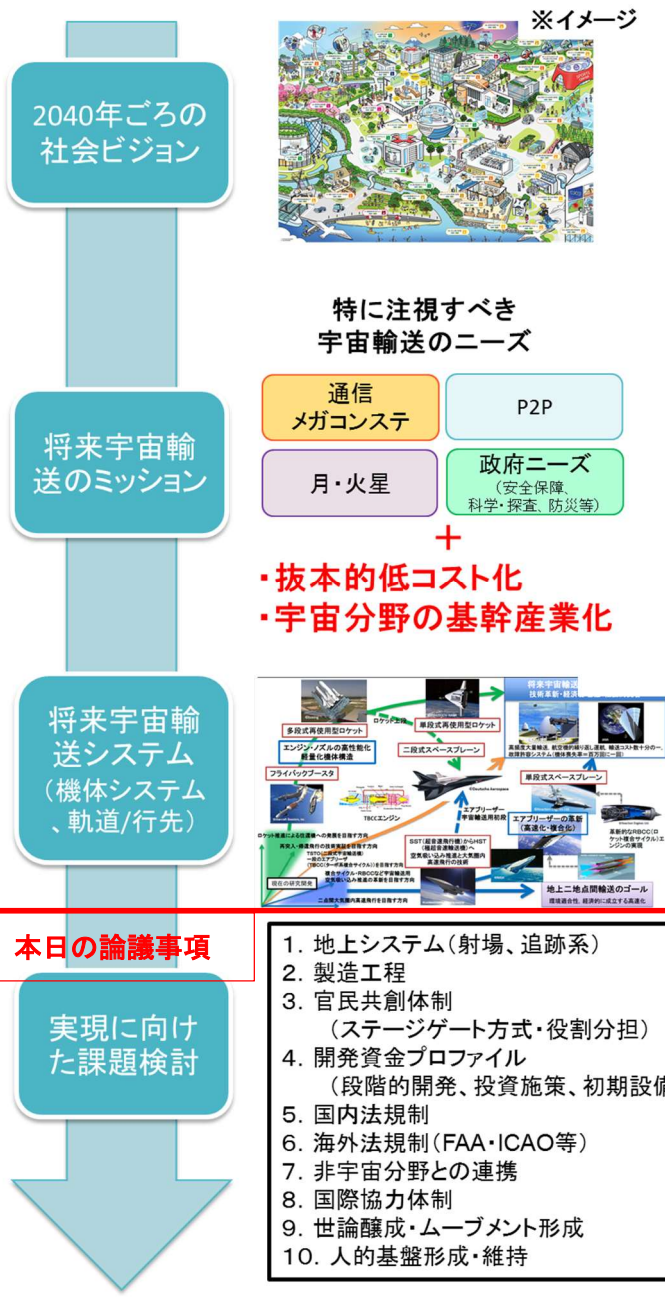


革新的将来宇宙輸送システムロードマップ検討会のこれまでの議論 の整理と検討の進め方（案）

文部科学省 研究開発局
宇宙開発利用課

1. 革新的将来宇宙輸送システムロードマップ検討の流れ

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



議論の ポイント

課題解決策或いは解決に必要な検討事項は何か。他に検討すべき課題はないか。

2. これまでの検討会での議論の整理

(1) 将来宇宙輸送システムの意義・価値（第4回にて議論）

提言）革新的将来宇宙輸送システム実現に向けた我が国の取組強化に向けて

4. 今後の取組方策 (2) 革新的将来宇宙輸送システムの実現

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からバックキャストしつつ、それぞれの領域に対して必要となる革新的将来宇宙輸送システムの実現を関係省庁や民間事業者等の関係者とともに目指す。そのとき、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し、民間事業者や大学等の関係者が資金分担も含めてそれぞれの役割を果たす。

本検討会第1回資料（資料 2-2-1 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検討項目素案）

1. ロードマップの目標

遅くとも2040年代前半までに継続的に我が国の宇宙輸送システムの自立性確保、併せて国際的競争力確保及び産業発展を目指した将来の国益確保と新たな宇宙輸送市場の形成・獲得に向け、抜本的低コスト化等も含めて革新的技術による革新的将来宇宙輸送システムを実現し、我が国の民間事業者が主体的に事業を展開することで、自立した宇宙開発利用を飛躍的に拡大させるとともに、宇宙輸送をはじめとする宇宙産業を我が国の経済社会を支える主要産業の一つとする。

また、将来宇宙輸送システムの意義・価値に関して、これまでの検討会で各委員から以下のような意見をいただいている。

ー 深宇宙市場の拡大ー

- 世界的な人口拡大に対応したエネルギー／資源のニーズが急増する。そのための宇宙利用の発掘。
- 宇宙の GDP は人の活動量と資源の利用で拡大する。
- 今後持続的人類の活動が予測されるため「深宇宙」は市場として期待できる。このため低軌道から高軌道への移動が市場となり、日本の独自性をだすべきである。

ー 地球周回軌道利用市場ー

- 「移動」そのものに価値がある市場と、移動が「手段」である市場は分けて考えるべきである。
- 将来 1 兆円市場は通信メガコンステ、深宇宙、P2P が想定される。但し、メガコンステの市場形成には不確かなところもある。宇宙からの通信利用（5G）例えばコネクテッドカー／自動運転等の低軌道宇宙利用がある。

- 宇宙活動の起点として国内でのスペースポート実現を期待する。
- P2P については技術、制度の観点で時間を要するので、その途中として「宇宙旅行」は適切な市場ではないか。

－ 全般的な宇宙市場拡大の方策－

- コロナの影響で「生命／環境」がキーワード化している中で「宇宙の貢献」を世論とする活動が必要
- カーボンニュートラルの達成目標を踏まえて社会の宇宙インフラ化から生ずる宇宙市場を考えるべき
- 宇宙技術の地上への活用の拡大
- 深宇宙にしろ、P2P にしろ有人輸送が将来必須となるので、信頼性を早期に早める必要がある。

（２）2040 年頃の宇宙開発利用の状況（斜体は主に官需）（第 5 回にて議論）

●市場規模（世界）は 2030 年頃を想定したもの

		行き先			
		サブオービタル軌道	低・静止軌道	深宇宙（月・火星）	他
輸送対象	有 人	・想定市場； P2P 宇宙旅行（※） ・市場規模予測； 約3, 000億円/年	・想定市場； 宇宙旅行（※） ・市場規模予測； 約1, 000億円/年	・想定市場； 月・火星 経済圏 <u>アルテミス計画</u> <u>(国際協力)</u> ・市場規模予測；未定	
	無 人	・想定市場； P2P／ 微小重力環境実験 ・市場規模予測； 未定	・想定市場； 通信メガ コンステ／ ISS 活用／ 軌道上サービス／ <u>安全保障、防災利用等</u> ・市場規模予測； 約9, 000億円/年		
	計	約3, 000億円/年	約1兆円／年	TBD	

（※）「移動」が手段ではなく、「移動」そのものに価値がある利用

2040 年頃の宇宙開発利用の状況に関しては前回の検討会での各委員から以下のような意見をいただいている。

- 地球上の 2 地点間、特に人を運ぶことで、大きな需要がでてくることになり、それによって安くした技術を使って宇宙輸送を安くするのではないか。
- 将来宇宙輸送システムは斬新的な人類の宇宙時代のインフラをつくるということになると感じている。
- 重力に打ち勝ち地球周回に行くまでが大変で、そのための個々の技術開発が重要である。
- 有人の技術開発は事故が生じた際の対応を考えると民間主導の方が早く復帰できて良いと想定。
- 将来の宇宙利用を増やすためにニーズを定めてやっていくことが重要である。
- ヒトの輸送とモノの輸送は識別するべき。
- 有人を目的にするのであれば、最初からそのようなことを織り込んだロケットにする必要がある。
- 有人宇宙輸送を技術論だけで議論するのは危ない。サービス・人を流動させていくことにコストがかかるということを認識する必要がある。
- どの程度の規模感の産業にするのか、というところは大きな議論である。
- 宇宙輸送ビジネス全体として、売り切りではない世界をどうするか。
- 10 兆円を目指すとして進めることでどうか。
- 市場規模を決めるのは、機体性能だけではなく、ポート（空港）の箇所と場所が重要。
- スペースポート拡大のためには国の支援が、資金的だけではなく、国家間交渉の観点でも必要。
- 人の移動という観点は、従来エアラインの事業の対象で 100 兆円規模となる。P2P 産業であれば、ビジネスジェットに近い。宇宙旅行では、高額クルーズの市場規模が参照できると想定。
- この事業を動かすためには以下の観点が重要。
 - ・命がけでやりたい人がいるか。⇔ 最適な組織体。（金持ちの個人。企業。JV。）
 - ・世論・社会受容性をどう高めるか。喚起する仕組みが必須。
 - ・ニーズを全部やれないので優先順位をつけないといけない。
- 有人では無事に地上に戻ってこないといけない。その際のアボート技術が必要となる。
- 10 兆円をベースとすると、どういう金額規模になるのか資金フローのシミュレーションが必要。実現するための機体性能について、技術についてもシミュレーションする必要がある。

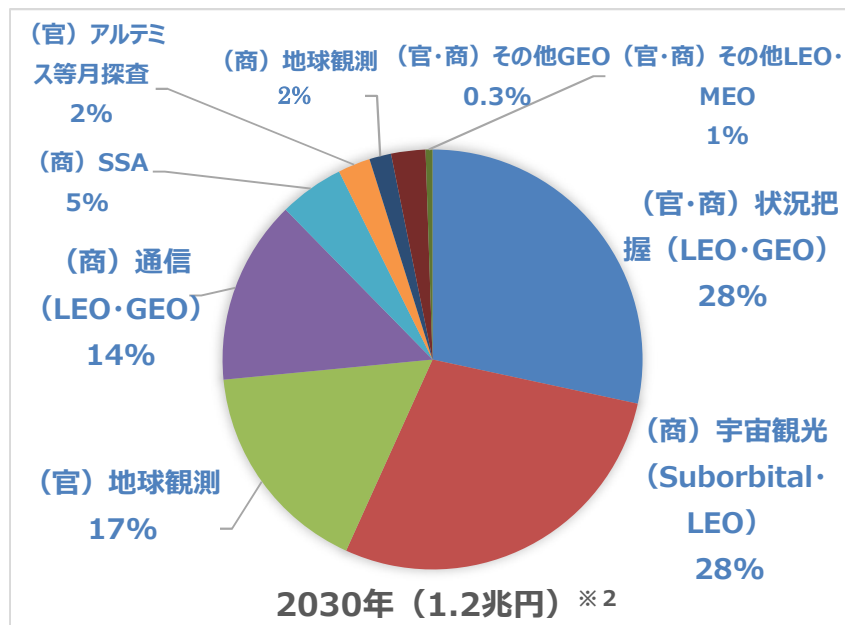
●2040 年頃に 10 兆円市場を構築するためには

2040 年頃に宇宙輸送市場で 10 兆円を実現するには、どのような市場概況となるのかを仮定の上、以下概算した。

概算の前提)

- ① 官需ミッションと民需ミッションを対象とする。(科学ミッションは、対象外とする。)
- ② 対象とするミッションの内、P2P・月経済圏は現状で市場が創出されていないため、市場規模を仮定の上、算出する。
- ③ P2P・月経済圏を除き、宇宙輸送全体における各ニーズの市場割合は、2030 年と 2040 年で変化がないものとする。
- ④ 宇宙輸送市場の成長率は、2018 年(約 0.4 兆^{※1})～2040 年で一定とする。

(年 10%成長)



※1 State of the Satellite Industry Report 2018 より

※2 2030 年の市場分布予想は、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(第5回)資料5-2付表(JAXA 調査結果)を基に作成

（１）2040 年の市場規模

2030 年に 1.2 兆円市場として、前提④より年間 10%で成長すると仮定すると、**2040 年には 3.1 兆円市場となる。**

よって、2040 年に宇宙輸送市場全体で 10 兆円規模の市場を目指すには、**P2P と月経済圏で、約 7 兆円市場を創出する**必要がある。

（本概算では、P2P で 5 兆円、月経済圏で 2 兆円を目指すとして試算する。）

参考)

The Future of Space 2060 and Implications for U.S. Strategy; Report on the Space Futures Workshop (2019.9.5 Air Force Space Command) (※)によると、2060 年代後半に、” the space economy is expanding rapidly, contributing at least 10% of global gross domestic product (GDP) with wide, diverse participation from nations” という記載があり、国連の GDP 想定をもとに計算すると、2060 年代後半の宇宙市場はおよそ 100 兆円規模になる試算となる。仮に、宇宙輸送が宇宙市場全体に占める割合が現状から変わらず、また、2040 年以降も年 10%で成長すると仮定した場合は、2040 年頃に 3 兆程度と逆算できる。

※ <https://www.politico.com/f/?id=0000016d-0513-d6ab-a97f-4f93520b0001>

（２）2040 年の各ミッションの市場

A 地球低・中・静止軌道における通信・状況把握・地球観測の市場予測

2030 年の市場

低・中軌道商業通信：700 億円（600 機／年）

低・中軌道状況把握（商業／政府）：1,400 億円（40～120 機／年）

低・中軌道商業地球観測：200 億円（40～120 機／年）

低・中軌道商業 SSA：600 億円（200 機／年）

静止軌道商業通信：1,000 億円（15 機程度／年）

静止軌道地球観測（政府）：2,000 億円（20 機程度／年）

静止軌道状況把握（政府）：1,000～2,000 億円（10 機弱／年）

計 7,900 億円（宇宙輸送市場 1.2 兆円の 65.8%）

前提④に基づき、年 10%で成長すると、2 兆 400 億円の市場となる。この市場のうち、静止軌道衛星の成長見込みはおよそ横ばいと考えられ、その上で、年 10%での成長を望むのであれば、**低・中軌道衛星（主としてコンステレーション）で、年間成長率 18%超、2040 年の市場で 1 兆 5000 億円超の市場規模を目指す必要がある。**

B 宇宙観光の市場予測

2030 年の市場

サブオービタル：2,800 億円（年 3,400 フライト以上）

低軌道：600 億円（年 8 フライト）

計 3,400 億円

前提④に基づき、年 10%で成長すると、8,800 億円の市場となる。その場合、サブオービタルの宇宙旅行で、7,300 億円（年 8,800 フライト）及び地球低軌道の宇宙旅行で 1,500 億円（年 21 フライト）の内訳となる。（旅行費用及び 1 フライトの席数が 2030 年から変更ないとした場合）

C P2P の市場試算

P2P（この場合、大気圏外を経由し、地上 2 地点間を高速で旅客輸送することを示す）の 2040 年の市場については、現時点で市場が存在しないため、5 兆円を目指すとして、試算する。

P2P は航空旅客輸送市場の置換えが可能だと考えられるが、その性質により、ある程度長距離間の移動の置換えに限定されると考えられる。

東京（羽田）から世界の主要都市までの所要フライト時間は、以下の通り。

都市	所要時間	都市	所要時間
ソウル	2 時間 40 分	ロサンゼルス	10 時間 10 分
北京	4 時間 10 分	モスクワ	10 時間 30 分
シンガポール	7 時間	ドバイ	10 時間 50 分
シドニー	9 時間 20 分	パリ・ロンドン	12 時間 30 分
デリー	9 時間 40 分	ニューヨーク	12 時間 50 分

※<https://www.localtime.jp/flight/> を参照

※南米・アメリカへの直行は現時点でない模様

※世界最長フライトの 1 つは、ニューヨークーシンガポール便（17 時間 50 分）

本試算では、**9 時間以上のフライト便を P2P に置換え可能だと仮定する。**

日本政府観光局の公表によると、2019 年の訪日外客数は約 3,200 万人、出国日本人数は約 2,000 万人 (https://www.jnto.go.jp/jpn/statistics/marketingdata_outbound.pdf)

また、東アジア・東南アジア地域以外の国際旅客便の割合は全体約の 20%

(<https://www.mlit.go.jp/common/001297874.pdf>)

のため、旅行者（訪日外客数＋出国日本人数）は全体の 20% 約 1,040 万人となる。

（2040 年まで、旅行者数が大きく変わらない前提）

この旅行者のうち、1%が P2P に置き換えられると仮定すると、P2P 旅客は、約 10 万人。

日本だけで 5 兆円市場を目指すのであれば、1 人あたり 5,000 万円の渡航費となる。

国際線航空旅客市場における ANA・JAL のシェア率を参考とすると、約 2.0%（※）となる。この場合、1 人あたり 100 万円の渡航費となる。

※一般財団法人日本航空機開発協会公表の令和元年度版航空機関連データをもとに（第 I 章 航空輸送の推移と現状 1.（2）有償旅客キロ(RPK)の推移、及び、第 IV 章 航空会社 2. エアライン・ランキング—2018 年 RPK（有償旅客キロ）Top50）、ANA 社及び JAL 社の RPK の割合として算出。

(http://www.jadc.jp/files/topics/38_ext_01_0.pdf)

(http://www.jadc.jp/files/topics/41_ext_01_0.pdf)

上記は、2040 年まで、旅行者数が大きく変わらない前提。2040 年には世界の航空輸送市場はおおよそ 2 倍になる見込のため、東アジア・東南アジア地域以外の旅行者数も 2 倍になると仮定すると、上記で算出された渡航費はさらに半分となる。

D 商業月経済圏の市場戦略

商業月経済圏（この場合、月への官需ミッションを除くものとする）の 2040 年の市場については、現時点で市場が存在しないため、2 兆円を目指すとして、試算する。

仮に、2040 年段階で、月面に、10t100 億円の輸送コストがかかるすると、**年間 2,000t の物資輸送**が必要となる。

参考）羽田空港が 1 日で取り扱う貨物量がおおよそ 1,000t

ISS への輸送は、年間おおよそ 15～20t

（３）10 兆円市場の打上げ回数の試算

打上げ回数については、P2P・月経済圏・宇宙旅行以外の市場（地球低・中・静止軌道における通信・状況把握・地球観測等）については、コンステレーション等打上げ回数の試算の困難なものがあるため、現在の打上げ回数から、市場の成長率と比例して増えるものとして試算した。P2P・月経済圏・宇宙旅行については、上記市場の試算に基づき算出する。

2040 年の打上げ回数動向

ミッション	世界全体
P2P	100,000 人（※ 1）
月経済圏	200 回（※ 2）
宇宙旅行（サブオービタル）	8,821 回（※ 3）
上記以外 （地球低・中・静止軌道における通信・状況把握・地球観測等）	755 回（※ 4）

※ 1 本資料（２）C P2P の市場試算の仮定より

※ 2 年間 2,000t 1 回の輸送で 10t と仮定

※ 3 当資料（２）B 宇宙旅行の市場予測の仮定より なお、飛行 1 回当たりの旅客人数が 2030 年と 2040 年で一定という前提になる。

※ 4 SPACE LAUNCH REPORT（2019）（年 102 回）をもとに算出

(3) 2040 年頃の宇宙利用における宇宙輸送システム要件及び革新的将来宇宙輸送システム参考案について（第6回にて議論）

●革新的将来宇宙輸送システム検討の前提条件

■これまでの 2040 年頃を想定した宇宙利用ニーズ検討に基づく宇宙輸送システムへの要件は以下と整理される。

	行き先		
	サブオービタル軌道	低・静止軌道	深宇宙(月・火星)
有人	・主要市場案: P2P、宇宙旅行 ・輸送方式案: 垂直打上げ 水平打上げ	・主要市場案: 宇宙旅行 ・輸送方式案: 垂直打上げ	・主要市場案: 月・火星 経済圏 アルテミス 計画 (国際協力) ・輸送方式案: 垂直打上げ
無人	・主要市場案: P2P、 微小重力環境実験 ・輸送方式案: 垂直打上げ 水平打上げ	・主要市場案: 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 ・輸送方式案: 垂直打上げ	

- ①わが国の宇宙輸送開発において、過去水平方式の輸送システム開発した経験がない。
 (航空機開発では、ジェットエンジンやラムジェットエンジン、機体システム等も開発有り)
- ②抜本的低コスト化を実現するシステム(総合システム:宇宙輸送機、射点／射場設備、飛行安全運用、再使用の場合は回収・再打上げ整備設備)である必要がある。そのため
 には、打上げに係る製造費用等を低減するのみならず、同一システムでの打上げ回数(10機以上/年)が増加する必要がある。
- ③実現する総合システムは単数か複数かを議論する必要がある。複数にした場合は、対応できるニーズは増えるものの、1つのシステムに対するコスト低減の恩恵を十分に受けられない可能性がある。
- ④実現する総合システムは、将来的な民間市場での適用も想定し、研究開発費は、期待される市場からの民間の収益を考慮した民間負担も考慮した費用対効果で測る必要がある。

●革新的将来宇宙用システム参考例（JAXA 検討中）

システム	システムA: ロケットタイプTSTO [®] (部分再使用検討例) ※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 [®] (完全再使用) ※Two Stage To Orbit
機体 イメージ			
	システムA ロケットタイプ	システムB 有翼タイプ	システムC ロケット+上段有翼
メリット	・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)	・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)	・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
デメリット	・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に対応できない	・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)	・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、上段再使用に係る主要技術(軽量熱構造、再突入誘導)の技術成熟度が低い

●抜本的低コスト化に向けたコスト削減方策

我が国における自立的な打上げ手段の確保並びに宇宙の利用による産業のさらなる活性化のためには、宇宙輸送の抜本的低コストが不可欠である。そのため、ミッションに関わらず、以下のような取組が必要となる。

■ 輸送システムの再使用化

- ・製造費・打上げ費・整備費の低減と使用回数の増大が必要。
- ・一定回数を超えると効果は低減するため再使用回数を見極めていく必要がある。

■ 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）

- ・JIS規格など需要の多い市場規格仕様に変更し、信頼性を確保する冗長化などのシステム設計による対処により低コスト化を図る。

■ 製造工程の革新化

- ・3Dプリント技術、デジタルツイン技術、モデルベース開発で実試験の省力化等

■ 国際協力（調達・技術協力）

- ・共通的な製品に関しては、企業間による開発・維持費が不要となる製品の調達、技術協力を推進し、打上コストの低減を図る。

■ 打上げ回数の増加（量産効果）

- ・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自動化・効率化等が想定される。

●第6回での将来の市場ニーズ及び革新的将来宇宙輸送システムに関して前回の検討会では各委員から以下のような意見をいただいた。

- ① どのようなシステムを選ぶかについて、有人飛行の場合はアボート飛行が重要であり、アボートのやりやすさがシステムによって異なる。この点もメリデメで整理されるとよい。アボートは不具合が生じた機体を回収しやすいかどうか、という観点で、射場の議論ともかかわる。
- ② リファレンスの考え方について、市場規模で考えた場合、P2P が本当に 5 兆円の市場になるのであれば、注力する市場の主眼となる。どの市場が確からしいかによって、注力するシステムが決まるはず。(個人的見解ではあるが、P2P にそれほどの需要があるだろうか)
- ③ 市場規模を考慮した輸送システム形態の選択が重要
- ④ P2P の場合、大量の人数を運ぶ輸送システムであるべき。マーケットからの要求を踏まえ、満たすシステムを決めるという順番であるべき。
- ⑤ 2014 年の長期ビジョンでも議論したが、2040 年の最終的な運用実機は国際協業となると思われる。そこに至る過程で、とがった技術を国内に維持するために、実証機で飛行試験を適宜実施し、その結果を要素研究にフィードバックすることが大事。
- ⑥ どのくらいのマーケットサイズに発展させていくのか、という議論が必要。この点の精査、どのような世界に出ていくかの議論が先にあるべき。官民の観点で、時系列でどのように開発を進めていくのか、その段階的開発を議論することが重要。
- ⑦ P2P の市場のイメージが不明。技術発展やコロナ禍を受けて、これからの人流がどのようになるのかを考えることが必要。物流とはマイルストーン等が異なるはず。SpaceX という巨人がいる中で、我が国が 2、3 周遅れている。どのようにコストを低減していくか。目的を絞って、コスト面ではない競争力が必要かと感じている。地球の周回軌道から深宇宙の in-space の市場は、日本の狙いどころだと思う。
- ⑧ In-space は重要。どのようなシステムを構築するかによっては、単段完全再使用が最適とは限らない。

- ⑨ 深宇宙物流と地表旅客用途で、システムが異なってもモジュール化して、共通部分をつくるということもあり得る。
- ⑩ P2P の場合、航空機技術との融合が必要なのはその通り。レギュレーションでも今 NASA と議論しているが、技術的にはかなり難しいことなのか。
- ⑪ カーボンニュートラルメタンについて、わが社でも、工場から出る排ガスもとに、CN メタンを生成することを考えている。宇宙輸送でも使われると、間接的に関わる企業が増えると思う。
- ⑫ 宇宙輸送システム用の燃料については広い範囲での議論が必要。先進的な高いレベルの輸送機には水素が魅力的なこともある。

これまで6回の検討会の中で、我が国の自立的な打上げ手段の確保（官需ミッションの確実な打上げ）及び宇宙の利用による産業の活性化には、宇宙輸送の抜本的低コストが不可欠であり、そのために、抜本的低コスト化に向けたコスト削減方策に加え、多くの打上げ機会を得るために、2040年頃にマーケットが期待されるミッションを検討し、整理した。

これらのミッションに対応するには、官民で個別に研究開発をするのではなく、官民各ミッションに応えるシステムを極力共通化する（第6回議論）とともに、それぞれのミッションに共通的な技術について、オープンイノベーションで官民一体となって研究開発することが重要ではないか。（第7回議論）

4. 本日の検討会での議論について

本日の検討会では以下の事項について主にご議論をお願いします。

- (1) 具体的な開発の進め方について
 - 1) オープンイノベーションでの共創体制について
 - 2) システム技術実証の進め方について
 - 3) 官民役割分担について
 - 4) 国際認証等における制度障壁について

5. 今後の検討の進め方

次回第8回（4月14日開催予定）には事務局から 中間まとめ案 を提示いたしますので、その内容についてご議論、ご検討をいただきたいと思います。