

原子力委員会

核融合研究開発基本問題検討会(第4回)

# FBRサイクル研究開発の現状と 核融合研究開発について

平成15年7月16日

核燃料サイクル開発機構

大洗工学センター

可児吉男

# 原子力研究開発利用長期計画における FBRサイクル

- 高速増殖炉サイクル技術はウランの利用効率の飛躍的な向上、環境負荷の低減の観点から、不透明な将来に備えた将来のエネルギーの有力な選択肢として位置づけ、着実に開発に取り組む。
- 安全性の一層の追求と併せて軽水炉や他電源と比肩し得る経済性を達成するという究極の目標を設定しておくことが重要。幅広い選択肢を検討して、柔軟に取り組む。
- 「もんじゅ」は高速増殖炉サイクル技術の研究開発の場の中核として位置づけ、早期に運転の再開を目指す。
- 研究開発計画を提示することを目的に、多様な技術選択肢について、「実用化戦略調査研究」を推進する。
- 実用化への開発計画は、実用化時期を含め柔軟かつ着実に検討を進める。

# なぜFBRサイクルを開発するのか？

日本 = 島国、小資源国

長期的エネルギーの確保

準国産自給エネルギーの開発

高速増殖炉(FBR)を用いた核燃料サイクル

原子力における  
「リサイクル」の理想的姿が  
FBRであると考えます。

## 1. ウランの有効利用

○FBRではウラン利用効率を飛躍的に向上

○数千年に渡って原子力エネルギーの利用が可能(資源の有効利用)

## 2. 高レベル放射性廃棄物対策

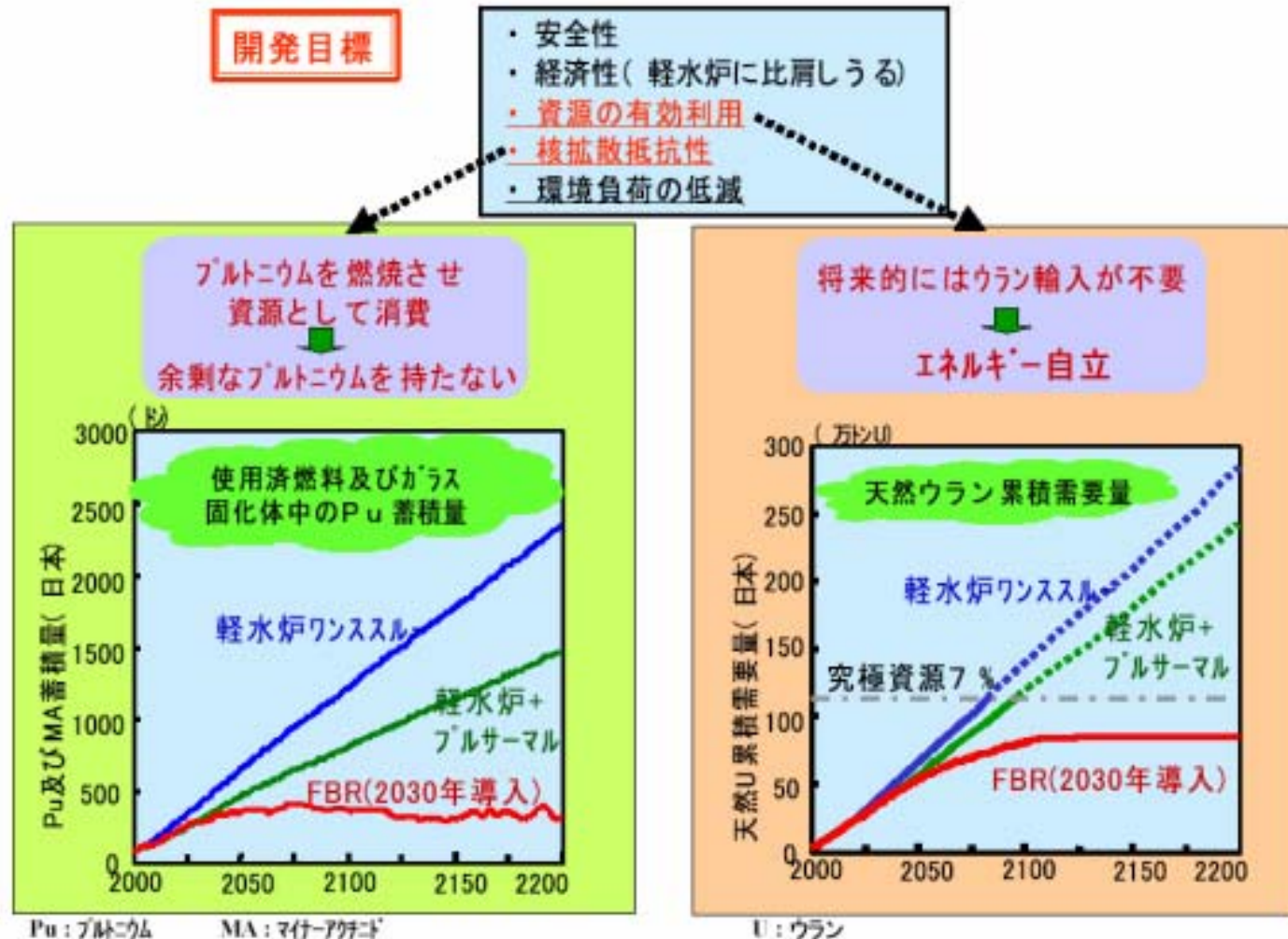
○高速中性子を使って高レベル廃棄物中に長期に残留する放射能を低減可能(長寿命核種の短半減期化)(環境負荷の低減)



将来のエネルギーの有力な選択肢として開発

〔2015年までに競争力あるFBRサイクル技術を提示〕

# 高速増殖炉サイクル実用化の狙い(1/2)



# 高速増殖炉サイクル実用化の狙い(2/2)

## 開発目標

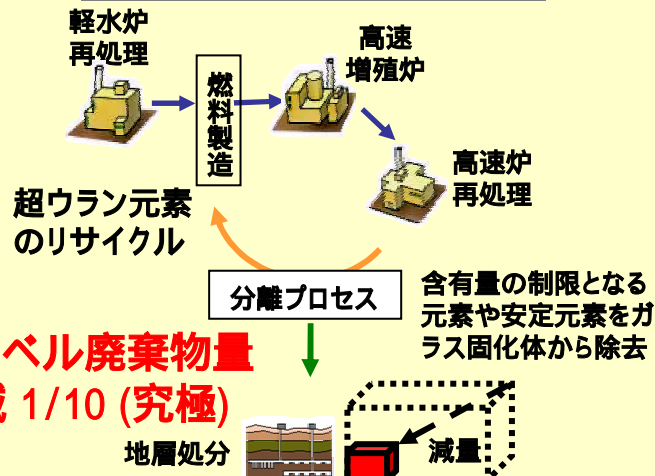
- ・安全性
- ・経済性(軽水炉に比肩しうる)
- ・資源の有効利用
- ・核拡散抵抗性
- ・**環境負荷の低減**

超ウラン元素 (TRU) を燃料としてリサイクル

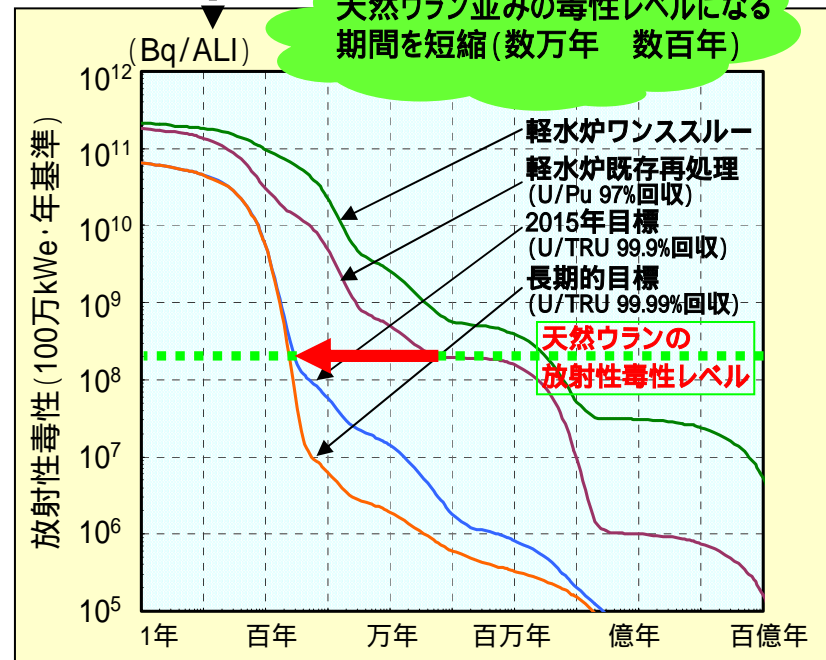
さらにFPを  
選択的に処分

TRU燃焼で毒性  
を大幅低減

## FBRを用いた先進リサイクル



天然ウラン並みの毒性レベルになる  
期間を短縮(数万年 数百年)



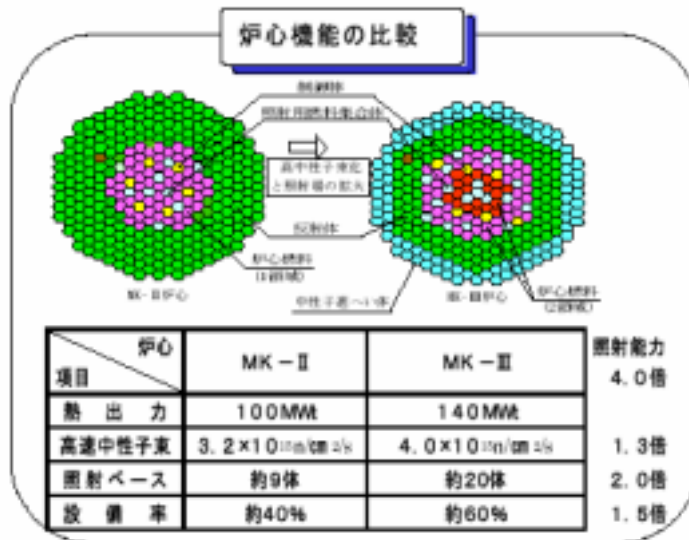
# F B R 実験炉「常陽」

## 1. 現状

- 高性能炉心・燃料開発のため改造中  
⇒ 照射試験能力 4 倍
- 平成15年7月から性能試験開始予定

## 2. 役割

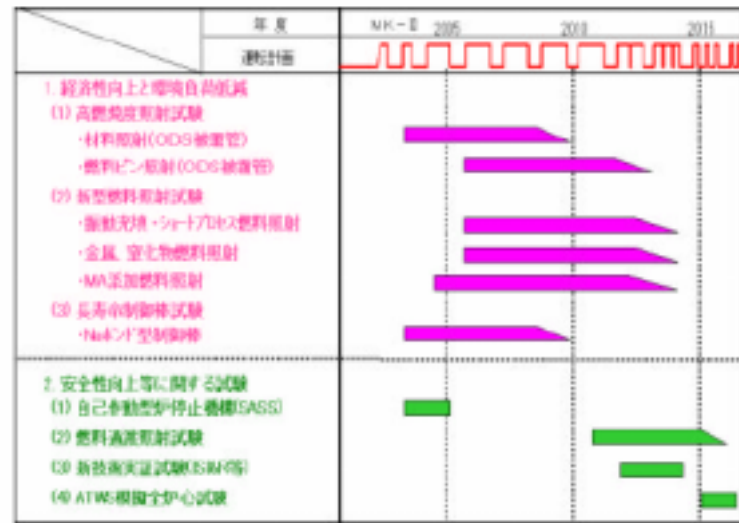
- ・高速増殖炉の基礎的なデータ取得  
(増殖性の確認、炉心・プラント特性の確認)
- ・高速中性子を用いた照射  
(FBR燃料・材料、核融合材料等の照射)
- ・FBRの運転・保守技術の蓄積と技術者養成



## 3. 今後の予定

- 高性能化及び環境負荷低減研究を実施
  - ・高燃焼度用燃料・材料の照射
  - ・マイナーアクチニド含有燃料の燃焼試験
  - ・金属燃料サイクル開発 (新型燃料照射試験等)
- 安全性向上研究
  - ・自己作動型炉停止機構
  - ・燃料過渡照射試験 等

⇒試験成果をF B R サイクル技術の研究開発に反映



ODS : 酸化物分散強化型フェライト鋼      MA : マイナーアクチニド  
ATWS : 異常な過渡変化時のスクラム不作動事象

# FBR原型炉「もんじゅ」

## 1. 現状

○原子炉設置変更申請書が許可  
(平成14年12月26日)

○設工認申請(平成14年12月27日)

## 2. 役割(原子力長期計画)

○高速増殖炉サイクル研究開発の中核

○発電プラントとしての実証

○ナトリウム取扱技術の確立

○世界の国際公共財として活用

## 3. 今後の予定

○地元了解後に所要の改造工事に着手

○運転再開後

### ・実用化の研究開発

⇒発電プラントとしての技術信頼性の確立

⇒高性能炉心を活用した研究開発

(実用化燃料の実証→高燃焼度化15万MWd/t)

### ・リサイクル技術の実証

⇒プルトニウムリサイクル

⇒低除染燃料(FP、TRU含有燃料)の実証

→環境負荷の低減

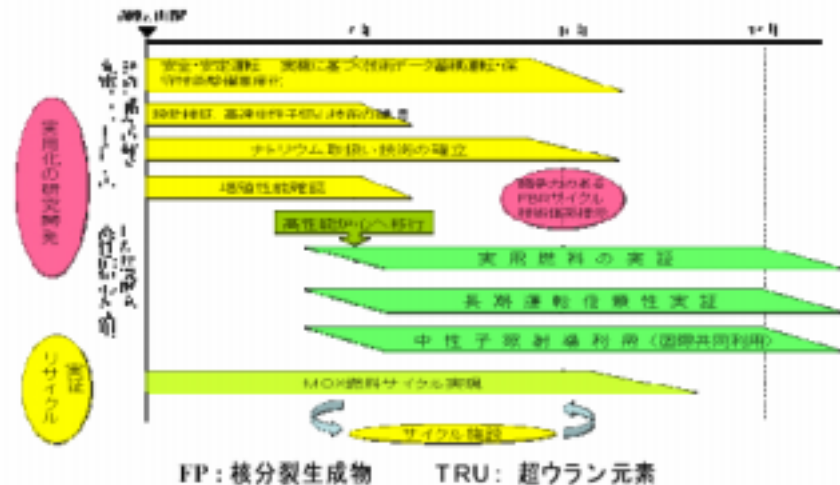
## もんじゅ

### 世界の国際公共財として

- ◇ Na冷却、MOX燃料サイクルは日本がリード
- ◇ 海外研究者参加(実績 研究員等30人)
- ◇ 「もんじゅ」国際共同利用
- ◇ フェニックスがを継承し、大規模照射として利用(廃棄物低減研究など)

### 2国間、国際機関との協力

- ◇ 欧、米との2国間協力を機軸とする共同研究(先端技術、運転経験情報交換)
- ◇ IAEA(TWGFR)
  - ・高速炉技術継承のための国際データベース構築
  - ・FBR開発途上国における安全性向上の貢献
- ◇ WANC(FBRグループ会議)
  - ・海外先行の技術継承と「もんじゅ」での活用





# FBRサイクル実用化戦略調査研究の研究開発ステップ

(年度)

2000

2005

2010

2015

## フェーズ

- ・幅広い選択肢の評価
- ・有望な候補概念の抽出

## フェーズ

- ・革新技術の導入
- ・設計研究の実施
- ・要素技術開発の開始

原研との統合

- ・複数の実用化候補概念の明確化
- ・研究開発計画の策定

## チェック＆レビュー

- ・課題評価委員会
- ・第三者評価

## <実用化戦略調査研究の開発目標>

- ・安全性の確保
- ・競争力のある経済性
- ・資源の有効利用
- ・環境負荷の低減
- ・核拡散抵抗性の向上

## 要素技術の例

### 炉システム

- Na炉 経済性の向上 (合体機器・長期運転サイクル等) 他
- Na炉の魅力追求&課題克服
- 鉛ビスマス炉 耐腐食材開発/経済性の向上 他
- ガス炉 被覆燃料開発 他

### 再処理

- 先進湿式法 経済性・環境負荷低減性の高いプロセス開発
- 乾式法 MA回収等の技術成立性の確認

### 燃料製造

- 振動充填法
- 簡素化ペレット法
- 鑄造法
- 燃料開発 ODS網の開発
- 低除染・TRU燃料の照射
- 振動充填燃料の照射 他

## フェーズ以降

## 技術体系の整備

### [工学規模の検証]

- ・概念設計
- ・設計手法高度化・基準策定等
- ・に必要なデータ取得
- ・燃料サイクルホット試験
- ・燃料のピン照射 等

### [炉及び燃料サイクル施設]

- ・基本設計
- ・燃料の集合体照射
- ・設置許可申請が可能な
- 安全設計・評価に関わる
- データ取得 等

## ローリングプランによる実施

5年程度毎の  
チェック＆レビュー



# 実用化戦略調査研究フェーズの開発目標

## 安全性

取り扱い物質の特性(科学的活性度、毒性など)やプロセス条件(運転温度など)を踏まえた安全対策  
FBRサイクルの導入リスクが、社会にすでに存在するリスクに比べて十分小さい

原子炉 ・炉心損傷に至る恐れのある事象の発生を防止するとともに、その発生を仮定しても  
炉容器 または格納施設内で収束

燃料サイクル ・臨界安全、閉じ込め機能の確保

## 経済性

将来の軽水炉に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**

- ・ より一層の物量削減
- ・ 海外調達、など

## 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

## 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

エネルギー源としての**多様なニーズ**への対応

- ・ 水素製造、海水淡水化、熱供給、分散電源など

## 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こと、など)

核不拡散性制度の運用の効率化(遠隔保守・監視、自動化技術など)

# 実用化戦略調査研究の主な設計要求

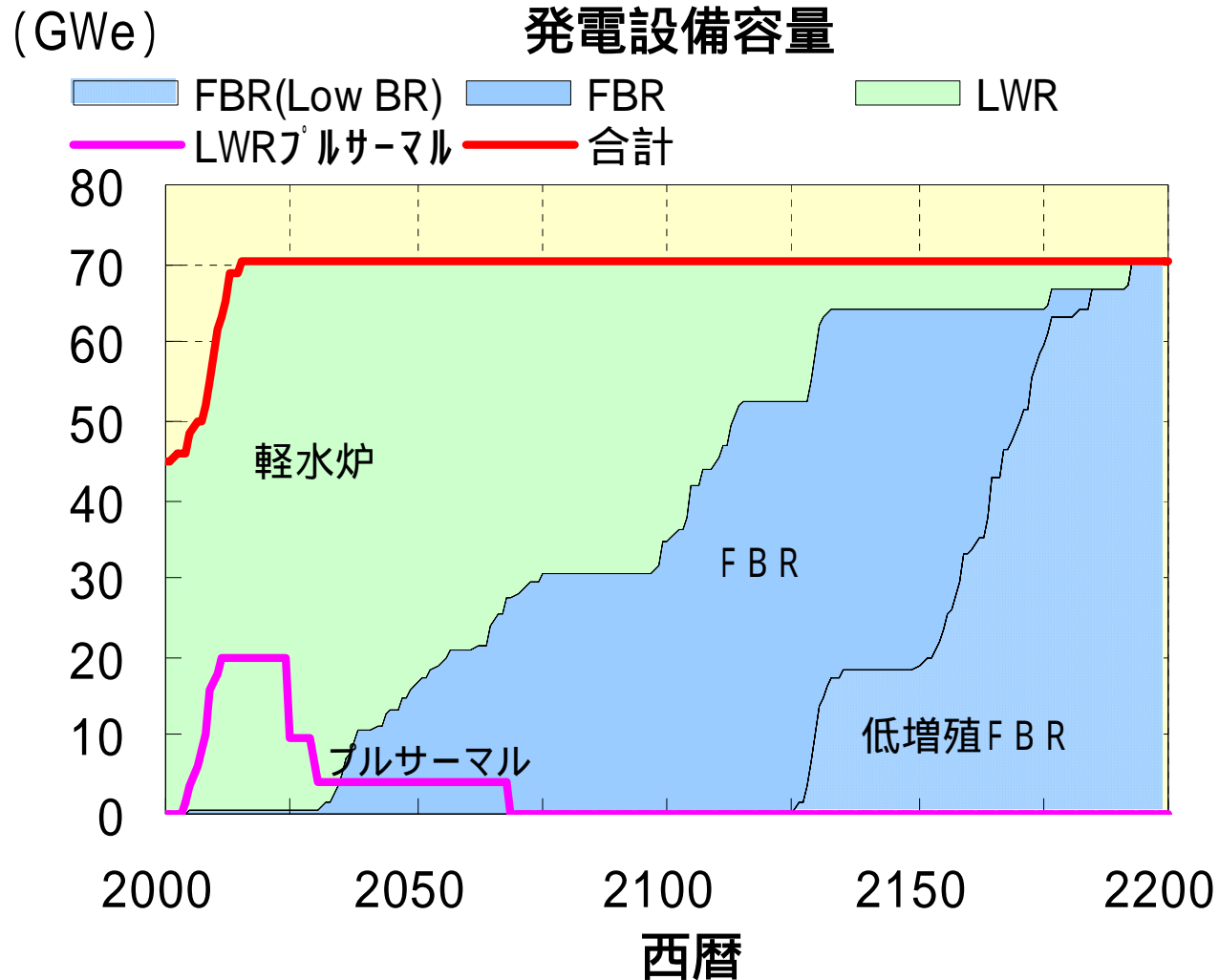
## FBRシステム(基幹電源)

発電単価 : 4.0円/kWh (建設単価 20万円 / kW<sub>e</sub>相当)  
連続運転期間: 13ヶ月以上  
建設工期 : 目標値として、大型炉42ヶ月、  
中型モジュール炉36ヶ月  
増殖性能 : 低除染TRU燃料を前提に、FP核変換を行なう場合、増殖比1.0以上  
目標値として、増殖比1.2以上、  
複利システム倍增時間30年以下  
TRU燃焼 : 低除染TRU燃料を前提に、FBRマルチ  
リサイクル及び長期貯蔵軽水炉使用済燃料  
を視野に入れたサイクルを考慮  
FP核変換 : I, Tc  
放出放射能 : 現行軽水炉の申請書記載値と同等以下  
安全性 : 受動安全機能、再臨界回避  
炉心損傷頻度 $10^{-6}$ /炉年未満

## 燃料サイクルシステム

燃料サイクル費 : 1.1円/kWh以下 再処理費 27万円 / kg HM  
燃料製造費 16万円 / kg HM  
相当  
稼働率 : 200日/年  
建設工期 : 60ヶ月  
U, Puの回収率 99%以上(サイクル全体として)  
分離対象核種 : I, Tc, Cs, Sr, Mo, Pd  
放出放射能 : 現行軽水炉燃料サイクル施設の申請書  
記載値と同等以下  
安全性 : 軽水炉燃料サイクルと同等  
施設内での放射性物質の大規模漏えい  
の発生頻度の目標値として  
 $10^{-6}$ /年・プラント以下(暫定)

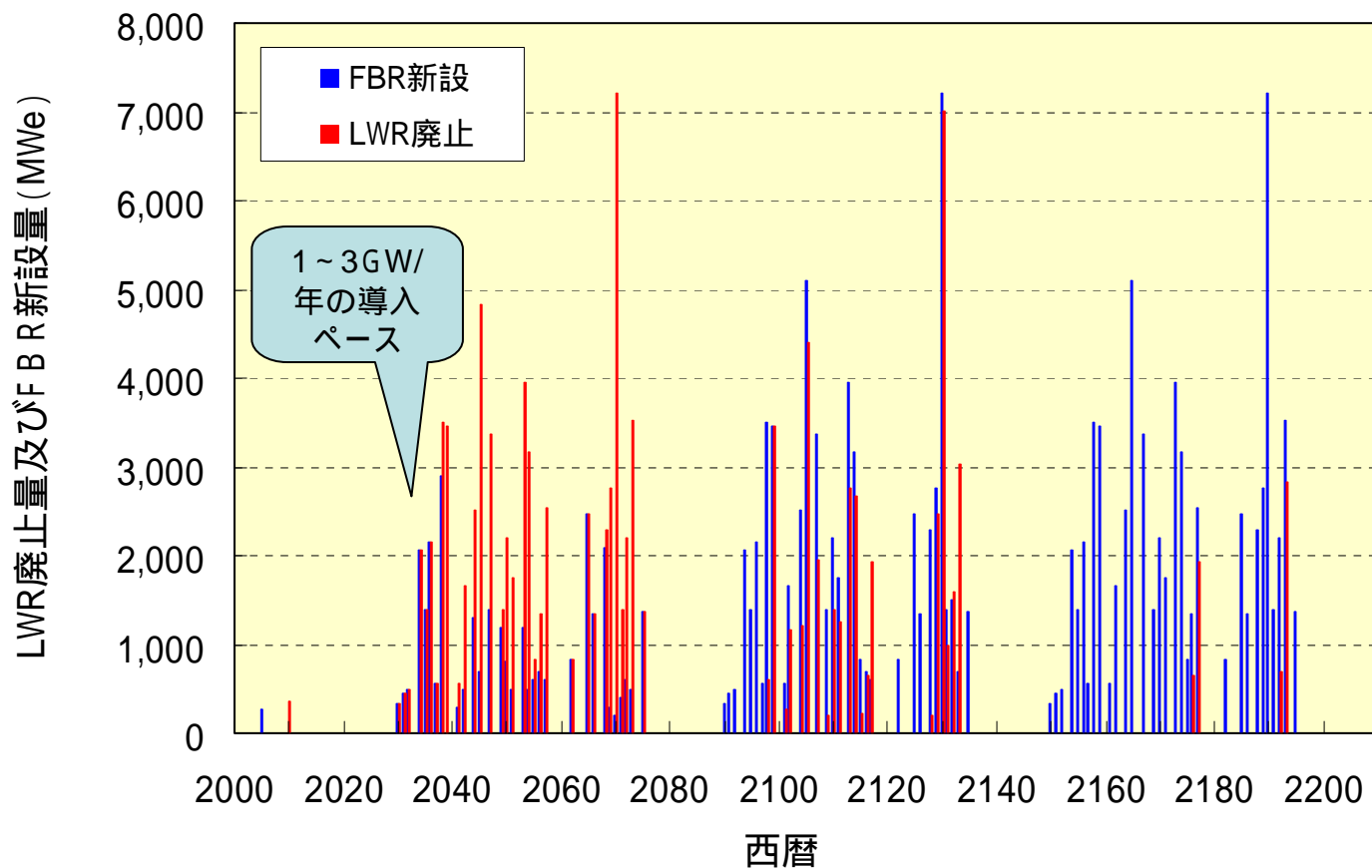
# 軽水炉 (LWR) からFBRへの移行シナリオ例

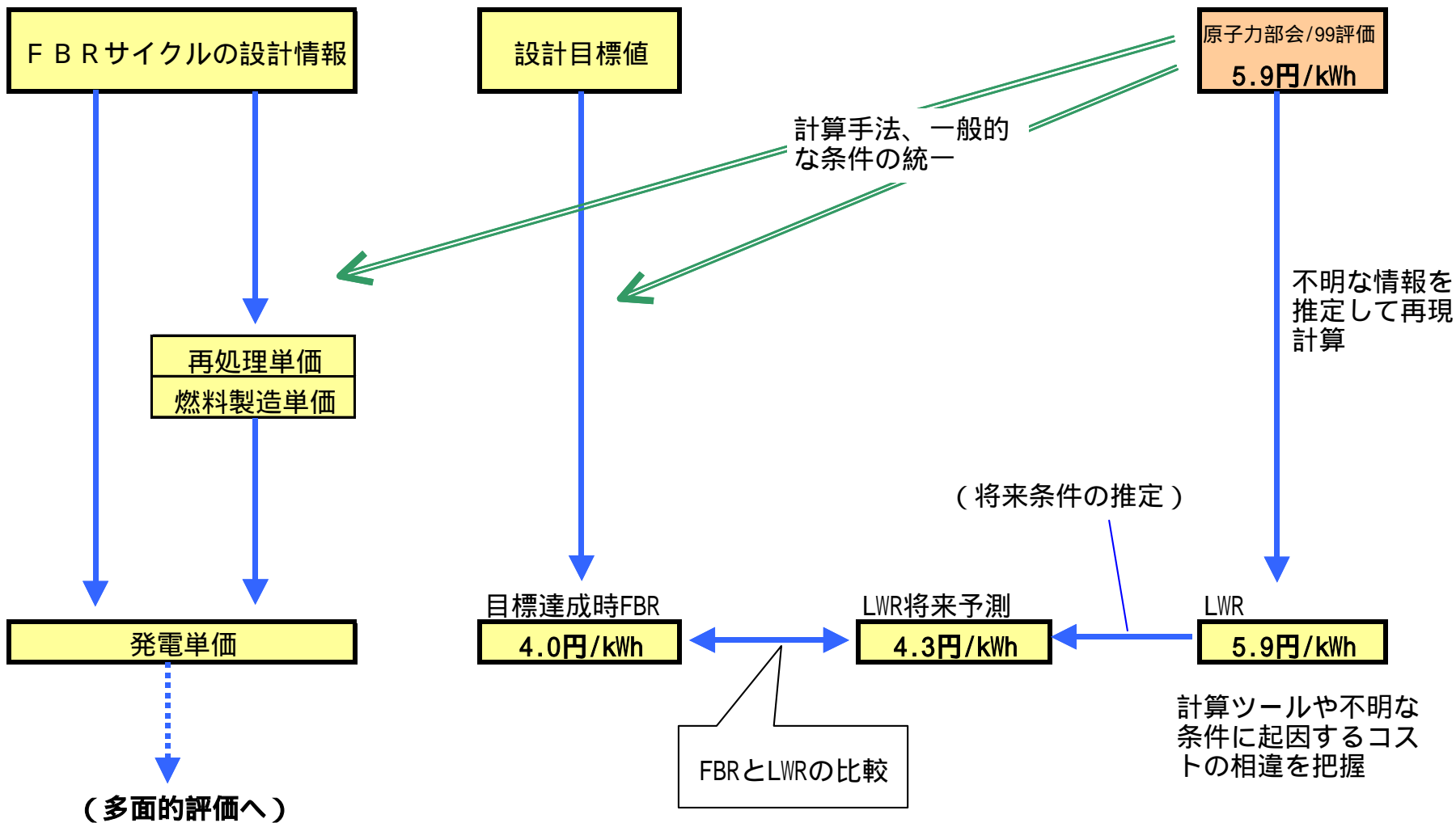


# 軽水炉廃止量とFBR新設量(想定例)

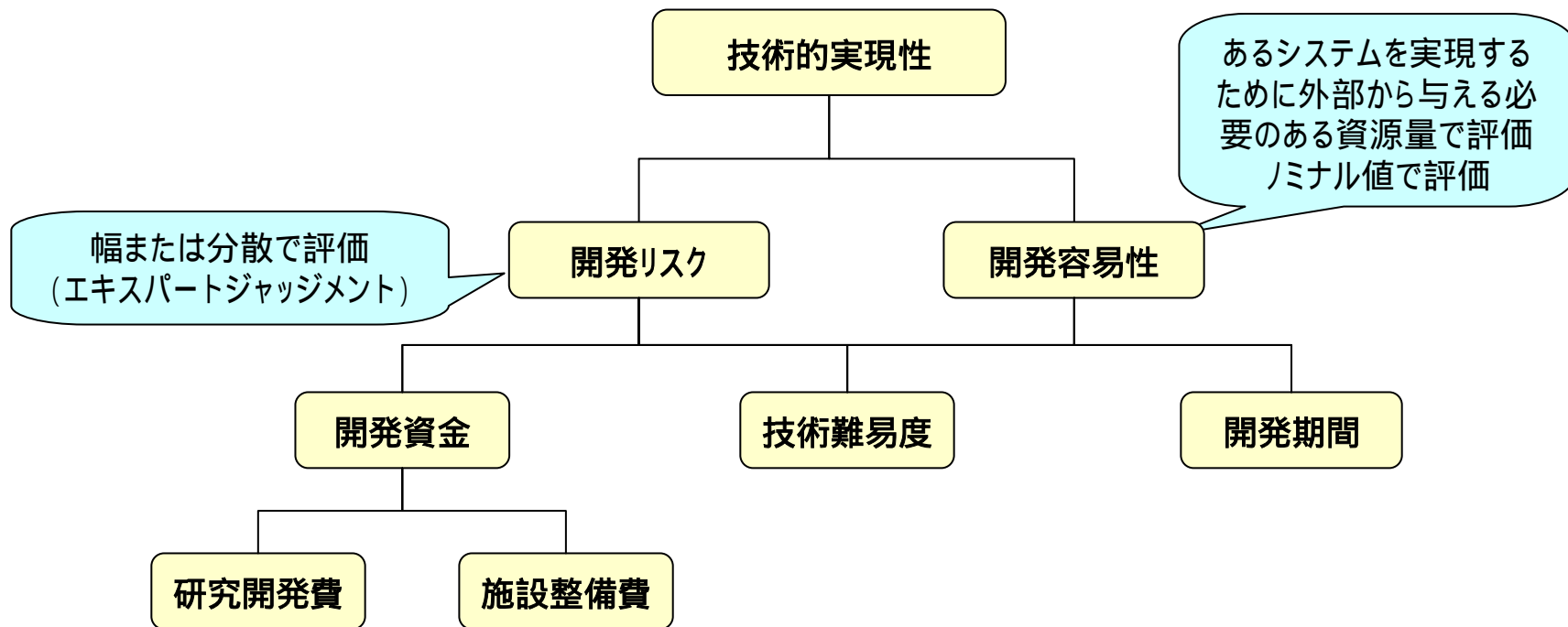
(LWR)

炉寿命を60年と想定



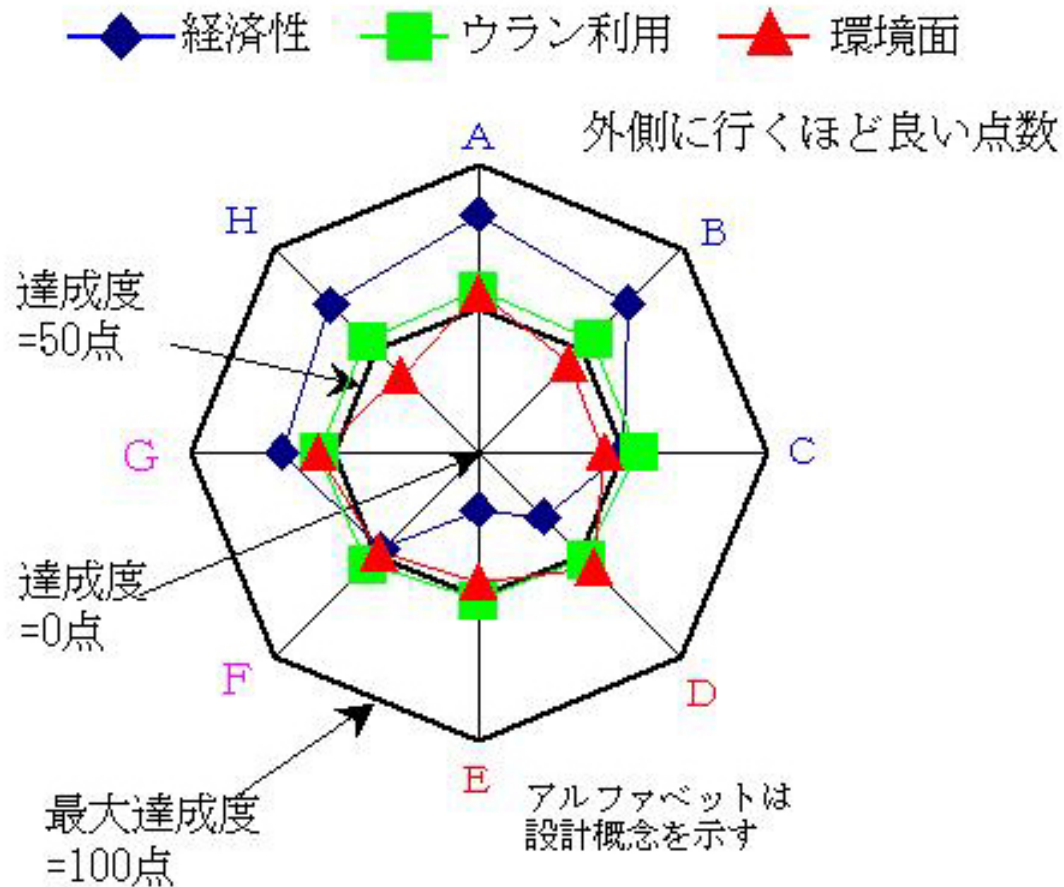


## 経済性目標値設定の流れ



## 技術的実現性の評価指標

# F B R 候補設計概念の多面的評価 (一例)



特性を「採点」して絞り込みの参考にします。  
総合点にまとめる際の重み付けなどがポイントです。



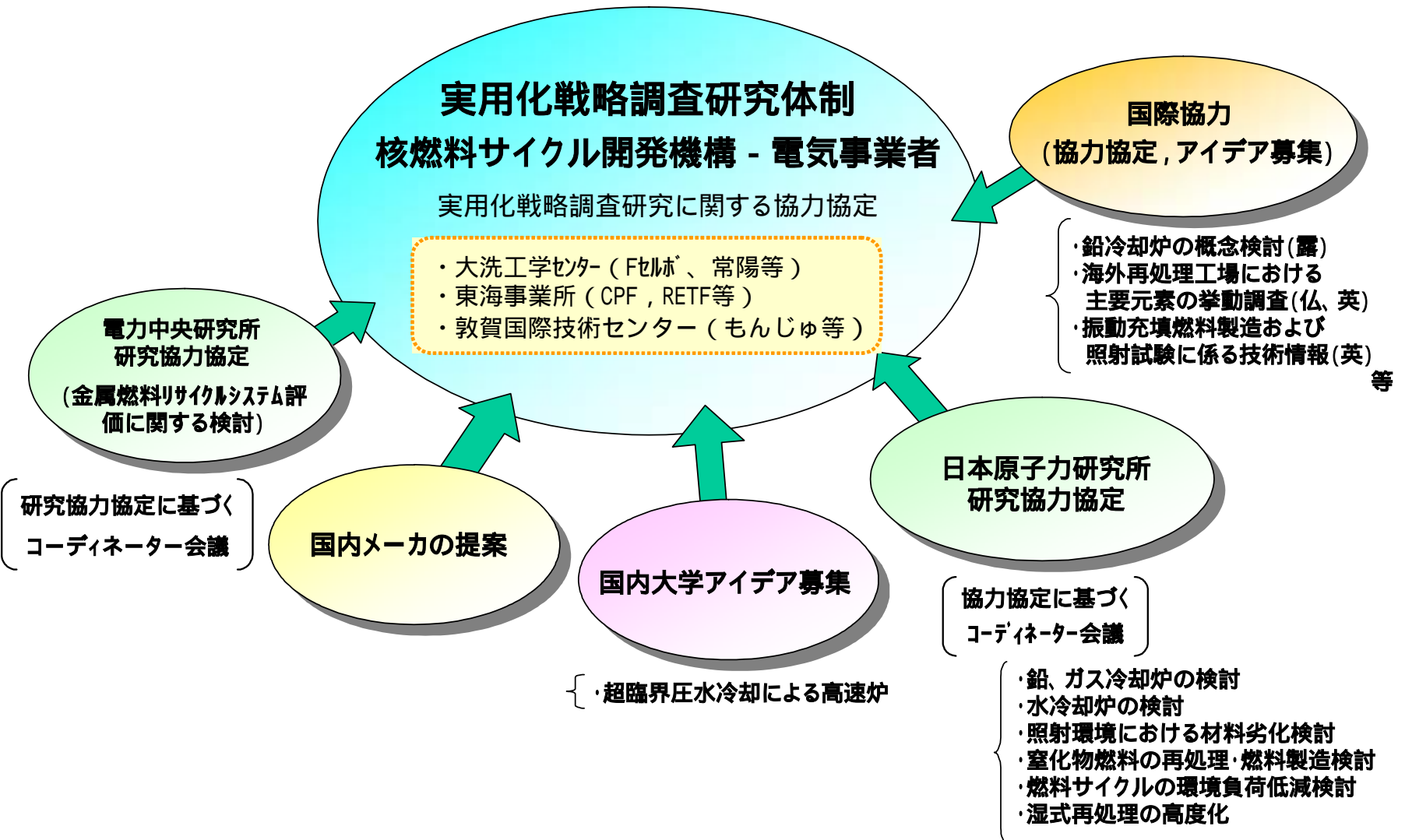
# 実用化戦略調査研究のフェーズの展開

	2001年度 (平成13年度)	2002年度 (平成14年度)	2003年度 (平成15年度)	2004年度 (平成16年度)	2005年度 (平成17年度)
炉心燃料	MOX燃料要素技術開発 ・高燃焼度燃料開発 ・低除染・TRU含有燃料技術開発 等 新型燃料技術開発 ・窒化物燃料、金属燃料概念設計		MOX燃料評価 新型燃料評価	MOX燃料/新型燃料 ・有望概念(複数)の設計 の見直し	
FBRシステム	概念設計 ・Na冷却炉(大型、中型モジュール炉) ・Pb-Bi冷却中型モジュール炉 ・ガス冷却炉(He、CO <sub>2</sub> 冷却炉 He冷却炉) ・水冷却炉 小型炉(Na炉、Pb-Bi炉)		システム設計 ・プラント全体の経済 性、安全性等評価 ・構造健全性評価 他	システム概念設計 ・中間評価を踏まえた設計の 見直し ・システム間の比較検討  概念の明確化に必要な要素試験 技術的成立性に係る要素試験	
燃料サイクル システム	概念設計(再処理、燃料製造をサイクルとして評価) [再処理] ・先進湿式法 ・乾式法:酸化電解法、金属電解法 [燃料製造] ・簡素化ペレット法 ・振動充填法 ・鑄造法		概念設計 ・システム設計 ・建設費・経済性 評価 ・再処理・燃料製造 一体化プラント概 念設計	システム概念設計 ・中間評価を踏まえた設計の 見直し ・システム間の比較検討  概念の明確化に必要な要素試験 技術的成立性に係る要素試験  RETfの利用・活用	
統合・評価	総合的な評価手法の開発・整備 開発シナリオの検討、研究開発計画の検討  アイデア公募研究の実施(3年間)		中間とりまとめに向けた 総合的な評価の実施	総合的な評価の実施 ・FBR導入シナリオの構築 ・候補概念の明確化 ・研究開発計画の策定	

フェーズ 中間とりまとめのチェック&レビュー

FBRサイクル全体の統合と選択肢の比較評価、  
候補概念の明確化、開発計画の策定

# 実用化戦略調査研究における協力体制

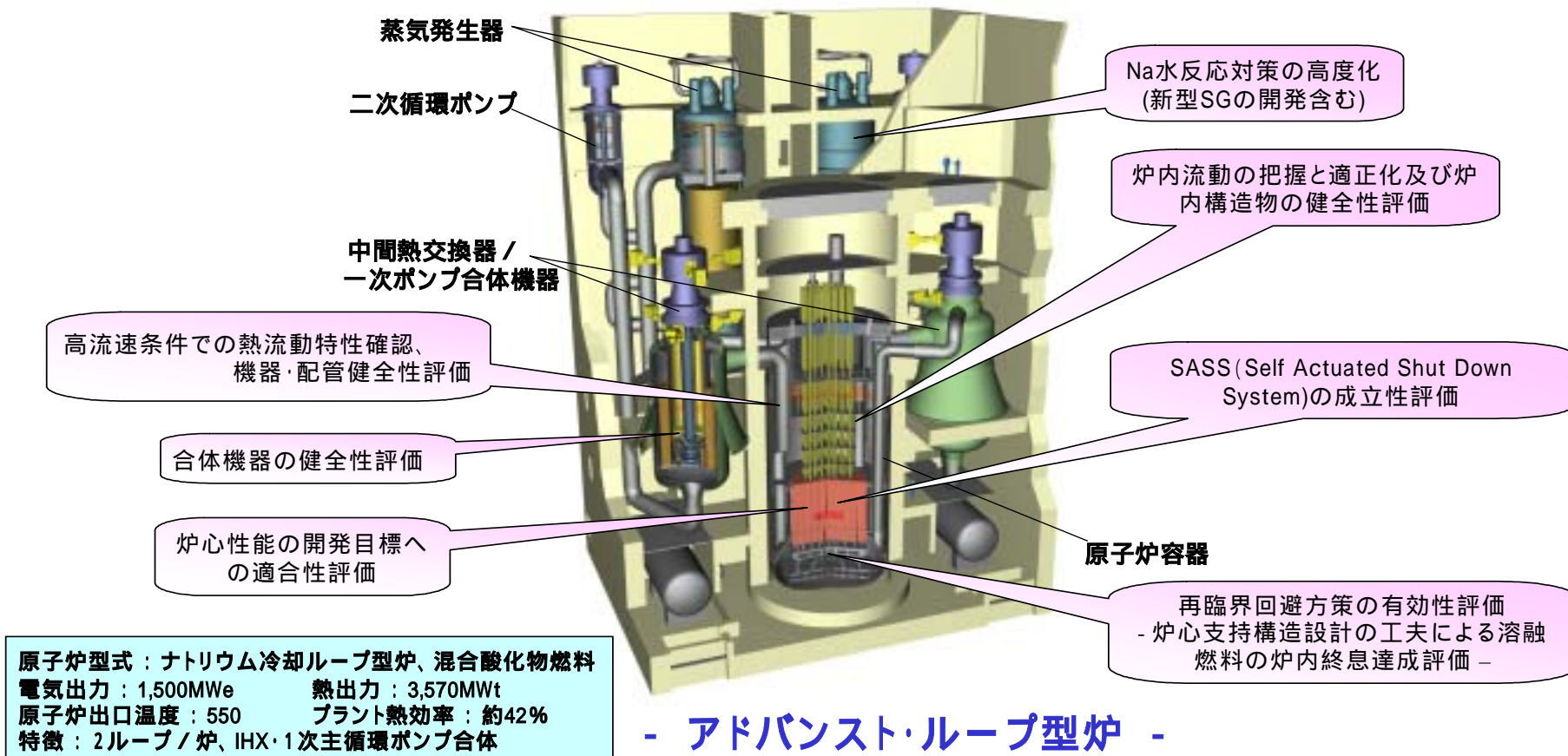


# FBR設計とR & D項目の一例

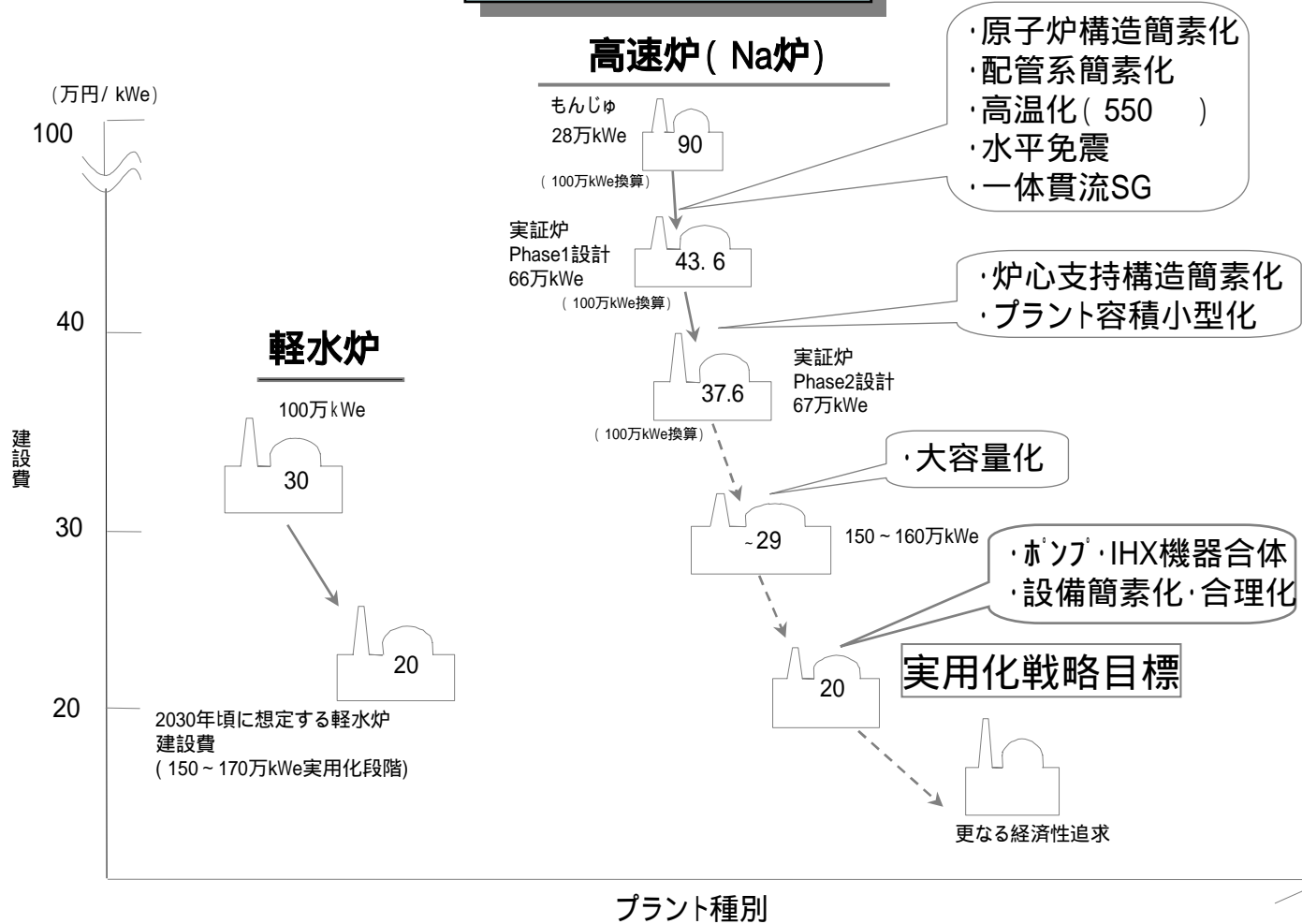
## ナトリウム冷却炉

### ナトリウム冷却炉の開発のポイント

- ・ 経済性の更なる向上、ナトリウム炉の魅力追求・弱点克服等に向けた設計概念の追求
- ・ 主要技術(冷却材流動高速化、合体機器、新材料等)の成立性確認



# 目標



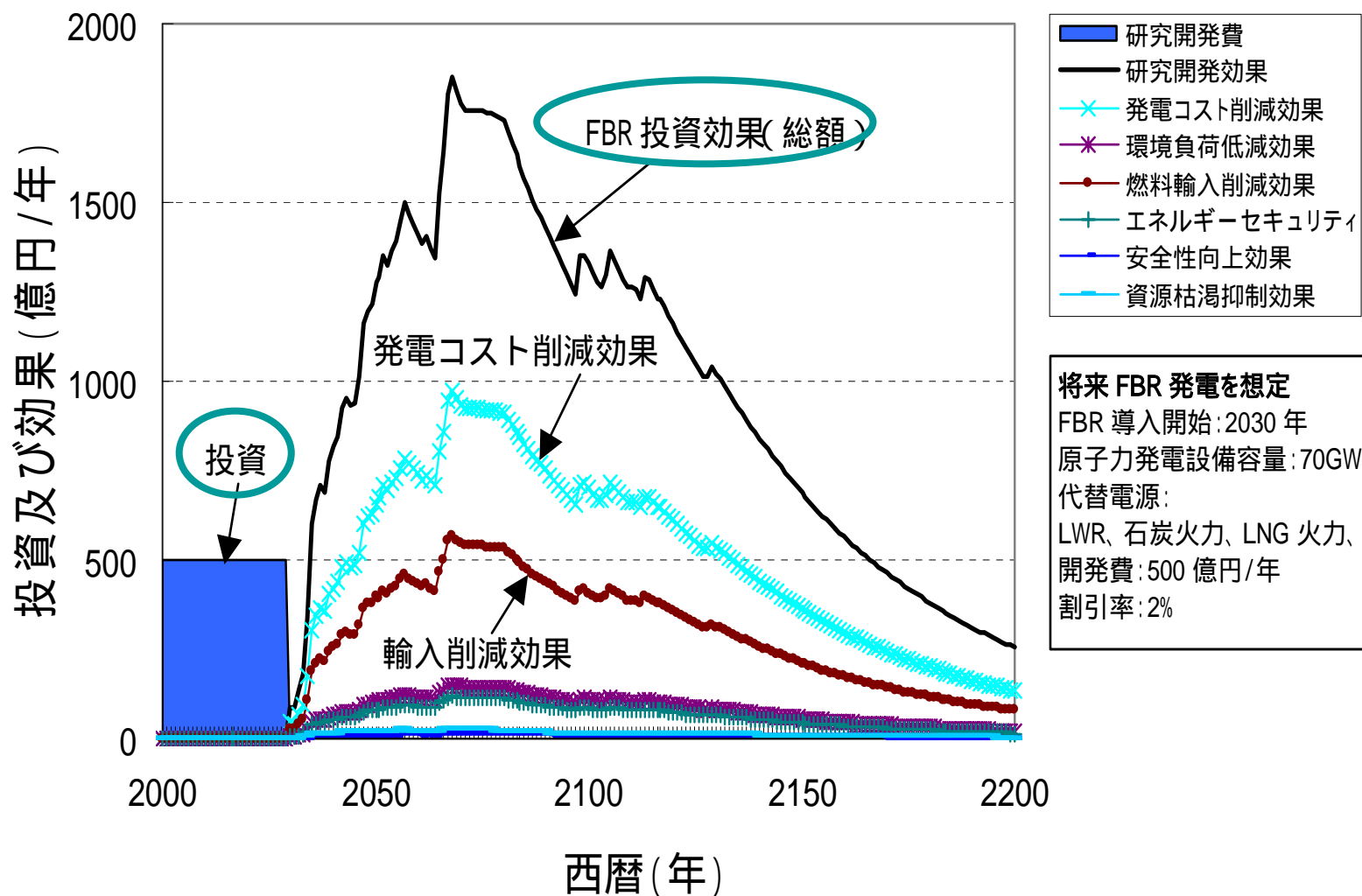
## ナトリウム炉の経済性追求



# FBRサイクルプラント全体概念図

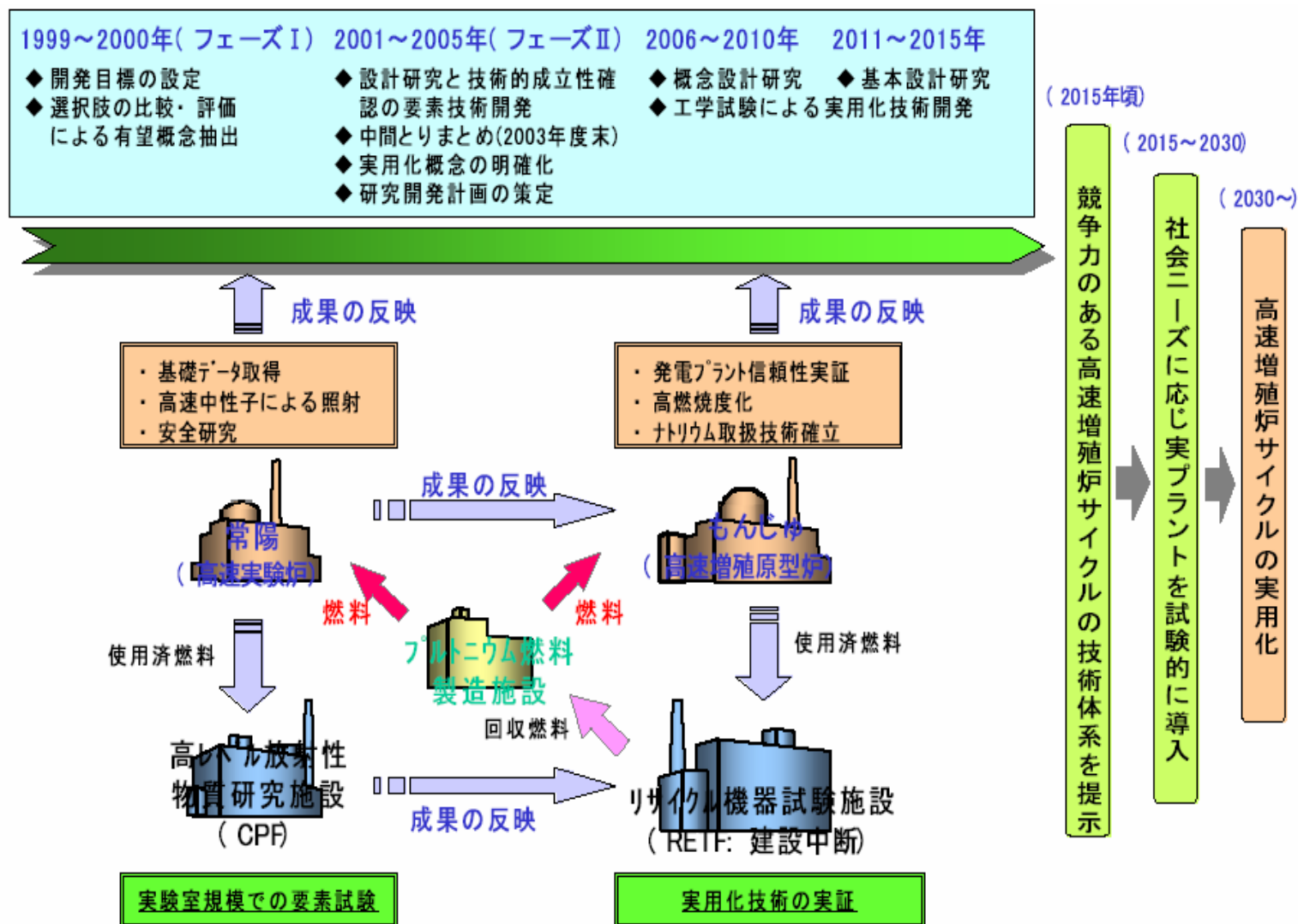


# FBRサイクル R & D投資対効果評価例



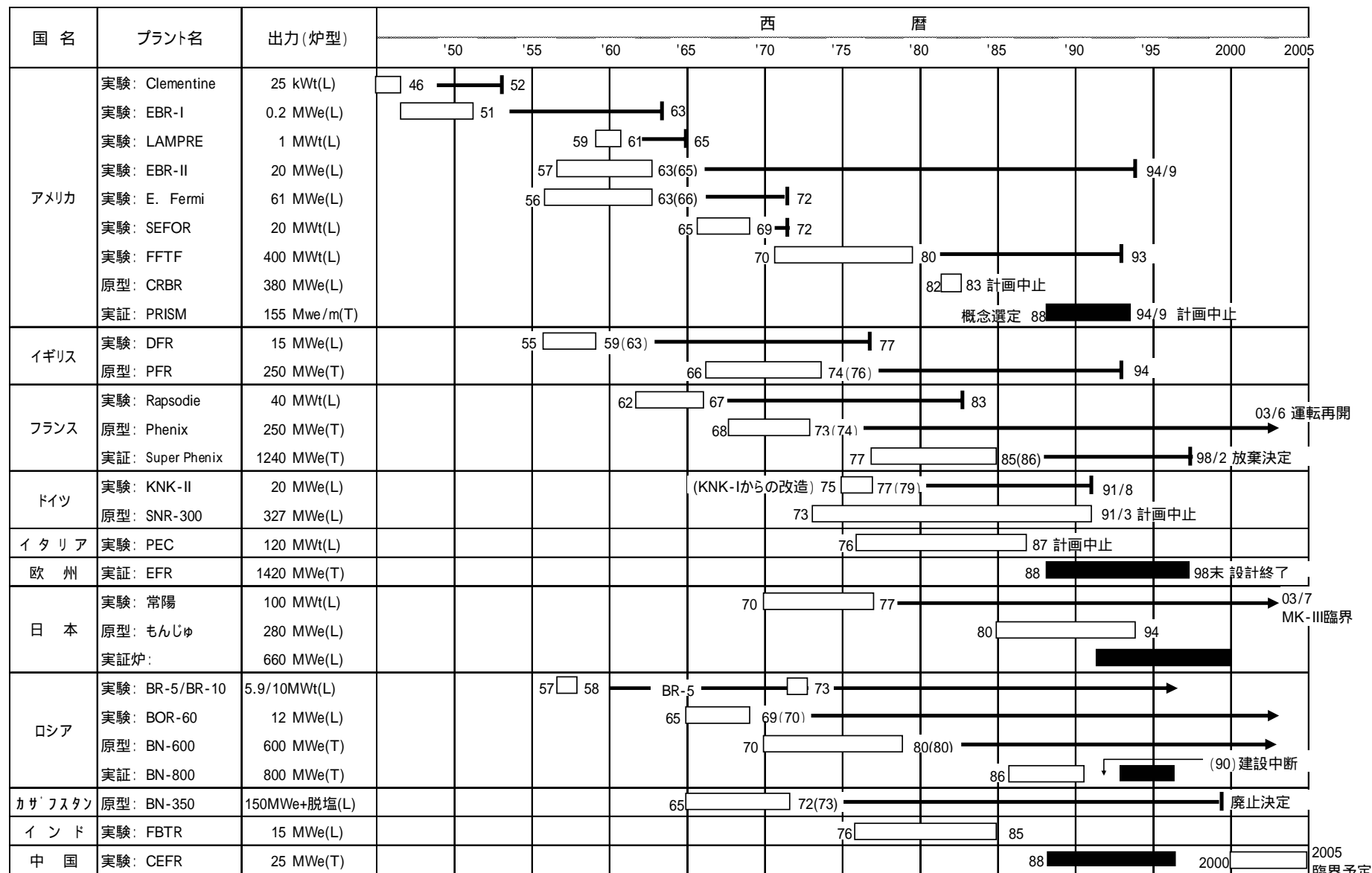
特殊法人改革では「費用対効果評価」が求められています。  
 左図の試算では、効果は投資の11倍程度となりました。

# FBRサイクル実用化に向けた研究開発の展望





# 世界の高速増殖炉のスケジュール



注) 着工 □ 初臨界(運転) — 閉鎖 → 運転中 ■ 計画中 (L): ループ型 (T): タンク型  
核融合研究開発基本問題検討会(030716)サイクル機構大洗可児吉男

# Gen. IV 技術開発

複数の原子力エネルギーシステム開発

2030 年までに実用化

大幅な技術革新

- 持続可能性
- 安全性と信頼性
- 拡散抵抗性と物質防護
- 経済性

あらゆる市場で競合可能

多様なエネルギー利用:

電気、水素、淡水化、熱



2002年12月 Gen.IVロードマップ発刊

# Generation IV Systems

	<i>Acronym</i>	<i>Neutron</i>	<i>Deployment Date</i>
<i>Gas-Cooled Fast Reactor</i>	<i>GFR</i>	<i>Fast</i>	<i>2025</i>
<i>Lead-Cooled Fast Reactor</i>	<i>LFR</i>	<i>Fast</i>	<i>2025</i>
<i>Molten Salt Reactor</i>	<i>MSR</i>	<i>Thermal</i>	<i>2025</i>
<i>Sodium-Cooled Fast Reactor</i>	<i>SFR</i>	<i>Fast</i>	<i>2015</i>
<i>Supercritical Water-Cooled Reactor</i>	<i>SCWR</i>	<i>Thermal – (Fast)</i>	<i>2025</i>
<i>Very High Temperature Reactor</i>	<i>VHTR</i>	<i>Thermal</i>	<i>2020</i>

# 核融合研究開発について

## 開発シナリオ、戦略

1. 核融合の研究開発にあたっては、中長期的な原子力エネルギー政策とのバランス、重点的投資の時期及び緊急性、投資対効果等の慎重な考慮が必要
2. 明確でより現実的なロードマップ(decision point含む)の提示
  - 原理・技術を追求する当面のベクトル
  - 実用技術としての現実的な拡大利用の道程  
(工学的な意味の主要判断材料が整うまでは困難か?)
3. 特に環境負荷(地球温暖化)対策としての早期導入(Fast Track)の実現可能性について説得力のあるロードマップ必要  
(短期的な効能を志向することは費用対効果からみてどうか)
4. 技術的実現性について、実用化に至るまでに要する資金や期間についての評価が必要。その際、原型炉から実用化段階に至る研究開発が極めて経費と期間を要する(特に経費)ことに留意すべき。許認可対応(基準・考え方の整備、データ取得等)にも配慮。
5. 費用対効果の評価は今後重要性を増大。

# 核融合研究開発について

## 経済性

6. 10円/kWhの発電コストの達成に対する技術的な根拠に乏しく、単なる目標値としか見えない。トータルシステムの設計を詰め、10円/kWh達成のための技術課題の整理が必要。
7. また、電力自由化等により将来一層の経済性向上を求められる状況下では、10円/kWhの目標設定は甘く(現在の軽水炉でさえ5～6円/kWhであり)、より積極的な姿勢が必要。

## システム、安全性

8. 核融合炉のエネルギーシステムとしての開発が重要。(エネルギーを取り出すブランケットも含めたプラントシステム全体として、バランスを持たせた研究開発の実施)
9. 施設に内在する放射性物質のリスクのポテンシャルが低いが、これは安全確保への負担が相対的に少なくてすむ(確保が比較的容易)ということ。実際のシステム(ブランケットや冷却系含む)に沿った安全性の議論が必要。

# 核融合研究開発について

- 10 . 設備の信頼性、運転信頼性の観点からは、ブランケットの構造材料が過酷な条件に晒されること、炉心プラズマの安定運転に対する見通しが実証されていないことなどが課題。材料によって冷却材も異なってくる。材料開発の計画的達成が不可欠。

## 廃棄物

- 11 . 金属の放射化によって生じる高 廃棄物や低レベル廃棄物は大量に排出され、その量は核分裂炉に比べてはるかに多く、エネルギー取り出し技術と併せ、これらを低減する技術が重要。  
(核融合では中性子発生部とは異なる比較的広い周辺の物質との薄い反応)
- 12 . 材料の開発が不透明な状況の中では、一定の運転期間毎に炉壁を取り替えることになる可能性がある。高 廃棄物が大量に発生することへの対策とともに遠隔保守技術の開発が不可欠となる。

以上