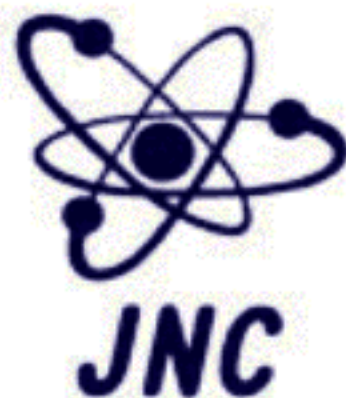


原子力委員会 研究開発専門部会 第2回革新炉検討会資料

革新炉の開発に関わる検討



平成14年2月14日

核燃料サイクル開発機構

相澤 清人

目次

I. 革新炉サイクルの要件, 革新炉サイクルの定義

II. 高速増殖炉システムの実用化に向けた検討

1) 「実用化戦略調査研究」の評価の流れと指標

2) Generation-IVにおける評価の指標

3) システム要素の特性と組合わせの例

4) FBRサイクル実用化に向けた基本的な考え方

5) 技術レベルの比較

参考資料

I. 21世紀の社会的要請

消費から調和型利用への転換

環境保全

高水準の安全性

資源高効率利用

エネルギーの
多様化

再生可能
エネルギー
への転換

市場競争力

- 地球環境保全(廃棄物の低減、CO₂削減など)
- エネルギー供給の長期持続
- (発展途上国での)大幅なエネルギー需要の伸び
- 不確実性と変化(国際紛争、電力自由化、不況、環境税の導入など)への柔軟な対応

環境破壊、資源枯渇、リスク増加をとまなわず、
安心感をもって長期に亘りエネルギー供給可能なシステム

- ・リサイクルの徹底追及により、省資源・環境調和を効率的に実現する革新技術
- ・市場導入を刺激する革新技術

革新炉サイクルに求められる要件と技術

革新炉サイクルに求められる要件 (在来炉に無い特性)	革新炉システムとしての技術
●環境保全 ・廃棄物の発生量の低減 ・廃棄物の毒性低減 ●資源高効率利用 ●再生可能エネルギー ●高水準の安全性 ●エネルギーの多様化 ●市場競争力 ・経済性の向上 ・核拡散抵抗性の向上	・FPの回収・分離・減容・変換 ・再処理量の低減（高燃焼度、高出力密度、高熱効率） ・MAの分離・回収・燃焼 ・TRUの高回収 ・高燃焼度・高熱効率 ・ニーズに応じた柔軟な増殖性の確保 ・受動的な安全特性の活用 ・多目的利用（水素製造・熱利用・分散電源・淡水化等） ・システムとしての合理化・簡素化・高性能化 ・低除染燃料サイクル・高燃焼度・高熱効率 ・Puを単独で扱わない ・核不拡散制度との適合性（核物質管理が容易） ・需給量に応じたPu利用（Pu蓄積量の最小化）

革新炉サイクルの定義

「在来炉」に無い革新的な特性を保持する原子炉と関連するサイクルシステム

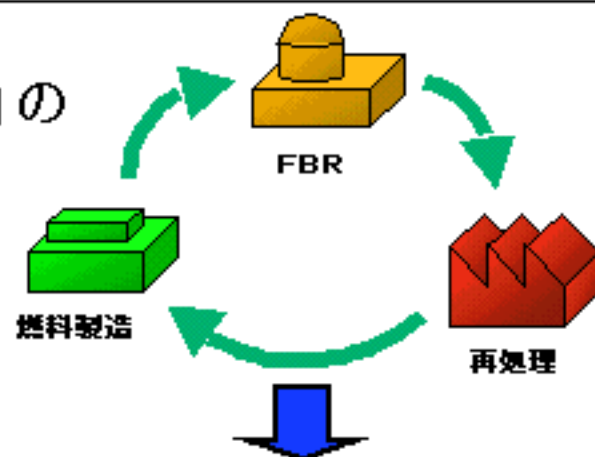
中性子反応の最適利用とリサイクルの徹底追及

安定供給の確保、環境への適合、市場原理の活用
において「在来炉サイクル」を凌駕するシステム

「資源消費型」から「省資源・環境調和型利用」への転換
を実現し、長期に亘り安定かつ柔軟なエネルギー供給を
可能とするサイクルシステム

Ⅱ. 高速増殖炉システムの実用化に向けた検討

1) 「実用化戦略調査研究」の 評価の流れと指標

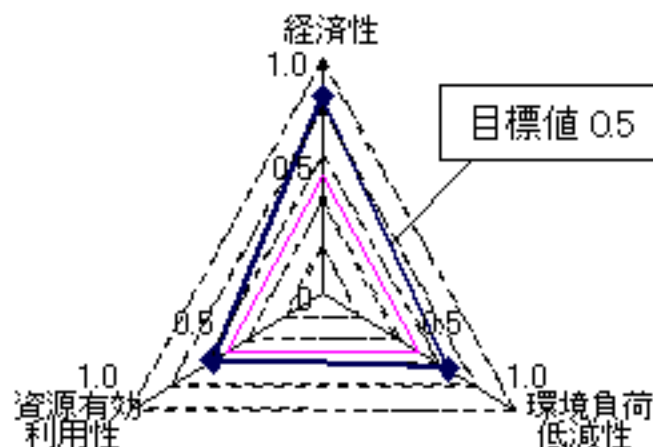


次のようなサイクルを想定してリサイクル
のシステムを構築
(代表例)

- 1) FBR多重サイクル
- 2) LWR使用済み燃料受け入れサイクル
- 3) LLFP分離変換機能付加サイクル

各視点に対する評価結果の例
(レーダーチャートによる比較の例)

ナトリウム炉



目標値 0.5

効用値

- ・ 効用関数
- ・ 重み付け

それらの各システム設計に基づき、物量及びマスバラン
ス、廃棄物発生量等、できるだけ数値的に算出する

7つの視点で評価

- 安全性
- 経済性
- 環境負荷低減性
- 資源有効利用性
- 核拡散抵抗性
- 技術的実現性
- 社会的受容性

1～3次指標
による定量及
び定性評価
(詳細なベ
ジ参照)

総合評価

評価視点	一次指標	二次指標
経済性	発電 単価	資本費
		運転維持費
		燃料サイクル費
		年間発電量
		耐用年数
環境負荷 低減性	固・ 液・ 気	廃棄物総量
		占有面積換算廃棄物量
		放射性毒性
		処分サイトからの核種移行によ る被ばく線量率
	希釈 放出	周辺被ばく線量率 (核種標準値)
技術的実 現性	開発フ ェーズ	技術レベル
		成熟度レベル
	開発 投資	投資資金
		開発期間

「実用化戦略調査研究」の評価指標(案)

評価視点	一次指標	二次指標	三次指標
経済性	発電単価	資本費	減価償却費
			事業報酬
			固定資産税
			廃止措置費
		運転維持費	人件費
			修繕費
			諸費
			関連費
		燃料サイクル費	燃料製造費
			燃料輸送費
			再処理費
			廃棄物処分費
		年間発電量	電気出力(送電端)
環境負荷低減性	固化・隔離	耐用年数	設備利用率
		廃棄物総量	
		占有面積換算廃棄物量	
		放射性毒性	
	希釈放出	処分サイトからの核種移行による被ばく線量率	
		周辺被ばく線量率(施設操業時)	
資源有効利用性	天然ウラン累積需要量	TRUインベントリー	
		TRU利得	
		炉外滞在時間	
	ウラン利用率	増殖比	
		燃焼度	
		ロス率	

評価視点	一次指標	二次指標	三次指標
安全性	設計基準事象に対する安全性	安全設計方針	
		安全評価	
	上記を超える事象に対する安全性	炉心損傷防止	
		再臨界回避	
核事故抵抗性	内在因子(技術的要件)	事故後安定冷却・閉じ込め	放射線量 発熱量 核分裂性Pu比率
		使用済燃料組成	
		Pu存在形態	
		Pu同位体組成	
		Pu製品混合性状	
		プロセス転用障壁	
		Pu持出容易性	
		在庫管理容易性	
	外在因子(制度的要件)	在庫計量容易性	
		在庫確認容易性	
		核物質防護	
		技術レベル	
技術的実現性	開発リスク	難易度レベル	
	開発投資	投資資金	研究開発費
		開発期間	施設整備費

[社会的受容性の評価項目は次ページ参照]

「実用化戦略調査研究」での社会的受容性の評価(案)

(評価因子の分析例とコミュニケーションツール)

◎:大いに興味あり
○:やや興味あり
△:関心薄い

評価因子		立地 住民	国民	事業 主体	政府
安全性	公衆死亡リスク	◎	○	◎	○
	従業員死亡リスク	○	○	◎	○
経済性	発電単価	◎	◎	◎	◎
	発電単価変動幅	○	○	◎	◎
	投資回収性	△	△	◎	△
環境影響 低減性	放射性廃棄物	◎	○	◎	○
	地球温暖化	◎	○	◎	○
	水質汚濁	◎	○	◎	○
技術 実用性	技術成熟度	◎	○	◎	◎
	投資	○	○	◎	◎
	発電による生成資源	◎	△	○	△
発電 源	発電施設・空間資源	◎	△	○	△
	ソフト資源	◎	△	○	△

評価因子			立地 住民	国民	事業 主体	政府
リスク認知 バイアス 低減性	不安感	災害可能性	◎	○	◎	○
		事故歴	◎	○	◎	○
		自己関与性	◎	○	◎	△
		任意暴露性	◎	○	◎	△
コミュニケーションの質			◎	○	◎	○
コミュニケーションの量			◎	○	◎	○
受益感	便益性	雇用	◎	○	○	△
			◎	○	○	○

コミュニケーションのための情報整備

- ・ 外部コスト
- ・ 社会的リスク
- ・ 他電源との比較
- ・ 投資対効果、など

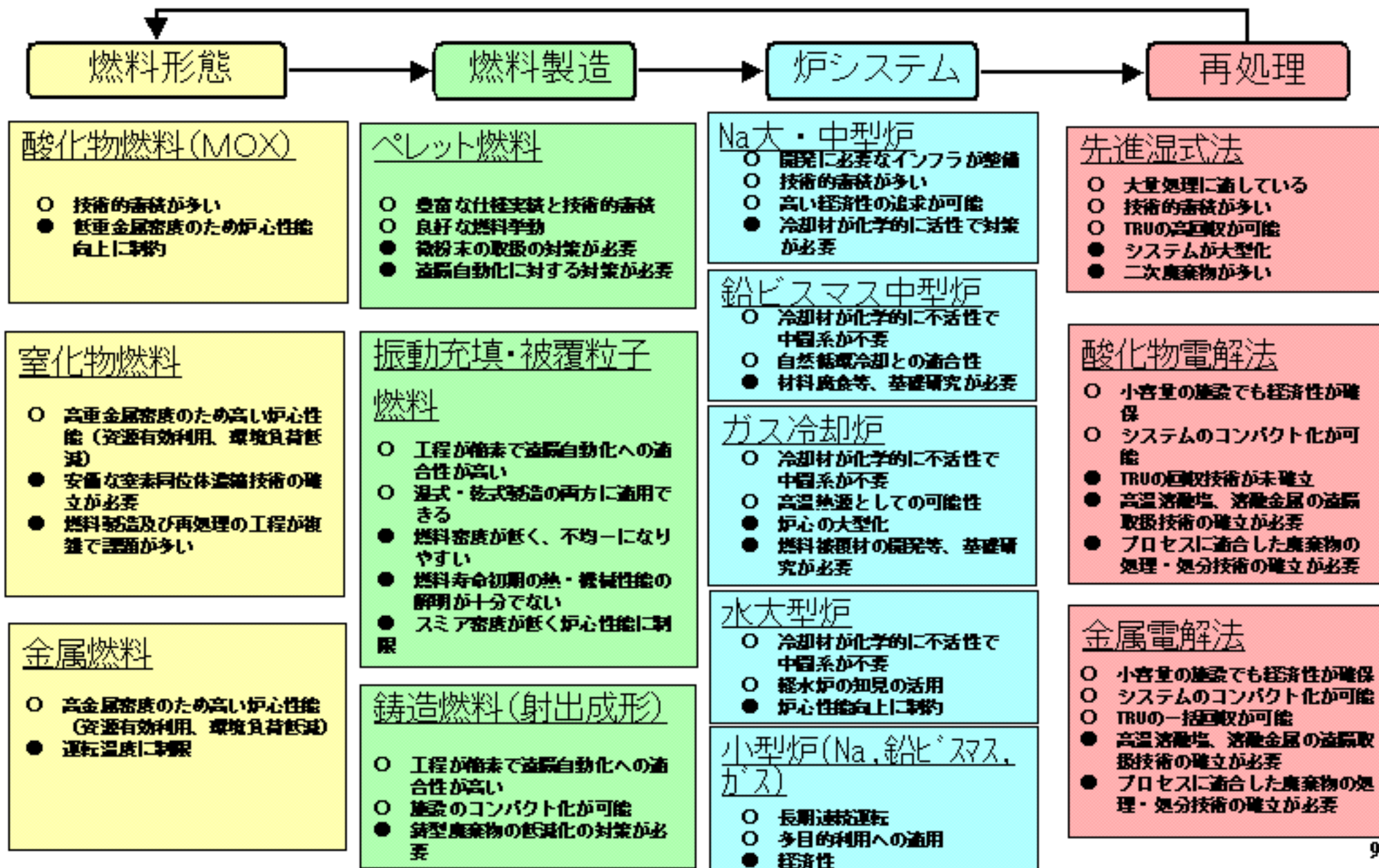
2) Generation-IVにおける評価指標

評価視点	一次指標	二次指標	三次指標
持続性	資源利用	ウラン消費量	
		環境影響（資源確保による影響）	
		他資源の利用	
	廃棄物最小化と管理	高レベル廃棄物最小化	廃棄物重量
			廃棄物体積
			長期経過後発熱量
			長期経過後放射性毒性
		環境影響(高レベル廃棄物以外)	
		廃棄物管理の負担	
	核拡散抵抗性	兵器級原料への分離回避性	
		使用済燃料特性	
		サボタージュなどに対する耐性	
安全性と信頼性	通常運転時の安全性、信頼性	信頼性	
		平常時の公衆及び従業員被ばく	
		事故時従業員安全性(被ばくなど)	
	炉心損傷防止(DBA)	工学的安全系の頑強性	簡易、頑強な反応度制御
			簡易、頑強な崩壊熱除去
		事象モデルの確実性、検証性	モデルの確実性
			燃料の熱的応答
	敷地外緊急時 退避不要性	ソースターム	モデルの縮尺度
			ソースタームの大きさ
		格納系の影響緩和機能	エネルギー放出特性
			炉心損傷発生までの時間
		個人リスク	放射性物質の保持能力
経済性	コスト	建設費(炉)	
		運転費・燃料費	
		炉建設期間	
	リスク	投資額	
		収益性	

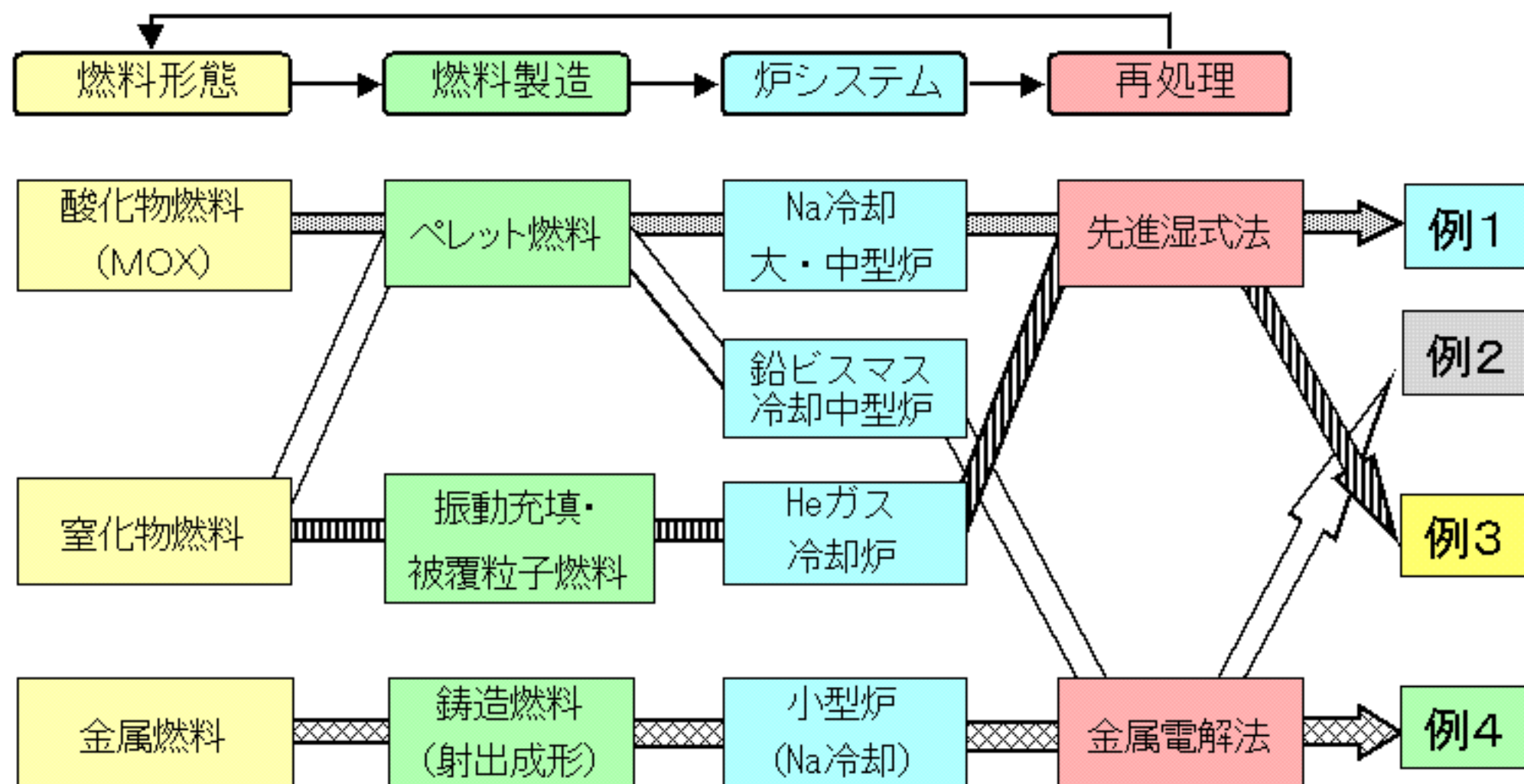
評価視点の重みは
協議により決定

3) システム要素の特性と組合わせの例

○: 長所
●: 短所



特徴を考慮したシステムの組合せの例



例 1 MOX+ナトリウム冷却大・中型炉+先進湿式再処理 +ペレット法サイクルシステム

(1/2)

システムの特徴（ねらい）

- ・資源高効率利用、環境保全を迫するTRU高回収
- ・開発の確実性



システム要素の特性を活かした組合せ検討

- | | | |
|-------------------|-------|--------------------|
| ・TRU高回収 | ————→ | 先進湿式再処理 |
| ・開発の確実性 | ————→ | MOX+Na冷却+先進湿式+ペレット |
| | ↓ | |
| ・革新炉サイクルの他の要件への適合 | ————→ | 上記の組合せで良好 |

成立性のキーとなる主な技術開発

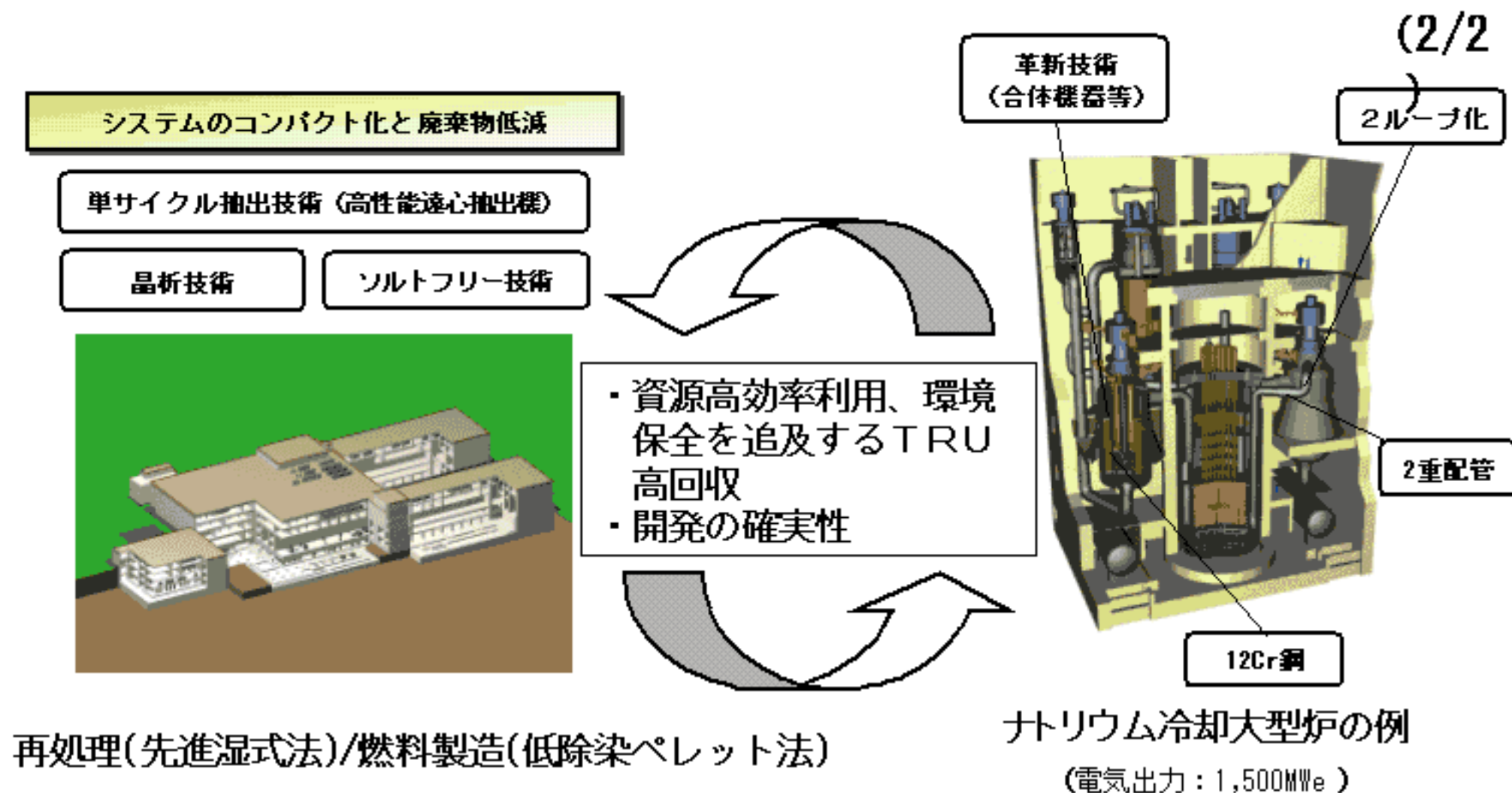
[炉システム]

- 経済性を向上させる革新技术の開発（機器合体、2ループ化、12Cr鋼等）
- 保守・補修性の観点からNaの化学的活性対応技術の開発（二重配管、新型SG等）

[燃料サイクルシステム]

- 一層の経済性を追求したシステムのコンパクト化と廃棄物の低減
 - 単サイクル抽出技術（高性能遠心抽出機）、晶析技術の導入、ソルトフリー技術の開発
 - 新技術の導入（イオン交換法、超臨界抽出法）
- 先進湿式+簡素化ペレット製造工程の簡略化及び高効率化

例 1 MOX+ナトリウム冷却大・中型炉+先進湿式再処理 +ペレット法サイクルシステム



例2 窒化物燃料+鉛ビスマス冷却中型モジュール炉+金属電解法 +ペレット法サイクルシステム

(1/2)

システムの特徴（ねらい）

- ・炉の冷却系の簡素化による経済性、保守性の向上を追求
- ・冷却材の特性を活かした受動的な安全特性の活用



システム要素の特性を活かした組合せ検討

- ・ 中間系簡素化可能 } → 鉛ビスマス冷却炉
- ・ 自然循環冷却との適合性 }
- ↓
- ・ 革新炉サイクルの他の要件
への適合（資源高効率利用、環境保全） → 窒化物燃料
- ↓
- ・ 窒化物燃料への適合サイクル → 金属電解法+ペレット法

成立性のキーとなる主な技術開発

[炉システム]

- 材料の防食技術、冷却材不純物管理技術等 基礎研究が必要
- 冷却材密度が大きいことに起因する構造設計上の工夫

[燃料サイクルシステム]

- 窒化物燃料のサイクル技術の確立
 - 窒化/還元技術
 - N-15同位体濃縮・回収リサイクル技術
 - 窒化物粉末取扱技術
- 金属電解法の工学的データの蓄積

例2 窒化物燃料+鉛ビスマス冷却中型モジュール炉+金属電解法 +ペレット法サイクルシステム

(2/2)

窒化物燃料のサイクル技術

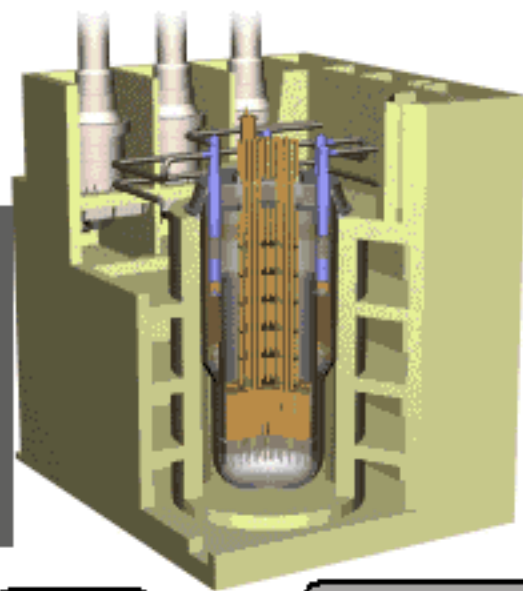
窒化・還元技術

N-15の濃縮リサイクル技術



- ・ 炉の冷却系の簡素化による経済性、保守性の向上を追求
- ・ 冷却材の特性を活かした受動的な安全特性の活用

高い自然循環能力



耐震性

耐腐食材開発

再処理(金属電解法)/燃料製造(低除染ペレット法)

鉛ビスマス冷却中型モジュール炉

(電気出力：400MWe/基)

例3 窒化物燃料+He冷却炉+先進湿式法+被覆粒子燃料サイクルシステム

(1/2)

システムの特徴 (ねらい)

- ・高温熱源、高熱効率による原子力利用拡大



システム要素の特性を活かした組合わせ検討

- 高温熱源、高熱効率 → He冷却炉
- ↓
- 革新炉サイクルの他の要件への適合 → 窒化物燃料
(資源高効率利用、環境保全)
- 炉の安全裕度の確保 → 被覆粒子燃料
- ↓
- 窒化物被覆粒子燃料への適合 → 先進湿式

成立性のキーとなる主な技術開発

[炉システム]

- 高温・高中性子照射場での高燃焼度燃料被覆材・集合体の開発等の基礎研究が必要
- 燃料集合体の通常運転時・事故時の除熱特性評価
- 高温ガスタービンの開発

[燃料サイクルシステム]

- (被覆粒子)窒化物燃料サイクル技術の確立
 - 窒化/還元技術
 - 被覆粒子燃料の脱被覆技術
 - 被覆粒子窒化物燃料の製造技術
 - N-15同位体濃縮・回収リサイクル技術
- 一層の経済性を追求したシステムのコンパクト化と廃棄物の低減

例3 窒化物燃料+He冷却炉+先進湿式法+被覆粒子燃料サイクルシステム

(2/2)

被覆粒子窒化物燃料のサイクル技術

脱被覆技術/被覆粒子燃料の製造技術

窒化・還元技術

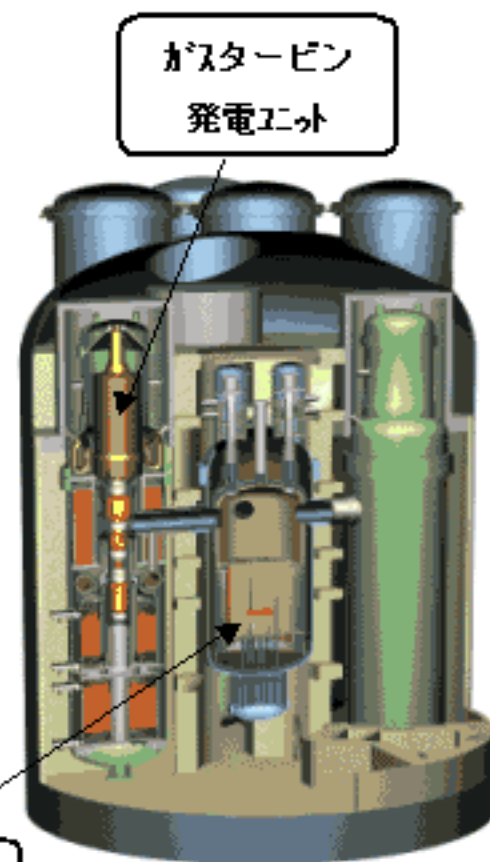
N-15濃縮リサイクル技術



再処理(先進湿式法)/燃料製造(被覆粒子)

高温熱源、高熱効率による原子力利用拡大

被覆粒子燃料



ヘリウム冷却炉

電気出力：1,200MWe
原子炉出口温度：850℃
プラント熱効率：約47%

例4 金属燃料+Na冷却小型炉+金属電解法+鑄造法サイクルシステム

(1/2)

システムの特徴（ねらい）

- ・多目的利用、長期間運転、立地柔軟性による利便性
- ・投資リスクが少ない



システム要素の特性を活かした組合わせの検討

- 多目的利用、立地柔軟性、投資リスク → 小型炉
 - 長期間運転（内部転換比大）の追求 → 金属燃料
- ↓
- 金属燃料に適合したサイクル → 金属電解法+鑄造
 - 革新炉サイクルの他の要件への適合 → 上記の組合せで良好

成立性のキーとなる主な技術開発

[炉システム]

- 経済性を向上させるプラント簡素化技術の開発（新型SG, RVACS等）
- 長寿命炉心実現のための燃料・材料開発（金属燃料、長寿命制御棒など）

[燃料サイクルシステム]

- 金属電解法の工学的データの蓄積
 - 塩廃棄物の処理、処分技術の確立
 - 高温溶融塩、溶融金属のマテリアルハンドリング技術

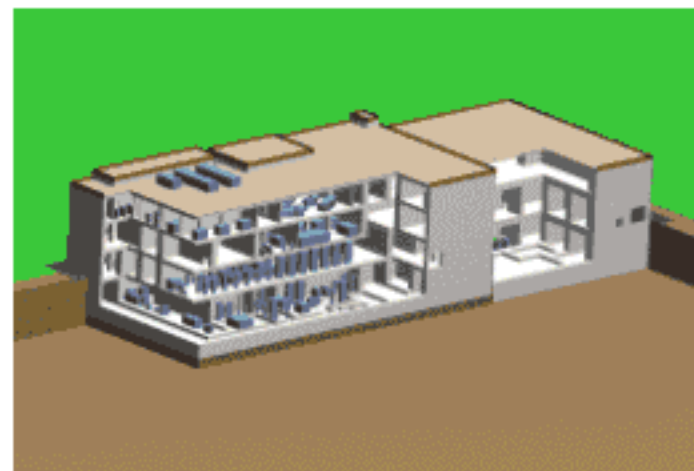
例4 金属燃料+Na冷却小型炉+金属電解法+鋳造法サイクルシステム

(2/2)

金属燃料に適したサイクル技術

塩廃棄物の処理処分技術

高温溶融塩・金属の取扱技術



長期間運転
(内部転換特性)

新型SG

金属燃料
炉心

- ・多目的利用、長期間運転、立地柔軟性による利便性
- ・投資リスクが少ない

ナトリウム冷却小型炉
(電気出力：10～150MWe/基)

再処理(金属電解法)/燃料製造(射出成形)

4) FBRサイクル実用化に向けた基本的な考え方

研究の進め方

- ・ 5年程度毎に分割し、チェック・レビュー、ローリングプランによる柔軟な運営
- ・ 革新的な技術開発への積極的な取り組み

推進組織

オールジャパン体制による研究の推進 及び 他機関と大学等との連携の強化
(JNC, 電気事業者, 電中研, 原研, メーカー)

国際協力

- ・ 「FBRサイクル国際研究開発センター」を中心とした国際拠点構築
- ・ 他国が開発している分野、海外におけるインフラを利用できる分野等についての戦略的国際協力
炉心燃料(金属燃料、窒化物燃料) - BO R60Iによる海外照射
再臨界回避 - カザフIGR炉の活用
プラントシステム ガス冷却炉 - 仏CEA, Pb-Bi腐食試験 - 独FZK
燃料サイクルシステム 乾式再処理 - 露RIARの施設
等
- ・ GEN-IV 等への協力を通じたFBRサイクル実現に向けての基礎づくり

アイデア公募

柔軟な発想に基づく独創性・創造性に富んだ革新的概念の創出
大学を始めとする研究者から広く革新的技術アイデアの募集

施設・設備

- ・ 要素技術開発：主としてJNC大洗工学センターのコールド施設を活用
(ナトリウム冷却炉の経済性向上技術、炉型共通な主要技術の成立性確認)
- ・ ナトリウム以外の要素試験：国内外の他機関の施設・設備の有効活用
- ・ 照射試験：「常陽」，「もんじゅ」の活用
- ・ 東海事業所のCPF，RETF等：先進湿式処理法や乾式再処理法の主要技術の成立性確認

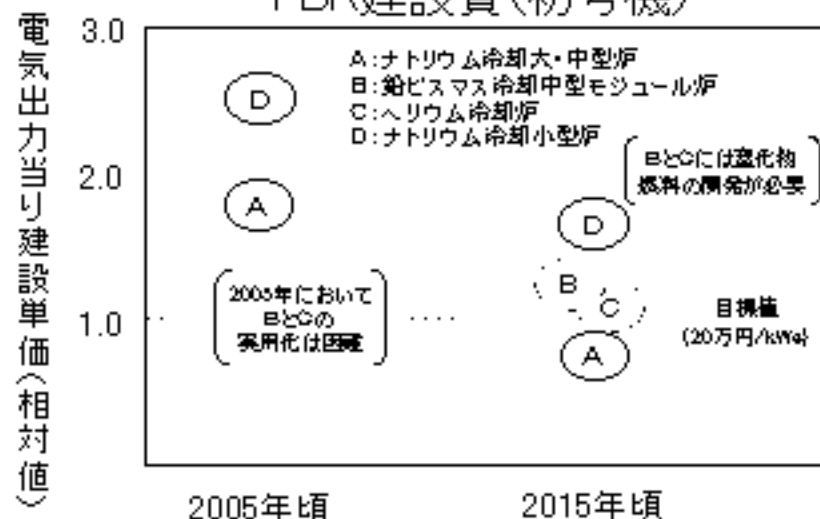
資金(予算)

- ・ 設計研究等、基本的概念の確立に重点をおいた予算配分
- ・ 公募研究予算の活用(革新的な技術開発)

5) 技術レベルの比較

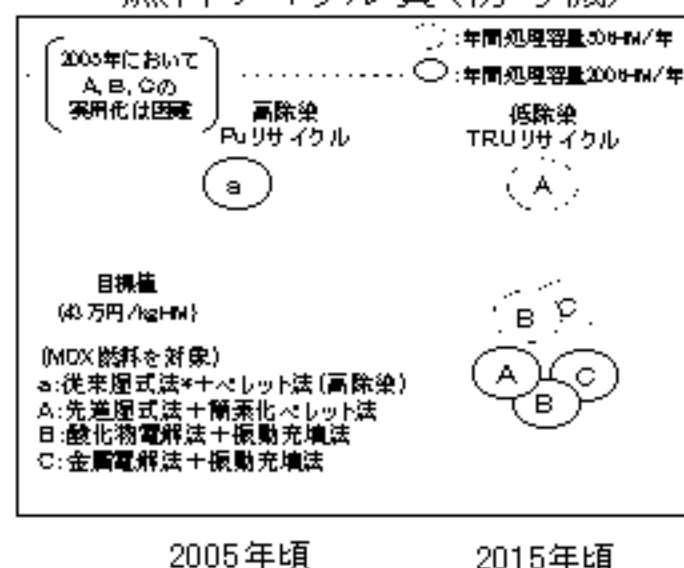
(2005年及び～2015年頃を建設準備時期とした場合)

FBR建設費(初号機)

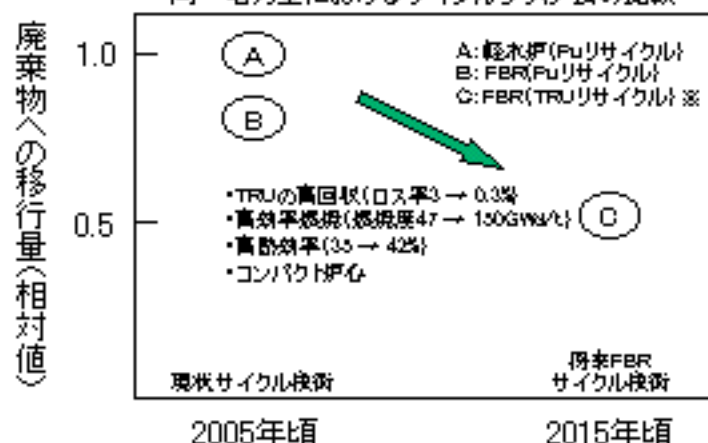


燃料サイクル費(初号機)

再処理・燃料製造単価(相対値)



エネルギー生産にともなう
 重金属及びFPの廃棄物*への移行量
 (*高レベル放射性廃棄物:U/TRU及びFP)
 同一電力量におけるサイクルシステムの比較



※FBR-TRUリサイクルは大型Na炉-MOX-先進湿式再処理システムの例

*従来湿式法: 遠心分離機の採用、建屋の合理化等で経済を向上

参 考 資 料

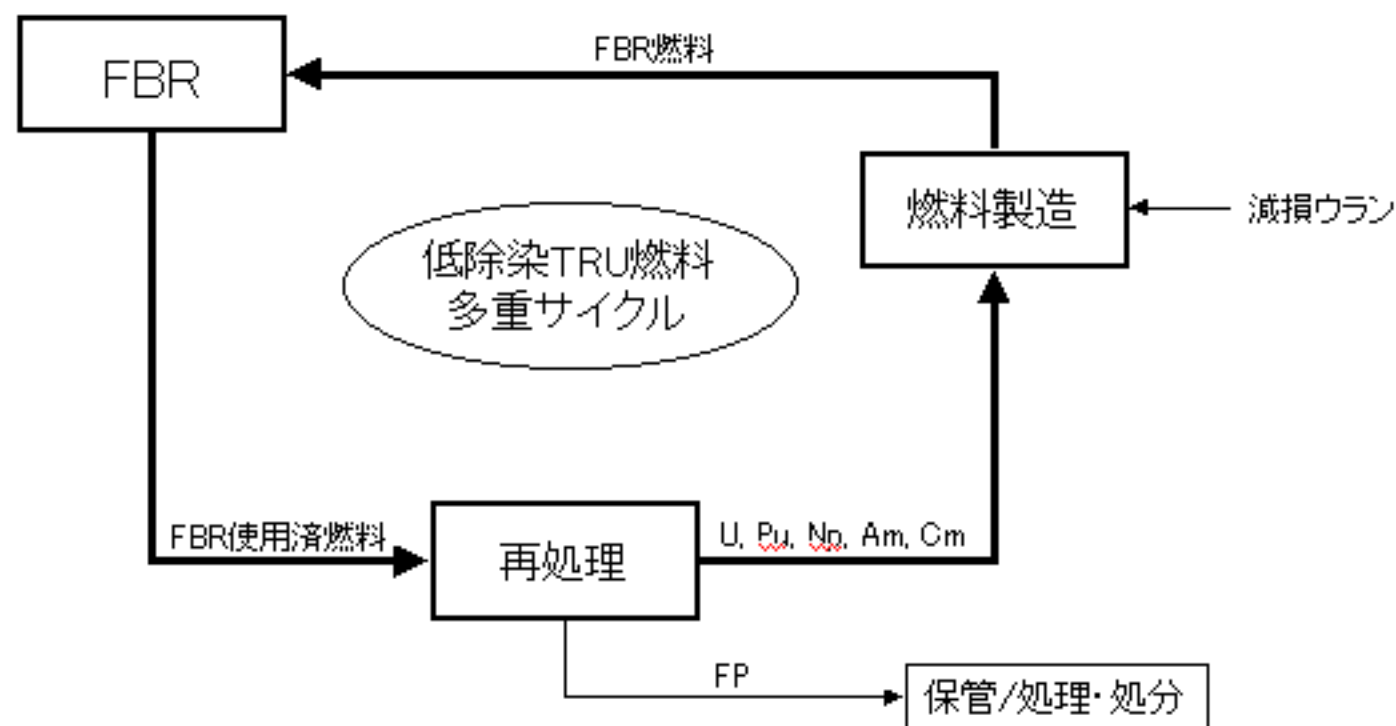
1. 「実用化戦略調査研究」の評価で想定したサイクルの機能別概念
 - 1) FER多重サイクル概念(例)
 - 2) LWR使用済燃料受け入れサイクル概念(例)
 - 3) FP分離変換サイクル概念(例)
2. 「実用化戦略調査研究」の評価
 - 1) 経済性の評価構造(案)
 - 2) 効用値の評価構造
 - 3) 効用関数と目標値
3. 「実用化戦略調査研究」の評価結果の例
 - 1) レーダーチャートによる各視点に対する相対比較(例)
 - 2) 効用値による評価(例)
4. Generation-IVにおける評価のフローと評価指標

1. 「実用化戦略調査研究」の評価で想定したサイクルの機能別概念

[社会的なニーズに対応した核燃料サイクルの機能を満たすFBRサイクルの概念(例)]

サイクル名	ニーズ	機能・特徴	狙い(または課題)
FBR多重 サイクル (図-1)	・経済性向上 ・U資源の有効活用 ・TRU蓄積の回避	・TRUマルチリサイクル ・U/TRU混合再処理 ・回収ウラン100%利用 ・炉心及びブランケット燃料ともに低除染	・低除染プロセスの採用による再処理コスト低減 ・セル内遠隔燃料製造技術
LWR使用済 燃料受け入れ サイクル (図-2)	・高次Pu/MA蓄積の回避	・TRUマルチリサイクル ・MOXを含むLWR使用済燃料受け入れ ・再処理:乾式と湿式のハイブリッド ・ウランの高除染回収 ・炉心燃料は低除染 ・ブランケット燃料は高除染	・MA燃焼効率の向上 ・ハイブリッド再処理概念の採用によるウランの高除染回収 ・LWR使用済燃料の高次Pu/MAの受け入れ方法
LLFP分離変換 機能付加サイクル (図-3)	・長半減期FPの環境影響リスク低減	・TRUマルチリサイクル (基本特性はFBR多重サイクルと同じ) ・LLFP(I, T_c)の分離変換サイクルを付加 ・Sr, Csの分離保管	・コスト負担(費用)に対する便益(効果)の評価 ・サイクルとしてのトータルリスク評価 ・基礎・基盤技術開発

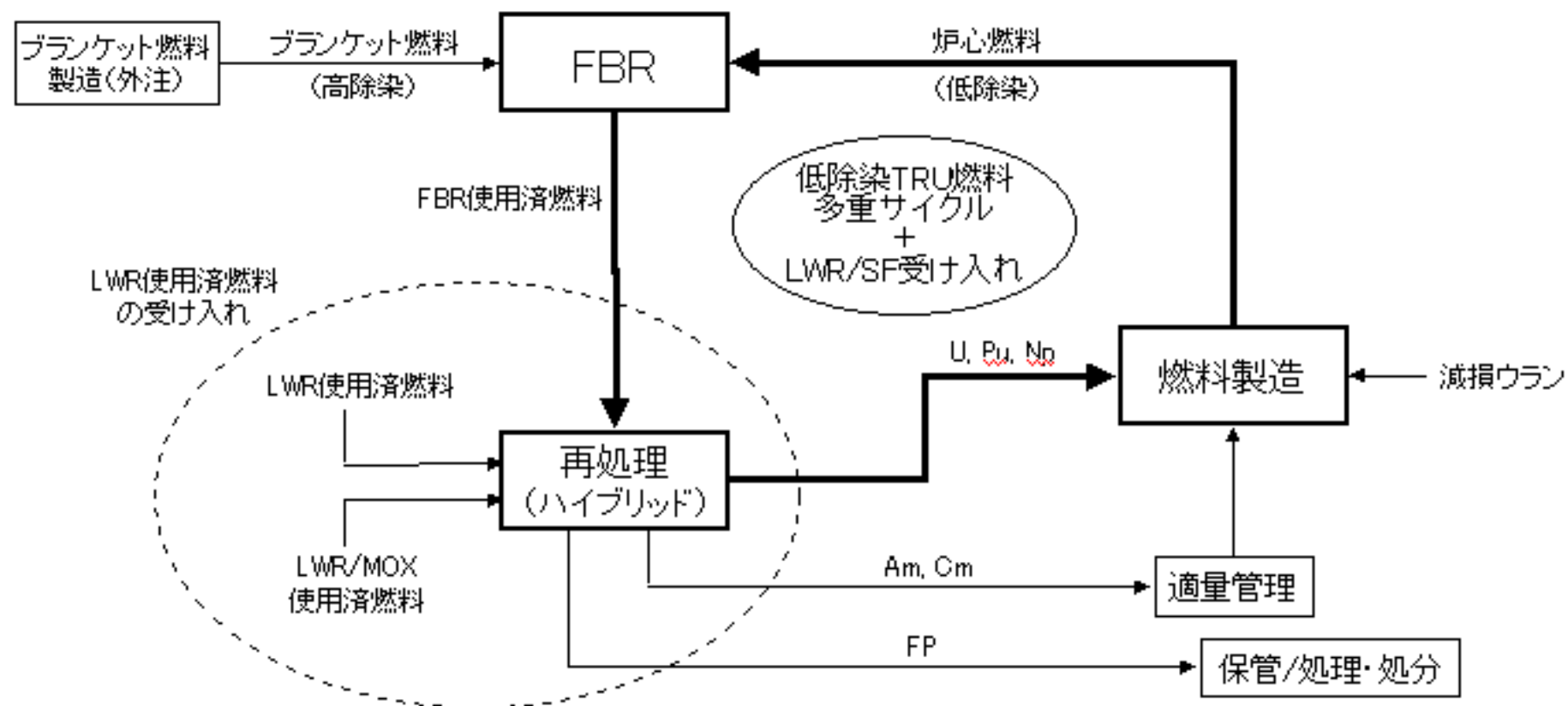
1) FBR多重サイクル概念(例)



主な特徴

- ・ FBR多重サイクル
- ・ 混合再処理
- ・ 回収ウラン100%利用
- ・ 炉心及びブランケット燃料ともに低除染

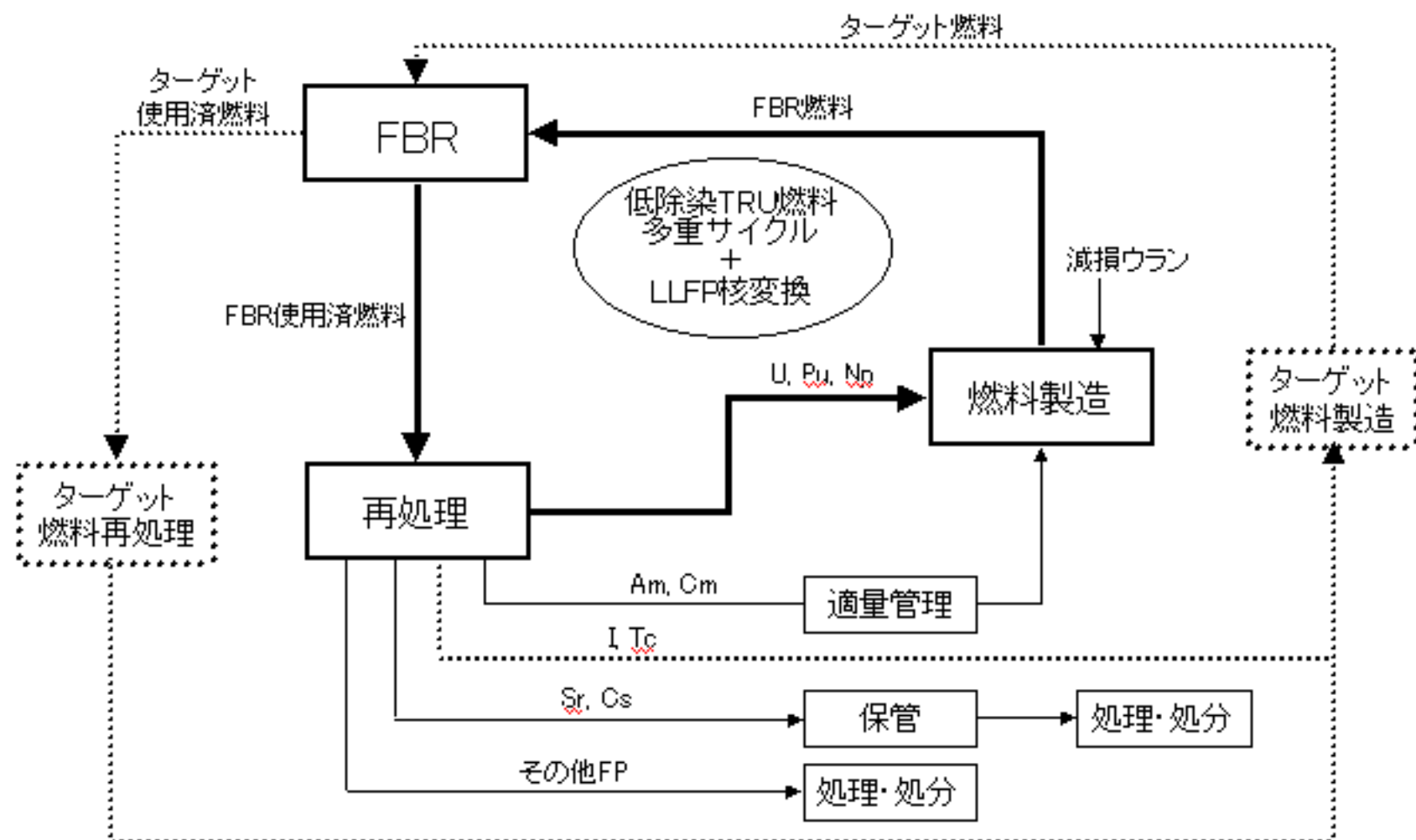
2) LWR使用済燃料受け入れサイクル概念(例)



主な特徴

- ・ FBR多重サイクル+LWR使用済燃料受け入れ
- ・ 再処理:乾式と湿式のハイブリッド
- ・ ウランの高除染回収
- ・ 炉心燃料は低除染
- ・ ブランケット燃料は高除染(LWRインフラ活用)

3) LLFP分離変換機能付加サイクル概念(例)



主な特徴

- ・ FBR多重サイクル(炉心及びブランケット燃料ともに低除染)
- ・ I, Tc核変換 + Sr, Cs保管
- ・ 混合再処理、回収ウラン100%利用

2. 「実用化戦略調査研究」の評価

1) 経済性の評価構造(案)

評価視点

一次指標

経済性

発電単価(円/kWh)

- 耐用年平均現在価値換算法
- 総合エネルギー調査会原子力部会(平成11年12月)に準拠
 - ・現状軽水炉 5.9 円/kWh
 - ・将来軽水炉 4.3 円/kWh

発電単価の内訳

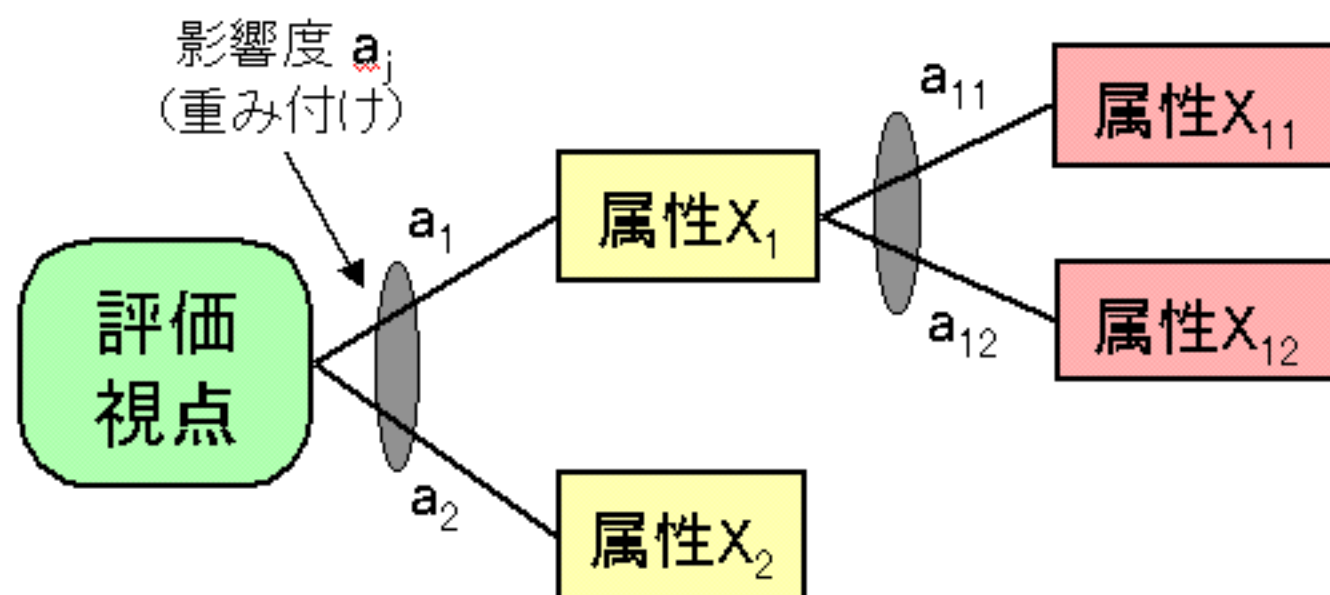
耐用年平均発電単価 (円/kWh)	年間発電経費 (億円/年)	資本費(億円/年)	減価償却費	工事費、土地代、建設中利子
			事業報酬	
			固定資産税	
			廃止措置費	解体費、廃棄物処分費
		運転維持費 (億円/年)	人件費	要員数
			修繕費	修繕費率
			諸費	消耗品、廃棄物処理費など
			関連費	一般管理費、事業税など
		燃料サイクル費(億円/サイクル)	燃料製造費	建設費、部材費、燃焼費など
			燃料輸送費	
			再処理費	建設費、操業費、ロス率など
			廃棄物処分費など	高レベル廃棄物発生量など
	年間発電量 (kWh/年)	電気出力(送電端:kWe)		熱出力、熱効率、所内率
		設備利用率(%)		定期検査日数
	耐用年数(年)			

2) 効用値の評価構造

効用値(U)

一次指標

二次指標

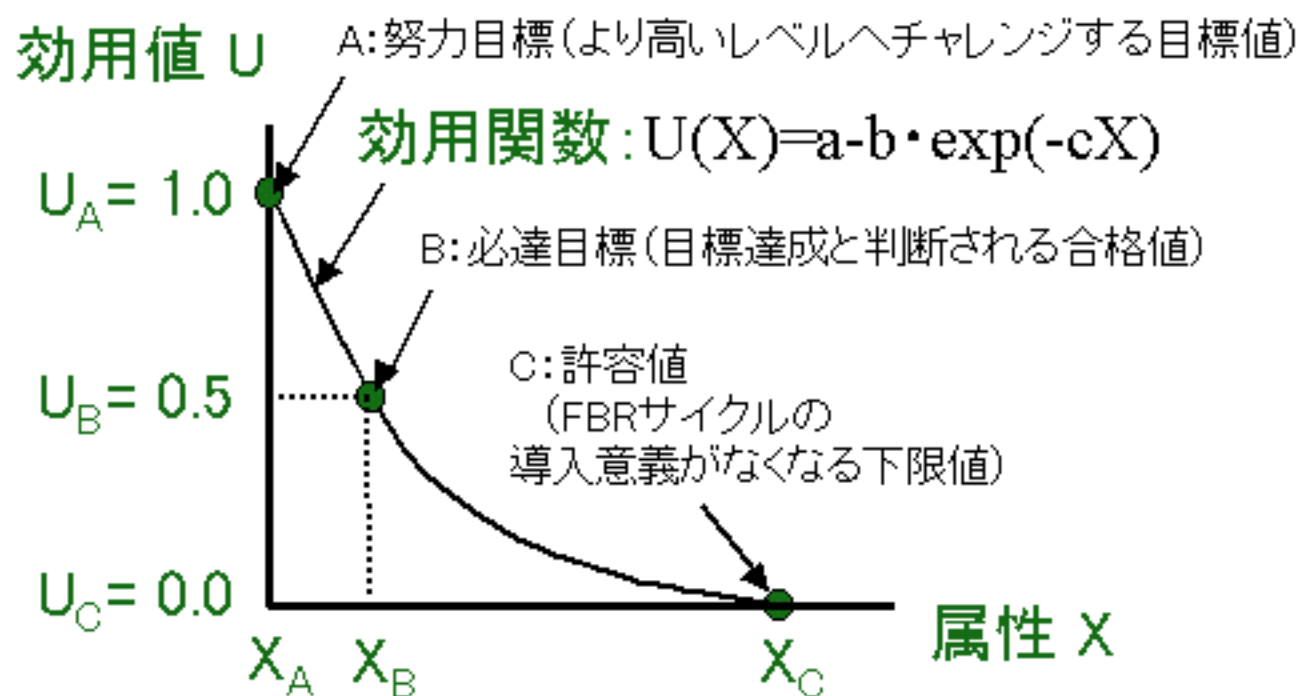


$$U = a_1 U_1 + a_2 U_2(X_2)$$

$$= a_1 \{ a_{11} U_{11}(X_{11}) + a_{12} U_{12}(X_{12}) \} + a_2 U_2(X_2)$$

3) 効用関数と目標値

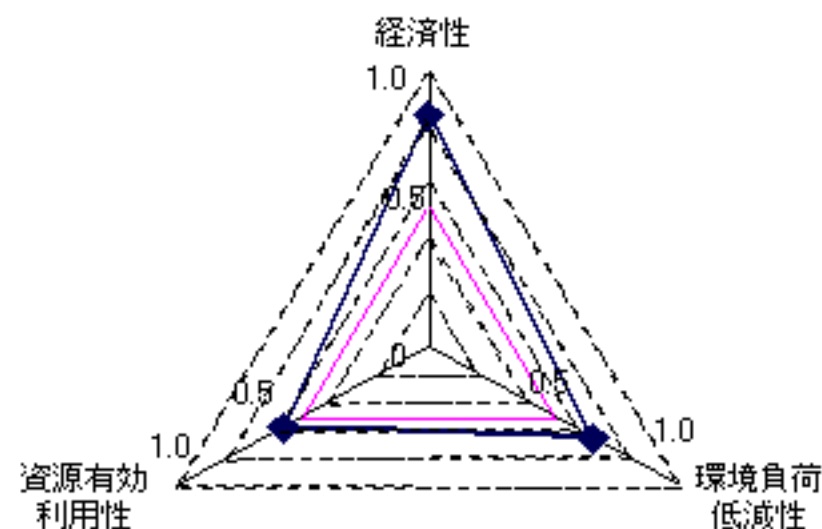
- 目標に対する達成度について、その価値観を含めて定量的に表現
(属性の異なるものを、効用関数により無次元量として同列に評価)
- 他の視点との相関を直感的に把握



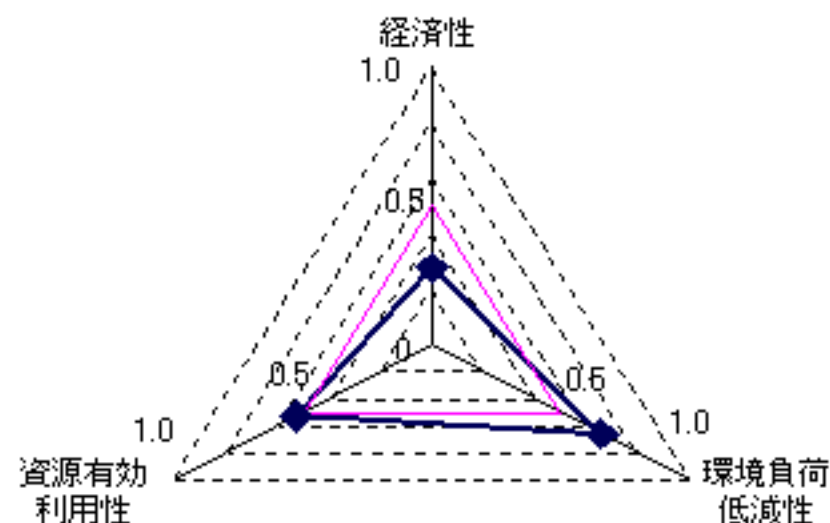
3. 「実用化戦略調査研究」の評価結果の例

1) レーダーチャートによる各視点に対する相対比較(例)

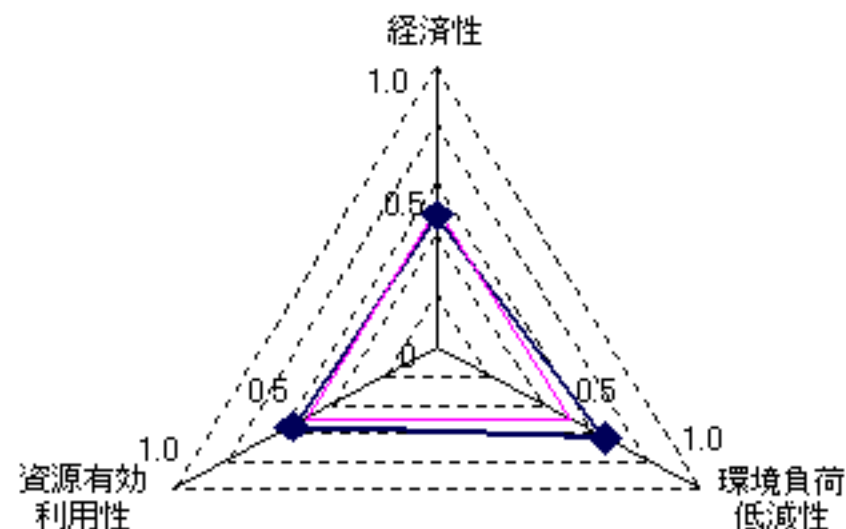
ナトリウム炉



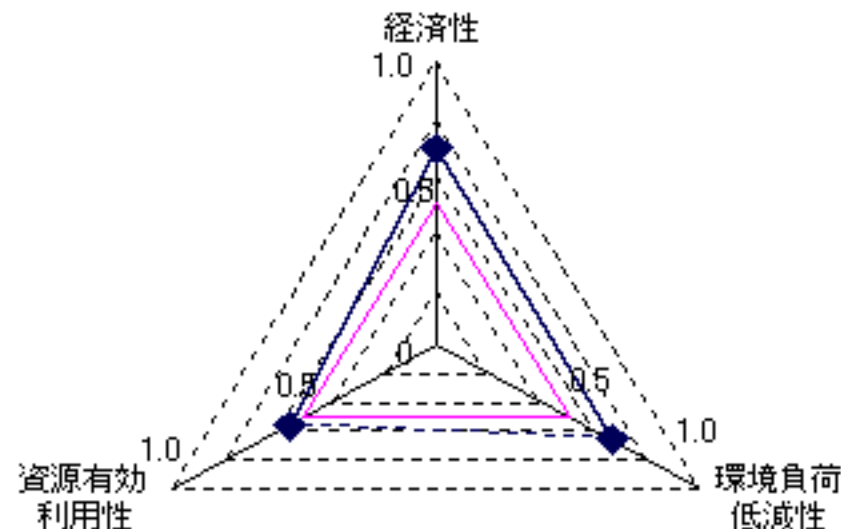
鉛ビスマス炉



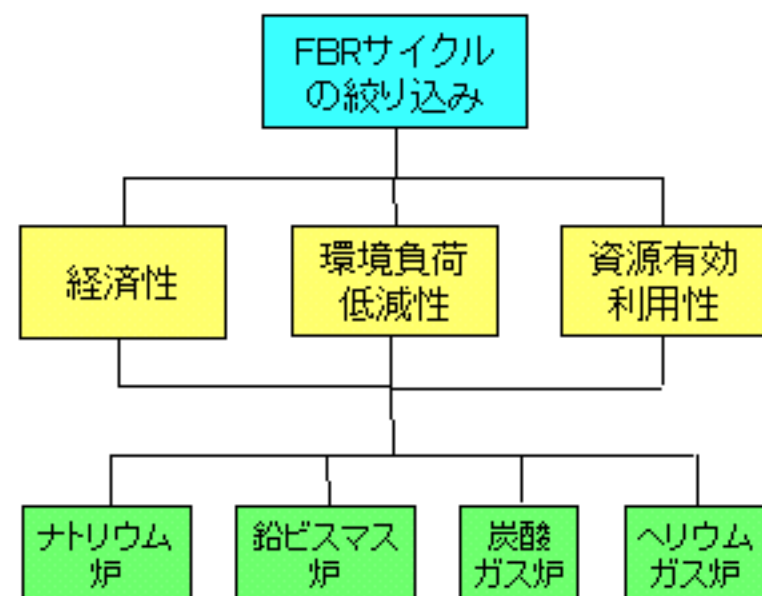
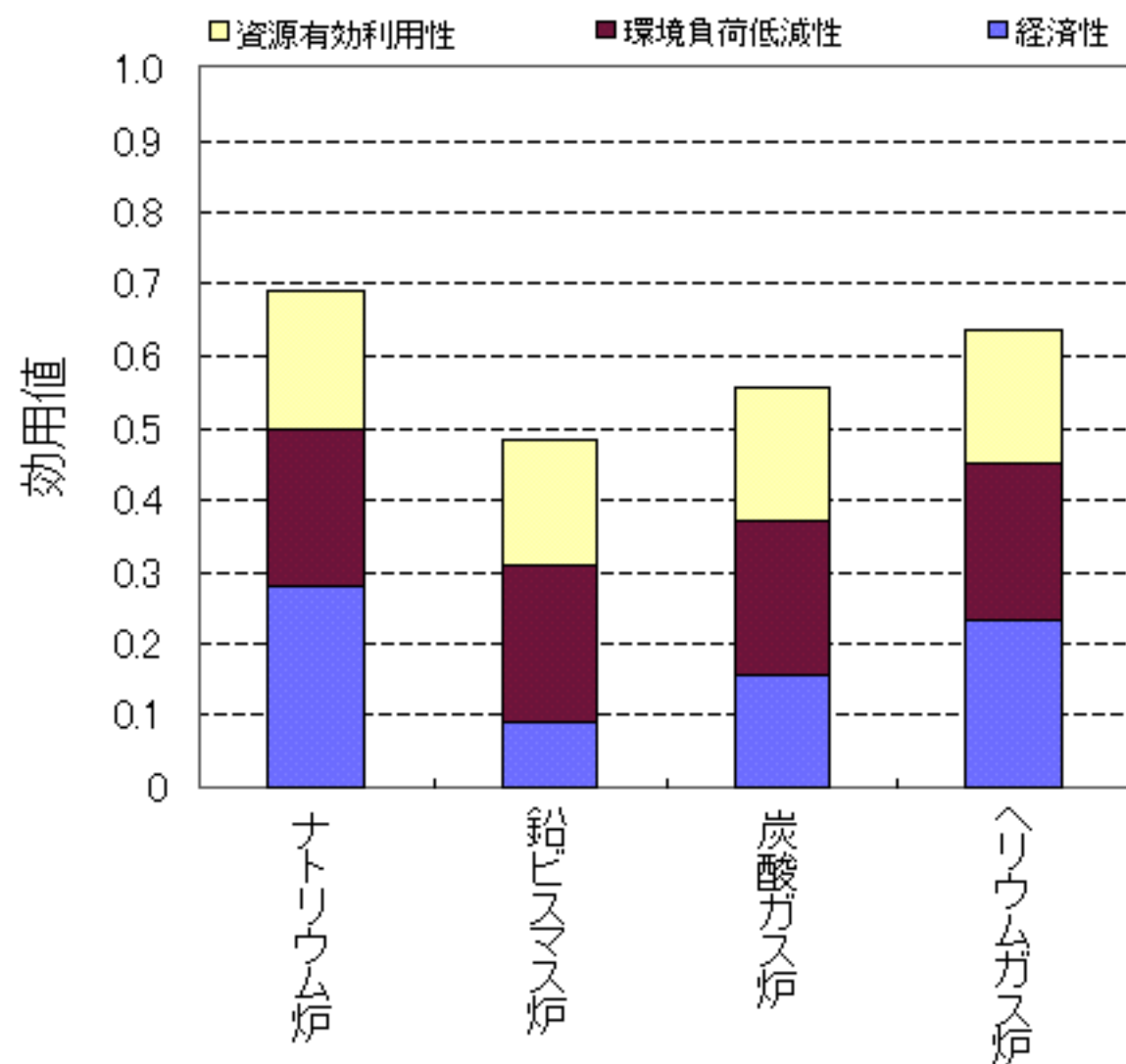
炭酸ガス炉



ヘリウムガス炉



2) 効用値による評価(例) —影響度均等の場合—



4. Generation-IVにおける評価のフローと評価指標

