

軽水炉の一世紀

軽水炉システムからみた日本の原子力政策史

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)「日本の未実現核燃料サイクル施設立地計画と地域抵抗運動成功例についての実証研究」の資料調査により、現時点で判明した関連した事項をまとめて、考察を加えたものである。

震災を引き金として、福島第一原子力発電所の複数の沸騰水型軽水炉が重大事故に陥って以降、発電用軽水炉システムに対する信頼性は大きく棄損された。事故を経た現時点でも、加圧水型を含めた軽水炉は、核分裂エネルギー民事利用(以下、原子力)の中心的技術であり、世界で最も利用されている発電用原子炉である。だが、事故以前のような、その将来性に対する楽観論は影を潜めた。軽水炉に替わる原子力技術が見直されるようになったが、どの技術も軽水炉ほど利用されたことがなく、それらが軽水炉を代替できるかどうかは全くの未知数である。

さて、これまで筆者が本誌に掲載した各論考では、来るべき原子力時代を切り拓く将来技術、などに見做されて華々しく登場しながら、開発段階を乗り越えられずに表舞台から消えていった様々な原子力技術について述べてきた。一方、それと対比するように、様々な優遇施策に支えられてではあるが軽水炉が世界的に利用拡大を続けてきた点にも言及してきた。言葉を返せば、世界的に軽水炉が普及した理由そのものが、他の技術の、経済面や純技術面での実現可能性の低さを証明しているといえる(カナダの重水炉など地域的な条件と関連して現役の軽水炉以外の商業炉は存在する)。本稿では、この軽水炉システムが日本の原子力政策上どう位置付けされてきたかの変遷を追い、そこからみえてくる日本の原子力政策の特色、および問題点について考察を加える。

樫本(2020)において、国内の軽水炉の位置づけに関し、概要を次のようにまとめた。日本の場合、商業再処理や高速増殖炉などの核燃料サイクル関連技術をはじめ、船用原子炉や原子力の多目的利用の中核となる高温ガス炉、その他の将来型原子力技術と比べると、軽水炉関連技術は全く違った経緯をたどった。1960

* 大阪府立大学人間社会システム科学研究科客員研究員

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、これらは他の原子力技術と違って既に実用化されていると考えられたため、技術導入で対処することでよしとされたのである。また、先に述べ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。それゆえ、日本独自に軽水炉の共通化・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、他の原子力技術の国内開発と比較しても後発である。

遅ればせながら商業原子力発電を管轄する通商産業省（通産省）が音頭をとってはじめて、軽水炉の共通化・高度化および国産化を狙う「軽水炉改良標準化計画」は、第一次（1975～77）から第二次（1978～80）を経て第三次（1981～85）まで継続した。吉岡（2011）によると、軽水炉改良標準化計画の概要は次のとおりである。第一次・第二次計画において、トラブルが頻発し運転停止が続発していた国内軽水炉の設備利用率の向上を目指した。電力会社とメーカーの努力で、これには一定の成果が上がった。一方、第三次計画で通産省が目指したのは、技術的な過度の米国依存から脱却した、自主開発能力の獲得（日本型軽水炉）である。しかしこの目的については、通産省の思惑とは裏腹に、電力側の主張した日米共同開発事業となってしまった。だが、この時期の米国々内の商業原子力事業縮小傾向と相まって、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。吉岡はこのように述べている。なお、そもそも通産省が米国依存脱却を目指した動機については、米国の核・原子力政策転換の悪影響が、日本の主体的な原子力政策の展開に及ぶことを警戒する同省が、技術的に米国へ過度の依存をしている軽水炉の現状についても是正するために行った、というのが吉岡の見立てである。

本稿では、樫本（2019）において商業再処理に関して述べた観点を軽水炉まで拡張し、通産省の軽水炉を巡る動きの中には、米国の核・原子力政策の一方面的な変化が日本に悪影響を及ぼさないようにするという目的以外に、通商政策上の動機もあったのではないかと指摘する。日米共同開発になった改良型沸騰水型軽水炉（ABWR）¹について、吉岡も米国の看板で商談ができる日米共同開発の通商政策上のメリットに言及している。実際にこの ABWR は、輸出商談に一旦は成功している（後に撤退、中止、凍結などで実現せず）。本稿では、日本の原子力政策上の軽水炉の位置づけの変遷をもう少し詳しくみて、通商産業政策およびその背景となる技術開発政策に滲出する傾向を指摘していく。なお、本稿で分析対象とする原子力政策関連の決定主体は、原子力発電の実用炉部門（すなわち軽水炉）を管轄していた通産省である。また、通産省時代の影響は、その末裔である現在の経済産業省にも一部及んでおり、関連する点については本稿中

¹ 柏崎刈羽原子力発電所の 6 号機として 1996 年運開、世界初の第三世代原子炉とされる。

で言及する。

第1章 普及

1.1

原子力平和利用などと呼称される核分裂エネルギーの民事利用あるいは商業利用は、特殊な事例を除くと、現時点では原子力発電分野に関連する事物を指す。そして現在の発電用原子炉の主流は本稿で取り扱う軽水炉である。軽水炉とは、普通の水²を冷却剤および減速材として利用する原子炉である。ここでいう減速材とは、核分裂連鎖反応を生起させるため、核分裂で生じた中性子のスピードを「減速」させて次の核分裂を生じ易くするための媒介物質である。減速材の種類で原子炉の炉型が分類され、利用できる核燃料も変化する。なお、高速炉に分類される炉型に減速材は必要ない。

現在、日本で商業段階の発電炉として用いられている原子炉は、米国のウェスチングハウス社（WH）の流れを汲む加圧水型軽水炉（PWR）と、ゼネラルエレクトリック社（GE）の流れを汲む沸騰水型軽水炉（BWR）である。両者とも冷却剤および減速材は軽水を利用し、燃料は低濃縮ウラン³である。歴史的な経緯もあって加圧水型は WH と提携関係にあった三菱重工が担当し、関西電力、四国電力、九州電力、そして北海道電力が利用する原子炉となった。沸騰水型は GE と提携する東芝および日立が担当し、東京電力をはじめとして上記以外の電力各社が用いている。なお、世界的には PWR が主流であるが、日本では国内最大の原子炉ユーザーだった東京電力の利用する BWR のシェアが、PWR を少し上回っていた。ちなみに、加圧水型と沸騰水型を合算した場合、軽水炉が世界の原子炉全体に占めるシェアは 8 割を上回っている。福島第一原子力発電所事故以前、世界全体で見ると軽水炉のタイプ別シェアは BWR が約 25% だったのに対し PWR が約 75% だったが、事故以降は BWR が約 20% に低下し、PWR の割合は 80% に上昇している。なお、事故後に廃炉となった福島第一原子力発電所の 1～6 号機および福島第二原子力発電所の 1～4 号機は全て BWR である。

ここで、少し世界と日本の軽水炉導入の歴史をまとめてみる。日本の商業発電炉第一号は英国から導入した東海第一発電所のコールダーホール改良型黒鉛ガス炉⁴である。初代原子力委員長正力松太郎発案による原子力発電早期導入路線の影響を受けて、1956 年の段階で早くも商業発電炉を運開させた英国から取

² 重水素や三重水素ではなく普通の水素で構成された水＝軽水。

³ 天然のウランに 0.7% 含まれる核分裂反応を生じ易い同位体 U235 の濃度を 3～5% 程度まで高めた核燃料。なお、核兵器に用いるウランは 90% 程度に濃縮度を高める。

⁴ 減速材が黒鉛で冷却剤は二酸化炭素。黒鉛は減速材としての効能がよく天然ウランを核燃料にできる。

り入れた。ただ、当初から国内電力会社は米国の軽水炉に注目しており、この黒鉛ガス炉は期待した性能が出せなかったこともあって、日本ではこの一基のみの導入で終わった。

商業発電炉の取り組みで英国に先を越されそうになった米国は、急遽、原子力潜水艦や原子力航空母艦の船用原子炉として開発された加圧水型軽水炉を転用して、1957年に SHIPPINGPORT 原子力発電所を運開させた（営業運転開始は翌年）。この時、原子力潜水艦の生みの親である米国海軍リッコーバー提督配下の原子力技術者が原子炉の設計と設置を監督したとされる⁵。そして、船用原子炉の契約企業だった WH がそのまま SHIPPINGPORT 発電所の主契約企業に横滑りした。一方、GE は、発電用軽水炉として独自に沸騰水型軽水炉を開発して売り出した。船用原子炉として求められる性能からやや複雑な構造⁶をもつ PWR に対し、BWR は構造が比較的単純だった⁷。ただし、BWR は補器を内蔵せねばならないため原子炉圧力容器（原子炉本体）が大型となり、また出力密度が PWR に比べるとやや低いなどの欠点もあり、両者ともに一長一短あってこの時点では優劣がつかなかった。ともあれ、このようにして PWR と BWR の二系統の軽水炉が米国から生まれたのである。

1963年、GE は火力発電に匹敵する発電コストと固定価格販売で BWR 発電システムを受注した（オイスタークリーク発電所、電気出力 60 万 kw）。この定価販売と完成まで原子炉メーカーが全責任を負う「ターンキー方式」が画期となって、軽水炉ブームが世界的に展開した。すぐさま WH も GE の手法に追随したため、BWR と PWR の二つの炉型がほぼ同時に西側世界に広がった（独自の炉型を開発していた一部の国を除く）。日本は、前述したように歴史的経緯に沿って企業別に WH と GE 二系統の軽水炉を導入した。なおその後の世界的傾向と相違し、日本国内で BWR と PWR の導入数がほぼ拮抗した理由は、軽水炉の導入が開始された時より、「通産省が産業政策的見地から電力業界に要請して、二つの企業系列にほぼ平等に仕事が割り当てられるように、九電力会社を PWR 採用会社グループと BWR 採用会社グループに分割させた」からだという指摘がある⁸。日本では、研究・開発段階のものを除く発電用原子炉は通産省が管轄する⁹。導入当初の優劣が判別できなかった時点では、選択の余地を残すという意味があったと考えられるが、以後もこのような政策的介入を続けた点は、日本の原子力政策の特殊性の一つを生み出す結果となってしまっている。潜水艦の

⁵ レスリー（2021）,p.186.

⁶ 冷却水の巡る回路が、炉心を冷却する一次系と、タービンを回す蒸気を発生させる二次系の二重構造となり、蒸気発生器を介して二つの回路が結ばれる。

⁷ 炉心を収めた原子炉圧力容器内で冷却水がタービンを回す蒸気となる。

⁸ 吉岡（2011）,p.123.

⁹ 70年代半ばまで許認可権限は科学技術庁（科技庁）にあったが、後に通産省へ移管された。

発注を川崎重工と三菱重工に交互に割り振る防衛装備品調達の手法と相通じる部分があるともいえるが、軽水炉の場合は世界の趨勢と齟齬をきたしている点は否めない。考えてみれば、戦前から、技術導入先が相違していたため東日本と西日本で交流発電の周波数が違ってしまい、現在に至ってなお東西で送電網が接続しにくいという前例があるにもかかわらず、再び同じような轍を踏んでしまっている。

欧州西側先進工業国は、当初日本と同様に **BWR** と **PWR** の両炉型を導入したが、次第に **PWR** に主軸を移していった。現在、既に説明したように旧東側諸国を含めた世界全体では **PWR** が軽水炉の主流となっているが、それには各種の技術的な理由があると考えられる。一部例示すると、**PWR** は、元々原子力潜水艦の船用炉として考案された原子炉を発電用途に転用したものであったため、軍用炉に求められたコンパクトで高出力という技術的特性があり、それが経済的にも有利に働いたこと¹⁰。また、初期の蒸気発生器細管にまつわるトラブルを克服してからは、一次系がクローズド=システムで水質管理に都合がよく、腐食などの問題が発生しにくい **PWR** の技術的特性が効果を発揮し、稼働率が **BWR** に比べて高くなったのも有利だった¹¹。こういった点が好感されてか、**PWR** は世界的に軽水炉の主流、すなわち世界で最も稼働する炉数の多い原子炉型へと昇り詰めていったのである。**PWR** が軽水炉の事実上の標準となった原因は例示した理由だけとは限らないが、いずれにしてもすでに軽水炉の 80%が **PWR** となっている以上、軽水炉自体の命運はひとまず措いて、この趨勢は今後も変化しないと考えられる。

先行した英国製の黒鉛ガス炉を押し退けて軽水炉（当初は **BWR** と **PWR** の双方）が商用原子炉の主流になった理由は、実際に黒鉛ガス炉をはじめとした他の炉型と比較して高性能、かつ経済的に有利という面も大きいですが、ユーザーにとって魅力的だった販促手法も大きく貢献している。先述のターンキー方式である。いわば原子炉の保証付き定価販売といった販促方法であり、ユーザーの電力会社にとって未知数の新技術を導入する際の敷居を大きく下げた。しかし実際のところ、ターンキー方式は原子炉メーカー側にとって負担が大きかった模様である。軽水炉導入段階の販売では、利益が出るどころか大幅な赤字を出しながら事業を継続せねばならなかったという **GE** 内部の証言がある。最初の難関を乗り越えて軽水炉産業が確立するまでに、当時の金額で 10 億ドル単位の超過支出が存在したとのことである¹²。ちなみに、この **GE** 関係者は、記事の同じ箇所、軽水炉以外の原子炉、特に高速増殖炉や核融合炉などといった、開発費が軽

¹⁰ 吉岡（2011）,pp.97-99.

¹¹ 舘野（2011）,p.212.

¹² 『原子力産業新聞』1976年6月24日付記事（3）

水炉と比較して膨れ上がってしまった次世代型・将来型の原子炉を産業的に確立させようとした場合、ターンキー方式を再び利用するのは不可能であろうと述べている。コストを度外視した軍用原子炉製造時のデータを流用できたこと。冷却剤に軽水（普通の水）を用いているため火力発電で利用される技術がそのまま転用できたこと。当時の発電炉の設備容量が後に比べると小さかったため、原子炉の実用化に必要な各段階である原型炉や実証炉の建設費が低く抑えられたこと。軽水炉の販促にターンキー方式が可能だった理由は、当時いくつもの幸運に支えられていたのである。

軽水炉が世界各国で次々と導入されていった時期、すなわち軽水炉ブームと呼べる期間は、1964年に開催された第3回原子力平和利用国際会議における米国製軽水炉のPRが発端とされる。これをきっかけに米国製軽水炉の優秀さが世界的に注目されるようになった¹³。以降、各国で軽水炉が導入されていったが、実際には喧伝されたような高性能は初期トラブル多発で発揮できなかった（かといって軽水炉以外の原子炉が取って代わることもなかった）。軽水炉を導入した本家米国を含め日本も西側欧州諸国も安定稼働に試行錯誤を重ね、各々のやり方でそれを克服する必要があった。軽水炉を含んだ全炉型による原子力発電の設備容量の拡大は、当初予想を裏切って伸び悩んでいく。国などの公式が発表する原子力発電設備容量拡大の見通しは、年度ごとに下方修正されるのが常であった。それでも1970年代後半になると、電気出力1億kwを超え、世界的に原子力発電は無視できない規模に達したのである。

1.2

ここまで軽水炉が世界的に普及してきた経緯と、それを可能にした他の炉型に比べて軽水炉が有利な点について述べたが、当然ながら軽水炉ならではの不利な点も存在する。なかでも最大のものは、核燃料製造時にウラン濃縮という厄介なワンステップが必要不可欠という点である。

軽水炉導入期にあたる1960年代半ば以降、しばらく軽水炉用核燃料の低濃縮ウランは、ほぼ全量を米国が供給していた。軽水炉の販売合戦が燃料供給保障と抱き合わせだったという点もあって、この事実が軽水炉の世界的な普及の障害にはならなかった。だが、核燃料供給部分を握っていれば、軽水炉導入国に米国の影響力が購入後も強く及ぶという側面は残り続ける。また、軽水炉の技術的な特許も同様に導入国を拘束する。

そもそも、米国がアトムズ・フォア・ピース（平和のための原子力）を掲げ、核エネルギーの民事利用のために、それまで機密としていた核物質や関連技術・情報の公開に舵を切った背景には、各国（西側同盟国含む）が独自に核・原子力

¹³ 吉岡（2011）,p.119.

技術開発へ乗り出して、無秩序に核関連技術が拡散するのを防止したいという思惑がある。核兵器に直結する技術（機微核技術）は、核燃料を製造する際と使用済核燃料を再処理する場合の、軽水炉燃料の上流部分と下流部分に集中するので、その部分さえ抑えていれば核拡散は未然に防止できるという考え方である¹⁴。また当時、ソ連との核軍拡競争期を経て過剰な兵器用ウラン濃縮設備を米国は抱えていたことも幸いし、軽水炉普及に伴う需要拡大にあたっても核燃料供給に必要な濃縮役務にしばらく不足はなかった。原子力潜水艦の舶用炉を転用したことや、このウラン濃縮設備の一件といい、軽水炉も冷戦期の核軍拡競争と決して無縁ではない。

日本が本格的に原子力技術を導入し始めた時期、すなわち政治主導で 1954 年に原子力予算が成立した当初から、原子力関連技術の蓄積で他を圧倒していた米国への依存は始まっている¹⁵。まず、米国から研究用原子炉とその核燃料が日本に入ってきた。日本最初の原子炉は、1957 年 8 月に臨界を迎えた旧日本原子力研究所（原研）の米国製研究炉 JRR1 である。その後、初の動力用試験炉も米国製を導入し、核燃料も米国が供給した。1963 年 10 月 26 日に日本最初の原子力発電を行った原研の JPDR（GE 製 BWR）である。英国製黒鉛ガス炉の東海一号炉が間に挟まったが、1970 年代から米国製軽水炉（PWR と BWR の双方）が商業炉として国内電力会社の原子力発電所で本格的に稼働し始めた。この原子炉の核燃料も米国からの供給である。そして米国製の核燃料は全て濃縮ウラン燃料である¹⁶。この米国に依存してしまう状況に、導入が始まる前の段階から一部の科学者は危機感を抱いて問題点を指摘していた。彼らの主張は、日本の原子力研究の自主性が損なわれ、国内原子力関連産業が米国の核戦略の一端に組み込まれてしまう、という危惧だった。米国製濃縮ウランを利用することの、いわゆる「ひも付き」問題である。一方、日本政府も、原子炉技術や核燃料を米国に依存しきったこの状況を問題なしとみている訳ではなかったが、彼らの問題意識は科学者のそれとは別のところにあった。

1960 年代から 70 年代初頭にかけて、世界的に原子力発電の拡大が当然視された時期、ウラン資源の希少性が問題視されていた。現実には杞憂に終わったことを現在の我々は知っているが、当時は原子力が世界的に発電量の多くを占めるようになれば、いずれ近い将来ウラン資源も枯渇するのではないかと恐れられていた。国内の鉱脈ではウラン資源が確保できないと判明してからは、よりいっそう日本にとってそれは憂慮すべき問題となった。もともと天然ウランの中に

¹⁴ 米国製核燃料は使用後も米国の権利が及ぶ。なお、軽水炉でも経済性を無視し運転時間を極端に短く切り上げて核燃料を取り出せば、兵器転用できる質の核分裂性プルトニウムが生成可能なので、軽水炉技術そのものが核兵器と無関連という訳ではない。

¹⁵ 以下の各項目は、吉岡（2011）,pp.103-110。

¹⁶ 軽水炉燃料は低濃縮ウランだが、一部の研究炉は高濃縮ウラン燃料。

は0.7%しか核分裂性のウラン同位体 (U235) が含まれておらず、核燃料としてウランを濃縮した後、あるいは原子炉内でウラン燃料を「燃やした」後は、大部分の核分裂しにくいウラン同位体 (U238) が残り滓 (減損ウランあるいは劣化ウラン) となって余ってしまう。しかし、核・原子力開発当初より、その残り滓から核燃料を生み出す裏技のような手法があることが知られていた。原子炉の中で核分裂反応の際に放出される中性子を浴びた U238 は、核燃料にもなる核分裂性プルトニウムに変換するのである¹⁷。そもそもアジア太平洋戦争末期に長崎へ投下された原子爆弾、すなわちファットマンの核爆発物質としてプルトニウムが利用されたことから、戦時中の核兵器開発の時点で原子炉内においてプルトニウムが生成されるのは自明であった。元々原子炉はプルトニウム製造機器として考慮されたものであり、戦時中は原子炉内の核分裂で生じた熱は利用されず捨てられていた。ここから、炉内で核分裂反応を起こしつつ、反応を起こした分以上の新たな核燃料もつくりだすという増殖炉の概念が誕生したのである。

増殖炉の概念誕生は核・原子力開発の歴史と同じくらいに古い。日本の原子力推進官庁を含む世界の核・原子力政策の関係者には、軽水炉を導入しつつも原子力利用の本命は増殖炉であり、軽水炉は増殖炉システム完成までの中継ぎの技術であるという観念があった。国内の原子力推進政策策定の最も早い段階のものの一つ、原子力委員会が1957年の「発電用原子炉開発のための長期計画」で示した方針でも、60年代後半には軽水炉が商業発電炉の主流になると予測しつつ、「(その) 軽水炉もまた、日本原子力研究所 (原研) を中心とする開発部隊による国産増殖炉実用化までの『つなぎ』とみなされていた」という指摘がある¹⁸。後に開発部隊が原研から旧動力炉・核燃料開発事業団 (動燃) に交代しても、このような考え方の原則は大きく変わらなかった¹⁹。

ウラン資源の枯渇問題にしろ、米国製濃縮ウランの「ひも付き」問題にしろ、増殖炉を国産化すればすべて解決可能とみなして、日本の原子力技術開発の軸足は常に増殖炉に重点があった。この技術開発を担う政策面の主体は科技庁であり、本稿の焦点となる通産省は周辺的な立場であったが、彼らも大枠ではこの政策方針を是認していた。軽水炉が原子力発電で確固たる地位を占めるようになってきた1970年代半ばまでに、原子力技術開発に投じられた国費のうち、軽水炉関連の費用は累積で全体の約5%を占めるに過ぎない。同時期の原子力技術開発関連予算の1976年度概算要求額において、トップを占める核融合臨界試験

¹⁷ プルトニウム同位体も各種あるが Pu239 が核物質として適している。

¹⁸ 吉岡 (2011) ,p.104.

¹⁹ 第2章末で解説するが、1990年代半ばになる頃には、増殖炉の実現が疑問視されるようになり、現実的な選択肢として軽水炉以外存在しない状況になる。

装置の 348 億円は別枠としても、次に額が大きいのは高速増殖炉開発関連費の 279 億円、そして新型転換炉開発関連費の 174 億円が続くのである²⁰。ちなみに、新型転換炉とは日本の独自技術で開発した重水炉の一種で、使った以上に増殖させるのは不可能だが軽水炉よりもプルトニウム生成率が高い原子炉である。さらに参考として述べると、運転中の軽水炉の炉内でも、低濃縮ウラン燃料中の U238 (97~5%) の一部は中性子を吸収して Pu239 に転換する²¹。軽水炉の使用済核燃料から核燃料に再使用できる Pu239 を抽出するのが、現在青森県六ヶ所村に建設されているような再処理工場である。

国内ではこのように増殖炉に重点を絞った自主開発戦略がとられたが、日本と同様に米国から軽水炉を導入する立場だった西側欧州各国は、1960 年代から 70 年代にかけてどのような戦略をとったのか。軽水炉はあくまで「つなぎ」で本命は増殖炉という基本的観点は共有しつつ、日本のような増殖炉の一点張り戦略とは距離を置いた方針で臨んでいたのだった。

第 2 章 追従と迷走

2.1

1972 年、フランス原子力庁は、中央アフリカのガボン共和国にあるウラン露天掘りのオクロ鉱床において、20 億年前に天然の原子炉が存在していたと発表した。天然ウランに含まれる核分裂性の U235 の半減期は 7 億年余、それに比較して天然ウランの大半を占める U238 は半減期 45 億年弱と長い。地球が誕生してから約 46 億年が経過しているため、もともと存在した U238 の約半分が壊変せずに残っている一方で、U235 はすでに大半が壊変してしまったことになる。逆に言うと、地球の地質学的な歴史を遡れば、天然ウラン中の U235 の比率が軽水炉中の低濃縮ウラン燃料と同じ程度の時代が存在したということであり、それがこの 20 億年前という話である。この時代のウラン鉱脈中に地下水が流れ込むと、ちょうど軽水炉の炉心部と同じ状態になる。実際には間欠的な核分裂連鎖反応が断続したと思われるが、約 60 万年間、天然の原子炉は存在したとされている。ともかく、自然現象で軽水炉と同じような反応が生じたのは確認された事実である。

この逸話は、高レベル放射性廃棄物の地層処分の正当性を主張するのに用いられる。天然原子炉の中で生じた核分裂生成物（高レベル放射性廃棄物の主成分）が、ウラン鉱床中から十億年以上の期間にわたり移動していなかった事実があるからである。だが、本稿で注目したいのは軽水炉の特質と似ていたという点で

²⁰ 以上の数値は、野沢（1979）,p.28.

²¹ 使用期間の長い軽水炉の核燃料中では、さらにその Pu239 が核分裂を起こす。

ある。つまり、適度に濃縮された状態のウランが水に漬かるだけで自然に原子炉が稼働したという部分である。実際の軽水炉の運転状態と天然原子炉を比較するのは乱暴な話であるが、それでも軽水炉以外の原子炉は様々な工夫を凝らさないと満足に稼働しないのに対し、自然に反応が起こり得るような、軽水炉の工学的な素性の良さは頭一つ抜けていると考えられる。また、人類が扱っている普通の水が利用できるという点も、他の原子炉より扱いやすい特質をもつといえよう。今日、世界で稼働する商業炉の約8割を軽水炉が占めるのも、故なことではない。

導入初期よりこうした軽水炉の性質の良さは知られており、日本と同様に米国から軽水炉を導入した西側欧州諸国は、その点を日本より重視した模様である。いずれ増殖炉の時代が来るとしても、軽水炉も十二分に利用すべきだと判断した。そこで彼らは、導入後まもなく米国製軽水炉をもとにして独自の軽水炉技術をマスターしていったのである。

以前の論考でも日本と比較するために引き合いに出した西独の事例を、ここで再びみてみよう。西独の軽水炉国産化と、その軽水炉の稼働に必要な濃縮ウラン燃料の確保について、同時代的な資料中に興味深い指摘がある。当時、日本の原子力推進官庁が軽水炉システムを軽視する姿勢を批判していた原研の関係者でもある東工大教授の言葉である（掲載誌の発行は1979年だが、この文章が書かれたのは1975年の段階と思われる）²²。

西独の原子力は、日本とおなじく平和利用だ。敗戦の焼野原から立上った点も、原子力開発に政府投資の始まった年も日本と大体おなじ（1954年）。

西独の開発のきわだった点は62年から67年にかけて重点投資（日本の予算の4倍から5倍）を行った点である。ウラン濃縮について遠心分離方式とノズルジェット方式とを完成させた。前者は英・蘭と共同の三国分離事業として実を結び、後者はブラジルへの核技術一括輸出協定に盛り込まれた。軽水炉については米国型を改良した自主技術を完成させ、輸出可能なレベルに到達した。すでに原理特許から周辺特許まで取り終えたから国際原子力機関の査察を受けても痛くも痒くもない。

引用した文中にもあるように、西独は米国が独占していた原子力発電プラント輸出市場に殴り込みをかけ、ブラジルとの間に、核燃料サイクルを含む原子力プラント技術の輸出協定を締結することに成功していた。1975年当時、史上最大といわれた輸出協定である。その中には西独の独自開発技術をもとにした軽水炉8基の輸出を含んでおり、当時の金額で過去最高となる数兆円規模の巨額取

²² 野沢（1979）,pp.26-7.

引となった²³。もちろん、引用文中にも書かれているが西独は日本と同様の非核兵器国の立場であり、取引は平和利用限定である。だがブラジルとの商談の場合、西独はライバルとなった米国との商戦において、核燃料サイクル技術を「オマケ」につけることで交渉を有利に進めたという指摘がある²⁴。米国は、核拡散防止の立場から、ウラン濃縮や核燃料再処理などの技術供与、ならびに再処理後のプルトニウム核燃料再利用には否定的だったため、西独はその隙を突いた形となった。なお、西独とブラジルの商談には、引用した文中にあるウラン濃縮だけではなく、使用済核燃料の再処理といった核燃料サイクル関連技術全般の供与も含んでいた。ちなみに同時期、ウラン濃縮および再処理の両技術について、日本はパイロットプラント規模の開発に苦心しているところであった。こうした点でも、同じ敗戦国同士で非核兵器国の西独と比較して、軽水炉の独自技術ばかりでなく、核燃料サイクル技術本体についても彼らの後塵を拝していたといえよう。念のために付け加えると、ブラジルが実績のある米国製軽水炉を蹴ってまで西独製を選んだ理由は、核燃料サイクル関連技術、すなわちプルトニウム燃料やウラン濃縮技術をもつことで、核武装能力に接近できるプラスアルファの価値を重視したからと考えられる。

西独ばかりでなく、旧西側欧州諸国の中ではフランスも独自の軽水炉技術をマスターして輸出市場に乗り込んできていた。仏はポンピドゥー政権時に国内軽水炉開発を経済性に優れる PWR に一本化した²⁵。WH の資本を含むフラマトム社が仏の軽水炉製造を一手に引き受けていたのだが、1975 年の年末、WH はフラマトム社の持ち株の大半を譲渡し、同社は仏の民族資本の支配下になる旨、発表される²⁶。この交渉時に威力を発揮したのが、仏の持つウラン資源カードである。1975 年、WH は天然ウラン価格高騰によって、それまでの核燃料保証付きで原子炉を販売する手法が取れなくなっていた。実際には原子力発電の設備容量拡大が予想を下回ってきていたため、実需はひっ迫していなかったが、1973 年の第一次石油危機もあり、政策的な問題や思惑が絡んで投機的なウラン価格になったとされる。なお、結局のところ実需が伴っていなかったため、1980 年代に入ったとたんに一転してウラン価格は急落している²⁷。フランスは、日本以上に高速増殖炉開発に重点を置いていたが、軽水炉開発は PWR に絞って技術を獲得していった。また、早くから国家的にウラン資源確保の重要性を認識して、「原子力庁のもとで世界のウラン鉱開発に乗り出して、国内や旧植民地ニジェ

²³ その後のブラジルの経済不振もあって実現したのは軽水炉 1 基のみである。

²⁴ 高瀬 (1976) ,p.25.

²⁵ 伊原 (1984) ,pp.43-4.

²⁶ 『原子力産業新聞』1976 年 1 月 8 日付記事 (2)

²⁷ 伊原 (1984) ,pp172-7. ※高価格を前提にウラン採掘・濃縮などの事業に遅れて乗り出していた日本は大打撃を受けたとされる。

ール、ガボンなどで着実にウラン生産者の地位を固め」ていたのである²⁸。こうした点が、ウラン資源確保に悩む WH との交渉を有利に進める材料になったと思われる。先に引用した原子力産業新聞の記事にも、交渉締結時に、仏原子力庁から WH に対して毎年 200 トンの天然ウラン供給が約束されているとある。ちなみに、本章冒頭で述べたオクロの天然原子炉が発見されたのは、仏のウラン資源開発中の一エピソードである。

軽水炉用の濃縮ウラン燃料に関しても仏、西独は順次米国の影響を脱している。ウレンコ（西独、蘭、英で 1971 年設立）とユーロディフ（仏、伊、他 5 カ国で 1974 年設立）により、欧州自身で軽水炉の低濃縮ウラン燃料を自前で確保する道が拓けた²⁹。また、核保有国である仏は使用済核燃料の再処理でも商業化に早くから取り組んでいた。旧西側欧州諸国は一体でフロントエンド部門だけではなくバックエンド部門も取り揃えたのである。ちなみに日本の商業再処理は、東海工場、六ヶ所工場ともにフランスからの技術供与で成立している。米国の影響を脱して西独、仏が独自に軽水炉システムを輸出可能にまでなった背景は以上のとおりである。

ここで一点注意喚起しておく。詳細は次章で説明するが、日本が羨望のまなざしを注いだ原子力プラント輸出は、西独、仏共にあくまで国内で拡大し過ぎた生産力のはけ口であって、プラントメーカーはいずれも軽水炉ビジネスで思ったように稼げていなかったという事実である。これは日本の製造者も同様であった。原子炉ユーザーである電力会社は別として、重工、電機などの原子力関連機器製造産業は市場規模が設備投資に見合わない狭隘さを宿命的に抱えているのである。

西独、仏の原子力産業の裏事情はともかくとして、日本にとって米国の影響を脱し、独自の歩みを始めた彼らの核・原子力政策は十分以上に魅力的に思えた。樫本（2019）で示したとおり、通産省など国内の原子力関係省庁や産業界は、遅まきながらそれまでの方針を見直し始めた。最初に変化が出現したのは核燃料の確保に関連する分野である。商業再処理実施に向けて本腰を入れるようになり、実質的なパイロット施設だった東海再処理施設（科技庁管轄の動燃が主体）が稼働する前から、通産省が大規模な商業再処理工場建設に向けて立地候補地調査を開始した。筆者が以前から調査している奄美群島徳之島の MA-T 計画調査が始動したのは 1974 年である³⁰。またウラン資源確保に向けては、1970 年代に入っただけで、鉱山会社や電力会社が主体となって設立された海外ウラン資源開発が、フランス原子力庁に協力してニジュールのウラン採掘事業に参画して

²⁸ Ibid., p.44.

²⁹ 吉岡（2011）,p.131.

³⁰ すでに 1970 年代初頭、水面下で現地人脈との接触は開始されている。

いった。当時、これら核燃料確保に関連する動きが最初にあったのは、エネルギー資源の確保や自給体制構築への志向性が日本に存在したことがその理由の第一と考えられる。特に第一次石油危機後にこの動きは加速している。

一方、自前の軽水炉本体技術獲得に関して、先に引用した文章にもあるとおり、政府はまだ煮え切らない態度であった。政府が費やした原子力開発予算中、累積でわずか5%しか軽水炉の技術開発には注がれていない。その後、費やす予算の実額、割合ともにやや増えたのだが、当時、日本は米国から導入した軽水炉に多発する初期トラブルによって、原子力発電所の稼働率低下に悩まされており、それに対処する費用で精一杯といった状況だった。1970年代初頭、原子力輸出に関して、通産省は自主技術を獲得して輸出するなど時期尚早と考えていた³¹。「原子力、航空機など高度の技術が要求される産業についてはアメリカ、ソ連などと比較するとまだ遅れた段階にあると言わざるを得ない」というのが、1974年当時の通産省内部の自己認識である³²。

本稿のはじめにでも触れたように、国内に導入した米国製軽水炉の稼働率の低さを改善し、判明した不都合な箇所などに改良を加えるため、1975年から第一次の「軽水炉改良標準化計画」が開始された。これに関連して、日本のものに比べ高稼働率を誇る、西独製加圧水型軽水炉の精緻な規格化・標準化プログラムを注視しているという記事がある³³。この時期、ほかにも様々な同時代資料中に西独の軽水炉や核燃料サイクル技術への言及がみられる。戦後、日本と同様の立ち位置だったにもかかわらず、戦勝国、すなわち核保有国に肉薄（一部は凌駕）する西独の技術力への羨望が垣間見える。ただし、西独によるKWU社製PWR輸出の申し出があったものの、それは断っている。このKWU社は、ジーメンス社とAEG社の共同出資会社で、西独の原子力設備供給を一手に引き受ける企業である。なお西独のPWRはジーメンス社の技術である。第一次改良標準化計画が開始されて以降、メーカーの努力などで徐々に日本国内の軽水炉稼働実績が向上し始め、明るい兆しも見えていた。しかし、通産省が十分その兆候を認識し、すぐにこの流れを現実の政策に生かそうとしていたとは言い難い。第一次の軽水炉改良標準化計画でも、申し入れのあった西独製軽水炉導入を断ったように、最終的な目標は日本型軽水炉システムの構築という暗黙の了解はあったのだが（当時の資料中に日本型軽水炉の表現が見える）、1970年代を通じ、むしろ通産省は軽水炉以外の炉型に食指を伸ばしていたのであった。

³¹ 『原通』No.2097,p.2.

³² 工業技術院研究開発室（1974）,p.40.

³³ 『原子力産業新聞』1976年3月11日付記事（4）

2.2

以下で、当初は軽水炉以外の様々な炉型導入に動き、最後になって日本型軽水炉開発集中に帰結した通産省の動きを説明するが、それを論旨明快に説明するのは実は難しい。原因には筆者の調査不足や理解力不足の問題もあろうが、まずもって当時の通産省の炉型戦略の方針自体が、混乱あるいは迷走していたとしか考えられないからである。

まず通産省は、傘下の電源開発株式会社を通じ、1970年代半ばまでは米国のジェネラルアトミック社（GA）の高温ガス炉を導入する方向で動いていた。詳細は檜本（2020）で説明しているなので、ここで深入りするのは避けるが、この高温ガス炉は原子炉多目的利用を見据えた技術であり、もし万事うまくいけば人類のエネルギー消費構造を一変させる程のインパクトのある技術であった。国内の立地場所も決まり予算措置まで行っていたものの、このような冒険的な技術開発が計画通り順調に進むはずもなく、1975年末までにGAの高温ガス炉は米国々内で完全に行き詰ってしまった。その後まもなく、通産省はGA製高温ガス炉の国内導入を諦め、今度はカナダ製重水炉（CANDU炉）の導入にスイッチする。これも同様に傘下の電源開発が導入主体となる予定だった³⁴。しかし、電源開発から卸売りの電気を購入する立場の各電力会社の抵抗もあって、CANDU炉導入も立ち消えとなった。電源開発は国内電力会社に電気を購入してもらわねばならないが、軽水炉に比べて2割程度価格が高くなる電気は、とてもではないが買い上げられない、というのが電力会社の主張である。なお、CANDU炉はカナダ産の天然ウランを濃縮しないまま核燃料に利用することができる。これを日本国内で用いれば、米国製軽水炉技術と低濃縮ウラン燃料の対米依存の双方を回避できる可能性がある。付け加えると、元々電源開発が導入予定だったGA社の高温ガス炉も、高濃縮ウランとトリウムの混合燃料（ウラン1に対してトリウム4～5）であり³⁵、ウラン資源への依存を下げられる技術的選択肢ではあった。だが、軽水炉に比較すると技術的な特殊性（CANDU炉）があるか、技術的に完成度が劣る（高温ガス炉）かしており、両者ともコストは数段高くなる可能性が高い炉型であった。

敢えて通産省が炉型戦略でこのように迷走した理由を斟酌すると、1970年代に入って世界的な石油危機と米国の核不拡散方針に続けざまに翻弄され、日本にとってエネルギー資源の多様性確保が急務となった、という点が挙げられよう。1973年の第一次石油危機はいうまでもなく、また米国の核不拡散方針転換

³⁴ 伊原（1984）,p.93. ※CANDU炉導入は、資源エネルギー庁を発足させた元通産事務次官で電源開発総裁に就任していた両角良彦の肝いりという話である。

³⁵ データはアトミカ「トリウムを用いた原子炉」の項目より。

https://atomica.jaea.go.jp/data/detail/dat_detail_03-04-11-01.html（2022年3月20日閲覧）

についても以前の論考で繰り返し解説しているのでここでは指摘するだけにとどめるが、とにかく日本経済に必要なエネルギー資源確保が、通産省にとって至上命題となった。それも各種エネルギー資源の必要量確保だけでなく、エネルギー安全保障の観点から、資源入手ルートやエネルギー関連技術導入などの多様性を確保する目的もあって、原子力分野でも望みがありそうなものはとりあえず試してみた、ということかもしれない³⁶。特に、1970年代終盤のカーター政権時代、米国政府は同盟国に対しても核拡散防止協力要請に強硬な姿勢で臨み、その余波で民事用原子力部門も影響を受けていた。この時期、殊更に通産省が米国系の軽水炉技術と距離を置こうとした理由の一端は、こうした日米関係の問題と関連するのは間違いないだろう。しかし、技術政策を政治的理由で方向づけても、結局、思ったようには進まなかったのである。

1970年代、通産省が焦燥の念に駆られ、エネルギー資源の多様性確保に悪戦苦闘していた一方で、当時の日本経済のパフォーマンスは大方の予想を上回っており、世界が驚くほど素早くエネルギー危機を乗り越えて、経済もいち早く成長軌道に回復した。それに引き換え、長引く経済の不振、核と原子力の両分野にまたがる求心力の低下、挙句の果てには当時世界最悪の原子力災害となるスリーマイル島原子力発電所事故を発生させてしまい、米国の凋落は誰の目にも明らかとみえた。この事故が起こった1979年、奇しくも『ジャパン・アズ・ナンバーワン』という書籍がベストセラーになった。米国、恐るるに足りず。日本の原子力関係者の認識も変わり始めた。

1980年代に入ってすぐ、米国との困難な交渉を凌ぎきった原子力政策担当者から、反転攻勢の開始を告げる勢いの言葉が漏れ出てくる。以前の論考でも引用した文章だが、この時期の日本の意気込みを、ある意味代表する言葉である。日本政府が一丸となって米国の方針に抗った INFCE（国際核燃料サイクル評価）で日本代表を務めた田宮茂文³⁷は、著書の中で以下のように述べる。ちなみにこの INFCE の場で、米国は、日本と欧州諸国がすすめる高速増殖炉—商業再処理路線の核燃料サイクル推進政策にブレーキをかける目論見だったが、結局その目的は達成できなかった。ただし米国の懸念そのものは的中し、その後、欧州各国の高速増殖炉開発は、ほぼ行き詰ってしまうのである³⁸。

³⁶ ちなみに、CANDU 炉導入が成功しなかった後、電源開発は国産の新型転換炉の実証炉建設に動いた。だが、これも発電コストが CANDU 炉以上に割高すぎて電力会社から拒否され、最終的にフル MOX 燃料を利用可能な ABWR に落ち着いた（大間原子力発電所）。このフル MOX 燃料 ABWR は、再処理で生じたプルトニウムを国際公約に沿って消費するという役割を主に背負わされている。

³⁷ 元科技厅原子力局長、当時は日本原燃サービス株式会社常務取締役。

³⁸ 当時のカーター米国大統領は、青年時代リッコーバー提督の下で原子炉開発に従事した海軍士官だった。その経験から高速増殖炉開発などの技術的困難さを人一倍理解していたのである。

アメリカにおける原子力開発の低迷は、80年代における自由世界の政治・経済的基盤を脅かし兼ねないといっても過言ではない。INFCEを通じて、原子力分野におけるアメリカの指導力の低下が、一層加速されたということになると、この低下分を補うに足る新たなイニシアティブが、他の国々から発揮されない限り、カーター新政策を棚上げし、日本の基本的ポジション（商業再処理とプルトニウム利用路線のこと、引用者註）を受容させたと単純に喜んではいられないことになる。（中略）このようなイニシアティブの一端は、わが国が引き受けなければならないことは明らかであろう。核不拡散を確保しつつ世界の原子力開発を円滑に進めること、さらには、これによって世界のエネルギー需給の逼迫を緩和することは、今や80年代のわが国のエネルギー・セキュリティーと密接不可分の課題となりつつある³⁹。

この引用文に続く箇所、今後の日本がとるべき方針として「原子力発電施設および核燃料サイクル・サービスの輸出力強化と市場確保」がはっきり謳われている。つまり、「原子力分野における米国の指導力の低下」の間隙を突く形で、国際秩序形成に貢献しつつ、日本の原子力界も国際市場に積極的に乗り出すべきだとの意思表示である。これは原子力発電施設製造業を輸出産業化する意欲を示している。田宮自身は通産官僚出身ではないが、原子力業界に深く関与した人物である。わずか6年前、通産省の内部でも、原子力、航空機などの高度技術産業について、米国に比べ日本は「まだ遅れた段階にあると言わざるを得ない」とみて輸出に慎重な姿勢だった。そうした現状認識が、この前後の時期、一部の政策責任者の中で変容していったと考えて間違いのないであろう。通産省全体としても、それまでの第一・二次とは打って変わって、1981年から開始された第三次軽水炉改良標準化計画では、日本型軽水炉を輸出戦略の目玉に据えて本格的に取り組む姿勢をみせるようになったのである。

ただし、日本国内の原子力関係者全員が、こぞって日本型軽水炉の実現を確実視していたわけでもない。70年代を通じて電力会社は、特に重要部分に関する開発力は日本製技術より米国製技術に信頼を置いていたもようである⁴⁰。業界誌編集長だった原子力関係者の一人も同時代的な資料中で語っている。「具体的な工業製品の優劣からすると、自動車の例をもちだすまでもなく、日本製のほうがはるかにまさる」⁴¹。それは軽水炉でも似たような状況で、米国製部品が多くを占める初期の軽水炉がトラブル頻発で稼働率が低いのに比べ、後の国産化率が高まった軽水炉は稼働率が高かった。だが、品質管理などの製造面で優位に立

³⁹ 田宮編（1980）,p.254.

⁴⁰ 『原通』,No.2206,pp.19-20.

⁴¹ 伊原（1984）,p.88.

っていることは、新技術開発の力量も高いことを必ずしも意味しない。「原子力を含めた科学技術開発においては、基礎原理、独創的発想で日本はアメリカの足元にも及ばない」⁴²。このような認識をもつ関係者も、当時、やはり一定数存在していたのである。

また、蛇足ながら再度、強調しておくが、日本が第三次軽水炉改良標準化計画に取り組んでいた頃、技術的困難さに加えて経済的な実現性が見通せなくなり、世界各国で高速増殖炉の開発は頓挫しつつあった。この時代、原子力発電における現実的な技術的選択肢は、ほぼ軽水炉に限定されるようになったのである。なお、高速増殖炉開発で欧州各国より遅れていた日本も、同様の道筋を辿って高速増殖原型炉「もんじゅ」開発に失敗した⁴³。

第3章 袋小路

3.1

通産省が日本型軽水炉をスローガンとして掲げた第三次軽水炉改良標準化計画だったが、同省の意気込みとは裏腹に、基幹プロジェクトとなる改良型軽水炉は日米共同開発方式に決着した。なお詳細については後述するが、プロジェクト上は改良型加圧水型軽水炉（APWR）と改良型沸騰水型軽水炉（ABWR）の両方が存在したものの、現在までに実現したのは ABWR のみである。日米共同開発方式に至った経緯について、吉岡（2011）は、そもそも米国側の抵抗感もある中、技術的独立性を高めても経営上のメリットがない電力会社が日米共同開発方式を提案し、通産省も妥協せざるを得なかった、としている。ただ、日米共同開発とはいえど、米国内の原子力産業は、スリーマイル島原子力発電所事故以前からすでに市場が飽和して供給量過多に陥っており⁴⁴、この時期に継続的な原子炉発注の存在した日本市場および日本の製造業者に協力を仰がねば事業継続が危ぶまれる状態であった。結局、日本側が米国側の原子力産業を飲み込む形となって、「(米国との) ライセンス契約は必ずしも海外展開を束縛するものではなく、むしろ日米共同事業という形での海外展開の可能性を開くものとなった」のである⁴⁵。

前段で説明した経緯を、当時の資料などを用いてさらに解説する⁴⁶。改良型軽

⁴² Ibid., p.88.

⁴³ 1995年に発生した「もんじゅ」冷却剤ナトリウム漏洩事故だが、高速増殖炉開発で先行していた欧米各国でも同様の事象が発生している。

⁴⁴ 事故後に発注キャンセルが多発して問題は深刻化した。

⁴⁵ 吉岡（2011）,p.191.

⁴⁶ この段落の内容については同時期の『原通』および『原子力産業新聞』を利用した。煩雑となるので個別の出典は省略する。

水炉計画で唯一実機の運用開始にまで漕ぎつけた ABWR は、すでに第一次の軽水炉改良標準化計画の段階でそれに至る動きがあった。この頃、GE から日立、東芝に申し入れられた沸騰水型軽水炉の競争力強化のための改良提案が、計画の発端と考えられる。1976 年に、日米両国政府の同意があれば、GE、日立、東芝の三社は、開発体制を一本化する点で合意していた。第三次計画では APWR と ABWR は同列の扱いとなったが、第一次計画の時期に加圧水型の WH 陣営からこの手の引き合いは出ていなかった。したがって ABWR のみが発現した理由（そして問題点）も、早い時点でのこれら BWR 陣営に属する企業独自の動きに存在すると考えられる。早くから BWR の競争力強化の動きがあった背景には、当時、すなわち 1970 年代半ばの段階で、GE が原子炉製造ビジネスから撤退すると噂されていた程の BWR の受注減があった。米国内では 1974 年を最後に受注がなくなり、国外輸出でも 75 年以降の受注が途絶えた。そこで生き残りかけた GE は、日本や欧州の BWR 製造各社に協力要請の声をかけたのである。すでに軽水炉は PWR が主流となり始め、特に西独の高性能 PWR（前述の KWU 社製軽水炉）に輸出市場を奪われた GE は焦りを濃くしていた。日本は東京電力からの継続的な発注があるものの、東芝、日立の両社が受注を分け合っていたので、とうてい満足できる需要はなかった。実際、日本の軽水炉製造業者はどの社も儲かっていないとしばしば報道されており、輸出に活路を目指すべく政府に協力を要請している。原子力機器は、保障措置などで政府の介入・助力が絶対必要な国際商材である。だが、この時期の通産省は、企業の要請に「応じる」と返答はするものの、本腰を入れているとは言い難かった。その背景は、前述したように米国依存から脱却するべく動いていた当時の通産省の思惑と相反していたからである。この後、スリーマイル島原子力発電所事故後に米国の原子力産業の状況がさらに悪化して、東芝や日立が主導権を獲得できる目途がたった時点で、第三次計画がスタートしたのであった。

結局、日本型軽水炉を声高に主張するよりも、米国 GE の看板を掲げたまま輸出商戦に乗り出した方が様々な局面で有利になると判断して、通産省は日米共同開発方式で妥協した。ちなみに、日本とは正反対の状況だが、前章で PWR 製造のフラマトム社が仏の民族資本によって支配された際、仏側が WH へ完全に手を引かないように申し入れた事例がある。申し入れの理由は仏にとって WH の看板を利用できるメリットがあるためだが、逆に WH にとって何らメリットが存在しないので、彼らは即時撤退する意向だった。しかしながら仏側からウラン供給を受けるために、しばらく資本参加を続けざるを得なかったのである。

通産省が本腰を入れた第三次軽水炉改良標準化計画の結実というべきこの ABWR は、世界初の第三世代原子炉として、柏崎刈羽原子力発電所 6 号機が

1996年に運開した。その特徴は、沸騰水型のアキレス腱だった外部再循環ポンプを圧力容器内に収めたインターナルポンプ（RIP）とした点⁴⁷、制御棒駆動方式に改良が加えられた点、コンクリート製格納容器の採用など、日本国内でそれまで稼働していた BWR とは大きく変わっており、熱出力も当時最大の大型原子炉となった。発電能力も従来型 BWR の 110 万 kw から 136 万 kw と大幅に増強されている。この ABWR にかかった研究開発費の総額約 700 億円中、27% を国が負担し⁴⁸、重要部分（RIP と新型制御棒駆動機構）の実証性を担保する役割を担った⁴⁹。欧州から遅れること 20 年を経て完成した国策軽水炉（ただし炉型は非主流の BWR）である。なお、柏崎刈羽 6 号機が運開した時点で、実際には満足な稼働実績を残せていないものの国内にはウラン濃縮工場と再処理工場も一応存在し、日本もついにフルセットの原子力発電システムを取り揃えて念願の原子力プラント輸出商戦に乗り出す段階に達したのである。

以降、2010 年代はじめにかけて台湾（龍門（第四）発電所の 2 機、現在建設凍結中）、米国（サウステキサス 3,4 号機、中止）、英国（ウィルヴァ・ニューウィッドの 2 機、オールドベリーの 2 機、撤退）に、一旦は ABWR を売り込むことに成功している。前章でも少し述べたが、通産省（後継の経済産業省、経産省を含む）をはじめ国家的な後押しがなければ原子力プラント輸出は困難である。2000 年代に入って一時世界的に盛り上がった原子力カルネッサンスだが、その動きに連動した日本の原子力立国計画でも、原子力プラント輸出は中心的な課題に設定されていた。旧西独や仏に約 30 年遅れで、日本も原子力プラント輸出に国を挙げて参加したのである。なお、もう一方の軽水炉 PWR は、三菱（仏のアレバと共同）と東芝（WH と共同）による輸出があった。だが、日本が舞台に上がった時には、ドイツは原子力そのものから手を引き、仏は無理な輸出が祟って原子力産業が傾いてしまっていた。そして日本も結局、2022 年現在の段階で原子力プラント輸出は全て失敗に終わった。見積もりが甘く、実際のコストが大幅に超過したことが原因である。東芝に至っては GE との関係を清算して WH を買収した際の高額出資が祟って⁵⁰、米国事業の躓きが直接の原因となり、実質的な破綻にまで追い込まれたのである。

⁴⁷ 軽水炉各々の炉型でそれぞれ特徴的な問題が多発し、BWR は再循環ポンプ、PWR は蒸気発生器が弱点といわれた。

⁴⁸ 通産大臣認可の財団法人原子力発電技術機構 NUPEC、元財団法人原子力工学試験センター。

⁴⁹ 電気事業連合会、原子力委員会研究開発専門部会（第 8 回）資料第 2 号（2009 年 3 月 17 日）

⁵⁰ BWR を捨てて PWR 路線へ乗り換えた代償である。

3.2

現在、消極的か積極的かを問わず温暖化ガス排出削減のために原子力発電を利用すべきとする考えは存在するので、予見できる将来にかけて世界中の原子力発電所が全廃されるとは想定しにくい。しかしながら、国策軽水炉の第三世代 ABWR が、再び国際的な商機を見出すことは困難と思われる。すでに第三世代プラスと呼ばれる PWR が投入される段階を迎えており、旧世代かつ非主流軽水炉型の ABWR が復活する可能性は限りなく少ないといえよう。

そもそも、ABWR に対しては、批判的な見解が存在した。開発目標が「安全性を犠牲にすることなく、経済性で既存 BWR を大きく上回る」と設定されており⁵¹、必ずしも安全性重視に振った設計思想をもたなかった。PWR に奪われた市場を奪還することが当初の目的であるから、当然のことながら経済性重視である。炉出力が増大する一方で、安全性が据え置きされていれば、万一の事故時に顕在化する被害はむしろ上昇する可能性が高い。「問題は飛躍的に大型化され、また再循環系という、安全性にとって重要な部分が大幅に変更された新しいタイプの炉を、実験炉も作らずに『いきなり』商用炉として運転を開始したことである」という指摘もある⁵²。ABWR の個々の装備については、例えば RIP にしろ、新型制御棒駆動機構にしろ、むしろ手堅く欧州の BWR で利用実績があるものを採用しているとされる⁵³。だが、原子炉システム全体としてみれば「ぶっつけ本番」であることは否めない。次の第三世代プラスの軽水炉には、それまでの安全装備と合わせて受動的安全性を付加（後述）する観点があり、福島原子力発電所事故を受けてさらに配慮が付け加えられている（コスト増につながった）。こうした観点が存在しない第三世代 ABWR は、やはり福島事故後の軽水炉として、どうしても見劣りするるのである。

樫本（2020）において、原子力船「むつ」船用炉選択に関する説明などでも指摘したが、日本の原子力開発の歴史上しばしば観察される「筋の悪さ」が、国策軽水炉である ABWR にも窺える。第三次計画の開始時、既に PWR が世界標準となりつつあった段階で、開発努力を BWR と PWR へ均等に振り分けるだけでも筋が良くない。だがそれ以上に、製造業者側の都合で先行していた ABWR を実現が近いというだけで大規模に採用した点が、結果的に国策軽水炉を早い段階で袋小路に追いやってしまった最大の原因といえよう。

国策軽水炉 ABWR と対比した関係上、第三世代プラスの PWR についても解説を加える。ABWR に比べると、先述したように受動的安全性を付与されている点が大きな違いである。話の流れで主に欧州加圧水型原子炉（EPR）のスペッ

⁵¹ 前述の電気事業連合会の資料より。

⁵² 館野（2011）, p.142.

⁵³ 前述の電気事業連合会の資料より。

クと対比するが、他の第三世代プラス軽水炉もほぼ同様の基準がある。ちなみに **EPR** は、前章で解説したフラマトムとジューメンスの **PWR** の技術の流れを受け継ぐ軽水炉である⁵⁴。**EPR** は、万一の炉心溶融事故が生じた際、溶け落ちた炉心（デブリ）を確保するためのコアキャッチャーが格納容器下部に備え付けられている。また、デブリを冷却するための水が貯水タンクに蓄えられていて、事故時には人の手を介さず自動的にデブリを冷やすために流れ込む設計になっている。原子炉圧力容器（原子炉本体）を冷却する際にも、自動的に（重力もしくは圧力差を利用して）行える設計である。安全システムは 4 つに分離独立されていて共通要因故障を回避できる。福島原子力発電所事故のように全電源喪失状態になっても、受動的安全性が働いてしばらくは冷温状態を保てるようになっている。また、航空機の衝突に耐えられる格納容器の頑丈さが求められているとのことである（9.11 テロの教訓）。

第三世代プラスといっても軽水炉の系譜に連なるので、本質的な構造の違いはない。軽水炉の特徴と欠点は同じである。そして、各世代を経て進化する方向性も一貫している。先に触れた安全性に関する点を脇に置いて簡単にまとめてしまうならば、それは大型化、高稼働率、長寿命化である。**EPR** の場合、電気出力 160 万 kw、最大連続 24 か月運転と 16 日程度の燃料交換時間で設備利用率 95%、設計寿命が 60 年である。これでようやくガスコンバインドサイクル発電にコスト面で優位に立てるとされる。

軽水炉は、これまでひたすら大型化し、ひたすら休まず長期間動かし続けるという進化を続けてきた。現用の軽水炉も設計寿命 40 年であったが、米国では 2 度目の運転期間延長で 80 年稼働させようとしている。第三世代プラスの軽水炉であれば、おそらく 100 年を超えて運用されるだろう。国際エネルギー機関の 2020 年度のデータでは、均等化発電原価で最も安いとされるのは、米国などで利用されている古い原子力発電所の電気である⁵⁵。このような恣意的データをもってきてエネルギー政策を議論するのは疑問だが、反面そうでもしないと原子力発電のコスト優位性を示せないということでもある。ともかく軽水炉の性質から、コンバインドサイクル化したガス火力のように抜本的な熱効率改善をもってコストを下げるのは困難である。第三世代プラスの軽水炉とて、その性質は免れず、極力大型化したプラントを長期間休まず酷使する以外に競争力を維持する手段はない。先に指摘した日本の国策軽水炉 **ABWR** の問題点と根本は共通している。そもそも軽水炉とは進化の袋小路に入ってしまった技術なの

⁵⁴ 以下の内容は、アトミカ「欧州加圧水型炉（EPR）」の項目より要約。

https://atomica.jaea.go.jp/data/detail/dat_detail_02-08-03-05.html（2022 年 3 月 20 日閲覧）

⁵⁵ IEA（2020）, p.48.

https://www.oecd-nea.org/upload/docs/application/pdf/2020-12/egc-2020_2020-12-09_18-26-46_781.pdf（2022 年 3 月 20 日閲覧）

かもしれない。

なお、あらためて言うまでもないが、福島第一原子力発電所の事故を起こした1号機は、設計寿命の40年を超えた矢先に過酷事故に遭遇した。この事実に対する受け止め方が、立場によって全く違っていると考えられる。

軽水炉技術については、産業面からも一考する必要がある。発電コストを比較したデータのみに着目するだけでは見落とししてしまう大きな問題がある。発電コストは我々消費者や原子炉ユーザーである電力会社にとっての指標である。では軽水炉を開発、製造している重工、電機その他関連製造業は、発電コストを下げる軽水炉開発で利益を確保できているのか。実際は既に述べたように、東芝WH連合はすでに実質破綻状態であり、その他も原子力事業は重荷になっている。どういう理由からそうなってしまったのか。

1973年の石油危機後、火力発電のコストが上昇した結果、電力会社は原子力部門からの利益が期待できるようになった。だが、それに引き換え製造業者は、開発費や改修費が嵩んで参入15年にして儲かる見通しが立たないと悲鳴を上げていた⁵⁶。しばらくたってもこうした状況は好転せず、1976年3月開催の第9回原産年次大会席上、日立製作所社長はスピーチでこう述べる。「過去20年、機器産業は膨大な資金と人材を投入してきたが、支出は売上を常に上まわり、とくにオイルショックと原子力発電計画の遅延による影響は深刻で、未だその痛手から回復していない」⁵⁷。通産省の指導で電力会社が原子力発電へ計画的に取り組み（国策民営）、まだ原子炉の発注が安定的にあった日本ですら、この状況である。ターンキー方式で出血大サービスをした後、利益が出始めた矢先に発注が途絶えたGEの苦境は推して知るべし、である。こうした苦境に陥れば、他社と提携するしか生き残る道はない。それがABWR開発の発端である。

1970年代半ば、日本企業も過剰な設備を持て余して、プラント全体ではなくコンポーネント単位だが、輸出に活路を見出そうとしていたことに触れた。通産省はこの時期乗り気ではなかったという点も説明を加えたとおりが、もし通産省が輸出に協力的であったとして、それが活路になり得たかという疑問符が付く。この時期、先に資金を集中的に投じて軽水炉技術をモノにしていた欧州の製造業が、米国の製造業に続いて苦境に陥り始めていた。欧州の軽水炉輸出促進の動きは、国内販売の低迷をカバーするためだったのである。1980年代に入り、一転して通産省が原子力プラント輸出促進に舵を切った時、このような風向きを察知していたメーカー側から、逆に慎重な意見が出ている。以前の論考でも引用した文章だが、現在こそ注目すべき卓見である。

⁵⁶ 『原通』No.2095,pp.1-2.

⁵⁷ 『原子力産業新聞』1976年3月18日付記事（3）

国際競争という側面で見ると、最近もあちこちで打ち上げられるプラント輸出の将来性は、これもまだ 10 年は先の話というのがメーカー筋の見通しである。その時点でも国際的な摩擦の火種になるということを考えると、まず将来性には乏しい。

(中略) 国際的な原子力市場の狭さは 10 年や 20 年でそう変わると思えない。政府の一部には輸出産業に育てるという考え方がなくはないものの、産業界の腰は重い。それより現在は国内市場をいかに確保するかが最大関心事である。海外に進出した米、西独、加などは結局、国内市場の低迷による打撃と、途上国のインフラストラクチャなどの制約によって、余り香ばしい成績を上げているとはいえない⁵⁸。

日本が羨望のまなざしを向けた、西独のブラジルへの原子力プラント巨額輸出も、大山鳴動して鼠一匹、軽水炉 1 機のみ輸出にとどまった。実際、西独時代のドイツ国内における軽水炉需要は、1970 年代半ば以降、国内で原子力発電所建設に対する社会的抵抗が強まったため急激に落ち込み、窮余の一策として原子炉プラント輸出に乗り出したというのが真相である。

すでに 40 年前から指摘されている国際的な原子力市場を取り巻く厳しい環境に、今も基本的な変化はない。電力会社と違って、メーカーは原子力事業から利益が出にくい構造なのである。ところが日本の場合、過去の原子力産業界にみられた慎重姿勢がなくなり、政府の原子力立国計画の音頭に乗って、うっかり踊ってしまったツケを支払わねばならなくなった。現在、林立していた旧西側諸国の原子炉製造業者は 3 つのグループに集約された。東芝 WH 連合は先述のごとく実質的に破綻、日立 GE 連合と三菱アレバ (フラマトム) 連合も青息吐息である。このような劣勢の挽回を狙って、新世代の軽水炉を売り込むことで状況を大きくかえられるかという点、むしろ効果は一時的にとどまり、最終的には逆効果になる可能性が高い。新しい世代ほど長寿命化した原子炉となり、1 機当たりの出力も大きいため、最終的に市場をより狭める結果となるからである。需要が一巡したら 100 年以上も新規購入がなくなる商品の製造業に将来性はあるのか、外部の視点からみて疑問である。今までは、たとえ新規の発注がなくとも、既存の原子炉に対するメンテナンスと改修作業で細々と事業が継続していた。もしも、高稼働率を誇る第三世代プラスの軽水炉が設計通りの性能を出せば、これまで製造業が糊口をしのいでいたビジネスモデルも維持できなくなる可能性がある。このような自分で自分の首を絞めるような開発を続けたところで、産業界としても袋小路ではないかと危惧するところである。

軽水炉は技術的、経済的に巨大な発展可能性をもって、1950 年代に誕生した。その可能性を最大限生かして進化し続けた結果、巨大化かつ長寿命化することで、他の炉型を駆逐して世界中に普及していった。しかし、半世紀を超えて、遂

⁵⁸ 『原通』 No.2503,p.5.

にその進化の方向の先に行き止まりが見え始めている。だからといって、安易に他の炉型の設計図を、古びたキャビネットから引っ張り出して焼き直したところで、過去の敗北を繰り返すだけであろう。今は、軽水炉の限界と原子力発電の意義の両方について、真剣に再考すべき時期なのである。

おわりに

本稿では、日本における軽水炉の位置付の変遷と通産省（経産省）の産業政策のかかわりを中心に、軽水炉型原子力技術の歴史を概観してきた。日本の原子力政策の方針についても、その都度説明と指摘を加えたとおりである。また通商政策に絡んで米国、欧州の原子力産業との関係にも一部言及した。通産省の原子力関連政策について、現在の視点から振り返って間違いを指摘するのは容易いので、そうした批判は控えるが、当時でも多くの疑問や合理的な批判が存在する中（引用したように通産省内にすら慎重論が存在した）、それを敢えて無視した選択を行った結果、国費を無駄にした責任は免れないと考える。特に近年に至るまで継続した原子力プラント輸出の強行と失敗は、日本有数の重工、電機メーカーに大きなダメージを与えた。各企業経営者の誤判断に最終的な責任が存在するとはいえ、行政的に誘導してきた省庁および官僚が無問責というのは不公平に過ぎるといえよう。また最大の疑問というか問題は、技術開発に一貫した方針がなく、むしろ機会主義的過ぎた結果、日本の軽水炉型戦略に迷走とみられても致し方ない振れ幅が存在した点であろう。なぜそのような政策判断に至ったのか。この疑問の根本を解明するには、個々の政策の分析だけでなく、意思決定した官僚の行動原理的な部分を分析する必要がある。そのためには、他の分野の技術開発の経緯等と比較しながら、戦前、あるいは殖産興業の時代にまで遡って、日本における技術政策の歴史を再検討するところから考えなければならない。本稿で検討できる範囲をはるかに超えるので、この点は今後の課題としておく。

今回の論考全体で示した点だが、軽水炉が他の炉型を圧倒していく過程が、反対に軽水炉の進化を袋小路に追い込んでいったという逆説は、深く検討すべき課題であろう。軽水炉の工学的な素性の良さが、大型化、高稼働率、長寿命化を可能にし、経済性などで他の炉型の追随を振り切ったのだが、その方向で行き着いた先は、技術的な進化の袋小路だった。ここから汲み取れる意味は多方面にわたって複数あると思われるので、継続して考えていく予定である。

最後に、今回あえて触れなかった現在のロシア、中国の原子力産業について、少しだけ解説を加える。現今のウクライナを巡る情勢で今後の状況変化は全く読めないが、これまで両国は、原子力プラント輸出活動を活発化していた。ただ、完全な商業目的ではない背景が推察されるので、本稿の軽水炉にまつわる各事

例の中へ正確に位置付けられなかった。敢えていえば、戦後間もない核開発競争時代の米国における原子力産業のような背景が存在すると思われる。近年、ロシア、中国共に、戦略および戦術の両方面の核兵器拡充に注力しているといわれる。それらの余波で原子力産業の拡張が迫られている面が考えられる。加えて、ロシアや中国の原子炉（ロシアは自前、中国は米仏ライセンス下の軽水炉含）の輸出は、政治的背景が商業的理由を上回っている気配があり、不透明な部分が存在する。ただ中国の場合、国内の原子力発電拡充の様子から考えると、過去の日米欧同様の設備過剰を抱え始めていて、同じように原子力プラント輸出に活路を見出している可能性もある。こうした点の解明を含め、中露両国の原子力産業の正確な位置付けについても今後の課題としたい。

謝辞

本論文に係わる研究は、筆者である榎本が研究代表を務める科研費（20K02065）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『原子力王国の黄昏』日本評論社、（1984）
原発史研究会編『日本における原子力発電のあゆみとフクシマ』晃洋書房、（2018）
舘野淳『廃炉時代が始まった』リーダーズノート、（2011）
田宮茂文編『八〇年代原子力開発の新戦略』電力新報社、（1980）
吉岡斉『新版・原子力の社会史』朝日新聞出版、（2011）
レスリー、スチュアート（豊島耕一、三好永作訳）『米国の科学と軍産複合体』緑風出版、（2021）

論文

- 榎本喜一「通商産業省は原子力産業帝国の夢を見るか？ープラント輸出戦略と国内商業再処理」『現代生命哲学研究』2019年、第8号、pp.79-102.
榎本喜一「幻の動力革命ー原子炉多目的利用と核燃料サイクルの歴史」『現代生命哲学研究』2020年、第9号、pp.1-26.
工業技術院研究開発官室編「航空機用ジェットエンジンの開発」『通産ジャーナル』1974年、通巻42号、pp.40-6.

高瀬昭治「積極化する核燃料政策—第二再処理工場の行方」『朝日ジャーナル』1976年6月11日号、pp22-6.

野沢豊吉、福田信之「原子力の中堅技術者諸兄！」『動向』1979年、通巻1389号、pp.26-9.

定期刊行物その他

Projected Costs of Generating Electricity 2020 Edition: INTERNATIONAL ENERGY AGENCY & NUCLEAR ENERGY AGENCY https://www.oecd-neo.org/upload/docs/application/pdf/2020-12/egc-2020_2020-12-09_18-26-46_781.pdf

電気事業連合会、原子力委員会研究開発専門部会（第8回）資料第2号（2009年3月17日）

<http://www.aec.go.jp/jicst/NC/senmon/kenkyuukaihatu/siryo/kenkyuu08/siryo2.pdf>

国立研究開発法人 日本原子力研究開発機構 ATOMICA 各項目（脚注部にアドレスと閲覧日記載）

『原通』原通（国立国会図書館本館蔵書）各号（脚注部に号数と頁数を記載）

『原子力産業新聞』原子力産業会議（pdf）各号（脚注部に刊行日と頁数を記載）

※各サイトの最終閲覧確認は2022年3月21日