

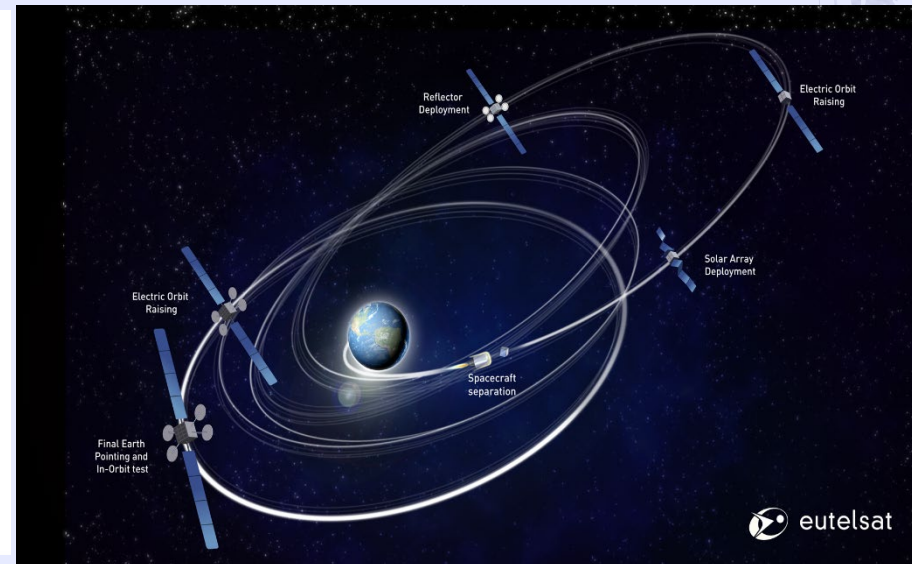
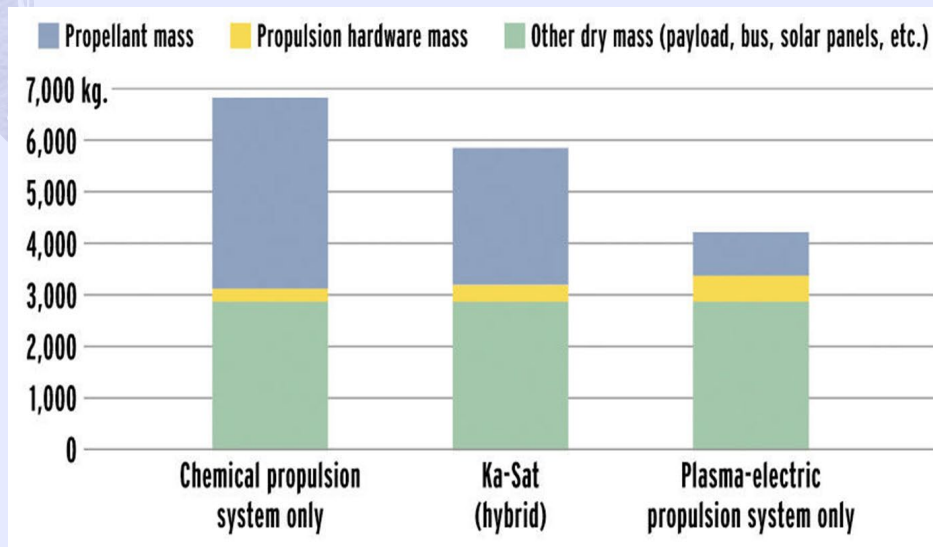
「先端宇宙推進工学」

5限 電気推進が拓く新しい宇宙輸送

1. 全電化静止衛星
2. メガコンステレーション衛星
3. ホールスラスタ開発競争
4. 大電力電気推進が拓く未来

1. 全電化衛星

- 化学推進を搭載せず、電気推進のみで以下を行う。
 1. 静止軌道までの軌道上昇 (O/R)
 2. 静止軌道保持 (NSSK)
 3. ほか (姿勢制御、ホイールアンローディング)
- 高比推力のため、搭載推薬量を大幅低減
- 一方、低推力ゆえ、らせん軌道上昇となり、遷移期間が長期化 (3~6ヵ月)



Europe's first all-electric telecom satellite Eutelsat-172B (2017-) built by Airbus.

世界初の全電化衛星

- 2012年Boeingが世界初の2トン級の全電化静止衛星（702SP）を4機受注。
- 100機近い軌道上実績のあるL3C社の4.5kW級イオンエンジン25cm-XIPSを搭載。
- 2015年、Falcon9にて2機同時打上げ、約半年かけてGEOへ到達。
- 2016年6月、残り2機が打上げ、2017年1月にサービスを開始。
- SES、米政府からも数機を受注済み。



2つの全電化衛星（静止衛星）がステージに組み上げられた様子。2015年3月2日打上成功、9月10日運用開始（クレジット: Boeing）

ボーイング全電化衛星プラットフォーム



ボーイング702SP

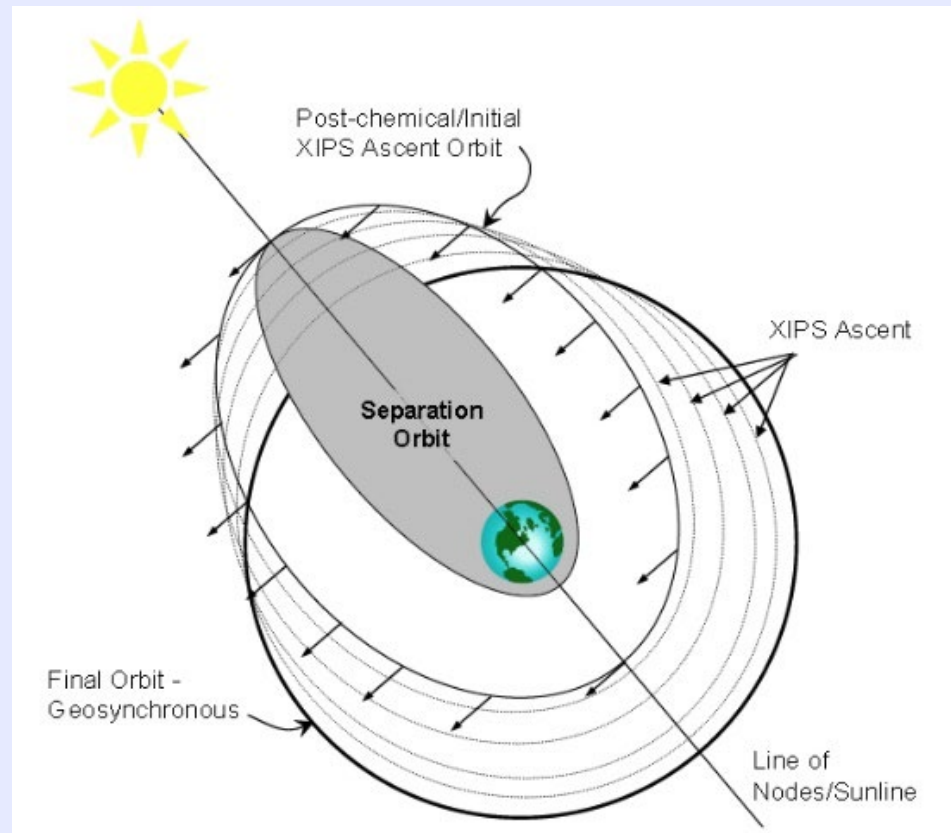


XIPS-25 (クレジット: Boeing)

プラットフォーム	非電化702MP	全電化702SP
最初の打上げ	2012	2015
最初の衛星	Intelsat	ABS & SatMex (joint order)
ドライ質量	300 ~ 650 kg	200 ~ 680 kg
打上質量	5.8 ~ 6.1 ton	1.5 ~ 2.0 ton

出典 <http://www.boeing.com/space/boeing-satellite-family/>

静止軌道(GEO)投入の遷移軌道



Boeing全電化衛星のスパイラル軌道（スーパーシンクロナス軌道から静止軌道への遷移）

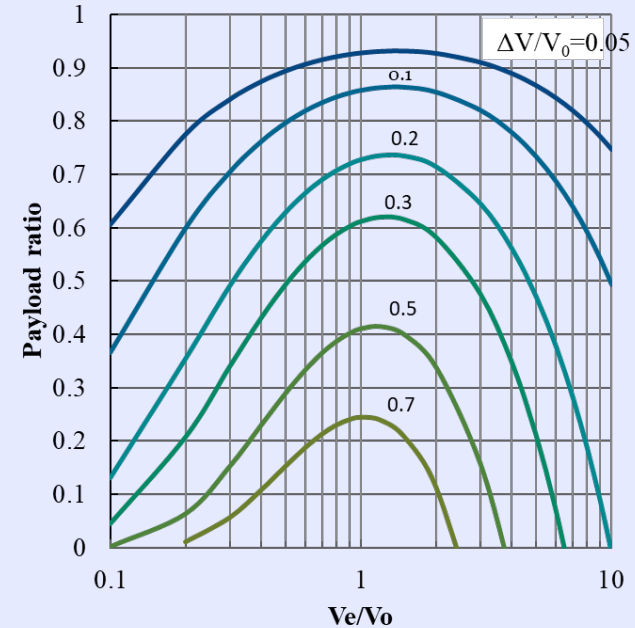
軌道投入に最適な排気速度/比推力

ペイロード比

$$\frac{m_{\text{pay}}}{m_i} = 1 - \frac{m_{\text{prop}}}{m_i} - \frac{\beta P_s}{m_i}$$

$$= \exp\left(\frac{-\Delta V}{V_e}\right) - \frac{V_e^2}{2V_0^2} \left\{ 1 - \exp\left(\frac{-\Delta V}{V_e}\right) \right\}$$

$$V_0 = \sqrt{\eta_{\text{th}} \tau / \beta}$$



排気速度とペイロード比

必要な遷移日数

初期衛星 質量、kg	スラスト(5kW級)			遷移日数	推進剤, kg	バンアレ ン帯通過 積算日数
	種類	推力, mN	比推力,s			
4,200	イオン	165	3,500	368	287	4.2
2,200	ホール	254	2,020	126	245	1.4

全電化衛星バスの動向(米)

■ Lockheed Martin

- 米軍AEHFにてホールスラスト（Aerojet XR-5）による軌道上昇実績あり（化学推進併用）。
- ホールスラストにより、3ヵ月での軌道上昇。
- 3～5トン、10～25kWのラインナップを用意。



■ Space Systems/Loral

- Fakel（露）製ホールスラストでの軌道保持実績多数。
- LM同様、ホールスラストにて3ヵ月の軌道上昇を目指す。
- Fakel のほかSafran（仏）の採用。
- Eutelsat 7C全電化衛星を受注。2019年打上げ。



全電化衛星バスの動向(欧)

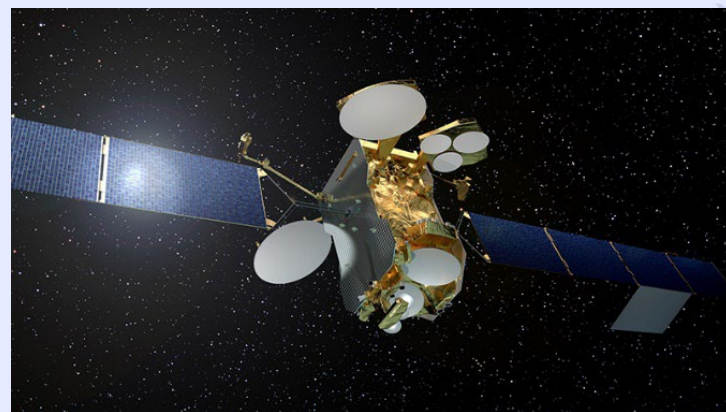
- Boeingの受注発表を受け、即座に政府主導の産業支援プログラム Neosat (3～6トン級)、Electra (3トン級) を立ち上げ

- Airbus Defense and Space (Airbus DS)

- Neosatプログラムにて大型バスEurostar Neoを開発中。
- 100日間での遷移を狙う。

【Eurostar E3000 EOR】

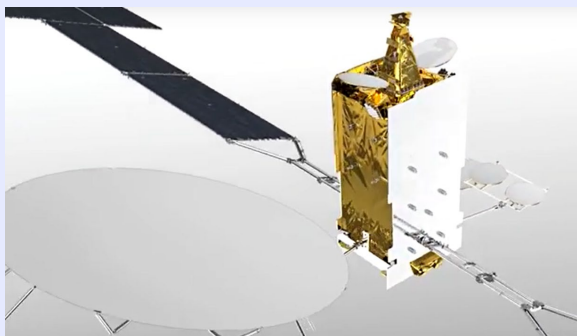
- Eurostar E3000をベースに全電化バスEurostar E3000 EOR (3.5トン) を開発。Eutelsat 172Bとして受注、2017年6月1日Ariane5にて打上げ。
- 遷移期間は4カ月。
- 2種のホールスラスタ (Safran PPS-5000 およびFakel SPT-140) を搭載。
- スラスタはブームに搭載し、キャントロス、ブルーム影響を低減。
- 電源はTAS-B (Thales Alenia Space Belgium) 。
- 仏軍からも受注 (Comsat NG)、2021年打上げ予定。



全電化衛星バスの動向(欧)

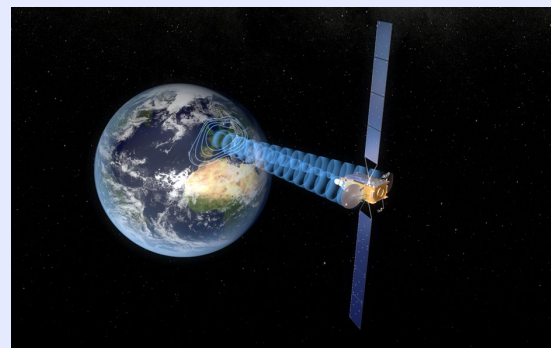
■ Thales Alenia Space (TAS)

- NeosatプログラムにてSpacebus Neoを開発
- Konnect通信衛星 (Eutelsat) 2019年打上。
- Comsat NG (仏軍) 2021年打上。



■ OHB

- ElectraプログラムにてElectra衛星を開発。
- Aerojet BPT4000/XR-5を搭載
- 1号機を2023年打上げ予定。



全電化衛星バスの動向(日)

■ 三菱電機

- 技術試験衛星 9 号機(DS2000衛星バス) に6kWのIHIホールスラストシステムを搭載
- 大出力ホールスラストにより、衛星打ち上げ後の軌道到達時間がBoeing全電化衛星よりも短くなり、顧客への軌道上納入が早期化
- 発生電力 25 kW 級の大電力・大容量を実現し、通信衛星の高速大容量化の需要に対応
- 国産 GPS 受信機を初めて静止衛星に搭載することで、軌道遷移および軌道制御の自律化運用を実現し、軌道上での衛星運用を省力化



技術試験衛星 9 号機イメージ図 (JAXA)

世界の全電化衛星バス比較

開発元	衛星/バス名	搭載電気推進	打上時質量	発生電力	ステータス	遷移期間
Boeing (米)	702SP	イオンエンジン XIPS-25	2 ton	8 kW	2015初フライト	6ヵ月
USAF (LM) (米)	AEHF (A2100M) 化学/電気双方でO/R	ホールスラスタ XR-5	6 ton	不明	2010	
LM (米)	A2100	ホールスラスタ XR-5	3 ton 5 ton※1	10 kW 20 – 25 kW※1	開発中	3ヵ月 (目標)
SSL (米)	SSL 1300	ホールスラスタ SPT or PPS	– 5 ton	– 25 kW	2018初フライト	3ヵ月 (目標)
OHB (欧)	Electra	ホールスラスタ BPT-4000/XR-5	3 ton	10 kW	2021初フライト	
TAS (欧)	Spacebus Neo	ホールスラスタ PPS-5000	3.5 ton	16 kW以上	2021初フライト	
Airbus DS (欧)	Eurostar E3000 EOR	ホールスラスタ PPS-5000/SPT-140	3.5 ton	13 kW	2017初フライト	4ヵ月
	Eurostar Neo	ホールスラスタ PPS-5000	3 – 6 ton	– 30 kW※1	2021初フライト	100日
RSCC (ロシア)	Express-2000	ホールスラスタ SPT	3.4 ton	14 kW	不明	
中国航天	DFH-4SP	不明	2 – 2.5 ton	9 kW	開発中	

※1 公表されたペイロード電力から推測

全電化衛星のまとめ

■ 実証機会

- 米：SSLが2018年、LMは不明。
- 欧：2017, 19, 21年と立て続けに各社バスの初号機打上げ。
- 日：2025年に初号機打ち上げ予定。その後年間2機の受注を目指す。

■ 衛星質量、電力

- 702SPの2トン級に留まらず、3～6トンの中・大型全電化バスを開発。
- ～25、30kWの大電力バスも視野。

■ ホールスラスタ

- 702SP以外、全てホールスラスタを採用予定。
- イオンエンジンの遷移期間（約半年）を3～4カ月に短期化できることが主たる要因。
- より安価。
- 搭載Xe量は増すが、ハードウェア質量が低減できて影響は小さい。
- SafranのPPS-5000が人気。低価格が要因か。

2. メガコンステレーション衛星

2.1 スターリンク 衛星インターネットサービス

- 2023年9月時点で3,000機を超える低軌道衛星が稼働中
- 地上との通信 : K_a band (27~40 GHz) と K_u band (12~18 GHz)
- 衛星間の通信 : レーザー
- 推進機 : ホールスラスタ (SpaceX社製)
- 第1世代(v0.9 - v1.5) : 227~295 kg@ 550 - 570 km 約3,000基
Falcon 9 を用いて60基ずつ打上
- 第2世代(v2.0) : 1250 kg@600 km以下、1.5 kW 約7,500基予定
増強型スターシップを用いて打上予定
- 日本でのWifiサービス: 月額12,300円、専用キット73,000円、KDDI(au)と提携



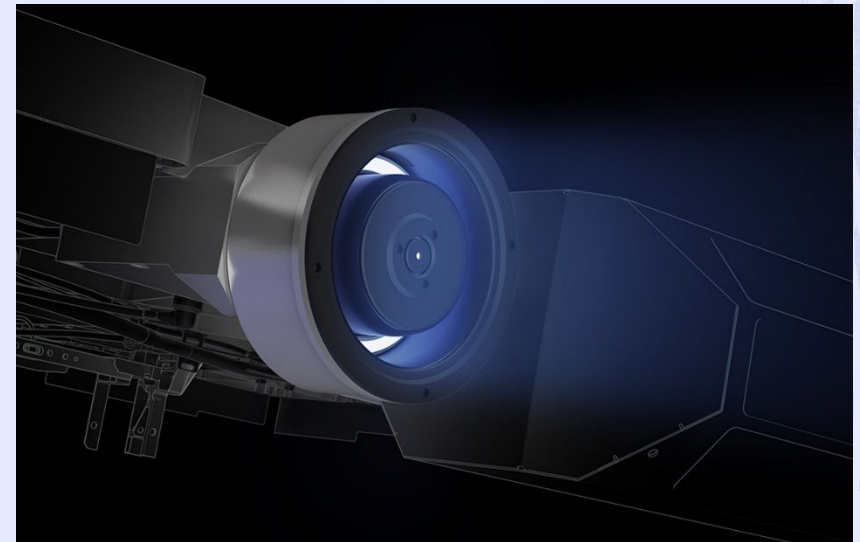
夜空に見えるスターリンク衛星群



スターリンク衛星放出の様子

ホールスラスタが担う役割

軌道上昇、衝突回避、軌道維持、脱軌道



- 打ち上げ直後 ISSに影響を与えないよう一旦高度400km以下の軌道で初期システム確認
- 合格しなかった衛星はスラスタ噴射によって軌道から脱離
- ミッション終了後には、数週間以内にスラスタの噴射で軌道から離脱
- 再突入時に完全に消滅するように設計

第1世代から第2世代へ



第1世代

2022年8月10日 Starlink V1.0を54機投入

サイズと重量

4.6 m × 2.3 m × 0.22 m, 295 kg



第二世代

2023年2月27日、2023年9月25日
それぞれStarlink V2 Miniを21機投入

サイズと重量 (推定)

6.5 m × 4.1 m × ? m, 1250 kg

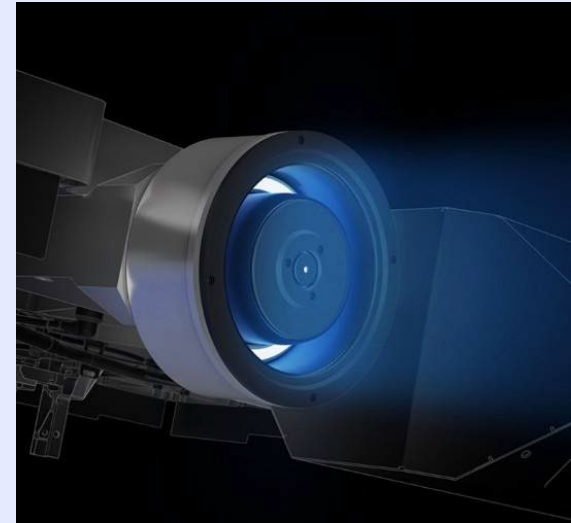
SpaceX社製 ホールスラスタ諸元

第1世代 (推定)

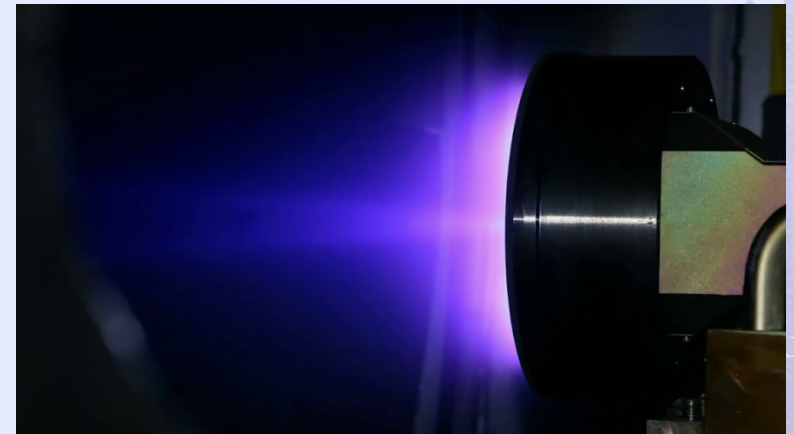
- 推進剤：クリプトン
- 作動電力：1 kW
- 推力：70 mN
- 比推力：1700 s
- 推進効率：60%
- 推進剤搭載量：4.5 kg – 6 kg

第2世代

- 推進剤：アルゴン
- 作動電力：4.2 kW (水冷?)
- 推力：170 mN
- 比推力：2500 s
- 推進効率：50%
- 推進機重量：2.1 kg



3D rendered model of Starlink Hall thruster



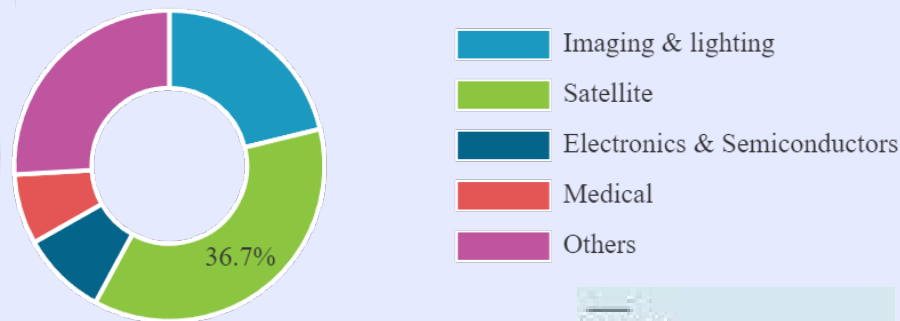
クリプトンホールスラスタ

世界的なキセノンの価格高騰

Xe需要

- Satellite（ほぼホール加速器用）利用の伸びが著しい

Global Xenon Market Share, By Application, 2021



Xe価格

- ロシア・ウクライナ紛争前から価格高騰
- Xe: 5,300 \$ /kg (2022)
- Kr: 650 \$ /kg (2022)



Xe生産

- 空気から液体酸素、液体窒素、アルゴンを精製する過程で分離
- 空気中のキセノン量 0.087ppm
- 世界の年間生産量 53トン（2015）
- ロシア・ウクライナ紛争前は全量の半分がその地域で生産

- **半導体製造用Xe不足**も叫ばれている
- 調達に長い待ち時間が必要となる
- 国際的戦略物資化の恐れ
- **Xeの代替ガス**開発が急務

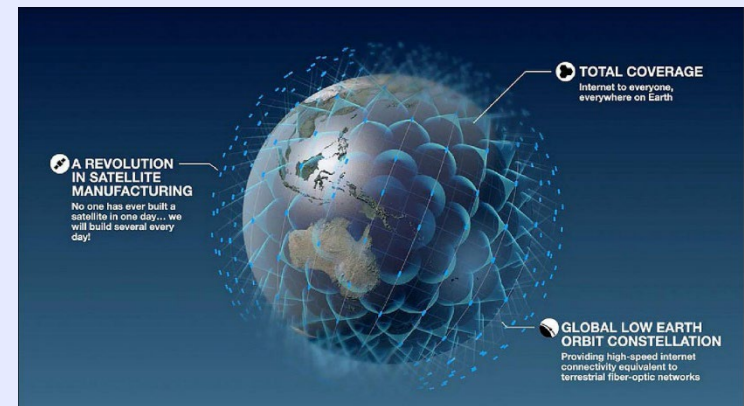
2.2 ワンウェブ衛星インターネットサービス

ソフトバンクや英政府、インドの通信企業バーティグループなどが出資する衛星通信企業 <https://oneweb.net/>

- 2023年3月26日の打ち上げ（18回目）で衛星数が618基となり全世界をカバー。
- 地上との通信：K_a band（27～30 GHz）と K_u band（10～20 GHz）
- 衛星間の通信：レーザー
- 推進機：ホールスラスタ SPT-100（ロシアFakel社）→BHT-350（米国Busek社）
- 第1世代ネットワーク：150 kg@ 1,200 km、高迎角
18軌道に36基ずつ配備。合計648基
アリアンエアロスペース社が打ち上げ機会を手配し、一度に36基打ち上げ
- 日本でのサービス：企業向けのみ。ソフトバンクと提携。
- 船舶や建設機械、航空機などのモビリティなどを想定。

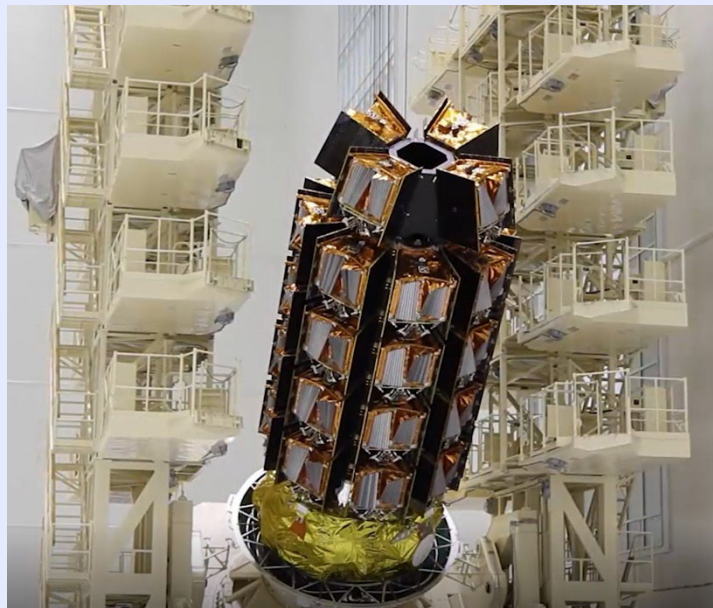


ワンウェブ衛星



18軌道に36基ずつ配備

Arian他の打ち上げ機を利用しネットワーク完成



2020年12月27日ギアナ宇宙センターからソユーズ 2.1bで初の実運用機となる衛星36機の打ち上げ

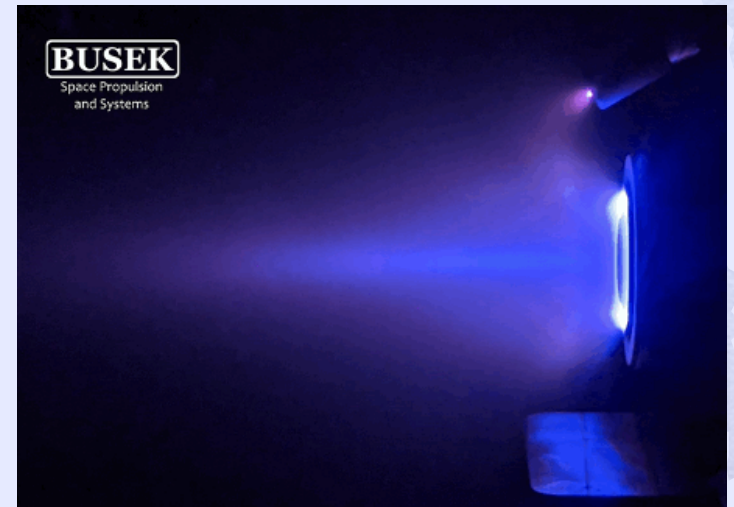


2023年3月25日インドのLVM3ロケットにより36機の衛星を打ち上げて第1世代ネットワーク完成

米Busek社製 ホールスラスタ諸元

BHT-350

- 推進剤：キセノン（クリプトン、ヨウ素）
- 作動電力：350W (200W-600W)
- 推力：17 mN
- 比推力：1244 s
- 推進効率：60%
- 推進機質量：本体1.7 kg, 陰極0.2 kg
- 総インパルス：>250 kN·s



Busek BHT-350

まとめ 国内の携帯電話事業者の動向

(1) KDDI(au)

山間部・離島でも高速通信を提供できるよう**スターリンク**を利用。2022年12月に熱海市初島に第1号基地局を設置。今後、約1,200の基地局を整備の予定。法人向けWi-Fiサービス提供をサポート。

(2) ソフトバンク

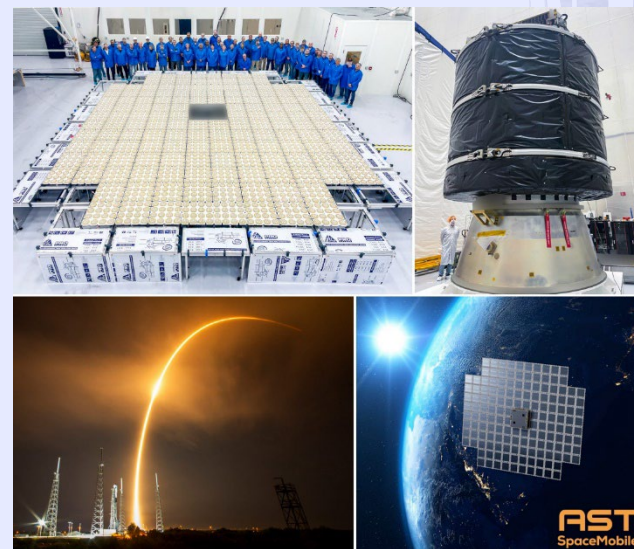
ワンウェブを活用し2023年度中のサービス開始を目指す。

(3) 楽天モバイル

AST スペースモバイルを利用する計画を進行中。試験衛星BlueWalker3を2022年9月打ち上げ。英Vodafone、米AT&Tを含めた4社協力のもとで一発逆転を狙う。（右図）

(4) Amazon

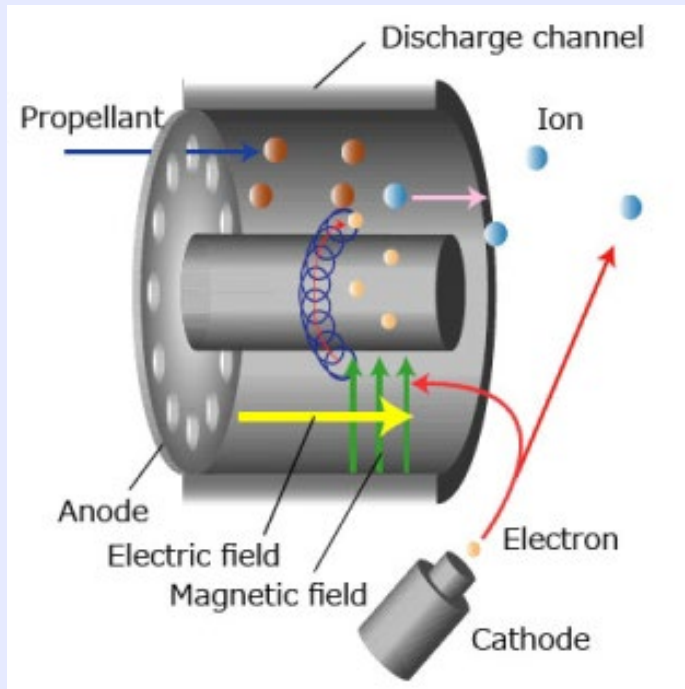
Project Kuiper初衛星を2023年10月6日に打ち上げ。



BlueWalker 3試験衛星

3. ホールスラスタ開発競争

推進システムの主構成要素



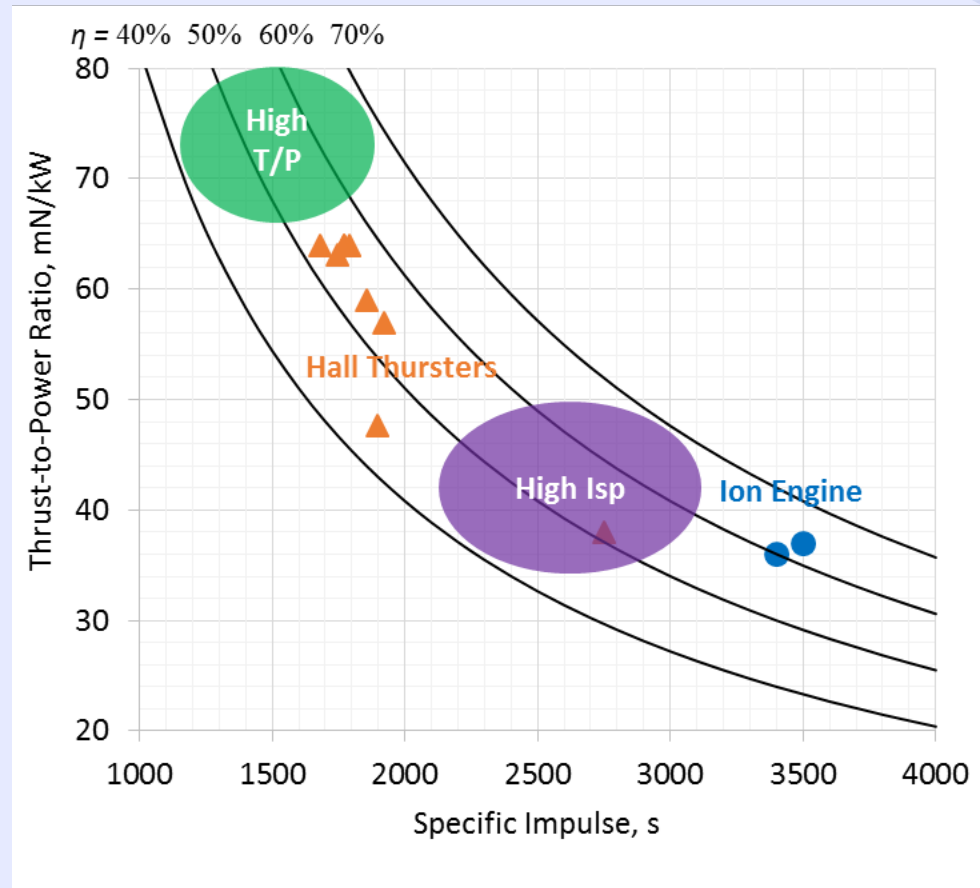
NASA PPU for Hall thruster

ホールスラスタの主構成要素

- スラスタヘッド：プラズマ生成、静電加速、推力発生
- カソード：ヘッドへの電子供給、中和
- PPU（電源）：主放電、磁場コイル、カソードに電力供給

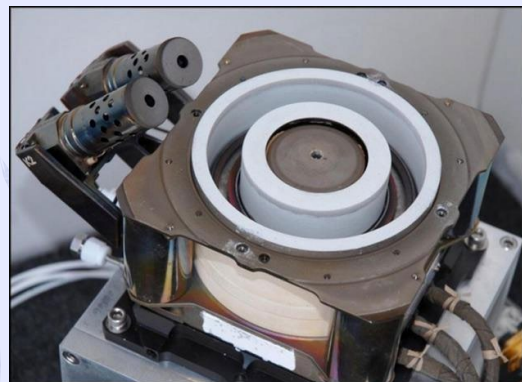
ホールスラスタの2モード作動

- 各国60 mN/kW、 $I_{sp}=1700$ sに集中
- 高性能化、高機能化の方向性：
 - ①軌道上昇（O/R）
70 mN/kW以上の高推力、低電圧
 - ②軌道保持（NSSK、深宇宙探査）
2000 s以上の高 I_{sp} 、高電圧
- ペイロード、バス電力確保の観点では低電力が望ましい
- 広い作動レンジでの推進効率の確保、これに対応したカソード、PPUの開発が課題。
- 衛星バスの更なる大型化、太陽電池セルの軽量化などの動向次第では、現状の4.5 kWからさらに大電力のニーズも



ロシアFakel社 SPTシリーズ

ロシア、カリニングラード州



SPT-100(リニア型)



SPT-140(リニア型)



D-55 (シース型, TsNIIMASH製)

外径	100 mm
電力	1.35 kW
比推力	1600 秒
推力	80 mN
効率	50 %

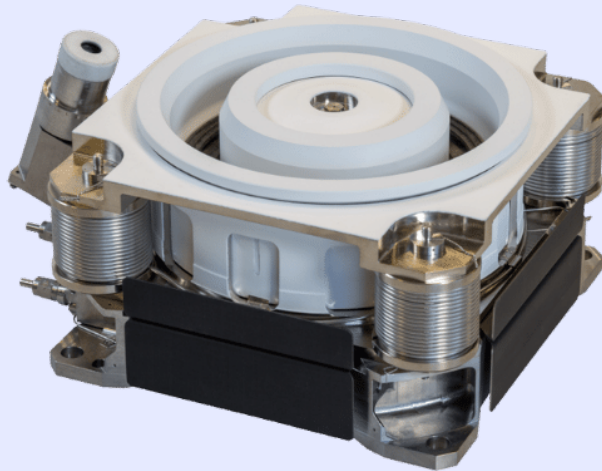
外径	140 mm
電力	4.5 kW-0.9 kW
比推力	1800 秒
推力	280 mN
効率	55 %

外径	55 mm
電力	1.3 kW
比推力	1600 秒
推力	80 mN
効率	48 %

- SPT-140 (4.5kW級) が主力、SPT-100の実績が多数
- SPT-140D : 2 モード (300Vおよび800V)
- Eutelsat 172Bに搭載 (2017打上げ)
- SS/Lとのつながりが強い

欧州Safran社 PPSシリーズ

フランス・パリ



サフラングループ

<https://www.satcatalog.com/component/pps5000/>

航空宇宙、防衛、通信分野の複合企業体である。約83000人の従業員を擁しており、世界27カ国に拠点がある。多くの企業を傘下に持つ。

PPS-5000 (fully qualified in 2021)

電力: 2.5 – 5.0 kW

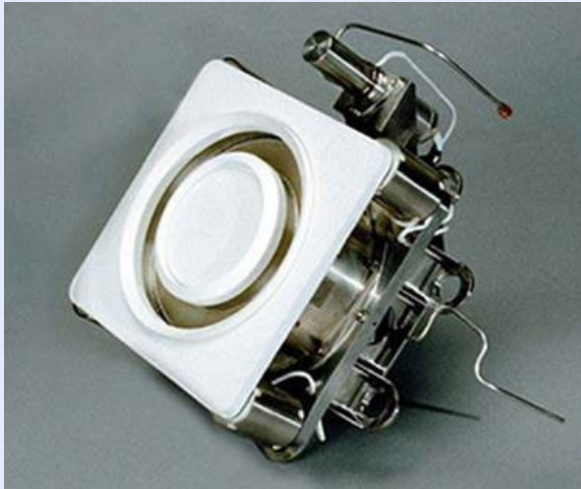
推力: 100 - 300 mN

比推力: 1730 - 2000 s

- 月探査機SMART-1に搭載されたPPS-1350（1.5kW級）の後継機
- Eutelsat 172Bで初フライト
- 300V（軌道上昇用）、400V（NSSK用）。800Vを研究中
- 年間35機売り上げ見込み(2021)、米国ボーイング社に供給

米国Aerojet社 XR-5

ワシントン州レイモンド



XR-5 Hall Thruster

電力: 4.5 kW
(300V、400Vの2モード作動)
推力: 290、254 mN
比推力: 1790、2020 s

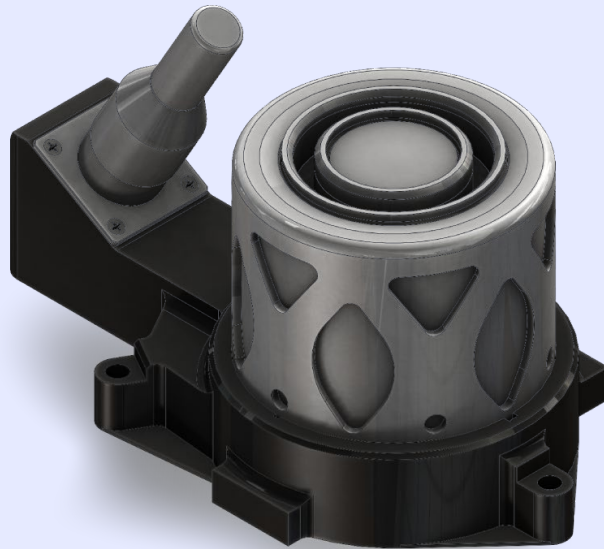
Aerojet/Rocketdyne社

これまで550以上の電気推進機を販売
MR-510 Arcjet Thruster
NEXT 6.9 kW Ion thruster
も含めて

- 米軍事衛星AEHFにて軌道実証 (2010)
- 改良型 (XR-5A) をX-37Bにて軌道上実験
- 全電化衛星GEOStar-3 プラットフォームに搭載

米国Busek社 BHTシリーズ

マサチューセッツ州ボストン



BHT-350

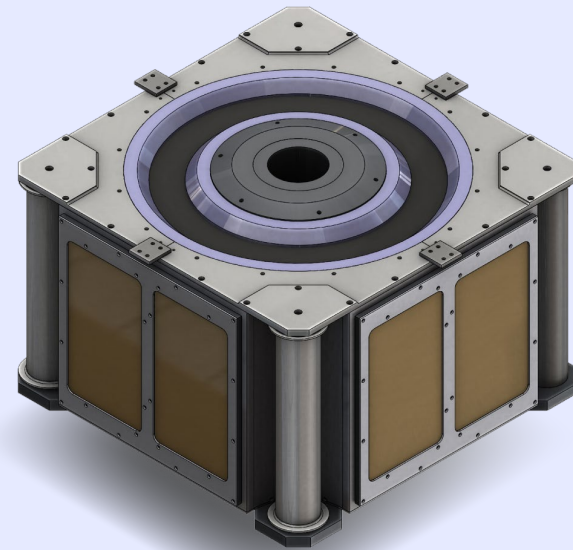
電力 350W (200W-600W)

推力 17mN

比推力 1244 秒

推進剤 Xenon, Krypton, Iodine

重量 1.9 kg



BHT-20K

電力 20 kW

推力 1.0 N

比推力 2515 秒

推進剤 Xenon, Krypton, Iodine

重量 45 kg

<https://www.busek.com/>

ホールスラスタの開発動向

いずれも4.5kWの「軌道上昇モード」、2～3kW級の「軌道保持モード」を有する

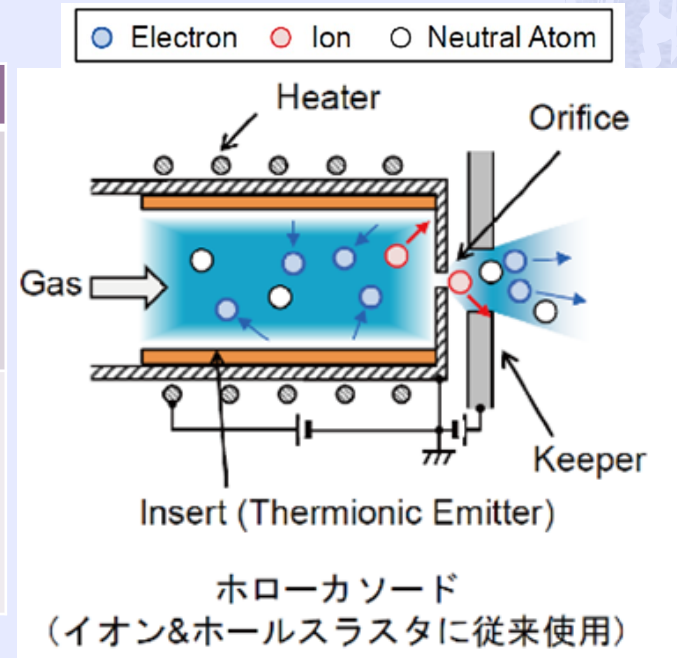
開発元	型式名	電力	推力	推力電力比	比推力	放電電圧	カソード
Aerojet (米)	XR-5	4.5 kW	290 mN	64 mN/kW	1790 s	300 V	BaO/W
		3.0 kW	170 mN	57 mN/kW	1920 s	400 V	
		2.0 kW	117 mN	59 mN/kW	1858 s	400 V	
Safran (仏)	PPS-5000	2 – 5 kW	100 – 325 mN	46 – 60 mN/kW	1730 – 2350 s	300 – 800※V	LaB6
Fakel (露)	SPT-140	4.5 kW	290 mN	64 mN/kW	1770 s	300 V	LaB6
		3.0 kW	193 mN	64 mN/kW	1680 s	300 V	
	SPT-140D	4.5 kW	290 mN	64 mN/kW	1770 s	300 V	
		4.8 kW	180 mN	38 mN/kW	2750 s	800 V	
(参考) L3C (米)	XIPS-25 イオンエンジン	4.5 kW	168 mN	37 mN/kW	3,500 s	-	BaO/W
		2.2 kW	79 mN	36 mN/kW	3,400 s	-	

※文献を基にした推算.

電子源

- 電子源（カソード）としてはホローカソードが用いられる
- 仕事関数の小さい「インサート」からの熱電子放出による
- インサート材料は仕事関数の小さい以下の2種類が主

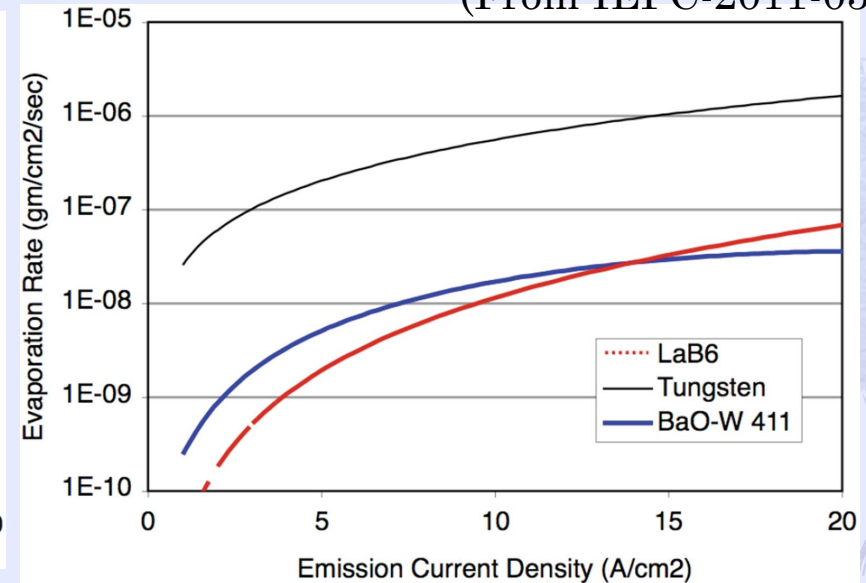
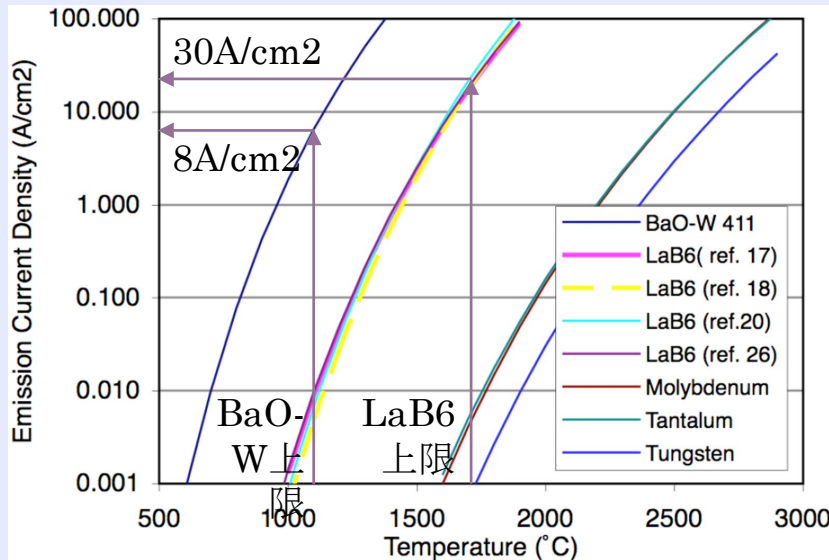
インサート	概要	特徴
BaO-W	多孔質タングステンにBaO等を含浸させたもの	主に米が採用 ○仕事関数がLaB6より小さい ×上限温度が低い（1100℃） ×蒸散速度がLaB6より速い ×酸素等により容易に汚染される
LaB6	六ホウ化ランタン	主に欧、露が採用 ×仕事関数はBaO/Wより高い ○上限温度が高い（1700℃） ○蒸散速度がBaO/Wより遅い ○汚染に対し強い（取扱性良）



首都大竹ヶ原研HPより

インサート材料の特性

(From IEPC-2011-053)



- 最大電流密度はBaO-Wが8A/cm2程度、LaB6が30A/cm2程度。大電流作動（＝大推力）にはLaB6が適している。
- 蒸散速度（寿命）についてもLaB6が優位。
- LaB6は汚染に強く、取り扱いが容易である点もメリット。
- 大型ホールスラスタ向けには、LaB6カソードが主流となるものと推測。
- ただし、高温で作動させねばならず、高度な熱構造設計が求められる。

電力制御器(PPU)

- ホールスラストシステムの価格の7割前後を占めると言われる
- 衛星システムメーカ（Airbus DS、TAS、SSL）が主として開発
- 高電圧（700～800V）もしくは低電圧（100～200V）に対応するPPUも存在
- TAS-Bが精力的に各種スラスタに対応したPPUを開発
- NASA探査用（HiVHAc）の開発を行ってきたCPE（Colorado Power Electronics）が商用向けの開発も開始、広作動レンジを狙っている

開発元	PPU名称	電力	電圧	質量	対応機種	ステータス
Aerojet	-	4.5 kW	150 – 400 V	12.5 kg	XR-5	実証済
TAS-B	Mk2	2.5 kW	220 – 350 V	11.8 kg	PPS-1350, SPT-100	開発済
	Mk3	4.8 kW	100 – 400 V	18.6 kg	PPS-5000, SPT-140D, XR-5	開発中
	HPPU	5 kW	400 – 800 V	-	PPS-5000, SPT-140	基礎開発まで
Airbus DS	Electro	5 kW	300 – 400 V	-	PPS-5000, SPT-140D	開発中
SSL	PPU-100	1.5 kW	300 V	-	SPT-100	実証済
	PPU-140	4.5 kW	300 V	15 kg	SPT-140	開発済
CPE	PDU	4.5 kW	200 – 700 V	-	SPT-140, XR-5	開発中

ホールスラスタ開発競争まとめ

- 大推力、低コストなホールスラスタが指向されている。
- 欧米露にて開発された推進機は、いずれも5kW級のO/Rモードのほか、2～3kW級のNSSKモードの2つのモードを持つ。
- 更なる高機能化として、高推力化（＝短期遷移）、高Isp化（＝推薬節約）への動きがあるが、カソード/PPUの対応など課題がある。
- カソードは大型スラスタ向けにはLaB6が主流になるとみられるが、高度な熱構造設計が必要。
- コスト割合が大きいPPUは、世界的にはスラスタメーカーではなく衛星メーカー（TAS、SSL、ABDS）が販売する構図が出来つつある。

4. 大電力電気推進が拓く未来

米国NASA 大電力ホールスラスタ



世界最大級 NASA-X3 スラスタ
Aerojet Rocketdyne社製

外径80 cm, 230 kg, 100 kW , 5.4 N

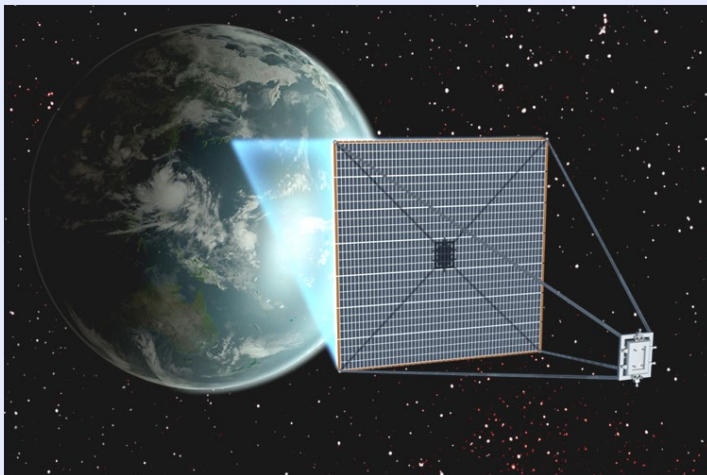
4.1 太陽発電衛星 (SPS) 輸送ミッション

5 GWのSPS概要

総質量	2 万トン
投入軌道	静止軌道
輸送期間	10 年間

H-IIB(80億円/機)の輸送能力

低軌道へ	19 トン
静止投入軌道へ	8 トン
静止軌道へ	4 トン



SPS の検討例

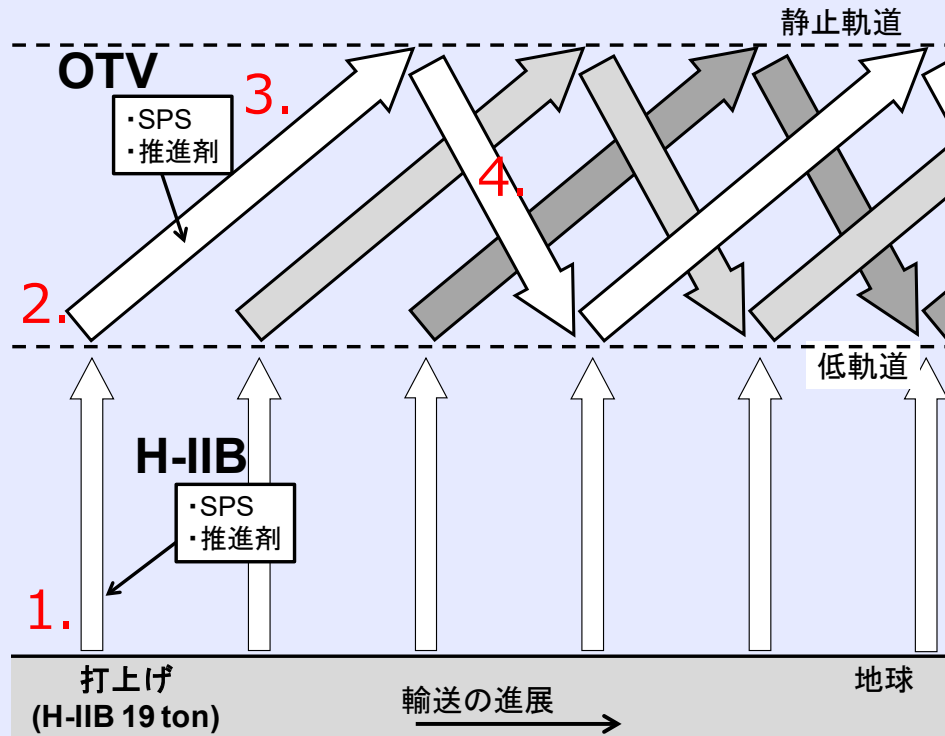
輸送費を概算

40 兆円 (5千回打上)



目標 は 1 兆円

全電化軌道間輸送機(OTV)



1. H-IIBで低軌道へ打上げ (500 t)
2. OTV に積み替え(20 t)
3. OTV で静止軌道へ輸送(15 t)
4. OTV を低軌道へ戻す

輸送シナリオ 必要機数はエンジン推力に依存

H-II打ち上げ総質量

	比推力	OTV推進剤	OTV機体	低軌道への総打上質量
化学推進	300 s	8 万トン	-	10 万トン(5千回)
電気推進	3,000 s	0.5 万トン	0.1 万トン	2.6 万トン(1.3千回)

軌道間輸送費(推進剤費)

$$\text{軌道間輸送費} = \text{推進剤費} + \text{OTV 製造費}$$

OTVの必要速度増分 ΔV

推進剤の価格

赤道上からの打ち上げ	4.1 km/s
種子島からの打ち上げ	6.1 km/s

Xe	96,000 円/kg
Ar	440 円/kg

必要推進剤質量 (価格)

必要 ΔV	Ar (40 km/s)	Xe (20 km/s)
4.1 km/s	2,200 ton (10 億円)	4,640 ton (4,500 億円)
6.1 km/s	3,350 ton (15 億円)	7,270 ton (7,000 億円)

$$m_f = 22,000 \text{ トン}$$

軌道間輸送費(OTV製造費)

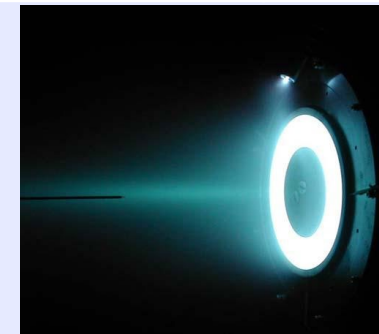
$$\text{軌道間輸送費} = \text{推進剤費} + \text{OTV 製造費}$$

OTV1機の構成および価格

	コスト	質量	総コスト
推進機	一機12 億円 ²⁾ @ 25 kW スラスタ5機 電力100 kW	20 kg/kW ¹⁾ 構造質量2 ton	60 億円
構体系	2000万円 / ton	総質量19 ton	4 億円

*推進系

PPU
ホールスラスタ
ジンバル
推進剤供給系
推進剤タンク
太陽電池



ホールスラスタ作動の様子

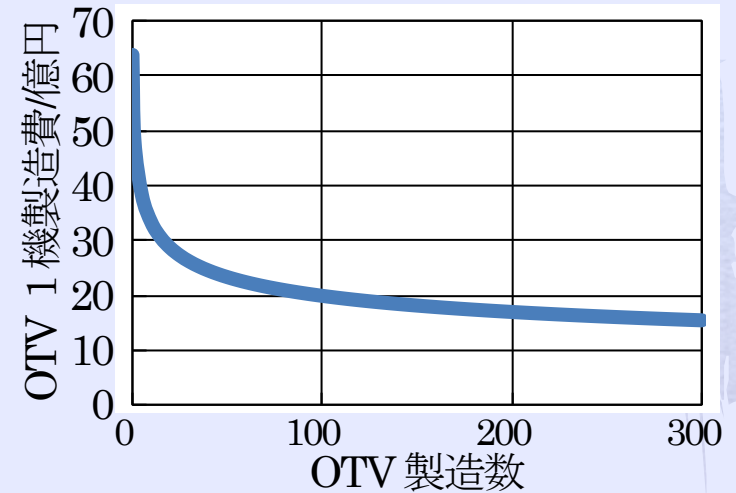
1) 主として太陽電池

2) R. Hofer, et al, "Mass and Cost Model for Selecting Thruster Size in Electric Propulsion Systems," 47th JPC, 2011

総軌道間輸送費

OTV製造数と製造費	
排気速度	40 km/s
OTV製造数	300 機
OTV総質量	600 ton
OTV製造費	6,000 億円

～2兆円



経験曲線効果³⁾を考慮した製造費

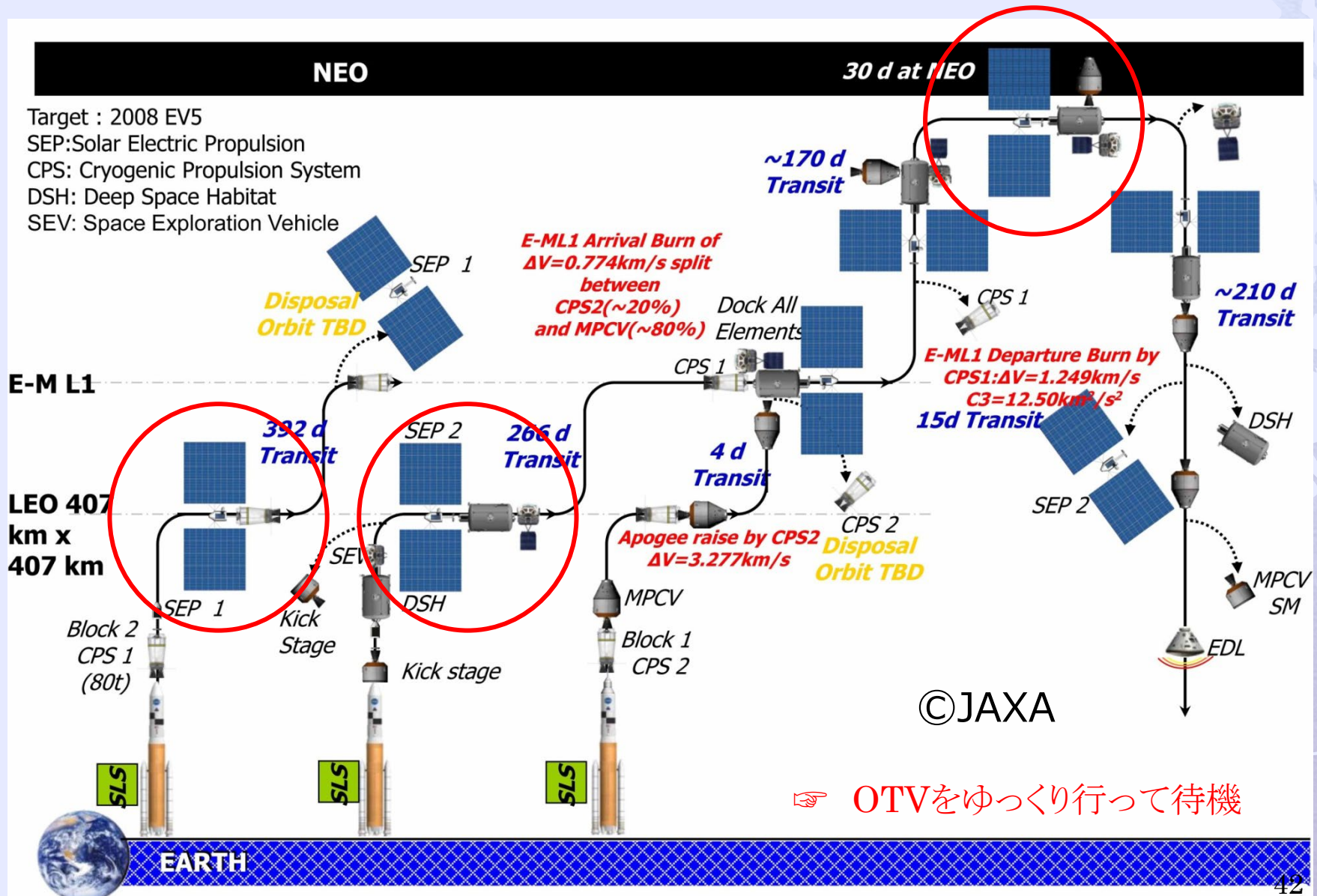
総軌道間輸送費	
推進剤費	15億円
OTV製造費	6000 億円
軌道間輸送費	6015 億円

<<

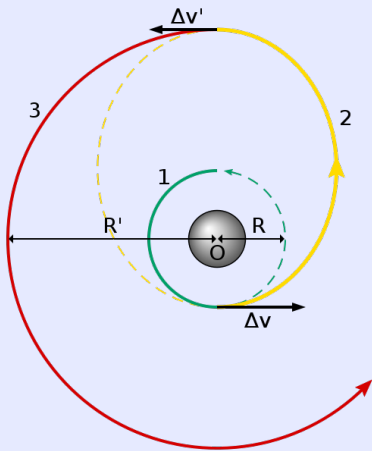
cf. 低軌道への打ち上げ費
2.6 万トン(1.3千回)
10兆円

☞ OTVを1兆円弱で、総打ち上げ費を1/4に。

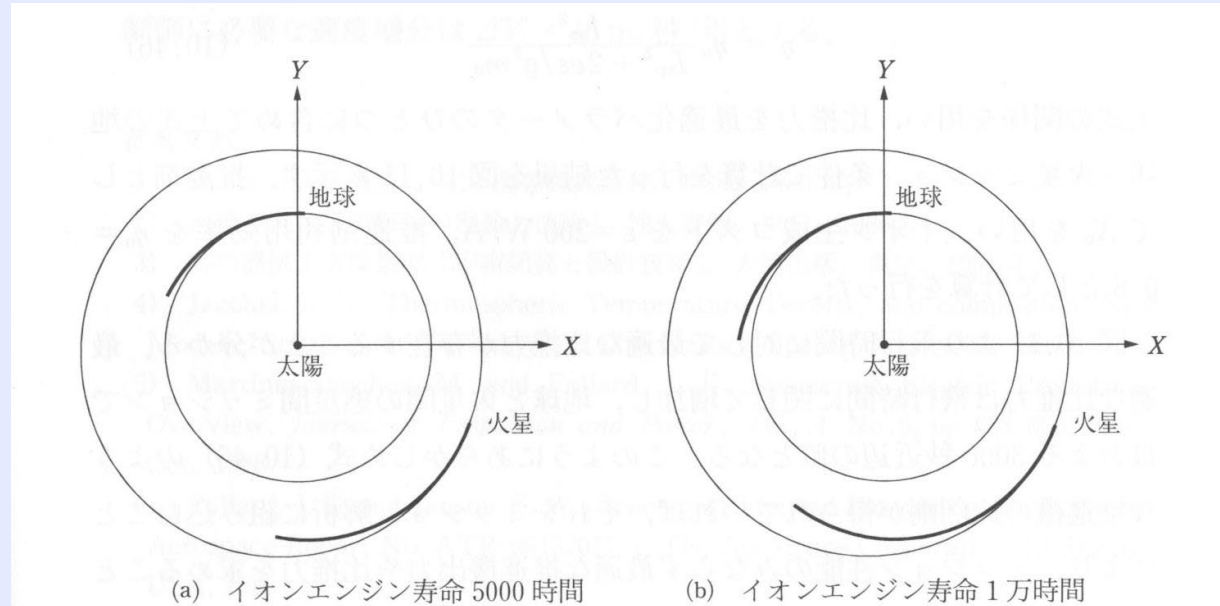
4.2 有人惑星探査の打ち上げアシスト



4.3 火星軌道へのOTV



火星へのホーマン軌道（化学推進、260日）



火星への電気推進OTV軌道（360日軌道）

☞ 何割かミッション時間が延びる程度

火星までの必要速度増分 $\Delta V = 9.3 \text{ km/s}$

化学推進で $V_e = 3 \text{ km/s} \Rightarrow m_i/m_f = \exp(\Delta V/V_e) \approx 22$

電気推進で $V_e = 30 \text{ km/s} \Rightarrow m_i/m_f = \exp(\Delta V/V_e) \approx 1.4$

☞それほど大きな推進剤タンクは必要ない

4.4 小惑星捕獲・採取計画

- ◆ 直径5～10 m、重さ500 tonほどの小惑星をターゲット
- ◆ 小惑星に着陸し表面の4 m程度の岩石を採取。
- ◆ 岩石を地球の近くまで運び、**電気推進**で月の周回軌道に乗せる
- ◆ 宇宙飛行士が宇宙空間で試料収集し、一部は地球に送る



小惑星捕獲ミッション



小惑星採取ミッション

$\Delta V = 8.7 \text{ km/s}$
40-50 kW 電気推進システム
12.5-kW Hall thruster

👉 **大きな速度増分を必要とする計画**

大電力電気推進システムが拓く未来まとめ

大電力宇宙機と高出力電気推進の実現より、以下のような新しいミッションが期待される.

- 2万トン太陽発電衛星を静止軌道に約10兆円で輸送.
- 国際有人惑星探査計画 (LEO to E-M L輸送)に貢献.
- 火星軌道投入にはそれほど大きな輸送船は不要
- 小惑星捕獲・採取ミッションの実現. 小惑星衝突回避.