

戦略ロードマップ（案）

平成 30 年 12 月 20 日
高速炉開発会議

0. 検討の経緯

（1）「高速炉開発の方針」の概要

2016 年 12 月に開催された原子力関係閣僚会議において決定された「高速炉開発の方針」では、今後 10 年程度の開発作業を特定する「戦略ロードマップ」を策定すること、またその検討のために高速炉開発会議の下に「戦略ワーキンググループ」を設置することを決定した。

（2）戦略ワーキンググループにおける検討及び関連する議論

①ヒアリングから得られた知見

2016 年 12 月の戦略ワーキンググループの設置以降、合計 16 回開催し、20 名・機関等から、ヒアリングを行った上で、議論を行った。ヒアリングから得られた知見として、まずこれまで高速炉開発に直接携わってきた政府機関、民間企業からのヒアリングを通じて、我が国における高速炉開発の経緯や、これまで蓄積されてきた技術・人材の再評価を行った。また、外部の有識者からのヒアリングを通じて、我が国の高速炉の客観的な位置づけや、高速炉開発の意義・目標設定の方向性を整理した他、炉の評価に加えて、燃料製造・再処理の観点からの技術的評価も行った。

さらにフランスや中国、米国等の高速炉・次世代炉開発に取り組む諸外国の政府関係者からのヒアリングでは、各国における高速炉開発の意義や目標、スケジュール等を確認した。2018 年 6 月に開催した、第 10 回戦略ワーキンググループでは、フランス原子力・代替エネルギー庁の担当者より、フランスの高速炉開発の状況についてヒアリングを行った。フランスは、2006 年のナトリウム冷却高速炉開発の再開以降、その開発を推進してきたが、現在のウラン市場の状況に鑑みると、高速炉実用化の必要性はそれほど緊急ではないとする一方、核燃料サイクル政策を引き続き維持するとともに、安全・高性能で競争力のある MOX 燃料を使用するナトリウム冷却高速炉を将来的

に実用化させることが必要であるとして、ナトリウム冷却高速炉の実用化時期の見直しを行いつつ開発を継続しているとのことであった。このように、諸外国の高速炉開発の現状と今後の方向性を整理し、我が国の高速炉開発の在り方の検討に資する議論を行った。

②原子力委員会からの意見

2017年7月に、政府が、原子力の研究、開発及び利用に当たり尊重することとした「原子力利用に関する基本的考え方」においては、高速炉開発について、「国内電力環境の変化等を勘案し、戦略的柔軟性を持たせつつ、商業化ビジネスとしての成立条件や目標を含めてその在り方や方向性を検討していく」ことが必要としており、これを十分に踏まえる必要があると指摘している。

また、原子力委員会が2018年6月に委員会決定した「技術開発・研究開発に対する考え方」では、まず、「電力自由化」により総括原価方式が無くなった現在、原子力のエネルギー分野での利用について、関係者が、国民の利益と負担の観点で、安価な電力を安全・安定に供給するという原点を改めて強く認識し、原子力関係企業と研究開発機関と大学が、それぞれの役割を踏まえ、生き残りをかけて、創意工夫や競争・協力し、それぞれの経営に努力する必要があるとしている。その上で国は、関係行政機関や国立研究開発機関がそれぞれの立場から民間主導のイノベーションを促進する仕組みを整えるべきであると指摘している。高速炉の開発や炉型の選択においても、様々な環境変化に柔軟に対応するために、国際情勢に高いアンテナを持ち、周辺環境の変化に伴う評価軸の重みや変化等も意識し、より柔軟なアプローチを追求すべきであり、さらに現在、世界では様々な選択肢や技術的チャレンジが追求されており、我が国も開発のスピードを含め柔軟かつ現実的に考えるべきであるとされている。さらに、「核燃料サイクルを実現するためには、再処理施設を早期に稼働させ、まずは、これまで我が国で採用されてきた軽水炉を活用しプルサーマルを推進していくことが、現時点で、最も市場の要請に合致した現実的な手段である。」とし、「加えて、長期的柔軟性を確保する観点から喫緊の課題である使用済燃料の中間貯蔵能力の拡大や、プルサーマル推進に関するプルトニウム利用等について、電力会社間の協力を含めて国と電力会社の精力的な取組が必要である。」と指摘している。その上で、各ステークホルダーが持つべき認識や果たすべき役割として、政府は、

長期的なビジョンを示し、その基盤となる技術開発・研究開発のサポートをする役割を担うべき、国立研究開発機関は、プロジェクトの抽出と実施に重点を置かず、ニーズ対応型の研究開発を行うべき、産業界は、今後の研究開発の方向性の判断を自ら真剣に行うとともに、相応のコスト負担を担い、民間主導のイノベーションを達成すべきとしている。

なお、プルトニウムの利用に関し、原子力委員会は、2018年7月に「プルトニウム利用の基本的考え方」を決定しており、これに基づいた取組を進めていくべきとしている。

③これまでの高速炉開発から得られた結果

我が国がこれまでに高速炉開発で蓄積した技術については、2018年6月に開催した、第10回戦略ワーキンググループにおいて議論を行った。我が国はナトリウム冷却高速炉の開発について、技術・人材を蓄積しており、今後国際協力も活用することで実用化を視野に入れることができる技術と、いまだ開発段階にある技術について整理するとともに、燃料製造・処理技術の開発についても、一定の成果が得られていることが確認された。

具体的には、我が国の高速炉開発は、1963年頃より本格的な設計研究が開始され、1977年には実験炉「常陽」が臨界を達成した。また、原型炉「もんじゅ」が1994年に臨界、1995年に40%出力運転を達成した。その後1999年から、2050年頃の高速炉等の実用化像と、そこに至るまでの研究開発計画を提示することを目的として、多様な冷却材と燃料形態、炉型、再処理法、燃料製造法などの技術に関して幅広く検討した。この「実用化戦略調査研究（FS）」は、官民が協力した体制で実施され、2006年からは「高速増殖炉サイクル実用化研究開発（FaCT）」として継続された。その結果、安全性と経済性を向上させた概念が提案され、今後開発していくべき設計概念と革新技術を明らかにした。

東京電力福島第一原子力発電所事故後、FaCTは中断されたが、「第4世代原子力システムに関する国際フォーラム（GIF）」の場を活用して、ナトリウム冷却高速炉に関する国際標準となる「安全設計クライテリア（SDC）」及び「安全設計ガイドライン（SDG）」の整備を主導してきた。これらは、現在、IAEAやOECD/NEA等の国際的なレビューを受けているところである。

④第5次エネルギー基本計画（2018年7月）

2018年7月に閣議決定されたエネルギー基本計画においては、今後、2050年のシナリオ設計に向けては可能性と不確実性が混在するため、「野心的かつしなやかな複線シナリオ」が必要となるとしている。原子力については、軽水炉技術の向上を始めとして、国内外の原子力利用を取り巻く環境変化に対応し、その技術課題の解決のために積極的に取り組む必要があると指摘した上で、安全性・信頼性・効率性の一層の向上に加えて、再生可能エネルギーとの共存、水素製造や熱利用といった多様な社会的要請の高まりも見据えた原子力関連技術のイノベーションを促進するという観点の重要性を指摘している。

また、高速炉に関しては、「高速炉開発の方針」に基づき策定されるロードマップの下、米国や仏国等との国際協力を進めつつ、高速炉等の研究開発に取り組むこととされている。

1. 国内外の原子力、高速炉開発を巡る潮流

（1）世界の動向

①電力を含むエネルギー政策環境の変化

現在、エネルギー政策を巡る環境は大きな変化を遂げつつある。例えば欧米では、再生可能エネルギーの導入が進むとともに、2000年前後から電力の小売全面自由化の進展により、発電コスト面での競争力がより重要になった。特に欧州ではEU域内全域で電力の自由化が進むとともに、温室効果ガス排出量の削減や再生可能エネルギー比率の目標設定等により、多くの国で再生可能エネルギーの導入が進む等、電力事業を巡る環境が大きく変化した。加えて、先進国のエネルギー需要の伸び率の鈍化と、新興国における需要の増大、シェールガスの普及等、様々な変化を背景に、電力産業の事業環境といった短期的視点に加えて、地球温暖化やエネルギーセキュリティの確保等、エネルギーの持続性確保の観点から、長期的視点かつ柔軟な対応が必要となっている。

②原子力の研究開発を巡る環境変化

我が国においては、これまで安全性を前提とした上で、エネルギーの安定

供給や、環境への適合性等の観点から、3E+Sの原則の下、原子力発電の開発・利用を推進してきたが、今日、国民の原子力に対する不信感の増大や、安全基準の高まり等によって増大した初期投資、廃棄物処理といった課題に直面している。

一方で、米国やカナダ、英国等において、更なる安全性向上の要求や、自由化市場における経済性の向上、再生可能エネルギーとの共存、水素製造・熱利用といったエネルギーの多目的利用等の課題に応えるべく、民間の取組を中心として、政府による支援を含めた形で原子力技術のイノベーションを追求する活動を実施している。他方で、ロシアや中国等では実用化に至るまで、国主導による開発を推進する等、国によって、原子力の研究開発体制が変化してきている。

(2) 高速炉開発における目的及び技術の多様化

① 目的の多様化

高速炉開発を巡っては様々な環境変化があり、不確実性が高まり、柔軟性がこれまで以上に重要になっているとともに、各国における高速炉開発を巡る政策目的も多様化している。2016年にOECD/NEAが公表した「ウランレッドブック 2016」によると、2014年時点の世界のウランの既知資源は、2014年のウラン需要を基準とした場合、135年分に相当すると分析されている。しかし、ウラン市場が低迷することで、今後必要となる生産能力拡張への投資が十分に行われられない可能性や、中国、インドを始めとする新興国を中心として、新たなウラン需要が見込まれ、天然ウランの価格が高騰する可能性を排除できない点に鑑みると、今後我が国が十分なウランを確保できなくなる可能性も存在する。また、資源の有効利用に加えて、高レベル放射性廃棄物の減容化・有害度低減は、我が国の原子力政策において、引き続き重要である。

② 技術の多様化

高速炉にはナトリウム冷却高速炉の他に、重金属冷却高速炉、ガス冷却高速炉、熔融塩冷却高速炉、超臨界圧軽水冷却高速炉などの様々な炉型と、使用する燃料もMOX燃料、金属燃料など、様々な仕様・組み合わせが考えられ、それぞれに技術的課題が存在する。その中でもナトリウム冷却高速炉とMOX燃料の組み合わせが燃料サイクル分野を含めて国際的に最も実績がある。

一方、前述のようなウラン資源のひっ迫時期の不確かさを含む原子力を巡る環境変化や高速炉の目的の多様化に伴い、求められる高速炉の技術も多様化している。特に米国、カナダ等を中心に、民間の創意工夫の中で多様な炉型の検討が行われている。また、ロシアや中国では、技術の多様化を考慮してナトリウム冷却高速炉の実用化開発とともに他概念の研究開発も行っている。

2. ロードマップに関する基本的考え方

(1) 高速炉開発の意義

従来、我が国は、核燃料サイクルの意義として、資源の有効利用、高レベル放射性廃棄物の減容化、潜在的有害度（放射能レベル）の低減の3点の意義を掲げ、その一環として高速炉開発を推進してきた。これらの意義は、時代背景や政策環境により重心やプライオリティが変化する。

前述の通り、現在、ウラン需給状況が変化している一方で、今後のエネルギー技術の発展の不確実性や我が国のエネルギー資源の乏しさを考えれば、高速炉開発は中長期的には資源の有効利用と我が国のエネルギーの自立に大きく寄与する可能性がある。他方、廃棄物に関する課題は継続的なものであり、高レベル放射性廃棄物の減容化・有害度低減に対する寄与の観点も重要である。また、米国や英国等では、プルトニウムマネジメントを主目的とした炉の開発が行われるなど、高速炉の意義が多様化している点も留意が必要である。

ただし、これらの意義を実現するためには再処理技術を伴う必要があり、高速炉開発に伴う技術的課題のみならず、高速炉に付随するバックエンドへの対応、立地対策や規制対応が必要である。特に、高レベル放射性廃棄物問題は、将来世代に負担を先送りしないよう、現世代の責任として、その対策を確実に進めることが不可欠であり、国が前面に立って最終処分に向けた取組を進める。「科学的特性マップ」の公表を契機として、多様な対話活動の推進等の取組を一層強化し、複数の地域による処分地選定調査の受け入れを目指す。その過程においては、自治体にも丁寧に情報提供しながら取り組んでいく。また、使用済燃料の貯蔵能力の拡大に向けた政府の取組を強化することに加えて、将来に向けて幅広い選択肢を確保し、柔軟な対応を可能とす

る観点から、使用済燃料の直接処分など代替処分オプションに関する調査・研究を着実に推進する。

こうしたことを踏まえると、ウラン需給の現状等の政策環境・社会情勢を勘案すれば、高速炉の本格的利用が期待されるタイミングは 21 世紀後半のいずれかのタイミングとなる可能性がある。しかしながら、新たなエネルギー危機の発生等、将来の政策環境の不確実性に関するリスクは存在している。また、新しい技術の発展・成熟には実用化から一定の時間が必要である点や、再生可能エネルギー等の他の技術の進展・普及等の要因も考慮する必要があることにも留意が必要である。

上記の場合、技術や経験の段階的な蓄積・発展の必要性を勘案しつつ、例えば 21 世紀半ば頃の適切なタイミングにおいて、技術成熟度、ファイナンス、運転経験等の観点から現実的なスケールの高速炉が運転開始されることが期待される。

(2) 高速炉を含めた原子力技術に関する研究開発政策の在り方

電力自由化の進展や再生可能エネルギーの導入の加速化、発電コスト面での競争の激化など、原子力を取り巻く社会環境は大きく変化していることを踏まえると、高い安全性を確保した上で、更なるコスト低減を志向した開発に際し、将来への不確実性にしなやかに対応できるアプローチが重要となっている。

我が国の今後の高速炉の研究開発においては、これまで培った技術・人材を最大限活用し、多様な高速炉技術の競争を促進する。そのため、国は長期的なビジョンを示し環境整備を行う一方で、国立研究開発法人は開発計画立案・推進に技術面で参画するとともに研究開発基盤の維持発展を図る、メーカーは多様な技術開発を推進しつつ炉概念を提案する、ユーザーたる電気事業者等のステークホルダーは最も望ましい炉概念を選択する等、各機関がそれぞれの役割を適切に果たすことが重要である。

このように、高速炉の開発に当たっては、民間の創意工夫を取り入れ、国、国立研究開発法人、電気事業者等のステークホルダーが適切な役割を果たすことによって、国内外の動向を想定した取組が進められることが必要である。その際、軽水炉を含む他の原子力技術開発との一体性と高速炉の各開発段階における特有の配慮の双方が重要となる。すなわち、高速炉及び関連する基

盤的技術について、発電技術など、軽水炉を含めた他の原子力技術との応用・共有が相互に可能な部分もあり、それらについて原子力技術開発全体の中で一体的に進めることが効率的である。一方、軽水炉はすでに実用化されているのに対して、高速炉は開発段階にあり、技術の成熟度に差があることに加えて、高速炉の付加価値を踏まえ、開発の各段階において、配慮が重要である。さらに、関連する燃料製造・処理技術の研究開発への取組が重要である。

また、高速炉開発プロジェクトに対する社会的な信認を得ていくためには、「もんじゅ」での取組で得られた教訓を真摯に踏まえ、プロジェクトマネジメント機能の強化と効率化の徹底を図っていく必要がある。

さらに、高速炉の開発に当たっては、その技術的特性を精査し、東京電力福島第一原子力発電所事故の教訓も踏まえて、規制への適応を念頭に高い安全性を追求することは当然である。例えば、米国やカナダを始めとした諸外国では、事前審査の実施等の取組によって規制の予見性を確保している他、開発側と規制側がワークショップを共催するなど、事前に開発側と規制当局が情報共有等の対話を行う仕組みが導入されつつある。

(3) 今後 10 年程度の各プレイヤーの役割

「高速炉開発の方針」にも記載されているとおり、これまでの「常陽」、「もんじゅ」、実証炉開発等、我が国における高速炉開発の経験とそこから得られる教訓を踏まえれば、今後の開発においては、国を含めた開発当事者それぞれが決して縦割りに陥ることなく、自ら果たすべき責任を自覚して、それぞれの役割を明確化していくことが極めて重要である。

①国による方向性の提示

民間が創意工夫をして技術開発を促進していくモデルの技術開発を進めるために、政府は、エネルギー基本計画等を通じて、将来的な原子力開発の方向性を示し、高速炉の研究開発について、民間が技術提案を行う際の前提となる目標を提示する。

開発に当たっては、関係省庁間で適切に役割分担を行いつつ、その分担によって切れ目が生じることに伴う諸障壁に直面することのないような適切な取組が必要である。

②電気事業者等ステークホルダーの関与

高速炉の利用を選択する電気事業者や資金調達に関与する金融機関等は、最終的な技術の選択を行うだけではなく、将来性のある技術に対しては早期の段階から開発に関与していくことも重要である。他方、電気事業者や金融機関等の民間の投資を促進するためには、政府としての制度面からの支援等も重要である。

③技術成熟度に応じた資金支援

原子力の技術開発は、中長期的な視座で取り組むべきものであり、また民間が単独では負担できないリスクを内包するものであることから、民間のリソースの活用を前提として、国としては適切な規模の財政支援を行うことが必要である。

その際、技術の成熟度に応じて段階的な支援制度を導入する等の開発段階の実態に即した研究開発・技術開発支援を実施し、実現性が高いと評価された技術に重点化し、着実に進めていけるよう、国際協力も活用して効率的に開発を行っていく。

④研究開発基盤の提供

原子力の研究開発・技術開発が永続的に生まれていく環境を整備するという観点から、日本原子力研究開発機構（以下、「原子力機構」という。）や大学の活動を中心とした原子力分野の研究開発・人材育成と、これらを支える研究開発基盤の維持・発展を図っていくことが必要である。特に、高速中性子照射による炉心・材料等の健全性への影響を確認するための機能や、プルトニウムや機微技術の研究開発施設等の研究基盤は、国際競争力の観点からも維持すべきである。

また、原子力機構がこれまでに蓄積してきた高速炉開発を中心とする知見について、広く民間との共有を図るという視点の下、民間が取り組む多様な技術開発に対応ができるニーズ対応型の研究基盤を維持していくことが必要である。

原子力機構は、国内外の最先端の技術を取り入れつつ設計手法や安全基準等の我が国の技術を国際標準化する取組を実施することも必要である。

⑤メーカーの創意工夫を活かしたイノベーションの実現

実際に技術開発を行うベンダーとしてのメーカーは、前述のような支援制度を適切に活用しつつ、政策目標や開発目標に応じた技術開発を推進する。開発に当たっては、社会のニーズを踏まえ、創意工夫をこらして、イノベーションを実現すべきである。

⑥技術評価と選択

国や原子力機構、電気事業者は、メーカーの協力を得て、エネルギー基本計画の改定等の適切なタイミングにおいて、高速炉の開発に向けた課題と個々の技術について、国内外における過去の高速炉研究開発の経験や教訓、ピアレビュー結果を参照し、バックエンド関連技術を含めた技術の実現可能性、得られるメリットや必要となるコストについて必要な検討・評価を行い、以降の技術選択について見直しを行うことが必要である。

3. 今後の開発の作業計画

(1) 研究開発の進め方

高速炉の実用化に向けた研究開発は中長期に及ぶが、今後の開発方針は大きく、三つのステップに区分される。その際、国民・立地地域の理解が重要である。

- ① 競争を促し、様々なアイデアを試すステップ
- ② 絞り込み、支援を重点化するステップ
- ③ 今後の開発課題及び工程について検討するステップ

【ステップ1：競争の促進】

まず当面5年間程度は、これまで培った技術・人材を最大限活用し、民間によるイノベーションの活用による多様な技術間競争を促進する。

【ステップ2：絞り込み・重点化】

2024年以降に採用する可能性のある技術の絞り込みを、政策実現性を確認する国、技術的知見を有する原子力機構、最終ユーザーであり事業化の見通しを判断する電気事業者が、技術的実現性に責任を有するメーカーの協力

を得て実施する。絞り込みに当たっては、各炉型等の技術的な成熟度の確認・評価に加え、経済性や社会環境への適応性についても評価を行った上で、各炉型等の有効性を評価・検討する。

本ステップが終了した後、再生可能エネルギーの導入状況等の社会環境の変化を踏まえつつ、高速炉開発及び高速炉に付随するバックエンドへの対応、立地対策や規制対応、コスト評価を含め実現可能性を検討の上、場合によっては今後の開発の在り方について見直しを行う。その際、プルトニウム保有量の削減にも留意する必要がある。

【ステップ3：今後の開発課題及び工程についての検討】

上記前提の下、一定の技術が選択される場合、関係者の理解が共通化されたタイミングで、現実的なスケールの高速炉の運転開始に向けた工程を検討する。具体的には、政府は関係者間での体制構築に向けた認識の共通化に加え、社会から当該技術が受容されるための説明責任を果たしていくことが重要である。関係者は、立地対策や規制対応といった現実的な対応を検討し、工程の具体化を進める。

市場メカニズムが適切に働かない場合には、長期にわたる国民の利益が確保されることを検証した上で、他の電源と同様に、適切な規模の市場補完的な制度措置が必要である。立地地域との諸調整は、軽水炉での立地経験を有する電気事業者によって行われることが適切であり、国は、電気事業者や立地地域との連携の下、制度面での支援を実施する。また、適切な事業運営体制が構築されることが必須である。

加えて、金融機関や原子力発電技術の最終ユーザーである電気事業者を中心とした開発資金調達メカニズムの構築も重要であり、政府はそのような仕組みが機能する環境整備を実施する。

（2）開発作業の体制

高速炉開発の実施に当たっては、科学技術基本計画にも定められているとおり、今後のエネルギー基本計画の改定を含む一定の段階でホールドポイントを設け、研究開発の成果の状況・進捗・妥当性の確認を実施し、その結果を今後の計画に適切に反映する必要がある。さらに、その次の段階において必要なこと、それを行う役割分担も含め、議論・見直しが必要である。

また、政策目標や開発目標等の整合性を始め、開発状況を評価するには、

過去の開発の経験や根拠となる情報を参照すること、多様な有識者の意見を聞くことが必要である。さらに、国内外の最先端技術の動向にも高いアンテナを張り、収集していくことも必要である。これらを経て、都度その進め方について再検討を行った上で、必要に応じ、本戦略ロードマップについても改定する等が必要である。なお、これらの議論は原子力関係閣僚会議及び高速炉開発会議において、官民が連携した体制で実施することとする。

4. 国際協力の活用

今後の開発に当たっては、フランスや米国等との二国間及び多国間でのネットワークを活用した国際協力によって、研究基盤や規制に関する知見等を共有しつつ、実用化のための技術基盤の確立とイノベーションの促進に、国内外一体となって取り組んでいく。ただし、国際協力の活用の際には、政治的・経済的な条件が異なり、常に相手国の政策変更リスクが伴うことに留意が必要である。

(以 上)