

# 高速炉の燃料技術開発について

令和6年5月10日

国立研究開発法人日本原子力研究開発機構

- 高速炉の開発目標、ロードマップ
- 各国の高速炉燃料
- 高速炉燃料開発の必要性
- 高速炉MOX燃料
- 高速炉金属燃料
- 「常陽」運転計画と今後の課題
- まとめ

## ① 安全性・信頼性

1F事故の教訓を踏まえ、高い安全性を追求すること。少なくとも、新規制基準に基づく安全基準を満足する軽水炉及びその核燃料サイクルのシステムと同等以上の安全性を達成すること。炉システムについては、今後の国際設計基準等で次世代炉に期待されるより高い安全性・信頼性を実現する設計上の工夫（受動安全等）を施すこと。施設の運転・保守・補修性を確保すること。

## ② 経済性

市場ニーズに応じた経済性を有すること。基幹電源として利用するプラントは、他の基幹電源と競合し得る経済性を有すること。小型電源や多目的用途に利用する場合には、市場ニーズに応じた経済性を有すること。なお、上記の経済性は1F事故を踏まえた安全性の強化、並びに事故リスク対応費及び政策経費を踏まえた上で実現すること。

## ③ 環境負荷低減性

高レベル放射性廃棄物量減容・潜在的有害度低減のため、マイナーアクチノイド (MA) を分離・回収し、燃料として利用できるようにすること。炉、燃料製造、再処理施設の建設・運転・廃止措置を通じて発生する放射性廃棄物量（高レベル放射性廃棄物を含む）を、軽水炉及びその核燃料サイクルシステムを参照して、合理的に実現可能な限り低減すること。ライフサイクルでの環境影響（土地占有、毒性、大気汚染、温室効果ガス（GHG）、酸性化、富栄養化、電離放射線、水資源利用等）が他電源と比して少ないこと。

## ④ 資源有効利用性

軽水炉及び軽水炉のプルスーマル利用から高速炉へ円滑に移行できること。エネルギー需給や資源の不確かさへの対処を始め、社会のニーズに合った増殖比に柔軟に対応可能であること。資源有効利用の観点から、核燃料サイクル内でウラン (U) 及びプルトニウム (Pu) の十分な回収による資源循環を図れること。

## ⑤ 核拡散抵抗性

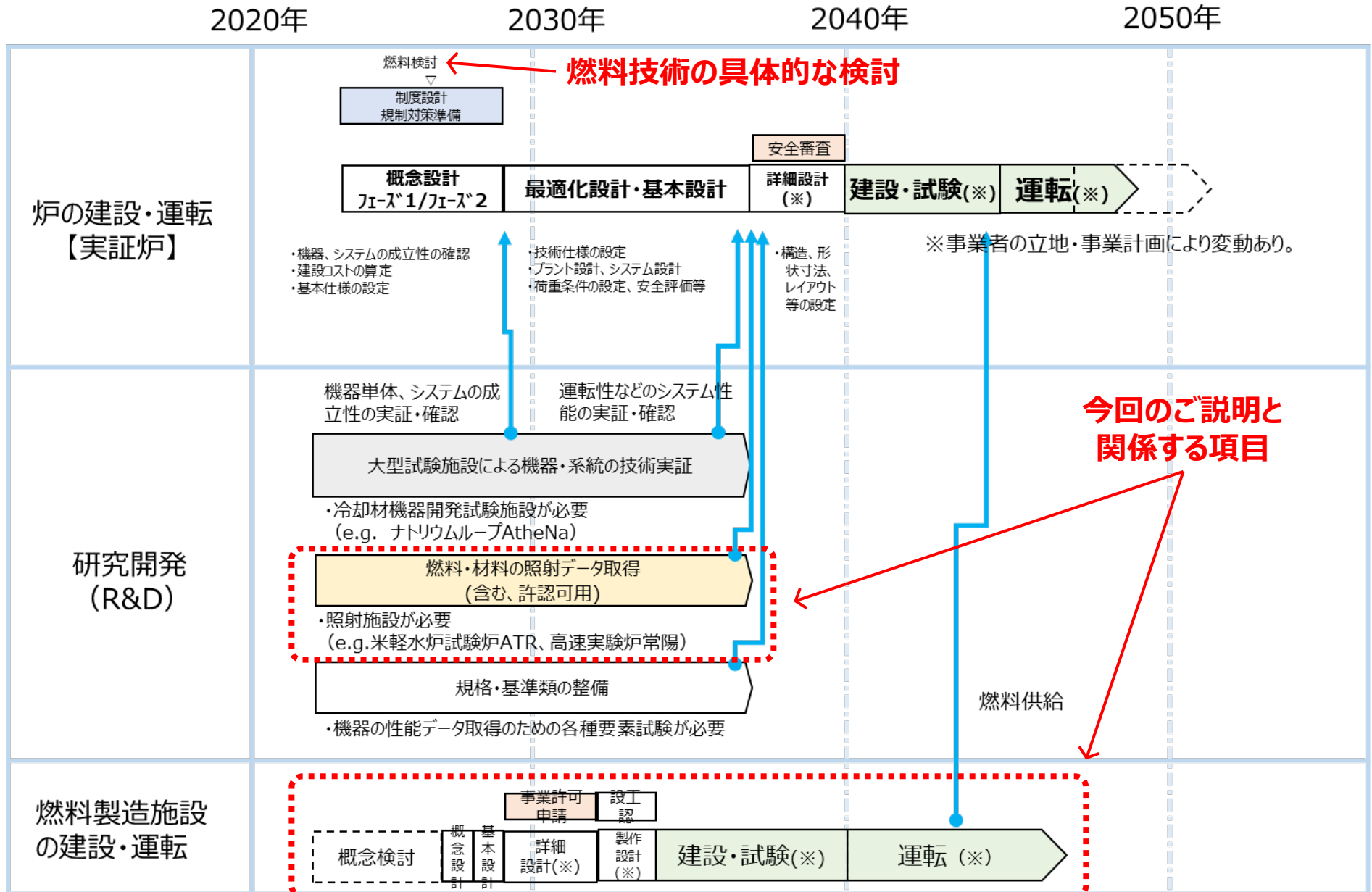
核拡散抵抗性と核物質防護を担保できる高速炉サイクルとすること。

## ⑥ 柔軟性・その他市場性

エネルギー供給システム全体の中で、再生可能エネルギーとの共存等を視野に、原子炉出力規模の選択肢や負荷追従能力等、必要な柔軟性に適切に対応できること。

# 導入に向けた技術ロードマップ<sup>o</sup> (高速炉)

(革新炉ワーキンググループ (第4回 (2022年7月29日開催)) で提示された「革新炉開発の技術ロードマップ (骨子案)」より引用)



高速炉の開発初期は、高い熱伝導率、高い燃料密度を有する金属燃料が開発されていたが、燃料の膨れ（スエリング）が大きいこと、融点が低いことなどが懸念され、その主流は酸化物燃料に移っていった。

## 【日本】

- 「常陽」、「もんじゅ」は酸化物燃料を採用
- 実証炉は開発目標の達成可能性や国内の開発実績、国際協力（日仏：酸化物燃料、日米：金属燃料）等を考慮し、酸化物燃料/金属燃料を選択予定

## 【フランス】

- 全ての高速炉で酸化物燃料を採用

## 【アメリカ】

- EBR-II は金属燃料、FFTF は酸化物燃料を採用
- アルゴン国立研究所（ANL）が研究を継続し、スエリング等の欠点を克服できる見通しが得られたことから、2000年以降は金属燃料を選択
- Natrium や VTR では金属燃料を採用

## 【ロシア】

- 酸化物燃料が主流だが、窒化物燃料も検討

## 【中国、インド】

- 当面は酸化物燃料だが、将来的には金属燃料を採用予定

主な高速炉の運転燃料（計画を含む）※

国	炉	燃料
日本	常陽	酸化物 (MOX)
	もんじゅ	酸化物 (MOX)
	実証炉	酸化物 (MOX) / 金属 (U-Pu-Zr)
フランス	Rapsodie	酸化物 (MOX)
	Phenix	酸化物 (MOX)
	Super-Phenix	酸化物 (MOX)
	ASTRID	酸化物 (MOX)
アメリカ	EBR-II	金属 (U-Zr)
	FFTF	酸化物 (MOX)
	Natrium	金属 (U-Zr)
	VTR	金属 (U-Pu-Zr)
ロシア	BOR-60	酸化物 (MOX)
	BN-350	酸化物 (UO <sub>2</sub> )
	BN-600	酸化物 (UO <sub>2</sub> )
	BN-800	酸化物 (MOX)
	BN-1200	酸化物 (MOX) / 窒化物
中国	CEFR	酸化物 (UO <sub>2</sub> )
	CFR-600	酸化物 (MOX)
インド	FBTR	炭化物 (PuC-UC)
	PFBR	酸化物 (MOX)

※ Fast Spectrum Reactors (<https://doi.org/10.1007/978-1-4419-9572-8>), Appendix A Fast Reactor Data 等より引用し、一部改訂

# 各国の高速炉燃料（製造の現状）

国	会社 / 施設	燃料	製造能力 (tHM/年)	操業開始年	備考
日本	JAEA / Pu-3	MOX（ペレット）	5 （設計時能力）	1988	<ul style="list-style-type: none"> <li>「常陽」、「もんじゅ」用燃料</li> <li>現在は保管体製作</li> </ul>
	JNFL / J-MOX*1	軽水炉用MOX（ペレット）	130	2026	
フランス	CEA / CFCa	MOX（ペレット）	20	1962	<ul style="list-style-type: none"> <li>Phenix, SPX用燃料</li> <li>2005年廃止</li> </ul>
	Orano / MELOX*1	軽水炉用MOX（ペレット）	195	1995	
アメリカ	INL / FMF	金属（U-Zr）	<4 （～20kg/日）	1989	<ul style="list-style-type: none"> <li>EBR-II用燃料</li> <li>現在は試験燃料製造等に転用</li> </ul>
	GNF-A&TP / Sodium炉向け燃料製造施設	金属（U-Zr）	—	計画中	<ul style="list-style-type: none"> <li>HALEU原料*2を適用予定</li> </ul>
	— / VTR向け燃料製造施設	金属（U-Pu-Zr）	—	計画中	
ロシア	RIAR / ERC	MOX（バイパック）	1	1975	<ul style="list-style-type: none"> <li>BOR-60、BN-800</li> </ul>
	PA Mayak / PAKET	MOX（ペレット）	0.5	1980	<ul style="list-style-type: none"> <li>BN-800</li> </ul>
	MCC / MFFF	MOX（ペレット）	60	2015	<ul style="list-style-type: none"> <li>BN-800（、BN-1200）</li> </ul>
インド	BARC / AFFF	MOX（ペレット）	20	1994	<ul style="list-style-type: none"> <li>FBTR、PFBR</li> </ul>
	IGCAR / FRFCF	MOX（ペレット）	7.5	建設中	<ul style="list-style-type: none"> <li>2027年完成予定</li> </ul>

\*1 軽水炉用MOX燃料製造施設であり、参考として掲載、

\*2 高純度低濃縮ウラン（<sup>235</sup>U < 20%）

- 高速炉と軽水炉では燃料仕様、冷却材が異なるだけでなく、高速炉燃料は高温環境で高燃焼度まで使用される。  
→ 高温・高燃焼度まで使用可能な**燃料・材料を開発**し、照射試験によって**燃料健全性を実証**する必要がある。
- 高レベル放射性廃棄物の減容・潜在的有害度低減の実現に向けて、MAを燃料として使用する。  
→ MA含有燃料の**製造技術を確立**し、照射試験によって**燃料として使用できることを実証**する必要がある。

		高速炉		PWR <sup>*1</sup> (17×17型の例)	BWR <sup>*1</sup> (8×8型の例)
		(MOX燃料の検討例)	(金属燃料の検討例)		
燃料仕様	材質	MOX	U-Pu-Zr	UO <sub>2</sub> (MOX) <sup>*2</sup>	UO <sub>2</sub> (MOX) <sup>*3</sup>
	Pu富化度	~21%	~15%	— (≤13%) <sup>*2</sup>	— (≤10%) <sup>*3</sup>
	MA含有率	最大5%程度	最大5%程度	—	—
	被覆管材料	PNC316/ODS鋼	HT-9/ODS鋼	ジルカロイ-4	ジルカロイ-2
冷却系	冷却材	ナトリウム	ナトリウム	軽水	軽水
	原子炉出口温度	約550℃	約510℃	約325℃	約287℃
使用条件	最高燃焼度	250GWd/t (ペレット) —	200GWd/t (軸方向最大) —	62GWd/t (ペレット) <sup>*4</sup> 45GWd/t (集合体)	— 40GWd/t (集合体)
	被覆管温度	700℃	600℃/650℃	<500℃	<500℃
	燃料中心温度	<約2500℃	<約1000℃	<1800℃	<1800℃

\*1 原子力百科事典ATOMICAより、 \*2 「伊方3号機MOX燃料の採用計画等について」より、 \*3 「浜岡4号機プルサーマル設置変更申請書」より、

\*4 「三菱PWR高燃焼度化ステップ2炉心におけるMOX燃料機械設計」より



## (1) 経済性向上技術

- 燃料の高燃焼度化による燃料サイクルコスト低減
- 冷却材の高出口温度化による発電効率向上

### ● 太径中空燃料の健全性実証

燃料の溶融防止と燃料のスエリングによる被覆管との機械的な相互作用の抑制を両立し、燃料の高燃焼度化が可能な太径中空燃料の健全性を実使用環境下で実証する。

### ● 長寿命炉心材料の開発

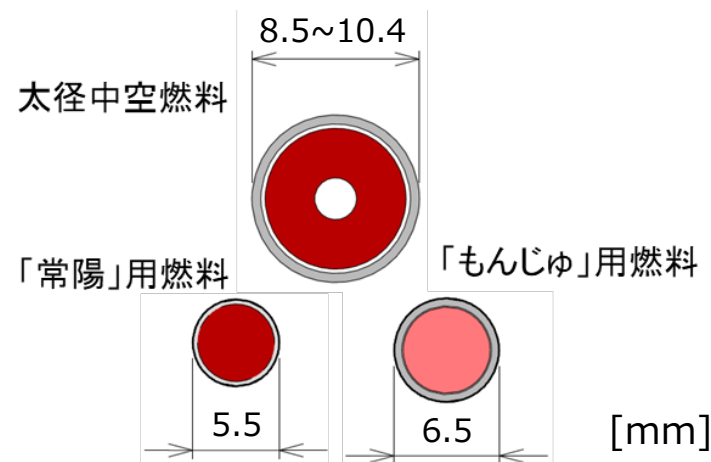
燃料の高燃焼度化（取出平均燃焼度150GWd/t）と冷却材の高出口温度化（550℃）を両立する酸化物分散強化型（ODS）鋼被覆管、フェライト鋼ラッパ管等を開発する。

## (2) 環境負荷低減性

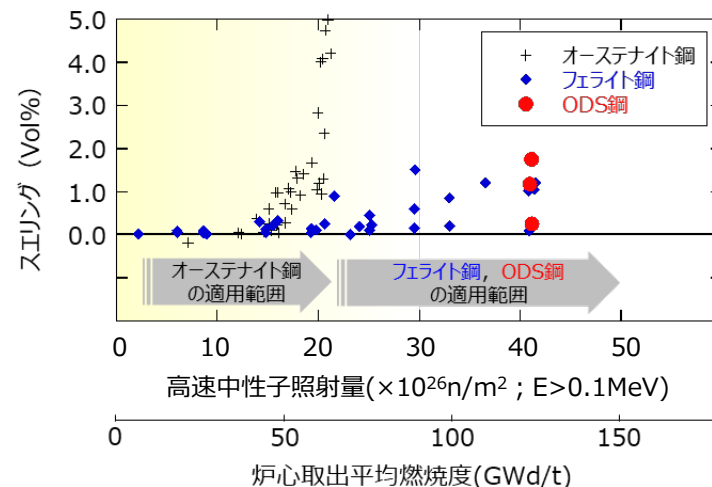
- 放射性廃棄物の減容化・有害度の低減に貢献するMA含有燃料の開発

### ● MA含有燃料の照射特性評価、健全性実証

MA添加が燃料の組織変化挙動、熱的挙動や被覆管との化学的な相互作用等に及ぼす影響を把握するとともに、MA含有燃料の健全性を実使用環境下で実証する。



「常陽」、「もんじゅ」燃料と太径中空燃料の断面寸法の例



炉心材料候補材のスエリング挙動  
(中性子照射環境下での寸法安定性)



## (1) 経済性向上技術

### ● 太径中空燃料の健全性実証

- ・ 「常陽」、仏Phenix、米EBR-II、英PFR等で照射実績あり
- ➔ 実証炉の初装荷燃料からの適用を目指す技術であり、照射試験による照射挙動データ取得、健全性実証が必要

### ● 長寿命炉心材料の開発

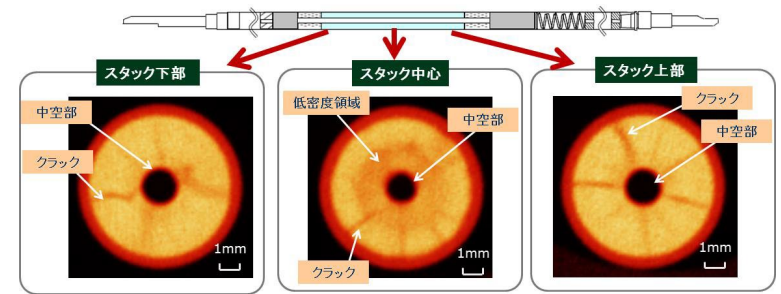
- ・ ODS鋼被覆管の製造に成功し、世界最高レベルのクリープ強度を長時間維持することを実証。量産技術開発を実施中
- ➔ 量産技術開発、基準類整備の継続に加え、材料照射試験、燃料照射試験による照射挙動データ取得、性能実証が必要

## (2) 環境負荷低減性

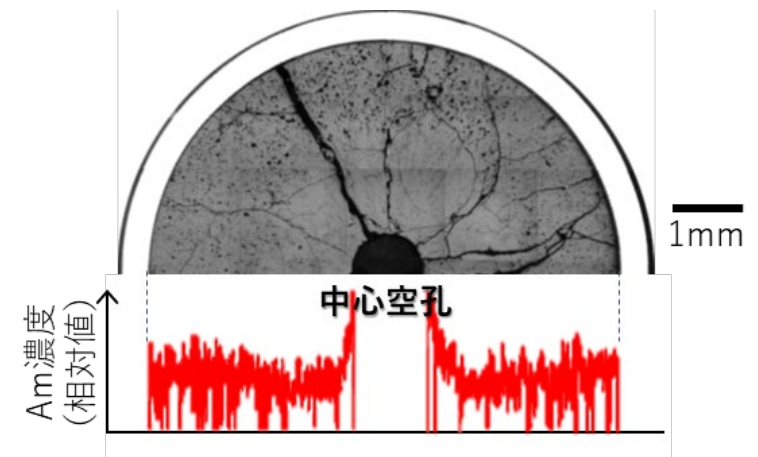
### ● MA含有燃料の照射特性評価、健全性実証

- ・ MA含有燃料 (5%Am、2%Np-2%Am) を製造し、「常陽」で短期高線出力試験を実施。燃烧初期の熱的挙動、MA再分布挙動等に係るデータを取得
- ➔ 長期照射試験により、MAを燃料として利用できることを実証するとともに、照射挙動データ取得、健全性実証が必要

- ☞ 「常陽」の活用等、継続的な照射試験が必要
- ☞ 被覆管をはじめとする炉心材料のサプライチェーンの再構築が重要

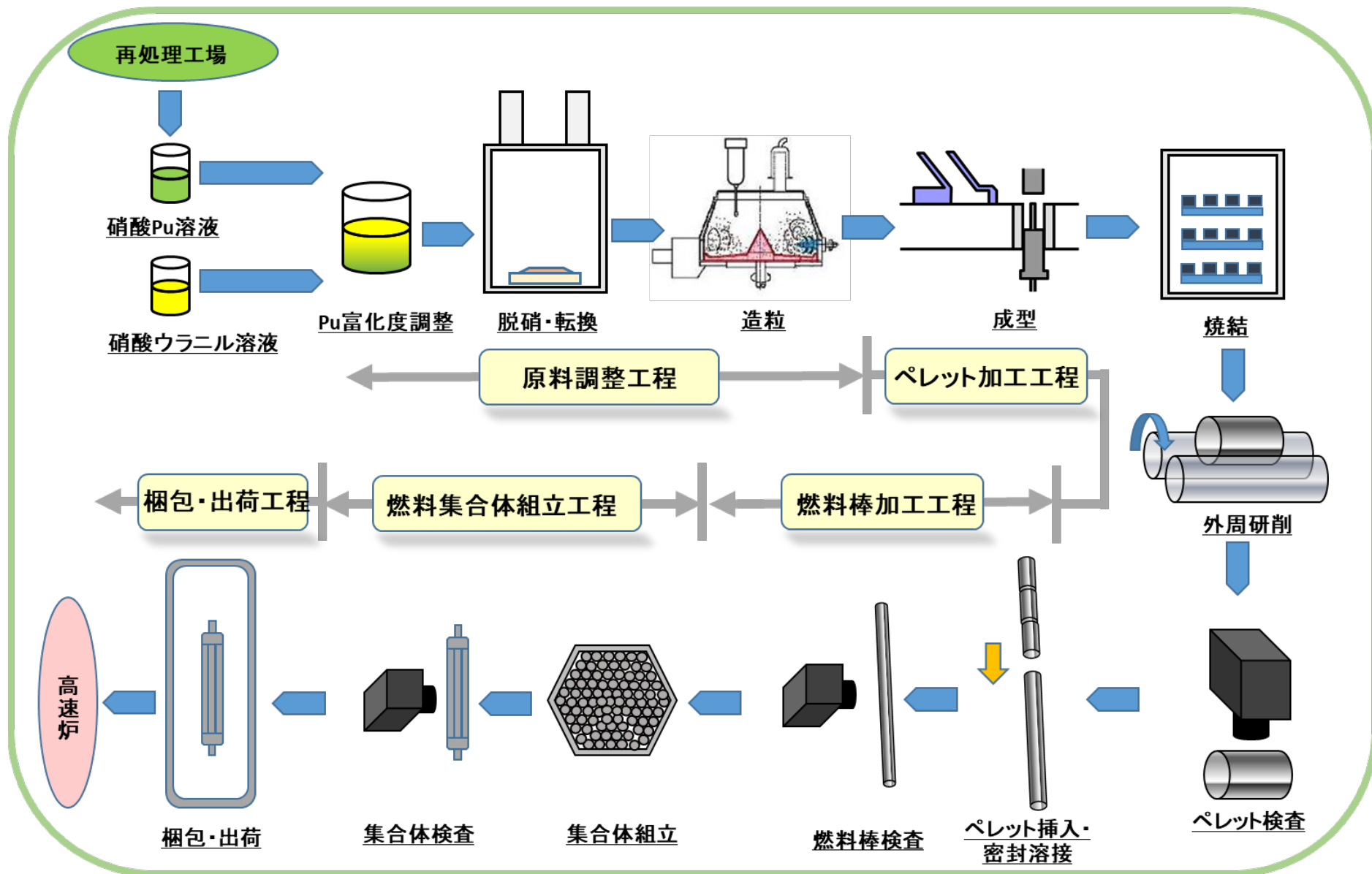


「常陽」における太径中空燃料の照射挙動データの取得例  
(太径中空燃料の照射後のX線CT結果)



MA含有MOX燃料のAm再分布挙動  
(5%Am含有MOX燃料、24時間照射)

# 高速炉MOX燃料 (燃料製造技術の概要)



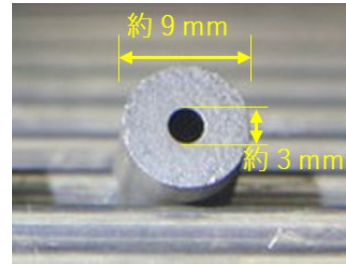
## (1) 経済性向上技術

### ● 中空ペレット量産技術開発

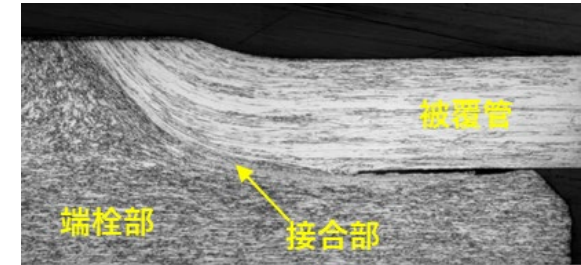
- Pu-3での短期的な試験において、約40kg-MOXの処理を実施し、技術的成立性は確認済
- ➔ 品質の安定性、検査技術を含め、量産規模での技術実証が必要

### ● ODS鋼被覆管を適用した燃料ピン製造技術開発

- 従来のTIG溶接とは異なる加圧抵抗溶接を用いた製造技術（端栓溶接技術）を開発
- ➔ 品質検査を含め、量産規模での技術実証を進めるとともに、照射試験燃料の製造が必要



Pu-3で製造したMOX中空ペレット



ODS鋼被覆管の抵抗溶接技術

## (2) 環境負荷低減性

### ● MA含有燃料のセル内遠隔製造技術開発

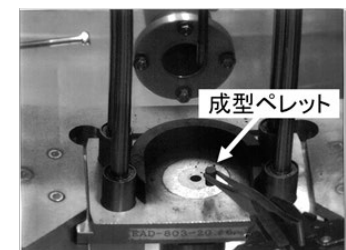
- AGFのコンクリートセル内に整備した小規模の燃料製造設備を用いた技術開発により、基本的なセル内遠隔製造技術を確立。照射試験用MA含有MOX燃料ピンを製造
- セル内遠隔製造設備のモックアップ試験を部分的に実施
- ➔ MA含有燃料ペレットを遠隔自動で低コストで製造するための技術開発と、その製造設備の遠隔保守・補修技術の実証が必要
- ➔ 再処理における低コストでのMA抽出技術の開発とその技術実証が必要



原料粉末の混合粉砕



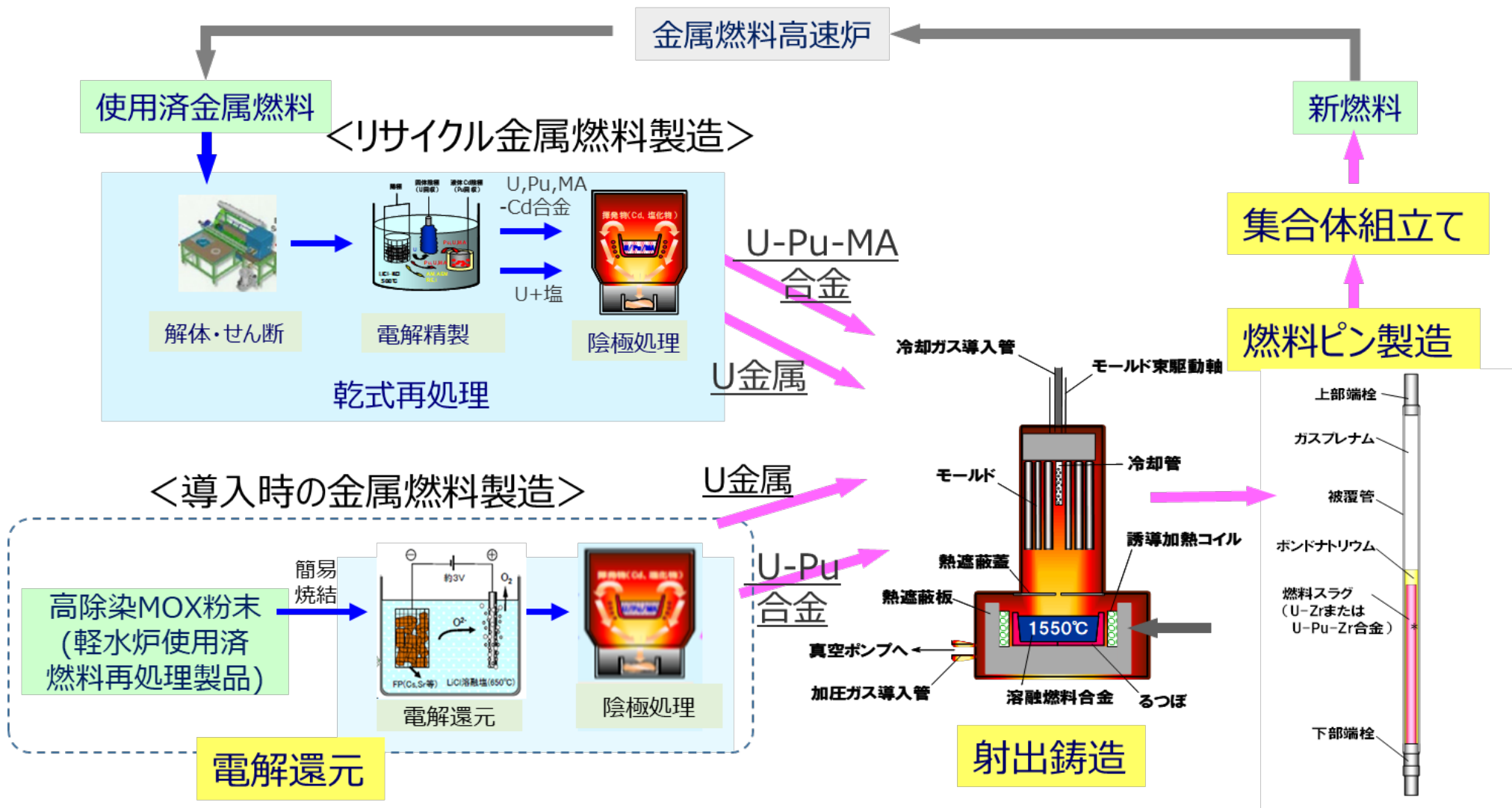
燃料ピン溶接・検査装置



燃料ペレットの成型

高速炉MOX燃料の実用化に向けて、インフラの維持・整備等を含めた量産規模の燃料製造技術開発が重要

## MA含有MOX燃料のセル内遠隔製造 (AGF)





電力中央研究所が中心となって、これまでに燃料設計手法の確立、「常陽」での照射試験の準備、MA含有燃料の照射試験・照射後試験、Uを用いた工学規模射出鑄造実績の蓄積まで進めてきた。

国内実用化に向けた課題は以下のとおり。

- 国内照射実績の蓄積。実用炉条件（高被覆管温度かつ高燃焼度）における照射健全性の実証
- 燃料の最適化・高性能化（Zr濃度最適化、被覆管内面の防食、照射挙動のモデリングなど）
- 国内でのU-Pu-Zr燃料の量産規模製造実績の蓄積 → 次ページ



中村勤也他、日本原子力学会2011年春の年会、2011/3/2.

## 「常陽」での金属燃料ピン照射試験（JAEA-CRIEPI共同研究）

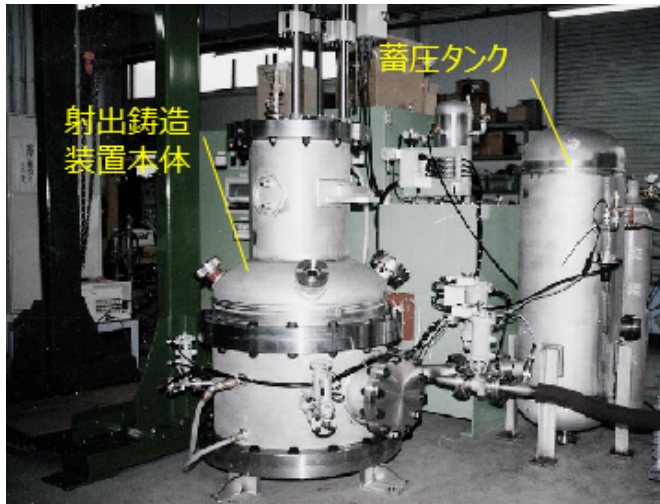
- 実用炉条件における照射健全性実証のためには「常陽」の活用等、継続的な照射試験が必要
- 被覆管をはじめとする炉心材料のサプライチェーンの再構築が重要

## ● 国内でのU-Pu-Zr燃料の量産規模製造実績の蓄積

- 燃料研究棟 (廃止措置施設) に整備したグローブボックスで、「常陽」での金属燃料ピン照射試験用に射出鑄造技術によるU-Pu-Zr燃料スラグの製造、小規模Naボンディング装置を用いた燃料ピン組立を実施
- U-Zr合金の工学規模の射出鑄造試験を実施 (文科省委託研究)

**製品の目標仕様**

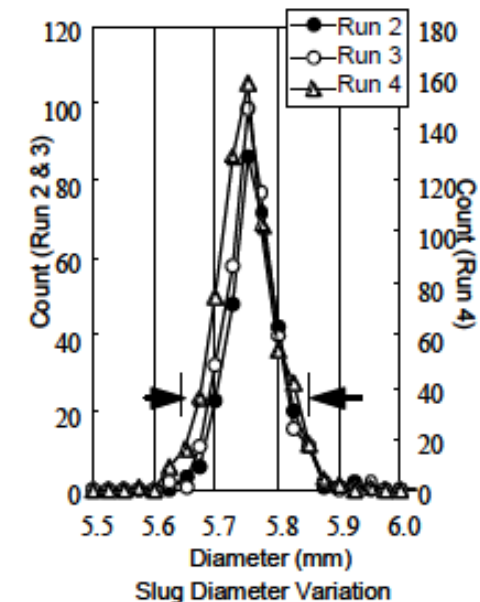
Zr content  $10 \pm 1$  wt. %  
 Impurity (O, C, Ni, Si) < 2000 ppm  
 Density =  $15.8 \pm 0.3$  g/cc  
 Diameter =  $\pm 0.05$  mm (avg.)  
                    $\pm 0.10$  mm (local)  
 Slug length > 400 mm  
 Heel < 30% of loaded ingot



工学規模U-Zr射出鑄造試験装置  
@原燃工 (東海)



工学規模試験における鑄造後の鑄型の外観とU-Zr合金スラグ



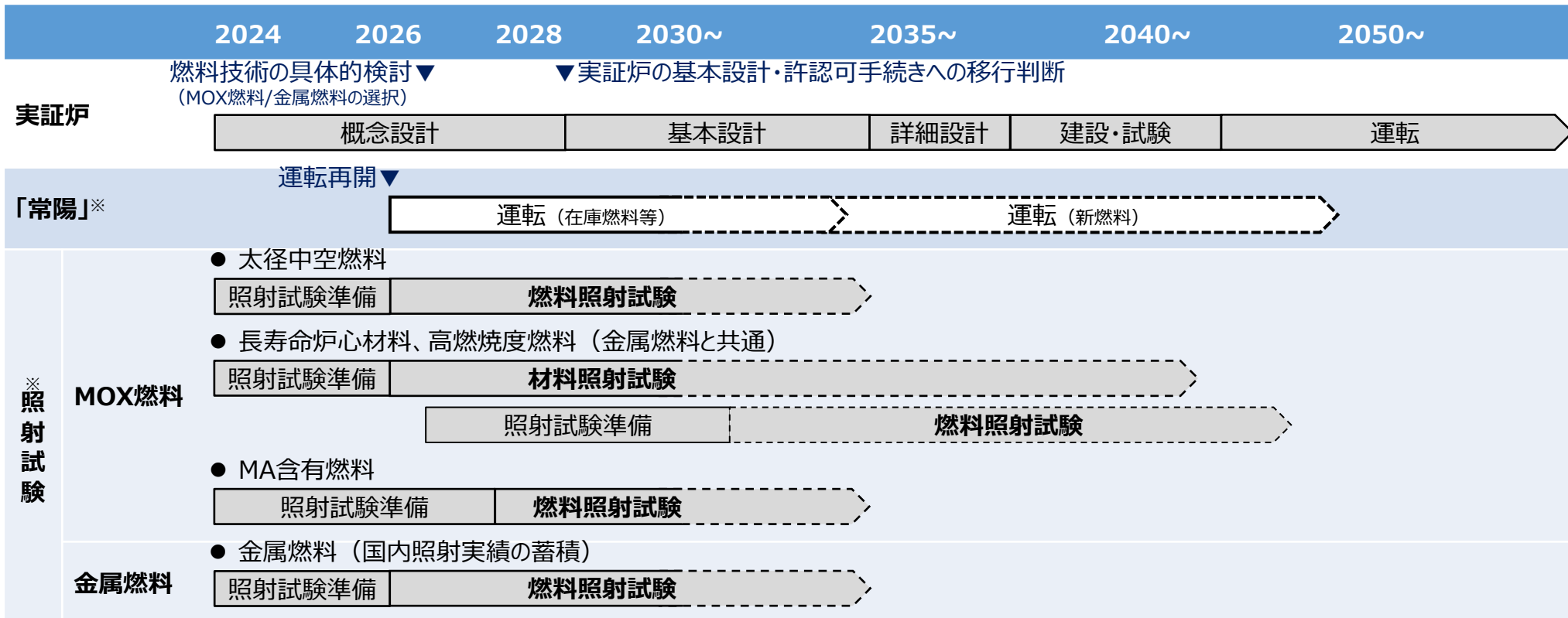
結果: U-Zrスラグ製品の直径分布

T. Ogata, T. Tsukada, Proc. Global 2007, Boise, Idaho, USA, Sep. 9-13, 2007 (2007).

# 「常陽」運転計画イメージと今後の課題

「常陽」の当面の運転は在庫燃料等で可能だが、高速炉の実用化に向けた技術実証のためには中長期的な燃料技術開発が重要であり、そのためには新燃料供給が必要な見通し

- 新燃料の調達先候補
  - 既存施設の活用、新規施設、海外調達等あらゆる可能性について検討中
- 新燃料調達に向けた課題
  - 既存施設の活用、新規施設：新規制基準への対応等
  - 海外調達：「常陽」炉心への適用性等の技術的な課題に加えて、スケジュールの整合性、国際情勢等を考慮する必要あり



※点線部は現時点で明確な時期の見通しが得られていない内容。また、照射試験には照射後試験は含んでいない



- 高速炉の燃料技術について、海外の状況を含めた開発実績、開発を進める上での課題等についてまとめた。
  - 酸化物燃料は、日本、仏国等を中心に世界的に開発が進められ、MA含有燃料を除き、国内及び海外で運転燃料としての製造・使用実績が豊富にあり、基礎的な燃料技術は確立している。
  - 金属燃料については、米国で開発が進められ、主要プロセスの成立性はほぼ確認済である。米国ではEBR-II等の実験炉での運転燃料としての実績があり、商用高速炉用燃料として開発が進められている。
  - 実用化に向けて研究開発インフラやサプライチェーンの維持・整備等が重要である（両燃料に共通）。
  
- 高速炉の実用化に向けて、酸化物燃料/金属燃料にかかわらず燃料の高性能化・高燃焼度化やMA含有燃料の実現が重要であり、それら燃料の量産性を考慮した製造技術開発を進める。また、照射挙動データの取得や照射下における燃料健全性の実証が重要となることから、「常陽」照射試験の継続的な実施が必要である。
  
- このため、「常陽」運転再開後の安定・継続的な運転が重要であり、今後の新たな燃料確保方策を含め、関係省庁とも連携しつつ、引き続き検討を進める。