

ロケット開発の海外事例 及び 我が国の取組状況について

2023年6月27日

宇宙航空研究開発機構

経緯と本資料の目的

- ◆ 2022年7月7日付で文部科学省による「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取りまとめ」（以下、「ロードマップ」という）が作成され、以下の必要性が示された。
 - 2030年頃を目指し、ロケットの再使用化等の方策による大幅な低コスト化の実現に向けた「基幹ロケット発展型」の開発を進める。
 - 二地点間高速輸送、宇宙旅行、低軌道衛星打上げ等のミッションに対応する「高頻度往還飛行型」を官民連携で開発する。
- ◆ 併行して、JAXAにおいて、ロードマップ実現に向けて、基幹ロケット発展型及び高頻度往還飛行型に必要な技術獲得を早期に実施するために、民間事業者の要望も盛り込んだ、技術ロードマップの設定・維持更新を実施し、オープンイノベーション等による技術獲得や民間事業者の開発環境整備を実施しているところである。
- ◆ 宇宙基本計画（令和5年6月13日閣議決定）において、新たに「宇宙技術戦略」を策定し、これに基づき技術開発を強化する方針が示された。宇宙輸送に関わる技術戦略では、上述のロードマップで示された基幹ロケットや官民連携の輸送システムを含め、我が国全体の宇宙輸送に係る重要な技術を検討することとなっている。
- ◆ 宇宙輸送に関わる技術戦略の策定に向けた検討項目として、内閣府より資料1が示されている。資料1で識別された検討項目を受け、本資料は内閣府からの依頼に基づき、ロケット開発・実証に関する海外事例や我が国における取組状況をまとめたものである。

宇宙基本計画における宇宙輸送の具体的取組

- ◆ 宇宙活動を支える総合的基盤の強化に向けた具体的アプローチとして以下の項目が識別されている。
 - 基幹ロケットの継続的な運用と強化
 - 民間ロケットを担う事業者の開発・事業支援
 - 新たな宇宙輸送システムの構築
 - 宇宙輸送に関わる制度環境の整備

- ◆ 輸送システムの自立性を確保する上で不可欠な輸送システムである基幹ロケット（H-IIAロケット、H3ロケット及びイプシロンSロケット）について、国際市場に対応する打上げ能力の獲得を目指した高度化（輸送能力の強化、衛星搭載方式の多様化、打上げ価格の低減等）にスピード感を持って取り組むとされている。

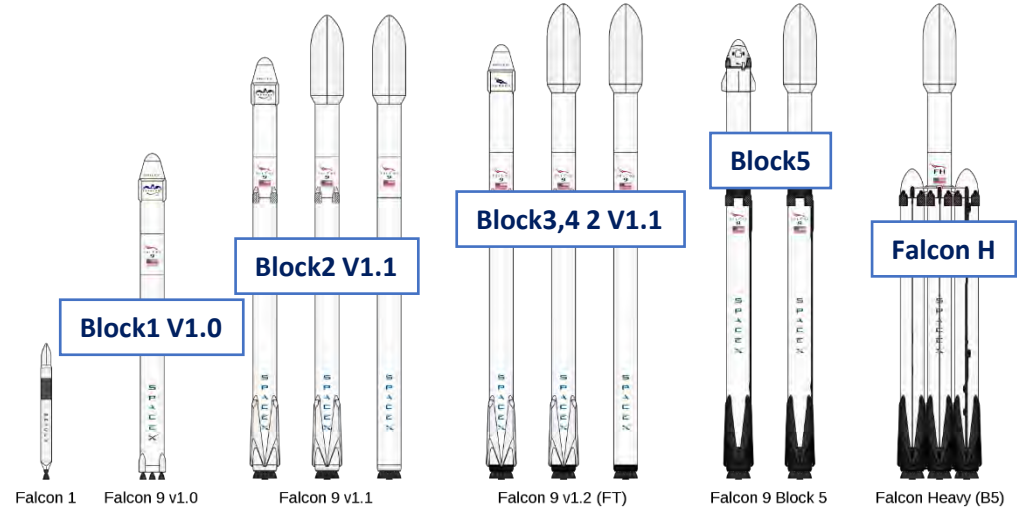
- ◆ 新たな宇宙輸送システムとして、将来にわたって我が国の宇宙活動の自立性を確保するため、宇宙開発利用の将来像（地球低軌道や月等における宇宙科学・探査、有人宇宙活動等）にも対応する次期基幹ロケットの開発に向けた取組を進めるとされている。

他国におけるロケット開発・技術実証に関する状況

Falcon 9の段階開発 (Block Upgrade)

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)

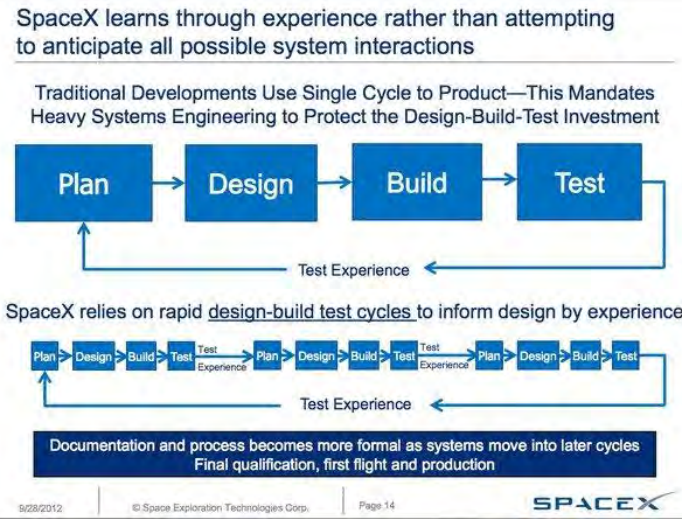


出典 : teslarati.com/spacex-ceo-elon-musk-bfr-update-launch-render-teasers/

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	<ul style="list-style-type: none"> ✓ 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 	<ul style="list-style-type: none"> ✓ 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 	<ul style="list-style-type: none"> ✓ 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) 	<ul style="list-style-type: none"> ✓ 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

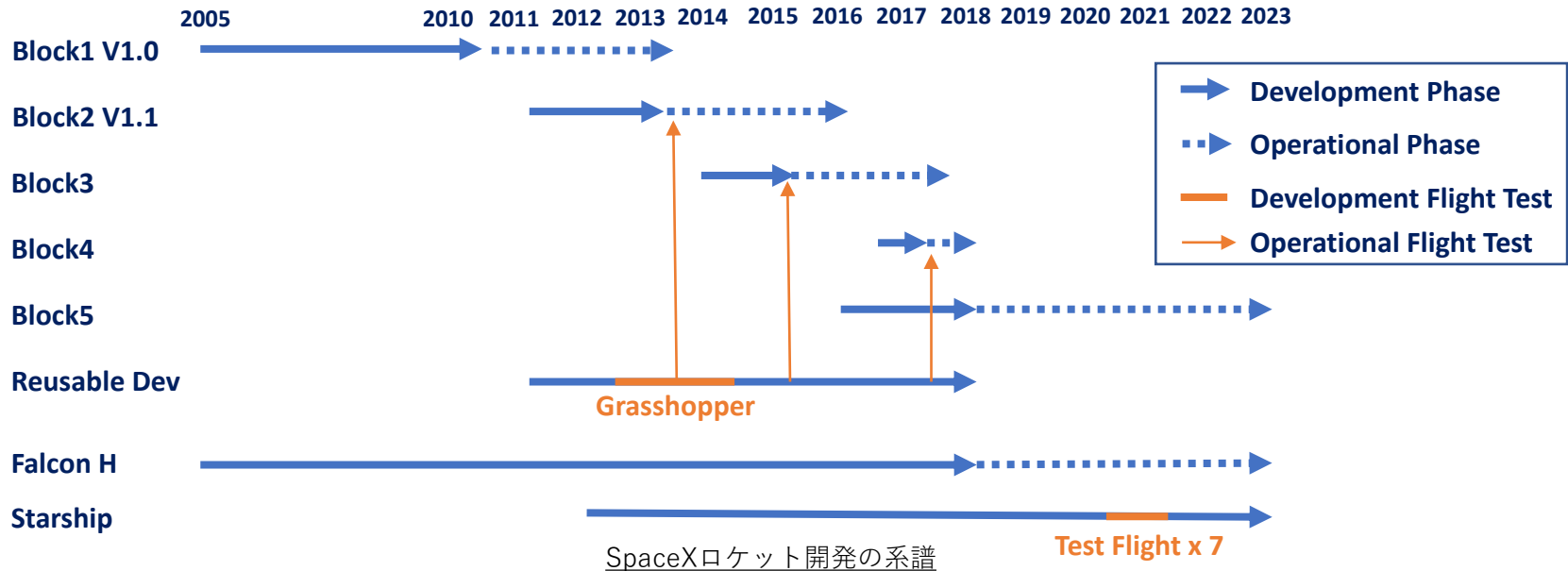
Falcon 9の段階開発 (Block Upgrade)

- ✓ 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
- ✓ Ver.1.2については現状においてもマイナーチェンジは継続して実施している
- ✓ 前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



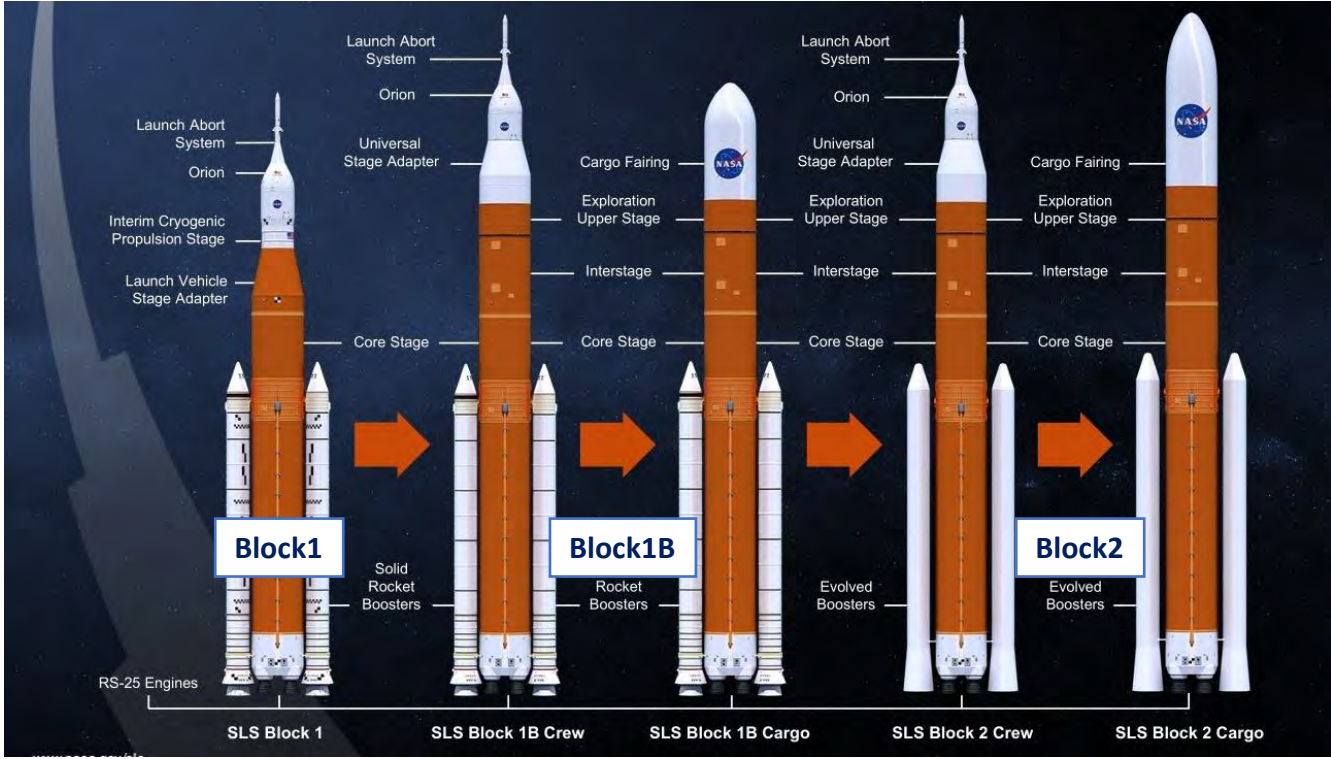
出典 : [quora.com/How-does-SpaceX-approach-the-technology-engineering-and-design-of-its-products](https://www.quora.com/How-does-SpaceX-approach-the-technology-engineering-and-design-of-its-products)

SpaceXの開発サイクル



Space Launch System (米 NASA) 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/exploration/systems/sls/sls-vehicle-evolution.html>

Block1	Block1B (Crew/Cargo)	Block2 (Crew/Cargo)
<ul style="list-style-type: none"> ✓ RS-25D ✓ SSSRB (5セグメント) ✓ ICPS (中間開発上段ステージ) 	<ul style="list-style-type: none"> ✓ RS-25E ✓ EUS (探査ミッション用上段ステージ) 	<ul style="list-style-type: none"> ✓ BOLE (新型一体成型ブースタ)

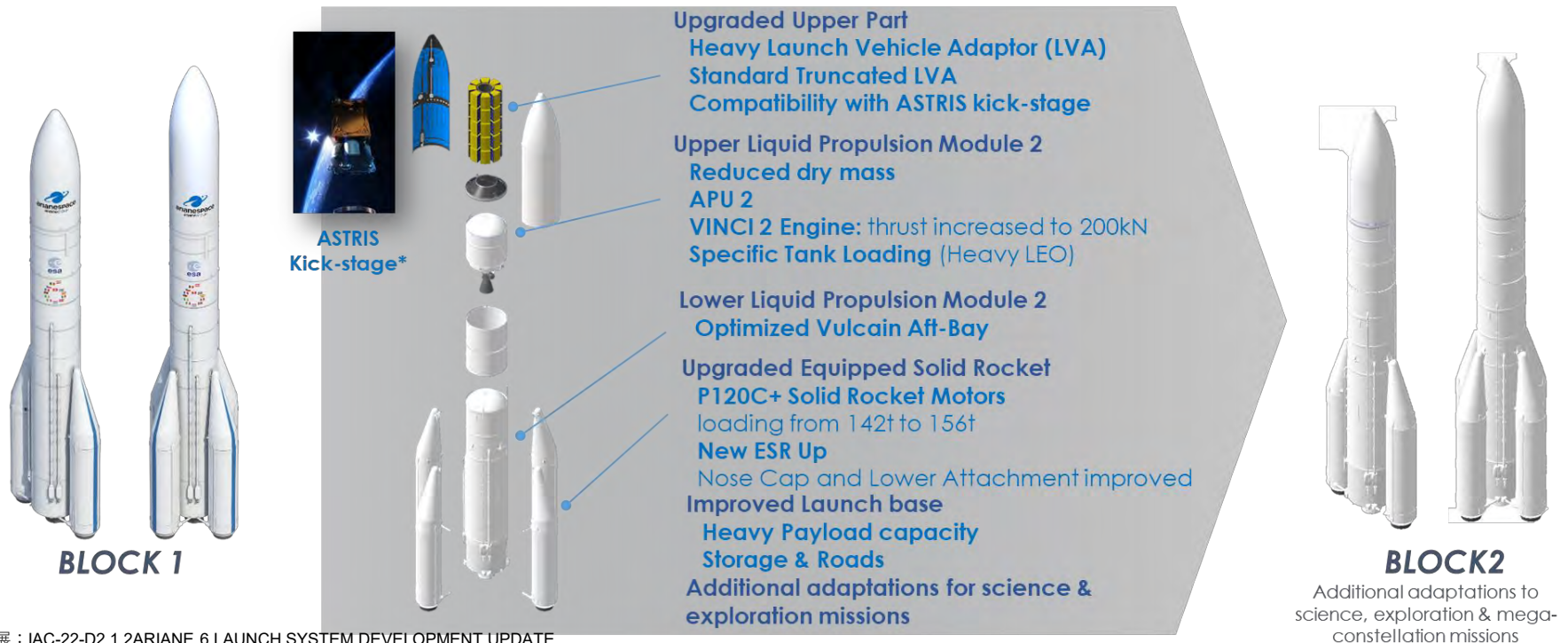
Ariane 6 (欧 ArianeGroup/ESA) の段階開発

- ◆ 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

FROM MID-2025

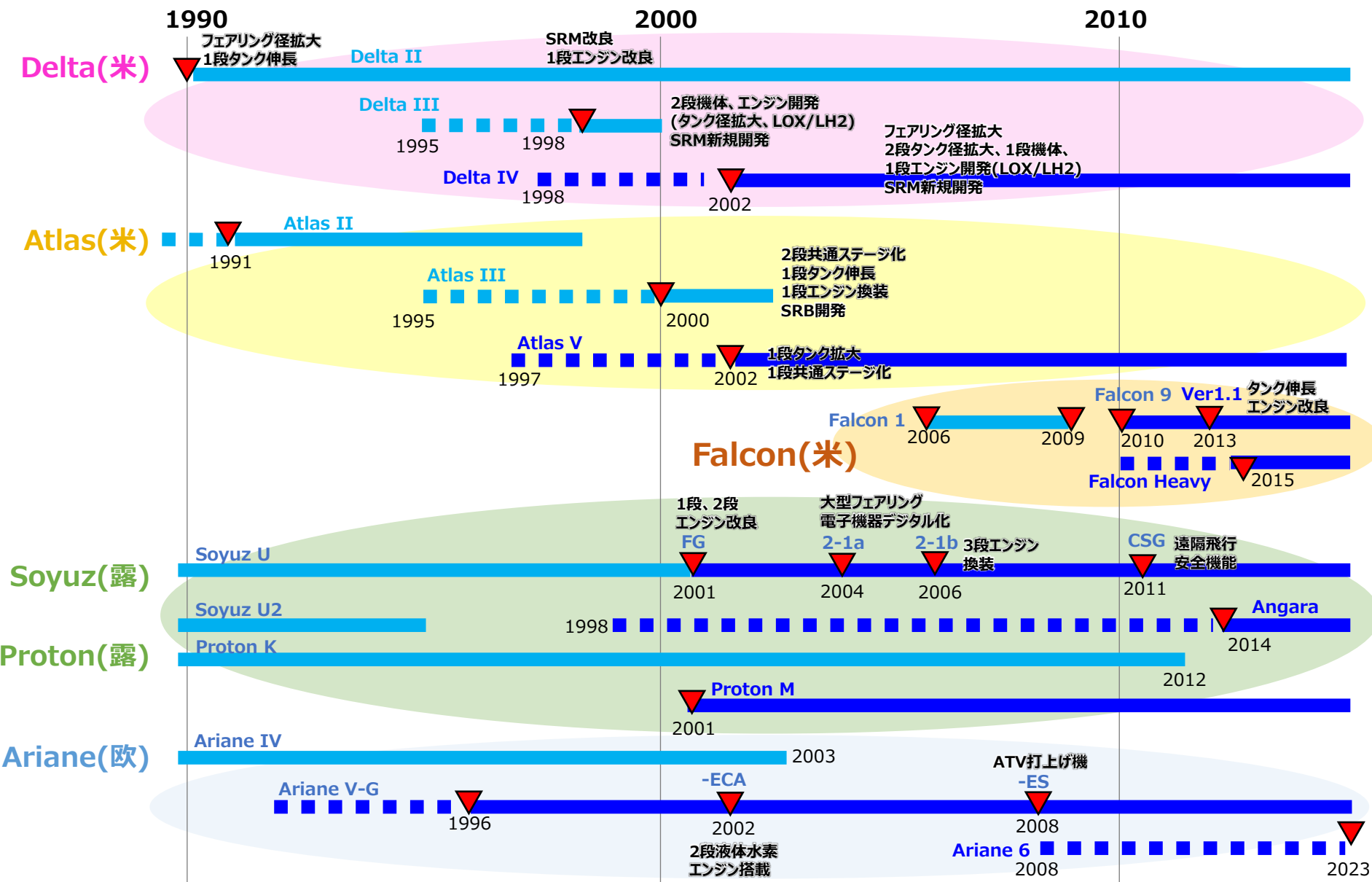


出展：IAC-22-D2.1.2ARIANE 6 LAUNCH SYSTEM DEVELOPMENT UPDATE

Block1	Block2 (Crew/Cargo)
<ul style="list-style-type: none"> ✓ Vulcain2.1 (Ariane5改良型) ✓ P120C Solid Booster ✓ 2段Vinci Engine ✓ 5.4m フェアリング (Large20m、Small14m) 	<ul style="list-style-type: none"> ✓ 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)

諸外国における開発の動向

■ 並行かつ間を置かずに新規ロケットの開発が開始されている。



一定サイクルの新規開発がない場合の影響の例

◆ NASAのシニアエンジニアの再雇用

- 米国では、ロケットエンジン開発に10年の空白期間が生じたことで、新規エンジン開発知見、経験が散逸
- 高齢技術者の支援を受けてエンジン開発を再開

◆ ロシアの例

- 2012年8月までの約18ヶ月間で、ロシアは7回の打上げ失敗により、計10機の衛星等を喪失
- 宇宙開発大国ロシアを支えてきた宇宙産業分野の技術力及び人材ポテンシャル低下（中間層不足）による品質劣化が一因の見解
- 「現在のロシア宇宙産業の人材構成は、60歳以上か30歳以下となっており、中間層が欠落している」（2011年12月23日RIA Novosti）