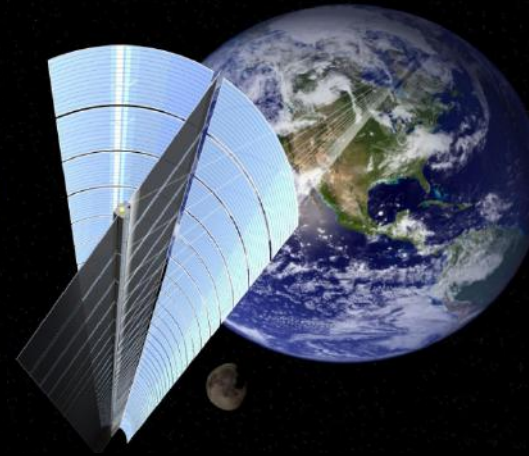
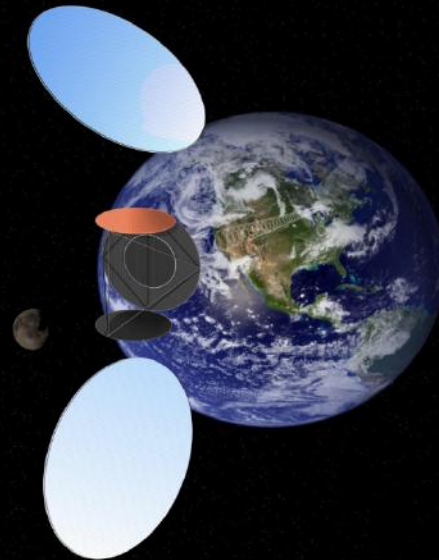
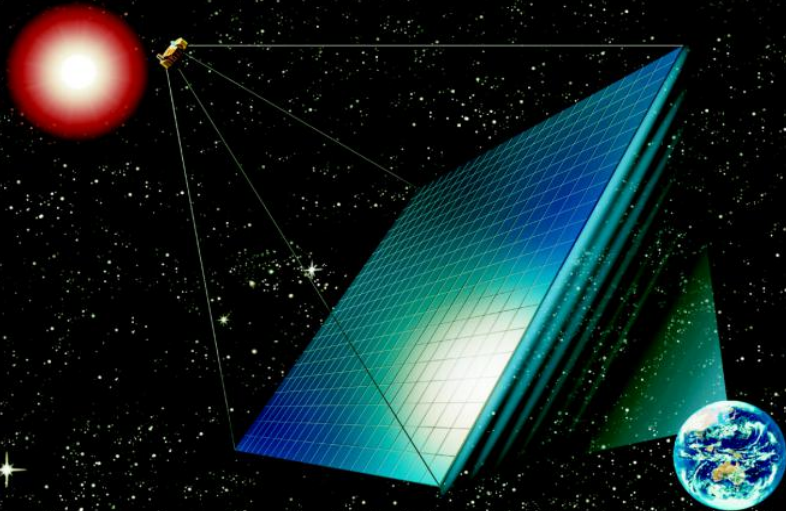


次世代エネルギー・宇宙太陽光発電

- ・ 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？



2012年12月

講師プロフィール 佐々木進

広島県出身. 東京大学理学系研究科博士課程物理学科、理学博士
現在、宇宙航空研究開発機構 宇宙科学研究所 宇宙機応用工学研究系専任教授

専門は宇宙エネルギー工学, 宇宙環境科学.

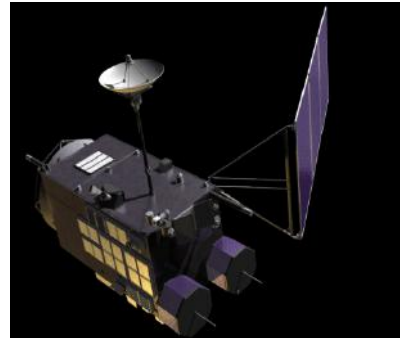
これまで、スペースシャトルでの日米共同オーロラ実験、回収型宇宙実験プラットフォームSFU計画、月探査ミッション計画“かぐや”に参加. 現在は太陽発電衛星の研究に従事.



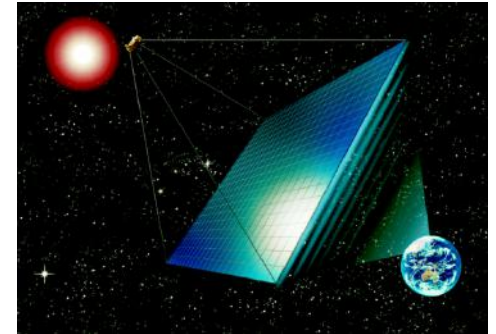
スペースシャトルでの
日米共同オーロラ実験



回収型宇宙実験プラット
フォームSFU計画



月探査ミッション計画“かぐや”



太陽発電衛星



**なぜ宇宙太陽光発電
を研究するのか？**

現在の日本の電力の状況



水力発電所(20%)



火力発電所(61%)



原子力発電所(19%)



送電線



製造(43%)



運輸(23%)



民生(34%)

ほとんど無くなった！



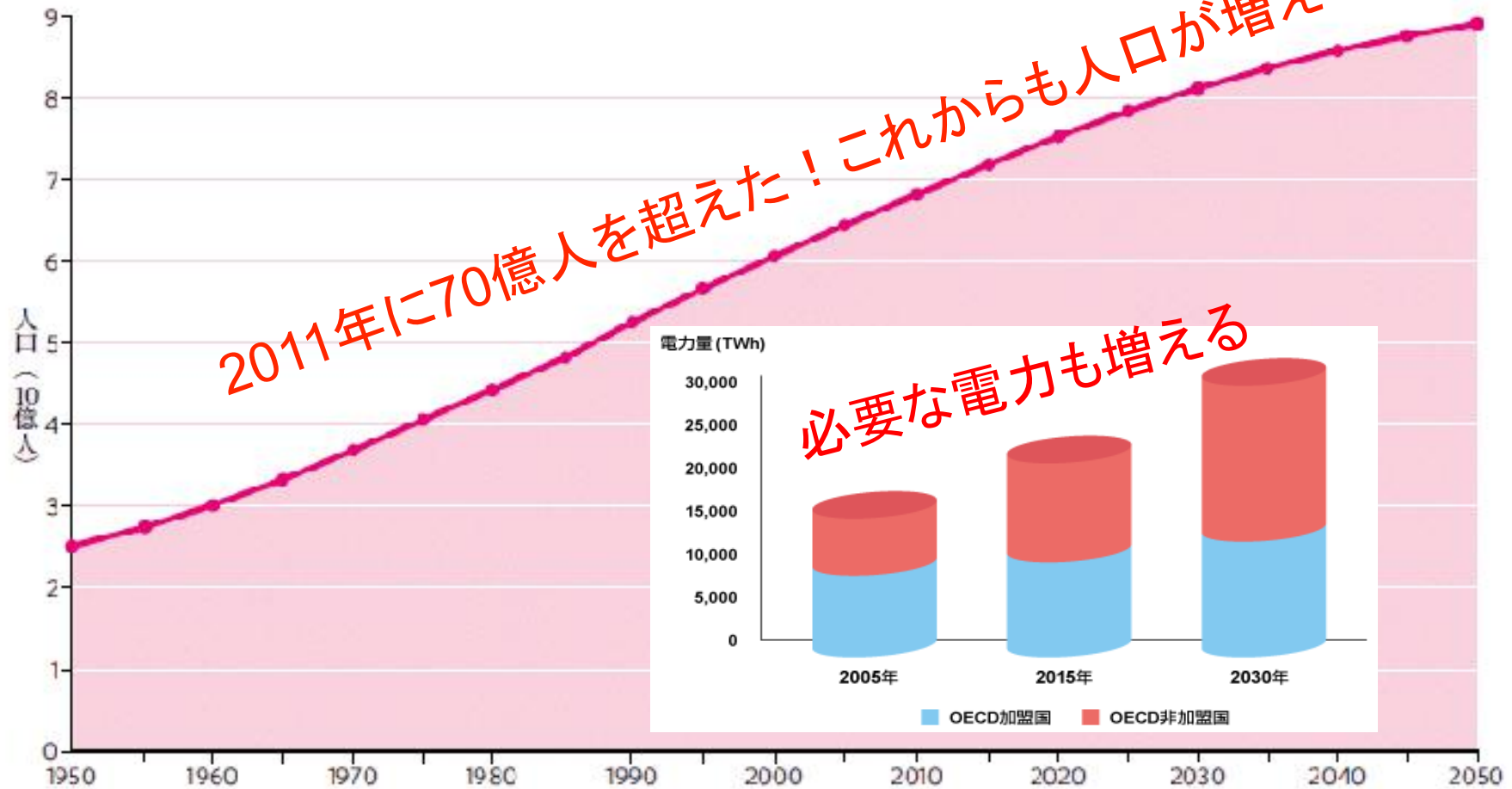
実際には、
原子力の問題がなくても
将来は電力が足りなくなる。



これまでの方法はもう限界！
これまでと別の
”電気を作る方法“
が必要。

今後も必要な電力が増えていく

国連人口推計 (1950~2050年)

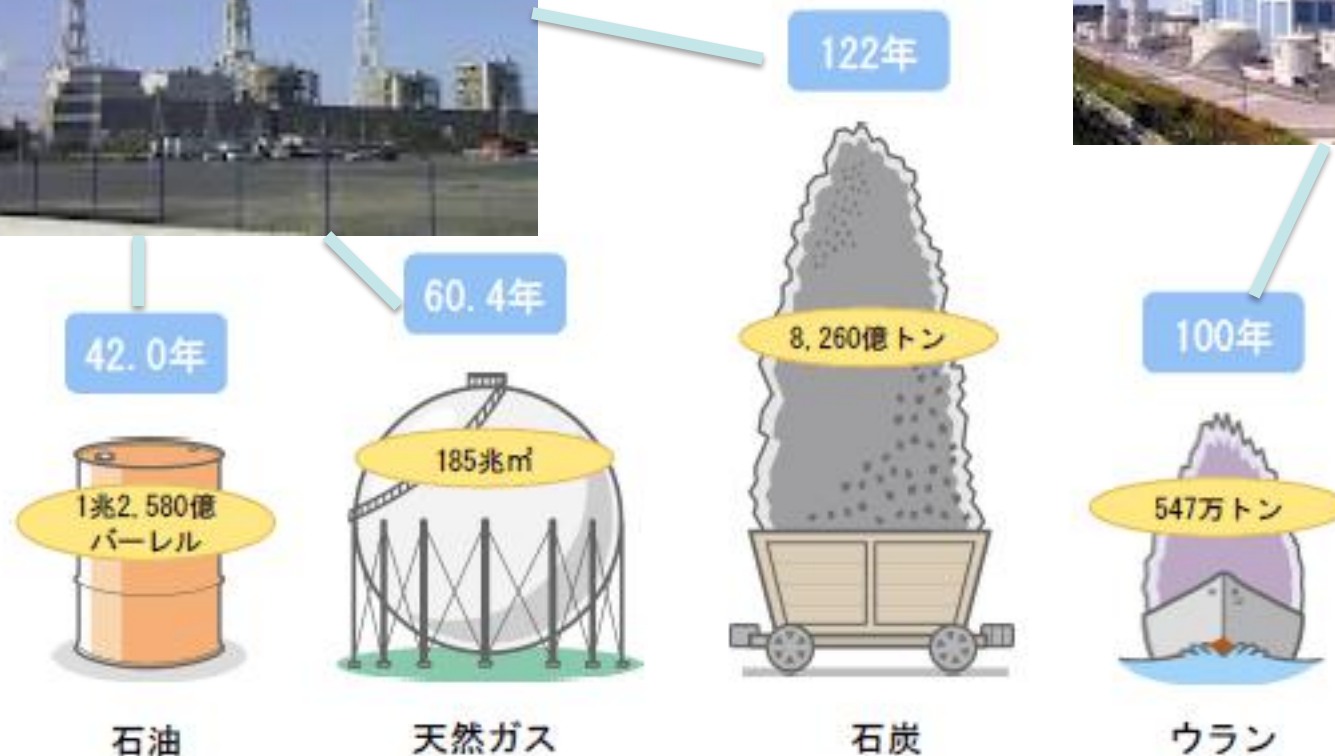


Source: UN Population Division

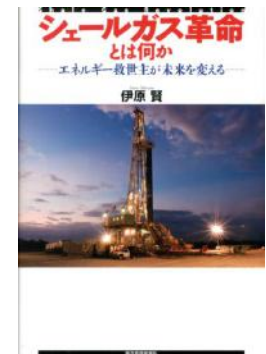


今 2012年

限りあるエネルギー資源

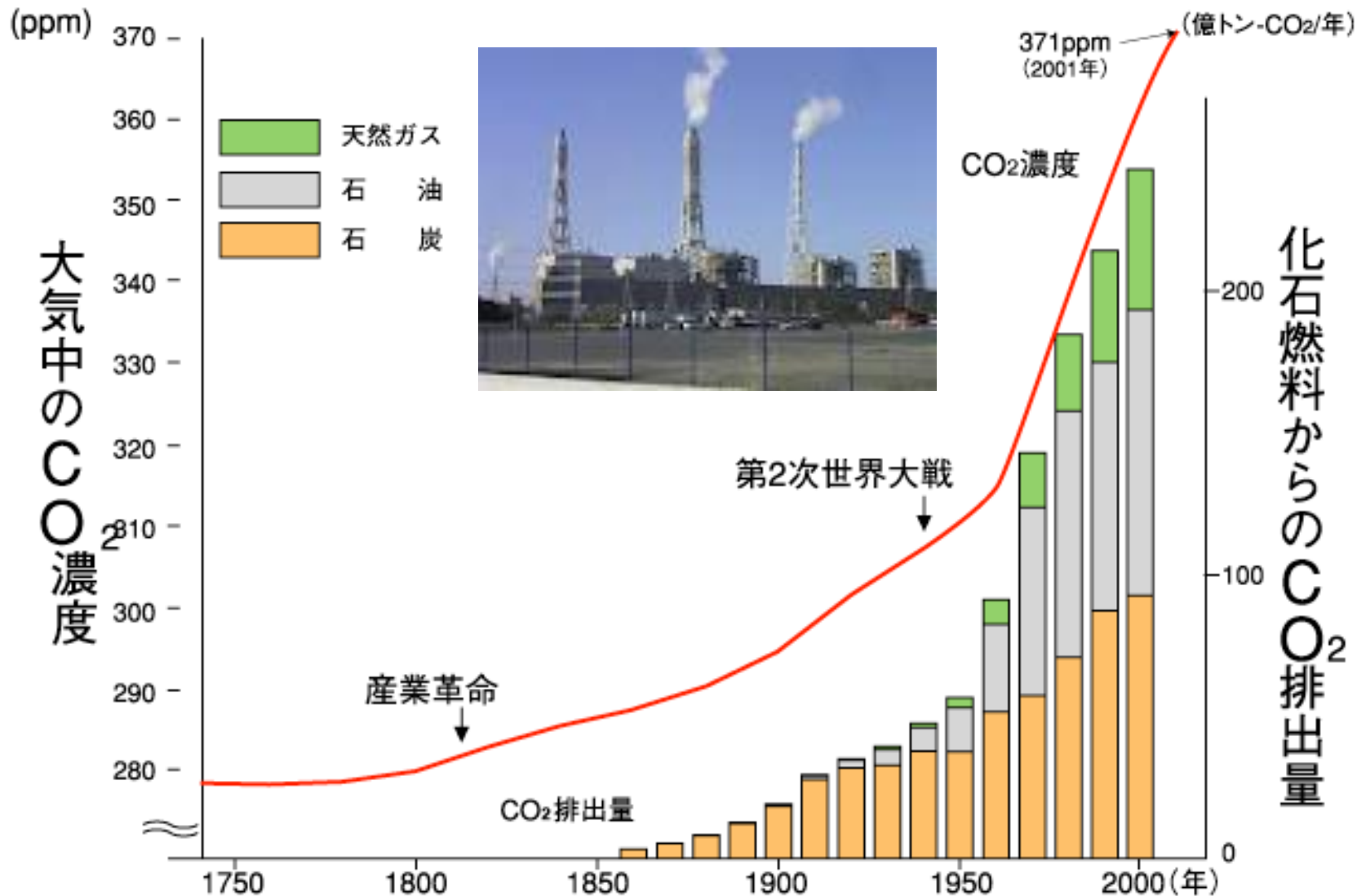


？



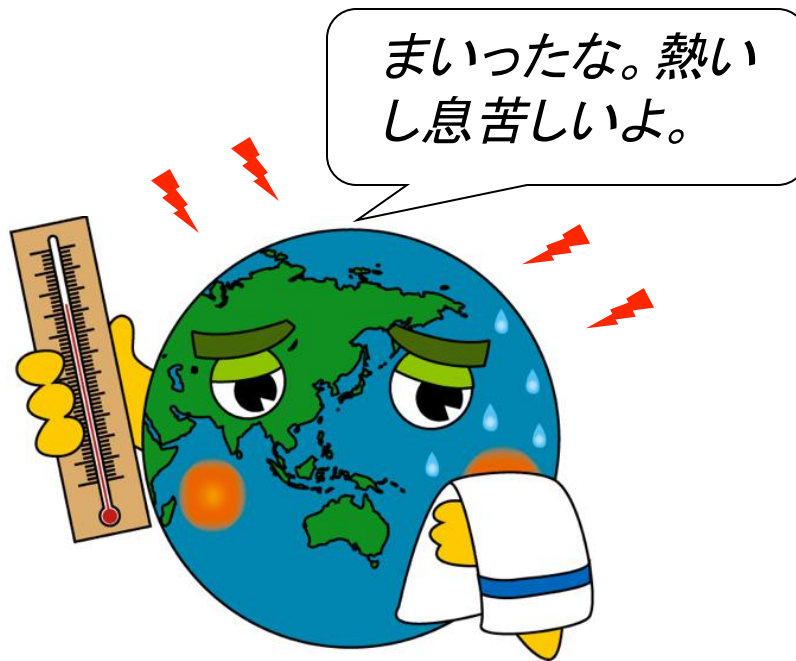
- ・化石燃料は0.02%の変換効率で太陽エネルギーを**2億年**かけて蓄積。人類はこれをわずか**100~150年**で使い切ろうとしている。
- ・石油の残存量(1兆バレル)は**富士山**を逆さにした容器として見立てるとその**1/8程度**しかない。

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

人類は地球にとってウイルス？



地球



他の惑星

では、どうしたら良いのか？

1. ずっと使える方法で電気を作る。
2. 地球を汚さない方法で電気を作る。



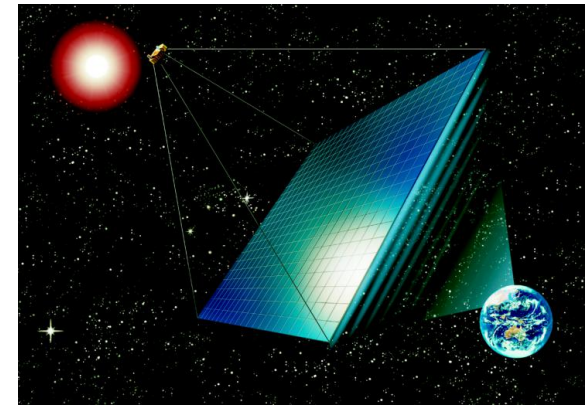
エネルギーの種類	発電方法
自然エネルギー	地上で太陽の光で発電
	風の力で発電
	海の波の力で発電
	地球の熱の力で発電
	宇宙で太陽の光で発電
新しい原子のエネルギー	核融合

宇宙の太陽光発電所

何度も使用できるロケット
で宇宙に運ぶ



宇宙で組み立てられた
太陽光発電所



電線を使用せず、電
波(マイクロ波)で電
力を地上におくる



地上の太陽光発電所



沿岸の人工島の受電所

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 1.77×10^{17} 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。



なぜ、宇宙か？

地上の太陽光発電所



雨や曇の日がある。



夜がある

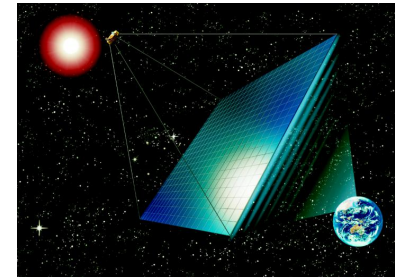


広い土地を探
すのが大変

宇宙の太陽光発電所



雨が降ったり曇ったりしない。



夜がない

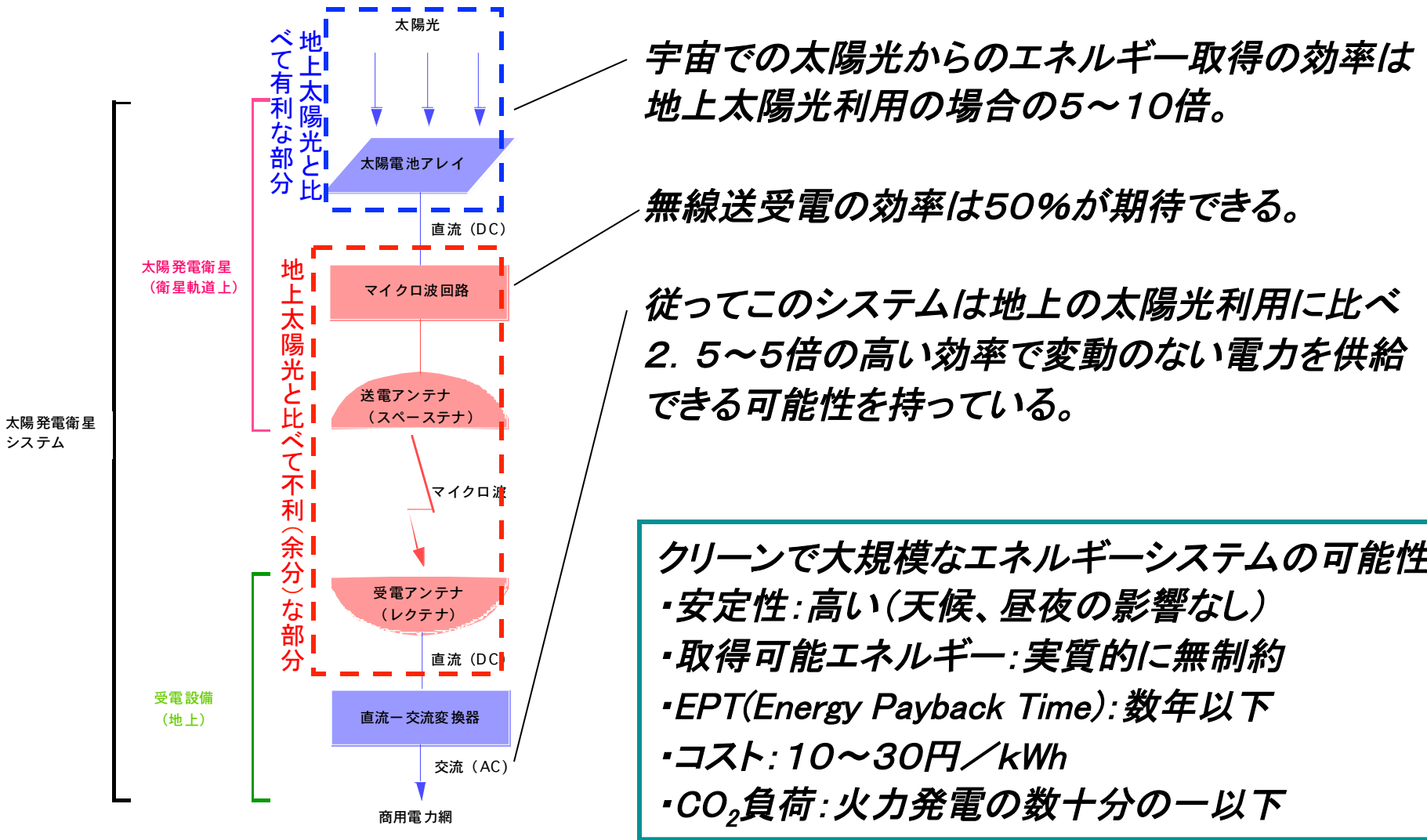


宇宙は広い

比較



エネルギーシステムとしての特徴



SPSによる地球の温度上昇？

地球に届く太陽エネルギー：

1.75×10^8 GW この内約30%は反射、残りの70%は熱になる。

地球から出て行く赤外放射：

$W = 1.22 \times 10^8$ GW

$W = \sigma T^4 \times (4\pi r^2)$, $r = 6360$ km, $\sigma = 5.667 \times 10^{-8}$ J/(s $\cdot$ m 2 ·K 4)から、

$T = -18^\circ\text{C}$ (実際には大気の温室効果があるため約 15°C となる)

全世界の一次エネルギーの消費量は

13000GW(太陽入射量の10000分の1)

全一次エネルギー全てをSPSで宇宙から

供給した場合、平均的な温度上昇は、

0.008°C と計算される。

さらに実際には太陽光そのものは0.1%程度

の変動があり、13000GWはその1/10程度。

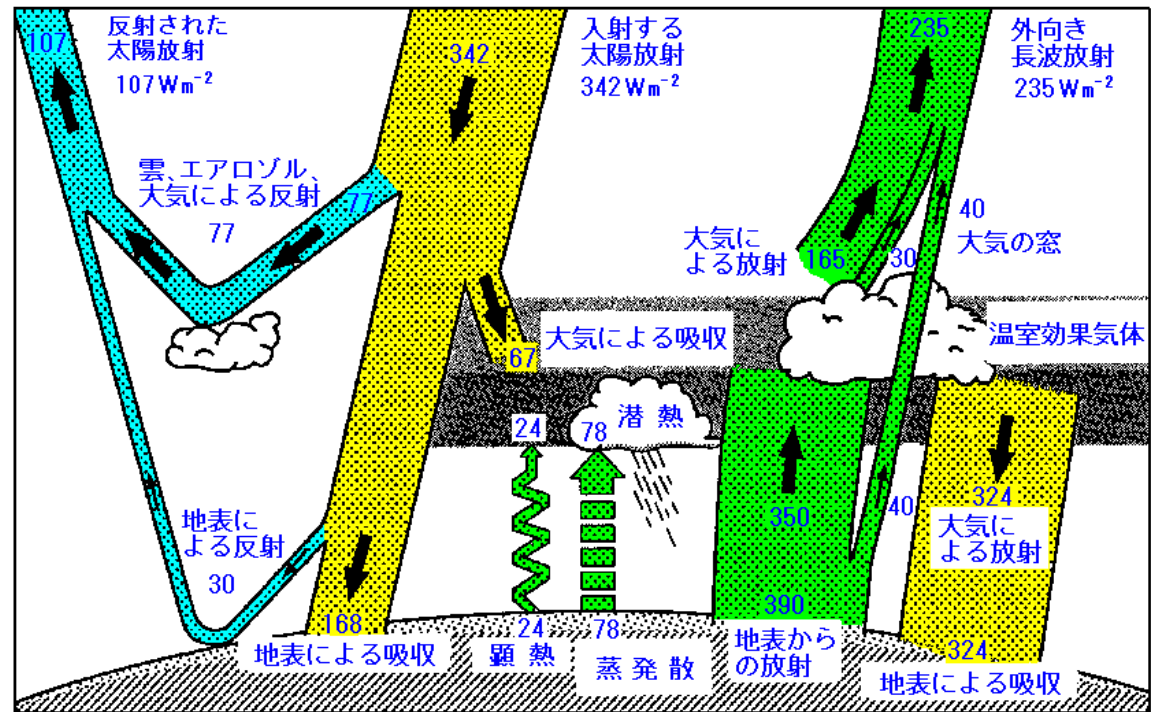


図3 地球の熱放射とエネルギーの収支

〔出典〕 気象庁訳：K. E. TRENBERTH, J. T. HOUGHTON, L. G. METRAFIHO, IPCC(1995) 第1章、P62

宇宙太陽光発電システムのCO₂負荷

CO₂負荷：1時間1kWの電力を作るために
発生するCO₂の重さ (g)

(g-CO₂/kWh)

発電方式	経常運転時	建設時	合計
太陽発電衛星	0	20	20
石炭火力発電	1222	3	1225
石油火力発電	844	2	846
LNG 火力発電	629	2	631
原子力発電	19	3	22

宇宙太陽光発電システムのコスト試算の例

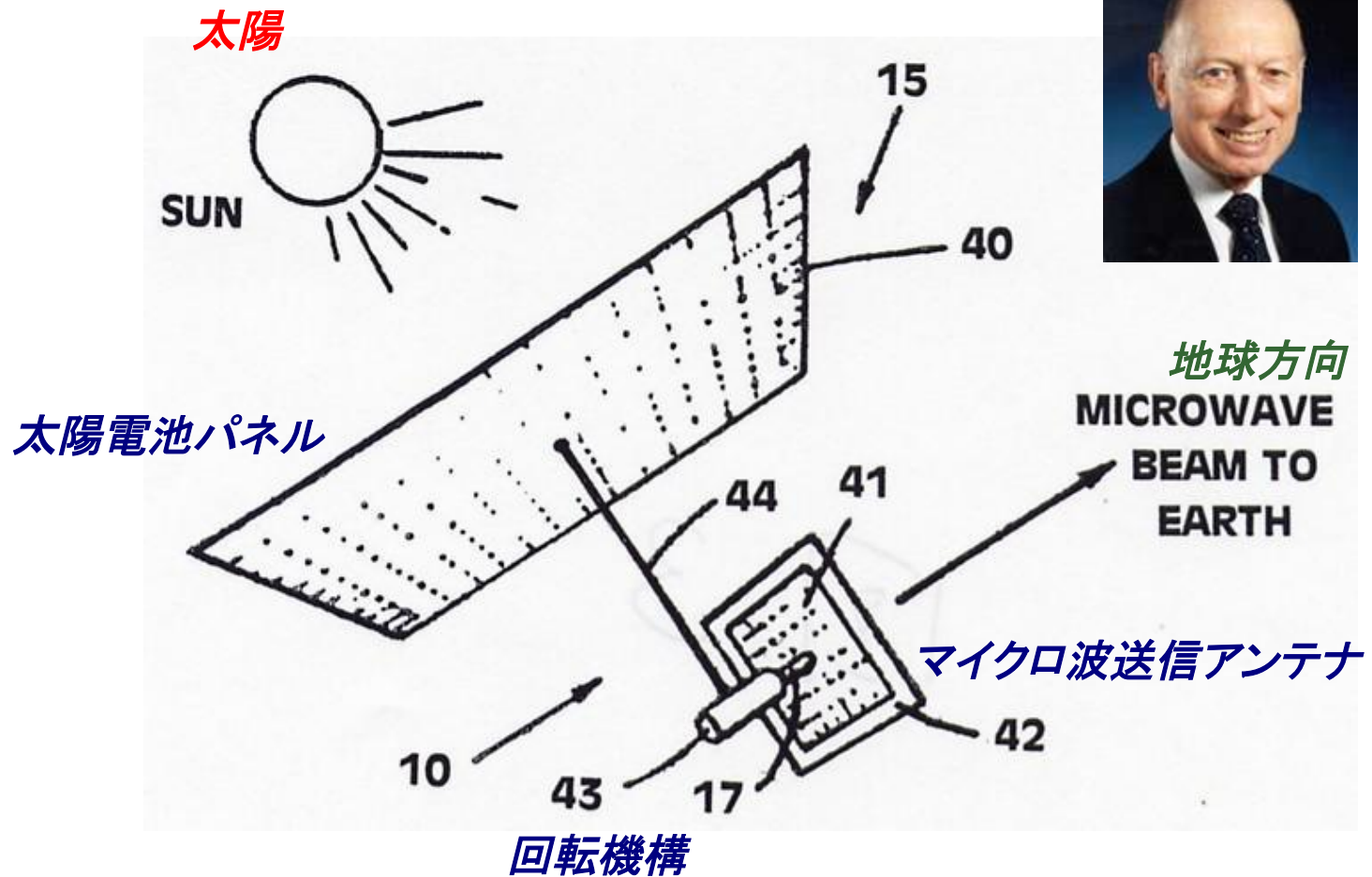
モデル名	検討年	寿命	総額	電力コスト	EPT
NEDOグランドデザイン	1994	30年	2兆4千万円	23円/kwh	2年
NASA Fresh Look Study	1995		10～100億ドル (目標)	1～10c/kwh (目標)	
NASDA1998年コストモデル	1998	30年	2兆7千億円	23.2円/kwh	5年
NASDA2003年コストモデル	2002	30年	1兆2500億円	8.5円/kwh	0.91年
USEFモデル	2003	40年	1.7～0.78兆円	13.4～7.7円/kwh	

但し科学技術(半導体、宇宙大型構造、宇宙輸送分野)の革新的な発展があることが前提となっている。

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）



太陽発電衛星の軌道と方向制御

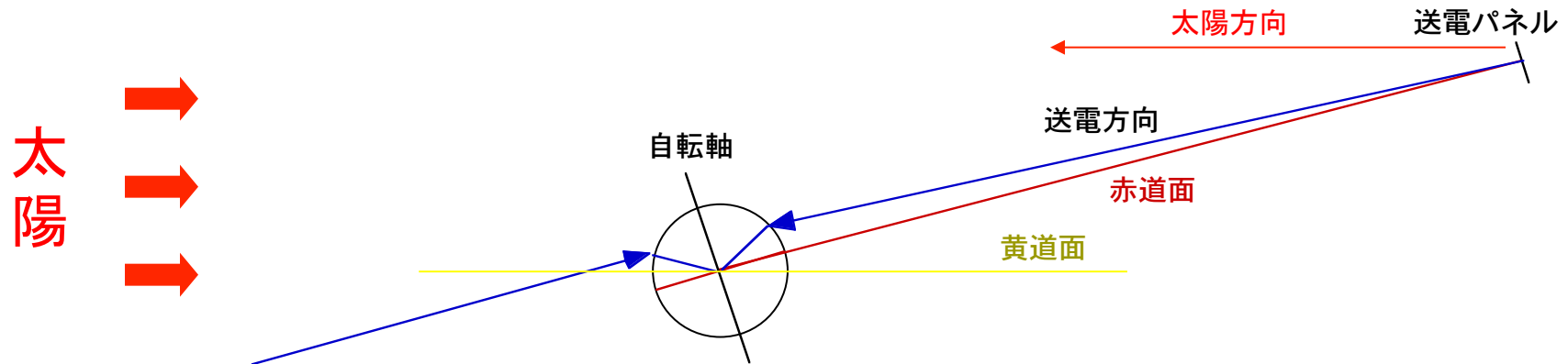
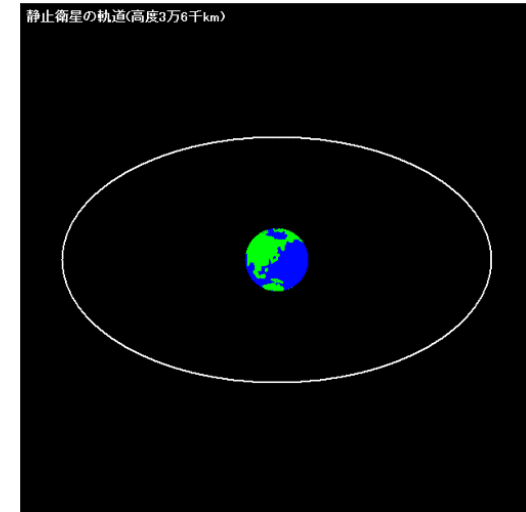
衛星の軌道：

地球の重力＝衛星の地球周りの回転運動
の遠心力

赤道上静止軌道：

地球の回転角速度と衛星の地球周りの回
転角周期が一致する高度。

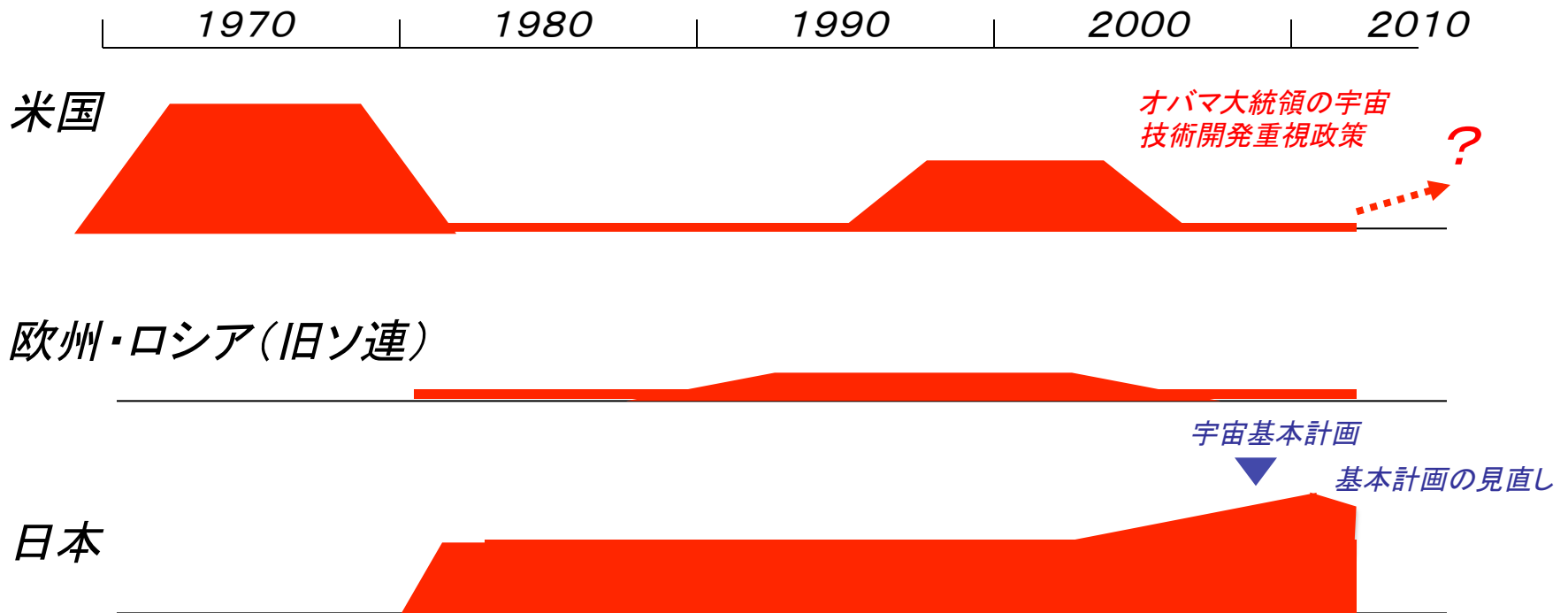
高度36000km(地球半径の6倍程度)



宇宙太陽光発電システム研究の歴史

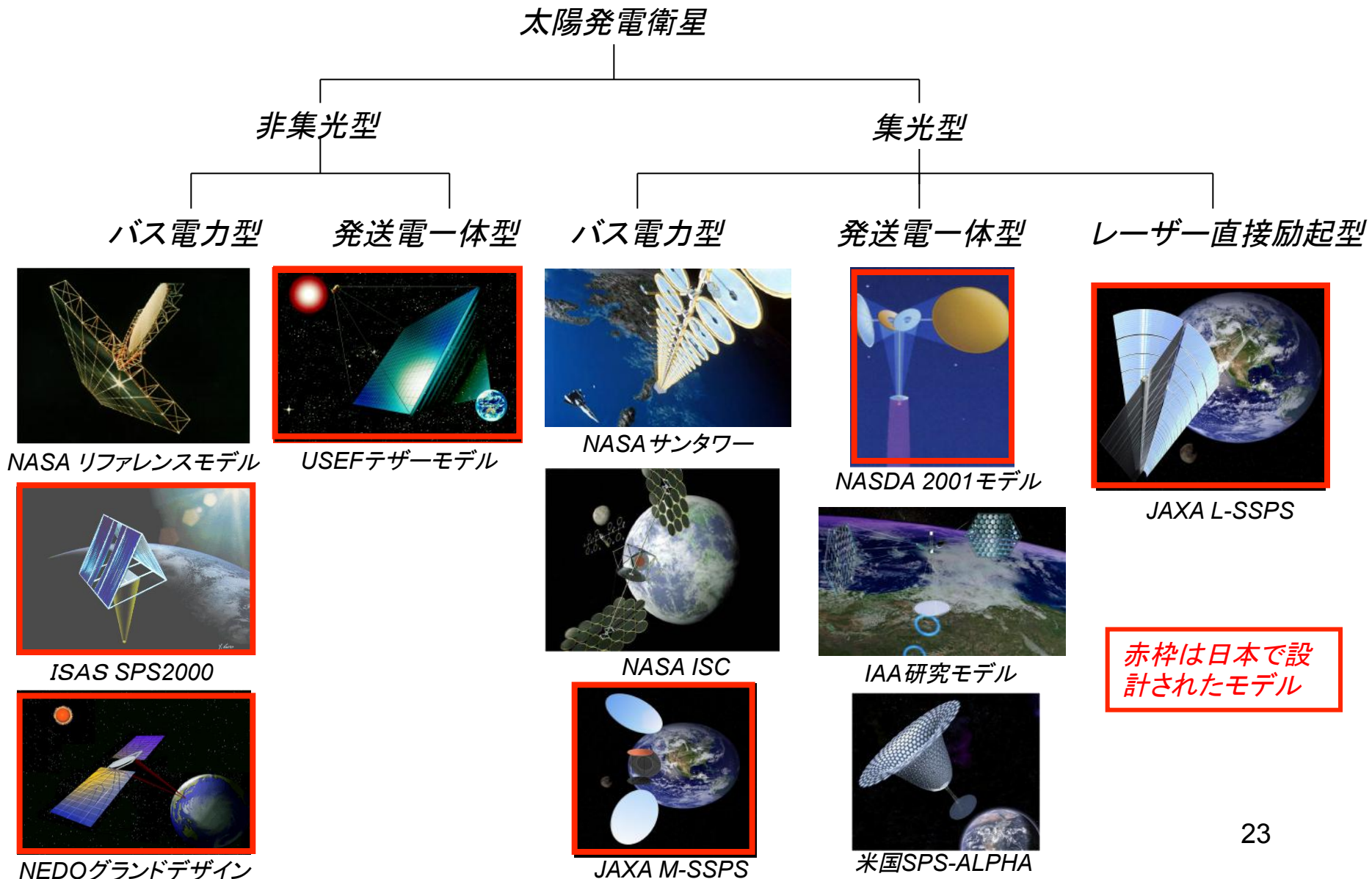
- 1968年 ピーターグレーザーのサイエンスの論文
 “効率的で安全なマイクロ波ビームによる電力伝送、宇宙空間における電力プラント”の概念、特許化（1973年）
- 1970年代 NASA（米航空宇宙局）/DOE（米エネルギー省）
 約2000万ドルを投じ初歩的な設計（リファレンスシステム）
- 1980年 米国でのシステムの研究はレーガン政権の財政緊縮方針で中断
- 1983年 観測ロケットによるマイクロ波送電実験（世界初）
- 1990年代 環境問題のたかまり、エネルギーオプションの必要性から再注目
- 1990年 宇宙科学研究所SPS2000研究スタート
- 1995年 NASA研究再開（-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



米国NASA リファレンスシステム

これまでの宇宙太陽光発電研究は？



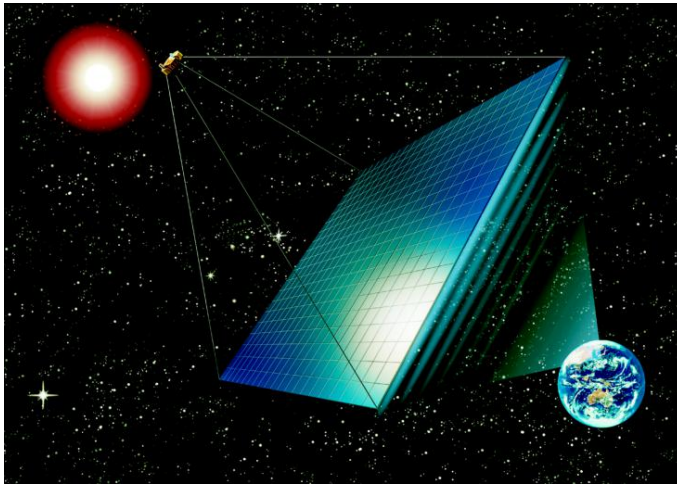
SPSの古典的なモデル
出力5GW
重量5万トン
面積5km x 10km
厚さ0.5km
送電アンテナ直径1km

発電所のスケール
出力1GW=10⁹W
概ね原子力発電1基分

宇宙科学研究所のSPS2000モデル

日本で初めての本格的なSPS
の設計研究
10 MW出力
高度1100 km（赤道軌道）

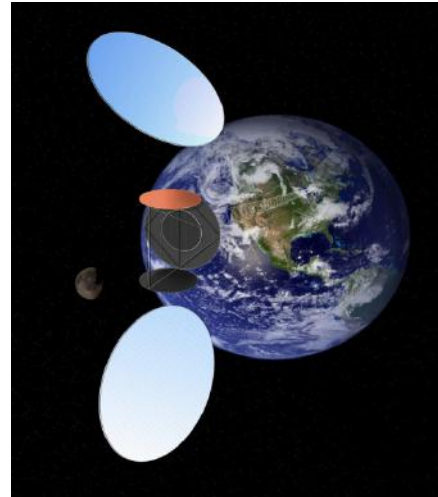
日本のSPSシステム代表的設計例(1GW級)



Basic Model
(マイクロ波型基本モデル)

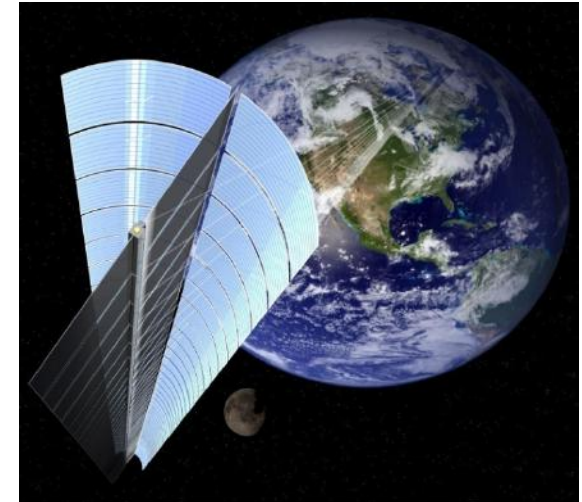
太陽非追尾マイクロ波型
発電電一体型パネルのモジュール構成

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

The background of the slide is a composite image of space. In the upper left, the Sun is shown as a bright, glowing sphere with a prominent starburst effect. In the lower right, a portion of the Earth is visible, showing blue oceans, white clouds, and dark landmasses. The rest of 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 と現在の実力

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	30, 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	50～100万円/kg	1万円/kg	1/100–1/50

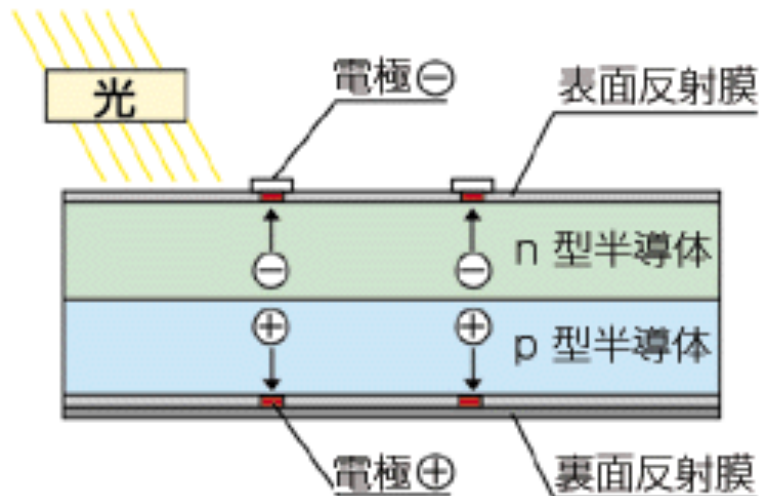
1GW=30～50万世帯分



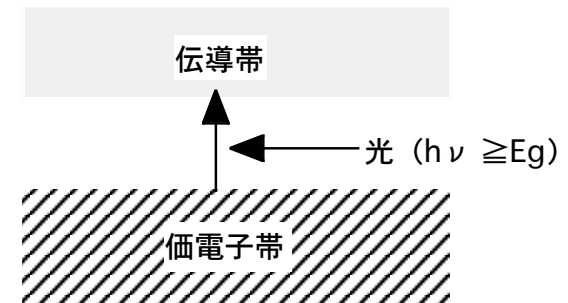
発電はどうやって行
う？ 何が問題？

太陽電池の発電原理

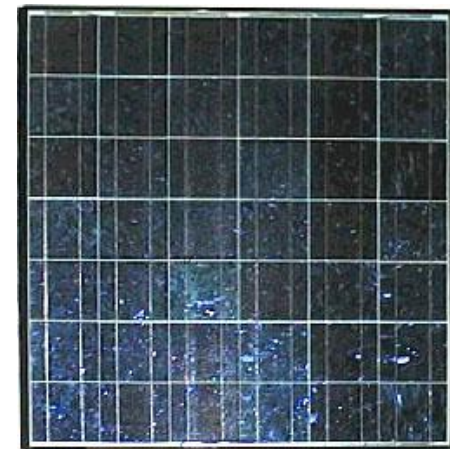
太陽電池の発電原理（結晶シリコンの場合）
 n型半導体とp型半導体を接合すると接合部で電場が発生。
 光のエネルギーが半導体内を自由に動くことのできる電子を発生させ、発電。



結晶の電子のエネルギー準位



$h\nu$: 光のエネルギー
 E_g : バンドギャップ



多結晶シリコン太陽電池のモジュール

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 (10μm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

従来のガラス基板型

フィルム基板型

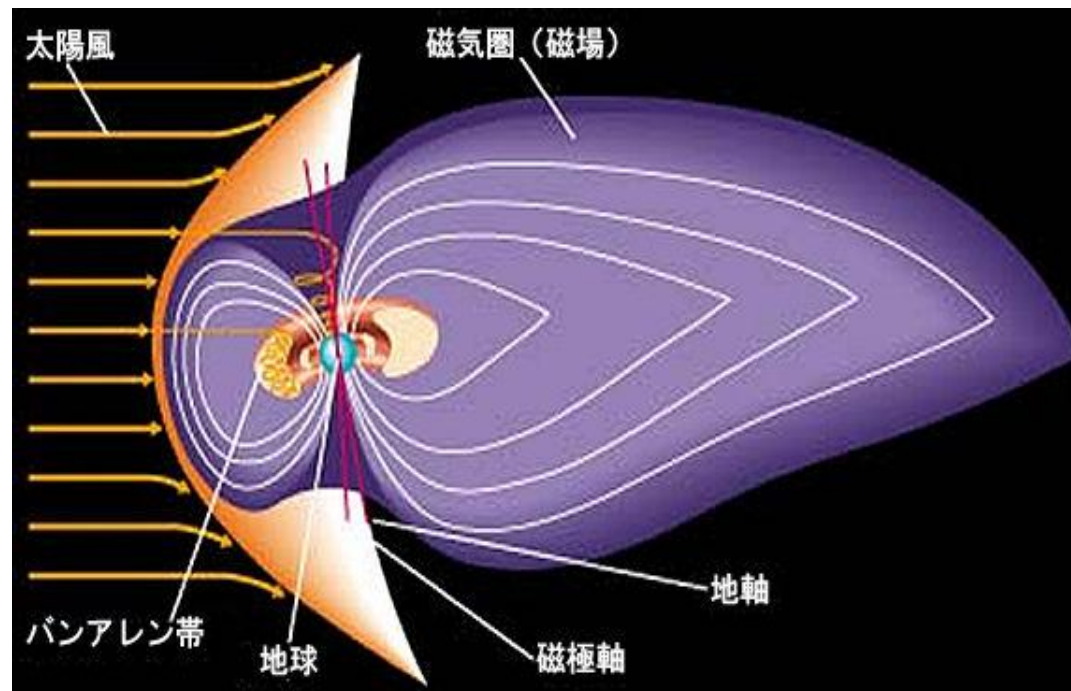
湾曲ボードに貼り付けた状態

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

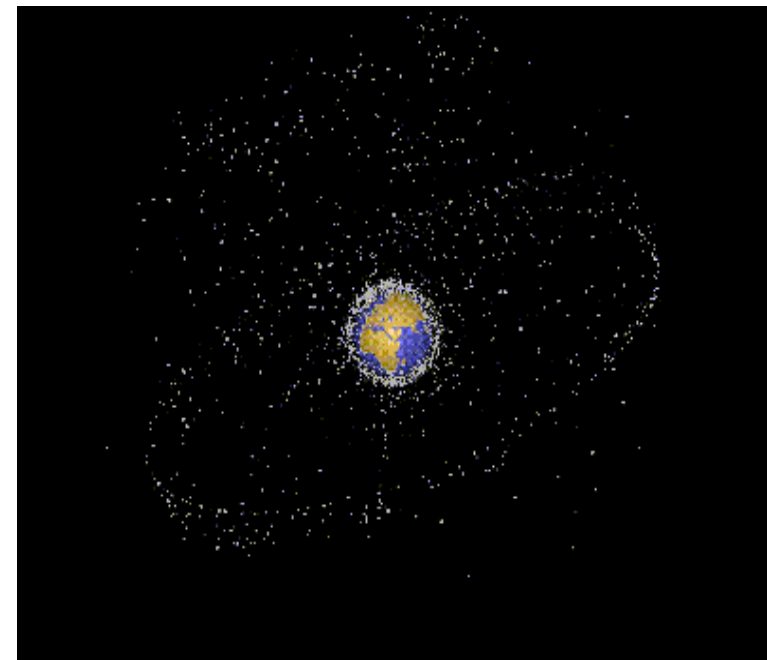
高い宇宙放射線耐性

⇒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: $6R_e$ (地球半径)
磁気圏境界: $10R_e$ (地球半径)



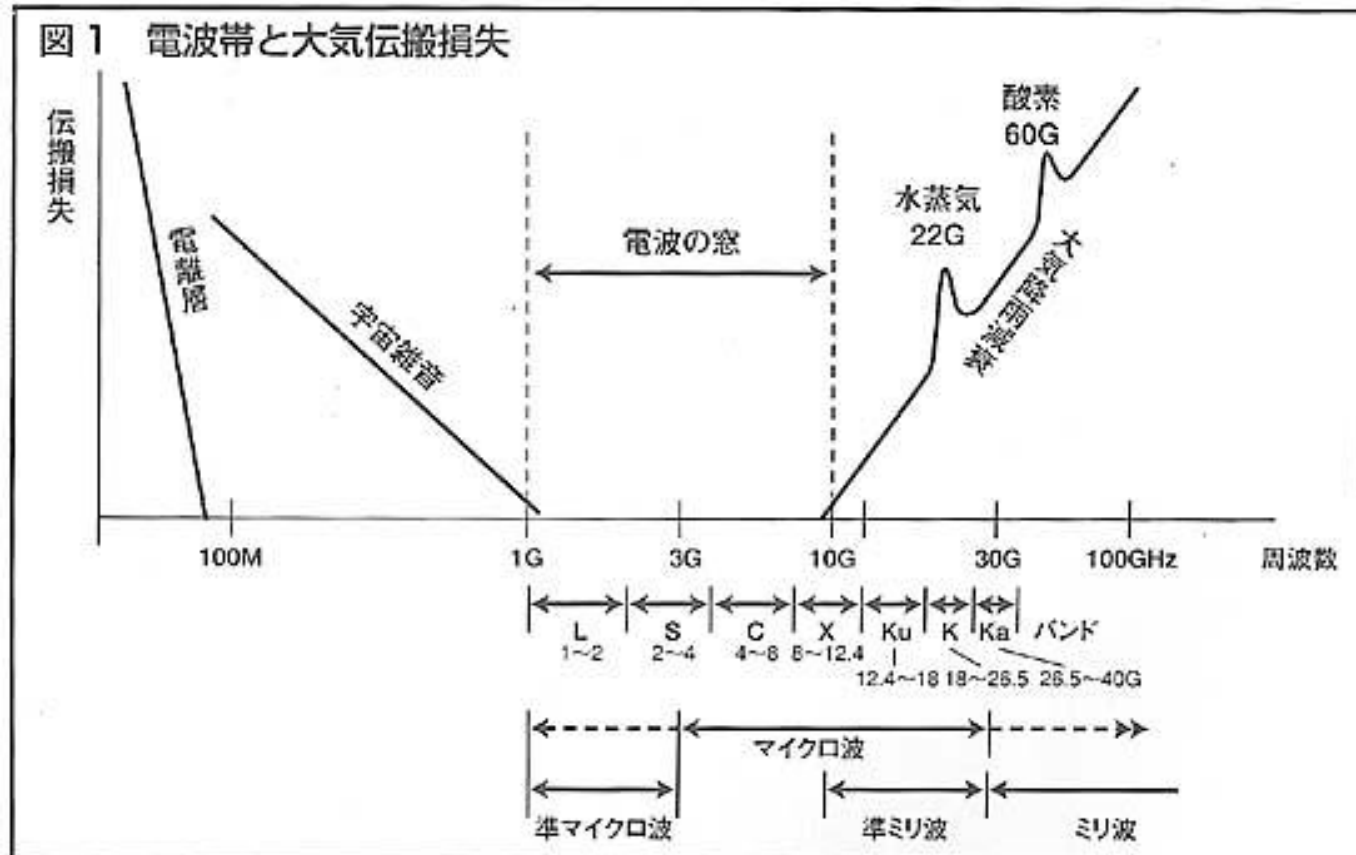
デブリ映像





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)

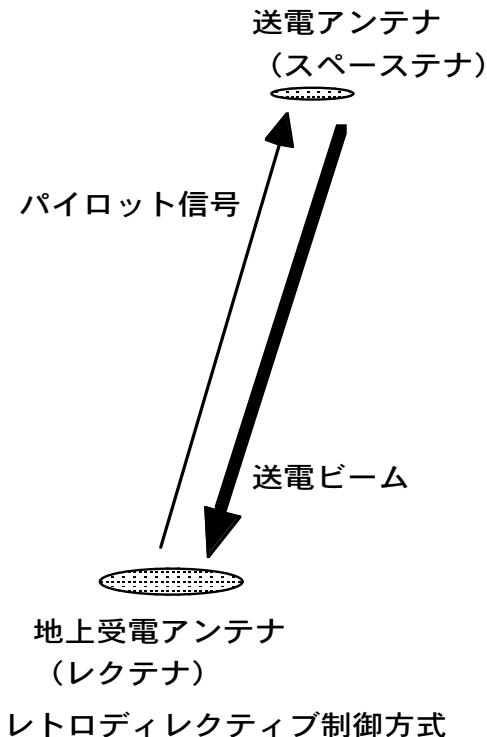


図21 半円を描くように広がる電波

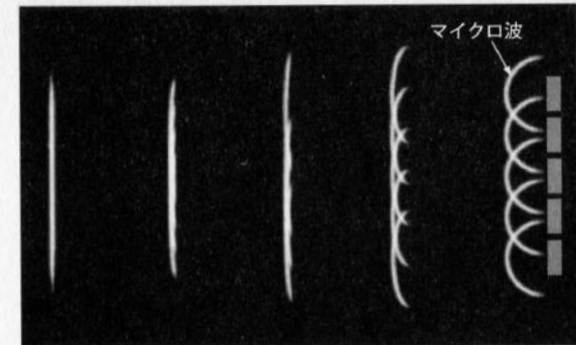


図22 いくつものアンテナが並び、電波の波がそろった状態

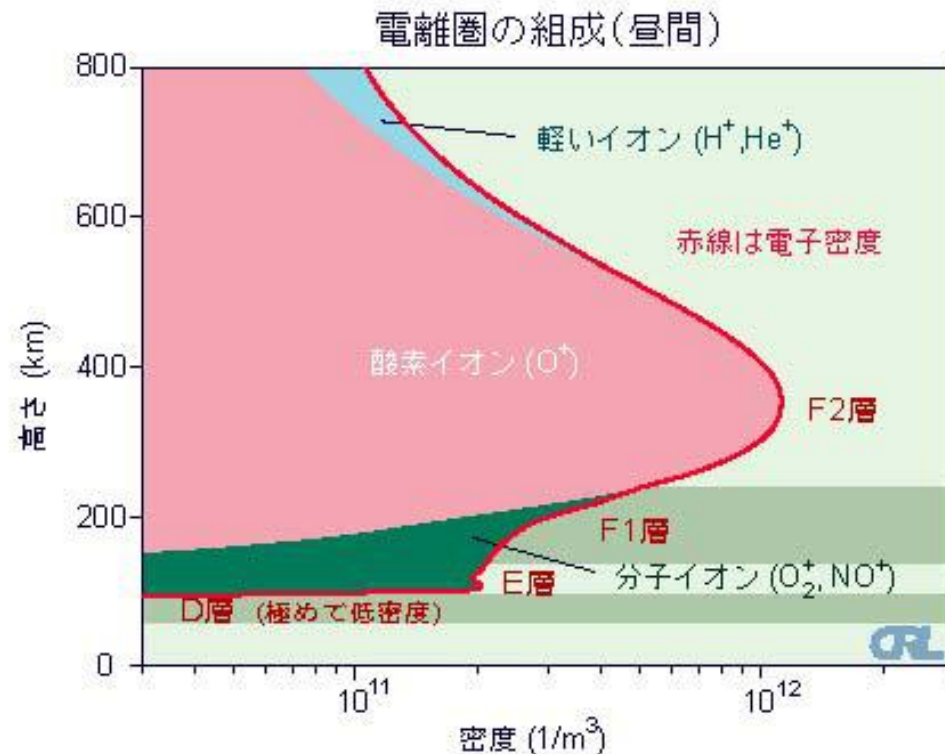


図23 電波を発するタイミングをずらすことで、位相を変えられる

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/m^2

10^5

電子レンジの中

10^4

10^3

太陽の光のエネルギー密度

10^2

10^1

マイクロ波安全基準
(受電所周辺部)

10^0

受電所立ち入り禁止

10^{-1}

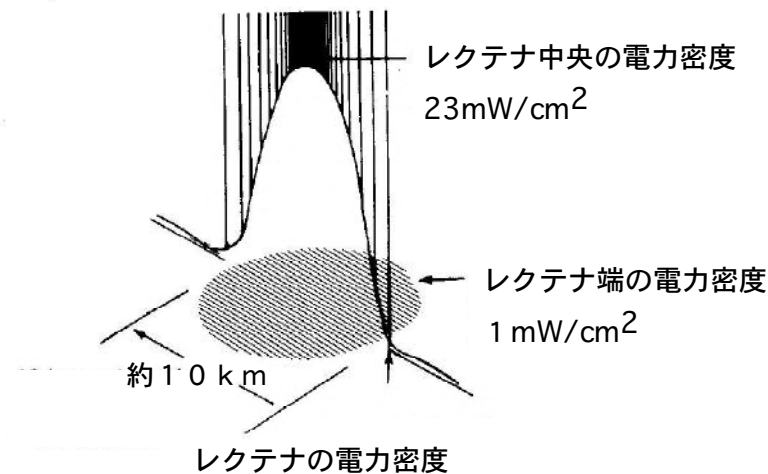
制御不能時の平均電力密度
東京タワー直下近傍電力密度

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

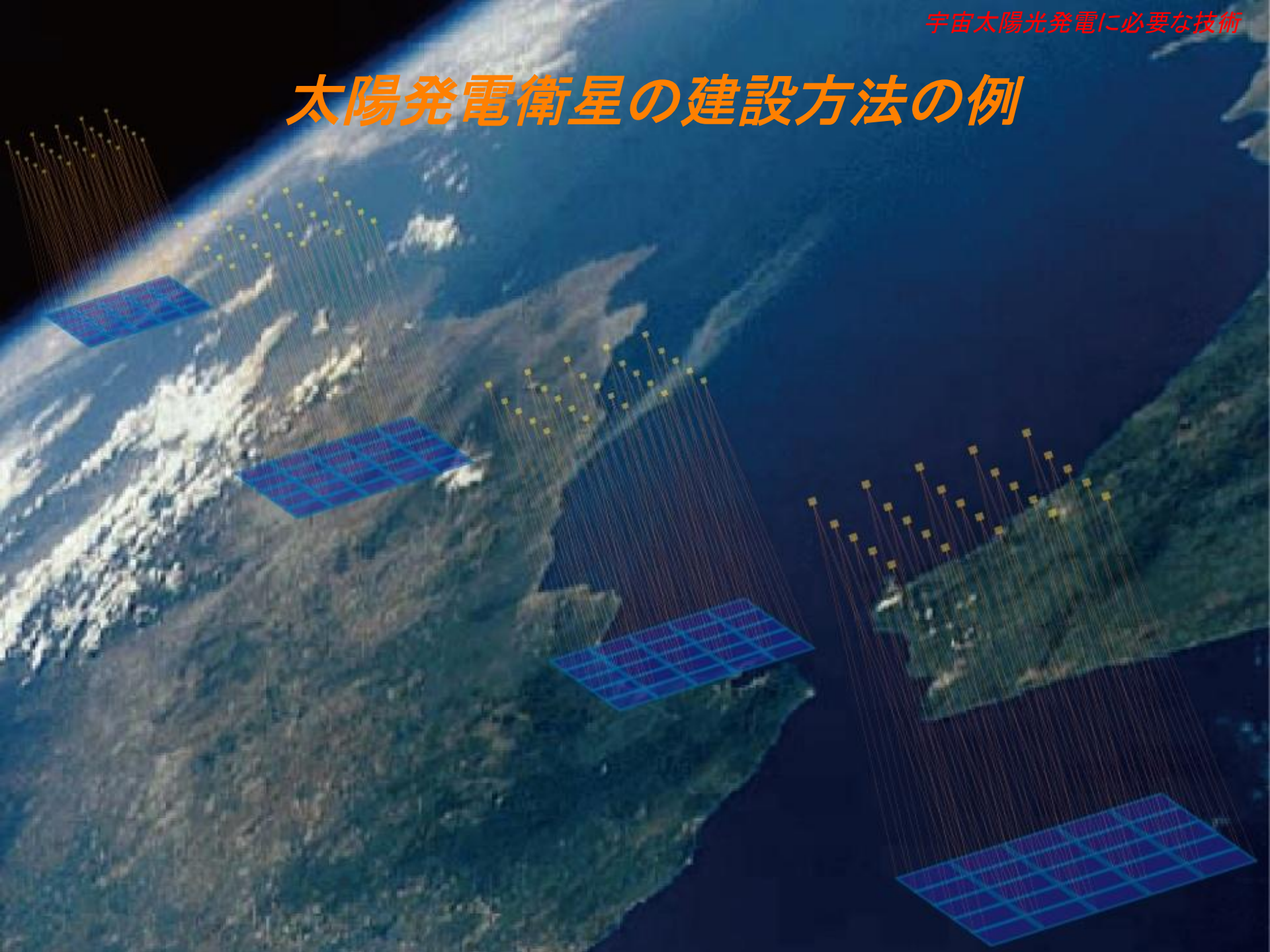


NASAのモデルの例(現在の設計では中央部の電力密度は高く受電領域の大きさが小さい)

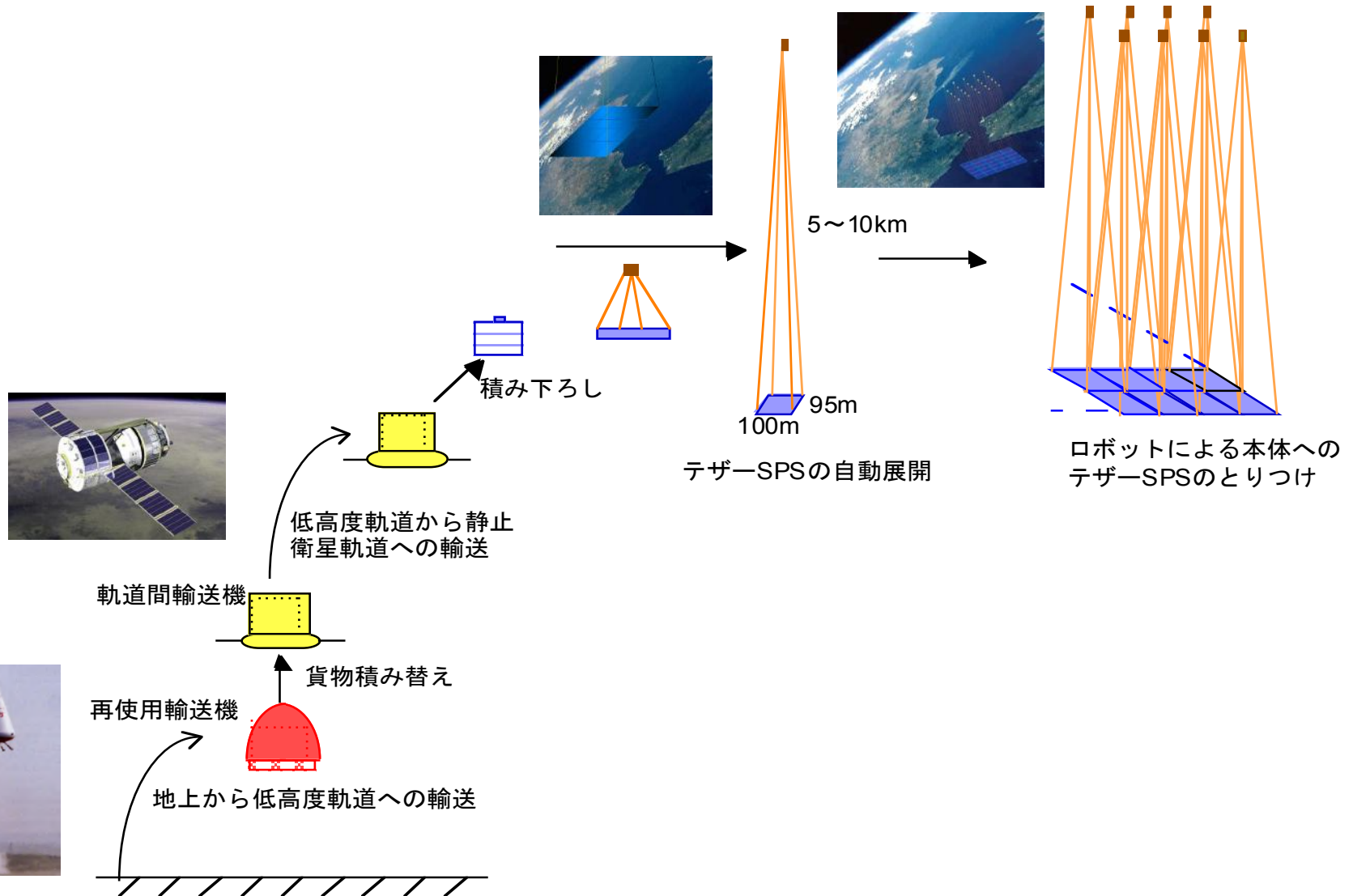
大きな発電所をどう
やって宇宙に作る？
ロケットは安くなる？



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



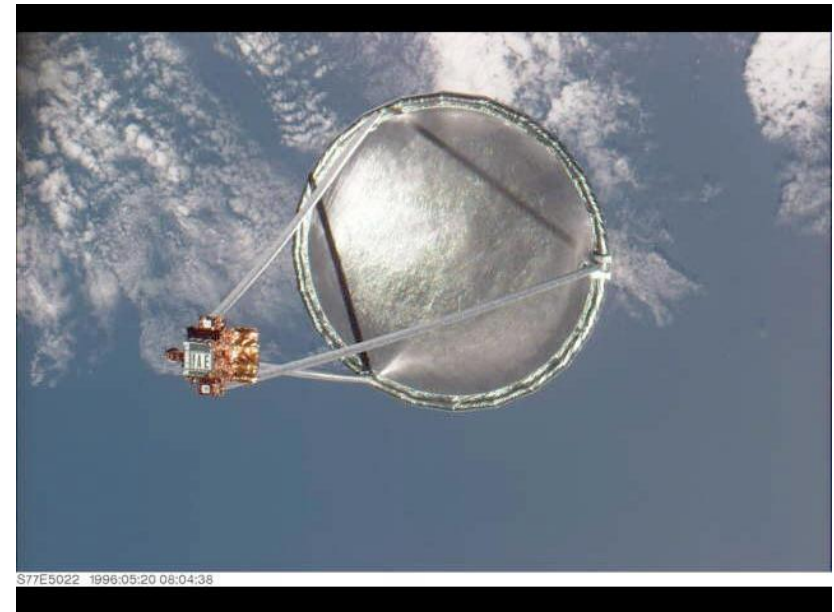
大型構造物とその構築方法

大型構造物にとっては必ずしも無重量ではない。
大型構造物に働く力(重力勾配力)
低高度軌道では1トン10kmで約50N

高価な有人作業は必要最小限とする。
構築ロボット、自動展開システム
自動膨張硬化型などの新しい技術が必要。

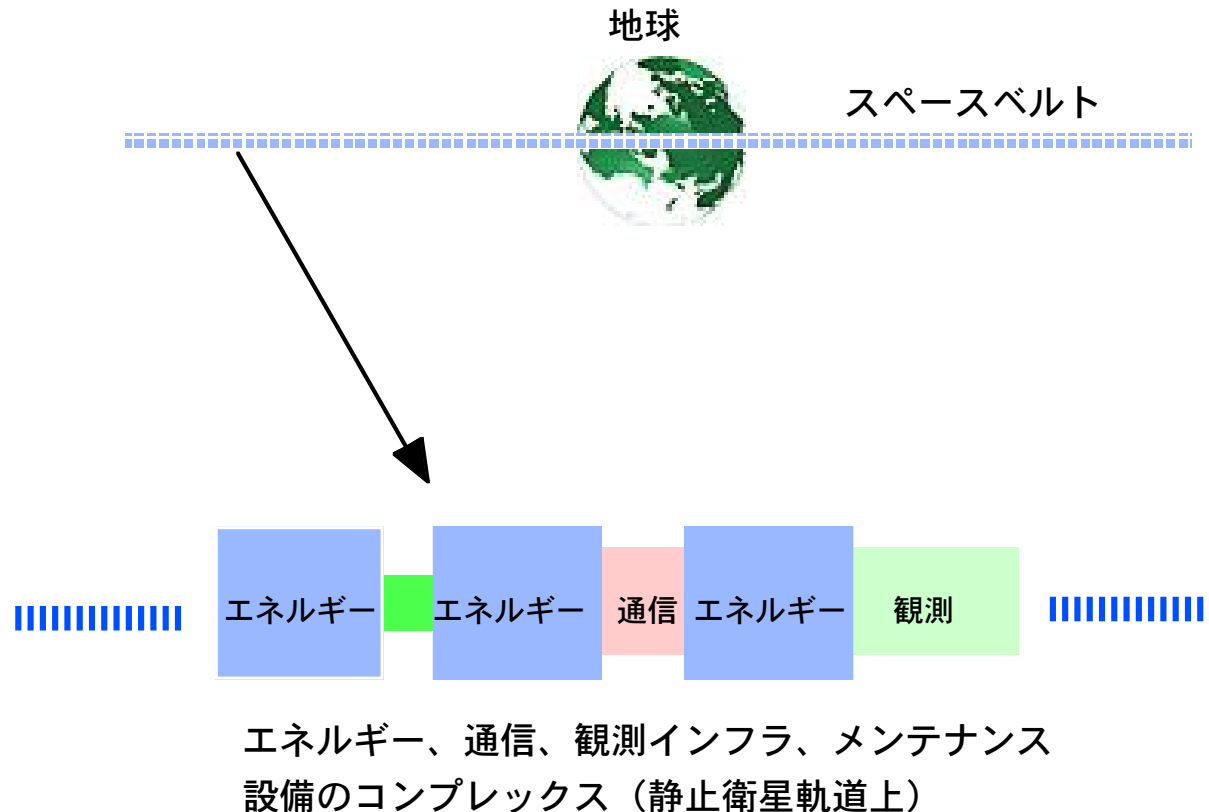


スペースシャトルで行われた20kmの紐付き衛星
伸展実験。重力勾配力により紐がピンと張ることが
確認できた。



スペースシャトルによる自動膨張実験
テニス場程度の大きさの構造物を展開

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

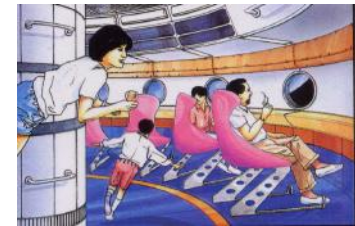
- ・現在の試算ではSPS構築のコストの**50%以上は輸送コスト**
- ・宇宙輸送コストの低減(**現在の輸送コストの1/50-1/100程度**)がSPS構想成立のための必要条件
- ・現在の使い捨てロケット方式では低コスト化は不可能(H2Aは1機80-100億円)
- ・**再使用型輸送システム**の開発が必須
- ・低コスト化のためには**大量輸送の需要**が必要(宇宙観光旅行、SPS)



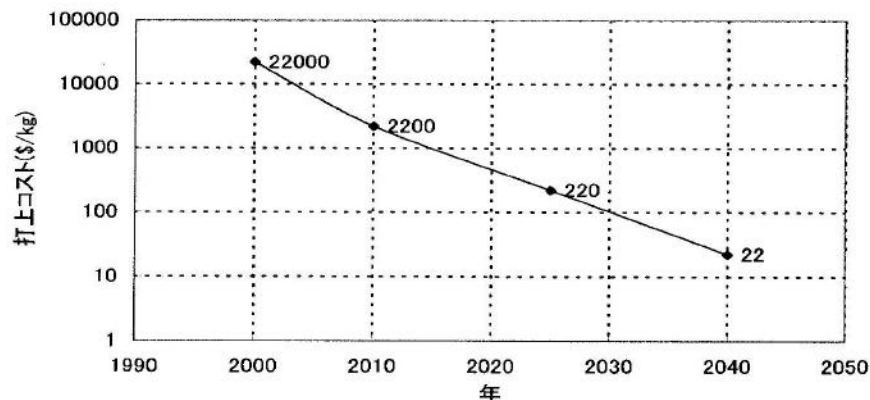
JAXAの大型ロケットH2



Air Ship One (June 21, 2004)



宇宙観光旅行



JAXAの再使用ロケット実験

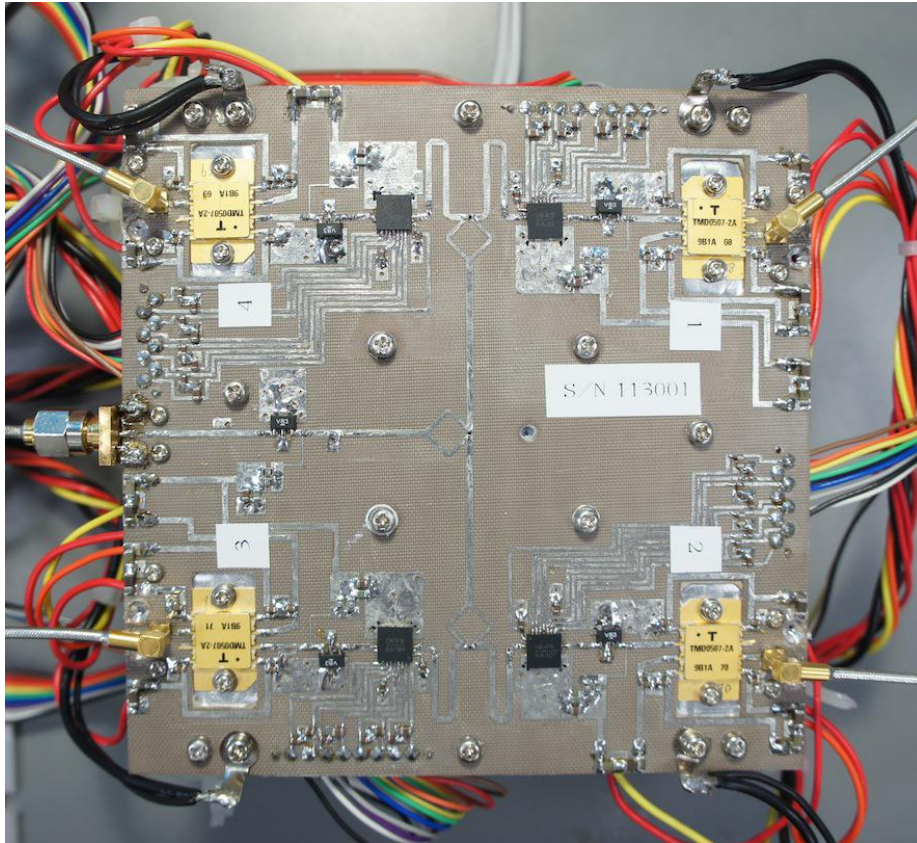
The image is a composite of a space-themed background. In the upper left, a bright yellow star with a prominent lens flare shines against the blackness of space. On the right side, the curved horizon of the Earth is visible, showing blue oceans, white clouds, and brownish-green landmasses. The text '現在どのような研究が行われている？' is written in a bold, yellow, sans-serif font, positioned in the center-left area of the image.

**現在どのような研究
が行われている？**

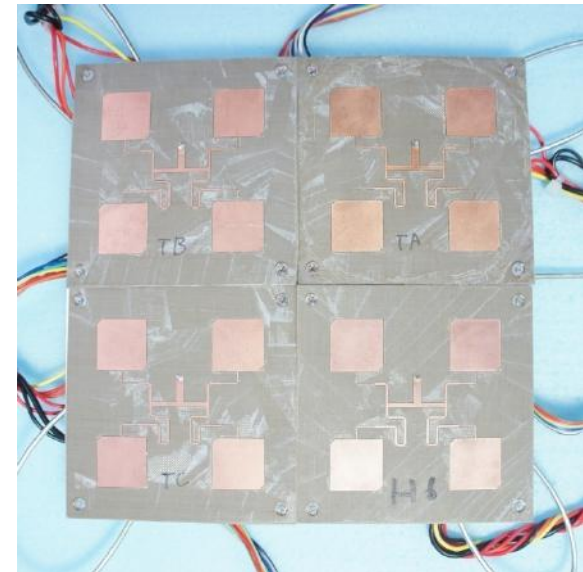
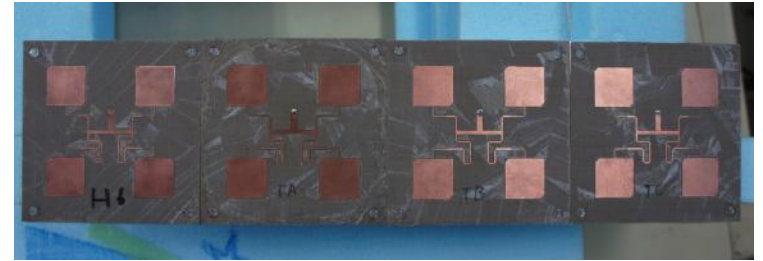
SPSの研究

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(制御精度0.5度)

直径2.5 m、素子変換効率 > 70 %

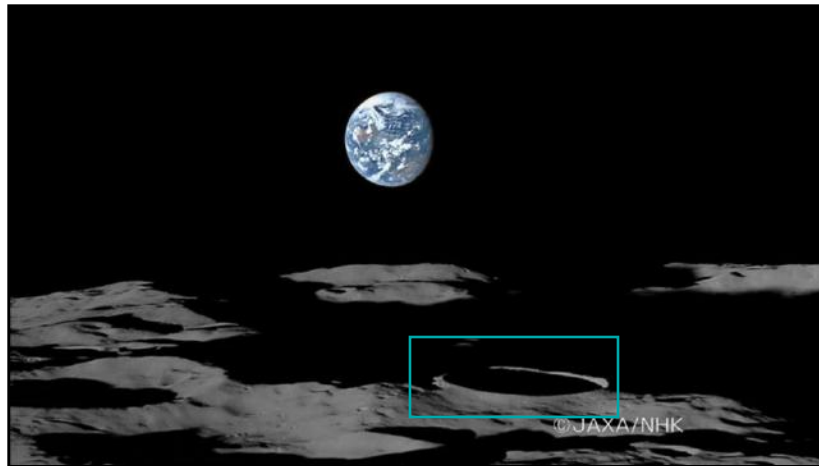
50 m (typical)

地上でのレーザーによる電力伝送実験の計画

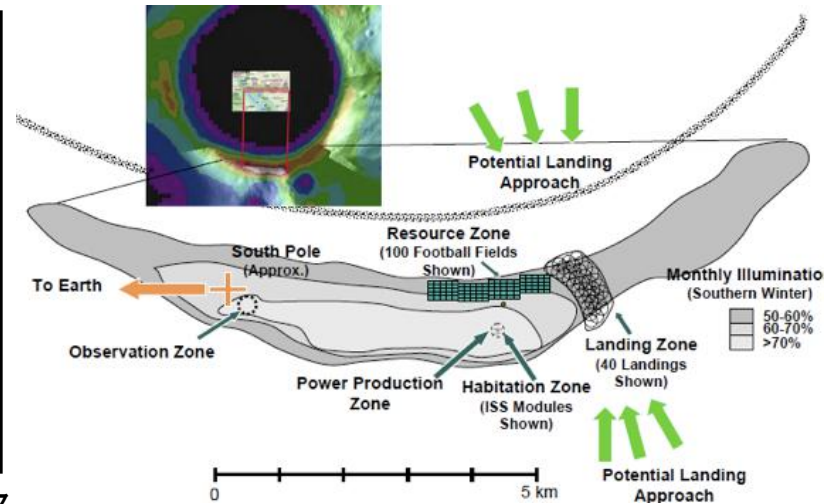


レーザー出力	1 kW(目標)
波長	1.06 μm
送電距離	500 m
ビーム制御精度	1万分の1度以下(目標)
受電出力	0.2 kW(目標)

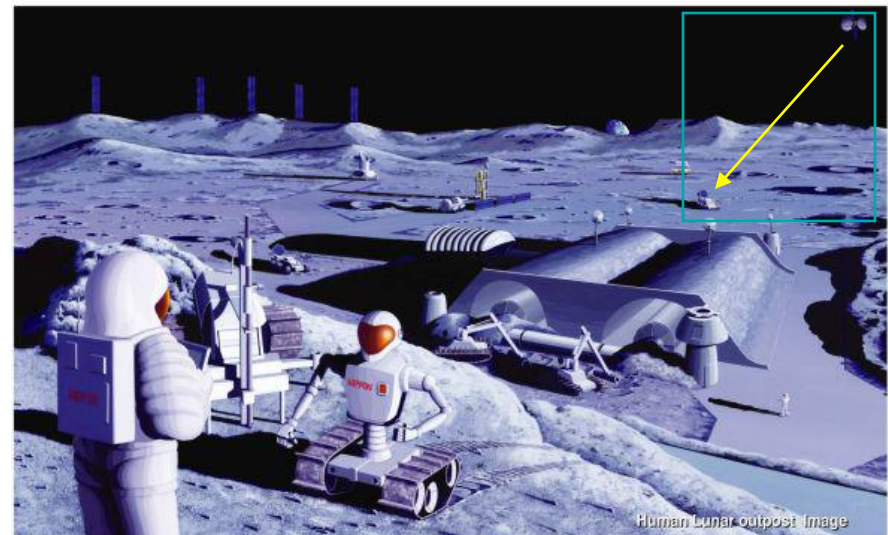
月探査基地構想とレーザー送電の応用



水の氷が存在する可能性のあるシャクルトンクレータ



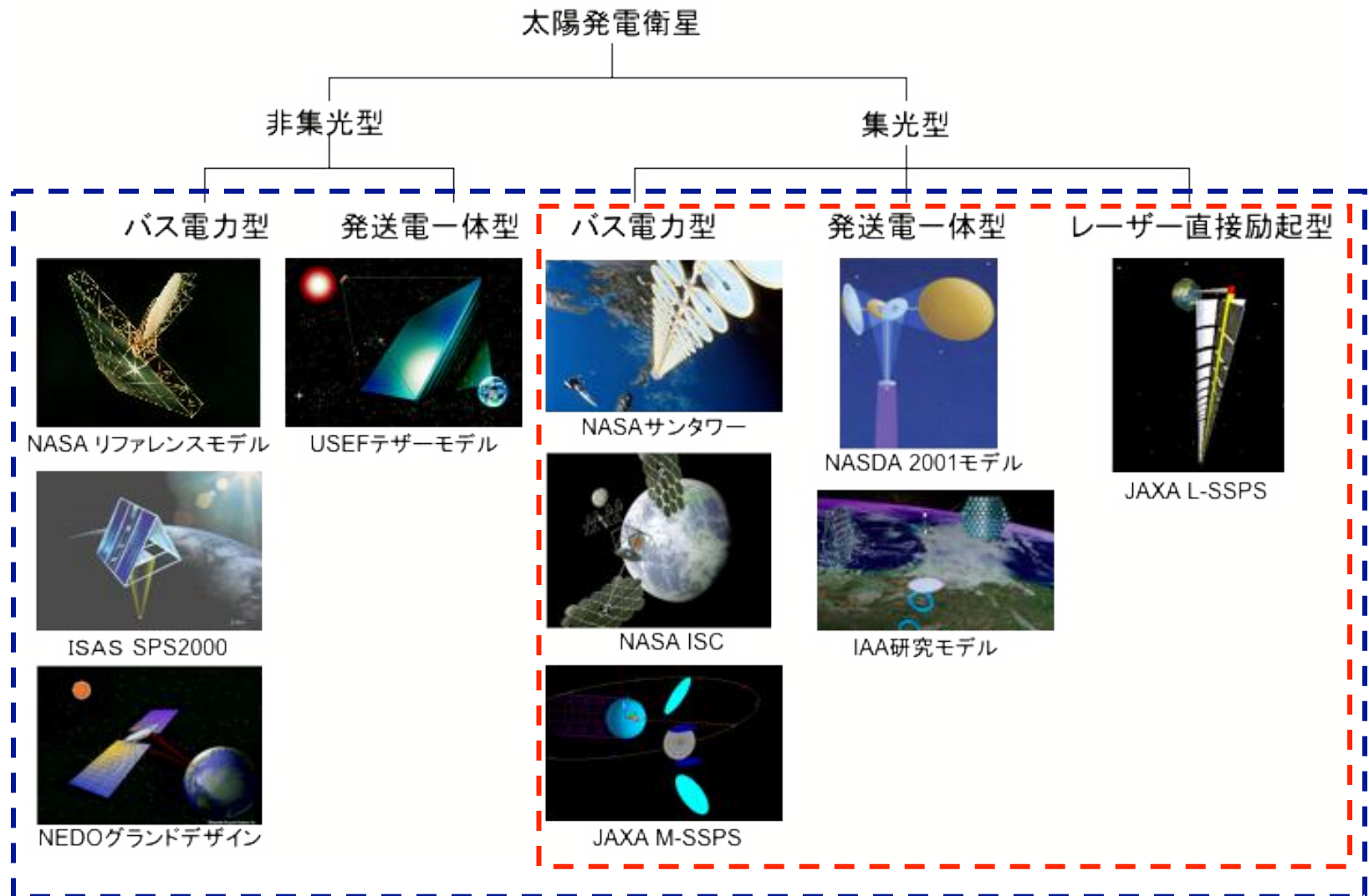
永久影への水探査ローバーへの送電



周回軌道上から月面基地への送電

SSPSに必要な大型構造の様式

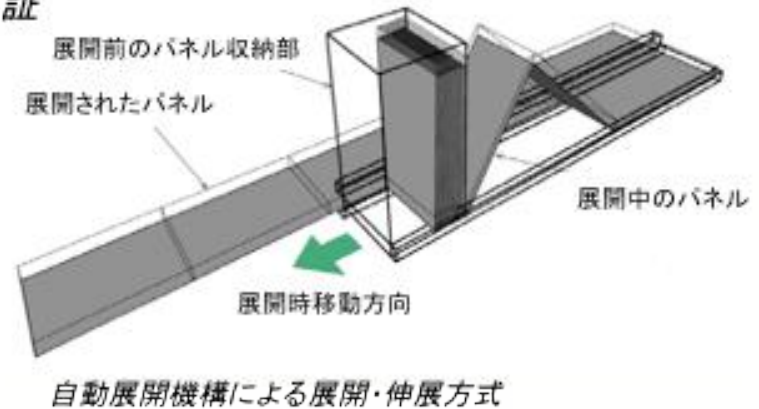
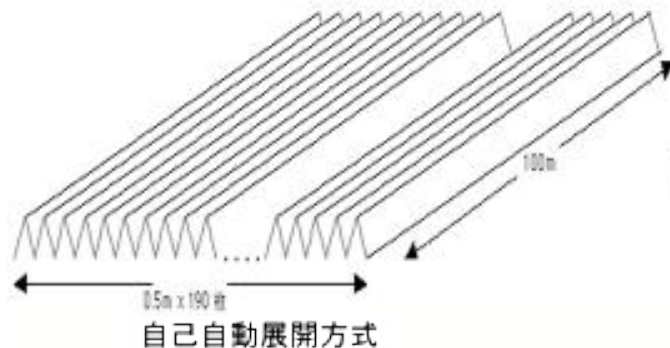
- [---] : 数百～数 km サイズの厚みのあるパネル構造
[---] : 数百～数 km サイズの超軽量ミラー



SPSに必要な大型構造の構築方法の研究

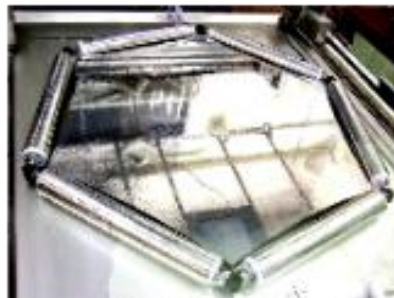
数百～数 kmサイズの厚みのあるパネル構造

目標:100m級パネルの構築技術の地上部分実証

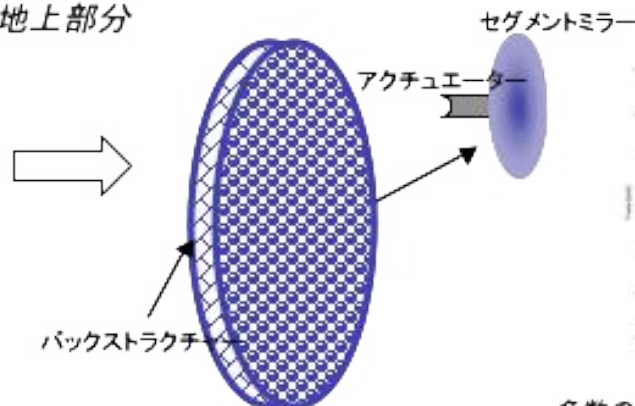


数百～数kmサイズの超軽量ミラー

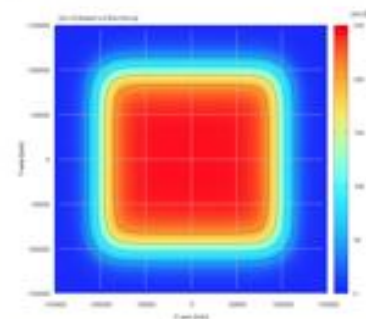
目標:100m級反射ミラーの構築技術の地上部分
実証(含む光学性能)



膨張硬化型ミラー

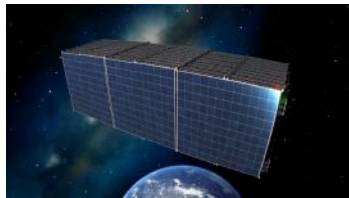
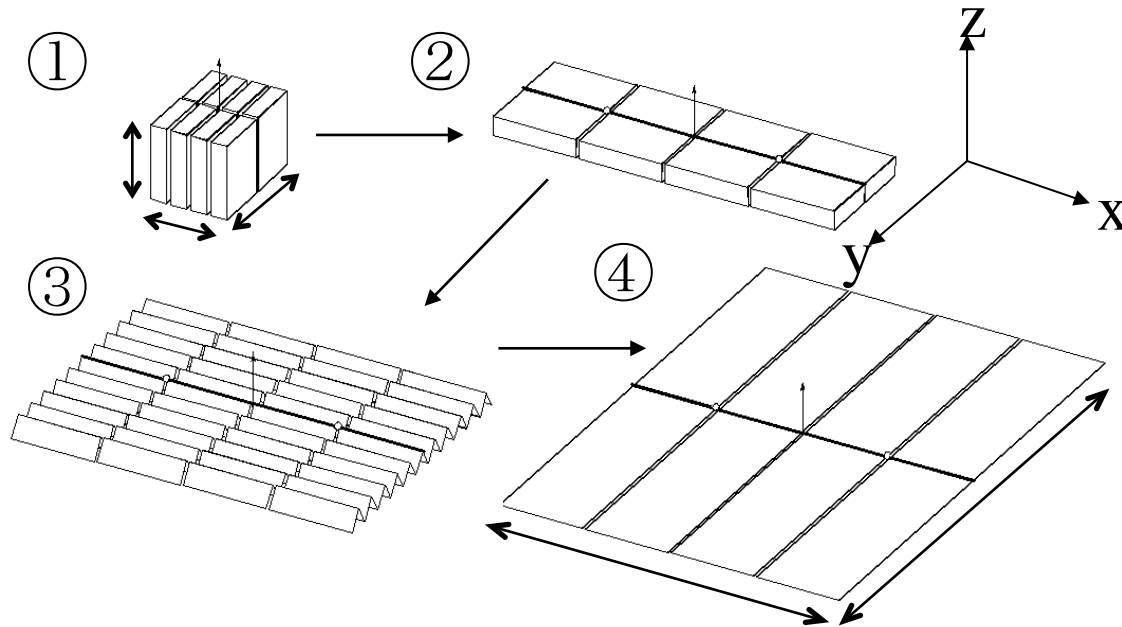


アクチュエータ付きセグメントミラーのバックストラクチャーへの取付方式



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

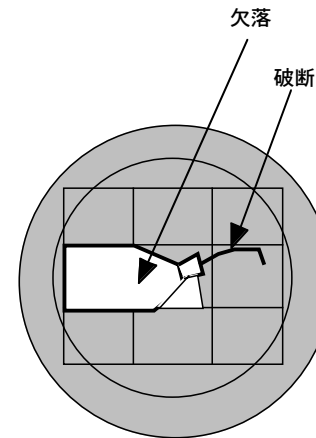
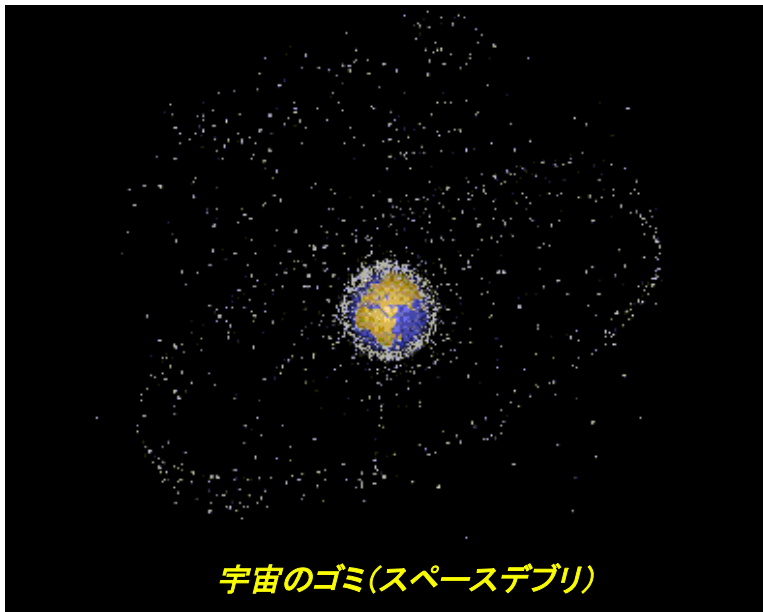
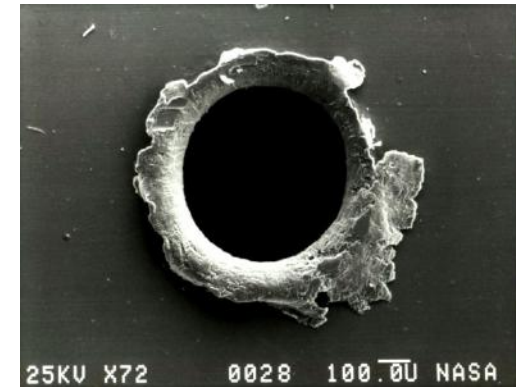
大きな構造を作るための実験



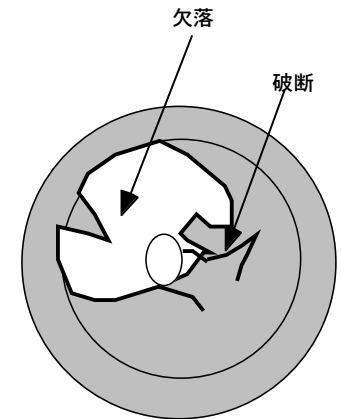
高速の宇宙ゴミ(デブリ)に対する対策

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。



格子状切り込み有り

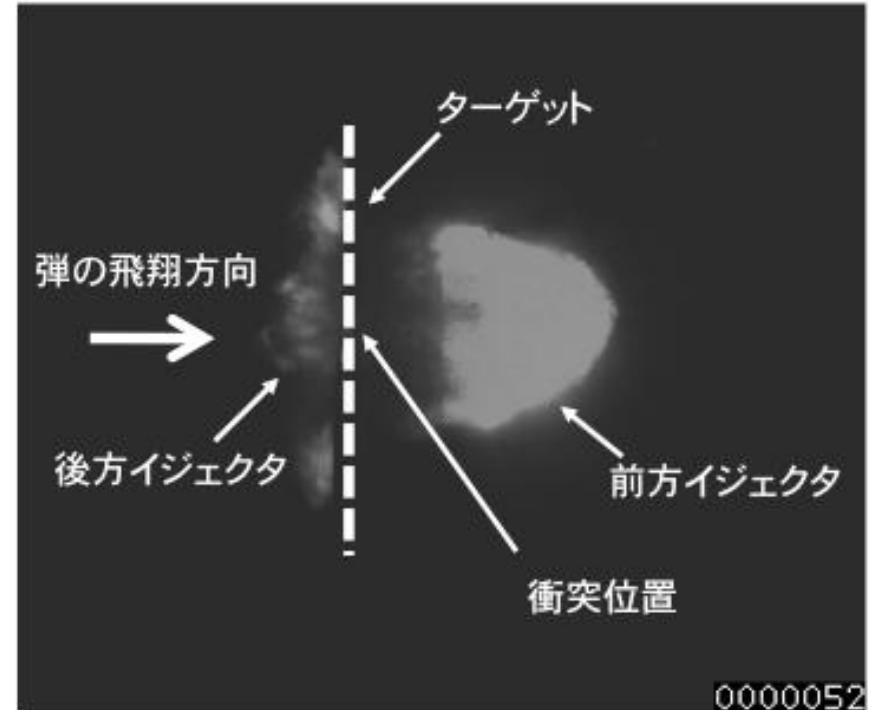


切り込み無し

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・宇宙科学研究所にある超高速実験設備(二段式軽ガス銃)



衝突弾も被衝突体も爆発的に破砕し蒸発する超高速衝突現象。



太陽電池面での放電事故を起こさないための実験

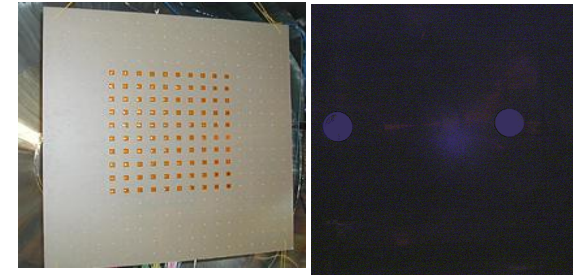
放電の危険性



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
 $\text{電力} = (\text{電圧}) \times (\text{電流})$
 $\text{抵抗(熱)損失} = (\text{抵抗}) \times (\text{電流})^2$



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

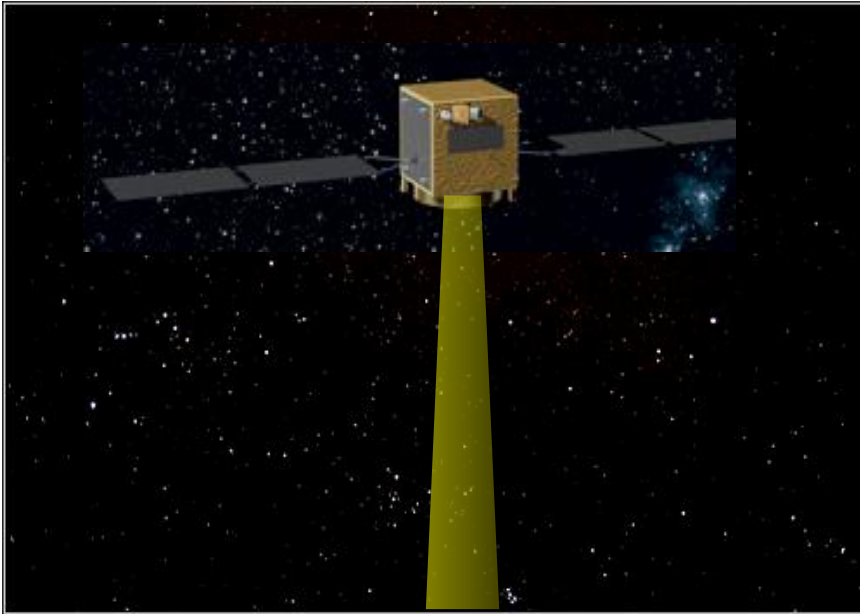


地上でも高い電圧で送電

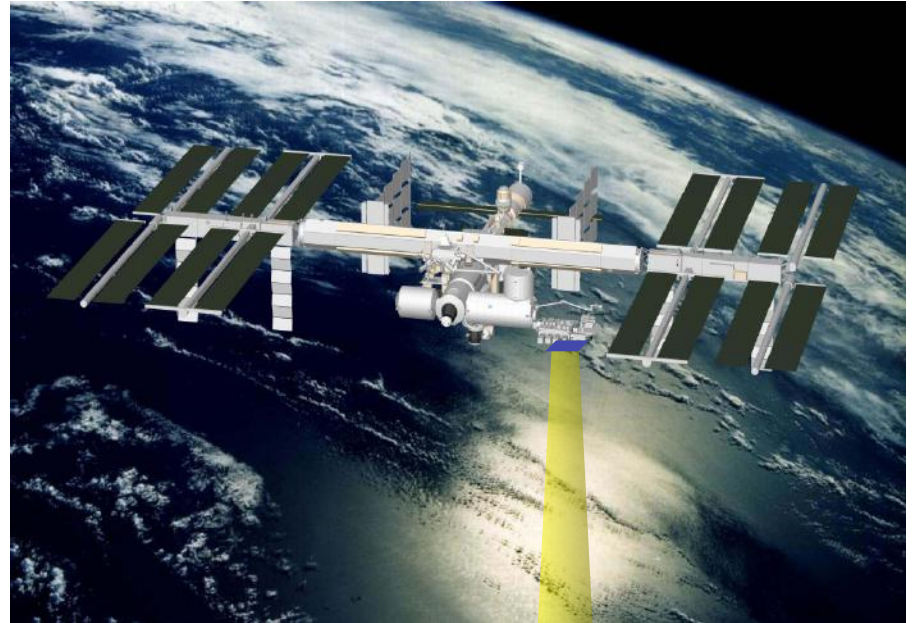
今後実用までどのような計画？



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

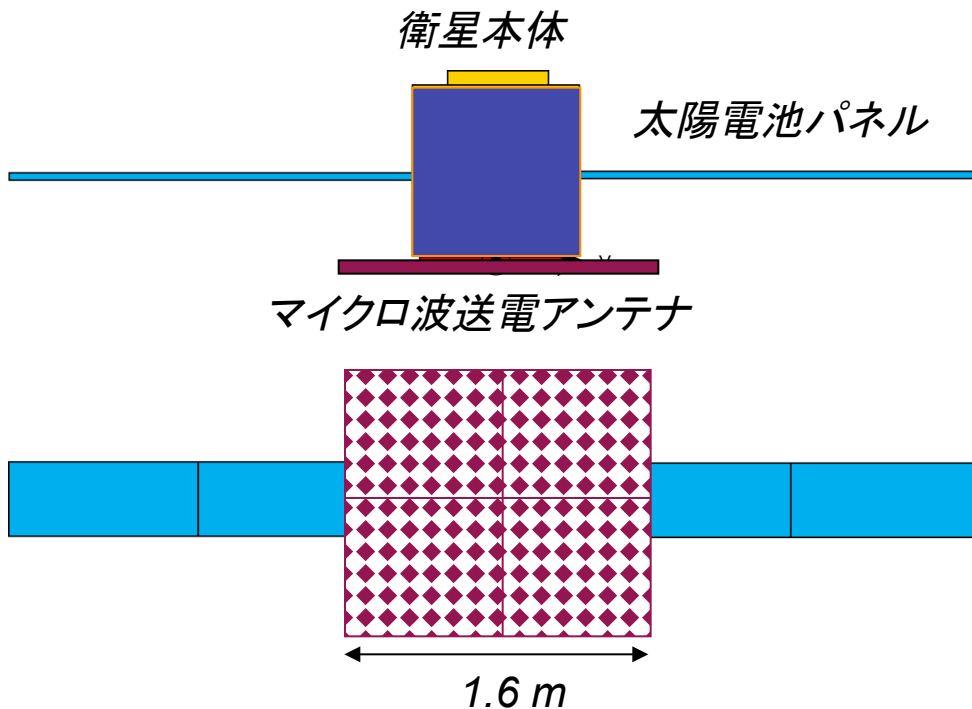
軌道: 低高度周回軌道 (370 km)

衛星重量: 400 kg

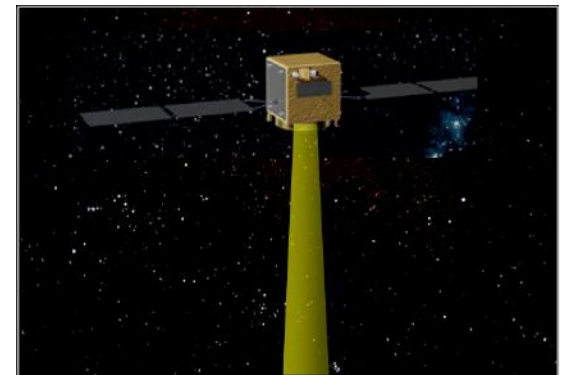
実験機器重量: 200 kg

姿勢制御: 3-軸制御

送電電力: 3.8 kW



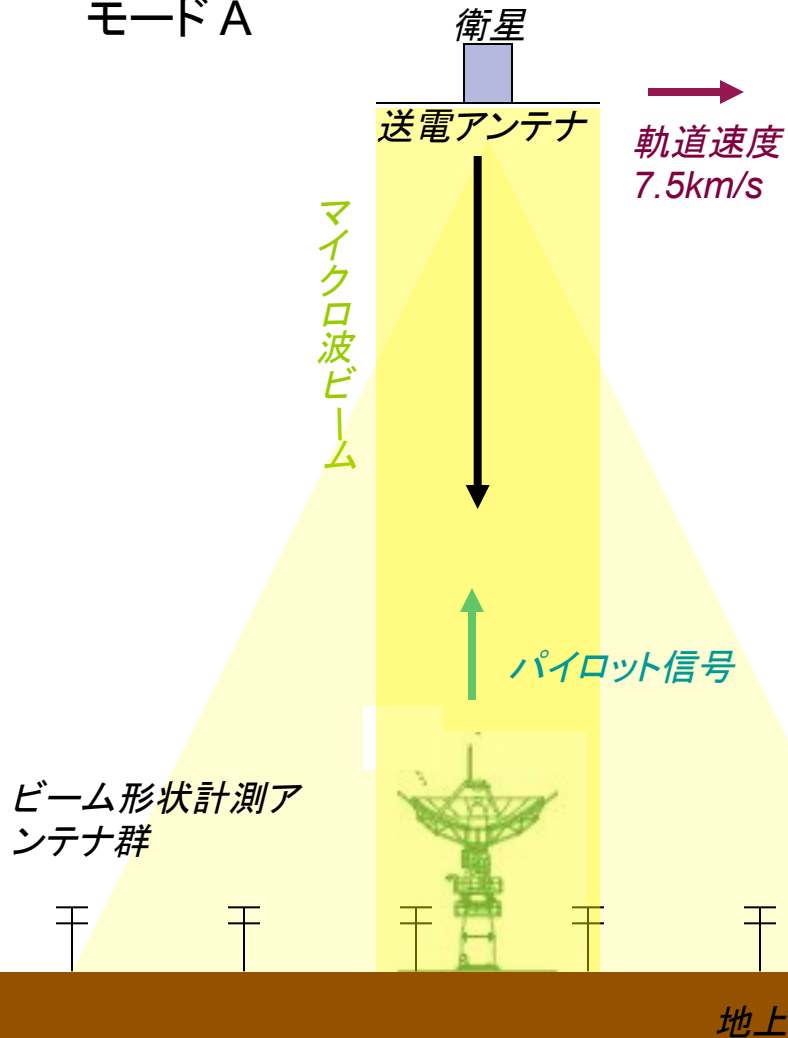
小型科学衛星打上用イプシロンロケット。初号機2013年度。



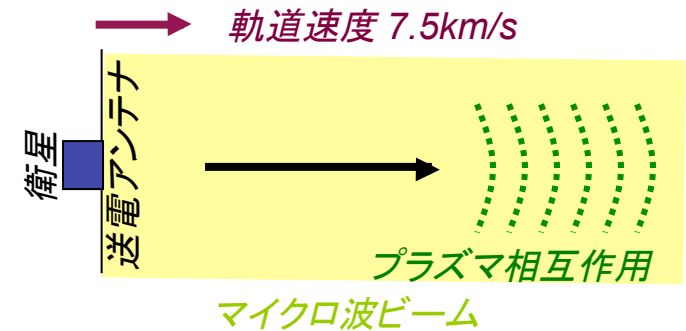
小型衛星から地上へのマイクロ波送電実験。

マイクロ波送電実験の場合の具体的な計画

モード A

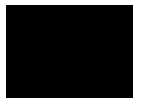
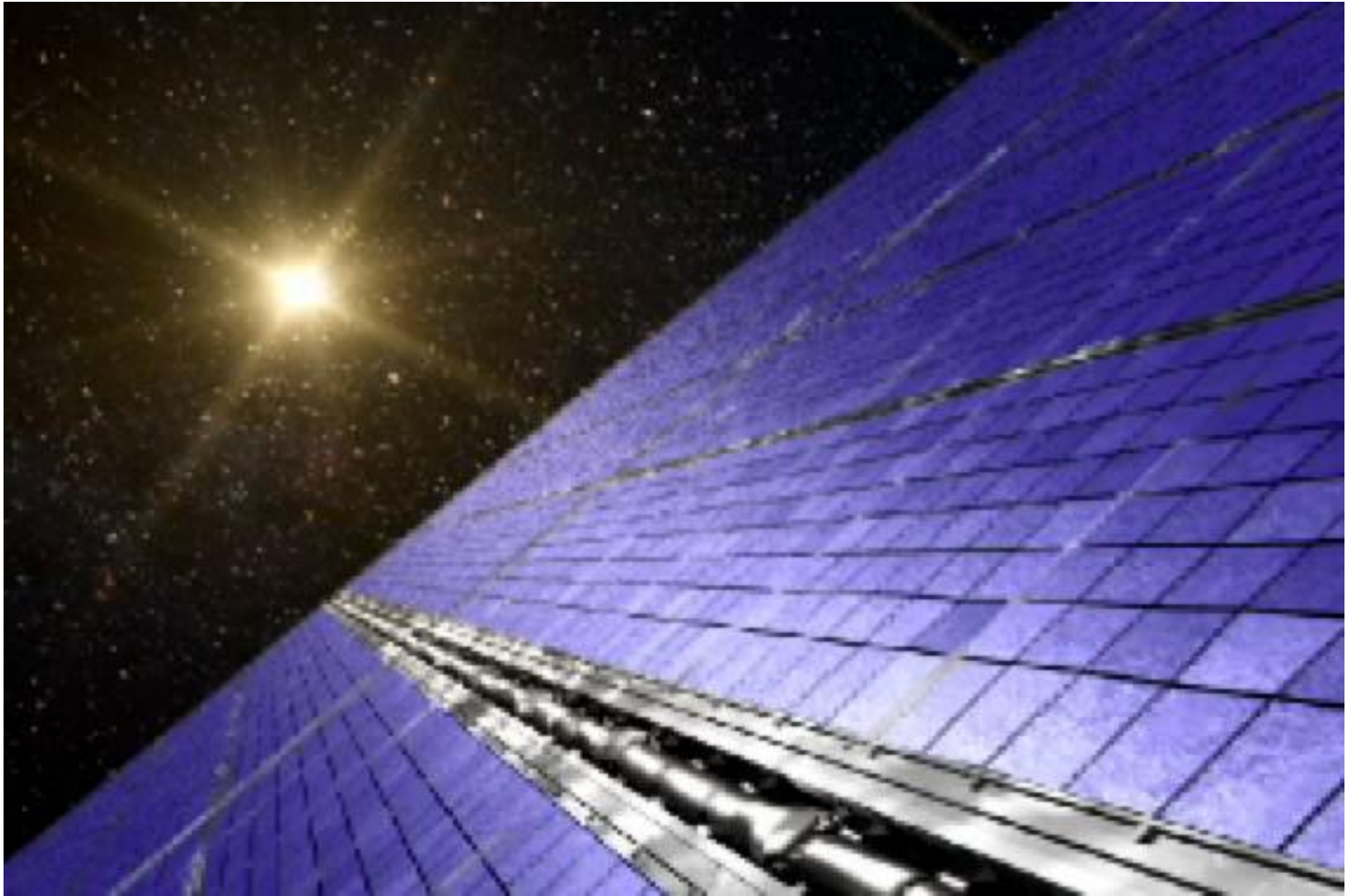


モード B



EMCモニターアンテナ

実験衛星デモンストレーションCG(首都大)



レーザー送電実験の場合の具体的な計画

国際宇宙ステーション日本実験モジュール(JEM)



レーザー送電装置
1 kW, 1.06 μm
20 cm Φ 送光系

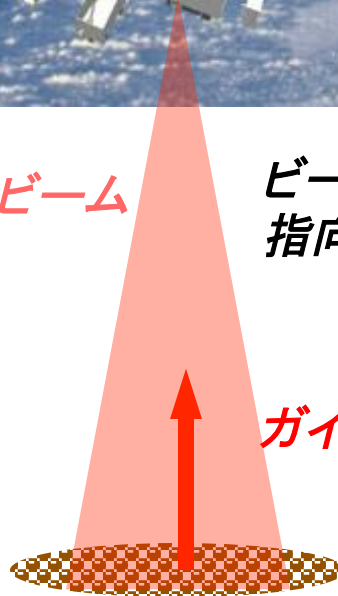
レーザービーム

ビーム拡がり 15 μrad
指向精度 1 μrad

受電システム
10 m Φ 受光系
出力200 W

ガイドビーム

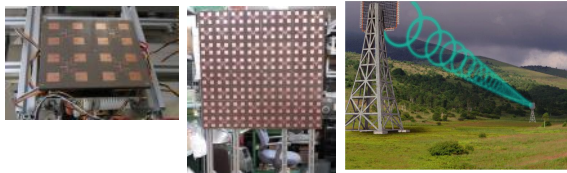
受光セルアレイ



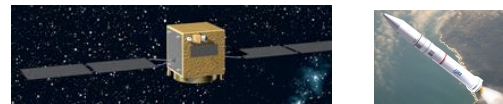
研究フェーズ



地上実証



小型の軌道上実証 ▲



100kW 級軌道上実証 ▲



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



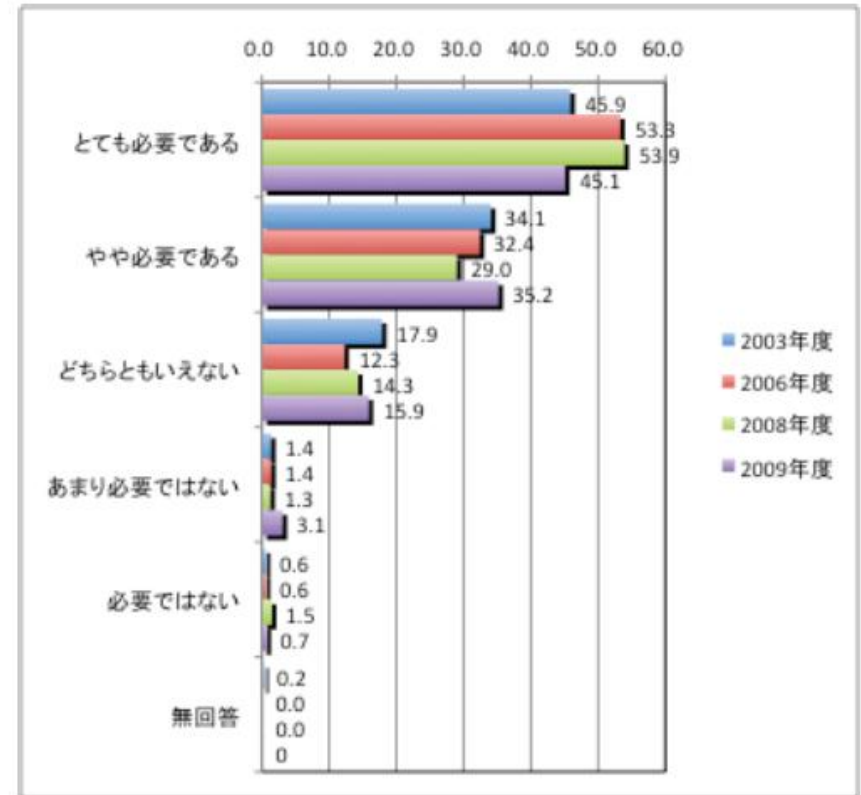
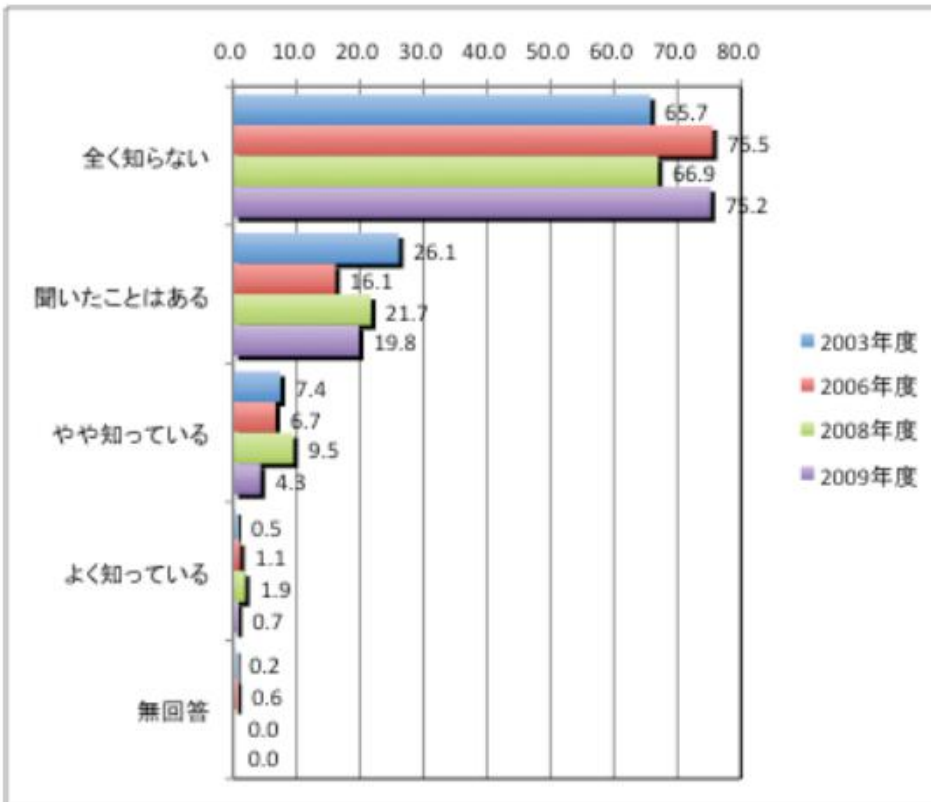
1GW級商用SPS 1号機



商用SPS本格的建設・運用 (1SPS/year)

SPSはどの程度知られているか？

三菱総研によるアンケート結果



2009年11月SPSシンポ

宇宙太陽光発電が実現したら・・・



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。
- ・JAXA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を進めている。



宇宙太陽光発電の研究を進めている職員や学生たち