

# **FBRサイクル実用化研究開発(FaCT) フェーズⅠの成果取りまとめ状況**

**平成22年7月13日**

**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**

# 目 次

- 1. FBRサイクルの開発意義**
- 2. 開発の現状(革新技術の採否等の判断  
状況と現状の技術レベル)**
- 3. FBRサイクルシステム概念の性能目標  
への達成度評価**

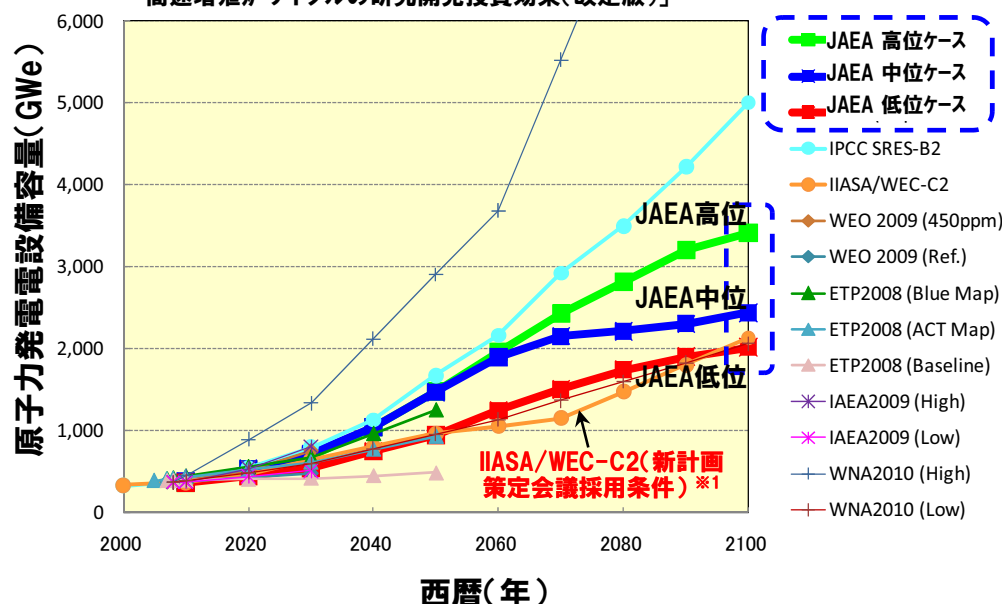
# **1. FBRサイクルの開発意義**

# 必要性と意義(1)

## ーウラン資源の有効利用と海外依存からの脱却ー

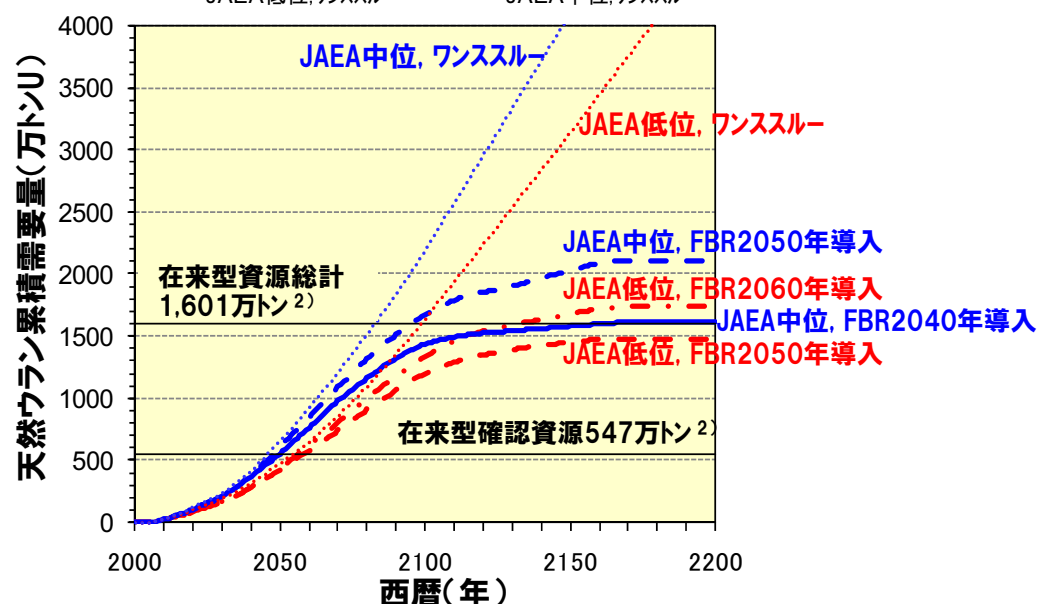
- 将来の原子力発電電力量として、近年の他機関の低位ケースと同等、あるいは中庸なケース(JAEA低位～中位ケース)を想定しても、軽水炉ワンスルーでは、21世紀終盤には在来型資源総計1,601万トンの天然ウランを消費し尽くす。上記を防止するためには、天然ウラン資源をほとんど消費しないFBRを遅くとも2040年から2050年までに全世界で本格的に導入する必要がある。
- 日本はFBR導入によって、最終的にウラン資源の海外依存から脱却可能となり、エネルギーセキュリティの確保につながる。

※1: 第17回新計画策定会議(平成17年1月28日)参考資料2  
「高速増殖炉サイクルの研究開発投資効果(改定版)」



主要機関による原子力発電電力量の将来予測 1)

--- JAEA低位, 2050年導入 --- JAEA低位, 2060年導入  
--- JAEA中位, 2040年導入 --- JAEA中位, 2050年導入  
..... JAEA低位, ワンスルー ..... JAEA中位, ワンスルー



天然ウラン累積需要量の推移(FBR導入と軽水炉ワンスルー) 3)

1) IASA/WEC: "GLOBAL ENERGY PERSPECTIVES", IASA/WEC(1998), IPCC/SRES: "Special Report on Emissions Scenarios", IPCC(2000), WEO: "World Energy Outlook 2009" IEA(2009), ETP: "Energy Technology Perspectives" IEA(2009), IAEA: "Energy, Electricity and Nuclear Power Estimates for the Period up to 2030, 2009 Edition" IAEA(2009), WNA: "The WNA Nuclear Century Outlook" WNA(2010)

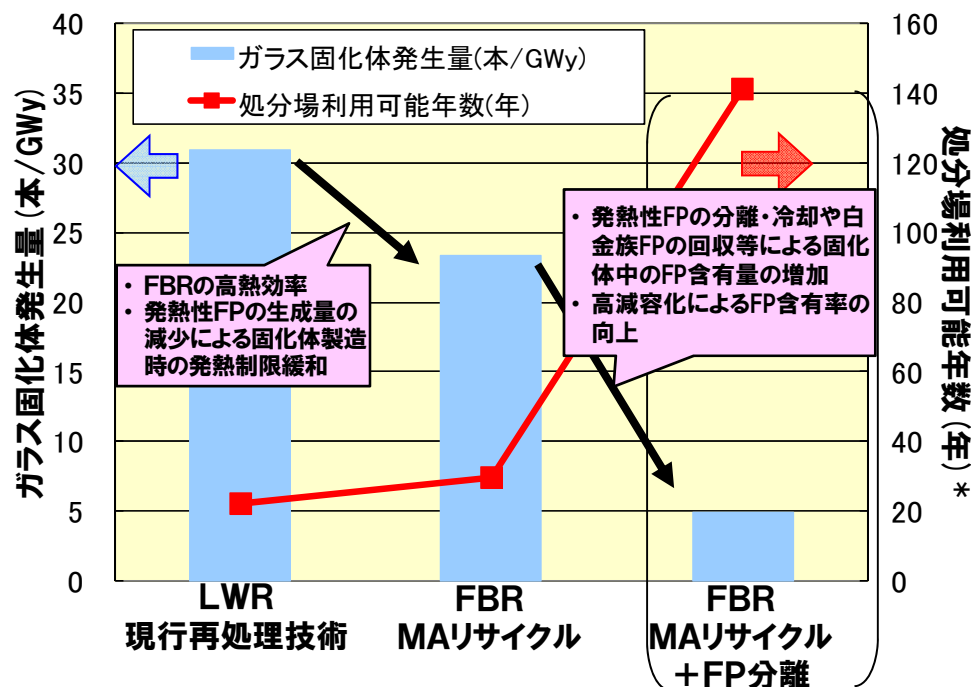
2) Uranium 2007, OECD/NEA-IAEA

3) 日本原子力研究開発機構試算

# 必要性と意義(2)

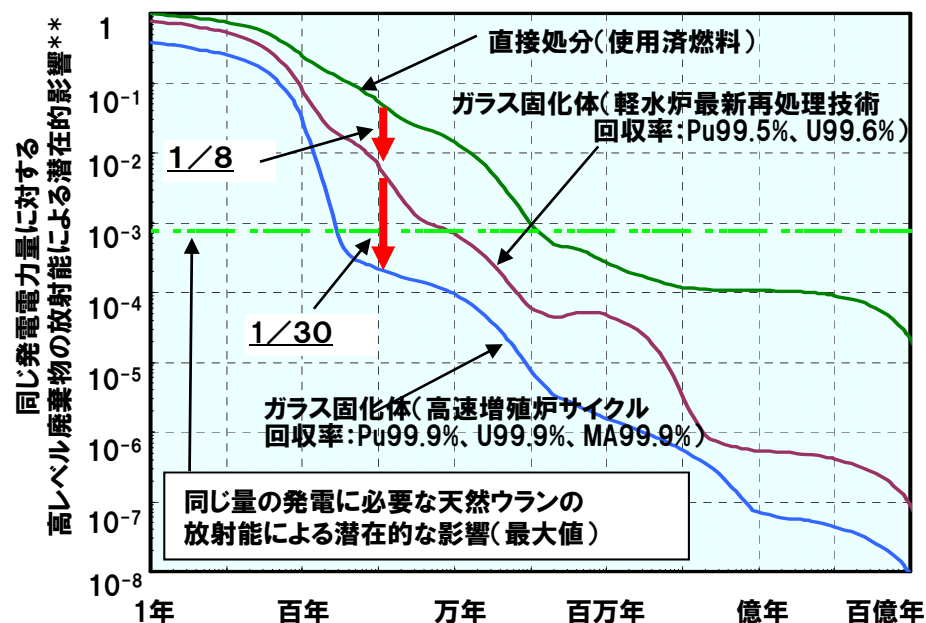
## －高レベル放射性廃棄物量の削減と放射能による潜在的影響の低減－

- FBRサイクルでは、高熱効率や発熱性FP生成量の減少等により高レベル放射性廃棄物の発生量を減少できる可能性がある。さらに、潜在的な有害度を小さくすること等、高レベル放射性廃棄物に起因する環境への負荷を低減することが期待できる。
- 濃縮工場で発生、貯蔵している劣化ウランについても有効に利用できる。



\* )処分場利用可能年数(年)

原子力発電設備58GWe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。



\*\* )高レベル放射性廃棄物と人間との間の障壁は考慮されておらず、高レベル放射性廃棄物の実際の危険性ではなく、潜在的な有害度を示している。使用済燃料の1年目の潜在的影響を1とした相対値。

## **2. 開発の現状**

**（革新技術の採否等の判断状況と現状の技術レベル）**

# 革新技術の採否判断評価基準(炉システム)

- 革新技術単体としての技術的成立性の確認
- 革新技術を適用した機器等を組み込んだシステムとしての成立性見通し

研究開発の成果目標(クライテリア)の達成状況を踏まえ、  
以下の視点から評価

## a.設計成立性

熱応力、地震力等に対する構造健全性、ガス巻き込み防止等の機器への要求機能に対する成立性等

## b.製作性

新材料の採用可能性、大型鍛造品等の構造部材の製作可能性、構造物としての製作性等

## c.運転・保守性

想定される規制要求検査、自主検査及び補修への対応可能性、アクセス性の程度等

## d.経済性

個々の技術毎及びプラント全体での建設費等経済性の評価を行う。

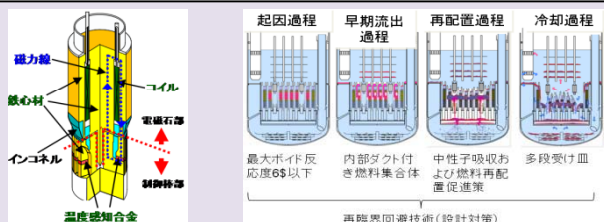
# 炉システムに係る革新技術の採否判断に関する3者合意の概要(1/2)

## ②安全性向上技術 (SASS、再臨界回避技術)

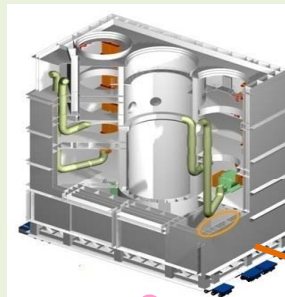
### 【議論の内容】

- ・受動的炉停止系(SASS)  
制御棒保持力、切り離れ温度、応答性、炉停止能力は成立性あり。
- ・再臨界回避技術  
起因過程、早期流出過程、再配置過程、冷却過程のシナリオの成立性あり。

【合意内容】:採用可能と判断。



「採用」:実用炉に採用できる見通しが得られ、実証炉の概念設計に適用する技術として対象とできる技術であること

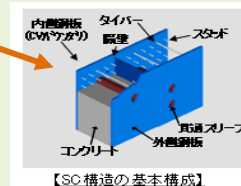


## ⑨SC造格納容器

### 【議論の内容】

安全上想定する事象に対する支持及び自立機能並びにバウンダリ機能、大型ユニット工法の成立性等の成立性が見込まれる。

【合意内容】:採用可能と判断。

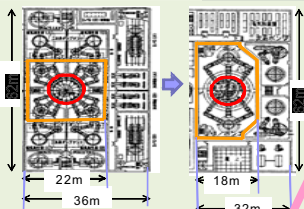


## ④9Cr鋼製大口径配管を用いた2ループシステム

### 【議論の内容】

配管の構造健全性やLBB成立性等の設計成立性が見込まれ、配管の製作性及び運転保守性が確保できる。

【合意内容】:採用可能と判断。



## ⑦自然循環除熱式崩壊熱除去システム

### 【議論の内容】

崩壊熱除去に関する安全設計や熱交換器の除熱性能の成立性が見込まれ、9Cr鋼製熱交換器の製作性及び運転保守性が確保できる。

【合意内容】:採用可能と判断。

## ⑧簡素化燃料取扱システム

### 【議論の内容】

安全評価事象の選定と評価、燃料交換機の耐震性、位置決め精度、2集合体移送ボットの除熱性能、燃料洗浄システムのナトリウム除去性能等の成立性が見込まれる。

【合意内容】:採用可能と判断。

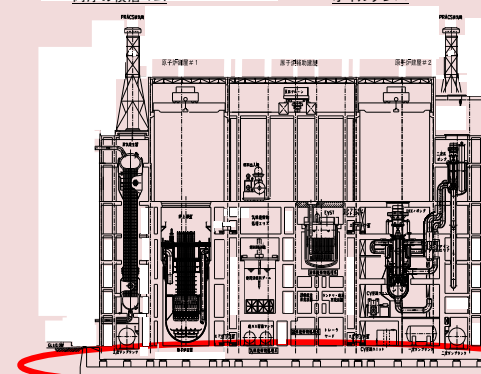


## ⑩高速炉用免震システム

### 【議論の内容】

免震性能、配置性及び指針基準類の適用性について成立が見込まれ、製作性及び運転保守性も確保できる。

【合意内容】:採用可能と判断。





# 炉システムに係る革新技術の採否判断に関する3者合意の概要(2/2)

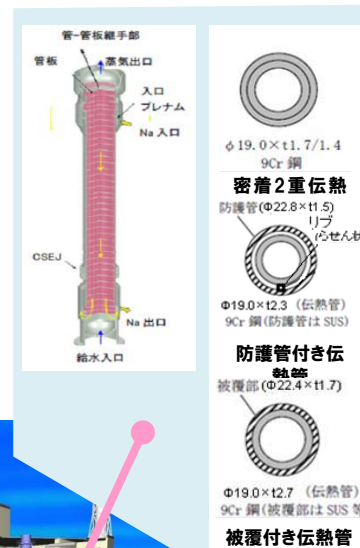
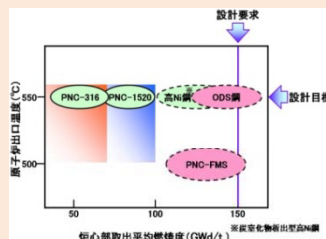
## ①高燃焼度炉心・燃料

### 【議論の内容】

- ・経済性向上のため、高い燃焼度(150GWd/t)と炉心出口温度(550℃)が見込めるODS鋼被覆管を開発してきた。
- ・海外照射試験でODS被覆管燃料ピンの破損事例や被覆管肉厚内で特異な組織を確認。ただし、原因、再発防止の方向性(品質安定化)も概ね把握。
- ・再処理時の溶解量が多く、分離工程を追加するなどの対策が必要。
- ・ODS鋼被覆材の開発見通し合意を得るには追加の実験的検討が必要。
- ・代替として高燃焼度を維持しつつ、設計温度を下げる案も協議されたが、経済性への影響が少ない高Ni鋼を検討することを選択。

### 【合意内容】

- ・高燃焼、高温設計(550℃)を志向。
- ・2010年度末:ODS鋼の再現確認による破損原因等の究明及び改善可能性の評価。高Ni鋼の高温強度等の特性を評価。不採要因の有無を判断。
- ・2013年度末:ODS鋼改善材料の試作・試験により改善(品質安定性)見通しを評価。高Ni鋼の炉外照射試験評価等により見通しを検討し、以後の照射による性能評価計画を立案。最終的に代替材開発の要否を含めて被覆管材料を選定。
- ・開発時期の見直しに対応し、実証炉初期装荷用にPNC316を採用。



## ⑥直管2重伝熱管蒸気発生器

### 【議論の内容】

- ・検査日数が長い。:(電力殿)
- ・2重伝熱管の安全ロジックに関する許認可性に懸念。:(電力殿)
- ・国内に密着2重伝熱管の製造設備がなく投資が必要。

### 【合意内容】

- ・以下の評価を踏まえ、伝熱管仕様及び管板について、2010年9月末までに仕様を決定する。
- (密着2重伝熱管):検査性向上について検討。また、現在、国内には、製造設備が無い場合、製造設備の整備費用を算定し投資の合理性を評価。
- (代替伝熱管):「単管+防護管」、「被覆付き伝熱管」について成立性の見通しを評価。
- (管板):大型管板の製作性、工場での取り扱い性について評価。
- ・蒸気発生器を1系統あたり複数基配置する案を代替技術として設定する必要性についても9月末までに決定する。

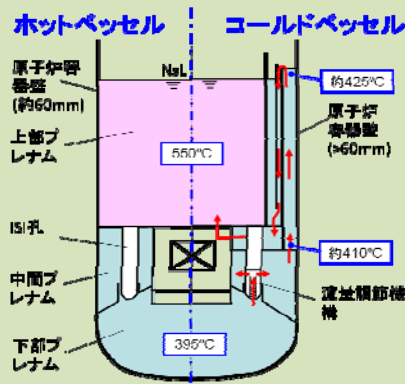
## ③コンパクト化原子炉構造

### 【議論の内容】

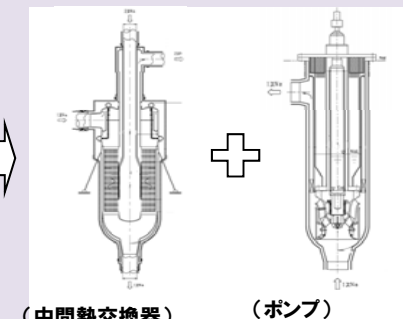
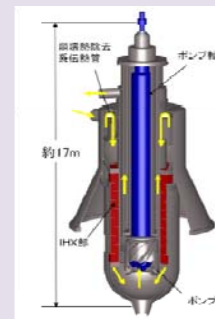
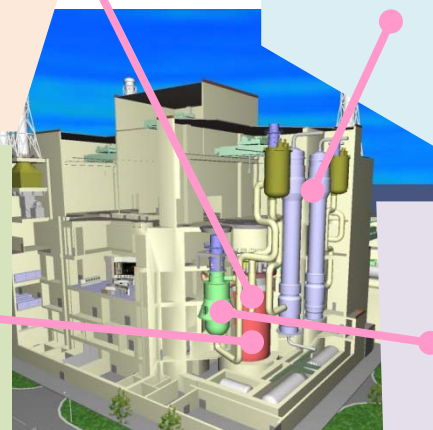
- ・耐震条件が厳しくなったため、炉容器肉厚が増加(30→60mm)。熱応力抑制のため、起動時間が増加(1→4日)。
- ・耐震設計裕度、耐熱性裕度は、不十分。:(電力殿)
- ・起動日数が長く運用性が劣る。:(電力殿)
- ・代替の炉壁冷却構造は、現時点では、達成見通し評価未完了。

### 【合意内容】

- 以下の検討を踏まえ、2010年9月末までに採用する技術を決める。
- ・ホットベッセル概念:裕度の増大対策を検討。
- ・コールドベッセル概念:構造概念の具体化と健全性の評価。



「採用」:実用炉に採用できる見通しが得られ、実証炉の概念設計に適用する技術として対象とできる技術であること



## ⑤ポンプ組込型中間熱交換器

### ポンプ組込型中間熱交換器

### 分離概念(例)

### 【議論の内容】

- 以下の構造対策によりポンプ軸長が伸びる可能性があるため、回転安定性を確認する必要がある。
- ・中間熱交換器上部プレナムの製作性確保のために構造見直しの可能性。
- ・コールドレグ配管入口部での液中渦対策のため配管口径増大の可能性。

### 【合意内容】

- ・ポンプと中間熱交換器を分離する構造を代替概念として設定する必要性について検討を進め、2010年9月末までに採用する技術を決める。

# 革新技术の採否判断評価基準(燃料サイクル)

## ■ 2010年時点における「採用」判断の定義

これまでの研究開発の進捗と設計評価の結果から工学的に判断して、工学規模での確認等の課題はあるが、**今後研究開発を継続していけば、実用施設に採用できる見通しがある**と判断される技術であること。

## ■ 機構の採否判断の視点：

### □ 第一の観点：**技術的成立性**の有無

革新技术が技術的に成立するとの見通しを示し得る  
(個々の革新技术に対して予め定めた成果目標に対する達成度の評価)

### □ 第二の観点：**開発目標・設計要求への影響(貢献度)**

開発目標：安全性/信頼性、持続可能性(環境保全性、廃棄物管理性、資源有効利用性)、経済性、核不拡散性

革新技术を採用・開発することの意義・必要性の確認  
(システム全体における経済性、廃棄物発生量、U-TRU回収率、核不拡散性等の評価に基づく分析)

## ■ 電力事業者(原電)の視点：

電力としては、機構の評価結果を再確認すると共に、施設の停止リスク等技術の**信頼性の観点を重視**して採否について検討・評価

# 再処理技術に係る革新技术の採否判断に関する合意の概要

## ◆ ① 解体・せん断技術

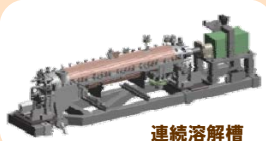


機械式解体装置とせん断機

- 「もんじゅ」模擬集合体を用いた解体試験にて、2時間程度で解体が可能であることを確認。ただし、切断時に砥石が破損する事象が複数回発生。
- 「もんじゅ」模擬集合体を用いたせん断試験にて、2時間以内のせん断及び短尺せん断が可能であることを確認。

【合意の内容】  
**採用可能**  
解体技術については、砥石破損の防止方策の有効性を2010年度に確認する。

## ◆ ② 高効率溶解技術



連続溶解槽

- 使用済燃料溶解試験にて、400gHM/Lまでの高効率溶解を確認し、シミュレーションにより目標(500gHM/L)達成見通し。2010年度に500gHM/Lを確認予定。
- 連続溶解槽モックアップ試験にて、ハルの排出性、燃料の保持性を確認。

【合意の内容】  
**採用可能**

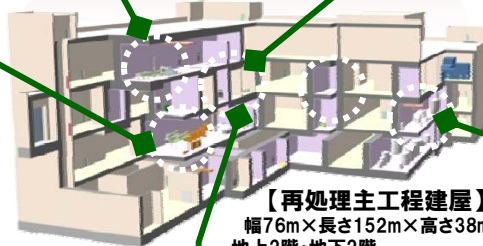
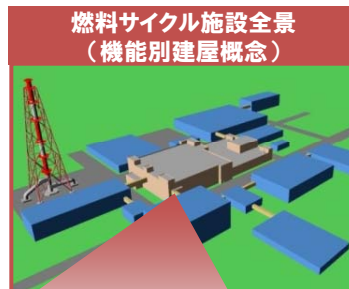
## ◆ ⑥ 廃棄物低減化(廃液二極化)技術

- ソルトフリー洗浄試薬の性能試験にて、Zr、Ruについて目標とした洗浄性能の達成を確認。Puについては未確認。
- 試薬分解試験において分解性能は目標達成。さらに、分解生成物の気相への移行率は十分低いことを確認。ただし、気相中での挙動評価が課題。

【合意の内容】  
**2013年までに決定**

投資対効果を考慮しつつ、廃棄物低減化技術に係る研究開発プログラムを再構築した上で、2013年度末までにサイクル技術全体の開発計画の中で別途協議。

燃料サイクル施設全景  
(機能別建屋概念)



【再処理主工程建屋】  
幅76m×長さ152m×高さ38m  
地上2階・地下2階

## ◆ ③ 晶析技術による効率的ウラン回収技術

- 所定のU回収率条件では、液体不純物のDFは目標達成(DF=100)したが、固体不純物(Cs、Ba)は不足。
- 装置開発では0℃前後の低温域での晶析システムや非正常事象検知方法の有効性を確認。



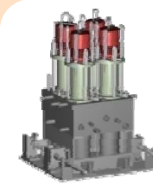
晶析装置と結晶洗浄器

【合意の内容】  
**2015年までに決定**

技術的成立性に関する課題についてR&Dで見通しを確認した上で、2015年までに採否を再協議し実用化までのR&Dの進め方を決定。リスク回避の観点からコプロセス法についても並行してR&Dを実施。

## ◆ ④ U-Pu-Npを一括回収する高効率抽出システム

- 使用済燃料溶解液を用いた試験にて、目標とした回収率・除染係数の達成見通し。
- 遠心抽出器試験において、目標とした装置性能(流量、段効率)の達成及び装置安定性を確認。
- 機械的耐久性は3年・耐放射線性は2年までを達成(さらに継続中)

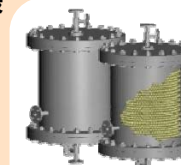


遠心抽出器

【合意の内容】  
**採用可能**

## ◆ ⑤ 抽出クロマト法によるMA回収技術

- 複数の抽出剤候補から最も有望なTODGAとR-BTPの組み合わせを選定。
- FPのDFはほぼ目標達成見通し(Tc以外は100以上)であるが、MA(Am・Cm)回収率は不足(95%)。



MA抽出クロマト塔

- 火災・爆発に関する安全性確保に関して通水による除熱、吸着材拔出による発熱源排除などの対策が実施可能。

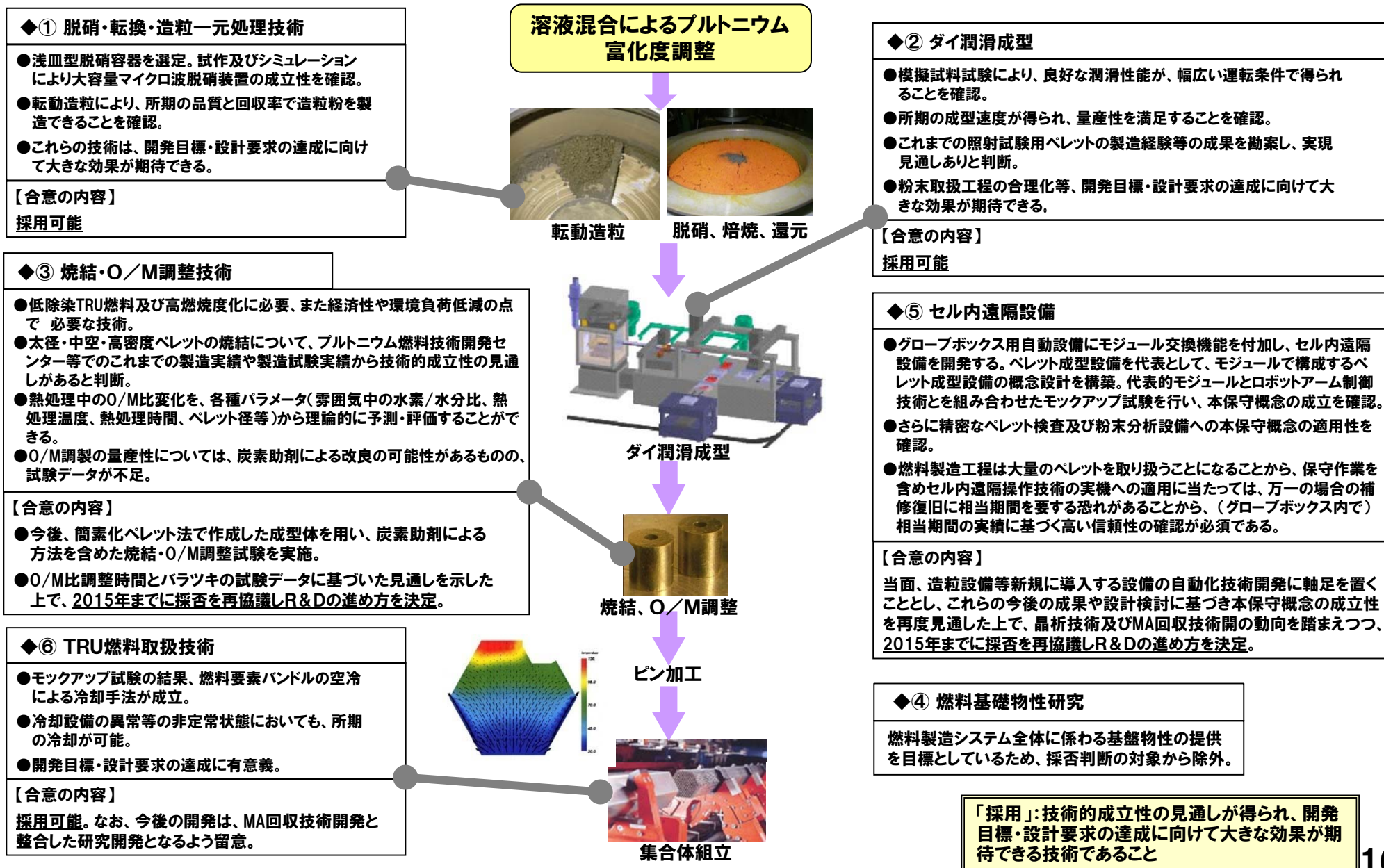
【合意の内容】  
**2015年までに決定**

技術的成立性に関する課題についてR&Dで見通しを確認した上で、2015年までに採否を再協議し実用化までのR&Dの進め方を決定。

「採用」: 技術的成立性が見通しが得られ、開発目標・設計要求の達成に向けて大きな効果が期待できる技術であること

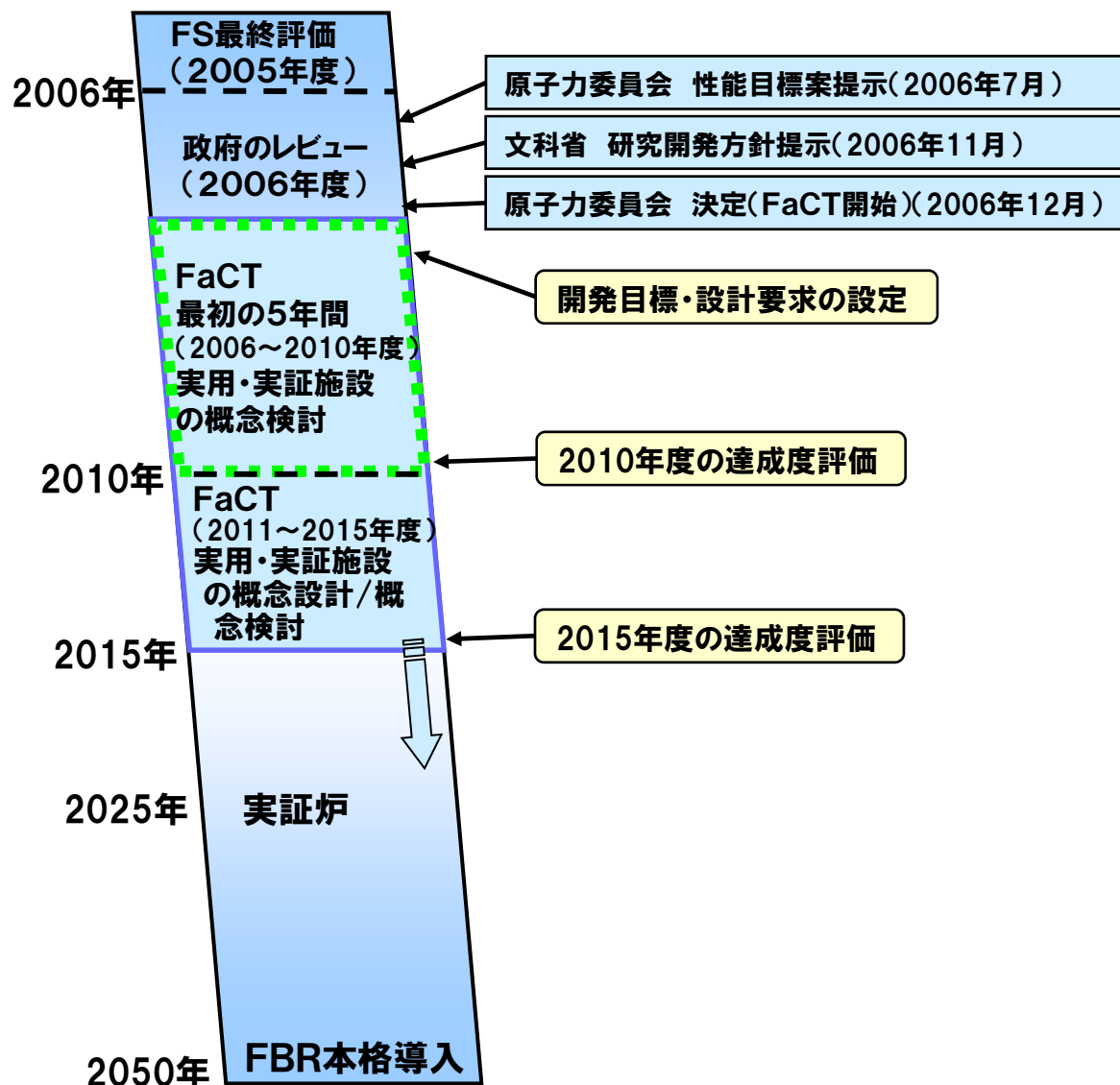


# 燃料製造技術に係る革新技術の採否判断に関する合意の概要



### **3. FBRサイクルシステム概念の 性能目標への達成度評価**

# 原子力委員会の性能目標とFaCTの開発目標と設計要求の関係



## 開発目標、設計要求の設定

○ 原子力委員会が提示した性能目標の細分化、定量化  
**開発目標**

- 2050年頃の本格導入時におけるFBRサイクル技術仕様の目標。性能目標を具体化、細分化したもの。

**設計要求**

- 開発目標の達成に向け、2010年(FaCTの最初の5年間)までに行う実用施設の設計の方向性をできるだけ定量的に示すもの
- 設計の努力目標として高い目標値を設定

## 開発目標、設計要求の適宜見直し

- 原子力を取り巻く状況、国際的な動向を考慮し、開発目標、設計要求は、適宜、見直しを行う。
- 2010年度の達成度評価を開始するに当たり、見直しの必要性を検討
  - 一部の追加(テロによる航空機墜落への配慮等)を除き、現時点で大きな見直しは不要と判断

# 原子力委員会の性能目標とFaCTの開発目標の関係

原子力委員会の性能目標		FaCTの開発目標	
安全性	<ul style="list-style-type: none"> <li>・地震、ヒューマンエラー、機械の故障等の考慮</li> <li>・シビアアクシデントの発生確率が十分低い</li> <li>・従業員と公衆の健康リスクが十分小さい</li> </ul>	安全性及び信頼性	<ul style="list-style-type: none"> <li>・SR-1 次世代軽水炉及び関連するサイクル施設と同等の安全性の確保</li> <li>・SR-2 次世代軽水炉及び関連するサイクル施設と同等の信頼性の確保</li> </ul>
経済性	<ul style="list-style-type: none"> <li>・将来の他エネルギー技術の発電コストと競合できる</li> <li>・投資リスク(初期投資、建設期間)も重視</li> </ul>	経済性	<ul style="list-style-type: none"> <li>・EC-1 発電原価</li> <li>・EC-2 投資リスク</li> <li>・EC-3 外部コスト</li> </ul>
環境影響	<ul style="list-style-type: none"> <li>・放射性廃棄物発生量が軽水炉技術のそれを超えない</li> <li>・マイナーアクチニド回収による処分場面積の低減</li> </ul>	持続可能性	<ul style="list-style-type: none"> <li>・EP-1 平常時の放射線の影響</li> <li>・EP-2 環境移行物質の抑制</li> <li>・WM-1 廃棄物の発生量の低減</li> <li>・WM-2 廃棄物の質の向上</li> <li>・WM-3 潜在的有害度の低減</li> </ul>
資源の利用効率	<ul style="list-style-type: none"> <li>・1をある程度超える増殖比</li> <li>・導入速度の向上のために倍増時間の短縮にも留意</li> </ul>	資源有効利用性	<ul style="list-style-type: none"> <li>・UR-1 増殖比</li> </ul>
核拡散抵抗性	<ul style="list-style-type: none"> <li>・Puへのマイナーアクチニド混合による核不拡散、核物質防護の強化</li> <li>・国際燃料供給ビジネスモデル時は倍増時間短縮が重要</li> </ul>	核不拡散性	<ul style="list-style-type: none"> <li>・NP-1 核不拡散</li> <li>・NP-2 核物質防護のシステム設計と技術開発</li> </ul>
軽水炉と高速炉の共生	<ul style="list-style-type: none"> <li>・軽水炉と高速炉を共存させる燃料サイクルシステムの整備</li> </ul>		

# 2010年度の達成度評価の目的

- **2010年度時点までの設計の進捗の範囲で、目標への達成度を評価**
  - ・ **革新技術採否判断結果を踏まえたプラント概念を対象**
    - － 評価対象とした施設： 全ての革新技術を採用したプラントで、原子炉はNOAK（150万kWeのツインプラント、増殖比は1.1、MA均質装荷）、再処理は先進湿式法（200tHM/年）、燃料製造は簡素化ペレット法でセル製造（200tHM/年）を想定
    - － さらに、代替技術の採用による目標達成への影響度を評価
  - ・ **開発目標、設計要求への達成度をできるだけ定量的に評価（設計の進捗により、定量化の程度は異なる）。**
  - ・ **個々の開発目標、設計要求に対する定量評価結果をもとに総合的に判断し、原子力委員会の性能目標を達成していることを評価**
  - ・ **課題（達成度が不十分なところ）と今後の対応方針を明確にする**



# 対象としたプラント概念(炉)

将来の基幹電源となり得る「安全性、信頼性、経済性」を実現し、  
ウラン資源の持続的利用を達成できるナトリウム冷却高速増殖炉

## プラント概念の特徴

### ◆安全性向上

- 受動的な炉停止機構(制御棒の自重挿入)
- 自然循環による炉心冷却

### ◆信頼性向上

- ナトリウム配管・容器の2重化
- 蒸気発生器伝熱管の2重化
- ナトリウム中機器・構造の保守性向上

### ◆経済性向上

- 燃料の高燃焼度化(15万MWd/t)と18~26ヶ月の長期運転サイクル
- 2ループ構成で高出力化(150万kWe級)
- 高クロム鋼による配管短縮
- ポンプ組込型中間熱交換器

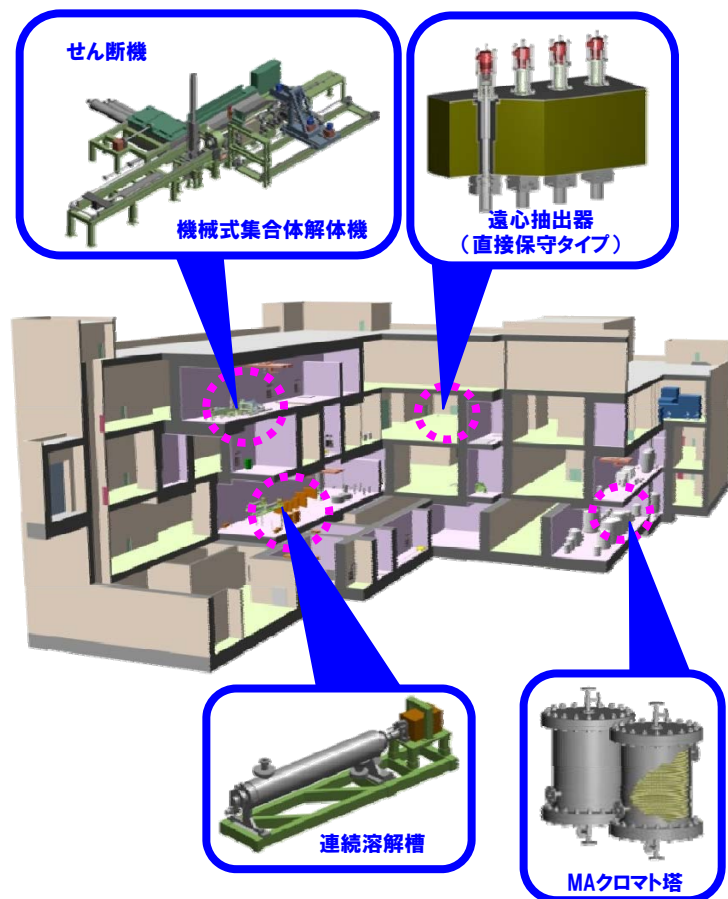
## 主要仕様及び性能

項目	性能
炉形式	Na冷却アドバンスドループ型
炉心・燃料形式	均質2領域炉心(MOX燃料高内部転換型)
燃料集合体形式	改良内部ダクト型集合体
ヒートバランス	1次系:550/395℃、2次系:520/335℃
ループ数	2ループ
崩壊熱除去系	直接炉心冷却系×1、1次系共用型炉心冷却系×2系統
主循環ポンプ及び中間熱交換器	1次系ポンプ組込型IHX
蒸気発生器形式	一体貫流型縦置有液面直管型2重管式(密着2重管)
構造材料	原子炉容器:316FR鋼、冷却系機器:改良9Cr-1Mo鋼
免震方式	高速炉用免震装置による建屋免震
プラント熱効率	約42%
増殖比	1.03, 1.1, 1.2
稼働率	90%以上



# 対象としたプラント概念(再処理)

## <F再単独プラント概念>



【再処理主工程建屋】  
幅76m×長さ152m×高さ38m  
地上2階・地下2階

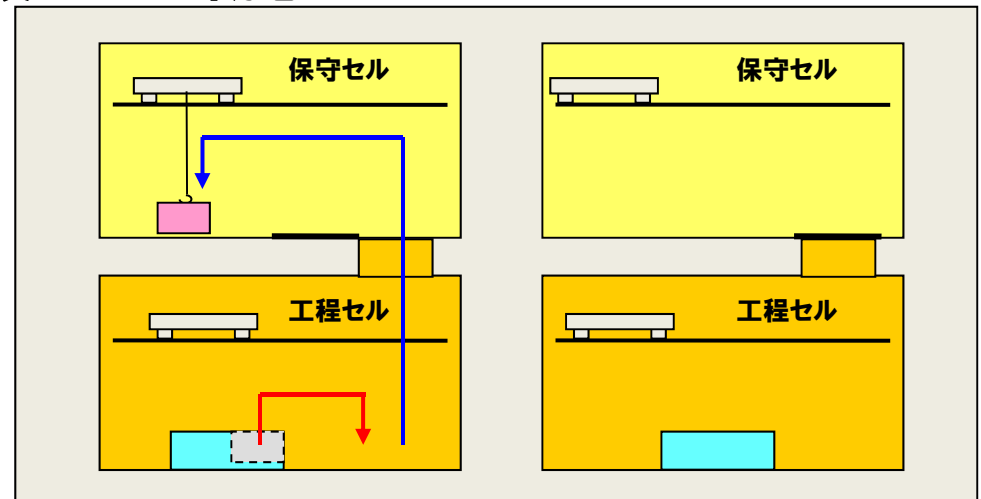
### F再単独プラントの主要スペック

項目	仕様
再処理能力	200tHM/y
年間操業日数	200日
処理対象燃料	1,500MWeのJSFRから排出される使用済燃料
・増殖比	1.1
・全炉心平均燃焼度	89.1GWd/t
・冷却期間	4年
・炉心燃料	Pu富化度(内側/外側):18.2/20.6wt%
	燃料形態(炉心/軸ブラ):中空MOX/中実UO <sub>2</sub>
・径方向ブランケット	燃料形態: 中実UO <sub>2</sub>
炉心/径方向ブランケット混合処理比率	内側炉心燃料:外側炉心燃料:径方向ブランケット燃料=3:3:1

# 対象としたプラント概念(燃料製造)

## 実用燃料施設プラント概念

対象燃料	低除染TRU燃料
年間製造量	200tHM
プロセス	簡素化ペレット法
建家配置	機能別独立建家
工程配置	小型セル方式（1セル1工程）
臨界管理	質量管理
保守設備	工程セル毎に専用設備
特徴	実現性が高い。 故障停止影響を限定できる。 保守設備が増大



### 小型セルにおける遠隔保守概念

## FaCT燃料製造設備概要

工程	設備能力	設備系列数	備考
溶液受入	TRU溶液用3,700リットル U溶液用4,600リットル	8 (U溶液用4、TRU溶液用4)	貯槽容量は燃料製造2.5日分に相当。
富化度調整	貯槽容量2,900リットル	6	燃料製造2.5日分に相当
脱硝	5kgHM/バッチ 1h/バッチ	10	大径浅皿型脱硝容器を採用。 脱硝・焙焼・還元の3ステージで同時処理。 還元ステージは2バッチ分を一括して2時間で処理。
造粒	5kgHM/バッチ、1h/バッチ	10	水をバインダとした転動造粒。
バッチ拡大混合	180kgHM/バッチ	4	造粒粉180kgHM(脱硝・造粒36バッチ分)を混合。
成型	12連パンチ、7.5サイクル/分	4	ダイ潤滑方式のレシプロ式成型機。
焼結・O/M調整	30kgHM/バッチ、30h/バッチ	26	炉心燃料用焼結・O/M調整炉。焼結後に雰囲気切り替えて引き続きO/M調整を行う。
	30kgHM/h	2	ブランケット用連続焼結炉
ペレット検査	70,000個/日	4	外観・寸法・重量検査。

## **各性能目標に対する達成度評価結果の概要**

# 性能目標に対する達成度評価の結果(安全性)

	原子力委が提示した性能目標	評価結果
安全性	<p>この技術は地震等の自然現象はもとより、人は誤り、機械は故障することを考慮しても、シビアアクシデントの発生確率が十分に低く、従業員と公衆の健康リスクが十分に小さいものでなければならない。</p> <p>なおこの性能は、実用化に至る実証施設や研究開発施設においても満足されるべきである。</p>	<p>(炉)</p> <p>主要な設計基準事象に対する安全評価を実施し、評価条件を満足する結果を得た。また、設計基準外事象に対しては受動的炉停止機構によって炉心損傷を回避できる設計とした。さらに、炉心損傷に至る事象を想定した場合でも、炉心物質を炉容器内で保持し、敷地外緊急時対応が発動されるような事態を回避可能な設計とした。予備的なリスク評価の結果、内的事象に対する炉心損傷頻度は、1サイト10基を想定しても開発目標値の<math>10^{-5}</math>/サイト・年を満たしており、目標を達成可能と評価した。また、中越沖地震を踏まえた設計の地震条件に対しても、十分な裕度を有していることから、外的事象についてもリスク目標は達成可能と評価した。</p>
	開発目標・設計要求設定の考え方	(燃料サイクル)
	<p>原子力安全委員会が公表している安全目標、現行原子力施設に対する基準・指針類、IAEAの定める基準等と整合を持たせて設定。</p> <p>「安全設計の基本原則の遵守」、「敷地外緊急時対応が発動されるような事態の実質的な回避」、「リスク目標の達成」に係わる具体的な要求事項を定めている。</p>	<p>FSフェーズIIでは安全設計・評価を実施したが、FaCTではそのような設計フェーズに至っていない。しかし、FSフェーズIIの設計から安全上有意な設計変更は生じないと考えられ、FSの結果を踏まえると、適切な安全設計が可能であると考え。</p> <p>(課題)</p> <p>燃料サイクル施設に関しては、今後、更に安全性の検討(安全設計・評価等)を進めていく必要がある。</p> <p>実証施設についても、実用施設と併せて施設設計/検討の進捗を踏まえて安全性の検討を進める。</p>



# 達成度評価の結果例

## (安全性/敷地外緊急時対応が発動されるような事態の実質的な回避)

「安全設計の基本原則の遵守」の観点から、設計基準事象に対する安全性を確認した上で、設計基準外事象が発生した場合でも、以下の観点から安全性の評価を実施。

- 設計基準外事象としてスクラム失敗事象(ATWS)想定した安全解析を実施し、受動的炉停止機構の作動によって安全性の判断基準を満足できることを確認したことから、炉心損傷を回避できると評価した。また、炉心損傷事故を想定した場合でも、集合体内部ダクト等の設計対策を施すことにより厳しい再臨界は回避され、原子炉容器内で事象終息可能な設計とした。
- 冷却系を2重化して信頼性の高い設計とした上で、原子炉容器液位喪失(LORL)事象として、配管の二重破損にポンプトリップ失敗等の重ね合わせを想定した場合でも、アクシデントマネジメント(AM)策として、ポンプ停止等の手動操作により、原子炉容器液位喪失(LORL)を回避できる設計とした。
- 崩壊熱除去系は、自然循環除熱を活用した3系統構成の信頼性の高い設計とした上で、除熱源喪失事象(PLOHS)回避のためのAM策として、空気冷却器の常用系ブロアの活用等により、除熱源を確保可能な設計とした。
- 以上により、想定される各事象を回避、または終息できる設計であることから、敷地外緊急時対応が発動されるような事態の実質的な回避を達成可能な設計となっていると評価される。

# 性能目標に対する達成度評価の結果(経済性)

	原子力委が提示した性能目標	評価結果
経済性	<p>この技術は経済性の面で他のエネルギー技術と競合できることが重要である。</p> <p>経済性の指標は第一義的には運転期間を通じての発電コストであるが、</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>①経営リスクの観点から初期投資や</li> <li>②出力規模が過大でないことや</li> <li>③建設期間の短いことが重視されること</li> </ul> <p>にも留意して定める必要がある。</p>	<p>以下の点を確認し、経済性の面で軽水炉等のエネルギー技術と競合できると評価した。</p> <p>(1)発電原価を定量的に評価した。将来の軽水炉と比較して、炉の建設費は幾分高くなるものの、<u>高い熱効率、高燃焼度燃料の採用等の効果により、将来軽水炉と同等の経済性を有するものと評価した(代替技術の採用等による発電原価への影響評価も実施する)。</u></p>
	開発目標・設計要求設定の考え方	(2)初期投資に関しては、高い信頼性が必要な一部材料を除く主要機器については通常の工業生産可能な材料を採用する等に努めた。
	<p>我が国及び世界各国において、市場競争原理に基づき基幹電源として導入が可能なFBRサイクルを開発することを目標として設定。</p> <p>炉の建設費・運転費、燃料サイクル単価、建設工期及びそれらを総合した発電原価に係わる数値を定量目標として設定。</p> <p>設計要求としては、努力目標として高い目標値を定めている。</p>	<p>また、物量低減や工期短縮のための革新技術の採用を図った結果、150万kWe×2のツインプラントの建設費は約7800億円、現地建設工期も約37ヶ月から40ヶ月と評価した。これは軽水炉での150万kWe級への大型化による経済性向上の実績を勘案すると、初期投資としては過大ではないと評価した。</p> <p>(課題)将来の軽水炉に及ばなかった建設費や建設工期については、対応の必要性を含め対応策を検討する。また、今後の軽水炉等のエネルギー技術開発の動向を踏まえて、開発目標の確認と設計要求の見直しを行う。</p>

## 達成度評価の結果例(経済性/発電原価)

- 原子炉の建設から廃止までの費用および燃料費を合計して、総発電電力量との比を取り、割引を考慮して発電原価を算出。
- 発電原価の算出にあたっての主な条件は下記の通り。
  - 炉プラントの概念検討結果に基づいて勘定科目(例えば蒸気発生器、制御盤等)ごとに設計物量と単価を用いて費用を算出し、それらを積算して求めたプラント建設単価(利子なし)約18万円/kWeと算定
  - 炉プラントの概念検討結果に基づいて定期点検期間と連続運転期間を評価し、設備利用率は約91%と算定
  - 炉心燃料設計結果に基づいて、炉心およびブランケットを合計した平均燃焼度は約9万 MWd/tと算定
  - 燃料サイクル施設の概念検討結果に基づいて、建設費、操業費、廃止措置費等をそれぞれ評価し、再処理単価および燃料製造単価は共に約26万円/kgHMと算定
- FBRサイクル(NOAK、ツインプラント)の発電原価は約2.6円/kWhと評価。
- 上記はFaCTの設計要求である2円/kWhは満足しないものの、将来の軽水炉等の他エネルギー技術とも十分競合できる経済性を有すると考えている。



# 性能目標に対する達成度評価の結果(環境影響)

環境影響	原子力委が提示した性能目標	評価結果
	<p>気体、液体及び固体状放射性廃棄物(高レベル放射性廃棄物を含む)の発生量が軽水炉技術のそれを超えないようにするべきである。</p> <p>この場合、これが技術進歩により変化していくこと、高レベル放射性廃棄物にはマイナーアクチニドが含まれないようにすることがその処分場の大きさを小さくすることに効果的であることに配慮するべきである。</p>	<p>以下の(1)～(3)から、気体、液体及び固体状放射性廃棄物の発生量が軽水炉技術のそれを超えないと評価した。</p> <p>(1)気体状放射性廃棄物に関しては、将来の軽水炉サイクルと同等程度に抑えられると評価した。</p> <p>(2)液体状放射性廃棄物に関しては、将来の軽水炉サイクルと同等程度に抑えられると評価した。</p> <p>(3)固体状放射性廃棄物の発生量に関しては、高レベル放射性廃棄物および低レベル放射性廃棄物についても、将来の軽水炉サイクルと同等程度に抑えられると評価した。</p>
	開発目標・設計要求設定の考え方	
	<p>FBRサイクルの運転・保守及び廃止措置から生じる放射性廃棄物の発生量を国内外の次世代軽水炉サイクルと比較して低減できるFBRサイクルとすることを基本思想としている。</p> <p>通常運転時の環境放出放射能、処分形態別の廃棄物発生量等の目標を定めている。</p> <p>設計要求としては、努力目標としてALARAの考え方で高い目標値を定めている。</p>	<p>マイナーアクチニドのリサイクル(FBR装荷時点の含有率は最大5%程度)を前提として、要素技術開発や施設設計を行っており、核設計成立性、回収率、発熱対策等の観点から炉心、再処理施設、燃料製造施設、燃料の貯蔵や輸送の検討を実施した。</p> <p>(課題)処分形態別に放射性廃棄物を細分化すると、地層処分相当の低レベル廃棄物等、軽水炉サイクルよりも発生量が多いものもあるため、これらの低減の可能性に配慮しつつ設計検討を進める。マイナーアクチニドリサイクルは比較的長期の開発を必要とするものであり、着実に技術開発を進める必要がある。</p>

# 性能目標に対する達成度評価の結果(資源の利用効率)

	原子力委が提示した性能目標	評価結果
資源の利用効率	<p>この技術は、資源の利用効率を格段に高くするために、1をある程度超える増殖比を実現できるべきである。</p> <p>また、増殖比が大きく使用済燃料を再処理するまでの待ち時間を含む炉外サイクル時間が短いと、燃料の倍增時間が短くなり、この技術システムの原子力発電体系への導入速度を大きくできることに留意するべきである。</p>	<p>以下の(1)、(2)から、FBRを原子力発電体系へ円滑に導入できることを確認し、1をある程度超える増殖比の実現を通じて資源の利用効率を格段に高くできると評価した。</p> <p>(1)将来のプルトニウム需給量に応じて、同一プラントで炉心構成を変更することにより、増殖比を1.03から1.2の範囲で調整可能であることを確認した。</p> <p>(2)再処理プラントにおいて、マイナーアクチノイド含有率5%程度(FBR装荷時点)の使用済燃料を現状の軽水炉サイクルと同等の炉外冷却時間4年で取り扱えと評価した。その結果、炉外サイクル時間を5年程度まで短縮でき、(複合システム)倍增時間として45年程度を達成できることを確認した。</p> <p>(課題)炉外サイクル時間の短縮の効果や影響等について検討する。</p>
	開発目標・設計要求設定の考え方	
	<p>長期にわたるエネルギー安定供給の確保、軽水炉から高速増殖炉サイクルへの円滑な移行を目指すことから設定。</p> <p>炉には低増殖から高増殖まで柔軟に対応可能な設計を要求。</p> <p>燃料サイクル側には炉外サイクル時間5年程度の達成を要求。</p>	

# 性能目標に対する達成度評価の結果(核拡散抵抗性)

	原子力委が提示した性能目標	評価結果
核 拡 散 抵 抗 性	<p>この技術が世界各国で広く利用されるためには、核不拡散、核物質防護の観点から、その核燃料サイクルにおいてプルトニウムが常にマイナーアクチニド等と混合された状態にあることが重要である。</p> <p>なお、再処理施設を有する原子炉利用国を限定して、この国が一般の原子炉利用国に対して燃料供給を行うというビジネスモデルが核不拡散の観点からグローバルスタンダードとされた場合には、燃料の倍增時間が短いことが重要になる可能性が高いことに留意するべきである。</p>	<p>以下の点を確認し、核不拡散、核物質防護の観点を満足すると評価した。</p> <p>(1) MAリサイクルと先進湿式再処理法の採用により、プルトニウムはウランおよびマイナーアクチニドと分離されず混合している状態にある設計とした。</p> <p>(2) 燃料の(複合システム)倍增時間を短縮すべく、増殖比を1.2に変更した場合(複合システム倍增時間は45年程度に短縮)でも、現行の保障措置システムの適用が可能であると評価した。また、使用済ブランケット燃料の核拡散抵抗性を向上する技術を検討している。</p> <p>(3) FBRサイクルが高い核拡散抵抗性を有するものとして国際的に認容されることを目指し、将来の核燃料サイクルの核拡散抵抗性に関するコンセンサス醸成のための国際的な活動を進めている。</p> <p>(4) なお、大型航空機衝突対策が求められた場合には、付加的な設計対策により、航空機が衝突しても、炉心の健全性を維持するとともに放射性物質の大量放散に至らない防護ができると評価した。</p> <p>(課題) FBRサイクルが高い核拡散抵抗性を有するものとして国際的に認容されるための活動を継続する。更なる倍增時間低減に対する現行の保障措置システムの適用性等、実用施設における関連技術の検討を継続する。</p>
	開発目標・設計要求設計の考え方	
	<p>核拡散抵抗性と核物質防護を担保できるFBRサイクルとすることを目標として設定。</p> <p>核拡散抵抗性については、INPROやGen-IV等の議論と整合させ、技術と制度の両面に対応することを目標として設定。</p> <p>また、国際的に容認されるシステムとすることを目標として設定。</p>	

## 性能目標に対する達成度評価の結果(軽水炉と高速炉の共生)

軽水炉と高速炉の共生	原子力委が提示した性能目標	評価結果
	<p>この技術は軽水炉による原子力発電体系が確立している社会に導入され、数十年をかけて高速炉中心の体系に移行していく状況で利用されていくことが多いので、上の性能目標を満足し、軽水炉と高速炉を共存させる燃料サイクルシステムの整備が必要であることに留意するべきである。</p>	<p>以下のように、軽水炉による原子力発電体系から高速炉中心の体系に移行していく状況を踏まえ、軽水炉と高速炉を共存させる燃料サイクルシステムの整備を進めている。</p> <p>(1)移行期において軽水炉から回収したプルトニウムやマイナーアクチニドもFBRへ装荷(マイナーアクチニドの含有率は最大5%程度)することを想定して炉心燃料、再処理施設、燃料製造施設等の検討を進めている。</p> <p>(2)FBR再処理専用プラントの他にLF共用型の再処理プラントについて検討を開始した。</p> <p>(課題)移行期の燃料サイクルシステムについて、引き続き検討を進める。</p>
	開発目標・設計要求設定の考え方	
	<p>比較的長期間続く軽水炉からFBRへの移行期についての対応も含めて開発目標を設定。その期間のサイクルシステム像を提示することとした。</p> <p>具体的には、資源有効利用性、廃棄物管理性等の項目において軽水炉からの移行期を含めて開発目標を設定している。</p>	

# 性能目標の達成度評価のまとめと今後

- FaCTフェーズⅠで取り組んできた実用施設の概念設計を対象に達成度の暫定評価を実施した結果、原子力委員会の性能目標は概ね達成していると判断される。
- 原子炉プラントおよび燃料サイクル施設の設計作業の方向性も妥当と判断されるが、達成度評価の中で摘出された課題について、2011年からのFaCTフェーズⅡの中でその対策を考慮した検討を進めていくこととする。
- 代替技術採用のケースも含めて、今年度前半に達成度評価をとりまとめるとともに、今年度中にFaCTフェーズⅡの実用・実証施設の概念設計/概念検討に向けた開発目標の確認と、設計要求の見直しを実施する予定である。

# 参 考 資 料



# 天然ウラン資源量

発見資源は547万tU、未発見資源も含めた在来型資源( 燐酸塩鉱床中や海水中のウランは除く)の総計は1,601万tU。

コスト区分	発見資源(万tU)		未発見資源(万tU)		在来型資源 総計(万tU)
	確認資源	推定資源	予測資源	期待資源	
コスト区分なし	—	—	—	297	1,601
<US\$130/kgU	547		277	480	
	334	213			
<US\$80/kgU	446		195		
	260	186			
<US\$40/kgU	297				
	177	120			

各コスト区分( <US\$ 80/kgU、<US\$ 40/kgU)の資源量はより上位のコスト区分の資源量の内数

**発見資源:**発見済みの資源であり、規模・品位・形状が明らかな鉱床中に存在する「確認資源」と鉱床の規模・特性に関するデータが不十分な「推定資源」に区分される。  
**予測資源:**既存鉱床の地質的延長に存在が間接的事実を基に推定される未発見資源をいう。  
**期待資源:**特定の地質鉱床地帯の中に期待される未発見資源をいう。

# 原子力委員会、FaCTプロジェクト、Gen-IVにおける目標の対比

## 原子力委員会(性能目標)

指標	開発目標
安全性	<ul style="list-style-type: none"> <li>・地震、ヒューマンエラー、機械の故障等の考慮</li> <li>・シビアアクシデントの発生確率が十分低い</li> <li>・従業員と公衆の健康リスクが十分小さい</li> </ul>
経済性	<ul style="list-style-type: none"> <li>・将来の他エネルギー技術の発電コストと競合できる</li> <li>・投資リスク(初期投資、出力規模、建設期間)も重視</li> </ul>
環境影響	<ul style="list-style-type: none"> <li>・放射性廃棄物(固体・液体・気体)発生量が軽水炉技術のそれを超えない</li> <li>・マイナーアクチニド回収による処分場面積の低減</li> </ul>
資源の利用効率	<ul style="list-style-type: none"> <li>・1をある程度超える増殖比</li> <li>・導入速度の向上のために倍増時間の短縮にも留意</li> </ul>
核拡散抵抗性	<ul style="list-style-type: none"> <li>・PuへのMA混合による核不拡散、核物質防護の強化</li> <li>・国際燃料供給ビジネスモデル時は倍増時間短縮が重要</li> </ul>
軽水炉と高速炉の共生	<ul style="list-style-type: none"> <li>・軽水炉と高速炉を共存させる燃料サイクルシステムの整備</li> </ul>

## FaCTプロジェクト

指標	開発目標						
安全性および信頼性	SR-1 次世代軽水炉及び関連するサイクル施設と同等の安全性の確保 SR-2 次世代軽水炉及び関連するサイクル施設と同等の信頼性の確保						
経済性	EC-1 発電原価 EC-2 投資リスク EC-3 外部コスト						
持続可能性	<table border="1"> <tr> <td>環境保全性</td><td>           EP-1 平常時の放射線の影響            EP-2 環境移行物質の抑制         </td></tr> <tr> <td>廃棄物管理性</td><td>           WM-1 廃棄物の発生量の低減            WM-2 廃棄物の質の向上            WM-3 潜在的有害度の低減         </td></tr> <tr> <td>資源有効利用性</td><td>           UR-1 増殖比         </td></tr> </table>	環境保全性	EP-1 平常時の放射線の影響 EP-2 環境移行物質の抑制	廃棄物管理性	WM-1 廃棄物の発生量の低減 WM-2 廃棄物の質の向上 WM-3 潜在的有害度の低減	資源有効利用性	UR-1 増殖比
環境保全性	EP-1 平常時の放射線の影響 EP-2 環境移行物質の抑制						
廃棄物管理性	WM-1 廃棄物の発生量の低減 WM-2 廃棄物の質の向上 WM-3 潜在的有害度の低減						
資源有効利用性	UR-1 増殖比						
核不拡散性	NP-1 核不拡散 NP-2 核物質防護のシステム設計と技術開発						

・長寿命核分裂生成物の分離・核変換は、基礎的に研究開発を進める長期的課題とする

## Generation-IV

分野	ゴール
安全性と信頼性	SR-1 安全性と信頼性 ・操業時、安全性及び信頼性で、他に勝ること SR-2 炉心損傷 ・炉心損傷の頻度が極めて低く、その程度が極めて小さいこと SR-3 緊急時対応 ・サイト外での緊急時対応が不要となること
経済性	EC-1 平均コスト ・他エネルギー源よりもライフサイクルコストで有利であること EC-2 資本のリスク ・他エネルギープロジェクトと同程度の財務リスクであること
持続可能性	SU-1 資源有効利用 ・持続的なエネルギー供給が、大気汚染防止と世界規模のエネルギー生産のための長期間のシステム利用と効率的な燃料利用を促すこと SU-2 廃棄物の最小化と管理 ・放射性廃棄物の最小化と将来の長期管理負担の大幅軽減による公衆衛生の環境保護の改善
核拡散抵抗性と核物質防護	PR&PP 核拡散抵抗性と核物質防護 ・拡散、盗難防止並びに転用手段が困難であること



# FaCTフェーズⅠの開発目標(1/2)

開発目標の指標		開発目標
安全性及び信頼性		<p><u>SR-1 次世代軽水炉及び関連するサイクル施設と同等の安全性の確保</u></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>・公衆の信頼感・安心感の醸成に資する観点から次世代軽水炉及び関連するサイクル施設と同等の安全性の達成を目標とする</li> </ul> <p><u>SR-2 次世代軽水炉及び関連するサイクル施設と同等の信頼性の確保</u></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>・施設の運転・保守・補修性の向上及び放射線作業従事者の被ばく低減の観点から次世代軽水炉及び関連するサイクル施設と同等の信頼性の達成を目標とする</li> </ul>
持続可能性	環境保全性	<p><u>EP-1 平常時の放射線の影響</u></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>・FBRサイクルの運転にともなう単位発電量当りの放射性気体及び液体廃棄物の環境への実効線量が、国内外の次世代軽水炉サイクルシステムを下回るFBRサイクルとすること</li> </ul> <p><u>EP-2 環境移行物質の抑制</u></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>・ライフサイクルを通じた環境移行物質の影響を安全な範囲に抑制できるFBRサイクルとすること</li> </ul>
	廃棄物管理性	<p><u>WM-1 廃棄物の発生量の低減</u></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>・FBRサイクルの運転・保守及び廃止措置から生じる放射性廃棄物の発生量を国内外の次世代軽水炉サイクルと比較して低減できるFBRサイクルとすること</li> </ul> <p><u>WM-2 廃棄物の質の向上</u></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>・FBRサイクルの運転・保守及び廃止措置から生じる放射性廃棄物の質を国内外の次世代軽水炉サイクルと比較して同等以上と向上できるFBRサイクルとすること</li> </ul> <p><u>WM-3 潜在的有害度の低減</u></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>・FBRサイクルの運転・保守及び廃止措置から生じる放射性廃棄物の潜在的有害度を国内外の次世代軽水炉サイクルと比較して低減できるFBRサイクルとすること</li> </ul>
	資源有効利用性	<p><u>UR-1 増殖比</u></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>・長期にわたるエネルギーの安定供給を確保するため、高速増殖炉サイクルの導入後は、新規に軽水炉を建設することなく高速増殖炉へ移行可能な性能を備え、かつ、持続的に核燃料生産が可能であること</li> <li>・エネルギー需給や資源の不確かさに加えて海外導入も視野に入れ、低増殖から高増殖まで柔軟に対応可能なこと</li> </ul>

# FaCTフェーズⅠの開発目標(2/2)

開発目標の指標	開発目標
経済性	<p><u>EC-1 発電原価</u></p> <p>・ライフサイクルにおける不確実性を考慮して、FBRサイクルによる発電原価が国内外の次世代軽水炉等の競合する電源と匹敵すること</p> <p><u>EC-2 投資リスク</u></p> <p>・国内外の次世代軽水炉サイクルと比較して、大きな投資リスクがないこと</p> <p><u>EC-3 外部コスト</u></p> <p>・国内外の次世代軽水炉サイクルと比較して、大きな外部コストがないこと</p>
核不拡散性	<p><u>NP-1 核不拡散</u></p> <p>・FBRサイクルにおける核拡散抵抗性を高める技術と核不拡散を担保できる制度を適用したFBRサイクルとすること</p> <p><u>NP-2 核物質防護のシステム設計と技術開発</u></p> <p>・FBRサイクルの技術的特徴を踏まえ、核物質等の盗取と施設の妨害破壊行為を抑止できる核物質防護システムを持つFBRサイクルシステムとすること</p>

## 基礎的に研究開発を進める長期的課題

長寿命核分裂生成物の分離・核変換

長寿命核分裂生成物の分離・核変換、廃棄物処理等の技術開発により、国内外の次世代軽水炉サイクルと比較して廃棄物管理を容易なFBRとすること