

核燃料サイクル分野の今後の展開について  
【技術的論点整理】

高速増殖炉サイクル実証プロセス研究会

平成21年 7月 2日

## 目 次

### はじめに

1. 将来の原子力を取り巻く環境
  - (1) あり得べき将来の社会環境の変化
  - (2) あり得べき原子力の将来像(定性的なFBRの導入シナリオ)
  - (3) 物量・時間スケール試算
  - (4) 再処理需要に応じた再処理工場の一例
2. FBRサイクル検討に際しての視点追加の必要性について
3. 第二再処理工場
4. 第二再処理工場で採用すべきプロセスの選定の視点
  - (1) 第二再処理工場のバリエーション
  - (2) プロセス選定の視点
5. 第二再処理工場の具体的イメージ例
  - (1) 共用化に係る認識
  - (2) 第二再処理工場における再処理ラインの共用化に対応したプラントイメージ
  - (3) 第二再処理工場に係る特定要件
6. 再処理プロセスの選定に向けた準備
  - (1) 再処理プロセスプロファイルの書式
  - (2) 再処理プロセスプロファイル記載・整備の留意点
7. 再処理プロセスプロファイル
  - (1) 再処理プロセスプロファイル
  - (2) プロセスの概要
8. 2010年頃までになすべき事項
  - (1) 再処理プロセスプロファイルから得られた必要調査事項
  - (2) 今次の検討を通して得られた必要調査事項
  - (3) 再処理プロセス選定のロードマップ及び研究開発ロードマップの作成
9. 情報整備の実施における留意点
10. 国際協力
11. 研究開発体制
  - (1) 一元的で全体を鳥瞰できるマネジメント能力の必要性
  - (2) プロジェクト開発のサステナビリティの確保と基礎研究とのバランス
  - (3) 必要な人材の確保と技術の継承

### おわりに

高速増殖炉サイクル実証プロセス研究会 委員名簿

- 別紙 1 将来の社会環境の変化が原子力産業に与える影響に関する定性的整理
- 別紙 2 物量・時間スケール試算のまとめ
- 別紙 3 試算条件等の変化をある程度包絡し得る再処理需要とその包絡性
- 別紙 4 第二再処理工場のバリエーション例
- 別紙 5 第二再処理工場検討に係る主なデータフロー
- 別紙 6 第二再処理工場のバリエーション毎の採用可能性が高いと考えられるプロセス
- 別紙 7 再処理プロセスプロファイルの書式
- 別紙 8 研究開発の進め方、役割分担、進捗度の判断等に際して念頭におくべき再処理プロセスの実用化に必要な分野・領域
- 別紙 9 各再処理プロセスに関する評価の概要

はじめに

高速増殖炉(FBR)の研究開発については、ナトリウム漏えい事故以降運転を停止している高速増殖原型炉「もんじゅ」の運転再開に向けた活動が行われ、これに引き続く実証炉の検討が必要な段階に差しかかっている。海外では米国が30年ぶりに原子力発電所の建設に向けた政策を展開するとともに、世界的な原子力エネルギーの利用拡大を念頭にGNEP(Global Nuclear Energy Partnership)を提唱している。このような中、高速増殖炉サイクル実証プロセス研究会は平成19年4月FBR実証炉のあり方や商業炉導入にいたるアクションプログラム・ロードマップ等に関する中間的な取りまとめを行ったところである。

FBRは、基本的には自らが運転に伴い作り出したプルトニウムを自己に還流し燃料として利用するという自己リサイクル型の核燃料サイクルを有する。軽水炉サイクルにおける再処理は、軽水炉の運転にプルトニウムも利用可能とする選択肢の拡大、核燃料物質の有効利用、高レベル放射性廃棄物量低減等に資する核燃料サイクルのダウンストリームの性格が強いのに対し、FBRサイクルにおける再処理は、ダウンストリームであると同時に燃料供給を司り、原子炉の運転に不可欠のアップストリームという性格も有する。このような認識の下、高速増殖炉サイクル実証プロセス研究会では、FBRと対をなす再処理を中心とした核燃料サイクル分野についても、平成18年12月から検討を開始した。

次世代の再処理については、平成17年10月の原子力委員会原子力政策大綱において、現行の六ヶ所再処理工場の処理能力を超えて発生する使用済燃料の処理の方策については、2010年頃から検討を開始することとされている。当該検討を2010年頃から開始するにしても、係る検討に必要な情報の整備や予備的な検討は現在から準備を進めておくことが不可欠である。このため当研究会においては、原子力委員会の検討に必要な情報の特定や今後整備する必要のある情報の整備の方策、研究開発の進め方等について検討を行い、今般現在までに検討が行われた事項を技術的論点整理としてとりまとめた。

核燃料サイクルの検討に際しては、再処理だけでなく燃料加工、燃料輸送等を一体として検討する必要があるが、今回の検討における燃料加工分野その他の検討の密度は、再処理分野のそれに比べて限定的である。また、核燃料サイクルの検討が原子炉の設計に影響を与える可能性のある事項も存在するが、これに関しても限定的な検討に止まっていることに留意を要する。

なお今回の検討においては、国内の原子力発電規模、FBR導入ペース、再処理需要等を念頭においた物量等を検討の前提としており、国際的な展開は前提としていないことに留意を要する。

## 1. 将来の原子力を取り巻く環境

次世代の再処理プロセス選定に際して、その前提としての再処理規模や処理開始時期等の再処理需要を明らかにすべく、ウラン供給環境の他、化石資源の枯渇や価格上昇等概念的に起こり得る将来の社会環境の変化が原子力産業に与える影響の程度も念頭に、一定の仮定の下再処理需要等に係る物量・時間スケールの試算を実施した。

2050年のFBR導入開始以降に原子力発電設備のリプレイスが必要となった場合、電力会社毎に1基のFBRを建設するものの、その後10年間はFBRの運転実績を観測するため追加のFBRによるリプレイスは行わず、その後はリプレイスが必要な全基をFBRでリプレイスとした場合、必要なプルトニウム量を確保するための再処理需要は以下の通り。

- ・軽水炉使用済燃料は、六ヶ所再処理工場に引き続き2047年から1200tHM/年程度の処理が必要。
- ・FBR使用済燃料は、2060年に100tHM/年程度の処理が必要で、その後2080年に100tHM/年程度の処理量増加の必要があり、最大規模は500tHM/年程度。

また、その他の多くの試算ケースを包絡する再処理需要は概ね下記の範囲で表される。

- ・軽水炉使用済燃料は、六ヶ所再処理工場に引き続き2047年から1200tHM/年程度の処理が必要。
- ・FBR導入開始後5～10年に100～200tHM/年程度のFBR使用済燃料の処理が必要。その10～20年後に処理量を100～200tHM/年程度増加の必要があり、最大規模として500～800tHM/年程度の処理が必要。

次世代の核燃料サイクルの中心をなす再処理プロセスを選定しようとする場合、現在研究開発途上にあるプロセスの実用化時期やプロセスの特性等との関係で、再処理規模<sup>1</sup>や処理開始時期等の再処理需要を念頭におくことが重要となる。また、再処理需要を検討するためには原子力発電規模、さらには資源制約や環境制約等のエネルギー環境を念頭に置くことが重要である。

このため、資源制約や環境制約が社会にどのような影響を与える可能性があるか、原子力発電規模やFBRの導入にどのような影響を与えるかをまず検討することにより、あり得べき原子力の将来像を考察し、再処理プロセス選定の前提条件とすべき再処理需要等の物量・時間スケール試算を行った。

### (1) あり得べき将来の社会環境の変化

将来の核燃料サイクル検討の前提とすべき物量に大きな影響を与えるFBRの導入開始時期及び導入ペースには、原子力発電規模及びウラン価格が直接的な影響を及ぼす。さらに、係る原子力発電規模には電力の供給構造が、電力の供給構造にはエネルギーの供給構造及び社会のエネルギー需要が、エネルギーの供給構造及び社会のエネルギー需要には資源や地球温暖化ガスの環境等の制約及びこれらを背景とした価格等の社会環境が影響を与え得るとの関係にある。

このため資源制約や環境制約等の社会環境がどのように変化した場合に、FBRの導入開始時期及び導入ペースがいかなる影響を受け得る可能性が存在するか検討を行った(【別紙 1】「将来の社会環境の変化が原子力産業に与える影響に関する定性的整理」参照)。この結果、需要分野では民

<sup>1</sup> 再処理施設規模に相当するが、後述4.(1)「第二再処理工場のバリエーション」に記述のとおり施設のバリエーションが多数存在するため、物理的な「施設」、「工場」、「容量」のイメージと安易に結び付けることは適当でない。このため、本報告書においては、極力「再処理規模」、「需要規模」を用いた。

生、産業、運輸の順にエネルギー需要の硬直性が高く需要構造が変化しにくく、社会環境の変化が緩やかかつ継続的な場合の方が、急激かつステップ的な場合より変化が緩やかとなると思われる。また、資源分野には価格の連動性は存在するものの、全ての資源が同時に限界を迎えることは考えにくい。最大の変化は化石燃料種の全てにおいて影響の生じるCO<sub>2</sub>制約による影響が最大となるものと思われる。

しかしながらこのような資源制約や環境制約等の変化は、それ自体が世界的な社会そのものの大幅な変動を惹起することから、その電力需要や原子力発電規模への影響の度合いや時期を定性的にも予測することは困難である。このため以降の具体的な検討に際しては、最もありそうな場合を幅を持って検討することとし、その検討の範囲外には上記のような大規模な変動もあり得ることを念頭におくにとどめた。

## (2) あり得べき原子力の将来像(定性的なFBRの導入シナリオ)

新たに建設する再処理工場検討の前提とすべき、FBR導入開始及びその後のウラン供給に係る環境の一例としては以下のようなものが考えられる。

### a. FBR導入当初

ウラン価格が上昇し、FBRが相対的に価格競争力を持つ。

- 1) 寿命を全うした軽水炉のリプレイスに際し、運転初期の発電コストは軽水炉を上回るものの、将来のウラン価格の上昇を勘案すると、生涯発電コストはFBRが安くなる。この結果リプレイスに際しては、将来的な経済性の見通しから、FBRの導入が開始される。

しかし導入ペースは「様子見」気配から鈍調となる場合もあり得る。

- 2) この際既存の軽水炉は、ウラン価格が上昇しているものの、減価償却が進んでいることからウラン燃料により運転を継続する。

### b. FBR導入中期

さらにウラン価格が上昇し、既存軽水炉の減価償却が進み設備費が軽減していることを踏まえても軽水炉の発電コストが高くなる。

- 1) FBRの導入がかなり進み、既存及び新設FBRのプルトニウム需要を上回るプルトニウム供給が可能となるため、FBRでは増殖比を低減する場合もあり得る。
- 2) 寿命末期の軽水炉は、寿命延長の中止または早期停止によりFBRにリプレイスされる場合もあり得る。
- 3) 残存寿命の長い軽水炉は、再度フルサーマルを再開することにより温存される場合もあり得る。

### c. FBR導入中期より後

従来の検討では、軽水炉が早期にFBRに代替されるとしており、FBRの導入開始後10年程度でプルトニウムが過剰となることを理由に、増殖比を1.2程度から1.03程度に低減することが考えられている。しかしながら増殖比を低減せずに、これを軽水炉にフルMOX用の原料としてリサイクルすれば、設備費が安い場合の軽水炉のメリットとプルトニウムを生産することができるFBRのメリットを最大限に享受することが可能となる。単純なプルトニウムバランスの観点からは、増殖比の1.2程度とFBRの完全自己リサイクル運転が可能な増殖比1.03程度の差、すな

わち増殖比0.17程度があると、原子力発電規模の16.5GWe/58GWe程度のフルMOX軽水炉の運転が可能となる。現実には軽水炉にプルトニウムを供給するためのブランケット量の増加に起因するFBR再処理量の増加に伴う再処理コストの増加等から、最適コスト点はこれを下回ることも考えられる。このため、この期間における軽水炉とFBRの共存について、プルトニウムバランスのみならず回収されるプルトニウムの同位体組成をも考慮した軽水炉とFBRの共存の成立性やその際の経済合理性について検討することが、将来の再処理のあり方を検討する前提として不可欠である。

さらに現在の開発段階では、FBR使用済燃料の再処理により回収されるプルトニウムの恒常的リサイクル利用(マルチリサイクル)には、プルトニウム高次化に伴うFBR燃料加工への影響や軽水炉へ供給した場合の軽水炉炉心成立性等に検討課題もあることから、FBR導入後当面は増殖比を低減せず、マルチリサイクルを行わないこともFBR導入当初における選択肢となり得ることも念頭に、検討を進めるべきである。

これらを勘案すると、安易に「FBR平衡期」を想定することも、プルトニウムバランスのみに着目することも適切ではなく、FBR導入当初におけるマルチリサイクルを行わないことや軽水炉へのプルトニウム供給も念頭においた経済合理性の検討を早急に開始するとともに、関連する研究開発、情報の取得を早急に計画する必要がある。

また、核燃料サイクルの検討や再処理プロセスの選定に際しても、FBR導入中期より後において軽水炉とFBRの混在する状態である可能性があることを念頭に検討を行う必要がある。

### (3) 物量・時間スケール試算

試算は、日本原子力研究開発機構(JAEA)が「高速増殖炉サイクル実用化戦略調査研究」(FS)の中で用いたプログラムを使用した。試算に当たっては、以下を満たすことを前提とした。

#### a. 試算方法

##### 1) 試算方法の前提

- i) 所与のFBRの導入開始時期、導入ペースの維持に必要とされるプルトニウム需要を満たすこと。
- ii) 新たに建設する再処理工場の操業期間平均稼働率は80%以上を確保。
- iii) 原子力発電規模は、原則的には総合資源エネルギー調査会需給部会の平成17年報告「2030年のエネルギー需給展望」の最終年度規模を念頭に2030年以降は58GWeで一定。
- iv) 新たな再処理施設では、軽水炉ウラン使用済燃料と軽水炉MOX使用済燃料を少なくとも1:1の割合で混合処理が可能(一部のケースでは軽水炉MOX使用済燃料:軽水炉ウラン使用済燃料=15:85の割合での処理も検討)。

##### 2) 変動させる主な条件

- i) FBRの導入開始時期
- ii) 寿命を全うした軽水炉のFBRによるリプレースの仕方(軽水炉のリプレースの仕方)
- iii) 軽水炉MOX使用済燃料をFBR、軽水炉のいずれの再処理設備で再処理するか
- iv) さらに、原子力発電規模の変化が再処理需要に与える影響の程度を評価するため、原子力発電規模(58GWe～110GWe)

## b. 試算結果

### 1) リファレンスケースにおける再処理需要量

FBR導入開始(2050年)以降に原子力発電設備(58GWe)のリプレイスが必要となった場合、全基をFBRでリプレイスするとした軽水炉のリプレイスの仕方の場合の再処理需要は下記の通りである。

- i) 軽水炉使用済燃料(MOX使用済燃料を含む)は、六ヶ所再処理工場に引き続き2047年から1200tHM/年程度の処理が必要。
- ii) FBR使用済燃料は、2060年に200tHM/年程度の処理が必要で、その後2080年に100tHM/年程度の処理量増加の必要があり、最大規模は600tHM/年程度。

### 2) ゆるやかなケースにおける再処理需要量

FBR導入開始(2050年)以降に原子力発電設備(58GWe)のリプレイスが必要となった場合、電力会社毎に1基のFBRを建設するものの、その後10年間はFBRの運転実績を観測するため追加のFBRによるリプレイスは行わず、その後はリプレイスが必要な全基をFBRでリプレイスするとしたゆるやかな軽水炉のリプレイスの仕方の場合の再処理需要は下記の通りである。

- i) 軽水炉使用済燃料(MOX使用済燃料を含む)は、六ヶ所再処理工場に引き続き2047年から1200tHM/年程度の処理が必要。
- ii) FBR使用済燃料は、2060年に100tHM/年程度の処理が必要で、その後2080年に100tHM/年程度の処理量増加の必要があり、最大規模は500tHM/年程度。

### 3) 多くの試算ケースを包絡する再処理需要とこれからの逸脱ケース

リファレンスケース(原子力発電規模58GWe、FBR導入開始2050年、導入開始以降に寿命を全うした軽水炉を順次FBRにリプレイス等)に対し、試算条件の変化に伴う再処理需要の変化を【別紙 2】「物量・時間スケール試算のまとめ」に示した。試算条件を変化させることにより再処理需要も変化するが、極端なケースを除き、再処理需要は概ね下記の範囲で表される(【別紙 3】「試算条件等の変化をある程度包絡し得る再処理需要とその包絡性」参照)。

- i) 軽水炉使用済燃料は、六ヶ所再処理工場に引き続き2047年から1200tHM/年程度の処理が必要。
- ii) FBR使用済燃料は、FBR導入開始後5～10年に100～200tHM/年程度の処理が必要で、その10～20年後に100～200tHM/年程度の処理量増加の必要があり、最大規模は500～800tHM/年程度。

一方、以下の場合、上述した再処理需要の範囲(処理時期、処理規模)を逸脱する可能性があるため、注意を要する。

- iii) 原子力発電規模が80GWeを超える場合、FBR導入時期が2050年より早まる場合、FBR導入ペースがゆるやかな軽水炉のリプレイスの仕方より遅くなる場合に必要となる軽水炉使用済燃料の再処理需要。
- iv) 原子力発電規模が80GWeを超える場合、FBR導入時期が2065年より遅くなる場合、FBR



導入ペースがゆるやかな軽水炉のリプレースの仕方より遅くなる場合等に必要となるFBR使用済燃料の再処理需要。

(4) 再処理需要に応じた再処理工場の一例

「(3) 物量・時間スケール試算」に示す再処理需要によれば、軽水炉使用済燃料(ウラン燃料及びMOX燃料)は2047年から継続的に1200tHM/年程度の処理が必要であり、FBR使用済燃料は当初再処理需要がなくFBR導入開始後徐々に再処理需要が増加する。このような再処理需要に対応する再処理工場の一例として、物量・時間スケール試算で前提とした軽水炉MOX燃料と軽水炉ウラン燃料の1:1混合処理が可能な再処理工場を仮定すれば、以下のような軽水炉・FBR再処理単一プラントも可能である。

a. 処理開始時期、処理容量、寿命

2047年、1400tHM/年、40年間

b. 処理様態(原子力発電規模58GWe、2050年FBR導入開始、ゆるやかな軽水炉のリプレースの仕方を想定)

- 1) 2047年～2051年の間、軽水炉MOX使用済燃料と軽水炉ウラン使用済燃料を1:1の割合で混合処理。軽水炉MOX使用済燃料の処理終了後、FBR使用済燃料の処理開始までの間(2052～2059年)、軽水炉ウラン使用済燃料のみを処理。
- 2) 2060年～2079年の間、FBR使用済燃料100tHM/年と軽水炉ウラン使用済燃料1300tHM/年を混合処理
- 3) 2080年～2087年までの間、FBR使用済燃料200tHM/年と軽水炉ウラン使用済燃料1200tHM/年を混合処理

上記の軽水炉・FBR再処理単一プラントにより、全操業期間中の平均稼働率80%以上を確保しつつ同期間中に必要となるプルトニウムの需要を満たすことが可能であることから、今後さらに軽水炉・FBR再処理単一プラントや共用化施設に係る検討及びこれに伴い回収されるプルトニウムの混合(プルトニウム同位体組成の平均化)の可能性やその影響に係る検討を深めていく必要がある。

2. FBRサイクル検討に際しての視点追加の必要性について

従来開発の前提とされてきた「FBRの平衡期」の前には、60年以上の期間を有する「軽水炉からFBRへの移行期」が存在する。「軽水炉からFBRへの移行期」においては、膨大な軽水炉及び関連する核燃料サイクル施設等のインフラストラクチャーのストックの存在とその活用、FBR導入初期の軽水炉から後期のFBR中心への再処理需要の移行への対応等、核燃料サイクルが調和・対応しなければならない複雑・困難な事項が存在する。

このため、軽水炉、FBRの混在する期間の核燃料サイクルの検討に際しては、「軽水炉からFBRへの移行期」に係る視点の追加が不可欠である。

JAEAが検討を行った「高速増殖炉サイクル実用化戦略調査研究」(FS)においては、「FBRの平衡期」を念頭に各種の検討が行われてきた。

しかしながら物量・時間スケール試算の結果が示すように、「FBRの平衡期」は現行の軽水炉に引き続き一足飛びに実現するものではない。すなわち、商用第1号FBR導入の直前には、最後に建設された従来型の軽水炉と関連する核燃料サイクル施設等のインフラストラクチャーの膨大な「軽水炉ストック」が存在する。商用第1号FBR導入の直前に建設された原子炉の寿命が60年程度であることを勘案すれば、「FBRの平衡期」は、FBR導入開始後少なくとも60年程度の期間を要することとなる。さらに、商用第1号FBRが運転を開始しても依然軽水炉が並行的に新設される可能性を考慮すると、移行期間はさらに長いものとなると考えられる。

このため現実的には、「FBR平衡期」に至る前の相当長期間にわたる「軽水炉からFBRへの移行期」を前提に検討すべきである。

「軽水炉からFBRへの移行期」の特徴は、膨大な軽水炉ストックの存在、初期の軽水炉中心から後期のFBR中心への再処理需要の移行及び規模の変動、再処理施設の寿命に匹敵する「軽水炉からFBRへの移行期」の長さ、FBR導入時期の不確かさ、「軽水炉からFBRへの移行期」の長さの不確かさ、長い「軽水炉からFBRへの移行期」に起因する将来再処理技術の可能性、である。

このため、核燃料サイクルも「FBRの平衡期」に比べ遙かに複雑で、再処理プロセスの選定も、考慮すべき事項が多く、また、選択肢も多数存在する困難なものである。このような複雑性・困難性と「FBRの平衡期」が今から100年後にしか到来しないとの想定に着目すれば、「FBRの平衡期」の前にある「軽水炉からFBRへの移行期」の核燃料サイクルについて早急に検討が必要である。

このため、次世代の核燃料サイクルの検討に際しては、「軽水炉からFBRへの移行期」に係る視点が不可欠である。

また、「1.(2) c. FBR導入中期より後」に述べたとおり、相当長期にわたり軽水炉とFBRが一定の比率で共存する可能性があり、同期間中に存在し得る全ての発電設備及びサイクル施設の組合せでの経済合理性の観点から、最適な姿を再検討することが不可欠である。

### 3. 第二再処理工場

「第二再処理工場」を、『軽水炉からFBRへの移行期に我が国が必要とする再処理施設』として、この期間に存在する軽水炉及びFBRの2つの核燃料サイクルを一連のものとして検討することが不可欠である。

「第二再処理工場」では、軽水炉とFBR使用済燃料を別々の設備で処理する場合も同一の設備で処理する場合もあり得、FBR使用済燃料の再処理製品を軽水炉にリサイクルする可能性もあるので、各種の可能性について検討を行う必要がある。

平成17年の原子力委員会原子力政策大綱によると、六ヶ所再処理工場の処理能力を超えて発生する使用済燃料の処理の方策は、2010年頃から検討を開始することとされている。これとは別に世間では「第二再処理工場」という表現も用いられる。当該「第二再処理工場」が何を指すかは明確ではない。

「2. FBRサイクル検討に際しての視点追加の必要性について」に記述のとおり、「軽水炉からFBRへの移行期」は「FBRの平衡期」の前に長期にわたり継続する。また、平衡期にも増した対応の複雑

性・困難性も存在する。このため、当研究会では「第二再処理工場」を、『軽水炉からFBRへの移行期に我が国が必要とする再処理施設』と定義し、この期間に存在する軽水炉及びFBRの2つの核燃料サイクルを一連のものとして検討する。

したがって「第二再処理工場」は、FBR、軽水炉及びプルサーマルから発生する使用済燃料を再処理する施設の抽象化された集合で、具体的、物理的な再処理設備としてはFBR由来と軽水炉由来の使用済燃料を別々の設備で処理する場合も、同一の設備で処理する場合もあり得ることとなる。また、製品(ウラン及びウラン・プルトニウム混合製品)は軽水炉またはFBRに供給されることとなるが、FBR使用済燃料の再処理製品を軽水炉にリサイクルする可能性も否定しない。

#### 4. 第二再処理工場で採用すべきプロセスの選定の視点

第二再処理工場で採用すべき再処理プロセスの選定を行うためには、

軽水炉とFBRが全く同じ再処理ラインを共有する

軽水炉とFBRが一部を除き同じ再処理ラインを共有する

軽水炉とFBRが再処理ラインの一部を共用する

軽水炉とFBRが全く異なる再処理ラインを有する(同一サイトまたは別サイト設置)

も念頭におき、各々について再処理プロセスを仮定して得失を評価することが必要である。

第二再処理工場で採用すべき再処理プロセスの選定は、再処理のみの合理性ではなく、軽水炉及びFBRの燃料加工、燃料輸送、放射性廃棄物処理・処分までを含めた「軽水炉からFBRへの移行期」の2つの核燃料サイクル全体の経済合理性から選定されるべきである。また、相当将来に実現される事項を選択することとなることから、不確かな未来や環境変化への柔軟性、核拡散抵抗性等の観点も含め総合的かつ定量的な評価を行うべきである。

一方、第二再処理工場のプロセスの決定は、数次の選定による絞り込みを経るものと考えられる。これらにおいては、選定の基本的視点は同じであっても各視点の重要度や優先順位は選定の進度に応じて変化すべきである。当面はニーズへの適合性、技術的成立性、開発リスクや柔軟性に係る視点が重要である。

「軽水炉からFBRへの移行期」の核燃料サイクルの検討においては、第二再処理工場で採用すべき再処理プロセスの選定が1つの大きな課題となる。

##### (1) 第二再処理工場のバリエーション

第二再処理工場で採用すべき再処理プロセスの選定を行うためには、物理的な第二再処理工場のバリエーションを念頭に、その各々について得失を評価することが必要となる。前述のように、第二再処理工場を軽水炉及びFBRから発生する使用済燃料を再処理する施設の抽象的集合として定義したが、その具体的、物理的な姿については次のようなバリエーションが考えられる。【別紙 4】「第二再処理工場のバリエーション例」参照。

軽水炉とFBRが全く同じ再処理ラインを共有する

軽水炉とFBRが一部を除き同じ再処理ラインを共有する

軽水炉とFBRが再処理ラインの一部を共用する

軽水炉とFBRが全く異なる再処理ラインを有する(同一サイトまたは別サイト設置)

これらバリエーションにおいて、どの再処理ラインが軽水炉またはFBRに製品(ウラン及びウラン・プルトニウム混合製品)を供給するかについても選択肢が存在する。どの選択肢が合理性を持つかは、ラインが採用する再処理プロセスの特性と使用済燃料種毎の再処理需要量、製品需要量及びその経済合理性等に依存する。また、採用する再処理プロセスの選定は、再処理だけでなく濃縮、燃料加工、燃料輸送等の全核燃料サイクルの経済合理性に依るところが大きい。

## (2) プロセス選定の視点

### a. プロセス選定における基本的考え方

第二再処理工場で採用すべき再処理プロセスの選定は、再処理のみの合理性に着目して選定するのではなく、軽水炉及びFBRの燃料加工、燃料輸送、放射性廃棄物処理・処分までを含めた2つの核燃料サイクル全体の経済合理性から選定されるべきである。また、FBR商業炉の導入開始までにまだ相当に時間が必要なこと、「軽水炉からFBRへの移行期」間が相当な期間に及ぶことから、不確かなFBR導入開始時期・導入ペースに対する柔軟性、各プロセスの成熟度と実用化に耐える技術を開発するために要する期間、核拡散抵抗性や社会環境変化への柔軟性等の観点も経済合理性の観点と併せ、総合的かつ定量的な判断を行うべきである。

このような再処理プロセスの選定を取り巻く、考慮すべき事項の総括的関連を【別紙 5】「第二再処理工場検討に係る主なデータフロー」に示す。

プロセスの選定に当たっては再処理プロセスや核燃料サイクルの経済性と併せて、環境負荷低減性、核拡散抵抗性、資源有効利用性等についても念頭におくことが必要である。この際には、どの項目がどの程度重要か、どの項目を優先するか等について考え方を整理することが重要であり、この際には抽象論にとどめることなく可能な限り定量化することが重要である。特に、マイナー・アクチニド(MA)回収・リサイクルについて評価する際には、このような視点が重要となる。

### b. プロセス選定の手順とプロセス選定に係る視点の優先順位

FBR商業炉の導入開始までにまだ相当に時間があり、第二再処理工場もバリエーションによっては再処理プロセスの決定に相当の時間的余裕があることから、この間には原子力やFBRを巡る上述の環境が想定とは異なる可能性もある。このためプロセス選定において一挙に多くの候補から1つのプロセスが決定されるとは考えがたく、プロセス選定が数次にわたって行われ、その度ごとに選定される再処理プロセスの数が減少し絞り込まれ、最終的に第二再処理工場のプロセスが決定されると考える方が自然で、また、その方がその時点での環境を適切に反映することが可能となる。このように考えると、プロセス選定の基本的考え方は同じであっても、選定に際しての視点の重要度や優先順位は数次にわたるプロセス選定の進捗にしたがって変化すべきものとする。

具体的には、当面(～2010年頃)は、当該プロセスが「ニーズに合うか、モノになる見込みがあるか」といった技術的成立性や開発リスクに係る視点が重要であり、また、当該プロセスが不確かな未来に対する柔軟性を有しているか、種々の使用済燃料へ適応可能か、再処理製品や

廃棄物仕様の多様性に対応可能か等の柔軟性に係る視点が重要である。一方、再処理事業実施主体によるプロセス決定時期(早ければ2025年頃)においては、技術的成立性はもとより、経済性や信頼性、社会的受容性に係る視pointsの相対的重要度が高くなると考えられる。

c. 普遍的な視点

- 1) 再処理の開始必要時期に間に合うプロセスか。
- 2) 十分性能・信頼性を保証し得るプロセスか。
- 3) 再処理施設の建設費・運転費は安い。核燃料サイクルコストを最低とするプロセスか。
- 4) 軽水炉への製品供給は合理的に可能か(除染プロセスの追加は合理的に可能か)。
- 5) MA回収・添加プロセスの追加・削除は合理的に可能か。
- 6) FBR導入時期等に係る不確かさに対し柔軟性を有するか。

d. 「軽水炉からFBRへの移行期」の視点追加に関連する視点(移行期の特徴に起因する視点)

「2. FBRサイクル検討に際しての視点追加の必要性について」に示したように、「軽水炉からFBRへの移行期」の最大の特徴は、核燃料サイクル全域にわたる膨大な軽水炉ストックの存在にある。したがって、その段階で既存のこれら資産を最大限に利用し得るような選択を行わないと、仮に再処理コストが最低となるような選択をしたとしても、その他の既存資産ストックを寿命途中で放棄せざるを得なくなったり、追加的な対策コストが必要となり、結果として総合核燃料サイクルコストが上昇し、全体として経済合理性のないものとなる恐れがある。

特にFBR再処理として提案されている再処理プロセスの多くは、低除染プロセスである。このため、FBR再処理の製品を、プルサーマル等を經由して軽水炉に供給する場合に、既存の軽水炉燃料加工施設を利用しようとすれば製品の精製(除染)のための追加コストや、既存の施設を強化するための追加コストが、または燃料加工施設新設のためのコストが発生したりする可能性が高く、注意を要する。

また、「軽水炉からFBRへの移行期」においては、その初期においては再処理需要のほとんどは軽水炉起源であり、これが60年以上をかけてFBR起源のもの中心にシフトしていくこととなる(または軽水炉起源のものにFBR起源のものが加わり増加することとなる)。このため、軽水炉、FBRの専用工場を各々建設すれば建設費が増加するのに加え施設の寿命稼働率は低下しかねず、一方1つの再処理施設で両者を手当てしようとするれば、運転開始当初は軽水炉使用済燃料を、後半はFBR使用済燃料を処理するプロセス設計上の困難が発生する。

さらに、「軽水炉からFBRへの移行期」間の60年という期間が再処理施設の寿命とほぼ等しい点も再処理プロセスの選択を複雑なものとする。具体的には、例えば軽水炉とFBRで各々別の再処理施設を建設する場合では、軽水炉用施設をまず建設し、移行期間が相当期間経過した後FBR用施設を建設する等といった時間差をもった建設計画も選択肢となり得る。

このような可能性のある多岐にわたる選択肢をまず列挙し、その各々について物量、必要とされる再処理規模と処理時期、増量の規模とそれまでの期間、施設の寿命稼働率等の観点から優劣を評価し、その上で各々の選択肢において採用可能な再処理プロセスを核燃料サイクル全体の合理性から選定していくことが適切である。

e. 不確かな未来に対する柔軟性の視点

現在六ヶ所再処理工場が操業開始の直前の段階にある。このため、これに続く再処理施設の操業開始には40年間程度の時間的余裕が存在する。さらに「軽水炉からFBRへの移行期」間をも考慮すると、100年に及ぶ将来を予測することは概数であったとしても不可能なことから致し方ないものの、現時点で考える将来の社会環境の変化が原子力産業に与える影響を先見的に検討し、再処理プロセス選定の際にはこれらの変動に対する対応可能性をプロセスの柔軟性の一つとして併せて評価しておく必要がある。また、各再処理プロセスの成熟に要する期間は様々であり、必要とされる時期の変動に応じて適切な対応が可能ないように選択肢を用意しておくとの考え方が重要である。

f. 核拡散抵抗性に関する視点

世界で唯一の非核兵器国で商業用再処理施設を有する我が国に対する信頼性を維持し、FBR路線を維持してゆくために、核拡散抵抗性に関し我が国自らが世界をリードすることが不可欠であり、このためには、核拡散抵抗性の考え方、具体的評価方策を体系的に用意することが必要である。

すなわち、「核拡散抵抗性」を抽象的な概念に止めず、少なくとも技術的に何を担保しておけば、どの程度の核拡散抵抗性を確保することが可能かを定量的に整理し、核燃料サイクルコスト及び技術開発の難易度を、抽象的な言葉だけの核拡散抵抗性の向上と混乱して議論することのないよう努めるべきであり、原子炉及び再処理・燃料加工技術の開発者と核不拡散の専門家の連携した取り組みが必要である。

再処理プロセスの選定に際しても、プロセスが持つ固有の当該性格を技術的かつ定量的に評価する必要がある。

5. 第二再処理工場の具体的イメージ例

第二再処理工場のイメージの具体化を図っていく上で、軽水炉とFBRの再処理ラインの共用化は重要な検討項目の一つであり、共用化に係る利害得失を、再処理だけでなく濃縮、燃料加工、廃棄物処理・処分等の全核燃料サイクルの経済合理性の観点から比較検討しておくことが重要である。

また、第二再処理工場のイメージの具体化を図っていく上で、回収ウランの再濃縮利用やMA回収・リサイクルなどの特定要件についても考慮しておく必要がある。

(1) 共用化に係る認識

一般的には、軽水炉及びFBRの再処理ラインの共用化の度合いが多くなるに従いプラントの建設費が低減するものと考えられる。また、共用化を行う場合でも試薬やユーティリティーなど共通性が高いプロセスを組み合わせた場合には、建設費に加え運転費も低減し得るものと考えられる。このため、共用を行わない場合や共通性の低いプロセスを組み合わせる場合にあっては、経済合理性の検証を十分に行うことや、当該組み合わせによるメリットが経済合理性の低下を補って余りあることの検証を十分に行う必要がある。

## (2) 第二再処理工場における再処理ラインの共用化に対応したプラントイメージ

「1.(4)再処理需要に応じた再処理工場の一例」では各種使用済燃料の再処理を行う軽水炉・FBR再処理単一プラントにより軽水炉からFBRへの移行のために必要となるプルトニウムの需要を満たすことが可能であることを示し、これを踏まえ、「4.(1)第二再処理工場のバリエーション」では軽水炉とFBRの再処理ラインの共用化に係るバリエーションを示した。これらの検討を踏まえつつ、特定の再処理需要と共用化のバリエーションを想定した場合に、採用される可能性のあるプロセスを【別紙 6】「第二再処理工場のバリエーション毎の採用可能性が高いと考えられるプロセス」に整理した。これらのバリエーションのうち、各種使用済燃料の再処理需要に対応したバリエーション3の共用化再処理工場は、その他のバリエーションに比べプラント建設費が最も安くなると推定されることから有望な選択肢と考えられる。

一方、FBRサイクルにおける再処理は、FBRへ燃料を供給するというフロントエンドとしての性格も有している。したがって、第二再処理工場の共用化に係るバリエーションを検討するに当たっては、FBR燃料の安定供給性やその冗長性の確保という観点からの検討も不可欠である。

これらを踏まえ、今後、プラント建設費のみならず「1.あり得べき原子力の将来像」で示唆された再処理需要の時間的变化を念頭に置きつつ、物理的な設備の共用化に係る技術的成立性や共用化に伴う設備稼働率への影響の有無、共用化に伴い生じる可能性のある製品や廃棄物の混合の影響、製品の安定供給性等について、再処理だけでなく濃縮、燃料加工、廃棄物処理・処分等の核燃料サイクル全体を対象としてさらに検討を深めていくことが重要である。

## (3) 第二再処理工場に係る特定要件

第二再処理工場の具体化に当たって、回収ウランの再濃縮利用やMA回収・リサイクルについても考えておく必要がある。

### a. 回収ウランの再濃縮利用

回収ウランを再濃縮して軽水炉で利用するためには、転換、濃縮、再転換、燃料加工といった処理を施す必要があり、これらの処理を行うに際しては、既存の技術や施設を利用することが効率的である。そこで、既存の技術や施設を利用して回収ウランを取り扱うとした場合に必要となる回収ウランの除染係数を、以下の様に求めた。なお、現時点で国内に転換施設はなく、濃縮施設も回収ウランを扱う施設はないためこれらの施設の立地・設計条件について具体的な想定が困難であることから、施設の周辺環境への線量に係る検討の対象外とした。

回収ウランを再濃縮して軽水炉で利用するに際して、回収ウランの除染係数を $10^2$ まで下げたとしても、原子炉の中性子経済や炉心の安全性に与える影響は無視できる。また、回収ウランを再濃縮した新燃料を輸送容器から取り出した後は、基本的に新燃料を水遮へい下で取り扱うことができるので、回収ウランの除染係数に係る制約はない。

回収ウランの転換、濃縮、再転換、燃料加工といった各作業時における作業者の被ばくを制限するために回収ウランに必要とされる除染係数は、転換、濃縮、再転換作業に対して約 $10^5$ 、燃料加工作業に対して約 $10^6 \sim 10^7$ と見積もられた。また、施設の周辺環境への線量に係る制約から、回収ウランに必要とされる除染係数は約 $10^6$ と見積もられた。一方、原料中の許容不純物濃度という観点からは、ASTM(米国材料試験協会)の基準に基づけば、回収ウランの除染係数

に与える影響が最も厳しい化学種はモリブデンとルテニウムであり、これらの化学種に対して必要となる回収ウランの除染係数は約 $4 \times 10^3$ であった。したがって、燃料加工施設の作業者の被ばくに係る制約が最も厳しいが、転換工程におけるウラン酸化物のフッ化過程において約 $10^2$ の除染係数が見込まれることから、再処理工場が必要となる回収ウランの除染係数は約 $10^5$ であることが分かった。

回収ウランの再濃縮利用に係る経済合理性について天然ウランを利用する場合と比較した結果、最近のウラン精鉱価格及び濃縮役務価格の水準であれば、約0.8wt%以上の残留濃縮度の場合には回収ウランの再濃縮利用が天然ウランの利用より安いとの一応の目途を得た。このため回収ウランの再濃縮利用を行う場合の廃棄物処分費の上昇や、軽水炉ウラン燃料とそれ以外の残留濃縮度の低い燃料との混合処理による回収ウランの濃縮度価値の低下、回収ウランの再濃縮を行わない場合のFBR燃料や軽水炉MOX燃料母材への利用も含め、核燃料サイクル全体としての経済合理性について今後さらに検討を深める必要がある。

#### b. MA回収・リサイクル

MAを回収・リサイクルすることにより、ガラス固化体の放射性毒性を大幅に低減できるとともに、ガラス固化体の発生本数や処分場占有面積を低減可能であり、環境負荷の低減という観点から大きな利点がある。一方、MAを回収・リサイクルするためには、新たにMA元素を分離する必要性が生じる他、燃料加工という観点からは関連設備のセル内設置・遠隔操作化が必要になる等の新たな開発課題も生じてくる。このため、MA回収・リサイクルに係る利点や課題を把握するため、均質炉心を用いてMAを回収・リサイクルする場合を対象に検討を行った。

FBR炉心の成立性については、炉心燃料仕様の改良等を行えば炉心の成立性が見込める範囲にあるものの、ナトリウムボイド反応度の増加やMAの壊変によるヘリウムガス発生に起因する内圧上昇への対応といった課題がある。

MA元素の分離については、ネプツニウムはリン酸トリブチル(TBP)で回収可能であるが、アメリシウム、キュリウムはTBPでは回収できないため新たに溶媒が必要である。MAとの分離が難しいランタニド元素とMAとの分離も含め、開発中の各種溶媒により原理的にはMA回収が可能な見通しが得られつつあるが、更なる技術開発が必要である。

燃料加工時の被ばくの観点からは、現行の高除染燃料にネプツニウムを添加する場合はグローブボックス内で製造可能と見込め、ネプツニウムとアメリシウムを添加する場合にはこれらMAの回収の高除染化に加え機器の自動化・高信頼性化を進めることでグローブボックス内製造の可能性があるが、全MA(ネプツニウム+アメリシウム+キュリウム)を添加する場合は燃料加工設備をセル内に設置し遠隔操作化する必要がある。燃料加工性の観点からは、何れの場合も簡素化ペレット法の採用や冷却設備の付加を通して技術的に対応可能な見通しであるものの、MAの発熱に起因する添加剤劣化、燃料粉酸化、被覆管酸化などの検討課題がある。

環境負荷の観点からは、全MAを99.9%回収・リサイクルした場合の1000年後のガラス固化体中の放射性毒性は回収・リサイクルしない場合の1%以下と大幅な低減が可能となるが、ネプツニウムのみ回収・リサイクルやネプツニウムとアメリシウムの回収・リサイクルでは放射性毒性の低減効果は少ない。さらに、ガラス固化体中の廃棄物含有率が現行と同様との前提に立



てばガラス固化体の発生本数は、全MAを回収・リサイクルする場合、軽水炉ウラン使用済燃料で約10%、軽水炉MOX使用済燃料で約50%が低減されるが、FBR使用済燃料では殆ど低減しない。ガラス固化体の処分場占有面積はネプツニウムのみ回収・リサイクルでは低減効果はないが、ネプツニウムとアメリカシウムの回収・リサイクルや全MAの回収・リサイクルでは、軽水炉ウラン使用済燃料で約15%、軽水炉MOX使用済燃料及びFBR使用済燃料で約50%の低減が図られる。ただし、固化体から放出されたMAはほとんど移動しないため処分場からの被ばくは、核分裂生成物(FP)による被ばくの寄与が支配的でMAを回収・リサイクルすることによる低減効果は少ない。上記をもとに処分コストと燃料加工の観点から今後の開発目標を考察すると、高除染燃料をグローブボックス内で加工する場合にはネプツニウムとアメリカシウムを高い除染係数で回収・リサイクルすることが、低除染燃料をセル内で加工する場合には全MAを回収・リサイクルすることが、合理的な開発目標となり得る。

また、放射性廃棄物の処分を含んだ核燃料サイクル全体の粗々のコスト評価を実施した結果、MA回収・リサイクルを実施することにより極端なコスト増とはならないとの一応の目処を得たが、さらに詳細な評価が必要である。

上述の検討結果は、均質炉心を用いたMA回収・リサイクルに対するものであるが、これとは別に、MA回収・リサイクルの進め方にも選択肢がある。具体的には、国内全てのFBRに対してMA入り均質燃料を用いる選択肢とMA入り非均質燃料を用いる選択肢があり、さらに、国内の一部のFBRに対してMA入り均質燃料を用いる選択肢とMA入り非均質燃料を用いる選択肢がある。概ね、この順に燃料中のMA濃度が上昇していくと考えられ、FBR炉心や燃料加工における技術的成立性が困難になっていくと考えられる。しかし、どの程度まで技術的成立性が見込まれるか、その限界について検討を行う必要がある。また、ガラス固化体へのFP添加量を増加可能な高減容化技術やキュリウムを減衰させた後MAを回収・リサイクルするというMA遅延リサイクルに係る検討も今後必要になる。

以上のように、MA回収・リサイクルについては検討課題が多数残されている。このため、MA回収・リサイクルに係る議論を抽象的段階にとどめるのではなく、最適なMA回収・リサイクル方法を選定するための定量性を持った検討を早急に実施した上で、核燃料サイクル開発戦略に具体的に組み入れることが重要である。

## 6. 再処理プロセスの選定に向けた準備

第二再処理工場に関する再処理プロセスの選定は、2010年頃からの原子力委員会の検討の一部としてなされるものと考えられるが、それまでに必要な情報の整備・整理を行う必要がある。

情報の整備・整理に際しては、多様な再処理プロセスの特性把握・理解を可能とする体系化したプロファイルにより統一的に評価することが重要なことから、【別紙 7】「再処理プロセスプロファイルの書式」を提案した。

プロファイル上の情報は、最終的なプロセス決定までに全ての情報が明らかとなることが望まれるが、途中過程にあっては、分からないまたは確認が必要な部分が特定され、将来の研究開発・調査計画に結び付けられることがより重要である。

第二再処理工場に関する再処理プロセスの選定は、2010年頃からの原子力委員会の検討の一部としてなされるものと考えられる。それまでに、再処理プロセスの選定の検討に必要な情報の整備・整理を行っておく必要がある。

情報の整備・整理に際しては、今までに提案された種々の再処理プロセスから我が国に適した再処理プロセスが選定できるよう、再処理プロセスの特性を把握・理解することを可能とする体系化したプロファイルを用意し、統一的な評価を可能とすることが重要である。かかるプロファイルの整備により、情報が欠落しているまたは定かではない部分を常に明らかにしておくことが可能となることから、研究開発や調査を行うべき分野の特定や研究開発計画の策定に際しても不可欠である。

プロファイルのデザインに際しては、研究開発の進捗状況については【別紙 8】「研究開発の進め方、役割分担、進捗度の判断等」に際して念頭におくべき再処理プロセスの実用化に必要な分野・領域」に記述した研究開発の分野や研究開発の段階を意識しつつ、「4. (2) プロセス選定の視点」に記述した軽水炉及びFBRの2つの核燃料サイクル全体の経済合理性等に関する特徴が明確となるよう設計しなければならない。

### (1) 再処理プロセスプロファイルの書式

上記を踏まえ、現段階の「再処理プロセスプロファイルの書式」を【別紙 7】に記載する。

### (2) 再処理プロセスプロファイル記載・整備の留意点

プロファイル上の情報は、プロセス決定が行われる最終的な段階では、全ての情報が記載され明らかとなっていることが望まれる。しかしながら、それまでの途中過程にあっては、明らかになった情報よりも、分からない又は確認が必要な部分がより重要性を持つ。すなわち、分かっている部分がない部分が特定できればその点を研究開発・調査すれば良いのであって、なまじ明確でないことを判明した事実であるように整理すること、類推を事実であるかのように整理すること等により、確認された事実とそれ以外を紛れさせることは、その後の研究開発・調査の妨げとなるので、不適切である。

また特に、特定の再処理プロセスの研究開発当事者が当該研究の課題、見通し等を整理する場合には、ピアレビュー等のクロスチェックを有効に活用しないと、客観性に問題が生じやすいこ

とも留意する必要がある。

## 7. 再処理プロセスプロファイル

国内外で提案されている11の再処理プロセス及び3の燃料加工プロセスを、プロファイルの対象とした。また、再処理プロセスを対象に研究開発の進捗度や個々の技術の成立性・柔軟性等に関する共通認識を整理した。これらは、研究開発・調査の進展、第二再処理工場の検討の進展に応じ適宜見直していくべきものであり、当面、2010年頃からの原子力委員会での議論に供せるよう用意しておくことが重要である。

### (1) 再処理プロセスプロファイル

再処理プロセスについては、大容量処理に適しており六ヶ所再処理工場の知見を活かせる範囲が広い湿式法再処理プロセスをプロファイルの対象とし、実用化されている「PUREX法」に加えて、現在提案・研究開発されている10(合計11)の再処理プロセス(コプロセッシング法、先進湿式法、モノアミド法、FLUOREX法、NCP沈殿法、超臨界直接抽出法、イオン交換法、海外技術としてCOEX法、UREX+法、GANEX法)を対象とした。なお、軽水炉と同様にFBRにも酸化物燃料が用いられると想定したことから、金属燃料用の再処理技術として国内で研究開発が進められている金属電解法は検討対象外とした。

また、燃料加工プロセスについては、粉末混合法としてMIMAS法(2段混合法)、JAEA法(1段混合法)及び溶液混合法として簡素化ペレット法をプロファイルの対象とした。

プロファイルは、今後の研究開発・調査の進展によりこれまで不確かであった情報に新たな知見が加わったり、プロセスそのものの改良が図られるなど内容が変化することが考えられる。また、プロファイルの書式についても、第二再処理工場の検討の進展に応じて、新たな側面での評価が必要となったり、既存の評価側面が不要となったりすることも考えられる。したがって2010年頃からの原子力委員会での議論が開始される頃までに、それまでの研究開発や第二再処理工場の検討の進捗を踏まえ、プロファイルの内容をその時点で完成したものとするはもとよりその書式についても見直して行くことが重要である。また、海外技術については、継続して情報収集、文献調査等を実施していくことが必要である。

### (2) プロセスの概要

再処理プロセスを対象に、研究開発の進捗度や個々の技術の成立性・柔軟性に関して議論を行い、得られた当研究会の共通認識を基に各再処理プロセスの特徴と評価を総括し、【別紙 9】「各再処理プロセスに関する評価の概要」に示した。

研究開発進捗度が高いものはPUREX法、COEX法、コプロセッシング法であり、続いて先進湿式法、UREX+法、モノアミド法であり、基礎領域の研究開発段階にあるものはFLUOREX法、NCP沈殿法、超臨界直接抽出法、イオン交換法、GANEX法である。

## 8. 2010年頃までになすべき事項

原子力委員会での検討が開始される2010年頃までに実施すべき技術的事項の重点を特定するためにプロセス選定の試行を行い、当該プロセスが選定されない理由を特定することにより、2010年頃までに調査しておくべき重要な項目を整理した。

また、再処理プロセスの研究開発戦略上重要な核燃料サイクルの将来像の想定に必須となるFBRの導入シナリオの精査や、第二再処理工場のプラントイメージの具体化に係る検討、そのプラントイメージに適するプロセス・機器の選定を行う上で必要となる経済性評価手法の検討、再処理プロセス選定や研究開発ロードマップの作成を進めていくことが重要である。

### (1) 再処理プロセスプロファイルから得られた必要調査事項

#### a. プロセス技術の調査

再処理プロセスプロファイルにより、現段階では十分な情報が獲得されていない事項を特定した。また、2010年頃から行われるであろう原子力委員会での技術的検討を想定してプロセス選定の試行を実施し、2010年頃までに整備すべき情報のプライオリティを整理した。

プロセス選定の試行に際しては、当該プロセスが選定されないと仮定し、その際の理由を特定することにより、これを2010年頃までに調査しておくべき重要な事項とした。

また、プロセス選定の試行においては、当面(～2010年頃)重要性を持つと考えられる視点、すなわち、当該プロセスが「ニーズに合うか、モノになる見込みがあるか」といった技術的成立性や開発リスクに係る視点、また、当該プロセスが、不確かな未来に対する柔軟性を有しているか、種々の使用済燃料へ適応可能か、再処理製品や廃棄物仕様の多様性に適用可能か等、柔軟性に係る視点を重視した。各研究開発機関においては、課題の成立性等を早期に見極めるべく、適切な研究開発の加速が必要である。

なお、整理に当たっては、個々のプロセス内での重要課題が抽出されたにとどまり、重要な課題のプロセス間での比較は行われていないことに留意する必要がある。

#### b. 各プロセス開発を進めていく上での特記事項

各プロセス開発を進めていく上で、特に留意すべき事項を以下に特記した。

##### 1) コプロセッシング法

コプロセッシング法は、核拡散抵抗性の向上を目指して、ウランの一部を常にプルトニウムに同伴させるようPUREX法を改良したプロセスであり、第二再処理工場用の最も有力な候補プロセスとして開発を進めておくべき技術である。

プルトニウムに特定割合のウランを安定的に混入させるためには、PUREX法に比べ許容される運転条件幅が狭くなることが判っており、工学レベルでのプロセス設計に向けて、運転条件の許容変動幅の把握やこれを可能とするプロセス制御の成立性を見極めていくことが重要である。

## 2) 先進湿式法開発<sup>2</sup>

先進湿式法は晶析法と簡素化溶媒抽出法を組み合わせたプロセスである。使用済燃料を高濃度で溶解した後に溶解液を冷却することにより多くのウランを結晶として取り除くことで、後段の溶媒抽出に必要な設備容量を小型化・低コスト化しようというものであり、核拡散抵抗性も高く現在最大の開発投資がなされている。先進湿式法は、「FBRの平衡期」を念頭にFBR再処理用に開発されているもので、「軽水炉からFBRへの移行期」において軽水炉再処理に適用するのは困難な特性を有している。他方、「1.(4)再処理需要に応じた再処理工場の一例」に示した軽水炉・FBR再処理単一プラントのプロセスとしてはコプロセッシング法がその実用化時期も含めて有望であることに着目すれば、これとは極めて融合性の高い特性も有している。また同時に、軽水炉・FBR再処理単一プラントが2090年頃までのFBR再処理需要に対応が可能であるとすると、「2090年頃なら先進湿式法以外のプロセスが利用可能」との意見も合理性を有する。

以上を勘案すると、先進湿式法開発に今後も最大の開発投資を継続するのであれば、他のプロセスにも増した核燃料サイクル全体としての以下のような合理性の検証及び開発の合理性が必要とされる。

- i) 晶析法により低除染で粗回収されるウラン製品の利用方法を含めた核燃料サイクルシステムの有効性・合理性の再検討又は回収ウランを利用しないことの核燃料サイクルシステムとしての合理性検証。
- ii) 先進湿式法を採用した第二再処理工場から回収されるウラン及びウラン・プルトニウム混合製品を軽水炉へ供給するとした場合の核燃料サイクルシステムとしての有効性・合理性の検討。
- iii) 移行期の軽水炉・FBRの2つの核燃料サイクルにおける先進湿式法の経済合理性の検討。
- iv) 【別紙 8】「研究開発の進め方、役割分担、進捗度の判断等に際して念頭におくべき再処理プロセスの実用化に必要な分野・領域」を念頭においた上で、特に多額の資金が必要となる機器開発分野での、メーカーと開発機関との役割分担、機器開発が不可欠となる時期、開発ハードルの高さ、開発に必要な予算、に応じた重点化計画の策定。
- v) FBR再処理を困難とするラッパ管、ラッピングワイア等の燃料集合体構造に係る原子炉開発サイドとの調整及び核燃料サイクルの観点からの均質・非均質炉心の合理性。さらに、軽水炉・FBRの2つの炉型及び核燃料サイクルにおけるFBR増殖比のあり方に関する合理性検討。
- vi) 晶析法のプロセスの成立性
- vii) 先進湿式法を用いたブロックフロー及びプラントの全体概念の確立
- viii) プラント保守思想の再検証、開発機器とプラント保守思想との整合性の再検証及び

<sup>2</sup> 先進湿式法開発の中には「先進湿式法」で必要とする晶析法や簡素化溶媒抽出法のプロセス開発に加え前処理工程機器や遠心抽出器等の関連技術開発も併せて行われており、ここでは先進湿式法開発として行われている一連の技術開発を対象に記述している。

潜在的ユーザーによるプラント保守思想の認証手段の検討。

### 3) FLUOREX法

FLUOREX法はフッ化工程の調整により後段のウラン・プルトニウム比を広い範囲で任意に調整でき、フッ化工程の原理は転換等の原子力分野で既に実用に供されている等のメリットを有する。一方でFLUOREX法は軽水炉燃料への適用を念頭に開発が行われた経緯から、FBRへの適用は余り検討されていない。しかしながら、FLUOREX法からPUREX法部分を削除してもFBR用のプロセスとしては成立する蓋然性が高く、本来の軽水炉用としての性格と併せて「軽水炉からFBRへの移行期」のプロセスとしての適合可能性が高いと考えられる。

以上を勘案すると、以下の検討が望まれる。

- i) FLUOREX法はフッ化プロセスと湿式プロセスを組み合わせたものであり工程の複雑化・高コスト化も懸念されることから、経済合理性の検討を優先して行う必要がある。
- ii) 同法はウランを $UF_6$ として回収することからウランの再濃縮利用に適するという利点を持つが、「軽水炉からFBRへの移行期」における再処理技術として、回収ウランを直接、MOXの母材原料として用いる選択肢も存在することから、回収ウランを再濃縮利用すること及びPUREX法と組み合わせることの合理性を検証していく必要がある。
- iii) FLUOREX法の一部であるフッ化工程のFBRサイクルへの適用の可能性と経済合理性。
- iv) 使用済燃料の粉体化を含むプロセス研究開発に係るロードマップの作成。

### 4) 超臨界直接抽出法

超臨界直接抽出法は、この研究開発に成功した場合、再処理の工程及び工程時間を劇的に簡素化、短縮できる可能性を有している。超臨界直接抽出法の至近の最大の課題は、非原子力分野での類似の研究開発実績が存在するものの、粉体を直接抽出塔に投入する際の高圧シールにある。また、現在の超臨界直接抽出法の研究開発範囲には入っていない使用済燃料の粉体化も大きな課題である。

このため、高圧使用条件下での装置のシール方法の成立性を見極めを優先して行いつつ使用済燃料の粉体化も含めたプロセス開発に係るロードマップを作成することが望まれる。

### 5) その他の基礎研究

実用化までの時間の長さや、その間での飛躍的なブレイクスルーの可能性、技術開発に成功したときのメリットの大きさを考慮し、必要に応じ基礎的な研究も実施することが重要である。

例えば、モノアミド法はTBPIに代わる抽出剤として利用可能であり新たな機器開発を要しないという利点を有していることから、基礎的な研究を着実に進めるべきである。

## (2) 今次の検討を通して得られた必要調査事項

本報告では、「軽水炉からFBRへの移行期」の重要性、プルサーマル再開の蓋然性、軽水炉・FBR再処理プロセスの共用化の重要性、軽水炉・FBR再処理単一プラントの可能性、軽水炉・FBR共存の可能性、等、従来の概念にはなかったいくつかの視点を提示した。また、検討を通じて、プルトニウム高次化等のマルチリサイクル上の制約に係る検討をはじめとする原子炉側と

核燃料サイクル側の基礎的概念の協調や軽水炉運用側とFBR研究開発側の協調等において、研究開発関係者間・研究開発関係者と研究開発成果利用者間・研究開発成果利用者間のそれぞれに連携の不足も確認された。これらの事項は、何れも核燃料サイクル開発の方向性を決定する基礎基盤部分に相当することから、この検討を不十分なまま研究開発の方向性を決定すると、研究開発が完成しても成果は現実の社会的・産業的要求から乖離し、利用価値の低いものとなる。

研究開発成果を利用価値の低いものとしないうためには、その技術が採用されるであろうプラント像に適合した技術を開発することが重要であり、そのプラント像は求められる核燃料サイクル像と適合したものである必要があり、核燃料サイクル像は将来想定される原子力発電を巡る社会環境や原子力発電産業環境に適合したものである必要がある。したがって、核燃料サイクルや再処理に係る研究開発以前の問題として、将来の原子力を取り巻く環境や原子力発電規模、FBR導入ペース等に係る基本的な将来像をどう想定し、想定した将来像が再処理技術や核燃料サイクル技術に何を求めるかを見極めた上で、これをいかに実現していくかといった基本的な開発戦略をしっかりと検討し確固たるものとした上で、各研究開発の方向性や研究開発の内容、研究開発の目標を定めることが不可欠である。また、このような各研究開発の方向性や研究開発の内容、研究開発の目標を恒常的に検証し認証を与え、実際の研究開発が細部にわたりこれらと整合していることを確認していくことが重要である。

このような実効ある開発戦略策定のためには、将来の核燃料サイクル像の想定に必須となるFBRの導入シナリオの想定と係る想定が再処理や核燃料サイクル技術に何を求めるかの想定が極めて重要であり、早期に精査しておく必要がある。また、「軽水炉からFBRへの移行期」の視点から見た第二再処理工場のプラントイメージの具体化に係る検討や、そのプラントイメージに適するプロセス・機器の選定を行う上で必要となる経済性評価手法の検討を進めていくことも重要である。

#### a. FBR導入シナリオの精査

##### 1) 「軽水炉からFBRへの移行期」の姿の再検討

- i) FBRで生産したプルトニウムの軽水炉での利用に係る経済合理性評価。
- ii) FBRと軽水炉の共存を想定したマルチリサイクルにおけるプルトニウム組成変化とマルチリサイクルの技術的成立性の評価。
- iii) MA回収・リサイクルの採否を判断するために必要な情報の拡充と経済性再評価。

##### 2) FBR導入中期から後の姿の検討

FBR単一サイクル、FBR・プルサーマル共存サイクルの原子炉・核燃料サイクル全体の経済性比較評価。

#### b. 軽水炉・FBR再処理単一プラントの成立性検討

「1.(4)再処理需要に応じた再処理工場の一例」では、軽水炉ウラン燃料とMOX燃料を1:1で処理できる主工程を持ったプラントを六ヶ所再処理工場に引き続くものとして仮定すると、この施設の寿命中の2090年頃までのFBR再処理需要にも対応できる可能性があることを示した(FBR再処理用の前処理部分の付加等は必要)。かかる構想は、「軽水炉からFBRへの移行期」における再処理需要の軽水炉からFBRへの移行、既存の核燃料サイクルインフラの経済合理性の観点からは極めて望ましいものといえる。しかしながら、係る構想はあくまでも物量・時間ス

ケールの観点からのみの検討であり、プルトニウムの高次化や軽水炉における中性子経済、FBR燃料の製造可能性、これらの対応を考慮してのFBRコア・ブランケット分離処理等の対策とその成立性までを検証したものではない。

このため、このような軽水炉・FBR再処理単一プラントの詳細な技術的成立性について早急に検討する必要がある。

c. 第二再処理工場のプラントイメージの具体化

「軽水炉からFBRへの移行期」の視点から見た第二再処理工場のあるべき姿については、軽水炉とFBRの再処理需要(時期や規模)、これらの両需要を軽水炉・FBR再処理単一プラントで実現することによりプラント建設費を安くできる可能性があること、共用化を行う事により回収されるウランやプルトニウムの同位体組成及び放射性廃液組成が平均化される可能性とその影響、核燃料サイクル全体の経済合理性等に係る検討を踏まえつつ、これを具体化するためのプラントイメージに係る検討を深めていく必要がある。

d. 経済性試算の強化

2010年頃のプロセス選定及びその前提となる軽水炉サイクル及びFBRサイクルの経済合理性評価を行うため、経済性試算能力を高めておくことが必要である。この際、候補プロセス毎に試算手法が統一されていることは勿論のことであるが、試算結果の絶対値的正確性より相対的な優劣度合い(比率)を、ウラン価格やプラント建設・運転に必要な物量等をパラメータとした数式的な相対比較として可能とすることが重要である。

(3) 再処理プロセス選定のロードマップ及び研究開発ロードマップの作成

再処理プロセス選定や研究開発には、項目間に例えば項目Bの前に項目Aが分らないと選定や研究開発が進められないといった従属関係が存在する。この項目間の従属関係を明らかにすることにより選定や研究開発の合理化が可能となる。また、研究開発においては、ピーカーレベル(化学メカニズムとしての再処理プロセス設計)から工学レベル(工業化技術としての再処理プロセス設計)へのステップアップ、工学レベルから実証レベルへのステップアップといった大きな節目が存在するとともにより小さな多数の節目が存在し、その節目毎に研究開発の力点が異なったり、必要とされる研究開発費が拡大する性格を有している。

このため、再処理プロセス選定と研究開発の両者について、係る大小の節目をマイルストーンとして定め、何が分かった段階で次の段階に進める等をロードマップとして予め整理する必要がある。なお、研究開発ロードマップの作成に当たっては、2007年4月に五者協議会にて合意された「高速増殖炉の実証ステップとそれに至るまでの研究開発プロセスのあり方に関する中間論点整理」とスケジュール上の整合性を十分に踏まえる必要がある。

9. 情報整備の実施における留意点

各プロセスに共通する課題を重複して研究開発することは無駄が多く、第二再処理工場に係る全ての研究開発を鳥瞰し研究開発者間で適切な役割分担を調整する仕組みが必要である。



「8.(1)a. プロセス技術の調査」を通して、不溶解残渣の性状把握やその除去、遠心抽出器の保守・信頼性向上、ガラス固化設備改良、燃焼計算コード改良、環境負荷低減など、各再処理プロセスに共通の課題が存在していることが判った。各プロセスは、ウラン・プルトニウムの分離方法が異なるもののその前後の工程は共通である場合があり、こうした前後の工程の課題は各プロセスに跨る共通の課題となる。また、プロセスは異なるものの使用する機器が共通である場合、この機器開発の課題を共有することになる。

今後、第二再処理工場に係る全ての研究開発を鳥瞰し研究開発者間での適切な役割分担を調整する仕組が重複の排除と研究開発の効率の観点から望まれる。

## 10. 国際協力

再処理をはじめとする核燃料サイクルの研究開発は、長期の期間と多額の経費を費やしても建設される再処理施設が全世界でも限られ、プラントメーカーの立場からは研究開発投資の回収が困難であるという特性を有する。

我が国においても、国家予算の制約や実用プラントとしての信頼性向上等への寄与等を踏まえ、我が国の研究開発成果やその蓄積の正当な評価、その効果的・効率的な実用化への貢献を前提に国際協力を追求すべきである。

その推進に当たっては、我が国にとってメリットのある国際協力であるか否かの主体的判断に基づく、有益な国際協力関係を構築するというオプションを持つことが重要であり、また、そのオプションを模索するための我が国を代表する主体の存在が不可欠である。

平成18年、米国は原子力エネルギーの世界的な活用の促進、これに伴う燃料供給保証と核拡散防止の両立を目指した国際的協力枠組み「GNEP(Global Nuclear Energy Partnership)」を提案した。我が国は、米国との間で日米原子力エネルギー共同行動計画を策定するなど、これを積極的に支援しているところである。

米国がこのような原子力関係施設に関する研究開発を国際協力の下で進める背景には、高速炉をはじめとした原子力の技術開発は長期の研究開発期間と多額の研究開発費が必要とされることがある。特に再処理をはじめとする核燃料サイクル分野の研究開発では、長期の期間と多額の経費を費やしても、建設される再処理施設は全世界でも数サイトに限られ、プラントメーカーの立場からは研究開発投資の回収が原子炉に比べて困難であるという特性を有する。こうしたことから、仏国をはじめとする他の原子力平和利用技術を有する国々も、国際的な共同研究開発についても不可欠な研究開発オプションとして追求している。平成19年9月のGNEP閣僚級会合の下で採択された「原則に関する声明」も、こうした考えを含むものである。

我が国においても、FBR及びFBRに伴う再処理等核燃料サイクルに関する研究開発に要する費用についての国家予算としての制約や、実用プラントとしての信頼性向上に大きく寄与する要素技術やエンジニアリングの国際標準化の要請を踏まえると、我が国の研究開発成果やその蓄積の正当な評価を前提に必要な国際協力を推進することが必要である。

国際協力を進めるに当たっては、関係国・関係者間で相互に利益を享受できることが不可欠である。当該研究会での検討等を踏まえた我が国の核燃料サイクル関連技術の保有状況の把握、他国の技術保有状況の把握と協力することの互惠性の判断、他国との協力による技術課題解決の可能性の認識等を我が国として主体的に行った上で、国費を投入してこれまで行われてきた我が国の再処理等技術開発の蓄積が効果的・効率的に実用化に繋がるのであれば、国際協力を追求すべきである。

我が国の技術的、人的、財政的蓄積の状況を的確に把握した上で、必要に応じて我が国の技術情報の他国への提示を行いつつ、「過去の国費投入の成果を最大限活かし今後の研究開発コストの効率化に繋がるという観点や 必要な国際的な技術情報の共有を図って我が国技術の国際標準化が進展するという観点から、我が国にとってメリットのある国際協力であるか否かの主体的判断に基づく、有益な国際協力関係を構築する」というオプションを持つことが重要であり、また、そのオプションを模索するための我が国を代表する主体の存在が不可欠である。

## 11. 研究開発体制

大規模プロジェクトである再処理技術開発では、通常プロジェクトマネジメントに要求される事項に加え、「一元的で全体を鳥瞰したマネジメント」が不可欠である。その内容は、技術開発戦略・論理の構築、研究開発失敗リスクをも踏まえた冗長性の確保、研究開発ロードマップ・意志決定アクションプログラムの策定、コンペティターの戦略・研究開発状況の把握、潜在的ユーザーのニーズの把握・マーケティング、関係者のコンセンサスの醸成等である。これを実現するためにも、研究開発の中心主体の研究開発体制強化が極めて重要である。

研究開発者も、プロジェクトの目標は何か、今何を求めているか、これに基づき自らは何をなすべきかを常に意識し、プロジェクトの一員としてこれと調和した研究開発を行うことが不可欠である。一方、再処理研究開発期間の長さとその間の飛躍的ブレークスルーの可能性を考慮すると、これを可能とする基礎研究と、プロジェクト開発のサステナビリティを確保するための効率的なプロジェクト開発の進め方、人材の厳選と厳正な評価のあり方、との適切な組み合わせ等について検討が必要である。また、技術者の人材確保と育成に係る我が国独自の方策も重要である。

### (1) 一元的で全体を鳥瞰できるマネジメント能力の必要性

再処理技術開発は、多額の研究開発費と数十年にわたる長期の研究開発期間を要する大規模プロジェクトである。研究開発成果の利用先である現実の再処理施設も多数建設されるようなものではなく、40～50年に1基ないし2基が建設されるに止まることから、1つの研究開発の成果が1プラントのみに利用されるような「1回限り技術開発」の性格を有し、プラントメーカーの立場からは技術開発経費の回収が原子炉に比べ困難という特性を持つ。このような性格も背景に、核燃料サイクルの確立に不可欠な再処理技術については国が中心となって開発を行っているものの、実際の再処理施設で採用する再処理技術の選択は再処理事業実施主体に全面的に委ねられることから、多額の経費をかけて開発した再処理技術がその競争力、魅力によっては利用されないリスクすら存在する。

このため、大規模プロジェクトである再処理技術開発をこのようリスクを回避しながら実効的に進めるためには、通常のプロジェクトマネジメントに要求される事項に加え、自らの技術開発戦略・論理の構築、研究開発失敗リスクをも踏まえた冗長性の確保、研究開発ロードマップ・意志決定アクションプログラムの策定、コンペティターの戦略・研究開発状況の把握、潜在的ユーザーのニーズの把握・マーケティング、関係者のコンセンサスの醸成、関係者のプロジェクトへの巻き込み等が不可欠である。また、研究開発目標・達成時期の設定、研究開発の方針・進め方の策定・周知、研究開発計画の策定、研究開発の管理、研究開発者の管理、研究開発者の世代交代管理と知見の伝承管理、研究開発におけるプラントメーカーとの役割分担の明確化及び管理、研究開発成果の体系的な整理・蓄積、外部評価・ピアレビューを含むプロジェクト評価、説明責任の履行等のプロジェクトのマネジメントに通常要求される事項の履行も勿論必要である。

これらを体系的・効率的に遂行するためには、「一元的で全体を鳥瞰したマネジメント」が不可欠である。特に、実用化までに長期を要する研究開発の初期段階においては、潜在的ユーザーをはじめとする関係者の知識、方針決定等ステアリングへの参画の真剣味も相応に限定的なものにならざるを得ないことから、研究開発の中心主体が積極的かつ自律的に「一元的で全体を鳥瞰したマネジメント」を履行できるよう、研究開発の中心主体の体制強化が極めて重要である。

## (2) プロジェクト開発のサステナビリティの確保と基礎研究とのバランス

プロジェクト開発では、研究開発者は、プロジェクトの目標は何か、今何を求めているかを常に意識し、これに基づき自らは何をなすべきかを把握して研究開発を進めることが重要である。プロジェクトの研究開発者は、基礎研究の研究者とは大きく異なり、プロジェクトが求めない成果は成果ではないことを十分認識し、プロジェクトの一員としてこれと調和した研究開発を行うことが不可欠である。プロジェクト開発においては、分かっていることだけを用いて学術論文を生み出すことは可能であっても、分かっていることだけ集めてもプロジェクトは成就しない。安易に推測で補うのではなく、分かっていることを特定し、その対応を真摯に行うことの方が有用な場合が多い。また、プロジェクト開発では、研究開発段階から最終プロダクトについてのコスト意識を持つことが重要であり、さらに研究開発そのもののコスト低減も重要である。

一方、実用化までの時間の長さ、その間での飛躍的なブレークスルーの可能性を考慮すると基礎的な研究も必要である。今後、プロジェクト開発のサステナビリティを確保するための効率的なプロジェクト開発の進め方や、人材の厳選と厳正な評価のあり方、基礎的研究との適切な組み合わせ等について検討を進めて行く必要がある。

## (3) 必要な人材の確保と技術の継承

再処理技術の開発は、長期の研究開発期間と多額の経費が必要となる。プラントの設計・運転の経験を重ねて初めて必要なエンジニアリング能力が身に付くのに対して、再処理施設の建設機会は数十年に1回と少ない。欧州の再処理エンジニアリング技術を有する組織は、かなりの規模を有している。また、欧米の企業は、民生以外の需要とあわせて人的規模の確保も可能で

ある。

我が国においては、必要な規模の技術者に重要な経験を積ませ、その知識・経験を継承していくためには、人材の確保と育成に係る独自の方策が重要である。

おわりに

当研究会は、2010年頃から原子力委員会で行われる検討も念頭に、主として技術的、産業的観点から検討を進め、現在までの検討の論点を取りまとめた。

まず当研究会は、現実的な幅を持った将来の再処理需要(時期と規模)と関連物量を算出し検討の基礎とした。60年以上に及ぶ「軽水炉からFBRへの移行期」には、既になされた投資である既存の軽水炉サイクル資源と新たな投資が必要なFBRサイクル資源が存在することから、新旧2つのサイクルを技術的にも産業的にも調和させることが不可欠であることを明らかにした。さらに、この過程で、将来のFBR導入開始後のエネルギー・資源情勢を勘案すると、FBR導入が進むとしても、状況によってはプルトニウム需給に余裕が生じプルサーマル利用が再開する可能性があるなど、軽水炉サイクルがFBR導入中期以降も継続する可能性があることを明らかにした。

かかる認識に基づき当研究会は、将来のFBR再処理プロセスの選定等を考えるに際しては、「軽水炉からFBRへの移行期」に係る視点の追加が不可欠であること、また、軽水炉とFBRの2つの核燃料サイクルの総合合理性の観点から検討すべきことを提言した。

「軽水炉からFBRへの移行期」には、核燃料サイクルの重心が長期に亘り徐々に軽水炉からFBRに移行すること、両者はさらに長期に亘り併存する可能性もあること、FBR導入時期・ペース等の不確実性に対し柔軟性が必要なこと等を勘案すると、従来のFBR専用との考え方とは異なる、軽水炉とFBR再処理プラントの共用化の重要性や軽水炉・FBR再処理単一プラントが合理性を持ち得る可能性を明らかにした。

しかしながら、研究会における係る検討は概念検討段階に止まっており、また、従来このような方策についての検討は行われていないため、これらの技術的成立性、合理性、経済性等に係る早急なデータ収集、情報整備が不可欠である。

当研究会は、上記のような新たな視点、提言も踏まえ、2010年頃からの原子力委員会の検討に含まれるであろう将来の再処理プロセスの選定等に向け、選定に必要なプロセスの特性、開発状況等の情報を網羅的、統一的かつ体系的に整理、評価可能とする、初めてのプロファイル書式を提言した。また、当該プロファイルにより、現時点で欠落または不確かな、2010年頃の検討に向けて整備すべき情報を特定した。また、2010年断面を念頭にプロセス選定を試行した。情報の欠落や不確かさに起因してプロセスの絞り込みには至らないものの、今後開発・整備すべき事項間の優先度を明確にするとともに、有望なプロセスにつき概ねの感触を得た。

一方、今回提言したプロファイル書式の完成度や、情報の程度あるいは精度等は、再処理の分離工程が中心であり、前処理、MA回収・リサイクル及び燃料加工分野に関しては限定的である。このため、これらの分野についての書式の充実やデータ・情報の収集・整備を今後継続的に進める必要がある。また、将来の再処理製品に求められる除染及びMA回収・リサイクルの程度、方策について、軽水炉とFBRの2つの核燃料サイクルの合理性の観点からさらに検討が必要である。

今次研究会は主に技術的、産業的観点から検討を行ったが、以下の事項は未完であり、引き続きの検討が必要である。

まず、将来の再処理技術をはじめ核燃料サイクル技術開発を合理的かつ実効ならしめるには、開発や再処理プロセス選定のロードマップの策定が必要である。かかるロードマップには、何が判明した段階で何を決断するかを明示した道標とアクションプログラム及び開発の進展に付随する開発の絞り込みやスケールアップ等に関するホールドポイントと解除条件等が含まれねばならない。

また、将来に亘り我が国の原子力利用への信頼を維持しFBR路線を維持していくためには、プロセ

スやプラント開発と平仄を取りつつ並行して、核拡散抵抗性に関し我が国が世界の考え方をリードすることが必要であり、特に再処理プロセスの核拡散抵抗性の考え方、評価体系等を用意することが必要である。

今次の検討を通じて研究会は、次世代の再処理技術開発等に関し課題も発見した。

第一は、開発関係者の視野が自らの開発事項のみに集中し、あるべき姿に比べ狭すぎる点である。実用化開発の成果が実用されるためには、その上位に位置する概念から見て開発テーマが妥当性を有し、開発の方向性等がこれと整合的である必要がある。例えば、特定の再処理プロセスの開発を行う場合には、その上位概念たる社会的要請(既に指摘したプルサーマルの再開やこのFBRとの共存、「軽水炉からFBRへの移行期」や軽水炉・FBRの2つ核燃料サイクルの総合合理性の重要性等)を要求仕様として明確化した上で、当該プロセスの合致性が精査されることが不可欠である。また、特定の機器を開発する場合では、その上位概念である、プラントへの要求仕様や、設計・保守思想、プラントエンジニアリング等の基本設計概念に対して、工程及び装置等の設計が整合することが不可欠である。かかる上位概念との関係の重要性は、プラント要求仕様から個別の実験までフラクタルな構造として連鎖している。しかしながら、当研究会の新たな指摘が必要であったことが示すように、上位概念を十分に精査・検討の上で一連の開発が行われているとは言い難く、むしろ特定の技術を確定的に中心に据えた上でのシーズ型、ボトムアップ型の単発的開発の色彩が強いように考えられる。

このため、開発に精励することはもちろん、個々の開発関係者がもう1段階か2段階上まで上位概念を認識し、上位概念の検討が十分か、開発内容が上位概念と整合的かを常に客観的かつ自律的にチェックし得ることが実用化開発においては不可欠である。

第二は、「一元的で全体を鳥瞰したマネジメント」の重要性である。これは個々の開発にも、開発テーマ間にも存在する。次世代の再処理技術開発は、長期と多大な開発投資を要するため、上述の社会的要請を踏まえた開発テーマの設定は元より、開発内容間の従属関係等をも踏まえた優先順位・スケジュール、組織間の役割分担・連携等が重要となる。また、成果の評価や進捗度管理、効率性評価等が客観的に行われ、開発テーマの改廃も含め次世代再処理技術開発全体を鳥瞰した管理が不可欠である。これらに際しては、「何が分かったか」ではなく、「実用化のためには何が分かっているか」、「何が分からねばならないか」の視点から評価・管理されることが重要である。

第三には、プラントエンジニアリング能力の重要性である。実用化開発においては、広く認識されている設計基準値はもとより、これに関わる許容範囲や、入ってはならない領域を特定し、その中で最適点を見出す必要がある。また、単体の機器開発に止まることなく、既存、開発中の機器をプラントにまとめ、最終的にはプラントの性能保証を行い得ねば、実用化開発は意味をなさない。従来、国が中心となった開発では、結果としてその多くをプラントメーカーに依存しているのが実情であるが、再処理技術開発は長期と多額の開発費を要する一方で実施の需要に限られることから、プラントエンジニアリング能力を従来同様にプラントメーカーに期待することは限界がある。

このため、将来の再処理技術開発におけるプラントエンジニアリング能力保有のあり方を早期に検討する必要がある。

最後に、2010年頃からの原子力委員会での議論に向けた調査・開発が着実に実施されるとともに、当論点整理を理解し、関係者による適切な対応がなされることを研究会として期待する。

# 高速増殖炉サイクル実証プロセス研究会 委員名簿

座長	田中 知	東京大学大学院工学系研究科原子力国際専攻教授
委員	山名 元	京都大学原子炉実験所教授
	井上 正	財団法人電力中央研究所首席研究員
	武藤 栄	東京電力株式会社常務取締役原子力・立地本部副本部長
	豊松 秀己	関西電力株式会社常務取締役
	田中 治邦	電気事業連合会原子力部長(第9回まで) 日本原燃株式会社経営企画室部長(第12回から)
	高橋 祐治	電気事業連合会原子力部長(第10回から)
	村上 秀明	日本原燃株式会社企画部長(第11回まで)
	飯田 式彦	株式会社東芝電力システム社原子力事業部技監
	峯 雅夫	日立GEニュークリア・エナジー株式会社事業主管
	岡田 敬三	三菱重工業株式会社原子力事業本部原子力技術センター原子力技術部 原子力技術部長(第9回まで) 三菱FBRシステムズ株式会社取締役社長(第10回から)
	鈴木 成光	三菱重工業株式会社原子力事業本部原子力技術センター原子力技術部 原子力技術部長(第10回から)
	柴田 洋二	社団法人日本電機工業会原子力部長
	中原 徹	文部科学省研究開発局原子力計画課長(第4回まで)
	山野 智寛	文部科学省研究開発局原子力計画課長(第5回から)
	中村 雅人	文部科学省研究開発局原子力研究開発課長(第7回まで)
	板倉 康洋	文部科学省研究開発局原子力研究開発課長(第8回から)
	柳瀬 唯夫	資源エネルギー庁電力・ガス事業部原子力政策課長(第9回まで)
	高橋 泰三	資源エネルギー庁電力・ガス事業部原子力政策課長(第10回から)
	中西 宏典	資源エネルギー庁電力・ガス事業部原子力立地・核燃料サイクル産業課長 (第12回まで)
	森本 英雄	資源エネルギー庁電力・ガス事業部原子力立地・核燃料サイクル産業課長 (第13回から)
	中島 一郎	独立行政法人日本原子力研究開発機構理事
	向 和夫	独立行政法人日本原子力研究開発機構次世代原子力システム研究開発部門長 (第11回まで)
	永田 敬	独立行政法人日本原子力研究開発機構次世代原子力システム研究開発部門長 (第12回から)
	佐賀山 豊	独立行政法人日本原子力研究開発機構次世代原子力システム研究開発部門 副部門長

(敬称略)

## 将来の社会環境の変化が原子力産業に与える影響に関する定性的整理

### 1. 将来の原子力産業に影響を与える社会的要因(イニシエーター)の抽出

将来の原子力を取り巻く社会環境の変化が、原子力産業に与える影響の程度を定性的に検討した。

将来の原子力産業像を想定するに当たって、電力利用、原子力利用、及びFBR導入(導入時期と導入速度)に影響を与える様々な社会的な要因(イニシエーター)を抽出し、別表1-1に整理した。この際、イニシエーター間相互の関連性や従属性は考慮しないものとした。さらに、現在から2070年頃までの期間を対象に、各イニシエーターの変動の様子を、「継続性」、「変化率」、「変化幅」、「確率」の4つの観点から定性的に想定した。「継続性」とはその事象が継続的なのか一時的なのか等を表し、「変化率」と「変化幅」は各々その事象の年あたりの変化割合と2070年までの総変化量を表している。

各イニシエーターの内、「CO<sub>2</sub>対策の強化」や「石油資源の枯渇」等の発生確率が高くかつ変化率や変化幅の大きいものが重要なイニシエーターとなる。なお、代表的な条件として想定した将来社会は、ウラン価格や化石資源価格がそれなりに継続的に上昇しCO<sub>2</sub>対策も継続的に強化している将来社会に対応している。

### 2. 各イニシエーターのFBR導入等に及ぼす影響

別表1-2は、各イニシエーターが将来の電力利用、原子力利用、及びFBR導入に及ぼす影響の程度を定性的に評価した後、将来の再処理需要に大きな影響を与える「FBR導入への影響」の程度が大きい順に整理したものである。

イニシエーターの中でFBR導入へ最も影響を与えるものは「CO<sub>2</sub>対策の強化(ステップ状、継続的)」である。CO<sub>2</sub>対策は将来においてさらに強化される可能性が高く、その強化の程度も大きいと予想される。CO<sub>2</sub>は、化石燃料の利用に依存している産業、民生、運輸の全てのエネルギー需要サイドにわたって発生しているため、CO<sub>2</sub>対策の強化は社会全体のエネルギー利用形態を大きく変化させる要因となる。特にその強化がステップ状に導入された場合、世界的に化石燃料(石油、石炭、天然ガス)の利用が一斉に抑制され、産業、民生、運輸の全ての部門において電力利用へのシフトが速やかに行われる。同時に、エネルギーの供給サイドすなわち電力供給部門においても化石燃料利用の抑制が働き、電力需要が急増するなか電源は石炭火力やLNG火力から原子力への依存を深めていく。原子力への高い依存がウラン需給のひっ迫ならびにウラン価格の高騰を引き起こす。この結果、FBRの導入時期が早まりその導入速度も最も早くなると予想される。このイニシエーターが、今回想定したイニシエーターの中で最も電力利用(電力需要)、原子力利用、さらにはFBR導入に影響を与えるケースである。一方、CO<sub>2</sub>対策の強化が継続的に徐々に行われた場合、ステップ状に導入される場合に比べ時間的な余裕があることから、社会はCO<sub>2</sub>削減に対して柔軟に社会全体のエネルギー利用形態を変化させていくことが想像される。このため、電力需要の増加、原子力利用へのシフト、及びFBR導入の促進の度合いは、ステップ状に導入される場合よりもやや小さいと考えられる。

次にFBR導入へ影響に大きな影響を与えるのは「石油資源の枯渇(ステップ状、継続的)」である。



石油資源の枯渇も将来発生する可能性が高く、その枯渇の度合いも大きいと予想される。特に継続的に枯渇が進展した場合、「CO<sub>2</sub>対策の強化」と同様、産業、民生、運輸の全てのエネルギー需要サイドにおいて、例えば運輸部門におけるハイブリッド車や電気自動車等の大幅導入など石油利用から電力利用へのシフトの傾向が強まるものの、対象となるエネルギー源が石油に限定されるため、電力需要の伸びは「CO<sub>2</sub>対策の強化」に比べてやや抑えられる。一方、電力供給サイドにおいては、LNGの生産量や価格などの供給動向が石油資源の枯渇と連動すると予想されるためLNG火力が主要な電源となる可能性は低い、引き続き石炭火力への依存は残る。したがって、電力需要の増加に対しては、原子力の役割が高まると同時に石炭火力への期待も残るため、「CO<sub>2</sub>対策の強化」の場合ほど原子力への高い依存は進まないと考えられる。しかし、その場合においても原子力利用の増加はウラン価格の上昇を引き起こし、結果的にFBRの導入時期ならびに導入速度が早まると予想される。一方、石油資源の枯渇がステップ状に発生した場合、継続的に発生する場合に比べより急速に脱石油エネルギー社会にシフトしなければならないため、電力需要の増加と原子力利用へのシフトは継続的に発生する場合よりも大きくなると考えられる。FBR導入への影響に関しては、急激な脱石油エネルギー社会シフトへの対応に対して適切なプルトニウム需給バランスの確保などの観点から、その導入に少し時間がかかることが予想され、継続的に発生する場合に比べてやや小さいと思われる。

「エネルギー・セキュリティの確保の機運が高まる」や「ウラン資源の枯渇(ステップ状、継続的)」もFBR導入に大きな影響を与える。エネルギー・セキュリティ確保の機運は今後も継続的に高まる可能性がかなり高いと予想される。その場合、政治的リスクが高い海外地域に大きく依存する石油等の化石燃料を消費する運輸をはじめ産業、民生の全ての部門において緩やかに電力利用にシフトする。その観点からは「石油資源の枯渇(継続的)」のイニシエーターと近い傾向を示す。増加する電力需要側においては、ベストミックスを大前提としつつ、なるべく一国あるいは一地域に依存しない、政治的に安定した地域に多く分布、などの性質を持った資源への依存を高めることを志向する。その結果、火力発電よりも、政治的リスクの低い地域で産出されるウランあるいは準国産資源のプルトニウムを利用した原子力への依存がやや高まり、FBRの導入時期ならびに導入速度が早まると考えられる。

「ウラン資源の枯渇(ステップ状、継続的)」では、特にその枯渇がステップ状に発生した場合、軽水炉体系にウランを十分供給することができなくなり電力供給サイドにおいて原子力発電が十年オーダーで減少する。その減少分を原子力発電より経済性の劣る他の火力発電などで補おうとするが、電気料金の上昇を招くことになる。この電力料金の上昇は、産業部門や民生部門のエネルギー需要サイドでの熱エネルギー利用源を電力から化石燃料(石炭、重油、灯油など)へとシフトさせ、電力需要を減少させる可能性がある。しかし、そのような状況下でもウラン資源の枯渇は結果的に軽水炉からFBRへの移行を促進し、FBRの導入時期の早期化ならびに導入速度の増加につながると予想される。ウラン資源の枯渇が継続的に発生した場合は、ステップ状に発生した場合に比べその対応への時間的な余裕があるため、一時的にウラン供給不足による軽水炉の減少あるいは電力料金の上昇が生じる可能性があるもののプルサーマル及びFBRの計画的な導入促進により、原子力利用と電力利用への影響はほとんど出ないと思われる。

「化石燃料(石油、天然ガス、石炭)の価格上昇」については、将来発生する可能性が高いと予想

される。石油資源の継続的な価格上昇は「石油資源の枯渇(継続的)」と同じ傾向を示すが、物理的な枯渇とは異なり石油利用に対するひっ迫度が小さい分、電力利用、原子力利用、及びFBR導入への影響はやや小さくなると考えられる。天然ガス資源あるいは石炭資源の継続的な価格上昇は電力料金の値上げにつながり、エネルギー需要サイドでの熱エネルギー利用源を電力から化石燃料(重油、灯油など)へと緩やかにシフトさせ、電力需要を減少させる可能性がある。しかし、逆に熱エネルギー源として利用していた石炭や天然ガス利用にも制約を与える効果もあることから、結果的に電力需要にあまり大きな影響を与えないと考えられる。電力供給サイドでは、より経済的な原子力への依存が高まり、その結果ウラン価格が上昇しFBR導入の促進につながる。

「エルバラダイ構想やGNEP構想の実現」、及び「放射性廃棄物処分場制約の顕在化」については、将来発生する可能性が高いと予想されるが、原子力特有のイニシエーターのため電力利用にはほとんど影響を与えない。エルバラダイ構想やGNEP構想が実現した場合、国内の原子力需要には影響を与えないが、国内での軽水炉再処理の処理量が増加しプルトニウム利用が活発になるため、FBRの導入時期の早期化ならびに導入速度の増加につながると考えられる。また、放射性廃棄物処分場制約が顕在化した場合、廃棄物発生量を抑えるため原子力利用は減少するが、高レベル放射性廃棄物処分体の削減及び処分場面積の大幅削減が見込まれるFBR(MAリサイクルあり)の早期導入ならびに導入速度の増加につながると思われる。

一方、「プルトニウムアレルギーの増大」あるいは「核拡散への懸念増加」も将来発生する可能性が高いと予想されるが、これらはプルトニウム利用に特有のイニシエーターであるため電力利用と原子力利用への影響はほとんどなく、プルトニウム利用を前提としたFBRの導入時期のみ遅れることが推測される。さらに、「海水ウランの低コスト化」が実現した場合は、軽水炉サイクルが継続される可能性も存在する。

その他のイニシエーターは、将来の電力利用、原子力利用、及びFBR導入に対してほとんど影響を与えないと予想される。

別表1-1 将来の原子力像の想定に関するイニシエーター

イニシエーター		イニシエーターの特性			
		継続性 (形状)	変化率	変化幅 2007～2070	確率
現状					
0.現実的なケース ウランの価格上昇 それ以外の項目(化石資源価格、CO2対策等)についてもそれなりの変化を来す。		継続的	そこそこ上昇	そこそこ変化	大きい
1-1	石油資源の枯渇	継続的	++	+++	++
1-2	石油資源の枯渇	ステップ状		+++	++
1-3	石油資源の枯渇なし	継続的	+	++	+
2-1	石油資源の価格上昇	継続的	++	+++	++
2-2	石油資源の価格上昇	一時的	+++	+++	+++
3-1	天然ガス資源の枯渇	継続的	++	+++	++
3-2	天然ガス資源の枯渇	ステップ状		+++	++
4-1	天然ガス資源/石炭資源の価格上昇	継続的	++	+++	++
4-2	天然ガス資源/石炭資源の価格上昇	一時的	+++	+++	+++
5	再生可能エネルギー導入	継続的	+	+	+
6-1	ウラン資源の枯渇	継続的	++	+++	+
6-2	ウラン資源の枯渇	ステップ状		+++	+
7	ウラン価格の予想を上回る上昇	一時的	+++	+++	+++
8	海水ウランの低コスト化	ステップ状		+++	+
9	メタンハイドレート(MH)の低コスト化	ステップ状		+++	++
10-1	CO2対策の強化	継続的	++	+++	++
10-2	CO2対策の強化	ステップ状		+++	++
11	放射性廃棄物処分場制約の顕在化	継続的	+	++	++
12	ブルトニウムアレルギーの増大	一時的	+++	++	+++
13-1	エネルギー・セキュリティの確保の機運が高まる	継続的	+	++	+++
13-2	エネルギー・セキュリティの確保の機運が高まる	一時的	+++	++	+++
14	FBR世界標準確保への戦略	ステップ状		++	+++
15	核拡散への懸念増加	一時的	+++	++	+++
16	エルバラダイ構想やGNEP構想の実現	ステップ状		+++	++

イニシエーターの特性指標			
継続性 (形状)	変化率	変化幅	確率
継続的	++ +	+++	+++
ステップ状		++	++
一時的	+++	+	+

別表1-2 イニシエーターの影響度の整理表

イニシエーター	イニシエーターの特性				電力利用(電気事業)への影響		原子力利用への影響		FBR導入への影響		
	継続性 (形状)	変化率	変化幅 20 07 - 20 70	確率	電力需要	理由等	発電規模	理由等	影響因子	導入 時期	導入 ペース
現状					約890TWh		約50GWe				
0 現実的なケース ウランの価格上昇 それ以外の項目(化石資源価格、CO2対策等)についてもそれなりの変化を来す。	継続的	そこそこ 上昇	そこそこ 変化	大きい	代表的な条件		約58GWe			2050年	1990年以降の 軽水炉の導入 パターン
10-2. CO2対策の強化	ステップ 状		+++	++	++++	全世界的に、運輸・産業・民生部門のエネルギー源が化石燃料から電力に大きくシフトする。	++++	世界的に、電源の原子力シフトが進む。ウラン価格の上昇が顕著。	1-1以上に、ウラン価格が高騰する。	早まる	+++++
10-1. CO2対策の強化	継続的	++	+++	++	+++	全世界的に、運輸・産業・民生部門のエネルギー源が化石燃料から電力に大きくシフトする。	+++	世界的に、電源の原子力シフトが進む。ウラン価格の上昇が顕著。	1-1以上に、ウラン価格が高騰する。	早まる	++++
1-1. 石油資源の枯渇	継続的	++	+++	++	++	運輸・産業・民生部門のエネルギー源が化石燃料から電力に大きくシフトする。	++	電源の原子力シフトが進む。ウラン価格の上昇が顕著だが、石炭火力の道は残る。	ウラン価格が高騰する。	早まる	+++
13-1. エネルギー・セキュリティの確保の機運が高まる	継続的	+	++	+++	++	政治的リスクが高い海外地域に大きく依存する化石燃料を消費している運輸・産業・民生部門において緩やかに電力ヘシフトする。	++	政治的リスクの低い地域から産出されるウランや純国産資源のプルトニウムを利用する原子力は増加する。	ウラン価格が高騰する。	早まる	+++
6-2. ウラン資源の枯渇	ステップ 状		+++	+	-	原子力の減少分を他電源で補うが、発電コストの増加による電力料金の値上げに伴い、消費端での熱利用のエネルギー源が電力から化石燃料ヘシフトする。	-	ウラン資源の供給途絶により軽水炉が十年オーダーで運転できなくなる。	ウラン資源の枯渇に伴い、軽水炉からFBRへの移行が急速に進む。	早まる	+++
1-2. 石油資源の枯渇	ステップ 状		+++	++	+++	運輸・産業・民生部門のエネルギー源が化石燃料から電力に大きくシフトする。	+++	電源の原子力シフトが進む。ウラン価格の上昇が顕著だが、石炭火力の道は残る。	1-1以上に、ウラン価格が高騰する。	早まる	++
2-1. 石油資源の価格上昇	継続的	++	+++	++	+	運輸・産業・民生部門のエネルギー源が化石燃料から電力に大きくシフトする。	+	電源の原子力シフトが進む。ウラン価格の上昇が顕著だが、石炭火力の道は残る。	ウラン価格が高騰する。	早まる	++
4-1. 天然ガス資源/石炭資源の価格上昇	継続的	++	+++	++	影響なし	天然ガス・石炭の価格上昇による電力料金の値上げに伴い、消費端での熱利用のエネルギー源が電力から化石燃料へ緩やかにシフトするものの、その影響は小さい。	+	電力需要は減少するものの、石炭、天然ガス火力の発電コスト上昇による原子力へのシフトの結果、原子力は増加する。	ウラン価格が高騰する。	早まる	++
6-1. ウラン資源の枯渇	継続的	++	+++	+	影響なし	ウラン価格の上昇による電力料金の値上げはあるが、プルサーマルやFBRによる補填が行われ、その影響は小さい。	影響なし	一時的に軽水炉の減少が生じるものの、プルサーマルやFBRの導入により、その影響は小さい。	ウラン資源の枯渇に伴い、軽水炉からFBRへの移行が進む。	早まる	+
16. エルバラダイ構想やGNP構想の実現	ステップ 状		+++	++	影響なし	国内電力(電気事業)利用には影響しない。	影響なし	国内原子力利用(需要)には影響しない。	LWR再処理の処理量が増加すること で、FBRの早期導入が見込まれる。	早まる	+
11. 放射性廃棄物処分場制約の顕在化	継続的	+	++	++	影響なし	原子力の減少を他の電源で代替する。	--	廃棄物発生量の制約によって原子力発電が減少する。	高レベル廃棄物処分体の削減及び処分場面積の削減を目的としたFBRサイクル(MAリサイクル)導入を促進する。	早まる	+

イニシエーター	イニシエーターの特性				電力利用(電気事業)への影響		原子力利用 への影響		FBR導入への影響		
	継続性 (形状)	変化率	変化幅 2007～2070	確率	電力需要	理由等	発電規模	理由等	影響因子	導入 時期	導入 ベース
1-3.石油資源の枯渇なし	継続的	+	++	+	影響なし	産業・民生部門における熱利用のためのエネルギー源が電力から石油へ緩やかにシフトするものの、その影響は小さい。	影響なし	ベストミックスの観点からも必要性があり、ベース電源として価格競争力のある原子力には大きく影響しない。	影響なし。	影響なし	影響なし
2-2.石油資源の価格上昇	一時的	+++	+++	+++	影響なし	社会構造の慣性力が大きくかつ一過性のため、対応が間に合わない。	影響なし	社会構造の慣性力が大きくかつ一過性のため、対応が間に合わない。	影響なし。	影響なし	影響なし
3-1.天然ガス資源の枯渇	継続的	++	+++	++	影響なし	天然ガスの価格上昇による電力料金の値上げに伴い、消費端での熱利用のエネルギー源が電力から化石燃料へ緩やかにシフトするものの、その影響は小さい。	影響なし	ガス火力の燃料を天然ガスをLPGにシフトする。	影響なし。	影響なし	影響なし
3-2.天然ガス資源の枯渇	ステップ 状		+++	++	影響なし	天然ガスの枯渇によるガス火力の減少分をLPGで代替する。	影響なし	天然ガスの枯渇によるガス火力の減少分をLPGで代替する。	影響なし。	影響なし	影響なし
4-2.天然ガス資源/石炭資源の価格上昇	一時的	+++	+++	+++	影響なし	社会構造の慣性力が大きくかつ一過性のため、対応が間に合わない。	影響なし	社会構造の慣性力が大きくかつ一過性のため、対応が間に合わない。	影響なし。	影響なし	影響なし
5.再生可能エネルギー導入	継続的	+	+	+	影響なし	再生可能エネルギーが導入され、自家発電が増加し、事業用発電は減少するものの、その影響は小さい。	影響なし	ベース電源として価格競争力のある原子力には影響せず、火力が減少する。	影響なし。	影響なし	影響なし
7.ウラン価格の予想を上回る上昇	一時的	+++	+++	+++	影響なし	社会構造の慣性力が大きくかつ一過性のため、対応が間に合わない。	影響なし	社会構造の慣性力が大きくかつ一過性のため、対応が間に合わない。	影響なし。	影響なし	影響なし
9.メタンハイドレート(MH)の低コスト化	ステップ 状		+++	++	影響なし	国内の天然ガス消費の大部分は事業用ガス火力であることから火力発電で燃料シフトが発生するものの、電力需要としては産業・民生部門の熱利用のためのエネルギー源が電力からMH系ガスへシフトする程度。	影響なし	ベース電源として価格競争力のある原子力には影響しない。	影響なし。	影響なし	影響なし
13-2.エネルギー・セキュリティの確保の機運が高まる	一時的	+++	++	+++	影響なし	社会構造の慣性力が大きくかつ一過性のため、対応が間に合わない。	影響なし	社会構造の慣性力が大きくかつ一過性のため、対応が間に合わない。	社会構造の慣性力が大きくかつ一過性のため、対応が間に合わない。	影響なし	影響なし
14.FBR世界標準確保への戦略	ステップ 状		++	+++	影響なし	FBRに関するイニシエーターであり、電力(電気事業)利用には影響しない。	影響なし	FBRに関するイニシエーターであり、原子力利用(需要)には影響しない。	FBR開発の促進とFBR導入時期の前倒しが期待される。	早まる	影響なし
12.プルトニウムアレルギーの増大	一時的	+++	++	+++	影響なし	原子力が減少する場合には他の電源で代替する。	影響なし	再処理は一時中断されるが軽水炉ワンスルーによる現状維持が期待される。	プルトニウムを本格利用するFBRの導入が遅れる。	遅れる	-
15.核拡散への懸念増加	一時的	+++	++	+++	影響なし	原子力が減少する場合には他の電源で代替する。	影響なし	国内の再処理や濃縮施設は一時中断されるが、軽水炉ワンスルーによる現状維持が期待される。	核拡散抵抗性や保障措置の有効性等が認められない場合には、FBRの導入が進まない。	遅れる	-
8.海水ウランの低コスト化	ステップ 状		+++	+	影響なし	ウラン資源は安定供給されるものの、導入時間の長い原子力の急速な拡大には繋がらず、電力利用にはあまり影響しない。	+	ウラン資源は安価に安定供給されるものの、元来価格競争力のある原子力の急速な拡大には繋がらない。	海水ウランの低コスト化がFBR導入以前に実現した場合は、FBRの導入は行われない。	導入されない	導入されない

イニシエーターの特性指標				電力利用への影響	原子力利用への影響	FBR導入への影響	
継続性 (形状)	変化率	変化幅	確率	電力需要	発電規模	導入時期	導入速度
継続的	++ +			++++	++++	早まる	+++++
ステップ状		+++	+++	+++	+++	影響なし	++++
				++	++		++
		++	++	+	+		+
一時的	+++	+	+	影響なし	影響なし	遅れる	影響なし
				-	-		-
				--	--	導入されない	導入されない

## 物量・時間スケール試算のまとめ

ケース		原子力 発電 規模 (GWe)	FBRの 導入 開始 (年)	軽水炉の リプレース の仕方 【参考2-1】 参照	FBR使用済燃料再処理								最大 規模 (トン/年)	その他の条件 注1	特 記																								
ケース №	FBRの導入 カーブ 【参考2-1】参照				処理開始		処理開始		最初の増設		次の増設																												
					開始年 (年)	処理規模 (トン/年)	開始年 (年)	処理規模 (トン/年)	処理開始 からの経過 年数(年)	増設規模 (トン/年)	最初の増設 からの経過 年数(年)	増設規模 (トン/年)																											
基本的な ケース	A-1 (A1-21)	図Aの	58	2050	2047	1200	2050	200	100	600	10	200	600	プルサーマル燃料は第二(L再)で15.85処理	A-1と比べ、第二(F再)の処理開始と増設の年早(不合理)																								
	A-2	2055														30	10	300																					
	A-3	2050														10	40	300																					
	B-1	2060														20	10	200																					
	B-2	2055														30	10	300																					
	B-3	2050														10	40	300																					
	A-4	図Bの	58	2050	2047	1400	2050	200	13	300	500	10	100	L/F再処理単一プラント、2060～2086年に100～200トン/年の燃料を処理	21世紀前半までL/F再処理単一プラントで対応が可能																								
	A-4	2087														100	10	500	10	100	700	プルサーマルへの供給用生産のためFBR処理量が削減																	
	A1-22	図Aの														58	2040	2037	2047	200	10	200	20	200	600	第二(L再)と第二(F再)の早期導入が必要													
	A1-22	図Bの																									2045	50	10	10	100	A1-24と比べ第二(F再)の増設開始が早いのは、立ち上りの急な1980年代の軽水炉導入カーブをトレスするため							
	A1-24	図Bの																															2060	100	20	20	300	500	
	A1-24	図Bの																																					極端に遅い注2
	A2-25	図Aの	2047	2055	200	100	800	FBR導入中期にプルサーマルが一時的に再開、プルサーマル燃料は第二(L再)で15.85処理	プルサーマル燃料は第二(F再)で処理するA2-25に比べ、第二(F再)最大規模が100トン/年大きいのは、処理開始時期の差に起因																														
	A3-25									2050	10	100	700	プルサーマルの一時的な再開も、第二(F再)最大規模に影響																									
	A1-26									リファレンス	1200	2060	200	10	800	軽水炉とFBRの炉外サイクル時間を各々2年間延長																							
	A1-3																図Aの	2075	100	15	200	600	2005年からの低軽水炉導入カーブをトレスするため、第二(F再)の規模は小さい																
	A1-23	図Aの	2070	2090	100	10	200	200	200																														
原子力 発電規模の 影響評価 ケース	A1-33	図Aの	80	2040	2030	2050	300	10	200	10	900	100	800	第二(L再)の2030年導入の実現性問題、第二(L再)の導入の方法について精査の必要あり、合わせて本ケースの成立性について精査の必要あり																									
	A1-32	図Aの														2050	2047	1200	2055	200	20	200	10	800															
	A1-34	図Aの																							2070	2080	100	200	900										
	A1-33	図Bの	110	2040	2042	2030	2045	200	10	500	100	1400	200	1100																									
	A1-35	図Bの															2050	2047	1200	2050	200	10	200	10	800														
	A1-37	図Aの																								2040	2042	2047	2080	10	400	1100							
	A1-36	図Aの	2050	2042	2045	100	200	200	1100																														
	A1-38	図Aの	2070	2047	2080	10	400	1100																															
	A1-39	図Bの	2050	2047	2070	200	300	1200																															

注1) プルサーマルの導入や再処理方法を中心に、リファレンスケースとは異なる条件を記載。

注2) リファレンスケースの主な条件は、原子力発電規模58GWe、FBR導入開始2050年、FBR導入開始以降に廃止される軽水炉を全てFBRに置き換えるリプレースの仕方、プルサーマル燃料を六ヶ所工場に続く第二(L再)で1:1処理、2030年に既存の炉を含めて軽水炉は一斉に高燃度化、軽水炉とFBRの炉外サイクル時間は各々4年と5年。

注3) リファレンス：FBR導入開始以降に廃止される軽水炉を全てFBRに置き換えるリプレースの仕方

注4) ゆるやか：電力会社各社はFBR初号機を導入後、10年間は追加のFBR導入を行わず、10年後から全ての軽水炉をFBRで代替するリプレースの仕方

注5) プルサーマル/FBR共存：2100年過ぎ(41.5GWe)まで軽水炉をゆるやかにリプレースし、その後のFBR発電規模は41.5GWeで一定となるリプレースの仕方

注6) 極端に遅い：2050年のFBR導入開始後、約85年間かけて極めて遅いペースで58GWeの軽水炉をすべてFBRに置き換えるリプレースの仕方

## 物量・時間スケール試算の前提条件

## 【原子力発電設備容量の想定】

58GWe：2010年以降の予測については総エネ調需給部会「2030年のエネルギー需給展望」（平成17年3月）の情報（2010年度で50.14GWe、2030年度で57.98GWe）を基に、2010～2030年の間にほぼ均等に合計6基の導入を想定した。

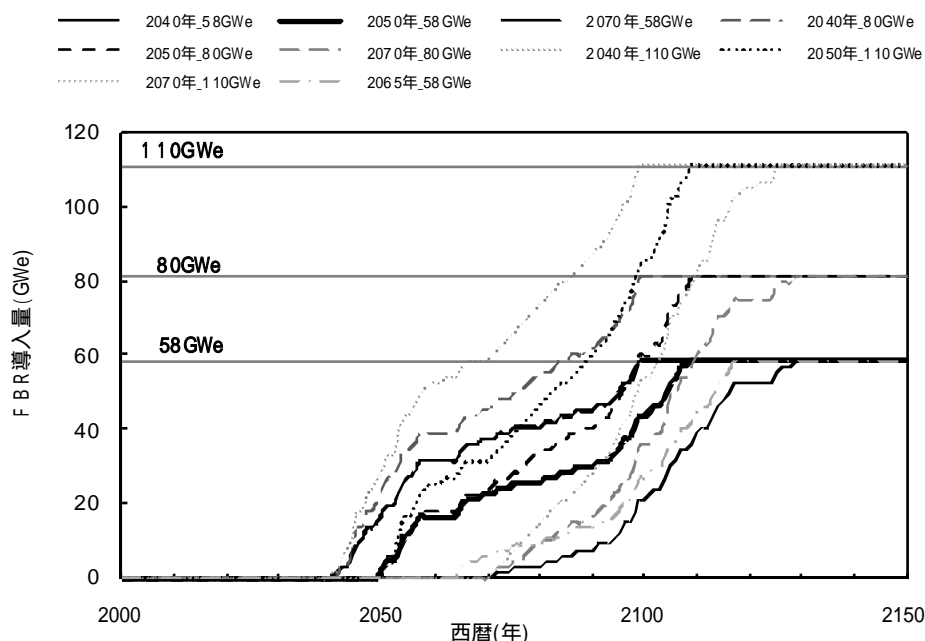
80GWe、110GWe：独自に実施した原子力発電設備容量の将来予測に基づいた。

## 【軽水炉のリプレースの仕方の想定】

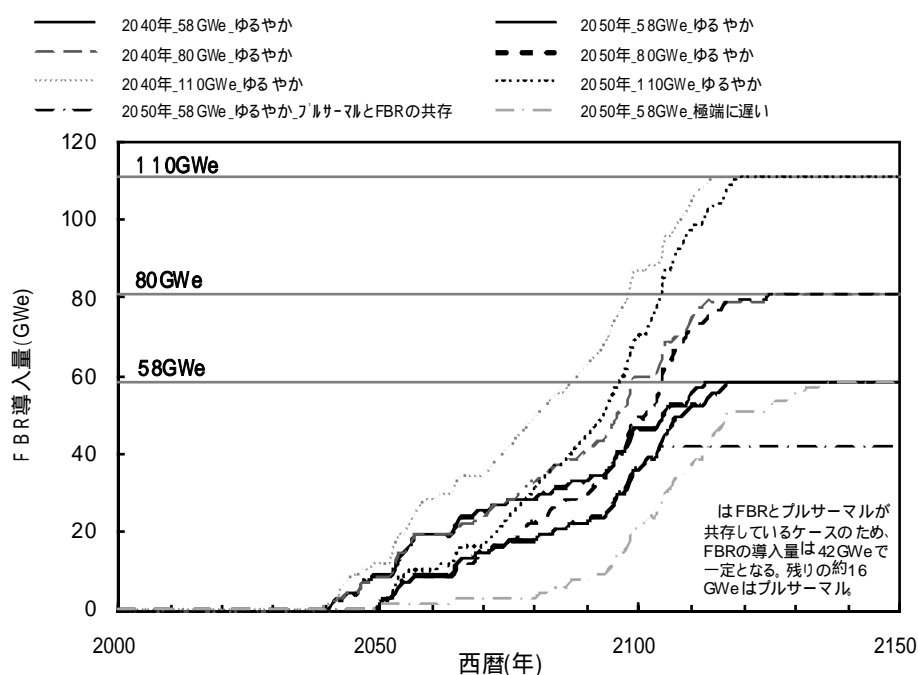
リファレンス：FBR導入開始以降に廃止される軽水炉を全てFBRに置き換えるリプレースの仕方。80GWe、110GWeの場合は、このリプレースの仕方を基に各年度の導入規模を拡幅。

ゆるやか：電力会社各社はFBR初号機を導入後、10年間は追加のFBR導入を行わず、10年後から全ての軽水炉をFBRで代替するリプレースの仕方。80GWe、110GWeの場合は、このリプレースの仕方を基に各年度の導入規模を拡幅。

極端に遅い：2050年のFBR導入開始後、約85年にかけて極めて遅いペースで58GWeの軽水炉をすべてFBRに置き換えるリプレースの仕方



図A リファレンス及びリファレンスを基に導入規模を拡幅したFBR導入カーブ



図B ゆるやか、極端に遅い及びこれらを基に導入規模を拡幅したFBR導入カーブ

## 【参考 2-2】

物量・時間スケール試算に用いた炉特性データ

炉 型	BWR		PWR		BWR プルサーマル		PWR プルサーマル		高増殖型 FBR			低増殖型 FBR		
	低燃 炉心	高燃 炉心	低燃 炉心	高燃 炉心	低燃 MOX	高燃 MOX	低燃 MOX	高燃 MOX	Na 冷却大型炉 MOX 燃料			Na 冷却大型炉 MOX 燃料		
発電端出力 (MWe)	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000			1,000		
熱出力 (MWth)									2,380			2,380		
増殖比	-	-	-	-	-	-	-	-	1.20			1.03		
平均燃焼度 (MWd/t)	45,000	60,000	49,000	60,000	45,000	60,000	42,000	60,000	54,700			114,900		
設備利用率 (%)	80.0	90.0	80.0	90.0	80.0	90.0	80.0	90.0	92.6			94.6		
MOX 変更割合					1/3	1/3	1/4	1/4	炉心	軸ブランク	径ブランク	炉心	軸ブランク	径ブランク
初装荷燃料														
重金属 (トン)	112	112	77.8	77.8	37.1	37.1	19.5	19.5	33.2	46.9	17.9	47.9	18.4	
プルトニウム (トン)	0.0	0.0	0.0	0.0	1.06	1.38	1.72	2.27	7.87	0.0	0.0	9.43	0.0	
核分裂性プルトニウム (トン)	0.0	0.0	0.0	0.0	0.61	0.81	1.19	1.56	4.82	0.0	0.0	5.77	0.0	
平衡装荷燃料														
重金属 (トン/年)	18.7	15.9	17.5	16.1	6.24	5.29	5.10	4.02	4.99	7.05	2.69	5.17	1.99	
プルトニウム (トン/年)	0.0	0.0	0.0	0.0	0.41	0.44	0.45	0.47	1.18	0.0	0.0	1.02	0.0	
核分裂性プルトニウム (トン/年)	0.0	0.0	0.0	0.0	0.25	0.27	0.31	0.32	0.72	0.0	0.0	0.62	0.0	
初期取出し燃料														
重金属 (トン/年)	21.4	18.3	16.6	15.1	7.12	6.09	4.88	3.77	4.25	6.97	2.68	4.97	1.98	
プルトニウム (トン/年)	0.19	0.18	0.21	0.21	0.19	0.20	0.36	0.36	0.98	0.27	0.06	0.99	0.03	
核分裂性プルトニウム (トン/年)	0.12	0.11	0.15	0.14	0.09	0.09	0.22	0.21	0.56	0.26	0.06	0.60	0.03	
平衡取出し燃料														
重金属 (トン/年)	17.9	14.9	16.6	15.1	5.96	4.98	4.88	3.77	4.25	6.97	2.68	4.38	1.95	
プルトニウム (トン/年)	0.17	0.17	0.21	0.21	0.29	0.30	0.36	0.36	0.98	0.27	0.06	0.92	0.11	
核分裂性プルトニウム (トン/年)	0.10	0.10	0.15	0.14	0.13	0.13	0.22	0.21	0.56	0.26	0.06	0.54	0.10	
廃止措置時取出し燃料														
重金属 (トン)	109	108	75.2	74.6	36.0	35.7	18.9	18.7	30.1	46.7	17.9	43.3	18.2	
プルトニウム (トン)	0.72	0.84	0.71	0.77	2.00	2.54	1.50	1.90	7.00	1.22	0.25	8.90	0.70	
核分裂性プルトニウム (トン)	0.52	0.59	0.53	0.56	1.02	1.28	0.94	1.18	4.09	1.15	0.24	5.31	0.65	

【備考】プルトニウム重量および核分裂性プルトニウム重量は、装荷直前と取出直後を想定した値である。

1 年あたりの平衡装荷燃料重量、初期取出し燃料重量および平衡取出し燃料重量は、各炉型の設備利用率を考慮した値に換算されている。



## 試算条件等の変化をある程度包絡し得る再処理需要とその包絡性

試算方法の前提や変動させる条件(試算条件等)			試算条件等を変化させた時の影響 (その他の条件はリファレンスケースの条件と同じ)	試算条件等の変化をある程度包絡し得る 再処理需要	包絡性				
項目		変動させた幅等 (下線部はリファレンスケースの条件を示す)							
原子炉要件	原子力発電規模(GWe)	58, 80, 110	・80GWeの場合、第二(L再)の処理開始時期、処理規模に影響なし。第二(F再)の処理開始時期は5年早まり、最大規模は600t/年から800t/年に増加する(A1-32)。 ・110GWeの場合、第二(L再)を5年早く処理開始し、一時的に六ヶ所再処理工場と併せて2000t/年での処理が必要。第二(F再)の処理開始も5年早まり、最大規模は600t/年から1200t/年に増加する(A1-36)。	第二再処理(軽水炉再処理): 処理開始時期:2047年 処理規模:1200t/年 第二再処理(FBR再処理): 処理規模: FBR導入開始後5～10年:100～200t/年 その後10～20年:100～200t/年増加 最大規模:500～800t/年			110		
	FBRの導入開始(年)	2040, 2050, 2065, 2070	・FBRの導入時期が2040年の場合、第二(L再)の処理開始時期は10年早まり、一時的に六ヶ所再処理工場と併せて2000t/年の処理が必要となる。第二(F再)の処理開始時期は13年早まり、FBR導入から7年後となる(A1-22)。 ・FBRの導入時期が2065年の場合、第二(L再)の処理開始時期、処理規模に影響なし。第二(F再)の処理開始時期は15年遅くなり、FBR導入から10年後となる(A1-3)。 ・FBRの導入時期が2070年の場合、第二(L再)の処理開始時期、処理規模に影響なし。第二(F再)の処理開始時期は30年遅くなり、FBR導入から20年後となる(A1-23)。						
	軽水炉のリブレスの仕方	リファレンス  ゆるやか  極端に遅い  ブルサーマル/FBR共存	・ゆるやかな軽水炉のリブレスの仕方の場合、第二(L再)の処理開始時期、処理規模に影響なし。第二(F再)の処理開始時期に影響はないが、当初規模は200t/年から100t/年に減少し、最大規模は600t/年から500t/年に減少する(A1-24)。 ・極端に遅い軽水炉のリブレスの仕方の場合、第二(L再)の処理開始時期は影響はないが、処理規模は1200t/年から800t/年に減少する。第二(F再)の処理開始時期は30年遅くなり、最大規模は600t/年から500t/年に減少する(A1-24)。 ・ブルサーマル/FBR共存の場合、第二(L再)で100～200t/年のFBR燃料処理を行っており、再処理需要の観点からは右記の再処理需要に包含される。(A-4- )		リブレス		ゆるやか	極端に遅い	ブルサーマル/FBR共存
	軽水炉高燃焼度化への移行	2030年に一斉に高燃焼度化 (約4.5～4.9万MWD/t) 6万MWD/t) 2030年以降の新設分のみ高燃焼度化 (約4.5～4.9万MWD/t) 6万MWD/t)	・軽水炉の高燃焼度化への移行パターンを変えても、第二再処理(L再+F再)の処理開始時期、処理規模に影響を与えない(B-1)。		一斉		新設分のみ		
	再処理要件	軽水炉MOX使用済燃料の処理	第二(L再)で ウラン燃料:軽水炉MOX燃料=1:1処理  第二(L再)で ウラン燃料:軽水炉MOX燃料=85:15処理  第二(F再)で処理		・軽水炉MOXを第二(L再)で85:15処理する場合、第二(L再)の処理開始時期、処理規模に影響なし。第二(F再)の処理開始時期が5年早まり、その後の処理量増加は20年後から30年後に遅れる(A-2)。 ・軽水炉MOXを第二(F再)で処理する場合、第二(L再)の処理開始時期、処理規模に影響はないが、第二(F再)を10年早く処理開始する必要がある、また増設時期も10年早く、不合理(A-3)。	1:1		85:15	
サイクル要件	炉外サイクル時間	軽水炉サイクル4年 <u>FBRサイクル5年</u> 軽水炉サイクル6年 FBRサイクル7年	・炉外サイクル時間を2年延長しても、第二(L再)の処理開始時期、処理規模に影響はない。第二(F再)の処理開始時期に影響はないが、最大処理規模は600t/年から800t/年に増える(A1-26)。	軽水炉サイクル4年 FBRサイクル5年		軽水炉サイクル6年 FBRサイクル7年			

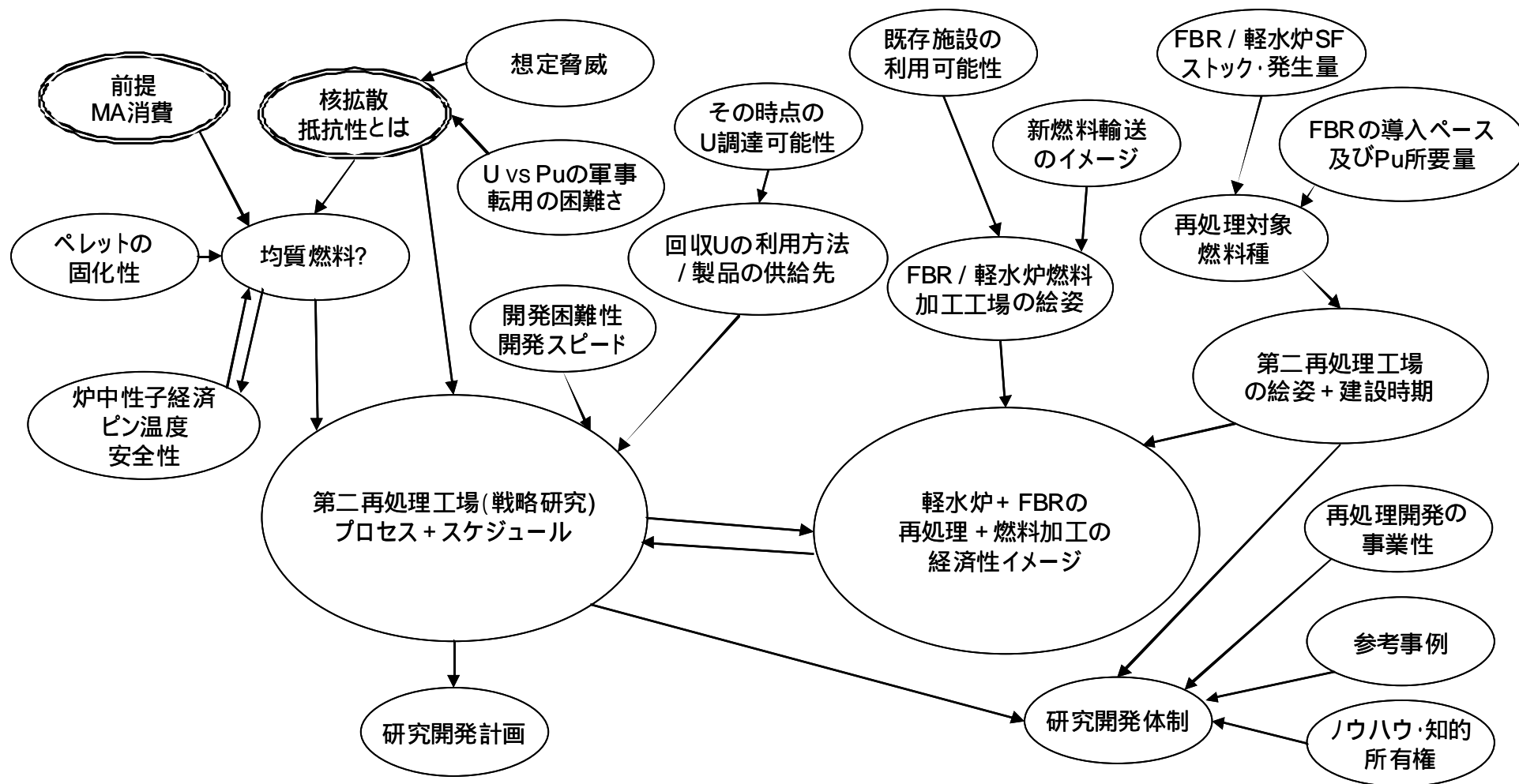
第二(L再):第二再処理工場の軽水炉使用済燃料の再処理  
第二(F再):第二再処理工場のFBR使用済燃料の再処理

- :軽水炉再処理需要、FBR再処理需要ともに「試算条件等の変化をある程度包絡し得る再処理需要」に包含されるもの  
 :軽水炉再処理需要が「試算条件等の変化をある程度包絡し得る再処理需要」に包含されるもの  
 :FBR再処理需要が「試算条件等の変化をある程度包絡し得る再処理需要」に包含されるもの  
 :軽水炉再処理需要、FBR再処理需要ともに「試算条件等の変化をある程度包絡し得る再処理需要」に包含されないもの

## 第二再処理工場のバリエーション例

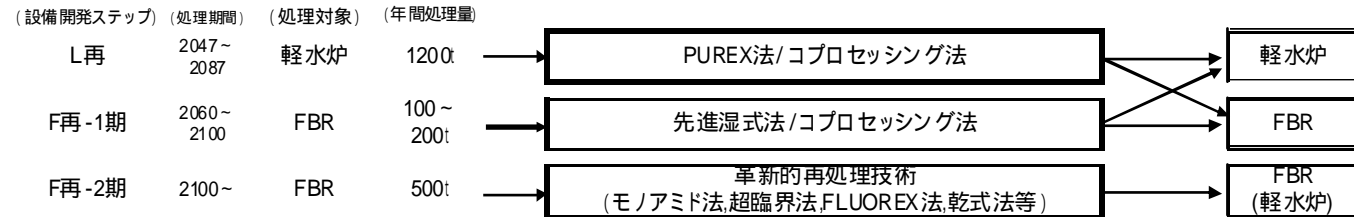
プロセス的視点	物理的視点	イメージ
異なる	異なる	
異なる	併設	
一部供用	併設 一部供用	
大部分共用	併設 大部分共用	
同一	同一	

## 第二再処理工場検討に係る主なデータフロー



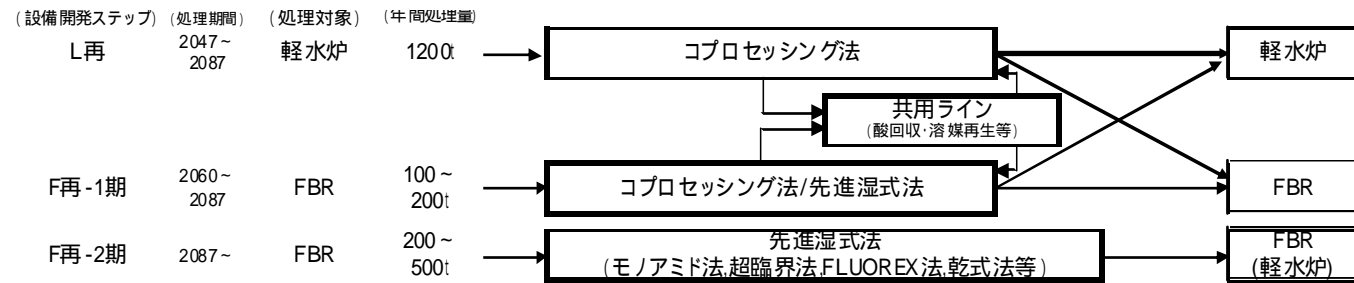
<バリエーション1>

・L再、F再を独立に建設することから、プラント建設コストは相対的に高くなる。



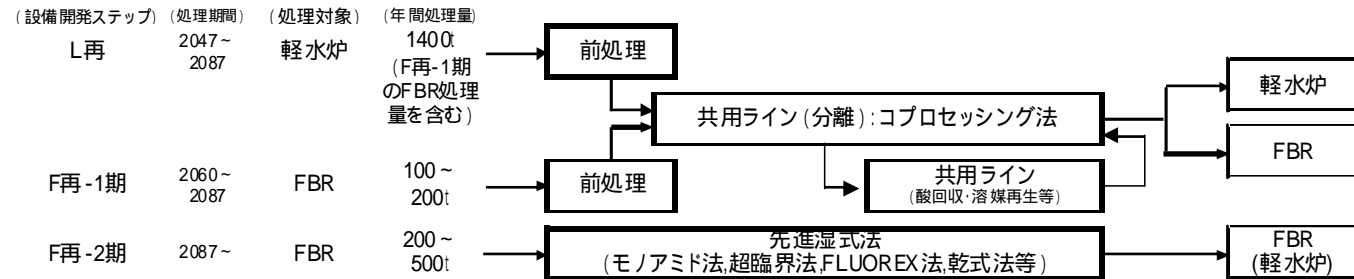
<バリエーション2>

・L再、F再の共用化は一部に留まることから、プラント建設コストはケース1に比べて若干安くなる。



<バリエーション3>

・L再、F再の大部分の共用化を図ることから、プラント建設コストは安くなる。



第二再処理工場のバリエーション毎の採用可能性が高いと考えられるプロセス

注) 専門家へのアンケート調査を基に各バリエーション毎に回答数の多いものを、採用可能性が高いプロセスとして記載。

## 再処理プロセスプロファイルの書式

****法プラント	重要点を簡潔に記載のこと		特記事項や重要課題など
0. 前提条件			
	FBR処理の場合	LWR処理の場合	
I. プラントの概要			
1. プラントの特徴			
2. 対象燃料			
3. 製品供給			
(1)MOX燃料供給対象炉型			
(2)供給上の条件(輸送・サイト・安全要求など)			
(3)回収ウランの利用ポテンシャル			
(4)既存の核燃料サイクル施設への追加措置			
4. 製品仕様			
(1)U-Pu-MA製品またはU-Pu製品仕様(除染係数、回収率等)			
(2)U製品仕様(除染係数、回収率等)			
(3)高レベル廃棄物			
(4)低レベル廃棄物			
II. プラントの主要な工程			
1. 主な工程仕様			
(1)ヘッドエンド			
(2)回収分離			
(3)製品精製			
(4)核種回収			
(5)高レベル廃棄物			
(6)低レベル廃棄物			
2. プラント処理量			
(1)ユニットサイズ(可能範囲・最適サイズ)			
(2)スルーputの律速プロセス			
3. 特殊な試薬や溶媒の使用など (PUREX法で使用しているもの以外と定義する。)			
III. 技術の現状と展開			
1. 研究開発の経緯と実績			
(1)基礎研究(コールド)の実績			
(2)基礎研究(ウラン)の実績			
(3)小規模ホット研究開発の実績			
(4)工学規模コールド、ウラン研究開発の実績			
(5)工学規模ホット研究開発の実績			
(6)大規模プラントの実績			
2. 国内の技術レベル			
(1)基礎研究知見			
(2)工学研究知見			
(3)プラント設計技術			
(4)機器製造技術			
(5)プラント建築技術			
(6)運転保守経験蓄積			
(7)技術者の存在・育成状況			
3. コスト			
(1)建設費			
(2)運転コスト			
4. 従来までの開発規模(開発投資、施設投資、人的投資)			
(1)国家による開発規模			
(2)民間による開発規模			
5. 海外での実績や取り組み			
6. 今後の課題			
(1)工程性能について			
(2)経済性について			
(3)放射性廃棄物について			
(4)環境対策について			
(5)核不拡散性について			
(6)施設稼働率など信頼性			
(7)安全性について			
IV. 評価			
1. 次期プラントへの適合性			
(1)第2軽水炉再処理への適用性(可能性・適合性)			
(2)FBR再処理への適用性(可能性・適合性)			
2. 次期プラントへの適用までの見通し			
(1)必要とされる開発施設			
(2)開発投資額			
(3)技術者数			
(4)実現までに必要な年数			
(5)実用までの不確実性			
(6)その他次期プラント適用の条件など			
3. 社会的国際的懸念関連			
(1)保障措置性			
(2)潜在的核不拡散性			
(3)社会的な受容性			
(4)安全性			
V. その他			

***法	溶媒抽出工程	高レベル廃棄物処理工程	***工程
I. 工程の概要・沿革			
1. 処理方法の特徴			
2. 研究開発の経緯と実績			
(1)基礎研究(コールド)の実績			
(1)基礎研究(U,Pu)の実績			
(2)小規模ホット研究開発の実績			
(3)工学規模コールド・ウラン研究開発の実績			
(4)工学規模ホット研究開発の実績			
(5)大規模プラントの実績			
3. 従来までの開発規模(開発投資、施設)			
(1)国による開発規模			
(2)民間による開発規模			
4. 海外での実績や取り組み			
5. 国内での技術レベル			
(1)基礎研究知見			
(2)工学研究知見			
(3)プラント設計技術			
(4)機器製造技術			
(5)プロセス設置施工技術			
(6)運転・保守経験			
(7)技術者の存在・育成状況			
II. 工程の詳細			
1. プロセス構成			
(1)プロセスフロー			
(2)装置の構成(数、サイズ、系列数など)			
2. 装置			
(1)装置の特徴			
(2)装置の開発経緯			
(3)特殊なユーティリティの必要性など			
(4)装置の耐久性や信頼性			
(5)装置の保守特性			
3. 装置や工程製作上の課題			
(1)装置製作の課題(材料や加工)			
(2)工程製作上の課題			
4. 工程性能			
(1)装置の機能・性能			
(2)工程の安定性・頑強性(ロバスト性)			
5. 工程の処理規模			
(1)ユニット規模(適正規模)			
(2)増設や拡大の柔軟性			
6. 反応試薬や溶媒			
(1)利用する反応試薬など			
(2)利用する反応試薬などの開発状況			
(3)利用する反応試薬の量など			
(4)利用する反応試薬の再生可能性			
(5)利用する反応試薬のコスト			
7. 製品形態			
8. 廃棄物の発生			
(1)廃棄物発生量			
(2)特殊な廃棄物発生			
(3)廃棄物処理技術の完成度			
III. 工程の評価			
1. 処理対象燃料			
(1)高速炉燃料への適合性			
(2)軽水炉燃料への適合性			
2. 実用までの課題とブレイクスルー(クリティカル課題など)			
(1)原理的課題			
(2)工学・装置課題			
3. 今後の開発投資展望			
(1)実用までの開発規模			
(2)実用までの期間			
(3)開発のリスク			
4. 代替技術の存在と影響			

研究開発の進め方、役割分担、進捗度の判断等に際して念頭におくべき

再処理プロセスの実用化に必要な分野・領域

再処理プロセスの実用化には、様々な分野が必要となる。これらを大まかに整理すると以下のようになる。再処理プロセスの研究開発においては、並行的に進められる部分は存在するものの、概ね上から下に研究開発が進行することとなる。

再処理プロセスの選定に際しては、我が国が必要とする時期に実用化することができるかを下記の視点を踏まえて評価する必要がある。また、各再処理プロセスに関し実用化に必要なプラント・機器設計領域の知見を我が国がどの程度保有しているか、その性能保証の可否と関連付けて評価することも重要である。加えて以下は、再処理プロセスの研究開発の進め方や役割分担の検討、研究開発の進捗状況の把握を行う際にも意識することが重要である。

これらにおいては、再処理等の核燃料サイクル技術開発は実施の需要に限られることから、プラントメーカーの貢献に多くを期待できないことが原子炉等と大きく異なることに、特段の注意を払う必要がある。

	化学プロセス分野	プラント・機器設計分野	プラント・機器製造/運転分野
基礎領域	・化学・物理物性の研究 (最高性能だけでなく平均、最低性能、偏差等工学的視点を含む)		
	・試薬・材料の開発		
	・プロセス概念の検討 - ブロックフローの検討 - 環境負荷低減思想の検討		
工学領域	・化学プロセスの設計 - ケミカルフローシートの作成 - 系統構成、物質・アクティビティ収支、設計根拠、設計基礎データ	・機器・設備概念の検討 - 施設概念、メンテナンス思想の検討 - エッセンシャル(ボトルネック)機器・工程のモックアップによるプロトタイピング	
工業化領域	・工業化技術としてのプロセス設計 - プロセスフローダイアグラムの作成 - 処理対象のバラツキ、不純物の存在、機器・試薬・消耗品寿命、制御性等の実条件を踏まえた化学プロセス設計及び実プラントのプロセス仕様設定、設計仕様設定		
		・プラント基本設計 - 主要工程のエンジニアリングフローダイアグラム( P&ID + アイソメ)の作成 - 建屋・セル配置、系統構成、原料タンク、サービスタンクやバッファータンク等を含むプラントのプロセス設計、セル構成設計、主要機器の選定とレイアウト	
		・プラント詳細設計 - 周辺部分のエンジニアリングフローダイアグラムの作成 - 配管の大きさや保守スペース等の実運用を念頭においたプラント構成設計、制御設計、機器配置、セルの設計	
		・機器詳細設計 - 化学品、材料選定	・製造設計
			・プラント設備・機器製造
			・建設技術及びフィールドエンジニアリング
運転保守領域			・運転・保守技術 (技術改良を含む)

注) 安全確保に関する事項については、各段階で当然のこととして検討されるべきことから、表中には記載していない。

## 各再処理プロセスに関する評価の概要

第二再処理工場に係る2010年頃からの原子力委員会における検討に必要なデータを提供することを目的に、「軽水炉からFBRへの移行期」に採用される可能性のある再処理プロセスを対象に、各再処理プロセスの特徴や技術開発進捗度、主要な研究開発課題に関する評価を行い、その概要を以下に取り纏めた。本概要は各再処理プロセスの特徴や研究開発課題等に関して行った議論に基づき、当研究会の共通認識として取り纏めたものである。

## 【PUREX法】

PUREX法は、高除染でウラン及びプルトニウムを個別に回収することを目的に開発された溶媒抽出プロセスであり、抽出剤としてリン酸トリブチル(TBP)を使用する。使用済燃料溶解液よりウラン、プルトニウムを共抽出後、還元剤を用いてウランとプルトニウムを分離し、精製することにより高除染のウラン溶液及びプルトニウム溶液を個別に回収している。

軽水炉使用済燃料を対象とした800tHM/年～1200tHM/年の商業プラントが仏、英、日で稼働中(あるいは稼働目前)であり、技術的に完成度の高い再処理技術である。また、商用再処理プラントを用いて軽水炉MOX使用済燃料を再処理した実績を有する。

PUREX法を用いてFBR使用済燃料あるいは軽水炉MOX使用済燃料を含む軽水炉使用済燃料を再処理するに際して、技術の成立性を脅かすような大きな課題は無い。しかし、廃棄物発生量の低減化や経済性向上に係る改善余地が残されており、今後の処理対象燃料の高燃焼度化やMOX利用(プルサーマル利用及びFBR-MOX利用を含む)に伴う、放射能増加による溶媒劣化に係る対策、不溶解残渣の増加に係る対策等について開発課題が残されている。

PUREX法は、現時点において最も完成度の高い再処理技術であるが、将来、核拡散抵抗性の更なる向上に関する国際的な制約の強化の影響を受ける可能性がある。

## 【コプロセッシング法】

コプロセッシング法は、ウランの一部を常にプルトニウムに同伴させることにより再処理工程内でプルトニウムを単体で抽出した状態が存在しないようPUREX法を改良した技術であり、PUREX法に比べ核拡散抵抗性を向上させたプロセスである。

わが国では、これまでに東海再処理施設(TRP)の小型試験設備(OTL)や高レベル放射性物質研究施設(CPF)において、軽水炉やFBRの実使用済燃料を用いたケミカルフローシート研究や計算コードによるシミュレーション解析が実施されており、コプロセッシング法の技術的成立性は確認されている。

プルトニウムに特定割合のウランを安定的に混入させるためには、PUREX法に比べ許容される運転条件(試薬の濃度や供給流量、操作温度等)幅が狭くなることが判っており、工学レベルでのプロセス設計に向けて、運転条件の許容変動幅の把握や、これを可能とするプロセス制御技術の成立性の見極めが、主要な開発課題となる。なお、コプロセッシング法は、廃棄物発生量の低減化や経済



性向上等のPUREX法と同等の改善余地や開発課題も併せ持っている。

コプロセッシング法は、PUREX法開発を通して得てきたプロセスや機器開発成果を殆ど全て利用可能であり、技術開発に伴うハードルは低く、第二再処理工場用の最も有力な候補プロセスとして開発を進めておくべき技術である。

#### 【先進湿式法】

先進湿式法は、FBR再処理への適用を想定して開発してきたプロセスで、使用済燃料溶解液へ晶析法を適用することにより低除染でウランを粗回収し、後段の溶媒抽出工程のコンパクト化を図ることにより経済性向上及び廃棄物発生量の低減化を狙ったプロセスであり、後段の溶媒抽出工程ではプルトニウムを単体で抽出せずウラン・プルトニウム・ネプツニウムの共回収(簡素化溶媒抽出法)を行うプロセスである。原理的にプルトニウムを単体で抽出することが困難であることから核拡散抵抗性が高く、また、PUREX法やコプロセッシング法と同じ試薬を使用していることから、多くのバリエーションが存在する設備共用ケースにおいて、PUREX法やコプロセッシング法のような進度の高いプロセスとの間で溶媒洗浄工程やユーティリティ等の共用化を図りやすいという利点も有する。

晶析法については、小規模ホット試験によるプロセス開発と工学規模ウラン試験(10t/年)による機器開発が並行して行われてはいるが、小規模ホット試験によるプロセス開発は未だ十分な成果が得られていない。また、簡素化溶媒抽出法については、小規模ホット試験によるプロセス開発を実施中であり、設備のコンパクト化や溶媒劣化の緩和などの利点から簡素化溶媒抽出法での採用を想定している遠心抽出器についても工学規模ウラン試験(50t/年)による機器開発を実施中ではあるが、遠心抽出器開発上重要な不溶解残渣による閉塞事象の機構の解明は不十分である。

先進湿式法の核燃料サイクル上での優位性を左右する可能性のある、先進湿式法により回収される低除染ウラン製品やウラン・プルトニウム混合製品の利用方法を含めた核燃料サイクルシステムの有効性・合理性について、再検討しておくことが最優先課題である。この際、特に以下の点に留意する必要がある。すなわち、晶析法で粗回収されるウランの利用方法について、低除染で粗回収されたウランをそのままFBR燃料の原料としてリサイクル利用する場合には燃料加工設備のセル内設置・遠隔操作化等が不可欠となり、信頼性担保やコスト増加が惹起される。一方、低除染で粗回収されたウランを後段で精製する場合には溶媒抽出工程のコンパクト化という晶析法のメリットが損なわれる可能性が高い。

これらを勘案すると、晶析法により低除染で粗回収されるウラン製品の利用方法を含めた核燃料サイクルシステムの有効性・合理性の再検討または回収ウランを利用しないことの核燃料サイクルシステムとしての合理性検証が極めて重要である。また、晶析法そのものに内在する同法の技術的成立性を左右する可能性のある課題として、不溶解残渣等の微量の固体不純物が含まれる条件下での回収ウランの除染性能の把握や固液ハンドリングを伴う晶析装置の信頼性の確立が重要である。

簡素化溶媒抽出法のプロセスについては、PUREX法において蓄積された技術的知見を利用可能であり、ネプツニウムの共回収率の管理に多少の課題は残るものの解決の見通しは得られている。

遠心抽出器等の機器は、開発された機器がプラント全体の保守方式と整合が取られていることが

不可欠であることから、機器開発の方向性(保守方式、型式選定等)はプラント全体の保守方式に大きく依存する。このため、プラントの保守方式をまず定量的に評価・確認した上で、遠心抽出器開発の方向性について再評価を行うことが不可欠である。また、上記と関連し、遠心抽出器に内在する技術的成立性を左右する可能性のある課題である不溶解残渣による詰まり対策等の課題解決が重要である。

先進湿式法は、工程のコンパクト化に対する開発効果が大きく、また、核拡散抵抗性も高いプロセスであると考えられる。前述の様に、晶析法は、その技術開発に伴うハードルは高いと考えられ、当面、上述した最優先課題への対応を進め、その成果を基に2010年頃に同法の採否判断が行われることが妥当な技術である。遠心抽出器については、技術開発に伴うハードルも中程度と考えられ、且つ、PUREX法やコプロセッシング法、モノアミド法等の溶媒抽出技術全般に適用可能な技術であることから、開発を継続することが妥当な技術であるが、その際に、上述した再評価を実施することが不可欠な技術である。なお、先進湿式法開発の一環として行われている前処理工程の開発は、他のプロセスが採用された場合でも必要となる要素を多く含んでいることから、【別紙 8】「研究開発の進め方、役割分担、進捗度の判断等に際して念頭におくべき再処理プロセスの実用化に必要な分野・領域」を念頭においた上で、着実に開発を行う必要がある。

#### 【モノアミド法】

モノアミド法は、TBPに代わる抽出剤としてモノアミド抽出剤を用いた溶媒抽出プロセスである。モノアミド抽出剤はCHON元素から構成されており、廃抽出剤の処理に伴い特別な廃棄物を発生することが無いため廃棄物発生量の低減化が見込まれる他、タイプの異なるモノアミド抽出剤を開発することによりウランやプルトニウムに対して多様な選択分離性能を持たせることが可能であり、核拡散抵抗性向上や分離工程の簡素化が期待できる。また、TBPに代わる抽出剤として利用可能なことから、新たな機器開発を要しないという利点を有する。

ウラン、プルトニウム、模擬FPを用いた小規模試験を通して、合成した抽出剤の基本性能の評価や分離フローシートの研究を実施している段階にある。

有望な抽出剤に対して、今後、ホット環境での性能(分離性能、抽出容量、耐放射線性等)や安定性・安全性、溶媒洗浄法等についての基礎データの取得が必須となる。また、モノアミド法を第二再処理工場で採用するためには、TBP抽出剤との比較において優位性を有する必要がある、数十年間使い込まれてきたTBPの信頼性を上回るだけのモノアミド法の利点を定量的に示すことが、今後の重要な課題である。

以上から、モノアミド法の技術開発に伴うハードルは高いと考えられるが、技術開発課題は溶媒開発に絞られ、新たな機器開発を要さないことから、多額の開発投資は不要であり、潜在的な可能性を考慮すると、第二再処理工場の候補技術(候補溶媒)として、小規模試験の積み重ねによる基礎的な研究開発を着実に進めるべき技術である。

#### 【FLUOREX法】

FLUOREX法は、使用済燃料をせん断し、燃料部分を粉体化した後、高温でフッ素ガスと反応させ、

ウランは高除染の $UF_6$ として回収、プルトニウムやFP及び残留ウランは酸化物に再転換後、溶解し、溶媒抽出工程にてウラン・プルトニウムの共回収を行うプロセスである。高速処理の可能なフッ化工程で大部分のウランを分離することにより後段の溶媒抽出工程のコンパクト化を狙った技術であり、ウランが $UF_6$ として回収されることから再濃縮利用に適していること、プルトニウム/ウラン比の異なる多様な燃料に対してもフッ化工程でのウラン回収率の制御を通してウラン・プルトニウム製品側のプルトニウム/ウラン比を制御可能であること等の利点も期待される再処理技術である。

ウラン、プルトニウム及び使用済燃料を用いた小規模フッ化試験や小規模の酸化物転換に係る模擬試験等を通して化学プロセスの成立性を見極めていく段階にある。

FLUOREX法は、フッ化プロセスと湿式プロセスを組み合わせたものであり工程が複雑であると考えられることから経済性の立証が最優先課題であり、その他に、使用済燃料の脱被覆・粉体化処理装置の開発や粉体取り扱い技術の確立、回収 $UF_6$ の高除染化に伴う核種挙動の把握(回収 $UF_6$ の除染係数の把握)、湿式工程へのフッ素混入に伴う材料腐食への影響評価等の技術的成立性を左右する可能性のある開発課題の解決が優先課題である。また、ウラン、プルトニウム、FPのフッ化挙動把握やフッ化残渣のフッ化炉からの抜き出し性の確認、フッ素含有廃棄物処理への対応等に関する技術的課題解決も重要である。さらに、回収ウランを $UF_6$ として回収することの優位性について、回収ウランの再濃縮需要の観点から再評価することも重要である。

以上から、FLUOREX法の技術開発に伴うハードルは非常に高いと考えられ、また、国内で工学規模のホット試験を実施できる施設が無いことからホット試験の実施を海外機関に依存している事を考慮すると、第二再処理工場の設計が開始されると目される頃までに、上述の重要な課題解決が見通せる段階に至ることは簡単ではないと予想され、今後の研究開発成果を踏まえて2010年頃に、以降の開発規模やその継続の是非を再評価すべき技術である。

#### 【NCP沈殿法】

NCP沈殿法は、FBR再処理への適用を想定した低除染プロセスであり、使用済燃料溶解液にウラン選択性の高い沈殿剤を加え、大部分のウランを沈殿分離(粗分離)した後、次にウラン・プルトニウム選択性の高い沈殿剤を加えることによりウラン・プルトニウム沈殿を生成させ、各沈殿物を焼成することによりペレット燃料化するプロセスである。高選択・制御性沈殿剤の組合せ適用により工程の合理化が図られること、沈殿剤の添加量でプルトニウム富化度を調整可能なこと、沈殿剤はCHON元素で構成されており焼成により二次廃棄物を発生しないこと等の利点が期待される。

ウラン、プルトニウム、模擬FPを用いた小規模沈殿試験等を通して化学プロセスの成立性についての確認や、工学規模の沈殿槽を用いたウラン沈殿物生成試験、実機相当の遠心分離装置を用いた沈殿物分離試験等が行われている段階にある。

今後、沈殿操作時における廃液側へのウラン、プルトニウムの移行率の把握(ウラン、プルトニウムの回収率の把握を含む)や、固液ハンドリングを伴う沈殿装置の信頼性や耐久性、保守性の確立、沈殿物の酸化ばい焼後の炭素含有率の低減等の技術的成立性を左右する可能性のある開発課題の解決が最優先課題であり、また、除染性能向上策の検討や沈殿による配管等の閉塞への対応等に関する課題解決も重要である。

以上から、NCP沈殿法の技術開発に伴うハードルは非常に高いと考えられ、その分離原理から回収ウランやウラン・プルトニウムの高除染化が望めないプロセスであり、NCP沈殿法を採用するためには燃料加工工程のセル内設置・遠隔操作化が前提となる。したがって、NCP沈殿法の開発は、燃料加工工程の開発と整合性を取りつつ進める必要があり、当面、化学プロセスの成立性に係る開発を中心に進め、NCP沈殿法に係る今後の研究開発成果と燃料加工工程の開発状況を踏まえて2010年頃に、以降の開発規模やその継続の是非を再評価すべき技術である。

#### 【超臨界直接抽出法】

超臨界直接抽出法は、せん断・粉化した使用済燃料を充填した直接抽出塔に、TBP硝酸錯体を超臨界CO<sub>2</sub>に溶解させ通気し、燃料中のウラン、プルトニウム、MAを高圧状態で直接抽出し、MA洗浄塔を経て、ウラン・プルトニウム逆抽出塔でウラン・プルトニウム・ネプツニウムを得るプロセスである。固体の状態から直接ウラン・プルトニウムを抽出しFPを分離することから抽出工程の大幅な簡素化が図られること、抽出残渣を最小限の硝酸で溶解し高レベル廃液とすることから廃液濃縮設備が簡素化されること、既にMA分離機能を一部内在しており本格的なMA回収プロセスへの発展が容易であること等の利点が期待される再処理技術である。

ウラン、プルトニウム及び使用済燃料を用いた小規模抽出試験や高圧シールバルブの工学規模試作品を用いたシール特性試験等を通して化学プロセスの成立性を見極めている段階にある。

使用済燃料の脱被覆・粉体化处理装置の開発や粉体取り扱い技術の確立、使用済燃料の粉体(固体粒子)を取り扱う条件下で使用される高圧シールバルブの開発等の技術的成立性を左右する可能性のある開発課題の解決が最優先課題であり、その他に超臨界直接抽出性能(除染性能等)やその抽出メカニズムの解明、高圧使用条件下における安全性評価等に関する課題解決が重要である。

超臨界直接抽出法は、その開発に成功すれば工程の大幅な簡素化が期待されるものであるが、前述の様に技術開発に伴うハードルは非常に高いと考えられ、今後の研究開発成果を踏まえて2010年頃に、以降の開発規模やその継続の是非を再評価すべき技術である。

#### 【イオン交換法】

イオン交換法は、使用済燃料溶解液より、イオン交換樹脂にてウラン・プルトニウム及びFPを分離するプロセスであり、プロセス全体をコンパクトにできる可能性を有している。

ウラン、プルトニウム及び使用済燃料を用いた小規模分離試験等を通して化学プロセスの成立性についての確認試験が過去に行われている。

実用化に向けては、樹脂と硝酸の反応等による火災・爆発に係る安全性の確認のほか、溶解液中のスラッジによるイオン交換塔の閉塞対策や分離処理の際の溶離液切り替え時のクロスコンタミ対策等の技術的成立性を左右する可能性のある開発課題の解決が最優先課題である。

以上から、イオン交換法の技術開発に伴うハードルは非常に高いと考えられ、また、現在、開発主体が不在であり、実用化に向けた技術開発の見通しも不透明であり、現時点においてイオン交換法の開発を再開することが現実的な選択とは考えられない。

## 【海外技術】

COEX法は、核拡散抵抗性向上を目的に、仏国AREVA/CEAにて開発中の再処理技術であり、ウラン・プルトニウム混合溶液の酸化物への転換にシュウ酸沈殿法を用いているものの分離工程についてはコプロセッシング法と同様と推定される。

仏国において小型パルスカラムを使ったホット試験を実施済みだが詳細は不明である。

UREX+法は、社会的要求の変化に対応できる融通性をもった再処理技術として米国DOE/ANLにて開発中であり、使用済燃料溶解液にAHA(アセトヒドロキサム酸)を加えウランのみをTBPにて溶媒抽出した後、残った溶解液から溶媒抽出によりプルトニウム・ネプツニウムを回収するとともに、多様な試薬等を使用し、長寿命FPや発熱性FP及びTRU元素を分離回収するプロセスである。

米国において小型遠心抽出器を使ったホット試験を実施中である。

GANEX法は、仏国CEAにて開発中の再処理技術であり、モノアミドを用いた溶媒抽出法により大部分のウランを分離した後、ウラン・プルトニウム・MAの一括回収を目指したプロセスである。

一括回収に係る具体的方法(選定溶媒)や開発状況の詳細は不明である。

海外技術については、継続して情報収集、文献調査を実施していくことが必要である。