

太陽系探査の将来

ISAS/JAXA 津田 雄一

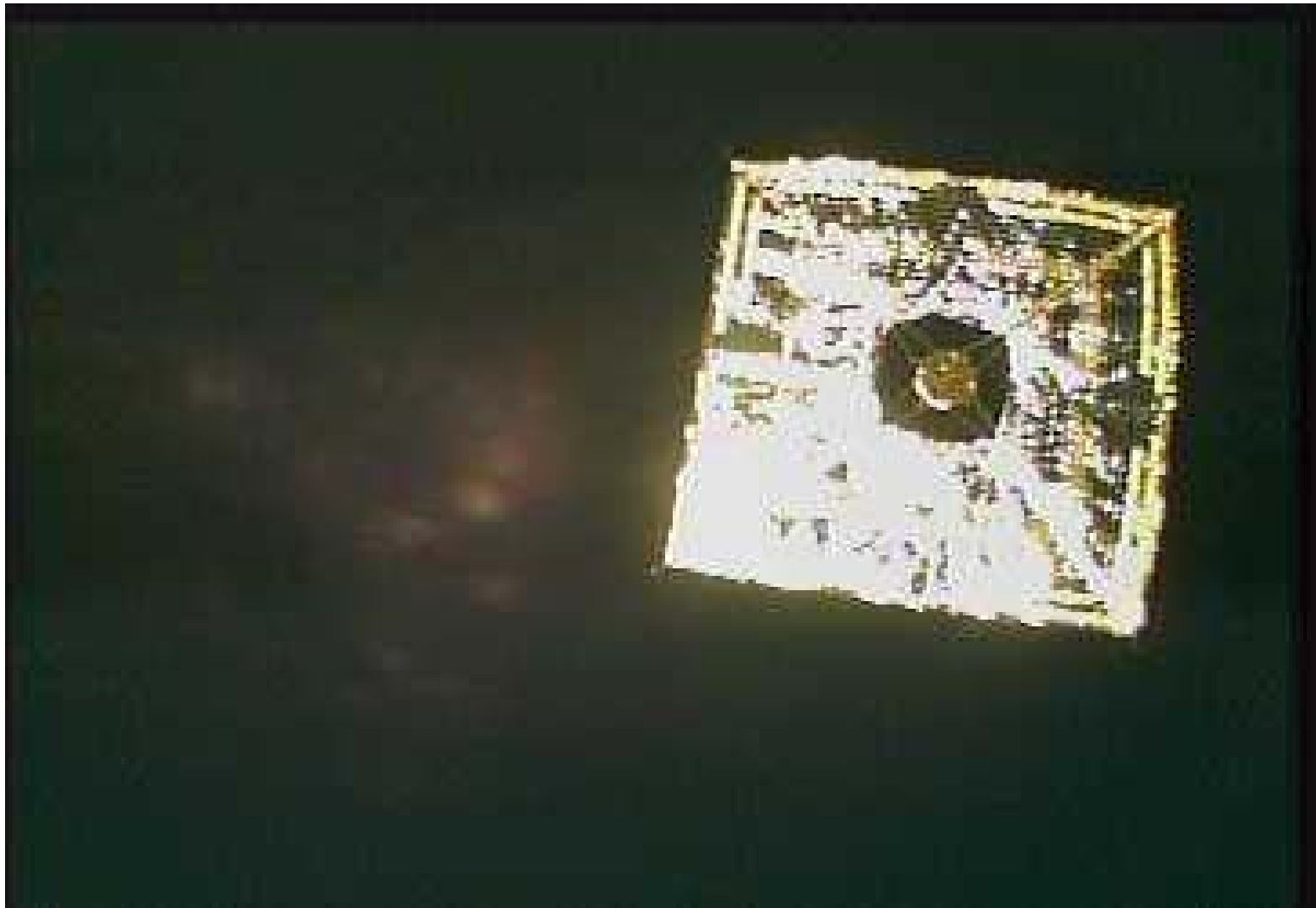
2011.1 宇宙科学シンポジウム



- 日本は、2010年に、世界で初めてソーラーセイルを搭載した無人探査機IKAROSを実現しました。ソーラーセイルは、地球重力圏外(「深宇宙」)で展開され、その後太陽光圧の加速を得て金星を通過しました。
- 日本は、2010年に、世界で初めて小惑星との往復飛行を完遂しました。はやぶさは小惑星への滞在、着陸、離陸を行い、小惑星の物質を地球へ持ち帰りました。

小型ソーラー電力セイル実証機「イカロス」

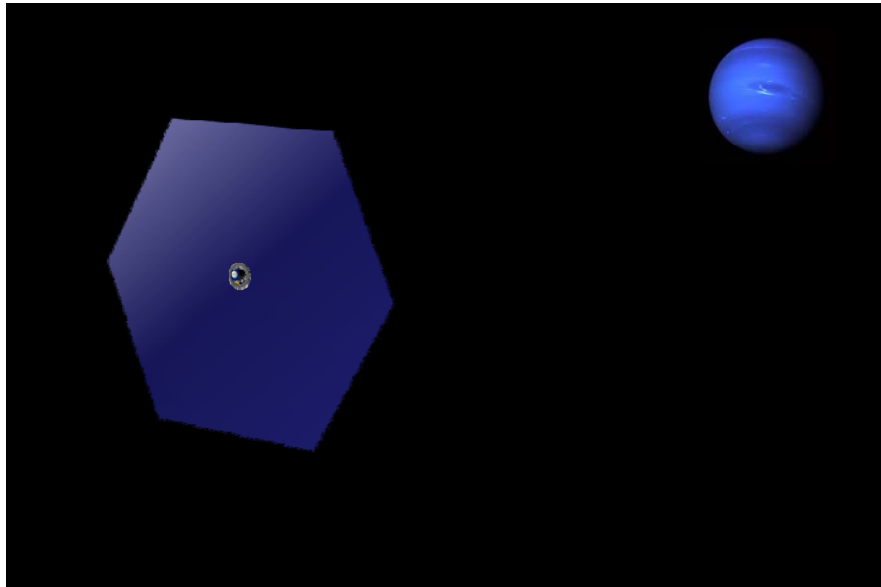
2010年6月9日, ソーラー電力セイル技術を実現しました.
しばらくは, ソーラーセイルと言えば, この絵が使われることでしょう.



惑星探査の歴史：我が国がいかに遅れているか.

195710/4	ソ連	スプートニク1号
1959/1/29	ソ連	月探査機ルナ1号(月に7500kmまで接近し、世界初の人工惑星となる)
1959/3/13	アメリカ	月探査機パイオニア4号(月に39000kmまで接近し、人工惑星となる)
1961/2/12	ソ連	金星探査機ヴェネラ1号
1962/8/27	アメリカ	マリナー2号(金星30000kmまで接近)
1966/1/31	ソ連	ルナ9号(世界初の月面着陸に成功)
1966/3/30	アメリカ	サーベイヤー1号(月面軟着陸に成功)
1969/2/22	アメリカ	マリナー6号(火星から3400kmの距離をフライバイ)
1970/2/11	日本	おおすみ(日本初の人工衛星)
1970/8/17	ソ連	ヴェネラ7号(世界初の金星軟着陸)
1971/5/28	ソ連	マルス3号(世界初の火星軟着陸)
1974/3/29	アメリカ	マリナー10号(世界初の水星フライバイ)
1976/7/20	アメリカ	バイキング1号(火星軟着陸)
1977/9/5	アメリカ	ボイジャー1号(外惑星グランドツアー、打ち上げ)
1985/1/8	日本	さきがけ(ハレー彗星フライバイ、打ち上げ)
1985/8/19	日本	すいせい(ハレー彗星フライバイ、打ち上げ)
1990/1/24	日本	ひてん(月周回工学実証機、打ち上げ)
1990/10/6	米欧	ユリシーズ(世界初の太陽極域探査)
1995/12/7	アメリカ	ガリレオ(世界初の木星周回軌道投入成功)
1996/2/17	アメリカ	NEAR(小惑星Erosランデブー)
1998/7/4	日本	のぞみ(火星探査)
2004/6/30	アメリカ	カッシーニ(世界初の土星周回軌道投入成功)
2004/7/4	アメリカ	マーズパスファインダー(火星ローバー着陸成功)
2006/1/15	アメリカ	スターダスト(ヴィルド第2彗星、世界初の彗星サンプルリターン成功)
2007/9/14	日本	かぐや(月周回探査機)
2010/5/21	日本	あかつき(金星探査機打ち上げ)
2010/6/9	日本	イカロス(世界初のソーラーセイル航行実証成功)
2010/6/13	日本	はやぶさ(小惑星イトカワ、世界初の小惑星サンプルリターン成功)

私のバックグラウンド(宇宙開発に対する私の実感)



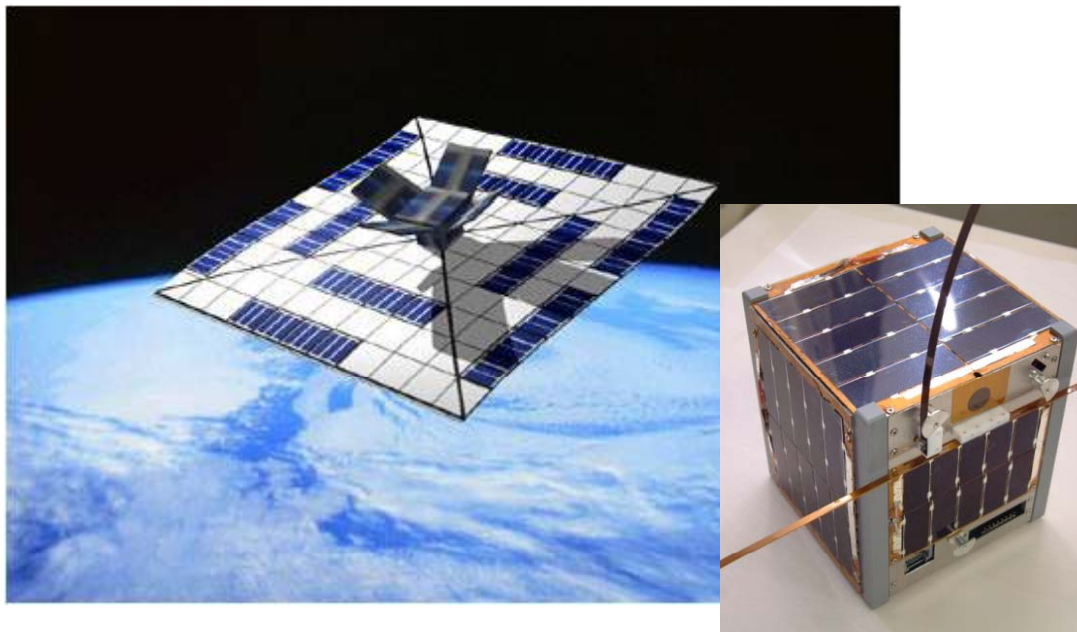
津田, 中須賀, 青木, 長島, 1999 宇宙輸送シンポジウム

1998年 直径200mの薄膜電池を遠心力展張する
冥王星探査機の研究. 提案のみで終わる.

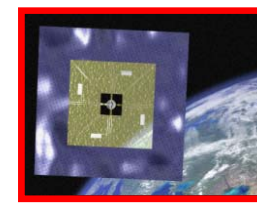
デスパンププラットフォーム＋大面積膜

1999年 CubeSatスケールで遠心力展開する薄膜電池実験を提案. 結局, 膜なしの小型衛星が出来上がる.

2003年 ソーラーセイルWGにて「ソーラー電力セイル技術」の一環として, 遠心力展開セイルの研究を始める.



S310実験

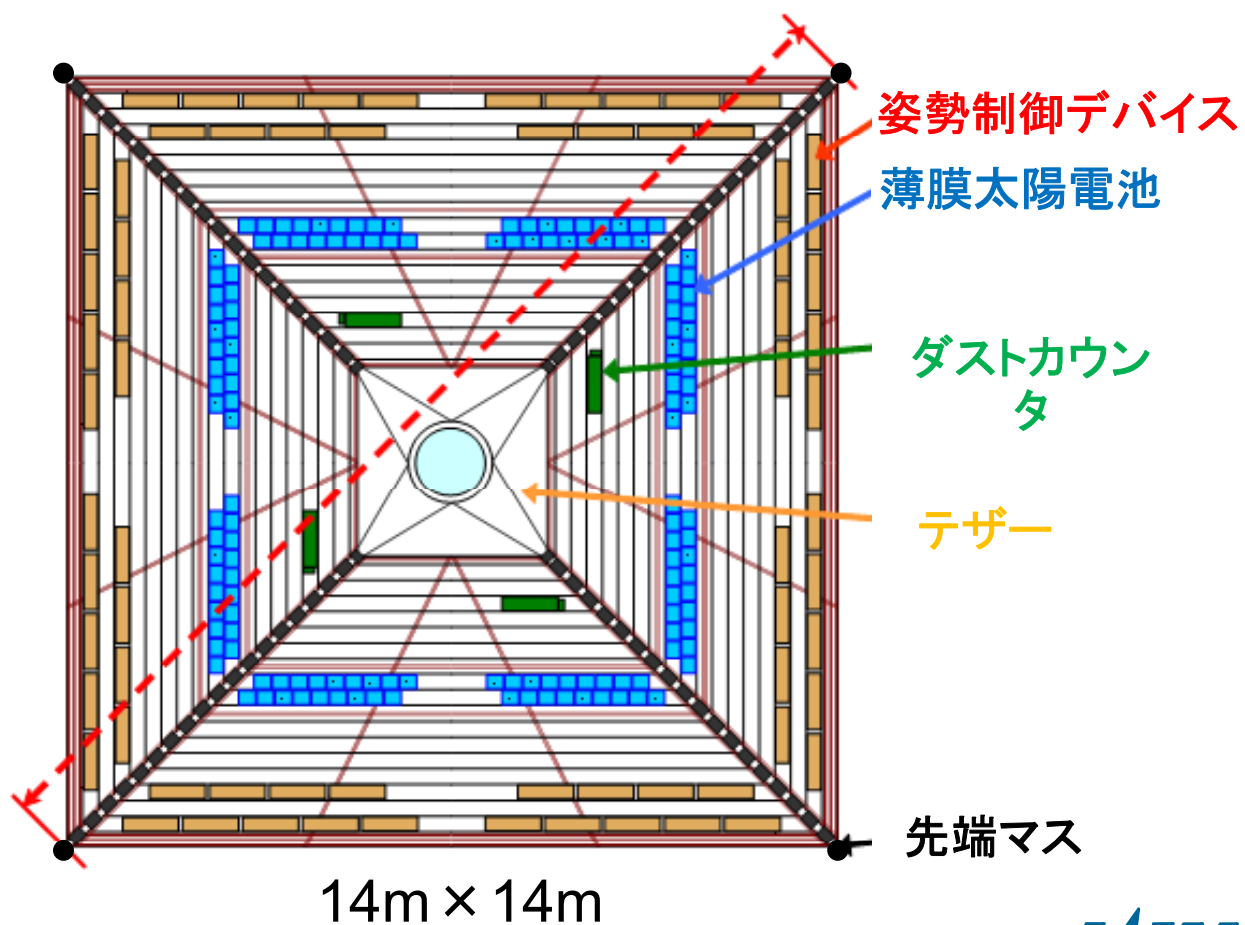
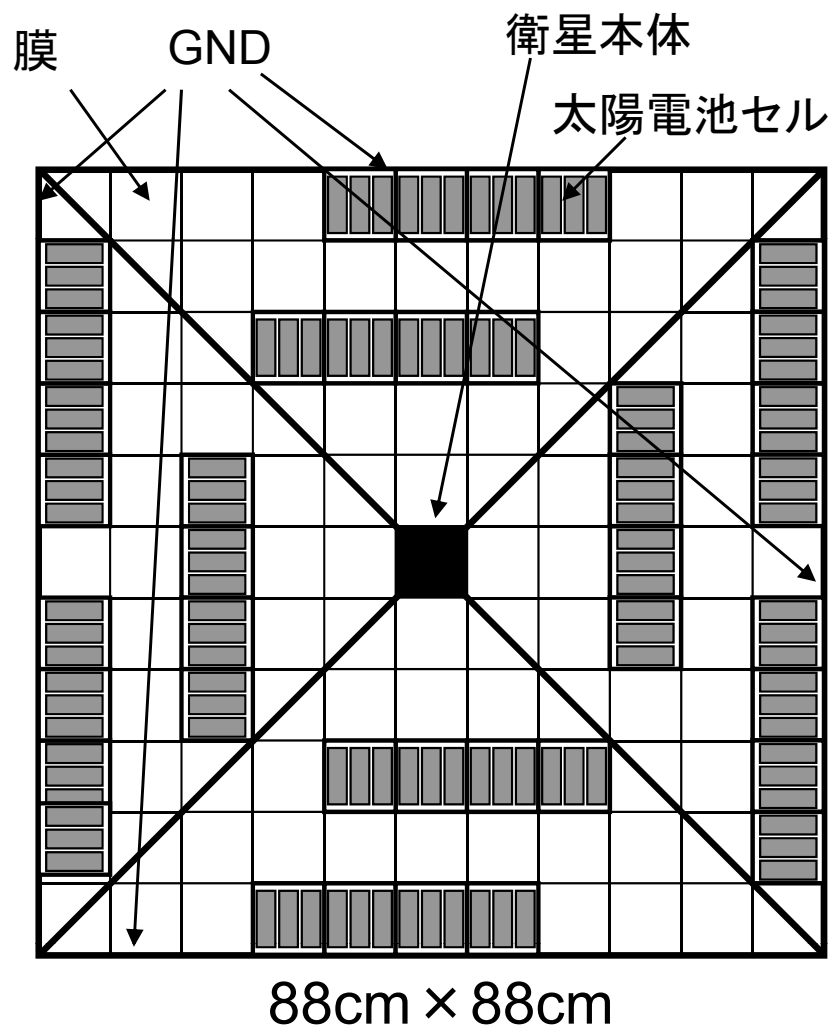
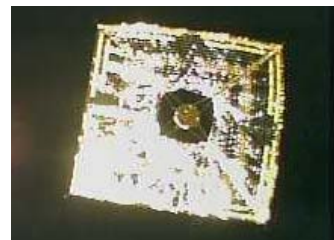
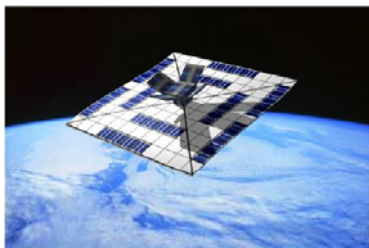


M-Vサブペイロード実験



気球実験

構想から、実現まで10年. 宇宙開発とはそういう世界ということか？



太陽系探査の将来を考えるにあたって

- ミッションの構想は、思いっきり前を見なければいけない。
 - 他国が試そうとも思わないことを創出し、実行しなければならない。
 - 不屈の精神で、こつこつと、しっかりとしたゴールを見据えて、技術開発をしていかなければならない。
- 
- ミッションの構想は、ロードマップに沿って着々と。
 - 他国に先んじて新しい技術を開発し、ミッションにつなげる。
 - 短期間に集中投資をして、ミッションを達成する技術開発をする。

たぶん、それは技術者・研究者として正しい姿勢でしょう。しかし、5～10年に1回のミッションで、私たち技術者・研究者が身につけたい(身につけるべき)技術と、太陽系探査の意義を両立し続けられるでしょうか？

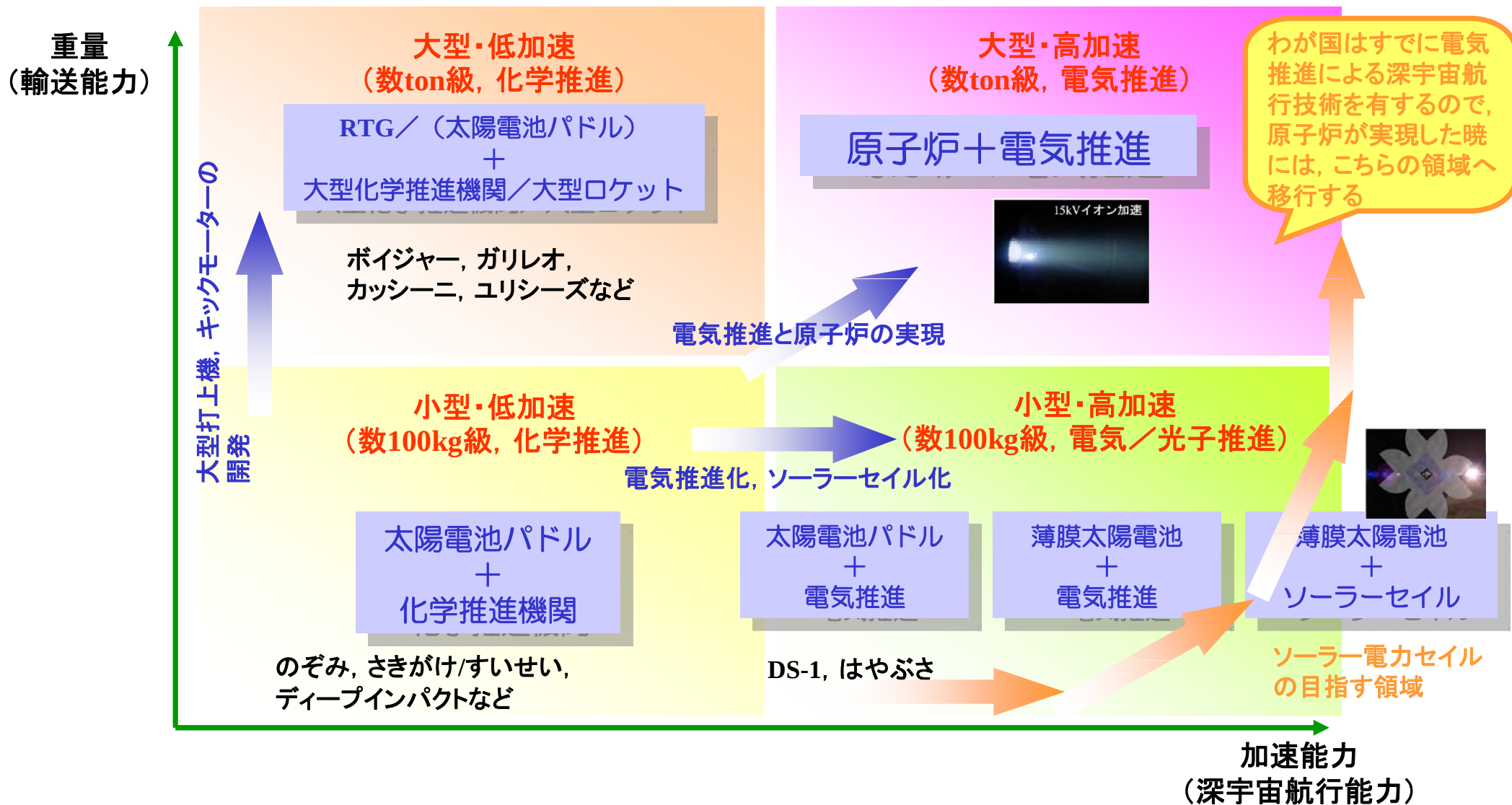
研究者としては、『百考は一験にしかず』と思うのです。

- 日本の惑星探査の歴史は、はやぶさの成果は、イカロスの成果は、1955年依頼脈々と続いてきた、我が国の宇宙開発黎明期を支えた諸先生方、国内関連メーカーの技術者、JAXAのシニアの方々の積み重ねてきたものの上に成り立っています。
- 技術は、紙の上に残すものではなく、人から人へ受け継いでいくものです。一度失われた技術を取り戻すのは、容易なことではありません。
- 惑星探査は、ひとつの分野です。地球周回の人工衛星が作れば惑星探査もできるというものではありません。
- ゆめゆめ今の周辺環境が厳しいから、などという理由で、惑星探査を中断してはいけません。減速もしてほしくないものです。

IKAROSの意義

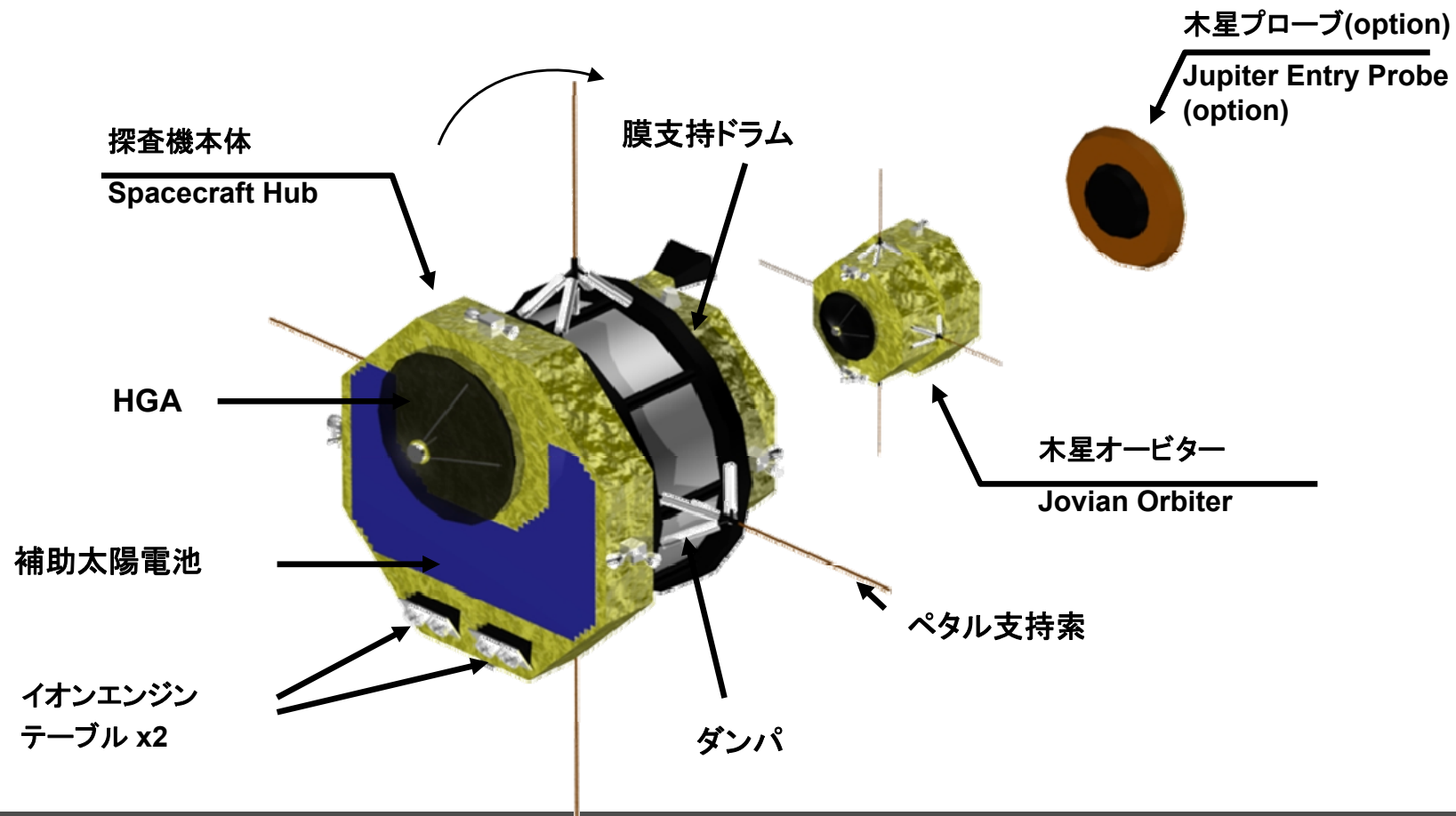
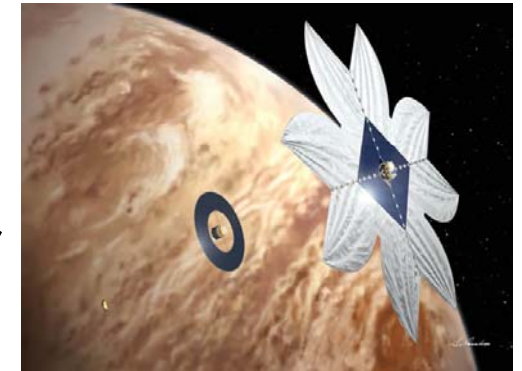
- ・日欧米露が開発にしのぎを削っていたソーラーセイル技術を，深宇宙探査機への適用という最も望ましい方法で，日本が世界で初めて実現した.
- ・ソーラー電力セイル技術の獲得は，日本が乗り出したくても乗り出せなかった，本格的な外惑星探査を検討できる礎を与えるものである.
- ・外惑星探査に必要な，「高効率推進機関」と「大電力確保」という2大技術のうち，「大電力確保」につながる技術を実現した. ちなみに「高効率推進機関」は，はやぶさが実証している.
- ・惑星探査技術の時代認識としては，宇宙大航海時代をIKAROSが拓いたと言えるが，20年後には，真の動力航海時代がくるであろう. そこでは，原子炉が電力源として使われているはずである.

ソーラー電力セイル技術の位置づけ



中型ソーラー電力セイル探査機

- 薄膜太陽電池展開の、ステータ／ロータ2重筒型スピン型探査機.
- セイル直径は、約50m. 目的天体は、木星およびトロヤ群小惑星.
- セイル膜で光圧を受け、ステータ部搭載の高比推力イオンエンジンを併用するハイブリッドセイル.



10年後のために、いまやっているアクション

中型計画の技術実証項目

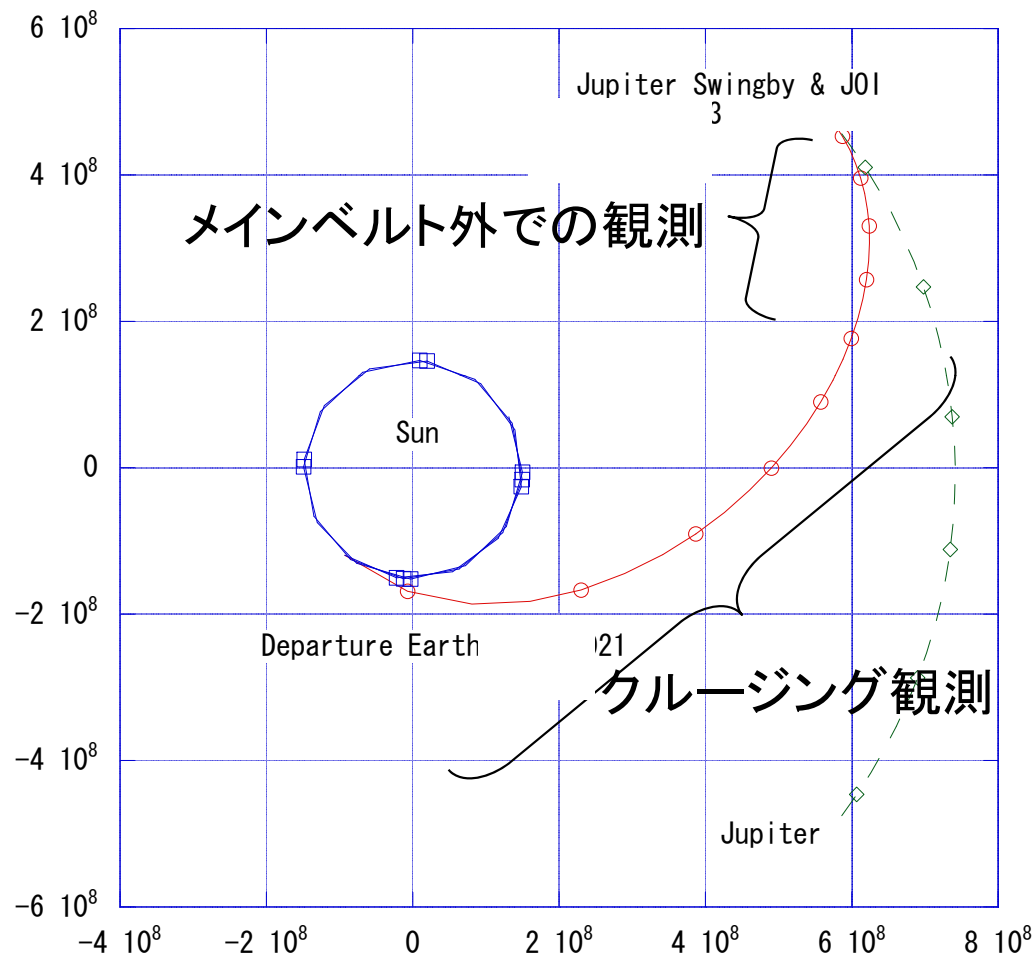
大型膜構造物の展開・展張	➡	IKAROSで実施したものを拡張.	セイル・リエントリ・柔軟構造物
薄膜太陽電池システム	➡	IKAROSで実証したものを高効率化.	電源一般・有人基地技術
低推力推進系による軌道操作	➡	電気推進と光圧推進のハイブリッド航行.	誘導航法技術
高比推力イオンエンジン	➡	はやぶさの10倍の効率の推進機関の実現.	宇宙推進一般
耐高放射線環境機器	➡	木星環境に耐える技術.	宇宙環境
低温2液推進機関	➡	木星距離での電力削減	宇宙推進・宇宙システム一般
燃料電池統合型推進系	➡	木星距離でピーク電力を確保する方策	電源一般・有人基地技術
惑星間フォーメーションフライト	➡	高度な誘導航法技術の獲得	誘導航法技術
超高速減速技術	➡	高速大気突入技術	リエントリ一般
USO・ΔVLBI軌道決定・航法	➡	遠距離高精度軌道決定技術	深宇宙航行技術
Ka通信系／膜面上Phased Array	➡	遠距離高速通信技術	宇宙通信一般

- 冒険型の探査から利用型の探査へ
 - 「一番乗り」の時代は(ほぼ)終わった.
 - 社会とより強い結びつきを持つミッションが, 大規模に行われるであろう.
ex 資源探査・分析, 天体上無人恒久基地, 惑星間往復航路, 有人アウトポスト(小惑星・月・火星)
- 先端技術実証
 - 人類のフロンティアの開拓. この意義は決して小さく見てはいけない.
 - 内向きに語られるとき, それは日本人のアイデンティティ, 国家・国民の誇り・礎
 - 外向きに語られるとき, 安全保障, 外交優位性
 - もっと大きな目で見ると, それは人類の美しい, 伸ばすべき本性

いろんなこと, できます

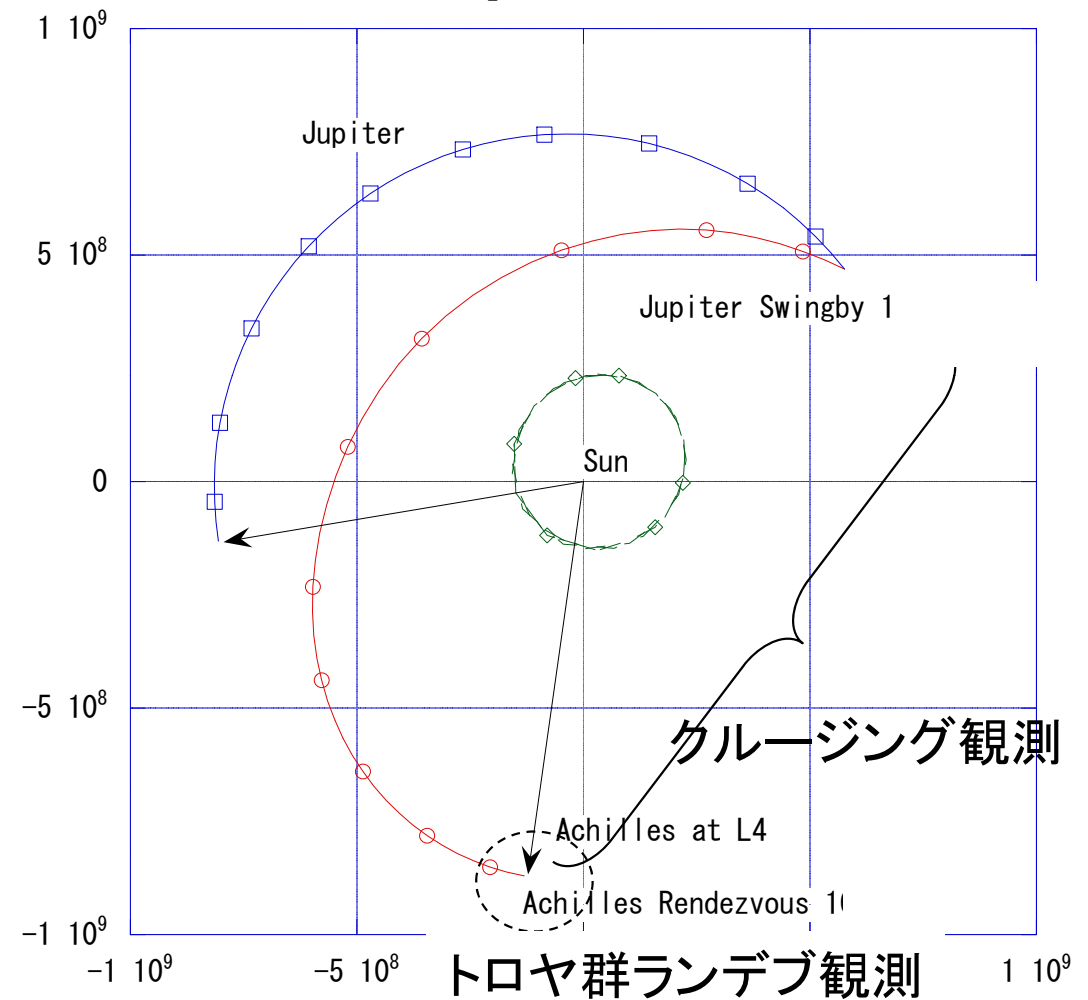
EDVEGAによる木星／トロヤ群到達

Earth to Jupiter



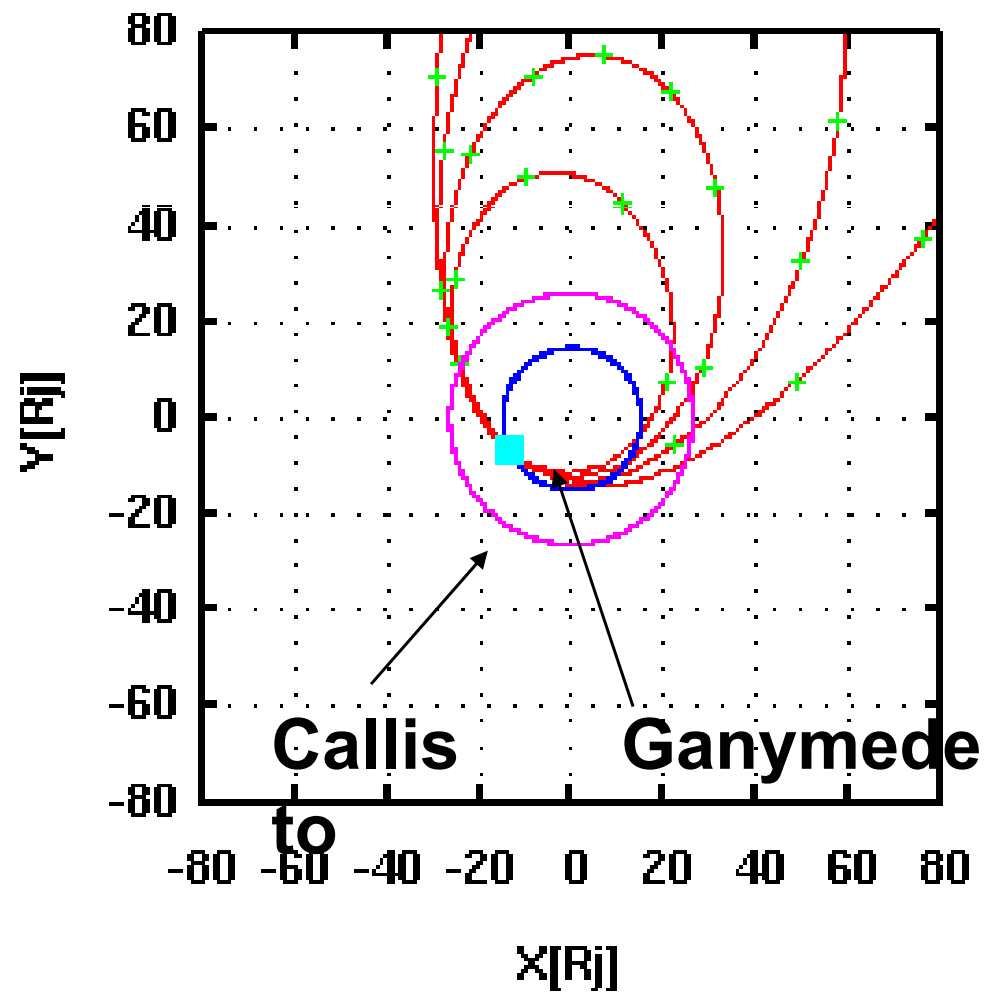
Launch→Single EDVEGA→Jupiter Swingby

Jupiter to Achilles



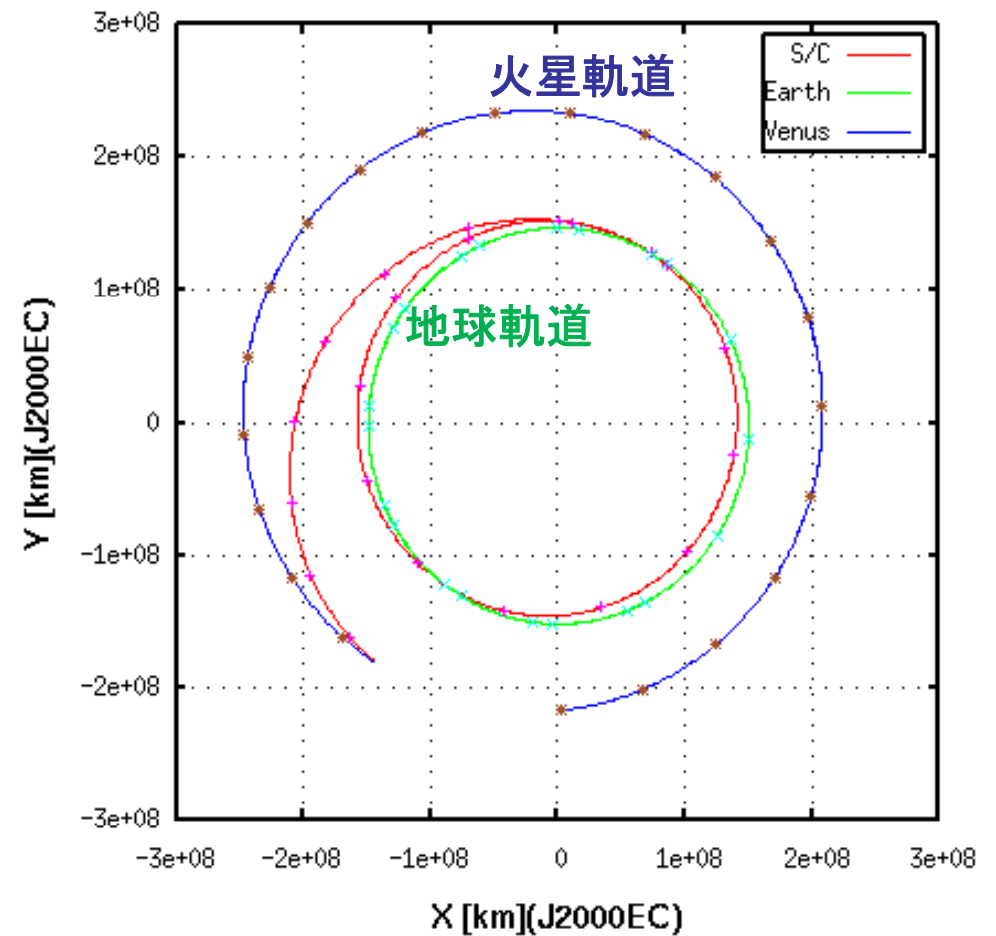
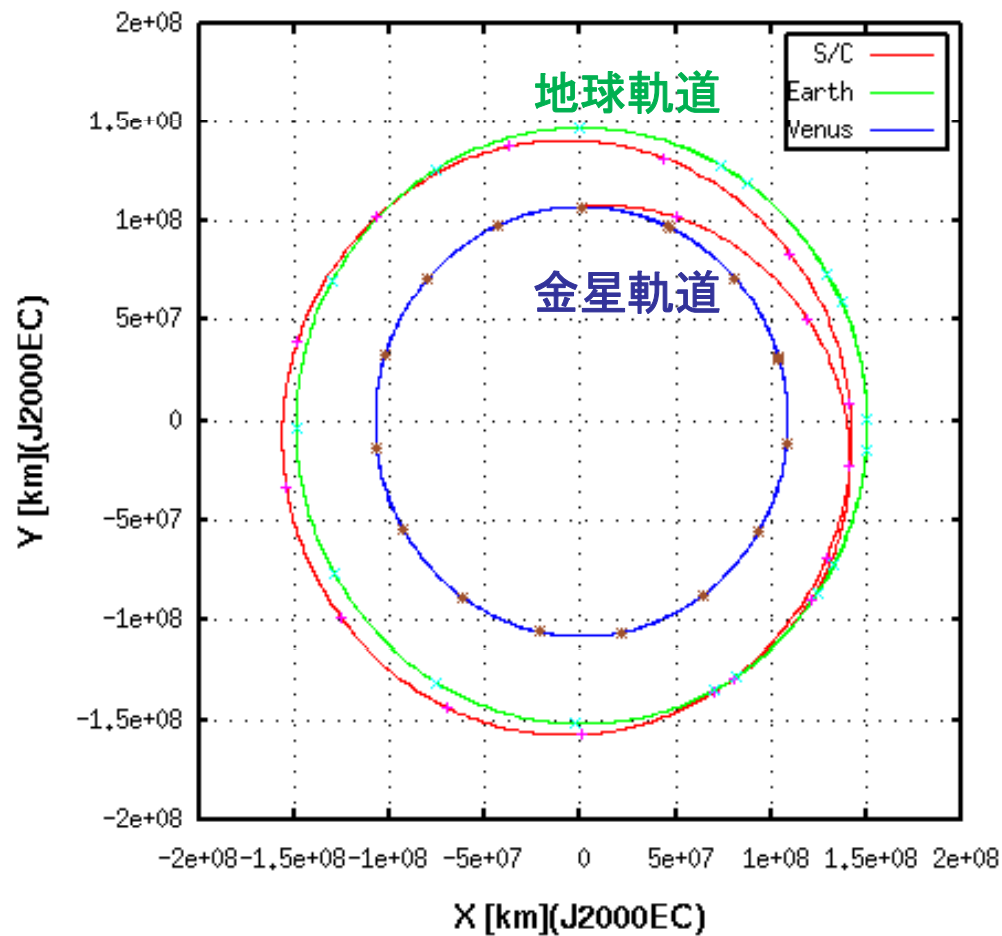
Jupiter→Trojan asteroid rendezvous

木星オービタによる木星衛星ツアー



木星衛星フライバイツアー計画例

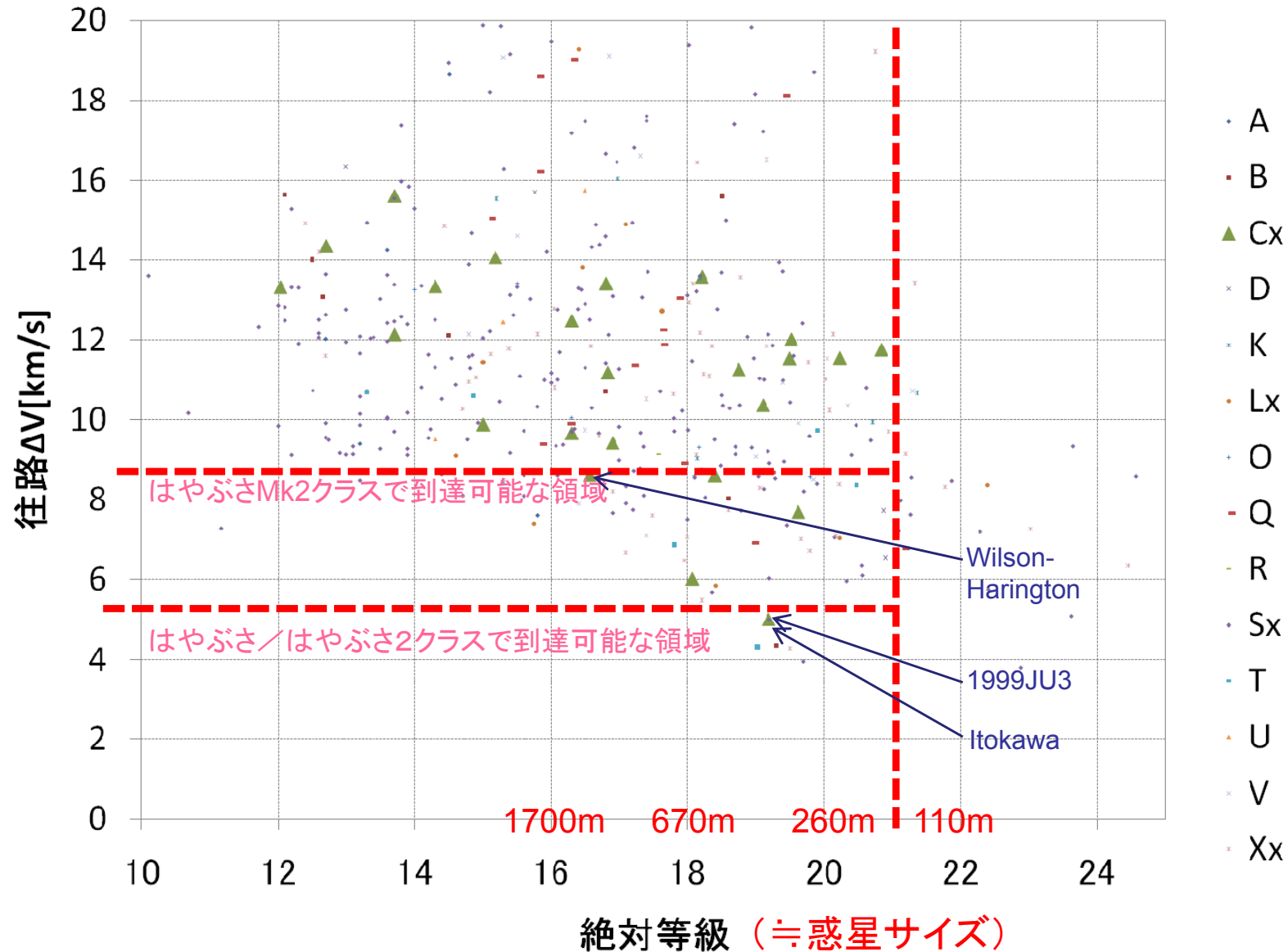
次期固体ロケットクラスでの金星／火星探査



200kgクラスの探査機ならば、火星・金星へ投入可能。

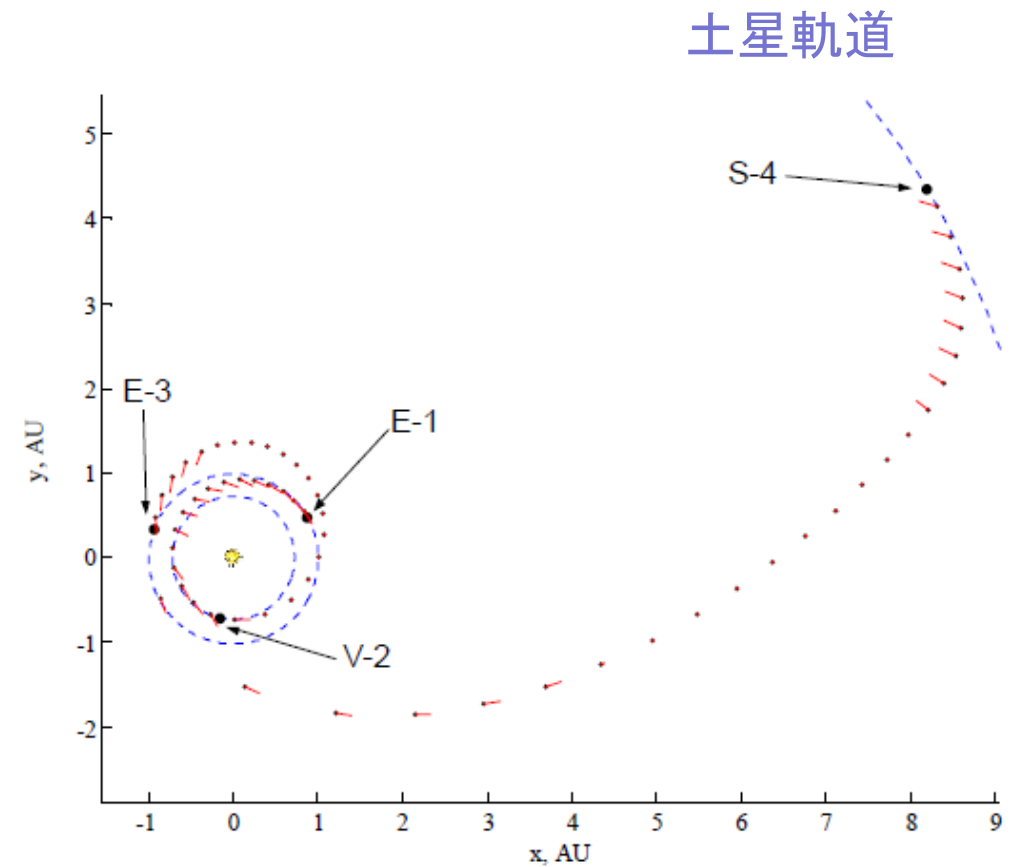
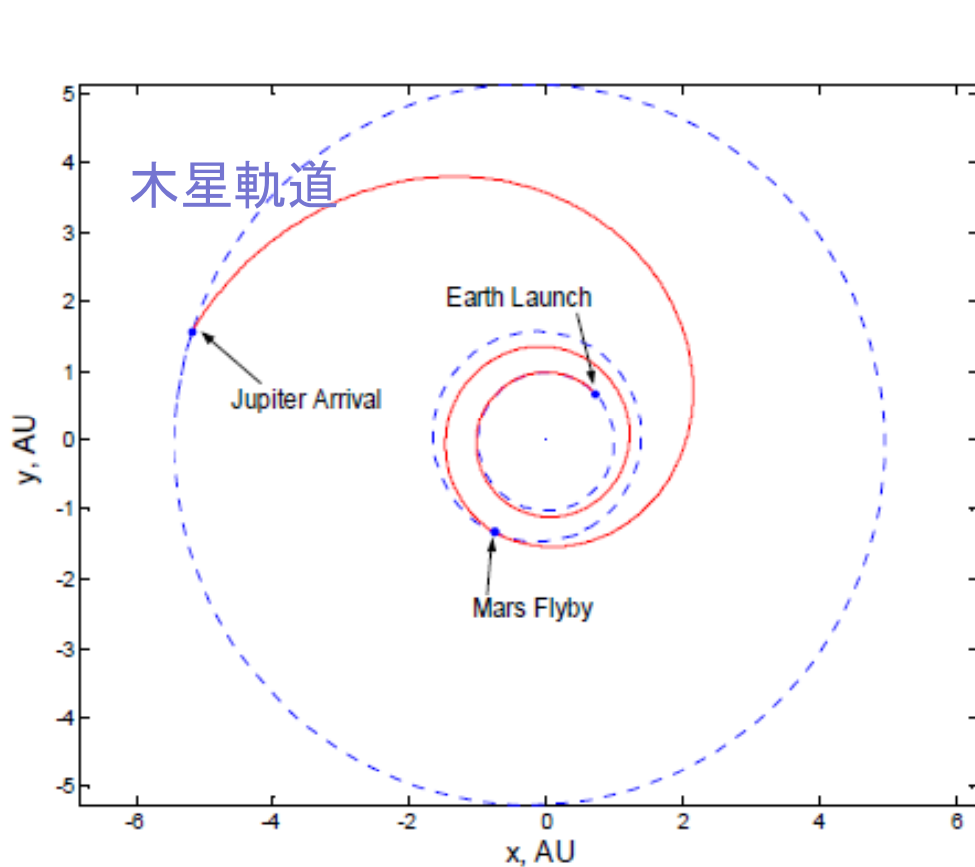
小惑星／彗星探査

弾道飛行の場合のランデブーミッションに必要な ΔV , スペクトルが既知のNEOのみ抽出



小惑星は、新しい科学成果の宝庫. 未来は、資源の宝庫.

原子炉時代の軌道設計



C.H. Yang, et.al., 2004

木星以遠は、原子炉が必要な必然性がある。電力／重量比の問題。
高比推力・定常電力での飛行は、これまでの電気推進の飛び方とは違う。
地球再会合(スイングバイ)を使わない木星・土星探査も可能。

H2A打ち上げ能力

ロケット構成と探査機Wet質量の関係

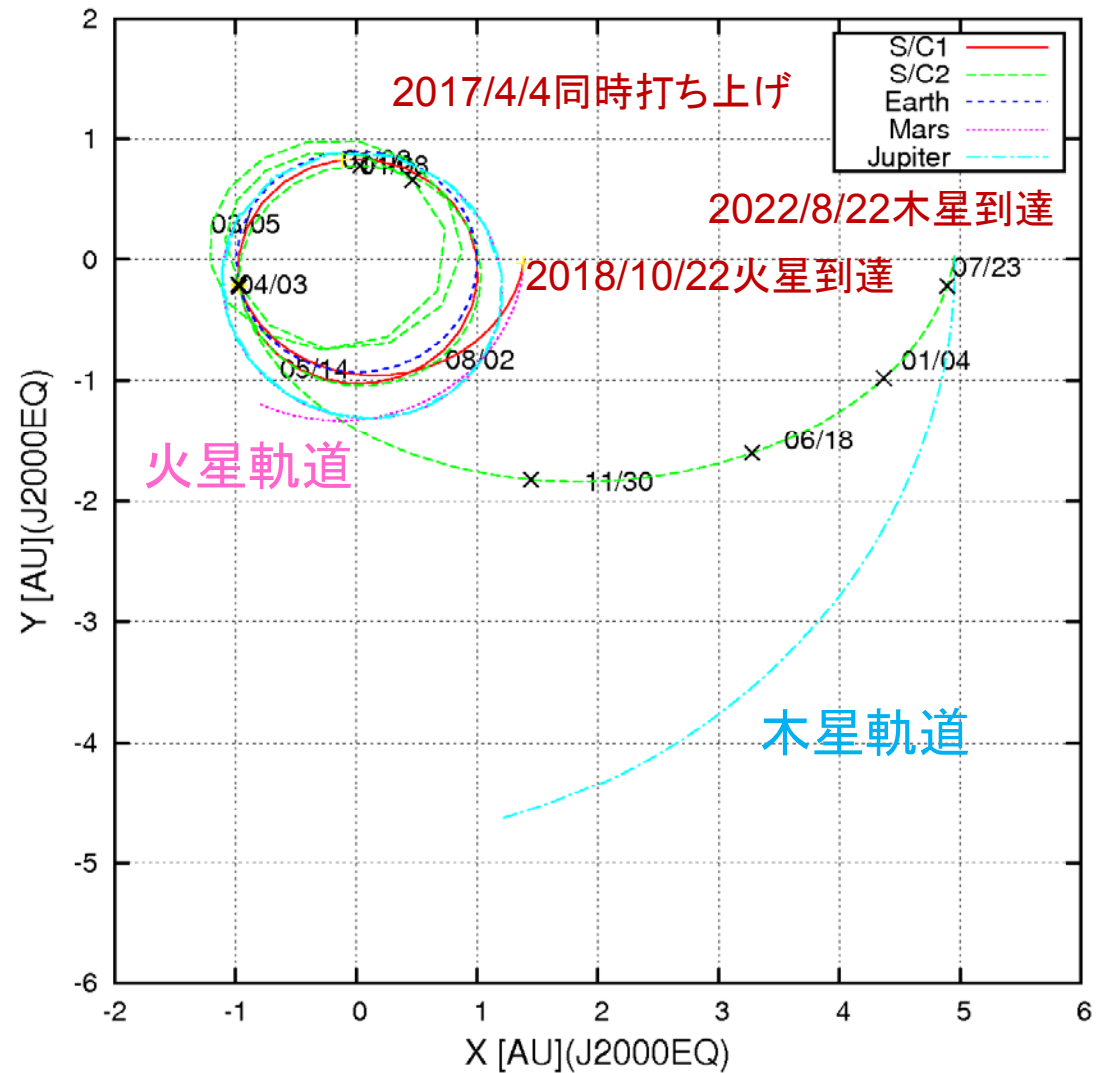
打上方式	ダイレクト(KMなし)		GTO+KM	
使用機体	H2A202-4S	H2A204-4S	H2A202-4S	H2A204-4S
脱出C3	10km ² /s ²			
2段投入軌道	地球脱出		GTO(250km × 36226km)	
2段投入能力	2000kg	3000kg	4100kg	6000kg
KM重量	---	9720kg	1460kg	2140kg
探査機初期重量	2000kg	2630kg	2510kg	3860kg

KM(キックモーター)は、固体モーター、 $I_{sp}=320\text{sec}$, $\beta=0.1$ を仮定

H2Aロケットを世界トップクラスの惑星探査を行える能力を有しています。

Single Launch to Multi-Planets

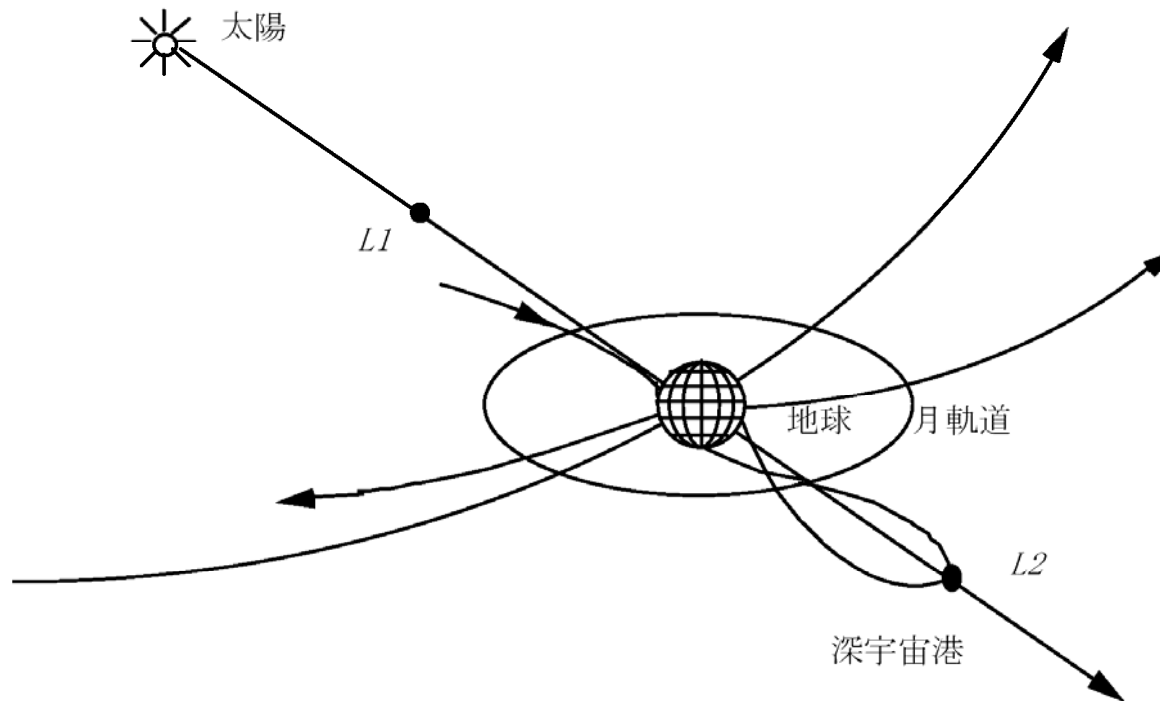
高性能電気推進とH2Aを組み
合わせれば, 1機のH2Aで
火星+木星同時打ち
金星+木星同時打ち
も可能です.
弾道飛行だけで
火星+金星同時打ち
は可能です.



大型惑星間輸送システムの運行～深宇宙港～

遠い先を見据える. 先人の偉業を受け継ぐ.

ラグランジュ点と深宇宙港。地球周辺の宇宙輸送航路。



- ・ 航路 E-L2 : 地球周辺の宇宙ステーションから、深宇宙港へ。
- ・ 航路 M-L2 : 月面基地から、深宇宙港へ。
- ・ 航路 L2-J : 深宇宙港から、惑星間へ。

- 米国はMSLのあとは、火星サンプルリターン構想.
- 月有人はなくなったものの、有人活動が次の30年間も低軌道にとどまり続けることはなかろう.
- 新しい視点:
exploration : 有人NEOミッション, 有人火星ミッション
national security, situational awareness, etc...
- いずれにせよ, science driven, technology drivenの区別のない宇宙探査の波が, 深宇宙へも広がる
- キーワード:
インフラとしての深宇宙システム, プログラマティックな資源探査
- 資源探査:「ある意味のある量, NEOからサンプルを持ち帰る」
有人支援:「人間の活動を支援するための惑星／衛星上システム」
未踏峰技術:「外惑星・衛星ランダー, 他恒星探査」

- 大型ロケットで、深宇宙探査がばんばんできる。そんな世の中ではないであろう。
- 宇宙開発は、細い糸である。すぐ途切れ得るし、一度途切れたら最初から作り直し。絶やしてはいけない。支え続けなければいけない。止めたり、再開したり、できるものではない。
- 新しい技術、新しい可能性は常に探らねばならない。
 - 従来のサブシステム区分に拘らない“技術を見る目”。
 - 原子炉は？軌道エレベーターは？etc
- ひとたび獲得した技術は大切にしなければならない。
 - ソーラー電力セイル技術、どう育てていくか？
 - 月探査技術、リエントリ技術、サンプルリターン技術、...

- 世界情勢をみるのは、世界の動向から外れないためではなく、ましてや宇宙先進国へ追随するためではない。
 - 宇宙探査の教科書を一冊書く力はない。でも教科書の一章を書く力は持つべきである。
 - 王道を進むのではなく、王道を作ることが重要である。
- 楽しく、わくわくしながら、みんなで、太陽系探査をしたいものです。

ありがとうございました

Mission Definition

The definition of the IKAROS mission is summarized as follows;

(1) Deployment of Large Membrane Sail 展開技術 *Minimum Success Criteria*

Done!

- Deployment and Expansion of a Large Membrane in space
- Using similar mechanical device and procedures to those in the Jupiter mission
- Obtaining a number of data indicating the expansion status of the membrane

(2) Power Generation by Thin Film Solar Cells 薄膜太陽電池技術

Done!

- Demonstrating Solar Power from Thin Film Solar Cells
- Evaluating performance of thin film solar cells on the membrane in space

(3) Demonstration of Photon Propulsion 太陽光圧加速 *Full Success Criteria*

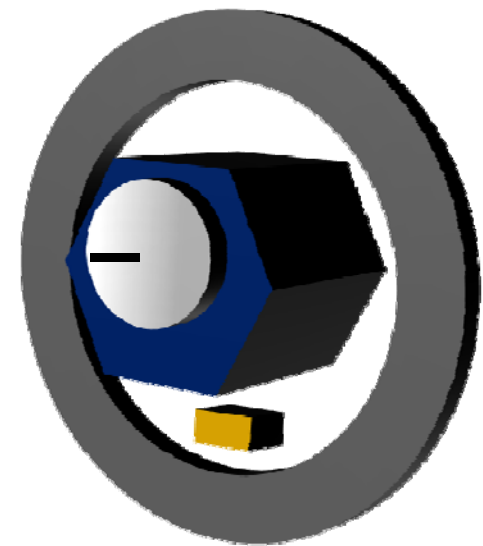
Done!

- Verification of Reflectance as well as Comparison with Diffuse & Specular Property
- Measurement of overall Reflectance with the rigorous relation examination of the temperature and surface status

(4) Demonstration of GNC for Interplanetary Solar Sailing ソーラーセイリング

Done!

- Navigation / Orbit Determination under continuous and small acceleration
- Acceleration Direction Control via Steering via appropriate attitude control means



- フライバイ
- オービター
- ランダー
- サンプルリターン

手段は, ある

- 次期固体での火星探査

- ロケット
H2A 第3段足すと、何ができる？という表
次期固体でもいける
- 電源
- Ka/VLBI, Phased Array
- 化学推進系, 電気推進系
- 熱

これらは、30年後にはじめる技術ではない。10年後に実現すべき技術である。