

## 資料12-2

研究開発局宇宙開発利用課  
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12回) R3.12.24

# 「技術ロードマップ」検討状況

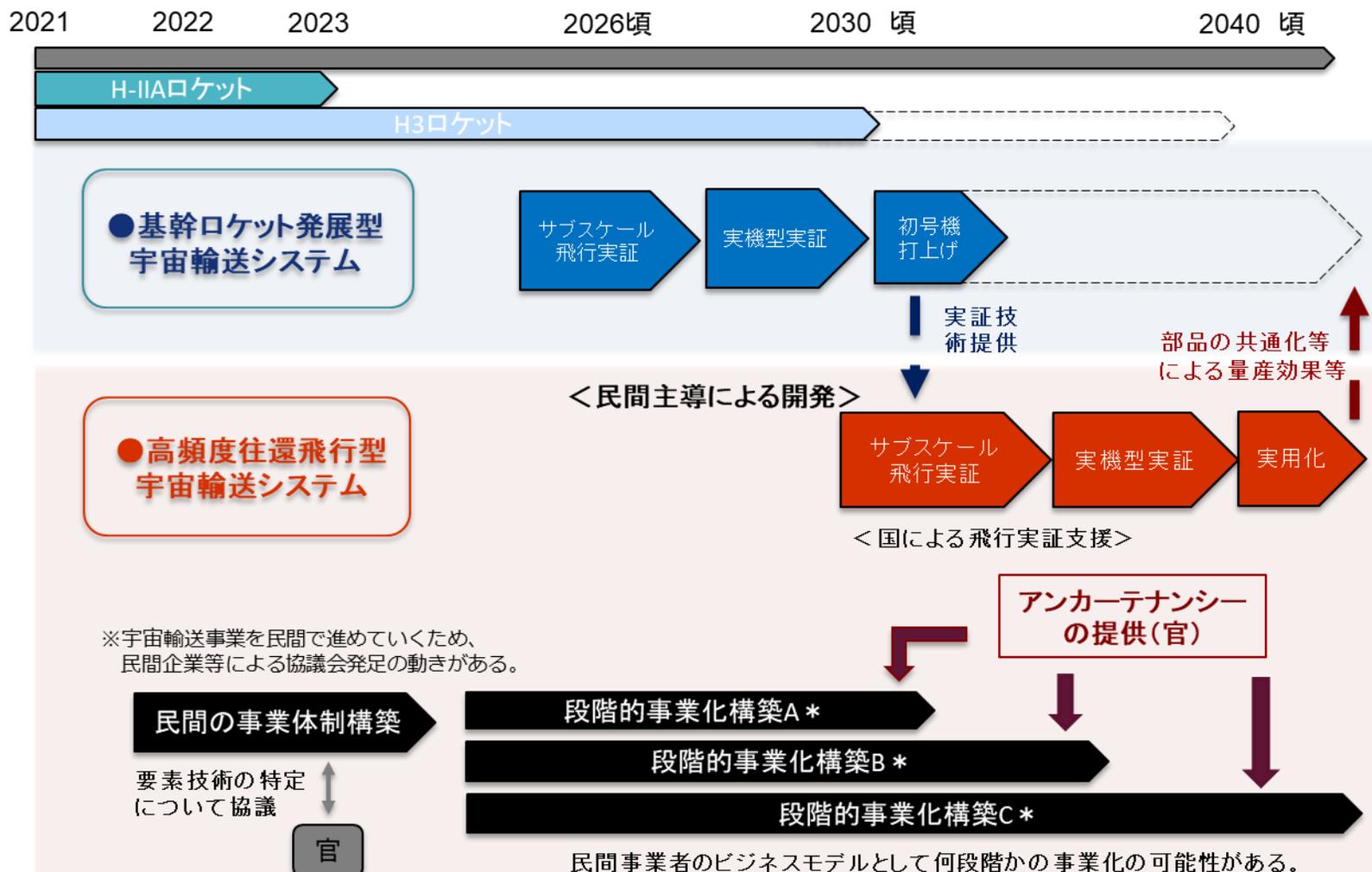
令和3(2021)年12月24日

国立研究開発法人 宇宙航空研究開発機構

# 革新的将来宇宙輸送システムロードマップ(1/2)

## 革新的将来宇宙輸送システムロードマップ

令和3年6月18日



機体システム

民間事業構築

# 革新的将来宇宙輸送システムロードマップ(2/2)

## 技術ロードマップ

### 要素技術開発

#### ①性能向上の実現

推進効率の向上  
構造効率向上  
搭載部品性能向上  
システムの高度化

#### <国主導による技術開発>

革新的推進等

革新的材料等

革新的誘導制御技術等

自己故障点検等

#### ②低コスト化の実現

再使用化  
部品・材料等の低コスト化  
生産工程の革新化

RV-X及び  
カリスト技  
術開発

再整備・点検技術等

液体エンジン低コスト化等

デジタルツイン技術等

#### ③往還飛行システムの実現

高頻度輸送技術  
旅客輸送技術

要素技術  
飛行実験

点検・整備最適化技術等

革新的推進(エアブリージングエンジン等)、  
熱防御技術/完全再使用化技術等

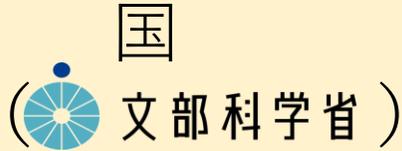
オープンイノベーションによる共創体制  
クローズドイノベーション体制  
JAXA固有の研究開発で実施

●技術開発における知財の官民での取り扱い検討

# 技術ロードマップ構築の目的

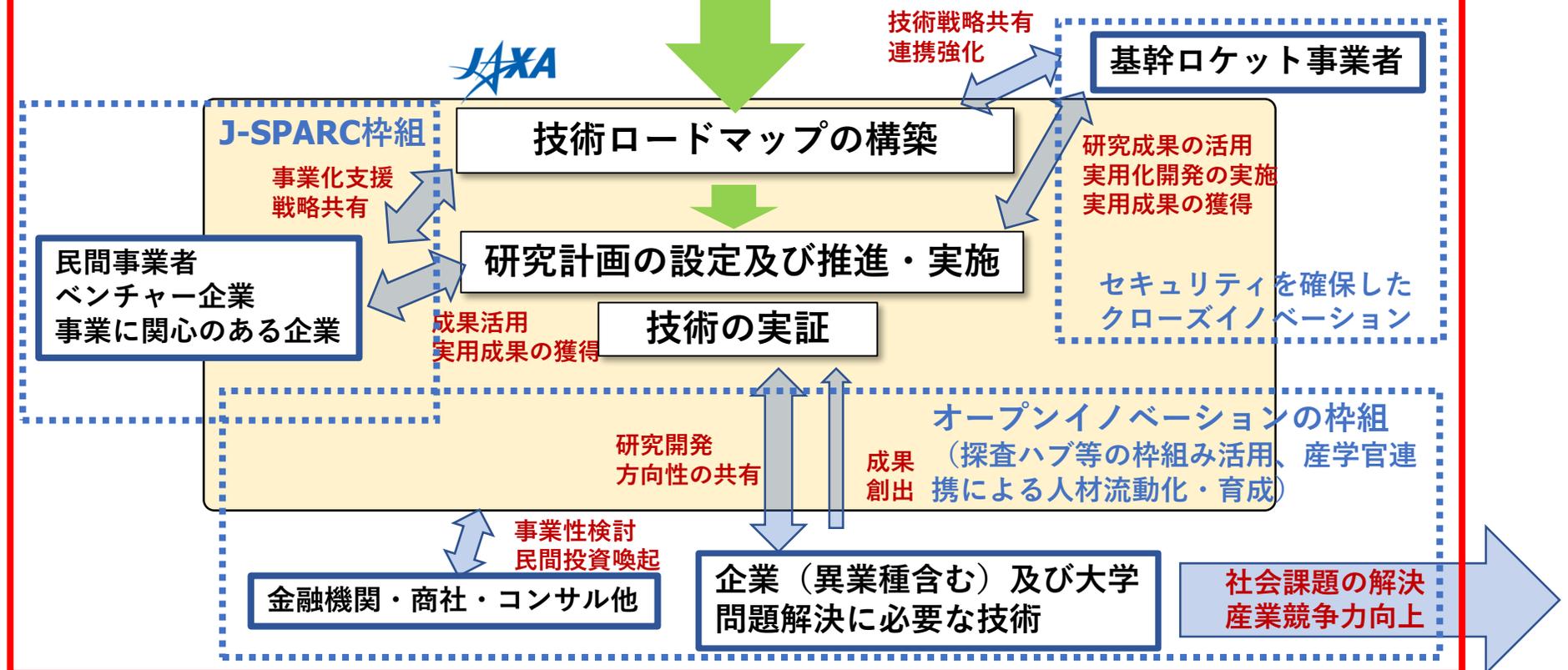
- 革新的将来宇宙輸送システムロードマップを着実に実現していく上で、オープンイノベーション共創体制の中で基幹ロケット発展型及び高頻度往還飛行型宇宙輸送システムの技術ロードマップを共有することによって、出口戦略を共有し、スピード感をもって推進する道標の役割を果たす。
- 技術ロードマップを宇宙分野／非宇宙分野の事業者と共有することにより、オープン／クローズイノベーション共創体制を活用し、より差別化された技術SEEDSに向けた研究開発の促進、SEEDSから効率的かつスピード感をもった、技術実証立案・実施、事業の掘り起こし等へ拡大、促進させる。
- 技術ロードマップを広く産業界と共有することにより、宇宙輸送産業に対する新たな民間事業者、投資家等の新規参入の促進を期待。

# 革新的将来宇宙輸送システム研究開発の共創体制



- ✓ 非宇宙分野やユーザコミュニティを含む産学官のチームを設置
- ✓ 政策領域ごとに適切な関係省庁間・政府関係機関と連携・協力
- ✓ ロードマップの策定・見直し

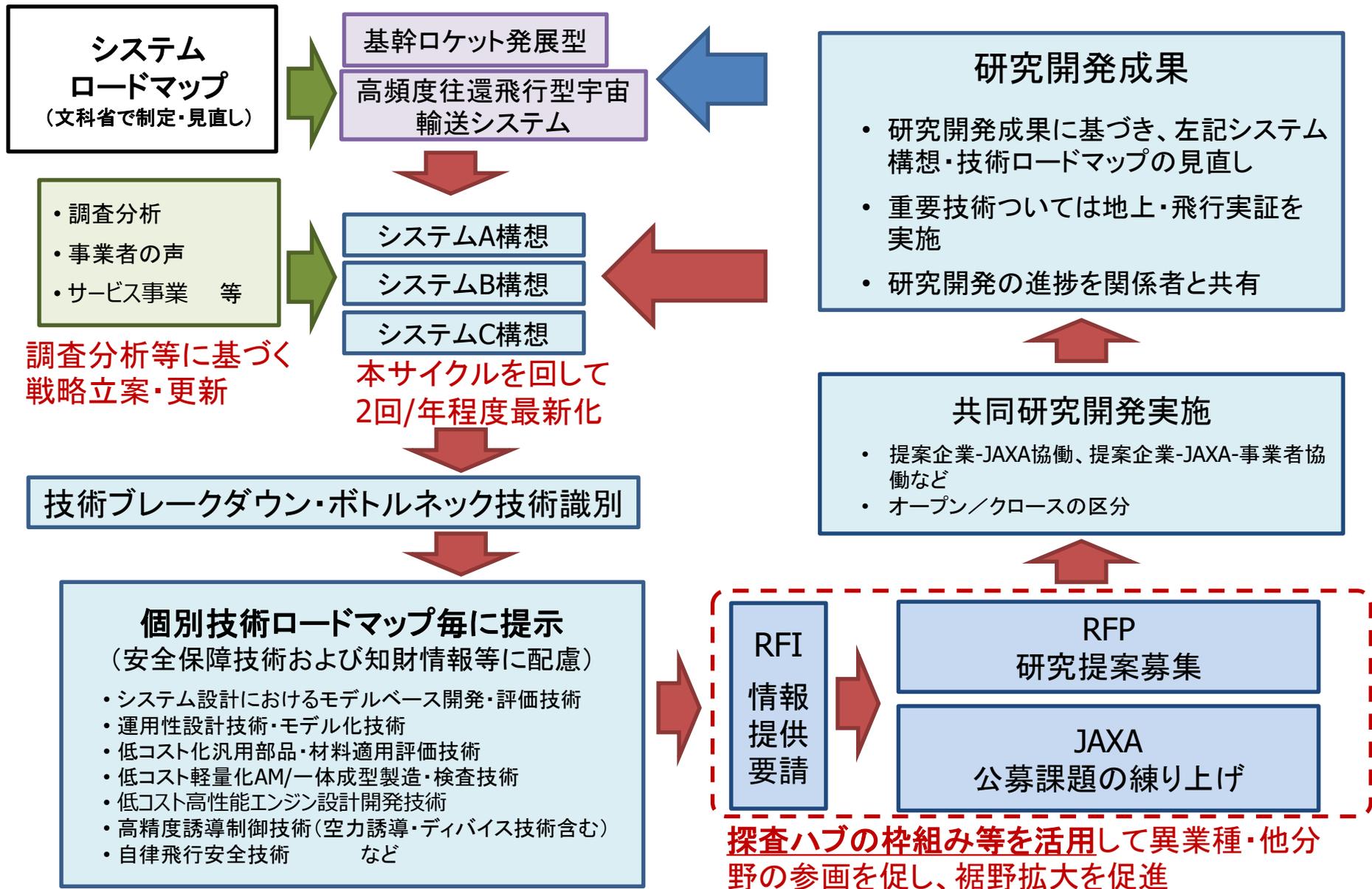
## 革新的宇宙輸送技術の共創体制



# 技術ロードマップを軸とした研究開発・システム実証の推進・加速

- 基幹ロケット発展型は、2030年頃の国際競争力のある大幅な低コスト化と打上能力増強、2040年まで見据えた抜本的低コスト化を加速させて実現するために、システム検討詳細化を行い、ボトルネックとなる技術を見極め、技術ロードマップとしてまとめた。この技術ロードマップにより技術獲得を加速させており、今後、システム実証・飛行実証などの技術実証を実施し、より競争力あるシステム及び、技術ロードマップの充実/詳細化・絞り込みを図る。
- 顧客要求や民間主導での活動は多岐にわたるとともに、国際的な市場状況や政府の要望に応じてシステム要求は変化。この状況・要望の変化に柔軟・迅速に対応できるように、競合/市場調査分析・技術獲得状況を踏まえつつ、2回/年程度の頻度でシステム検討及び技術ロードマップを更新。
- 高頻度往還飛行型宇宙輸送システムについて、民間主導での活動に関して必要となる技術を見極め、実証飛行に必要な技術レベルまで高める技術ロードマップを策定着手。
- 技術ロードマップに基づくオープンイノベーション共創体制における課題設定、第1回技術情報提供要請(RFI)、共同研究提案募集(RFP)を年度当初に実施し、21件のテーマを設定するとともに、第2回RFIを1月上旬まで実施し、更に技術獲得の加速を目指した課題解決研究を含むRFPを3月に予定。
- オープンイノベーションも含む研究開発等で得た知財は、機微な安全保障技術の管理については、外為法に基づく管理を行うと共に、創出された重要技術全般について適正に管理する。知財獲得後については、広く活用できるよう利用権の扱いなど踏まえた共有を推進する。

# 技術ロードマップ活用の全体ながれ



# 基幹ロケット発展型 技術ロードマップ作成に当たり出口戦略の構築 (サブシステム及び必要な機構を識別)

- 基幹ロケット発展型のミッション要求(出口戦略)を仮設定し、システム構想を仮設定
- システム構想をもとに、サブシステム及び必要な機構を識別、構成要素レベルまで機構を細分化

## 基幹ロケット発展型構想 概要

- 宇宙輸送の抜本的な低コスト化を実現するための機体システム例およびその実現に必要な主要な技術開発項目を示す。
- 以下の機体を研究開発のリファレンスシステムAとして定義し、その実現に向けた研究開発ロードマップを作成する。



システム概要	システム構成	部分再使用型2段式ロケット LRB付加により打ち上げ能力を変更 上段ステージは使い捨て
	打ち上げ能力	GTO:4 ton以上(シングルスティック:1段再使用) LEO: 25ton以上(1段・LRB再使用) LTO: 16ton以上(1段・LRB使い捨て)
	目標コスト	GTO:30億円(H3 2-2の半額) LEO:25億円(H3 3-0の半額)
	再使用運用	第1段:ダウンレンジでの洋上回収 LRB:射点近傍での洋上回収 各10回程度の再使用
	推進剤	LH2/LOX またはLNG/LOX 将来:カーボンニュートラルメタン
主要技術開発項目	システム	モデルベース開発の高度化
	構造系	主構造・タンク複合材化、共通隔壁化、軽量降着装置
	エンジン・推進系	点検・再整備技術、AM適用範囲拡大、各部電動化、推薬管理
	アビオニクス系	完全自律飛行安全、機器統合、ワイヤレス化
	地上設備	洋上回収システム

## システム構想

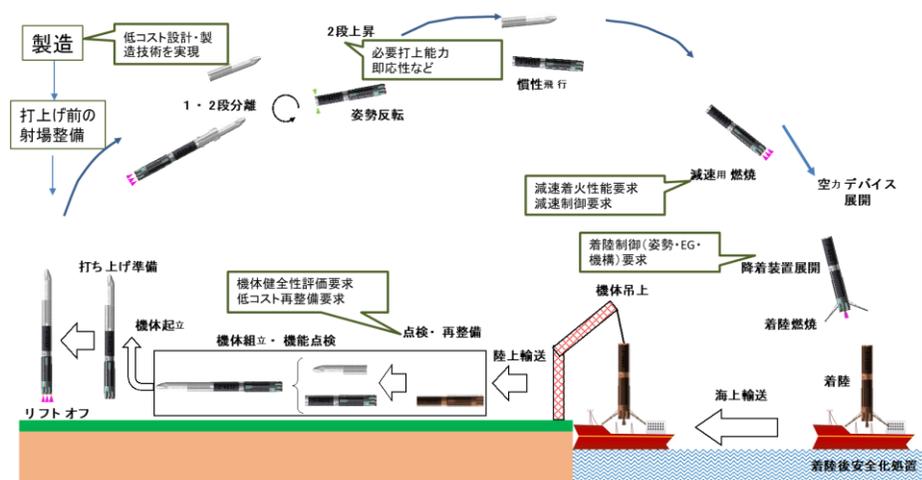
- システムのサイジング結果は以下の通り。
  - ▷ LRBの有無と再使用範囲を変更することで各種ミッションに対応する。
  - ▷ 商業需要が見込まれるGTOや、今後の利用拡大が見込まれるLEOへの輸送に対しては、1段・LRBを再使用することで抜本的な低コスト化を図る。上段は使い切りで能力向上、低コスト化が必要。
  - ▷ 機体の再使用化のみならず、他産業の技術の活用(例:複合材、電子部品)や製造技術の革新(積層造形技術、デジタルツイン)などにより、機体そのものの大幅な低コスト化を目指す。



概要	機体直径	5.2 m	輸送制約・製造設備制約を考慮	
	機体全長	61 m	横置き整備前提	
打上げ能力	シングルスティック	GTO 4 ton	GTO商業ミッション対応	
	LRB2基形態(再使用)	LEO 25 ton	LEO利用需要拡大を想定	
	LRB2基形態(1段含め使い捨て)	LTO 16 ton	探査ミッション対応	
第2段	推進剤	LH2/LOX、LNG/LOX		
	有効推進剤量	80 ton		
	エンジン比推力	365 s	1段エンジンに対して高機張ノズル付加	
	構造効率	0.94		
	総推力	100 tonf		
第1段/LRB	推進剤	LNG/LOX	LH2/LOX	カーボンニュートラルメタン等の適用
	有効推進剤量	460 ton	230 ton	
	エンジン比推力	340 s	422 s	オープンサイクル想定/LE-9再使用@LH2
	構造効率	0.920	0.87	機体各部複合材化・共通隔壁化
	総推力	900 tonf	500 tonf	複数エンジンをクラスタ化する想定

# 技術ロードマップ作成に当たり機能要求の識別

- 従来を使い捨てロケットの知見・経験を最大限活用しつつも、新たな運用シーケンスである再使用・再整備も含めた適切な機能要求を識別するために、製造～再整備までの各状態遷移(もしくは運用フェーズ)を細分化し機能要求を詳細化



フェーズ	ステート		機能要求
	部品	サブフェーズ	
設計・製造	部品組み立て		<ul style="list-style-type: none"> <li>低コストにつながる基準、規格の見直しを行うこと【基準・規格見直し】</li> <li>安価部品で必要信頼性を確保する冗長等アーキテクチャ設計・製造を行うこと【高信頼】</li> <li>低コストにつながる新たな設計・製造技術を実現すること【新規設計・製造技術】</li> <li>衛星要求への即応性対応【即応性】</li> <li>設計・製造工程のIT技術利用等による革新を実現すること【DX,IT】</li> </ul>
運用	射場整備	組み立て作業 点検作業	<ul style="list-style-type: none"> <li>設備保全負荷の小さいこと【低設備保全】</li> <li>組立作業負荷の小さい機体仕様【低組立作業負荷】</li> <li>短時間・低コストチェックアウトできること【低コストチェックアウト】</li> <li>衛星アクセス性の良いこと【衛星アクセス】</li> <li>打上げ可能確率の高いこと【高打上げ可能確率】</li> </ul>
	上昇		<ul style="list-style-type: none"> <li>打上げ能力確保、最適化【打上げ能力】</li> <li>打上げ制約の緩和(管制・通信)【制約緩和】</li> <li>衛星包絡域の確保、環境条件の向上【大包絡域、良環境条件】</li> <li>複数衛星、軌道対応【マルチ衛星、軌道】</li> </ul>
2段階フェーズ			<ul style="list-style-type: none"> <li>使い捨て2段の多機能化・長秒時、軌道間輸送などのマルチミッション対応【多機能2段】</li> <li>軌道環境と両立する上段低コスト【低コスト軌道環境対応】</li> </ul>
プースバック	射点近傍運用(主にプースタ)		<ul style="list-style-type: none"> <li>機体速度方向の短時間反転【短時間反転】</li> <li>プースバック制御性能(速度、推進薬制御)【プースバック制御】</li> </ul>
コース	(コア、プースタ各々)		<ul style="list-style-type: none"> <li>機体の安定制御(姿勢、推進薬制御)【コース制御】</li> </ul>
減速	(プースタは要否検討から)		<ul style="list-style-type: none"> <li>適切な減速制御(着火タイミング、姿勢、燃焼時間)【減速制御】</li> </ul>
1段再突入			<ul style="list-style-type: none"> <li>再突入姿勢制御【再突入制御】</li> </ul>
着陸	大気中(アプローチ) 大気誘導込み		<ul style="list-style-type: none"> <li>着陸点との相対航法誘導制御【着陸相対航法誘導制御】</li> <li>空力安定および制御【空力制御】</li> </ul>
	着陸燃焼～設置		<ul style="list-style-type: none"> <li>スロットリング性【スロットリング】</li> <li>着火時刻補正に適切に対応、エンジンが再着火できる状態になっていること【着火制御】</li> <li>着陸相対航法誘導制御【着陸相対航法誘導制御】</li> </ul>
回収			<ul style="list-style-type: none"> <li>省人安全化【着陸後安全化】</li> <li>(洋上)輸送～地上回収【回収運用要求】</li> </ul>
再整備			<ul style="list-style-type: none"> <li>機体健全性など適切に評価できること【健全性評価】</li> <li>低コスト再整備できること【低コスト再整備】</li> </ul>

製造～再整備までの各状態遷移(もしくは運用フェーズ)を細分化し機能要求を詳細化

# 技術ロードマップ作成に向けたボトルネック技術識別について

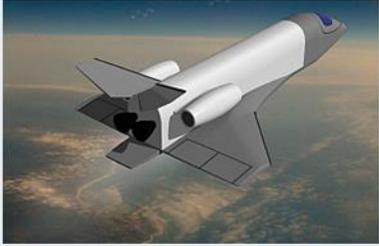
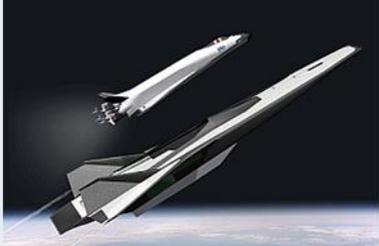
- システム構想をもとに、サブシステム及び必要な機構を識別と構成要素レベルまで細分化した機構と、製造～再整備までの各状態遷移(もしくは運用フェーズ)を細分化し詳細化した機能要求による、機能機構展開を実施し、下記の視点の下、ボトルネック技術(BNE)を抽出。
  - システム仕様を適正化するための技術(システム仕様・構成最適化など)
  - システム全体に影響する技術(製造技術、地上部品適用など)
  - 部品展開(サブシステムレベル)と対応する必須要素技術

	FY2022	FY2023	FY2024	FY2025	FY2026
主要達成目標			各RMのボトルネック技術に対してTRL4の向上とTRL5に向けた取組	サブスケール飛行実証システムTRL5に向けた取組	サブスケール飛行実証
RM01 運用性設計技術・運用性モデル化技術		システム設計への運用性設計反送			
		RPSL #10 運用整備計画型 共通研究(ANA等)	RPS(T.S.D.) MSG-A(仮称)課題解決研究		
		適用・整備性A試作	適用・整備性A構築	適用・整備性A構築	
		モデルベース開発評価法確立に向けた		実証機への運用モデル・整備モデルシステム適用	
RM02 汎用部品・材料活用を実現する基準・制約・評価技術					
RM03 AM / 一体成形製造技術・検査技術					
RM04 環境予測技術 / 耐候・耐環境技術					
RM05 高性能・低コストエンジン設計技術					
RM06 エンジン試験技術・ヘルスマネジメント技術					
RM07 有効推進管理・制御技術 / モニタ技術					
RM08 高応答RCS技術(T. B. D.)					
RM09 上段ミッション適応に向けた低コスト高機能技術					
RM10 自律飛行・安全技術					
RM11 高機能通信・伝送技術					
RM12 柔軟な衛星インタフェース技術					
RM13 高精度誘導制御技術					
RM14 高構造効率と低コストを実現する新構造様式実現技術					
RM15 空力誘導制御技術・デバイス技術					
RM16 洋上回収システム技術・把持技術					
RM17 運航整備技術					
MBD システム設計におけるモデルベース開発評価技術					

技術ロードマップはボトルネック技術毎にTRL4まで向上させることを目標として設定  
⇒  
今後、市場動向、研究開発の進捗などを踏まえ、TRL5,6に向けたシステム実証やシステム構想の見直しを継続し、技術ロードマップを更新

# 高頻度往還飛行型宇宙輸送システム技術ロードマップ検討状況

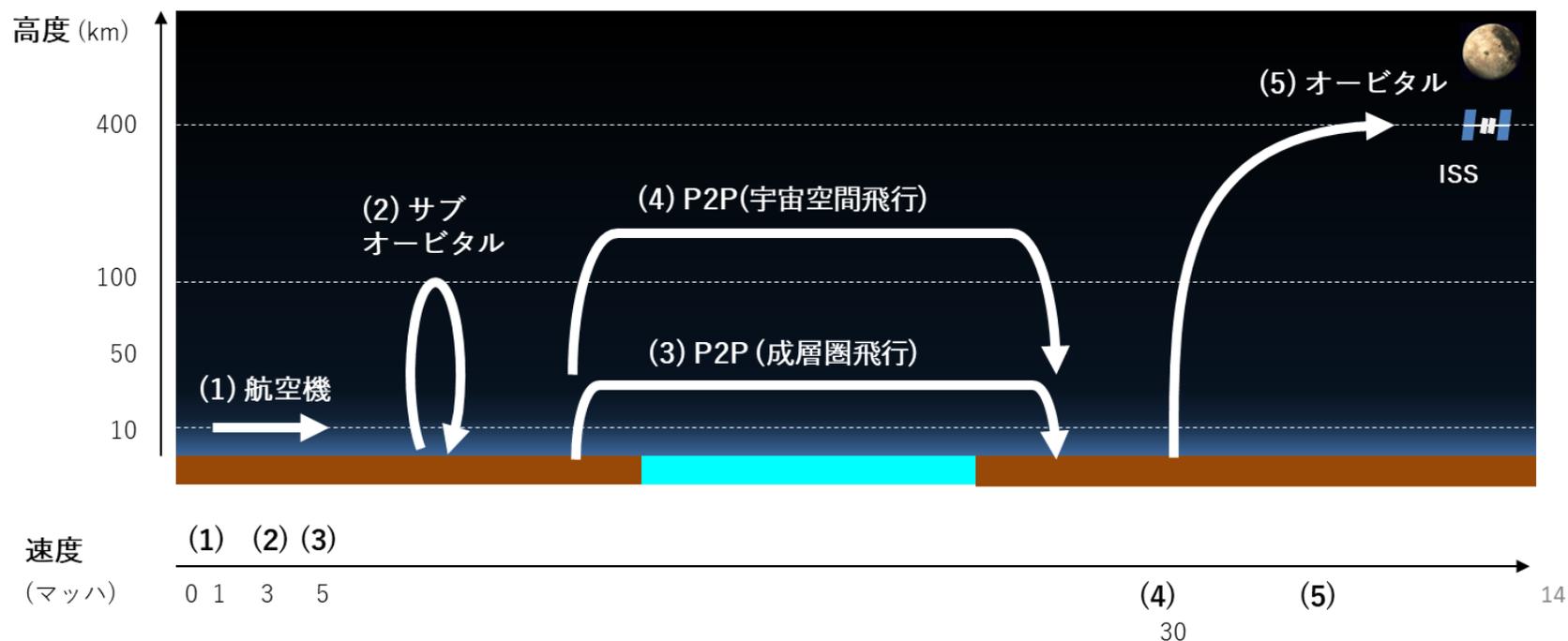
- 民間主導による高頻度往還飛行型宇宙輸送システムに関しては、民間事業者が決定することから、必ずしも以下の6種のシステムだけに限定されない。当面、JAXAは、これらのシステムに対して、TRLが低いシステム・技術を中心に技術獲得を進め、技術支援に対応。(事業者に応じて見直しを実施)
- TRLが低いシステム技術、空力制御技術、熱防御技術、空気吸い込みエンジン技術をボトルネック技術として技術ロードマップを検討中。その他、軽量化、低コスト化などのボトルネック技術については、基幹ロケット発展型技術の活用を想定している。
- 民間主導の事業支援に応じて、今後ボトルネック技術テーマ調整及びシステム検討の精度向上を図る。

	①サブオービタル宇宙旅行	②オービタル宇宙旅行	③P2P(高速2地点間輸送) 旅客輸送
A 垂直離陸/水平着陸 ロケットエンジンのみ	ケース A① 1段式 	ケース A② 2段式 	ケース A③ 1段式 
B 水平離陸/水平着陸 空気吸込エンジン等	ケース B① 1段式 	ケース B② 2段式 	ケース B③ 1段式 

# 高頻度往還飛行型宇宙輸送システムの飛行条件

## (参考) 典型的な飛行条件

	高度	速度	移動距離・飛行時間
(1) 一般的ジェット航空機	10km	マッハ 1未満	大陸間、1万kmで11時間以上
(2) サブオービタル飛行	100km	マッハ 3~4	なし(同一の空港等で発着)
(3) P2P (高速2地点間輸送) 成層圏飛行	25km以上	マッハ 5以上	大陸間、1万kmで2時間以上
(4) P2P (高速2地点間輸送) 宇宙空間飛行	200km以下	マッハ30未満	大陸間、1万kmで0.5時間以上
(5) オービタル飛行	200km以上	マッハ 30以上	地球周回~ISS・月



## 今後の計画(案)

- 技術ロードマップについては、引き続き検討を推し進める。
- 2021年度末を目途に、関心のある企業等を対象とし、
  - 要素技術開発の進捗状況
  - 技術ロードマップ(ボトルネック技術)

の共有を目指したフォーラム(仮称)等を開催し、国/JAXA側からの情報発信を行う準備を進める。

# (参考)TRLとは -BDB-06005CJAXA技術成熟度(TRL)運用ガイドライン抜粋-

TRL	Technology Readiness Level 定義
9	<p>詳細定義)対象の実際のモデルが、実際にライフサイクルに亘って経験する環境で、宇宙システムの一部として、軌道上運用を通じて所期の寿命まで実証されること。『ライト・プルーブ』。</p> <p>早見版)対象の実際のモデルが軌道上運用を通じて所期の寿命まで実証されること。『ライト・プルーブ』</p>
8	<p>詳細定義)対象の実際のモデルが、ライフサイクルに亘って経験する環境を包含するレベルのシステム的环境中、宇宙システムの一部(最終コンフィギュレーション)として、システムPFT又はAT試験を通じて実証されること。『ライト認定(Accepted for Flight(ライト準備完了))』。</p> <p>早見版)対象の実際のモデルのライフサイクルに亘って経験する環境での地上試験(システムPFT又はAT)を通じた『ライト認定(Accepted for Flight(ライト準備完了))』</p>
7	<p>詳細定義)対象の認定モデルが、ライフサイクルに亘って経験する環境を包含し適切なマージンを有したシステム的环境中、宇宙システムの一部(システムPMコンフィギュレーション)として、システムQT試験を通じて実証されること。</p> <p>早見版)対象の認定モデルのライフサイクルに亘って経験する環境を包含し適切なマージンを有した環境での地上試験(システムQT)を通じた実証 ※必ずしも、この段階(TRL7)を経なくても良い。</p>
6	<p>詳細定義)対象の認定モデルが、ライフサイクルに亘って経験する環境を包含し、その対象となる機器にとって重要な機能・性能を検証するために要求される最も厳しい運用(条件)を考慮に入れた機器の環境で、機器単体として、認定試験(QT)を通じて要求仕様に規定された範囲に亘って適切なマージンを有する機能・性能であること、又はプロトフライト試験(RFT)を通じて要求仕様に規定された範囲に亘って受入れ得る機能・性能であることの妥当性が確認されること。</p> <p>早見版)対象の認定モデルの相当環境での地上試験(QT又はPFT)を通じた妥当性(有効性)確認</p> <p>※TRL7以上はシステムレベルでの検証・実証が必要。</p>
5	<p>詳細定義)対象のエンジニアリングモデル(EM)が、ライフサイクルに亘って経験する環境を包含し対象となる機器にとって重要な機能・性能を検証するために要求される最も厳しい運用(条件)を考慮に入れた機器の環境で、機器単体として、EM開発試験を通じて設計の妥当性(有効性)が確認されること。</p> <p>早見版)対象のエンジニアリングモデル(EM)の相当環境での妥当性(有効性)確認</p>
4	<p>定義詳細)対象のブレッドボードモデル(BBM)が、実験室環境で、機器単体として、BBM試作試験を通じて妥当性(有効性)が確認されること。</p> <p>早見版)対象のブレッドボードモデル(BBM)の実験室環境での妥当性(有効性)確認</p>
3	クリティカル機能や特性の分析的及び実験的なコンセプト証明
2	テクノロジーコンセプトやアプリケーションの明確化
1	基本原理の観察と報告