

新型炉部会セッション

今後の新型炉サイクル開発への提言（私たちの経験を踏まえて）

Proposition for the Future Development of the Advanced Fast Reactor Cycle (From Our Experience)

(2) 高速炉開発への提言

－もんじゅの経験を踏まえて－

(2) Proposition for the fast reactor development (From my experience in Monju)

*柳澤 務¹¹元 原子力機構

1. はじめに

高速原型炉もんじゅが2016年12月21日、原子力関係閣僚会議で「もんじゅの位置付けを見直し、原子炉としての運転再開はせず、今後廃止措置に移行するが今後も高速炉研究開発を継続していく」という方針が決定され、欧州、米、ロシアと異なり、高速炉発電プラントの本格的な運転経験を得るに至らなかった。今後の開発計画は、高速炉開発会議の下、戦略ワーキンググループで検討されているので、もんじゅプロジェクトでの経験からの教訓や、やり残したことを中心に整理してみて、今後の高速炉実用化への取り組みの足がかりに資すればと思う。

2. 高速炉開発とは

原子力発電は、核分裂反応でエネルギーを発生させ、水を蒸気にしてタービンで電気を起こすというより、地球（大地）から贈られたウランを繰り返し燃やしてエネルギーを利用し、廃棄物は大地へやさしく戻すシステムであると言える。そこに至るまでには色々な段階や方式がある。軽水炉から出発して高速炉へ繋いでいくのが基本であるが、例えば軽水炉段階で一区切りつけ立ち止まる考え、地球規模で軽水炉利用が定着され国際的に一段落してから次の段階に進む考え、濃縮ウランを使いながら高速炉技術を成熟させてからリサイクルする考え、高速炉を使いつつトリウム燃料まで拡大して利用する考えなど様々である。

しかしこのように考えることで、再処理、高レベル廃棄物処分などの課題も一括して俯瞰できることになり、原子力全体に対する社会との認識の共有がしやすくなる。

人類の営みが国連のSDG（持続可能な開発目標）に沿うことが求められ、当初から諸々の活動の後始末、廃棄物処分まで視野に入れた取り組みにより、経済性を備えた循環型社会を指向することになる。核燃料サイクルはこのシステムそのものであり、高速炉はそのリサイクルシステムの中核の役割をなし、1994年の原子力長計では「リサイクル炉」という表現にもなっている。軽水炉での大量の劣化ウラン、使用済燃料を資源として再利用できる。また、高度な再処理技術により核分裂生成物の有用元素の回収、長半減期核種の核転換による安定化にも展開できる。

この循環型システムは、基本的には核反応による核種転換と各核種まで注目して利用、処理する核種分離という二つの技術によって支えられていると言える。高速炉を中核とした核燃料サイクルを支える学術科学は核種毎に扱うという意味で周期律工学とでも呼べる地球や宇宙の元素との対話である。

一方、高速炉開発の歴史をひもとくと、インドは高速炉と核爆弾（平和目的）の開発を併せて研究することに、仏では高速炉のブランケット燃料からは兵器級プルトニウムが取り出せることに関心があった。インドの高速炉開発は1972年5月臨界になったパルス型高速炉（Purnima）から出発した高速炉炉心の核特性把握と共に核爆弾の初歩的開発も行ったと言われ、プルトニウムに関する連鎖反応や臨界超過の動特性解析等に活用されたようである。非核兵器国がプルトニウム利用を行うには核不拡散や核セキュリティーに対し国際的にも意識して、より果敢かつ誠実に行動することが必要である。

原子力やプルトニウムを兵器として使わない、より進化した確固たる社会が望まれる。戦後やっと生まれた国連、NPT、軍縮諸条約、IAEAによる査察制度など社会が原子力を取り込むために社会制度も変化してい

る。原子力の平和利用の分野でも開発と国際管理は車の両輪である。プルトニウム利用は広まる方向であり中国による原子力後発国への働きかけなどを考えると、各国のプルトニウム利用を国際管理の下、行われるべきであり、日本の主体的活動が求められる。

低炭素エネルギーシステムとして、費用対効果からみても、原子力発電の果たす役割は大きい。ベースロード電源として軽水炉に続く第4世代システムとして大型高速炉が位置付けられる。また、熱供給、水素製造など原子力の多様なエネルギー源としても SMR などの技術開発により低炭素エネルギーシステムに貢献できる。

3. もんじゅプロジェクトの教訓

新しい技術の実用化を目指しての開発において、これまで馴染みのない技術を使いこなしていく場合、開発プロジェクト及びそれに携わる関係者に、新しい技術自体及びそれに対する向き合う姿勢、開発体制、社会への向き合い方などに関し、特別必要とされる慎重さ、謙虚さが十分でなかった。

新しい技術開発でつまづきがあれば、社会が心配することへの備え、構えができていなかった。開発当事者は新しい技術開発に挑戦する意気込みが強すぎることに引きずられ、社会への向き合い方への配慮が足りなかった。多様な人材と相当の陣容を整えておく必要があった。もんじゅは、試験、運転を通じて事故、トラブル、不具合等を経験し、原因究明、調査研究、対策、品質保証活動の改善、社会への説明責任を通じて、それらを克服しつつ、技術や人材、規制が育っていく道場とでも位置付けられるが、これらに比べられるような備え、構えが脆弱であった。

3-1. 政策面

(i) 実用化見通し

当初は高速炉実用化の見通しがもんじゅ運転10年後であった。この背景には米国で軍事用潜水艦の動力炉として、冷戦の厳しい情報管理の下で開発された軽水炉の成功の影響があったのではないかと考えられる。

新型炉開発でも、多少の手戻りは覚悟しても、計画通りに進めればうまく行くだろうという意識が強かった。開発から社会に受け容れられるまでの実用化の道は相当困難であるという認識が、政策立案側、技術者側も十分でなかった。

(ii) 開発方針転換

もんじゅは1995年12月のナトリウム漏洩事故後、拙速に実証炉計画から実用化へ繋げるのではなく、国際的な技術開発、研究開発のセンターへと舵を切った。そこで、技術高度化、保全技術を中心とした技術開発部門を充実整備し、福井県エネルギー研究開発拠点化計画でも研究開発の重要な役割を担うようになった。しかし、スケジュールとして、早期にステップアップする方向に引きずられた。

(iii) プルトニウム利用計画

ATR ふげんはプルサーマルや高速炉によるプルトニウム利用が進まない中、25年間 MOX 燃料の利用で東海の再処理、MOX 工場と連携しつつ、我が国のプルトニウム利用政策を支え続けた。大間の ATR 実証炉計画の中止に伴い、ふげんは運転停止に至り、この役割をもんじゅが引き継ぐこととなった。もんじゅは高速実証炉とセットで我が国のプルトニウム利用政策に直結した路線に乗っていた。事故後は、運転に支障が生ずると、プルトニウム利用計画が破綻するような短絡的な考え方にならないよう、包括的基本政策が必要であった。

(iv) 保障措置優良国

高速炉開発の歴史は核兵器との接点が多い。非核兵器国がプルトニウム利用を行うには、国際的にも意識して、より真剣な議論が継続的に必要なのではないか。あかつき丸によるプルトニウム輸送は国を挙げての画期的プロジェクトであったが、プルトニウム利用に伴う、インフラ、周辺技術を整備、充実し、国民にも広く、深く共有できるような政策が不足していた。プルトニウムが日本の国で現実に利用されているという実感が広まらないと国内外で理解は得られない。

3-2. 開発体制

(i) 長期停止による現場力の弱体化

当初は早期実用化の短期決戦型を想定したが、もんじゅナトリウム漏洩事故、東海アスファルト火災爆発

事故が続き、動燃の信頼は失墜した。電気事業者も実証炉の開発は容易ならざると、協力姿勢は弱まった。軽水炉等の現場経験を積んだ技術者の減少により現場力は弱体化した。また、プラントの運転が行えず、設計条件との対比、評価、マニュアルの改善なども十分ではなく、したがって、研究開発段階炉としての規制面からの配慮についての検討もできなかった。

(ii) 改革活動の風化

もんじゅの運営組織は、事故後の総点検、動燃改革、原研との原子力機構への統合等の改革を経てきた。新たな課題が追加されると、優先順位、取り組み姿勢に対する経営トップの判断は重要である。また、運営管理では計画に対する PDCA サイクルが基本となるが、特にチェックの段階が重要であり、根本に戻ってこのままで良いか等、本質的な監視が鍵である。そのために、現場ばかりでなく、経営層との一体的取り組みができるかがポイントとなる。

(iii) 完遂指向の体制

動燃設立当初はプロジェクト毎に専任の役員が就任していた。プロジェクト完遂の浸透が原点である。国のプロジェクトの長期化に伴う、国と地方の位置付けの合意形成やトラブル等により、監督官庁の役割が大きくなり、国が前面に立つことが多くなる。国が現場の指揮をとるのは難しく、昔の国鉄では総裁をおいて責任体制を明確にし、新幹線網のめどが付いて民営化したのは参考になるのではないかと。もんじゅプロジェクトでは守備範囲が広く、現場ばかりでなく相当の覚悟をもって社会への細心の配慮、国際協力などプロジェクト推進を体現できる構えが必要であった。

3-3. 技術

(i) すべての活動が試験

もんじゅは研究開発段階の原子炉であり、規制も含めてすべての活動が新しい技術体系に対する試験であるという認識が徹底されなかった。実用炉のように経験を積んだ実績がある訳ではない。設定を変えたり、条件を変えたり、調整できるような計画作りで土俵ができる。そうすれば、規制側も新規の活動への対応が試験と位置付けられる。

(ii) ナトリウム技術

社会で馴染みのないナトリウム取扱技術への継続的な慎重さが不十分であった。地道な研究開発によって一定のレベルの基礎ができたかと判断され、研究活動は縮小された。もんじゅナトリウム漏洩事故後、もんじゅに隣接してナトリウム研修棟を整備し、消防研究所との共同研究も進めた。常陽の火災事故からも新たな知見を得ている。

(iii) 他分野へのアンテナ

原子力以外のより広い技術分野へのアンテナ機能の備えが甘かった。軽水炉と異なり、高温であるが低圧であるという特徴がある。軽水炉中心の原子力業界とは異なる分野への関心、総合的に把握する視点をもち、それらの技術に関する交流や共同研究を行う積極的思考が必要であった。

(iv) 海外経験の反映

海外炉における貴重な経験の反映の仕方が不徹底であった。もんじゅの設計では、海外の高速炉や国内外軽水炉の運転経験での事故やトラブルの事例を活用するべく、情報入手と技術交流を行い、発生防止の対策を設備設計に反映させた。しかし、直接的原因の防止対策を行ったことで完了という意識で、起こった時の措置、備えを検討し、適応力の育成、訓練まで反映できなかった。運転再開にあたっては、事故、トラブル事例集を作成し、公開・活用を図った。

(v) 研究開発段階の保全計画

研究開発段階炉が備えるべき保全計画に対する準備が拙速であった。建設段階を終えていないのに、使用前検査において、屋外排気ダクトの腐食など保守管理上の問題が明らかになり、予防保全を基本とした計画的点検に基づく保全計画が必要であると認識した。保全計画は研究開発段階炉であることを考慮し、試行錯誤を重ねて充実させていくプロセスを科学的合理性をもって準備できなかった。こういう活動こそ、新しい技術体系への構えの真髄なのではないか。

3-4. 社会への対応

(i) 新しい技術体系への透明性不足

社会からの関心が高い原子力において、特にこれまでと異なる新しい技術体系の実用化に向けての開発、なかでも安全性に懸念が表明されている下では、技術開発の取り組みは透明性高く進めるべきである。原子力界には、技術開発は将来の重要な技術なので国家や専門家に任せているとの意識が強く、何度となく信頼性を大きく喪失してきている。もんじゅがビデオ隠しなどの不適切な対応から社会的な事件となり、動燃、サイクル機構、原子力機構に任せておけるかという組織信頼性が問われた。組織としての広聴、広報機能の構えが組織マネジメントとして極めて重要である。これらにより原子力界以外からも監視され、メディアへの喚起にもつながっていくことを経営理念に挙げるべきである。

(ii) 大学との連携

もんじゅを高速炉の国際研究開発拠点にすることは無論、新しい技術開発への挑戦を地元の技術向上にもつなげていく福井県エネルギー研究開発拠点化計画が実現したが、より発展した形を模索できたのではない。特に大学の役割は地域では重要であり、新技術の社会での受容性の研究などで特色を出せることが期待された。

(iii) 地域振興策

国のプロジェクトとして、もんじゅが役割を果たすときの国と地方の関係も重要である。ATR ふげんは実証炉建設に向けて地元も運転を見守ってきたが、実証炉中止に伴い、ふげんの運転停止が地元との相談もなく決められ、国策への不信感となった。もんじゅも同じ轍を踏んだ。鉄道、道路等の公共事業の国による整備に関して、もんじゅもその渦中に巻き込まれた。予め地域社会に対する立地振興構想が検討されるような仕組みが必要ではないか。米国では国家環境政策法は連邦政府が関わるあらゆる行為に対し、社会的、経済的、倫理的な視点からも評価される。

4. 実用化への展開

原子力に対して、これ程閉塞感がある中、高速炉の実用化を進めることは容易なことではない。開発プロセスの社会との共有がどこまでできるかが、今後の鍵となる。

4-1. 高速炉の実用化とは

技術開発として、まず開発目標を達成することが基本となる。具体的には、GEN-IV で取り上げられているように安全性、経済性、持続可能性（資源有効利用、廃棄物など環境保全）、核拡散抵抗性が目標となる。

次に、社会からの以下のような要請に応えていくことが求められる。実際に立地が決まり、建設、運転に至るプロセスが推進される要件となる。

- (i) 安全性の納得、規制手続きの整備
- (ii) 供給安定性、信頼性
- (iii) 社会が受け容れる経済性
- (iv) 産業活動の達成
- (v) プルトニウム管理が心配ない
- (vi) 燃料供給、使用済燃料、廃棄物処理の整備
- (vii) 国際的規範に沿っている
- (viii) 若い人の仕事
- (ix) 実施体制の信頼性

4-2. 実用化をめざして

我が国は欧州、米、ロシアとは異なり、高速炉発電プラントの本格的な運転経験がない。実用化に向けて、産業界、社会に受け容れられるかどうか、死の谷を乗り越える重要なステップである。すなわち、開発当事者、規制、社会が様々な経験を蓄積する機会を用意しないといけない。もんじゅがやり残したことを冷静に整理、抽出しておくことが必要である。

高速炉のような新型炉開発の実用化では、取り組みの大半は規制の仕組み、安全確保の体系を整えることであり、相当な期間の運転、試験の実績が必要となる。

もんじゅでの経験をあきらめるなら、その代わりに海外炉の生きた運転経験を我が事ととらえる位の覚悟

が求められる。豊富な運転経験のロシア、実験炉ながら様々な試験も行っているインド、中国との技術交流の道を、容易なことではないが何としてでも探る気概をもってほしい。もんじゅのナトリウム漏洩事故後の改造では旧ソ連の BN-350 との技術交流、常陽のトラブルの解決ではインドの実験炉 FBTR との技術交流により知見を得たりしている。

また、もんじゅ施設を国際的な FBR 研修センターとして海外との交流もできないか。海外高速炉の運転・保守経験成果の集約、データベース化をはじめとして、もんじゅの実機設備を、停止されている状況の下、研究・研修材料にして、実物を調査・評価研究の対象あるいは海外にも開かれた若手技術者・学生への研修の場として活用できよう。また供用期間中検査などの機器の検査は、実機条件下での動作・操作試験により保全技術の高度化が図れる絶好のチャンスだ。

また、シミュレーターによる運転技術の高度化や事故、トラブル事象の研究や事故トラブル事例集の拡大・深化なども忘れてはいけない。プラントが廃止措置に向かっているからこそ、実現できる研究、技術開発があるだろう。

さらに、もんじゅの「マネジメント」を原点に戻って検討、再構築し、新しい技術体系開発の要塞化を図り、新たな技術開発成果を反映し、改良を加えて再利用についてきちんと検討したらどうであろうか。

4-3. プロジェクト推進

実用化を目指すプロジェクトの進め方として、バトンタッチ方式で良いのかという問いかけがなされてきた。実用化に向けて、産業界、社会に受け容れられるかどうか、死の谷を越えられるかどうかである。まず計画されたプロジェクトの全力での完遂が何より重要である。これまでは原型炉段階の完遂を重要なホールドポイントとしつつも、実用化への開発プログラムが先走っていた。原型炉が設計を終え、建設に入る段階から科学技術政策でなく産業政策の一環として位置付け直して民間の主体的参入を促す方策が考えられたかもしれない。設計期間全体を研究開発主体と建設・運転主体の併走期間として技術移転の観点や国の政策体系の中に適切に位置付けるチェック・アンド・レビューも行えた。プロジェクト運営の本質的課題である。

4-4. プルトニウム政策

我が国は資源に乏しい島国のエネルギー確保のためプルトニウム利用を目指す核燃料サイクルが国際的に認められてきた。核拡散防止の原点に立ち、プルトニウム利用計画や貯蔵の透明性を含め、積極的な工夫が必要である。

我が国は現在、プルトニウム利用の主流はプルサーマルであり、使用済 MOX を中間貯蔵し、高速炉利用とセットにする戦略とすべきである。MOX の使用済燃料は六ヶ所の再処理の対象になっていない。高速炉サイクルまで保管するには国が前面に立ち、中間貯蔵を明示する必要がある。そのためには、MOX 使用済燃料を再処理し、プルトニウム利用する高速炉の開発戦略を提示しない限り、中間貯蔵の立地も進まない。

4-5. 学会への期待

もんじゅ廃止決定を審議した高速炉開発会議は、経産、文科両大臣、関連三機関の代表者のみで構成され、学会の見解や地元の意向も取り込んだ議論もなかった。廃止決定に際し「もんじゅはプロジェクトの『技術的な内容』に問題があったというよりむしろ、保全実施体制や人材育成、関係者の責任問題など『マネジメント』に問題があった。とりわけ『最先端の研究開発』と『安全な発電事業の実施』という二つの性格が異なる要素が混在する難しいプロジェクト」と述べている。実用化を目指した新型炉開発の本質的課題の問いかけである。併せて、実証炉以降の開発に資する様々な成果知見が蓄積され、燃料供給等関連技術、人材育成基盤の成果も得られているとしている。まだやり残したことは多く、これらの議論は十分吟味されてはいない。原型炉のもんじゅを廃止決定した以上、これらの議論を冷静、客観的にまとめられるのは学会の重要な役割であろう。将来、次世代システムの研究開発から実用化段階へ進める上で、十分配慮できるようにしておくためにも。

*Tsutomu Yanagisawa¹

¹JAEA (retired)