

## 宇宙輸送システム長期ビジョン（案）の検討結果について

平成 26 年 4 月 3 日

### 1. 宇宙輸送システム長期ビジョン（案）について

宇宙基本計画に基づき、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についての総合的検討を行うため、平成 25 年 8 月より宇宙輸送システム長期ビジョンワーキンググループの会合を開催した。

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主な宇宙輸送システムであると想定される。ワーキンググループでは、2040 年以降において実現が期待される宇宙輸送システムを検討の対象とし、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。

ワーキンググループにおいて検討した結果を宇宙輸送システム部会において審議し、今般「宇宙輸送システム長期ビジョン（案）」として取りまとめたので、宇宙政策委員会に報告する。

### 2. 宇宙輸送システム部会の審議状況

第 7 回	平成 25 年 7 月 25 日
第 8 回	平成 25 年 9 月 2 日
第 11 回	平成 25 年 12 月 20 日
第 12 回	平成 26 年 2 月 17 日
第 14 回	平成 26 年 3 月 31 日

### 3. ワーキンググループの検討状況

#### (1) 宇宙輸送システム長期ビジョンワーキンググループ構成員

- (主査) 白坂 成功 慶應義塾大学大学院システムデザイン・マネジメント  
研究科准教授
- 渥美 正博 三菱重工業株式会社宇宙事業部宇宙システム技術部  
部長
- 稲谷 芳文 (独) 宇宙航空研究開発機構宇宙科学研究所 副所長
- 井元 隆行 (独) 宇宙航空研究開発機構宇宙輸送ミッション本部  
イプシロンロケットプロジェクトチームサブマネージャ
- 坂田 公夫 航空総合技術政策フォーラム 代表幹事、  
(独) 宇宙航空研究開発機構 元理事
- 牧野 隆 株式会社 IHI 航空宇宙事業本部 宇宙開発事業推進部長

#### (2) ワーキンググループの開催状況等

- 第1回 平成25年 8月23日
- 第2回 平成25年10月 2日
- 第3回 平成25年10月17日
- 第4回 平成25年10月31日
- 第5回 平成25年11月 4日
- 第6回 平成25年11月14日
- 第7回 平成25年12月 8日
- 第8回 平成25年12月23日
- 第9回 平成26年 1月 8日
- 第10回 平成26年 1月16日
- 第11回 平成26年 2月 3日
- 意見募集 平成26年 2月21日 ~ 3月10日
- 宇宙政策セミナー宇宙輸送システム長期ビジョンワークショップ  
平成26年 3月 4日
- 第12回 平成26年 3月13日

## 宇宙輸送システム長期ビジョン(案)の概要

平成 26 年 4 月 3 日

### 第1章 基本的な考え方

#### 1-1. 長期ビジョンの目的

将来、出現が想定される新たな宇宙利用には、一般人による滞在型の宇宙旅行、宇宙太陽光発電、資源採掘等の形態が考えられる。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になると考えられる。

本長期ビジョンでは、新たな宇宙利用に対応した宇宙輸送を実現することを前提とした。このような宇宙輸送は、特別な輸送手段ではなく、鉄道や航空機のようにインフラとして当たり前のものとして存在し、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が、我が国の宇宙活動における自律性確保につながる。

宇宙輸送システムをインフラとして利用するためには、現在の高コストで低頻度な輸送から、通常の輸送手段のような低コストで高頻度な輸送への転換が必要である。このような宇宙輸送を実現可能とするのは、繰り返し運用の可能な再使用型宇宙輸送システムであると考えられるが、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つた、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。したがって、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。

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

##### ①長期的な自律性の確保

新たな宇宙利用に対応した将来宇宙輸送システムの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ることが可能となる。

## ②新た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、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、先端的な技術を獲得することができる。なお、これらの先端技術は、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

将来宇宙輸送システムが実現した場合、現在のように訓練を積んだ人間だけでなく、一般人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

### 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 (事実の記述のため省略)

### 2-3. 歴史及び動向の分析

これまでの宇宙輸送システムは使い切り型ロケットが主力であり、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。我が国が保有するロケット技術は、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、国際市場で競争していくために、現行の基幹ロケットの高度化や新たな基幹ロケットの開発等のプロジェクトが進行しつつある。

一方、米欧を中心として、スペースシャトルよりも先進的な技術に基づく再使用型宇宙輸送システムの研究開発も行われてきた。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、一時的に停滞したが、近年、輸送コスト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、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。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。

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。我が国としても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。

## 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

新たな宇宙利用の姿について以下に示す。

#### (地球上の高速二地点間輸送)

2040-2050年頃には宇宙空間を飛行するスペースプレーンを利用した高速二地点間輸送が実現し、航空旅客・高速貨物輸送需要の一部を取り込むことができると期待される。

#### (サブオービタル体験飛行)

2010年代中にも米国で実用化が見込まれるサブオービタル体験飛行が、今後、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)

2010年代後半には民間が運営する宇宙ステーションが登場してくることが見込まれる。

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宇宙ホテル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補給)**

月周辺に対して頻繁なアクセスを行うため、低軌道等で物資や人を載せ替えるための中継拠点及び燃料や物資の貯蔵・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)**

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、人工衛星に対する軌道上での燃料補給や修理・改修によって、より長期間にわたって衛星の運用が可能となる。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)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。また、国際的な合意形成がなされた場合には、大型構造物による地球環境のマネジメント(日照コントロール)等も検討され得ると考えられる。

#### **(月の資源採掘、月旅行等)**

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が大量に存在していると考えられており、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考えられる。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すること等が可能となる。

※宇宙利用の姿を整理したものを別添1に示す。

### **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、「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（「航空と宇宙の融合」）。

航空機並みの安全性及び運用性並びに輸送コストの抜本的な低下により、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。このような宇宙輸送システムは、以下の要件を備えているものと想定される。

#### ①航空機並みの安全性、運用性

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近づけるかが重要である。

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。

#### 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。

また、JAXA の試算によると、宇宙空間に SSPS 等の大規模構造物を建設するためには、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。

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。

このため、1 回あたり数十分の一の輸送コストを実現す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、当面、現在の宇宙探査のように大型の使い切り型ロケットにより、ペイロードを直接、所定の軌道に輸送することが想定される。ただし、低軌道領域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。例えば、大型構造物の建設、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。

※宇宙利用の姿を軌道領域別に整理したものを別添2に示す。

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。

## 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

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、使い切り型ロケットの部分再使用化等が進むと考えられる。

このような再使用型宇宙輸送システムでは、技術革新の動向によって、次の三つの発展経路が考えられる。

#### (第一のパス:再使用型ロケット)

現在、第一段ロケットの再使用化(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、単段式の再使用型ロケットへの発展が考えられる。このパスで必要となる革新的な要素技術としては、推進系構造材料、機体の大幅な軽量化や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)

大気中の酸素を取り込むエアブリージングエンジンが実現した場合、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。そのためには、極超音速エンジン技術、大気圏内で長時間の空力加熱に耐えるための耐熱・熱制御技術、機体システム構築技術の獲得が必要である。

#### (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))

第一段にエアブリージングエンジンを使用し、大気圏内で必要な速度に達した後、第二段に再使用型ロケットを用いて、ペイロードを宇宙空間に投入する形態である。この第三のパスは、第一と第二のパスを実現する過程で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できる。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。

※低軌道領域の将来宇宙輸送システムの発展経路を別添3に示す。

#### 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

##### (1) システム全体として故障を許容する安全設計

再使用型宇宙輸送システムでは、飛行中に故障が起きても機体を失うことなく安全を確保し、帰還するような故障許容(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)

##### (2) 高頻度な運航を可能とするシステム設計

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。

ターンアラウンド時間の短縮のためには、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の技術課題があり、航空機分野等の手法から、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

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、開発プロセスをより効率化する必要がある。

製造については、多品種少量生産、ネットシェイプ化等の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

再使用型宇宙輸送システムの実現に向け、各要素技術分野に対して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

### 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の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。

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、破損箇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。

### 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。技術課題としては、取り入れた空気の色度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等、極限環境の中で飛行するための技術が挙げられるが、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、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。

これまで我が国では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。

## (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おいて、機体の強度を保ちつつ、機体の軽量化を図るためには、材料技術の革新的進歩に加え、バイオミメティクスをはじめとする新たな考え方に基づいた構造設計技術が必要である。これには、カーボンナノチューブをはじめとするナノ材料技術等が大きく貢献することが期待される。また、繊維強度を引き出すために、航空機に用いられる FRP (繊維強化プラスチック) の構造設計技術の革新及び高度化が重要となる。

エアブリージングエンジン搭載機では、機体表面の温度は数千度に達し、耐熱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対して熱防護材料を多用すると機体がさらに重くなり、空力加熱も強まるという悪循環に陥るため、機体を軽量

化するとともに、熱防護材料を多用しないサーマルマネジメント(熱制御)が必要である。

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 SiC(シリコンカーバイド)等の耐熱素材技術を核に、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。

### (3)ヘルスマネジメント技術

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onitoring)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。

また、ヘルスマonitoring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り、航空機用エンジン等で用いられている、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

高軌道において再使用型の軌道間輸送機ネットワークを構築する場合には、その利用用途によって推進系が大きく異なる。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、物資輸送等輸送時間が問題とならない場合には有効である。

### (1)推進系

#### ①化学推進系

水素燃料を用いた推進系は高い比推力<sup>1</sup>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(LNG 及びケロシン等)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。

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。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ことが重要である。また、我が国は LNG 燃料の一種である液化メタン燃料を用いた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、長寿命化が重要になる。

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、

<sup>1</sup>比推力とは、「1kg の燃料で 1N の力を生じさせることができる時間」である。言い換えれば、「効果的な燃焼が維持できる秒数」であり、自動車で言えば「燃費」に似た概念である。

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輸送のための電気推進系は、低コストかつ小型で、大推力を発揮できるホールスラスタが考えられる。また、小惑星・火星以遠では、アークジェットが想定される。

ホールスラスタに関しては、長寿命化とともに低コスト化が必要である。アークジェットに関しては、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

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。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

再使用型の軌道間輸送機ネットワークが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、軌道上で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必要がある。このために軌道上の施設(デポ)に関する技術が重要となる。

また、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ことが重要である。

## 4-5. 先端技術の獲得による国際優位性の確保

将来の再使用型宇宙輸送システムにおいても航空機分野と同様に国際共同事業が必要となると考えられる。その場合に重要なことは、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、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

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が、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実績が不足している。このため、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、次に実用化に必要な技術を実証する実証機を開発し、その成果を研究開発に再びフィードバックして、実用型の試験機を開発するというプロセスが考えられる。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。

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。

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。

※低軌道領域の将来宇宙輸送システムの開発プロセスを別添4に示す。

また、再使用型の軌道間輸送機については、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開発段階を目的に再使用型の軌道間輸送機実験機を開発し、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

今後、将来宇宙輸送システムの実現過程において、航空機と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。このため、国際優位性の確保の観点から、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する各国の実施機関と我が国の実施機関との間において、密接な連携を推進し、効率的に研究開発を進めていくことが望ましい。

### **(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、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である。

### **(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ため、他分野の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、人材の確保及び育成が重要である。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。

### **(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**

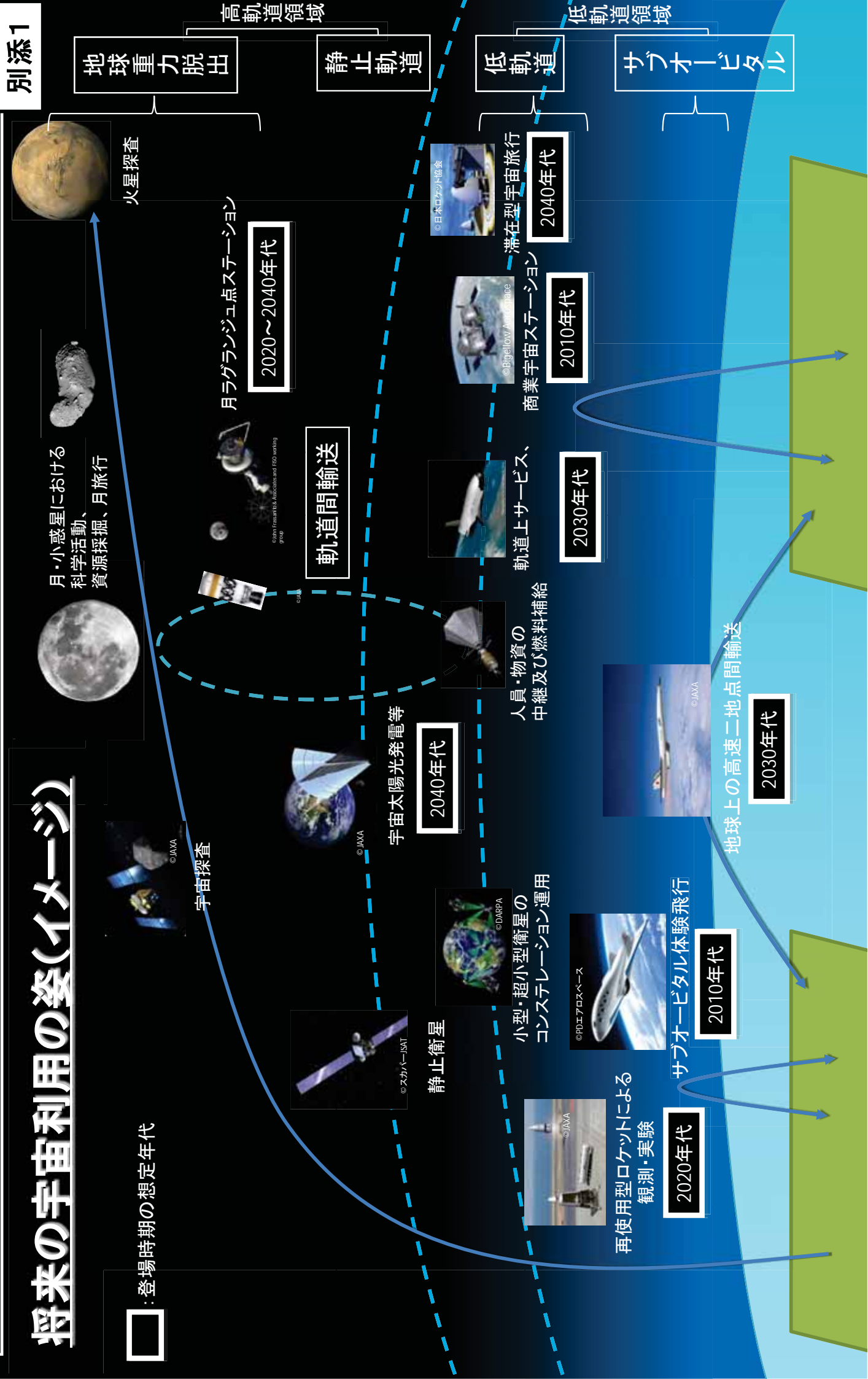
民間が新しいアイデアの提案も含めて開発段階から積極的に参画し、将来宇宙輸送システムの実現に向けた取組が活性化することが期待される。また、実用機については、民間は適切な段階で事業化判断を行い、国との適切な役割分担の下、開発に責任を持って取り組むことが望まれる。

以上

宇宙輸送コストの大幅な低減により、新たな宇宙利用の出現・拡大が考えられる。サブオービタル体験飛行、二地点間高速輸送、滞在型宇宙旅行、軌道上サービス、大規模構造物(SSPS等)建設、資源採掘など。

別添1

# 将来の宇宙利用の姿(イメージ)



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	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	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、 軌道間輸送機



# 低軌道領域の将来宇宙輸送システムの発展経路

別添3

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ザー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となる技術があることや、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。



多段式再使用型ロケット



単段式再使用型ロケット



将来宇宙輸送システムのゴール  
技術革新・経済合理性・社会的受容

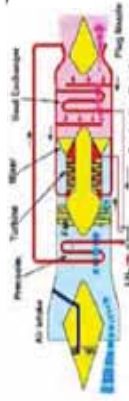


二段式スペースプレーン

高頻度大量輸送、航空機の繰り返し運航、輸送コスト数十分の一、故障許容システム(機体喪失率=百万回に一回)

エンジン・ノズルの高性能化  
軽量化機体構造

フライバックブースタ



エアブリーザー  
宇宙輸送用初段

TSTO(二段式宇宙輸送機)  
一段のエアブリーザー  
(TBCC(ターボ系複合サイクル))を目指す方向

ロケット推進による往還機への発展を目指す方向  
再突入・帰還飛行の技術実証を目指す方向

SSST(超音速飛行機)からHST(極超音速輸送機)へ  
空気吸い込み推進と大気圏内  
高速飛行の技術

複合サイクル・RBCCなど宇宙輸送用  
空気吸い込み推進の革新を目指す方向

現在の研究開発

二点間大気圏内高速飛行を目指す方向

単段式スペースプレーン



エアブリーザーの革新  
(高速化・複合化)



革新的なRBCC(ロケット複合サイクル)エンジンの実現



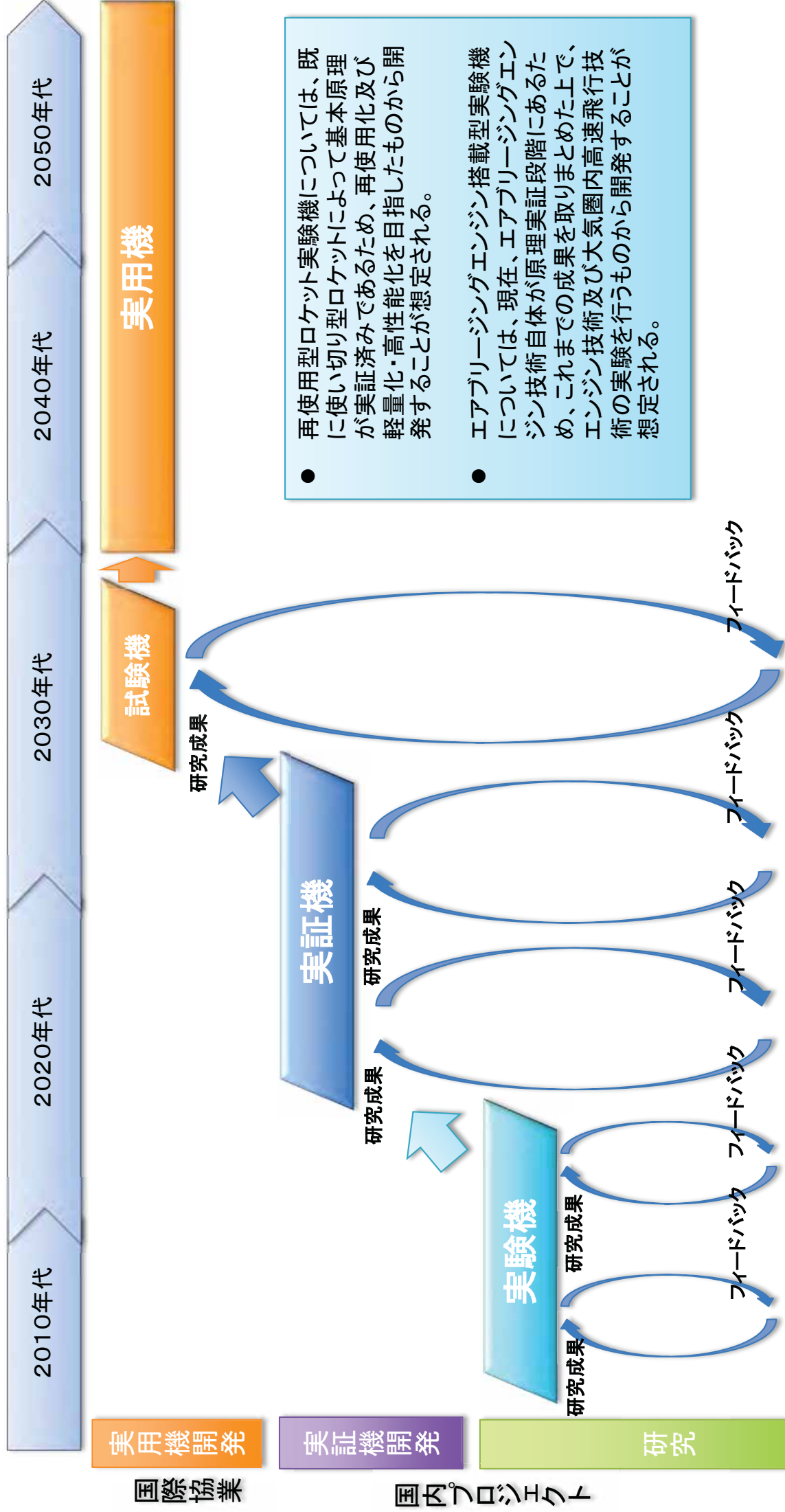
地上二地点間輸送のゴール

環境適合性, 経済的に成立する高速化

# 低軌道領域の将来宇宙輸送システムの開発プロセス

別添4

実験機を開発してシステム全体の実証や新たな研究課題の抽出を行い、その成果を要素研究にフィードバックするサイクルを確立して、研究開発を加速。その成果を順次実証機、試験機、実証機に移る段階、実証機から試験機から試験機から試験機に移る段階といった、適切な時期において、国際的な時期において、国際動向も踏まえつつ、4-1で述べたような検討を行うことが適当。



- 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・高性能化を目指すもの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。

要素研究 (システム技術、推進系技術、超軽量化・熱構造技術、ヘルスマネジメント技術等)