

# 性能目標に対する達成度評価の結果(経済性)

経済性

## 原子力委が提示した性能目標

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。

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、経営リスクの観点から

- ①初期投資が過大でないこと
- ②出力規模が過大でないこと
- ③建設期間の短いことが重視されること

にも留意して定める必要がある。

## 開発目標・設計要求設定の考え方

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。

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。

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。

## 評価結果

以下の(1)、(2)から、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。

(1)発電原価を定量的に評価した結果、設計通りの性能を実現した場合には、約2.8円/kWh(NOAK)と評価された。将来の軽水炉と比較して、炉の建設費は幾分増加したものの、高い熱効率、高燃焼度燃料の採用等の効果により、将来軽水炉の経済性と競合できると評価した。さらに**設備利用率の低下や代替技術の採用がもたらす燃料サイクル単価の上昇による発電原価への影響を考慮し、巾をもって評価した場合にも、発電原価は、2.8～5.1円/kWh程度と試算され、将来軽水炉の経済性と競合できる範囲にあるものと判断した。**

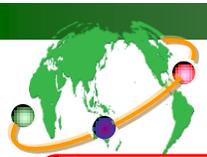
(2)主要系統や配置の簡素化と主要機器コンパクト化により、**150万kWe×2のツインプラントの建設単価(NOAK、利子なし)は約18万円/kWe、現地建設工期も約37ヶ月から40ヶ月であった。国内の最新軽水炉の建設単価(利子込)である約25～29万円/kWeに比べ、FBRのNOAK建設単価は3～4割程度低くなっている。また、建設工期については、従来施工法で評価した約46ヶ月や、現行軽水炉の約50ヶ月よりも短縮化されている。以上のことから、経営リスク低減の観点からは遜色ないレベルと判断した。**

(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。MAサイクルについて経済性への影響を含めた総合的な評価を進める必要がある。また、発電原価、建設単価、建設工期等は高い努力目標となっているが、今後はどの部分で経済性向上を狙うのが効果的なのか、FBRサイクルの特徴を考慮して目標を設定する必要がある。また、FBRサイクルや競合電源に関する不確実性も踏まえ、開発フェーズを考慮した段階的な目標を設定する必要がある。**



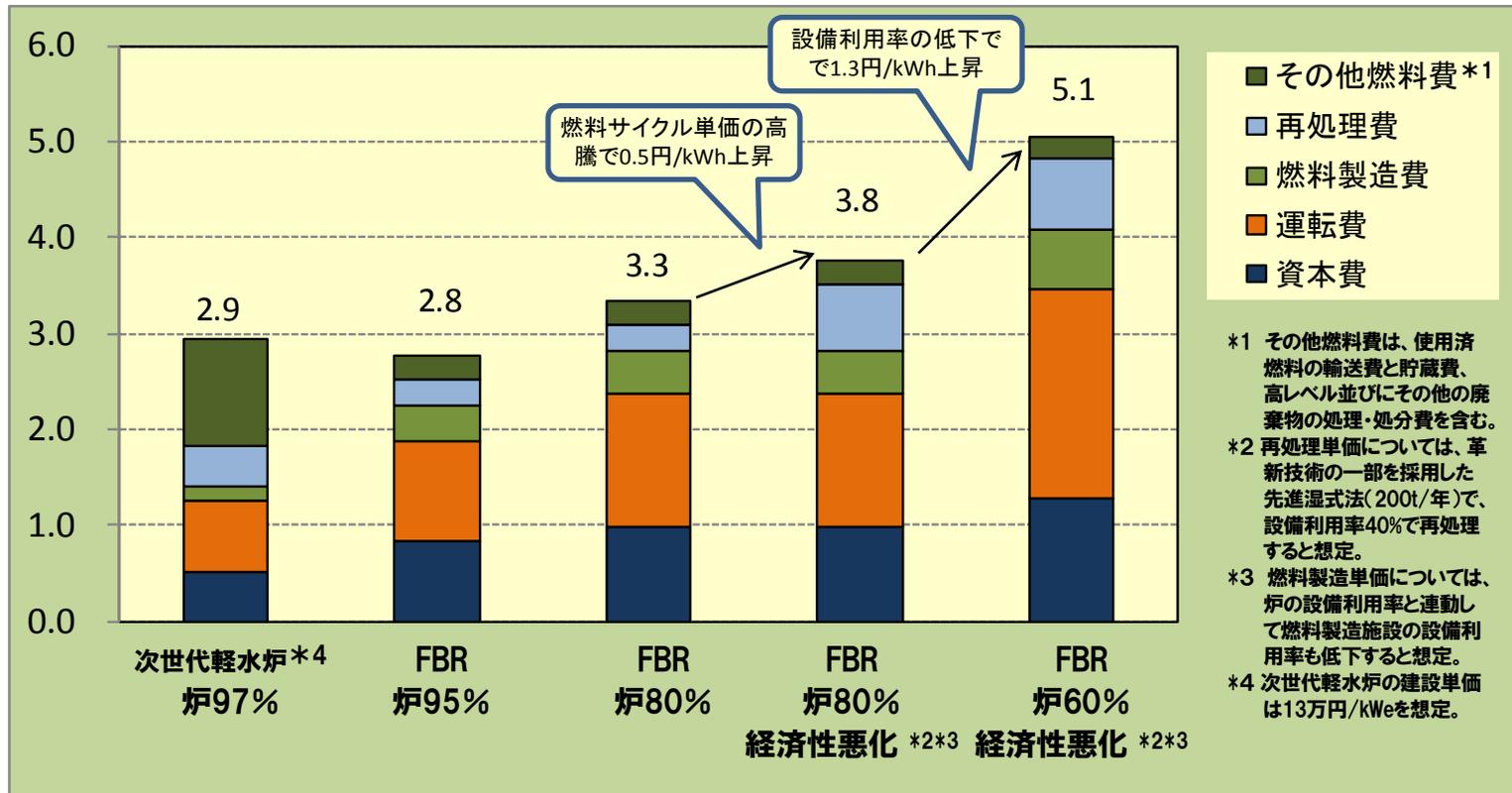
## 達成度評価の主な結果(経済性/発電原価)

- 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(割引率2%)を考慮して耐用年平均の発電原価を算出。
- 炉プラントの耐用年は60年(償却期間15年)、燃料サイクル施設の耐用年は40年(建屋償却期間38年、燃料製造設備は11年等)
- リファレンスケースの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(NOAK、ツインプラント)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それぞれ46日と約26ヶ月と評価した(設備利用率は約95%)。
  - 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
  - 再処理施設については、年間200日操業時を設備利用率100%と見なして評価を実施し、燃料製造施設は、炉が設計通り約95%の設備利用率で運転したとき、年間200日操業すると想定して評価を実施した。



# 達成度評価の主な結果(経済性/発電原価)

- 炉システムの革新技術の採否判断結果を踏まえ、FBRサイクルの発電原価は約2.8円/kWhと評価。さらに、設備利用率や研究開発等に関する将来の不確実性を考慮すると約2.8~5.1円/kWhの範囲に収まると評価した。
- 将来の軽水炉の発電原価も約2.9円/kWh(建設費を13万円/kW、ウラン価格を175\$/kgU)以上と試算しており、FBRサイクルは、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。





# 達成度評価の主な結果

## (経済性/発電原価のパラメータ影響評価)

- 高Ni鋼採用ケース、増殖比変更のケースについては、1割前後の影響があるものの、前出の設備利用率等の不確実性評価の範囲内に収まり、将来軽水炉の経済性と競合できる範囲にあるものと判断した。
- その他のケースにおいては、発電原価への影響は非常に小さいことが分かった。

ケース	評価結果
高Ni鋼採用ケース	仮に約120GWd/tまで炉心燃料の燃焼度が低下する場合は想定した結果、発電原価が約0.2円/kWh上昇した。
液-液抽出によるMA回収採用ケース	通常の溶媒抽出を用いたマイナーアクチノイド回収による再処理施設建設費上昇を考慮した結果、発電原価が約0.01円/kWh上昇した。
コプロセッシング法採用ケース	先進湿式再処理法を、コプロセッシング法で代替することを想定した結果、発電原価が約0.01円/kWh上昇した。
増殖比1.2のケース	再処理単価の低下、燃料製造単価の上昇、燃焼度の低減による燃料費の上昇等を考慮した結果、発電原価が約0.4円/kWh上昇した。
増殖比1.03のケース	再処理単価および燃料製造単価の上昇を勘案しても、燃焼度の上昇による燃料費の低下等のために相殺されて、発電原価が約0.1円/kWh低減した。
径方向ブランケット削除炉心ケース	径方向ブランケットを削除し、一定の増殖比を保つために軸方向ブランケットの長さを増加させたことによる燃焼度の低下、燃料製造単価の低下を考慮した結果、発電原価が約0.04円/kWh上昇した。
Pu添加径方向ブランケット炉心ケース	径方向ブランケットにPuを添加することで、燃焼度がわずかに上昇したことによる燃料費の低減の結果、発電原価が約0.03円/kWh低減した。
MA添加径方向ブランケット炉心ケース	径方向ブランケットにMAを添加することによる再処理単価の上昇、燃焼度のわずかな低下を考慮した結果、発電原価が約0.03円/kWh上昇した。



# 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

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。

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。

## 開発目標・設計要求設定の考え方

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。

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。

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。

## 評価結果

現段階の設計検討の深みを考慮して、全ての形態、全てのレベルの放射性廃棄物の発生量を詳細に評価するよりも、概略評価を行って今後の設計検討の基本的な方向性を見出すことを重視した評価を実施し、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とほぼ同等程度に抑えられると評価した。

- (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。
- (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。
- (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。

**マイナーアクチニド(MA)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いる。MAリサイクルの意義を踏まえ、総合的な成立性等に関して環境影響(FaCTでは廃棄物管理性)の中で評価している。**炉心成立性、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、大きな課題がないことを確認した。**

(課題)処分形態別に放射性廃棄物を細分化したとき、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ったため、原子炉と燃料サイクル施設双方を考慮した上で、これらの廃棄物発生量低減の可能性に配慮しつつ設計検討を進める。また、**MAリサイクル**は比較的長期の開発を必要とするため、**着実に技術開発を進める**必要がある。フェーズIでは、廃棄物発生量や回収率について高い努力目標を要求したが、今後はFBRサイクルの特性を考慮して設定する必要がある。また、現状の技術レベルと技術開発に要する期間を考慮して**段階的な目標を設定**する必要がある。



## 達成度評価の主な結果(環境影響/廃棄物発生量)

- 炉プラントの耐用年は60年、燃料サイクル施設の耐用年は40年とし、操業時と廃止措置時の廃棄物発生量の試算結果からFBRサイクル全体の廃棄物発生量を原子力事業評価モデルで計算。発電原価その他の目標達成度評価項目と一括評価した。
- リファレンスケースの放射性廃棄物発生量の算出方法は下記の通り。
  - － 所定のリファレンスFBRサイクルシステムを評価対象とした。
  - － 気体および液体放射性廃棄物については、施設概念検討結果とFSフェーズIIの検討結果に基づいて、主な発生源である原子炉と再処理施設の発生量を概算した。それらを合算して単位発電量当たり換算したFBRサイクル全体からの発生量を算出した。
  - － 操業時および廃止時の固体放射性廃棄物についても、施設の概念検討結果とFSフェーズIIの検討結果に基づいて発生量を概算した。それらから単位発電量当たり換算したFBRサイクル全体からの発生量を算出した。
  - － 特に高レベル放射性廃棄物(ガラス固化体)の発生量に関しては、バッチごとの使用済燃料組成の評価結果から、再処理施設の概念検討結果を反映したガラス固化体製造時の制約条件(発熱量2.3kW/体、核分裂生成物含有量10%等)を考慮して算出した。
- 廃棄物発生量の評価結果は、発電原価評価における廃棄物処分費等に反映した。

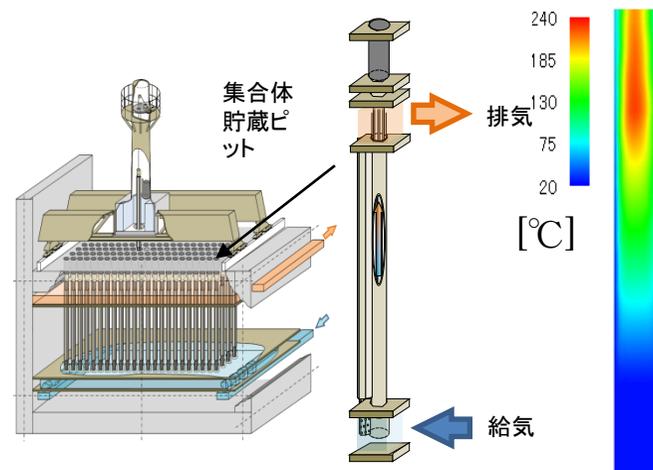


# 達成度評価の主な結果(環境影響/廃棄物発生量)

- 操業時および廃止時の気体、液体、固体廃棄物の発生量を、設計結果およびFSフェーズIIの結果等も参考にして概算し、施設ごとおよび単位発電量当たりの発生量を算出した。将来の軽水炉サイクルを想定した試算結果を比較しても、それぞれの廃棄物について、ほぼ同等あるいはそれ以下の発生量に抑えられると評価した。
- MAリサイクル(1~5%)に関して、炉心成立性、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、大きな課題はないことを確認した。MAリサイクルを実施するために、今後、経済性への影響等も含めて総合的な評価を行う。ただし、MAリサイクルの実現には長期の研究開発が必要であると考えている。

(将来LWRサイクルからの廃棄物発生量を1としたときの相対値)

		FBRサイクルからの発生量	FaCTの設計要求
気体状放射性廃棄物	大気放出量 (Bq/kWh)	約1	約1
液体放射性廃棄物	海洋放出量 (Bq/kWh)	約0.7	約1
固体状放射性廃棄物	高レベル廃棄物の発生量(m <sup>3</sup> /kWh)	約0.5	約0.2
	低レベル廃棄物の発生量(m <sup>3</sup> /kWh)	約0.9	約0.5

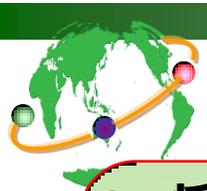


300℃以下で燃料集合体を貯蔵可能(被覆管酸化防止)



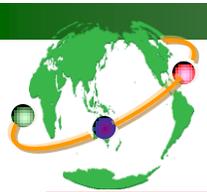
# 性能目標に対する達成度評価の結果(資源の利用効率)

	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>以下から、1をある程度超える増殖比を実現し、資源の利用効率を軽水炉サイクルよりも格段に高くできることを確認した。</p> <p>また、増殖比を1.1から1.2程度まで高め、さらに炉外サイクル時間の短縮による燃料の倍增時間の短縮を通じて、速やかにFBRサイクルを原子力発電体系に導入できることを確認した。</p> <p>(1) 将来のプルトニウム需給量に応じて、<b>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</b>ことを確認した。</p>
	<p><b>開発目標・設計要求設定の考え方</b></p> <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>	<p>(2) <b>再処理プラントにおいて、MA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年で取り扱えると評価した。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</b>ことを確認した。</p> <p>(3) FBR導入前半において1.1~1.2程度の増殖比を想定すると、5年程度の炉外サイクル時間を達成すれば、<b>60年~70年程度でFBRに移行できる</b>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>



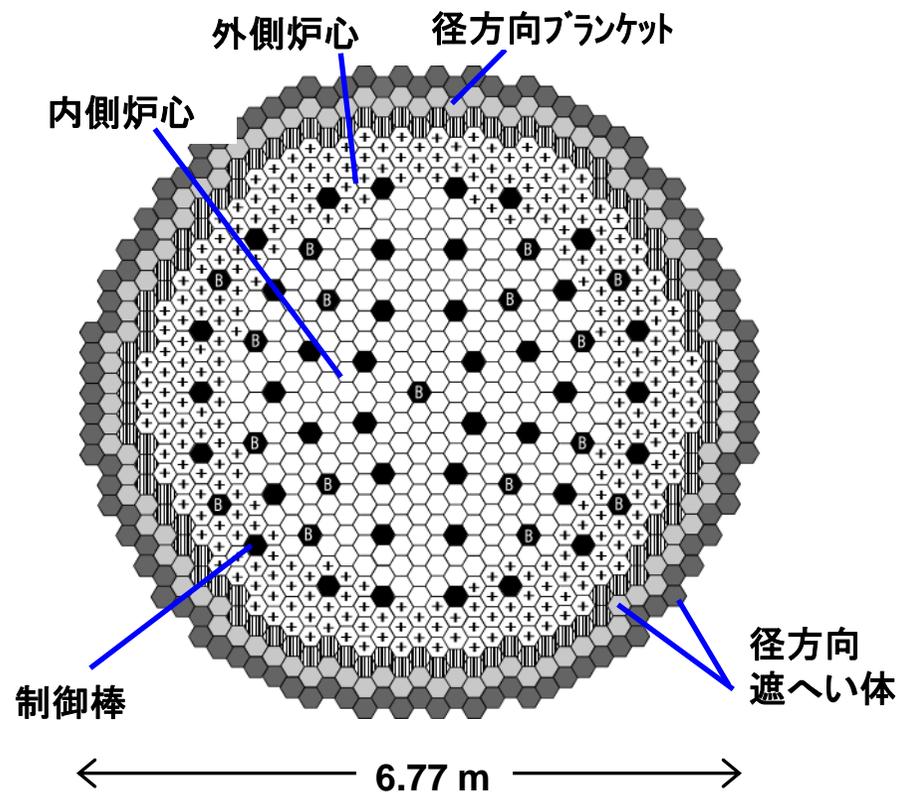
## 達成度評価の主な結果(資源の利用効率)

- 将来の国内原子力発電設備容量として2030年以降約58GWe一定と仮定し、2050年からFBRを本格導入した場合の天然ウラン累積需要量を核燃料サイクル諸量解析コードで計算。
- LWR使用済燃料から回収した天然ウラン濃度以上の劣化ウランは再濃縮利用を図り、天然ウランの節約量として計算。
- 前記の天然ウラン節約量を考慮した天然ウラン累積需要量は、レッドブック2009の在来型資源量と対比するため2009年を起点として累計。
- リファレンスケースの天然ウラン累積需要量の算出にあたっての主な想定条件は下記の通り。
  - 原子力発電プラントの寿命は60年(中部電力・浜岡1号、同2号、原電・敦賀1号を除く)
  - プルサーマル導入条件は2009年6月の電事連公表計画、大間原子力発電所の運開条件は2009年3月の電発公表計画に基づいてそれぞれ設定
  - LWRの燃焼度と設備利用率については、2029年までは平均燃焼度4万MWd/t台、設備利用率80%、2030年以降は全てのLWRが平均燃焼度6万MWd/t、設備利用率90%
  - 実証炉および高増殖型FBR炉心の増殖比は1.1とし、Pu需給量に応じて増殖比1.03の低増殖型FBR炉心を適宜導入
  - 六ヶ所再処理工場の運転条件は2009年8月の原燃公表計画に基づいて設定し、2014年より年間処理規模800トン/年の定格運転に移行。2047年にUO<sub>2</sub>燃料とLWR-MOX燃料の混合処理を考慮した第二再処理(年間処理規模1200トン/年)が運開。
  - 商業用FBR再処理施設は2075年に運転を開始し、Pu需要量や使用済燃料貯蔵量に応じて、適宜、年間処理規模の増大を図る(最大年間処理規模600トン/年)



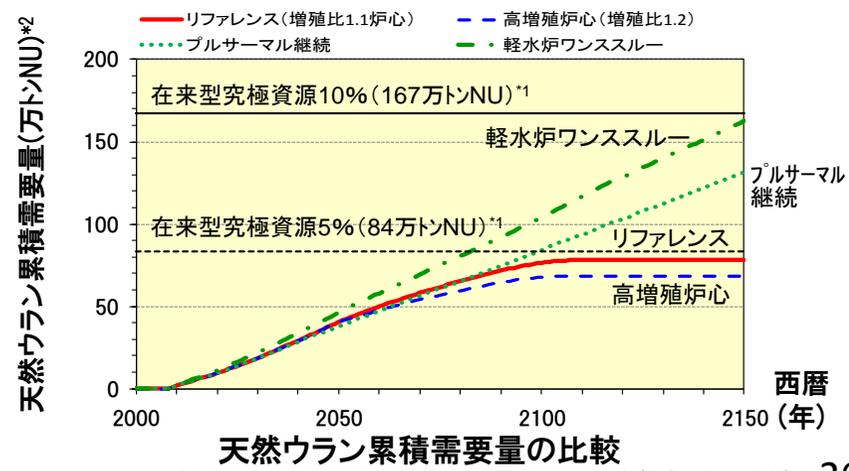
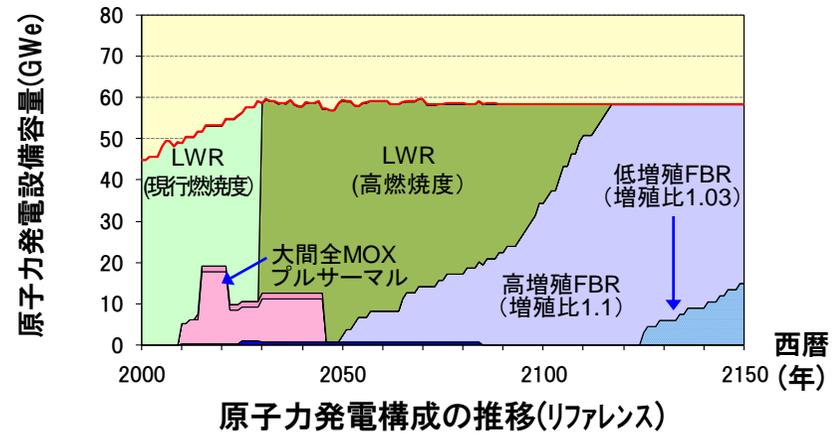
# 達成度評価の主な結果 (資源の利用効率/炉心とFBR導入)

- 増殖比1.03~1.2程度まで、炉心部だけを置換可能な炉心概念を構築でき、核設計上の成立性を確認した。
- 増殖比1.03~1.2と炉外サイクル時間5年を想定し、FBRに60年~70年程度で置換可能との結果が得られた。なお、天然U累積需要量も、在来型資源の5%程度に抑制可能と試算された。



## 炉心配置

増殖比1.03~1.1程度: 上部・下部共に20cmの軸方向ブランケットを設置  
 増殖比1.2程度: 上部40cm、下部45cmの軸方向ブランケットを設置



(備考) \*1: Uranium 2009, OECD/NEA-IAEA, 2010、 \*2: 西暦2009年を起点にした累積量 26

# 性能目標に対する達成度評価の結果(核拡散抵抗性)

核  
拡  
散  
抵  
抗  
性

## 原子力委が提示した性能目標

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ノイド等と混合された状態にあることが重要である。

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。

## 開発目標・設計要求設計の考え方

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。

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。

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。

## 評価結果

以下の(1)~(4)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。

- (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ノイドと分離されず混合している状態にある設計とした。**
- (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**を検討しており、その使用済ブランケット燃料中のプルトニウム同位体組成等の評価を通じて物質障壁への効果を確認した。
- (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。
- (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。

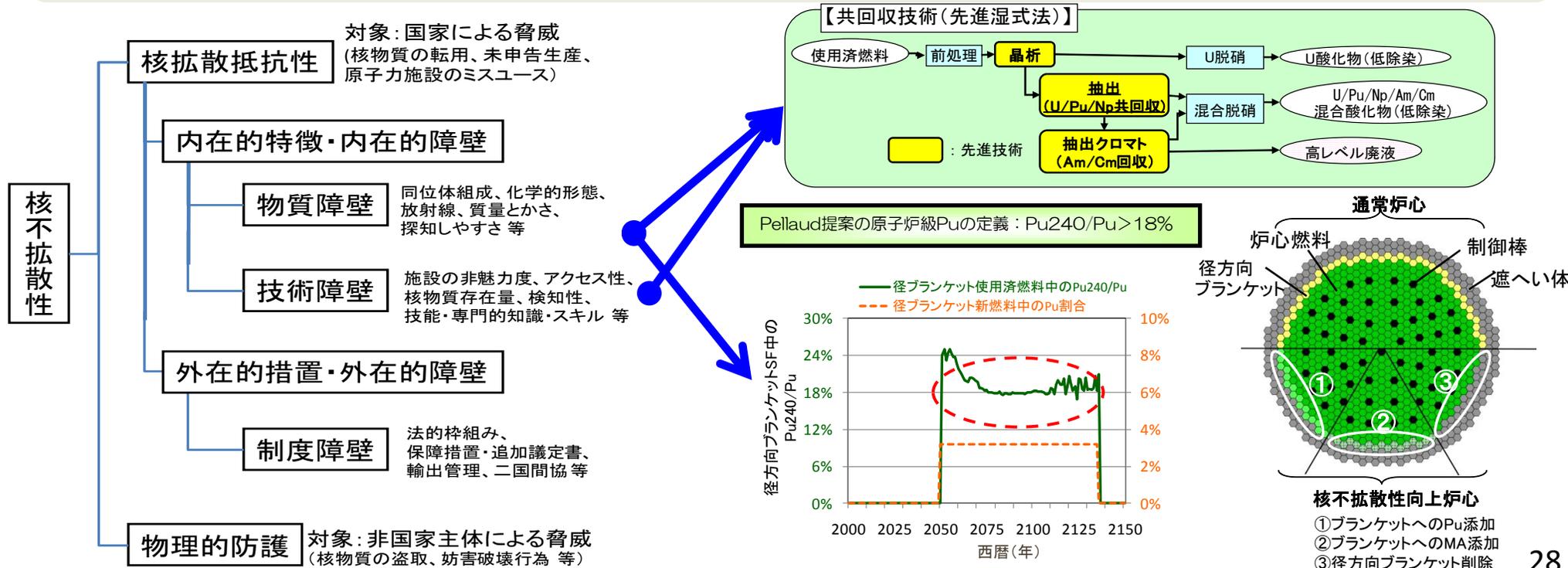
(課題) FBRサイクルが高い核拡散抵抗性を有するものとして国際的に認容されるため、内在的障壁(核不拡散性向上炉心、MAリサイクル、低除染燃料等)の効果や導入のあり方等について、引き続き海外との情報や意見の交換を通じて**世界的なコンセンサスの構築**を図る。更なる倍增時間低減に対する現行の保障措置システムの適用性等、**実用施設における関連技術の検討**を継続する。内在的な障壁を廃棄物低減等の視点と合わせて最適化する考え方を整理し、移行期および平衡期に適用可能な目標を設定する。



# 達成度評価の主な結果

## (核拡散抵抗性/内在的障壁に関する主な検討)

- 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。
- 核拡散抵抗性向上炉心を検討しており、その使用済ブランケット燃料中のプルトニウム同位体組成等の評価を通じて物質障壁への効果を確認した。
  - 径方向ブランケットを削除した炉心、Puを添加した炉心、MAを添加した炉心を検討し、Pu同位体組成への効果を確認した。
  - 導入性への影響、使用済燃料中のPu同位体組成の時系列変化、経済性への影響を検討し、核拡散抵抗性を向上させるオプションとして見通しがあると評価した。





# 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

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。

## 開発目標・設計要求設定の考え方

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。

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。

## 評価結果

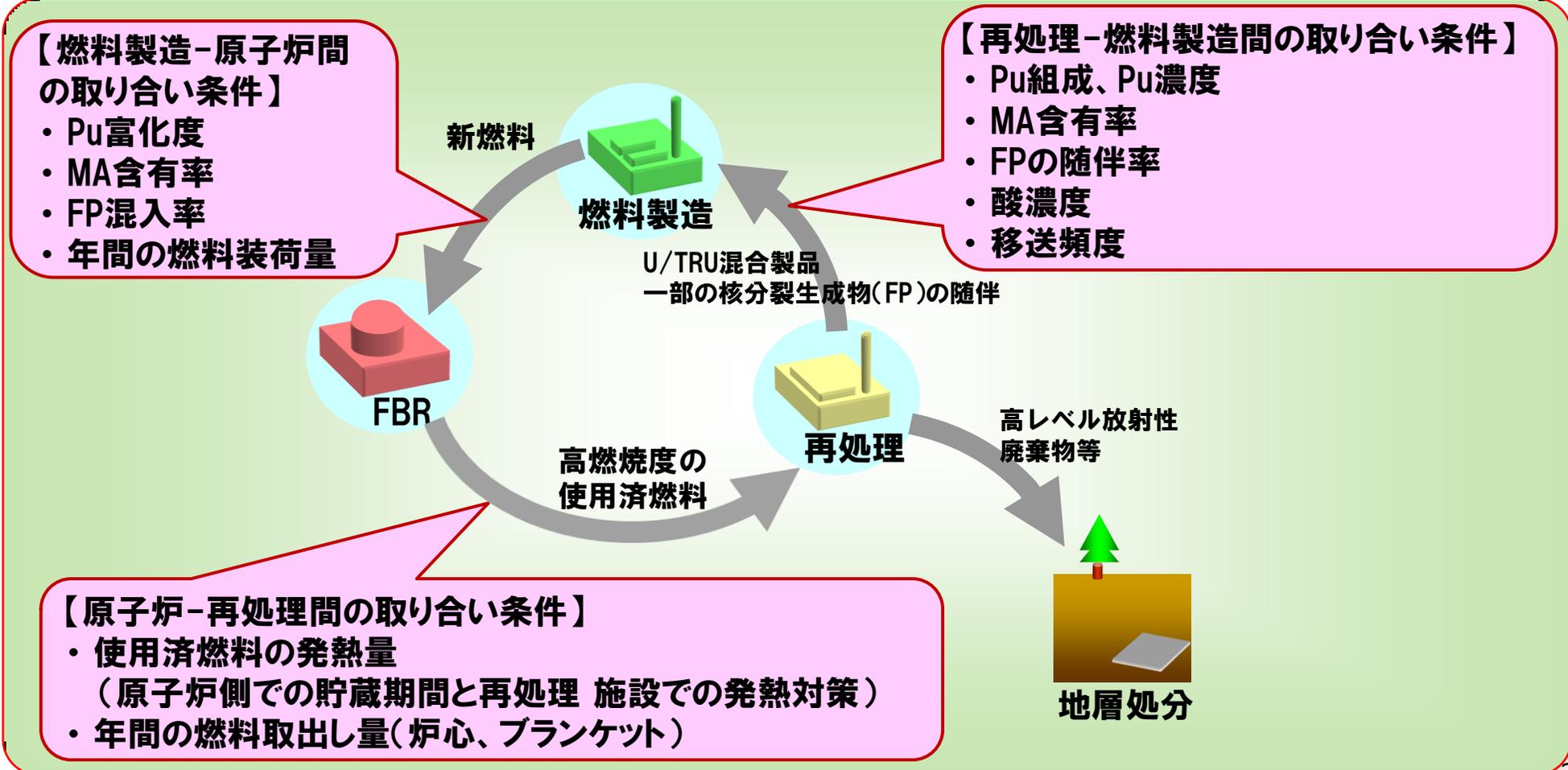
以下のように、軽水炉による原子力発電体系から高速炉中心の体系に移行していく状況を踏まえ、軽水炉と高速炉を共存させる燃料サイクルシステムの整備を進めている。

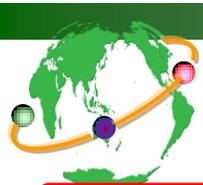
- (1) **移行期において軽水炉から回収したプルトニウムやMAもFBRへ装荷(MAの含有率は最大5%程度)することを想定して炉心燃料、再処理施設、燃料製造施設等の検討を進めており、その成立性を確認した。**
- (2) **FBR再処理専用プラントの他にLF共用型の再処理プラントについて検討を開始した(FaCTとは別の枠組みで実施)。**
- (課題) **移行期の燃料サイクルシステムについて、引き続き検討を進める。再処理の要素技術開発、設計検討については、第二再処理(軽水炉ウラン燃料、軽水炉MOX燃料及びFBR燃料の再処理)全体から見た合理的、効率的な開発が必要である。燃料製造の要素技術開発、設計検討については、FBR燃料の原料が、当面は軽水炉再処理から提供されることを踏まえた開発が必要である。**



# 炉、再処理、燃料製造間の取り合い条件

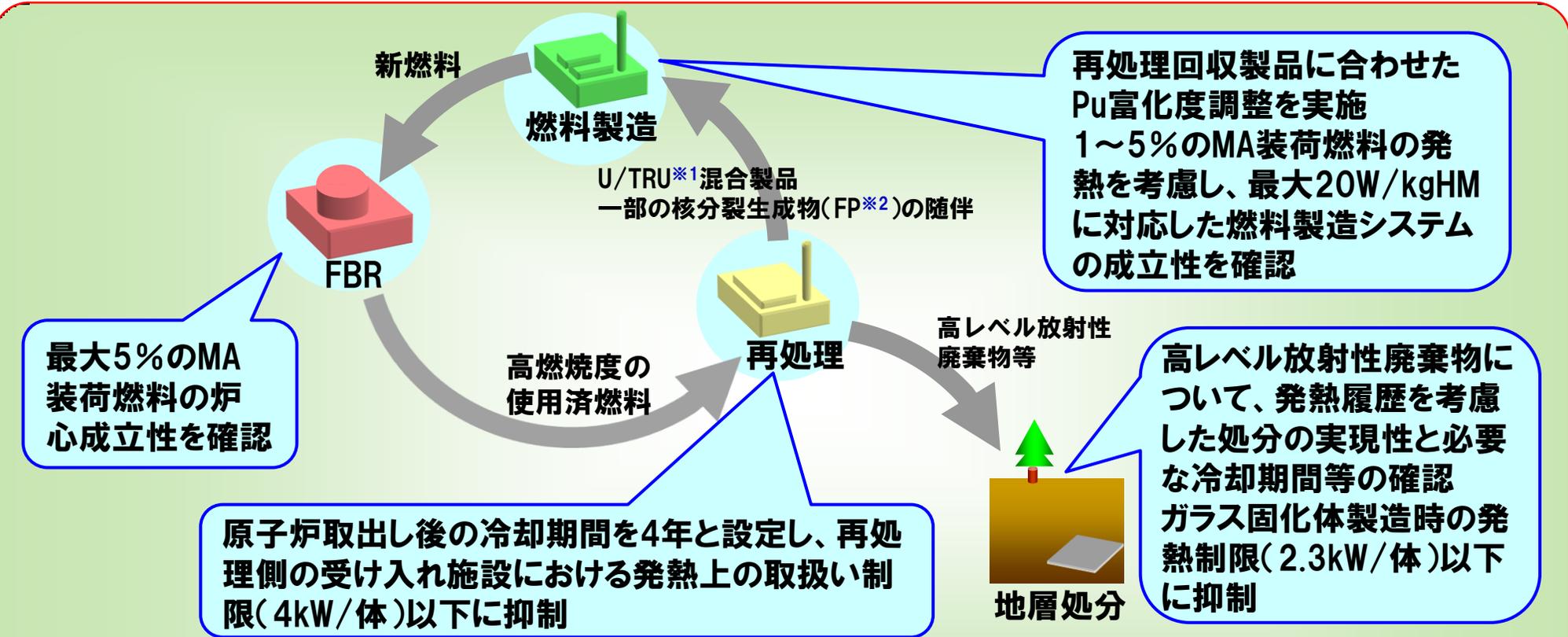
- 施設ごとの設計の開始に先立って、施設間をリサイクルする核燃料(新燃料、使用済燃料)等の量およびPu富化度、MA含有率、FP混入率といった組成に関する取り合い条件を定め、FBRサイクル全体が整合して性能を発揮できるように設計検討を進めている。





# FBRサイクル全体を俯瞰した最適設計の検討(MAリサイクル) (1/2)

- FBRの導入期、軽水炉からの移行期、FBR平衡期を通じて想定されるMA含有量に対応してMAリサイクルを実現することを目指して、FBRサイクルシステムを構築している。FaCTフェーズIでは、炉心成立性、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、大きな課題がないことを確認した。



※1 TRU(超ウラン元素): 原子番号がUより大きい元素であり、PuのほかAm,Cmなど(MA)を含む

※2 FP(核分裂生成物): 核分裂によって生じた核種及びその一連の放射性崩壊によって生じる核種であり、半減期は1秒以下のものから数百万年に及ぶものまである



## FBRサイクル全体を俯瞰した最適設計の検討(MAリサイクル) (2/2)

- MAリサイクルの効果を確認する目的で、MAリサイクルを実施しないケースも参考として試算した。MAリサイクルの採用による高レベル放射性廃棄物の潜在的有害度の低減に効果があることを確認した。また、使用済燃料ブランケット燃料の核拡散抵抗性向上などへの効果も検討した(前出)。
- 今後、FaCTの設計評価結果を踏まえて、MAリサイクルの採用による高レベル放射性廃棄物の発生量や処分場面積への効果を再確認する予定である。
- さらに、経済性をはじめ、環境影響、核拡散抵抗性等についてMAリサイクルの影響を総合的に評価し、MAリサイクルのあり方について国際的なコンセンサスの形成を図る。



# 性能目標の達成度評価の課題(1)

## (FaCTフェーズIIの研究開発計画に反映すべき課題 1/2)

- **安全性**: フェーズIでは概略検討に留まった燃料サイクル施設および実証施設(特に実証炉)の安全性の検討について、着実に進める必要がある。
- **経済性**: 今回の評価では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、低減の必要性を含め対応策を検討する必要がある。  
MAリサイクルについては、経済性への影響を含め総合的に導入効果を評価する必要がある。
- **環境影響**: 放射性廃棄物の形態をより細分化して評価すると、発生量が軽水炉サイクルを超えるものもあることが明らかになった。FBRサイクルから排出される廃棄物の特性に考慮して発生量低減方策を検討する必要がある。  
MAリサイクルは、現時点で成立性を左右する大きな課題はないものの、比較的長期の開発を必要とするため、着実に技術開発を進める必要がある。
- **資源有効利用性**: 性能目標が求める炉外サイクル時間短縮について、施設設計やFBR導入ペースへの影響を検討する必要がある。



# 性能目標の達成度評価の課題(2)

## (FaCTフェーズIIの研究開発計画に反映すべき課題 2/2)

- **核拡散抵抗性**： 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必要がある。  
MAリサイクル、低除染燃料、核不拡散性向上炉心等について、その内在的障壁としての効果や導入のあり方について、世界的な動向も考慮しながら検討する必要がある。  
MAリサイクルを前提とした実用施設について、現行の保障措置システムの適用性等、関連技術の検討を進める必要がある。
- **軽水炉と高速炉の共生**： 再処理については、第二再処理全体から見た合理的、効率的な開発計画を策定する必要がある。  
燃料製造については、FBR燃料の原料が当面は軽水炉再処理から提供されることを踏まえた開発計画を策定する必要がある。



# 性能目標の達成度評価の課題(3)

## (FaCTフェーズIIの開発目標／設計要求に関する課題)

- **全般**： 将来に向けた高い目標である開発目標に加え、フェーズIIで実施するプラント設計・概念検討に対応した設計要求を設定する必要がある。

フェーズIにおいては、高い性能追求を促すため、経済性、環境影響(廃棄物発生量、MAリサイクル)など、一部の設計要求について、高い努力目標値を設定したが、炉、再処理、燃料製造で、開発フェーズが異なるため、フェーズIIでは、2015年に提示するプラント像のそれぞれの位置づけに適合させる必要がある。

実用施設のみでなく、実証炉を対象とした設計要求を適切に設定する必要がある。

**安全性**： 設計・構造基準等に関する最新の国際的な規制の動向に留意して開発目標や設計要求を見直すべきかについて確認する必要がある。

- **核拡散抵抗性**： MAリサイクル、低除染燃料については、核不拡散に関連する国際的な最新の動向を参照しつつ、内在的な障壁や廃棄物低減への効果等を総合的に考慮して、考え方を整理する必要がある。



# 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、開発目標/設計要求に対する達成度を評価した結果、一部達成度が不十分な項目があったものの、原子力委員会の性能目標に対しては、総合的に評価した結果、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における研究開発計画あるいは開発目標・設計要求に反映する予定である。**



# 参 考 資 料



# 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>マイナーアクチノイ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	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



# 達成度評価手法と結果例(経済性/炉の建設費)

軽水炉評価用DB(EEDB)  
NUS勘定項目

勘定科目の整備

		勘定項目名
直接費	21	構築物及び土地改良工事
	22	原子炉設備
	23	タービン発電機設備
	24	付属電気設備
	25	発電用雑設備
	26	特殊材料
間接費	91	建設用施設、機器及びサービス
	92	ホームオフィスのエンジニアリング
	93	現地オフィスのエンジニアリング
	94	所有者費用
	95	建設期間中の利子

評価式の設定

【基本評価式】

直接費 = 物量 × 単価

間接費 = 直接費 × 比率

機器毎の単価設定

◆“円/物量”の設定

<考慮事項>

- ・米国内エスカレーション
- ・日米価格差
- ・為替レート
- ・日本国内物価補正

複数基建設費評価における低減効果	
重複利用	設計、施工、管理の中で図面、解析結果等を再利用することによるエンジニアリング費の低減
量産効果	生産設備の利用／治工具の利用／生産体制のシステム化／大量購入による資材費の低減
施設共用	同サイト内複数基建設による施設(管理、港湾、道路等)の共用化
習熟効果	熟練による製作時間の短縮及び仕損じの低減

設計物量データ

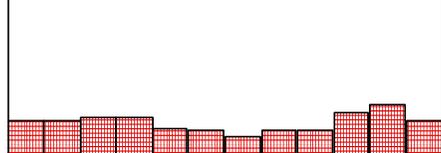
建設費



# 達成度評価手法と結果例(経済性/発電原価)

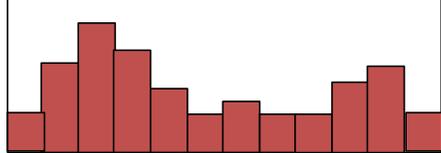
各施設の費用(円)

1. 燃料製造  
(施設建設・操業・廃止)



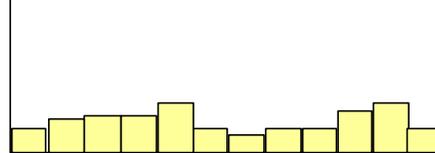
燃料製造の関連費用と処理量から燃料単価を算出

2. FBR  
(施設建設・操業・廃止)



機器物量と機器単価等から建設費を算出  
運転・維持に関する費用を推計

3. 再処理  
(施設建設・操業・廃止)

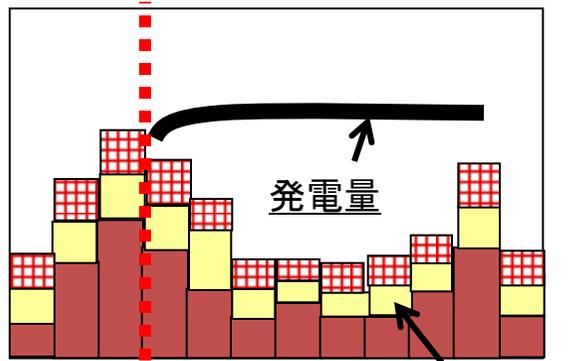


再処理の関連費用と処理量から再処理単価を算出

+ その他の費用

## 4. FBRサイクル全体

関連の費用・単価等から総費用を算出  
発電量を算出

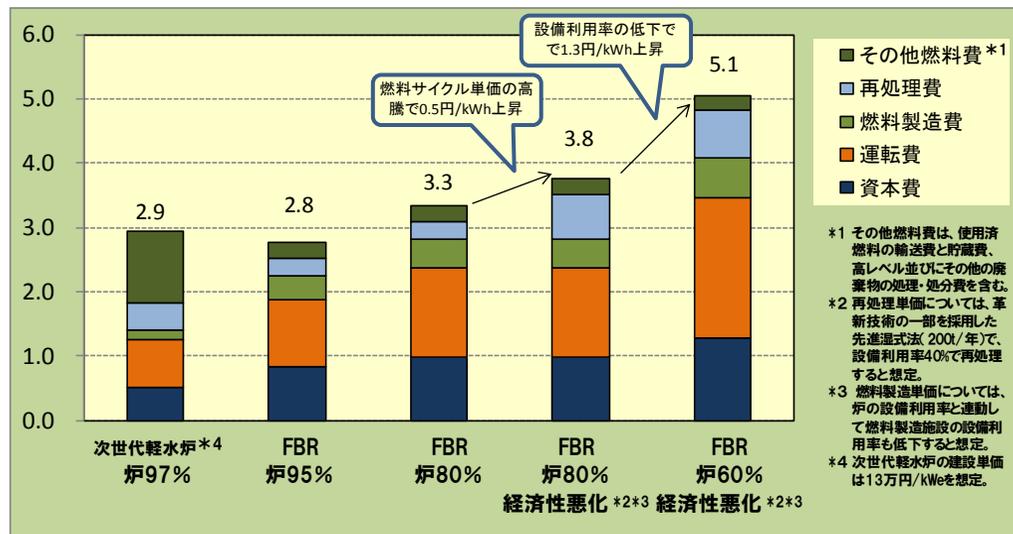


操業開始  
(価値換算の基準時点)

キャッシュフロー  
基準時点  
(運転開始時)に割引

## 5. (耐用年平均)発電コスト

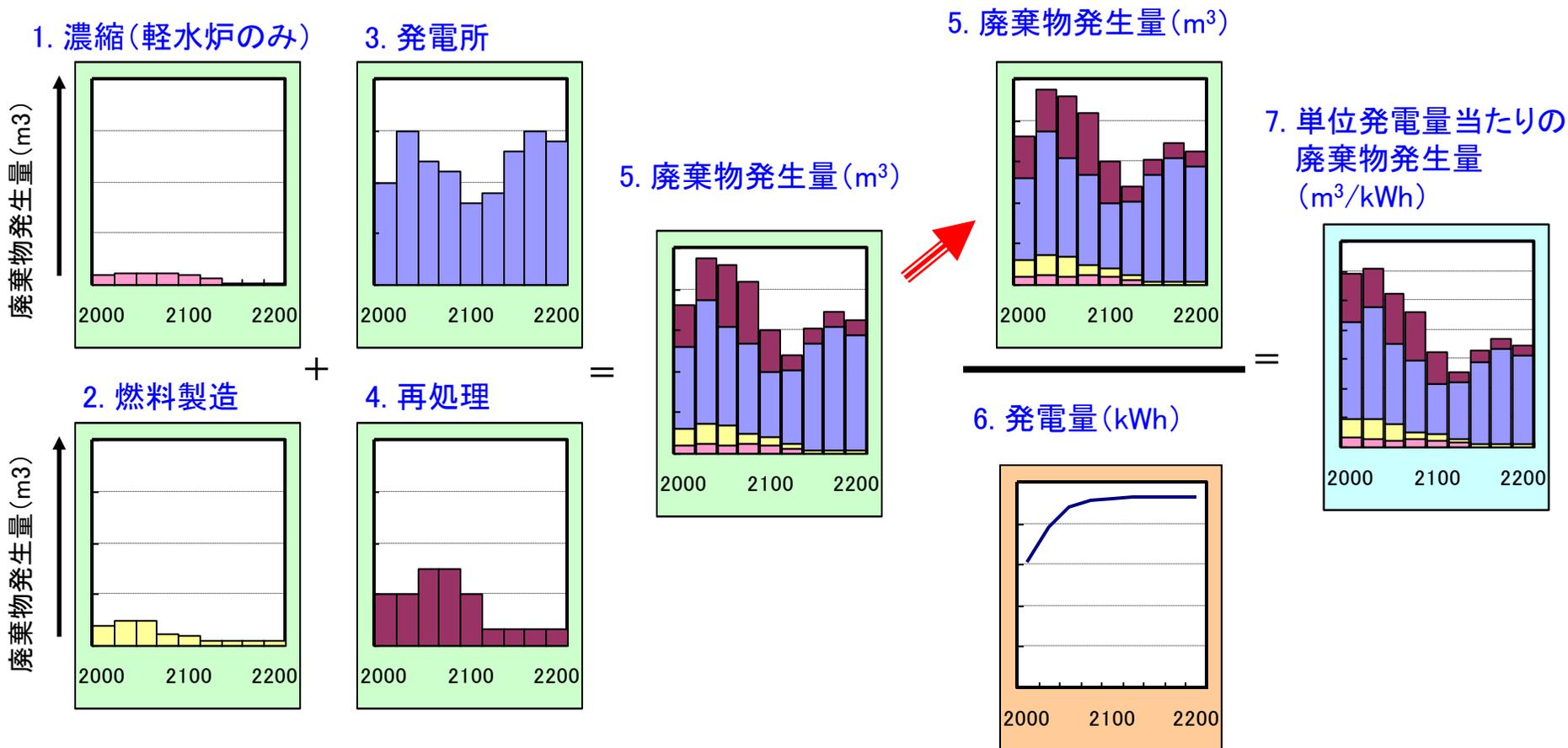
総費用を基準時価値に換算し、同様に価値換算した総発電量で割って算出





# 達成度評価手法と結果例(環境影響/廃棄物発生量)

- 操業時および廃止時の気体、液体、固体廃棄物の発生量を、設計結果およびFSフェーズIIの結果等も参考にして概算し、施設ごとおよび単位発電量当たりの発生量を算出。
- 将来の軽水炉サイクルを想定した試算結果を比較しても、同等あるいはそれ以下の発生量に抑えられると考えている。





# 天然ウラン資源量

発見資源は630万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1,670万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	—	—	—	359	1,670
<US\$260/kgU (<US\$100/ポント'U308)	630		291	390	
	400	230			
<US\$130/kgU (<US\$50/ポント'U308)	541		281	374	
	353	188			
<US\$ 80/kgU (<US\$30/ポント'U308)	375		170		
	252	123			
<US\$ 40/kgU (<US\$15/ポント'U308)	80				
	57	23			

各コスト区分(<US\$ 130/kgU、<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。



# 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> <ul style="list-style-type: none"> <li>・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</li> </ul> <p><u>EC-2 投資リスク</u></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>・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</li> </ul> <p><u>EC-3 外部コスト</u></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>・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</li> </ul>
核不拡散性	<p><u>NP-1 核不拡散</u></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>・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</li> </ul> <p><u>NP-2 核物質防護のシステム設計と技術開発</u></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>・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</li> </ul>

## 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