

図1-2-1 実用炉の概念

電気出力: 150万kWe × 2
(ツインプラント)

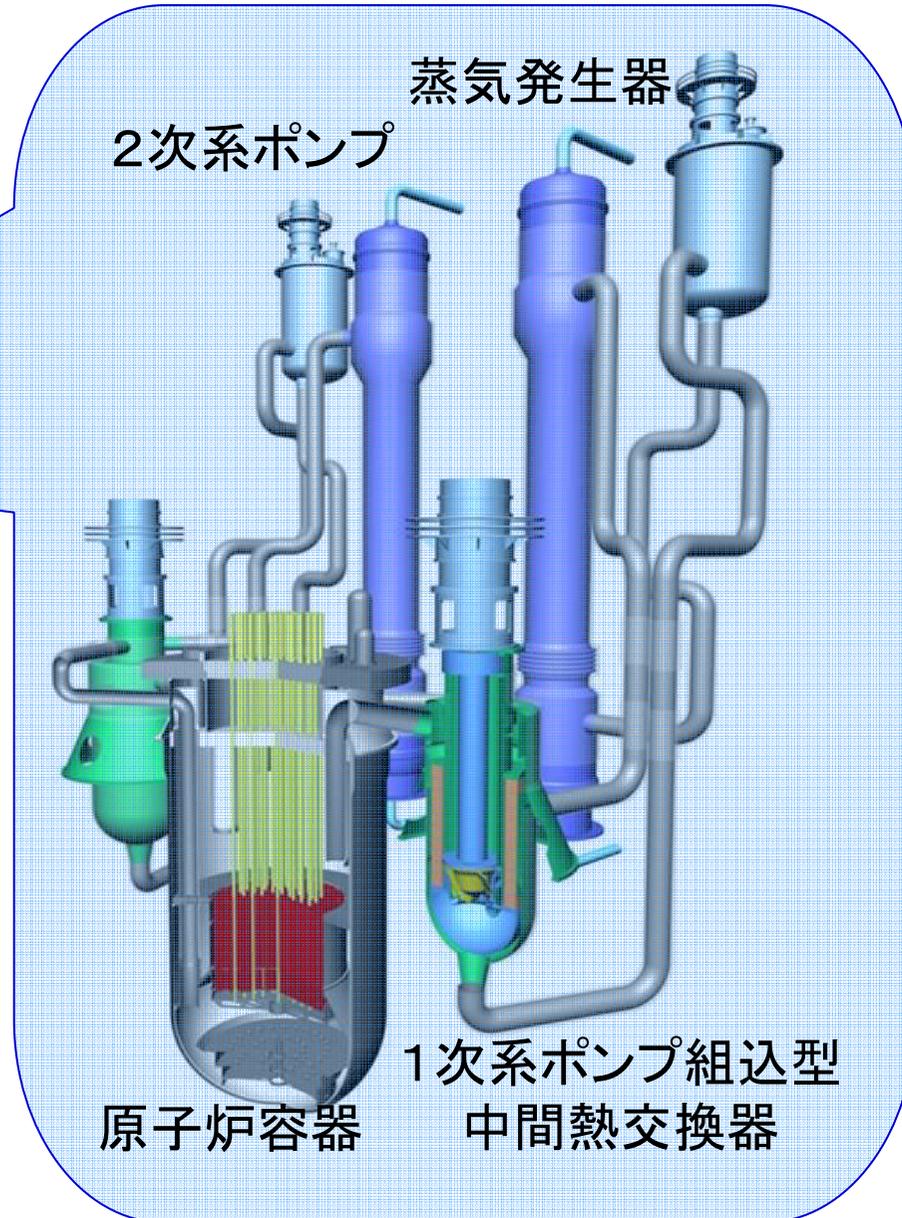
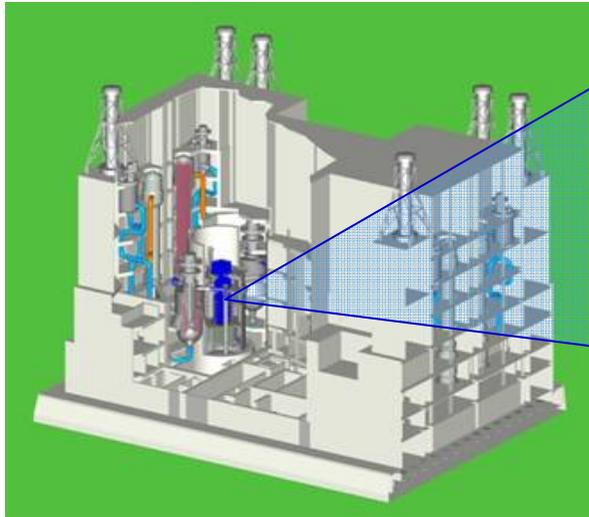
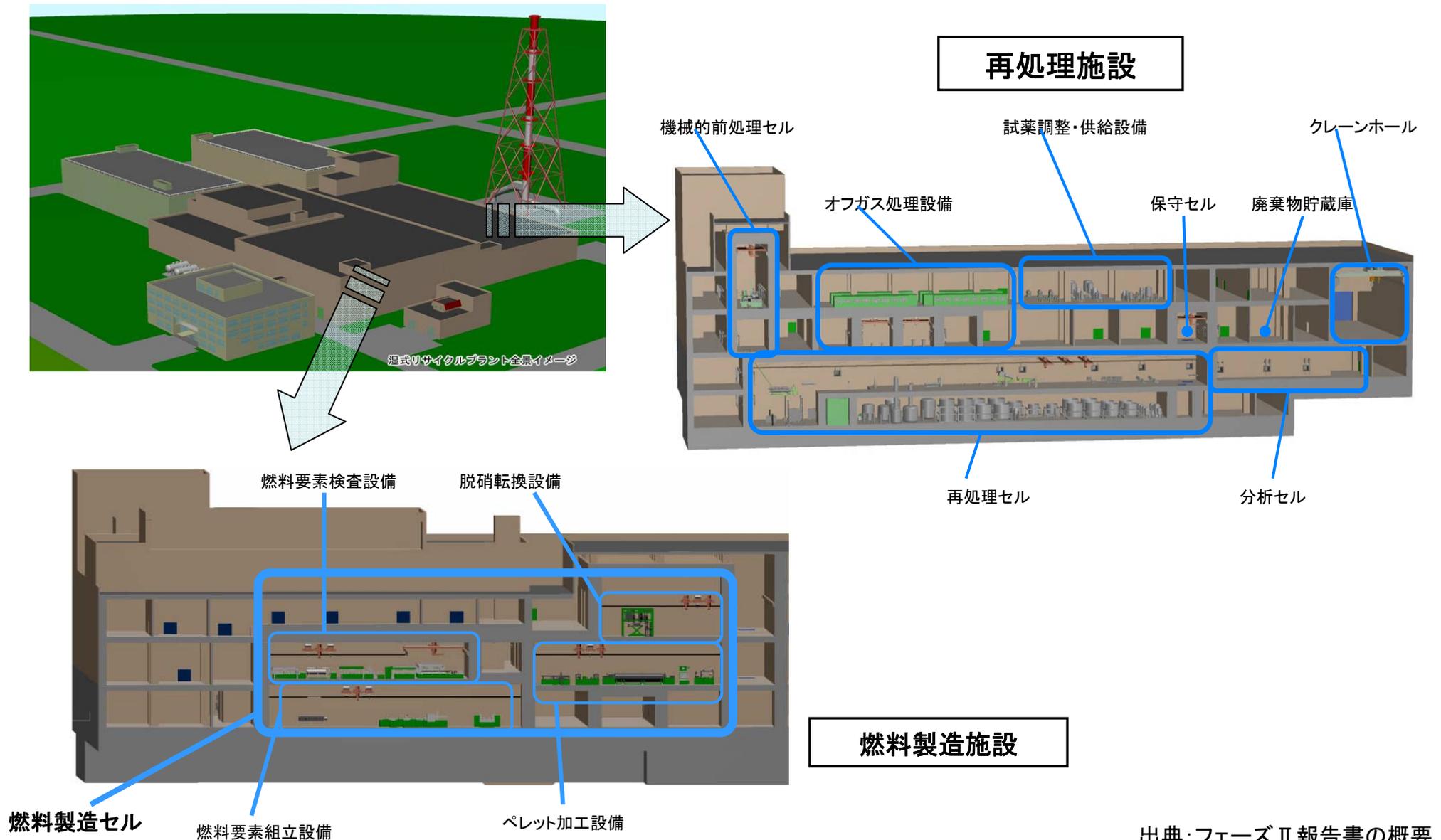


図1-2-2 燃料サイクル実用施設の概念



出典: フェーズ II 報告書の概要

2. 主概念の今後の研究開発の進むべき方向

当委員会は、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り、今後研究開発を特に進めるべきものとして、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の組み合わせを「主概念」として選択した（図 1-2-1 及び図 1-2-2 参照）。

この選択のための検討を通じ、次のような、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。今後の研究開発は、これらの点に留意して行われるべきであるとする。

(1) 開発目標、設計要求へのコメント

開発目標や設計要求は、社会情勢の変化などに適応していなければならない。このため、必要に応じて適宜適切な見直しを行うべきであるとする。

① 軽水炉から高速増殖炉への移行期の明確化

FS 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。これまでの研究開発により、2110 年頃以降、軽水炉のリプレースが終了し、高速増殖炉のみが存在する高速増殖炉サイクル平衡期における高速増殖炉サイクルの実用化像を検討するための技術的な知見が積み重ねられてきている。

しかし、高速増殖炉サイクル平衡期に至るまでの過渡期にあたる、2050 年頃に商業ベースの高速増殖炉の導入が開始された以降の高速増殖炉サイクル導入期、さらには、現在から 2050 年頃に商業ベースでの高速増殖炉の導入が開始されるまでの研究開発段階から実証段階、それぞれの時期に建設される施設の姿についても明確にすることが不可欠であるとする（図 1-2-3 参照）。これらについては、「FS フェ

図 1 - 2 - 3 軽水炉から高速増殖炉への移行期

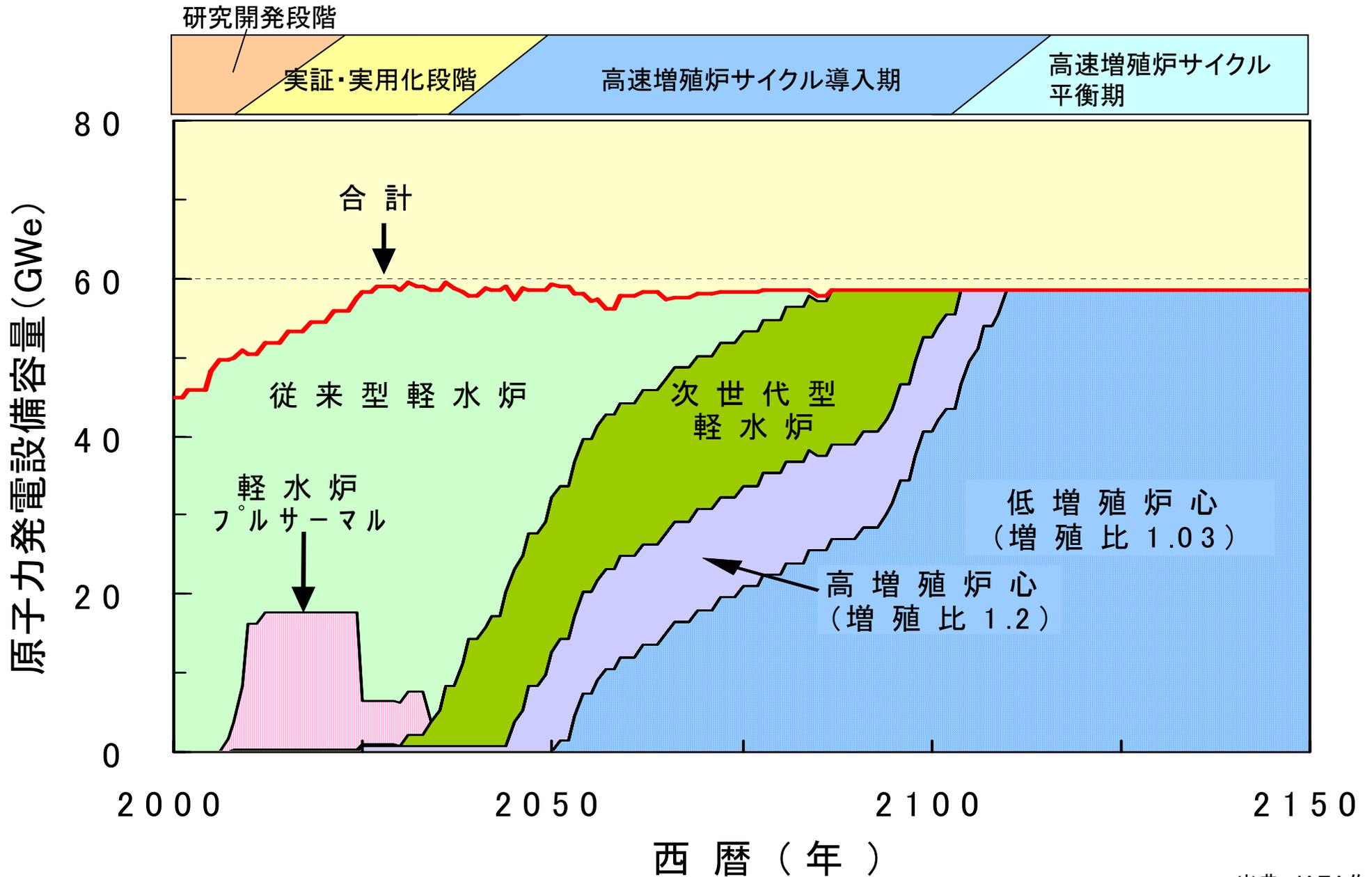


表1-2-1 開発目標を実現するための設計要求

| 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1.2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 | <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 |

* : ユーザーとの協議が続けられている項目

ーズⅡ報告書」においても明確にされておらず、これまでの研究開発においては十分に意識されていなかったと考える。

それぞれの時期に建設されるべき施設に対する設計要求は、当然、それぞれ異なる。従って、それぞれの時期に対応した適切な開発目標、設計要求を定めて研究開発を行う必要があると考える。また、その研究開発の成果は、個々の要素技術の進展のみならず、要素技術が適切に組み合わせられて総合的な判断が可能となる施設の概念設計という形でとりまとめられるべきである。

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研究開発は、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」）を定め、それぞれの開発目標に対応した設計要求に適合するように研究開発を行うという手法は妥当であると考ええる。（表1-2-1参照）

「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ことを意味している。

しかし、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、マイナーアクチニドを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や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、どれかひとつの開発目標を優先して判断するのではなく、全ての開発目標を一定のレベルで満たしているかどうかを判断すべきである。また、設計要求は全体のバランスをはかりつつ適切に設定すべきであると考ええる。

表1-2-2 ナトリウム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 *

(1) 異常発生防止

(2) 異常の制御 ・ (3) 事故の制御

(4) シビアアクシデントの管理

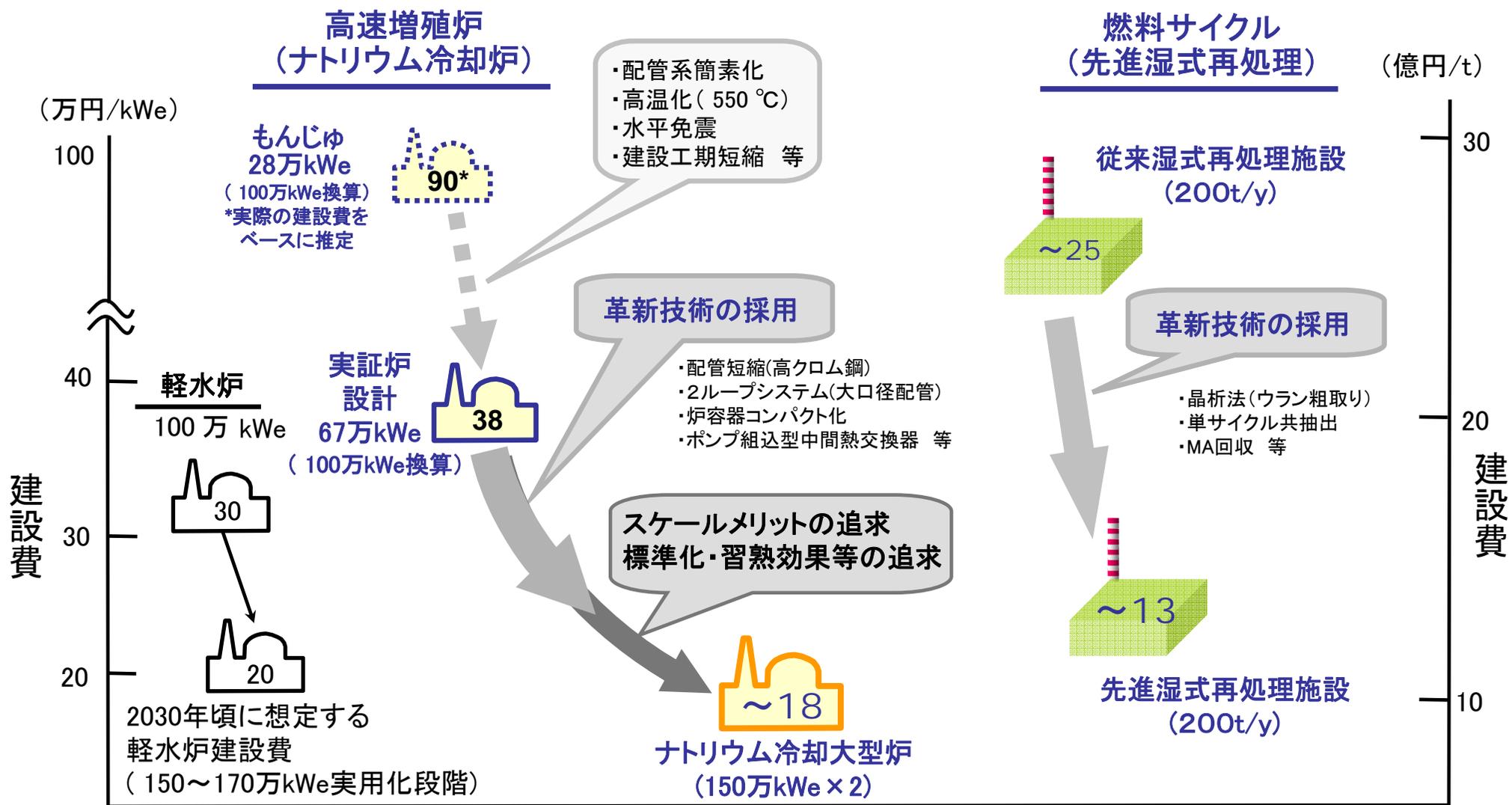
| | | | | |
|--------------------------------------|------------------------------|-------------------------------|--|-----------------------------|
| ◆適切な安全裕度 ◆設計建設における品質管理 ◆予防保全など | | 設計基準事象(DBE) | 設計拡張条件(DEC) | 設計拡張条件(DEC) |
| | 設計信頼度の目標 | $10^{-4}/d \sim 10^{-6}/d$ ** | $10^{-1} \sim 10^{-2}/d$ | $10^{-1} \sim 10^{-2}/d$ |
| | 止める 原子炉停止系 | 主炉停止系 後備炉停止系 | SASS (受動的炉停止機構) | 閉じ込める 再臨界回避 事故後融体冷却保持 |
| 冷やす 崩壊熱除去系 | 多重性・多様性 自然循環 外管による液位確保 | アクシデント マネジメント | 炉容器内終息 気密格納容器 + FP除去機能付き コンファインメント 放射能影響緩和 | |

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

図1-2-4 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



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は、「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」とすることが適切であると考ええる。

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、現行の軽水炉よりも安全性の向上に配慮したものとすることが検討されている（表 1-2-2 参照）。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と考ええる。

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は、「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」とすることが適切であると考ええる（図 1-2-4 参照）。

「FS フェーズⅡ報告書」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 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%が目標とされており、現行の軽水炉よりも経済性が向上するよう配慮されたものとなっている。高速増殖炉サイクルにおいても、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、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、多数基建設による習熟効果の促進を目指すべきであると考ええる。なお、次世代軽水炉の設計要求は、今後の検討におい

図1-2-5 増殖比の違いによる高速増殖炉導入特性の比較

- 2045年にFBRサイクルを本格導入した場合の軽水炉からFBRへの移行完了は2104年と見込まれる。
- 軽水炉プルサーマルの運用は増殖比1.1の場合で2024年まで、増殖比1.2の場合には2033年までと予想される。
- 次世代型軽水炉の導入規模は、最大で20GWe程度と見込まれる。

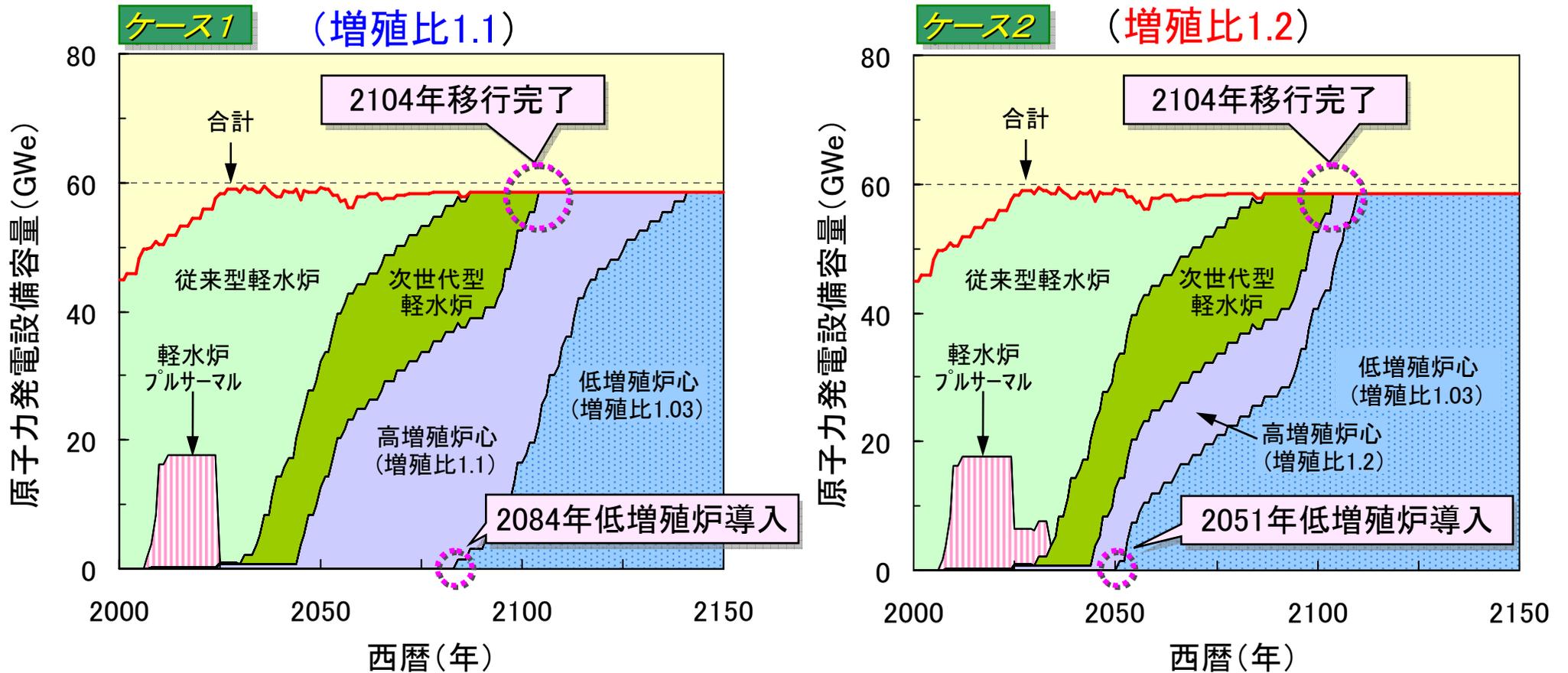
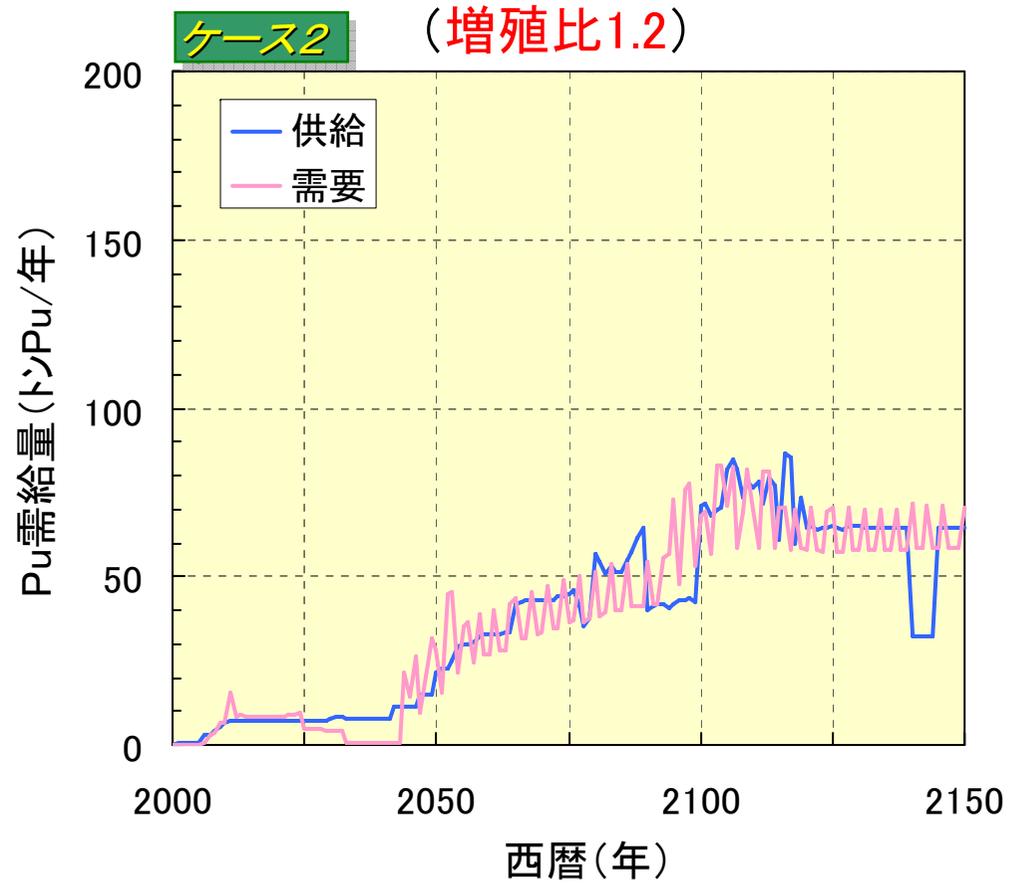
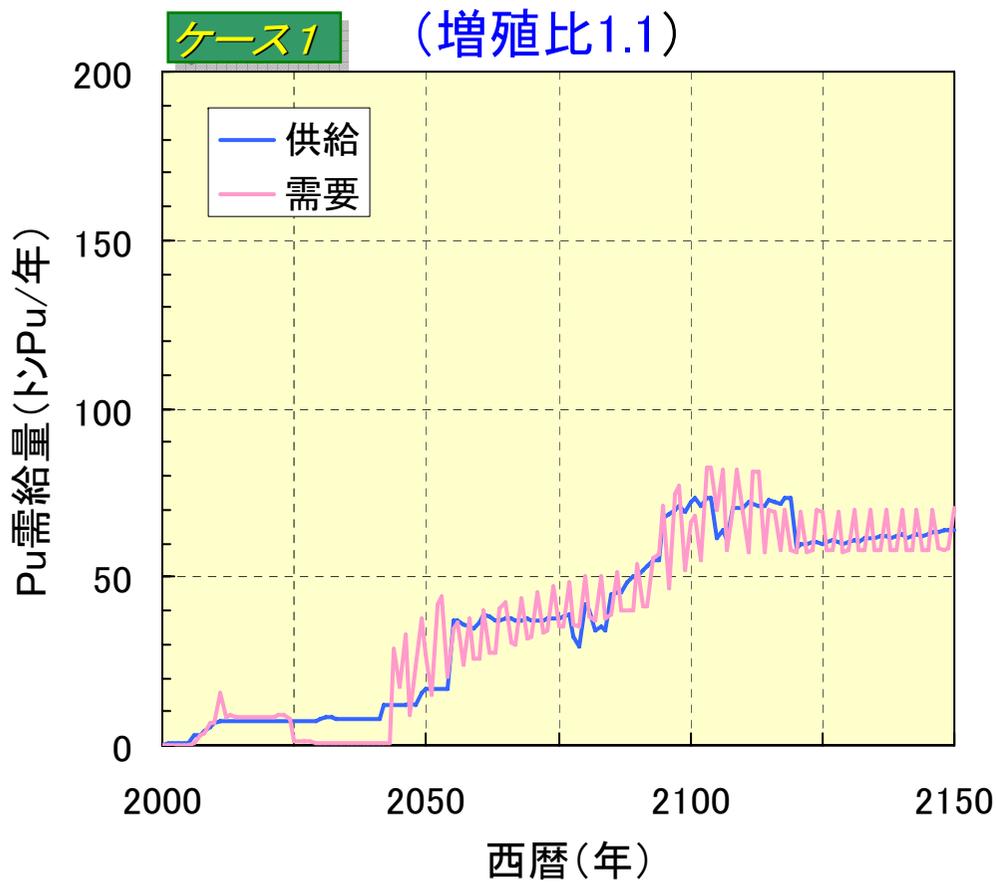


図1-2-6 増殖比の違いによるプルトニウムの年間需給量の比較

● 増殖比1.1および1.2のケースともに、解析期間全体を通してプルトニウムの年間の需要量と供給量はほぼバランスしている



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と考えます。

⑤ 増殖性能

「FS フェーズⅡ報告書」においては、増殖比（原子炉に燃料として装荷したプルトニウムの核分裂量と、炉内において、核分裂を起こさないウラン238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239に変換する量の割合）について、1.10と1.03の2つの設計要求を設定し、それぞれに対応した2つの炉心概念を設計している。ひとつは、高速増殖炉サイクル導入期に対応し、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）である。この時期に必要なプルトニウム量を確保するため増殖比を1.10程度として設計している。もう一つは、高速増殖炉サイクル平衡期に対応し、一定規模の高速増殖炉を維持し続けるための炉心概念（経済性重視炉心）である。プルトニウムバランスを図りつつ、燃料サイクルでのロス（使用済燃料を再処理するまでの冷却期間を4年と設定しており、この間の核分裂性物質の壊変による損失など）を考慮しても増殖比1が確保できるように増殖比1.03として設計している。なお、経済性重視炉心では、炉心における中性子の利用効率が資源重視炉心より高いことから、高燃焼度が達成でき、経済性が向上する。

しかし、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裕度を十分に考慮したものとはいえない可能性があると考えます。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、燃料生産に必要なストックが不足するなど、燃料確保の点で不安定性が生じる可能性があると考えます。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、各国それぞれのエネルギー需給状況によって高速増殖炉への設計要求が異なることから（例：中国やインドは、高速増殖炉を短期間に数多く導入するエネルギー計画を発表している。しかし、軽水炉の運転実績が少なく軽水炉使用済燃料が少ないため、そこからのプルトニウム供給は十分に期待することができず、高速増殖炉に対し高い増殖比を要求するものと考えられる）、高い増殖比に対応できるポテンシャルを設計上確保することへの配慮が重要と考えます。

図1-2-7 高速増殖炉新燃料中のマイナーアクチニド装荷率

● FBR新燃料中のMA装荷率については、第2軽水炉再処理施設(年間処理量1200tHM/年)の運転期間中は3~4%程度と見込まれるが、軽水炉からFBRに移行し終えた後では概ね1%で推移する。

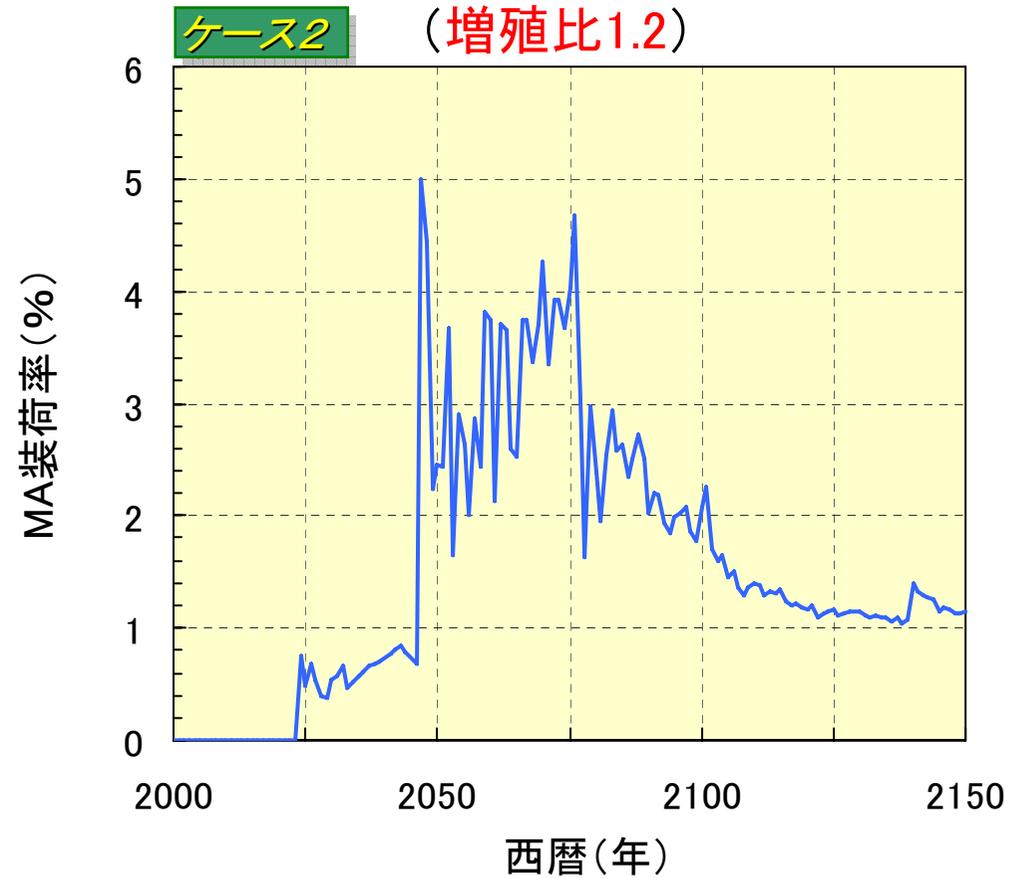
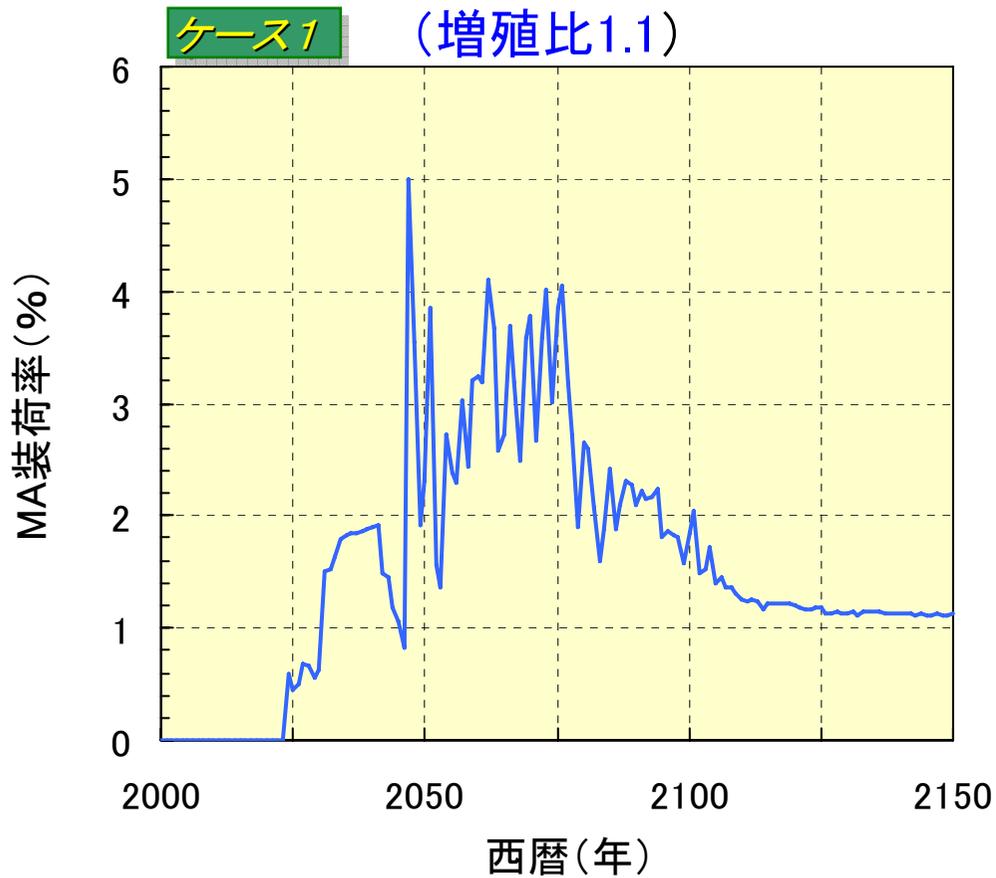
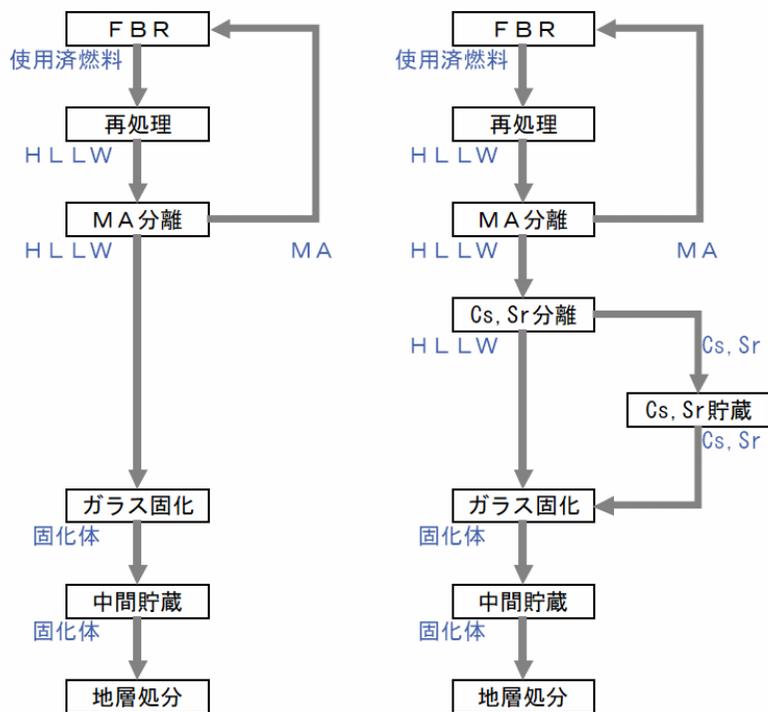


表1-2-3 セシウム-ストロンチウムの減衰処分に係る検討結果

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 |

このため、「FS フェーズⅡ報告書」では、設計要求として増殖比 1.10 とすることを提案しているが、設計要求としては増殖比 1.20 程度とし、同時に燃焼度を向上する方策を検討し、燃料増殖に関する柔軟性を確保すべきである（図 1-2-5 及び図 1-2-6 参照）。

⑥ 核燃料中の MA 含有率と設計対応

「FS フェーズⅡ報告書」においては、2050 年頃に商業ベースの高速増殖炉の導入が開始された以降の高速増殖炉サイクル導入期における、それまでに中間貯蔵された軽水炉燃料やプルサーマル燃料を含む軽水炉燃料の再処理から回収される MA の物質収支を考慮した場合、これを高速増殖炉で燃焼して減らすためには、高速増殖炉燃料に含有させる MA 量は最大 5%、平均 3～4%程度が必要であるとされている（図 1-2-7 参照）。

このような外的環境を踏まえ、設計要求として高速増殖炉燃料中の MA 含有率を 5%と設定しているが、「FS フェーズⅡ報告書」で示された高速増殖炉の概念は、この範囲の MA 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としている。なお、高速増殖炉サイクル平衡期においては、MA の物質収支を考慮すると、高速増殖炉燃料中の MA 含有率は 1.3%程度で十分とされている。

また、高速増殖炉燃料の MA 含有率を 5%と設定した場合、再処理及び燃料製造においてもこれに対応したプロセス設計、遮蔽設計、取扱設備設計などが必要となるが、「FS フェーズⅡ報告書」ではこれに対応が可能であるとしている。

高速増殖炉燃料に要求される MA 含有率は時期によって異なるが、さまざまな時期を見据えて、高速増殖炉、再処理及び燃料製造施設の設計要求及び設計の前提を、MA 含有率約 1～5%程度としていることは妥当であると考えられる。

⑦ 長寿命核分裂生成物等の分離

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、これまで LLFP の分離を設計要求に含め研究開発が行われてきた。その結果、「FS フェーズⅡ報告書」では、LLFP の分離変換について、現時点においては「基礎的な課題が多く、研究開発に長期間を要することから将来の目標」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。また、ガラス固化体の製造の際に核分裂生成物（FP）を多く混入しようとするとう発熱量が制限因子になるとされている。このため、再処理工程において発熱性の核種を分離しガラス固化体に FP を含めないようにすれば、地層処分施設に必要とされる面積を縮小できるとともに、ガラス固化体の発生量を減らす効果が期待できる。なお、分離した発熱性の核種については、一定の期間保管を行い、発熱量を減衰させた後にガラス固化体に混入して処分することが考えられている。但し、分離した核種の一時貯蔵が新たなコスト増につながるという問題が生じる。（表1-2-3参照）

LLFP の分離については、効果が数百万年後といった極めて遠い将来に期待されるものであること、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から、今後5年間の研究開発において設計要求に含めないとするは妥当であると考えられる。むしろ発熱性核種（セシウムやストロンチウム）等の地層処分に大きな影響を与える核種の実分離に関する研究開発を進めることが適切であると考えられる。

なお、再処理施設の設計は、放射性廃棄物の地層処分に影響を与えることから、関連する設計要求を定めるにあたっては放射性廃棄物の処分にかかわる研究者と連携をより一層深めるべきである。

⑧ 保守、補修性への考慮

「FS フェーズⅡ報告書」では、保守、補修性に関連し、主な機器についての供用中検査の要求項目、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ている。

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、また、研究開発段階から実用化段階への移行とともに機器設計・機器配置の具体化、詳細化が進むことから、徐々にその重要性が増していくものとする。今後5年間は、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、及びナトリウム中補修技術の開発が重要と考える。また、メンテナンスフリー設計、取替機器の長寿命化、及び設計段階からの状態監視保全（CBM）・運転中保全（OLM）技術の適用を取り上げて研究開発を進めることが必要と考える。

保守、補修性について、「FS フェーズⅡ報告書」では開発目標「経済性」の一環として評価している。しかし、今後の研究開発においては、安全性や環境負荷低減性（放射性廃棄物発生量の低減）などをも考慮して、保守、補修性に積極的に取り組むべきであり、保守、補修性を設計要求に取り上げることを検討すべきである。