

企画セッション | 総合講演・報告：総合講演・報告4「核燃料サイクルの成立性」研究専門委員会

■ 2019年9月13日(金) 13:00～14:30 | 会場 共通教育棟 2F D21

[3I_PL] シナリオ・研究開発・人材育成を俯瞰した核燃料サイクルの成立性の検討状況

座長:井上 正(電中研)

[3I_PL01] 本委員会の設立趣旨と目的

*佐藤 勇¹ (1. 東京都市大)

[3I_PL02] 多様な原子力発電シナリオに対する諸量評価

*西原 健司¹ (1. JAEA)

[3I_PL03] 原子力需要の成長またはゼロ成長シナリオにおける評価

*太田 宏一¹ (1. 電中研)

[3I_PL04] 原子力需要の減少シナリオにおける評価

*斉藤 拓巳¹ (1. 東大)

[3I_PL05] 原子力需要シナリオとその研究・開発項目

*佐藤 聡¹ (1. MHI)

総合講演・報告4「核燃料サイクルの成立性」研究専門委員会活動報告

シナリオ・研究開発・人材育成を俯瞰した核燃料サイクルの成立性の検討状況
Study status on feasibility of nuclear fuel cycle by overlooking energy scenario, R&D
and human resource development

(1) 本委員会の設立趣旨と目的

(1) Purpose of Establishment and aim of this committee

*佐藤 勇¹, 井上 正²¹ 東京都市大学, 研究専門委員会主査, ² 電力中央研究所, 研究専門委員会前主査

1. 原子力(核燃料サイクルを中心に)の現状について

原子力業界は、2000 年代初頭の「原子力ルネッサンス」、2011 年の東日本大震災とともに生じた福島第一原子力発電所事故を経て、今後のエネルギー産業として、今まさに岐路に立っていると考えられる。その背景には、当該事故を踏まえた原子力産業に対する(反省も含めた)総括が明確になされないまま、これまでと大きな変化がみられない原子力政策路線を推進することに対する社会受容が困難になっている状況がある。一方で、福島第一原子力発電所の廃炉に対する取組を第一優先で行っていく必要があることは、地域及び社会からの強い求めであるが、今後の核燃料サイクルはどのような路線に向かうのか、福島第一原子力発電所や通常炉の廃止措置から発生する放射性廃棄物の最終的な処理・処分はどのようにしていくか、などの検討を行うことが必要である。

このような背景において、本研究専門委員会では、今後の原子力発電利用に伴う核燃料サイクル等のバックエンドがどのような姿になるのか、将来の発電量を変数として検討し、廃棄物処分場への負担なども考慮して、議論を開始している。ここではその経緯やこれまでの検討状況を報告する。

2. 本研究専門委員会の設立趣旨と実施内容

上述のように、現状のウランの埋蔵量やコスト、使用済み燃料の発生量、処分のオプションや課題など、これまでのシナリオや路線に囚われることなく、目指すべき姿を見据えて幅広く検討することが必要である。そこで、これまでの状況を調査し、情報を整理すると共に今後のシナリオについて幅広く討議し、複数の核燃料サイクルシナリオ、例えば、軽水炉のみのシナリオ、従来シナリオを含めた軽水炉－高速炉シナリオ、高速炉＋先進炉シナリオなどを示すと共に、これまで検討してきた調査資料と合わせて整理、およびデータベース化し、それに基づき核燃料サイクルのあり方を検討することを目的として、本研究専門委員会を立ち上げた。以下の項目で調査を行い、核燃料サイクルに関わる研究のあり方について検討している。

- ・フロントエンド（ウラン資源など、海水も含め）の現状と課題
- ・燃料サイクル（コスト、資源論その他）の候補シナリオと課題
- ・再処理（既存、先進的）の現状と課題
- ・高速炉の可能性と整理、現状と課題

3. 高速炉及び再処理開発の現状

核燃料サイクルの枢要要素として、高速炉事業と再処理事業の状況を示す。

(1) 高速炉開発の現状

核燃料サイクルにおいて、Pu の効率的な利用、長半減期核種や Am、Np 及び Cm などのマイナーアクチノイドの消滅処理を進める上で、高速炉は枢要な役割が付与されてきている。ところが、高速炉開発の要とされてきた高速増殖原型炉「もんじゅ」は、2016 年 12 月をもって廃止措置への移行が決定した。高速炉開発に

*Isamu Sato¹, Tadashi Inoue²¹Tokyo City Univ., Chairman, ²Central Research Institute of Electric Power Industry, Former Chairman

においては、高燃焼度のため多くの長半減期核種が含まれる、軽水炉から発生する使用済燃料の処理、およびリサイクルする技術の開発が不可欠である。長半減期核種やマイナーアクチニドの消滅処理は加速器駆動システム(ADS)を用いた核変換技術も研究されているが、Pu の効率的な利用も考慮に入れ、軽水炉の稼働(あるいは、軽水炉で発生する Pu)も範疇にいた核燃料サイクル全体としての高速炉の役割と位置付けを明確にすることは重要であると考えられる。

(2) 再処理事業の現状

原子力機構・核燃料サイクル工学研究所の再処理施設は、2007年5月で操業を停止し、その後廃止措置に移行したため、国内の再処理施設は六ヶ所再処理工場(日本原燃株式会社)のみとなる。2006年にアクティブ試験を開始したが、様々な原因及び2011年の福島第一原子力発電所事故後の「新規制基準」への対応などで本格稼働は未だになされていない。これまでの全量再処理から直接処分も選択肢とした議論もある。本専門委員会では、原子力利用のシナリオに応じてどのようなオプションがありうるかの検討を進めている。

上記では高速炉及び再処理の方向性を簡単に紹介したが、その他の核燃料サイクルの工程も含めて、技術的な観点、社会的な観点、経済的な観点、環境負荷の観点などの多面的に原子力に携わる我々が自ら、立場の垣根を越えて、検討を行うことに重要性があると考ええる。

4. 核燃料サイクルの成立性を定量的に評価するための「論点」

2017～2018年度の本研究専門委員会第一期では、各分野の専門家・事業者から講演を聴講し、核燃料サイクルを取り巻くフロントエンド、燃料サイクルの候補シナリオ、再処理及び高速炉開発における現状と課題を委員間で共有し、これらを基にどのような「論点」で検討していくべきか、「委員各個人として」の考えを抽出した。すなわち、委員はそれぞれの原子力業界としての立場があるわけであるが、この立場にとらわれず検討し、51件の核燃料サイクルの成立性を定量的に調査・評価するための「論点」を得た(この一部を表1に示す)。

表1 核燃料サイクルの成立性を定量的に調査・評価するための「論点」(一部)

論点	キーポイント	大分類	小分類
2050年の世界を想定した時、原子力はどのくらいの電源比率(発電量)であるべきか(3E+Sの観点で)。	電力比率	1. 電源比率	1. 実力評価
今後見据えての原子力と再生可能エネルギー利用の適値は? FITが切れたときの再生可能エネルギーの利用は?	原子力v.s. 再生可能エネルギー	1. 電源比率	1. 実力評価
軽水炉サイクルの行く末が見えてくれば、高速炉サイクルの議論ができるようになる。 まずは10～20年後の軽水炉サイクル+Puサーマルの成立性を議論。	LWRサイクル+Puサーマルの成立性	2. シナリオ検討	1. 実力評価
学会として、想定される核燃料サイクルを合理的に定義し、それを技術的及び経済的に評価。 将来実現に向けての課題は何でまた、どれだけ想定できるか。 現状と将来といってもいくつか考えられるので、これまでに想定されたケースでまず一度評価結果を整理してみる。それをきちんと現段階で再評価し、提示できる核燃料サイクルの選択肢を提示、成立性を技術的、経済的な観点から評価してはどうか。	技術的・経済的に合理的なサイクル	2. シナリオ検討	1. 実力評価
その世界(2050年断面での電源比率)が仮に2100年まで続くとしたら、燃料サイクル(再処理)は必要か? 必要だとしたらいつ頃どの程度必要か?	世界の継続性	2. シナリオ検討	2. ニーズ
廃棄物の観点: 直接処分した時に何が本質的な課題となるか(コストか、被ばくか)。	廃棄物直接処分	4. 開発	1. 意義
国際協力を含めたとしても、自国で開発する意義は何か? 軽水炉は米国から輸入し、改良を重ねている。	自国開発の意義	4. 開発	1. 意義
再処理に必要な知見を照射済燃料を用いた実験によって実験室レベル・工学レベルで得るための施設・設備の老朽化が著しい。産官学が乗り入れが容易な施設・組織は必要ないか。	照射後試験施設の必要性	5. 研究	1. 基盤
我が国には一杯研究施設があった、ある。それが有効に利用されてこなかった理由は何か。	施設の有効活用	5. 研究	1. 基盤
大学、研究機関の技術研究力、開発力の大幅な低下(原因とまだ立て直せるならあるべき方向)	開発力の低下	5. 研究	1. 基盤
継続的な原子力エネルギー利用のため、また研究開発の沈滞を防いで専門家とそれを目指す若者の意欲を守るためには、原子力施設のスクラップアンドビルドを説得力あるコストと期間で完了することが不可欠である。	Scrap&Buildの技術的・制度的方策	5. 研究	1. 基盤
課題の「核燃料サイクルの成立性を定量的に調査・評価するための「論点」」ですが、ウラン資源の観点から、地球温暖化の観点から、等々、と言っても未来のことを予測することは不可能なので、人によって意見は異なるのが常であり、それが合っている、間違っているということではできないと思います(反原子力の人間を説得するための成立する要件を将来に求めても、それは考え方の問題になってしまい、トランス・サイエンスです)。 ただ、逆に、核燃料サイクルが成立するために必要な条件として、やはり「人材」は重要な項目だと思います。現在の所属や立場、目先の欲(金儲け?)から離れて、原子力利用が将来の人類にとって必要不可欠と本心から思い、他人から非難されても、ぐっとこらえて原子力技術の維持・革新にコツコツ取り組む人材がいなくては原子力利用自体の成立性すらもそもそもないと私は思います。	人材	6. リソース	1. 人材育成
大学の研究、人材育成はどうすべきか(最近の大学人のはやりの言葉、リスクマネジメント、レジリエンス、グレイデッドアプローチ すべてこれ前向きの技術開発の言葉ではない)	大学における研究と人材育成	6. リソース	1. 人材育成
1F廃棄物(そこにある危機)の処理の行方 これが決まらずSF,HLWの処分を先に決められるか(対国民目線)	1F廃棄物問題	7. 外乱	

これらの論点には、原子力産業において以前から指摘されてきた課題も含まれているが、核燃料サイクルの各分野に横断的なものもある。また、原子力産業のシナリオに関しては、将来の国内外の様々な「状態」に依存することもあり、不確かさが大きく、多くの委員が懸念を抱いていることが分かった。さらには、核燃料サイクルに関する研究を工学レベルで進めていくためのインフラの老朽化に対する論点も指摘されている。このように論点は、様々なベクトルを示しているうえ、提案者と読み手の間での認識の差があるため、委員の間で高いレベルでの認識の一致を経た提言としていくためには、更なる作業が必要であると考えている。

5. 各分野におけるグループ活動と提案発想のための手法と全体のまとめの見通し

「論点」は、50以上にのぼるうえ、単なる「まとめ」を追求するだけでは説得力のある提言とならないと考えられる。効率的かつ説得力のあるものにしていくには、ある程度の「議論の発散」、汗をかくための「実務的な作業」、及びこの後に「委員間の合意形成」が必須であると考えた。こうすることで、委員の皆の合意の上での提案となると考えられる。重要なポイントとしては、多方面からの議論を行うこと、実務的な作業(実態調査と評価)を行うこと及び委員間の合意形成を行うこととし、「論点」を以下の5グループに分け、グループ討論を実施している。

- (1) シナリオ検討（原子力発電容量は現行の想定）
- (2) シナリオ検討（同、上振れ）
- (3) シナリオ検討（同、下振れ）
- (4) 研究・開発
- (5) 人材育成

なお、(1)～(3)のグループが用いる原子力発電の諸量評価は、JAEAが実施したものを用いて行った。

現在、グループ員が定期的に集まり活動を実施しているが、現在のところ、論点を拙速にまとめていくことを期待しておらず、まず委員での相互理解を深める活動(または、意見の発散)を行っている状態である。本グループ活動を経て、本研究専門委員会第二期末(2021年3月)までに、核燃料サイクルの成立性に対する網羅的な「提言」を得ることができるよう活動を進めていく。

総合講演・報告4「核燃料サイクルの成立性」研究専門委員会活動報告

シナリオ・研究開発・人材育成を俯瞰した核燃料サイクルの成立性の検討状況
Study status on feasibility of nuclear fuel cycle by overlooking energy scenario, R&D
and human resource development

(2) 多様な原子力発電シナリオに対する諸量評価

(2) Evaluation of quantities on various nuclear power generation scenarios

*西原 健司¹¹ 日本原子力研究開発機構

「核燃料サイクルの成立性」研究専門委員会において、将来の核燃料サイクルのために必要となる技術開発・人材育成を議論するために、将来シナリオを幅広く想定し諸量解析を行った。諸量解析では、軽水炉・高速炉の将来発電量、使用済み燃料再処理量等を設定し、ウラン消費量、使用済み燃料蓄積量、プルトニウム蓄積量、ガラス固化体発生量等を見積もった。

キーワード： 諸量評価、発電シナリオ、NMB コード

1. 緒言

2011年の福島第一原子力発電所事故を境に、国による原子力発電の将来利用計画は大きく下方修正された。事故以前 50GWe の発電容量を擁した我が国は、2020 年にはさらに 58GWe へ増大する計画¹⁾を進めるとともに、ウラン資源の節約や放射性廃棄物の削減のために、使用済み燃料再処理、プルサーマル利用、高速増殖炉への移行することが標準的な将来予測とされていた。しかし、事故以降、核燃料再処理路線の堅持と最低限必要な原子力発電の維持は示されているものの、2030 以降の原子力発電に対する計画は示されていない。

このような状況下で、今後の発電・核燃料サイクルについて幅広く討議し、どのような原子炉および核燃料サイクルの技術開発・人材育成が必要か検討するために、日本原子力学会において「核燃料サイクルの成立性」研究専門委員会が 2017 年に立ち上げられた。本評価はこの委員会での現実的な検討に資するために行われたものである。

将来シナリオとして、大胆な原子力発電の利用幅を以下のように想定した。A：最も大きい場合、事故以前の計画に近い 66GWe の容量に拡大する。B：現状維持の場合、国の計画値である 33GWe 程度を維持し続ける。C：最も利用が小さい場合、将来の新設・リプレースを想定せず、原子力発電の寿命に従ってフェーズアウトする。

2. 解析手法

諸量評価では、日本原子力研究開発機構が開発している NMB(Nuclear Material Balance)コード^{2,3)}を用いた。このコードでは、入力された各年の商業炉発電量や再処理容量等から、使用済み燃料、Pu 在庫、廃棄物などに移行するアクチノイド核種のマスフローを計算する。

本コードは以下の特徴を有する。①半減期が数日よりも長い 26 のアクチノイド核種と 2 つの核分裂生成核種に対して、燃焼及び貯蔵期間中の組成変化を計算する。計算精度は、ORIGEN コード⁴⁾等の燃焼コードと同等である。②初期の ²³⁵U 濃縮度や Pu 富化度を、無限実効増倍率を用いて決定する。それにより Pu 富化度の Pu 組成への依存性を考慮できる。③軽水炉、CANDU 炉、ガス炉、ナトリウム冷却 FBR、ADS が利用可能である。それぞれの炉心は、UO₂、MOX、窒化物燃料等と組み合わせることが出来る。④核分裂生成物を幾つかのグループに分けて評価し、廃棄体発生量を評価可能である。その際には、温度制限を考慮して地層処分場の専有面積も評価する。⑤Microsoft Excel 上で動作する。

3. シナリオ

3.1 2018 年の状況

本研究では 2018 年時点の国の方針、原発の運転状況を考慮して、将来シナリオを設定した。2015 年 7 月の長期エネルギー需給見通し⁵⁾によると、2030 年の電力需要は 9808 億 kWh と予測され、そのうちの 20～22%、すなわち、1962～2158 億 kWh を原子力発電が担うとされている。原子力発電所の設備利用率は 75%が想定されているため、発電容量は 29.8～32.8 GWe が 2030 年の目標と設定されている。

一方、2018 年 7 月時点における国内の原子力発電所の状況から予測される発電容量を図 1 に示す。ただし、現在建設中の原子力炉のうち、進行度が大きい大間および島根 3 号機は含め、小さい東通は除いた。

運転終了日が決まっていない原子炉については、2つの場合を想定した。一つは、すでに 60 年の延長申請を実施したものは合格すると仮定し、それ以外のものは 40 年とした場合(図中「延長申請済みのみ」)、他方は全基 60 年の延長申請を実施した場合(図中「全基延長」)である。

前者の場合、2030 年の発電容量は 25 GWe であり、前述の目標に達しない。一方、全基延長した後者の場合は 2044 年まで前述の目標以上を維持可能であることがわかる。2044 年以降も 20～22%の発電容量を維持しようとする、新設または 60 年以上の(2 度目の)運転延長が必要となる。

3.2 将来シナリオ

将来シナリオとして、表 1～3 に示すように、まず原子力発電の占める割合で 3 つのシナリオに大分類した。その後、発電容量の時間推移でのおおの 2 つに分類し、更に、核燃料サイクルのサブケースに分化した。なお、図 2 に各シナリオの発電容量推移を一覧した。

上振れシナリオ

上振れシナリオでは、長期エネルギー需給見通しで示された発電量の 2 倍、すなわち、国内発電の 44% を原発が担うと設定した。これは 66GWe の発電容量に相当し、2011 年以前に考えられていた 58GWe の発電容量に近いものである。

発電容量を 44%に維持する期間によって、二つのシナリオ(A、A')を設定した(表 1)。シナリオ A では、2050 年に 44%に到達し維持されるように建設を進める。シナリオ A'では、2040 年から緩やかに建設を行い、2100 年に 44%に到達し維持される。前者のシナリオでは、軽水炉の新設が 2040 年代に集中し、高速増殖炉への移行を考えた場合には合理的ではないため、A'のシナリオを設定した。また、現在稼働中の軽水炉はすべて 60 年に寿命延長するものとし、また、新たに建設するもの寿命は 60 年とした。

二つのシナリオに対して、各々 4 つのサブケースを設定した。A1 および A'1 は、軽水炉を継続し、ここからの使用済み燃料を直接処分する、いわゆるワンスルーシナリオである。軽水炉のリプレースでは軽水冷却の SMR(スモールモジュラー炉)を想定するが、十分な設計情報が利用できないため、燃料設計・燃焼度など、従来軽水炉(ただし、高燃焼)と同じになると仮定した。これらのシナリオでは六ヶ所再処理工場を稼働しない。

A2 および A'2 では、A1 と同様に軽水炉を軽水冷却 SMR でリプレースする。ウラン使用済み燃料の

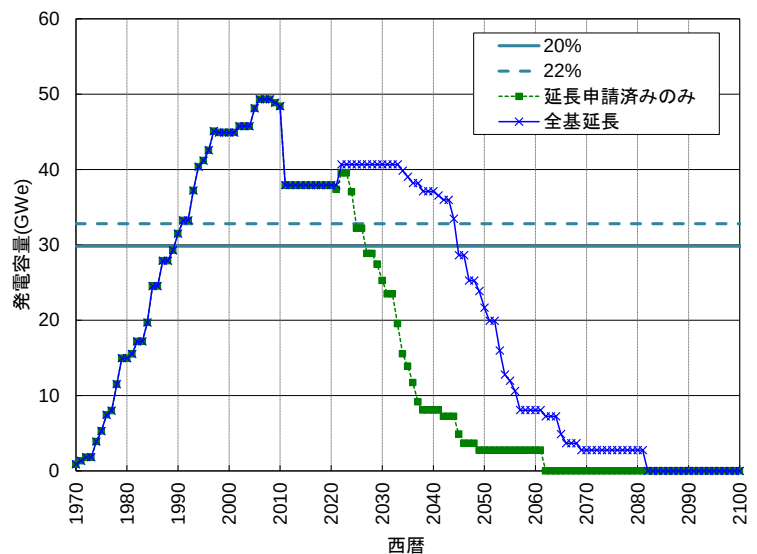


図 1 2018 年 7 月の状況から予測した発電容量

全量を六ヶ所再処理工場および、続く第二再処理工場で再処理し、プルトニウムを回収し、軽水冷却 SMR でプルサーマル燃料として利用する。

A3 および A'3 では 2055 年または 2060 年から高速炉系の SMR で軽水炉をリプレースする。高速 SMR も十分な設計情報がないため、大型ナトリウム冷却炉と同じ燃料設計が用いられると仮定した。A3 では、2040 年代に多数の軽水 SMR が建設され、2100 年付近にそのリプレースとして多数の高速 SMR が建設されるため、2100 年時点の高速 SMR 建設時に十分な量の Pu 在庫が存在する。そのため、高速 SMR の導入時期を 2055 年、BR(増殖比)を 1.1 として Pu 需給を満たすこととした。一方、A'3 では、軽水 SMR からの Pu 供給が不足するため、高速 SMR の導入を 2060 年に遅らせ、また、BR を 1.2 とする必要がある。

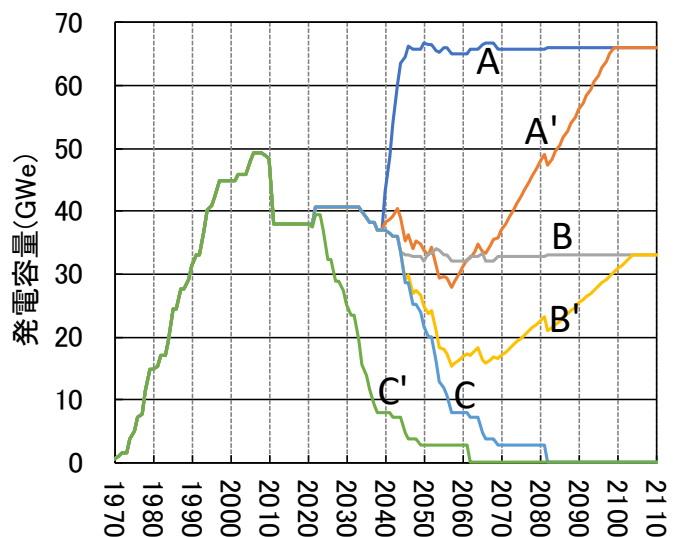


図 2 各シナリオの原子力発電容量

現状シナリオ

現状シナリオでは、長期エネルギー需給見通しで示された発電量、すなわち、国内発電の 22%を原発が担うと設定した。これは 33GWe の発電容量に相当する。

B シナリオおよび B'シナリオは、A シナリオおよび A'シナリオと同様に、2040 年以降の新設の速さが異なる。また、4 つのサブケースについても、A シナリオと同様に設定した。

下振れシナリオ

下振れシナリオでは、現在建設中の原子炉のうち、進行度が大きい大間および島根 3 号機を最後とし、以降の新設およびリプレースを行わない。従って、現在稼働中および建設中の原子炉の運転の終了とともに、原子力発電を終了する。

下振れシナリオとして、現在稼働中の原子炉の運転期間を全て 60 年に延長したシナリオ C と、運転延長認可取得済みの原子炉のみ 60 年に延長したシナリオ C'を想定した。

サブケースとして、六ヶ所再処理工場を稼働しない C1 および C'1、六ヶ所再処理工場の稼働を制限し、余剰 Pu を生じさせない C1.5 および C'1.5、そして、六ヶ所再処理工場を稼働し、軽水炉使用済み燃料を全量再処理する C2 および C'2 を想定した。

C2 では、40 年間の六ヶ所再処理工場稼働で計画されている再処理量では、全量を再処理できないので、その場合は必要なだけ運転期間を延長するものとした。

2019年秋の大会

表 1 上振れシナリオ

ID	発電容量	サブケース	サブケース概要
A (上振れ)	44%を 2050 年以降維持する。 全基 60 年延長する。	A1	軽水炉を軽水 SMR で更新、ワンススルー(六カ所再処理工場稼働無し)
		A2	軽水炉を軽水 SMR で更新、全量再処理(第二再処理導入)
		A3	軽水炉を高速 SMR で更新(2055 年、BR=1.1)全量再処理
		A4	同上。ただし、MA を Pu に随伴させてリサイクルする。
A' (上振れ)	2040 年から年間 1.1GWe で緩やかに容量を増やし、44%を 2100 年以降維持する。全基 60 年延長する。	A'1	A1 と同じ。
		A'2	A2 と同じ。
		A'3	A3 と同じ。ただし、高速 SMR は 2060 年から BR=1.2 で導入。
		A'4	A4 と同じ。ただし、高速 SMR は 2060 年から BR=1.2 で導入。

表 2 現状シナリオ

ID	発電容量	サブケース	サブケース概要
B (現状)	22%を 2030 年以降維持する。 全基 60 年延長する。	B1	軽水炉を軽水 SMR で更新、ワンススルー(六カ所再処理工場稼働無し)
		B2	軽水炉を軽水 SMR で更新、全量再処理(第二再処理導入)
		B3	軽水炉を高速 SMR で更新(2055 年、BR=1.03)全量再処理
		B4	同上。ただし、MA を Pu に随伴させてリサイクルする。
B' (現状)	2040 年から年間 1.1GWe で穏やかに容量を加え、22%を 2100 年以降維持する。全基 60 年延長する。	B'1	B1 と同じ。
		B'2	B2 と同じ。
		B'3	B3 と同じ。ただし、高速 SMR は 2055 年から BR=1.2 で導入。
		B'4	A4 と同じ。ただし、高速 SMR は 2055 年から BR=1.2 で導入。

表 3 下振れシナリオ

ID	発電容量	サブケース	サブケース概要
C (下振れ)	新設/リプレースなし(フェードアウト) 全基 60 年延長する。	C1	ワンススルー(六カ所再処理工場稼働無し)
		C1.5	一部再処理(余剰 Pu を生じさせない)
		C2	全量再処理(必要なら六カ所延長)
C' (下振れ)	新設/リプレースなし 運転延長認可取得済み のみ 60 年延長	C'1	C1 と同じ
		C'1.5	C2 と同じ
		C'2	C3 と同じ

3. 解析結果

解析結果の一例として、B4 シナリオ(発電容量 22%、高速炉移行、MA リサイクル)を図 3 に示す。左上から、各炉心の発電容量、各年度の原子炉運転開始量、プルサーマル割合、累積の天然ウラン需要、使用済み燃料貯蔵量、年間再処理量、プルトニウム蓄積量、マイナーアクチノイド蓄積量、ガラス固化体蓄積量が一覧されている。

4. まとめ

「核燃料サイクルの成立性」研究専門委員会において、将来の核燃料サイクルのために必要となる技術開発・人材育成を議論するために、将来シナリオを幅広く想定し諸量解析を行った。今回の諸量評価の目的は、上記の 3 つの発電シナリオに対して優劣・得失をつけることではない。現時点において重要なことは、将来想定される様々なシナリオに対して、いずれにも対応しうるように必要な技術開発課題、開発段階、実用化時期、必要な開発資源を検討することである。このような検討に本結果が利用されることを期待する。

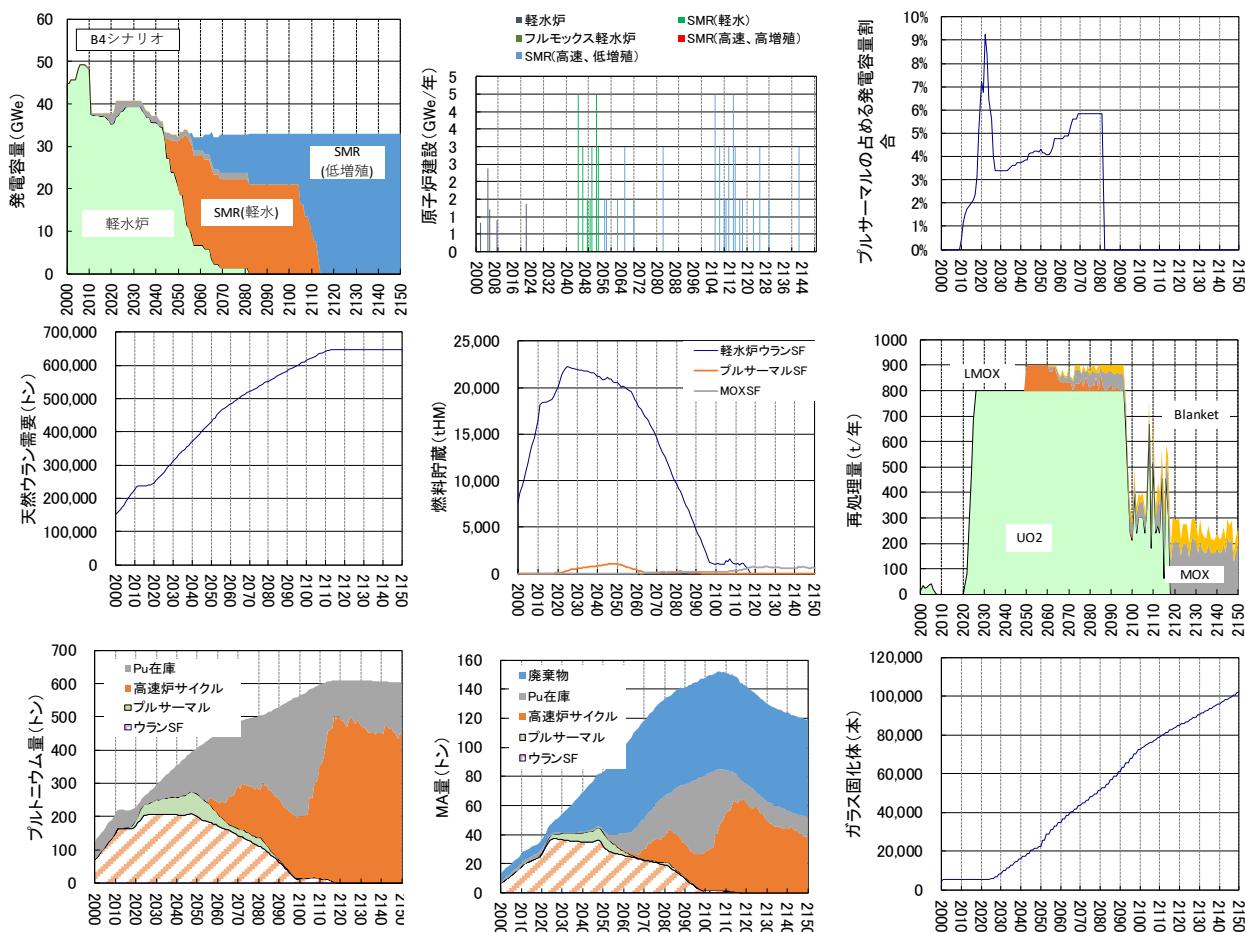


図 3 B4 シナリオ(現状、高速炉移行、MA リサイクル)

参考文献

- 1) 総合資源エネルギー調査会、"2030 年のエネルギー需給展望(中間取りまとめ)"、(2004).
- 2) K. Nishihara, H. Akie, N. Shirasu and T. Iwamura, "Utilization of rock-like oxide fuel in the phase-out scenario," J. Nucl. Sci. Technol., 51(2), pp. 150-165 (2014)
- 3) 西原 健司 大井川 宏之、"アクチニド核種のマスバランス解析に基づく群分離-核変換サイクルの導入シナリオと効果の検討"、JAEA-Research 2006081(2006).
- 4) OECD Nuclear Energy Agency, ZZ ORIGEN2.2-UPJ, A complete package of ORIGEN2 libraries based on JENDL-3.2 and JENDL-3.3,
<http://www.oecd-nea.org/tools/abstract/detail/NEA-1642/>, (2006).
- 5) エネルギー基本計画(平成 30 年 7 月)
https://www.enecho.meti.go.jp/category/others/basic_plan/pdf/180703.pdf
- 6) 経済産業省、長期エネルギー需給見通し(平成 27 年 7 月)
https://www.enecho.meti.go.jp/committee/council/basic_policy_subcommittee/mitoshi/pdf/report_01.pdf
- 7) 高速増殖炉サイクル実証プロセス研究会, 第 28 回原子力委員会 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】(2009)
<http://www.aec.go.jp/jicst/NC/iinkai/teirei/siryo2009/siryo28/siryo1-1.pdf>

*Kenji Nishihara¹¹JAEA

総合講演・報告4「核燃料サイクルの成立性」研究専門委員会活動報告

シナリオ・研究開発・人材育成を俯瞰した核燃料サイクルの成立性の検討状況

Study status on feasibility of nuclear fuel cycle

by overlooking energy scenario, R&D and human resource development

(3) 原子力需要の成長またはゼロ成長シナリオにおける評価

(3) Evaluation of quantities on various nuclear power generation scenarios

*太田 宏一¹、川島 正俊²、三倉 通孝³、松村 達郎⁴、津幡 靖宏⁴、島田 隆⁵、
駒 義和⁴、飯塚 政利¹、兼平 憲男⁶、佐々木 良一⁷、千田 太詩⁸、中原 将海⁴

¹電力中央研究所、²東芝テクニカルサービス、³東芝、⁴日本原子力研究開発機構、
⁵三菱重工、⁶日本原燃、⁷三菱マテリアル、⁸東北大学

1. 緒言

核燃料サイクルの成立性を検討するうえで、将来の原子力発電の需要に関する様々なシナリオに対し、予測される影響を評価しておく必要がある。本研究専門委員会では、以下の3ケースのシナリオについて諸量評価を行っている。

- ① 長期エネルギー需給見通しで示された発電量の2倍(66 GWe)程度に拡大する。(上振れシナリオ)
- ② 長期エネルギー需給見通しで示された発電量33 GWe程度を維持し続ける。(現状シナリオ)
- ③ 将来の新設を想定せず、原子力発電の寿命に従ってフェードアウトする。(下振れシナリオ)

本報告では、原子力発電の利用が長期にわたって維持される、①および②のシナリオにおける今世紀末時点での諸量評価の結果について整理する。なお、下振れシナリオに関する考察は本シリーズ発表の「(4) 原子力需要の減少シナリオにおける評価」で詳報される。

2. 諸量評価の結果

上振れシナリオ

本シリーズ発表の前報「(2) 多様な原子力発電シナリオに対する諸量評価」で設定した上振れシナリオにおいて、2050年以降66 GWeの原子力発電容量を維持するケースA1～A4の、2100年時点における諸量解析の結果を表1に示す。上振れシナリオの場合、2100年までの天然ウラン需要量はリサイクルの有無によらず膨大となる。今世紀半ばから高速炉が導入されるA3およびA4ケースにおいても、2060年前後には34.7万t(=U₃O₈ 45.1万s.t)のウラン購入契約(契約ウラン)が終了することから、長期的なウラン資源の確保が必要となる。なお、A3およびA4ケースでは、2100年頃から高速炉の導入が本格化するため、その後の天然ウラン需要の増加は抑えられるのに対し、A1、A2ケースでは単調に増加を続ける。

使用済燃料の貯蔵量は、再処理を稼動することでワンスルーに比べ2100年時点で10-20%に低減できる。また、最大貯蔵量も大幅に低減され、高速炉を導入するA3、A4シナリオでは、2018年時点の管理容量(2.1万t)に対し、約5600t分の貯蔵設備を追加することで全使用済燃料を貯蔵することが可能となり、現在計画されている6000t程度²⁾の追加対策で対応可能となる。

高速炉が導入されるケースでは、2100年時点でおおよそ500tのプルトニウム(Pu)をリサイクル在庫として蓄積する必要がある。これは、2010年頃から始まる急激な高速炉の導入に備えるためであり、炉の導入ペースを平坦化することで抑制される傾向にある。ただし、A'3またはA'4ケースで評価されているように、2040年以降一定ペースで軽水炉や高速炉を導入する場合も、おおよそ100tのPuが蓄積する結果となっており、Pu蓄積量を減らすための工夫や回収Puの管理法の構築が必要と考えられる。また、高速炉燃料としてマイナーアクチニド(MA)をリサイクルする場合もおおよそ67tのMAは廃棄物に移行

2019年秋の大会

表 1 上振れシナリオ (A1~A4) における 2100 年時点の諸量解析結果

シナリオ	A1 軽水炉 ワンススルー	A2 プルサーマル導入	A3 高速炉導入	A3 高速炉導入 MA リサイクル
天然ウラン需要量*	76.5 万 t	69.0 万 t	67.0 万 t	68.1 万 t
使用済燃料貯蔵量 最大貯蔵量 (時期)	9.52 万 t 単調増加	1.94 万 t 2.84 万 t (2063 年)	1.10 万 t 2.66 万 t (2063 年)	1.19 万 t 2.66 万 t (2063 年)
Pu 保有量	990t	735t	871t	906t
使用済 U 燃料	953t	153t	141t	152t
使用済 MOX 燃料	37t	541t	0t	0t
FBR サイクル			245t	259t
リサイクル在庫		41t	485t	494t
MA 量	226t	265t	229t	214t
使用済 U 燃料	211t	23t	21t	23t
使用済 MOX 燃料	9t	85t	0t	0t
FBR サイクル	0t	0t	10t	40t
リサイクル在庫	0t	0.4t	10t	83t
廃棄物	6.2t	157t	189t	67t
ガラス固化体	0.55 万本	9.23 万本	11.0 万本	9.18 万本

*: 2014 年-2100 年の需要量

表 2 現状シナリオ (B1~B4) における 2100 年時点の諸量解析結果

シナリオ	B1 軽水炉 ワンススルー	B2 プルサーマル導入	B3 高速炉導入	B3 高速炉導入 MA リサイクル
天然ウラン需要量	45.5 万 t	39.5 万 t	37.7 万 t	37.7 万 t
使用済燃料貯蔵量 最大貯蔵量 (時期)	6.84 万 t 単調増加	0.79 万 t 2.26 万 t (2025 年)	0.13 万 t 2.26 万 t (2025 年)	0.13 万 t 2.26 万 t (2025 年)
Pu 保有量	677t	474t	553t	565t
使用済 U 燃料	640t	18t	14t	14t
使用済 MOX 燃料	37t	407t	0t	1t
FBR サイクル	0t	0t	164t	188t
リサイクル在庫	0t	48t	375t	362t
MA 量	159t	192t	167t	148t
使用済 U 燃料	144t	2t	2t	2t
使用済 MOX 燃料	9t	69t	0t	0t
FBR サイクル	0t	0t	6t	27t
リサイクル在庫	0t	1t	7t	52t
廃棄物	6t	119t	153t	67t
ガラス固化体	0.55 万本	7.27 万本	8.85 万本	7.36 万本

*: 2014 年-2100 年の需要量

する。一方、ガラス固化体発生数は 10.8 万本からおおよそ 15%低減される結果となった。

現状シナリオ

同様に、本研究専門委員会で設定した現状シナリオにおいて、2030 年以降おおよそ 33 GWe の原子力発電容量を維持するケース B1~B4 の 2100 年までの諸量解析の結果を表 2 に示す。上振れシナリオに比べ、天然ウラン需要量は 40%以上低減されるものの、2080 年頃 (B1 ケース) ~2090 年頃 (B2、B3、B4 ケース) までに購入契約済のウランが底をつく結果となった。

上振れシナリオ同様、再処理を稼動することで 2100 年時点における使用済燃料の貯蔵量は大幅に削減される。また、使用済燃料の最大貯蔵量も大幅に低減され、2018 年時点の管理容量 (約 2.1 万 t) に対し、約 2000t 分の貯蔵設備を追加することで全使用済燃料を貯蔵することが可能となる。ただし、高速炉が導入されない B2 シナリオでは使用済プルサーマル燃料が増加を続け、2090 年頃からは蓄積量の大半を使用済プルサーマル燃料が占めることに注意を払う必要がある。

その他、現状シナリオの場合、上振れシナリオに比べ原子力発電容量が抑えられることによって Pu や MA の蓄積量、ガラス固化体の数はそれぞれ低減するが、各ケースによる変化の傾向は同様であり、原子力発電の利用が継続する両シナリオに、本質的な相違は見られないことが分かった。

3. まとめ

「核燃料サイクルの成立性」研究専門委員会では、将来の核燃料サイクルのために必要となる技術開発や人材育成について議論するために、将来の原子力発電の利用規模に関する幅広いシナリオに対する諸量解析を行っている。そのなかで、今後も原子力需要が長期に維持し続ける 2 通りのシナリオについて特徴を整理した。2030 年時点で 33 GWe の設備容量が整備されている条件を基準に、その後 66 GWe まで上振れするシナリオでは、使用済燃料のリサイクルによらず 2060 年前後までの天然ウラン需要量が契約済のウラン量を上回ることから、長期的なウラン資源の確保が必要といえる。また、上振れシナリオと現状シナリオともに、使用済燃料をリサイクルすることによって、その蓄積量を大幅に低減でき、現在計画されている使用済燃料貯蔵容量の追加対策で対応可能となることが明らかとなった。

その他、原子力発電容量が異なることによって、上振れシナリオと現状シナリオで、Pu や MA の蓄積量、ガラス固化体の数は変化するが、リサイクル導入の有無に関するケースごとの変化の傾向は同様であり、原子力発電の利用が継続する両シナリオにおいて、核燃料サイクルのために必要となる技術開発や人材育成の観点から本質的な相違は見られないことが分かった。

参考文献

- 1) OECD・IAEA「Uranium 2018」
- 2) 電気事業連合会「使用済燃料貯蔵対策の取組強化について」2018 年 11 月 20 日

*Hirokazu Ohta¹, Masatoshi Kawashima², Michitaka Sasou³, Tatsuro Matsumura⁴, Yasuhiro Tsubata⁴, Takashi Shimada⁵, Yoshikazu Koma⁴, Masatoshi Iizuka¹, Norio Kanehira⁶, Ryoichi Sasaki⁷, Taiji Chida⁸, Masaumi Nakahara⁴

¹CRIEPI, ²Toshiba Tech. Services, ³Toshiba, ⁴JAEA, ⁵MHI, ⁶JNFL, ⁷Mitsubishi Material, ⁸Tohoku Univ.

総合講演・報告4「核燃料サイクルの成立性」研究専門委員会活動報告

シナリオ・研究開発・人材育成を俯瞰した核燃料サイクルの成立性の検討状況

Study status on feasibility of nuclear fuel cycle by overlooking energy scenario, R&D and human resource development

(4) 原子力需要の減少シナリオにおける評価

(4) Evaluation of scenarios with descending demand for nuclear power

* 齊藤 拓巳¹、西原 健司²、長谷川 秀一¹、本間 俊司³、村上 朋子⁴

¹ 東京大学、² 日本原子力研究開発機構、³ 埼玉大学、⁴ 日本エネルギー経済研究所

1. 緒言

2011年の福島第一原子力発電所事故後、安全性の確認のために一旦全ての原子力発電所が停止し、その後新規制に適合することで安全性が確認された発電所から設置変更許可を受け、再稼働を果たしているものの、その数は限られている¹⁾。また、国のエネルギー基本計画では、原子力発電を発電時にCO₂排出の無い、重要なベースロード電源として位置づけているが、多くの原子炉が40年の運転期間を迎え、高経年化対策や追加の安全対策への費用が電力会社の経営に大きな負担となっている²⁾。このような状況の下、将来の核燃料サイクルのために必要となる技術開発・人材育成を議論するために2017年に設立された「核燃料サイクルの成立性」研究専門委員会では、将来、原子炉の再稼働や新設が進まず、原子力の発電容量が減少するシナリオも含めて評価対象に含めることとした。本発表では、「(2) 多様な原子力発電シナリオに対する諸量評価」における原子力需要の減少シナリオに対する諸量評価結果に基づき、そのようなシナリオ下で顕在化するであろう核燃料サイクル上の技術的、社会・制度的な課題の抽出を行った結果を紹介する。

原子力発電は、他の発電方式、特に火力発電と比べて、使用済み燃料も含めた燃料の管理期間が長く、発電所の運転における燃料サイクルの重要性が高いことが特徴である。この点は、原子力発電の需要が減少する状況、あるいは、完全に需要が無くなり、発電が行われない状況においても、使用済み燃料や高レベル放射性廃棄物の管理、処分を含む多様な核燃料サイクル上の技術開発や施設の運転を長期間維持していく必要があるという点で重要である。

2. 評価手法

原子力需要の減少シナリオでは、まずシナリオ全体を廃止措置に入っている、あるいは、廃止措置を表明している原子炉を除く全ての原子炉が20年の運転期間の延長申請を行い、60年間の運転期間終了後、停止するとしたシナリオ（シナリオC）と、現在、運転期間の延長申請が認可されている炉のみ60年間の運転期間とするシナリオ（シナリオC'）に大別した。さらに、各シナリオにおいて、(1) 再処理無しのシナリオ（ワンススルー、シナリオC-1、および、C'-1）、(2) 国内での軽水炉MOX燃料の利用によるPu消費量とバランスさせるように使用済み燃料の一部を再処理するシナリオ（シナリオC-1.5、および、C'-1.5）、(3) 使用済み燃料の全量を再処理するとしたシナリオ（シナリオC-2、および、C'-2）を考え、それぞれ、ウラン需要や燃料貯蔵、Pu量、ガラス固化体本数などの諸量評価を行った。そのようにして得られた諸量評価結果を元に、各シナリオにおいて、主に、発生する使用済み燃料やガラス固化体、分離Puへの対策の点での核燃料サイクル上の技術的課題と社会・制度的な課題を抽出し、それらをまとめて、原子力需要の減少シナリオ下で、核燃料サイクルに求められる技術開発・人材育成を議論した。

3. 結果と考察

本シリーズ発表の「(3) 原子力需要の成長またはゼロ成長シナリオにおける評価」と比較した、原子力需要の減少シナリオの特徴は、使用済み燃料やガラス固化体の発生時期が明確に定まり、また、それらの発生量も限定されることが挙げられる。例えば、将来的な再処理を仮定しないシナリオC-1、C'-1では、全ての原

子炉の運転が終わる 2080 年、あるいは、2060 年に、それぞれ、48,000、34,000 tHM の軽水炉ウラン燃料由来の使用済み燃料が発生する (図 1)。また、使用済み燃料の一部の再処理を仮定するシナリオ (C、C'-1.5) や全量再処理を仮定するシナリオ (C、C'-2) では、軽水炉ウラン燃料由来の使用済み燃料の一部がプルサーマル由来の使用済み MOX 燃料に置き換わる。なお、ここで、原子力需要の減少シナリオでは、経済的、および、U 資源上のメリットが小さいことから、使用済み MOX 燃料の再処理は想定しなかった。さらに、発生するガラス固化体の本数は、シナリオ C-1.5、2 では、2080 年時点で、それぞれ、45,000、54,900 本となり、シナリオ C'-1.5、2 では 2060 年時点で、それぞれ、21,600、37,100 本となる。

このような各子シナリオにおいて抽出された個別の課題を整理した結果を以下にまとめる。なお、シナリオ C 群と C' 群では、運転期間を延長する原子炉の基数が異なることで、使用済み燃料やガラス固化体の発生時期と発生量が異なるのみであり、抽出される課題は共通であることから、ここでは、全基 20 年間の運転延長を行うとしたシナリオ C 群に対する検討の結果の一例を紹介する。

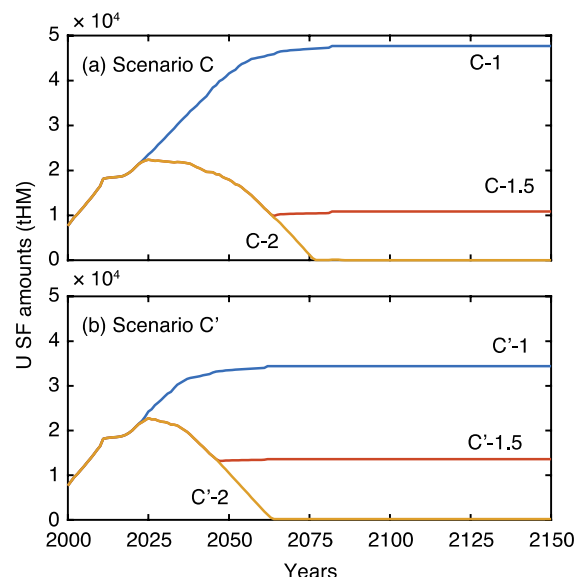


図 1. シナリオ C (a)、C' (b)における使用済みウラン燃料貯蔵量の推移。要差し替え

(A) 使用済み燃料の管理・処分

原子力需要の減少シナリオでは、高速炉サイクルへの移行がないために、想定した 3 つの子シナリオいずれの場合も、量の大小の違いはあるものの、使用済みウラン燃料、使用済み MOX 燃料、ガラス固化体の管理、処分が求められることになる。特に、使用済み燃料の直接処分は、我が国では技術的な成熟度がガラス固化体の地層処分と比べて遅れていることから、先行しているスウェーデン、フィンランドなどの例を参考に、処分概念の確立や安全評価手法のための技術開発を進める必要がある。また、処分場の立地、建設は数十年以上の長期間を要することから、再処理工場から返却分も含めた使用済み燃料の長期保管の場所、方法に加えて、社会的合意を原子炉自体の廃止措置との関係から検討する必要がある。

(B) 分離 Pu 対策

シナリオ C-2 では、限られたプルサーマル容量の中で、使用済み燃料の全量再処理を行うことから、余剰の分離 Pu が発生する。また、Pu の分離と消費をバランスさせるシナリオ C-1.5 でも、プルサーマル対応の発電所の計画外の停止等により、Pu 消費のバランスが崩れ、分離 Pu が発生することも想定される。そのような分離 Pu への対策として、将来的な Pu 専焼炉とそれに付随した燃料サイクルの導入、あるいは、保管や直接処分、さらには、海外への譲渡に向けた技術開発や制度設計が求められる。また、そのような分離 Pu 対策に対する保障措置、国際政治上の懸念や社会による受容も課題である。

(C) 再処理工場の高経年化対策

シナリオ C-2 では、全量再処理を行うために再処理工場を 60 年以上操業する必要がある、原子力プラントと化学プラントの両方の性質を有する再処理工場の高経年化の評価と対策、そして、社会の合意が求められる。

冒頭でも述べたように、原子力需要の減少シナリオでは、関連産業が縮小する中、さらには、完全に原子炉の運転がなくなった状況下で、使用済み燃料やガラス固化体の管理、処分のための技術開発、事業の推進、人材の維持が求められるという全体的な特徴がある。企画セッションにおける発表では、各子シナリオの特徴を諸量評価の詳細な結果を交えて説明すると共に、そこでの技術的、社会・制度的な課題を具体的に紹介

する。

参考文献

- 1) 資源エネルギー庁、“日本の原子力発電所の状況”、

https://www.enecho.meti.go.jp/category/electricity_and_gas/nuclear/001/pdf/001_02_001.pdf.

- 2) エネルギー基本計画（平成 30 年 7 月）

https://www.enecho.meti.go.jp/category/others/basic_plan/pdf/180703.pdf

*Takumi Saito¹, Kenji Nishihara², Shuuichi Hasegawa¹, Shunji Honma³, Tomoko Murakami⁴

¹The University of Tokyo, ²Japan Atomic Energy Agency, ³Saitama University, ⁴IEE Japan

総合講演・報告4「核燃料サイクルの成立性」研究専門委員会活動報告

シナリオ・研究開発・人材育成を俯瞰した核燃料サイクルの成立性の検討状況
Study status on feasibility of nuclear fuel cycle by overlooking energy scenario, R&D and human resource development

(5) 原子力需要のシナリオとその研究・開発項目

(5) Nuclear demand scenario and the R&D items

*佐藤 聡¹、大井川 宏之²、可児 祐子³、塚原 剛彦⁴、山村 朝雄⁵、村上 毅⁶¹三菱重工、²日本原子力研究開発機構、³日立製作所、⁴東京工業大学、⁵京都大学、⁶電力中央研究所

1. 緒言

2011年の福島第一原子力発電所事故後、安全性の確認のために一旦全ての原子力発電所が停止し、その後新規制に適合することで安全性が確認された発電所から設置変更許可を受け、再稼働を果たしているものの、その数は限られている¹⁾。また、国のエネルギー基本計画では、原子力発電を発電時にCO₂排出の無い、重要なベースロード電源として位置づけているが、多くの原子炉が40年の運転期間を迎えることから、高経年化対策や追加の安全対策が必要であり、その費用が電力会社の経営に大きな負担となっている²⁾。このような状況の下、将来の核燃料サイクルのために必要となる技術開発・人材育成を議論するために2017年に設立された「核燃料サイクルの成立性」研究専門委員会では、2017～2018年度の第一期にて各分野の専門家・事業者から講演を聴講し、核燃料サイクルを取り巻くフロントエンド、燃料サイクルの候補シナリオ、再処理及び高速炉開発における現状と課題を委員間で共有するとともに、これらをもとにどのような「論点」で検討していくべきかについて「委員各個人として」の考えを抽出し、核燃料サイクルの成立性を定量的に調査・評価するための51件の「論点」を得た。その後、取得した論点を、電源比率の考え方、それを踏まえて描かれるシナリオ、その実現に必要な研究・開発要素、それを支える人材の育成といった全体の流れを意識して分類し、グループ活動により各論点で提起された課題の具体化とその解を紐解くための検討を進めている。本発表では、研究・開発に分類された論点を対象に、確認・整理の進め方とその途中経過を紹介する。

2. 確認・整理の進め方

研究・開発に分類された論点の確認・整理は、先ず担当委員によるディスカッションを行い、各論点で課題としている事項とその解がどのようなものになるのかを整理した。次に、この整理結果が各論点の提言者が意図した内容からずれていないかを確認するため、イメージ共有するための具体的な提言と対象とする具体的な研究・開発対象技術の再調査を実施した。さらに、選択するシナリオがどのように研究開発に影響するのかを確認するために、各論点の提言者の協力のもと、シナリオA～Cとの関係性として、どのシナリオに強く紐付くのか、もしくは全く関連しないのかを整理した。

3. 結果と考察

研究・開発に分類された各論点とシナリオとの関係を整理した結果、A（成長シナリオ）、B（ゼロ成長シナリオ）、C（減少シナリオ）の各々において、論点との関連付けの強弱に差異がみられた。一方、各シナリオに紐付く論点の数は、特定のシナリオに偏ることなくほぼ均等にばらついていることを確認した。

今後は、各論点の提言者を加えたディスカッションによる深掘りを進めるとともに、シナリオ検討側、人材育成側の各検討グループから抽出された研究・開発要素に係る課題の取り込み、グループ間での総合討議を経て、論点分類で意識した流れに沿って描かれる核燃料サイクルの成立性を示す全体像を見出していく予定である。

参考文献

- 1) 資源エネルギー庁、“日本の原子力発電所の状況”、

https://www.enecho.meti.go.jp/category/electricity_and_gas/nuclear/001/pdf/001_02_001.pdf.

- 2) エネルギー基本計画（平成 30 年 7 月）

https://www.enecho.meti.go.jp/category/others/basic_plan/pdf/180703.pdf

*Akira Sato¹, Hiroyuki Oigawa², Yuko Kani³, Takehiko Tsukahara⁴, Tomoo Yamamura⁵, Tsuyoshi Murakami⁵

¹MHI, ²JAEA, ³Hitachi, ⁴Tokyo Tech, ⁵Kyoto Univ., ⁶CRIEPI