

今後の研究開発の進め方



令和3年9月3日

国立研究開発法人 日本原子力研究開発機構

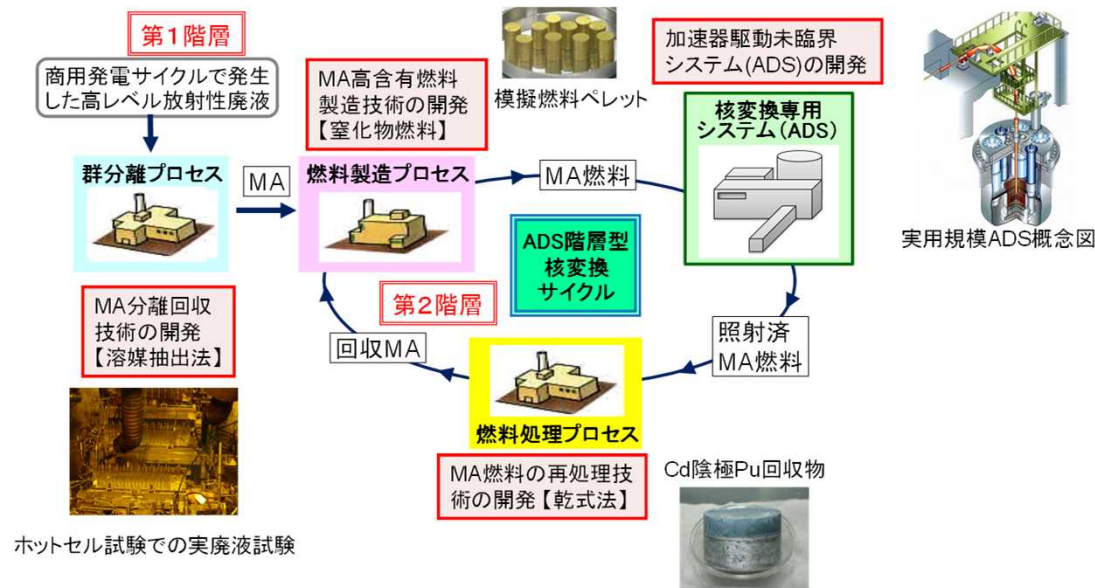
ADSの研究開発目標

第5次エネルギー基本計画（平成30年7月）

放射性廃棄物を適切に処理・処分し、その**減容化・有害度低減のための技術開発を推進する**。具体的には、**高速炉や加速器を用いた核種変換**など、放射性廃棄物中に長期に残留する放射線量を少なくし、放射性廃棄物の処理・処分の安全性を高める技術等の開発を国際的なネットワークを活用しつつ推進する。



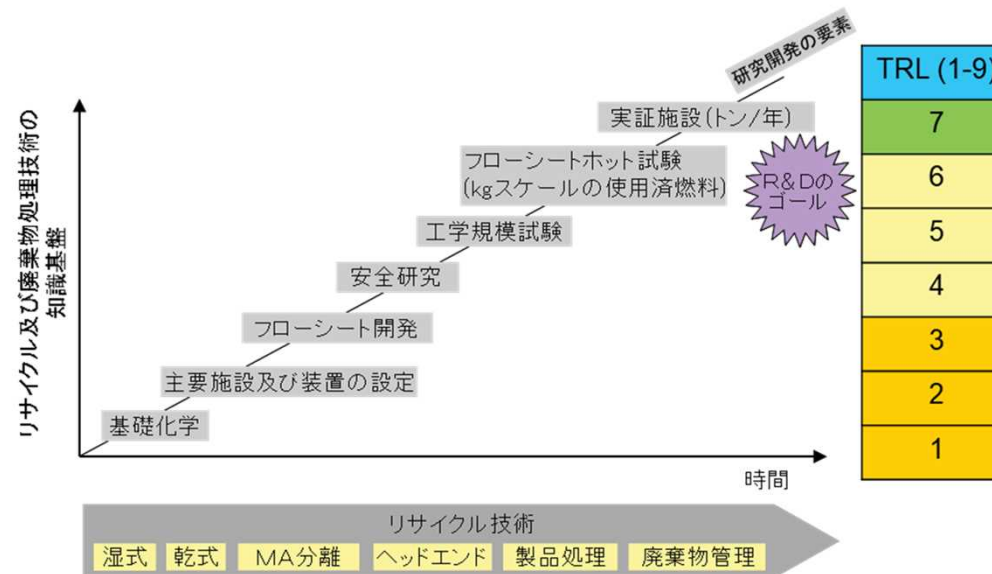
目標: 加速器駆動システム(ADS)を用いた階層型分離変換システムの実現性、実用性等の判断に向けて、システムを構成する各要素に対する技術開発・技術基盤の確立



1. MA分離、 MA含有窒化物燃料(製造、乾式処理)

研究開発段階と研究開発課題: TRL評価

- 分離プロセス(湿式、乾式)およびMA含有燃料に対するTRL評価(OECD/NEA専門家会合)を参考に、研究開発の現状を評価し、今後の研究開発課題を抽出
 - ✓ 参考資料1: 分離プロセス(State-of-the-Art Report on the Progress of Nuclear Fuel Cycle Chemistry, 2018)
 - ✓ 参考資料2: MA含有燃料 (State-of-the-Art Report on Innovative Fuels for Advanced Nuclear Systems, 2014)
- 概念実証(TRL1-3)、原理実証(TRL4-6)、性能実証(TRL7-9)までを使用する物質と実施する項目とのマトリクスを用いた評価を実施。
- 大規模な施設が必要な性能実証の実施可否を判断するためのTRL6が研究開発目標。



分離プロセスの開発段階(参考資料1:Fig.4.1)



MA分離技術のTRL評価: OECD/NEA

- OECD/NEAの専門家会合(EGFRC)において、各国で開発中の**主要なMA分離プロセスのTRL評価を実施**。
- MA分離プロセスの研究開発は、実験研究に利用する物質、研究開発の進捗内容、及びスケールなどを勘案し、下記のような表としてとりまとめ。
- 参考文献1では、2011年までの文献に基づき、SELECTプロセスの原型であるTDdDGAプロセスについてTRL3-5、抽出クロマトグラフィはTRL4-6と評価。
- SELECTプロセスは、研究開発が進展。SELECTプロセスと抽出クロマトグラフィはどちらも実廃液による実証を達成し、**プロセスフローシートの研究開発はTRL6到達**。
- 機器開発、モデル開発などはTRL5の部分がある。

OECD/NEA EGFRCにおける分離プロセスのTRL定義
(参考文献1:Table.4.1)

TRL		定義
9	実用開発段階	工業スケールにおける数年間の運転。MA燃料及びターゲットの処理及びリサイクル
8		フルスケールのプラントの試験的な条件における実証
7		プロトタイプ分離システムによる実証
6	工学実証段階	パイロットスケールの機器及びプロセス検証。使用済燃料を使用した ホット試験によるプロセスフローシートの実証
5		ベンチスケールによる機器及びプロセスの検証。プロセスモデルの開発。
4		実験室条件における機器及びプロセスの検証。
3	原理実証段階	実験室スケールにおける原理実証、基礎データ取得
2		技術の実現及び適用に関する研究
1		初期コンセプト提案、基本概念の確立

実廃液を用いた小規模連続抽出試験を通じた性能確認により、この開発段階に到達と判断。

実用炉使用済燃料溶解液				TRL 8-9
照射済燃料・ターゲット試料		TRL 6-7	TRL 7	
模擬燃料溶解液	TRL 3-4	TRL 4-5	TRL 6	
主要元素含有溶液又は部分的模擬溶液	TRL 2-3	TRL 3-4		
コールド又はトレーサー試料	TRL 1-2			
	基礎研究	フローシート試験	パイロット機器開発・安全研究	実用規模運転

SELECTプロセスのTRL到達度 (参考文献1:Table.4.26)

実用炉使用済燃料溶解液				TRL 8-9
照射済燃料・ターゲット試料		TRL 6-7	TRL 7	
模擬燃料溶解液	TRL 3-4	TRL 4-5	TRL 6	
主要元素含有溶液又は部分的模擬溶液	TRL 2-3	TRL 3-4		
コールド又はトレーサー試料	TRL 1-2			
	基礎研究	フローシート試験	パイロット機器開発・安全研究	実用規模運転

抽出クロマトグラフィのTRL到達度 (参考資料1:Table.4.34)

MA分離：今後の研究開発課題

- 新規開発の抽出剤・吸着材を用いた分離プロセスを構築。実廃液試験により技術的成立性を実証(TRL6)。
- 今後は、JAEAの現有施設を最大限活用して、性能実証(準工学規模)の実施可否に必要な課題(TRL6に相当)に対応した研究開発を実施。
 - より有効なMAの分離手法開発、安全評価に必要な基礎基盤データの取得
 - 工学規模への展開に必要な化学工学機器の開発

- 上記の各研究開発には、計算科学を積極的に適用。ミクロスケールの抽出剤の分子設計、分離過程の理解から、マクロな工学機器及びプラント設計、安全評価まで有効に活用するとともに必要なコードを開発

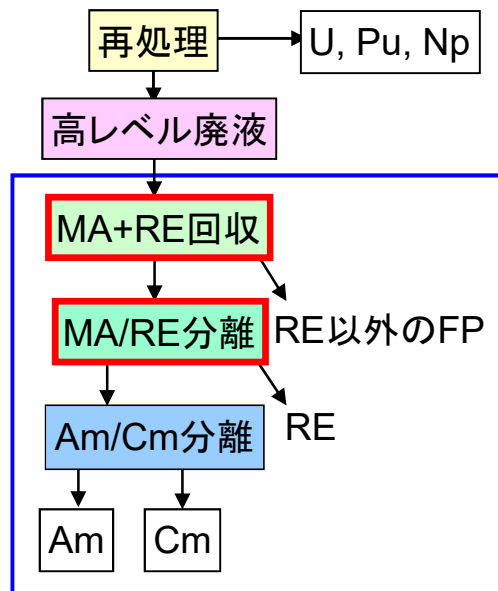
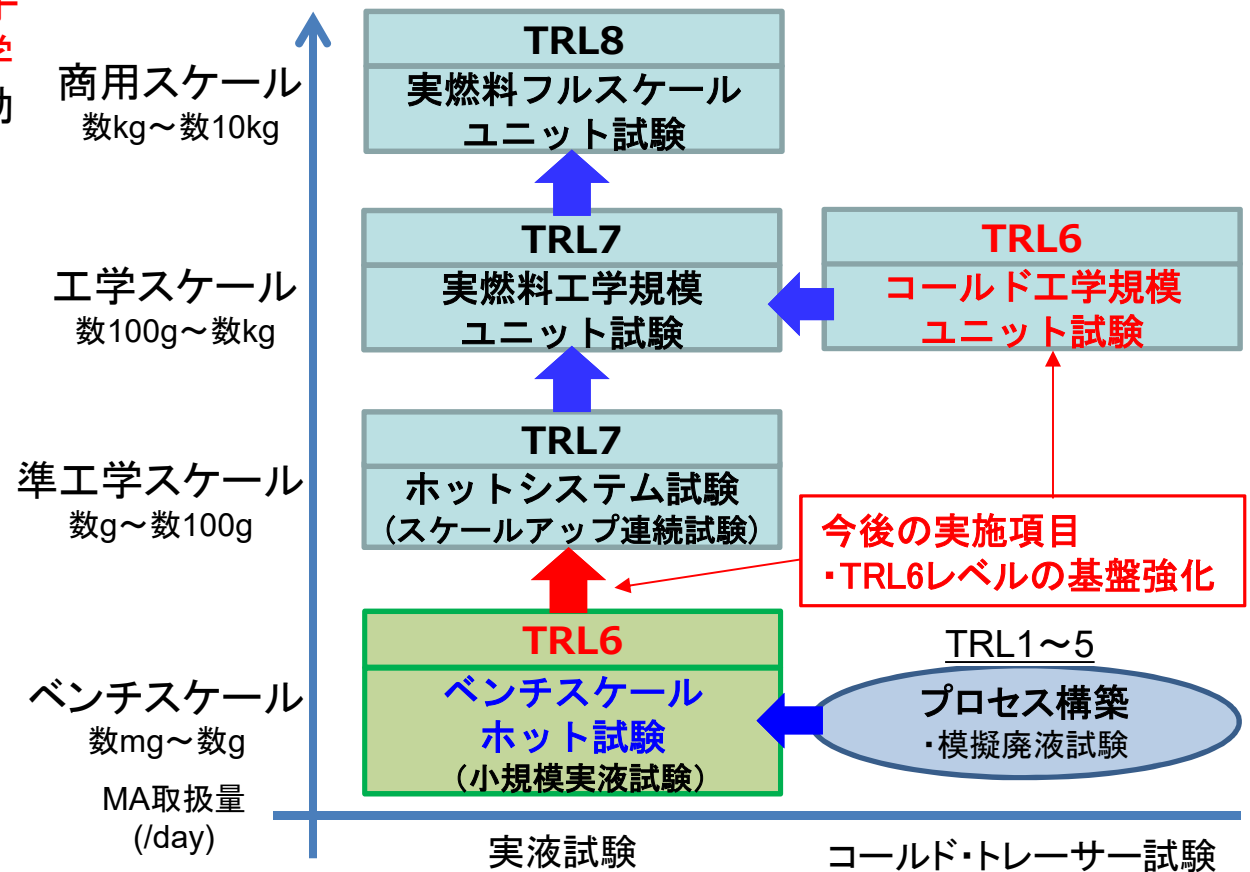


図 分離プロセスの概念図



MA含有窒化物燃料のTRL評価: OECD/NEA



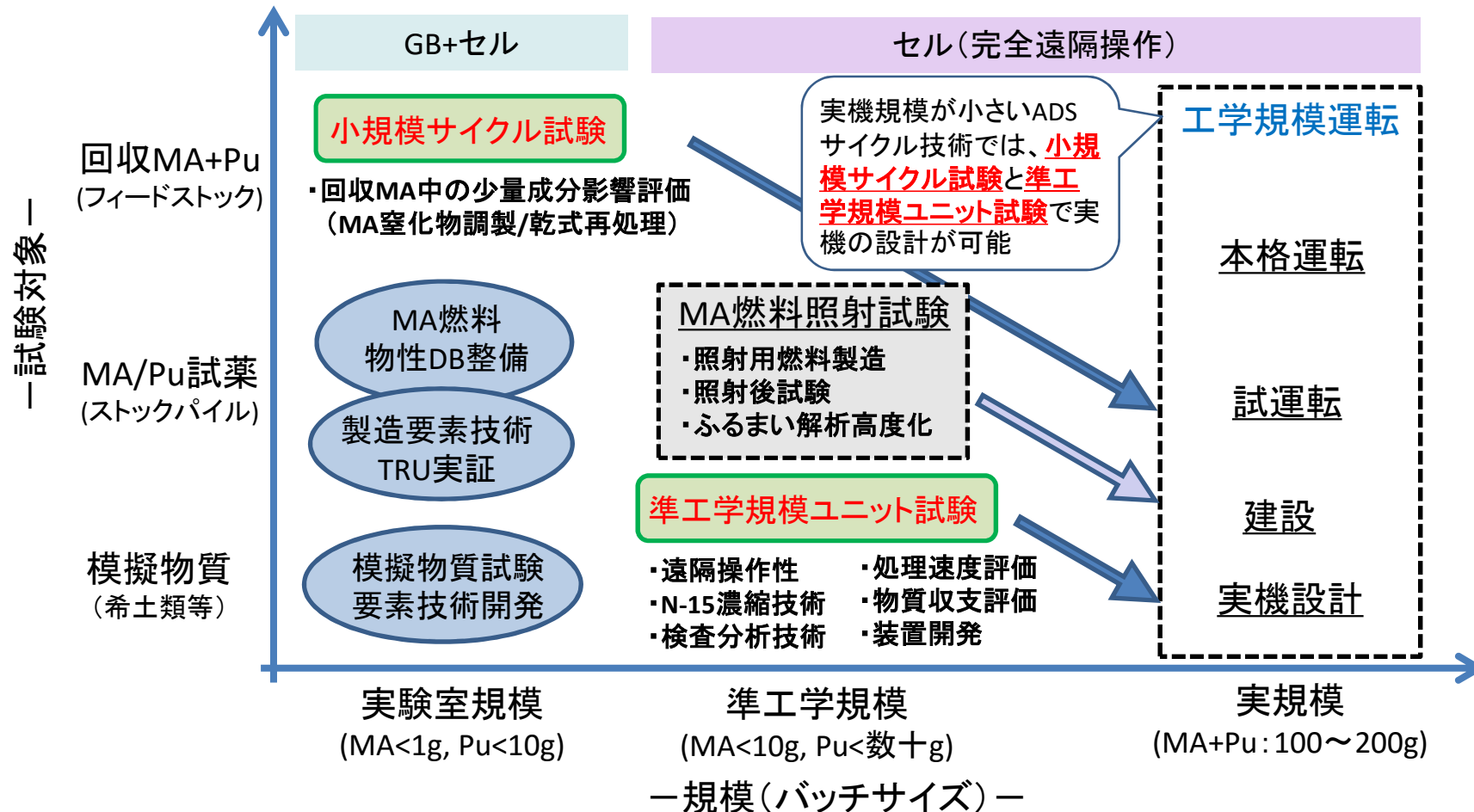
- OECD/NEAの専門家会合(EGIF)において、様々なMA含有燃料の製造プロセスおよび照射時の燃料ふるまい試験に関するTRL評価を実施。
- ADS用窒化物燃料に関しては、製造プロセスおよび燃料ふるまい試験のどちらもTRL3-4と評価。

回収MA+Pu	TRL 4 - 5	TRL 6	TRL 7	TRL 8 - 9	集合体						TRL 8 - 9
MA/Pu試薬 (ストックパイル)	TRL 4	TRL 4 - 5			バンドル				TRL 6 - 7	TRL 7 - 8	TRL 8
模擬物質 (希土類等)	TRL 3				燃料ピン		TRL 4	TRL 5	TRL 6	TRL 6 - 7	
	ベンチ スケール (1g-1kg)	実験室 規模 (1-10kg)	工学 規模 (10-100kg)	商用 規模 (>1 ton)	試料	物性 測定	炉外 試験	炉内 試験 (<燃焼度)	炉内 試験 (>燃焼度)	過渡 試験	通常 運転
						TRL 4	TRL 4	TRL 4	TRL 5	TRL 5 - 6	

ADS用窒化物の燃料の製造・燃料ふるまいに関するTRL到達度(参考資料2: Table7.8 & 7.9)

MA含有窒化物燃料：今後の研究開発課題

- 燃料製造技術では、実燃料で必要となるゾルゲル法による粒子作製のTRU試験と実証。
- 燃料ふるまい解析の精度向上のため照射試験が不可欠であり、照射試験用燃料の作製に着手する。併せて、安全性評価の観点からレーザー照射による融点測定のTRU適用を目指す。



乾式処理技術のTRL評価: OECD/NEA

- OECD/NEAの専門家会合(EGFRC)における窒化物燃料乾式処理技術のTRL評価結果から、TRL3-4に到達していると判断。
- 今後は、原理実証段階の研究開発を進める。具体的には、使用済不活性母材含有MA窒化物燃料を模擬した試料を用い、模擬使用済窒化物燃料ペレット中のMAを分離回収する技術の原理実証を目指した試験を実施する。
 - 分離性能評価試験: 使用済不活性母材含有MA窒化物燃料を模擬したコールド試料・MA含有試料を使用
 - 機器開発: 窒化物ペレット試料の熔融塩電解試験に適した陽極及び陰極の改良
 - その他: 廃塩処理プロセスの改良・開発

商用炉燃料				TRL 8-9
照射済燃料		TRL 6-7	TRL 7	
模擬燃料	TRL 3-4	TRL 4-5	TRL 6	
主要元素含有試料	TRL 2-3	TRL 3-4		
コールド又はトレーサー試料	TRL 1-2			
	基礎研究	フローシート試験	安全研究	実規模運転

今後目指すところ

窒化物燃料の乾式処理プロセスのTRL到達度

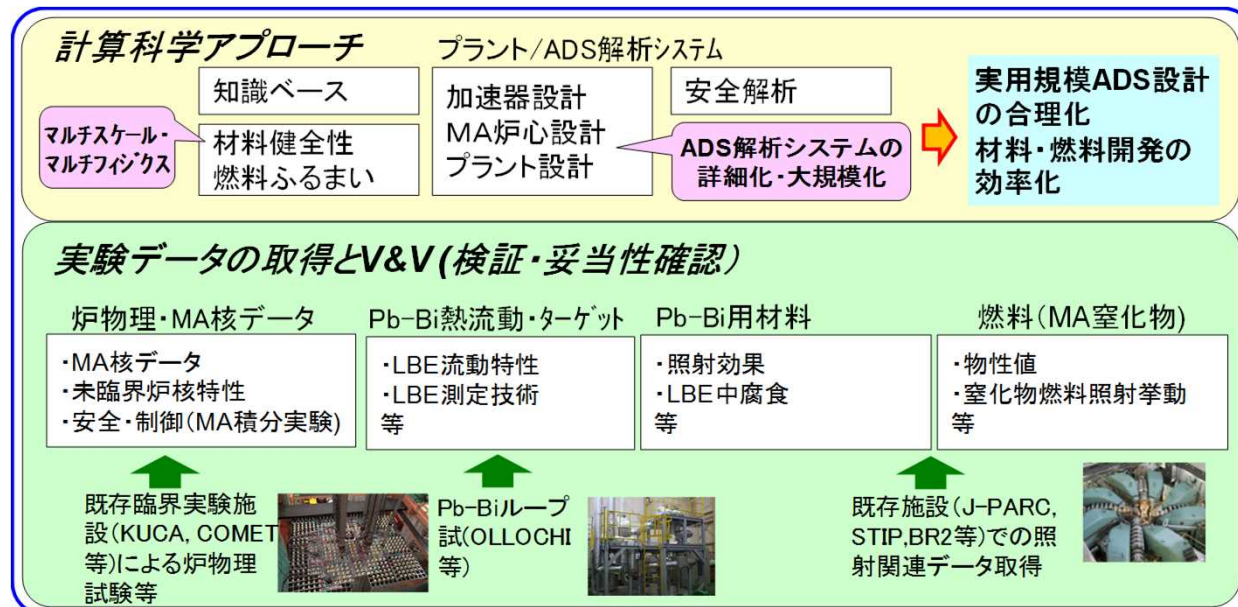
(参考資料1: Table.4.51)

2. ADS

ADS研究開発の今後の進め方

- 現中長期計画においてTEFの建設着手を目指し、**必要なR&Dや施設設計を実施**。建設着手の準備が整ったが、現時点において建設予算獲得の見通しは得られていない。
- 多くのリソースが必要な施設建設に代わって、合理的かつ効率的に研究開発を進めるために、計算科学などの最新の技術・知見を活用した**研究開発計画の再検討**を行った。
- 新たな研究開発計画では、**計算科学技術を活用した新たな計算シミュレーション手法の開発を目指す**。新たに開発する計算機シミュレーション手法については、これまでの実験解析データを取り込むとともに、**国内外の既存実験施設を最大限活用**して実験的検証を進めながら開発を進める。

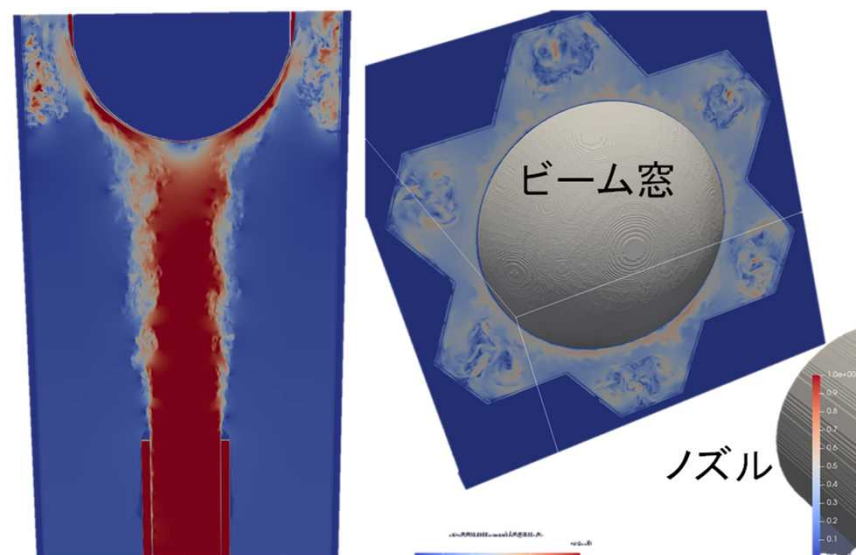
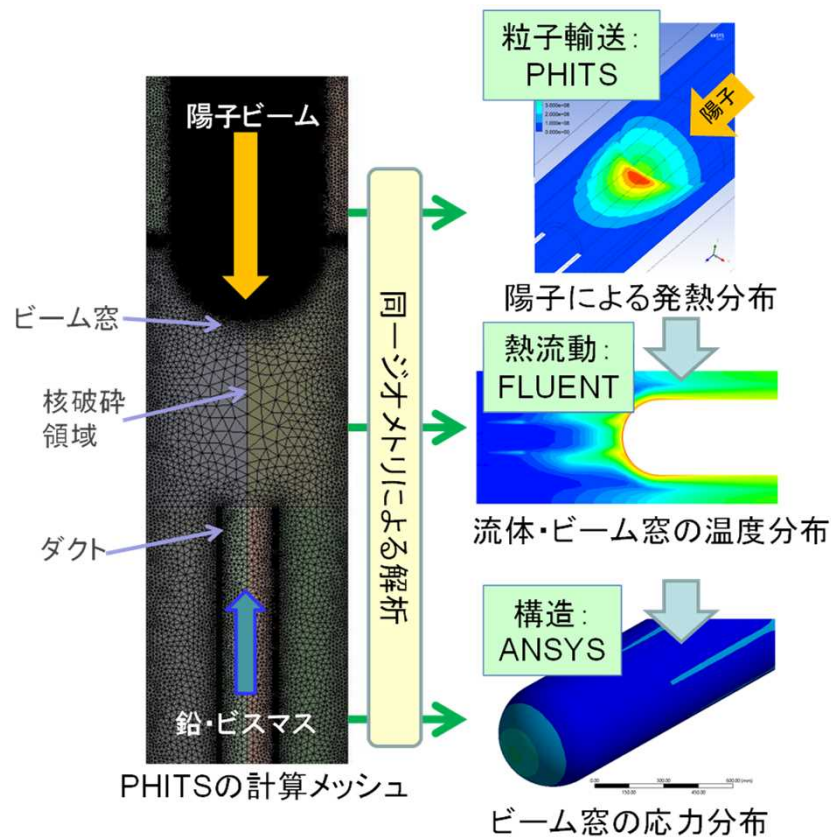
PSi 計画 (Proton accelerator-driven Subcritical virtual system)



計算科学アプローチを導入し、ADS設計の合理化、材料・燃料開発の効率化を図る。

計算科学活用例：核・熱・構造連成解析システムの開発

- ADS特有の核破砕ターゲット・ビーム窓領域を対象に、ADS安全性評価において重要なビーム窓の構造健全性を評価するために、粒子輸送、熱流動、構造解析を連成させたシミュレーションシステムの高度化を目指す。



計算領域: 675mm x 700mm x 1100mm,
計算格子点数: 848 x 876 x 1377
=1,022,901,696

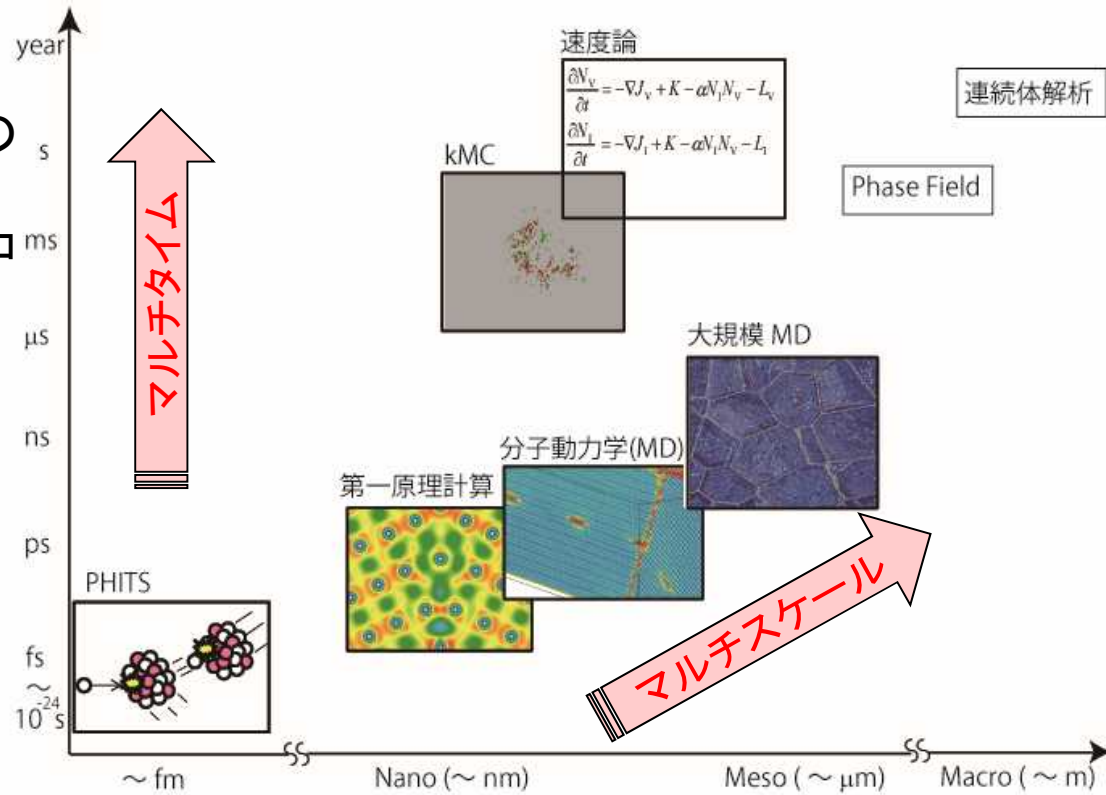
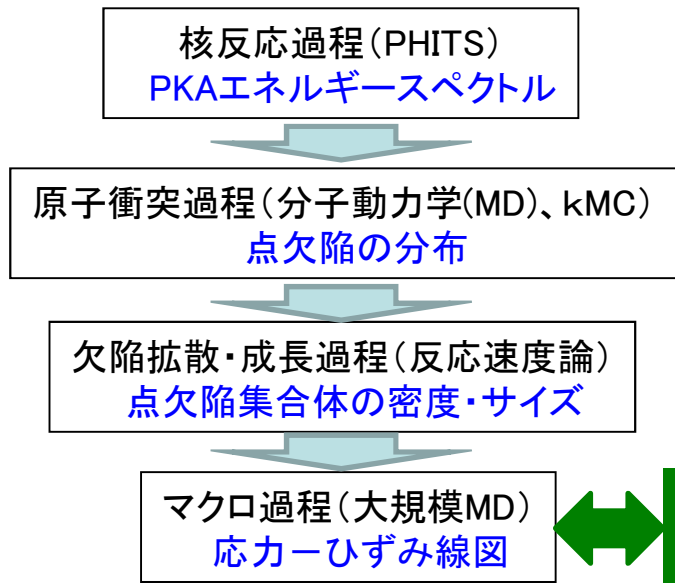
大規模非定常流解析が可能なJUPITERを用いたビーム窓周りの大規模詳細熱流動解析

- 粒子輸送・熱流動・構造連成解析システムの開発に着手。
- 今後、非定常解析を含む解析システムの高度化を実施するとともに、炉内システム全体への拡張を目指す。

計算科学活用例：照射損傷シミュレーション手法の開発

課題：ADSビーム窓材料開発

- ✓ ADS設計（構造解析）に必要な照射材の応力-ひずみ関係の予測
核反応、原子衝突、欠陥拡散・成長、マクロ過程（機械的特性の変化）を考慮



時間発展とスケール依存のマルチフィジックスシミュレーション

- ✓ 鉛ビスマスと照射による材料劣化機構の解明と材料改良（液体金属脆化機構の解明と添加元素の影響）

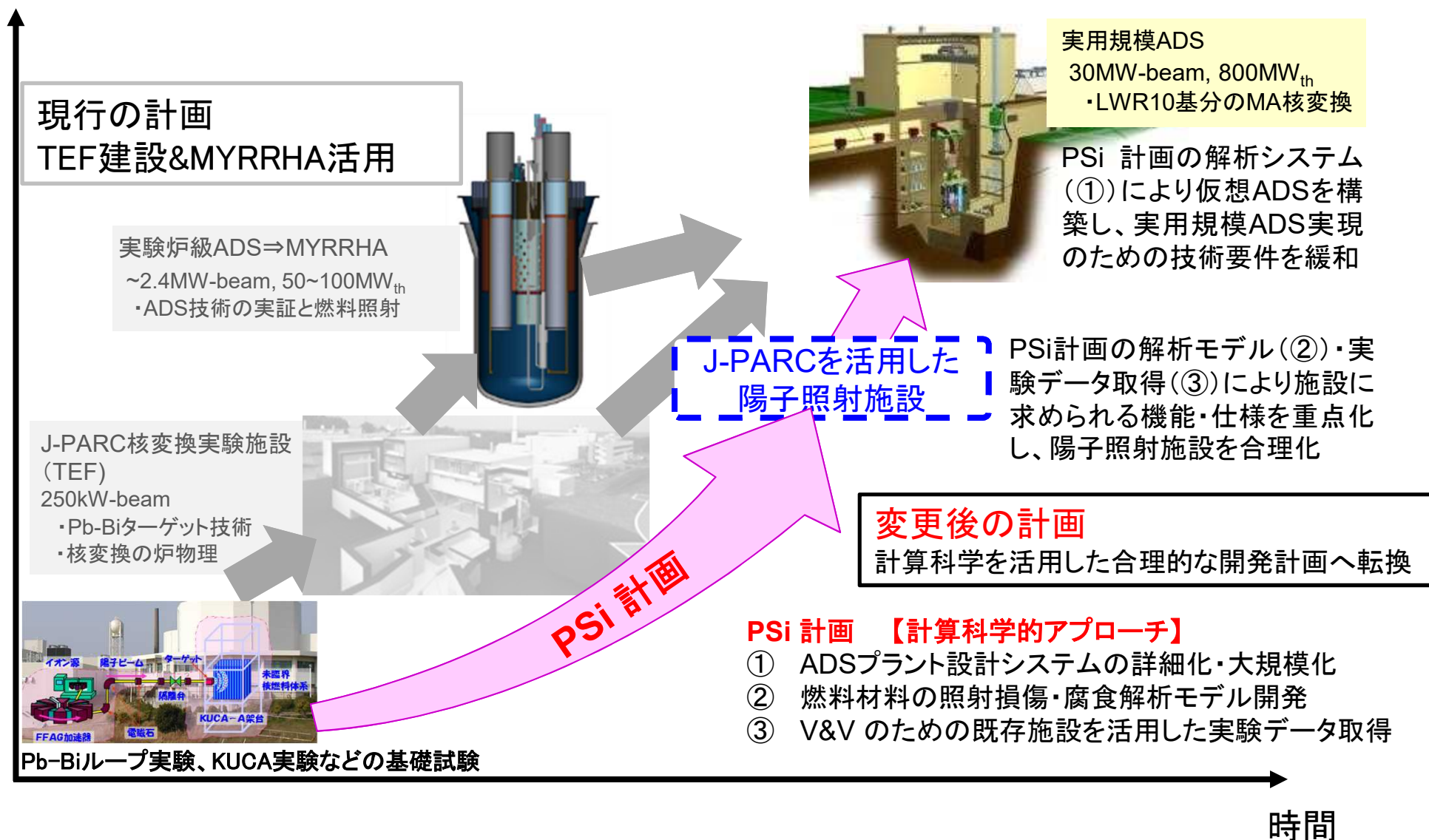
第一原理計算と転位論・破壊力学を組み合わせることにより、熱力学特性や機械特性に及ぼす添加元素の影響を評価する非経験的な合金設計手法 (ex. 元素戦略) を構築

J-PARC施設構想見直しの方針の見直し



1. TEF-P および TEF-T のうち、利用可能な J-PARC 加速器を活用し、材料照射を主目的とする TEF-T の機能を優先した試験施設として再検討を行う。
 - 大強度陽子ビームを用いた試験のうち、TEF-T で考えていた高温鉛ビスマス流動環境下におけるビーム窓の材料照射試験が最重要課題。
 - 2016年、TEF-P での使用を想定していた JAEA 保有の核燃料の一部(高濃縮ウラン、プルトニウム)が米国へ移送されたため、TEF-Pで実施予定であった炉物理研究項目が大幅に制限(MA部分装荷体系の研究意義、実験体系の自由度)。
2. PSi 計画における 計算機シミュレーションの可能性や国際協力による役割分担も含めた合理的な研究開発の進め方の検討を進め、施設に求められる役割を再確認し、施設概念を再構築する。
3. ADS の工学的課題解決に加え、貴重な高強度陽子・中性子照射場として、多様なニーズへの対応可能性を含めて検討する。

ADS研究計画 見直しの概要



海外におけるADS開発の位置付け

欧州におけるADS研究の位置付け

- **フランス放射性廃棄物管理に関する調査研究評価委員会(CNE2)の第15次報告書** (2021年7月)
 - ✓ フランス政府によるエネルギー複数年計画の変更が放射性廃棄物処分に与える影響を調査・分析。
 - ✓ 優先的に取り組むべき3つのテーマ: 深地層処分の代替技術、分離に関する研究開発、中レベル放射性廃棄物地層処分場CIGÉO。
 - ✓ 深地層処分の代替技術となり得るのは核変換技術だけである。候補概念は、高速炉、ADS、熔融塩炉、レーザーであるが、いずれの技術についても工業化にいたる具体的な計画段階ではなく、非常に大きなリソースが投入されれば今世紀末までに工業化につながる可能性がある。

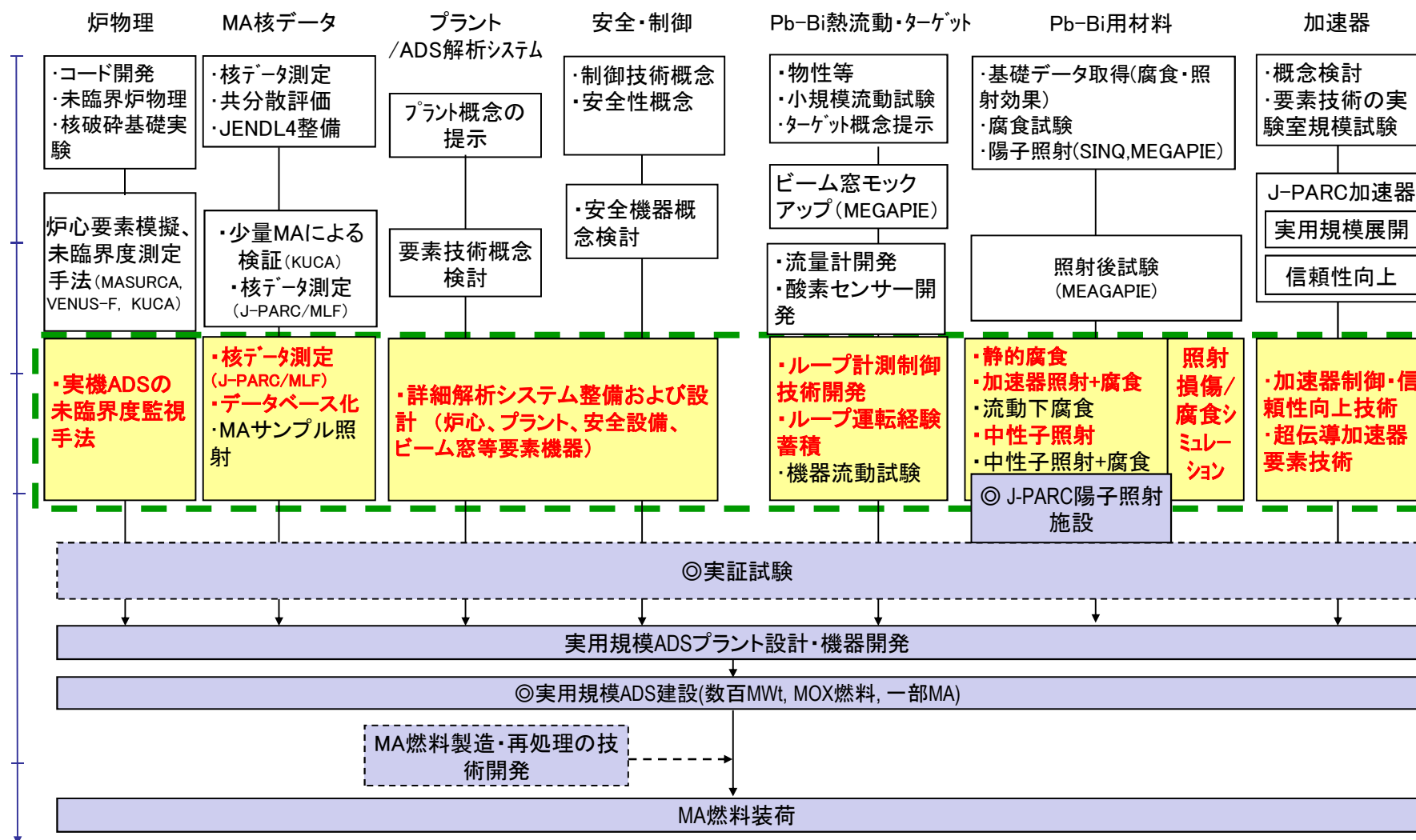
- **欧州持続的原子力産業戦略(ESNII:The European Sustainable Nuclear Industrial Initiative)**
 - ✓ 第4世代高速炉技術の実証にむけて産業界の取組を促進する目的で 2010 年に設置。
 - ✓ 2021年ビジョンでは、MYRRHAを最も実現可能性の高いR&Dプロジェクトに位置付け。



国際協力による研究開発の推進

- 高レベル放射性廃棄物の処理処分の負担軽減は、原子力を継続して利用する国、原子力から撤退する国、これから原子力を導入する国の全てで**共通する課題**。
- 分離変換技術は**極めて広範囲な技術**が関わるものであり、一国で全ての研究開発を実施すると大きな負担が生じる。

ADS開発ロードマップ(見直し)



注: 表記の都合により、時間軸は必ずしも開発期間を表さない。

→ 技術の流れ

□ ほぼ終了している部分

■ 現在実施中(赤字)、及び今後の中心部分(黒字)

□ Psi計画

■ 将来計画。施設の新設が必要な部分を◎で示した。

まとめ(1/2)

【分離変換導入シナリオ】

- ADSは、核変換システムのオプションの一つとして、様々な原子力利用シナリオを想定し、現実的で柔軟性のある分離変換導入シナリオを継続的に検討する。

【MA分離】

- MA分離の候補技術として、SELECTプロセスと抽出クロマトグラフィの研究開発を実施し、どちらも主工程については小規模実廃液試験まで実施した。
- JAEAの現有施設(CPF、BECKY)では、これ以上の規模を拡大した試験は困難であり、今後は、現有施設を有効活用して、工学規模実証の実施判断に向けた機器開発等の課題抽出やプロセス改良等の研究開発を一体的に実施する。
 - CPF: 工学化に向けた課題抽出等の応用研究
 - BECKY: 抽出プロセスの改良等の基礎基盤研究
- また、MA分離の研究開発は、再処理研究の一環として研究開発を実施し、大学・民間企業等との連携・協力を積極的に推進する。

まとめ(2/2)

【ADS】

- 分離変換導入シナリオ検討と連携し、最適な核変換システムの検討を継続する。
- 多くのリソースが必要な施設建設に代わって、合理的かつ効率的に研究開発を進めるために、既存の施設を有効活用しながら、計算科学などの最新の技術・知見を活用した研究開発計画(PSi計画)を実施する。
- PSi計画で得られた成果等を活用し、次期中長期計画期間中に、実現性、柔軟性、経済性の観点や規制基準を考慮した成立性の高いシステム概念を必要な技術的根拠とともに提案する。
- 海外研究機関との研究協力(特にMYRRHA計画によるADS実験炉の建設を目指すベルギーSCK-CEN)を積極的に進めながら、合理的な研究開発計画を再検討する。
- J-PARCの実験施設については、PSi計画の成果や多目的の応用を考慮して、陽子加速器が利用可能な利点を最大限活用する施設仕様を再検討する。

【ADS用窒化物燃料】

- 燃料製造技術については、実燃料で必要となるゾルゲル法による小規模サイクル試験の実施を目指すとともに、燃料ふるまい解析の精度向上のため照射試験を目指して、照射試験用燃料の作製に着手する。
- 乾式処理技術については、使用済不活性母材含有MA窒化物燃料を模擬した試料を用いて、原理実証段階の研究開発を進める。

参考資料

ADSのTRL

H25.10.16 科学技術・学術審議会研究計画・評価分科会
原子力科学技術委員会 群分離・核変換技術評価作業部会（第4回）資料1より

- 日本原子力学会「分離変換・MAリサイクル」研究専門委員会（H19～H23）において、NASAやJAXAで活用されている技術成熟度（TRL）評価手法を用いて、我が国のMA分離変換に係る各技術分野の現状達成度や開発段階を整理。
- 上記研究専門委員会の資料を基に、MA分離及びADS階層型核変換システムに関する各技術毎の開発段階について、研究開発の進展や今後の重点課題等を考慮して内容を見直し、代表的な研究開発項目を記載。

「分離変換・MAリサイクル」研究専門委員会、『分離変換技術はどこまで成熟したか？技術成熟度評価に基づく現状整理と提案』、日本原子力学会誌、Vol.52, No.12 (2010)。

研究開発段階の基本的な考え方

開発段階	
概念開発段階	システム概念の構築
	技術概念の具体化
	技術開発の活性化
原理実証段階	要素技術の開発
	要素技術の完成
	技術基盤の確立
性能実証段階	プロトタイプの試験運転
	実機プラント試験
	実機プラント運転

研究開発段階(p.3～p.8)の表中の記載事項

: 実施済みの段階 : 実施中の段階

✓ : 既に終了した項目

○ : 現在実施中又は一部実施中の項目

・ : 未実施の項目

[] : 実験施設等（青字：既存施設、赤字：将来計画）

（赤字記載は、今後の研究開発において特に重点的な検討が必要な項目）

ADSのTRL:核工学

H25.10.16 科学技術・学術審議会研究計画・評価分科会
原子力科学技術委員会 群分離・核変換技術評価作業部会（第4回）資料1を改訂

	ADS炉物理	MA装荷炉心
概念開発段階	<ul style="list-style-type: none"> ✓ADS用解析コードの開発 	<ul style="list-style-type: none"> ✓評価済データの比較検討
	<ul style="list-style-type: none"> ✓核破碎中性子基礎実験 ✓未臨界体系での基礎炉物理試験 	<ul style="list-style-type: none"> ✓MA等の核種の核データ測定 ✓評価データの整備
	<ul style="list-style-type: none"> ✓ADS模擬実験(臨界、未臨界:固定中性子源) ✓未臨界度測定手法の開発 	<ul style="list-style-type: none"> ✓臨界実験による核データ検証(反応率、反応度測定)
原理実証段階	<ul style="list-style-type: none"> ✓ADS模擬実験(未臨界:DT源 [VENUS-F, FCA, KUCA]) 	<ul style="list-style-type: none"> ○MAサンプル照射試験
	<ul style="list-style-type: none"> ・未臨界度測定手法の実証 [TEF-Pの機能。鉛装荷高速体系、DT源で代替] 	<ul style="list-style-type: none"> ・臨界実験装置による部分装荷MA実験 [TEF-Pの機能。BFS:Np部分装荷の知見と設計裕度で対応]
	<ul style="list-style-type: none"> ・実用規模ADS炉心設計 ・実用規模ADS未臨界度測定システム確立 	<ul style="list-style-type: none"> ・MA燃料集合体燃焼試験と照射後試験解析
性能実証段階	<ul style="list-style-type: none"> ・実験炉級ADSの性能試験(MOX) [MYRRHA] ・実用規模ADSの炉心設計 	<ul style="list-style-type: none"> ・実験炉級ADSへのMA燃料集合体装荷 [MYRRHA] ・実験炉級ADSへの実用規模ADS用MA燃料集合体照射
	<ul style="list-style-type: none"> ・実用規模ADSの建設、性能試験 	
	<ul style="list-style-type: none"> ・実用規模ADS運転 	

ADSのTRL:炉工学

H25.10.16 科学技術・学術審議会研究計画・評価分科会
原子力科学技術委員会 群分離・核変換技術評価作業部会（第4回）資料1を改訂

	熱流動	構造	運転制御	遮蔽
概念開発段階	✓ADS概念の検討			
	✓小規模LBE流動試験	✓炉心概念の提示	✓ADS運転制御方法検討	✓ADS遮蔽概念の検討
	○中規模LBE流動試験 ・集合体水流動試験	✓プラント構造検討 ✓構成要素技術概念の絞込	✓安全性概念の検討 ✓ADS運転制御概念提示	✓遮蔽コードの開発 ✓遮蔽概念検討
原理実証段階	・集合体LBE流動試験	○実用規模ADSの機器概念設計	○過渡・事故事象解析および安全設備設計 ・加速器運転・制御手法検討	○ADS用実験施設遮蔽設計 ○遮蔽実験、コードの検証
	・大規模LBE流動試験	・実験炉級ADS用機器開発	・安全設備開発 ・加速器の運転・制御試験	○実用規模ADSの遮蔽検討
	・実験炉級ADS用モックアップ試験		・ADS安全設計の確立 ・運転制御手法の確立	・実験炉級ADSの遮蔽設計
性能実証段階	・実験炉級ADSプラントの建設、運転 [MYRRHA]			
	・実用規模ADSの建設、性能試験			
	・実用規模ADS運転			

ADSのTRL:ターゲット・加速器

H25.10.16 科学技術・学術審議会研究計画・評価分科会
原子力科学技術委員会 群分離・核変換技術評価作業部会（第4回）資料1を改訂

	核破碎ターゲット		加速器
	熱流動	材料	
概念開発段階	<ul style="list-style-type: none"> ✓ターゲット概念の検討（窓有り、窓無し） ✓基礎データの調査 		<ul style="list-style-type: none"> ✓ADS用加速器概念検討
	<ul style="list-style-type: none"> ✓ターゲット・ビーム窓の概念提示 	<ul style="list-style-type: none"> ✓基礎データの取得 	<ul style="list-style-type: none"> ✓ADS用加速器の開発目標の明確化 ✓要素技術の開発着手
	<ul style="list-style-type: none"> ✓ターゲット小規模LBE流動試験 ✓各種測定技術開発 	<ul style="list-style-type: none"> ✓ビーム窓候補材の腐食試験 ✓ビーム窓候補材の陽子照射試験 (STIP-2) 	<ul style="list-style-type: none"> ✓要素技術の実験室規模試験
原理実証段階	<ul style="list-style-type: none"> ✓ビーム窓モックアップ試験 [MEGAPIE] ○実用化に向けた各種計測技術開発 ○高温ビーム窓モックアップ試験 	<ul style="list-style-type: none"> ✓LBE流動条件での陽子照射 [MEGAPIE] ○照射後試験(強度、腐食) 	<ul style="list-style-type: none"> ○要素技術の実用規模展開 [J-PARC(常伝導)] ○超伝導加速器要素開発
	<ul style="list-style-type: none"> ・LBEを用いたビーム窓、ターゲット領域モックアップ試験 [TEF-Tの機能] 	<ul style="list-style-type: none"> ・実用規模ADS条件でのビーム窓材料の陽子照射 [TEF-Tの機能] 	<ul style="list-style-type: none"> ○実証試験 [J-PARC加速器運転] ○信頼性向上方策等検討 ・超伝導加速器要素の実証試験
	<ul style="list-style-type: none"> ・実用規模ADS用ターゲット試験 [TEF-Tの機能] 	<ul style="list-style-type: none"> ・実用規模ADSの設計データの取得 [TEF-Tの機能] 	<ul style="list-style-type: none"> ・実用規模ADS用加速器設計
性能実証段階	<ul style="list-style-type: none"> ・実験炉級ADSのターゲット運転 [MYRRHA] 		<ul style="list-style-type: none"> ・実験炉級ADS用加速器運転 [MYRRHA]
	<ul style="list-style-type: none"> ・実用規模ADSの建設、性能試験 		
	<ul style="list-style-type: none"> ・実用規模ADS運転 		

フランス：CEAの分離変換に関する報告書(2012年)



2006年放射性廃棄物等管理計画法に基づき実施した研究開発成果を基に、原子力・代替エネルギー庁(CEA)が、2012年12月に「長寿命放射性元素の分離・核変換研究」について報告書を取りまとめた(2020年にプロトタイプ炉の運転開始するためのオプション選択)。

- MAの核変換は、深地層処分の必要性を排除するものではないが、より長期に渡る発展への道を開く可能性がある。
- **分離技術**
 - ✓ MA分離技術は、検討されている全てのプロセスについて実験室レベルで実証済。それらプロセスを産業規模まで外挿することに対し理論的な障害はない。
- **高速炉**
 - ✓ 現状、ナトリウム冷却高速炉は、今世紀前半に配備する場合に対する最良の解決策と思われる。電気出力60万kWの統合技術実証炉ASTRIDは、産業化に向けた必須ステップ。
 - ✓ Amの核変換は、高速炉の炉心部均質モードでの数個のペレット規模で実証。非均質オプションについては、最初の照射試験分析を現在実施中。
 - ✓ 高速炉の発電コストへの核変換の影響は5%から10%程度。産業化には、特にMA含有燃料の製造及び取扱いに関して持続的な研究開発が必要。
- **ADS**
 - ✓ 核変換は、加速器駆動システム(ADS)を含む専用の独立した階層においても可能であるが、産業用に成熟させるために必要な研究開発努力は、臨界システムに比べ遙かに大きなものになる。
 - ✓ ADSによる核変換は、高速炉単独の場合と比べて発電コストが約20%増加。

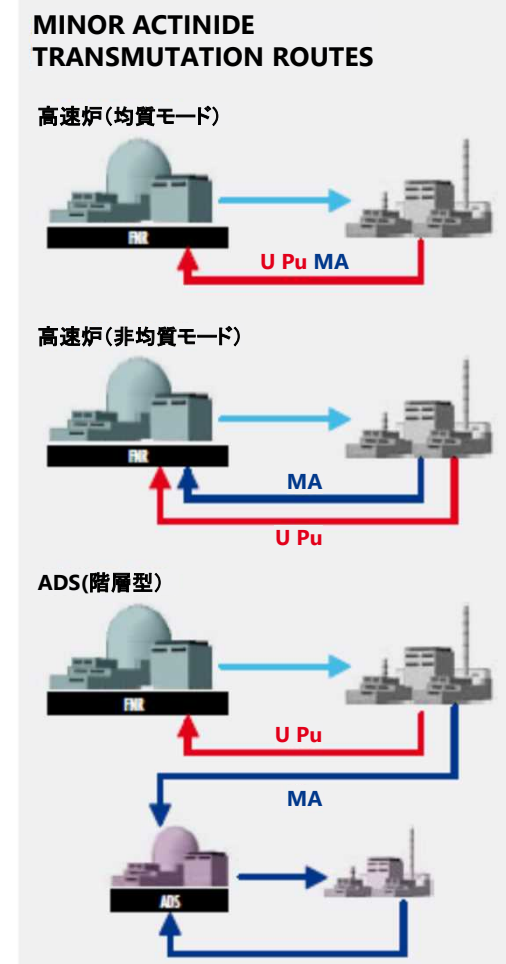
フランス:CEAの分離変換に関する報告書(2012年)



- コスト比較の前提条件(軽水炉から高速炉へ完全に移行した2120~2150年を想定)
 - ✓ 総発電量は、60GWe(1500MWeの高速炉40基)
 - ✓ ADS導入時:熱出力400MWthのADS18基
 - ✓ 高速炉でMA核変換を実施しない場合に対する相対値として評価
- **ADSの場合は、高速炉に加えてADSが必要となるため約25%程度コスト高。**
 - ✓ コストは導入基数に比例するため、コスト削減には出力上げる必要がある
 - ✓ 出力を上げる検討例として、JAEAの800MWthの概念検討を提示

平準化コストの相対比較(発電容量60GWeの高速炉(UとPuマルチリサイクル、MA核変換無):100%)

シナリオ	割引率 8%→3%			割引率 4%→2%		
	合計	原子炉	サイクル	合計	原子炉	サイクル
核変換無	100	94	6	100	91	9
非均質(MA)	106	96	10	107	92	14
非均質(Am)	104	95	9	105	92	13
均質(MA)	108	95	12	109	92	17
均質(Am)	106	95	10	106	92	13
ADS(MA)	126	116	10	124	110	14



CEA, 02 Séparation – Transmutation des Éléments Radioactifs à vie Longue, 2012.

<http://www.cea.fr/multimedia/Documents/publications/rapports/rapport-gestion-durable-matieres-nucleaires/Tome%202.pdf>

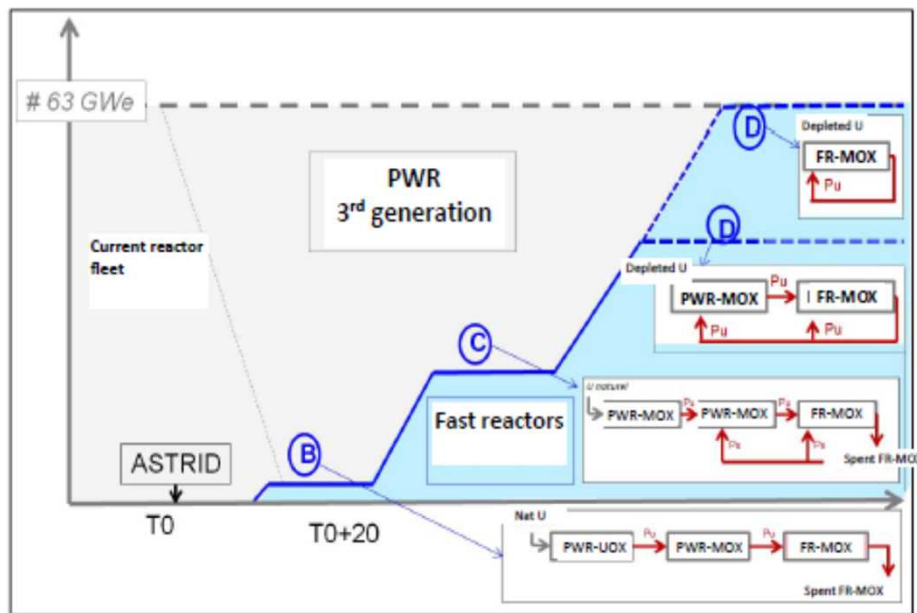
CEA, Report on Sustainable Radioactive Waste Management, 2012.

<http://www.cea.fr/english/Documents/corporate-publications/report-sustainable-radioactive-waste-management.pdf>

フランス:CEAの分離変換に関する報告書(2015年)



- 核燃料サイクルを実施することで、高レベル放射性廃棄物(HLW)処分場面積を低減することは可能である。
 - ✓ PWRワンスルーでも、リサイクルしない場合に比べてHLW処分場面積は1/3分。
 - ✓ Amを高速炉で核変換することで処分場面積は1/20になる。
- 相当数の高速炉を導入した場合には、Amの核変換を効率良く実施できる。しかし、少数しか導入しない場合には、Amの装荷量を増やす(Am割合の増加またはAm装荷ブランケット数の増加)必要があり、これは現段階では想定されていない。
- プルトニウムをリサイクルすることで、プルトニウム生成量を減らすことができ、原子力発電終了時のプルトニウム量も減らすことができる。



	Milestone 0 open cycle (no recycling)	Milestone A once-through recycling (PWR fleet)	Milestone B twice-through recycling (PWRs then FRs)	Milestone C multiple recycling (PWRs and FRs)	Milestone D multiple recycling without natural U (FR fleet)
FR proportion of the fleet (GWe)	0	0%	5%	40%	100%
Natural consumption U	7,600 t/year	6,300 t/year	5,800 t/year	2,700 t/year	0
Net Pu production	+10.5 t/year	+7.4 t/year	+7.1 t/year	0 (stabilisation)	0 (stabilisation)
Spent fuel stocks	+960 t/year (UOX)	+160 t/year (MOX+RepU)	+100 t/year (FR MOX+RepU)	Stabilised	Stabilised

CEA, Advances in research on partitioning-transmutation and plutonium multi-recycling in fast neutron reactors. Summary of results., 2015.

<https://www.cea.fr/english/Documents/corporate-publications/advances-research-on-partitioning-transmutation-and-plutonium-multi-recycling-in-fast-neutron-reactors.pdf>

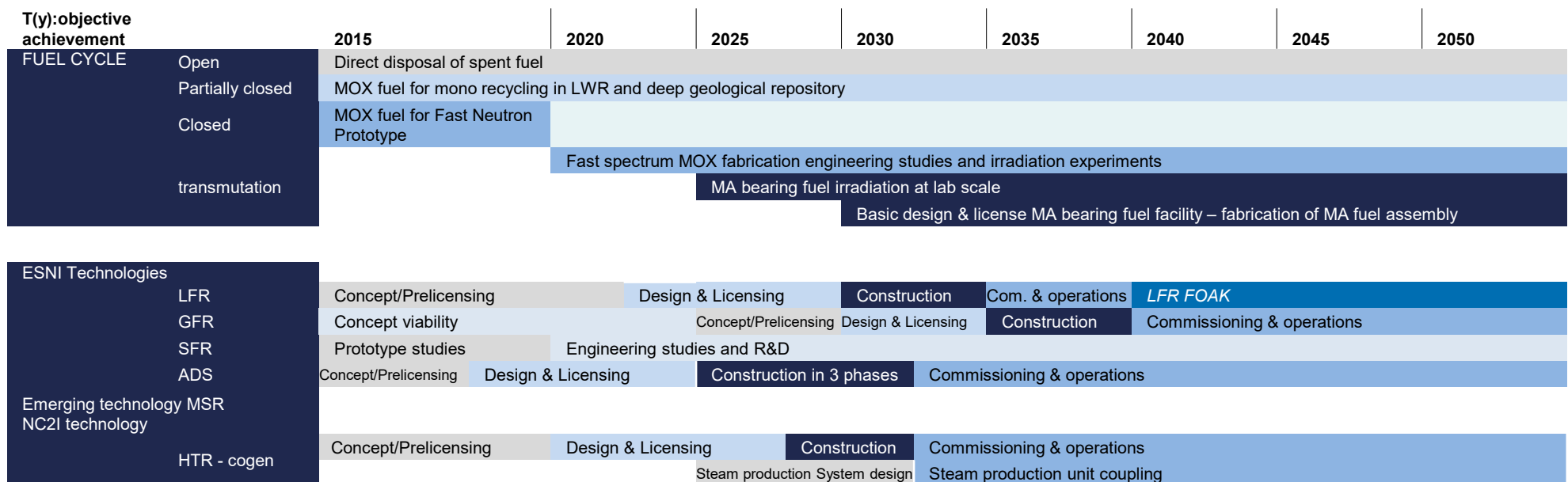
フランス:CNE第15次報告書

放射性廃棄物管理に関する調査研究評価委員会(CNE2)の第15次報告書(2021年7月)

- フランス政府は、2020年4月に、2019～2028年を対象としたエネルギー複数年計画(PPE)を発表。
 - ≫ 2035年までに発電電力量に占める原子力のシェアを現在の71%から50%まで引き下げる目標を正式に掲げる。
 - ≫ プルトニウムのマルチリサイクルは、2040年代まで温存し、研究開発を進める。中期的にはEPRでのマルチリサイクルに基づくが、今世紀後半には高速炉への産業規模での導入を視野に入れる。
- エネルギー複数年計画の変更による放射性廃棄物処分に関する影響を調査・分析を実施し、優先的に取り組むべき3つのテーマを提示。
 - ≫ 深地層処分の代替技術
 - 代替となり得ると考えられるのは核変換技術だけであり、候補概念は、高速炉、ADS、熔融塩炉、レーザー(開発段階の高い順)。
 - いずれの技術も工業化にいたる具体的な計画段階ではなく、非常に大きなリソースが投入されれば今世紀末までに工業化につながる可能性がある。
 - ≫ 分離に関する研究開発
 - 分離に関する研究は、PPEの実施に不可欠であり、非常に高い優先度が与えられるべき。
 - 2040年代のPWRでのマルチリサイクルを実施する観点からは、2030年以前に新しい分離プロセスの工業的実現性を確立する必要がある。
 - ≫ 高・中レベル放射性廃棄物地層処分場CIGÉO

欧州:欧州持続的原子力産業戦略ESNII

- 2007年9月に、欧州委員会EURATOMが、「持続可能な原子力エネルギー技術開発プラットフォーム構想」(SNE-TP: Sustainable Nuclear Energy Technology Platform)を発表
- 2010年10月からは、欧州持続的原子力産業戦略(ESNII:The European Sustainable Nuclear Industrial Initiative)として研究をさらに推進
 - 2040年代の第4世代高速中性子炉(FNR)実現に向けたロードマップ
 - ウラン資源の有効活用、MAの核変換による高レベル放射性廃棄物の減量等を目的
- ナトリウム冷却高速炉(SFR)の実証炉ASTRIDの建設を目指していたが、計画中止を受け、2021年版ビジョンでは、MYRRHAを最も実現可能性の高いR&Dプロジェクトに位置付けている。



ESNII (2021年版のVision Paperより)

ESNII vision paper (2021 Edition) : <https://snetp.eu/wp-content/uploads/2021/07/ESNII-Vision.pdf>