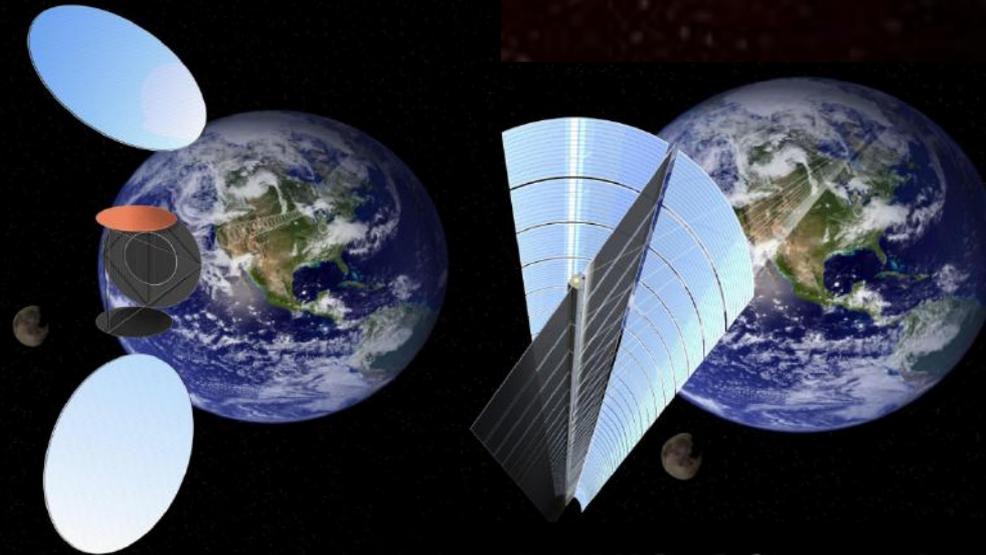
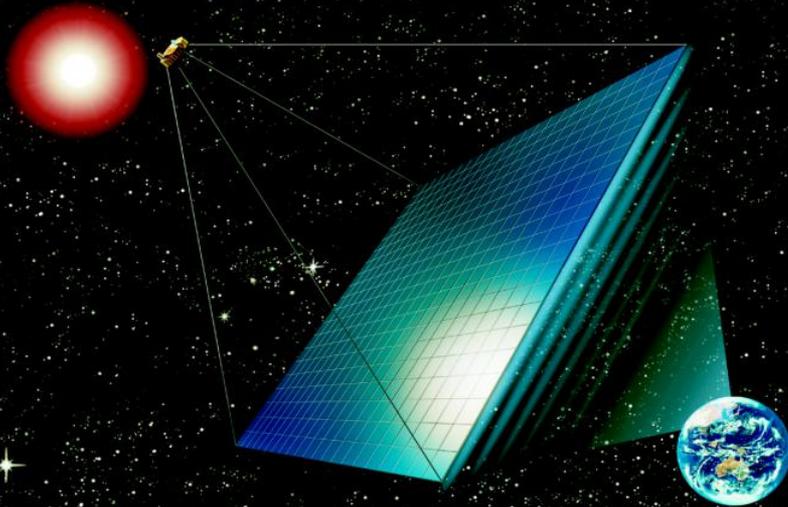


宇宙太陽光発電への挑戦

- ・ 宇宙太陽光発電(SPS)とは？
- ・ 研究の歴史
- ・ 実現のために必要な技術
- ・ 我が国での研究の現状と今後の展望
- ・ 実現したらどんな社会が？

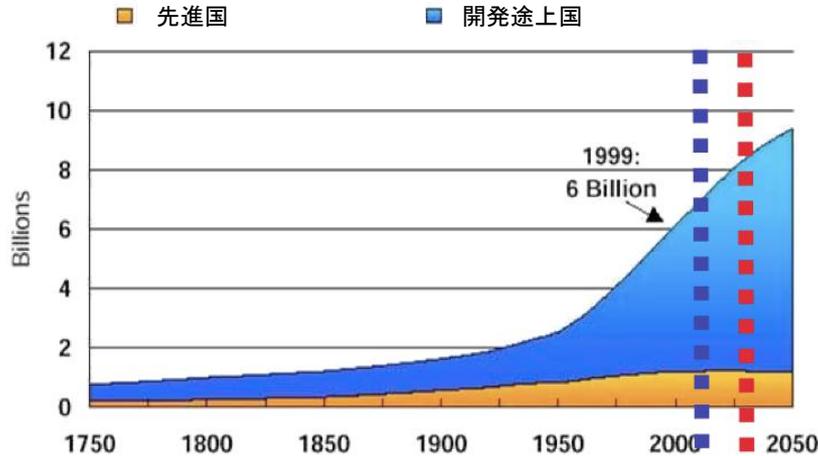


April 2012

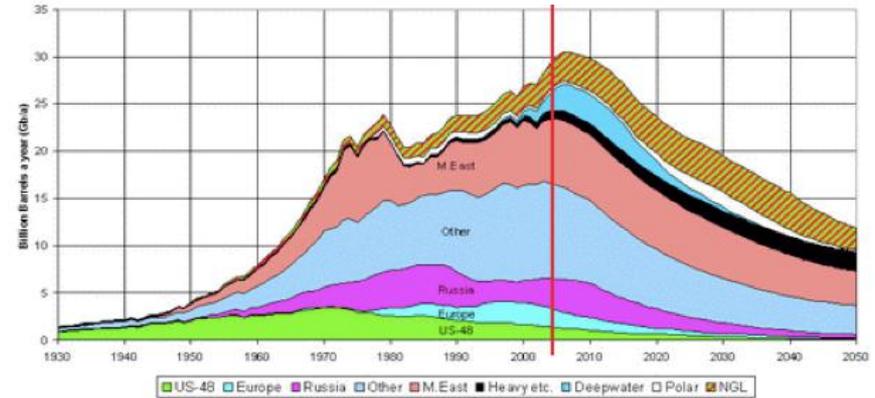
A bright sun is visible in the upper left corner, casting a lens flare across the dark space. The Earth is shown on the right side, partially illuminated, showing blue oceans and white clouds. The text is centered in the middle of the image.

**なぜ宇宙太陽光発電
を研究するのか？**

資源問題と地球環境問題

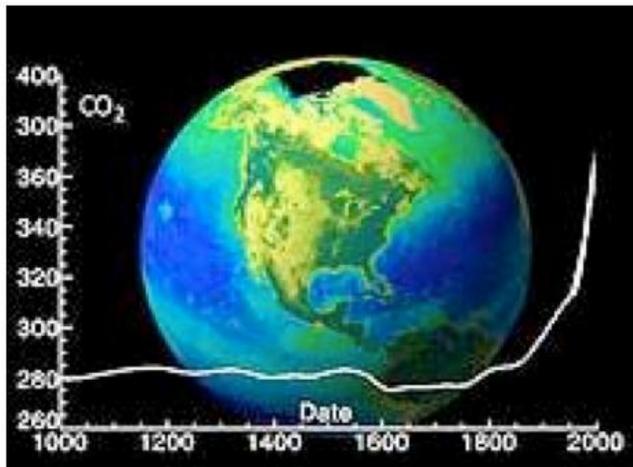


人口の増大



限界あるエネルギー資源

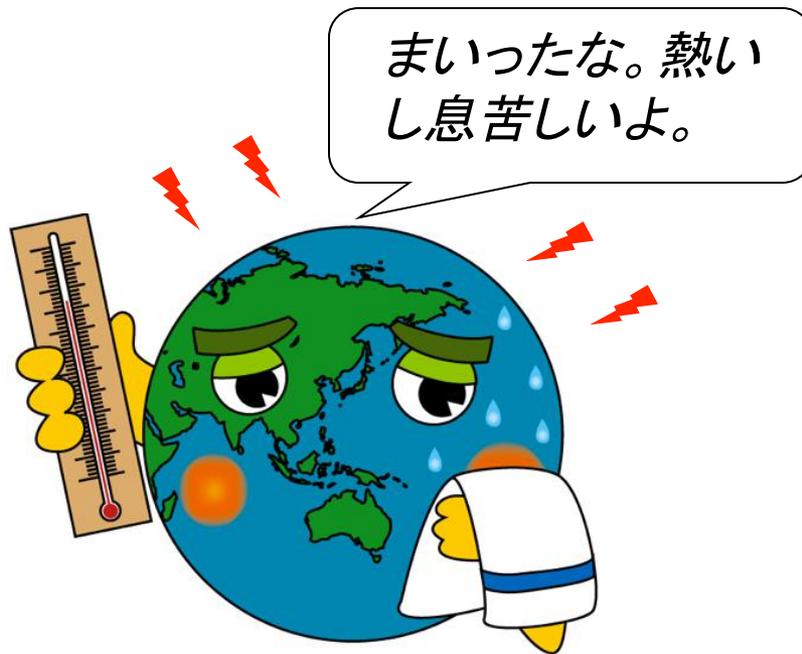
Ref: *Abundant & Affordable Space-Based Solar Power Realizing the Opportunity* John C. Mankins (2007)



CO₂ 問題

- ・化石燃料は0.02%の変換効率で太陽エネルギーを2億年かけて蓄積。人類はこれをわずか100~150年で使い切ろうとしている。
- ・石油の残存量(1兆バレル)は富士山を逆さにした容器として見立てるとその1/8程度しかない。

人類は地球にとってウイルス？



地球



他の惑星

宇宙空間における太陽エネルギーの獲得による問題の解決

何故太陽か？

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
10,000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。

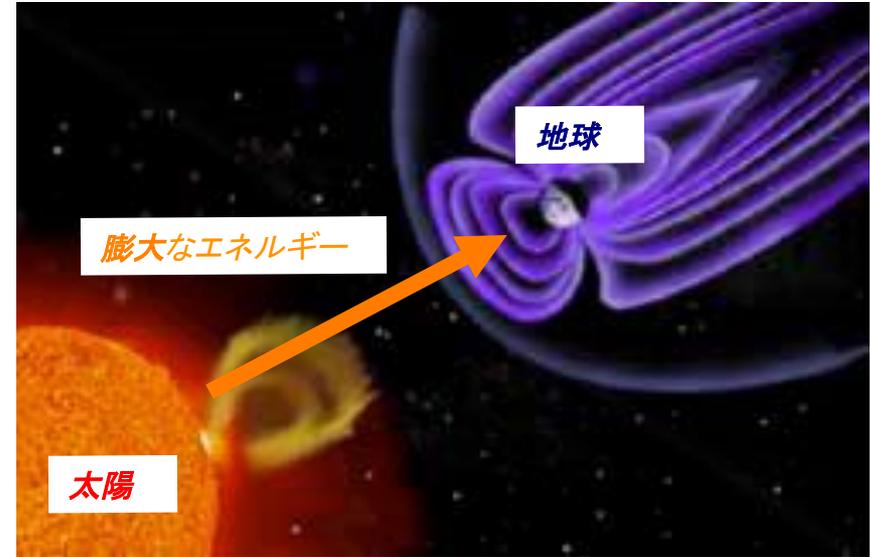
何故宇宙か？

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。



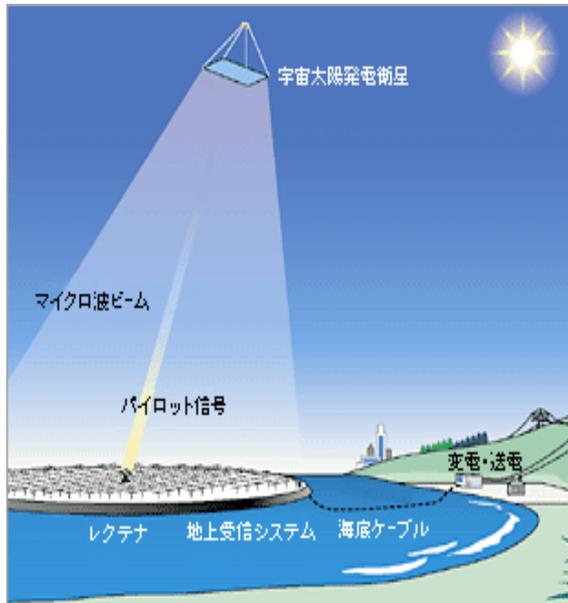
➡ 宇宙太陽光発電システム

環境問題、エネルギー問題という地球規模の問題に対し、地球閉鎖系の中ではなく、地球の外即ち宇宙空間に解決を求めようとするもの。

宇宙太陽光発電 (SPS) の原理と構成

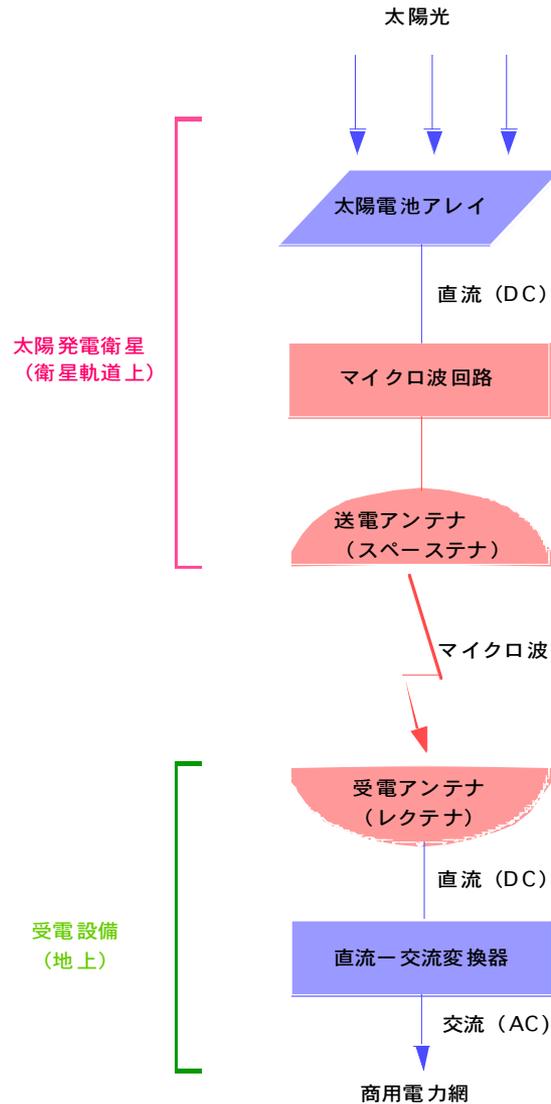


カナダ 80MW (2010年、世界最大、約1km²)

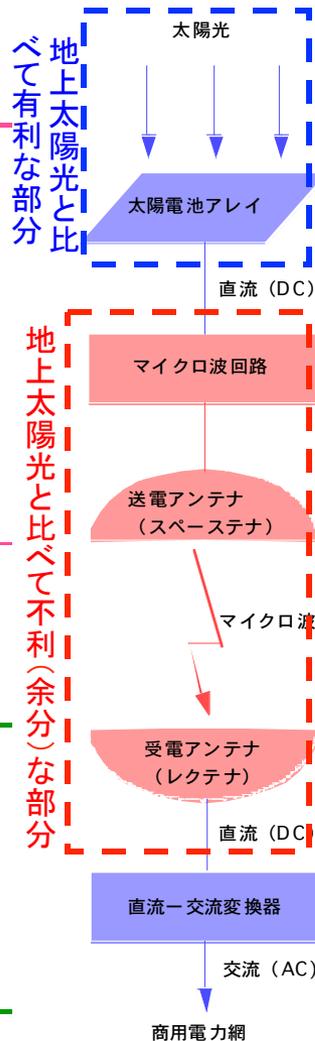


宇宙の太陽光発電所: **宇宙太陽光発電**

太陽発電衛星システム



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。

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

- ・安定性: 高い(天候、昼夜の影響なし)
- ・取得可能エネルギー: 実質的に無制約
- ・EPT(Energy Payback Time): 数年以下
- ・コスト: 10~30円/kWh
- ・CO₂負荷: 火力発電の数十分の一以下

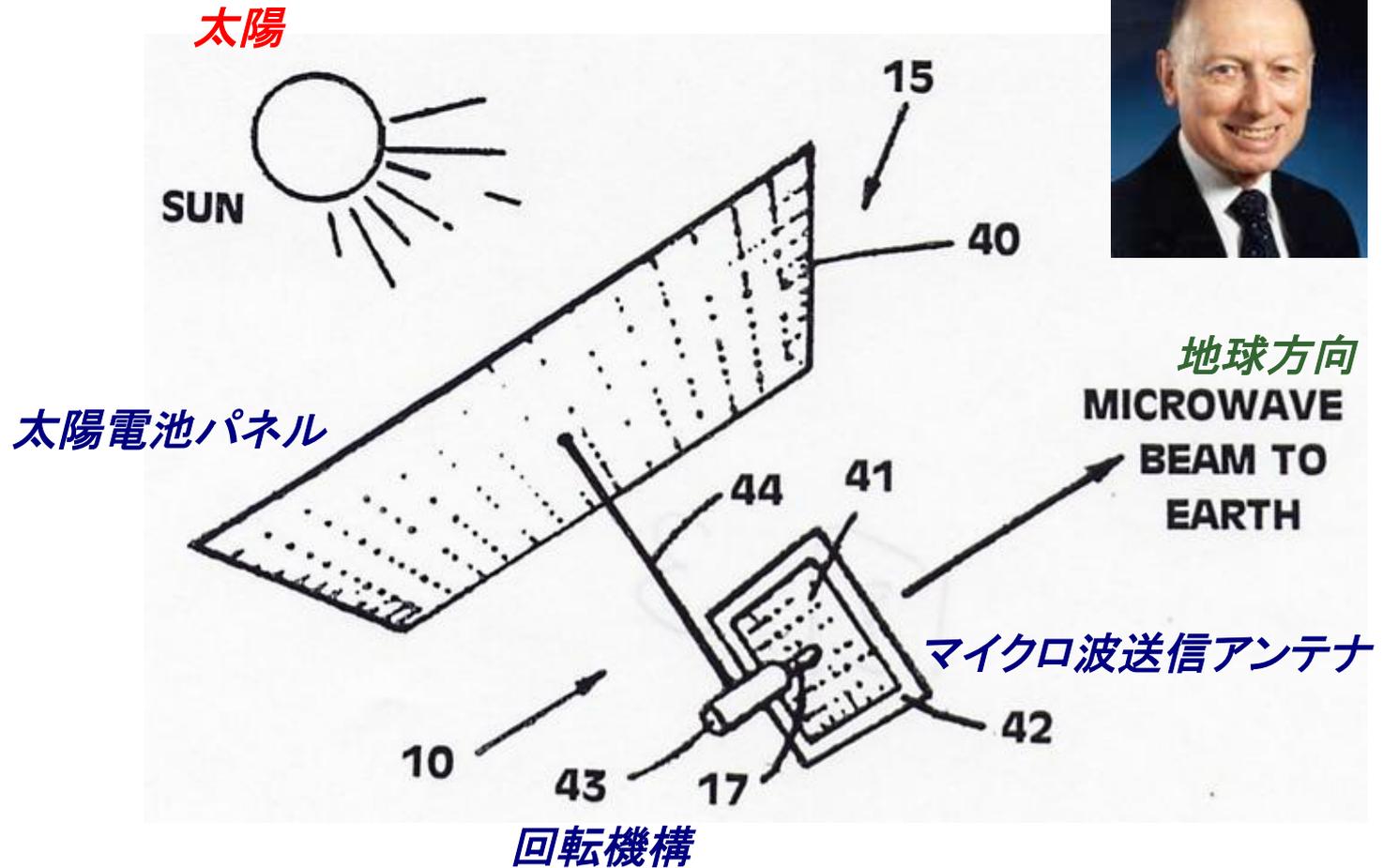
太陽発電衛星システム

受電設備
(地上)

A bright sun in space with the Earth's horizon on the right. The sun is a large, glowing yellow-white sphere with a starburst effect, positioned in the upper left. The Earth is a curved horizon on the right side, showing blue oceans, white clouds, and brownish-green landmasses. The background is a dark, starry space.

宇宙太陽光発電の研究の歴史は？

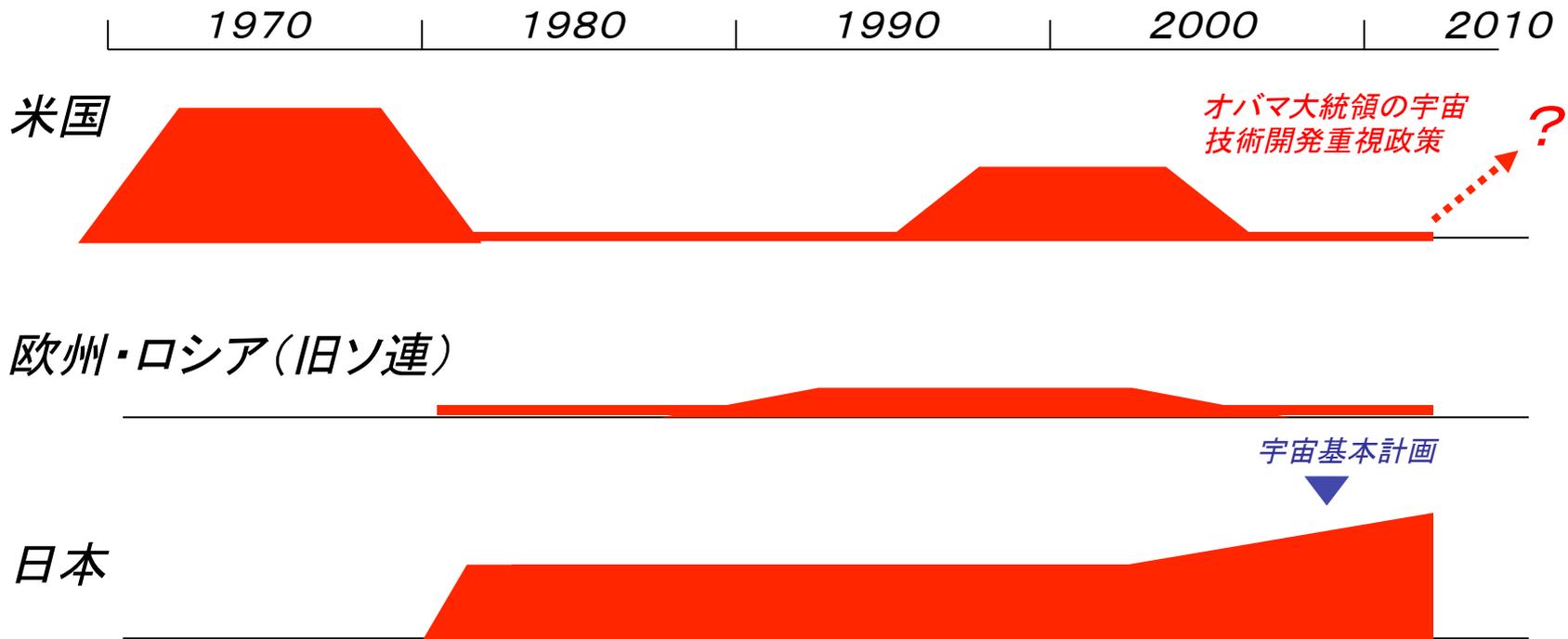
ピーターグレーザーの特許公告（1973年）



宇宙太陽光発電システム研究の歴史

- 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
 カプラント” の概念、特許化（1973年）
- 1970年代 NASA（米航空宇宙局）/DOE（米エネルギー省）
 約2000万ドルを投じ初歩的な設計（リファレンスシステム）
- 1980年 米国でのシステムの研究はレーガン政権の財政緊縮方針で中
 断
- 1983年 観測ロケットによるマイクロ波送電実験（世界初）
- 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SPS2000研究スタート
- 1995年 NASA研究再開（-2004）
- 1998年～ 日本の宇宙開発事業団NASDA調査研究（現JAXA），経産
 省の宇宙機関（USEF）調査研究
- 2009年 宇宙基本計画に宇宙太陽光発電の研究開発を明記

SPS研究の現状



現在は日本が世界の研究をリード！

SPSの種類

太陽発電衛星

非集光型

集光型

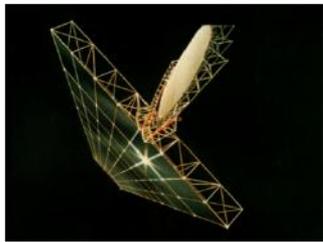
バス電力型

発電電一体型

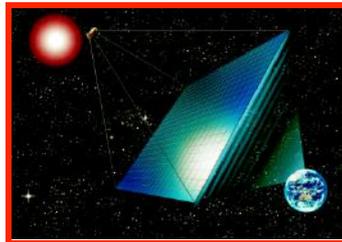
バス電力型

発電電一体型

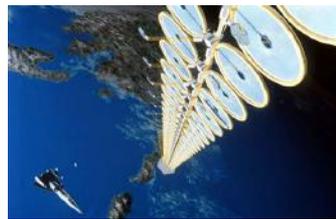
レーザー直接励起型



NASA リファレンスモデル



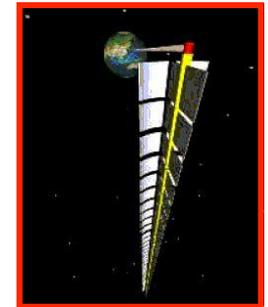
USEFテザーモデル



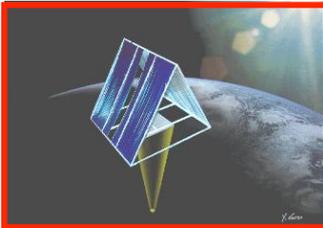
NASA サンタワー



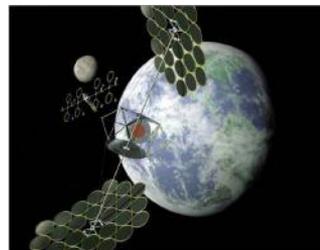
NASDA 2001モデル



JAXA L-SSPS



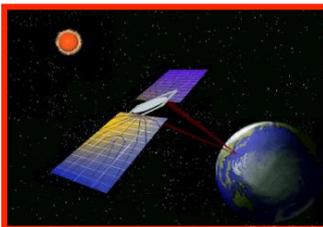
ISAS SPS2000



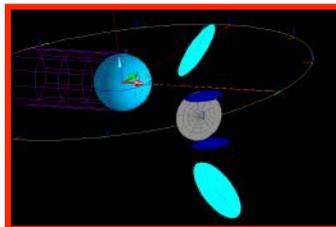
NASA ISC



IAA研究モデル



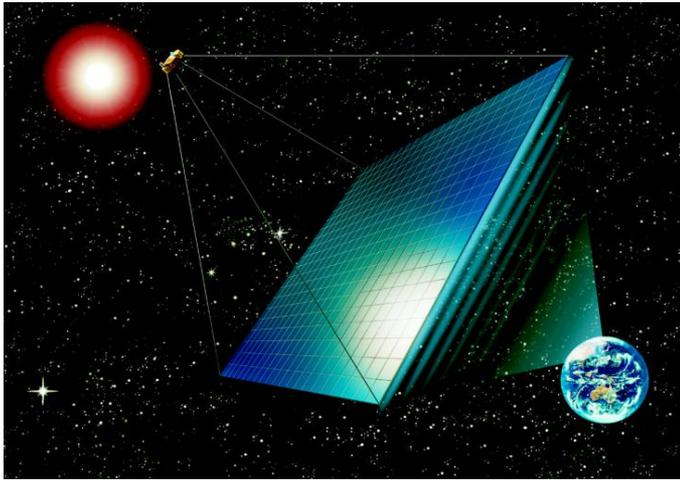
NEDO グランドデザイン



JAXA M-SSPS

日本のモデル

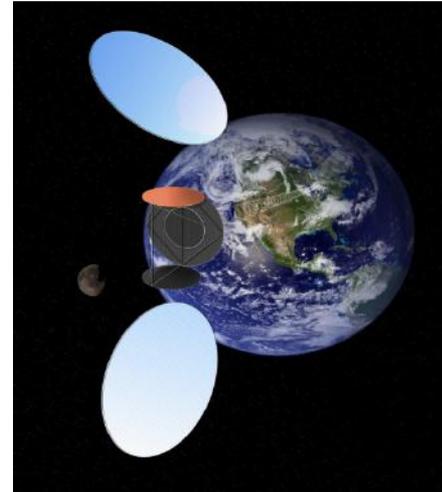
日本のSPSシステム代表的設計例(1GW級)



Basic Model (マイクロ波型基本モデル)

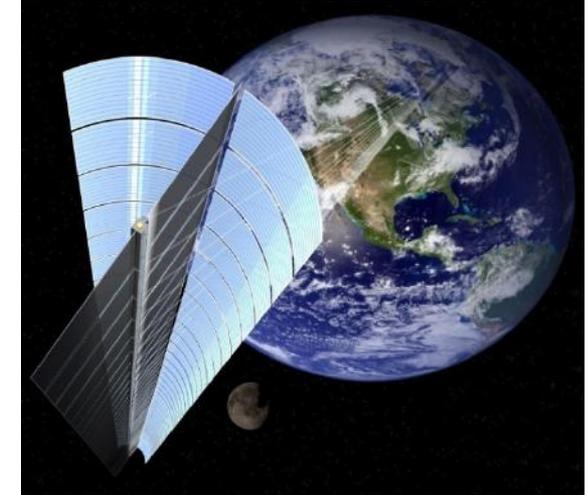
太陽非追尾マイクロ波型
発電電一体型パネルのモジュール構成

テザーによる重力安定
総重量2万トン
単純、低い電力効率(64%)



Advanced Model (マイクロ波型先進モデル)

太陽追尾マイクロ波型
ミラー(反射鏡集光鏡)は編隊飛行
発電電分離型
総重量:10,000トン(目標)
複雑、高い電力取得効率



Laser Model レーザー型モデル

太陽光直接励起レーザー型
高倍率反射集光鏡・発電電・
放熱部のモジュール構成
総重量:5,000トン(目標)
複雑、システムが小型



A bright sun in space with the Earth's horizon on the right. The sun is a large, glowing yellow-white sphere with a prominent lens flare effect, positioned in the upper left quadrant. The Earth's horizon is a curved line on the right side, showing the blue atmosphere and the dark, cratered surface of the planet. The background is a deep black space filled with numerous small, distant stars.

宇宙太陽光発電に必要な技術は何？

SPS実現のための主な技術の目標 と現在の實力

主要な技術	現状の到達レベル	目標レベル	ファクター
宇宙太陽光発電	数十kW（国際宇宙ステーションで80kW）	GW	10,000
マイクロ波送電	数十kW（地上）、1kW（宇宙）	GW	100,000
レーザー送電	数kW（地上）、1W以下（宇宙）	GW	1,000,000
排熱	数十kW	数百MW	10,000
大型構造物	100mクラス（国際宇宙ステーション）	数km	10
宇宙輸送のコスト	100～200万円/kg	2万円/kg	1/100-1/50

1GW=30～50万世帯分

A bright sun in space with the Earth visible on the right side. The sun is a large, glowing yellow-white sphere with a starburst effect, positioned in the upper left. The Earth is a large, blue and white planet with visible clouds and landmasses, curving from the bottom right towards the center. The background is a dark, starry space.

**発電はどうやって行
う？ 何が問題？**

太陽電池の種類と太陽発電衛星用として有望なタイプ

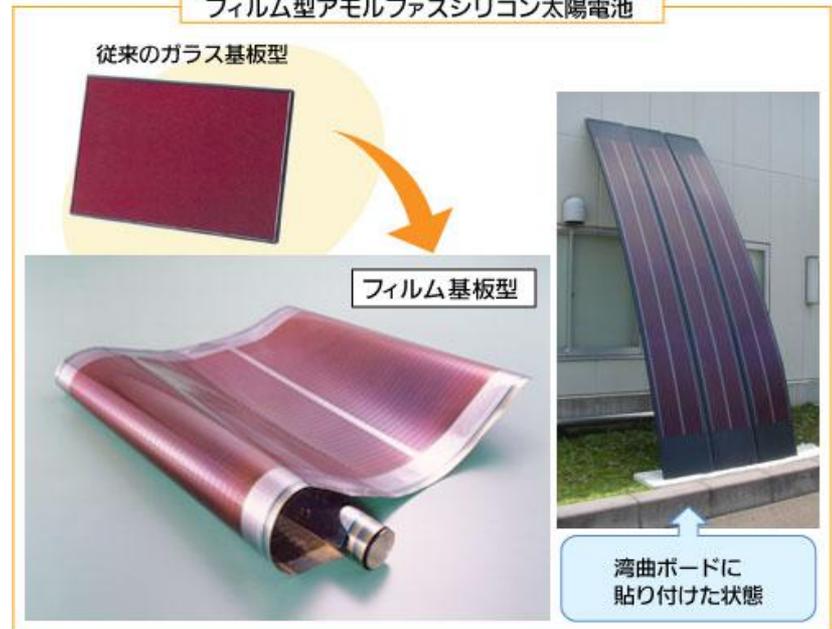
薄膜、フレキシブル、軽量、高効率（重量当たりの電力）

型	種類	特徴	SPS用としての評価
バルク型 (厚いタイプ)	Si (単結晶、多結晶)	現在の生産の主流	重量あたりの出力が低い
	III-V族結晶化合物	超高効率 宇宙用、高コスト	資源的制約 (Ge, In) 集光系との組み合わせで可能性有り。但し、正確な太陽指向が必要
*薄膜型 (10 μ m以下)	アモルファスシリコン	量産性、低コスト、製品としての先行	当面有力
	CdTe	構造が簡単で安定性が高い 低コストの可能性	資源的制約 (Cd, Te)
	CIS	高効率、長寿命、耐放射線性に優れる	資源的制約 (In) 将来有望
	多結晶シリコン	ハイブリット型での組み合わせ	
	化合物	高効率 (25%)	新規、今後の展開待ち



衛星で使われている太陽電池のパネル

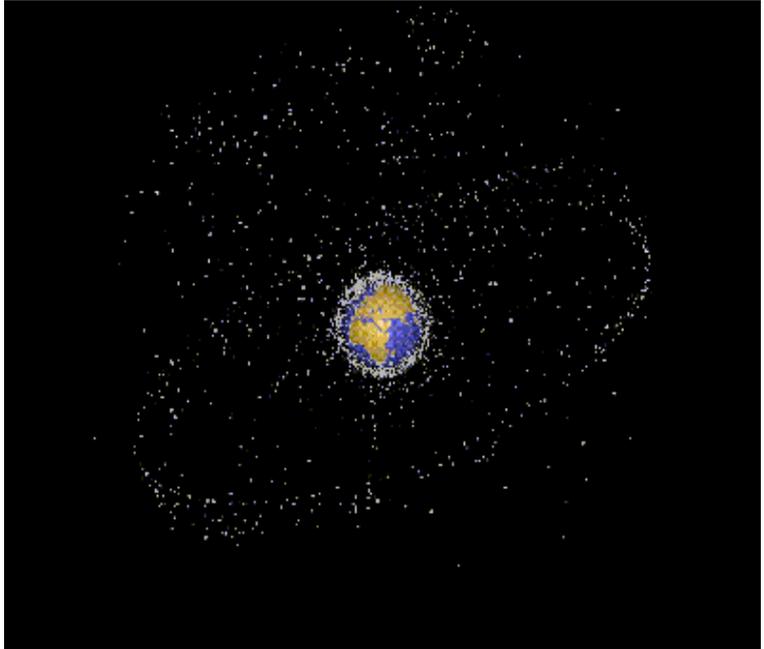
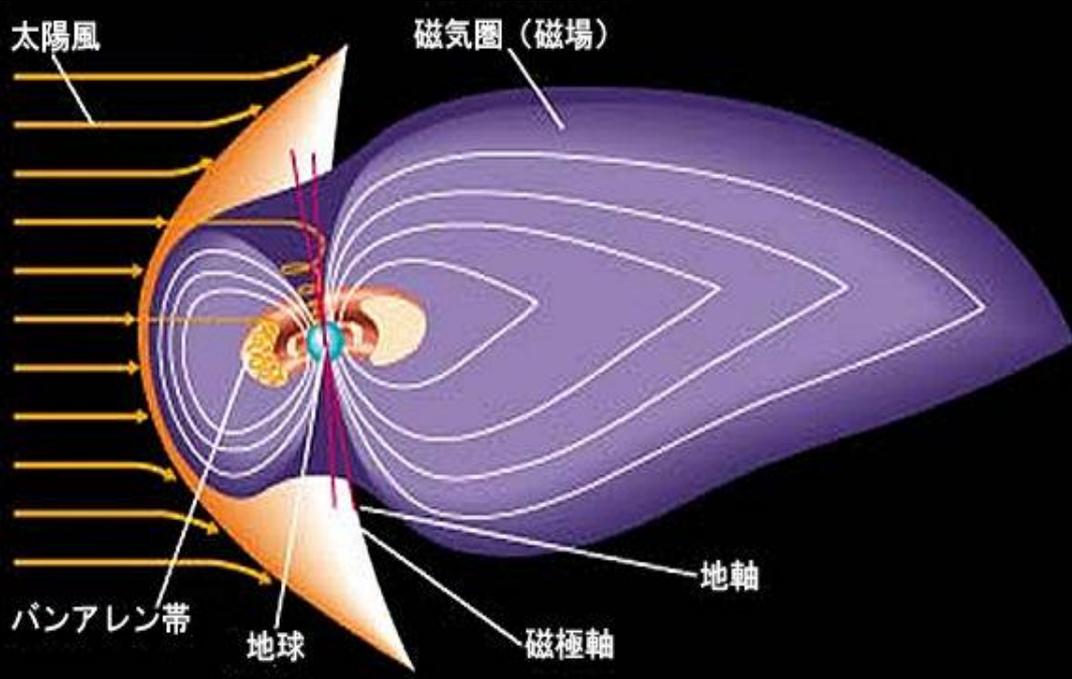
フィルム型アモルファスシリコン太陽電池



太陽発電衛星用の太陽電池は宇宙特有の環境に耐える必要

高い宇宙放射線耐性
⇒放射線に強いタイプの太陽電池の開発・選定

宇宙ゴミ（デブリ）との衝突破壊を考慮した設計⇒故障が広がらない分割設計



静止衛星軌道: $6xR_e$ (地球半径)
磁気圏境界: $10R_e$ (地球半径)

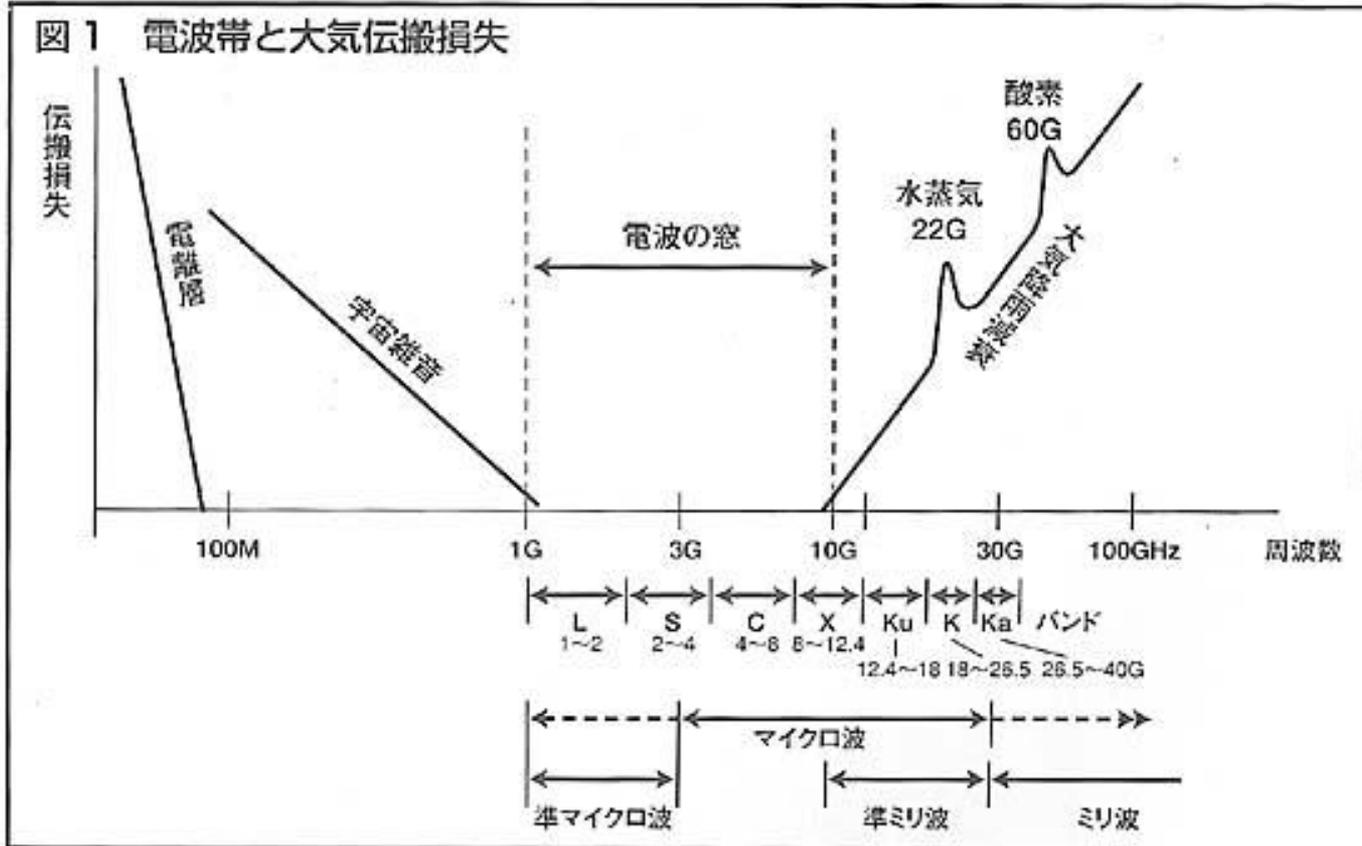
デブリ映像





**地球への送電はどう
やって行う？ 何が問
題？ 安全性は？**

電波の窓

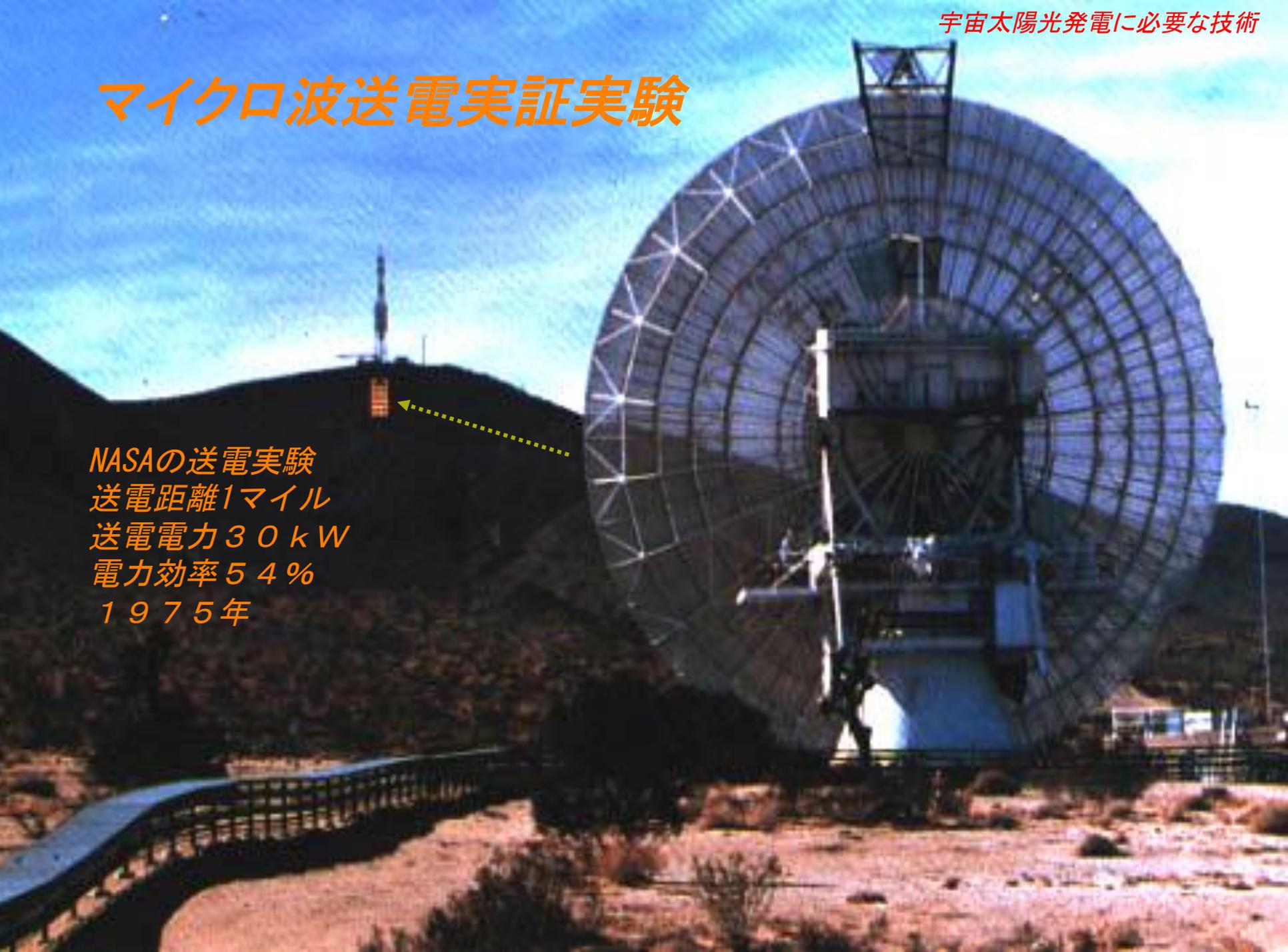


キクスイホームページ キクスイ・ナレッジ・プラザ

http://www.kikusui.co.jp/knowledgeplaza/microwave/microwave01_j.html

マイクロ波送電実証実験

NASAの送電実験
送電距離1マイル
送電電力30 kW
電力効率54%
1975年



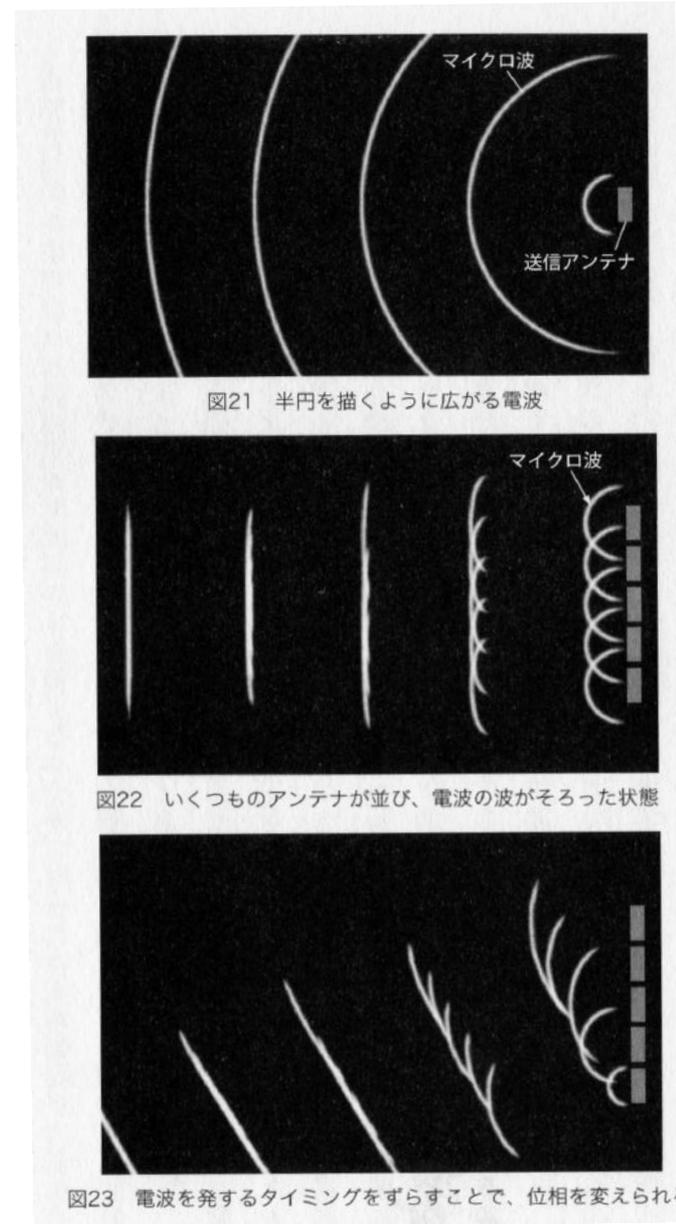
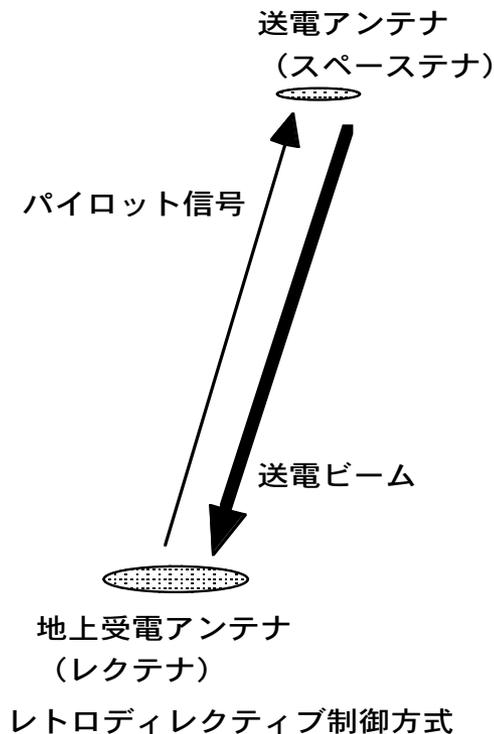
地上の数kmサイズの受電所(レクテナ、NASAの設計例での想像図)



マイクロ波を狙った受電所にどのように向けることができるか？

SPS技術の中で最も困難な技術

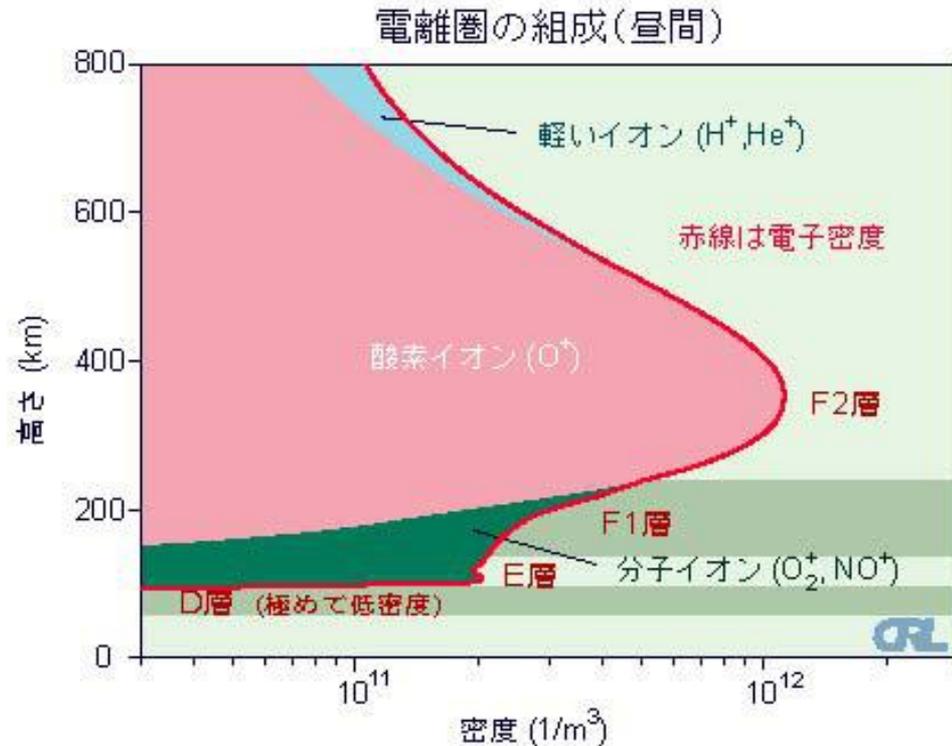
レトロディレクティブ制御: 地上局の誘導電波を用い正確に数百～数万km離れた地上アンテナに向けて送電(静止衛星の場合であれば1km離れて3cm内に指向する精度)



マイクロ波は電離層を通過できるか？

地上へのマイクロ波の送電は、
電離層を通過する必要がある。

これまでの研究では電力を失うことなく通過。
ただし実際に衛星による実験で確認する必要がある。



マイクロ波の人体への影響は？

W/m²

10⁵

電子レンジの中

10⁴

10³

太陽の光のエネルギー密度

10²

10¹

マイクロ波安全基準
(受電所周辺部)

10⁰

受電所立ち入り禁止

10⁻¹

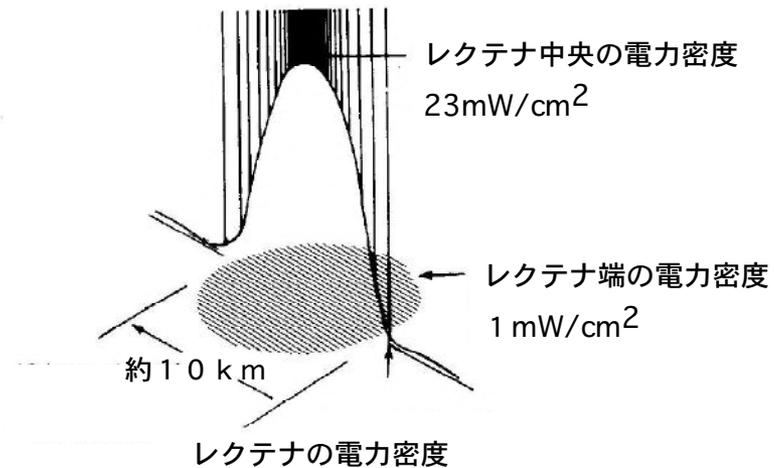
制御不能時の平均電力密度
東京タワー直下近傍電力密度

10⁻²

度

国・機関名	一般公衆への曝露		職業者への曝露	
	電界強度 (V/m)	電力密度 (mW/cm ²)	電界強度 (V/m)	電力密度 (mW/cm ²)
郵政省電気通信技術審議会 [日本] 1990、1997	61.4	1 (一般環境)	137	5 (管理環境)
ANSI/IEEE [米] C95.1-1999	—	3.87 (非管理環境)	—	10 (管理環境)
ICNIRP 1998	61	1 (公衆曝露)	137	5 (職業曝露)

(注) ANSI : 米国国家規格協会、
IEEE : 米国電気電子学会、
ICNIRP : 国際非電離放射線防護協会

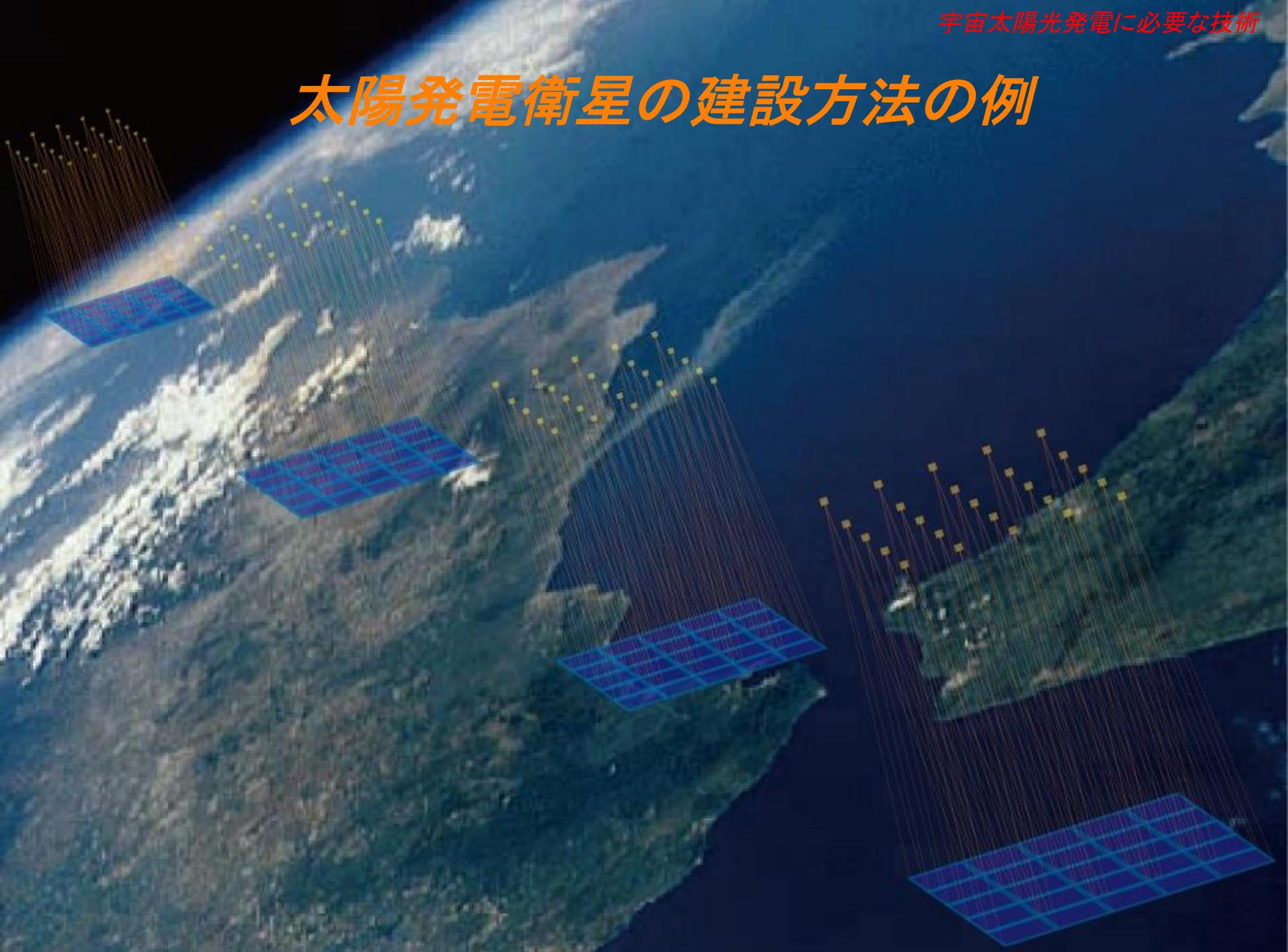


NASAのモデルの例(現在の設計では中央部の電力密度は高く受電領域の大きさが小さい)

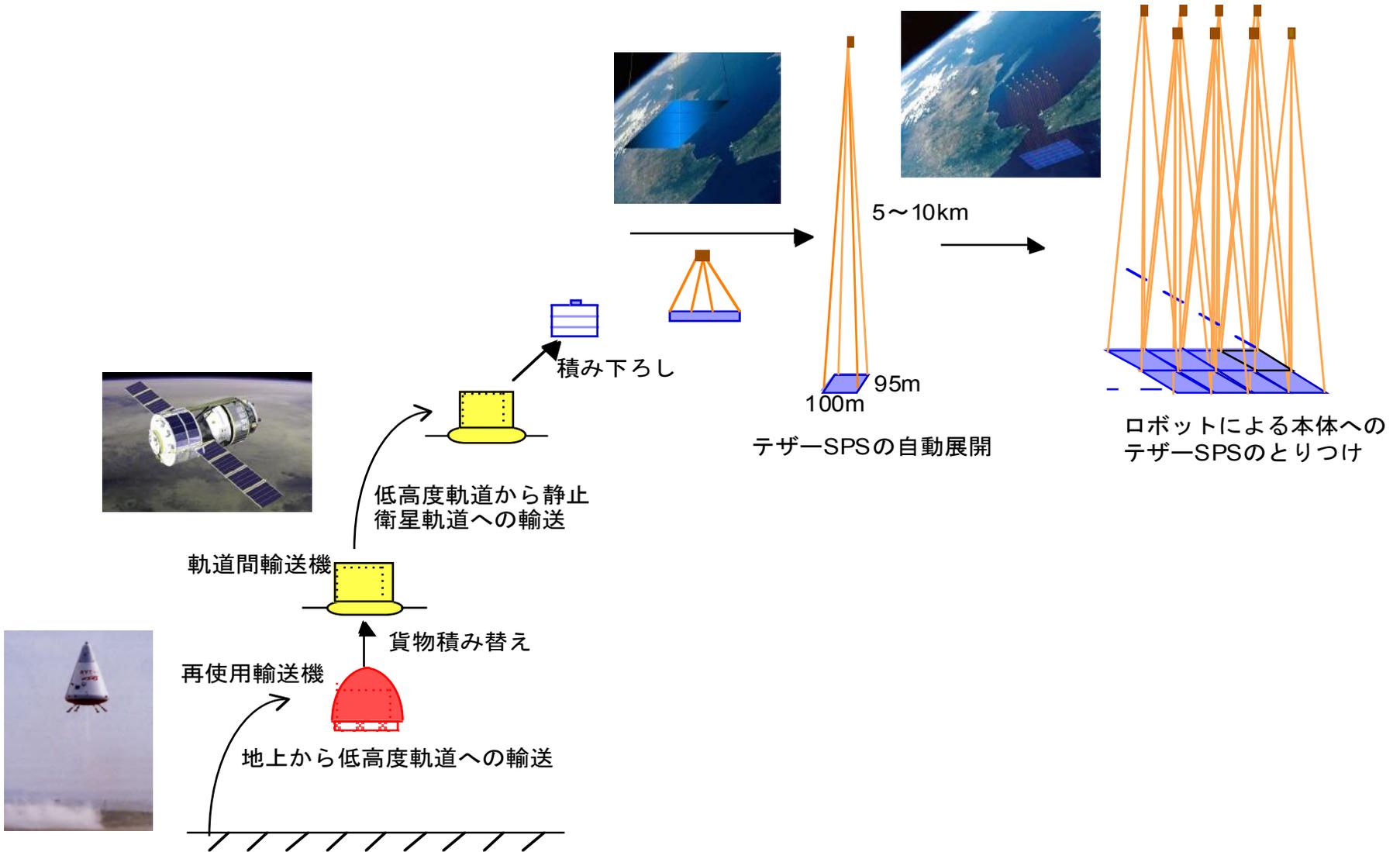


大きな発電所をどう
やって宇宙に作る？
ロケットは安くなる？

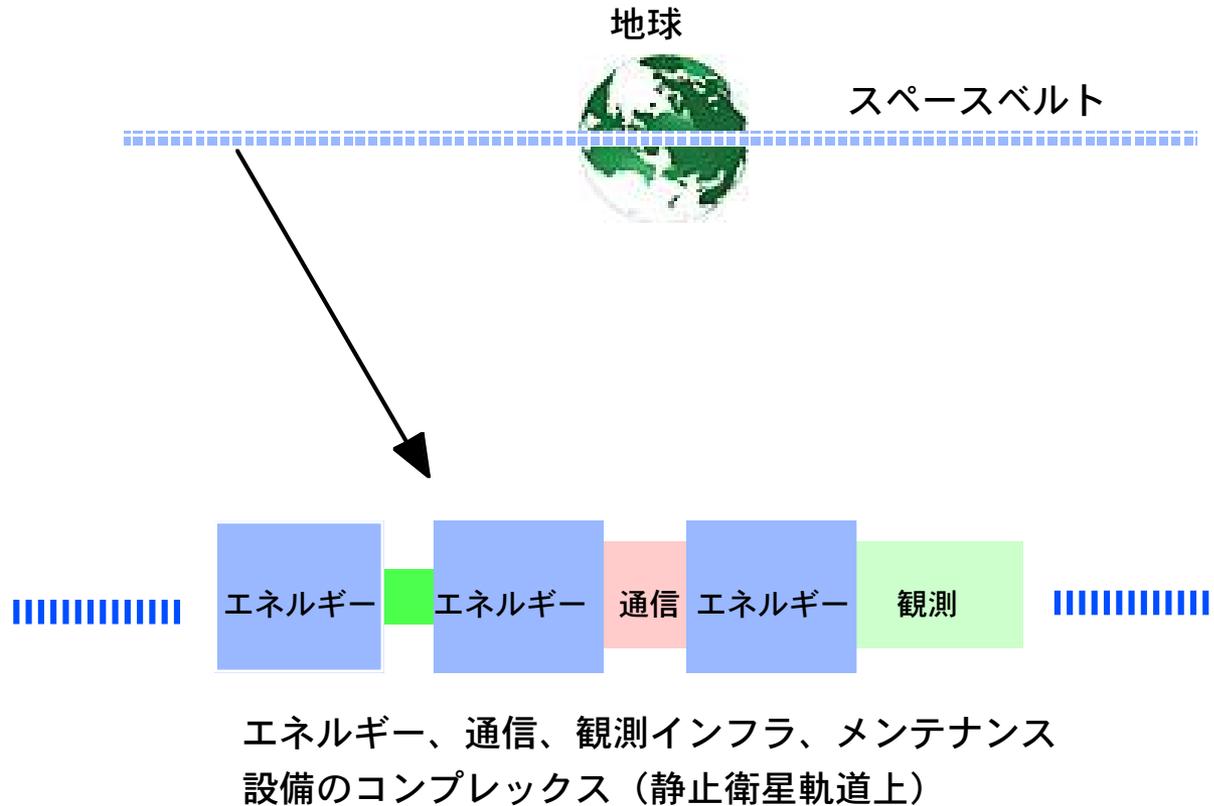
太陽発電衛星の建設方法の例



太陽発電衛星の建設方法の例



静止衛星軌道は既に沢山の衛星で混雑している 対策は？



地球上の全ての一次エネルギー(13000 GW)を出力一定型のテザーSPSでまかなうとしたら全長32,500kmとなり、スペースベルト全周の14%を占めることになる。

低コスト打ち上げ輸送手段の開発

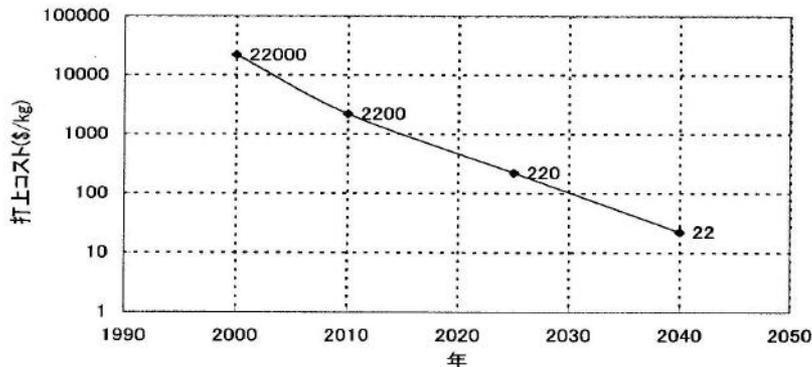
- ・現在の試算ではSPS構築のコストの**50%以上は輸送コスト**
- ・宇宙輸送コストの低減(現在の輸送コストの**1/50-1/100程度**)がSPS構想成立のための必要条件
- ・現在の使い捨てロケット方式では低コスト化は不可能(H2Aは1機80-100億円)
- ・**再使用型輸送システム**の開発が必須
- ・低コスト化のためには**大量輸送の需要**が必要(宇宙観光旅行、SPS)



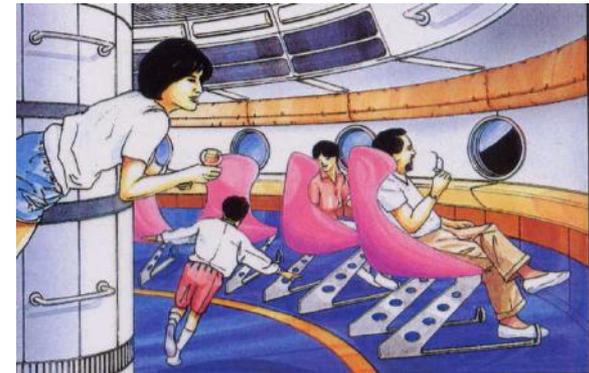
JAXAの大型ロケットH2



Air Ship One (June 21, 2004)



JAXAの再使用ロケット実験



宇宙観光旅行

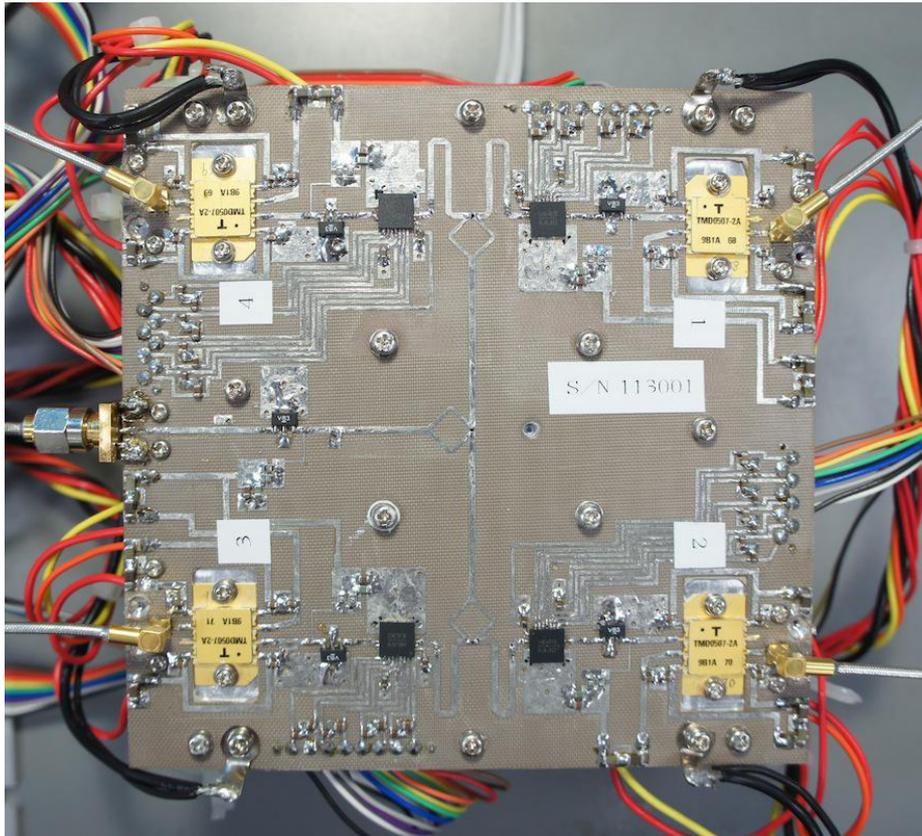


現在どのような研究
が行われている？

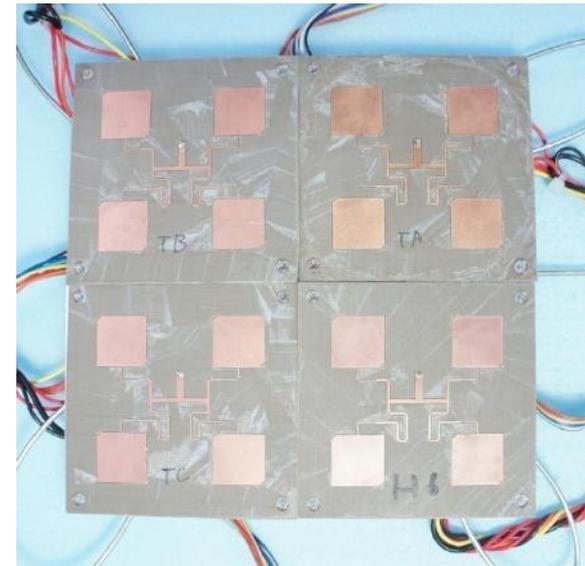
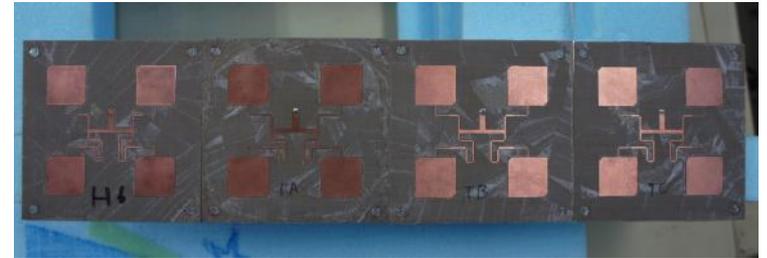
SPSの研究

区分	分野	項目	具体的な目標
中枢技術の地上 実証	マイクロ波送電技術	マイクロ波ビーム制御技術	制御精度 0.5度以内
	レーザー送電技術	高効率送受電技術	太陽光直接励起効率 20%以上 受電効率 20%以上
		レーザービーム制御技術	制御精度 10 μ ラジアン以内
	大型構造物技術	厚みのあるパネル展開	100mサイズの展開の部分実証
		薄膜反射鏡の展開	100mサイズの展開の部分実証 反射鏡光学性能評価
	耐宇宙環境性	高電圧・高出力マイクロ波の プラズマ干渉	電圧15KV、 電力密度1500W/m ²
中枢技術の軌道 上実証の準備	無線送電技術	マイクロ波送電技術実証	kWクラス、小型衛星又はJEMで の実験計画策定
		レーザー送電技術実証	kWクラス、JEMの実験計画策 定
システム検討	宇宙輸送	SSPS構築に必要な宇宙輸送 機の検討	宇宙輸送の専門家との協働による ロードマップの策定
	開発計画	SSPS実現に至るロードマップ の検討	各分野の専門家との協働による 技術ロードマップの策定

マイクロ波回路の試作研究



マイクロ波増幅器



マイクロ波アンテナ

小型車両へのマイクロ波送電実験



マイクロ波送電器



マイクロ波受電器



小型車両

マイクロ波送電技術の地上実証

送電パネル

マイクロ波出力

ビーム制御

レクテナ

送電距離

1.2m x 1.2 m, 4cm 厚さ

4 サブパネル構成(可動)

1.6 kW, 5.8 GHz, 素子変換効率 >60 %

パイロット信号を利用した制御

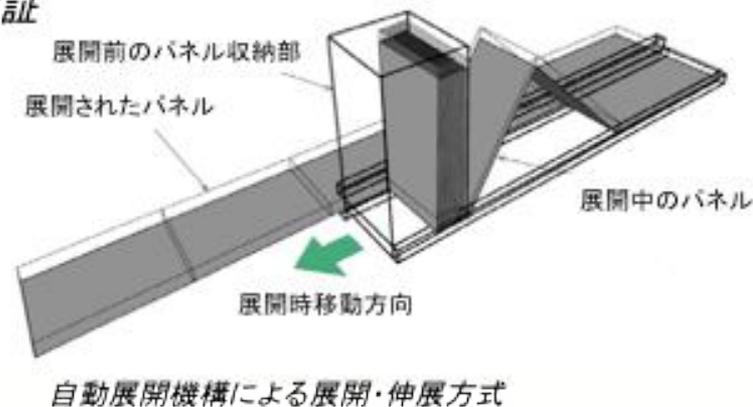
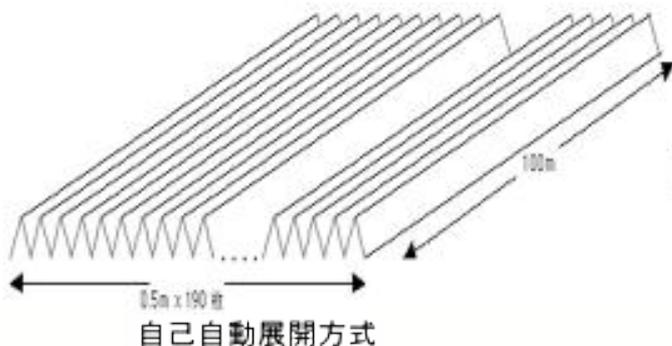
直径2.5 m、素子変換効率 > 70 %

50 m (typical)

SPSに必要な大型構造の構築方法の研究

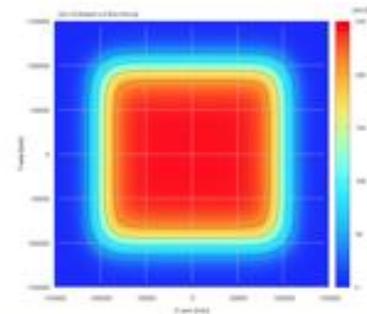
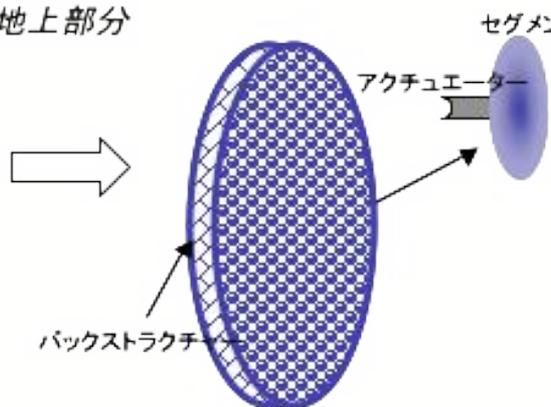
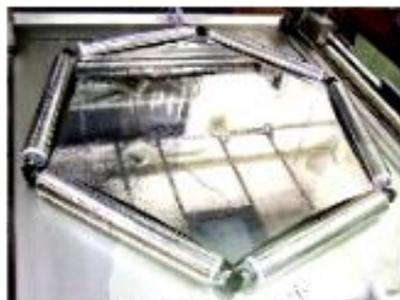
数百～数 kmサイズの厚みのあるパネル構造

目標:100m級パネルの構築技術の地上部分実証



数百～数kmサイズの超軽量ミラー

目標:100m級反射ミラーの構築技術の地上部分実証(含む光学性能)

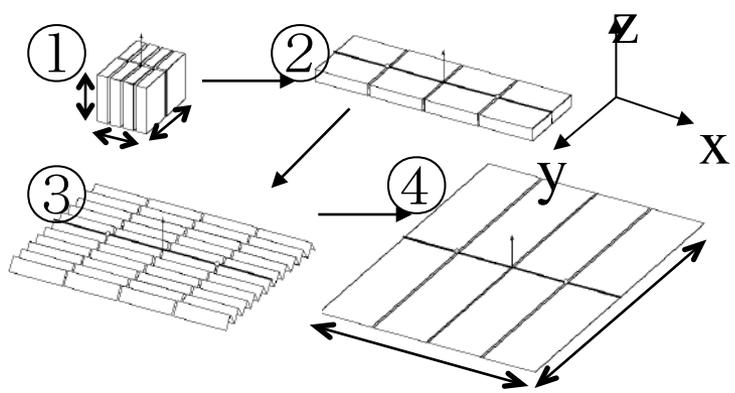


アクチュエータ付きセグメントミラーのバックストラクチャーへの取付方式

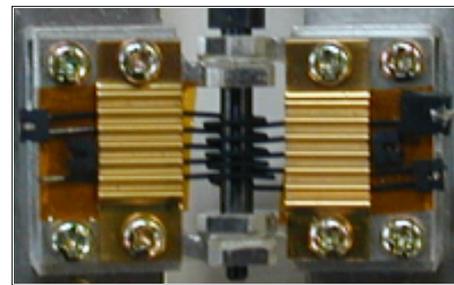
多数のセグメントミラーによるターゲット面(太陽電池面)への一様分布の計算例

SPSに必要な大型構造の新しい構築方法の研究

形状記憶素子をアクチュエーターとして用いた二次元展開機構



試験した2種類のSMA



形状記憶合金を組み込んだ
ヒンジ



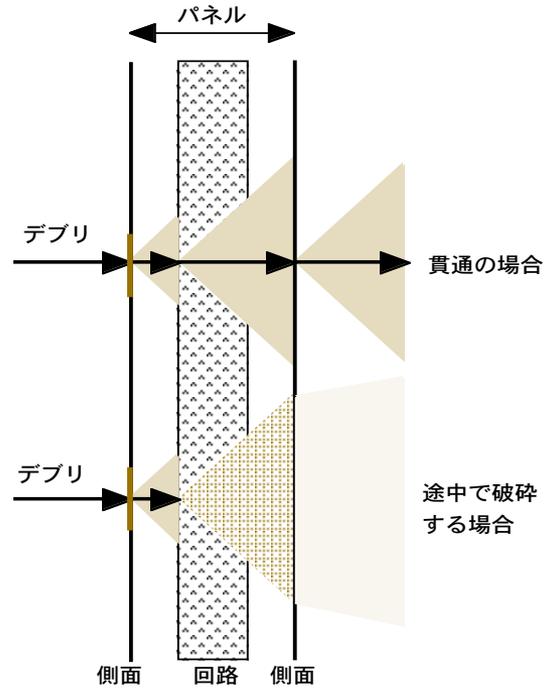
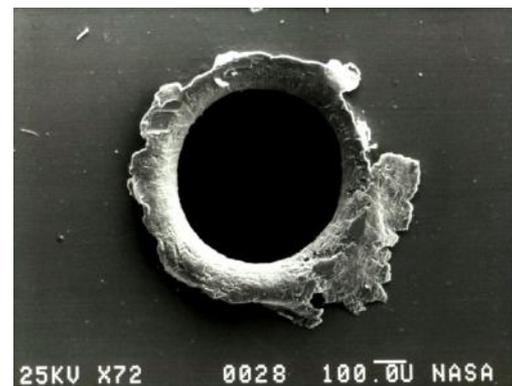
32枚パネルの展開試験



高速の宇宙ゴミ(デブリ)に対する対策

大面積の発送電一体型パネルへの
デブリ衝突は避けられない。

衝突による破壊の影響が最小限に
なるような構造や構成を見いだす必
要がある。

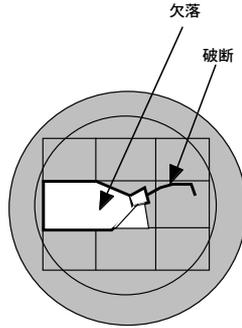


宇宙ゴミ（デブリ）の衝突の影響を最小限にとどめる設計のための超高速衝突実験

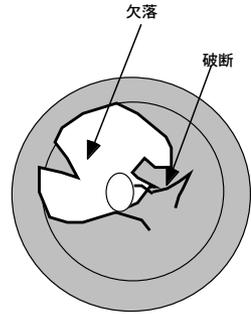
JAXA宇宙科学研究所の超高速衝突実験設備 二段式軽ガス銃(0.3gの物体を秒速5km以上に加速可能)



格子状に切り込みをいれた場合の薄膜の破壊状況。切り込みがある場合は切り込みに沿った破壊が見られた。

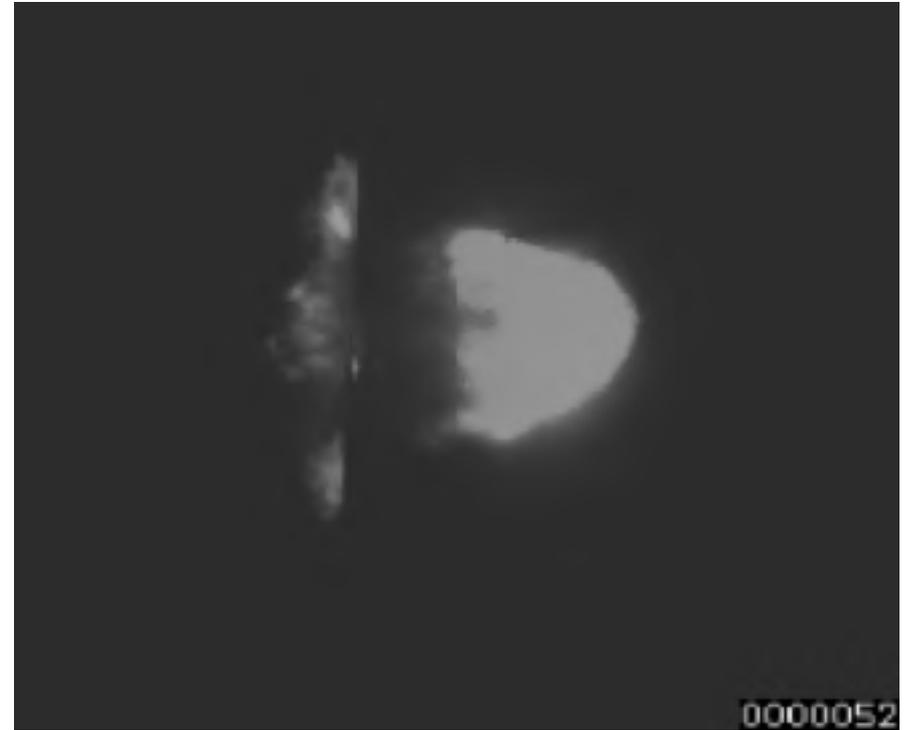
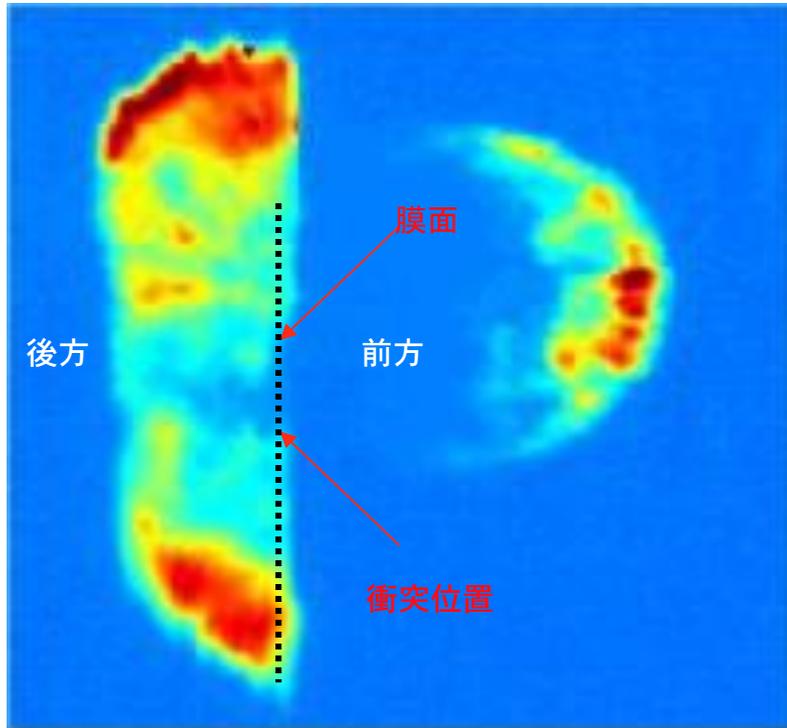


格子状切り込み有り

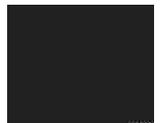


切り込み無し

超高速衝突の状況



高速カメラによるイジェクタの放出物の観測(高速弾は左側より飛翔、画面中央やや左に薄膜ターゲット)



太陽電池面での放電事故を起こさせないための実験



太陽電池パネル 大きな電力を扱う
ためには高い電圧を使用
電力=(電圧)x(電流)
抵抗(熱)損失=(抵抗)x(電流)²

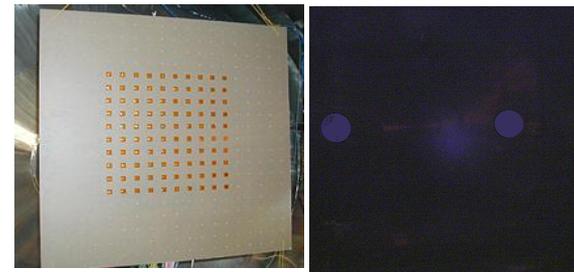


地上でも高い電圧で送電

放電の危険性



宇宙空間プラズマ模擬試験装置

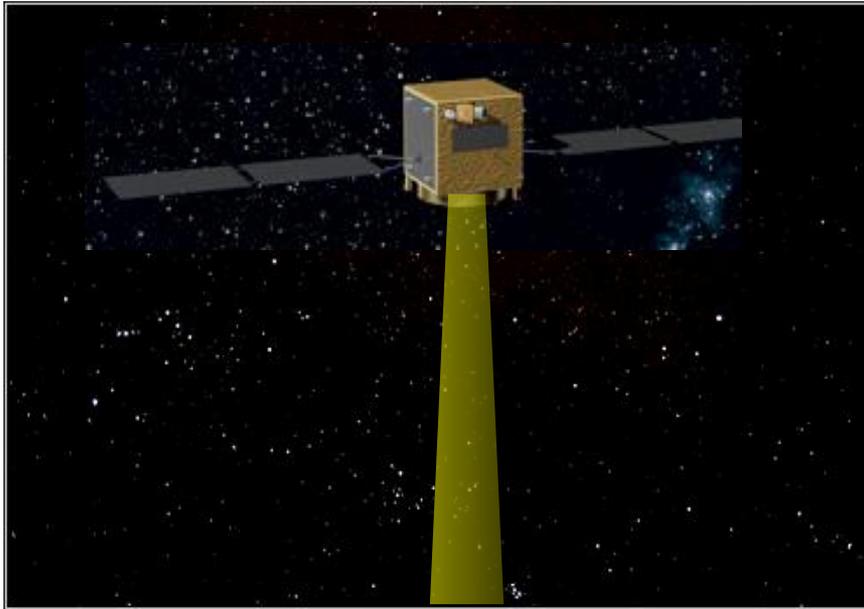


太陽電池パネルの実験
放電が発生し難い太陽電池の
形状や電位の分布を明らかに
する研究

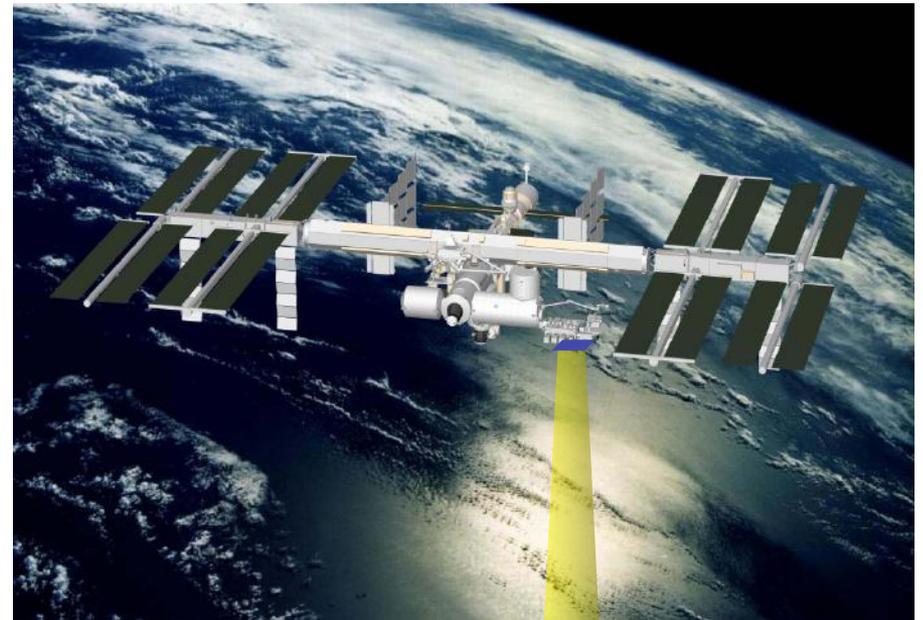


今後実用までどのような計画？

無線送電技術実証のための宇宙実験の計画



小型衛星を用いた実験



国際宇宙ステーションを用いた実験

高度:400km程度、電力レベル:1-5kW程度
送電ビーム(マイクロ波またはレーザー)の精密方向制御技術の実証
電離層(マイクロ波の場合)及び大気(レーザーの場合)の通過実証

小型衛星を用いたマイクロ波送電実験の案

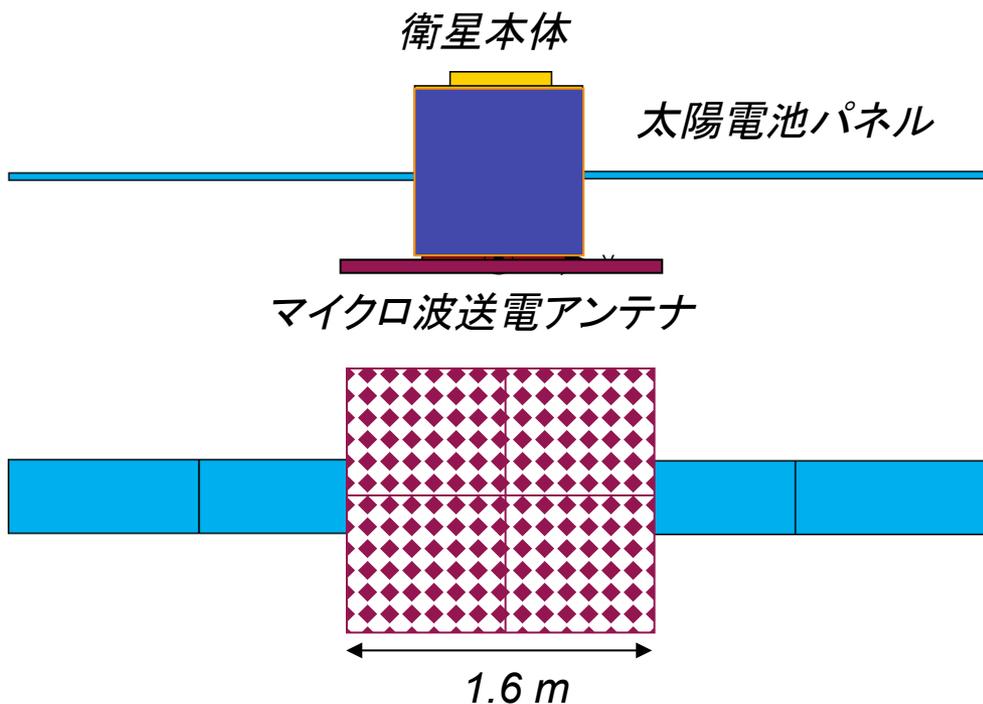
軌道: 低高度周回軌道 (370 km)

衛星重量: 400 kg

実験機器重量: 200 kg

姿勢制御: 3-軸制御

送電電力: 3.8 kW



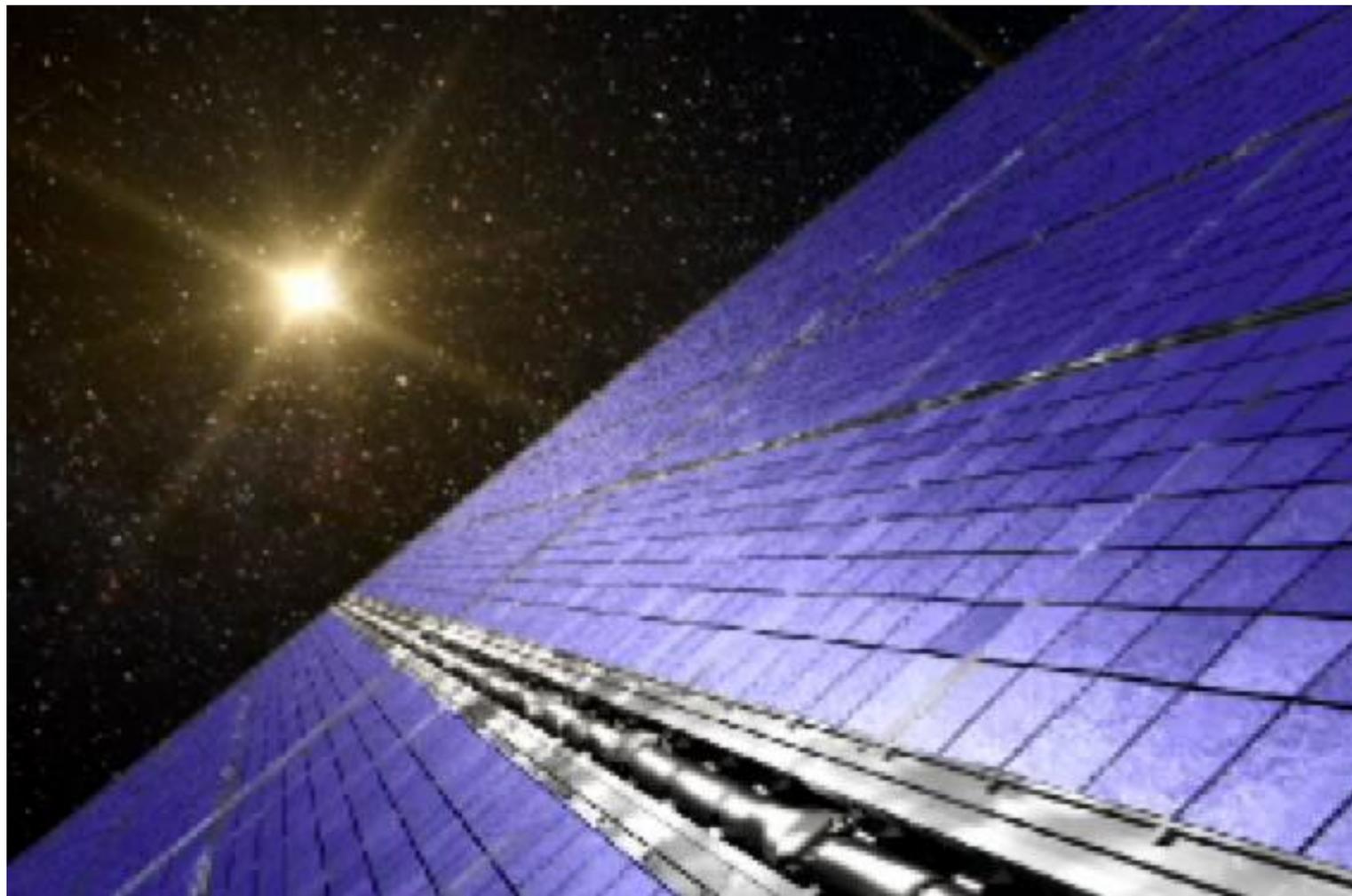
小型科学衛星打上用イプシロンロケット。初号機2013年度。



小型衛星から地上へのマイクロ波送電実験。

今後何を計画しているのか？

実験衛星デモンストレーションCG(首都大)



実用へ至るまでの道のり

研究フェーズ



地上実証



小型の軌道上実証



送電方式選択(マイクロ波/レーザー)



100kW 級軌道上実証



コンフィギュレーション選択

開発フェーズ



2MW級の軌道上実証

200MW級のプラント実証

実用フェーズ



1GW級商用SPS1号機



SPSが実現したら・・・



環境に優しいエネルギーがふんだんに得られる
地球環境が修復され自然そのままに維持される
偏在するエネルギー資源をめぐる争いの終焉
豊富なエネルギー資源がもたらす穏やかで創造的な社会
新しい社会の活力による宇宙への発展が生み出す新しい
文明と文化……

まとめ

—宇宙からのクリーンエネルギーの獲得に向けて—

- ・宇宙空間には、地上と異なり広大な場と天候に左右されないふんだんな太陽エネルギーがある。宇宙太陽光発電の構想は、人類のフロンティアである宇宙空間を人類のエネルギー取得の場として利用しようとするものであり、クリーンで大規模なエネルギーシステムとして大きな可能性を持っている。
- ・我が国では現在、宇宙太陽光発電の最も重要な課題である無線送電と大型構造物構築について地上での実証実験、及び実用に至るまでの開発計画の検討が進められている。
- ・宇宙太陽光発電が真に人類社会の救世主になりうることを検証するため、近未来に本格的な軌道上実証実験に着手すべき段階に来ている。