

高速増殖炉サイクルの実現性について

1. 高速増殖炉の実現性について

高速増殖炉の開発目標と設計要求

	開発目標	設計要求
安全性	<p>取り扱い物質の特性(化学的活性度、毒性など)やプロセス条件(運転温度等)を踏まえた安全対策 高速増殖炉サイクルの導入リスクが、社会に既に存在するリスクに比べて十分に小さい(臨界安全、閉じ込め機能の確保等)</p>	<p>高信頼性を有する能動的な安全設備に加え必要に応じて受動的な安全機能を導入 炉心損傷時の影響を原子炉容器内あるいは格納施設内で終息 ・炉心損傷の発生頻度 10^{-6}/炉年 未満 ・大規模な放射性物質の放出に至る格納容器の破損確率 10^{-2}/炉心損傷事故 未満</p>
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	<p>将来、競合するエネルギー源(軽水炉等)と比肩する発電単価の達成 世界に通用するコスト競争力の確保</p>	<p>炉の建設費 20万円/kWe 炉心燃料の 集合体平均燃焼度 15万MWd/t 連続運転期間 13カ月以上 稼働率 90%以上</p>
資源有効 利用性	<p>優れた中性子経済を活用し持続的に核燃料を生産 ・ TRU燃料の多重リサイクル ・ 軽水炉TRUのリサイクル 多様なニーズへの対応(水素製造等)</p>	<p>増殖比(最低限の要求値) 低除染・TRU燃料の使用を前提に、サイクルロスも考慮しても1.0以上を維持 高速増殖炉サイクルでの燃料組成および軽水炉から供給される燃料組成のMAを経済的に燃焼</p>
環境負荷 低減性	<p>長寿命核種(TRUおよびLLFP)の燃焼または分離変換による地層処分への負荷軽減 運転・保守および廃止措置にともなう廃棄物の発生量低減</p>	<p>軽水炉使用済燃料中のMAを燃焼 長寿命核分裂生成物の核変換 廃棄物の発生量を現行軽水炉以下</p>
核拡散抵抗性	<p>核物質防護および保障措置への負荷軽減(単体プルトニウムが純粋な状態で存在しない等) 核不拡散性制度の運用の効率化(遠隔保守・監視、自動化技術 等)</p>	<p>低除染・TRU燃料の使用や燃焼に伴う高線量化による接近性の制限</p>

各高速増殖炉の設計結果の比較

網掛け部は他に比べて優れた点を示す

項目		ナトリウム炉 (1,500MWe) 酸化物燃料		ヘリウムガス炉(1,124MWe) 窒化物燃料		鉛ビスマス炉(710MWe) 窒化物燃料		水炉 (1,356MWe) 酸化物燃料		
		資源重視*	経済性重視**	資源重視	経済性重視	資源重視	経済性重視			
安全性		再臨界回避方策について 炉外・炉内試験実施中		検討中 (コアキャッチャの設置)		検討中 (燃料浮遊による再 臨界回避の可能性)		検討中 (容器下部への吸収体、 注水系の設置など)		
資源有効利用	増殖比 (1.0 ~ 1.2程度) †	1.16	1.04	1.17	1.03	1.15 ‡	1.04 ‡	1.03		
	複利システム倍増時間	46年	-	73年	-	48年 ‡	-	200年以上		
	初装荷炉心に必要となる核分裂性物質質量	4.4t/GWe	5.9t/GWe	9.6t/GWe	9.6t/GWe	5.8t/GWe ‡	5.6t/GWe ‡	11t/GWe程度		
環境負荷低減	MA 燃焼	低除染条件 (FP含有率2vol%) で、 軽水炉使用済み燃料条件のMA含有率4%程度まで受入可能						低除染条件と水冷却高速炉のリサイクル条件 (MA含有率2%程度) は 受入可能		
	FP 核変換	径ブランク領域に装荷することで、 自己生成分のLLFP(I-129とTc-99)を核変換できる可能性あり						未検討		
経済性	燃料費削減	燃焼度	炉心平均 (150GWd/t以上)	148GWd/t	149GWd/t	119GWd/t	119GWd/t	157GWd/t ‡	159GWd/t ‡	88 GWd/t
			全体平均 (60GWd/t以上)	63GWd/t	110GWd/t	58GWd/t	80GWd/t	105GWd/t ‡	143GWd/t ‡	45 GWd/t
	稼働率向上	連続運転期間 (13ヶ月以上)	18ヶ月	26ヶ月	20ヶ月	19ヶ月	18ヶ月 ‡	18ヶ月 ‡	18ヶ月	
		稼働率 (90%以上)	93%程度	96%程度	93%程度		93%程度		93%程度	
	熱効率向上	原子炉出口温度	550		850		445		287	
		熱効率/所内負荷率	42% / 4%		47% / 3%		38% / 3%		35% / 3%	
	資本費削減	建設単価 (20万円/kWe以下)	相対値: 90%		相対値: 110%		相対値: 110%		相対値: 100%程度	

*: 燃料の増殖性能を高めた炉心

** : 炉心全体の平均燃焼度を高めた炉心

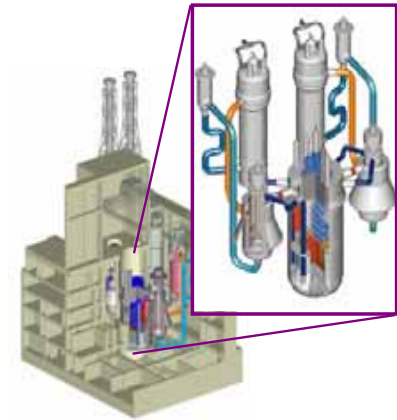
† 増殖比は初期及び末期炉心の平均値を使用。なお水冷却炉についてはPu残存比を記載。

‡ 被覆管制限温度650 とした時の評価結果。

高速増殖炉の技術的実現性(1/2)

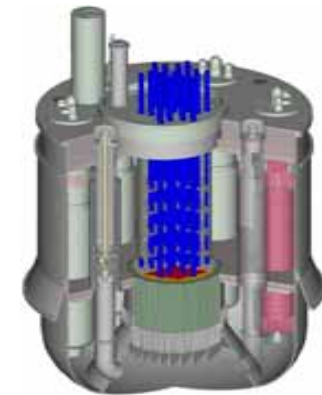
[ナトリウム冷却炉]

- 「常陽」、「もんじゅ」の設計・建設・運転経験、実証炉の設計研究および要素技術開発の成果により、開発目標を満たす概念の技術的実現性を見通すことができる。
- 経済性向上のための機器・構造・材料に関する技術課題があるが、明確な解決方策がある。
- 主要な技術課題としては、原子炉容器のコンパクト化、高温強度・高燃焼度を達成する被覆管材料の開発等が挙げられる。



[鉛ビスマス冷却炉]

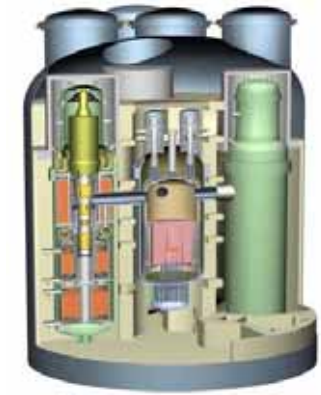
- 流動環境下での基礎的な腐食試験を実施した結果、既存材料では、原子炉出口温度が460 程度に制限される。技術的実現性を見通すためには、実機環境条件での材料腐食問題を解決する必要がある。
- この問題を解決した上で、窒化物燃料、鉛ビスマス用機器(主循環ポンプ、蒸気発生器)等の開発と安全性試験研究を進め、その後、実験炉による技術実証を行う必要がある。



高速増殖炉の技術的実現性(2/2)

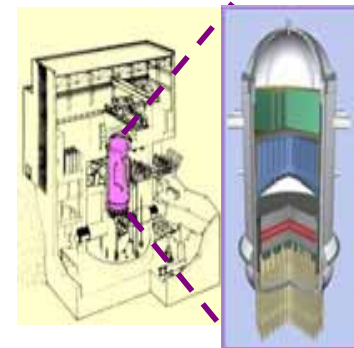
[ヘリウムガス冷却炉]

- 冷却系統に関してはHTTR等の他の高温ガス炉の開発成果が活用できるが、高温耐性に優れた革新的な窒化物被覆粒子燃料および燃料集合体等の研究開発と安全性試験研究が必要である。
- これらの問題を解決した上で、受動的炉停止機構および炉心損傷時の影響緩和対策等の研究開発を進め、その後、実験炉による技術実証を行う必要がある。



[水冷却炉]

- 冷却系統に関しては、軽水炉の知見を活用できるが、炉心燃料に関わる研究開発が必要である。
- 稠密燃料格子での除熱能力を実験により確認中であるが、開発経験に乏しい高速中性子および水冷却環境下の燃料被覆管材料の開発、炉心損傷時の影響緩和方策の具体化が必要である。



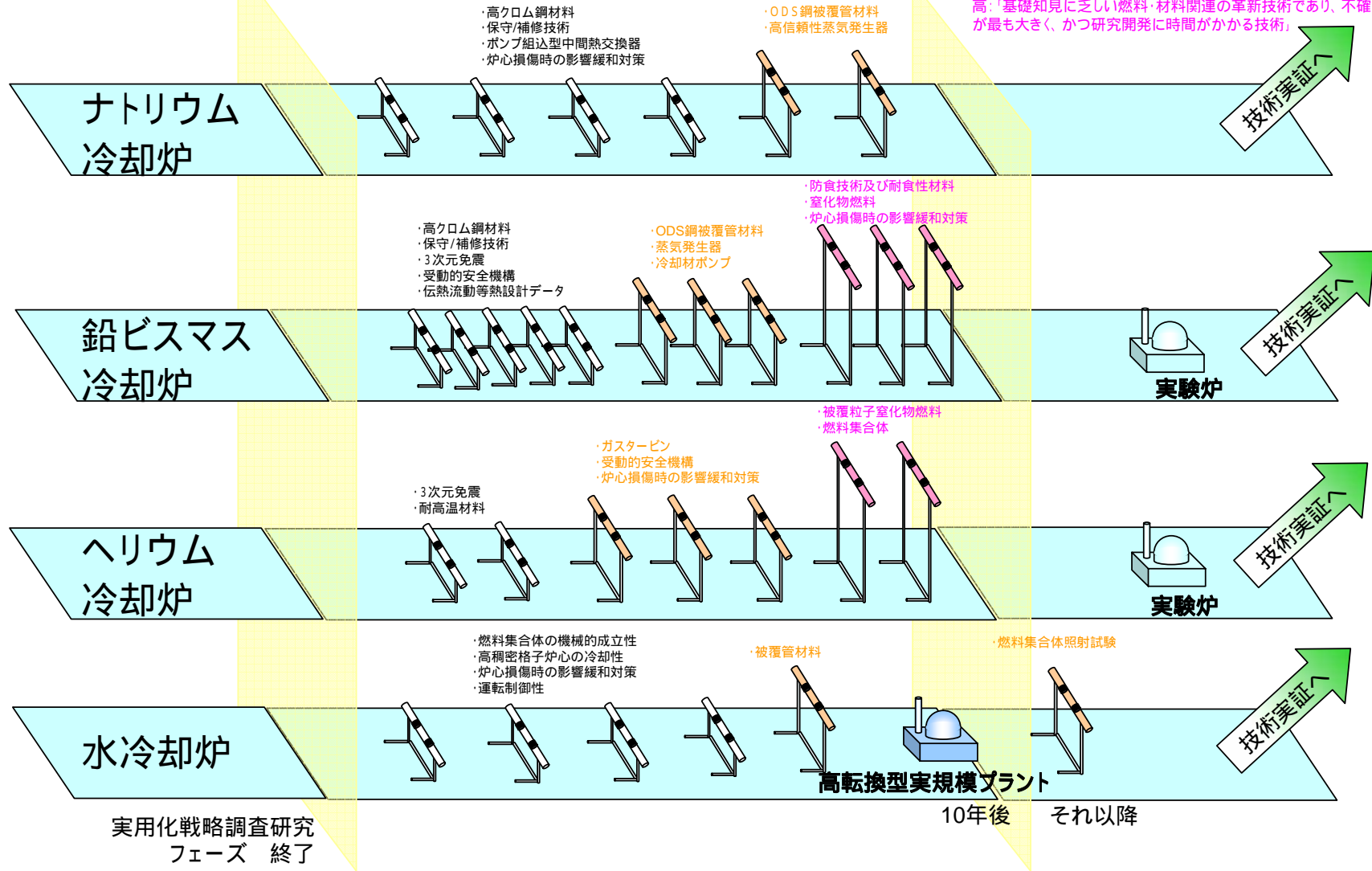
各高速増殖炉の実現可能性

実現可能性(難易度:ハードルの高さ)の分類

低:「開発見通しがあり、不確かさが少ない革新技術」

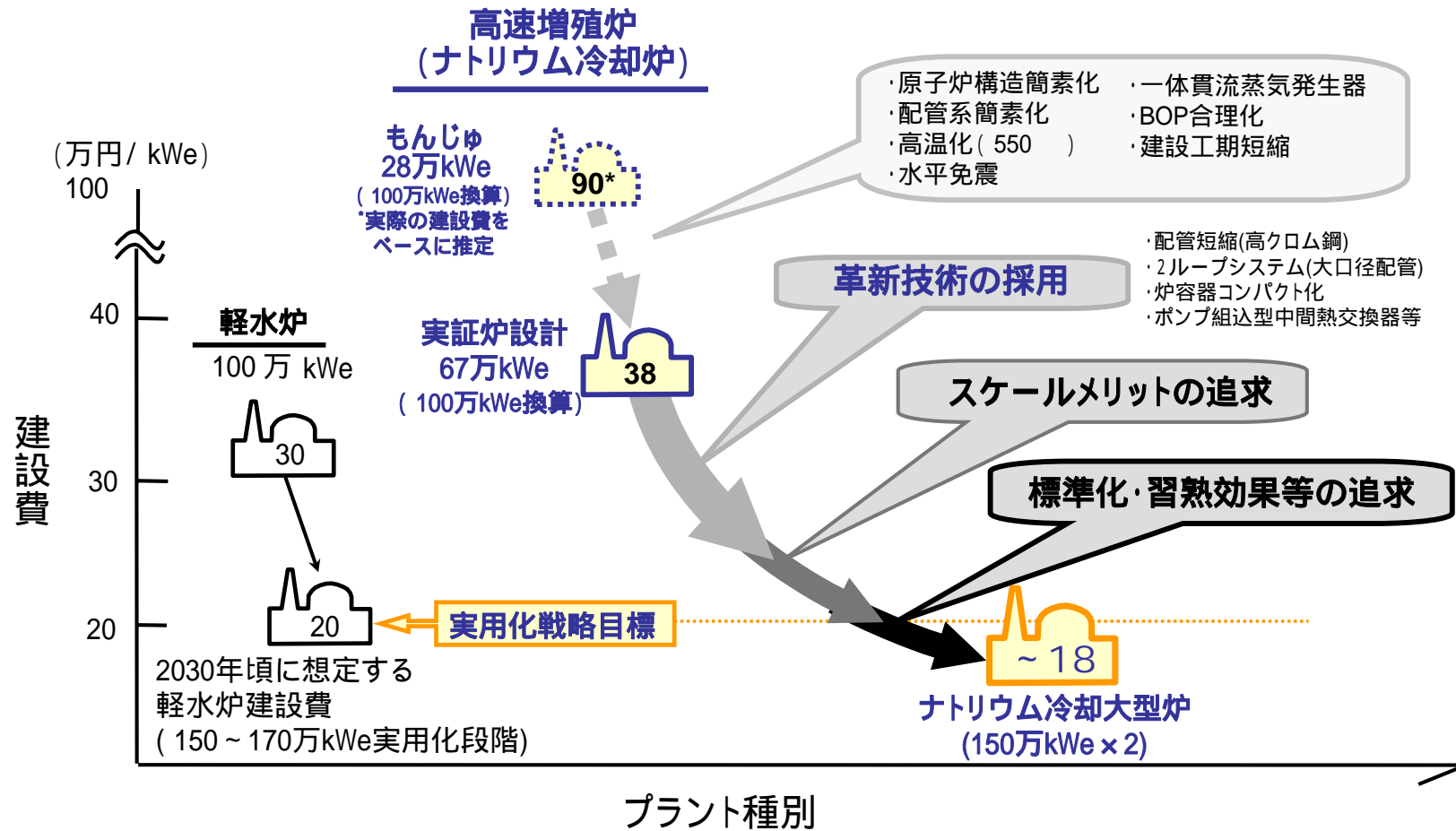
中:「現状知見に乏しく、開発に不確かさがある革新技術」

高:「基礎知見に乏しい燃料・材料関連の革新技術であり、不確かさが最も大きく、かつ研究開発に時間がかかる技術」



ナトリウム冷却炉を例とした検討

ナトリウム冷却炉コストダウン検討の推移



ナトリウム冷却炉の主な研究開発課題

	項目	主な研究開発課題
建設コスト低減 (経済性)	高燃焼度を目指した ODS 鋼の開発	被覆管材料、燃料ビン、燃料集合体照射データの取得など
	配管短縮のための 高クロム鋼の開発	材料強度基準のための長時間強度データの取得、高クロム鋼配管の漏洩先行型破損(LBB)の評価基準策定など
	ポンプ組込型 中間熱交換器	ポンプの回転振動による伝熱管の摩耗特性の把握など
	2ループシステム	冷却材が高速で流れることによる配管の減肉現象、大口径配管の振動現象の把握など
	原子炉容器のコンパクト化	コンパクト化した原子炉容器内の流動現象の把握と炉内構造の最適化、高温構造設計方針の策定など
稼働率向上 (経済性)	高信頼性蒸気発生器	伝熱管破断によるナトリウム-水反応が防止できる二重伝熱管などの開発
	保守補修技術	ナトリウム中目視試験装置の開発、二重伝熱管の検査方法の開発など
安全性	炉心損傷時の影響緩和対策	溶融燃料の排出を促進し再臨界を回避できる燃料集合体の開発、試験による再臨界回避能力の有効性確認など

ナトリウム冷却炉の開発に対する取り組み方(1/2)

(1)ナトリウム冷却炉のコストダウンに必要な革新技术に対する代替技術の確保

被覆管材料: ODS鋼の代替としてPNC-FMS鋼

(炉心設計の工夫で同燃焼度、同出口温度達成を目指して検討中)

高クロム鋼構造材料: 12Cr鋼の代替として改良9Cr-1Mo鋼

(改良9Cr-1Mo鋼採用により、約1.6%のコスト増加: 再評価予定)

ポンプ組込型中間熱交換器の代替としてポンプと中間熱交換器の分離

(分離により約1.1%のコスト増加: 再評価予定)

二重伝熱管を採用した蒸気発生器の代替としてナノ粒子ナトリウム・単管ヘリカル型蒸気発生器など(今後検討予定)

ナトリウム冷却炉の開発に対する取り組み方(2/2)

(2) 国際協力による研究開発の分担、情報交換など

Gen-IV/ナトリウム冷却炉、日米研究協力、日仏先進技術協定等の枠組みを活用

主概念に対する国際共同開発
他システム概念に関する共同研究、情報交換

(3) ナトリウム冷却炉の代替高速増殖炉の調査

高温熱源としての魅力を有し、国際的にも注目されているヘリウムガス冷却炉技術の調査(フランス、米国、EUなど)
材料・防食技術の進展によって性能の飛躍的向上が考えられる鉛ビスマス冷却炉技術の調査(ロシア、EU、米国など)
炉心燃料技術開発の進捗次第で技術的実現性が高くなる可能性がある水冷却炉技術の調査

(4) 研究開発の柔軟性

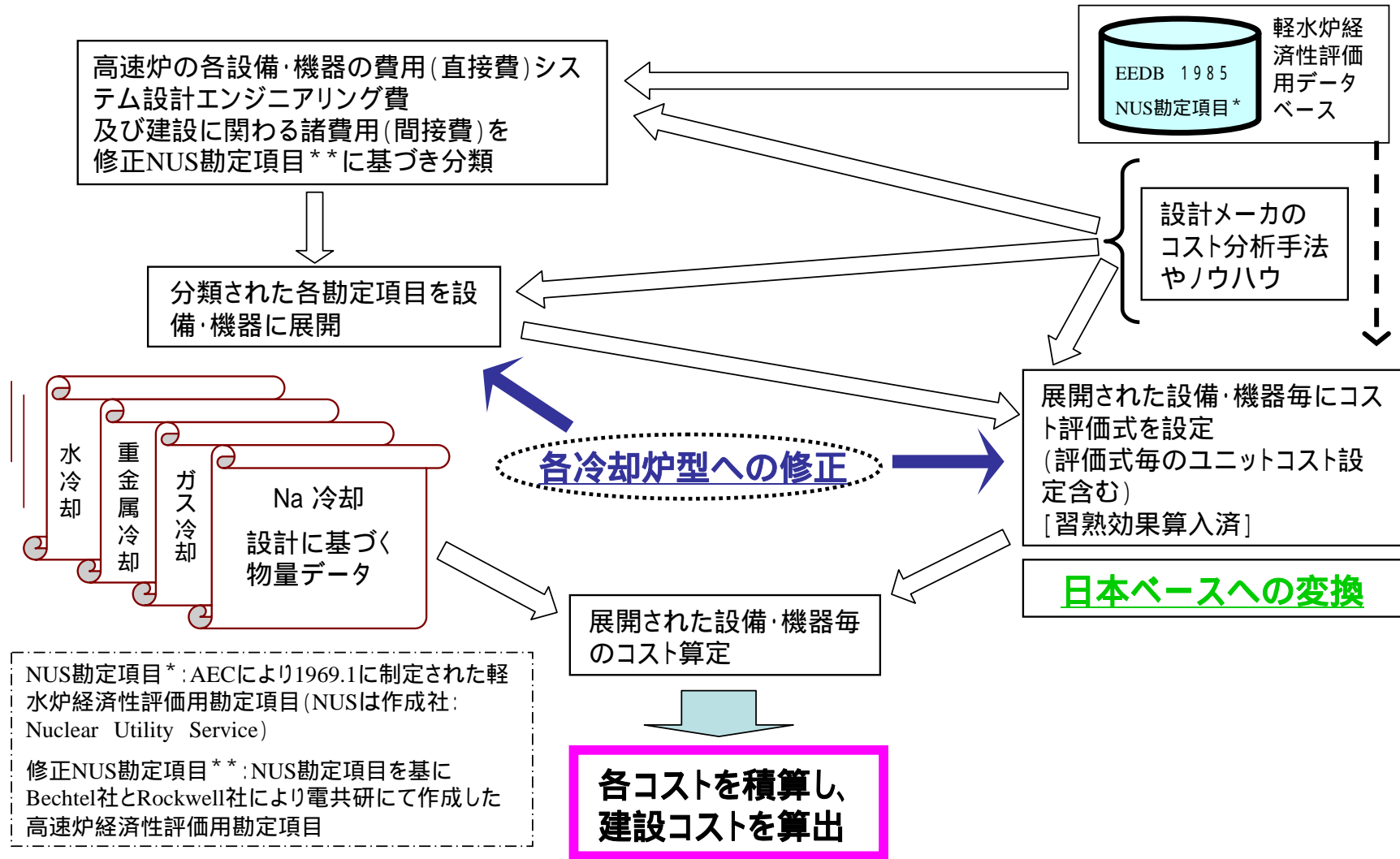
一定期間毎に研究開発の進展、内外の研究開発動向、社会ニーズについてチェックアンドレビューを行い、研究開発計画を見直し

参考： 建設コストの評価手法

高速増殖炉の建設費評価

- **高速増殖炉プラントの建設費は、実用炉の建設実績がないため、プラント概念設計データを基に評価している。**
 - 概念設計では、プラント機器の設備設計、構造設計、熱流動設計、耐震設計はもとより、「常陽」、「もんじゅ」や実証炉の設計経験を活かして、許認可に必要な安全評価も行っている。この設計に基づいた機器の物量、伝熱面積、流量、建屋容積データを建設費評価に用いている。
- **建設費評価コードは、実証炉の設計研究用に開発され、10年以上の使用経験あり。**
 - 建設費評価コード
米国の軽水炉用原子力施設のデータベース(EEDB)と設計メーカーのコスト分析手法やノウハウをベースに、プラントを構成する機器、容器、配管について、それらの物量、材質、冷却材流量や熱輸送量、各システム設計のエンジニアリング費などに基づき、建設コストを積み上げる方式の計算コード。
 - 軽水炉用データベースを高速増殖炉に適用可能とするため、米国の各種高速増殖炉設計に携わったシンクタンク、メーカーの技術者の協力の元、評価項目(勘定項目)とコスト単価(ユニットコスト)を拡張している。

建設費評価コードの概要



NUS勘定項目*: AECにより1969.1に制定された軽水炉経済性評価用勘定項目 (NUSは作成社: Nuclear Utility Service)

修正NUS勘定項目**: NUS勘定項目を基に Bechtel社とRockwell社により電共研にて作成した高速炉経済性評価用勘定項目

2. 燃料サイクルの実現性について

燃料サイクルの開発目標と設計要求

	開発目標	設計要求
安全性	取り扱い物質の特性(化学的活性度、毒性など)やプロセス条件(運転温度等)を踏まえた安全対策 高速増殖炉サイクルの導入リスクが、社会に既に存在するリスクに比べて十分に小さい(臨界安全、閉じ込め機能の確保等)	同時代の軽水炉燃料サイクルシステムと同等以上施設内での放射性物質の大規模放出事象の発生頻度を 10^{-6} /プラント年以下(暫定)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
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	将来、競合するエネルギー源(軽水炉等)と比肩する発電単価の達成 世界に通用するコスト競争力の確保	再処理・燃料製造費 0.8円/kWh
資源有効 利用性	優れた中性子経済を活用し持続的に核燃料を生産 ・ TRU燃料の多重リサイクル ・ 軽水炉TRUのリサイクル 多様なニーズへの対応(水素製造等)	UおよびTRU回収率99%以上
環境負荷 低減性	長寿命核種(TRUおよびLLFP)の燃焼または分離変換による地層処分への負荷軽減 運転・保守および廃止措置にともなう廃棄物の発生量低減	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標 UおよびTRUの廃棄物への移行率 0.1%以下(目標) 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
核拡散抵抗性	核物質防護および保障措置への負荷軽減(単体プルトニウムが純粋な状態で存在しない等) 核不拡散性制度の運用の効率化(遠隔保守・監視、自動化技術 等)	核物質防護、保障措置への対応を考慮した設計 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

各燃料サイクルプラントの設計結果の比較

項目		先進湿式法 + 簡素化ペレット法	先進湿式法 + 振動充填法	金属電解法 + 射出鑄造法	酸化物電解法 + 振動充填法	
安全性		現行の指針等にほぼ準拠 (超臨界直接抽出法の高圧 容器の安全性が課題)	検討中 (ゲル化工程の化学物質の 分解処理による火災爆発防 止の可能性)	検討中 (高温融体の取扱い, 臨界管 理手法の開発が課題)	検討中 (高温融体, 塩素ガスの取扱 い, 臨界管理手法の開発が 課題)	
経済性 0.8円/kWh	大型プラント (200tHM/y)	資源重視 : 0.48円/kWh 経済性重視 : 0.28円/kWh	資源重視 : 0.56円/kWh 経済性重視 : 0.34円/kWh	/	/	
	小型プラント (50tHM/y)	資源重視 : 1.17円/kWh (1.06円/kWh) 経済性重視 : 0.61円/kWh (0.56円/kWh) (カッコ内: 超臨界直接抽出法)				資源重視 : 0.83円/kWh 経済性重視 : 0.44円/kWh
資源有効 利用性	UおよびTRUの 回収率 99%	基礎試験データから, 99%以上を回収可能なプロセスの設計が可能			検討中 (MA回収プロセス開発が必要)	
環境負荷 低減性	再処理	高レベル固化体体積 0.5 /GWh	ホウケイ酸ガラス: 0.28 /GWh		人工鉱物: 0.56 /GWh	リン酸ガラス, 合金: 0.21 /GWh
		TRUおよび高 廃棄物量 1.6 /GWh	1.3 /GWh		0.9 /GWh	1.4 /GWh
	UおよびTRUの廃棄物 への移行率 0.1%	0.1%	0.1%	回収率向上が必要 (U 0.5%)	MA回収プロセスの開発及 び回収率向上が必要 (U 0.2%)	
	FP (I, Tc, Sr, Cs)	検討中 (吸着, 電解析出, 大環状化合物など)		検討中 (ゼオライト吸着など)	検討中 (揮発, 吸着など)	

網掛け部は、他に比べて優れた点を示す

燃料サイクルの技術的実現性(1/2)

[先進湿式法再処理 + 簡素化ペレット燃料製造]

- 再処理については、晶析などの主要プロセスの成立性は使用済燃料を用いた試験で確認されている。主な課題としては、晶析法などの機器開発やプロセス最適化が挙げられる。
- 燃料製造については、MOX試験により簡素化プロセスの成立性は確認されている。また、セル内でのMA含有ペレット製造実績も有している。主な課題としては、セル内遠隔自動化技術の開発や、経済性向上の観点からのプロセス最適化が挙げられる。

[先進湿式法再処理 + 振動充填燃料製造]

- 再処理技術については上記と同様。
- 燃料製造についてはMA含有燃料粒子製造試験によりプロセスの成立性は確認されている。主な課題としては、粒子製造工程で発生する廃液量の低減対策や燃料ピンの品質検査技術開発、セル内遠隔自動化技術の開発などが挙げられる。

燃料サイクルの技術的実現性(2/2)

[金属電解法 + 射出鋳造燃料製造]

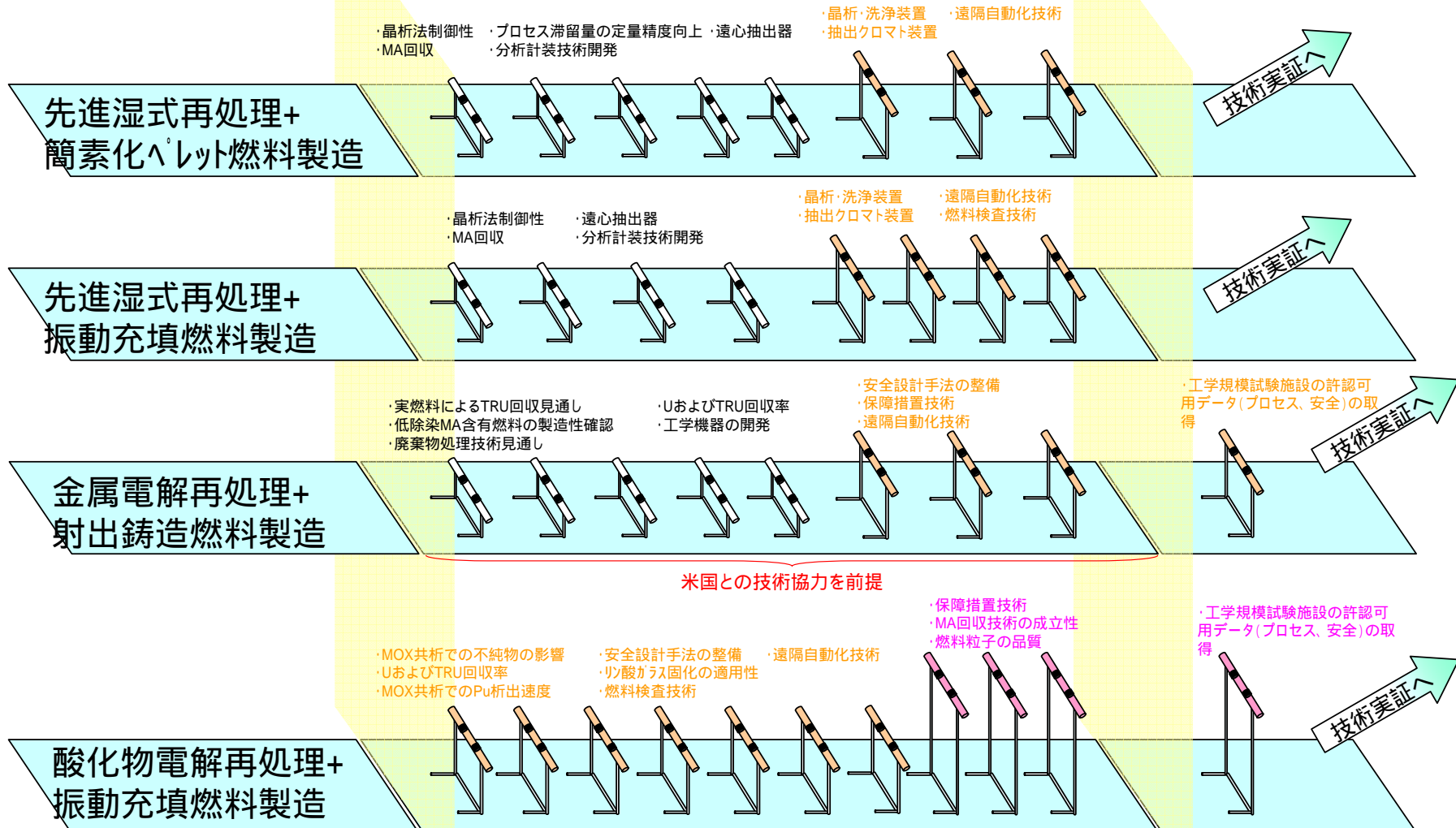
- 再処理については、国内外での小規模～工学規模試験により電解精製、Cd蒸留など主要なプロセスの成立性はほぼ確認されている。主な課題としては、使用済燃料を用いた小規模試験によるプロセスの確認、遠隔操作性を考慮した機器開発、計量管理手法の検討などが挙げられる。
- 燃料製造については米国の実績などからプロセス成立性は確認されている。主な課題としては、合金燃料の均質性確認や燃料製造時に発生する酸化物(ドロス)の回収技術などが挙げられる。

[酸化物電解法 + 振動充填燃料製造]

- 再処理のMOX共析など主要工程については、使用済燃料を用いた試験により原理的な成立性が確認されている。主な課題としては、MOX共析の性能向上やプロセス最適化、MA回収プロセスの開発、塩素ガス使用による材料腐食対策、計量管理手法の検討、塩廃棄物処理技術の構築などが挙げられる。
- 燃料製造については、ロシアにMOX燃料集合体のセル内製造実績があり、プロセスの成立性は確認されている。主な課題としては、燃料ピンのPu分布の均一性など品質検査技術の開発、金属U(酸素ゲッター)の製造技術開発などが挙げられる。

各燃料サイクルの実現可能性

実現可能性(難易度:ハードルの高さ)の分類:
 低:「開発見通しがあり、不確かさが少ない革新技术」
 中:「現状知見に乏しく、開発に不確かさがある革新技术」
 高:「基礎知見に乏しく、不確かさが大きく、開発に時間のかかる技術」



実用化戦略調査研究
フェーズ 終了

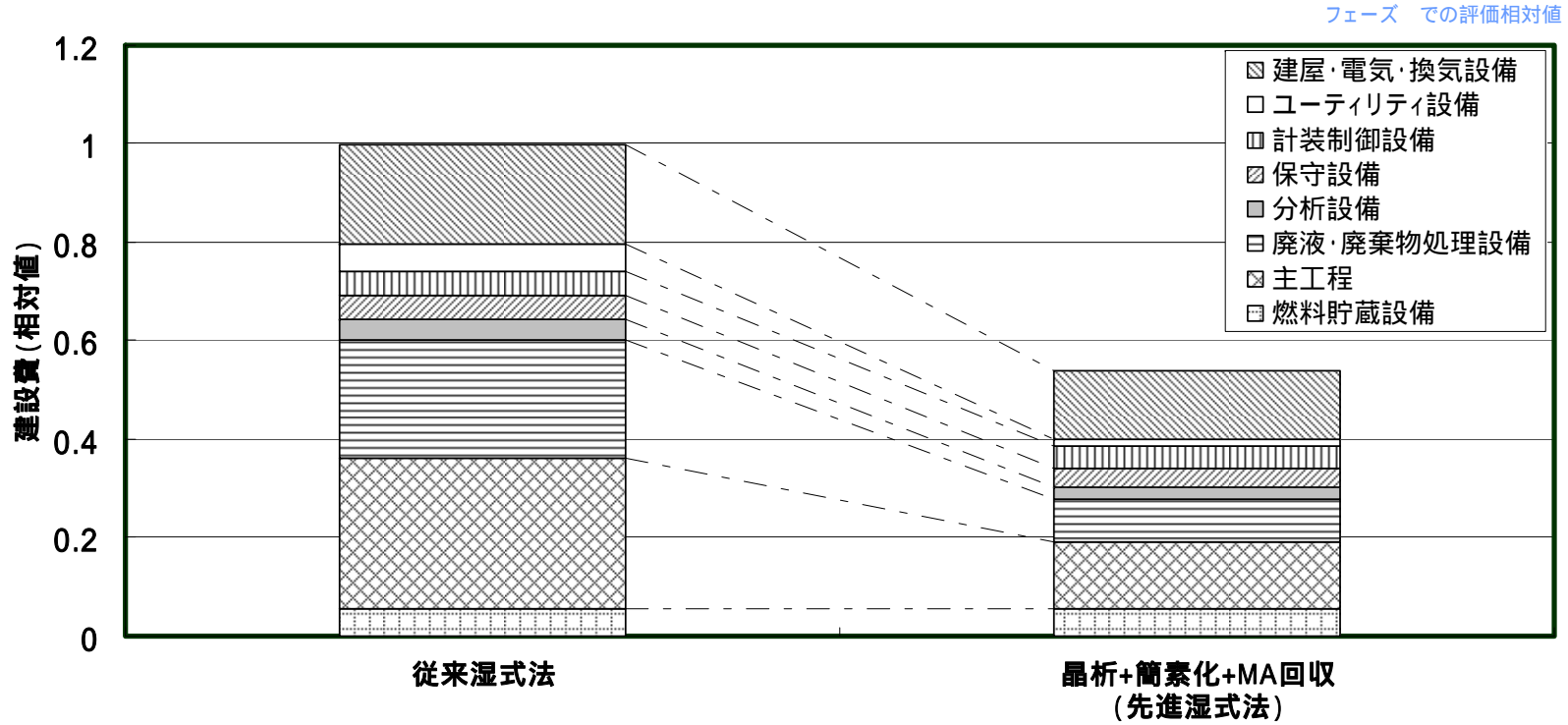
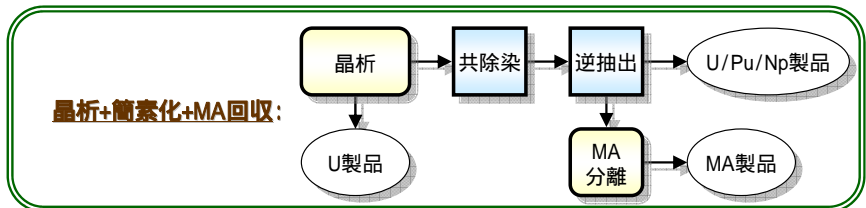
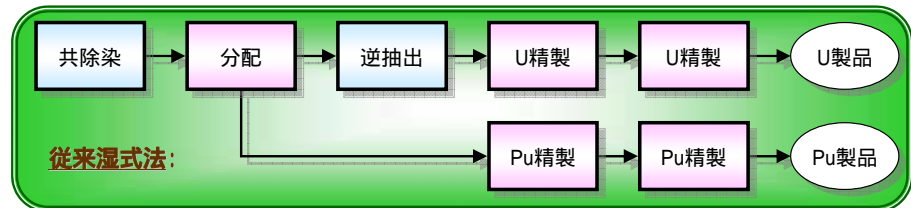
10年後

それ以降

先進湿式法再処理 + MOX燃料製造 を例とした検討

湿式再処理プラント建設費の低減

- ウランの粗取り(晶析工程)による分配工程の削除及び精製工程の削除等のコスト削減方策により,マイナーアクチド(MA)分離工程を追加しても,再処理プラント建設費全体としてのコスト低減が達成可能な見込み。



《先進湿式法再処理 + MOX燃料製造》に係る 実現性を左右する主要技術と主な課題

工程	主要技術	主な課題
晶析	U結晶洗浄	<ul style="list-style-type: none"> ・U製品の除染係数把握と最適化 ・洗浄工程でのロス率低減
	晶析装置	<ul style="list-style-type: none"> ・固液分離とU結晶の取扱い ・分析・計装システム
MA分離	抽出クロマトグラフィ装置	<ul style="list-style-type: none"> ・運転切り替えモニタと切り替え方法
	安全性検討	<ul style="list-style-type: none"> ・装置内除熱 ・加圧または減圧による流速確保
簡素化ペレット	焼結・成型プロセス	<ul style="list-style-type: none"> ・ダイ潤滑方式による成型性確認 ・造粒工程付加の検討
	不明物質量の削減	<ul style="list-style-type: none"> ・工程内滞留量把握 ・滞留物質の回収方法

〈先進湿式法再処理 + MOX燃料製造〉の開発に対する取り組み方

(1) 湿式再処理、MOXペレット燃料製造の革新技术とその代替技術の確保

U粗分離:「晶析」の代替として「溶媒抽出」

MA分離:「抽出クロマトグラフィ」の代替として「溶媒抽出」

ペレット成型原料:「マイクロ波直接脱硝粉末」の代替として「造粒粉末」

(2) 国際協力による研究開発の分担、情報交換など

Gen-IVや二国間協力等の国際協力の枠組みを活用

(3) 複数の燃料サイクル技術の調査・検討

再処理 : 超臨界直接抽出、金属電解、酸化物電解

燃料製造 : 振動充填、射出鋳造

(4) 研究開発の柔軟性

一定期間毎に研究開発の進展・内外の研究開発動向、
社会ニーズについてチェックアンドレビューを行い、研究開発計画を見直し

参考： 燃料サイクルコストの評価手法

燃料サイクル費の算出方法

「建設費」

- 各々の設備, 建屋, 電気設備, 換気設備毎にコスト評価を実施
- 設備費の算出(主要プロセス設備, 共用設備等)
 - 要求される機能を発揮させるためのプロセス設計を実施
 - 物質収支や工程系統図の作成, 各工程機器の設計(年間必要処理容量から機器基数を評価)
 - 機器リスト(周辺機器を含む)を作成
 - 上記に基づきコストを積み上げ
 - 計装制御設備費については, 主要計測点を評価し, コストを積み上げ
- 建屋・電気設備・換気設備費の算出(建電換)
 - プロセス設計及び機器設計を元に, 遠隔自動運転を前提としたホットセル内での配置設計, 建屋設計を実施
 - プラントの建屋容積, セル容積に基づいてコストを算出

「運転費」

- 修繕費の算出(機器交換費, 定期検査費, 人件費等)
 - 修繕比率を燃料製造及び再処理施設のプラント設計により算出
 - 各工程での機器使用環境や作業内容等の特徴を考慮した機器交換費および定期点検費を積み上げ
 - 通常資本費に含まれる設備の更新費用は, 年当りに換算して修繕費として計上
- 諸費の算出(消耗品費, 人件費等)
 - 消耗品率がプラント設計への依存度が大きいため, 消耗品と委託費を分けて設定
 - 消耗品費は各々の施設のプラント設計により算出
 - 委託費については原子炉プラントと同様0.8%を想定
- 業務分担費の算出(人件費等)
 - 製造業や委託作業契約の実績値を参考に15%程度を想定した。
- 部材費の算出(消耗品費等)
 - 燃料集合体の仕様(原子炉プラントの設計)に依存

