

今後の基幹ロケット開発方策について

令和6(2024)年7月23日
宇宙航空研究開発機構
宇宙輸送技術部門/研究開発部門

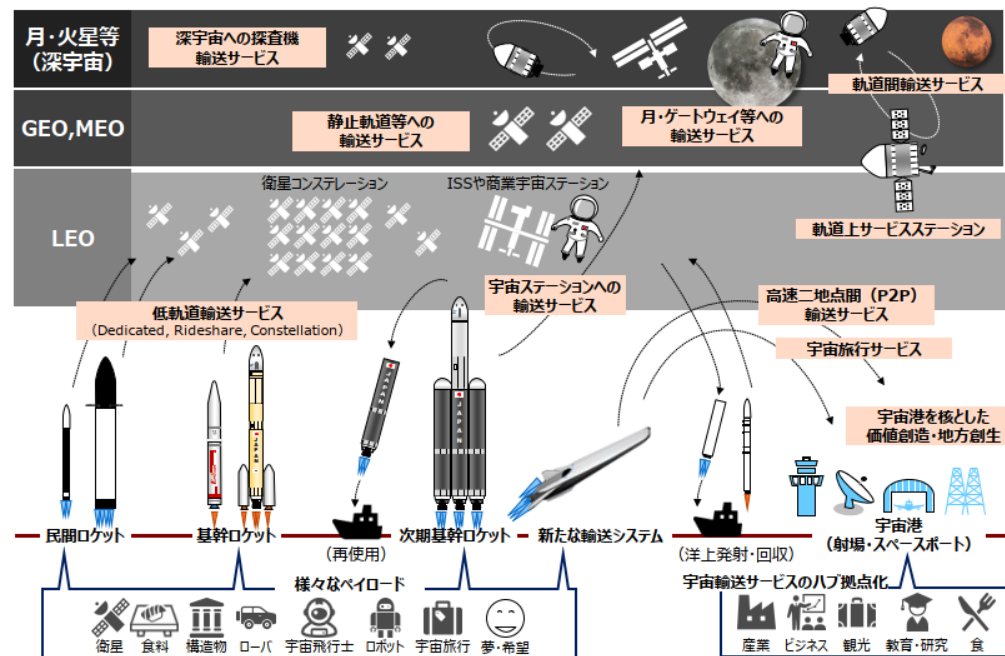
1. はじめに

- 我が国の新しい基幹ロケットであるH3ロケットは、試験機2号機に続く3号機の打上げ成功により本格的な運用段階に入った。今後、これまでの開発で培ってきた技術、人材、及び産業を基盤として、固体ロケットブースタ無しの30形態やLE-9の恒久対策型エンジンの開発などによりH3ロケットに更に磨きをかけ、**打上げ成功実績を積み重ねていく中で、これらの基盤をより強固にしていく**ことが、宇宙アクセスの自立性確保のために重要である。
- 更に、本格的な宇宙空間への人類活動領域の拡大に向け、**宇宙活動の重要基盤である宇宙輸送は、能力を強化し、安価でかつ高頻度の打上げを実現していく**ことが、宇宙技術戦略の基本的考え方として位置付けられている。
- これらの背景を踏まえ、**基幹ロケットの基盤を維持向上しながら、環境の変化や社会的な要請に応じて柔軟に性能を強化していく**ことを目指し、今後の基幹ロケットの開発方策の検討を行った。

2. 今後の基幹ロケット開発方策

2.1 宇宙技術戦略を踏まえた宇宙輸送システムの将来像

- 宇宙基本計画および宇宙技術戦略では、次期基幹ロケットの運用実現、完全再使用化及び有人輸送への拡張、及び高速二地点間輸送や宇宙旅行などの新たな宇宙輸送システムの実現を目指すことが示されており、こうした宇宙輸送分野のイノベーションを積極的に創出することにより、**多様な宇宙輸送ニーズに確実に対応**できるようにすることが求められている。
- 多様な輸送ニーズに対応するため、宇宙への輸送はより高頻度になるとともに、より柔軟性が高く、高頻度なロジスティクスを実現する**柔軟性の高い宇宙輸送サービスへと進化**しなければならない。
- このような変化の中で、基幹ロケットが果たすべき役割やあり方を次ページ以降に示す。



宇宙技術戦略(令和6年3月28日)
P65 図1: 宇宙輸送の将来像

2. 今後の基幹ロケット開発方策

2.2 基幹ロケットの役割とあり方

■ 宇宙輸送の意義と基幹ロケットの役割

- 我が国の安全保障や経済・社会活動における宇宙輸送システムの重要性が高まる中、自立的な宇宙活動実現のために他国に依存しない宇宙輸送システムを確保することは宇宙政策の基本である。
- 自立的な宇宙へのアクセス手段を確保し、拡大する宇宙利用に対応していくために、基幹ロケットは必要な技術・人材・産業の基盤を持続的に維持する役割を担う。

■ 自立性確保および国際競争力強化のための要件

- 宇宙輸送システムの自立性確保のためには、安定した開発・運用・事業の機会を持つことが重要。
- 特に、技術や人材の基盤を維持するためには、継続的なロケット開発機会の確保が不可欠である。これまで我が国の大型ロケット開発は20年程度の間隔で立ち上げられており、技術・人材基盤の途絶リスクを抱えている状態であった。H3開発で再び構築した技術・人材基盤を維持するとともに、その基盤を土台とした民間ロケットとの共創等により、我が国全体の共通基盤として活用していくことも重要である。
- また、産業基盤の維持には、事業として成立するために必要な打上げ機会の確保および打上/試験設備等の更新/拡充が不可欠である。打上/試験設備等の多くは整備後50年近く経過し、老朽化が激しく、安定した打上げや開発の継続に対してリスクを有する状態であるため、総合システム維持のためには対応が必須。民間による宇宙利用が益々拡大する中、基盤的な課題に対処しながら、打上げ需要に適切に応え、カスタマの信頼を保ち続けることが重要である。

■ 以上を踏まえた基幹ロケットのあり方

- 技術・人材・産業基盤の維持/向上のため、基幹ロケットの継続的な開発機会を通して、これまで熟成してきた総合システムとしてのロケット開発技術を後世に確実に継承するとともに、新たな技術革新を可能とする裾野の拡大、次世代の人材の確保・育成を推進しなければならない。
- 更に、官需衛星を着実に打上げながら同時に民需も獲得していくため、基幹ロケットの強化により、社会的な要請に応え信頼を保ちながら、将来にわたり国際競争力を保持しなければならない。

2. 今後の基幹ロケット開発方策

2.3 基幹ロケット開発方策検討における基本的な考え方

前頁で述べた基幹ロケットのあり方をもとに、今後の開発方策における基本的な考え方を、以下のとおり整理した。

① 技術・人材・産業基盤維持向上

H3/イプシロンSロケットの技術・人材・産業基盤を成熟させながら、**段階的に強化**するとともに、多様な研究成果による**新たな技術革新**にも機を逃さず挑戦することにより、**持続的かつ安定した基盤を構築**する。また、構築した基盤を土台として、民間ロケット事業等との共創に貢献する。

② 官需衛星の着実な打上げ

宇宙基本計画工程表で示される衛星の打上げ、ならびに宇宙技術戦略で示される将来構想の実現に**必要な打上能力と高い信頼性**をもったロケットシステムを獲得する。

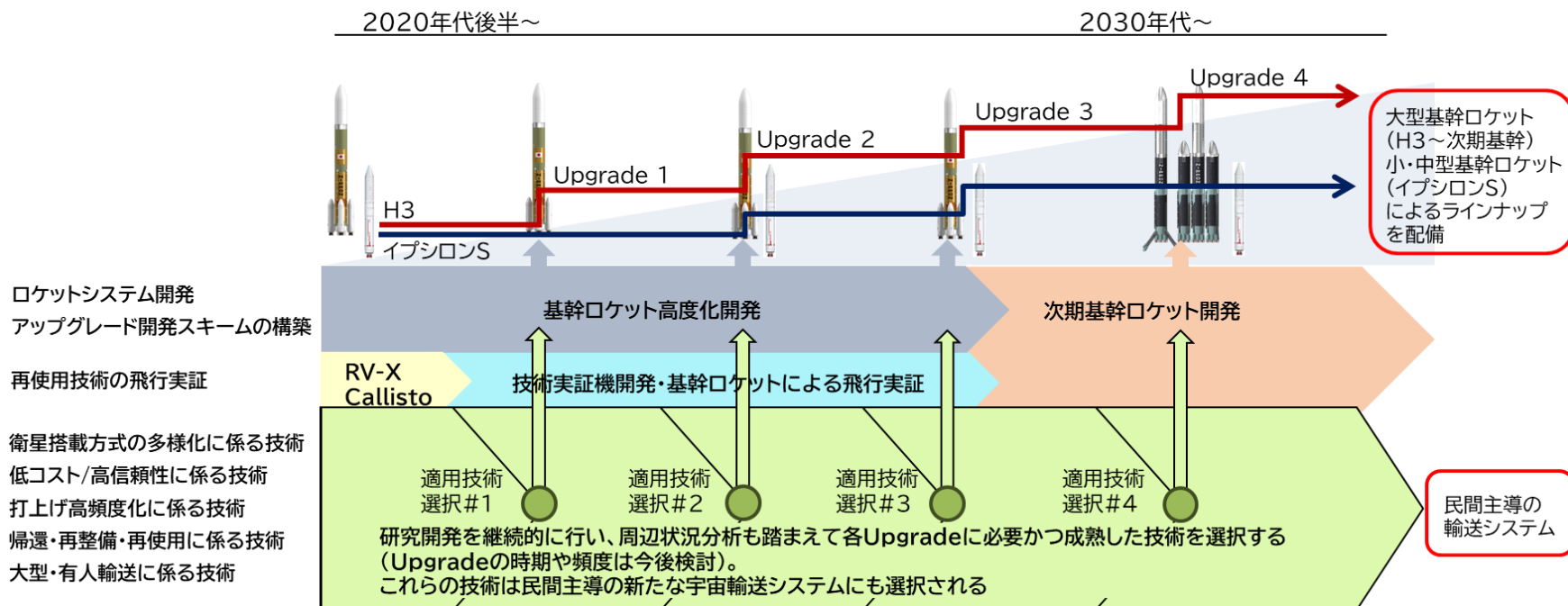
③ 国際競争力強化

常に**変化する需要動向・競合分析**を踏まえ、海外競合ロケットと比肩しうる**打上能力、打上能力単価**、社会的需要に応えるための**打上げ頻度**、ならびに多様化/大型化する**衛星動向への対応等**を、**柔軟性とスピード感**をもって進める。

2. 今後の基幹ロケット開発方策

2.4 基幹ロケット開発方策の検討

- 打上げ需要動向や技術動向の変化が激しい状況の中、ロケットの性能目標は柔軟に見直し・最新化することが重要であることから、打上げニーズの変化を踏まえた持続的かつ段階的な開発プロセス（ブロックアップグレード方式）を構築し、技術や人材基盤の維持向上を図る。
- さらに2030年代には、再使用化を軸とし、抜本的なコストダウンと打上げ頻度向上を備えた次期基幹ロケットを実現するために、基幹ロケットを総合システムとしてアップグレードしながら各システム性能を段階的に向上させる。
- 並行して、老朽化した射場設備・試験設備の刷新・拡充や、現在実施中の基幹ロケット打上げ高頻度化に向けた取組みを着実にを行うとともに、将来にわたって高頻度に打ち上げ続けるための我が国の打上げ射場等のあり方について今後検討を進める。また、新たな機能を実証するための飛行実験場の検討等を併せて行うことも重要。



2. 今後の基幹ロケット開発方策

2.4 基幹ロケット開発方策の検討

■ ブロックアップグレード全体構想

- アップグレードの仕様や開発項目は、刻々の打上げ需要動向や、研究開発の技術成熟度、課題対応の緊要性等を考慮し、柔軟に検討し設定することが重要である。
- そのため最初に全体の計画設定するのではなく、以下の方向性を考慮し2025年度から段階的にアップグレードを立ち上げ、並行してさらに先のアップグレードを逐次設定する流れを指向する。
- このアップグレードプロセス全体を、基幹ロケット高度化と呼ぶ。

■ 各アップグレードの検討の方向性（※アップグレードの区切り方も重要な検討要素）

● アップグレード1

- ・ 宇宙戦略基金の創設等により増加する多様なミッション・複数衛星搭載需要や国内小型衛星コンステレーションへの対応(ユーザ利用拡大)を柔軟に実現し、さらなる宇宙利用拡大に資する。
- ・ システムの信頼性を確保しながらアップグレードを実現するため、アビオニクスシステム等の信頼性の構築・検証／アップグレード開発スキームを確立し、システム脆弱性の評価やロバスト性向上対策の適用に資する。

● アップグレード2～

- ・ 再使用/使い切りを問わない低コスト製造技術、それを支える部品・コンポの簡素化/量産化や運用効率化に資する高頻度化技術により、国際競争力の確保と打上げ事業基盤の安定化に資する。

● アップグレード3～

- ・ 国際協力ミッションや深宇宙探査等の大型輸送需要に対応するための打上げ能力向上や、余剰能力を活用した再使用技術の飛行実証等により、次期基幹ロケットの早期実現に向けた技術・人材基盤の橋渡しを担う。

2. 今後の基幹ロケット開発方策

2.4 基幹ロケット開発方策の検討

■ 補足：アップグレード1の狙いと方向性

- 大型かつ複数衛星打上げ需要の増加
 - ・ 打上げニーズ分析等から、従来の小型衛星の主流であった100kg以下級よりも、300kg程度までの**複数衛星打上げやコンステレーション需要**が大きく増加し、さらに大きなものでは、500kg級程度の衛星の**相乗り打上げ需要**増加も見込まれる。
 - 基幹ロケットの目指す方向性
 - ・ 今後宇宙戦略基金を活用した国内衛星が増えることも見込まれ、**増加する国内衛星を可能な限り国内から打ち上げられる状態**を目指す。そのためには以下の方向性が考えられる。
 - ≫ 要求軌道や固有インタフェースにより、小型かつ単独または少数で打ち上げるのに適した衛星は、**イプシロンSと民間小型ロケットの協業**により、即応性/柔軟性をもって対応する。
 - ≫ 標準的な軌道やインタフェースの衛星は、**H3ロケットで多数機同時に搭載**するライドシェア等によりできるだけ多くの衛星を一度に打ち上げる。そのために必要な打上げ能力余裕と柔軟性のある衛星搭載機能を確保する必要がある。
 - ・ このように、**ユーザ毎に異なる多様な、かつ喫緊のニーズに適切に応えられる宇宙輸送サービスの実現**を目指す。
- この実現のために、以下の技術をアップグレード1で優先的に取り組む方向で検討を進める。
 - ・ 共通的な搭載構造およびI/Fで互換性をもって衛星搭載可能とし、衛星事業者にとって国内の打上げロケット選択や乗換えを容易とする。
 - ・ 環境条件・剛性要求、検証要求などを国内各ロケットで可能な限り統一規格化し、衛星の設計/検証を効率化する。

2. 今後の基幹ロケット開発方策

2.5 基幹ロケット開発方策の実現方針

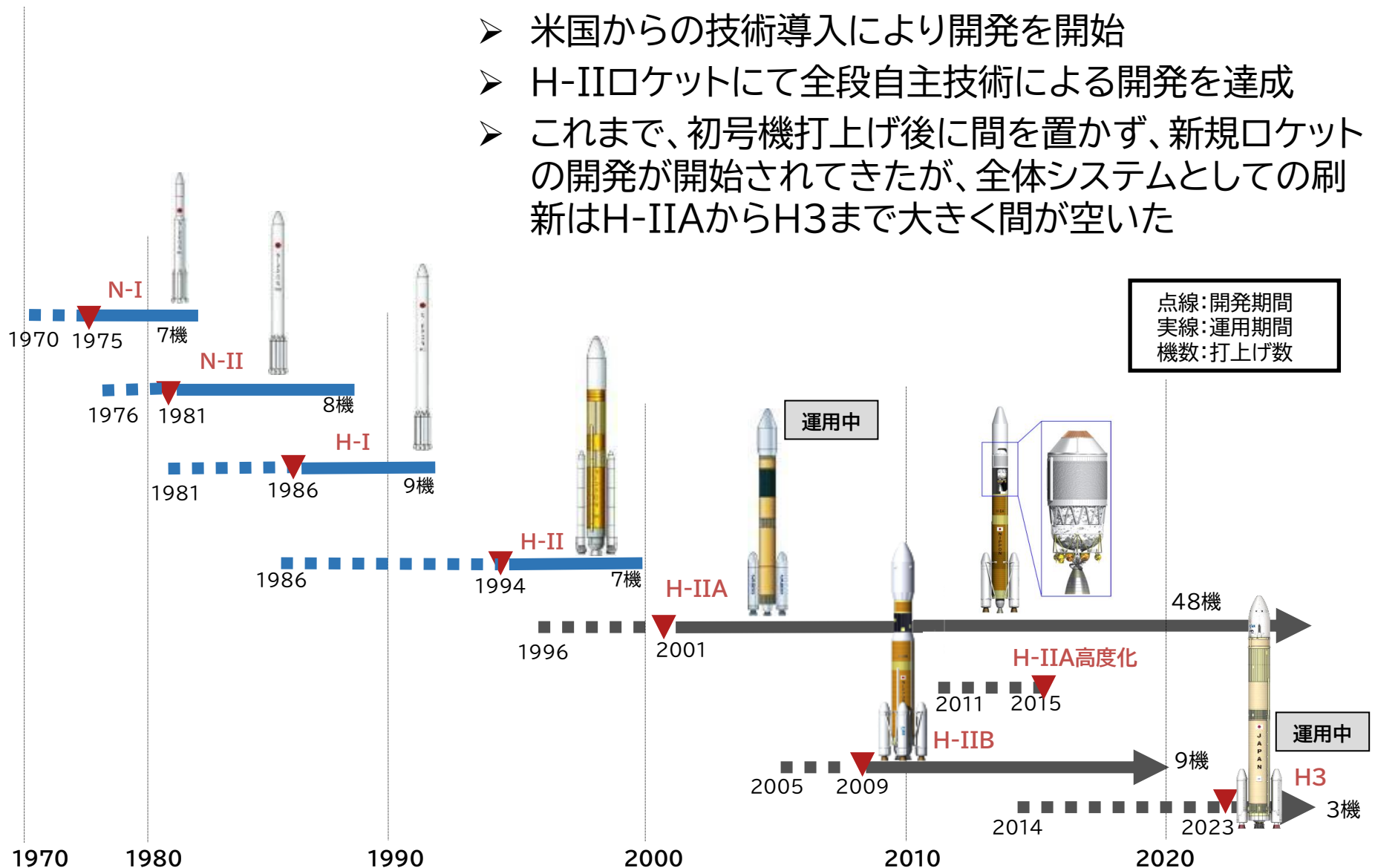
- 今後の基幹ロケット開発方策の基本的な考え方である、①技術・人材・産業基盤維持向上、②官需衛星の着実な打上げ、③国際競争力強化、のために必要な、継続的なロケット開発機会の確保、高い信頼性の獲得、変化する需要への対応 を実現するため、以下の基幹ロケット開発方策を実施していく。
- 宇宙技術戦略に沿った次世代の宇宙輸送技術の研究開発を迅速に進め、実機適用する出口戦略を明確にし、**基幹ロケットを総合システムとしてブロックアップグレードしつつ、次期基幹ロケットを完成**させるため、宇宙輸送系の事業・プロジェクト機能と研究機能を**一体化した研究開発体制を構築**し、必要な研究開発とその成果のシステムインテグレーションを推進する。
 - マネジメント改革検討委員会の報告を踏まえ、安定して高頻度に打上げ成功実績を積み重ねることが可能な**基幹ロケットの信頼性確保と打上げ基盤の整備**に取り組む。
 - **JAXAと産業界が連携・分担して、一貫性を持った基盤的活動**(信頼性向上や事業環境整備、打上げ高頻度化、射場設備老朽化への対応等)による産業エコシステムの構築を継続して推進する。

【添付資料】

これまでの我が国の基幹ロケット開発
および各国のロケット開発の状況

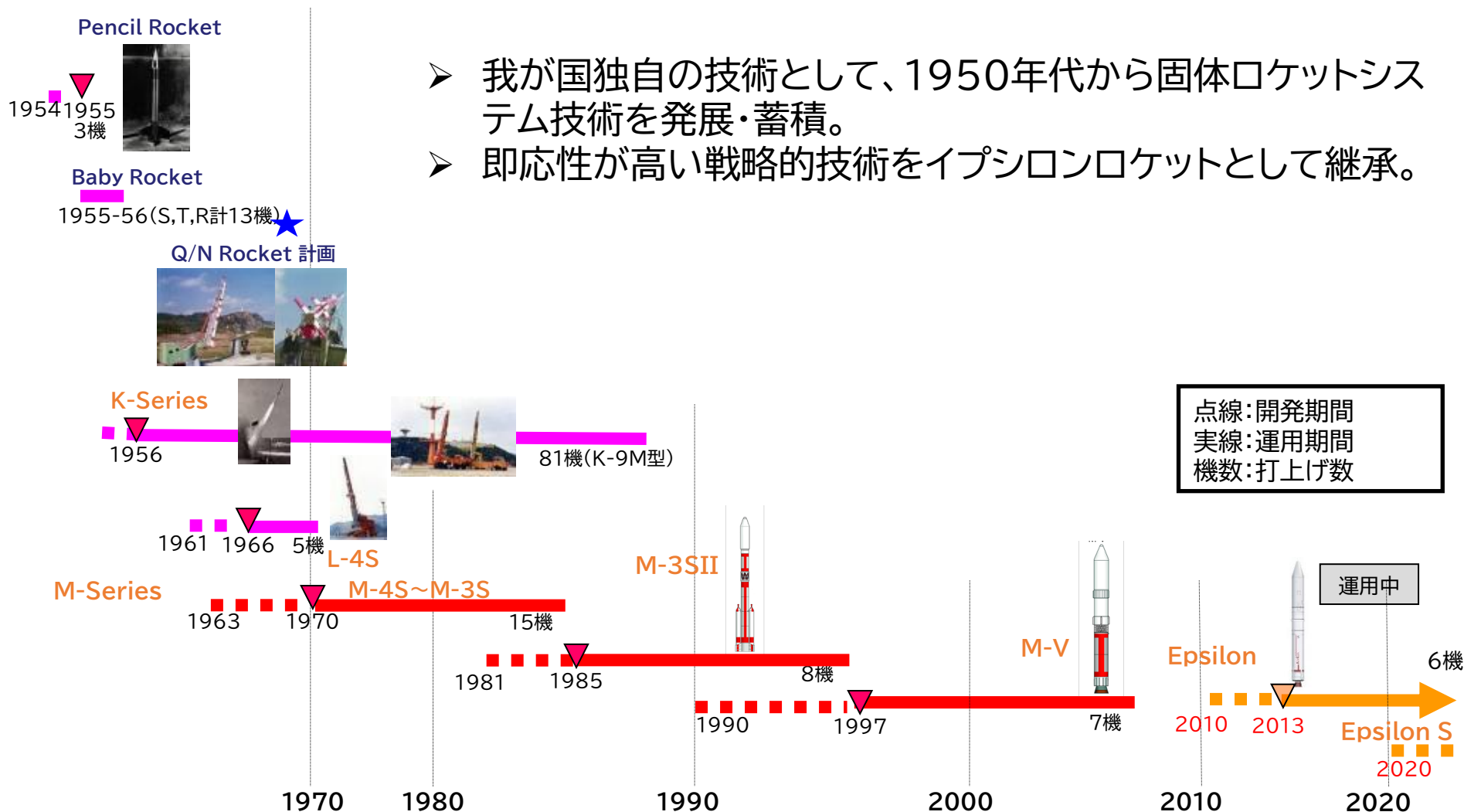
我が国の液体ロケットの開発経緯

- 米国からの技術導入により開発を開始
- H-IIロケットにて全段自主技術による開発を達成
- これまで、初号機打上げ後に間を置かず、新規ロケットの開発が開始されてきたが、全体システムとしての刷新はH-IIAからH3まで大きく間が空いた



我が国の固体ロケットの開発経緯

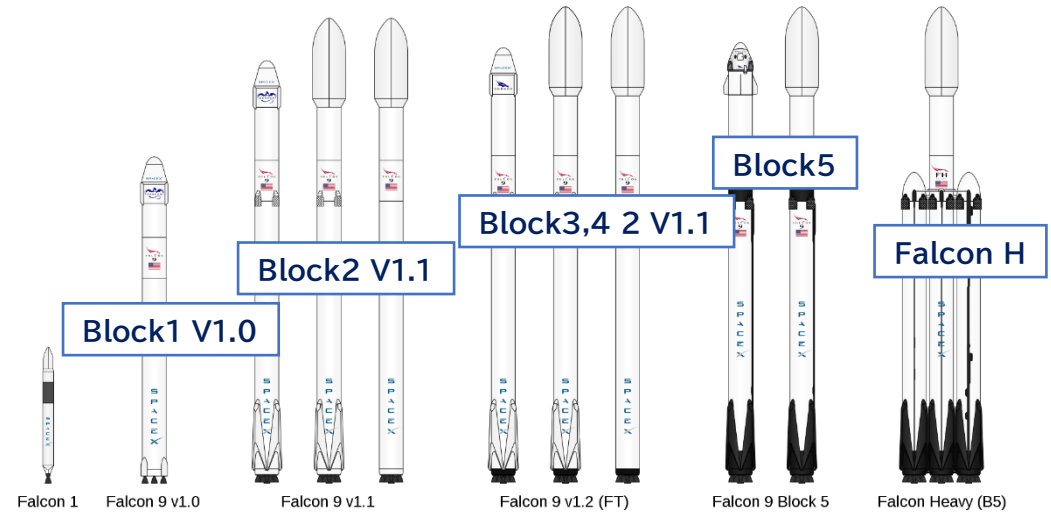
- 我が国独自の技術として、1950年代から固体ロケットシステム技術を発展・蓄積。
- 即応性が高い戦略的技術をイプシロンロケットとして継承。



各国のロケット開発の状況 - Falcon9の段階開発 -

Falcon9 Block Upgrade 概略

- Merlin1Dエンジンを段階的に15%から30%の能力増強
- 液体燃料と酸化剤の過冷却機能付加により貯蔵燃料及びエンジンへの質量流量の増加
- 構造面では1, 2段タンクの延長、ステージ分離部の改良、1段エンジン配置変更等
- 自律飛行安全適用、アビオニクス改良
- 再利用開発適用(グリッドフィン、着陸脚等)



出典: Dari kiri ke kanan: Falcon 1, Falcon 9 v1.0, tiga versi Falcon 9 v1.1, tiga versi Falcon 9 v1.2 (FT), dua versi Falcon 9 Block 5, dan dua versi Falcon Heavy

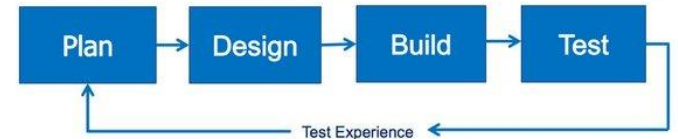
バージョン	Falcon9 v1.0 (運用終了)	Falcon9 v1.1 (運用終了)	Falcon9 Ver.1.2 フル・スラスト ブロック 3/4(運用終了)	Falcon9 Ver.1.2 ブロック5 (運用中)
第1段	Merlin 1C × 9	Merlin1D × 9	Merlin1D(改良版) × 9	Merlin1D(改良版) × 9
第2段	Merlin1C Vacuum × 1	Merlin1D Vacuum × 1	Merlin1D Vacuum(改良) × 1	Merlin1D Vacuum(改良) × 1
全高 (m)	53	68.4	70	70
直径 (m)	3.66	3.66(フェアリング5.2m)	3.66(フェアリング5.2m)	3.66(フェアリング5.2m)
質量(ton)	318	506	549	~587
静止トランスファ軌道(GTO) ペイロード (kg)	3,400	4,850	8,300(使い捨て) >5,300(再利用)	8,300(使い捨て) 5,500(再利用)
ブロックアップグレード 主要変更箇所	✓ Merlin1C+ (Falcon1改良型) ✓ 1段Eng 3x3グリッド配置 ✓ 2段Merlin1C Vacuum ✓ 軽量熱防御システム	✓ Merlin1D(60%増強) ✓ 1段Eng 放射状型配置 ✓ 2段Merlin1D Vacuum ✓ タンク延長(60%) ✓ ステージ分離部削減 ✓ アビオニクス強化 ✓ 着陸脚の適用	✓ Merlin1D+(能力強化) ✓ 推進過冷却機能付加 ✓ 2段Merlin1DV改良型 ✓ 2段タンク延長 ✓ ステージ分離機構改良 ✓ グリッドフィン改良 ✓ 自律飛行安全適(AFSS)	✓ Merlin1D++(能力強化) ✓ 2段Merlin1DV ✓ 製造運用工程の見直し ✓ 複合材タンク(COPV2) ✓ スロットル設定見直し ✓ 分離タイミング見直し ✓ 着陸脚の改良

各国のロケット開発の状況 - Falcon9の段階開発 -

- ✓ 段階的な開発を行うことで運用をし続けながら改良・実証していく方式(Test As You Fly)
- ✓ Falcon9は、Ver.1.0からVer.1.1で3年間、Ver.1.1からVer.1.2で2年間で実施し、新しい技術や改良を適用
- ✓ 全バージョンの開発終了後、すぐに次バージョン開発に移行しつつ、実機を使いながらエンジン、構造、アビオ、自律飛行安全等を段階的に実証
- ✓ 再使用技術についてはBlock2から段階的に開発成果を実機に適用しながら実証しつつ、単体試験(Grasshopper試験、回収機体を使ったエンジン限界試験等)を複数回実施

SpaceX learns through experience rather than attempting to anticipate all possible system interactions

Traditional Developments Use Single Cycle to Product—This Mandates Heavy Systems Engineering to Protect the Design-Build-Test Investment



SpaceX relies on rapid design-build test cycles to inform design by experience



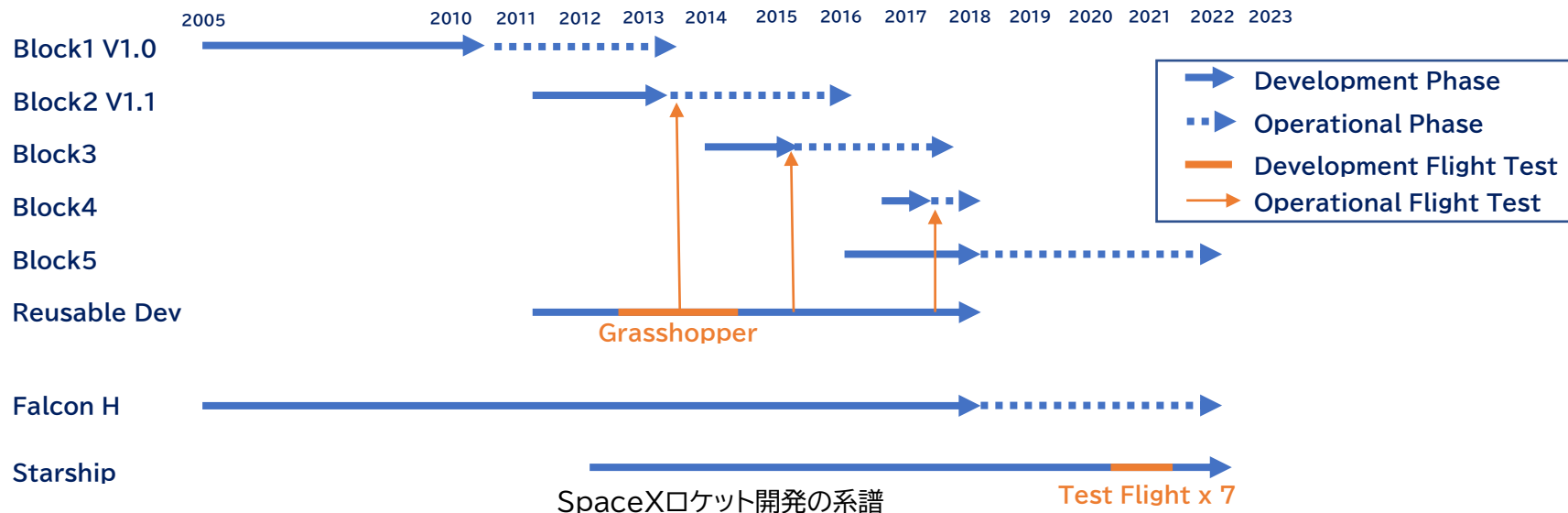
Documentation and process becomes more formal as systems move into later cycles
Final qualification, first flight and production

9/28/2012 © Space Exploration Technologies Corp. Page 14

SPACEX

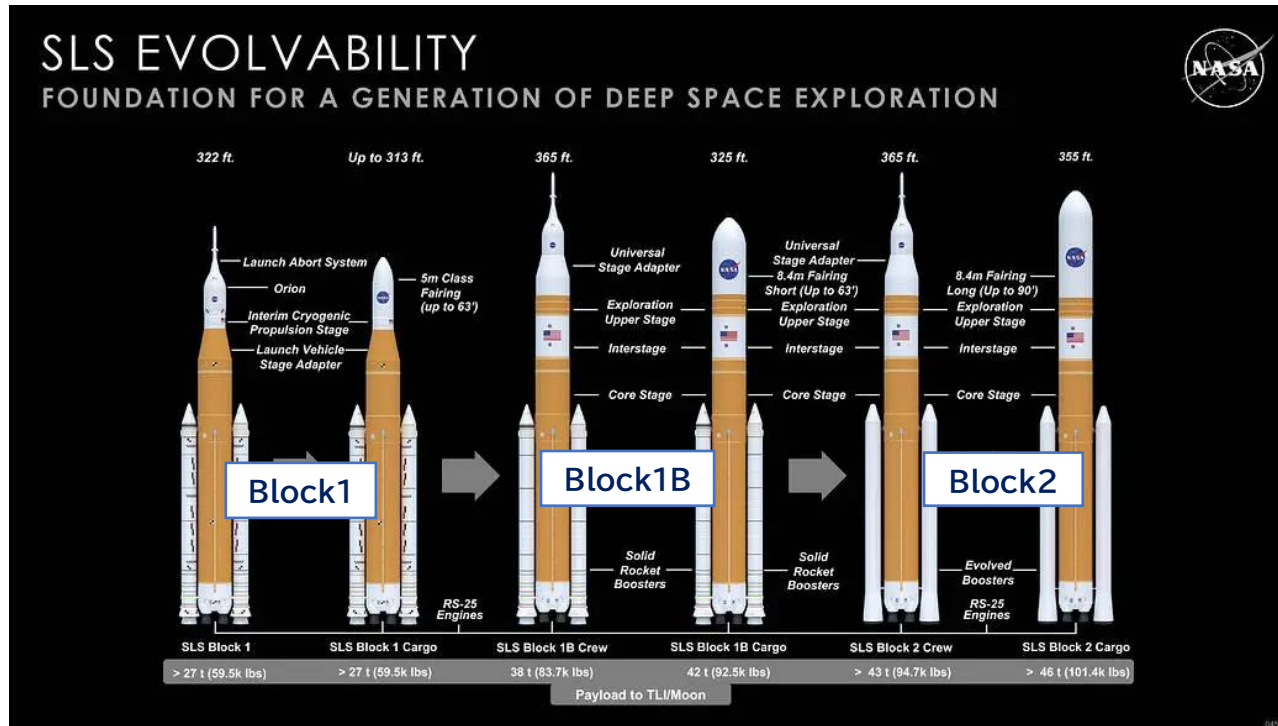
出典: SpaceX System Engineering: A Traditional Discipline in a Non-traditional Organization

SpaceXの開発サイクル



各国のロケット開発の状況 - Space Launch Systemの段階開発 -

- ✓ 主要なサブシステムを段階的に適用・実証していくようなモデルであり、メインエンジン、固体ブースタ、上段ステージを分けることでリスク分散している
- ✓ 開発は2011年から始まっており、2013年にKDP-C(CDR相当)を通過するも、技術的、予算的な要因含め開発が大幅に遅延し、Block1の初号機は2022年11月に打上げられた



出典: <https://www.nasa.gov/image-article/sls-block-1-crew-block-1b-crew-block-1b-cargo-block-2-cargo-evolution/>

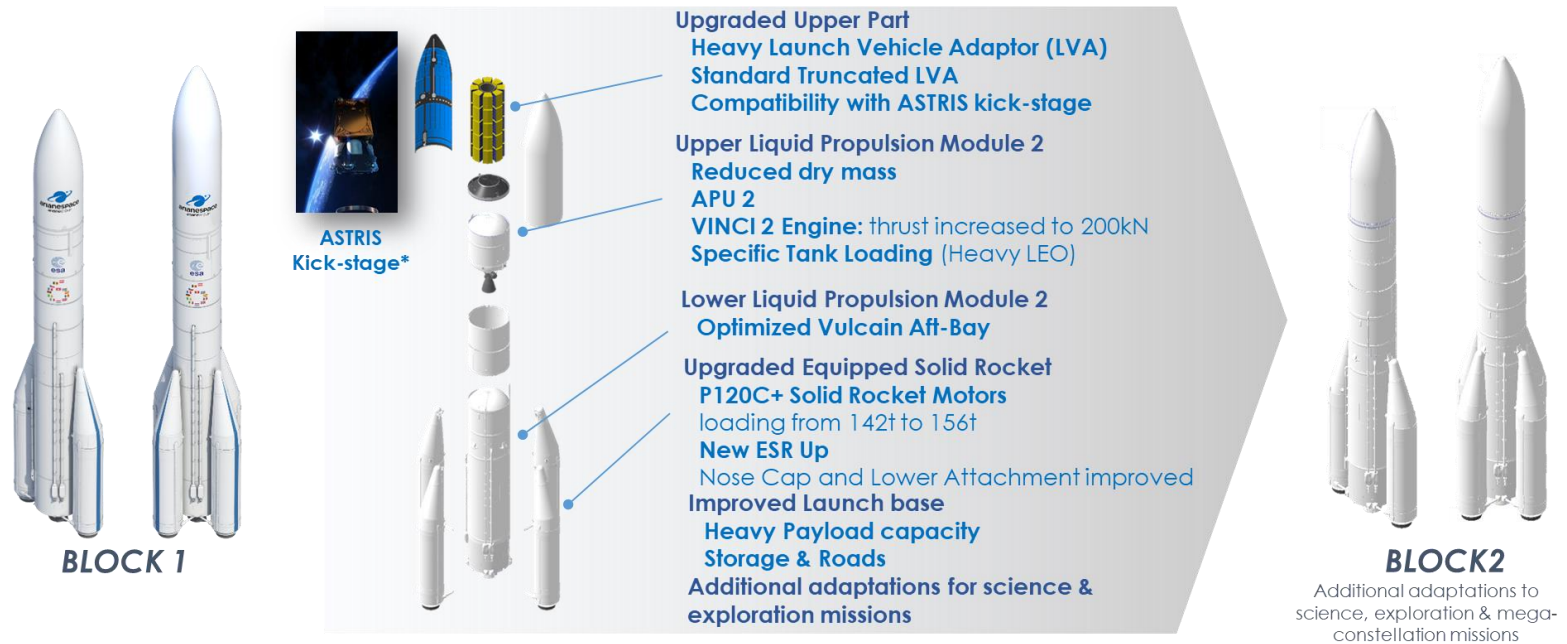
Block1	Block1B(Crew/Cargo)	Block2(Crew/Cargo)
✓ RS-25D ✓ SSSRB(5セグメント) ✓ ICPS(中間開発上段ステージ)	✓ RS-25E ✓ EUS(探査ミッション用上段ステージ)	✓ BOLE(新型一体成型ブースタ)

各国のロケット開発の状況 - Ariane 6の段階開発 -

- ◆ Ariane 6において、2025年頃を目指したサブシステムやエンジンの性能向上を図り、打上能力向上やユーザ利用拡大を図る取組みを始めている。

FROM ARIANE 6 BLOCK 1 TO BLOCK 2

CURRENT VISION AND PROPOSALS



出展: IAC-22-D2.1.2 ARIANE 6 LAUNCH SYSTEM DEVELOPMENT UPDATE

Block1	Block2(Crew/Cargo)
✓ Vulcain2.1(Ariane5改良型) ✓ P120C Solid Booster ✓ 2段Vinci Engine ✓ 5.4mフェアリング(Large20m、Small14m)	✓ P120C+ Solid Booster ✓ 2段Vince2 Engine ✓ 2段軽量化 ✓ ペイロードアダプタ改良型(Heavy LVA)

欧州のロードマップ

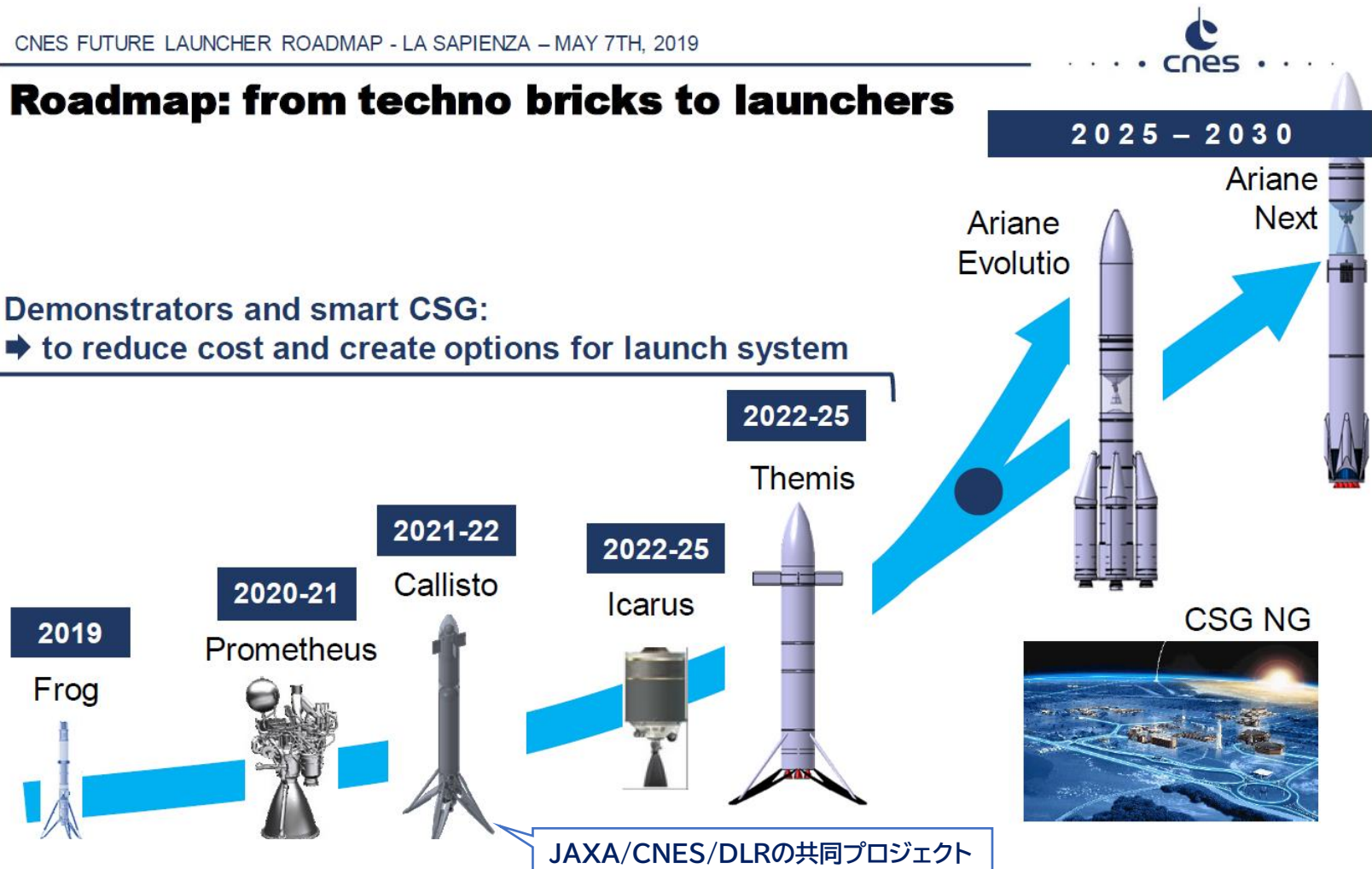
- 欧州においては、Ariane6の開発と並行して、次世代ロケットAriane Nextに向けて、ロードマップに従い推進している状況

CNES FUTURE LAUNCHER ROADMAP - LA SAPIENZA - MAY 7TH, 2019

Roadmap: from techno bricks to launchers

Demonstrators and smart CSG:

➔ to reduce cost and create options for launch system



【添付資料】

将来宇宙輸送システム研究開発プログラムの
取組状況

将来宇宙輸送システム研究開発プログラムの取組状況(1/4)

■ 宇宙輸送の将来像(出典:宇宙技術戦略(令和6年3月28日))

- 人類の活動領域は、地球低軌道を越え、月、更に火星等の深宇宙へと、本格的に宇宙空間に拡大する。それに伴い、宇宙空間へ輸送されるペイロードは、これまでは人工衛星や探査機が中心であるところ、宇宙における人類の活動拠点(宇宙ステーションやゲートウェイ、月面基地等)に向けて、その構築に必要な構造物、活動に当たっての物資・食料やローバ、ロボット、そこで活動する人員など、従来以上に多様かつ大量のペイロードの輸送ニーズが生まれる。

■ 将来宇宙輸送システム研究開発プログラム

- 輸送ニーズの多様化などの将来の宇宙利用市場も見据えて、宇宙輸送の国際的な競争が激化している。継続的な我が国の宇宙輸送システムの自立性確保に加え、宇宙産業の発展に向けて、国と民間が連携して抜本的な輸送能力の強化、高頻度化、及び低コスト化に取り組むことで、我が国の宇宙活動を支える総合的基盤の強化を図る。

輸送能力の強化

2030年代の月・ゲートウェイ等への輸送には、H3ロケットの2倍程度の打上能力が必要

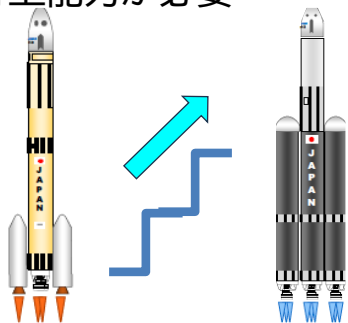
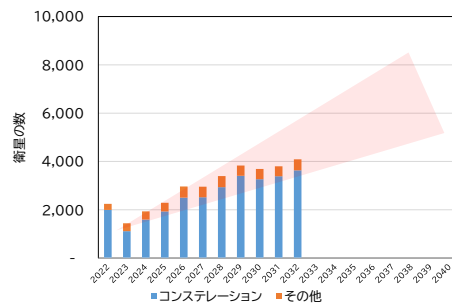


図:宇宙技術戦略(令和6年3月28日)より引用

打上げの高頻度

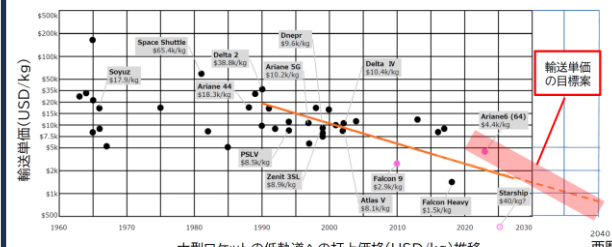
2030～40年代には世界の衛星打上数が数倍に増え、日本でも同程度の打上頻度増加の可能性



出典:Satellite manufacturing and launch markets, 13th edition

打上げの低コスト化

2030～2040年代の国際競争力維持のために、質量当たりの輸送費をH3比で1/2～1/10程度へ低減(出典:宇宙技術戦略(令和6年3月28日))



大型ロケットの低軌道への打上価格(USD/kg)推移
(注)図は「宇宙輸送を取り巻く環境認識と将来像(2023年6月27日、内閣府宇宙開発戦略推進事務局作成)」に追記

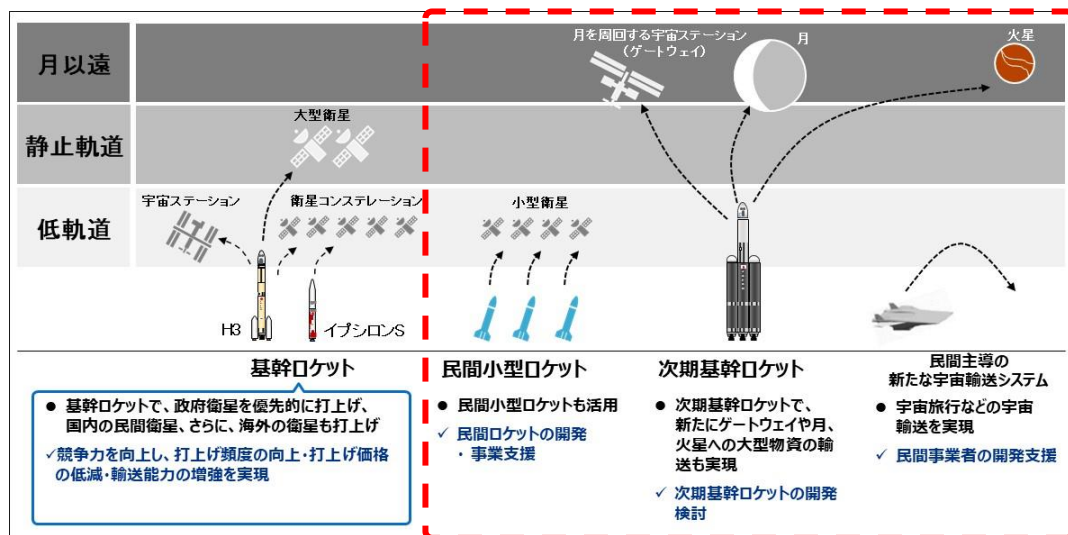
将来宇宙輸送システム研究開発プログラムの取組状況(2/4)

■ 新たな宇宙輸送システムの構築

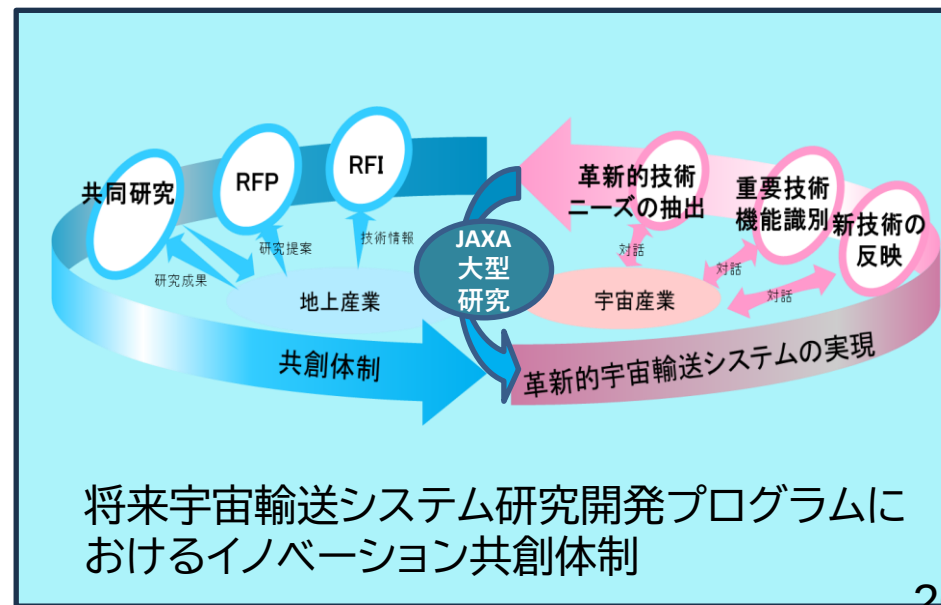
- 将来にわたって我が国の宇宙活動の自立性を確保するため、宇宙開発利用の将来像にも対応する次期基幹ロケットの開発に向けた取組として、輸送能力の大型化・再使用化・低コスト化などに必要な次世代の宇宙輸送技術の研究開発を実施中。
- 高速二地点や宇宙旅行のような分野の取組を主導する民間事業者の開発・事業化を促進するため、国・JAXAと民間事業者が連携し、要素技術開発を実施中。
- 産官学連携のもとRFI/RFPによって非宇宙業界を含む多くの企業の参画を得て、JAXAと企業との共同研究による共創体制を構築。

■ 民間ロケットを担う事業者の開発・事業支援

- 民間主導の開発体制を支えるため、エンジン試験設備を民間も効率的に利用できることを目指して、官民共創推進系開発センターの整備をJAXA角田宇宙センターにて実施中。



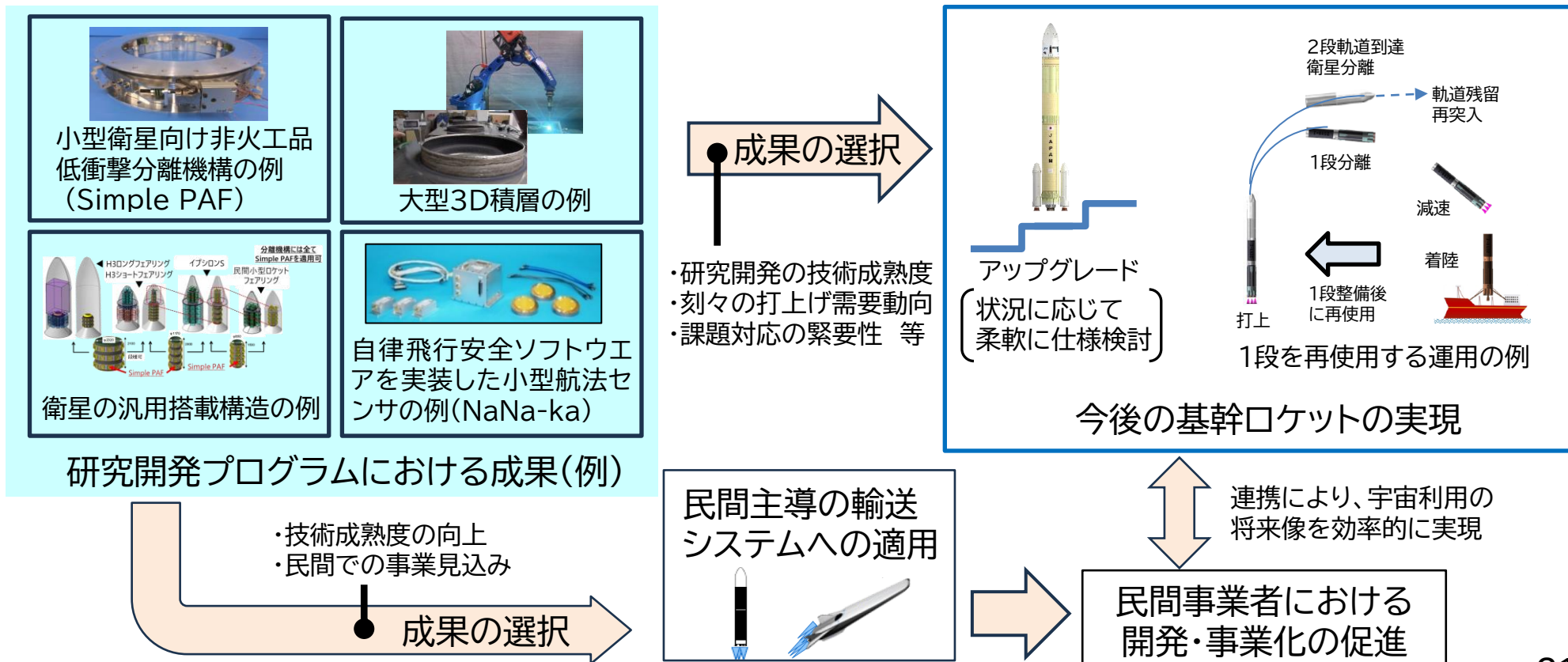
(図:2023年6月27日第1回宇宙輸送小委員会 資料2より引用)



将来宇宙輸送システム研究開発プログラムの取組状況(3/4)

■ 将来宇宙輸送システムに必要な要素技術研究開発の例

- 再使用化を軸とし、抜本的なコストダウンと打上げ頻度向上を備えた将来宇宙輸送システムの実現に向けて、次世代の要素技術研究開発を実施中。
- 技術成熟度や周辺状況を踏まえて選択されるシステム仕様に研究開発成果を適時適用していく。
- 研究開発によって成熟度が向上した技術は、民間主導の輸送システムにも適用されることによって、民間事業者における開発・事業化の促進が期待される。



将来宇宙輸送システム研究開発プログラムの取組状況(4/4)

■ ロケット機体の一部を再使用化する場合の課題と研究事項の例

- 打上の高頻度化や低コスト化に対し、機体の再使用化は有効な手段であるものの、日本においては技術難易度が高い新しい技術(以下、例)が多数含まれる。
- 使捨て型ロケットに比べて開発リスクが大きいことから、開発着手に向けた取り組みとして技術成熟度(TRL)の向上に向けたフロントローディング研究を推進中。
- なお、我が国では、仏・独の宇宙機関との共同プロジェクト(CALLISTO)において機体再使用に必要な技術獲得を目指すなど、要素レベルだけではなくシステムレベルの技術検証活動も実施中。

高高度からの帰還技術

ロケットの打上飛行時において、高い高度(およそ100km)で分離した1段機体を所定の場所へ着陸させ、機体を回収する技術

- ・帰還時誘導飛行制御技術
- ・着陸機構技術
- ・洋上回収技術



着陸機構の例



洋上回収の例
(Space-Xの例※)

高性能・軽量化技術

帰還用燃料や着陸脚等の追加により機体が使捨て型より大きくなり運用性が悪くなることを回避するため、機体の小型化に資する技術

- ・複合素材成形技術
- ・3D積層技術
- ・メタンや水素エンジン技術



大型3D積層の例

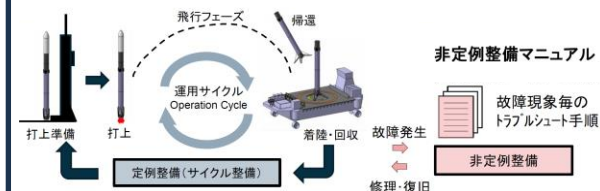


エンジン検討の例

再整備効率化技術

回収後の機体再整備期間及び費を低減するために長寿命化等による点検項目・回数の低減や作業の効率化に資する技術

- ・回収した機体の点検・整備技術
- ・長寿命液体エンジン技術
- ・ヘルスマニタ技術



点検・再整備に関する検討の例

※引用:<http://tokyorexpress.info/wp-content/uploads/2016/04/d8ca484b6f2350cba6e1fd72b6302d13.jpg>