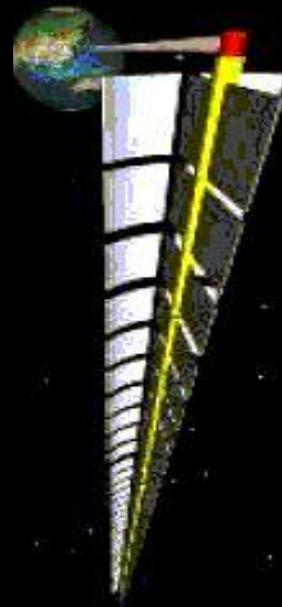
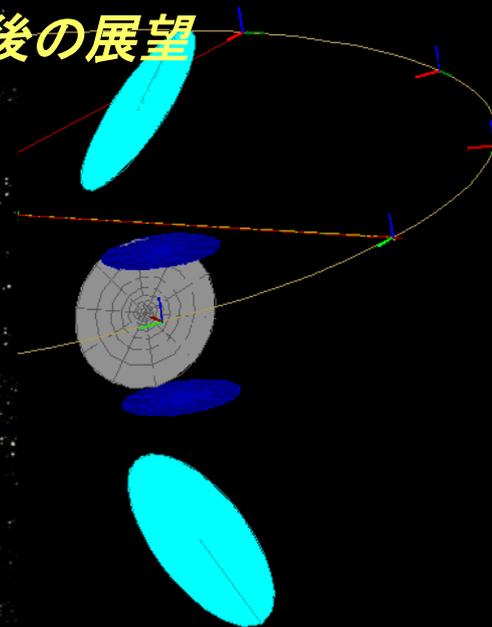
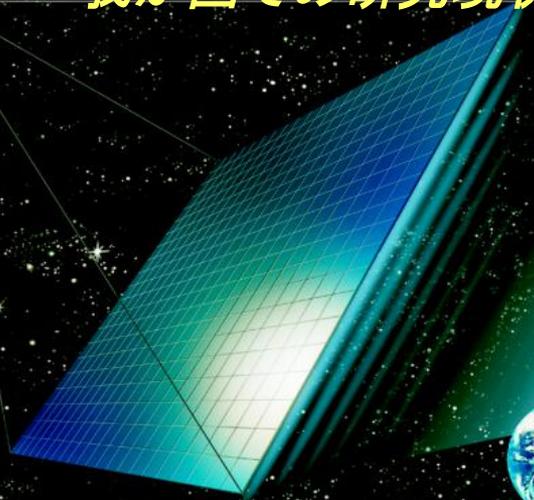


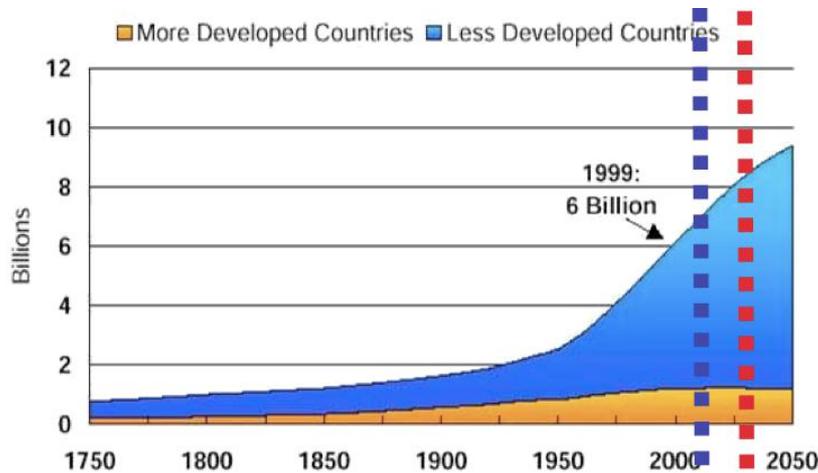
宇宙太陽光発電の仕組みと研究の現状

- ・宇宙太陽光発電(SSPS)の概念と研究の歴史
- ・実現のために必要な技術
- ・我が国での研究現状と今後の展望

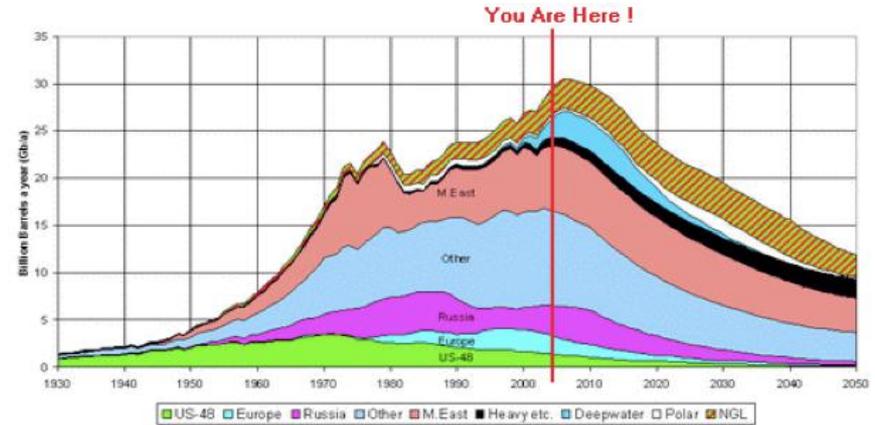


2011年3月

資源問題と地球環境問題



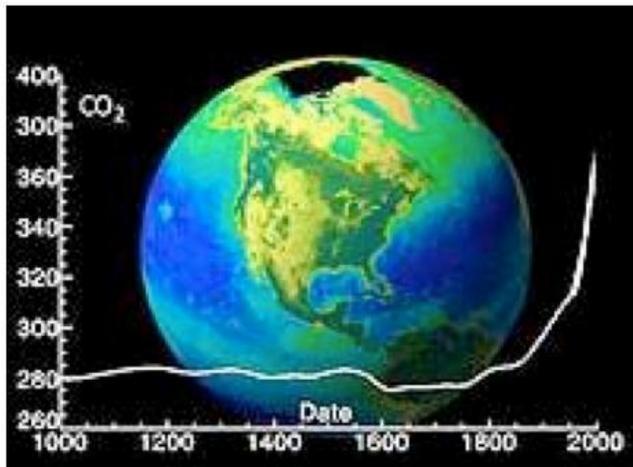
人口の増大



限界あるエネルギー資源

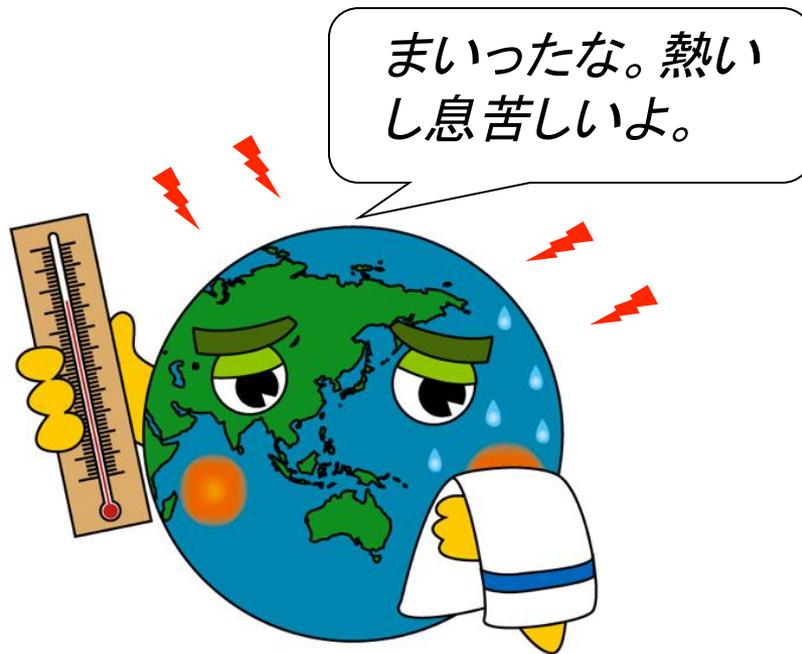
Ref: *Abundant & Affordable Space-Based Solar Power Realizing the Opportunity* John C. Mankins (2007)

- ・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。



CO₂ 問題

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利用

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。

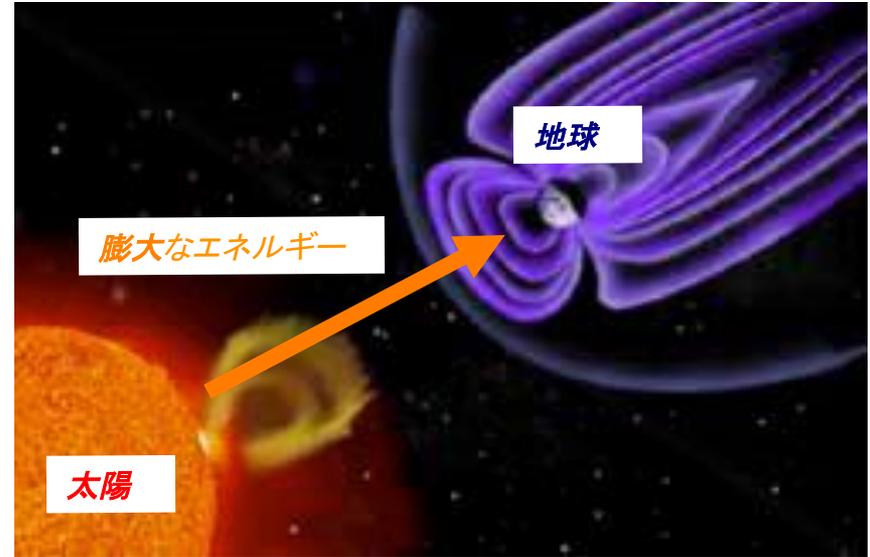
何故宇宙か？

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。



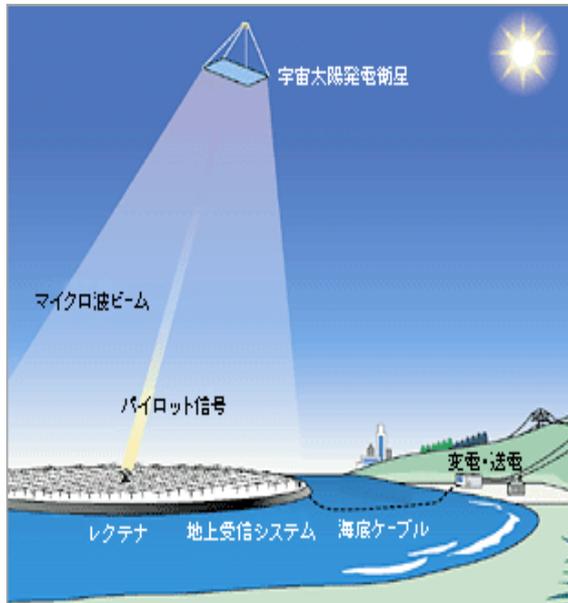
宇宙太陽光発電システム

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らる。

宇宙太陽光発電 (SSPS) の原理と構成



地上の太陽光発電所 (ドイツ5MW)

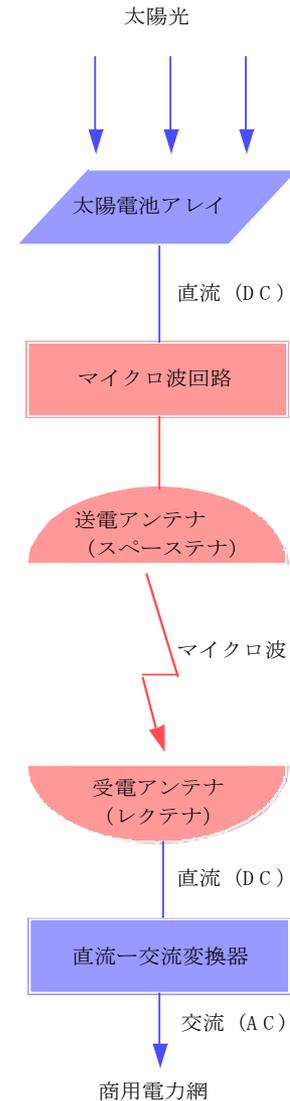


宇宙の太陽光発電所: 宇宙発電衛星

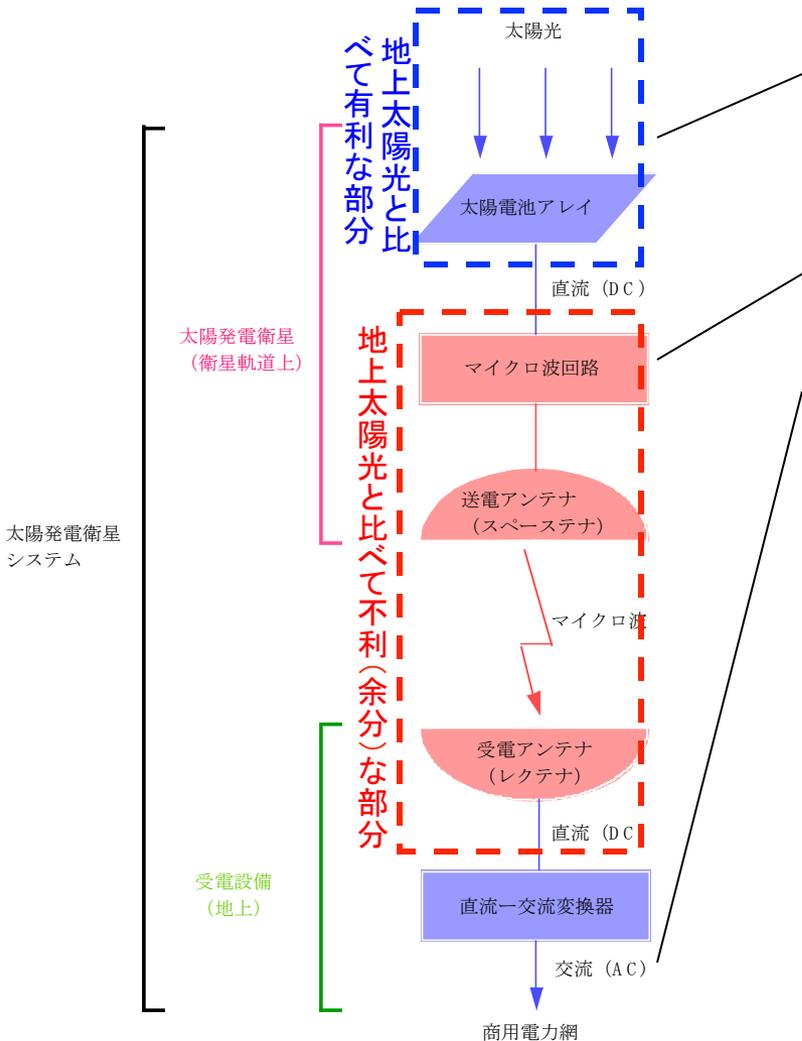
太陽発電衛星
システム

太陽発電衛星
(衛星軌道上)

受電設備
(地上)



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

宇宙太陽光発電システムのCO₂負荷

宇宙太陽光発電システムのCO₂負荷

(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

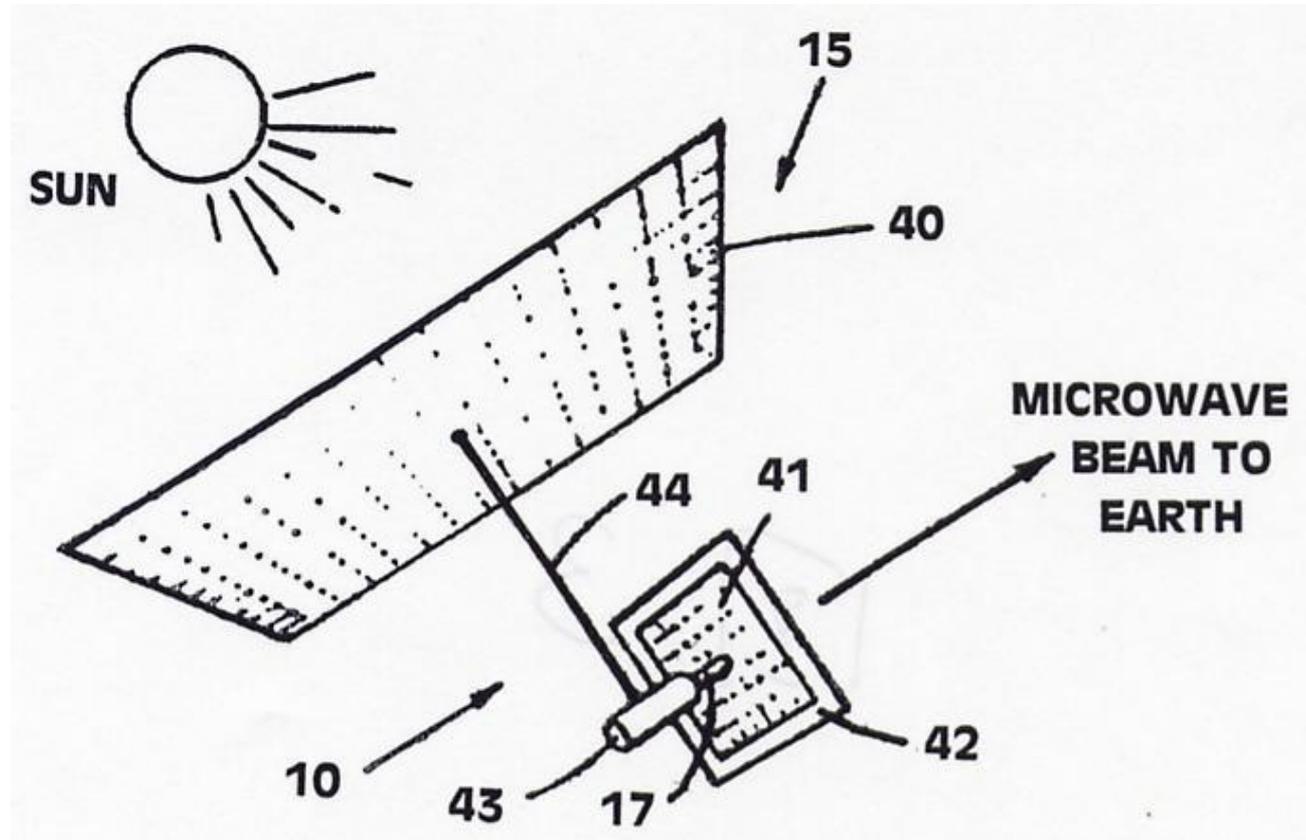
吉岡、菅、野村、朝倉、第1回SPSシンポジウム、平成11年

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。

ピーターグレーザーの特許公告

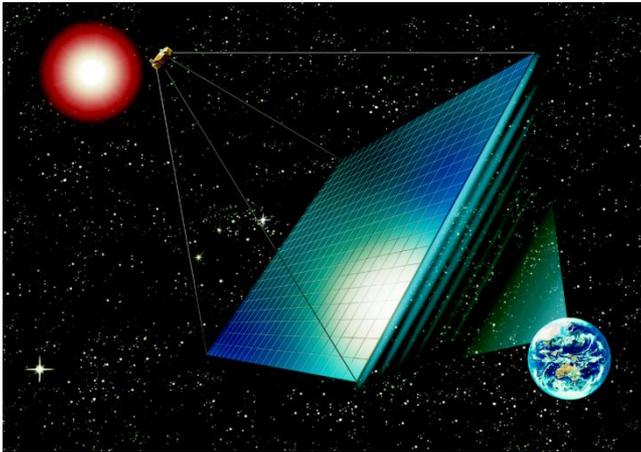


宇宙太陽光発電システム研究の歴史

- 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/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レーガン政権の財政緊縮方針中断
- 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～ NASDA調査研究（現JAXA）、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

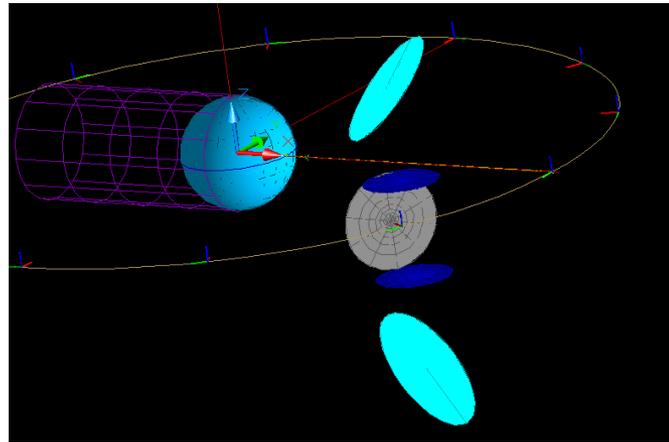
赤字:我が国の事項

日本のSSPSシステム代表的設計例(1GW級)



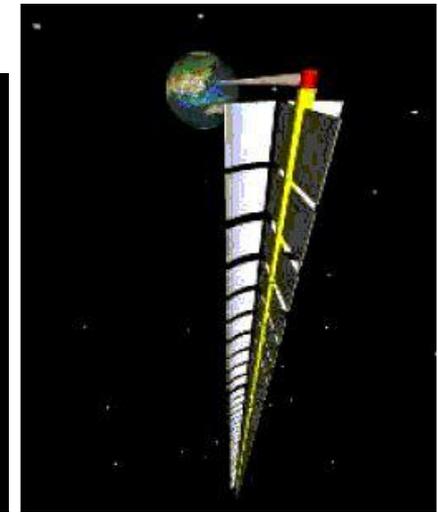
Basic Model

太陽非追尾マイクロ波型
発送電一体型パネル $2\text{km} \times 1.9\text{km} \times (2-10)\text{cm}^t$
テザー
(5-10km)による重力安定
100m \times 100mパネルのユニット構成
マルチバス方式
総重量2万トン
単純、低い電力効率(64%)



Advanced Model

太陽追尾マイクロ波型
ミラー(反射鏡): $2.5\text{ km} \times 3.5\text{ km}$,
1000トン \times 2式、 $100\sim 300\text{g}/\text{m}^2$
ミラーはフリーフライヤー
発電部: 直径1.25km
集光倍率: 4倍
送電部: 直径1.8km
総重量: 10,000トン以下(目標)
複雑、高い電力取得効率



Laser Model

太陽追尾高集光レーザー型
1モジュール: 10MW、50トン
ミラー(反射鏡): $100\text{m} \times 100\text{m} \times 2$ 式
ラジエーター: $100\text{m} \times 100\text{m}$
二次光学系、レーザーモジュール: 120m
集光倍率: 数百倍
システム: 100モジュール接続、12km
総重量: 5,000トン(目標)
複雑、システムが小型、雲の影響

SSPS実現のための主要技術の目標

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

宇宙太陽光発電システムの研究

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

技術ロードマップ: ロードマップを実現するために全ての技術要素について何時までにどの性能まで必要かを明確化

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 %

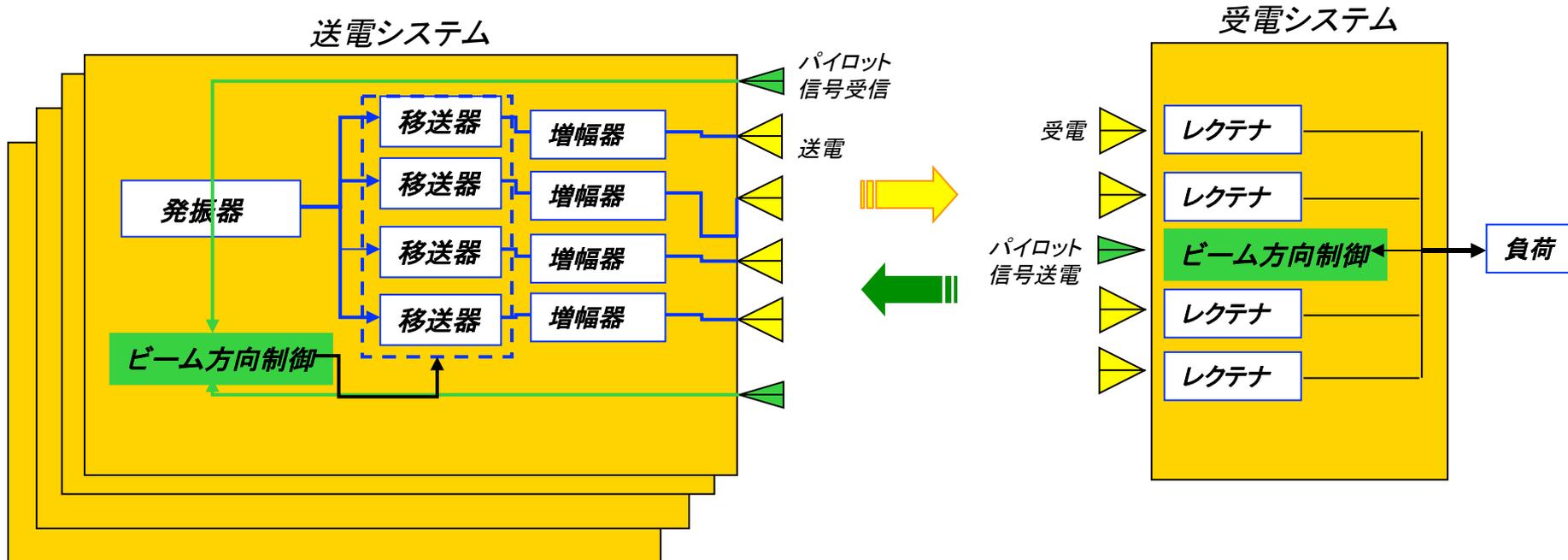
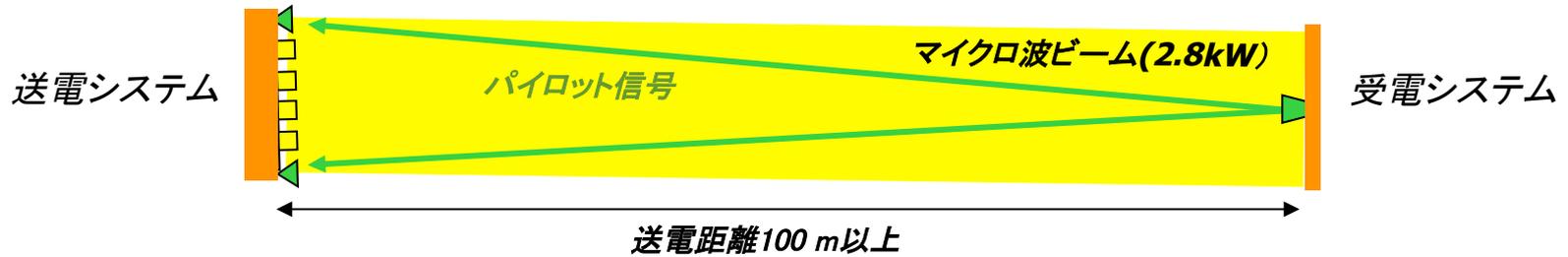
パイロット信号を利用した制御

直径2.5 m、素子変換効率 > 70 %

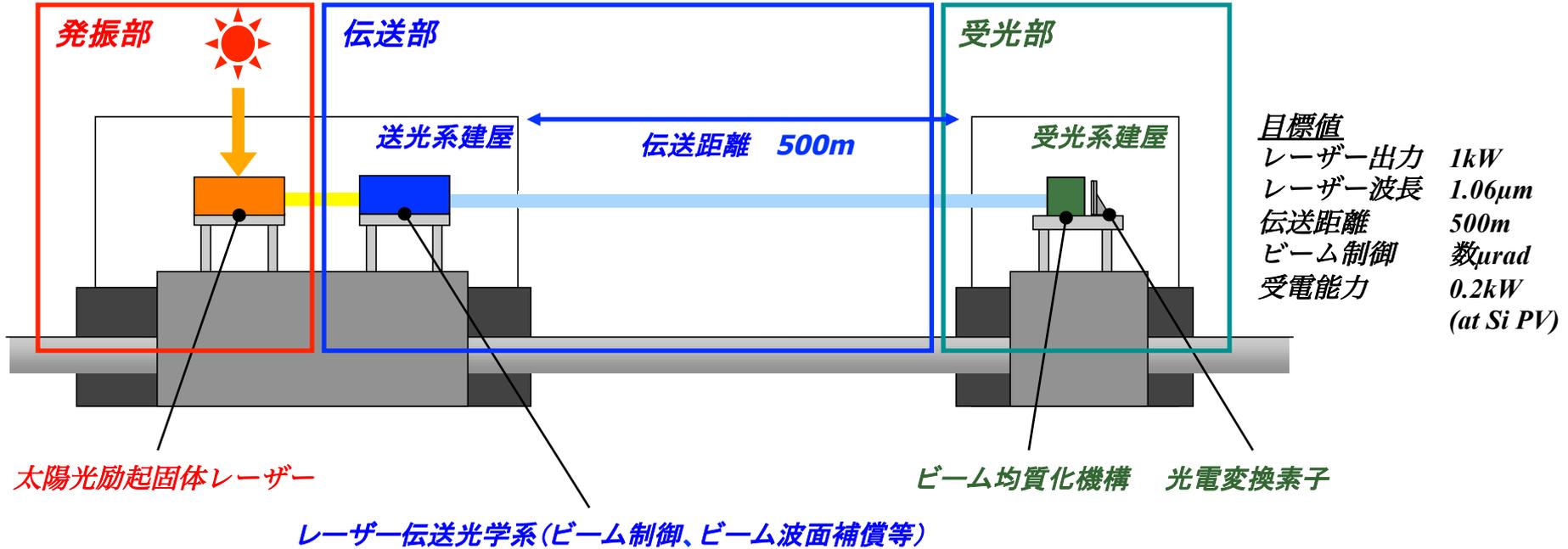
50 m (typical)

マイクロ波送電技術の地上実証

目標: 制御精度0.5度のレトロディレクティブビーム方向制御



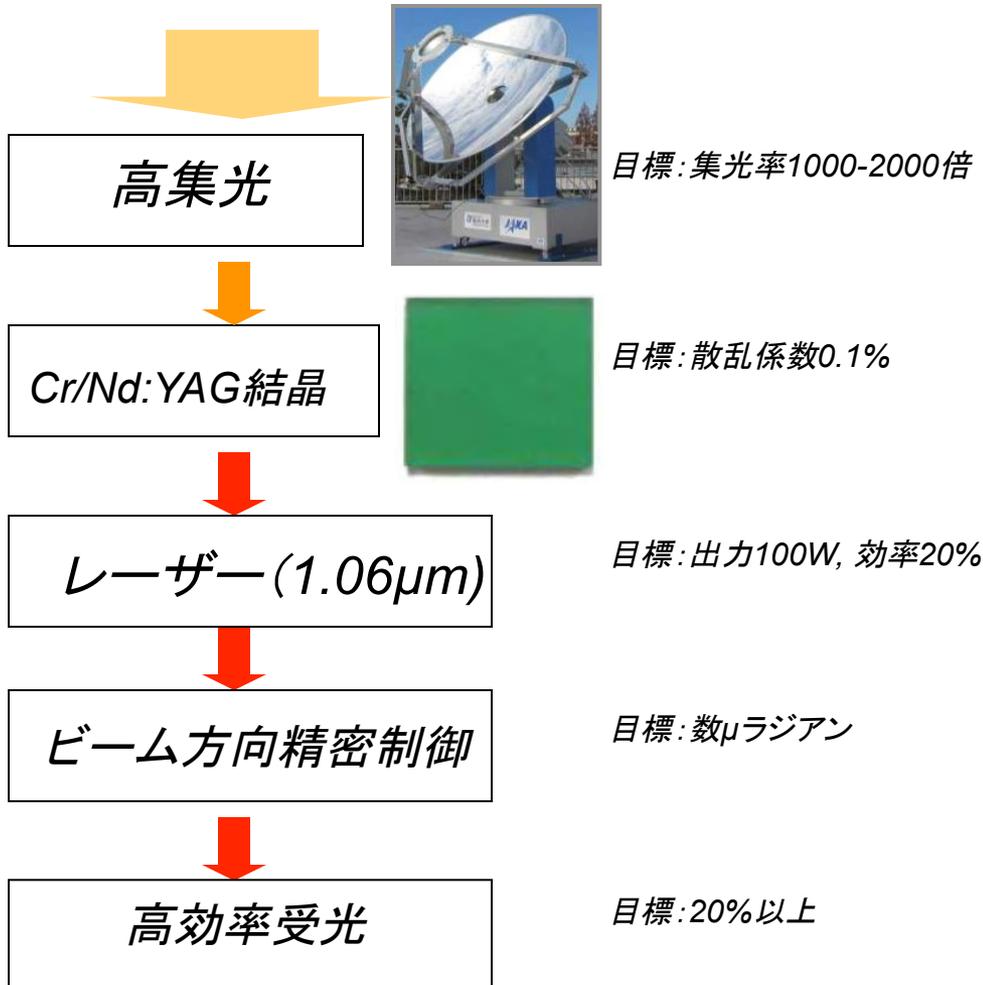
レーザー送電技術の地上実証



200W クラスレーザー送電実験(角田/JAXA)

太陽光直接励起レーザー方式による送電実証

太陽光



福井大等との共同で実施中の太陽光直接励起レーザー発振実験

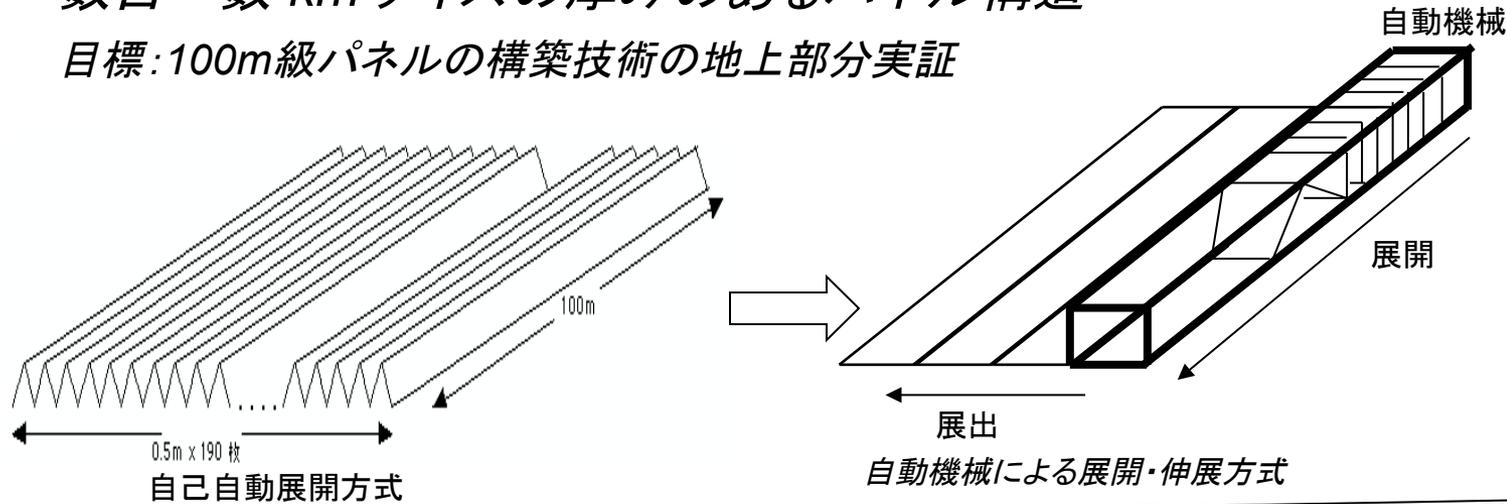


以前実施した200W クラスレーザー送電実験 (角田/JAXA)

SSPSに必要な大型構造に係わる研究

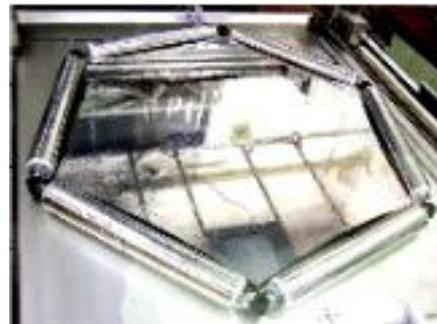
数百～数 kmサイズの厚みのあるパネル構造

目標: 100m級パネルの構築技術の地上部分実証

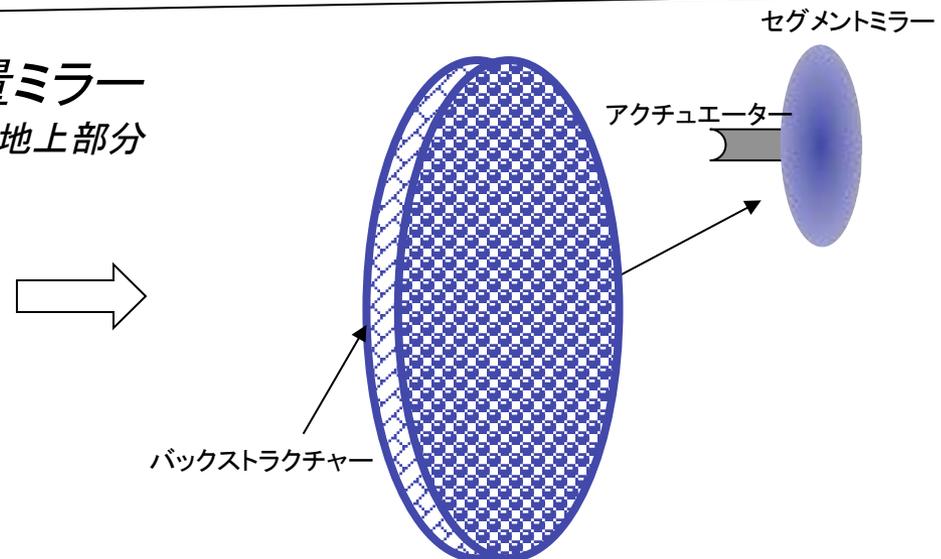


数百～数kmサイズの超軽量ミラー

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)

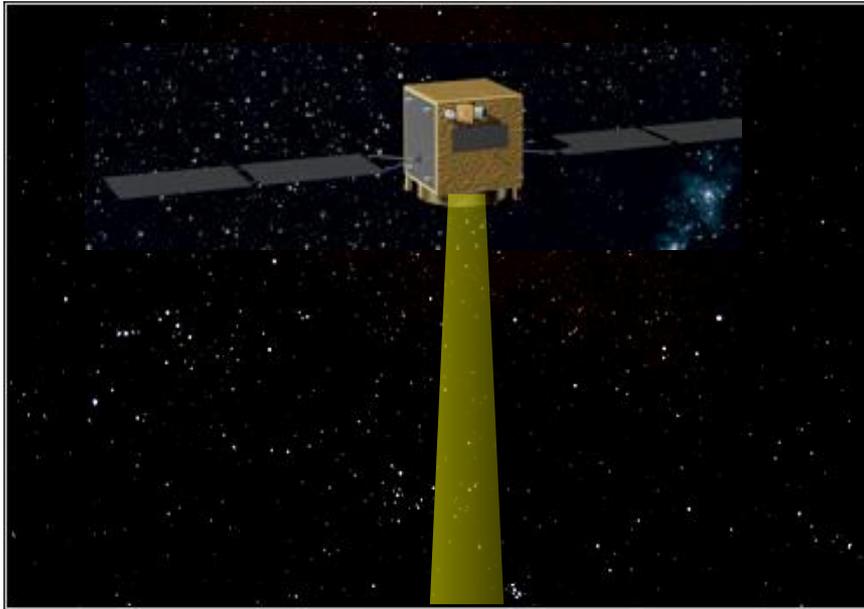


膨張硬化型ミラー

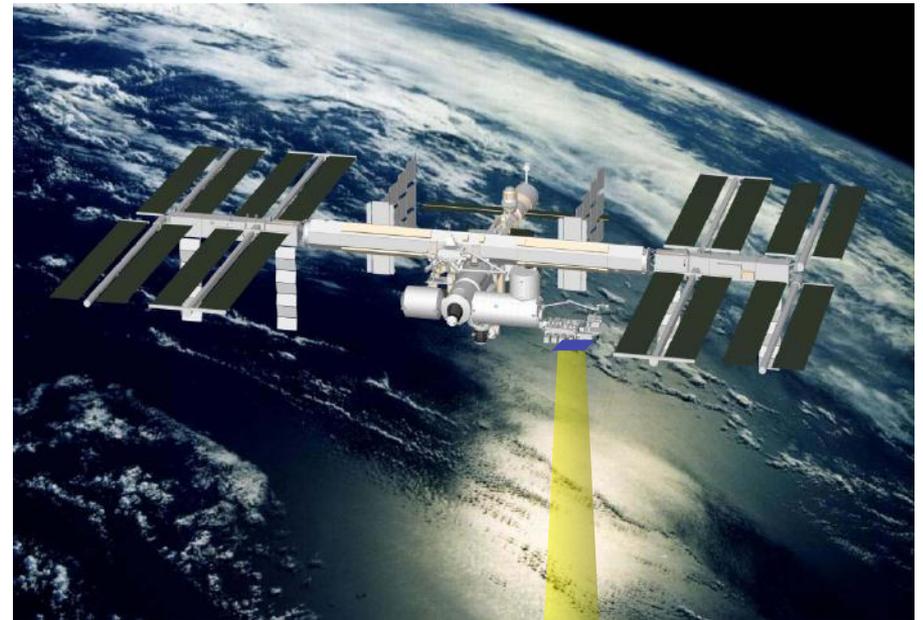


アクチュエータ付きセグメントミラーのバックストラクチャーへの取付方式

無線送電技術実証のための宇宙実験の構想



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

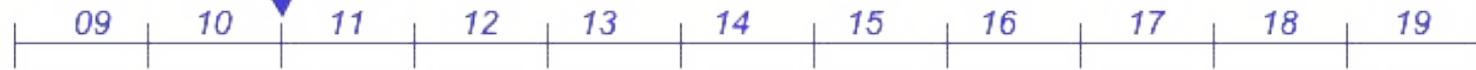
高度:400km程度、電力レベル:1-5kW程度

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

実用への研究・開発シナリオ

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



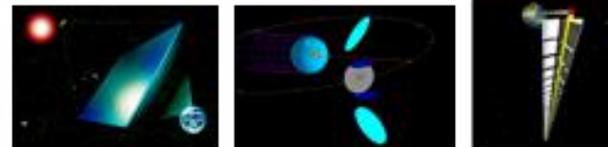
2MW級の軌道上実証

200MW級のプラント実証

実用フェーズ



1GW級商用SSPS 1号機



商用SSPS本格的建設・運用 (1SSPS/year)

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。

