

宇宙開発利用分野の 技術的動向について



2025.9.16

東京大学 中須賀真一

日本政府の宇宙開発利用の全体像

- 輸送系（基幹ロケット：H-IIA,Epsilon→H3-2,3,4,5号機成功！）
- 測位衛星（日本版GPS：準天頂衛星、精度が数cmに）
- 地球観測衛星（光学、レーダー：ALOSシリーズ）
 - 温室効果ガス観測：GOSAT, 気象衛星：ひまわり
 - 水蒸気、大気中の粒子等観測：GCOMシリーズ
- 通信放送衛星（技術実証衛星：ETS-9開発中）
- 宇宙科学衛星（X線：XRISM, 赤外：SOLAR-C, LightBird,等）
- 宇宙探査衛星（はやぶさ、月SLIM、火星MMX2026年）
- 国際宇宙ステーションISS→月のGatewayへ
 - アルテミス計画参加、HTV-X、月面上与圧ローバ
- 安全保障ニーズ：SSA（デブリ等）、早期警戒、通信

令和6年度宇宙予算は8945億円。7年度は1兆近い

H3 2号機の打ち上げ成功(昨年2/17)

3号機もALOS-4搭載して
打ち上げ成功！ 4, 5号機も
成功！



エンジン技術は世界最高
---しかし、世界に売り出す
ためには信頼性を維持した
まま、低コスト化が鍵

もう一つの基幹ロケット・エ
プシロンは故障改修中(2年
半以上停止)

民間の小型衛星(100~200
kg)を打ち上げる小型ロケッ
トのスタートアップが必須

- 2023年10月現在

計画中 4

みちびきの高精度測位の利用が拡大中

みちびきの高精度測位サービスの利用拡大（新サービス、産業振興）

- 2018年のサービス開始以降、様々な分野において、みちびきの各種サービスを活用した実証実験、実証事業を官民が実施。
- 2024年夏時点、みちびきに対応する製品数は429（受信機、スマートフォン、カーナビ、スマートウォッチなど50種類）

自動車分野

- ・日産自動車株式会社
- ・**運転支援技術（プロパイロット2.0）を搭載した100%電気自動車「アリア」**を発売。セレナ上位の「e-POWER LUXION」にも搭載。
- ・**車4両の位置情報取得にみちびきのセンチメートル級測位補強サービス（CLAS）**を活用。



物流分野

- ・株式会社エクスプローラ
- ・みちびきの**サブメータ級測位補強（SLAS）**を活用した**コンテナやシャーシの駐車位置情報の管理**をスマホアプリで実現。受注生産中。



スマートウォッチ（ゴルフウォッチ）

SLASで**ゴルフコース内で測位**。
また、**災害通報を受信し、表示**



ドローン分野

- ・株式会社A C S L
- ・**サブメータ級測位補強サービス（SLAS）に対応した国産の小型空撮ドローン「蒼天」**の販売を開始。全国の官公庁に約500台以上を出荷。
- ・最近、信号認証サービスにも対応する機体が登場



海洋分野

- ・株式会社イトノット
- ・20トン未満の**小型船を対象との自律航行プラットフォーム「イトノット AI CAPTAIN」**
- ・船舶の自動航行・離着岸に**センチメートル級測位補強サービス（CLAS）**を活用。



SLAS利用した**波高推定システム（海象ブイ）**



インフラ分野

- ・株式会社K I S
- ・**サブメータ級測位補強サービス（SLAS）を活用した水道メータの位置情報管理システム**を開発。全国でのサービス展開も開始。



道路分野

- ・NEXCO東日本、国土交通省（北海道開発局、北陸地方整備局）
- ・**センチメートル級測位補強サービス（CLAS）**を利用した**除雪車、除草車**を開発。実証や実働配備を開始。



除雪車



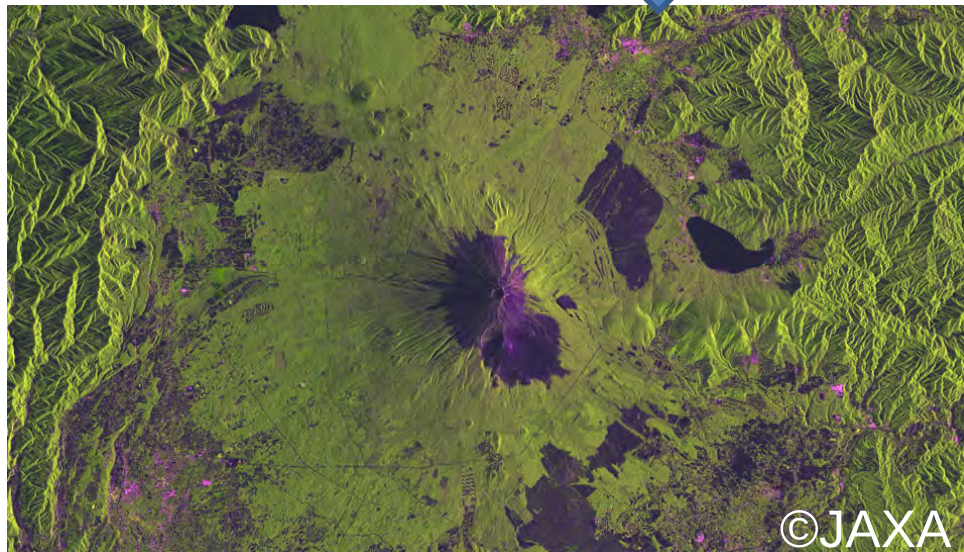
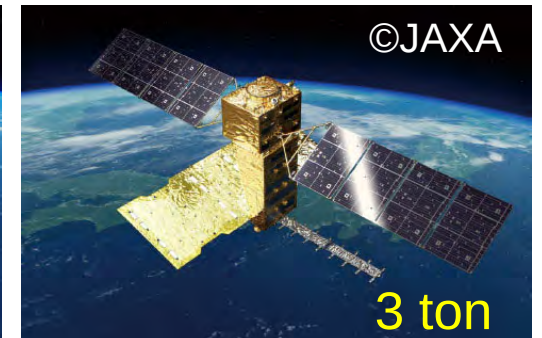
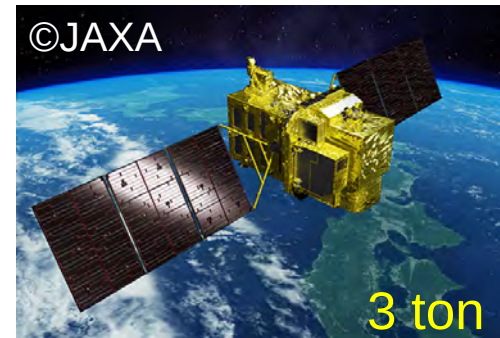
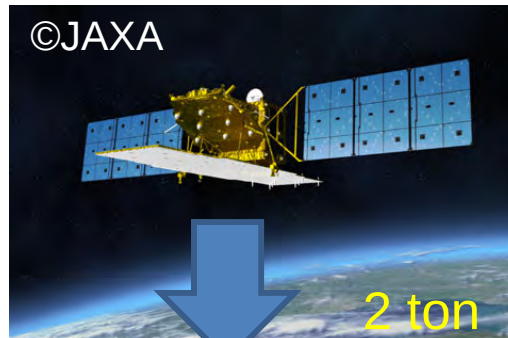
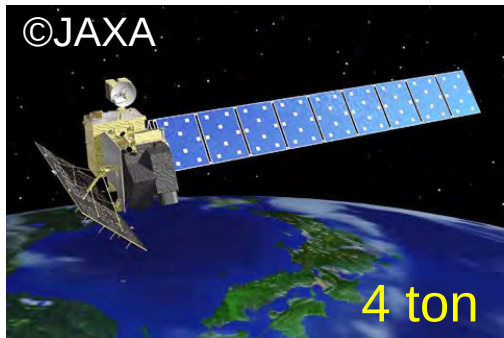
除草車

cm測位の利用ビジネスを展開中。受信機の小型・低電力化、低コスト化が鍵

地球観測衛星(世界情勢・日本の概要)

- 政府専用の超高分解能衛星: 秘匿の中で性能向上競争
 - 空間分解能10cm程度(不明)まできている?
 - 情報収集衛星(日)は高性能で世界レベルの能力と高評価
- デュアルユースの高分解能衛星(30~50cmレベル)
 - 防衛省も米国から大量購入。日本での自前の調達が課題
 - Startup数社がこの精度を目指して技術開発中(日本)
- オープン&フリー戦略(10m~)
 - 政府が画像を無償開放。画像利用産業拡大目指す
 - アメリカのLANDSAT、欧州のコペルニクス、日本は現状では無し
- 小型・超小型衛星によるStartup・大学の参入
 - Skyboxレベルの小型高分解能(80cm~コスト1/10)
 - 超多数衛星で時間分解能向上(10m程度~コスト1/300)
 - 日本も大学発の超小型衛星が進展、ベンチャー多数登場し
小型コンステレーション目指す(1m~コスト1/100)

地球観測：JAXAのALOSプログラム（光学＋SAR）



それ以外の政府プログラム

GOSAT Series: 温室効果ガス観測

Himawari Series: 気象衛星

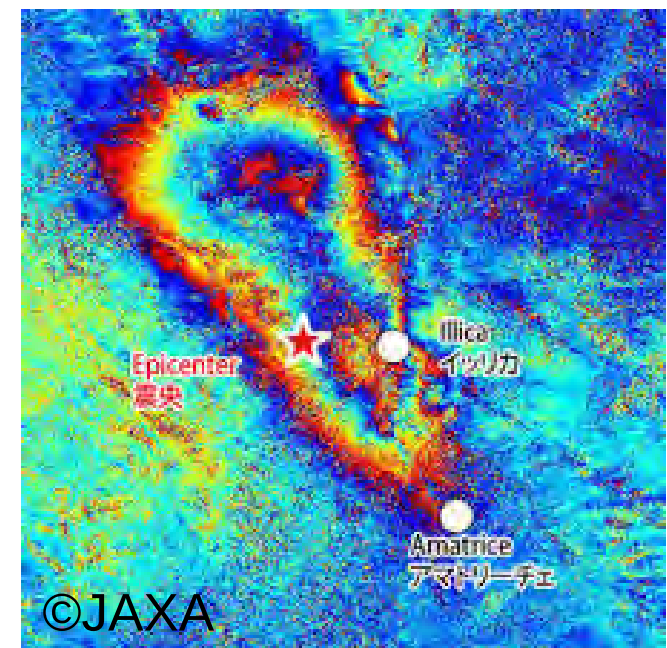
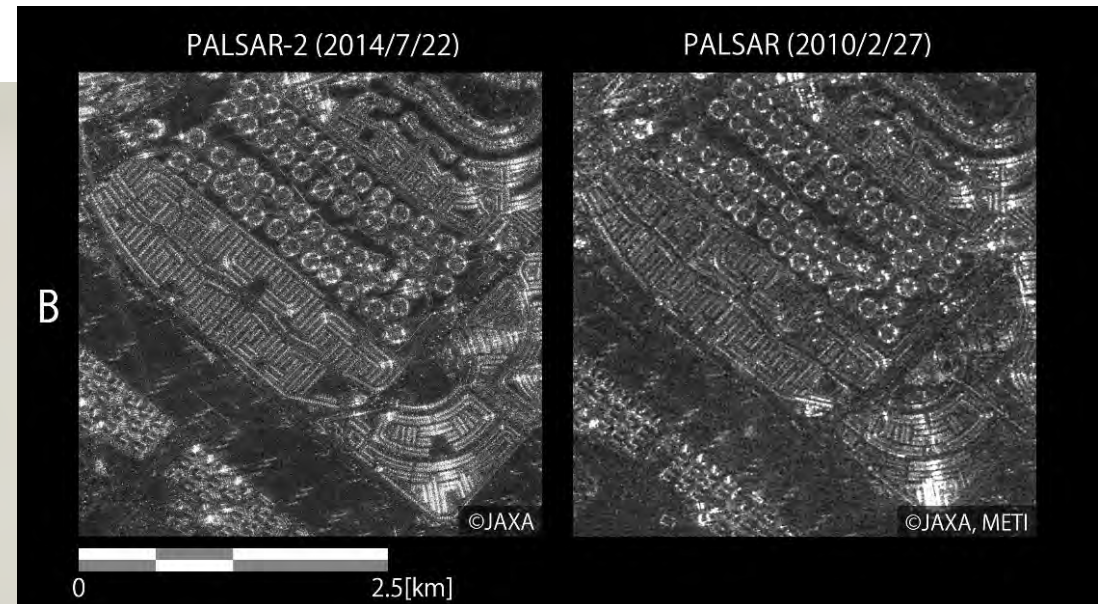
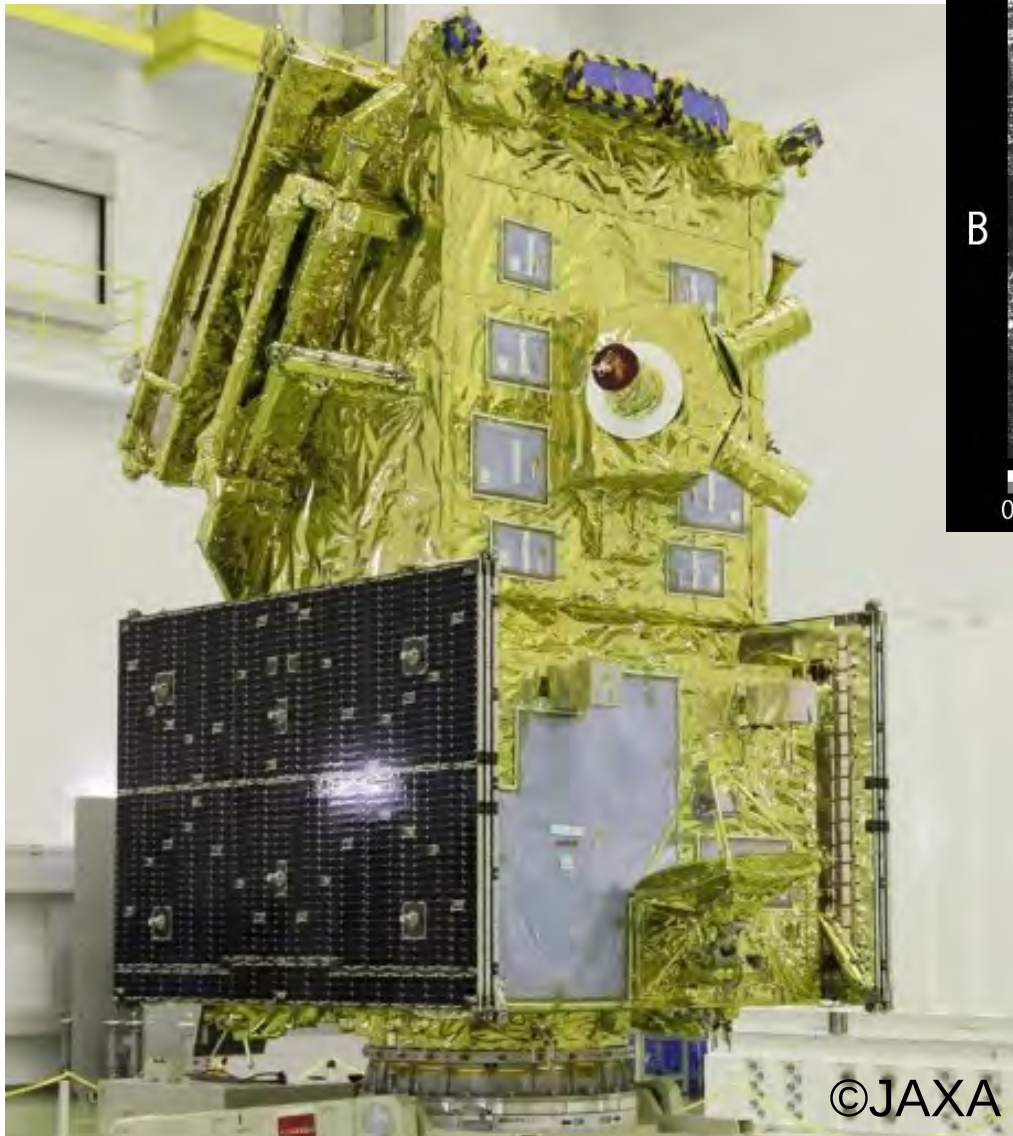
GCOM: 水および大気中粒子

ASNARO-1: 光学観測(450kg,0.5m)

ASNARO-2: X-band SAR(570kg,1m)

画像の利用とビジネス化を徹底追及をコミュニティで(CONSEO)→衛星スペックは後から決める

ALOS-2「だいち2号」合成開口レーダ



©JAXA

5mm
精度の
干渉計
測

防災、安全保障ニーズなど多数の利用。干渉計測は火山噴火予知、インフラ監視などに活用

気象衛星



©気象庁



ひまわり8号 ©気象庁

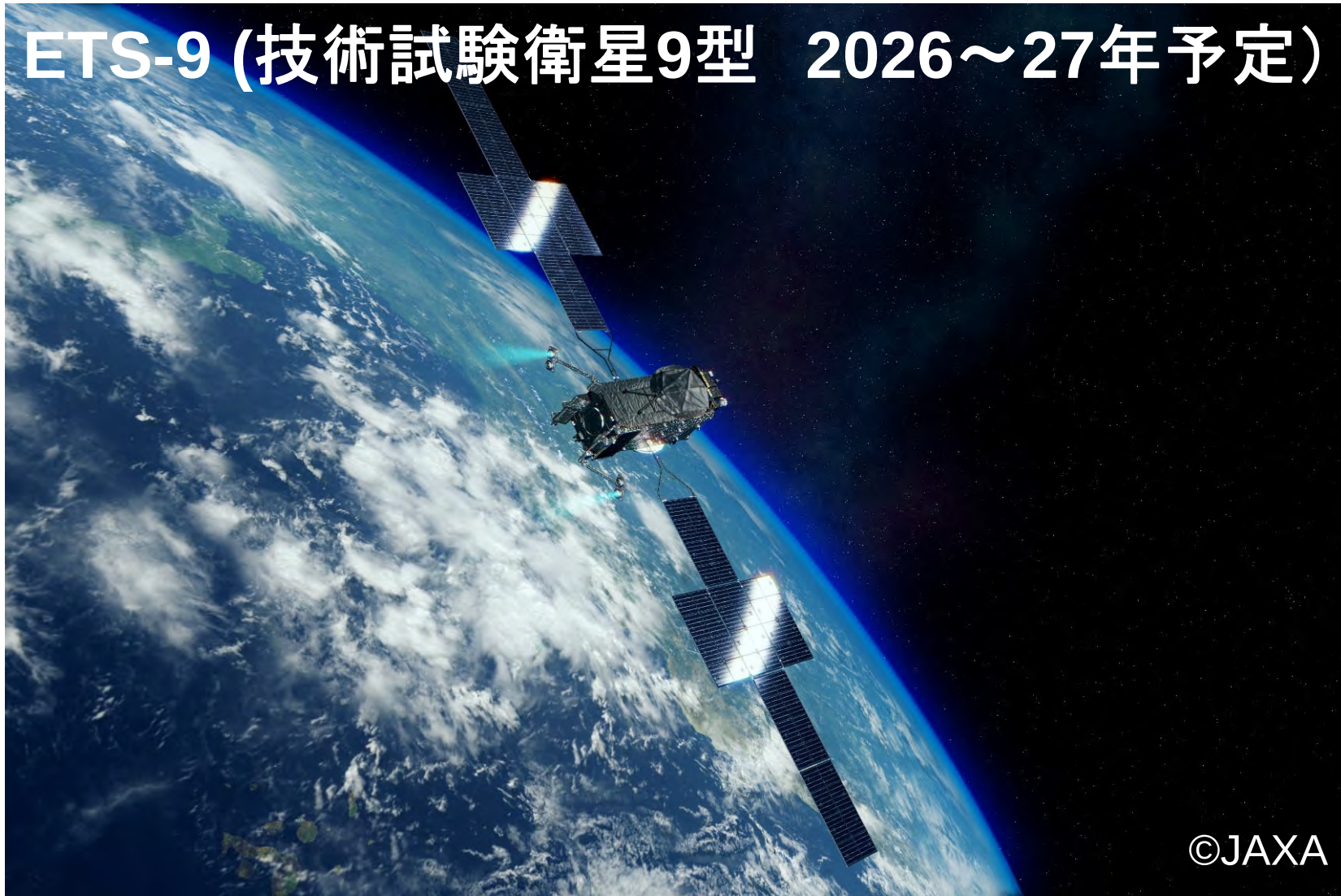


©気象庁

- ・日本近海は2.5分間隔で繰り返し観測
- ・ひまわり10号開発開始:線状降水帯の観測、予測に重点を置いた赤外サウンダー

通信放送衛星

ETS-9 (技術試験衛星9型 2026~27年予定)



すでに政府の手を離れ、民間による海外への販売の産業化を目指す。ただ、数年に1回は技術向上を目指す政府投資を入れる(技術試験衛星シリーズ)。フルデジタル、Flexibility、High Throughputなどの技術で日本は周回遅れに

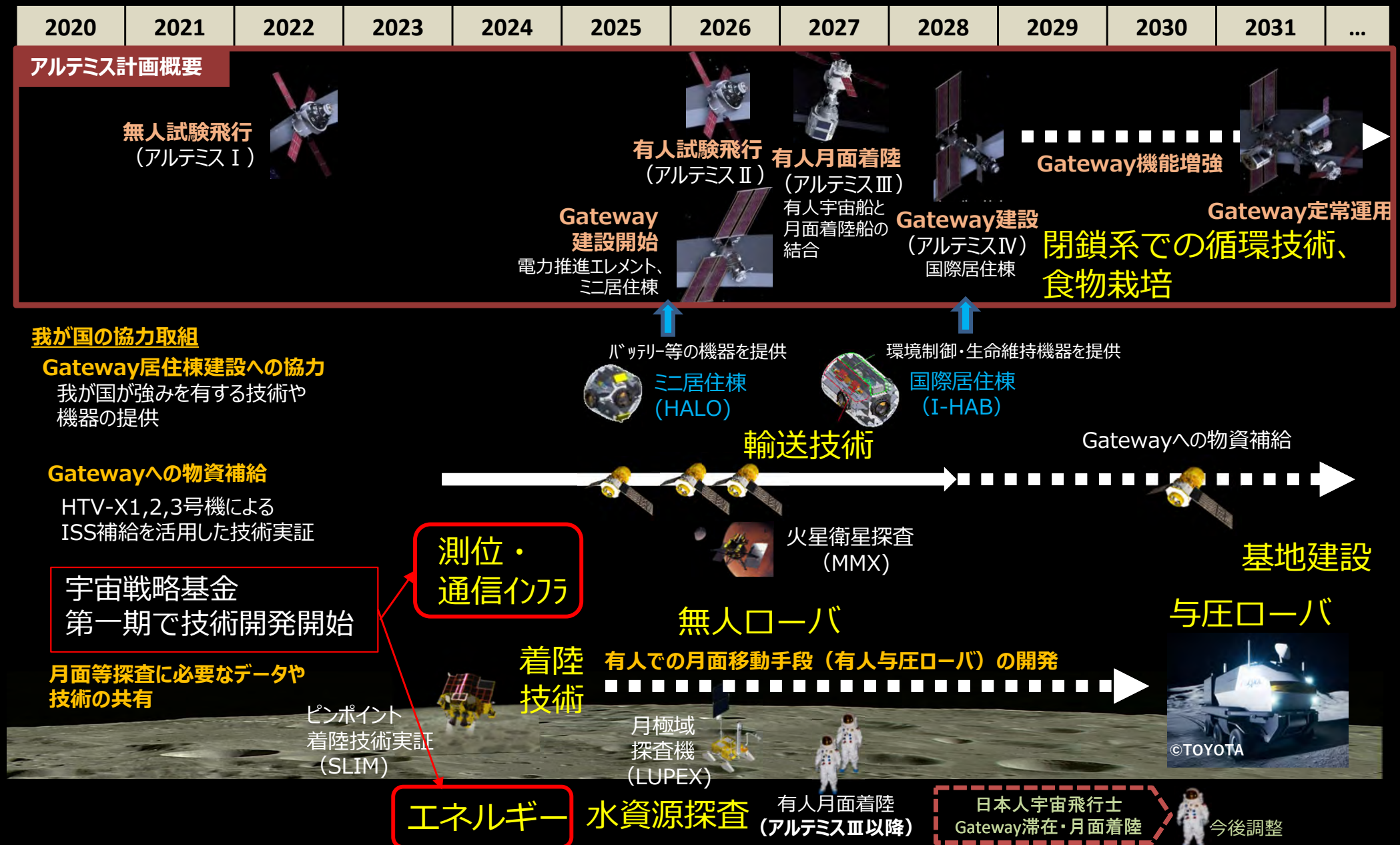
国際宇宙ステーション (ISS)

- 5国の国際連携と15パートナー -



2030年までは運用するが、それ以降は民間が経営する宇宙ステーションを米政府も有償利用する。そのために、米5社が現在概念検討中。2026年くらいから1、2社が開発スタート。

国際宇宙探査「アルテミス計画」と我が国の協力取組



アルテミス計画による国際連携 + 月面 3 科学をはじめとした独自の月面探査

世界の宇宙開発における 2つの大きなゲームチェンジ

宇宙開発利用の現場で起きている2つの大きなゲームチェンジ

- 国家機関主導による研究開発に加え、ベンチャー主導による研究開発+サービス調達が活発化（SpaceX社宇宙船打上げ、CLSPなど）
- 小型衛星コンステレーション（衛星群）による低価格化、データ量の飛躍的増大による新しい価値創造(通信、地球観測分野中心に)

<戦略面でのTrend>

- ・民生利用と防衛ニーズの連携による横通しの戦略と技術開発(米)
- ・拡大する通信ニーズへの官民一体となった戦略的な技術開発と実証(欧州)

<技術面でのTrend>

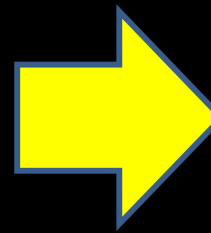
- ・Digitalization, Digital Transformation、ソフトウェアベースでの柔軟性確保
- ・技術進化のスピード加速、多品種少量生産への対応のためAgile開発
- ・大量製造技術(OneWeb:800, Starlink:12000、Planet:200, Spire:50など)

GEO と LEO リモセンの違い

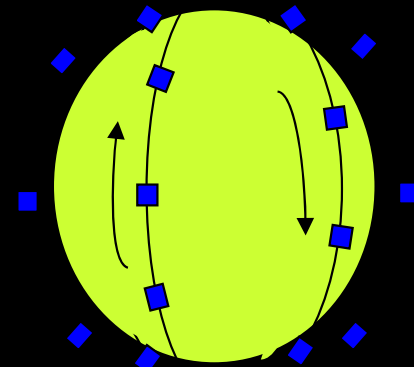
LEO (500-800km 高度)

リモセン衛星のほとんどはこれ

- 解像度0.3m – 30m
- 一周は96 -100分
- 同じ位置を1日ないし40日に一回観測可能(回帰周期)



LEO衛星は空間分解能はいいが、時間分解能(頻繁な観測)ができない。これを補うのが「機数」(コンステレーション)



静止衛星の空間分解能を上げる
方向性もあり(静止光学)



GEO (36000km高度)

- 分解能 18m – 2 km
- 同じ地域を見続けられる
- スキャンすることで数地域を短い周期で観測可能
- 地上とリンクは常に取れている

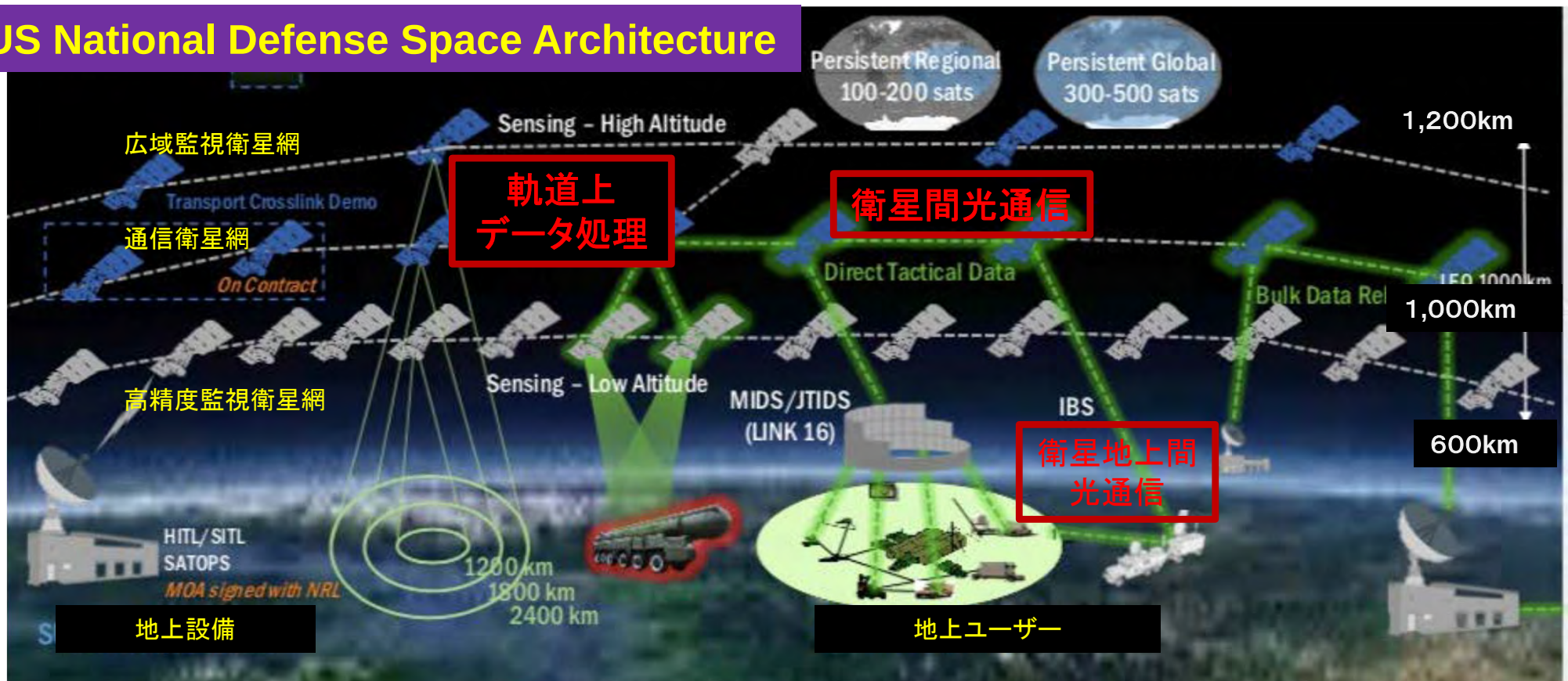


「頻繁に見たい」
「高分解能で見たい」
この二つの要求をどう満たすかが永遠のテーマ

米国：安全保障もコンステレーションで(PWSA)

- **高速で滑空するミサイルの迎撃**には、複数の衛星が連携して追尾し、分析結果をリアルタイムに地上と共有する小型衛星コンステレーション技術が必要。米国のNDSAでは、小型衛星コンステレーションを活用した対応を構想。
- 我が国でも、赤外観測衛星を多数配置した衛星コンステレーションにより、極超音速滑空弾（HGV）等を宇宙から探知・追尾するシステムの実現に必要な技術実証を行うための実証機について、概念検討を実施

US National Defense Space Architecture

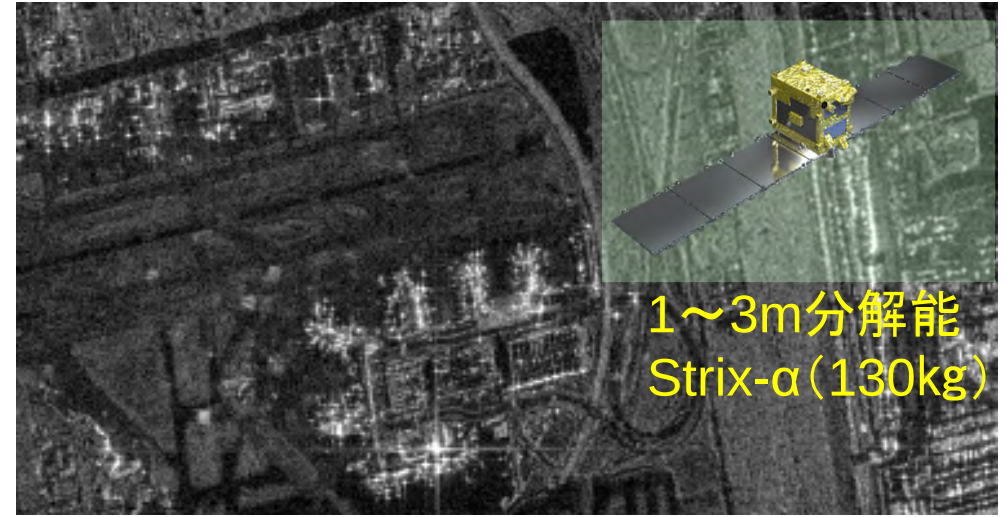


日本における小型コンステレーション会社



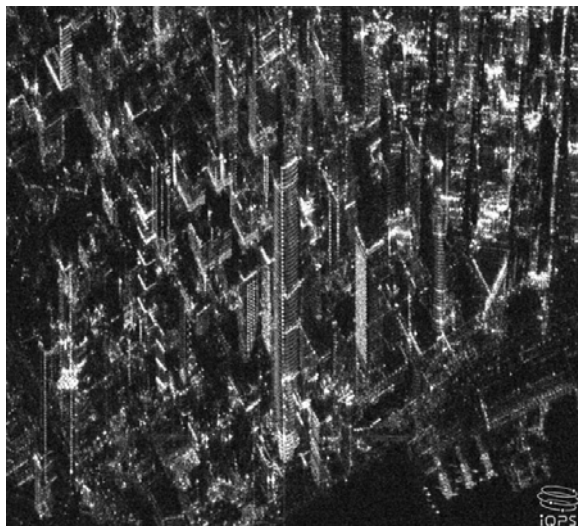
2.5m分解能
GRUS(90kg)

Axelspace社は5機の光学衛星コンステ運用中。小型コンステで世界中1日1回の撮像を目指す

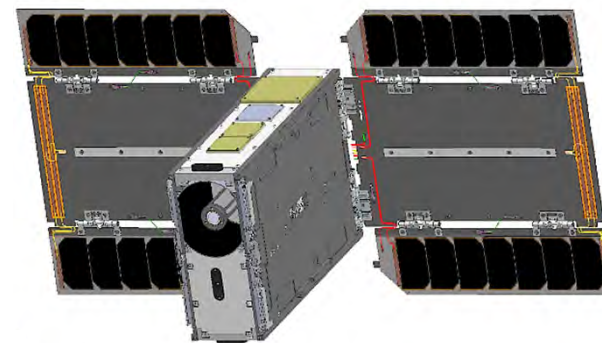


1~3m分解能
Strix-α(130kg)

Synspective社はSAR衛星による数時間に一回の観測を目指す(現在5機運用中)



QPS研究所(5機)
70cm分解能実現



Arkedge Space社は6U衛星による
VDES/MDA/IoTコンステ開発中

宇宙開発利用における重要技術1(私見)

- 通信衛星分野
 - 新しい周波数による通信技術(現在の周波数が逼迫、Q、V、Wへ)
 - NTNによる地上ベースの通信との協調・役割分担(システム技術)
 - 光通信技術(地球観測、深宇宙探査、安全保障ニーズ等に対応)
 - 通信のセキュリティ確保のための技術(量子暗号他)
- 地球観測分野
 - コンステレーション衛星群による監視技術(Tip & CUEなど含む)
 - センサー技術(高分解能赤外線、HyperSpectral、CO₂、センサ小型化)
 - 気象衛星のセンサーが米国企業独占のため高価格化、供給リスクあり
 - 静止光学衛星(巨大鏡の構成技術、フォーメーションフライング等)
 - オンボードでの情報処理技術(高性能耐放射線コンピュータ)
 - AI活用による情報の統合・分析技術
- 測位衛星分野
 - 周波数基準(高精度クロック):光格子時計の小型化・宇宙利用
 - 脆弱性対策(スプーフィング、ジャミング→低軌道PNTなど)
- 軌道上サービス分野
 - デブリ除去のための非協力対象の接近・監視・捕獲技術
 - Post Mission Disposal(寿命後・故障後は自身で大気突入する技術)
 - 宇宙ロジスティック関連技術(軌道間輸送機、燃料補給基地、等)

宇宙開発利用における重要技術2(私見)

- 宇宙科学分野
 - センサー技術(センサ素子、小型化、冷却技術)
 - 超小型衛星による宇宙科学遂行のシステム技術
 - 超精密(μm レベル)フォーメーションフライング合成開口・干渉計測
- 宇宙探査分野
 - サンプルリターン技術(はやぶさ1, 2の先につながる技術)
 - 超小型探査機技術(冬眠技術、親子衛星技術)
 - 深宇宙での電力獲得技術(電池、大面積太陽電池Sailなど)
 - 重力・大気天体着陸技術(エアロシェル、着陸制御等)
- 月面探査分野
 - エネルギー獲得技術(太陽発電衛星、月面原子力発電所、等)
 - 月面・周回軌道での通信・測位技術
 - 表面移動探査、掘削、月の資源による「現場製造」技術
- 宇宙輸送系分野
 - 低コスト・高頻度宇宙輸送技術(方式は多数あり、JAXA・企業が検討中)
- 共通技術
 - 高精度シミュレーション技術(“デジタルツイン“)
 - 高効率バッテリー・太陽電池、ダイヤモンド半導体(増幅素子)

繰り返し(衛星・ロケット開発)数の重要性

- 世界の開発スピードに遅れないためには、技術実証と結果のフィードバックを、早いサイクルで多数、繰り返していくことが必要。

$$\text{技術の向上度} = (1 + a)^N$$

1回の実証の技術向上度

実証の頻度

Nの向上がスピードアップのカギ
(指数関数的な向上)

- スペースXが、創業から20年弱で有人ロケットまで到達した理由の一つに、失敗をおそれず、実際に造って試すことを重視したことが挙げられる。

<ギャレット・リースマン氏のインタビュー(スペースX顧問、元NASA宇宙飛行士)>

- ✓ スペースXでは、机上で何年も考え込んで素晴らしい設計図を描くことよりも、実際に造って試してみて、描いた設計図が本当に機能するかどうかを試すことを優先。
- ✓ 設計の問題点をすべて修正し、また実際に試してみると、今度は別の問題が見える。これをスピーディーに繰り返すことで、どんどん成功に近づいていく。失敗を早く重ねることこそが、短期間で高い技術力を身につけられた一番の要因。
- ✓ コストも、実際にやってみて失敗したほうが安くつく場合が多い。失敗を恐れて実験をしなければ、もっと長い年月がかかる。高給で優秀な技術者を長期間、雇い続けなければならない。



2020.12.9の試験で爆発するスターシップ(ロイター)

打ち上げ回数が確保できない場合、デジタルツインの中で
模擬打ち上げを繰り返して設計にフィードバックする

日経新聞のインタビュー記事(2020.12.29)を要約

<https://www.nikkei.com/article/DGXZQOFK248FP0U0A221C2000000/>

"If things are not failing, you are not innovating enough"
「失敗していないとすれば、イノベーションを起こしていないということだ」(イーロン・マスク)

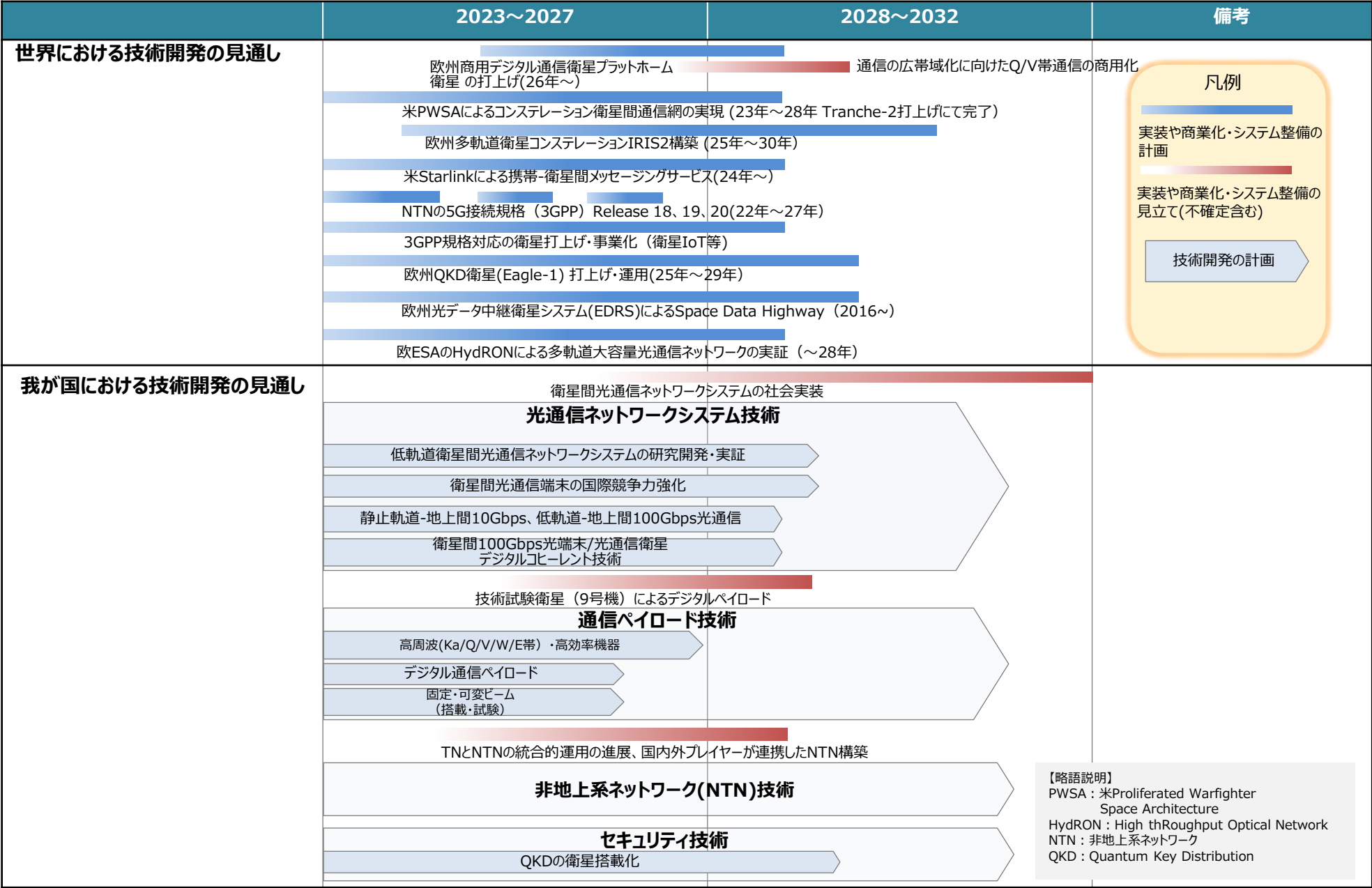
参考：昨今の政府宇宙施策

- **経済安全保障重要技術育成プログラム（K-program）**
 - 光通信コンステ、VDES/海洋状況把握、赤外多波長センサ、衛星燃料補給、静止光学大口径アンテナ

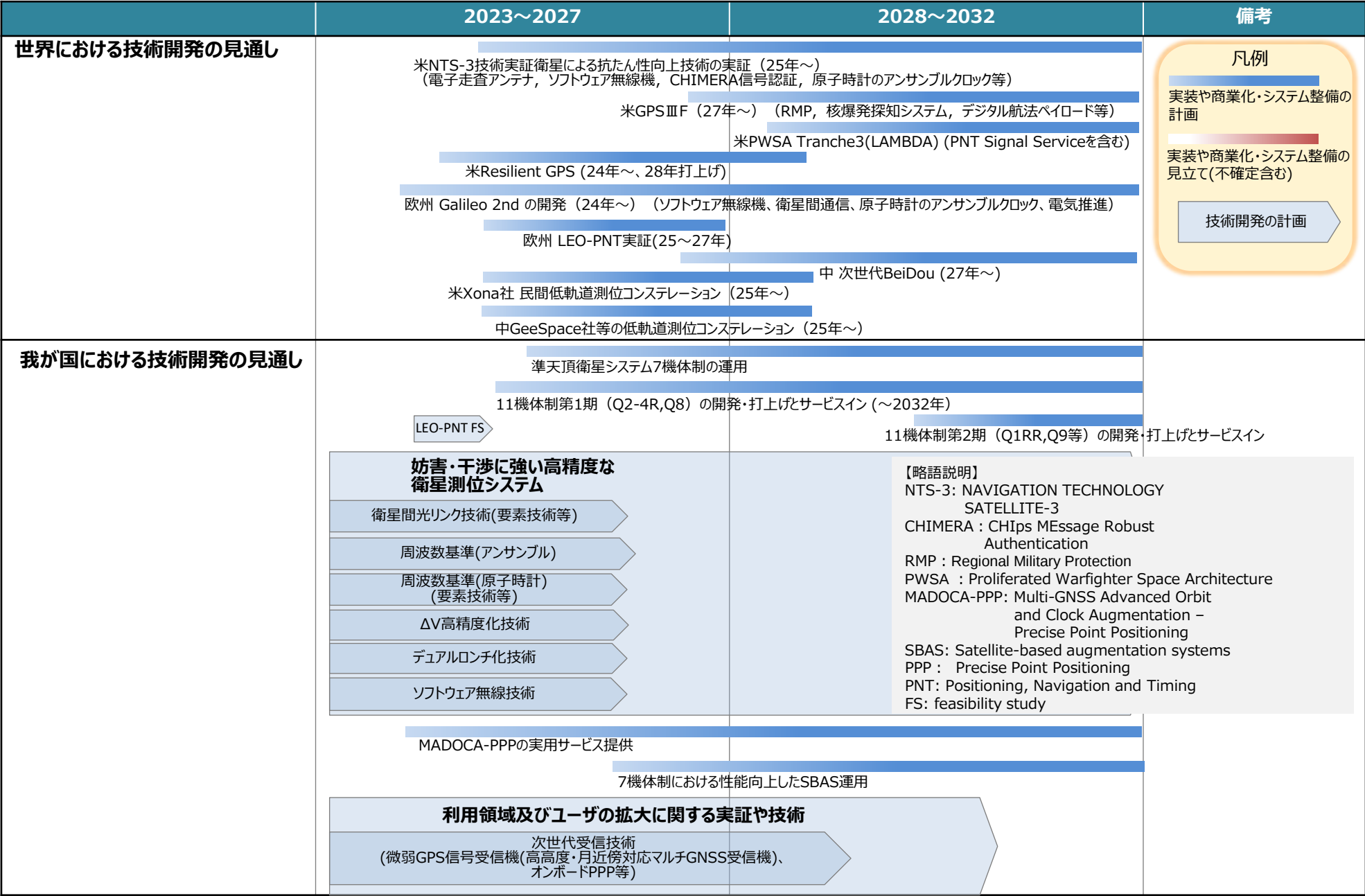
https://www8.cao.go.jp/cstp/anzen_anshin/kprogram.html
- **宇宙戦略基金（JAXA基金）**
 - 研究開発を強化すべく10年で1兆円のJAXA基金化を目指す
 - 第一期3000億円（22テーマ）決定。2期の3000億円の公募実施中
 - JAXAがファンディングエージェンシー機能を果たし、外の産・学が資金を利用

<https://fund.jaxa.jp/>
- **宇宙技術戦略（次ページ以降に2024年度版の参考資料を載せる）**
 - 世界の技術の徹底的調査と日本の優位技術、宇宙開発利用の日本の目指す方向に基づき、研究開発を強化する分野の選定
 - 公共利用と産業化の双方をにらんで、企業からのヒアリングも含めて優先順位付け→宇宙戦略基金の公募する技術分野を選ぶベースに
 - 2023年に3つの小委員会で調査分析し執筆。その後、毎年マイナーチェンジ
 - 内閣府宇宙政策委員会 衛星開発実証小委員会の委員長として参画

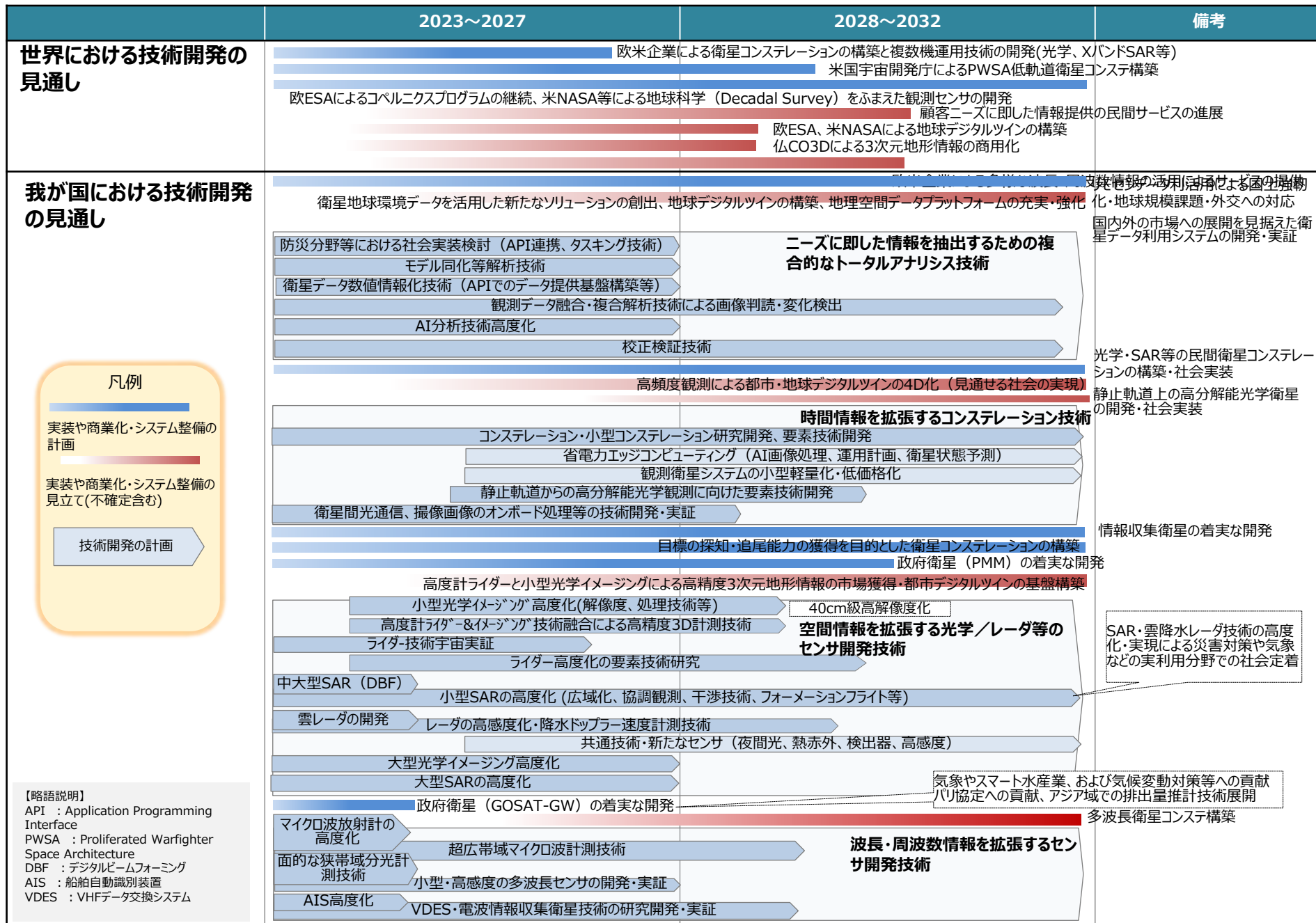
通信の技術ロードマップ°



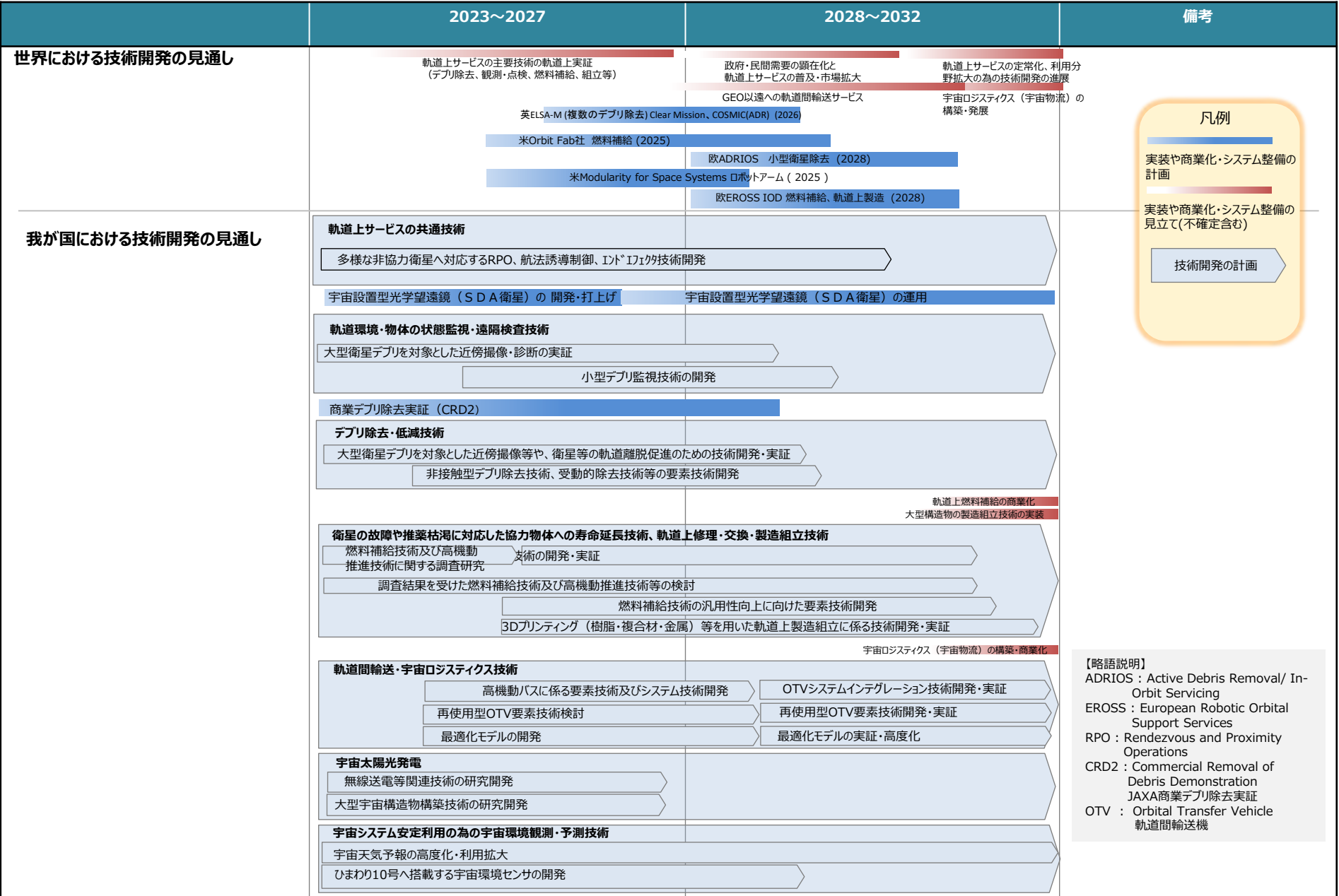
衛星測位システムの技術ロードマップ



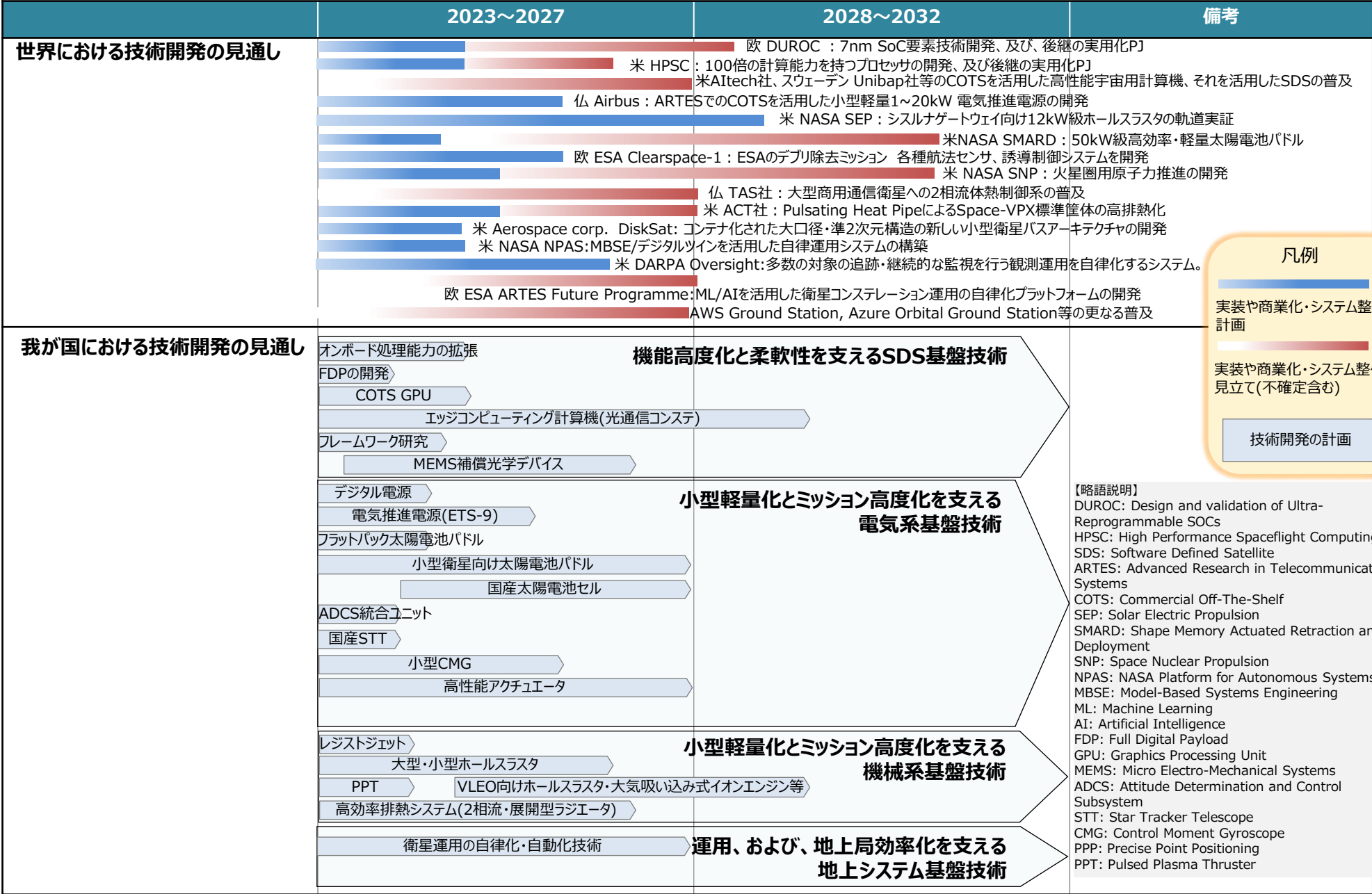
リモートセンシングの技術ロードマップ



軌道上サービスの技術ロードマップ°



衛星基盤技術の技術ロードマップ



凡例

実装や商業化・システム整備の計画

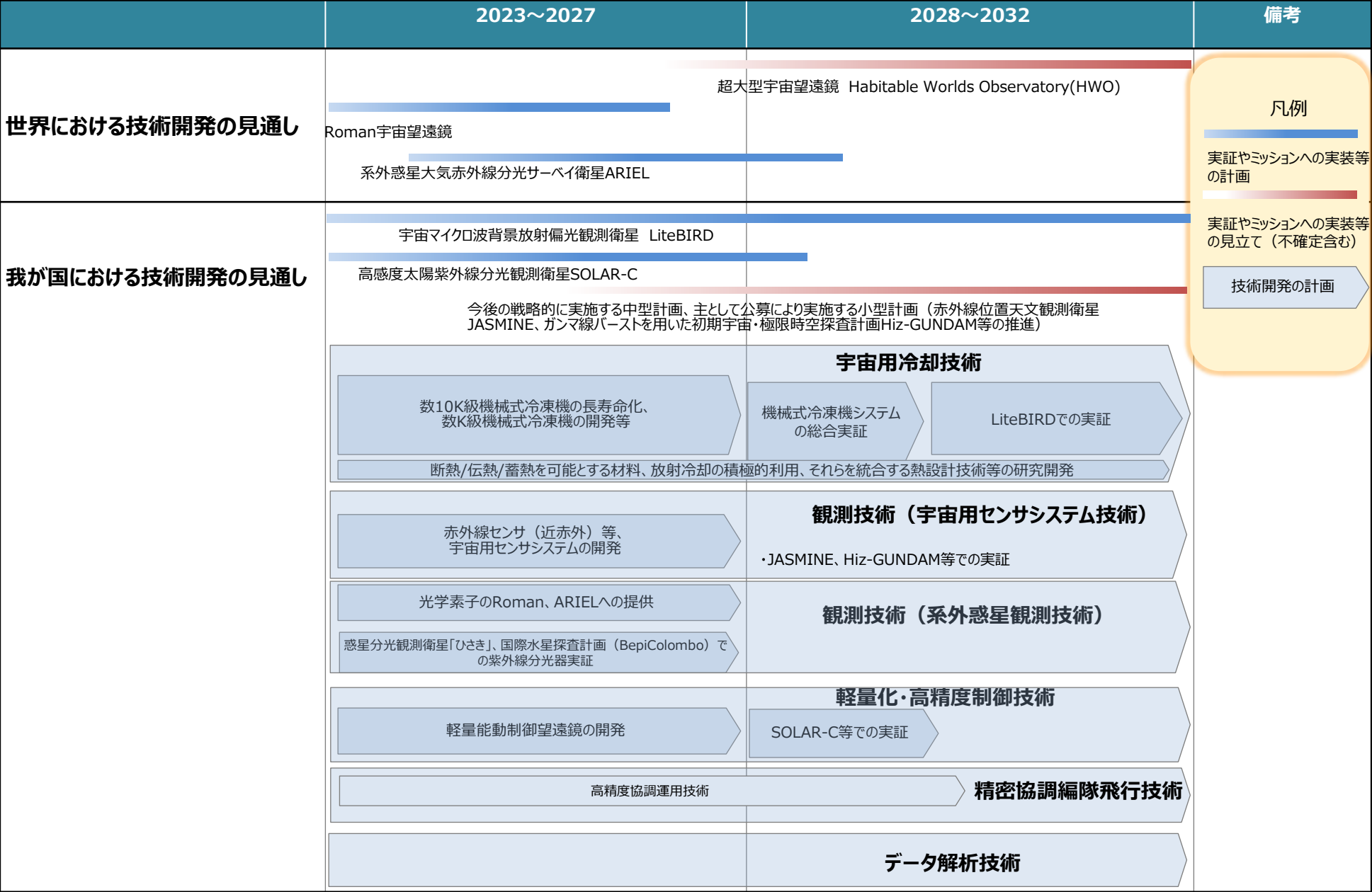
実装や商業化・システム整備の見立て(不確定含む)

技術開発の計画

【略語説明】
DUROC: Design and validation of Ultra-Reprogrammable SOCs
HPSC: High Performance Spaceflight Computing
SDS: Software Defined Satellite
ARTES: Advanced Research in Telecommunications Systems
COTS: Commercial Off-The-Shelf
SEP: Solar Electric Propulsion
SMARD: Shape Memory Actuated Retraction and Deployment
SNP: Space Nuclear Propulsion
NPAS: NASA Platform for Autonomous Systems
MBSE: Model-Based Systems Engineering
ML: Machine Learning
AI: Artificial Intelligence
FDP: Full Digital Payload
GPU: Graphics Processing Unit
MEMS: Micro Electro-Mechanical Systems
ADCS: Attitude Determination and Control Subsystem
STT: Star Tracker Telescope
CMG: Control Moment Gyroscope
PPP: Precise Point Positioning
PPT: Pulsed Plasma Thruster

宇宙物理分野の技術ロードマップ^o

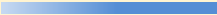
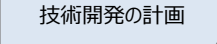
※太陽系科学・探査分野との連携により技術開発を推進



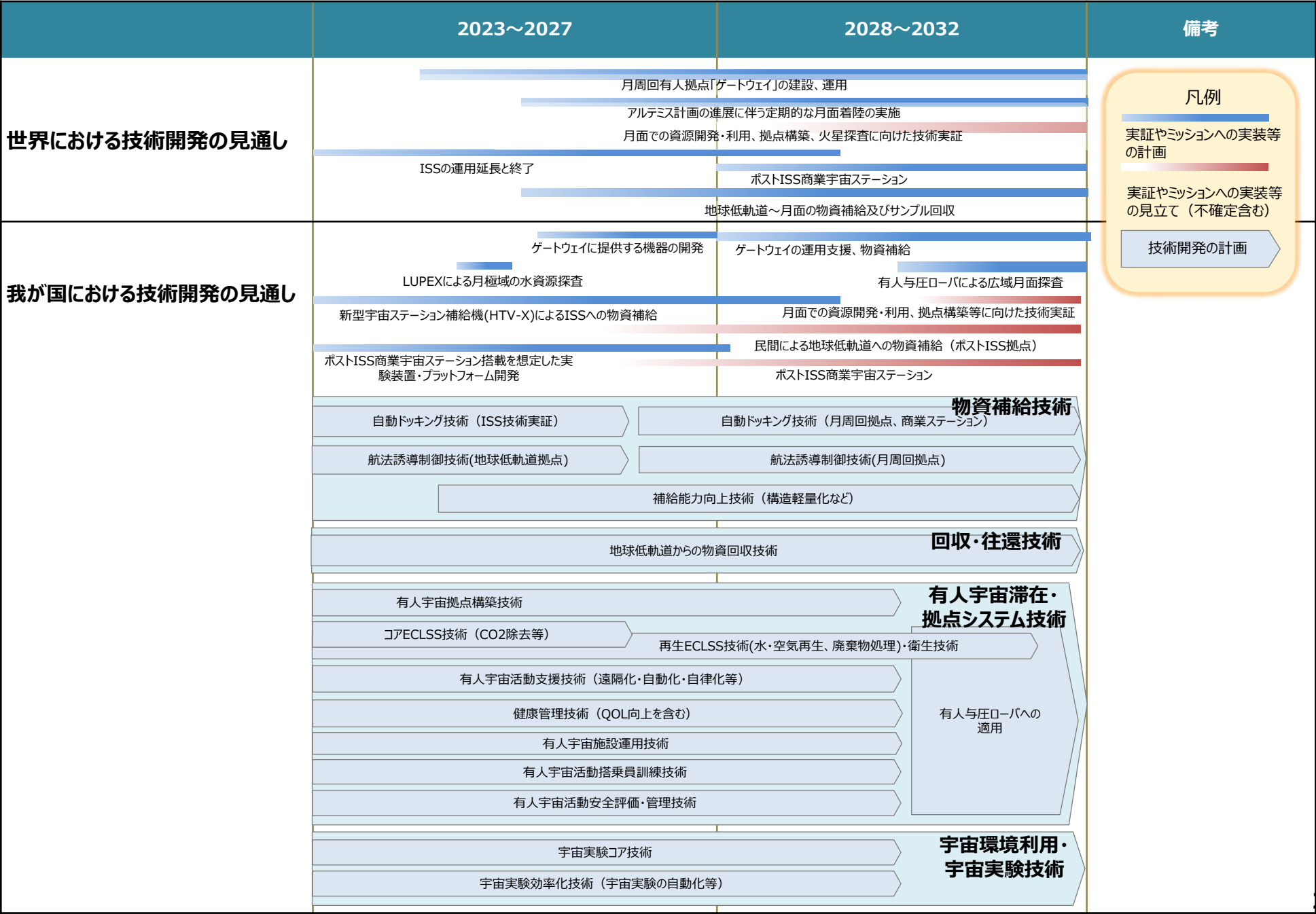
太陽系科学・探査分野の技術ロードマップ°

	2023～2027	2028～2032	備考
世界における技術開発の見通し	月面における科学成果の創出（サンプル分析、月震計、月面天文台等） アルテミス計画の火星への展開 中国等による月、火星探査の進展 土星衛星探査計画 Dragonfly 長周期彗星探査計画 Comet Interceptor 彗星探査計画 CAESAR		凡例 実証やミッションへの実装等の計画 実証やミッションへの実装等の見立て（不確定含む） 技術開発の計画
我が国における技術開発の見通し	火星衛星探査計画MMX 深宇宙探査技術実証機DESTINY+ 日本主導の次世代サンプルリターン計画の推進 我が国の独創的・先鋭的な火星本星探査計画の推進 回収カプセルの高性能化・大型化 試料採取機構の高度化 サンプルリターンミッションに応じたキュレーション設備の拡充・強化 サンプルリターン技術 ・回収カプセルの国際展開（CAESARへの供給） 超小型探査バス、自律・ネットワーク運用技術等の開発、多様な機会での技術実証、複数機によるシステムとしての軌道実証 信頼性を確保しつつ効率的なS&MA（ミッション保証）・SE（システムズエンジニアリング）/PM（プロジェクトマネジメント）の検討・確立 超小型探査技術 展開型エアロセル技術の開発 地球低軌道実証 火星着陸ミッション等に向けた開発 相対自律画像航法技術、航法センサ、逆噴射等、到達精度向上等のための技術開発 大気突入・空力減速・着陸技術 非測位環境下での高精度誘導航法要素技術、静止軌道を含むスルナ領域と共用化可能なシステム技術等の開発 化学・電気・太陽光推進等強み技術の発展、既存推進系の性能向上 深宇宙軌道間輸送技術 大気・表層・磁気圏等観測技術の高度化、国際展開、日本主導ミッションへの適用 表面等探査技術（大気・表層・磁気圏等観測技術） 惑星保護技術の開発、設備整備 表面等探査技術（惑星保護技術）		

月面探査・開発等の技術ロードマップ°

	2023～2027	2028～2032	備考
世界における技術開発の見通し		アルテミス計画の進展に伴う定期的な月面着陸の実施 月の測位・通信インフラの構築 月面での資源開発・利用、拠点構築、火星探査に向けた技術実証 中国等による月・火星探査の進展	凡例  実証やミッションへの実装等の計画  実証やミッションへの実装等の見立て（不確定含む）  技術開発の計画
我が国における技術開発の見通し	SLIMによる高精度着陸技術の実証 LUPEXによる月極域の水資源探査	月の測位・通信システムの実証、運用（国際連携で推進） 月極域を含む定期的な月面着陸機会を活用した科学研究・技術実証 有人と圧ローバによる広域月面探査 月面での資源開発・利用、物資補給、拠点構築等に向けた技術実証	
	月面天文台、月サンプル選別・採取・分析、月震計等に係る技術 半永久電源（熱源）技術	・ 月面輸送機会を活用した実証 ・ 各技術の高度化	月面科学に係る技術
	航法誘導制御技術及び自律障害物検知・回避技術 降着系技術（着陸脚等）	・ 月面資源探査や月面科学を実現する月面着陸機への活用	月着陸技術
	発電技術（展開収納型太陽電池タワー等） 蓄電技術（高エネルギー密度電池等）	有人と圧ローバへの適用	エネルギー技術
	月測位システム(LNSS)技術 光通信技術、小型軽量化技術、惑星間インターネット技術 月面拠点域内のRF通信技術	・ 測位インフラの整備拡張、高性能化	月通信・測位技術
	航法誘導制御技術（航法・自動運転技術、オンボードの有人操縦と地上遠隔操作の融合技術） 走行機構技術（不整地、長距離走行技術） 耐環境技術（越夜、防塵等）、作業支援技術（ロボットアーム）	有人と圧ローバへの適用	月表面探査技術
	月周回資源探査技術 月面資源探査技術（探査機による月面資源調査・掘削・採取技術等）	・ 月面資源調査への活用	月資源開発技術
	水資源利用技術（資源採取技術、推薬生成技術等） 宇宙無人建設技術（無人建設技術、建材製造技術、簡易施設建設技術） 月面等での食料生産技術（高効率食料生産技術、有機物等の資源再生技術等）		月資源利用技術

地球低軌道・国際宇宙探査共通の技術ロードマップ^o



宇宙輸送の技術ロードマップ°

	2023～2027	2028～2032	備考
世界における技術開発の見通し	(世界)民間企業を中心としたロケットの開発 (米)(中)超大型ロケットの開発 宇宙輸送ネットワークの拡大（月ゲートウェイ、月面、火星等への輸送） (印)(欧)有人輸送技術の開発 宇宙輸送サービスの高度化（より安価に、より大きなものを、高頻度に輸送） (米等) サブオービタル飛行等による宇宙旅行の進展 (世界)宇宙港の整備		凡例 実装や商業化・システム整備の計画 実装や商業化・システム整備の見立て(不確定含む) 技術開発の計画
我が国における技術開発の見通し	基幹ロケット（H3ロケット、イプシロンSロケット）の運用と高度化 次期基幹ロケットの開発・実証 民間ロケットの開発 民間ロケットによる輸送サービスの商用化・海外展開 サブオービタル飛行・軌道間輸送等、新たな宇宙輸送システムの開発 国内の民間射場・宇宙港の活用 システム技術（システムインテグレーション技術、MBSE等） 構造系技術（3D積層、複合素材成型技術等） 性能向上・低コスト化を目指した技術開発 推進系技術（メインエンジン、デトネーションエンジン、エアブリージングエンジン、固体モータ量産化技術等） 低コスト・軽量な高性能エンジン研究開発 固体モータ主要材料の量産化のための技術開発 その他の基盤技術（自律飛行安全、再使用型ロケット技術、洋上回収技術、製造プロセスの刷新等） 再使用型ロケット技術の研究開発 1段階目再使用を目指した帰還技術実証 回収システム等の地上系技術開発 自律飛行安全関連技術開発 製造プロセスの刷新 輸送サービス技術（複数搭載技術等） 軌道間輸送技術、有人輸送技術等 有人輸送技術の研究開発 環境制御・生命維持装置の基盤技術、異常検知や緊急退避の基盤技術 射場・宇宙港技術 射場設備や打上げ運用・管理等のスマート化に係るシステム技術 汎用射場設備の検討(F/S) 宇宙輸送に係るサプライチェーンの強化・維持 輸送部品・コンポーネント等の開発		2040年代前半に単位質量当たりの 打上げコストH3ロケットの1/10程度 次期基幹ロケットの運用 2040年代前半に単位質量当たりの 打上げコストH3ロケットの1/10以下 2030年代後半：宇宙空間での輸 送ネットワークの構築、有人輸送・宇 宙旅行の実用化

分野共通技術の技術ロードマップ

