

1. 「高速炉戦略ロードマップ検討会」の目的

我が国のエネルギー自給率は先進国中で最も低く、東京電力福島第一原子力発電所事故（以下、1F 事故）後は、1973 年の第一次オイルショック時並みに化石燃料への依存度が高まっている。パリ協定では今世紀中に二酸化炭素排出量を実質ゼロにするという目標が掲げられており、世界は二酸化炭素排出量の大幅削減を目指したエネルギー改革を進めている。それを踏まえ我が国は、「2030 年度に 13 年度比 26%減」を国連に提出するとともに、長期的に目指す目標として「2050 年 80%減」を政府が定めている。^{(1) (2)}

21 世紀半ばに向けてエネルギー安定供給と二酸化炭素排出量大幅削減を実現していくには、太陽光や風力を中心とした変動型再生可能エネルギー（以下、VRE）だけで電力需要に対応することは難しく、原子力エネルギーとの組み合わせが現実的かつ有望であるとの意見が国内外で提出されている。^{(2) ~ (6)}

原子力エネルギーの持続的な利用のため、我が国では原子力開発の当初から国策として高速炉サイクルの開発が進められてきた。1F 事故以降、国民の多くが原子力発電に対する信頼を失くし、次世代の高速炉サイクルの開発計画も停滞した。その状況下に「もんじゅ」廃止措置の政府決定がなされ、高速炉サイクル実用化に対する展望は不透明になった。「もんじゅ」の設計、建設、起動試験等を通じて得られた経験や知見は、今後の高速炉開発の在り方に適切に反映していくことが重要である。このような中で、国は 2016 年 12 月に原子力関係閣僚会議にて、将来に向けた「高速炉開発の方針」を提示し、その中で今後 10 年程度の開発計画を特定する「戦略ロードマップ」を、2018 年末を目途に策定することとしている。

当部会としては、原子力学会の行動指針である「研究開発成果の活用、地球環境の保全、人類社会の持続的発展への寄与」の観点に立ち、今後の原子力研究開発の在り方に大きな影響を及ぼす高速炉開発の方向性とその進め方について議論を重ね、以下に提言を行うこととした。

2. 開発目標

(1) 原子力エネルギーの持続的利用

・ウラン資源利用率の飛躍的拡大

OECD/NEA と IAEA による「Uranium 2016: Resource, Production and Demand」によれば、2014 年のウラン(U) 需要 (5.6 万 tU) をベースに「既知資源量は世界の原子力発電を 135 年以上賄うのに十分」という報告がなされている。しかし、今後世界の原子力発電規模がロシア、中国、インド等を中心に増大していくと、21 世紀後半にウラン価格が高騰する可能性を排除できない。エネルギー安全保障の観点から楽観的予測に基づき判断するのではなく、この不確かさについて安全側に対策を講じておくべきである。ウラン資源の一部を

利用した軽水炉から、ウラン資源をプルトニウム(Pu)に変換して資源利用率を飛躍的に拡大できる高速炉サイクルへ移行し、資源の問題を解決することに意義がある。

・マイナーアクチニド(MA)燃焼による環境負荷低減

(放射性廃棄物の減容と潜在的有害度の低減)

原子炉では核分裂反応に伴って長期に亘って放射能を有する放射性物質が炉心燃料内で発生する。このうちの MA は、軽水炉では核分裂し難く、その放射能は 10 万年オーダーで継続する。将来的には軽水炉及び高速炉の使用済み燃料の中から U、Pu 及び MA を抽出し、高速炉で核分裂させ、放射性廃棄物の削減（例えば、1/7 程度）と潜在的有害度の低減（例えば、10 万年オーダーから 300 年程度に短縮）を図っていくことも重要な意義である。

(2) 安全性向上

高速炉の安全性は、その開発当初から、炉心損傷の発生防止対策の強化と炉心損傷時の影響を原子炉容器及び格納容器内に閉じ込めることを目標とし、各国で様々な研究開発がなされてきた。1F 事故後は、より厳しい自然現象（地震、津波等）に対するシステム健全性の確保とともに、炉心損傷の防止対策や影響緩和対策の一層の強化が求められている。今後は、これまでに開発された「受動的炉停止機能」⁽⁷⁾や「自然循環による崩壊熱除去機能」⁽⁸⁾、「炉心損傷時の再臨界回避機能」⁽⁹⁾を採用することによって、次世代炉（第 4 世代炉）に求められる「シビアアクシデントを想定しても、周辺住民の緊急退避を不要とする概念」を達成していくことが重要である。

また、「ナトリウム冷却高速炉(SFR)」は冷却材であるナトリウムの高い化学的活性度が、炉心安全性に影響を及ぼさない設計にする必要がある。主要なナトリウム配管や容器のバウンダリー二重化、周辺の不活性雰囲気化、ナトリウムの化学的活性度自体を低減する研究開発（例えば、「ナノ粒子分散ナトリウム」⁽¹⁰⁾）等によって達成していくべきである。

(3) 経済性向上

高速炉の実用化には、他の電源と競合できる発電コストを達成することが求められる。このため、高速炉の特長を生かし、高燃焼度燃料及び被覆管材料の開発と長期運転サイクルを可能とする炉心設計（例えば、高内部転換炉心等）を行い、kWh 当たりの運転費（含む燃料費）の低減に取り組むべきである。また、システム設計の簡素化、主要機器のコンパクト化、ナトリウムループ数等の削減等、革新的な技術開発を行い、他の電源と競合できる発電コストを達成できる見通しを示していくことが必要である。

今後は、設計研究と連携した要素技術開発を進め、技術的実現性を高めていくとともに、高速炉サイクルによって達成できる①燃料増殖、②放射性廃棄物減容と潜在的有害度の低減、③エネルギー資源の備蓄効果、④将来のエネルギー源に対する安全保障、の 4 項目に対する経済価値（社会的便益コスト）を評価する研究を進めることも重要である。

(4) 機動性の確保（変動型再生可能エネルギーと共存できる能力）

2050 年の脱炭素社会の実現に向けて、原子力発電と VRE が共存できることが必要である。現時点では、天候次第で電力需要に応える能力に乏しい VRE は、バックアップ電源が必要

であり、化石燃料による火力発電が用いられている。将来の脱炭素時代に向けては、大容量バッテリーに期待がかかるものの、大規模に導入される VRE の調整電源とするには経済的にも大きな課題がある⁽⁵⁾。このため、将来の脱炭素社会の実現に向けては、原子力発電が安全性と信頼性を損なうことなく、短時間の負荷追従能力を確保するとともに、定格運転しつつ電力を他のエネルギー（熱エネルギー、水素等）の形で貯蔵できるシステム等、様々な方策について研究開発を行い、機動性を確保していくことが重要となる⁽⁶⁾。

3. 世界における高速炉開発の現状

(1) 政策として高速炉の実用化開発を進めている国々

ロシア、中国、インド等では、各々の国情に応じて、新規軽水炉の開発・建設あるいは導入と並行して、SFR の実用化計画を持ち、これを着実に進めている。特に、ロシア、中国では、建設中の軽水炉を国内外に複数有し、設計から建設完了まで概ね順調に進展している。これらの新規軽水炉の建設とともに、高速炉の実用化開発も国の開発計画の下、実証炉の設計や運転が進められ、2030 年代の実用化を目指して開発が進められている。

(2) 民間提案の多様な炉概念の研究開発を進めている国々

民間企業が提案する高速炉及び軽水炉の多様な革新概念の研究開発を、政府が支援している国として米国、英国等がある。そこでは従来の大型炉ではなく、民間投資を促進可能な小型モジュール炉が対象となっている。高速炉に関しては、鉛冷却炉や熔融塩炉に関する概念検討や基礎的な研究開発が民間提案に基づいて進められているが、それらを実用化する計画立案の段階には至っていない。

(3) 日本

1F 事故後、原子力発電は重要な電源と位置付けるものの、可能な限り依存度を低減するという政府方針は、今般のエネルギー基本計画でも残された。高速炉開発については、「高速炉開発の方針」（2016 年 12 月原子力関係閣僚会議決定）に基づき策定されるロードマップの下、米国や仏国等と国際協力を進めつつ、研究開発に取り組むと記載されている。

「もんじゅ」以降の高速炉開発は、1980 年代から 1990 年代まで行われた電力実証炉計画を経て、1999 年から JAEA と電力の共同プロジェクトとして、「FBR サイクルの実用化戦略調査研究 (FS)」が行われた。そこでは、我が国で蓄積してきた SFR（酸化物燃料：MOX）だけでなく、多様な炉概念としてガス冷却炉、重金属冷却炉、水冷却炉、熔融塩炉が、また多様な燃料形態（酸化物燃料、金属燃料、窒化物燃料）に対応する高速炉サイクルが検討された。2006 年には、開発目標（安全性、資源有効利用、環境負荷低減、経済性、核拡散抵抗性）への適合性と技術的実現性（国際協力の可能性を含む）の 2 つの視点から比較検討し、SFR(MOX) を主概念、SFR（金属燃料）が副概念として選定された。

2006 年の原子力立国計画に基づき 2025 年頃の実証炉建設、2050 年より前の実用化を目指して、SFR(MOX) を対象に「FBR サイクルの実用化研究開発 (FaCT)」が開始された。ここでは安全性、経済性、信頼性を向上させていくために 13 種類の革新技術が選定され、設

計研究による成立性評価や設計物量や炉心性能に基づいた経済性評価が行われた。

一方、安全性については、FaCT で実施された実用炉/実証炉の設計研究の成果を踏まえ、第 4 世代炉に求められる安全設計の方針類が整備された。そこには 1F 事故の教訓も反映されたが、これらは安全設計基準（SDC）及び安全設計ガイドライン（SDG）としてまとめられ、日本原子力学会・専門委員会での議論を経て第 4 世代炉国際フォーラム（GIF）において策定された。現在、これらは GIF/SFR 参加国（米、仏、露、中）の規制関係者及び IAEA 関係者と意見交換が進められている。

また、FaCT では受動安全性と炉心損傷時の再臨界回避方策に関する技術開発が進展し、第 4 世代炉の安全目標を実現できる見通しが得られてきている。その後、2014 年からフランスの ASTRID 計画に参画し、共同設計及び共同研究が進められ、1F 事故の教訓を生かした先進ループ型 SFR のみならず、国内立地可能性も見通せるタンク型 SFR の設計概念も概略検討された。これらにより、「実証炉の設計段階に向けた開発作業に改めて着手することは十分に可能」と国の高速炉戦略 WG にて判断されている⁽¹¹⁾。

4. 技術戦略の視点

(1) エネルギー安全保障に対する地政学的認識

我が国はエネルギー資源に乏しく、化石燃料資源のみならず、天然ウラン資源も海外に依存している。また、VRE である風力・太陽光発電ともに、諸外国に比べて稼働率を年間通じて高くできる気象条件の良い場所も少なく、国内で電力系統は閉じていることから、EU 諸国のように電力の輸出入で調整することも容易ではない⁽²⁾。一方、高速炉サイクルは技術によって長期に亘り安定したエネルギーを獲得できることから、我が国では原子力開発当初から高速炉サイクルの実用化を目標としてきた。高速炉サイクルは、技術が生み出す国産エネルギーであり、技術自給率の向上、ひいてはエネルギー自給率の向上に貢献でき、ウラン資源の価格高騰等によって軽水炉利用が困難になる可能性に備えることができる。

(2) ステークホルダーとの合意形成

高速炉開発は長期に亘ることから、開発関係者のみならず、規制機関を含む政府の関係省庁、立地自治体、国民の各層において、社会的な合意形成とその維持に取り組むことが重要である。特に、エネルギー安全保障等の重要性、確保すべき安全性の目標、Pu 保有量の管理等の認識を共有するため、立地自治体や国民に対しては丁寧に説明する必要がある。また、「もんじゅ」で得られた知見と教訓も、今後の開発に活かしていくことが望まれる。特に、保守管理不備で指摘された事項を解決できる「開発段階にある SFR に適合する保全計画」と、国際的に合意された安全設計（SDC/SDG）の考え方に基づいた「SFR に対する規格基準類」については、開発側だけでなく規制側、関連学会、内外の有識者等と幅広く意見交換を行い、技術開発と並行して整備していくことが重要である。

(3) 蓄積された技術レベルの維持・発展

我が国に蓄積されてきた高速炉技術は、SFR(MOX)に関するものが殆どである。これまで、実験炉「常陽」及び原型炉「もんじゅ」の設計・建設・運転、そして FaCT 以降に実施した設計研究と要素技術開発、日仏 ASTRID 協力により、実証炉を建設可能なレベルの技術が官民に蓄積されてきた。特に事業者やメーカーが保有する技術の維持は、設計研究や要素技術開発を進めていくだけでは困難であり、実際の高速炉プラントを設計・建設・運転して初めて実用化に向けた技術の発展が期待でき、人材の確保につながるのである。「もんじゅ」の建設完了から四半世紀経過した現在では、「もんじゅ」の機器製造や建設、試運転に携わった技術者の多くが退職年齢に到達しつつある。我が国の技術資産を無駄にせず、若手・中堅の技術者へ伝承し、今後の実用化に繋げていく方策を明確にすることが急務である。

(4) 建設間隔の経済性への影響

米国は、1979 年の TMI 事故以降、新規軽水炉の設計・建設プロジェクトが途絶えていた。2012 年に認可・建設が開始された新規軽水炉は、主に建設プロジェクト上の問題（サプライチェーンや現地での設計変更対応不備の問題も含む）で建設工期が大幅に遅延しコストが高騰した。また、フランスの新規軽水炉でも、安全規制による設計変更、原子炉材料の品質保証の問題等により、建設工期の遅延と建設コストの高騰が発生した。このように、欧米での新規軽水炉の建設実態から、原子力発電の経済性は、設計物量に基づいたコストのみならず、安全規制の予見性、主要機器の品質保証、建設プロジェクトの熟練度等が大きく影響することが指摘されている。

一方、上述したようにロシア、中国では、多くの新規軽水炉の建設が進められており、欧米で発生したような工期の大幅な遅延や建設コストの高騰は見当たらない。これらの事実は、設計、建設の経験知が十分あるうちに、次期炉の開発に着手することが、技術継承のみならずプラントの経済性を確保する上でも有効であることを示している。

(5) イノベーションおよび人材の確保

高速炉が実用化されるまでの開発期間が長期に亘ることから、現時点で未成熟な概念の開発が進展する可能性がある。この不確実さに備えるためには、国内外の多様な研究開発動向を注視し、様々な炉概念及び革新技術に関するイノベーション研究の状況を把握するとともに、それらの中から将来の高速炉サイクルに寄与する可能性の認められる技術を取り込んでいく柔軟性を持つことが重要である。特に、大学や研究機関においては、実用化開発における主概念や技術の制約に囚われず、より幅の広い多様な炉型や革新技術について研究し、原子力研究の裾野を拡大していくことが望まれる。その際、学会のみならず産業界との意見交流の場を設け、研究活動の活性化を図るとともに、高速炉サイクルの研究開発を担う人材育成も図っていくことが重要である。

(6) 国際協力による効率的な開発と市場性の確保

長期間を要し、多額の研究開発資金が必要となる高速炉開発では、国際協力を活用して、効率的な研究開発を実施するとともに、海外の運転経験や技術知見の取り込みを積極的に進め、開発リスクの低減を行うことが合理的である。加えて、SFR の安全基準類の世界標

準化を目指し、これに基づく安全設計概念を世界に先駆けて実機で具現化する。そして、その内容や効果を国際的なネットワークを通じて情報発信していくことは、将来の市場性を確保していく上でも重要である。その場合、これまで行ってきた日仏及び日米協力にとどまらず、高速炉開発を加速しているロシア、中国、インドとの情報交換等により、安全技術の標準化を先導し、高速炉の安全性向上に貢献していくことが望まれる。

5. 今後の開発の方向性と進め方

今後の高速炉開発は、上述した技術戦略の視点を踏まえて、方向性と進め方を決める必要がある。ここでは、現状の情勢や目先の利益からは一定の距離をおいて 100 年程度は揺るがない普遍的な目標を定め、そこからバックキャストで長期計画を考えた上で、一転、現時点の情勢から出発したフォアキャストで、長期計画と整合する現実的な短期計画を考えるアプローチを採用した。このような長期と短期の 2 つの視点を設けることで、長期に亘る一貫性と不確実性に対する柔軟性の両者を確保することとした。

○バックキャストの視点

高速炉サイクルの目標は、我が国のエネルギー安全保障に貢献するための、資源有効利用と環境負荷低減の同時達成による原子力エネルギーの持続的利用である。その達成のために、使用済燃料から U/Pu とともに MA を抽出し、これらを混合した燃料による高速炉サイクルを実用化していくことが、原子力における真のイノベーションと考える。これに至る前の 21 世紀後半には、世界のウラン需給・価格の大きな変動や、軽水炉のリプレイス需要が想定される。この時期までに、高速炉による U/Pu サイクルの本格実用化を可能にすることで、資源問題に備えることが望まれる。また、同時期には VRE の導入も拡大していることが予想され、原子力発電は調整電源としての役割から、エネルギー貯蔵設備とも連携できる技術を開発し、原子力と VRE の共生を実現できることも必要になる。さらにその前の段階（21 世紀半ば頃）では、軽水炉での燃料サイクル（プルサーマル）利用を支援するため、プルサーマルからの使用済 MOX 燃料を再処理し取り出された（高次化）Pu を高速炉で燃焼させることにより、（高次化）Pu の削減などの役割を担うことも期待される。そのため、使用済 MOX 燃料の再処理技術の確立が必要となる。このように、高速炉の導入初期は、軽水炉が多数基稼働する中で少数基の高速炉がどのような役割を果たせば原子力利用の幅を広げられるかについて更なる検討が望まれる。

○フォアキャストの視点

現時点で我が国は、実証炉の設計、建設が可能なレベルの高速炉技術を保有しているが、これが散逸する前に、次期炉の開発に着手し、蓄積した高速炉技術を設計、建設、運転の一連のプロセスで総合的に高めていくことが、これまで育成した人材と技術継承、研究開発に投資した資金を有効に活用する観点からも重要である。

高速炉の安全設計基準類の整備では、1F 事故の教訓反映も含め、我が国が世界で主導的な役割を担ってきた。同時に、受動的な安全機能や炉心損傷時の再臨界回避方策等の研究

開発も進展し、GIF で策定された SDG/SDG を実現する安全技術の開発も世界に先行してきている。早期にこの安全技術を実証し、国際標準として世界に貢献していくことが我が国の責務であり、市場の優位性を確保することにも繋がることが期待できる。そこでは、実用化に求められる経済性が見通せるように、設計の簡素化と機器コンパクト化等による物量削減と、製造建設技術を高度化することも重要である。更に、「もんじゅ」でやり残した、高速炉の運転経験、保守補修経験を蓄積し、建設コストだけでなく、基幹電源としての発電コストに関する見通しも立てられることが重要である。

以上より、我が国に蓄積された技術知見を有効に活用し、安全技術の世界展開と高速炉の実用化を見通すための経済性実証を行うための最も合理的な方法として、安全標準炉 (Safety Standard Demonstration Reactor) の建設を目指した開発を提案する。その開発に当たっては、高速炉サイクルの目標の達成に長期間を要することから、エネルギー安全保障を確保する国の政策が不可欠である。併せて、この政策の下、適切なタイミングで国民及び立地自治体や規制側等のステークホルダーへ、開発計画と進捗状況を丁寧に説明し、合意形成に努めていくことが必要である。

参考文献

- (1) 日本の約束草案 2015.07.17 地球温暖化対策推進本部決定
- (2) 総合資源エネルギー調査会・基本政策分科会 第26回 2018.04.27
- (3) The Future of Nuclear Energy in a Carbon-Constrained World, An Inter-disciplinary MIT Study, 2018
- (4) The 4th GIF Symposium 2018, <http://gifsymposium2018.gen-4.org/programme.html>
- (5) 経済産業省資源エネルギー庁エネルギー情勢懇談会提言「エネルギー転換へのイニシアチブ(案)」平成30年4月10日
- (6) Charles Forsberg, “Strategies for a Low-Carbon Electricity Grid with Full Use of Wind, Solar, and Nuclear Capacity to Minimize Total Costs,” MIT-ANP-TR-162, Aug. 2015
- (7) S. Nakanishi et al, “Development of Passive Shutdown System for SFR,” Nuclear Technology Vol. 170 Apr. 2010.
- (8) A. Ono, H. Kamide, N. Doda, O. Watanabe, “An Experimental Study on Natural Circulation Decay Heat Removal System for a Loop Type Fast Reactor,” Journal of Nuclear Science and Technology, Vol.53, Issue 9, 2016.
- (9) H. Yamano, S. Kubo, Y. Shimakawa, K. Fujita, T. Suzuki, K. Kurisaka, “Large-Scale Japan Sodium-Cooled Fast Reactor,” Science and Technology of Nuclear Installations, Volume 2012, Article ID 614973 (May 2012).
- (10) J. Saito, N. Yoshioka, M. Nagai and K. Ara, “Study on Chemical Reactivity Suppression and Coolant Applicability of Sodium with Suspended Nanoparticles”, IAEA, FR13, Paper 121207 (2012).

- (11) 現時点で我が国が保有している高速炉サイクル技術に対する評価について, 高速炉開発会議
戦略ワーキンググループ 統括チーム, 平成 30 年 6 月 1 日

用語集

- ・ 潜在的有害度

同じ発電電力量に対する高レベル放射性廃棄物の放射能による潜在的な有害度であり、全量直接処分の1年目の毒性（被ばく線量：Sv）に対する相対値。

- ・ 受動的炉停止機構

自然現象により原子炉停止系の機能を確保しようとする機構。例えば、キュリー一点温度を超えると電磁石の保持力が急激に減少する現象を利用し、制御棒が自重で原子炉内に自然落下する仕組みなどが考えられている。

- ・ 自然循環

ポンプ等の外部からの駆動力がなくても、炉心の熱源と空気冷却器の除熱源に高低差をつけることで、冷却材が浮力によって自然に循環する現象。

- ・ 炉心損傷時の再臨界回避

高速炉の炉心損傷時に溶融燃料が凝集すると、大きな圧力を発生させる再臨界事象が生じる可能性がある。そのため、溶融燃料が凝集しないように、燃料が溶融した途端に炉心から排出させる機構を設けるなどによって再臨界事象を回避すること。

- ・ ナノ粒子分散ナトリウム

ナノスケール領域で生じる原子間相互作用に着目した流体の機能制御に関する研究を液体金属ナトリウムへ適用することにより化学的活性度を抑制するというナノテクノロジーを応用した従来にない全く新しい概念。



高速炉サイクル開発の方向性と進め方

