

高速増殖炉サイクルの実用化戦略調査研究 フェーズⅡ最終報告書の概要



| | |
|-----|-------------------------|
| 序 論 | 実用化戦略調査研究のあらまし |
| 第Ⅰ部 | 研究開発の重点化の考え方 |
| 第Ⅱ部 | 2015年頃までの研究開発計画とそれ以降の課題 |

(独)日本原子力研究開発機構
日本原子力発電株式会社

2006年3月



序 論

実用化戦略調査研究のあらまし

目 次

- (1) 我が国における高速増殖炉サイクル導入の意義
- (2) 実用化戦略調査研究の経緯
- (3) 実用化戦略調査研究の展開
- (4) 実用化戦略調査研究における協力体制
- (5) 実用化戦略調査研究の実施方針
 - (a) 開発目標
 - (b) 設計要求への展開
 - (c) 高速増殖炉サイクル全体での整合性
 - (d) フェーズⅡでの検討対象

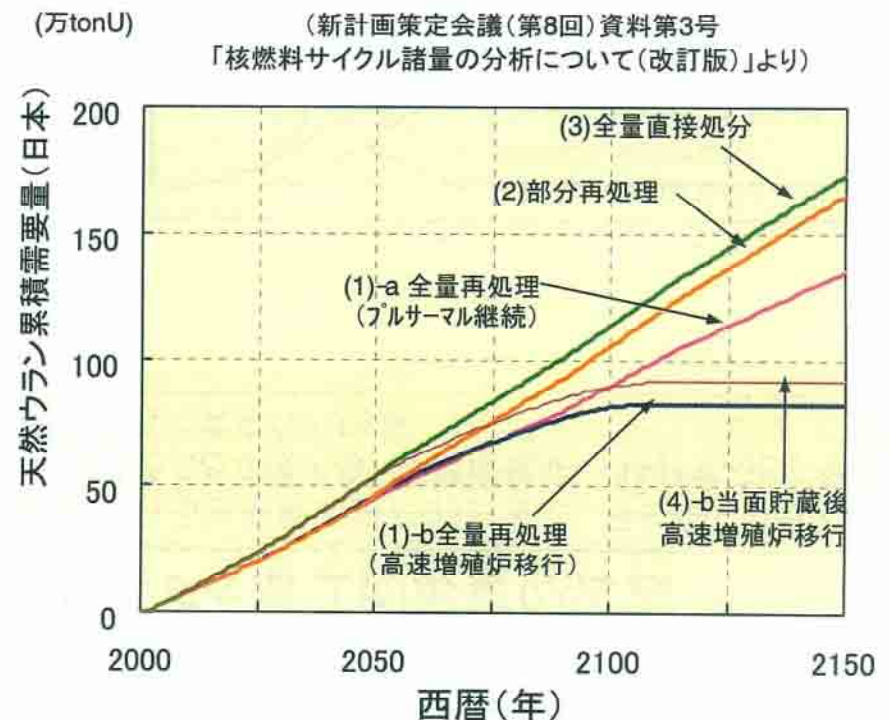
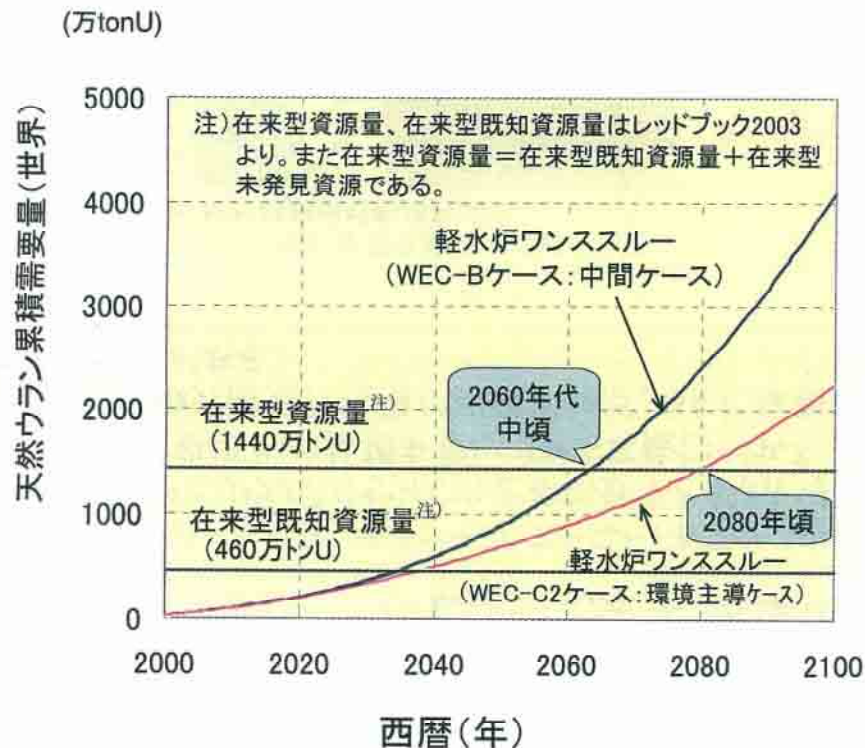


(1) 我が国における高速増殖炉サイクル導入の意義(1/2)

ーウラン資源の有効利用とエネルギーセキュリティの確保ー

世界エネルギー会議 (WEC) における長期の世界エネルギー需給に基づくサイクル諸量解析によれば、軽水炉ワンスルーでは、21世紀中頃以降ウラン資源の枯渇が現実化する可能性がある。

我が国においては、2050年以降、軽水炉のリプレイスにより高速増殖炉を本格的に導入していけば、22世紀には、天然ウランの調達は不要となる。



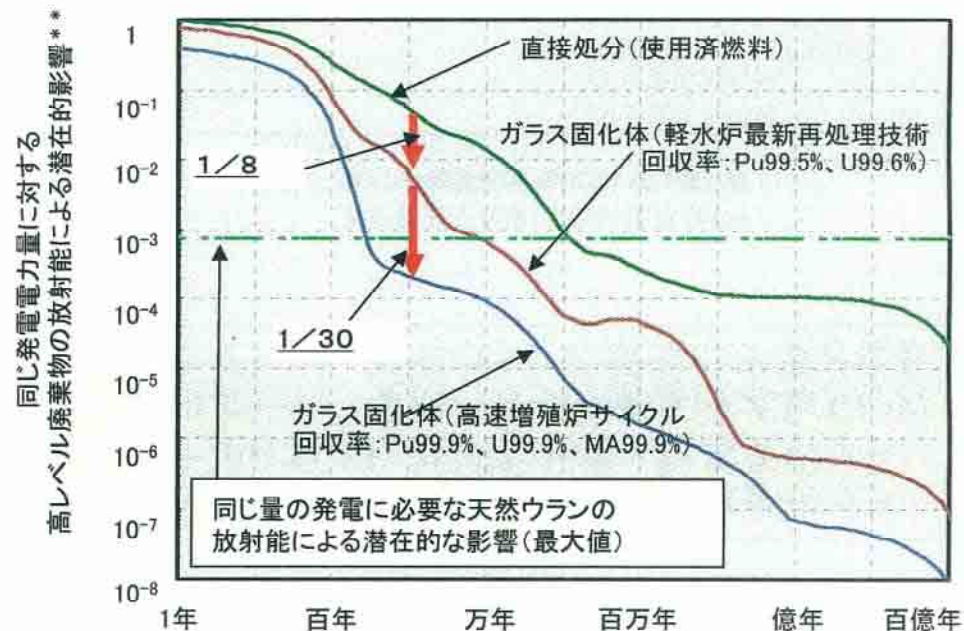
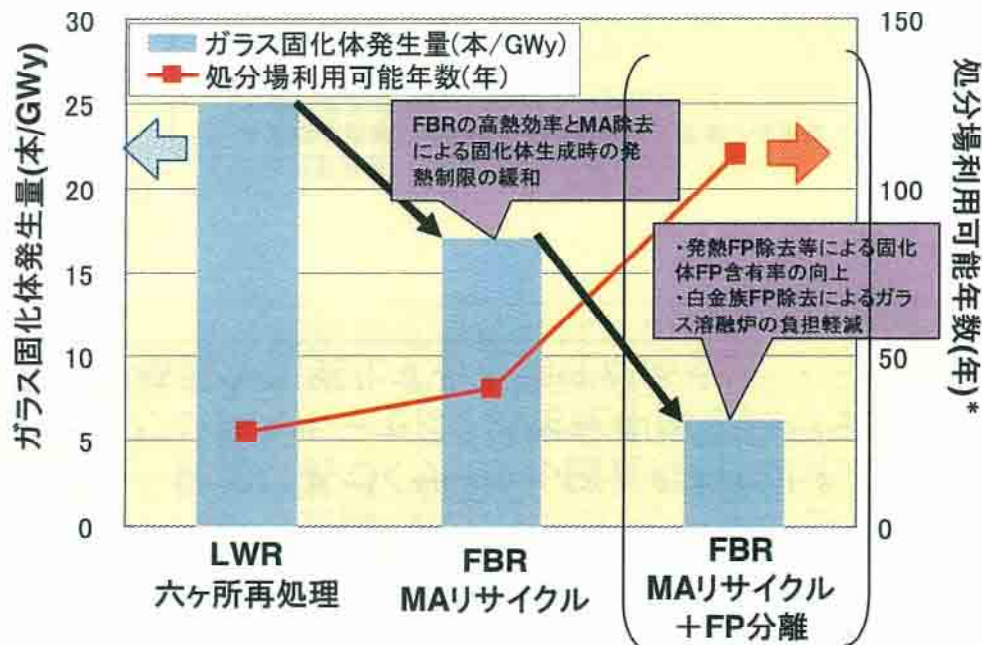


(1) 我が国における高速増殖炉サイクル導入の意義(2/2)

－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MA:マイナーアクチニド(ネプツニウム、アメリシウム、キュリウム)リサイクルと高熱効率とがあいまって高レベル放射性廃棄物の体積を減少できる可能性がある。(また、発熱FP等の分離処分技術が実現すれば、さらに体積を減少できる可能性がある。)

処分される放射能の潜在的影響は、再処理しガラス固化体にすることで減ずる。高速増殖炉へ移行すると、その効果はさらに大きくなりうる。



*) 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) 実用化戦略調査研究の経緯

【原子力政策円卓会議】

【原子力委員会『高速増殖炉懇談会』(1997年12月1日)】

将来のエネルギー源の一つの有力な選択肢として、高速増殖炉の実用化の可能性を技術的・社会的に追求するために、その研究開発を進めることが妥当。



実用化戦略調査研究の開始

サイクル機構、電気事業者、電中研、原研等によるオールジャパン体制で、**1999年7月より、高速増殖炉サイクルの実用化戦略調査研究を開始。**

実用化戦略調査研究の目標:

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年頃に提示する

【原子力長計】

(2000年11月24日)

・高速増殖炉サイクル技術が技術的な多様性を備えていることに着目し、選択の幅を持たせ研究開発に柔軟性を持たせることが重要。サイクル機構において実施している「**実用化戦略調査研究**」等を引き続き推進する。

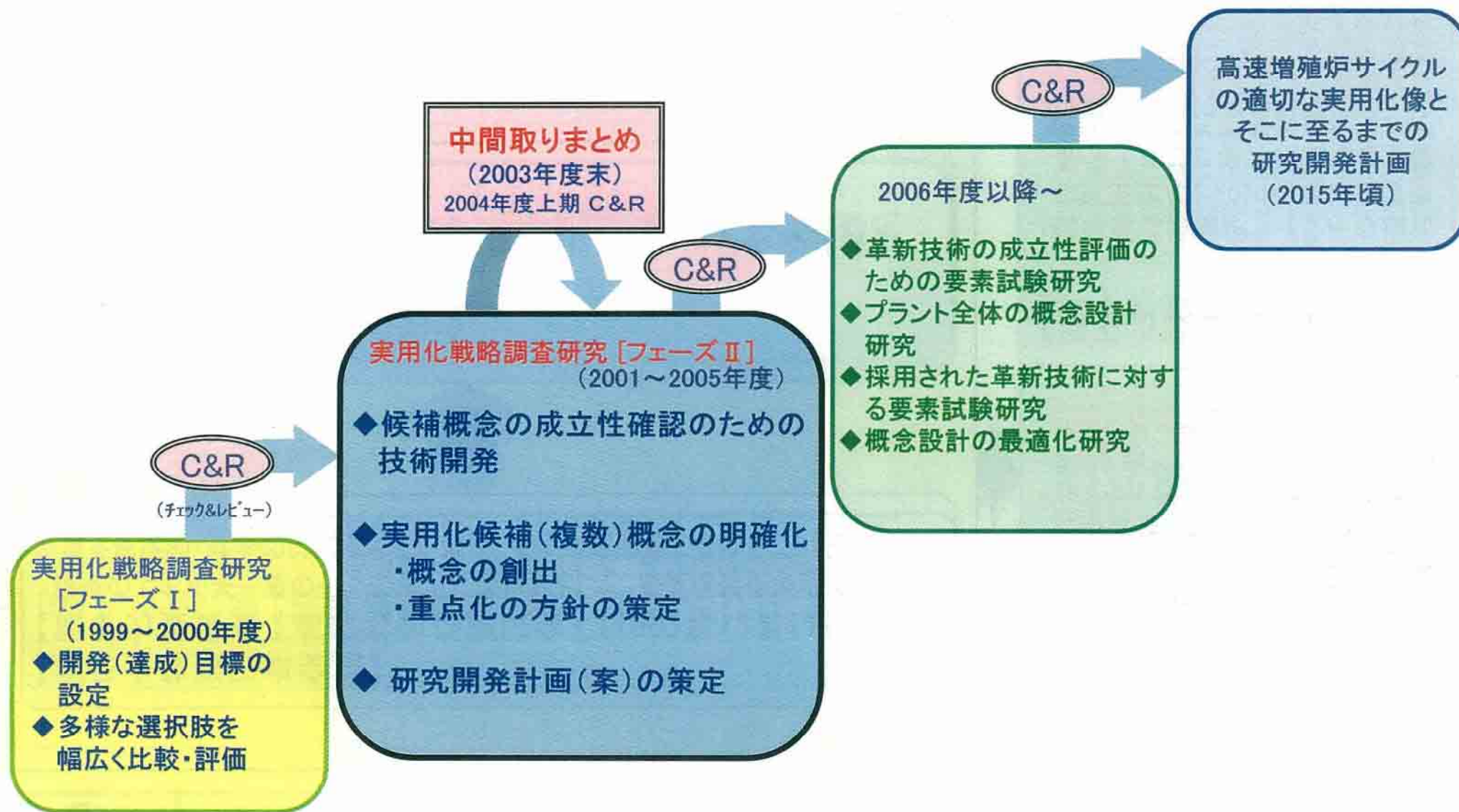
【原子力政策大綱】

(2005年10月11日)

・国は高速増殖炉サイクルの適切な実用化像と2050年頃からの商業ベースでの導入に至るまでの段階的な研究開発計画について**2015年頃から国としての検討を行うことを念頭に、実用化戦略調査研究フェーズⅡの成果を速やかに評価して、その後の研究開発の方針を提示する。**

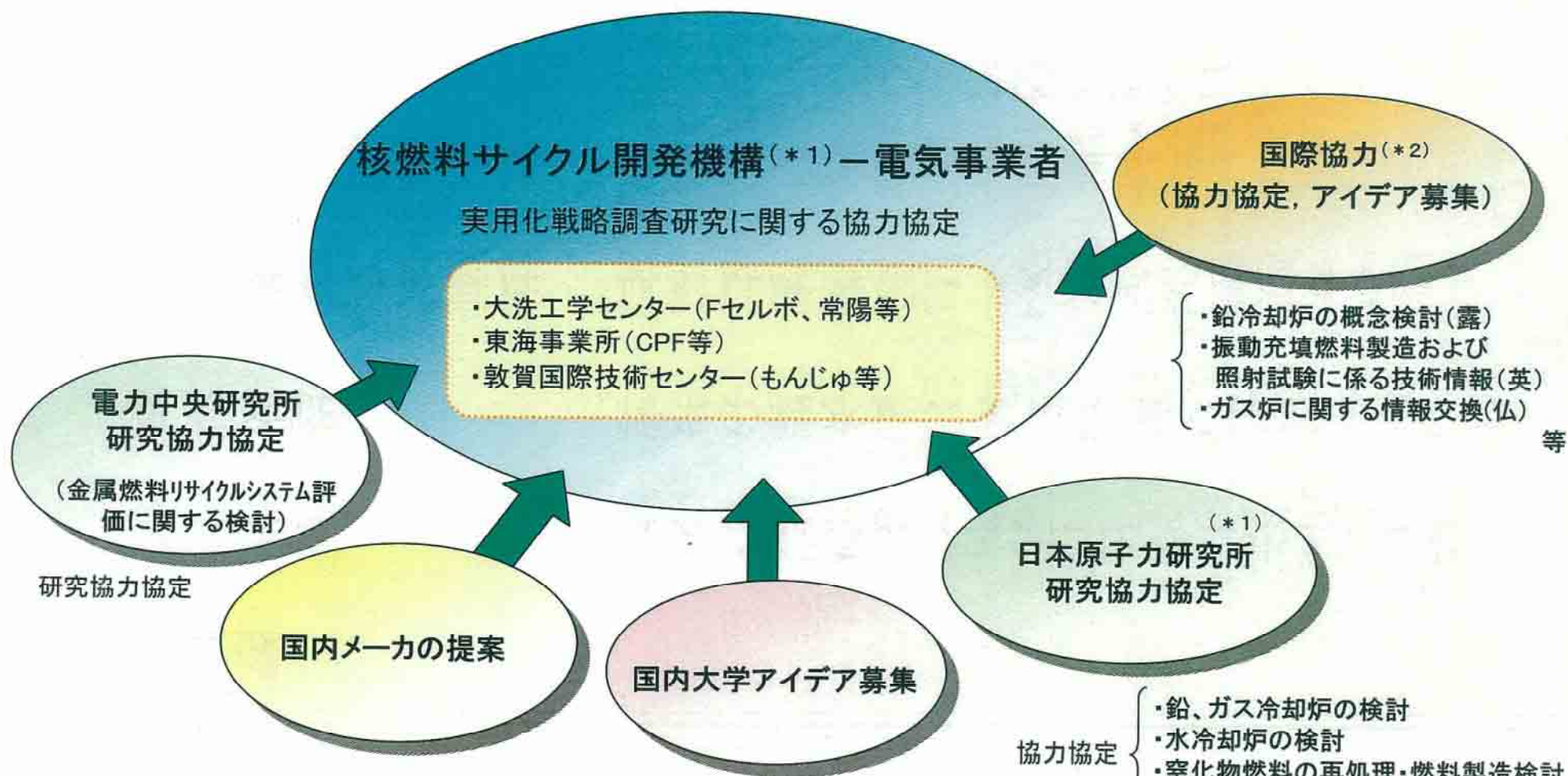


(3) 実用化戦略調査研究の展開





(4) 実用化戦略調査研究における協力体制



(*1) 平成17年10月より「日本原子力研究開発機構」

(*2) 国際協力の現状については、参考一序一(OHP114)を参照



(5) 実用化戦略調査研究の実施方針

(a) 開発目標

●世界に先駆けて、高速増殖炉サイクルの**5つの開発目標**を設定

開発目標

- 安全性 : 社会の既存のリスクに比べて小さいこと
- 経済性 : 将来の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
- 資源有効利用性 : 持続的に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 : 核物質防護及び保障措置への負荷軽減



(5) 実用化戦略調査研究の実施方針

(b) 設計要求への展開

- 開発目標を実際の設計検討作業における具体的な指標に展開するため、高速増殖炉システム、燃料サイクルシステムそれぞれに係る定量的な設計要求を設定

| 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 <small>高速増殖炉サイクル全体としての発電原価 4円/kWh</small> | <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"> ● 再処理・燃料製造費 0.8円/kWh ● 処分費等を含む燃料サイクル費としては 1.1円/kWh |
| 環境負荷低減性 | <ul style="list-style-type: none"> ● 軽水炉の使用済燃料中のMAも経済的に燃焼できるよう、5%程度のMA含有低除染TRU燃料を受入可能 ● 長寿命核分裂生成物の核変換能力 | <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を要求、1/10に削減することを目指す ● UおよびTRUの廃棄物への移行率 0.1%以下（目標） ● 長寿命核種の分離核変換技術の採用などにより処分負荷低減の可能性を追求 |
| 資源有効利用性 | <ul style="list-style-type: none"> ● 増殖比 低除染TRU燃料を用いて増殖比1.0以上を達成できること 1.1以上が達成できる場合は、移行期での経済性向上のため、炉心全体の燃焼度の増加及び連続運転期間の長期化を図る ● 基幹電源としての利用に加え、多目的利用・高熱効率を達成できること（目標） | <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燃料を輸送・取扱い、高線量化により接近性を制限 | <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 プルトニウムが単体の状態で存在しないこと ● 低除染・TRU燃料の使用に伴う高線量化による接近性の制限 |

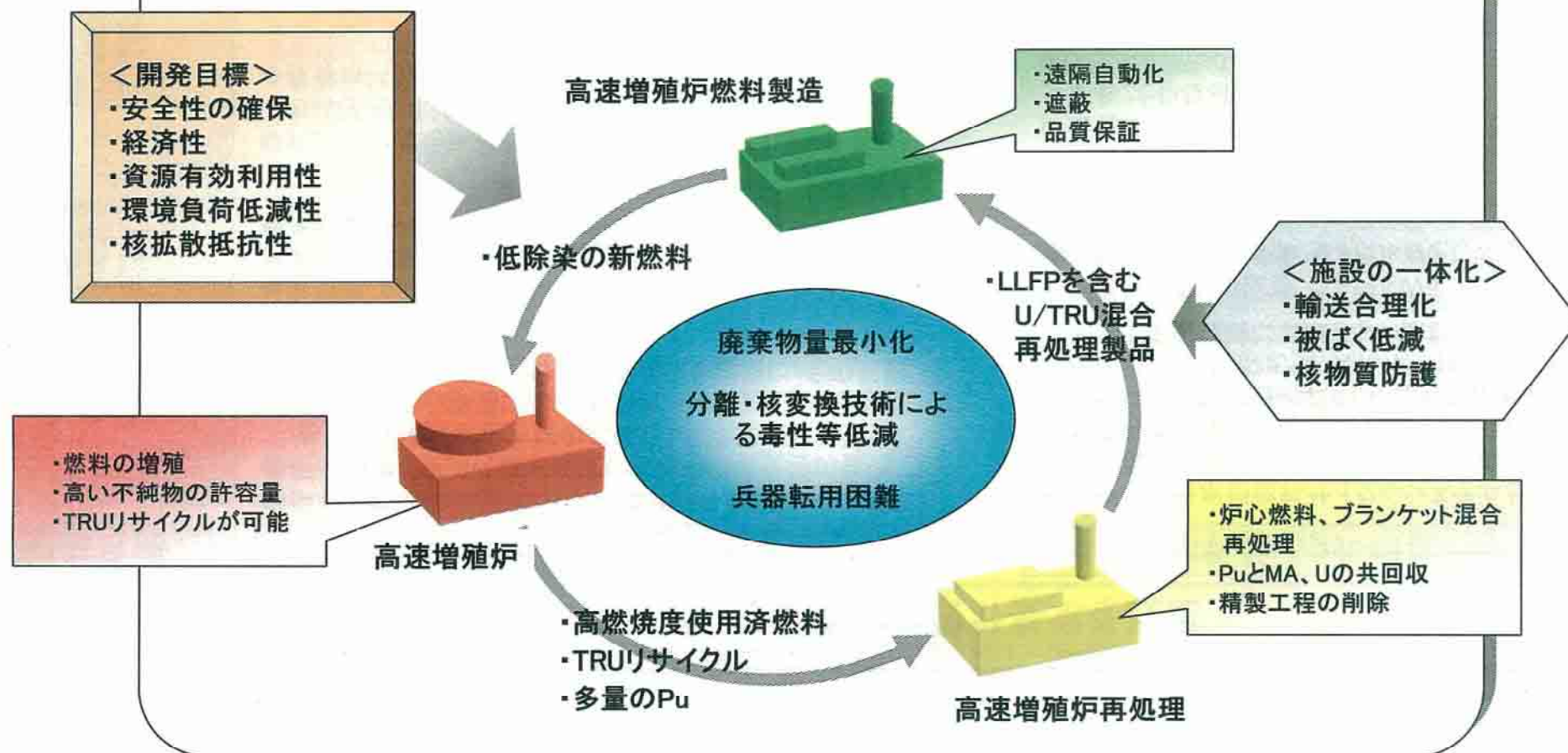


(5) 実用化戦略調査研究の実施方針

(c) 高速増殖炉サイクル全体での整合性

実用化戦略調査研究では、高速増殖炉サイクル全体で整合を取った研究開発を実施

～ 高速増殖炉の特長を活かすとともに、燃料サイクルとの整合を図る ～



TRU: 超ウラン元素

MA: マイナーアクチニド(Am, Np, Cm)



(5) 実用化戦略調査研究の実施方針

(d) フェーズⅡでの検討対象：高速増殖炉システム

- 幅広い選択肢(冷却材と燃料形態)の組合せ(約40概念)から、今後検討すべき概念を選択

フェーズⅠにおける有望概念の抽出結果

| 対象技術 | | 炉型の評価 | 燃料形態の評価 | | |
|--------|----------|-------|------------|-----|----|
| | | | MOX | 窒化物 | 金属 |
| ナトリウム炉 | 大型タンク | B | A | B | A |
| | 大型ループ | A | | | |
| | 中型モジュール | A | | | |
| | 小型炉 | A(※1) | B | A | |
| ガス炉 | CO2ガス炉 | B* | A* | A* | C |
| | Heガス炉ピン型 | B* | | | |
| | Heガス炉粒子型 | A* | B | | — |
| | 小型炉 | B* | B* | A* | — |
| 重金属炉 | 大型 | C | B | A | A |
| | 中型モジュール | A(※2) | | | |
| | 小型炉 | A(※3) | | | |
| 水炉 | BWR型 | A(※4) | A | — | — |
| | PWR型 | A(※4) | A | — | — |
| | 超臨界圧水型 | A(※4) | A | — | — |
| 溶融塩炉 | | C | C [塩化物溶融塩] | | |

A: 引き続き検討 B: 国内外の研究のレビュー C: データ化 * : 2001年度に抽出

○: フェーズⅡ 中間評価以降に検討を進めた主要な組合せ

フェーズⅡでの検討対象

- ナトリウム炉
 - ・ 大型ループ型(MOX、金属燃料)
 - ・ 中型ループ型モジュール炉(MOX、金属燃料)
 - ・ 小型炉(金属燃料)
- ガス炉
 - ・ Heガス炉粒子型(窒化物燃料)
- 重金属炉
 - ・ 中型モジュール炉(窒化物燃料)
- 水炉
 - ・ BWR型(MOX)

- ※1 炉心性能及び実現可能性の観点から金属燃料を選択。小型炉については多目的利用など、基幹電源とは異なる概念として検討。
- ※2 金属燃料はボンド部にNaを使用しており、破損時に金属間化合物を形成するため、ヘリウムボンドの窒化物燃料を選択。
- ※3 中型モジュール炉と同様の基礎的課題があるため、2001年度以降の検討対象は中型モジュール炉のみを対象とした。
- ※4 設計検討が最も進んでおり、炉心損傷時の成立性、経済性を含めたシステムの成立性が高い概念として、BWR型を検討対象とした。



(5) 実用化戦略調査研究の実施方針

(d) フェーズⅡでの検討対象：燃料サイクルシステム

- 幅広い選択肢(燃料形態)の組合せ(再処理システム約10概念、燃料製造システム約10概念)から、今後検討すべき概念を選択

フェーズⅠにおける有望概念の抽出結果

| 対象技術 | | 燃料形態 | MOX | 窒化物 | 金属 |
|------|---------|-----------|-------|-------|-------|
| 再処理 | 先進湿式 | | ○A | A(*2) | — |
| | 乾式 | 酸化物電解法 | ○A | C | C |
| | | 金属電解法 | ○A | A(*2) | ○A |
| | | フッ化物揮発法 | B | B | B |
| 燃料製造 | 簡素化ペレット | | ○A | A(*2) | — |
| | 振動充填 | 湿式法対応 | ○A | A(*2) | — |
| | | 酸化物電化法対応 | ○A | C | — |
| | | 金属電解法対応 | A(*1) | A(*2) | — |
| | | フッ化物揮発法対応 | B | B | — |
| | 鑄造 | 射出鑄造法 | — | — | ○A |
| | | 遠心鑄造法 | — | — | A(*1) |

A: 引き続き検討 B: 国内外の研究のレビュー C: データ化

○: フェーズⅡ 中間評価以降に検討を進めた主要な組合せ

フェーズⅡでの検討対象

○再処理

- ・先進湿式法(MOX、窒化物)
- ・酸化物電解法(MOX)
- ・金属電解法(金属、酸化物、窒化物)

○燃料製造

- ・簡素化ペレット法(MOX、窒化物)
- ・振動充填法
 - 湿式対応[スフェアパック](MOX、窒化物)、
 - 酸化物電解対応[バイパック](MOX)
- ・射出鑄造法(金属)

*1 金属電解法対応振動充填法(MOX)及び金属燃料対応の遠心鑄造法は経済性の点で魅力がないことからフェーズⅡ中間段階で検討対象から除外。

*2 窒化物燃料については、主たる工程はMOX対応の先進湿式法やペレット、振動充填法あるいは金属燃料対応の金属電解法等の適用が可能であるため、これらの成果を活用して検討



第 I 部 研究開発の重点化の考え方



第 I 部 目次

第1章 研究開発の重点化に向けたフェーズⅡでの検討の流れ

第2章 設計した各候補概念のシステムの特徴と技術総括

(1) 高速増殖炉システム

- (a) ナトリウム冷却炉
- (b) ヘリウムガス冷却炉
- (c) 鉛ビスマス冷却炉
- (d) 水冷却炉
- (e) 有望なシステム概念の摘出

(2) 燃料サイクルシステム

- (a) 先進湿式法再処理＋簡素化ペレット法燃料製造
- (b) 金属電解法再処理＋射出鑄造法燃料製造
- (c) 先進湿式法再処理＋振動充填法燃料製造
- (d) 酸化物電解法再処理＋振動充填法燃料製造
- (e) 有望なシステム概念の摘出

(3) 高速増殖炉サイクル全体での技術総括結果

第3章 多面的評価

- (1) 多面的評価の位置付けと評価方法
- (2) 多面的評価の結果

第4章 研究開発の重点化の方針



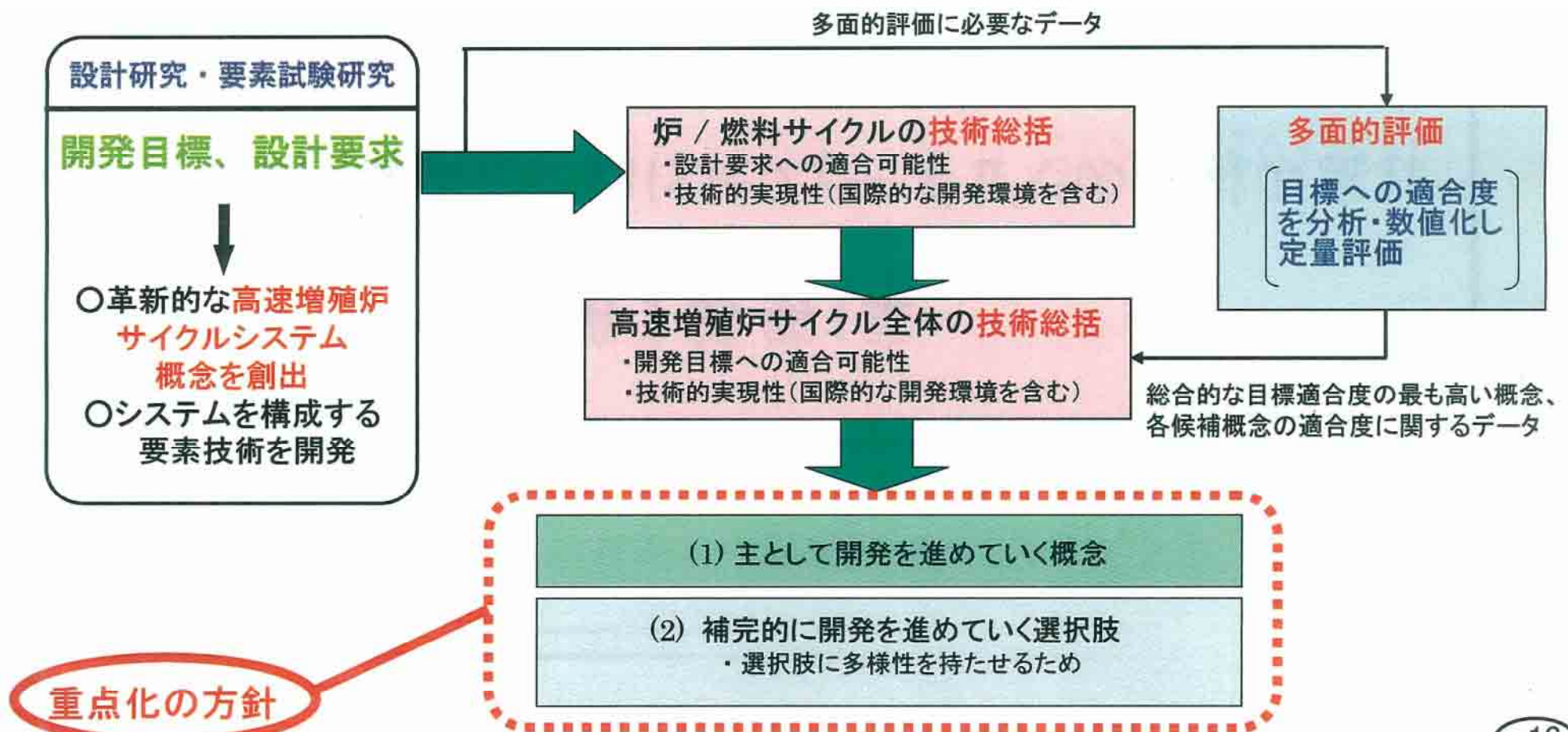
第 I 部 第1章

研究開発の重点化に向けたフェーズⅡでの検討の流れ



1. (1) 研究開発の重点化に向けた フェーズⅡでの検討の流れ

- 開発目標、設計要求を設定し、革新的な高速増殖炉サイクルを創出、構成する要素技術を開発
- 創出した概念について、多面的評価の結果も参考にしつつ、技術総括の結果に基づき重点化の方針を決める





1. (2) フェーズⅡにおける技術総括の流れ

1. 革新的な高速増殖炉サイクルの創出、要素技術開発の実施

- 高速増殖炉システム、燃料サイクルシステムの各々について、経済性などの設計要求を達成するための革新的要素技術に関し、技術的実現性を評価するために必要な試験・解析を実施。
- 要素技術開発成果を反映し高速増殖炉システム、燃料サイクルシステムの概念を創出。

2. 炉／燃料サイクルの技術総括

- 創出した概念が有する能力を評価する観点から、革新的要素技術が実現することを前提に、設計要求への適合可能性を評価する。
- 要素技術開発や概念検討において摘出された今後の課題について、各課題の難易度などにに基づき技術的実現性を評価する。

3. 高速増殖炉サイクルの技術総括、重点化の方針

- 高速増殖炉システム、燃料サイクルシステムの有望な概念を組み合わせた高速増殖炉サイクルについて総合的な評価を行い、主として開発を進めていく概念と補完的に開発を進めていく選択肢を決める。



第 I 部 第2章

設計した各候補概念のシステムの特徴と技術総括



2.(1) 高速増殖炉システム

(a) ナトリウム冷却炉(1/3)

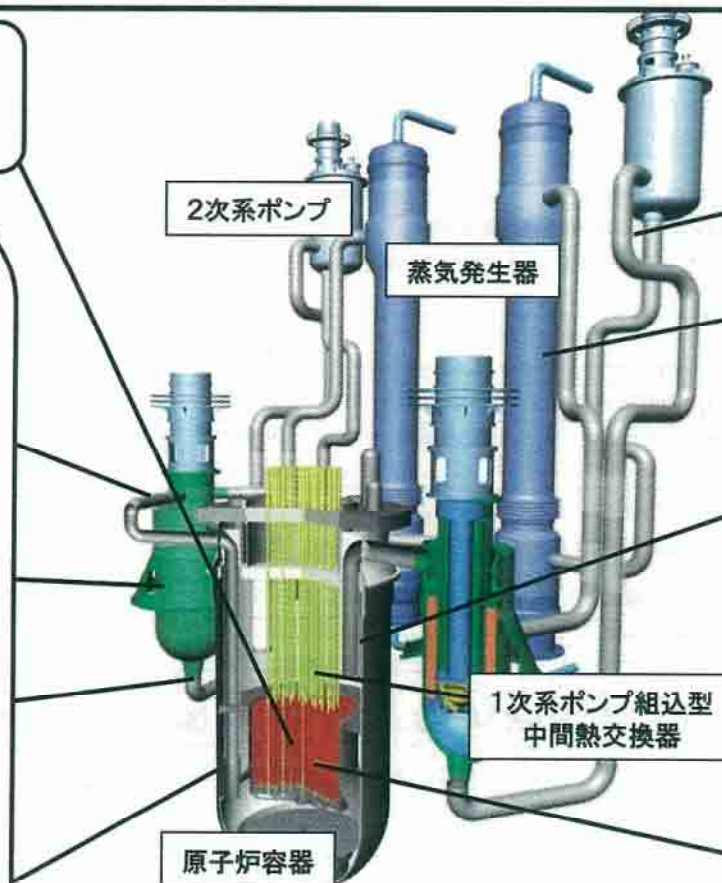
● システムの特徴

- 150万kW大型炉の概念を構築。(酸化物燃料及び金属燃料)
- 革新技術の採用により物量、建屋容積を大幅に削減。
- ナトリウム固有の課題に対する対応策を設計に取り込むことで信頼性を確保。

高燃焼度化のための
ODS鋼被覆管

革新技術の採用による物量、
建屋容積の削減

- ・システム簡素化のための2
ループ化
- ・配管短縮のための高クロム鋼
構造材料
- ・1次冷却系統簡素化のための
ポンプ組込型中間熱交換器
- ・原子炉容器のコンパクト化



ナトリウムの化学的活性

- ・配管二重化の徹底
- ・直管二重伝熱管蒸気発生器

保守・補修性を考慮した
プラント設計

炉心安全性の向上

- ・受動的炉停止と自然循環に
よる炉心冷却
- ・炉心損傷時の再臨界回避
を達成できる炉心概念

注) ナトリウム炉の仕様比較については、参考 I-1(OHP116) 参照



2.(1) 高速増殖炉システム

(a) ナトリウム冷却炉(2/3)

● 主要な成果

- 主要な革新技術についての要素技術開発試験により成立性見通しを得た。
- 開発に長期を要する燃料被覆管材料開発の照射試験に着手。

| 項 目 | | 開発の目的とフェーズⅡまでの主要な成果 |
|----------|---------------|---|
| ナトリウム冷却炉 | 安全技術 | <p>炉心損傷時の受動的核反応停止機構(再臨界回避)</p> <p>目的 : 仮想的な炉心損傷時において再臨界に至らず事象終息し、事故影響を原子炉容器内で収納できる炉心概念を構築する。</p> <p>成果 : 予備解析による再臨界達成見通しとカザフスタンIGR炉を用いた炉内・炉外試験により、内部ダクト付燃料集合体概念の有効性を確認した。</p> |
| | 経済性向上に関わる革新技術 | <p>ODS鋼被覆管</p> <p>目的 : 高燃焼度化、原子炉出口温度高温化を達成可能な燃料被覆管を開発する。</p> <p>成果 : 露国BOR-60において照射試験を実施し、5万MWd/tの照射実績を得た。</p> |
| | | <p>高クロム鋼採用による配管短縮</p> <p>目的 : 冷却系機器のコンパクト化を可能とする高強度、低熱膨張材料である12Cr鋼を開発する。</p> <p>成果 : 高速増殖炉用12Cr鋼候補仕様を提示。材料試験を実施し、材料強度基準暫定案を策定した。</p> |
| | | <p>ポンプ組込型中間熱交換器</p> <p>目的 : 系統簡素化のため、機械式の主循環ポンプをHXIに組み込む。</p> <p>成果 : 模擬試験体を用いた振動試験を実施し、寿命中の伝熱管健全性を確保できる見通しを得た。</p> |
| | | <p>2ループ化:大口径高流速配管</p> <p>目的 : スケールメリットを狙った冷却系統の大容量化に伴い、大流量化する配管の流動安定性を確保する。</p> <p>成果 : ホットレグ配管模擬試験体による水流動試験を実施。2ループ化に伴い大口径、高流速となる配管の構造健全性に影響する振動が生じないことを確認した。</p> |
| | | <p>切込型炉上部機構(原子炉容器コンパクト化)</p> <p>目的 : 原子炉容器コンパクト化を達成するため、新型のUIS構造及び上部プレナムの流動制御技術を開発する。</p> <p>成果 : 上部プレナムを模擬した水流動試験を実施し、カバーガス巻き込みが発生しないよう上部プレナム内流動を適正化する方策を提示した。</p> |
| | | <p>新型燃料取扱設備</p> <p>目的 : 切り込み型炉上部機構に整合するスリムな新型燃料交換機と燃交期間を短縮可能な移送設備を開発する。</p> <p>成果 : スリム型燃料交換機に必要な軸受けの要素試験を実施し、開発の見通しを得た。</p> |
| | | <p>高温構造設計方針</p> <p>目的 : 原子炉及び冷却系のコンパクト化のため、高温かつ高応力条件での設計手法を開発する。</p> <p>成果 : 非弾性解析を用いた熱応力解析手法を整備するとともに、これを取り入れた高温構造設計指針案を提案。</p> |
| | 信頼性向上技術 | <p>高信頼性蒸気発生器</p> <p>目的 : SGの水リーク事故に対する信頼性向上と事故拡大抑止を狙った2重管直管型SGを開発する。</p> <p>成果 : 短尺の2重伝熱管を試作し、ターゲットウェステージ及びセルフウェステージに関する基礎的なデータを取得し、安全評価に反映した。また、ISI手法に関しても成立の見通しを得た。</p> |
| | | <p>保守・補修技術</p> <p>目的 : Na中の構造物の炉寿命中の信頼性を担保するために必要なISI技術を開発する。</p> <p>成果 : 実証炉で開発したNa中目視検査技術を適用可能とするため、小型軽量化・高解像度化するための技術開発に着手し、その原理的な成立性を確認した。</p> |

注) ナトリウム冷却炉の酸化物燃料の炉心配置及びナトリウム炉開発に係わる主要成果の具体例については、
参考 I-2～I-3 (OHP117～118)参照



2.(1) 高速増殖炉システム

(a) ナトリウム冷却炉(3/3)

● 設計要求への適合可能性、技術的実現性

- 酸化物燃料で全ての設計要求に高いレベルで適合する可能性がある。金属燃料の採用により更に適合可能性が向上。
- 開発課題が明確で、それらの技術的実現性が見通せる。開発リスクの高い課題には代替技術を準備可能。

● 設計要求への適合可能性

- 建設コストは目標 (20 万円 / kWe) の 90 % 程度に低減できる可能性がある[**経済性**]。
- 酸化物燃料を用いた場合、増殖比1.1を確保しつつ[**資源有効利用性**]、ブランケットを含めた平均燃焼度9万MWd/t(設計要求:6万MWd/t)と連続運転期間26ヶ月(設計要求:18ヶ月)[**経済性**]の炉心性能を確保できる可能性がある。
- 燃料中の全重金属の5%程度までMAを含んだ低除染TRU燃料を受入れ可能で、炉心に装荷したMAの約45%を燃焼可能[**環境負荷低減性**]。
- 高速増殖炉に全てリプレースするために必要となる期間は、60 年程度[**資源有効利用性**]。
- 金属燃料を採用することで、さらに炉心性能に優れた概念*を構築できる可能性がある[**環境負荷低減性、資源有効利用性**]。
- ナトリウム漏えい、ナトリウム水反応に対して冷却材バウンダリを二重化する等の設計対応と保守・補修性を考慮したプラント設計を採用[**安全性、信頼性**]。

● 技術的実現性

- 「常陽」、「もんじゅ」、実証炉などの豊富な開発経験を有し、概念成立性を左右する課題はない。また開発課題が明確で、その解決方を具体化できる。
- ODS鋼など開発リスクの比較的高い課題に対して代替技術**がある。
- Gen-IVで代表的な概念候補となっており、国際標準の概念へ発展していく可能性があり、その実現に向けて国際的に開発分担できる可能性がある。

*: 金属燃料の仕様比較については、参考 I-4(OHP119) 参照 **: 代替技術と設計への影響については参考 I-5(OHP120) 参照



2.(1) 高速増殖炉システム (b) ヘリウムガス冷却炉(1/3)

●システムの特徴

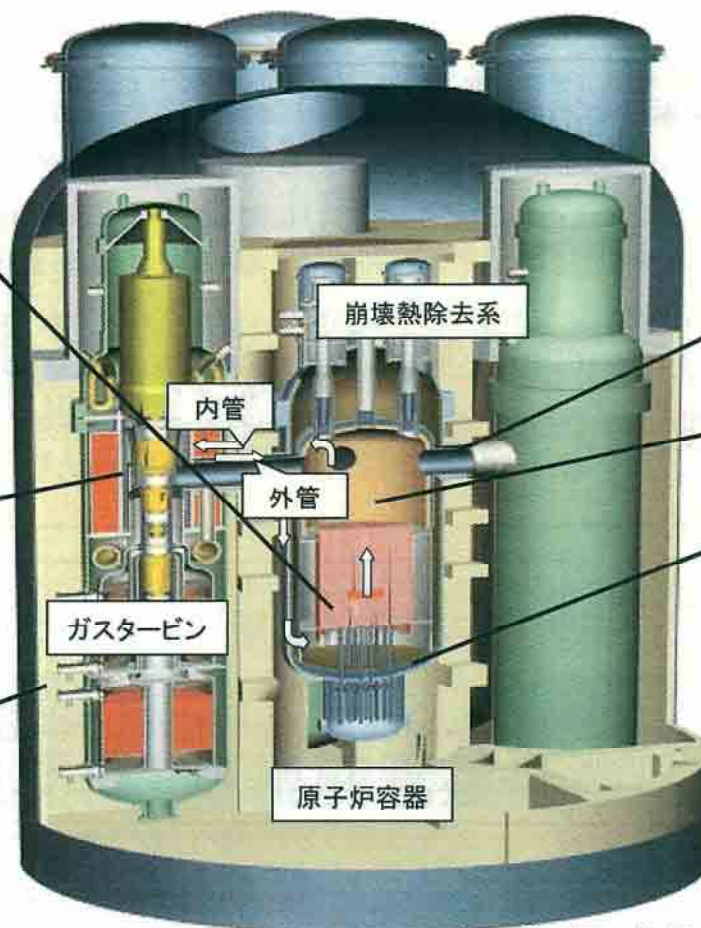
- 150万kWe大型炉概念について検討。(窒化物被覆粒子燃料)
- 高温熱源の特長を活かしたコンパクトで簡素なシステム構成により、物量・建屋容積を削減。
- 減圧事故、炉心損傷事故対策を考慮。

耐熱性に優れた炉心概念

- ・ 窒化物被覆粒子燃料
- ・ SiC母材の六角ブロック型燃料集合体

高効率化のための 直接ガスタービン発電

高温熱源の特長を 活かした多目的利用



炉心安全性の向上

- ・ 減圧事故影響の緩和のための主配管の三重管化
- ・ 受動的炉停止と自然循環による炉心冷却
- ・ 炉心損傷時の再臨界回避を達成できる炉心概念

耐震性確保のための 三次元免震装置

注) ヘリウムガス炉の仕様比較については、参考 I-6(OHP121) 参照

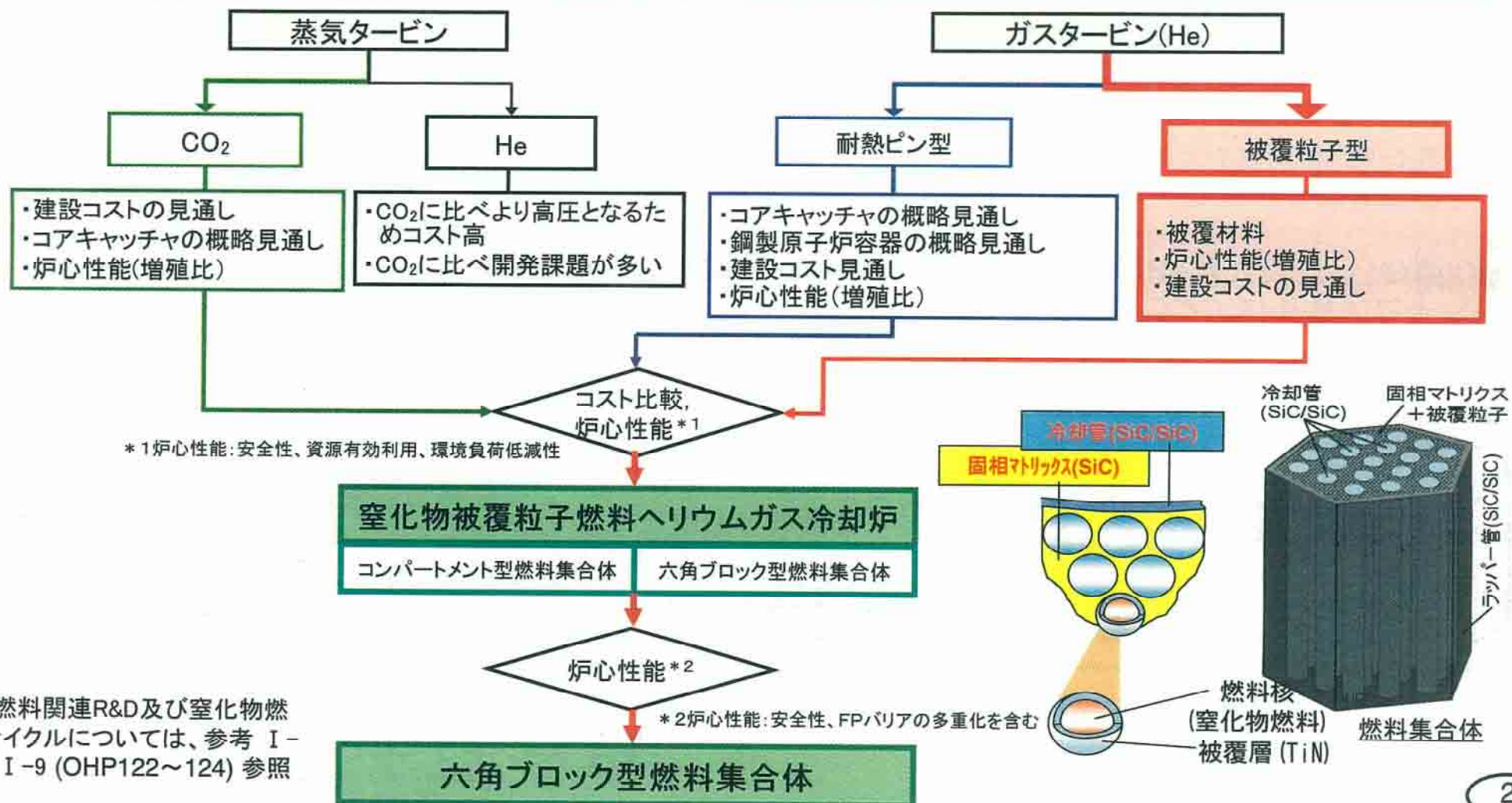


2.(1) 高速増殖炉システム

(b) ヘリウムガス冷却炉(2/3)

● 主要な成果

- 複数の冷却材(ヘリウム、CO₂ガス)、燃料形態、発電方式を用いた設計研究を幅広く実施。
- 最も有望な六角ブロック型窒化物被覆粒子燃料ヘリウムガス冷却炉の概念を構築し、その設計評価を実施。





2.(1) 高速増殖炉システム (b) ヘリウムガス冷却炉(3/3)

● 設計要求への適合可能性、技術的実現性

- 全ての設計要求に対して適合可能性がある。
- 窒化物被覆粒子燃料・燃料集合体の実現性を見通すためには、基礎的課題の解決が必要である。
- 国際協力により基礎的課題をブレイクスルーできる可能性がある。

● 設計要求への適合可能性

- 建設コストは目標 (20 万円 / kWe) を達成できる可能性がある[**経済性**]。
- 窒化物被覆粒子燃料により、増殖比1.1を確保しつつ[**資源有効利用性**]、ブランケットを含めた平均燃焼度7万MWd/t(設計要求:6万MWd/t)と連続運転期間18ヶ月(設計要求:18ヶ月)[**経済性**]の炉心性能を確保できる可能性がある。
- MA含有量5%程度の低除染TRU燃料を受入れ可能で、炉心に装荷したMAの約40%を燃焼可能[**環境負荷低減性**]。
- 高速増殖炉に全てリプレイスするために必要となる期間は、110 年程度[**資源有効利用性**]。
- 高温熱源(850℃)としての特長から、多目的利用・高熱効率(47%)を達成できる可能性がある[**資源有効利用性**]。

● 技術的実現性

- 技術的実現性を見通すためには、窒化物被覆粒子燃料及び六角ブロック型燃料集合体の基礎的課題を解決する必要があるのに加え、システムを構築していくためには、ガスタービン、再臨界回避、受動的 safety 機構などを開発する必要がある。
- 仏国を中心としたガス冷却実験炉の開発計画に対し、Gen-IV等国际協力の活用によって基礎的課題をブレイクスルーできる可能性がある。



2.(1) 高速増殖炉システム (c) 鉛ビスマス冷却炉(1/3)

●システムの特徴

- 75万kWeのプール型中型炉が経済的、技術成立性の観点から有望。(窒化物燃料)
- 化学的に不活性な冷却材であり二次冷却系を削除したシステムを構築。

炉心性能の向上

- ・ 窒化物燃料の採用
- ・ 高燃焼度化のためODS鋼被覆管

革新技術の採用による物量、建屋容積の削減

- ・ 蒸気発生器の小型化のため的高Cr鋼
- ・ 中間冷却系削除によるシステム簡素化
- ・ 鉛ビスマス中浸積型冷却材ポンプ、蒸気発生器

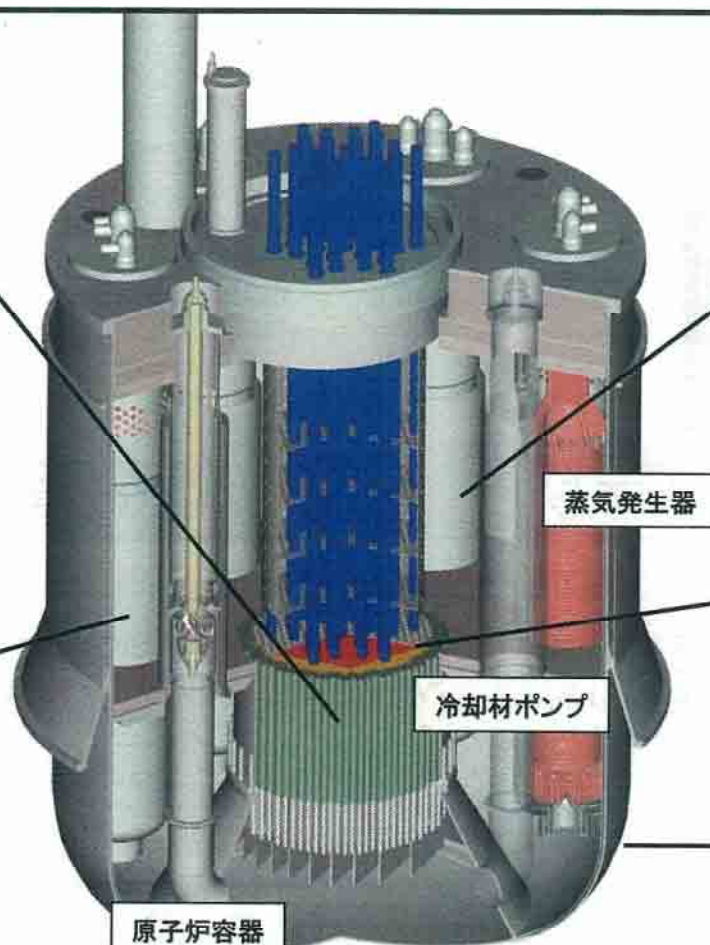
材料腐食対策

- ・ 防食技術
- ・ 冷却材流速の低速化
- ・ 保守・補修性を考慮したプラント設計

炉心損傷時の再臨界回避を達成できる炉心概念

耐震性の確保

- ・ 三次元免震装置
- ・ 中型炉システム概念



注) 鉛ビスマス炉の仕様比較については、参考 I-10 (OHP125)参照

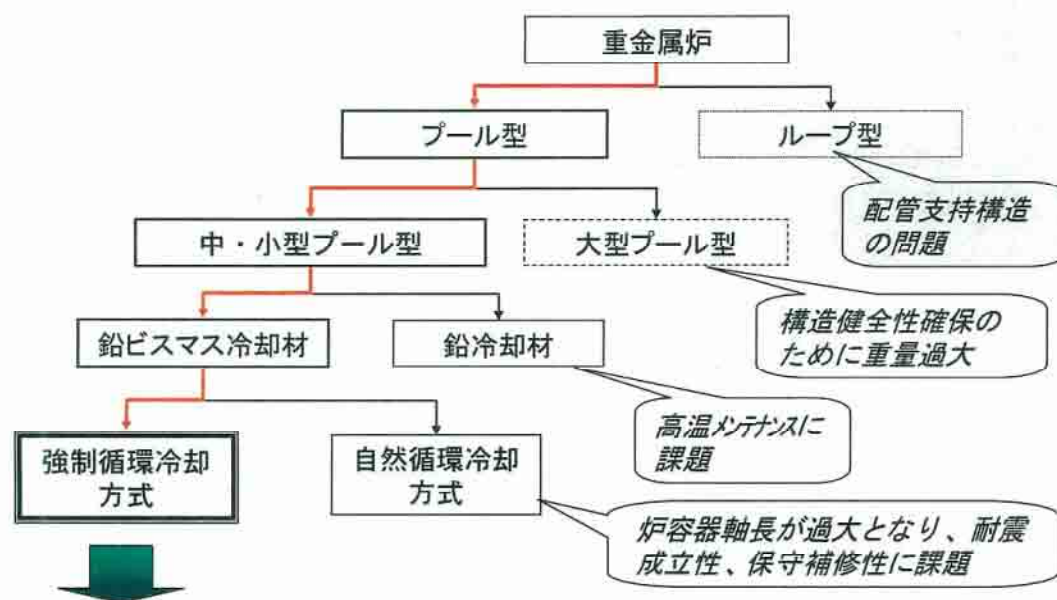


2.(1) 高速増殖炉システム (c) 鉛ビスマス冷却炉(2/3)

● 主要な成果

- 設計研究の結果に基づき、プール型中型鉛ビスマス冷却モジュール炉(強制循環)を選択。
- 主要構造材の鉛ビスマス中の腐食特性データを取得し設計に反映。
- ODS鋼、高クロム鋼などの材料開発を実施(ナトリウム冷却炉と共通)

重金属冷却炉の検討の流れ



停留鉛ビスマス中ODS鋼浸漬試験結果



600°C-10,000 h 浸漬後表面

- 独国FZKとの国際協力を実施した材料腐食試験の結果、被覆管最高温度を570°C程度に制限することが必要。
- これを受けて原子炉出口温度を445°C以下に設定。

プール型中型 鉛ビスマス冷却モジュール型炉 (強制循環) の選択



2.(1) 高速増殖炉システム (c) 鉛ビスマス冷却炉(3/3)

●設計要求への適合可能性、技術的実現性

- 全ての設計要求に対して適合可能性がある。
- 材料防食技術・窒化物燃料の実現性を見通すためには、基礎的課題の解決が必要である。

●設計要求への適合可能性

- 建設コストは目標 (20 万円 / kWe) を達成できる可能性がある[**経済性**]。
- 窒化物燃料により、増殖比1.1を確保しつつ[**資源有効利用性**]、ブランケットを含めた平均燃焼度 11万MWd/t(設計要求:6万MWd/t)と連続運転期間18ヶ月(設計要求:18ヶ月)[**経済性**]の炉心性能を確保できる可能性がある。
- MA含有量5%程度の低除染TRU燃料を受入れ可能で、炉心に装荷したMAの約45%を燃焼可能[**環境負荷低減性**]。
- 高速増殖炉に全てリプレイスするために必要となる期間は、70 年程度[**資源有効利用性**]。

●技術的実現性

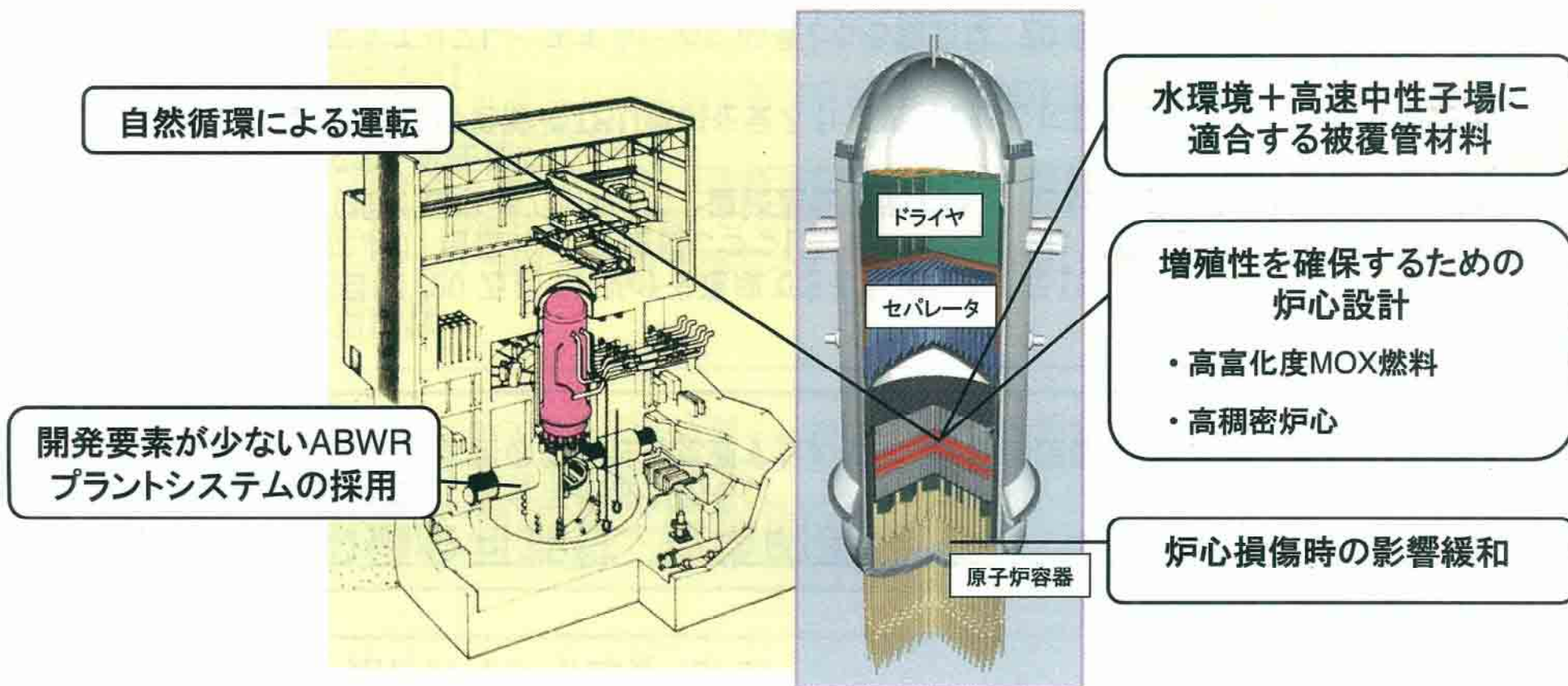
- 技術的実現性を見通すためには、材料防食技術と窒化物燃料に関する基礎的課題を解決する必要があるのに加え、システムを構築していくためには、再臨界回避方策、ODS鋼被覆管、保守・補修技術、蒸気発生器、冷却材ポンプなどを開発する必要がある。
- Gen-IV概念に選定されているものの、開発を主導する国がなく、国際協力によって基礎的課題をブレークスルーできる可能性は低い。



2.(1) 高速増殖炉システム (d) 水冷却炉(1/3)

●システムの特徴

- 設計の進んでいるBWR型高速増殖炉(135万kWe)を選択。(酸化物燃料)
- 増殖性を確保するための高富化度・高稠密炉心概念を構築。
- ABWRのプラント技術が利用可能。



注) 水冷却炉の仕様比較については、参考 I-11(OHP126) 参照



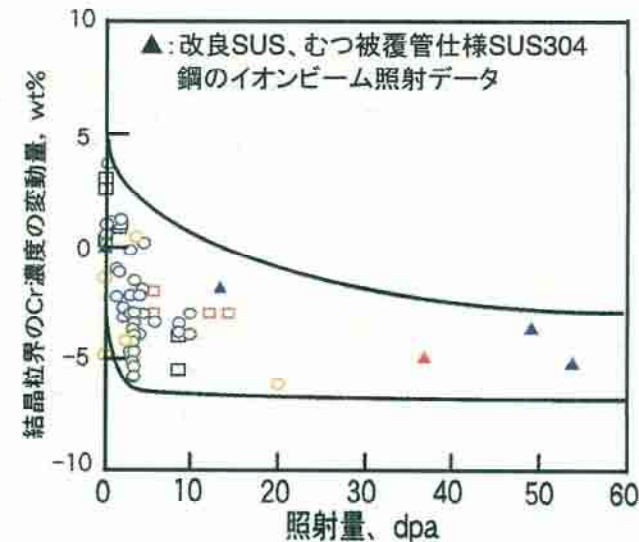
2.(1)高速増殖炉システム (d) 水冷却炉(2/3)

●主要な成果

- 燃料被覆管候補材料として改良ステンレス鋼とジルコニウム合金を選定した。
- 稠密炉心の熱流動特性を把握するため、大規模バンドルの限界出力試験を実施し、除熱限界、燃料棒間ギャップの効果を明確にして技術的見通しを得た。

改良SUS(25Cr-35Ni-0.2Ti)の開発

- 耐食性、耐照射性、延性に優れた合金設計
- 超高純度電子ビーム溶製法を採用し粒界型応力腐食割れを抑制
- 微細析出分散と微細粒化が可能な加工熱処理により機械的強度を向上



改良SUSの照射による結晶粒界のCr濃度変動量を測定した結果、粒界腐食抑制に十分なCr濃度を保持できることを確認した。

実用化に向けて高速中性子炉条件及び沸騰水条件の照射試験が必要。



2.(1) 高速増殖炉システム (d) 水冷却炉(3/3)

●設計要求への適合可能性、技術的実現性

- 資源有効利用性に制約があり、環境負荷低減性がやや低い。
- 燃料被覆管材料の開発や炉心損傷時の影響緩和策の検討が必要。

●設計要求への適合可能性

- 建設コストは目標 (20 万円 / kWe) を達成できる可能性がある[**経済性**]。
- 酸化物燃料により、増殖比1.05程度[**資源有効利用性**]、ブランケットを含めた平均燃焼度4.5万 MWd/t(設計要求:6万MWd/t)、連続運転期間18ヶ月(設計要求:18ヶ月)[**経済性**]の炉心性能を確保できる可能性がある。

但し、

- ・高速増殖炉に全てリプレースするまでに 250 年程度の期間が必要であり、
- ・MA含有率4%程度(他炉は5%程度)の低除染TRU燃料を受入れ可能で、炉心に装荷したMAの約10%を燃焼可能と、

他炉と比較して、**資源有効利用性**に制約があり、**環境負荷低減性**がやや低い。

●技術的実現性

- 開発課題が炉心燃料部分に限定され、実現性を見通すための課題が明確。
- 高速中性子場および水環境場で利用可能な被覆管材料の開発や炉心損傷時の影響緩和対策に関する試験研究、許認可のためのデータ取得が必要。
- Gen-IV概念に選定されておらず、現状では基盤的な研究協力内容に限定される。



2. (1) 高速増殖炉システム (e) 有望なシステム概念の抽出

● 有望なシステム概念抽出の考え方

- 設計要求への適合可能性を評価し、代替技術の有無および国際協力の可能性を含めた技術的実現性の評価を加味した上で、有望なシステム概念を抽出する

設計要求への適合可能性

- 安全性、経済性、環境負荷低減性、資源有効利用性、核拡散抵抗性に関する設計要求に対し、各概念の適合可能性を評価する



技術的実現性
(国際的視点)

- 実用化するために克服すべき課題の多さとそれぞれの課題の難易度および代替技術の有無と国際協力の可能性から、各概念の技術的成立性を評価する

Gen-IV 等の国際協力の活用により、開発分担による効率的な研究開発が期待できるとともに、共同開発により開発リスクの高い革新技術をブレークスルーし技術的実現性をより確かなものとすることができる。更には、国際協力の実施により、システム概念を国際標準にできる可能性がある。以上の観点より、各概念の国際協力の可能性を評価する



有望なシステム概念の抽出



2. (1) 高速増殖炉システム (e) 有望なシステム概念の抽出

各高速増殖炉システムの 設計要求への適合可能性

| 設計要求 | | | ナトリウム炉(1,500MWe) 酸化物燃料(金属燃料) | | He炉(1,500MWe) 窒化物燃料 | | Pb-Bi炉(750MWe) 窒化物燃料 | | 水炉 (1,356MWe) 酸化物燃料 | |
|--------|---------------------------|--------------------------|--|------------------|---|------------|-------------------------|------------|---------------------------|----------|
| | | | 資源重視 | 経済性重視 | 資源重視 | 経済性重視 | 資源重視 | 経済性重視 | | |
| 安全性 | | | 受動的 safety 機構及び 再臨界回避方策について 炉外・炉内試験実施中 | | 炉心加熱昇圧に伴う燃料 流出とコアキャッチャによる 再臨界回避の可能性 | | 燃料浮遊による 再臨界回避の可能性 | | 吸収体設置などによる 再臨界回避の可能性 | |
| 資源有効利用 | 増殖比 (1.0～1.2程度) | | 1.10(1.11) | 1.03(1.03) | 1.11 | 1.03 | 1.10 | 1.04 | 1.05 | |
| | 初装荷炉心に必要となる核分裂性物質質量 | | 5.7(4.9)t/GWe | 5.8(5.1)t/GWe | 7.0t/GWe | 7.0t/GWe | 5.9t/GWe | 5.9t/GWe | 11t/GWe程度 | |
| | 高速増殖炉に全てリプレースするために必要となる期間 | | 60 年程度 | — | 110 年程度 | — | 70 年程度 | — | 250 年程度 | |
| 環境負荷低減 | MA燃焼 | | 低除染条件 (FP含有率0.2vol%) で、 軽水炉使用済み燃料条件のMA含有率5%程度まで受入可能 | | | | | | 低除染条件でMA含有率 4%程度まで受入可能 | |
| | FP核変換 | | 炉心部及び径ブランケット領域に装荷することで、 自己生成分のLLFP(I-129とTc-99)を核変換できる可能性あり | | | | | | 未検討 | |
| 経済性 | 燃料費削減 | 燃焼度 炉心平均 (15万MWd/t以上) | 14.7(14.9)万MWd/t | 15.0(15.3)万MWd/t | 12.1万MWd/t | 12.3万MWd/t | 15.4万MWd/t | 15.5万MWd/t | 8.8 万MWd/t | |
| | | 燃焼度 全体平均 (6万MWd/t以上) | 9.0(13.4)万MWd/t | 11.5(15.3)万MWd/t | 6.9万MWd/t | 8.9万MWd/t | 10.5万MWd/t | 12.8万MWd/t | 4.5 万MWd/t | |
| | 稼働率向上 | 連続運転期間 (18ヶ月以上) | 26(22)ヶ月 | 26(22)ヶ月 | 18ヶ月 | 18ヶ月 | 18ヶ月 | 18ヶ月 | 18ヶ月 | |
| | | 稼働率(計算値) (90%以上) | 95(94)%程度 | 95(94)%程度 | 92%程度 | | 93%程度 | | 93%程度 | |
| | 熱効率向上 | 出口温度 | 550℃ | | | 850℃ | | 445℃ | | 287℃ |
| | | 熱効率/所内負荷率 | 42.5% / 4% | | | 47% / 3% | | 38% / 3% | | 35% / 3% |
| 資本費削減 | 建設単価 (20万円/kWe以下) | | 相対値:90%程度 | | 相対値:100%程度 | | 相対値:100%程度 | | 相対値:100%程度 | |

は優れた特性 稼働率(設計値)=100×連続運転期間/(連続運転期間+計画停止期間)

資源重視: 倍增時間を短縮し、より効率的にPuを増殖させる炉心仕様

経済性重視: 平均燃焼度向上により燃料サイクルコスト低減を図った炉心仕様



2. (1) 高速増殖炉システム (e) 有望なシステム概念の抽出

● 各高速増殖炉システムの設計要求への適合可能性

ナトリウム冷却炉

- ・酸化物燃料用いた場合、全ての設計要求に高いレベルで適合する可能性がある。
- ・金属燃料を採用した場合には、適合可能性がさらに向上する。

ヘリウムガス冷却炉

- ・全ての設計要求に適合する可能性が有る。
- ・高温熱源としての特長から、多目的利用・熱効率向上の可能性はある。

鉛ビスマス冷却炉

- ・全ての設計要求に適合する可能性がある。

水冷却炉

- ・安全性、経済性、核拡散抵抗性の設計要求に適合する可能性がある。
- ・環境負荷低減性、資源有効利用性の設計要求に適合する可能性が他の概念より低い。



2. (1) 高速増殖炉システム (e) 有望なシステム概念の抽出

実現可能性(難易度:ハードルの高さ)の分類

低:「開発見通しがあり、不確かさが少ない革新技術」

中:「現状知見に乏しく、開発に不確かさがある革新技術」

高:「基礎知見に乏しい燃料・材料関連の革新技術であり、不確かさが最も大きく、かつ研究開発に時間がかかる技術」

各高速増殖炉システムの技術的実現性

注) 各炉のロードマップ(案)は参考-I-12~15(OHP127~130)参照

でマークした課題: 国際協力が期待される項目

●: 代替概念がある技術

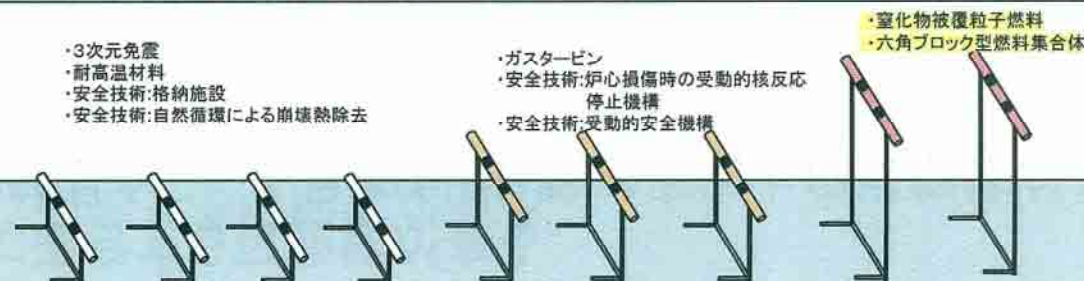
- 高クロム鋼採用による配管短縮
- ポンプ組込型中間熱交換器
- 保守・補修技術
- 安全技術: 炉心損傷時の受動的核反応停止機構

- ODS鋼被覆管
- 高信頼性蒸気発生器

ナトリウム冷却炉



ヘリウムガス冷却炉



鉛ビスマス冷却炉



水冷却炉



実用化戦略調査研究
フェーズⅡ終了

10年後



2. (1) 高速増殖炉システム (e) 有望なシステム概念の摘出

● 各高速増殖炉システムの技術的実現性

ナトリウム冷却炉

- ・開発課題が明確で高い確度で実現が見通せるとともに、開発リスクの高い課題には代替技術を準備することができる。
- ・Gen-IV及び二国間協力等を用いて、仏・米・韓等と共同開発による革新技術のブレークスルー、あるいは開発分担による効率的な開発の可能性がある。

ヘリウムガス冷却炉

- ・概念成立性に係わる窒化物被覆粒子燃料や六角ブロック型燃料集合体の実現性を見通すためには、基礎的課題の解決が必要である。
- ・Gen-IV等の国際協力により、基礎的課題を解決できる可能性がある。

鉛ビスマス冷却炉

- ・概念成立性に係わる材料防食技術や窒化物燃料の実現性を見通すためには、基礎的課題の解決が必要である。
- ・Gen-IV概念に選定されているものの、開発を主導する国がなく、国際協力の可能性は低い。

水冷却炉

- ・高速中性子場および水環境場で利用可能な被覆管材料の開発や炉心損傷時の影響緩和対策に関する試験研究が必要。
- ・Gen-IV概念に選定されておらず、国際協力は基盤的な研究協力内容に限定される。



2. (1) 高速増殖炉システム (e) 有望なシステム概念の抽出

● 有望なシステム概念

- ナトリウム冷却炉が最も有望な概念である
- ヘリウムガス冷却炉は多様なニーズに対応可能な概念である

| | ナトリウム 冷却炉 | ヘリウムガス 冷却炉 | 鉛ビスマス 冷却炉 | 水冷却炉 |
|-----------------|---|---|--|--|
| 設計要求への 適合可能性 | 全ての設計要求に対して、高いレベルで適合する可能性がある。金属燃料を採用した場合にはさらなる炉心性能の向上が見込める。 | 全ての設計要求に対して適合する可能性があり、高温熱源としての魅力を有する。 | 全ての設計要求に対して適合する可能性がある。 | 資源有効利用性および環境負荷低減性に制約がある。上記以外の設計要求に対しては、適合する可能性がある。 |
| 技術的実現性 | 開発課題が明確であり、また代替技術を準備することができることから、高い確度で実現性を見通すことが可能 | 実現性を見通すためには、概念成立性に係わる課題を解決することが必要 | | 実現性を見通すための課題が炉心燃料関連に限定 |
| (国際的視点) | 国際協力を期待することが可能 〔GIFでの活動が活発で、国際標準の概念へ発展していく可能性がある。また、共同開発による革新技术のブレークスルー、開発分担による効率的開発が期待できる。〕 | 国際協力を期待することが可能 〔GIFでの活動により、国際標準の概念へ発展していく可能性がある。また、概念成立性に係わる課題が解決されれば、技術的実現性をより向上させることができる。〕 | 国際協力を期待することが困難 〔GIFでの活動において開発を主導する国が無く、概念成立性に係わる課題をブレークスルーできる可能性が低い。〕 | 国際協力を期待することが困難 〔GIFでの候補概念に取り上げられていないため、現状では基盤的な研究協力内容に限定される。〕 |

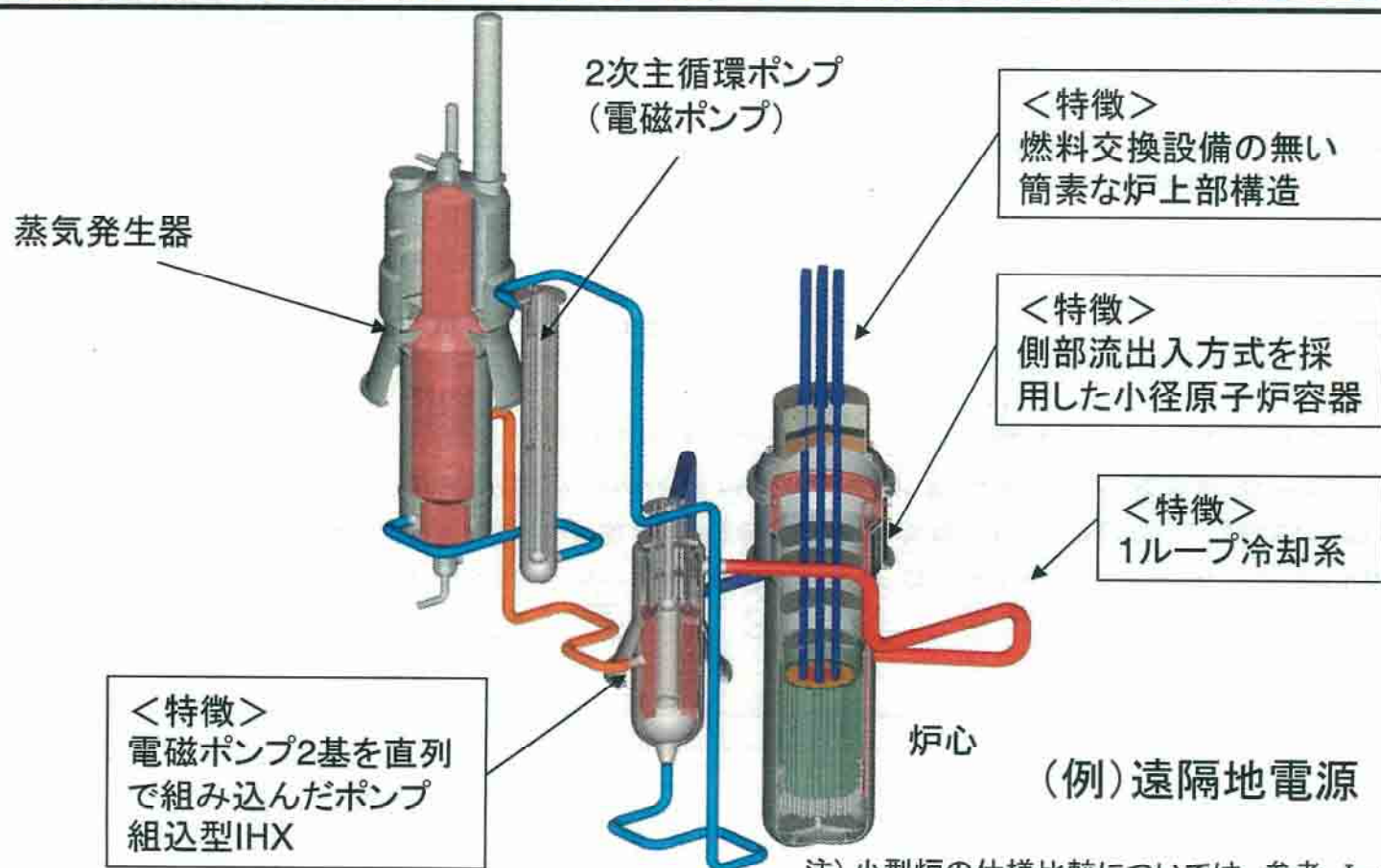
は優れた部分



2.(1) 高速増殖炉システム (f) 小型炉(1/2)

● システムの特徴

- 基幹電源とは異なるニーズに対応するため、需要地立地型電源、遠隔地電源、経済性追求の3つのプラント概念を検討。
- 1ループ構成等のプラントシステム簡素化・コンパクト化による建設費低減。
- 金属燃料の採用による炉心の長寿命化。
- 高温熱源の多目的利用の可能性を追求した水素製造プラント概念の検討。



注) 小型炉の仕様比較については、参考 I-16(OHP131) 参照



2.(1) 高速増殖炉システム

(f) 小型炉(2/2)

● 主要な成果

➤ 基幹電源と異なる要求条件に基づき、3つの炉心及びプラント概念を構築。

1. 需要地立地型電源: 都市近郊への立地を考慮し、長期運転サイクルと受動的安全性を強化した小型炉概念。
2. 遠隔地電源: 遠隔地への立地を考慮し、燃料交換設備を有しない30年寿命の燃料無交換プラント概念。
3. 経済性追求プラント: 30万kWe出力で量産効果を含めて基幹電源と同等の経済性を狙ったプラント概念。

➤ 水素分離改質法、ハイブリッド熱化学法について水素製造プラントの概念を構築。

| ニーズ | 要求条件 | 概要 |
|-----------------------------------|---|---|
| 需要地立地型電源 － 都市近郊への立地 | <ul style="list-style-type: none">・ 受動的安全性の強化・ 10年以上の長期運転サイクル・ 建設単価35万円/kWe(送電費用削減) | <ul style="list-style-type: none">・ 出力16.5万kWe、タンク型炉・ 炉心出口温度550℃、運転サイクル20年・ 初号機の建設単価は56万円/kWeであり目標達成困難 |
| 遠隔地電源 － 燃料輸送や送電系統に制約がある遠隔地への立地 | <ul style="list-style-type: none">・ プラント寿命中は燃料無交換(30年) | <ul style="list-style-type: none">・ 出力5万kWe、ループ型炉(1ループ)・ 炉心出口温度550℃、運転サイクル30年・ 燃料交換設備を有さず、原子炉上部構造を簡素化・ 遠隔地用燃料無交換電源として魅力がある |
| 経済性追求 － 総建設費低減による投資リスクの抑制 | <ul style="list-style-type: none">・ 量産効果により基幹電源と同等な経済性(20万円/kWe)の達成 | <ul style="list-style-type: none">・ 出力30万kWe、ループ型炉(1ループ)・ 炉心出口温度550℃、運転サイクル2年・ 炉心のコンパクト化による建設費の低減・ 建設単価は初号機で38万円/kWe、量産化によるコストダウンを考慮しても23万円/kWeで目標をやや上回る |
| 水素製造プラント － 高温熱源の多目的利用 | <ul style="list-style-type: none">・ 発熱量で換算したガソリンの市場価格相当の製造コスト(17円/Nm³) | <ul style="list-style-type: none">・ 500℃程度的高速炉の炉心出口温度域に適用可能・ 水素分離改質法の製造コストは21円/Nm³で目標をやや上回る・ ハイブリッド熱化学法では、水素製造効率の向上が必要 |

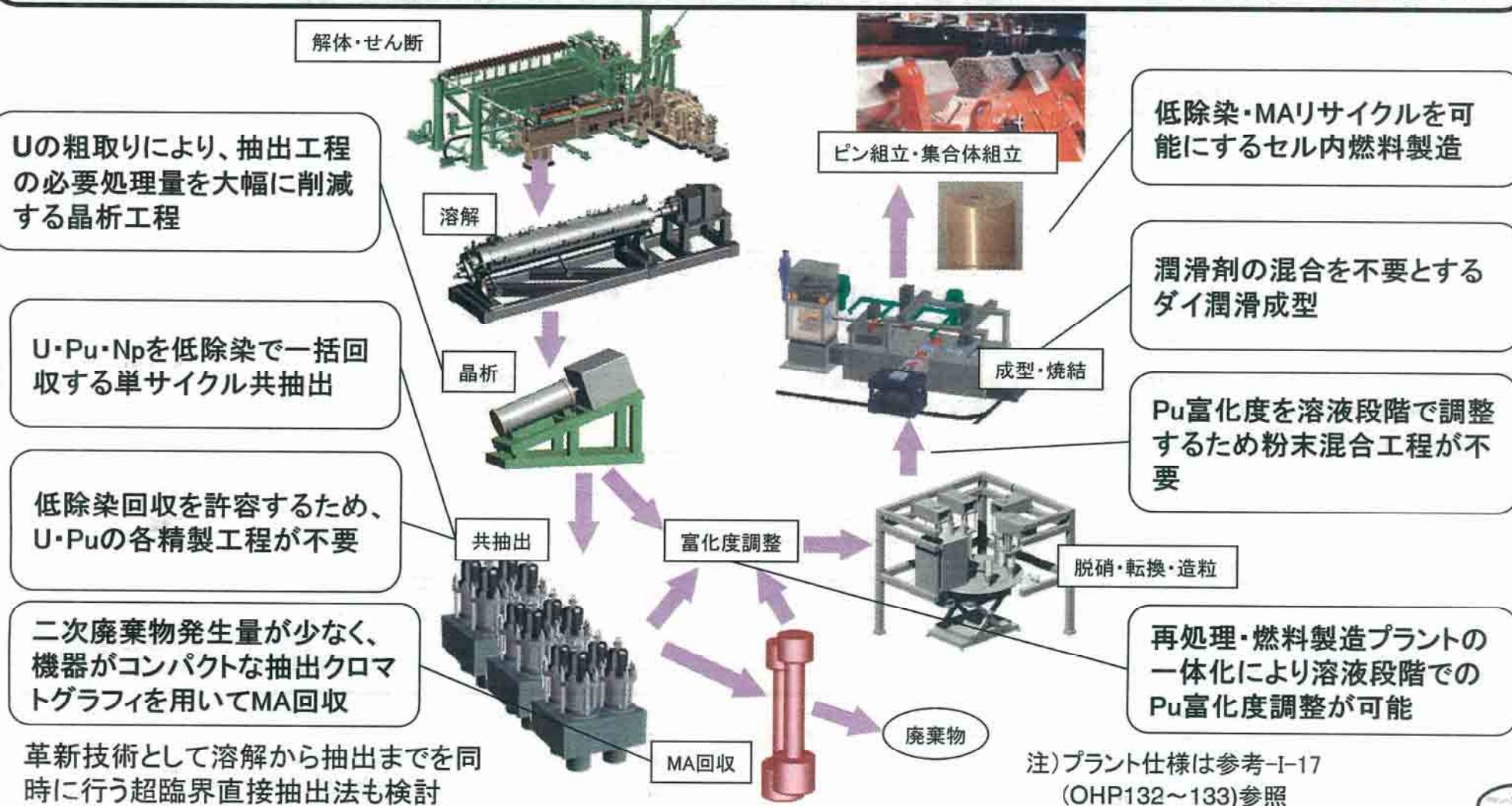


2.(2) 燃料サイクルシステム

(a) 先進湿式法再処理＋簡素化ペレット法燃料製造(1/3)

●システムの特徴

- 低除染燃料の使用が許容される高速増殖炉の特徴を生かし、回収/精製工程を合理化。
- 溶液段階でのPu富化度調整などにより、従来のペレット製造から粉末混合工程を削除。





2.(2) 燃料サイクルシステム

(a) 先進湿式法再処理＋簡素化ペレット法燃料製造(2/3)

● 主要な成果

➤ 主要工程の成立性は小規模ホット試験や照射燃料製造などによって確認。

| 項目 | | 開発目的とフェーズⅡまでの主要な成果 |
|----------|----------|---|
| 先進湿式法 | 解体・せん断 | 目的: 解体設備及びせん断設備のコンパクト化により、前処理設備の経済性向上を図る。 成果: ラップ管切断試験等により、集合体解体への機械式切断の適用可能性の見通しを得た。一体型解体・せん断機概念設計を実施した。 |
| | 溶解 | 目的: 晶析工程との適合性を考慮して、短尺せん断や粉体化等の処理条件も踏まえて、効率的な溶解条件で適正な濃度の溶解液を得る。 成果: 照射済燃料を粉体化すれば、99%以上の溶解率で、晶析工程に適した濃度500g/Lを所定の時間内に達成できることをビーカースケールのホット試験で明らかにした。1cm程度の短尺せん断でも同等の性能を達成できる可能性がある。 |
| | 晶析 | 目的: 使用済燃料を溶解した溶液を冷却して、硝酸ウラニルの結晶として75%程度のウランを粗回収することにより、後に続く共除染・逆抽出工程での必要処理量や試薬量を低減し、UとPuの分配工程を削除する。 成果: ビーカースケールのホット試験によって、U回収率80%を達成するとともに、BaやCsなど除染されにくい(DF=5~10程度)元素を確認した。円環型キルン式晶析装置(約4kg/h)を試作、硝酸ウラニル結晶の連続的回収に成功した。 |
| | 共除染・逆抽出 | 目的: U晶析により適切なU:Pu比に調整された溶液から遠心抽出器を用いてU-PuとNpを一括で抽出することにより、工程簡素化による経済性向上を図る。 成果: ビーカースケールのホット試験によって、U・Puの回収率99%以上、Npの回収率90%以上で一括回収できた。また、10kg/h規模の遠心抽出器を開発し、水相と有機相の分離など基本性能や耐久性などを確認した。 |
| | MA回収 | 目的: コンパクトな設備となる可能性が高い抽出クロマトグラフィ技術を活用して、MA回収に要するコストを低減する。 成果: 化学的原理が同じ溶媒抽出法についてはビーカースケールのホット試験でMA回収率99%以上を確認した。クロマトグラフィ技術については、軽希土類元素および重希土類元素との分離特性からMA分離の可能性見通しを得た。 |
| 簡素化ペレット法 | 脱硝・転換・造粒 | 目的: 粉末混合工程を経ることなく、所定のPu富化度に調整した溶液を脱硝・転換・還元し、成型に適した性状の原料粉を製造する。 成果: MOX粉末の流動性改良には転動造粒法が有効であることを小規模MOX試験で確認した。ターンテーブル方式による小型脱硝転換装置を製作し、U試験によって良好な粉末を製造した。 |
| | 成型 | 目的: 粉末混合工程削除と適合する、潤滑剤混合が不要のダイ潤滑直接成型技術を確立する。 成果: 流動性を改良したMOX粉を用いた小規模試験によってダイ潤滑成型の見通しを確認した。 |
| | 焼結 | 目的: 低除染TRUペレットの焼結性を確認するとともに、高燃焼度まで燃料被覆管の健全性維持を可能とするために酸素と重金属の原子数比(O/M比)の調整技術を確立する。 成果: 簡素化ペレット法のプロセスによって製造した成型体を焼結し、欠け・割れ・有意なPuスポット等のない理論密度95%以上のMOXペレットを得た。MA含有ペレットについては、従来のペレット製造法にて照射用ペレットの製造およびO/M調整を実施した。 |

注) 先進湿式再処理＋簡素化ペレット法燃料製造に係わる主要成果の具体例については、参考-I-18(OHP134~135)参照



2.(2) 燃料サイクルシステム

(a) 先進湿式法再処理＋簡素化ペレット法燃料製造(3/3)

●設計要求への適合可能性、技術的実現性

- 全ての設計要求に適合する可能性を有し、200tHM/y程度の大型プラント(例えばナトリウム冷却炉22～28GWe分の使用済酸化物燃料処理能力に相当)では最も経済性に優れる可能性がある。
- 開発課題が明確で、技術的実現性を見通すことが出来る。

●設計要求への適合性

- 200tHM/y程度の大型プラントでは最も**経済性**に優れる可能性がある。
- 環境負荷低減**に関する設計要求も満足する可能性がある。
- U・TRUを99%以上回収可能なプロセスの設計が出来る可能性がある[**資源有効利用性**]。
- U/Pu/Npを共回収するため単独でPuが存在しない。また、低除染化により難接近性を確保[**核拡散抵抗性**]。
- 既存再処理施設に対する安全設計技術を適用できる[**安全性**]。

●技術的実現性

- ベース技術は、東海再処理工場や東海Pu燃料製造施設等の建設・運転の経験。
- 晶析工程や脱硝・転換・成型工程など遠隔保守補修性を考慮した機器開発、低除染MA含有ペレット製造の実証などが課題。
- 高い確度で実現性を見通すことができる。
- 国際協力により、技術的実現性の向上が期待できる。

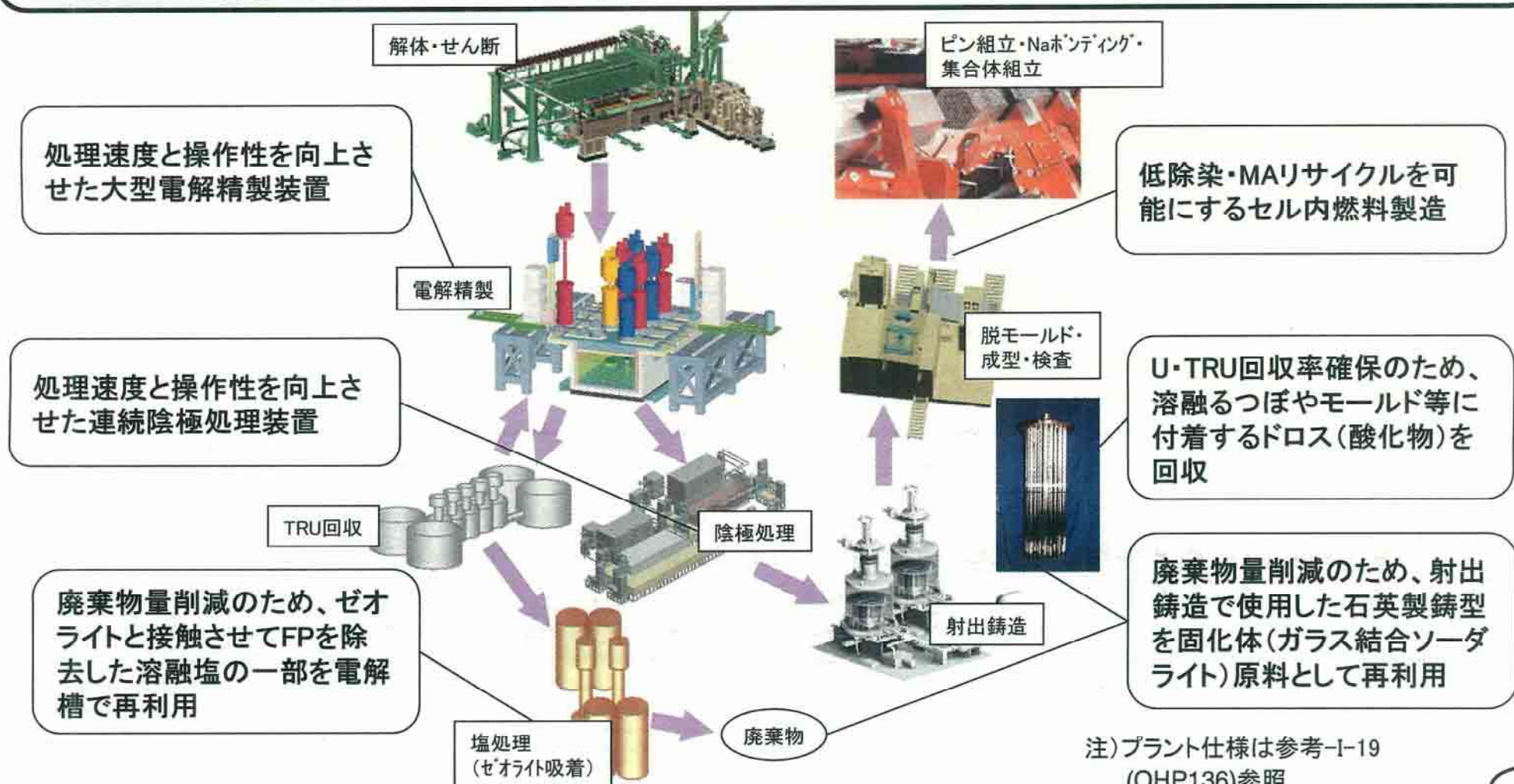


2.(2) 燃料サイクルシステム

(b) 金属電解法再処理＋射出鑄造法燃料製造(1/3)

●システムの特徴

- 米国で開発された乾式再処理法に対して、処理速度向上等の改良。
- 米国高速実験炉EBR-IIの燃料製造に用いられた射出鑄造法の一部合理化。





2.(2) 燃料サイクルシステム

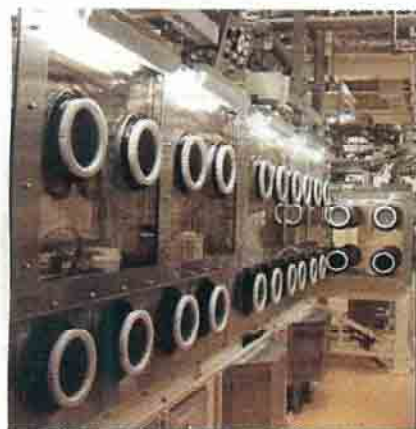
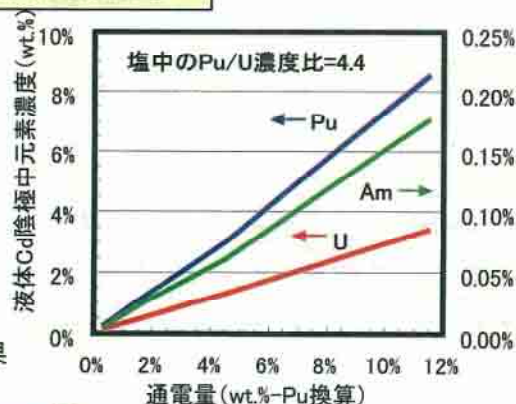
(b) 金属電解法再処理＋射出鑄造法燃料製造(2/3)

● 主要な成果

➤ 主要工程の成立性はU・Puを用いた小規模試験などによって確認。

電解精製技術開発

Puを用いた小規模試験の結果、
 ✓ PuをUと共に安定的に回収
 できる条件：塩中Pu/U濃度比 >2 、
 ✓ AmはPuに伴ってCd陰極に
 回収されること、
 ✓ 希土類の分離係数 $=20\sim30$ 、等
 がわかった。※電中研-旧原研共同研究の成果

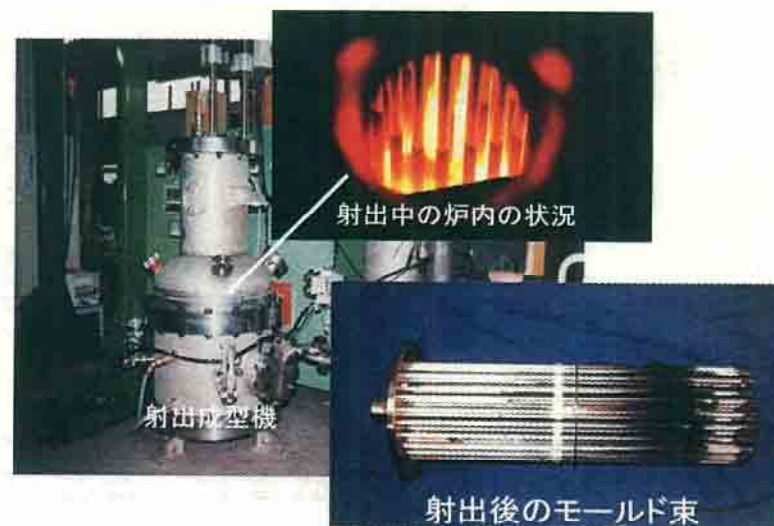


CPFにおける金属電解法
プロセス試験設備とU析出物

CPFに設置した電解精製および陰極処理などからなる試験設備を用いてU試験を実施、高いU回収率($>96\%$)を確認。

※旧JNC-電中研共同研究の成果

射出鑄造技術開発



U-Zr合金を用いた実規模に近い規模での射出鑄造試験により、燃料スラグの外径や密度に関する統計データを蓄積。平均外径精度 $\pm 0.05\text{mm}$ 以内、Zr濃度 $\pm 1\%$ 以内などの仕様設定値が満足される見通しが得られた。
 溶融合金に対する射出量の割合(射出割合)は設計目標値70%を定常的にクリアした。

塚田ら、日本原子力学会「2004年秋の大会」H20(2004年9月京大)



2.(2) 燃料サイクルシステム

(b) 金属電解法再処理＋射出鑄造法燃料製造(3/3)

●設計要求への適合可能性、技術的実現性

- 概ね全ての設計要求に適合する可能性があり、50tHM/y程度の小型プラント(例えばナトリウム冷却炉8～9GWe分の使用済金属燃料処理能力に相当)では最も経済性に優れる可能性がある。
- 技術的実現性は高いが、開発インフラ整備のため、開発には長期を要する見込み。

●設計要求への適合性

- 50tHM/y程度の小型プラントでは最も**経済性**に優れる可能性がある。
- 環境負荷低減**に関しては、高レベル廃棄物発生量が若干多いが、プロセス合理化等により設計要求を満足する可能性がある。
- U・TRUを99%以上回収可能なプロセスの設計が出来る可能性がある[**資源有効利用性**]。
- U/TRUを同時回収するため単独でPuが存在しない。また、低除染化により難接近性を確保[**核拡散抵抗性**]。
- 化学形態を考慮した質量管理に基づく臨界安全管理手法を適用[**安全性**]。

●技術的実現性

- 米国の開発・操業実績などから、技術的実現性を見通すことが可能。
- 照射済燃料を用いた再処理主要工程の確認、遠隔操作性を考慮した機器開発、計量管理手法の開発、安全設計手法の整備などが課題。
- 国内開発インフラ整備の必要があり、開発には湿式法に比べて長期を要する見込み。開発実績を有する米国等との国際協力の可能性が重要。

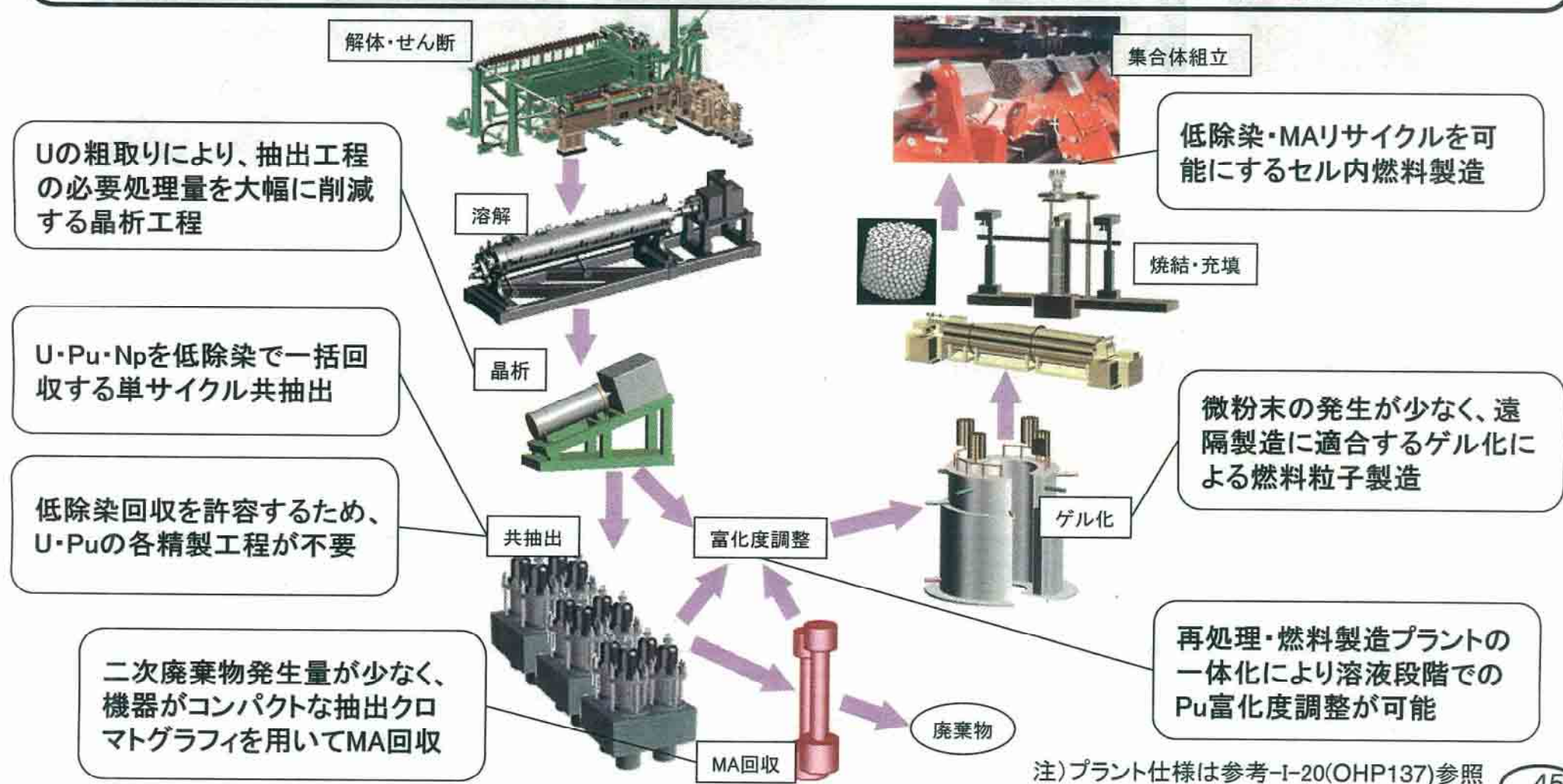


2.(2) 燃料サイクルシステム

(c) 先進湿式法再処理＋振動充填法燃料製造(スフェアパック燃料) (1/3)

●システムの特徴

- 低除染燃料の使用が許容される高速増殖炉の特長を活かし、回収/精製工程を合理化。
- 微粉末発生が少なく、遠隔製造に適合するゲル化法による粒子燃料製造を採用。



注) プラント仕様は参考-I-20(OHP137)参照



2.(2)燃料サイクルシステム

(c) 先進湿式法再処理＋振動充填法燃料製造(スフェアパック燃料) (2/3)

●主要な成果

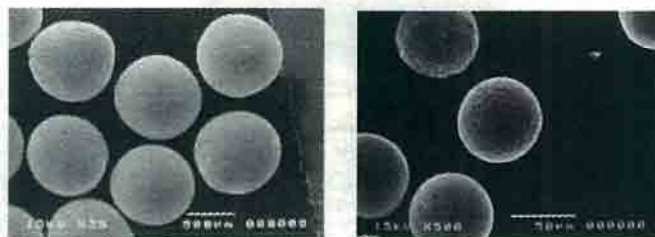
➤主要工程の成立性は小規模ホット試験や照射燃料製造などによって確認。

ゲル化法粒子製造技術開発

- ✓ 5%のNpを含有するMOX粒子燃料を製造し、Npの添加が粒子燃料製造に悪影響を及ぼさないことを確認。
- ✓ 原料溶液や添加剤の γ 線照射試験を行い、MA添加時や低除染時に懸念された放射線劣化の影響が少ないことを確認。



外部ゲル化法による小径液滴の滴下(U試験)

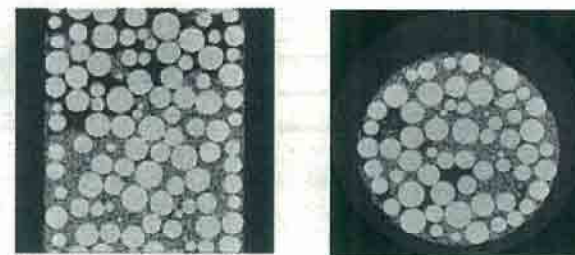


大径粒子(約900 μm) 小径粒子(約70 μm)

外部ゲル化法で製造した UO_2 粒子

充填試験と照射試験

- ✓ 模擬粒子の充填試験や照射試験燃料の製造の結果、スミア密度80%以上、軸方向分布 $\pm 2\%$ 以内、などを確認。
- ✓ 高出力照射試験などを実施し、実用燃料として十分な溶融限界を有すること等を確認。



充填途中のスフェアパック燃料ピンのCT画像



2.(2) 燃料サイクルシステム

(c) 先進湿式法再処理＋振動充填法燃料製造(スフェアパック燃料) (3/3)

●設計要求への適合可能性、技術的実現性

- 全ての設計要求に適合する可能性はあるが、簡素化ペレット法燃料製造に比べると経済性は劣る見込み。
- 成立性に影響する技術的課題について解決の見通しがある。

●設計要求への適合性

- 経済性**に関する設計要求を満足する可能性はあるが、簡素化ペレット法に比べると**経済性**は劣る見込み。
- 環境負荷低減**に関する設計要求に適合する可能性がある。
- U・TRUを99%以上回収可能なプロセスの設計が出来る可能性がある[**資源有効利用性**]。
- U/Pu/Npを共回収するため単独でPuが存在しない。また、低除染化により難接近性を確保[**核拡散抵抗性**]。

●技術的実現性

- 再処理のベース技術は、東海再処理工場等の建設・運転の経験。
- 廃液処理工程の簡素化、燃料ピン品質検査技術の開発、プロセス最適化による経済性向上、遠隔保守補修性を考慮した機器開発などが課題。
- 簡素化ペレット法に比べれば技術的知見は少ないが、これまでの基礎的な研究開発の成果より技術的実現性を見通すことが可能。
- 高い確度で技術的実現性を見通すことができる。

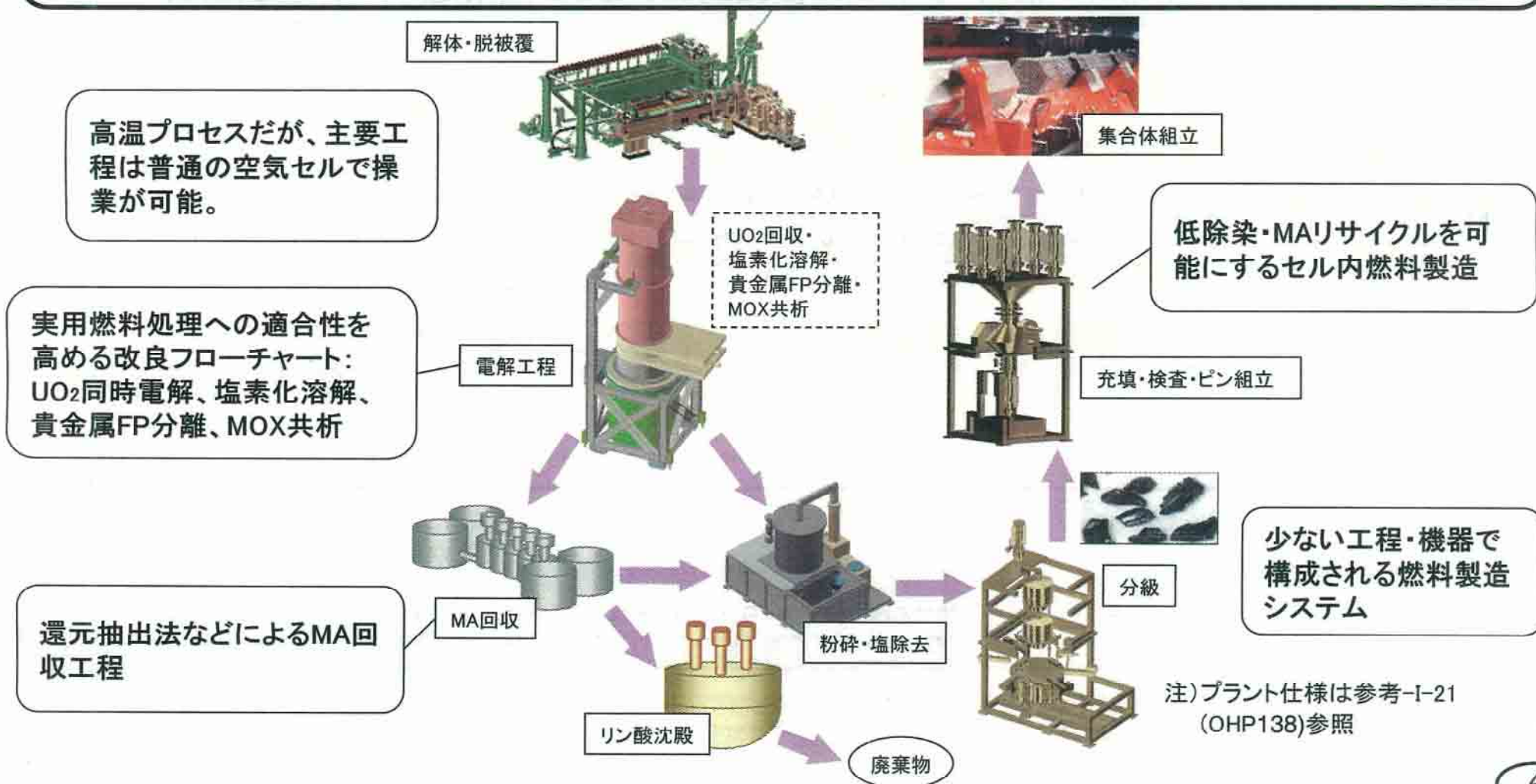


2.(2) 燃料サイクルシステム

(d) 酸化物電解法再処理＋振動充填法燃料製造(バイパック燃料) (1/3)

●システムの特徴

- ロシアで開発された乾式再処理法に対して、実用燃料処理への適合性を高める改良。
- ロシアの高速実験炉BOR-60の燃料製造に用いられているバイパック燃料製造を採用。





2.(2)燃料サイクルシステム

(d) 酸化物電解法再処理＋振動充填法燃料製造(バイパック燃料) (2/3)

●主要な成果

➤主要工程の成立性はホット試験などによって確認。

MOX共析試験

- ✓ Pu沈殿の生成は吹き込みガス中の塩素濃度を上げることで防止でき、電流効率は塩中のPu/U濃度比を高めることで維持できることをロシアにおける使用済燃料を用いた試験で確認。電流効率はMOX析出物中のPu富化度などにより、20～60%の間で変化
- ✓ 希土類の除染係数は現状では10～20との見込み

振動充填と照射試験

- ✓ 照射済MOX燃料を酸化物電解法(ただしRIARオリジナルの方法)で処理して得られたMOX顆粒を用いて低除染バイパック燃料を製造。
- ✓ Pu富化度の軸方向のばらつきは、ロシアにおける高除染MOX燃料製造実績から、制限値(Pu富化度の±5%)以内とできる見通し。
- ✓ 実験炉BOR-60で照射した結果、高除染のバイパック燃料とほぼ同様のふるまいを示すことがわかった。



回収したMOX析出物
(U+Pu 2.7kg)



2. (2) 燃料サイクルシステム

(d) 酸化物電解法再処理＋振動充填法燃料製造(バイパック燃料) (3/3)

●設計要求への適合可能性、技術的実現性

- 全ての設計要求に適合する可能性はある、MA回収率のホット試験による確認が必要。
- 技術的課題が多く、開発には長期を要する見込み。

●設計要求への適合性

- 50tHM/y程度の小型プラントでは先進湿式＋簡素化ペレットより**経済性**に優れる可能性がある。
- 環境負荷低減**に関して、廃棄物発生量の設計要求に適合する可能性がある。
- 資源有効利用性**の設計要求に適合する可能性があるが、MA回収率のホット試験による確認が必要。
- U/Puを共回収するため単独でPuが存在しない。また、低除染化により難接近性を確保[**核拡散抵抗性**]。

●技術的実現性

- 実現するためにはMOX共析の性能向上、MA回収技術、材料腐食対策、計量管理技術、塩廃棄物固化技術、燃料ピン品質検査技術等の開発が必要。
- ロシアにMOX燃料集合体セル内製造実績があるが、技術的成立性を見通すにはさらなる基礎的研究が必要。
- 技術的課題が多く、国内開発インフラの整備の必要もあり、開発には長期を要する見込み。



2.(2) 燃料サイクルシステム (e) 有望なシステム概念の抽出

● 有望なシステム概念抽出の考え方

- 設計要求への適合可能性を評価し、次いで国際協力の可能性を含めた技術的実現性に関する比較により、有望なシステム概念を抽出する

設計要求への適合可能性

- ・ 安全性、経済性、環境負荷低減性、資源有効利用性、核拡散抵抗性に関する設計要求に対し、各概念の適合可能性を評価する

技術的実現性
(含 国際的視点)

実用化するために克服すべき課題の多さとそれぞれの課題の難易度および代替技術の有無と国際協力の可能性から、各概念の技術的成立性を評価する

〔 国際協力の活用により、効率的な研究開発が期待できるとともに、技術的実現性をより確かなものとすることができることから、各概念の国際協力の可能性を評価する 〕

有望なシステム概念の抽出

※鉛ビスマス冷却炉やヘリウムガス冷却炉等への適用が検討されている窒化物燃料については、酸化物から窒化物への転換など適切な処理工程を付加することで、先進湿式法再処理、ペレット燃料製造、ゲル化法粒子燃料製造(スフェアパック燃料製造の一部)などが適用可能である。



2.(2) 燃料サイクルシステム (e) 有望なシステム概念の抽出

各燃料サイクルシステムの 設計要求への適合可能性

| 設計要求 | | | 先進湿式法 ＋簡素化ペレット法 | | 金属電解法 ＋射出鑄造法 | | 先進湿式法 ＋スフェアパック | | 酸化物電解法 ＋バイパック | |
|---------|-----------------------------|-----------------------------|--|-----------------|---|-------|-------------------------------|-------|---|-------|
| | | | 資源重視 | 経済性重視 | 資源重視 | 経済性重視 | 資源重視 | 経済性重視 | 資源重視 | 経済性重視 |
| 安全性 | | | 設計要求への適合が可能 (現行の指針等を踏襲できる) ※超臨界直接抽出法では、高圧流体の取扱等を考慮した設計により設計要求への適合が可能 | | 設計要求への適合が可能 (質量管理と化学形態管理を組み合わせた臨界管理、高温融体、活性金属等の取扱いを考慮した設計) | | 設計要求への適合が可能 (現行の指針等を踏襲できる) | | 設計要求への適合が可能 (塩素ガス、高温融体、活性金属等の取扱いを考慮した設計) | |
| 経済性 | 再処理＋燃料造) ≤ 0.8円/kWh | 大型プラント[200t/y] | 約60% | 約45% | 約65% | 約55% | 約80% | 約65% | | |
| | | 小型プラント[50t/y] (超臨界直接抽出法) | 約135% (約120%) | 約105% (約95%) | 約80% | 約75% | | 約110% | | |
| | 輸送・貯蔵・処分費 ≤ 0.3円/kWh | 大型および小型プラント (超臨界直接抽出法) | 約100% (約95%) | 約95% (約90%) | 約145% | 約140% | 約100% | 約95% | 約120% | 約110% |
| | | 燃料サイクルコスト ≤ 1.1円/kWh | 大型プラント[200t/y] | 約70% | 約60% | 約85% | 約80% | 約85% | 約75% | |
| | 小型プラント[50t/y] (超臨界直接抽出法) | | 約125% (約115%) | 約100% (約95%) | 約100% | 約90% | | 約115% | 約95% | |
| 資源有効利用性 | | UおよびTRUの回収率 ≥ 99% | 基礎試験データから、99%以上を回収可能なプロセスの設計が可能 | | | | | | 設計できる可能性がある (MA回収率確認が必要) | |
| 環境負荷低減性 | 再処理 | 高レベル固化体体積 ≤ 0.5L/GWh | ホウケイ酸ガラス: 約60% | | 人工鉱物: 約110% | | ホウケイ酸ガラス: 約60% | | リン酸ガラス, 合金: 約80% | |
| | | TRU及び高βγ廃棄物量 ≤ 1.6L/GWh | 約85% | | 約35% | | 約85% | | 約60% | |
| 核拡散抵抗性 | Puが単独で存在しない | | U,Pu,Npの共回収 | | U,TRUの共回収 | | U,Pu,Npの共回収 | | U,Puの共回収 | |
| | 難接近性の確保 | | 低除染化による難接近性の確保 | | | | | | | |

は優れた特性



2.(2) 燃料サイクルシステム (e) 有望なシステム概念の抽出

● 各燃料サイクルシステムの設計要求への適合可能性

先進湿式法＋簡素化ペレット法

- ・全ての設計要求に高いレベルで適合する可能性がある。
- ・大規模施設の経済性は最も高くなる可能性がある。

金属電解法＋射出鑄造法

- ・全ての設計要求に適合する可能性がある。
- ・高レベル廃棄物発生量が若干多い。
- ・小型施設の経済性は先進湿式法＋簡素化ペレット法を上回る可能性がある。

先進湿式法＋振動充填法(スフェアパック)

- ・全ての設計要求に適合する可能性がある。
- ・先進湿式法＋簡素化ペレット法に比べると経済性は劣る見通し。

酸化物電解法＋振動充填法(バイパック)

- ・全ての設計要求に適合する可能性があるが資源有効利用性についてはMA回収率のホット試験での確認が必要。
- ・小型施設の経済性は先進湿式法＋簡素化ペレット法を上回る可能性がある。

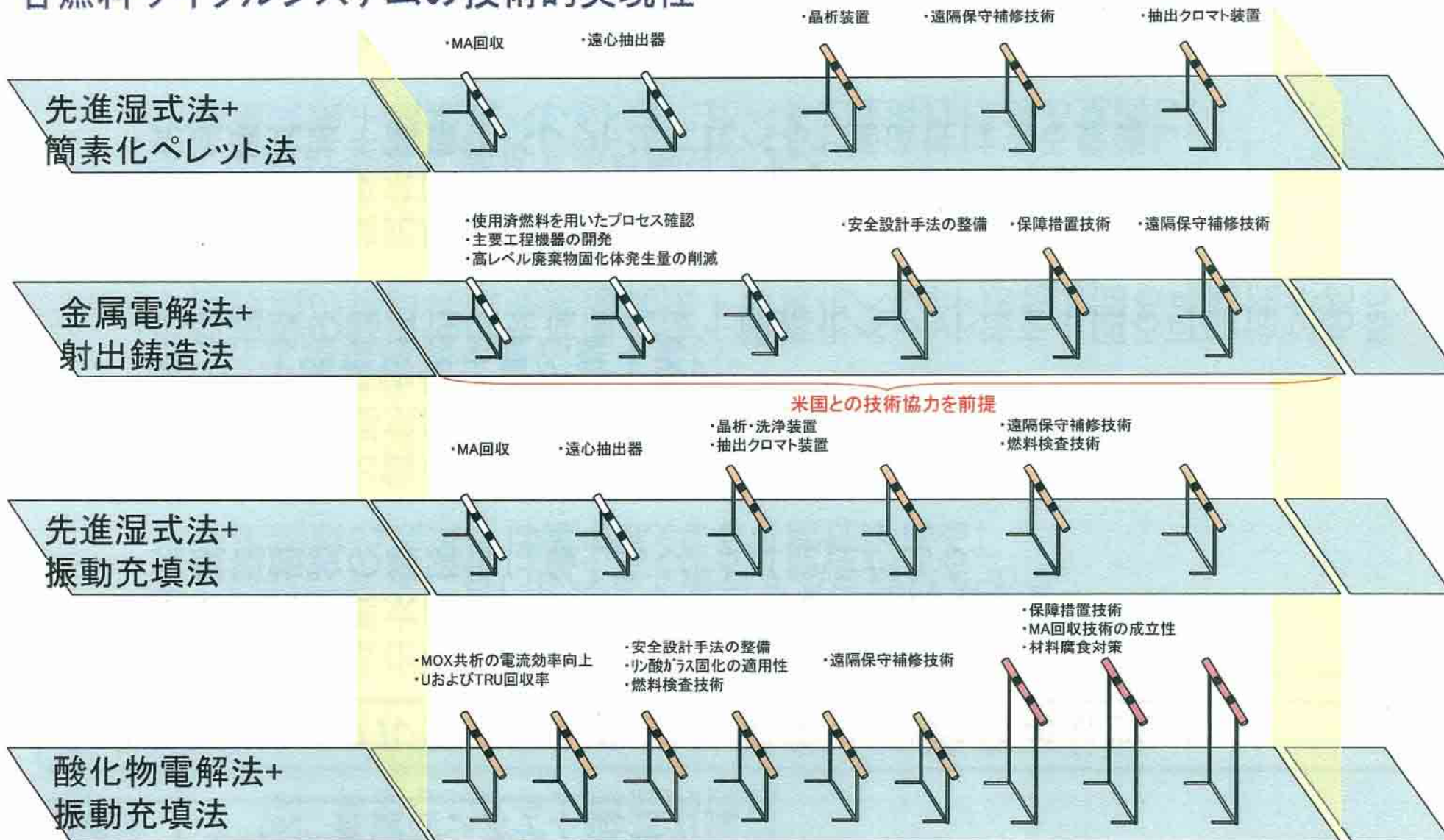


2.(2) 燃料サイクルシステム (e) 有望なシステム概念の抽出

実現可能性(難易度:ハードルの高さ)の分類
 低:「開発見通しがあり、不確かさが少ない革新技術」
 中:「現状知見に乏しく、開発に不確かさがある革新技術」
 高:「基礎知見に乏しい燃料・材料関連の革新技術であり、不確かさが最も大きく、かつ研究開発に時間がかかる技術」

各燃料サイクルシステムの技術的実現性

注)各ロードマップ(案)は参考-I-22~28 (OHP139~145)参照



実用化戦略調査研究
フェーズⅡ終了



2.(2) 燃料サイクルシステム (e) 有望なシステム概念の抽出

● 各燃料サイクルシステムの技術的実現性

先進湿式法＋簡素化ペレット法

- ・燃料製造設備の遠隔保守性等に課題はあるが、実現性を見通すことが可能。
- ・仏ではホット施設などによる関連研究を実施。

金属電解法＋射出鑄造法

- ・国内における技術的知見や開発インフラが乏しく、長い開発期間が必要な見通し。
- ・米国ではホット施設などによる関連研究を実施。

先進湿式法＋振動充填法(スフェアパック)

- ・技術的知見は簡素化ペレット法に比べて少ないが、実現可能な見通し。
- ・スフェアパックについては積極的に開発する国がない。

酸化物電解法＋振動充填法(バイパック)

- ・電解効率向上、燃料粒子の品質管理等に係る基礎的課題など、再処理技術のハードルが比較的高く、長い開発期間が必要な見通し。
- ・露ではホット施設等による関連研究を実施。



2.(2) 燃料サイクルシステム

(e) 有望なシステム概念の抽出

● 有望なシステム概念

- 先進湿式法＋簡素化ペレット法が最も有望な概念である
- 金属電解法＋射出鑄造法は多様なニーズに対応可能な有望概念である

| | 先進湿式法＋ 簡素化ペレット法 | 金属電解法＋ 射出鑄造法 | 先進湿式法＋ 振動充填法 ^(※) | 酸化物電解法＋ 振動充填法 |
|-----------------|---|--|----------------------------------|--|
| 設計要求への 適合可能性 | 全ての設計要求に対して高いレベルで適合する可能性があり、スケールアップ効果のため大規模施設の経済性が高い。 | 全ての設計要求に対して適合する可能性があり、小規模施設の経済性が高い。 | 全ての設計要求に対して適合する可能性がある。 | 全ての設計要求に対して適合する可能性がある。 |
| 技術的実現性 | 実現性を見通すことが可能 | 実現性を見通すことが可能だが、インフラ整備が必要なことから比較的長期の開発を要する見込み | 実現性を見通すことが可能 | 技術的課題が多く開発に長期を要する |
| (国際的視点) | 国際協力を期待することが可能 〔フランスではホットラボなどによる関連研究を実施〕 | 国際協力を期待することが可能 〔米国ではホットラボなどによる研究を実施〕 | 国際協力を期待することが困難 〔積極的に開発する国はない〕 | 国際協力を期待することが可能 〔ロシアではホットラボなどによる関連研究を実施〕 |

は優れた部分

(※) ヘリウムガス冷却炉用の窒化物被覆粒子燃料の製造には、この振動充填法の工程の一部である「ゲル化法」が用いられるが、対応する燃料サイクル概念の開発については、高速増殖炉システム開発の進捗により被覆粒子窒化物燃料の概念が固まった後に着手することが効率的である。



2.(3) 高速増殖炉サイクル全体での技術総括結果(1/2)

- 高速増殖炉システム、燃料サイクルシステムの技術総括結果を踏まえて、高速増殖炉サイクル全体として総合的に評価する対象を選定する。



- 高速増殖炉システムの有望な概念は以下のとおり。
 - ナトリウム冷却炉(酸化物(MOX)燃料)が最も有望な概念であり、金属燃料を採用した場合には更なる炉心性能向上が見込める。
 - ヘリウムガス冷却炉は、高温熱源として利用できるなど、多様なニーズに対応可能な概念。
- 一方、燃料サイクルシステムでは、「先進湿式法+簡素化ペレット法」が最も有望な概念、将来のウラン需給が予想以上に逼迫した場合に増殖性能が高い金属燃料炉心が対応能力を有することから、それに適合する「金属電解法+射出鑄造法」が有望概念となった。
- 高速増殖炉サイクル全体としての評価にあたっては、高速増殖炉システムの有望な概念に対して、燃料サイクルシステムの検討結果を踏まえ、最もふさわしいと考えられる燃料サイクルシステム概念を組み合わせることとした。その結果、以下の組合せを評価対象とした。
 - ナトリウム冷却炉(MOX燃料)+先進湿式法再処理+簡素化ペレット法燃料製造
 - ナトリウム冷却炉(金属燃料)+金属電解法再処理+射出鑄造法燃料製造
 - ヘリウムガス冷却炉(窒化物被覆粒子燃料)+先進湿式法再処理+被覆粒子燃料製造法

(ヘリウムガス冷却炉については、先進湿式法再処理をベースに、窒化物被覆粒子燃料に適合する燃料製造としてゲル化法粒子燃料製造法との組合せとしている)



2.(3) 高速増殖炉サイクル全体での技術総括結果(2/2)

(a) ナトリウム冷却炉(MOX燃料)＋先進湿式法再処理＋簡素化ペレット法燃料製造

- 経済性、環境負荷低減性等の開発目標に高いレベルで適合する可能性がある。
- Na冷却炉、先進湿式法再処理、簡素化ペレット法燃料製造のいずれも技術的実現性を見通すことが可能。

総合的に最も
優れた概念

(技術総括の結果は、
多面的評価の結果でも
裏打ちされた)

(b) ナトリウム冷却炉(金属燃料)＋金属電解法再処理＋射出鑄造法燃料製造

- 経済性、環境負荷低減性等の開発目標に適合する可能性がある。
(a)と比較すると、経済性(発電原価)、環境負荷低減性(高レベル放射性廃棄物発生量)はやや劣る見込み。
- 技術的実現性は、(a)と同等であるが、燃料サイクルの開発に比較的長期を要する見込み。
- 金属燃料の採用により高い増殖比にも対応可能など、炉心性能の向上が期待できるという魅力を有する。

総合的な評価で
は(a)を超えるも
のではないが、
(a)にはない魅力
を有する概念

(c) ヘリウムガス冷却炉(窒化物被覆粒子燃料)＋先進湿式法再処理＋被覆粒子燃料製造法

- 経済性、環境負荷低減性等の開発目標に適合する可能性がある。
(a)と比較すると、経済性(発電原価)、環境負荷低減性(低レベル放射性廃棄物発生量)、資源有効利用性(移行に要するウラン累積需要)はやや劣る見込み。
- 技術的実現性は、(a)に比べて劣る見込みであるが、国際協力による成果を期待することが可能と考えられる。
- 高温熱源としての多目的利用が期待できるという魅力を有する。

(注)各概念の開発目標への適合可能性を
参考-I-29(OHP146)に示す。



第 I 部 第3章

多面的評価



3. 多面的評価

(1) 評価の位置付けと評価方法

● 多面的評価の位置付け

高速増殖炉サイクル全体の技術総括を裏付ける参考データとして用いる。

● 多面的評価の方法

■ 炉システムと燃料サイクルシステムを組み合わせた各候補概念について、分析的アプローチにより、安全性を前提として、5つの視点（開発目標への適合可能性、技術的実現性）に関する目標適合度をJAEAで評価し、0～1に数値化する。

5つの視点 経済性（発電原価、投資必要額など）
環境負荷低減性（放射性廃棄物発生量、潜在的放射性毒性など）
資源有効利用性（天然ウラン累積需要量、天然ウラン利用効率）
核拡散抵抗性（保障措置制度への適合性、難接近性など）
技術的実現性（開発資金、開発期間など）

■ 5つの視点について、将来社会ではどの視点が重要視されるかの電気事業者（35名）、有識者（5名）、普通の市民（約2200名）に対するアンケート調査結果を用いて、それぞれのグループでの5つの視点間の重み付けを行う。

■ 各候補概念の、それぞれの視点に対する目標適合度にグループの視点間の重み付けを行い、それらを合計することによってそのグループでの「総合的な目標適合度」を算出する。この数値が大きいほどそのグループのニーズに対して、より適合していることを示している。

3種類の「総合的な目標適合度」 (i) 電気事業者の重みを用いた場合
(ii) 有識者の重みを用いた場合
(iii) 普通の市民の重みを用いた場合



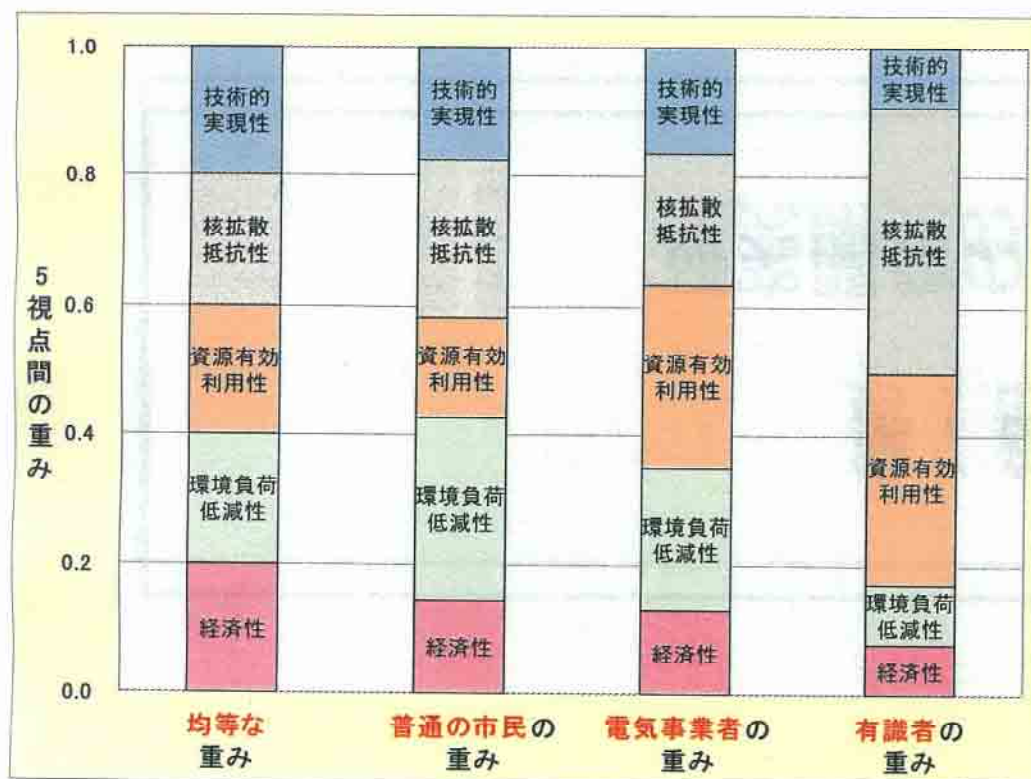
3. 多面的評価

(2) 多面的評価の結果

(電気事業者、有識者、普通の市民が考える重みを用いた総合的な目標適合度(資源型炉心))

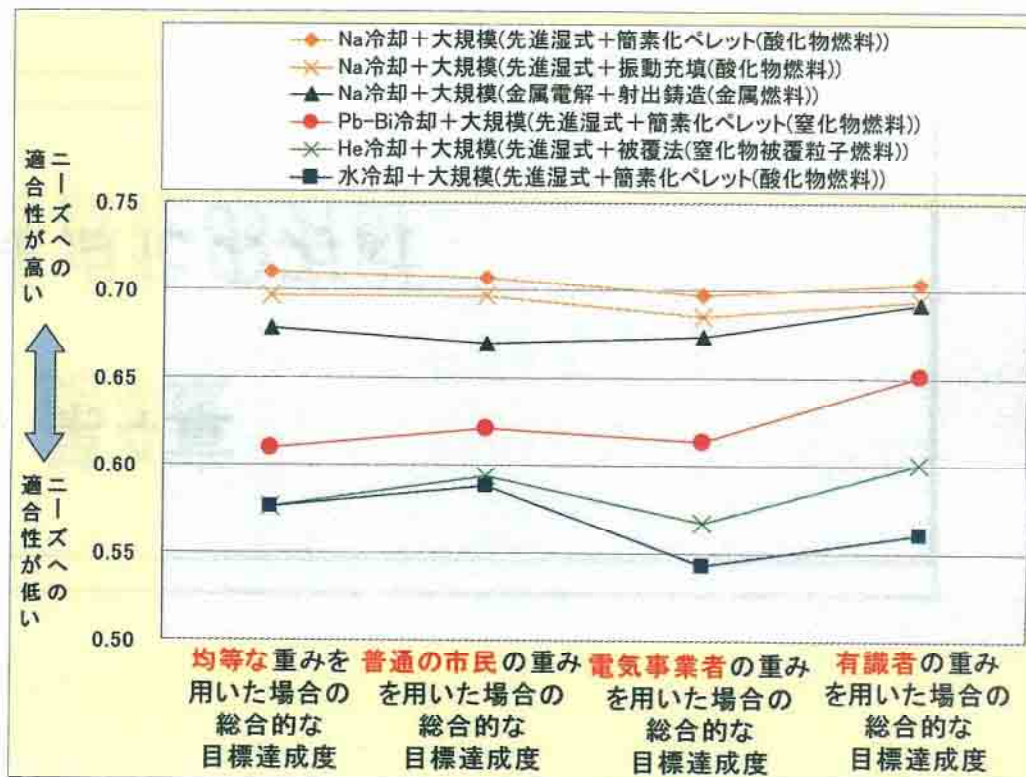
「ナトリウム冷却炉(MOX燃料)+先進湿式法再処理+簡素化ペレット燃料製造法」が多面的評価において将来社会のニーズへの適合性に優れた傾向を示した。

資源重視型炉心の場合



5視点間重み

(電気事業者、有識者、普通の市民の重み)



重みを考慮した総合的な目標適合度の比較

[注] 普通の市民の重みを用いた場合の炉型別及び燃料サイクル別の比較は参考-I-30(OHP147)参照



第 I 部 第4章

研究開発の重点化の方針



4. 研究開発の重点化の方針

主概念(最も優れた概念を選択)

「ナトリウム冷却炉(MOX燃料)＋先進湿式法再処理＋簡素化ペレット法燃料製造」

補完概念(将来の不確実性を考慮し選択肢に多様性を持たせる観点から、

主概念にはない魅力がある概念を選択)

「ナトリウム冷却炉(金属燃料)＋金属電解法再処理＋射出鑄造法燃料製造」

将来のウラン需給が予想以上に逼迫した場合に柔軟に対応できる能力を有する

「ヘリウムガス冷却炉(窒化物被覆粒子燃料)＋先進湿式法再処理＋被覆粒子燃料製造法」

高温熱源として多目的利用が期待できる

今後の基本的な進め方

- 主概念と補完概念の投資配分に差を付け
- 2015年頃までには補完概念の扱い方を再検討する
- その他の概念は基盤研究と位置づけ、適宜評価を実施する