

高速炉開発に関する技術戦略

2019年7月

一般社団法人 日本原子力学会新型炉部会
高速炉戦略ロードマップ検討会

目次

要旨	2
本文	10
1. 背景と目的	10
2. 検討の基本方針および範囲	11
3. 開発目標	12
3. 1 原子力エネルギーの持続的利用	12
3. 2 安全性向上	21
3. 3 経済性向上	22
3. 4 機動性の確保(VRE と共存できる能力)	23
4. 世界における高速炉開発の現状	23
4. 1 政策として高速炉の実用化開発を進めている国々	24
4. 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	29
4. 3 我が国の高速炉開発の歴史と現状	31
5. 技術戦略の視点	34
5. 1 エネルギー安全保障に対する地政学的認識	34
5. 2 ステークホルダーとの合意形成	35
5. 3 蓄積された技術レベルの維持・発展	35
5. 4 建設間隔の経済性への影響	36
5. 5 イノベーションおよび人材の確保	36
5. 6 国際協力による効率的な開発と市場性の確保	36
5. 7 失敗や事故の経験を活かすマネジメント	37
5. 8 MOX 使用済み燃料とプルトニウム量の抑制	38
5. 9 不確実性	39
6. 今後の開発の方向性と進め方	40
6. 1 バックキャストの思考	40
6. 2 フォアキャストの思考	42
7. まとめ	44
参考文献	47
あとがき	50
付録	52
資料集(別冊)	

高速炉開発に関する技術戦略

－要旨－

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温室効果ガス排出量を実質ゼロにするという目標が掲げられており、世界は温室効果ガス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 2013 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温室効果ガス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た。これは技術的問題ではなかったものの、高速炉サイクル実用化に対する展望を一層不透明にした。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た。

日本原子力学会新型炉部会としては、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することはできない。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保守的な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 を回収し、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「受動的炉停止機構」⁽⁷⁾や「自然循環による崩壊熱除去設備」⁽⁸⁾、「炉心損傷時の再臨界回避対策」⁽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ことも重要な点である。

(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)の低減に取り組むことが肝要である。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の削減等を進め、プラント物量の低減を図るとともに、これを成立させる革新的な技術開発を行うことも欠かせな

い。これらの結果、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⁽¹¹⁾。

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(VRE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には、調整電源が必要であり、主に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など、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、民間投資が促進可能と考えられる小型モジュール炉が対象となっている。このうち、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サイクル実用化研究開発(FaCT)」が開始された。そこでは安全性、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基準類が整備された。そこには1F事故の教訓も反映され、また安全設計クライテリア(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⁽¹²⁾。

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の安全設計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し、これを運転保守できることを実証していくことは重要である。そして、その設計と効用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、将来の高速炉の市場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、現在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思考で長期計画を考える。この一方、現在の情勢から出発したフォアキャスト思考で、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。

○バックキャストの思考

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、使用済み燃料から U/Pu とともに MA を回収し、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、軽水炉のリプレー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み 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、使用済み 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。

○フォアキャストの思考

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 SDC/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のが期待できる。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) 向井田恭子他:高速炉サイクルの経済性評価, 原子力学会誌, Vol.61, No.1 (2019)
- (12) 原子力関係閣僚会議,「高速炉開発の方針」(2016年12月決定)

高速炉開発に関する技術戦略

－本文－

1. 背景と目的

21世紀のエネルギー消費においては2つの基本的制約がある。1点目は、前世紀における大量エネルギー消費に伴う温室効果ガスの放出が地球環境を破壊していることである。このため、カーボン・エミッション・フリーのエネルギー消費に制限される。2点目は、エネルギー資源は有限であり、かつ地球上に偏在しているという事実である。このため、自国にエネルギー資源を有しない我が国では準国産のエネルギーを確保しなくてはならない。

我が国のエネルギー自給率は約8%（2016年）と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[1]。パリ協定では今世紀中に温室効果ガス排出量を実質ゼロにするという目標が掲げられており、世界は温室効果ガス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2013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[2][3]。

21世紀半ばに向けて温室効果ガス排出量大幅削減とエネルギー安定供給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[3]～[7]。我が国においてもVREの導入には限度があり、ベストミックスを実現するエネルギー源として原子力が期待されている[1]。

ここで、原子力エネルギーの持続的な利用（エネルギー安定供給）のためには、ウラン資源の制約からの開放と放射性廃棄物による環境負荷の低減が必要になる。高速炉サイクルは、その両者を解決するポテンシャルを有しており、我が国では原子力開発の当初から国策として開発が進められてきた。

これに対し、1F事故、電力自由化、および2016年末の高速増殖原型炉「もんじゅ」（以下、「もんじゅ」）廃止措置決定といった情勢の大きな変化が生じたことから、高速炉開発戦略を練り直す必要性が出てきている。また、国において今後10年程度の高速炉開発戦略ロードマップ構築の検討が2017年から開始[8]された。

これらを受けて、日本原子力学会の新型炉部会に「高速炉戦略ロードマップ検討会」を2017年8月に設置し、現状の課題等を整理したうえで、国が検討するロードマップ

の範囲には含まれない、高速炉サイクル開発の長期目標や人と社会との係りを含む技術戦略を中心に、学会としての見解を示すこととした。

なお、本報告書は学会における議論をまとめたものであり、平成 30 年 12 月 21 日の原子力関係閣僚会議を経て公表された高速炉開発に係る「戦略ロードマップ」を反映したのではない。ただし、「戦略ロードマップ」に対する本検討会の見解をあとがきとして記述する。

以下に背景に関して補足する。

エネルギー資源の乏しい我が国では、エネルギー安全保障の観点から、1960 年代より一貫して高速炉サイクル開発を国策として進めてきた[9]が、2011 年の 1F 事故以降は、安全性への懸念から、原子力エネルギー利用全体が国民の多くから支持されない状況に陥った。これに加え、長期間停止状態にあった「もんじゅ」は、新規制基準対応に伴う時間とコストの増大、新たな運営主体を含む再開に向けた不確実性が大きいとして、政府は「もんじゅ」の廃止措置を決定した[8]。

この判断は、高速炉開発に関わる関係 5 者（文科省、経産省、JAEA、電力、三菱）で構成される高速炉開発会議での決定事項が、原子力関係閣僚会議にて了承されたものである。しかしながら、その決定は技術的な理由ではなく、経済的、政策的な側面が強い。持続的な原子力利用のためには高速炉が必要不可欠であり、1F 事故以降、高速炉の実用化開発計画（高速増速炉サイクル実用化研究開発：略称 FaCT）[10]が中断している状況での廃止措置の政府決定は、高速炉開発及び原子力利用に対する否定的なインパクトを与えた。「もんじゅ」運転再開の代わりに、国際協力によって「もんじゅ」で得るべき技術情報を獲得する方針が示されているものの、国際的に対等な協力関係を構築していくには、我が国が原型炉を保有し、運転経験を蓄積していることが重要であることは自明である。

「もんじゅ」は既に、廃止措置に関する申請が規制庁から認可され、原子炉容器に装荷された炉心燃料の取出しから廃止措置のための準備が始められている。高速炉の開発を今後も継続していく観点からは、長期に亘る廃止措置作業の各工程で得られるデータや経験を最大限活用する方法を、具体的に検討していくことが重要である。

また、これまで高速炉の実用化開発に協力してきた原子力事業者は、既設軽水炉の再稼働の遅延と電力自由化の進展により、研究開発段階からの協力に対し、資金及び要員数が制約される状況となっている。

2. 検討の基本方針および範囲

高速炉サイクル開発の長期目標や人と社会との係りを含む技術戦略について検討することが本検討会の目的である。この目的を達成するための基本方針および検討範囲を本章（2 章）で記述する。

まず、原子力エネルギーの持続的利用を可能とする高速炉サイクルの持つポテンシャル（潜在的な能力）について考える。次に、そのポテンシャルを産業として活用するための課題を、安全性、経済性、そしてVREとの共存の視点から整理し、それらを開発目標としてポテンシャルと合わせて3章で以下のように整理する。

目標1：原子力エネルギーの持続的利用

目標2：安全性向上

目標3：経済性向上

目標4：VREと共存するための機動性の確保

高速炉サイクルのような大規模な技術開発を長期に亘り継続するには、国民の理解が前提となる。そのためには3章で述べた開発目標に対して、国民に支持が得られる論理（Logic）と、それを支える事実認識（Fact Finding）が必要である。こうした理由から、検討の範囲を技術から人や社会まで広げることとし、認識の基礎となる情報として、世界における高速炉開発の現状と、日本の高速炉開発の歴史と現状を第4章に整理する。

このように整理された国内外の経験と現状を参考とし、上記4つの目標を達成するための戦略を検討するための視点として以下の(1)から(9)を設定する。それぞれの視点に基づき解決策を考えて5章に記述する。

- (1) エネルギー安全保障に対する地政学的認識
- (2) ステークホルダーとの合意形成
- (3) 蓄積された技術レベルの維持・発展
- (4) 建設間隔の経済性への影響
- (5) イノベーションおよび人材の確保
- (6) 国際協力による効率的な開発と市場性の確保
- (7) 失敗や事故の経験を活かすマネジメント
- (8) MOX使用済み燃料とPu量の抑制
- (9) 不確実性

最後に、視点毎に個別に考えた対策の関係性に基づき論理構成を与えることで、今後の開発の方向性と考え方を、6章にまとめる。長期開発は不確実性が大きく単調な一本道にはならないことから、ぶれない目標と状況変化に対応する柔軟性を併せ持つ必要がある。このため、バックキャスト思考で長期計画を考えると同時に、フォアキャスト思考で短期計画を検討し、両者を整合させることにより、長期目標と柔軟性が両立する開発の方向性をまとめる。

3. 開発目標

3. 1 原子力エネルギーの持続的利用

現在実用化されている軽水炉による原子力発電は、使用済み燃料を再処理し取り出されたPuを再び軽水炉でリサイクル（いわゆるプルサーマル）しても、ウラン資源の1%

程度しか利用できない。このため、軽水炉によってウラン資源を利用できる期間は石炭より短くなる。また、軽水炉では燃焼させることが難しい MA といった超長寿命の放射性核種を、放射性廃棄物として地層処分することは、原子力発電に対する社会的受容性の観点から改善の余地がある（図 1）。

これに対し、高速炉サイクルは、天然ウランに 99.3%の割合で含まれる核分裂しにくい U-238 を、核分裂のしやすい Pu-239 に変換し、これを主たる核燃料として利用できる。天然ウランに 0.7%しか含まれない U-235 を 3~5%程度まで濃縮して利用する軽水炉よりも、含有量の多い U-238 を Pu-239 に変換して利用する高速炉は、天然ウランの利用効率を原理的に軽水炉に比べて 100 倍程度に向上することが可能である。また、高速中性子を利用して核分裂反応を維持することから、軽水炉では燃焼し難いネプツニウム、アメリシウム、キュリウムといった超長寿命の核種（マイナーアクチニド：MA）を燃焼及び核変換させることも可能である。

ウラン資源をほぼ 100%利用できることから、原子力が準国産エネルギーとなり我が国のエネルギー自給率を大きく改善できる。また、原子力固有の環境問題である放射性廃棄物に関しては、高レベル放射性廃棄物に含まれる放射能半減期の長い MA を燃焼・核変換し、放射性廃棄物量の低減（放射性廃棄物の減容）と放射能レベルが高い期間を短縮させることが可能となる。

すなわち、高速炉サイクルは「資源の有効利用」と「環境負荷低減」を両立させ、将来のエネルギー・環境問題を解決し、原子力の持続的利用のための鍵（切り札）となり得るものである。また、我が国が技術立国の地位を保ち、世界に貢献できるテーマでもあることから、開発意義は大きい。こうした長期の意義を国民で共有する必要がある。

このような高速炉サイクルの究極の概念として、放射性物質を閉じた燃料サイクルシステム（高速炉と燃料サイクルからなるシステム）内に閉じ込め、放射性核種の短寿命化と有用物質の回収を行い、システム外に出るものを、エネルギーと有用物質とする「自ら整合性のある原子力エネルギーシステム：SCNES」[11]が提案されている。これを原子力エネルギーシステムの目指すべき最終ゴールとして、プルトニウム利用による高速炉サイクルの導入段階、MA の分離変換を加えた U/Pu/MA サイクルへの進展、そしてレーザーや加速器等の技術も導入して超長半減期核分裂生成物（以下 LLFP）の分離・変換も加えた U/Pu/MA サイクルへの、段階的な開発目標を設定して、着実に開発を進めていくことが重要である。

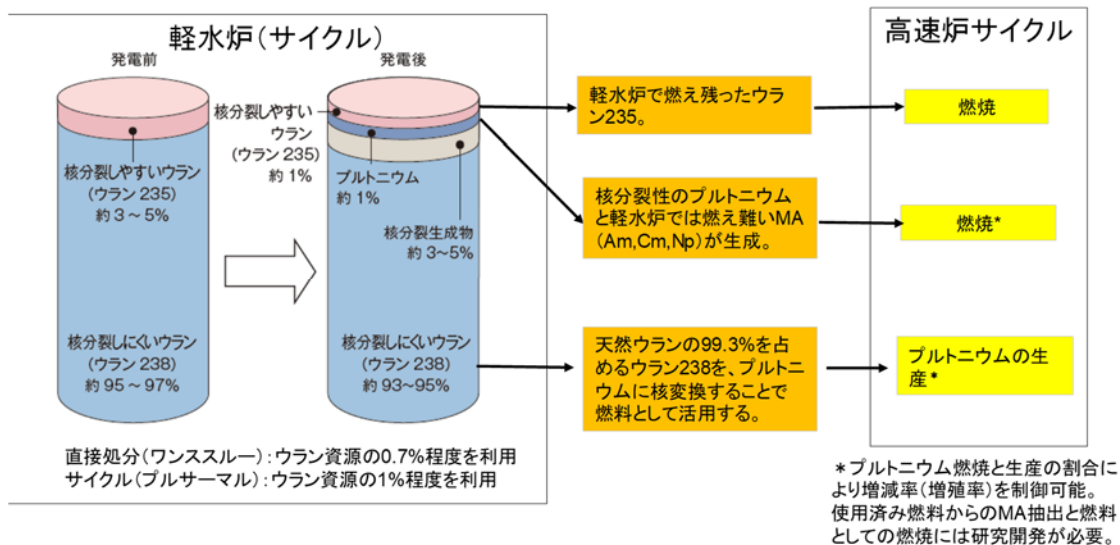


図1 高速炉サイクル開発の意義

(1) 世界の原子力発電の規模とウラン資源について

世界の原子力成長見通しを図2に示す。世界の原子力発電規模の現状と将来動向は、国際原子力機関 (IAEA) によると、2018年8月1日現在、運転中の原子力発電所は453基 (398GWe: ネット)、建設中が56基 (57GWe: ネット) となっている。IAEAの「2050年までのエネルギー、電力、および原子力発電の予測」(2017年版)と同報告書のとりまとめに関するIAEA理事会等の情報によれば、IAEAは、2050年までの原子力発電規模を「高ケース」と「低ケース」の2つを予測している[12]。

「高ケース」は、現在の経済成長率と電力需要増加率が維持され、極東アジア地域では特に高くなることを想定し、多くの国が原子力をコスト効果の高い温暖化防止オプションの1つとして受け入れることを前提とした場合に相当する。そこでは、今後数年間は拡大ペースに鈍化傾向が見られるものの、長期的に見れば現状規模の2倍以上に増加する(世界の原子力発電設備容量が2030年までに554GWe、2050年までには874GWe)可能性があるとしている。そこでは、低炭素電源としての原子力の可能性が一層強く認識され、先進的な原子炉設計によって安全性と放射性廃棄物管理問題の両方が改善されれば、原子力の開発利用は飛躍的に拡大するとの見方も示している。

一方、「低ケース」では、現在の市場、技術、資源動向、政策、法令等が大きく変化しないと仮定した場合で、各国における原子力発電の計画縮小や脱原子力政策への転換可能性等の不確かさも考慮したものである。この場合、現状の391GWeのまま2050年まで、原子力発電の規模は、やや減少していく傾向を予測している。

IAEAとは別に、国際エネルギー機関 (IEA) は、世界エネルギーアウトルック2017 (WEO-2017)では、種々のシナリオで2040年までの世界のエネルギーを予測している[13][14]。このWEO-2017で新たに導入された「持続可能な開発シナリオ」では、国連

の持続可能な開発目標のエネルギー関連項目（気候変動に対する断固たる取り組み、2030年までに誰もが現時点のエネルギーを利用できるようにして大気汚染の大幅削減を目指す）を達成するために必要な統合的なアプローチを概観している。そこでは、原子力発電の規模拡大を見込んでおり、2040年までの設備容量は、IAEAの「高ケース」とほぼ同等な推移を経過すると予測している。

ここで、冒頭に記載したように、現在建設中の57GWeが全て完遂されて運転を開始すると想定すれば、2025年頃の原子力発電規模は455GWeと、現在に比べ2割弱増加する。これに加え、世界原子力協会（WNA）は2018年4月統計で、世界31か国の原子力発電導入国で計画中あるいは検討中の原子力発電所が、それぞれ154基（158GWe）、333基（382GWe）、新規導入国17か国で計画19基（20GWe）、検討中66基（75GWe）が公表されている。計画中の総数が173基（178GWe）、検討中総数が399基（457GWe）であることから、今後の廃炉規模（2030年断面で181～241GWe）を考慮しても、計画中及び検討中の原子力発電所が着工・運開していけば、世界の原子力発電規模はIAEAの「高ケース」に漸近、あるいは超過していくことが想定される。

このように世界規模でみると、原子力発電所の建設は新規軽水炉の建設を中心に拡大していく可能性が予見されるものの、IAEAによる「2050年までのエネルギー、電力、および原子力発電の予測」の2009年度から2017年度版の差異を含めて概観すると、「高ケース」「低ケース」の両方とも2030年断面での原子力発電容量が年々減少している点を考慮する必要がある。世界の幾つかの地域では、低コスト化が進む天然ガス供給量増加や再生可能エネルギーの政策的導入拡大等が見られることや、1F事故による厳しい安全要求と設備対策の増加と審査期間の長期化や機器製作や据付等の建設技術力の低下等によって、原子力発電所の新規建設への進展に遅れをもたらしていることが、原子力発電の成長を阻害している要因と考えられる。これに加え、特に2030年頃以降は、既設原子力発電所のプラント寿命到達による廃止措置への移行、他電源との価格競争力をなくした原子力発電所の閉鎖、脱原子力政策による廃炉措置が進むことが想定されている。これらによる原子力発電規模の減少を抑制するには、既設原子力発電所の寿命延長（60年あるいは80年）や、建設中の新規原子力発電所の着実な運開、計画中及び検討中の原子力発電所の着工、運開が必要になる。

このような様々な要因に対する不確かさから、2050年までの原子力発電容量の推移については、IAEAの「高ケース」から「低ケース」の間の幅を考慮しておく必要がある。

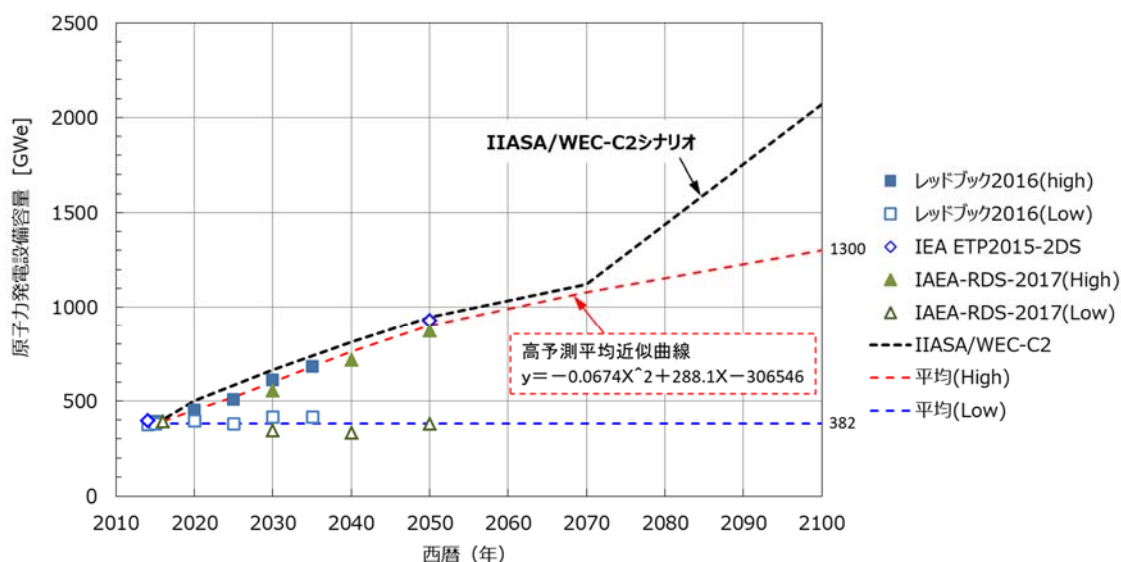
OECD/NEA レッドブック 2016[13]では、天然ウラン資源量の現状（表1に示す）が、原子力発電設備容量および対応するウラン需要量とともに提示されている。

これらの発電設備容量と需要量の関係から、単位発電容量当たりの平均ウラン需要量は、155tU/y/GWeとなり、図3に示すように2100年断面のウラン需要量は、「高ケース」で1,200万tUを超え、在来型ウラン資源量（1506万tU）には到達しないまでも、

既知資源量 764 万 tU を超える。また、「低ケース」でも、ウラン需要量 560 万 tU は、確認資源量 439 万 tU を超える[14]。

既知資源(764 万 tU)でも、「高ケース」の経過をたどると 2070 年代過ぎには資源量が逼迫することとなる。また、先行して消費される確認資源(439 万 tU)の場合に至っては、2050 年代に入ると逼迫する可能性があり、これ以前に、資源価格の高騰や流通制限(投機の対象としての買占めや価格つり上げなど)がリスクとして顕在化する可能性がある。

未発見資源を含む在来型資源(1506 万 tU)があると予測されていても、その不確実性は既知資源に比べてさらに高く、そもそも日本が長期間にわたり海外からウラン資源を輸入し続けなければならない状況や、その価格が高騰して国内輸入が制限される可能性があることは、エネルギー安全保障確保の観点から避けるべきであり、21 世紀半ばまでには、最悪の状況に対する最善策を考えるべきである。



IIASA/WEC-C2: 国際応用システム分析研究所と世界エネルギー会議が作成した報告書 (Global Energy Perspectives)の中で、温暖化抑制策として再生可能エネルギーと原子力の普及を想定した環境主導シナリオ
IEA ETP2015-2DS: 温室効果ガスとCO₂の排出量を削減した持続可能なエネルギーシステムを提示するシナリオ

図2 世界の原子力成長見通し[13]

表 1 USD260/kgU 未満のウラン資源の現状 (2015 年 1 月 1 日現在) [13]

在来型ウラン資源(Conventional resources)			
1506 万トン			
既知資源(Identified resources)		未発見資源 (Undiscovered resources)	
764 万トン		742 万トン ^{※5}	
確認資源 ^{※1} (Reasonably assured resources)	推定資源 ^{※2} (Inferred resources)	予測資源 ^{※3} (Prognosticated resources)	期待資源 ^{※4} (Speculative resources)
439 万トン	326 万トン	167 万トン	336 万トン

※1 確認資源：鉱床の規模・品位・形状が**明らかな資源**

※2 推定資源：鉱床の規模・特性に関する**データが不十分な資源**

※3 予測資源：既存鉱床の地質的延長にウラン資源の存在が**間接的事実をもとに推定される資源**

※4 期待資源：特定の地質鉱床地帯の中に**期待される資源**

※5 未発見資源 742 万トンには、回収コストレンジが未確定な資源量 (239 万トン) を含む

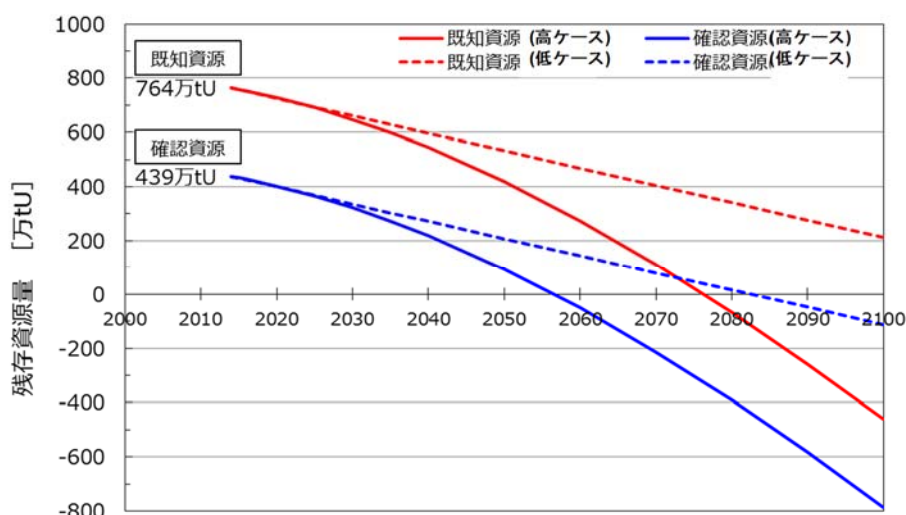


図 3 天然ウラン資源の見通し ([12][13][14]に基づく)

(2) U/Pu サイクルの実用化

図 4 に我が国のエネルギー安全保障に対するシナリオを比較する。ウラン燃料を利用する軽水炉体系を長期継続する場合、天然ウランの使用量は単調増加する。

直接処分 (ワンスルー) の場合と比較すると、プルサーマルの長期継続を選択した場合、ウラン資源の節約は 2150 年時点で約 8% の節約となる。高速炉との長期併存～移行を行う場合、2150 年時点のウラン資源節約量は、約 19% となる。2090 年頃から高速炉の本格導入～完全移行した場合、30 年経過時点(2120 年)で約 30 万トン (約 38%) の節約となる [15]。(導入が早ければ早いほど、節約効果は顕著になる。)

以上から、2050年代に、軽水炉と高速炉の併用によりウランとプルトニウムをリサイクルするMOX燃料サイクルを実用化できる技術が整備できていれば、資源の有効利用と環境保全に対する最低限の要求には応えられる。その後、高速炉の割合を増やし、軽水炉で燃えにくいウランやプルトニウムの同位体を、高速炉で燃えやすい同位体に核変換・燃焼することで、ウラン資源の利用率を数十倍高め、現状の確認埋蔵量でも数千年の利用が可能となる（図5）。

ここで、実用化できる技術を整備するとは、安全性と経済性を兼ね備えた実用炉の設計、建設、運転が見通せる、炉型と出力規模を持つ実証炉級の設計・建設・運転ができる状況と定義する。

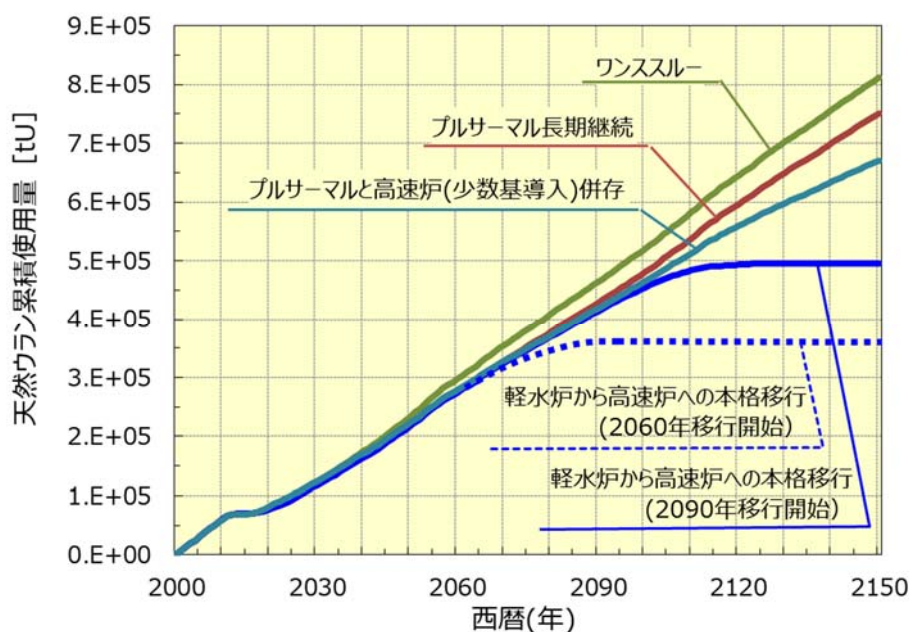


図4 エネルギー安全保障に対するシナリオの比較[15]

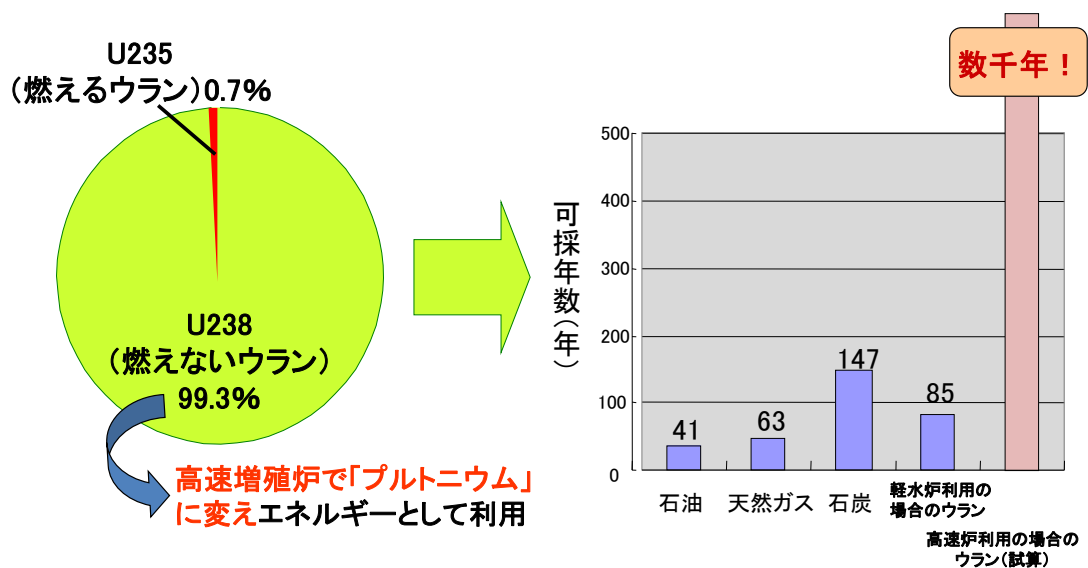


図5 ウラン資源有効利用によるエネルギー安全保障貢献

(3) U/Pu/MA サイクルの実用化

次に、環境負荷低減の観点から、我が国におけるガラス固化体の処分場面積の21世紀後半からの比較シナリオを図6に、使用済み燃料の放射能毒性が取り出し後から天然ウランレベルに低下するまでの期間の比較を図7に示す[15]。

使用済み燃料の処分において、ワンスルーの場合は、ガラス固化体の処分場における離間距離に比べ、より距離を取る必要が生じ、処分場面積はガラス固化体の場合(約6km²:羽田空港の約1/2)に比べて約5倍の広さ(32km²:山手線内側の面積の約1/2)が必要となる。

直接処分体の放射能毒性は、埋設後に天然ウランレベルに低下するまで約19万年を必要とする。一方、プルサーマル長期継続と高速炉少数基導入による併存を行い、その後再処理からガラス固化体として埋設する場合、天然ウランレベルに低下するには、約1~2万年までの期間短縮が図れる。

高速炉の本格導入・移行(高速炉サイクル)を行い、さらに再処理時の高レベル廃液からMAを99%の収率で分離回収すると、放射能毒性は約3千年程度まで短縮が可能となる。さらに、MA回収率99.9%の場合は約3百年程度まで短縮が期待できる。

MOX使用済み燃料の放射能レベルの減衰に1万年程度かかるのは、使用済み燃料中にはウランとプルトニウムの他に、長寿命の放射性核種であるMAが含まれているためである。このため、2050年以降は、MAを高速炉により燃焼および核変換させるU/Pu/MAサイクルを開発する。これによって、高レベル放射性廃棄物の放射線の毒性が天然ウランと同等に減衰するまでの期間を、数百年程度まで縮め、環境負荷低減を図る。この段階では、高速炉再処理技術と燃料製造技術が主たる開発課題になる。以上のように、着

実に高速中性子を利用した閉じた燃料サイクルを開発し、人類のエネルギー環境問題の解決に貢献する。

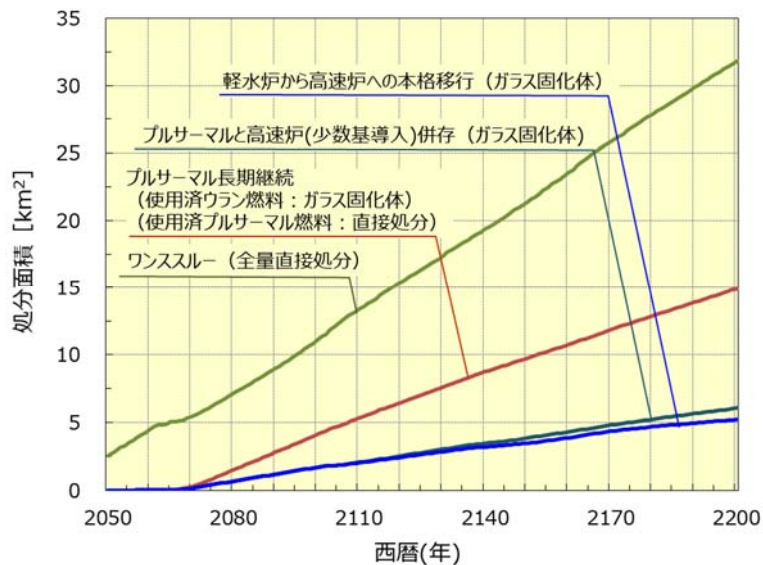


図6 ガラス固化体の処分場面積の比較[15]

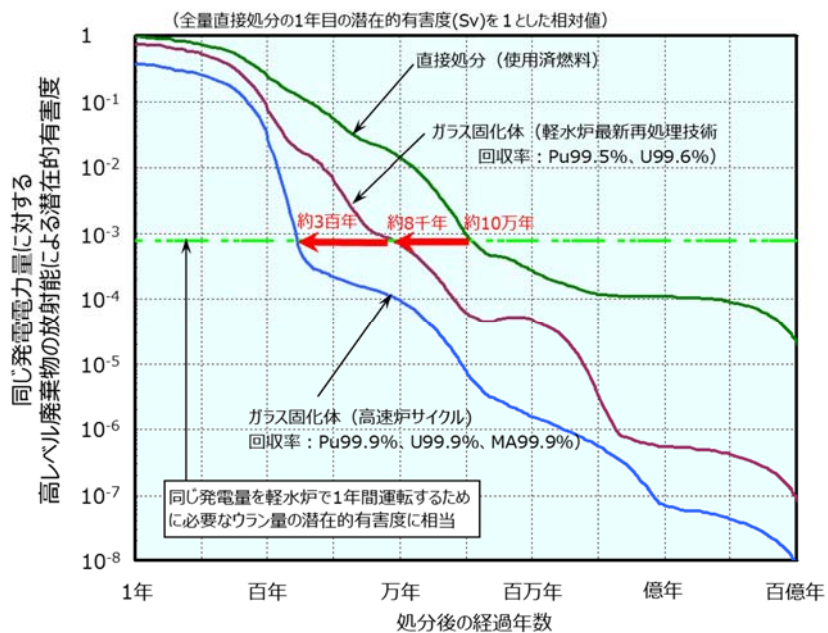


図7 放射能毒性が天然ウランレベルに低下するまでの期間[15]

3. 2 安全性向上

高速炉の安全上の特徴は表2に示すように軽水炉とは異なることから、その特徴を考慮して開発当初から、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事故を教訓として策定された、我が国の軽水炉に対する新規規制基準では、自然災害に対するより厳しい想定をはじめとして、様々なシビアアクシデントへの影響緩和対策や環境への放射性物質の放散可能性を抑制するための対策等が強く求められるようになった。

表2 軽水炉と高速炉（SFR）の安全上の特徴と設計対策

	軽水炉の特徴	高速炉（SFR）の特徴と設計対策	
炉心	最大反応度体系	最大反応体系ではない	炉心溶融時の再臨界回避技術
冷却材	加圧システム(7-15MPa) 345℃(15MPa)	常圧システム 880℃ (0.1MPa)	冷却材液位確保 (LOCAの想定不要)
ボイド反応度	負	大型炉心では中央が正	冷却材沸騰の防止とガス混入防止と除去など
崩壊熱の除去	海水が最終ヒートシンクであり、相変化を利用した自然循環で炉心冷却可能	大気が最終ヒートシンクであり、単相のままの自然循環で炉心冷却可能	冷却システムがシンプル、注水不要により長時間除熱の信頼性が高い
化学的活性度	常温ではなし	水や空気と激しく反応	2次冷却系の設置と外管や不活性雰囲気導入（ナノ粒子分散Na）

高速炉の安全設計・評価では、その開発当初から仮想的炉心崩壊事故（HCDA）等のシビアアクシデントに関する安全研究が米欧日で活発に進められてきたことや、1990年代の日欧における次期高速炉の設計において、受動的な原子炉停止機構や負の反応度投入機構の開発や自然循環冷却による崩壊熱除去設備の設計が進められた。特に、我が国はナトリウム冷却炉に関する受動的な原子炉停止と崩壊熱除去機能に関する技術開発と、炉心損傷時の再臨界回避技術（溶融した炉心燃料が集中化しないように炉心外に排出を促進する構造とその機能を実証する試験計画の実施）が進展していたことから、2010年に第4世代炉国際フォーラム（GIF）に働きかけ、ナトリウム冷却高速炉（SFR）に対する安全設計基準（図8）である安全設計クライテリア（SDC）と安全設計ガイドライン（SDG）の構築を我が国主導で進めた[16][17]。この安全設計基準では、自然災害を起因とするものも含めて炉心損傷を受動的に（物理現象を利用して）防止できる機構や、仮に大規模な炉心損傷に至った場合にも、炉心損傷による影響を原子炉容器内で終息させ、最終障壁である格納容器内に放射性物質を閉じ込めることを設計要求しており、

それらを達成するための技術開発が重要となっている。これらは主として事故を起こさないための従来の安全性の考え方に加えて、仮に重大事故が起こった場合にも、その影響を緩和して、敷地外への放射性物質の拡散を防ぎ、事故やトラブル経験から学んで安全性を継続的に高める「深みのある安全対策（In-depth safety）」あるいは、「強靭な安全対策（レジリエンス設計）」に繋がるものである。

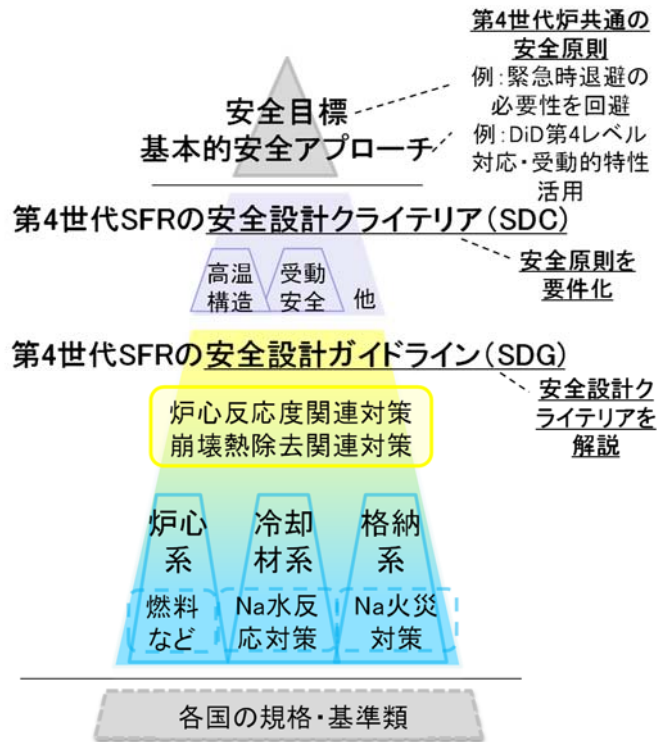


図8 第4世代SFRの安全設計クライテリア（SDC）／安全設計ガイドライン（SDG）

3.3 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、高速炉プラントの物量を削減するための設計検討と、それを実現できる技術開発に取り組むことが重要である[18]。炉心・燃料設計では、高速炉心の特長を活かし、高燃焼度燃料及び高性能被覆管材料の開発と長期運転サイクルを可能とする設計（例えば、高内部転換炉心等）を行い、運転費及び燃料費の低減を図ることなどが挙げられる。

プラント設計に関しては、システム設計の簡素化（ex:1次系/2次系等のナトリウムループ数の削減）、主要機器のコンパクト化（原子炉容器、冷却材ポンプ、熱交換器等）等の設計と共に、これらを実現する革新的な技術開発（例えば[10]）を行うことが必要になる。その設計の成熟と大型化あるいはモジュール化によって実用化をめざし、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。

燃料サイクルに関しては、ロボット技術などの活用により高い放射線や熱の環境下でも効率的な高速炉用再処理方法や、工程を減らし簡素化した燃料製造法など（例えば[10]）を確立し、サイクルコストの削減に努める必要がある。

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。

3. 4 機動性の確保（VRE 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[6]。

軽水炉の負荷追従運転が積極的に検討された経緯があるが、熱中性子炉において負荷追従運転を行う場合、キセノン毒作用が大きな問題となることが分かっている。ウランの核分裂により発生する半減期9時間程度のキセノンは熱中性子を効率よく捕獲するため、炉停止後のキセノンが減衰するまでの間は、中性子が捕獲されてしまい制御棒を引き抜いても再起動できない[19]。高速中性子に対するキセノンの中性子捕獲断面積は無視できるため、高速炉ではキセノン毒作用の問題は発生せず、負荷追従運転のポテンシャルを有している。

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、負荷追従能力を確保するとともに、定格運転しつつVREの発電量によって余剰となる電力を、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]。

4. 世界における高速炉開発の現状

各国とも実用化段階にある軽水炉の導入と新型炉である高速炉の研究開発を並行して進めている[20]。そして、政策として高速炉の実用化開発を進めている、ロシア、インド、中国などの国々と、軽水炉を含む他のエネルギー資源の動向と高速炉サイクルの民間提案の多様な炉概念の研究開発を進めている米国や英国がある。フランスは、これまで高速炉の実用化開発に積極的であったが、近年、財政難を理由にその開発速度を緩めている。

資源に乏しい我が国は、これまでロシア、インド、中国と同様に国策として高速炉の開発を進めてきたが、1F事故により、原子力発電への依存度を可能な限り低減するとの方針判断等により、国内での高速炉の開発スケジュールは不明瞭になっている。

4. 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、フランス等では、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。フランスも、ASTRIDの設計計画は延期されたが、21世紀後半には、実用規模の高速炉(100万kWe級)を導入していく考えを持っており、高速炉の実用化開発を進めている国に分類される。

以下では、現在、高速炉開発を進めている国における原子力発電規模を国毎に紹介する。なお、電気出力及び発電設備容量については、原則として運転中のものはネット電気出力(送電端出力)とし、それ以外(建設中・計画中等)はグロス電気出力(発電端出力)とした。これらの出典は、世界原子力発電協会(WNA)のホームページの各国のCountry Profiles中のNuclear Power情報[21]に基づいた。

○ロシア

旧ソ連時代の1954年に世界初の実用規模の原子力発電を開始し、2018年3月現在、運転中37基(28.9GWe)、建設中5基(3.6GWe)、計画中26基(28.4GWe)で、2016年の全発電設備容量に占める原子力比率は11%、全発電量に占める原子力比率は18.3%である。ロシアは原子力を最も経済的なエネルギー供給システムと位置づけて、原子力開発当初からSFRの開発も進めており、実験炉BOR60(1.2万kWe)、原型炉BN600(56万kWe)、実証炉BN800(78.9万kWe)の3基が運転中である[21]。2010年2月、ロシア連邦政府は、「連邦目標プログラム:2010年より2015年の期間、さらに2020年までの見通しを含めた新世代原子力技術」[22]を承認した。この目標は、ロシアのエネルギー需要を確保し、天然ウランと使用済み燃料の利用率向上を確保する原子力発電所のため、ロシアで自主開発をしたPWR(VVER)とともに、閉じた核燃料サイクルをもつ高速中性子炉に基づく新世代の原子力技術(プラットフォーム)を開発することとしている。ナトリウム及び鉛/鉛ビスマスを冷却材とした高速炉の開発、高速炉用のウラン・プルトニウム混合酸化物燃料(MOX燃料)製造施設の建設、高密度燃料(窒化物燃料)製造のための施設の建設、閉じた燃料サイクル技術の開発、多目的実験炉(MBIR)の設計など、様々な開発・建設計画が掲げられた。この連邦目標プログラムは2012年に見直しされ、新たな原子力研究開発のプラットフォームを作るプロリフ計画(ブレイクスル

一計画)が作成された。このブレークスルー計画では、SFRであるBNシリーズの開発と、鉛/鉛ビスマス冷却高速炉の研究開発を並行して行うことを原子力開発の中心として位置付け、共に120万kWe級での実用化を目指すこととしていた。2017年に、ロシアの一人当たりの年間のエネルギー消費量を将来的に欧米並みに倍増させるためには原子力発電設備容量の増大が必須であるとした上で、国内の主力となる原子力発電を、ロシア製PWR(VVER)とSFR(BN)の2炉型で対応する方針が打ち出された。これは、2種類のMOX燃料を用いた熱中性子炉と高速炉からなるサイクルシステム「2コンポーネントシステム」と呼ばれる原子力の導入戦略を掲げている[22][23]。核分裂性Puの割合が相対的に高い高速炉(BNタイプ)の使用済み燃料からのPuをMOX燃料として熱中性子炉(VVER)に供給し、VVERの使用済み燃料から回収したPuは高速炉にリサイクルするという軽水炉と高速炉の共生概念で、この概念の実現はBN-1200が系統に連結される頃を想定している。この共生シナリオにより、使用済み燃料や回収Puの蓄積が大きく抑制されるとの評価結果も報告されている。PWRのVVER1200とSFRのBN1200の二つの原子炉を建設することにより、現在28GWeある原子力発電設備容量を2030年に35GWe、2050年に52GWe(そのうち高速炉約20GWe)、2100年に120GWe(そのうち高速炉約90GWe)まで増強するという野心的な目標を掲げている。国内での建設と並行して、同規模のVVER1200とBN1200を海外に輸出することも計画しており、ロシアでのVVERとBNの設計、建設、運転経験は、今後急速に増大していくものと考えられる。BN600は1981年の運転開始以降、平均設備利用率が75%を超える順調な運転を継続している。特に、2014年から2016年までの3ケ年の平均設備利用率は85.9%と優れた実績を残している。BN800は1980年代に建設開始後、チェルノブイリ事故の対応とソ連崩壊のためしばらく建設を中断していたが、2006年に建設を再開し着工から30年以上をかけて2016年11月に営業運転を開始した。BN1200は122万kWeで、第4世代炉の実用炉として2030年頃の運転開始を目指して開発が進められている。ロシアでは、高速炉の炉心燃料としてMOX燃料を使うSFRを実用炉の本命としているが、将来オプションとして、窒化物燃料や鉛/鉛ビスマスを冷却材とした鉛冷却高速炉:Lead-cooled Fast Reactor:LFRも開発している。LFRとしては原型炉BREST-OD-300(30万kWe、窒化物燃料)の建設が計画され、鉛ビスマス冷却高速炉としてはSVBR(10万kWe、ウラン酸化物燃料)の開発が進められている。このように、ロシアでは独自の技術を基に高速炉の実用化に向けた開発が着実に進められている。

○中国

中国は、2019年1月現在、運転中45基(43.0GWe)、建設中13基(12.8GWe)、計画
中43基(50.9GWe)、提案中170基(193GWe)で、2016年の全発電設備容量に占める原子力比率は2%、全発電量に占める原子力比率は3.5%である。現在の原子力発電規模

は日本を抜いて世界第3位であるが、2030年までには米国を抜いて世界第1位の原子力発電大国になる見通しである。

建設中の軽水炉には、海外導入した最新の第3世代炉のEPRやAP1000、VVER-1000、国産化した第3世代炉ではACPR1000、華龍1、小型炉ACPR50S、更に国産の第4世代実証炉である高温ガス炉HTR-PMやSFRのCFR600がある。また、AP1000の国産化機CAP1000、CAP1400や国産小型炉ACP100が計画中的である[24]。

中国の中長期原子力発電見通しとして、中国工程院は2011年2月、「中国エネルギー（エネルギー）中長期（2030～2050）発展戦略研究」を公表し、エネルギー需要の大幅な拡大に備えて、原子力発電容量を現在の35GWeから2020年に70GWe、2030年に200GWe、2050年に400GWeまで増強する計画である。なお、この開発計画の策定直後に発生した1F事故により、2020年の原子力発電容量の開発目標値は58MWeへ縮小されたが、2030年、2050年の開発目標値は変更されていない[25][26]。中国原子能科学研究院（CIAE）は、2030年頃に高速炉（SFR）を実用化し、高速炉の高導入ケースでは、2050年には原子力発電容量の約4割、160GWeを高速炉が担うと試算している[27]。また、中国政府は、クリーンエネルギーである原子力産業をハイテク戦略産業と位置づけて国際競争力を高め、習近平国家主席が提唱した「一帯一路」（陸と海のシルクロード）戦略に従って沿線国家に華龍等の国産化した軽水炉を中心にした原子力発電炉の輸出を積極的に進めようとしている。

中国では、SFRを実用炉の本命として開発し、増殖炉としての運用を計画しており、2014年に定格出力運転を開始した実験炉CEFR（2万kWe）は、ロシアからの技術輸入により建設された。続く実証炉として中国の自主技術によって開発されたCFR600の建設が2017年12月に始まり、2023年の試運転開始を目指している。CFR600は、60万kWeでMOX燃料を採用し、第4世代炉としての設計要求を満足するように計画されている。実用炉CFR1200（120万kWe、MOX燃料）については、現在、概念検討が行われているところであり、2020年に建設を判断し、2035年頃の運転開始を目指している[27]。また、中国核工業集团有限公司（CNNC）はビル・ゲイツ氏が出資する米国のテラパワー社と、2017年9月に進行波炉の実証炉TWR-Pを開発するための合弁会社を設立し、金属燃料を用いたSFRの開発を並行して進めている。

このように、中国はロシアと米国から技術導入を図るとともに、これをもとにした独自の技術改良で2030年代に、SFR実用炉の運転を開始することを目指し、急ピッチでSFRの開発を進めている。

○インド

2018年3月現在、運転中22基（6.2GWe）、建設中6基（4.4GWe）、計画中19基（17.3GWe）で、2016年の全発電設備容量に占める原子力比率は2%、全発電量に占める原子力比率は3.5%である。急速な経済成長と人口増加のために、一次エネルギー消

費量が急増しており、2016年の一次エネルギー消費量とCO₂排出量はいずれも中国、米国に次ぐ世界第3位となっている。そのため、環境負荷低減に向けてインド政府はCOP21で、2030年までにGDP当たりのCO₂排出量を2005年比で33～35%削減する自主目標を発表している。この当面の対応として、欧米露から大型軽水炉約40GWeを輸入するとともに、自国開発してきたPHWR(0.7GWe)を12基とSFR(0.6GWe)を6基建設することが計画されている。

インドの原子力委員会は、国内にトリウム資源が豊富に存在するため、「ウラン-トリウム(U-Th)サイクル」を将来的に実現するべくインド独自の三段階の原子力開発計画を1950年代に策定し、この計画に沿って開発を進めている[28]。第一段階では、天然ウランを燃料とする重水減速加圧重水冷却炉(PHWR)で発電をしつつ、U-238から核分裂性のPu-239を生産する(なお、当初の計画にはなかった海外から濃縮ウラン付きで最新型大型軽水炉を導入する計画も新たに加わっている)。第二段階では、PHWR(及び軽水炉)の使用済み燃料を再処理して回収されるPuを基に高速炉を運転するとともに、核燃料サイクルを確立し原子炉基数の大幅な増大を計画している。第三段階では、高速炉のブランケット燃料にTh-232を装荷して生成された核分裂性のU-233を回収し、それを新型重水炉AHWR等で燃やすことで長期にわたる安定した原子力発電を達成する計画としている。

インド原子力庁(DAE)が2004年に策定した「電力成長戦略」[29]では、「インドの生活水準を先進国並みに向上させるためには、一人当たりの年間電力消費量を今後約50年間で1桁増大させる必要がある。エネルギー安定供給と環境負荷低減を考えると原子力発電の大幅な増大が必要であり、さらに国内の資源的制約を考えると高速炉の大幅導入が不可欠である。」とし、目標とする原子力設備容量を「2022年までに29GWe、2032年までに63GWe、2052年までに275GWe(2052年の全発電設備容量約1,300GWeの20%相当)を導入し、その大半を高速炉で賄う。」としている。その後、後述するように海外から濃縮ウラン付きで大型軽水炉を大量に輸入すること等が可能となってきたため、DAEではこの計画の見直し検討が行われている。

そのケーススタディ(2008年)として、濃縮ウラン供給国の了解を得て、軽水炉の使用済み燃料をインドで再処理し、回収したPuとUを高速炉でリサイクルできるようになれば、ポテンシャル的には2050年頃の電力設備の半分を原子力で賄うことも可能であろうとの検討結果も発表されている[30]。

インドは現在、原子力開発計画の第二段階にあり、高速実験炉FBTRの30年を超える運転経験を基に、原型炉PFBRを完成させるなど、SFRの開発を進めている。1985年に運転を開始したFBTRは、1.35万kWeでフランスとの協力の下で建設された。炉心燃料には当初、フランスの実験炉ラプソディと同じ高濃縮ウラン酸化物燃料を採用する計画だったが、1974年にインドが地下核実験を実施したため国際協力を活用できなくなったから、それ以降は、より高密度でPu富化度を高くすることができる炭化物燃料を独

自開発して使ってきた。続く PFBR は 50 万 kWe で、インドが独自技術で開発した MOX 燃料高速炉である。2015 年に建設を完了し、現在は試運転中であるが、1F 事故以降の規制強化への対応のため、初臨界が遅れており、最新のインド国会情報では 2018 年後半、ないし 2019 年頃とされている。PFBR とコロケーションで、燃料製造・再処理・廃棄物管理を統合した高速炉燃料サイクル施設 FRFCF (14t/y) も建設中である。

今後は、PFBR を基に安全性、経済性を向上させた、60 万 kWe の実用高速炉をツインプラントとして 3 セット (合計 6 基) 建設し、2030 年から 2040 年にかけて順次運転を開始するとしている。また、これと並行して MOX 燃料サイクル施設も増強する計画である。また、金属燃料サイクルについても開発を進め、2030 年までに実験炉 FBTR-2 を運転開始する計画である。このように、インドは計画的かつ着実に SFR サイクルの開発を進めているが、原型炉から実用炉へのスケールアップの程度が小さく、原型炉の経験を基に確実に実用化していこうとする実践的な計画としている。

○フランス

2018 年 3 月現在、運転中の軽水炉が 58 基 (63.1GWe)、建設中 1 基 (1.75GWe)、計画中無しで、2015 年の全発電設備容量に占める原子力比率は 49%、全発電量に占める原子力比率は 77% である。運転中の軽水炉の内、24 基で MOX 燃料を装荷しており、その使用済み MOX 燃料は将来 SFR で利用するために貯蔵保管されている。フランスは原子力の開発を強力に牽引してきた国であり、原子力を基幹エネルギーで輸出戦略上も重要な産業と位置づけている。SFR と MOX 燃料サイクルを将来の原子力の本命と位置付けており、実験炉ラプソディ、原型炉フェニックス、実証炉スーパーフェニックスの設計、建設、運転等の豊富な経験を有している。

1998 年のスーパーフェニックスの閉鎖にともない、SFR の開発は一時中断されたが、2006 年の大統領宣言に基づきその開発を再開し、2010 年から工業的実証を目的とした第 4 世代炉 ASTRID (Advanced Sodium Technological Reactor for Industrial Demonstration) の開発が進められてきた。ASTRID 計画では、60 万 kWe 級の MOX 燃料 SFR の概念設計と基本設計を行い、2030 年代の運転開始を目指していた。同計画では、日仏で政府機関間取り決めを締結し、フランスの CEA とフラアトム、日本の日本原子力研究開発機構、三菱重工業、三菱 FBR システムズが実施機関協定を締結して、研究協力を進めてきた。

しかし 2017 年末にフランス政府は、高速中性子炉の実用炉導入の必要性は、現在のウラン市場の状況に鑑みると、それほど緊急ではないとし、フランス原子力・代替エネルギー庁 (CEA) に ASTRID 計画の見直しを求めた。CEA は、実機建設を含む SFR シミュレーションプログラムを提案し、その実機の出力は 10~20 万 kWe 級とした。この研究計画は、発電事業の仕様を満たす 100 万 kWe の実用炉の設計及び許認可を開始できるようなデータを、当初の ASTRID 計画よりも、低コストで獲得できるとしていた[31]。しか

し、2019年1月に発行された「エネルギー多年度計画(PPE)」において、ASTRID計画は2020年以降、実機建設の意向を保持しているものの、当面は実用化に向けた研究開発を中心に取り組んでいく方針が示された。現在は、日仏で実用化に向けた共通の研究開発課題の検討を進めており、今後も継続して日仏協力が進められていく見込みである。

CEAの燃料サイクルオプションと移行シナリオ評価例によれば、既存の第2世代の軽水炉については、順次第3世代軽水炉(EPR)に置き換えていき、2070年頃に第4世代のSFRに順次置き換えていく計画が検討されている。ASTRIDの導入後、まずは数基の高速炉導入により軽水炉使用済みMOX燃料から回収したPuを燃焼し、使用済み軽水炉MOX燃料量を安定化させ(増大させない)、その後、段階的に高速炉を導入していくことでPu蓄積量の安定化、最終的にはウラン資源からの解放が可能であるとしている[32]。

なお、2015年7月に「グリーン成長のためのエネルギー転換法」が成立し、2025年までに原子力発電量比率を50%へ削減するとしていたが、上記エネルギー多年度計画にて、削減までの期間が10年延期され、2035年までに見直された[33]。

4. 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。

○米国

2018年3月現在、運転中の軽水炉が99基(105GWe)、建設中4基(5GWe;このうち2基は建設を中断している)、計画中14基(3.1GWe)で、2016年の全発電設備容量に占める原子力比率は9.9%、全発電量に占める原子力比率は19.7%である。運転中の軽水炉のうち86基が運転寿命延長(60年)の許可を受けている。米国は原子力をエネルギーミックスの主要技術と位置づけ、高速炉についても研究開発が進められている。SFRについては1950年代からEBR-2、フェルミ炉などの実験炉の設計、建設、運転および、金属燃料、乾式再処理等多くの経験があるが、現在、運転している高速炉はない。

2015年8月、オバマ大統領は「クリーン・パワープラン」を発表し、老朽化した石炭火力のリプレース等により発電所からのCO₂排出量を2030年までに32%(2013年度比)削減するとした。その一環として、2015年11月に設立された「原子力の技術革新を加速するゲートウェイ(GAIN)」では、民間企業が先進原子炉を開発するために必要となる技術・規制・財政に関する支援を政府が行う方針が打ち出された。民間企業における高速炉開発としては、前述した進行波炉TWRの他にも、GE日立ニュークリア・エナジー

社が開発している SFR の PRISM（金属燃料）、Gen4 エナジー社の鉛ビスマス冷却高速炉 G4M（窒化物燃料）、ゼネラル・アトミック社のガス冷却高速炉 EM2（炭化物燃料）などがある。また、2017 年 1 月に米国エネルギー省（DOE）は「先進炉開発のビジョンと戦略」[34]を発表し、既存軽水炉の寿命延長（60 年または 80 年）、新型の大型軽水炉、小型炉、先進炉（第 4 世代炉）を組み合わせ、2050 年までに原子力発電設備容量を倍増するとしている。ただし、このビジョンは前述の IAEA の原子力発電規模の将来見通しには反映されていない。

トランプ政権はパリ協定からの離脱を表明したが、まだ具体的なプランは発表しておらず、原子力開発・利用は進めていくことを表明しており、燃料サイクルの研究も小規模ながら継続されている。

○英国

2018 年 2 月現在、15 基（8.9GWe）の原子炉が運転中で、建設中のものは無く、計画案中が 11 基（15.6GWe）で、2016 年の全発電設備容量に占める原子力比率は 12%、全発電量に占める原子力比率は 21%である。国の主導により 1956 年の黒鉛減速炭酸ガス冷却炉の運転を皮切りに原子力利用を開始し、その後、改良型ガス冷却炉や SFR（1.5 万 kWe の実験炉 DFR（金属燃料）を 1962 年～1977 年運転、25 万 kWe の原型炉 PFR（MOX 燃料）を 1975 年～1994 年運転）の開発・利用を進めてきた。当時の北海ガス田等のエネルギー資源、国産原子力発電の低い経済性と原子力部門の民営化等を背景に、1987 年以降、原子力発電所の新規着工が凍結されてきた。運転中の PFR も経済性を理由に 1994 年に運転を停止した。しかし、2000 年以降になると、北海ガス田等の枯渇による減産、2001 年の「再生可能エネルギーに関する欧州指令」等に基づき、2008 年、新規原子力発電所の建設と開発の再始動を決定した。2008 年に策定された「気候変動法」では、2050 年までの温室効果ガス削減目標を達成するため、電力部門において 2020 年までに低炭素電源の割合目標を 40%とし、このうち 10%を原子力及びクリーンコール電源とすることが定められた。2013 年に原子力を含めた低炭素電源への投資促進を目的とした電力市場改革を内容とする「エネルギー法」が制定された。現在のエネルギー政策は、このエネルギー法に基づいている。

原子力の長期的戦略については、2013 年に英国政府によって発表された「英国の原子力の将来」[35]と、6 つの関連文書（長期原子力戦略[36]、原子力研究開発ロードマップ[37]等）が発表されている。この中で英国政府は、新たな原子力発電を英国が目指す将来の信頼性のある持続可能な低炭素エネルギー社会にとって非常に重要な電源として位置づけており、原子力研究開発ロードマップは、ベースライン、オープンサイクル、そしてクローズドサイクル（高速炉サイクル）の 3 つの進路から構成されている。

この中で、エネルギーセキュリティと気候変動法（2008 年）に対応するためには、現在の原子力発電設備容量を 2025 年までに 16GWe、2050 年までに 75GWe（Gen-III と Gen-

IV（小型モジュール炉（SMR）を含む）まで増大し、将来的には、高速炉（SFR）によるクローズド燃料サイクルに移行する必要があると考えている。ただし、2008年1月の原子力白書において英国で建設される新しい原子力発電所は、使用済み燃料を再処理しないことを基本として進めることが打ち出されているため、40GWe程度に原子力が増加した時点で再処理について改めて判断する考えとしている。

一方、国内外の軽水炉使用済み燃料の再処理で回収された140トンのプルトニウムの処理・利活用方法については原子力廃止措置機構（NDA）が、軽水炉、CANDU炉または高速炉での利用を選択肢の一つとして検討されている。

4. 3 我が国の高速炉開発の歴史と現状

○1F事故前までの高速炉開発

エネルギー資源の乏しい我が国では、エネルギー安全保障の観点から、1960年代から一貫して高速炉サイクル開発を国策として進めてきており、1977年に実験炉「常陽」が1994年に原型炉「もんじゅ」が臨界に達した。

「もんじゅ」は原型炉であることから、国の開発組織であった動力炉・核燃料開発事業団（動燃）が開発主体となって設計、建設、運転が進められた。しかし、当時の動燃は、若い組織であり、軽水炉の設計・建設・運転経験を持つ設計メーカーや電力の技術者が動燃に出向して開発の中核を担った。また、「もんじゅ」の総建設費5860億円に対し、電力・メーカーの民間企業から総額1382億円が拠出される[38]とともに、電力は建設協力も行った。試運転が開始されてからは、軽水炉の運転経験を有する電力職員を「もんじゅ」へ派遣して、その運転・保守等のプラント運営に協力してきた。このように、原型炉は、国主体で開発が進められつつも、電力、メーカーの技術者も協力した所謂ナショナルプロジェクトとして遂行された。

高速炉の開発に着手して約15年で実験炉の臨界を達成、その後約15年で原型炉の臨界を達成した。その間、実験炉の運転を通じて高速炉技術や燃料・材料の照射データを着実に蓄積してきた。また、高速炉サイクルを構成する再処理（但し、軽水炉燃料再処理であって高速炉燃料再処理は実験室規模）や燃料加工について施設の建設・運転及びこれらを通じて関連技術を蓄積してきた。但し、「もんじゅ」は1995年に2次冷却系配管でナトリウム漏えい事故を起こし、運転再開のための改良工事を経て、2010年5月に再起動したものの、炉内中継装置の落下トラブル等により、同年8月に再度運転が停止された。その後、1F事故の影響により、運転再開に至らず、2016年12月に政府は「もんじゅ」の廃止措置を決定した。

「もんじゅ」以降の次世代炉に向けての研究としては、1980年代に電力実証炉計画が民間を中心に実施され、当時の動燃と日本原子力研究所（原研）、電力中央研究所（電中研）も、それぞれの研究開発分野で協力して開発が進められた。1982年の原子力委員会の「原子力の研究、開発及び利用に関する長期計画（原子力長計）」において、高速

実証炉の建設・運転については、国の支援のもとに、電力が積極的な役割を果たすことが示された。すなわち、この時点で実証炉の開発主体は民間の電力に移された。そこでは原型炉から実証炉に向けての最大の課題として、経済性の向上が求められた。経済性を向上させるために、系統の簡素化（配管短縮、ループ数の削減、主要機器の大型化）を追求した炉型が検討され、その技術的実現性を得るための試験研究と解析研究が、メーカー、動燃、原研、電中研、大学等で幅広く実施された。電力実証炉はその開発目的とした建設費の目標を満たす概念を構築できたものの1999年、「もんじゅ」がナトリウム漏えい事故後数年以上再起動していなかったこと、世界のウラン価格が低水準で推移していたこと、さらには六ヶ所村の軽水炉使用済み燃料再処理工場の建設も大幅に遅延していたこと等から、高速実証炉の建設は見送られた。これに代わる新たなプロジェクトとして、核燃料サイクル開発機構（サイクル機構）において「高速増殖炉サイクルの実用化戦略調査研究（FS）」[39]が電力・メーカーの協力を得て開始された。この時点で、実証炉の開発主体は、再び国に戻された。そこでは2050年頃の高速炉サイクルの実用化像を選定することを目的に、ナトリウム、ガス（ヘリウム、炭酸ガス）、重金属（鉛、鉛ビスマス）、水（超臨界水、沸騰水、加圧水）などの多様な冷却材と多様な燃料形態（MOX燃料、金属燃料、窒化物燃料、熔融塩等）を対象にして、多様な高速炉サイクル概念について検討された。その6年半に亘る研究の結果として、「ナトリウム冷却高速炉（MOX燃料）、先進湿式法再処理、簡素化ペレット法燃料製造」の組合せが、開発目標への適合性と技術的実現性に最も優れ、また国際協力による効率的な開発を展開できる可能性があること等も踏まえ、最も有望な概念（主概念）として抽出された（図9）。次に有望な概念（副概念）として、「ナトリウム冷却高速炉（金属燃料）、金属電解法再処理、射出鑄造法燃料製造」の組合せが選定された。これは、技術的実現性に不確実性が高いものの、将来の社会環境によっては主概念よりその時点の社会に柔軟に適合する可能性があると考えられた。

2006年からは「高速増殖炉サイクル実用化研究開発（FaCT）プロジェクト」[10]が2025年の実証炉建設、2050年頃の実用化を目指して開始された。ここでは、安全性・経済性の向上に加えて、環境負荷低減に向けて、MAを積極的にリサイクルするための炉心概念・再処理技術・燃料製造技術が主要な研究開発課題として指摘され、課題解決のための設計研究や実験室規模での試験が実施されている。

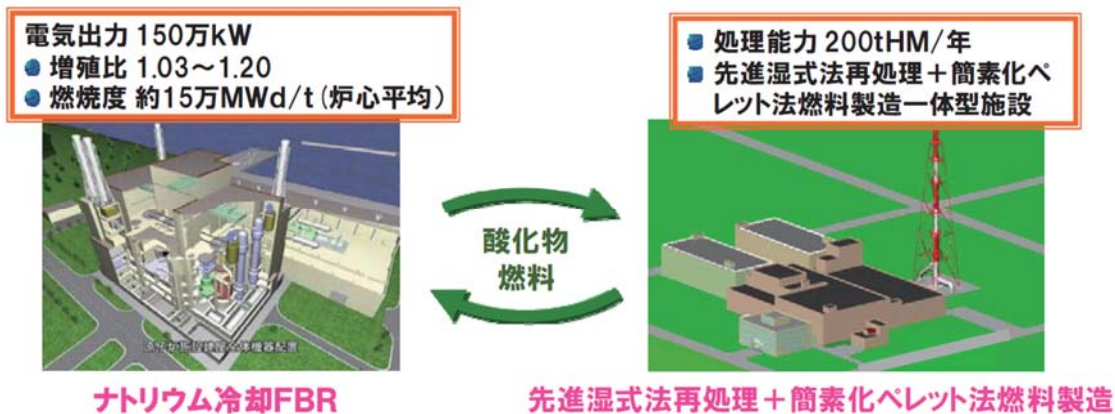


図9 高速増殖炉サイクル実用化戦略調査研究で選定された高速炉サイクル主概念[39]

○ 1F 事故後の高速炉開発の状況

1F 事故以降、国内の脱原子力の世論を受け、高速炉の実用化研究開発計画は凍結され、高速炉の研究開発は、3.2 節で述べたように安全性向上のための研究開発と世界標準となる安全設計クライテリア (SDC) の開発に注力された。

また、その後の電力自由化の進展と既設軽水炉の再稼働の遅延、電力会社の財務状況の悪化も相俟って、電力会社では開発段階にある高速炉サイクルの研究開発に対するインセンティブは低下した。また、実用化された安価で確実な電源を選定し、これを確実に導入・運用していくことが電力会社における経営の中心課題となってきている。自由競争が始まった電力各社間で、高速炉の開発費用や技術要員を分担・協力し、開発段階にある原子炉の開発に投資していくことは今後更に難しくなることは容易に理解される。

このような状況の中では特に、これまでに国内に蓄積されたナトリウム冷却 MOX 燃料高速炉に係る技術知見や経験知を散逸させることなく、これらを伝承できるよう人材育成の方策を考慮する必要がある。原子力発電所の設計、建設、運転に亘る広範な技術伝承を果たすには、これらが散逸する前に、次期炉の設計、建設、運転の経験ができるように繋いでいくことが重要と考える[40]。

○ 「もんじゅ」でやり残したこと

「もんじゅ」は原型炉本来の目的を十分に達成していない点が幾つかある[41]。

「もんじゅ」は、設計・建設・試運転の段階までの技術や知見は蓄積され、我が国の高速炉の技術基盤を構築することができた。しかしながら、定格運転を実施できず、運転特性データや運転保守に伴う経験がほとんど得られなかった。特に、「常陽」の運転では、得ることのできない蒸気発生器 (SG) を含む水-蒸気系の運転保守データを得る意義は発電用原子炉として大きかったが、殆ど得ることはできなかった。更に、実機の運

転により、発生しうる様々なトラブルを経験し、それらの原因追求、問題解決、そして運転再開していく貴重な経験を得ることができなかった。

更に、「もんじゅ」に対する新規規制基準の適用に際しては、本来、軽水炉と異なる高速炉の仕様、および商用炉と異なる試験研究炉の特徴を考慮した開発段階炉に適した基準を新たに策定すべきであったのに対し、原子力規制委員会は時間的制約の中で、商用軽水炉の多くを流用した高速炉用基準を策定した。すなわち、現状では商用軽水炉用の規制基準とほぼ同様の内容に留まっており、高速炉の安全確保の考え方に基づいた規制基準にはなっていない。また、「もんじゅ」の保守管理についても、原子力規制委員会は、商用軽水炉と同等な要求を行い、試運転段階から商用炉並みの保安規定の順守を強く求め、「もんじゅ」の保全計画の遂行を難しくした。

この点を踏まえ、次の高速炉の建設・運転に当たっては、高速炉の安全上の特徴を踏まえた新規規制基準の改訂とともに、開発段階にあるナトリウム冷却高速炉の構造や機器の特徴を踏まえた保全計画の策定が必要になる。

5. 技術戦略の視点

前章で概観した高速炉サイクル開発に関する国内外情勢を参考として、技術戦略を検討するための視点を設定し、それぞれに対して対策を検討する。まずは、各国の戦略の違いを生じさせる理由である（1）エネルギー安全保障に対する地政学的認識を挙げる。次に、長期に亘る開発継続に必要となる、（2）ステークホルダーとの合意形成と、（3）蓄積された技術レベルの維持・発展を取り上げる。さらに、海外における最近の状況から（4）建設間隔の経済性への影響が大きくなっていることが認識できる。また、開発の柔軟性確保には、（5）イノベーションおよび人材の確保が必要になる。研究開発の経済性の観点からは、（6）国際協力による効率的な開発と市場性の確保が重要である。必ずしも順調ではなかった我が国の開発の歴史からは、（7）失敗や事故の経験を活かすマネジメントの必要性を取り上げる。また、我が国の現在の課題として、（8）MOX 使用済み燃料とプルトニウム量の抑制が挙げられる。最後に、長期開発に付随する（9）不確実性に対する戦略について検討する。

5. 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・太陽光発電は、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が少なく、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[3]。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。

世界は脱炭素社会を目指すことで合意されている。我が国も温室効果ガスを排出しない基幹電源として原子力エネルギーを利用していく方針である[6]。現時点で原子力エネルギーを安定して供給可能なのはウラン燃料の1%程度を有効利用できる軽水炉と、その使用済み燃料を再処理することにより得られるPuを燃料とする軽水炉（プルサーマル）である。プルサーマル利用によって生じる使用済み燃料中のPuが高次化（軽水炉では燃焼し難い偶数核の割合が増加する）して、軽水炉では繰り返し利用できなくなる。この高次化したPuは、高速炉の炉心では燃焼可能であることから、プルサーマル利用によって生じる高次化Puを削減していくために、高速炉を少数機導入していくことは有効である。軽水炉利用からウラン燃料をほぼ100%利用できる高速炉へ移行していく段階には、国が電力業界の意向や海外の状況等を踏まえ、政策的に高速炉の導入を判断することが、長期的なエネルギー安全保障の観点から重要と考える。

5. 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していく必要がある。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。

5. 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燃料)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、次の実証炉を設計できるレベルの技術が官民に蓄積されてきた。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蓄積と発展が期待でき、人材の確保に繋がるのである。

「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。我が国に蓄積され

た技術資産を散逸させず、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。机上の設計研究と要素技術開発だけでは、高速炉の実用化に必要な機器の開発、プラント建設、運転保守等の能力は涵養されないことを認識すべきである[40]。

5. 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、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問題にされてない。これらの事実、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. 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は排除できない。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[42]。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。

5. 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の安全設計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ことは大きな意義があろう。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. 7 失敗や事故の経験を活かすマネジメント

高速炉サイクルの開発を含めどんな技術でも、新しい技術の開発には失敗を繰り返しながらの試行錯誤の過程がある。新型原子炉を開発していく場合、万一重大事故が起きた場合は、放射性物質の放散に至る可能性があることから、炉心溶融や放射性物質の放散に繋がる失敗は許容されない。このため特に慎重に開発を進めていく必要があり、燃料材料等の基礎基盤的な研究開発から原子炉の原理を確認する「実験炉」、発電システムまで含めた工学実証を目指す「原型炉」、経済的に建設・運転管理できることを確認する「実証炉」、発電炉として事業性を見込める「商用炉」と、段階を踏んだ開発が行われてきた。

高速炉サイクル技術のような新技術開発においては、開発中の失敗や事故は発生するものであり、それらリスクに対するマネジメント（リスクマネジメント）を徹底する必要がある。例えば、ナトリウム漏えい事象の場合、日本では「もんじゅ」におけるナトリウム漏えいに対するマネジメントに失敗し、結果的に長期運転停止を招いた。一方、海外、例えばロシア BN-600 では 20 回以上のナトリウム漏えいを経験しながらも、マネジメントをしっかりと行いその経験を技術開発に生かした結果、高い稼働率で運転している。フランスも同様に 20 回以上のナトリウム漏えいを原型炉フェニックスで経験し、それを教訓として実証炉スーパーフェニックスの建設運転を行っている。

我が国において、失敗や事故の経験を活かすマネジメントを実現するためには、適切でかつ丁寧な社会への情報発信や関係するステークホルダー（規制機関、立地自治体、国民等）との議論や情報共有と、PDCA（Plan, Do, Check, Action）により最新知見を踏まえた継続的改善が必要である。

具体例の一つとして、安全神話などの誤解や、絶対安全か非安全かといった二項対立による不合理な判断がなされることが無いように注意が必要である。「もんじゅ」が放射性物質の放散に無関係な 2 次系のナトリウム漏えい事故で長期間停止した要因の一つに、ナトリウム漏えいは起こり得ないとの誤解を与える説明をしたことや、事故後もそうした誤解を解く努力が不十分であったことなどが挙げられる。その結果、ナトリウムに対する過度の恐れを招き、高速炉は軽水炉より危険な炉との根拠のない誤った印象が広がった点は否めない。

「もんじゅ」は、ナトリウム漏えいや SG 伝熱管破損による Na-水反応等が例え起こったとしても、炉心損傷事故には繋がらないシステム構成になっている。これは米欧日との共同研究や我が国で実施した様々な安全研究による知見を反映したものであり、

「もんじゅ」の安全設計、安全評価で確認されている。これからは、「漏えいは起こらない」という絶対安全のような説明ではなく、どんなに努力しても漏えい事故が起る可能性はゼロで無いことを伝えた上で、その影響は炉心損傷事故には繋がらず、周辺環境へ影響を及ぼすことはないようにする対策が施されていることと、さらなる安全技術の向上努力を続けることを正しく説明すべきである。ここで、軽水炉と高速炉では、炉心損傷事故につながる要因と、事故時の影響緩和策が異なることから、それを考慮した対策や規制が合理的であることを、ねばり強く説明していくことが必要である。

5. 8 MOX 使用済み燃料とプルトニウム量の抑制

原子力発電は温室効果ガスを排出せず、電力需要に対し一定の割合を常に分担できる能力があり、ベースロード電源として期待されている。それに応えるためしばらくの期間は軽水炉を一定割合で持続利用していく必要がある。その結果、使用済み燃料が蓄積されていくため、それを再処理により削減し、再処理によって回収した Pu の一部は軽水炉で使用する計画となっている。この計画は電気事業者によって進められている。

当面は、プルサーマルにより軽水炉の使用済み燃料から回収される Pu を消費する。しかし、軽水炉では Pu が高次化 (Pu の質量数が中性子を吸収することによって大きくなること) して燃焼し難くなり複数のサイクルを回すことが出来ないことから、使用済み燃料中に高次化 Pu が蓄積していく。これを抑制するため、少数基の高速炉を導入して、軽水炉で燃え難い高次化 Pu を燃焼させると共に、高速炉のブランケット領域の燃料中で生成される燃焼し易い Pu とこの高次化した Pu を混ぜ合わせることで軽水炉でも使用可能な Pu 組成にする。これによって、軽水炉サイクルを利用出来る期間を延長できる。この方法は、プルサーマル利用で蓄積する MOX 使用済み燃料を削減していく上でも重要と考えられる。

図 10 に使用済み燃料中間貯蔵量の比較シナリオを示す[15]。ワンスルーを選択肢とした場合、使用済み燃料の貯蔵量(冷却中)は 2030 年過ぎに貯蔵限界量(約 3 万ト)を超えるため、約 1 万ト程度の追加の中間貯蔵施設が必要となる。一方、六ヶ所再処理工場や以降の燃料サイクルを選択する場合、プルサーマル長期継続で使用済みプルサーマル燃料を貯蔵し続けたとしても、中間貯蔵量は 1.5 万ト程度であるが、緩やかに漸増する。2050~2120 年にかけてプルサーマルと高速炉(少数基導入)で長期併存する場合は、2150 年時点では 1.3 万トになり、緩やかではあるが、その後は単調減少する。2090 年頃から高速炉へ本格移行する場合は、2130 年頃には使用済み軽水炉燃料及び使用済みプルサーマル燃料の再処理が終了し、使用済み高速炉燃料が 0.3 万ト程度まで減少し、平衡状態となる。

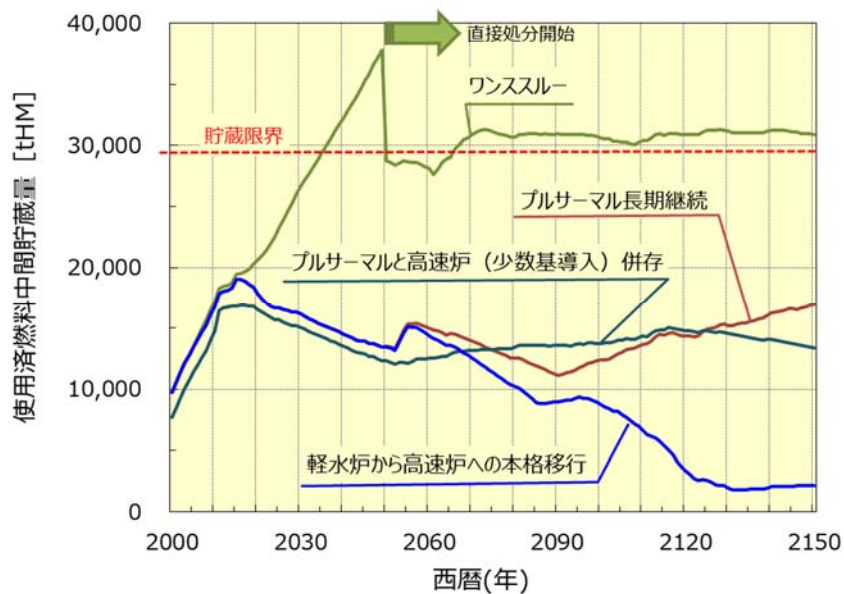


図 10 使用済み燃料中間貯蔵量の比較シナリオ[15]

5. 9 不確実性

高速炉及び関連する核燃料サイクル（高速炉サイクル）は、現時点での我が国のエネルギー安全保障を確保できる段階には至っていない。当面はプルスールを含めた軽水炉にその役割を委ねることになる。これは、高速炉サイクルの実用化のための研究開発は長期に及ぶことを意味している。このため、リソース（人的、予算的を含む）を計画的に配分し効果的に開発を進めていくことが重要である。

高速炉は、燃料増殖と MA 燃焼の両方の機能を有している。いずれの機能が優先されるかはその時代のニーズによって変化する。したがって、両者に柔軟に対応できる計画とする。また世界の技術開発の方向や市場の動向と整合できるように、炉型や燃料などに柔軟性を確保しておくことが望ましい。フランスが安全性向上と MA 燃焼とのバランスにより研究の方向を模索する中、ロシア、中国、インドはエネルギー確保を主目的とした開発を加速している。

現時点で高速炉サイクルの実用化に向けた開発を進めているフランス、ロシア、中国、インドのみならず、多様な新型炉の研究開発をしている米国や英国においても、ナトリウム冷却高速炉と酸化物燃料あるいは金属燃料を組み合わせた高速炉サイクルがもっとも実現性が高い技術体系と評価している専門家は多い[5]。我が国で蓄積されている技術は、酸化物燃料とナトリウム冷却炉の技術に厚みがあることから、ナトリウム冷却高速炉サイクルから優先的に開発するのが合理的である。

しかし、高速炉サイクルを実用化する方策については、長期的開発期間を考慮すると、現在の主流であるナトリウム冷却以外の可能性も否定できず、適切に国際的な開発動向を踏まえて、開発計画の定期的な見直しが必要となる。

世界では、ナトリウム冷却高速炉以外にも、様々な冷却材、燃料形態の高速炉概念の研究開発も行われている[20]。我が国においても、高速増殖炉サイクルの実用化戦略調査研究[36]において、様々な概念が研究されている。これらの研究開発の動向については、アンテナを高くし、酸化物燃料ナトリウム冷却炉よりも優れた概念の開発が進む可能性や、革新炉における研究開発から酸化物燃料ナトリウム冷却高速炉へ適用できる技術が開発される可能性に常に注意を払っていくことが重要である[42]。

以上より、高速炉サイクル技術の実現に向けては、50年以上に亘る長期の開発計画を具体化し、必要なリソースの確保および効果的な配分が肝要である。また、適当な期間毎に社会環境の変化、国内、国際的な開発動向等を考慮して、その取り扱いと技術開発の進め方を見直すことができるホールドポイントを設けるべきであり、それらを踏まえた上でより具体的で現状の制約を踏まえた短期的計画を重ね合わせることで有効であると考えられる。

最終的には高速炉サイクル技術を実用化（産業化）しなければならない。しかし、産業化に至る過程（プロセス）においては、不確実性の他に「死の谷」や「ダーウィンの海」と呼ばれる障壁があると言われている。これらの障壁が何であって、それを克服するための方策は何かを考え、そして産業化へのプロセスについて社会科学的側面から明らかとするとといった研究が必要である。このような研究に携わる学生や若手社会人を育成することも重要である[40]。

6. 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、現在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思考で長期計画を考えた上で、一転、現在の情勢から出発したフォアキャスト思考で、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を目指した。

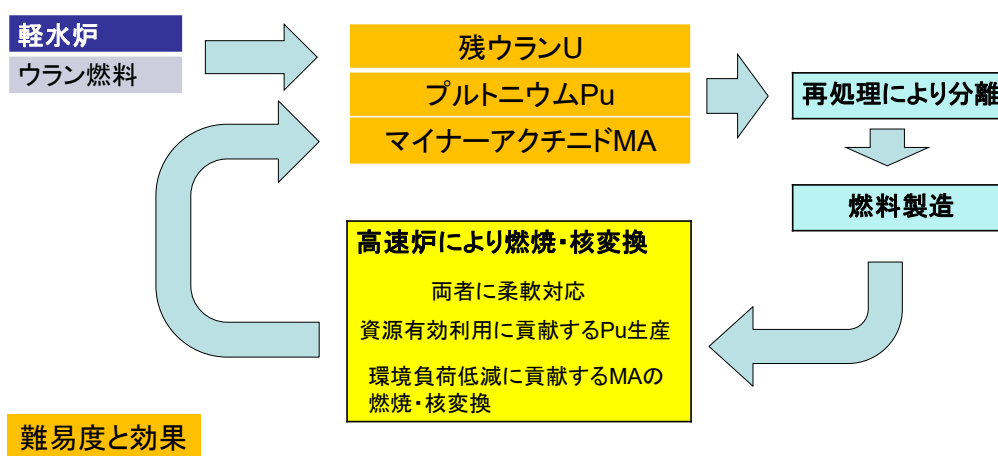
6.1 バックキャストの思考

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、使用済み燃料からU/PuとともにMAを回収し、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、軽水炉のリプレース需要が想定される。第一段階としてこの時期までに、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ることから、原子力発電は調整電源としての役割や、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重要な要件になる。さらにその前の段階（21 世紀半ば頃）には、21 世紀後半の高速炉の本格実用化を見通せる技術体系の整備が必要であり、同時に軽水炉サイクル（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み MOX 燃料を再処理し回収された高次化 Pu を高速炉で燃焼させて高次化 Pu を削減するなどの役割を担うことも期待される。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。

U/Pu の高速炉サイクルの本格実用化に続く次の段階が、環境負荷低減に向けて必要となる U/Pu/MA サイクルの実用化と考えられる。これは U/Pu サイクルに比較して、再処理および燃料製造に関わる技術的難易度が高いためである。このため 21 世紀後半から 22 世紀にかけて技術を確立するとともに産業化に備えることとする（図 11）。

さらにその先には、超長半減期の核分裂生成物（LLFP）を使用済み燃料から分離しこれを高速炉で核変換する技術も提案されている。MA リサイクルと合わせると放射性物質の寿命を 300 年からさらに短くできる。



直接処分(ワンスルー): 易 放射性物質寿命10万年程度*

21世紀半までU/Pu サイクル: 中 燃料増殖+放射性物質寿命8000年程度に短縮*

21世紀後半 U/Pu/MA サイクル: 難 燃料増殖+放射性物質寿命300年程度に短縮*

* 放射線の人体への影響が天然ウランと同等に減衰するまでの期間

図 11 難易度と効果に応じた段階的な開発

6. 2 フォアキャストの思考

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。

(1) 「常陽」「もんじゅ」を活用した技術継承

現状を考えると、次期炉の運転開始までには一定期間かかることが予想される。それまでの間の技術維持に、常陽の改造に加え、国際協力を通じた世界標準の炉型の設計検討や、その成立性と安全性と経済性の向上に必要な技術開発を進めていくことが必要である。そこでは、廃止措置が進む「もんじゅ」で得られる知見も最大限活用していくことが重要である[41]。

実験炉「常陽」は、現在、新規規制基準への適合性審査に対応しているところである。「常陽」は世界最高レベルの高速中性子束を有しており、多様なニーズに対応可能なように工夫がなされている。また、高速炉研究や人材育成のみならず、核融合や非原子力分野からの基礎基盤研究や多目的利用が期待されている。さらに、照射後試験施設が近接しており、インフラが充実していることから、高速炉の実用化に向けた研究開発、特に炉心燃料材料の開発で重要な役割を果たしていくことが求められる。このような期待に応えるためにも、「常陽」は早期に再稼動して最大限活用していくべきである。

国際的にも貴重な施設である「もんじゅ」は廃止措置に移行するが、廃止措置期間中においても燃料取り出し時の燃料取り扱い技術知見蓄積や廃止措置過程における点検経験に基づく高速炉保守管理技術知見の蓄積や、解体過程において長期間ナトリウムを内包した機器の経年特性データ取得・設計検証を行うなど重要な技術成果を取得することができる(図12)。また、既存及び今後「もんじゅ」で得られる知見・経験とシミュレーション技術を組み合わせた新たな設計最適化手法を開発することで、「もんじゅ」で期待された成果に匹敵した知見を得ることも期待できる。このため、廃止措置期間中においても国際的な視野で「もんじゅ」を最大限に活用した技術開発、知見・経験の蓄積を実施するべきである。「もんじゅ」活用が期待される項目例を下記に示す。

① プラントシステム保守管理技術

伝熱性能等の経年特性の把握、ISI・サーベランス材による健全性確認、解体時の経年データ等は、軽水炉と異なる高速炉の特徴を踏まえた保全技術の開発に有用である。

② 機器設計の検証と妥当性確認

廃止措置に伴う燃料取扱機等の取扱い実績の蓄積により、機器設計の妥当性を確認するとともに、将来炉のシステムの最適化に資することが期待できる。

供用期間中検査装置の実機条件での稼働により、機器設計の妥当性確認・性能実証を行うとともに、将来炉の装置開発・最適化に資する知見の取得が期待できる。

③ 高速炉用の規制基準

発電炉としての点検経験（不具合、改善含む）や運転経験を蓄積し、保守管理の観点からの将来炉の設計最適化、保守管理適正化への反映、将来炉の運転手順書類／保安規定整備の根拠獲得等が期待できる。

④ 「もんじゅ」を活用した新たな取組み

地震時のプラント安全性の評価構築に向けた「もんじゅ」を活用した耐力限界の把握、次期炉設計に必要となる技術開発成果の集約、運転シミュレータ、ナトリウム取扱い訓練施設等を活用した高速炉技術者の人材育成、「もんじゅ」で得られた知見・経験とシミュレーション技術を活用した新たな設計最適化手法の開発、など新たな活用方法も考えられる（図 12）。

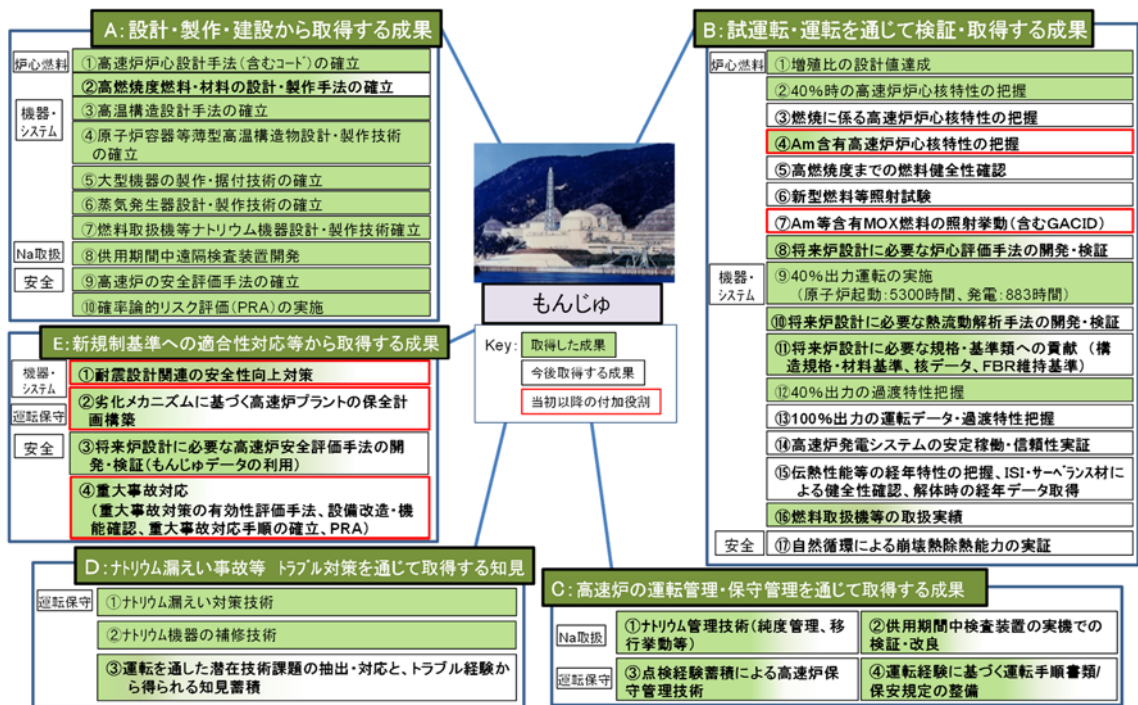


図 12 「もんじゅ」各段階での主な成果 (JAEA 資料)

(2) 安全標準炉の建設

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 SDC/SDG を実現する安全技術の開発も世界を主導してきている。早期にこの安全技術を導入した高速炉を建設、運転して、これら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重要であり、市場の優位性を確保することにも繋がることを期待できる。そこでは、実用化に求められる経済性が見通せるように、系統の簡素化や主要機器のコンパクト化等による物量削減と、製造・据

え付け技術を高度化していくことも重要である。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。

事故を起こさないための努力と共に、万が一事故が起こった場合にもその影響を緩和し、失敗や事故の経験を活かすマネジメントにより炉心損傷リスクを継続的にゼロに近づけていくとともに、仮に大規模な炉心損傷に至った場合にも周辺環境に放射性物質を放散させない対策を講じていくことが、従来の安全性と異なる特徴である。このため、「もんじゅ」の単純な延長上にある実証炉ではなく、新しい安全性と経済性を向上させた技術を開発・実証し、高速炉の実用化見通しを獲得する役割も持つ。

また「もんじゅ」で果たせなかった、運転経験に基づくトラブル経験とそれらを克服していく経験、高速炉用の運転保守技術の確立、高速炉の特徴を踏まえた新規規制基準の策定も、安全標準炉の重要な役割である。

さらに、軽水炉サイクル（プルサーマル）の課題である MOX 使用済み燃料・Pu 量の抑制といった社会ニーズに応えることも期待される。

ここで、出力規模や炉型については、柔軟に考えるべきであろう。「もんじゅ」の廃止措置が決定した現段階において、技術の伝承と維持が急務であり、安全性と経済性向上の見通しを得られる規模であることを前提に、早期着工が優先される。また、炉の設計・建設の経験は、高速炉用の規制の基礎となることから、規制側との連携も重要である。

上記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。

7. まとめ

エネルギー安定供給と温室効果ガス削減を両立させるための手段として、変動型再生可能エネルギー（VRE）と原子力発電の組み合わせが現実的との考え方が諸外国の主流となっている。高速炉サイクルは、「資源の有効利用」（ウラン資源の利用率の拡大）と「環境負荷低減」（高レベル放射性廃棄物の減容と潜在的有害度の低減）により原子力発電の持続的利用を可能とする技術である。

一方、2011 年の 1F 事故以降は、原子力エネルギー利用が国民の多数から支持されない状況に陥り、高速炉の開発計画も不透明な状況になった。そして、2016 年 12 月の原子力関係閣僚会議にて、高速増殖原型炉「もんじゅ」の廃止措置が決定されるとと

ともに、「高速炉開発の方針」が示された。それに基づき、今後 10 年程度の開発作業を特定する「戦略ロードマップ」が、2018 年 12 月に策定された。

原子力学会新型炉部会では、2017 年 8 月に「高速炉戦略ロードマップ検討会」を設置し、高速炉開発の方向性について、提言をまとめた。短期的具体的ロードマップの検討を中心とする国の検討に対して、本報告は長期的視点と戦略を重視したものである。ここで、制約や不確実性の大きい環境下では長期開発に困難が予想される。このため最初に、現状の制約からは一定の距離を置いた普遍的目標からバックキャスト思考で長期計画を考え、次に現在の制約から出発してフォアキャスト思考で長期計画と整合する短期計画を検討した。

(1) 長期的視点 (～100 年)

「高速炉サイクル」は「資源の有効利用」と「環境負荷低減」を両立させることにより原子力エネルギーの持続利用を可能とするポテンシャルを有しており、資源の乏しい我が国におけるエネルギー安全保障問題の解決に大きく貢献する意義を国民の間で共有するようにする。これに基づき、人材と技術を維持し技術開発を着実に進める環境を整える。

また、人類は軽水炉を中心に原子力エネルギーの恩恵を受けてきた。しかし、一方では劣化ウラン、超ウラン元素、核分裂生成物を排出してきた。これらの物質の多くは高い放射能を有するものであり、原子力の利用を終了する時点では少なくとも出発物質である天然ウランのレベルに戻すことが原子力利用における究極の使命である。この使命を全うできるのが高速炉サイクルであり、核分裂エネルギー利用の最終的な姿と考えられる。

研究開発は、必要性和難易度に応じて段階的に進める。最初の開発目標は、21 世紀半ば以降から想定されるウラン資源の価格高騰といった世界情勢を考慮しても、「資源有効利用」により安定で経済的な電力を供給するための「U/Pu サイクル実用化」の見通しを 21 世紀半ばまでに獲得することである。それ以降、21 世紀後半の何れかの時期に、本格的な商用高速炉を導入し、ウラン需給に左右されない高速炉サイクルを基幹電源としていくことが期待される。更に、それ以降には、原子力エネルギーを持続的に利用するために必要な「環境負荷低減」を達成するための「U/Pu/MA サイクルの実用化」を目指していくべきである。

(2) 短期的視点 (～30 年)

現在における高速炉と軽水炉の共通情勢として、1F 事故による安全対策とそれに伴う建設費の高騰、MOX 使用済み燃料と Pu 量の抑制が挙げられる。これに加え、高速炉では、1F 事故後の開発中断と「もんじゅ」廃止措置により、技術維持が困難となっている。

る。また、大規模蓄電池や二酸化炭素回収貯留などの技術選択肢の多様化が進んでいることから、それらとの競合と不確実性を考慮に入れる必要がある。

こうした情勢を克服するため、以下の理由から国際標準安全設計クライテリア (SDC) に基づく「安全標準炉 (Safety Standard Demonstration Reactor)」の建設を提案する (図 13)。

第一に、1F 事故を教訓とした安全性向上とその世界標準化に貢献するものである。次に、使用済み燃料とその再処理で回収される Pu 量を抑制することで、既設軽水炉の長期利用を可能とするものである。第三に、実際の炉を建設運転することで、実用化のために必要な、設計・製造・建設から運転や規制基準までを含む技術を維持するために必要なものである。

開発の進め方については、建設期間長期化が経済性を悪化させたなどのプロジェクトの失敗を教訓とし、不確実性が大きいなかで技術を維持発展させるための、柔軟な姿勢が必要である。Pu の増殖性能と燃焼性能、炉型・規模・基数など、様々な社会ニーズに応えられるように、実績のある技術に基づく着実性と、多様な技術に基づく柔軟性を併せ持つ必要がある。



図 13 高速炉サイクル開発の方向性と進め方

参考文献

- [1] 経済産業省、第5次エネルギー基本計画（案）（2018年7月閣議決定）
- [2] 日本の約束草案 2015.07.17 地球温暖化対策推進本部決定
- [3] 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
- [4] The Future of Nuclear Energy in a Carbon-Constrained World, An Inter-disciplinary MIT Study, 2018
- [5] The 4th GIF Symposium 2018, <http://gifsymposium2018.gen-4.org/programme.html>
- [6] 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
- [7] 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
- [8] 原子力関係閣僚会議, 「高速炉開発の方針」 (2016年12月決定)
- [9] 原子力教科書「高速炉システム設計」オーム社(2014)
- [10] JAEA, 高速増殖炉サイクル実用化研究開発 (FaCT プロジェクト) フェーズ I 報告書(2011)
- [11] 藤家洋一, 今後のエネルギー利用の長期的視点 “資源確保及び自然環境・社会環境との調和”, 原子力学会誌, Vol. 58, No. 1, pp24/26 (2016)
- [12] IAEA-RDS-1/37, “Energy, Electricity and Nuclear Power Estimates for the Period up to 2050, 2017 Edition”, Sep. 2017
- [13] OECD/NEA No. 7301, “Uranium 2016 Resources, Production and Demand” (2017)
- [14] IEA/NEA, Technology Roadmap : Nuclear Energy, 2015 edition
- [15] 森 行秀, 小野 清, 大滝 明, 新型炉部会 部会・連絡会セッション「高速炉戦略ロードマップ検討会報告」(2)長期的視点からの検討 : 高速炉開発の意義, 日本原子力学会, 秋の大会(2018)
- [16] Gen-IV International Forum, https://www.gen-4.org/gif/jcms/c_93020/safety-design-criteria
- [17] John W. Herczeg , U. S. Department of Energy Advanced Reactor Research and Development Program for Fast Reactors, (2018), http://www.meti.go.jp/committee/kenkyukai/energy/fr/senryaku_wg/pdf/008_01_00.pdf
- [18] 向井田恭子他 : 高速炉サイクルの経済性評価, 原子力学会誌, Vol. 61, No. 1 (2019)
- [19] 若林二郎ほか, 「原子力発電所の負荷追従運転」、日本原子力学会誌、28, p. 913 (1986)

- [20] Gen-IV International Forum, https://www.gen-4.org/gif/jcms/c_9260/public
- [21] World Nuclear Association, Russia's Nuclear Fuel Cycle (Updated March 2018)
- [22] ロシア連邦政府, 2010年2月3日付ロシア連邦政府政令 No. 50
- [23] V. Pershukov, "Strategic view on the Russian nuclear energy development until 2100," (2017)
- [24] Chinese reactor design evolution, 22 May 2014, Nuclear Engineering international
- [25] 中国原子力ハンドブック 2015、テピア総合研究所 (2015年1月)
- [26] J. Chen, "Reprocessing of Nuclear Spent Fuel in China," A-049, GLOBAL2017
- [27] D. Zhang, "Nuclear energy and Fast Reactor development in China," IAEA/TWG-FR, May16-20, 2016
- [28] 佐藤浩司、他、世界の原子力事情、第5回インドの原子力開発の動向、日本原子力学会誌 Vol. 56, No. 4, P. 55-60 (2014)
- [29] A. Kakodakar, Nuclear Energy in India-Retrospect and Prospect, Int. J. Nucle. Power, Vol.18, No.2-3 (2004)
- [30] A. Kakodakar, Evolving Indian Nuclear Programme-Rationale and Perspective, AEC, India (Jul.4, 2008)
- [31] N. Devictor, "French sodium-cooled fast reactor Simulation Program," 平成30年6月1日 第10回高速炉開発会議 戦略ワーキング
- [32] B. BOULLIS, "The French Nuclear Fuel Cycle: Current Status and Possible Future Options," International Conf. on the management of spent fuels from nuclear power reactors: an integrated approach to the back-end of the nuclear fuel cycle, IAEA, June 2015
- [33] 電気事業連合会、海外電力関連トピックス情報、[フランス] 減原子力目標の達成時期を2025年から2035年に先送り 2018年11月30日 及び [フランス] 政府、エネルギー多年度計画(PPE)の詳細版を発表 2019年2月28日
- [34] DOE, "Vision and Strategy for the Development of Advanced Reactors", DOE/INE-0147, January 2017
- [35] HM Government, The UK's Nuclear Future
- [36] HM Government, Long-term Nuclear Energy Strategy
- [37] UK Department of Energy and Climate Change (DECC), "Nuclear Energy Research and Development Roadmap: Future Pathways," (2013)
- [38] JAEA 「もんじゅ」の事業費(支出額)
<https://www.jaea.go.jp/04/turuga/anncer/page/kaitou/kaitou2-2.html>

- [39] JAEA, 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－
(2006)
- [40] 文部科学省原子力人材育成作業部会, 「中間取りまとめ」(2016年8月)
- [41] 特集「もんじゅ」, 原子力学会誌, Vol. 58, 12, (2016)
- [42] 原子力委員会, 技術開発・研究開発に対する考え方, 第9回高速炉戦略WG資料
(2018)

以上

あとがき

国の戦略ロードマップについて

高速炉開発に係る「戦略ロードマップ」（以下、RM）が、平成 30 年 12 月 20 日の高速炉開発会議及び翌 12 月 21 日の原子力関係閣僚会議を経て公表された。この RM は、平成 28 年 12 月に同様のプロセスを経て公表された「高速炉開発の方針」に基づいて策定されたものである。この開発の方針には、①国内資産の活用、②世界最先端の知見獲得、③コスト効率性の追求、④責任体制の確立という開発の 4 原則を関係者で共有し、これを推進・具体化するために、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、平成 30 年年末を目途に策定することを目指すとされていた。

今回公開された RM の第 0 節「検討の経緯」、同 1 節「国内外の原子力、高速炉開発の潮流」では、我が国で蓄積されてきた高速炉技術はナトリウム冷却炉（MOX 燃料）であり、世界も同じ炉型を中心に実用化に向けた開発が進んでいることが記載されており、しっかりと現実を見据えている。その上で、同 2 節「ロードマップに関する基本的考え方」では、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を示し、さらに 21 世紀半ば頃の適切なタイミングにおいて、技術熟成度、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と記している。

東日本大震災により高速炉開発が事実上凍結され、開発の目標時期が白紙状態となっていた状況を踏まえれば、次期炉運開、実用化の時期が明示されたことは、高速炉開発において一歩前進したと考えられる。

一方、第 3 節「今後の開発の作業計画」での以下の記述は、全 16 回の戦略ワーキングでは殆ど議論されておらず、違和感が拭えない。

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

また、第2節「ロードマップに対する基本的考え方」、同3節「今後の開発の作業計画」では、ナトリウム冷却炉の具体的な開発方針に触れていない。21世紀半ば頃の適切なタイミングにおいて、技術熟成度、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を運転開始するためには、多様な炉型に関するアイデアを試すステップにおいても、技術的実現性の高いナトリウム冷却炉の開発をしっかりと進めるべきである。「もんじゅ」経験者の退職が続く中で、技術を維持継承する上でも、開発継続は必要である。特に、我が国が世界で主導的役割を果たしてきた安全技術を早期に実証し、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る。

今回のロードマップのとりまとめに当たっては、短期的な計画に特化した記載になっているためかもしれないが、そのような場合にあっては、今後の高速炉開発を進めるにあたっては、高速炉開発を担ってきた研究機関、電気事業者、メーカの3者も揃って主張している、「国内に蓄積されてきた高速炉技術を着実に維持・発展させつつイノベーションを取り入れて、21世紀半ばに高速炉の実用化に繋げていくべき」との考えの反映が重要と思われる。

学会が提示する技術戦略とRMは、方向性は一致しているが、以下の具体的内容では相違点がある。

- ① エネルギー安全保障にかかわる技術を国内で確実に維持発展させるための長期戦略を国が示す必要がある。
- ② 製造や運転を含む技術維持には特段の配慮が必要であり、炉の建設が最善である。
- ③ イノベーションにはSFRの安全性や経済性の向上に関わるものも含まれる。

「高速炉開発の方針」の最後に記載された以下の文章を深く受け止め、着実に高速炉開発が推進されることを期待したい。

「高速炉開発は長期にわたるプロジェクトであり、将来を見据えた一貫性のある継続した取り組みが欠かせない。国内の全ての関係者が、本方針を踏まえ、それぞれの責任を自覚して役割を果たしつつ、相互の連携を強化することによって、着実に高速炉開発を進めていくことの重要性を改めて強調したい」

付録

1. 委員リスト

日本原子力学会 新型炉部会 「高速炉戦略ロードマップ検討会」

No.	氏名	所属	
1	笠原 直人	東京大学 大学院工学研究科	(主査)
2	堺 公明	東海大学 工学部	
3	守田 幸路	九州大学 大学院工学研究院	
4	高木 直行	東京都市大学 工学部	
5	関本 博	元 東京工業大学	
6	望月 弘保	東京工業大学科学技術創成研究院	
7	Van Rooijen, Willem	福井大学附属国際原子力工学研究所	
8	宮崎 慶次	元 大阪大学	
9	杉山 憲一郎	元 北海道大学	
10	中江 延男	元 日本原子力研究開発機構	
11	小竹 庄司	日本原子力発電株式会社	(事務局)
12	宮川 高行	日本原子力発電株式会社	
13	大本 正人	関西電力株式会社	
14	後藤 正治	東京電力ホールディングス株式会社	
15	松井 一秋	一般財団法人エネルギー総合工学研究所	
16	尾形 孝成	一般財団法人電力中央研究所	
17	太田 宏一	一般財団法人電力中央研究所	
18	藤田 琢己	完全免震原子炉支持構造(株)	
19	奥出 克洋	米国サウスウエスト研究所	
20	藪下 幸久	(株)シー・エス・エー・ジャパン	
21	尾崎 博	富士電機株式会社	
22	内藤 俣孝	株式会社ナイス	
23	糸岡 聡	日立 GE ニュークリア・エナジー株式会社	
24	浅野 和仁	株式会社東芝	
25	田口 正樹	三菱電機株式会社	
26	黒目 和也	三菱重工業株式会社	
27	伊藤 隆哉	三菱 FBR システムズ株式会社	
28	森 行秀	三菱 FBR システムズ株式会社	
29	大谷 知未	三菱 FBR システムズ株式会社	
30	市川 健太	三菱 FBR システムズ株式会社	
31	永田 敬	三菱 FBR システムズ株式会社	
32	須田 和則	日本原子力研究開発機構	
33	江沼 康弘	日本原子力研究開発機構	
34	大島 宏之	日本原子力研究開発機構	
35	高田 孝	日本原子力研究開発機構	
36	大木 繁夫	日本原子力研究開発機構	(事務局)
37	山野 秀将	日本原子力研究開発機構	(事務局)

(順不同、敬称略)

付録

2. 活動実績

	2017年度						2018年度						2019年度											
	8	9	10	11	12	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	1	2	3	4	5	6～	
検討会		▲ (9/11) 第1回	▲ (10/16) 第2回	▲ (11/20) 第3回	▲ (12/27) 第4回		▲ (2/27) 第5回			▲ (5/9) 第6回		▲▲ (7/5) 第7回 (7/11) 第8回	▲ (8/22) 第9回	▲ (9/20) 第10回	▲ (10/31) 第11回	▲ (11/15) 第12回		▲ (1/16) 第13回		▲ (3/27) 第14回				
もんじゅ活用WG									▲ (4/11) 第1回	▲ (5/18) 第2回	▲ (6/28) 第3回													
その他 (外部報告等)	▲ (8/22) 運営委員会にて検討会設置承認	▲ (9/13-15) 学会秋設置報告						▲(3/26-28) 学会全体会議にて報告プレスリリース						▲ (9/6) 学会秋企画セッション			▲ (12/1) エグゼクティブサマリーweb公開			▲ (2/27) 新型炉シンポジウム				△ 報告書と資料集web公開解説記事

検討会						
第1回：2017/9/11 ・趣旨確認 ・検討会の進め方 ・ロードマップ検討法 ・高速炉サイクル技術開発の意義	第2回：2017/10/16 ・高速炉開発の目標と導入シナリオの検討 ・検討会報告書骨子案の検討	第3回：2017/11/20 ・高速炉開発の目標と導入シナリオの検討 ・論点整理 ・高速炉開発状況 ・検討会報告書骨子案の検討	第4回：2017/12/27 ・論点整理 ・検討会報告書骨子案の検討 ・技術の俯瞰マップの検討	第5回：2018/2/27 ・検討会報告書ドラフトのレビュー ・プレスリリース文書のレビュー ・技術の俯瞰マップの検討	第6回：2018/5/9 ・検討会報告書の見直し検討 ・技術の俯瞰マップの検討 ・検討会報告書資料集の執筆分担	第7回：2018/7/5 ・検討会報告書の見直し検討
第8回：2018/7/11 ・検討会報告書のレビュー	第9回：2018/8/22 ・企画セッション資料のレビュー	第10回：2018/9/20 ・検討会の進め方 ・検討会報告書資料集のレビュー	第11回：2018/10/31 ・検討会報告書まとめのレビュー ・検討会報告書資料集のレビュー	第12回：2018/11/15 ・エグゼクティブサマリーのレビュー	第13回：2019/1/16 ・検討会報告書資料集のレビュー	第14回：2019/3/27 ・検討会報告書のレビュー ・検討会報告書資料集のレビュー

付録

3. もんじゅWG委員リスト

日本原子力学会 新型炉部会 「高速炉戦略ロードマップ検討会」
「廃止措置期間中『もんじゅ』活用検討ワーキンググループ」

No.	氏名	所属
1	笠原 直人	東京大学 大学院工学研究科
2	宮崎 慶次	元 大阪大学
3	杉山 憲一郎	元 北海道大学
4	竹田 敏一	福井大学附属国際原子力工学研究所
5	岡村 茂樹	富山県立大学工学部
6	小竹 庄司	日本原子力発電株式会社
7	伊藤 隆哉	三菱FBRシステムズ株式会社
8	竹内 則彦	日本原子力研究開発機構
9	江沼 康弘	日本原子力研究開発機構
10	山野 秀将	日本原子力研究開発機構
11	尾崎 博	富士電機株式会社
12	古賀 和浩	富士電機株式会社
13	本岡 直人	三菱重工業株式会社
14	菊池 裕彦	三菱重工業株式会社
15	小野 正博	日立GEニュークリア・エナジー株式会社
16	森泉 真	日立GEニュークリア・エナジー株式会社
17	神保 昇	東芝エネルギーシステムズ株式会社
18	久保田 健一	東芝エネルギーシステムズ株式会社

(順不同、敬称略)