

ADSを用いた核変換技術の研究開発状況



令和3年7月30日

国立研究開発法人 日本原子力研究開発機構

内容

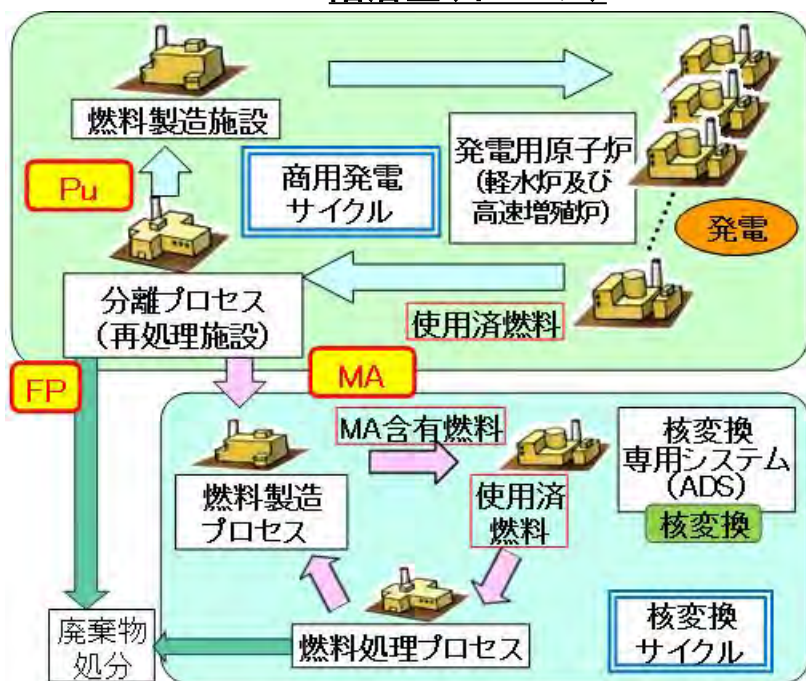
1. 全体概要・開発ロードマップ
2. ADS
3. 核変換実験施設 (TEF)
4. MA燃料製造
5. MA燃料再処理
6. 国際協力

ADSを中心とした分離変換システム

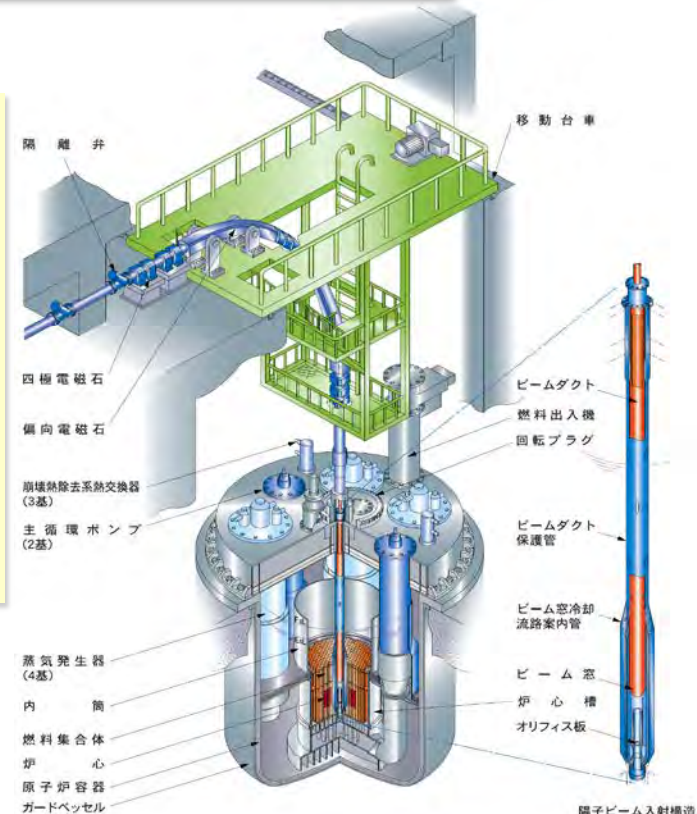
核変換専用サイクル型(階層型)

- ✓ 発電用サイクルから独立して、核変換サイクルを付設
- ✓ コンパクトなサイクルにMAを閉じ込める
- ✓ 核変換専用システム(加速器駆動システム: ADS 等)
- ✓ 燃料のMA含有量は50%以上(ウランを含まない燃料)
- ✓ 鉛ビスマス冷却窒化物燃料ADSが有力候補

階層型(イメージ)



- ・ 陽子ビーム : 1.5GeV
- ・ 核破碎ターゲット : Pb-Bi
- ・ 冷却材 : Pb-Bi
入り口 : 300°C、出口 : 407°C
- ・ 最大 $k_{\text{eff}} = 0.97$
- ・ 熱出力 : 800MWt
- ・ MA初期装荷量 : 2.5t
- ・ 燃料組成 :
(MA + Pu)N + ZrN
- ・ 核変換効率 :
10%MA / 年
- ・ 燃料交換法 : 600EFPD, 1 バッチ



ADSの研究開発課題(1/2)

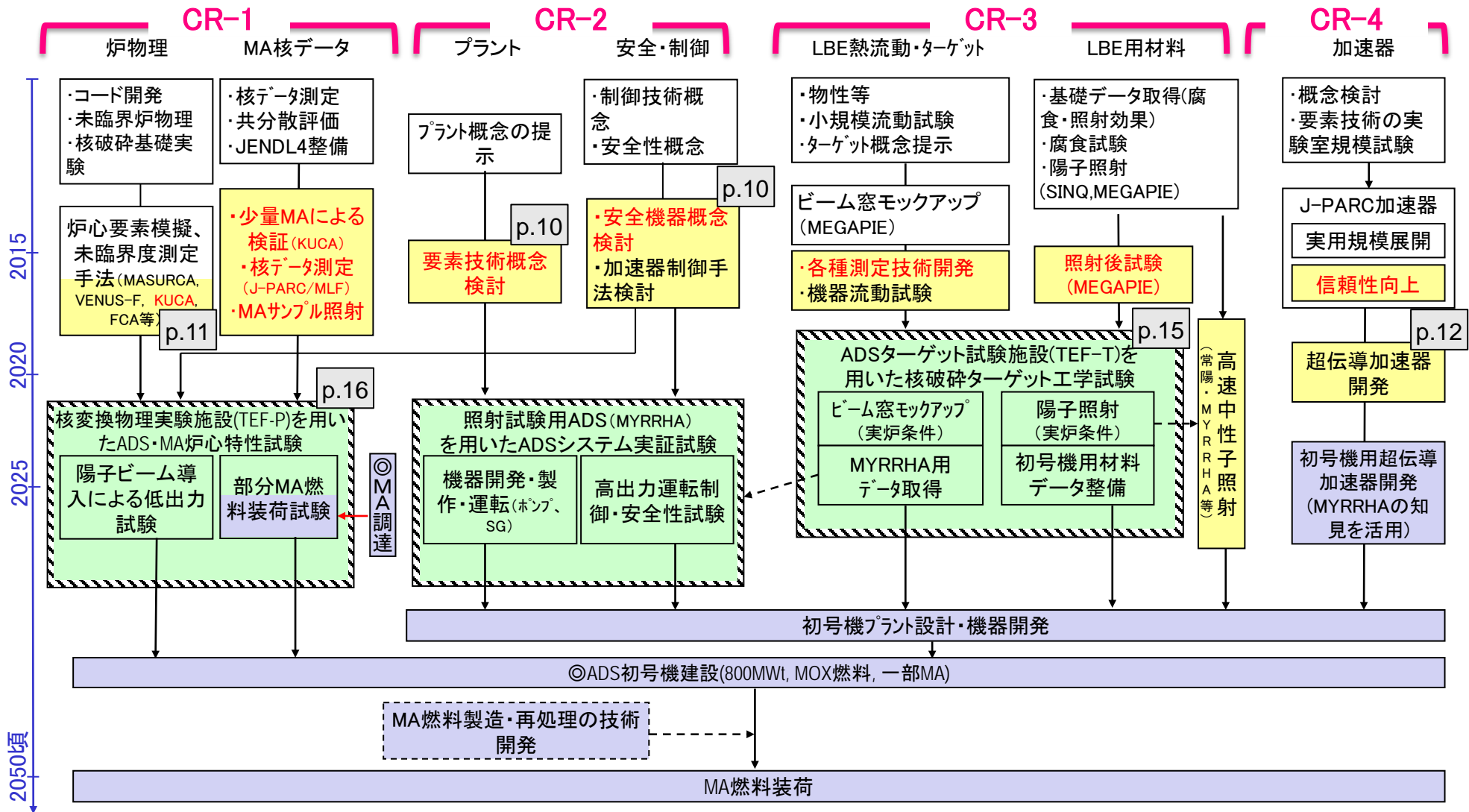
平成21年原子力委員会C&Rにおける指摘事項と対応状況

番号	原子力委員会C&Rでの指摘事項	対応状況(H27以降)
CR-1	未臨界炉心の制御等の炉物理的課題を高い信頼度で解決すること	<ul style="list-style-type: none"> • ADSの炉物理課題解決を目的とした核変換物理実験施設(TEF-P)の建設許可に必要な要素技術開発等を実施。 p.16 • 既存の臨界実験装置を用いた炉物理実験の実施。 <ul style="list-style-type: none"> ✓新たに開発した未臨界度監視手法の実証試験。 p.11 ✓MAや鉛ビスマスなどの核データの精度検証実験。 p.11
CR-2	Pb-Bi冷却炉の設計及び安全性を高い信頼度で確認すること	<ul style="list-style-type: none"> • 実用規模ADSを想定した炉心概念検討を実施。 <ul style="list-style-type: none"> ✓プラント停止後に受動的に除熱可能な崩壊熱除去系 ✓加速器・ビーム窓の設計裕度を高めるための未臨界度調整機構 p.10 ✓SELECTプロセス、乾式再処理の進捗を反映した炉心設計
CR-3	ビーム窓の工学的成立性を確認すること	<ul style="list-style-type: none"> • ビーム窓材料の流動鉛ビスマス中での陽子ビーム照射試験を目的としたADSターゲット試験施設(TEF-T)の建設に必要な要素技術開発等を実施。 p.15 • 既存の照射場を用いて、ビーム窓材料の照射効果を予測する試験を実施中。 • 粒子輸送・熱流動・構造を統合した解析システムを構築し、陽子ビーム入射部の非照射条件での成立性を高める設計を実施。 p.10
CR-4	ADSが実現する時代に発電システムに要求される安全性、信頼性、経済性といった性能目標の達成を妨げない、もしくは達成に寄与できる加速器の性能・コストが実現していること	<ul style="list-style-type: none"> • 安全性・信頼性向上のため、全ての加速領域を超電導化した陽子加速器を設計し、要素機器を試作中。 p.12 • J-PARC等の加速器運転の知見を集約し、現行技術の信頼性評価を実施。



1. 概要

ロードマップ: ADS



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
- MAの流れ
- (white) ほぼ終了している部分
- (yellow) 現在実施中(赤字)、及び今後の中心部分(黒字)
- ▨ (hatched) 評価を踏まえて進めていく部分
- (blue) 更に将来の部分。施設の新設が必要な部分を◎で示した。

ADSの研究開発課題(2/2)

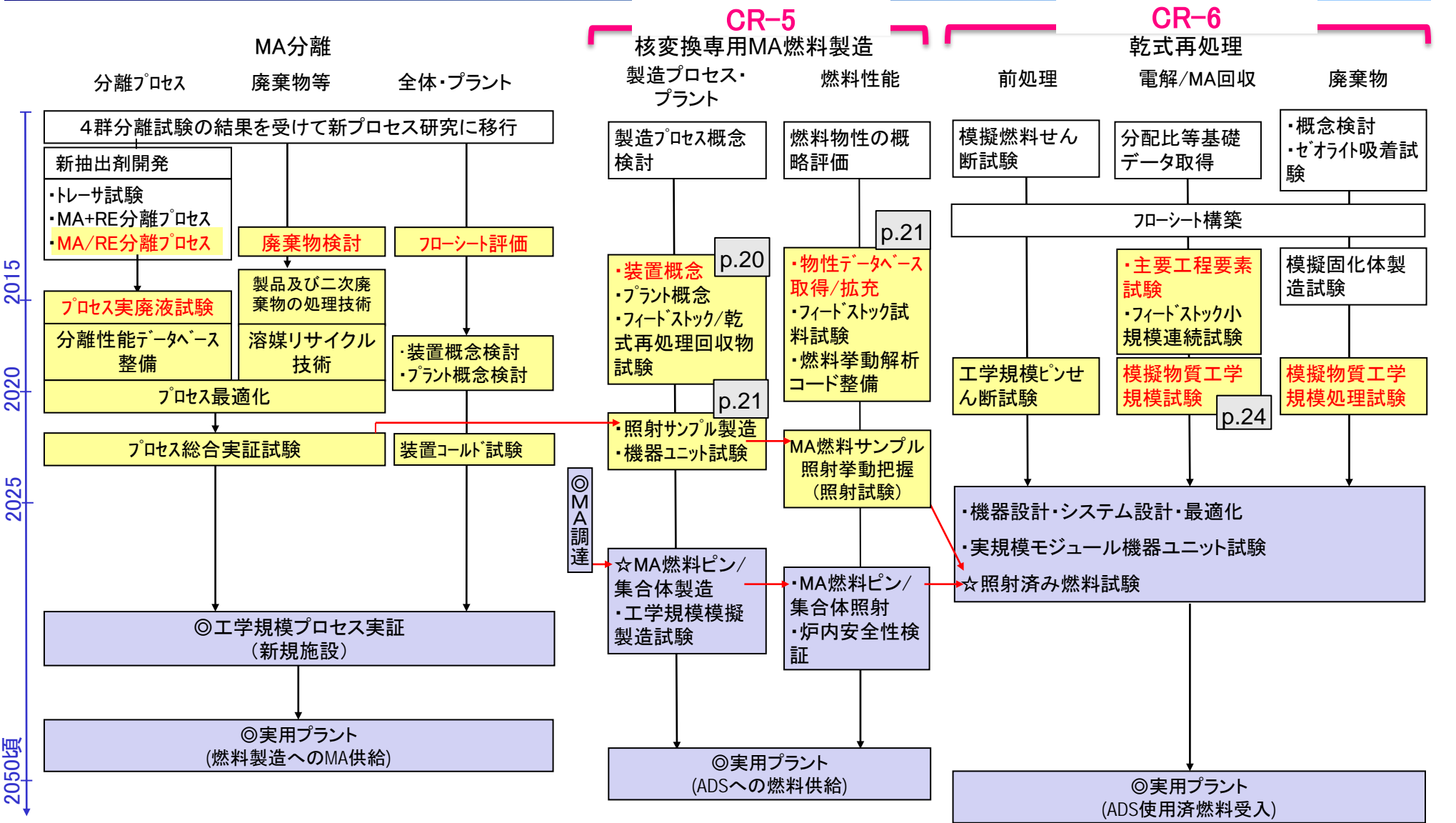
平成21年原子力委員会C&Rにおける指摘事項と対応状況

番号	原子力委員会C&Rでの指摘事項	対応状況(H27以降)
CR-5	所定の使用条件下での 燃料性能 及び高燃焼度を達成する 窒化物燃料 が製造できることを高い信頼度で確認すること	<ul style="list-style-type: none"> • MA含有窒化物燃料の物性データ測定と燃料ふるまいコードへの反映。 <ul style="list-style-type: none"> ✓ 被覆管との化学的両立性が良好なことを試験で確認。Cm含有ペレットによる蓄積Heの挙動データを取得。 p.21 ✓ 窒化物燃料物性データベースweb版公開。燃料ふるまい解析コードの改良を着実に実施。 ✓ 照射試験に向けて、セル内遠隔操作の燃料ピン作製装置を設計。 p.21 • MA含有窒化物燃料の製造技術開発を実施。 <ul style="list-style-type: none"> ✓ 外部ゲル化法による高純度窒化物粒子作製技術を模擬物質で確立。 p.20 ✓ ZrN母材型ペレットの焼結密度制御技術をPu含有試料で実証。 p.20 ✓ ¹⁵N₂ガス製造・循環利用に関し、技術的・経済的に実現可能な見通しを得た。
CR-6	窒化物燃料の乾式再処理 による燃料サイクルシステムの 実用性 を示すこと	<ul style="list-style-type: none"> • 再処理プロセス目標(99.9%回収、RE濃度5%以下)を満たすプロセスフローを提示。 • 各工程のコールド試験を実施。 <ul style="list-style-type: none"> ✓ せん断試験装置概念の妥当性を、模擬燃料ピンを用いた試験で確認。 ✓ 窒化物の溶解に適した陽極の有効性を、模擬試料を用いた試験で確認。 p.24 ✓ 準工学規模の電解回収物窒化試験装置を製作し、十分な性能を示すことを確認。 p.24



ロードマップ：分離・燃料サイクル

1. 概要



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
→ MA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)

更に将来の部分。MA取り扱い設備・施設の新設が必要な部分を☆(～10gMA)及び◎(kgMA～tMA)で示した。

JAEAの第3期中長期計画(平成27～令和3年度)

JAEAの第3期中長期計画(該当箇所の抜粋)(達成状況については、参考資料p.30に提示)

- MAの分離変換のための共通基盤技術の研究開発

MAの分離技術に関する複数の候補技術のプロセスデータ、高レベル放射性廃液を用いた試験による分離回収データ等を取得し、MA分離回収に関する技術的成立性を評価する。

幅広い組成のMA燃料の基礎データを取得するとともに、MA燃料製造に関する技術的成立性を評価する。

- 加速器駆動システム(ADS)を用いた核変換技術の研究開発

J-PARC核変換実験施設の建設に向けて必要な要素技術開発、施設の検討や安全評価等に取り組み、外部委員会による評価を受けた上で、目標期間内に建設着手を目指す。

また、ADS概念設計、ターゲット窓材評価、MA燃料乾式処理技術開発等を行うとともに、国際協力によりADS開発を加速させる。

年度	H27	H28	H29	H30	H31/R1	R2	R3
MA分離技術開発	トレーサ試験	実廃液試験	FS試料回収実廃液試験	技術的成立性評価			
MA窒化物燃料 基礎物性	模擬物質・MA試料による基礎特性・挙動データ取得					技術的成立性評価・	
照射試験用機器	セル内機器検討・概念設計			基本設計・詳細設計		照射試験検討	
乾式処理 小規模試験	模擬物質による再処理試験						
コールド工学機器設計	技術検討、予備試験				準工学機器試験		
ADSターゲット試験施設(TEF-T)	要素技術開発・設計				施設建設		
核変換物理実験施設(TEF-P)	要素技術開発・概念検討				許認可		実施設計
ADS概念設計	炉物理実験(未臨界度測定手法、核データ検証)				ADS概念検討への反映		
ターゲット窓材評価	試験装置の整備(Pb-Bi槽等の設置)				コールド試験		ホット試験準備

2. ADS

実用規模ADS概念検討

目的 実用ADS概念の構築・改良

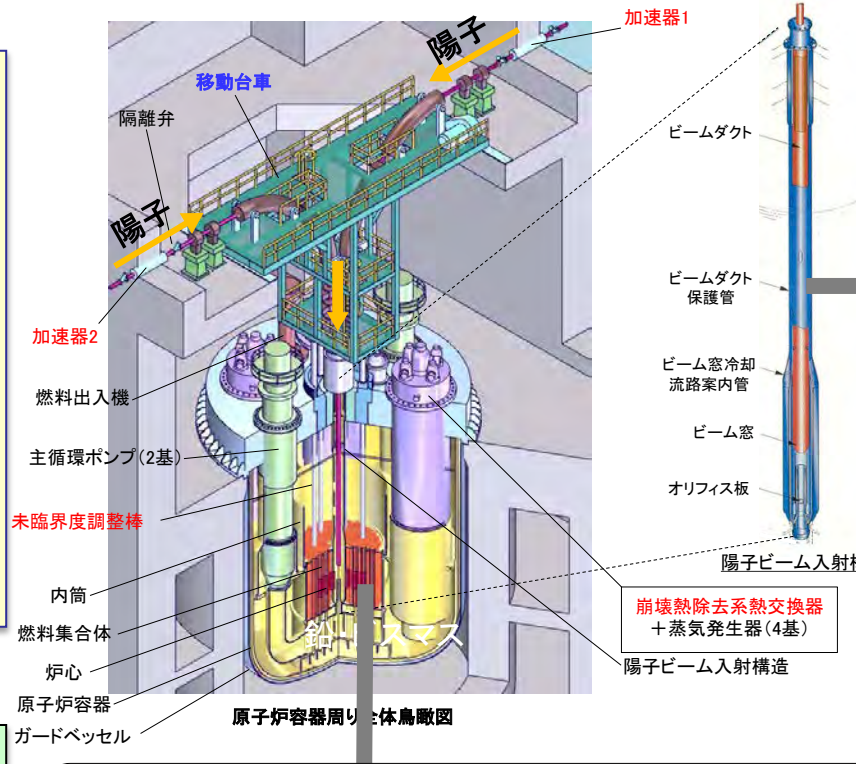
結果

- 陽子ビーム入射部の統合的な解析システムの構築により**高信頼・高精度な解析を実現**、
- 未臨界度調整**により、未臨界度の変化を最小化し、加速器・ビーム窓設計条件を緩和。同時にPu核変換などのための多様な炉心燃料への適用性を向上。
- 自然循環を用いた崩壊熱除去**より、受動的な安全性を向上

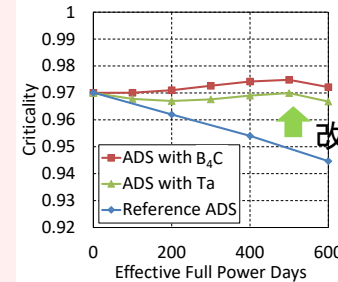
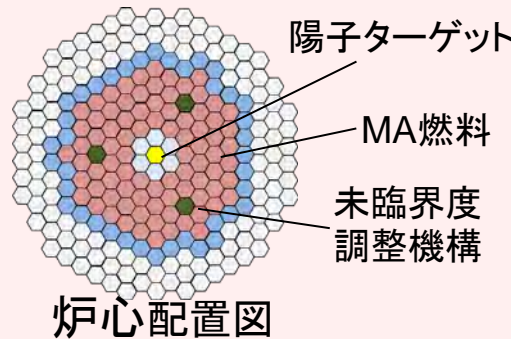
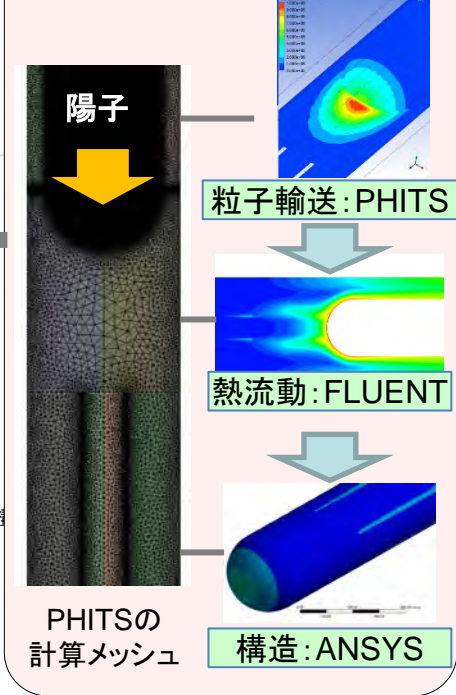
今後

- 解析の大規模化・詳細化による精度向上ならびに、統合的な解析システムによる設計効率化
- 陽子ビーム入射部への材料研究成果の反映による高信頼化
- 目的に応じた柔軟なADS概念の創出

安全性・安定性に優れたADSプラント概念



同一ジオメトリによる高信頼・高精度な解析を実現



運転中の臨界度変化

未臨界度調整機構の設置により、運転中の未臨界度変化を大幅に抑制し、加速器・ビーム窓の負担を低減した。

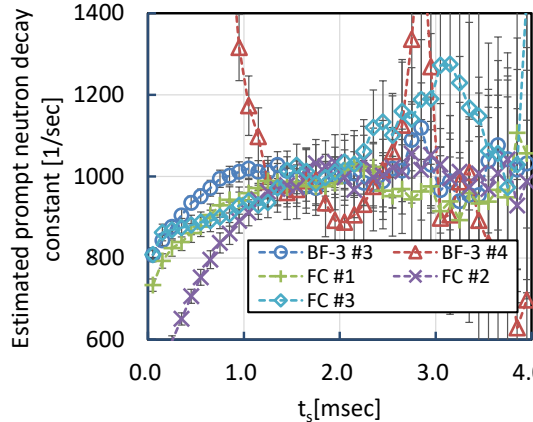
炉物理実験(国内外研究機関との共同実験)

目的

ADSの未臨界度監視技術を確立する。

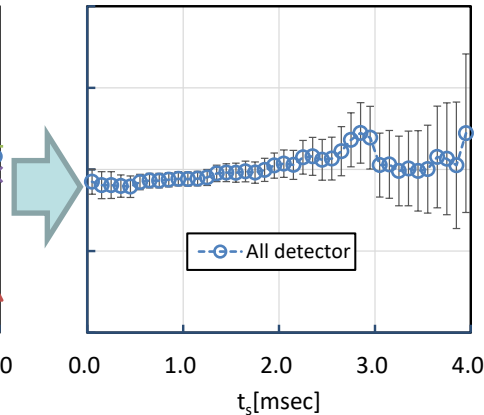
従来法

- ✓ 検出器毎に異なる値
- ✓ フィッティング開始時間・検出器位置による大きなばらつき



新手法

- ✓ 全ての検出器情報を用いて一つの値
- ✓ フィッティング開始時間に対して頑健



京都大学臨界実験装置KUCAにおける測定手法の検証
(フィッティング開始時間を変化させた時の即発中性子減衰定数 α の解析結果)

結果

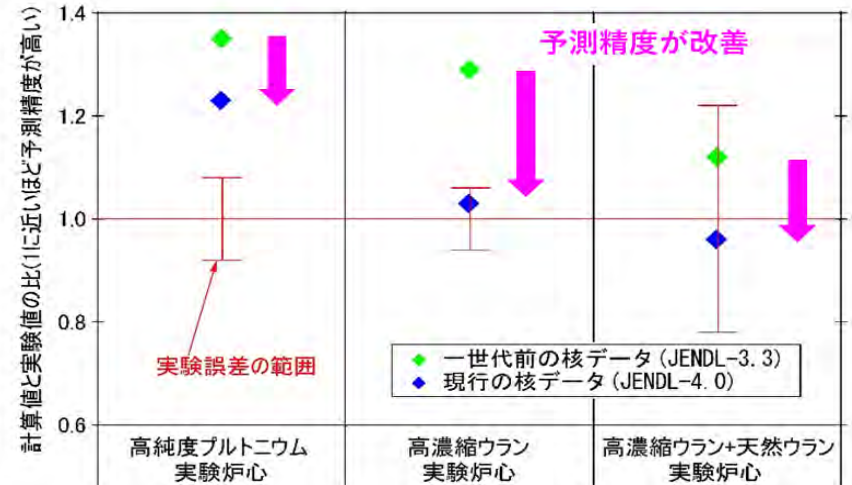
検出器の位置の影響を低減させる手法を開発し、陽子加速器と組み合わせた臨界実験装置で実証

今後

ADS実機の炉心構築時及び、運転時の未臨界度監視設備の概念設計を行う。

目的

低エネルギー陽子・中性子、少量MAを用いて、ADSに用いる核データを検証



米国COMET炉の鉛置換反応度実験結果: 現行の核データ(JENDL-4.0)の予測精度は、一世代前に比べて改善していることを確認

結果

- 鉛置換反応度取得(米国COMET炉、京大KUCA)
- MA断面積検証データを取得(京大KUCA)

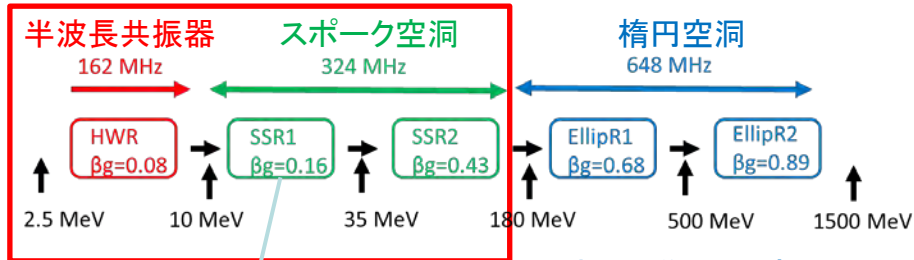
今後

一連の検証実験のデータベース化を進め、ADS核設計の信頼性を向上

ADS用加速器開発

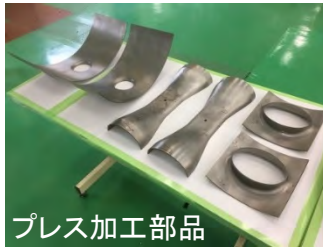
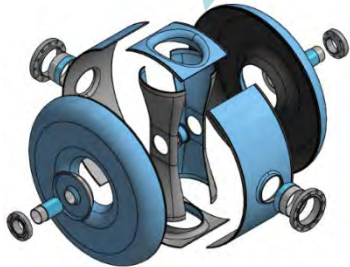
目的 ADSに求められる高い信頼性(少ないビームトリップ)、および高い経済性(少ない消費電力)を有する超伝導加速器を開発

超伝導リニアック設計・試作



ビーム光学設計により、低エネルギー部まで超伝導化した基本設計を完成させた。

超電導設計済み



ニオブ板を用いた超伝導加速空洞の試作に着手

プレス加工部品

大強度加速器の信頼性評価

- 加速器のビームがトリップ(停止)すると、ADS炉心構造材料の熱疲労および稼働率低下の原因となる。
- ADS材料・稼働率の点から許容できるトリップ頻度を求め、J-PARC線形加速器(常伝導)の運転実績と比較
- 5分以下のトリップ頻度は概ね許容値を満足するが、**5分以上のトリップ頻度を1/5程度に低減**する必要がある。

停止時間	(A) ADS許容トリップ頻度	(B) 2020年度J-PARC実績	(B) / (A) < 1ならOK
0 ~ 10 s	20,000	0 *1	0
10 s ~ 5 min	2,000	2,209 *2	1.1
> 5 min	42	226	5.4

*1 再起動には運転員の判断を要するため、10 s 以下の復帰は無い。

*2 2020年度からRFQ自動復帰技術の導入により、半分以下に減少

結果 低エネルギー部まで超伝導化した加速器設計を完成し、加速空洞の試作に着手した。

現状の大強度加速器のビームトリップ頻度は、ADSにとって過大であることを明らかにした。

今後 KEK、理研(ImPACT等で超伝導加速空洞開発)、量研(IFMIF)、ベルギー原子力研究センター(MYRRAH)等と連携し、ADS用超伝導加速器開発を継続するとともに、ビームトリップ低減策の検討を進める。

3. 核変換実験施設 (TEF)

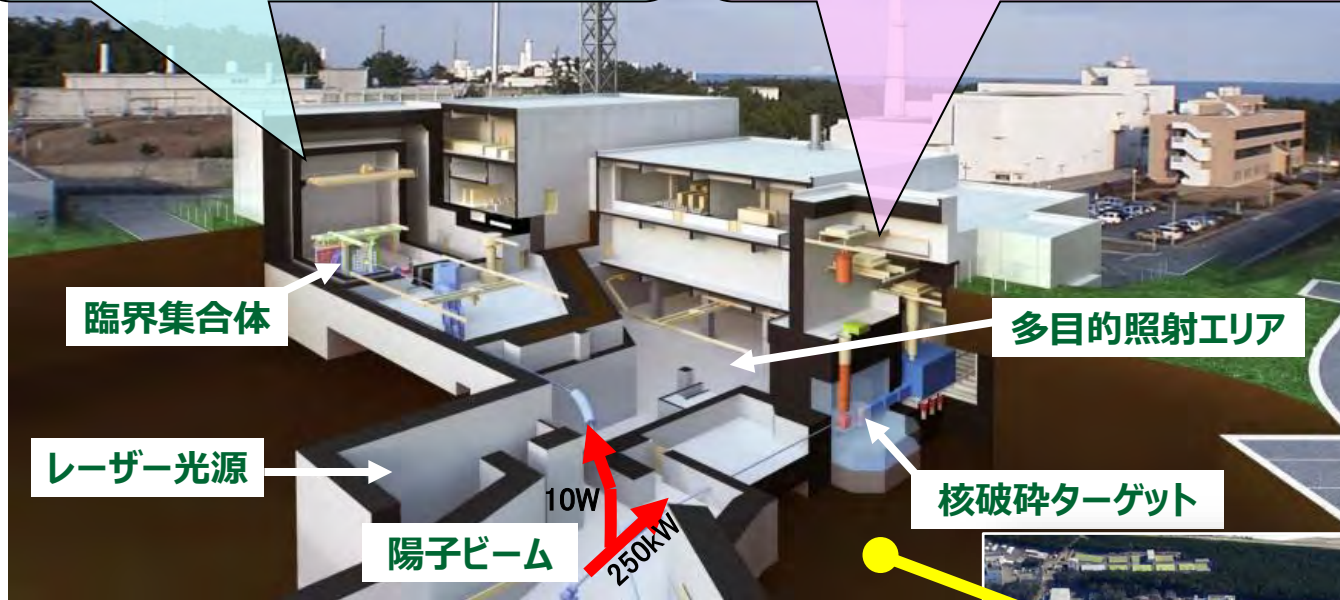
J-PARCにおける核変換実験施設計画

核変換物理実験施設:TEF-P

目的： 低出力で未臨界炉心の物理的特性探索とADSの運転制御経験を蓄積
 施設区分： 原子炉（臨界実験装置）
 陽子ビーム： 400MeV-10W
 熱出力： 500W以下

ADSターゲット試験施設:TEF-T

目的： 大強度陽子ビームでの核破碎ターゲットの技術開発及び材料の研究開発
 施設区分： 放射線発生装置
 陽子ビーム： 400MeV-250kW
 ターゲット： 鉛・ビスマス合金 (LBE)



大強度陽子加速器施設
 (J-PARC, 茨城県東海村)



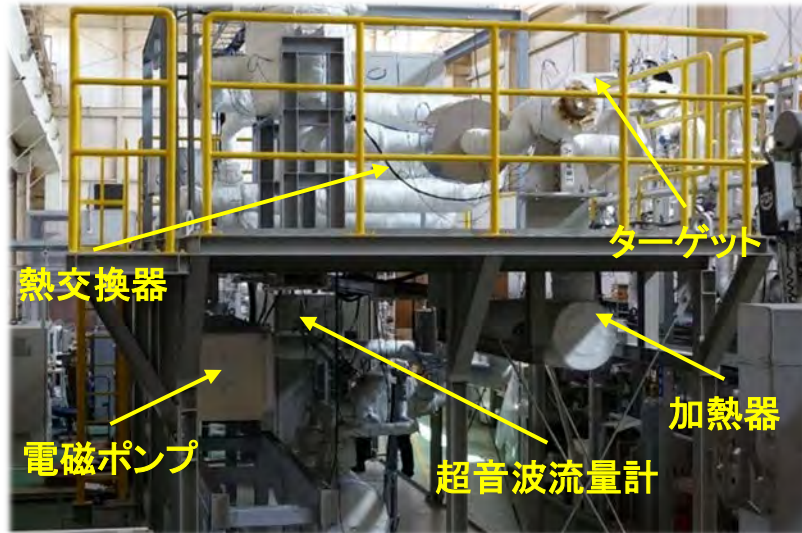
JAEA中長期計画 (H27~R3)

- ADSターゲット試験施設に関しては、早期に施設整備に必要な経費の精査や技術課題解決の見通し等について外部委員会による評価を受けた上で、目標期間半ばを目途に同施設の建設着手を目指す。
- 核変換物理実験施設に関しては、施設の設計・設置許可に向けた技術的課題解決の見通し等について外部委員会による評価を受けた上で、目標期間内に設置許可を受けて建設着手を目指す。

TEF-Tのための要素技術開発

目的

ターゲットモックアップループを用いたLBEループ総合性能試験を実施し、TEF-T運転に必要なLBE取扱技術確立の見通しを得る。



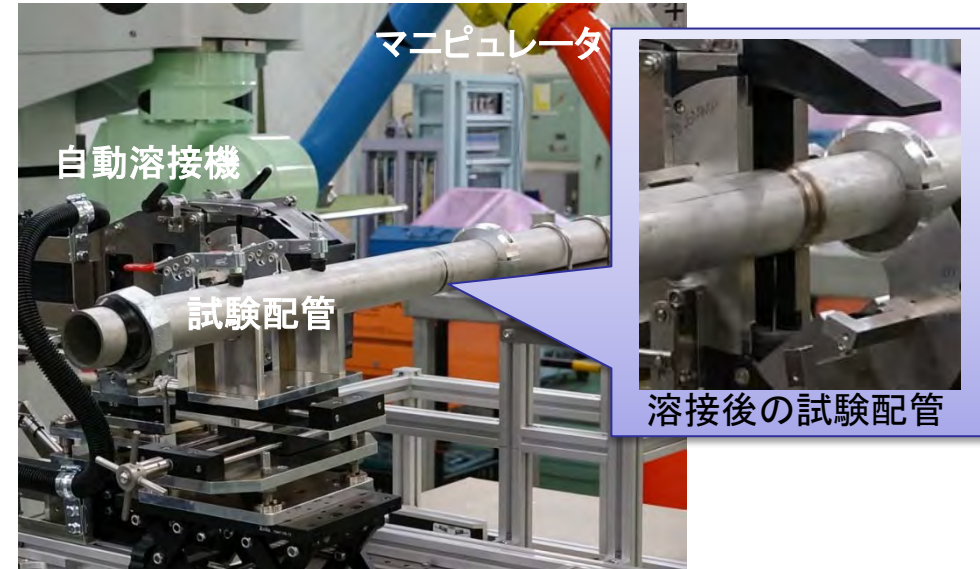
ターゲットモックアップループの外観

結果

- 非接液型超音波流量センサを開発、実装。
- 鋼材の腐食抑制に必要な酸素濃度センサおよび酸素濃度自動制御技術を開発、実装。
- 実機で想定される温度域での等温運転及び温度差運転による総合性能試験を通じて、LBE取扱技術確立の見通しを得た。

目的

遠隔操作によるLBEターゲット容器交換作業に必要な配管の切断・接続技術について、モックアップ試験を行い実用の見通しを得る。



試験用ジグによる配管遠隔溶接試験の状況

結果

- 遠隔操作によるLBEターゲット容器配管の切断、溶接、溶接後の検査を含むモックアップ試験装置を製作。
- モックアップ試験を実施し、一連の遠隔交換作業手順の実用の見通しを得た。

TEF-Pの安全に係る研究開発

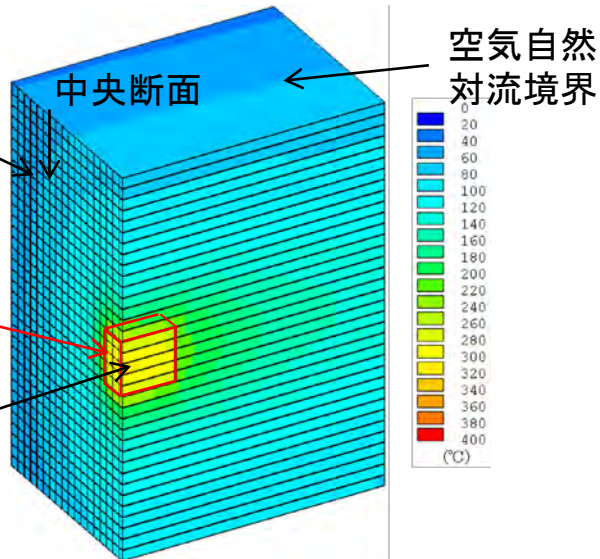
目的

事故時(炉心冷却機能・停止機能喪失時)の炉心温度上昇を評価

格子管を35行35列組上げた炉心(1/4モデル)

MA装荷部

中心最高温度:
303°C

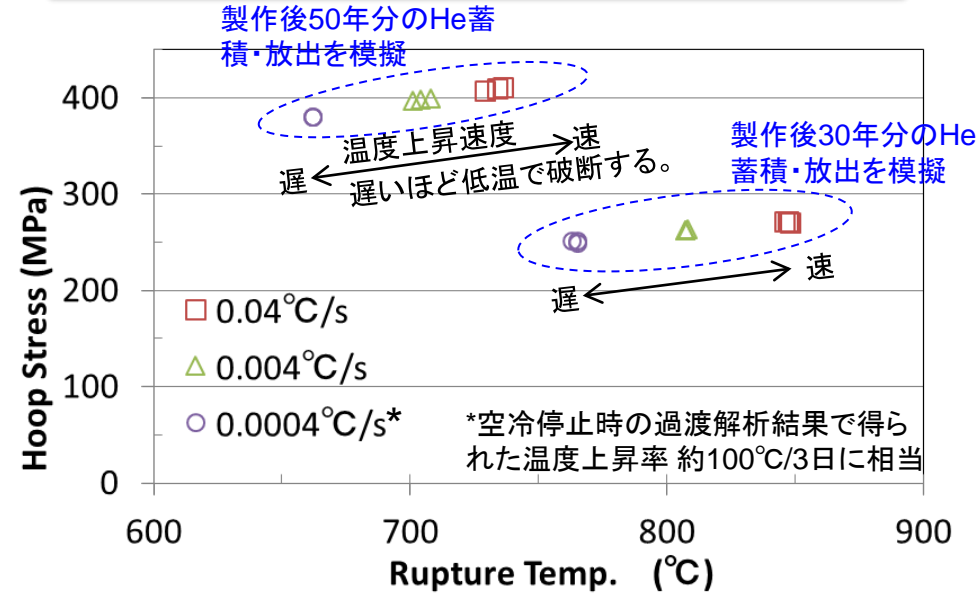


MA燃料空冷停止・炉心分離失敗後の平衡温度分布

結果

最大の発熱(2.75kW)条件で、空冷停止と炉停止失敗を想定した場合でも、炉心最高温度は、300°C程度であり、炉心は健全であると評価

被覆管高温破裂試験により、事故時の燃料健全性を検証



破裂温度とフープ応力の関係

600°C以下では被覆管は破断せず、燃料は健全であることを確認

⇒ 周辺公衆に過度の放射線被ばく(5mSv/イベント)を及ぼす恐れはないため、Bクラスの試験研究用等原子炉施設に該当すると判断し、設置許可申請に向けた安全設計書を作成

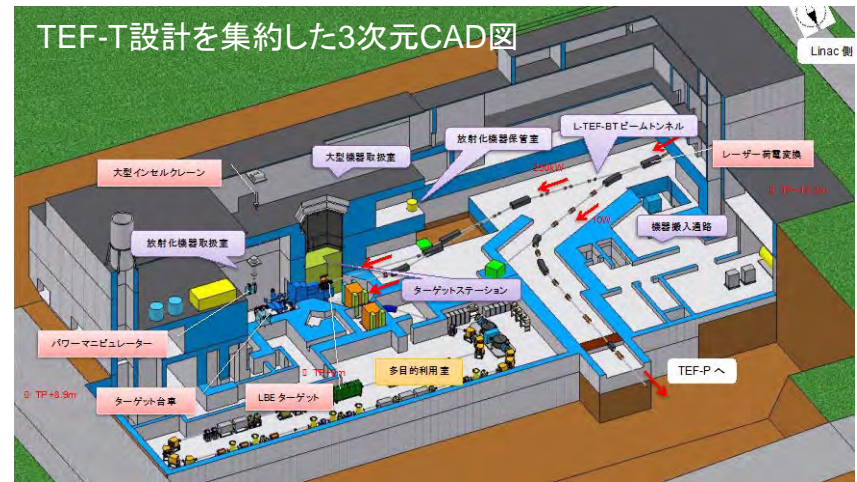
TEF設計取りまとめと将来構想

TEF-T技術設計書 (JAEA-Technology 2017-003, 539ページ)

- ✓ 施設の目的、核特性解析、主要構成機器 (LBEターゲットシステム、陽子ビーム輸送機器等)、建家設計、安全性等を記載

TEF-P安全設計書 (JAEA-Technology 2017-033, 383ページ)

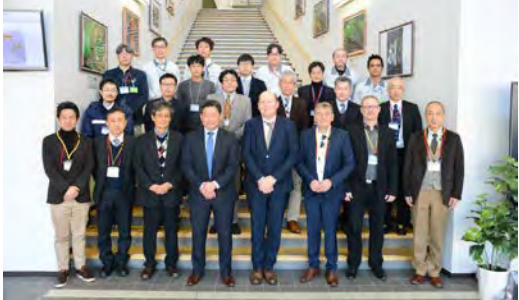
- ✓ 「原子炉施設の安全設計に関する説明書」(添付書類8相当)
- ✓ 「原子炉施設において事故が発生した場合における当該事故に対処するために必要な施設及び体制の整備に関する説明書」(添付書類10相当)



将来構想

- ✓ 早期の施設整備に代えて、シミュレーションを活用した研究成果を反映しつつ、施設概念の見直しを進める。
 - ✓ 具体的には、ADSの工学的課題解決に加えて、陽子・中性子照射場として多様なニーズを受け入れることが可能な陽子照射施設として新たな構想を進める。
 - ADS材料照射 と LBEターゲット取扱技術開発
 - 大強度加速器 (J-PARC等) の材料照射
 - 核融合炉・原子炉材料照射
 - 効率的な照射後試験のためのホットラボ
 - 半導体ソフトエラー試験
 - RI製造、陽子ビーム利用研究 等
- (本TF第2回会合で議論)

T-TAC: TEFに関する国際技術諮問委員会



- T-TACは、良くまとめられたTEF-T技術設計書を評価するとともに、TEF-Tの概念設計は完結し、基本設計が十分に進捗していると認める。(2019年2月)
- T-TACは、良くまとめられたTEF-P安全設計書が刊行されたことに注目する。(2018年2月)

4. MA燃料製造

想定する実燃料製造フローと研究開発項目

4. MA燃料

外部ゲル化技術 p.20

- 形状・直径制御
- 窒化特性
- 窒化粒子性状(密度等)

窒素15関連技術

- 濃縮プラント実現性
- コスト評価
- 経済的利用技術

焼結密度制御技術 p.20

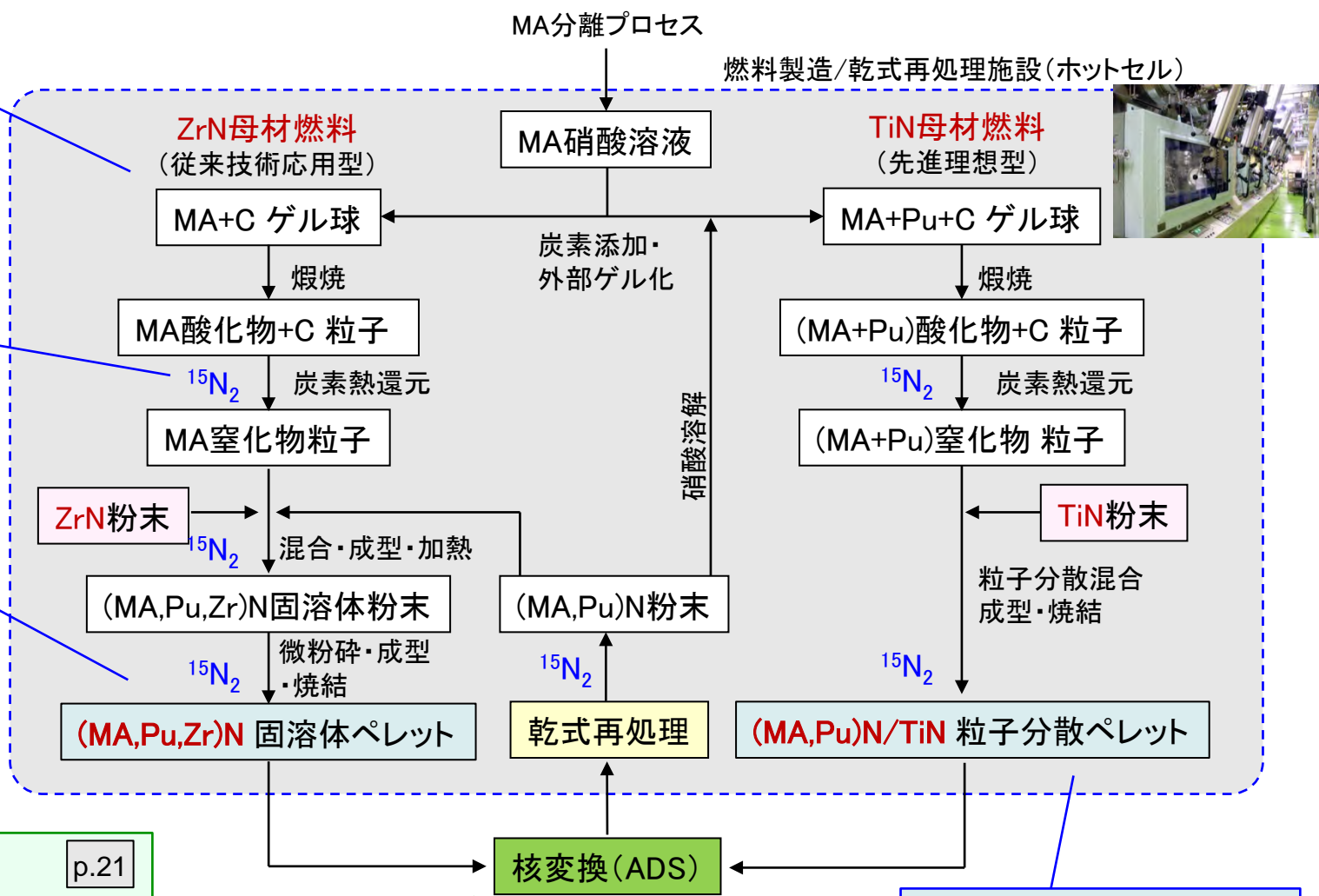
- 緻密な組織
- なおかつ気孔率制御(気孔形成材)

燃料物性DB・ふるまい解析 p.21

- 物性DB拡充、ふるまい解析コード改良
- 被覆管との両立性、蓄積He
- 照射試験に向けた取り組み

先進型ペレット技術

- 粒子均質分散性
- 粒子/TiN母材密度制御



燃料製造/乾式再処理施設(ホットセル)

MA分離プロセス

ZrN母材燃料
(従来技術応用型)

TiN母材燃料
(先進理想型)

MA+C ゲル球

MA+Pu+C ゲル球

煆焼

煆焼

MA酸化物+C 粒子

(MA+Pu)酸化物+C 粒子

$^{15}\text{N}_2$ 炭素熱還元

$^{15}\text{N}_2$ 炭素熱還元

MA窒化物粒子

(MA+Pu)窒化物粒子

ZrN粉末

TiN粉末

$^{15}\text{N}_2$ 混合・成型・加熱

粒子分散混合
成型・焼結

(MA,Pu,Zr)N固溶体粉末

(MA,Pu)N粉末

$^{15}\text{N}_2$ 微粉碎・成型・焼結

$^{15}\text{N}_2$

(MA,Pu,Zr)N 固溶体ペレット

乾式再処理

(MA,Pu)N/TiN 粒子分散ペレット

核変換(ADS)

硝酸塩溶解

炭素添加・
外部ゲル化

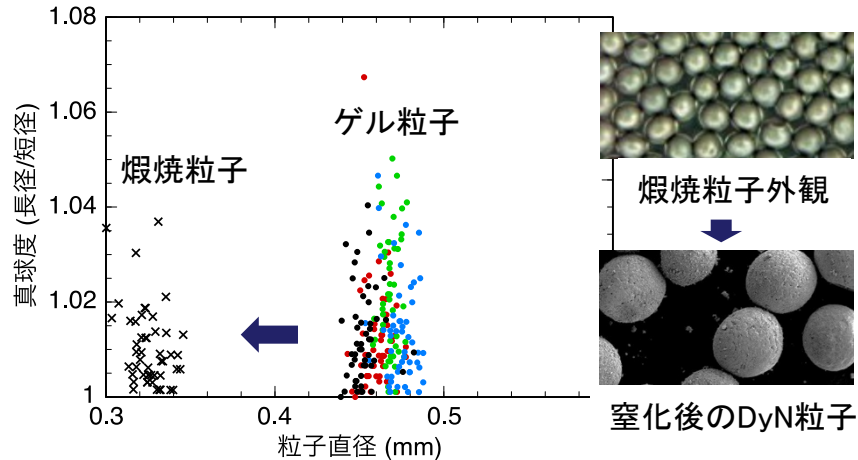
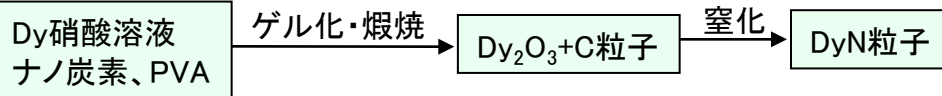
MA窒化物燃料製造

4. MA燃料

目的

粉末プロセスを排したTRU窒化物粒子を得るための外部ゲル化基礎技術確立

- 希土類のDy (TRU模擬)を用いた粒子作製試験で諸条件を最適化



粒子直径と真球度の分布

結果

- 球形状・直径を再現性良く制御可能な諸条件を確立
- 粉末プロセスに比べて高純度の窒化物が容易に得られることを実証 (ZrN母材燃料には十分)

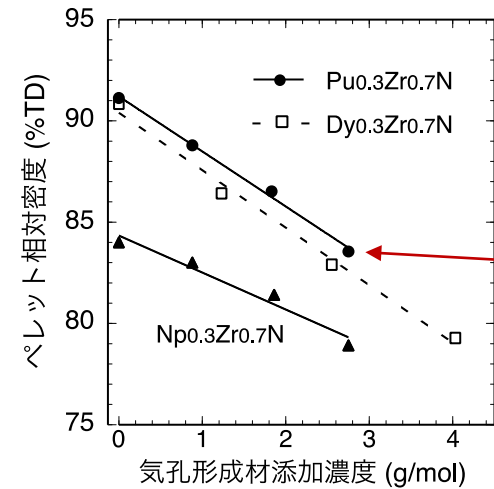
今後

- ゲル化のTRU実証に向けたGB用機器検討
- 窒化物粒子密度向上のためのゲル化条件見直し

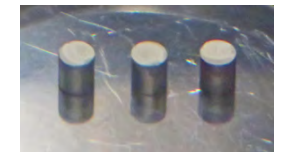
目的

緻密な組織かつスエリング対策のための気孔率制御 (ZrN母材燃料)

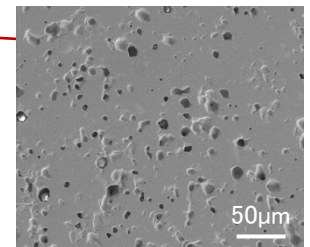
- 高密度化のための遊星ボールミルによる粉砕条件を確立
- 気孔形成材 (有機系ポリマー微粒子) を添加して焼結



添加濃度と相対密度の関係 (ポリエステル系)



(Pu,Zr)Nペレット



ペレット断面組織 (気孔が分散)

結果

有望な気孔形成材を選定し、気孔率制御をTRUで実証

今後

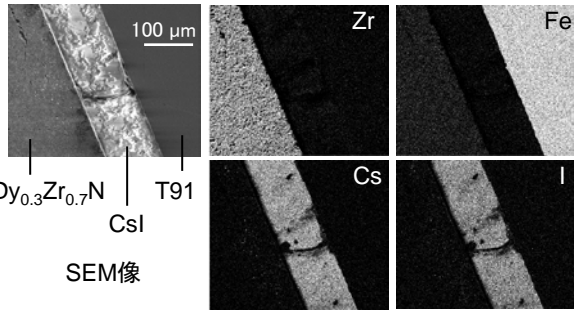
- TRU元素の種類による焼結性相違
- 照射試験用燃料への適用

燃料物性データ・燃料ふるまいコード

目的

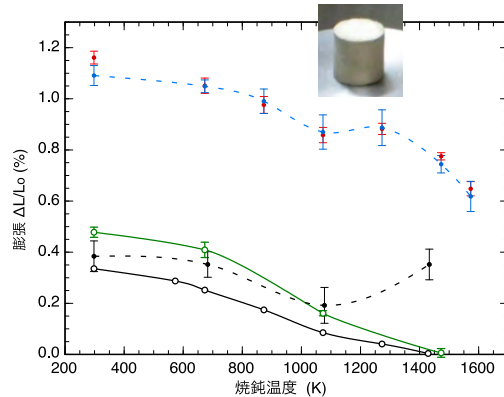
燃料ふるまい解析コードの実用性向上

- 被覆管候補材との高温化学両立性(左図)、蓄積He放出等の試験データ(右図)取得
- レーザー照射局所加熱によるごく短時間での非接触融点測定技術を開発中
- 窒化物燃料物性DBのweb版を公開
- FEMAXI用窒化物燃料解析モジュールに各種モデルを追加して感度解析を実施



元素分布像

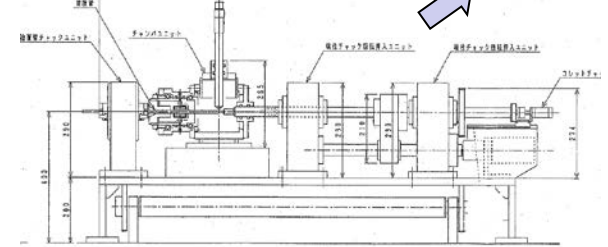
模擬燃料-CsI-T91鋼の長時間加熱試験断面
(500°C-60日、He封入)～反応の痕跡なし



室温で膨張した(Pu,Cm,Zr)Nペレットの
焼鈍曲線～ポイドスエリングが大きく残存

ふるまい理解・燃料設計への反映のため照射試験に向けた準備

- NUCEFでの燃料作製、常陽での照射・FMFでのPIEを想定して準備
- セル内遠隔用機器の基本設計を実施



セル内遠隔操作の端栓溶接装置

- 国外での試験も並行して検討開始
(INLの照射済試料活用及び国外で作製、照射、PIE)

- 被覆管候補材との両立性良好(照射試験に適用可)
- 自己照射損傷によるペレットのポイドスエリングと高温回復挙動のデータ取得→解析コードへのモデル化
- ふるまい解析では、現状PCMIが課題となる見通し

今後

- 融点測定技術のTRU試料への適用を目指す
- ふるまい解析では、PIEデータのフィードバックが必須

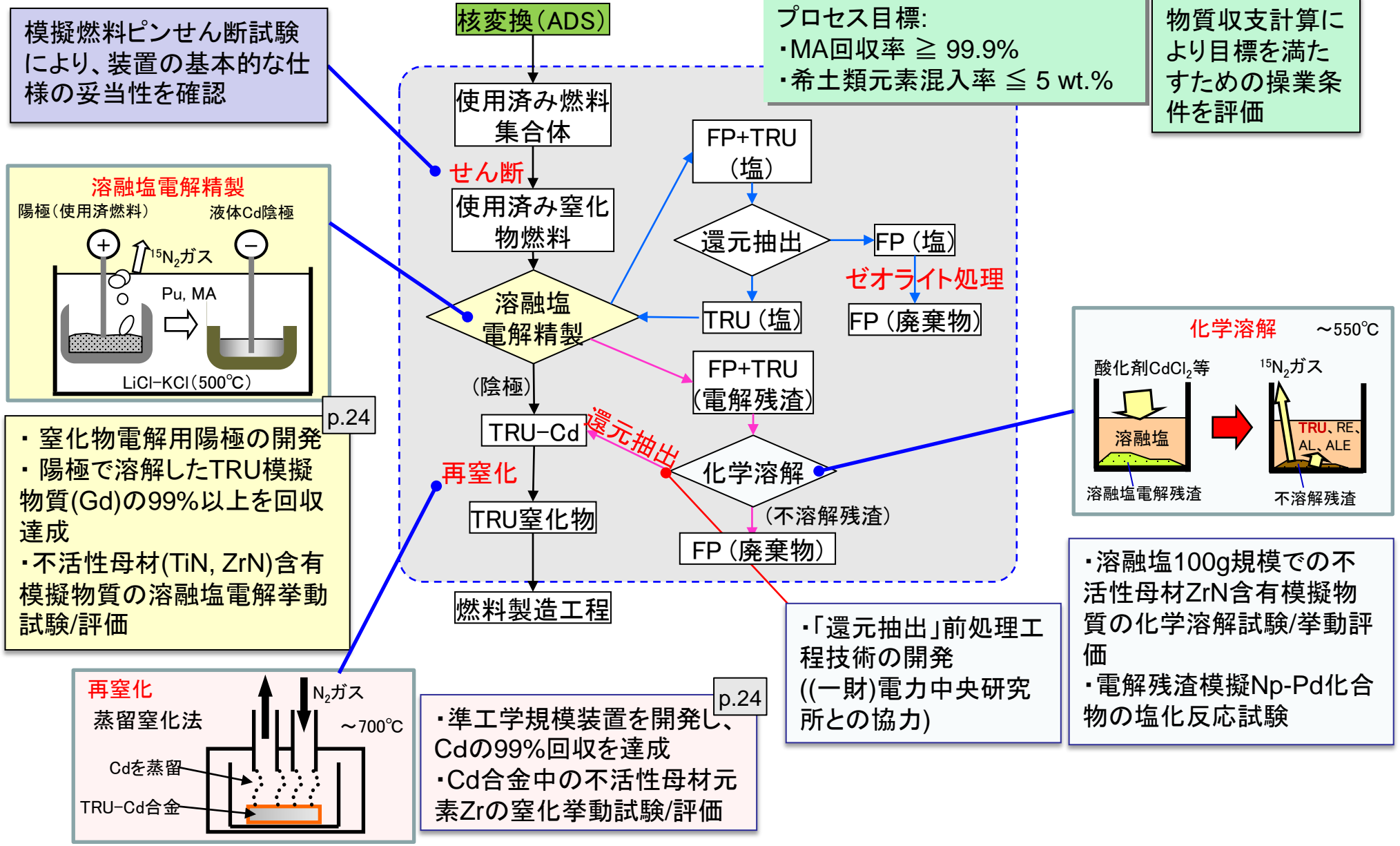
- 照射試験用ペレットの作製は現状可能
- 遠隔によるピン封入等の機器類の基本設計まで完了

- セル内遠隔機器の製作、設置
- Am入手、照射のための各所との調整

5. MA燃料再処理

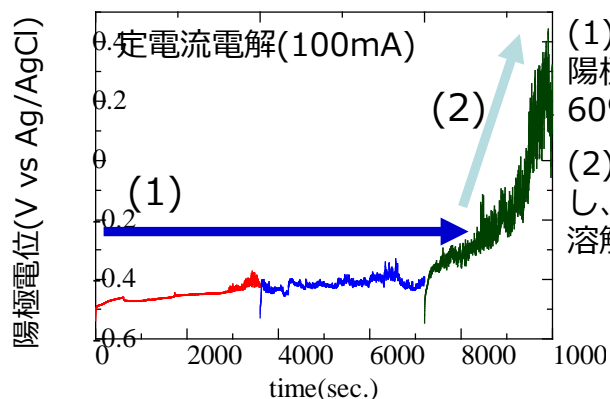
5. 乾式処理

想定する乾式再処理フローと研究開発項目



工学規模試験に向けた装置開発

目的 熔融塩電解装置用電極の開発



- (1) 安定した電位で陽極溶解し、約60%のGdNが溶解
- (2) 陽極電位が上昇し、GdN及びTiNが溶解

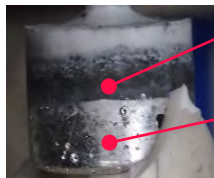
模擬物質(GdN-TiNペレット)の熔融塩電解挙動



GdN(40mol%)
-TiNペレット



陽極兼熔融塩
容器(内部にペ
レット設置)



Cd 陰極
(電解試験
終了後)

上部析出物
(Ti+少量Gd含有)

Cd相
(大部分の
Gdを含有)

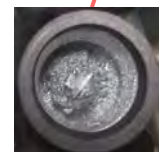
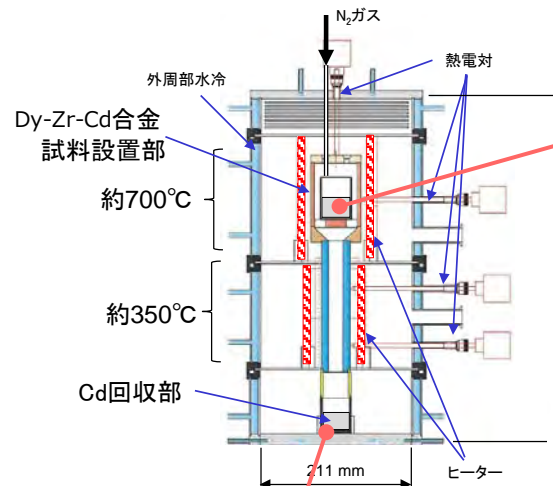
結果

- ・ 不活性母材を含まない模擬物質で**99%以上の回収**を達成
- ・ 不活性母材(ZrNまたはTiN)を含む模擬物質を用いて熔融塩電解挙動を評価

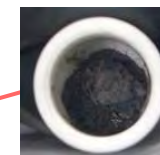
今後

選択的回収を行うための陰極及び電解条件の改良

準工学規模の再窒化装置の開発

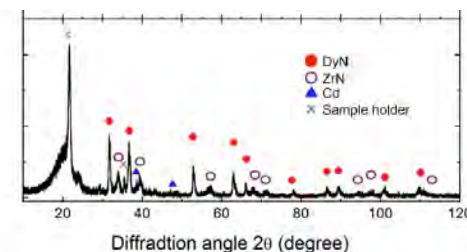


Cd 試料蒸
留試験で回
収されたCd



Dy-Zr-Cd合
金の窒素気流
中での加熱*
によって得ら
れたDyN-ZrN

*加熱条件：
700°C(4h)+750°C(4h)+800°C(4h)



X線回折測定結果(DyN-ZrN)

- ・ Cd金属のみを用いた試験で、蒸留による**Cdの回収率99%**を達成
- ・ Dy-Zr-Cd合金を用いた試験で、窒素気流中での加熱による**DyN-ZrN混合物への転換に成功**

得られた窒化物中に含まれる不純物の濃度を低減するための操作方法、及び装置の開発

6. 国際協力

ADSに係る国際協力

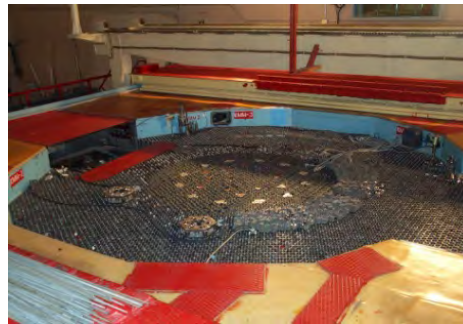
国際協力を最大限に活用し、実験データ取得や情報交換を行うことにより、効率的に研究開発を推進。

炉物理分野

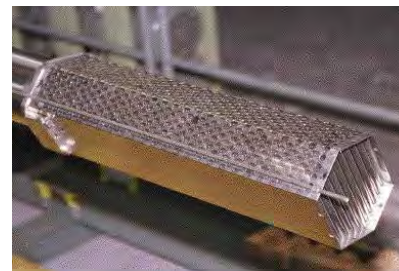
- ❑ 米国LANLとの共同研究: COMET臨界実験装置を用いて鉛の積分実験データを取得。
- ❑ ロシアとの情報交換: 臨界実験装置(BFS-1, -2)で取得された実験データとの交換を予定
- ❑ IAEA共同研究: JAEA設計ADSの燃焼解析ベンチマークを実施し、MA核データ起因の不確かさを検討。



COMET臨界実験装置
(LANL)



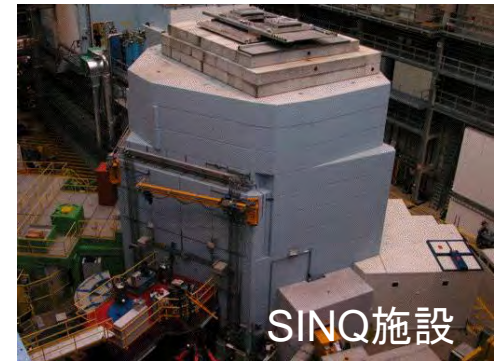
BFS-2 (ロシアIPPE)



SINQ核破砕ターゲット

材料照射・鉛ビスマス分野

- ❑ スイス・ポールシェラー研究所(PSI)との研究協力: 核破砕ターゲット照射プログラム(STIP-8)に参加。計49週間の照射を終了し(2018-2020年)、標的から試験片取出し後(2022年予定)、照射後試験を実施する予定。
- ❑ ベルギー原子力研究センター(SCK CEN)との研究協力: 核工学、LBE技術、加速器技術等について研究協力を実施。2021年11月に研究協力取決延長予定。
- ❑ ドイツ・カールスルーエ工科大学(KIT)との研究協力: 研究協力取決を締結(2020年6月)し、鉛ビスマス技術分野の協力を実施。



SINQ施設

まとめ

ADS

- 4つの開発分野(炉物理、Pb-Bi炉、ビーム窓、加速器)に対して、研究開発を実施し、解決・確証に向けた成果を得た。
- 炉物理およびビーム窓分野の開発に必要な**核変換実験施設(TEF)**については、現中長期計画期間での建設着手に必要なR&Dや施設設計を実施し、**建設着手の準備を整えた**。
- 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・知見を活用した施設概念および研究開発計画の再検討を行っている。

MA燃料製造

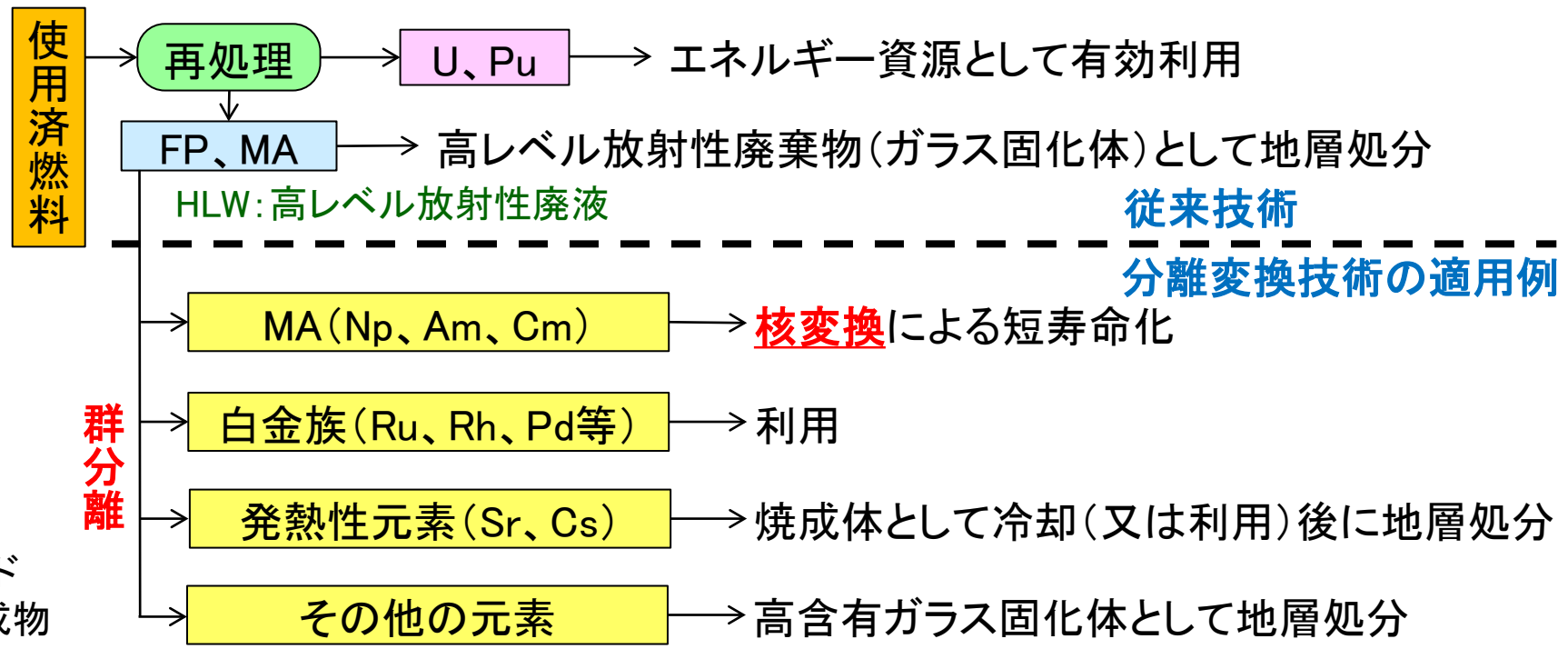
- 燃料性能を確証するために、物性データ測定、データベース構築、解析コード改良を実施し、照射試験に向けた準備を行った。
- 製造可能性の確証に向けて、**重要な要素技術について基礎技術の確立及び技術的見通しを得た**。
- 今後は、外部ゲル化法等の工学的要素技術のホット実証と照射試験用燃料の作製を進める。

MA燃料乾式再処理

- 実用性を示すために、回収目標を満たす再処理プロセスを提示し、**工学規模に向けたコールド試験で主要工程の性能を確認**した。
- 今後は、使用済MA窒化物燃料を模擬した試料等を用いた分離性能評価試験、及びコールド工学規模試験装置の開発を実施する。

参考資料

分離変換技術の概要・目的



MA: マイナーアクチノイド
FP: 核分裂生成物

分離変換技術
高レベル放射性廃棄物に含まれる放射性核種を、その半減期や利用目的に応じて分離する（**分離技術**）とともに、長寿命核種を短寿命核種あるいは非放射性核種に変換する（**核変換技術**）ための技術

放射性廃棄物の減容化・有害度低減

- 目標**
- ・**長期リスクの低減:**
廃棄物の潜在的有害度の総量を大幅に低減
 - ・**処分場の実効処分容量の増大:**
発熱の大きい核種を除去してコンパクトに処分
 - ・**放射性廃棄物の一部資源化:**
希少元素の利用(白金族など)

JAEAの第3期中長期計画(平成27～令和3年度)

	JAEAの第3期中長期計画(該当箇所の抜粋)	達成状況	論文数
A D S、 乾式再処理	J-PARC核変換実験施設の建設に向けて必要な要素技術開発、施設の検討や安全評価等に取り組み、外部委員会による評価を受けた上で、目標期間内に 建設着手を目指す 。	<ul style="list-style-type: none"> ADSターゲット試験施設(TEF-T)の鉛ビスマスループのモックアップを製作し、運転能力を実証した。 TEF-Tのターゲットシステム概念の詳細化及び施設全体の設計を行い、技術設計書として公表した。これにより、技術的観点からの建設着手の準備を完了した。 核変換物理実験施設(TEF-P)について、MA含有燃料の遠隔での炉心装荷技術開発、微小出力陽子ビーム取出し技術等の必要な要素技術開発を実施した。 施設の設置許可申請に向けて安全上重要な施設・設備に対する安全要求事項を整理し、安全設計書として公表した。これにより、TEF-Pの安全設計を完成させ、許認可申請に必要な準備を完了した。 	主著論文 90報
	ADS概念設計、ターゲット窓材評価、MA燃料乾式処理技術開発等を行うとともに、国際協力によりADS開発を加速させる。	<ul style="list-style-type: none"> ADS概念設計のために陽子粒子輸送、熱流動、構造解析からなる連成解析システムを開発し、ビーム窓の設計等を実施した。また、ADS核データ検証実験、新たに開発した未臨界度測定手法の実証実験等を行った。 ターゲット窓候補材に対して実ADS環境を模擬した加速器照射で、照射影響データを取得した。また、高精度に酸素濃度を制御した鉛ビスマス中での腐食データを取得し、腐食予測式を構築した。 MA核変換用窒化物燃料の乾式処理技術では、模擬物質を用いた熔融塩電解試験及び再窒化試験を実施した。コールド工学機器試験のための仕様を取りまとめた。 	
燃料製造	<ul style="list-style-type: none"> 幅広い組成のMA燃料の基礎データを取得する。 MA燃料製造に関する技術的成立性を評価する。 	<ul style="list-style-type: none"> MA窒化物燃料の熱機械特性データ、被覆管候補材との高温化学両立性、蓄積Heの影響などの基礎データを取得した。 ゾルゲル法により、粒子径・形状を制御した高純度な窒化物粒子が得られることを実証した。焼結時の気孔形成材添加技術を開発し、NpやPuを用いて実証した。また、15N同位体濃縮技術を開発し、実用化可能な目処を付けた。 	

酸化物燃料高速炉サイクル(MA均質サイクル)の研究開発課題(1/2)

平成21年原子力委員会C&Rにおける指摘事項と対応状況

原子力委員会C&Rでの指摘事項	対応状況(H27以降)
<p>MA核種を含むMOX燃料をMA核種による強い発熱・高い線量に阻害されずに実用的に製造できるプロセスを構築すること</p>	<ul style="list-style-type: none"> MA核種の発熱・線量の影響防止に有効な簡素化ペレット法に関しては、主な製造工程設備概念の開発・試験、また転換工程からペレット焼結に至る一連の製造プロセスに対する小規模MOX試験等を実施することにより、脱硝・転換・造粒一元処理技術については、流動性が良好(Carrの流動性指数60以上)な造粒粉が得られること等、ダイ潤滑成型技術については十分な成型速度(7.5個/分・パンチ以上)等を確認し、実効的な簡素化法システム実現の見通しを得るとともに、簡素化法を導入した将来のMA含有MOX燃料製造施設の概念を構築した。なお、簡素化法による転換工程からペレット焼結に至る総合試験については、2021年度中に完了する計画である。さらに、遠隔保守性に優れる革新的な焼結技術であるマイクロ波焼結技術等に関するコールド試験を実施し、処理時間を半分程度に短縮できる可能性があること等を確認した
<p>炉心に対する安全要求を満足してMA核種を5%まで装荷できる炉心を実現すること</p>	<ul style="list-style-type: none"> FaCTフェーズI(～2010)及びその後の安全性・信頼性向上の研究開発(2011～2015)において、炉心に対する安全要求を満足してMA核種を炉心平均3%程度(局所的には5%まで)装荷できる次世代ナトリウム冷却高速炉の炉心概念を構築した。また、廃棄物減容・有害度低減研究(2014～)において、次世代ナトリウム冷却高速炉の技術をベースとして、高次化Puの受け入れやPuの増殖・燃焼、MAの核変換の観点から性能を向上した炉心概念を構築した。それら炉心の許認可に向けて、炉心設計解析手法の検証・妥当性確認に関する技術開発を実施し、高速原型炉「もんじゅ」や高速実験炉「常陽」を始めとする国内外の施設で測定された高次化Pu及びMAの炉物理実験データを統合して炉心設計精度の確認・向上を行った。また、更なる実験データの拡充のため、ロシアや米国との国際協力を開始した

酸化物燃料高速炉サイクル(MA均質サイクル)の研究開発課題(2/2)

平成21年原子力委員会C&Rにおける指摘事項と対応状況

原子力委員会C&Rでの指摘事項	対応状況(H27以降)
<p>所定の使用条件の下で、高い燃焼度を高い信頼度で達成できる燃料が製造できること</p>	<ul style="list-style-type: none"> 長寿命被覆管材料の酸化物分散強化型(ODS)鋼について、基準類の整備に不可欠な高温・長時間強度データの取得を継続し、実用化段階の高速炉で想定される燃料の使用時間を超える9万時間超のクリープ強度データを取得した。その結果、フェライト系耐熱鋼として世界最高レベルのクリープ強度を長時間維持することを実証するとともに、暫定的に定めた設計用クリープ強度を満足することを確認した。また、ODS鋼被覆管の量産に不可欠な大型の高エネルギー・ボールミル(アトライター)を整備し、その適用可能性を評価するための試作・評価試験を進めている。1次試作では、従来材と同等の強度特性を有するODS鋼の製造に成功し、同装置の適用見通しが得られた。「常陽」の運転再開後には照射データ取得及び性能実証のための照射試験を実施する予定である

TEF-T: 課題への対応状況

「今後の進め方について」(H27)の指摘事項	対応状況
非接触式超音波式LBE流量計の開発やLBE中酸素濃度の自動制御化を進める。	非接触式流量計による流量計測に成功。酸素濃度の自動制御を実現し、試験ループでの酸素濃度制御下での材料腐食試験を実施中。
要素技術をLBEモックアップループに実装した上で運転温度を実機で想定される温度まで上昇させ、加熱器や熱交換器も動作させた状態でLBEループ総合性能試験を実施することにより、TEF-Tに求められるLBE取扱技術確立の見通しを確認すること	機能拡充したモックアップループを用い、実機で想定される温度域での等温運転及び温度差運転による総合性能試験を実施し、様々な条件下でのLBE取扱技術確立の見通しを得た。
LBE流量計の設置に係る閉じ込め性能や、酸素濃度センサーに係る機器の精度向上については、引き続き、高速炉等での実績を踏まえた検討を進める。	高速炉と協力して検討を進めている。
LBEターゲットシステムの検討では、放射性物質を含む排ガスの処理や材料試験片の切り出しなどシステムの運転・保守に係わる作業手順を検討	運転保守手順を検討し、技術設計書に取りまとめて公開した。
遠隔操作による配管の接続・切断技術についてモックアップ試験を行う。	遠隔操作による配管の切断・溶接、溶接後の検査を含む遠隔メンテナンスのモックアップ試験装置を開発、試験を実施し、実用の見通しを得た。
システム技術としての検証を進めながら、システム全体としての詳細な機器構成を検討する必要がある。	詳細な機器構成を検討し、技術設計書に取りまとめて公開した。
欧州に加えLBE取扱技術について多くの知見を有すると考えられるロシアの技術情報も参考にし、これらの検討を進める必要がある	OECD/NEA、IAEAが主催する会議等を通じて情報収集、意見交換を行っている。

TEF-P: 課題への対応状況

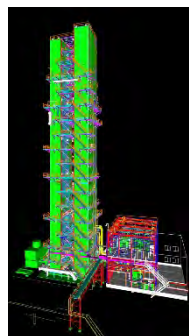
「今後の進め方について」(H27)の指摘事項	対応状況
<p>TEF-P設計に向けてMA燃料装填、MA燃料識別、MA燃料冷却等の各要素技術の確立や、安全性向上に向けた物理的メカニズムを把握するため、落下防止機構の付加、収納状態での識別、反射体を使用した場合の冷却性試験を行い、TEF-P用の装置の概念検討等に適切に反映していく必要がある。</p>	<p>反射体を使用した場合の冷却性を含む、MA燃料取扱要素技術を確立した。事故時の燃料健全性を検証した。また、落下防止機構の追加および収納状態での識別についても検討した。</p>
<p>施設及び主要機器の安全性について、引き続き、新規制基準の考え方に沿って検討を進める。</p>	<p>新規制基準に基づく原子炉設置許認可申請を想定した解析を実施し、新規制基準に基づく原子炉の設置許可申請のための安全設計を安全設計書(約400ページ)として取りまとめた。</p>
<p>TEF-TとTEF-Pでは規制法令が異なることを踏まえ、TEF-Tの異常又は損傷によりTEF-Pへ大きな影響が及ばないように検討を進める。</p>	<p>TEF-Tから供給される陽子ビームについて、過大なビーム電流の入射を防止できる微小陽子ビーム切り出し技術を確立した。</p>

窒化物燃料：窒素15関連技術

目的

燃料製造用 $^{15}\text{N}_2$ ガス入手実現性とその経済的利用技術に見通しをつける

- 既存濃縮原理は大規模プラント化に不向き
- 安全な N_2 低温蒸留が最有力候補（既存の ^{18}O 濃縮プラントの技術・設備が流用可能）



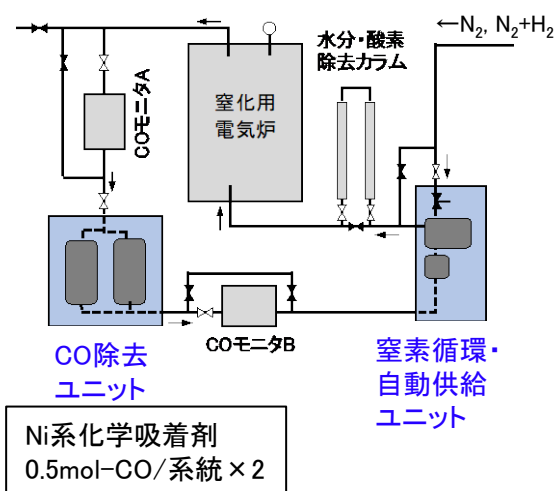
プラント
3D-CAD画像
(全高70m)

N_2 低温蒸留による濃縮プラントのコスト

^{15}N 濃縮度 (at%)	99
$^{15}\text{N}_2$ 年産量 (kg)	1000
プラント設備費 (億円)	84.0
所要電力 (MW)	5.41
年間運転コスト (億円)	27.6
製品単価 (円/g)	2760

⇒ ~20億円/ADS炉心燃料

- **窒素循環精製**システム試作機による実証試験
- 窒化時に N_2 ガス中に発生するCOを触媒で除去、消費した正味の N_2 ガスを自動供給



システム接続概略図



CO濃度：数千ppm→~0ppm

結果

- 1トン/年規模の $^{15}\text{N}_2$ 濃縮プラントの基本仕様を定めてコスト算出、技術的・経済的に実現可能
- 窒化時の N_2 ガスの循環精製利用を実験室規模で実証

今後

窒素循環精製システムの実用化のための機能付加(水素添加への対応)

