

## 地球改変技術と有人火星探査への原子力の応用

米国プラウシェア計画と核熱推進ロケットの事例研究

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。

日本で一般的に原子力と呼称される核分裂エネルギーの民事利用(以下、原子力)には、福島第一原子力発電所事故後の現在でも、ある種の幻想がまわりついている。原子力発電に批判的な世論の一部の主張にも、そうした幻想に影響を受けた箇所が見受けられる。いわく、「原子力発電の効率は高いと思うが、万一の事故の際は危険(コストが膨大)なので受け入れない」といった見解である。筆者が担当する複数の大学の教養科目の受講生のレポートなどで、この類の意見が散見される。一般化するにはサンプル数が少なく、母集団も関西圏大都市近郊の大学生に偏っている問題点は十分承知しているが、筆者が福島原子力発電所事故以前から継続的に調べている都市圏世論の一部分であり、同様の例が事故前から事故後にかけて、常に一定数存在する。身の回りで観測できる範囲でも耳にする意見なので、ある程度実情を反映しているとも考えられる。

こうした見解には、核分裂反応の際に生じるエネルギーは化学反応の際に生じるエネルギーの100万倍という一見科学的な知見に基づいてはいるものの、そこから短絡的に原子力発電の「効率」も桁違いに高くなるという間違った連想がある。原子力発電について賛成、反対の立場に関係なく「原子力関連技術の効率は高い」とみる意見が常に存在する。ここでいう効率の意味するところは曖昧だが、ある種の思い込みにより経済効率についての誤解も派生している模様である。また、100万倍とまではいかずとも10~100倍の桁数で効率が良いとみている場合が多いように見受けられる。ともかく、一部の人々の間で醸成された、在来技術に比較して桁違いであるというイメージが、原子力関連技術を取り巻く幻想の根幹にある。

専門家など原子力に利害関係をもつ当事者(加えてそれに雷同する原子力技術の支持層)は、意識的かどうかは不明だが、一般の人々が抱くプラスイメー

---

\* 大阪府立大学人間社会システム科学研究科客員研究員

ジの誤解を強く否定しない。この点、低線量の放射線被ばくに対して抱く危険性といった、これも一般の人々が原子力技術にもつ負のイメージへの対処の仕方とは対照的である。

筆者が解明に取り組んでいる、商業規模の使用済核燃料再処理（以下、商業再処理）を中核とする日本の核燃料サイクル政策についても、幻想の存在と無縁ではなく、むしろ濃厚にまわりついている。「再処理工場と高速増殖炉を組み合わせた核燃料サイクルにより使用済核燃料が繰り返し利用可能になり、発電システムとして桁違いの（燃料利用）効率が得られる」。一時期、官民の原子力関連組織自身がこうしたイメージを喧伝してしまい、イメージに対する誤解もあって、無際限にエネルギーが取り出せるという幻想が商業再処理にまわりついた。実際には、機微核技術であり核拡散の危険性を内包している一方、サイクルを完結させるために不可欠な高速増殖炉の実現が見通せなくなって、商業再処理は経済的に成立していない（その技術自体も最先端ではない）。桁違いの核燃料の利用効率向上はおろか、結果的に原子力発電全体の経済効率を下げたことによって、もはや商業再処理を実施する意味は失われている。だが、現時点で政府には方針転換の気配がなく、展望のないまま開発継続中である。全ての理由がそうではないにしろ、人々が未だ漠然と抱く、「何か桁違いの効率」があるという幻想にも支えられ、いっこうに中止の世論が盛り上がる気配もない。むしろ機微核技術であればこそ、技術神話的なイメージさえも濃厚にまわりつき、心理的な核燃料サイクル政策への支持が存在する可能性が高いともいえる。事実、講義中に再処理技術が機微核技術だという説明を聞いて、嫌悪感を示す受講生がいる一方で、「重要な技術だ」と考える受講生も一定数存在する。核関連技術には、一部の人々の心に響くイメージが含まれている。以上の点から類推して、原子力技術を取り巻く幻想は、民主主義国家の意思決定システムに悪影響を与えていると考えられる。

これらの幻想が生じた原因は、核兵器がもつ桁違いの破壊力である。米ソによる核開発競争真ただ中の1950年代中頃から、原子力平和利用が世界的な注目を浴びるようになった。現実存在する核戦争勃発可能性の悪夢から倒錯した、核分裂エネルギー＝原子力が世界に第二の産業革命を起こすという夢が、様々な分野に広がった。夢の中には、地球環境を改変するような規模で実施される超巨大土木工事、外惑星系を視野に入れた有人宇宙探査など、今なお一部の人間を魅了してやまないようなアイデアもある。これらの原子力技術を応用したアイデアにも、既存技術と桁違いのイメージが濃厚に存在する。他方、初期の段階から発電に応用する現実的アイデアが原子力技術の中心にあり、実用化もされ、一部の工業国においては発電のかなり大きな割合を原子力で担ってきた実績も残っている。だがもし、原子力技術の応用が、核燃料サイクルを

含まない通常の発電用途（ウラン燃料のワンスルー）に完全に限定されていたとすれば、今のように桁違いというイメージ、原子力技術を取り巻く幻想が存在し続けていたかは疑わしい。商業再処理で誤魔化せない放射性廃棄物の処分問題等、多くは避けようのない原子力の負の側面に直面し、さらに福島第一原子力発電所以前にも各国で発生していた大事故を経て、早晚、技術的に廃れていたと思われる。おそらく、核兵器との関連や核燃料サイクルも含んだ発電用途以外の技術的な余白部分が、原子力を包み込む幻想を生み、ひいては原子力発電システムを生き延びさせてきた原動力である。しかし、様々な分野で提案された壮大で魅力的なアイデア、すなわち原子力技術の余白部分というか糊代は、結局どれも満足に形にならず消えていった。幻想だけを残して。

筆者が調査のために目にする機会が多い資料文献、特に原子力関連技術を開発する側の資料にも、華々しく提案された一種魅力的な原子力技術の応用アイデアが残されている。しかし、それらは、様々な理由で実現が困難だと関係者内で徐々に判明していった模様である。当然ながら開発側にとって不都合な情報は積極的に公表されず、資料中でも目立たない記載となり、最後は、はっきりとした顛末が分からないままフェードアウトしていく。このような事例がほぼ全てといっても過言ではない。勢いよく始まったものの曖昧に消えていった（事実上失敗した）開発情報の独り歩きが、原子力技術を取り巻く幻想がはびこる一因となっているとも考えられる。

本稿では、竜頭蛇尾に終わったエキゾチックな原子力技術応用の顛末を紹介し、その実際を検討する。なお、今回本稿で取り扱うのは、これまで筆者が調査し、種々の検討を加えてきた高速増殖炉や商業再処理を中核とする核燃料サイクル、あるいは原子力コンビナート以外の分野となる。具体的には平和的核爆発の巨大土木工事利用と核熱推進ロケットによる有人火星探査である<sup>1</sup>。新奇な原子力技術のスタートアップが人目を惹いた後、実際には既存技術に対抗できず開発が行き詰ったとしても、最初の段階で人々の脳裏にはある種の幻想を残してしまっている。その幻想を残したままにしておくと、先に述べた理由から、民意に悪影響を与え、政策決定の上でも有害である。有害な幻想は、顛末まで含めた実像を明らかにして一つ一つ潰していかなければならない。過去に人目を惹いたような物珍しい原子力技術には、どの程度、既存技術からの向上が見込めたのか、またいかなるデメリットが存在したのか、そして実態はどのようなものだったのか、様々な角度から検討を加える。本稿を叙述する目的は、冒頭に述べた原子力を取り巻く幻想の解体である。意思決定や世論に悪影響を与えかねない、誤った原子力に関するイメージを訂正する一助となるよう、幻想

---

<sup>1</sup> 現時点で巨大土木工事に核爆発を利用する工法は、ほぼ顧みられていない。だが、核熱推進ロケットは今まで何度もリバイバルしており、現在の火星探査熱の再興で見直しされている。

を生み出す原子力の発電用途以外の技術的な余白の実態を、過去の資料などから明らかにすることである。

## 第1章 地球改変技術と平和的核爆発

### 1.1

人類が核兵器の威力を目の当たりにした時、この巨大な力を生産的に用いれば、途轍もない可能性があるだろうと夢想した。戦後ほどなく「原子力平和利用」が世界的に大流行したが、冷戦時の東西両陣営の政治的思惑が背景にあるとはいえ、世界中の人々から間違いなく核分裂エネルギー、すなわち原子力は注目を浴びていた。日本の原子力問題の歴史を調べていると、この過去の夢想の残滓が、近年の資料であっても時折顔を出す。冒頭でも触れたように、100万倍云々というイメージがそうした残滓の一例である。

では実際に核分裂エネルギーを生産的な目的に利用しようとした時、まず頭に浮かぶ核爆発そのものを用いたらどうかというアイデアからみてみよう。いわゆる平和的核爆発（Peaceful Nuclear Explosions: 以下、PNEs）である。原子力発電のように段階を経て電気に変換するのではなく、直接的に核爆発エネルギーを用いた場合、実際に高性能火薬を用いた時に比べて、100万倍とまではいかずとも桁違いの経済効率を発揮できるのであろうか。

PNEs に関していうと、米国の場合、プラウシェア計画と呼称されるアイデアが知られている。この計画では、地表や地下で施工される巨大土木工事等に、発破として核爆発を利用することが考慮された<sup>2</sup>。米国の場合、実用化された例はないが、実際に核爆発を伴う実験は、1961年から1973年にかけて27回行われている（計画予算は1975会計年度で終了）。実は、プラウシェア計画よりも先に宇宙空間の推進方法として核爆発を直接利用することが考慮されている。以前の論考で説明したオリオン計画、惑星間核パルス推進型有人宇宙船の建造計画である<sup>3</sup>。

平和的と銘打っても、実際そこで用いられる核爆発装置は核兵器と基本的に同一である。この点から、平和利用三原則のもとで原子力技術開発に取り組む日本には関係がないと思われるかもしれない。しかし詳細は後ほど述べるが、1970年代前半に米国が加わった国際的な巨大土木事業にPNEsが用いられる計画があり（未実現）、その事業に日本政府の関与が疑われる事例があった。従っ

<sup>2</sup> 以下のプラウシェア計画関連の情報は、主に米国エネルギー省科学技術情報オフィスのまとめた同項目 pdf より。同省公式サイトからは消滅しているので、米国政府印刷局のデジタルアーカイブを利用した。（アドレスは参考文献一覧に記載）

<sup>3</sup> 詳細については、檜本（2014）を参照のこと。

て日本も PNEs と全く無関係だったわけではない。

さて、戦争目的以外で核爆発を直接利用する様々なアイデアは、しばしばフィクションの中などで見かけるが、ほとんどが思い付きの域を出ていない。一方、プラウシェア計画もオリオン計画も一定程度の実現性が見込めたため、政府から資金提供を受けている。特にプラウシェア計画は、前述したように実際の核爆発を伴う実験を行っている。そして実のところ両者ともに核開発の申し子なのである。

プラウシェア、オリオンの両計画が具体化したのは、戦後しばらくして東西両陣営の核開発競争がエスカレートし始めた時期の水爆開発の恩恵がある。直接的には核爆発の物理的挙動を解明する理論の進歩、およびその理論をシミュレートする計算機能力の向上のおかげである。これらは水素爆弾（水爆・核融合反応）のプライマリー（点火系）に使われる核分裂装置の設計などに応用された。なおプライマリーの威力を最小限にできれば、水爆の爆発の際に生じる核分裂生成物（死の灰）も低減できる。すなわち「きれいな核兵器」の登場である。これはプラウシェア計画の実現性を上昇させた。また一方でプライマリーの改良は推進用核パルス装置の設計にもつながり（小型化と指向性制御）、オリオン計画の実現性も高めたのである<sup>4</sup>。

こうした経緯の後、実際に PNEs の実現性が真剣に考慮されるようになったのであり、時期的には戦後早くから着手されていた原子力発電の技術開発より後になった。時系列で示すと、英国でコールダーホール黒鉛ガス炉が営業運転を開始したのは 1956 年。翌 1957 年、スプートニク・ショックに刺激を受けたセオドア（テッド）・テイラーによってオリオン計画のアイデアが生まれた<sup>5</sup>。同年末に米国の SHIPPINGPORT 原子力発電所の加圧水型軽水炉が試運転を始め、翌年に営業運転開始となった。プラウシェア計画スタートの具体的目標（水爆によりアラスカに人工港湾を開削するチャリオット計画など複数）は、この 1958 年に水爆の父エドワード・テラーによって提案されている<sup>6</sup>。

オリオン計画は先述のように拙稿で一通り解説しているので、本稿の PNEs 関連では主にプラウシェア計画について説明する。プラウシェア計画とは、特別に設計された水爆を、運河や港湾の掘削のほか、道路や鉄道敷設の障害となる山地の開削、貯蔵用地下大空間の作成、油田やガス田を刺激して産出量を増大させるなど、平和目的に利用する計画である。様々なアイデアが唱えられ、中には第二パナマ運河を開通させるといった壮大なものも存在したが、全て構想のみに終わった。

---

<sup>4</sup> Dyson (2003)、pp17-8

<sup>5</sup> これ以前の原型的なスタニスラフ・ウラムのアイデアは 1955 年のレポートにまとめられている。

<sup>6</sup> 米国原子力委員会が専門家を集めて PNEs に関する会合を初開催したのは 1957 年 2 月である。

プラウシェア計画において、当初は大気圏内核実験と同様、周辺環境を放射性物質で汚染する危険性のある施工方法を念頭にした実験も行われた。だが、部分的核実験禁止条約（PTBT）が締結された後は、地下核実験と同じく、地下で起爆させる実験のみが継続された。オリオン計画が PTBT に命脈を絶たれた一方で、その後も実験が続けられたプラウシェア計画は、ある程度技術的な完成度が高まったところで、国外で実現が目指された模様である。1970年代になり、マレー半島が最も狭まった部分、タイ国内のクラ地峡に運河を開削する国際共同大プロジェクトに、プラウシェア計画が応用されようとしたのである。

## 1.2

1974年2月6日開催の衆議院予算委員会において、社会党選出の岡田春夫議員が、水爆を用いるクラ運河開削国際共同プロジェクトに日本政府が関与しているのではないかと追及した。以下、その議論の場で明かされた各種データを見て、プラウシェア計画に関する検討を加える。なお、プラウシェア計画関連事項としてクラ運河計画をここで取り上げる理由を、まず説明する。岡田議員の発言ではクラ運河計画はプラウシェア計画の一環だと断定しているが、管見の限り、公式に両者の関連は詳らかになっていない。だが、前年1973年7月、東京の帝国ホテルで開催された同運河計画の国際会合において、水爆使用工法（以下の表-1中では PNEs 工法と記載）が最終決定されたとあり、その場には米国のエドワード・テラーなどプラウシェア計画の中心人物が出席していた<sup>7</sup>。また、ソ連を除いて PNEs 技術の蓄積があるのは米国のプラウシェア計画関連以外にはないので、米国の関与がないと詳細な施工計画がつかれず、以下（表-1）で示すデータも見積もるのは不可能である。そして肝心なところだが、ここで示された数値はある意味貴重であって、プラウシェア計画関連の構想で在来工法とコスト比較ができるものは現在、他に発見できていない。先にも触れたが、プラウシェア計画全体でも終盤に近い時期の構想なので、ある程度技術的に完成していると考えられる点も重要である。

---

<sup>7</sup> この国際会合に出席した日本側関係者に複数の官庁の官僚も含まれていたため、政府の関与が強く疑われた。それとは別に、出席者の中には日本工業立地センターの飯島貞一常務理事の名がある。クラ運河計画について議会での追及があった1974年、MA-T計画調査の秘匿名称で報告書がまとめられる商業再処理工場用地選定作業で、日本工業立地センターの関係者が徳之島現地入りしている。また、これより少し以前に話題となったむつ小川原開発の原子力コンビナート計画の中心部分にいた人物が飯島理事である。両事例とも以前の研究で筆者が調査、検討のうえ各々論考にまとめているが（樫本（2011）・（2017））、本件で、その日本工業立地センターと飯島貞一常務理事の名を目にするのは驚きだった。だが一方で納得できる部分もある。政府が表立って動きにくい原子力が絡む案件に、この組織は常に顔を出しているのである。

	水路種別	工事期間	期間比	総工費 (億ドル)	費用比	総核出力 (メガトン)
在来工法	一水路型	10~12年	—	56	—	—
	二水路型			110	—	—
PNEs工法	一水路型	6~10年	0.6~0.83	35.4	0.63	42
	二水路型			62	0.56	105

表-1 (1974年2月6日開催衆議院予算委員会の岡田春夫議員発言より作成)

表-1 中には書き込めなかったが、PNEs 工法を用いた場合のみ、被ばくを避けるため工区周辺の人口約 21 万人を一時的に避難させる必要がある。地域により避難期間に差があり最短 1 週間から最大 6 か月程度となっている。

さて、このデータを一覧してどう考えるか。最初に指摘すべき事項は、関係者による（おそらく楽観的な）見積もりであっても、工期や総工費の節約は数割程度にしかならない点である。威力が桁違いなはずの核爆発を直接利用しても、総合的な効率向上は二倍にも届かない。一般の人々がもつ桁違いの原子力という感覚は、あくまで幻想にすぎないと分かった。実際、数割程度の差であれば、技術的蓄積があり突発的な事態にも柔軟に対応可能な在来工法に対し、今まで全く経験のない PNEs 工法を敢えて導入する経済的魅力は、あまり存在しないと思われる。また、周辺住民を一時避難させる必要がほとんど不要な点も在来工法に有利である。一方、岡田議員も委員会発言中に言及しているが、PNEs 工法を促進する側が出した周辺住民の避難期間の見積もりは、あまりにも楽観的だと言わざるを得ない。

計画では、クラ地峡の運河開削において PNEs 工法を取り入れる工区の延長は約 45 km となる。身近な距離感に直すと、おおよそ大阪市から京都市までの距離に等しい。そこに一水路型運河の場合は合計 42 メガトン、二水路型の場合は合計 105 メガトンの水爆を爆発させる必要がある。核融合出力比が向上した後期実験より推定すると、総核出力中、核分裂反応が担う部分は 5% 程度となる。広島に投下された原子爆弾 15 キロトンを目安として、双方に含まれる核分裂出力（＝核分裂生成物、すなわち死の灰の発生量に比例）<sup>8</sup>を見積もると、一水路型の場合 140 発分、二水路型の場合は 350 発分のヒロシマ型原爆が大坂京都間で爆発するのと同様である。いくら地下核爆発といえども、周辺住民の感覚ではこの見積もりは受け入れ難い。

クラ運河計画のあった 1970 年代には、米国各地で原子力発電所建設に対する抵抗が生じていた。その米国内のどこか一地域でブラウシェア計画を実用にするのは、社会的抵抗があつておおよそ不可能と思われる。同じく 70 年代初頭、むつ小川原開発に関係して陸奥湾と太平洋をつなぐ運河を開削せよと主張する声があつたが、コスト削減のためなら PNEs 工法であっても許容するという意

<sup>8</sup> ここでは核融合反応で生じる誘導放射能は除外した。

見は見当たらない。また、当時のタイ国内のクラ地峡部は、ゲリラ地帯（田中角栄首相の答弁）である。クラ運河計画全体を俯瞰して眺めた場合、国家間の力関係でみると時代遅れな帝国主義的開発、一国単位でみると地域社会の中に存在する異物排除指向など、何重にも入り組んだ差別的構造が浮かび上がってくる。また、そうした差別構造の下部に位置付けられて初めて、当該工区における PNEs 工法の適用可能性が検討できるのである。これは技術以前の問題であろう。

結局、PNEs 工法を利用するクラ運河開削計画は実行されることなく終わった。本計画遂行のために結成された国際コンソーシアムが水爆利用を決定した第四回東京会議とは何だったのか、日本政府の関与はどの程度だったのか、今もって公式には明らかにされていない。そして真相が曖昧なまま計画が消滅するのは、こうしたエキゾチックな原子力技術開発につきものである。しかし、クラ運河の事例は、見積もり段階で数割の効率向上が見込める程度では、現実に核爆発を平和目的に利用する行為は実施不可能である点を証明している。加えて原子力関連施設立地には必ずといって良いほど付きまとう差別的な社会構造問題とも無縁ではなかった。むしろこの問題は、核実験にまつわる国際的な差別構造と同質である。いずれにしろその後、今に至るまで、大規模な土木工事に PNEs 工法が実用された例はない。包括的核実験禁止条約（CTBT）では平和目的を含む一切の核爆発が禁止される。核爆発を直接利用しても 100 万倍の効率どころか桁違いにもならず、開発側の甘い見積もりですら数割程度の向上で、実際には在来工法を超えるメリットは存在しなかった。それどころか新たに（国際的な）社会問題まで生じさせる可能性もあった。CTBT の制限はそうした幻滅の反映である。そして、これが現実である。ここに幻想の入り込む余地は存在しないのである。

## 第 2 章 火星有人探査と核熱推進

### 2.1

宇宙開発に関連する分野においても、原子力技術の幻想は忍び込んでいる。一般的に宇宙開発と原子力の二つの技術部門は、日常生活とは隔絶している感覚がある<sup>9</sup>。先端的で巨大技術のイメージが存在する宇宙開発にも、様々な幻想の入り込む余地は大きいと考えられる。この点、宇宙関連技術も原子力関連技術と似た構造をもつ。ただ現状では、両者に目立った技術的交流は存在しない

---

<sup>9</sup> 日々利用する電気の原子力発電所分が意識されていないように、GPS 等の宇宙関連技術も日常生活と密接に関係しているが、通常は意識されていない。

ので、双方お互いに技術体系的な独立峰を形成しているといえる。しかし、わずかながら二つの技術分野が交錯した部分には、一種の相乗効果が働いてしまい、奇妙な技術的幻想を生じる可能性が高まってしまう。それを代表するのが、宇宙と原子力のハイブリッドな技術的幻想、いわゆる「原子力ロケット」であろう。米国では「原子力ロケット」（核熱推進ロケット、後述）の地上実験が実施されているので、あながち完全な幻想とまでは決めつけられないが、それでも様々な「語り」の中に存在する「原子力ロケット」は、そのほとんどが幻想の産物である。1960年代生まれの筆者は、子供の頃、21世紀には原子力ロケットが実用化され、宇宙旅行（少なくとも月くらいは）ができるようになる、と思っていた。実際、1960年代の科学技術庁監修の書籍で、「あなたは、原子力ロケットに乗って、21世紀を飛んでいる」と描かれている<sup>10</sup>。21世紀に入って既に20年経過した今現在でも、この夢は実現する気配が全くない。

以下、本論に入る前に、まず断っておく点がある。核燃料サイクル政策の可否など、日本政府が進める原子力関連政策の妥当性に対し、筆者はこれまでの調査結果を踏まえて常々疑問を呈している。だが、日本に限らずどの国の取り組みであっても、宇宙空間において真に必要性があって行う技術開発を（各種の宇宙開発が必要あるかどうかはひとまず措く）、それが原子力関連であるというだけで排除はしない。地球上で宇宙船用の核燃料を製造する場合など、完全には地上社会と無縁ではないだろうが、基本的に宇宙空間において生じる原子力技術関連の問題は、予見できる将来にかけて自らの意思で乗り組む各個人が関係する問題である。同一の主体が、自らの判断で事故や被ばくなどに関わるリスクと、原子力を利用するベネフィット、双方の兼ね合いを勘案できる。この点、地球上で利用する核・原子力関連技術の多くが内包する社会的な非対称性を免れている（PNEs工法にも非対称性はあった）。それに宇宙空間での放射線被ばく環境は、原子力関連機器の利用云々に関係なく高いので、いわば副次的なものになる<sup>11</sup>。したがって地上社会で生じる原子力技術関連の問題とは構造的に別種の問題系である。一方で、本章後半で一部言及するが、地上社会を超えた倫理的問題等も新たに発生すると思われるので、手放しで原子力技術を宇宙空間で利用すべきとは考えない。

また別途断っておくべき点もある。おそらく宇宙開発分野においても、原子力関連とは独立に様々な技術的幻想が取り巻いて、種々の問題を生じていると思われる。しかし筆者は原子力問題の研究者であり、資料的な制約もあって、原子力が関与する以外の宇宙開発問題に言及するのは最小限にとどめるつもり

---

<sup>10</sup> 科学技術庁監修（2013）、p50

<sup>11</sup> むしろ核熱推進ロケット利用により航行時間を短縮できるので、宇宙放射線被ばくを低減すると主張される。

である。あくまで本稿では、宇宙開発分野に原子力関連技術の幻想が紛れ込むのを防ぎ、ひいては宇宙開発分野で幻想が増殖し、それが地上分野にまで波及して、今以上に民意を歪めてしまうのを未然に防止する目的で、以下の論述を進めるつもりである。加えて米国の事例が中心であるのも、日本の原子力関連技術の多くが米国発祥であり、同様に幻想の源流を辿ると米国に行きつくからである。

## 2.2

大型ローバーの火星着陸のニュース。地球外生命が存在した可能性。送られてきた高明細な火星表面の風景。現在進行形で発信される様々なイメージが、繰り返し火星への有人探査構想を刺激する。月面に続いて火星へ有人探査を行う構想は、アポロ計画と同時代にも存在してはいた。以後も度々、米国政権が思いついたように火星へ宇宙飛行士を送り込む構想を語るが、現時点でどれも実現していない。火星有人飛行が困難な最大の理由は、月に比べて火星があまりにも遠いからである。

月と違い、火星は地球と異なる周期で太陽の周りを公転している。従って地球と火星の距離も一定ではない。太陽からみて地球と火星が同じ方向にあるとき（衝と呼ばれる）、両惑星の直線距離は最も近づく。だが、この最短距離で宇宙船を送り込む手段は、物理的条件が厳し過ぎ、予見できる将来にかけて存在しない。逆に太陽を挟んで地球（発射時）と火星（到着時）が反対の位置あるとき（合と呼ばれる）、直線距離は最も遠いが、物理的条件が最適になる。

「宇宙船の機動に関する一般的な法則は次のとおりである。地上から離陸した宇宙船は、地球の公転軌道と平行な方向に同じスピードで動く。この軌道成分が、ある惑星 P を捕らえ得る放物線軌道（ホームマン軌道と呼ばれる）に宇宙船を投入できるような時に離陸する（地球周回軌道からタイミングを見計らって離脱しても地球離陸と同様である。ここでいう「投入できるような時」とは、地球公転軌道から惑星 P へ向かうホームマン軌道への遷移が可能な出発時期を示す…訳者補足）。その後、宇宙船は、可能な限り惑星 P の表面に近づく。それから、宇宙船に対し、惑星 P をめぐる楕円軌道に投入する速度変化」を与えるのが、最も物理的条件が最適となる他惑星に向かう旅程となる<sup>12</sup>。地球火星間の場合、2年に一度やってくる時期を見計らって出発するのが、引用文にある「宇宙船を投入できるような時」である（ローンチウインドウ・打ち上げの窓などと呼ばれる）。なお、実際に火星への有人飛行へ用いられる最適の軌道は、ホームマン軌道そのものではなく、それより速度を加えて航行時間を短縮させ、かつトラブルがあっても帰還可能な軌道となる。

---

<sup>12</sup> Dyson (2003)、 p190

ちなみに、合の配置にある地球火星間の直線距離は約 4 億kmある。「たとえ余分に燃料を使って近道をし、ホーマン軌道をまるまる避けても、地球から火星へいくには少なくとも 4 億kmは何らかの曲線に沿って飛行する必要がある。4 億km。これは相当な距離である。これに比べて地球の月はたった 40 万kmしか離れていない。だから火星にたどり着くには、アポロの宇宙飛行士たちが月へ行った時の 1,000 倍遠くまで旅をしなければならない」のである<sup>13</sup>。

アポロ計画の主力ロケット、サターンシリーズの生みの親でもあるフォン・ブラウンが、有人火星船の構想をまとめた資料には、以下（表-2）に示す超大型宇宙船の諸元が記されている。

	推進剤	総重量（推進剤含）	地球周回軌道帰還時重量	単位（t）	比推力 単位（秒）
有人火星船	ヒドラジン/硝酸	3,720	50.5		285.5
サターンV	ケロシン/液体酸素（第1段）	3,038	5.8	帰還時はアポロ	263
	液体水素/液体酸素（第2,3段）			司令船のみ	421

表-2（Braun（1991）版他より、ただし一部比推力は筆者が排気速度より算出した）

この表-2 の上段にある有人火星船の各項目数値が、フォン・ブラウンによって構想された化学推進剤を利用する（初期の）火星船の諸元である<sup>14</sup>。下段には参考のためアポロ計画で使用されたサターンV型ロケットの諸元を記した。なお、この有人火星船は地球周回軌道で組み立てられた段階でこの諸元の総重量となる。地上発射時のサターンV型と比較しても、それを上回る巨大さであるのがわかる。現代でも最大を誇るサターンV型の地球低軌道打ち上げ能力は約 120t なので、単純に計算して、地球軌道上にフォン・ブラウンの火星船一隻を組み立てるには、サターンV型ロケットを 30 回以上打ち上げる必要がある。計画では、有人船 7 隻、無人貨物船 3 隻で船団を組み、火星への探検旅行に出発する。帰還するのは 7 隻の有人船の第 4 段部分のみとなる。これは想像を絶する物量作戦である。ロケットエンジニアの夢想という側面もあるので、これだけの物量が火星有人探査に必須かどうかは再考の余地がある。しかし、逆に宇宙船開発者側は、化学推進システムで実施するのが困難であれば、もっと効率の良い推進システムを開発・装備すれば良いと考え、当時注目されていた原子力技術に飛びついてしまった。結局、火星有人探査と「原子力ロケット」が結びつく幻想が出来てしまったのである。

<sup>13</sup> ズ布林（1997）、p86

<sup>14</sup> 元々が 1952 年版となるので、この有人火星船にはサターンV関連技術開発で得られた知見が反映されておらず、推進剤は自己着火式の二剤式（ハイパーゴリック燃料）である。各用語の詳細については後程詳しく説明するが、長期保管が必須となる有人火星船の燃料として、性能の良い液体水素を用いるのは、現在でも技術的に困難であり、計画中の最新鋭機体（液化メタンが燃料）であっても比推力は 400 秒を下回る。

「原子力ロケット」とは、実際のところ何を指すか。各種コンセプトがあり、以前、拙稿で紹介した核パルス推進も広い意味では原子力ロケットの範疇に含まれる。だが、ここで述べる「原子力ロケット」とは、もっと狭い意味に限定される。アポロ計画で有人月探査を成功させた米国において、次の段階である火星有人探査にも利用可能な技術として、現実に関された実績がある核熱推進ロケットである<sup>15</sup>。基本的な構成は、ウラン燃料の個体炉心で黒鉛を減速材として用いる高温ガス炉となる。冷却材及び推進剤としては水素を用いる。水素が炉心を冷却しつつ膨張加速され排出ガスとなって推進力を生むのである。水素を用いるのは、分子量の最も軽い水素が、最も早い排気速度を得られるからとされる。なお、排気速度を重力加速度で除した数値が比推力（単位は秒）となり、各種ロケット推進エンジンの性能指標となる（数字が大きいほど良い）。非公式的には、1 kgの推進剤が1 kgの推力を発生させられる時間としても理解でき、比推力はロケットにおける一種の燃費を示す。実用されたサターンV型ロケット各段の比推力を表-2 に示した。化学推進剤を用いるロケットでは、液体水素/液体酸素系の燃料と酸化剤を組み合わせた場合、最も比推力が高くなるが、約 450 秒がその限界となる。

実際に米国で開発された核熱推進ロケットは、地上の燃焼試験で最大 901 秒、多くは 800 秒台の比推力を達成している<sup>16</sup>。開発の初期段階であっても、数値的には最良の化学推進ロケットの二倍の比推力となる。当時の核熱推進ロケット計画全体の開発進捗度について、NASA の公式文書では「1955 年から 1973 年にかけての Rover 計画および NERVA 計画、両個体炉心核熱ロケットの研究中、20 基の推進用原子炉が設計、建造、そして試験された。熱出力と推力は各々 1,100 メガワット/55,000 ポンド (24.9 トン) から 5,000 メガワット/250,000 ポンド (113.3 トン) の範囲である（訳注、後者の数値は計画値でおそらく実測されていない）。NERVA 計画では、定格出力で 1 時間を超える持続的燃焼に核熱エンジンが持ちこたえる点と、運転期間中に 20 回を超えてリスタートする能力を示した。個体炉心核熱ロケットは、今までのところ機能試験品レベルの動作確認と性能実証を完了したところであり、核熱エンジンがフライトシステム用途として実地開発される準備が整うまでに、より大規模なコンポーネント及びシステムの各レベルでの試験が求められるであろう」と総括されている<sup>17</sup>。

Rover 計画および NERVA 計画が 1973 年に終了したのは、すでにアポロ計画で莫大な予算を使い、さらに大掛かりな開発資金が必要な火星有人探査と核熱

---

<sup>15</sup> 熱核推進・熱核ロケットという呼称もあるが、日本語で熱核だと Thermonuclear（核融合反応）という意味になるため、本稿では原語の Nuclear Thermal Propulsion の語順で核熱推進と訳す。

<sup>16</sup> NASA (1992)、pdf. p144

<sup>17</sup> NASA (1989)、Section8-p12

推進システムの開発に、米国政府が尻込みしたからである（米国はアポロ計画と同じ時期にベトナム戦争にも介入していた）。加えて1970年代になると、「放射性物質を含んでいる可能性の高い排ガスをネヴァダ州の試験場にまき散らしながら核熱ロケットエンジンのテストを屋外でする」のは通用しなくなっていた<sup>18</sup>。その後、火星有人探査構想も核熱推進ロケットも、しばらくの期間、注目されなかった。

## 2.3

レーガン政権時代の戦略防衛構想（SDI、いわゆるスターウォーズ計画）の一環で核熱推進システムが取り上げられたが、火星有人探査と直接の関係はなかった。一方、次のブッシュ（父）大統領が1989年7月20日に行った演説をきっかけに、再び火星有人探査が、米国政権の中で取り組むべき目標に浮上した。そのために必要な技術的選択肢の一つとして核熱推進システムにも関心が払われるようになった。先に引用した1989年版のNASAの公文書は、このブッシュ（父）大統領の演説を受けて急遽まとめられたレポートである。かかった日数のタイトルから、これは通称『90日レポート』と呼ばれる。ただ、この『90日レポート』中の火星有人探査はあまりにも遠大な計画の一部であった。最終的な火星有人探査までに、準備段階として宇宙ステーション建造や月の恒久的拠点建設がある。またそこで構想された有人火星船の原案も、一部の識者から「宇宙空母ギャラクティカを建造するつもりか？」などと揶揄される、物凄く大掛かりな代物であった。なお、この時の構想の一部で、月や火星へ向かう際のプラットフォームや宇宙船組立用ドックとなるよう考案されたのが、現在の国際宇宙ステーションの原案である<sup>19</sup>。

当時、この構想に幻滅し、もっと実現可能な規模で火星有人飛行を実施すべきだと主張する米国内のグループが存在した。彼らが、『90日レポート』に対抗して出した構想がマーズ・ダイレクトである。この名称は、NASAのように地球低軌道を周回する宇宙ステーションや月を経由せず、直接火星を目指すという構想から名付けられた。このマーズ・ダイレクト中に示されたのが、火星現地で帰還時の推進剤を調達する画期的アイデアだった。オリジナルアイデアでは、先発する無人機（次回乗員の帰還船を兼用）で、少量の液体水素<sup>20</sup>と全自動小型プラントを火星地表へ持ち込み、持ち込んだ水素を火星大気中の二酸化炭素

---

<sup>18</sup> ズブリン（1997）、p119

<sup>19</sup> 当時は米ソ冷戦終結直前だったので、この計画にロシア（旧ソ連）の参加は予定されておらず、名称も宇宙ステーションフリーダムだった。

<sup>20</sup> 後述するように長期保管が技術的に困難な液体水素だが、途中で失われる量を勘案しても、片道で少量なら不可能ではないとされた。火星地表において水素は液化メタンの一部となる。なお、現在は火星地表に存在が確認された水分を利用する考えが主流である。

と反応させて、メタン/酸素からなる推進剤・酸化剤を生成する。次にやってきた有人船の乗員は、この燃料満載となった帰還船を用いて地球へ旅立つのである。以降の火星有人飛行のコンセプトは、この現地調達のアイディアを基本的に踏襲するようになった。

現在、NASA が計画中の有人火星探査に関しても、燃料の現地生産・調達は組み込まれている。ただしこうした計画では、地球帰還のため、絶対に火星で推進剤を得る必要がある。したがってミッション変更・中断などへの柔軟性が欠けてしまう。このリスクを避けるオプションとして、推進剤補給不要な核熱推進ロケットの研究も継続中だが、現在のところ試験機を用いた燃焼試験にまでは至っていない模様である。また、NASA の現有計画も、『90 日レポート』同様、宇宙ステーションと恒久的な月基地建設を経由して火星へ向かう、非常に大掛かりなコンセプトとなる。様々な要素技術を積み上げながら向かう 2030 年代以降の有人火星探査計画には、他の部分に比較して具体的情報が少ないように思われる。

ちなみに、米国において、核熱推進システムの開発促進を含む原子力技術を宇宙関連に活用するための国家戦略が、2020 年 12 月 16 日に発表された。これは前トランプ米国大統領が発令した宇宙政策指令第 6 号と呼ばれるが、NASA の公式サイトには情報が残っているものの、米国大統領府のサイトからは詳細情報が消滅している。大統領選の結果で大きな政策転換が生じる米国には、しばしば観察される事例だが、宇宙政策、原子力政策に関連する部分は振れ幅が大きい場合がある。今後、注視する必要がある。

国家が行う事業ではないものの、現在、最も活発に有人火星飛行実現に取り組んでいるのが、イーロン・マスク代表が率いる民間企業スペース X である。そこで計画されている有人火星飛行は、現在、実用化に向けて試験中の大型汎用宇宙船スターシップ（化学推進ロケット）を用いる予定である。地球低軌道上において、火星へ向かう推進剤を再補給するアイディアが新たに付け加わっているが、地球から直接火星に向かって飛び、帰還時燃料は現地調達するアイディアを用いている。NASA の計画などに比べ、比較的マーズ・ダイレクトに近いコンセプトとなる。以下（表-3）において、フォン・ブラウン構想の有人火星船のうち復路仕様（火星出発時）の機体と、スペース X のスターシップの各種諸元を比較した。なお、スターシップの総重量は打ち上げ時の第 2 段目状態のもので、地球低軌道上で火星への燃料再補給をしても、これよりかなり軽量となる。また、地球周回軌道帰還時の数値は機体重量（ペイロード含まず）とした。下段部分には、計画のみ（NASA で現在検討中の核熱推進システム）、地上試験のみ（Rover 計画および NERVA 計画の核熱推進実験機）ではあるが、核熱推進ロケットの諸元も参考に付け加えた。

	総重量 (推進剤含)	推進剤	地球周回軌道帰還時重量 単位 (t)	推力 単位 (t)	比推力 単位 (秒)
有人火星船 (帰還時)	408	ヒドラジン/硝酸	50.5	—	285.5
スターシップ	1,320	液化メタン/液体酸素	120	1,225	380
核熱推進 (計画中)	—	液体水素	低濃縮ウラン…使用核燃料	20.4~34	900
Rover and NERVA	—	液体水素	高濃縮ウラン…使用核燃料	24.9~113.3※	724~901

※113トンはおそらく計画値である。

表-3 (各数値の出典は別途脚注部分に記載) <sup>21</sup>

2021年3月現在、完成はまだ見通せないが(先日、実験機SN10が着地後に爆発した)、スペースXのスターシップは21世紀の技術で構成される。それと比較しても、20世紀中頃の技術で考案されたフォン・ブラウンの有人火星帰還船は、さほど非現実的な諸元ではなかった点が理解できる(もちろんこの燃料は現地調達不能である)。細かく見ると、火星表面に離発着可能(計画上)なスターシップと軌道上にとどまるフォン・ブラウンの有人火星船は、宇宙船としての構造が全く違う。従って、本来は直接比較できないが、規模や推進剤の占める割合など極端な違いはない。帰還時燃料を現地調達するアイデアが、化学推進システムを有人火星飛行へ応用するカギになった点が良く分かる。一方で、液体水素/液体酸素を利用する化学推進ロケットと比較すると、スターシップであっても比推力は見劣りする。対して実用化は見通せないが、核熱推進ロケットの比推力はスターシップの2倍以上ある。これだけ比推力に差があれば、化学推進ロケットに比べ核熱推進ロケットは、半分以下の時間で火星へ到達できるのであろうか。

## 2.4

先述したように、他惑星へ向かう遷移軌道は、出発時期が限られ、何らかの曲線に沿って航行する一種の弾道飛行になる。従って、比推力が2倍程度では、こうした制限に拘束され、自由な航行は不可能である。むしろ、無理な軌道を取ると危険が増す。この点、マーズ・ダイレクトの中心人物ロバート・ズブリンはこう述べる。「弾道軌道を用いないきわめて未来的な推進システム(核融合エンジン、反物質ロケットなど)が出現しないかぎり、人類を火星へ送る正しい軌道は、どんな推進システムを使っても火星へ到達するのに約180日かかる2年間の自由帰還軌道である。(中略)核熱ロケットを使えば、先に選んだ(約180

<sup>21</sup> フォン・ブラウンの有人火星船は前記、Braun (1991)、p41より。スターシップはスペースX社公式サイト、及びNASAで計画中の核熱推進は契約企業のBWXTテクノロジーズ公式サイトとBennett (2018)のweb記事より。(各社公式サイト・web記事の各アドレスは参考文献一覧に記載)。Rover計画およびNERVA計画については、NASA (1992)、pdf. p144より。それぞれ参照した。

日かかる) 軌道で火星へ向かうときに水素/酸素化学推進剤が使われた場合に比べて、60%から70%余計にペイロードを火星へ運ぶことができる」<sup>22</sup>。

引用文中にある自由帰還軌道とは、何らかのトラブルで宇宙船が航行不能となっても、いずれ地球に帰還してくるような軌道である。深刻なトラブルに遭遇したアポロ13号の乗組員が無事生還できたのも、自由帰還軌道に乗っていたおかげである。従って、力任せに無理な軌道を選択すると、何かあった場合、帰還が困難になる可能性がある。NASAの現役主任技術者であるジェフ・シェヒーが主張するような、「核熱推進を用いる宇宙船は、火星への航行時間を化学推進ロケットと比較して20~25%程度節約できる」、あるいは「在来型のロケットエンジンを装備した宇宙船よりも、火星へと向かう際の宇宙船の打ち上げ可能期間(ローンチウインドウ)を長くとれる」利点も、危険と隣り合わせであるかもしれない<sup>23</sup>。というのも、選択可能な火星へ向かう軌道のうち、火星までの飛行時間短縮と、火星へアプローチする際の減速の困難さ、及び自由帰還軌道の長短は反比例するからである。

マーズ・ダイレクト中に示された選択肢では、航行時間：減速の困難さ：自由帰還時間は、それぞれ(180日：やや困難：2年)→(140日：困難：3年)→(130日：不可能：4年)となる。マーズ・ダイレクトの場合、減速の困難さの理由は、動力を極力節約して火星大気を利用するエアロブレーキングが中心となるからである。他方、余裕のある核熱推進を利用すれば、航行時間140~130日に短縮しても減速が可能になるため、シェヒーの主張する20~25%節約という数値が示されると思われる。ただ、140~130日に短縮した場合、推進機関にトラブルが発生した際の自由帰還軌道は1~2年程度長期化する。最短2年間の自由帰還軌道であっても、乗組員の生命維持は決して容易ではないが、さらにこの年月が加わるとかなり厳しい。だが、推進機関が利用できる限り、ミッションを中止し地球へ帰還する自由度は核熱推進の方が高い。核熱推進システム全体の高い信頼性が、必須の条件となる。

なお、火星から地球へ帰還する軌道は自由帰還軌道を取る意味はない。だが、「飛行時間を短縮しようと出発速度を上げると、秒速4kmを超えたあたりで見返りがなくなり始める。これよりずっと速い速度でいこうとすると、飛行時間はさほど短くならないのに、宇宙船のペイロードを、したがって非常時用のシステムの冗長性を断念せざるをえなくなる」とされる<sup>24</sup>。

他方、有人火星飛行で大きな障害となるのは、宇宙空間における放射線被ばくの問題である。火星への全行程で乗員が被ばくする放射線量は、一般人より

---

<sup>22</sup> ズブリン(1997)、p122

<sup>23</sup> Bennett(2018)、web記事。(アドレスは参考文献一覧に記載)

<sup>24</sup> ズブリン(1997)、p94

も制限が緩和されている宇宙飛行士の許容範囲すら、はるかに超過すると分かっている。行程中、火星地表に滞在する期間は、薄いながらも火星大気により被ばく量は低減される。最悪の場合は居住空間を地下に設置して放射線を遮蔽するなど、比較的対処の方法がある。しかし、惑星間航行中の宇宙放射線などの被ばくは防御しにくいといわれる。被ばく低減に有効な手段は、できる限り航行時間を短縮することである。その点で、20～25%程度であっても航行時間を節約できる核熱推進ロケットに相応のメリットは存在する。

現在、NASA と協力企業が検討中の核熱推進ロケットは、濃縮度 20%程度の低濃縮ウラン燃料で運転できる。この点が、過去の Rover 計画および NERVA 計画で試験された原子炉との最大の違いである。他方、基本的な理屈は Rover 計画および NERVA 計画の原子炉と同様のため、前述した理由により、冷却材兼推進剤に液体水素を用いないと、予定した比推力を発揮できない。推進剤として長期間、液体水素を保持する必要がある核熱推進ロケットは、技術的なハードルが高い。前述の NASA の主任技術者シェヒーは、この問題もいずれ解決できるとしているが、インタビュー記事内で「NASA にとって、他の核熱推進システムに必要なエンジンコンポーネントは比較的ハードルの低い技術開発なのだが、この（極低温を保つ必要があり、分子が小さく漏洩し易い性質もある液体水素用の…訳者補足）推進剤タンクの設計は、真に挑戦的なものの一つ」だと、その困難さが指摘される<sup>25</sup>。前述したように、火星現地で帰還燃料を補給するリスクを回避するオプションとして、NASA は推進剤補給不要な核熱推進ロケットを現在開発中である。だが、最短でも 2 年以上かかるミッション期間中、液体水素の推進剤を保持し続ける技術的ハードル、およびリスクはかなり高い。

さて、ここまで「原子力ロケット」のイメージで捉えられる核熱推進ロケットと火星有人飛行との関連を整理し、核熱推進ロケットと通常の化学推進ロケットを比較し検討を加えてみた。まとめると、火星有人飛行に核熱推進ロケットを選択した場合、従来型の化学推進ロケットと比較して、航行時間を 20～25%程度短縮する（最適な自由帰還軌道を取れない可能性がある）、あるいは 6 割から 7 割程度余分に荷物を積める（1990 年代のロケットと比較した場合）というメリットが存在した。有人火星飛行で原子力関連技術を応用しても、総合的にみて、重要分野について 2 倍以上の効率向上は生じない実態が明らかとなった。効率上昇は、もしあったとしても数割程度にとどまる。数割といえども在来技術の改良ではおそらく達成困難な効率上昇なのだが、全く新たな技術体系を導入するには、若干、物足りない数字である。なお、いまだ核熱推進ロケットは原型機を宇宙空間で試験運用する目途すら立たないので、核実験を繰り返して

---

<sup>25</sup> Bennett (2018)、web 記事。(アドレスは参考文献一覧に記載)

いた第1章の PNEs 工法よりも見積もりは不確実である。その点を差し引いても、桁違いはおろか、数倍にもならず、ほぼ在来工法に対する PNEs 工法と同じ数割程度の効率向上になった点は興味深いといえよう。火星有人飛行のような宇宙関連分野でも、原子力技術の応用は幻想を生む余地は存在しなかったのである。

確かに有人宇宙飛行の場合、数割程度といえども効率向上の恩恵が大きい部分もある。特に航行時間の短縮は宇宙放射線被ばく対策には有効である。現時点では実質的に困難だが、将来的には核熱推進ロケットの利用が視野に入るかもしれない。地上社会と違って、放射線被ばくを避ける有効な手段が原子力技術なのが興味深い。しかし、原子力・核分裂エネルギーとは別種の新技术が、効率を向上させ、大幅に航行時間を短縮する可能性もあるので（太陽光による電気推進など）、原子力技術だけにこだわる必要もない。しかしこの先、どの類の推進手段が主流になっていくのかは、正確な予測が困難なところである。

生命を危険に晒す価値が火星にあるかどうかは分からない。その一方で、今あげたような「実戦経験のない」技術の完成を待っていては、おそらく火星有人飛行はいつまで経っても実現しないだろう。「もしコロンブスが大西洋横断の輸送手段として鉄の蒸気船やボーイング 747 が手に入るようになるまで自分の探検隊を埠頭に引き留めていたら、そう遠くまで行けなかった」のだ<sup>26</sup>。

## 2.5

ここまで検討を加えた火星有人飛行であるが、惑星間宇宙船の開発だけでは、システム全体として未完成である。火星表面の恒久的な有人拠点付設も必須となる。往路に関して説明したのと同様、復路にも地球火星間の往来が可能な惑星配置を待たねばならないので、火星滞在時間は必然的に長期になる<sup>27</sup>。この場合、火星表面に時折発生する砂嵐のせいで、太陽電池による有人施設への給電では不安がある。実際、米国が送り込んで長期間活躍した火星ローバー、オポチュニティーも、最後は火星を覆った大規模砂嵐によって太陽光が遮られ、電力不足になって機能を喪失した<sup>28</sup>。またこれも説明したが、現在の化学推進ロケットを用いる火星有人飛行のアイデアでは、帰還時の燃料を火星表面で生成する工程が必須となる。同様の理由で、化学合成自動プラントのエネルギーを太陽光のみに依存するのも不安が残る。以上の点からして、有人拠点の生命維持

---

<sup>26</sup> ズブリン (1997)、p117

<sup>27</sup> オリジナルのマーズ・ダイレクトでは約 600 日で、ほぼ 1 火星年。滞在時間を極端に短縮させて出発した場合、帰路は宇宙放射線被ばくなどの問題がより一層厳しくなる。

<sup>28</sup> その後に送り込まれたキュリオシティや、本稿執筆時に火星へ到着したパーシビアランスの両大型ローバーは、原子力電池 (Radioisotope Thermoelectric Generator: RTG) を搭載している

と帰路の燃料生成の両方を賄う安定したエネルギー源として、火星表面で稼働する小型原子炉を持ち込むアイデアが存在する。実際、その他の有効な選択肢はあまり存在しない。

しかし、火星に地球と同様の放射性廃棄物最終処分問題を生じさせて良いのかどうかは、別途、慎重に思案すべきである。近年の有人火星飛行が計画される動機の一つは、火星のテラフォーミングであろう。将来の人類定住を考えている場合は、特に環境に配慮した技術が求められる。移住する前に汚染してしまうのでは本末転倒も甚だしい。また有人火星探査の目標の一つ、地球外生命の発見がもしもなされた場合、その生命に対する配慮からして、放射性物質の環境汚染問題は深刻に検討されるべきである。もし火星に生命体が発見された場合、テラフォーミングは生命倫理上許されないのではないかという疑問が生じる。

もう一つ蛇足的に付け加えると、外惑星の衛星系の無人探査に関しても、原子力技術の応用は慎重な検討が必要である。近年の研究では木星や土星の氷衛星の表面氷の下に広がる内部海に、地球外生命の存在可能性が高まり、探査価値も同様に高まっている。しかし火星無人探査等に比較すると、これらは非常に技術的ハードルが高い。探査機に装備された各種機器の動力源として、火星以遠の外惑星は太陽との間が離れすぎ、太陽電池パネルの効率が低下する。内部海で地球外生命の存在を調査する場合、分厚い衛星表面氷に降着した後、潜水探査機を表面氷下に降ろす必要がある。必然的に探査機自体も今までにない大型高機能にする必要がある。これまで木星以遠に送り込まれた無人探査機も原子力電池（RTG）を搭載して対応しているが、使用できる電力が限られるので、今後は無人探査機本体に装備された宇宙用原子炉による発電が検討されるはずである。

しかし、本当に地球外生命が表面氷下の海で発見された場合を考慮し、探査活動がその生命に悪影響を与えはしないか、事前に慎重な検討を済ませておく必要がある。もし悪影響を与える危険が少しでも存在した場合、その探査は倫理的に許されないだろう。筆者はこれらの問題に通じていないが、外部観察以上の行為（例えば生体サンプルリターン）に対する倫理的歯止めも事前に設定しておくべきであると考え。そもそも地球外生命の発見可能性がある場所に、大型無人探査機を突っ込ませるとするのは、生命倫理・環境倫理的に大いに問題がある。生命維持に必要な利用可能エネルギーが微弱な外惑星の氷衛星の表面下に、万一生命が存在した場合、原子炉を装備していなくても、地球製大型探査機の侵入は環境を大きく擾乱する可能性があるだろう。エネルギー密度が高い（ただし発電効率は地球上で稼働する発電炉よりもかなり低い）宇宙用原子炉を利用するリスクは、より高いといえる。もし大きく破損するような事象が発

生したら、目も当てられないことになる。

宇宙開発関連で代替手段が見当たらない場合、環境影響を最小限にとどめる配慮は必要だが、原子炉をはじめとする原子力技術の利用は必要である。しかし様々な観点から、その使用は極力制限した方が良い。過渡的な代用手段である。おそらく火星軌道までなら、太陽光の利用が最終的に有効になると思われる。

太陽光が届かないので原子力技術を応用するしかない、と安易に決めてかかる態度も禁物である。本章の初めで言及したように、地上社会で生じる問題構造が存在しないという理由もあって、原子力技術適用の心理的ハードルが下がってしまいかねない。実際、地上社会では存在した地域住民による抵抗という強力なブレーキも、そもそも住民がいないので全く効かない。地球上において、今まで原子力関連技術が無秩序に利用拡大してこなかったのは、社会的な抵抗が存在したからである。地球外天体表面を含む宇宙空間で、原子力関連技術（に限らないが）を利用する際、宇宙環境倫理、宇宙生命倫理という問題構造が新たに生じ得る。うっかり地上社会の技術的幻想を外惑星空間に持ち込むのは危険であると戒めねばならない。

## おわりに

事故など多くの問題を起こし、後始末が国民的な負担となり、将来性についても疑問をもたれながら、未だ日本国内では原子力発電や商業再処理が命脈を保っている。冒頭でも紹介したが、その理由の一つとして、おそらく一般の人々が原子力技術全般に対して抱く曖昧な「幻想」がまだ色濃く残存して、感覚的な支持が完全に消滅していない点が挙げられよう。ある種の幻想は民主主義社会の意思決定にとって有害である。本稿では、核の事例（平和的核爆発：PNEs工法）と宇宙の事例（火星有人宇宙船用核熱推進ロケット）を対象にして、その幻想を取り巻く実態を明らかにした。原子力関連技術を取り巻く幻想について、該当部分に対する解毒作用が存在すると考える。まだ他にも原子力関連技術を取り巻く数多くの幻想が存在するので、一つ一つ地道に幻想を潰していく必要がある。先は長い。

本稿冒頭でも触れたように、資料文献、特に原子力関連技術を開発する側の見積もりなども、筆者は調査で目を通す機会は多い。しかしよく読むと、一般に流布した「桁違いの原子力」は虚構に過ぎないとわかる。核分裂反応のエネルギーを生産的用途に向けた場合、開発促進側の視点でも、経済効率など肝心な部分で、在来技術と比較して数割程度の向上しか見込めないと考えているの

である。現在の視点からそうした過去の開発事例を見返すと、当初見積もった程度の効率向上では、新規技術にかかる導入コストから考えて経済的に全く適合しなかったため、実現に行き詰ったケースが大半であったといえる。種々の優遇策に支えられながらではあるが、経済的に成立していた軽水炉の低濃縮ウラン燃料ワンスルーサイクルは、放射性廃棄物の後始末と大事故の発生から生じる追加コストを除外すれば（廃棄物の処分問題は回避不能で除外するのは不適當だが）、その数少ない例外である。

再生可能エネルギーのコスト低下に加え、福島原子力発電所の事故以降、追加の安全投資が負担となって軽水炉ワンスルーサイクルが競争力を失いつつあるなか、今なお折に触れ原子力に関連する新たな技術・用途が提案されている。この状況からは、原子力技術を延命させようとする意図が透けて見える。新奇な原子力技術が話題にされ、必要性が云々されるのも、ひとえに原子力に利害関係のある者が生き残りのためにする議論であって、そこには軽水炉サイクルの将来性に対する彼ら自身の焦りや不安がある。全ての原子力関連技術の新提案がそうだと決めつける訳ではないが、彼らは、生き残りのため、原子力を取り巻く新たな幻想を生み出そうと躍起になっているのかもしれない。

これはなにも日本に限った話ばかりではなく、むしろ原子力の民事利用には経済性の面から厳しい視点で臨む米国などでも、最近になって新奇で魅力的なアイデアの提案がみられる。日本において、過去の原子力技術の研究・開発に取り組んだ事例を鑑みると、米国など先行している国々で主張された新奇なアイデアに遅れて参入するケースが多い。高速増殖炉と商業再処理を中核とする核燃料サイクル技術をはじめ、民間原子力船や原子力コンビナートなど、筆者がこれまで検討してきた事例は全てそうだとっても過言ではない。そして先行した国々が開発を放棄した後も撤退せずに、無駄な投資を続けて傷口を広げるといなのが、日本の原子力技術の研究・開発がしばしば陥ったパターンである。経済成長期のような余裕がない現在の日本には、同じような失策を繰り返す愚を避ける必要がある。うっかり他国の幻想に巻き込まれるようなことがあってはならない。

軽水炉以外の新形式炉や小型モジュール炉など、今回取り上げなかった近年話題の新技术も、新たな幻想を生み出すだけで終わる可能性がある。というのも、過去の資料調査の中で、別形式の原子炉は軽水炉に比較して劣位になる根拠が記されていたのを、しばしば目にしているからである。一見、新技术に思えても、考えつく限りの形式の原子炉は過去に提案されており、その都度、軽水炉の優位性を崩せず消えていつている。これらについての詳しい検討は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

- 科学技術庁監修『21世紀への階段(復刻版)』弘文堂、(2013)  
ロバート・ズ布林(小菅正夫訳)『マーズ・ダイレクト』徳間書店、(1997)  
Dyson, G., *Project Orion: The Atomic Spaceship 1957-1965*, (London, U.K.: Penguin Books, 2003)  
Von Braun, W., *The Mars Project*, (Illinois, U.S.: University of Illinois Press, 1991)

### 論文

- 榎本喜一「徳之島の核燃料再処理工場立地計画と住民による反対運動の形成過程について」『人間社会学研究集録』第6号(2011)、pp237-259  
榎本喜一「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(2014)、pp31-49  
榎本喜一「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(2017)、pp79-100  
安田秀志・滝塚貴和「米国及び旧ソ連の原子力ロケット」『JAERI・Review』No. 96-015(1996)、日本原子力研究所

### 定期刊行物その他

国会会議録検索システム・第72回国会衆議院予算委員会第13号昭和49年2月6日

<https://kokkai.ndl.go.jp/#/detail?minId=107205261X01319740206&current=1>

米国エネルギー省科学技術情報オフィス作成「プラウシェア計画」

<https://permanent.access.gpo.gov/websites/osti.gov/www.osti.gov/osti/openet/plowshar.pdf>

Report of the 90-Day Study on Human Exploration of the Moon and Mars: 1989/11, NASA. [https://history.nasa.gov/90\\_day\\_study.pdf](https://history.nasa.gov/90_day_study.pdf)

ROVER ENGINE TEST final report: 1991/2,

NASA.<https://ntrs.nasa.gov/api/citations/19920005899/downloads/19920005899.pdf>

JOURNEY-TO-MARS-NEXT-STEPS: 2015/10,

NASA.[https://www.nasa.gov/sites/default/files/atoms/files/journey-to-mars-next-steps-20151008\\_508.pdf](https://www.nasa.gov/sites/default/files/atoms/files/journey-to-mars-next-steps-20151008_508.pdf)

Bennett, Jay., NASA's Nuclear Thermal Engine Is a Blast from the Cold War Past: Popular Mechanics: 2018/2/21,

[https://www.popularmechanics.com/space/moon-mars/a18345717/nasa-ntp-nuclear-engines-mars/?utm\\_medium=syndication&utm\\_source=newscred](https://www.popularmechanics.com/space/moon-mars/a18345717/nasa-ntp-nuclear-engines-mars/?utm_medium=syndication&utm_source=newscred)

SpaceX: <https://www.spacex.com/> (企業サイト内/STARSHIP/ HUMAN SPACEFLIGHT の各項目)

BWX Technologies, Inc.: <https://www.bwxt.com/> (企業サイト内/NUCLEAR THERMAL PROPULSION の項目)

※各サイトの最終閲覧確認は 2021 年 3 月 21 日