

革新的将来宇宙輸送システム実現に向けた ロードマップ検討会のこれまでの議論の整理

令和3年4月14日

文部科学省 研究開発局

宇宙開発利用課

目次

1. 抜本的な低コスト化を中心とした将来宇宙輸送システム開発を日本が行う意義について
2. 2040年台前半の社会ビジョンを踏まえての2040年代前半に想定される将来宇宙輸送システムのミッション
3. 将来宇宙輸送システムのミッションと飛行形態の適合性
4. 革新的将来宇宙輸送システム実現に向けたロードマップ
5. 将来宇宙輸送システムに必須となる抜本的低コスト化の方策
6. ロードマップ検討会での引き続きの検討課題

1. 抜本的な低コスト化を中心とした将来宇宙輸送システム開発を日本が行う意義

●将来宇宙輸送システムの開発に挑む意義、必要性

スペースX等の台頭により、国際的な民間市場での競争は激化している。このような中で我が国において民間市場で競争力のあるロケットが作れなければ、市場発展性の少ない官ミッションのみに対応したコストの高いロケットを調達して打上げを続けることになるか、あるいは我が国の宇宙輸送システムが民間市場より退出させられることになり、我が国独自の打上げ手段を失い、自立的に宇宙にアクセスする方法を喪失することになり、国益、経済的な利益が失われる可能性が有る。

こうした状況を踏まえると、我が国の宇宙輸送市場を拡大していくためには、世界の宇宙輸送市場を求めて国と民間が連携して将来宇宙輸送システムの開発に取り組む必要がある。

また同時に民間の参画を促し事業予見性を持たせるために、国が宇宙輸送システムに関わる基盤要素技術の成熟度を向上させて民間ミッションにも活用し、コストの低減化をはかる。

2. 2040年台前半の社会ビジョンを踏まえての2040年代前半に想定される 将来宇宙輸送システムのミッション

●2040年代前半の社会ビジョン

我が国で2040年代までに生じる大きな社会様相の変化として、人口の減少・高齢化の進行等が見込まれる。特に人口においては、2040年時点では、2020年時点より総人口が13%減少(1億2600万人⇒1億1100万人)、生産年齢人口が25%減(7500万人⇒6000万人)となり、65才以上の人口は総人口の35%超になる見込み(平成31年3月 内閣官房 まち・ひと・しごと創生本部事務局)。

他方、世界人口は、現在の約78億人が92億人に増加する見込み(国連人口調査2019)であり、日本の人口減少のみに目を囚われ、将来への投資を考えることは拙速である。国内においては人口が減少していくからこそ、日本の産業を支えるために世界の市場を十分意識する必要がある。

2. 2040年台前半の社会ビジョンを踏まえての2040年代前半に想定される 将来宇宙輸送システムのミッション

●2050年頃の社会ビジョン

2050年までに温室効果ガスの排出を全体としてゼロにするカーボンニュートラル、脱炭素社会への対応が必要である。我が国をはじめ主要国において、2050年頃のカーボンニュートラルを表明する国が相次いでいるが、世界的な人口が引き続き増大し、エネルギーの消費量が上昇する中、2050年のカーボンニュートラル達成は地上のみを考慮しただけでは容易な課題ではない。

我が国の宇宙開発利用は、大気圏内のロケット打ち上げでは主に水素燃料を使用しており、また直接のミッション活動が軌道上等大気圏外であるという事から、カーボンニュートラル下での経済活動として宇宙分野は非常に有望であり、そこには十分な民間ミッションがあることが想定される。

2. 2040年台前半の社会ビジョンを踏まえての2040年代前半に想定される 将来宇宙輸送システムのミッション

●2040年代前半に想定される将来宇宙輸送システムのミッションについて

(低・中軌道における通信・状況把握・地球観測)

メガコンステレーションを筆頭に、今後成長が期待される市場である。2030年の需要予測では、年間2,900億円となっているが、2030～2040年においても年間10%で成長すると仮定すると、低・中低軌道市場は、約1兆円の市場規模になることが見込まれる。

(静止軌道における通信・状況把握・地球観測)

2030年の需要予測から、静止軌道における通信・状況把握・地球観測等の市場は年間4,000～5,000億円程度の見込みである。一方、静止軌道市場は、2020年代において、凡そ横ばいの見込みであり、その傾向は2030年代も継続されると予想される。

(軌道上サービス(宇宙太陽光発電含む))

デブリ除去、衛星デオービット、衛星検査ロボティクス、衛星寿命延長、衛星燃料補給等の軌道上サービス市場は、今後の成長が見込まれる市場である。また、「宇宙太陽光発電」についても、今後の研究開発の進展により、我が国のエネルギー政策に貢献する技術であるが、実用は2040年代後半以降となる見込み(経済産業省「宇宙太陽光発電システム研究開発ロードマップについて」(2017年3月))。

2. 2040年台前半の社会ビジョンを踏まえての2040年代前半に想定される 将来宇宙輸送システムのミッション

(宇宙旅行)

現在、世界的に民間によるサブオービタル宇宙旅行の事業創出が盛んであるが、宇宙旅行も今後の成長が期待される市場である。2030年の需要予測では、サブオービタルでの宇宙旅行及び地球低軌道(ISS活用等)への宇宙旅行を合わせて、約3,400億円の市場となる見込みである。2030~2040年においても年間10%で成長すると仮定すると、宇宙旅行市場は、サブオービタル・地球低軌道併せて、8,800億円程度の市場となることが見込まれる。なお、旅行費用及び1フライトあたりの席数が2030年から変わらない、という前提に立つと、サブオービタルの宇宙旅行で年間8,800フライト、地球低軌道の宇宙旅行で年間21フライトという市場概況となる。

(P2P(高速2地点間旅客輸送))

2040年に向けて、高頻度輸送を実現するために、最も輸送量が見込める市場の1つである。現時点で市場が創出されていないため、2040年の市場予測は困難であるが、既存の旅客航空機の一部を代替すると仮定して概算すると、年間5.2兆円の市場規模(我が国発着ベース)となる可能性がある。

2. 2040年台前半の社会ビジョンを踏まえての2040年代前半に想定される 将来宇宙輸送システムのミッション

(商業月経済圏)

2040年に向けて、高頻度輸送を実現するために、最も輸送量が見込める市場の1つである。 2040年ごろの月面においては、1,000人が居住し、年間10,000人が月面を訪問すると想定されている。(第4回ロードマップ検討会でのiSpace社発表内容による) また、有人と圧ローバや月面天文台等さまざまな設備の輸送も予測される。常時3人、年間12人の滞在であるISSに比して、設備等含め100倍近くの輸送量が求められると仮定すると、2兆円程度の市場規模となる可能性がある。 (ISSへの輸送量は年間15~20ton、月面への輸送コストを10億円/tonと仮定)

(宇宙科学・探査及びアルテミス計画)

宇宙科学・探査及びアルテミス計画等の深宇宙探査については、国際協力に基づくものでもあり官ミッションとして確実に実施する必要がある。 今後も火星等の探査が本格化するため需要が高まってくることが考えられる。一方、2040年において、どのような利用規模となっているかは、今後の科学ミッションの成果や国際情勢にもよることから、現時点で予測は困難であるが、増加することが期待される。

(安全保障、防災利用等)

安全保障や防災利用においても、衛星データの需要の増大等により、打上げの需要が高まってくることが考えられる。2040年における利用規模は不明であるが、国の存続、国民生活にとって非常に影響が大きい分野であり、民間によって代替えられる分野でもないことから低・静止軌道にかけて官ミッションとして確実に実施する必要がある、増加することが期待される。

2. 2040年台前半の社会ビジョンを踏まえての2040年代前半に想定される将来宇宙輸送システムのミッション

表2.1 2040年頃の宇宙開発利用の状況予測（赤字は主に官ミッション）

		行き先／ミッション		
		サブオービタル軌道	低・静止軌道	深宇宙(月・火星)
輸送対象	有人	P2P輸送 宇宙旅行(※)	宇宙旅行(※)	月・火星経済圏 アルテミス計画 (国際協力)
	無人	P2P輸送 微小重力環境実験	通信メガコンステ ISS活用軌道上サービ ス 安全保障／ 防災利用等	

(※)「移動」が手段ではなく、「移動」そのものに価値がある利用

3. 将来宇宙輸送システムのミッションと飛行形態の適合性

将来宇宙輸送ミッションとそのための飛行形態案(表3. 1参照)との適合性は以下が想定される。

・「ロケット形態」(システムA)；

将来の宇宙利用市場(サブオービタル宇宙旅行ミッションを含めて)の大部分の要求に対応できる形態であり、また現在の宇宙輸送システムであるH-2A、H3ロケットの開発方式／技術要素の蓄積を最大限利用できるものであり、大量物資の軌道上輸送に適していると言える。 但し、有人輸送を想定するP2P用途への対応には2段目の再使用化等の課題がある。また高頻度打上げに対しては射場の増加が必要になる。

・「スペースプレーン(有翼)形態」(システムB)；

空力翼を有した形態であるため水平離陸・着陸といった航空機的飛行運用方式が可能となる。 従って、有人輸送を想定するP2P用途への対応には効果的な形態といえる。但し、軌道上への輸送のためには「2段目(上段)ロケット」を追加する必要があり、輸送量は相対的に少量である。 また主要必要技術である推進系技術(スクラムジェットエンジン等)、熱防御技術の技術成熟度(TRL)が低いため、実用化までには「ロケット形態」に比較して、期間を要すると想定されている。




3. 将来宇宙輸送システムのミッションと飛行形態の適合性

・「ハイブリッド形態(ロケット+上段有翼)」(システムC)；

システムAの派生型でP2P輸送、サブオービタル飛行を含むあらゆるミッションに対応が可能であるとともに「2段目(上段)」を有翼形態とすることで地上帰還／再使用が可能が容易となり**有人輸送を想定するP2P用途への対応も可能**にしている。但し、「2段目(上段)」の地上帰還／再使用に係る必要技術である**熱防御技術、再突入誘導制御技術の技術成熟度(TRL)が低い**ため、システムB同様に実用化までには期間を要すると想定されている。

将来の宇宙利用市場ニーズに基づき宇宙輸送システム形態案の大まかな評価検討から、軌道上／深宇宙ミッション等には従来の基幹ロケットから発展形態であるシステムAの実用化を進めることが良い。国は今後の大市場予測のP2P用途ではシステムAに必要な共通基盤技術はもとより、固有の革新的推進系技術、熱防御技術等の獲得をはかり、その上で、システムB, C(有翼型輸送システム)の**民間主体の開発にどのようにつなげていくか**について、その時点での需要や技術の成熟度を勘案して検討していくことが必要であると考えられる。

表3.1 将来宇宙輸送システムの飛行形態案の特徴

システム	システムA: ロケットタイプTSTO* (部分再利用検討例) ※Two Stage To Orbit	システムB: 有翼タイプTSTO* ※Two Stage To Orbit	システムC: ロケットタイプTSTO* (完全再利用) ※Two Stage To Orbit
機体イメージ			
	<p>●システムA(2段式) ロケットタイプ (1段目再利用)</p>	<p>●システムB(2段式) 有翼タイプ (1段目再利用)</p>	<p>●システムC(2段式) ロケット+2段有翼 (1/2段再利用)</p>
メリット	<ul style="list-style-type: none"> ・サブオービタルを含む大部分のミッションに対応可能(深宇宙への輸送が可能) ・搭載輸送能力が大きい(大型化が相対的に容易) ・開発の知見/関連技術の蓄積がある ・有人輸送の可能性(有人カプセル輸送など海外での実績あり) 	<ul style="list-style-type: none"> ・P2P、サブオービタルを含むあらゆるミッションに対応可能(深宇宙への輸送が可能) ・ロケット部分は開発の知見/関連技術の蓄積がある(上段部分は技術成熟度低) ・有人輸送の可能性 	<ul style="list-style-type: none"> ・P2Pに最適 ・空港など地上インフラの共用が可能 ・推進剤(酸化剤)を減らせるため、機体軽量化が可能 ・有人輸送の可能性(航空機運用技術が使用できる)
デメリット	<ul style="list-style-type: none"> ・射点が限定的 ・機体の軽量化、エンジン高性能化 ・海上回収などの新規設備・維持 ・P2Pは対応できない 	<ul style="list-style-type: none"> ・搭載輸送能力がロケットタイプに比べ相対的に低い(大型化が相対的に容易) ・現時点で、上段再利用に係る主要技術(軽量熱構造、再突入誘導)の技術成熟度が低い 	<ul style="list-style-type: none"> ・単独での大型建造物の軌道上輸送や深宇宙への輸送は困難(現実的な機体サイズを超え、長距離の発着場が必要になる) ・現時点で、主要技術(エンジン・熱構造)の技術成熟度が低い(航空分野との融合が必要)

4. 革新的将来宇宙輸送システム実現に向けたロードマップ

・国は、低・静止軌道、月面等を対象としたミッション(官ミッション(安全保障、防災、アルテミス計画等)含む)に対応するため、2030年頃の初号機打上げを目指して大幅な低コスト化を実現するための「基幹ロケット発展型」の開発を進める。更に、民間主導による下記新型宇宙輸送システムとの部品等の共通化による量産効果や完全再使用化等により抜本的なコスト低減化を図る。

・上記の形態ではカバーすることが困難なP2P等の将来の大型市場を確保するための抜本的低コスト化を実現する「高頻度往還飛行型宇宙輸送システム」に関する研究開発プロジェクトを官民で新たに開始する。

・上記新規プロジェクトの実施にあたっては、将来のP2Pミッションに向け民間での実施機運が高まりつつある中、民間中心での体制構築が期待される。早期に計画を開始するためにも、今年度中の体制構築を目指す。

・当該新規開発を進めるにあたり、キーとなる技術で、民間だけでは開発できない下記要素技術※を官民体制で特定し、JAXAにおいて開発を実施する。

※革新的推進技術(エアブリージングエンジン等)、熱防御技術／完全再使用化技術、性能向上技術、低コスト化技術等

4. 革新的将来宇宙輸送システム実現に向けたロードマップ

- ・高頻度往還飛行型宇宙輸送システムのための2040年代前半の実用機打上げを目標に、2025年頃までに、必要となる要素技術の絞りこみを行い、2030年代始めに飛行実証を行うことを目指す。(事業化まで時間が掛かることから) 要素技術の獲得状況等も踏まえ、高頻度往還飛行型宇宙輸送システムの開発プロジェクトの進捗について5年毎に文部科学省によるレビューを行い、継続するか否かを含め研究開発計画、官民の役割分担等の見直しを行う。
- ・国は民間での高頻度往還飛行型宇宙輸送システム事業化に先立って、有人飛行実施に際しての安全規制・法制度等の対応検討を進めておく。

付図 将来宇宙輸送ロードマップ
フローチャート(案) 参照

革新的将来宇宙輸送プログラム オープンイノベーションによる共創体制

文部科学省

革新的将来宇宙輸送
システムの計画・進捗
報告

将来宇宙輸送ロー
ドマップ[※]の提示・
進捗管理

※実用システムの目標形態(ゴール)、実現時期や官民の役割の在り方を明示しつつ、研究開発の発展に応じた段階的な計画・道筋(ロードマップ)

革新的将来宇宙輸送プログラム(JAXA)

- ・安全保障や宇宙探査といった将来の政策ニーズへの対応や高速二地点間輸送、低軌道輸送等の将来の大きな需要を生み出す発展性と可能性のある市場形成と一体となり、利用形態や市場主導で将来のあるべき事業形態を目指す
- ・自立性確保や将来の宇宙開発利用の飛躍的拡大に向け、抜本的低コスト化等を実現する革新的技術をはじめとして国が革新的で基盤的な研究開発を先導。
- ・非宇宙分野など幅広く革新的将来宇宙輸送システムに必要な最新の知見・技術を取得し、また、研究開発を通じて得られた最新の知見・技術等を民間事業者や非宇宙分野の関係者へ移転して活用・波及 (オープンイノベーションによる共創体制)

①革新輸送として
リファレンス
システム設定・必要
技術識別

政策ニーズ・市場調査の要求分析
リファレンスシステム検討

リファレンスシステムの
設定 (維持更新)

RFI/民間
等個別調査
インプット

個別技術ロードマップ[○]作成・維持
・スタートアップではRFI/個別技術ロードマップの
作成を並行して実施
・システム・飛行実証計画含む

②オープンイノベーションによる共創体制

研究開発成果により反映

- ・地上に市場がある技術 (非宇宙企業が研究開発) の需要や低コスト性を生かしつつ研究開発によりスピニン、低コスト化促進
- ・宇宙輸送特有の高信頼性・厳しい環境条件など付加し、宇宙輸送事業者・非宇宙市場分野にスピアウトし、市場価値向上

宇宙輸送事業者の要望集約
(基幹ロケット、ベンチャー)

RFP要請

JAXAキー技術・差別化技術
安全保障関連技術含む

RFP選定委員会[※] : 個別案件の公募・選定(年数回)

共同研究開発 (オープンイノベーション)

共同研究開発 (宇宙輸送事業者とクローズイノベーション)

③JAXA共同研究開発/シ
ステム・飛行実証

- ・オープンイノベーションの成果を活用
したシステム・飛行実証
- ・連携する宇宙輸送事業者を明確化

知財は原則非独占、但し自社投資は除く

※RFP選定委員会

外部有識者…宇宙輸送システム・技術の専門家
オープンイノベーションの外部専門アドバイザー(金融、コンサル他)
…地上ビジネスの活性化・デュアルユーティリゼーションの視点

地上市場への付加価値追加、需要拡大へ
(地上市場の需要増加による部品・機器コスト低減)

自立性を確保した
宇宙輸送事業の開発

5. 将来宇宙輸送システムに必須となる抜本的低コスト化の方策

(1) 部品・材料等の低コスト化(地上部品・汎用材料等との共通化、国際調達・技術協力)

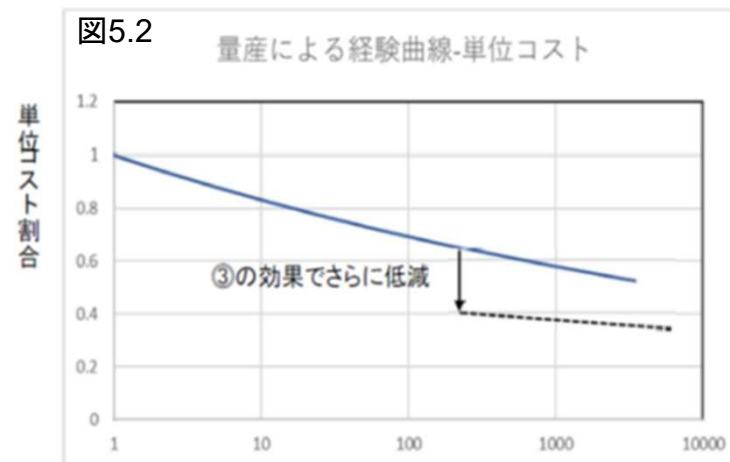
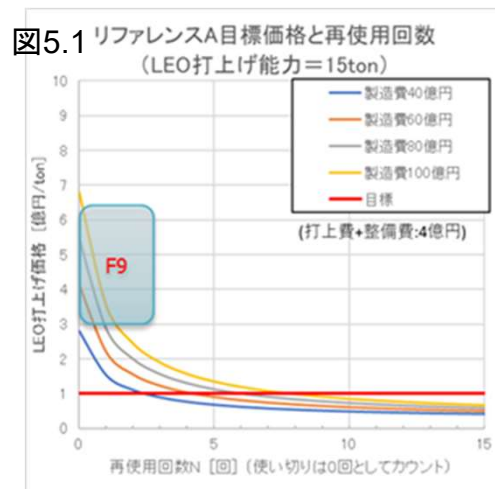
- ・設計仕様を従来の宇宙仕様からJIS規格など需要の多い民間市場規格仕様に変更
- ・材料、機器等宇宙輸送システムに共通的な製品に関しては、国際企業間での製品の調達等

(2) 宇宙輸送システムの再使用化(図5.1参照)

- ・機体システムの再使用化により、新規製造を最小限にすることでコスト削減。
- ・更なる費用削減のための新規品製造費、打上げ費、再使用品等の整備費の削減等

(3) 宇宙輸送システムの打上げ回数の増加による量産効果(図5.2参照)

- ・製品の大量生産に伴う量産効果は、①固定費の割掛け減少効果、②習熟度向上による製造費低減、③大量生産に伴う製造設備大規模化、装置ノウハウに基づく製造の自動化、効率化等。



5. 将来宇宙輸送システムに必須となる抜本的低コスト化の方策

(4) 製造工程のIT技術利用等による革新化

- ・3Dプリント技術／デジタルツイン技術により設計・製造のプロセスの効率化、低コスト化実現
- ・モデルベース開発による実試験、検査工程の省力化等で低コスト製品の実現

上記低コスト化の方策の詳細については共創体制の中で詳細検討及び実現を図る。

6. ロードマップ検討会での引き続きの検討課題

引き続き検討が必要と考えられる事項は以下の通り。

○官民の役割分担

- ・国と民間の研究開発費の分担(知財の持ち方にも係る)
- ・我が国の宇宙輸送の自立性確保のために、国が責任を負うべきキー技術の維持方策
- ・機体システム以外のシステム(地上施設設備・打上安全管理)の主体、役割分担

○射場・スペースポート

○安全規制・法制度等の整備(法律・条約事項等)

○国際協業の在り方