

企画セッション | 部会・連絡会セッション：新型炉部会

■ 2018年9月6日(木) 13:00 ~ 14:30 | 会場 H会場 B棟 B32

[2H_PL] 高速炉戦略ロードマップ検討会報告

座長: 山口 彰(東大)

[2H_PL01] 高速炉戦略ロードマップ検討会の検討範囲

*笠原 直人¹ (1. 東大)

[2H_PL02] 長期的視点からの検討：高速炉開発の意義

*森 行秀¹ (1. MFBR)

[2H_PL03] 短期的視点からの検討：技術継承と東電福島第一事故を踏まえた安全性向上

*堺 公明¹ (1. 東海大)

[2H_PL04] 総合討論

新型炉部会セッション

高速炉戦略ロードマップ検討会報告

Report from Fast Reactor Strategic Roadmap Committee

(1) 高速炉戦略ロードマップ検討会の検討範囲

(1) Scope of Fast Reactor Strategic Roadmap Committee

*笠原 直人¹¹ 東京大学

1. はじめに

東京電力福島第一原子力発電所事故、電力自由化の進展および2016年末の「もんじゅ」廃止措置決定といった情勢の大きな変化により、高速炉開発戦略を練り直す必要性が出てきている。また、国が設置した高速炉開発会議の下、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実施されている[1]。

このような状況から、原子力学会の新型炉部会は「高速炉戦略ロードマップ検討会」を設置し、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、今後検討されるロードマップを補完する見解を示すこととした。ここでは、検討の基本方針、検討範囲及び技術戦略の視点について述べる。

2. 検討の基本方針

原子力学会新型炉部会は、公衆の安全をすべてに優先させて、原子力の平和利用に関する学術および技術の進歩を図る立場から、高速炉の研究開発に係る大学、研究機関、メーカ、電力の職員、OBが多く参加している。このため、高速炉開発に強い関心を持つ研究者、技術者、経験者が自由に討議し、多様な議論の中から本質的な部分を抽出・展開していくことが期待されている。併せて、高速炉開発の意義と開発の方向性について、それぞれの立場で高速炉開発に関与した経験を踏まえ、国民が理解し易い形で示していくことも期待できよう。

ここで、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必要であることから、提示する技術戦略は、世の中がそれをどのように理解するかを考え、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。

このため、検討の範囲を技術から人や社会まで広げ、以下の（１）から（６）の範囲の検討に基づき、技術戦略に関する提言を行うこととした。

- （１）高速炉サイクル開発の意義
- （２）高速炉サイクル開発の特徴
- （３）我が国の高速炉開発の歴史と現状
- （４）海外の高速炉開発の状況
- （５）長期開発における不確実性とその対応策
- （６）失敗や事故の経験を活かすマネジメント

3. 検討の範囲

上記方針に基づく検討範囲の中で、特徴的な（２）（５）（６）について以下に説明する。

3-1. 高速炉サイクル開発の特徴

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、万一大きな事故が起きた場合は、放射性物質の放散に至

* Naoto Kasahara

¹The University of Tokyo

る可能性があることから、炉心熔融などの大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。このため、新型炉の実用化には、技術者の現役寿命を超える数十年以上の研究開発期間と、それぞれの段階の原子炉の設計及び建設費が必要となり、開発の段階が実用化に接近していくとともに、その開発総額はかなり大規模になる[2]。

特に高速炉サイクルの実用化には、高速炉用の燃料製造や再処理技術も必要になる。軽水炉と共存する高速炉の導入初期は、軽水炉の使用済燃料を再処理して、燃料製造をする施設の建設が必要となるほか、軽水炉でのプルサーマル利用との共用等、効率的な開発が重要である。

高速炉として最も多くの国で開発が進められてきたナトリウム冷却高速炉は、原型炉級の開発から実証炉あるいは商用炉の段階に到達しており、その開発に必要な資金規模は大きくなっている。その一方で、未だ開発段階にあるため、安全審査から建設、安定運転に対するリスクが軽水炉と比較して大きく、その投資を回収できる事業見通しが立てられる状況ではない。このため、高速炉の実用化を目指す、フランス、ロシア、中国、インドは、国策として国が主導的に、建設までに必要となる研究開発に投資し、実用化に向けた着実な研究開発が進められている。

3-2. 長期開発における不確実性とその対応策

高速炉サイクル技術の開発の最大の特徴は、技術の利用時期も含め、開発スパンが非常に長期に及ぶところである。このため、リソース（人的、予算的を含む）を如何に計画的に配分し効果的に開発を進めていくかが課題となる。

一般に、長期間にわたる開発は、それが実用化する時には、当初のニーズが陳腐化して役に立たなくなるリスク等が指摘されている。しかしながら高速炉サイクル技術は我が国のエネルギー安全を保障する最も有力な技術であるとの認識は、原子力技術開発の黎明期から現在に至る60年以上何ら変わっていない。我が国は世界で最も資源に恵まれない国の一つであり、かつ現在優れた工業技術を有している。また、リサイクルによって資源を無駄にせずに環境に負荷をかけない方針は、国柄にあっている。以上から、我が国の目的達成が、そのまま世界貢献につながる、意義深いテーマである。こうした意義が陳腐化することはないと考えられるが、人材を確保し技術を維持していくには、それを国民に理解してもらう継続努力が必要である。

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。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、適切に国際的開発動向を踏まえた計画の定期的な見直しが必要となる。

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重要となる。また、適当な期間毎に社会情勢の変化、国内外の開発動向等を考慮して、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ことが必要であると考えられる。

3-3. 失敗や事故の経験を活かすマネジメント

高速炉サイクル技術のような新技術開発は、どのような努力をしても開発中の失敗やトラブル、事故は避けられず、それらのリスクに対するマネジメント（リスクマネジメント）を徹底したしぶとさが必要である。例えば、ナトリウム漏えい事故の場合、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、海外ではロシア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、それらの教訓も含めて実証炉スーパー・フェニックスの建設運転を行った。

我が国において、失敗やトラブル、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（規制機関等）との議論や情報共有と、PDCA（Plan, Do, Check, Action）による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」が放射線に無関係な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と、事故後もそうした誤解を解く努力をしてこなかったことが挙げられる。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印象が広がった感は否めない。

「もんじゅ」は、ナトリウム漏えいやSG伝熱管破損での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。これからは、絶対安全のような安易な説明ではなく、どんなに努力してもトラブルや軽微な事故が起る可能性はゼロで無いことを伝えた上で、仮にナトリウム漏えいが起ったような場合でも、その影響が炉心燃料の健全性に影響を及ぼさない設計対策、漏えいを早期に検出し停止させる対策、漏洩の影響が建屋施設や設備の健全性に影響を与えない対策などを、多重に講じることで重大事故には至らないことを丁寧に説明していくべきである。また、このような設備の適切な保全により、信頼性や安全性を向上させる努力を継続していくことも説明すべきである。さらに、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。

「もんじゅ」の廃止措置はナトリウムの安全性や取扱いの技術に問題があったからではない。技術的には実用化一歩手前まで確立されていることを、高速炉開発の意義と共に、国民に説明し続けることも大切である。

4. 技術戦略の視点

上記の検討結果から、従来の実験炉から実証炉へステップアップする単調な計画では、3-2で述べた不確実性の大きい環境下での長期開発は困難が予想される。このため、今後50～100年程度の期間が必要であると見込まれる開発を継続するための意義を確認し、現在の情勢や目先の利益からは一定の距離を置いた普遍的な目標を定め、長期的視点でもって、本来あるべき姿からバックキャストで考えることとする。次に、長期的視点との整合性を前提とした上、短期的視点で、現在の情勢から出発してフォアキャストで検討することとする。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方針とする。

4.1 長期的視点(30年～100年)：本来あるべき姿からのバックキャストの検討

長期間一貫性のある研究開発を継続するため、高速炉を開発する意義を国民に分かり易く説明できる技術戦略とする。そのためには、エネルギー安全保障、世界情勢、世界貢献といった大きな視野に基づくものとする。特に我が国にとって死活的に重要なエネルギー安全保障については、予測の不確実性に対して安全側の立場から検討する。

また、局所的因子の影響を受けた見直しにより変動幅が大きくなる短期的な技術戦略と、柔軟に整合できるように、普遍的かつ間口の広い技術戦略とする。

理論的可能性のある理想的な技術（高速中性子を利用した閉じた燃料サイクル）の追求を最終目標として、そこに至るまでのステップを示す。特に、我が国において原子力エネルギーを持続的に利用していくために以下項目の考慮が重要である。

- ① 軽水炉利用の拡大に伴い顕在化するウラン資源の価格高騰リスクへの備え、
- ② 軽水炉サイクルでは廃棄物側に移行する超長半減期核種の減容と有害度低減

4.2 短期的視点(20年～30年)：現在の情勢からのフォアキャストの検討

東京電力福島第一原子力発電所事故後の現在の情勢と、「もんじゅ」廃止措置の教訓を踏まえ、長期の開

発目標である閉じた核燃料サイクルを実現していくための最初の一步の技術戦略を提示する。

- ③ 軽水炉によるプルサーマルで蓄積していくMOX使用済み燃料(高次化プルトニウムを含む)の低減
- ④ 「常陽」、「もんじゅ」、その後の実用化研究開発やASTRID協力等で蓄積された我が国の高速炉技術の維持発展と有効活用
- ⑤ 我が国が主導的に開発してきた高速炉の安全性向上技術（受動安全性技術や炉心損傷時の影響緩和対策）を実証し、世界の高速炉安全性のデファクトスタンダード化

国内軽水炉やプルサーマル利用が進んでいる仏は、③②①の優先順位で開発を進めている。一方、軽水炉の導入拡大と並行して高速炉開発を加速している露印中は、①を中心に開発を進めている。我が国の開発方針を決めるにあたっては、我が国の原子力利用の状況に照らして、向こう20年から30年でどのようなことに取り組むべきかを検討していく必要がある。

参考文献

- [1] 原子力関係閣僚会議、「高速炉開発の方針」（2016年12月決定）
- [2] 原子力教科書「高速炉システム設計」オーム社(2014)

新型炉部会セッション

高速炉戦略ロードマップ検討会報告

Report from Fast Reactor Strategic Roadmap Committee

(2) 長期的視点からの検討：高速炉開発の意義

(2) Long-Term Perspective: Significance of Fast Reactor Development

* 森 行秀¹, 小野 清², 大滝 明²¹MFBR, ²原子力機構

1. はじめに

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CO₂を排出しないベースロード電源として原子力エネルギーを利用していく方針が閣議決定された第5次エネルギー基本計画に謳われている。原子力の利用に際して、高速炉サイクルは、安全性の確保を大前提に、ウラン資源の利用の大幅な拡大によって長期に亘りエネルギーを安定供給し、放射性廃棄物の減容と潜在的有害度の低減を達成できる技術であることから、その開発意義は今も変わることはないが、最終目標に至るには長期の開発が必要であり、その間には国際環境の変化、政策の変化など種々の不確実性が存在する。このため、今後50～100年程度の期間におけるエネルギー安全保障、世界情勢、世界貢献といった大きな視野に基づき、2100年がどのような状況なのかを、原子力発電量、ウラン資源量等から予測設定し、そこに至る道筋をケーススタディした。

2. 世界の原子力情勢の見通し

2015年12月に196か国が参加した気象変動に関するパリ協定では、地球の平均気温上昇を2℃以内に収める目標が合意され、各国政府は約束草案を提出して対策を取ることとなった。2017年にIAEAがまとめた2050年までの世界のエネルギー・電力・原子力発電予測[1]によると、30ヵ国で448基の原子力発電所が稼働、15ヵ国に61基が建設中であり、2016年末の原子力発電量は391GWeに達し、これまでに報告された最高レベルにある。多くの加盟国は、エネルギー供給の安全保障の向上と気候変動の緩和において原子力が低炭素技術として引き続き主導的な役割を持つと認識している。

2-1. 原子力成長見通し

世界の原子力成長の見通しは、国際原子力機関（IAEA）を始め国際エネルギー機関（IEA）が毎年取り纏め報告されている。IAEAは、将来の原子力成長の見通しを高位/低位で予測[1]しており、原子力発電設備容量に関する低位予測として、2016年の391GWeから2030年には345GWe、2050年には382GWeに回復すると予測する一方、高位予測では、現在の経済需要及び電力需要の伸び率が引き続き継続し、特に極東で高い成長が続くと想定し、2030年に554GWe、2040年には717GWe、2050年には874GWeに達するとしている。IAEA/NEAのUranium2016[2]では、2015年に382(低)～392(高)GWe、2030年には418(低)～612(高)GWeと報告されている。また、OECD/IEAの原子力成長見通し[3]では、IEA2℃シナリオ（IEA-ETP2015-2DS）において全発電量に占める原子力の割合が11%（2012年）から17%（2050年）へ増大するとともに、原子力発電設備容量を2014年の396GWeから2050年に930GWeまで増大する予測を提示している。特に中国、インドにおける原子力利用の拡大は顕著であり、近年の当該国情報[4],[5]によると、2050年時点で中国は現在計画240GWeをはるかに超える400GWe超へ拡大との報告があるほか、インドでは275GWeを目指す目標が表明されている。これらの情報を基に、長期的視点として2100年断面の世界の原子力発電設備容量を外挿すると、低位予測として420～630GWe、高位予測として1,500～1,600GWeに達することを想定する必要がある。

* *Yukihide Mori¹, Kiyoshi Ono² and Akira Ohtaki²¹Mitsubishi FBR Systems, Inc., ²Japan Atomic Energy Agency

2-2. 天然ウラン資源の見通し

天然ウラン資源は、金属資源として濃集したもの（鉱床）でなければ回収には多大なコストとエネルギーを要するため、実用に供することは難しい。Uranium 2016によると、コスト区分USD260/kgU未満のウラン資源量が記載されている。そこでは既知資源として764万tU、これは、鉱床の規模・品位・形状が明らかな確認資源439万tUと、鉱床の規模・特性に関するデータが不十分な推定資源326万tUの合計として示されている。これに加え、未発見の資源として、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予測資源と、特定の地質鉱床地帯の中に期待される期待資源を合計した742万tUも推定されており、既知資源と未発見資源を合わせた在来型ウラン資源の総計は1506万tUとされている。一方、同報告では、前述の原子力発電設備容量の予測とともにウラン需要量予測も併記されている。パリ協定合意前の2014年における世界の原子力発電設備容量（377GWe）が必要とする年間の天然ウラン使用量（約5.6万tU/年）で使い続けた場合、既知資源764万tUは135年間賄える量となるが、確認資源量439万tUで評価すると約1/2の78年が消費限界年数となる。同機関の過去の報告（Uranium2005以降）を資源コスト区分ごとにみると、USD40/kgU未満やUSD80/kgU未満のウラン資源は、確認資源、続いて推定資源と確実に資源量が減少し、2009年以降、USD80/kgU以上USD260/kgU未満の資源量が平衡状態にあることがわかる。これらのウラン資源量と左記に外挿した2100年の原子力発電容量（低位予測：420GWe、高位予測：1600GWe）に対応する年間消費量（低位予測：7.2万tU、高位予測：22.3万tU）から2100年までの残存資源量を評価すると、2014年に764万tUとされる既知資源は、低位予測で176万tUまで減少すると評価され、高位予測では2070年過ぎに残存量がゼロ（枯渇）になる。同様に確認資源439万tUで評価すると、それぞれ、低位予測で2080年、高位予測で2055年には残存資源量がなくなることになる。パリ協定後、脱炭素化指向によりロシア、中国、インドを始めとして、原子力発電の導入を加速する動きを踏まえると、決して考えられないことではないことがわかる。現実的には、低位予測と高位予測の間で推移することが考えられるが、いずれも、確認資源が消費限界に到達する前には、資源流出抑制が働き、流通量の規制やこれを引き金とする価格の高騰が十分懸念されるため、21世紀半ばまでにはウラン資源の確実な確保に加え、ウラン資源の輸入に頼らない準国産エネルギーシステムの構築、即ち、高速炉を実用化できる技術基盤を整備しておくことが必要である。

3. 国内原子力の見通し

2018年6月現在、新規制基準への適合性審査にかけられた原子力発電所は26基であり、2015年7月に策定された「長期エネルギー需給見通し」[6]における2030年断面の原子力比率（20～22%）確保に必要な原子力発電設備容量は、設備利用率を75%（既設軽水炉発電所のこれまでの平均）とした場合、32～36GWeとなるが、既に20年の延長申請が認可された発電所を含め全ての発電所を再稼働しても40年運転制限の下では需給見通しは達成できず、既設軽水炉を全て再稼働し、なおかつ60年運転とすることでようやくクリアできる。しかし、2030年のエネルギー需給を満足したとしても、2030年代半ばまでには60年を過ぎた発電所の廃止措置が始まり、急速に発電量は減少していく。原子力の発電設備容量を維持するには、2040年頃には従来から計画されていた新規発電所を投入していくことで、2050年頃までの発電量需給見通し維持は何とか達成が可能である。2050年断面における原子力発電比率が維持できたとして、その後も発電比率を維持するには、2050年以降導入すべき次世代の発電所をどのような炉型とするかをそれ以前には決定しなければならない。そこで、21～22世紀に向けた日本の原子力政策におけるあらゆる方面からの選択肢を検討し、今後の世界の原子力環境の中で、我が国が選択すべき方向性を評価した。

3-1. 国内原子力政策の選択肢の組合せ（導入シナリオ）の特徴

我が国の核燃料サイクル政策は、第5次エネルギー基本計画にも示されるように、高レベル放射性廃棄物の減容化・潜在的有害度低減や資源の有効利用等に資することを基本方針として、再処理やプルサーマル等の推進を指向している。そこで、原子力発電の長期継続に至る過程を分解し、①再稼働する原子力発電所をいつまで継続するか（順次停止・発電の継続）、②そこで発生する使用済燃料はどう処置するか（直接処分・再処理）、③使用済燃料から分離回収したPuをどう処置するか（現計画のプルサーマル計画まで使用・プルサーマルの長期継続）、④その使用済燃料（プルサーマル）はどう処置するか（直接処分・再処理）、

⑤使用済プルサーマル燃料から分離回収したPuはどう処置するか（プルサーマルでマルチリサイクル・高速炉で燃焼）、⑥その使用済燃料はどう処置するか（第二再処理以降で適宜再処理・さらに将来再処理）の問いに沿い、表1に示す長期に亘る選択枝の組合せ（シナリオ）について諸量を評価した。評価に際しては、以下の指標を設けシナリオの比較を実施した。

指標①・・・使用済燃料の中間貯蔵量は、現在計画する中間貯蔵対策量(約3万tHM)を超えないこと。

指標②-1・利用目的のないPu(余剰Pu)を保持しないため、再処理で回収したPuの貯蔵量はできるだけ少なくする。

指標②-2・核燃料サイクル系内の炉外Puインベントリが過剰に増加しないこと。

指標③・・・天然ウラン使用量が現在の購入契約量を超過する時期の明確化

指標④-1・放射性廃棄物発生量の減容効果として、処分場面積が増加しないこと。

指標④-2・処分後の放射能の潜在的有害度の低減

表1 原子力政策で考えられる選択枝の組合せ（シナリオ）一覧

シナリオ		軽水炉				高速炉(FR)	
		発電(UOX)	使用済UOX燃料	発電(MOX)	使用済MOX燃料	発電(MOX)	使用済FR燃料
原子力 早期停止	A1	2030年までに 全プラント停止	中間貯蔵後 ⇒直接処分	既保有Pu分の み発電	発生分は 直接処分	—	—
原子力 順次停止	B1	再稼働し所定の 年数稼働後、停止 新增設なし	中間貯蔵後 ⇒直接処分	既保有Pu分の み発電	中間貯蔵後 ⇒直接処分	—	—
	B2		RRPで再処理 以降は直接処分	現計画のみ (大間NPPまで)		—	—
2030年発電 割合を維持 高速炉導入 なし	C1	発電量維持のためUOX 新增設導入	中間貯蔵後 ⇒直接処分	既保有Pu分の み発電		—	—
	D1		RRPで再処理 以降は直接処分	現計画のみ (大間NPPまで)		—	—
	E1		Puバランス範囲内 で継続発電 (全発電量の1/3)	第2再処理～	—	—	
	E2				—	—	
2030年発電 割合を維持 高速炉導入 あり	F1	高速炉移行完了 までは新增設	全量再処理 六ヶ所再処理 第2再処理 第3再処理	現計画のみ (大間NPPまで)	第3再処理～	2050年頃導入 (最大導入量:フルサーマル規模)	第2再処理～
	F2					第3再処理～	
	G1				第2再処理～	2050年頃導入 2100年以降、全 発電量規模まで 移行	第2再処理～
	G2				第3再処理～		第3再処理～
	G3				第3再処理～ 再処理/MA分離		向上 MA2wt%含有

3-2. シナリオ諸量の比較

(1) 使用済燃料の中間貯蔵管理量の逼迫

直接処分を選択した場合、使用済燃料の中間貯蔵量は、2030年過ぎに貯蔵限界量(約3万tHM)を超えるため、約1万tHM程度の追加の貯蔵施設が必要となる。一方、全量再処理を選択した場合には、使用済燃料の中間貯蔵量は1.5万tHM程度に留まる。2050年～2120年にかけて全発電量の1/3程度(約12GWe)まで高速炉を導入した場合、2150年時点の中間貯蔵量は1万tHM以下に留まる。さらに2090年頃から高速炉に本格移行するシナリオでは、貯蔵量は0.3万tHM程度までに減少する。

(2) プルトニウム管理

再処理によって回収されるPuの貯蔵量は、多くのシナリオにおいて最大50tPu以下(平均的には30tPu以下)に抑制することが可能である。また、使用済燃料、ガラス固化体、貯蔵中の製品Puなどの炉外のPuインベントリに関して、直接処分を選択した場合、使用済燃料の形態で単調増加し2150年には約1,000tPuを超える。一方、高速炉の本格導入を行い完全移行する選択枝では、高速炉の本格導入開始時期(2090年

頃)から炉外Puインベントリは減少し、完全移行到達の2120年以降、使用済燃料集合体(冷却中・再処理待機)の形態で約300tPu程度になる。

(3) エネルギー安全保障

ウラン燃料を利用する軽水炉体系を長期に継続する場合、天然ウランの使用量は単調増加し、2070年には我が国のウラン購入契約量35万tUを超え、2150年には80万tUに達する。また、プルサーマルの長期継続や高速炉との併存によってウラン資源の使用量を抑制する場合、使用量は約8%～18.5%削減されるが、2150年時点で68万tUに達する。一方、2090年頃から高速炉の本格導入・完全移行を行うと、完全移行が完了する2120年時点でウランの使用量は50万tUとなり、その後の増加は抑制されるが、約10万tUの追加契約が必要となる。このウランの使用量は、高速炉の導入量に比例するため、将来的に現契約量に留めるには、高速炉の実用化を2050年頃より始める必要があることを示唆している。

(4) 放射性廃棄物の減容・潜在的有害度の低減

直接処分を選択した場合、安定処分に必要な廃棄体の離間距離がガラス固化体の離間距離に比べて、より距離を取る必要があることから、より多くの処分場面積が必要となる。ワンスルーで軽水炉を継続使用した場合、処分場面積は約32km²(山手線内側の面積の約1/2)が必要となるが、再処理を行いガラス固化体として処分すると高速炉の導入如何に関わらず処分場の面積は約7km²(羽田空港の約1/2)となる。さらに高速炉サイクルとしてMAを廃棄物から分離することにより、ガラス固化体の処分面積は約5km²に縮小が可能となる。直接処分体の放射能の潜在的有害度は、埋設後から天然ウランレベルに低下するまでに、約19万年を必要とする。一方、現計画のプルサーマルと高速炉の併存を行い、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1～2万年を要する。高速炉の本格導入・移行を行い、さらに再処理時の高レベル廃液からMAを99%の収率で分離回収し（ただし、超長寿命核分裂生成物：LLFPの分離は除く）高速炉に一定量装荷して燃焼させると、放射能の潜在的有害度は、約0.2万年まで短縮が可能となる。

4. 結論

2015年12月の気象変動に関するパリ協定合意を受け、世界の原子力発電の規模は増加傾向に向かい、2050年時点の予測は、400GWeから930GWeへと拡大する傾向にあり、これに伴って天然ウランの需要増加が予想される。現在評価されている天然ウラン資源量は既知資源量で764万tUであり、パリ協定以前の世界の年間ウラン使用量が一定と仮定した消費限界年数は約135年と評価されるが、エネルギー政策として議論する際には、原子力発電規模の拡大の不確実性も考慮した検討が必要である。この視点から見ると、天然ウラン資源は、21世紀半ば(2050～2060年)には確認資源を消費し尽くし、推定資源に頼ることとなり、流通制限により価格高騰が懸念される。エネルギー自給率の低い日本として、このような状況に対応していくには、高速炉建設に必要となるリードタイムも考慮し、21世紀半ばには、ウラン資源への依存度を下げることが出来る高速炉技術の実用化見通しを獲得しておくべきである。

種々のシナリオにおける諸量評価の結果においても、高速炉の導入は、天然ウランの需要を抑え、我が国をウラン資源の流通規制や価格高騰のリスクから回避できる方策であるとともに、結果として我が国のエネルギーセキュリティ確保において有効であることを示した。さらには、ガラス固化体の発生量、処分場面積や潜在的有害度の低減効果も期待できる可能性を提示した。

これらの結果より、長期的視点からみた高速炉開発は、21世紀半ばまでに使用済MOX燃料を高速炉燃料として利用（U/Puの資源有効利用）することを可能にし、ウラン価格高騰の不確実性に備えるべきである。その次には、高速炉サイクルとしてMAのリサイクルを目指し、放射性廃棄物発生量を減容と潜在的有害度の低減に向けて段階的なシステムの技術拡張を図るべきである。

参考文献

- [1] IAEA-RDS-1/37, “Energy, Electricity and Nuclear Power Estimates for the Period up to 2050, 2017 Edition”, Sep. 2017
- [2] IAEA/NEA No.7301, “Uranium 2016 Resources, Production and Demand.”,2017
- [3] IEA/NEA, “Technology Roadmap Nuclear Energy 2015 edition”, 2015
- [4] 第4回戦略ワーキンググループ資料2, ”The Progress of the GEN-IV reactor in China”, 2017.9
- [5] 第5回戦略ワーキンググループ資料2, 「インドの高速炉サイクル開発戦略」,2017.10
- [6] 経済産業省, 「長期エネルギー需給見通し」, 平成27年7月

新型炉部会セッション

高速炉戦略ロードマップ検討会報告

Report from Fast Reactor Strategic Roadmap Committee

(3) 短期的視点からの検討：技術継承と東電福島第一事故を踏まえた安全性向上

(3) Short-Term Perspective: Technology Succession and Safety Improvement Based on TEPCO Fukushima Dai-ichi Accident

*堺 公明¹¹ 東海大学**1. はじめに**

我が国は、資源の有効利用、高レベル放射性廃棄物の減容化・有害度低減等の観点から、使用済燃料を再処理し、回収されるプルトニウム等を有効利用する核燃料サイクルの推進を基本的方針としている。その方針の下、「第5次エネルギー基本計画」（2018年7月閣議決定）[1]では、『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、高速炉等の研究開発に取り組む」とされており、我が国は今後も技術開発を推進していくこととされている。新型炉部会は、長期的視点から検討した結果、「資源の有効利用」と「環境負荷低減」を両立できる高速炉を、必要性が高まる可能性のある21世紀半ばには高速炉を実用化できる技術基盤を整備すべきと考えている。一方、東京電力福島第一原子力発電所事故、電力自由化の進展および2016年末の「もんじゅ」廃止措置決定といった情勢の大きな変化を踏まえる必要がある。このため、短期的視点からの検討として、現在の情勢を考慮して向こう20年から30年間に取り組むべき事項の観点について検討する。

2. 社会的合意形成に向けた取組み

「高速炉開発の方針」[2]において、「今後の我が国の高速炉開発は、世界最高レベルの技術基盤の維持・発展を図りつつ、高い安全性と経済性を同時に達成する高速炉を開発し、将来的な実用化を図り、もって国際標準化に向けたリーダーシップを最大限に発揮することを目標に掲げる。」こととされているが、開発のステークホルダーをはじめ、規制機関を含む政府の関係省庁、都道府県、関係市町村、国民の各層において本決定が十分に浸透し、理解を得た状態で開発を推進することが重要である。特に、高速炉開発は、向こう50年から100年程度の長期的な取組みが必要となることから、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、得られる便益及びコスト等の視点を長期間にわたって共有できるように、社会的な合意形成に取り組むとともに、その維持に努めることが重要である。

3. 安全性の向上（リスク低減）

東京電力福島第一原子力発電所事故により、我が国では安全性に対する考え方が見直され、新規規制基準では、より過酷な自然災害への対策や様々なシビアアクシデント対策等を確実に行うことが要求されるようになった。一方、第4世代炉国際フォーラム（GIF）では、高速炉開発国の政府間協力として、ナトリウム冷却高速炉（SFR）に対する国際的な安全設計要件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）の構築が進められている[3]。

そこでは、自然災害を起因とする事象を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、その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、周辺公衆の避難を不要とできるほど安全性を高めるための技術開発が重要となっている。これまでは、炉心損傷に至る事故を起こさないことに重点が置かれていたが、それだ

* Takaaki Sakai¹¹ Tokai Univ.

けではなく、今後は、炉心損傷が発生しても、敷地外への放射性物質の拡散を実質的に防ぐためのリスク低減努力を重視していく必要がある。そのためには、実用発電用原子炉（軽水炉）とは異なる高速炉の特徴を考慮したリスク低減を図る必要がある。また、こうした技術は、先行して開発された技術がデファクトスタンダード化することから、国際的な開発状況に遅延することなく、実用化を進めることが重要である。

4. 技術継承

我が国の高速炉開発は原型炉「もんじゅ」の設計・建設から30～40年経過している。このため「もんじゅ」経験者の引退により次期炉の設計にその経験を生かしていくことが困難な状況になってきており、世代間での技術伝承や人材育成は急務である。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。先行炉の経験知があるうちに、次世代を担う若手研究者・技術者と共に我が国の高速炉技術を維持・発展させるべきである。このためには、今後数十年かけて、安全性を向上させたプラント設計と技術開発、そして機器・構造物の製造・建設、運転という一連の経験を積む必要がある。

人材育成の観点からは、原子力エネルギーの役割、その安全な利用のための種々の対策等に関する丁寧な説明に継続的に取り組むとともに、原子力について正しく理解し、社会に対して伝えていくことのできる人材の育成が重要である[4]。特に、高速炉に関する正確な知識と情報に基づく教育がモチベーションを有した人材の育成につながることから、大学における原子力エネルギー利用に関する幅広い教育を強化するとともに、研究開発機関、規制機関等と大学間の高速炉サイクル技術に関する具体的な研究連携を推進し、研究開発人材に関するシームレスな育成を図ることが重要である。

5. 不確実性への備え

エネルギー安全保障と環境負荷低減のいずれがどの程度要求されるか不確実性が高いことから、両者に柔軟に対応できる計画とすることが重要である。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。

現状の世界の高速炉開発に関する趨勢は、ナトリウム冷却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である。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していくのが合理的である。

一方、国際的には、萌芽的なものを含めて、様々な冷却材、燃料形態の革新的な高速炉概念の研究開発も行われている。これらの研究開発の動向については、常にアンテナを高くし、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必要がある。我が国はナトリウム冷却高速炉等の基幹技術の実用化に向けた技術開発とともに、革新炉技術の多様性確保の両者を達成できる研究開発環境を整備し、自由な発想ができる大学等が中心となって、幅広く多様な概念検討や基礎研究に取り組み、革新技術の創出と人材の育成を進めていくことが期待される。

6. 国内資産の活用

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。また、地震時のプラント安全性の評価構築に向けた「もんじゅ」の主要機器や構造物を活用した耐力限界の把握、次期炉設計に必要な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にも活用できる。さらに、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により、「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。

実験炉「常陽」は、現在、新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、研究の発展性に期待できる。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。

7. 国際協力

フランスとのASTRIDの共同開発や、ロシアの運転経験の習得など、海外と積極的に知識共有を図るべきであるが、国際協力にはギブアンドテークが要求される現実を考えると、国内技術の維持・向上が前提であることを忘れてはならない。また、ASTRID計画の規模縮小など資本主義国におけるプロジェクトはその時代の経済に大きく左右されることから、過度な海外依存は安定性を損なう可能性もある。

したがって、国内での開発と技術維持が基本であり、国際協力はそれを補うものであり、有効に活用しつつも、肩代わりするものではないと認識すべきである。

8. 結論

高速炉開発は、数十年オーダーの長期的な取組みが必要となることから、社会的合意形成に向けた取組みが必要である。また、東京電力福島第一原子力発電所事故を踏まえて安全性を高める技術開発を推進していくとともに、先行炉の経験知があるうちに、次世代を担う若手研究者・技術者と共に我が国の高速炉技術を維持・発展させるべきである。このためには、今後数十年かけて、安全性を向上させたプラント設計と技術開発、そして機器・構造物の製造・建設、運転という一連の経験を積む必要がある。将来の不確実性への備えとして、基幹技術のみならず多様な技術開発にも取り組み、革新技术の創出を推進して、柔軟性を確保しておくことが望ましい。また、次期炉に役立つ知見を蓄積するため、「もんじゅ」、「常陽」といった国内資産を有効に活用すべきである。国際協力は有効に活用しながら、国内での開発と技術維持を基本的に推進していくべきである。

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] 原子力関係閣僚会議、「高速炉開発の方針」（2016年12月決定）
- [3] Gen-IV International Forum, https://www.gen-4.org/gif/jcms/c_93020/safety-design-criteria
- [4] 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）

企画セッション | 部会・連絡会セッション | 新型炉部会

[2H_PL] 高速炉戦略ロードマップ検討会報告

座長:山口 彰(東大)

2018年9月6日(木) 13:00 ~ 14:30 H会場 (B棟 B32)

[2H_PL04]総合討論

東京電力福島第一原子力発電所事故、電力自由化の進展および2016年末の「もんじゅ」廃止措置決定といった情勢の大きな変化により、高速炉開発戦略を練り直す必要性が出てきている。また、国が設置した高速炉開発会議の下、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実施されている。このような状況から、原子力学会の新型炉部会は「高速炉戦略ロードマップ検討会」を設置し、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、今後検討されるロードマップを補完する見解を示すこととした。