



将来の原子力開発の在り方についての提言

(原子力発電利用シナリオの諸量評価等から得られた知見に基づく)

2024年3月12日

特定非営利活動法人

革新的原子炉推進協議会

理事長 **田中敏幸**

2024年3月12日

将来の原子力開発の在り方についての提言

(原子力発電利用シナリオの諸量評価等から得られた知見に基づく)

原子力の必要性については、再生可能エネルギーと補完し合ってカーボンニュートラルの達成や、資源の少ない我が国のエネルギー源として重要であると位置づけられてきている。更に、持続的に原子力を利用していくためには、ウラン資源の利用効率向上や核廃棄物の毒性低減による環境負荷低減の観点から、現状の軽水炉サイクル*¹からナトリウム冷却高速炉を用いた高速炉サイクル*²へ移行し、核燃料のクローズドサイクルの確立が必要であることが、原子力発電利用のシナリオ検討の結果として示されてきている。

当NPOでは、このような視点から、高速炉サイクル導入戦略について、革新炉有識者会議を設け、原子力発電利用シナリオの諸量評価や核燃料サイクルに係る技術開発の現状などについて、最新の情報を把握するとともに、取り組むべき課題について検討を重ねてきた。

これらの検討結果を踏まえ、昨年度の提言に加えて我が国として取り組むべき重要な課題について、次のように提言するものである。

* 1 軽水炉再処理とプルサーマル利用を行う軽水炉燃料サイクル

* 2 高速炉の導入とその燃料サイクルを確立した高速炉燃料サイクル

提言 1.

原子力の持続的利用の観点から、高速炉サイクルへの移行を、国の政策として明確に位置づけ、国民の合意形成を図ることが必要である。

提言 1. の説明

持続的な原子力利用を達成していく為には、軽水炉サイクルから高速炉サイクルへの移行を、国の政策として明確に位置付けるとともに、国民の理解醸成に努めることが必要である。

その取り組みの一環として、利用目的の無いプルトニウムは持たないとの理念の元、平和利用の観点から核セキュリティの確保を前提に、高速炉への供給のためのプルトニウムの備蓄等、柔軟な対応が可能となるよう検討を進めることが必要である。

また、軽水炉における燃料利用効率向上の観点からプルサーマルを実施していくが、軽水炉プルサーマル使用済み燃料については、その有効利用及びその核廃棄物の毒性低減を図るため、高速炉サイクルへの移行を前提とした核燃料サイクルに組み入れていくことが合理的な核燃料サイクルとして必要であり、その為の技術開発の具体化が必要である。

提言 2.

高速炉サイクルへの移行には、信頼性や成立性を実証するための技術開発とともに、許認可性の見通しを得るための取組が必要である。

提言 2. の説明

軽水炉サイクルから高速炉サイクルに移行するために必要な技術開発が、国の定める開発ロードマップに沿って行われているが、開発段階は実用化の段階に達しておらず、開発レベルを実用化可能なレベルに引き上げることが肝要である。

高速炉サイクルを社会のエネルギー供給の基盤として位置づける為には、産業として信頼して採用される技術であることが必要であり、その為の具体的な開発計画の明示が必要である。

核燃料サイクルの要素技術の実用化の見通しがシナリオに大きく影響するので、最適シナリオを実現するためにも、まず、第一優先として、実用化のための技術開発と採用できる技術を確立することが必要である。

また、新しい分野であるので、規制当局の事前審査等により、その許認可性の見通しを得ていくことが重要である。

開発目標をこのような視点に置いて開発計画を明確にすることが必要である。

提言3.

高速炉サイクルを前提として進められている原子炉、燃料、再処理技術の複数の技術選択肢については、早期に実用化の可否判断が出来るよう、開発を進めることが必要である。

提言3. の説明

ナトリウム冷却高速炉サイクルを前提として進められている原子炉、燃料、再処理技術に関連する技術開発の複数の選択肢については、早急に実用化の可否判断が出来るよう開発を進めることが必要である。特に、MOX燃料、金属燃料両方にも対応可能な乾式再処理については、早急に実用的な選択肢として判断可能なレベルまで開発を進めることが望まれる。

提言 4.

開発の最適化を図るため、恒常的な開発シナリオの検討と開発計画への反映が必要である。

提言 4. の説明

将来の電力需給見通しを現時点で確定することは困難であるが、現状の原子力の供給力が大幅に増加することも想定される。加えて、軽水炉の供用期間の在り方が、核燃料サイクルの移行の時期と期間に大きく影響を及ぼすことが考えられる。

技術開発の進展や電力需給変動・供給電源状況が今後の開発シナリオに大きく影響を及ぼすので、それらの調和を図っていくことが必要で、絶えず開発状況などが開発シナリオにどのような影響を及ぼしているか継続的な評価を行い、開発要素の促進や選択を行うことが必要である。

また、将来の原子力開発の在り方の検討に当たっては、実用化に向けた経済性評価も重要である。技術開発の進展に応じ、個々の技術の経済性評価の精緻化を図るとともに、核燃料サイクル移行の在り方に伴う経済性評価を明らかにしていくことが必要である。

以上

原子力発電利用シナリオの諸量評価や 高速炉サイクル技術開発から得た知見と取組課題

2024年3月12日
NPO 革新的原子炉推進協議会

CN 達成の観点から、再生可能エネルギーと共存して原子力エネルギーの利用が必要であることを、前回の当法人主催のシンポジウム(2023年6月17日開催)において示してきた(*1)。

(*1「原子力の必要性と役割(原子力による温暖化・エネルギー危機の回避)」辻倉)

原子力エネルギーが必要なものであり、それを持続可能なものとするためには、どのような開発計画が必要であるかを明確にしていくことが重要である。技術開発の現状から抽出される固有技術の開発課題に加えて、この観点から、多様なシミュレーションによる核燃料サイクルの諸量評価が行われてきた。これらのシミュレーションの諸量評価から、種々の知見が得られてきている。

将来のエネルギー需給の変動に応じて、最適な開発計画は大きく影響を受けるが、ここでは現状の原子力供給力(総発電量の20~22%)が将来的にも求められることを想定したケースをベースとして、将来の開発計画における課題を抽出した。また、安定的で経済性のあるCN社会の実現にむけて、さらにそれを上回る原子力発電量も想定されることから、その場合に対しても追加的な課題を抽出した。

また、必要な技術開発が精力的に行われることが肝要であるが、技術開発の進捗や需給の変動などを慎重に見極め、開発計画の柔軟な評価見直しが継続的に行われることが必要である。

以下に、原子力発電利用シナリオの諸量評価から得られた知見、及び高速炉サイクル技術開発から得た知見や取組課題の現状を示す。

I. 原子力発電利用シナリオの諸量評価から得られた知見

参考:1)「幅広い原子力発電利用シナリオの諸量評価」JAEA 西原氏 JAEA-Data/Code 2020-005、2)「NMB 解析例」西原氏@2023年10月16日当法人有識者会議、3)「Management of MOX Spent Fuel from LWR: (2)Assessment of material flow」Kenji Nishihara et al @IEMPT-16(2023年10月)

1. 軽水炉サイクルから高速炉サイクルへの移行の必要性

以下に示すような知見から、持続的にエネルギー供給を可能にするためには、高速炉サイクルへ移行していくことが必要である。それに向けては、技術開発達成度は軽水炉サイクル*1に比べ低く、高速炉サイクル*2実用化のための技術開発の促進が必要である。

*1 軽水炉再処理とプルサーマル利用を行う軽水炉核燃料サイクル

*2 高速炉の導入とその燃料サイクルを確立した高速炉核燃料サイクル

- ① 高速炉サイクル移行完了後はウランの輸入が必要なくなり、持続的にエネルギーの供給が可能。(添付図 1-1~1-3)
- ② 発電に伴う廃棄物を減量、減衰させ、環境負荷を低減することが可能(添付図 1-4)。
- ③ 核エネルギーの平和利用の観点から、Pu 単独の形では保持せず、核不拡散性の向上が図れる。
- ④ 革新的技術の導入により、安全性、信頼性は軽水炉と遜色ないレベルの確保が可能な見通しがある。(Na 高速炉の安全性の特徴や安全性向上策例:添付図 1-5~1-8)
- ⑤ 高速炉サイクルの価値は経済性だけから決まるものではないが、軽水炉サイクルと同程度の高い経済性を持つとの評価例がある(*2 及び添付図 1-9)。これに関しては、今後の技術開発成果を踏まえ、今後評価をしていく必要がある。

(*2「高速炉サイクルの経済性評価」JAEA 向井田氏他@日本原子力学会誌 2019Vol61)

2. 軽水炉サイクルから高速炉サイクルへの望ましい移行の在り方

核燃料サイクルの移行に当たっては、軽水炉の寿命に応じて軽水炉のリプレースを高速炉で行うことが天然ウラン燃料使用量の低減、核廃棄物の毒性低減による環境負荷低減などの観点からは望ましい。軽水炉の寿命を 60 年としてリプレースを軽水炉で行うと高速炉の導入は 2100 年以降となり天然ウランの消費量が増大し、持続的な原子力エネルギー利用の観点から不利である。

その為には、

- ① 軽水炉の寿命延長は二つの視点から重要である。
 - ア. 高速炉サイクルの実用化に整合させる。
 - イ. 軽水炉の有効利用。
- ② 軽水炉の寿命延長により既存軽水炉のリプレース必要時期に柔軟性を持たせるとともに、軽水炉寿命に対応して高速炉導入が可能なように、高速炉サイクルの開発、実用化を促進することが必要である。

高速炉サイクル技術の開発が遅れた場合でも、出来るだけ早期に高速炉によるリプレースに移行することが、その後の燃料供給や環境負荷低減の観点から必要である。
- ③ 軽水炉サイクルから高速炉サイクルへの移行に当たっては、関連技術の開発状況、軽水炉の使用可能期間、電力需要による必要な原子力供給力の確保など多くの要因に対応していくことが必要である。その為、使用済み燃料貯蔵、燃料供給、再処理等それぞれの方式や規模など適切に選定していくことが必要である。(添付図 1-2)
- ④ 軽水炉から高速炉への移行に際しては、再処理の実施による十分な Pu が必要である。現状、「使用目的のない Pu は持たない」との理念に基づき、現状より Pu 在庫を増加させない方針であるが、高速炉への移行に際しては十分な Pu が必要なことから、核拡散抵抗性を配慮の上、柔軟な対応とする必要がある。(添付図 1-2)
- ⑤ 軽水炉によるリプレースや増設により軽水炉の利用が長期に亘る場合には、軽水炉の使用済み燃料の再処理が長期化することになり、軽水炉再処理／高速炉再処理の合理的な在り方の

検討が必要である。天然ウランの追加調達、Pu バランスを考えたスムーズな移行、軽水炉使用済み燃料の再処理方式や規模の在り方等について、高速炉の導入規模やその再処理との関係などと整合を図りながら、総合的に合理的なシステム構成を検討していくことが必要である。

- ⑥ CN の確実な実現や電化促進による電力需要増加のために、原子力の発電量が大幅に増加するケースも想定しておく必要がある(30GW レベルから倍増等)。この場合、高速炉の導入が並行して可能だとしても、相当規模の革新軽水炉によるリプレースや増設が想定される。それらの高速炉への移行は新設された革新軽水炉の供用終了以降に、相当規模の高速炉への移行が必要となり、相当期間、軽水炉と高速炉の燃料サイクルが混在することとなり、上記と同様に合理的なシステム構成の検討が必要である。

⇒軽水炉再処理と高速炉再処理が、長期に規模も大きく混在することになるが、それに対する合理的な再処理方式や規模の検討が必要である。

3. 軽水炉プルサーマルの在り方

軽水炉プルサーマルは軽水炉サイクルにおける Pu の有効利用の観点から有効であり、分離された Pu の保管量低減に寄与することが出来る。一方、Pu サーマルの使用済み燃料は、ウラン燃料の使用済み燃料に比べ、Pu や MA が数倍多く、放射線量や発熱が多くなり、現状の軽水炉用再処理施設では取扱いが難しい上に、高レベル廃棄物の量も増加する。また、マルチリサイクルをすると、Pu の組成の悪化(核分裂性 Pu 割合が低下)が生じるため、軽水炉で再利用する場合 Pu 濃度を高める必要があり利用しにくくなる。

この Pu サーマルの使用済み燃料で増加する Pu の偶数核や MA は、高速炉では核分裂しやすいため、有効利用しやすい。(添付図 2-1)

従って、高速炉サイクルへの早期移行を前提とするならば、軽水炉プルサーマルのマルチリサイクルは、再処理の経済性面や環境負荷の観点からも不利であるため、プルサーマル利用は一回とし、その使用済み燃料は高速炉サイクルで利用することが望ましい。

II. 高速炉サイクルの技術開発から得られた知見

高速炉サイクル開発の主な技術的要素は、高速炉、燃料、再処理技術である。

参考: 1)「高速炉サイクルの実用化への取組」JAEA 早船氏(@2022 年 11 月 26 日当法人シンポジウム)、2)「金属燃料と乾式再処理」電中研・飯塚氏(@2022 年 11 月 26 日当法人シンポジウム)、3)「先進湿式再処理・酸化物燃料開発の現状と今後の課題について」JAEA・竹内氏(@2023 年 12 月 18 日当法人有識者会議)、4)「金属燃料サイクル技術開発の現状と課題」電中研・尾形氏(@2023 年 12 月 18 日当法人有識者会議)

1. 高速炉の開発

炉型選定として、タンク型とループ型ともに、技術的には成立可能な見通しであるが、信頼性、経済性等技術評価の結果として選定することが必要である。

それぞれの利害得失は次の通り(添付図 3-1)。

①ループ型の特徴

- ◆各機器への接近性が良く、保守・補修、改造の点で有利
- ◆原子炉容器を小型化でき、工場内での組立が可能。また、耐震設計条件を満足させやすい
- ◆配管系設計では、熱応力を緩和するため曲がりをもとった柔な構造と、耐震設計の観点から要求される剛な構造とを成立させる設計上の工夫が重要となる
- ◆1次系の配管破断事故に対する設計対応が必要
- ◆常陽やもんじゅでの国内実績があり

②タンク型炉の特徴

- ◆Na インベントリーが大きく熱慣性が大なので外乱に対して熱過渡が小さい
 - ◆炉心がナトリウムに浸漬されており、冷却系機能喪失時における炉心冷却が容易。また、1次冷却材バウンダリーからの冷却材漏洩対策が容易
 - ◆大型炉では、原子炉容器径は16~20 m にもなり、耐震条件の厳しい日本では成立性が厳しくなる可能性有⇒免震構造が必要になる可能性大
 - ◆海外での実績が多い
- ⇒免震構造検討が実施はされてはいるが(添付図 3-2)、その適用は初めてのことであり、適用に際しては、許認可性の観点から、早い段階からの規制庁との会議を持つことが望ましい。

2. 燃料選定

MOX 燃料か金属かの選定は、それぞれの特性や安全性等について開発課題や効用が明らかにされてきている。再処理方式とリンクして、技術評価に基づき選定を行うことが必要である。

それぞれの利害得失は次の通り(添付図 4-1~4-2 及び添付 1~3)。

① 金属燃料の特徴

メリットとしては下記。

- ◆同一出力に対して、MOX に比べて少ない Pu 量で炉心設計が可能。
- ◆金属燃料の方が、MOX に比べ、増殖比は大きくなる傾向(スペクトルがハードなため)
- ◆乾式再処理との組み合わせで、再処理~加工まで一貫した小規模な設備での対応が可能である。また燃料製造では射出成型など原理的に簡単で、小規模での経済性の確保が可能。MA も同時回収できる。

デメリットとしては下記

- ◆0.1MeV 以上の高速中性子束が増加し、被覆管健全性上は MOX よりデメリットがある。
- ◆照射実績は、米国 EBR II であるが、酸化物燃料に比べれば少ない。
- ◆金属燃料は、被覆管との共晶反応(液状化)が 650~675 度で起こる。このため、出口温度を

MOX の場合より低くする必要があり、発電効率は低下する。過酷事故時の安全性評価も課題がある。

以上のように燃料サイクルの観点からは MOX に比べて優位な特性を有している。一方、炉心の安全性の観点から高温域での燃料被覆管との共晶反応を生じることから、発電効率の低下や、過酷事故も含めた炉心の安全性評価等今後の研究開発領域が残されている。

② MOX 燃料の特徴

炉心特性的には上記の通り金属燃料が優れた面があるが、MOX 燃料においても高速炉サイクルへ移行するにあたり、Pu バランスや増殖比などの面で課題となることはなく、同様に高速炉サイクルへの移行は可能である。

また、炉心の安全性の観点からは実績があり、特段の問題がなく実用化の観点からは金属燃料に比べ完成度が高いと評価できる。

3. 再処理技術の開発

再処理技術については実用化研究、FaCT フェーズ I に続く湿式再処理ならびに乾式再処理の実用化研究開発が行われている。

それぞれの再処理方式の特徴と開発段階の現状は以下の通りである。(添付図 5-1~5-4)

① 乾式再処理の特徴

乾式再処理の主な特徴は下記の通りである

- ◆比較的過程が簡素であり、小規模でも経済性確保が可能。
- ◆10kg/日程度の処理規模(小~中型炉一基分)で、米国で実績があり。
- ◆原理的にMAがU-Puと随伴するので、核拡散抵抗性が高い。

乾式再処理技術は、米国での実績に加え、国内でも各種の研究開発(MA を含む照射燃料の乾式再処理実証、工学規模乾式リサイクル試験、工学規模機器開発(コールド)、工学規模ゼオライトカラム試験など)が実施されており、添付図 5-5 の通り、各技術の TRL は 4~6レベルにあるが、相対的に TRL の低い廃棄物処理関係について、実用化に向けたプロセスの最適化と遠隔操作や遠隔保守対応した機器の設計・製作経験の実施が必要である。

② 先進湿式再処理の特徴

先進湿式再処理の特徴は下記の通りである。

- ◆湿式(Purex 法)は大量処理に向いており、分離性能が高く、また FP の除去効率が高い特徴があり、商業レベルの実績がある。
- ◆先進湿式再処理は、実績のある Purex 法をベースに、低除染燃料の使用が許容される高速炉の特徴を生かし回収や生成工程の合理化、廃棄物低減・有害度低減のためのMA回収、核拡散抵

抗性向上 (U-Pu-Np の一括回収) を図ったものである。

◆小規模 (50t/年) レベルでは金属サイクルに比べ経済性に劣るが、スケールアップによる経済性向上効果は大きく、大量処理 (200t/年) レベルでは、金属サイクルより経済性に優れるとの 2006 年評価がある。

◆経済性評価に関しては、最新の技術開発状況での見直しが必要である。また、高速炉サイクルとして、どの程度の規模を想定するかにより、湿式方式と乾式方式の経済性優劣は変わるので、それも踏まえた総合評価が必要である。

先進湿式再処理の各要素技術の TRL は添付図 5-6 の通りであり将来的には TRL6 レベルに引き上げの開発は必要であるが、本方式は実績のある技術をベースにした高度化であり、成立性の点では、相対的に TRL の低い MA 分離回収技術と U-Pu 共抽出技術の開発を重点的に実施する必要がある。

以上

「原子力発電利用シナリオの諸量評価や高速炉サイクル技術開発から得た知見と取組課題」の添付図

2024年3月12日
NPO革新的原子炉推進協議会

1

1-1 軽水炉サイクルから高速炉サイクルへの移行時の天然ウラン使用量

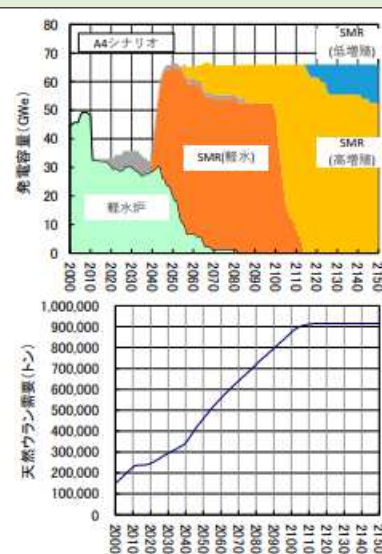
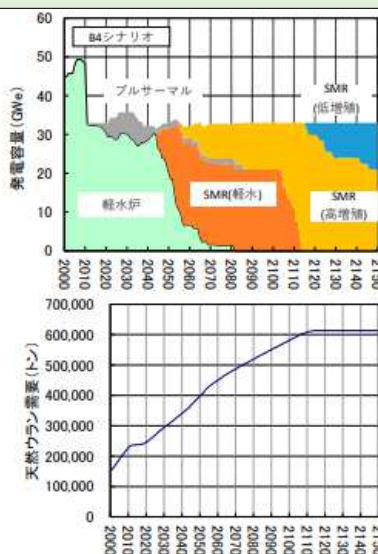
* 図は「幅広い原子力発電利用シナリオの諸量評価」JAEA西原健司氏JAEA-Data/Code 2020-005より抜粋

B4 シナリオ (現状、高速炉移行、MA リサイクル)

A4 シナリオ (上振れ、高速炉移行、MA リサイクル)

- 天然ウランの累積消費量は、将来の発電量33GW、66GWにおいて、**高速炉サイクル移行完了に伴いそれぞれ61万t、92万tで、飽和しており、それ以降はウランの輸入は必要がない。**
- 2020年以降の使用量はそれぞれ36万t、67万tであるが、これは全世界のウラン資源量792万(*)の約5~9%を日本が使用することにあたる。

* 2021年1月1日付けのUS \$ 260/kgU以下のウラン資源(確認資源469万t+推定資源323万t)



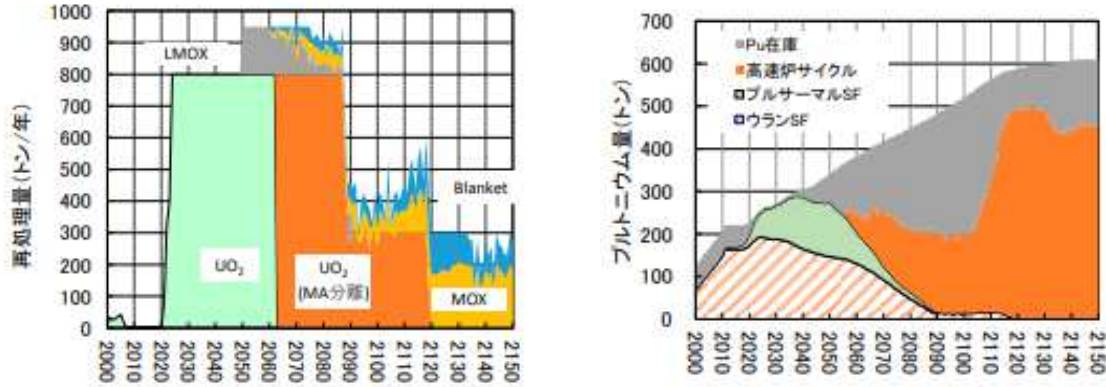
尚、本検討では軽水SMRや高速SMRとの記載となっているが、炉のデータは両者とも大型炉のデータを用いており、大型炉で評価した場合の物量バランス評価になっている

2

1-2 高速炉サイクルへの移行時の再処理量及びPu量

* 図は「幅広い原子力発電利用シナリオの諸量評価」JAEA西原健司氏JAEA-Data/Code 2020-005より抜粋

B4 シナリオ(現状、高速炉移行、MA リサイクル)



- ◆シナリオ分析による諸量評価により、再処理の方式や規模等を適切に選定していく必要がある。
- ◆高速炉へのスムーズな移行に際しては、使用目的のあるPuの在庫量は増加(上記ケースでは大量の軽水炉⇒高速炉に置き換わる2100年頃に最大時約300t)。このPuは、核拡散抵抗性向上の観点からPu単独の形で保持しない。⇒現状、使用目的のないPuは持たないとの理念に基づき、現状より分離Puは増加させない方針としているが、高速炉移行に際して柔軟な対応とする必要がある。

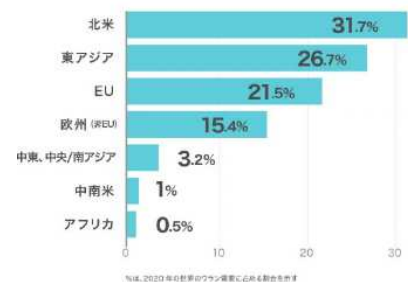
3

1-3 ウラン資源量とウラン需要

IAEA—OECD/NEAのUranium 2022: Resources, Production and Demandによると

- ウラン資源量(2021年1月1日現在)
US \$ 260/kgU以下 792万t(確認資源 469万t+推定資源323万t)
このうちUS \$ 130/kgU以下は、608万t(382万t+226万t)
- 2020年のウラン需要は6.0万t(右図)
2040年の高予測シナリオでの約10.7万t(低予測では約6.2万t)

世界の2020年のウラン需要: 60,114tU
(2021年1月1日現在、運転中442基)



* 図は日本原子力産業協会「ウラン2022 資源、生産、需要」ポイント紹介より引用

全世界で平均10万t/年で使用すると、2100年頃には現行の確認+推定資源(US \$ 260/kgU以下)は使いきることとなる。

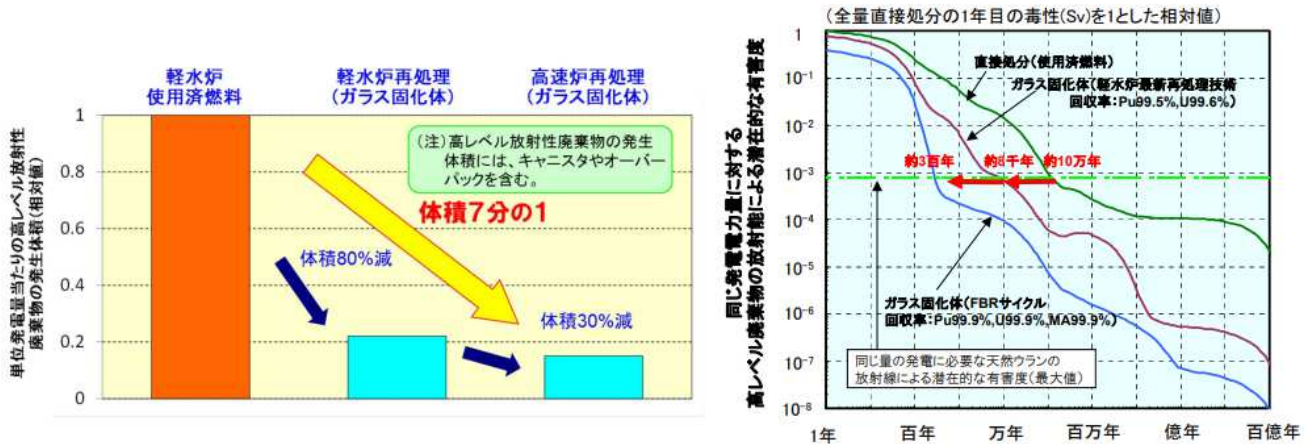
* 海中には、約45億トンのウラン資源があるが、溶存濃度3.3ppb(海水1t中3.3mg)と極めて薄く、経済的で、効率よくウランを回収できる開発が必要

4

1-4 高速炉サイクルによる廃棄物の減容化と有害度低減

高速炉サイクルにより、長半減期のPuやMAが有効利用され、有害度が10万年から300年と短縮され、高レベル廃棄物体積が約1/7に低下

*) 下図は「廃棄物の減容・有害度の低減のために」2012年11月21日JAEA資料より抜粋



5

1-5 軽水炉と比較したNa高速炉の特徴

	軽水炉 (LWR)	ナトリウム冷却高速炉 (SFR)
炉心・燃料特性	<ul style="list-style-type: none"> 最大反応度体系 冷却材喪失及び燃料溶融時に大きな正反応度挿入なし 	<ul style="list-style-type: none"> 最大反応度でない体系 炉心中心領域でNaボイド反応度正 溶融燃料の集中で大きな正反応度
冷却材の特性	<ul style="list-style-type: none"> 水 熱伝導率低 低沸点 100°C(大気圧) 345°C(16MPa) 化学的活性小 	<ul style="list-style-type: none"> Na 熱伝導率高 高沸点 883°C(大気圧) 化学的活性大
原子炉冷却系圧力	<ul style="list-style-type: none"> 高圧(70~150気圧) 	<ul style="list-style-type: none"> 大気圧と同程度(数気圧以下)
材料の使用環境	<ul style="list-style-type: none"> 比較的低温 熱中性子場 水冷却材 	<ul style="list-style-type: none"> 高温(300~600°C) 高速中性子場 Na冷却材

* 「高速炉の安全性について」可児氏@高速炉開発会議戦略WG(2017年12月19日) より抜粋

6

1-6 Na高速炉の安全上の特徴

長所

- ◆Naの高い熱輸送能力 ⇒ 電源が喪失しても、自然循環による崩壊熱除去が可能
- ◆低圧系 ⇒ 1次系圧力は大気圧近傍であり、ガードベッセルにより
1次系冷却材喪失は防止可能(軽水炉ではLOCA対策が安全上重要)
- ◆被覆材温度が上昇しても、水素が発生しない
(1F事故では高温水と被覆材の反応による水素発生が爆発につながった)

課題

- ◆冷却材のNaの化学的活性が大きい ⇒ Na燃焼火災、Na-水反応への対処が必要
- ◆Naボイド反応度が正になる傾向(*) ⇒ 形状やブランケット配置等に工夫必要
- ◆熔融燃料の集中で大きな正の反応度 ⇒ 燃料熔融時の再臨界防止が必要

*以下の②の効果より①③の効果勝り、炉心の内側でNaボイド反応度は正になる傾向。
Naの密度が下がると、①Naによる中性子の吸収が減少(正の効果) ②炉外への漏れが増大(負の効果)
③中性子のスペクトルがエネルギーの高い側にシフト: 共鳴吸収減少、Puの核分裂増加(正の効果)

7

1-7 Na高速炉の安全性向上策

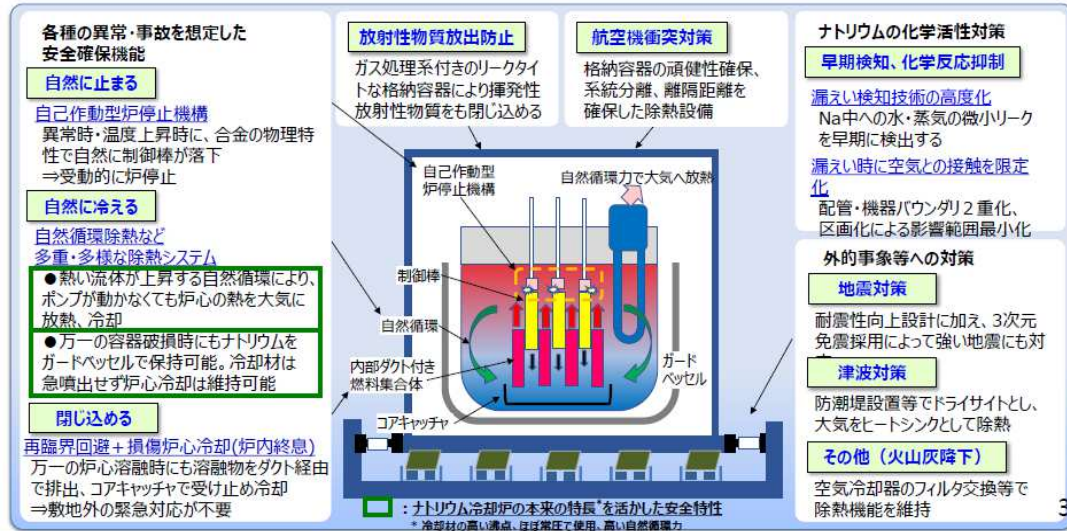
Na高速炉の特性や1F事故を踏まえ、下記のような安全性向上に向けた各種検討を実施⇒**その実証や反映が必要**

課題	対応策	具体例	DRACS: 原子炉容器内に冷却器を直接浸漬して崩壊熱を除去する方式 PRACS: 一次主冷却系に補助的な冷却器を組み込んで崩壊熱を除去する方式 IRACS: 二次主冷却系を補助的な冷却器で冷却する方式 RVACS: 空冷で圧力容器を冷却
負のフィードバック	◆中性子漏洩増加等	◆金属燃料 ◆細身炉心 ◆扁平炉心 ◆非均質炉心 ◆温度上昇時集合体隙間からのストリーミング増加	
炉停止	◆独立2系統の制御棒 ◆受動的停止系	◆異なる機構による制御棒挿入 ◆キュリー一点電磁石方式SASSなど	
崩壊熱除去	◆Naや空気の自然循環による自然循環冷却	◆高低差活用 ◆DRACS ◆PRACS ◆IRACS ◆RVACS	
再臨界回避	◆熔融燃料を平らな形状にする	◆再臨界回避のための内部ダクト付燃料 ◆コアキャッチャー	
Naの化学的活性対策	◆Na漏洩対策(1次系) ◆Na漏洩対策(2次系) ◆反応抑制	◆Na検知⇒炉停止、ガードベッセル、窒素雰囲気、コンクリートはライナーで内張 ◆Na検知⇒炉停止、床ライナー、窒素ガス注入機能 ◆2重管SG ◆可燃性低下を図ったナノ粒子を分散したNa ◆3次元免振システム	
耐震性向上	◆免振システム		

8

1-8 Na高速炉の安全性向上例

「常陽」「もんじゅ」から得た知見・成果を含め、Na高速炉の特性や1F事故を踏まえた、受動安全の活用など新たな機能を付加した堅牢なシステム



*「高速炉サイクルの実用化への取組」JAEA早船氏(@2022年11月26日 当法人シンポジウム)より抜粋

9

1-9 軽水炉とNa高速炉(SFR)の発電コスト評価例

2019年JAEAの評価例(*1)によれば、軽水炉と高速炉の発電コストは下図の通り同等となっている。

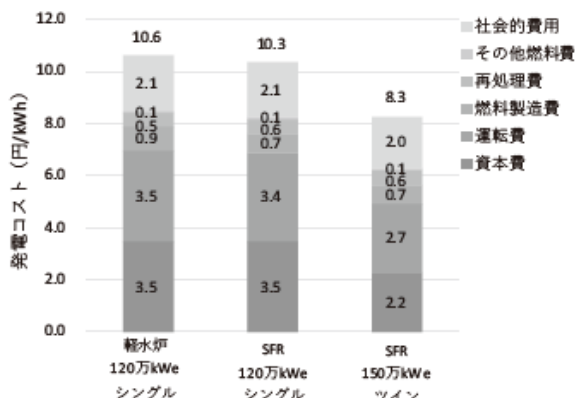


図6 発電コスト評価結果

*1)「高速炉サイクルの経済性評価」日本原子力学会誌2019Vol61, JAEA向井田氏他 FaCTフェーズ I におけるSFR及びSFR用燃料サイクル施設の合理化設計ベースに、1F事故を踏まえた安全対策費等を考慮して試算した結果

*2) FBR大型炉(酸化炉) 出口550度 1500/3530⇒熱効率42.5%

左記結果の主な要因の考察

- ◆ 建設費(資本費)は、SFRの方が中間熱交等中間ループが必要となり物量が増え、熱出力あたりの建設費は大きくなる傾向。一方、SFRは酸化炉燃料の場合、熱効率が42.5%(出口温度550度*2)と軽水炉の約35%より、相対的に20%強高くでき、kWeあたりの建設単価は下げる方向。結果としては、この評価では建設単価(資本費)は同程度となっている。
- ◆ 燃料製造費、再処理費は、高放射線対策や発熱量増大等でSFRでは上がる傾向だが、一方、燃焼度が高くできること及び熱効率が高いことで低下方向であり、この評価では同程度。
- ◆ その結果、**発電コストは同程度となっているが、今後設計の進捗により、検証が必要である。**

10

2-1 プルサーマル使用済み燃料の扱い

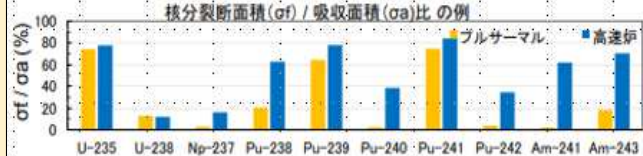
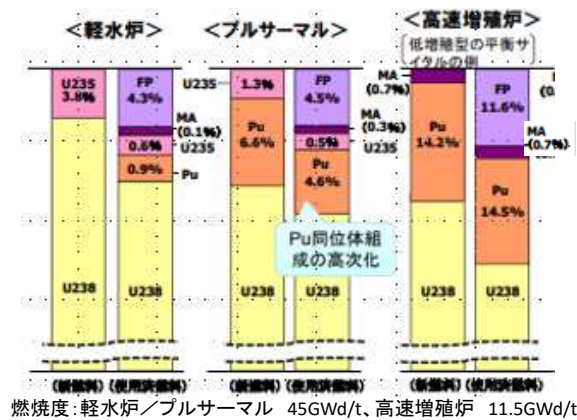
◆ プルサーマルの使用済み燃料は、ウラン燃料の使用済み燃料に比べ、PuやMAが数倍多く、放射線量や発熱が多くなり、現状の軽水炉用再処理施設では取扱いが難しい。

◆ Pu同位体組成の高次化(核分裂性Pu割合が低下)により、軽水炉でのPu濃度を高くする必要があり、利用しにくい。

一方、右下図の通り、軽水炉では核分裂の寄与が小さいPuの偶数核(Pu238,240,242)やMAが、高速炉では核分裂しやすく有効利用できる。



高速炉サイクルへの移行を前提とするならば、プルサーマルでのマルチサイクルは、再処理の経済性面や環境負荷の観点からも不利である。従って、**プルサーマル利用は一回とし、その使用済み燃料は高速炉サイクルで利用することが望ましい。**



* 図は「高レベル放射性廃棄物の減容化・有害度低減に向けた技術開発」JAEA前田氏(@2017年新型炉部会企画セッション)より抜粋

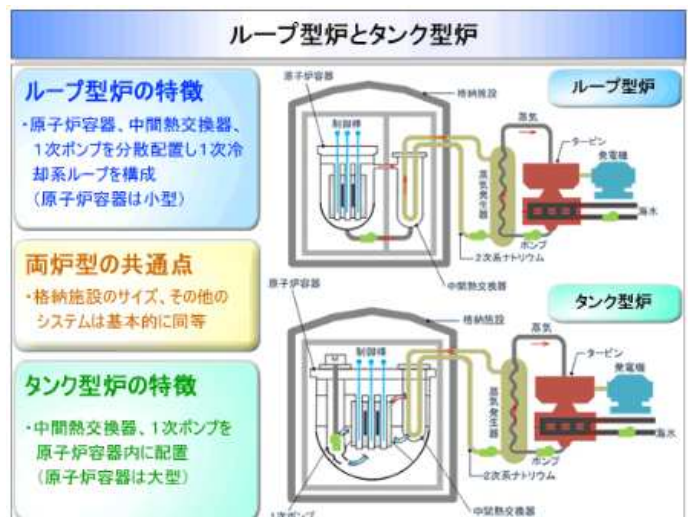
3-1 ループ型炉とタンク型炉の比較

ループ型の特徴

- ◆ 各機器への接近性が良く、保守・補修、改造の点で有利
- ◆ 原子炉容器を小型化でき、工場内での組立が可能。また、耐震設計条件を満足させやすい
- ◆ 配管系設計では、熱応力を緩和するため曲がりをもととした柔な構造と、耐震設計の観点から要求される剛な構造とを成立させる設計上の工夫が重要となる
- ◆ 1次系の配管破断事故に対する設計対応が必要
- ◆ 常陽やもんじゅでの国内実績があり

タンク型炉の特徴

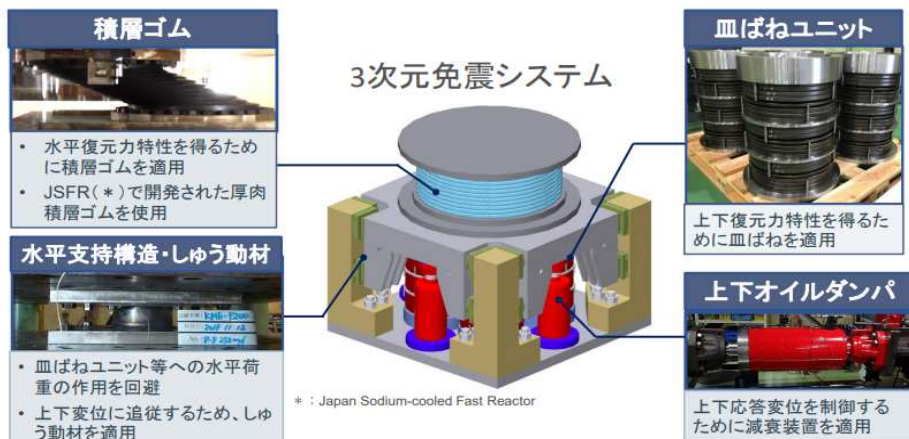
- ◆ Na インベントリーが大きく熱慣性が大なので外乱に対して熱過渡が小さい
- ◆ 一次系がナトリウムに浸漬されており、冷却系機能喪失時における炉心冷却が容易。また、1次冷却材バウンダリーからの冷却材漏洩対策が容易
- ◆ 大型炉では、原子炉容器径は16~20 mにもなり、耐震条件の厳しい日本では成立性が厳しくなる可能性有⇒免震構造が必要になる可能性大
- ◆ 海外での実績が多い



*図は三菱FBRシステムズのHPから転載

3-2 3次元免振システム

高速炉の機器設計要求では、構造物の厚さが耐熱設計の観点からは薄肉構造に、耐震設計の観点からは厚肉構造になるという相反する傾向がある。タンク型では原子炉容器径が大きくなり耐震上厚肉になる方向であるが、薄肉構造でも耐震設計が成立するよう、地震荷重の大幅低減に着眼した原子炉建屋への3次元免震システムの導入の検討が実施されている。



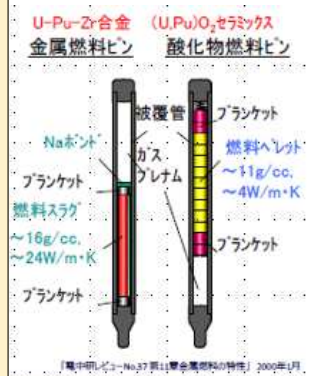
* 図は、「3次元免振技術」 MFBR深沢氏@日本原子力学会2020年秋の大会新型炉部会セッションより抜粋

* 参考「3次元免震装置を適用したタンク型SFRの原子炉構造概念の検討-大型原子炉構造の検討-」JAEA内田氏他@ 原子力学会2022年秋 ¹³

4-1 金属燃料の酸化物燃料に対する特徴

金属燃料は、酸化物燃料に比べると、以下の特徴をもつ (緑字:金属燃料のメリット、青字:金属燃料のデメリット)

- ◆金属燃料は重金属密度が大きく、軽核種を含まない
⇒中性子スペクトルが硬くなる(高エネルギー側にシフト) ⇒添付1)
- ・増殖比が、酸化物燃料より高くなる。 ⇒添付2)
同じ増殖比ならブランケット比率が小さく炉心全体の平均取出燃焼度は高い
・0.1MeV以上の中性子束が増加し、被覆管の健全性上課題となる
⇒超高燃焼度化を目指す場合、燃焼度制限が、酸化物燃料より低くなる。
- ◆金属燃料は、被覆管との共晶反応(液状化)が650~675℃で起こる ⇒ 添付3)
⇒出口温度を下げる設計とする必要⇒プラント熱効率が低下
⇒金属燃料と被覆管との液相浸食速度データの充実が必要(事故時の温度上昇時の健全性評価必要)
- ◆金属燃料は、高い熱伝導率、高い燃料密度である ⇒ 炉心のコンパクト化が可能
- ◆金属燃料は、当初燃焼によるスウェリングが大きく、問題視されたが、U-Pu-Zr合金+被覆管径に対して余裕を持った燃料棒径採用(スミア密度低下)+共存性の高いNaボンドでその欠点は克服されたとされている
- ◆金属燃料の照射実績は米国実験炉EBR IIではあるが、酸化物燃料に比べれば少ない。また安全評価用の溶融時挙動のデータが少ない。



4-2 金属燃料炉心と酸化物燃料のまとめ

金属燃料・炉心と酸化物燃料・炉心については、以下と考える。

- 1) 金属燃料の方が、増殖比が高い設計が可能のため、それが要求される場合は有利。
- 2) 増殖比は、ブランケットの配置やその比率の変更等に大きくすることは可能であり、酸化物燃料炉心でも、十分な増殖比の確保は可能。
⇒ 諸量評価結果より、蓄積された軽水炉使用済み燃料の再処理により、軽水炉⇒高速炉への移行には高い増殖比は必要がないことから、金属燃料でも酸化物燃料でも、軽水炉サイクルから高速炉サイクルへの移行に対して差は生じない。
- 3) 金属燃料の場合、被覆管との共晶反応(液状化)が650～675℃で起こるために、出口温度を下げる設計とする必要があり、酸化物燃料だと出口温度550度レベルであるが、金属燃料の場合500～510℃レベル。
⇒ 金属燃料の方が、同じ熱出力に対して低い電気出力(熱効率が悪い*)となり、建設単価が高くなる。
⇒ さらに、この液状化現象に対する過酷事故時の安全性評価が課題となる。

上記のように、金属燃料、酸化物燃料にメリット・デメリットがあるが、この選定は、再処理方式ともリンクした形で評価すべきである。

*) SFRの熱効率の代表的な値は下記の通りであるが、これらは、2次系の設計等で変化はする。
FBR大型炉(酸化物) 出口550度 1500/3530⇒熱効率42.5%、もんじゅ(酸化物) 出口529度 280/714⇒熱効率39.2%、
PRISM(金属燃料) 出口500度 165/471⇒熱効率35.0%

15

添付1) 金属燃料と酸化物燃料炉心のスペクトル

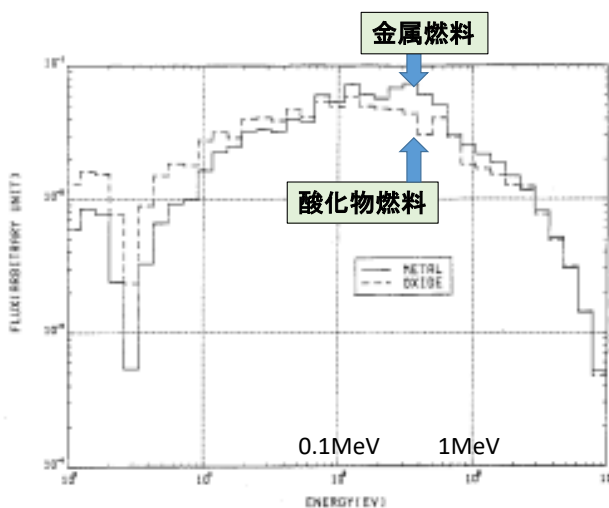


Fig. 2.2 Comparison of neutron spectra between metal and oxide core

* 「FCAIによる金属燃料高速炉のベンチマーク実験(I)」JAEA飯島氏他(1992年12月)

金属燃料の方が、酸化物燃料より、酸素がない分減速されずスペクトルが高エネルギー側にシフト
⇒増殖比は高くなる。

16

添付2) 金属燃料と酸化物燃料の増殖比の比較

増殖比は、ブランケット比率、漏れ度合い設計、燃焼度、MA混在等に依存するが、下記の通り、**金属燃料の方が軽核種(酸素)を含まないため、増殖比は高い。**

1. 高速増殖炉サイクルの実用化戦略調査研究—フェーズII 最終報告書 (軽水炉並燃焼度55GWd/t時)

- ・増殖比: 金属燃料1.26程度、酸化物燃料1.20程度
 - ・酸化物燃料より、約11%少ない燃料インベントリー
- ⇒高速増殖炉の導入を急ぐ場合や原子力発電容量を増加など、将来のU需給が予想以上にひっ迫した場合にも金属燃料炉心は柔軟に対応可能

2. PRISM炉心(金属燃料)に酸化物燃料で置き換えたケース(日立GE評価*) (同一のブランケット比率時)

- ・増殖比: 金属燃料1.2程度、酸化物燃料1.1程度

*「金属燃料高速炉とMOX 燃料高速炉の炉心特性の比較」日立 藤村氏他@原子力学会2019年春の年会からの抜粋

17

添付3) 各燃料とNa/被覆管との共存性等の比較

	酸化物	金属	窒化物	炭化物
Naとの共存性	× (Heボンドのみ可)	○ (Naボンドが適)	○ (Naボンド可)	○ (Naボンド可)
燃料中心温度(定常運転時)	2200 °C	800 °C	800 °C	窒化物と同程度
被覆管との共存性	O/M調整により 腐食量の制御が可能	共晶反応 (650~675 °C)	○	浸炭反応
設計線出力(代表値)	450 W/cm (中空ペレット)	450 W/cm	450 W/cm (最大1500 W/cm)	450 W/cm
増殖ポテンシャル	△	○	○	○

*「核燃料の種類と性質ならびに研究開発」黒崎氏@2018年8月10日高速炉開発会議戦略WGより抜粋

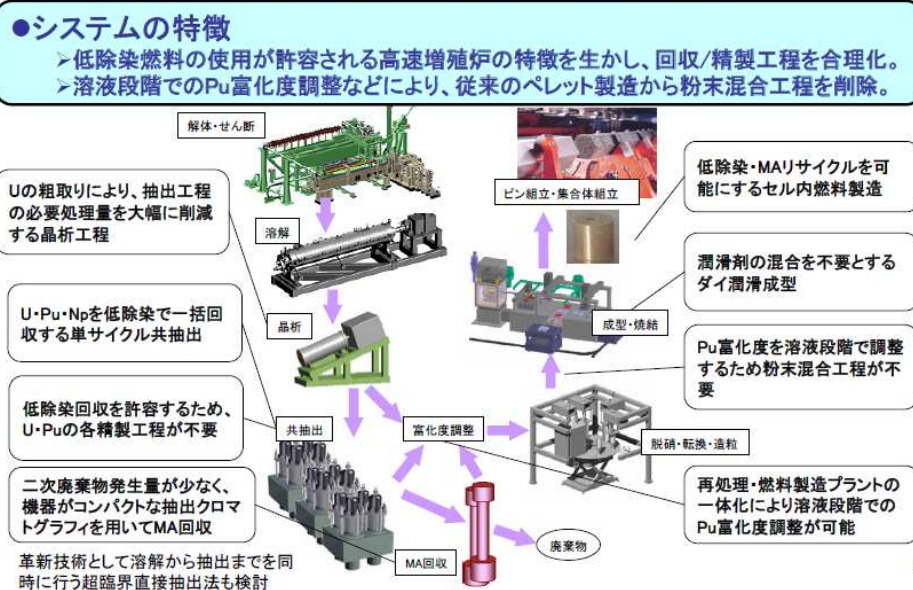
18

5-1 高速炉MOX燃料サイクルと金属燃料サイクルの比較

- ◆ 実用化戦略調査研究(1999～2006年)により、以下が選定。その後各種研究開発を実施。
 主概念: MOX燃料サイクル(先進湿式法+簡素化ペレット法)
 副概念: 金属燃料サイクル(金属電解法+射出鋳造法)
- ◆ 主概念は、実績豊富な「従来のPurex法+燃料製造方式」をベースに、経済性向上、廃棄物低減・有害度低減(MA回収)+核拡散抵抗性向上(U-Pu-Np一括回収)等の改良を図ったものであり、ベースとしての成立性は高い。また、スケールアップによる経済性向上効果は大きく、大量処理(200t/年レベル)では副概念より、経済性に優れる。
- ◆ 副概念は、比較的プロセスが簡素であり、少量(50tHM/y)でコストメリットがある。また原理的にMAがU-Puと随伴するので、核拡散抵抗性が高い。
- ◆ 両者の選定は、評価項目(経済性、技術達成度、核拡散抵抗性、廃棄物量、シナリオ上の整合性等)を明確にしたうえで、実施される必要がある。

19

5-2 先進湿式法再処理+簡素化ペレット法燃料製造



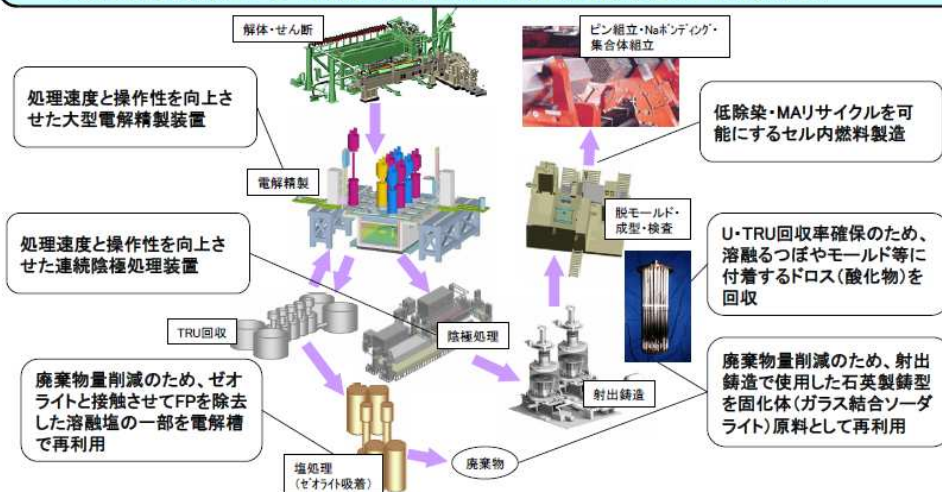
*)「MOX燃料サイクルと金属燃料サイクルの比較」JAEA(2006年6月)より抜粋

20

5-3 金属電解法再処理+射出鑄造法燃料製造

●システムの特徴

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



*)「MOX燃料サイクルと金属燃料サイクルの比較」JAEA(2006年6月)より抜粋

21

5-4 主概念と副概念の経済性比較

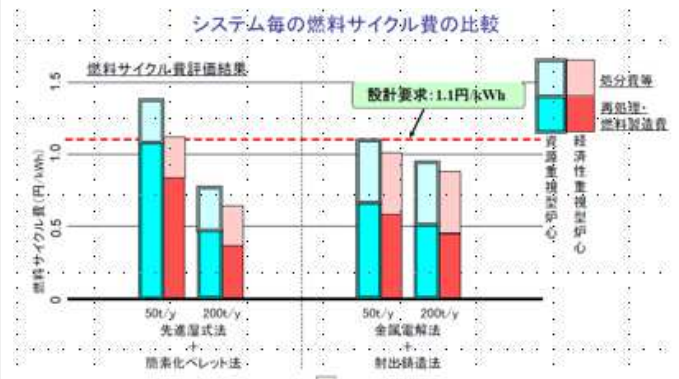
1) 処理規模: 3.6GWe相当 (SFR120万クラス3基分)
乾式再処理・金属燃料の方が、先進湿式再処理・酸化燃料に比べると、安価である。

2) 処理規模: 14.4GWe相当 (SFR120万クラス12基分)
先進湿式再処理・酸化燃料の方が、スケール効果により低下が大きく、乾式再処理・金属燃料よりも安価となる。



- ◆右記は2006年当時の評価であり、最新の技術開発進展により見直しが必要。
- ◆高速炉サイクルとして、どの規模を想定するかによって、湿式方式と乾式方式の経済性優劣は変わる。

2006年評価結果(*)



50t/y: 処理規模3.6GWe相当
200t/y: 処理規模14.4GWe相当
資源重視型炉心: 増殖比1.1、中燃焼度
経済性重視型炉心: 増殖比1.03、高燃焼度

*)「MOX燃料サイクルと金属燃料サイクルの比較」JAEA(2006年6月)より抜粋

22

5-5 金属サイクルの技術成熟度と実用化に向けた課題(1/2)

- **金属燃料開発**については、米国照射データを用いた照射挙動評価、燃料設計手法の確立、国内照射試験準備、海外炉でのMA含有燃料の照射試験まで進めたところ
 - 燃焼度10,000MWd/t (軽水炉の2倍程度)、冷却材炉心出口温度500℃程度であればTRL=6~7； 実証炉での使用が可能
 - 燃焼度と冷却材炉心出口温度の向上を狙う場合にはTRL=4程度； 高温条件での照射試験データが必要
- **金属燃料炉心の安全性評価技術**（特に炉心溶融事故の評価技術）については、酸化物燃料炉心からの類推や公開文献等を踏まえた評価に加えて、溶融燃料のふるまいを解析可能な解析コードの開発を進めている段階
 - TRL=4； 炉心溶融事故における種々の現象を解析可能なコードの開発、ウラン等を使用した実験によるコード検証が必要

*「金属燃料サイクル技術開発の現状と課題」尾形氏(@2023年12月18日当法人有識者会議)からの抜粋

23

5-5 金属サイクルの技術成熟度と実用化に向けた課題(2/2)

- **乾式再処理技術**では、MAを含む照射燃料の乾式再処理実証、工学規模乾式リサイクル試験、工学規模機器開発(コールド)、工学規模ゼオライトカラム試験、高レベル廃液からのMA乾式分離回収実証まで進めたところ
 - 電解還元、電解精製、陰極処理についてはTRL=5~6； 実用化に向けて遠隔操作や遠隔保守に対応した機器の設計・製作経験の蓄積が必要、ただし、実用規模は数十kg/日であり、大規模化に対するハードルは低い
 - 使用済塩からのアクチニド抽出、ゼオライトカラムによる使用済塩処理、セラミック廃棄物固化体製造、金属廃棄物固化体製造など廃棄物処理関係についてはTRL=4~5； 実用化に向けてプロセスの最適化と遠隔操作や遠隔保守に対応した機器の設計・製作経験の蓄積が必要、ただし、実用化規模は数十ℓ/日であり、大規模化のハードルは低い
- **金属燃料製造技術**では、Uを用いた工学規模射出鋳造試験と「常陽」照射試験燃料製造まで進めたところ
 - TRL=5~6； 実用化に向けて遠隔操作や遠隔保守に対応した機器の設計・製作経験の蓄積が必要、ただし、実用規模は数十kg/日であり、大規模化に対するハードルは低い
- ◆ 試験施設を有する米国ANLやINLとの協力により、実用化に向けた開発が効率的に進む可能性

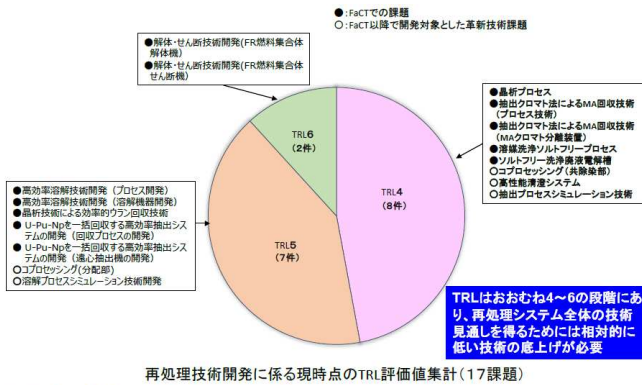
*「金属燃料サイクル技術開発の現状と課題」尾形氏(@2023年12月18日当法人有識者会議)からの抜粋

24

5-6 先進湿式再処理・酸化物燃料開発の課題

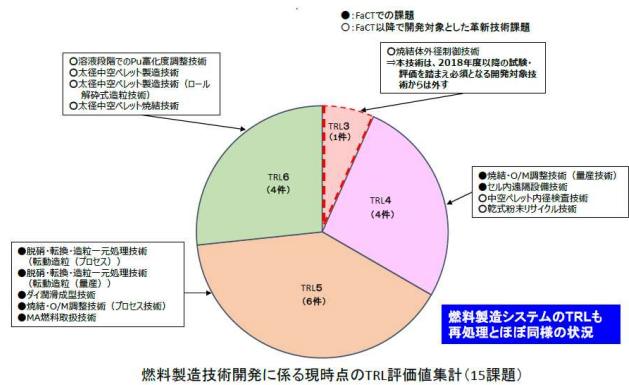
各技術のTRLは下記の通りであり将来的にはTRL6レベルに引き上げの開発は必要であるが、本方式は実績のある技術をベースにした高度化であり、成立性の点では、相対的にTRLの低いMA分離回収技術と、U-Pu共抽出技術の開発を重点的に実施する必要がある。

高速炉MOX燃料再処理システム関連技術のTRL値



引用) 日本原子力学会 2023年春の年会 新型炉部会セッション 2L_PL03

高速炉MOX燃料製造システム関連技術のTRL値



引用) 第3回次世代革新炉の開発に必要な研究基盤整備に関する検討会 資料2を引用の上、一部加筆

* 上図は「先進湿式再処理・酸化物燃料開発の現状と今後の課題について」竹内氏(@2023年12月18日当法人有識者会議)からの抜粋

【参考-1】

革新的原子炉推進協議会(CINRAT)

第1回革新炉有識者会議

議事次第

1. 日時:令和5年10月16日(月) 13:00-15:30
2. 場所:参議院議員会館 B101会議室
3. 議題:
 - 1) NPO 革新的原子炉推進協議会の今後の取組について
 - 2) 核燃料サイクルの諸量評価の国内外コードの比較と NMB コードの特徴
 - 3) NMB コードによる諸量評価結果の代表ケースの紹介
 - 4) シナリオ等に関する意見交換

【出席者】

有識者(五十音順、敬称略)

- 尾形 孝成 (一財)電力中央研究所 EX 研究本部 研究統括室 研究参事
- 竹下 健二 東京工業大学 理事副学長特別補佐(特任教授/名誉教授)
- 西原 健司 東京工業大学 ゼロカーボンエネルギー研究所 特定教授
- 山口 彰 (公財)原子力安全研究協会 理事/東京大学 名誉教授

CINRAT 技術検討チーム

- 辻倉 米蔵 副理事長
- 石隈 和雄 委員
- 駒野 康男 委員

オブザーバー

- 田中 敏幸 CINRAT 理事長

事務局

- 坂下 重信 CINRAT 理事/事務局長
- 小林 綾子 CINRAT 事務局

【配布資料】

- 資料1 議事次第
- 資料2 革新的原子炉推進協議会 令和5年度の取組
- 資料3 CINRAT 打合せ① NMB 紹介
- 資料4 CINRAT 打合せ② NMB 解析例

革新的原子炉推進協議会(CINRAT)
第2回革新炉有識者会議
議事次第

1. 日時:令和5年12月18日(月) 9:30-12:00
2. 場所:参議院議員会館 B101会議室
3. 議題:
 - 1) 金属燃料サイクル技術開発の現状と課題
 - 2) 先進湿式再処理・酸化物燃料開発の現状と今後の課題について
 - 3) その他

【出席者】

有識者(五十音順、敬称略)

- 尾形 孝成 (一財)電力中央研究所 EX 研究本部 研究統括室 研究参事
- 竹内 正行 (国研)日本原子力研究開発機構 高速炉・新型炉研究開発部門
燃料サイクル設計部長
- 竹下 健二 東京工業大学 理事副学長特別補佐(特任教授/名誉教授)
- 西原 健司 東京工業大学 ゼロカーボンエネルギー研究所 特定教授
- 山口 彰 (公財)原子力安全研究協会 理事/東京大学 名誉教授

CINRAT 技術検討チーム

- 辻倉 米蔵 副理事長
- 石隈 和雄 委員
- 駒野 康男 委員

オブザーバー

- 田中 敏幸 CINRAT 理事長

事務局

- 坂下 重信 CINRAT 理事/事務局長
- 小林 綾子 CINRAT 事務局

【配布資料】

- 資料1 議事次第
- 資料2 金属燃料サイクル技術開発の現状と課題
- 資料3 先進湿式再処理・酸化物燃料開発の現状と今後の課題について

革新的原子炉推進協議会(CINRAT)
第3回革新炉有識者会議
議事次第

1. 日時:令和6年3月1日(金) 15:00-18:00
2. 場所:専修大学 神田キャンパス 7号館 6階 763 教室
3. 議題:
 - 1) CINRAT 提言内容について
 - 2) その他

【出席者】

有識者(五十音順、敬称略)

- 尾形 孝成 (一財)電力中央研究所 EX 研究本部 研究統括室 研究参事
- 竹内 正行 (国研)日本原子力研究開発機構 高速炉・新型炉研究開発部門
燃料サイクル設計部長
- 竹下 健二 東京工業大学 理事副学長特別補佐(特任教授/名誉教授)
- 西原 健司 東京工業大学 ゼロカーボンエネルギー研究所 特定教授
- 山口 彰 (公財)原子力安全研究協会 理事/東京大学 名誉教授

CINRAT 技術検討チーム

- 辻倉 米蔵 副理事長
- 石隈 和雄 委員
- 駒野 康男 委員
- 中島 文明 委員

オブザーバー

- 田中 敏幸 CINRAT 理事長

事務局

- 小林 綾子 CINRAT 事務局

【配布資料】

- 資料1 議事次第
- 資料2 原子力開発の在り方についての提言
- 資料3 原子力開発シナリオの諸量評価や高速炉サイクル技術開発から得た知見と取組課題
- 資料4 「原子力開発シナリオの諸量評価や高速炉サイクル技術開発から得た知見と取組課題」の添付図

【参考-2】

革新炉有識者会議の様子



特定非営利活動法人 革新的原子炉推進協議会

理事長	田中 敏幸	元福井県議会議員
副理事長	田中 宏典	福井県議会議員
副理事長	多仁 照廣	若狭寺文化研究所 所長
副理事長	辻倉 米蔵	元日本原子力研究開発機構 副理事長 元関西電力(株) 常務執行役員
理事兼事務局長	坂下 重信	NPO 法人フィリア 理事長
監事	中塚 寛	おおい町 町長
委員	石隈 和雄	元日本原子力発電(株) 取締役安全室長 元原子力安全推進協会 理事 評価計画部長
委員	宇野 晃成	気比高校理事長
委員	勝木 一雄	福井大学 産官学連携本部 客員教授
委員	駒野 康男	元三菱重工業(株)原子力事業本部 副事業本部長 元日本原子力学会 会長
委員	塩谷 昭文	(株)明光建商 会長
委員	谷川 信吾	元日本原子力研究開発機構 敦賀本部長代理兼敦賀本部 経営企画部長
委員	中島 文明	福井大学産学官連携本部 客員教授
委員	肥田 善雄	NPO 法人ワネッツ 理事長 元関西電力(株) 執行役員
委員	山本 建	福井県議会議員

以上

特定非営利活動法人 革新的原子炉推進協議会

住所：福井県福井市問屋町一丁目128番地1

e-mail : office@cinrat.org / URL : <https://cinrat.org/>