



「持続的な原子炉・核燃料サイクル検討・提言分科会」  
最終報告書

2024年3月

日本原子力学会 原子力アゴラ調査専門委員会

持続的な原子炉・核燃料サイクル検討・提言分科会





## 目次

日本原子力学会 アゴラ調査専門委員会 .....	1
「持続的な原子炉・核燃料サイクル検討・提言分科会」最終報告書.....	1
1. 序論 .....	1
2. 持続的な原子力利用とは.....	2
3. 持続的な原子炉・核燃料サイクルを巡る状況の変遷 .....	4
4. 持続的な原子力利用の要件 .....	6
5. 持続的な原子力利用の評価例.....	10
6. 持続的な原子力利用に向けた提言 .....	12
【参考資料】 サイクル諸量に関する試算結果 .....	15
【別紙】 日本原子力学会 原子力アゴラ調査専門委員会 持続的な原子炉・核燃料サイク ル検討・提言分科会 委員等名簿 .....	19



## 日本原子力学会 アゴラ調査専門委員会

### 「持続的な原子炉・核燃料サイクル検討・提言分科会」最終報告書

「持続的な原子炉・核燃料サイクル検討・提言分科会」は、長期的かつ包括的な視点から、エネルギー・経済安全保障とカーボンニュートラルを両立する社会の実現に貢献する原子炉システムと核燃料サイクルのあり方について検討し、日本における原子力利用のシナリオにつき政策提言を行う。

#### 1. 序論

(ア) 2023年2月10日に「GX実現に向けた基本方針～今後10年を見据えたロードマップ～」が閣議決定された。そこで、「エネルギー安定供給の確保を大前提としたGXに向けた脱炭素の取組」の基本的考え方として、「化石エネルギーへの過度な依存からの脱却を目指し、需要サイドにおける徹底した省エネルギー、製造業の燃料転換などを進めるとともに、供給サイドにおいては、足元の危機を乗り越えるためにも再生可能エネルギーや原子力などのエネルギー安全保障に寄与し、脱炭素効果の高い電源を最大限活用する」とされた。また、原子力については、「出力が安定的であり自律性が高いという特徴を有しており、安定供給とカーボンニュートラル実現の両立に向け、脱炭素のベースロード電源としての重要な役割を担う」と位置付けられた。つまり、エネルギー経済安全保障と気候変動対応の両立にその牽引役として貢献することが原子力のミッションである。

(イ) 原子力開発・利用政策については、「第6次エネルギー基本計画」や「GX実現に向けた基本方針」に基づき、「今後の原子力政策の方向性と行動指針」が2023年4月28日に、原子力関係閣僚会議で決定された<sup>1</sup>。この「行動指針」は、既設の原子力発電所の再稼働と最大限活用に加え、次世代革新炉の開発・建設、バックエンドプロセスの加速化を推進すること、そのための事業環境、社会的環境、研究開発環境の確立を求めている。「行動指針」の最も意義深い点のひとつは、原子力の開発・利用にかかる基本原則を定めたことである。その基本原則は、安全を最優先とすることを第一に掲げ、さらにエネルギー供給の自給率を向上させ、エネルギー・経済安全保障<sup>2</sup>を確保し、GXを牽引すること、すなわち、非化石エネルギーの利用の促

<sup>1</sup> <https://www.meti.go.jp/press/2023/04/20230428005/20230428005.html>

<sup>2</sup> 経済安全保障推進会議（2021年11月19日）では、我が国の経済安全保障の方向性として、(1) 自律性の向上（基幹インフラやサプライチェーン等の脆弱性の解消）、(2) 優位性ひいては不可欠性の確保（研究開発強化等による技術・産業競争力の向上や技術流出の防止）、(3) 基本的価値やルールに基づく国際秩序の維持・強化）を挙げている。

進と、エネルギー供給に係る自律性の向上を原子力の価値として定めた。また、原子力委員会の「原子力利用に関する基本的考え方（2023年版）」は、この基本原則を法令等で明確化することが望ましいと述べ、原子力基本法が改正されるに至った。

(ウ) 原子力小委員会革新炉ワーキンググループは、革新軽水炉、小型軽水炉、高速炉、高温ガス炉、核融合炉を2050年に向けた次世代革新炉と位置づけ、開発のポートフォリオを明確化するとした<sup>3</sup>。高速炉については、資源循環性獲得を可能とすることから、21世紀半ば頃の運転開始を期待し開発炉型を具体化するとした。高温ガス炉は、産業の脱炭素のためにカーボンフリーの電力・熱・水素をコジェネレーションすることを念頭に、国際連携の可能性も追及しながら開発を推進するとした。その後、2022年12月23日には、高速炉開発の「戦略ロードマップ 改訂」が原子力関係閣僚会議で決定された。第6次エネルギー基本計画と同様、高レベル放射性廃棄物の減容化と有害度の低減、ウラン資源の有効活用といった効果を更に高める技術として高速炉を位置づけ、2050年のカーボンニュートラル実現に向けて、国際連携を通じた高速炉開発を着実に推進するとしている。他の次世代革新炉については、小型モジュール炉技術の国際連携による実証、高温ガス炉における水素製造に係る要素技術確立等の技術開発の着実な推進を行うと言及した。GX実現における原子力の意義として、資源循環性を備えうる高速炉を中心とした核燃料サイクルの意義が明確化された。

(エ) 「持続的な原子炉・核燃料サイクル検討・提言分科会」（以下、本分科会という）は、原子力小委員会で上記の行動指針に係る議論が行われている中、2022年8月に、日本原子力学会アゴラ調査専門委員会の中の分科会として発足した。そして、長期的（100年以上にわたり持続性があること）かつ包括的な視点（エネルギー源としての原子力、燃料資源の有効利用、高レベル廃棄物の負担軽減）から、エネルギー・経済安全保障とカーボンニュートラルを両立する社会の実現に貢献する原子炉システムと核燃料サイクルのあり方について検討し、日本における原子力利用のシナリオにつき政策提言を行うことを目的としている。本報告書は、本分科会で検討中の政策提言に至る論点を整理した中間報告書を元に、その後の検討結果も追加して取りまとめたものである。

## 2. 持続的な原子力利用とは

(ア) 持続的な社会の構築のためには、日本のエネルギーの安定供給の再構築とそれを前提とした脱炭素に向けた経済、社会、産業構造の変革が求められる。すなわち、

---

<sup>3</sup> 「カーボンニュートラルやエネルギー安全保障の実現に向けた革新炉開発の技術ロードマップ（骨子案）」、2022年11月

エネルギー・経済安全保障とカーボンニュートラルが両立する社会を実現することが必須である。そのためにはエネルギー自給率を向上させ、エネルギー・経済安全保障の確保と GX の実現の両方を目指したエネルギー政策が不可欠である。これに原子力技術が貢献するところは大きく、中長期的なエネルギー供給能力の拡大が必要である。

- (イ) 原子力がこのような貢献をするためには、原子力システム全体として持続的である必要がある。つまり、発電だけではなく、フロントエンドからバックエンドに至るサイクル全体において、様々な制約の下で、その規模の維持・拡大が求められる。
- (ウ) 持続的な原子力利用のためには、様々な技術開発、実用化開発を進めていく必要がある。そして、100 年程度を目安に、時間フェーズに応じた技術の進化が見通せ、かつ数百年程度に及ぶ資源確保と環境影響抑制の展望が描ける取組みが必要である。
  - ① 短期的な観点からは、既設軽水炉の再稼働並びに最大限活用
  - ② 中期的な観点からは、安全性を向上させた革新軽水炉の新增設あるいはリプレース<sup>4</sup>、そして、廃炉を決定した軽水炉の廃止措置プロセスの円滑な推進
  - ③ 長期的な持続性の観点からは、核燃料サイクルを閉じて、エネルギー資源の確保と放射性廃棄物の負担軽減を同時解決していく高速炉サイクルの実用化<sup>5</sup>

これらの観点は実現時期に時間的な差があるものの、いずれも実現に向けた取組みを今から着実に継続・推進していく必要がある。このためには、開発に必要な技術の維持・継承とともに、人材の育成や企業の高速炉分野から撤退が顕在化しつつあるサプライチェーンの再構築の観点から、理由のない先送りや開発計画遅延をさせない努力が不可欠である。また、これらの取組みは、3. で示すように、日本の原子力政策の初期に目指した原子力開発の方向と同一であり、社会環境の変化と原子力発電によって発生する放射性廃棄物の問題解決も加えた現実的な進め方である。また、特に、本報告書では、「③長期的な持続性」に着目し、主に、2050 年以降の原子炉システムと核燃料サイクルのあり方、および、それに向けた取組みについての提言をまとめた。

---

<sup>4</sup> 上述の行動指針では、「リプレース、ならびに、新增設」と表現されているが、リプレースは既設炉の廃止措置後の建設であるため、それ自体では原子力発電の規模拡大に繋がらない。また、新規建設が遅れることで、発電規模の一時的な低下に繋がる危惧がある。本分科会では、エネルギー・経済安全保障の確保と GX の実現に資するためには、原子力発電の規模拡大が必要との観点から、新增設を進めるべきと考え、リプレースとの順序を入れ替えた表現とした。

<sup>5</sup> GIF Annual Report, 2021 は、21 世紀の経済的、環境的、社会的な要請に応える 4 分野（持続可能性、経済性、安全性と信頼性、核拡散抵抗性の向上と核物質防護）の 8 目標を掲げている。

### 3. 持続的な原子炉・核燃料サイクルを巡る状況の変遷

(ア) 日本の原子力政策は1956年、最初の「原子力開発利用長期計画<sup>6</sup>」に始まり、原子力開発利用の方向性として、大きく以下の二点が述べられている。

- ① 原子燃料については、極力国内における自給態勢を確立させる。将来わが国の実情に応じた核燃料サイクルを確立するため、増殖炉、燃料要素再処理等の技術の向上を図る。
- ② 動力炉を国産することを究極的な目標とする。最終的に国産を目標とする動力炉は、原子燃料資源の有効利用ひいてはエネルギーコストの低下への期待という見地から、増殖動力炉とする。

(イ) 1980年代、90年代とウラン価格の低下や以下で述べる社会的な情勢変化により増殖炉の実用化時期が延伸するとともに、軽水炉の時代がしばらく続くとされた。プルトニウム利用政策としては、高速炉が実用化されるまでの間、軽水炉によるプルトニウム利用(プルサーマル)を行うこととされた。原型炉もんじゅ以降の実証炉・実用化開発は、当時、民間主体で進められていたが、1995年のもんじゅナトリウム漏洩事故に端を発した国内での原子力政策議論、欧米諸国における高速炉開発の停滞、電力自由化等の影響を受け、民間主体の実証炉開発は見直され、プルトニウム利用についても、上述のプルサーマルがその中心となった。

(ウ) 1999年からの核燃料サイクル開発機構(現在の日本原子力研究開発機構、JAEA)と電力の共同プロジェクトとして、多様な冷却材、燃料形態を対象にして、2050年頃の高速炉サイクルの実用化像を構築する「FBRサイクルの実用化戦略調査研究(FS)」が開始された。7年間のFSの結果、ナトリウム冷却MOX燃料炉+先進湿式再処理が主概念、同金属燃料炉+乾式再処理が副概念として選定され、2006年の原子力立国計画とともに、2025年までの実証炉運開を目指した「FBRサイクルの実用化研究開発(FaCT)」に移行した。

(エ) しかし、2011年3月の東北地方太平洋沖地震による巨大津波によって発生した東京電力・福島第一原子力発電所事故(以下、1F事故)により、我が国において原子力技術に対する期待と信頼が著しく損なわれた。そして、原子力利用および開発に関する原子力政策の見直しとともに、FaCT計画は事実上凍結された。

(オ) 同事故の影響により、全ての原子炉はより高い水準の安全規制を満たすことが要請され、新たな規制基準への適合性審査が求められた。原型炉もんじゅは、保全計画の不備により保安措置命令を規制委員会から受け、再起動までに必要となる新規基準への適合性審査や改良工事等に要する期間と必要となるコスト増大等の

---

<sup>6</sup> <http://www.aec.go.jp/jicst/NC/tyoki/tyoki1956/chokei.htm> を参照。1956年版の正式名称は「原子力開発利用長期基本計画」である。第2回(1961年)以降から「原子力の研究、開発及び利用に関する長期計画」とした。

理由により、2016年12月に廃止措置への移行判断がなされた。これに併せて、今後の高速炉開発は仏米との国際協力を活用して進めていく「高速炉開発の方針」が示されたものの、原型炉もんじゅの廃炉判断は、わが国の高速炉開発を不透明化させることとなった。

- (カ) 結果として、核燃料サイクルを含む高速炉に特有で不可欠なサプライチェーンの脆弱化が進んでいる。例えば、被覆管材料、集合体ラッパー管等の素材メーカ、ナトリウム機器やバルブ等の製造メーカ等が原子力分野から撤退してきている。
- (キ) 高速炉の開発を進めている露、中、印、米、仏、韓は、ナトリウム冷却炉の実用化を目指して開発している。露、中、印は、閉じた燃料サイクルの実用化開発、すなわち再処理、燃料製造、廃棄物固化等の技術開発を、炉の開発に並行して精力的に進めている。更に露は、高性能化を目指して、ナトリウム冷却高速炉（以下、SFR）の大型化や高燃焼度燃料の開発を進めると同時に、鉛冷却高速炉の原型炉も建設している。
- (ク) OECD 加盟国だけでなく、露、中を加えて進められている第4世代原子炉国際フォーラム(GIF)では、SFRだけでなく、重金属（鉛）、ガス（ヘリウム）、超臨界水、熔融塩等での高速炉の可能性についても、関係機関が参加して基礎研究、設計概念に関する情報交換等を行っている。その中でSFRは、持続性があり、実現性が高い炉型と認識されている。
- (ケ) 気候変動への対応が緊急課題とされ、カーボンフリーエネルギーへの移行、電化の進行やDX推進等に伴う電力需要の増加への対応、供給安定性確保が重要であり、原子力発電の利用を目指す国が増加するとともに、ウラン価格が上昇傾向に転じた。加えて、2022年2月の露によるウクライナ侵攻、これに伴う露に対する制裁措置の発動によって、エネルギーの安定確保への各国の関心が高まり、化石燃料価格のみならず、ウラン価格も上昇し、2024年1月現在、2018年当時の4倍以上という高い水準で推移している。
- (コ) 世界各国はカーボンニュートラル社会実現とエネルギー確保に向けて最大限の努力を続けており、シビアアクシデント対策を講じ技術的実現性の高い新型軽水炉開発が進められている。一方で、露中印3国は、国策として2030年代の高速炉サイクルの早期実用化を目指して着実に開発を進めている。米国は、新型炉を含む原子力開発の主導権維持を目指し、新型炉の実用化を促進する政策を法律で定め、民間が提案した高速炉や高温ガス炉を2028年頃の運開を目指して開発している。
- (サ) 新興国の原子力導入と先進国の原子力回帰によるさらなるウラン価格高騰と将来のウラン需給の逼迫の可能性がある。
- (シ) 六ヶ所再処理工場はできるだけ早い時期での竣工を予定している。なお、同工場では使用済MOX燃料ならびに高速炉使用済燃料の再処理を想定しておらず、長半減期のマイナーアクチノイド（MA）分離工程も導入されていない。したがって、

高速炉の導入時期を見越して、新たな再処理工場の具体化と建設が必要になる。

- (ス) 使用済燃料の再処理の結果生じる高レベル放射性廃棄物と TRU 廃棄物の地層処分については、20 年程度に亘る 3 段階の調査（文献調査、概要調査、精密調査）に基づき最終処分施設建設地を選定することとしている。我が国の地層処分実施主体である原子力発電環境整備機構（以下、NUMO）は、2020 年 11 月から、北海道の寿都町と神恵内村での文献調査を実施している。サイトの調査、安全な処分場の設計・建設・操業・閉鎖、閉鎖後の長期間にわたる安全性確保については、NUMO によって、これまでに蓄積された科学的知見や技術を統合して包括的に説明した報告書<sup>7</sup>が公開されている。
- (セ) GX 実行会議にて原子力政策の方向性と実現に向けた基本方針が定められ、あわせて、「今後の原子力政策の方向性と行動指針」が決定された（2023 年 4 月）。そこでは、社会情勢変化に対してもエネルギー政策の遅滞をもたらすことなく原子力の開発利用が進められるように基本原則が提示され、原子力基本法が改正されるに至った。
- (ソ) 2022 年 12 月に改訂された高速炉開発の「戦略ロードマップ 改訂」では、各機関の役割・開発体制や今後の開発の作業計画等について明記されており、2024 年度～2028 年度頃に実証炉について概念設計を実施しつつ、必要な研究開発を実施するとされている。また、その過程で 2026 年頃を目途に燃料技術の具体的な検討を行うとされており、核燃料サイクルの在り方に重要な影響を与えられと考えられる。

#### 4. 持続的な原子力利用の要件

- (ア) 軽水炉を最大限に活用するとともに、革新軽水炉を新規に導入することは短期的ならびに中期的な観点から持続的な原子力利用に貢献するものである。一方で国際的な原子力導入の動向を踏まえれば、世界的にウランの需要が拡大することが予想されることから、将来のウラン需給の問題への配慮と備えが必要である。つまり、既設軽水炉の活用と革新軽水炉の新規導入だけでは、長期的な視点に立った持続的な原子力利用を実現することには必ずしも繋がらない。
- (イ) 軽水炉の使用済燃料を再処理してプルトニウムを回収し、燃料として利用することはその解決策の一つとなる。つまり、資源利用効率の高い高速中性子炉の特性を活かせば燃料の有効活用が可能となり、将来的には、海外からのウラン調達や国内外でのウラン濃縮への依存度を低減させた（準）国産エネルギーとなりうる。
- (ウ) 原子力利用にともない発生する放射性廃棄物の処分は社会から強い関心をもたれる問題である。原子力エネルギーは単位発電量あたりの廃棄物発生量が他の電源

---

<sup>7</sup> 包括的技術報告書：わが国における安全な地層処分の実現 – 適切なサイトの選定に向けたセーフティケースの構築 –」（2021 年 2 月）

と比べて格段に小さいとしても、特に、高レベル放射性廃棄物に関する、現世代並びに将来世代の負担をできるだけ低減する必要がある。つまり、この点も同様に、持続的な原子力利用という長期的な視点に関わるポイントである<sup>8</sup>。

- (エ) 再処理ならびに高速炉技術の実用化により閉じた核燃料サイクルを達成すれば、資源の有効活用に加え、高レベル放射性廃棄物の減容化・潜在的有害度の低減を実現し、将来世代の負担軽減が期待できる。
- (オ) 持続的な原子力利用のためには、社会の信頼を獲得することが不可欠である。通常運転はもとより、重大事故（シビアアクシデント）等による原子力災害について、放射性物質と放射線による健康影響と社会的影響を抑制するものでなければならない。
- (カ) これらの取組において核拡散抵抗性と核物質防護、核セキュリティの視点も重要であり、その性能を備えた持続的原子力利用戦略が求められる。
- (キ) 継続的に次世代革新炉を導入するにあたり、システム全体としての経済性が他の競合技術に劣らないことが求められる。
- (ク) 廃炉を決定したプラントの着実かつ経済的な廃止措置は持続的な原子力利用のための前提となる。
- (ケ) 上記を踏まえると、持続的な原子力システムの特長として、以下が考えられる。

① 持続的な原子力システムの重要な要素である次世代革新炉について、我が国の実情に適合する選択のため、選択肢の特性付けを行なう必要がある。GIFの年次報告書<sup>9</sup>が述べる次世代革新炉（第4世代炉）の要件を参考に、持続可能社会のための原子力利用は以下の要件に適合するべきと考える。

- 資源有効利用と放射性廃棄物処分
    - (ア) 持続可能なエネルギー生産（クリーンで、長期的に利用可能なシステムであり、燃料を有効利用できること）を提供できる。
    - (イ) 放射性廃棄物を最小限に抑え、特に長期的な潜在リスクを軽減し、それによって公衆衛生と環境の防護を向上させる。
  - 経済的優位性
    - (ア) 他のエネルギー源よりもライフサイクルコスト、環境フットプリントの優位性を有する。
    - (イ) その財務リスクは、他のエネルギー源のプロジェクトと同等レベルである。
- 特に、原子力事業は巨額の初期投資が必要であり、バックエンドコス

---

<sup>8</sup> EUにおいても、環境上の持続可能性を備えたグリーン事業への投資基準「EUタクソノミー」への原子力エネルギーへの認定において、高レベル廃棄物最終処分場の建設計画の策定を条件としている。

<sup>9</sup> GIF 2021 ANNUAL REPORT, GIF: <https://www.gen-4.org/gif/>

トの上振れ、規制基準審査の長期化や運転差し止め訴訟等によるコストの増加と投資回収期間の長期化、金融機関からの資金調達の不透明性等、他電源と比較して大きな財務リスクがある。このようなリスクを合理的な範囲とし、安定的・効率的な事業実施を確保するための環境を整備し、活用されるべきである。

- 安全性と信頼性
    - (ア) 運転時の安全性と信頼性が優れている。
    - (イ) 炉心損傷発生頻度が低く、その影響度が抑制されている。
    - (ウ) オフサイトの緊急対応を実質的に排除できる。
  - 核拡散抵抗性の向上と核物質防護
    - (ア) 武器に転用可能な物質を流用または盗取することが困難であること、実行する価値がないことの保証を高め、テロ行為や内部脅威に対する核物質防護、核セキュリティを強化する。
- ② 我が国のエネルギー需給構造の特徴を踏まえれば、①で挙げた 4 つの要件に加えて、(1) エネルギーミックスとの整合性、(2) 自律的なエネルギー需給構造、(3) 核燃料サイクルと革新炉の整合性、(4) プルトニウム利用方針、(5) 円滑な廃止措置、(6) 最終処分との整合性、(7) 人材育成とサプライチェーンに関わる要件を追加することが適切であると考える。
- エネルギーミックスとの整合性
    - (ア) 再生可能エネルギーを含むエネルギーシステム全体として最適な原子炉システムであること。  
例えば、負荷追従運転、蓄熱や水素製造などの電力バッファ機能による系統安定化に貢献する。水素製造を含む高温熱源としての利用は、広義のエネルギーミックス、非電源部門での脱炭素化に資するものであると位置づけられる。
  - 自律的なエネルギー需給構造
    - (ア) 困難な国際状況の中で、特定の不安定な地域・国家に過度に依存しないサプライチェーンならびに燃料供給の見通しをそなえる。
    - (イ) 燃料価格のボラティリティが低く、予見性の高いエネルギー源として将来的なエネルギー安全保障に対するリスク回避が可能となる。
  - 核燃料サイクルと革新炉の整合性
    - (ア) 開発目標への適合性、技術的成熟度の観点から、酸化物燃料および金属燃料高速炉に適合する核燃料サイクル（再処理 + 燃料製造）を選択する必要がある。
    - (イ) これらの技術開発工程と高速炉導入スケジュールや規模が対応するサイクルのそれらと整合することの分析・判断が必要である。

- プルトニウム利用方針
  - (ア) ウラン需給や高速炉導入・移行の状況を見越し、安定にプルトニウムを供給できる方策と、プルトニウムの蓄積量に配慮した再処理と高速炉の導入シナリオでなければならない。
  - (イ) 軽水炉によるプルトニウム利用が長期化することによる、資源有効利用への影響、プルトニウム高次化などの技術課題を考慮する。
- 円滑な廃止措置
  - (ア) 円滑な廃止措置の実施は、既設炉を可能な限り使用し、革新軽水炉、そして、高速炉へと原子力エネルギー利用を継続していく上で不可欠であり、資金管理の外部化や知見、ノウハウの共有、共同調達などが議論されている。
  - (イ) 現在、検討、設計が進められている革新軽水炉や高速炉、あるいは、次の再処理工場では、設計段階から、効率的な施設・設備の解体、除染に資する検討をしておくことが重要である。
  - (ウ) 発生する低レベル放射性廃棄物を着実に処分していくことは、着実な廃止措置の推進において不可欠となる。L1、L2、L3 処分場の早期の確保と限られた処分場の効率的な利用のための、フリーリリースを含むクリアランス制度の合理的な運用による資源の再利用や処理による処分廃棄物量の抑制が求められる。
- 最終処分との整合性
  - (ア) 持続的な原子炉・核燃料サイクルの実現にあたり、高レベル放射性廃棄物の最終処分は重要な課題の一つである。我が国では、社会的受容性の観点から、処分地の候補選定が十分に進んでいない。このような状況をふまえ、最終処分場に係る負担を可能な限り低減させていく取組が重要である。
  - (イ) 放射性廃棄物の発熱や放射性物質の長期間に亘る放射線毒性の主要因となる MA を使用済燃料から分離し、燃料として炉心で燃焼させて、廃棄物の負荷を低減していくことにあたり、MA 分離のみならず MA 分離によって発生する二次廃棄物の管理・処分、技術開発目標や時間軸を考慮した技術開発ロードマップを構築する必要がある。
  - (ウ) 高レベル放射性廃棄物に対する処分場建設のフットプリントを減少させるためには、再処理前の冷却期間や処分前の固化体貯蔵期間などを考慮しつつ、MA などの発熱核種の分離に係る技術開発の推進が重要である。
  - (エ) 以上の取組は、我が国において、処分場に適した安定かつ均質な地層を選定していく上でも有利に働く。

- 人材育成とサプライチェーン
  - (ア)原子力を最大限活用するにあたり、短中期的な観点では革新軽水炉の新增設を下支えする人材およびサプライチェーンの維持・確保が不可欠である。
  - (イ)中長期的な観点からは、高速炉及び関連サイクル施設を建設・運転し、実用化していくには、プラント設計及び機器製造の技術を持つメーカーを中核にして、サプライチェーンを構成する計装・機器メーカー、素材メーカー等の技術力が不可欠である。高速炉固有の技術開発から撤退しているメーカーも複数存在しており、サプライチェーンを再構築していく必要がある。
  - (ウ)研究機関や電力会社においても、もんじゅ以降の高速炉の設計及び技術開発経験を持つ技術者に蓄積された技術知見を散逸させることなく、次世代の技術者へ継承・発展させていくためには、実証炉及び関連する燃料サイクル施設の建設を急ぐ必要がある。
  - (エ)大学や研究機関においては、若手人材の確保が急務である。特に、炉物理や炉設計、サイクル分野における人材の空洞化が著しい。産官学が一丸となった集約的な人材育成への投資と人材の流動化のための施策、意識改革が必要であり、それを支える安定的な研究環境の提供が望ましい。また、そのためには、老朽化し、国内に点在するホットラボの集約化と共用化並びに更新が必要である。
  - (オ)原子力分野を志す人材を増やすことは、持続的な原子力利用を下支えする重要な点である。つまり、原子力分野が、将来の夢を託すにたる魅力的なものであり、原子力エネルギーの価値の認知が求められる。そのため、予見性のある原子力政策や国民各層との丁寧なコミュニケーションが求められる。

## 5. 持続的な原子力利用の評価例

- (ア)原子力を持続的に利用していくためには、長期的に軽水炉から高速炉サイクルへ移行し、核燃料サイクルを閉じていくことが重要である。ここでは、上述した持続的な原子力利用のための中長期的な展望の一例として、軽水炉から高速炉へ移行していく2つのケースと、高速炉の導入が限定的になり軽水炉と高速炉が共存するケースを想定し、高速炉の導入ペース(年間の建設基数や移行に必要な期間)、軽水炉の運転に必要な天然ウランの累積消費量、軽水炉と高速炉の使用済燃料(以下、SF)の蓄積量、再処理施設の規模、分離 Pu 保有量、分離 MA 蓄積量等のサイクル諸量を試算した結果について紹介する。具体的には以下の3ケースである。

- ・ 原子力発電容量は 31 GW 一定(2030年時点の総発電量の予測の 20-22%相当)と

し、高速炉の本格導入以降は、軽水炉の運転期間終了後に高速炉にリプレースしていく「**発電容量 31GW での高速炉への移行ケース**」。

- ・ カーボンニュートラル(CN)を実現する 2050 年に向けて、原子力発電容量を革新軽水炉の導入により倍増(60GW)させ、その後高速炉へ移行する「**発電容量 2 倍増と高速炉への移行ケース**」。
- ・ 高速炉実用化の遅延により、その導入が限定的となり、軽水炉による発電が主体だが、高速炉が原子力発電容量全体の 1/3 で共存する「**LF 共存ケース**」。

(イ) この諸量評価は、軽水炉から高速炉への移行プロセスや LF 共存時のサイクル施設の諸量を概略の把握を目的とした試算であることから、現時点において諸量評価に必要な情報が揃っている酸化燃料のデータを用いた。これらの試算から、各ケースにおいて以下の結論が導かれる。(参考資料に代表的な試算結果のグラフを添付した)

#### (ウ) 【**発電容量 31GW での高速炉への移行ケース**】

- ・ 高速炉を 2060 年から本格導入し、運転期間が満了した軽水炉を高速炉へ移行していくことで、2115 年～2138 年までに高速炉への移行が完了する。
  - ① 海外から天然ウランを購入する必要はなくなりエネルギー自給が実現する。
  - ② SF 貯蔵量を現状の 1/5 程度に削減できる。
  - ③ MA 添加率 3%の燃料を高速炉で燃焼させることにより、軽水炉 SF から回収された MA を、高速炉への移行が終わるまでに殆ど燃焼させることができる。
- ・ 天然ウランの累積消費量は、約 27 万トン～約 36 万トンの間になる。本格導入が 2080 年に遅れた場合には、同消費量は約 46 万トンまで増加する。
- ・ 軽水炉と高速炉の再処理施設の規模は移行パターンにより幅がある。軽水炉の再処理設備は、移行パターンの影響を殆ど受けず、六ヶ所へ続く第二再処理工場 (2 再) で 500～550 トン/年、同 3 再で 250～300 トン/年規模となる。高速炉の再処理施設は、移行初期に 300～150 トン/年、移行後期は 300～400 トン/年になる。
- ・ 高速炉の増殖比が 1.2 の場合と 1.1 の場合で移行パターンを含め評価結果に大きな差はない。
- ・ 高速炉へ円滑に移行していくためには高速炉の初装荷燃料を確保する必要があることから、分離 Pu の確保は極めて重要である。そこで、分離 Pu 保有量に関する現行の制約と、原子力の持続的活用を求めるエネルギー政策との整合性を改めて議論する必要がある。

#### (エ) 【**発電容量 2 倍増と高速炉への移行ケース**】

- ・ GX 実現に向けて原子力の発電設備容量を倍増して 2050 年までに 60GW にする場合は、高速炉の初装荷燃料に必要な Pu は、軽水炉 SF を再処理する 2 再容量を 1200 トン

ン/年へ拡大することが必要になる。軽水炉の3再は400トン/年の規模で20年の稼働期間で終了する。再処理施設が順調に稼働することによりSF貯蔵量は2060年以降急激に減少していく。高速炉の再処理施設容量は、300トン/年、その後のF再施設は600トン/年規模の施設が必要になる。なお、天然ウランの累積消費量は、軽水炉での発電量が増加するため、同ケースの2倍となる約52万トンとなる。

- ・ 高速炉への移行完了は、31GWの場合と同時期の2116年頃となり、上記①から③を満足する。

#### (オ) 【LF共存ケース】

- ・ 高速炉の導入が限定的になった場合、SF貯蔵量は高速炉の導入に伴って減少し、2100年以降は現状の約1/4である約5000トン前後で静定する。MA燃焼については、将来的なR&Dや評価技術の向上によって、一時的にMA添加率を5%まで拡大するか、あるいは平均4%程度まで増やすことができるようになれば、回収したMAを高速炉サイクル内に閉じ込めることができる。但し、天然ウランの累積消費量は、単調に増加し、2170年までに約50万トンを越える。

(カ) 以上を総括すれば、軽水炉及び高速炉の燃料サイクル施設の規模については、今後の状況変化(燃料選択、原子力発電容量、高速炉サイクルの実用化時期等)を踏まえた諸量評価に基づく、適切な施設整備計画や操業条件の検討が肝要であると結論できる。

### 6. 持続的な原子力利用に向けた提言

(ア) 「今後の原子力政策の方向性と行動指針」の実現のためには、ステークホルダーが共有できる将来見通しの確立のため、燃料供給と核燃料サイクル、廃棄物処分などライフサイクル全体に関する長期的な整合性を確保することが重要である。本分科会の提言を踏まえつつ、関係者による将来の原子力利用の規模等に関するシナリオの定量的な検討が求められる。そのためには、国(経産省、文科省)、日本原子力研究開発機構(JAEA)、電気事業者、中核メーカ、学協会などのステークホルダーが協議・意見調整をしつつ進める必要がある。

(イ) エネルギー基本計画に定めるエネルギー政策は、2050年時点の目標を定め、そこからバックキャストするアプローチによっている。一方、原子力利用ライフサイクル全体に関する長期的な整合性の確保のためには、2050年以降の方向性も見通す必要がある。したがって、次世代革新炉と関連するバックエンドプロセスの導入シナリオを提示・共有することが不可欠である。このような認識のもと、本分科会では持続的な原子力利用とはどのような絵姿であるかを示した。さらに、我が国における高速炉と核燃料サイクル開発の経緯を分析し、GIFにおける第4世代原子炉のゴールを踏まえ、持続的な原子力利用シナリオの技術要件を定めた。その結果、

閉じた核燃料サイクルの確立が、我が国の原子力の持続的利用と GX への貢献にとって選択すべき方向であるとの結論に至った。

- (ウ) 竣工を控える六ヶ所再処理工場は使用済 MOX 燃料や高速炉燃料を念頭に設計されたものではないため、次期の再処理システムについて産学官で議論していく必要がある。あわせて、高速炉と閉じた核燃料サイクルの確立において、最終処分に及ぼす影響についても、技術開発の段階から検討することが必要であり、原子力利用ライフサイクル全体にわたり長期的な整合性を確保した道筋が示していく必要がある。
- (エ) 原子力の持続的利用のシナリオは、国民から信頼され社会に受け入れていただけるよう、具体化すべきものである。つまり、「5. 持続的な原子力利用の評価例」でまとめたように、軽水炉から高速炉への移行、高速炉と核燃料サイクル技術の適切な本格導入時期と導入ペース、導入規模についての定量的な評価の下、提言を行い、技術開発・導入・普及が具体的に見通せるシナリオが必要である。
- (オ) 今後、具体化する原子力開発・利用シナリオは、将来のエネルギー需給や資源制約、技術進展に関する不確かさに備えるべく柔軟性をもたせなければならない。また、様々な制約条件を適切に考慮した現実的なものとする必要がある。そこで、原子力開発・利用シナリオを可能な限り定量的に分析・考察すべきであり、必要に応じて、国内外で評価された情報も適宜活用しながら、4. に述べた要件を展開する必要がある。
- (カ) 持続的なエネルギーの確保、あるいは原子力の利用といった長期にわたる開発プロジェクトを進めるためには、原子力基本法に示されている原子力開発利用に関する基本方針を念頭におくことが大切である。同時に、予見性を確保できる政策の下、既設炉の利用、革新軽水炉の新增設、高速炉の導入へと繋がる持続的なサプライチェーンを含む適切かつ実効的な開発体制と人材育成、そして、それらを下支える社会経済制度を構築しなければならない。
- (キ) 原型炉「もんじゅ」の廃炉によって、素材メーカーや製造メーカー等が原子力分野から撤退してきている。これまでに我が国で蓄積されてきた高速炉建設に必要なノウハウや技術が喪失しつつある厳しい状況を踏まえ、実証炉の建設計画を具体化していく中でサプライチェーンを再構築していくことが急務である。
- (ク) 革新炉の研究開発においては、GIF の枠組みや日米、日仏等の二国間の枠組み等の国際協力を活用、深化させていくことも重要である。これにより研究開発を効率的に進めるだけでなく、将来的な革新炉の海外展開やそのための標準化に繋げ、原子力分野の供給国として、世界をリードしていく必要がある。
- (ケ) これまでの軽水炉の開発・利用、並びに高速炉や再処理技術開発から得られた知見・経験を活かすことは、今後の原子力開発・利用にとってきわめて重要であると考える。必要とされる原子力利用・活用の規模を維持・拡大するため、電気事業に

おける制度の現状や将来の展開を踏まえ、事業の予見性確保と継続的投資環境の維持のための方策の考え方についても早急の議論が求められる。

【参考資料】 サイクル諸量に関する試算結果

1. 本試算で想定した主な条件

- ① 高速炉を 2060 年から本格導入し、これ以降は軽水炉 SF、MOX-SF、高速炉 SF から MA 回収を行い、炉心平均 3%の MA 添加率の燃料を高速炉で燃焼させていくことを想定した。(感度解析として、本格導入時期を 2080 年とした場合も試算した)
- ② 軽水炉 SF は軽水炉用再処理施設(操業期間 40 年)で、プルサーマル MOX-SF と高速炉 SF は、高 Pu 富化度燃料を扱える高速炉用再処理施設(同 40 年)で扱うと想定した。
- ③ 高速炉の増殖比は 1.2、軽水炉 SF と高速炉 SF の炉外サイクル期間は共に 5 年(冷却 4 年、再処理と燃料製造に 1 年)とした。
- ④ 原子炉の稼働率は 75%、再処理量は設計容量で稼働するとした。実際には、再処理施設の計画外停止によって燃料製造施設の操業が影響を受けないよう一定の Pu 貯蔵量が必要になるが、本試算では考慮せず、理想的なマテリアルバランスであることに留意する必要がある。

2. 発電容量 31GW での高速炉への移行ケース

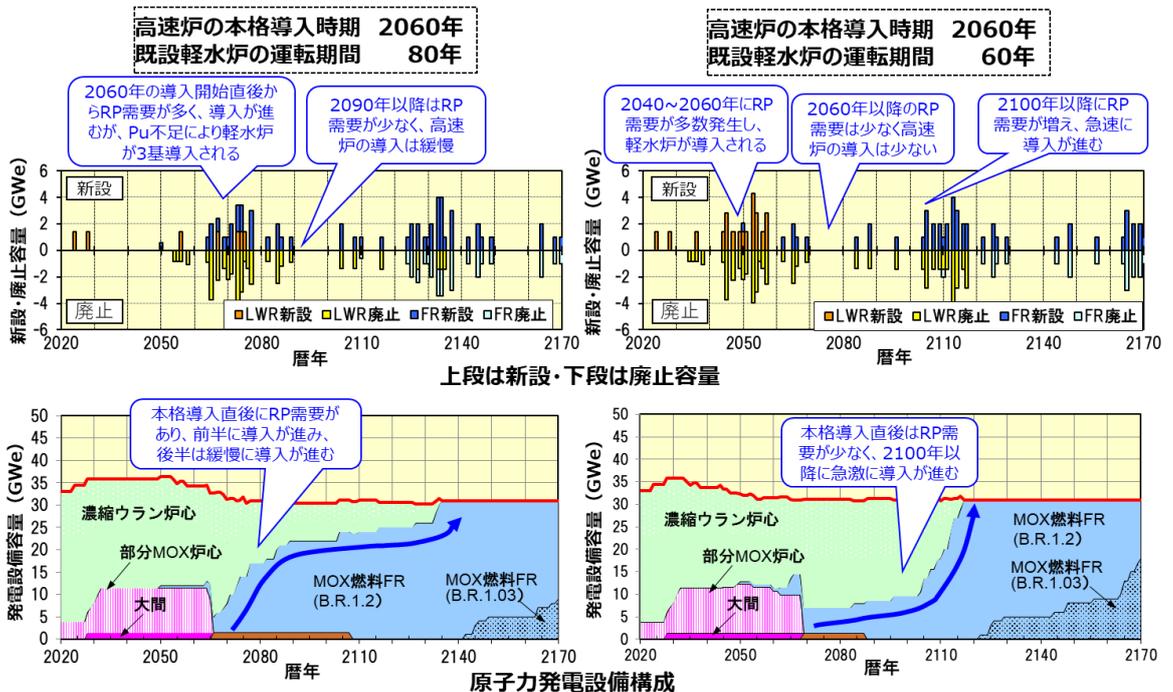


図 1 既設軽水炉の運転期間に対応した高速炉への移行パターンの違い

図-1 上の棒グラフは、リプレース需要に応じて新規導入された原子炉の出力を、同図下の棒グラフは廃炉になった原子炉の出力である(リプレースの橙色が革新軽水炉、青色が高速炉)。新規導入された原子炉は、2060年までは革新軽水炉(140万 kW)が、2060年以降は主に高速炉(100万 kW)である。

既設軽水炉の運転期間を 80 年とした場合には、2060 年後半から既設軽水炉のリプレース需要の増加により高速炉建設の繁忙期に入り、2080 年以降に閑散期へ移行する。ここで、2060 年以降に革新軽水炉が 3 基導入されているのは、分離 Pu 貯蔵量を現在の保有量 40.8 トン以下に制限すると、高速炉導入に必要な Pu 量を確保できなかったためである。この結果、高速炉への移行完了時期は 2135 年(移行期間 75 年)となり、軽水炉の利用期間が増え、天然ウランの累積消費量は 33 万トンとなる。

なお、高速炉導入の繁忙期前半(2060 年から 2070 年)に、分離 Pu 貯蔵量の制限を見直し、70 トンに拡大すれば 2060 年以降に革新軽水炉を導入せず、全て高速炉を導入できる。この結果、移行完了時期は 2118 年(移行期間 58 年)に短縮され、天然ウランの累積消費量も 27 万トンとなる。

一方、既設軽水炉の運転期間を 60 年とした場合には、高速炉が実用化される前の 2040 年代後半にリプレース需要の繁忙期が発生するために革新軽水炉が 15 基導入され、高速炉が導入開始する 2060 年以降にはリプレース需要が少なく、高速炉は僅か 5 基しか導入されない。しかし、2100 年以降に、2040 年代に導入された革新軽水炉 15 基のリプレース需要によって高速炉導入の繁忙期が発生し、移行完了は 2115 年(移行期間 55 年)と結果として早期に完了する。この場合、高速炉導入が増加するのが後半になるため、軽水炉による発電量が増え天然ウランの累積消費量は約 36 万トンに増加する。

なお、高速炉の本格導入時期が 2080 年に遅延した場合は、既設軽水炉の運転期間を 80 年としても、高速炉導入の繁忙期は 20 年遅れた 2120 年以降に発生し、移行完了時期は 2138 年(58 年)、天然ウランの累積消費量は約 46 万トンと最大となる。

このように、原子力発電容量が 31GW 一定の状況でも、既設軽水炉の運転可能期間の違いにより、リプレース需要が発生するパターンは大きく異なり、高速炉への移行期間や天然ウランの消費量に大きな影響を与える。これに伴って軽水炉及び高速炉の再処理設備容量も変動する。

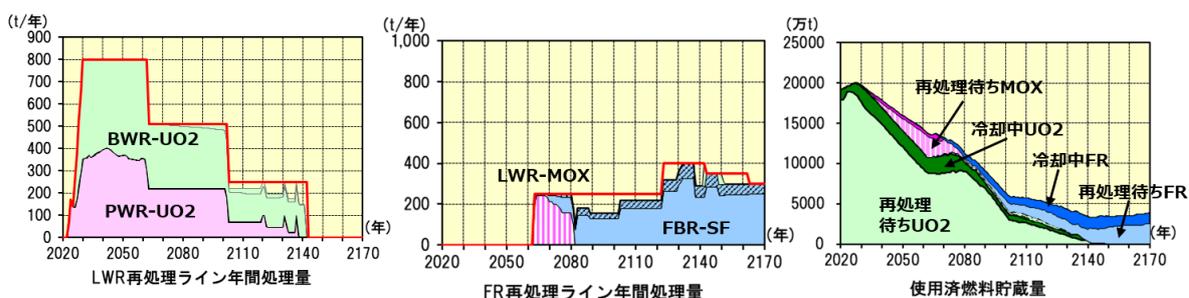


図 2-1 高速炉への移行ケース：既設軽水炉の運転期間 80 年

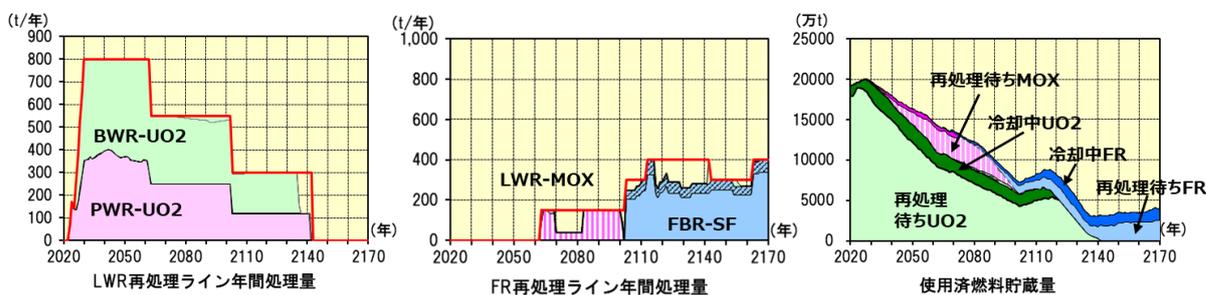


図 2-2 高速炉への移行ケース：既設軽水炉の運転期間 60 年

### 3. 発電容量 2 倍増と高速炉への移行ケース

革新軽水炉の新增設とリプレース需要の状況と試算結果を図-3 に示す。高速炉の初装荷燃料に必要な Pu は、軽水炉 SF を再処理する 2 再施設(1200 トン/年)から調達することで移行は円滑に進み 2116 年に完了する。これは 31GW 規模での移行ケースと同時期となる。この再処理施設の稼働によって、使用済み燃料の貯蔵量は、2060 年以降急激に減少する。高速炉の再処理施設容量は 300 トン/年で稼働し、2 番目の F 再施設では 600 トン/年規模の施設が必要になる。

分離 Pu 貯蔵量は、最初の高速炉建設の繁忙期までは 70 トン規模であるが、2100 年からの 2 回目の繁忙期に備えては、200 トンを越える貯蔵量を確保して、高速炉導入に必要な初装荷 Pu 量を確保する必要がある。また分離 MA 貯蔵量は、MA 添加率 3% で高速炉へ装荷していくことで、高速炉への移行完了前にゼロになり、放射性廃棄物の減容と潜在的有害度の低減が実現できる。

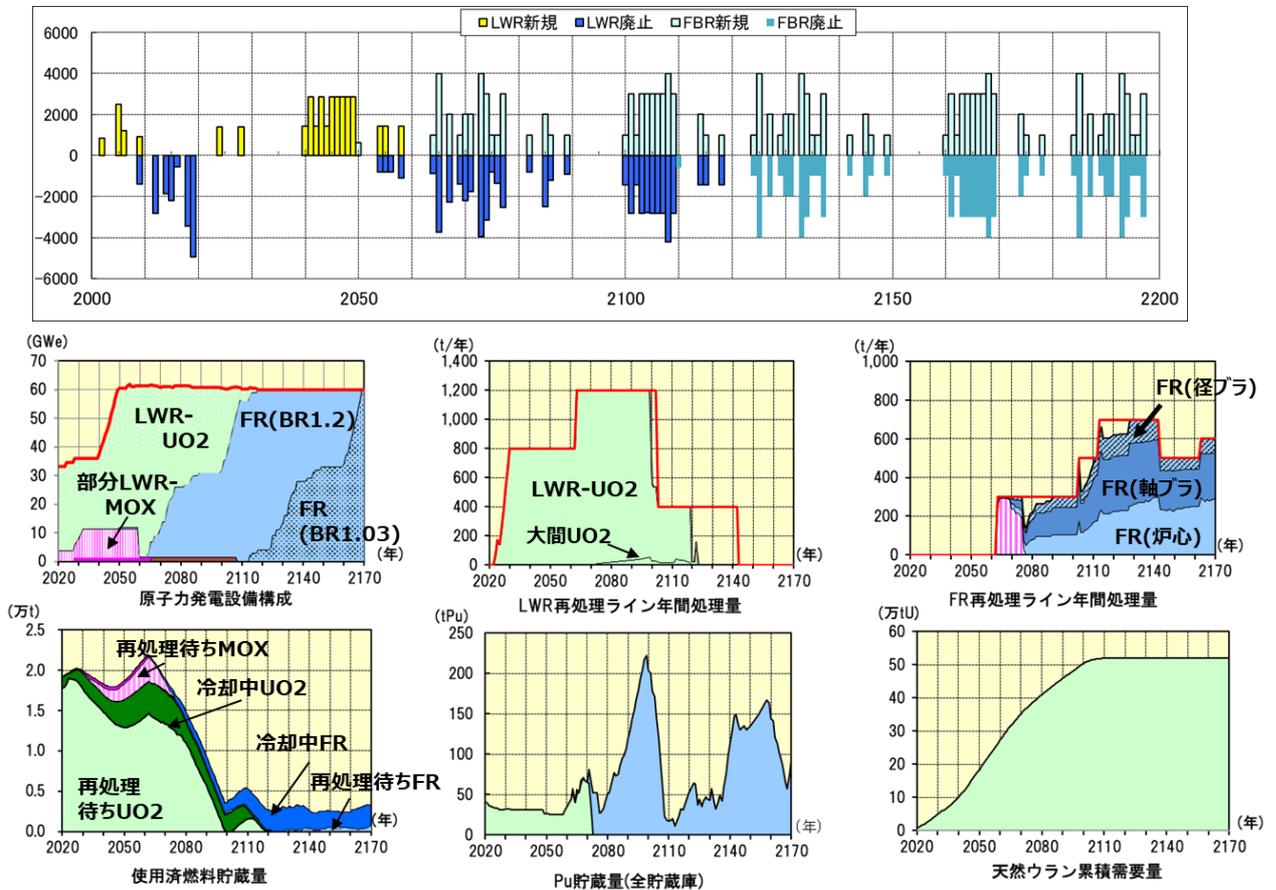


図-3 原子力発電容量を 60GW に倍増し高速炉へ移行するケース  
既設軽水炉 80 年、2060 年本格導入

原子力発電の規模を倍増した場合でも、上記の燃料サイクル施設が計画通りに操業すれば、高速炉への移行完了時期は 31GW の場合とほぼ同時期になる。これは、この倍増ケースでも、高速炉の増殖比や倍増時間よりも、軽水炉 SF の再処理によって高速炉の初装荷燃料に必要な Pu 量が確保できるためである。なお、天然ウランの累積消費量は、軽水炉での発電量が増加するため、31GW の場合のほぼ 2 倍の約 52 万トンとなる。

#### 4. LF 共存ケース

31GW の原子力発電容量の規模では、その 1/3 の設備容量 11GW を高速炉とすることで、高速炉の導入効果を確認できる。使用済み燃料の蓄積量も現状の約 1/4 に削減することができる。図-4「MOX 新燃料の Pu 富化度と FR 炉心 MA 添加率」のグラフのように、将来的な R&D や評価技術の向上によって、炉心燃料の MA 添加率を一時的に 5% まで拡大するか、あるいは平均 4% 程度まで増やすことができるようになれば、分離 MA 貯蔵量はゼロにでき放射性廃棄物の減容と潜在的有害度の低減を実現できる。しかし、天然ウランの累積消費量は、軽水炉利用が継続するために増加し続け、2170 年で 50 万トンを超える。

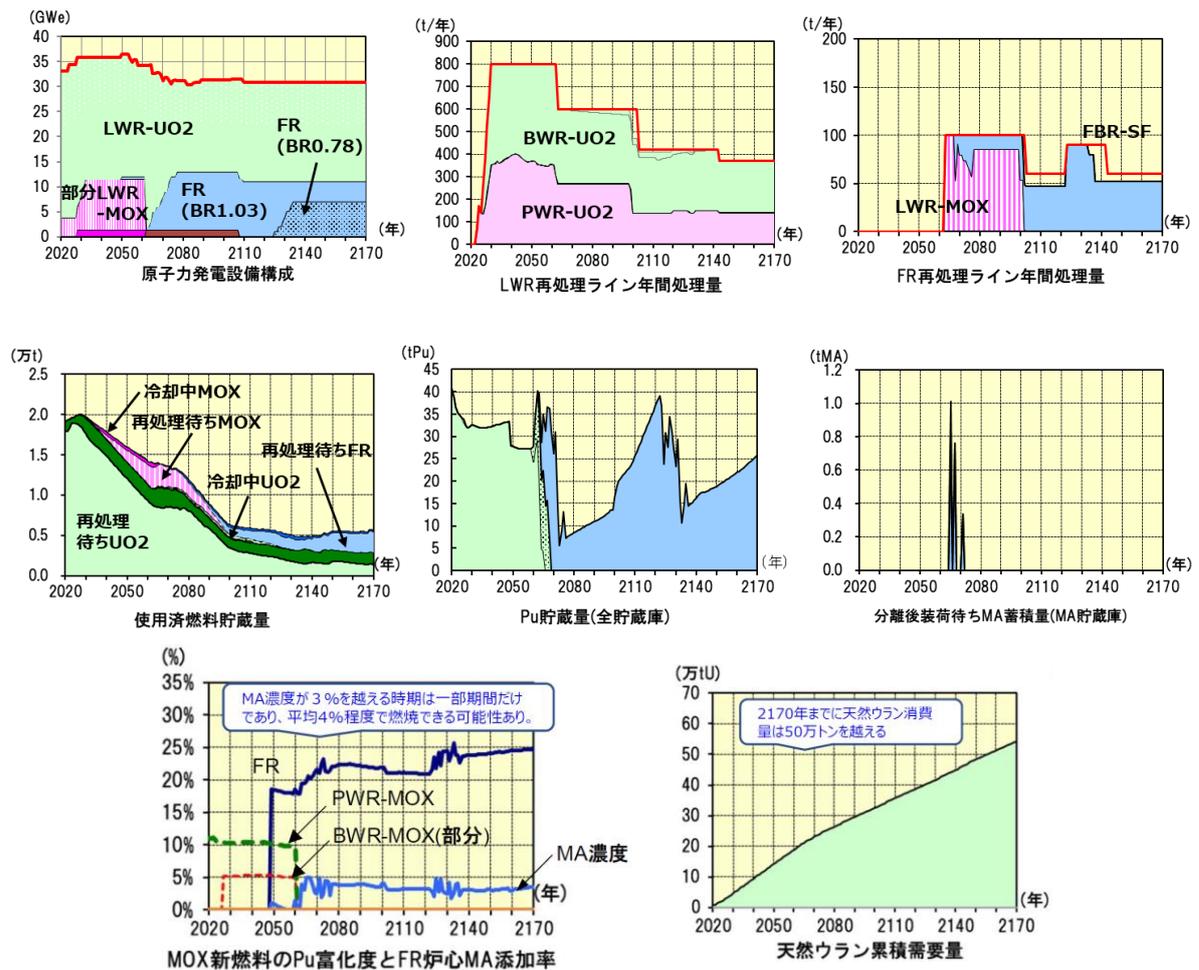


図-4 「高速炉 11GW + 軽水炉 20W」の共存ケース (MA 添加率 : 最大 5%)

#### 謝辞

本資料に掲載したサイクル諸量評価は、日本原子力研究開発機構 高速炉・新型炉研究開発部門・国際・社会環境室の FAMILY コードを用い、同部門高速炉設計部の協力を得て実施したものである。本検討にご協力頂いた皆様に感謝します。

【別紙】 日本原子力学会 原子力アゴラ調査専門委員会  
 持続的な原子炉・核燃料サイクル検討・提言分科会 委員等名簿

区分	氏名	所属
主査	齊藤 拓巳	東京大学
幹事	岡村 泰治	日本原燃(株)
幹事	小竹 庄司	日本原子力発電(株)
幹事	白木 貴子	三菱重工業(株)
幹事	竹内 正行	日本原子力研究開発機構
幹事	山口 彰	(公財)原子力安全研究協会
委員	浅沼 徳子	東海大学
委員	石田 圭輔	原子力発電環境整備機構
委員	碓井 志典	三菱重工業(株)
委員	浦田 英浩	東芝エネルギーシステムズ(株)
委員	太田 宏一	(一財)電力中央研究所
委員	尾形 孝成	(一財)電力中央研究所
委員	越智 仁	日本エヌ・ユー・エス(株)
委員	上出 英樹	日本原子力研究開発機構
委員	亀山 正敏	日本原子力発電(株)
委員	川合 康太	(株)三菱総合研究所
委員	川崎 大介	福井大学
委員	川村 慎一	日立GEニュークリア・エナジー(株)
委員	黒崎 健	京都大学
委員	小坂 進矢	三菱FBRシステムズ(株)
委員	小宮山 涼一	東京大学
委員	坂下 嘉章	東芝エネルギーシステムズ(株)
委員	佐藤 拓	原子力エネルギー協議会
委員	下郡 けい	日本エネルギー経済研究所
委員	田中 治邦	日本原燃(株)
委員	中熊 哲弘	電気事業連合会
委員	三牧 英仁	三菱重工業(株)
委員	雪田 篤	日立GEニュークリア・エナジー(株)