

宇宙輸送システム長期ビジョン（案）

平成 26 年 3 月 31 日

目次

はじめに

第1章 基本的な考え方

- 1-1. 長期ビジョンの目的
- 1-2. 将来宇宙輸送システムの実現に向けた取組の意義

第2章 宇宙輸送システムの歴史及び動向

- 2-1. 世界における宇宙輸送システムの歴史及び動向
- 2-2. 我が国における宇宙輸送システムの歴史及び動向
- 2-3. 歴史及び動向の分析

第3章 将来宇宙輸送システムの姿

- 3-1. 将来の宇宙利用の姿
- 3-2. 将来宇宙輸送システムの姿

第4章 将来宇宙輸送システムの実現に向けて

- 4-1. 低軌道領域の将来宇宙輸送システムの発展経路
- 4-2. 低軌道領域の将来宇宙輸送システムの設計等の変革
- 4-3. 低軌道領域の将来宇宙輸送システムの実現のための要素技術
- 4-4. 高軌道領域の将来宇宙輸送システムの発展経路及び要素技術
- 4-5. 先端技術の獲得による国際優位性の確保
- 4-6. 将来宇宙輸送システムの開発プロセス
- 4-7. 長期ビジョンの実現に向けた課題

おわりに

はじめに

宇宙基本計画（平成25年1月25日宇宙開発戦略本部決定）において、宇宙活動は、我が国の安全保障や社会的経済的利益の確保のために不可欠であり、自律的に行う能力を保持することは、我が国宇宙政策の基本であると示されている。また、宇宙輸送システムは、我が国が必要とする時に、必要な人工衛星等を、独自に宇宙空間に打ち上げるために不可欠な手段であり、その維持は我が国の宇宙活動の自律性確保の観点から重要であるとされている。さらに、今後長期にわたり我が国が自律的な宇宙輸送能力を保持し続けていくために、これまでの我が国ロケット開発の実績を十分に評価しつつ、より中長期的な観点から、我が国の宇宙輸送システムの在り方について速やかに総合的検討を行い、その結果をふまえ必要な措置を講じることが盛り込まれている。

この宇宙輸送システム長期ビジョン（以下、「長期ビジョン」という。）は、宇宙基本計画において上記の通り示された総合的検討を行い、長期的な観点で我が国の宇宙輸送システムに関する取組の方向性を明らかにしたものである。我が国では新型基幹ロケットの運用を2020年から開始する予定であり、各国の動向を踏まえても、少なくとも2030年代までは新型基幹ロケットのような使い切り型ロケットが主な輸送手段であると想定される。

本長期ビジョンでは、それ以降の2040年以降において実現が期待される宇宙輸送システム手段を検討の対象とし、鉄道や航空機のようなインフラとして誰でも自由に利用できる宇宙輸送システムの実現を我が国の総合力を結集して目指し、将来、その開発及び製造において国際社会で主導的な立場を獲得するという挑戦的で夢のある目標を掲げることとした。

第一章 基本的な考え方

1-1. 長期ビジョンの目的

現在、世界ではこれまでの宇宙利用に加えて、新たな宇宙利用がはじまりつつある。これにより、今後、宇宙利用の姿は大きく変貌すると考えられる。

これまでの宇宙利用とは、国威発揚を目的とした宇宙開発や人工衛星による測位、通信放送、観測等情報の収集とその伝達といった宇宙利用の形態である。しかし、現在の衛星の高機能化・長寿命化や市場規模から考えて、この延長線上に飛躍的な宇宙輸送需要の増加は見込まれない。

一方、新たな宇宙利用とは、今後、出現すると考えられる宇宙の利用形態を指す。例えば NASA（米航空宇宙局）¹が宇宙輸送の商業化を検討してまとめた商業宇宙輸送スタディ（CSTS）²は、宇宙環境を利用した製造、一般人による滞在型の宇宙旅行や物資の運搬等の輸送サービス、エンターテイメント、デブリ対策、宇宙医療施設、資源採掘及びエネルギー（宇宙太陽光発電）等の新たな形態の宇宙利用が大幅に拡大すると想定している。

このような新たな宇宙利用を実現するためには、年間数万トン規模の宇宙輸送が必要となるため、抜本的なコスト低減を可能とする宇宙輸送システムが求められる。

新たな宇宙利用が実現した場合、国が宇宙活動を主導する現在の世界から、民間が宇宙活動を主導する世界へと転換していくことが想定される。

本長期ビジョンの検討に当たっては、以上のような新たな宇宙利用に対応した宇宙輸送を前提とした。このような宇宙輸送は、従来のように特定のミッションに限定した特別な輸送手段ではなく、鉄道や航空機のようなインフラとして当たり前に存在し、誰でも自由に利用できるものになると想定される。人類の活動領域が宇宙に拡大していくことを考えれば、このような宇宙輸送能力を保持することは、我が国の宇宙活動における長期的な自律性の確保につながると考えられる。

しかし、現在の宇宙輸送はその費用が地球上の輸送に比べて桁違いに高く、

¹ National Aeronautics and Space Administration

² *Commercial Space Transportation Study*. NASA, 1997.

<<http://www.hq.nasa.gov/webaccess/CommSpaceTrans/>>

新たな宇宙利用を実現する上での制約となっている。現在のロケットは一回で使い捨てるという方式を採用しているため、輸送コストとして毎回、ロケットの製造費が発生する。したがって、今後は航空機や他の通常の輸送手段のような多数回の繰り返し運用により、宇宙輸送システムを低コストで高頻度な大量輸送インフラとして利用できるようにすることで、前述のような大規模な宇宙利用を可能とすることが想定される。

これまでに開発された繰り返し運用の可能な宇宙輸送システムは技術的な限界等からコスト低下や高頻度運用を実現することはできなかった。しかし、近年、輸送コストの低減に対する要求が高まり、それを支える技術にも大幅な進展があったため、再使用型宇宙輸送システムの実現を可能とする技術基盤が整ってきた。たとえば、設計や加工・製造、素材等の基盤的な技術において技術革新が起きていることや、スクラムジェットの飛行試験の成功や、ターボ系エンジンの技術実証の成果の蓄積等も進んでいること等が挙げられる。諸外国においても、米国空軍や DARPA 等のほか、民間の米国 SpaceX 社、英国 Reaction Engines 社等の企業を含め、再使用型宇宙輸送システムの開発に向けた動きが再び見られるようになってきた。

したがって、今後、このような再使用型宇宙輸送システムが実現する可能性が高まっており、我が国としても自律性と国際競争力を確保するためにその開発を加速させる必要がある。

このような宇宙輸送の転換を実現するためには、他分野技術の積極的な導入を含め、先端的な技術を獲得する必要がある。また、このような先端技術を獲得することにより、将来の宇宙輸送システムの分野における国際優位性の確保を目指すことが重要と考えられる。

我が国では新型基幹ロケットの運用を 2020 年から開始する予定であり、各国の動向を踏まえても、少なくとも 2030 年代までは使い切り型ロケットが低軌道への主な輸送手段であると想定される。その間に再使用型宇宙輸送システムの実用化に向けた研究開発が進展し、それらの成果を用いて、基幹ロケットの低コスト化のための部分再使用化等が進むと考えられる。

以上のような背景を踏まえ、本長期ビジョンでは、新たな宇宙利用の姿を示し、そこから要求される技術的な目標を設定して、将来宇宙輸送システムの発展過程とこれを実現するためのプロセスを示すことで、長期的な観点からの我が国の宇宙輸送システムの在り方を明らかにすることを目的とした。

1-2. 将来宇宙輸送システムの実現に向けた取組の意義

将来宇宙輸送システムの実現に向けて我が国が取り組む意義として、以下の6点が挙げられる。

①長期的な自律性の確保

宇宙基本計画においては、我が国の宇宙活動を支える宇宙輸送能力の維持、発展が必要であるとされている。

新たな宇宙利用に対応した将来宇宙輸送システムの実現に向けた取組を進めることで、長期にわたり我が国が自律的な宇宙輸送能力を保持し続けていくことが可能となる。

②新たな飛躍的な宇宙利用の拡大と宇宙産業の発展

低コスト高頻度な輸送を可能とする将来宇宙輸送システムが実現されれば、新たな宇宙利用の飛躍的拡大と宇宙空間における人類の活動領域の拡大に伴い、宇宙を利用した産業の発展が期待される。また、これまでの宇宙利用である宇宙探査や科学観測等も、より低コストかつ高頻度を実施することが可能となる。

③先端技術の獲得

将来宇宙輸送システムの研究開発や運用を通じてシステムインテグレーション技術を獲得するとともに、我が国が優位性を持つ推進系技術、材料技術、開発・製造技術、品質管理技術及び運航管理技術等の革新及び高度化を実現することで、先端技術を獲得することができる。これらは宇宙分野以外にも広く波及することが期待される。

④国際優位性の確保

将来宇宙輸送システムの実現には、国際共同開発や国際協業が不可欠となることが想定される。我が国がそのための先行的な研究開発や技術基準・制度の策定においても中心的な役割を果たすことは、新たな宇宙利用を切り開く上で極めて意義深く、我が国の国際的な優位性の確保につながる。

⑤人材育成

将来宇宙輸送システムの実験機の開発等を通じて、システム全体の開発を若い世代が経験できる機会を確保することで、若い世代にとって魅力的な環境を創出するとともに、我が国の宇宙開発利用の将来を担う人材が育まれる。

⑥有人宇宙輸送への発展性

航空機のような高い信頼性を持ち、多数回の繰り返し運用による低コストで高頻度な大量輸送を可能とする将来宇宙輸送システムが実現した場合には、現在のように訓練を積んだ人間だけでなく、一般の乗客も搭乗することになる。したがって、将来宇宙輸送システムの実現に向けた取組は、我が国独自の将来的な有人宇宙輸送への発展性を持つ。

第2章 宇宙輸送システムの歴史及び動向

本長期ビジョンの検討に当たって、世界及び我が国における宇宙輸送システムの歴史及び動向を整理するとともに、それらを踏まえた分析を行った。以下では、特に、使い切り型ロケット及び再使用型宇宙輸送システムにおける各国の取組を中心に述べる。

2-1. 世界における宇宙輸送システムの歴史及び動向

(1) 米国及びソ連（ロシア）

①使い切り型ロケットの出現と発展

近代的な化学ロケットの歴史は、第二次世界大戦中にドイツが実用化したV-2ロケットに始まる。戦後、ドイツのロケット技術資料や技術者は米国やソ連へと渡り、両国のロケット開発の基礎となった。

両国はさらに宇宙開発競争を繰り広げた。1957年には、ソ連がボストークロケットによって世界初の人工衛星スプートニクの打ち上げに成功し、1961年には世界初の有人宇宙飛行を行った。1960年代にはボストークロケットの改良型のソユーズロケット及び静止衛星の打ち上げが可能なプロトンロケットが実用化され、ソ連を継承したロシアはこれらの改良型を現在も主要な宇宙輸送システムとして使用している。特にソユーズロケットは現在、国際宇宙ステーション（ISS³）に対する唯一の有人アクセス手段である。今後は多様な打ち上げ需要に対応するアンガラロケットの実用化が予定されている。

一方、米国は1958年にNASAを設置し、衛星打ち上げロケット開発計画（サターン計画）と、有人宇宙飛行計画（マーキュリー計画）を開始した。1962年には月面着陸を目標とするアポロ計画を掲げ、1969年、サターンV超大型ロケットとアポロ月着陸船を使用した月面着陸に成功した。1980年代には後述する部分再使用型宇宙輸送システムであるスペースシャトルが登場した。

2002年以降には空軍がEELV（発展型使い切り型ロケット）⁴としてデルタ4ロケット及びアトラス5ロケットを運用し、主として政府衛星の打ち上げに使用されている。

2011年のスペースシャトルの退役後、米国はISSに対する独自のアク

³ International Space Station

⁴ Evolved Expendable Launch Vehicle

セス手段を失い、外国の無人宇宙船に一時期依存していた。しかし米国は近年、商用軌道輸送システムプログラム（COTS）⁵等の計画により、ISSへの人員・物資輸送を民営化する方針を打ち出し、すでにスペースX社のファルコン9ロケット（ドラゴン宇宙船等の打ち上げ）やオービタルサイエンシズ社のアンタレス（シグナス宇宙船等の打ち上げ）の開発・運用が行われている。このような民間主体による宇宙輸送システム開発の特徴は、事業としての収益性を確保する為にコスト低減を強く意識している点である。

NASAは今後、使い切り型ロケットである宇宙探査用次期打ち上げシステム（SLS）⁶を開発し、2017年に宇宙船オリオンの打ち上げを計画している（有人飛行ミッションは2019年以降）。SLSの第2段階では、軌道投入と軌道間輸送の機能を兼用する上段ステージEUS⁷のコンセプトも検討されている。また、NASAや民間企業において、軌道間輸送機に関連する極低温燃料貯蔵技術の研究が行われている⁸。

米国政府の将来宇宙輸送システムに関する今後の方向性を示すものとして、2013年11月に公表された「国家宇宙輸送政策」⁹がある。同政策は、宇宙輸送政策の両輪である安全保障と民生用開発にとって必要な自律性を担保する打ち上げ手段を政府主導で確保した上で、他省庁・民間との連携を通じた代替打ち上げ能力に関する研究開発を追求するとの方針を打ち出した¹⁰。

技術面では、NASAが2010年に「NASA宇宙技術ロードマップ」¹¹を公表し、その中で将来宇宙輸送システムに関して今、後取り組むべき課題を分析している。同ロードマップでは2040年代以降に日常的な宇宙へのアクセスが可能になると想定されている。

②再使用型宇宙輸送システムの実現に向けた取組

再使用可能な宇宙輸送システムの構想は早い段階から存在していた。

⁵ Commercial Orbital Transportation Services

⁶ Space Launch System SLSの詳細については資料集 p. 14「世界の将来宇宙輸送システムに関する動向（米国 2/4）」を参照。

⁷ Exploration Upper Stage

⁸ 資料集 p. 15「世界の将来宇宙輸送システムに関する動向（米国 3/4）」を参照。

⁹ *National Space Transportation Policy*. White House, 2013.

<http://www.whitehouse.gov/sites/default/files/microsites/ostp/national_space_transportation_policy_11212013.pdf>

¹⁰ 資料集 p. 9「世界の宇宙輸送政策について（1/4）」参照。

¹¹ *NASA Space Technology Roadmap*. NASA, 2010.

<<http://www.nasa.gov/offices/oct/home/roadmaps/index.html>>

米国では、アポロ計画後の 1970 年代からスペースシャトル計画が開始され、1981 年 4 月から運用が始まった。

スペースシャトルは 1980 年代に予想された人と物資の様々な輸送需要を前提として設計され、構想段階では年に 50 回の飛行による輸送コストの大幅な低減を目指していた。現実には、ロケットエンジンや帰還飛行のための耐熱等再使用化の技術が未成熟であったことや、2 度の重大事故の結果、再使用の過程で膨大な点検や修理作業を要したこと等により、当初期待された高頻度、低コストの運用は結果的に実現できず、2011 年に退役した。しかし、そこで得られた技術的知見と、部分的にせよ再使用型宇宙輸送システムを約 30 年間にわたって運航したという実績は、今後の宇宙輸送システムを検討する上で大きな足跡を残したことは事実である。

スペースシャトルが就役した 1980 年代には、レーガン大統領がより革新的なスクラムジェットエンジンによるスペースプレーンの構想を打ち出し、X-30 計画として広範囲な研究開発活動が実施されたが、技術的な困難のため実験機による実証までには至らなかった。

1990 年代に入っても、スペースシャトルの後継となる新宇宙輸送システムを検討する宇宙アクセス・スタディ (Access to Space Study) を NASA が実施する等、将来の宇宙輸送に向けた研究活動は継続された。この中で、複数の提案から単段式ロケット宇宙輸送機であるベンチャースター計画が採択され、その必要技術を実証するための実験機 (X-33) の開発試作が行われた。しかしながら、高度補償ノズルの実証や極低温複合材燃料タンク等の技術的困難に直面し、飛行に至ることなく計画はキャンセルされた。米国防総省も垂直離着陸型再使用型ロケットの開発を目指すデルタ・クリッパー計画において試作機 DC-X/DC-XA の離着陸飛行やターンアラウンドの実証を行った。

以上のように、1980 年代から 1990 年代にかけて、米国はスペースシャトルの後継を視野に入れて多様な再使用型宇宙輸送システムの研究開発を活発に実施していた。米国では再使用型宇宙輸送システムの開発に向けた取組は現在も続いており、前述した国家宇宙輸送戦略においては、宇宙輸送システムの再使用化が将来の課題として挙げられている。また、米国防総省の国防先進高等技術局 (DARPA) は 2004 年以降、X-37B 無人再使用型往還機の軌道上実証を進めてきたが、2013 年には XS-1 二段式再使用型宇宙輸送システムの開発計画を発表した。民間企業 Sierra Nevada 社も NASA の商業乗員輸送機開発 (CCDev) 向け有人再使用型往還機とし

てドリーム・チェイサーを開発している¹²。

高速二地点間輸送システムの鍵となる超音速・極超音速技術についても、米国は様々な試験研究を行ってきた。米国は1980年代のオリエント・エクスプレス計画において大気圏外をマッハ25で飛行可能なスクラムジェット型航空宇宙一体機X-30の開発を計画した（1994年に計画中止）。

近年では2004年にマッハ9.68を記録したNASAの実験機X-43（スクラムジェットエンジン搭載）に続き、空軍、NASA、DARPA等が共同でスクラムジェットエンジンを使用したX-51極超音速実験機（最大速度マッハ6-7）の試験を行っている。また、2010年以降には、DARPAのFALCON¹³計画の下、マッハ20台で飛行するHTV-2極超音速技術実証機の飛行試験が実施されている。

米空軍は再使用型ロケットブースターシステム（RBS）¹⁴の開発にも取り組んでおり、2025年以降にロケットの部分再使用化によりEELVを代替する計画である。民間においてはスペースX社がファルコン9ロケットの再使用化（ファルコン9R）やドラゴン宇宙船の再使用化を計画している。

ソ連も1988年にスペースシャトルのような部分再使用型宇宙輸送システムであるブランの試験打ち上げを行ったが、ソ連末期に宇宙予算が大幅削減された上、1991年にソ連が崩壊したため、開発は中止された。

ロシアでは2000年代に欧州と共同で使い切り型ロケットの上段に搭載する有人再使用型往還機としてクリッパーの開発を進めていたが、計画は中止された。再び再使用型往還機の開発に着手すべきであるとの意見もロシア政府内には見られる¹⁵。

現在はアンガラを部分再使用化するためのフライバック・ブースターRRM¹⁶を2020年頃までに開発する計画があるほか¹⁷、次期有人宇宙船PPTS¹⁸についても再使用化が検討されている。

（2）欧州

欧州では、1973年に欧州宇宙機関（ESA）¹⁹が設立され、フランス主導で

¹² 資料集 p. 13「世界の将来宇宙輸送システムに関する動向（米国1/4）」参照。

¹³ Force Application and Launch from Continental United States

¹⁴ Reusable Booster System

¹⁵ 宇宙産業を担当するロゴジン副首相は2013年9月、ロシアはブランのようなスペースプレーンの開発を再び検討すべきであると発言した。Vzgliad, 2013. 9. 27.

¹⁶ Re-entry Rocket Module

¹⁷ 資料集 p. 18「世界の将来宇宙輸送システムに関する動向（その他の国）」参照。

¹⁸ 英: Prospective Piloted Transport System、露: Perspektivnaia pilotiruemaia transpotnaia Sistema

¹⁹ European Space Agency

アリアンロケットの開発が始まった。1979年にはアリアン1の打ち上げに成功し、1980年には商業打ち上げサービスを提供するアリアンスペース社が設立された。現在では、アリアン5ロケットが世界の静止衛星打ち上げ市場の約50%を占めるに至っている。今後は改良型のアリアン5MEと、アリアン5よりコストを30~40%ダウンし、独立採算化を目指すアリアン6の開発が進められる。また、小型衛星を低コストで低軌道に打ち上げる手段としてヴェガロケットがイタリアやフランス等を中心に開発され、2012年から運用されている。

欧州の宇宙輸送政策は、2007年のEU/ESA合同閣僚級理事会で承認された「欧州宇宙輸送政策」である。同政策は持続可能な欧州の打ち上げロケットプログラムに対する安定した政策的支援を規定したものであり、民間の成長促進のための補助金施策を政府として行うことを打ち出している。そのために宇宙輸送戦略として、政府支援による商業打ち上げサービス体制の維持と商業打ち上げサービス獲得に必要な施策・役割を官民が分担し、協力して体制を維持することが謳われている²⁰。

再使用型宇宙輸送システムについては、フランスのエルメス、英国のHOTOL（水平離着陸宇宙輸送機）²¹、ドイツのゼンガー等の研究開発が行われ、技術的成果を残したものの、いずれもシステムとしては実現しなかった。

しかし、近年では再使用型宇宙輸送システムや、技術的に共通性のある高速二地点間輸送システムの開発に向けた動きが欧州においても見られるようになってきた²²。英国ではReaction Engines社が、HOTOLと同じ原理のSABRE²³エンジンを使用したスペースプレーン「スカイロン」の研究開発を実施しており、英国政府が同計画を支援している。

ESAも2004年から再使用型宇宙輸送システムも含めた次世代打ち上げ機（NGL）の開発を目指して将来打ち上げ機準備計画（FLPP）²⁴を実施しており、システム構成の概念検討や技術研究が広範囲に行った結果、複数の実験機計画の立案や、様々な技術的成果を残した。今後、FLPPの枠内では、再突入技術等再使用型宇宙輸送システムに必要な要素技術の獲得を目指して中間実験機（IXV）²⁵計画が進められており、2014年にはヴェガロケット

²⁰ 資料集 p. 10「世界の宇宙輸送政策について（2/4）」参照。

²¹ HOrizontal Take-Off and Landing

²² 資料集 p. 17「世界の将来宇宙輸送システムに関する動向（欧州）」参照。

²³ Synergistic Air-Breathing Rocket Engine

²⁴ Future Launchers Preparatory Programme

²⁵ Intermediate eXperimatal Vehicle

による打ち上げが計画されている。FLPP は 2015 年まで実施され、NGL の開発に関する勧告を策定する予定である。

高速二地点間輸送システムとしては、1960 年代に英仏がコンコルド超音速旅客機を開発し、1976 年から実運用した実績がある。さらに近年、欧州諸国は極超音速輸送機の研究開発にも着手しており、欧州委員会の資金で実施された研究の枠組みである LAPCAT（長期先進推進システム概念及び技術）²⁶において、マッハ 5 級及びマッハ 8 級の極超音速輸送機の研究が実施された。ドイツ航空宇宙センター（DLR²⁷）も 2040 年頃を目処に二段式再使用型宇宙機（TSTO²⁸）へと発展可能なマッハ 25 級の高速二地点間輸送機スペース・ライナー計画を進めている。

（3）中国

中国は 1970 年 4 月、国産ロケット長征 1 号で人工衛星の打ち上げに成功して世界で 5 番目の衛星打ち上げ国となり、1984 年には長征 3 号ロケットによる静止衛星の打ち上げにも成功した。

さらに 1985 年には長征 3B ロケットによる商業打ち上げサービスを開始し、1988 年には米中ロケット割り当て協定を締結した。しかし、1999 年、米国は衛星技術の流出を防ぐために人工衛星を ITAR²⁹（国際武器取引規制）の武器リストに含めた。更に米国は 2013 年には ITAR の適用範囲を広げたため、中国が外国から商業衛星打ち上げを受注することは実質的に困難になっている。しかし、中国は非欧米圏における商業衛星打ち上げ受注に向けた活動を活発化させており、2012 年にはロシアに次ぐ世界第 2 位の衛星打ち上げ国（19 回）となった。

また、中国は 2003 年、長征 2F ロケットによってカプセル型有人宇宙船神舟 5 号を打ち上げ、世界で 3 番目の有人宇宙飛行に成功した。中国はこれまでに神舟の打ち上げを継続するとともに、低軌道宇宙ステーションの構築に向けた動きを見せている。

2007 年以降には、中国は月探査機嫦娥（じょうが）を用いた月探査を実施し、2013 年打ち上げられた嫦娥 3 号は月面ローバーによる無人探査を行っている。さらに 2017 年に月サンプルリターンを行う予定であるほか、月面基地の設置や火星への無人探査も計画されている。

今後の中国の宇宙輸送政策は、中国国家航天局が公表した「宇宙白書」

²⁶ Long-Term Advanced Propulsion Concepts and Technologies

²⁷ Deutschen Zentrums für Luft- und Raumfahrt

²⁸ Two Stages To Orbit

²⁹ International Traffic in Arms Regulations

や中国航天科技集团公司(CASC)の第12次五カ年計画(2011~2015年)によって示されており、打ち上げロケット等の分野で世界トップクラスに入ること、を5大目標の一つに掲げている。このため、現行の長征2シリーズ及び長征3シリーズの信頼性を高めるとともに次世代主力大型打ち上げロケット長征5、小型衛星打ち上げロケット長征6、有人・月探査用ロケット長征7が開発されている。商業打ち上げ、新興国への進出についても積極的に実施されている³⁰。

また、極超音速技術や再使用型宇宙輸送システムへの基礎ともなる実験機「神龍」の開発についても報じられており、2011年には飛行実験が実施されたと言われている³¹。

(4) その他の国(インド等)

インドは、自律的な宇宙アクセス能力と産業振興の観点から独自ロケットの開発に着手し、インド宇宙研究機関(ISRO)が1980年には民生技術による固体燃料のSLV³²ロケットによって技術試験衛星の軌道投入に成功したほか、1988年にはSLVの派生型であるASLV³³の打ち上げにも成功した³⁴。1994年には固体燃料と液体燃料を組み合わせた低軌道打ち上げロケットPSLV³⁵の打ち上げに成功し、商業打ち上げの受注にも成功している。2014年には、GSLV-Mk. II³⁶により静止衛星の軌道投入に成功した。

今後は、更に高性能なGSLV-Mk. IIIの実用化が計画されており、有人宇宙船を2016年に地球周期軌道に打ち上げる計画がある。

月探査に関しては、2008年に月探査機チャンドラヤーンを打ち上げ、月面リモートセンシングを実施した。また、2013年に火星無人探査機をPSLVにより打ち上げた。今後は月や火星への無人探査機の着陸を計画している。

再使用型宇宙輸送システムとしては、小型衛星打ち上げ用の二段式再使用型宇宙輸送システムAVATAR³⁷の開発がISROによって実施されており、今後は技術実証機RLV-TD³⁸を固体ロケットで打ち上げる計画である³⁹。

これ以外にも現在までに使い切り型ロケットによる衛星の打ち上げに成

³⁰ 資料集 p. 12「世界の宇宙輸送政策について(4/4)」参照。

³¹ 資料集 p. 18「世界の将来宇宙輸送システムに関する動向(その他の国)」参照。

³² Satellite Launch Vehicle

³³ Augmented Satellite Launch Vehicle

³⁴ 資料集 p. 12「世界の宇宙輸送政策について(4/4)」参照。

³⁵ Polar Satellite Launch Vehicle

³⁶ Geosynchronous Satellite Launch Vehicle Mark. II

³⁷ Aerobic Vehicle for Hypersonic Aerospace Transportation

³⁸ Reusable Launch Vehicle-Technology Demonstrator

³⁹ 資料集 p. 18「世界の将来宇宙輸送システムに関する動向(その他の国)」参照。

功している国はいくつかあり、今後はブラジルも衛星打ち上げを目指してロケット開発を実施中である。そのほかにアジアやアフリカ等でも衛星打ち上げ国を志向する国が見られる。

(5) 国際枠組み (ISECG 等)

国際的な宇宙探査に関しては、国際協働による有人宇宙探査に向けて技術検討を行う枠組である ISECG⁴⁰が 2011 年及び 2013 年にロードマップを公表しており、小惑星を捕獲して月軌道まで牽引し、有人探査を行う構想や、地球-月間のラグランジュ点（以下、単に「ラグランジュ点」と言う）に配置するステーションでの有人長期滞在（90 日程度）、有人月面着陸等に関する構想を議論している。この中で、宇宙探査のための宇宙輸送システムとしては、使い切り型の大型ロケットの他に軌道間輸送機等も想定されている。

2-2. 我が国における宇宙輸送システムの歴史及び動向

日本の宇宙開発は、東京大学宇宙科学研究所が 1955 年から独自技術による固体燃料ロケット開発を開始したことに始まり、1970 年 2 月、L-4S ロケットにより初の人工衛星おおすみを打ち上げたことで、日本はソ連、米国、フランスに続く世界で 4 番目の衛星打ち上げ国となった。

また、大型実用衛星打ち上げに適した液体燃料ロケットを保有すべきであるとの方針により、米国からデルタロケットの技術や設計思想を導入し、N-I ロケットとして実用化された。N-I は 1975 年に衛星打ち上げを開始し、1977 年には日本初の静止衛星きく 2 号の打ち上げに成功した。1981 年には N-I の改良型としてより大型の衛星打ち上げが可能な N-II ロケットの打ち上げが開始された。N-I / II の開発・運用の過程で液体燃料ロケットの基礎的な技術を獲得することができた。

1986 年には、米国のデルタロケットの技術に依拠しながらも、国産の液体酸素・液体水素燃料型第 2 段エンジンである LE-5 を採用した H-I ロケットの打ち上げが始まった。ライセンス生産分も含めると、H-I ロケットの最終的な国産率は 98% に達した。

1994 年には第 1 段エンジン、第 2 段エンジン、誘導制御システム等を純国産化した H-II ロケットの打ち上げに成功した。現在では、H-II の信頼性向上とコスト低

⁴⁰ International Space Exploration Coordination Group

下を図ったH-II A や、その増強型であるH-II B が実用化されており、性能面でも信頼性においても世界最高レベルのロケットに成長した。

また、近年ではH-II A/B の打ち上げサービス事業が民間に移管され、衛星の商業打ち上げも受注している。H-II B は国際宇宙ステーションに対する物資補給機「こうのとり」(HTV)の打ち上げに使用されており、2009年から2013年までに4機が打ち上げられている。

さらに2014年からは、我が国の総合力を結集し、新型基幹ロケットの開発に着手する。

固体燃料ロケットについては、一貫して独自の技術開発が行われ、1960年代のLシリーズから1970年代にはM(ミュー)シリーズへと発展を遂げ、1997年には当時世界最大の固体燃料打ち上げロケットであるM-Vロケットの打ち上げが開始された。2003年にM-Vロケットで打ち上げられた小惑星探査機「はやぶさ」(MUSES-C)は、2005年に小惑星イトカワに着陸、2010年には世界初の小惑星サンプルリターンに成功した。固体燃料ロケット技術はH-IIシリーズ用の固体燃料ブースター(SRB)⁴¹としても活用され、2013年に打ち上げられたイプシロンロケットもH-II AのSRBを第一段目として使用している。さらにイプシロンでは自律点検機能により打ち上げ管制を大幅に簡素化し、小型衛星の低コスト打ち上げ能力の実現を目指している。

以上の宇宙輸送システムは、いずれも使い切り型であるが、再使用型宇宙輸送システムについても様々な取組が行われてきた。

1990年代にはHOPE⁴²の開発が計画され、軌道再突入飛行実験機(OREX)⁴³、極超音速飛行実験機(HYFLEX)⁴⁴、小型自動着陸飛行実験機(ALFLEX)⁴⁵、高速飛行実証(HSFD)⁴⁶といった一連の実証機による要素技術の研究が行われた。並行して、無人の有翼宇宙往還機の打ち上げから再突入、着陸までの一貫した飛行を可能とするシステム技術に関して基本設計まで実施し、その見通しを得た。しかし、計画は縮小され、その開発は基本設計段階で終了したため、実際の実験機HOPE-Xの開発着手には至らなかった。

また、超音速・極超音速輸送システムの研究の一環として、ラムジェットエンジン及びスクラムジェットエンジンの基礎研究が行われた。スクラムジェットエンジンはマッハ10を超える速度を目指した空気吸い込みエンジンで

⁴¹ Solid Rocket Booster

⁴² H-II Orbiting Plane

⁴³ Orbital Re-entry Experiment

⁴⁴ Hypersonic Flight Experiment

⁴⁵ Automatic Landing Flight Experiment

⁴⁶ High Speed Flight Demonstration

あり、これに関する基礎研究として、超音速燃焼器試作・燃焼実験、空気取り入れ口（インテーク）を含む燃焼風洞実験、数値シミュレーション等が航空宇宙技術研究所（現宇宙航空研究開発機構（JAXA））において行われた。

一方、マッハ5を目指す極超音速航空機の推進技術の確立に向けた実証的な研究開発として、1990年から2000年にわたってHYPR（超音速輸送機用推進システムの研究開発）⁴⁷が、通商産業省（現経済産業省）と航空宇宙技術研究所、国内外の主要航空機エンジンメーカーによって共同で推進された⁴⁸。

さらにHTVの開発を通じて誘導・ドッキング技術が蓄積され、その運用を通じて有人システムの安全性・信頼性の技術、再突入技術等も蓄積されてきた。

今後の将来宇宙輸送システムに関する取組については、JAXAが二段式完全再使用型輸送システム⁴⁹、高速二地点間輸送機、再使用観測ロケット、物資回収システム（HTV-R）、有人宇宙船の研究等を実施しているが、まだ実用化に向けた実証段階にあるものは無い。将来宇宙輸送システムの基礎となるサブオービタル実験機については、JAXA単独の取組だけでなく、大学とJAXAの共同で高度100kmに達する飛行実験が検討されている。

その他、経済産業省の委託により、安価で即応性のある小型衛星等の空中発射システム（ALSET）⁵⁰の研究開発が実施されている。また、2013年には経済産業省と欧州委員会とが共同で資金提供し、JAXA、ESA、民間企業等が参入する形で、将来の極超音速輸送システムに関する共同研究プロジェクトHIKARI⁵¹が実施されている。

民間においては、超小型衛星を安価に打ち上げることを目指した独自の小型ロケット開発や再使用型のサブオービタル飛行用宇宙機の実現を目指した研究開発が実施されている。

2-3. 歴史及び動向の分析

以上のように、これまでの宇宙輸送システムはロケットが主力であり、低軌

⁴⁷ super/HYper-sonic transport PRopulsion System

⁴⁸ HYPRは、ターボジェット（マッハ3以下）とラムジェット（マッハ3から5のメタン燃料使用の亜音速燃焼ラムジェット）の複合サイクルエンジンシステム（可変サイクルターボラムジェット）を対象として、各要素の研究とともにエンジンをトータルシステムとしてとりまとめるエンジンの試作実証研究が行われた。技術実証エンジンとしては画期的な試みである、可変機構を組み込んだ地上試験用デモンストレータが開発され、日、米、英各地の設備で総合的な技術実証試験が行われた。

⁴⁹ 二段式完全再使用型輸送システムに関する具体的なJAXAの取組としては、資料集p.20～22「我が国の将来宇宙輸送システムに関する動向（1/5）～（3/5）」を参照。

⁵⁰ Air Launch System Enabling Technology

⁵¹ HIgh speed Key technologies for future Air transport Research & Innovation cooperation scheme

道から地球重力圏脱出までの幅広い宇宙活動を支える様々な能力のロケットが我が国を含む世界の各国で開発され、使用されてきた。

また、我が国が保有するロケット技術は、液体燃料、固体燃料の両分野において世界最高水準にある。このような自在な宇宙輸送能力を保持し、開発能力を維持発展させていくとともに、信頼性・能力を維持しながら打ち上げ費用を低減して国際市場で競争していくために、すでに現行の基幹ロケットの高度化や新型基幹ロケットの開発等のプロジェクトが進展しつつある。

しかし、これまでのロケット技術の主力は使い切り型であり、技術革新により単位ペイロード当たりの打ち上げ費用が年々低下する傾向が見られるものの⁵²、打ち上げの度に機体の製造コストが発生することは原理的に避けられない⁵³。このため、使い切り型ロケットでは、新たな宇宙利用の輸送需要に対応できる低コストで高頻度な宇宙輸送の実現は困難である。

一方、様々な再使用型宇宙輸送システムの研究開発が米欧を中心に行われてきた。スペースシャトルが高信頼、低コストでの宇宙輸送を実現できず、その後継プロジェクトも中止されたことで、再使用型宇宙輸送システムの開発の流れは、一時的に停滞したかのように見えた。

しかし、近年、輸送コストの低減に対する要求が高まり、それを支える技術にも大幅な進展があったため、再使用型宇宙輸送システムの実現を可能とする技術基盤が整ってきた。たとえば、設計や加工・製造、素材等の基盤的な技術において技術革新が起きていることや、スクラムジェットの飛行試験の成功や、ターボ系エンジンの技術実証の成果の蓄積等も進んでいること等が挙げられる。我が国について言えば、H-IIシリーズや一連の固体燃料ロケット等の開発を通じて宇宙輸送システムの開発能力が飛躍的に高まるとともに、宇宙利用の進展により、宇宙環境についての理解が大幅に深まった。諸外国においても、米国空軍やDARPA等のほか、民間の米国SpaceX社、英国Reaction Engines社等の企業を含め、再使用型宇宙輸送システムの開発に向けた動きが再び見られるようになってきた。これらは、スペースシャトル計画が始まった1970年代当時よりも先進的な技術に基づくものである。

こうした再使用型宇宙輸送システムは、使い切り型ロケットに比べ、開発費が高額になり、再使用に伴う維持・整備コストや、新たなインフラ整備も必要になることが想定される。しかし、再使用型宇宙輸送システムは同一の機体を繰り返し使用できるため、一回当たりの打ち上げコストを大幅に低下させるこ

⁵² 資料集 p. 28 「宇宙輸送システムのコスト予測」を参照。

⁵³ 資料集 p. 27 「使い切り型と再使用型宇宙輸送システムのコスト構造比較」を参照。

とが可能になると考えられる。

輸送コストが大幅に低下すれば、これまで高い輸送コストのために採算に合わなかった新たな宇宙利用が実現し、宇宙輸送需要の飛躍的な増加が予想される⁵⁴。

このような状況に鑑み、我が国としても使い切り型ロケットである新型基幹ロケットの開発だけでなく、再使用型宇宙輸送システムの実現に向けた取組を活発化させる必要がある。

⁵⁴ 資料集 p. 29 「輸送コストと年間総輸送需要の関係」を参照。

第3章 将来宇宙輸送システムの姿

3-1. 将来の宇宙用の姿

第2章で述べたように、今後は、これまでの宇宙利用に加えて、新たな宇宙利用が出現し、宇宙利用が大きく変貌すると考えられる。本節では、新たな宇宙利用及びそれに至る前に実現されると考えられる宇宙利用のうち、具体的な検討等が行われているものを中心にその姿について示す。

(1) 現在の延長上にある宇宙利用

(再使用型ロケットによる観測・実験)

軌道投入されない使い切り型ロケットによって従来から実施されている宇宙観測や微小重力実験については、今後、再使用型観測・実験ロケットの実用化によってより低コストかつ高頻度を実施することが2010年代後半から2020年代初頭には可能になると考えられる⁵⁵。コストや頻度の面だけでなく、より柔軟な軌道、姿勢、速度等による実験も可能となるメリットがある。

(人工衛星の利用)

現在、低軌道領域において地球観測等の目的で実施されている人工衛星の利用は今後も継続されると考えられる。

また、複数の衛星が同じ軌道を通ることで時間頻度を高めて地球上をモニタリングするコンステレーション運用⁵⁶が既に始まっており、今後、拡大することが想定される。将来的には、小型・超小型衛星を大規模にコンステレーション化することによって大型衛星並みの高機能・多機能な地球観測が可能となると想定される⁵⁷。

高軌道領域⁵⁸に含まれる静止軌道では、今後とも高機能・大型の人工衛星が中心になると考えられる。

⁵⁵ JAXA では、現行の観測ロケットの運用コストを一桁削減することを目標とし、高度120km以上に100kgのペイロードを打ち上げ、発射点に帰還させるシステムが検討されている。再使用観測ロケットは、飛行運用技術や故障許容技術など、将来宇宙輸送システムに必要な技術開発の一翼を担っており、これまで技術課題への対応として要素技術試験が実施されている。今後、運用システム開発に向けた技術確立する計画である。

⁵⁶ コンステレーションとは英語で星座を意味し、複数の衛星を協調させて利用する方式を意味する。

⁵⁷ 資料集 p. 31「現在の延長上にある宇宙利用の姿 (1/3)」を参照。

⁵⁸ 静止軌道等の中・高軌道、地球重力圏脱出の領域を指す。

（宇宙探査）

月周辺⁵⁹に関しては、無人探査機による月面リモートセンシングや月面着陸、サンプルリターン等が複数の国によって2010年代以降に検討されている。ISECGの2013年のロードマップでは、2010年代中にロボット技術を用いた月・小惑星・火星に対する無人探査ミッションを開始し、2020年代中にも地球近傍小惑星の有人探査、深宇宙への長期有人滞在、月面有人探査を行い、2030年代以降に有人火星探査を目指すとしている⁶⁰。

このほかにも、太陽系内惑星や小天体等に対する探査ミッションの実施が見込まれる⁶¹。

（2）新たな宇宙利用

（地球上の高速二地点間輸送）

将来、宇宙空間を経由して地球上の二地点間を結ぶ高速輸送手段として航空宇宙一体機が運用されることになると見込まれる。高速二地点間輸送の商業化を研究するために設立されたグループであるFast Forwardの試算によると、高速二地点間輸送の運賃が現在の航空機のエコノミークラスの3倍程度になれば、現在の航空旅客需要や高速貨物輸送需要の一部を取り込むことができるとされている⁶²。

高速二地点間輸送システムは低軌道に対する再使用型宇宙輸送システムとも技術的に共通性が高く、この二つの異なる利用の姿は技術的には一体のものとして捉えることができる。

（サブオービタル体験飛行）

サブオービタル（高度約100km）までを往復する宇宙体験飛行は2010年代中にも米国で実用化される見込みであり、ヴァージン・アトランティック社等が宇宙体験飛行ツアーを準備中である⁶³。また、このような宇宙体験飛行用の宇宙往還機やその運用施設（スペースポート）も、米国ではすでに実運用に向けた試験段階に入っている。現時点で発表されているサブオービタル体験飛行の価格は高価であるが、輸送コストの抜本

⁵⁹ ここではラグランジュ点、月軌道、月面を指す。

⁶⁰ 資料集 p. 32「現在の延長上にある宇宙利用の姿（2/3）」参照。

⁶¹ 資料集 p. 33「現在の延長上にある宇宙利用の姿（3/3）」参照。

⁶² Fast Forwardには、ボーイング、ロッキード・マーティン、ノースロップ・グラマンなどの航空宇宙メーカー大手、ベンチャー宇宙企業、スペースポート運営会社、米商務省・米連邦航空局等の公的機関が参加している。高速二地点間輸送の需要予測については資料集 p. 35「新たな宇宙利用の姿（2/6）」参照。

⁶³ 資料集 p. 34「新たな宇宙利用の姿（1/6）」を参照。

的な低減により、一般大衆も支払うことができる価格になれば、宇宙旅行者数は大きく拡大すると見込まれる。

（滞在型宇宙旅行、宇宙実験・生産拠点）

現行の ISS 計画の終了以降も、新たな宇宙ステーションが軌道上で運用されると考えられる。2010 年代後半には米国等で商業宇宙ステーションが登場してくることが見込まれる。例えば米国のビゲロー社は 2010 年代半ばにも実験用モジュールを打ち上げ、試験運用を開始する計画を示している⁶⁴。

こうした商業宇宙ステーションは、滞在型宇宙旅行のためのいわゆる宇宙ホテルとしての利用や無重力環境下での実験・生産拠点としての用途が考えられる。

（軌道上における人・物資の中継及び燃料貯蔵・補給）

月周辺に対して頻繁なアクセスを行うため、地上から低軌道領域までの再使用型宇宙輸送機から低軌道領域から高軌道領域までの再使用型の軌道間輸送機、それらの輸送機の間で物資や人を載せ替えるための中継拠点、軌道上に燃料や物資の貯蔵・補給施設（デポ）等が建設され、宇宙輸送のハブとして利用されると考えられる。

（軌道上サービス⁶⁵）

軌道上で人工衛星や宇宙探査機等の組立を行うことにより大型化や高機能化が可能となると想定される。また、人工衛星をより長期間にわたって運用可能とするため、軌道上での燃料補給や修理・改修を行うことが見込まれる。これにより衛星の寿命が延び、デブリ低減にもつながる。

（宇宙太陽光発電等）

太陽光発電パネルで発電した電力をマイクロ波等で地球に送信する宇宙太陽光発電システム（SSPS）⁶⁶等、大規模な構造物を宇宙空間に建設することが想定される⁶⁷。また、国際的な合意形成がなされた場合には、宇宙からの積極的な地球環境への活動として、大型構造物による地球環境

⁶⁴ 資料集 p. 36 「新たな宇宙利用の姿 (3/6)」を参照。

⁶⁵ 資料集 p. 36 「新たな宇宙利用の姿 (3/6)」を参照。

⁶⁶ Space Solar Power System

⁶⁷ 資料集 p. 37 「新たな宇宙利用の姿 (4/6)」参照。

のコントロール（日照コントロール）等も検討され得ると考えられる⁶⁸。

（月の資源採掘、月旅行等）

月周辺においては、深宇宙観測設備や地球観測設備を設置したり、月における埋蔵資源の調査を行う等、国による本格的な科学的活動が開始されることが想定される。

これに続いて、月の商業利用が始まると想定される。例えば、月面の土壌には、月面での活動や、月以遠に対する活動に必要な建設資材や燃料を作り出すのに必要な資源や核融合発電の燃料となるヘリウム 3 が大量に存在すると考えられており、国際的な取り決めを待って民間資本も参入して月における採掘・利用が開始されると想定される。また、宇宙旅行が月周辺にまで拡大することも見込まれる⁶⁹。

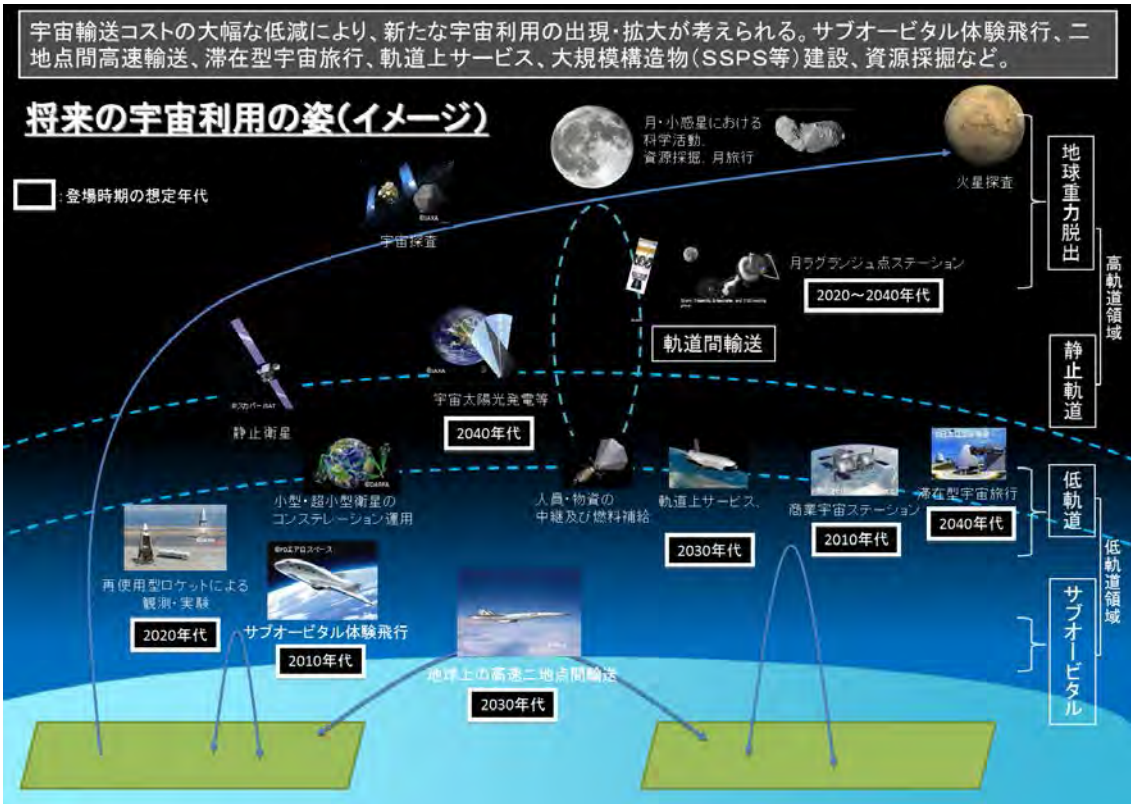
地球近傍小惑星については、希少資源を多く含むものを捕獲して資源を採掘し地球に輸送すること等が可能となる。

また、地球に衝突する可能性のある小惑星の軌道を変更すること等も考えられる。

以上で挙げた宇宙利用の姿を整理したものを以下の図に示す。

⁶⁸ 例えば米国議会調査局は、日照コントロール手段の一つとして、軌道上に太陽光反射鏡を配置することを挙げている。 *Geoengineering: Governance and Technology Policy*. Congressional Research Service, 2013.

⁶⁹ 資料集 p. 39 「新たな宇宙利用の姿 (6/6)」参照。



3-2. 将来宇宙輸送システムの姿

新たな宇宙利用に対応するための将来宇宙輸送システムは、「宇宙に人や物を運ぶ」機能に加えて、「宇宙から人や物を持ち帰る」、「宇宙空間を利用して高速に人や物資を輸送する」機能を有し、低コストかつ高頻度にこれらを実施するものになると考えられる。

(1) 低軌道領域の将来宇宙輸送システム

低軌道領域における将来宇宙輸送システムを実現する上では、輸送インフラとして確立している航空輸送の考え方を宇宙輸送に導入することがポイントになる。すなわち「航空と宇宙の融合」である。

航空機並みの安全性と運用性を兼ね備え、かつ輸送コストを現在よりも抜本的に低下させれば、一般人や民間企業が日常的に宇宙輸送を利用できる「宇宙輸送のインフラ化」が実現すると考えられる。「宇宙輸送のインフラ化」が実現されれば、3-1で示した新たな宇宙利用に関連する産業が出現し、拡大すると想定される。このような低軌道領域の宇宙輸送システムは、次のよ

うな要件を備えているものと考えられる。

①航空機並みの安全性、運用性

航空輸送のような多数回の繰り返し飛行運用を行う場合には、100回中数回失敗するという現状のロケットの事故率は、一般人も利用するインフラとして社会的に容認されないと考えられる。したがって、宇宙輸送においても、現在の航空輸送において確立されている100万回に1回以下の事故率にいかにも近づけるかが本質的に重要である。

そのためには、ロケットのように単にシステムの信頼性を上げて故障する確率を減らすこと(フォルト・アボイダンス)によって安全を担保するのではなく、故障や事故が発生したときに如何に安全を担保するかという、故障許容(フォルト・トレランス)のシステムを構築する必要がある。故障許容のシステムの構築は、宇宙輸送機の再使用化と同義であると言える。

②抜本的な低コスト化

米国や欧州では、2020年代以降に輸送コストを数十分の一程度まで低下させることを目指して、再使用型宇宙輸送システムの研究開発が行われている^{70 71 72}。

また、宇宙空間にSSPS等の大規模構造物を建設するためには、大量の建設資材を分割して軌道上まで運ばなければならないため、1日1回から数回程度の高頻度輸送を長期間にわたって行う必要があり、そのためには、JAXAの試算によると、輸送コストを1/50程度にまで低下させる必要があるとされている⁷³。

また、新たな宇宙利用においては、滞在型宇宙旅行や資源採掘等その他の宇宙輸送需要も増大すると見込まれ、このような高頻度な宇宙利用を支えるためにも、現在に比べて輸送コストを抜本的に低下させる必要

⁷⁰ NASAの研究によると、年間200回台の高頻度打ち上げを実施する場合には、再使用型宇宙輸送システムの形式にもよるが、1回当たりの打ち上げコストを300万ドル台から600万ドル台に抑制できると想定されている(資料集p.30「再使用運用による輸送コストの低下」を参照。レートは2013年現在の1ドル=100円で概算している。以下、ドルと円の換算はこれに従う。)

⁷¹ DARPAが計画するXS-1は、100ポンド(45kg)以内の小型ペイロードであれば1回につき100万ドル(約1億円)以内、最大ペイロードの5000ポンド(2.3トン)でも500万ドル(約5億円)のコストで低軌道に投入できる能力を目指しており、2018年に最初の飛行が計画されている。

⁷² 米国のSpaceX社は、重量1ポンド当たりの輸送コストを100ドル(1トン当たり約0.2億円)に低下させることを目指している。また、英国のReaction Engines社のスカイロンも、2022年までに運用を開始し、1回あたりの輸送コストを500万ドル(約5億円)に低下させることを目指している。(資料集p.13,17「世界の将来宇宙輸送システムに関する動向(米国)(欧州)」を参照)

⁷³ 資料集p.38「新たな宇宙利用の姿(5/6)」を参照。

がある。

さらに輸送コストの抜本的な低減により、宇宙利用の需要全体が大幅に拡大することが予測される⁷⁴。

しかし、第2章2-3で述べたように、従来の使い切り型ロケットでは、輸送コストの抜本的な低減が困難である。このため、1回あたりの輸送コストをロケットの数十分の一に低減させることができる再使用型宇宙輸送システムにより、抜本的な低コスト化を図る必要がある。

(2) 高軌道領域の将来宇宙輸送システム

高軌道領域においては、宇宙探査の頻度等の宇宙輸送需要を考慮すると、当面、大型の使い切り型ロケットが使用されることになると見込まれる。

ただし、低軌道における低コストかつ高頻度の再使用型宇宙輸送システムが実現された場合は、低軌道から更に遠い軌道への効率的な輸送手段として、その間を高頻度に往復する再使用型の軌道間輸送機の使用が考えられる⁷⁵。

例えば、静止衛星の軌道投入、SSPS等の大型構造物の建設、軌道上サービス、資源採掘及び滞在型宇宙旅行等のため、低軌道と静止軌道や月周辺以遠を結ぶ再使用型の軌道間輸送機によって輸送ネットワークを構築することが想定される。

なお、火星以遠については、2040-2050年代においても使い切り型ロケットが主に使用されると考えられるが、例えば地球周回軌道で組み立てた再使用型の軌道間輸送機による輸送が行われることも想定される。

(3) 軌道領域別に見た2040年から2050年頃の宇宙利用と輸送の分類

宇宙利用の姿を軌道領域別に整理した表を以下に示す。

低軌道領域の宇宙利用には、輸送手段として再使用型宇宙輸送システムが用いられると考えられる。高軌道領域のうち、月周辺までの輸送手段として軌道間輸送機が用いられると考えられる。火星以遠については基本的には、使い切り型ロケットが用いられ、輸送需要が増大した場合には、再使用型の軌道間輸送機を用いられることも考えられる。

なお、核融合推進やレーザー推進、軌道エレベータといった革新的な将来

⁷⁴ 資料集 p. 29「輸送コストと年間総輸送需要の関係」を参照。

⁷⁵ 高軌道領域に到達するのに必要な速度を得るためには、地球から直接打ち上げるよりも地球軌道からの軌道遷移を行った場合の方が必要なエネルギーが小さくて済み、経済的である。資料集 p. 43「軌道遷移エネルギーの比較」を参照。

宇宙輸送システムも、2050年代以降には出現すると考えられる。

軌道領域別に見た 2040 年から 2050 年頃の宇宙利用と輸送の分類

軌道の分類		宇宙利用の例	宇宙輸送システム
低軌道領域	サブオービタル (高度100km)	・科学観測、微小重力実験	再使用観測・実験ロケット
		・サブオービタル体験飛行 ・地球上の高速二地点間輸送	再使用型宇宙輸送システム
	低軌道 (高度数百km)	・地球観測衛星 ・低軌道ステーションへの人員 及び物資の輸送・回収 ・一般大衆の宇宙旅行	再使用型宇宙輸送システム
高軌道領域	中・高軌道 (静止軌道等)	・測位衛星、通信放送衛星等 ・宇宙太陽光発電システム (SSPS) 等	再使用型の軌道間輸送機
	月周辺	月周辺での持続的滞在・活動 (月探査、科学研究、資源採掘、 旅行等)の為の人員・物資の輸 送	再使用型の軌道間輸送機
	火星以遠	宇宙探査(深宇宙、惑星、小惑 星)	使い切り型ロケット、 再使用型の軌道間輸送機

第4章 将来宇宙輸送システムの実現に向けて

本章では、第3章で述べた将来の宇宙利用を現状より大幅な低コストで実現するために、必要な将来輸送システムの発展経路の形についてまず述べる。続いて、そのために必要なシステムレベルでの技術課題や、従来の使い切り型ロケットの開発や運用では獲得することのできない新たな技術課題等について述べる。さらに、これらの先端技術の獲得により国際優位性を確保する必要性を示すとともに、その研究開発のプロセスを提示する。

4-1. 低軌道領域の将来宇宙輸送システムの発展経路

我が国では新型基幹ロケットの運用を2020年から開始する予定であり、各国の動向を踏まえても、少なくとも2030年代までは使い切り型ロケットが低軌道への主な輸送手段であると想定される。

その間に、安全、高頻度な宇宙輸送を現在よりも数十分の一のコストで実現できる再使用型宇宙輸送システムの実用化に向けた研究開発が進展し、それらの成果を用いて、使い切り型ロケットの低コスト化のための部分再使用化等が進むと考えられる。また、このような再使用型宇宙輸送システムは、誰でも自由に利用できる輸送インフラとして確立されると考えられる。

しかし、このような再使用型宇宙輸送システムは、現状の技術水準では実現が困難であり、様々な革新的な技術の開発が必要である。その際、技術革新の動向によって、発展経路（パス）は変化することが想定される。考えられる発展経路は次の三つである。

（第一のパス：再使用型ロケット）

ロケットに関しては、第一段ロケットブースターを再使用化したフライバック・ブースターの開発が行われており、さらに多段式の再使用型ロケットや、最終的には高頻度再使用が可能な単段式の再使用型ロケットへの発展が考えられる。このパスで実現が必要となる革新的な要素技術としては、大幅な軽量化、推進系構造材料、極低温タンクの断熱を実現する技術等がある。

(第二のパス：エアブリージングエンジン搭載の単段式スペースプレーン)

エアブリージングエンジンは、大気中の酸素を酸化剤として使うことにより酸素タンクの容量を減らし、機体の軽量化が可能なエンジンであり、現在、各国が安全保障の分野で実験機による実証試験等を進めている重要な技術である。

エアブリージングエンジンの実現により、水平に離陸して大気圏内で加速しながら宇宙空間へ到達し、宇宙空間ではロケットエンジンで飛行した後、再び帰還する単段式スペースプレーンの実現が可能になると考えられる。

このパスで実現が必要な革新的な技術は、極超音速エンジン（ロケットエンジン、エアブリージングエンジン、これらの複合型）技術、大気圏内で長時間にわたって空力加熱に耐えるための耐熱・熱制御技術、システムインテグレーション技術等がある。また、高速二地点間輸送システムの使用を実現するためには、このような技術に加えて低騒音や低排出ガス等の環境性能も必要となる。

(第三のパス：エアブリージングエンジン推進の第一段と再使用型ロケット第二段の組み合わせ(二段式スペースプレーン))

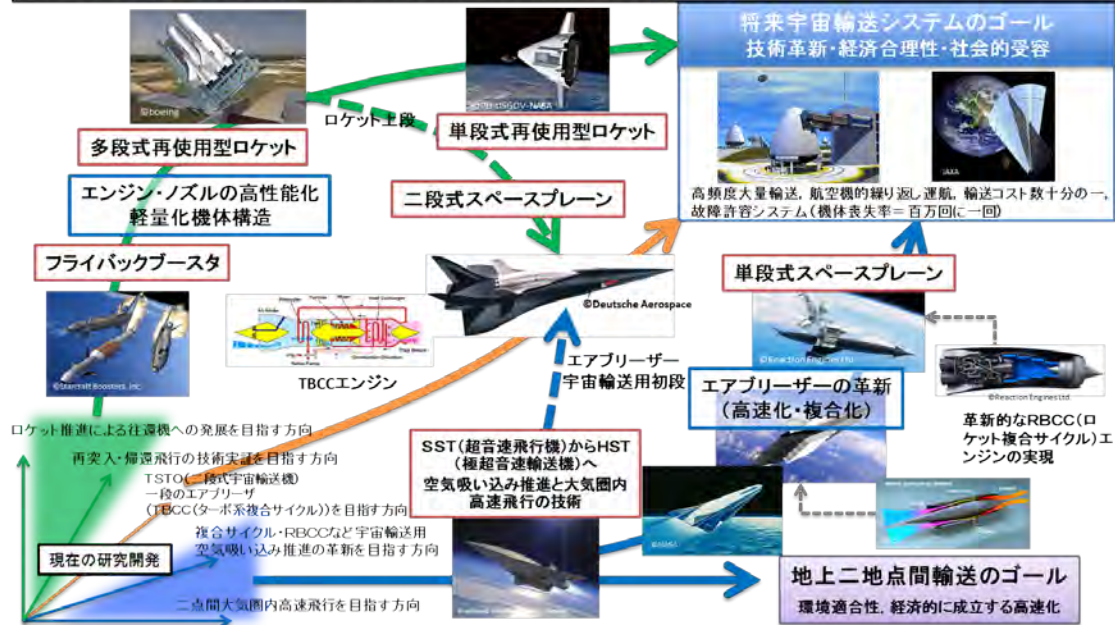
上記のエアブリージングエンジンと再使用型ロケットを組み合わせたパスも考えられる。この場合、第一段に極超音速輸送機の技術を活用したエアブリージングエンジン搭載機を用い、大気圏内で必要な速度に達した後、再使用型ロケット技術を用いた第二段がペイロードを宇宙空間に投入する形態である。第一段のエアブリージングエンジンと第二段のロケットエンジンの長所を組み合わせるため、それぞれ単独の方式を採用するよりも各段に要求される性能が緩和されることが特長である。この第三のパスについては、第一のパスと第二のパスを開発する過程の途中で得られた技術を活用して実現すると考えられる。

上記の通り、再使用型宇宙輸送システムには複数のパスが考えられ、その過程においては、発展形態についても多様なものが想定される。また、どのパスにおいても共通に必要な技術があることや、各パスが進展する途上で、実用化できるシステムが生まれる可能性もあることから、開発の初期の段階では、各パスの発展可能性を追求することが必要である。その上で、適切な時期に適切なパスを選択し、開発を集中させる必要がある。

以上で述べた低軌道領域の将来宇宙輸送システムの発展経路を以下の図に示す。

低軌道領域の将来宇宙輸送システムの発展経路

材料技術の革新による単段式再使用型ロケット、エンジン技術の革新によるエアブリージングエンジン搭載単段式スペースプレーン、両者の技術を活用した二段式スペースプレーンの3つの発展経路(パス)を想定。再使用型宇宙輸送システムの発展経路は、複数のパスが考えられるが、適切な時期に適切なパスを選択する必要がある。ただし、どのパスにおいても共通に必要な技術があることや、各パスが進展する途上で、実用化できるシステムが生まれる可能性もあることから、開発の初期の段階では、各パスの発展可能性を追求することが必要。



4-2. 低軌道領域の将来宇宙輸送システムの設計等の変革

再使用型宇宙輸送システムの実現には、新しい考え方によるシステム全体の設計や開発・製造が必要となる。以下では、その設計や開発・製造の考え方について述べる。

(1) システム全体として故障を許容する安全設計

現在の使い切り型ロケットの設計思想では、複数回の使用は想定されておらず、故障等のためにミッションが遂行できないときは機体を放棄して乗員や地上の安全を確保することを前提としている。

一方、再使用型宇宙輸送システムでは、飛行のどの時点で故障が起きても機能の喪失につながることはない仕組みを用意し、機体を失うことなく安全を確保して帰還できるような故障許容(フォルトトレラント)の設計思想へ転換を図ることが必要である。このような設計思想は現在の使い切り型ロケットでもサブシステムレベルで部分的に実現されているが、再使用型宇宙輸送システムでは、機体及び地上施設も含めたシステム全体がこうした設計思

想に基づく必要がある。この点が使い切り型ロケットとの本質的な相違点である。このようなシステムレベルのフォルトトレラント性を実現することにより、成功率 95%で世界標準という使い切りロケットの世界から、100 万回につき 1 回以下の機体喪失率という民間航空機と同様の水準に達することが可能になると考えられる。このためには以下のような課題を解決する必要がある。

- ① 単一の故障がシステムの喪失につながらないこと
- ② 機器が故障した場合でも必ずシステム全体の安全側に故障すること
- ③ 故障機器をシステムから安全に隔離できること
- ④ 単一の故障が、他のサブシステムや機器の故障につながらないこと
- ⑤ 故障発生時もシステム機能を維持できること（例えば、エンジン故障時にも、機体・貨物・人員が安全に帰還できること）

航空機の世界では、このようなフォルトトレラントなシステム設計思想に基づく安全設計の基準が耐空性審査要領として体系化され、これを満たすものに認可を与えて、ある一定の制約の下で飛行を認めるというシステムができあがっている。将来的には再使用型宇宙輸送システムに対しても同種の考えに基づく基準が策定され、開発や運用が行われるものと考えられる。このように、再使用型宇宙輸送システムにおいては、航空機のような故障を許容する安全設計の考え方を取り込むことが重要な課題である。

（２）高頻度な運用を可能とするシステム設計

前節で述べたようなシステムの安全性確保のための課題に加えて、高頻度な運航のためには、帰還してから次の飛行までの時間（ターンアラウンド時間）の短縮が求められる。宇宙輸送システムのターンアラウンド時間は、時間あたりの必要輸送量に対して必要な機体の数に直結するため、極めて重要な課題である。これに関する技術的課題としては、燃料の帰還後の扱い（安全化措置等）、飛行中の点検、ヘルスマニタリング、次の飛行開始に向けた確認等があり、航空機や高度な安全性が求められる地上システムの運用、点検、検査等の手法から、その解決策を学ぶことも多いと考えられる。

(3) 効率化のための開発及び製造のイノベーション

低軌道領域の再使用型宇宙輸送システムを合理的に設計するためには、輸送要求を受けて運用要求をとりまとめ、システム全体の仕様を決定し、アーキテクチャを設計し、一つのシステムとして統合する技術（システムインテグレーション技術）の革新が必要である。

再使用型宇宙輸送システムのようにロケットより大規模で複雑なシステムにおいては、開発プロセスをこれまでより効率化する必要がある⁷⁶。

事前にコンピュータによるシミュレーションを活用した評価を行い、大規模な開発試験を不要とするような開発プロセスの効率化が今後、更に重要になっていくと考えられる。また、シミュレーション技術をシステム全体のライフサイクルを通じて適用することにより、安全性、運用性、保守性等を評価できる技術を習得することが重要であると考えられる。

様々な分野の専門家が協働することで集合知を使ったデザインをおこなうことができるような組織、プロセス等の導入も必要である。このような集合知を活用した協働設計は、これまで日本では、熟練した専門家により暗黙的に行われてきたが、今後は体系的に整理した上で、戦略的に組織、プロセス等に適用できることが必要となると考えられる。

製造については、多品種少量生産もしくは変種変量生産、ネットシェイプ化⁷⁷、製造工程の自動化、大規模な設備を必要としない複合材料等の製造等をはじめとする技術革新の成果を継続的に製造プロセスに適用していくことが考えられる。

4-3. 低軌道領域の将来宇宙輸送システムの実現のための要素技術

4-1で述べた第一のパスであるロケットエンジンを用いたシステムにおいては、基本的な原理は現在のロケットエンジンで実証されているものの、推進性能の向上及び機体の軽量化が必要である。第二のパスであるエアブリージングエンジンを用いたシステムにおいては、大気圏内の超高速飛行と空気吸い込みによる性能向上を併せもつ機体システムを構成することが必要であり、そのための多くの課題がある。

⁷⁶ 開発には、最適化など論理的に扱うことが可能な範囲を対象とした分析的 (Analytical) アプローチと、ある要求を満たすシステムアーキテクチャをデザインするように、論理的には決めることができない範囲を対象とした統合的 (Synthetical) アプローチが必要となる。開発プロセスは、統合的アプローチの結果としてデザインしたものを、分析的アプローチで評価することを繰り返して進められる。

⁷⁷ 材料を削ったり熱を加えることなく加工する技術を指す。

また、どのパスを取るにせよ、再使用型宇宙輸送システムは高い信頼性を実現するとともに、航空機並みの高頻度で運航することが必要とされる。このための短いターンアラウンド時間を実現するためには、機体・エンジンの状況を正確に把握し事前に異常を検知し、飛行が可能かどうかを判断するためのヘルスマネジメント(状態診断技術)技術の成熟が必要となる。

以上のような要素技術は、現在の使い切り型ロケットの開発の延長上にはないため、再使用型宇宙輸送システムの実現に向けた特別な取組が必要である。それぞれの技術分野における我が国の取り組むべき方向を以下に示す。

(1) 推進系

エンジンには、宇宙空間で使うロケットエンジン、大気中で作動し高い性能をもつエアブリージングエンジン、これらの複合型が考えられる。再使用型宇宙輸送システムのエンジンは複数基装備され、エンジン1基に故障が発生しても機体全体で対応をとることができ、エンジン単体には故障時に安全に止まるフェールセーフ性を持つことが求められる。また、いずれのエンジン形態であっても、運用性・整備性に優れたものであることが求められる。

① ロケットエンジン

再使用型ロケットの基本的な原理は現在使われている化学燃料ロケットエンジンと変わらないが、長寿命化や、故障発生時に安全に停止できるフェールセーフによる信頼性向上等を踏まえた設計にする必要がある。

長寿命化に関しては、ロケットエンジンの寿命を決める主な要因である燃烧室やターボポンプの更なる寿命延長を目指した先進的な要素研究が進められているが、基本的には現在の設計で再使用に必要な寿命を確保することが可能なレベルに達している。

信頼性については、現在のH-IIAロケットの第二段エンジンにおいて故障に対する自律的な安定性が達成されている。新型基幹ロケット開発の過程では、フェールセーフ性のあるシステム/コンポーネント(構成品)設計能力の向上を狙っているが、再使用型宇宙輸送システムの開発ではこれを一步押し進め、更にフェールセーフなエンジン開発を行う必要がある。

具体的にはエンジンの構成やコンポーネントを簡素化して損傷箇所を減らすとともに、航空機設計のように意図的な破損箇所及び破損モードを盛り込むことで、自己状態診断の強化、点検・交換等の簡便化を図るととも

に、破損個所の影響がエンジン全体へ波及しないように設計することが必要である。

また、エンジンの構成やコンポーネントを簡素化する技術は製造コストの削減をもたらす。この点で日本は世界をリードできる可能性があり、注力すべきである。

②エアブリージングエンジン（空気吸い込みエンジン）

エアブリージングエンジンは酸化剤を搭載する必要がなく、軽量化が可能のため、飛躍的な高効率運行を可能にすることができるが、技術的ハードルが高いため、各国でも実用化には至っていない。エアブリージングエンジンについては多様な形態が検討されているが⁷⁸、宇宙輸送に使用するためには、マッハ10以上の速度を出すことが可能なスクラムジェットエンジン等が特に重要となる。

エアブリージングエンジンの技術的な課題としては、取り入れた空気の速度が超音速のまま燃料を燃焼させる技術、超音速の空気を取り込む超音速インテーク技術⁷⁹等、極限環境の中で飛行するための技術が挙げられる。これらは現在の延長上にある技術では実現が困難であるが、近年では米空軍がマッハ5級のスクラムジェット実験機 X-51 の飛行試験に成功する等、技術的蓄積やその実証が進みつつある。

また、エアブリージングエンジンを搭載するスペースプレーンには、高速飛行用のエアブリージングエンジンの他に、離着陸時等の低速飛行用のジェットエンジン、宇宙空間飛行用のロケットエンジンを組み合わせた複合型のエンジンが必要となる。さらに、ロケットに比べ、機体／エンジン全体のバランスを取った総合的なインテグレーションが必要である。

第2章2-2で述べたように、これまで我が国ではエアブリージングエンジンの要素研究を中心とした技術的蓄積が行われてきたが、今後は各要素技術の革新及び高度化並びにシステムインテグレーション技術の獲得が必要である。

⁷⁸ 高速飛行によって圧縮された空気を燃焼させるラムジェットエンジン、ラムジェットエンジン内部にジェットエンジンを搭載したターボラムジェットエンジン、ラムジェットエンジンと基本的原理は同様だが、より高速度域で動作することを目指したスクラムジェットエンジンなどがある。

⁷⁹ 超音速の空気を適切に取り込むためには、機体/エンジン全体が空気の流れを妨げない形状である必要がある。また、可変ノズル、統合可変インテークなどの機能構造設計技術も重要である。

(2)機体の超軽量化技術と極低温／超高温構造の一体設計技術

再使用型宇宙輸送システムの実現には、機体全体の質量に対する構造材の質量の割合（構造効率）を5～10%程度まで低下させる必要があるため、材料技術の革新及び高度化に加え、バイオミメティクス⁸⁰をはじめとする新たな考え方に基づいた構造設計技術の革新及び高度化が必要である。

タンクをはじめとする構造材の革新的な軽量化には、2020年代に実用化が予想されるカーボンナノチューブをはじめとするナノマテリアル技術が大きく貢献することが期待される。このような革新的材料の開発に加え、それらの繊維の強度を引き出すために、航空機製造に用いられているFRP⁸¹構造設計技術をさらに一歩進めることが重要となる。

エアブリージングエンジン搭載機は、空気中での極超音速飛行が必要となり、機体表面の温度は空力加熱によって数千度に達する。この条件ではセラミック系材料やカーボン/カーボン材料のような高温に耐えられる材料でも、無冷却で使用することは不可能である。また、再突入時の空力加熱により、特に機体の先端部や前縁部等で温度が上昇するが、熱防護材料を多用すると機体がさらに重くなり、空力加熱も一層強まるという悪循環に陥る。

スペースシャトルをはじめとするこれまでの再突入機体では、冷構造による荷重分担機能と熱構造による熱防御機能は独立の設計となっていたため、熱防護材を多用せざるを得なかった。したがって、機体を軽量化するとともに、熱防護材料のみに依存しないサーマルマネジメント（熱制御）を採用する必要がある。

具体的には極低温推進剤を冷媒として用いる再生冷却構造を含めた冷・熱構造の一体設計や高温強度の高い複合材技術、あるいはこれらの組合せが不可欠である。

また、我が国が得意とするSiC⁸²（シリコンカーバイド）等の耐熱素材技術を用いて、熱構造技術の革新及び高度化を実現することも重要である。

これらの革新的な材料技術については、他分野の技術の進展を積極的に取り込む必要がある。

⁸⁰ バイオミメティクスとは、「生物模倣」を意味し、生物の構造とその機能から着想を得て、それらを人工的に再現することによって、工学や材料科学、医学などの様々な分野への応用を目指そうとする考え方を指す。

⁸¹ FRP (Fiber Reinforced Plastic: 繊維強化プラスチック)

⁸² Silicon Carbide

(3)ヘルスマネジメント技術

4-2で述べたように、再使用型宇宙輸送システムの事故率を、航空機並みにするためには、故障許容システムが不可欠である。このため、機体の状態を常時把握（ヘルスマニタリング）し、不具合が発生した場合には、適切な対応を行うためのヘルスマネジメント技術が必要である。

特に「エンジンヘルスマニタリング技術」⁸³、「構造ヘルスマニタリング技術」⁸⁴、「統合機体ヘルスマネジメント（IVHM）技術」⁸⁵等が重要である。

また、ヘルスマニタリングの結果、飛行継続が困難と判断された場合に適切な行先や飛行経路を再設定する自律飛行管理・飛行計画技術も必要である。これらの開発に当たっては、現在の航空機用エンジンや地上のプラントシステム等で故障予知に用いられている、センサー技術、ネットワーク技術、ビッグデータ解析技術等の ICT 技術の進展を積極的に取り込む必要がある。

4-4. 高軌道領域の将来宇宙輸送システムの発展経路及び要素技術

第3章3-2（2）で述べた高軌道領域の再使用型の軌道間輸送機は、その利用用途によって推進系が大きく異なる。したがって、基本的に推進系の発展経路が軌道間輸送機の発展経路と考えることができる。

化学推進系は、有人輸送等可及的速やかに目的の軌道に到達する必要がある場合に用いられる。電気推進系は加速度が低いものの経済性に優れるため⁸⁶、静止軌道における SSPS 等の大規模構造物の建設、小惑星捕獲、ラングランジュ点及び月への物資補給、月で採掘した資源の地球への輸送等輸送時間が問題とならない場合には有効である。NASA 等は、将来の火星以遠に対する高速輸送需要に対応して、化学推進や電気推進と異なる原理を用いた高出力推進系の検討・開発を進めている。

また、燃料補給、誘導・ドッキング、長期自律航法等の関連技術も必要となる。

以下ではそれぞれの技術分野における我が国の取り組むべき方向を示す。

⁸³ 動作中のエンジンの健全性を監視し、故障検知や残存寿命の評価（故障予知）を自律的に行う技術。スペースシャトルは毎回エンジンの全分解点検を行い、これに数カ月を費やしていたが、この技術により航空機と同様、飛行中のデータで診断を行うことで、毎回の分解点検は原則不要となる。

⁸⁴ 金属材料に比べて損傷許容（ダメージトレラント）性に劣る複合材の弱点に対して歪みや加速度などのセンサデータから損傷を検知し、飛行続行の判断を自律的に行う技術。

⁸⁵ フライト中の機体・エンジンシステムの作動状況モニタリングとそのデータベース化によるトレンド評価を行い、次のフライトへの移行可否を評価する技術。IVHM：Integrated Vehicle Health Management。

⁸⁶ 地球静止軌道に 2t 程度のペイロードを投入する場合、化学推進系ならば数日程度であるところを電気推進系では 4-8 カ月程度の期間を必要とする。

(1) 推進系

① 化学推進系

高い推力を発揮できる化学推進系は、燃料として水素を使用するものと、炭化水素（LNG 及びケロシン等）を使用するものに大きく分けられる。水素燃料を用いた推進系は高い比推力⁸⁷を発揮できるというメリットがある。一方、炭化水素系燃料を用いた推進系は機体を小型化でき、燃料の貯蔵も比較的容易であるというメリットがある。

水素燃料を用いた推進系に関しては、我が国はN-I以降、H-I、H-II A/Bまで一貫して水素燃料のロケットエンジン開発に取り組んできており、高度な技術を有する。我が国では現在、基幹ロケットの高度化において長時間の飛行を実現するための技術開発が進められているが、今後はさらにアクティブ蒸発抑制システム技術の開発により貯蔵性を向上させる必要がある。

また、我が国はLNG燃料の一種である液化メタン燃料推進系の研究開発にも取り組んできており、国際的な優位性を有する。今後は、その小型化、長寿命化が必要となる。

これらの推進系は、燃料の貯蔵性や比推力等に関するそれぞれの特性を活かし、地球低軌道から月までの輸送や火星以遠への輸送等、用途に合わせて使い分けられることになると想定される。

② 電気推進系

月周辺等の比較的近い軌道間輸送用の電気推進系に関しては、現在の静止衛星の軌道維持や惑星間探査機で主に用いられるイオンエンジンよりも低コストかつ小型で、大推力を発揮できるホールスラスト⁸⁸が考えられる。

小惑星・火星以遠については電力1MW級のMPDアークジェット⁸⁹またはDCアークジェット⁹⁰が想定される。アークジェットは大電力領域において優れた推進効率を発揮することに加え、イオンエンジンやホールスラストよりも簡素かつ小型軽量であるというメリットを持つ。今後は長寿命化を図ることで、

⁸⁷ 比推力とは、航空機やロケットエンジンの性能指標であり、「1kgの燃料で1Nの推力を生じさせることができる時間」と定義される。自動車であれば「燃費」に似た概念である。

式としては、次のように表される。 $I_{sp}=F/(dw/dt)$

I_{sp} ：比推力（単位：秒）

F ：推力（単位：kgf）→kgf：キログラム重

dw/dt ：ロケットが噴出する推進薬の重量流量（単位：kgf/秒）

⁸⁸ 電流に磁場を掛けることで起電力を発生させるホール効果を利用し、推進剤を電離させ、電場により加速させて推進力を発生させる推進系

⁸⁹ Magnetoplasmadynamic thruster（電磁加速アークジェット）

⁹⁰ Direct Current arcjet（直流アークジェット）

火星・小惑星に対する無人物資補給等に利用されると見込まれる。

ホールスラストに関しては、我が国は電源性能面で概ね世界水準を達成している。今後は長寿命化とともに低コスト化が必要である。さらに軌道間輸送機の推進系として使用するためには、静止軌道への物資輸送で 5kW 級、小惑星ミッションで 10kW 級の大電力が必要であり、月周辺への物資輸送にはさらなる大電力化が必要とされる。

また、アークジェット推進系に関しては、我が国は 1997 年に世界で初めて、MPD アークジェットの軌道上実証を行った実績を持つ。当面は既に開発されている DC アークジェットの大電力化を図りつつ、将来的には小惑星・火星探査用の再使用型の軌道間輸送機の推進系として更に大電力化が原理的に可能な MPD アークジェットの開発に取り組む必要がある。

③その他推進系

現在の化学推進系では、その比推力及び加速性能の限界から、地球と火星の位置関係が最適な場合でも片道所要時間は最短 7 か月程度となる。地球と火星の会合周期（約 2.2 年）も考え合わせると、往復には 4 年程度を要する。また、火星周回軌道での放射線環境は宇宙ステーション軌道の 2.5 倍程度とされ、現在宇宙飛行士に設定されている被曝限度量から推定して、飛行期間を含めた全体の滞在期間は 3 年程度が上限となり、火星への滞在期間が制限される。

このため、火星以遠の有人輸送では、化学推進や電気推進より高速輸送が可能な新たな推進技術が必要になることも想定されており、米国やロシアでは原子力推進の研究開発が行われている⁹¹。我が国も今後、高出力推進系に関する優位性を確保できるよう、要素技術を見極めた上で研究に取り組む必要がある

（２）軌道上の貯蔵・中継技術及びその他関連技術

低軌道領域から高軌道領域までの宇宙輸送システムが再使用型の軌道間輸送機ネットワークとして統合運用されると、それぞれの宇宙輸送システム間で、人や物資の乗換や、軌道上の燃料補給が必要となる。このため、軌道上に燃料や物資の貯蔵施設を設けることや、人や物資の中継拠点を構築することが必要となることから、軌道上の施設（デポ）に関する技術が重要となる。

⁹¹ 資料集 p. 44 「高出力推進系について」参照。

デポにおける燃料の補給に関しては、地上から宇宙空間に水素、メタン、酸素等を直接運ぶのは非効率的であるため、水やアルコール等の安定した形で運び、これを必要に応じて分解生成する方式が想定される。推進薬の分解生成と液化のためには、排熱制御（効率のよい放熱パネル、冷却機を稼働させるための電源の確保等）が必要となる。推進薬を液化した後の貯蔵に関しては、4-4（1）で述べた極低温燃料貯蔵技術が必要となる。

その他関連技術としては、航法・測位・誘導技術等がある。これらの技術は、現在のHTV やはやぶさである程度達成されているが、再使用型の軌道間輸送機では自律的により長時間の誘導を行う必要があることから、これらの技術の革新及び高度化を実現する必要がある。

4-5. 先端技術の獲得による国際優位性の確保

これまで本章で述べた先端技術を開発する際に特に留意すべきこととして、国際優位性の確保がある。

現在、ロケット開発に関しては国際協業が進んでおり、各国は重要な技術は保持しつつ、比較優位にある技術によって相互に連携して市場の獲得に乗り出している。こうした状況は今後、宇宙輸送システムの高度化に従って、さらに進むと考えられる。

航空機産業の場合、中大型輸送機の市場は米国ボーイングと欧州エアバスの2社による寡占状態⁹²であるが、両社は機体の設計技術やシステムインテグレーションといったキー技術を自社で保有する一方で、機体の部品、コンポーネント、サブシステム等については広く国際的なサプライチェーンを構築している⁹³。将来の再使用型宇宙輸送システムにおいても、このような国際共同事業が必要となると考えられる。

国際共同開発とそのビジネスにおいて重要なことは、主体性を確保することである。推進系技術や材料技術等個別の要素技術で優位性を確保するとともに、システムインテグレーション技術を獲得することにより、主体的な立場で国際共同開発を主導していくべきである。

4-6. 将来宇宙輸送システムの開発プロセス

⁹² 資料集 p. 45 「航空業界における国際協業の状況」参照。

⁹³ これは、300万点に及ぶ部品点数とその幅広い設計製造技術、長期にわたる高いリスクの存在、人材や技術の共有需要、広くないマーケットへのアクセス、資金分担といった要因への対応である。

現在、低軌道領域における再使用型宇宙輸送システムに関する我が国の取組として、政府全体の宇宙開発利用を技術で支える中核的な実施機関である JAXA を中心に、主に要素技術の研究が進められている。しかし、再使用型宇宙輸送システムの実用化を目指すためには、要素技術だけでなく、それらを統合するシステムインテグレーション技術を獲得する必要がある、これは4-5で述べたように国際優位性の確保の観点からも重要である。さらに、推進系、材料、熱制御等の要素技術を実際の環境下でシステム全体として検証することで、個々の要素技術の限界や課題を抽出することができる。そのためには、実機による研究開発が最も有効であるが、我が国では再使用型宇宙輸送システムに関する実機による研究開発の実績が不足している。

このため、実験機の開発と運用を通じて、得られる各種の成果を再び研究フェーズにフィードバックするというサイクルを確立し、実用化に向けた研究開発を進めていく必要がある。より具体的には、まず実験機を開発し、その成果を研究開発にフィードバックして、再使用型宇宙輸送システムの実用化に必要な技術を実証する実証機を開発するというプロセスが想定される。さらに実証機で得られた成果を研究開発にフィードバックして、実用型の再使用型宇宙輸送システムの試験機を開発することになると考えられる。

以上の考え方にに基づき、2010年代中に、再使用型ロケット実験機とエアブリージングエンジン搭載型実験機の二種類の小型実験機の開発に向けた検討を開始すべきである。具体的な検討については、今後、適切な場において別途実施する必要がある。

開発を行う場合、次のような小型実験機から開発に着手することが考えられる。再使用型ロケット実験機については、既に使い切り型ロケットによって基本原理が実証済みであるため、再使用化及び軽量化・高性能化を目指したことから開発することが想定される。エアブリージングエンジン搭載型実験機については、現在、エアブリージングエンジン技術自体が原理実証段階にあるため、これまでの成果を取りまとめた上で、エンジン技術及び大気圏内高速飛行技術の実験を行うものから開発することが想定される。

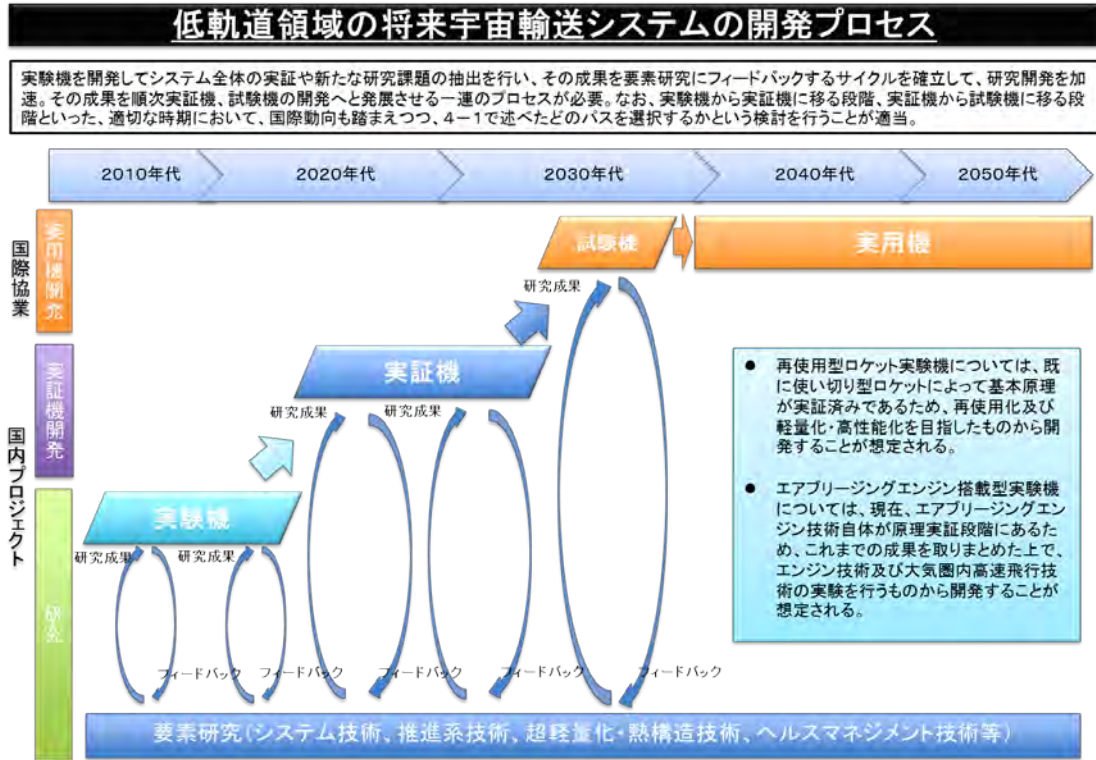
実験機に続いて、2020年代以降には実証機の開発にも着手し、2030年代には将来型宇宙輸送システムの実用化を見据えた試験機を開発することが想定される。

さらに、実験機から実証機、実証機から試験機へと開発フェーズが移行する段階において、国際動向も踏まえつつ、4-1で述べたどのパスを選択するか

を検討することが必要である。

なお、実験等に必要な地上施設についても、検討を行う必要がある。

以上で述べた、低軌道領域の再使用型宇宙輸送システムの開発プロセスを
 模式化した図を以下に示す。



高軌道領域における再使用型の軌道間輸送機ネットワークについては、3-1で述べたように、低軌道領域における再使用型宇宙輸送システムによって低コストかつ高頻度の宇宙輸送が実現することが前提となる。そのため、当面はHTV又は使い切り型ロケットの実運用の機会を活用してシステムを構成する要素技術を実証し、その成果を順次研究フェーズにフィードバックする。その後、低軌道領域における再使用型宇宙輸送システムの試験機の開発段階を目途に再使用型の軌道間輸送機の実験機を開発し、デポ技術、誘導・航法技術等も含めた再使用型の軌道間輸送機ネットワークのシステム全体として発展させていくことが想定される。

4-7. 長期ビジョンの実現に向けた課題

長期ビジョンの実現に向けて、これまで述べた課題に加え、以下のような課題がある。

(1) 国際基準策定への積極的な参画

航空機の運用においては、国際民間航空機関（ICAO）⁹⁴が国際的な安全基準を定め、それを基に米国連邦航空局（FAA）⁹⁵、欧州航空安全機関（EASA）⁹⁶が認定を行っており、我が国では、米国 FAA に準ずる制度を運用している。今後、将来宇宙輸送システムの実現過程においては、同様の認定制度が宇宙機に関しても策定されることが考えられる。実際に米国では民間宇宙輸送の台頭に伴い、FAA において認定基準の規程化の動きがある⁹⁷。このため、国際優位性の確保の観点から、4－5で述べた先端技術の獲得に加え、国際的な技術基準や技術認証制度の策定に積極的に参画することが必要である。

(2) 国際連携の推進

将来宇宙輸送システムに関して研究開発を実施している各国の機関と我が国の実施機関において、密接な連携を推進し、効率的に研究開発を進めることが望ましい。

(3) 国内関係機関の連携強化

将来宇宙輸送システムは大規模で複雑なシステムであり、技術課題も多岐にわたる。このため、JAXA 内、並びに JAXA、大学、民間企業等関係機関の連携を一層強化し、我が国の総合力を結集して、将来宇宙輸送システムの実現に向けた取組を進める必要がある。

(4) 他分野技術の取り込み

これまで述べたように、航空機技術、材料技術及び ICT 技術等他分野技術の取り込みが、将来宇宙輸送システムの研究開発において重要となる。このため、他分野の民間企業等からの協力を得て、将来宇宙輸送システムの技術課題を解決することも必要である。

(5) スペースポート等の地上施設

実用型の将来宇宙輸送システムを運用するために必要なスペースポート等

⁹⁴ International Civil Aviation Organization

⁹⁵ Federal Aviation Administration

⁹⁶ European Aviation Safety Agency

⁹⁷ 資料集 p. 46「海外の宇宙輸送システムに関する制度の動向」参照。

の地上施設や管制、運航管理に関する技術についても、今後、開発の進展とともに検討を行う必要がある。

(6) 人材育成

将来宇宙輸送システムの実現には、2040-2050年という未来を見据える必要があり、若い人材の確保及び育成が重要である。

これまでの我が国の将来宇宙輸送システムに関する開発においては、要素技術の研究開発が主であり、将来宇宙輸送システム全体の開発経験を有する人材は極めて不足している。人工衛星の分野においては超小型衛星の開発が一部の大学等で行われ、学生時代からシステム全体の開発を経験する機会がある。将来宇宙輸送システムの分野においても、同様に実験機の開発等を通じて、システム全体の開発を若いうちに経験できる機会を確保し、若い人材にとって魅力的な環境を創出することが必要である。その際、過去の開発ノウハウの伝承にも留意する必要がある。

その際、ビジネスとして展開できるような人材の確保及び育成にも留意すべきである。

(7) 国の役割

国に期待される役割としては、自律的な宇宙アクセスの確保や基盤的な技術の確保を目的として、国の責任で将来宇宙輸送システムの研究開発に向けた検討に着手することが適当である。また、得られた成果は民間に円滑に移転していくことが適当である。

さらに、人命の安全確保等の基準や民間事業者の商業活動を促進するための制度の整備を国が行う必要がある。

(8) 民間の役割

民間が新しいアイデアの提案も含めて開発段階から積極的に参画し、将来宇宙輸送システムの実現に向けた取組が活性化することが期待される。また、実用機については、民間は適切な段階で事業化判断を行い、国との適切な役割分担の下、開発に責任を持って取り組むことが望まれる。

おわりに

本長期ビジョンでは、これまでの宇宙輸送システムの歴史及び動向を分析し、宇宙利用の飛躍的な拡大をもたらす将来宇宙輸送システムの姿を描き、その実現に向けた複数の発展経路を示した。その上で、我が国が将来宇宙輸送システムを国際社会において主導的立場で開発するという観点に立ち、取り組むべき方向性をまとめた。

本長期ビジョンでは、2040年から2050年頃には、将来宇宙輸送システムが社会インフラとして整備され、広く日常的に宇宙輸送を利用できるような社会になるものと想定した。このような社会を実現するために鍵となるのは、低軌道領域への再使用型宇宙輸送システムであり、低軌道より先の静止軌道や月周辺以遠における新たな宇宙利用の実現にも、やはり低軌道領域の再使用型宇宙輸送システムが前提になるとの結論に至った。

これまで我が国では、再使用型宇宙輸送システムに関しては要素技術研究が中心であったため、システム全体として検証する機会が乏しかったため、本長期ビジョンでは小型実験機の開発に向けた検討を開始するように提案している。

なお、高い信頼性を前提とした再使用型宇宙輸送システムは有人輸送にも用いられることを想定した上で一連の検討を行ったが、我が国における有人宇宙活動の議論は、宇宙輸送システムの議論にとどまらないため、今後、別の総合的な検討が行われることが望ましい。

本長期ビジョンを実現するためには、関係府省、JAXA、民間企業等の連携による我が国の総合力を結集した取組が不可欠である。そのために、実験機の開発に向けた所要の施策を早期に実施することを期待する。