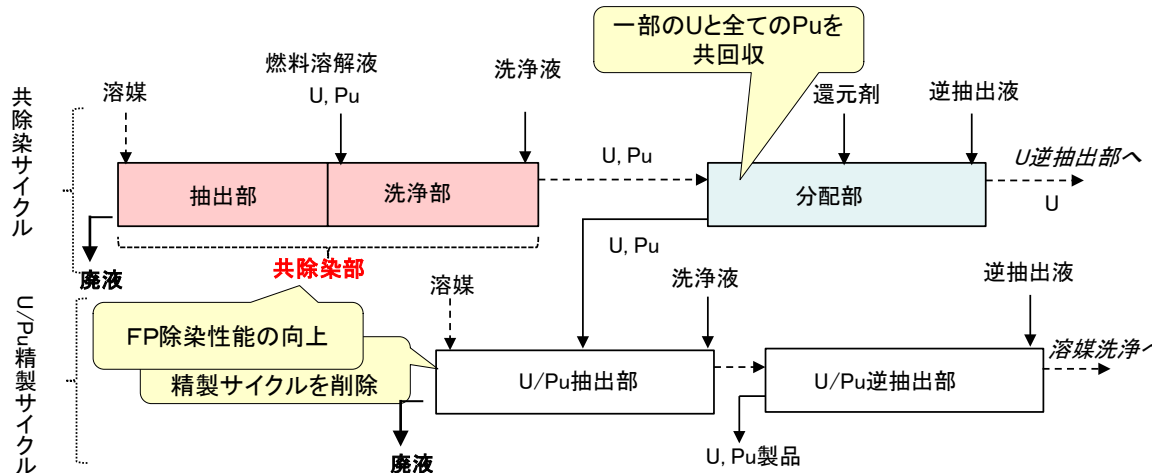


### 【装置原理】

ロータの回転により水溶液と溶媒を激しく混合し、相分離を遠心力下で行う

### 【主な特徴】

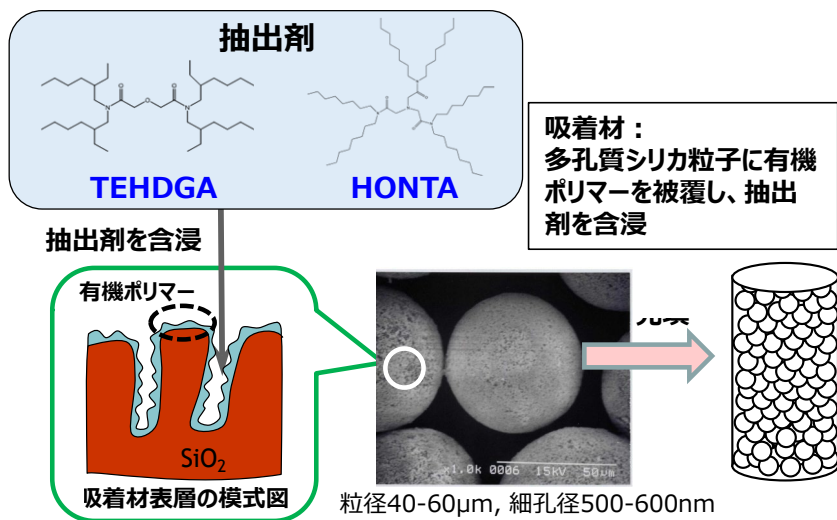
- ✓ 小型でコンパクトなシステム構成が可能
- ✓ 液のホールドアップ量が少なく、抽出・分離時間が短い
- ✓ 起動・停止時間が短い
- ✓ 臨界安全設計が容易



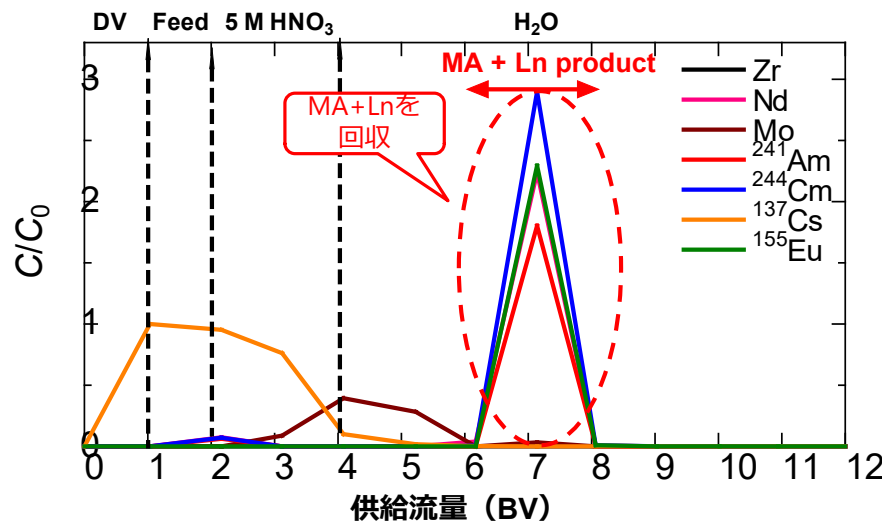
コプロセスング法確立に向けた改良の狙い

### 【主要課題】

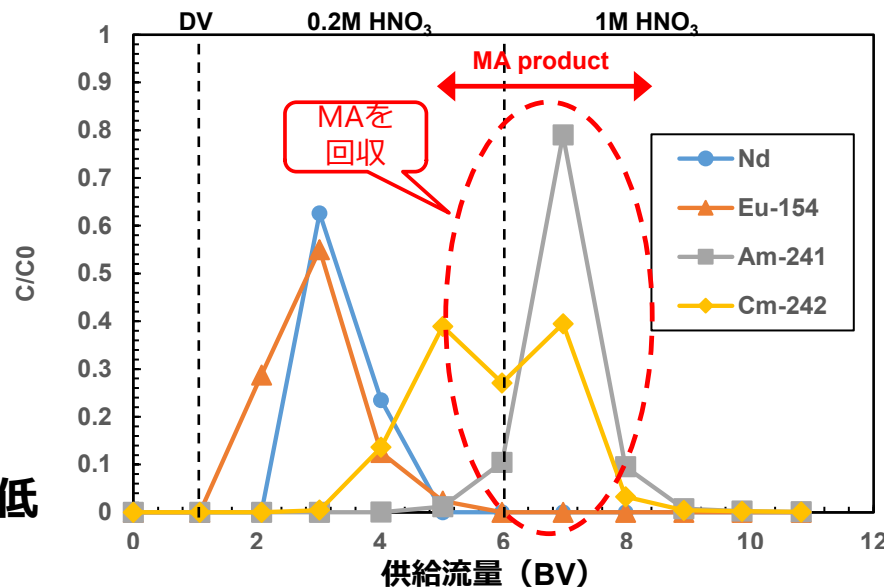
遠心抽出器を利用した共除染部、分配部のホット性能実証→既存のホット再処理研究施設で評価を計画



吸着材の基本構造



高レベル放射性廃液からのMA+Ln共回収結果の例



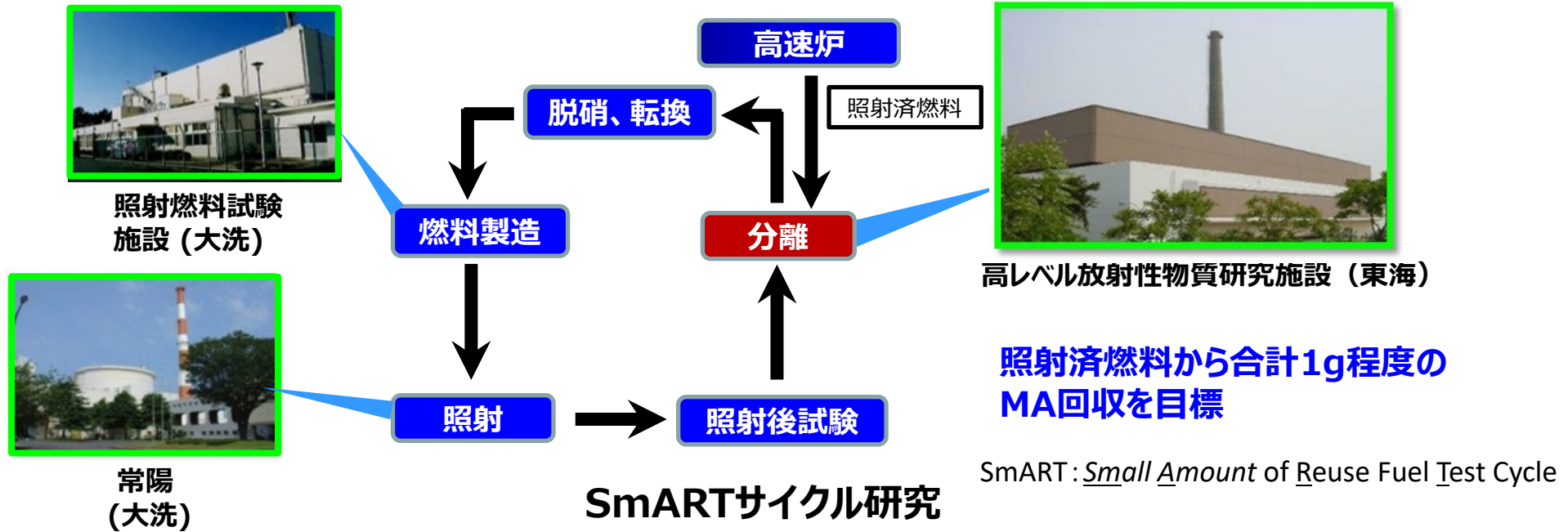
MA+Ln共回収溶液からのMA分離結果の例

- 放射性廃棄物の減容化・有害度低減を実現する上で、**長寿命核種や発熱性核種を有するMAの分離技術が必要不可欠**
- 第1段階 (MA+Ln共回収：抽出剤 TEHDGA)、第2段階 (MA/Ln分離：抽出剤 HONTA) によるフローシートを検討
- 第1段階では、**Cs、Mo等のFP元素に対して100以上の除染係数**を有するMA+Ln中間製品を回収できること、第2段階では**MAのみを95%以上回収**できることを確認

**【主要課題】**

- ✓ MA分離回収率、除染性能の更なる向上、廃液発生量の低減、機器システムの信頼性、安全性向上
- **既存のホット研究施設やコールド工学試験施設で評価を計画**

放射性廃棄物の減容化・有害度低減の観点から、照射済燃料中の少量MAを出発原料とした高速炉利用による一連のサイクル試験（SmART研究）計画を推進



## 【本研究の狙い】

炉・燃料・再処理のJAEA施設を最大限に活用しつつ、MAを中心とした分離変換データを取得し、サイクル成立性の小規模実証を行う

(照射済燃料中のMA核種に係る照射変換挙動データは世界的にも貴重な知見であり、高レベル放射性廃棄物の減容化・有害度低減の実現に貢献)



→ 技術の流れ  
→ 施設変遷の流れ

軽水炉燃料再処理 (L再)



JNFL六ヶ所再処理工場 (RRP)

・技術協力  
・人材育成

知見反映

知見反映

重点開発項目の評価  
及び燃料技術の検討に  
向けた情報整備

・TRL評価と開発計画の策定

R&D結果  
の反映

ホット、ウラン、コールド試験施設

PUREX法による  
オーソドックスな再処理法

TRP



東海再処理施設



Chemical Processing Facility(CPF)

MA分離技術開発

各種高速炉再処理機器開発

高速炉MOX燃料再処理技術の  
実用化

再処理技術実証フィールド (新規)

プロセス開発 (使用済燃料小規模ホット試験)  
機器開発 (コールド工学試験、ウラン工学試験)

累積処理量 1,140トン  
(国内再処理需要の一部を賅う)

高速炉燃料再処理 (F再)

## 目的

MOX燃料再処理プロセス及び機器の性能を実際の環境の下、工学的観点を含めて技術実証する

## 想定仕様等

- システム構成については、実証すべき再処理技術全体が対象（再処理製品や廃液関係の処理機能も必要）
- 数十t/y以上の処理規模（集合体規模の処理が前提）

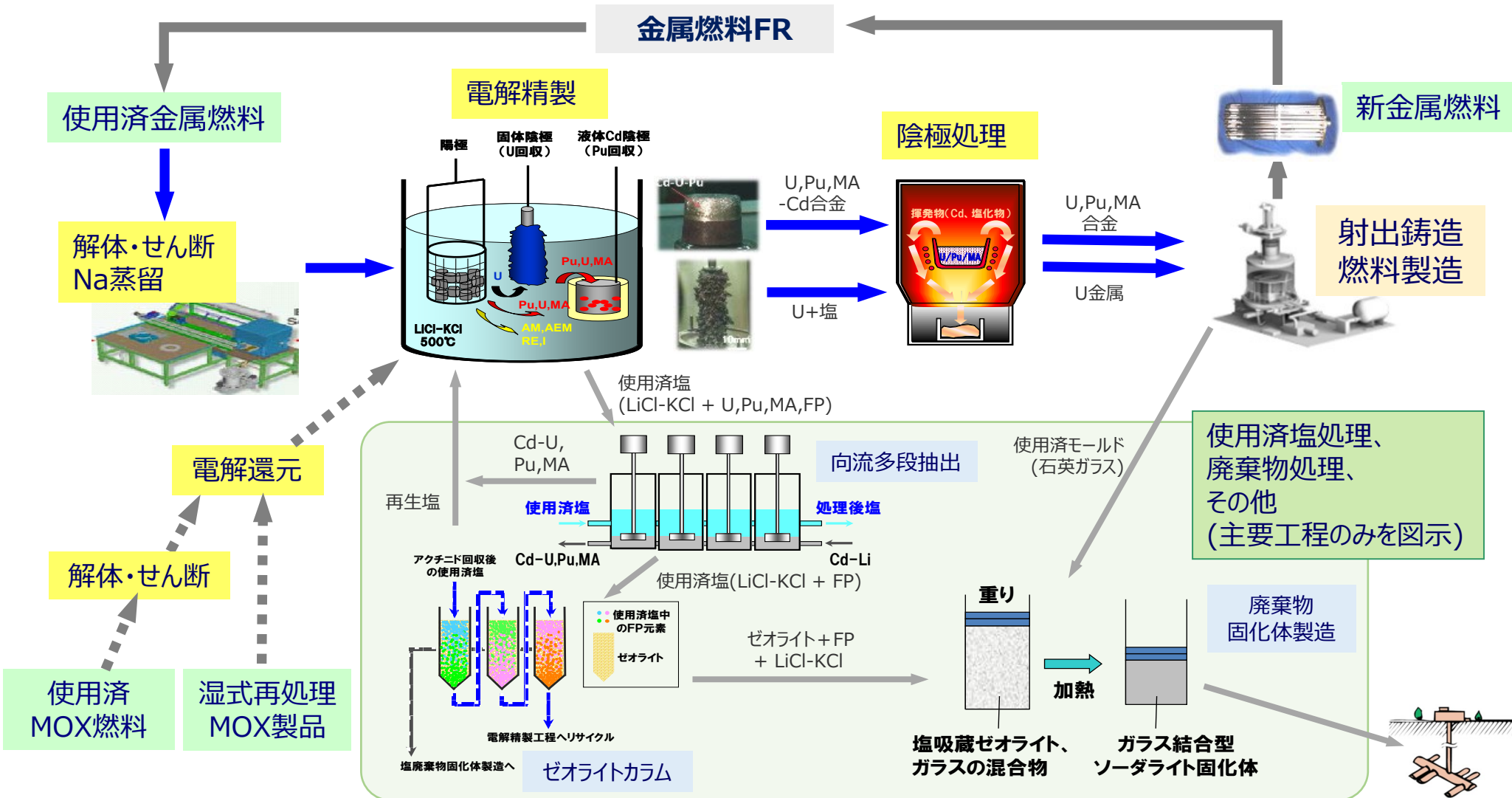
参考：東海再処理工場の処理規模 140t/y  
（年間200日稼働条件）

- 処理対象燃料：  
高速実験炉「常陽」の照射済燃料等を想定
- 本フィールドでは、再処理技術の工学実証試験を通じて、燃料製造に必要なMA原料の回収を行う



再処理技術実証フィールドの部分イメージ例

再処理技術の実用化を図るためには、実環境での技術実証を可能とする新たな施設整備が将来的に必要



### 重点課題（廃棄物処理技術、電解還元技術）に関して米国と研究協力を実施

#### ● 参加機関

- 日本： 原子力機構、電力中央研究所
- 米国： 米国エネルギー省 (DOE)  
アイダホ国立研究所 (INL)  
アルゴンヌ国立研究所 (ANL)

#### ● 期間

2018年9月に5年間の取決めとしてPA-NE-09を締結し、研究協力を実施中

#### ● 協力項目

##### 廃棄物処理技術開発

- Task-1： セラミック廃棄物固化体
- Task-2： 金属廃棄物固化体
- Task-3： 前処理操作(DOE側のみ実施)

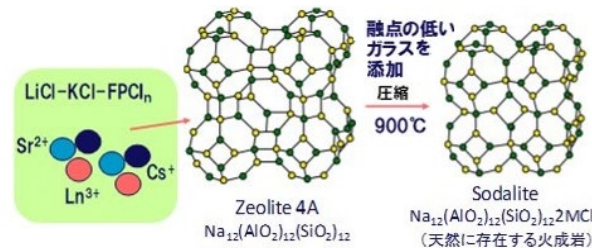
##### 電解還元技術開発

- Task-1： 酸化物燃料の電解還元における核分裂生成物とジルコニウムの挙動評価
- Task-2： 陽極材料
- Task-3： 装置設計

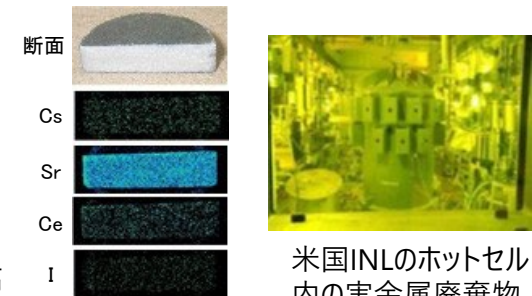
#### ● 実施内容

##### 【廃棄物処理技術開発】

高レベル廃棄物（セラミック固化体）への廃棄物元素の充填量増大方策や安定な金属廃棄物固化体製造のための研究開発を実施



FPを吸着したゼオライトにガラス基材を加え、高温高圧でセラミック固化体化（ソーダライト）する技術 → 廃棄物元素含有率向上に資するため、アルカリ金属等の吸着、固化挙動評価を実施



作製したセラミック固化体試料断面と元素分布(R3)

米国INLのホットセル内の実金属廃棄物固化装置 (直径約1.2m)

##### 【電解還元技術開発】

- 様々な組成の使用済燃料の還元処理を検討するため、電解還元時のFP、アクチニド、Zr等の元素挙動を評価
- 工学規模の電解還元処理装置を開発
- CPFではU,Pu,Am,模擬FPを用いた小規模試験を実施



電解還元後の陰極と切断面の例(R3)



試作した工学規模電解還元装置の電極部 (R2)





IFR計画参加による  
米国技術導入



工学規模電解精製試験  
@東芝ESS浮島



工学規模射出鑄造試験



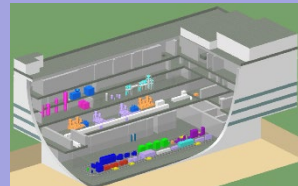
乾式再処理Pu試験@CPF



使用済金属燃料を用いた  
乾式再処理プロセス実証  
@JRC-Karlsruhe



工学規模機器開発  
@電中研



金属燃料サイクル施設  
設計と経済性評価  
(FS/FaCT)

電解還元・  
燃料製造  
機器開発

金属燃料製造施設（新規）  
軽水炉燃料再処理製品(MOX)を原料とした  
MOX還元-金属燃料製造施設

燃料技術検討に  
向けた技術評価

- ・CNWGおよび新規日米共研(CRADA)によるTRL底上げのみとおし
- ・JAEA・メーカー他による技術評価の力量向上
- ・開発計画の策定

再処理機器開発

金属燃料リサイクル実証施設（新規）

- ・5～10tHM/yの機器処理規模を想定
- ・次期炉の使用済燃料を再処理
- ・再処理製品はMA含有金属燃料としてリサイクル

高速炉金属燃料再処理技術の  
実用化



酸化物燃料サイクル (湿式再処理法)	主要な技術課題	必要な研究施設
集合体解体・せん断技術 (TRL=6)	<ul style="list-style-type: none"> <li>解体刃の耐久性、ピン損傷の抑制、切断粉回収システムの構築、システム信頼性</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>コールド工学試験施設</li> </ul>
燃料溶解技術 (TRL=5)	<ul style="list-style-type: none"> <li>実燃料溶解データの信頼性評価、耐食材料の調達、製作性、工学機器（回転ドラム型連続溶解槽）による溶解性能の検証</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>ホット試験研究施設、ウラン工学試験施設及びコールド工学試験施設</li> </ul>
高性能清澄技術 (TRL=4)	<ul style="list-style-type: none"> <li>清澄システム（遠心清澄＋フィルタ）の統合性能評価、計装・保守システムの構築、実用規模機器による工学性能評価</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>コールド工学試験施設</li> </ul>
U・Pu共回収技術 (TRL= 4～5)	<ul style="list-style-type: none"> <li>抽出性能のホット検証</li> <li>抽出器（遠心抽出器）の制御・保守システムの構築、多段システムの信頼性</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>ホット試験研究施設、ウラン工学試験施設及びコールド工学試験施設</li> </ul>
MA分離技術 (TRL=4)	<ul style="list-style-type: none"> <li>MA分離回収率、除染性能の向上、機器システムの信頼性、安全性向上</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>ホット試験研究施設及びコールド工学試験施設</li> </ul>

□ 実用化に向けて、さらに開発レベルをTRL=7に到達させるためには、実環境下での工学規模による技術実証が必要であり、そのための**再処理技術実証フィールドを国内に整備することが必要**

金属燃料サイクル（乾式再処理法）	主要な技術課題	必要な研究施設
せん断技術(TRL=5) Na蒸留技術(TRL=4) 電解還元技術(TRL=6) 電解精製技術(TRL=6) 陰極処理技術(TRL=5) 陽極処理技術(TRL=5) 廃棄物処理技術(TRL=4) 向流抽出・逆抽出 ゼオライトカラム ドロス処理 セラミック固化 金属廃棄物固化 高温融体移送技術(TRL=6)	<ul style="list-style-type: none"> <li>・各機器の設計・製作技術の確証</li> <li>・各機器の遠隔・自動操作性、信頼性、耐久性等の確認</li> <li>・U-Pu模擬物質・溶融塩・Cdを用いた機能試験</li> </ul>	コールド工学試験施設 ※高純度アルゴンガス雰囲気をもつ簡易セルが必要 ※U・Puは使用しない。
電解還元技術(TRL=6) 電解精製技術(TRL=6)	<ul style="list-style-type: none"> <li>・MOX電解還元プロセス改良、他</li> <li>・Cd陰極の運用等のプロセス改良、他</li> </ul>	ホット試験研究施設

- IFRプログラムにおいては、実験室規模Pu試験と工学規模U試験の次に使用済燃料を用いた工学規模（≒実規模）実証試験に移行した。
- 国内における乾式再処理技術開発においても実験室規模Pu試験と工学規模U試験は完了しているため、国内工学規模（≒実規模）実証に移行可能と考えられる。しかし、国内メーカーの育成を考慮すると、各機器の設計・製作・開発技術の確証を踏まえた上で、TRL=7としていく必要がある。これには金属燃料リサイクル実証施設及びコールド工学試験施設を整備することが必要である。

## ● ホット試験研究施設



高レベル放射性物質研究施設 (CPF)

## 再処理技術開発の主な実績

- 高速炉照射済MOX燃料の溶解プロセス性能評価
- U・Pu共回収法（コプロセッシング法）のプロセス性能評価
- MA分離プロセス開発
- 乾式再処理法の基盤データ取得 他

## ● ウラン工学試験施設



応用試験棟

(別建屋に機能を集約することで、本建屋は廃止措置に移行する計画となっており、今後、機能確保に向けた対応が必要)

- 抽出プロセス及び機器（遠心抽出器、パルスカラム）の開発
- 溶媒洗浄工程のソルトフリー技術開発
- 再処理用装置材料の腐食挙動評価 他

## ● コールド工学試験施設



実規模開発試験室



第二応用試験棟

- 集合体解体・せん断装置開発
- 溶解槽開発
- 清澄機開発
- 遠心抽出器開発
- MA分離システム開発 他

分野	試験施設	必要性	施設の現況
酸化物	● ホット試験研究施設	✓ MOX再処理プロセス技術開発、MA分離回収プロセス開発等に必要	✓ CPF：運用中。耐震補強の計画あり。（耐震補強、高経年化対策等が今後必要）
	● ウラン工学試験施設	✓ 高速炉燃料再処理機器（溶解槽、抽出装置等）の工学的性能を評価するために必要	✓ 応用試験棟：施設中長期計画により廃止措置準備中であるが、ウラン工学試験に必要（耐震補強、高経年化対策等が必要）
	● コールド工学試験施設	✓ 高速炉再処理用機器（集合体解体、せん断、溶解槽、清澄機、抽出装置、MA分離装置等）の工学的性能を評価するために必要	✓ 第2応用試験棟：運用中。実規模開発試験施設：東日本大震災による損傷のため、工学試験の再開には、施設の復旧費用が必要
	● 再処理技術実証フィールド	✓ MOX燃料用の湿式再処理技術の実証及び実証炉へのMA原料供給のために必要	✓ 国内に新規に整備が必要
金属	● ホット試験研究施設	✓ 乾式再処理各種要素試験によりデータを取得するために必要	✓ 上記の記載と同様
	● コールド工学試験施設	✓ 乾式再処理の各機器の設計・製作技術の確証のために必要	✓ 第2応用試験棟相当を新設することが必要
	● 金属燃料リサイクル実証施設	✓ 金属燃料用の乾式再処理技術の実証及び実証炉へのMA原料供給のために必要	✓ 米国INLに工学規模実証施設があるが、国内では新規に整備が必要

# 高温ガス炉使用済燃料の取扱い 研究開発と基盤整備



# 開発課題と整備・項目（高温ガス炉）

（次世代革新炉の開発に必要な研究開発基盤の整備に関する検討会（第2回（2022年10月28日開催））資料3より引用）

- HTTRの技術の延長上にある範囲で大型化を目指し、開発要素を少なくする
- 蒸気タービン、既存水素製造技術等を接続し、2030年代の運転開始が可能な実証炉を開発

## 整備状況

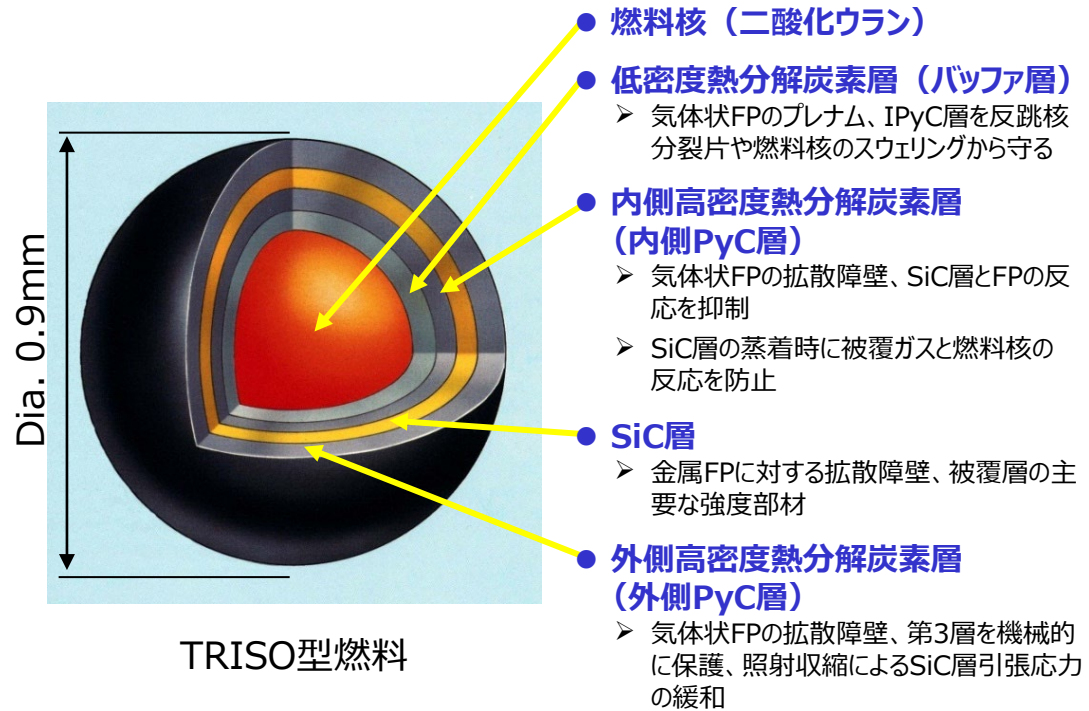
- ：整備済み（利用可能）      △：整備中  
□：追加整備が必要（予算未定） ×：未整備（新規案件）

下線は機器等の整備が必要な項目

分野	実証炉の課題	開発・整備項目	整備状況	検討状況
炉心	<ul style="list-style-type: none"> <li>炉心高度化               <ul style="list-style-type: none"> <li>▶ 大型環状炉心解析技術開発</li> </ul> </li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>環状炉心性能評価手法の妥当性確認、炉心・炉内構造成立性確認</li> </ul>	△	
燃料	<ul style="list-style-type: none"> <li>実用高温ガス炉燃料設計基準</li> <li>HTTR使用済燃料用いた前処理技術の確証</li> <li>使用済燃料再処理技術開発</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>燃料設計基準策定</li> <li>TRISO燃料製造再整備               <ul style="list-style-type: none"> <li>▶ 民間燃料メーカーへの委託により実施</li> </ul> </li> <li>TRISO燃料再処理試験               <ul style="list-style-type: none"> <li>▶ HTTR使用済燃料を用いた再処理技術の確証</li> </ul> </li> </ul>	△ × □	<ul style="list-style-type: none"> <li>技術実証済み、加工施設整備要、濃縮ウラン確保が課題、海外調達可</li> <li>未照射燃料を用いた技術確証済、セル内機器の整備要</li> </ul>
安全防災	<ul style="list-style-type: none"> <li>実用高温ガス炉の安全基準策定</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>規則内規策定、合理的な防災計画策定、安全評価コードシステムの整備及び検証</li> </ul>	△	
構造	<ul style="list-style-type: none"> <li>実用高温ガス炉黒鉛構造民間規格化</li> <li>材料データ取得</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>黒鉛構造物規格策定及び鋼構造物規格策定</li> <li>既存の照射場を用いた照射試験</li> </ul>	□	<ul style="list-style-type: none"> <li>JRR-3、「常陽」、HFIR、ATR（以上米国）、HFR（オランダ）、JHR（フランス）等での照射試験において、照射キャプセル等の準備が必要</li> </ul>
設計	<ul style="list-style-type: none"> <li>設備機器の開発・実証               <ul style="list-style-type: none"> <li>▶ 大型機器の製作・成立性</li> <li>▶ 安全・燃料取扱・接続関連施設の性能及び製作性確証</li> </ul> </li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>大型化に向けた機器の性能及び製作性確証</li> <li>機器の設計手法の検証</li> </ul>	△	
熱利用	<ul style="list-style-type: none"> <li>HTTR-熱利用試験               <ul style="list-style-type: none"> <li>▶ 水素製造施設接続に係る安全設計・安全評価技術の確立</li> <li>▶ 高温ガス炉水素製造システム運転制御技術確立</li> </ul> </li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>高温ガス炉と水素製造施設の接続技術確立               <ul style="list-style-type: none"> <li>▶ 水素製造施設接続に係る安全設計の確立</li> <li>▶ プラントシミュレータの開発及びHTTR-熱利用試験施設による検証</li> </ul> </li> </ul>	△	<ul style="list-style-type: none"> <li>エネ庁の委託費により整備予定</li> </ul>

# 高温ガス炉燃料の再処理

- 高温ガス炉は、二酸化ウラン燃料核を炭素層およびSiC層で4重被覆したTRISO型燃料を使用する
- TRISO型燃料は被覆層のFP閉じ込め機能に優れているため、海外では高燃焼度燃料を長期保管または廃棄（直接処分）する考え方が主流である
- ドイツ及び米国ともに過去の高温ガス炉の使用済み燃料は貯蔵施設で保管中。ドイツは直接処分を計画、米国は具体的な処分の計画なし<sup>\*1\*2</sup>
- 一方、国内エネルギー資源に乏しい我が国では、使用済み燃料の再処理を基本方針としており、高温ガス炉燃料についても、再処理技術の確立が必要である

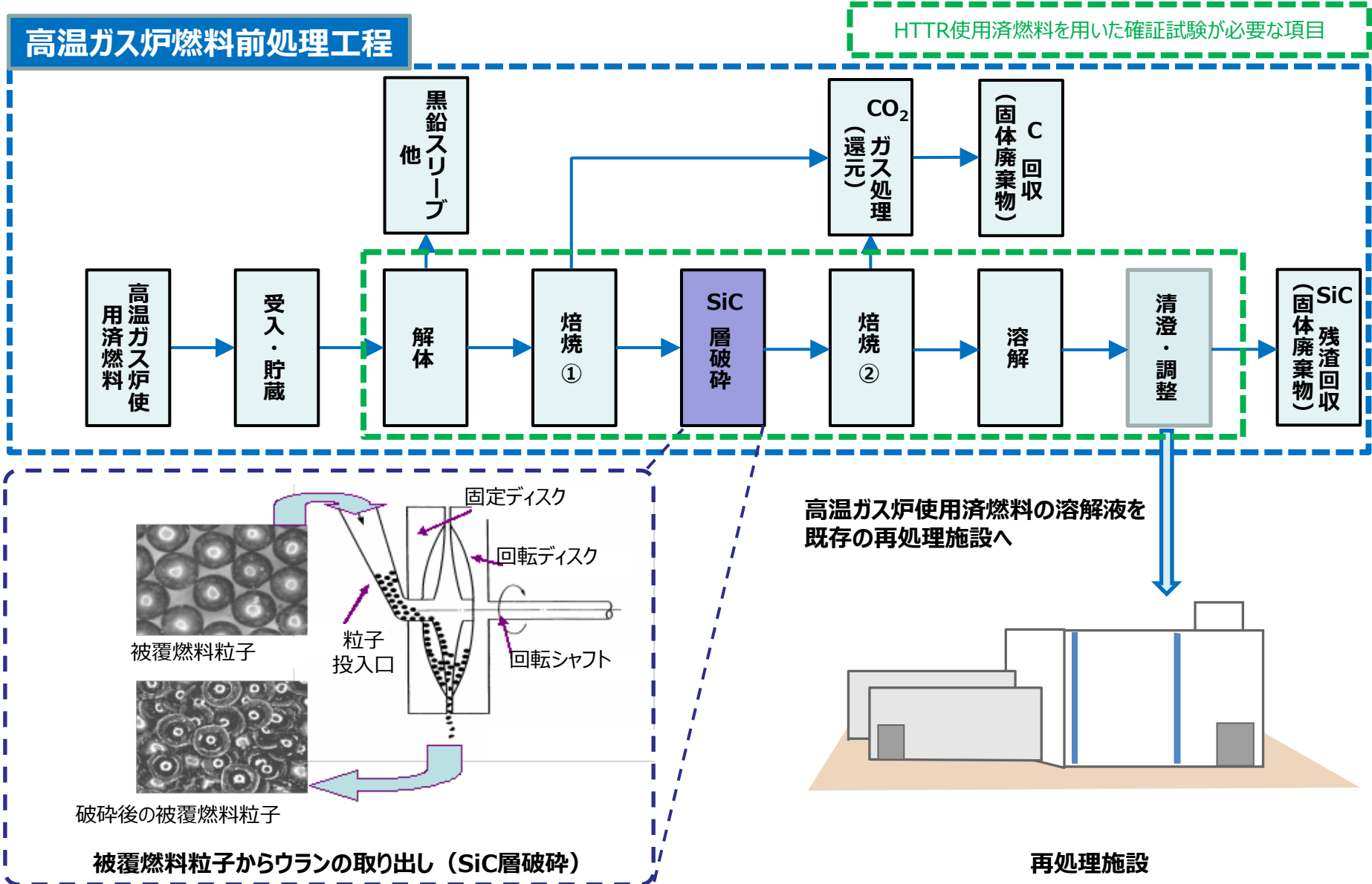


- 高温ガス炉燃料の再処理は、前処理工程（被覆燃料粒子から燃料核を取り出す工程）を追加することで、その後の工程は軽水炉のPUREX法を適用できる
- 前処理工程はHTTR未使用燃料からのウラン回収により、基礎技術は確立されている
- 高温ガス炉燃料の再処理技術は、前処理工程の基礎技術を用い、HTTRの使用済み被覆燃料粒子から燃料核を取り出す試験により確認する
- 試験を実施するにあたり、課題としてホット試験施設の確保が挙げられる。使用済み燃料の取扱い経験のあるNUCEF（原科研）及びCPF（サイクル研）が候補として挙げられる

\*1 [https://www.bge-technology.de/fileadmin/user\\_upload/MEDIATHEK/vortrag/KTG\\_2012\\_LABRADOR.pdf](https://www.bge-technology.de/fileadmin/user_upload/MEDIATHEK/vortrag/KTG_2012_LABRADOR.pdf)

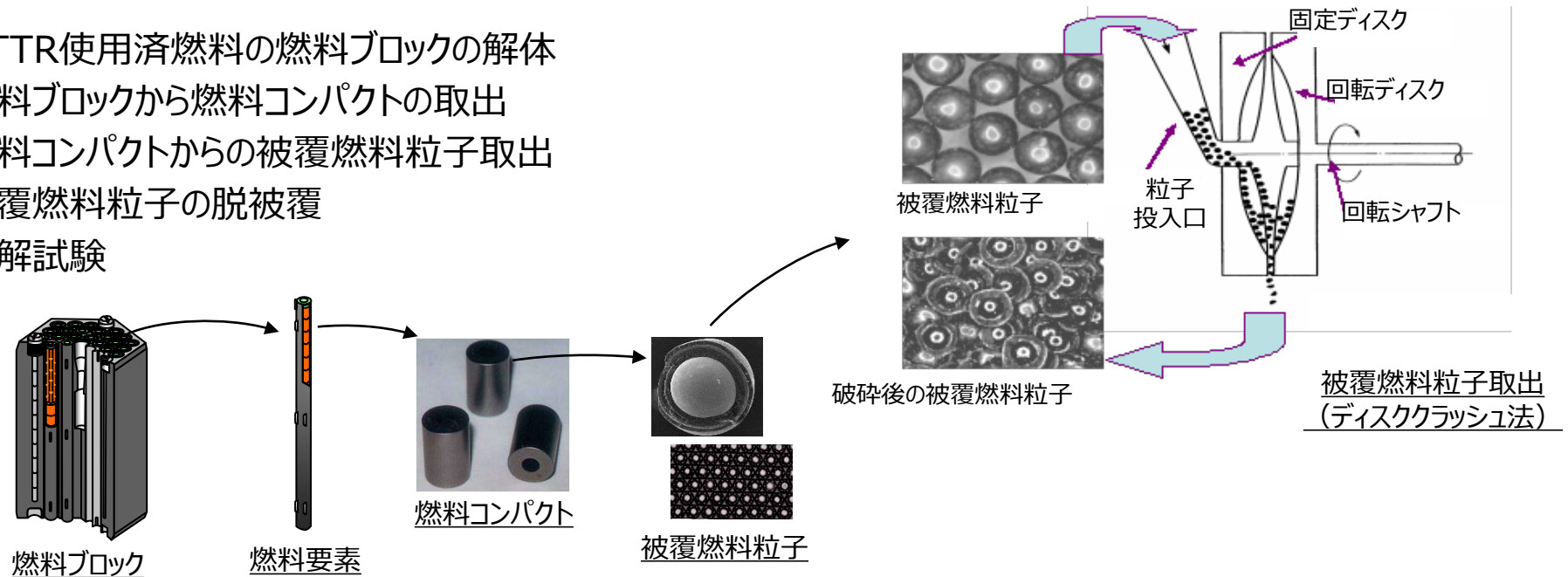
\*2 <https://inldigitalibrary.inl.gov/sites/STI/STI/3303760.pdf>

## 前処理技術を確立することで高温ガス炉燃料の再処理が可能



高温ガス炉燃料再処理上特有のプロセスである、前処理工程の技術確立のため、HTTR使用済燃料を用いて①～⑤を行う。

- ① HTTR使用済燃料の燃料ブロックの解体
- ② 燃料ブロックから燃料コンパクトの取出
- ③ 燃料コンパクトからの被覆燃料粒子取出
- ④ 被覆燃料粒子の脱被覆
- ⑤ 溶解試験



実施場所	2026	2027	2028	2029	2030	2031
HTTR	燃料交換	使用済燃料冷却 (プール)		燃料ブロック解体 CPFもしくは NUCEFに輸送		
CPFもしくは NUCEF-BECKY				試験準備	CPF取り出し 脱被覆	溶解

## 目的

高温ガス炉燃料再処理プロセス及び機器の性能を実際の環境の下、工学的観点を含めて技術実証する

## 想定仕様等

- システム構成については、高温ガス炉燃料に特有の前処理技術が対象
- 数t/y程度の処理規模（燃料ブロック規模の処理が前提）  
参考：東海再処理工場の処理規模 140t/y（年間200日稼働条件）
- 処理対象燃料：HTTRの照射済燃料等を想定
- 本フィールドでは、再処理技術の工学実証試験を通じて、被覆燃料粒子からウラン及びプルトニウムの回収を行う

**再処理技術の実用化を図るためには、実環境での技術実証を可能とする新たな施設整備が将来的に必要**



分野	試験施設	必要性	施設の現況
前処理 技術	● ホット試験研究施設	✓ 高温ガス炉燃料の前処理プロセス開発等に必要	✓ NUCEF：運用中。（耐震補強、高経年化対策は不要。施設の整備が必要。） ✓ CPF：運用中。耐震補強の計画あり。（耐震補強、高経年化対策等が今後必要。施設の整備が必要。）
	● 工学試験施設	✓ 高温ガス炉使用済燃料の前処理機器（解体）の工学的性能を評価するために必要	✓ HTTR使用済燃料検査室：施設の整備が必要
	● 工学試験施設	✓ 高温ガス炉使用済燃料の前処理機器（焙焼、SiC層破碎、溶解）の工学的性能を評価するために必要	✓ 燃料試験施設：施設の整備が必要 ✓ 第2応用試験棟、実規模開発試験室を利用、施設の整備が必要
	● 再処理技術実証フィールド	✓ 高温ガス炉燃料の前処理技術の実証に必要な	✓ 国内に新規に整備が必要

# 参考資料

技術開発の相対的なレベル	TRL	TRLの定義
システムの運転段階	TRL 9	想定される全ての条件で運転された実システム
システムの試運転段階	TRL 8	試験と実証を通じて完成し性能確認された実システム
	TRL 7	フルスケールで、同様な（原型的な）システムを、現実的な環境において実証しているレベル
技術の実証段階	TRL 6	工学規模で、同様な（原型的な）システムを、現実的な環境において検証しているレベル
技術の開発段階	TRL 5	実験室規模で、同様なシステムを、現実的な環境において検証しているレベル
	TRL 4	実験室環境で、機器・サブシステムを検証しているレベル
実現可能性を示すための研究段階	TRL 3	解析や実験によって、概念の重要な機能・特性を証明しているレベル
	TRL 2	技術概念・その適用性を確認しているレベル
基礎技術の研究段階	TRL 1	基本原理を確認しているレベル

	技術開発項目	TRL
1	解体・せん断技術開発（FR燃料集合体解体機）	6
2	解体・せん断技術開発（FR燃料集合体せん断機）	6
3	高効率溶解技術開発（プロセス開発）	5
4	溶解プロセスシミュレーション技術開発	5
5	高効率溶解技術開発（溶解機器開発）	5
6	晶析技術による効率的ウラン回収技術（プロセス開発）	4
7	晶析技術による効率的ウラン回収技術（晶析機器開発）	5
8	高性能清澄システム	4
9	U-Pu-Npを一括回収する高効率抽出システムの開発（回収プロセスの開発）	5
10	U-Pu-Npを一括回収する高効率抽出システムの開発（遠心抽出機の開発）	5
11	コプロセッシング法開発（共除染部）	4
12	コプロセッシング法開発（分配部）	5
13	抽出プロセスシミュレーション技術	4
14	抽出クロマト法によるMA回収技術（プロセス技術）	4
15	抽出クロマト法によるMA回収技術（MAクロマト分離装置）	4
16	溶媒洗浄ソルトフリープロセス	4
17	ソルトフリー洗浄廃液電解槽	4

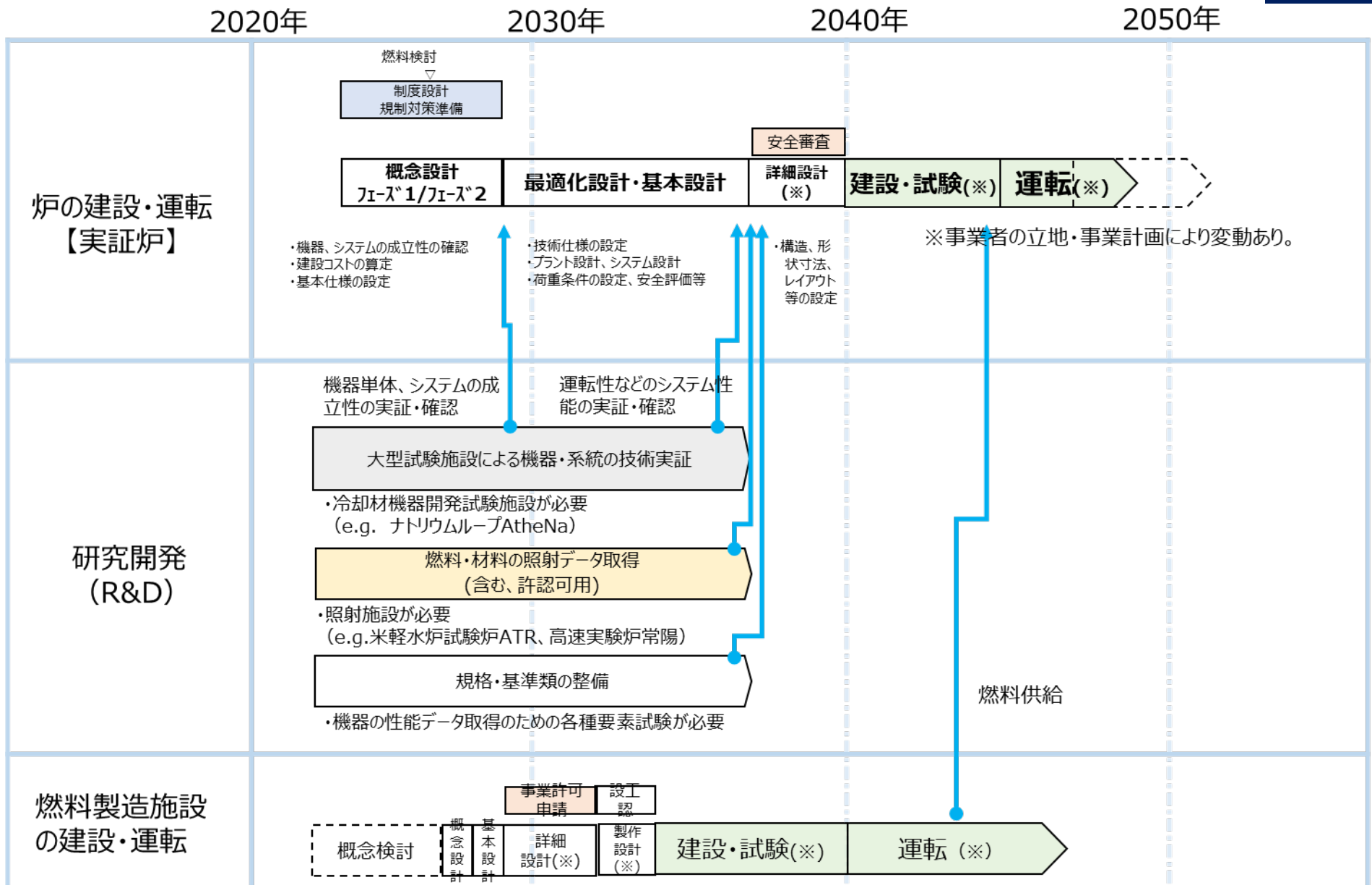
※「現時点で我が国が保有している高速炉サイクル技術に対する評価について－技術成熟度（TRL）評価結果－、平成30年6月1日 高速炉開発会議 戦略ワーキンググループ統括チーム」の結果を参考（なお、MA分離プロセスはこの評価以降の開発状況をふまえてTRL=4と独自に評価）

**現状は開発対象の中で、より低いTRLの技術を底上げすべく、重点的に開発を進めている**

	技術開発項目	TRL
1	解体・せん断技術開発 (せん断技術)	5
2	解体・せん断技術開発 (Na蒸留技術)	4
3	電解還元技術開発	6
4	電解精製技術開発	6
5	陰極処理技術開発 (Cd蒸留技術/塩蒸留技術)	5
6	陽極処理技術開発	5
7	廃棄物処理等技術開発 (向流抽出・逆抽出技術)	4
8	廃棄物処理等技術開発 (ゼオライトカラム技術)	4
9	廃棄物処理等技術開発 (ドロス処理技術)	4
10	廃棄物処理等技術開発 (ソーダライト固化技術)	4
11	廃棄物処理等技術開発 (金属廃棄物溶融固化技術)	4
12	高温融体移送技術開発 (高温融体移送技術)	6

※「現時点で我が国が保有している高速炉サイクル技術に対する評価について－技術成熟度 (TRL) 評価結果－  
平成30年6月1日 高速炉開発会議 戦略ワーキンググループ統括チーム」の結果を参考





## 革新技術(1)：解体・せん断技術

- 高速炉燃料集合体解体を高い制御性で実現する（機械式解体技術）。
- 高効率溶解に対応したせん断（短尺せん断による粉化率向上）。

高速炉使用済燃料受入

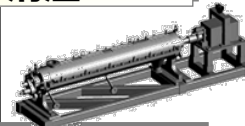
解体・せん断



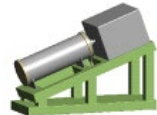
## 革新技術(2)：高効率溶解技術

- 晶析プロセスのフィード液に適した高濃度の溶解液を直接得る。
- 短尺せん断に対応した高粉化燃料の取扱いを可能とする。
- 向流接触による溶解効率の高い連続溶解槽の採用による設備のコンパクト化。

溶解・清澄



晶析



抽出  
(簡素化溶媒抽出)

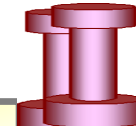


## 革新技術(5)：抽出クロマト法によるMA回収技術

- MA回収により環境負荷を低減。
- 従来法（溶媒抽出法）に比べて、設備がコンパクトで、溶媒使用量が少ない。

MA回収

(抽出クロマトグラフィー)



HAW  
(ガラス固化)

## 革新技術(3)：晶析技術による効率的ウラン回収技術

- 後工程（抽出工程）の処理量及び溶媒使用量の大幅低減=U-Pu-Np一括回収プロセスの導入を可能にする。
- Puの分離が原理的に困難な分離プロセスで核拡散抵抗性向上。

燃料製造へ  
(富化度調整)

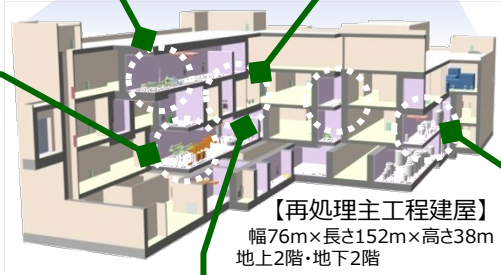
廃棄物低減

## 革新技術(4)：U-Pu-Npを一括回収する高効率抽出システム

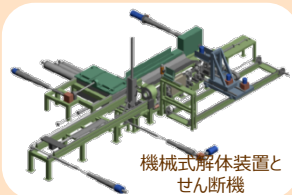
- U-Pu-Np一括回収による核拡散抵抗性の向上。
- コンパクトで高処理能力を持つ遠心抽出器の採用による設備サイズ縮小、溶媒劣化低減。

## 革新技術(6)：廃棄物低減化（廃液二極化）技術

- 高レベル廃棄物体の発生量を低減。
- 廃液の種類を抑制することで、雑多な廃液取扱設備・処理設備を不要とする。



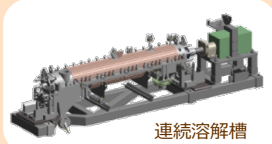
### ◆ ①解体・せん断技術



- 「もんじゅ」模擬集合体を用いた解体試験にて、2時間程度で解体が可能であることを確認。
- 「もんじゅ」模擬集合体を用いたせん断試験にて、2時間以内のせん断及び短尺せん断が可能であることを確認。

【判断結果】  
**採用**

### ◆ ②高効率溶解技術



- 使用済燃料溶解試験にて、400gHM/Lまでの高効率溶解を確認し、シミュレーションにより目標（500gHM/L）達成見通し。2010年度に500gHM/Lを確認。
- 連続溶解槽モックアップ試験にて、ハルの排出性、燃料の保持性を確認。

【判断結果】  
**採用**

### ◆ ⑥廃棄物低減化（廃液二極化）技術

- ソルトフリー洗浄試薬の性能試験にて、Zr、Ruについて目標とした洗浄性能の達成を確認。Puについては未確認。
- 試薬分解試験において分解性能は目標達成。さらに、分解生成物の気相への移行率は十分低いことを確認。ただし、気相中での挙動評価が課題。

【判断結果】  
**検討継続**

投資対効果を考慮しつつ、廃棄物低減化技術に係る研究開発プログラムを再構築した上で、2013年度末までにサイクル技術全体の開発計画の中で検討。

### ◆ ③晶析技術による効率的ウラン回収技術

- 所定のU回収率条件では、液体不純物のDFは目標達成（DF=100）したが、固体不純物（Cs、Ba）は不足。
- 装置開発では0℃前後の低温域での晶析システムや非常常事象検知方法の有効性を確認。

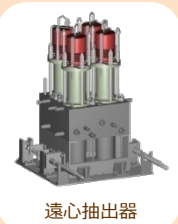


【判断結果】  
**検討継続**

検討を継続し、技術的成立性に関する課題についてR&Dで見通しを確認した上で、2015年までに実用化までのR&Dの進め方を決定。リスク回避の観点からコプロセス法についても並行してR&Dを実施。

### ◆ ④U-Pu-Npを一括回収する高効率抽出システム

- 使用済燃料溶解液を用いた試験にて、目標とした回収率・除染係数の達成見通し。
- 遠心抽出器試験において、目標とした装置性能（流量、段効率）の達成及び装置安定性を確認。
- 機械的耐久性は3年・耐放射線性は2年までを達成



【判断結果】  
**採用**

### ◆ ⑤抽出クロマト法によるMA回収技術

- 複数の抽出剤候補から最も有望なTODGAとR-BTPの組み合わせを選定。
- FPのDFはほぼ目標達成見通し（Tc以外は100以上）であるが、MA（Am・Cm）回収率は不足（95%）。
- 火災・爆発に関する安全性確保に関して通水による除熱、吸着材抜出による発熱源排除などの対策が実施可能。



【判断結果】  
**検討継続**

検討を継続し、技術的成立性に関する課題についてR&Dで見通しを確認した上で、2015年までに実用化までのR&Dの進め方を決定。

