

資料6-2

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6回) R3. 3. 3

革新的将来宇宙輸送システム案 * について

令和3年3月3日

(国研)宇宙航空研究開発機構

※議論のための参考例

1. 革新的将来宇宙輸送システムの検討条件

- 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	<ul style="list-style-type: none"> ・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 	<ul style="list-style-type: none"> ・主要市場案; 宇宙旅行 ・輸送方式案; 垂直打上げ 	<ul style="list-style-type: none"> ・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	<ul style="list-style-type: none"> ・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 	<ul style="list-style-type: none"> ・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. 革新的将来宇宙輸送システムの検討条件

■ システム検討の上での前提条件：

- 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提言するのみならず、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。

2. 革新的将来宇宙輸送システム案について

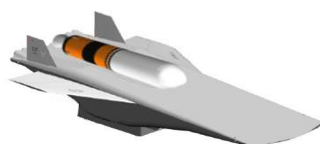
- 2040年代に向けて、宇宙輸送システム方式として、これまでのミッション検討結果及び重要技術の網羅性を踏まえ、1段垂直離陸／水平離陸、2段垂直着陸／水平着陸の形態から抽出したリファレンスシステムA, B, Cの3方式を紹介する。

- リファレンスシステムA
飛行実証は2030年頃



1段: 垂直離陸・垂直着陸
2段: 使い切り
(推進薬: 左は水素、
右はLNG(将来的にはCNメタン*))
* Carbon Neutral: カーボンニュートラル

- リファレンスシステムB
飛行実証は2035年頃



1段: エアブリージングエンジン※搭載機体
2段: 使い切りロケット

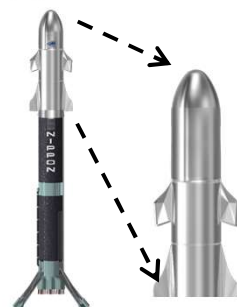


1段: エアブリージングエンジン※搭載機体
2段部に有人搭載部を装着

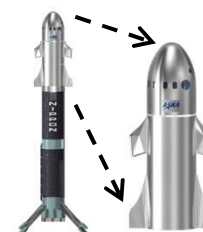
※エアブリージングエンジンは、宇宙へのアクセスも可能なロケットエンジンをベースとした複合サイクルエンジン

- リファレンスシステムC
飛行実証は2040年頃

(リファレンスシステムAの上段を発展) 完全再使用



有人P2P仕様(1段再使用)



それぞれのシステム形態の特徴

	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	<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) 	<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
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"> ・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) 	<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

再使用の意義・価値について(共通)

○高頻度打上への対応

○高頻度打上機会による高頻度改良開発機会の増加(新旧同時搭載フライトの活用等)

○無人/有人輸送に対して、安全信頼性の早期熟成

リファレンスシステム例

システム実現シナリオ(例)

○2030年頃に部分再使用(システムA)を実現し、並行して上段再使用に向けた研究開発・飛行実証を加速し、2040年までにシステムCを実現。

○システムBに関しては、TRL(Technology Readiness Level :技術成熟度)が低いことから、2030年頃に、2040年の中間段階の飛行実証として、意義価値のある目標システムを設定する。

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	<p>水素 Φ5.2 ×64m メタン Φ5.2 ×61m</p> <p>水素 Φ5.2 ×64m メタン Φ5.2 ×61m</p>		
打ち上げ能力	シングルスティック 【一段再使用】 LEO 15 ton GTO 4.2 ton 【一段使い捨て】 LEO 20 ton GTO 6.8 ton LRB2基形態 【一段/LRB*再使用】 LEO 26 ton GTO 8.1 ton 【一段/LRB*使い捨て】 LEO 54 ton GTO 21 ton LTO*** 16 ton *: Liquid Rocket Booster 補助ロケット ***: Lunar Transfer Orbit 月遷移軌道	SSO 300kg (TBD) P2P(有人輸送): 10数名 (TBD)	ファミリー化にて広レンジに対応 上段はサブオービタル利用にも発展能力はTBD.
ミッション要求(案)	<ul style="list-style-type: none"> 打上費目標: TBD LRB射点回収, コア海上回収 LRB再使用回数: 8~10回 再整備期間: 20~40日間 有人輸送: TBD 	<ul style="list-style-type: none"> 打上げ費用: TBD 再使用回数: TBD 再整備期間: TBD 有人輸送: TBD 	<ul style="list-style-type: none"> 打上費目標: LEO1~2億円/ton以下 再使用回数: 8~10回 再整備期間: 20~40日間 有人輸送: 3人以上のクルーをLEOとP to P輸送できる発展性を有すること
主な技術課題	下記に資する低コスト化技術が必要 ✓ モデルベース開発の高度化・低コスト化 ✓ 主構造タンク複合材化 ✓ 共通隔壁化 ✓ 軽量降着装置 ✓ 点検・再整備技術 ✓ AM適用範囲拡大 ✓ 各部電動化 ✓ 無効推薬を減らす推薬管理 ✓ 完全自律飛行安全 ✓ 機器統合 ✓ ワイヤレス化 ✓ 洋上回収システムなど	✓ モデルベース開発の高度化 ✓ 複合材技術 ✓ ヘルスマネジメント技術 ✓ 有人化技術 ✓ エアブリージングエンジン技術 ✓ 耐熱・熱制御技術 ✓ エアブリージングエンジンでの機体設計技術 など	✓ システムAの技術課題に加えて ✓ 有人発展性技術 ✓ 上段再使用化技術 ✓ 環境保全技術 ✓ 着陸環境整備 など

2030年-2040年頃の利用像とシステム

システムA, C(メタン仕様例): 宇宙輸送(部分再使用、完全再使用)、P2P

システムB: 空中発射(小型衛星打ち上げ)、P2P

OTV*(軌道間輸送機): 探査、拠点輸送、軌道上サービス

* Orbital Transfer Vehicle

GW*輸送、月/惑星探査

※Gate Way: 月周回有人拠点

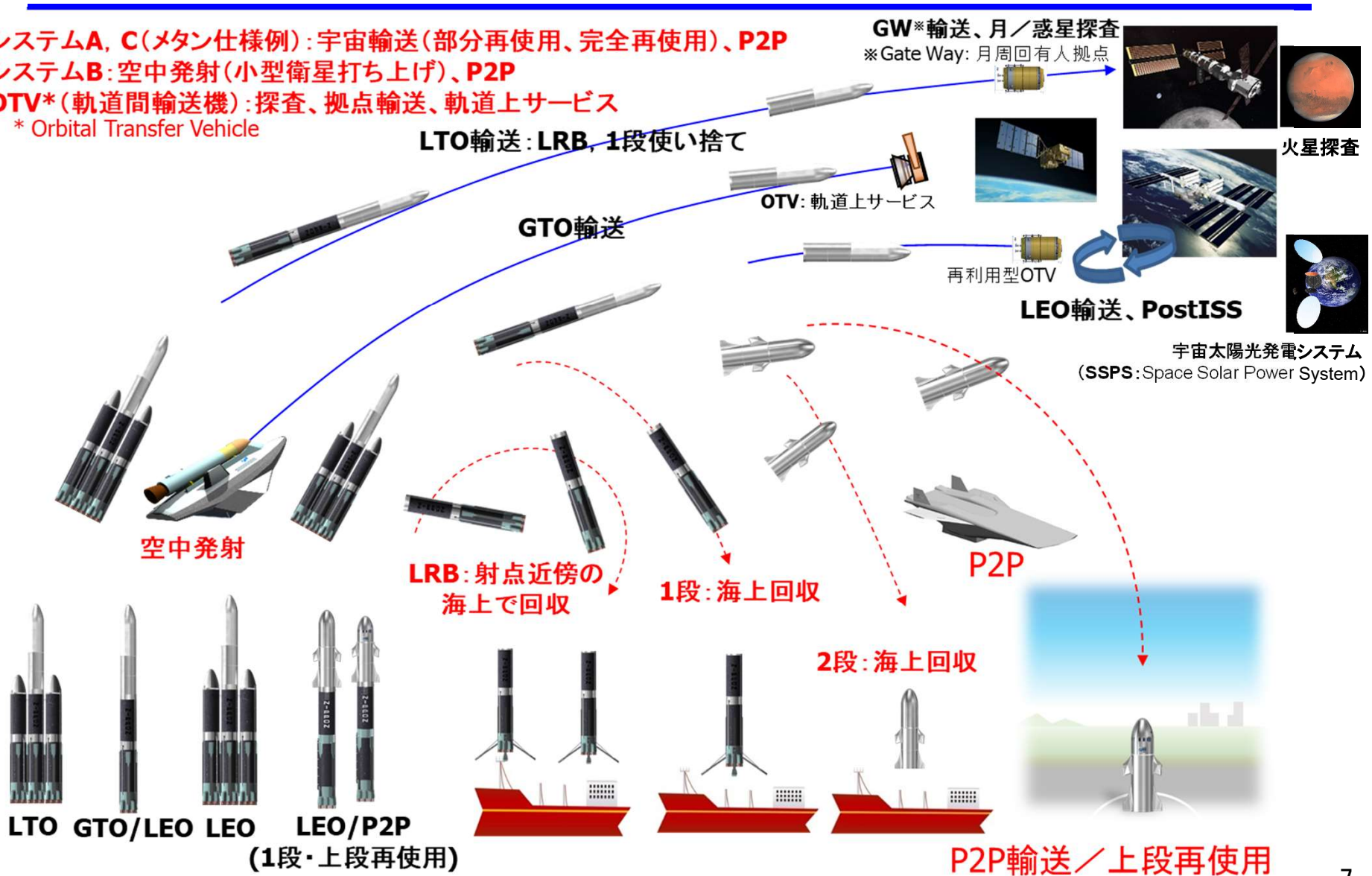
LTO輸送: LRB, 1段使い捨て

OTV: 軌道上サービス

再利用型OTV

LEO輸送、PostISS

宇宙太陽光発電システム
(SSPS: Space Solar Power System)



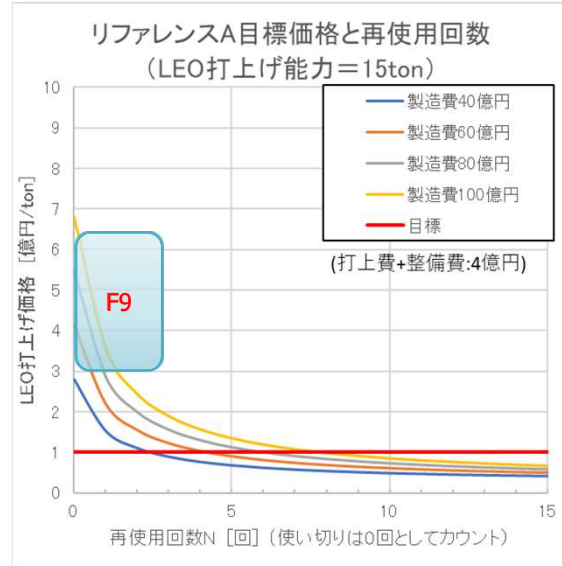
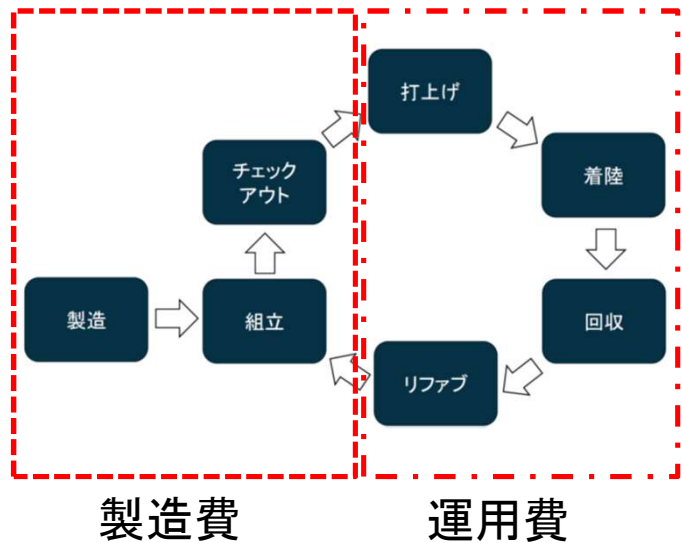
3. 抜本的低コストに向けたコスト削減方策

■ 輸送システムの再使用化

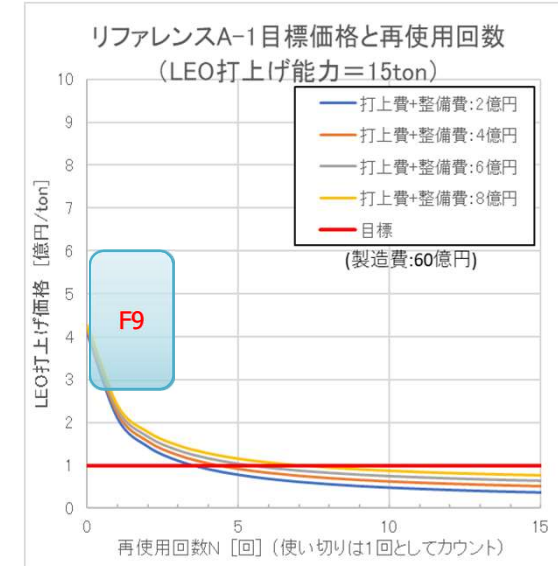
- 完全再使用システムによる打上げ輸送コストは下記で概算され、**製造費・打上げ費・整備費の低減**と**使用回数の増大**が必要。

$$\{(\text{製造費})+(\text{打上げ費})\times(\text{使用回数})+(\text{整備費})\times(\text{使用回数}-1)\} \div (\text{使用回数})$$

- ただし、機体再使用による打上げ輸送コスト低減は、**一定回数を超えると効果の低減**、**開発費・製造費・整備費の増加**を招く可能性があるため、**市場の需要を踏まえ打上価格を段階的に設定しつつ、再使用回数を見極めていく必要がある。**



再使用回数に対する**製造費**(推進薬含む)感度
(LEO打上げ能力15ton)



再使用回数に対する**運用費**感度
(LEO打上げ能力15ton)

※製造費:60億円(打上価格4億円/ton)の例 8

3. 抜本的低コストに向けたコスト削減方策

■ 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）

これまでの宇宙輸送システムにおいては、一部車載品等の適用を除き、基本的にMIL-SPEC等航空宇宙用仕様での部品購入。このため、一般流通品よりも検査などのコストが付加され、高価な傾向にある。これらを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。

今後カーボンニュートラル政策に踏まえ、複合材は市場が拡大し、低コストが進行すると推測。このため、複合材の適用範囲を拡大するとともに、製造方法を含む低コスト化を図る。

■ 製造工程の革新化（3Dプリント技術・モデルベース開発・実試験の省力化等）

・3Dプリント技術は、これまでの機械加工等の製造技術を基本とした設計技術から、機能・コストを最適化を図るトポロジー設計が重要。こうした設計技術に対して、デジタルツイン技術を活用し、より効率的かつ低コストな製品を実現。効率的な開発を実現するモデルベース開発を更に推進し、低コスト製品の実現のみならず、実試験・検査の規模の縮小などを図る。

※デジタルルイン技術：機体やメカトロニクスをコンピューター上にバーチャルに再現し、コンセプト開発、設計、生産、利用のすべてのフェーズの効率化や価値向上を図る

■ 国際協力（調達・技術協力）

国内の宇宙輸送事業者と海外の宇宙輸送事業者の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。

低コスト複合材の適用範囲の拡大例

【3次元曲面形状への適用性】

再使用型上段機体でも使い捨てでも必ず必要になる3次元曲面形状への適用性はCFRPが優れている。
 (金属材料から切削加工で製造すると材料の無駄が多くなり高コスト)

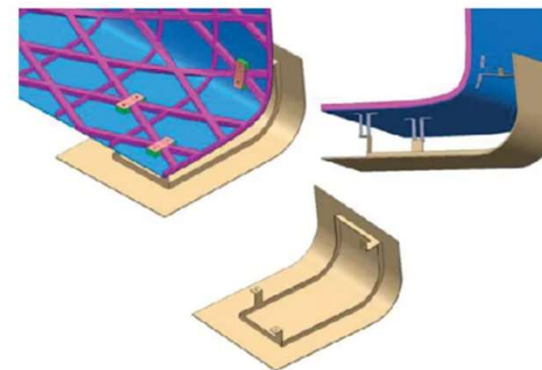
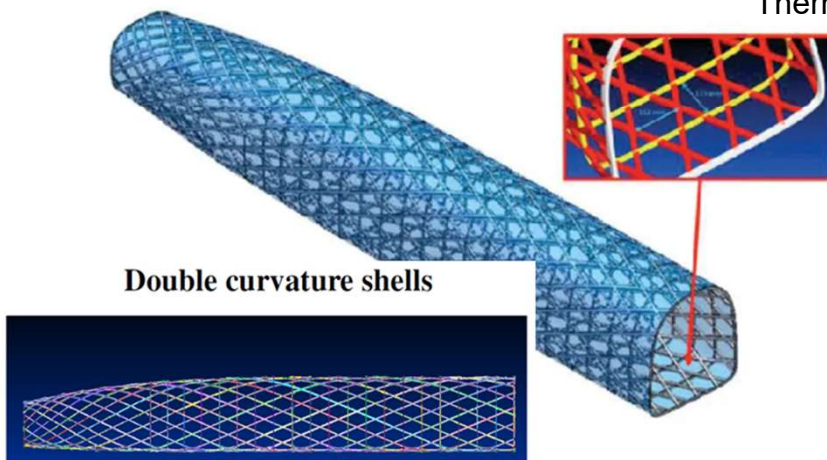


宇宙機に限らず、航空機の胴体構造にもCFRPラティス構造による3次元曲面形状のニアネット製造適用の検討事例があり。

【スタンドオフTPSとの構造結合への適用性】

大型複曲面構造にラティスを用いることで、リブ交点をハードポイントとしたTPSインターフェース適用性も良いと期待される。

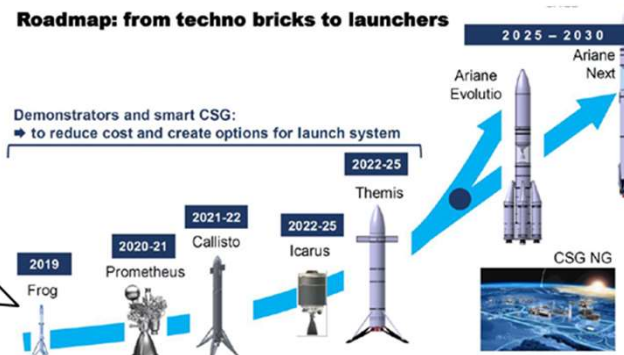
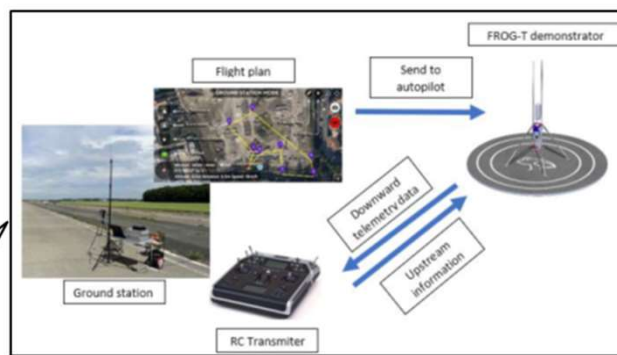
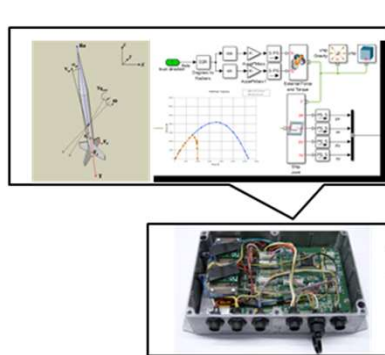
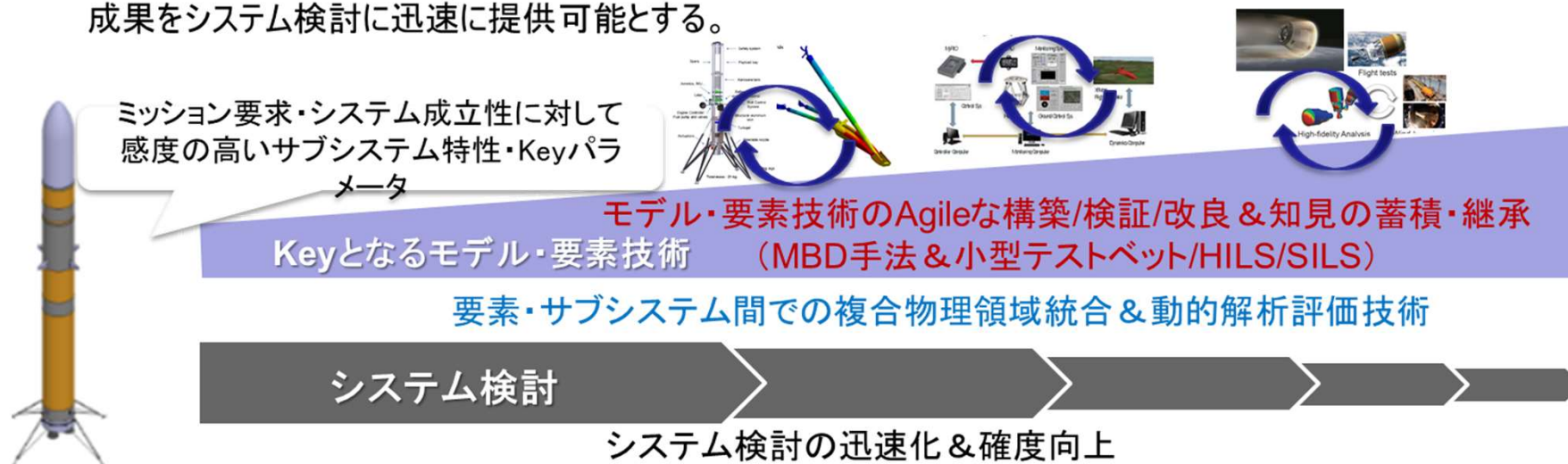
* Thermal Protection System: 熱防御システム



モデルベース開発 (MBD) のシステムへの適用

■ MBD基盤構築

開発期間の短縮・スピード向上を目指し、システム成立性のKeyとなるモデル・要素技術を小さく・短期 (Agile) に構築/検証/改良するための仕組み (小型テストベット/HILS/SILSの活用等) を構築し、最新の成果をシステム検討に迅速に提供可能とする。



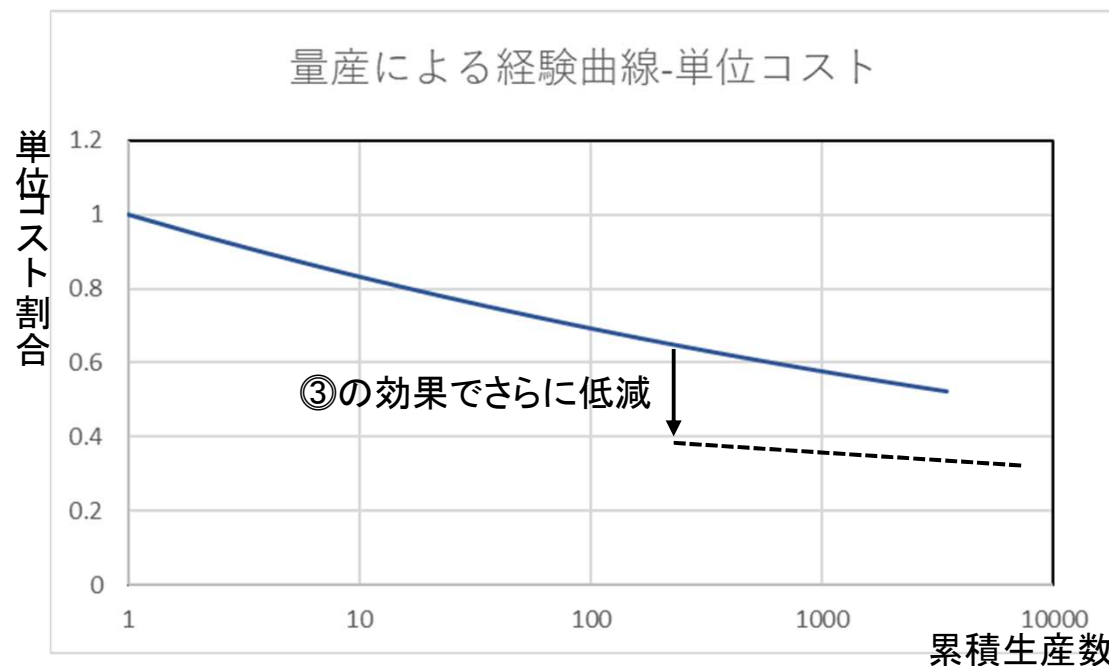
小型テストベットを活用したモデル・要素技術のAgileな検証

3. 抜本的低コストに向けたコスト削減方策

■ 打上げ回数の増加(量産効果)

飛躍的なミッションの増加に対しては、再使用における整備・再運用など高頻度打上により量産効果を発揮する可能性がある。量産効果は、①固定費(製造に必要な装置の維持費など)の割掛け減少効果、②習熟度向上(学習による歩留まり減少や生産性向上など)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・効率化などある。

※Space Xは第1段の再使用運用を繰り返すことで、ターンアラウンド時間を大幅に短縮している。最初の再使用時には約350日のターンアラウンド時間が必要となっていたが、最近の打ち上げにおいては約40日程度まで短縮されている。



経験曲線: 単位コスト=初期生産単位コスト×(累積生産数)^(累積生産数に対するコスト弾力性)