\Orchestrating a brighter world NEC

深宇宙探査機の作り方
～小惑星と金星を例にして～

2019年10月19日(土) 16:00~16:30
@東大本郷工学部2号館4階 241講義室

NEC宇宙システム事業部　大島 武

Orchestrating a brighter world

未来に向かい、人が生きる、豊かに生きるために欠かせないもの。
それは「安全」「安心」「効率」「公平」という価値が実現された社会です。

NECは、ネットワーク技術とコンピューティング技術をあわせ持つ
類のないインテグレーターとしてリーダーシップを発揮し、
卓越した技術とさまざまな知見やアイデアを融合することで、
世界の国々や地域の人々と協奏しながら、
明るく希望に満ちた暮らしと社会を実現し、未来につなげていきます。

1. どこに行くか？　どうやって行くか？

1.1 まずは、大気圏外へ

打ち上げ時の機械環境

- ロケット加速による準静的加速度：4G程度
- ロケットの振動(ポゴ振動等)による正弦波振動：2G程度(探査機質量に依存)
- フェアリング振動による音響：140dB程度

高真空→アウトガスに注意→アウトガスの出にくい材料を選定する。

- TML(Total Mass Loss)：1%以下
- CVCM(Collected Volatile Condensable Materials)：0.1%以下

高真空→通常の潤滑油は使えない→蒸気圧の低い真空グリースや固体潤滑(MoS_2)等を使用

放射線(Total Dose)→耐放射線性能の高いデバイス(SOI：Silicon On Insulator等)や材料(電子線架橋ETFE：Ethylene TetraFluoroEthylene等)を使用する。

放射線(重粒子)→Single Eventを許容する3重多数決回路等を使用する。

無重量→(気体を閉じ込めたとしても)対流は期待できない→熱伝導と熱輻射による熱設計を行う。

© NEC Corporation 2019

1.1.1 振動試験

衛星はまず、
打上げ時の
ロケットエンジンの
音や振動に
耐えなければならない

ロケット打上げ時の
振動環境を模擬
（月周回衛星「かぐや」の例）

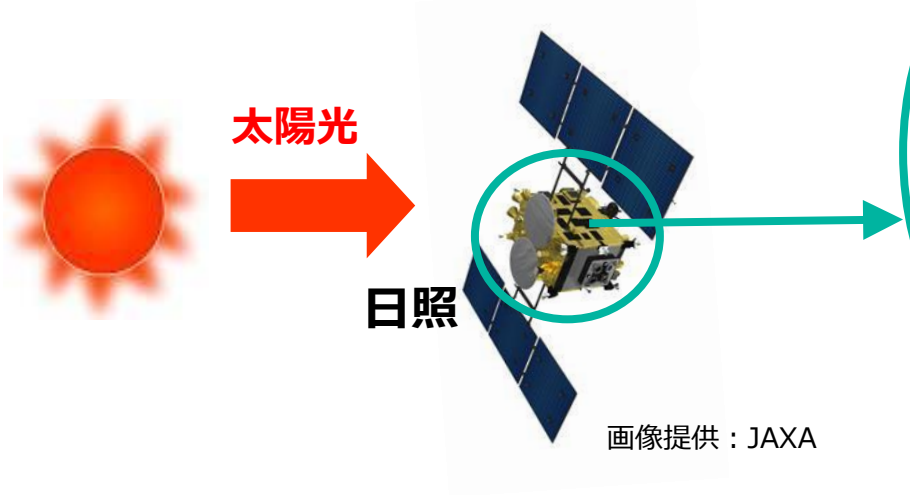
画像提供：JAXA

© NEC Corporation 20

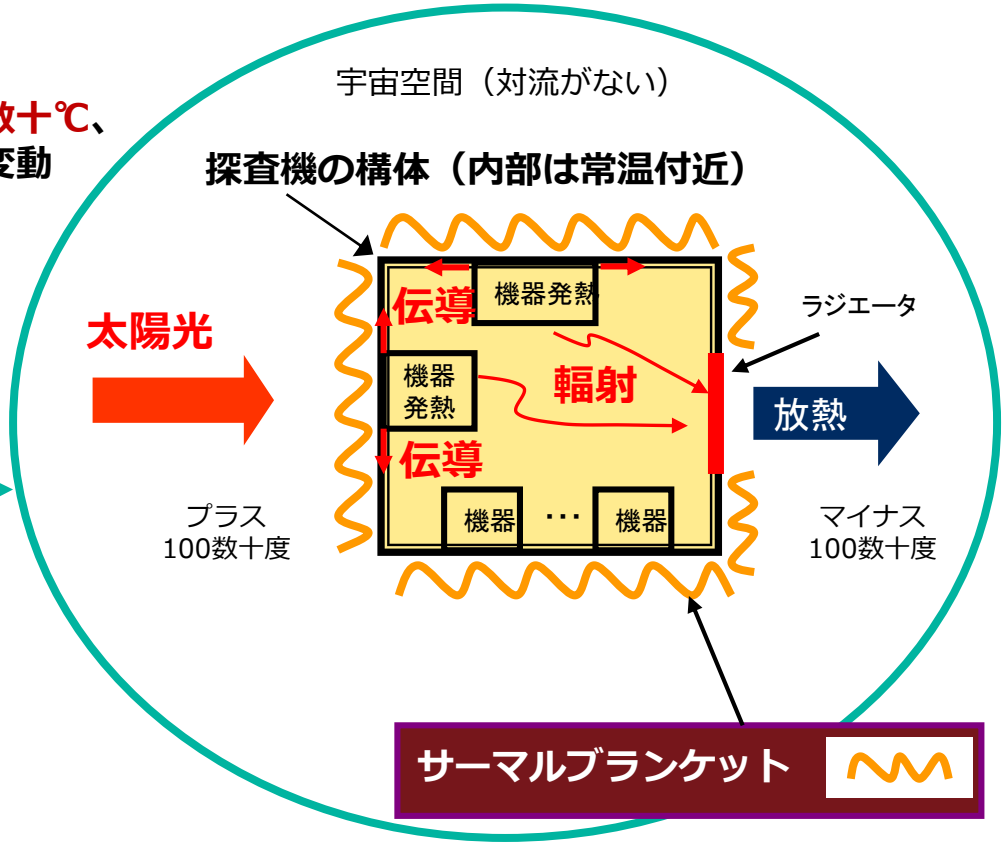
過酷な宇宙環境に晒される探査機

探査機は、修理されることなく数年から十数年にわたり動作する、高い信頼性が要求される

- **宇宙空間は高真空で対流がない**
- **衛星外表面は、**
  太陽光が当たる面でプラス100数十℃、
  日陰ではマイナス100数十℃に変動
- **一方で衛星内部は常温付近に制御**



探査機 内部の熱制御（模式図）



© NEC Corporation 2019

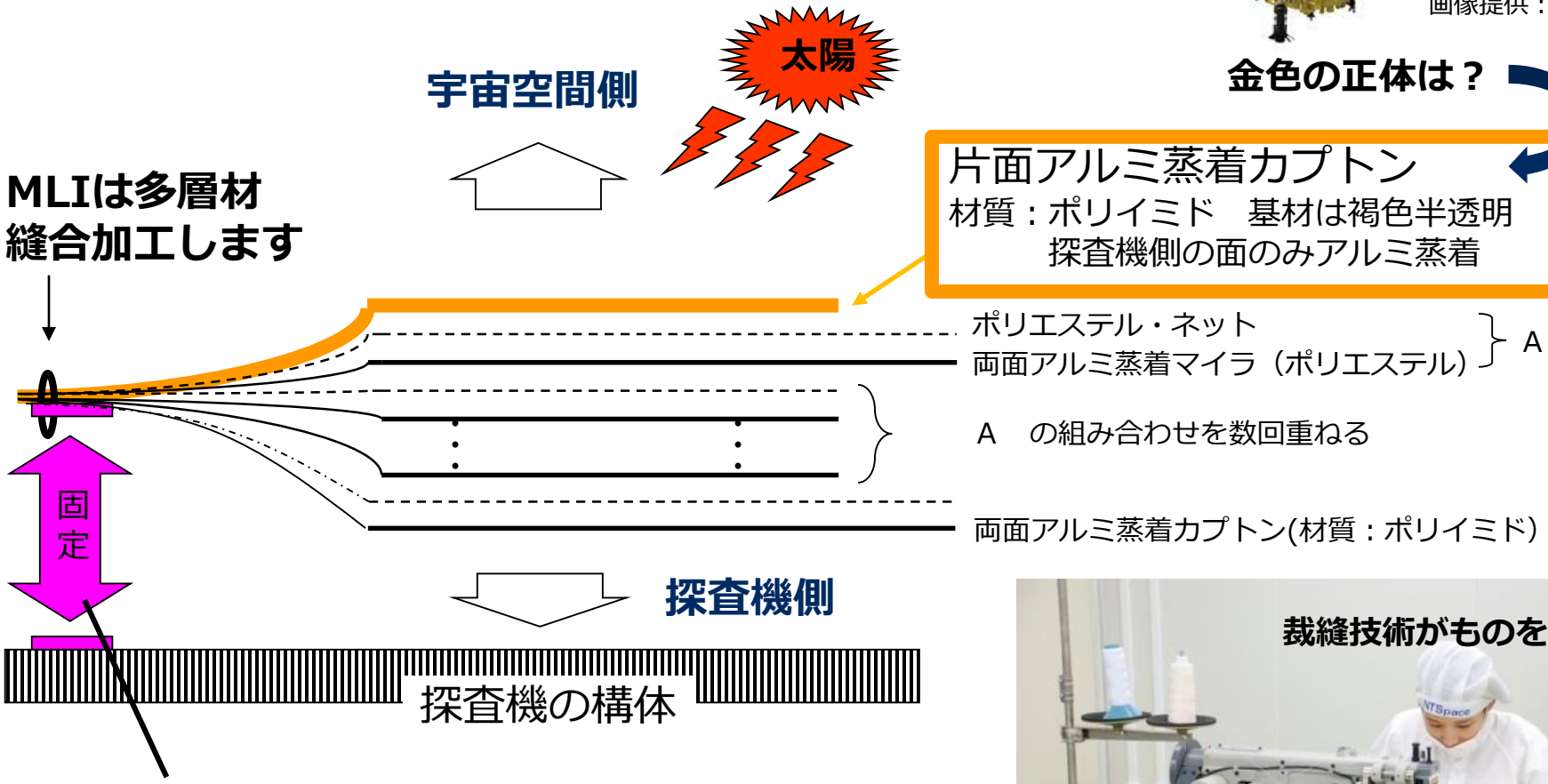
1.1.2 熱制御系(2/2)

探査機の外表面は サーマルブランケット で覆われている
（多層断熱材：Multi Layered Insulator／ MLIと略す）

画像提供：JAXA

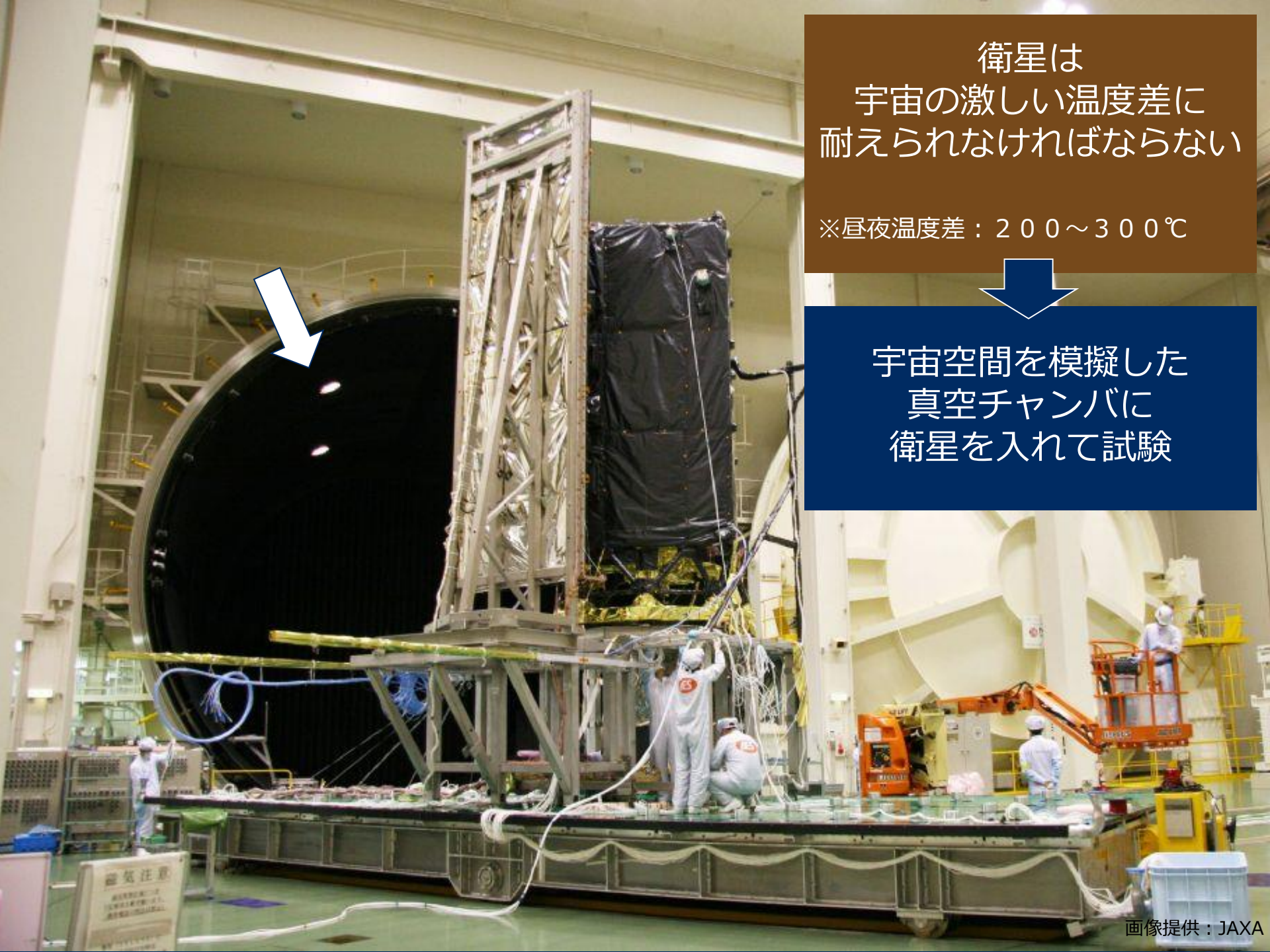
金色の正体は？

片面アルミ蒸着カプトン
材質：ポリイミド　基材は褐色半透明
探査機側の面のみアルミ蒸着



MLIの固定は、マジックテープ(ベルクロ)を使用

© NEC Corporation 2019



衛星は
宇宙の激しい温度差に
耐えられなければならない

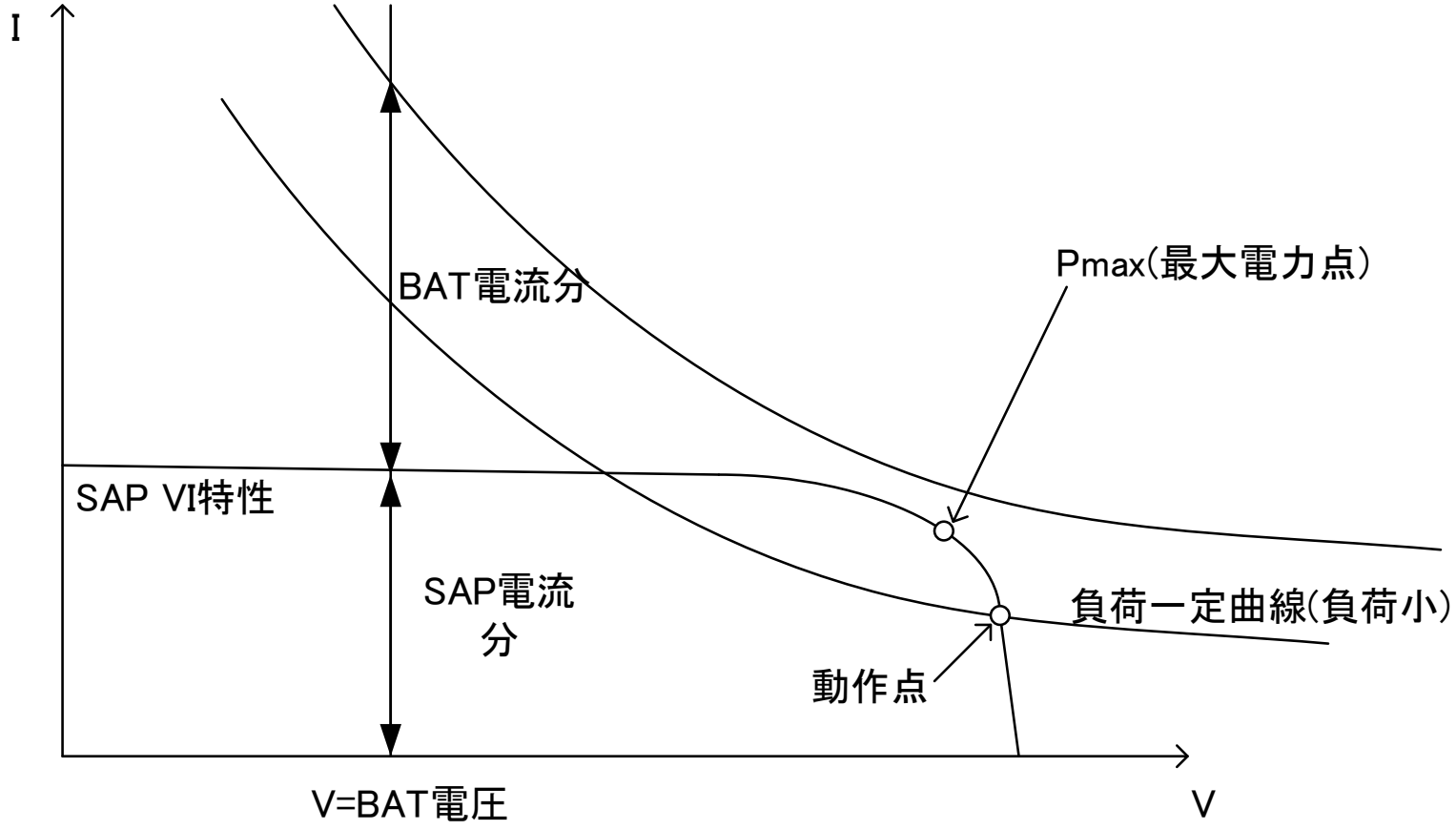
※昼夜温度差：２００～３００℃

宇宙空間を模擬した
真空チャンバに
衛星を入れて試験

画像提供：JAXA

1.2 小惑星へ(はやぶさ2の場合)(1/2)

- 太陽距離が大きく変わる中(0.92～1.42AU)、イオンエンジンを最大限に活用して軌道変更。(AU：Astronomical Unit、太陽地球平均距離)
  - バス電源として、太陽電池のVIカーブのPmax(最大電力点)まで活用するピークパワートラッキング方式を採用(あかつきも同様)



© NEC Corporation 2019
\Orchestrating a brighter world NEC

1.2 小惑星へ(はやぶさ2の場合)(2/2)

- 太陽距離が大きく変わる中(0.92～1.42AU)、イオンエンジンを最大限に活用して軌道変更。(AU：Astronomical Unit、太陽地球平均距離)
  - ピークパワー制御付きHCE(Heater Control Electronics)を使用(あかつきも同様)

ch No.	ch 電力	chごとのDuty	1周期での各chのON状況									
			1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
1	15	70%	15	15	15	15	15	15	15			
2	5	30%	5	5	5							
3	5	60%				5	5	5	5	5	5	
4	10	30%								10	10	10
合計ヒータ電力			20	20	20	20	20	20	20	15	15	10

- 重力が小さい　→周回軌道投入ではなくランデブー
  →ホームポジション(小惑星から地球方向に高度20km)に滞在
- とは言え、降下時には重力を考慮して誘導→軌道を予測しながら、予測軌道を計画軌道に近付けるためのΔV計画を作成し、探査機にアップロード

© NEC Corporation 2019
\Orchestrating a brighter world NEC

1.2.1 軌道制御：電気推進系(イオンエンジン)(NEC)

地球小惑星間クルージング時の軌道変更に使用

軌道制御

- **化学推進系**
- **電気推進系（イオンエンジン）**

真空チェンバ内 噴射試験

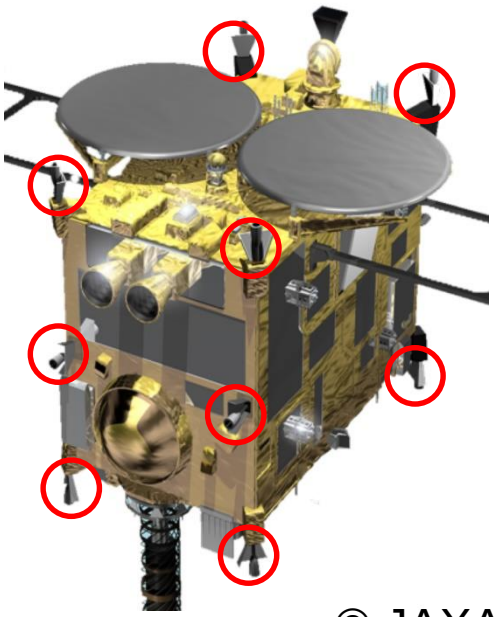
- キセノンをイオン化し、電圧をかけて加速して噴射
  ～30km/s
- イオンの生成は、マイクロ波放電方式
- 4台搭載し、最大で3台同時運転
  →最大推力28mN
- キセノンは約60kg搭載
  →Total約2km/sの加速

はやぶさ2
イオンエンジン
画像提供：JAXA

© NEC Corporation 2019

1.2.2 軌道制御：化学推進系(MHI)

- 姿勢制御や軌道の微修正、小惑星滞在時の軌道制御に使われる。
- 燃料（ヒドラジン）と酸化剤（MON-3）を使う20N二液式
- スラスタは12個。
- スラスタ系統は冗長構成。
- 推進剤は約48kg搭載する。

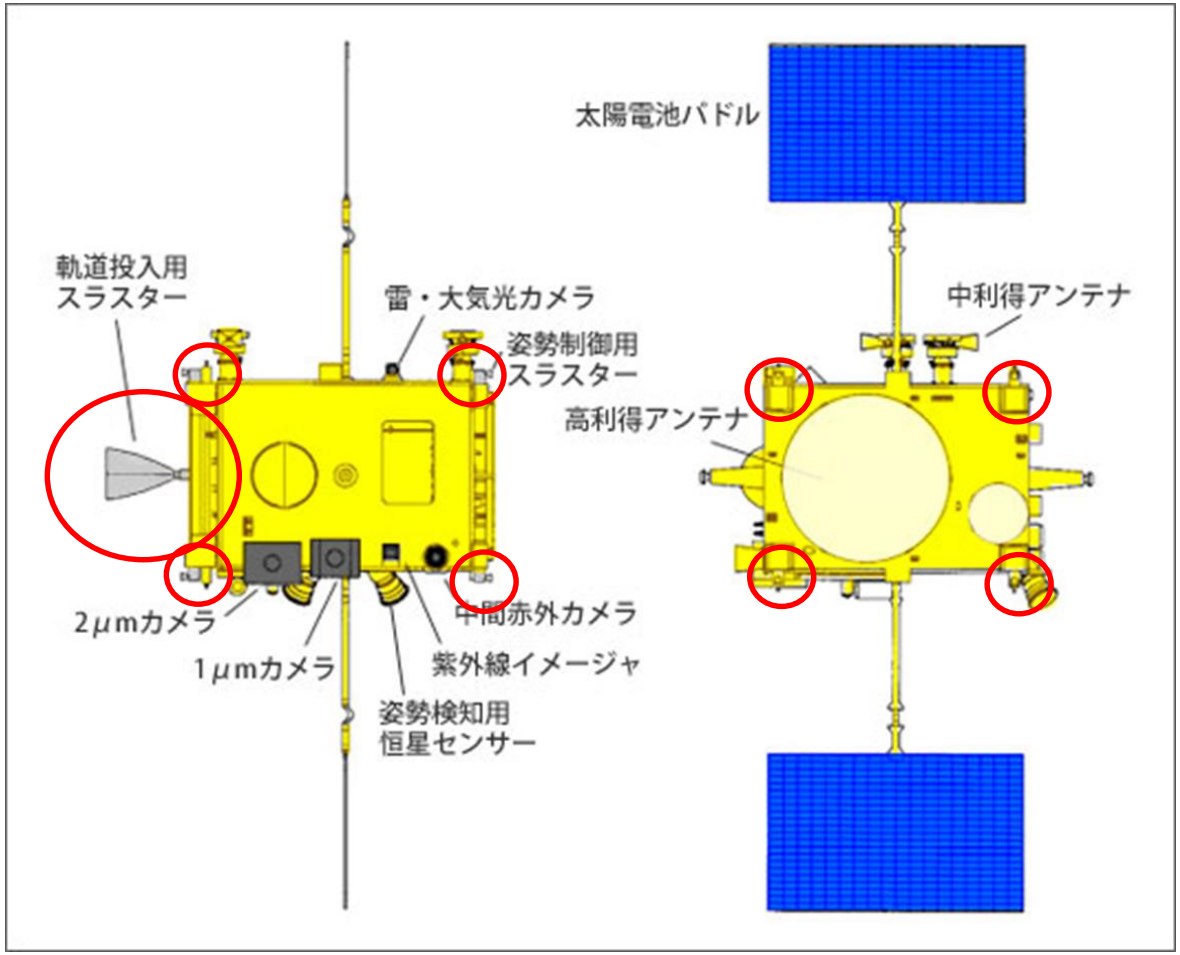


© JAXA

© NEC Corporation 2019

1.3 金星へ(あかつきの場合)

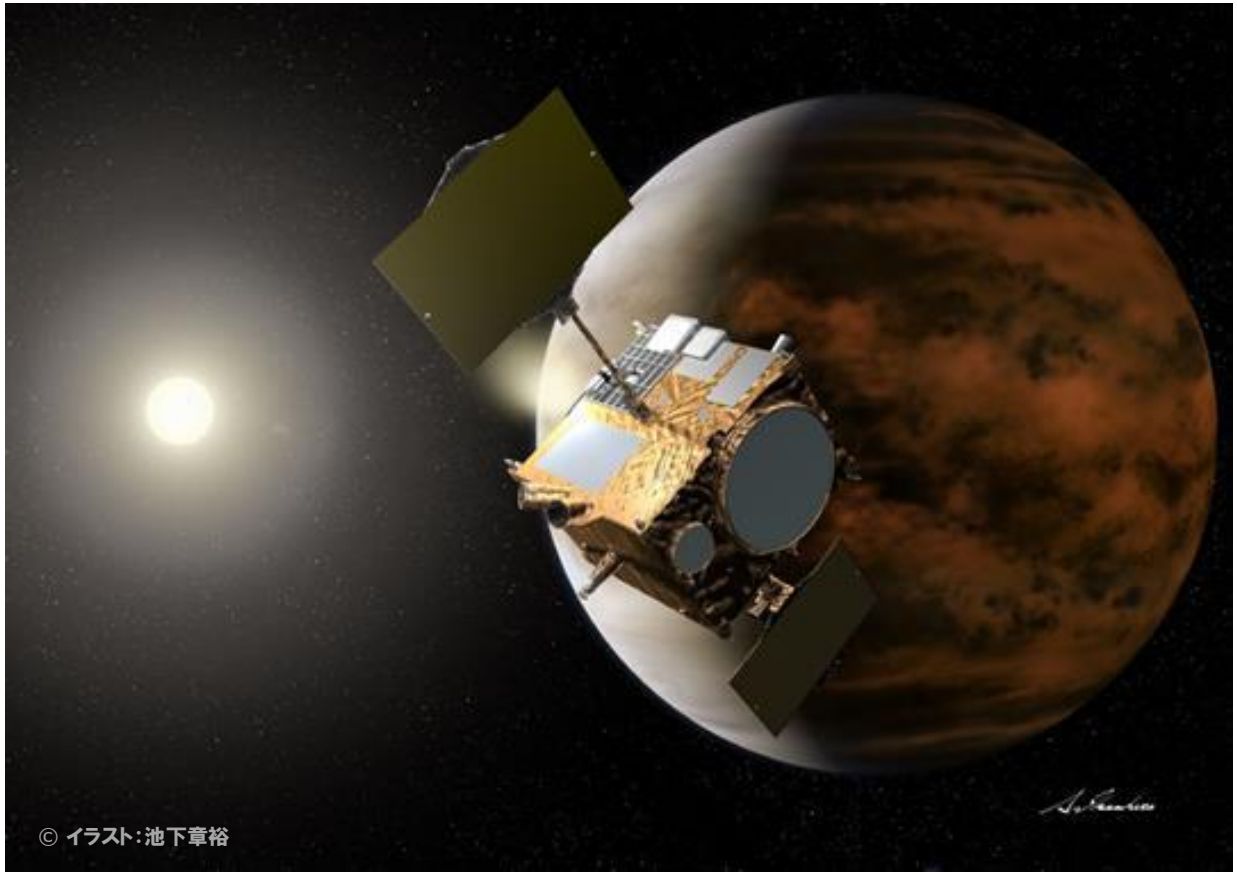
- 太陽の近く(0.7AU)へ：地球の2倍の太陽光入力
- 重力天体→周回軌道投入：OME(Onboard Maneuver Engine)での投入
  →2010年には失敗し、5年後にRCS(Reaction Control System)で投入



© JAXA

© NEC Corporation 2019

1.3.1 金星探査機「あかつき」の金星周回軌道投入



- 2010/5/20　あかつき打上げ
- 2010/12/7　金星周回軌道投入に失敗
- 2015/12/7　金星周回軌道再投入に成功

ちなみに、

- 2010/6/13　はやぶさ地球帰還
- 2014/12/3　はやぶさ2打上げ
- 2015/12/3　はやぶさ2地球スイングバイ

© NEC Corporation 2019

2．何をするか？

2.1 リモートセンシング

可視光による2次元画像取得：

- はやぶさ2 ONC(Optical Navigation Camera)

赤外線による2次元画像取得：

- ボロメータ(MEMS技術による非冷却10μm帯2次元センサ)
  - あかつきLIR(Long-wave Infra-Red camera)
  - はやぶさ2 TIR(Thermal Infra-Red Imager)
- CCD
  - あかつきIR1：波長1μm帯カメラ
  - あかつきIR2：波長2μm帯カメラ

赤外線分光

- はやぶさ2 NIRS3(Near Infrared Spectrometer)：波長3μm帯

紫外線による2次元画像取得

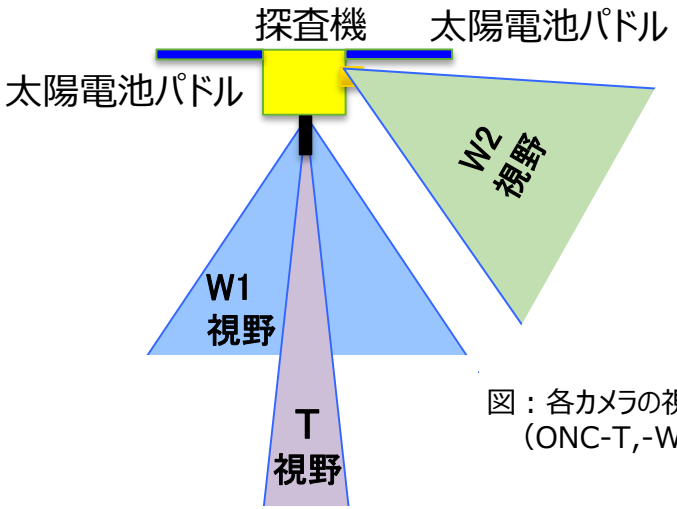
- あかつきUVI (Ultra Violet Imager)：波長283nm、365nm

© NEC Corporation 2019

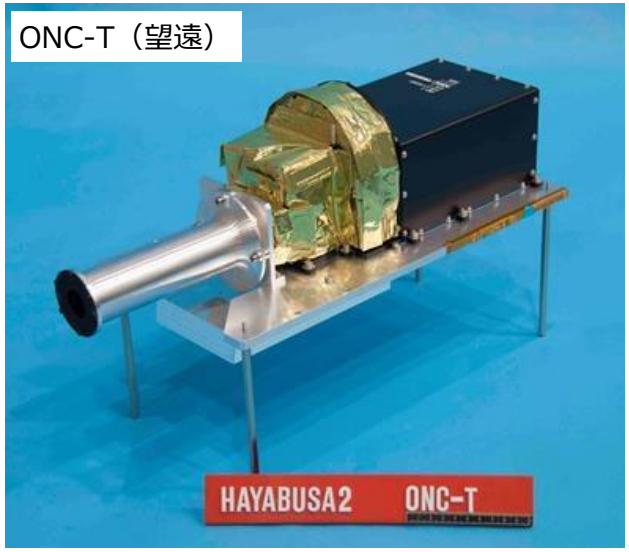
2.1.1 はやぶさ2 ONC (Optical Navigation Camera) (NEC)

目的：探査機誘導と科学計測のために恒星と探査小惑星を撮像する

- 探査小惑星の素性解明
- サンプル採取地点選定
- サンプルの産状把握



図：各カメラの視野イメージ
（ONC-T,-W1,-W2）



画像提供：JAXA

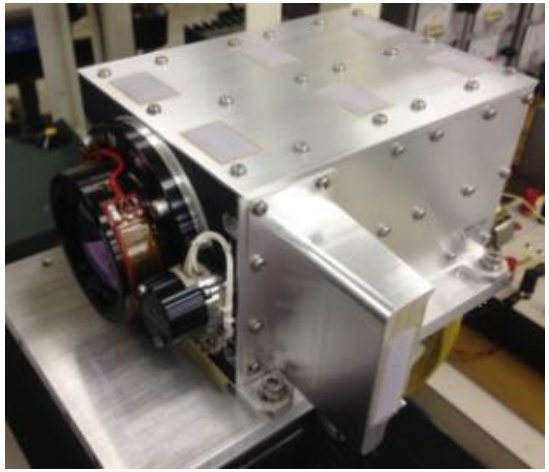
引用元：はやぶさ2情報源 Fact Sheet Ver.2.0（25-27頁）2018.04.19 JAXA発行

© NEC Corporation 2019

2.1.2 はやぶさ2 TIR(Thermal Infra-red Imager) (NEC)

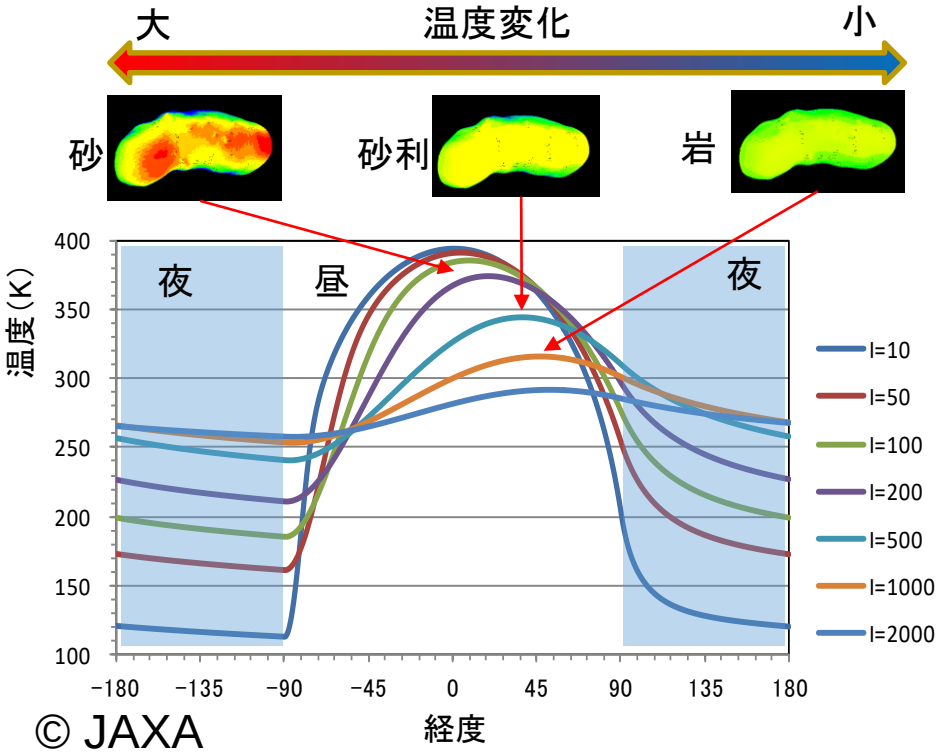
- 表面温度：昼間は上昇、夜間は低下(日変化)
- 細粒の土質(砂)や、空隙の多い岩石　→　日変化大
- 中身の詰まった岩石　→　日変化小
- 目的：小惑星からの熱放射の２次元撮像（サーモグラフ）によって、小惑星表面の物理状態を調査

写真：中間赤外カメラ（TIR）外観



© JAXA

図：小惑星からの熱放射の2次元撮像（サーモグラフ）イメージ



© JAXA

引用元：はやぶさ2情報源 Fact Sheet Ver.2.0（30頁）2018.04.19 JAXA発行

© NEC Corporation 2019

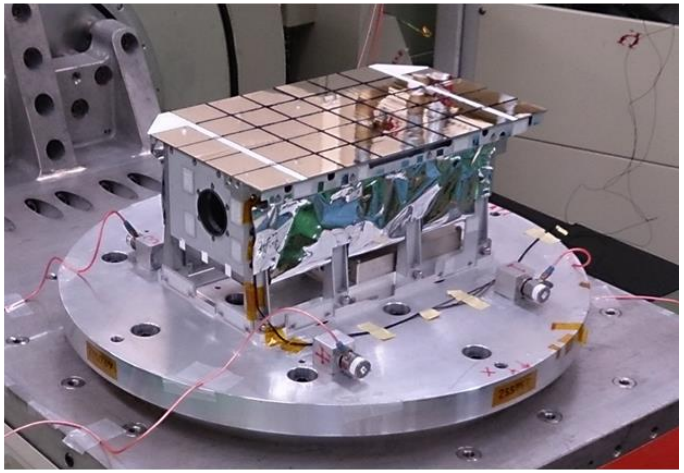
2.1.3 はやぶさ2 NIRS3(Near Infrared Spectrometer) (明星電気)

NIRS3: Near InfraRed Spectrometer
('3'は3μmより)

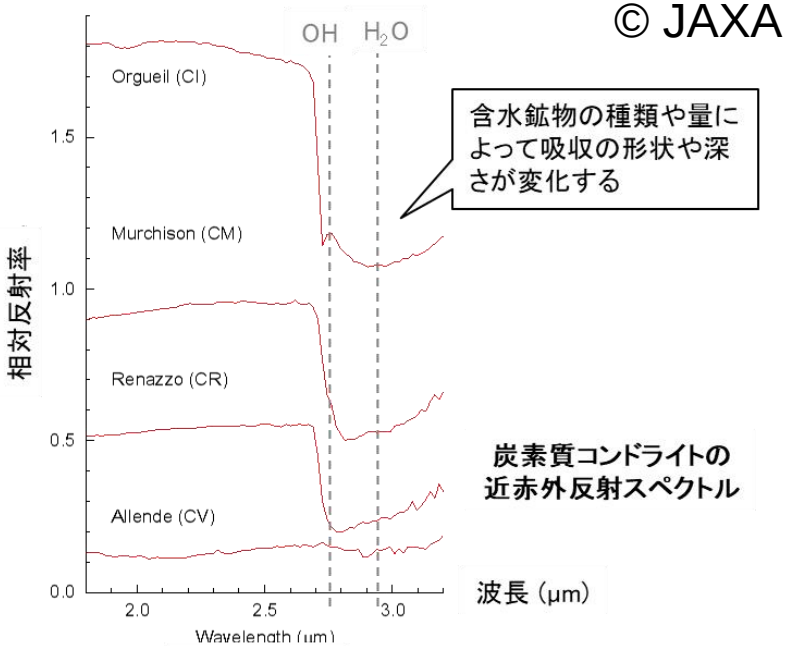
近赤外線領域の3μm帯の反射スペクトルには水酸基や水分子の赤外吸収が見られる。NIRS3では、3μm帯の反射スペクトルを測定することで、小惑星表面の含水鉱物の分布を調べる。

- 観測波長範囲：1.8−3.2 μm
- 波長分解能　：20 nm
- 視野全角　　：0.1°
- 空間分解能　：35 m（高度20km）
  2 m（高度1km）
- 検出器温度　：−85℃～−70℃
- S/N比　　：50以上（波長2.6μm）

(© JAXA)



© JAXA



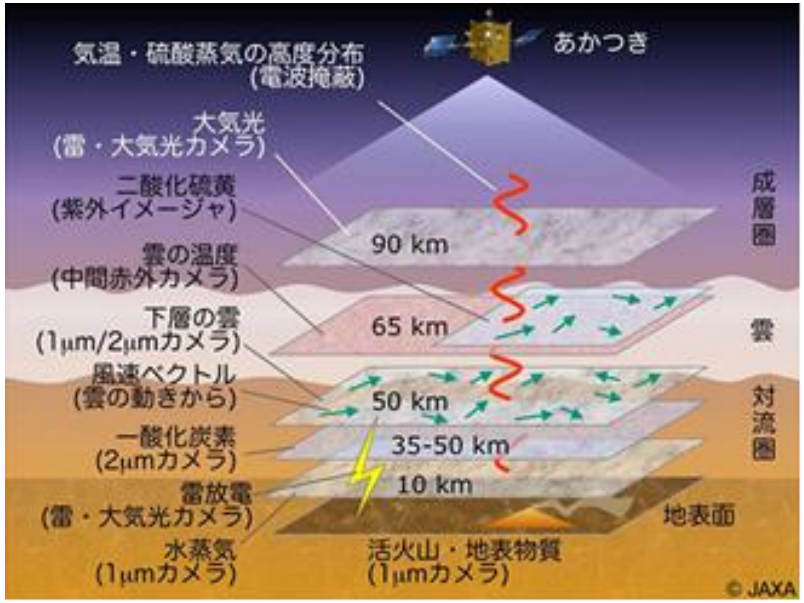
© JAXA

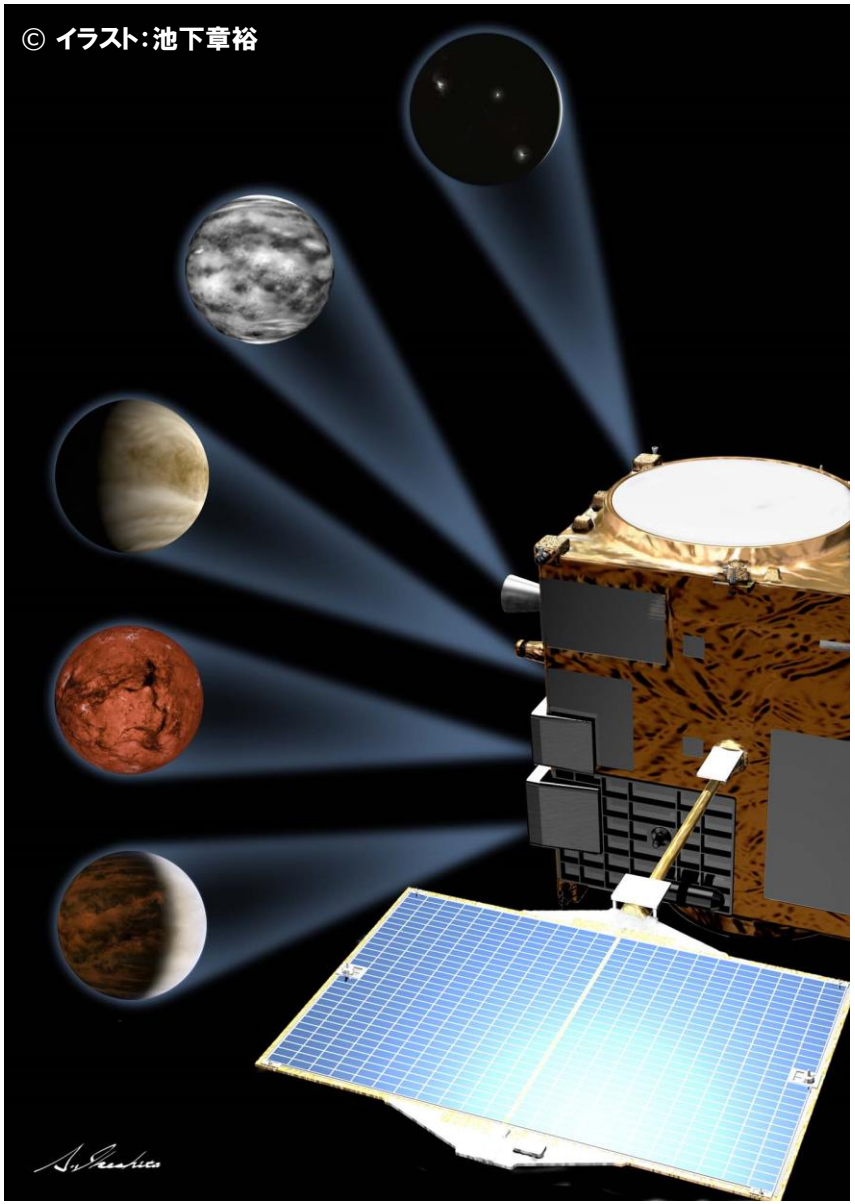
© NEC Corporation 2019
\Orchestrating a brighter world NEC

2.1.4 金星探査機「あかつき」搭載センサ

- LAC：雷・大気光カメラ
- LIR：中間赤外カメラ
- UVI：紫外イメージャ
- IR1：1μmカメラ
- IR2：2μmカメラ

© JAXA





© NEC Corporation 2019

2.2 表面探査

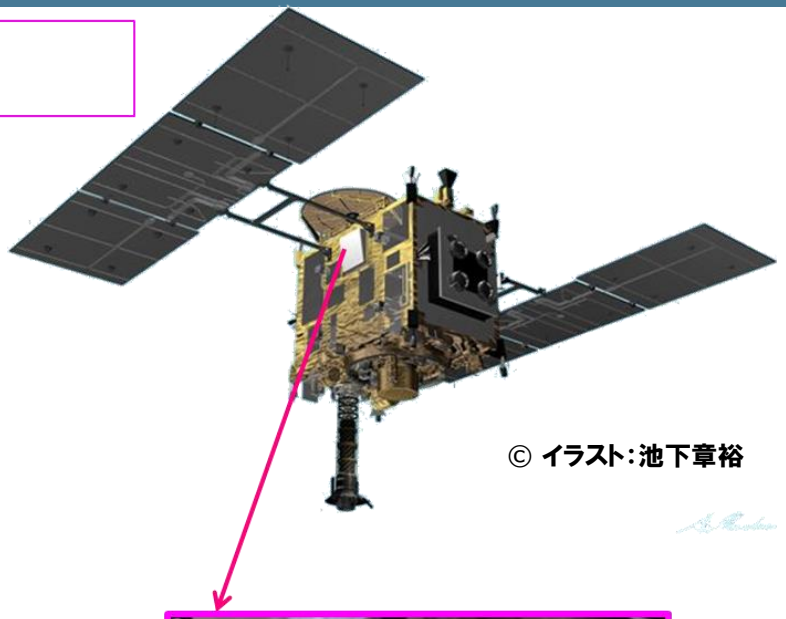
- ランダー：表面に着陸
- ホッパー：表面を飛び跳ねる
  - はやぶさ2 MASCOT(Mobile Asteroid Surface sCOuT)
  - はやぶさ2 MINERVA Ⅱ(MIcro Nano Experimental Robot Vehicle for Asteroid)
- ローバ：表面を走り回る

© NEC Corporation 2019

2.2.1 MASCOT (DLR、CNES)

Mobile Asteroid Surface Scout

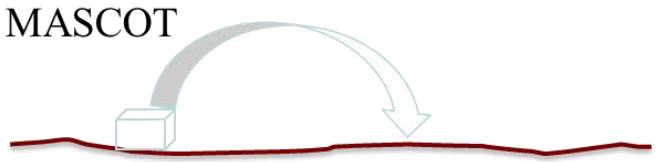
- DLR（ドイツ航空宇宙センター）と CNES（フランス国立宇宙研究センター）によって製作
- 約10kgの小型の着陸機
- 4つの科学機器を搭載
- 1度だけジャンプして移動可能



MASCOT搭載科学機器

機器名	機能
広角カメラ（CAM）	複数波長での画像の撮影
分光顕微鏡（MicrOmega）	鉱物組成・特性の調査
熱放射計（MARA）	表面温度の測定
磁力計（MAG）	磁場の測定

フライトモデル　(© DLR)

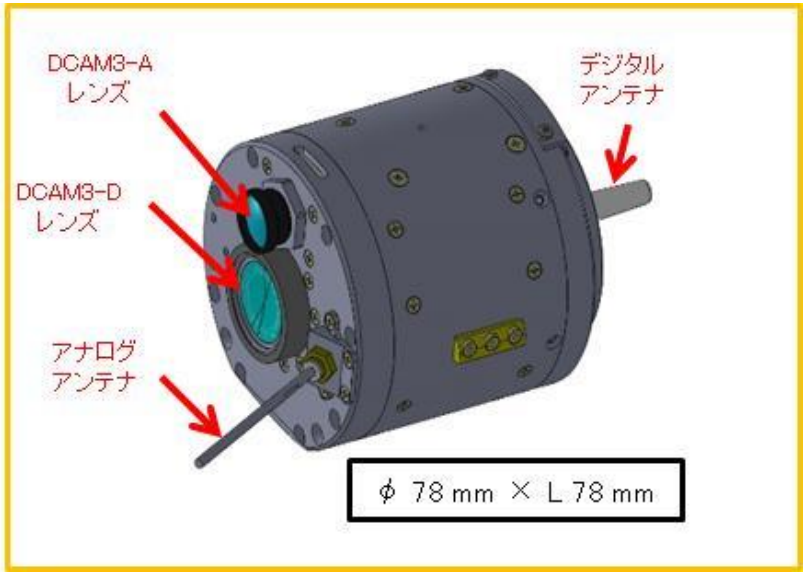


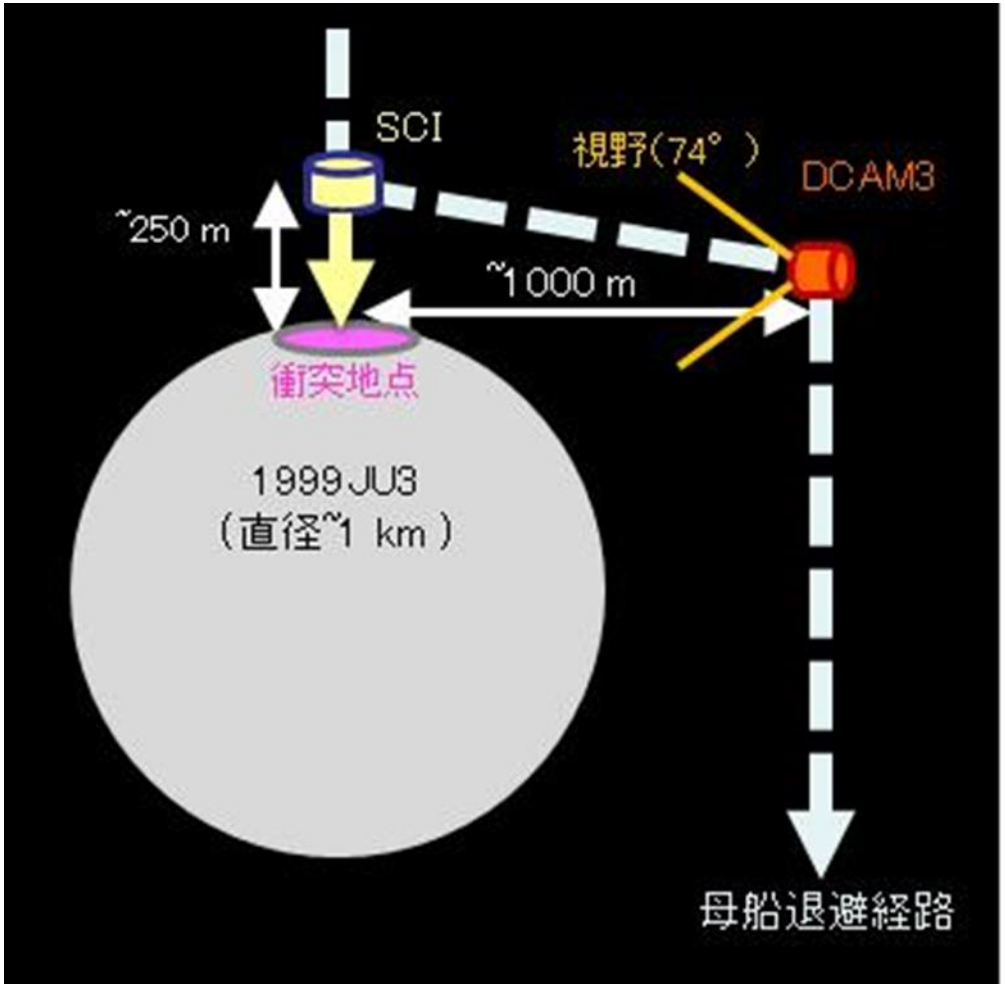
© NEC Corporation 2019

2.3 実験

はやぶさ2 クレータ生成

- インパクタでクレータを生成し、分離カメラ(DCAM3)で撮像
- カメラはスピン安定





画像提供：JAXA

© NEC Corporation 2019

2.3.1 衝突装置(IA、搭載機器はNEC)

■目的：

- 衝突前後の表面の変化から小惑星の内部構造を探査
- 露出した地下物質のリモート観測を行い表面物性を調査
- クレータ内部からのサンプリングも行い、表層下の“新鮮な”物質を採取
- 「宇宙衝突実験」により、天体衝突科学に必要なデータを入手

■クレータ生成方式：高速衝突体の衝突による

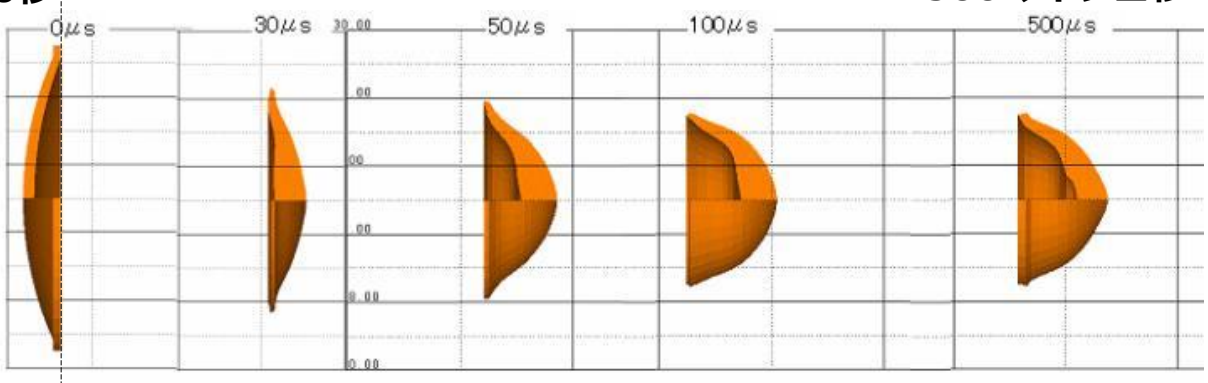
- 探査機搭載可能な小型軽量の装置で実現
- 爆薬で小惑星表面物質を吹き飛ばす方法に比べて、土壌汚染が少ない
- 衝突体は小惑星に存在する物質と容易に区別できるように純銅

■衝突装置の技術

- 成形炸薬の技術を応用
- 2kgの銅のライナを約1msで約2km/sに加速

■ライナ形状の時間的変化

0秒 → **500マイクロ秒**

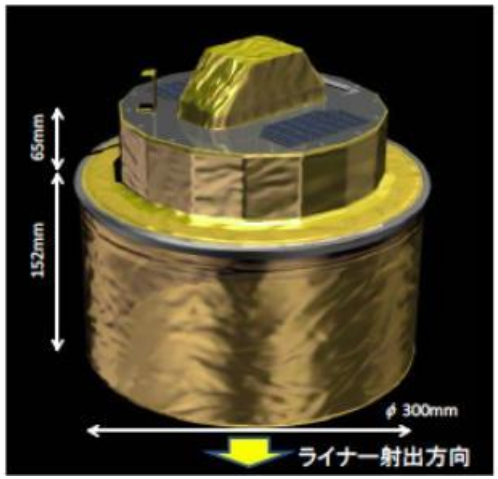


銅板（ライナ）が時間の経過とともに変形しながら飛んでいく

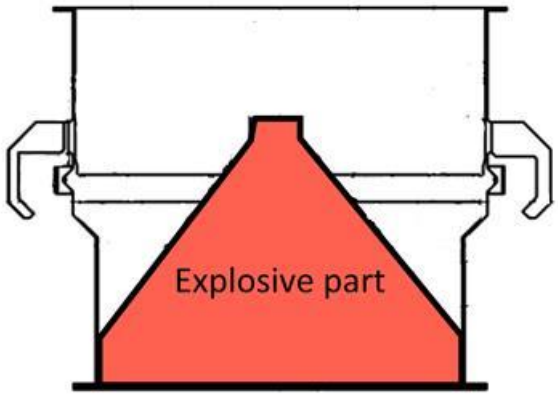
画像提供：JAXA

© NEC Corporation 2019

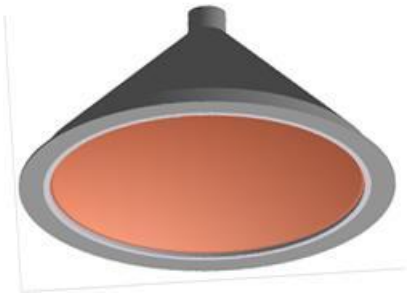
2.3.2 衝突装置の構造



装置外観



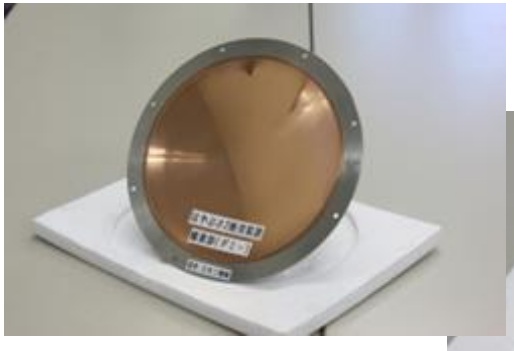
断面図



爆薬部

金属ライナを加速する部分について

- ◆ 形状: 円錐形(直径265mm)
- ◆ 爆薬: HMX系PBX
  (Plastic bonded explosive)
- ◆ 質量: 約9.5kg
  (爆薬: 4.7kg, ライナ: 2.5kg)
- ◆ ライナ(衝突体となる部分): 純銅
- ◆ ライナ厚み: 約5mm



試作品

画像提供：JAXA

© NEC Corporation 2019

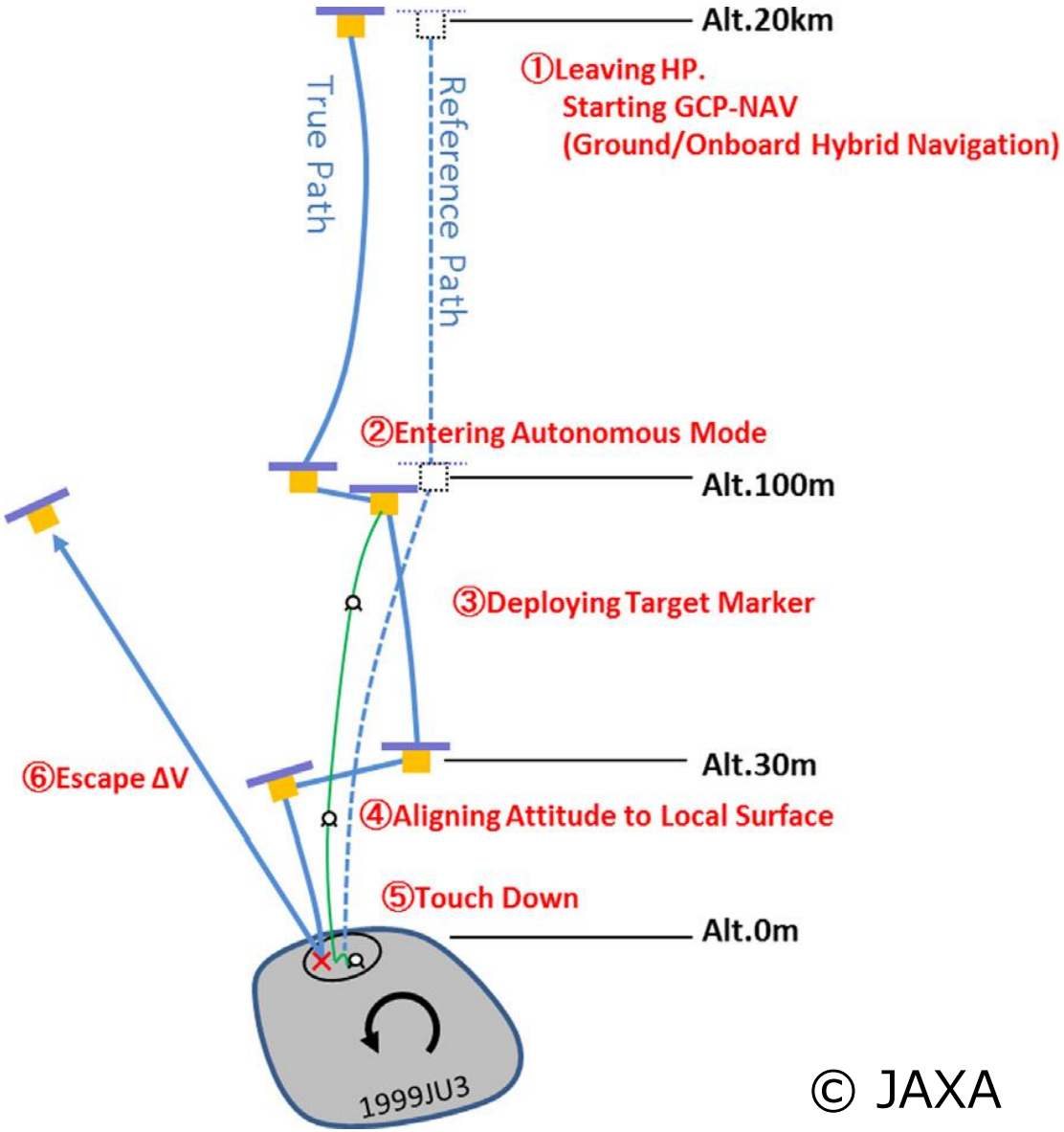
2.4 サンプルリターン(はやぶさ2)

サンプリング

- ONCで撮像した画像を元に現在位置を推定しながら降下

地球帰還

- 再突入カプセルで大気圏内へ



© JAXA

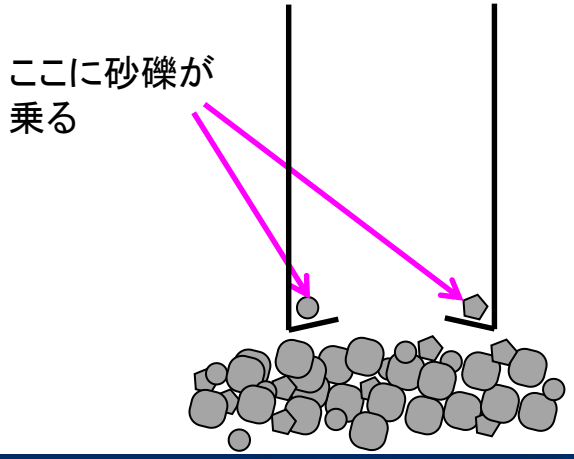
© NEC Corporation 2019

2.4.1 サンプリング装置(NEC)

- 小惑星表面から試料を採取
- 筒状のホーン部先端が小惑星表面に触った瞬間にホーン内部で小さな弾丸を撃ち出し、表面から射出した試料がホーン上部に昇っていき格納庫（キャッチャ）に入る
- 「はやぶさ2」ではシール性能を上げ、揮発性のガスも密閉して持ち帰れるようメタルシール方式を新たに開発。希ガスも採取。
- 試料を格納するキャッチャは3部屋。
- ホーンの先端に小さな折り返し部品有り。

サンプラホーン

© JAXA



© NEC Corporation 2019

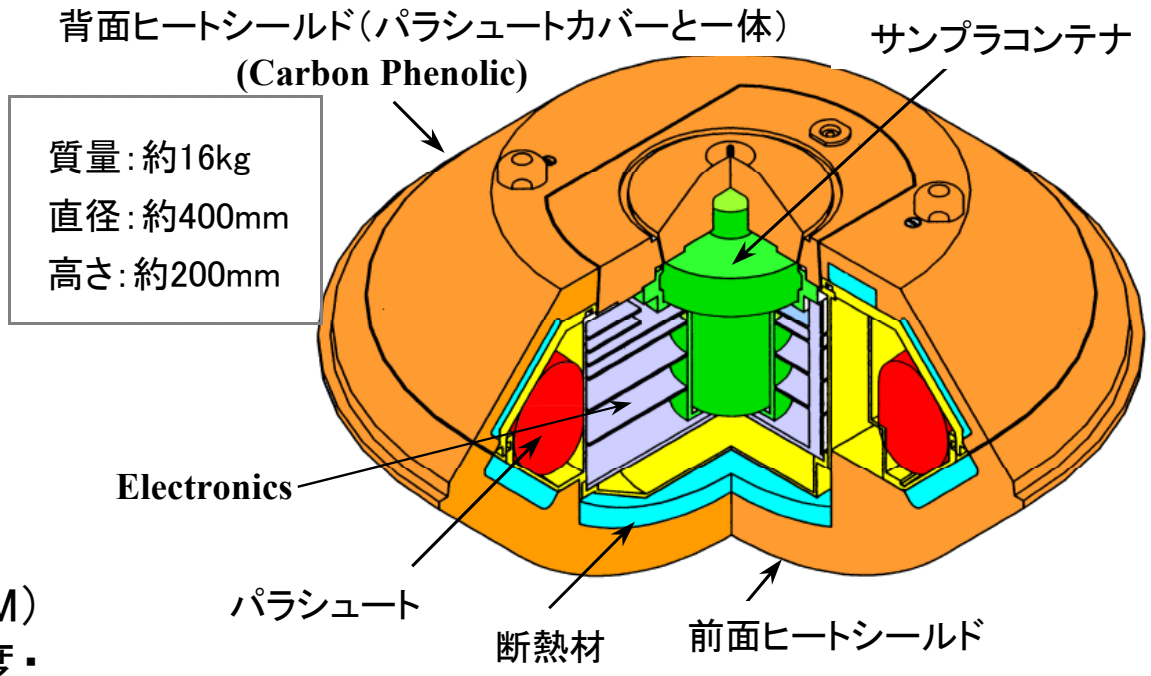
2.4.2 再突入カプセル(NEC、搭載機器以外はIA)

・12km/sで地球大気に再突入し、地上で回収。

・約3秒間で1回転するスピンをしながら母船から切り離される。

・大気衝突による空力加熱は14MW/m^2。

・高度10kmでパラシュートを開き、ビーコン電波を出しながら緩降下・着地。

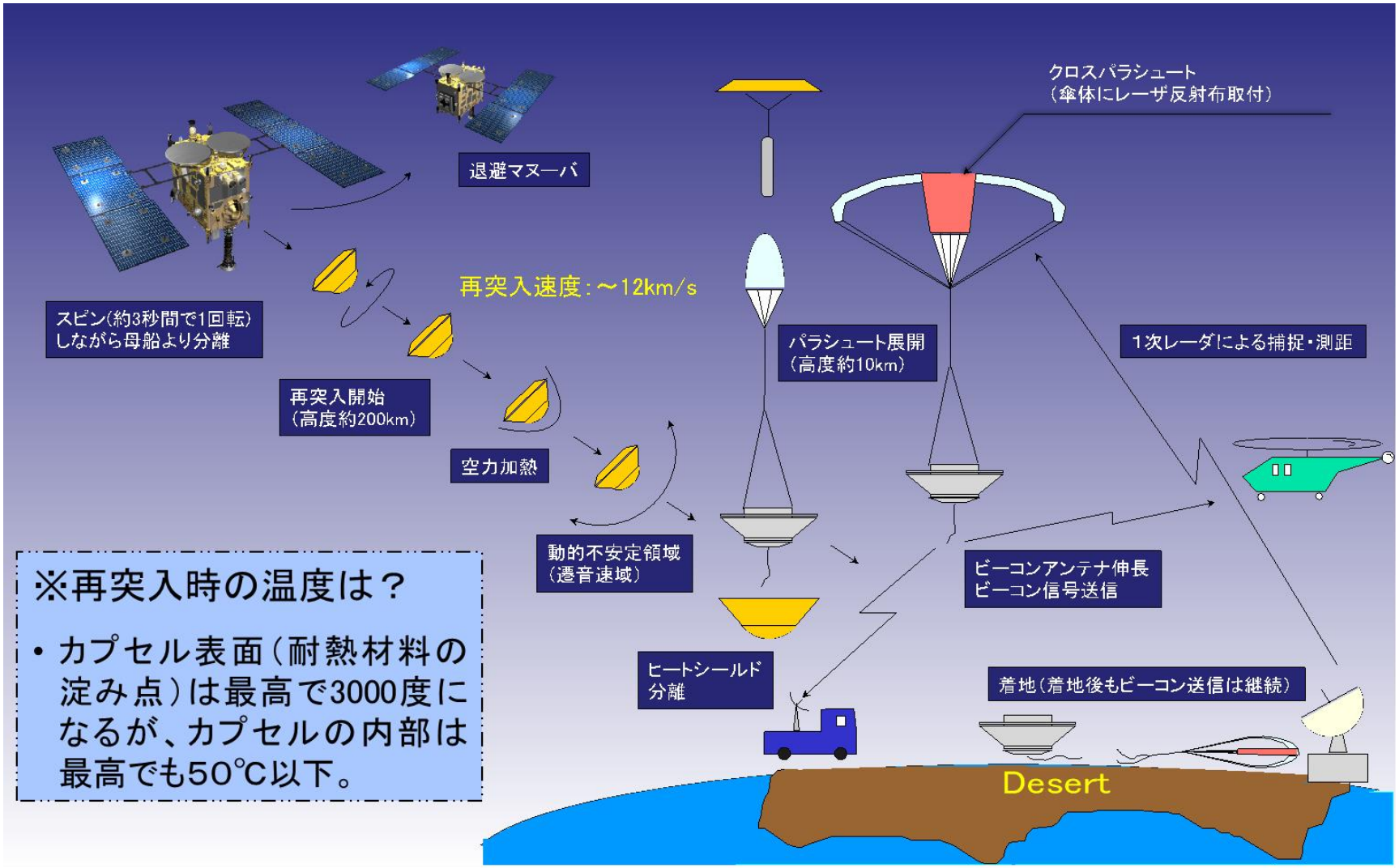


・飛行環境計測モジュール（REMM）を新たに搭載。飛行中の加速度・回転速度・内部の温度を計測。

© JAXA

© NEC Corporation 2019

2.4.3 再突入カプセル



※再突入時の温度は？

- カプセル表面（耐熱材料の淀み点）は最高で3000度になるが、カプセルの内部は最高でも50℃以下。

再突入シーケンス概要

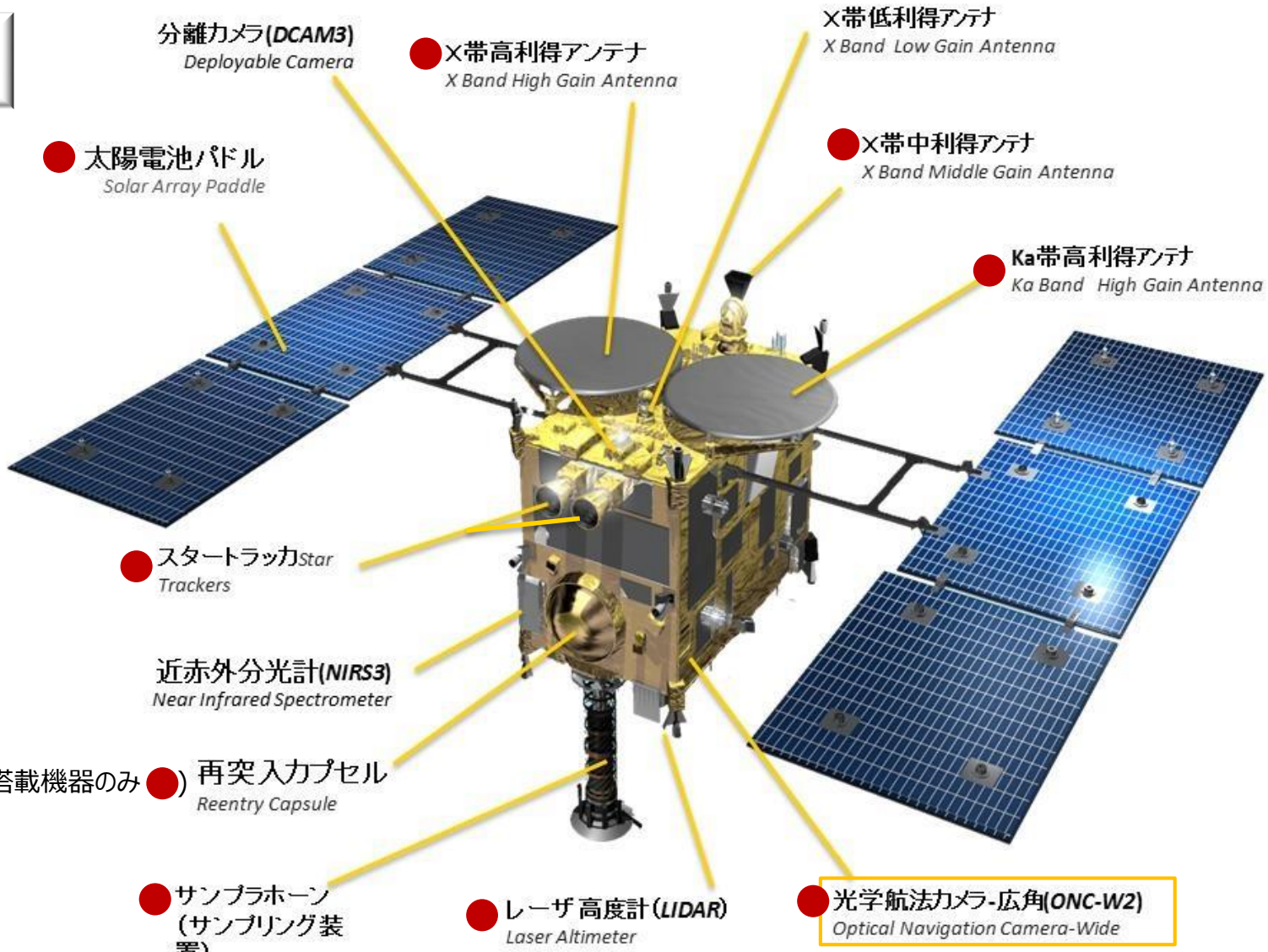
(© JAXA)

© NEC Corporation 2019
\Orchestrating a brighter world NEC

3．設計結果

3.1 はやぶさ2搭載機器(1/2)

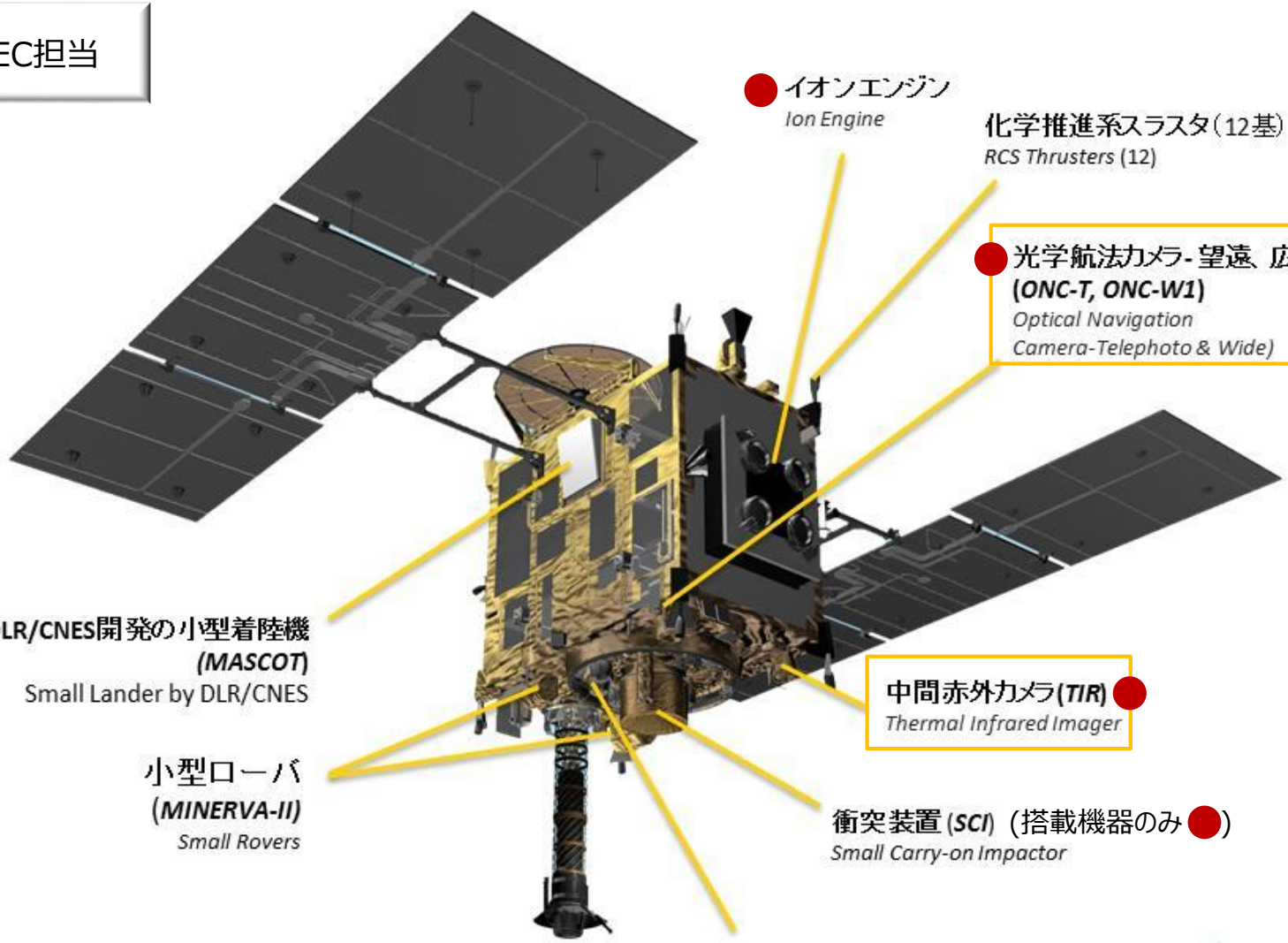
● NEC担当



画像提供：JAXA

© NEC Corporation 2019

3.2 はやぶさ2搭載機器(2/2)

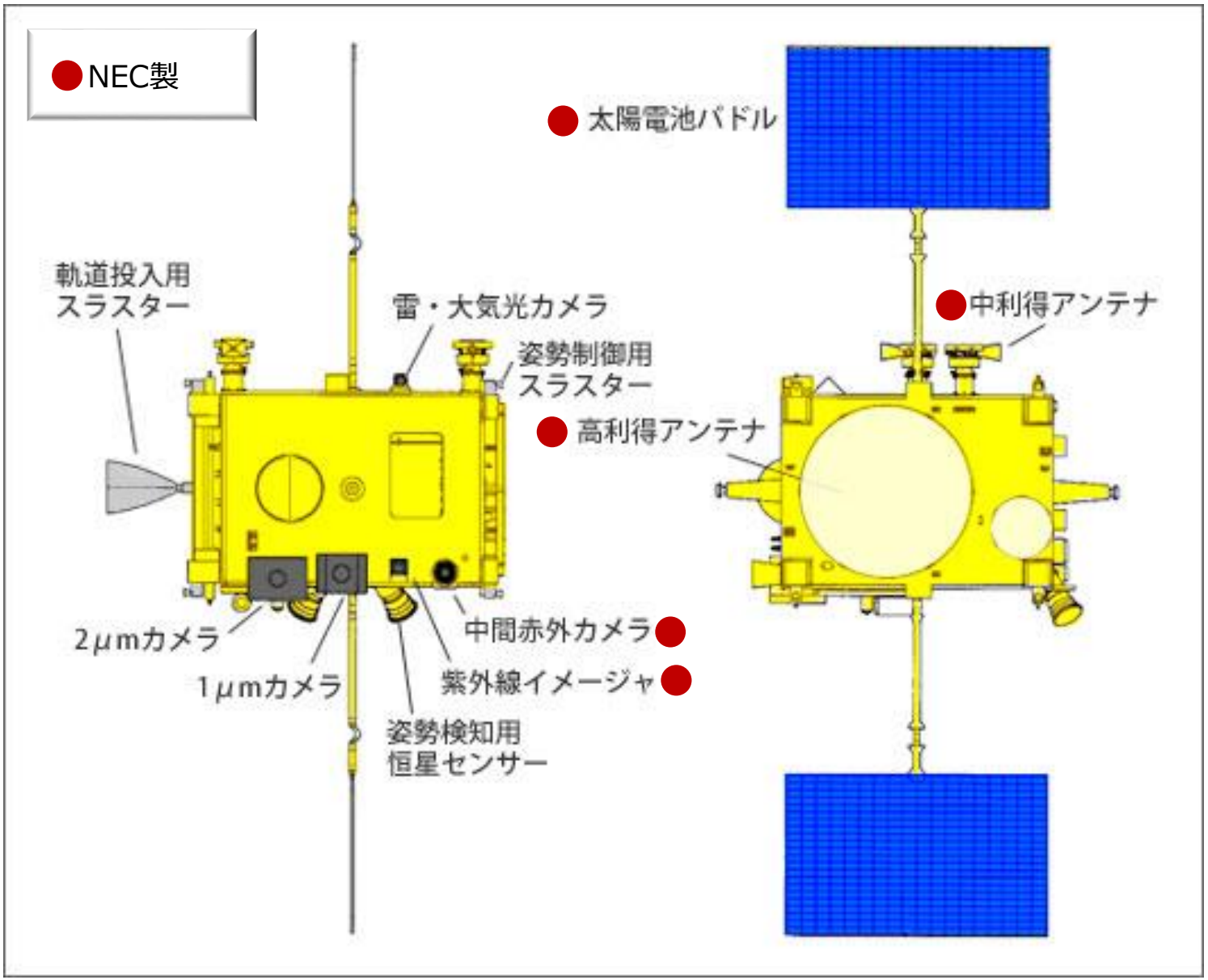


NEC担当

画像提供：JAXA

© NEC Corporation 2019

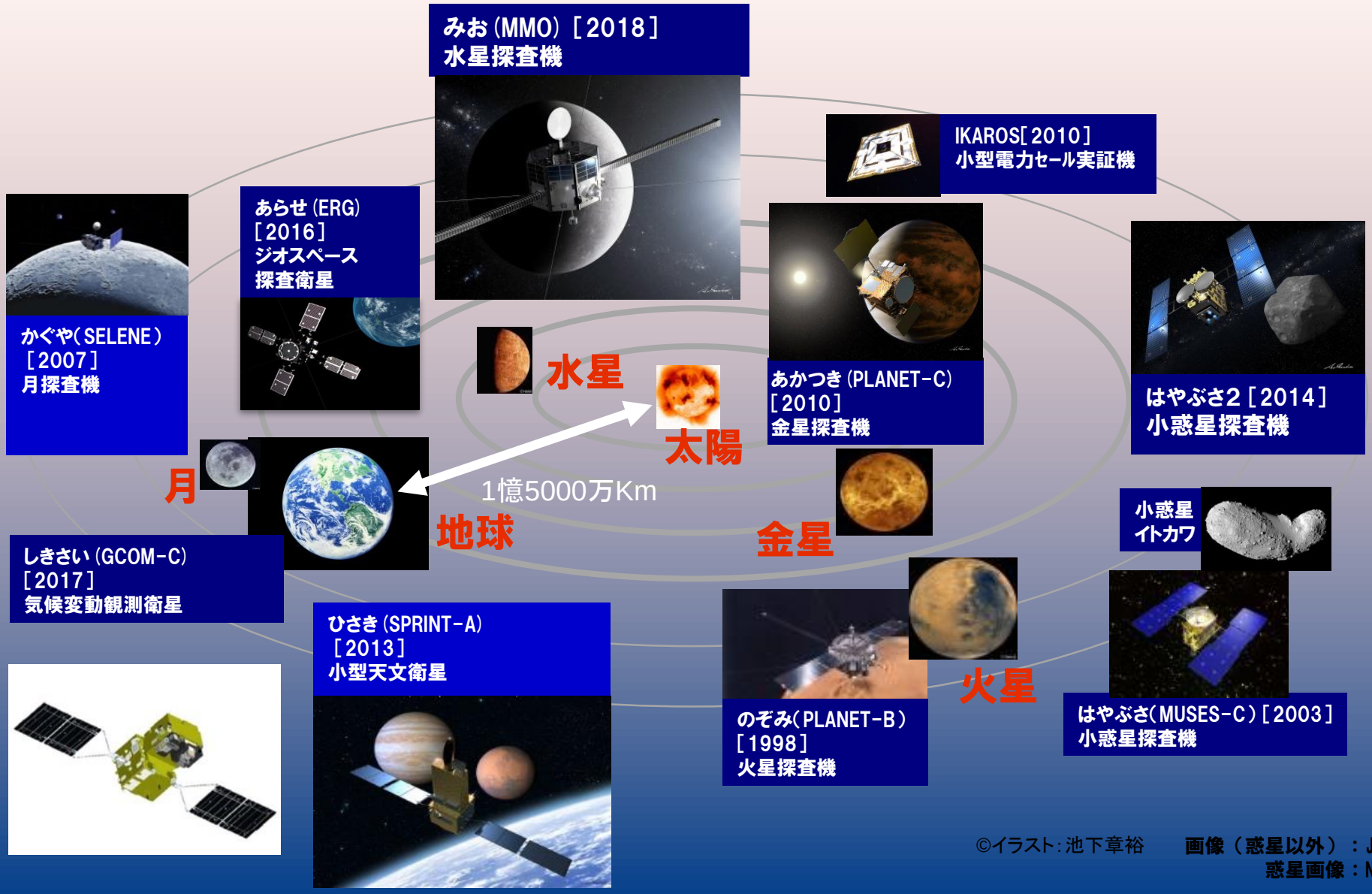
3.3 金星探査機「あかつき」のコンフィギュレーション



© JAXA

© NEC Corporation 2019

3.4 ジオスペース、月、惑星探査のラインナップ



©イラスト：池下章裕　　画像（惑星以外）：JAXA
惑星画像：NASA

© NEC Corporation 2019

Orchestrating a brighter world

NEC