

## FBR サイクルの実用化戦略調査研究 (進捗状況報告書)

2000年1月17日  
核燃料サイクル開発機構

### 1. はじめに

昨年7月、推進体制を発足し、FBR とその関連する核燃料サイクル (FBR サイクル) の実用化戦略調査研究を開始した。実施体制等については、第2回会合資料「高速増殖炉サイクルの研究開発の現状と実用化戦略」で説明した通りである。現在、半年が経過した段階であるが、ここでは現時点での進捗状況を中心に述べる。

### 2. 実用化戦略調査研究の進め方

FBR サイクルの実用化戦略調査研究は、フェーズ I (1999 年度～2000 年度)、フェーズ II (2005 年度頃まで) と段階を踏み、各フェーズ毎に研究開発の計画及び成果についてチェックアンドレビューを受けながら進めることとしている。フェーズ I、II の実施内容を以下に示す。

#### フェーズ I [2000 年度まで]

##### [実施概要]

幅広く技術的選択肢の評価を行い、実用化戦略を明確にする上で必要となる判断資料を整備する。このフェーズの成果として、有望な実用化候補概念を抽出することとしている。[フェーズ I 終了時のチェックアンドレビューのポイント]

研究開発を継続することによって、上記候補概念が後述の開発目標に適合するものに成長し得るか否かの評価を受けた後、次の段階へ進むこととなる。

#### フェーズ II [2005 年度頃まで]

##### [実施概要]

工学試験等を踏まえ、FBR サイクル全体としての最適化及び評価を行い、実用化候補概念 (複数) を絞り込んで必須の研究開発テーマを特定する。

このフェーズで必要となる研究開発項目はフェーズ I の成果により変わるが、研究開発項目の候補例を以下に示す。

**炉心燃料**：例えば、燃料材料の照射試験 [高燃焼度燃料、低除染燃料、超ウラン元素 (TRU) 燃料、金属燃料、窒化物燃料等] 等が必要と考えられる。

**FBR プラントシステム**：例えば、ナトリウム炉であれば抽出された概念に応じた経済性向上のための要素技術試験 (合体機器モデル試験等) が、重金属炉、ガス炉であれば小型試験ループによる冷却系特性試験 (伝熱流動、材料腐食等) が必要になると考えられる。

**燃料サイクルシステム**：システム構築の上で必須の技術、経済性向上等に著しい効果のある

技術、及び、複数の候補概念に共通する技術を洗い出し、最も適切な規模による試験を実施する。例えば、乾式再処理では回収率向上策、処理速度向上策、廃棄物対策、保障措置等に係わる技術等、湿式再処理では遠心抽出器等の新型機器の試験、燃料製造では振動充填燃料の照射挙動評価等が必要になると考えられる。

[フェーズⅡ終了時のチェックアンドレビューのポイント]

絞り込んだ実用化候補概念（複数）について、工学的な成立見通しの評価を受けた後、次の段階へ進むこととなる。

フェーズⅡの後の研究開発についても、5年程度毎にチェックアンドレビューを受けながらローリングプランで進め、安全性確保を大前提として競争力ある FBR サイクル技術を 2015 年頃には提示することを目標としたい。

また、FBR の実用化を推進する上で、要素技術を統合し発電プラントとしての技術的知見と経験を蓄積することは重要である。このため、「もんじゅ」の運転で得られる発電システムとしての知見・経験は、どのような炉型の FBR に対しても重要なものである。更に、実用化に向けたプラント新技術の検証と確認等で実用化研究の一翼を担っている。したがって、早期に運転が再開されることが望まれる。

### 3. フェーズⅠの検討状況

現在は上記の実用化戦略調査研究の内、フェーズⅠの途中段階に位置している。ここでは、その検討状況について述べる。

#### 3.1 検討フロー

FBR サイクルの開発目標を図 3-1 に示す。幅広い選択肢の中からこの目標を満足する実用化候補概念を抽出するフェーズⅠの検討フローを図 3-2 に示す。

2年間で成果を上げるため、炉心、FBR プラントシステム、燃料サイクルシステムを検討がある程度並行して進めることとなるが、FBR サイクル全体の整合性に十分に配慮し、互いにフィードバックを掛けながら検討を進めている。

FBR は、プルトニウムの増殖や TRU の燃焼 [資源の有効利用]、長半減期の核分裂生成物 (FP) の核変換 [FBR の付加価値としての環境負荷低減への貢献] 等を行える特長を有しており、これらの性能は炉心が決めることから、炉心が全体をリードした形で検討を進める。

炉心の特性は、冷却材と燃料形態（酸化物、窒化物、金属）の組合せに依存する。目標とする炉心性能を実現するため、有望な燃料形態と冷却材の組合せを抽出する。

FBR プラントシステムの検討では、特に、軽水炉と比肩する経済性を実現するための、経済性向上策の抽出を重視している。1999 年度の検討では、まず、有望な選択肢を見極め、2000 年度に概念検討を進めることとしている。

燃料サイクルシステムの検討では、これまで中心に据えて開発を進めてきた湿式法 (PUREX 法) を抜本的に見直すことに加え、新たに乾式再処理等の方式を対象に、その技

術的成立性を評価する。1999 年度には乾式法及び湿式法再処理、並びに、それらに関連する燃料製造法の技術評価と課題抽出を行い、2000 年度には抽出した課題の解決と経済性の見通しをつけ、有望な概念を抽出する。

**総合評価**は、FBR サイクルの開発目標を基に、評価指標と判断基準を設定して総合的に行うこととしている。現在、評価指標とそれらを総合的に評価する手法の具体化を進めている。

評価指標としては、実用化戦略調査研究の 5 つの開発目標（安全性、経済性、資源有効利用、環境負荷低減、核不拡散性）に、技術的実現性を加えた 6 項目とする予定である。この内、安全性についてはある一定の水準を必ず満足させるものとして扱う。技術的実現性については現状の技術レベル（基礎研究、工学試験、実用化）と実用化までの開発期間及び投資資金を考慮する。

評価手法としては、FBR、再処理、燃料製造の各システムに対して上記 6 つの評価指標を適用して評価すると共に、FBR サイクル全体の整合性について評価する総合的なものとする予定である。

## 3.2 FBR サイクルの要素毎の検討状況

### 3.2.1 FBR の炉心及びプラントシステム概念

はじめに既往文献の調査、社内提案、メーカ提案、アイデア公募、国内研究協力、国際協力等により、国内外の FBR のこれまでの開発経験及び新たな概念等を広範に調査・分析し、冷却材及び燃料形態の検討対象範囲を設定した。検討対象とすべき概念として、冷却材はナトリウム、重金属（鉛、鉛ビスマス合金）、ガス（炭酸ガス、ヘリウム）、水（沸騰水、加圧水、超臨界圧水）を、燃料形態は被覆管燃料（酸化物、窒化物、金属）、ヘリウムガス冷却炉として被覆粒子燃料（酸化物、窒化物）を選定した。

なお、液体燃料を用いた高速増殖溶融塩炉概念については、既存の研究が基礎的な段階であることから、他の冷却材とは同列に扱えず、調査を行って、その技術的内容を把握しておくこととした。

#### (1) 安全性確保

FBR の実用化にあたっては、軽水炉と同等ないしはそれ以上の安全性を確保するものとし、IAEA（国際原子力機関）の基本安全原則はもとより、現行の軽水炉に適用される基準及び指針類、「もんじゅ」の安全審査で適用された基準及び指針類、実証炉の安全基準案等の考え方を参考に、燃料形態及び冷却材の特徴を考慮した安全設計とすることとしている。

具体的な安全要求としては、原子炉停止系は十分信頼性の高い設計とするが、これらの安全系に期待しなくとも、炉心損傷に至らずに自然に事象が終息できるよう、受動的な原理で原子炉を停止できる能力を持たせる。併せて、炉心冷却に関しても崩壊熱を自然循環により除去できる設計とする。また、仮想的な炉心損傷状態を仮定しても、大きな機械的エネルギー放出を伴わず自然に事象終息すること、例えばこのエネルギー放出の原因が排除できる炉心設計（再臨界を排除する炉心概念）とする。

現在、酸化物燃料炉心に対し、この要求を満たす概念を構築し、その有効性と炉心性能への影響について検討を行っている。

また、機器の故障及びヒューマンエラーの影響が極力少なくなるようシステムの簡素化等を通して信頼性の確保を図ると共に、ナトリウムを使用する場合には、その化学反応の影響を緩和する設備対策にも配慮している。

## (2) 炉心

炉心の検討状況（ナトリウム冷却炉の例）について、燃料形態毎に表 3-1 に示す。燃料形態には、酸化物、窒化物、金属燃料を被覆管で包んだピン型燃料と、酸化物及び窒化物燃料を仁丹状にセラミック材などで被覆した粒子燃料がある。この粒子燃料は、ヘリウムガスを冷却材に用いた場合にしか採用されないため、ガス炉の設計検討の中で個別に検討していくこととしている。

炉心の検討では、それぞれの燃料形態について、安全性の要件に適合する範囲内で、炉心性能を明確にするよう検討を進めている。

酸化物燃料については、経済性向上として、運転サイクルの長期化、燃焼度の向上、低除染燃料（FP 等が不純物として多く混入された燃料）の適用性等について検討している。資源の有効利用では、最大の増殖比と最短の倍增時間の評価、マイナーアクチニド核種（MA 核種）を含めた TRU の燃焼能力評価を行っている。

環境負荷低減については、長半減期の FP 核種を炉心外周部等に配置して、炉内の中性子を利用して核変換し、短寿命核種に変換する方策の具体化や TRU 燃焼による MA 核種の低減効果の評価等を行っている。（図 3-3）

窒化物、金属燃料については、これまでに原研（日本原子力研究所）及び電中研（電力中央研究所）で進められてきた研究成果も加え、両機関と協力して、酸化物燃料と同様な検討を実施すると共に、それぞれの燃料に固有の特徴と課題を考慮した検討を実施している。

今後は、それぞれの燃料形態毎に炉心性能の向上と安全性との整合を図りつつ検討し、将来の FBR サイクルとして有望な燃料形態を絞り込んでいく予定である。

## (3) FBR プラントシステム

プラントシステムの検討では、安全性の向上を図りつつ建設費のコストダウン方策についての検討を中心に進めている。

ナトリウム冷却炉については、これまでの経験をもとに検討を深めることが可能であるので、軽水炉と比肩しうる経済性を達成できるシステム概念を追求している。あわせて、「もんじゅ」の 2 次系ナトリウム漏洩事故の経験をもとに、ナトリウムの安全確保対策について検討している。その他の冷却材を用いたシステム概念については、まだ検討の緒についた段階であるので、基本的な特性である FBR としての炉心性能とシステムの技術的成立性見通しを中心に検討を進めている。

### (a) ナトリウム冷却炉（図 3-4～3-7、表 3-2）

ナトリウム冷却炉については、沸点が高く、低圧システムであり、自然循環能力が大きい等のナトリウムの利点と、不透明で化学的に活性なナトリウムの欠点を十分認識した上で、安全性の確保を前提に検討を進めている。

ナトリウム冷却大型炉については、「もんじゅ」をはじめとする既存プラントの経験はもとより実証炉の設計研究成果、モジュール炉の合理化方策、欧州 EFR (European Fast Reactor) のコストダウン方策等も参考にしながら、将来の軽水炉と同等の建設費 (20 万円/kWe) を達成しうる有望な方策を検討した。これまでに、炉心の低圧損化によるループ数の削減、免震による地震荷重低減を図り機器・配管等の簡素化、新材料の適用によるシステムのコンパクト化及び高性能炉心による長期運転サイクル化等のコストダウン方策を抽出した。さらに、2 次系を削除して更なるコストダウンを可能とする革新的な蒸気発生器概念を抽出した。現在、これらの概念の成立性等を中心に検討を進めている。

中型モジュール炉では、中小型炉の特徴を生かした安全系の簡素化や、プラントの低温化 (炉心出口で 510°C 程度) による安価な材料の適用等により、経済性を追及している。また、反射体制御方式を採用した長期運転サイクル炉心と、1 次及び 2 次系のポンプと熱交換器の機器合体等により経済性向上を目指した概念についても検討している。

更に、将来的な技術選択肢として、高温・高電気伝導度のナトリウム冷却材の特長を生かした直接発電システム [MHD (Magnetohydrodynamics: 電磁流体力学) 発電及び熱電子発電システム] は、これが可能となればシステムの大幅な簡素化によるコストダウンが期待される。また、この技術は、併せて検討しているナトリウム冷却の小型炉への適用も考えられる。なお、小型炉については、他の冷却材の概念も含め後述する。

### (b) 重金属冷却炉 (図 3-8、3-9)

重金属冷却炉では、冷却材として鉛又は鉛ビスマス合金を対象として検討を進めている。

鉛は、沸点が 1750°C と高く、また、水及び空気との反応性が低いことから、ナトリウム冷却で採用されている 2 次系が不要な簡素なシステムとできると共に、ナトリウム火災対策等を不要とできる利点を有している。また、中性子スペクトルが硬いことから、増殖比等の炉心性能は、ナトリウム冷却炉よりもやや改善できる可能性がある。

一方、鉛の伝熱特性がナトリウムに比べて劣ることから稠密でコンパクトな炉心にできないこと、比重が大きいことから大きなポンプ駆動力が必要となること、高温鉛の構造材料等に対する防蝕技術が必要であり構造材料の耐久性が課題となること、融点が 327°C と高く予熱設備による所内負荷率が増加すること、ナトリウム以上に高温かつ不透明環境下での供用期間中検査技術が必要なこと等、多くの解決すべき技術課題がある。

鉛ビスマスについては、基本的には鉛と同じ特性で融点が 124°C と低い有利性はあるが、放射性ポロニウムの生成及びビスマス資源量が限られている点が課題である。

このため、これらの解決すべき技術課題の見通しを得ると共に、日本の立地条件に適合しうるシステム概念を追求するべく、スケールメリットを生かした大型炉とモジュール効果を活用した中小型モジュール炉並びに小型炉の 3 種類の概念について検討を進めている。併せ

て、原子力潜水艦での運転実績があり鉛及び鉛ビスマス冷却炉の設計研究が進められているロシアの使用実績及び設計例等についても調査し、検討に反映することとしている。

### (c)ガス冷却炉（図 3-10、3-11）

ガス冷却炉では、炭酸ガス冷却炉及びヘリウムガス冷却炉を対象として検討を進めている。

ガス冷却炉の利点は、ガスが不活性で透明な冷却材であることから、2次系を削除した簡素なシステムとなり経済性を向上できる可能性があると共に、プラントの保守・補修、供用期間中検査が容易にできることである。炭酸ガス冷却炉については、英国の商用炉である改良型ガス冷却炉（AGR）の設計・運転経験と、ナトリウム冷却 FBR の研究開発で得られた被覆管材料を活用できることから、高温化の限界があるものの開発課題は比較的少ない。一方、ヘリウム冷却炉については、熱輸送能力が炭酸ガスより劣ることから、燃料ピン形態では熱伝導性の良い窒化物燃料を用いる必要がある。また、再処理に課題はあるものの高温に耐える被覆粒子燃料を用いて、ガスタービン発電システムにより簡素で高温・高効率を達成する概念が考えられる。

ガスは上記のような利点がある一方で、液体金属よりも熱輸送能力に劣るため、炉心、機器、熱交換器の大型化による物量増加の可能性があり、並びに大型 PCRV（プレストレスト・コンクリート原子炉容器）の成立性等の課題がある。また、高圧システム（炭酸ガスで 40 気圧、ヘリウムガスで 100 気圧以上）となることから、増殖比を確保するため稠密化した炉心燃料の事故時冷却能力について検討する必要がある。更に、仮想的な炉心損傷時における大きな機械的エネルギー放出の回避と冷却等の影響緩和方策についても検討する必要がある。

そのため、事故時冷却能力及び、仮想的な炉心損傷時の影響緩和方策を検討すると共に欧州の技術等をもとに大型炉、モジュール炉、小型炉の3種類のプラントシステム概念を追求している。

### (d)水冷却炉

水冷却炉は、沸騰水型軽水炉（72 気圧、287℃）の炉心を稠密な構成にするか、あるいは、加圧水型炉（157 気圧、320℃）に重水を用いることにより増殖炉となる可能性がある。また超臨界圧水（250 気圧、530℃）を用いたシステムでは、直接サイクル（超臨界圧蒸気タービン）を利用でき、簡素なシステム構成の増殖炉となる可能性がある。しかしながら、水冷却炉もガス冷却炉と同様に高圧システムとなるので、事故時（配管破損時）の炉心冷却性、並びにプルトニウム含有率の高い燃料を利用するため、炉心損傷時の大きな機械的エネルギー放出の回避と冷却性等の影響緩和方策について検討する必要がある。そのため、これらの課題を中心に炉心性能と安全性にかかわる特性評価を開始している。超臨界圧水のシステムでは、他の水冷却炉と同様の検討に加えて、炉心燃料及び構造材料の腐食等について検討している。

### (e)溶融塩炉

液体燃料を用いた FBR 概念については、既存の研究が基礎的な段階であることから、ウ

ラン・プルトニウムサイクルに適合する塩化物燃料を用いた熔融塩炉を中心に検討している。

#### (f) 小型炉

小型炉については、多目的分散電源として今後注目していく必要があると考えられる。国内向けのニーズとしては、送電ロス、送電コスト低減の観点から島嶼部への立地及び電力需要都市への近接立地等が挙げられる。さらに、投資リスクの縮小の観点も考えられる。また、国外向けのニーズ（輸出）としては、投資リスクの縮小の観点のほか、海水淡水化及び寒冷地の熱供給等が考えられる。

これらを考慮すると、**図 3-12** に示すような要求条件が抽出され、現在燃料交換頻度の少ない長期運転サイクル炉心、受動的安全性、核不拡散性に優れるシステム概念を中心に検討を進めている。

#### (4) 現在の検討状況と今後の課題

表 3-3 に検討状況と今後の課題についてまとめた。

現在は、各種冷却材と燃料形態とを組み合わせ、幅広く検討を行っており、1999 年度末には各冷却材毎に有望な炉心概念及び FBR プラントシステム概念を抽出する。

2000 年度は、サイクル技術との整合性を取りつつ抽出された候補概念の設計検討、開発目標の達成度評価を行い、実用化候補概念の抽出と開発計画の策定を実施する予定である。

#### 3.2.2 燃料サイクルシステム概念

FBR の燃料は軽水炉に比べ、不純物の許容量を高くとれるという特長を有している。このため再処理の低除染化が可能となる。その結果、プロセスの簡素化及びこれに基づく廃棄物発生量の削減、プラントのコンパクト化等の経済性向上や環境負荷低減に寄与し得る改良方策を考案できる。また、低除染化は、核不拡散性の観点からも好ましい方向となる。

安全性確保については、多量の FP を含んだプルトニウム等の TRU を非密封の形で取扱うので、臨界安全、閉じ込め機能に十分な対策を施すと共に、取扱物質の特性（化学的活性度、毒性等）やプロセス条件（運転温度等）を踏まえた安全対策を施すこととする。

これらの特徴を踏まえて、燃料サイクルシステムについて、既往文献、社内提案、メーカー提案、アイデア公募、国内外協力等により幅広く技術を調査し、開発目標への適合性、技術的成立性の観点から検討候補対象の選択を行った。その結果を燃料形態とサイクル技術のマトリックスとして整理すると共に、実用化戦略調査研究における検討のポイントを含めてまとめた（**図 3-13**）。

燃料形態については、酸化物、窒化物、金属燃料を選定した。

再処理プロセスについては、処理媒体として水溶液を用いる湿式法と、水溶液を用いない乾式法を選定した。さらに、湿式法としては、軽水炉燃料の再処理法として実績のある PUREX 法（抽出溶媒としてリン酸三ブチル：TBP を使用）に対し、開発目標に合致するようサイクル機構が考案した「先進湿式法」（PUREX 法を大幅に見直した「簡素化 PUREX 法」と「晶析法」とを組合せさらに TRU 回収機能も付加）のほか、その一部を代替／補完するプロセスとして「イオン交換法」、「アミン抽出法」、「超臨界流体抽出法」、「沈殿法」等を、ま

た、乾式法としては、溶融塩中での電解を利用した「金属電解法」(米国アルゴンヌ研究所 (ANL) で開発されたものを改良)及び「酸化物電解法」(ロシア原子炉科学研究所 (RIAR) で開発されたものを改良)、並びにフッ化物気体の生成し易さの違いにより燃料と FP を分離する「フッ化物揮発法」を選定した。

燃料製造プロセスについては、「ペレット法」、粒径の異なる燃料粒子を直接被覆管に装荷し振動により充填する「振動充填法」、低融点の金属燃料用の「鑄造法」、ガス冷却炉用燃料の「被覆粒子法」を、それぞれ燃料形態との組合せで選定した。

なお、3種類の燃料形態の内、酸化物燃料と窒化物燃料の再処理及び燃料製造については基本的に類似の技術が適用可能であることが調査により判明したため、まず経験の多い酸化物燃料サイクルに対してプロセスフロー、物質収支、設備機器仕様の概念設計検討を進め、それらに基づく経済性等の評価を行うと共に、その検討結果をベースに窒化物燃料サイクルについて概略評価を行うこととした。また、これと並行して金属燃料サイクルに関する検討を行うこととした。

### (1) 酸化物及び窒化物燃料サイクル

#### (a)再処理システムの検討状況

##### ①湿式再処理

酸化物燃料の湿式再処理法として「先進湿式法」を考案し、その具体化を図っている。これは従来の PUREX 法を大幅に見直したもので、次の主要工程からなるものである (図 3-14)。

抽出溶媒に TBP を用いるが、プルトニウムはウラン及びネプツニウムと分離せず、低除染係数で共回収する「簡素化 PUREX 法」。

TBP 以外の溶媒を用いた高レベル廃液からの「TRU 回収法」

ウラン/プルトニウムの溶解度の差を利用して溶解液中に多量に存在するウランを溶媒抽出の前段で温度を下げて固体で析出させる「晶析法」

これによりプルトニウムは単独では回収はされず、また晶析法の併用により溶媒抽出プロセスでの処理量が削減されることから廃液発生量の低減が可能となる。上記の方法について、プロセスフロー及び物質収支の評価を行うと共に、遠心抽出器の採用等によりシステムの一層の小型化をねらった設備機器仕様の検討を進めている。

このほか、ウラン/TRU 元素回収に高性能イオン交換樹脂を用いた「イオン交換法」、新たなウラン/プルトニウム回収方法としてアミン抽出剤を用いた「アミン抽出法」及び超臨界炭酸ガスに TBP-硝酸錯体を添加した処理媒体を用いた「超臨界流体抽出法」、中和処理等により FP を順次沈殿物として除去していく「沈殿法」等についてのシステム検討等を行っている。

また、湿式法すなわち連続処理という従来の発想を転換し、バッチ処理システムを追求することによりプロセスの簡素化をねらった「パイプレスプラント」の概念についても検討を実施している。

窒化物燃料に対しては、主プロセスに上述の酸化物燃料を対象とした技術が適用できる。固有の課題としては、燃料製造に用いる N-15 の濃縮技術と再処理におけるその回収技術、ボンド材（ナトリウム等）の除去等の前処理技術あるいは製品の窒化物への転換技術等があり、それらに対する検討を進めている。

## ②乾式再処理

酸化物燃料の乾式再処理として、「酸化物電解法」、「金属電解法」及び「フッ化物揮発法」の検討を行い、オリジナルのプロセスに対し、以下に示すような改良を加えたプロセスフローを考案し、より詳細な技術成立性の検討を進めている。

- 酸化物電解法では、オリジナルの RIAR 法に対し、前処理に機械式脱被覆法を採用、同時電解による処理速度の向上・運転温度の低温化・塩素使用量の低減、炉特性に悪影響を及ぼす白金族 FP の分離工程の追加、二酸化プルトニウムの単独沈殿をウラン・プルトニウム混合酸化物 (MOX) 電解共析に変更、絞り電解による MA 回収、等の改良プロセスを構築した。
- 金属電解法では、オリジナルの ANL 法（ウラン、プルトニウムを MA と共に回収）に対し、前処理に熱脱被覆法を採用、酸化物の塩素化溶解法の採用による塩廃棄物の削減、白金族 FP 分離プロセスの追加等の改良プロセスを構築した。
- フッ化物揮発法では、既往のプロセスに対し、低除染 MOX としてのプルトニウムの回収、MA の回収等の改良プロセスを構築した。

以上のプロセスの改良点を、**図 3-15～図 3-17** にフローと共に示す。

上記の各方式について、それぞれ物質収支の評価を行うと共に機器・配置設計等の概略検討を進めている。

なお、窒化物燃料の乾式再処理に関しては、湿式再処理の項で述べたものと同様の固有の課題があり、原研の協力を得てシステムの検討に着手したところである。

## (b)燃料製造システムの検討状況

### ①ペレット法

PUREX 法から得られる高除染の燃料原料粉をベースとした酸化物ペレット燃料製造法について、経済性向上に向けた工程簡素化の検討を進めている。具体的には、硝酸溶液混合時に燃料仕様に合わせたプルトニウム富化度調整を行い、マイクロ波加熱脱硝時にペレット成型・焼結のための粉末特性調整を行うことで、混合から造粒までの酸化物燃料粉末を取扱うプロセスを撤廃し合理化を図った「簡素化ペレット法」の開発、及びそれに基づくシステム設計を実施している。（**図 3-18**）

さらに、先進湿式再処理から得られる低除染の放射能強度が高い燃料を使用した酸化物ペレット燃料製造技術を確立するために、上記の簡素化ペレット法をベースに、ホットセルによる遠隔製造プラントの概念検討を進めている。（**図 3-18**） 窒化物ペレット燃料製造は、酸化物燃料粉末を窒化処理しペレットに成型加工するプロセスをとるので、基本的には酸化物燃料の製造プロセスに炭素熱還元/窒化プロセスを付加したものとなる。このため、

この付加工程を中心に検討を行っている。

## ②振動充填法

振動充填法で用いる燃料粒子は再処理の方法に応じてその性状が異なるため、粒子仕様に合致した振動充填条件の最適化を図る必要がある。このような特徴を踏まえて被覆管に均質に燃料を充填できるシステムの検討を行っている。(図 3-19)

先進湿式再処理法で得られる酸化物燃料粒子を振動充填する方法は、スイスのポールシェラー研究所 (PSI) との共同研究等により、添加剤を加えたウラン及びプルトニウムの硝酸溶液をノズルから液滴状に落下させアンモニアと反応させて球状のゲル球を形成させ、それを洗浄乾燥の後、焙焼、還元焼結して燃料粒子を得る湿式ゲル化法の基本プロセス及び振動充填条件を開発してきた。これをベースに、サイクル施設間の燃料輸送の削減やユーティリティの共有化等による経済性向上を目指した先進湿式再処理施設と燃料製造施設を一体化したプラントシステムについて、機器・配置設計等の検討を実施している。

乾式法で得られる酸化物燃料粒子を振動充填する方法については、各乾式再処理方式と整合をとり、以下のような点に留意しつつ、プロセスフロー、物質収支、設備機器仕様の検討を行っている。また、乾式再処理と燃料製造の一体化プラントシステムの概念検討を行っている。

酸化物電解法では、陰極に析出させた酸化物燃料の結晶を粉砕することにより高密度の燃料顆粒が得られるため、それを直接振動充填燃料として使用することが可能であるが、顆粒形状が不定形であるため、その充填特性を把握する必要がある。

金属電解法で得られる酸化物は、充填性能の向上のために粒子形状を揃える工夫が必要であり、薬品製造の分野で実績のある転動造粒法などが候補技術となる。

フッ化物揮発法では、流動床により直接燃料粒子を得られる特長を活かした振動充填プロセスの合理化を図っていく。

窒化物の振動充填燃料用粒子製造の基本プロセスは、酸化物燃料プロセスに炭素熱還元/窒化プロセスを付加したものであるため、この付加工程を中心に検討を行っている。

## (2) 金属燃料サイクル

金属燃料に対する乾式再処理及び燃料製造については電中研と協力して ANL が開発したプロセスに、ウラン/TRU 回収率向上のための工程付加等の改良を加えつつ施設概念を検討し、経済性評価を行っている。

溶融した合金燃料を圧力差でパイプ状の石英ガラス製の鋳型に射出する「射出成型法」については多量の鋳型廃棄物が発生するため、その改良方策の一つとして、鋳型の繰り返し使用が可能となる「遠心鋳造法」による金属燃料製造システムの検討に着手した (図 3-20)。

## (3) 被覆粒子燃料

ガス炉用の燃料として考えられている被覆粒子燃料については現状の技術の調査を行っているところである。

## (4) 今後の進め方

以上述べてきた燃料サイクルシステムの検討状況と今後の課題を合わせて表 3-4 に示す。

1999 年度末にかけては、各燃料サイクル施設について酸化物燃料サイクルを中心に、概略のプロセス成立性、プラント概念、建設費、等の検討を実施する。2000 年度の上半期に、処理規模の影響、計量管理手法、廃棄物の発生量等について、他の燃料形態も含めたより詳細な検討を行う。下半期には炉側の検討において有望と判断された燃料形態と整合をとりつつ、各燃料サイクルシステムを比較評価して複数の実用化候補概念の抽出と開発計画の策定を進めていく予定である。この際、炉とサイクル施設を近接させたコロケーション型の立地についても検討を行う。

#### 4. 実用化戦略調査研究推進に当たって留意すべき点

実用化戦略調査研究については、関係機関等にかかれた体制で以下のように進めており、その進捗状況等はインターネットに適宜掲載する予定である。

- ① 大学、研究機関、メーカー、シンクタンクその他、外部の有識者を中心とした社内技術検討会を設けることにより、多面的なコメントを受けながら調査研究を進めている。
- ② 関係機関のコンセンサスを得ながら調査研究を進めるため、電気事業連合会との意見交換や、関係機関の連絡協議会（サイクル機構、電気事業者、電中研、原研）での協議を適宜行っている。
- ③ 成果については、国内外の学会等の場に報告する等して、透明性を確保しながら進めることとしている。
- ④ また、計画や成果については、第三者の外部評価（サイクル機構の研究開発課題評価委員会）を受けることとしている。

## 安全性

### 炉

- 炉心損傷に至る恐れのある事象の発生を防止するとともに、その発生を仮定しても問題が生じず自然に終息

### 燃料サイクル

- 臨界安全、閉じ込め機能に十分な対策を施す
- 取扱物質の特性(化学的活性度、毒性等)やプロセス条件(運転温度等)を踏まえた安全対策

## 経済性

- 将来の軽水炉に比肩する経済性の達成
- コスト目標
  - ・ 炉の建設費: 20万円/kWe
  - ・ 再処理費: 27万円/kgHM
  - ・ 燃料製造費: 16万円/kgHM

## 資源の有効利用

- 高増殖から、低増殖、TRU燃焼まで柔軟に対応
- 高増殖としては、増殖比1.2程度を目標

## 環境負荷低減

- TRU燃焼及び長半減期FPの核変換により、放射性廃棄物量等を低減
- 施設の運転・保守及び廃止措置に伴い発生する放射性廃棄物量の低減

## 核不拡散性

- FBRサイクルの中で純粋なプルトニウムが単独で存在しないこと
- 核物質防護性及び保障措置性の対応が良好な設計

図3-1 FBRサイクルの開発目標

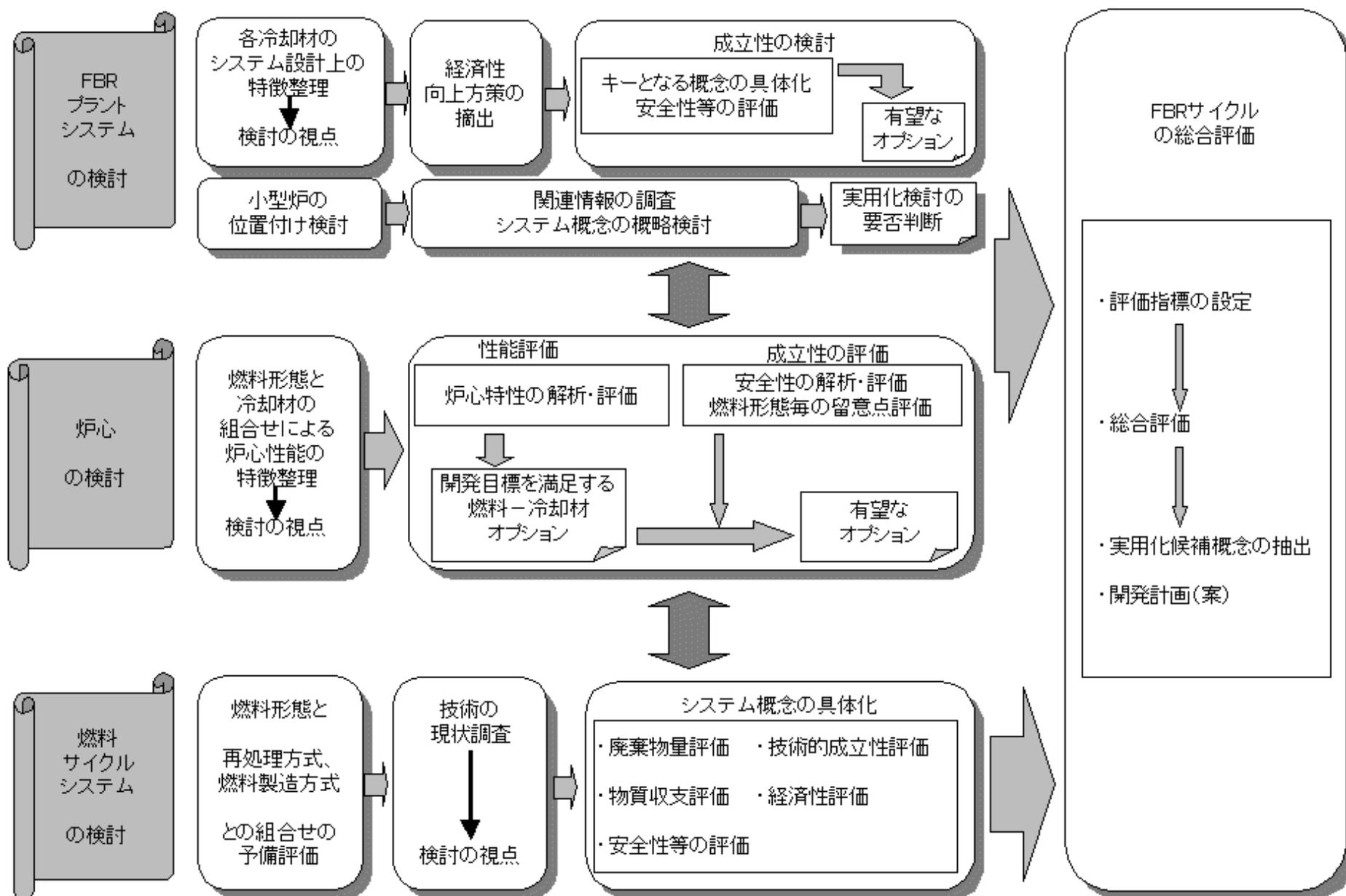
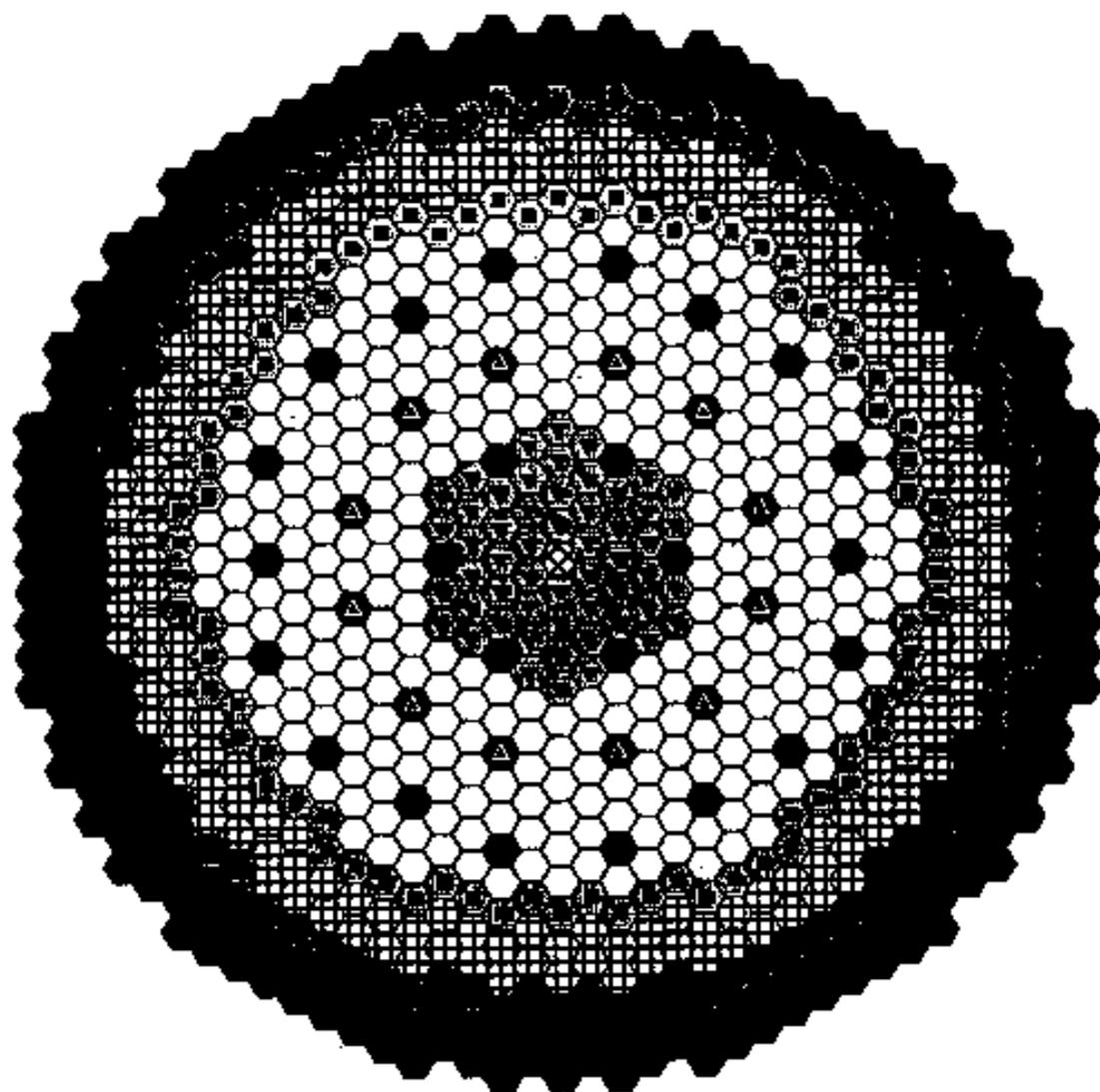


図3-2 フェーズ I の検討フロー

表3-1 炉心の検討状況 (ナトリウム冷却炉の例)

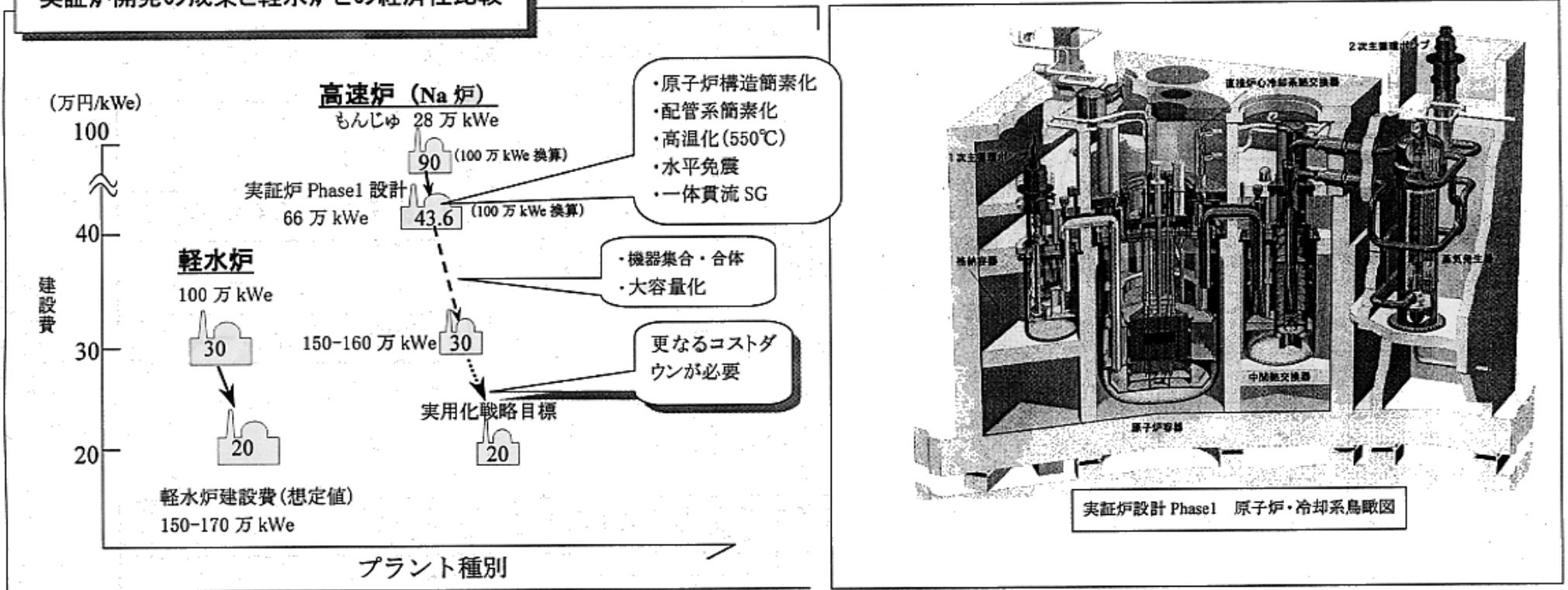
	検討項目	これまでの成果	今後の検討内容
<p>酸化 物 燃 料</p>	<p>○大型炉心の経済性 (長期運転期間、高燃焼度、低除染燃料の適用性)</p> <p>○資源の有効利用 (Pu需給への柔軟な対応能力、TRU燃焼能力)</p> <p>○環境負荷低減 (長半減期FP核種の変換)</p> <p>○安全性 (仮想的な炉心損傷時に、機械的エネルギー放出を伴わずに事象終息する特性:再臨界を排除する炉心概念)</p>	<p>・低除染燃料(2wt% HMのFP混入)を用い、連続運転期間18ヶ月、燃焼度15万MWd/tの炉心概念が成立する見通し</p> <p>・高燃焼度化を達成するための被覆管材料として分散強化型フェライト鋼(ODS)を選定</p> <p>・増殖比1.2、倍増時間30年が達成可能</p> <p>・TRU燃焼能力(燃焼率/生成率:~5%/1%)が達成可能</p> <p>・(長半減期FP核種の変換方策、炉心概念を検討中)</p> <p>・再臨界を排除した炉心概念の具体化</p>	<p>・炉心性能の向上(増殖能力、等)</p> <p>・効率的なFP核変換方策</p> <p>・許認可に必要なODS被覆管の照射データ、高燃焼度燃料の安全性試験データの取得計画、等</p>
<p>窒 化 物 燃 料</p>	<p>○大型炉心の経済性 (N-15と天然窒素(N-14)を用いた場合の炉心特性)(注)</p> <p>○資源の有効利用</p> <p>○環境負荷低減</p> <p>○安全性 (炉心損傷時の窒素解離の問題)(注)</p>	<p>・(低除染燃料(2wt% HMのFP混入)を用い、連続運転期間18ヶ月、燃焼度15万MWd/tの炉心概念を検討中)</p> <p>・(N-15とN-14を用いた場合の炉心特性を評価中)</p> <p>・(高燃焼度化を達成する被覆管材料を検討中)</p> <p>・増殖比1.3、倍増時間20年が達成可能</p> <p>・TRU燃焼能力(燃焼率/生成率:~5%/1%)が達成可能</p> <p>・(長半減期FP核種の変換方策、炉心概念を検討中)</p> <p>・(再臨界を排除した炉心概念の具体化を検討中)</p> <p>・(窒素解離を考慮した炉心損傷事象推移について解析評価中)</p>	<p>・炉心概念の検討継続</p> <p>・N-15濃縮の経済性評価</p> <p>・炉心性能の向上(増殖能力、等)</p> <p>・効率的なFP核変換方策</p> <p>・再臨界排除の炉心概念の成立性</p> <p>・炉心損傷時の窒素解離の問題</p> <p>・許認可に必要な燃料要素及び被覆管材料の照射データ、燃料挙動解析手法の開発、新燃料~高燃焼度燃料の安全性試験データの取得計画、等</p>
<p>金 属 燃 料</p>	<p>○大型炉心の経済性 (炉心出口温度の高温化方策)(注)</p> <p>○資源の有効利用</p> <p>○環境負荷低減</p> <p>○安全性</p> <p>(注)それぞれの燃料の個別課題として酸化物と同様な課題に加えて検討</p>	<p>・(低除染燃料(2wt% HMのFP混入)を用い、連続運転期間18ヶ月、燃焼度15万MWd/tの炉心概念を検討中)</p> <p>・(炉心出口温度の高温化方策を検討中)</p> <p>・(高燃焼度化を達成する被覆管材料を検討中)</p> <p>・増殖比1.3、倍増時間20年が達成可能</p> <p>・TRU燃焼能力(燃焼率/生成率:~5%/1%)が達成可能</p> <p>・(長半減期FP核種の変換方策、炉心概念を検討中)</p> <p>・(再臨界を排除した炉心概念の具体化を検討中)</p> <p>・(炉心損傷事象推移について解析評価中)</p>	<p>・炉心概念の検討継続</p> <p>・炉心性能の向上(増殖能力、等)</p> <p>・効率的なFP核変換方策</p> <p>・再臨界排除の炉心概念の成立性</p> <p>・許認可に必要な燃料要素及び被覆管材料の照射データ、燃料挙動解析手法の開発、新燃料~高燃焼度燃料の安全性試験データの取得計画、等</p>



- 炉心燃料集合体 (U/Pu/TRU)
- ⊗ } 長半減期核分裂生成物を添加した集合体
  - ⊕ } 長半減期核分裂生成物を添加した集合体
- ⊕ 径ブランケット集合体
- SUS遮蔽体
- B<sub>4</sub>C遮蔽体
- 粗調整制御棒
- △ 起動・微調整制御棒
- ⊗ SUS集合体

図3-3 環境負荷低減を目指した炉心概念例

## 実証炉開発の成果と軽水炉との経済性比較



17

## 実用化プラント構築の着眼点

- 実証炉開発を含めたこれまでの実用化の為の革新技术の開発成果の活用
- 原子炉構造、1次冷却系、2次冷却系、燃料取扱系及び電気計装系の原子炉設備全般にわたる更なるコストダウンが必要

図3-4 軽水炉に比肩する経済性を目指す Na 炉の建設費低減

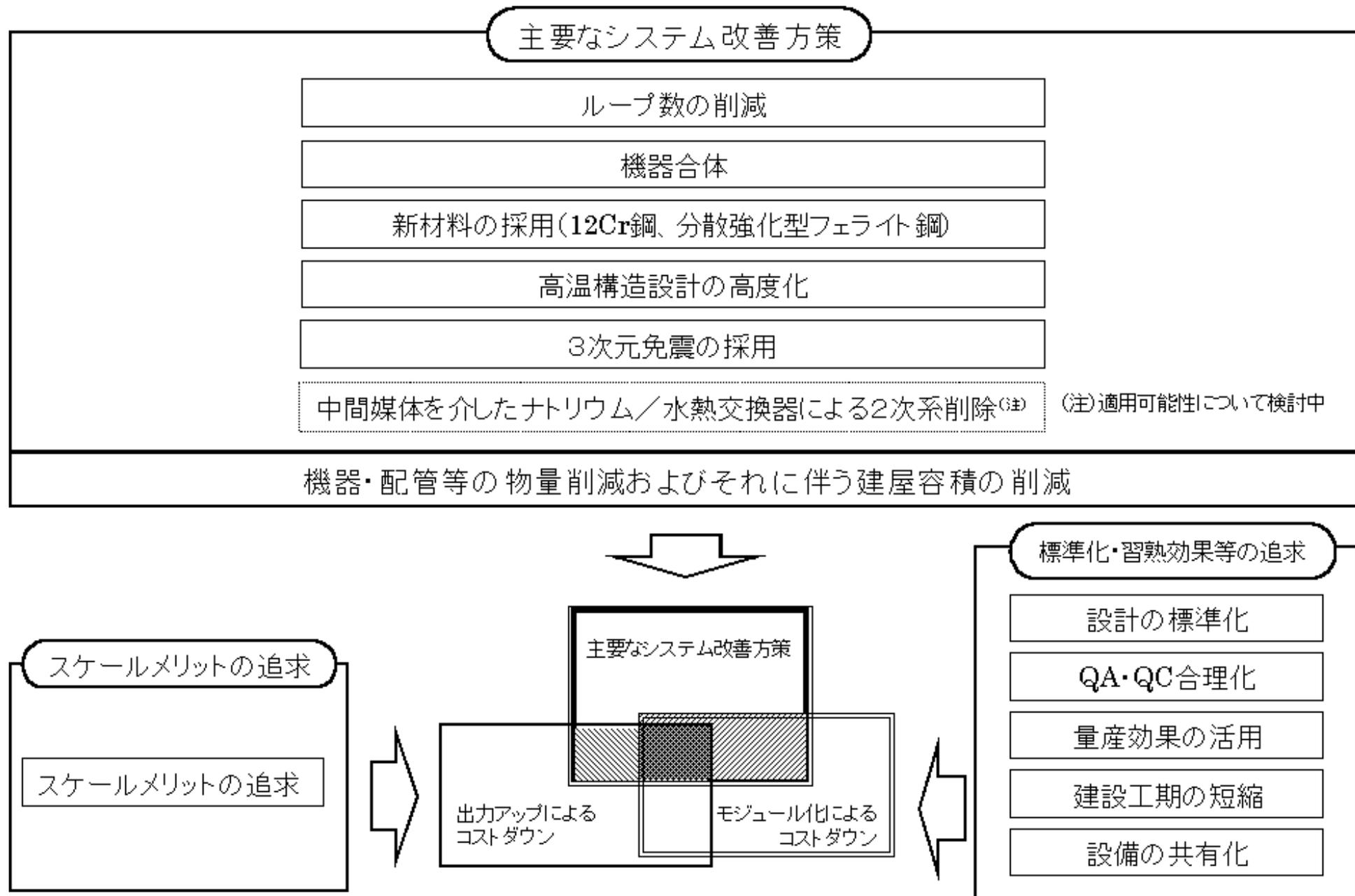


図3-5 建設費20万円/kWeにむけてのコストダウン方策

表3-2 ナトリウム冷却炉における炉心並びにシステムの改善方策

	設計要求(課題)	解決方針	課題解決方策
炉心	炉心領域全体の縮小	・炉心燃料部のみならず、その周囲を含めたコンパクト化	・高性能遮熱体(鉛/Zr-H)による板厚削減 ・径方向ブランケット削減(内部転換比の向上) による炉心のコンパクト化
	炉心の圧力の低減	・燃料バンドルの流動抵抗の削減	・燃料要素の太径化 ・高化度分布をつけ、軸方向ピッチングを低減 による低圧炉心の採用
	再臨界排除による炉心性能低下の緩和(集合体内部に内部ダクトを配置)	・炉心燃料体積比の確保	・内部ダクト長の最適化、内部ダクト及び集合体壁の薄肉化 ・炉心性能に影響が少ない他の再臨界排除方策の創出とその採用 ・重原子密度の高い新型燃料(金属、窒化物)の採用
	燃焼度の向上	・炉心材料のスエリング特性改善	・耐スエリング特性の良いODS鋼の開発(取出平均15万MWD/h達成可能) ・高速中性子フルエンス平坦化炉心の検討
	運転サイクル期間の長期化	・燃料体積比の増加による燃焼反応度の抑制	・ラッパ管及び内部ダクトの薄肉化 ・燃料要素の太径化(18ヶ月以上のサイクル期間達成可能) ・重原子密度の高い新型燃料の採用
	炉心出口温度の高温化	・炉心材料の高温特性改善	・高温強度に優れた材料(ODS鋼)の開発(炉心出口温度550℃達成可能) ・高化度分布をつけ、炉心内ホットスポットファクターを低減
	制御棒の長寿命化	・長寿命制御棒の開発	・Naボンド型制御棒の開発 ・軸受均質(B-10濃縮度の軸方向多領域化)制御棒の採用
	柔軟な増殖性能	・燃料体積比及びブランケット厚で調整	・ラッパ管及び内部ダクトの薄肉化 ・燃料要素の太径化 ・径方向及び軸方向ブランケットの調整
	TRUの受け入れ能力	・炉心反応度特性の改善	・炉心型式、形状の最適化による改善 ・重原子密度の高い新型燃料の採用によるTRU混入制限(融点等)の改善
	長寿命FP各層の核交換	・FP核交換形態の最適化	・効率的な減速材配置、ターゲット材料の最適化 ・重原子密度の高い新型燃料の採用
核減衰抵抗性の確保	・核物質への接近困難性	・低DF燃料、MA混入燃料の採用	
ブランケットシステム	配管引通しの簡素化・短尺化	・熱膨張の少ない新材料の配管への適用 ・機器合体による機器を結ぶ配管の削減	・12Cr鋼の採用 ・中間熱交換器/ポンプ ・蒸気発生器/ポンプ による機器合体による系統コンパクト化
	ループ数の削減	・冷却系機器及び配管の単基容量の増大、炉心圧力の低減による炉心冷却性能の向上	・ループ数の削減(4ループから2or3ループ化) ・低圧炉心の採用
	重物物量の削減	・機器・配管のコンパクト化と合理的な配置 ・地震入力の高減による重量構造の簡素化	・冷却系統のコンパクト化と配置の最適化による機器容量の削減 ・付帯設備(ヒータ、計測系など)の削減 ・3次元免震の採用
	構造設計裕度の拡大	・熱膨張応力発生要因の緩和 ・設計裕度の適正化	・高温構造設計(基準)の高化 ・熱膨張応力の少ない12Cr鋼の採用
	原子炉容器の縮小	・炉容器径の縮小	・炉心コンパクト化 ・単面転プラグの採用 ・炉心支持構造の改善 ・縦向きHXによる炉内配置効率の向上(タンク型のみ) による炉容器径増加の抑制
	燃料取扱設備の簡素化	・燃料取扱方法の改善と設備の簡素化	・切り欠き式炉心上部機構 ・多関節型燃料取扱機構 による燃料取扱設備のコンパクト化
	伝熱機器、容器の縮小	・伝熱性能に優れた新材料による機器コンパクト化 ・低膨張材料の採用による機器合体の拡大	・中間熱交換器、蒸気発生器への12Cr鋼の採用による機器コンパクト化 ・中間熱交換器、蒸気発生器とポンプとの機器合体による系統コンパクト化
	地震荷重の低減	・免震の採用による機器・配管の薄肉化	・3次元免震の採用による機器配管及び支持構造の簡素化 ・サイト条件にとらわれない設計の標準化によるエンジニアリング費の合理化
	安全性の向上	・受動的な炉停止、崩壊熱除去機能の付与	・異常高温時の制御棒自然挿入機構の採用 ・自然循環による炉心崩壊熱除去機能の向上 ・非常用電源設備の簡素化
	ナトリウム-水反応対策の向上	・ナトリウム-水反応の発生可能性の排除	・中間媒体を介したナトリウム/水熱交換器による2次系剛性の検討
	ナトリウム機器の検査・補修能力の拡大	・ISI技術の高化	・超音波探傷技術、遠隔操作技術の開発
	その他	・設計標準化の拡大	・設計の標準化による製作性の向上/リピート効果の追求等によるエンジニアリング費の削減 ・QA/QCの合理化による管理費の削減

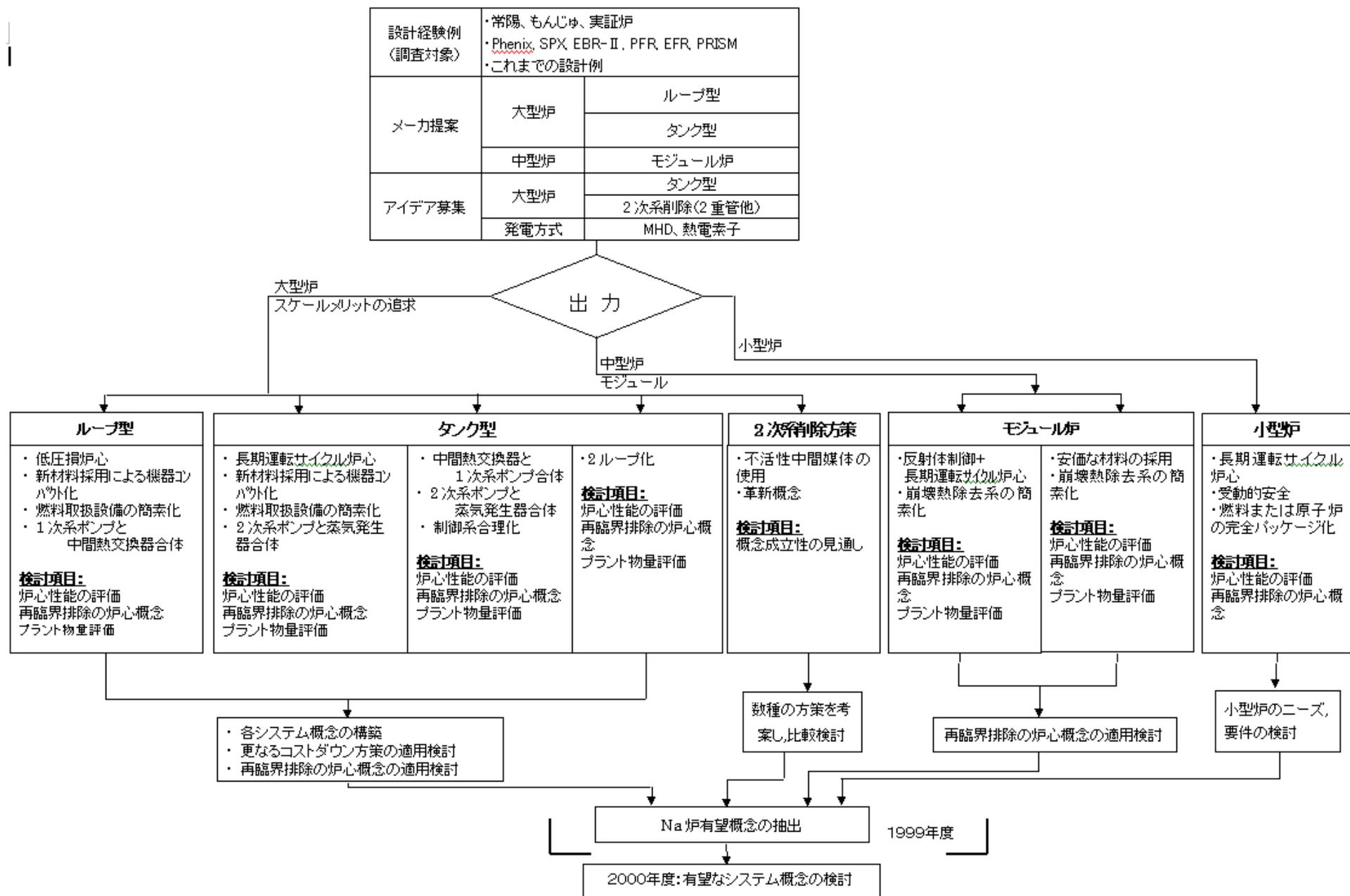


図3-6 Na冷却炉の候補と検討の進め方



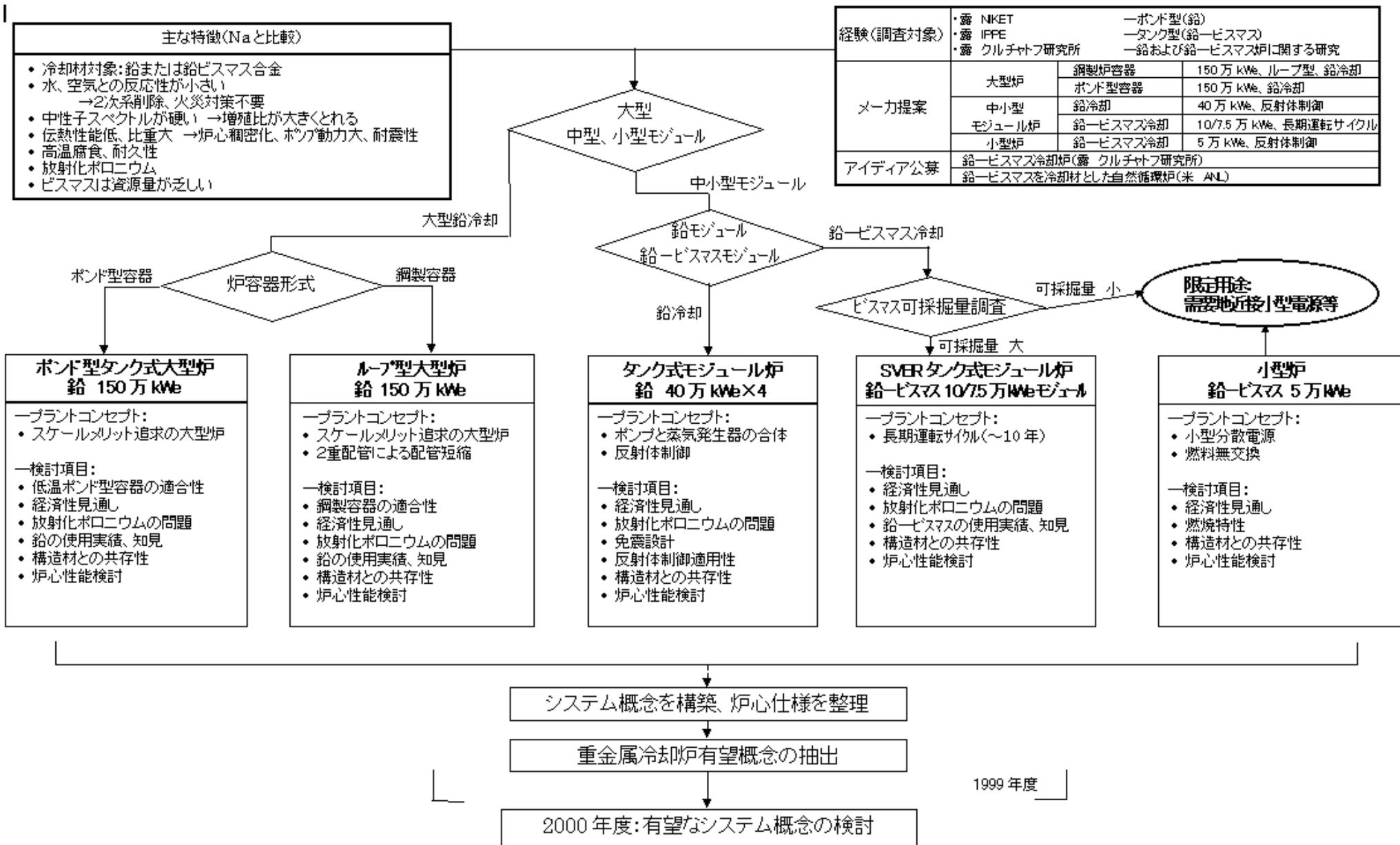
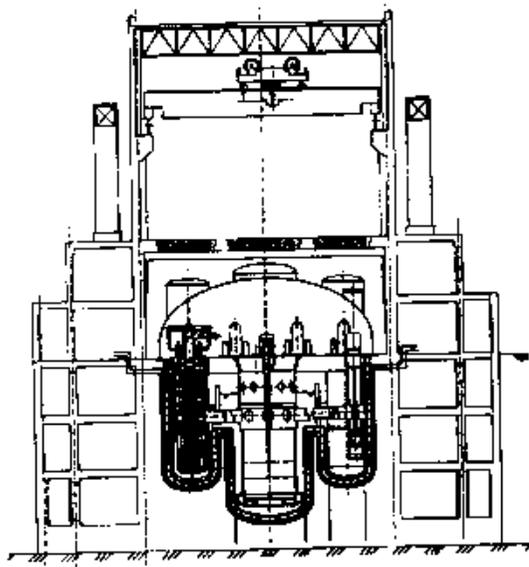
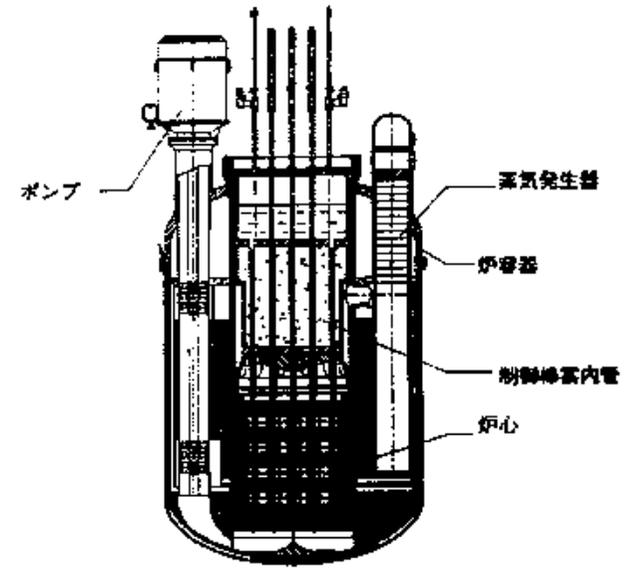
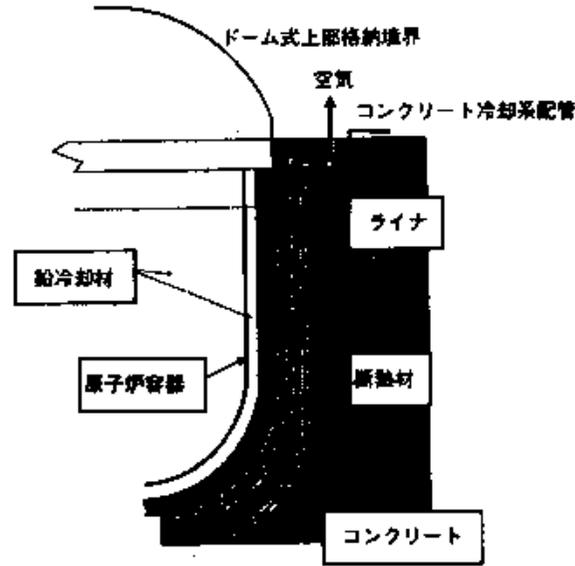


図3-8 重金属冷却炉の候補と検討の進め方

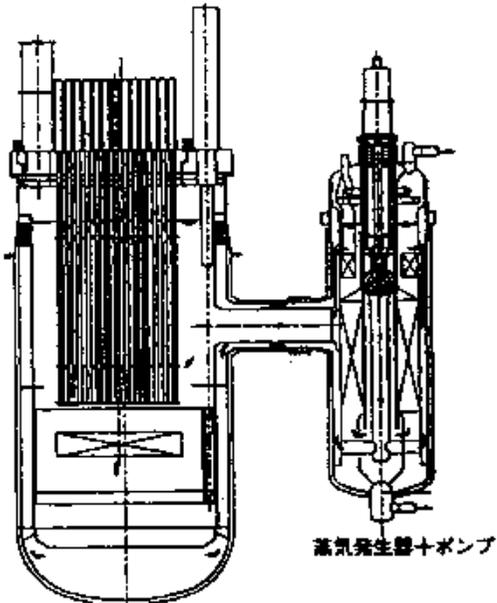


ボンド型タンク式大型炉

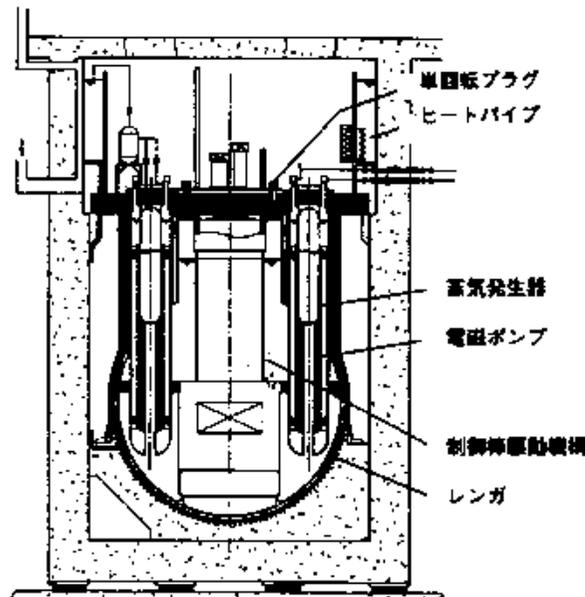


SVBR タンク式モジュール炉

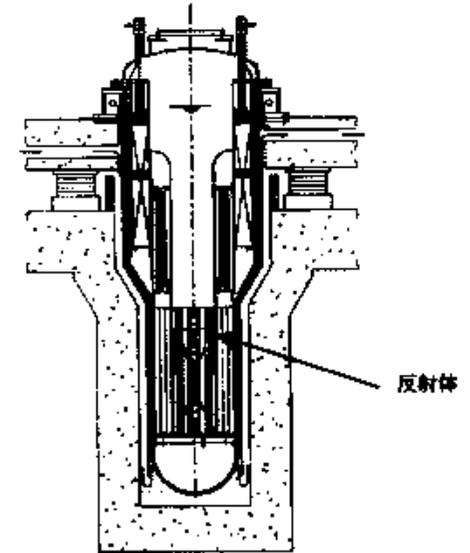
23



ループ式大型炉



タンク式モジュール炉



小型炉

図 3-9 重金属炉のプラント概念

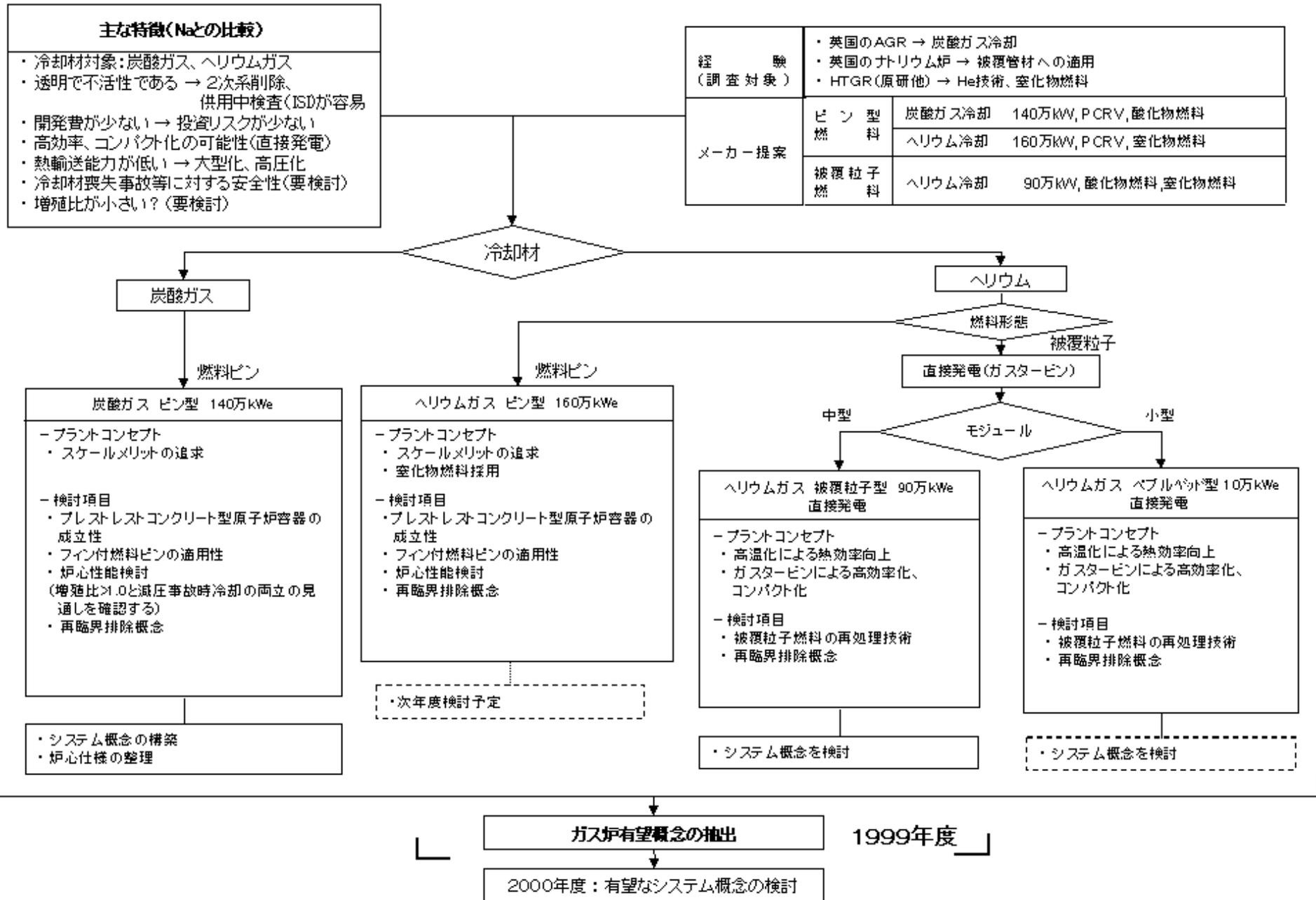
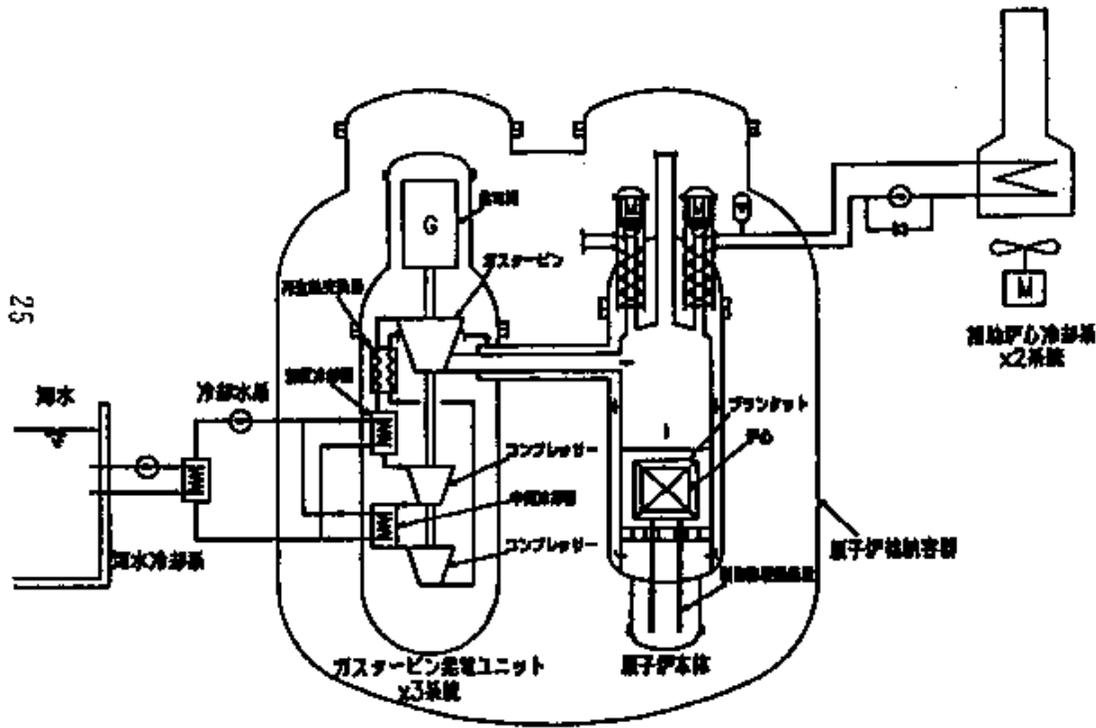
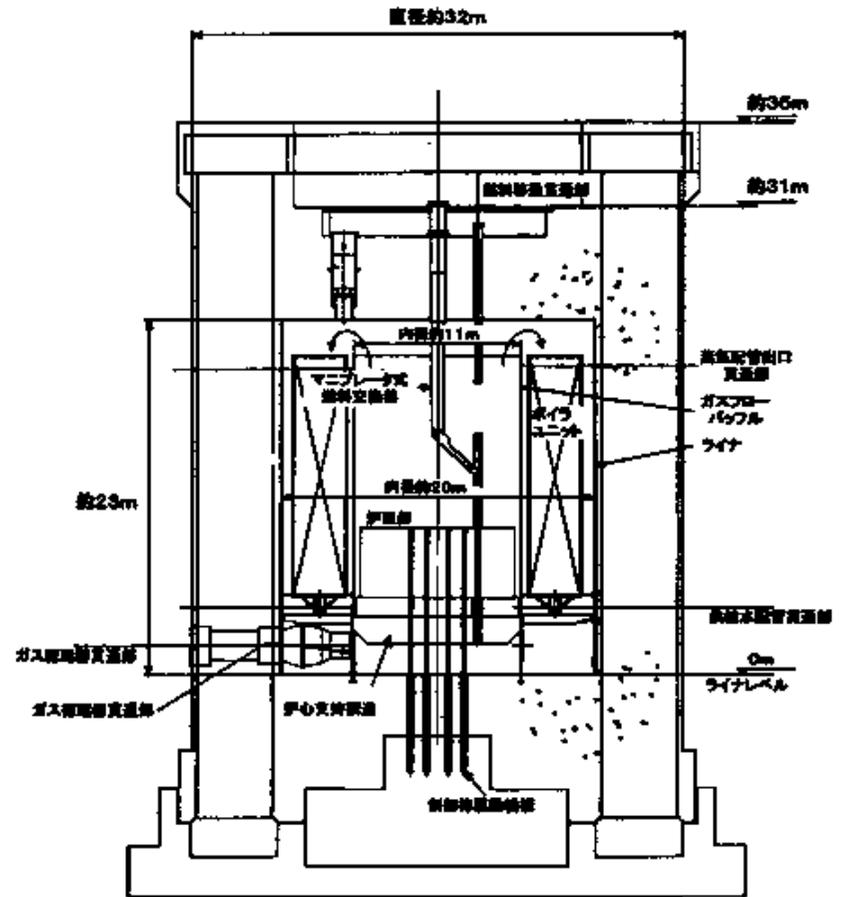


図3-10 ガス冷却炉の候補と検討の進め方



ヘリウム冷却ピン型燃料型



炭酸ガス冷却ピン型燃料型

図3-11 ガス冷却大型炉の主なプラント概念例

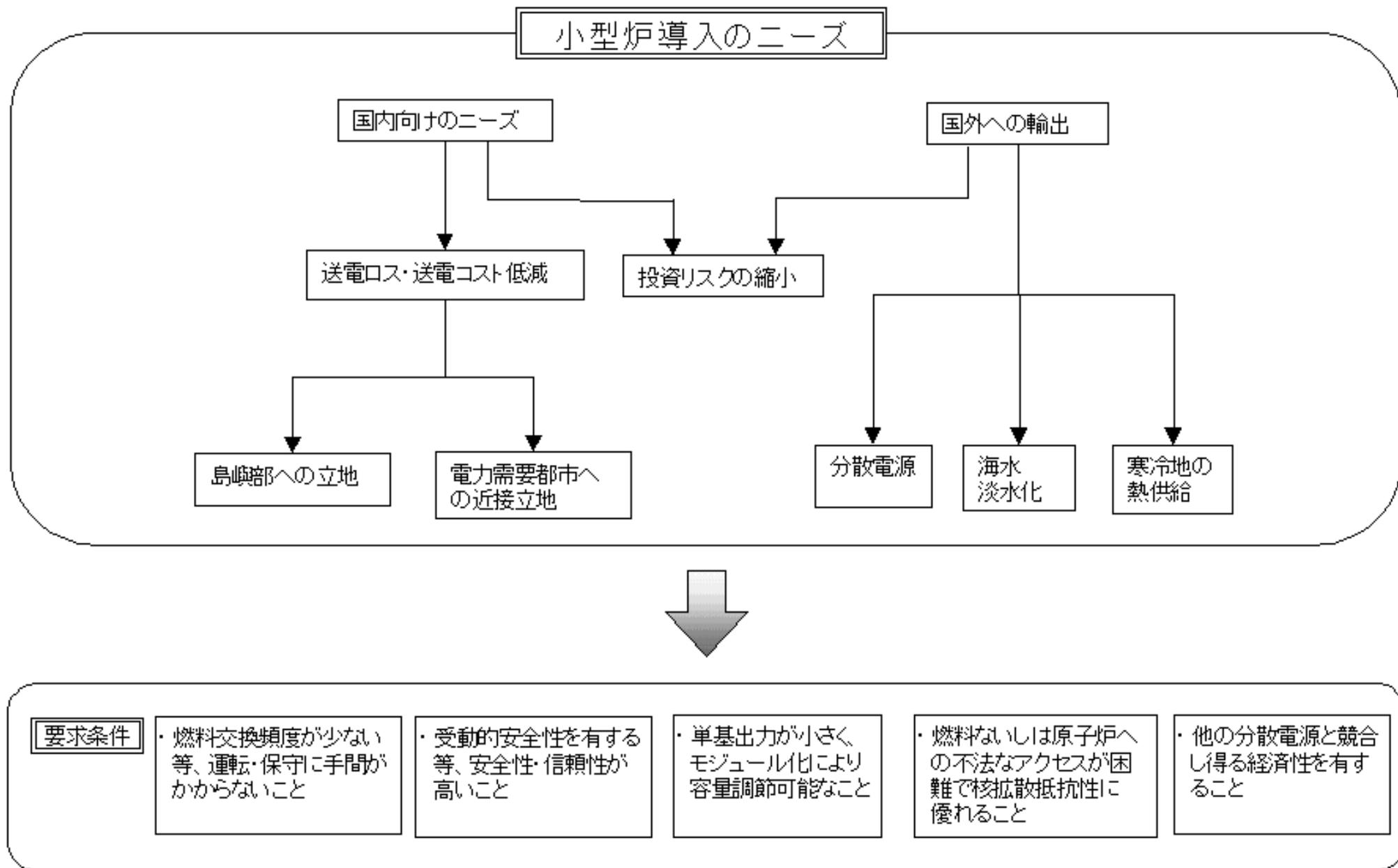


図3-12 小型炉のニーズと要求条件

# 表3-3 冷却材ごとの炉システムの検討状況と今後の課題

炉種別	検討状況	今後の主な課題
ナトリウム冷却炉	<ul style="list-style-type: none"> <li>○ 実証炉と軽水炉のコスト比較と、欧米のナトリウム冷却概念の調査分析を踏まえ、コストダウン方策を立案</li> <li>○ 各種概念の構築               <ul style="list-style-type: none"> <li>・ 大型炉: コストダウン方策を取り入れたループ型炉、タンク型炉概念を立案</li> <li>・ モジュール炉: コストダウン方策とともに、再臨界排除炉心の適合性を検討中</li> <li>・ 2次系削除: 有望な方策(案)を抽出</li> </ul> </li> </ul>	大型炉 <ul style="list-style-type: none"> <li>・ ループ数削除の具体化</li> <li>・ 免震システムの具体化</li> <li>・ 機器合体、新材料による機器、配管コンパクト化</li> <li>・ 高温構造設計の高度化</li> </ul>
		中型モジュール炉 <ul style="list-style-type: none"> <li>・ 機器合体による機器、配管のコンパクト化</li> <li>・ 低温化による安価材料の利用効果</li> </ul>
		2次系削除型炉 <ul style="list-style-type: none"> <li>・ 中間媒体を介したナトリウム/水熱交換器の具体化</li> <li>・ 直接発電システム概念の有効性評価</li> </ul>
重金属冷却炉	<ul style="list-style-type: none"> <li>○ 大型鉛炉: ボンド方式及びループ式大型鉛炉のプラント設計条件を設定し、耐震/免震成立性を評価中</li> <li>○ モジュール型鉛炉: タンク式モジュール炉の設計条件を設定</li> <li>○ モジュール型鉛-ビスマス炉: タンク式モジュール炉の設計条件を設定</li> <li>○ 構造材の腐食: 防食技術の予備調査を実施</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>・ 構造材料に対する腐食対策</li> <li>・ 予熱設備による所内負荷率の低減化</li> <li>・ 供用期間中検査方法の開発</li> <li>・ 放射化ポロニウム対策</li> </ul>
ガス冷却炉	<ul style="list-style-type: none"> <li>○ CO<sub>2</sub>炉:               <ul style="list-style-type: none"> <li>・ 英国商用ガス冷却熱中性子炉(AGR)のシステムを調査し、システム概念を検討中</li> <li>・ 炉心性能と事故時炉心安全性を検討中</li> </ul> </li> <li>○ He炉:               <ul style="list-style-type: none"> <li>・ 被覆粒子燃料                   <ul style="list-style-type: none"> <li>? 欧州のガス冷却高速炉GHR-4のシステムを調査中</li> <li>? 被覆粒子燃料の仕様と再処理方法を検討中</li> <li>? ガスタービンを活用したシステム概念を検討中</li> </ul> </li> <li>・ ビン型燃料については炉心性能を中心に検討中</li> </ul> </li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>・ 熱交換器等の機器の大型化による物量増加対策</li> <li>・ 大型PCRVの成立性</li> <li>・ 事故時の炉心冷却性</li> <li>・ 仮想的炉心損傷時の影響緩和方策の具体化</li> </ul>
水冷却炉	<ul style="list-style-type: none"> <li>○ 軽水炉(BWR)をもとにした稠密化炉心:               <ul style="list-style-type: none"> <li>・ 炉心性能評価により増殖比1.05を達成可能</li> <li>・ 事故時安全性評価(LOCA等)を実施中</li> <li>・ 仮想的炉心損傷事故時の再臨界排除可能性を検討中</li> </ul> </li> <li>○ 超臨界圧水冷却炉: 大出力化による経済性向上方策を検討中</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>・ PWRをもとにした重水冷却稠密化炉心の安全性評価</li> <li>・ 事故時の炉心冷却性</li> <li>・ 仮想的炉心損傷時の影響緩和方策の具体化</li> <li>・ 燃料被覆管及び構造材料の腐食対策(超臨界圧水炉)</li> </ul>
小型炉	<ul style="list-style-type: none"> <li>○ ナトリウム、鉛-ビスマス及びガス冷却小型炉について、多目的分散型電源として開発目標と要求条件を整理し、炉心、システム概念を検討中</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>・ 燃料交換頻度の少ない長期運転サイクル炉心構築</li> <li>・ 受動的安全性、核拡散抵抗性に優れたシステムの具体化</li> </ul>
熔融塩炉	<ul style="list-style-type: none"> <li>○ 塩化物熔融塩炉を中心に、プラント基本概念の調査を実施中</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>・ ウラン-プルトニウムサイクルに適合するシステムの具体化</li> </ul>

幅広い選択肢の調査

方法	既往文献の調査、社内提案、メーカー提案、アイデア公募、国内研究協力、国際研究協力、等	
調査対象	再処理	湿式(先進湿式法、イオン交換法、超臨界流体抽出法、沈殿法、等) 乾式(酸化物電解法、金属電解法、フッ化物揮発法)
	燃料製造	簡素化ペレット、振動充填、被覆粒子 鑄造(射出成型、遠心法)、等

燃料形態とサイクル技術の組合せの分析によるマトリックス化

○:適用可能な技術

	再処理		燃料製造			
	湿式	乾式	ペレット	振動充填	鑄造	被覆粒子
酸化物	○	○	○	○		○
窒化物	○	○	○	○		○
金属		○			○	
検討のポイント	<ul style="list-style-type: none"> <li>・工程の簡素化</li> <li>・TRU回収率の向上</li> <li>・液体廃棄物発生量の低減</li> <li>・Puの非分離回収</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>・工程間の核物質移送技術</li> <li>・TRU回収率の向上</li> <li>・塩廃棄物処理</li> <li>・計量管理手法の確立</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>・工程の簡素化</li> <li>・低除染燃料への適用</li> <li>・遠隔自動化</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>・造粒工程の合理化</li> <li>・Pu富化度、充填密度等の品質管理</li> <li>・廃棄物量低減</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>・鑄型廃棄物量の低減</li> <li>・歩留まりの向上</li> <li>・坩堝の寿命延長</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>・炉システム、再処理との整合</li> </ul>

図3-13 選択肢の調査と検討のポイント

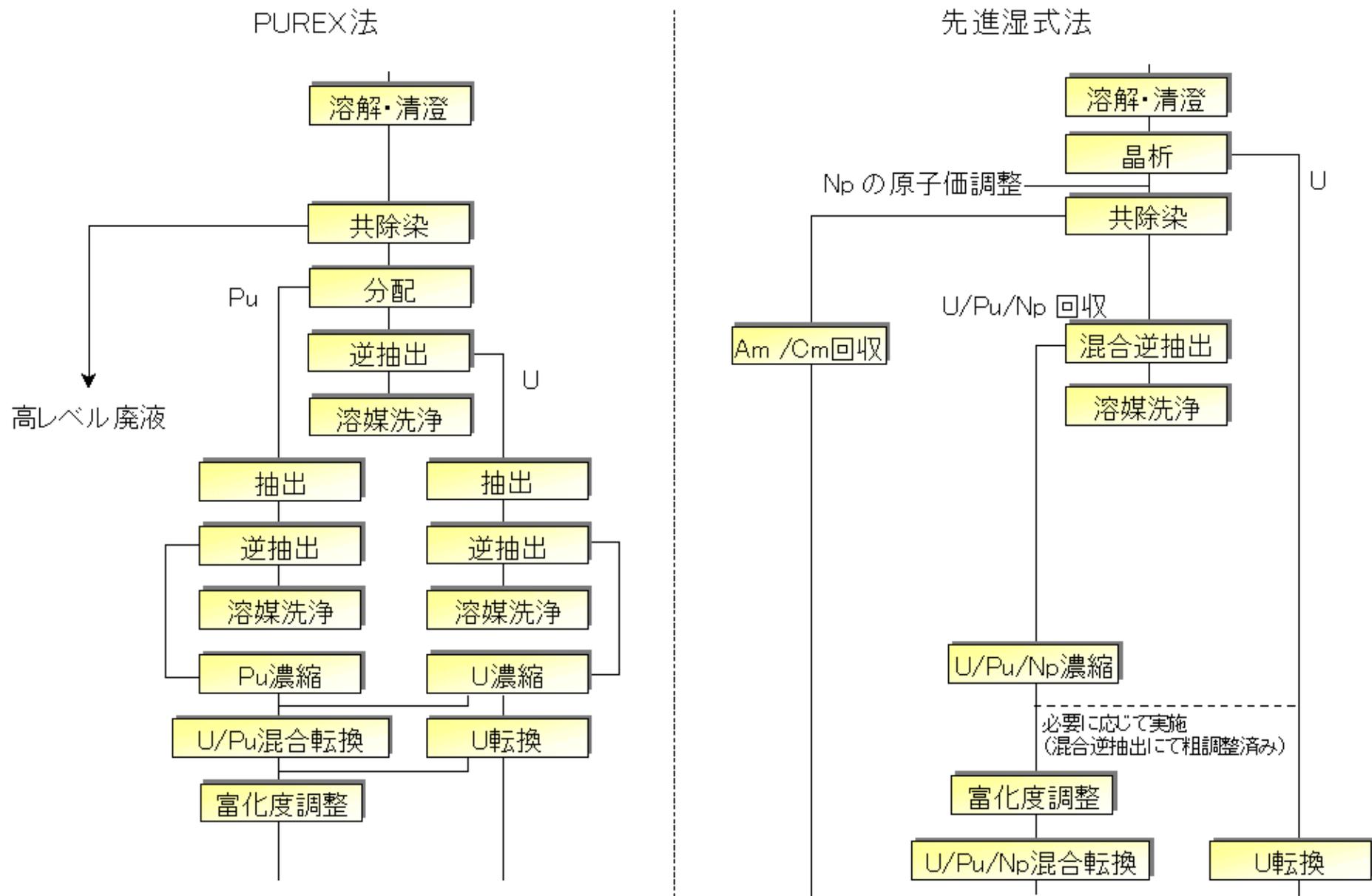
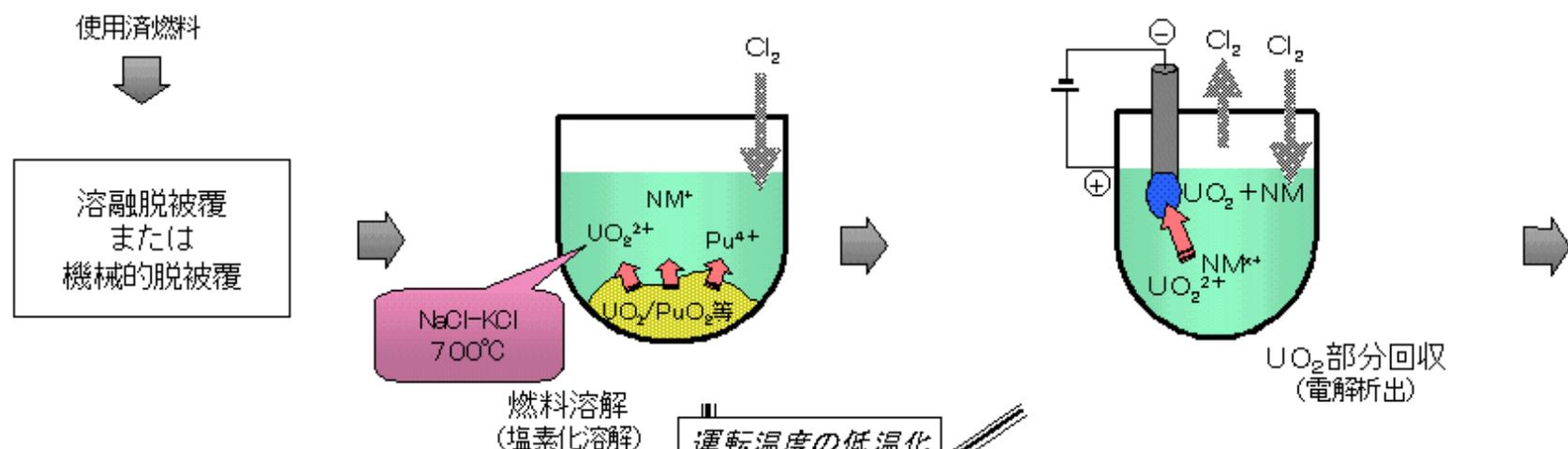
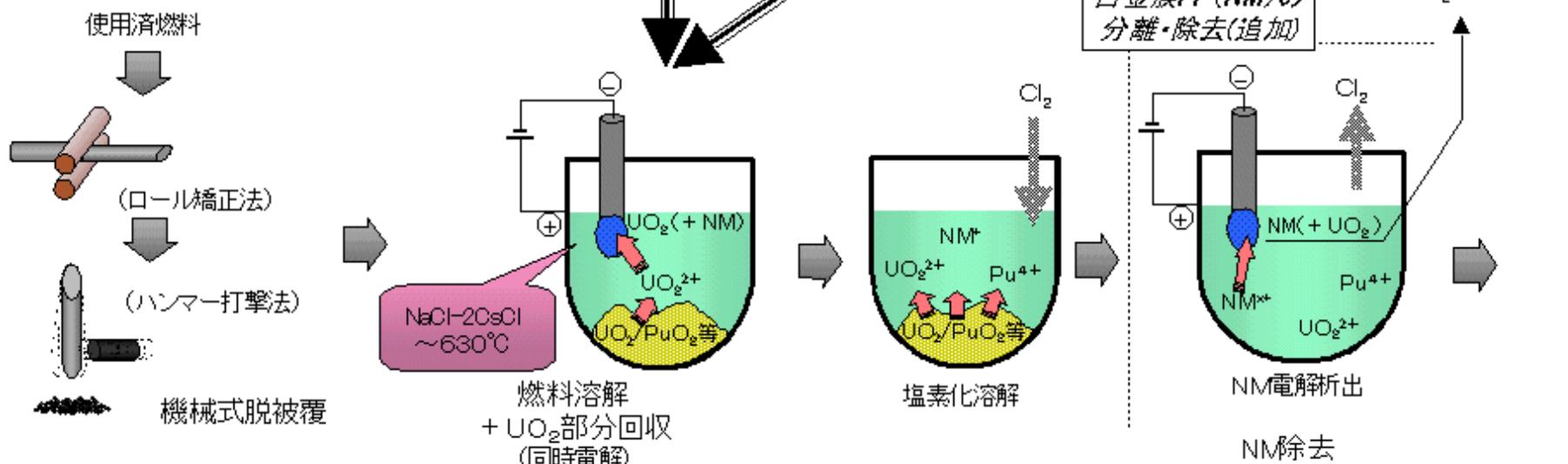


図3-14 先進湿式法プロセスフローの例  
(酸化物燃料への適用例)

酸化物電解法(ロシアRIAR開発プロセス) (1/2)



酸化物電解法(改良プロセス) (1/2)

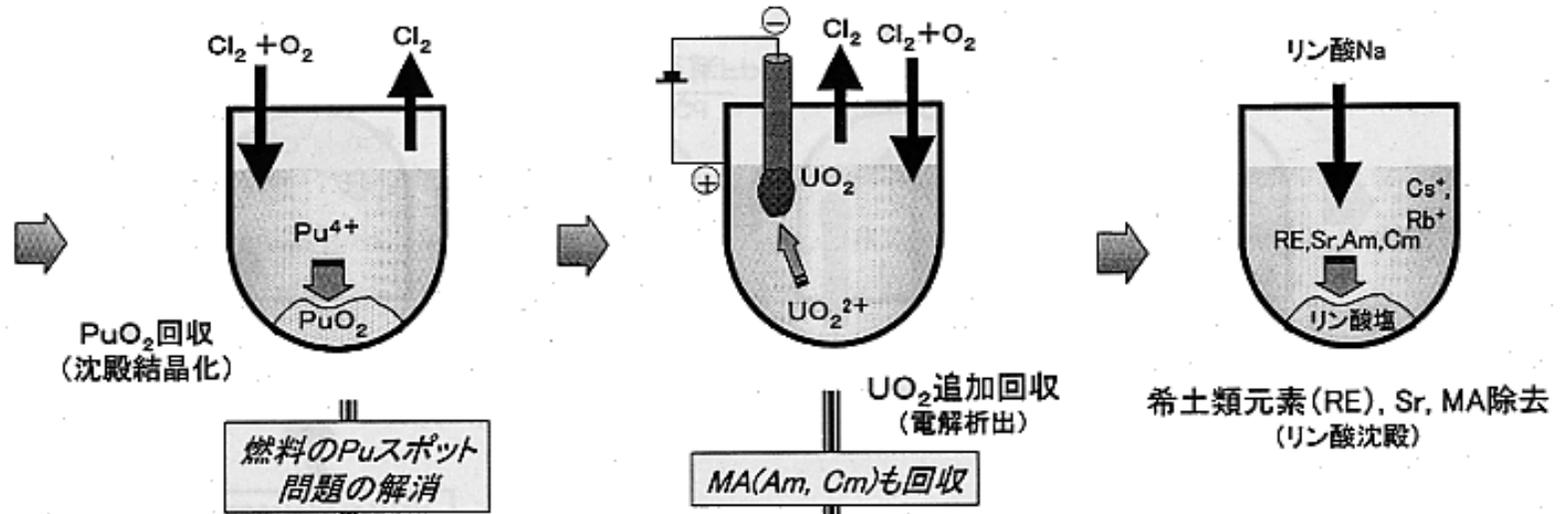


運転温度の低温化  
処理時間の短縮  
Cl<sub>2</sub>使用量の低減

図3-15 酸化物電解法プロセスフロー(RIAR開発プロセスとの比較)(1/2)

(酸化物燃料への適用例)

酸化物電解法(ロシアRIAR開発プロセス) (2/2)



31 酸化物電解法(改良プロセス) (2/2)

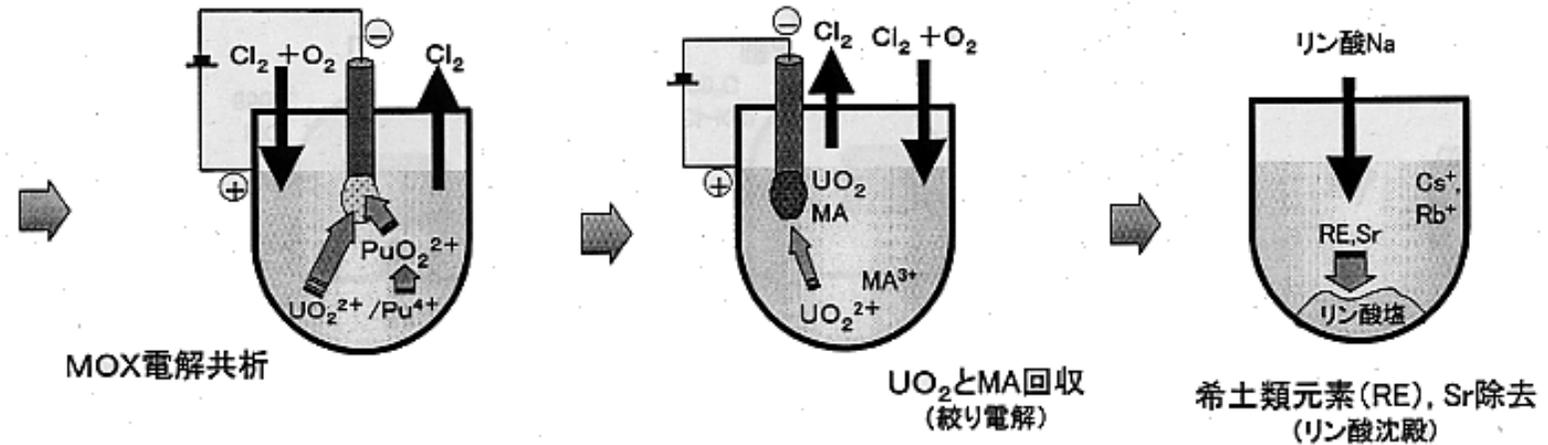
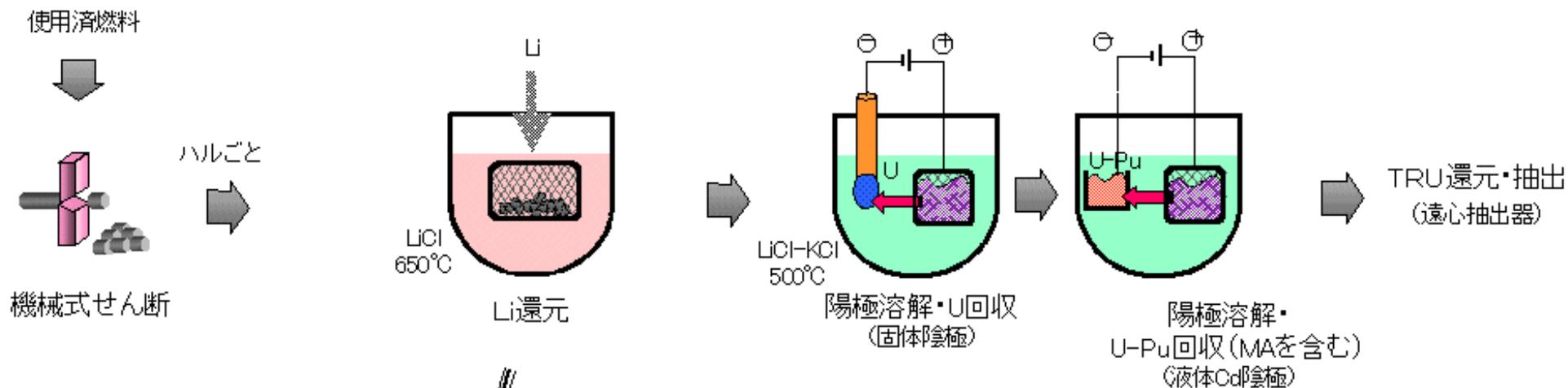


図3-15 酸化物電解法プロセスフロー(RIAR開発プロセスとの比較) (2/2)  
(酸化物燃料への適用例)

### 金属電解法(A NL開発プロセス)



### 金属電解法(改良プロセス)

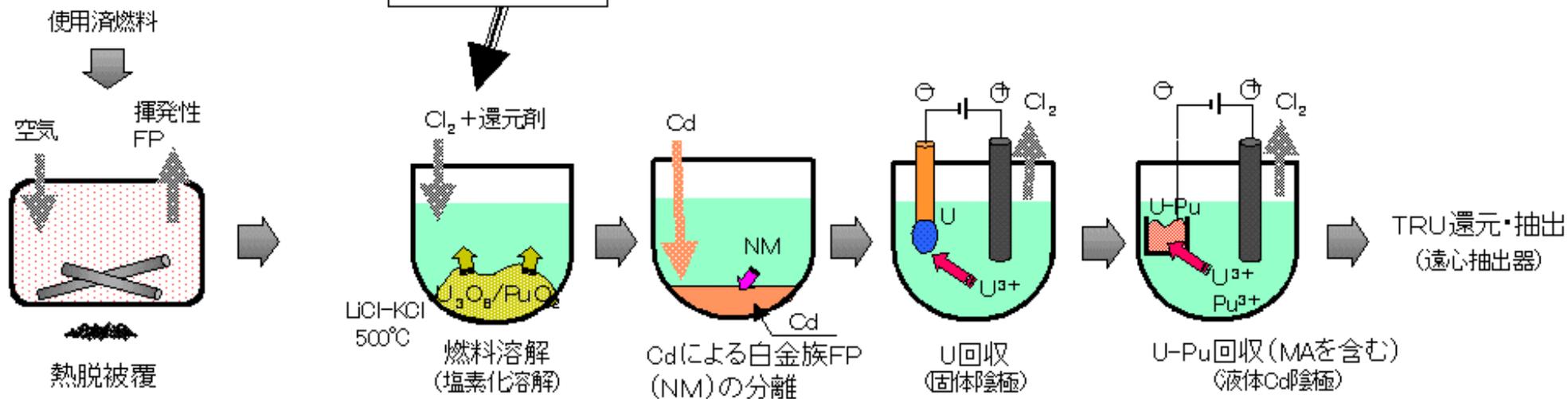
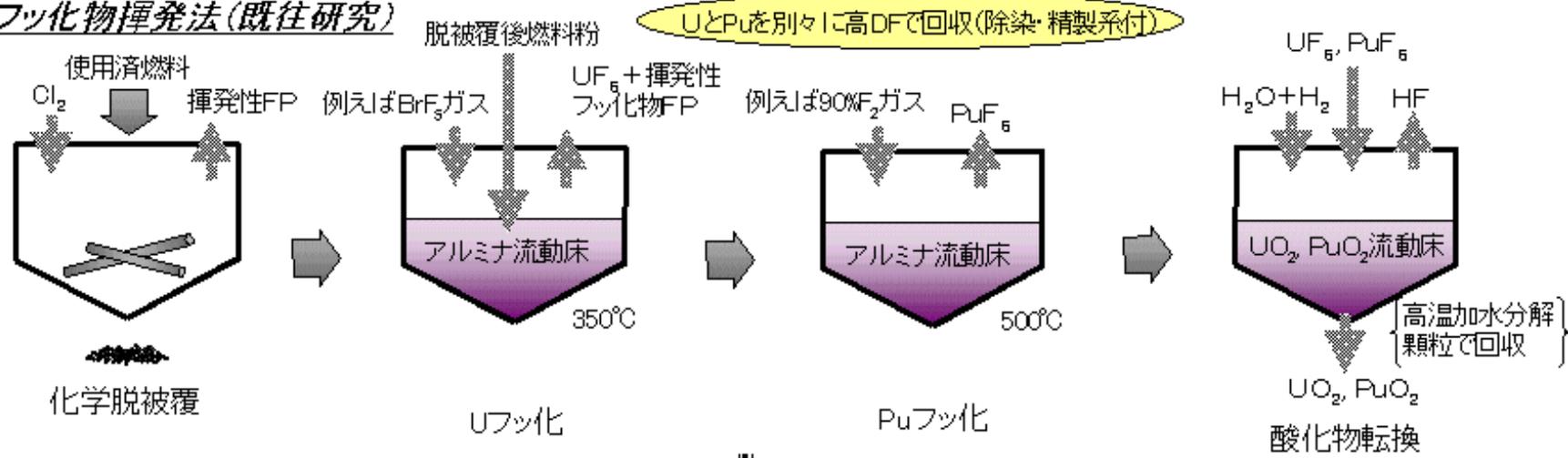


図3-16 金属電解法プロセスフロー (ANL開発プロセスとの比較)  
(酸化物燃料への適用例)

フッ化物揮発法(既往研究)



フッ化物揮発法(改良プロセス)

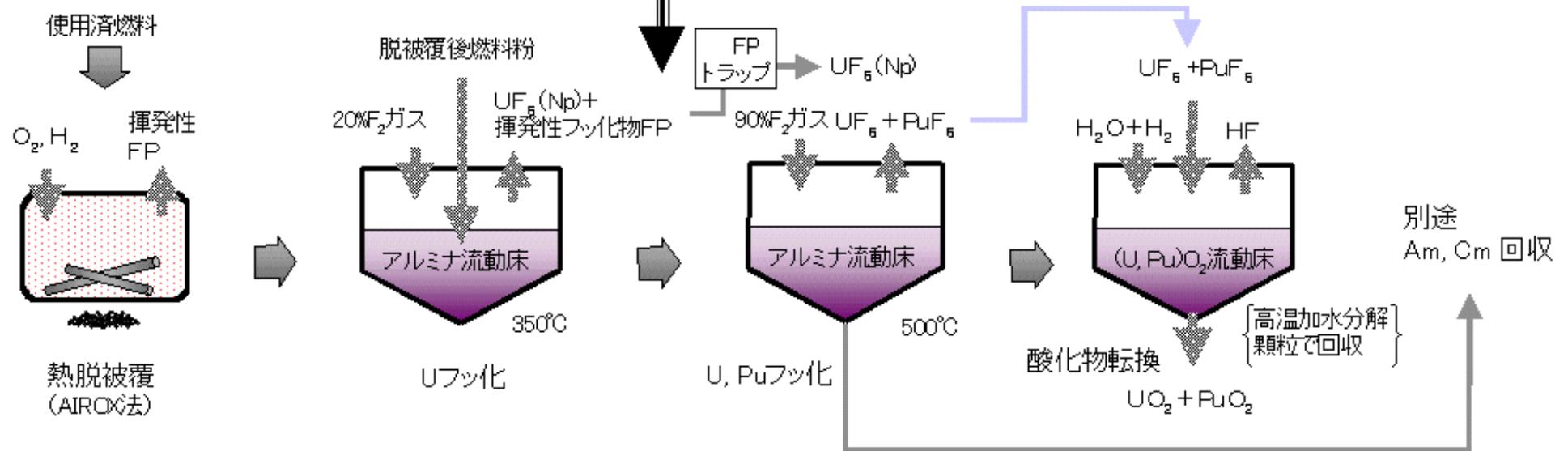


図3-17 フッ化物揮発法プロセスフロー(既往研究との比較)  
(酸化物燃料への適用例)

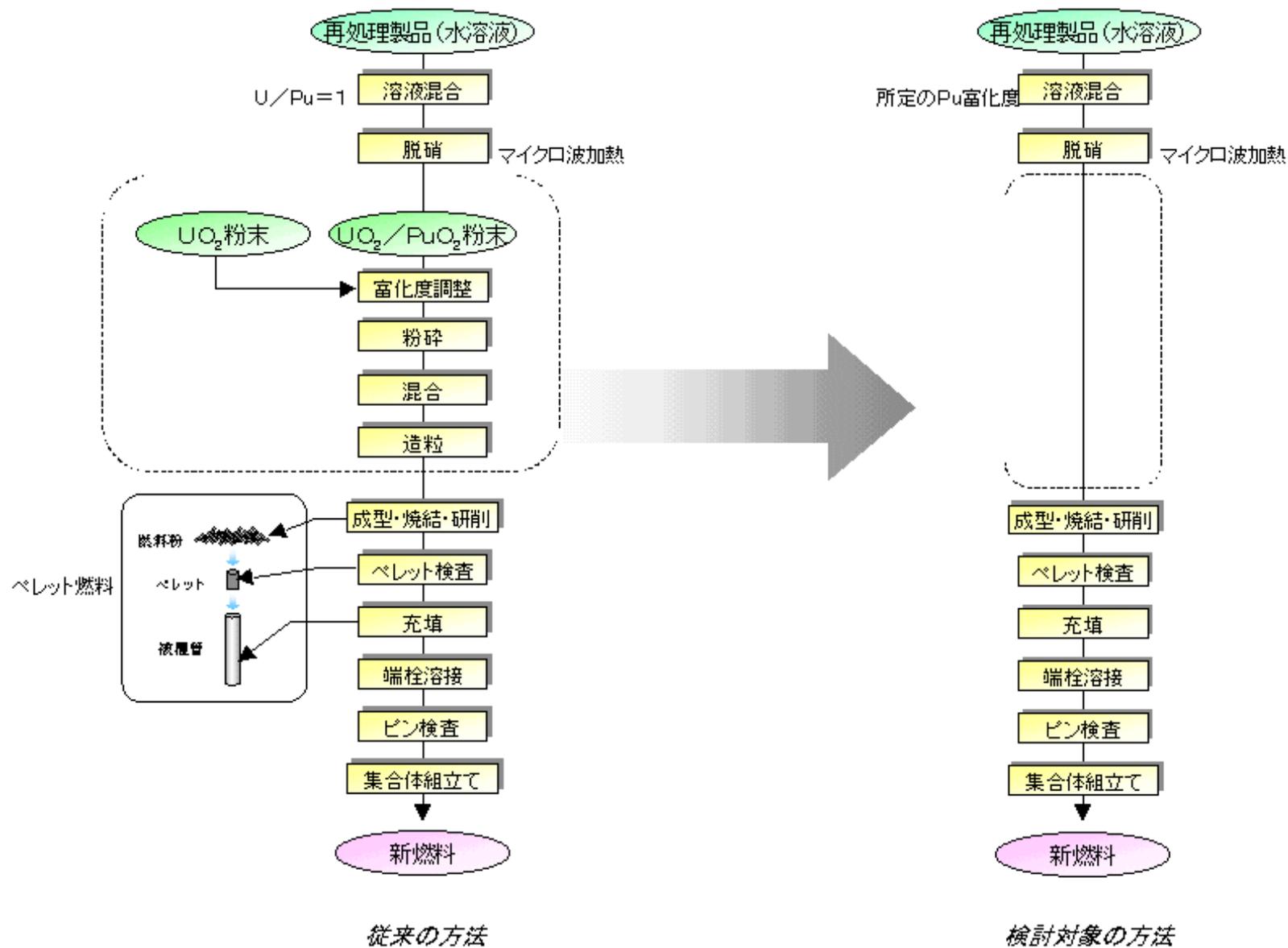
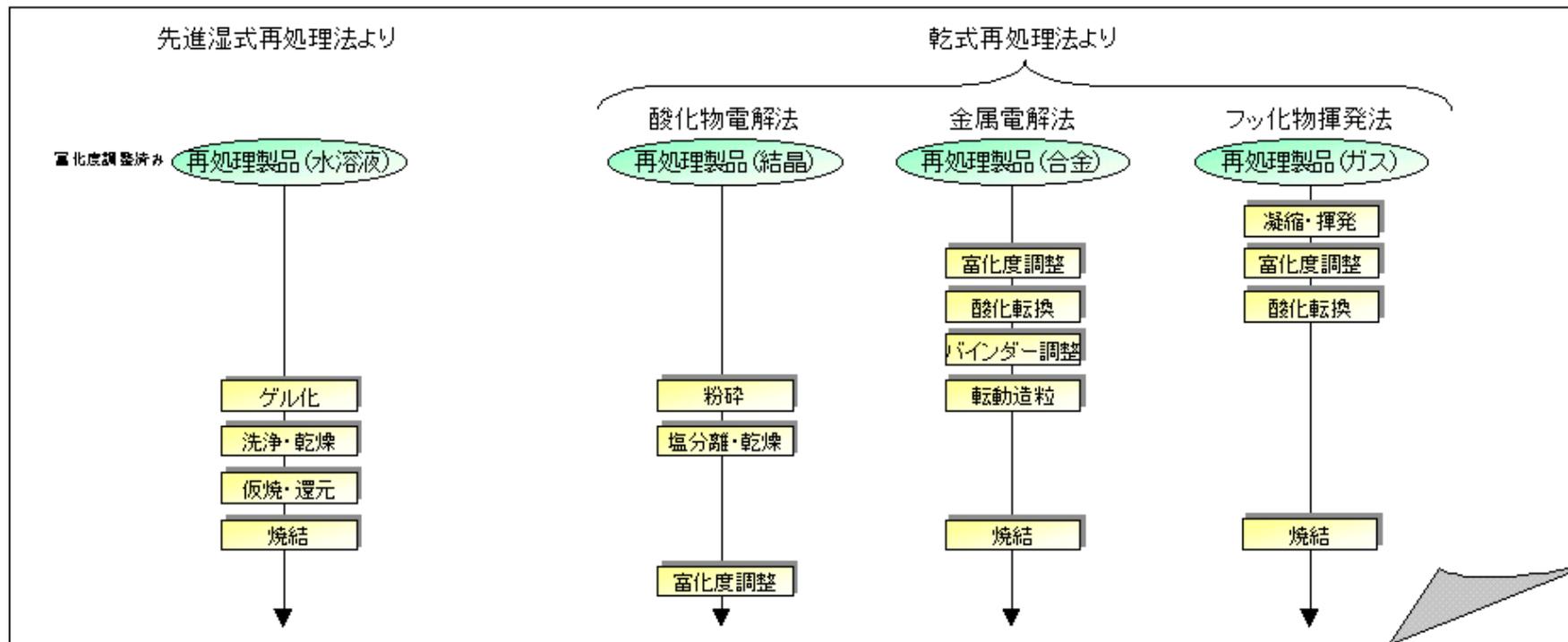


図3-18 簡素化ペレット製造システム  
(酸化物燃料への適用例)

顆粒製造工程



振動充填工程

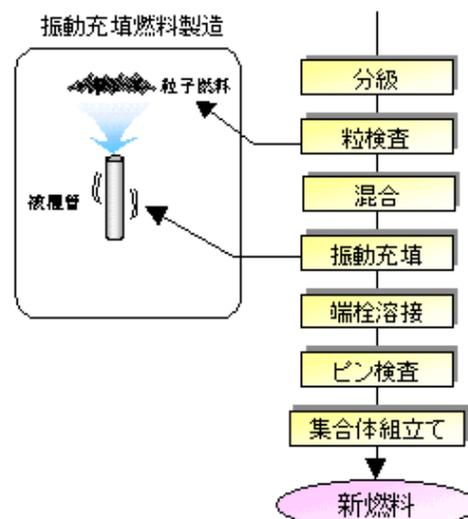
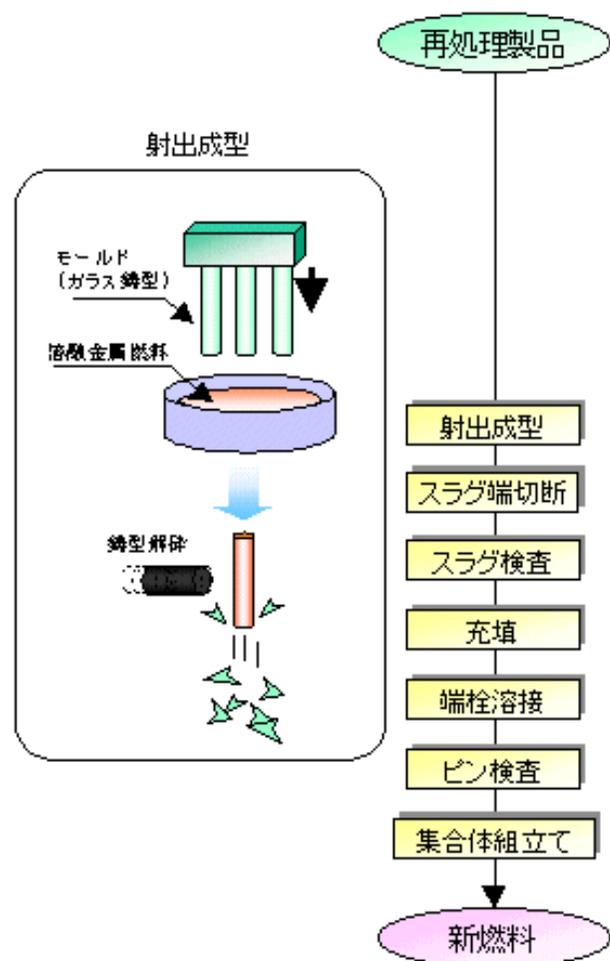


図3-19 振動充填製造システム  
(酸化物燃料への適用例)

### 射出成型燃料製造



### 金属鑄型・遠心鑄造燃料製造

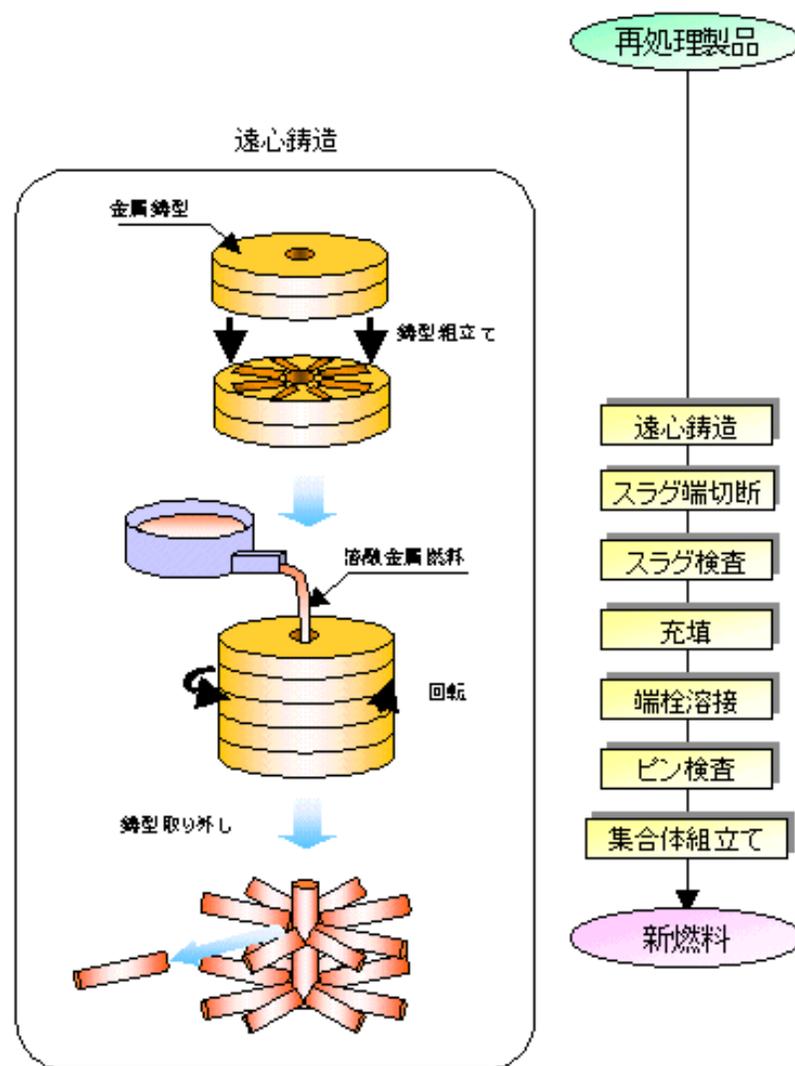


図3-20 金属燃料製造システム

表3-4 燃料サイクルシステムの検討状況と今後の課題

システム	分類	検討状況	今後の課題
再処理システム	湿式法	<p><b>(酸化物燃料及び窒化物燃料)</b>            酸化物燃料への適用を中心に、以下の施設概念を検討している。            ○先進湿式法            ・簡素化PUREX法による、ウラン/プルトニウム/ネプツニウムを分離せず低除染係数で共回収することによる工程簡素化、及び遠心抽出器採用による施設コンパクト化            ・晶析法併用による過剰なウランの先行分離と液体廃棄物量削減            ・TRU回収機能付加            ○先進湿式法の一部代替・補完プロセスとして、イオン交換法、アミン抽出法、超臨界流体抽出法、沈殿法等</p> <p>窒化物燃料については、前処理及び製品の窒化物への転換を除き基本的に酸化物と同様の基本プロセスで構築可能であるため、これらを中心に検討を実施している。</p>	<ul style="list-style-type: none"> <li>・先進湿式法及び代替・補完プロセスを採用した方法についての再処理施設概念の構築</li> <li>・建設費、運転費等の経済性評価</li> <li>・廃棄物発生量の評価</li> <li>・合理的TRU回収技術の検討 等</li> </ul>
	乾式法	<p><b>(酸化物燃料及び窒化物燃料)</b>            酸化物燃料への適用を中心に以下の施設概念を検討している。            ○酸化物電解法として、ロシア技術をベースに、処理速度向上、塩素使用量低減、白金族FP分離工程の付加、ウラン/プルトニウムの共回収、TRU回収工程付加等の改良            ○金属電解法として、米国技術をベースに、塩廃棄物削減のための塩素化溶解の採用、それに伴う白金族FP分離工程付加等の改良            ○フッ化物揮発法として、従来の技術をベースに、U/Puの低除染・共回収やTRU回収工程付加等の改良</p> <p>窒化物燃料については、前処理及び製品の窒化物への転換を除き基本的に酸化物と同様の基本プロセスで構築可能であるため、これらを中心に検討を実施している。</p> <p><b>(金属燃料)</b>            ANLが開発したプロセスに、ウラン/TRU回収率向上のための工程を付加して、施設概念を検討している。</p>	<ul style="list-style-type: none"> <li>・保障措置等も考慮した再処理施設概念の構築</li> <li>・建設費、運転費等の経済性評価</li> <li>・廃棄物発生量の評価</li> <li>・合理的TRU回収技術の検討</li> <li>・材料の耐食性改善方策の検討</li> <li>・計量管理手法の検討 等</li> </ul>
燃料製造システム	ペレット	<p><b>(酸化物燃料及び窒化物燃料)</b>            酸化物燃料への適用を中心に、湿式再処理法の検討と整合をとりつつ、溶液での富化度調整を行い、造粒工程等の削除による簡素化を図った簡素化ペレット法を検討している。更に低除染の酸化物燃料に対応するため、セル構造でのペレット製造の自動化について検討し、機器・設備構成及び施設概念を検討している。</p> <p>窒化物燃料については、酸化物燃料製造プロセスを基本に、炭素熱還元/窒化プロセスを付加したプロセスを検討している。</p>	<ul style="list-style-type: none"> <li>・先進湿式再処理法との一体化施設概念の構築</li> <li>・建設費・運転費等の経済性評価</li> <li>・廃棄物発生量の評価 等</li> </ul>
	振動充填	<p><b>(酸化物燃料及び窒化物燃料)</b>            湿式法、乾式法の再処理で得られる製品仕様に対応して、廃棄物量低減、造粒工程の合理化設計、粒子の仕様に合致した振動充填条件の最適化を行い、各工程の物質収支の評価と機器・設備構成及び施設概念を検討している。</p>	<ul style="list-style-type: none"> <li>・上記各再処理との一体化施設概念の構築と経済性評価</li> <li>・廃棄物発生量の評価</li> <li>・遠隔自動化による検査技術の検討</li> <li>・低除染の燃料への適用性検討 等</li> </ul>
	鋳造法	<p><b>(金属燃料)</b>            射出成型法及び鋳型廃棄物の低減を目指した遠心鋳造法について、機器・設備構成及び施設概念の検討を行っている。</p>	<ul style="list-style-type: none"> <li>・金属電解再処理法との一体化施設概念の検討と経済性評価</li> <li>・廃棄物発生量の評価 等</li> </ul>