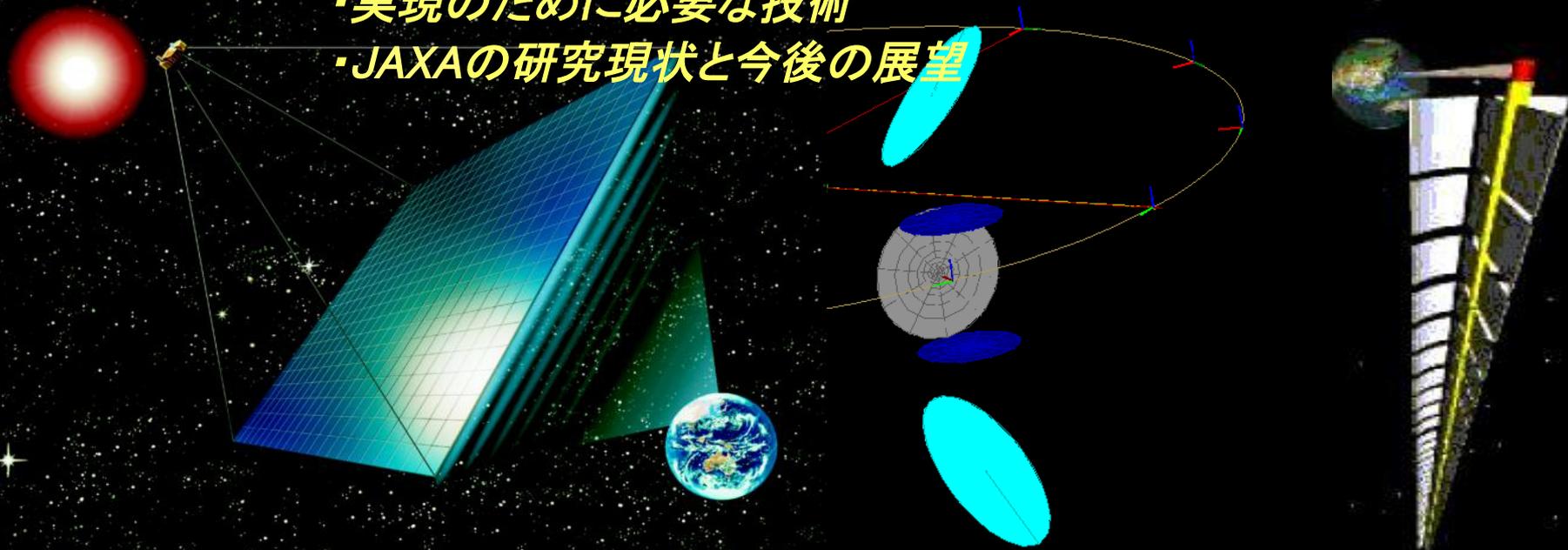


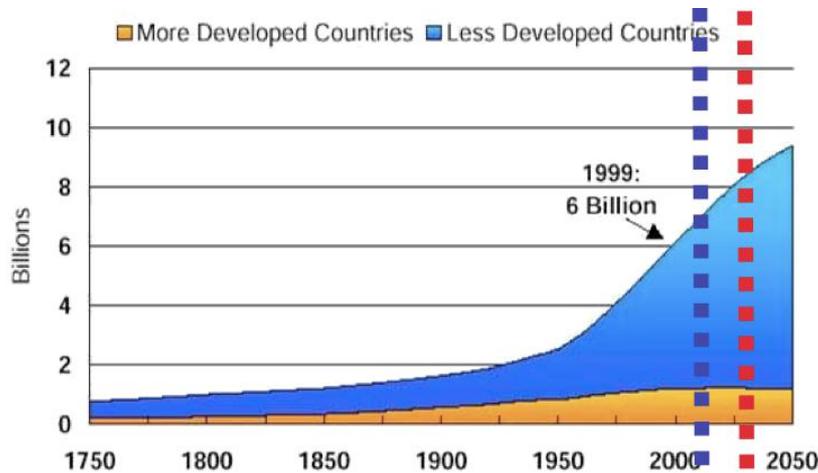
# 宇宙からのクリーンエネルギーの獲得に向けて —宇宙太陽光発電研究の現状—

- ・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
- ・JAXAの研究現状と今後の展望

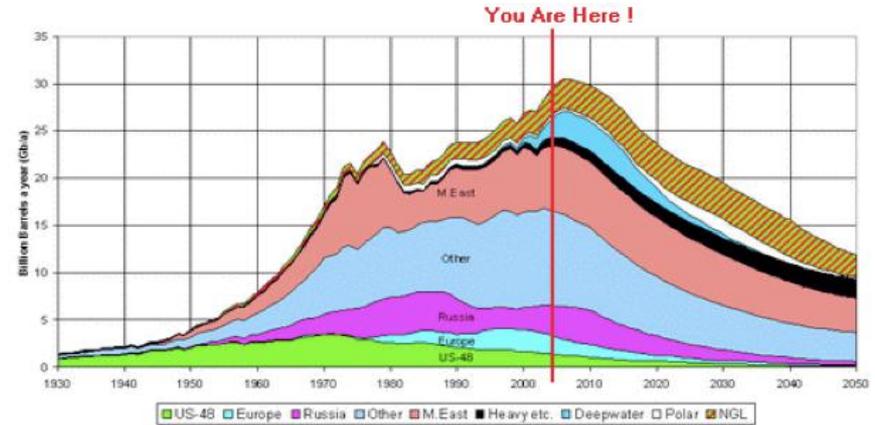


2010,年11月

# 資源問題と地球環境問題

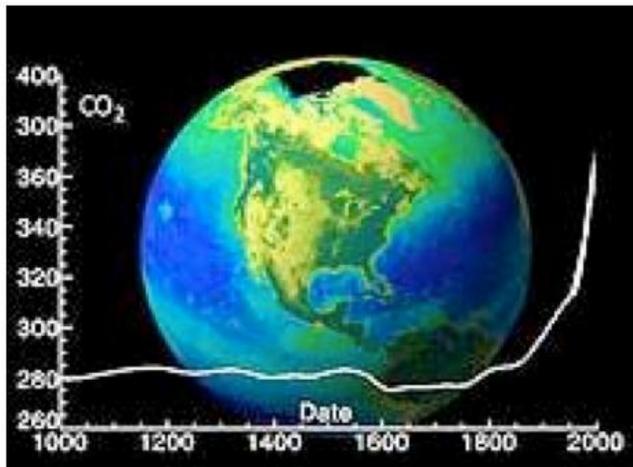


人口の増大



限界あるエネルギー資源

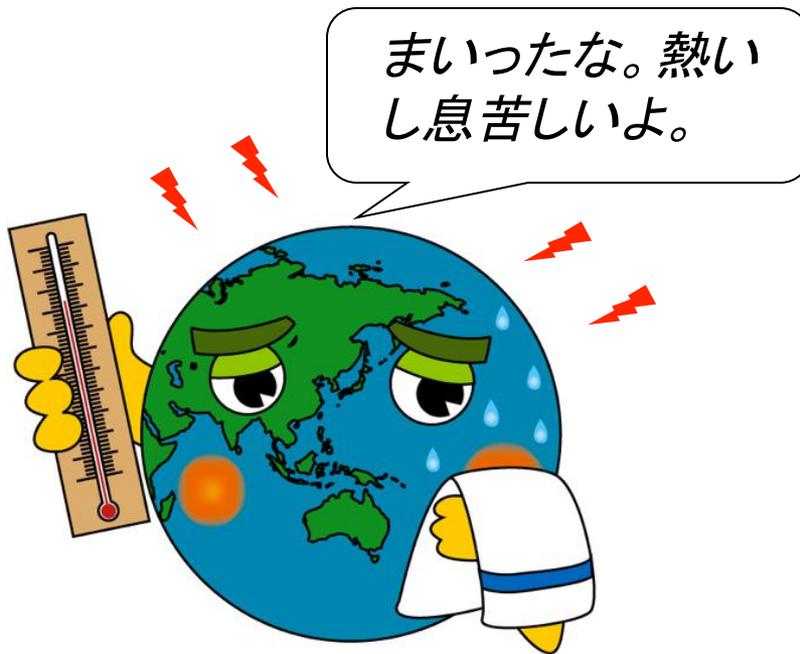
Ref: *Abundant & Affordable Space-Based Solar Power Realizing the Opportunity* John C. Mankins (2007)



CO<sub>2</sub> 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。

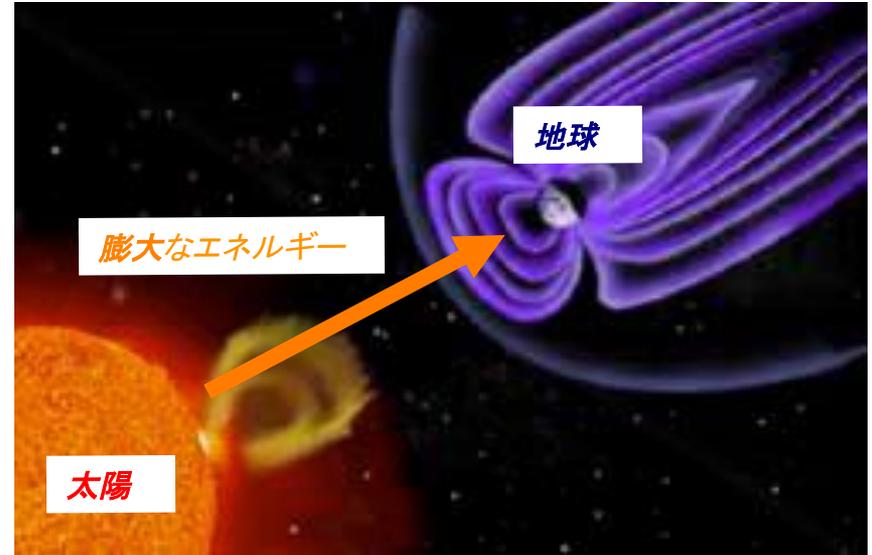
## 何故宇宙か？

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

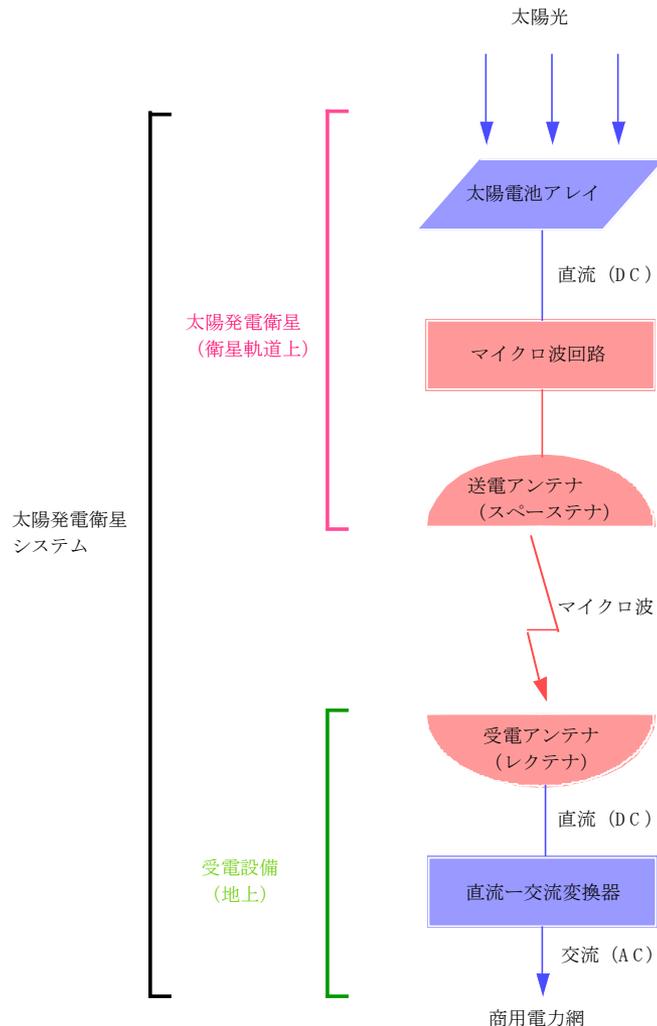
⇒ 宇宙空間から地上への効率の良い電力  
輸送が可能であれば宇宙空間を太陽エネルギー取得の場として利用することが有望。



## 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  
系ではなく、地球の外即ち宇  
宙空間に解決を求める。

# 宇宙太陽光発電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
- ・CO<sub>2</sub>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

## SPS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

# JAXAの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 $\mu$ 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 <sup>2</sup>
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	SPS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	SPS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

1.8m x 1.8 m, 3cm 厚さ

4 サブパネル構成(可動)

2.8 kW, 5.8 GHz, 変換効率 >60 %

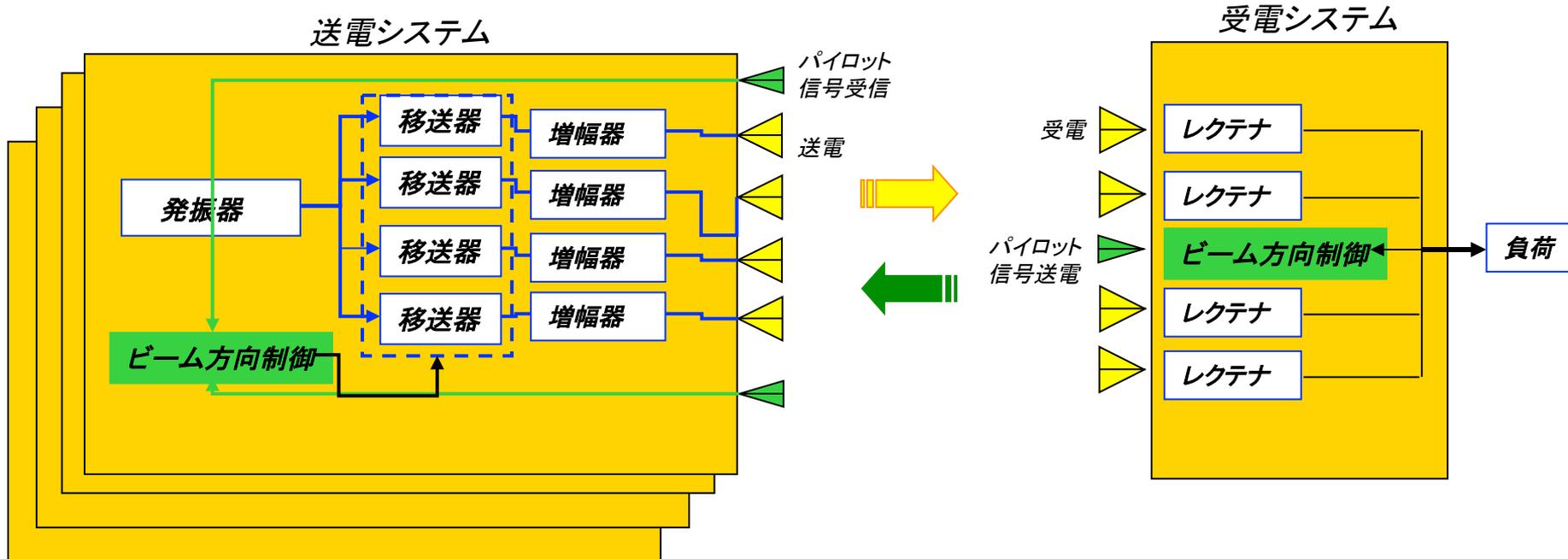
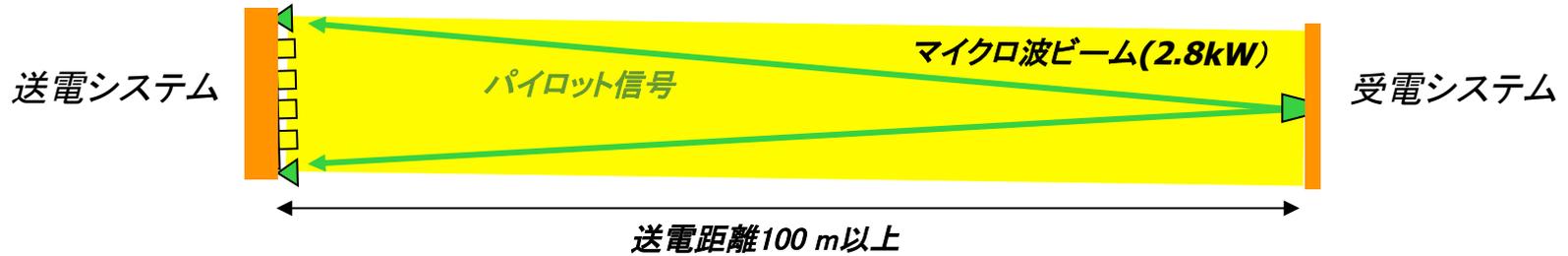
パイロット信号を利用した制御

2.5 m x 2.5 m、素子変換効率 > 70 %

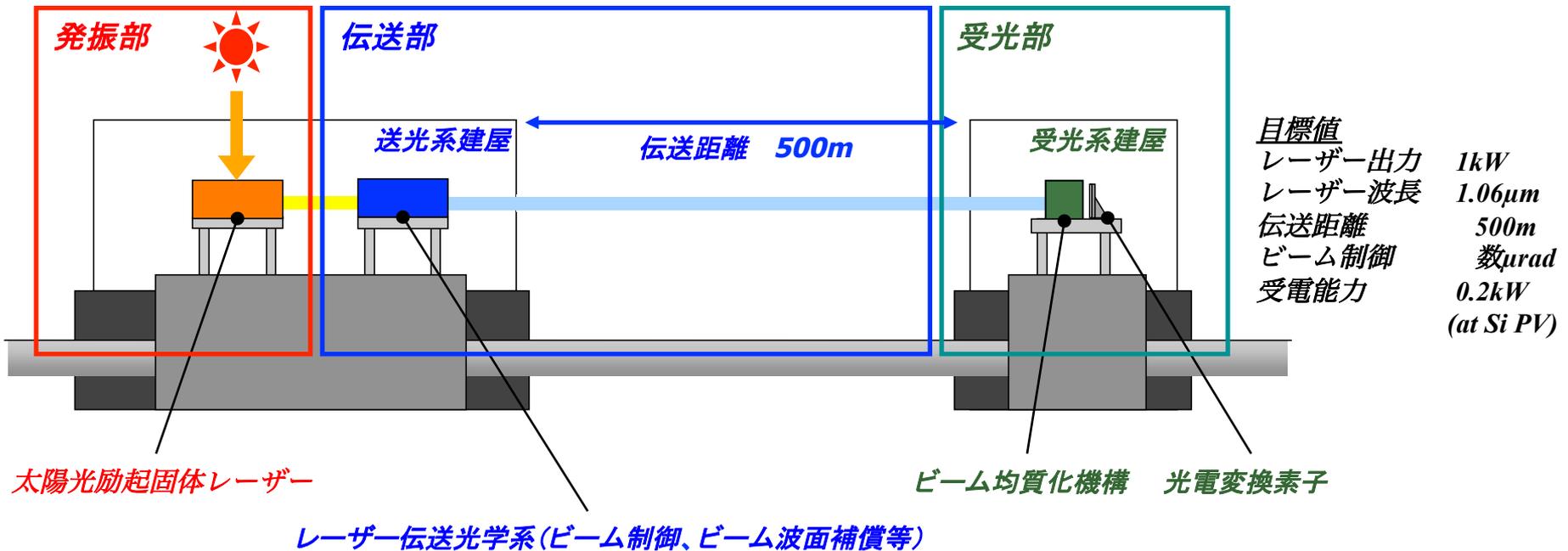
100 m (typical)

# マイクロ波送電技術の地上実証

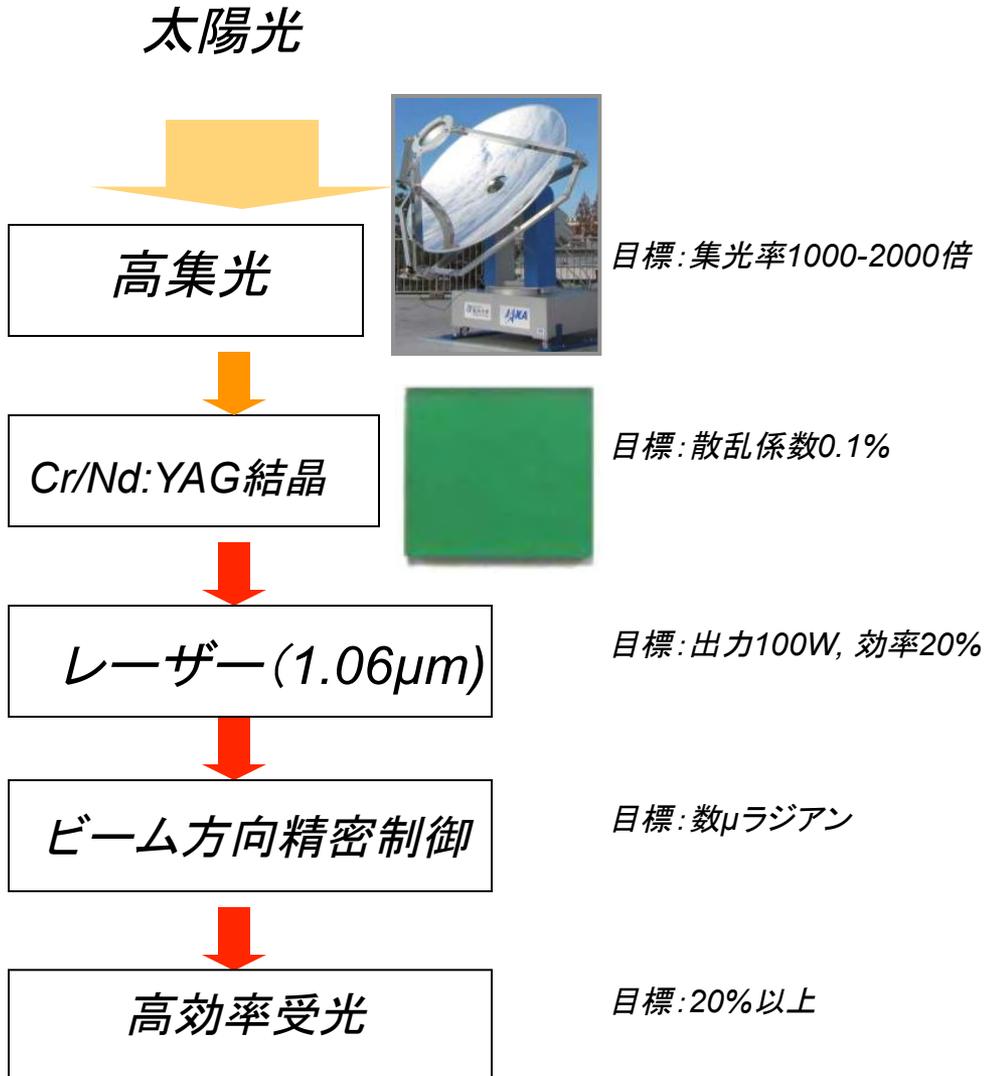
目標: 制御精度0.5度のレトロディレクティブビーム方向制御



# レーザー送電技術の地上実証



# 太陽光直接励起レーザー方式による送電実証



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



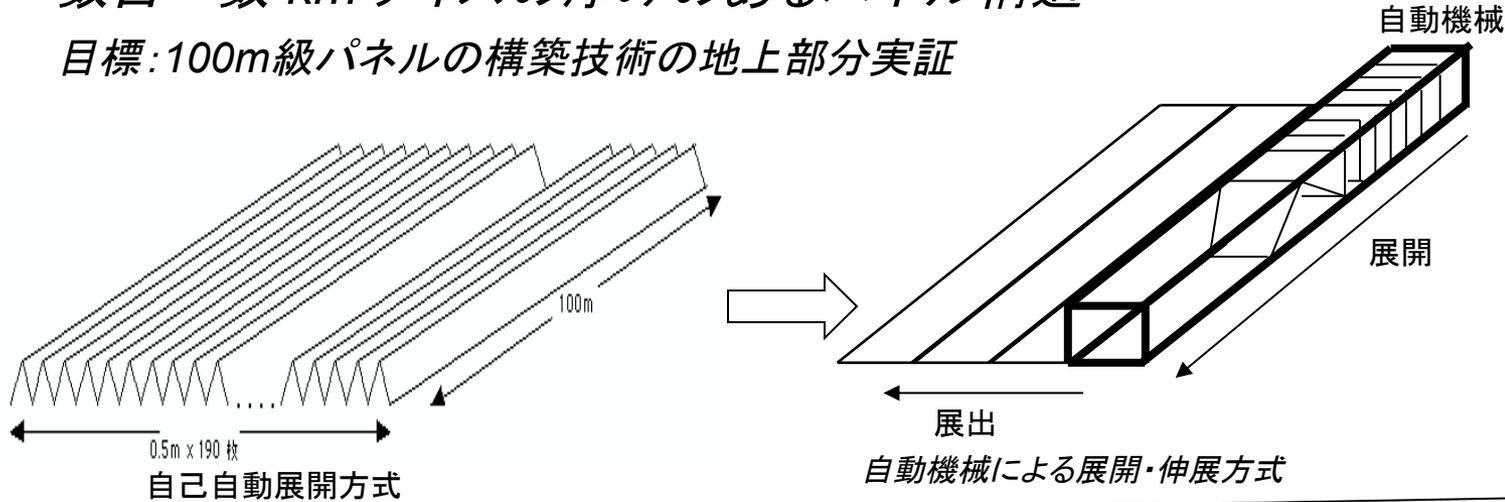
以前実施した200W クラスレーザー送電実験 (角田/JAXA)



# SSPSに必要な大型構造に係わる研究

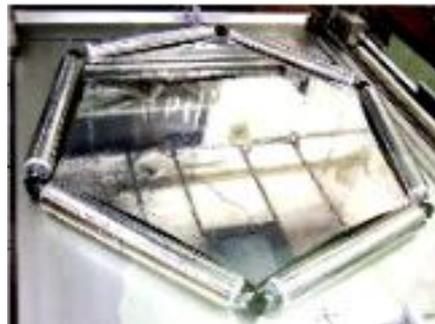
数百～数 kmサイズの厚みのあるパネル構造

目標: 100m級パネルの構築技術の地上部分実証

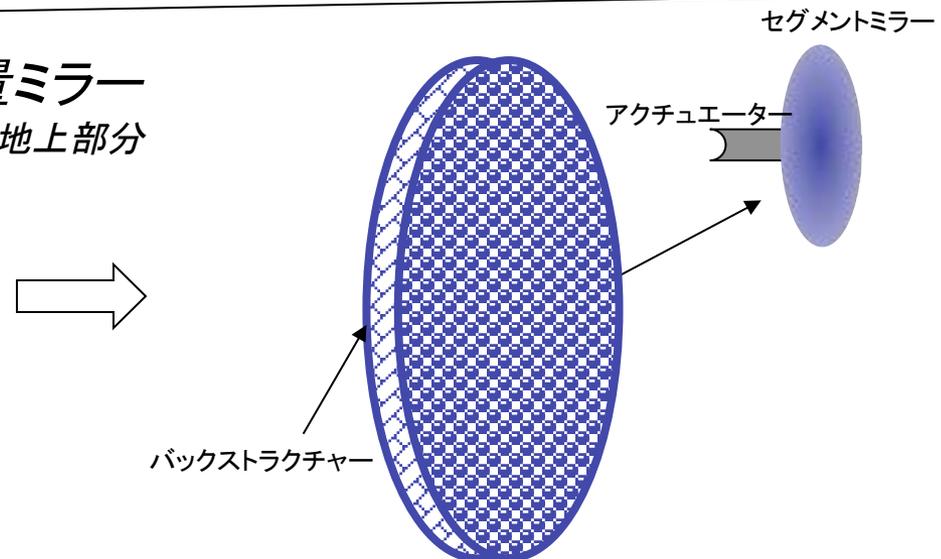


数百～数kmサイズの超軽量ミラー

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)



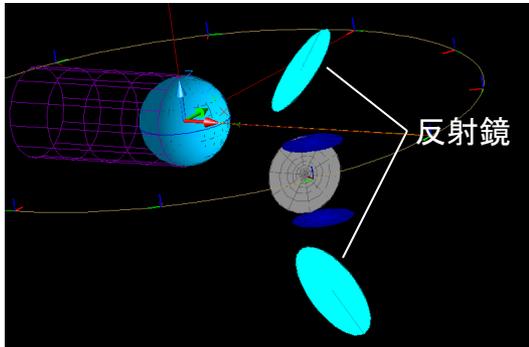
膨張硬化型ミラー



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

# 反射鏡の光学性能評価

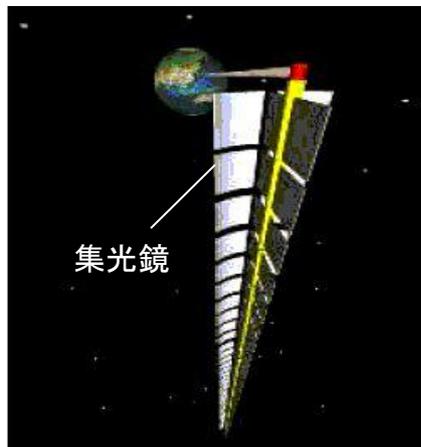
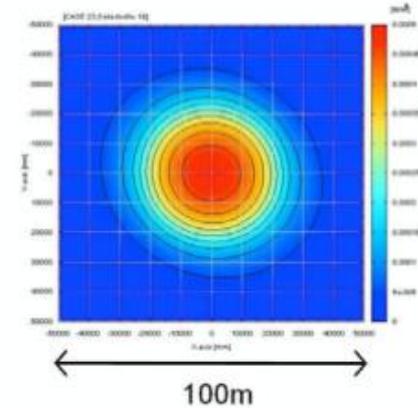
市販のリフレックスミラー(平面膜鏡、透明ポリエステル、裏面アルミ、反射率83-95%)の鏡面平面度計測  
計測された平面度データに基づき光学解析ソフトでターゲット面での照度分布評価



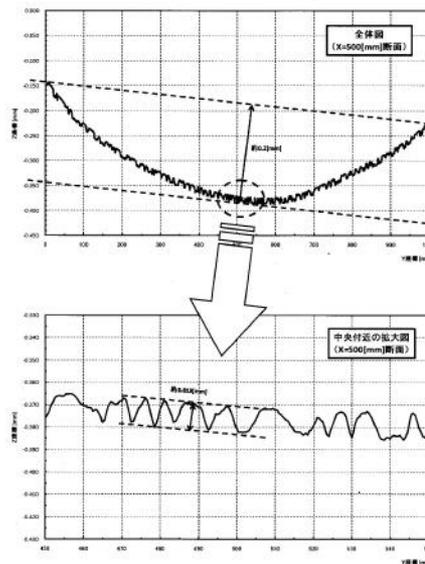
反射鏡付きマイクロ波型SSPS



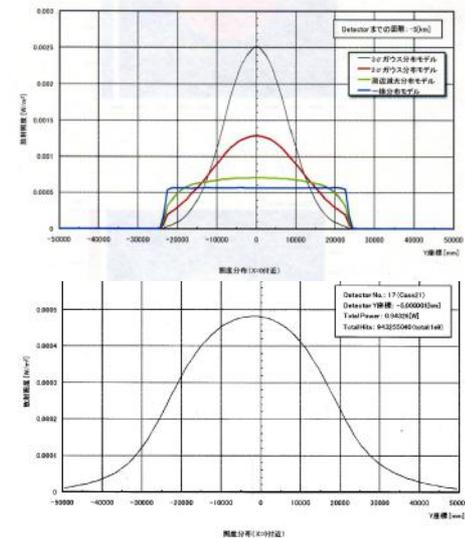
ミラーの平面度測定



集光鏡付きレーザー型SSPS



ミラーの平面度結果

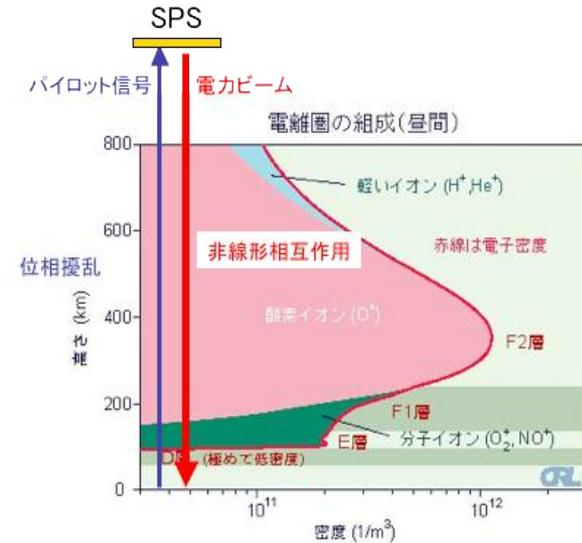


測定結果に基づく照度分布解析結果

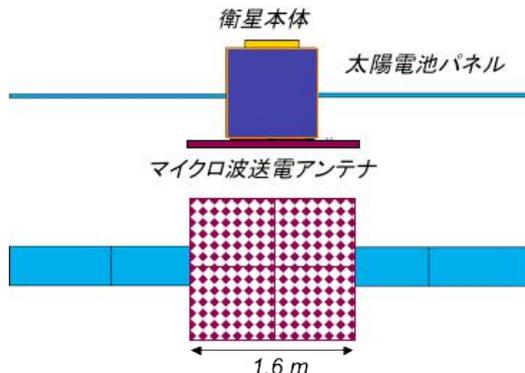
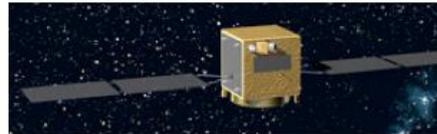
# 近未来の軌道上実証実験の検討 マイクロ波送電

## 目的

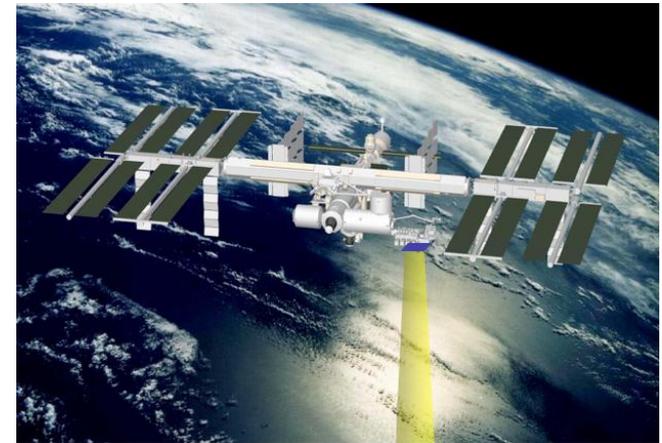
- (1) マイクロ波ビーム制御能力実証(軌道上のアンテナダイナミクスの条件の下でのパイロット信号への追従能力)
- (2) 高電力密度( $\sim \text{kw}/\text{m}^2$ )マイクロ波の電離層通過実証
- (3) 電力システムとしての効率評価
- (4) 不要波の抑圧レベル評価(既存の通信インフラに対する電磁適合性の実証)



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



小型衛星を用いたマイクロ波送電実験の案



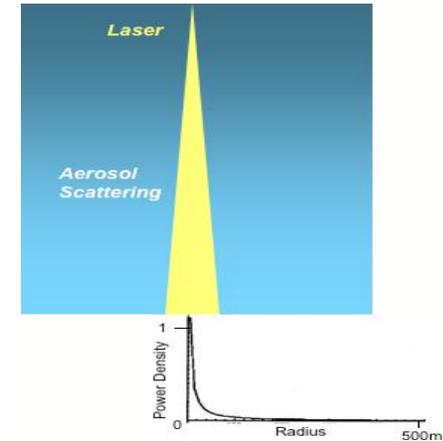
宇宙ステーション日本実験モジュール (JEM)でのマイクロ波送電実験案

# 近未来の軌道上実証実験の検討

## レーザー送電

### 目的

- (1) レーザービーム制御能力実証(軌道上から地上の受電所への精密指向制御)
- (2) レーザービーム( $\sim 1\mu\text{m}$ )の大気通過実証
- (3) 電力システムとしての効率評価
- (4) レーザービームを電力伝承手段として使用した場合の安全性実証



レーザー送電装置  
1 kW,  $1.06\ \mu\text{m}$   
20 cm $\Phi$  送光系

レーザービーム

ビーム拡がり  $15\ \mu\text{rad}$   
指向精度  $1\ \mu\text{rad}$

ガイドビーム

受電システム  
10 m $\Phi$  受光系  
出力200 W



受光セルアレイ

宇宙ステーション日本実験モジュール(JEM)を利用したレーザー送電実験案

## システム検討(実現性のある開発計画の策定)

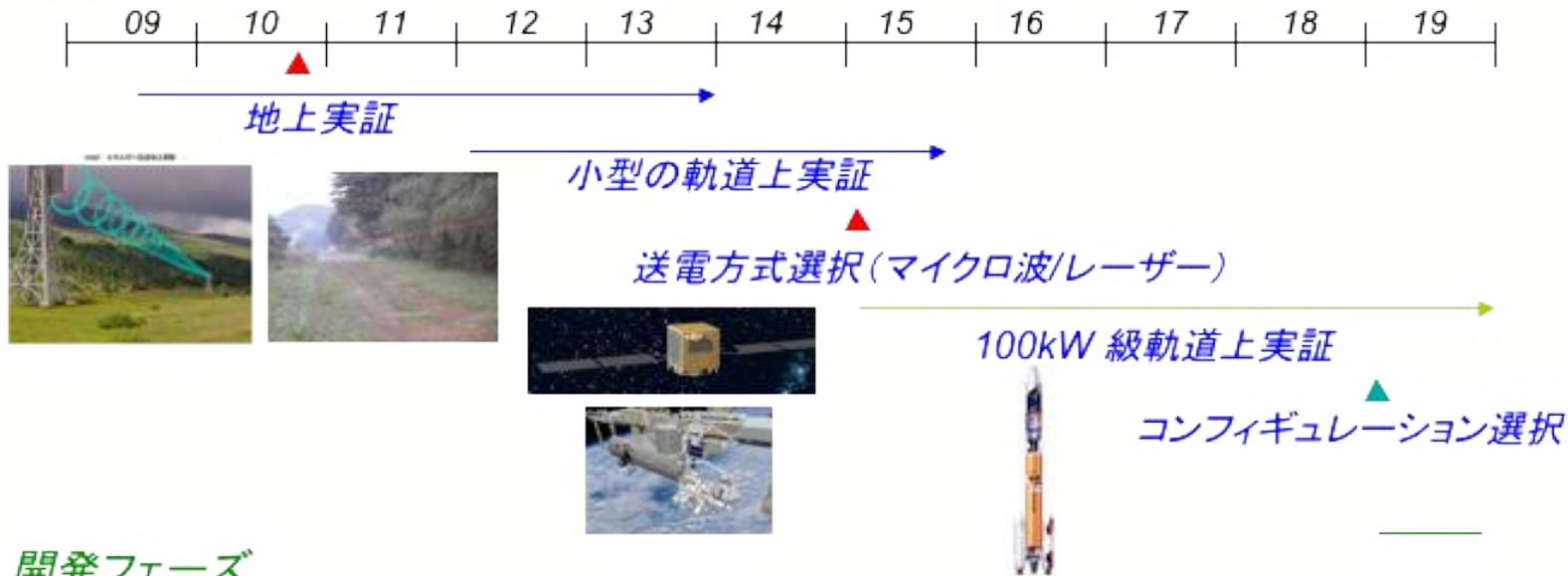
システム検討	宇宙輸送	SPS構築に必要な宇宙輸送機の検討	JAXA内の宇宙輸送の専門家とのロードマップとその実現性についての検討の枠組み準備中。
	開発計画	SPS実現に至るロードマップの検討	JAXA内の担当者による技術ロードマップの作成中。その後外部専門家との協働で詳細化。

### 検討のベースとしている実証計画案

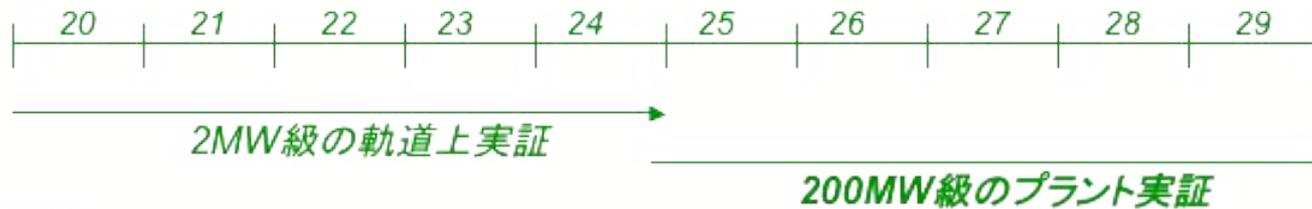
実証フェーズ	地上実証	小型衛星あるいはJEM	大型衛星	2MW級プラント	200MW級実証プラント
電力レベル、軌道	KW級、地上	KW級、低軌道	100KW級、低軌道	2MW、低軌道又は1000km付近	200MW、低軌道又は静止衛星軌道
ビーム制御技術実証	100m級	400km級	400km級	(36000km級)	36000km級
電離層通過実証	-	1kW/m <sup>2</sup> 級			
電力伝送実証(受電電力)	(試験的レクテナkW級)	-	小型レクテナ10kW級	大型レクテナ2MW級	大型レクテナ200MW級
SPSとしての全機能実証	-	-	10kW級	2MW級	200MW級
実用電力の供給	-	-	-	2MW級	200MW級

# 実用への研究・開発シナリオ

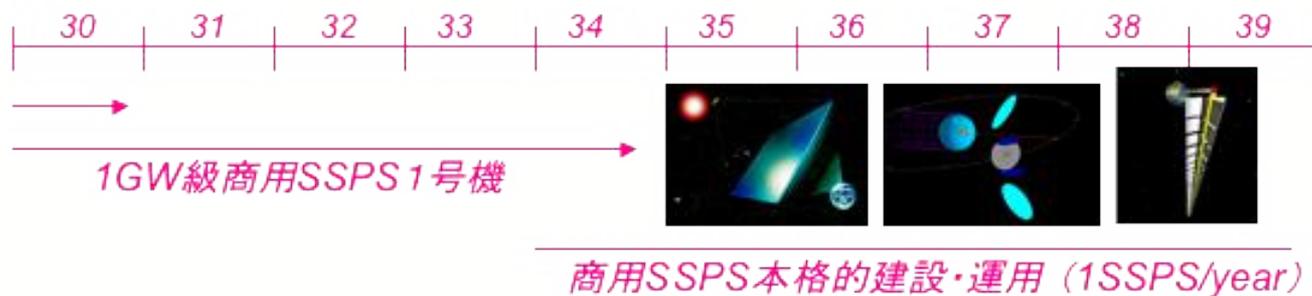
## 研究フェーズ



## 開発フェーズ



## 実用フェーズ



# まとめ

宇宙からのクリーンエネルギーの獲得に向けて —宇宙太陽光発電研究の現状—

- ・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。