

高速炉燃料サイクル技術開発と国際動向

2026年9月9日

(国)日本原子力研究開発機構

竹内 正行

- 世界の燃料サイクル政策等の動向
- 日本の高速炉開発に係る政策状況
- 高速炉燃料の具体的検討に係る技術評価
 - ✓ 技術評価の背景
 - ✓ 高速炉用MOX燃料サイクル技術の開発状況と課題
 - ✓ 高速炉用金属燃料サイクル技術の開発状況と課題
- おわりに

世界の核燃料サイクル政策等の動向

出典:平田 勝 令和8年第13回原子力委員会定例会議 資料3-2の内容を引用・参考の上、作成

燃料サイクル政策等の概況

- ❑ 燃料サイクル推進を基本政策とする世界最大の再処理サービス供給国。現在でも、MOX燃料製造工場として、MELOX工場(1995年～)、再処理施設として、UP2-800(1994年～)及びUP3プラント(1989年～)が稼働中。軽水炉MOX燃料を60t以上、商用プラントで再処理した実績があり、高速炉燃料の再処理実績も有する。
- ❑ 2024年2月の原子力政策評議会(CPN)にて閉サイクル方針の継続と再処理施設への大規模投資を確認。Back End of the Futureプログラム開始(①ラ・アーグ再処理施設の更新・拡張(～40年)、②新規MOX燃料製造工場の建設検討、③新規使用済燃料処理工場建設検討(～50年))
- ❑ 2026年2月の第3次複数年エネルギー計画(PPE3)で、PWR(EPR)のマルチリサイクル研究の継続と、今世紀末までの高速炉・関連燃料サイクル施設導入に向けたロードマップの策定を明記。同年3月のCPNで閉サイクルに向けた新たなプログラムを開始し、4年間の研究フェーズを経て、2030年に2045年頃の運転開始を目標とする高速実証炉の建設フェーズへの移行を判断するとした。

表 仏国の再処理施設の状況

施設名	場所	主な対象燃料	処理能力	運転開始/終了	備考
UP-1	マルクール	ガス冷却炉燃料	800t/y	1958年/1997年	廃止措置中
UP-2	ラ・アーグ	ガス冷却炉燃料	800t/y	1966年/1987年	廃止措置中
UP2-400	ラ・アーグ	軽水炉燃料	400t/y	1976年/1998年	廃止措置中
UP2-800	ラ・アーグ	軽水炉燃料	1000t/y	1994年/運転中	当初は800t/y、2023年から1000t/y
UP3	ラ・アーグ	軽水炉燃料	1000t/y	1989年/運転中	当初は800t/y、2023年から1000t/y
AT1	ラ・アーグ	高速炉燃料	1kg/d	1969年/1979年	1979-1997年に除染・解体を実施
APM(TOP)	マルクール	ガス炉・試験炉・Th燃料	10-20kg/d	1974年/1983年	1983年停止後にAPR(TOR)に改造
APM(TOR)	マルクール	高速炉・軽水炉燃料	5t/y	1988年/1997年	

燃料サイクル政策等の概況

- ❑ 現在は燃料サイクル政策を取っておらず、**使用済燃料はワンスルー処理**の方針
- ❑ 上記の方針に関連して、現状、再処理施設はサバンナリバーのHキャニオンで固化施設のみが運転中であり、分離回収運転は実施していない
- ❑ 昨年、原子力再興にかかる4つの大統領令が発表され、国内核燃料生産の強化、使用済燃料管理・余剰Pu処分政策の再検討、DOE保有核燃料の放出、再処理・リサイクルの再評価、先進炉の積極的導入、規制改革などの政策実行が指示された
- ❑ 原子力再興に関連して、**政府の積極的支援の下、各種スタートアップ企業による燃料サイクルの施設検討や研究開発を推進**

・Curio社：2021年設立のスタートアップ企業。DOE国研と共同実証したNuCycle技術(使用済MOX燃料から揮発性核分裂生成物を除去しフッ素化した後電解精製する技術)を開発中。2027年パイロットスケール実証が目標

・SHINE Technology社：2010年設立のスタートアップ企業。DOE国研と共に湿式ベースでPuを単体分離せず処理し、MA回収する技術を開発。仏Orano社と提携し、2030年代早期に米国にてパイロットスケール(100t規模)実証が目標

・Oklo社：2013年設立のスタートアップ企業。アイダホ国立研究所内にEBR-IIベースのナトリウム冷却高速炉(Aurora、75MWe)を建設中、テネシー州に燃料リサイクル施設を建設予定。再処理技術は乾式再処理を採用

表 米国の再処理施設の状況

施設名	場所	主な対象燃料	処理能力	運転開始/終了	備考
PUREX工場	ハンフォード	Pu生産炉燃料	10-33t/d	1956年/1988年	廃止措置・環境修復実施中
Fキャニオン	サバンナリバー	ガス冷却炉燃料	14t/d	1954年/2002年	廃止措置中
Hキャニオン	サバンナリバー	高濃縮U、試験炉燃料	14t/d	1955年/ 運転中	分離回収運転は終了、固化施設運転中
ICPP	アイダホ	研究炉燃料	0.7t濃縮U/y	1953年/1992年	廃止措置・環境修復実施中
NF	ウェストバレー	軽水炉燃料	300t/y	1966年/1972年	廃止措置中

燃料サイクル政策等の概況

- 再処理・高速炉サイクルを中核とした**燃料サイクル路線を推進**
- 軽水炉は輸出・国内電源として維持するものの、長期的には核燃料自立と資源最大化が可能となる高速炉へ移行する方針
- Na冷却高速炉原型炉BN-600、実証炉BN-800を運転中であり(2022年からフルMOX炉心運転、2024-2026年にNp/Am含有燃料試験実施)、商業炉BN-1200Mを建設準備中
- 燃料サイクル施設については、**MOX燃料製造施設**(MFFF、60tHM/y、2015年操業開始)にて**BN-800燃料を製造中**。**再処理に関しては、現存のRT-1**(PUREX法、400tHM/y)**にて軽水炉他、BN-600燃料再処理を実施中**。先進再処理施設RT-2(RT-2)としてMCC内に再処理パイロット実証センター(PDC(フェーズ1)、2015年稼働)拡充、実験実証センター(PDC(フェーズ2)、200tHM/y)が運用を開始(2025年)。

表 露国の再処理施設の状況

施設名	場所	主な対象燃料	処理能力	運転開始/終了	備考
RT-1	チェリャビンスク	軽水炉、高速炉、研究炉	400t/y	1976年/ 運転中	RT-2が完成後の2030年頃に閉鎖予定
トムスク-7	トムスク	Pu生産炉燃料	800t/y	1955年/運転終了(推定)	2008年にPu生産炉の運転を終了しているため、再処理施設も既に運転終了見込み
クラスノヤルスク	クラスノヤルスク	Pu生産炉燃料	400t/y	1964年/運転終了時期は不明	
PDC (フェーズ1)	クラスノヤルスク	軽水炉、高速炉	5t/y	2015年/ 運転中	
PDC (フェーズ2)	クラスノヤルスク	軽水炉、高速炉	200t/y	2025年/ 運転中	2025年7月に運転開始

燃料サイクル政策等の概況

- 過去には、核燃料サイクル政策を推進し、下表に示す商用施設により、使用済燃料の再処理を進めてきた
- 従来、再処理で回収される分離プルトニウムについては、高速増殖炉を開発して利用する計画とし、高速炉用再処理パイロットプラントも建設・運用していたが、原型炉PFRが事故により廃炉となる等、開発を断念した
- 1994年に稼働を開始したTHORP再処理工場も放射性廃液の漏洩事故等により、2018年に操業停止に陥った
- 2025年に「貯蔵中の長期安全・セキュリティ負担」の軽減を理由に、民間分離プルトニウムの再利用方針を転換し、不動化(immobilisation、セラミック固化)方針を発表(核燃料サイクルの断念)

表 英国の再処理施設の状況

施設名	場所	主な対象燃料	処理能力	運転開始/終了	備考
B205	セラフィールド	ガス冷却炉燃料	1500t/y	1964年/2022年	英国内の全マグノックス燃料の処理 (東海1号炉の燃料も処理)
FEP	セラフィールド	ガス冷却炉燃料	400t/y	1969年/1973年	
THORP	セラフィールド	軽水炉・ガス冷却炉燃料	850t/y	1994年/2018年	海外から軽水炉燃料の再処理受託
DFR	ドンレイ	高速炉燃料	10t/y	1960年/1978年	
PFR	ドンレイ	高速炉燃料	4t/y	1981年/1998年	廃止措置中
MTR	ドンレイ	材料試験炉燃料	0.1t/y	1958年/1996年	廃止措置中

燃料サイクル政策等の概況

- 再処理・高速炉サイクルを中核とした燃料サイクル路線を推進
- 発電プラントの大半は濃縮ウランを不要とする加圧水型重水炉（PHWR）であり、高速炉（MOX）についてもカルパッカム原子力複合施設の高速増殖原型炉PFBR（0.5GWe）が2026年4月に初臨界を達成
- 2024年1月にCORALとFRFCFの中間となる高速炉燃料再処理実証プラント（DFRP）が完成・開設
- 商業規模の高速炉用酸化物燃料の燃料製造、再処理、廃棄物管理を統合した高速炉燃料サイクル施設（FRFCF）が2029年12月に運転開始予定
- HyderabadにあるNuclear fuel complexがウランの精製、転換、燃料加工を実施しており、400t/yのメインプラントでPHWR用燃料を加工し、小規模プラント（25t/y）でタラブールのBWR用燃料を加工している
- PHWRで発生した使用済燃料は下表のBARC、KARP等の施設（約100t/y）で、高速炉燃料はカルパッカムのCORALで再処理されている
- 原子力開発計画の長期的目標は先進型重水炉によるThサイクルである

表 印国の再処理施設の状況

施設名	場所	主な対象燃料	処理能力	運転開始/終了	備考
BARC	トロンバイ	PHWR燃料	50t/y	1964年/運転中	PHWR（加圧重水炉）
PREFRE	タラブール	酸化物燃料	100-150t/y	1979年/運転中	
KARP	カルパッカム	PHWR燃料、FBTR燃料	100t/y	1998年/運転中	FBTR（高速増殖実験炉）
CORAL	カルパッカム	高速炉燃料		2001年/運転中	

燃料サイクル政策等の概況

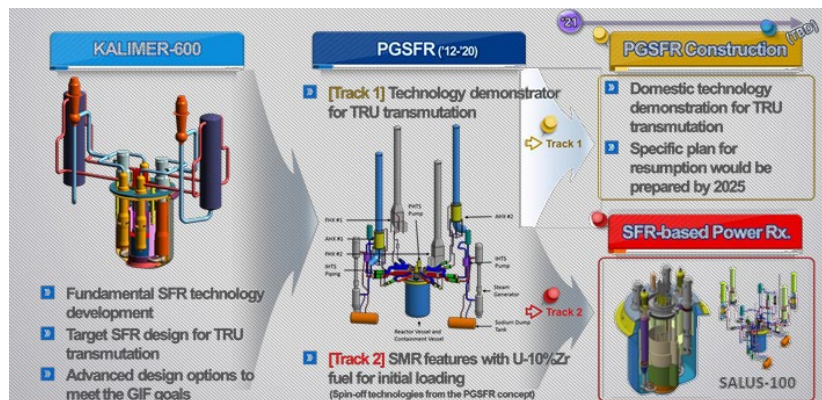
- ❑ 2026年に施工された中国初となる原子力基本法においては、**使用済燃料再処理による閉サイクルを国家戦略として位置付けている**
- ❑ 高速炉・再処理サイクルを将来の資源確保と位置づけ、技術主権の柱として育成している状況
- ❑ Na冷却高速炉では、ロシアの支援を受けて、実験炉CEFR（20MWe、ナトリウム冷却高速炉）運転中（2014年フル出力）。実証炉CFR600（600MWe）1号機運転中（2023年運開）、2号機建設中。
- ❑ 技術的には**MOX燃料を用いるSFR（CFR1000:1200MWe）と、金属燃料を用いるSFR（CiFR1000:1200MWe）に乾式再処理を組み合わせた一体型システム**の開発を推進。燃料サイクル分野では、湿式再処理技術が先行しつつ、乾式再処理技術の研究開発を推進
- ❑ 燃料製造では、中国核工業集团公司（CNNC）/甘肅省にMOX製造実証施設（20t/y）を建設中（CFR600用）
- ❑ 再処理では、パイロット施設（PUREX、約50t/y、甘肅省蘭州、2013年本格稼働～）運転を経て、現在、MOX実証施設に併設した実証再処理プラント「プロジェクトI」（PUREX、200t/y）が2026年運転開始。同敷地内にある2番目のプラント「プロジェクトII」（200t/y）の建設は完了しており、まもなく稼働可能となる見込み。また、3番目のプラント「プロジェクトIII」も建設中。

表 中国の再処理施設の状況

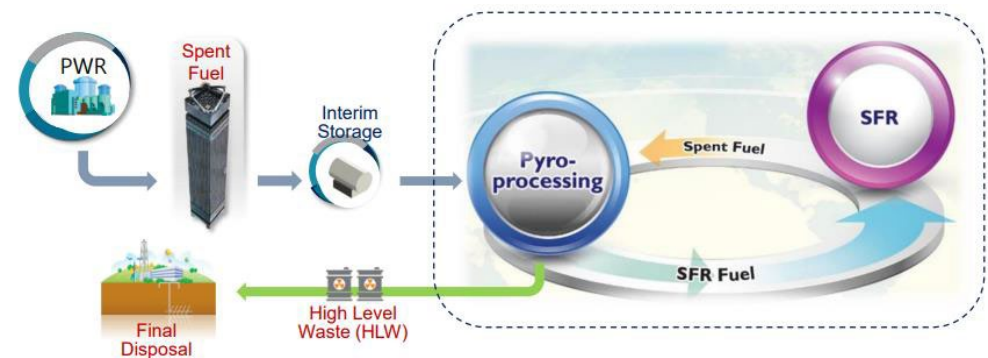
施設名	場所	主な対象燃料	処理能力	運転開始/終了	備考
酒泉軍事用再処理PP	甘肅省	Pu生産炉燃料	0.4t/y	1968年/	
酒泉軍事用再処理PP	甘肅省	Pu生産炉燃料		1970年/	
蘭州再処理プラント	甘肅省	軽水炉燃料	50t/y	2006年/ 運転中	

燃料サイクル政策等の概況

- ❑ 米韓原子力協定(1973年発効)にて米国からの核物質・機器移転の枠組みを策定。**ウラン濃縮には米国の事前同意が必要な他、使用済燃料の再処理は事実上禁止**となっている
- ❑ 米国との協働により、高速炉や再処理技術の開発を実施。高速炉については、米国ANLと共同でNa冷却高速炉(原型炉、150MWe、EBR-IIベース)を開発
- ❑ 再処理技術に関しては、**1990年代からKAERIが乾式再処理技術(Pyroprocess)の開発を進めてきており、2012年より、ウラン試験が可能な実証施設(PRIDE、10tHM/y)を稼働している**
- ❑ トランプ大統領との首脳会談(2025年8月)を起点として、韓国の濃縮・再処理実施に関する議論が再燃し、同年11月の合意文書では、米国は「韓国の平和的利用のための民間ウラン濃縮及び再処理に帰結しつつ手続きを支持する」とする文言が盛り込まれた



韓国の高速炉開発 (出典:KAERI資料※158)



韓国原子力研究院(KAERI)の核燃料サイクルのビジョン
出典:H. Jang & J.H. Park (2024)※178

燃料サイクル政策等の概況

- 燃料サイクル路線を原子力政策の基軸として推進
- 軽水炉向けとしては、MOX燃料製造施設の建設を実施しており、再処理については東海再処理工場（1977-2009）の操業を経て、六ヶ所再処理工場の竣工準備を進めている
- 高速炉研究については1960年代から開発を開始し、我が国最初の高速増殖炉の実験炉常陽は1977年に初臨界を達成。原型炉もんじゅについては、1994年に初臨界を達成したが、翌1995年に発生したNa漏洩事故等を発端に、2016年に政府により廃炉が決定された。
- その後、2016年には原子力関係閣僚会議が「高速炉開発の方針」を策定し、その基本方針を改めて明記。2018年には高速炉開発の「戦略ロードマップ」を定めた。さらに2022年にはこれを改訂し、28年度頃の高速炉実証炉の基本設計・許認可フェーズの開始を目標とした作業計画が具体化された
- 2050カーボンニュートラル実現に向けて、2023年に政府は原子力の最大限の活用と核燃料サイクルの推進を明記した「GX実現に向けた基本方針」を閣議決定
- 上記に示す戦略ロードマップ改訂版に基づき、2026年度頃を目途に高速炉燃料の具体的な検討を進めることとしている

表 日本の再処理施設の状況

施設名	場所	主な対象燃料	処理能力	運転開始/終了	備考
東海再処理工場	茨城県東海村	軽水炉燃料	0.7t/d	1977年/2009年	PUREX法
六ヶ所再処理工場	青森県六ヶ所村	軽水炉燃料	800t/y	竣工準備中	PUREX法

(参考) 世界のPUREX再処理施設(1)

	場所	施設名	対象燃料	処理能力	処理実績	運転開始／終了	備考
フランス	マルクール	UP-1	ガス冷却炉燃料	800t/y	13,330t	1958年/1997年	廃止措置中
	ラ・アーグ	UP-2	ガス冷却炉燃料	800t/y	4,895t	1966年/1987年	廃止措置中
	ラ・アーグ	UP2-400 (UP2-HAO)	軽水炉燃料	400t/y	4,453t	1976年/1998年	廃止措置中(処理実績は1976-1998年の運転による)
	ラ・アーグ	UP2-800	軽水炉燃料	1000t/y	14,254t (2018年までの実績)	1994年/運転中	当初は800t/y、2023年から1000t/y
	ラ・アーグ	UP3	軽水炉燃料	1000t/y	16,579t (2018年までの実績)	1989年/運転中	当初は800t/y、2023年から1000t/y
	ラ・アーグ	AT1	高速炉燃料	1kg/d	1t	1969年/1979年	1979-1997年に除染・解体を実施
	マルクール	APM (TOP)	ガス炉・試験炉・Th燃料	10-20kg/d	11t	1974年/1983年	1983年停止後にAPR(TOR)に改造
	マルクール	APM (TOR)	高速炉・軽水炉燃料	5t/y	22t	1988年/1997年	
イギリス	セラフィールド	B205	ガス冷却炉燃料	1500t/y	44,000t (2010年までの実績)	1964年/2022年	
		FEP	ガス冷却炉燃料	400t/y	90t	1969年/1973年	
		THORP	軽水炉・ガス冷却炉燃料	850t/y	9,331t	1994年/2018年	
	ドンレイ	DFR	高速炉燃料	10t/y		1960年/1978年	
		PFR	高速炉燃料	4t/y		1981年/1998年	廃止措置中
		MTR	材料試験炉	0.1t/y		1958年/1996年	廃止措置中
アメリカ	ハンフォード	PUREX工場	Pu生産炉燃料	10～33t/d	73,100t	1956年/1988年	廃止措置・環境修復実施中
	サバンナ リバー	Fキャニオン	ガス冷却炉燃料	14t/d		1954年/2002年	廃止措置中
		Hキャニオン	高濃縮U、試験炉燃料	14t/d		1955年/運転中	回収運転は終了。固化施設運転中
	アイダホ	ICPP	研究炉燃料等	0.7t濃縮U/y	31.5t	1953年/1992年	廃止措置・環境修復実施中
	ウェストバ レー	NF	軽水炉燃料	300t/y	641t	1966年/1972年	廃止措置中

出典：日本原子力学会 再処理・リサイクル部会 テキスト「核燃料サイクル」 6-6 世界の再処理工場(2013)
松田孝司、特集記事「原子燃料サイクル(3)世界の再処理工場、保全学、Vol.18-4 (2020)

(参考) 世界のPUREX再処理施設(2)

	場所	施設名	対象燃料	処理能力	処理実績	運転開始／終了	備考
ベルギー	モル	ユーロケミック	軽水炉燃料	天然 U:0.4t/d 濃縮 U:0.25t/d	220t	1966年/1974年	廃止措置中
ドイツ	カールスルーエ	WAK	軽水炉燃料	35t/y	210t	1972年/1990年	廃止措置中
ロシア	チェリャビンスク	RT-1	軽水炉、高速炉、研究炉、船舶炉燃料	400t/y		1976年/運転中	
	トムスク	トムスク-7	Pu生産炉燃料		190,000t	1955年/	処理実績は松田氏の論文(2020時点)を引用
	クラスノヤルスク	クラスノヤルスク	Pu生産炉燃料		97,000t	1964年/	処理実績は松田氏の論文(2020時点)を引用
インド	トロンバイ	BARC	PHWR燃料	50t/y		1964年/運転中	PHWR(加圧重水炉)
	タラブール	PREFRE	酸化物燃料	100~ 150t/y		1979年/運転中	
	カルパッカム	KARP	PHWR燃料、FBTR燃料	100t/y		1998年/運転中	FBTR(高速増殖実験炉)
		CORAL	高速炉燃料			2001年/運転中	
		FRFCF	高速炉燃料			2024年/運転中	
中国	甘粛省	酒泉軍事用再処理パイロットプラント	Pu生産炉燃料	0.4t/y		1968年/	
		酒泉軍事用再処理プラント	Pu生産炉燃料			1970年/	
		蘭州再処理プラント	酸化物燃料	50t/y		2006年/運転中	
日本	東海	TRP	軽水炉燃料	210t/y		1977年/2009年	
	六ヶ所	RRP	軽水炉燃料	800t/y	425t(アクティブ試験での処理量)	2026年予定	操業準備中

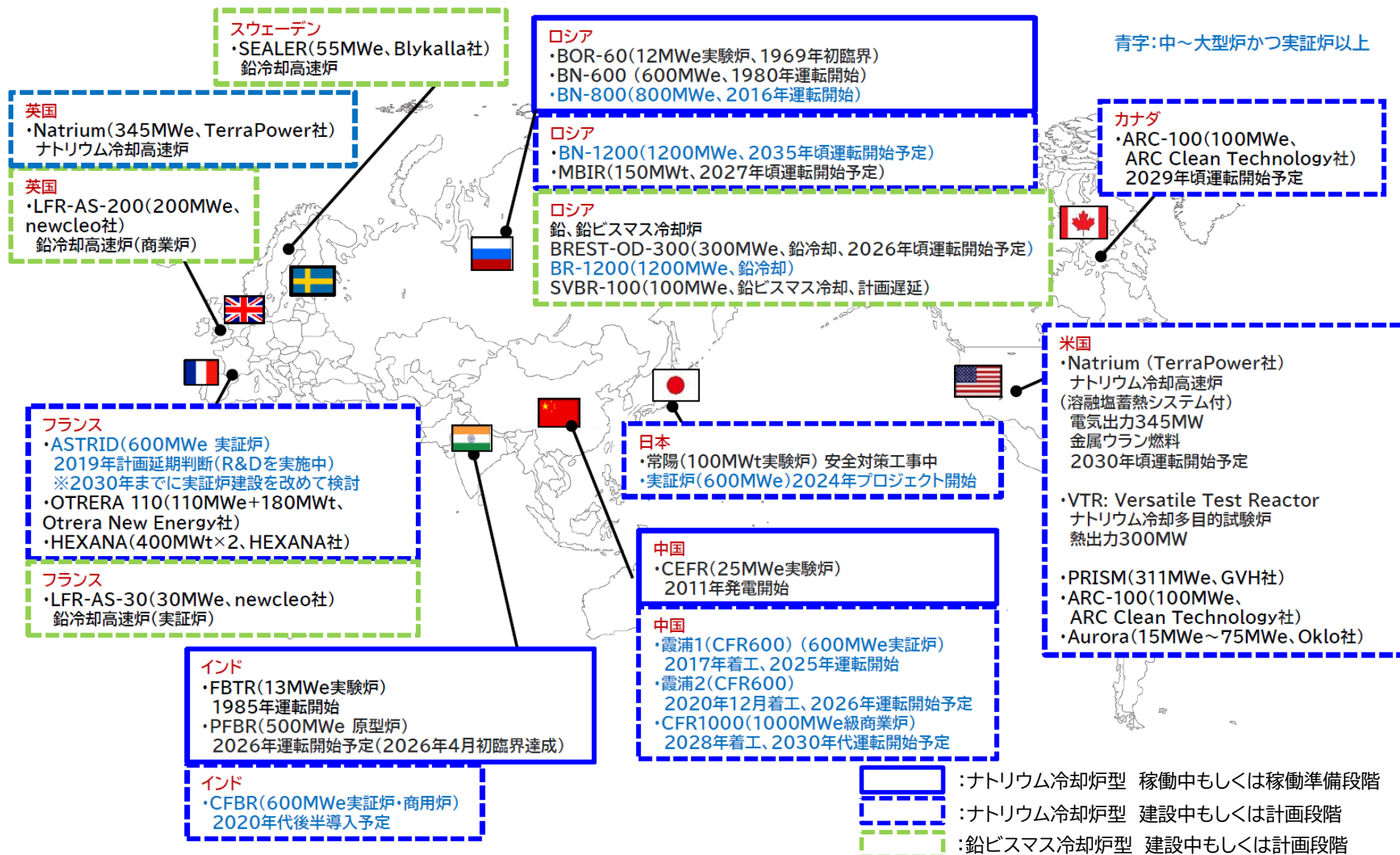
出典：日本原子力学会 再処理・リサイクル部会 テキスト「核燃料サイクル」 6-6 世界の再処理工場 (2013)
松田孝司、特集記事「原子燃料サイクル(3)世界の再処理工場、保全学、Vol.18-4 (2020)

主要国(日本以外)の核燃料サイクル政策のまとめ

国名	再処理実施	概要
露 	◎積極実施	世界最大級のウラン濃縮・転換サービス供給国であり、実質的に完全自給体制を確立。 原子力輸出・核燃料サイクルサービスが国家戦略の一部。世界のウラン需給状況により 軽水炉と高速炉のバランスを柔軟に調整しつつ、 <u>将来的に高速炉中心の閉サイクルを志向</u> 。
仏 	◎積極実施	世界最大の再処理サービス供給国であり、原子力輸出・核燃料サイクルサービスが 国家戦略の一部。 <u>核燃料は原料ウラン以外自給(原料ウランは100%輸入)</u> 。 今世紀末までの高速炉サイクルの導入に向けた具体化の動き。 今世紀後半に閉サイクルを実現するためのロードマップを検討中。
中 	○拡大中	ウラン濃縮・転換サービス供給国であり、原子力技術の国産化・輸出が国家戦略の一部。 <u>核燃料は原料ウラン以外自給(原料ウランは大部分輸入)</u> 。 露と協力して高速炉を開発。
印 	○積極推進	経済発展の拡大と共に原子力利用を拡大。 <u>豊富なトリウム資源による資源自給を 目指した3段階の原子力開発計画</u> を推進中。
米 	△民生用は凍結 も見直しの動き	世界最大級の原子力利用国。民間企業が革新炉開発を進め政府が積極支援。 ウラン資源・濃縮を露に依存してきたが、現在 <u>自給力強化・供給網の再構築を急務</u> に据え る。 <u>リサイクル/再処理利用再評価の動き</u> 。
韓 	×禁止	核燃料は完全に輸入依存。米韓原子力協定上の制約から、 <u>ウラン濃縮には米国の事前 同意が必要なほか、再処理は事実上禁止</u> 。昨年8月、米韓首脳会談以降、米が韓の原子力 潜水艦建造を容認したことも背景に、 <u>米韓原子力協定見直しの議論</u> が活発化。
英 	×商用再処理 終了	<u>西側最大の濃縮ウラン供給サービス国(原料ウランは100%輸入)</u> であり、原子力拡大 政策を掲げ自給力強化を図る。 一方、再処理は2022年に終了し、直接処分政策に転換。

主要国の高速炉開発・導入状況

出典：平田 勝 令和8年第13回原子力委員会定例会議 資料3-2に一部追記



主要国の燃料サイクル施設の状況

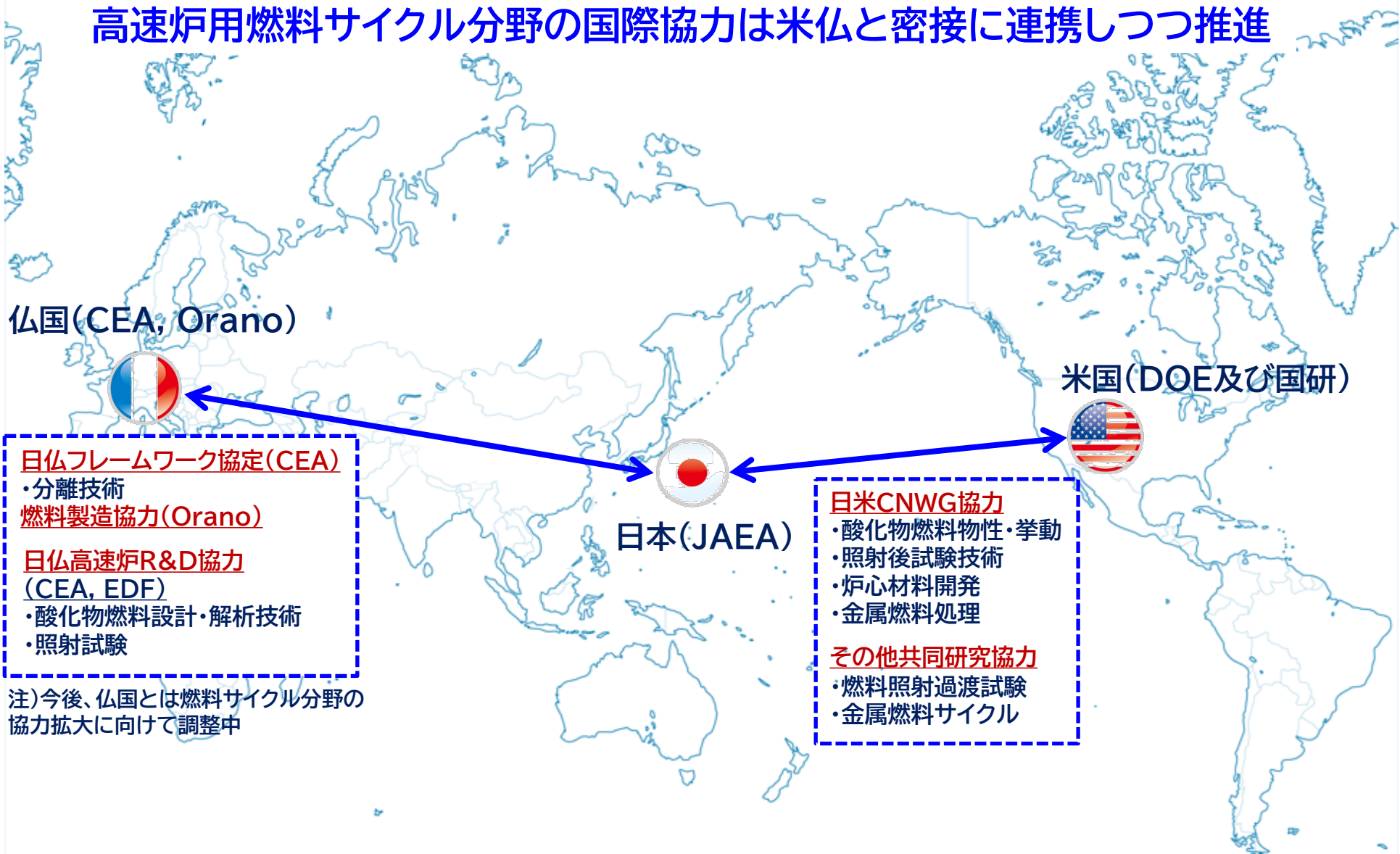


*1: 6頁以降の各国参考文献に基づき作成

*2: BARCニュースレター 2022, <https://www.barc.gov.in/barc.nl/2022/2022010202.pdf>

高速炉サイクル技術に係る国際協力の状況

高速炉用燃料サイクル分野の国際協力は米仏と密接に連携しつつ推進



日本の高速炉開発に係る政策状況

CNの実現に向けたGX戦略

- 2050年カーボンニュートラルの政府方針(2020年10月)を受けて、経済産業省が中心となり、関係省庁と連携して「2050年カーボンニュートラルに伴うグリーン成長戦略」を策定(2021年6月)
- 本戦略では、産業政策・エネルギー政策の両面から、成長が期待される14の重要分野について実行計画を策定。そのエネルギー関連作業の中に原子力が位置付けられている
- 政府によるGX*実行会議で「GX実現に向けた基本方針(案)～今後10年を見据えたロードマップ～」が示され(2023年2月)、脱炭素社会の実現に向けた基本方針がまとめられた。この中では、安全保障に寄与し、脱炭素効果の高い電源を最大限活用するとし、原子力に関しては、バックエンド問題の進展等とともに、安全性の確保を大前提に、高速炉等の次世代革新炉の開発・建設に取り組むことが示されている

* GX: グリーントランスフォーメーション
化石燃料中心の社会・経済・産業構造を、再生可能エネルギー中心の持続可能な構造へと転換する取り組み

- 「高速炉開発の方針(2016年12月:原子力関係閣僚会議)」概要

- ✓ 今後10年程度の開発作業を特定する「戦略ロードマップ」を策定すること、その検討のために「戦略ワーキンググループ」を設置することを決定

- 高速炉開発の意義等

- ✓ 資源の有効利用、高レベル放射性廃棄物の減容化、潜在的有害度低減の3点の意義について政策環境等により優先度が変化。Puマネジメントの観点など、意義も多様化
- ✓ 高速炉の本格的利用は21世紀後半のいずれかのタイミングとなる可能性があり、21世紀半ば頃の適切なタイミングで現実的なスケールの高速炉の運転開始が期待される

- 今後10年程度の各プレイヤーの役割

- ✓ ①国による方向性の提示、②電気事業者等ステークホルダの関与、③技術成熟度に応じた資金支援(国)、④研究開発基盤の提供(JAEA)、⑤メーカーの創意工夫を活かしたイノベーションの実現、⑥技術評価と選択(国、JAEA、電気事業者)

- 今後の開発の作業計画

- ✓ ステップ1:競争の促進
- ✓ ステップ2:絞り込み・重点化
- ✓ ステップ3:今後の開発課題及び工程についての検討

< 高速炉の開発目標 >

①安全性・信頼性、②経済性、③環境負荷低減性、④資源有効利用性、⑤核拡散抵抗性、⑥柔軟性・その他市場性

< 技術絞り込みを実施する上での評価軸 >

①技術の成熟度と必要な研究開発、②実用化された際の市場性、③具体的な開発体制の構築と国際的な連携体制、④実用化する際の規制対応、⑤その他

< 今後の開発の作業計画 >

- 2023年度夏:2024年度以降の概念設計の対象となる炉概念の仕様と中核企業を選定
- 2024年度～2028年度頃:実証炉の概念設計・必要な技術開発

この期間の中では、**2026年度頃を目途に**研究開発成果・国際協力を通じて知見を得つつ、これらを踏まえて**燃料技術の具体的な検討**を行うとしている。



燃料技術の具体的な検討 → 高速炉燃料(MOX or 金属)の選択判断

- 2028年度頃:炉の概念設計の結果と制度整備の状況等を踏まえたステップ3への移行判断

燃料サイクル技術開発に係る原子力機構の役割

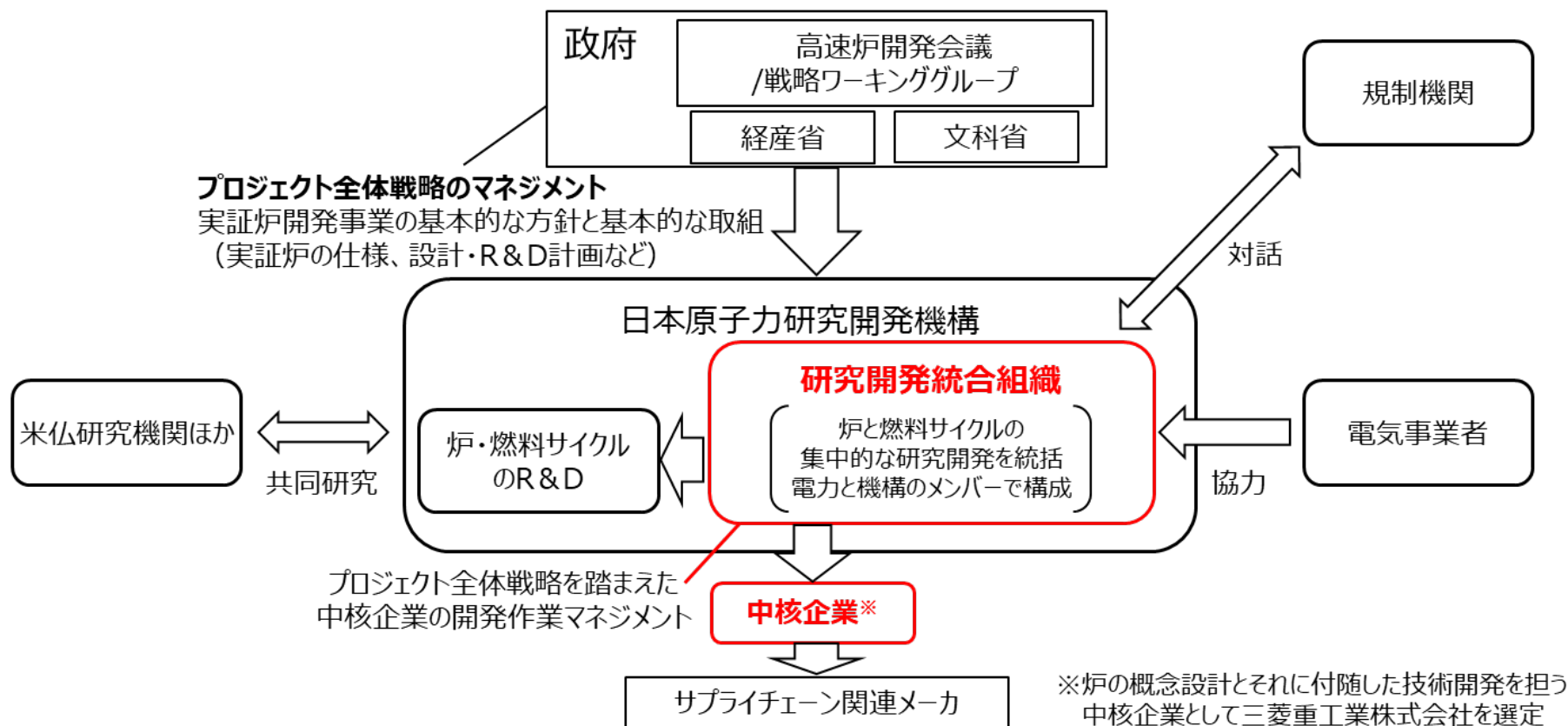
- サイクル技術は研究開発のために**大量のプルトニウムを扱い、ホット試験が必要となる等、民間が主体的に開発を進めるにはハードルが高い**ことから、当面は軽水炉サイクルとの共通技術を含めて、原子力機構がステークホルダーとの連携を図りつつ、開発の中心的役割を果たす必要がある。
- 原子力機構及び民間が研究開発を実施していくためには、原子力機構が有する、**常陽、ナトリウム試験施設、ホット試験施設等のハード、及び、解析評価技術や規格基準類の基礎データといったソフトの開発基盤を、必要な時期に利用可能とする維持・整備を行う**ことも原子力機構の役割である。また、**原子力分野の人材育成についても、大学等とともに担う**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」一部抜粋し、加筆



高速炉開発の体制

- 高速炉開発の体制は下図のとおり。
- 実施者：JAEA(研究開発統合組織)、三菱重工業株式会社(中核企業)



高速炉燃料の具体的検討に係る技術評価

高速炉燃料の具体的検討に必要な評価軸

本年度内に計画されている高速炉燃料の検討では、高速炉の実証炉燃料として**MOX燃料又は金属燃料の選択判断**を想定

<燃料判断のための評価軸>

- ① 技術的実現性
- ② 安全性・信頼性
- ③ 経済性
- ④ 環境負荷低減性
- ⑤ 資源有効利用性
- ⑥ 核拡散抵抗性
- ⑦ 柔軟性その他市場性

左記の7つの評価軸をもとに、MOX及び金属燃料サイクルの性能を評価し、比較を行う

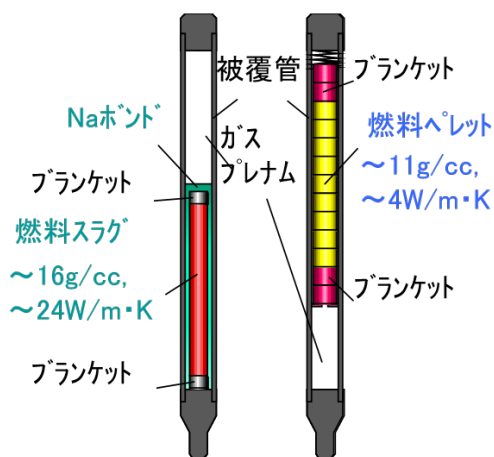
これまでの技術開発成果及びそれらを導入した将来想定されるサイクル施設の概念検討結果をもとに各性能評価実施中

※ 上記の評価軸は高速炉開発のロードマップ改訂版に記載された技術の絞り込みを行う上での評価軸を参考とした

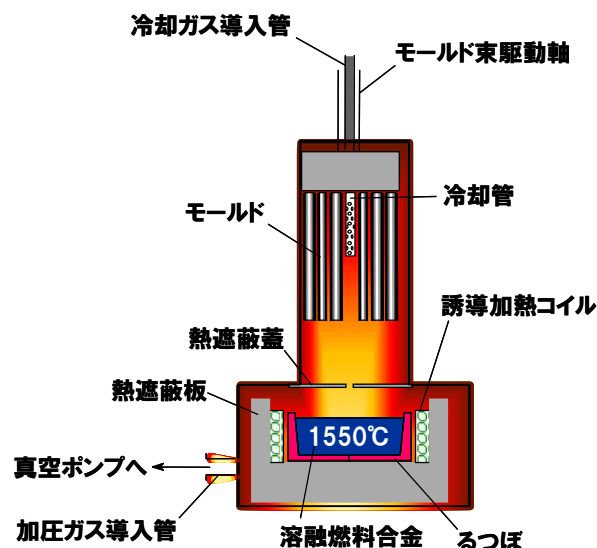
MOX燃料と金属燃料サイクル技術の主な違い

分野	MOX燃料サイクル	金属燃料サイクル
炉心・安全	- MOX燃料はペレット状のU+Pu酸化物の焼結体 - セラミックスのため、熱を伝えにくい - 融点は約2,700℃	- 金属燃料は棒状のU+Pu+Zrの合金(高密度) - 合金のため、熱を伝えやすく、冷却がしやすい - 融点は約1,200℃
燃料製造	- U,Puの混合粉をペレット形状にプレス成型して焼結 - 燃料製造の実績は豊富(MA含有燃料製造には遠隔操作技術が必須。この点は金属側も同様)	- U,Pu,MA合金をるつぼで溶融し、鋳型に射出して鋳造 - 米国で17,000本の燃料を遠隔製造した実績有 - 射出鋳造はArガスの不活性雰囲気下で実施
再処理	- 使用済燃料を硝酸に溶解し、U,Pu,MAを抽出分離する湿式再処理を採用 - 連続処理で、スケールメリットは大きい - Puを単離しない共抽出(U-Pu)は原理的に可能	- 使用済燃料を溶融塩に溶解し、電解精製でU,Pu,MAを回収する乾式再処理を採用(Ar雰囲気対応) - バッチ処理であり、スケールメリットは小さい - 原理的にPuの単離は困難(核拡散抵抗性大)

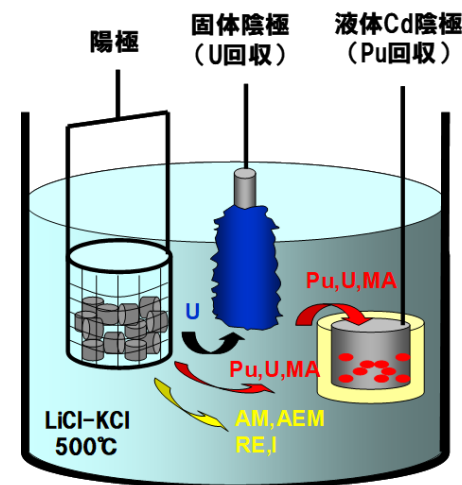
U-Pu-Zr合金 (U,Pu)O₂セラミックス
金属燃料ピン 酸化物燃料ピン



燃料ピンの構造の違い



金属燃料製造の概念図



※ 図は電中研
殿から提供

AM: アルカリ金属
AEM: アルカリ土類金属
RE: 希土類
MA: マイナーアクチノイド

金属燃料用乾式再処理
の概念図

高速炉用MOX燃料製造技術における主な開発項目

脱硝・造粒・転換一元処理 (FaCT)

再処理側から受入れた原料溶液から富化度調整済の流動性の良いMOX粉末を製造する技術

ダイ潤滑成型 (FaCT)

金型壁面に潤滑剤を噴霧塗布することにより、潤滑剤を混合することなく、MOX粉を直接成型する技術

焼結・O/M調整 (FaCT)

熱処理により、MOXペレットのO/Mを1.97以下に調整し、高燃焼度時の被覆管内面腐食を抑制する技術

セル内遠隔保守 (FaCT)

セル内のMOX燃料製造設備を、マニプレーター等を用いて遠隔で保守・補修する技術

MA燃料取扱 (FaCT)

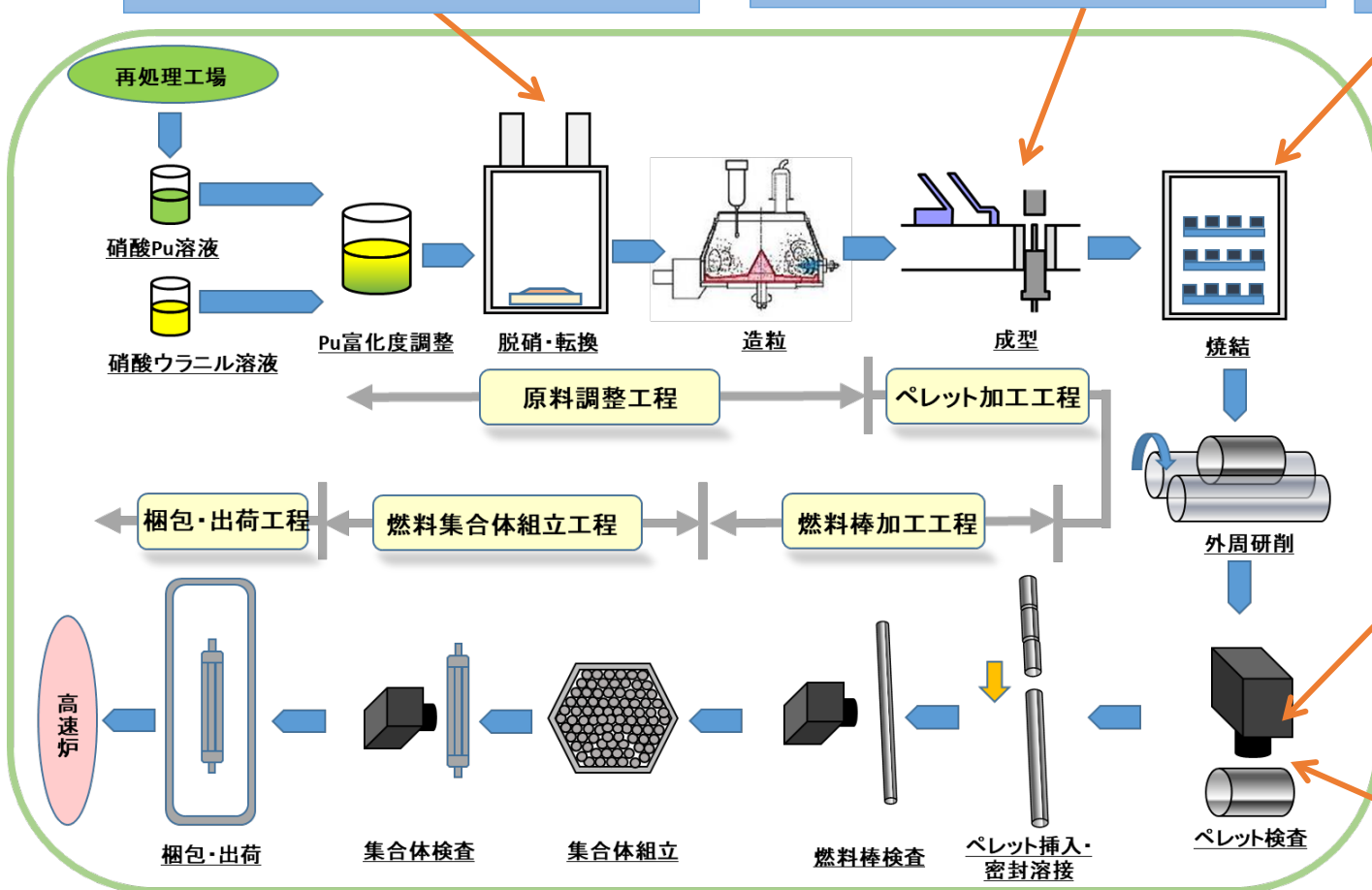
発熱の大きいMA含有MOX燃料を制限温度以下に冷却する技術

乾式リサイクル

ペレット検査で不合格となったペレットを粉砕し、原料粉末として再生する技術

中空ペレット検査

製品ペレットの検査（寸法、重量、外観等）を行う技術。中空ペレットの内径検査技術の開発が課題



主なMOX燃料製造技術の開発状況と課題

脱硝・転換・造粒技術 TRL=5【MA含有MOX燃料】

○ FaCT研究では機器開発、工学規模試験(コールド及びホット)により性能評価を実施し、技術の成立性を確認した。一方、保管後のMOX造粒粉の性状劣化によりダイ潤滑成型できない事象が発生。MA-MOXでは造粒粉の劣化が加速する可能性があり対策が必要。

○ 信頼性の高いシステムの構築のため、大容量・大出力脱硝装置の開発、簡素化ペレット法に適した造粒技術の開発、セル内遠隔燃料保守に対応した機器設計が課題。

燃料被覆管内面腐食防止技術・発熱対策 TRL=5【高燃焼度対応・MA含有MOX燃料】

○ 高燃焼度化に伴う被覆管の内面腐食を低減するには、燃料ペレット由来の酸素による被覆管の酸化抑制が重要である。低O/M比(1.97以下)調整・維持、腐食低減策として燃料要素内に酸素吸収材を装荷する酸素ゲッター法の検討が必要。

○ 実証炉燃料及び燃料要素に適した酸素ゲッター材(Ti)の装荷方法の検討を進め、酸素ゲッターによる内面腐食対策の有効性確認試験(照射試験)の実施に資する各種データを取得する。

○ 粉末およびペレットの制限温度は高温での酸化挙動からの外挿による粗い推定であるため、粉末容器およびペレット保管容器は、ハンドリング性を考慮した再設計が必要。

○ MAによる発熱対策も重要な課題であり、MA含有MOXの酸化の問題や保管容器・保管設備の具体化が必要。

中空ペレット量産技術開発 TRL=5【高除染MOX・MA含有MOX燃料】

○ MA燃料への適用等を考慮して、中空ペレット検査装置の簡素化とAIを導入した装置高度化、並びに遠隔操作による装置の保守補修を可能とした中空ペレット検査装置の開発が不可欠。

○ セル内での量産化に向けたシステム開発が必要。

高速炉用MA含有MOX燃料製造技術 (簡素化ペレット法)

原料溶液*

溶液によるPu富
化度調整*

脱硝・転換
・造粒*

ダイ潤滑成型

焼結・O/M調整

研削・ペレット検査

燃料要素組立

燃料集合体
組立・検査

高速炉燃料集合体



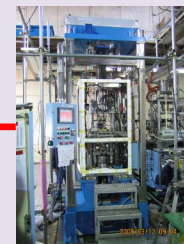
工学規模ホット試験



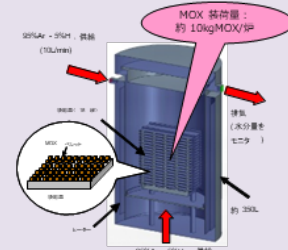
工学規模コールド試験
(5kg/バッチ)



工学規模MOX試験
(1kg MOX/バッチ)



工学規模MOX試験



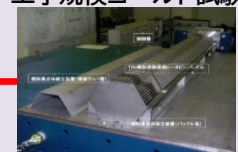
工学規模のバッチ式焼結炉



工学規模MOX試験



工学規模コールド試験



工学規模コールド試験

セル内遠隔保守

発熱対策

*:再処理施設内に整備

高速炉MOX再処理分野における主な開発対象

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

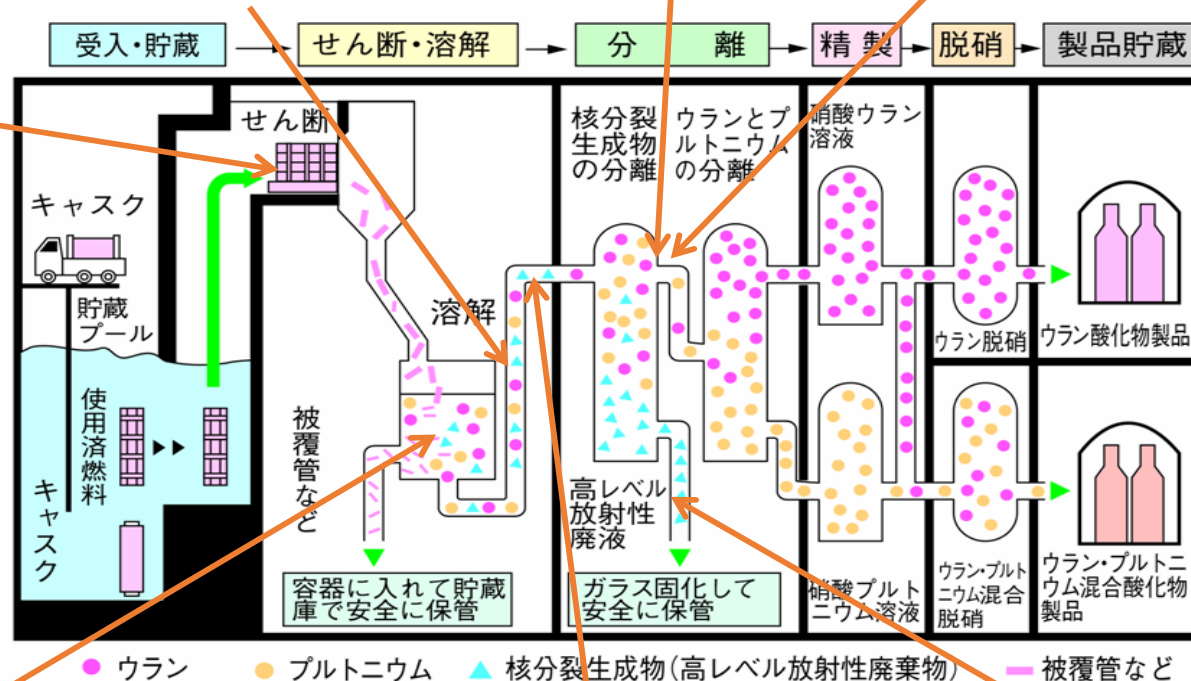
抽出機器 (FaCT)

小型で高性能を有する遠心抽出器の開発



解体・せん断 (FaCT)

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 (FaCT)

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

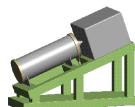
溶解 (FaCT)

Pu含有量の高い高速炉燃料の溶解技術



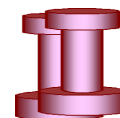
晶析 (FaCT)

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 (FaCT)

高レベル放射性廃液からマイナーアクチニド(MA)を分離回収する技術



MOX燃料の湿式再処理技術は、すでに商用化されているPUREX法をベースとしている

主なMOX再処理技術の開発状況と課題

集合体解体技術 TRL=6

- FaCT研究で機械式集合体解体(ラッパ缶の除去)システムを開発、工学規模試験(コールド)により性能評価を実施し、一連の集合体解体操作の可能性を確認。切断操作の安定性、切断時間の短縮化等が課題

燃料溶解技術 TRL=5

- FaCT研究で開発を進めてきた回転ドラム式の連続溶解槽を対象に、溶解プロセスデータの拡充とともに、装置の実用化に向けてスケールアップ性の評価及び工学的信頼性の向上が課題

清澄システム技術 TRL=5

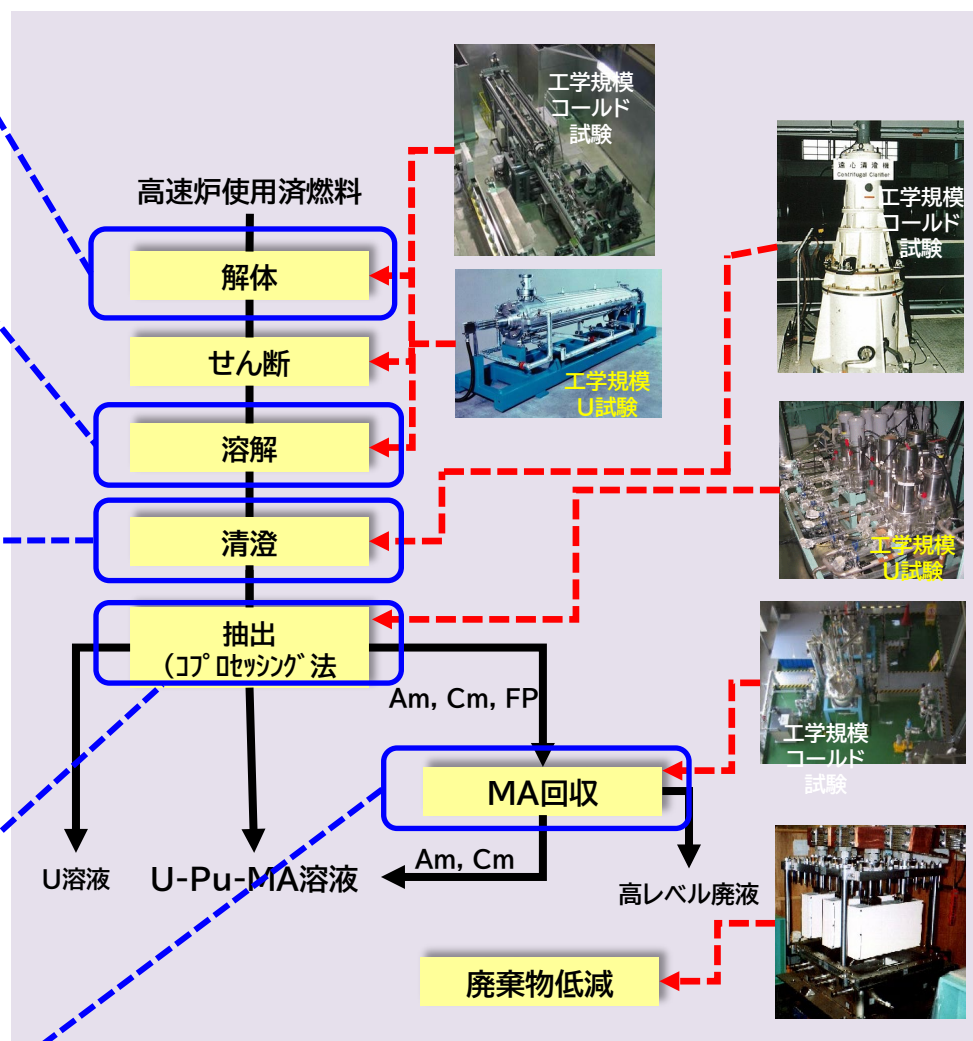
- 清澄性能の向上を目的とした遠心清澄+フィルタのハイブリッドシステム開発
- 小規模スケールでコールド模擬環境での清澄試験により清澄性能の向上効果を確認。臨界管理を確保した実用規模機構造の具体化、駆動部の耐久性、セラミックフィルタの交換頻度の評価が主な課題

コプロセッシング技術 TRL=5

- PUREX法の高度化技術として、LF移行期用に軽水炉及び高速炉SF処理に対応可能なU-Pu-Np共抽出技術の開発
- 分離条件の最適化・実証(Zr及びTcの除染係数やNpの共回収性能の向上)や大型化を前提とした「中性子吸収剤内封型」遠心抽出器での流動性及び抽出性能の担保、並びに保守方法の確立が課題

MA分離回收技術 TRL=5

- FaCT研究では抽出クロマトグラフィを対象に、MA分離目標を達成可能なフローシート選定、安全性評価、遠隔操作性を考慮した機器開発を実施
- FaCT以降も開発を継続し、フローシートの改良、更なる安全性向上に向けた対策、放射線環境下での安定な運転に向けたシステム開発を実施
- 廃棄物量低減や異常時対策の詳細化、自動運転システムの実証等が課題



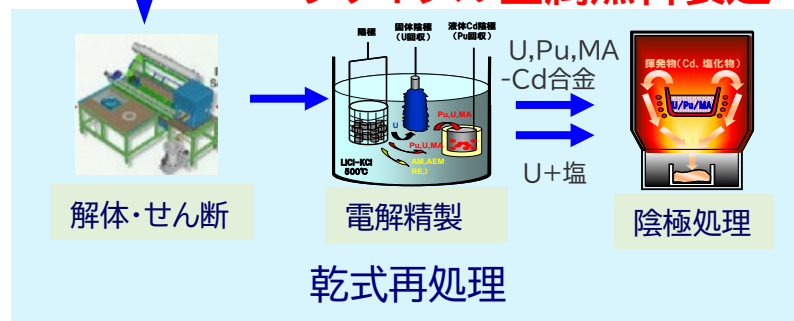
金属燃料サイクル技術の概要(燃料製造)

- 燃料体としてU-Pu-Zr合金を使用。Zrは照射中の安定性維持と融点上昇のため10%程度添加
- 燃料体は長さ約30~40cmのため、「燃料スラグ」と呼ぶ。内径約7mmの被覆管に外径約6mmの燃料スラグを入れる。スミア密度(面積割合)≒75%
- 燃料体とNaは反応しないので、被覆管と燃料スラグの間にNaを入れる(ボンドNa)

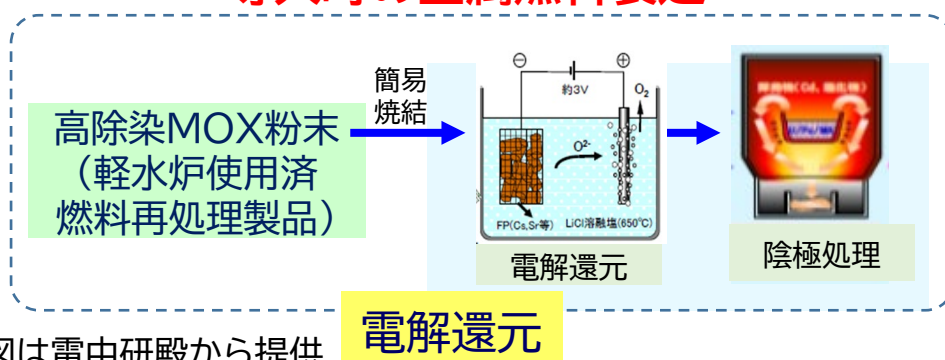
金属燃料高速炉

使用済金属燃料

<リサイクル金属燃料製造>



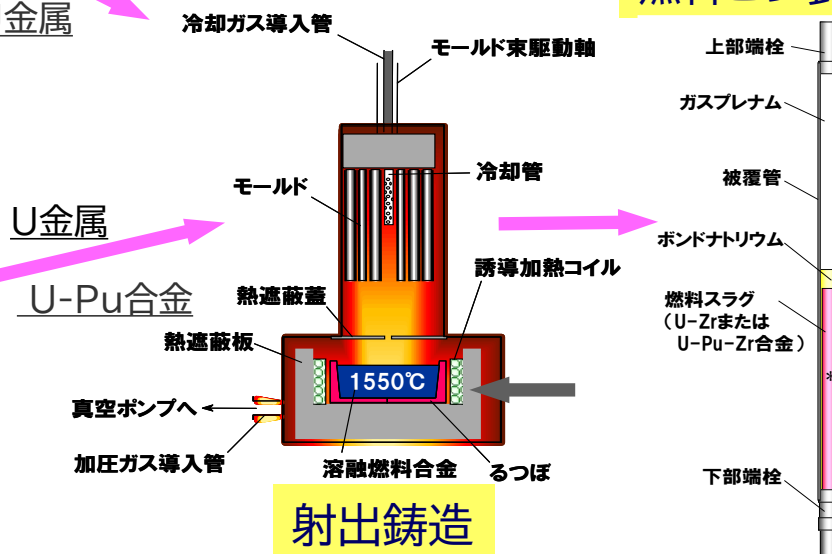
<導入時の金属燃料製造>



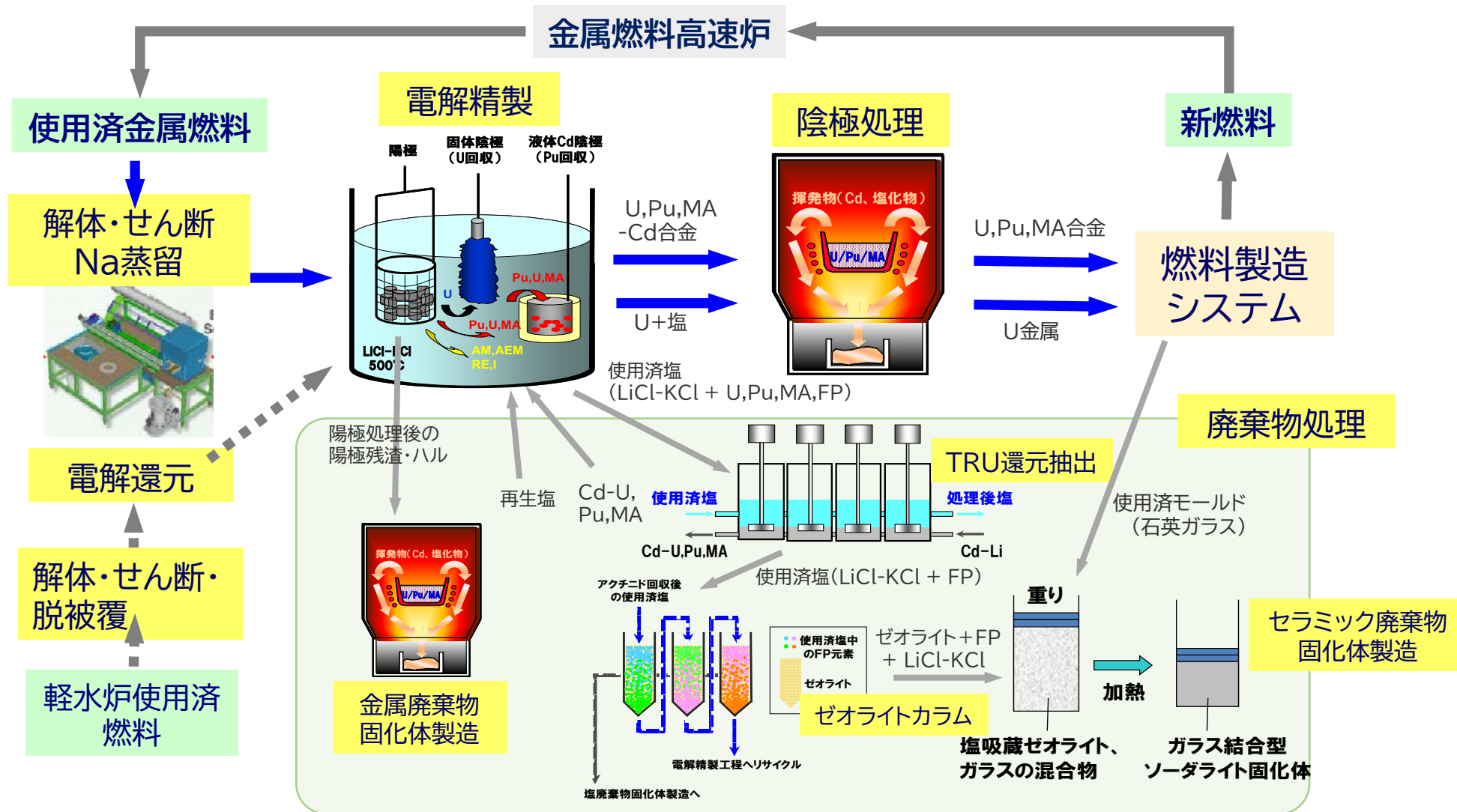
新燃料

集合体組立

燃料ピン製造



金属燃料サイクル技術の概要(乾式再処理)



- 各工程はバッチ処理であり、電解還元技術を適用することで軽水炉使用済燃料に対する乾式再処理の適用も可能

米国における金属燃料サイクル開発の経緯

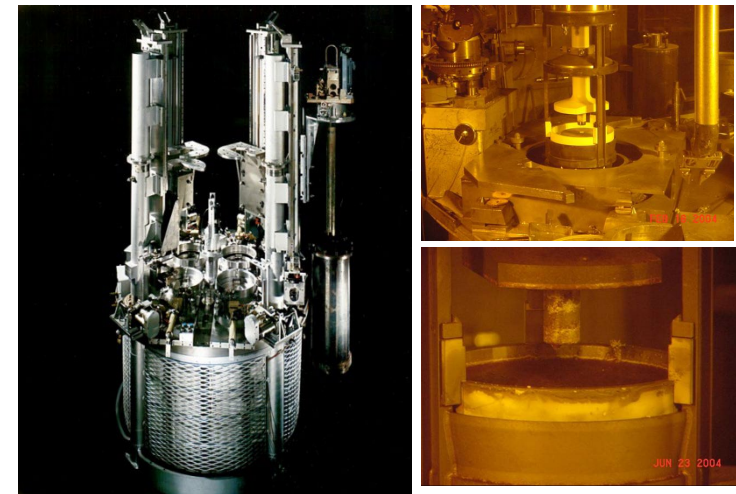
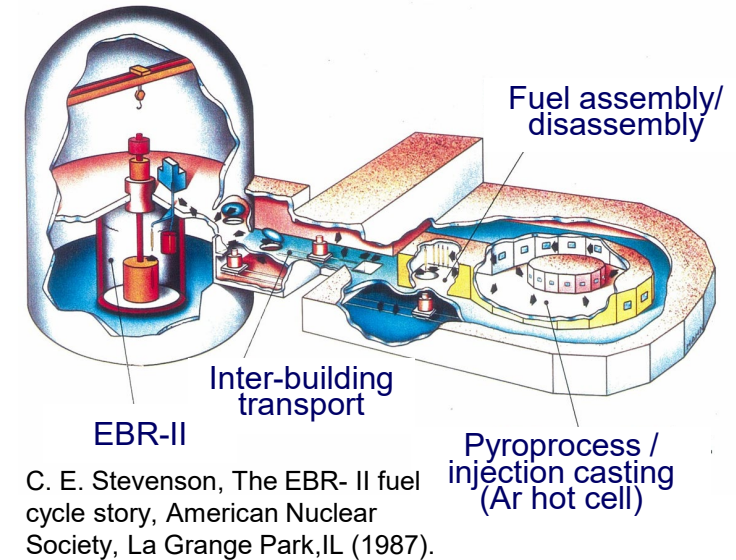
➤ 金属燃料リサイクルの実証(1960年代)

- ✓ 約34,500本のウラン合金燃料をホットセル内で遠隔で製造し、隣接のEBR-IIに再装荷。ただし、燃焼度は1.2at.%と低い。
- ✓ 最高4回リサイクル、原子炉から取り出して最短4-6週で再装荷。

➤ IFRプログラム(1984-1994)

- ✓ EBR-II固有安全性実証試験
- ✓ 10,000本以上のU-Zr合金燃料と600本以上のU-Pu-Zr合金燃料をEBR-IIとFFTFで照射、最高19 at.%の燃焼度を達成。
- ✓ 工学規模電解精製試験、実験室規模Pu試験
- ✓ 電解精製や陰極処理など実規模機器の開発

➤ 現在は、MA含有合金のATR照射試験、使用済金属燃料の乾式再処理、酸化物燃料の電解還元試験などを継続中。



主な金属燃料製造技術の開発状況と課題

射出鑄造技術 TRL=6

- 国内の実規模射出鑄造試験の実績を踏まえ、遠隔操作性、保守性、信頼性を確保した射出鑄造装置を開発
- 炉体空冷の促進、自動運転が課題であり、実規模装置による、遠隔自動化の検証を行い、設計を完了する

ピンプロセス技術 TRL=5

- 米国での実規模での操業実績を踏まえて、自動化を考慮したピンプロセス装置基本構造を具体化した。
- 自動化性能、保守性の検証が課題であり、実規模試験装置によるコールド試験によって遠隔操作性、保守性、信頼性の検証を行い、設計を完了する

Naボンディング技術 TRL=5

- 国内での実験室規模装置の開発及び米国での実規模での操業実績を踏まえて、Naボンディング装置の基本構造を開発
- 燃料ピンの量産化対応、自動制御、遠隔操作、保守性、信頼性が課題であり、実規模装置によるコールド試験によって検証を行い、設計を完了する

電解還元技術 TRL=6

- 国内の実規模での電解還元試験の開発実績を踏まえて、有望な陽極材料を選定し、電解還元装置の基本構造を確立。
- 電極や構造材の腐食性の評価が課題であり、実規模装置による電解性能の検証、遠隔操作性、保守性、信頼性を確保を行い、設計を完了する

※ 金属燃料サイクルは米国からの情報を加味してTRL値を再評価

金属燃料製造技術

軽水炉使用済燃料の
湿式再処理製品

使用済金属燃料の
乾式再処理製品

MOX粉

U金属(購入品)
Zr金属(購入品)

U-TRU合金

U金属

プレス成型

ペレット焼結

電解還元

陰極処理

U-Pu合金

射出鑄造

スラグ処理・検査

燃料ピン組立

Naボンディング

燃料ピン検査

燃料集合体組立

金属燃料集合体

新燃料輸送



射出鑄造装置
T. Ogata & T. Tsukada, Global 2007, Boise, Idaho, USA, Sep. 9-13, 2007.



Naボンディング装置

C. E. Stevenson, The EBR- II fuel cycle story, American Nuclear Society, La Grange Park, IL (1987).

主な金属燃料乾式再処理技術の開発状況と課題

解体・せん断・Na除去技術 TRL=6

- FaCTでの解体システムの開発及び米国での運転実績を踏まえて縦置き集合体解体機を開発。実規模装置により遠隔操作性、保守性、信頼性を検証。
- 米国での開発実績を踏まえてNa除去試験装置の基本構造を選定。炉体空冷の改善、FP挙動把握等が課題であり、実規模装置等による検証等を行い、設計を完了する。

電解精製技術 TRL=6

- 国内での工学規模開発の実績及び米国での運転実績を踏まえて、電解精製装置の基本性能を確認、TRU回収は実験室規模のCd抽出装置により性能を確認した。
- 実規模での遠隔操作性、保守性、信頼性の確保が課題であり、実規模コールド試験により検証を行い、設計を完了する。

陰極処理技術 TRL=6

- 日米の陰極処理装置開発・遠隔運転実績を踏まえて陰極処理装置を開発。
- 実規模での遠隔操作性、保守性、信頼性の確保が課題であり、
- 処理後の炉体冷却速度向上による処理時間の短縮、つぼの繰り返し使用回数の増大が課題であり、実規模装置を用いたコールド試験により、遠隔操作性、信頼性等を検証し、設計を完了する。

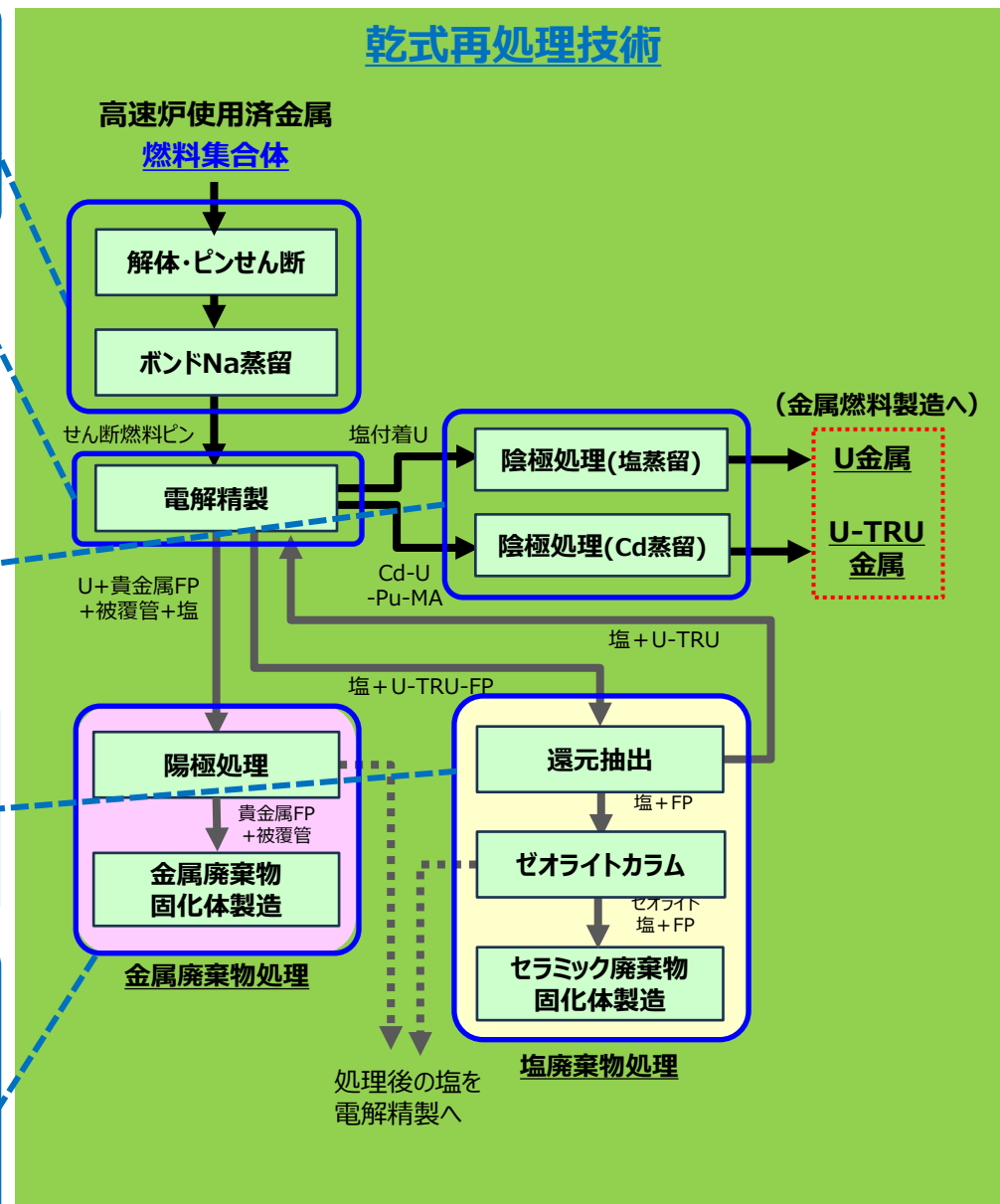
塩廃棄物処理技術 TRL=5

- 国内での開発により、U、TRU及び希土類の還元抽出技術、ゼオライト吸蔵技術及びCd-Li製造技術のプロセス性能を検証し、各装置の基本構造を具体化した。
- 各装置のシステム性能の検証が課題であり、模擬物質を用いた実規模試験により、遠隔操作性、保守性、信頼性を検証し、設計を完了する。
- 地層処分時の安全評価手法を構築、セラミックス廃棄物固化体の安定性を評価。

金属廃棄物処理技術 TRL=5

- 国内での開発により、陽極処理技術・ドロス処理技術及びCdCl₂製造技術のプロセス性能を検証し、各装置の基本構造を具体化した。
- 各装置におけるシステム性能の検証が課題であり、模擬物質を用いた実規模試験により、アクチニド残留量や処理能力等を確認、実際の処理対象物（陽極残留物やドロス等）の移送を考慮したシステム試験では、遠隔操作性、保守性、信頼性を検証し、装置設計を完了する。
- 地層処分時の安全評価手法を構築、金属廃棄物固化体の安定性を評価。

乾式再処理技術



おわりに

- ✓ 現在は日本その他、仏国、露国、印国、中国が燃料サイクル政策を推進しており、いずれも閉サイクルの実現に向けて、高速炉燃料サイクルの研究に取り組んでいる。他の国々についても、米国、加国、英国等で高速炉建設の計画を有するなど、世界的に高速炉導入の動きがある
- ✓ 国際協力の状況については、MOX燃料サイクルでは米仏と連携し、燃料設計・製造や分離技術等に係る協力を進めており、金属燃料サイクルについては、過去に技術の実証を進めてきた米国と燃料処理、廃棄物処理等の協力を実施中である
- ✓ 我が国においては、高速炉開発の戦略ロードマップが2022年に改訂され、2023年から高速炉実証炉開発事業が進められている。ロードマップ改訂版をふまえ、本年度には高速炉燃料の具体的検討(MOX燃料又は金属燃料の選択判断)が計画されている。JAEAでは燃料判断に必要な技術評価を進めている