

The background of the slide is a detailed illustration of the Hayabusa 2 spacecraft in deep space. The spacecraft is shown from a three-quarter perspective, with its gold-colored body, a large white parabolic antenna, and two large blue solar panel arrays. Four ion thrusters at the rear are firing, creating bright purple and white plumes. In the background, the Earth is visible on the left, and a large, grey, irregularly shaped asteroid is on the right. The sky is a deep blue with numerous white stars.

はやぶさ／はやぶさ 2 小惑星探査
～イオンエンジンによる宇宙航行の実現～
Hayabusa/Hayabusa2 Asteroid Exploration
～Deep Space Maneuver by Ion Engine～

國中 均

Hitoshi Kuninaka
JAXA



1 . Electric Rockets

2 . Plasma Diagnostics

3 . HAYABUSA1/2 Missions

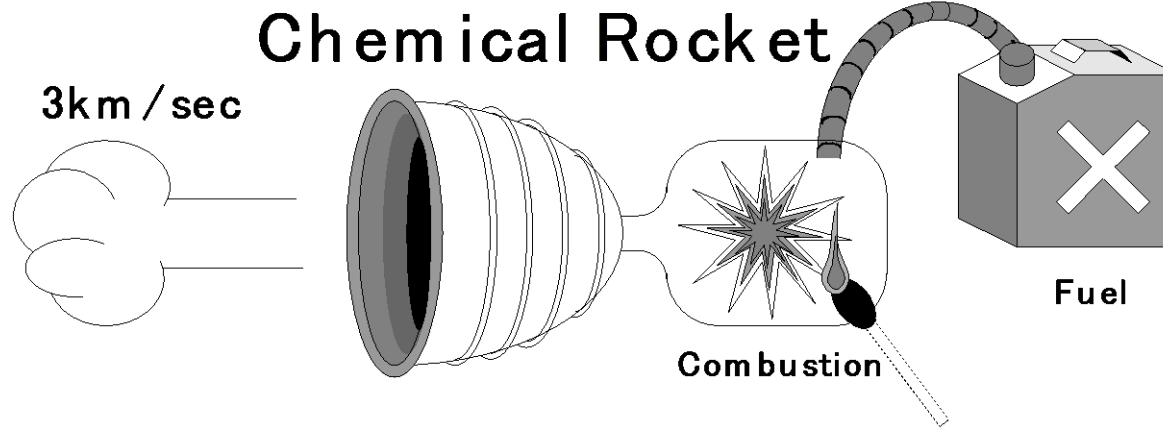
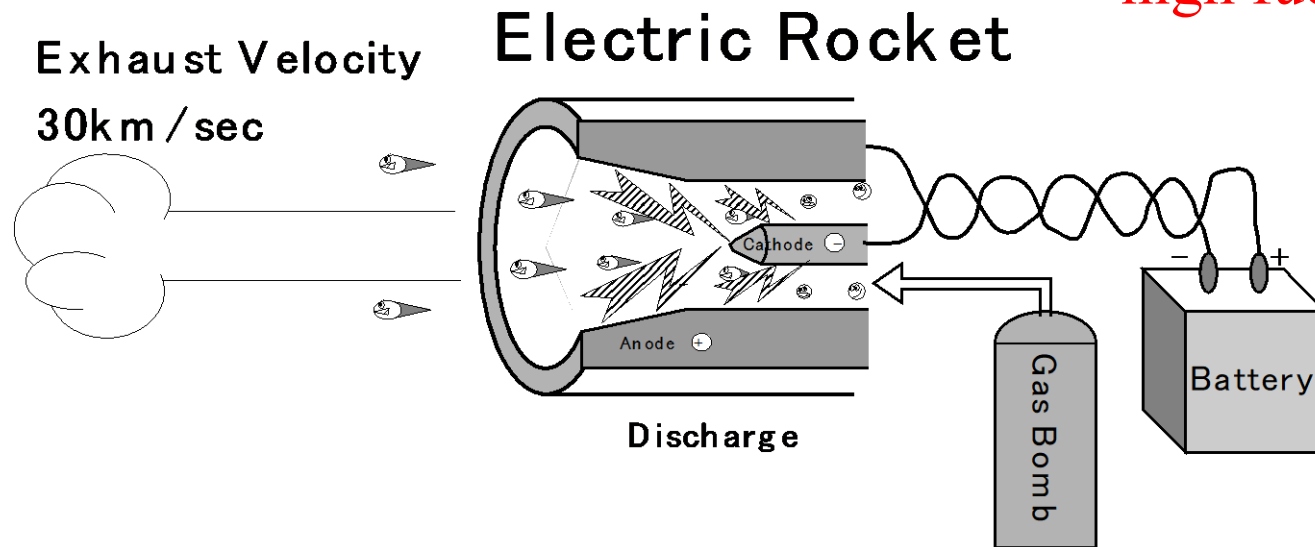
4 . Future Projects

Velocity of Rocket Exhaust

Rocket Equation:
(Tsiolkovsky Formula)

$$\Delta V = v_{\text{ex}} \ln \frac{M_{\text{S/C}} + m_{\text{prop}}}{M_{\text{S/C}}}$$

A rapid jet results in
high fuel efficiency.

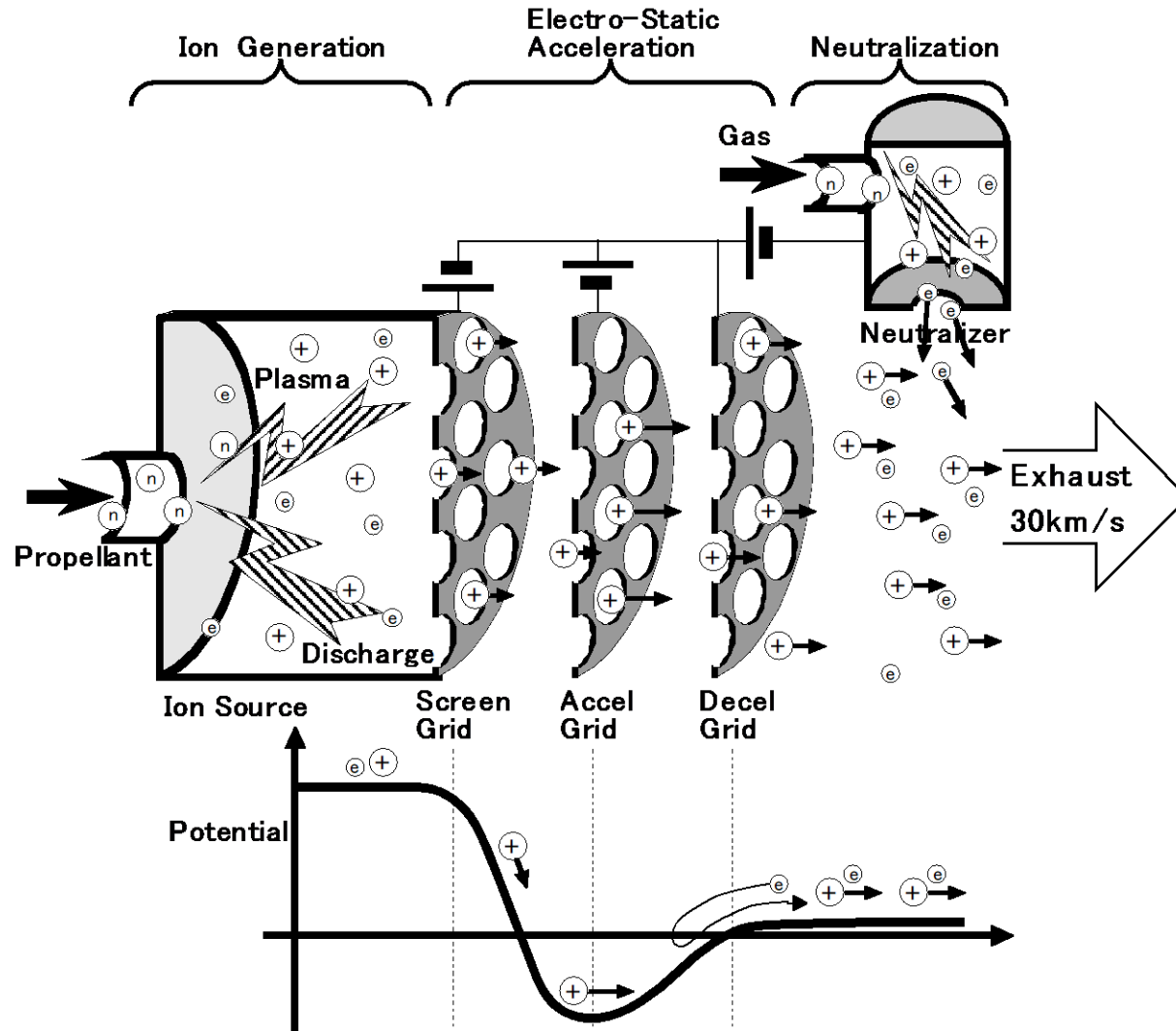


Mechanisms of Ion Engine

Several types of Ion Engine exist depending on the plasma generation mechanisms.

Kaufman IE
Ring cusp IE
RF IE

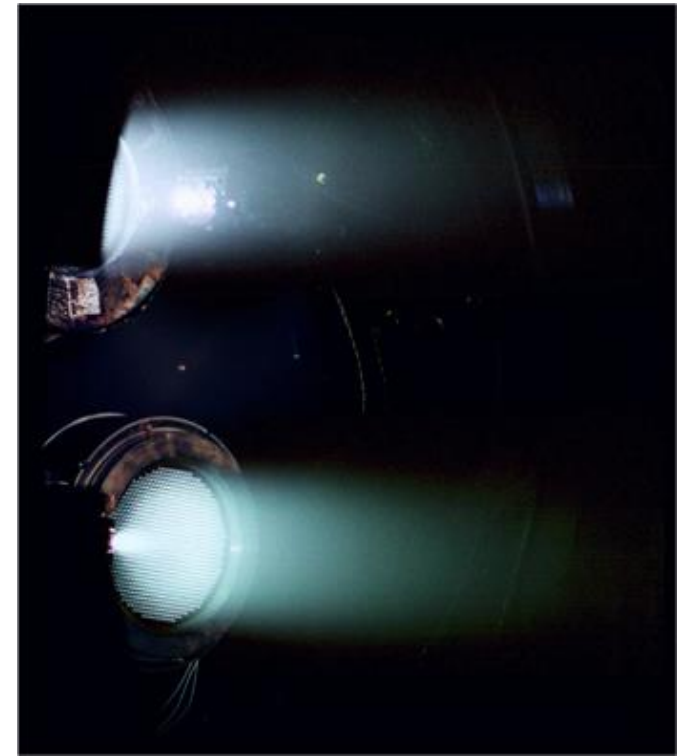
Microwave Discharge IE



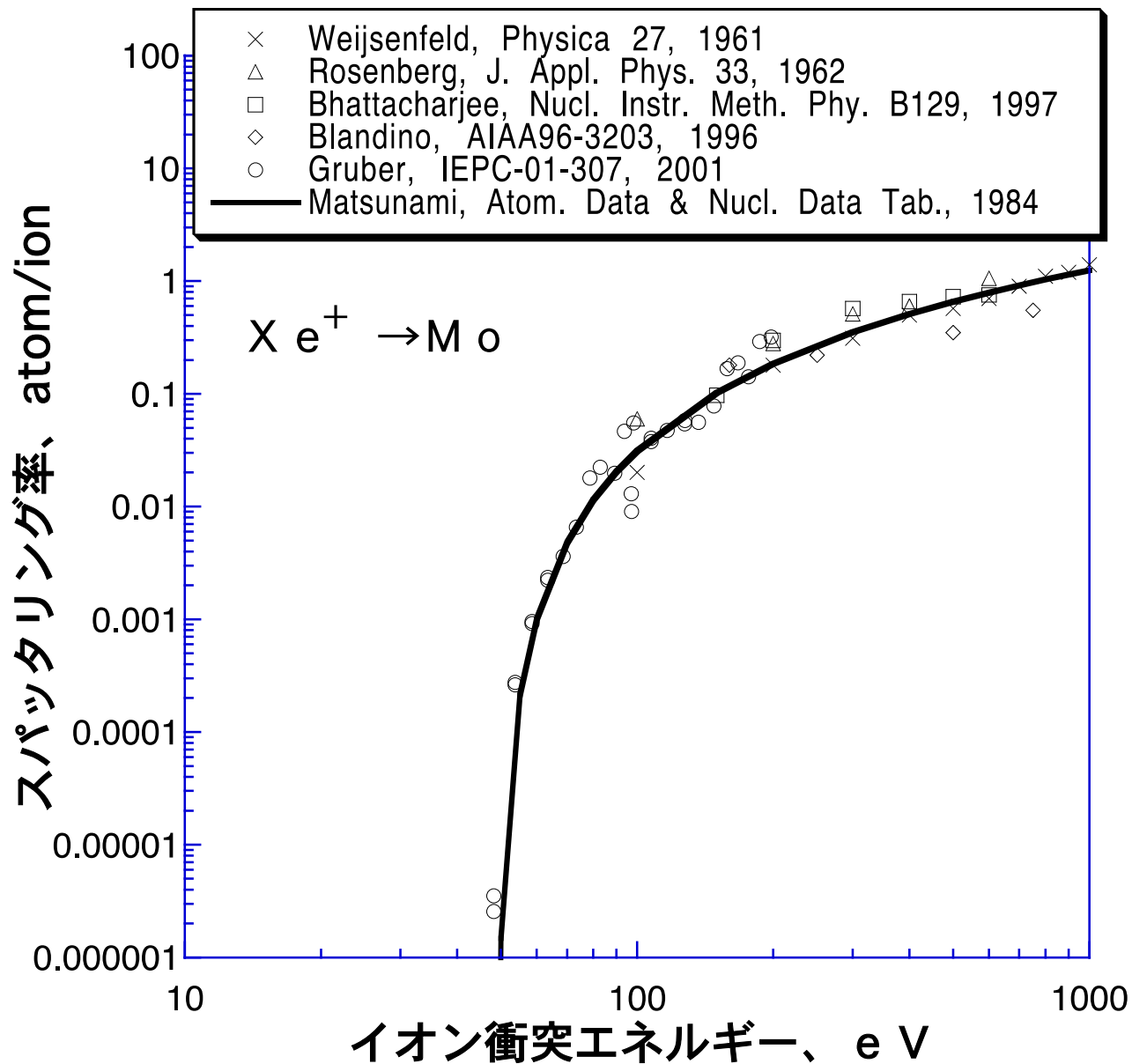
Life critical components

Electrodes for plasma generation

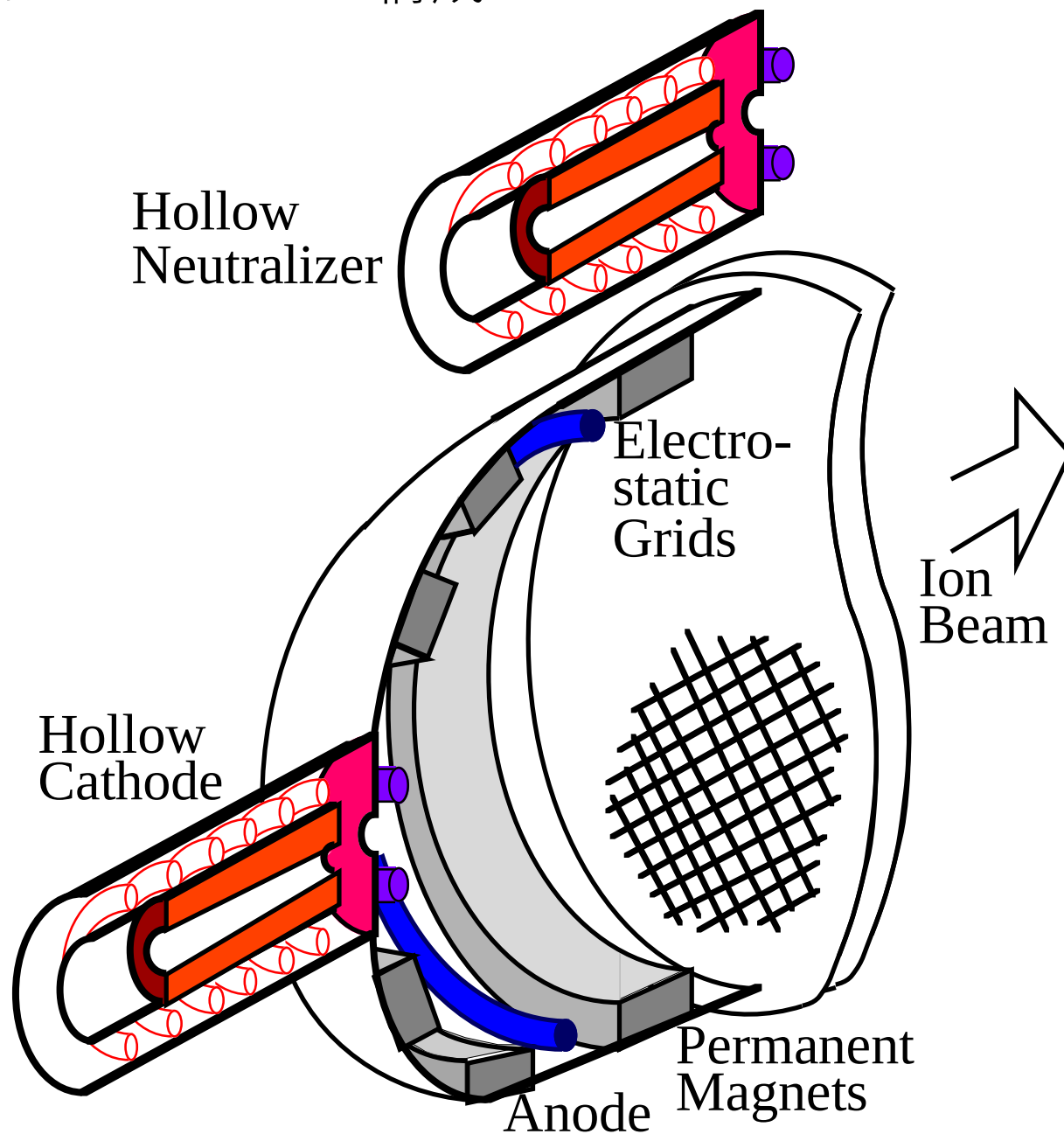
Electro-static grid



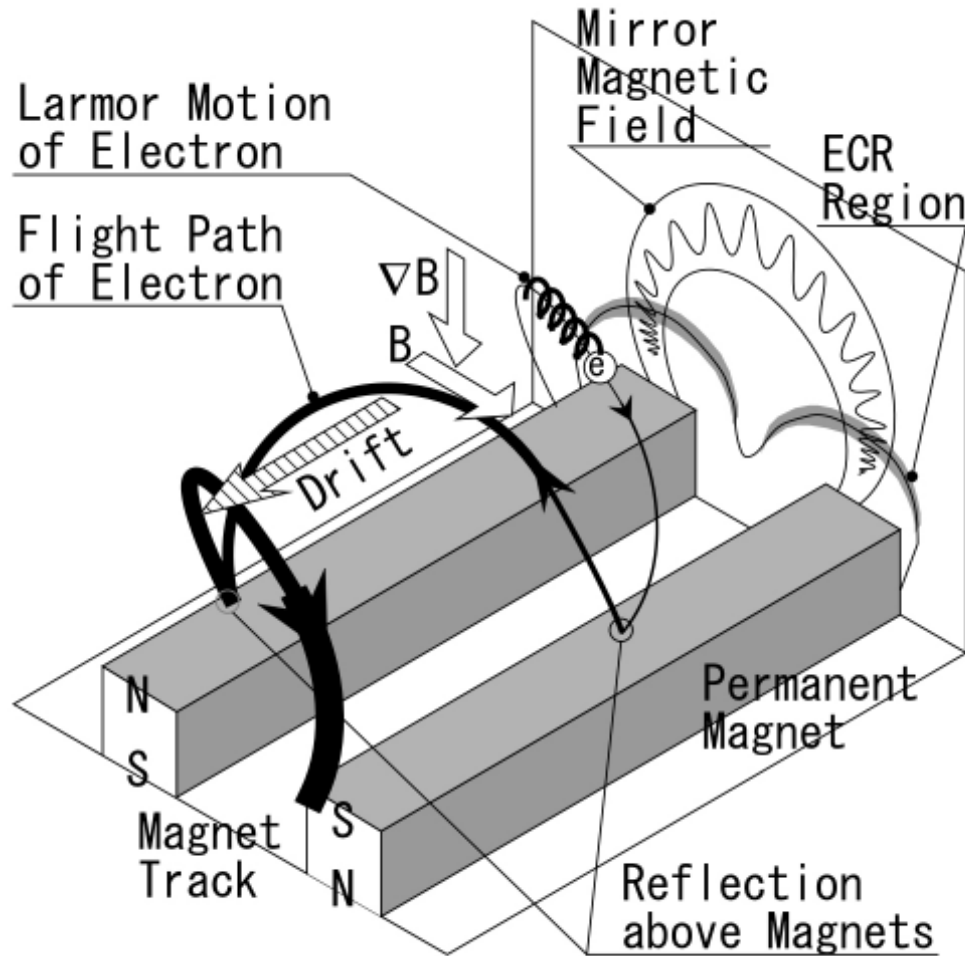
スパッタリング特性



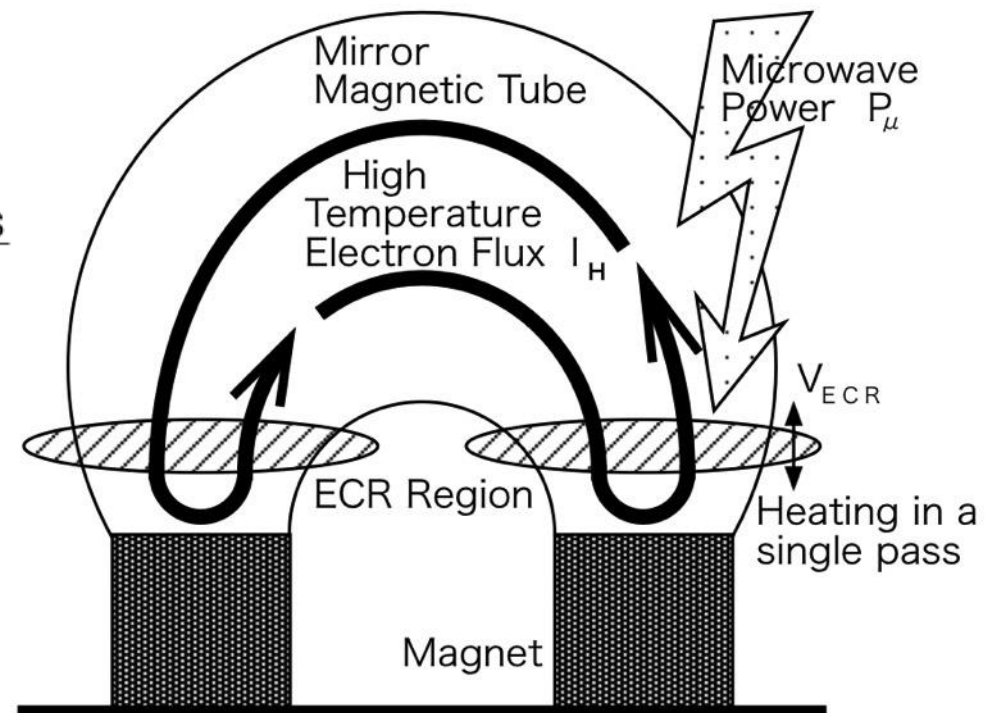
イオンエンジンの構成



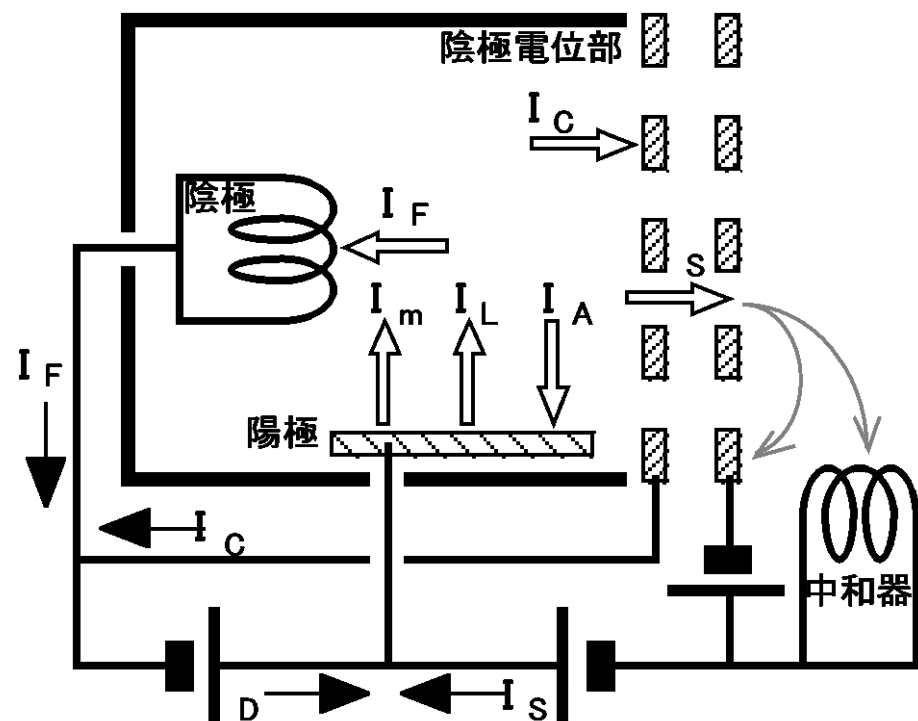
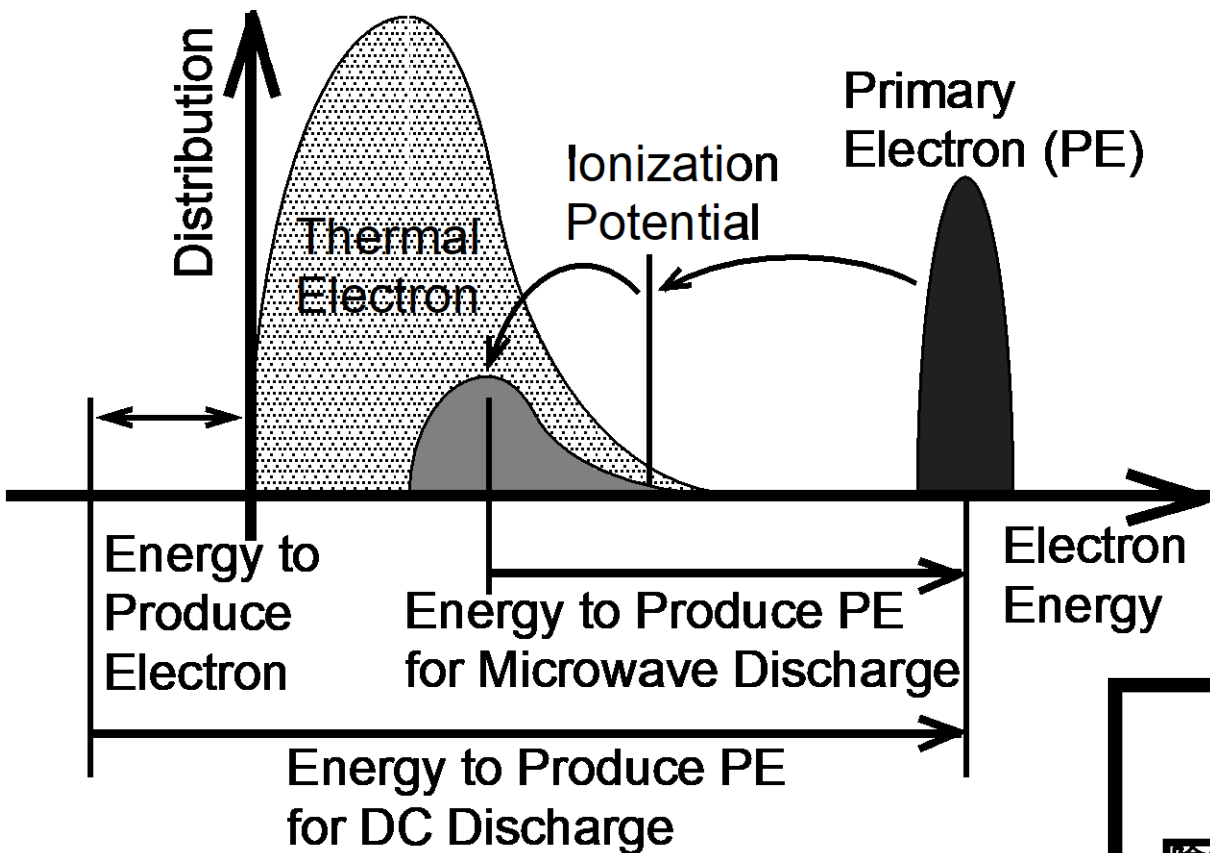
ECRマイクロ波放電の機構



$$V_{\text{ECR}} = \frac{\rho E_{\text{ECR}}^2}{v_{\parallel} \left| \frac{\partial B}{\partial s} \right|_{\text{ECR}}} = 0.6 \text{ eV}$$



プラズマ生成の機構



正／負イオンビームエンジン Positive/Negative Ion Beam Engine

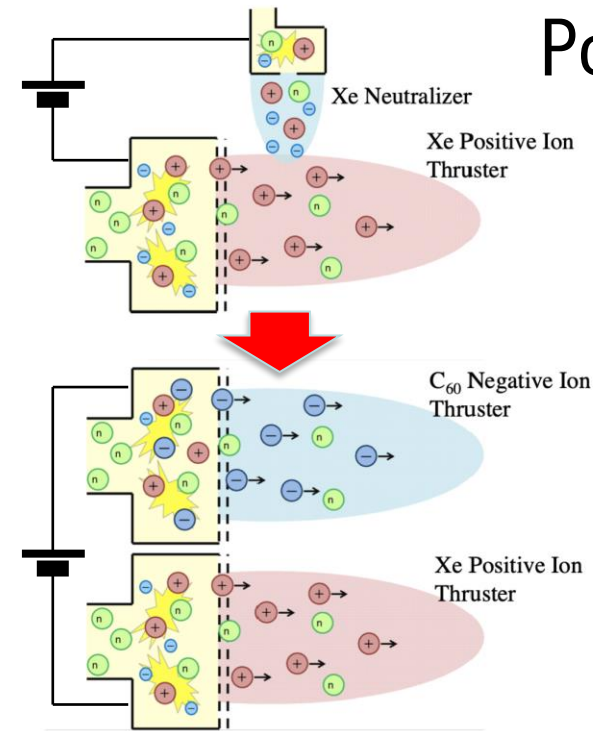


Figure1.14: 提案した C_{60} 負イオン +Xe 正イオンスラスタシステムの概念図

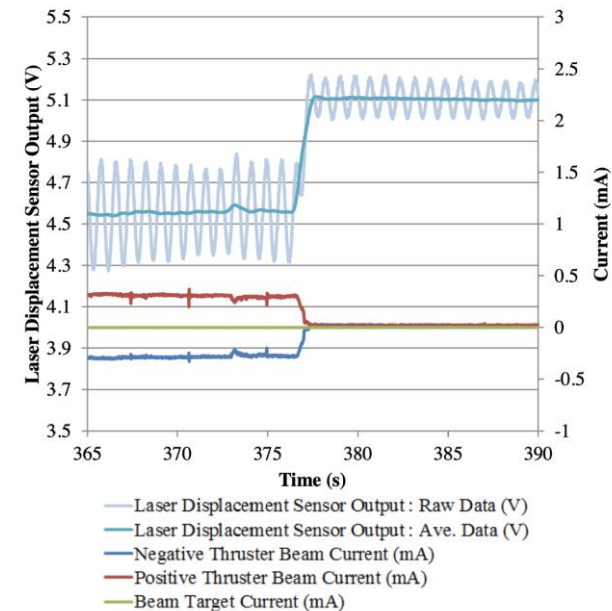
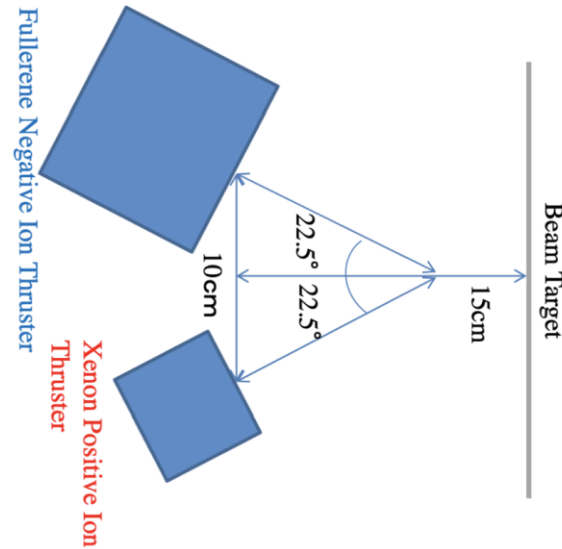
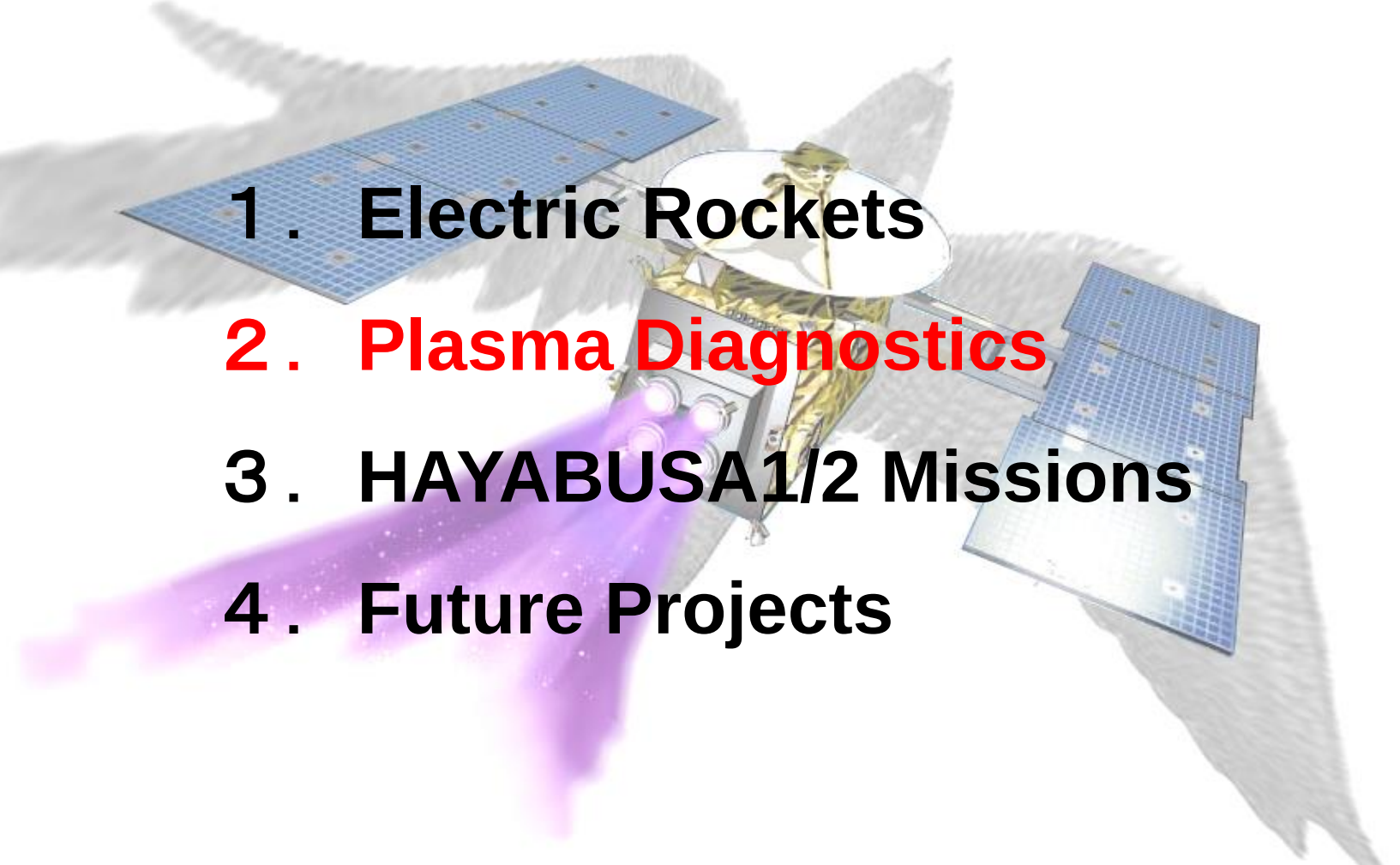
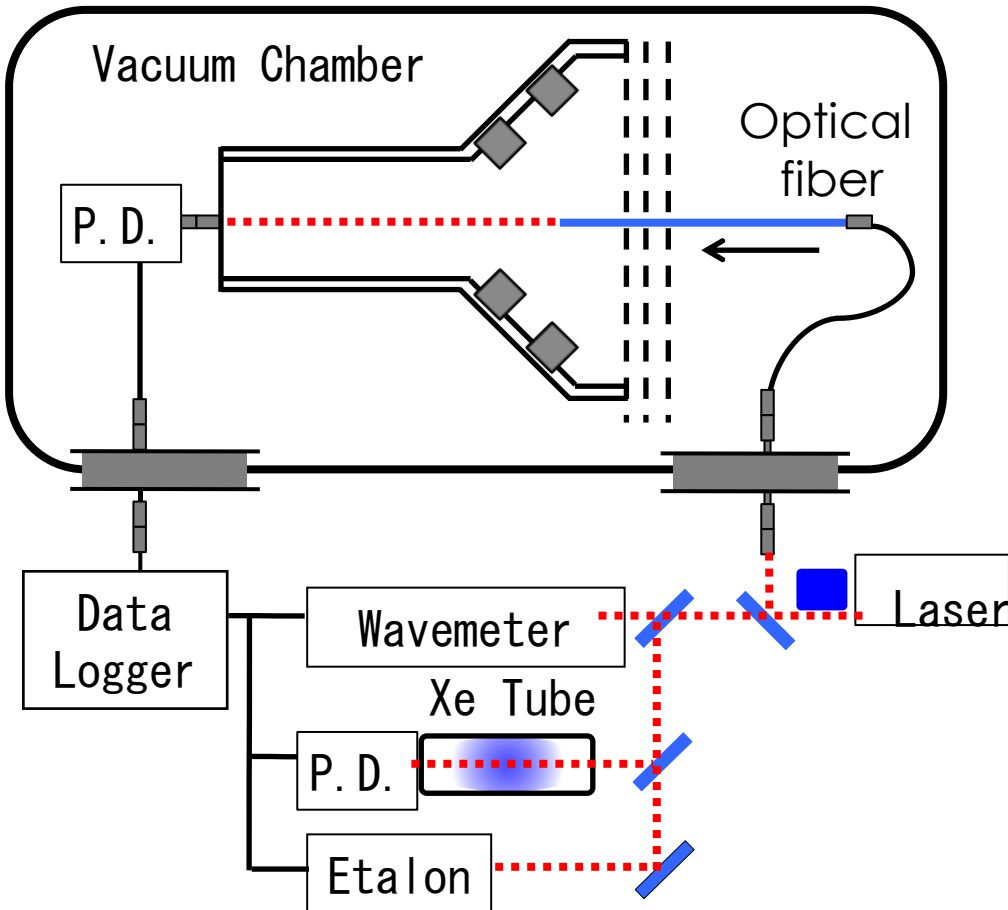


Figure7.23: フロートビームターゲットによる正負イオンビームの推力測定

- 
- An illustration of a satellite in space. The satellite has a central body with a white circular dish antenna and two large blue solar panel arrays extending outwards. A bright purple plasma trail is shown emanating from the rear of the satellite, suggesting it is an electric propulsion spacecraft. The background is a light gray, textured surface.
1. Electric Rockets
 2. Plasma Diagnostics
 3. HAYABUSA1/2 Missions
 4. Future Projects

Experimental setup for LAS

- Xe I 828 nm
- Inserting the optical fiber via the grid's aperture.
- Change the length of laser path.



1. Little disturbance.
2. High accessibility to high-voltage plasma.
3. Nondestructive monitoring.

Target

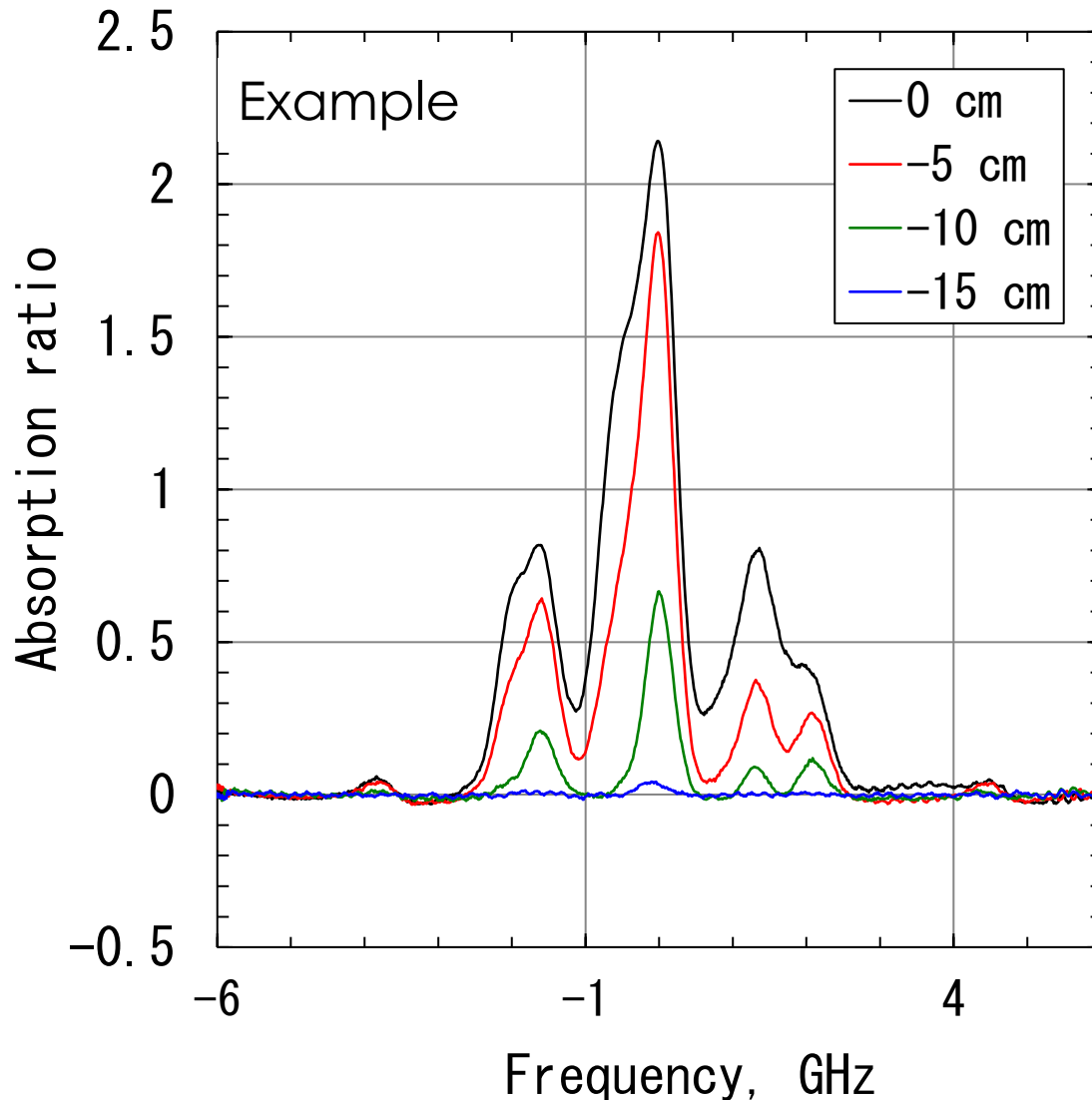
Xe I excited by electrons

Propellant Injection

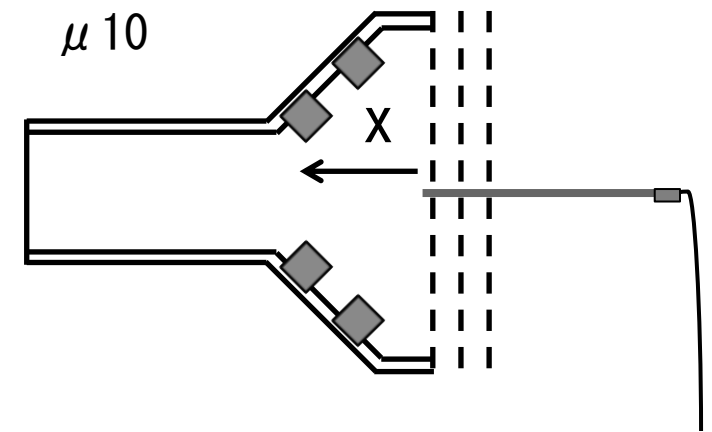
WG: 1, 2, 3 sccm

DC: 2, 3, 4 sccm

How to get number density distribution

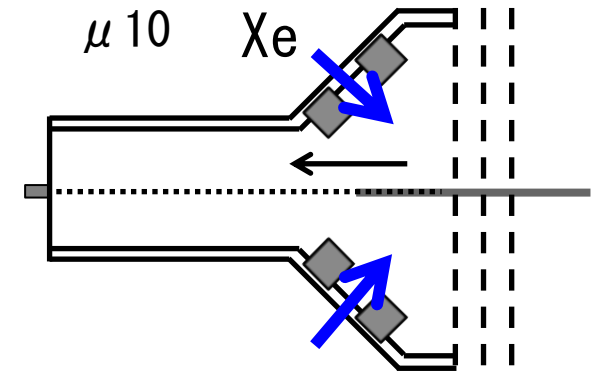
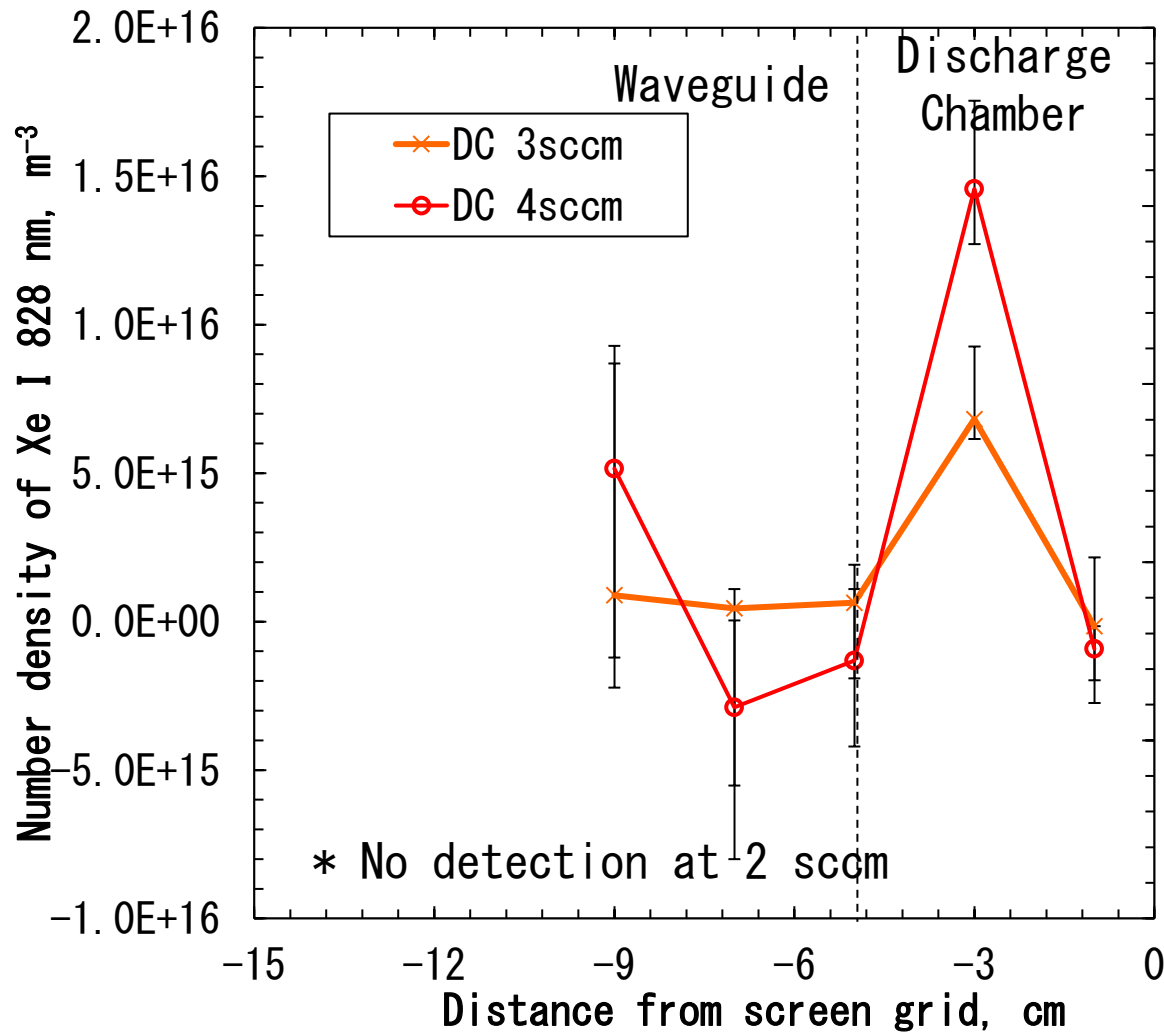


Integrated absorption coefficient “K” : Area of the graph → number of the target particles



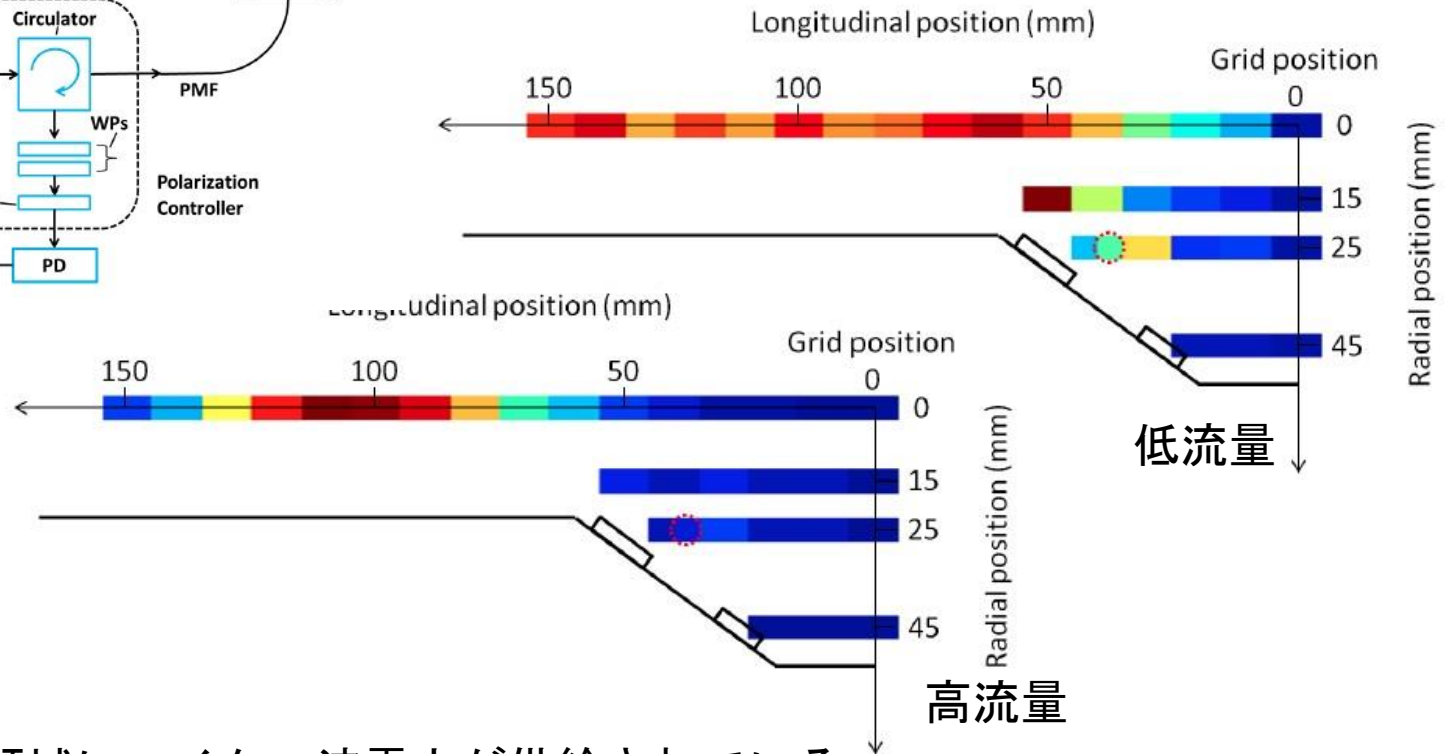
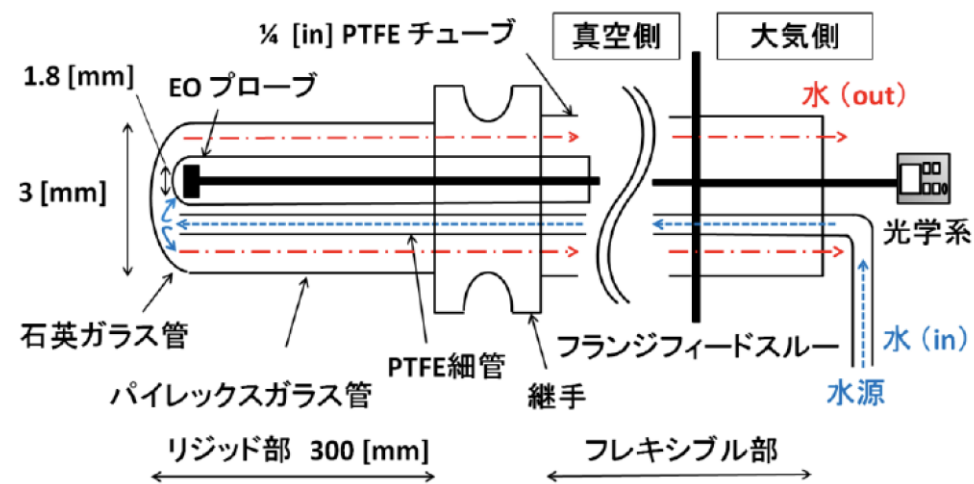
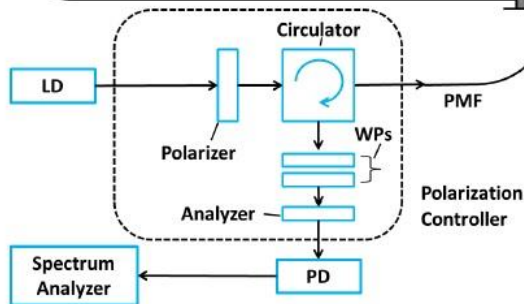
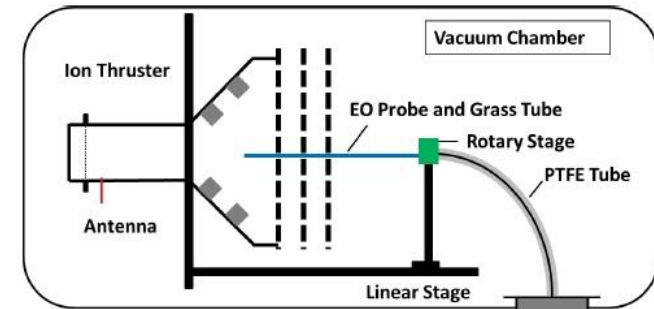
dK/dX : number density
“K” is experimentally differentiated by inserting optical fiber to get the number density distribution.

Xe 2, 3, 4 sccm from DC

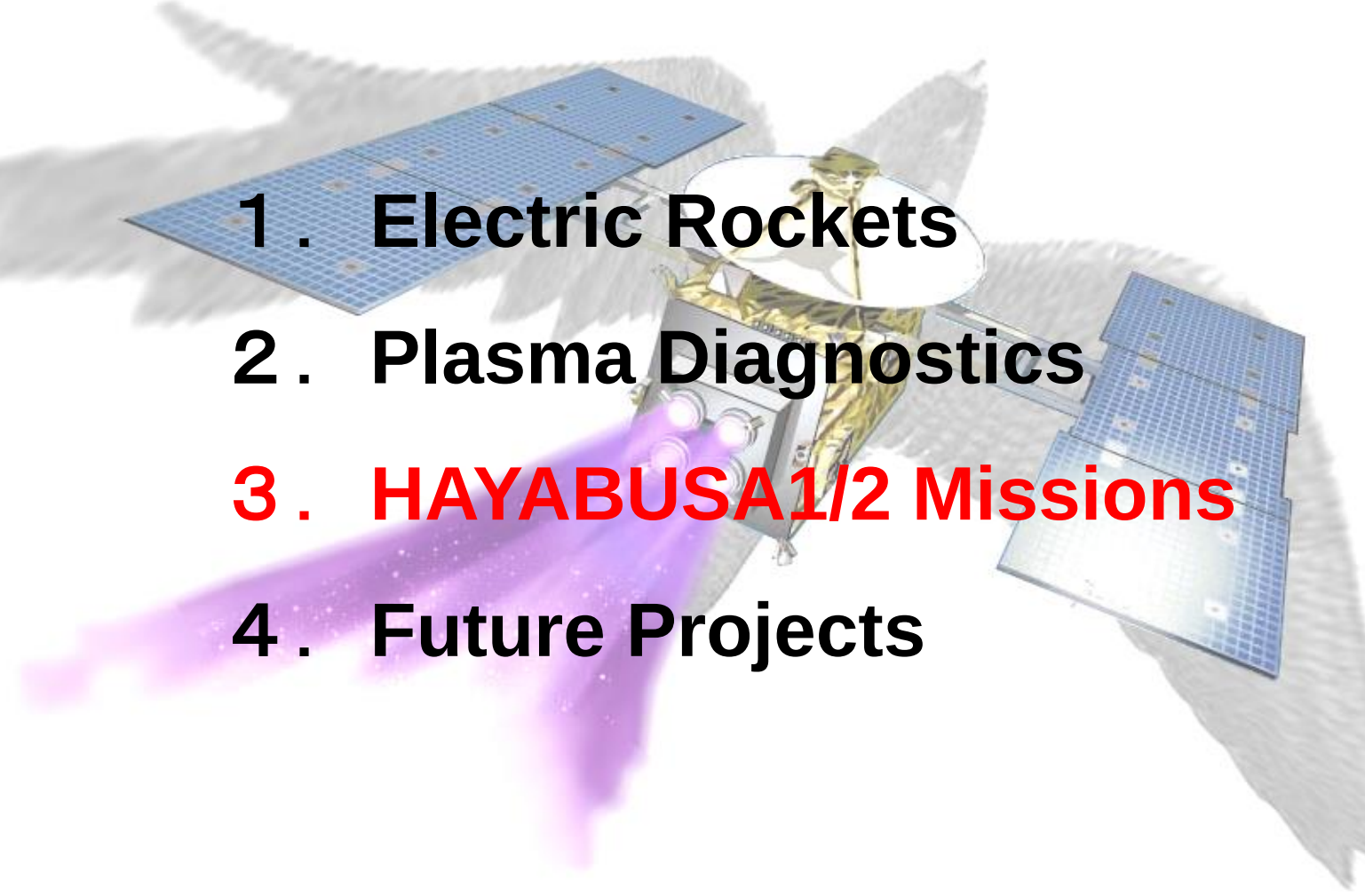


Highest values were recorded in the discharge chamber.

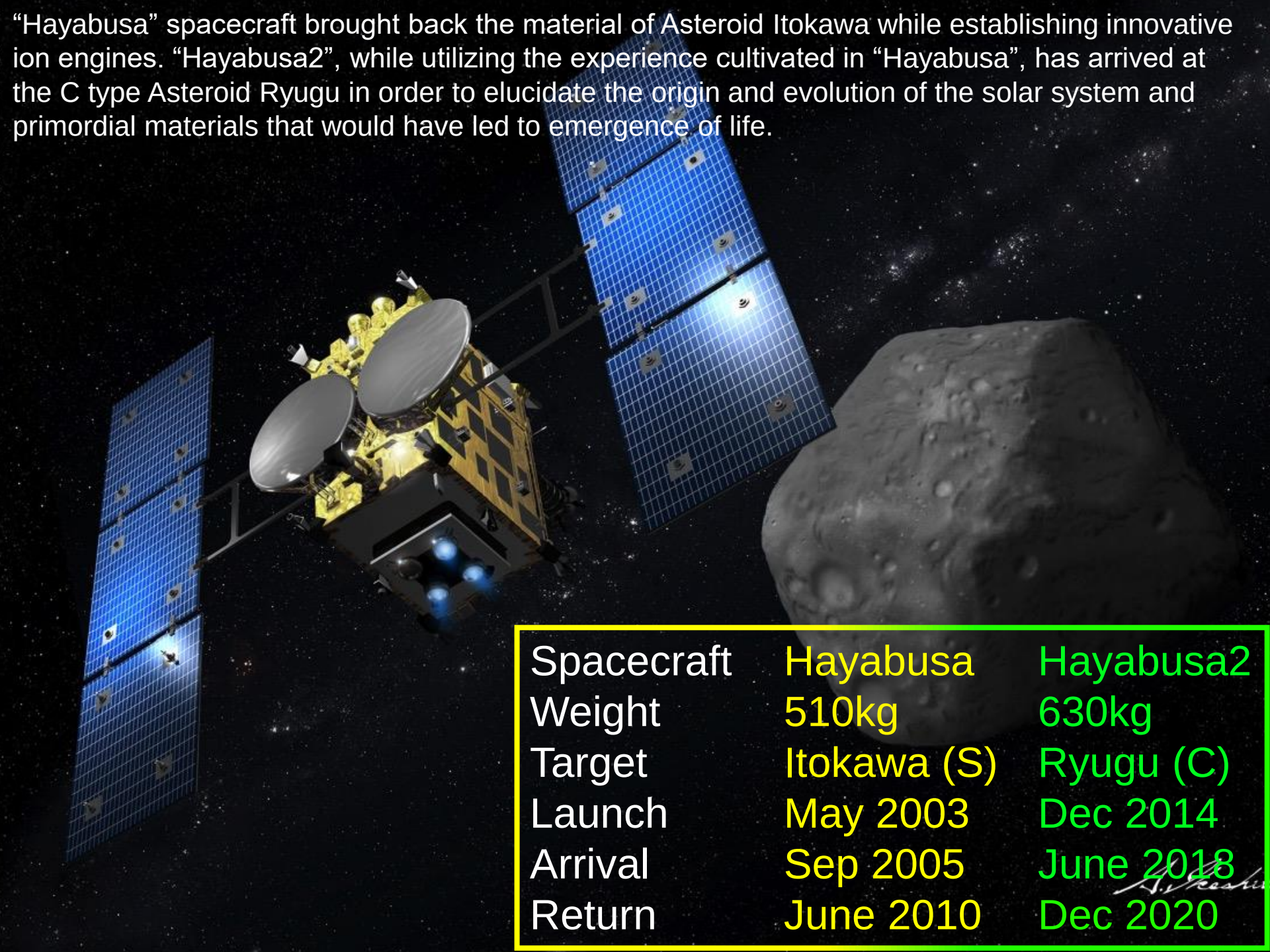
EOプローブ



低流量時にECR領域にマイクロ波電力が供給されている。
高流量になると、マイクロ波電界が放電室に届かなくなり、推力ストールが起こる。
推進剤分配投入により、マイクロ波反射が高流量側に移行することを確認した。

- 
- An illustration of a satellite in space. The satellite has a central body with a gold-colored thermal blanket, a large white parabolic dish antenna, and two large blue solar panel arrays. One thruster is firing, creating a bright purple and white plume of exhaust. The background is a light gray, suggesting a nebula or interstellar dust.
1. Electric Rockets
 2. Plasma Diagnostics
 3. HAYABUSA1/2 Missions
 4. Future Projects

“Hayabusa” spacecraft brought back the material of Asteroid Itokawa while establishing innovative ion engines. “Hayabusa2”, while utilizing the experience cultivated in “Hayabusa”, has arrived at the C type Asteroid Ryugu in order to elucidate the origin and evolution of the solar system and primordial materials that would have led to emergence of life.



Spacecraft	Hayabusa	Hayabusa2
Weight	510kg	630kg
Target	Itokawa (S)	Ryugu (C)
Launch	May 2003	Dec 2014
Arrival	Sep 2005	June 2018
Return	June 2010	Dec 2020

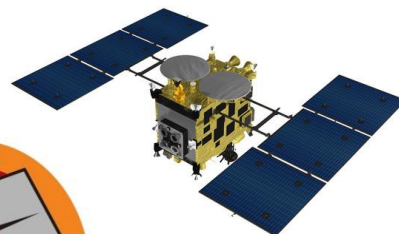
名称	打上質量	乾燥質量	推進	費用
----	------	------	----	----



オシリス レックス	2,110kg	860kg	化学	1,000億円
--------------	---------	-------	----	---------



はやぶさ2	610kg	490kg	電気	300億円
-------	-------	-------	----	-------

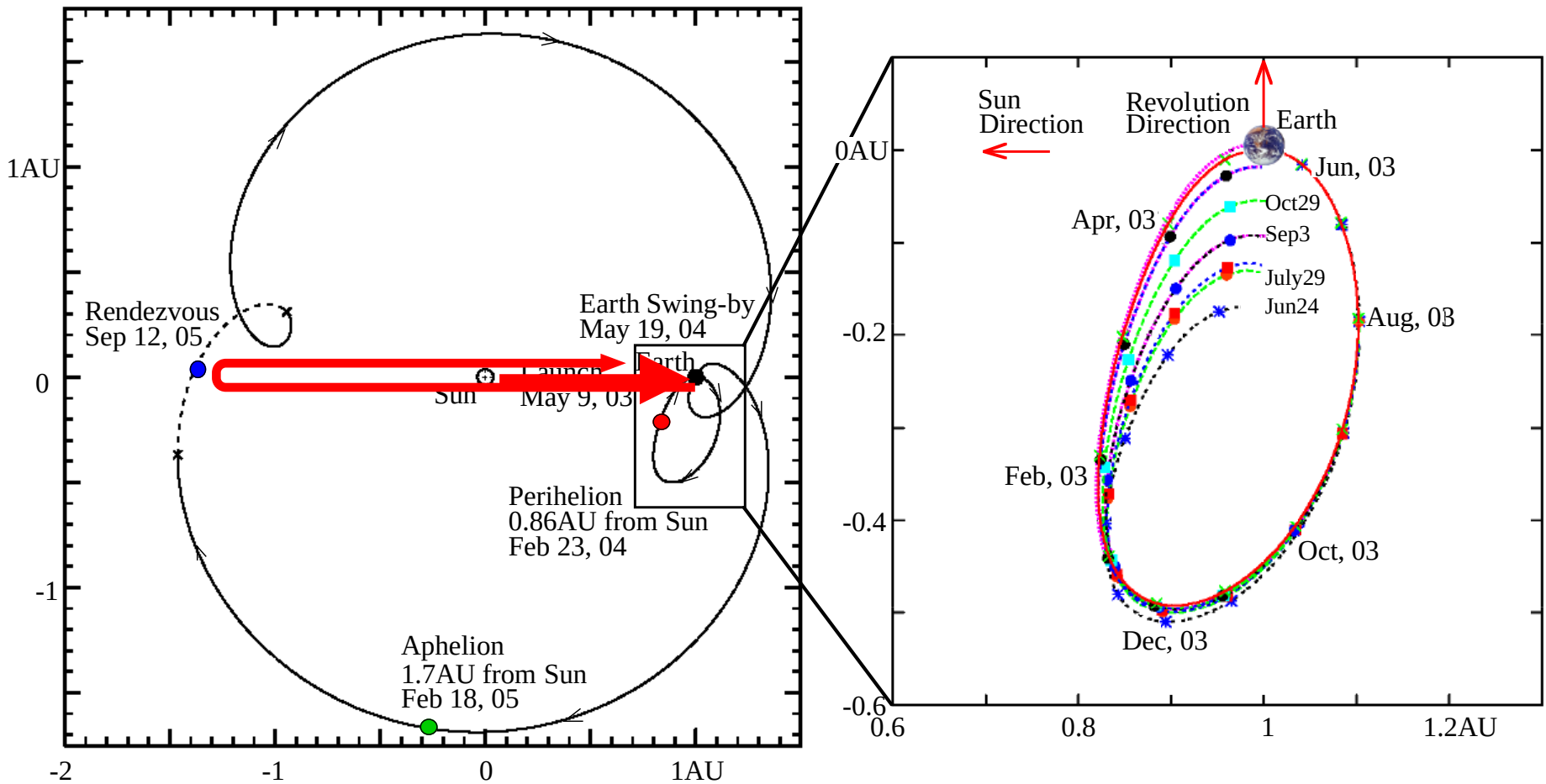


はやぶさ／はやぶさ2が身軽に小惑星サンプルリターンを実現可能なのは、燃費の良い、イオンエンジンのおかげ。
イオンエンジンは、宇宙科学研究所の主力技術である。

Launch Campaign of Hayabusa2 by H2A Rocket on Dec.3 2014

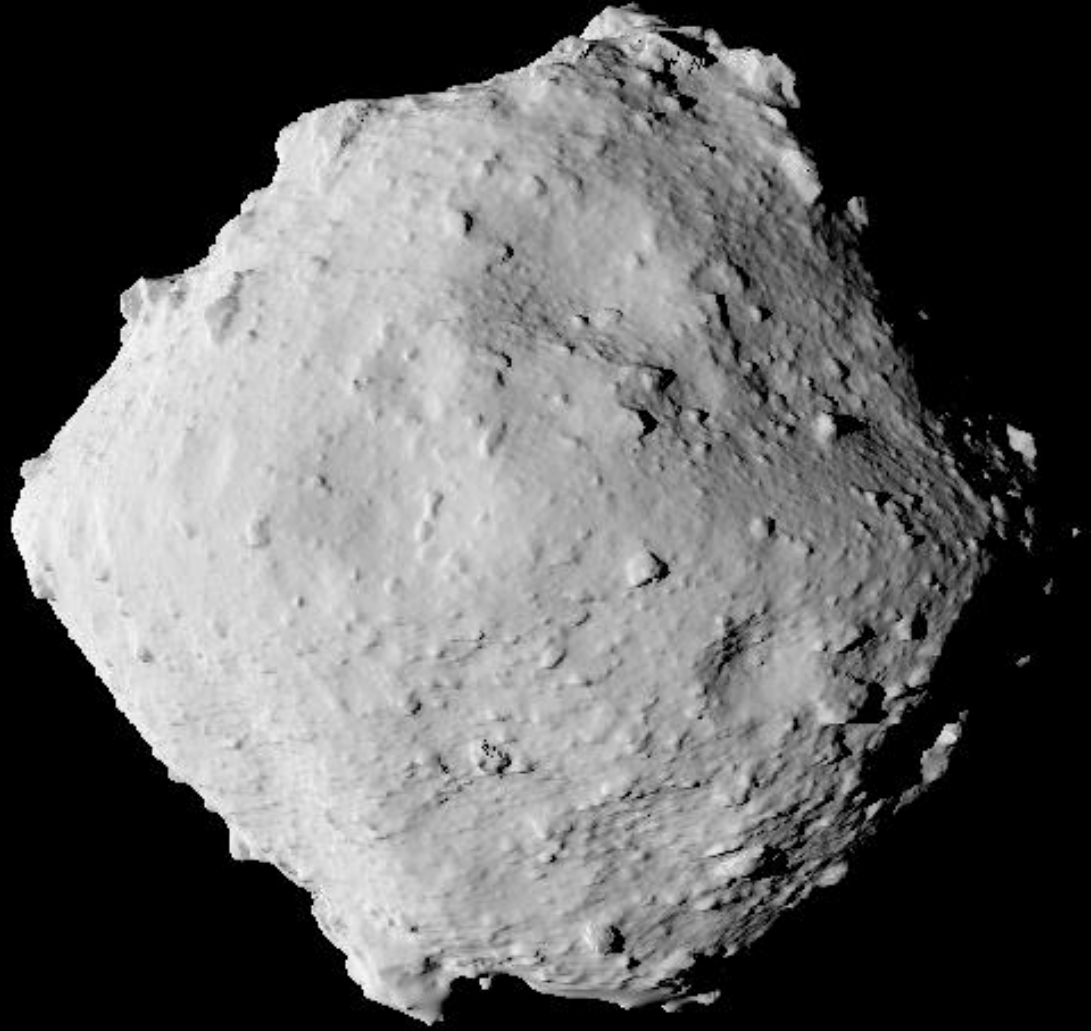


EP Δ VEGA toward Asteroid Itokawa



Hayabusa executed Earth swing-by in May 2004
and directed its course toward Asteroid Itokawa.
Hayabusa as SEP runs outward journey between 1.7AU outer and
0.86AU inner in solar distance.

Asteroid Ryugu



Asteroid Itokawa

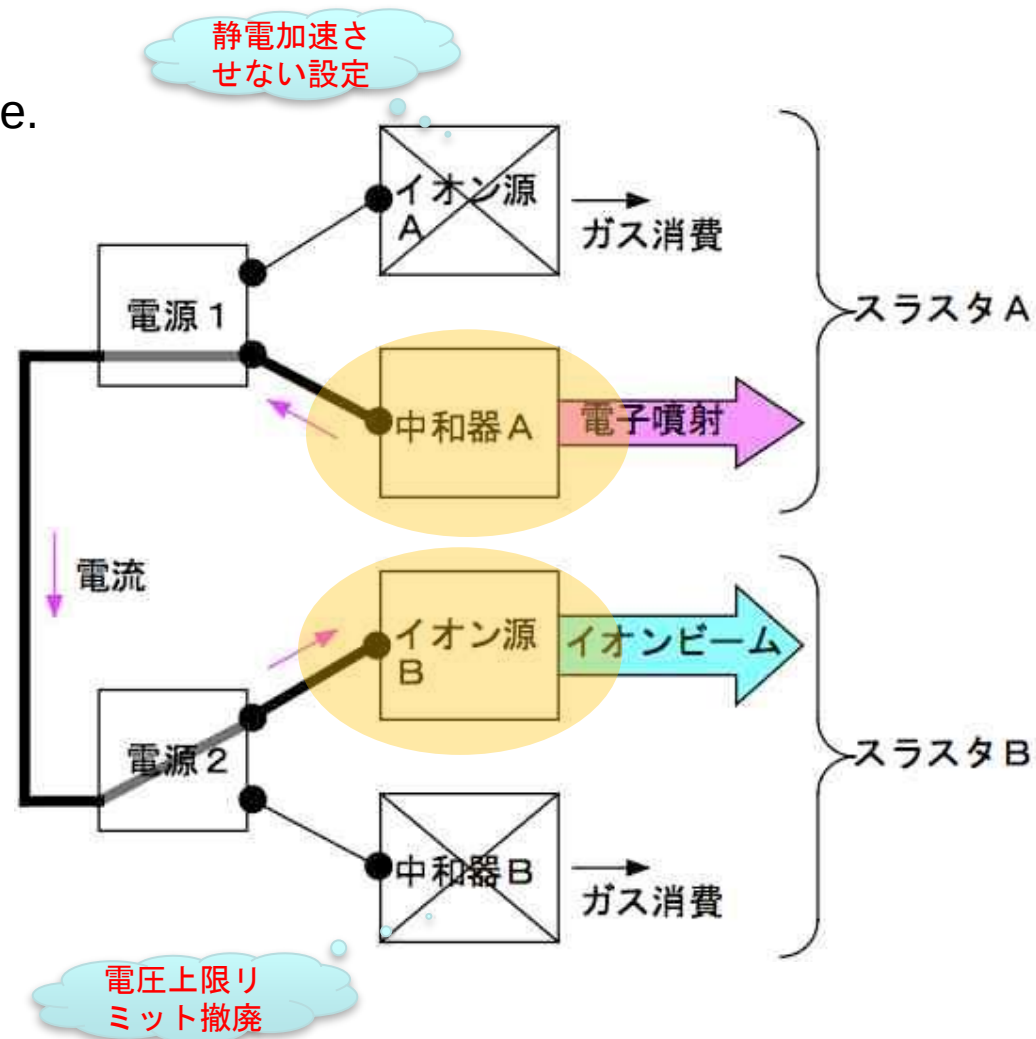
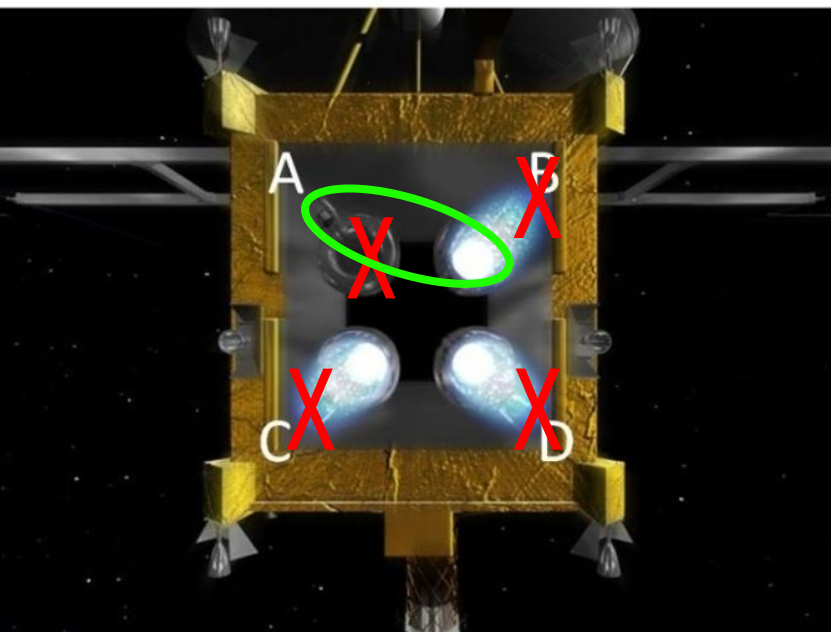


Cross Connected Operation of Ion Engines

Thruster D was shut off on November 4, 2009.

As counter measure Thruster-B combined with Neut-A generated enough thrust for the rest of the cruise.

The spacecraft was intentionally charged down to negative value, which made Neut-A emit electron current.



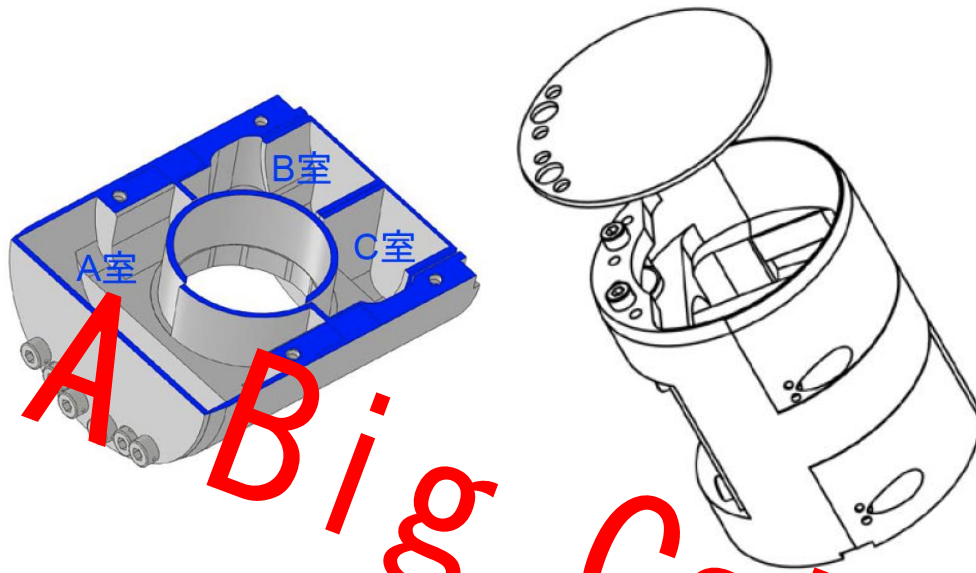
SRC reentry to Earth on June 13, 2010





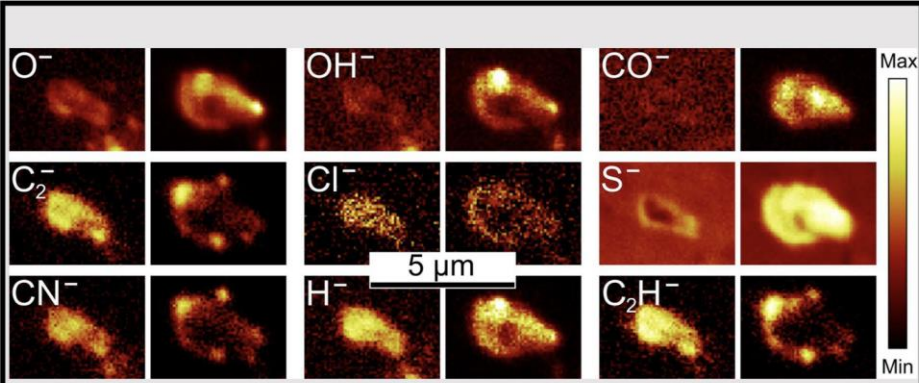
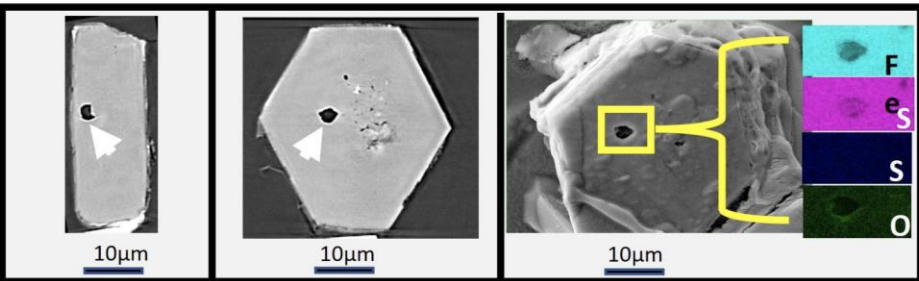
イオンエンジン担当
20世紀FOX: 鶴見辰吾
東映: 江口洋介
松竹: 豊原功補





The Hayabusa2 re-entry capsule was recovered in Woomera, Australia on December 6, 2020 and delivered to the JAXA Sagami-hara Campus on December 8. Work then began to open the sample container inside the re-entry capsule. On December 15, a sample of grains of black sand thought to be derived from asteroid Ryugu was confirmed to be inside the chamber A. The largest grain is estimated 1cm diameter and total collected sample will be about 5.4 grams of materials, far above the target of one-tenth of a gram.



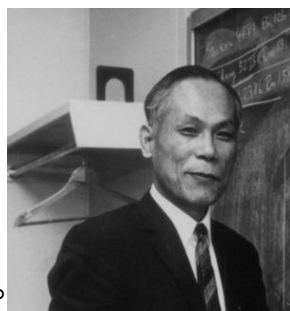


© 東北大学、NASA/JSC、SPRing-8

図5：リュウグウサンプル中の六角板状の結晶（硫化鉄）の内部に発見された水とCO₂を主成分とする液体。（A、B）硫化鉄結晶中の空孔のCT像。数ミクロンの大きさの空孔（白矢印）が結晶中に存在している。（C）質量分析計で測定した空孔内に含まれていた様々なイオン種（同じ分子種の2枚の写真は、左側が空孔上部、右側が空孔中部に含まれていたイオン種を示す）。結晶の温度を-120℃にして、空孔中の液体を凍らせて分析した。（D）分析後の空孔中の液体を蒸発させて、空孔内部を観察した結果、結晶を構成する元素（鉄と硫黄）以外は検出されなかった。空孔内には液体以外の固体成分は存在しないことを示す。

木星／土星が系内を飛び回った？。
Jumping Jupiter, Grand Tack
Nice Model

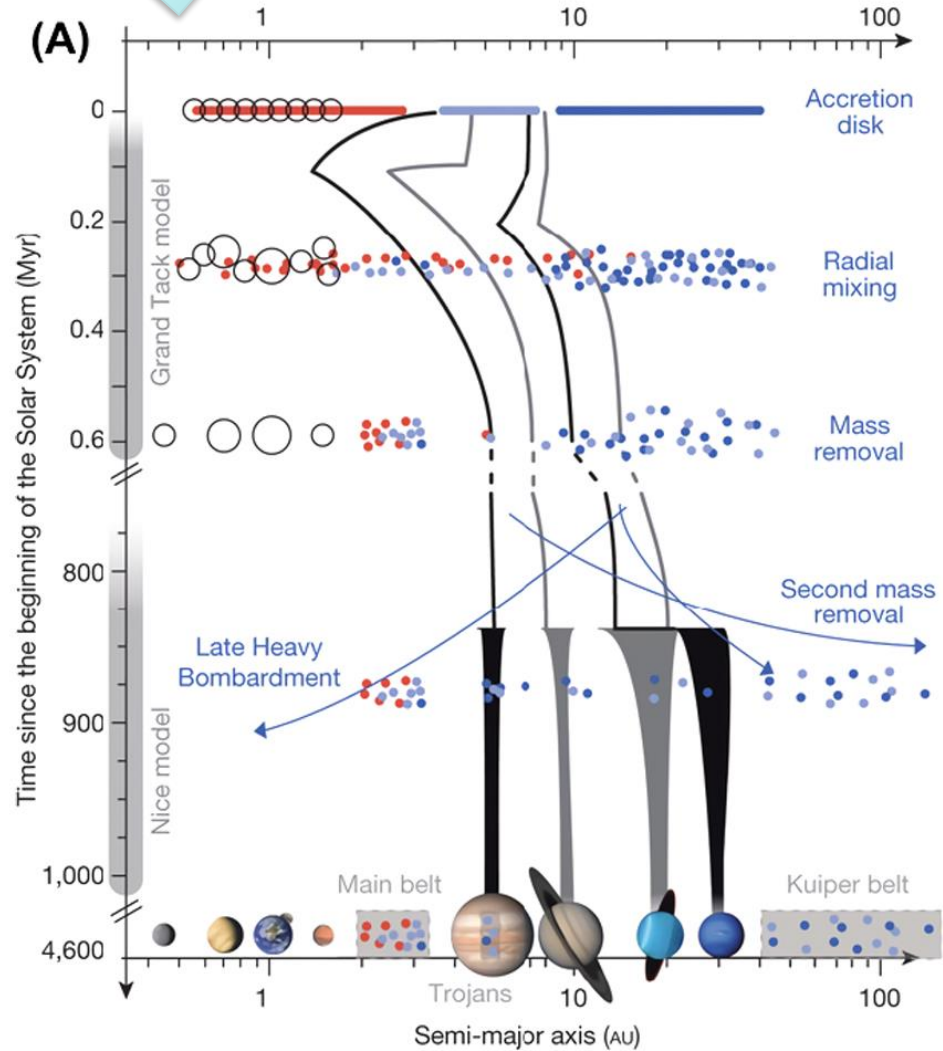
5千個を超える系外惑星が発見されたが、
太陽系のような並びが1つも無い。
Hot Jupiter



太陽系形成の古典的標準シナリオは
「京都モデル」と呼ばれ、1980年代に
京大理学部物理学科・天体核物理学研
究室・林忠四郎のグループにより提唱。

リュウグウ試料内に、CO₂液体を発見 ← 物的証拠

ドライアイス環境で形成された@太陽系外縁部
木星／土星に揺すぶられて地球近傍に移動





Hayabusaによる小惑星イトカワの全景
2006年 6 月



Hayabusaにより採取された粒子
2011年 8 月



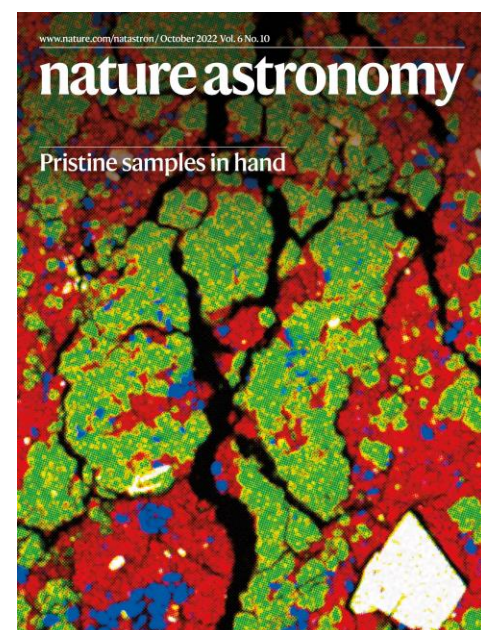
Hayabusa2による小惑星リュウグウの全景
2019年 4 月



Hayabusa2による小惑星リュウグウの赤外画像
2020年 3 月



Hayabusa2の着陸時想像図
2023年 2 月



Hayabusa2が採取した試料の顕微鏡写真
2022年 1 0 月

第227回 2014年4月7日放送

ゆっくりでも、止まらなければ、けっこう進む 宇宙工学者・國中均



▶ プロフェッショナルとは ▶ The Professional's Tools



マイクロ波型イオンエンジン



“宇宙大航海時代”の扉をひらけ

國中が開発したマイクロ波型イオンエンジンは、従来のエンジンとは根本的に発想が異なる。それは、原子そのものの物理を利用した、近未来型のエンジンだ。地上では1円玉を動かす程度の推力だが、驚異的な持久力を誇る。はやぶさが、たった60キロあまりの燃料で7年間60億キロの航海ができたのも、國中のイオンエンジンがあったからだ。

國中は、実に20年以上の歳月をかけ、このイオンエンジンの開発に挑んできた。NASAなどが開発の難しさに撤退を決め、国内でも“穀つぶし”と言われるほど厳しい状況に追いやりられても、この技術こそが、新たな世界の扉を開くと信じ、こつこつと研究を続けてきた。見据える先には、1つの夢がある。人類が火星や月に暮らし、自由に惑星間を行き来する時代、“宇宙大航海時代”だ。

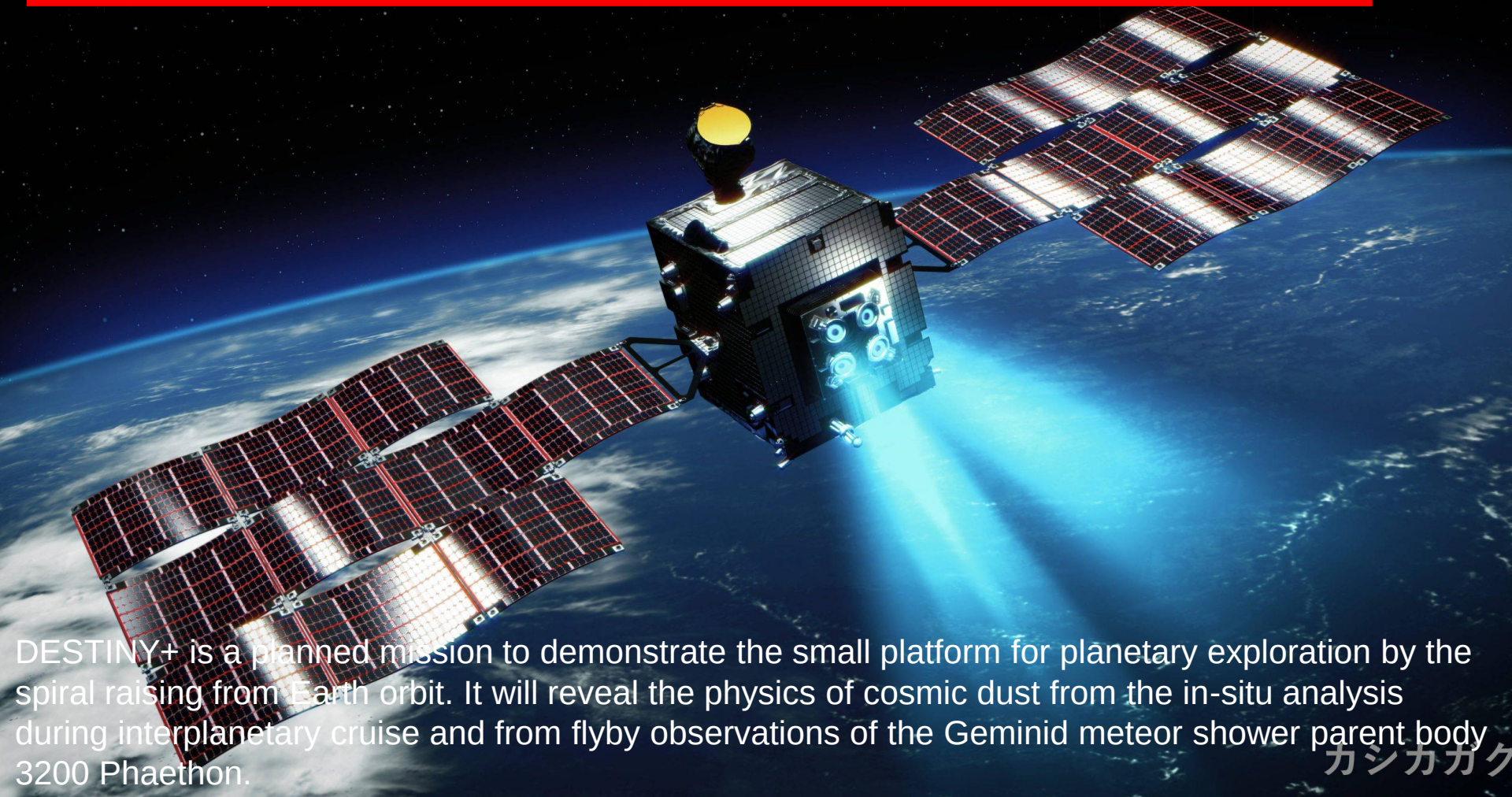
- 
- 1 . Electric Rockets**
 - 2 . Plasma Diagnostics**
 - 3 . HAYABUSA1/2 Missions**
 - 4 . Future Projects**

Spacecraft DESTINY⁺

Demonstration and Experiment of Space Technology for
INterplanetary voYage, Phaethon fLyby and dUst Science

Target Phaeton

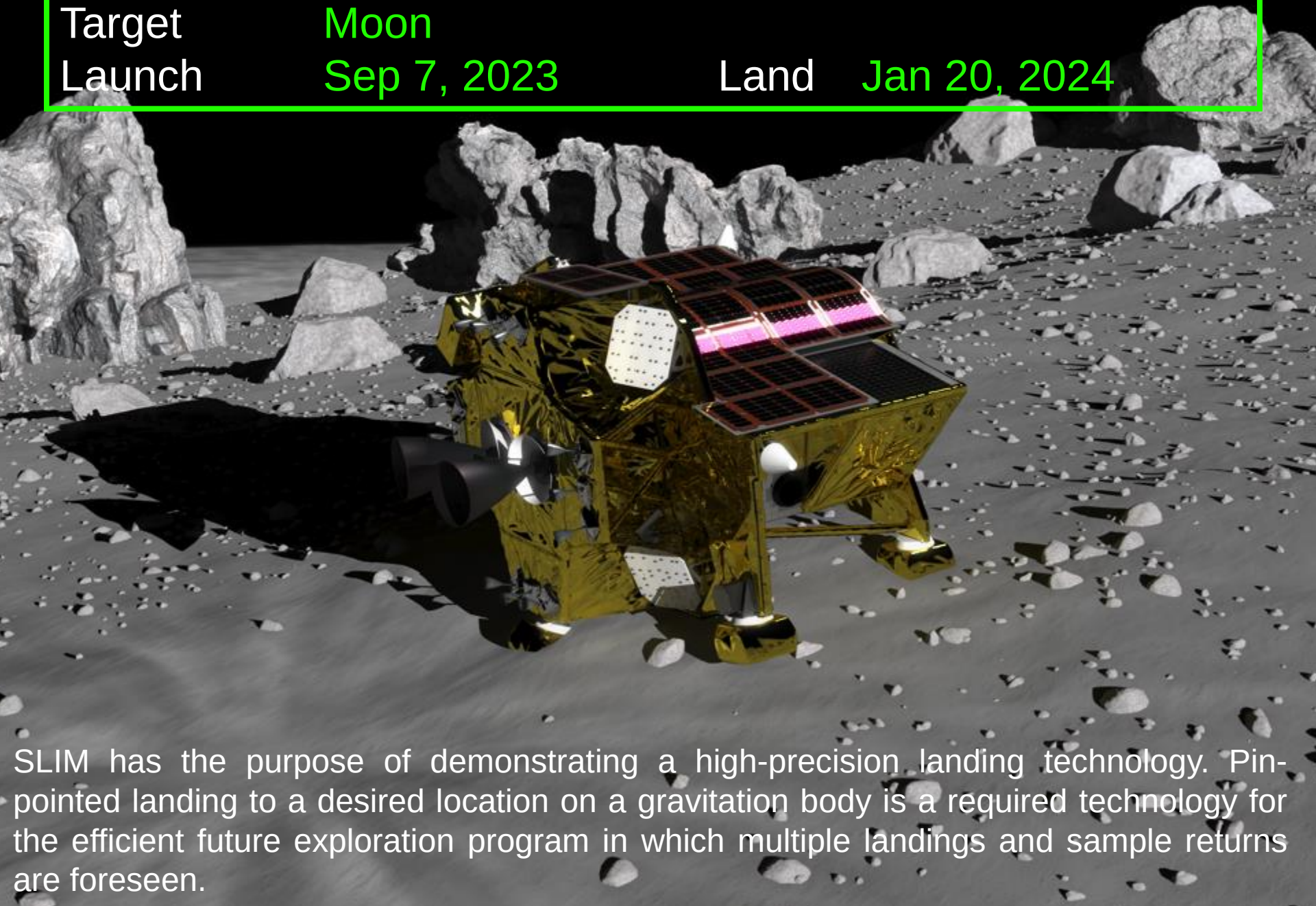
Launch 2025



DESTINY+ is a planned mission to demonstrate the small platform for planetary exploration by the spiral raising from Earth orbit. It will reveal the physics of cosmic dust from the in-situ analysis during interplanetary cruise and from flyby observations of the Geminid meteor shower parent body 3200 Phaethon.

カシカガク

Spacecraft	S L I M: Smart Lander for Investigating Moon		
Target	Moon		
Launch	Sep 7, 2023	Land	Jan 20, 2024



SLIM has the purpose of demonstrating a high-precision landing technology. Pin-pointed landing to a desired location on a gravitation body is a required technology for the efficient future exploration program in which multiple landings and sample returns are foreseen.

SLIMオリジナルコンテンツ



SLIM着陸シーケンスCG

SLIM着陸シーケンスのシミュレーション結果例をCGで紹介します。

CG作成：三菱電機エンジニアリング



SLIM着陸 360度CG

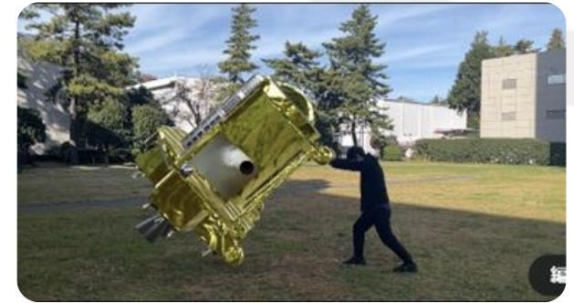
SLIM着陸降下の数値シミュレーションの中から、着陸部分の一例を360度CGにてご紹介します。スマホで見るのもお薦めです。

360度CG作成：三菱電機エンジニアリング



▶ 高解像度版はこちら [🔗](#)

▶ 別画面に拡大する [🔗](#)



SLIM AR

スマホでSLIMをAR表示します。お気に入りの姿勢まで倒れたら「ARで表示する」ボタンを押して下さい。【注】一部機種では動作しないようです。ご了承下さい。



▶ ARに移動する [🔗](#)

360°



JAXA's Lunar & Planetary Exploration Program

Yellow: Legacy
Green: Active
Red: Development
Blue: Plan

Mercury: **Mio** (BepiColombo)

Venus: **Akatsuki**,
IKAROS

Jupiter: **JUICE**
Solar Sail

Mars: **Nozomi**,
MMX

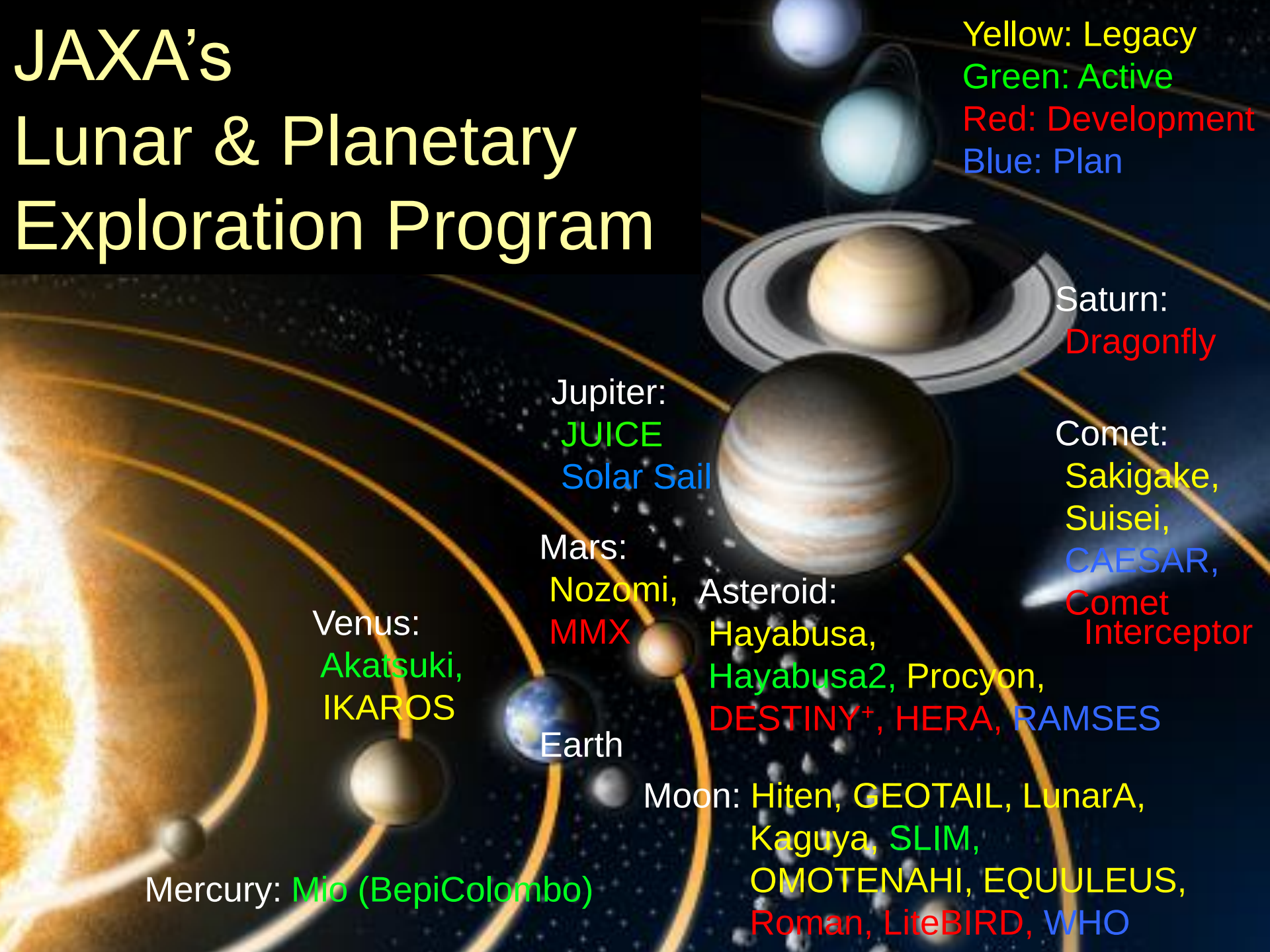
Earth

Moon: **Hiten**, **GEOTAIL**, **LunarA**,
Kaguya, **SLIM**,
OMOTENAHI, **EQUULEUS**,
Roman, **LiteBIRD**, **WHO**

Asteroid: **Hayabusa**,
Hayabusa2, **Procyon**,
DESTINY+, **HERA**, **RAMSES**

Saturn: **Dragonfly**

Comet: **Sakigake**,
Suisei,
CAESAR,
Comet Interceptor



AKATSUKI
Venus Climate Orbiter

JUICE
JUpiter Icy Moon Explorer

COMET INTERCEPTOR
Mission to a Long-Period Comet or Interstellar Object/Saturn's Moon Titan

HERA
Mission to a Binary Asteroid System for Planetary Defense and Science

DRAGONFLY
Flights of Exploration Across Saturn's Moon Titan

MIO
Mercury Magnetospheric Orbiter

SLIM
Smart Lander for Investigating Moon

HAYABUSA2
Asteroid Explorer

EQUULEUS
EQUilibriUm Lunar-Earth point 6U Spacecraft

DESTINY+
Demonstration and Experiment of Space Technology for Interplanetary voyage with Phaethon flyby and dust science

MMX
Martian Moons eXploration

CAESAR
Comet Astrobiology Exploration Sample Return

ISAS Deep Space Fleet will elucidate
4.6-billion-year History of Solar System
and Origin of Life

DEEP SPACE FLEET ISAS/JAXA

