

幻の動力革命

原子炉多目的利用と核燃料サイクルの歴史

樫本喜一*

はじめに

本稿は、筆者が研究代表を務める科学研究費助成事業・基盤研究(C)「日米核燃料サイクル政策変遷に太平洋島嶼地域住民運動が与えた影響の実態解明」関連の史資料調査により、現時点で判明した事項をまとめて、考察を加えたものである。

調査上、目にする機会が多い1950年代後半の主要全国紙には、折に触れ、例えば新年の特別紙面を割くなどして、「原子力が切り開く未来」といったテーマの特集記事が掲載されていた。そうした記事の多くは、原子力¹を主な動力源とした新しい文明社会が、間もなく、少なくとも二十一世紀には実現すると予想していた。記事中には、「新たな産業革命」などという大仰な形容もみられる。

今から振り返ってみると、革新的な新技術が社会に導入される際、しばしば観察される一過性の熱狂というべき状態が、この時の原子力にも生じていたのであろう。日本の場合、国内原子力開発開始と同時期に発生したビキニ事件で高まった、核兵器反対と米国への反感を和らげるための国策キャンペーンとしての色合いも強い。政治的意図はともかくとして、技術面で確たる裏付けのない楽観的予想の記事内容であっても、当時の全国紙のもつ影響力を鑑みると、現時点で考えるよりもはるかに大きく原子力平和利用に対する世論動向を左右したはずである。

原子力の場合、監督官庁である科学技術庁自体が、そうした状態を諫めるところか、率先して原子力利用拡大を喧伝していた。たとえば1960年刊行の科学技術庁監修による『21世紀への階段・40年後の日本の科学技術』という書籍では、冒頭の一章を費やして「原子力時代は花盛り」といったタイトルで、楽観的な未来予想図を描いている。科学技術庁は原子力開発・利用推進が主要業務なので、世論を喚起することも業務の一環ではある。しかし、同庁は当時、原子力の規制監督を一手に引き受けていた点を考慮すると、バランス的に問題なしとはいえない。

* 大阪府立大学人間社会システム科学研究科客員研究員

¹ 通常、核分裂エネルギーを意味するが、広義には核融合エネルギーの意味を含む場合がある。以下、本稿では核分裂エネルギーについて、人口に膾炙している原子力という用語を注釈なしで使用する。

その後、60年代末から70年代に入る頃には、次第に夢想的な原子力時代の到来という将来図は顧みられなくなっていた。むしろ逆に、同時期、原子力発電所建設に対する反対運動が各地で開始され、70年代中盤になると運動は全国的に連携し始めている。一方、同じ頃の科学技術庁など推進官庁は、夢の原子力時代を声高に主張することはなくなったが、国内外の研究動向を踏まえたうえで、原子力の新技術開発へ本格的に乗り出していった。特に国外で実用化を目指して開発されつつあった原子力技術に関しては、日本も追随して開発に取り掛かっている。

原子力を動力源とする商業船舶、高温ガス炉（HTGR）を中核技術とする原子力製鉄など、現在ではあまり顧みられないが、一時、世界的に流行した原子力技術開発に日本も手を染めていた。経済性に難があったため実用化が断念された国産の新型転換炉（ATR）も、時期的には各国の似たような重水炉開発とほぼ同時進行である。日本はいまだ正式に商業利用を前提とする開発を放棄していないものの、いわゆるハップルの後退²のために実用化の目途がたたなくなり、次々と旧西側各国が商業規模の開発から撤退した高速増殖炉（FBR）—再処理路線の核燃料サイクル関連技術も、この時期には、核分裂型原子力利用の本命として、日本をはじめ各国で熱心に取り組まれていた³。加えて、当時、ウラン燃料の確保が世界的に急務とされていたため、ウラン濃縮技術開発を含む核燃料サイクルの上流部分の開発・開拓に日本も追随した。なお、これら高速増殖炉、使用済核燃料再処理、ウラン濃縮といった核燃料サイクル関連技術は、核兵器開発に直結する機微核技術となる。

他方、福島原子力発電所事故のために将来には疑問符が付くが、現時点で原子力利用の主流となっている軽水炉技術については、日本の場合、他の原子力関連技術とは違った経緯をたどった。1960年代末、本格的に国内大手電力会社が米国製軽水炉を建設し始めた時点で、これらは既に実用化されており、技術導入で対処することでよしとされた。高速増殖炉などの将来型技術が原子力利用の本命で、軽水炉はあくまで中継ぎの技術であるという認識もあった。そのため、日本独自に共通化・高度化のための技術開発に改めて取り組まれ始めるのは、欧州各国が独自の軽水炉技術を獲得した後になってからで、他の原子力技術開発と比較しても後発である。

ここまで指摘した各原子力技術開発について、多くは科学技術庁のみでなく通商産業省や実業界も少なからぬ資金を投じており、単なるペーパープランに

² 開発が進めば進むほど実用化時期が遠ざかる様子を宇宙膨張のハップルの法則になぞらえたもの。吉岡齊が名付けた。

³ 日本の場合、核燃料サイクル技術の中核部分となる再処理工程は、核兵器開発と直結する機微核技術のため、他の技術と違って米国からの技術導入が受けられず、核不拡散政策に独自のスタンスをとるフランスから技術導入を図った経緯がある。

とどまらない段階にまで進んでいる。だが周知のように、ほとんどの開発計画は、とん挫するか、もしくは実用化の目途を失ったまま漂流している状態である。

とりまく様々な動きが活発だったこの時期、1970年代半ばから80年代初頭の日本における各種の原子力技術開発の全体像について、吉岡(2011)は、「原子力共同体の内部対立激化と民営化の難題」(pp162-171)、「核不拡散問題をめぐる国際摩擦」(pp172-177)、「対米自立政策の形成と屈折」(pp187-191)、そして「科学技術庁グループによる他の開発プロジェクトの展開」(pp209-220)という節において解説している。吉岡の二元的サブガバメントモデルによる解説をまとめると、以下のとおりの全体像となる。

「むつ」の放射線漏洩事故によって大失態を演じた原子力船開発は残務整理的な事業を継続するのみとなり、その他の新型転換炉、高温ガス炉など科技庁案件も、「民営化＝開発継続」⁴にたいする電力会社や通産省の理解が得られず、開発撤退(新型転換炉)または縮小(高温ガス炉)に追い込まれた⁵。科技庁は自らの失態で、商業炉に関する一部の許認可権限についても通産省に譲ることとなる。一方、将来の原子力利用の本命と考えられた高速増殖炉と、それに密接に関連する商業再処理は、通産省の了解のもと引き続き開発が継続された。ただし、電力会社は高速増殖炉開発と違って商業再処理に関しては消極的であったが、通産省が彼らを指導して、電力会社を再処理事業の主体とさせている⁶。この理由に関して吉岡は、特にこの時期に米国が重視していた核不拡散問題によって、通産省がエネルギー政策上の重点をおく核燃料サイクルにタガをはめられるのを嫌ったため、商業再処理の実施を急がせたと推測する。また通産省が音頭をとってはじめて軽水炉の高度化・国産化については、彼らの思惑とは裏腹に日米共同開発事業となったが、米国々内の商業原子力事業縮小と相まって、日本側が米国の事業を飲み込む形となり、通産省もむしろその状況をよしとして受け入れた。このように吉岡はみなしている。

本稿では、原子力史全体の中でも特に激動期というべき1970年代半ばから

⁴ 経済実証炉段階の開発には、実験炉や原型炉と違う大規模な投資が必要となるため、民営化するにわち商業利用が前提となる。それには電力会社と通産省の協力が不可欠であるとされる。

⁵ 原子力技術のなかでも核融合発電に関してはやや特殊な扱いとなるため、本稿では取り扱わないが、当時、今後の技術開発を進めるためには膨大な予算が必要、かつそこまでしても実用化は見通せないという状況に世界全体で陥った。日本原子力研究所の予算も、核融合研究によって圧迫された。現在、国際熱核融合実験炉(ITER)になっても、状況は基本的に変わっていない。

⁶ 上流工程であるウラン濃縮事業は、放射性物質による環境負荷も少なく事業費も比較的小規模で済むために、環境負荷の高い再処理事業を中核とする下流工程のイメージを緩和するために、まとめて立地された。再処理工場、低レベル放射性廃棄物埋設処分場、高レベル放射性廃棄物中間貯蔵施設と合わせて核燃四点セットなどと呼ばれる。事業主体も現在、日本原燃に一本化されている。

80年代に焦点を当てて、原子力技術開発に関する史実を整理する。その中でも特に、原子力を推進機関の動力源とする船舶、高温ガス炉を原子力製鉄に用いる多目的利用、そしてそれらにかかわる米国や西独の原子力開発の動向と日本との関係など、当時は話題になったが結局は尻すぼみで終わった技術開発に着目する。科技庁および通産省という二つの政策推進主体を分析の枠としてとらえる前述の吉岡の説明では、格別重要視されなかった技術開発の歴史である。これらの技術開発と、本命とされた高速増殖炉—商業再処理の技術開発の経緯とを対比する。本論考中で着目する別視点からは、吉岡の明解な理論にはなじまないが、政策決定主体の科技庁および通産省の双方に確たる方針がなかったため、海外動向に追随せざるを得なかった曖昧な日本の原子力技術開発構想が浮かび上がる。また、政策的にどの技術開発を維持し、どれを放棄するかといった取捨選択からは、日本の原子力開発の方向性の変化が跡付けられると思われる。そこからみえてくるのは、原子力による動力革命で新たな時代を到来させるという当初の夢想から、この時期、実用化途上の困難な現実につづいて異様な形に変質していった、日本の原子力開発の顛末である。

第一章 キャッチアップの陥穽

はじめに原子力船開発の歴史を振り返りたい。これは、「夢の原子力時代」が夢で終わった経緯を象徴する出来事であり、日本の原子力技術開発が迷走した事例を代表する出来事でもある。

今ではほとんど顧みられなくなった話題だが、大型タンカーやコンテナ船など、民間船舶の動力源として船用原子力機関が有望だと考えられた時代があった。日本の開発した原子力第一船「むつ」が世情を騒がせたのは主に1970年代だが、世界全体を見渡すと、民間原子力船開発が注目された時期は少し前にずれる。東西冷戦時代、西側先進工業国と呼ばれていた米国およびその同盟国（特に第二次大戦の戦勝国）が行っていた原子力関連技術開発に、日本もやや遅れて参加した。原子力船開発も他の技術と同じく、日本は先発国の動向をみて本格的に動き始めた。したがって、日本と他の西側先進工業国の原子力技術開発には時間差が存在する。日本において原子力船開発の主体となったのは日本原子力船開発事業団であり、事業団に関与した官庁は科技庁と運輸省である。現在、すでに事業団は清算され、日本原子力研究開発機構が残務を引き継いでいる。

日本の民間原子力船開発事業は、1974年、第一船「むつ」の起こした放射線漏洩事故でひととき世間の注目を集めた。この事故、あるいは事件によって国

内の原子力開発体制上の問題が白日の下に晒された。確かに原子力開発体制上の問題の根は深く、見直しせざるを得なかった点多々あり、結果として「むつ」事件が、その後の日本の原子力分野全般に与えた影響は大きなものがある。だが、国内の経緯のみに注目すると全体像を見失うおそれがある。

二十一世紀には石油資源が枯渇すると予測されたため、多くの西側工業国において、将来型商業船舶の主要動力源として原子力機関を開発することが企図された。間もなく船用原子力機関の経済的実現性がない⁷、原子力船は寄港地が限定される、石油資源には予想されたよりも余裕があったなど、諸々の問題点が判明し、開発に着手していた各国は手を引いてしまった。一連の出来事が生じた期間は、日本を除く旧西側諸国に限れば、多少のばらつきはあるものの1950年代終盤から10年と少し程度の時間である。なお、実際に軍用以外の原子力船建造に至った旧西側国は、日本を除くと米国と西独のみである。原子力を推進機関に用いた軍艦（主に潜水艦）の開発経験をもつ米国などは、比較的早期に商業利用を放棄している（英仏は民需用の船舶を建造せず）。西独は、これらの国々よりも長期間開発を継続したが、1970年代終盤には手を引いた。商業原子力船を開発しようとした各国の思惑の背景は、発電用途だけに限らない夢の動力源として注目を浴びていた原子力技術開発の世界的な流行と、開発着手後、様々な社会経済上・技術上の困難に直面したゆえの幻滅である⁸。

先発国の開発状況に追随して手堅く始めたつもりが、何らかの理由で先行した国々が開発を取りやめた後も中止の決断が遅れてしまい、結果的に多額の予算を浪費する。これが日本の原子力開発が陥りやすいパターンだが、原子力船開発の場合、特に明瞭な形であらわれた。以下、原子力船「むつ」が辿った経緯を、他の開発国のものと対比しながら簡単に追ってみよう。

やや特殊な用途の船で、かつ西側先進国でもないが、軍艦以外の原子力船舶建造にいち早く取り掛かったのは、1956年に砕氷船レーニン号（排水量約16,000トン）を起工した旧ソ連である。ほぼ同時期、米国も1958年に貨客船サバンナ号（前同22,000トン）を起工した。なお米国は、1954年に世界で初めて艦船の推進機関として原子力を用いた原子力潜水艦ノーチラス号を建造している。1963年には西独で鉱石運搬船のオットー・ハーン号（前同26,000トン）が起工された。日本で開発主体の原子力船開発事業団が発足したのは西独のオットー・ハーン号起工と同じ1963年である。事業団発足の前から、原子力船の検討自体は開始されていたが、輸入炉か国産炉かの選択、船舶用途選定（結局は用途的にも中途半端な特殊貨物船となった）、母港用地選定など諸々に手間

⁷ 例えば、石油枯渇を前提条件として原子力推進の超大型石油タンカー（大型船舶需要の多くを占める）を建造する経済的意義については、当時も疑問視された。

⁸ 西独と日本の場合、原子力機関の軍事応用面の隠れ蓑という観点でも、民間商業船舶開発経緯をみる必要があるが、紙幅の関係で本稿では深入りを避ける。

取った結果、原子力第一船「むつ」(約 8,000 総トン…排水量換算であれば 10,000 トンをはるかに上回る) の建造開始は遅れて 1968 年になっていた。なお、日本の「むつ」は、他国の原子力船に比較すると船体が小型である。船体が小型になった原因は、開発費用を低く抑えようとしたことが大きな理由である。発注の際、最初の入札に応じる企業がなく、発注価格を上げざるを得なかったという逸話(36 億円を 80 億円)が残っている。船体の実際の数値を比較すると、特に全幅はレーニン号約 28m、サバンナ号約 24m、オットー・ハーン号約 23m などに対し、「むつ」は約 19m でしかなく、原子炉格納容器の設計などに余裕が失われることにつながって、ひいては放射線漏洩事故を引き起こす遮蔽問題が生じる遠因になったと考えられる⁹。

遮蔽問題の技術的詳細をもう少し説明すると、以下のとおりである。先ほども触れた発注価格の低さに加え、開発の全責任を負う場合の高いリスクなどを理由として、船体と機関を一体で受注する企業が出てこなかった。そのため、開発主体の事業団は船用原子炉と船体を個別に発注することとし、原子炉は三菱重工、船体は石川島播磨重工が担当した。結果として、この二社の責任分担の境界部にあたる二次遮蔽部分に問題が生じてしまった。実は事業団の技術者も、個別の発注では原子炉と船体をつなぐ二次遮蔽部分の設計が複雑になり過ぎる点をあらかじめ危惧している。だが実際の開発状況はもっと過酷で、費用低減のため当初予定された遮蔽材が安価なものに置き換えられるなどしたため、問題がより一層複雑化・深刻化したのである。また、三菱重工がウェスチングハウス社に依頼した自社製船用原子炉の事前評価でも、事故を生じた根本原因である中性子ストリーミング問題は指摘されていたが、楽観視する事業団側のトップの意向によって慎重論は無視されてしまった¹⁰。

「むつ」が原子炉部分の艤装と核燃料の装荷を完了し就役可能な状態になったのは 1972 年である。その時点で米国のサバンナ号はすでに役目を終え、退役に向けて係留中だった。西独のオットー・ハーン号は 1968 年に就航し、この頃は実際の鉱石運搬業務に従事している。「むつ」の就航は原子炉関連の実験を陸奥湾内で実施するかどうかなどで地元漁協と揉めたために大幅に遅延し、反対を押し切って試験航海に出港したのは 1974 年になっていた。直後、試験航海開始時点で、先に説明した理由により、原子力船に対する悪評を決定的にする中性子線漏洩事故を起こした。以降、日本の原子力船開発は、修理港の選定、新母港の決定などに再び長い年月と多額の資金を費やすことになった。この期間中に、西独のオットー・ハーン号も退役してしまった(1979 年、核燃料抜取のために係船。後に船用原子力機関を撤去して在来機関に載せ替え)。西独および

⁹ 各船舶の数値については竹村(1983)の pp5~8 を参照した。

¹⁰ 遮蔽問題の詳細などについては、倉沢(1988)の pp188~191 を参照した。

米国とも次船の建造計画自体は存在したものの、新たな民間原子力船を建造することはなかった。原子力船固有の維持費が嵩むことなど、実際に運航経験を積んでみて分かったからである。英国などは、1975年半ばの段階で、原子力船を就役させても採算が取れないとして、早々に開発をあきらめている。なお英国は、1960年代以降、艦型を更新しつつ原子力潜水艦を実戦配備し続けているので、開発をあきらめたのは商業分野のみである。

日本の原子力船「むつ」が改修を終えて再び本格的な試験航海に出港したのは、世界で民間原子力船実用化の夢が忘れ去られたはるか後、1990年になっていた。この間、放射線漏洩事故後、修理などに費やした政府資金を合わせると、原子力船「むつ」には総額1500億円が投じられた。特に事故後にかかった費用は、むつ市関根浜の新母港建設部分が大半を占める。原子力技術開発というよりも公共土木事業の様相を呈し、「むつ」は原子力船ではなく政治力船だと批判された。建造費80億円程度の船にこのような形で資金を費やすのは、当時、原子力開発側からも「無駄遣い」と厳しく指摘されている。

ちなみに、米独に遅れること約20年、90年代になってやっと本格的な実験航海を実施した原子力船「むつ」の船用原子炉だが、基本設計が古い蒸気発生器が別体の分離型と呼ばれる形式で、批判側からは「骨とう品」などと揶揄された¹¹。他方、オットー・ハーン号に採用された一体型¹²が船用原子炉では基本形となっている。「むつ」の場合、船用炉を日本国内で自主開発するにあたり、技術的に難易度の高い一体型を避け、先行する米国のサバンナ号と同型式の分離型を手堅く採用したと思われる。だが、90年代では「むつ」の船用炉は完全に時代遅れとなっていた。なお、第一船「むつ」以降、実現していないものの、日本が新たに計画した船用炉も一体型である。批判を振り切り実験航海を実施した「むつ」の運用で得られた折角のデータであるが、ペーパープラン上の開発とはいえ全く違う形式の原子力機関では、生かせる範囲もおそらく限定的だったと思われる。その後の原子力船「むつ」は、一種のアリバイ工作的な短い実験航海を終えた後、原子炉を撤去して通常動力船用機関に載せ替えて海洋調査船「みらい」として運用されている。

先行した国々の進んだ技術を吸収することや、参考にすることは、技術開発では当たり前の手法である。しかし日本が取り組んだ原子力技術開発の場合、後追いの有利さを生かせない見通しの甘さや取捨選択の先見性のなさが目立つ。「むつ」はその一例に過ぎない。迷走した原子力船開発の陰に隠れて目立たないが、ほぼ同時期に進行していた高温ガス炉関連技術開発も、内実はかなり迷

¹¹ 分離型の基本形は陸上発電用軽水炉の加圧水型と同じである。加圧水型軽水炉そのものが、原子力潜水艦用に開発された原子炉を発電に転用したものである。なお、一部を除く船用原子炉は、蒸気タービンで直接スクリューを回して推進力とする。

¹² 独バブコック&ウィルコック社製。原子炉本体は米国製という資料もあるが詳細は不明。

走した形跡がある。そして、この技術開発には科技庁だけではなく通産省や企業も多額の資金をつぎ込んでいる。次節では、高温ガス炉関連技術開発の経緯をみてみよう。

第二章 動力革命の迷路

高温ガス炉（HTGR）は、日本では高温工学試験研究炉（HTTR）という名称で実験炉が開発された。同機は旧日本原子力研究所（以下、原研）によって開発され、1990年に着工、1998年に初臨界、2000年代に入り本格運転を開始した。しかし福島原子力発電所事故以降、運転休止中の状態が続いている。本稿執筆時点で、2030年代に商業利用開始を目指すポーランドの高温ガス炉開発に協力するというアナウンスは存在するが、日本国内において実験炉以降の開発は未定である。

高温ガス炉はヘリウムを冷却剤として利用するガス炉の一種であり、黒鉛を中性子の減速に用いる（ヘリウムは反応性が低く放射化しないという利点がある）。核燃料は濃縮したウランやトリウムを用いるが、表面をコートした粒子状の核分裂物質を、高熱に耐える黒鉛に包んで球状、ブロック状に成型するところに特徴がある¹³。これらの核燃料要素が炉心を構成する。ガス炉そのものは原子力開発初期から存在しており、日本初の商業炉である東海一号も英国のコールダーホール改良型ガス炉であった。東海一号炉は減速材としては黒鉛を用い、核燃料は天然ウランを利用する。燃料要素は金属製であり（金属ウランをマグネシウム合金で被覆したもの）、耐熱性および使用後の保存性に難がある。冷却剤は二酸化炭素を用いており、冷却剤の出口温度が比較的低かった（400℃以下）。一方、高温ガス炉は、文字通り冷却剤ガスの出口温度が高い原子炉であり、それまでのガス炉とは技術的にも一線を画す。日本のHTTRの出口温度は950℃を達成し、これは世界で最も高い。高温ガス炉の特徴は、この高温を利用し、発電以外の用途で原子炉を多目的に利用しようというところにある。現在、HTTRは、燃料電池用の水素生産を発電以外の多目的利用の中心目標に据えている。HTTRをはじめ世界で開発が続く高温ガス炉は小型モジュール形式が中心で、電気出力も主力軽水炉の半分を大きく下回り、30万キロワット程度となる。

そもそも小型モジュール形式の原子炉というものが商業的に成立するかどうか

¹³ 過去には高濃縮ウランを用いたが、核不拡散性に対処して現在の高温ガス炉の核燃料には低濃縮ウランが用いられている。また各粒子は仁丹程度と形容される大きさで、核分裂生成物を閉じ込める耐熱被覆に包まれている。

かはまだ不透明だが、高温ガス炉の歴史を振り返ると、小規模化することでかろうじて開発継続を維持してきた現実が窺える。本来、高温ガス炉による原子力の多目的利用は、一種の動力革命を目指したものであったのである。当時の壮大な目標を知ってしまうと、今の高温ガス炉開発は夢の残滓に感じられる。

以前の論考で言及した原子力コンビナート、すなわち原子炉を熱電供給の中核ユニットに据えた巨大な製鉄・化学コンビナートとして実現を期待されたのが、高温ガス炉によって構成される原子力コンビナートである。高温ガス炉は原子力製鉄などと密接に関連しており、原子炉の多目的利用の中心的技術として企図されたものだった。既存の軽水炉を中核ユニットとする原子力コンビナートも代案としては存在したが、軽水炉を熱源にすると低温すぎて（一次冷却水は出口温度で 300℃程度）、直接製鉄などに用いるプロセス熱源にならない。なお、HTTR の保持する記録 950℃でもまだ低く、原子力製鉄に用いるには 1000℃以上の高温が必要であるとされる。当時はまだその概念が存在していなかったが、現在では第四世代の超高温ガス炉に分類されるスペックである。また、原子力コンビナートの概念設計段階の要目をみると、現在主流の 100 万キロワット級発電用軽水炉とほぼ同等の出力をもつ、大型の高温ガス炉を（複数）用いる予定であった¹⁴。

製鉄業はエネルギー消費の多い産業である。第一次石油危機後、製鉄量の伸びが頭打ちになった 1975 年の段階でも、日本の全エネルギー需要の 2 割弱を製鉄業が占めており、環境負荷も大きな装置産業である。加えて化学コンビナートも、エネルギー多消費産業であり環境汚染を引き起こしがちである。高度経済成長期、日本国内で公害問題が注目を浴び、産業立地が飽和しかかっていた頃、鉄鋼や化学製品の生産量拡大を確保しつつ公害発生を抑制する切り札として考えられていたのが、原子力コンビナートであった。ちなみに、公害対策基本法において、放射性物質による土壌や大気汚染および水質汚濁は法律の規制対象外であり、日本において原子力コンビナート建設計画に注目が集まった動機には、「公害（問題）を生じない」という面も大きかった。ただ、日本の関係者がどこまで自覚的だったのかは不明だが、原子力コンビナートには、人類のエネルギー消費構造を大きくシフトさせる可能性も存在したのである。

原子力コンビナートの概念そのものは、原点をたどると、米国や西欧諸国の原子力製鉄のアイデアに行き着く。1960 年代半ば、米国や西独などで考案されたものが原型である。日本では、樫本（2017）の中で説明したように、1967 年

¹⁴ 原子力コンビナートの各要目は、通商産業大臣官房総合エネルギー政策課原子力産業政策室（1971）の pp27～39 を参照した。なお、軽水炉と高温ガス炉では熱効率も違い、加えて後者の出力の一部はプロセス熱源として発電とは別途取り出されるため、単純な出力の比較は難しい。また、現在も開発が続く高温ガス炉は、工場生産可能な小型モジュール型であり、この時期の大型プラント化した原子炉とは別概念である。

秋に開催された青森県議会の席上、知事から原子力コンビナートのコンセプトが紹介されたあたりで、原子力関係者の話題には上っていた模様である。だが、組織的に検討が始まるのは少し遅れ、管見の限りでは、1968年9月、日本鉄鋼協会の共同研究会内に設置された原子力部会での話し合いが初出である。日本原子力産業会議に、原子炉多目的利用懇談会が立ち上がったのは、1969年9月になっていた。先発国の動向をみて本格的に動き始めるのは、原子力船開発と同様である。

高温ガス炉開発も米国などを追いかけるように開始された。先行する欧米の高温ガス炉開発は、当初、発電用途を主目的にして行われ、1970年代半ばになると米国や西独で実用炉直前の高温ガス炉が稼働し始めている。この時期の高温ガス炉は、核燃料にトリウムを利用するなど、供給不足が心配されたウラン燃料と違う系統の核燃料サイクルを確立する目標もあったので、技術開発の内容も錯綜している。そこを敢えて整理すると、米国も西独も発電用途の高温ガス炉利用技術を確立したうえで、製鉄など多目的利用への技術開発を発展的に付け加えていく目論見だったようである。日本の場合、司令塔が複数あるのでますます錯綜しているが、米国からは発電用の高温ガス炉を技術導入し、加えて米国や西独と提携して進んだ技術を学び、日本独自で原子力製鉄に応用可能な多目的高温ガス炉開発を行うという二本立てであったと思われる。なお、日本で高温ガス炉開発を担ったのは科技庁管轄下の原研であり、前述の実験炉HTTRを完成させた。ただし、高温ガス炉と接続する多目的利用技術の開発、特に原子力製鉄関連の要素技術開発は、通産省管轄の工業技術院が中心となって行った。同工業技術院は原子力製鉄の中核技術となる高温熱交換器開発などを手掛けている¹⁵。第一次石油危機後に生産量の伸びが頭打ちとなった製鉄業界も、1970年代中頃の段階では原子力製鉄の将来性を見限ってはならず、資金も人員も割いて原子力製鉄技術研究組合を結成し、検討を続けていた（組合の結成は第一次石油危機直前）¹⁶。

同時期、原子力製鉄と高温ガス炉に関連する開発資金に費やした額は、年度によっては高温ガス炉本体を担当した科技庁よりも、実業界や通産省側の方が多いくらいである。たとえば通産省では、1973年度中に原子力製鉄の技術開発に着手し、同省管轄の工業技術院につけられた「高温還元ガス利用による直接製鉄の研究開発」予算は、1975年から数年にわたり毎年20～30億円程度を計上した。他方、1976年に予算が増加するまで、科技庁管轄の原研における高温ガス炉関連予算は5億円程度である。しかし、1970年代半ばに差し掛かる頃、

¹⁵ 以下、本稿における高温熱交換器関連の工業技術院に関する記述は、『原通』（国会図書館東京本館新館所蔵）各号記載の数値を参照した。

¹⁶ 原子力製鉄技術研究組合の詳細は伊原（1984）のpp161～4を参照のこと。

本家の米国などで高温ガス炉を取り巻く雲行きが怪しくなっていた。こうした間の悪いタイミングで開発を開始するのが、日本の原子力技術開発の悪い癖である。

ここから、世界と日本において、高温ガス炉と原子炉の多目的利用開発が辿った経緯を追ってみたい。

1970年代前半、軽水炉に替わる新形式炉として一躍注目を浴びていた高温ガス炉、その開発の先陣を切っていた企業が、米国のゼネラル・アトミック（以下GA）社である¹⁷。彼らの設計した原型炉クラスの高温度ガス炉は、フォートセントブレイン発電所において1970年代半ばに本格運用を開始する予定であった。なお、フォートセントブレイン炉は熱出力約80万キロワット、電気出力約30万キロワットの高温度ガス炉となる。核燃料要素にトリウムを含むタイプで、この時期に流行していた代替核燃料サイクルを視野に入れた技術である。70年代で原型炉クラスを手掛ける米国は、高温ガス炉開発で日本の20年以上先を進んでいた。当時の米国における高温ガス炉開発を一瞥すると、同原型炉の次には、早くも実証炉と商業実用炉を兼ねる電気出力70万キロワットクラスの高温度ガス炉が建設される予定だった。その後には、現代の大型軽水炉と比較しても全く遜色のない、電気出力110万キロワットの商業実用炉の建設も控えていた¹⁸。しかし、技術的なトラブルが重なりフォートセントブレイン炉の本格運用は遅延を重ねてしまう。これらのことから経済的実現性に重大な疑問符がつき、1975年末の段階に至って、米国内の電力企業との間で結んだすべての実用炉建設契約を、GA社は破棄せざるを得なくなった。結局、フォートセントブレイン炉は1979年に入り、ようやく本格的に運用を開始されたものの、その後も高温ガス炉が軽水炉に取って代わることはなかった。同炉自体も、1980年代終盤、原子炉としては短命となる約10年で運用期間を終えている。経済的に立ち行かなかったことがその理由とされている¹⁹。

日本でもこのGA社の高温ガス炉を導入する計画があった。ただし、この高温ガス炉の冷却剤出口温度は1000℃を大幅に下回っており（700℃前後）、多目的利用に適した原子炉ではない。通常の原子力発電用動力炉としての導入である（それでも熱効率は軽水炉より高い）。他方で、米国内の商業化が総崩れになる1年以上前、まだ高温ガス炉の前途が有望だった段階では、米国の製鉄会社10社が、GA社の高温ガス炉を原子力製鉄に応用する技術開発計画に参加している²⁰。この点から考えると、米国における原子炉の多目的利用は、先に高温ガ

¹⁷ GA社成立の詳細については、榎本（2014）の該当部分を参照されたい。ただし、高温ガス炉開発などに携わった時点で、オリオン計画当時のオリジナルメンバーの多くは退社している。

¹⁸ 『原通』No.2118のp3にGA社が手掛けていた高温ガス炉の各要目が一覧されている。

¹⁹ 各国の高温ガス炉の歴史については、大山（1985）pp208～211で簡潔にまとめられている。

²⁰ 『原通』No.2143のp11に参加社の一覧が記載。

ス炉を発電部門で普及させてから、徐々に応用範囲を拡大していく手法をとったと考えられる。日本の場合、先ほども少し触れたが、この GA 社の高温ガス炉導入路線と原研による自主開発路線 (HTTR) の二本立てであり、その関係性が不明瞭である。GA 社の高温ガス炉導入ですべてうまくいけば、そのまま多目的利用まで進むつもりだったのか、あるいは国産炉の登場を待つつもりだったのか、判然としない。おそらくその背景については、吉岡によるサブガバメントモデルで示されるように、通産省 (GA 社の高温ガス炉を導入) と科技庁 (原研の HTTR の自主開発) の二元的な開発体制によって説明できよう。穿った見方をすれば、通産省側の工業技術院が、高温ガス炉と原子力製鉄の間を繋ぐ高温還元ガス利用による直接製鉄技術の開発を担当したのも、日本の自主開発炉が駄目だった場合、GA 社の高温ガス炉に乗り換えが効くという理由を勘繰ることもできる。

さて、問題点が噴出するまでは GA 社の高温ガス炉が非常に有望にみえたことから、日本国内への急速な導入が計画されていた。導入主体は通産省の管轄下にある電源開発株式会社であり、立地予定場所は岩手県の田老町 (現宮古市) である。立地については予算措置もされた。しかしながら、米国内における契約破棄騒動をみて日本の関係者も腰が引けたとみえ、1976 年夏の段階で GA 社の高温ガス炉導入を見送った。その一方、先述のように、原研の高温ガス炉開発と工業技術院の原子力製鉄につながる技術開発については、この時点で開発が本格化していた。しかし日本国内における高温ガス炉の技術基盤は心許なく、結果として新たなパートナーを求めて、この分野では米国と並ぶ技術をもつ西独に日本は接近した。

1977 年初頭、日本と西独は高温ガス炉の共同開発について合意した。日独科学協力協定の範囲を高温ガス炉開発にまで拡大したものである。日本側は原研、西独側はユーリッヒ研究所が主体となって共同開発を行うこととされた。日本側は高温に耐えられる構造材などで西独から先進的な技術を吸収する目論見であった²¹。しかし、その後の HTTR の開発状況をみると (着工開始までこの時点で 10 年以上ある)、原子炉本体のコンセプトは米国のものに近く、西独技術の導入は各要素部分にとどまったと思われる。ちなみに、独仏伊の欧州諸国で検討していた原子力製鉄計画では、西独が原子炉開発、フランスが中間熱交換器、イタリアが製鉄加工部を各々分担することになっていた。その西独は、実験炉 AVR (電気出力 1.5 万キロワット) と原型炉 THTR-300 (同 30 万キロワット) の二つを完成させ、運用した経験がある。日本の HTTR と同規模の熱出力をもつ前者は、ドイツ国内で早くも 1960 年代末から本格運転に入った。原型炉の后者が本格運転に入ったのは 1980 年代半ばである。ちなみに両原子炉とも

²¹ 本内容の報道があったと『原通』の No.2254 で紹介されているが、詳細は未確認。

80年代末には運用を終了している。ごく短期間で運用を終えた商業原型炉の THTR-300 には、様々な技術的なトラブルに加え、運用を継続する上で経済的な問題があった点が指摘されている²²。

なお、西独の高温ガス炉は両方とも野心的な設計のペブルベッド型炉である²³。粒子状核分裂物質成分を内に含む直径 5 センチ程度の黒鉛のボール（ペブルベッド）が燃料要素となる。炭団とも形容されるそれら核燃料要素を次々と中空の炉心に「くべる」ことで、運転中も燃料交換ができる利点があるとされる（使用済みの炭団は漏斗状の炉心下部から排出される仕組み）。日米の方式に比較してどれだけ有利なのか筆者には判断しがたいが、現在、実用炉の建設をアナウンスしている中国をはじめ、ドイツの流れをくむペブルベッド型炉に技術的な魅力を感じる国は多いようである（ペブルベッド型炉のアイデアそのものは米国発祥）。元々が小型モジュール形式に適合した設計だとする意見もある²⁴。

一方、日本国内の自主開発で臨んだ高温ガス炉と原子力製鉄関連の技術であるが、その後の経緯はどうなったのか。まず原子炉本体、旧原研の開発した実験炉級の HTTR については、先述したように着工が 1990 年、初臨界は 1998 年である。日本が実験炉を着工した時には、米国と西独で建設された原型炉級の高温ガス炉は共に運用を終えている。すでに両国とも、高温ガス炉を大規模化する技術開発に見切りをつけた状況である。この点だけみれば、原子力船「むつ」と同様、むしろそれ以上に、周回遅れの状況といえよう。ただし、米国などで小型モジュール形式（一体型の発電システムとして既製品化され工場出荷する形式）の原子炉として高温ガス炉が捉えなおされて、再開発の機運がでたことが追い風となり、コンセプトの近い実験炉級の HTTR は、幸運にも時代錯誤な技術開発になることを避けられた。一方、重厚長大な原子力製鉄技術に関しては、そう上手くはいかなかった。

1970 年代終盤、通産省管轄の工業技術院と製鉄各社の原子力製鉄技術研究組合による原子力製鉄の技術開発は、第一期の基礎的な研究を終え、パイロットプラント建設に取り掛かる第二期に入ろうとしていた。この段階までで通産省の公的予算だけでも、すでに 150 億円が費やされている。この先、実際にパイロットプラントを建設するには、桁違いの予算が必要となる。ところが、肝心の高温ガス炉の目途が立っていなかった。科技庁管轄の原研による国内の高温ガス炉開発は遅々として進まず、後の HTTR となる実験炉は、この時点では着工すらされていない。海外の高温ガス炉開発、特に多目的利用に適した大型プ

²² 大山（1985）の pp208～211 を参照。

²³ ペブルベッド型の説明については、「アトミカ」の「海外における高温ガス炉の運転実績」の項目より。詳細は以下のアドレスとそのリンクを参照のこと（2020 年 3 月 10 日閲覧）。

https://atomica.jaea.go.jp/data/detail/dat_detail_03-03-03-03.html、

²⁴ 和田編（2011）の p45 を参照。この項目は小林圭二による。

ラント化も実現する気配がない。結局、1979年から開始される予定だった第二期の原子力製鉄パイロットプラント建設を2年間先延ばししたものの、1980年の段階で通産省はパイロットプラント建設を放棄した。民間の原子力製鉄技術研究組合も1981年末に解散となった。背景には日本国内の製鉄業における設備過剰の問題があり、このような鉄鋼不況下で新たに大規模な原子力製鉄技術を導入する余力は産業界にもなかったのである²⁵。

第三章 動力革命と核燃料サイクル

原子力開発黎明期、日本ばかりではなく世界各国でも原子力が大きな話題となったのは、核エネルギーによる動力革命が行われるという夢が存在したからであった。もちろん、核兵器開発など核エネルギーの軍事的応用の後ろ暗い面を一般公衆から隠すための口実として、原子力平和利用のバラ色の未来像が強調された部分もある。しかし一時的とはいえ、現代社会の基盤となる電力供給、製鉄業や重化学工業の熱源、交通機関の動力といったものへ原子力が応用される可能性に、関係者を含めた世界中の人々が魅入られたのも間違いない。さもなければ、世界各国で民間原子力船や高温ガス炉などの開発に多額の資金が投じられることはなかった。新たな産業革命という大げさな形容がされたのも、原子力の多目的利用が産業、交通機関および社会生活の広範な動力需要を支えるはずだという予想が存在したからであって、単に発電の一手段が新たに登場したという理由だけではありえない。

当時の予想では、二十一世紀になると、陸上の生活では原子力発電により無尽蔵に安価な電気が利用できて、産業・交通に必要とされる熱源・動力源も多くは原子力で賄われているはずだった。海には原子力船が縦横に航行し、時代遅れの化石燃料で動く船は少数派になっているはずだった。さらには宇宙でも原子力ロケットが月や火星に人類を送り込んでいるはずだったのである。

結局、二十一世紀になって実現していたのは、事故を起こした場合、生活や環境に与える被害は甚大なのに、他の方法と比較しても決して安価とは言えない発電の一手段、そして軍用艦船以外には今一つ使いようがない船用原子力推進機関ぐらいである。原子力コンビナートも原子力ロケットも画餅で終わった。ちなみに、実現しなかったコンビナートおよびロケットの双方とも高温ガス炉が技術的な中核部分である。先に説明したように製鉄を含む原子力コンビナートの中核には高温ガス炉が存在するが、ここで初めて触れた原子力ロケット（原子力熱推進ロケット）にも高温ガス炉の技術が利用されている。原子力ロケッ

²⁵ 伊原（1984）の pp161-164 を参照。

トとは、推進剤（水素ガス）を原子炉内で加熱してジェットとして排出し、推進力を得るロケットである。基本的構造は高温ガス炉と同じであるが、排出ガスの出口温度は原子力製鉄で要求される温度よりもはるかに高くなる。1960年代を中心に米国内で地上実験された原子力ロケット（Rover計画/NERVA計画、実験期間は1959～73年）の場合、2～3000℃の超高温である（ただし全力運転時間は最大でも数時間程度）。原子力ロケットは、推力も大きく、比推力（ロケットの推進剤効率を比較する数値）も、現用の化学ロケットで最も優秀な液体酸素—液体水素を利用したロケットの二倍以上となる。なお、ペブルベッド型高温ガス炉を応用したタイプの原子力ロケットでは、さらに効率が数割上昇するとのことである²⁶。

戦前から基礎的な科学技術力や工業力があつた米国や欧州諸国（旧ソ連含む）では、様々な夢を追いかけた時代の原子力分野においても、革新的な技術開発ができた。今回の論考で取り上げた二つの技術、民間原子力船開発と高温ガス炉開発でいうと、米国と西独の二か国が群を抜いている。しかし、結局この二か国の技術力をもってしても、夢を現実にすることは叶わなかった。

商業化にまで漕ぎつけた唯一の原子力技術といってもいい発電部門についても、原子力開発黎明期の予想は裏切られている。二十一世紀には、原子力発電によって電気料金がほぼ無料になっているはずだったからである。1970年の大阪万博に象徴されるような、全てが電化され自動化された未来像は、「タダ同然」の原子力による電力が無尽蔵に利用できることを前提にしていた。ただし、当時の予想でも、原子力発電がそのようになるには一つの条件を満たす必要があつた。希少なウラン資源を100%有効に利用できることが、その前提である。天然のウラン成分中の大半を占める燃えないウラン（核分裂反応を起こしにくいウラン238、全体の99.3%）を利用して、初めてその条件が満たされる²⁷。すなわち、発電用高速増殖炉—商業再処理工場による核燃料サイクルの実用化である。

原子力平和利用の技術開発が始まった時から、核分裂エネルギー利用技術の本命は、使った分以上の核燃料を生み出せる高速増殖炉²⁸と、使用済み核燃料の中から生成された核分裂性プルトニウムを抽出する再処理工場の組み合わせであつた。これらの技術開発については、むしろ高温ガス炉や民間原子力船の開発よりも早い段階から手掛けられていた。特に再処理技術に関しては第二次世界大戦中のマンハッタン計画時から早くも開発がスタートしている。その理由

²⁶ 原子力ロケット開発の詳細および各数値については、安田・滝塚（1996）を参照した。

²⁷ なお二十一世紀には核融合発電なども実用化されているはずだったので、電気料金が「タダ同然」というのは、それらすべてを合わせての話となる。

²⁸ 炉心周辺部に装荷されたウラン238に、核分裂反応時に出た一部の中性子が吸収され、核分裂性のプルトニウム239に変化させることができる原子炉。

は、ナガサキ型原子爆弾用の核爆発物質、すなわちプルトニウム 239 を抽出するための技術だったからである。一方の高速増殖炉にしても、原子炉の本命技術として戦後すぐに開発が始まっている。1951年、世界初の原子力発電を行ったのも米国の実験用高速増殖炉（EBR-1）である。高速増殖炉の炉心部周辺に装荷された燃料（ブランケット燃料）中で生成されるプルトニウムは、不純物（核兵器に不向きな性質のプルトニウムの同位体）が少なく超兵器級と呼ばれる核爆発物質となる。それゆえ再処理と高速増殖炉の両技術は、最も取り扱いに注意が必要な機微核技術である。そして、コストを度外視した軍事目的ならいざ知らず、これらは経済的に成立させるのが困難な技術でもある。各種ある原子炉の炉型の中でも、開発期間が最も長いものの一つであるにもかかわらず、商業用高速増殖炉は未だに実用化の目途が立たない。商業規模の再処理も、核兵器国が兵器用核物質製造プラントと併設する以外、満足に動いた例はない。そもそも高速増殖炉が実用化できない限り、再処理を実施することに経済的な意味はないのである。

1970年代半ば、兵器利用と平和利用にまたがるあらゆる分野で豊富な開発経験をもつ米国は、早くも再処理と高速増殖炉の商業化に及び腰となった。特に1977年に就任したカーター大統領は、核拡散問題を重視して、機微核技術である再処理と高速増殖炉の開発を厳しく規制した。その政策もあり、民間企業は商業再処理事業から次々と撤退してしまう。政府が開発を進めていた原型炉級のクリンチリバー高速増殖炉（電気出力約40万キロワット）も店晒し状態となった。

後のレーガン大統領時代になると原子力政策は転換する。商業再処理と高速増殖炉を見直す動きも出た。だが、小さな政府をスローガンとするレーガン政権にとって、連邦政府の資金投入は認められなかった。あくまで「民間のことは民間で」である。結果、民間企業の商業再処理は完全に消滅する。政府援助を当てにして最後まで残っていたバーンウェル再処理工場も、1983年に建設中止が決定した。再処理事業は純粋な商業ベースには乗らなかったのである。同じ時期、米国内の高温ガス炉についても、前節で述べたように1980年代に入る前後から開発の熱意は失せていた。ちなみにフォートセントブレイン高温ガス炉を開発したGA社が、バーンウェル再処理工場の建設も行っている²⁹。バーンウェル再処理工場が命運尽きたのと同じ1983年、クリンチリバー高速増殖炉も連邦予算が認められず、正式に建設中止となった。連邦議会が改めて見積もりしたところ、完成までにかかる費用が最大で当初の約20倍、90億ドルに高騰

²⁹ 正確にはGA社と化学企業アライド・ケミカル社とで創設された新会社、アライド・ゼネラル・ニュークリア・サービス社による合併事業である。

していたのである³⁰。他にも、民間原子力船開発は、すでに 70 年代が始まる以前からペーパープラン上の検討だけに後退していた。原子力時代到来の実現に最も早くから取り組んだ米国が、最も早くその夢から醒めたといえよう。

核兵器に忌避感があり実際に核開発をしない決断をした西独は、第二次世界大戦の敗戦国という立場も日本と同じで、機微核技術である再処理と高速増殖炉の技術開発は日本と同じく純商業ベースで取り組んだ。技術開発を開始したタイミングも日本と同じ頃となった。本稿で西独と日本を比較しているのはそのためである。ただし、戦前から高度な技術基盤をもつ西独は、日本とスタートラインが同じでも、その後の展開速度は全く違った。原子力関連技術も瞬く間に先頭集団に躍り出ている。例えば軽水炉技術では、当初は米国から導入したものの、1960 年代に重点的に開発投資を行って独自技術による特許に置き換えることに成功している³¹。機微核技術についても同様に、1970 年代に入るとパイロットプラント規模だが再処理施設やウラン濃縮施設の技術を輸出できる段階にまで達している³²。その西独でも、高速増殖炉と再処理の大規模商業化には成功しなかった。

1970 年代中頃から西独国内で環境問題に関する関心が高まり、原子力発電に対する風当たりが強まっていた³³。軽水炉と比較して過酷事故が発生した際の被害が大きくなる可能性がある高速増殖炉や、全ての施設と比較して放射性物質による環境負荷が桁違いに大きな商業再処理工場には、反対運動が大規模に生じている。1979 年には米国のスリーマイル原子力発電所事故、1986 年には旧ソ連のチェルノブイリ原子力発電所事故が起こり、西独国内ではますます原子力施設に対する風当たりは強まっていた。結局、候補地が転々とする紆余曲折を経て 1985 年に建設が決まったバックースドルフ再処理工場は、本格的に工事が開始される以前の 1989 年に建設中止が決まった。1973 年に着工したカルカー高速増殖炉（電気出力約 30 万キロワット）に至っては、1980 年代後半になって原子炉本体は完成していたにもかかわらず、州政府の反対で一度も核燃料を装荷して稼働しないまま、1991 年に廃炉が決定したのであった。

西独（後に統一ドイツとなる）の商業再処理工場と高速増殖炉は、ともに社会的反対によって実現しなかった。だが、実際のところ両方の技術開発は当初に見積もられたコストを大幅にオーバーしており、たとえ事故や故障なしで稼

³⁰ 米国の商業再処理の項目については伊原（1984）の pp231～7 を、高速増殖炉については同書の pp142～6 を参照した。

³¹ 西独の国産軽水炉開発などの詳細は野澤・福田（1976）の pp26～7 を参照した。

³² 事業は途中で挫折したが、ブラジルとの間で西独製軽水炉 8 基と核燃料サイクル関連技術をセットにした包括輸出契約締結に成功している。

³³ 和田編（2011）の p221 によると、1975 年、バーデン・ビュルテンベルグ州ヴィールの原子力発電所建設予定地の敷地占拠を実施した反対運動が画期とされる。

働いたとしても商業的に成立し得たかは疑問である。実際に建設できなかった商業再処理工場の傷は浅かったが、ほぼ完成した高速増殖炉の方はそうはいかず、当初の見積もりの3倍弱となる70億マルクの費用となった³⁴。ドイツも米国に比べて各々の分野で約10年程度の遅れはあるが、民間原子力船は1970年代末、高温ガス炉（大型化プラント）や商業再処理工場は80年代末、高速増殖炉でも90年代初頭に商業開発から手を引いている。

さて日本の場合はどうか。高速増殖炉と再処理技術の開発に取り掛かったのは、他の技術と同じように先発国の動向を学んでからである。そもそも日本は、戦後の約10年間にわたって原子力研究の空白期間があるので、そうならざるを得ない部分がある。だが、たとえ後追いであっても、1960年代半ばからは高速増殖炉—商業再処理で完結する核燃料サイクルを原子力開発の本命と位置付け、資金を重点的に投じている。しかし、これらは共に機微核技術なので、他の技術と違って導入路線がとり難かった。1970年、科技庁管轄の旧動力炉核燃料開発事業団（以下、動燃）により、日本独自の技術（ただし基本コンセプトは先発国と同じナトリウム冷却の高速中性子炉）で高速増殖実験炉「常陽」³⁵の建設がスタートした。一方、実質的に核兵器開発と同じ再処理技術の国内開発は、思うようにならなかった。日本が多くの技術を導入してきた米国は、核不拡散政策の一環として再処理関連技術の提供を制限していた。これらの事情により、米国の意向を忖度せず機微核技術輸出にも独自の立場をとるフランスから、日本は再処理関連技術の導入を図った。仏サン・ゴバン社の技術を導入した動燃によって、茨城県東海村に実質的なパイロットプラントに相当する再処理施設が着工されたのは1971年である。

実験炉「常陽」は1977年に初臨界を迎え、その後の運用も順調だったので、動燃関係者は日本の高速増殖炉技術に自信を深めた。しかし、皮肉にも、後に続く原型炉の「もんじゅ」の重大事故と事故隠しが、動燃解体の発端になった。「常陽」に次ぐ商業利用のための原型炉「もんじゅ」は、米国や西独の原型炉とほぼ同規模であり、電気出力約30万キロワットの発電設備をもつ。ただし、着工開始の時期は、両国よりかなり遅れて1985年にまでずれ込んでしまった。この時点で、米国のクリンチリバー高速増殖炉は開発中止となっており、西独のカルカー高速増殖炉も反対運動によって身動きが取れなくなりつつあった。高温ガス炉開発と同様、何とも間が悪いとしか言いようのないタイミングである。

³⁴ 金額については、「アトミカ」の「ドイツの高速増殖炉の研究開発」の項目より。詳細は以下のアドレスとそのリンクを参照のこと（2020年3月10日閲覧）。

https://atomica.jaea.go.jp/data/detail/dat_detail_03-01-05-07.html

³⁵ 初期炉心の熱出力5万キロワットである。初期炉心のみプルトニウム増殖用のブランケットを装備した。以後の炉心にはブランケットは装備されないかわりに、熱出力は上昇している。なお、実験炉の常陽は発電設備をもたない。

なお、高速増殖炉開発で日本や西独よりも約 10 年先行していた英仏だが、高速増殖炉一本に絞って開発を続けていたフランスは別として、英国も自国の商業化開発を放棄する決意を固めていた段階であった。その後、唯一気を吐いていたフランスの高速増殖実証炉スーパーフェニックスさえも、運開直後からトラブルに悩まされることになった。そんな中、ようやく日本の「もんじゅ」は 1994 年に臨界を迎えた。そして運命の 1995 年 12 月 8 日、試験のため出力上昇中の「もんじゅ」は、冷却剤ナトリウム漏洩の重大事故を起こしてしまう。その後の顛末は他書に譲るが、この事故によってもたらされた衝撃で日本の高速増殖炉開発は完全に失速したのであった。

東海再処理施設は 1974 年に動燃の手により完成したが、たとえ同盟国であっても機微核技術拡散に厳しく臨む米国カーター政権による介入で、運用スケジュールが滞ってしまう。その後、ようやく日米再処理交渉を乗り越えて東海再処理施設は試験操業に入るが、今度は技術的な故障・トラブルが続出し、1981 年に本格操業へ入ってから満足に稼働できない時間の方が長い状態となった³⁶。また、1997 年とかなり時間が経ってからになるが、この東海再処理施設付属の低レベル放射性廃棄物アスファルト固化施設で発生した爆発事故、および事故後の不手際によって、動燃という組織自体が致命的な打撃を受け、解体されていくことになった³⁷。このようなパイロットプラント段階での惨憺たる状況にもかかわらず、日本は、核保有国以外では世界唯一の大型商業再処理工場の建設を強行する。しかし今回も、フランスからの技術導入に多くを頼らざるを得なかった。1980 年、電力会社を中心となって事業主体となる日本原燃サービスが立ち上がり、1984 年に立地場所として青森県六ヶ所村が選定された。再処理工場本体の着工は 1993 年にまでずれ込んだが、その後の長期にわたる建設期間・試験操業中も深刻なトラブルが多発しており³⁸、いまだ完工には至らない。延期され続けた完工予定は、本稿執筆時点で着工開始から約 30 年後の 2021 年度上期となっている。繰り返しになるが、高速増殖炉が実用化できない限り、再処理を実施することに経済的な意味はない。たとえ六ヶ所再処理工場が無事完工して、再処理事業を開始できたとしても、得られたプルトニウムは経済的に引き合わない核燃料にしかならないのである。

³⁶ 東海再処理施設のトラブルについては、伊原（1984）の pp221～4 を参照。

³⁷ 核燃料サイクル開発機構となった後、原研と合併して現在は日本原子力研究開発機構である。

³⁸ 特に試験操業中に発生した高レベル放射性廃棄物ガラス固化体製造施設でのトラブルが深刻である。

第四章、いびつな技術開発

前章まで、日本や米独などが手掛けた原子力技術開発の経緯を比較してきた。原子力時代を切り拓くという希望を託されつつも、未完に終わった技術開発の経緯である。特に、現在では顧みられることの少ない、民間原子力船開発そして原子力製鉄をはじめとした多目的利用のための高温ガス炉開発に焦点を当てて、原子力開発の主流とみなされていた高速増殖炉と商業再処理にかかわる核燃料サイクル関連技術開発と比較した。これら意外な組み合わせからは、興味深い特徴が浮かび上がってきた。

一瞥すると、米国および西独ともに、多少のタイムラグはありつつも同様の順番とタイミングで、各々の技術開発に見切りをつけたことがみてとれる。まず、民間原子力船開発が真っ先に切り捨てられた。動力革命を担うはずだった多目的利用の高温ガス炉の開発縮小が続き、無尽蔵のエネルギー源になるはずだった高速増殖炉―再処理路線の核燃料サイクル実用化の放棄が、ほぼ同時期となる。各々の技術開発が最も進んでいた米国が、最も早く見切りをつけた事実は注目すべきだが、少し遅れたものの、西独も同じようなタイミングで同様の決断を行っている。西独の場合、核武装能力を事実上担保する核燃料サイクル技術の開発放棄が、冷戦終結のタイミングと相前後したのは全くの偶然とは考えにくい。だが、高速増殖炉と商業再処理工場の建設自体、西独国内において技術的にも社会経済的にも、ほぼこの時点で行き詰っていた。核武装能力とは無関係の高温ガス炉が開発縮小に舵を切った時期も、これら核燃料サイクル関連技術開発を見切った時期と、大体において重なっている。将来的に有望とみなされ、開発を続けてきた各種の大型原子力技術に対する西独国内の期待感が、この時点で全般的に消失したのであろう。

さて、それに引き換え日本はどうか。吉岡が指摘するように、日本の原子力開発は二元体制的な指揮系統をもち統一が取れていない。詳細にみると様々な利害が相反する組織や企業がからんでおり、錯綜した状態が基本である。民意も反映し難い構造である。そこを敢えて整理してみると、以下のような順番になる。一番早い段階で開発に見切りをつけたのは、高温ガス炉開発と連動していた通産省管轄の工業技術院による原子力製鉄関連の技術開発である。それまで続けていた研究段階に比較すると、桁違いの資金を必要とするパイロットプラントを建設する直前で手を引いている。これは、高温ガス炉の大型プラント化を放棄した米独と比較しても適切な判断時期といえる。しかし後ほど説明するが、この冷静な判断を下したはずの通産省が、こと商業再処理事業になると、合理的な説明のつかない判断をしている。なお高温ガス炉本体は、科技庁管轄の原研で細々と小型の実験炉開発が継続していたが、米独が大型プラント化を

捨て小型モジュール形式を模索した時期と重なっている。

一方、米独が真っ先に切り捨てた民間原子力船開発は、日本において 1990 年代まで引き延ばされた。ただ、第一章で説明したように、政治的な利害関係や開発側のメンツといった、技術開発とは無関係な理由によって延命しただけであり、原子力船「むつ」の技術開発そのものは 1974 年の強硬出港時点以前、あるいは遅くとも 1982 年の改修工事完了時点で終結している。

高速増殖炉開発は、原型炉「もんじゅ」の着工時期がかなり遅れてしまった。この時、先に説明した米独などの状況を冷静に受け止めていれば、原子力製鉄のパイロットプラント建設と同じく撤退の判断を下せた可能性はある。ただ当時は実験炉「常陽」の運用が好調であり、この状態で「もんじゅ」開発に後ろ向きの決定を下せる意思決定システムを日本は持っていなかった。結局、運開に漕ぎつけた直後、1995 年の大事故の時点で、「もんじゅ」建設は実質的な失敗に終わったが、これは世界の高速増殖炉開発の歴史の中では平均的な結末ともいえる。しかし、開発が失敗しているはずの高速増殖原型炉「もんじゅ」は、その後も原子力船「むつ」に似た無意味な延命措置を続けられた。

「もんじゅ」事故後、日本は高速増殖炉開発の次の段階の実証炉へ進むことを諦めなかった。その際、炉型は「もんじゅ」のループ型ではなく、新たにトップエントリー型を採用することになった。これは「むつ」の分離型船用炉と、後継機計画の一体型船用炉の関係と同じである。したがって、事故後に「もんじゅ」を改修、運転再開することにも、技術的に大きな意味があるとは考えにくい。結局、「もんじゅ」は長期間の改修工事後に運転再開を果たすが、直後に炉内機器のトラブルで再度の運転停止を余儀なくされる。その後、福島原子力発電所事故の影響もあって、2016 年に廃炉が決定した。「もんじゅ」開発の経緯には不運もあるが、曲がりなりにも改修後に実験航海を無事こなした原子力船「むつ」の方が、技術的な完成度は高かったと思われる。なお、政府は現時点でもプルトニウム増殖を伴わない高速炉の開発は放棄していない。だが、単なる高速中性子炉では、再処理と組み合わせた核燃料サイクルを完結させる意味はない。

高速増殖炉開発も他国と比較すると日本のこだわりは突出しているが、それを上回るのが商業再処理に対する固執である。そもそも、日本は国内再処理技術を確立しておらず、東海再処理施設も六ヶ所再処理工場もフランスからの技術導入に頼らざるを得なかった。核兵器国フランスからの技術導入によって建設したパイロットプラント規模の東海再処理施設も、計画を大幅に下回る運用成績しか残せなかった。技術的に、より困難な商業規模の六ヶ所再処理工場に至っては、着工後 30 年経っても完工できない状態が続く³⁹。高速増殖炉計画の

³⁹ 六ヶ所再処理工場のモデルとなったフランスのラ・アーグ再処理工場は、問題がない訳では

ない現時点で、商業規模で再処理を実施する経済的意味は全くない。むしろ何兆円もの国費を消尽させて、環境汚染問題と核拡散問題の悪化を引き起こすだけである。核保有国以外で唯一認められた核物質プルトニウムを大量に扱える特権を維持するという意味はあるが、こうした日本の商業再処理実施に対するこだわりは、あらゆる観点からみて、常軌を逸していると形容する以外に言葉はない。

この種の核燃料サイクル関連の議論をする際、特に商業再処理を巡る議論で必ず引き合いに出されるのが英仏の方針である。英国はつい最近まで商業再処理を実施していたし、フランスは今でも実施していると。しかしながら、そもそも英仏二国は日本やドイツと違って核兵器国であり、再処理事業の基盤部分は軍民の境界線を明確に引けない官営事業の色彩が濃い。実現しなかった米国の民間企業単独による商業再処理事業とは性質が違っており、あるいは軍事利用を前提としない西独と比較しても、英仏の再処理は純粋な形で商業的に成立しているかどうかを厳密に判断できない。それ以上に、英国の商業再処理にかかわる施設を整備した費用の一部分は、日本が資金提供したものである。また、フランスおよび英国の商業再処理の最大のお得意様だったのも日本である。日本の使用済み核燃料全量再処理の方針に、いわば付け込む形の委託再処理事業により、英仏は自国の施設を維持していたのである。こうした裏事情のある英仏を引き合いにして日本の商業再処理を正当化する見解は、考慮の対象外である。

ちなみに、日本の電力会社に対し、自社が生み出した使用済み核燃料の全量再処理を強要したのは科技庁の方針である。そのノルマをこなすため海外に再処理を委託した際、英国国内の軽水炉燃料再処理設備の整備費用を負担せざるを得なくなったのが、日本の電力会社である。だが、その費用を日本輸出入銀行の融資に頼ろうとした電力会社に対し、第二再処理工場（後の六ヶ所再処理工場）を民間が主体となって運営することを条件にして、融資許可を与えたのは通産省である⁴⁰。以後、現在に至るまで、電力会社などによって構成される商業再処理事業主体である日本原燃が、六ヶ所再処理工場から撤退できない状況をつくりだしているのは、通産省（現経産省）の責任が非常に大きいといえる。高温ガス炉の多目的利用、原子力製鉄の技術開発から撤退した際の好判断とは対照的である。

こうして各種の技術開発を他国と比較することにより、日本の特殊性が炙り出されてきた。他の技術開発は、米独などに比較しても適当な時点で妥当な判断を下していることと比べ、核燃料サイクル、特に商業再処理に対する固執が

ないが稼働状態を維持している。

⁴⁰ 伊原（1984）p217

異様に突出している点が明らかである。それまで投入した資金の多寡が、日本のこうした判断に影響したと主張する向きもあろう。つぎ込んだ金額が大きなほど、今さら方針転換するのは難しかったという理屈である。だが、各々の技術開発に投じた資金の割合、絶対量とも、日本も他国とそう変わらない。例えば1976年の段階で、日本は高速増殖炉開発には280億円、高温ガス炉や原子力製鉄には合わせて40億円程度の予算を投じている⁴¹。一方米国は、高速増殖炉に4～5億ドル、高温ガス炉には2～3000万ドルである⁴²。日本と同じ割合の開発費であり、単にこれは技術的難易度が投下資金量に比例しているだけともいえる。同じことが大型再処理工場についてもいえ、当時でもコスト上昇に悩まされていたバーンウェル再処理工場（開発放棄直前の改修予定費用含）と六ヶ所再処理工場の見積もり額は、日本円で数千億円のオーダーとなってほぼ同レベルとなった⁴³。同じ水準の完成品を目指した同じ技術開発にかかる資金は、国によってそれほど大きな相違はない⁴⁴。投じた資金の多寡にかかわらず、米国がこれらの技術開発に見切りをつけたのは、ほぼ同時期である。その後、西独が同じような判断を下している。むしろ、あくまで商業再処理実施にこだわり、六ヶ所再処理工場の開発を継続している日本の場合、追加の工費積み増しで、総額では一桁高い数兆円単位の開発に陥ってしまっている。そして、この先六ヶ所再処理工場が本格稼働に漕ぎつけたとしても、それによって経済的にはますます傷口を広げるだけなのである。

夢の原子力時代実現に向けて技術開発が始まった頃、米独やその他の開発先行国に比較して、多少時間的な遅れはあったものの、日本の技術開発内容は他国と比較して特徴があるわけではなかった。敢えていえば総花的で、開発理念というか基本方針が見えない程度であった。しかし今や日本の原子力技術開発の全体像は、開発を放棄する技術と開発を継続する技術の取捨選択を経て「いびつ」に変形し、他国からみて異様な形相を呈してきているといえよう。原子力時代の到来を夢見て始まったはずの技術開発だが、日本は他国のように単にその夢から醒めることはなかった。むしろ、変質してしまった悪夢の中で、日本は未だにうなされているのである。

⁴¹ 高速増殖炉関連予算については、野澤・福田（1976）の p28 を、また高温ガス炉・原子力製鉄関連予算については、『原通』No.2185 の pp1～5 を参照した。

⁴² 『原通』No.2204 の pp9～10 を参照。

⁴³ 伊原（1984）p235 によると、初期投資額3億ドルと追加投資見積額10億ドルであった。これらを合計し、円相場は1ドル250円とした。

⁴⁴ 西独の数字は不明だが、前段で触れた高速増殖炉の開発資金額が米国などと同様の規模だったことからみて、桁違いの金額にはならないはずである。

おわりに

今から約 60 年前、夢のような原子力時代の到来を喧伝し、多くの人々を扇動した責任の一端は、当時、原子力技術開発に携わった人々にある。そもそも、彼らは、自らの語る夢を信じていたのか。

核・原子力技術開発で先頭を走り続けていた米国では、実際に夢を現実に変えようと、能力のある人々が集ってベンチャー企業が立ち上がった。本稿で登場した米国の GA 社など、その典型例である⁴⁵。しかし、彼らの能力をもってしても現実の壁は厚く、米国社会伝統の非情な損得勘定で、様々な計画は淘汰されていった。ある意味、それが健全な技術開発の在り方だったのかもしれない。今までみてきたように、来るべき原子力時代の到来を告げる技術はほとんど不発に終わった。西独の場合も、彼らが伝統的にもつ分厚いエンジニアリング能力で粘り、ある程度の前進を得たが（一体型船用炉、ペブルベッド型高温ガス炉など）、夢の現実化には及ばなかった。米独の各種原子力技術開発撤退までの一連の流れには、大まかにこうした背景があると考えられる。

一方、高度な技術開発に日の浅い経験しかもたない日本は、様々な原子力開発分野で先発国を後追いしただけにとどまった。各国で様々な技術的冒険が夢見られた時代に、まったくの新機軸となる原子力技術開発を日本が提唱した例は見当たらない、それでも当時の時代背景を鑑みると、開発の実務に携わっていた技術者は、原子力時代到来の夢や理想を胸に抱く者が大半だったと考えられる。一方、その後の原子力船「むつ」や高速増殖原型炉「もんじゅ」開発の顛末をみてもわかるように、日本の原子力技術開発は、そういった現場の人々の思いとは無関係に動いてきた。例えば、「むつ」新母港の関根浜に港湾整備費 600 億円を投じる決断をした人間にとっては、原子力技術開発など、実際のところ、どうでもよかったに違いない

日本国内において、現在進行形で巨額の資金を浪費し続ける六ヶ所再処理工場建設だが、もはや原子力技術開発とは別の論理で動いているとしかみえない。現在、均衡を欠いた状態の日本の原子力技術開発、中でも不均衡が集中する商業再処理事業を、前に進めようとしている人々は、その先に何を夢見ているのか。原子力がもたらすはずだった未来技術の夢を、まだ見続けているのか。おそらくそんなはずはなく、彼らには彼らなりに得るものがあると考えて行動しているはずである。巷でいわれている日本の核武装能力の維持も、そうした効能の候補になりうる。だが、実は別の思いがけない要素が隠されているかもしれない。そして、ひょっとすると当事者にしかわからない論理があるのかもしれない。そ

⁴⁵ GA 社はある意味、原子力ベンチャー企業の先駆者でもある。詳細は榎本（2014）を参照のこと。

れが人類の幸福を増進する技術開発として肯首できるものかどうかは分からないが。

本稿が明らかにしたのは、日本の原子力技術開発史にみられる特異性である。このように他国と比較してみると、各原子力技術に対する価値判断が、日本の場合かなり特殊であったことが明確となった。特に時間経過とともに、その特異性があらわになってきた。戦後の立ち位置が日本と似ている西独と比較しても、その差は歴然としている。筆者が研究対象としている商業再処理工場の離島設置案の調査段階で、日本の核燃料サイクル技術に対する執着は、関連する様々な資料から漠然と感じていたところである。今回、このような形で明確にできたことは、今後の調査を拡大していくうえで、日本の核燃料サイクル政策問題を明らかとする手掛かりの一つとなると考える。

一方、紙幅の関係により同時代の原子力技術開発で今回取り上げられなかった事例もあった。特に日本が遅れて取り組んだ軽水炉改良・高度化計画を、今回の見取り図の中に位置づけることは非常に重要である。また、比較対象も米独の技術開発を中心として、英仏などとの比較は、対象を絞ったところでしか行えなかった。これらの点を今後の課題として明示しておく。

以前の論考でも触れたが、筆者は現地調査で訪れた場所の原子力PR施設はなるべく見学するように心がけている。その中でいつも感じるのは、PR施設全体にそれとなく漂う懐かしい未来のイメージである。筆者の世代であれば、少年時代にまだ感じられた原子力時代到来の夢、その残滓が現代の原子力PR施設には残っているのだろう。しかし、もうそろそろ、長い夢から目を醒ますべき時がきている。

謝辞

本論文に係わる研究は、筆者である樫本が研究代表を務める科研費(26380689)の助成を受けたものである。ここに謝意を表す。

文献一覧

書籍

伊原辰郎(1984)『原子力王国の黄昏』日本評論社

大山彰(1985)『現代原子力工学第二版』オーム社

科学技術庁監修(1960・2013)『復刻版・21世紀への階段』弘文堂

倉沢治雄（1988）『原子力船「むつ」虚構の航跡』現代書館
原子力総合年表編集委員会編（2014）『原子力総合年表』すいれん舎
竹村数男（1983）『原子力船工学』成山堂
通商産業大臣官房総合エネルギー政策課原子力産業政策室編（1977）『原子力コンビナート—その展望と課題』通商産業研究社
吉岡斉（2011）『新版・原子力の社会史』朝日新聞出版
和田長久編（2011）『原子力・核問題ハンドブック』七つ森書館

論文

樫本喜一（2014）「オリオン計画—核パルス推進型宇宙船：1950年代後半、米
国物理学者たちが構想した「2001年・宇宙の旅」」『現代生命哲学研究』第3
号、pp31～49
樫本喜一（2017）「原子力コンビナートと幻想の未来—新全国総合開発計画にお
ける原子炉多目的利用」『現代生命哲学研究』第6号、pp79～100
野沢豊吉、福田信之（1979）「原子力の中堅技術者諸兄！」『動向』通巻1389
号、pp26～9
安田秀志・滝塚貴和（1996）「米国及び旧ソ連の原子力ロケット」『JAERI -
Review』No.96-015、日本原子力研究所

定期刊行物その他

『原通』原通（国立国会図書館本館蔵書）各号
『ATOMICA』国立研究開発法人日本原子力研究開発機構（web サイト）の各
項目