

5. 主概念の今後の研究開発の進むべき方向

現在の知見で実用施設として実現する可能性が最も高いと考えられる概念であることから、ナトリウム冷却高速増殖炉（MOX 燃料）、先進湿式法再処理、簡素化ペレット法燃料製造を「主概念」として選択した。

この選択のための検討を通じ、今後の研究開発における考慮事項、新たな研究開発課題、優先的に取り組むべき研究開発課題などが明らかになった。

なお、原子炉に関しては「もんじゅ」を運転するレベルまで開発が進んでいるが、再処理及び燃料製造に関しては現時点においては実験室規模の試験を実施しているレベルであり、実証段階に向けて知見が十分とはいえない。このため、再処理及び燃料製造については、工学規模での試験の実施など精力的な研究開発の実施が必要である。

（1）開発目標、設計要求

2015 年頃までに革新技術の採用可能性を判断して高速増殖炉サイクルの実用化像を提示する研究開発にあたっては、社会情勢の変化等に対応した開発目標や設計要求を掲げることが重要であり、必要に応じて適宜適切な見直しを行うべきである。

① 軽水炉から高速増殖炉への移行期の設計要求

「高速増殖炉サイクルの実用化戦略調査研究」は、高速増殖炉サイクルの適切な実用化像とそこに至るまでの研究開発計画を 2015 年頃までに提示することを目的に行われてきた。この研究開発を通じ、全ての原子炉が高速増殖炉となった時代の将来像に関し、様々な検討を行うための技術的な知見が積み重ねられてきている。

しかしながら、全ての原子炉が高速増殖炉となる将来を実現するためには、そこに至る過程も明確にすることが不可欠である。実証段階に建設される実証炉や実証サイクル施設の設計は実用施設とは時期が異なるため要求される設計要求のレベルが異なる。また、実用施設の導入後から軽水炉のリプレース終了時までは軽水炉と高速増殖炉が並

今後の研究開発目標

2015年頃の技術体系整備に向けた目標

安全性

- 社会の既存リスクに比べて小さいこと

経済性

- 将来の国際標準軽水炉の発電単価に比肩すること

環境負荷低減性

- 放射性廃棄物による負荷を低減すること
 - －TRU(超ウラン元素)の燃焼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伴う廃棄物発生量の低減

資源有効利用性

- 持続的な核燃料を生産するとともに、多様なニーズへ対応できること

核拡散抵抗性

- 核物質防護および保障措置への負荷軽減

基礎的に研究開発を進めるべき環境負荷低減の目標

- LLFP(長寿命核分裂生成物)の分離変換による地層処分への負荷軽減

- フェーズⅢ以降の研究開発計画策定に向け、研究開発目標の見直しの要否について検討した結果、基本的にフェーズⅡで設定した研究開発目標と一貫性のある目標を設定し、2015年頃までに研究開発目標を満足する技術を準備することとした。
- LLFP(長寿命核分裂生成物)の分離変換については、課題が多く研究開発に長期間を要すると考えられるため、基礎的に研究開発を進めるべき目標とした。
- 研究開発目標については、今後も定期的に見直しを行う。

設計要求への展開(検討中)

研究開発目標	高速増殖炉の設計要求	燃料サイクルの設計要求
安全性	<ul style="list-style-type: none">● 炉心損傷の発生頻度10^{-6}/炉・年未満● 炉心損傷に至る代表事象に対する受動安全性の強化 あるいは事故管理方策の具体化● 仮想的な炉心損傷時の再臨界発生を回避し、その影響を原子炉容器あるいは格納施設内で確実に終息	<ul style="list-style-type: none">● 同時代の軽水炉燃料サイクルシステムと同等以上 (異常の発生要因を極力排除、異常の拡大防止等)● 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・年未満に抑制し、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	<ul style="list-style-type: none">● 建設費: 20万円/kWe *● 燃料費: 炉心燃料の平均燃焼度 15万MWd/t *● 運転費: 連続運転期間 18カ月以上 *、稼働率 90%以上 *	<ul style="list-style-type: none">● 処分費等を含む燃料サイクル費は1.1円/kWh *● 再処理・燃料製造費としては 0.8円/kWh *
環境負荷低減性	<ul style="list-style-type: none">● 低除染TRU燃料 (MA含有率 5% 程度) を燃焼できること	<ul style="list-style-type: none">● 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● UおよびTRUの廃棄物への移行率 0.1%以下
資源有効利用性	<ul style="list-style-type: none">● 増殖比; 低除染TRU燃料で、増殖比1.1以上を達成できること (60年程度で軽水炉から高速増殖炉に移行できること)● 増殖ニーズに柔軟に対応できること● 高温熱源による多目的利用	<ul style="list-style-type: none">● UおよびTRU回収率99%以上
核拡散抵抗性	<ul style="list-style-type: none">● 低除染TRU燃料による高線量化で接近性を制限	<ul style="list-style-type: none">● 核物質防護、保障措置への対応を考慮した設計として、プルトニウムが単体の状態で存在しないこと● 低除染TRU燃料による高線量化で接近性の制限

* : 国際標準となる具体的な目標を設定予定

➢ LLFPの分離変換に関する設計要求

- 放射性廃棄物発生量が軽水炉燃料サイクルの発生量の1/10に削減する(単位発電量当たり)

✓我が国における軽水炉から高速増殖炉への円滑な移行を図るため、増殖比1.1以上を要求するとともに、将来の国際的なエネルギー需給の不確実さを考慮して増殖比の柔軟性も要求した。また、環境負荷低減に関する高い目標を達成するため、UおよびTRUの廃棄物への移行率0.1%以下を設計要求とした。

存していることに対応した高速増殖炉サイクルでなければならない。このため、軽水炉から高速増殖炉への移行期の課題を明らかにし、これに対応した研究開発を積極的に行う必要がある。

② 開発目標、設計要求の間のバランス

高速増殖炉サイクルの概念設計は、5つの開発目標（「安全性」、「資源有効利用性」、「環境負荷低減性」、「核拡散抵抗性」、「経済性」）と5つの開発目標に対応した設計要求に適合するよう検討されている。

この5つの開発目標はそれぞれが目的を持っている。開発目標の「安全性」は原子力施設を設計・建設・運転する上での前提であり、「資源有効利用性」と「環境負荷低減性」は高速増殖炉サイクルを導入する意義であり、「核拡散抵抗性」は国際社会の原子力システムに対する受容性の変化への対応であり、「経済性」は社会への導入の基礎である。従って、どれかひとつの開発目標を上位の判断基準として他の目標の優先度を下げて判断することは適切ではない。

しかしながら、開発目標や設計要求は相互に関連性があり、設計を収束していく過程で利益相反となる場合が多い。例えば、MAを5%含んだ燃料を高速増殖炉で利用できるよう設計することは、環境負荷低減や核不拡散抵抗性の向上には寄与するが、燃料の放射線が強くなること、発熱量が大きくなることなどにより、その取り扱いが軽水炉燃料と比較して難しく、結果として経済性を下げる方向に働く。従って、設計要求は全体のバランスをはかり適切に設定すべきである。

③ 開発目標「安全性」に関する設計要求

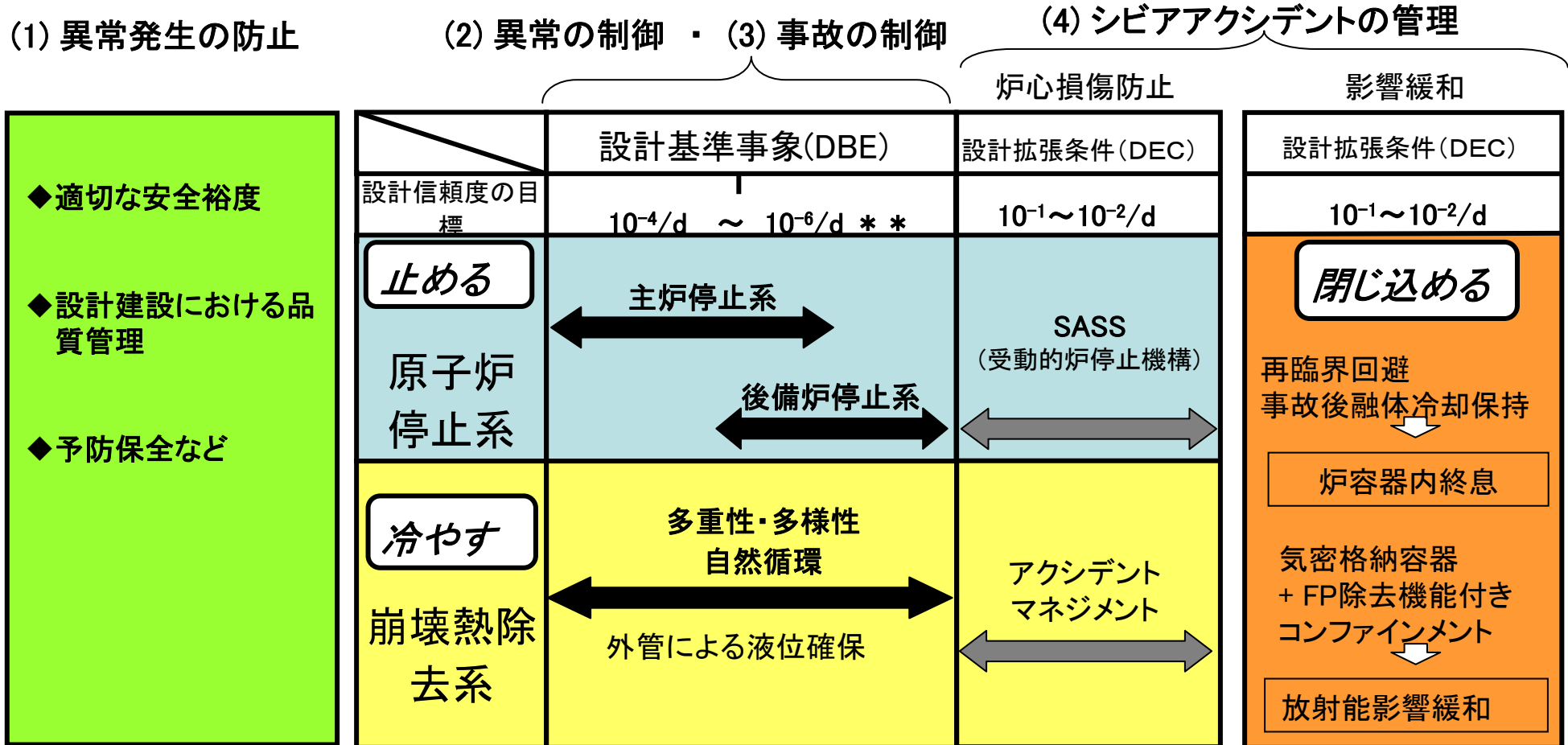
高速増殖炉が軽水炉のリプレースとして実用化されることから、原子炉の開発目標「安全性」に対応する総合的な設計要求として、「現在の軽水炉のリプレースとして2030年代に導入が検討されている次世代軽水炉に比肩すること」が考えられる。

この次世代軽水炉に関する検討においては、シビアアクシデントへの考慮、耐震性の向上など、最新の知見を踏まえて、現行の軽水炉よ

Na冷却炉の安全設計概念

固有の安全性、能動的安全設備、受動的安全機能の組み合わせとこれらを活用した事故管理方策

深層防護*

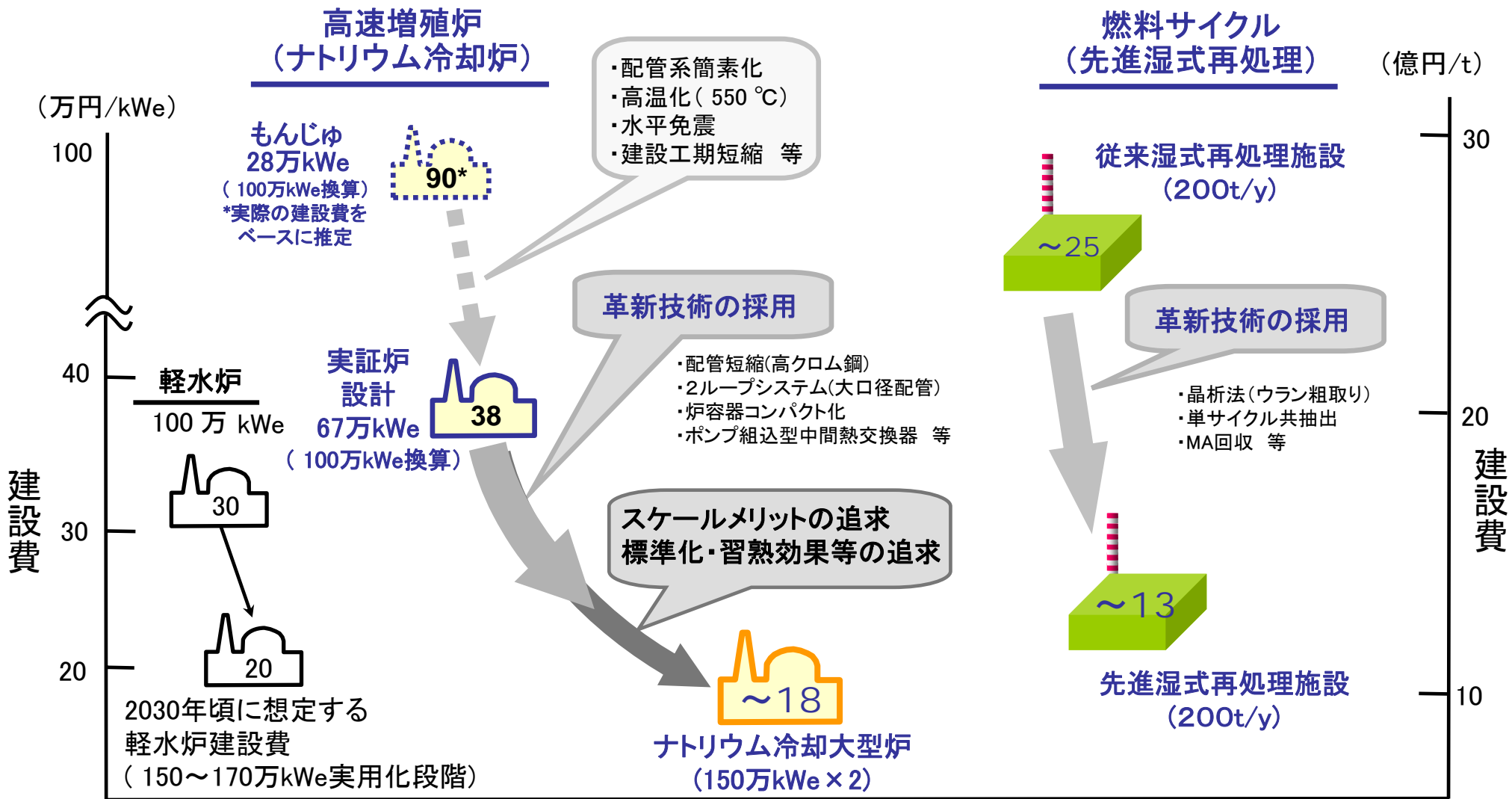


Naの化学反応対策

- ◆Na漏えい → ガードベッセルと外管による漏えいNa保持
- ◆SG伝熱管破損 → 二重管SG、早期検出 & 水-蒸気側の早期減圧

□ : 主要安全機能 * : IAEA / INSAG-10 による定義 ** : 機能要求あたりの失敗確率

高速増殖炉サイクルのコストパフォーマンスに関するキー技術



りも安全性の向上に配慮したものにすることが検討されている。高速増殖炉サイクルの研究開発においてもこのような最新の知見を踏まえた設計を目指すべきである。なお、次世代軽水炉の設計要求は、今後の検討において適宜見直されるものであることから、その状況に留意することが重要である。

④ 開発目標「経済性」に関する設計要求

高速増殖炉が軽水炉のリプレースとして実用化されることから、原子炉の開発目標「経済性」に対応する総合的な設計要求として、「安全性」と同様、「現在の軽水炉のリプレースとして 2030 年代に導入が検討されている次世代軽水炉に比肩すること」が考えられる。

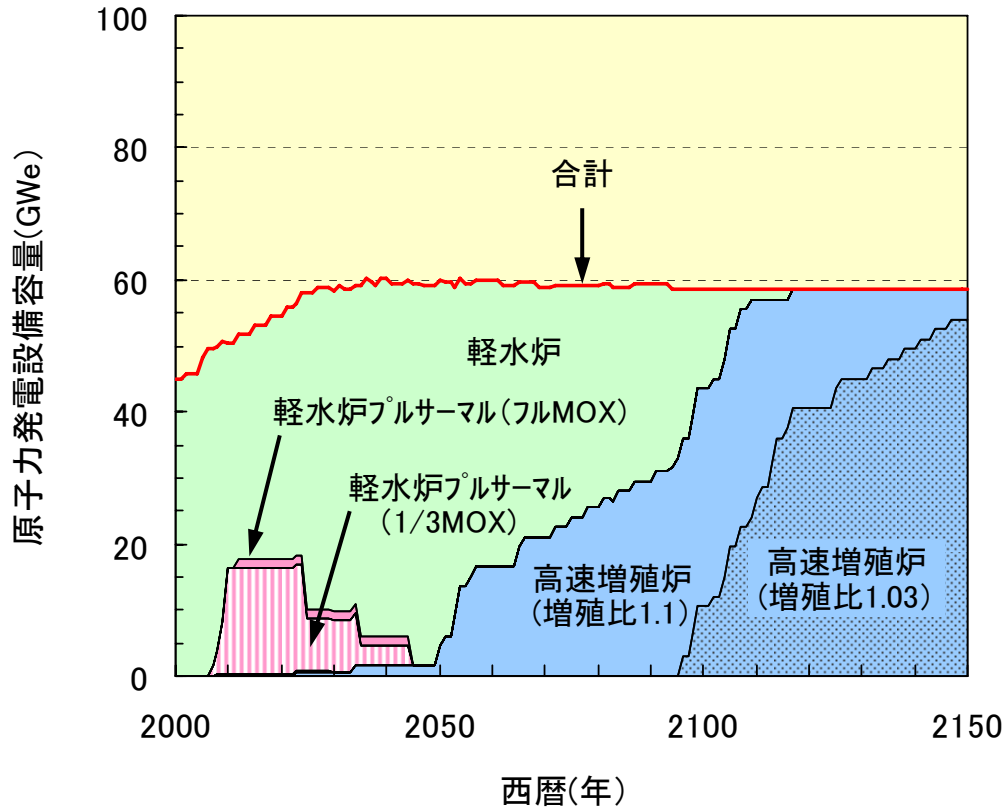
高速増殖炉サイクルの実用化戦略調査研究フェーズⅡにおいて、ナトリウム冷却高速増殖炉の概念設計は、ツインプラント（150 万 kWe × 2 基）初号機の平均建設費として 18 万円 / kWe 程度、建設期間として 46 ヶ月（性能試験期間を含む）、稼働率が 95%程度を達成できる可能性が示されている。一方、次世代軽水炉に関する検討においては、多数基建設による習熟効果を考慮して世界水準の建設費（1000 ドル / kWe、12 ～ 13 万円 / kWe に相当）、建設期間 30 ヶ月台前半、稼働率 94%を目標としており、現行の軽水炉よりも経済性の向上に配慮したものとなっている。高速増殖炉サイクルにおいても、多数基建設による習熟効果を考慮した上で、次世代軽水炉と同等の経済性を実現できることが重要であり、今後の研究開発において、3次元免震技術などを導入してプラント設計の標準化を図り、習熟効果の促進を目指すべきである。なお、次世代軽水炉の設計要求は、今後の検討において適宜見直されるものであることから、その状況に留意することが重要である。

⑤ 増殖性能

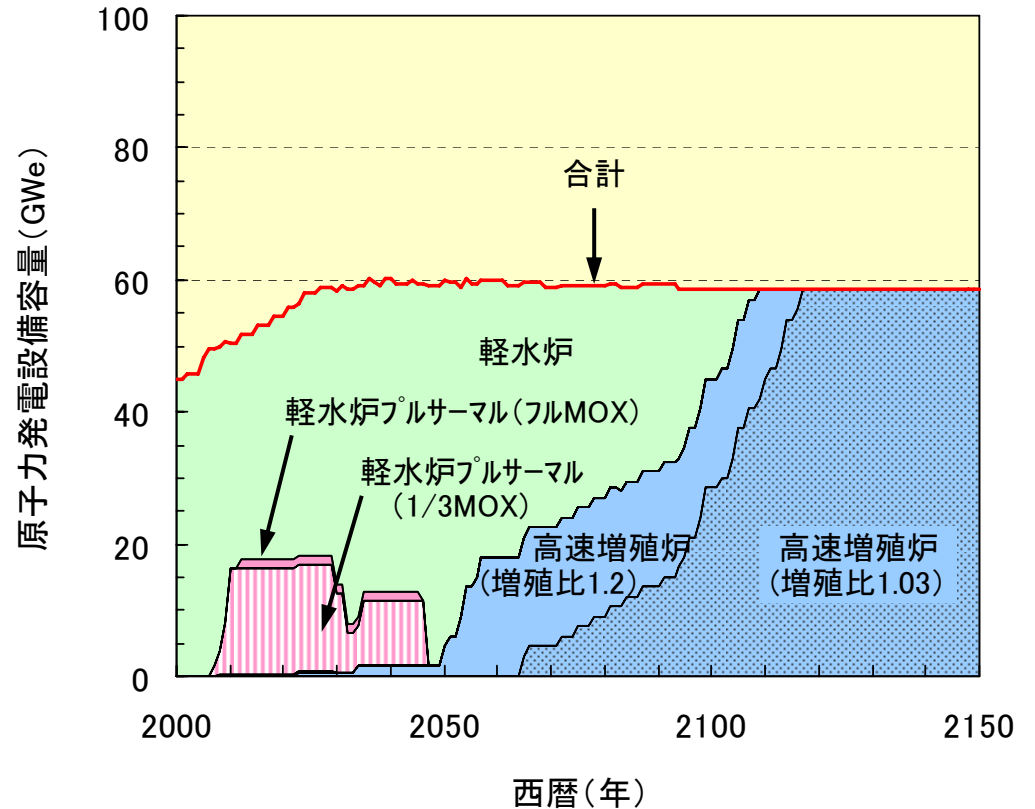
高速増殖炉サイクルの実用化戦略調査研究フェーズⅡにおいては、原子炉に燃料として装荷したプルトニウム量に対し、炉内において、核分裂を起こさないウラン（U238）が中性子を吸収し、燃料として利用が可能なプルトニウム（Pu239）に変換する割合（増殖比）につ

原子力発電構成の比較

- 2050年に高速増殖炉を導入した場合の高速増殖炉サイクルへの移行完了は、増殖比1.1(ケース1)では2120年頃、増殖比 1.2 (ケース2)では2110年頃と見込まれ、増殖比の違いによる移行完了の差は小さい。
- 移行期の前半は軽水炉再処理からのプルトニウム供給が支配的であるため、増殖比の影響は小さい。
- 移行期の後半は約20年間で50%(約30GWe)のリプレースが可能である。
- 増殖比1.2の場合、増殖比1.1の場合よりも30年程度早く、2065年頃から経済型炉心の利用が可能となる。



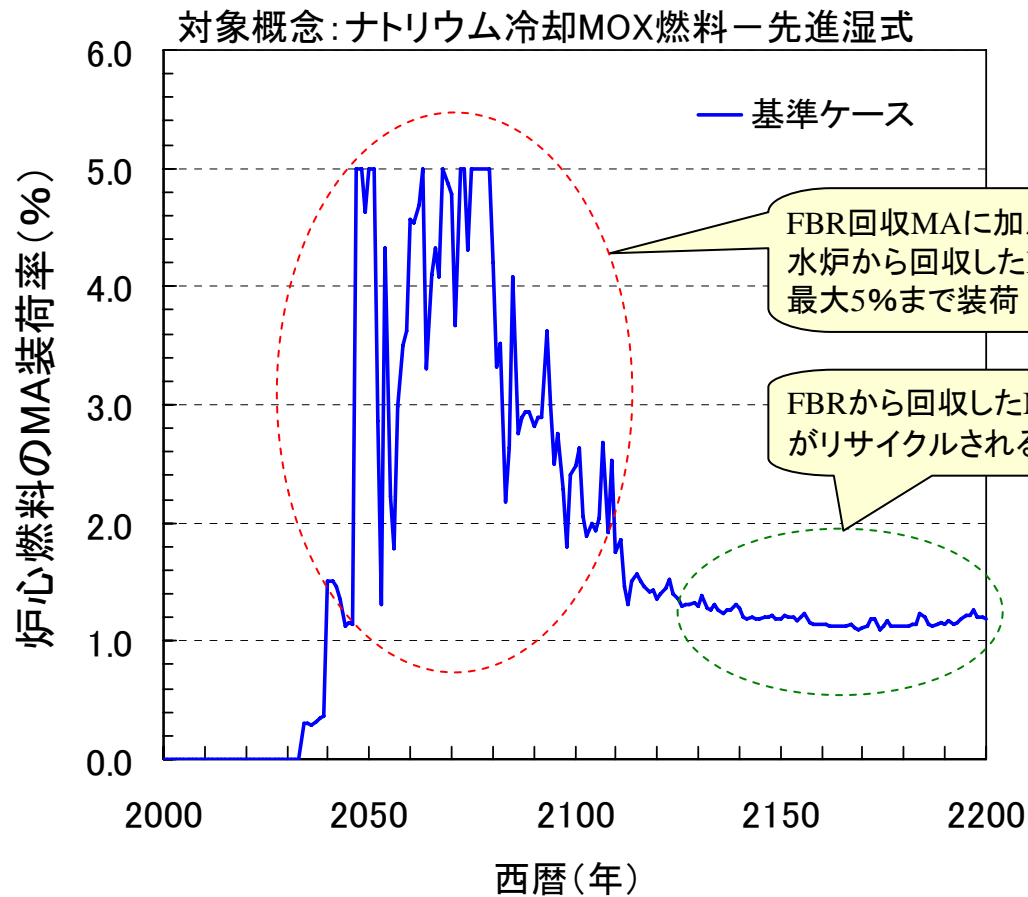
増殖比1.1の高速増殖炉を導入した場合(ケース1)



増殖比1.2の高速増殖炉を導入した場合(ケース2)

FBR燃料中のMA装荷率

● FBR炉心燃料中のMA装荷率は、軽水炉からFBRへの移行過程で平均3~4%、移行完了後は約1%



【主な想定条件など】

- ① LWRからのMAは5%を上限にFBRに装荷する。余ったMAは次の年に装荷する。
- ② LWR再処理では、第二軽水炉再処理工場以降、MAをUやPuから分離して回収することを想定。平均的な再処理待ち時間は20年程度。
- ③ FBR再処理では、FBRとプルスーマルの使用済燃料を再処理し、MAはUやPuと共にTRU製品として回収することを想定。最初の施設からMAを回収する。
- ④ 2050~2100年過ぎまでにかけてMA装荷率が変動するのは、FBR新設炉の有無の影響である。

FBR炉心燃料のMA装荷率

いて 1.10 と 1.03 の 2 つの設計要求を設定して 2 つの炉心概念を設計している。1 つは軽水炉から高速増殖炉に 60 年間程度で置き換えるための炉心概念（資源重視炉心）であり、そのために必要な増殖比が 1.10 程度であることから、この増殖比で燃料費を低減するために炉心燃料の平均燃焼度を高く取れるよう設計している。2 つ目は全ての軽水炉が高速増殖炉に置き換わり燃料増殖が不要となった段階の炉心概念（経済性重視炉心）であり、プルトニウムバランスを図りつつ、ウラン資源を有効利用するために燃料サイクル中のロス（冷却期間 4 年での核分裂物質の壊変による損失等）を考慮しても増殖比 1 を確保できる増殖比 1.03 とし、最大の燃焼度を達成できるよう設計している。

しかしながら、この増殖比 1.10 という設計要求は、プルトニウム需要量に対する供給量の余裕を十分考慮したものとなっていない可能性がある。例えば、何らかの要因でプルトニウムの生産が予定量に達しない場合、ストックを含めプルトニウム供給に余裕がなく、燃料確保の不安定性が無視できなくなる場合が考えられる。さらに、我が国の高速増殖炉サイクル技術を世界標準とするためには、各国のエネルギー需給状況に応じて増殖性能を柔軟に変更できることが必要と考えられる。

このため、増殖比を 1.20 程度とした設計を行い、同時に燃焼度を向上させられる方策を検討し、燃料増殖に関する柔軟性を確保できるようにしておくべきである。

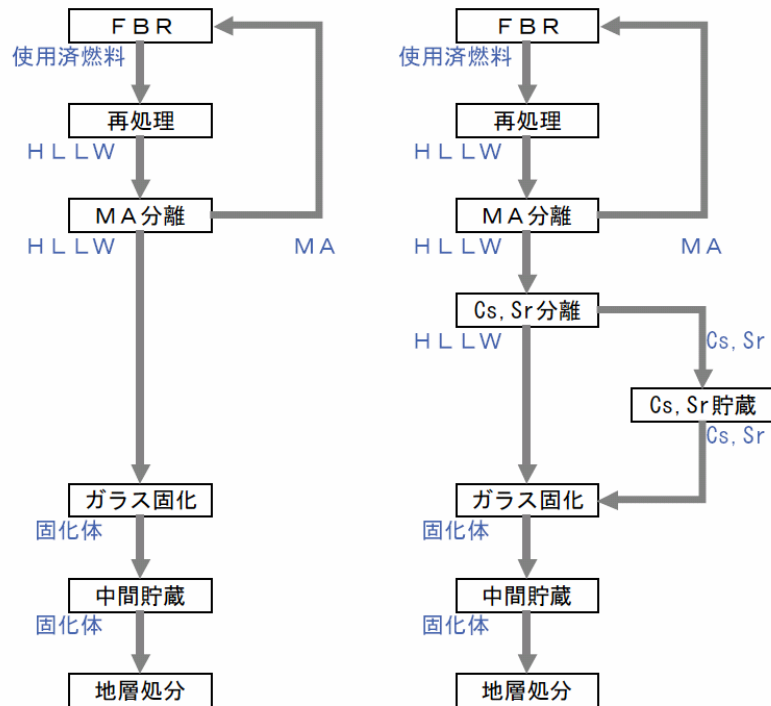
⑥ 核燃料中の MA 含有率と設計対応

軽水炉体系から高速増殖炉サイクル体系への移行期においては、中間貯蔵された軽水炉燃料やプルサーマルの燃料から回収された MA の物質収支を考慮した場合、高速増殖炉燃料に含有される MA 量は最大 5 %、平均 3 ~ 4 %程度と想定されている。この範囲の含有率であれば、炉心特性に与える影響は軽度であり、炉心設計により対応が可能である。

一方、高速増殖炉の平衡サイクルにおいては、高速増殖炉の燃料中の MA の含有率は約 1 %程度で推移する。

セシウムーストロンチウムの減衰処分に係る検討結果

Cs-Srの減衰処分に係るシナリオ



シナリオ1

シナリオ2

白金族類の分離により、更なるガラス固化体発生量の削減が見込まれる

各シナリオにおける経済性評価結果

費目 (百万円/tHM)	シナリオ 1		シナリオ 2	
	FP 酸化物 15 wt%以下	FP 酸化物 15 wt%以上	FP 酸化物 20 wt%以下	FP 酸化物 25 wt%以下
Cs-Sr 分離	—	—	30	30
Cs-Sr 貯蔵	—	—	8	21
固化体中間貯蔵	33	31	25	16
地層処分	73	69	54	44
合計	106	100	117	111

各シナリオにおけるガラス固化体発生量の評価結果
(使用済燃料(新燃料1tHM からの発生分)を再処理して発生する高レベル廃棄物当たり)

	シナリオ 1		シナリオ 2	
	FP 酸化物 15 wt%以下	FP 酸化物 15 wt%以上	FP 酸化物 20 wt%以下	FP 酸化物 25 wt%以下
ガラス固化体発生量 (本/tHM)	1.08	1.03	0.81	0.65
制限因子	FP 酸化物濃度	発熱量	FP 酸化物濃度	FP 酸化物濃度

以上のように、MA 含有率は時期によって異なることから、プラント設計、炉心設計においては、約 1～5%程度の MA 含有率を考慮した対応をとることが適切である。

⑦ 長寿命核分裂生成物の分離

長寿命核分裂生成物（LLFP）の分離は、数百万年後といった超長期における放射能の環境への潜在的影響を 1 桁程度低減する効果が認められる。このため、高速増殖炉サイクルの実用化戦略調査研究フェーズⅡにおいては、LLFP の分離を設計要求に含め検討を行っている。その結果、現時点においては多くの困難な課題が残されており技術的実現性が低いことが示された。LLFP の分離については、今後は基礎的な課題と位置づけることとし、今後 5 年間の研究開発においては設計要求に含めないこととしている。

高レベル放射性廃棄物（ガラス固化体）を地層処分する際、ガラス固化体が周囲に過大な熱影響を与えないよう、一定の間隔を保って設置することが考えられている。このため、再処理工程において発熱性の核種を分離し、一定の期間保管を行い発熱量を減衰させるなどの方法が可能となれば、地層処分施設の設計に与える条件を緩和する効果が期待される。セシウムやストロンチウムといった核種は発熱性が高いため、これらの核種分離によりガラス固化体発生量を低減できる可能性がある。一方、分離した核種の一時貯蔵のための新たなコストが必要になるという課題もある。また、白金族元素の除去によりガラス固化処理技術の高度化が図れるとともに、析出しやすい元素（モリブデン等）の除去によりガラス固化体の発生量を低減できる可能性もあり、このような観点から、分離する必要性は高い。

したがって、LLFP の分離を今後 5 年間の研究開発において設計要求に含めないことは適切であるが、むしろセシウムやストロンチウムなどの発熱性核種、白金族やモリブデンの分離に関する研究開発を進めるとともに東海再処理工場等で進められているガラス固化処理高度化に係る研究開発成果を反映しつつ検討を進めていくことが適切である。

⑧ 保守、補修性への考慮

保守、補修性に関連し、主な機器について、ISI 要求に基づいた供用期間中検査項目、破損の起こりやすさに基づいた補修レベル、などを考慮している。また、定期検査期間を評価し、運転コストに与える影響を考慮している。

しかしながら、今後の機器設計・機器配置の具体化、詳細化においては、保守、補修性への配慮はユーザーの視点から極めて重要であり、実用化への移行に当たって徐々に重要性が増して行く。今後5年間の研究開発においては、ナトリウム可視化技術を含む検査装置、蒸気発生器検査装置、ナトリウム中補修技術の開発が重要である。また、メンテナンスフリー設計、取替機器の長寿命化、設計段階からの状態監視保全（CBM）技術、運転中保全（OLM）の適用を考慮すべきである。

保守、補修性については、包括的には開発目標「経済性」の一環として評価されているが、安全性や環境負荷低減性（放射性廃棄物発生量の低減）をも考慮し、設計要求として積極的に取り込むなど、その取り扱いを考慮すべきである。