

## 2. FBRサイクルシステムの実用化に向けて

### 報告要旨

原子力機構と電気事業者は、電力中央研究所やメーカ各社の協力を得て、1999年7月から高速増殖炉（FBR）サイクルの実用化戦略調査研究を実施しています。本研究は、安全性の確保を大前提として、軽水炉など他の基幹電源と比肩する経済性を達成し得るFBRサイクルの実用化像を構築し、その技術体系を確立することを目的としています。フェーズⅡ研究（2001～2005年度）では、フェーズⅠ研究（1999～2000年度）で抽出したFBR、再処理法および燃料製造法の各候補概念について設計検討及び要素技術開発を行い、各概念が有する能力を最大限に引き出すことが可能なFBRシステムおよび燃料サイクルシステム概念を構築しました。また、技術体系整備に向けた2015年頃までの研究開発計画と、それ以降の進め方に関する課題についてとりまとめました。技術総括の結果から、酸化物燃料を用いた「ナトリウム冷却炉、先進湿式法再処理および簡素化ペレット法燃料製造の組合せ概念」は、開発目標への適合可能性が最も高く、開発実績および国際協力の可能性から技術的実現性も高く、総合的に最も優れた概念であると評価しました。したがって、限られた研究開発資源の効率的な活用の観点から、この組合せを今後重点的に開発していく主概念として選定することが望ましいと考えられます。

次世代原子力システム研究開発部門 部門長 向 和夫



第1回原子力機構報告会

## FBRサイクルシステムの 実用化に向けて

平成18年6月20日

独立行政法人 日本原子力研究開発機構  
次世代原子力システム研究開発部門  
部門長 向 和夫

### JAEA 高速炉導入機運の高まり



仏国シラク大統領

2006年1月 第四世代  
原子炉のプロトタイプ  
を2020年に運転開始  
との目標を明示



第四世代原子力システム  
国際フォーラム(GIF)  
2005年2月 政府間協定締結



米国ブッシュ大統領

2006年1月 グローバル  
原子力パートナーシップ  
(GNEP)計画を提唱

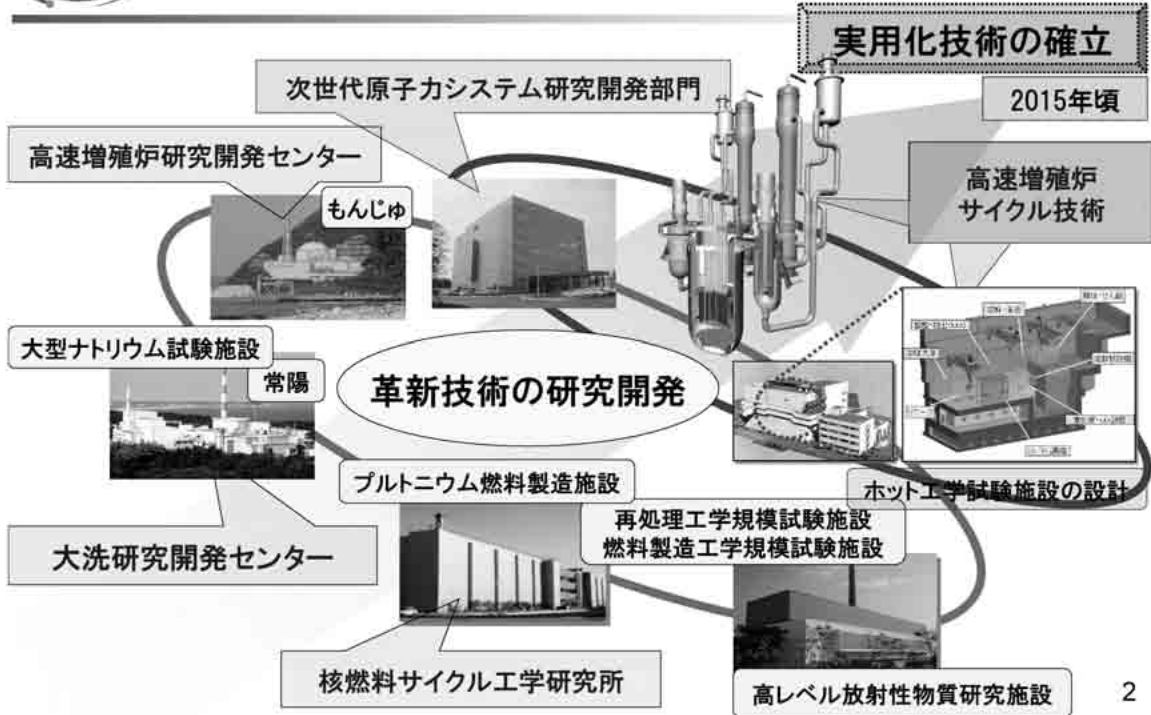


国家基幹技術として推進(第3期科学技術基本計画)

「長期的なエネルギーの安定供給を確保する高速増殖炉サイクル技術」が国家基幹技術として位置付けられた。

1

**JAEA** FBRサイクル技術体系の整備に向けた研究開発



2

**JAEA** 「もんじゅ」における研究開発の現状(1/2)



高速増殖原型炉「もんじゅ」の現状



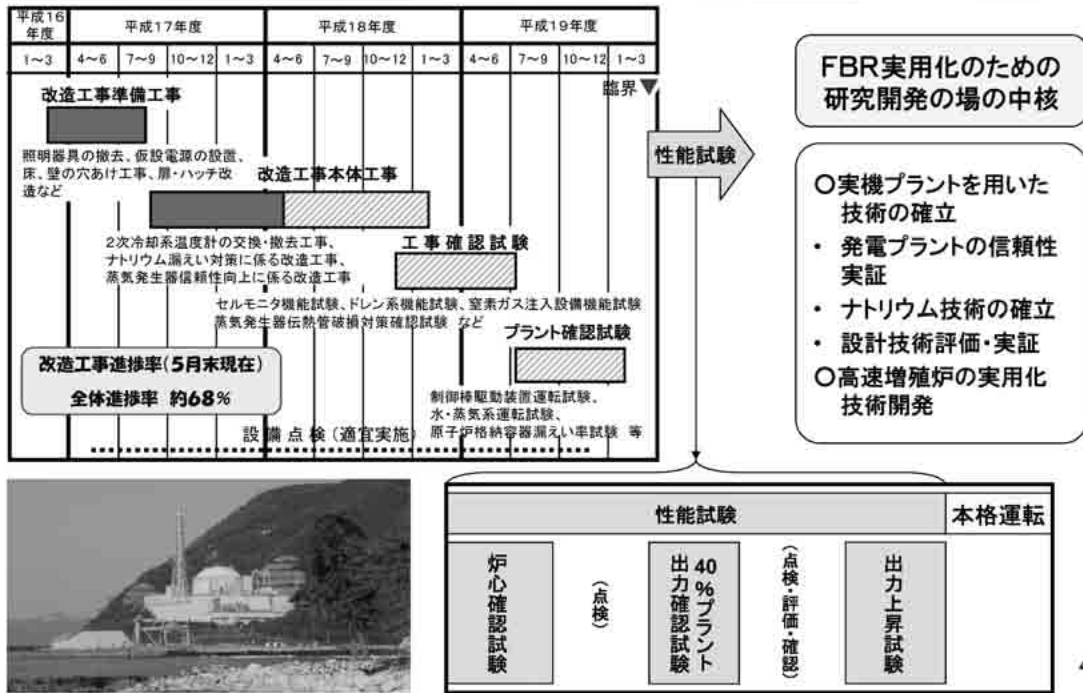
ナトリウム配管の切断



新型温度計取付

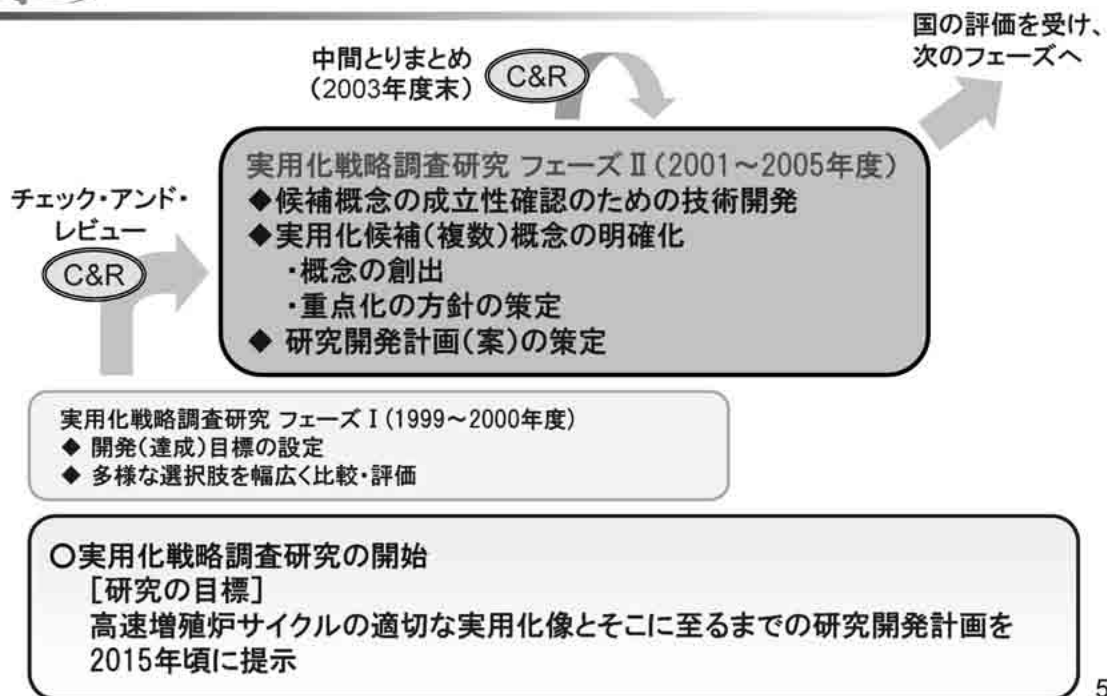
3

**JAEA** 「もんじゅ」における研究開発の現状(2/2)



4

**JAEA** 実用化戦略調査研究の経緯



5



**JAEA** 実用化戦略調査研究の開発目標

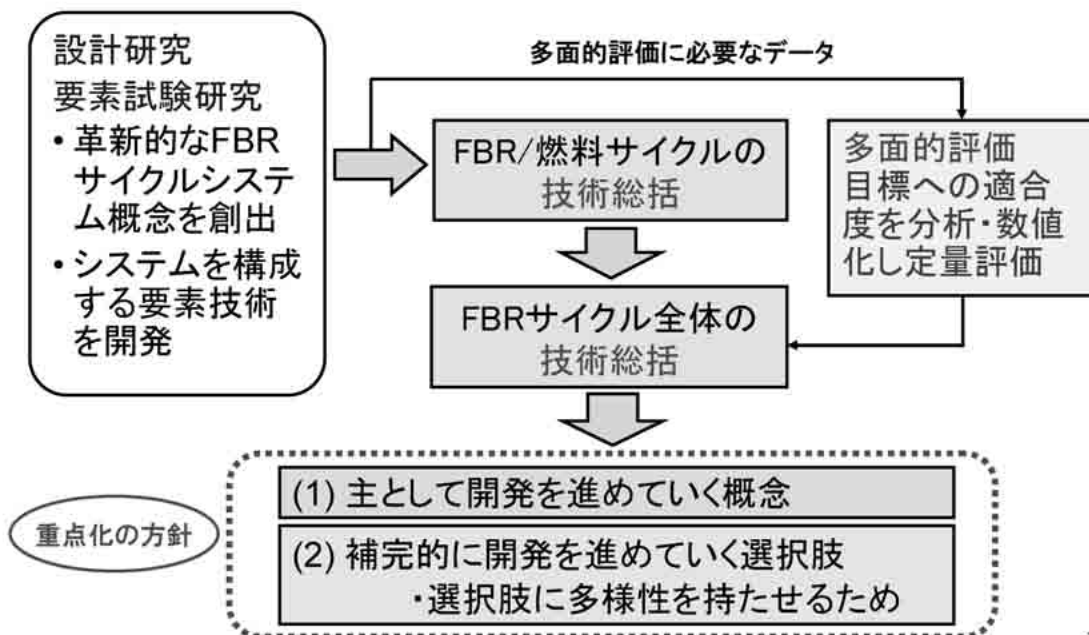
世界に先駆けて、  
高速増殖炉サイクルの5つの開発目標を設定

**開発目標**

- 安全性: 社会の既存のリスクに比べて小さいこと
- 経済性: 将来の軽水炉の発電単価に比肩すること
- 環境負荷低減性: 放射性廃棄物による負荷を低減すること
- 資源有効利用性: 持続的に核燃料を生産するとともに、多様なニーズへ対応できること
- 核拡散抵抗性: 核物質防護及び保障措置への負荷軽減

6

**JAEA** 研究開発の重点化に向けた検討の流れ



7

**JAEA** FBRサイクル全体での技術総括

(a) ナトリウム冷却炉(MOX燃料) + 先進湿式法再処理 + 簡素化ペレット法燃料製造

- ・ 開発目標に高いレベルで適合する可能性あり
- ・ 技術的実現性を見通すことが可能

主概念

総合的に最も優れた概念

(b) ナトリウム冷却炉(金属燃料) + 金属電解法再処理 + 射出鑄造法燃料製造

- ・ 開発目標に適合する可能性あり
- ・ 経済性、環境負荷低減性はやや劣る見込み
- ・ 燃料サイクルの開発に比較的長期を要する見込み
- ・ 炉心性能の向上が期待できるという魅力

補完概念

総合的な評価では(a)を超えるものではないが、(a)にはない魅力を有する概念

(c) ヘリウムガス冷却炉(窒化物被覆粒子燃料) + 先進湿式法再処理 + 被覆粒子燃料製造法

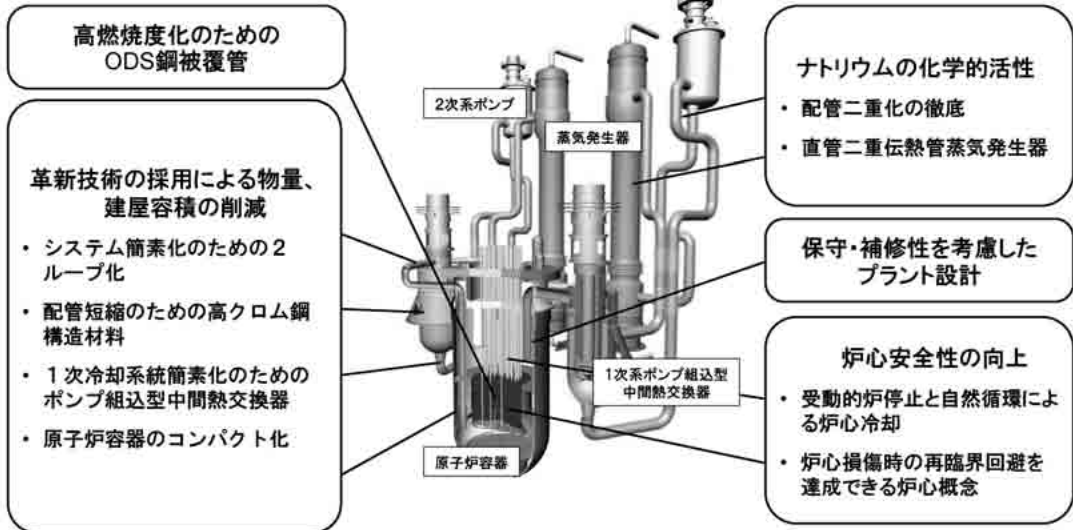
- ・ 開発目標に適合する可能性あり
- ・ 国際協力による成果を期待し得る
- ・ 高温熱源としての多目的利用が期待できるという魅力あり

8

**JAEA** ナトリウム冷却炉概念

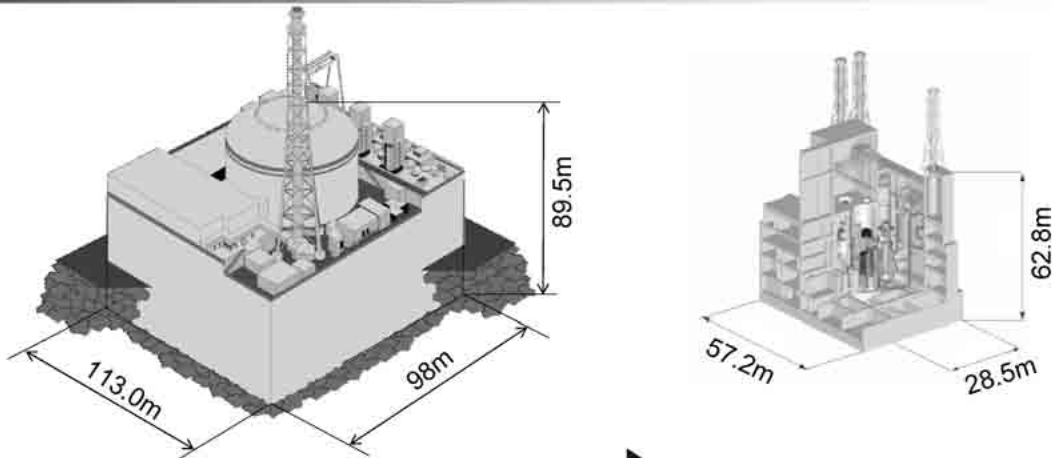
● システムの特徴

- 150万kWe大型炉の概念を構築。(酸化物燃料及び金属燃料)
- 革新技术の採用により物量、建屋容積を大幅に削減。
- ナトリウム固有の課題に対する対応策を設計に取り込むことで信頼性を確保。



9

**JAEA** ナトリウム冷却炉の物量低減に関する検討例



**原型炉「もんじゅ」**  
 熱出力:714MW  
 電気出力:280MW  
 建屋体積:810,000m<sup>3</sup>

**革新技術の採用**

- ループ数削減
- 12Cr鋼の採用
- ポンプ組込型中間熱交換器
- 炉容器コンパクト化

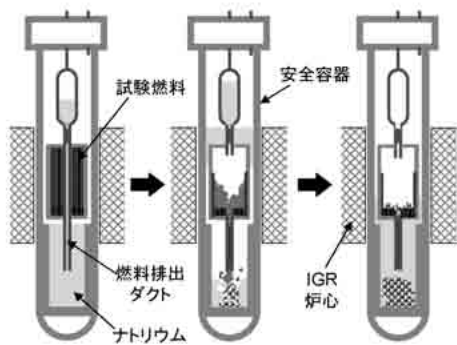
**実用化候補概念**  
 熱出力:3,570MW  
 電気出力:1,500MW  
 建屋体積:130,000m<sup>3</sup>/unit

**JAEA** ナトリウム冷却炉に関する要素技術開発の例

● EAGLEプロジェクト

炉心損傷時の再臨界回避方策実現のための試験研究

- 炉心内に熔融燃料排出経路を確保した設計概念を構築
- 設計概念の有効性をカザフスタンIGR炉により確認



予想される燃料流出挙動

IGR (Impulse Graphite Reactor)



試験の様子



試験体  
 (燃料チャンバと排出ダクト)

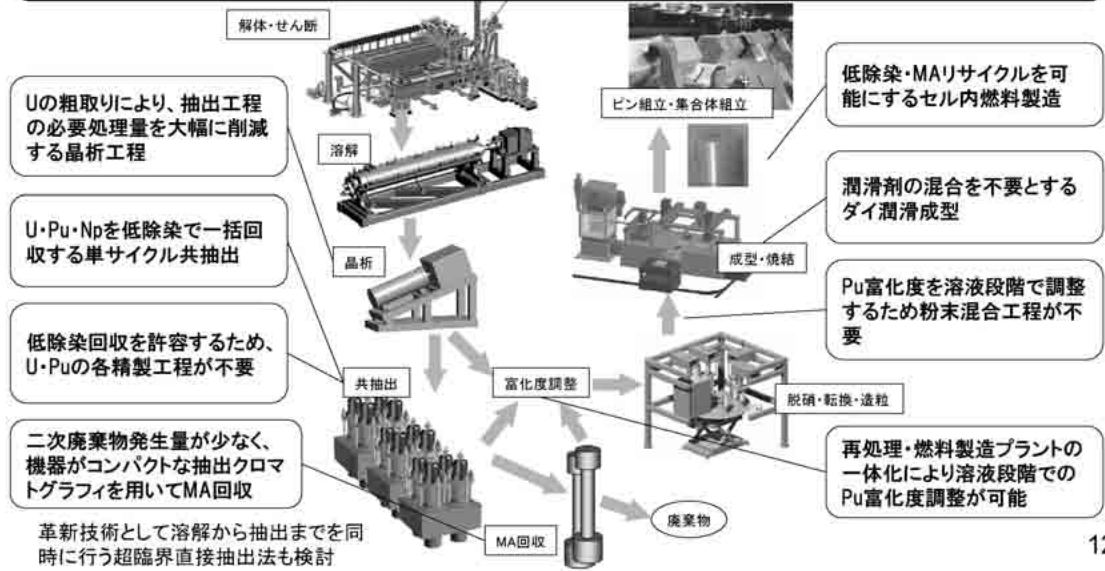




**JAEA** 先進湿式法＋簡素化ペレット法概念

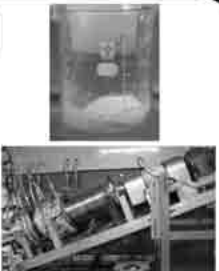

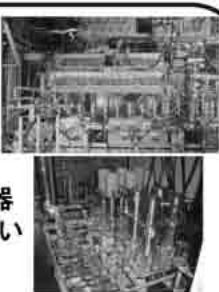

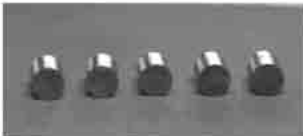
● システムの特徴

- 低除染燃料の使用が許容される高速増殖炉の特徴を生かし、回収/精製工程を合理化。
- 溶液段階でのPu富化度調整などにより、従来のペレット製造から粉末混合工程を削除。



12

**JAEA** 先進湿式法に関する要素技術開発の例

<p><b>晶析技術開発</b></p> <p>実溶解液を用いた小規模ホット試験</p> <p>晶析装置(約0.1t-U/d)の試作、ウラン試験</p> 	<p><b>脱硝技術開発</b></p> <p>約1/50規模のウラン脱硝試験</p> 
<p><b>抽出技術開発</b></p> <p>小規模ホット試験</p> <p>10Kg-U/hの遠心抽出器システム試験装置を用いた試験</p> 	<p><b>簡素化ペレット法による燃料製造</b></p> <p>転動造粒により製造したMOX原料粉末を用いたペレット焼結試験</p>  <p><b>MA含有燃料開発</b></p> <p>5%Am-MOXや2%Am-2%Np-模擬FP-MOXのペレット製造試験</p> 

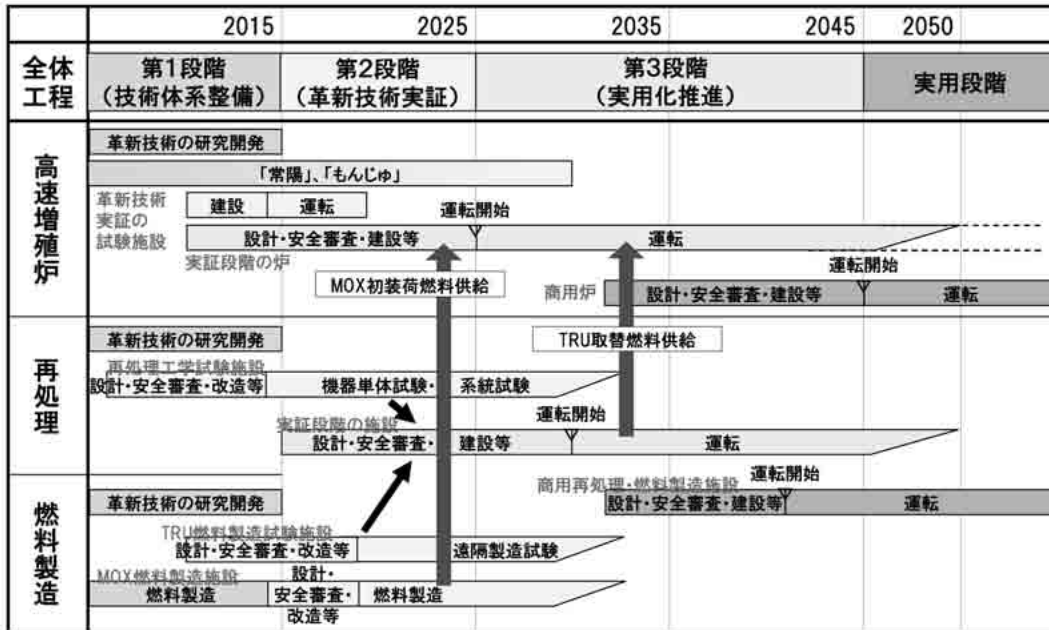
13





## FBRサイクル技術の段階的研究開発

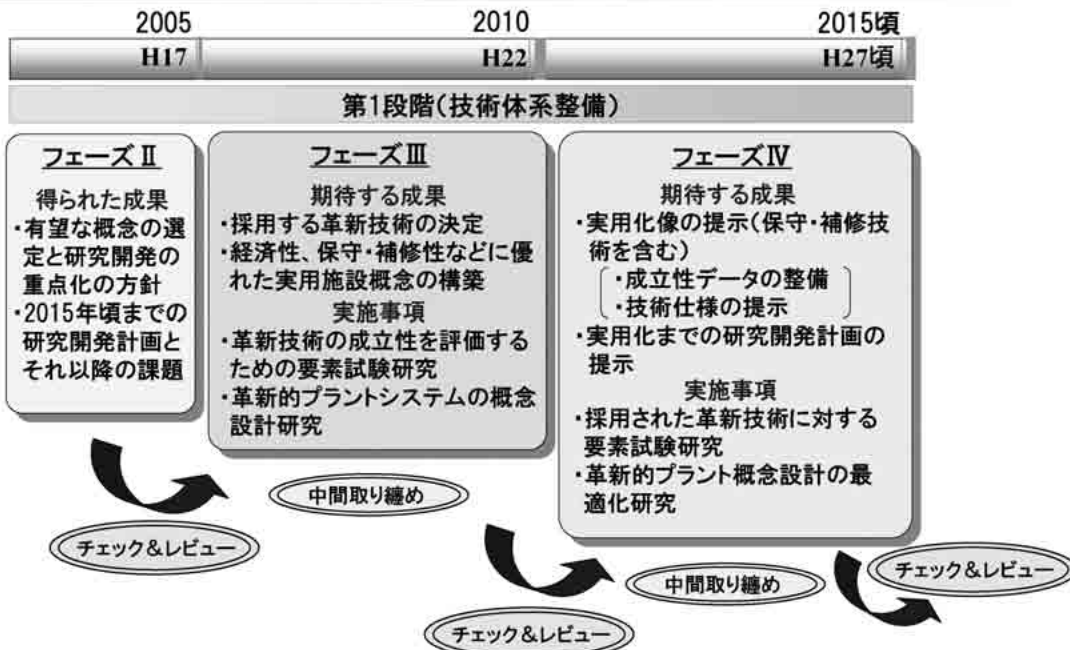
高速増殖炉の実用化ロードマップ例 加速ケース(技術的可能性を検討中)



14



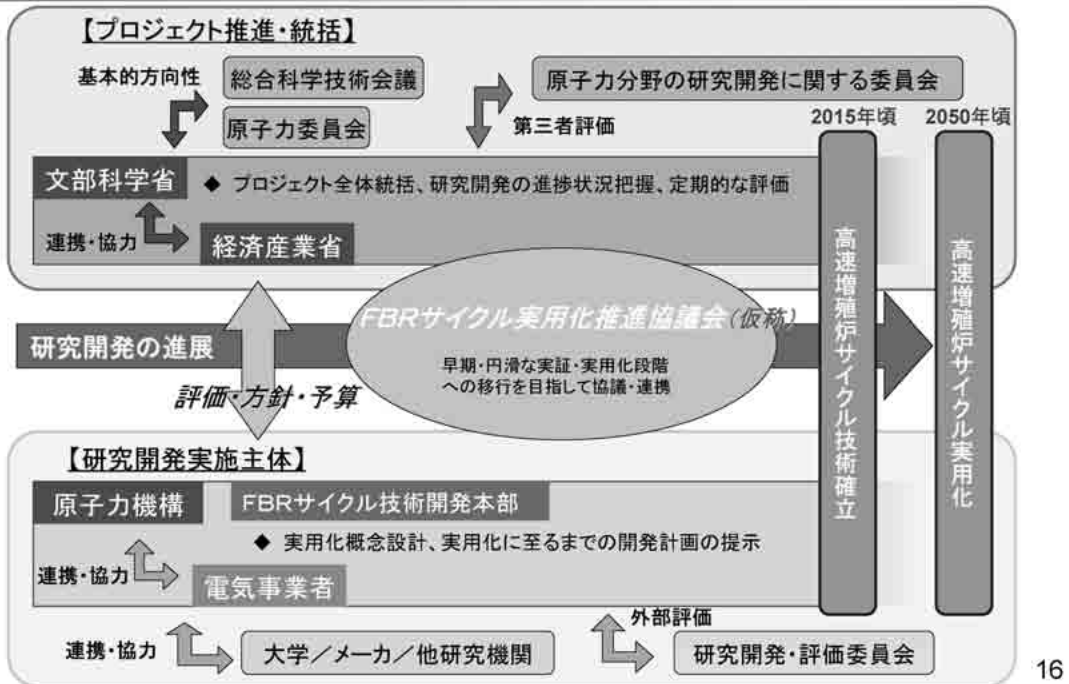
## FBRサイクルの技術体系整備



15



## 国家基幹技術 FBRサイクル技術に係る研究開発推進体制



16



## 第4世代原子力システム国際フォーラム(GIF)

- 日仏米が中心となり、10カ国+1機関が参画した国際共同研究開発
- 2030年頃に初号機の導入を目標
- 2015～2020年頃までで研究開発を終了し、その後は実証試験を行う予定（現在は研究開発課題とその協力体制について議論中）
- 検討対象6概念のうち、3概念が高速炉

参加国 10カ国 + 1機関

アルゼンチン ブラジル カナダ フランス 日本 EU 韓国 南アフリカ スイス 英国 米国



2006.2.15 ナトリウム冷却高速増殖炉の研究開発に係わる取り決め締結

### 検討対象の6概念

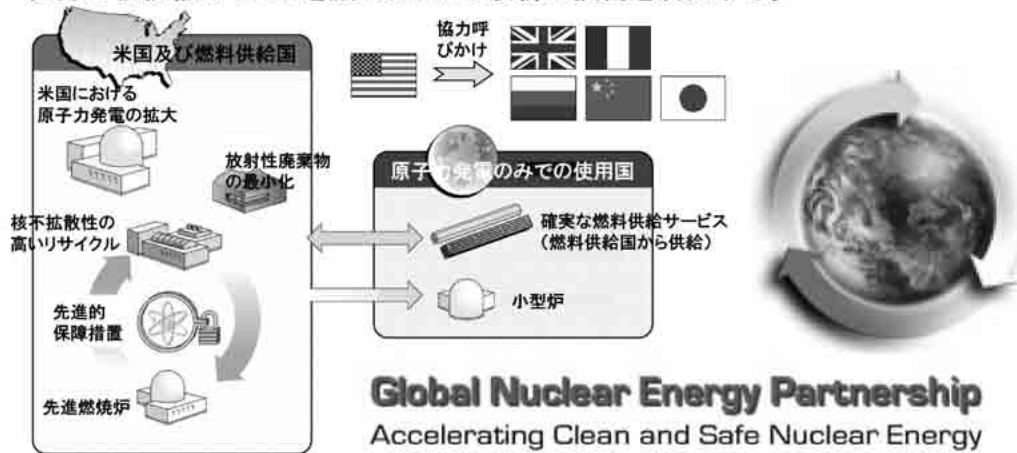
- ナトリウム冷却高速炉 (SFR)
- ガス冷却高速炉 (GFR)
- 鉛冷却高速炉 (LFR)
- 超高温炉 (VHTR)
- 超臨界水冷却炉 (SCWR)
- 溶融塩炉 (MSR)

17

## グローバル原子力パートナーシップ(GNEP)

### GNEPの目標

- 米国の海外の化石燃料への依存度を下げ、経済成長を促進する。
- 核拡散抵抗性を高める先進的技術を活用して核燃料リサイクルを行い、より多くのエネルギーを再生産するとともに廃棄物を低減する。
- 世界の成長と繁栄、クリーンな開発を奨励する。
- 世界の核拡散のリスクを減らすため、最新の技術を利用する。



18

## おわりに

- フェーズⅡの最終報告書を3月30日に公表
- フェーズⅡ成果について国の評価が開始
  - 6月末 中間とりまとめ
  - 10月末 最終とりまとめ
- 国の評価結果を踏まえ、2015年頃の技術体系整備に向けて着実に研究開発を実施
- 国家基幹技術として体制を構築して推進
- 国際協力を活用した効率的な研究開発

19





ナトリウム冷却炉の原子炉施設鳥瞰図  
(150万kWe大型炉ツインプラント)




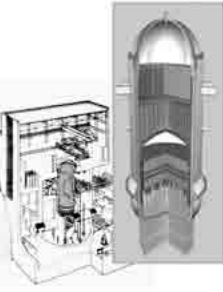
# 参考資料

## JAEA 開発目標の設計要求への展開

● 開発目標を実際の設計検討作業における具体的な指標に展開するため、高速増殖炉システム、燃料サイクルシステムそれぞれに係る定量的な設計要求を設定

開発目標	高速増殖炉の設計要求	燃料サイクルの設計要求
安全性	<ul style="list-style-type: none"> <li>● 炉心損傷の発生頻度 <math>10^{-6}</math>/炉・年未満</li> <li>● 炉心損傷に至る代表事象に対する受動安全性の強化あるいは事故管理方策の具体化</li> <li>● 仮想的な炉心損傷時の再臨界発生を回避し、その影響を原子炉容器あるいは格納施設内で確実に終息</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>● 同時代の軽水炉燃料サイクルシステムと同等以上（異常の発生要因を極力排除、異常の拡大防止等）</li> <li>● 施設内での放射性物質の大規模放出事象の発生頻度を <math>10^{-6}</math>/プラント・年未満に抑制し、その事象を想定しても、施設の閉じ込め能力を確保して、影響を周辺環境に及ぼさない設計</li> </ul>
経済性 高速増殖炉サイクル全体としての発電原価 4円/kWh	<ul style="list-style-type: none"> <li>● 建設費：20万円/kWe</li> <li>● 燃料費：炉心燃料の平均燃焼度 15万MWd/t</li> <li>● 運転費：連続運転期間 18カ月以上、稼働率 90%以上</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>● 再処理・燃料製造費 0.8円/kWh</li> <li>● 処分費等を含む燃料サイクル費としては 1.1円/kWh</li> </ul>
環境負荷低減性	<ul style="list-style-type: none"> <li>● 軽水炉の使用済燃料中のMAも経済的に燃焼できるよう、5%程度のMA含有低除染TRU燃料を受入可能</li> <li>● 長寿命核分裂生成物の核変換能力</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>● 発電量あたりの放射性廃棄物の発生量が軽水炉燃料サイクル施設と同等以下を要求、1/10に削減することを目指す</li> <li>● UおよびTRUの廃棄物への移行率 0.1%以下（目標）</li> <li>● 長寿命核種の分離核変換技術の採用などにより処分負荷低減の可能性を追求</li> </ul>
資源有効利用性	<ul style="list-style-type: none"> <li>● 増殖比 低除染TRU燃料を用いて増殖比1.0以上を達成できること 1.1以上が達成できる場合は、移行期での経済性向上のため、炉心全体の燃焼度の増加及び連続運転期間の長期化を図る</li> <li>● 基幹電源としての利用に加え、多目的利用・高熱効率を達成できること（目標）</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>● UおよびTRU回収率99%以上</li> </ul>
核拡散抵抗性	<ul style="list-style-type: none"> <li>● 低除染TRU燃料を輸送・取扱い、高線量化により接近性を制限</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>● 核物質防護、保障措置への対応を考慮した設計 プルトニウムが単体の状態で存在しないこと</li> <li>● 低除染・TRU燃料の使用に伴う高線量化による接近性の制限</li> </ul>

## JAEA FBRシステムの実用化概念

			
<p><b>ナトリウム冷却炉</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>● 150万kWe大型炉（酸化物及び金属）</li> <li>● 革新技術の採用で物量、建屋容積を大幅に削減</li> <li>● ナトリウムの特徴を考慮した設計により信頼性を確保</li> </ul>	<p><b>ヘリウムガス冷却炉</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>● 150万kWe大型炉（窒化物被覆粒子燃料）</li> <li>● 高温熱源の特長を活かして物量・建屋容積を削減</li> <li>● 減圧事故、炉心損傷事故対策を考慮</li> </ul>	<p><b>鉛ビスマス冷却炉</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>● 75万kWe中型炉（窒化物燃料）</li> <li>● 化学的に不活性な冷却材であり二次冷却系を削除したシステムを構築</li> </ul>	<p><b>水冷却炉</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>● 135万kWe BWR型高速増殖炉（酸化物燃料）</li> <li>● 増殖性確保のため、高富化度・高稠密炉心概念</li> <li>● ABWRのプラント技術が利用可能</li> </ul>

2

## JAEA FBRシステムの技術総括

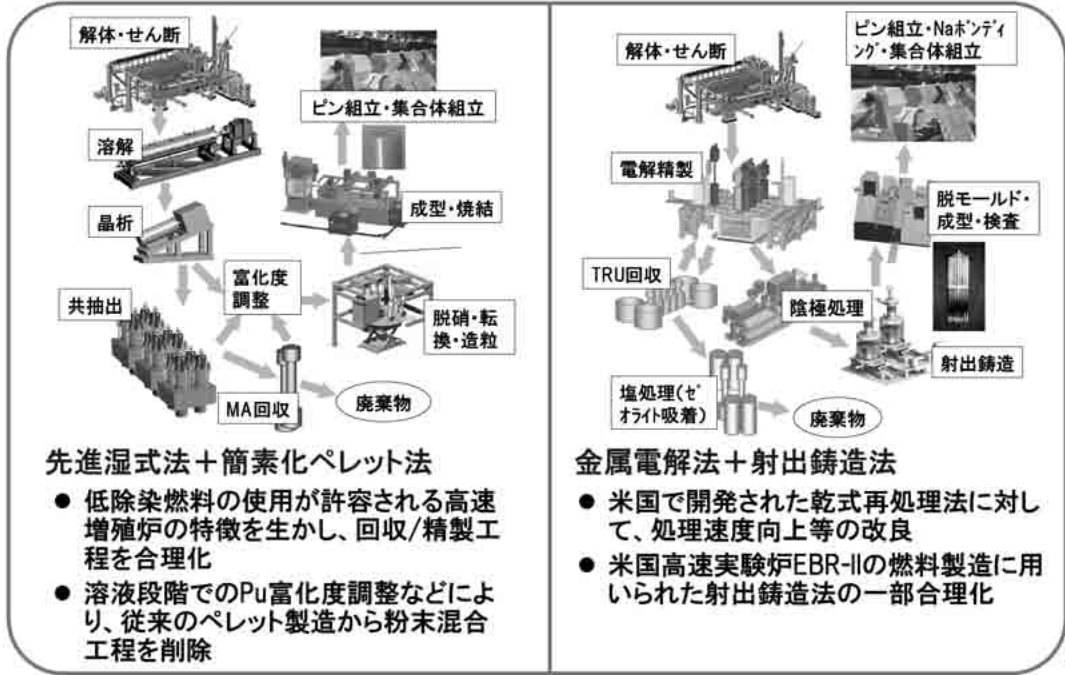
- 有望なシステム概念
  - ナトリウム冷却炉が最も有望な概念である
  - ヘリウムガス冷却炉は多様なニーズに対応可能な概念である

	ナトリウム冷却炉	ヘリウムガス冷却炉	鉛ビスマス冷却炉	水冷却炉
設計要求への適合可能性	全ての設計要求に対して、高いレベルで適合する可能性がある。金属燃料を採用した場合にはさらなる炉心性能の向上が見込める。	全ての設計要求に対して適合する可能性があり、高温熱源としての魅力を有する。	全ての設計要求に対して適合する可能性がある。	資源有効利用性および環境負荷低減性に制約がある。上記以外の設計要求に対しては、適合する可能性がある。
技術的実現性	開発課題が明確であり、また代替技術を準備することができることから、高い確度で実現性を見通すことが可能	実現性を見通すためには、概念成立性に係わる課題を解決することが必要		実現性を見通すための課題が炉心燃料関連に限定
(国際的視点)	国際協力を期待することが可能 GIFでの活動が活発で、国際標準の概念へ発展していく可能性がある。また、共同開発による革新技術のブレークスルー、開発分担による効率的開発が期待できる。	国際協力を期待することが可能 GIFでの活動により、国際標準の概念へ発展していく可能性がある。また、概念成立性に係わる課題が解決されれば、技術的実現性をより向上させることができる。	国際協力を期待することが困難 GIFでの活動において開発を主導する国が無く、概念成立性に係わる課題をブレークスルーできる可能性が低い。	国際協力を期待することが困難 GIFでの候補概念に取り上げられていないため、現状では基礎的な研究協力内容に限定される。

□ は優れた部分

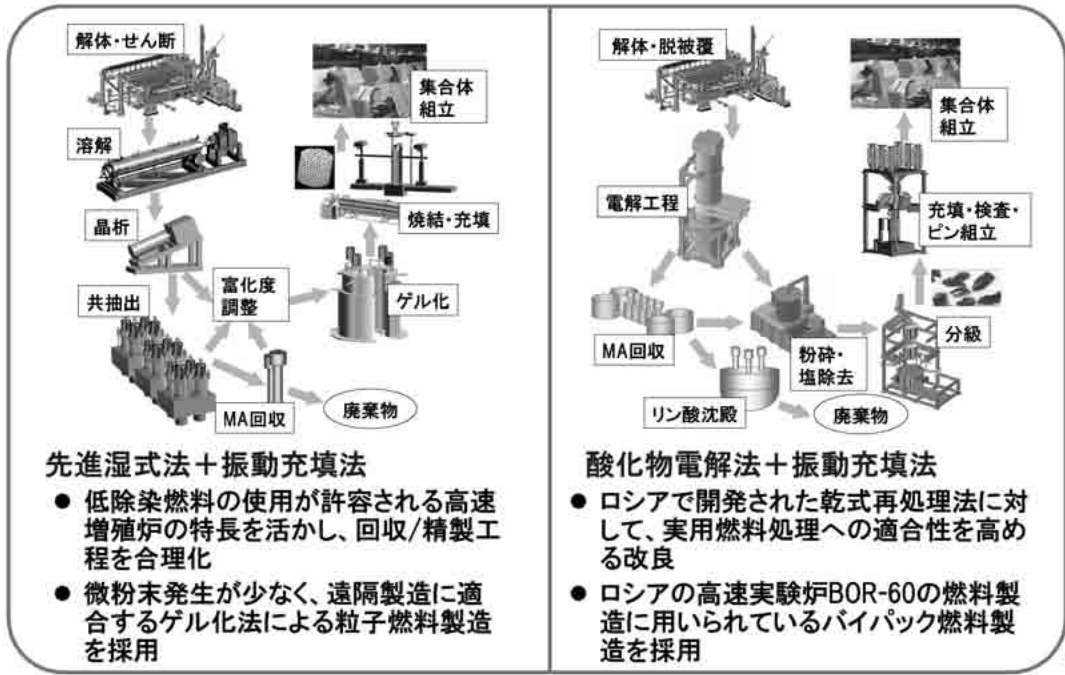


**JAEA** 燃料サイクルシステムの実用化概念(1/2)



4

**JAEA** 燃料サイクルシステムの実用化概念(2/2)



5

●有望なシステム概念

- 先進湿式法+簡素化ペレット法が最も有望な概念である
- 金属電解法+射出鋳造法は多様なニーズに対応可能な有望概念である

	先進湿式法+ 簡素化ペレット法	金属電解法+ 射出鋳造法	先進湿式法+ 振動充填法(※)	酸化物電解法+ 振動充填法
設計要求への 適合可能性	全ての設計要求に対して 高いレベルで適合する可 能性があり、スケール アップ効果のため大規模 施設の経済性が高い。	全ての設計要求に対して 適合する可能性があり、 小規模施設の経済性が 高い。	全ての設計要求に対して 適合する可能性がある。	全ての設計要求に対して 適合する可能性がある。
技術的実現性	実現性を見通すことが 可能	実現性を見通すことが 可能だが、インフラ整備 が必要なことから比較的 長期の開発を要する 見込み	実現性を見通すことが 可能	技術的課題が多く開発に 長期を要する
(国際的視点)	国際協力を期待するこ とが可能  (フランスではホットラボな どによる関連研究を実施)	国際協力を期待するこ とが可能  (米国ではホットラボなど による研究を実施)	国際協力を期待するこ とが困難  (積極的に開発する 国はない)	国際協力を期待するこ とが可能  (ロシアではホットラボなど による関連研究を実施)

□ は優れた部分

(※) ヘリウムガス冷却炉用の酸化物被覆粒子燃料の製造には、この振動充填法の工程の一部である「ゲル化法」が用いられるが、対応する燃料サイクル概念の開発については、高速増殖炉システム開発の進捗により被覆粒子窒化物燃料の概念が固まった後に着手することが効率的である。



▽ 革新技术の決定 ◆ 各課題のマイルストーン

# JAEA 炉心燃料の研究開発計画

主概念・MOX燃料	2005			2010			2015			判断のポイント	代替技術
	2005	2005	2005	2010	2010	2010	2015	2015	2015		
高燃度燃料・材料研究開発				燃料ピン照射試験(OR-60「準実」)目標:250dpa,20万MWd/t	照射試験(準実)		17万MWd/t燃料ピン照射試験(準実)			<ul style="list-style-type: none"> <li>OGS燃料ピンの目標燃度達成見通し判断</li> <li>OGS燃料ピンの75dpa,15万MWd/t<sup>(*)</sup>までの健全性確認</li> <li>OGS燃料ピンの250dpa,25万MWd/t<sup>(*)</sup>相当までの健全性確認</li> <li>OGS燃度等の90dpaまでの材料照射特性評価</li> <li>OGS燃度等の250dpaまでの材料照射特性評価</li> <li>OGS燃料ピンの15万MWd/t燃度までの健全性確認および25万MWd/tまでの健全性外挿評価</li> <li>OGS燃料ピンの25万MWd/tまでの性能実証</li> </ul>	替管管材料: PNC-FMS鋼
低燃度TRU酸化燃料の照射健全性				TRU酸化燃料照射試験(準実)			ショートプロセス中空燃料ピンの照射試験(準実)			<ul style="list-style-type: none"> <li>TRU酸化燃料ピンの430N/cmまでの熱的挙動評価</li> <li>TRU酸化燃料ピンの10万MWd/tまでの健全性確認</li> <li>TRU酸化燃料ピンの25万MWd/tまでの健全性確認</li> <li>ショートプロセス中空燃料ピンの5万MWd/tまでの健全性確認および炉内燃焼出力評価</li> <li>ショートプロセス中空燃料ピンの25万MWd/tまでの健全性確認</li> <li>低燃度TRU酸化燃料ピンの25万MWd/tまでの燃料ピン健全性確認</li> <li>低燃度TRU酸化燃料燃料/燃料の25万MWd/tまでの性能実証</li> </ul>	-
再臨界回遊集合体研究開発				再臨界回遊集合体燃焼試験			燃料ピン健全性照射試験(準実)			<ul style="list-style-type: none"> <li>再臨界回遊集合体の詳細構造決定と成立性見直し</li> <li>再臨界回遊集合体の燃料健全性確認</li> <li>再臨界回遊集合体の7万MWd/t燃度までの健全性確認および25万MWd/tまでの健全性外挿評価</li> </ul>	-

注)LLFP変換技術開発については、LLFPの変換性能、技術的実現性、経済合理性等を評価すると共に、I, Tcなどのターゲット化合物の照射試験を行い、2015年頃までにはその後の進め方を判断する。

(\*) 燃度値、照射量はピーク値、取出平均燃度値:15万MWd/tは、▽ 革新技術の採否判断 25万MWd/t, 250dpaのピーク値と対応する。

◆ 各課題の主要なチェックポイント

# JAEA 先進湿式法+簡素化ペレット法の研究開発計画

主概念	項目	目的	2010		2015		評価・判断のポイント	代替技術
			2010	2010	2015	2015		
先進湿式法	設計研究	・実用サイズ炉施設の概念構築 ・技術的健全性確認(実証試験: ~10kg/h=50t/y燃焼)	概念設計研究		最適化設計研究		-	-
	プロセス開発	・燃焼条件最適化のための小規模ホット試験 (OPF) ・スケールアップの影響等確認のための小規模ホット試験 (10~100kg/h=50t/y燃焼)	・せん断や晶析の条件(粉体化学、温度、等)と整合した溶解速度の確認 ・晶析工程の燃焼後数値確認および結晶洗浄効果の確認 ・晶析条件と整合した気取除/空抽出データ取捨 ・MA回収工程の燃焼確認 ・超臨界蒸気抽出法の抽出性能の確認	設計支援データ、試験条件 概念検討 → 詳細設計 → 許認可	試験条件 施設整備	試験条件 晶析、共析後・空抽出、MA回収に関する燃焼プロセス試験 (~1kg/h)	<ul style="list-style-type: none"> <li>最新技術の実用化の見直し評価</li> <li>晶析プロセス試験結果の設計への反映</li> <li>小規模ホット試験結果に基づき溶解・晶析・共析後・空抽出の燃焼条件提示、実用化の見直し判断</li> <li>小規模ホット試験結果等を踏まえた燃焼プロセス試験の燃焼条件提示の判断</li> <li>燃焼プロセス試験結果に基づき溶解・晶析・共析後・空抽出の実用化の見直し判断</li> <li>実用燃焼の性能(燃焼速度、燃焼効率等)の確認、実用化の見直し判断</li> </ul>	従来型P/Ureaベース技術
	燃焼開発	・燃焼速度や燃焼性能など燃焼性能を確認するための燃焼試験の実施 ・実用化が見込める燃焼の燃焼設計・製作・試験	・燃焼速度や燃焼性能など燃焼性能を確認するための燃焼試験の実施 ・燃焼速度や燃焼性能など燃焼性能を確認するための燃焼試験の実施	燃焼、せん断、溶解、晶析、共析後・空抽出、MA回収等 主要工程の試験用燃焼設計(試作・試験も含む)		主要工程の燃焼の製作、燃焼性能試験		
簡素化ペレット	プロセス開発	・低燃度MA含有MOXペレット製造実証 ・製造プロセス開発	簡素化ペレット法の小規模実証		簡素化ペレット法の小規模実証		<ul style="list-style-type: none"> <li>簡素化ペレット法の燃焼的成立性の確認、実用化の見直し判断</li> <li>簡素化ペレット法製造システムの技術確認、実用化の見直し判断</li> </ul>	従来型ペレット法ベース技術
	燃焼開発	・実用化が見込める燃焼の燃焼設計・製作・試験	燃焼転送・ダイゲージ成形・焼結等、簡素化ペレット製造小規模システムの設計・製作	燃焼転送・ダイゲージ成形・焼結等、簡素化ペレット製造小規模システムの設計・製作	簡素化ペレット法の燃焼試験(技術確認)	燃焼転送・ダイゲージ成形・焼結等、簡素化ペレット製造小規模システムの設計・製作	<ul style="list-style-type: none"> <li>実用燃焼の性能(燃焼速度、燃焼効率等)の確認、実用化の見直し判断</li> </ul>	従来型ペレット法ベース技術

コールド試験  
 ホット試験  
 ウラン試験  
 MOX試験  
 ▽ 革新技術の採否の判断  
 ◆ 各課題の主要なチェックポイント