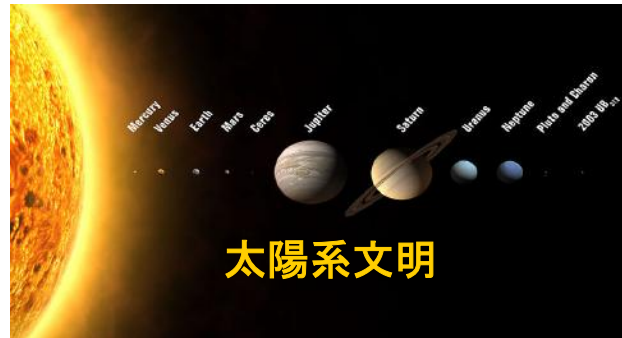
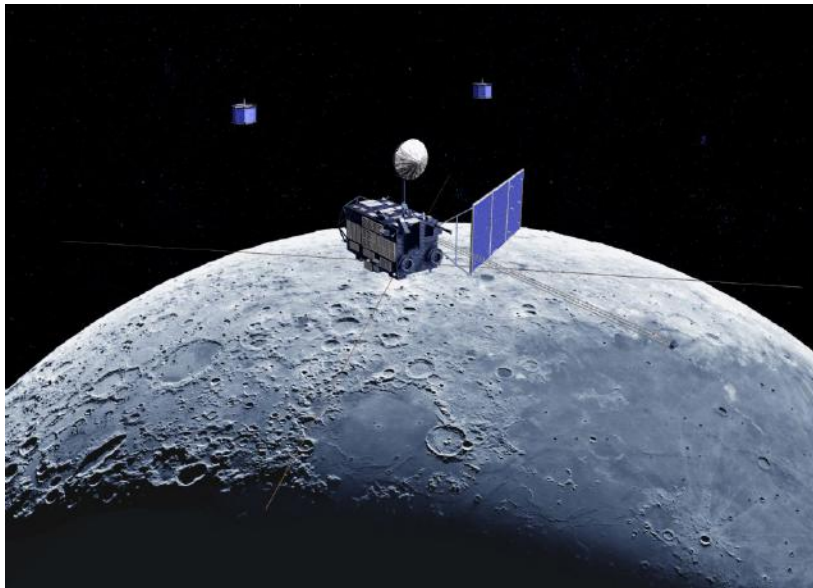


人類社会持続的発展への道ー地球文明から太陽系文明へ (地球閉鎖空間から宇宙空間への展開)

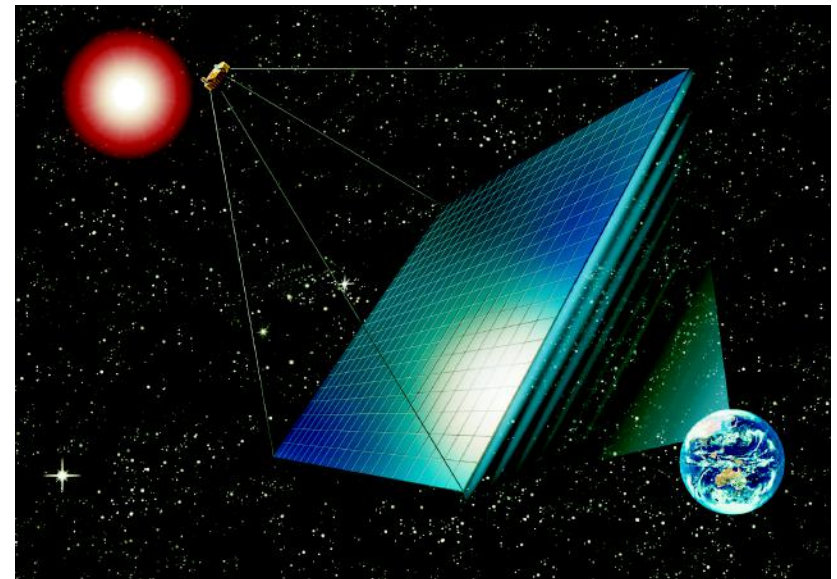


2010年8月

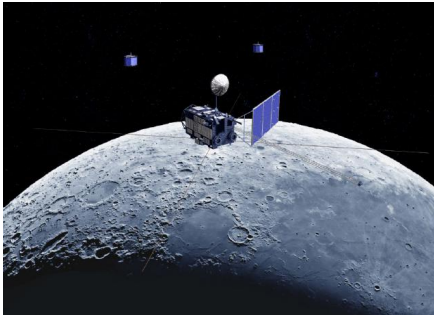
知の探求
月探査計画”かぐや”



地球環境問題解決への挑戦
宇宙太陽発電所

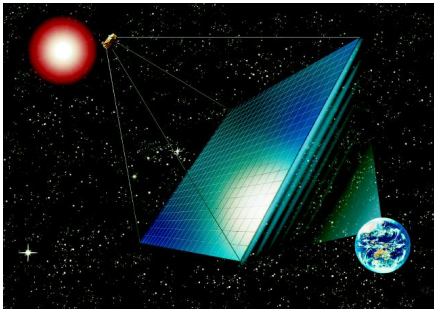


知の広場・・・人と学問・・・



(前半)今年9月に打ち上げられ、月探査を開始した科学探査機”KAGUYA”

KAGUYAとはどのような計画か？
何が搭載されているのか？
何が分かるのか？
どういう意義があるのか？



(後半)まだプロジェクトしてスタートしていないが地球環境・エネルギー問題解決の切り札とされる”宇宙太陽発電所”

宇宙太陽発電所とは何か？
エネルギーシステムとして成り立つのか？
技術的に本当にできるのか？

本講演は、“人類社会持続的発展への道—地球文明から太陽系文明へ(地球閉鎖空間から宇宙空間への展開)”という一つの見解(価値観)に基づいています。一方、
知の広場: 見解(価値観)の異なる人々の対話の場、
人と学問: 学問とは真理をめぐる人々の交流、
です。講演後、この見解(価値観)についても聴衆の方々のご意見をいただきたいと思います。

月探査機かぐや(SELENE)の目的

- 月科学

月の起源と進化の解明

- 月利用の可能性の調査

取得データは、将来の月面上活動や月利用のための調査にも使用

- 月探査技術の開発と蓄積

月探査を体系的、継続的に進める上で必要となる基盤技術の開発及びノーハウの蓄積

- 宇宙開発と科学技術への国民の理解増進

ハイビジョンカメラによる「地球の出」等の印象的な映像取得

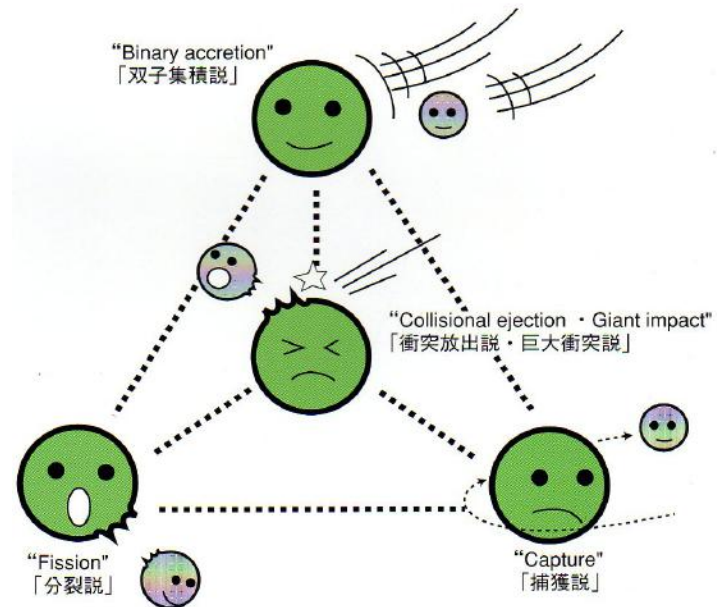
“かぐや”のめざす科学とは？

1. 月の科学(主目的) 月の起源と進化の解明



2. 月での科学 月面環境の解明

3. 月からの科学 太陽地球系プラズマ環境の解明 月面天文台等の候補場所調査



月の起源に関する主なモデル

“かぐや”の月探査史上の位置づけ

(1) 1960年代から70年代の無人探査、有人探査(アポロ計画が代表例)

- ・月周回観測、サンプルリターンなどが行われたが、月へ人を送ることを主目的としたことから、科学的成果は限定的。
- ・月は約45億年前に形成された、表と裏の構造が大きく異なっていることなどを明らかにしたが、「月の起源と進化」については謎として残された。



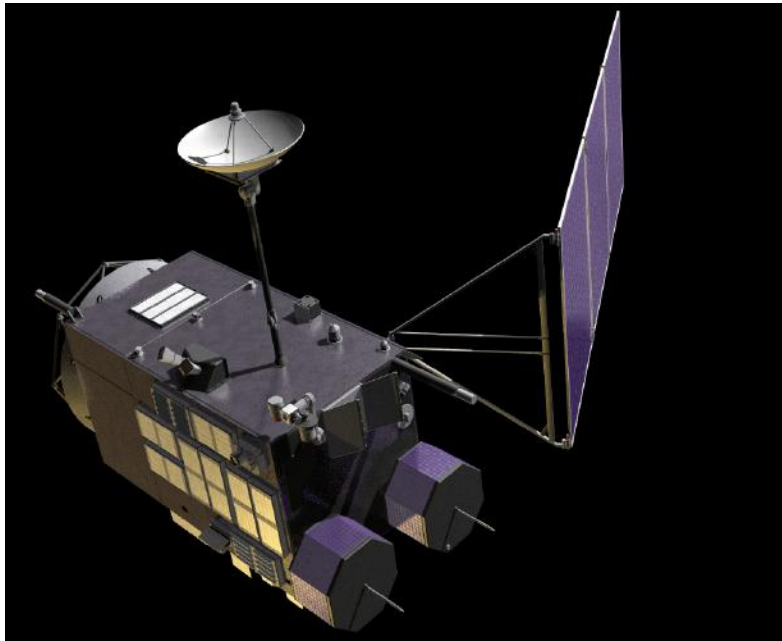
(2) 1990年代以降の無人月周回衛星(1994年のクレメンタイン(米)、1998年のルナ・プロスペクタ(米)、2004～2006年のスマート1(ESA))

- ・大まかな鉱物分布等の全域観測、極域に水氷がある可能性を示すデータを得たが、搭載観測機器の性能、観測軌道の制約のため、科学的成果は限定的。

(3) かぐやによる月周回探査

- ・月の起源と進化の解明のためには、月全域にわたり、元素・鉱物分布、表層構造、重力分布、磁場分布について、高精度なデータが必須であり、セレーネはこれらの全てのデータの取得を目的として開発された。

“かぐや”の性能



月遷移軌道飛行中の機体(想像図)

諸元

(主衛星)

質量: 約2.9ton(打上げ時)
(子衛星約50kg×2機を含む)
構体外形寸法: 約2.1×2.1×4.8m
姿勢制御方式: 3軸安定
発生電力: 約3.5 kW(最大)
ミッション期間: 約1年
観測軌道: 高度100km／傾斜角90度の円軌道

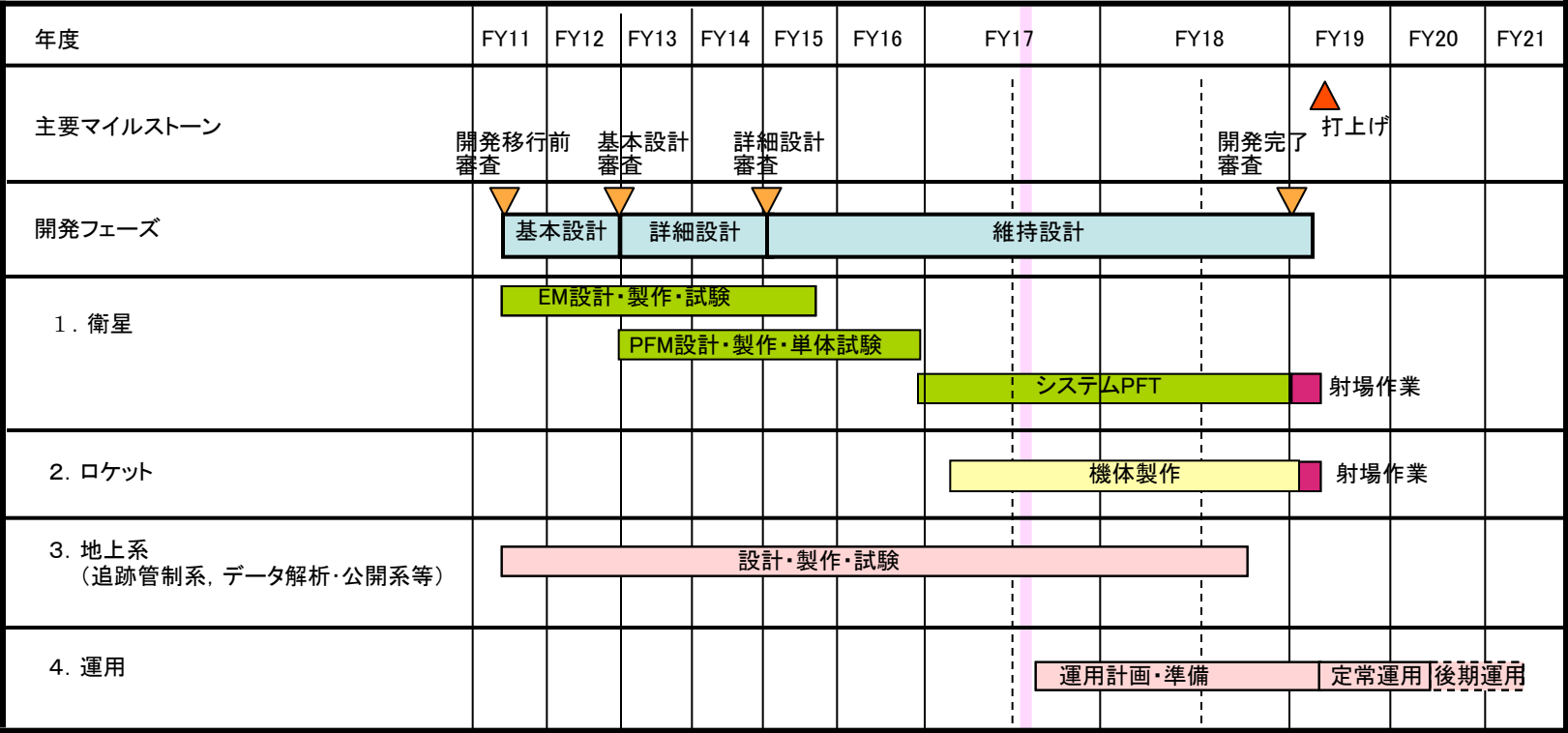
(子衛星)

質量: 約50kg
構体外形寸法: 約0.99×0.99×0.65m (八角柱状)
姿勢制御方式: スピン安定
発生電力: 約70W
ミッション期間: 約1年
観測軌道(分離時):
(リレー衛星): 高度100km×2400kmの楕円軌道
(VRAD衛星): 高度100km× 800kmの楕円軌道

VRAD: VLBI RADio source

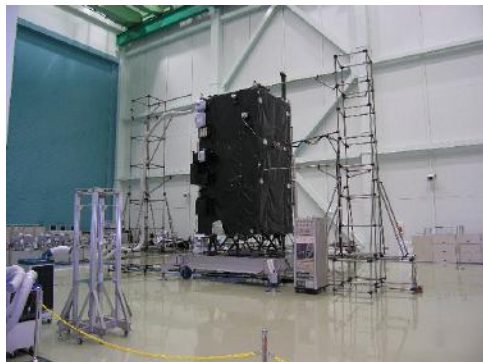
VLBI: Very Long Baseline Interferometry

“かぐや”の開発の歴史

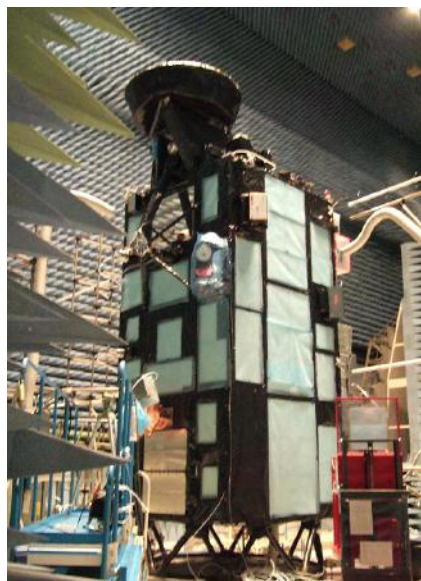


EM: Engineering Model
PFM: Proto Flight Model
PFT: Proto Flight Test

“かぐや”の地上試験と打ち上げ



電気試験



電磁適合性試験

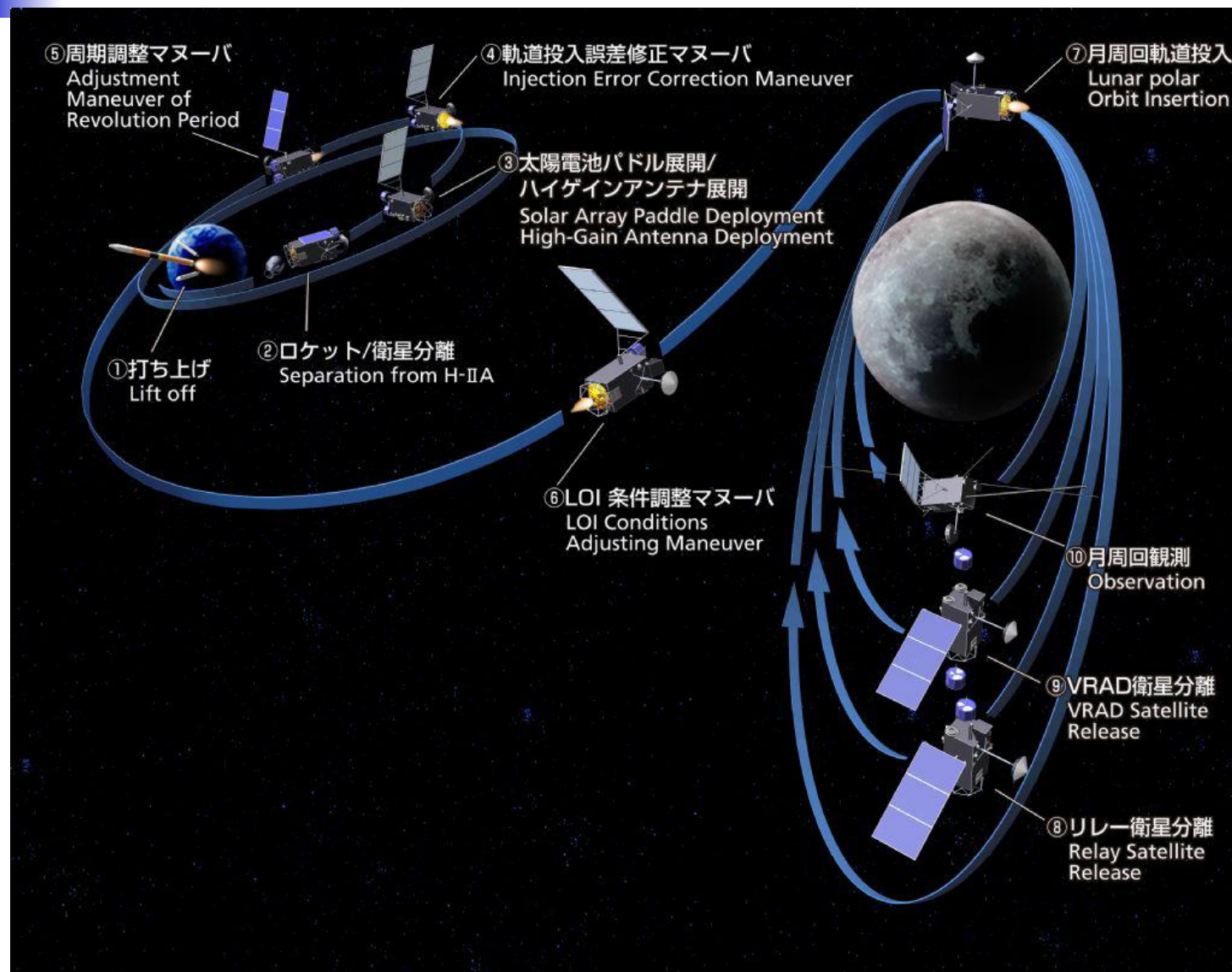


ロケット収納



ロケット打ち上げ

“かぐや”の月軌道投入経過



“かぐや”に搭載されている観測機器

	機器名称	観測項目	観測内容
1	蛍光X線分光計	元素分布	太陽からのX線を受けて月面から放射される二次X線を観測し、月表面のAl, Si, Mg, Fe等の元素分布を調べる。
2	ガンマ線分光計		月面から放射される γ 線を観測し、月表面の放射性元素(U, Th, K等)分布を調べる。
3	マルチバンドイメージャ	地質・ 鉱物分布	月面からの可視近赤外光を複数の波長で観測し、地質を調べる。
4	スペクトルプロファイラ		月面からの可視近赤外光における連続スペクトルを観測し、地質中に含まれる鉱物の組成等を調べる。
5	地形カメラ	地形・ 表層構造	高分解能(10m)カメラ2台のステレオ撮像により、標高を含む地形データを取得する。
6	月レーダサウンダ		月面に電波を発射し、その反射により月の表層構造(地下数km程度)を調べる。
7	レーザ高度計		月面にレーザ光を発射し、その反射時間により、地形の起伏、高度を精密に測定する。
8	磁力計	月面環境	月面および月周辺の磁気分布を観測する。
9	粒子線計測器		月周辺における、宇宙線や太陽から放射される高エネルギー放射線、及び月面から放射される α 線を観測する。
10	プラズマ観測器		月周辺の太陽風の電子とイオン及び月面からの反射電子と二次イオンを測定する。
11	電波科学		衛星のリム通過時に衛星からの電波の位相変化を測定し、希薄な月電離層を検出する。
12	プラズマイメージャ	地球プラズマ環境	月軌道から地球の磁気圏及びプラズマ圏のダイナミクスを画像として観測する。
13	リレー衛星中継器	月の重力分布	主衛星が月裏側を飛行中に地球局との4ウェイドップラ計測を行う。主衛星の軌道擾乱から月裏側の重力場データを取得する。
14	衛星電波源		2機の子衛星に搭載する電波源に対し地球局から相対VLBI観測を行い、両衛星の軌道を精密に計測する。これにより月重力場を精密に観測する。
15	高精細映像取得システム	映像取得	月面上の「地球の出」等のハイビジョン撮影を行う。

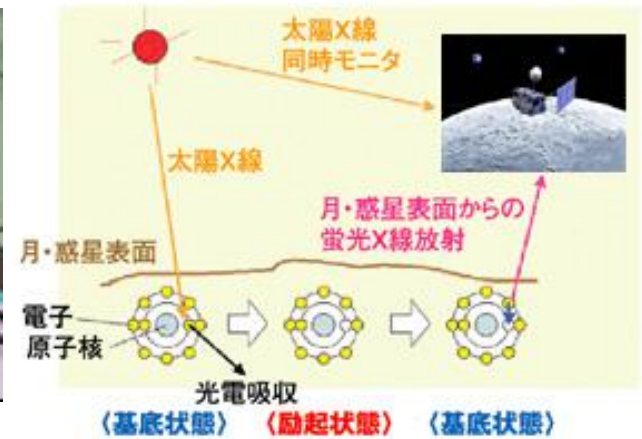
元素分布の観測

蛍光X線分光計

太陽X線によって励起された表層からの蛍光X線を分析
Al, Si, Mg, Fe 等の主要元素を計測
先進的な検出センサーCCDを使用
エネルギーレンジ 0.5-10keV
高い空間分解能 20km x 20km



X線分光計検出器

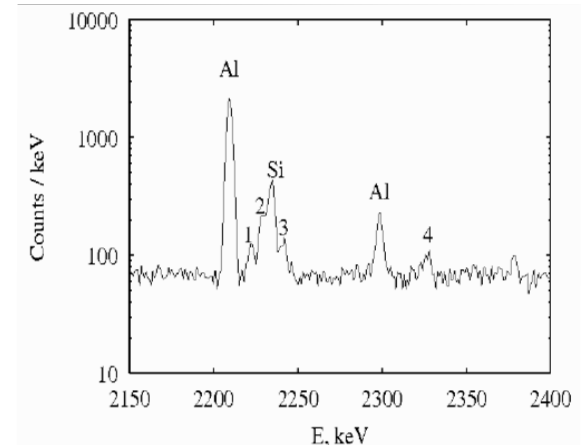


ガンマ線分光計

放射性元素、宇宙線励起のガンマ線を検出
K, U, Th, O, Mg, Al, Si, Ti, Fe, Ca, H
などの元素全般を計測
高純度ゲルマニウム結晶 (250cm³)
を用いた高いエネルギー分解能
(高い元素識別能力)
エネルギーレンジ 100 keV-10MeV
空間分解能 160km



ガンマ線分光計検出器



水素の検出

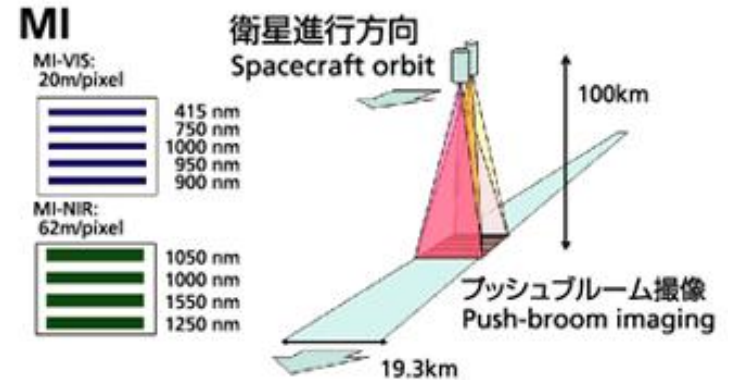
鉱物分布の観測

マルチバンドイメージャ

可視～近赤外 ($0.4 \mu\text{m} \sim 1.6 \mu\text{m}$)

9 枚のフィルタで画像観測(
バンド幅 10–30 nm)

空間分解能 20m

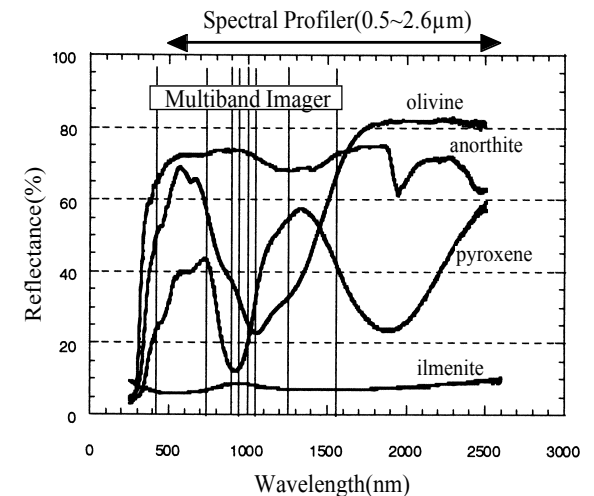
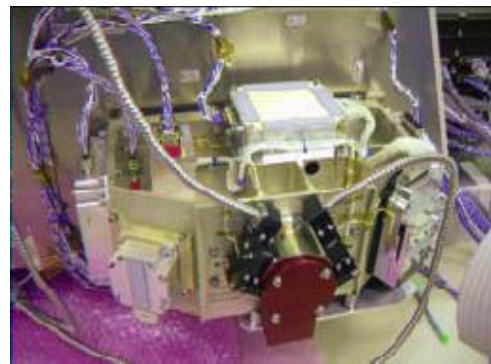


スペクトルプロファイラ

可視～近赤外 ($0.5 \mu\text{m} \sim 2.6 \mu\text{m}$)

連続分光(分解能5nm)

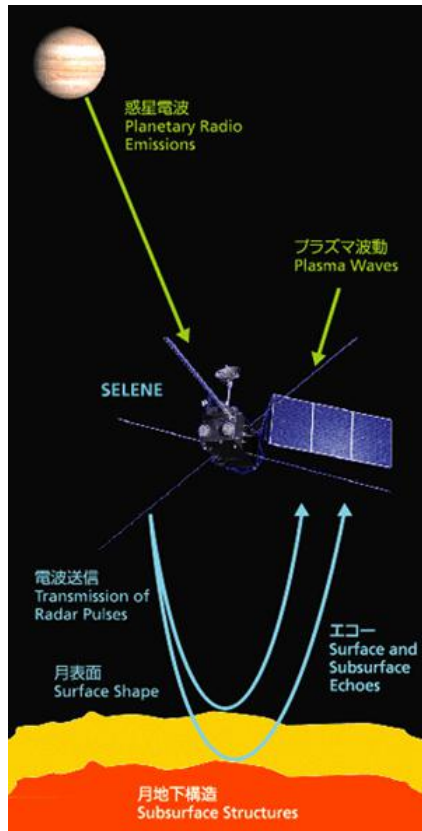
空間分解能 500m



表層構造の観測

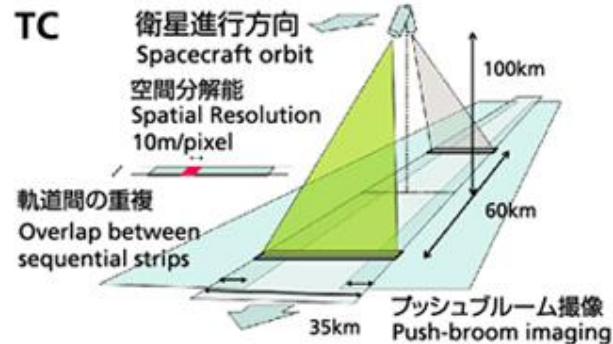
月レーダサウンダー

電波(5 MHz)による地下構造探査
地下5 kmまで分解能100m



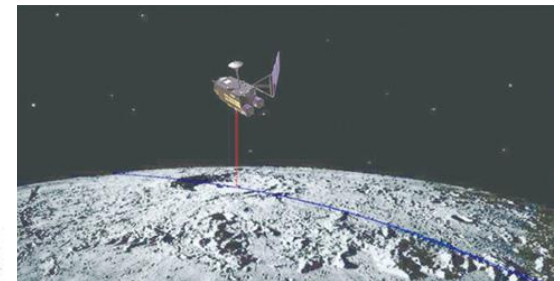
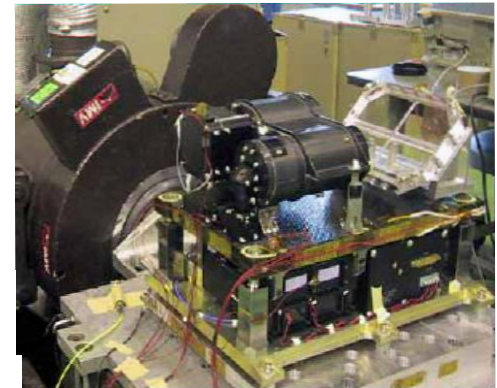
地形カメラ

2台のカメラによるステレオ撮像
空間分解能 10m



レーザ高度計

Nd:YAGレーザー
フットプリント30m
高度分解能 5m,
空間分解能 1600m
(発振 1Hz)



月重力場の観測

リレー衛星中継器

周回衛星の電波をリレー衛星(近月点100km, 遠月点2400km に投入)で地上に中継し4ウェイドップラ観測を行う。

これにより月の裏側の重力分布を計測。

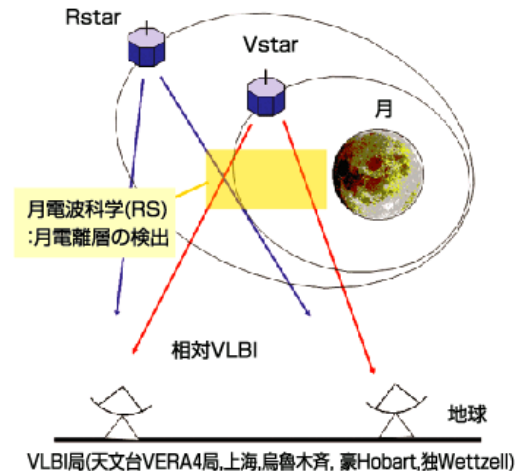
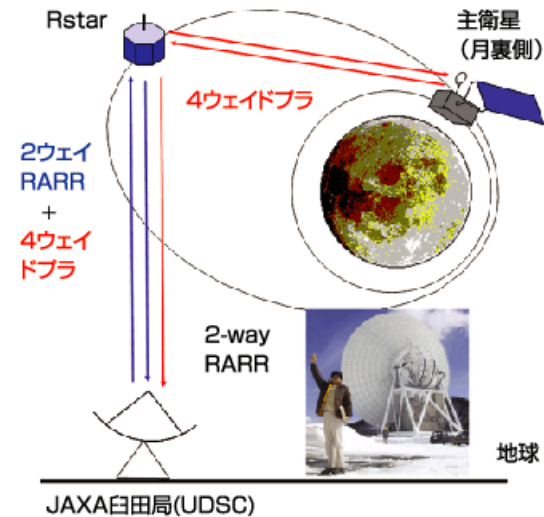
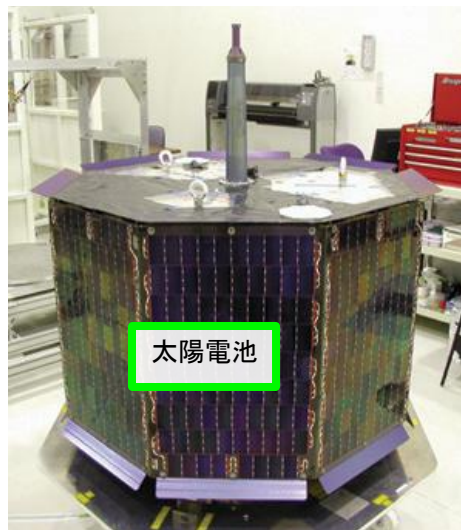
衛星電波源

Sバンド3波、Xバンド1波の電波源をリレー衛星、VRAD衛星(近月点100km, 遠月点800kmに投入)に搭載

地上からのVLBI観測(3局以上)により高精度軌道決定

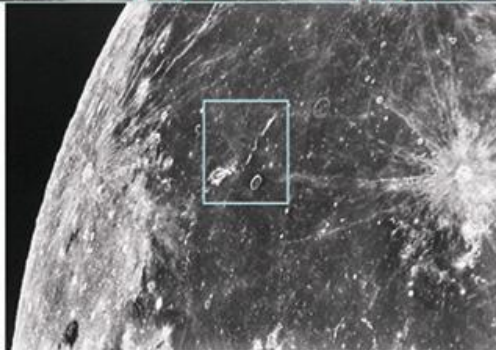
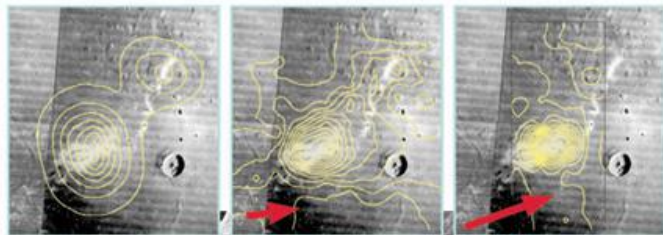
これにより月全体の重力場を高精度で決定

子衛星
(RSTAR,
VSTAR)



磁場観測

微弱な月磁場
何故月に磁場が存在しているのか謎



LO-IV-157-II-112, LO-IV-182-II-112
of Digital Lunar Orbiter Photographic Atlas of the Moon
DV No. N9547C of Consolidated Lunar Atlas

磁力計

3軸リングコア型磁力

精度0.1 nT以上

マスト(長さ 12m)先端に取り付けることにより衛星本体の残留磁場の影響を回避



プラズマ観測器(電子エネルギー分析器)

表面磁場により反射された太陽風電子を計測することにより表面磁場を検出(反射電子法)

計測範囲 5 eV～15 keV



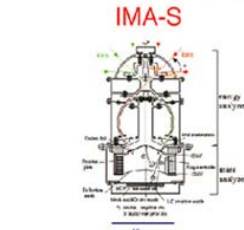
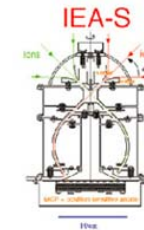
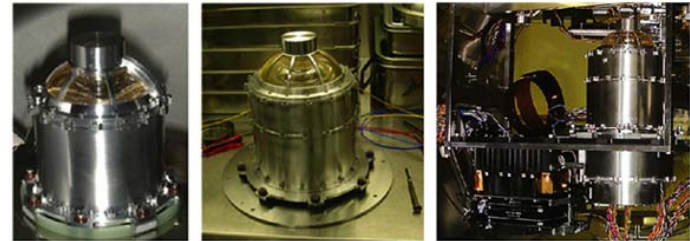
月環境の観測

プラズマ観測器

電子エネルギー分析器 5 eV-15 keV

イオンエネルギー分析器 5 eV/q-28 keV/q

イオン質量分析器 1-60 AMU



粒子線計測器

高エネルギー粒子の観測

電子 30keV~1MeV

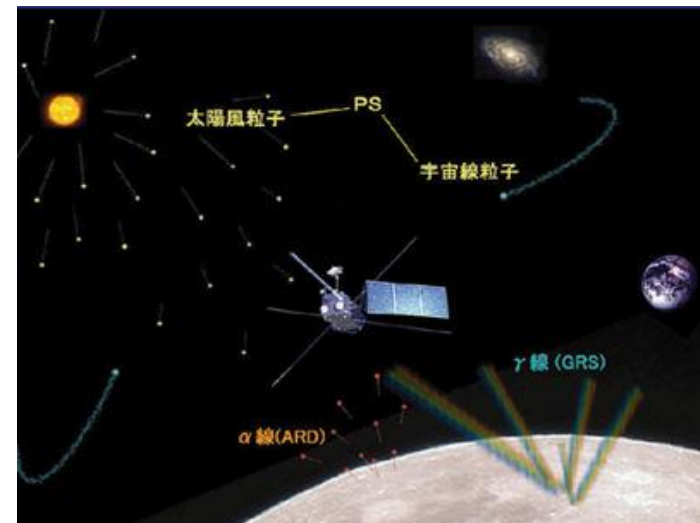
プロトン 100keV~60MeV

He 2.5~30MeV, C, Fe, Kr 最大370MeV

ラドンからの α 線 4-8MeV

電波科学

VRAD衛星からの電波が月表面を通過する時の電波の位相変化を観測して月電離層の検出を行う。



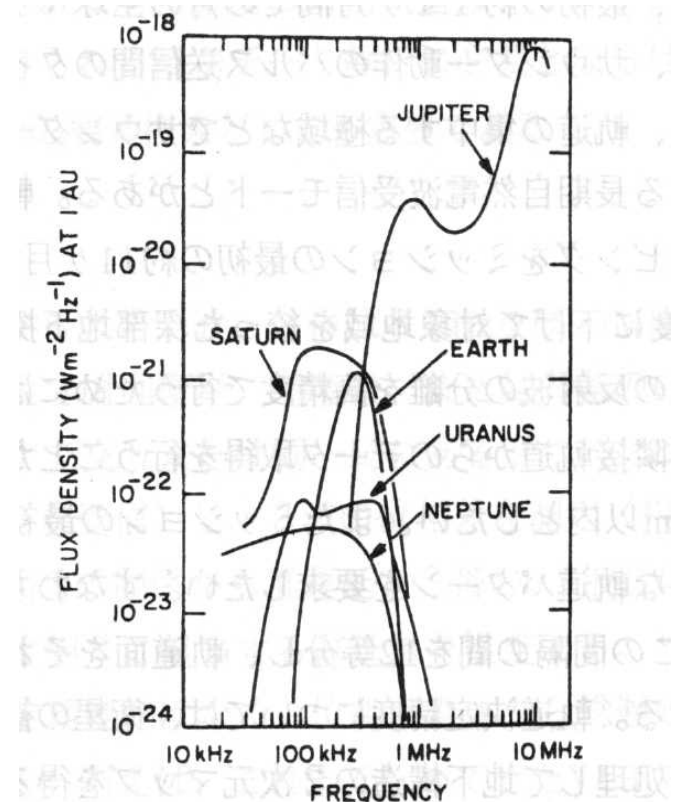
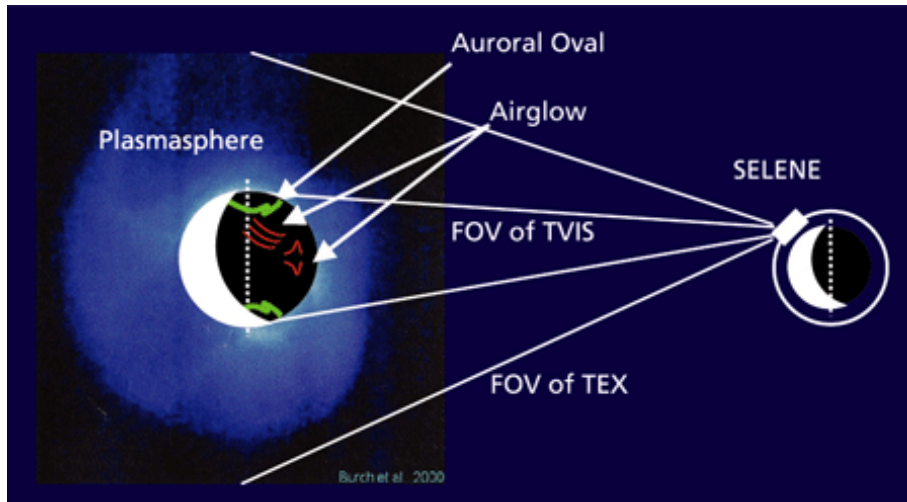
月軌道からの太陽地球系環境からの観測

プラズマイメージャ

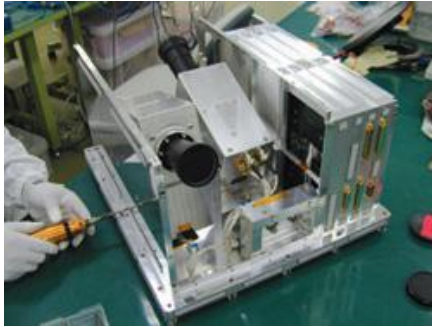
月軌道から地球プラズマ圏全体を画像として観測しオーロラやイオンの流出を観測する。

月レーダサウンダー(自然電波受信器)

月による太陽及び地球からの電波雑音の掩蔽を利用して微弱な惑星電波を観測(~ 30 MHz)



ハイビジョンカメラによる映像



寸法	46cm × 42cm × 28cm
質量	16.5kg
電力	50W
水平画角	44° (広角 Wide-angle)
	15° (望遠 Telephoto)

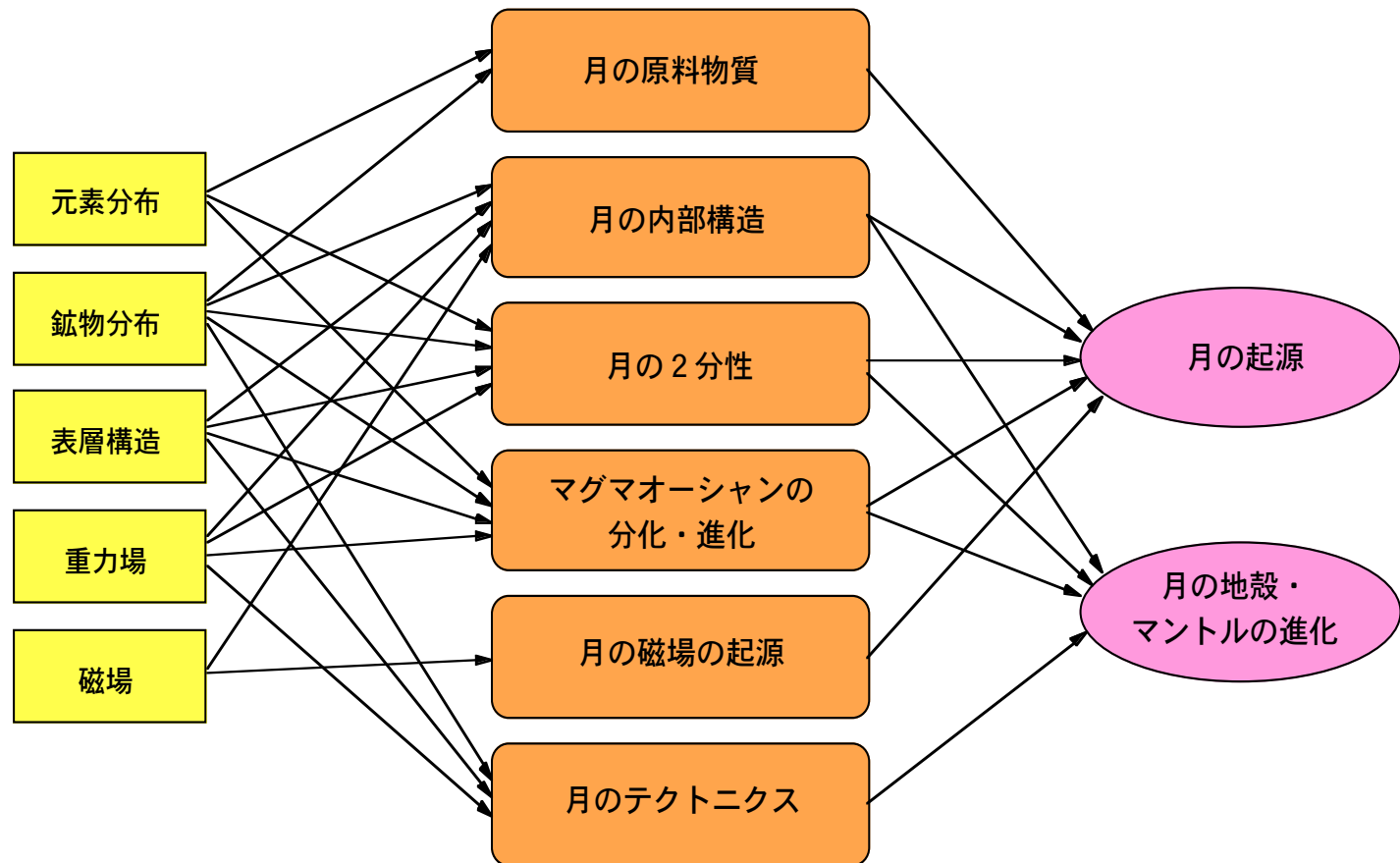


月周回軌道で観測された地球の入り



月へ向かう途上で撮影した映像

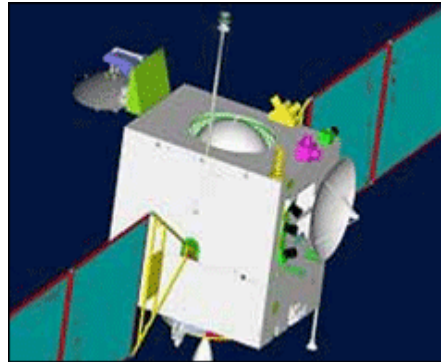
データの統合による月の起源と進化の研究



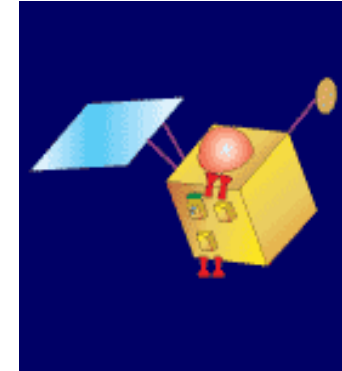
嫦娥1号, チャンドラヤーン1号のとの比較



SELENE



嫦娥1号

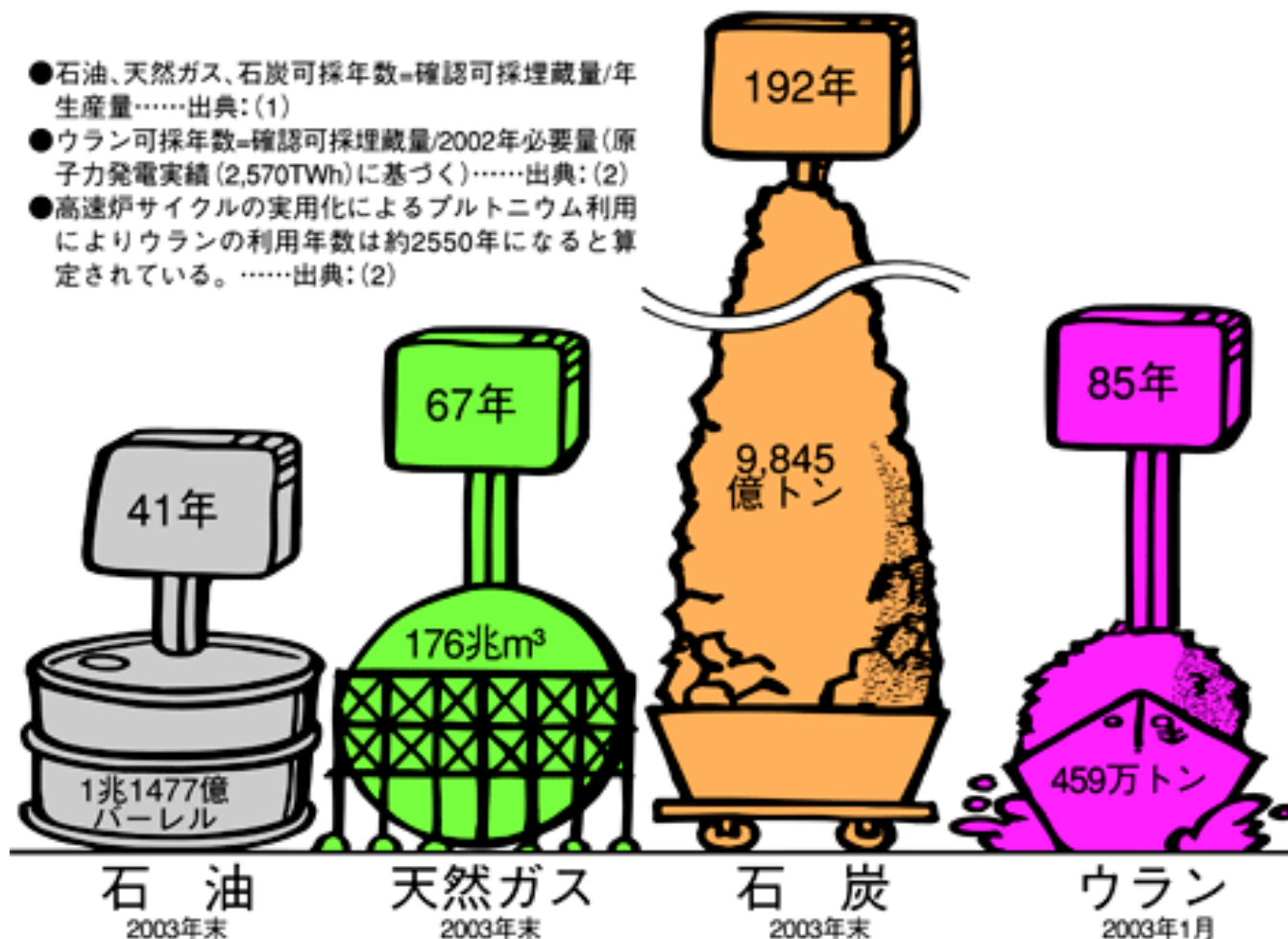


チャンドラヤーン1号

	かぐや(日本)	嫦娥1号(中国)	チャンドラヤーン1号 (インド)
打上げ時質量	2,885kg	2,350kg	1,050kg
月周回軌道高度	100km	200km	100km
定常運用期間	1年	1年間	2年間
打上げ時期	2007年9月	2007年10月	2008年4月

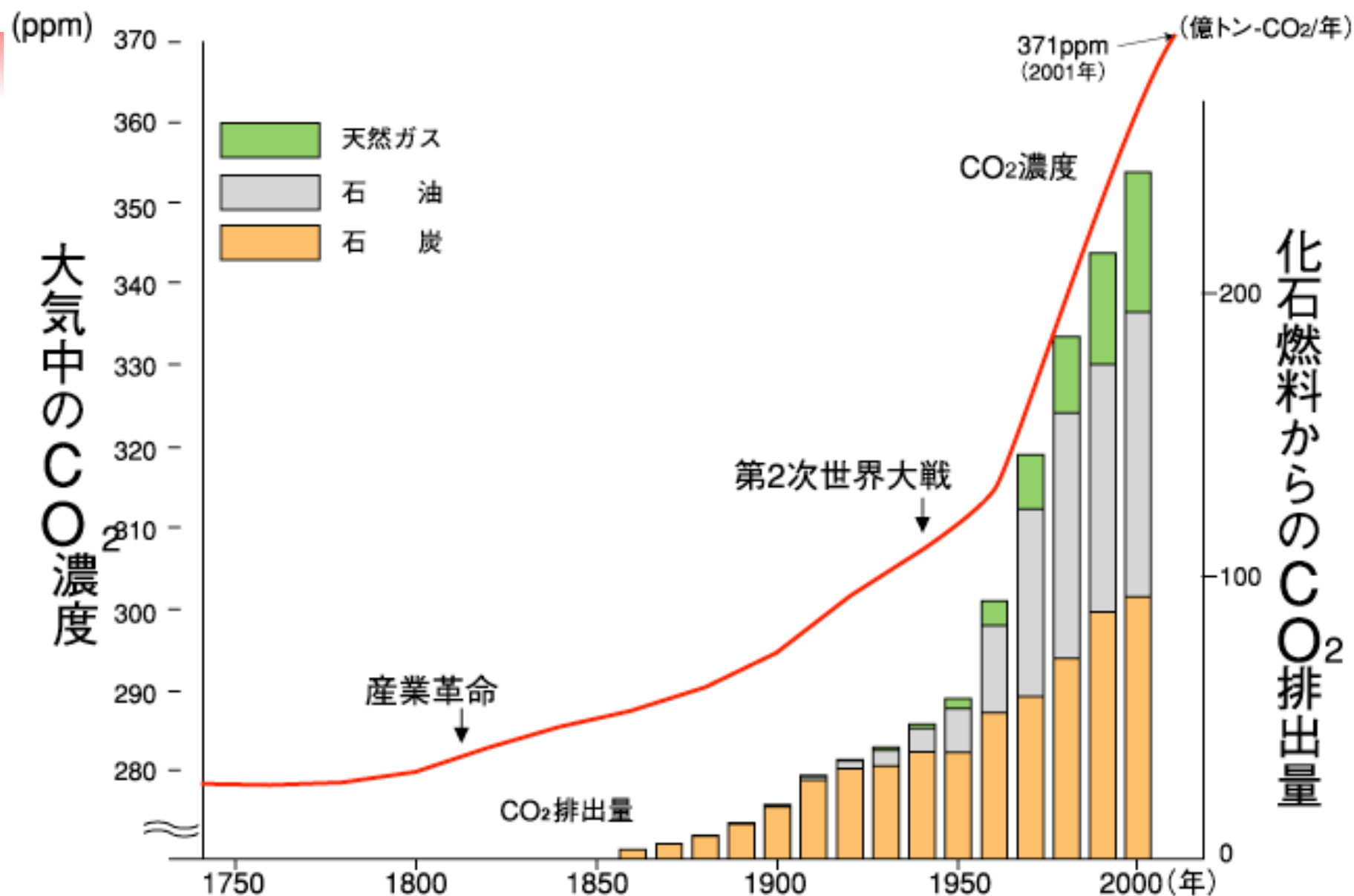
世界のエネルギー資源確認埋蔵量

- 石油、天然ガス、石炭可採年数=確認可採埋蔵量/年生産量……出典:(1)
- ウラン可採年数=確認可採埋蔵量/2002年必要量(原子力発電実績(2,570TWh)に基づく)……出典:(2)
- 高速炉サイクルの実用化によるプルトニウム利用によりウランの利用年数は約2550年になると算定されている。……出典:(2)



出典:(1)BP統計2004
(2)URANIUM2003

化石燃料からのCO₂排出量と大気中のCO₂濃度の変化



(注) 1850年以前の化石燃料からのCO₂排出量のデータは無いため記載していない。
出典：環境省資料、気象庁資料、エネルギー・経済統計要覧 2003年版

宇宙（空間・環境）の利用

情報分野（成熟）

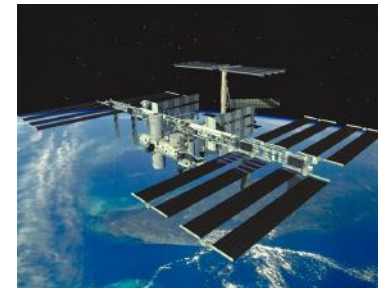
大きな対地視野という軌道の特性を利用した通信、放送、気象、地球観測
（特に静止衛星軌道が有効）



データ中継衛星

物質分野（開発途上）

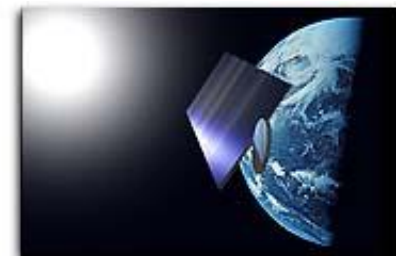
地上では実現できない極限環境（超高真空、長時間高品質マイクロG）を利用した新材料・医薬品創製



国際宇宙ステーション

エネルギー分野（未着手）

ふんだんな太陽エネルギーを利用した
エネルギー取得システム（宇宙太陽発電所）



太陽発電衛星

宇宙空間における太陽のエネルギー量

太陽からの地球へのエネルギーは

$1.77 \times 10^{17} \text{Watt}$

現在の人類のエネルギーの消費量の
15,000倍

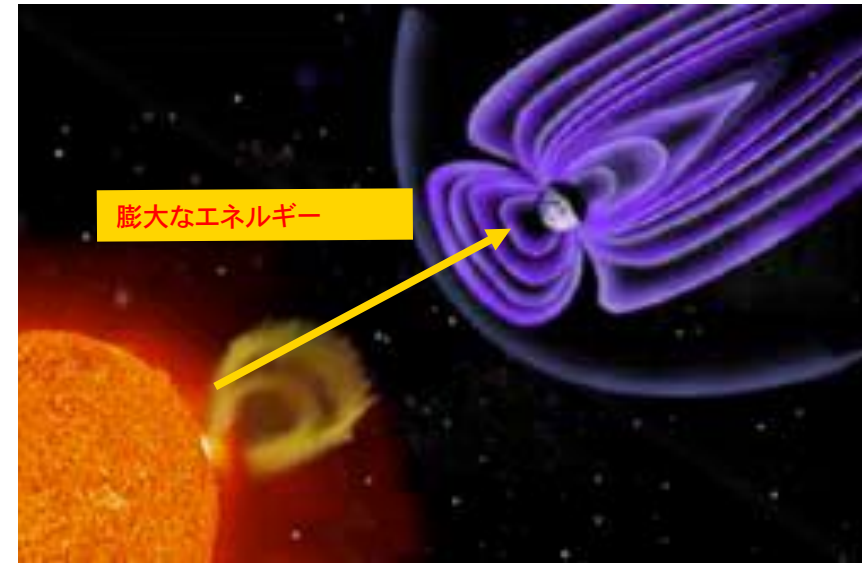
⇒太陽エネルギーは人類のエネルギー源
として大きな可能性を持っている。

地球周辺の宇宙空間での太陽光のエネルギー密度は $1,350 \text{W/m}^2$

地上での太陽光の年間平均エネルギー密度は $100 \sim 200 \text{W/m}^2$

理由：夜の存在、曇天・雨天の存在、大気による減衰

⇒宇宙空間から地上への効率の良い電力
輸送が可能であれば宇宙空間を太陽エネルギー取得の場として利用することが有望。



⇒ 宇宙太陽発電所



卒業論文発表会”太陽からの粒子の流れ”太陽風””

地上の太陽発電プラント



ドイツ 5MW



イタリア 3.3MW



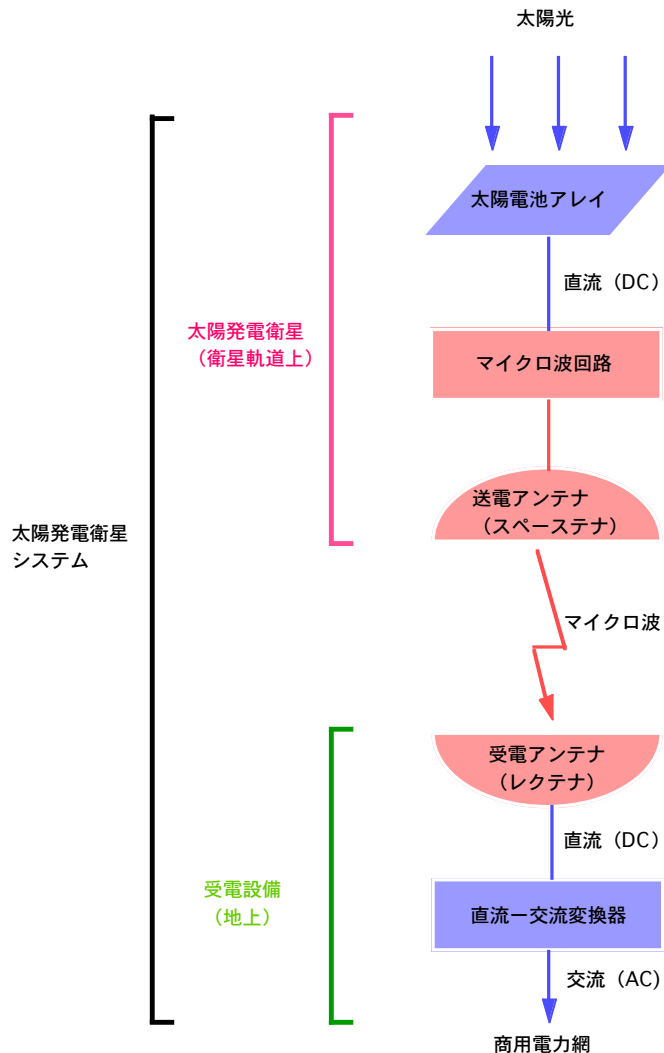
スペイン 1.2MW



沖縄 0.78MW

地上の太陽発電プラントを軌道上に建設

宇宙太陽発電所の原理とエネルギーシステムとしての特徴



宇宙での太陽光からのエネルギー取得の効率 は地上太陽光利用の場合の **5 ～ 10 倍**。一方無線送受電の効率は **50 %** が期待できる。

従ってこのシステムは地上の太陽光利用に比べ **2.5 ～ 5 倍** の高い効率で変動のない電力を供給できる **可能性** を持っている。

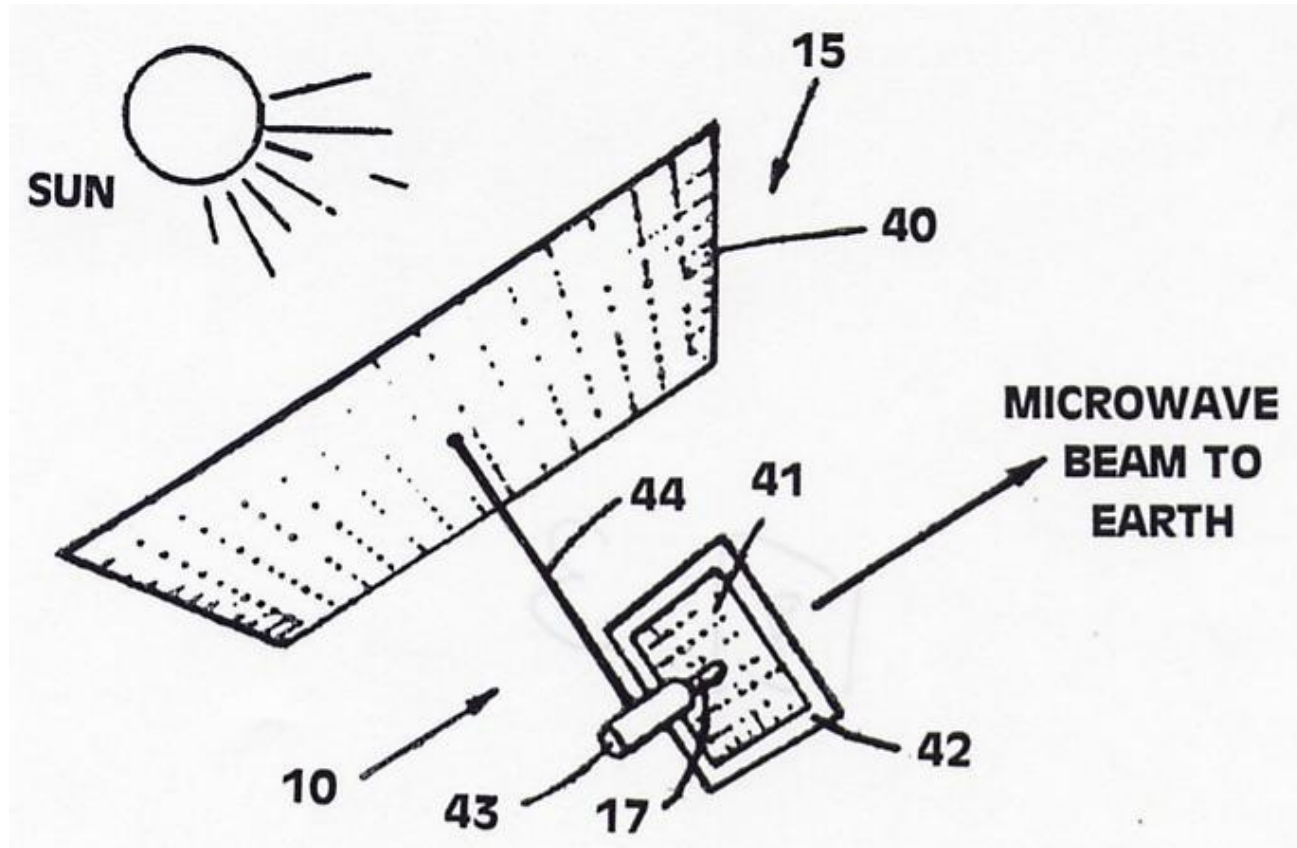
クリーンで大規模なエネルギーシステムの可能性

- ・ EPT (Energy Payback Time) : **数年以下**
- ・ コスト : **10 ～ 30 円 / kWh**
- ・ CO₂ 負荷 : **化石燃料火力発電の数十分の一以下**
- ・ 取得可能エネルギー : **実質的に無制約**

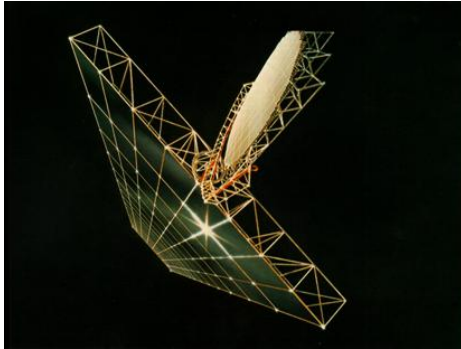
宇宙太陽発電所研究の歴史

- 1968年 **ピーターグレーザー**のサイエンスの論文
“効率的で安全なマイクロ波ビームによる電力伝送、宇宙空間における電
力プラント” の概念、特許化（1973年）
- 1970年代 NASA/DOE (US Department of Energy)
リファレンスシステム
1977-1980 NASA 約2000万ドルを投じ概念設計
1978 DOEのSPS Concept Development and
Evaluation Program (CDEP)
- 1980年 米国でのシステムの研究は中断、NAS（米国科学アカデ
ミー）の評価
レーガン政権の財政緊縮方針で中断
- 1990年代 環境問題のたかまり、エネルギーオプションの必要性から
再注目
- 1990年 宇宙科学研究所 **SPS 2000** 研究スタート
- 1995年 **NASA** 研究再開（-2004）
- 1999年以降 **NASDA** 調査研究（現JAXA）， **USEF** 調査研究

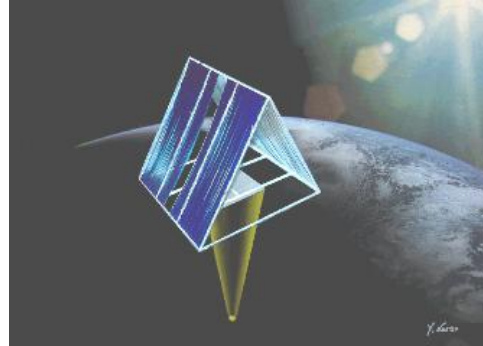
ピーターグレーザーの特許公告



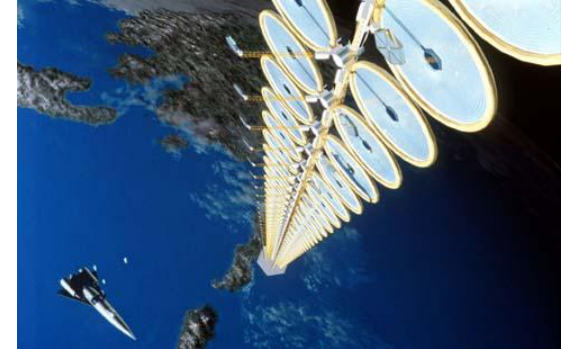
宇宙太陽発電所の設計例



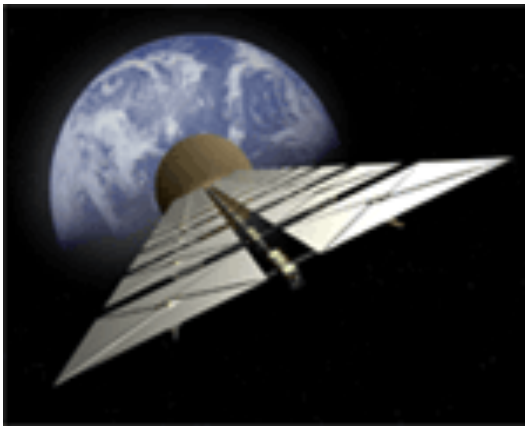
NASA Reference System



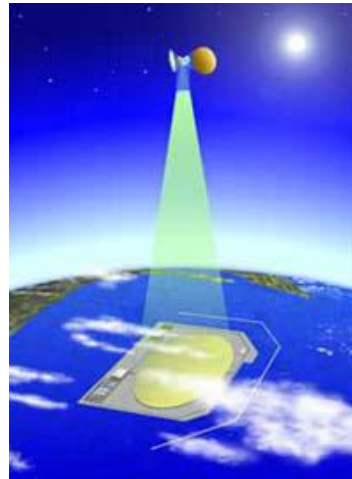
ISAS SPS 2000



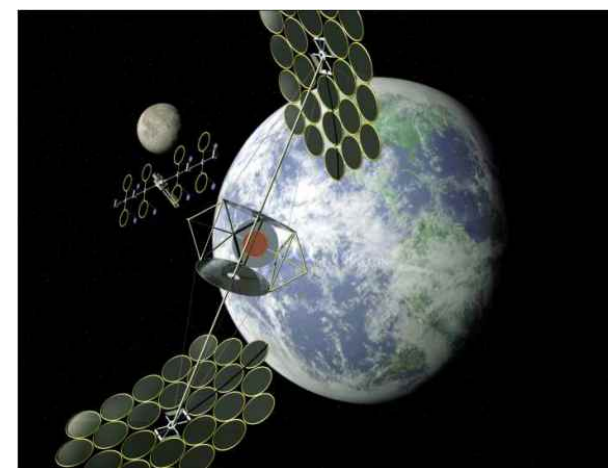
NASA Sun Tower



European Solar Sail Tower



NASDA (JAXA) SSPS
Model



NASA Integrated Symmetrical
Concentrator

宇宙太陽発電所の分類

太陽発電衛星

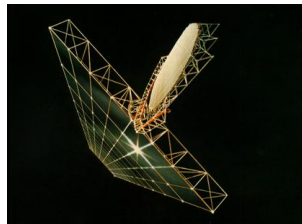
非集光型

集光型

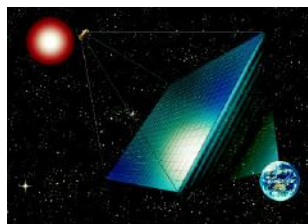
バス電力方式

分散電力方式

NASAリファレンスシステム
SPS2000
NEDOモデル



USEFベースライン
(Tethered-SPS)

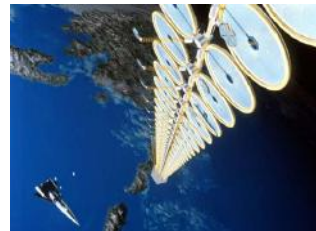


バス電力方式

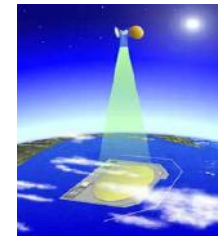
分散電力方式

レーザー直接励起方式

NASAサンタワー
NASA ISC



NEDOオプション
NASDA2001年モデル
USEFオプション



NASDAレーザーSPSモデル

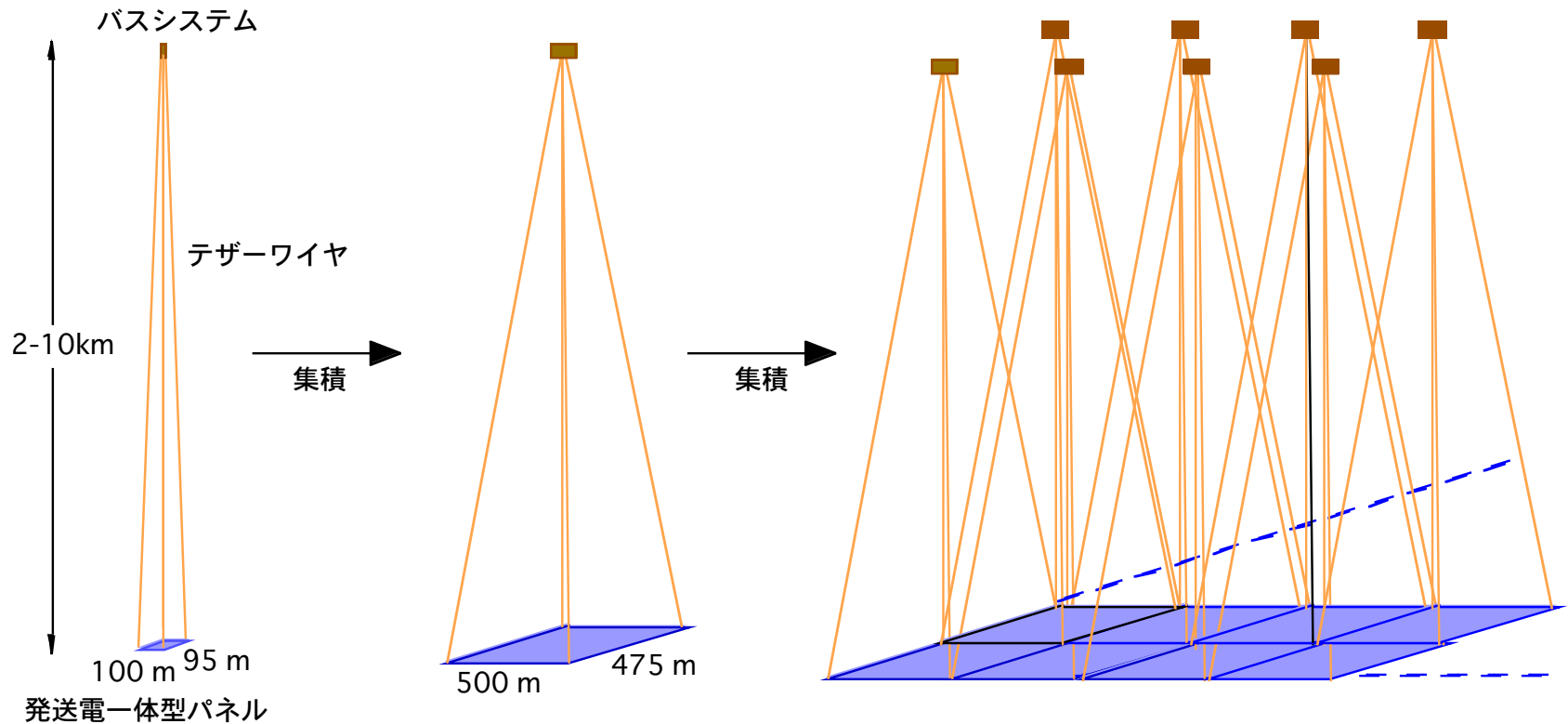


新しいコンセプト：平板型テザー宇宙太陽発電所

問題点	問題の内容	T-SPSによる問題の解決
回転電力伝達機能 ミラー回転機能	ロバスト性の欠如（冗長機能なし） 一点故障で全機能喪失	可動部なし
バス集電ケーブル 超電導ケーブル	非現実的なケーブル重量 超電導システムも現技術では適用困難	バス集電機能なし
集光ミラー	集光部での排熱が困難 薄膜大型構造物の太陽指向姿勢制御が困難	集光ミラーなし
全ての建設が終了後に始めて機能動作可能	開発リスク、投資リスク 商業システムとして受け入れ困難	建設途上で性能検証可能
低高度軌道で建設、完成後静止衛星軌道へ移動	巨大な（非現実的な）軌道間輸送機が必要 低速移動のため半導体素子の放射線劣化が不可避	静止衛星軌道での展開、建設
デモンストレーションと実用SPSを独立に検討	一貫した開発のロードマップが描けない	デモンストレーションモデルは実用SPSの一部

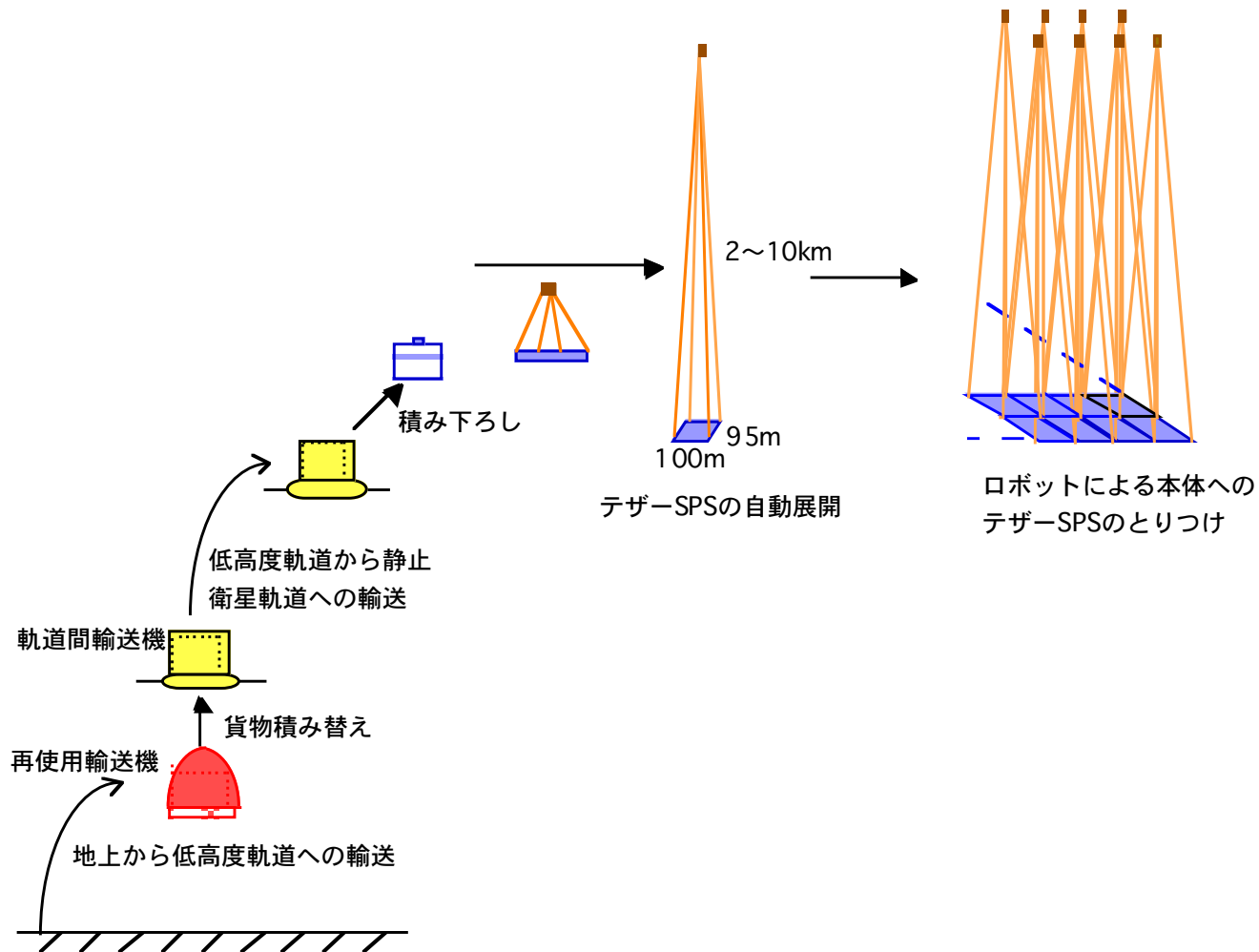
宇宙太陽発電所の建設シナリオ

全重量: 26,500 MT 出力: 1 GW(一定)





平板型テザー宇宙太陽発電所の建設方法



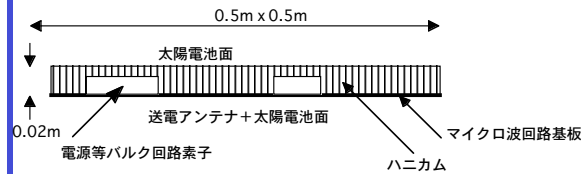
発電・蓄電・送電の全機能を持つモデルを設計・試作・試験

発電・蓄電・送電の全機能を持つモデルを設計・試作・試験

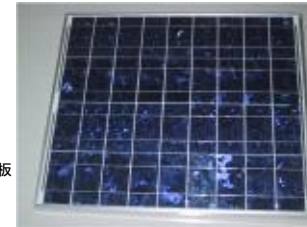
発電電一体型パネル

発電面
薄膜太陽電池

送電素子 (PCM, 集積化アンテナアレイ)
二次電池、充電器、高圧電源、リレー、
モジュール制御路、LAN受信部



機能モデル設計(断面図)



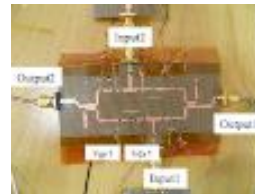
機能モデル発電面



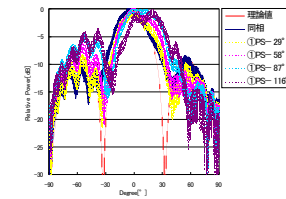
機能モデル送電面

送電アンテナ面(パッチ) 625ヶ
パイロット信号受信アンテナ(円形パッチ)

ループ方式位相制御回路を試作、発振確認

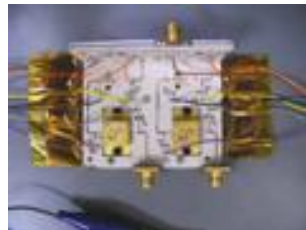


位相制御発振回路

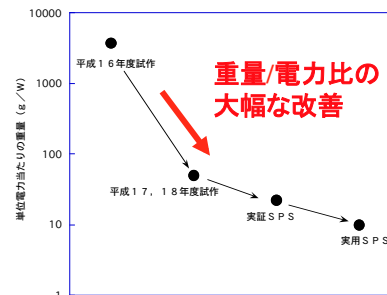


位相制御によるビームの方向制御

軽量高出力アンプ(Wクラス)及び軽量受電アンテナの試作・試験

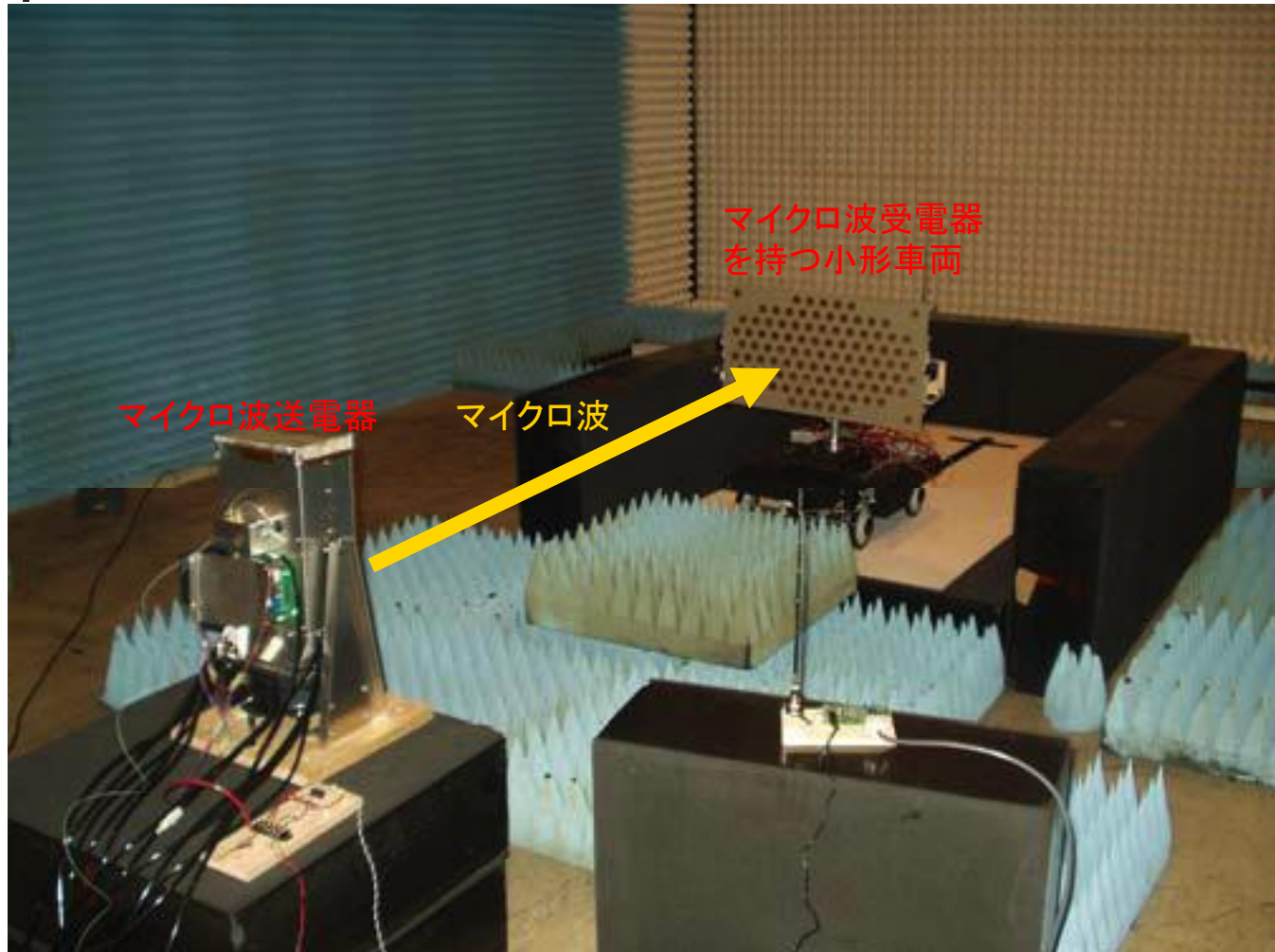


折り曲げ型3段アンプの試作
(4W40%、20dB、30g/W)、京大・USEF共同

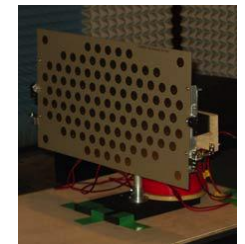


フレキシ基板上のレクテナアレイの試作

小形車両へのマイクロ波送電実験（U S E F）



マイクロ波送電器



マイクロ波受電器



小形車両

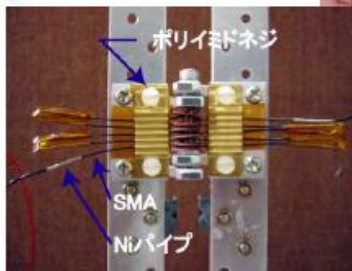
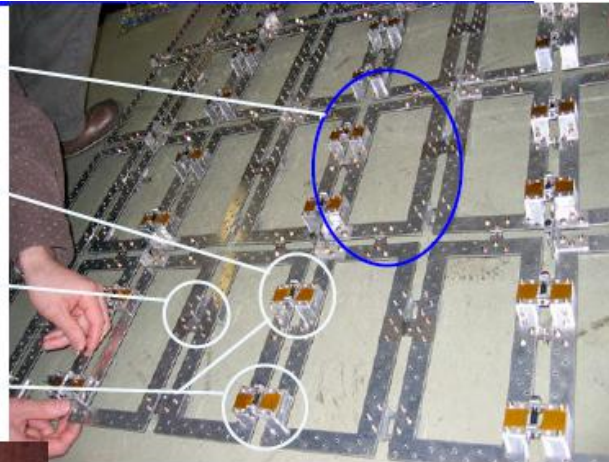
形状記憶合金を利用した新規展開機構の試作研究

ユニットの大きさは
112×232mm

嵩上げ部材で厚板
をモデル化

ラッチ機構として
永久磁石を装着

横方向展開用に2個
のアクチュエーター



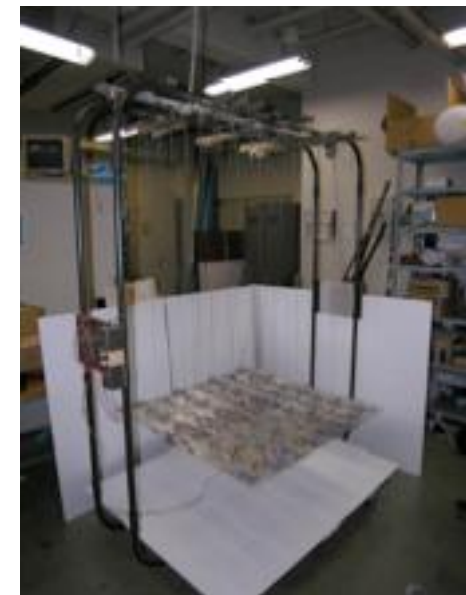
SMAを3重巻3本一組直列

一組あたり抵抗 2Ω

逆変態終了温度は約80度



試験した2種類のSMA



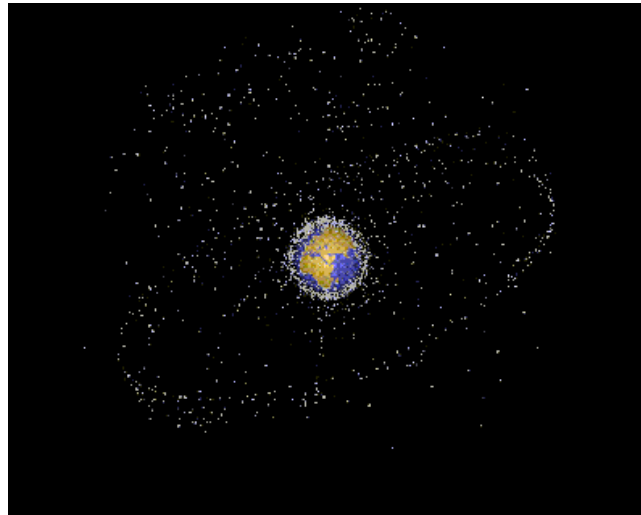
32枚パネルの展開試験

展開アクチュエータとしてのSMAの電力投入時の温度、回転トルク、疲労に関するデータを取得。

2種類のSMAの組み合わせによるパネル角制御実験を行いその原理を確認。

重力をキャンセルする吊り具を用いて32枚パネルの展開試験を繰り返し行いデータを取得。

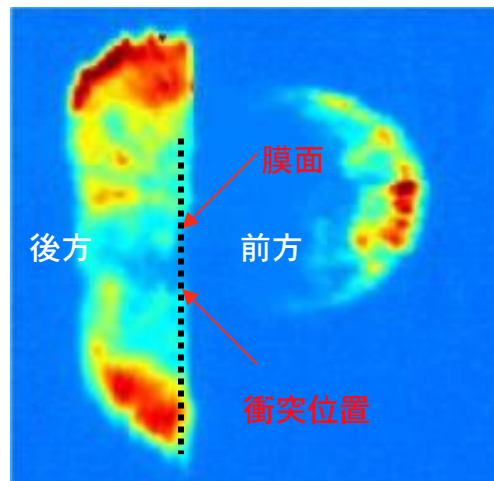
スペースデブリによる衝突放出物の振る舞い



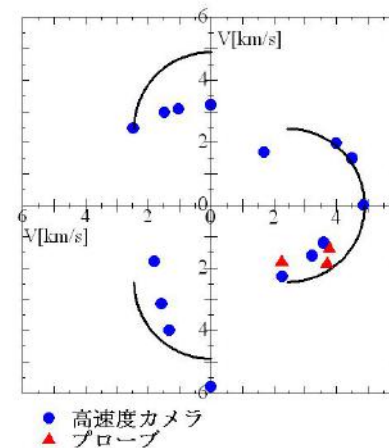
宇宙のゴミ(スペースデブリ)



JAXA宇宙科学研究本部の超高速衝突実験設備レールガン



高速カメラによるイジェクタの飛散観測後方への飛散状況が新しい知見(沿面伝搬)



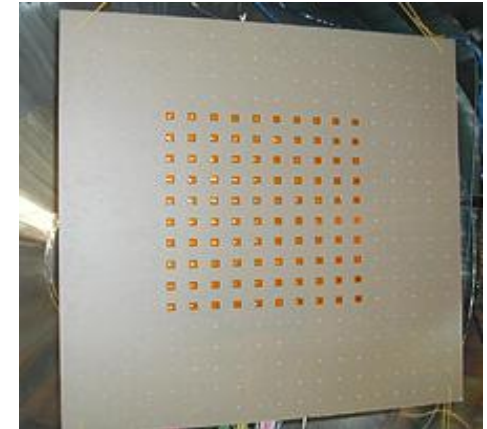
発電面の電位分布の選択のための実験



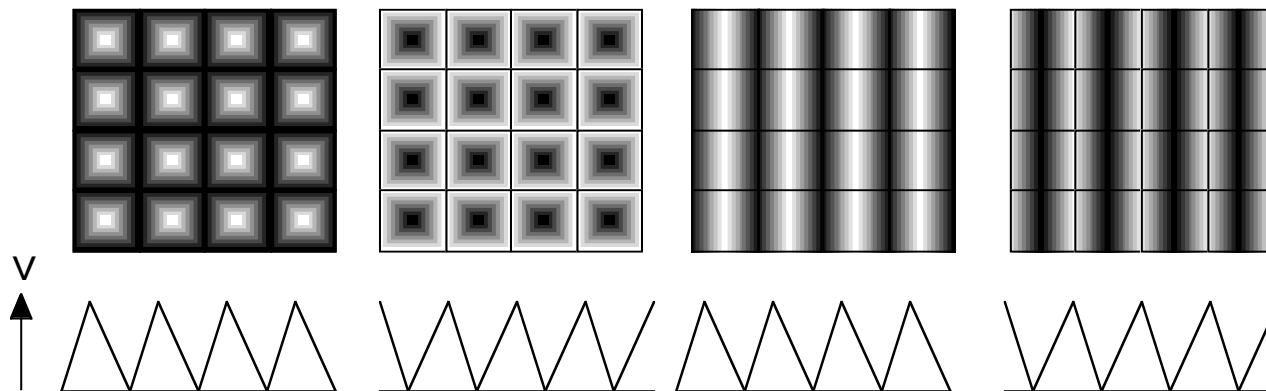
太陽電池パネル



宇宙空間プラズマ模擬試験装置



太陽電池パネル模擬実験装置



パネル面中央が高電位

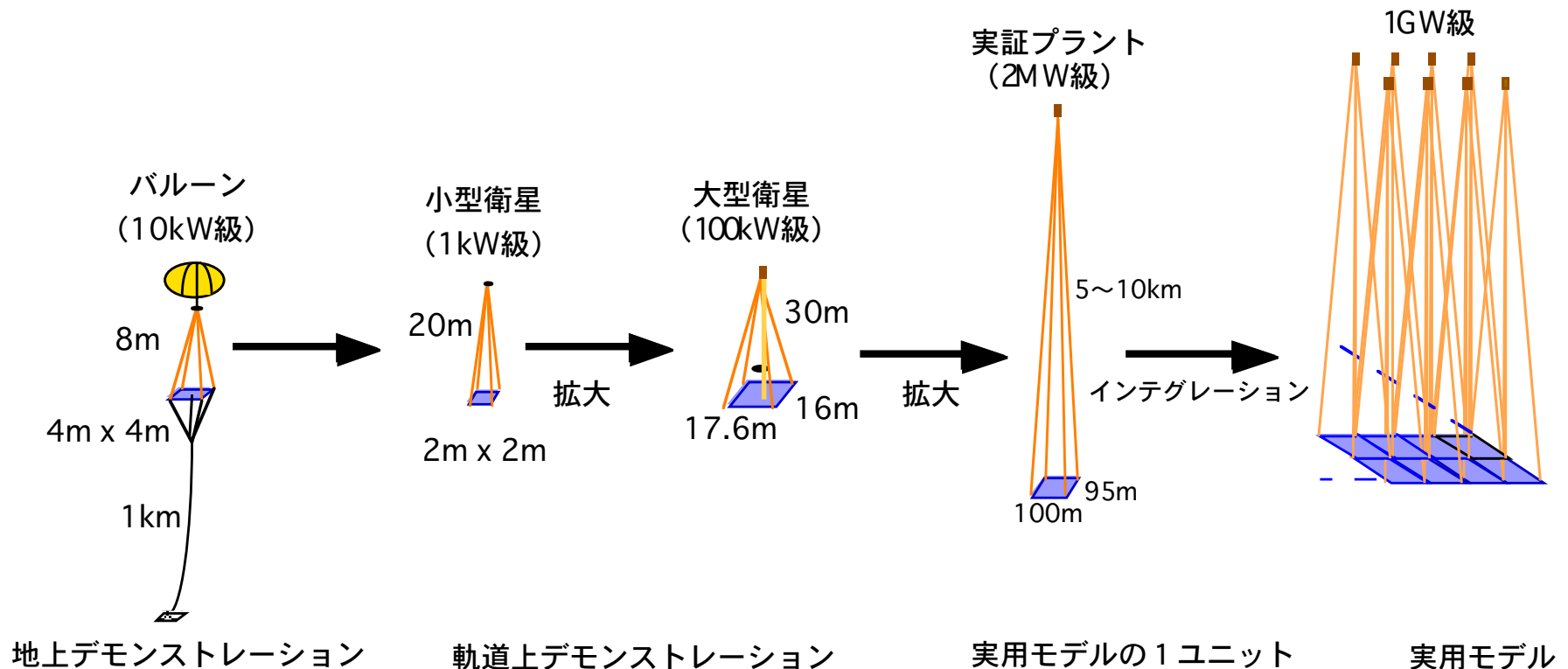
パネル面周辺が高電位

パネル面側面が低電位

パネル面側面が高電位

太陽電池パネル上の電位分布

実用型宇宙太陽発電所実現までの道のり



宇宙太陽発電所のデモンストレーション

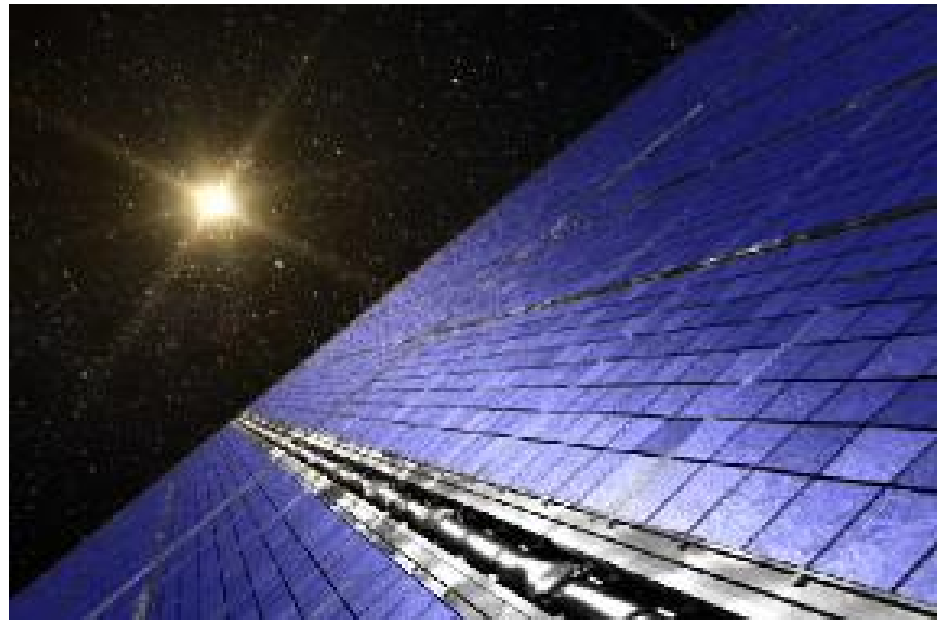
宇宙太陽発電所の
全電気機能を持つ
モデルのデモ



宇宙太陽発電所構築
するためのトラス自動
組立機械のデモ



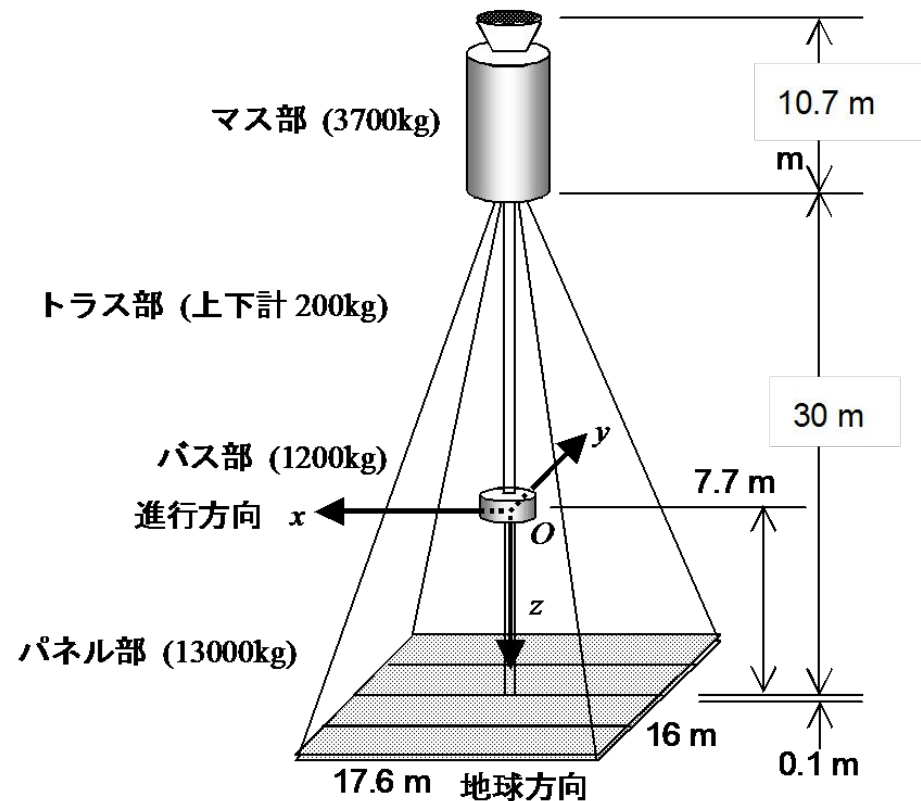
宇宙太陽発電所軌道上デモ
ンストレーションのCG



軌道上デモンストレーション実験の構想案



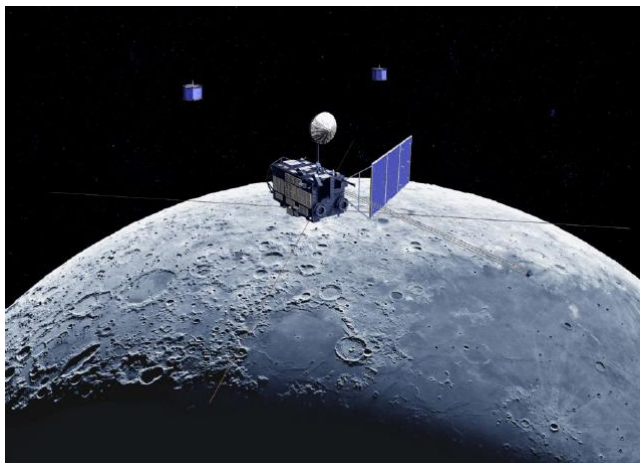
大型ロケットH2-A



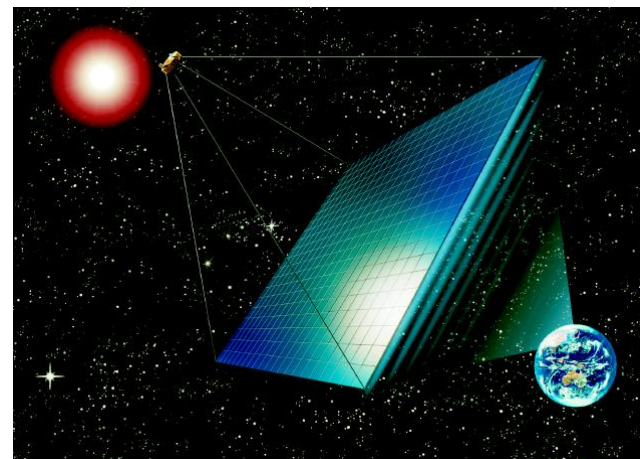
宇宙太陽発電所実験システム

知の広場・・・人と学問・・・

知の探求
—月探査計画”KAGUYA”—



地球環境問題解決への挑戦
—宇宙太陽発電所—



“人類社会持続的発展への道—地球文明から太陽系文明へ”
(地球閉鎖空間から宇宙空間への展開)

実感・共感・違和感・反感・・・？