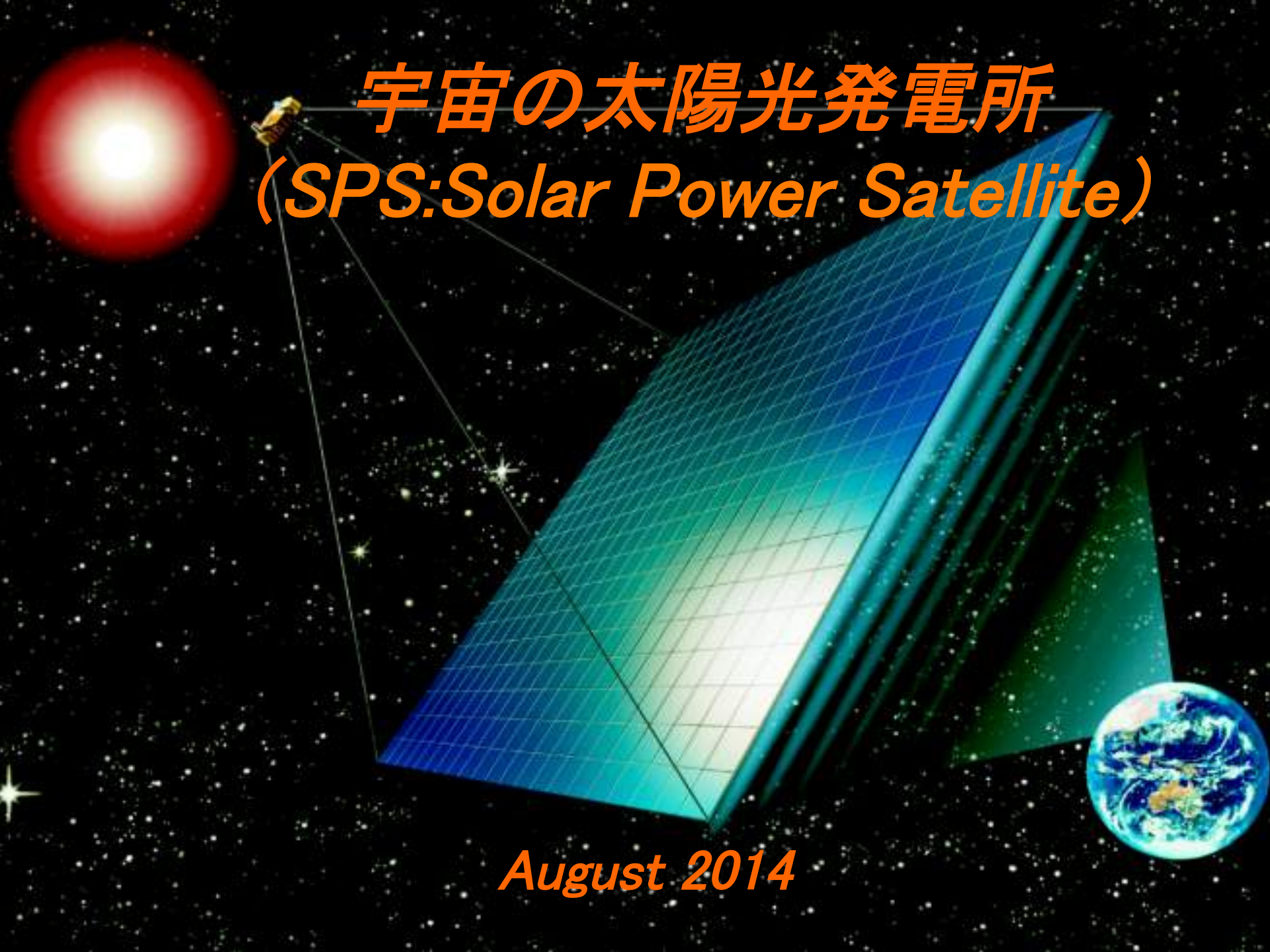



# 宇宙の太陽光発電所 (SPS: Solar Power Satellite)



August 2014

# 宇宙の太陽光発電所：講義の内容

1. 背景となるエネルギー問題と地球環境問題
2. エネルギー問題と地球環境問題の解決を目指す  
宇宙の太陽光発電所とはどんなアイデア？
3. 宇宙の太陽光発電所に必要な技術と現在の  
研究状況
4. 実現への道のり



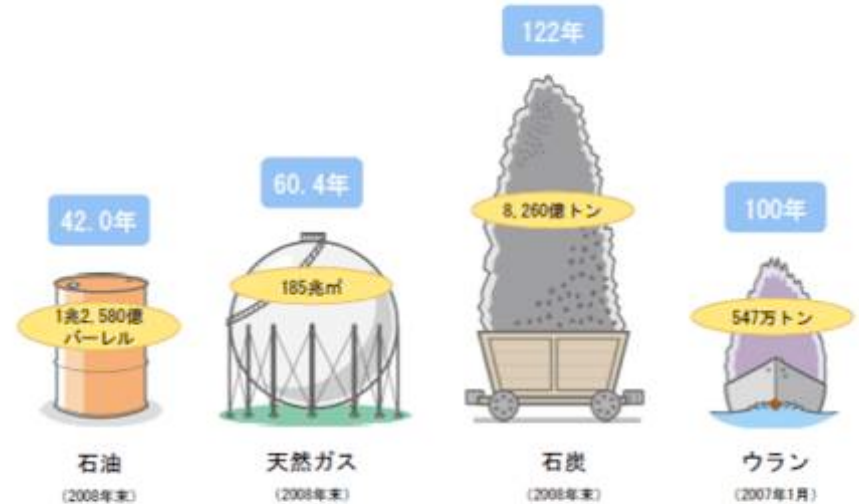
**1. 背景となるエネルギー問題と地球環境問題**

# 人口、エネルギー、地球環境の問題

## 人口の増大



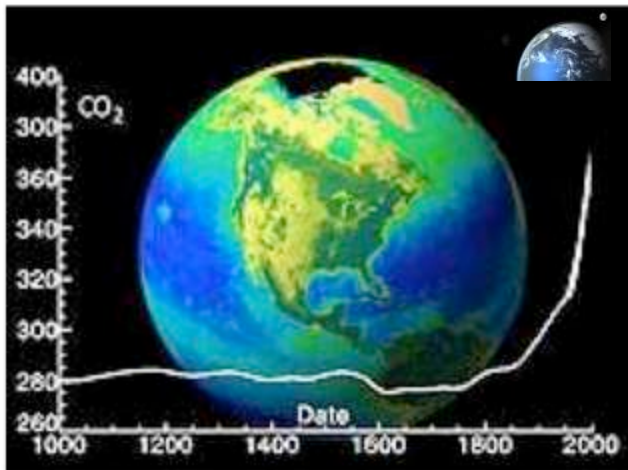
## 限りあるエネルギー資源



- 石油、天然ガス、石炭可採年数=確認可採埋蔵量/年間生産量
- ウラン可採年数=確認可採埋蔵量/年間消費量

出典：資源エネルギー庁「原子力2010」

## CO<sub>2</sub> 問題



### 化石燃料の現状

- ・地球が太陽エネルギーを生物遺骸の形で**数億年**かけて蓄積。人類はこれをわずかに**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**しかないと言われている。

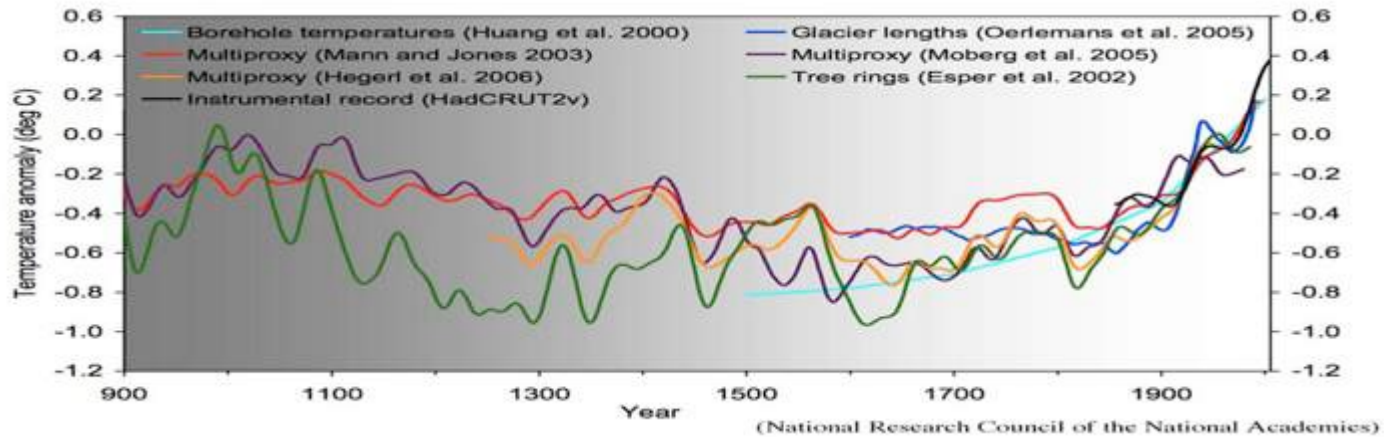
# 地球環境問題：人類は地球にとってウイルス？




氷河融解？



砂漠化？



注意：国連の「気候変動に関する政府間パネル(IPCC)」では、地球の温暖化を予測しているが、今後寒冷化すると考えている研究者も多い。いずれにしても、大気中の人為的な(不自然な)CO<sub>2</sub>濃度の増大は地球環境にとって望ましくない。



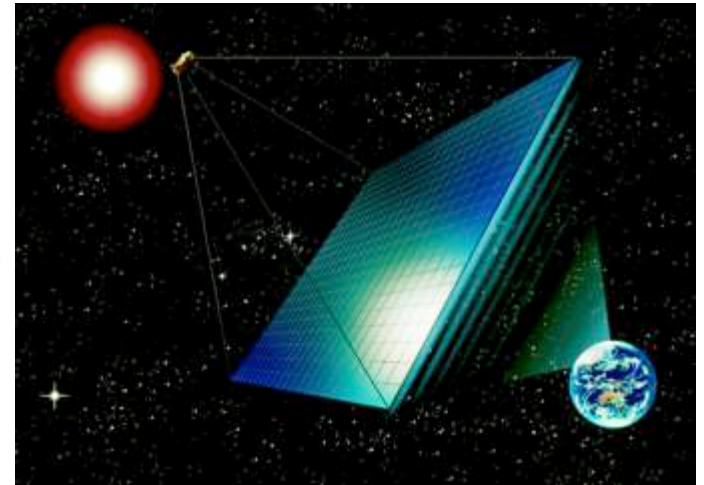
**2. エネルギー問題と地球  
環境問題の解決を目指  
す宇宙の太陽光発電所  
とはどんなアイデア？**

# 宇宙の太陽光発電所とはどのような構想か？

何度も使用できるロケット  
で宇宙に運ぶ。



太陽光発電所を  
宇宙で組み立てる。



地上の太陽光発電所

小さく折りたたんで宇宙に運ぶ。  
宇宙で組み立てる。  
発生した電気は電波で地上に送る。

# なぜ、宇宙の太陽光発電所を考えるのか？

## 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1万倍

→ 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(お天道様)。

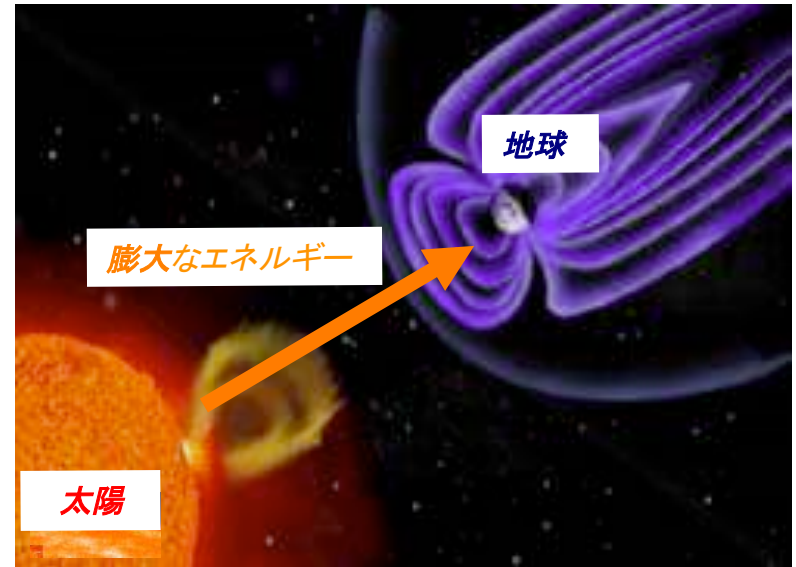
## 何故宇宙か？

地球周辺の宇宙空間での太陽光のエネルギー密度は  $1,370 \text{W/m}^2$

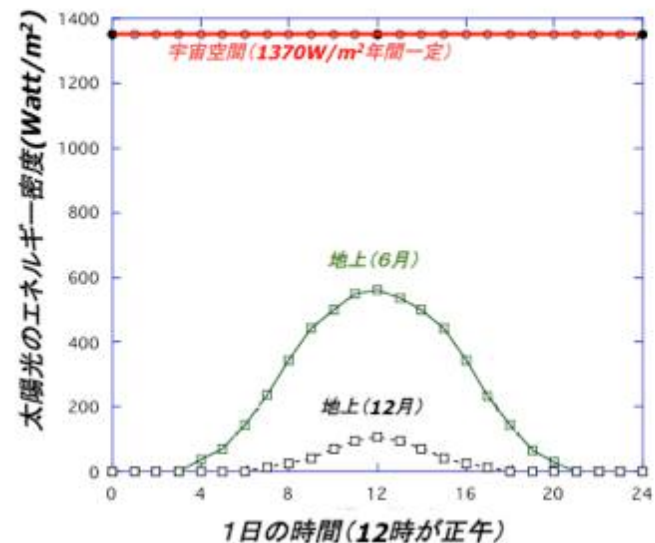
地上での太陽光の年間平均エネルギー密度は  $100 \sim 200 \text{W/m}^2$

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伝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利。



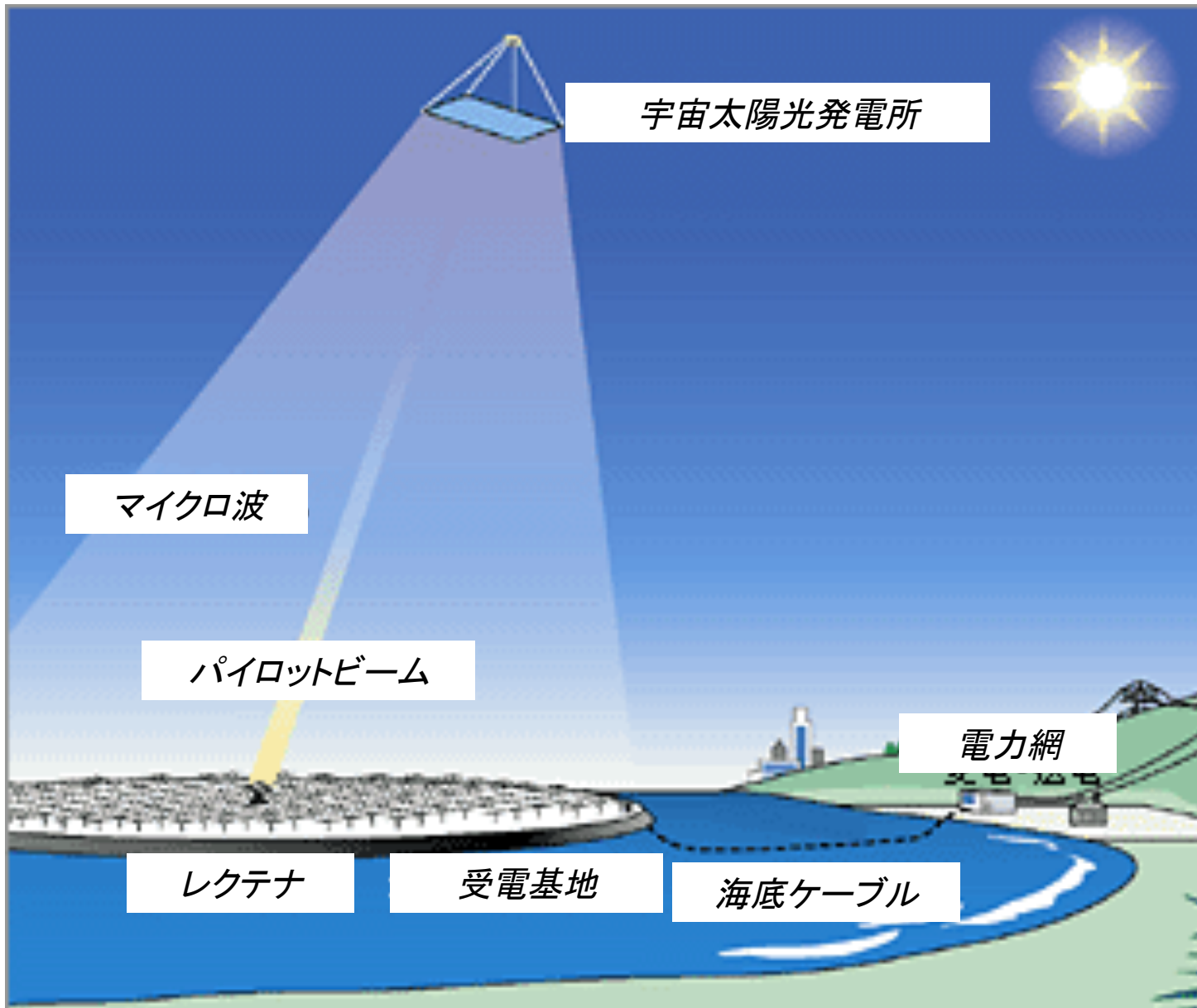
毎秒6億トンの水素が燃焼(核融合)



宇宙と地上の太陽光強度



# 宇宙の太陽光発電所の構想



# 宇宙の太陽光発電所の利点

## 地上の太陽光発電所



雨や曇りの日がある。



夜がある

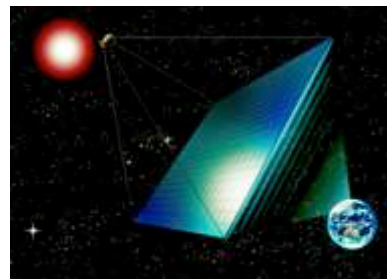


広い土地を探  
すのが大変

## 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



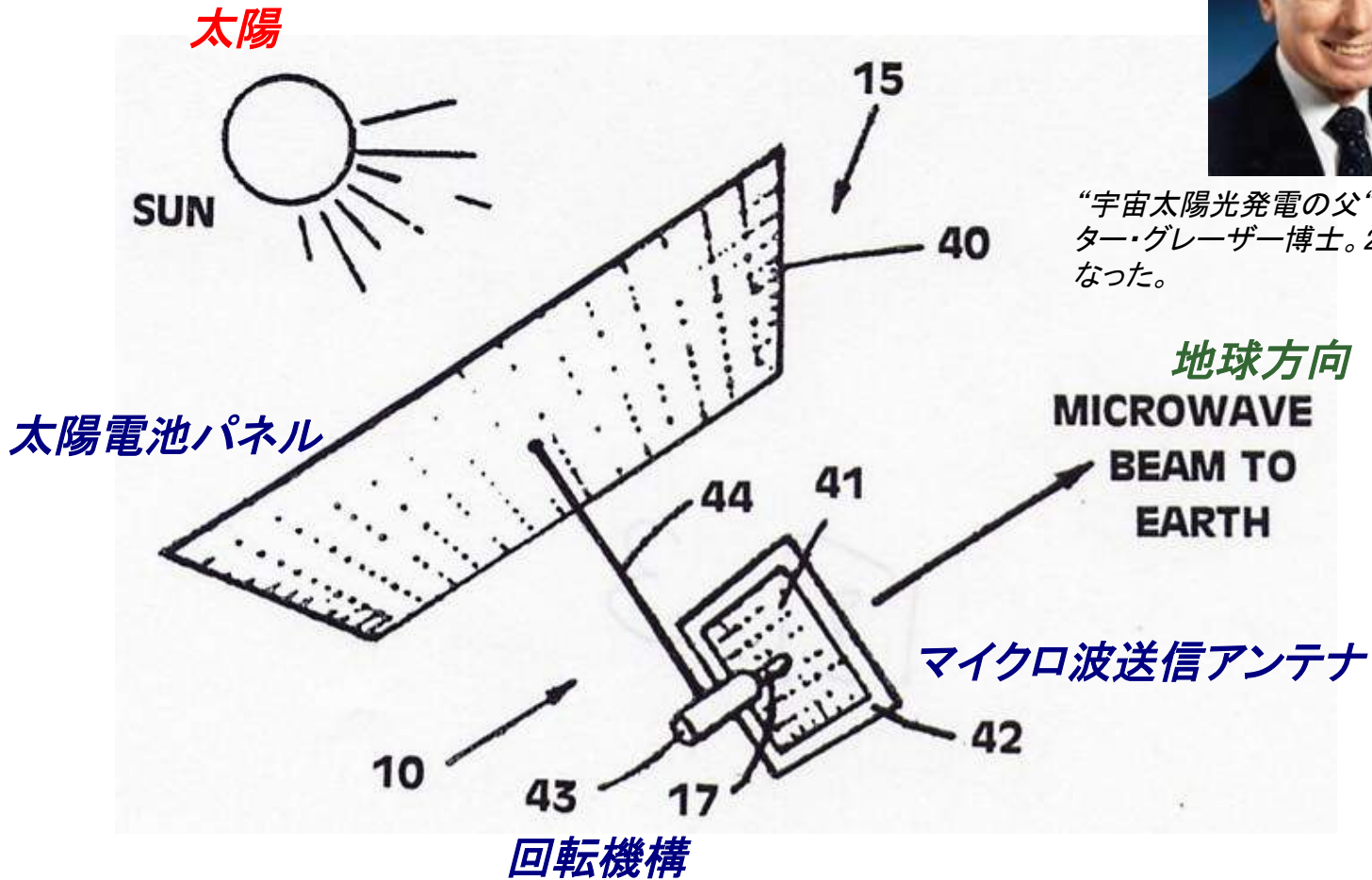
宇宙は広い



# 宇宙の太陽光発電所の発案者



“宇宙太陽光発電の父”と呼ばれたピーター・グレイザー博士。2014年5月末亡くなった。

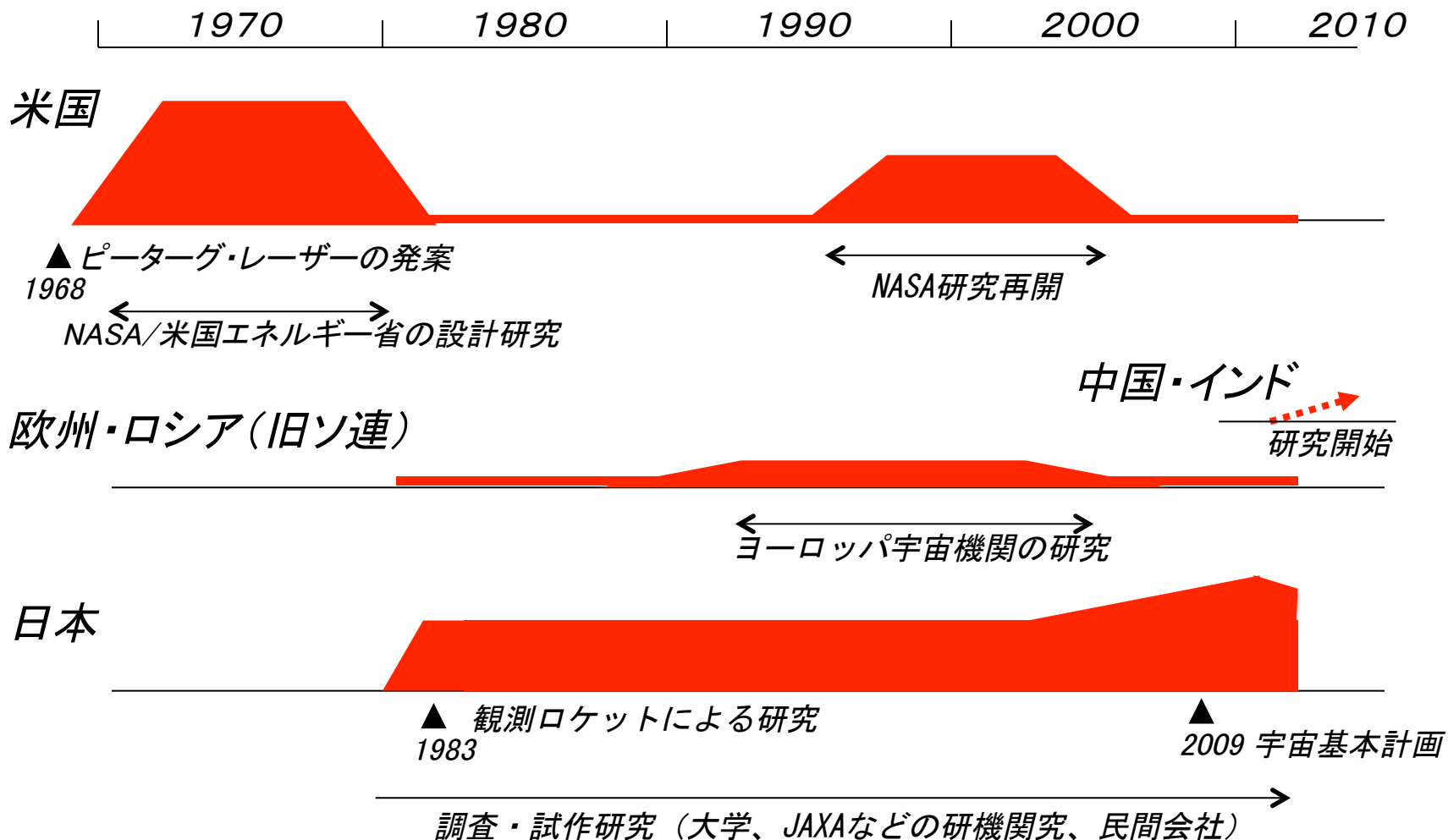



発案者ピーター・グレイザーの特許公告(1973年)

# 宇宙の太陽光発電所の種類



# 宇宙の太陽光発電所の研究 世界の状況





# 3. 宇宙の太陽光発電 所に必要な技術と現在の 研究状況

# 宇宙の太陽光発電所実現のために必要な主な技術 (目標と現在の實力)

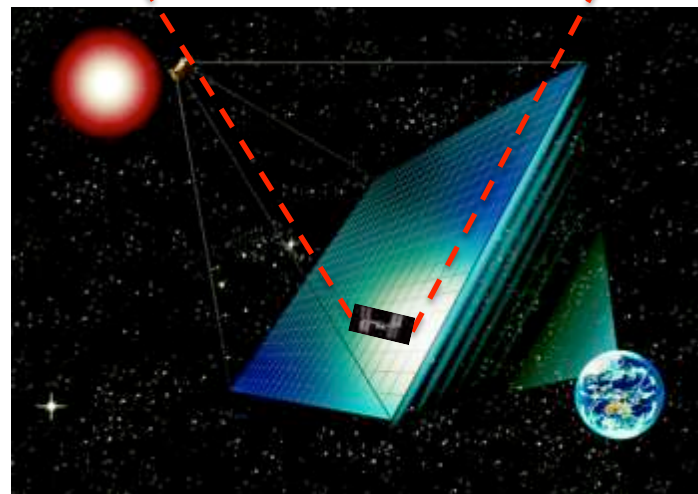
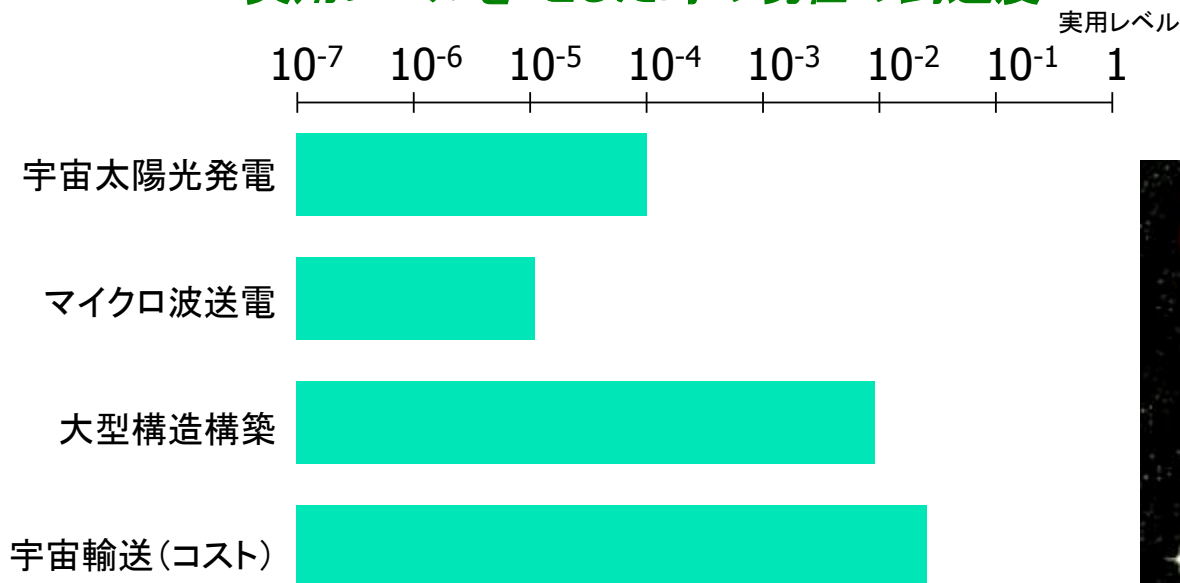
1GW=30~50万世帯分

主要な技術	現状の到達レベル	目標レベル	比率
宇宙太陽光発電	数十kW (国際宇宙ステーションで100kW)	1 GW	10,000
マイクロ波送電	数十kW (地上)、1kW (宇宙)	1 GW	100,000
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	~100万円/kg	2万円/kg	1/50

国際宇宙ステーション 100m サイズ



## 実用レベルを1とした時の現在の到達度



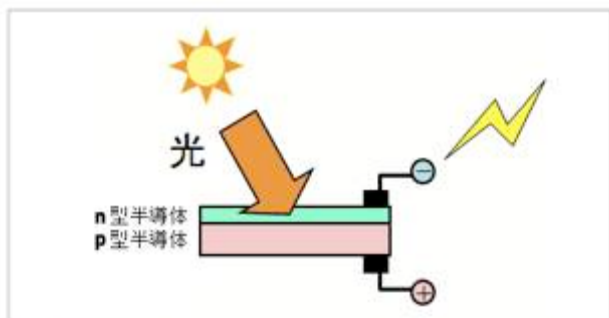
100万kW級太陽発電衛星 1-2 km サイズ

# 宇宙の太陽光発電所実現のために必要な主な技術

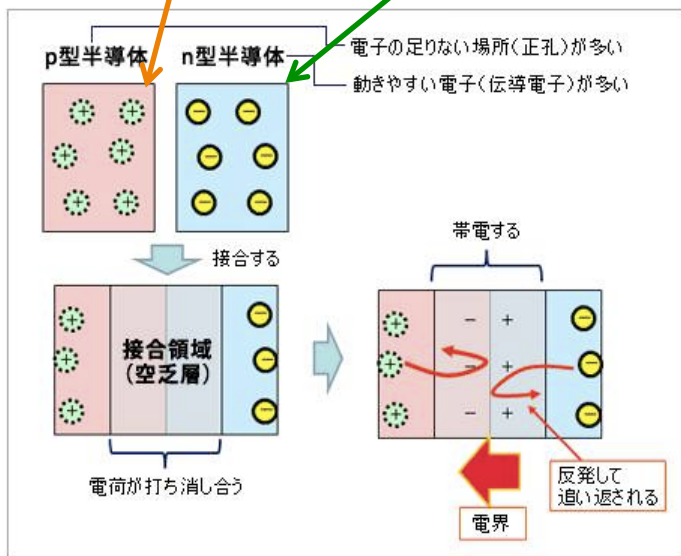
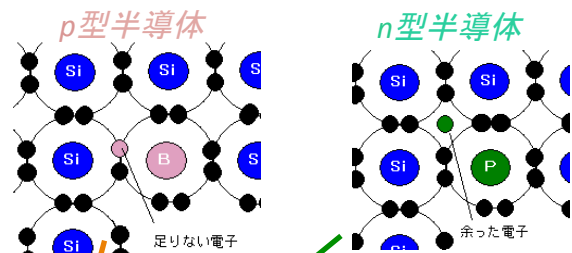
- ・太陽電池による発電技術
- ・マイクロ波による送電技術
- ・大型の構造物を宇宙に構築する技術
- ・宇宙発電所の建築シナリオ
- ・宇宙に低コストで物資を輸送する技術
- ・宇宙ゴミに対する対策



# 発電は太陽電池で行う/太陽電池の発電原理



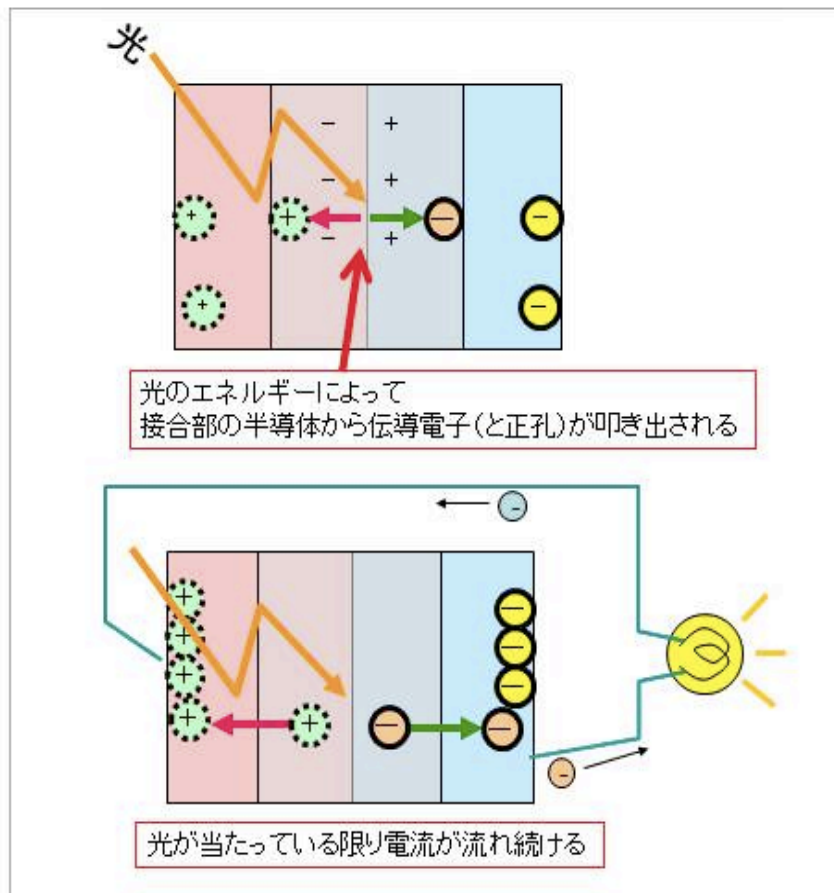
↑図1 太陽電池は、薄いn型とp型の半導体を積み重ねた構造をしている



↑図2 n型とp型の半導体を重ねると、接合部に空乏層と電界が出て安定する

n型半導体: キャリアが自由電子の半導体である。4価元素のシリコン半導体に、微量の5価元素(例えばリン、ヒ素など)を不純物として添加して作る。

p型半導体: キャリアが正孔の半導体。シリコン半導体に微量の3価元素(ホウ素、アルミニウムなど)を不純物として添加して作る。



↑図3 空乏層に光が入射すると、電子と正孔が叩き出されて流れ出す

# 宇宙の太陽光発電所用の太陽電池

宇宙の発電所の太陽電池には、薄膜、曲げることができる、軽量、高効率（重量当たりの電力）であることが求められる。

## 太陽電池のタイプ(緑のタイプが有望)

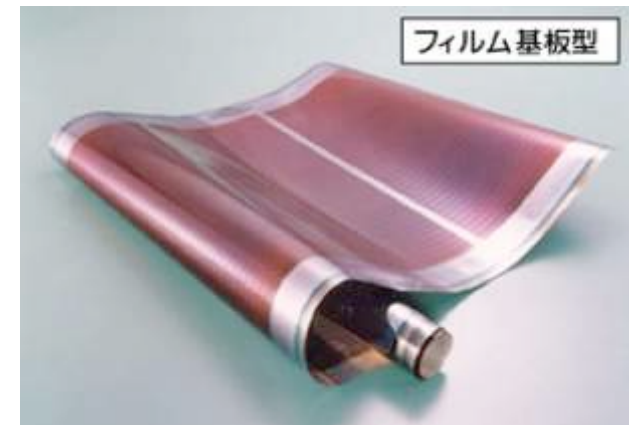
型	種類	特徴	SPS用としての評価
バルク型 (厚いタイプ)	Si (単結晶、多結晶)	現在の生産の主流	重量あたりの出力が低い
	III-V族結晶化合物	超高効率 宇宙用、高コスト	資源的制約 (Ge, In) 集光系との組み合わせで可能性有り。但し、正確な太陽指向が必要
*薄膜型 (10 $\mu$ m以下)	アモルファスシリコン	量産性、低コスト、製品としての先行	当面有力
	CdTe	構造が簡単で安定性が高い 低コストの可能性	資源的制約 (Cd, Te)
	CIS	高効率、長寿命、耐放射線性に優れる	資源的制約 (In) 将来有望
	多結晶シリコン	ハイブリット型での組み合わせ	
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



現在の衛星で使われている宇宙用太陽電池のパネル（ガラスが用いられ堅く重い）



宇宙の発電所にはフィルム状のものが望ましい

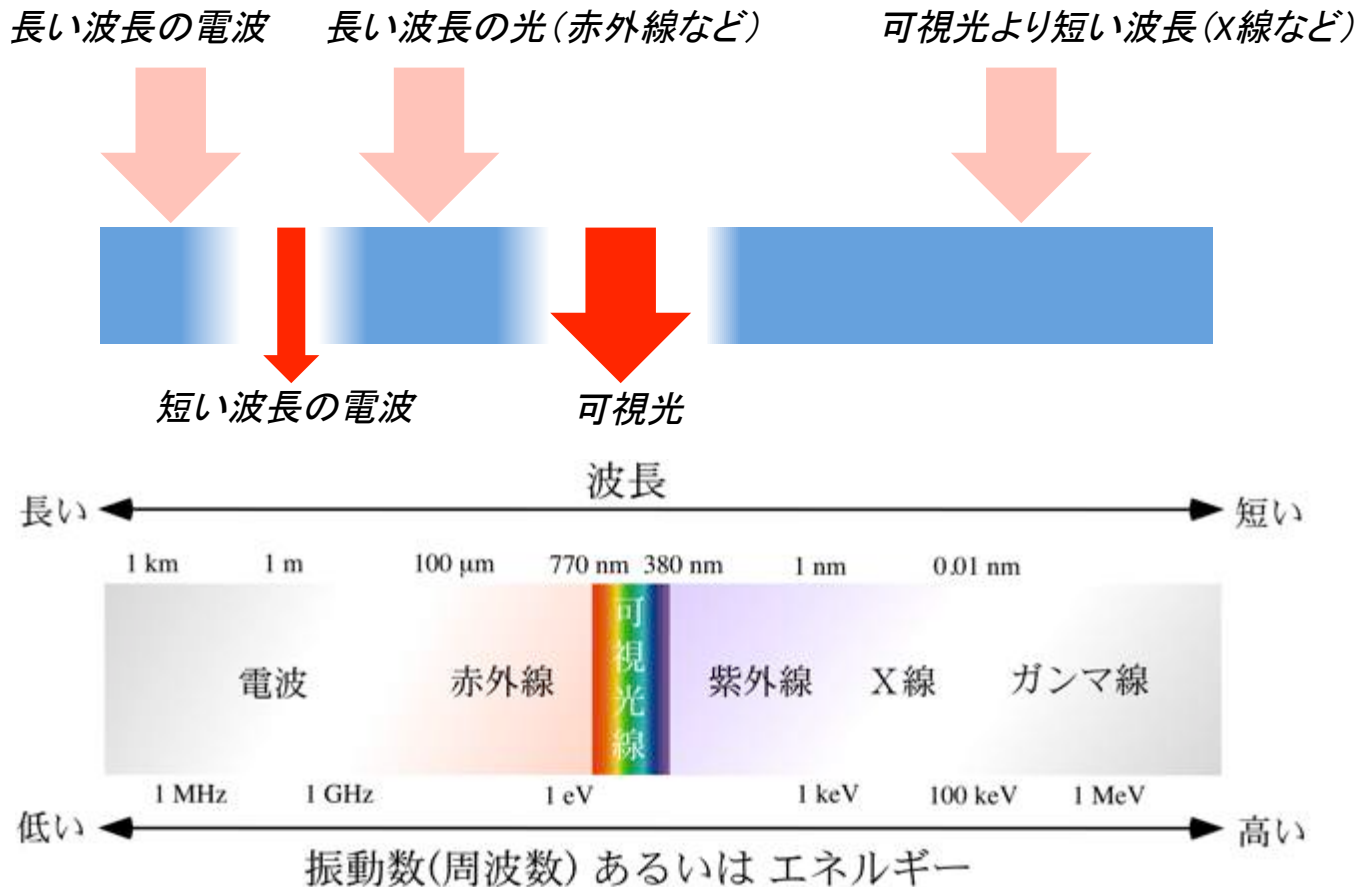


薄膜、柔らかく軽い

太陽電池デモ

# 宇宙から地上への電力伝送: 大気之窗

## 宇宙からのいろいろな波長の光や電波



無線送電の候補

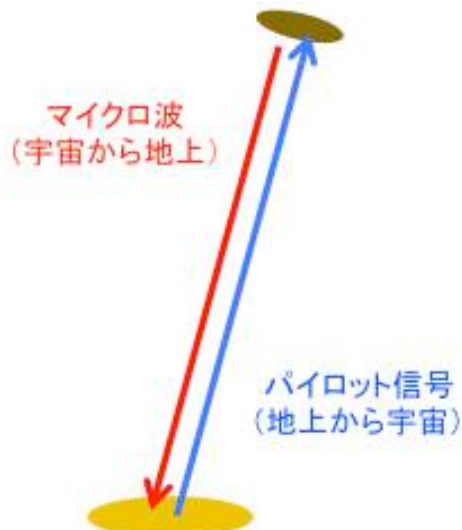
マイクロ波 (周波数 1-10GHz 付近)

レーザー (波長 1μm 付近)

# マイクロ波送電技術

宇宙太陽光発電の技術の中で最も高度な技術の一つ。地上局の誘導電波を用い、数万km離れた直径数kmの地上アンテナに正確に送電する必要がある(1km離れて10cmの的に1cmの精度で指向する必要)。レトロディレクティブ制御と呼ばれる。

軌道上のマイクロ波送電アンテナ



地上のマイクロ波受電アンテナ

宇宙からのマイクロ波の制御方法



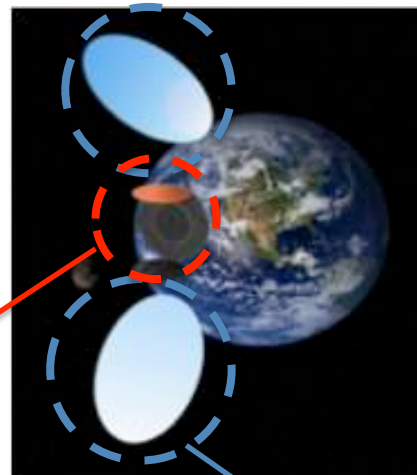
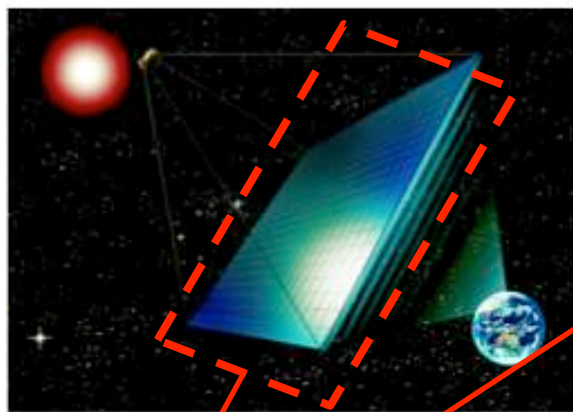
NASA JPLでのマイクロ波電力伝送実験(1.5km, 450kW送電、34kW受電、1975年)



日本での地上でのマイクロ波送電実験  
(本年度に実施予定)

# 宇宙に大型の構造物を構築する技術

宇宙の発電所の太陽電池には、km級の大きさの構造物が必要。



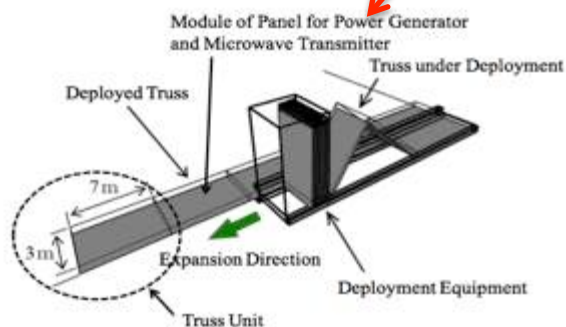
実験室実験



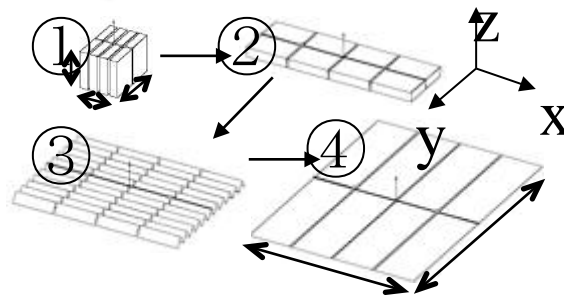
CG©NYAISAS  
(宮崎氏製作)

数百m～数kmサイズの厚みのあるパネル構造

数百～数kmサイズの軽量薄膜ミラー



パネルを組み立てながら  
展出する展開方式

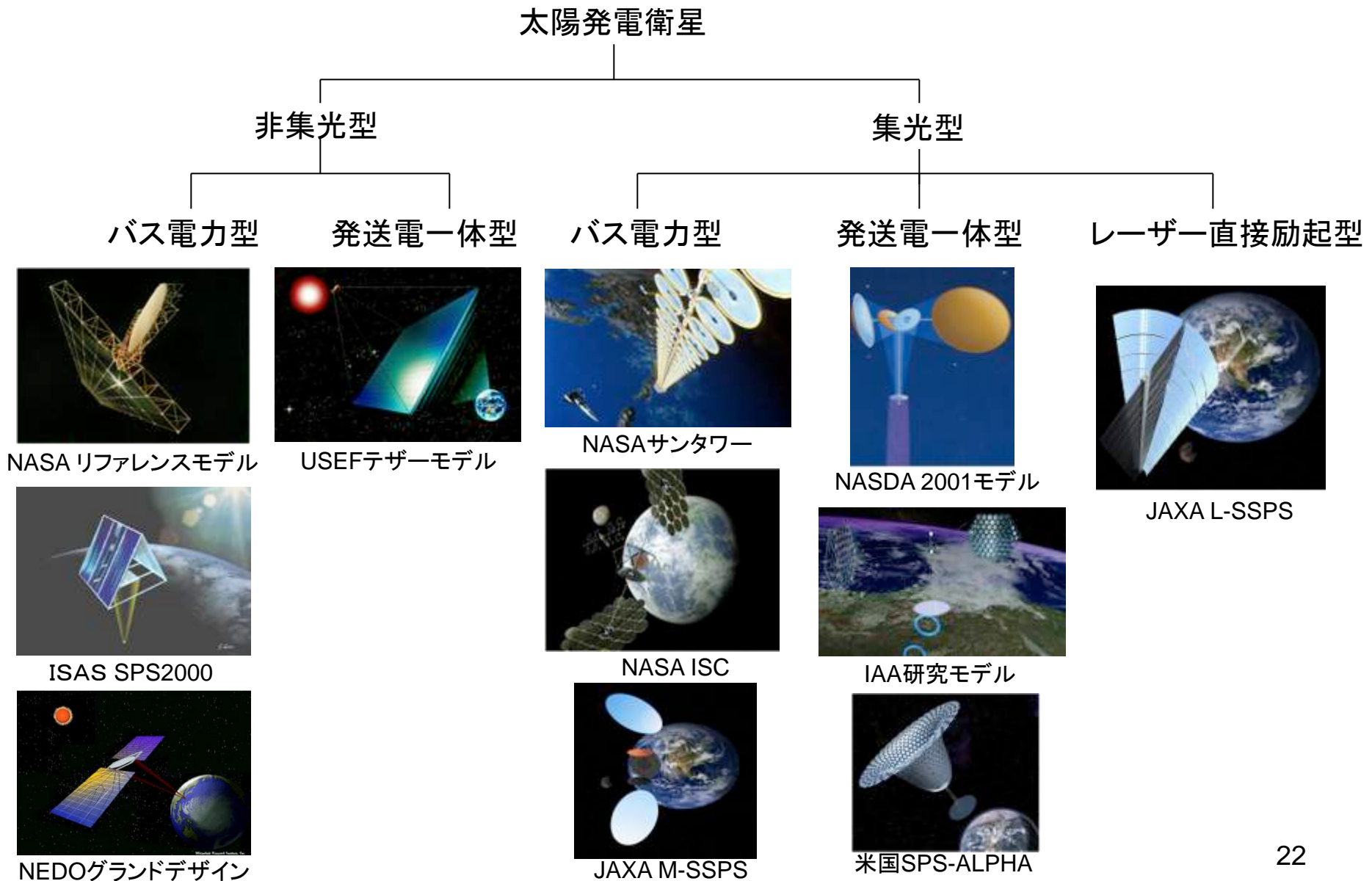


自動で自己展開する展開  
方式

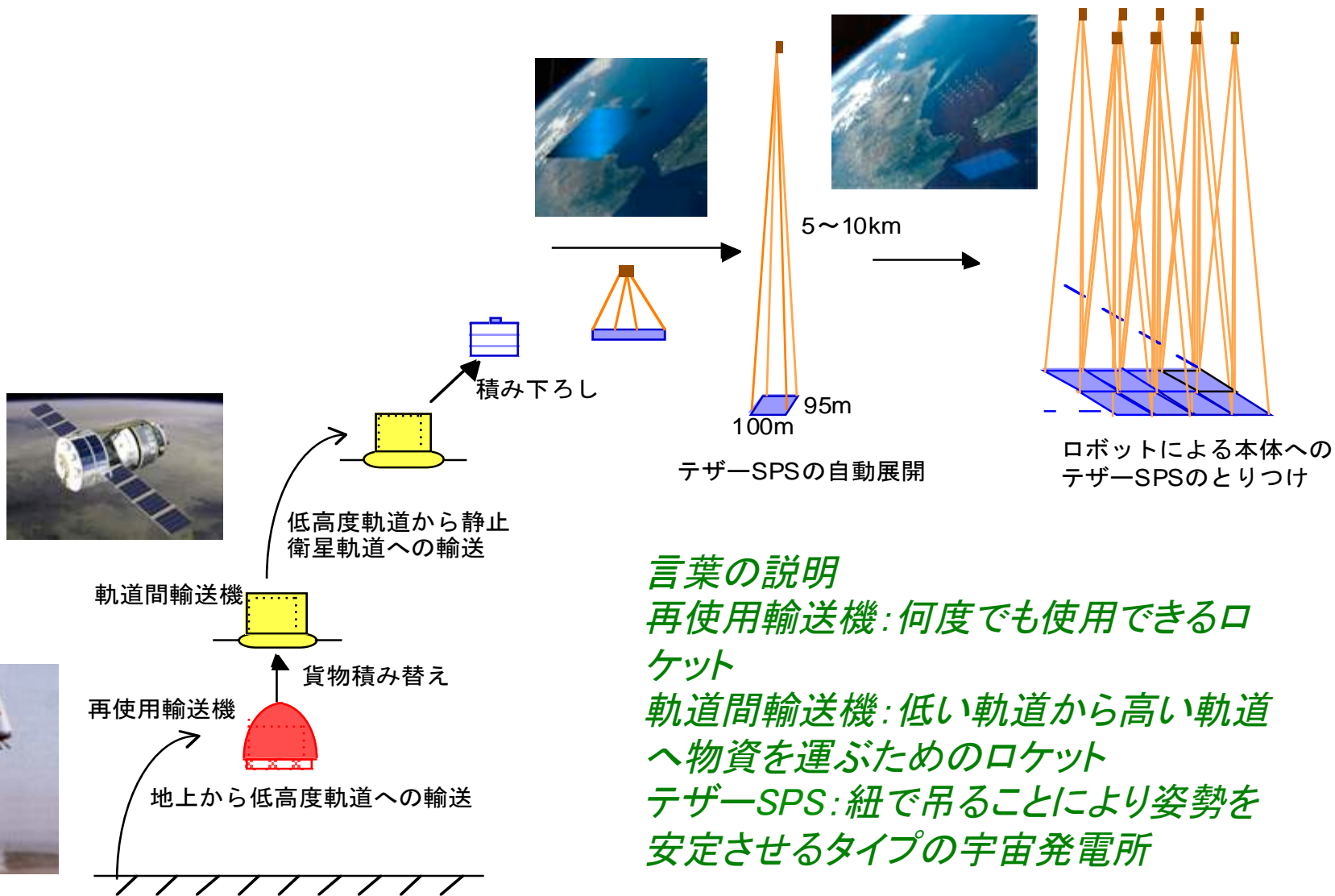


風船のように膨らんだ後硬  
化する薄膜構造物

# 宇宙の太陽光発電所の種類



# 宇宙の太陽光発電所の建設シナリオ



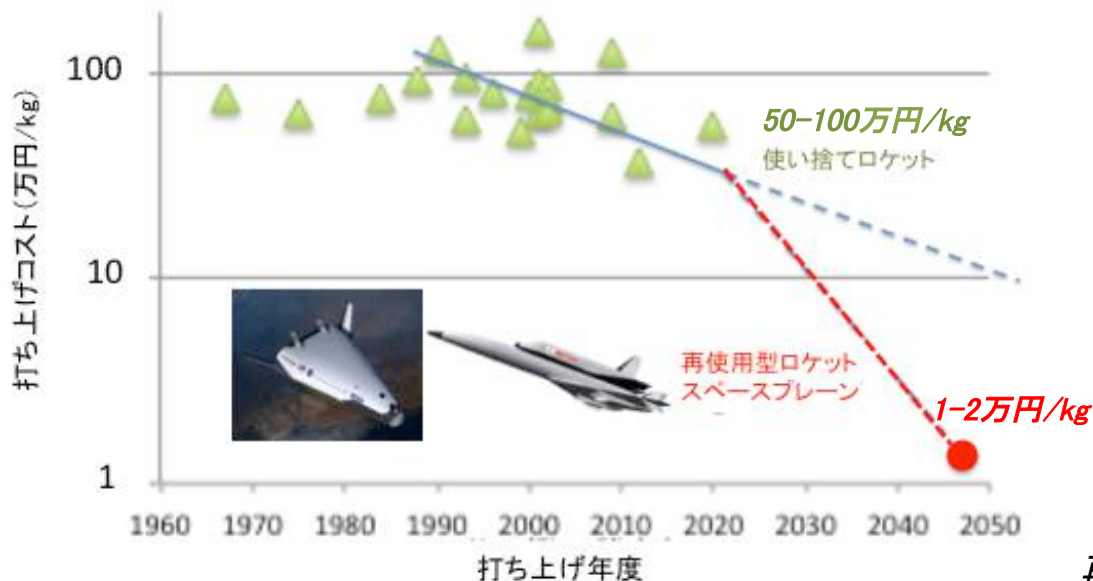
## 言葉の説明

再使用輸送機: 何度でも使用できるロケット

軌道間輸送機: 低い軌道から高い軌道へ物資を運ぶためのロケット

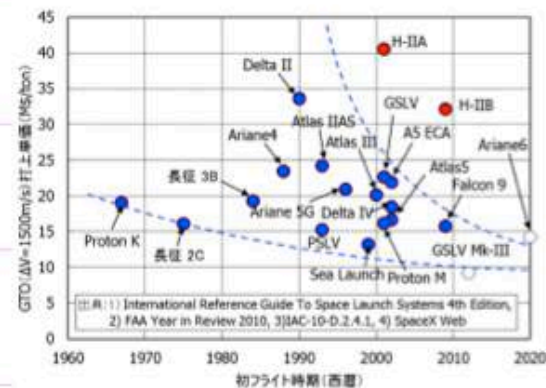
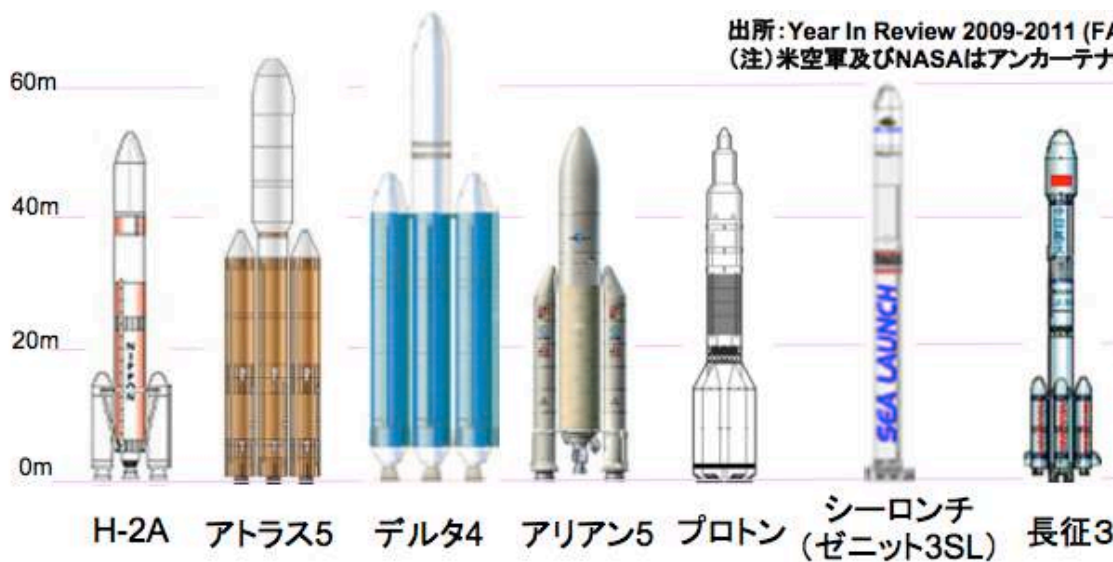
テザーSPS: 紐で吊ることにより姿勢を安定させるタイプの宇宙発電所

# ロケット打ち上げのコストの現状と将来



再使用ロケット実験機 重量:500kg、全長3.5m

出所: Year In Review 2009-2011 (FAA) ※H-2A/Bについては、平成24年8月現在までの数字  
(注)米空軍及びNASAはアンカーテナントなどによる支援を実施



静止トランスファ軌道(GTO)打上単価の比較

※Ariane 6, GSLV Mk-IIIの数字は予測値(現在開発中のロケット)



# 宇宙ゴミ（デブリ）との衝突は大丈夫か？

衝突は避けられないので、衝突による破壊の状態を予め実験で調べ、衝突の影響が全体に及ばないような設計を行う。



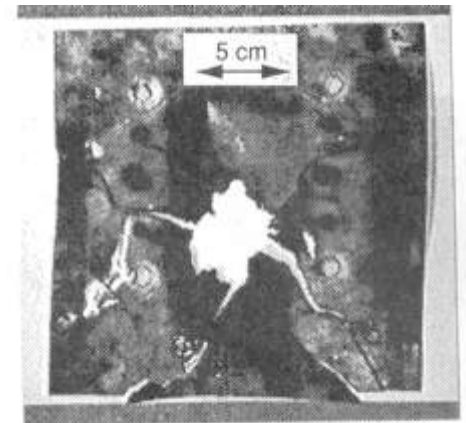
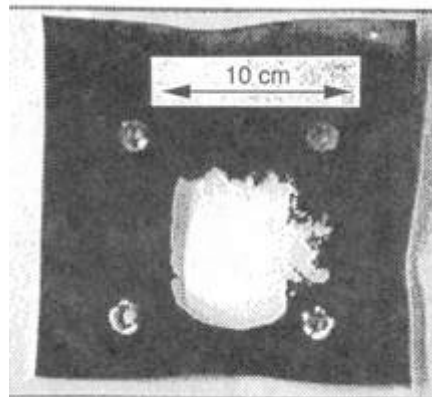
宇宙デブリの分布(動画)



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

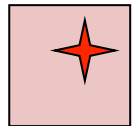
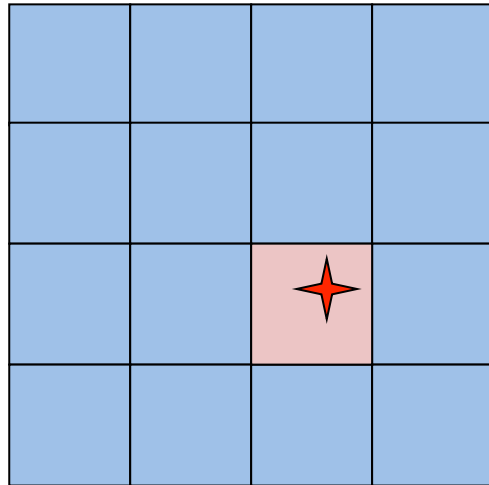


爆発的な超高速衝突現象の例(動画)

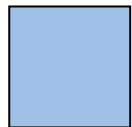


↑ 太陽電池を模擬した薄膜への超高速衝突による破壊の例

# 宇宙塵や宇宙ゴミの衝突を考慮した設計



超高速衝突で破壊されたモジュール



健全なモジュール

静止衛星でのパネル状構造物への衝突頻度は、 $\text{km}^2$ あたり、  
10 cmサイズ 70年に1回  
1 cmサイズ 3年に1回  
1 mmサイズ 2400回/年

太陽電池のモジュールサイズを $0.5\text{m} \times 0.5\text{m}$ とし、モジュールの破壊は $1\text{mm}$ 以上のサイズの高速度の衝突で生じるとした場合、破壊が1モジュール内にとどまるように設計すれば、40年間の宇宙塵や宇宙ゴミの衝突による電力ロスは4.8%程度(両面衝突を考慮)となる。

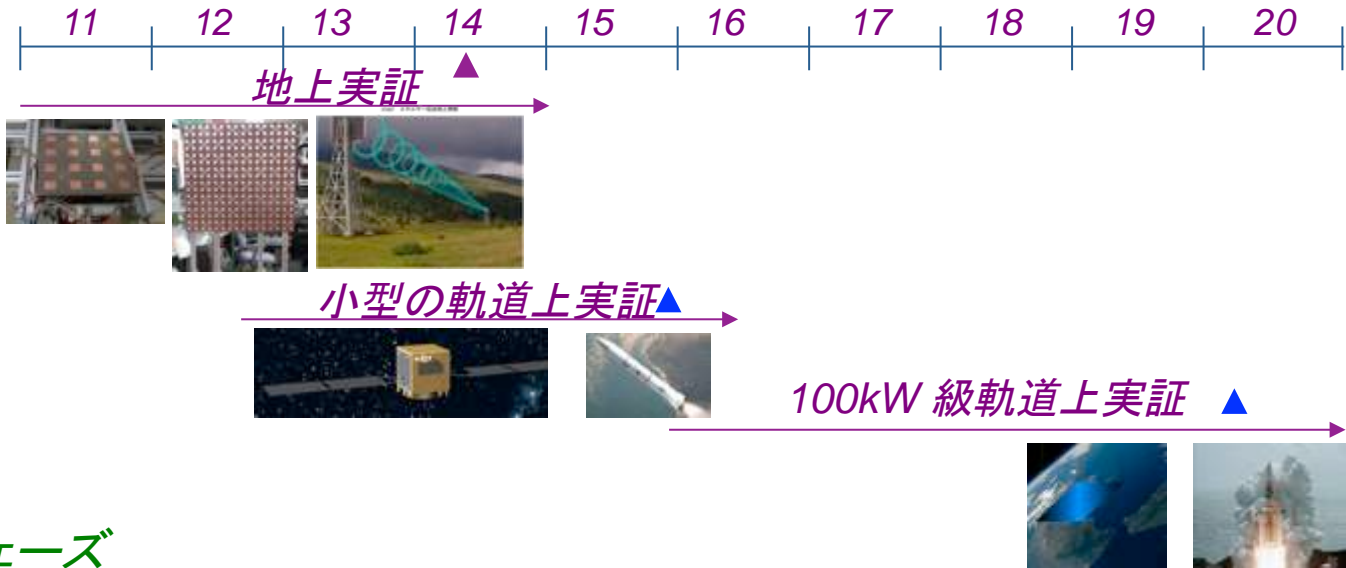


## 4. 実現への道のり

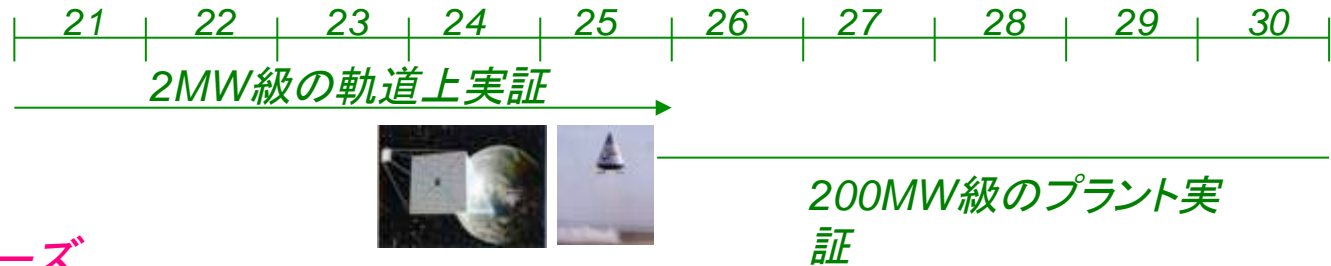
# 今後の研究開発の計画(研究者の提案)

SPS:宇宙の太陽光発電所

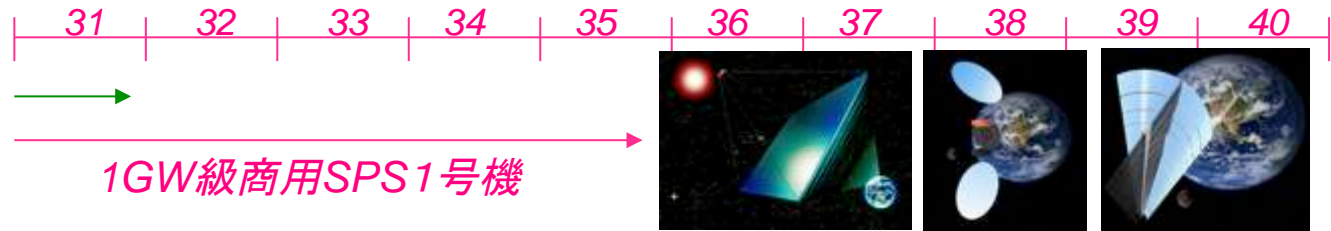
## 研究フェーズ



## 開発フェーズ



## 実用フェーズ

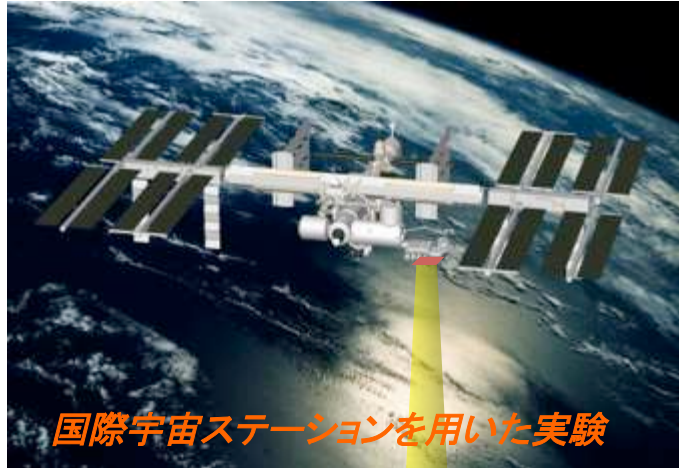
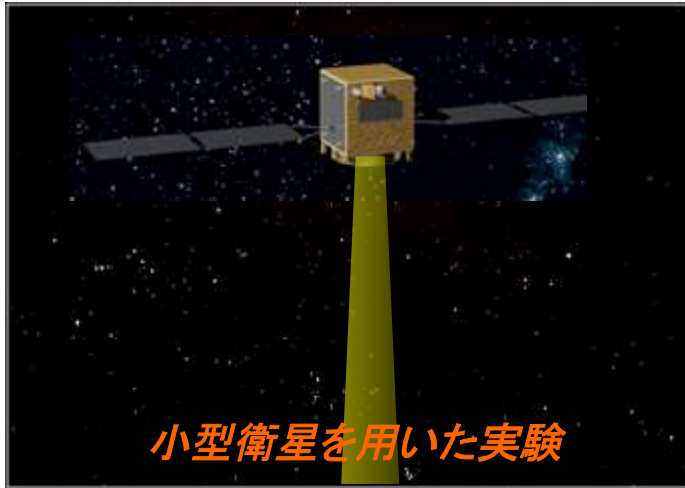


商用SPS本格的建設・運用 (1SPS/year) 28

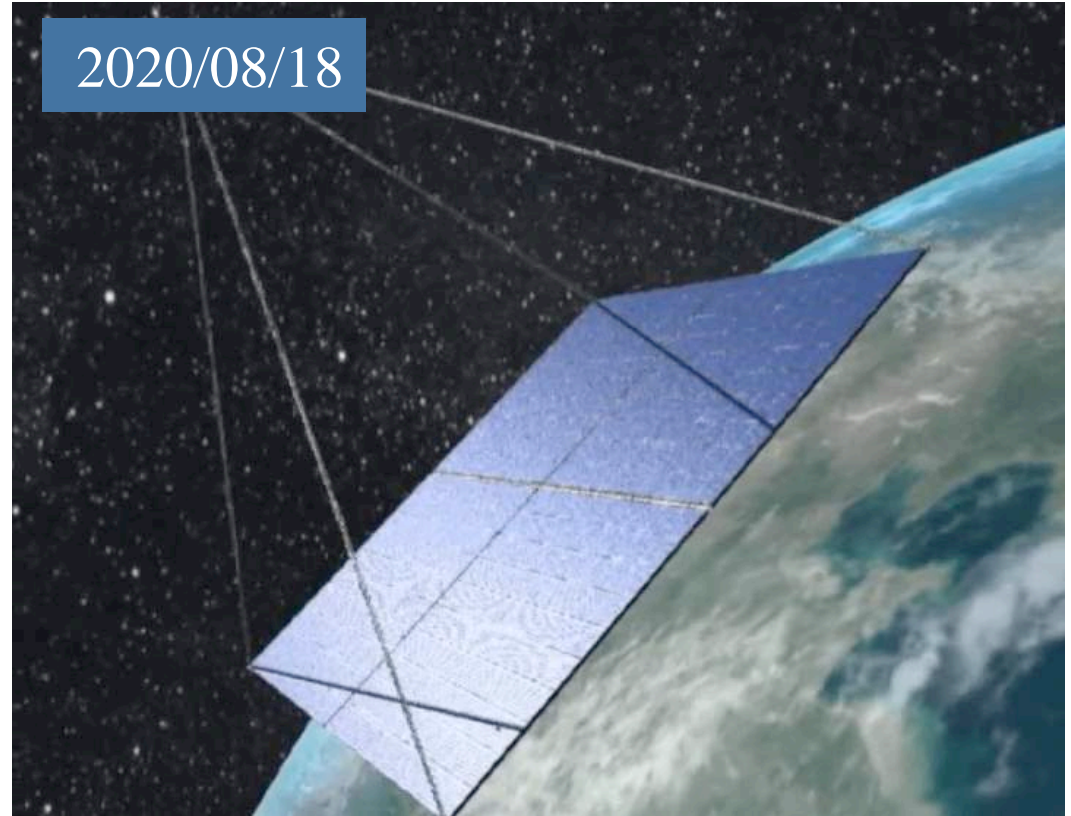
# 無線送電技術実証のための宇宙実験

(提案中)

(研究者の夢)



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



高度:400km程度、電力レベル:100-400kW程度  
送電ビーム(マイクロ波)の電力送電の実証。  
2020年東京オリンピックに合わせて実施できたら世界の人にクリーンエネルギーシステムを知ってもらうために効果的!

# 宇宙の太陽光発電所が実現したら・・・



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……