

宇宙輸送分野の技術戦略の考え方と実施方法について
民間主導の宇宙輸送の革新を推進する立場からの提言
2023年12月
宇宙旅客輸送推進協議会(SLA)

概要

日本の宇宙輸送とその実力を、これまでの実績と現状を踏まえ、今後の10-20年の中長期に向けて発展させる方法について考える。本提言は、日本を取り巻く国際環境や海外の国や民間の宇宙輸送事業との相対化や差別化を強く意識し、国の大型支援も動くところ、特に民間主導による宇宙輸送の革新を加速し、日本の優位性とリーダーシップを発揮する状況を作るために、行うものである。

まず現在の、世界の宇宙活動において、国から民間へのシフトが起こる中で、今後の宇宙利用の拡大や進展を俯瞰し、世界の動向の先をいく形で、どのような宇宙輸送サービスを考え、如何に新しい世界を切り開くかの視点を提示する(第1節)。

その上で、どのような宇宙活動の拡大を図り、そこで求められる宇宙輸送の世界を、マーケットという概念で描像し、我々の次の目標として、有人輸送と高頻度往還型の輸送体系の構築と定めることによって、桁違いに巨大なマーケットの創出を目指す。結果として先行する米民間などとの差別化の源泉となりうることについて述べる。またこれらは民間の主導で行うことが必要であり、目指すマーケットで求められる事からのバックキャストで、現在およびゴールに至る過程で行うべき事柄について概観した(第二節)。

これらの目指すべき宇宙活動とエコシステムとでもいうべき輸送体系を構築するために、獲得が必要となる技術課題について、SLAが日本の代表的な民間事業者との対話から抽出した「取り組むべき技術課題」について述べる。これらは、輸送機の高性能化をもたらし、先端的な推進システム、超軽量な構造材料、宇宙往還の帰還飛行と極超音速再突入に関する技術と、安全性が担保された有人輸送に関する技術および航空機的高頻度繰り返し運航に関する技術に大別され、これらについて概説した。「技術戦略」とは、これらに如何に戦略的に取り組むかを考えることに他ならない(第3節)。

次にこれらの技術獲得や実証を段階的に進めるにあたり、必要となる施策を提示した。これらは、民間主導の輸送体系の構築を加速するための、意図的な輸送需要の創出、本来的にいわゆるディアルユースの特徴を有する宇宙輸送技術の安全保障の世界との接点、民間主導の活動を行う環境を整備するための制度面やインフラの整備、および桁違いの規模と高度な研究開発を行う際のアカデミアとの連携や人材育成に関する事柄などである(第4節)。

最後に、これらの議論に基づき、スタートアップを含めた民間事業者が自在性高く活躍し、民間主導のイノベーションを支え、技術戦略を実行に移すために求められる、国の支援と民間との間に整備すべき体制について述べた(第5節)。

以上

目次

1. 背景と現状認識および技術戦略の考え方
 - 1-1. 日本と世界の宇宙輸送の現状
 - 1-2. 民間主導の輸送の革新と国の支援
 - 1-3. 宇宙輸送サービスの今後
 - 1-4. イノベーションの創出に向けて

2. 宇宙輸送の将来像と民間主導による目標設定の具体化
 - 2-1. 目指す世界の描像
 - 2-2. 目標達成の時期について
 - 2-3. マーケットドライブの要請
 - 2-4. 世界の一線に出るために行うべきこと

3. 取り組むべき技術課題の抽出と技術戦略
 - 3-1. 推進系の高度化とシステム構築の戦略
 - 3-2. 軽量構造材料・製造法技術
 - 3-3. 高頻度多数回再突入帰還飛行の技術
 - 3-4. 再使用高頻度運航をもたらすシステム技術・運用技術
 - 3-5. 有人輸送の技術と制度整備・安全基準

4. 技術戦略を実行する上での課題とインプレメンテーション
 - 4-1. 最終ゴールへの到達と段階的發展およびアンカーテナンシーの用意
 - 4-2. 安全保障の世界における研究や装備開発との接点
 - 4-3. 試験設備や射場などの実行インフラの整備と制度面の整備
 - 4-4. アカデミアとの連携と人材の育成

5. 民間主導のイノベーションを支える体制について

参考資料

宇宙輸送分野の技術戦略の考え方と実施方法について
民間主導の宇宙輸送の革新を推進する立場からの提言

2023年12月

宇宙旅客輸送推進協議会(SLA)

1. 背景と現状認識および技術戦略の考え方

1-1. 日本と世界の宇宙輸送の現状

現在の日本の宇宙への輸送手段の維持発展は、いわゆる基幹ロケット(今後はH3とイプシロンS)によって日本としての打ち上げ自在性の確保を第一の目的として行われている。欧州においては国主導のロケットが同様に民間による運営への転換を進めながら運用されており、こちらもアリアン6とベガCへの移行が図られているところである。一方米国においては商業宇宙輸送への転換が進み、NASAによる国としての宇宙活動は月火星探査などの輸送に専念し、地球周回軌道への輸送サービスはスペースXファルコン9などの民間ロケットに委ね、世界の商業打ち上げ需要をまかなう状況が作られており、宇宙ステーションへの物資や人員の輸送も民間の輸送サービス事業として行われる状況にある。他方宇宙活動や打ち上げ能力の増強を図る中国では、多くの打ち上げが行われ、有人輸送も独自ステーションへの物資と有人輸送が行われる状況にある。その他の世界の民間による小型衛星市場への参入も進むが、世界の打ち上げ機数においては、米民間スペースXと中国がそのほとんどを占める状況がつけられている。またスペースXは次への発展として超大型のスターシップというロケットを開発中で、次の時代のマーケット支配をさらに進めようとしている。中国においても次世代の輸送システムの研究は軍事の目的と一体で活発に行われている模様である。

1-2. 民間主導の輸送の革新と国の支援

この中で日本の基幹ロケットは従来型技術の意味での洗練度は高いものの、市場の獲得という意味では、大きく遅れをとっており、世界の打ち上げ機数が年間百機を超えて急速に伸びる状況下で全体の数%以下を占めるに過ぎない。現行計画でのH3がフル稼働する定常運用状態でも、市場の1割にも遠く及ばないのが現実である。これらの状況の中で、2022年の文部科学省ロードマップ検討会では、日本の国としての基幹ロケットの発展と、民間主導による輸送の革新を2本柱として今後の宇宙輸送研究開発を行うこととし、民間事業として行う将来の打ち上げ市場の拡大と、革新技術による再使用高頻度運航や有人輸送を目指した研究開発と事業化を推進する方向が打ち出された。日本においても複数の輸送スタートアップ事業者によって、打ち上げ機会の低コスト化や多様化および将来の輸送の革新に向けた活動が行われている。2023年度の宇宙基本計画改定においても、これら民間主導の活動支援および有人輸送や革新的輸送システムの研究開発の推進について言及されたところである。これらと同期して、宇宙輸送にイノベーションをもたらす技術革新を促し、いわゆるスタートアップに対する民間ロケット

支援(SBIR)がスタートし、さらにその次の施策として宇宙戦略基金という形の、衛星と軌道上サービス、宇宙輸送および探査の分野で、民間主導の将来指向の活動への大型支援の予算化がなされ、実行の枠組みが作られようとしている。

日本の宇宙政策は2004年の宇宙基本法策定により、「研究開発から利用へ」という方向に政策をシフトさせ、衛星分野では準天頂衛星の開発・運用や、衛星データプラットフォーム(Tellus)の整備など利用を主眼とした政策が進展している。他方、宇宙輸送領域に関しては未だに研究開発中心の発想となっている。現在内閣府において検討中の、「宇宙技術戦略」についても、技術成熟度(TRL)を向上させることに主眼を置いており、打ち上げ機会のサービスの高度化、量産技術や運航整備技術の確立および射場など実行インフラ整備などといった産業化のために必要な投資の観点で欠落したままでは、宇宙輸送領域に関して「研究開発から利用へ」という流れを生み出すことはできないだろう。米中がより高度なレベルを目指し、米民間が市場を支配する中で、輸送分野において世界で勝つためには、これまでのJAXAとレガシースペース中心の研究開発ドライブの延長線上では立ち行かないことは明白だろう。今は世界で勝つための技術戦略を立てるのだ、という前提をまずは関係者が共有すべきである。

1-3. 宇宙輸送サービスの今後

宇宙空間への打ち上げ需要への対応という意味では、今後の5年程度の間の短期中期の期間に見込まれる多様な衛星打ち上げ能力の確保と、衛星打ち上げ市場での国際競争力を獲得することは重要な課題のひとつである。これと並行して、中長期の先端技術開発の目標として、高頻度往還飛行や地上2地点間高速輸送などの、将来の革新的輸送エコシステムの構築を目指した民間の活動を考えることが適当であろう。すなわち従来型の衛星打ち上げ需要のキャプチャーから始め、段階的な発展を加速し、今後の10年-20年の時間のうちに、質的量的に飛躍的な宇宙活動の拡大を図ることを大きな意味のゴール設定とし、これを実現する宇宙輸送体系の構築によって、世界の中での日本のプレゼンスを増大させる。その上で、新たな宇宙輸送エコシステムの構築によって、国際競争力の高い基幹産業へと日本の宇宙輸送産業を発展させる道筋と技術戦略を描くべきであろう。特に高頻度往還輸送や有人宇宙輸送の輸送体系の実現のためには、中長期的には法制度の整備と国際間での整合、宇宙港の整備など国家的視点で取り組むべきインフラ整備が必要となる。民間の能力構築支援と並行して国家主導でこうした取り組みを加速すべきである。

1-4. イノベーションの創出に向けて

1990年台のバブル経済の崩壊とともに、世界のシェアを支配した日本の電気産業や半導体産業、あるいは情報産業および自然エネルギー産業などの衰退や他国の後塵を拝する状況は、さまざまな意味で世の中の流れに立ち遅れ、先行者利益を活かせずにガラパゴス化し、一時的には機能していた他に先んじた行動が、その後の市場本位の戦略の不在や不作為のために、過日の世界支配や頂点の地位およびその可能性をわずか10年という時間で失ってきた歴史である。未来への投資の場面において、自ら

変わることを恐れ、現状維持バイアスという無意識のうちに変わらないことに賭けるマインドが、この衰退を招いたとされ、事態が進むごとに日本の切り札がないことに気づくことの繰り返しである。

米国においては、宇宙輸送のみならず民間による大胆かつアジャイル的な開発に、国がハイリスクハイリターンな支援をすることで、従来、国ではなし得なかったことが、民間の力によって実行されている。このある種のダイナミズムが、一方では社会の格差と分断を産むと同時に、他方ではイノベーションの源泉であるとも言われる。変わることへの躊躇から大胆な行動を取らずに衰退への道に進むことを避けるためには、非連続的イノベーションとでもいうべき大胆な目標設定の元に、日本の宇宙輸送を前に進め、海外先行者よりも前に出るほどの活動を展開するための、ビジョンと技術戦略を立てるべきであろう。

他方で、国内外の宇宙活動が拡大していくことは中長期的に確実ではあるものの、どういった方向にビジネスチャンスが伸びていくかについては多様な可能性と同時に不確実性がある。また、米国も含めて国主導からビジネス化への黎明期にあり、実施方法や実行ボディの新陳代謝も活発に起きている。こうした中では、旧来型の大規模国家プロジェクトの方法で概念検討から完成まで長期を要するウォーターフォール形で推進しているだけでは、社会の要請と大きく乖離して硬直化し、陳腐化し、国際競争力を失う事態を生じさせかねない。如何にアジャイルに進めるか、失敗を許容し、幅広い選択肢を日本として持つために、基礎技術に投資を行い複数かつ並走する活発な活動を支援しながら、短期的な景気のサイクルや状況変化に翻弄されないような、技術の多様性を育む視点もまた重要である。

2. 宇宙輸送の将来像と目標設定の具体化

1で述べた考えをもとに、輸送の次の目標の具体化のアイデアとして、上記文科省ロードマップ検討委員会答申や、改定宇宙基本計画にも沿う形で、地上と宇宙空間の間で高頻度往還による有人輸送のエコシステムの構築と、これによる巨大マーケットの創出、という具体的目標を掲げることは、有意義かつここで技術戦略を策定するための目標設定としてふさわしいであろう。

2-1. 目指す世界の描像

この目標設定については、有人輸送と宇宙空間への極めて低コストな輸送エコシステムの構築による宇宙活動のより飛躍的な拡大と、一般大衆化を体現する方法として、さまざまな輸送需要の飛躍的な拡大の議論やマーケットの描像と定量化がなされている。目指すエコシステム全体のゴールとして、極めて多数回の繰り返し運航によって輸送コストの2桁ダウンと航空機的旅客輸送の安全性が担保された世界を作り、宇宙空間を大規模に利用すること、現在の大陸間長距離輸送を飛躍的に短時間化する、という旅客の要望に応えること、および一般大衆の宇宙旅行機会の提供によって、年間100万人規模の輸送と10兆円オーダの事業規模という、現在の商業航空輸送の事業規模の5-10%の規模の輸送市場が生み出される、と定量化される。このような大規模なエコシステムが実現する世界は、現在のような、国によって選ばれた宇宙飛行士や、数10億円の搭乗費用を負担できる限られた人々ではなく、技術革新によって宇宙輸送や有人輸送の一般大衆化を目指すことによってもたらされるのである。（ここでのマーケット

の描像は SLA が2022年度に行なった、宇宙活動と輸送のマーケットリサーチの結果に基づいている(参考資料)

2-2. 目標達成の時期について

上記の状況をどの時期に達成することを目指すのかは自明ではないが、過去に世の中にイノベーションを起こし、新しい世界を切り拓いた様々な例を参照できるだろう。具体例として、安全保障の世界での通信技術改革の動機から生まれたインターネットが情報通信の世界を一変させたこと、衛星測位を用いた軍事目的の航法ネットワーク GPS が当初の予想を超えて地上の民生の世界での位置情報の極めて広範囲の利用形態を生み出した事例、第二次大戦で発達した長距離爆撃のための大量航空輸送の技術が海外旅行を一般大衆化させるに至った事例、イーロンマスク率いるスペース X がその設立から宇宙輸送の世界を席卷するに至った事例、などを典型的な例と観ることができるだろう。これらはいずれも20年以内という時間の内に、当初のスコープや目論見を遥かに超えた効果をイノベーションの創出を伴って実現したと言える。これらの例から、ここで議論する宇宙輸送の技術戦略を考えるためのゴールとして、2-1に述べた様な大きな目標設定は、実現すれば社会実装の場面において想定以上の応用や市場を生み出す期待も含め、20年という目標達成の時間設定は十分で有意かつ合理的と言えるであろう。

2-3. マーケットドライブの要請

このような宇宙輸送エコシステムを構築するには、ロケットなど現在の輸送機の性能や機能に関わる革新が必要であることは論を俟たない。他方で、未来のマーケットの求める姿は、宇宙輸送や有人輸送を、国による選抜を経て選ばれた宇宙飛行士や、巨額の搭乗券を買えるほど資金を用意できる数少ない人々の世界から、誰でも容易にアクセスでき、大量宇宙輸送が一般化された世界が、現在の商業航空輸送の世界のように、社会から受け入れられる世界である。例えば、現在の宇宙飛行士のような多くの訓練を必要とせず、搭乗前に安全講習または安全ビデオを見る程度のことで出発できること、スペースポートへのアクセスが都市圏から短時間でアクセスでき航空機への搭乗のようなスタイルとなること、事故などの場合に保険でカバーできるほどの安全性の向上とその定量化による社会の受容が得られること、さらにはエアライン的定時運航ができる整備性や全天候性、環境コンシャスネス対応、などといったことからである。すなわち、新たな宇宙輸送エコシステムに求められるのは、従来のロケットに対しては全く求められたことのないような、未来のマーケットからドライブされる新しい要請を満たし、民間事業として世の中に受け入れられる状況を作ることである。

2-4. 世界の一線に出るために行うべきこと

以上述べた様に、現在米民間などで行われている未来への投資が目指す世界よりも、さらに先を見据え、これらを超えた新しいマーケットの求める厳しい要求を具体化・定量化し、実現に向けて取り組むための技術戦略を立案し実行することを考える。これによって、初めて、世界の中での競争力を備え、先行する米民間などを超えて、世界の一線に立つ基幹産業として自立する道が開けるのであろう。これらの

ハードルはいずれもかなり高く、克服には多くの困難が伴うことは容易に想像されるが、困難であるが故に世界の一線に立てるのであると知るべきであろう。

これらの克服すべきハードルのあるものは、宇宙空間を用いた衛星による安全保障の求めや、いわゆるスタンドオフ防衛のための大気圏内高高度極超音速飛行における技術課題などと極めて多くの共通点を有する。次の3節で具体的な技術課題について議論した後に述べるが、典型的なデュアルユースの技術との一体的な推進を意識した技術戦略を考えることが有意義であろう。

一方で多くの技術ソリューションの選択や将来のマーケット創出は、国が主導するよりも民間の営利事業として、民間が自ら事業リスクを負って行うべき事柄に属するだろう。これらを民間の努力とアントレプレナーシップに裏打ちされた自在な事業活動に委ね、一方で国は大胆かつハイリスクハイリターンな事業計画や技術開発提案に支援をする、あるいは高度な研究を行い民間に知財を提供する、などという、宇宙活動の新しい国と民間の関係構築とその循環を作りたい。これによって、民間による段階的発展と飛行実証、衛星打ち上げアンカーテナンシーから段階的に有人輸送の輸送サービスを行う状況を経て最終ゴールへの到達、という図式を描く様な技術戦略を描きたい。

ここでは、文科省ロードマップ検討委答申および改定宇宙基本計画で述べられた、「民間主導による輸送の革新」に該当する部分について、2040年の未来において実行しうる目標設定を考える。一方で別途議論されている宇宙戦略基金による民間や大学支援の枠組みは今後の10年間の活動に対して行われるものである。ここで述べた2040年の巨大マーケット創出と日本の基幹産業化に向けては、この基金による10年間の支援の成果を得て、さらにその次の10年に向けた、先行者を凌ぐほどのより競争力の高い状況を作るための活動の基盤とする、と位置づけるのが良いだろう。他方で、基幹ロケットの今後に向けた技術戦略については、別途定められるものとした。ただしここで述べた輸送の未来に向けた技術戦略の考え方や、以下に述べる技術課題の多くは、基幹ロケットの将来に向けても共通かつ不可分な要素が多いこと、民間主導の輸送の革新と基幹ロケットの発展の双方が独立なものでなく相互に連携し合うものであることも強く意識すべきだろう。

3. 取り組むべき技術課題の抽出と技術戦略

本節では、第2節までに述べた背景と現状認識および目標設定の考え方に立脚し、技術戦略として立案しておくべき技術課題の抽出を行う。既に述べたように、現在までに確立された宇宙輸送技術との比較で言うと、大別して機能や性能の向上に関する技術課題と、社会の受容する安全で経済性に優れた運航に関わる技術に大別されるであろう。もちろん両者の間には強い相互関係がある。前者は、推進システムの性能や機能の向上に関する課題および軽量化や耐久性の向上に関する課題、および、往復飛行の帰還飛行部分の重要な課題である大気圏再突入飛行や帰還着陸に係る技術課題である。後者は旅客輸送の安全と、商業航空輸送の世界のような運航の方法に如何に近づけるかに関する課題群であ

る。以下に抽出した課題について概説し、技術戦略の具体案とする。(これらの課題抽出は SLA が2022年度に行った将来に向けた技術課題検討業務委託の結果(PKG2)に基づいている)

3-1. 推進系の高度化とシステム構築の技術戦略

現在我が国の宇宙輸送システムの推進機関では、液体水素液体酸素ロケットと、固体ロケットの技術の洗練とともに実用化され、世界レベルの性能が国産技術で確立されている状況にあると言える。またメタン推進系や常温型燃料の補助推進系なども一定レベルの技術を保有しているが、米民間など世界の先端プレイヤーが、その性能や高度化の意味で前に進むスピードは極めて早いと知るべきである。一方で従来から進化が期待されているエアブリーザなどの革新エンジンは、期待も大きいですが、その技術的困難さから、世界的に進化が停滞している部分もある。

ロケットエンジンの世界では、従来技術の範囲で液水ロケットの高い性能を発揮する状況は国産化されていると言えるが、その基盤の延長として、究極的には運用性に優れた単段式高頻度往還型再使用運用ができるようなシステムへの適用を目指すべきだろう。この観点では、より高い圧力レベルでの燃焼による燃焼機の小型コンパクト化と、これをもたらすフルフロー二段燃焼サイクル化および酸素リッチプリバーナなどの導入による高性能化と高推力重量比化されたエンジンの実現、また低密度推進剤である水素の代わりに、大推力の必要な打ち上げ時にメタンなど高密度炭化水素推進剤を用い、水素との併用によるシステム全体の性能向上を目指すトリプロペラント推進化、および排気ノズルの工夫によって排出ガス膨張の圧力損失を低減して推進性能向上を図る高度補償ノズルの研究開発など、多くの発展の可能性が指摘されている。

また、いわゆる空気吸い込み式エンジンの分野では、スクラムジェットやラムジェット、ターボ系圧縮機による空気吸い込み式推進の技術は、航空機的運航のできる宇宙輸送機の実現可能性を現実のものとする期待から、多くの基礎研究がなされている。ただし現在までに宇宙輸送の実用へと成熟を見た例は世界的に存在しない。また空気吸いこみ推進だけで地球周回軌道まで加速することは不可能で、ロケットベースの複合空気吸い込みコンバインドサイクルエンジンシステム(RBCC)、超音速流との燃料の混合と燃焼をベースとしたスクラムジェット推進技術、インテーク(空気吸い込み)の技術、などによって単段式または二段式での宇宙往還機を目指すコンセプトがある。またロケットベースの推進系に空気液化などの方法でエアアデクションすることで、推進剤である液体酸素の搭載量を減らして機体をコンパクト化することも空気利用の一つの形態である、この空気吸い込み式推進の分野での研究は地上の燃焼要素試験やエンジン燃焼試験などに加えて、空気を吸い込むという意味で実飛行環境での性能実証が必須であるところ、米国においてもいまだにその試みが続けられている状況であり、先端的な研究開発と飛行実証によって性能の検証を行う価値のある分野であろう。

またこれらのうちのどの推進システムを採用するかによって、機体システムの形態を、単段式とするか二段式とするか、水平離着陸か垂直離着陸のどちらを選ぶか、の選択は次の3-2で述べる軽量化の程度との関連で決まることであり、これらの推進と軽量化の技術成熟の程度によって機体のシステム構成や運用方法は大きく変わってくる。このシステム形式の選択は、2-3で述べた様に、将来の大きな輸送マ

マーケットの求める要請を如何に満たせるかどうか、に照らして決めるべきであろう。さらには次節以下に述べる推進系以外の、軽量化や帰還飛行の方法および運航性や有人安全性の確保などの観点も踏まえ、極めて広範囲なシステム技術の統合の上に、マーケットドライブでシステム形態を決めていくストーリーの構築も、また今後取り組むべき技術戦略の重要な部分を占める。また、再使用往還型輸送システムに採用する推進系に必要な共通技術である、寿命管理設計手法、ヘルスマonitoring、高度な点検整備手法などについては、3-4. 運航性の観点で述べる。

3-2. 軽量構造材料・製造法技術への取り組み

宇宙輸送機の打ち上げ性能は上記推進系の性能と機体の軽量化がもうひとつの鍵である、同じ打ち上げ能力をいかにコンパクトな機体構成で実現できるかを追求することで、地上系も含めた運航性に優れた機体システムを現実のものとし、結果として競争力と事業成立性の高い輸送体系を構成することができるのである。従って、この技術戦略で議論するような2040年の運航型システムの目標を高いレベルに置くことが、ゴール達成時点およびそこに至る過程での国際競争力の源泉となるであろう。

その意味で機体構造の軽量化は決定的に重要なファクターのひとつであり、可能な限り、機体構造を複合材化することが一つの目標となる、このためには、複合材一体整形技術、複合材接着接合整形技術、再突入時の耐熱の特性も考慮した機体主構造の高温構造化(ホットストラクチャ技術)、メタン水素など極低温燃料と液体酸素タンクの複合材化と対酸素耐性の付与、多数回使用に耐える極低温タンク断熱技術(断熱方式および断熱材)の革新、などが必須の要件であるとされる。再突入飛行の耐熱システムや材料については次節3-3で述べる。

また最近の3D プリンティングなどアディティブマニュファクチャリング技術の積極採用による、理想的構造様式や構造形態の実現による軽量化と、これら製造方法の革新による、高温部分を含めた一体化製造や接合部の減少による信頼度の向上、およびその結果としての長寿命化も重要な課題である。またこの製造技術の革新は、試作開発時点での短時間でのトライアルアンドエラーを可能とする開発サイクルを可能とし、試作試験のターンアラウンド性の向上による開発時間の短縮など、アジャイル的な開発などの新しい開発手法を実践する意味でも有意で、従来型の開発環境を変えていく可能性を意識しておくべきだろう。

機体全体のうち重量の多くを占めるエンジンの軽量コンパクト化すなわち高推力重量比化が決定的に重要で、このためのエンジンの高圧燃焼化やサイクルの選定が鍵となることは既に述べた。この文脈で、エンジンに採用する材料も、耐高温高強度の複合材やCMC(セラミックス基複合材料)、酸素雰囲気耐性など革新材料の獲得と3DP など新しい製造方法の採用による寄与が大きい。

素材および材料の研究開発能力は航空宇宙製造業界の川上産業として日本の優位性を発揮できる分野であり航空機での実績も多い。一般に新材料の開発やその性能検証は長いリードタイムを要することから、この日本の高い素材ポテンシャルを活かして、中長期の研究開発戦略と課題設定および事業化

計画を立てるべきだろう。同時にこれらの風上の素材や材料技術を活かして、川下のシステム技術や製造販売及び運航のエコシステムを支配することで基幹産業化へと導く戦略を立てるのである。

3-3. 多数回再突入帰還飛行の技術課題

宇宙空間を利用した大陸間高速二地点飛行や地球周回軌道からの大気圏への再突入から減速および目的地への帰還およびアプローチと着陸に関わる課題は、スペースシャトルでその実用化の先鞭が切られたが、同時に多くの課題をあぶり出し、さまざまな次に向けた課題を顕在化させることとなった。我が国においては、1990年台にはいわゆる将来型輸送機である再使用帰還機を目指した活動でシステム開発や耐熱システム・材料の研究が進められたが、その後の停滞のために多くの技術は引き継がれているとは言い難い状況である。その後は軌道からの弾道再突入や揚力再突入の実験的な実証が行われている状態である。またスペース X ではファルコン9が第一段ステージの帰還垂直着陸と再使用を実用化させたが、軌道速度からの帰還は次のスターシップで取り組んでいる途上で、周回軌道との高頻度有人往還飛行の実現には、帰還飛行の分野で未だ多くの課題がある、という状況である。

揚力飛行型(有翼型や揚力型カプセルなど)の再突入飛行においては、空気力による減速 G と空力加熱率の両者の低減と機体表面の耐熱システム(TPS)の性能の関係において、飛行方法と機体構成を決めていく再突入飛行の最適化技術を洗練させることが重要な課題の一つである。その際、耐熱システムの軽量化、長寿命化、繰り返し使用の耐環境性の向上、点検交換の容易さおよび全天候性などといった課題の克服が航空機的高頻度運航の観点から要求されることとなるだろう。再使用型の耐熱材料(TPS)については、スペースシャトルや X37などで開発された現状からの洗練を図り、機体各部の機体先端や翼前縁の高温部から、機体底面、側面から背面へと、各種の耐熱材料、C/C、SiC、セラミックタイル、可撓断熱材などの各種 TPS 材料や形式、長寿命化や軽量化および対飛行環境耐性などの洗練を図るための研究開発を推進すべきだろう。これらの再突入飛行関連技術はその一部にいわゆる極超音速飛行に関わる技術課題と重なっている。後で述べる様にスタンドオフ防衛の文脈で行われる極超音速飛行関連技術との接点は極めて多いことをリマークしておく。

帰還飛行の最終段階では高空から着陸場へのアプローチから着陸へという飛行を行うのだが、その際に、2で議論した様な高頻度運航や定時運航などと言う条件を課すことが求められ、強風・降雨など荒天時や故障時に備え、この種の宇宙輸送機に特有な、着陸復行の困難な滑空型飛翔体や垂直着陸機のそれぞれにおいて故障許容や有人安全の確保という意味でのシステム構築技術の成熟と安全の基準の確立が求められるだろう。また着陸場への誘導および着陸飛行などについて、シャトルで開発された水平着陸方式および、その後のスペース X が実用化したロケットエンジンによる垂直帰還方式など複数の選択肢が現実に採用可能となっているところ、どのようなシステム構成で帰還飛行着陸飛行を行うかを決めていくための総合的なシステムのトレードオフと評価が必要である。その際、航空機的運航を目指したクイックターンアラウンド性や有人帰還着陸飛行の安全性から、乗客の利便性などといった、将来のスペースポート運用の事業性や輸送サービスのエコシステム全体の中での、帰還着陸から短時間ターンアラウンドを実現する、次の飛行への点検整備や飛行準備の容易さ、および定時運航性などという観点が重要な要件となるであろう。

3-4. 再使用高頻度運航のためのシステム技術・運用技術

再使用繰り返し運航を実現したスペースシャトルでは、機体喪失事故などを経て5機製造された各機体は概ね平均して30回ほどの飛行を行い、総飛行回数は135回である。そのターンアラウンド時間は時期にもよるが、平均してみると100日のオーダーであった。スペースXのファルコン9第一段の再使用回数は10回(最近では10回以上が定常化している)で、約1ヶ月程度のインターバルで行われている。シャトルは有人かつ地球周回軌道からの帰還であるのに対し、後者は無人かつ一段ロケットで高度や速度の帰還条件が大きく異なるから両者は同列の比較はできない。はじめに述べた様にここで議論する技術戦略で目指すところは、より大量高頻度の航空機的運航で、上記ふたつの例に比べて遥かに多数回の飛行と短期間で次の飛行を繰り返して行うシステムを構築することである。このことが、ここで目指す飛躍的な輸送の低コスト化と巨大マーケット創出のための条件であるとも言える。

このために必要なことは、再使用運用による飛躍的な低コスト化に資する多数回・短時間での繰り返し運用を可能とするシステム構築の技術であり、多様な候補システム形態・推進系・帰還着陸飛行方式がある中で、どの方法が実現性とマーケット要請への対応の観点で有利であり、かつ実行可能であるかのシステム評価のためのモデルや解析の技術が重要であろう。

また、このような運行を行うためには、これまでに述べた輸送機の打ち上げや軌道上運用および帰還運用に関わる課題や運航性のみならず、スペースポート立地と地上運用の安全基準(特に極低温燃料／酸化剤の充填と有人旅客施設の共存)などの研究、高頻度大量輸送の環境適合性の研究などが重要な課題である。高頻度運航であるということは、タイムテーブルに従って運行されるような、いわゆるルーチンアクセス、あるいは定時運行性の追求、などと言った事柄を含んだ技術課題への取り組みが必要となる。そのためには、大量高頻度繰り返し運航における健全性の確認機能を備えた機体システム、とくに推進系と再突入時の熱負荷に対する定時運航性と安全関連の共通技術(寿命管理設計手法、高度なヘルスマニタリング、点検整備手法)の研究、および地上系システム(高頻度運航や定時運航のための点検整備計画、予兆整備のアーキテクチャ、点検整備方法の確立に備えた研究、運行のための安全基準、立地および地上の交通の進化との連携などの研究)などが重要な課題である。

現在の民間商業航空の分野で確立された、高頻度大量運航のもとでの100万回に1回以下に相当する事故率の世界や、定時運航の世界を如何に実現するか、についての多くのシステム技術や運航と安全の基準の確立が強く求められるところである。

3-5. 有人輸送の技術課題と制度整備・安全基準

有人宇宙飛行はこれまで60年以上の歴史を重ねてきたが、国によって選ばれ訓練を受けた宇宙飛行士によって行われてきた。有人輸送機を開発し運用しているのは露米中の3国だけである。最近では民間の宇宙船に有償で民間人が乗るといった状況が作られているが、数十億円という費用を大幅に下げな

ければ、有人宇宙飛行の一般大衆化は困難である。ここでの技術戦略で目標とする宇宙空間を利用した輸送の大きなマーケットは、すなわち宇宙輸送の飛躍的低コスト化であり、一般大衆化である。

現在のロケットのミッション成功率または信頼度は90何%などという数字で表現される。99%はロケットの世界では極めて成績の良い部類に入るのだが、これは100回に1回は機体を失うということであって、商業航空輸送の世界が確立した100万デパーチャーに1回より有意に低い機体喪失確率の世界とは桁違いで、社会から受け入れられるには程遠い。宇宙輸送の有人化は単に人を載せる機能があるだけでは全く不十分で、商業航空輸送の世界が確立したような、社会が許容する安全の確保が不可欠であることは言うまでもない。このことは現在の多くのロケットのような使い捨て型ではなく、再使用すなわち帰還機能を持つことで、航空機と同様の、故障時にも安全に帰還できるシステムとする、いわゆる故障許容型のシステムとすることがその要諦であり、そのために必要なアーキテクチャを構築することにほかならない。

従って有人安全にかかる設計基準や、安全の基準などの調査およびこれらの制度面の整備計画、構造設計基準、故障許容の考え方、火災時や事故時の乗客の安全確保に関する有人キャビン設計、機体および地上系システムの運用と安全基準、加えてこれらの安全確保策と同時に宇宙輸送機としての性能の要件を満たすこととの両立を如何に図るか、についての合意形成と制度化と言う課題である。この意味でも機体システムの軽量化や高性能化は、これらの安全のための装備に重量リソースをより多く振り向けることができる、と言う観点で、リスクとベネフィットのトレードオフと言う意味で重要な要件なのである。

これらの有人運航の安全に対する制度の議論は、将来的には、民間航空機の世界の安全を規定する耐空性審査要領を宇宙輸送機についても確立させることにつながっていくべきなのだろう。故障が起きても、それらが分離されて他のサブシステムへ影響や損傷が広がらない、他のシステムで代替され機能を失わず安全に帰還できる、などと言った、異常時の対応や緊急着陸や脱出などに関わる、安全の基準と技術的成立性に関する技術研究、故障許容設計(フェイルセーフ設計)による航空機並み安全性の担保、搭乗者用キャビンの安全基準、耐火性、緊急脱出の基準策定と技術的成立性などのへの取り組みが極めて重要な技術課題である。

スペースシャトルやクルードラゴン、などの乗員である極めて限られた人たちが、インフォームドコンセントというある種のリスク認識と損害賠償放棄の合意で飛行しているのが今の状況である。航空機な安全が担保される世界とは、輸送の目的が達成されない場合や、事故あるいは人命の喪失の際には、保険で補償されるような世界のことである。この転換のために、社会が許容するほどに低減化されたリスクの明示とその定量化、これらに対して世の中が認めるほどの実績の蓄積、および、国際間では、実証機運用や実用輸送サービスなどの実践を通じて、これらの課題に先行して取り組むことが求められる。その実行実態と実績を他に先んじて作っていくことで、技術課題への取り組みのアドバンテージの意味のみならず、国際土俵での安全基準やルールメイキングのリーダーシップを執ることに通じるものである、ということも自覚しておくべきだろう。

4. 技術戦略を実行するための方法とインプレメンテーション

上の3節では、2節までに述べた大きな目標設定のために取り組むべき技術課題について述べた。ここでは3節で抽出した技術課題に取り組み、戦略的に実行していく上で、その実施方法とインプレメンテーションにあたって、課題として認識しておくべき事柄について記しておく。中長期の段階的発展の各過程で発展段階に応じた輸送サービスが機能し、いわゆるアンカーテナンシーの方法で実行を支えていくこと、安全保障の世界との接点の持ち方、民間主導でさまざまな活動を行う上で各実行者に共通なインフラや制度整備の課題への取り組み、および高度な研究課題の追求のために必要なアカデミアとの連携と人材育成、などの観点である。これらはここで述べる技術戦略を今後実行に移すための前提条件として共有しておくべき重要なことからである。

4-1. 最終ゴールへの到達と段階的発展およびアンカーテナンシーの用意

3節までに述べた、技術戦略の考え方と各分野における技術課題の抽出は、最初に述べた様に2040年代の高頻度大量および有人旅客輸送というゴール設定の議論とそれに必要でかつ獲得しておくべき技術課題として述べた。現在からこの状態への遷移は、一足飛びに行けるものでは決してなく、途中の複数の段階を経て到達すべきものであろう。その途中段階の一つ一つのステップでは、そのステップごとに、その能力に応じた打ち上げサービスを行う状況を、軌道上への衛星投入から始まって、安全な帰還能力の獲得から有人飛行サービスへ、という風に段階的に事業化を進めて行く形で、研究開発規模と事業規模を段階的に拡大して行くのであろう。

その際考えるべきは、米民間、中国など先行して行われる活動や軍事の目的や国家の意思で行われる活動などとの相対化を図り、差別化をすることで、大きなマーケットの創出とそのキャプチャーという観点で、それらを凌駕し、世界のフロントに立つ、という意志を持って段階的発展の計画やインプレメンテーションを考えるのであろう。

その過程で、2040年までを何段階かに区切り、例えば最初の5年は、小型の衛星を高頻度に打ち上げる世界を構築することと、国あるいは衛星事業者の打ち上げ需要を獲得して行くという形で進化し、アンカーテナンシー的な打ち上げ需要の提供と確保、および輸送サービスの進化が同期して起きる様なシンクロナイゼーションができれば理想的であろう。現時点では、SBIR フェイズ3「民間ロケットの開発・実証」に基づき技術開発補助の採択が行われ、この実証後に政府調達の特例を検討することとなっている。まずこれを早期に具体化することにより「まず官需からビジネスが成立する」という期待を高め、民間投資を呼び込む機会として機能させることが重要だろう。

その次のステップとしては、繰り返し運行が定常化して、安全性や信頼性が確保されることを通じて、世の中が受け入れる形で有人輸送へのトランジションを起こし、これを用いて旅客輸送サービスができる環境を醸成して行く、などという形で、提供しうる輸送サービスと輸送対象が、衛星打ち上げから物資や有人輸送へと進化して行く、という様な図式が描くことができれば理想的であろう。このような高頻度運航や

有人輸送については将来大きなマーケットが期待されるものの、初期需要を如何に確保するかが、事態を前に進めるための鍵となる。先行する米国においても、国際宇宙ステーションへの物資や有人輸送の市場を民間解放したことがきっかけとなり、商用宇宙旅行市場が立ち上がっている。我が国においてもまず政府が、有人宇宙輸送ミッションを企画し、民間企業から調達する支援策が必要なのである。

これらの実行に向けたインプレメンテーションや輸送能力の確保においては、ゴールに至る道のりや、複数の技術ソリューションには、多くの選択肢があり、その選択は各民間実行ボディの自由な発想に基づく事業戦略の自立性に委ねることを基本とする。その上で国の支援はそれらの民間主導の活動が活性化するように、上記のアンカーテナンシーなど官需による加速、というステージを各段階で経る形で、民間需要を活性化させる仕組みを整えて行くのであろう。一方で国の支援を得る民間の事業者は、将来に向けたイノベーションを起こすための実行ボディとして機能することが求められる。また日本の輸送能力の高度化を図り、国支援を経て宇宙活動の活性化と大きなマーケットを創出し、然るべき時間の後には先行者の前に出るほどのマインドとアントレプレナーシップを持って、社会課題の解決や社会的利益の創出を牽引して行く責務を負うほどの自覚が求められるのであろう。

4-2. 安全保障の世界における打ち上げ需要や研究開発との接点

安全保障の世界においては、今後の10年20年の間の研究開発の方向性として「多次元統合防衛力とその先へ」として研究開発ビジョンを策定している。その中で、宇宙空間を用いた情報収集と電磁波領域における優越の確保や広域常続型警戒監視アセットなど、小型から高機能までの衛星による監視や情報収集、および地上支援から防護のために、極めて多数かつ多様な衛星が必要となるだろう。これらの衛星打ち上げに向けた輸送サービスの提供という文脈で、宇宙輸送体系の整備との接点とすべきである。ここで議論した、将来への宇宙輸送の革新の段階的発展の短期中期の発展の過程で、これらの輸送機研究開発の成果を用いて、多数回低コスト高頻度打ち上げサービスの提供によってこれら衛星打ち上げ需要を対象とすることで、アンカーテナンシーの打ち上げ機会の提供を期待すべきだろう。

一方で、ここでの主題である宇宙輸送用の将来向け新規技術と安全保障目的の飛翔体関連技術との関係では、いわゆるスタンドオフ防衛能力への取り組みの中で、極超音速飛行技術の洗練すなわち、スクラムジェットなどの極超音速推進、および高高度極超音速飛行体や滑空飛行体など、大気圏内高速飛行や推進の技術研究開発と装備化への取り組みが図られる。この文脈で今後の2040年までの開発と装備配備の計画との接点を考えるのであろう。これらは、本宇宙輸送技術戦略の中の、3-1. スクラムジェット推進や3-2. 構造材料・耐熱材料構造、3-3. 再突入飛行、などの中で大気圏への再突入飛行や極超音速推進と機体構造や飛行誘導制御技術などの分野で取り組むべき、と述べた技術課題と極めて多くの接点を持つ。あるいは双方で獲得された技術がデュアルユースとして互いに応用しうる分野であると言える。

これらの連携や相互乗り入れを実行することで、安全保障と宇宙産業の発展の好循環の実現につながっていくのであろう。しかしながら、ここで述べる民間主導の輸送の革新に向けた活動と安全保障目的の研究の連携の意味で、スタートアップや大学研究者を中心とするアカデミアとの間には、未だに双方でこ

れらを活性化するには課題がある。民間や産業界を通じてアカデミアとの連携をする様な仕組みの構築が必要である。また相互の実行インフラや試験設備利用の相互乗り入れについても、活性化の余地は多く残されているだろう。これらの状況の改善にも一段進んだ状況を作りたい。

4-3. 試験設備や射場などの実行インフラの整備と制度面の整備

宇宙輸送に係る飛翔体の研究開発には、推進系試験設備や風洞試験設備および耐熱加熱試験設備など、一般に極めて高度かつ大規模な地上試験設備が必要となる。また宇宙空間への打ち上げや帰還のための研究開発を行う実験場から輸送サービスの運航のための地上設備、さらには将来的にはスペースポートなどへの発展も考えた離発着場など、大規模な地上設備や施設、すなわち実行のためのインフラの整備が必須の要件となる。一方で、これらの実行インフラを、個別の民間事業者がそれぞれに用意して事に当たるのでは、非効率であることは言うまでもないし、その負担を個別の民間事業者に担わせることも適切でないだろう。来るべき民間主導の宇宙輸送の発展を先取りして、熱意のある自治体や地域の実行ボディなど、将来のスペースポートビジネスを目指す人たち、に対して国が支援する形で、複数の地域で並行して実行インフラ整備がされることが望ましい。

また、現在のロケット打ち上げを国が承認する、という世界を超えて、再使用や帰還飛行の許認可の仕組みと地上の安全確保の基準、および将来の有人飛行の搭乗者あるいは乗客に対する安全の基準や許認可の仕組みなどは、国が整備をすることが求められる大きな課題である。これらは、上記インフラと同様、民間事業者が個別に対応をするのではなく、高頻度往還運航や有人輸送を目指し実行を予定する民間事業者に共通の課題として議論され整備されるべきである。この動きを仕掛ける民間実行ボディが実行実態を先んじて作るムーブメントがまず必要であることと併せて、国による制度整備のイニシアティブが期待されるであろう。

これら民間実行者に共通の事柄について、今後の5年間程度を第一段階の実行として、上記の実行インフラの意味では、打ち上げ射場のみならず帰還場などの整備に向けた国支援の具体化を進め、また並行して中長期のインフラ整備に向けた検討も始めておくべきだろう。同時に往還飛行や帰還場の安全、ターンアラウンド運航のフライトレディネスと繰り返し運航のための許認可スキームと制度整備などを行うべきであろう。またその次の5年間のステップの前提として、これらの繰り返し運航に加え、の3-4、5で述べた様な有人輸送の安全面の許認可や基準づくりに向けて、技術検討や関係府省による準備活動も始めておくべきだろう。国産の小型ジェット旅客機開発プロジェクトが国際的な許認可取得等の問題により中止したことを思えば、早期段階から米国等の海外と連携する民間活動を積極的に支援することも必要である。

4-4. アカデミアとの連携と人材の育成

高度な研究課題の追求によって初めて高いレベルのシステム構築や新たな推進システム、超軽量で運航性に優れた輸送機開発と輸送体系からエコシステムの構築ができ、それなくしては先行する米民間や中国などの先行者の前に出ることは不可能であると知るべきである。このためには高度な研究の能力を

有する大学などの研究機関との連携や協力および、スタートアップも含めた民間主導の活動への積極参加と研究資金の流れを作ることが極めて重要である。単なる従来型の競争的外部研究資金獲得のようなスキームを超えて、基金運営と民間主導の実行ボディおよびアカデミアとの間で、目標を共有し、成果の創出に責任を持ち、なおかつより高いレベルの研究にチャレンジするインセンティブが働く様な、相互間のマッチングを図りブリッジをする仕組みを構築すべきであろう。

一方で、今回の宇宙戦略基金の様な、従来の日本の研究開発規模を拡大する様な大規模の研究開発資金の支援は、この実行資金増加に見合うだけの仕事の受け皿となれる人員の増加がなければ実行できないことは言うまでもない。5年10年20年のスコープで、基金の運営をより拡大させ、次の段階での市場からの資金調達により実行規模を拡大させていくことと、これに合わせて実行人材を増やしていくための人材育成は、不可分の要件であると知るべきである。この意味でも、大学など研究機関に、資金の投入を行うことで、学生の教育や実践機会が予見性を持って提供されることを通じて、宇宙輸送の技術者のみならず、事業創出の世界に求められる、多様でかつレベルの高い人材のマスを増やしていく、と言うポジティブな循環が機能する様にしたい。

5. 民間主導のイノベーションを支える体制について

以上、今後の日本の宇宙開発の技術戦略とその実行について、民間主導の宇宙輸送革新の今後に向けた基本的な考えと目標設定、およびそれらに基づく具体的な技術課題を提示し、実行上の課題などについて述べた。この民間主導の輸送の革新については、従来の国主導のロケット開発プログラムをいわゆるレガシースペースが支えるという既存の図式からの脱却が必要だろう。ここではニュースペースやスタートアップのアントレプレナーシップに溢れたイノベーションを目指すマインドがその実行の鍵であり、この期待の元に SBIR や戦略基金などの大型支援が行われる状況が作られているところである。

そのためには、スタートアップも含めた民間が自在に活躍できる環境を作り、従来の国主導の論理ではなく、これら民間の意向の反映と、新しい考え方で推進する様な、日本としての実行エコシステムが必要なのだろう。今般の JAXA 法の改正によって、FA 機能を含め JAXA の役割を充実させる仕組みづくりが進行中であるが、民間主導による輸送の革新を実行するには、ニュースペースを含めた産業界の意向の反映や、将来の基幹産業のあり方などのビジョンの構築、および安全保障の動機で行われる活動との連携など、JAXA の外の世界からの要請を反映したビジョン構築、などやるべきことは多岐に渡る。これらを推進するための上位の考え方について、調査や提言および支援の実施を行う機能が必要であろう。米国においては、宇宙輸送の分野のみならず、国の宇宙計画を実行する NASA 自身の外に、民間主導の活動を支えるための、さまざまな国支援の仕組みや、民間に軸足を置いた組織およびシンクタンクなどの機関が多数あって、産業界の意向の反映やイノベーションの創出に向けたビジョン構築から、コンサルティック機能や実行支援までの多様な役割を機能させており、これらの例が参考になるだろう。

他方で、これに応える民間主導の実行者に対しては、国からの支援を得ることのみならず、技術的に高いレベルを目指し、自らの資金調達によってイノベーションを起こし、世界の前に出るほどのマインドを持

って、日本の基幹産業となるほどの大きな文脈で、宇宙輸送の革新を前に進めることが期待されている。その結果としての社会課題の解決や社会的利益の創出を牽引する民間事業者にこそ支援がなされるのであると知るべきであろう。

この技術戦略は今後の10年-20年の宇宙活動の活性化と、日本の宇宙活動が世界の一線に立ち続けるための戦略である。上に述べた様なこの戦略の実行を保証するための、米国の例に見られる様な多様な支援の体制も、一過性のものではなく、この期間に対応して中長期のコミットメントができる継続的な存在が必要であり、民間主導の宇宙輸送の革新とそれに必要なさまざまな施策を実行するための鍵となるだろう。実行者に求める資質についても書いた。再びだが、今やるべきは、旧来の方法から脱し、世界で勝つための技術戦略を立て、新しい方法で実行することだ、という前提を確認して前に進めたい。

以上

参考資料

「革新的宇宙輸送システム実現に向けたロードマップ検討会取りまとめ」文部科学省，令和4年7月7日

https://www.mext.go.jp/content/220707-mxt_uchukai01-000023863_1.pdf

改定宇宙基本計画，2023年6月 https://www8.cao.go.jp/space/plan/plan2/kaitei_fy05/honbun_fy05.pdf

宇宙政策をめぐる最近の動向と宇宙技術戦略の進め方 2023年9月 内閣府宇宙開発戦略推進事務局

https://www8.cao.go.jp/space/comittee/01-kihon/kihon-dai34/siryou2_1.pdf

宇宙技術戦略の考え方，内閣府基本政策部会

<https://www8.cao.go.jp/space/comittee/27-anpo/anpo-dai58/siryou3.pdf>

宇宙輸送マーケット調査業務委託結果，宇宙旅客輸送推進協議会：SLA ビジネス TF (PKG1)

<https://spaceliner.jp/actions/422/>

「2040年の社会ニーズに対応する有人宇宙輸送サービス構想と必要技術」検討要請へのインプット

https://spaceliner.jp/wp-content/uploads/2022/07/PKG2_インプット.pdf

有人輸送および高頻度大量運航を行う宇宙輸送体系の構築に必要な技術課題の抽出，宇宙旅客輸送推進協議会：SLA 技術検討 TF (PKG2：一部非公開)

https://spaceliner.jp/wp-content/uploads/2022/07/PKG-2_アウトプット_2.pdf