

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」

樫本喜一*

はじめに

本稿は、1950年代後半から数年間をかけて米国の一部物理学者たちが取り組んだ、核パルス推進型惑星間有人宇宙船建造計画・コードネーム「オリオン計画」(以下オリオン計画)の顛末について述べる。依拠した資料は George Dyson, (以下ジョージ・ダイソン)による、*Project Orion – The Atomic Spaceship 1957-1965*, (以下『オリオン計画』、2003年 Penguin Books 版)が中心である。加えて、適宜、同書で参考文献としてあげられている資料なども参照した。核パルス推進型宇宙船とは、小型核爆弾を船体後方で間欠的に爆発させ、その反動によって推進力を得るタイプの宇宙船である。スペックなど詳細は本文中で解説する。

筆者が本稿を執筆する理由を、最初に説明しておく。

筆者は都市近郊立地型研究用原子炉の設置問題を調査してきた。1950年代後半、日本の著名な物理学者が、この問題に関わって、いわば地を這うような苦闘をしていたことを明らかにした。一方、同じ時期の米国の物理学者は、自ら開発したオリオン宇宙船に乗って、土星の衛星系へ探査旅行に出かけることを真剣に夢見ていたのである。しかし、天と地に大きくかけ離れた両国の物理学者には接点が存在した。当時、日本国内の複数の大学に導入された研究用原子炉本体と、世界的な原水禁運動である。

武蔵工業大学(現東京都市大学)と立教大学に導入された研究用原子炉が、TRIGA という名称の原子炉である¹。24か国、65か所以上の施設に設置され、現在、世界で最も広く利用されているこの研究用原子炉を開発した物理学者チームが、オリオン計画のオリジナルメンバーであり、開発した企業が、オリオン計画の主契約会社のジェネラル・アトミック(現ジェネラル・アトミックス、当時はジェネラル・ダイナミックスの一部門)だった。日本の物理学者たちもTRIGA ユーザーになるが、1950年代終盤、大都市近郊に導入が検討された複

* 大阪府立大学人間社会学研究科客員研究員

電子メール: kasikazu43d2[a]yahoo.co.jp

¹ TRIGA は、Training, Research, Isotopes, General Atomic(s) の頭文字を取ったスイミングプール型の研究用原子炉である。日本の二大学に導入された TRIGA は、現在、両方とも廃炉となっている。なお、この原子炉の情報に関しては、General Atomic(s)社の公式サイトを参照した(2014年3月7日閲覧)。アドレスは、<http://www.ga.com/about-triga>

数の研究用原子炉に生じた疑問や反対に対処するため、彼らは様々な苦勞を舐めた経験をもつ。一方、1960年代前半、大気圏内核実験禁止条約が成立する過程でオリオン計画は中断を余儀なくされるが、この条約に至る世界的な原水禁運動の潮流の源にいたのもまた、日本の物理学者たちだった。筆者は都市近郊立地型研究用原子炉の歴史を調査する中で、この時期の日本と米国、双方の物理学者がおかれた「鮮明かつアイロニカル」な立ち位置の対比を知ることとなった。日米の原子力の歴史の中で隠れた興味深い一ページを明らかにしたい。これが本稿執筆の目的である。

本稿を叙述する上で中心資料として用いるジョージ・ダイソン著『オリオン計画』は、2014年3月現在、日本語文献として刊行されていない。日米両国の核・原子力問題に係わる歴史を見る視点で、オリオン計画・核パルス推進を捉えた日本語の先行研究はない。加えて、同書は、原子力史とは別の宇宙開発史の一ページとしても非常に興味深い内容が含まれている。限られた紙幅ではあるが、この点についても必要に応じて部分的な言及を行う。

原著の著者であるジョージ・ダイソンは、英国から米国に移住した世界的に著名な物理学者フリーマン・ダイソンの子息である。フリーマン・ダイソンは、オリオン計画のオリジナルメンバーの一人でもあった。この父子は、ベトナム戦争をめぐる見解の相違で離反していた時期がある。しかし、原著の成立過程では、父子の共同作業が随所にみられる。本稿では指摘するだけにとどめるが、原著は親子の和解の物語として読むことも可能である。

1. General Atomic

オリオン計画の契約企業であるジェネラル・アトミックという組織は、ある物理学者の夢と野心から生まれた。その物理学者とは、フレデリック・デ・ホフマンである。

ホフマンは、ハーバード大学物理学科の最終年度在籍中の1943年から、マンハッタン計画に参加した経歴をもつ。ハンス・ベーテの理論部門に所属して、最初に投下された二つの原爆、リトルボーイとファットマンについて、爆弾投下時の弾道軌道を計算するなどした。戦後は、エドワード・テラーの下で水爆開発に携わった。テラーいわく、「私よりも、ずっと熱心に水爆研究をやりたがっていたのが、フレディ（・デ・ホフマン）だ」とのことである²。

ホフマンは、第一回原子力平和利用国際会議で国際使節団の科学部門の重要な仕事を務めた。同時期、テラーの推挙により、ホフマンは、原子力産業に乗り出す意図を持っていたジェネラル・ダイナミックス社社長のジョン・J・ホプ

² Dyson (2003), pp. 29-30.

キンスに雇われて、原子力部門を立ち上げた³。この時、ホフマンはまだ 30 代であった。1955 年 7 月、以上の経緯で設立されたのが、ジェネラル・アトミックである。

ホプキンス会長のお気に入りとなったホフマンは、資金集めや経営判断といったビジネスマンの資質も兼ね備えていた。フリーマン・ダイソンいわく、「フレディは、ビジネスの才にも秀でた第一級の物理学者だった。彼と会う以前に、フレディほど素早く意思決定を行い、しかもそれを何事もなくやってのける権限を併せ持った人物に会ったことがない」⁴。

ジェネラル・アトミックを設立した際、ホフマンは、「原子力平和利用」⁵を目的に、マンハッタン計画時に彼自身が経験したような科学者や技術者の楽園を作り出すことを目指した。物理学者や化学者、理論家や実験家、それに技術者が、各々の垣根を越えて一緒に仕事をする。成果は素早く各分野にフィードバックされる。金に糸目はつけない。そういった体験である。1958 年、サンディエゴのプエブロ・ランドに建設されたジェネラル・アトミックの本社は、彼の理想を体現したものになった。1960 年までには、スタッフとして技術者 700 名を抱えることになり、そのうち、博士号を持つ者が 100 名以上いた⁶。

ホフマンは、特に若く優秀な物理学者を選んでスカウトした。ケーダー（ブット）・ピャッタは、1959 年にジェネラル・アトミックへやってきた物理学者だが、若かった当時の記憶をこう語る。「すべてはみなフレディの物事に対する取り組み方のおかげだった。実は私も気に入っていた言葉だけれど、彼がいつもいていた決め台詞があって、それは、十分な資金と時間を 10 年ほど与えてくれたら、『太陽の仕組みをこの地上で再現してみせよう』だった。フレディは、ホプキンス会長にこの台詞を納得させたのだろう。また、科学に対するフレディの態度ときたら、『部屋いっぱいの理論物理学者を与えてくれたら、世界を征服してみせよう』という感じで、野心満々だった。フレディは、ジェネラル・アトミックで先任となったテッド⁷ やロッサー・ノルトヘイムに、『ここに 10 人の若い理論物理学者を 1 年間雇うだけの金がある。彼らを何かの計画へ従事させてはいかんよ。ただ、若い奴らを 10 人雇うだけでいいんだ』と念を押していたようだ。というのも、その後、私が職を得て、ジェネラル・アトミックへ初めてやってきた時、テッドに『私は何をすればいいんですか』と尋ねてみたのだけれど、テッドの返事ときたら、『とりあえず、しばらく本でも読んで、自分に何ができるのか考えといてくれ。それがクリエイティブってもんだろ』だ

³ Ibid., p. 32.

⁴ Ibid., p. 35.

⁵ 資料との整合性もあり、本稿では以降、原子力平和利用を注釈なしで使用する。

⁶ Ibid., p. 35.

⁷ セオドア・B・テイラー、後述するように、オリオン計画の実質的な発案者である。

ったのだ。この時のジェネラル・アトミックは、物理学者にとって、地上の楽園だったよ」⁸。

だが、物理学者たちは、ジェネラル・アトミックで物思いに耽っていたばかりではない。営利企業であるからには、稼がないとまらない。その点についてのホフマンの回想は、以下の如くである。「ある日、遅い午後から夜にかけて、私の家で行ったミーティングの席上だったが、今どのような原子力関連製品を提供することが望まれているのか、ひとつここでハッキリさせようじゃないかと決めたのだ。“超安全型研究用原子炉”が良かろう、ということになった。それこそ、我々自身がまともに取り組んで、なんとか達成できるギリギリ限度内にあるような計画だと思われたからだ。フリーマン・ダイソンやテッド・テイラーといった、グループ内でも若手の二人が、その夜、大きく刺激を受けて、結果として、水素化ウラン・ジルコニウム合金燃料型原子炉を発明してくれた」⁹。こうしてできた研究用原子炉が **TRIGA** だった。なお、この原子炉の特許は、「フリーマン・ダイソン、テッド・テイラーとアンドリュー・マクレイノルズのものとなったが、慣習によってこの特許権は、一人当たり 1 ドルでジェネラル・アトミックに売却された。これこそ、かつてジェネラル・アトミックが支払った 3 ドルの中で最も価値のある 3 ドルになった。(中略) 病院などで利用される短寿命のアイソトープから、科学研究用実験のための 2,000 メガワットの高出力パルスまで、何でも作り出せる **TRIGA** は、40 年もの間、常に利益を生み出してきた唯一の原子炉デザインである」¹⁰。

TRIGA の特徴は、危険な操作を防止する安全装置の取り付けといった工学的工夫に頼らない、自然法則そのものによって保障される「固有安全性」をもつという点にある。単純化して言うと、急速な負の温度効果を核燃料要素自体にもたせ、制御棒が一気に引き抜かれるなどして炉心が異常事態に陥り、燃料要素の温度が上昇した場合、自発的に核分裂連鎖反応の反応率が急低下し、炉心が熔融したりする前に反応を停止するのである。何も分かっていない大馬鹿者が扱っても大丈夫というばかりでなく、博士号をもった専門家が無茶な実験に用いても大丈夫な位の安全性があるとされる **TRIGA** は、研究用原子炉として、もってこいの特性があると考えられた¹¹。

プロトタイプの **TRIGA** は、1958 年 5 月から運用が始まった。同年 9 月まで開催の第二回国際原子力平和利用会議で **TRIGA** は展示され、数ある展示品の中でも注目の的となった。ジェネラル・アトミックは、会議開催期間中に「この

⁸ Ibid., p. 35.

⁹ Ibid., p. 42.

¹⁰ Ibid., pp. 42-43.

¹¹ Ibid., p. 42.

原子炉をまるで屋台のホットケーキのように売り捌いた」のである¹²。なお、同じ時期、1958年7月開催の東急取締役会で決議されてから、武蔵工業大学の原子力研究所設立が本格的に検討され始めており、同大学に TRIGA が導入決定された時期と TRIGA が景気よく売り捌かれた時期はぴったり符合する¹³。翌年、武蔵工業大学原子力研究所の候補地となった神奈川県川崎市麻生区王禅寺では、原子炉設置の是非を巡って騒動が発生した。売れに売れたジェネラル・アトミックの TRIGA は、当時、遠く離れた日本の地域社会にも影響を及ぼしたのである。

もし、TRIGA の成功がなければ、オリオン計画がまともに取り上げられることもなかっただろう。TRIGA は、ジェネラル・アトミックの資質に信頼感を与えてくれた。最も早い段階でホフマンにスカウトされた物理学者エド・クロイツによると、ジェネラル・ダイナミクス本社で、役員たちに対するオリオン計画のセールストークはシンプルなものだったそうである。いわく、「ここには TRIGA を発明した男たちがいる。そして今度また奴らは、とてつもなくファンタスティック、かつドでかいアイデアを思いついたのだ」と¹⁴。TRIGA を創った男たちが、次に何をしてくれるのか、そういう期待があった。ちょうどその頃、スプートニクショックが全米を震撼させていた。

2. “Saturn by 1970”

核爆弾を間欠的に爆発させ、それによって宇宙機の推進力を得るというアイデアを、最初に思いついたのはスタニスラフ・ウラムである。ウラムはユダヤ系米国人の数学者だが、核融合爆弾（水素爆弾）の仕組みであるテラー・ウラム方式にもその名を連ねている。

ウラムは、マンハッタン計画に参加し、原子爆弾を目の当たりにした直後から、その爆発力を推進力に利用できるのではないかと考え始めた。1955年、彼は、コーネリアス・エベレットとともにレポートを作成した。「外部核爆発による投射物等の推進方法について」というそのレポートは、ロスアラモスの機密文書 No.LAMS-1955 として刊行された¹⁵。

だが、この段階では、有人宇宙機の推進力として利用することは考えられていなかった。常識的なサイズのロケットの推進力として用いると、「そもそも加速が強烈過ぎて、乗組員は潰れて壁の染みになってしまうだろうからね。だから、

¹² Ibid., p. 45.

¹³ 武蔵工業大学も東急グループの一員（五島育英会）である。この間の経緯は、樫本（2007）を参照。ただし、ジェネラル・アトミックに関する言及部分は本稿の方が正確である。

¹⁴ Ibid., p. 45.

¹⁵ Ibid., p. 23.

他のことを心配する必要がなかった。たとえば放射線被曝の問題とか。だれもそのことについて考えもしなかった」¹⁶。こう語るのは、ロスアラモスでウラムと同僚だったハリス・メイヤーである。

そこに転機をもたらしたのは、TRIGA を発明した一人、テッド (セオドア) ・B・テイラーである。戦後、学位をもたないままロスアラモスで目立たない職種に就いたテッド・テイラーは、後に核分裂爆発装置開発のスペシャリストとなっていた (在職中に物理学で博士号の学位を取得する)。ジェネラル・アトミック設立時に、ホフマンにスカウトされた彼は、最大威力と最小威力の両方の核分裂爆発装置 (原爆) を開発してきた男である。なお余談だが、テッドは、しばらく経ってから政府がらみの核関連の仕事をして全て辞め、今までの経歴とは正反対の反核・反原子力活動に転向した人物でもある。また、フリーマン・ダイソンとは、オリオン計画終了以降、別々の道に分かれた後も、友情で結ばれていた¹⁷。

1957 年、スプートニクが打ち上げられたというニュースを聞いた後、テッドは、ショックアブソーバを船体に追加すれば、人が乗ってもウラムの考えた推進方法の衝撃に耐えられるのではないかと考え始めた。「そのことを思いついた夜、もし、地球近傍でなく太陽系全体を探検するための乗り物が欲しいとして、そいつが必要とするスペックを実際に次から次へと付け加えていったら、それを動かすには、スケールの的に多数の核爆弾を利用する位のエネルギーがいるだろうと気付いた。そして、いったいこんなものを実現するには、どうすりゃいいんだろうかと考えた時に、思わずこう呟いたんだ。『おいおい、こりゃスタン・ウラムがここ数年言い続けてたことじゃないか』とね。自分は No. LAMS-1955 をすでに読んでいた」と、テッドは当時の状況を回想する¹⁸。こうして、オリオン計画は誕生した。

なお、オリオン計画の誕生は、技術的に水爆開発と密接かつ複雑にからみあっていた。実用的な水素爆弾には、核融合反応を引き起こすための引き金、あるいは起爆剤となる小型かつ特殊な核分裂爆発装置つまり原爆が必要であり、その必要性が核爆弾設計上のルネッサンスをもたらした。「兵器開発者たちは、いかにして核分裂爆発のエネルギーを特定の方向に向かわせたり分岐させたりするか、いかにしてそのエネルギーを変換させるか、という研究を開始した。これは、理論部門と工学部門のエキスパート達に対し、二つの新しい分野への扉を開けることになった。核分裂反応の瞬間に何が起きているかを研究する物

¹⁶ Ibid., p. 23.

¹⁷ ダイソン(1998),pp, 42-46. なお、Dyson (2003)冒頭の献辞にも“*For Ted Taylor*”とある。

¹⁸ Dyson (2003) p. 25. 原著同箇所によれば、この後、ウラムとテッドはミーティングを重ねて初期アイデアを煮詰めていった。しかし、ウラムはジェネラル・アトミックには所属していないので、実際のオリオン計画では部外者となったが、彼らへの支援を惜しまなかった模様である。

理学上の分野と、爆発の次の瞬間、何が起こるかに関心を向けた核兵器効果研究の分野、この二つである。オリオン計画には、兵器開発に携わる人々の中でも、最も創造的な精神をもつ者を引き寄せる魅力があった。テッド・テイラーは、核分裂爆発装置設計に関する特別な才能をもっていた。また、彼のまわりには、核爆発がもたらすあらゆる効果を見通す才能をもった人々が集まった。マーシャル・ローゼンブラット、バート・フリーマン、チャールズ・ルーミス、ハリス・メイヤーといった人々である。彼らは、理論上あるいはコンピュータシミュレーション上の様々なツールを自家薬籠中にしていた。水爆開発のために開発されたツールではあるが、それらはテッドが考えたオリオン計画の実現性を検討するためにも利用できたのである¹⁹。オリオン計画は、まさに人を得ていた。

ここから少し、ロケットの基礎理論を説明する。当時の宇宙開発に携わる人々にとって、オリオン計画がいかに魅力的だったかを理解するためである。化学ロケットに対するだけでなく、原子力ロケットに分類される推進方法の中でも、オリオン宇宙船はずば抜けたスペックと、技術的な敷居の低さを兼ね備えていた。少々長いが、当該箇所を『オリオン計画』から引用する。

従来型化学ロケットの性能は、排出ガスの速度によって支配される。これは、①燃料に含まれるエネルギーの総量、②推進剤速度を経由した燃焼エネルギーから運動エネルギーへの変換効率、そして③ロケットノズルと燃焼室が耐えられる温度限界、以上三点の制限を受けている。化学ロケットが出せる最大の排出ガス速度は、おおよそ秒速 3 キロメートルである。化学反応で電子の転位が起こり、それによってエネルギーが解放され燃焼生成物を吹き飛ばす際、それらに与えられ得るスピードがその限界である。化学ロケットをより速く推進させる唯一の方法は、ロケットの一部分を後方に捨てて、残りを加速し続けるやり方であり、多段化といわれる。地球の低軌道周回速度（秒速 7 キロメートル）に達するには少なくとも 2 段目、地球の重力圏を離脱する速度（秒速 11 キロメートル）に達するには少なくとも 3 段目のロケットが必要である。しかしこうして重力圏を離脱した場合でも、地球に帰還する分（段）は別勘定である。ロケット各段の初期重量は、各々の段の最終ペイロード（搭載重量）に約 4 を掛け算すれば求められる。例えば、地球低軌道打ち上げ用の二段ロケットの場合、1 トンのペイロード（人工衛星など）を軌道投入するには、打ち上げ時の初期重量は 16 トン（ $[1 \text{ トン} \times 4] \times 4 = 16 \text{ トン}$ ）となる。月面に着陸して帰還する飛行では、五段ロケットが必要となり、月往復質量 1 トンあたりおおよそ 1,000 トンの初期質量が要求される。この点からみて、化学ロケットによる木星、土星、および火星への往復探検旅行はとてつもなく高価で不経済なものとなる。片道かつ無人の探査機を除いて、現在、我々がいまだ月以遠へ行っていない理

¹⁹ Ibid., pp. 17-18.

由が、まさにこれである。太陽系広域の本格的探査、それも実際に探検に行く人々が受け入れ可能なタイムスケールで行なうには、探検すべき価値ある星域まですばやく移動するための高加速力、往復のための十分な燃料、そして宇宙空間で停止するための効率の良いブレーキがすべて要求されるのである。

いっぽう、オリオン宇宙船はこれらの制限を受けない。なぜなら、核分裂でもたらされるエネルギーは化学反応によって得られるエネルギーの100万倍であり、単位重量あたりの燃料のもつエネルギー総量も100万倍となる。加えて、船外で生じる間欠的な推進用核爆発は、船体内部のどこも高温化しないため、ノズルや燃焼室の温度限界とは無縁である。化学ロケットでは、燃料自体が燃焼して高温化することで推進剤（つまり排出ガス）となる。オリオン宇宙船では、核燃料としてウラン・プルトニウムのどちらを用いるかにかかわらず、船外の推進用核パルス爆弾と船体に取り付けられた推進盤（エネルギーを受けとめ推進力に転換するため核爆発に耐えられるよう装甲された部品・プッシャー・プレート。この推進盤と船体の間にショックアブソーバが入る…註）の間でエネルギーの伝達を媒介する推進剤には、ほとんどどのような安い不活性物質であっても利用することが可能である。オリオン宇宙船の推進剤は、ポリエチレンのような軽い物質でも、タングステンのような重い物質であってもかまわない。長距離の宇宙探検旅行に出かけた場合には、火星表面、土星のリングなど、宇宙船が目的地として停泊した場所のどこからでも採取可能な氷、凍ったメタンその他の物質に加えて、はては船内から出る廃棄物に至るまでもが、推進剤として利用できるだろう。

推進剤は核爆発によって蒸発しプラズマジェットと化す。燃焼ガスと化した推進剤を船外に押し出す化学ロケットなどとは反対に、オリオン宇宙船は船外で高速プラズマジェット化した推進剤により船体を押される。つまり、比較的低速で推進剤と核爆発装置を組み合わせた推進ユニット（核パルス装置）が船外へと排出された後、起爆装置が作動し、核爆発が生じた結果、船体底部の推進盤へ高速に拡散する推進剤が跳ね返るのである。核爆発で生じた破片物質（プラズマ状のガスなど）は、大まかにみて化学ロケットの排気スピードの約1,000倍の速度で推進盤にぶち当たる。この際に生じる高温は、どのようなロケットノズルであっても耐えられない。3,000分の1秒間、約12万度の高温プラズマは推進盤の下にとどまる。あまりに短時間のため、熱は推進盤プレートを貫通できない。結果、オリオン宇宙船の推進盤などの船体は核爆発パルスを耐え抜ける。それは、やけどを負わずに焼けた炭を敷き詰めた上をはだしで駆け抜ける人物がいるのと同じ理屈である。数千回の推進用核爆発を必要とする野心的な惑星間ミッションであっても、核爆発パルスと推進盤の間の相互作用時間は、合計1秒以下に収まる。オリオン宇宙船の船体は、時間と距離の両面で、耐え難い高温から安全に隔離されているのだ。

以上に加えて、1958年にARPA、空軍には7年間、また短期間ではあるが1963年の最終段階でもNASA、各々の組織に計画を売り込んだ際の最大のセールスポイント

は、オリオン宇宙船のもつ比推力である。比推力は、宇宙空間において違った推進方式を比較する場合の標準的指標である。比推力を公式的にいうと、推進剤排出速度を重力加速度 (g) で割ったものとして定義され、単位は秒となる。また公式的ではないものの、1 キログラムの燃料が (地上で) 1 キログラムの推力を発生できる時間の長さとしても理解可能である。いわばロケットの燃費を示す指標となる。最良の化学ロケットであっても、比推力は約 430 秒が達成可能な上限である。また、現有技術で製造可能な原子炉を用いる原子力ロケットでは、比推力は 1,000 秒に達すると思われる。比推力は排出ガス温度の平方根に比例するので、上記のような内部に燃焼室をもつロケットは、それ以上の比推力を得ようとする船体が溶けてしまうことになる。

オリオン宇宙船の「外部燃焼型」エンジンは温度限界を免れており、より高い比推力を達成できる。第一世代のオリオン宇宙船であっても比推力は 2,000~3,000 秒であり、現有の核爆発装置を用いた、より大型の宇宙船であれば 4,000~6,000 秒に達する。もし技術的な進歩があったなら、おそらくもう一桁上の比推力に手が届くだろう。その他の技術、たとえば原子力発電や太陽光発電を利用したイオン推進であれば、高い比推力は提供できるだろうが、推力の面では低すぎる。一方、化学ロケットは高い推力を引き出せるものの比推力は小さい。オリオン宇宙船のみが、高推力、高比推力の両方を提供できる。またオリオン宇宙船は、船体が大型化すればするほど比推力も高くなる。航空宇宙関係の歴史家であるスコット・ロウサーによれば、第一世代のオリオン宇宙船ですら、「一段ロケットで、ジャッカス平原の真ん中から土星の軌道まで出かけて行き、さらに地球低軌道まで戻ってくるのが可能だ」とのことである²⁰。

オリオン宇宙船は、より大型化した方がその真価を発揮し易いという、他の宇宙推進システムにはない性質を有する。火星へのシェイクダウン航海用に設計された秒速 20 キロメートルの第一世代のオリオン宇宙船は、簡単に秒速 40 キロメートル型にアップグレードできる。そして、第一世代就航から数年を経ずして、外惑星へ向けて次世代、本来の性能を有したオリオン宇宙船が就航する。オーシャンライナークラスのその宇宙船、科学者からはダーウィンの乗っていたビーグル号の宇宙バージョンになぞらえられていた探検船の目的地について、オリオン計画の中心人物の一人フリーマン・ダイソンは、12 ページのレポートを作成している。「外惑星衛星への宇宙旅行」と題されたこのレポートは、土星もしくは木星の衛星への有人探検が可能かどうかについて考察を加える。レポート中でフリーマンは次のように記している。「外惑星の衛星は、確実に豊富な水素が存在することを我々が知っている唯一の場所である。また、宇宙船が着陸できる唯一の場所でもある。加えて、それらの衛星では、制限なくその他の軽い元素、例えば炭素、酸素そして窒素、が手に入るだろう。これらの元素は

²⁰ Ibid., pp. 2-4.

生命維持のため必要であり、かつまた推進剤としても有用である。外惑星の重力が大きく脱出速度が高いことは、それら外惑星表面（あるとして）に着地することを困難にする一方、それらの衛星に着陸することを助けてくれているのだ。「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ととなる。この軌道成分が、ある惑星Pを捕らえ得る放物線軌道（ホーマン軌道）に宇宙船を投入できるような時に離陸する。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が与えられる。適切な楕円軌道が選ばれることにより、宇宙船は今まで描いていた放物線軌道からわずかにそれるだけで、その目的の衛星の軌道へと遷移することができる。目的とする衛星表面への最終的な速度変化は着陸するためだけのものが要求される」。木星と土星の衛星は、オリオン宇宙船の目的地とするのに最適な場所と考えられた。「ただ、木星の衛星に関しては問題がある。その問題は、まさに木星の重力圏があまりにも強すぎるという点にある。いったん、木星に向かって降下したら、速度が速くなりすぎ、衛星の速度と合わせることが困難になるのだ。一方、土星の衛星はより簡単である。なぜなら、土星はそこまで大きくないからだ」。「我々は、外惑星の各衛星に関する知識をほんの少ししか持っていなかった。その中で、土星の衛星の一つエンケラドスは特に良いと思われた。エンケラドスの密度は 0.618 と知られていた。それゆえ、この衛星は氷や炭化水素といった軽い物質によってできているのは間違いない。それらは生命維持用に必要とされるばかりでなく、現地調達の推進剤として用いることも可能だろう」²¹。

「1970年までに土星へ」が、オリオン計画の合言葉になった²²。もちろん、このレポートを作成したフリーマンもそうなのだが、一部の科学者たちは、「宇宙船ビーグル号」に自分たちも乗船するつもりだったのである。

フリーマンは、オリオン計画が中断された後の1968年の段階でも、オリオン宇宙船の発展型、核融合パルス推進型恒星間移民船に関する考察を続けていた。それによれば、技術的にやや楽観的な見積もりを加えると、最終到達速度が秒速10,000キロメートル（光速の約3%）で10万トンクラス（かそれ以上）の核融合パルス推進型宇宙船の建造も視野に入るとのことである²³。このような恒星船は、いつ建造可能になるのか。フリーマンはその点に関しても考察する。「もし、我々がこの先しばらく滅亡せず、現時点の経済成長率（年間4%）を続けられるならば、約200年後に、経済は、今のGNPに比較して1,000倍の規模にな

²¹ Ibid., pp. 189-190.

²² Ibid., p. 192.

²³ 恒星間有人船だが、出発時の乗組員の生存期間中に目的地に到着が不可能な、いわゆる世代宇宙船のカテゴリーに入る。

る。その時点で恒星間移民船の建造コストが GNP に占める割合と、現時点のサターン 5 型（アポロ月旅行計画用のロケット）に用いる大艦隊の建造コストが GNP に占めている割合とが、ほぼ等しくなる。冷静に考えれば馬鹿馬鹿しいことだと思いつつも、我々は、現在、何とかしてこの月旅行計画を成し遂げようとしているところだ。このような視点に立つ限り、破局的な事態が我々に生じなければ、今から 200 年後には最初の恒星間有人飛行が始まると予測できる。ではなぜ、そのような企てを人類はする（べきな）のか。フリーマンの答えの一つはこうである。「この太陽系に住む全人類を呑み込んでしまう破局、それは天文学的な出来事かもしれないし人災かもしれないが、どちらにしても考え得る最悪の事態である。恒星間を渡る移民は、そういった破局から人類を生き延びさせるための保険となるだろう」²⁴。まさにそれが存在するせいで人類滅亡の危険性に現実味があった核融合爆発の技術を用いて、人類滅亡のリスクを回避するための恒星間移民を考察する。冷戦真っ盛りの時代とはいえ、今から振り返ると、皮肉な響きのある見解である。

なお、現在、web 上などで見受けられるオリオン計画（オリオン宇宙船）の情報や画像などは、これまで述べたものとは違う低スペックバージョンが多い。オリジナルアイデアのオリオン宇宙船の打ち上げ方法では、大気圏内に直接放射能をまき散らすことが危惧されたため、計画末期には、アポロ宇宙船用サターン 5 型の第 1 段ブースターで、地球周回低軌道に船体を打ち上げるタイプに変更された。このタイプが web 上で多くみられるオリオン宇宙船である。このオリオン宇宙船は、かなり現実的なサイズにスケールダウンされたが、それでもなお比推力は 1,800~2,500 秒の範囲であり、火星有人探査旅行には十分のスペックを保持していた²⁵。

ここまで様々な数値で述べてきたオリオン宇宙船のスペックには、フィージビリティスタディの結果、ある程度のデータの裏付けがある。超小型原爆に転用可能な核パルス推進装置の詳細など、まだ機密を解かれていない部分も多いが、ジョージ・ダイソンの取材によって、オリオン計画の実現性に関するかなり具体的な証言が得られている。

これらの研究は米国政府、おもに空軍の資金が提供され、正式な計画となっていた。一見常識はずれに思われるオリオン宇宙船のアイデアに、政府機関の正式なお墨付きが得られた理由は、1957 年から少しの間、スプートニクショックで米国政府が大いに狼狽していたからである。落ち着きを取り戻して、従来型の化学ロケットでやるべしと正式に決定されるまで、米国の宇宙政策に、わずかな隙間が生じた。TRIGA をつくったナイスガイたちが、その隙間を少しの間

²⁴ Dyson (1968), p. 45. 前段の引用も同じ個所である。

²⁵ General Dynamics Co. (1964), p. 1.

だけ、こじあけることに成功したのであった。

理論研究より先のオリオン宇宙船は、核爆弾の代わりに高性能火薬を用いた、ごく小さなモデルを実験的に飛ばしただけである。ユーモラスなその実験の映像が残っている。しかし、本当のオリオン宇宙船の打ち上げ風景はそのような「のんびり」したものとは違ったはずだった。オリオン計画の最も中心にいたテッド・テイラーは、オリジナルサイズのオリオン宇宙船が実際の核パルス装置を用いて地表から打ち上げられる様子をこう形容する。「フル規格、フル装備で行なうこいつの初飛行は、人類が今まで見た中で最もスペクタクルな出来事になるだろう」²⁶。

だが、「核爆弾」を用いるという、まさにその1点によって、オリオン計画はこれより先に進めなかった。時代の流れは、オリオン宇宙船の離陸を許さなかったのである。

3. Death of a Project

米国内では、当初、大気圏内核実験による「放射能汚染」²⁷はあまり問題視されていなかった。それゆえ、ネバダ核実験場付近から、フルサイズ 4,000 トンクラスのオリオン宇宙船が、核パルス推進を用いて地上発射されるオリジナルプランも、さほど問題があるとは考えられていなかった。オリオン計画の実験部門を主導したブライアン・デュニーいわく、「死の灰が舞い降りてくるまで、我々はすばらしく自由な時間を過ごしていた。クレイジーな時代だった。全ては冷戦のために、我々の価値観すらねじ曲げられていた。閉じた科学者コミュニティの中で、あらゆる種類の奇妙なアイデアが育つことを許されたのだ」²⁸。だが、1954年3月のビキニ事件と、以後、日本の科学者によって明らかにされた地球規模の放射能汚染の実態解明によって、そのような風向きにも変化が生じてきた。

1957年、英国が太平洋上のクリスマス島で水爆実験を行うと発表した時、日本の物理学者たちが、英国の物理学者たちに、実験の中止に協力してほしいと依頼した。世界的な放射能汚染の水準が危険水域まで近づいてきたことを、日本の科学者コミュニティがいち早く気付いていたからである。彼らの必死のアピールは世界の科学者の共感を得た模様である。当時の雰囲気伝える武谷三男の文章ではこう書かれている。「(日本政府は) 英国に特使を派遣して、実

²⁶ Dyson (2003), p. 2. なお、ニーヴン&パーネルのSF小説『降伏の儀式』下巻にオリオン宇宙船の地表からの打ち上げシーンがある。

²⁷ 以下、本稿では、核兵器のフォールアウトを主体とした放射性物質による大気、土壌、海洋汚染などを一まとめにしてこう形容する。

²⁸ Ibid., Preface, viii.

験禁止を訴えるという考えを出したのであります。そして、この特使として松下立教大学総長が派遣されました。松下氏はわれわれ理学部に²⁹、誰を随員としてつれていくべきか諮問してきましたので、ぜひとも今まで原水爆放射能汚染を日本で測定してきた、立教大学の道家助教授をつれて行くべきだと答えて、これが容れられたのでした。「道家助教授は日本での測定の精密な結果の報告書を作って、これをもって英国に行き、英国各界の人々にこれをわたして来たのです。この影響が直ちに現れて、英国の原子力の責任者コッククロフト博士は4月12日附で駐英日本大使館を通じて返事をくれました」。日本の物理学者の訴えの少し前、米英間の会談の場で、両首脳から、水爆実験の必要性と放射能汚染は問題ではないことがアピールされていたのだが、「そのときまで世界的に発表されていた降灰量の数字は、1955年までの降灰量で、それはまだそれほど大きい量ではなかったのです。ところが道家報告では、その後になって放射能降灰がはるかに強まっていることが明らかにされているのです」。「米国でもその後リビーが、4月の終りになってはじめて、最近までの詳細な米国の調査結果を発表したのです。これによりますと、米国での降灰量は日本での測定以上の量を示しているのです」³⁰。核戦争下の戦場での戦闘行動も訓練されていた当時のこと、政府に協力していた米国の科学者も、核実験場付近の放射能汚染の深刻な状況を当然知っていたはずである。日本の物理学者の訴えはそれを明らかにするきっかけをつくったといえよう。

1957年5月から6月にかけて、米国の上下両院放射能調査特別分科委員会の公聴会が開かれ、放射能汚染の悪影響に米国民の関心が向き始めた。武谷いわく、「(1956年の大統領選挙時に行われたギャラップの調査によれば)国民の24%が水爆実験禁止のスローガンに賛成しましたがけれども、今日(1957年6月)になってこの公聴会を通じて60%以上の米国人は、水爆実験禁止の必要を認めるようになってきたといわれています。ビキニ実験のころは、水爆実験被害に対する日本人の抗議に対して、けんもほろろの態度であった米国国民としては、いかに大きな変化を来したことであるか」とのことである³¹。1957年、まさにオリオン計画が産声を上げたその頃、米国の一般市民が、ようやく放射能汚染に注意を向け始めた。だが、冷戦の渦中に巻き込まれ、核兵器開発の最前線にいた人々が正気に返るのは、それからしばらく経ってからとなった。

翌年、1958年のおそく、紆余曲折がありながらも、国際的な世論に押され英米ソの三か国は核実験モラトリアムに入った。それゆえ当然のことだが、オリオン計画も核爆弾を実際に用いる実験作業には進めなかった。だが、オリオン

²⁹ 当時、武谷は立教大学理学部教授である。なお、立教大学理学部も TRIGA ユーザーとなる。

³⁰ 武谷(1957), pp. 23-24.

³¹ Ibid., p. 26.

計画のメンバーは、その間も手を休めていた訳ではなかった。オリオン用の核実験サイトを物色することはできたので、フリーマン、テッド、デュニーたちは、ネバダテストサイト近郊のジャッカス平原に見学に出かけた。1959年7月のことである。そこでフリーマンはようやく正気を取り戻し始めた。「人生において空前絶後となる完全な静けさというものをその時体験した」と、彼は語る。「それは、真昼の太陽の下に広がるジャッカス平原だった。魂を揺さぶられるような静けさだった。息を止めれば、全く何も聞こえない。真っ白で平坦な静けさに包まれたその場で、私は、初めて、我々が実行しようとして提案している行為に関して、それはもしかして恥ずべきことなのではないか、という僅かな疑念がもたげ始めるのを感じた。我々は、本当に、この静寂をトラックやブルドーザーで侵し、数年後には放射性物質のジャンクヤードにしてしまうつもりなのだろうか。オリオン計画の正しさに対する最初の疑惑の影が、私の心の中に忍び寄ってきた」³²。

1961年半ばには、英米ソ三か国の核実験モラトリアムは終わりをつげ、以前を上回るペースで核実験が再開された。だが実際は、それらは部分的核実験停止を見越した駆け込みの実験だった。地表、大気圏内、宇宙空間に近い上空、そして海中で実施されてきた放射能をまき散らす野放図な核実験は、もはや限界に達していたのである。オリオン計画も対応を迫られた。スペックダウンを承知で大幅な設計の見直しが加えられ、地球周回低軌道まで通常の化学ロケットブースターを用いる方式が採用された。この、サターン 5 型第一段ブースターで打ち上げるタイプのハイブリッドバージョンのオリオン宇宙船によって、放射能汚染問題は解決された、ということが言われる。だが、「オリオン計画にとって不幸なことには、地球の大気圏内だけではなく、それより上層にある地球の磁気圏内のあちらこちらに放出された核分裂生成物のほとんどは、ゆっくりとではあるが磁力線に沿う形で巡り回って、最終的に地表に到達することになる」のである³³。

オリオン計画に従事した期間の後半、フリーマン・ダイソンは、放射能汚染問題に集中的に取り組んだ。「火星やその他の場所に行こうとすれば、少なくとも加減速の動力飛行期間の半分は地球の磁気圏の中でのものとなろう。それゆえ、核パルス推進で生じる半分の核分裂生成物が地球に降り注ぐことになる。飛行に伴って生じる核分裂生成物の総量は約1メガトン分であり、つまりその半分の0.5メガトン分が大気圏内に放射性降下物として降り注ぐこととなろう。あの時代、米国とソ連の双方が、巨大な核爆弾を使った大気圏内実験を行っていた。年間、100メガトンといったところであろうか。我々のオリオン宇宙船が打ち上

³² Dyson (2003), p. 227.

³³ Ibid., p. 229.

げられた場合には、実際に行なわれている 1 年間の核実験で撒き散らされる放射性降下物の量に約 1%分³⁴、余計に付け加えることになると見積もられた。つづく問題は、大気圏内核実験により生命を失う人がどれだけいるか、ということであった。当時、それは熱い議論の対象だった。「核実験に伴って生じる放射性物質をおおよそ均一に地球全体に撒き散らしたとして、また同時に一人当たりの致命的な被曝量に 10,000 ラド/人³⁵を当てはめれば、実際行なわれている大気圏内核実験で毎年 1,000 人の人々が殺されている、といった計算になる。このことは、オリオン宇宙船の打ち上げが実施された場合、1 回の打ち上げで約 10 人の人々が命を落とすということの意味している。それは私にとって非常に深刻に考えさせられる数値であった。もし放射性降下物を減らす何らかの手立てをしなかった場合、オリオン宇宙船を打ち上げる度に 10 人の人々に死刑宣告を下すのと同じことになるのだ。私にとって、それは真剣に計画の中止を考えさせられる出来事だった」³⁶。1959 年 9 月の終わり、フリーマンは計画から去った。

「当初、ハイブリッドバージョンのオリオン宇宙船で火星へ向かう現実的な希望があるかぎり、私は核実験禁止条約の成立を望んでいなかった。しかし、1963 年頃には、もし核実験禁止条約の成立を妨げてしまうのであれば、オリオン計画のために頑張る価値などないことが明らかになっていた。最終的に私は、禁止条約に抵抗する立場から、条約に賛成する立場へと態度を変えた」と、フリーマンは語る³⁷。1963 年夏、モスクワにおいて部分的核実験禁止条約の最終的な交渉が進行していた期間、フリーマンはワシントンにある軍備管理軍縮機関の仕事に従事していた。「その夏、我々が話し合った主要な議題とは、オリオン計画とは別の『鋤・プラウシェア』と呼ばれる平和利用目的の核兵器の使用についてだった。ある時は、米国側がその核兵器の平和目的利用を行なうことを望み、それにロシア人が反対した。またある時には、彼らの方が望んで、我々が反対するという有様だった。しかし、その特別な夏は、米国が希望して、ロシア人はそうではないという状況だった。この両者の隔たりが、条約の交渉を困難にする『躓きの石』となっていた。ロシア人たちは平和利用目的の核爆発も禁止条約の中に含まれるべきだと主張し、我々は含まれるべきではないと主張していた。そしてその時、全く偶然のことだが、週末で全員が不在で、私だけがたまたまワシントンの持ち場にいるという状況があった。そのワシントンへ、ロングを通じてハリマンからの問い合わせがきた。『アメリカ合衆国は核爆

³⁴ 実際は 0.5%だが、数値を丸めたものと思われる。

³⁵ 10,000 ラドは現在の単位で 100 グレイである。極めて高い線量であり、この線量を全身に被曝すれば人間は短時間で全数死亡する。

³⁶ Ibid., p. 230.

³⁷ Ibid., p. 233.

発の平和利用を放棄することは可能や否や』というものだった。オフィスには私一人しかいなかった。私は一生懸命考えた。『この問い合わせはオリオン計画の死命を決する。答えは是なのか、それとも否なのか』。結局私はこう答えた。『はい、もちろん可能です』と。そして条約はすばやく、ほとんど数日の内に実現したのだ」³⁸。大気圏外での核爆発も禁じる部分的核実験禁止条約成立により、オリオン計画は、事実上中断に追い込まれた。

しかし、フリーマンは、オリオン計画の技術的コンセプトそのものに限界を感じて立場を転向した訳ではなかった。あくまでオリオンを取り巻く政治的、社会的な状況に困難さを痛感したからである。事実、全てが終わった後に、彼はオリオン計画の中止を悼む文章を『サイエンス』誌上に発表している。その文章冒頭は次のように始まる。「本年（1965年）1月、一般公衆に気付かれず、またそれゆえ悲しまれずに、オリオン計画は葬られた。1958年にこの計画を開始し、神経をすり減らす7年の歳月それに従事してきた人々は、長い目でみて、この計画がもし実現するなら、宇宙空間探検の『リーズナブルなプログラム』として最も希望の持てたものであると信じている。『リーズナブルなプログラム』ということはつまり、現時点で存在している他の宇宙探検プログラムと比較可能なコストで、かつ約束される内容に関しては、はるかに優れているということを意味している。彼らの目的は、太陽系域の探査という役目を負った現実的なサイズに収まる推進システムを、政治的に許容できるコストで作ることである。また、彼らは、やろうとさえ思えば、それを行なう方法を皆の前に実際に提示できたと信じている。しかし、今や、本計画はこれ以上先に進めなくする決定がなされてしまった。この記事の目的は、オリオン計画を葬るためのものでもなければ、賞賛するためのものでもない。それはただ、オリオン計画の生と死に関する事実をはじめて公にし、かなう限り公平に、この計画の運命に影響を与えた政治的及び哲学的な問題を説明することである」³⁹。

オリオン計画末期、なんとか計画を存続させようと関係者は奮闘していた。そのうちの 하나가、可能な範囲でオリオン計画の存在を公衆一般に知らせる努力であった。大衆の共感を支持にして計画の存続を図ったのである。だが、それも徒労に終わった。唯一、目を止めてくれたのは、映画監督と小説家だった。

未だに色褪せない未来映像を提供したことでも知られる『2001年・宇宙の旅』という映画が、まだロンドン近郊のボアナム・ウッドのMGMスタジオで製作中だった1965年10月26日、映画の原作者であるアーサー・C・クラークの日記には次のように記されている。「スタンリー・キューブリック監督と私は、監督の最新のアイデアについてディスカッションした。宇宙船ディスカバリー

³⁸ Ibid., pp. 233-234.

³⁹ Dyson (1965), p. 141.

号は核パルス推進にしよう、というアイデアだ。最近機密解除された核パルス推進に関するレポートを読んで、彼はとても強い印象を受けたようだ⁴⁰。

技術的に視覚化が難しい核パルス推進のイメージを、実際の画面にしなければならない特撮スタッフの抵抗で、このアイデアは没になった。だが、監督自身が関わったと思われる映画脚本の初期バージョンには、核爆弾で推進するディスカバリー号が画面上に登場する。「地球から 100 万マイル彼方のディスカバリー号。地球も月も小さく見えた。5 秒毎に宇宙船の核パルス推進部から発せられる目も眩むような閃光が見える。核パルスのプラズマは宇宙船尾部の分厚いアブレーション推進盤を打ちつけた」⁴¹。

低コストで大規模な輸送に対応できる宇宙空間推進システムとしてのオリオン宇宙船が、もしも実用化されていれば、『2001 年・宇宙の旅』の特撮シーンで登場する「人類が活動する宇宙空間」は実現していたかもしれない。だが、現時点でそれは、映画の中にしか存在しない宇宙空間である。しかし、実現しなかったのは、技術的に不可能だったからという理由では決してない。結局のところ、社会がそれを望まなかったからであった。「オリオン計画に対しては、8 年を超えるその期間に合計 1,000 万ドルの資金が費やされた。キューブリック監督の映画『2001 年・宇宙の旅』には、4 年の制作期間を通じて同じく 1,000 万ドルの資金が投入された。アポロ計画は、クラークが 1965 年に指摘したところでは、NASAにおいて、1 日あたり 1,000 万ドルのコストがかかっていたのである」⁴²。

おわりに

オリオン計画全体からすると、本稿で取り上げたエピソードは、ほんの一部分に過ぎない。紙幅の関係で割愛しなければならなかった興味深いエピソードは数多くある。特に、ジョージ・ダイソンが原著『オリオン計画』中で、いわば主人公として扱っていたテッド・テイラーという人物の魅力は、殆ど伝えられなかった。以上の点については全訳を刊行できる機会を待ちたい。

また、日米の物理学者たちの同時代史として、本来であれば、紙数を費やした精密な論証があつてしかるべきなのだが、本稿ではスケッチ程度のものに留まっている。これについては今後の課題としたい。

第 1 節で言及したように、ホフマンがジェネラル・アトミックを設立した動機は、原子力平和利用のために、マンハッタン計画時のような科学者や技術者の

⁴⁰ Dyson (2003), p. 271.

⁴¹ Dyson (2003), P. 271. なお、アーサー・C・クラークの小説版では、ディスカバリー号のエンジンは核パルス推進ではない。

⁴² Ibid., p. 273.

樂園を作り出すことだった。しかし、原子力や科学技術を取り巻く現実は、当初から彼の理想とは食い違っていたようである。というのも、「ジェネラル・アトミックの現金収入の大部分は、米国原子力委員会や国防省との兵器がらみの契約から得たものだった。オリオン宇宙船の軍事目的への応用可能性や、平和利用の曖昧さの問題として良く蒸し返される水爆用のトリチウム製造を、たとえ脇においたとしても、軍事機密の船舶用原子炉計画や、宇宙監視システム用の電源供給のための完全自立型小規模原子炉のシリーズなどが、ジェネラル・アトミックの契約として存在した」からである⁴³。

オリオン計画の中断からしばらく経って、ホフマンはジェネラル・アトミックを去った。その後、この組織は、ジェネラル・ダイナミクスから売却され、転々と持ち主を変えて、最終的に個人所有の同族会社ジェネラル・アトミックスとなり、先端的な科学技術を防衛産業と多角化ベンチャーに応用する企業となった。現在、子会社を含む企業全体としての主要な製品の一つに、攻撃能力をもつ無人機システムの開発・製造がある。イラクやアフガニスタンで実戦運用される RQ-1 プレデターなどの機体とその運用設備一式を開発したのが、このジェネラル・アトミックスの航空機部門である⁴⁴。今や兵士は、自宅から通勤可能な米国内の施設でこれらの機体を遠隔操作し、戦場の敵性人物を殺傷する任務についている。ある意味、非常に未来的な光景である。科学者や技術者の樂園を夢見たはずの組織のいわばなれの果てが、この現実を生んだ。

それに比べて、1950 年代終盤、核爆弾で推進する宇宙船を開発して自ら乗り組み、土星を目指していた物理学者たちには、まだ万人を魅了する夢があったようである。

謝辞

末尾となりましたが、英文資料の翻訳作業を長期間にわたってご指導いただき、多くのアドバイスを頂戴した齋藤憲大阪府立大学教授に、心よりお礼申し上げます。なお、本稿中の引用部分の翻訳上の問題等は、全て筆者の責任に帰すこととお断りしておきます。

⁴³ Ibid., pp. 36-37.

⁴⁴ ジェネラル・アトミックスの現状については、冒頭に示した同社の公式サイトを参照した。

資料・文献一覧

- Dyson, G., *Project Orion – The Atomic Spaceship 1957-1965*, (London, U.K.: Penguin Books, 2003)
- Dyson, F. J., “Interstellar Transport,” *Physics Today*, Oct (1968): 41-45
- Dyson, F. J., “Death of a Project,” *Science*, 149 (3680) (1965): 141-144
- General Dynamics Co., *Nuclear Pulse Vehicle Study Condensed Summary Report*, Jan (1964): 1-10
- ダイソン、フリーマン (はやし・はじめ、はやし・まさる訳) 『科学の未来を語る』三田出版会、(1998)
- 武谷三男 『原水爆実験』岩波書店、(1957)
- 檜本喜一 「研究用原子炉の都市近郊立地に関する歴史的考察」『人間社会学研究集録』3、大阪府立大学、(2007): 131-160