

FBRサイクルの実用化戦略調査研究 ーフェーズⅡの中間とりまとめの成果ー



平成16年8月
核燃料サイクル開発機構



実用化戦略調査研究の目的と意義

JNC

目的

21世紀の社会ニーズに適合する主要なエネルギー供給源としてFBRサイクルの実用化像を明確にし、その技術体系を整備する。

意義

高速増殖炉（FBR）の特長

中性子の利用効率が高く、ウラン、プルトニウム、マイナーアクチニド※を燃料として使うことが可能

- ① ウランを燃焼することで発生するプルトニウム等を燃料としてリサイクルできるため、持続的なエネルギーの利用が可能となる。
- ② マイナーアクチニドなどの燃焼・消滅により、高レベル放射性廃棄物の発生量を低減できる。
- ③ 燃料に不純物（核分裂生成物など）を含むため核兵器への転用が難しく、核拡散抵抗性が高い。

エネルギーの長期安定供給と地球環境の保全に寄与

※ マイナーアクチニド：使用済み燃料中に存在するアメリシウム、キュリウムおよびネプツニウムを指す。

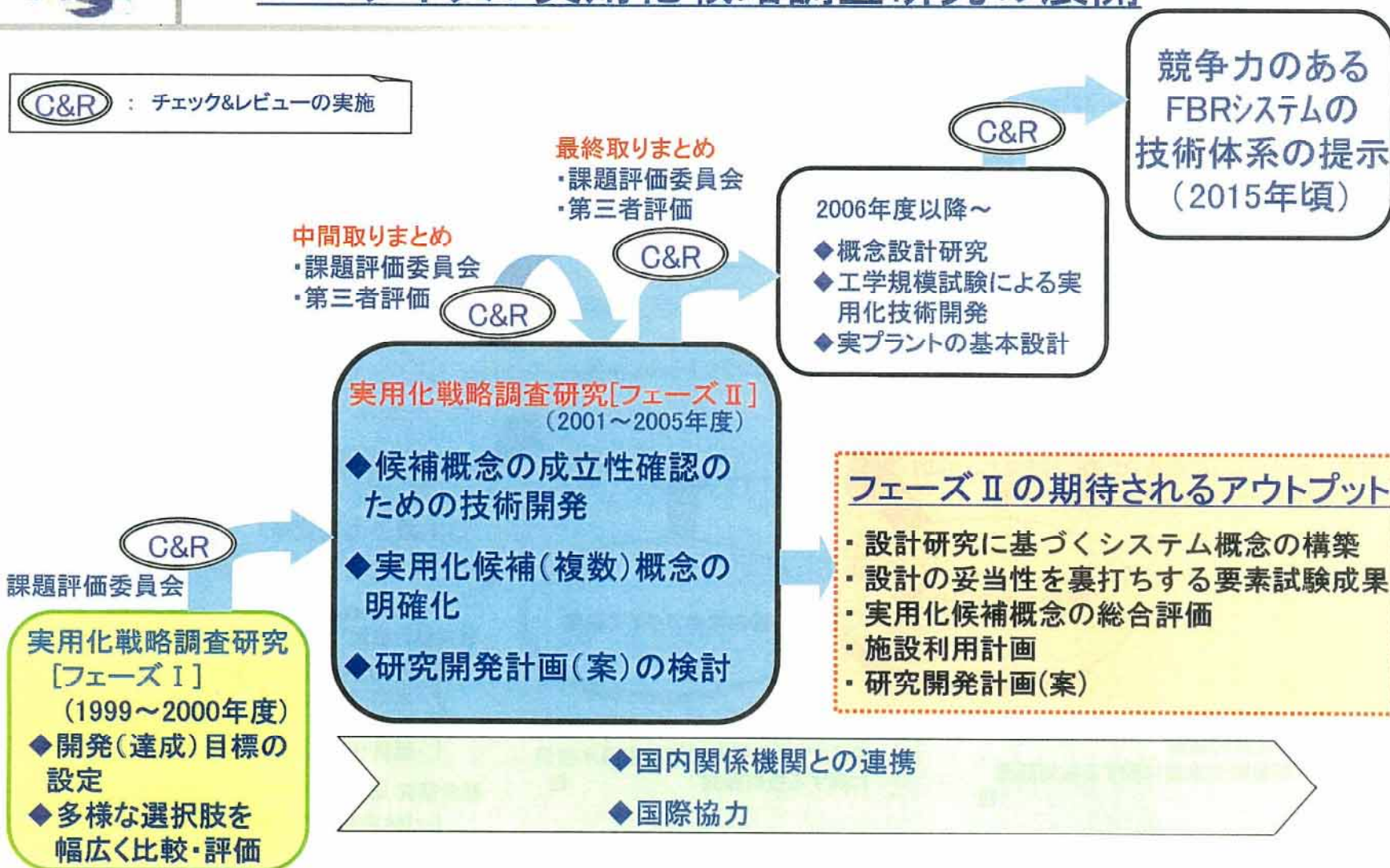
研究の目標

FBRサイクル技術体系を2015年頃までに提示する。



FBRサイクル実用化戦略調査研究の展開

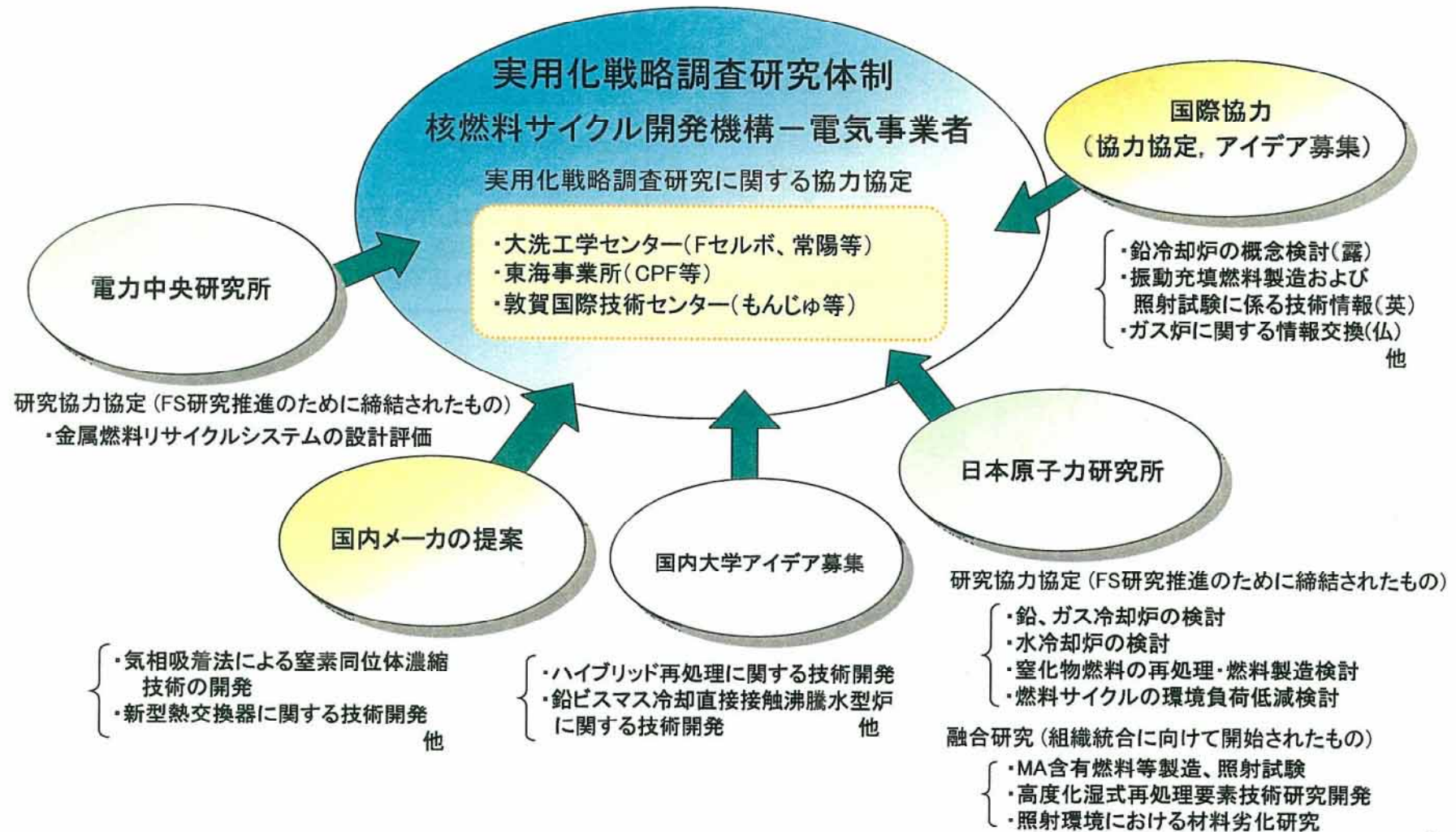
JNC





実用化戦略調査研究における協力体制

JNC





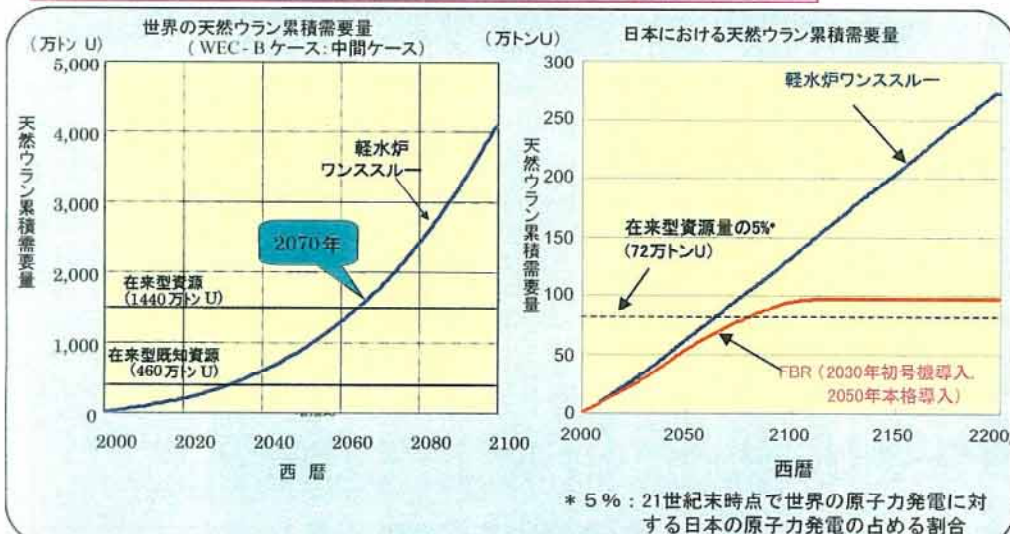
5つの開発目標の設定

- 安全性 : 既存のリスクに比べて十分小さいこと
- 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 : 廃棄物の発生量と毒性が低減できること、
地層処分への負荷を低減できること
- 資源有効利用性 : ウラン資源をリサイクルし、持続的にエネルギー
を利用できること
- 核拡散抵抗性 : プルトニウムが単体の状態で存在しないこと



FBRの導入の必要性 (1/2)

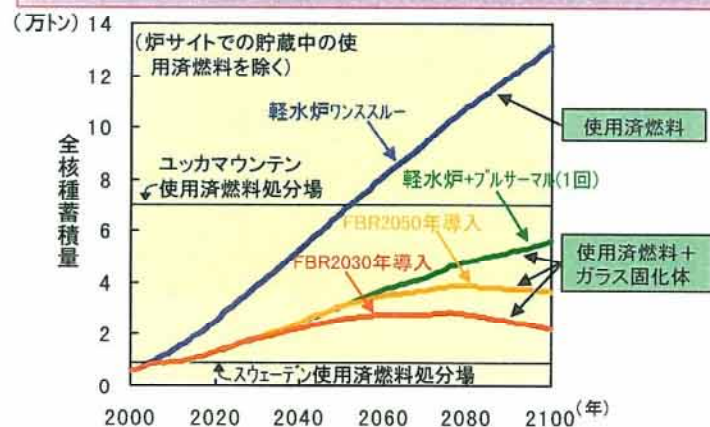
天然ウランの累積需要量 (ワンスルーと FBR サイクルの場合)



世界のエネルギー消費量の増加が予想される中、化石燃料資源の不確実性、地球温暖化の問題などを考えると、世界各国で原子力発電への依存が高まり、ウランも手に入りにくくなる可能性がある。

FBRサイクル (プルトニウム等の利用) を実現することによって、エネルギー資源のリサイクル&使用可能量が増加し、海外ウラン資源に依存する必要がなくなる。

廃棄物発生量の低減 (使用済燃料、ガラス固化体中の全核種蓄積量)



使用済燃料の管理負担の低減

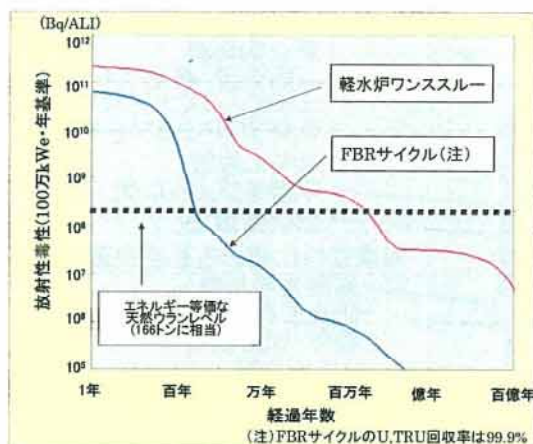
- ・FBRを導入することにより、軽水炉ワンスルーでは増え続ける使用済燃料の蓄積を抑制できる。
- ・FBRサイクルの導入時期が早いほど使用済燃料の管理負担は小さく、2030年に導入した場合、2050年に導入した場合に比べおよそ1万トン程度蓄積が少ない。



FBR導入の必要性 (2/2)

JNC

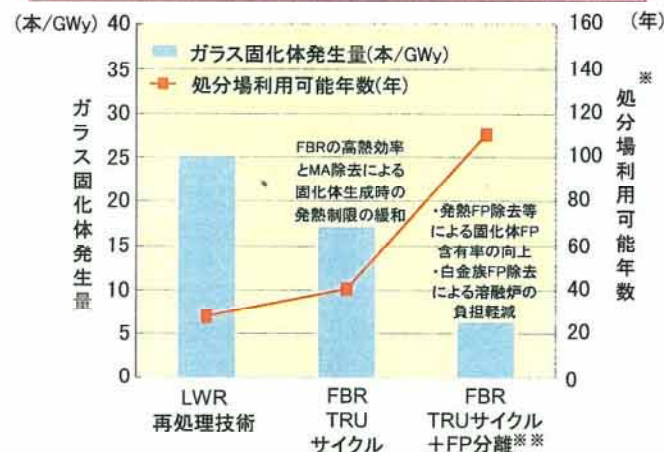
廃棄物の放射性毒性の低減



TRUサイクルによる廃棄物中の放射性毒性の低減

- FBRでマイナーアクチノイド(MA)を燃焼することで、高レベル廃棄物へのMAの移行を抑え、放射性毒性のレベルを低減させることが可能である。
- 軽水炉ワンスルーでは、天然ウランレベルまで放射性毒性が低減するには500万年程度必要。
- FBRサイクルではMA燃焼などにより、高レベル放射性廃棄物に含まれる放射性毒性が大幅に低減でき、天然ウランレベルまで減衰するのに必要な期間を数百年程度に短縮できる。

地層処分への負荷低減(高レベル廃棄物の低減)



TRUサイクルによる高レベル廃棄物の低減

- TRUサイクルにおけるガラス固化体発生量は、マイナーアクチノイドの除去により、現行LWRの約2/3程度に低減可能である。
- FP分離及び高レベル廃棄物の高減容処理により、現行LWRの1/4程度までガラス固化体発生量を低減可能である。
- 高レベル廃棄物処分場の利用可能年数を5倍程度延長することが可能である。

※処分場利用可能年数(年)

原子力発電設備58GW_eとして、各処理技術を適用した場合に、ガラス固化体4万本処分可能な処分場を満杯にするのに要する期間を示す。

※※ FP分離

- CsおよびSrはガラス固化体生成時の発熱制限の緩和を目的として分離し、減衰待ち保管後、ガラス固化体に戻すことを想定
- 電気伝導性の高いRu, Pdは、ガラス溶融炉への影響を軽減する観点から分離・有効利用

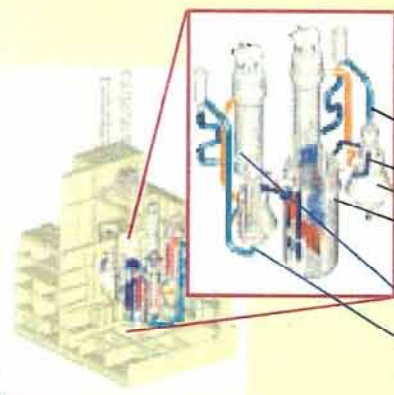


各冷却材のFBRシステムのプラント概念を構築

JNC

- 開発目標適合性の追求
- 革新技術の導入
- 技術的課題の検討

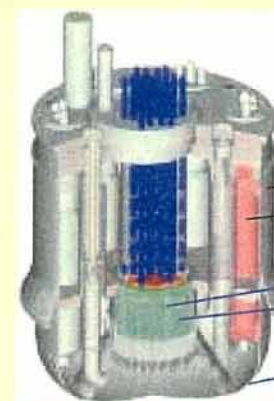
ナトリウム冷却炉



★革新技術

- ◆炉心・燃料
 - ・高燃焼度・長期運転サイクル炉心←ODS被覆管
 - ・低除染TRU燃料を対象
- ◆安全
 - ・再臨界回避のための燃料集合体概念
- ◆設計合理化
 - ・ループ数削減(2ループ化)
 - ・配管短縮←高クロム鋼
 - ・ポンプ組込型IHX
 - ・炉容器コンパクト化
 - ・3次元免震(サイト標準化)
- ナトリウム固有の課題対応
 - ・高信頼性蒸気発生器
 - ・2重配管
 - ・保守・補修技術

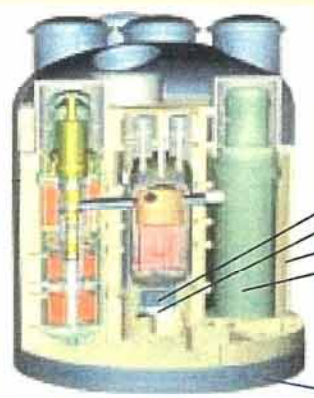
鉛ビスマス冷却炉



★革新技術

- ◆炉心・燃料
 - ・窒化物燃料
 - ・高燃焼度・長期運転サイクル炉心←ODS被覆管
 - ・低除染TRU燃料を対象
- ◆システム設計
 - ・中型モジュールタンク型
 - ・強制循環炉
- 成立性に関わる基礎的課題
 - ・高耐食性材料
 - ・防食制御技術
 - ・保守・補修技術
 - ・3次元免震
 - ・鉛ビスマス環境の燃料安全
 - ・再臨界回避対策

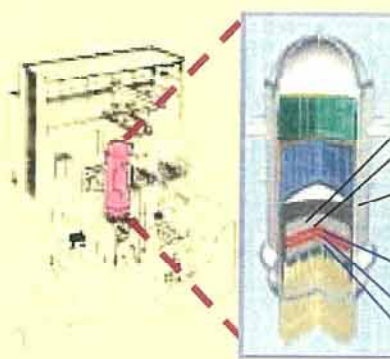
ヘリウムガス冷却炉



★革新技術

- ◆炉心・燃料
 - ・被覆粒子窒化物燃料
 - ・新型燃料集合体概念
 - ・低除染TRU燃料を対象
- ◆安全
 - ・高温キュリー点式SASS
 - ・コアキャッチャ
- ◆システム設計
 - ・コンパクト化システム構成
 - ・直接ガスタービン発電
- 成立性に関わる基礎的課題
 - ・被覆粒子燃料開発(製造、再処理、燃料安全)
 - ・燃料集合体(製造、健全性)
 - ・耐高温材料
 - ・3次元免震

水冷却炉



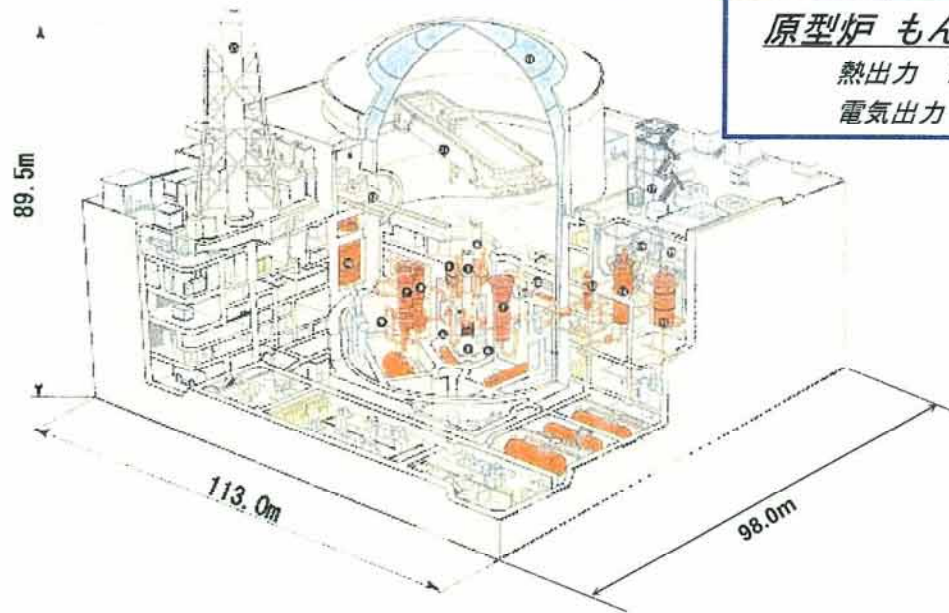
★革新技術

- ◆炉心・燃料
 - ・高稠密格子炉心
 - ・軸非均質炉心構成
 - ・低除染TRU燃料を対象
- ◆システム設計
 - ・ABWRプラントシステム
 - ・自然循環冷却可能
 - ・3次元免震(サイト標準化)
- 成立性に関わる技術課題
 - ・高速中性子、水環境下に適合する被覆管材料
 - ・再臨界回避対策
 - ・稠密格子炉心の除熱性能



FBR原子炉施設の大きさの比較

JNC



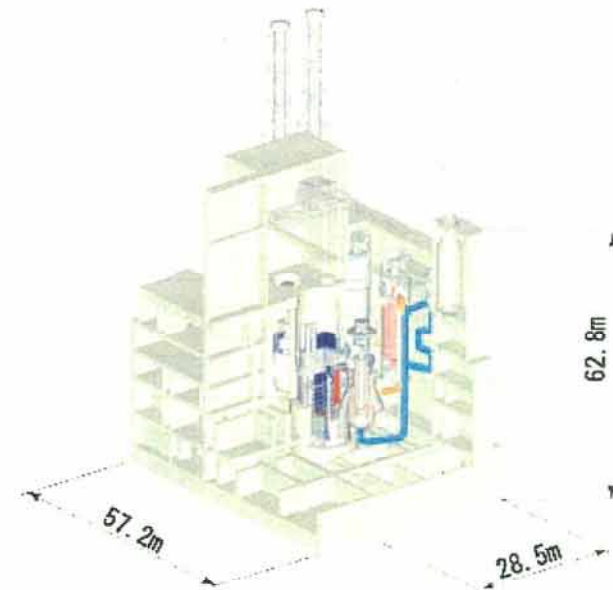
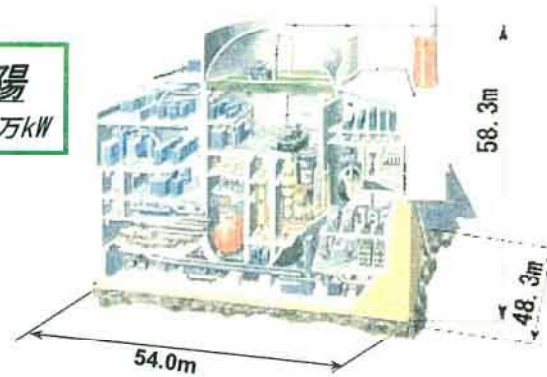
原型炉 もんじゅ

熱出力 71.4万kW

電気出力 28万kW

実験炉 常陽

熱出力 14万kW



Na冷却大型炉

熱出力 357万kW

電気出力 150万kW

革新技術の導入により、コンパクトなプラント概念を構築

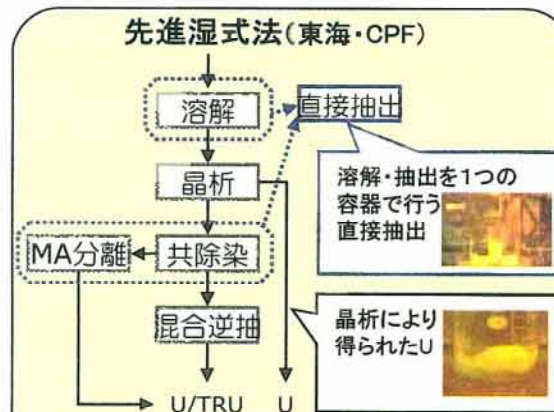


フェーズⅡにおける再処理システムの研究開発状況と成果

JNC

■ 様々な方式の再処理システムの施設概念を創出し、技術的成立性を評価

● 簡素化とTRUリサイクル ● 開発目標適合性の追及 ● 技術的成立性の評価 ● 研究開発課題の抽出



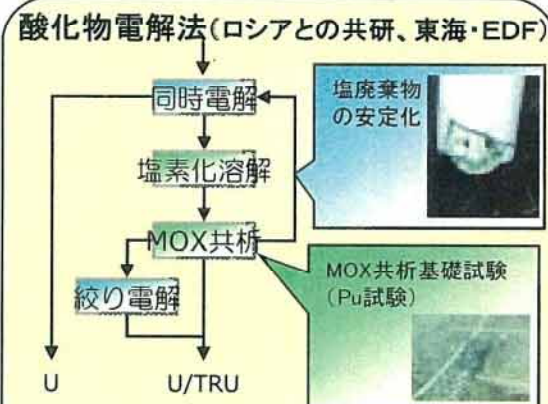
開発目標の適合性が高く、豊富な開発実績に基づき、技術的成立性を高い確度で見通せる再処理システム

★革新技術

- ◆ 工程数削減と設備・施設規模の合理化
 - ・ 晶析技術による大量のU粗取り
 - ・ 単サイクルでのU/Pu/Np回収
- ◆ TRUリサイクルシステム構築による環境負荷低減性向上
 - ・ システム外へのMA排出量抑制

■ 経済性向上のための技術課題

- ◆ 導入期でも十分な経済性を有するシステムの構築
- ・ 使用済燃料からの直接抽出



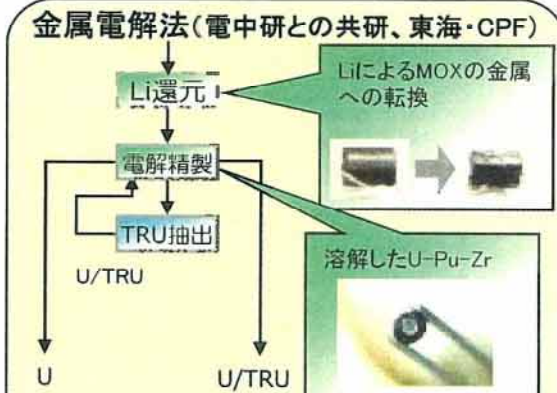
酸化物燃料サイクルシステムとして原理的に簡素であり、小型施設としてのポテンシャルが高い再処理システム

★革新技術

- ◆ 設備の合理化
 - ・ 同時電解による貴金属分離
- ◆ 核拡散抵抗性向上と品質向上
 - ・ 混合酸化物(MOX)での製品回収

■ 成立性に関わる技術課題

- ・ MOX共析・MA回収技術の開発
- ・ 高温の熔融塩を用いる機器開発(高性能なつぼ開発など)
- ・ 廃棄物処理・処分技術の構築



金属への適合性が高く、小型施設としてのポテンシャルが高い再処理システム

★革新技術

- ◆ 設備の合理化
 - ・ 大型電解槽や連続陰極処理装置の採用
 - ・ 新たな臨界管理法の検討
- ◆ 環境負荷低減技術
 - ・ ドロス回収によるU、TRUのロス率の低減

■ 成立性に関わる技術課題

- ・ 使用済燃料を用いたCd・塩処理技術
- ・ 廃棄物処理・処分技術の構築

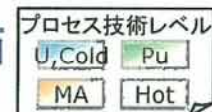


フェーズ II における燃料製造システムの研究開発状況と成果

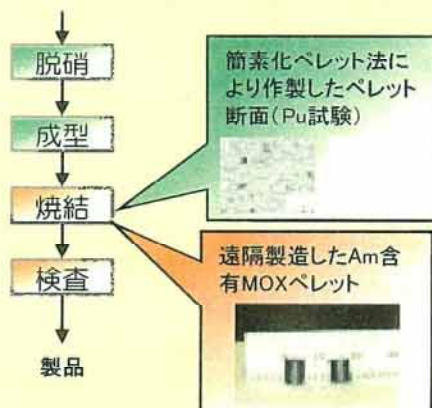
JNC

■ 様々な方式の燃料製造システムの施設概念を創出し、技術的成立性を評価

● 低除染TRU燃料開発 ● 開発目標適合性の追及 ● 技術的成立性の評価 ● 研究開発課題の抽出



簡素化ペレット法(東海・Pu-3、大洗AGF等)



開発目標の適合性が高く、豊富な開発実績に基づき、技術的成立性を高い確度で見通せる燃料製造システム

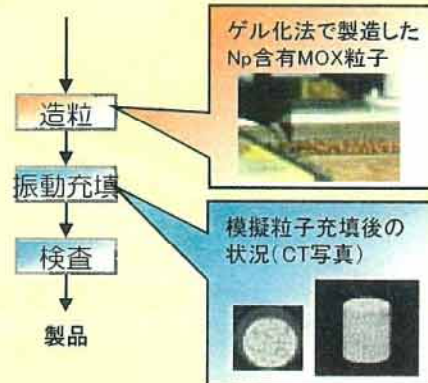
★革新技術

- ◆ 工程数の大幅削減と設備・施設規模の合理化
 - ・ダイ潤滑方式による直接成型
 - ・粉末流動性改良技術 等
- ◆ 遠隔・自動化機器設備

■ 成立性に関わる技術課題

- ◆ 実際の燃料物質による製造条件の確認
- ◆ 工学規模でのセル内遠隔・自動化機器・設備の成立性確認

振動充填法(東海・EDF、スイスとの共研)



燃料粒子を直接被覆管に詰めるため、簡素で遠隔・自動化に適した燃料製造システム

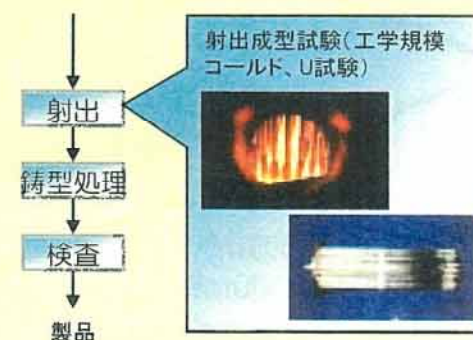
★革新技術

- ◆ インフィルトレーション技術による高密度充填
- ◆ 粒子径分布最適化と金属ウランゲッター

■ 成立性に関わる技術課題

- ◆ 実際の燃料物質による製造条件の確認
- ◆ 低除染燃料の検査技術開発
- ◆ 燃料の高性能化
 - ・充填密度の向上
 - ・高燃焼度化

鑄造法(電中研)



簡素かつ動的機器の少ない燃料製造システム

★革新技術

- ◆ 廃棄物の再利用
 - ・石英製廃鑄型を高レベル廃棄物固化体の原料として利用

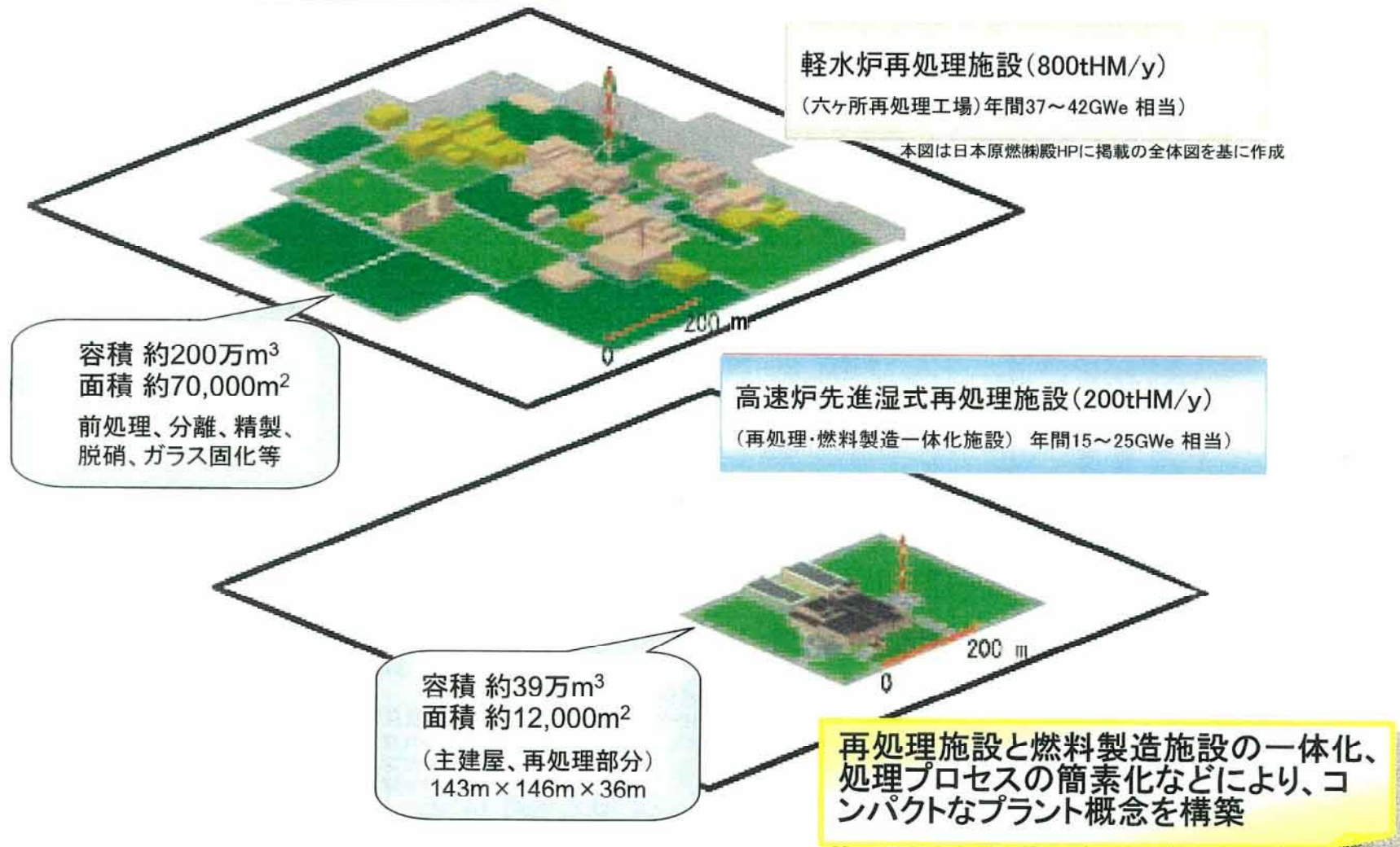
■ 成立性に関わる技術課題

- ◆ 均質組成を有する燃料スラグ製造技術の確認
- ◆ サンプル代表性の確認
- ◆ 実際の燃料物質による製造性確認



燃料サイクル施設の大きさの比較

JNC





燃料、FBRシステム、燃料サイクルシステムの代表的な組み合わせ

ナトリウム冷却炉との組合せ



- 経済性と環境負荷低減性の目標に対する適合性が高い組合せ
- ナトリウム漏えい対策等の固有の技術開発が課題
- 燃料サイクル施設のプロセス簡素化技術開発が課題



- 金属燃料は、資源有効利用性の目標に対する適合性が高い概念
- 使用済燃料を用いた工学規模の試験による確認が課題
- 小型炉の場合もこの組み合わせ

鉛ビスマス冷却炉との組み合わせ



- ナトリウム冷却炉に次いで高い潜在的な能力を持つ炉システム
- 鉛ビスマスに対する防食技術、耐腐食材料の開発が課題
- 窒化物燃料の技術開発が課題

ヘリウムガス冷却炉との組み合わせ



- 炉心出口温度850℃という特徴を活かし、高い熱効率と多目的利用の可能性のある概念
- 構造材や燃料の開発が課題

水冷却炉との組み合わせ



- 軽水炉の設計・運転の経験を活用
- 燃料被覆管の開発や炉心損傷対策が課題



FBRシステムの各概念が選択された場合のそれぞれの研究開発ステップ

年度		フェーズⅡ	～2005年	2006 ～ 2010年	2011 ～ 2015年	2016年～
[実用化戦略調査研究]			候補概念の明確化	C&R	技術体系の整備	
FBRシステム	ナトリウム冷却炉	☆概念検討[概念構築と成立性評価] ☆革新技術開発(被覆管材料、高Cr鋼、ポンプ組込型IHX等) ☆ナトリウム炉固有の課題解決見通し ・ナトリウム－水反応回避 ・高信頼性蒸気発生器 ・保守・補修方策		Step 1 ◆ナトリウム固有の課題解決の見通しが得られた場合 ☆概念検討 ・要素技術開発設計への反映、成立性評価への反映、概念の見直し ☆革新技術の開発	Step 2 ◆主要革新技術の開発見通しが得られた場合 ☆概念検討 ・要素技術開発成果を反映した概念の成立性確認 ☆革新技術の確証	技術実証へ
	鉛ビスマス炉	☆概念検討[概念構築と成立性評価] ☆革新技術開発(材料腐食等) ☆鉛ビスマス炉固有の課題解決見通し ・材料腐食等		Step 1 ◆鉛ビスマス固有の課題解決の見通しが得られた場合 ☆概念検討 ・要素技術開発設計への反映、成立性評価への反映、概念の見直し ☆基盤技術・革新技術の開発(防食技術、耐食性材料等)		Step2
	ヘリウムガス冷却炉	☆概念検討[概念構築と成立性評価] ☆革新技術開発(燃料被覆技術等) ☆ヘリウム炉固有の課題解決見通し ・炉心燃料及び材料等		Step 1 ◆ヘリウム炉固有の課題解決の見通しが得られた場合 ☆概念検討 ・要素技術開発設計への反映、成立性評価への反映、概念の見直し ☆基盤技術・革新技術の開発(炉心燃料及び材料等)		Step2
	水冷却炉	☆概念検討[概念構築と成立性評価] ☆革新技術開発(稠密炉心熱流動等) ☆水炉固有の課題解決見通し ・燃料被覆管等		Step 2 ◆水炉固有の課題解決の見通しが得られた場合 ☆概念検討 ・要素技術開発成果を反映した概念の成立性確認 ☆革新技術の確証(燃料被覆管、炉心損傷時の影響緩和対策等)		技術実証へ

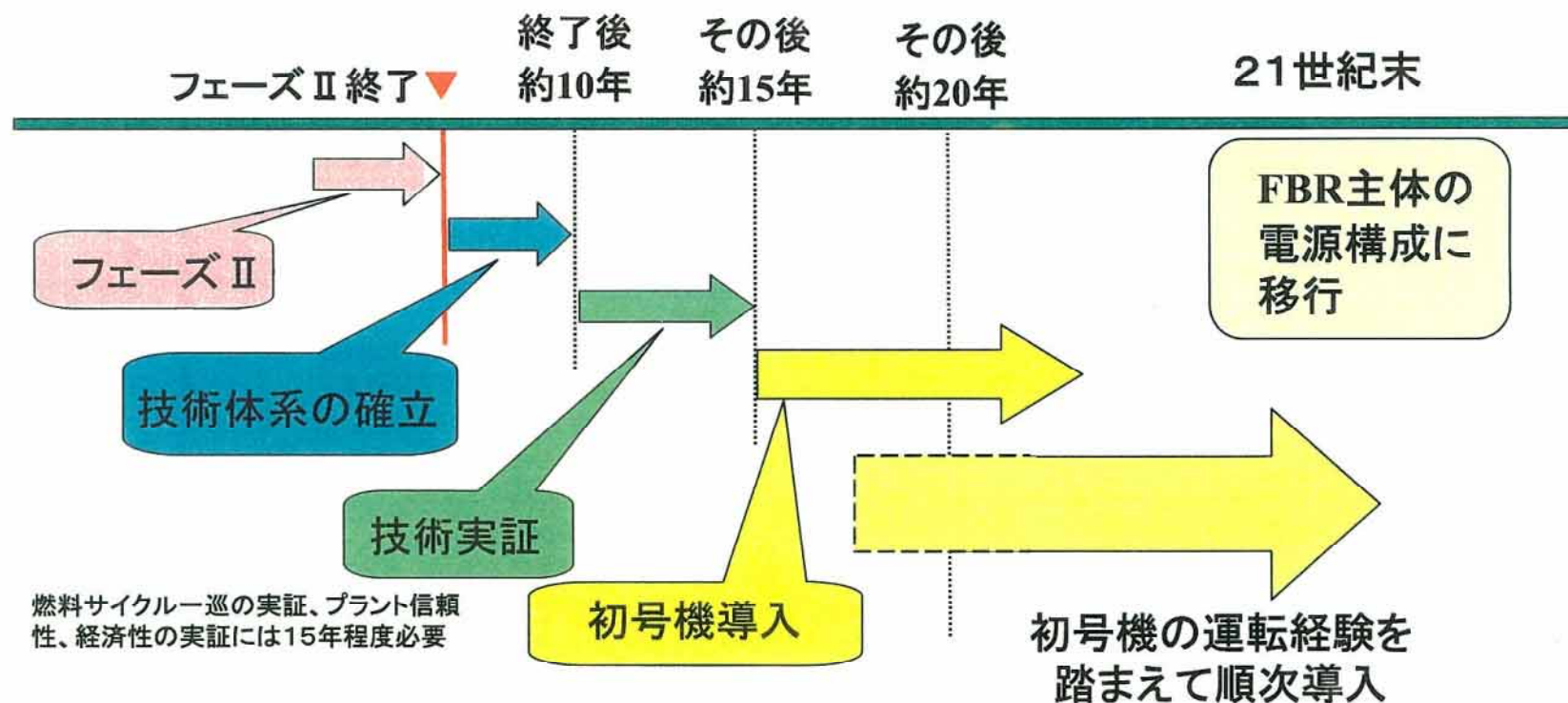


燃料サイクルシステムの各概念が選択された場合のそれぞれの研究開発ステップ

年度 [実用化戦略調査研究]	フェーズⅡ ～2005年	2006～2010年	2011～2015年	備考
	候補概念の明確化	C&R	技術体系の整備	
酸化物燃料	<p>☆有望概念選定に向けた技術開発</p> <ul style="list-style-type: none"> ・再処理プロセス 先進湿式法 MOXを用いた試験による直接抽出型先進湿式法の技術的成立性の見通し 酸化物電解法 ホット試験等による枢要技術(MOX共析、MA回収技術等)の成立性見通し ・燃料製造プロセス(簡素化ペレット/振動充填) 燃料密度、照射試験等による燃料性能比較 	<p>Step1</p> <p>◆各概念の枢要技術の成立性見通しが得られた場合</p> <p>☆候補概念の開発</p> <ul style="list-style-type: none"> ・工学規模試験の具体化(詳細設計の完了) ・工学機器の開発 ・プロセス高度化開発(直接抽出型先進湿式法のホット試験/酸化物電解法プロセスの開発) 	<p>Step2</p> <p>◆主要機器開発の見通しが得られた場合</p> <p>☆候補概念の工学規模試験による技術の確立</p> <ul style="list-style-type: none"> ・工学規模ホット再処理技術実証 ・低除染TRU-MOX燃料の製造技術の確立 	技術実証へ
金属燃料	<p>☆技術的成立性確認</p> <p>金属電解法 使用済み燃料を用いたTRU回収および廃棄物処理技術の技術的成立性見通し</p> <p>MOXを用いた試験によるプロセスフローの確認</p>	<p>Step1</p> <p>◆金属電解法の枢要技術の成立性見通しが得られた場合</p> <p>☆国内施設や国際協力等を活用した研究開発</p> <ul style="list-style-type: none"> ・U-Pu-Zr燃料ピンの照射試験 ・実験室規模ホット試験 <p>(※工学規模ホット試験へのステップアップを判断)</p>		Step2
窒化物燃料	<p>☆技術課題の明確化</p> <ul style="list-style-type: none"> ・窒化物燃料固有の課題解決(窒素同位体分離試験、被覆技術、窒素同位体の回収、脱被覆等) 	<p>Step1</p> <p>◆窒化物燃料固有の課題解決の見通しが得られた場合</p> <p>☆技術的成立性確認、基礎試験</p> <p>基礎試験として継続、5年程度を目途に評価</p>		Step2



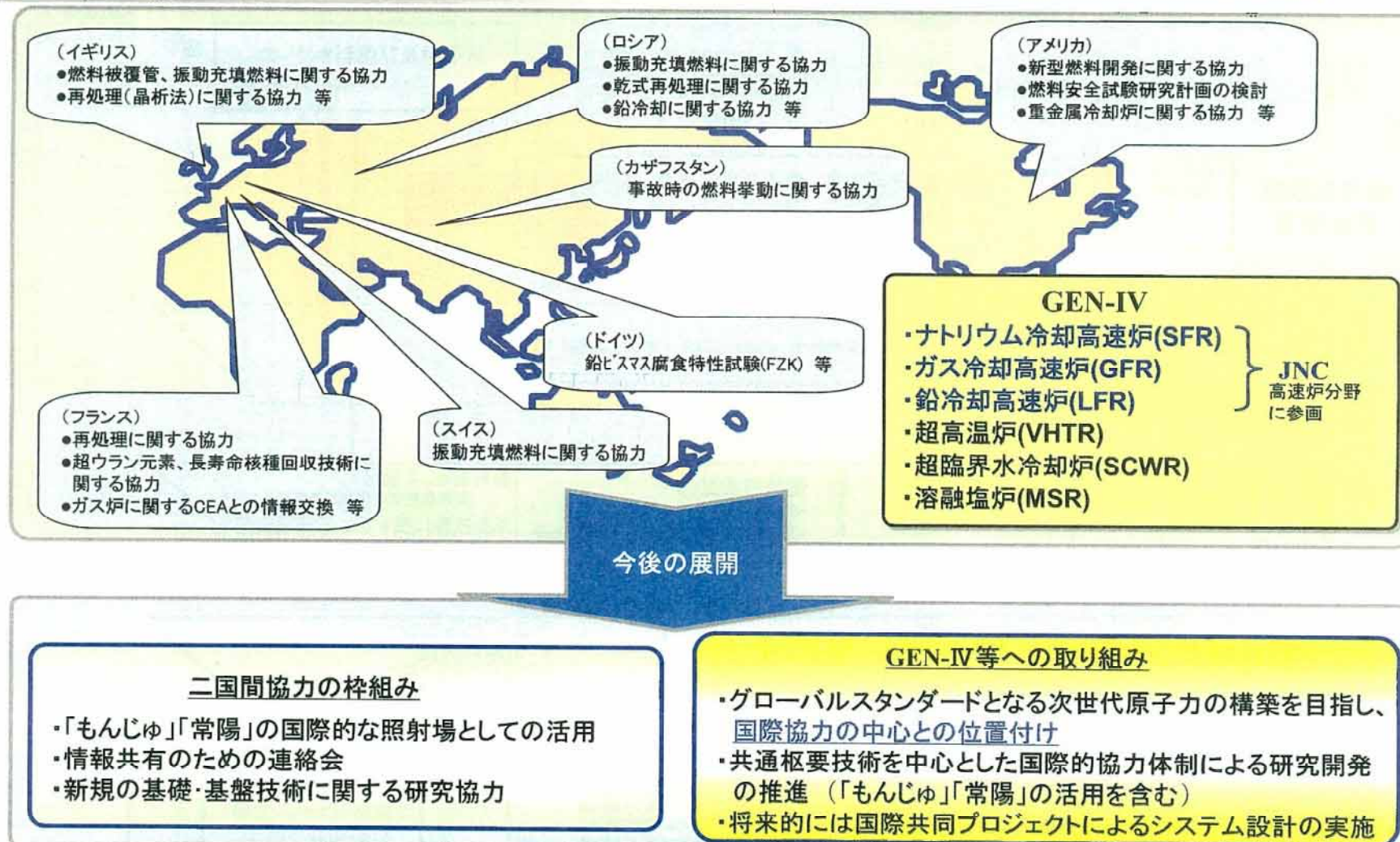
FBRサイクル実用化へのステップ



2015年頃に技術体系を確立すれば、2030年頃には初号機の導入が可能となる。その後の運転実績を踏まえて、2050年頃には順次導入が可能となる。



実用化戦略調査研究における国際協力の状況と今後の展開





FBRサイクル技術開発の展開

JNC

