

# 宇宙で電力を送るということ

## Power Transfer in Space

三谷 友彦

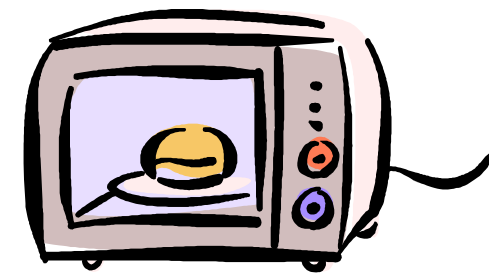
京都大学 生存圏研究所

- 無線電力伝送の紹介
- 宇宙太陽発電構想の歴史および個人的見解
- 宇宙での無線電力伝送の可能性
  
- 施設見学(30分程度)

1977年 香川県生まれ

1995年 京都大学工学部電気電子工学科入学

1998年 4回生の時に超高層電波研究センター・橋本研に配属  
→ 修士から松本研へ



学生時代の研究テーマ:

マグネトロン(電子レンジのマイクロ波源)の高効率化・低雑音化の研究  
マグネトロンを使ったマイクロ波送電システムの研究開発

2003年 宙空電波科学研究中心 助手着任

(2004年 生存圏研究所に改組)

この辺りからマイクロ波加熱の研究にも従事

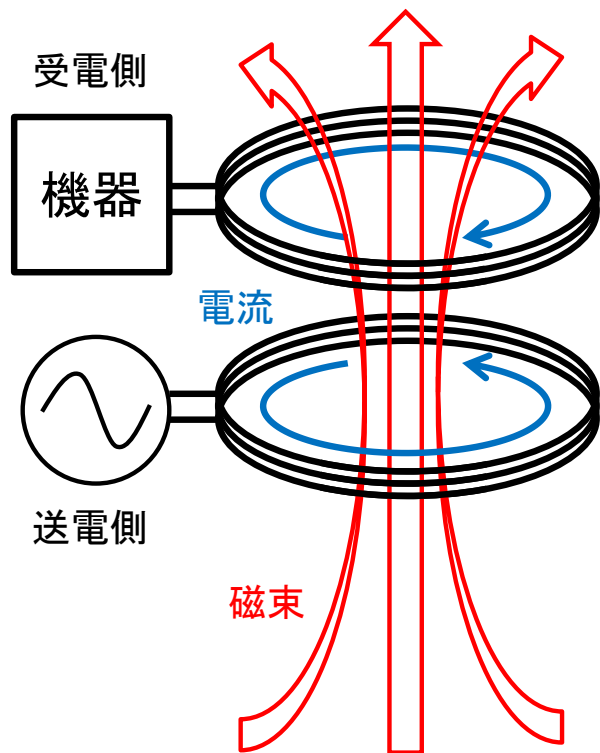
2012年 生存圏研究所 准教授

最近の趣味: 茶道(裏千家)、ゴルフ(ほとんど練習していない)



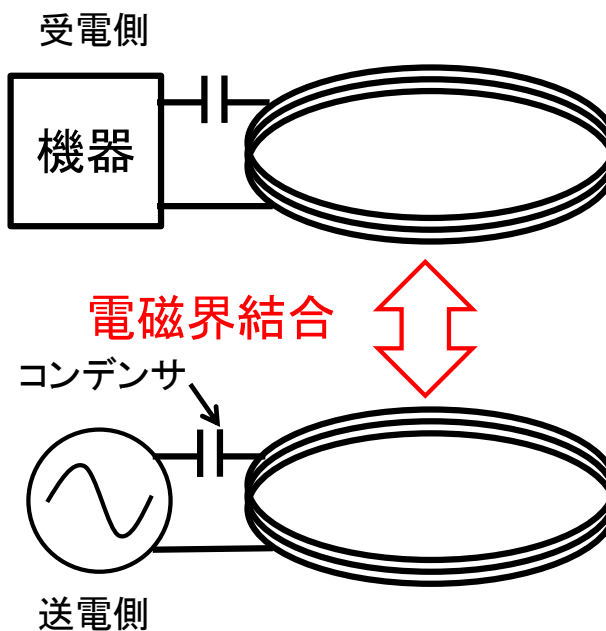
(Youtubeにアップしております)

## 電磁誘導型



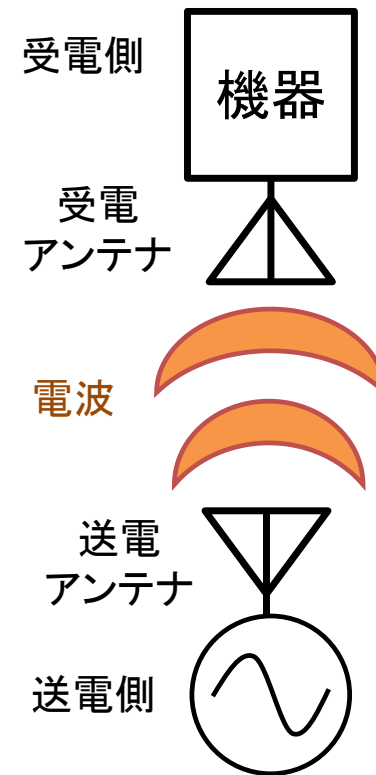
磁束の時間変動により  
導体(コイル)に電流が発生

## 電磁界結合型



共振(共鳴)現象により  
送受間の電磁界を結合

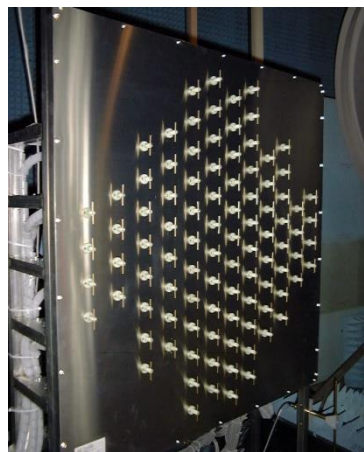
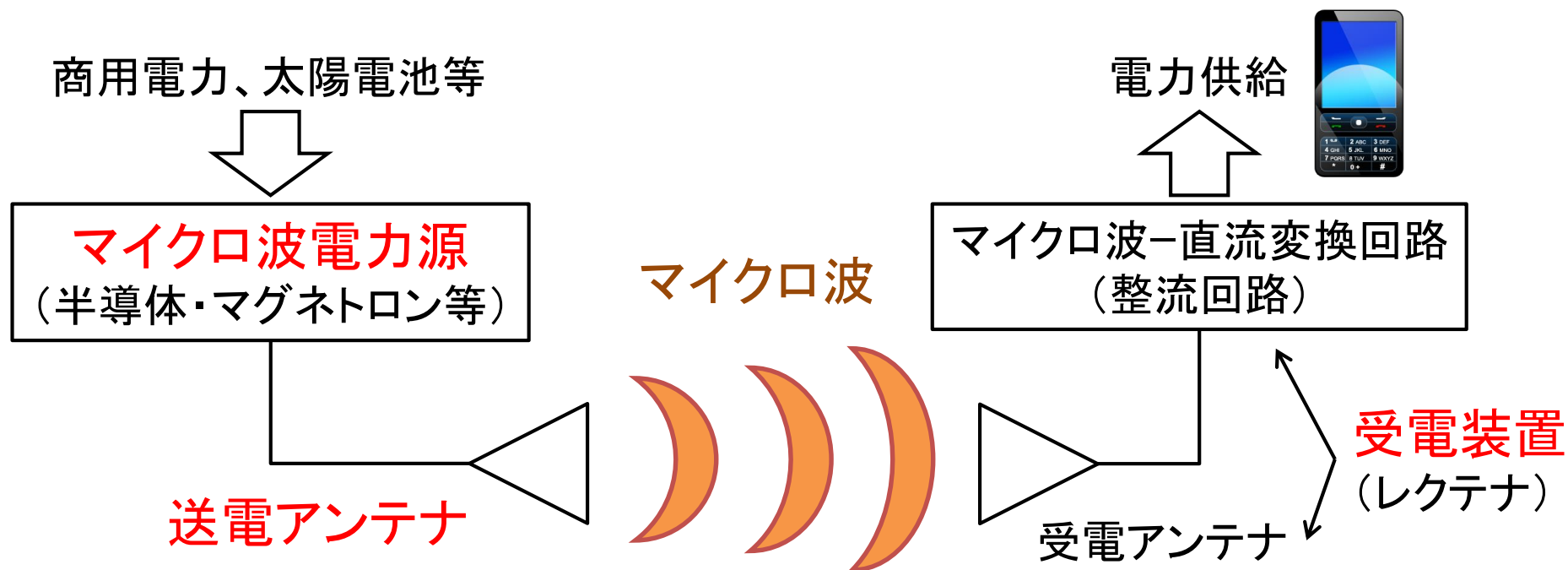
## 電波放射型



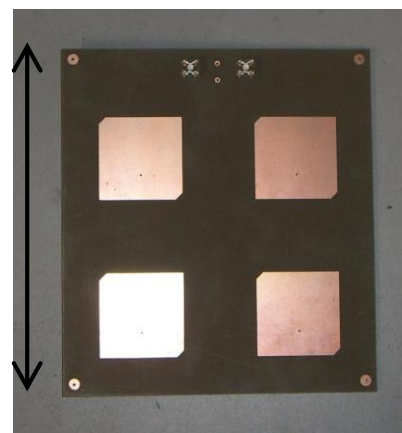
空間に電波を放射して  
エネルギーを送受

**電波放射型の利点: 長距離送電が可能**

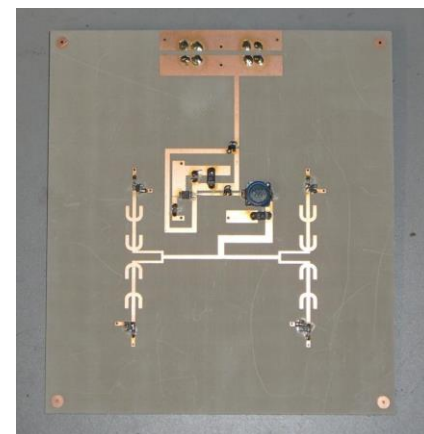




約15cm



アンテナ



整流回路

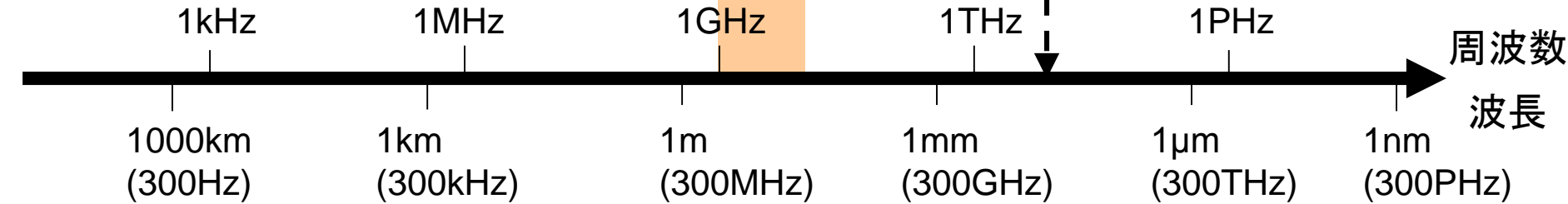
# マイクロ波って何？

周波数: 1秒間に電磁界が振動する回数  
 波長: 電磁波の長さ  
 (= 光の速さ[秒速約30万km] ÷ 周波数)

電波法における  
 電波の定義

3GHz(1GHz) ~ 30GHz (3THz[0.1mm]以下)

P(ペタ)	: 1000兆 (10 <sup>15</sup> )
T(テラ)	: 1兆 (10 <sup>12</sup> )
G(ギガ)	: 10億 (10 <sup>9</sup> )
M(メガ)	: 100万 (10 <sup>6</sup> )
k(キロ)	: 1000 (10 <sup>3</sup> )
m(ミリ)	: 1/1000 (10 <sup>-3</sup> )
μ(マイクロ)	: 1/100万 (10 <sup>-6</sup> )
n(ナノ)	: 1/10億 (10 <sup>-9</sup> )
p(ピコ)	: 1/1兆 (10 <sup>-12</sup> )



商用電力 50/60Hz (電源コンセント)

IH調理器 20kHz ~ 50kHz (IH調理器)

ラジオ AM FM (ラジオ)

非接触ICカード (ICOCA等) 13.56MHz帯 (ICカード)

地上デジタル放送 500MHz付近 (地上デジタル放送)

携帯電話 850MHz付近 2GHz付近 (携帯電話)

電子レンジ 2.45GHz付近 (電子レンジ)

衛星放送 12GHz付近 (衛星放送)

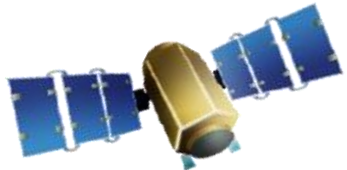
遠赤外線 赤外線 可視光線 紫外線 X線 ガンマ線 (遠赤外線, 赤外線, 可視光線, 紫外線, X線, ガンマ線)

約380nm ~ 約750nm (可視光線)

10pm以下 (ガンマ線)

光も電磁波の一種 (光も電磁波の一種)

衛星通信・衛星放送



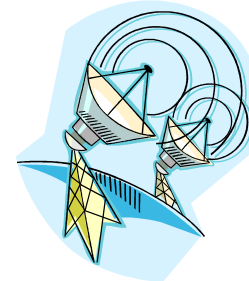
携帯電話



無線LAN



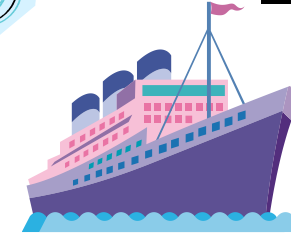
気象レーダ  
(降雨観測)



電波天文



船舶用  
レーダ



温熱治療



電子レンジ



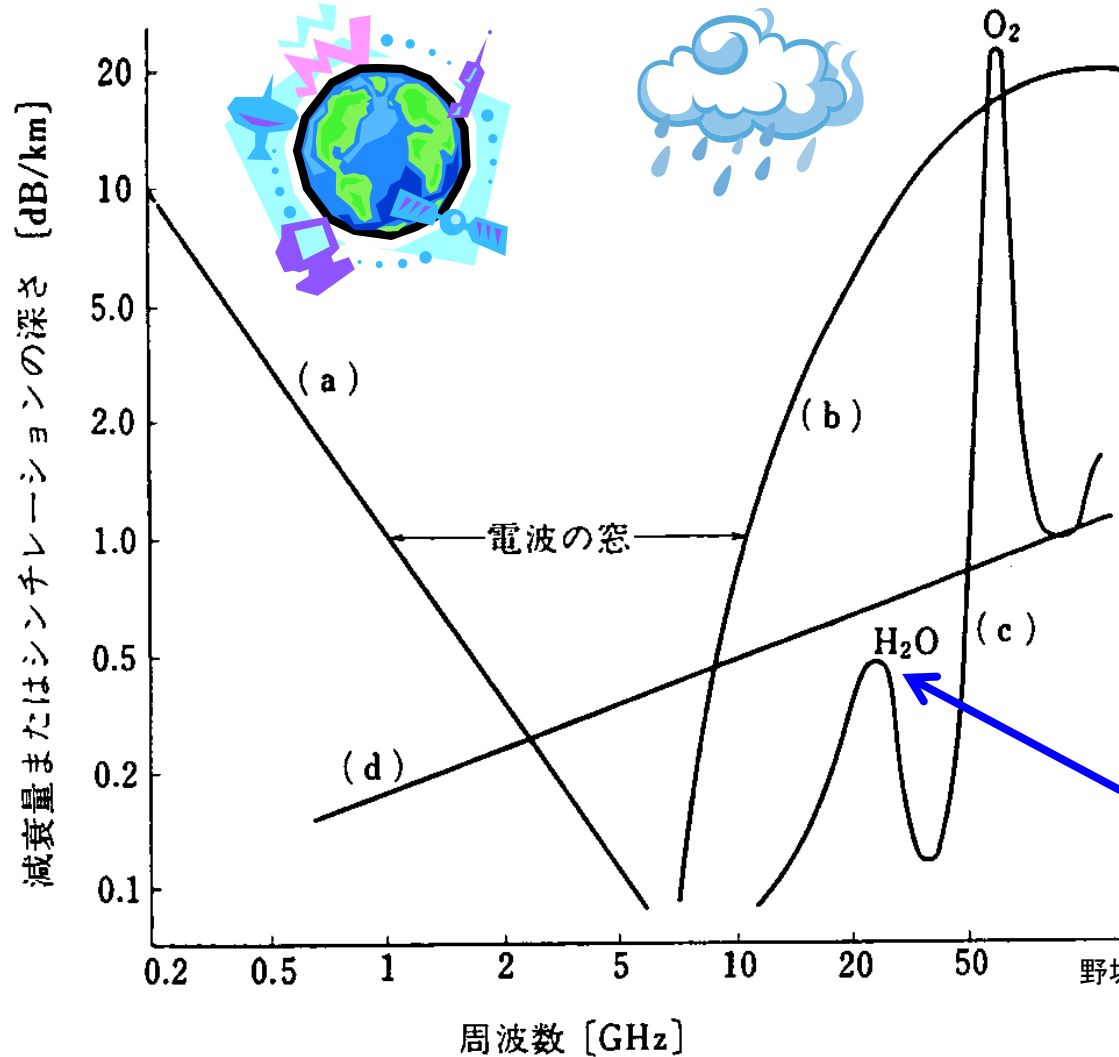
プラズマ励起

エネルギー・加熱

電波放射型無線電力伝送でマイクロ波が使われることが多いのは  
**宇宙太陽発電所構想**に依るところが大きい



# なぜマイクロ波が使われるのか？



(a) 電離層シンチレーション  
(場所や太陽活動で変化する)

(b) 降雨減衰 (25mm/h、  
降雨中を2kmだけ通る例)

(c) 晴天時の大気による吸収

(d) 大気圏シンチレーション  
(気候帯によって異なる)

水分子の吸収: 22.235GHz

野坂邦史、村谷拓郎、衛星通信入門、p.33、オーム社、1986

マイクロ波自体は伝搬中のエネルギー損失はほぼゼロ

## Space Solar Power Systems: SSPS

直径数kmの送電アンテナ  
数十億素子以上のアンテナ

重さ数万トン以下の  
宇宙システム!!

現在最大の宇宙アンテナ 直径13m程度  
世界最大数のアンテナ  
475素子 (地上, 京大レーダー)  
数千素子?(パトリオット)

現在最大の宇宙システム  
国際宇宙ステーション150トン程度

### 宇宙太陽発電所

宇宙空間で発電した電気エネルギーを無線で地上に送り、地上でその電気を利用する構想。静止衛星軌道(36,000km)から100万kWの電力を得る設計が主流。

地上

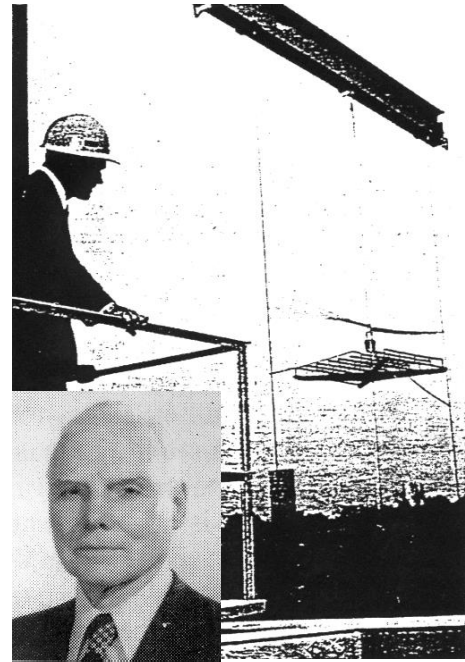
直径数kmの受電  
アンテナ(レクテナ)

マイクロ波  
電力伝送

現在最大の地上アンテナ  
直径103m (地上, 京大レーダー)

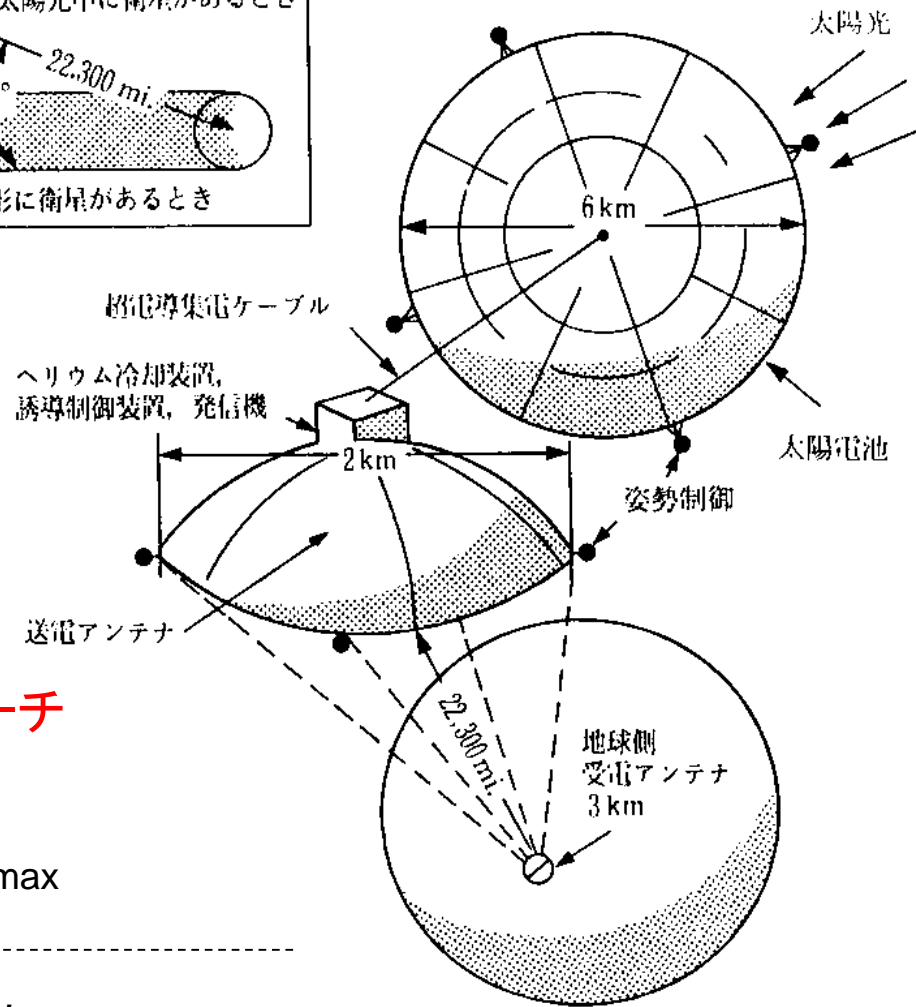
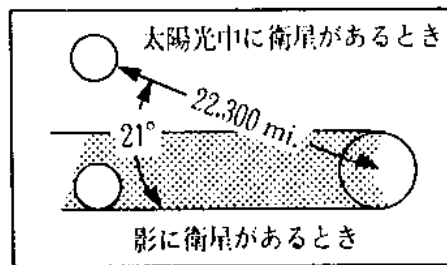
SC Kyoto University

- 1957年 スプートニク1号(ソ連)
- 1961年 世界初の有人宇宙飛行(Gagarin・ソ連)
- 1964年 ヘリコプターへの無線送電実験(Brown・米国)
- 1968年 宇宙太陽発電の提唱(Glaser・米国)
- 1969年 世界初の人類月面着陸(アポロ11号)
- 1977-80年 SSPSリファレンスシステム(NASA/DOE)
- 1978年頃 欧州宇宙機関(ESA)でのSSPS検討開始
- 1979年 日本でのSSPS基礎調査開始
- 1983年 世界初の宇宙でのマイクロ波送電実験(MINIXロケット実験・日本)
- 1994年 ニューサンシャイン計画(日本) ←SSPSのグランドデザイン設計
- 1995-97年 Fresh Look Study (NASA)
- 1998年 国際宇宙ステーション(ISS)組立開始
- 2000年 ISSでの長期滞在開始
- 2001年 民間人による初宇宙旅行(D. A. Tito・米国) ← 自費で旅行





P. E. Glaser, "Power from the Sun: Its Future," Science, vol.162, no. 3856, pp.857-861, 1968



## 動機づけ:

- ・化石資源消費の爆発的増大予測  
⇒ **代替電力**
- ・公害(空気・水・熱公害)の増加  
⇒ **環境コストに対する代替アプローチ**

送電電力:**20GW**、周波数:3GHz

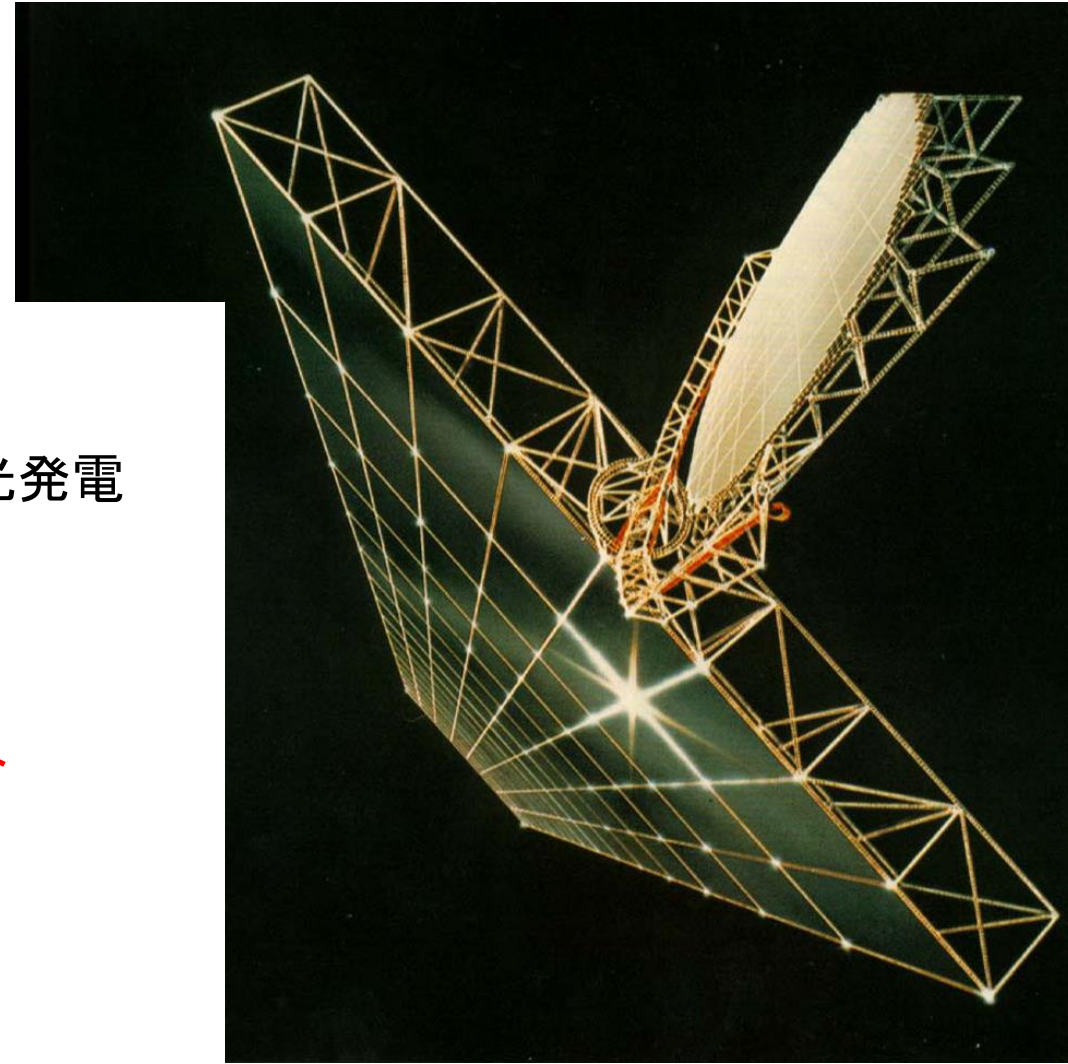
c.f. 黒部ダム(第四発電所)の出力:335 MWmax

1980年 J. Ruth (ESA/ESTEC), IAC@東京の論文

「全世界のエネルギー需要を満たすために、**出力5GW**のSSPS **120台**を静止軌道に建設」

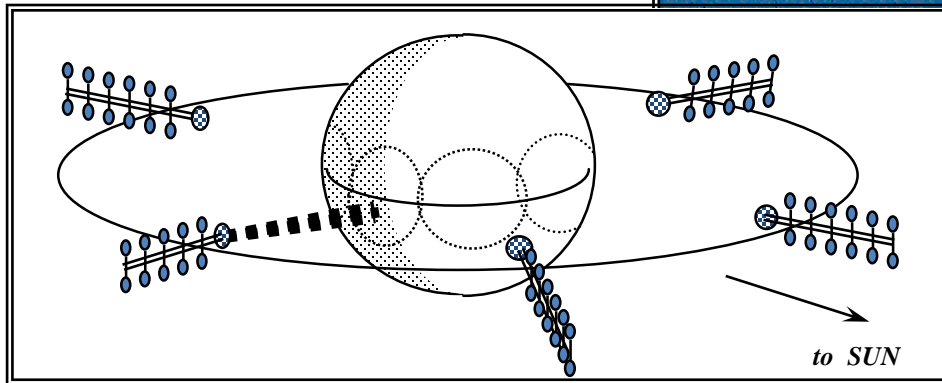
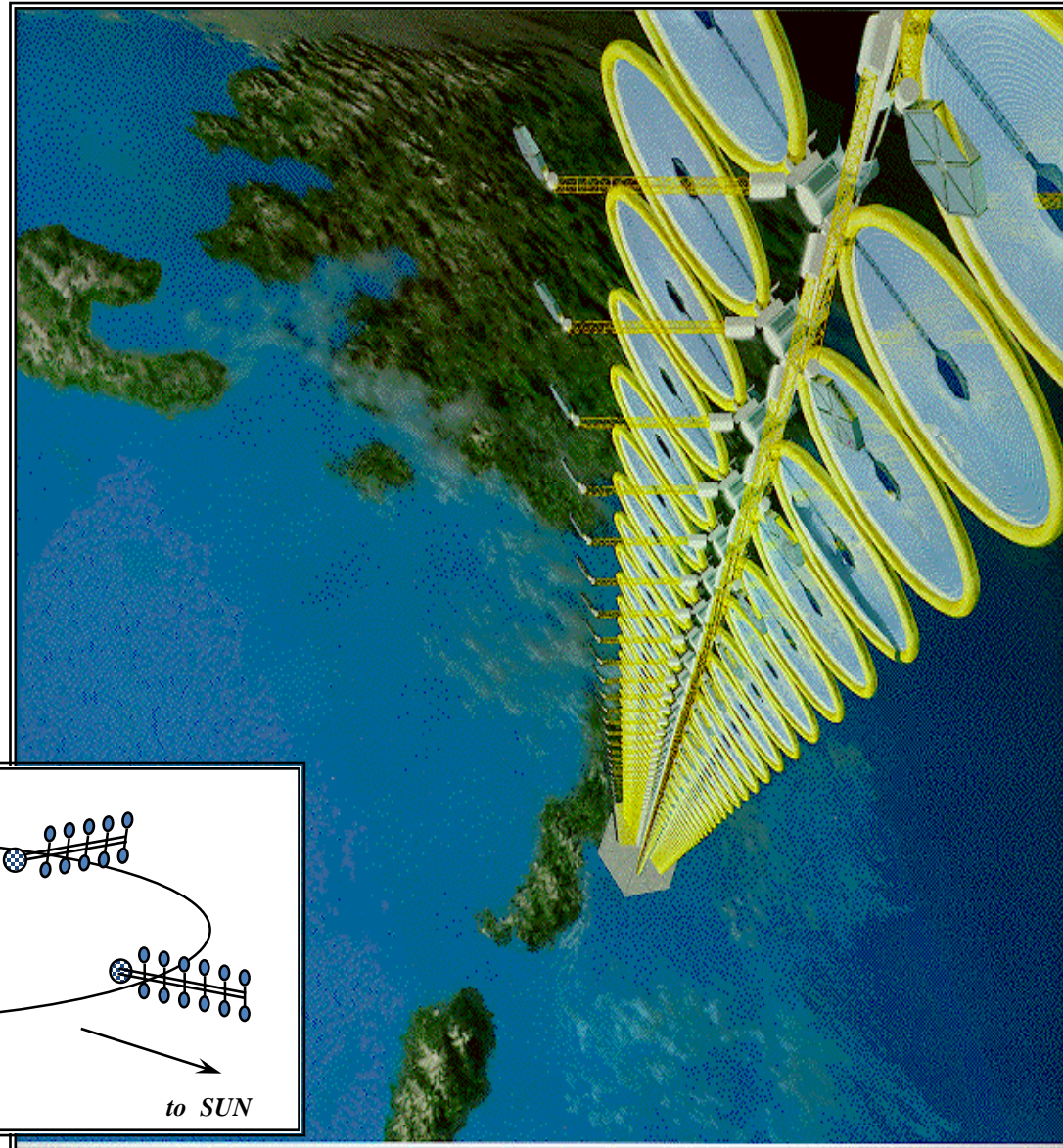
c.f. オイルショック:1973年(第1次)、1979年(第2次)

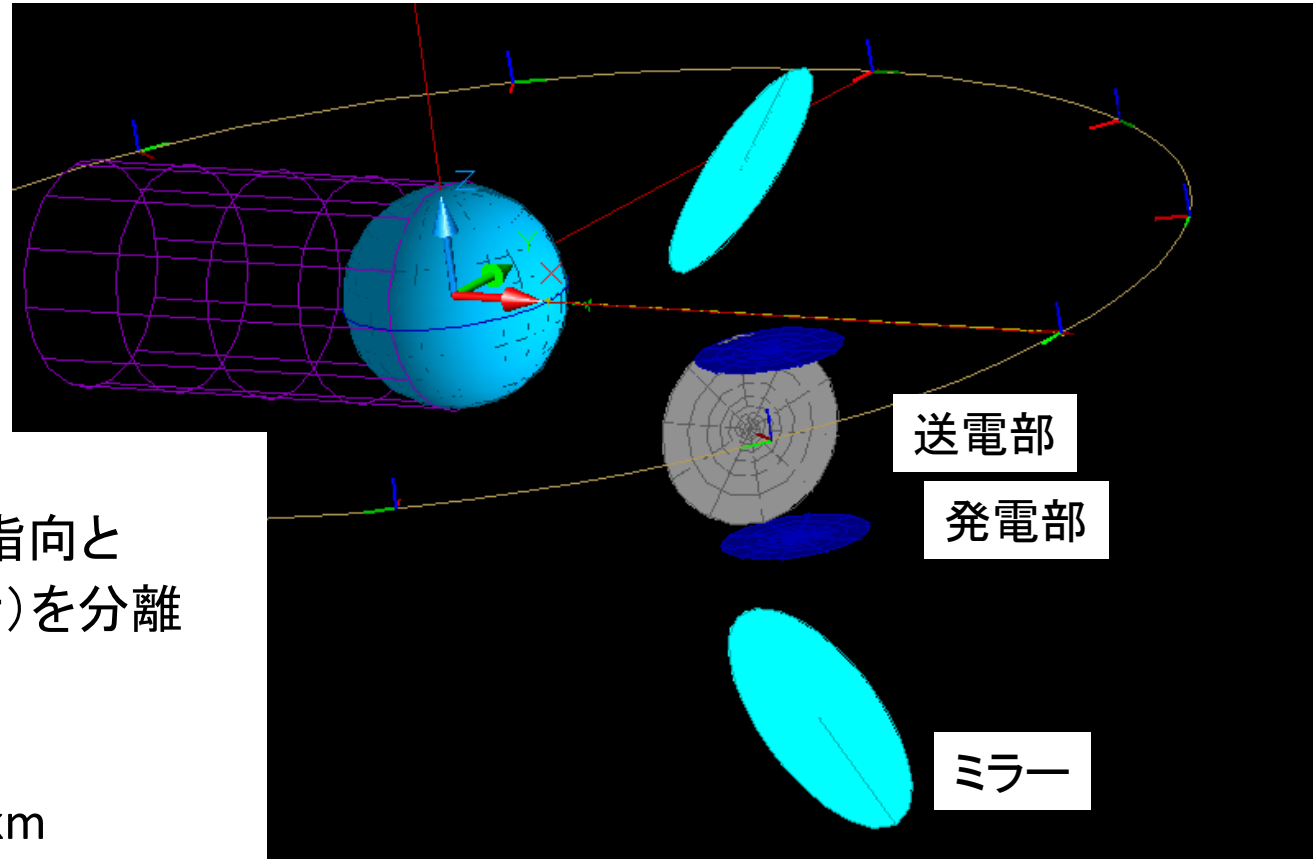
- 静止衛星軌道
- 重量 : 約5万トン
- Si(17.3%) or GaAlAs(20%)の太陽光発電
- 太陽電池面積 : 5km × 10km
- 発電能力 : 10GW (地上で5GW)
- 送電アンテナ直径 : 1km
- **電気結合方式ロータリージョイント**  
(1日1回転, 10A/cm<sup>2</sup>)
- 発送電部の送電 : 直流  
(最長10km, 40kV)
- 周波数 : 2.45GHz
- 受電 : 10km × 13km



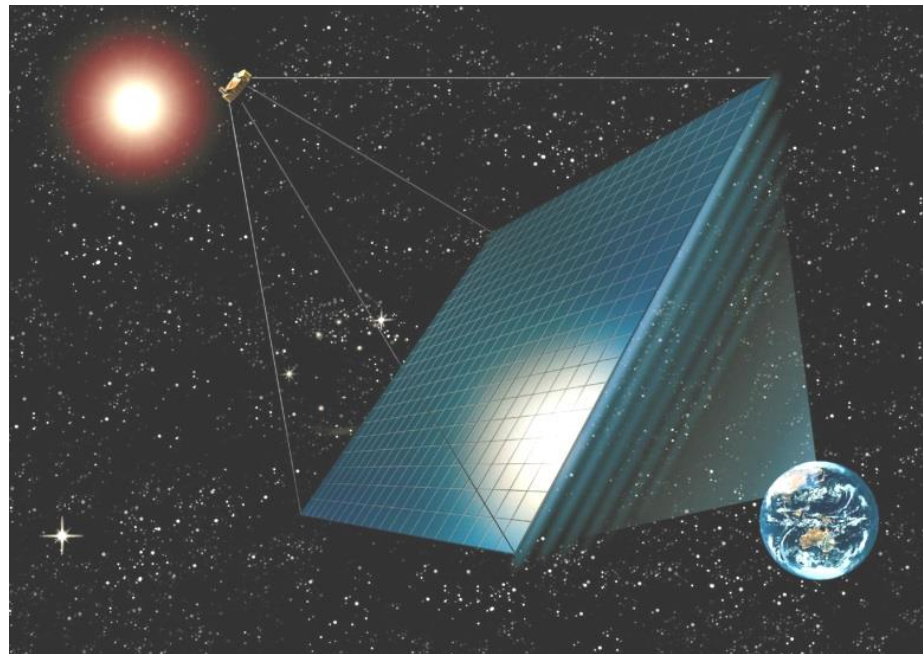
## サンタワー

- 上空 1,000km
- 太陽光発電
- 太陽電池面積：  
直径50m~100m × パドル数
- 発電能力：100MW~400MW
- 送電アンテナ直径：260m
- 周波数：5.8GHz
- 受電：直径4km





- 静止衛星軌道
- ミラーを用いて太陽指向と地球指向(アンテナ)を分離
- 太陽光発電
- 太陽電池面積：  
直径1.2km~2km
- 送電アンテナ直径：  
1.8km~2.5km
- 周波数：5.8GHz
- 発送電部重量目標：8000トン

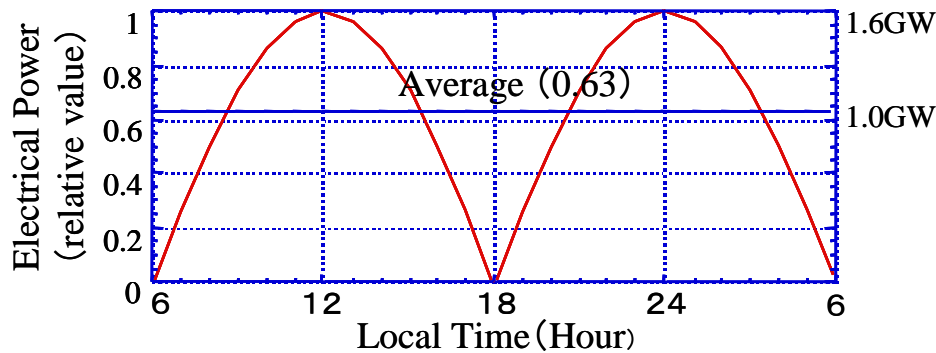
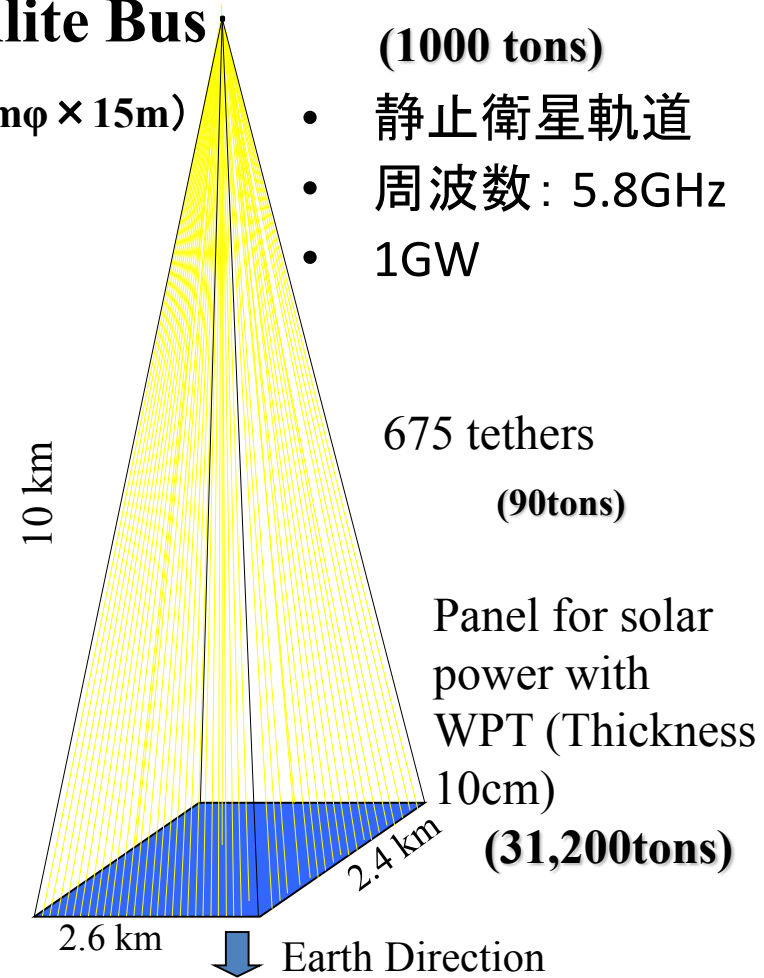


## Satellite Bus

(10mφ × 15m)

(1000 tons)

- 静止衛星軌道
- 周波数: 5.8GHz
- 1GW



Scaled Image



- 地上太陽光発電パラメータ

- 太陽光強度 :  $1\text{kW/m}^2$
- 太陽傾斜係数: 0.6
- 年間日照時間(日本平均): 2,000時間



- 出力: 9GW
- 積算出力: 18TWh

- 地上太陽光発電の場合...

- ・表面ガラスの汚れによる効率低下
- ・夜間需用の蓄電池の効率による出力低下
- ・日照時間の多い砂漠等に設置した場合、電力輸送(有線等)に伴う効率低下



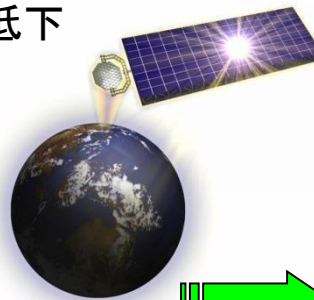
- 共通パラメータ(同一面積)

- 太陽電池効率(現状) 15%
- 太陽電池面積(仮) 10km角

**SSPSは出力 2.2倍！  
積算出力 9.5倍！**

- 宇宙太陽発電パラメータ

- 太陽光強度  $1.3\text{kW/m}^2$
- 年間日照時間 8,760時間



- 出力: 19.5GW
- 積算出力: 170.8TWh

## 電磁波の生体への影響に関する研究



## ELF帯

- 商用電源周波数(50Hz,60Hz)
- 磁場が人体に影響
- 国際がん研究機関(IARC)はELF帯磁場をグループ2B(発がん可能性有)に分類

異なる周波数の電磁波

マイクロ波帯

- 1GHz～30GHz
- 加熱作用が問題
- 動物実験において、 $100\text{mW}/\text{cm}^2$ のマイクロ波を前進に6分間照射すると平均体温が $2^\circ\text{C}$ 上昇\*

電波防護指針(1.5GHz～300GHz)

・一般環境下  $1\text{mW}/\text{cm}^2$  ・管理環境下  $5\text{mW}/\text{cm}^2$

SSPS計画では、受電レクテナ範囲外での電力密度が $1\text{mW}/\text{cm}^2$ の基準を満たすよう設計

\*鈴木 務、“電磁界と生体 —電波法の「電波防護基準」に関連して—”，生体医工学、Vol.43、No.3、pp.395-405、2005

## いくらかかるの？

100万kWのSSPS構築：**1.29兆円**

→ 発電コスト：**8.9円/kWh**

エネルギーペイバック：**7年**

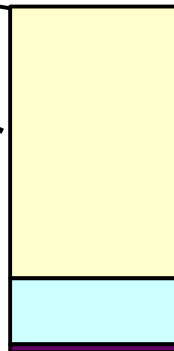
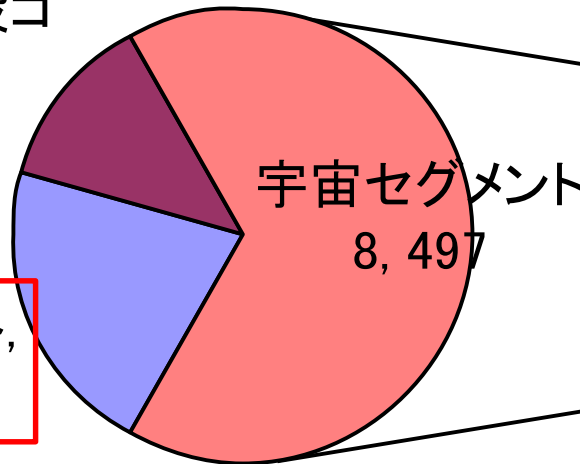


ただし技術開発の発展  
による見込み値を含む

特に輸送コスト、マイクロ波送電部の  
コストが課題

レクテナ建設コ  
スト, 1,637

総輸送コスト,  
2,795

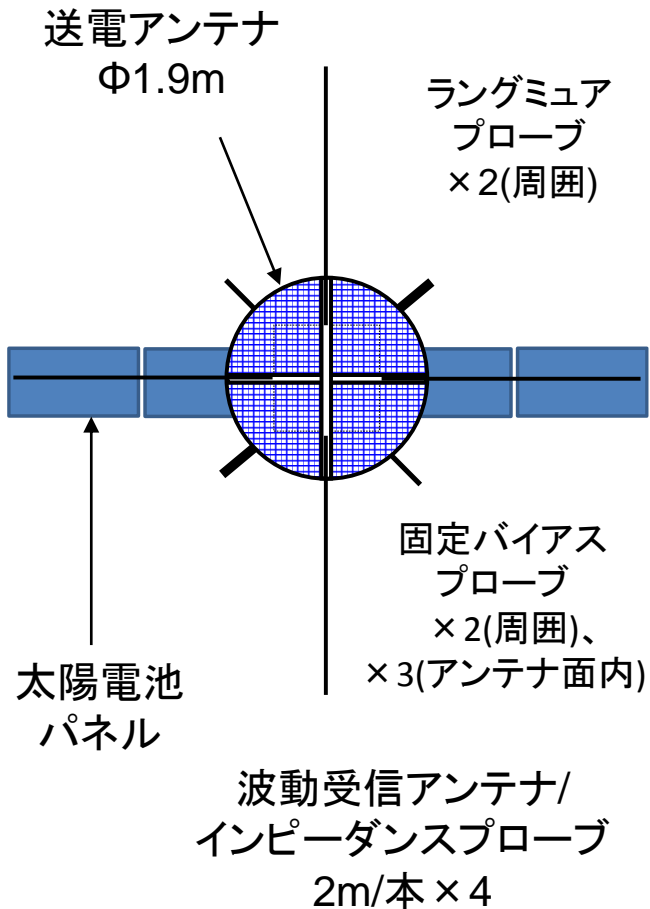


マイクロ波送電  
部分のコスト,  
6,713

太陽光-DC変  
換部のコスト,  
1,581

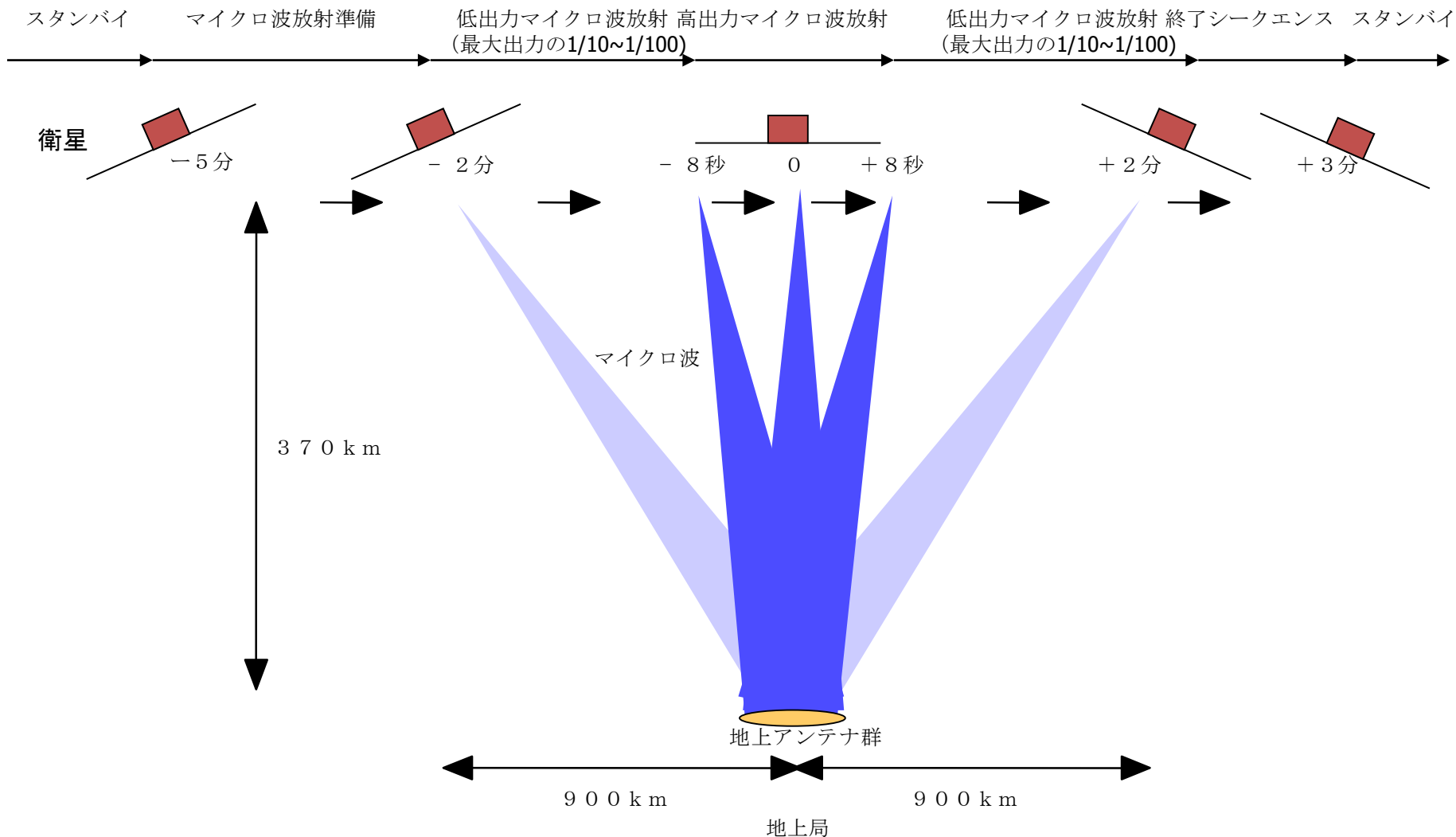
構造体のコスト,  
203

出展: JAXA-SPS委員会

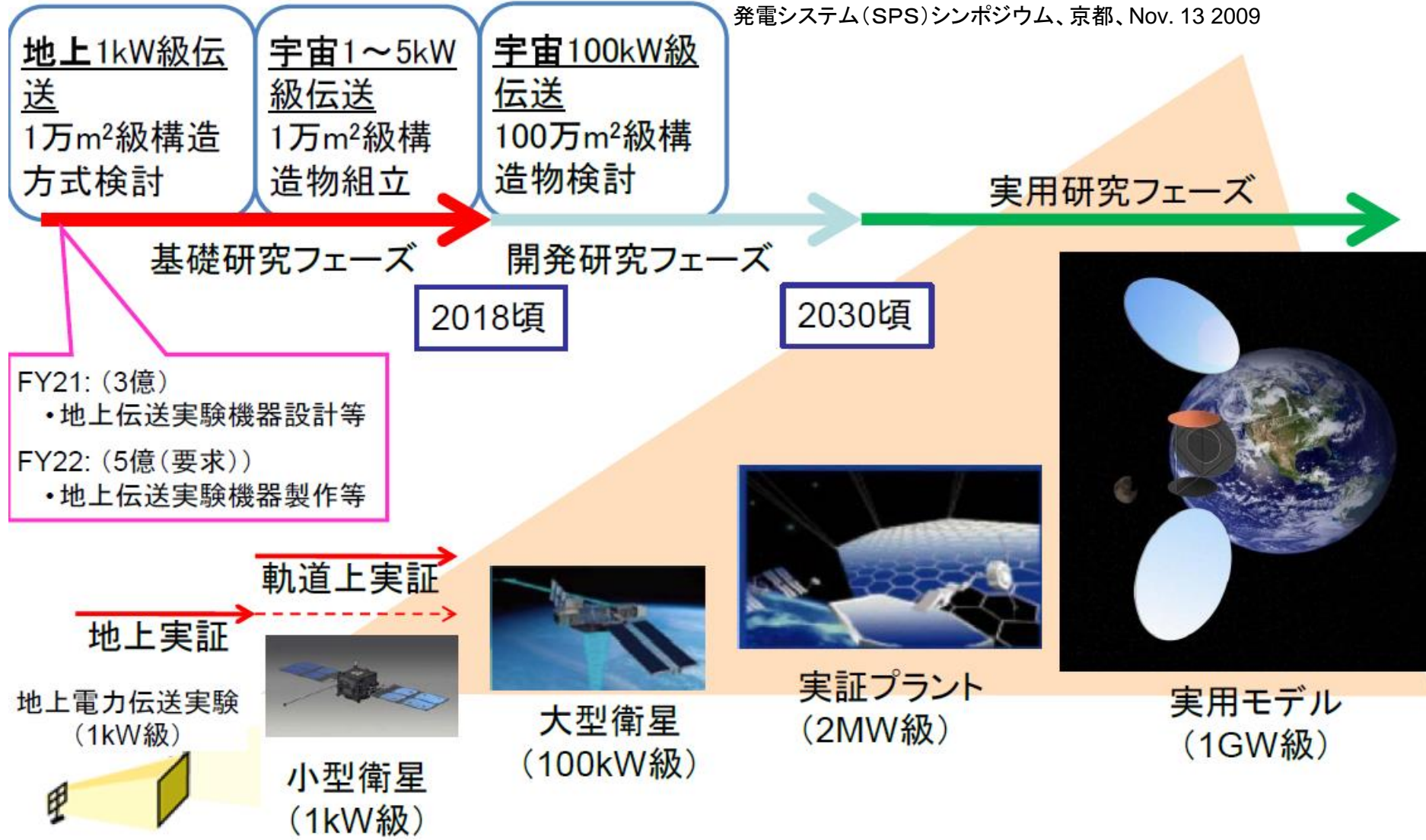


	フェーズ	所要期間	小型衛星
運用	打ち上げ	—	小型衛星打上用ロケット(イプシロン)
	初期運用	約1週間	初期チェックアウト、パネル展開、システムチェックアウト
	定常運用	約1年	1日約3パス実験運用 <b>高度370km</b> 3日に1回の地上局真上パスにおいて モードA(地上局への放射)実験 他のパスではモードB(プラズマ相互作用)実験
姿勢			太陽指向(非送電実験時) 3軸制御(送電実験時、モードA,B)
搭載観測			プラズマプローブ(ラングミュアプローブ、インピーダンスプローブ): 電子密度計測範囲 $10^3$ - $10^7$ /cc、電子温度計測範囲500-5000° K、応答1ms プラズマ波動受信機: 100kHz-10MHz、 [1kHz-30kHz(ワイドバンド): TBD]
地上観測			電界強度計: パイロット送信局を中心に ビーム内数十点程度、ビーム外数点程度 周波数分析器: パイロット送信局付近数 点程度

## 地上局へのビーム制御実験



【引用】 小澤秀司、“宇宙基本計画とJAXAのSPS計画  
 -シンポジウムへの話題提供としての考察-”、第12回宇宙太陽光  
 発電システム(SPS)シンポジウム、京都、Nov. 13 2009



- ・新エネルギー源の開拓としてのSSPSというのは理解できる  
あくまで電力オプションの一つ
- ・地球に送電することは、それほど重要なのか？

#### 【現状課題の観点】

- ・地球に送電するなら、通信との干渉問題解決は必須
- ・生体影響を考慮（電波防護指針）
- ・36,000kmを送電するためだけの巨大送受電アンテナ

#### 【商売の観点】

- ・地球に送電する時点で、地球の電力コスト(～20円/kWh)と勝負
- ・宇宙で電力を売ることにはできないのか？商売敵がいらないはず



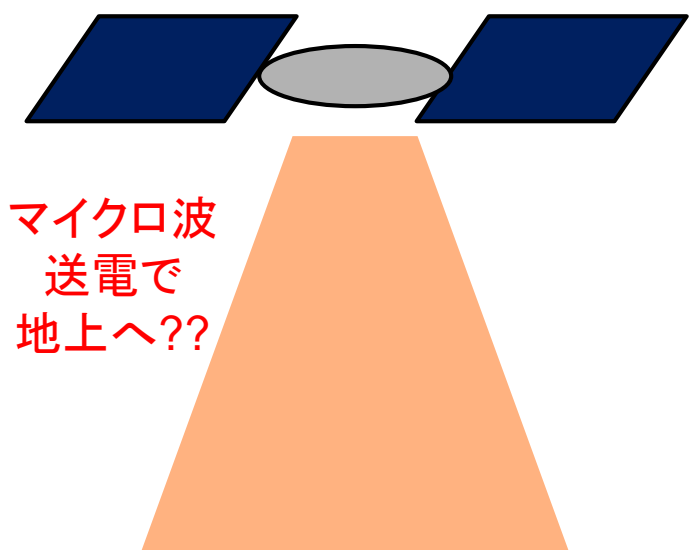
宇宙に電力ニーズはないの？

一般的に、発電した電力は発電した場所で使うはず  
 e.g. 自宅の太陽光発電電力をわざわざ電力損失させて隣の家に無線送電しない

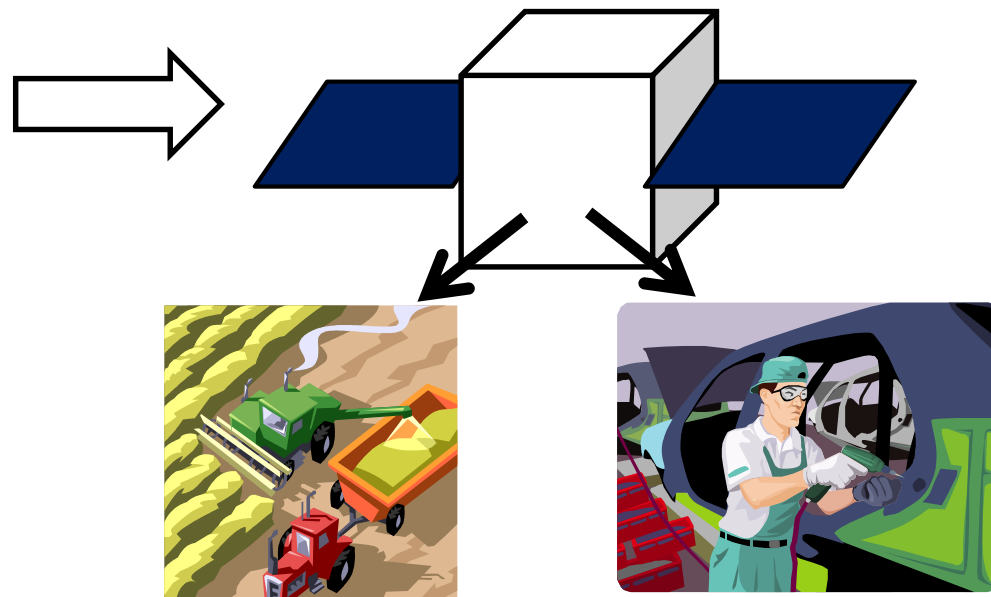
**宇宙で発電したのなら、まず宇宙で使うことから考えるのが普通**

宇宙の電力ニーズがあれば、そもそも地上に送電しようとは思わない

宇宙太陽発電所



宇宙太陽発電所



考えようによっては国際宇宙ステーションだって立派な宇宙太陽発電所





## 送受電アンテナを同じ大きさにした場合

送受電間の伝送効率  $\eta$  の近似式

$$\eta = 1 - e^{-\tau^2}$$

$$\tau = \frac{A_t A_r}{\lambda^2 d^2}$$

$A_t$ : 送電アンテナの開口面積

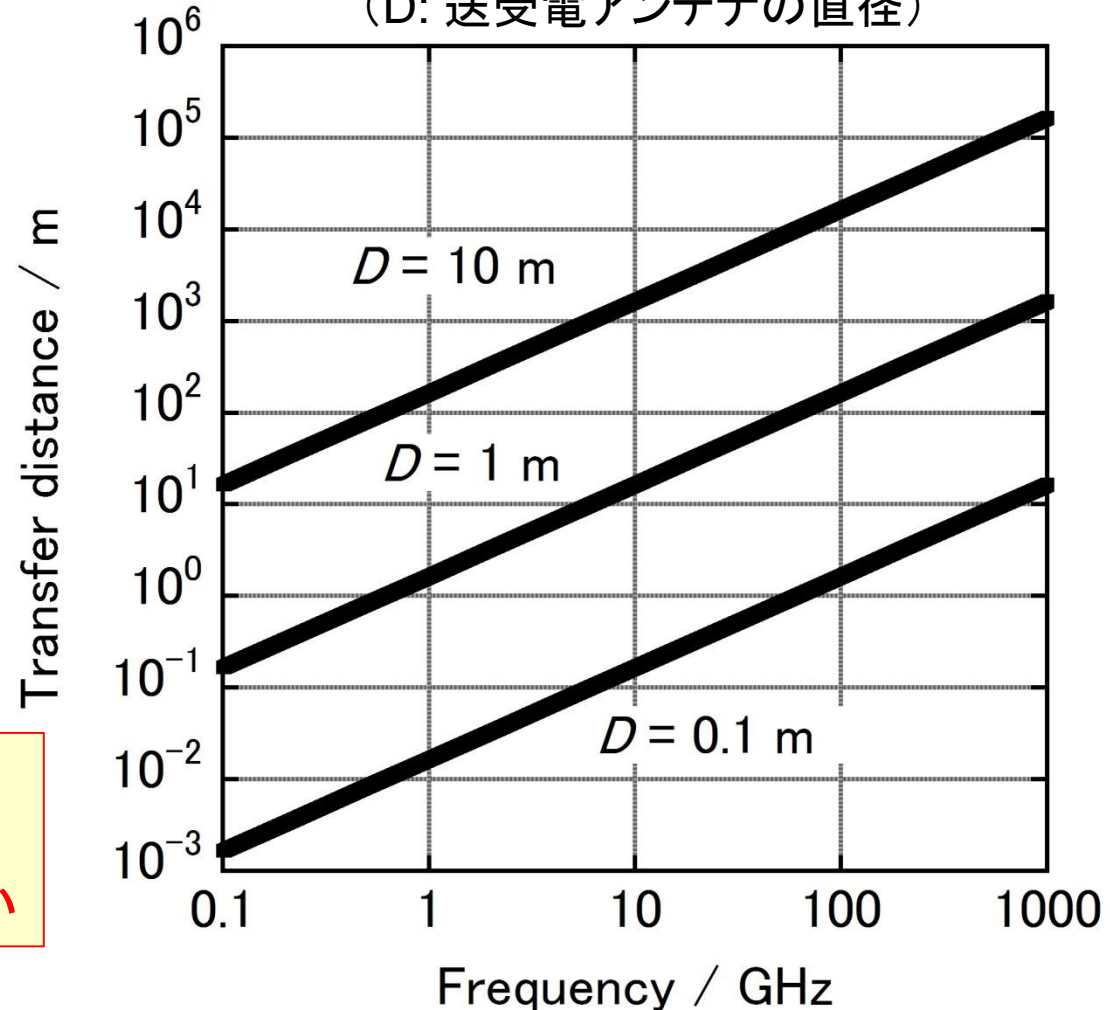
$A_r$ : 受電アンテナの開口面積

$\lambda$ : 電波の波長

$d$ : 送受電間距離

送受電アンテナ径を同じとして  
長距離を効率良く送電するには  
とにかく周波数を上げるしかない

送受電間の伝送効率91.5%とした場合  
( $D$ : 送受電アンテナの直径)



## 受電アンテナを小さくした場合の伝送効率変化

宇宙での無線電力伝送の想定事例

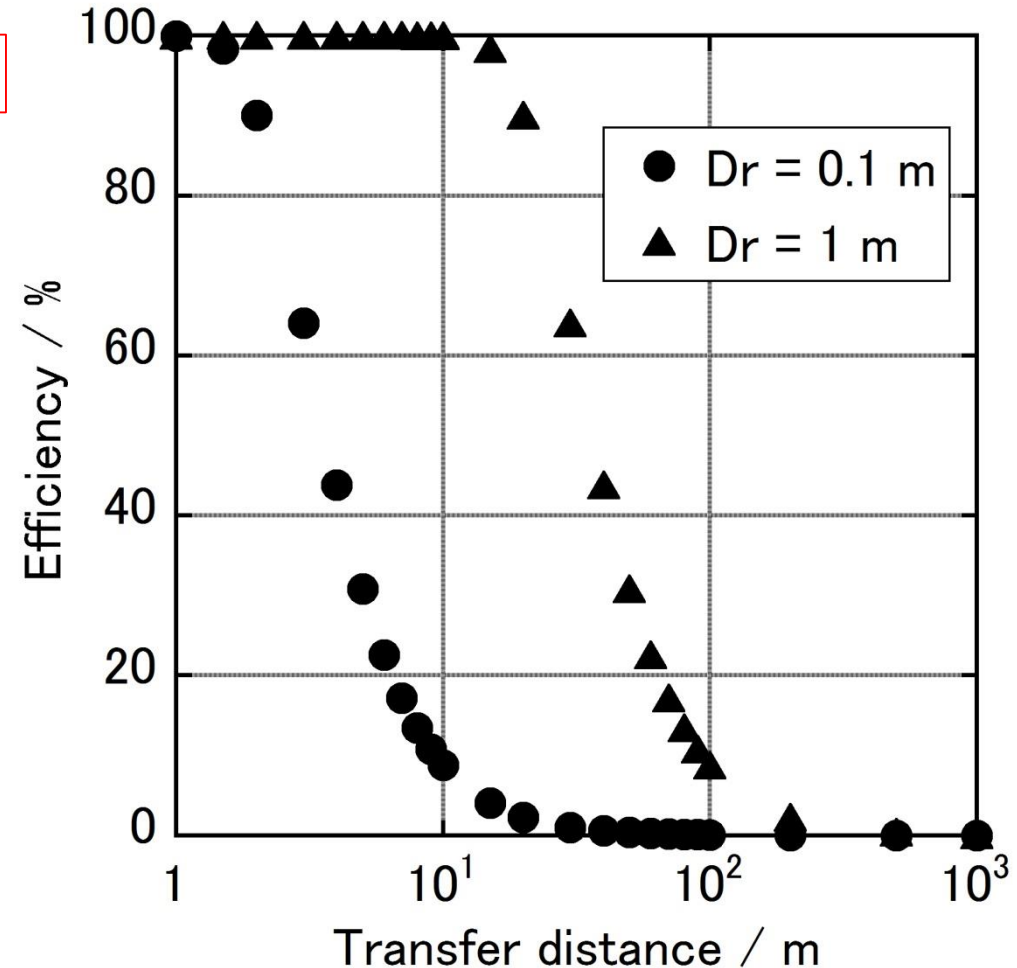
### 10 cm立方程度の超小型衛星への送電

- ・衛星の電力仕様: 100 W
- ・衛星の様々な面に受電装置を配置
- ・受電装置のマイクロ波一直流の変換効率: 50 %

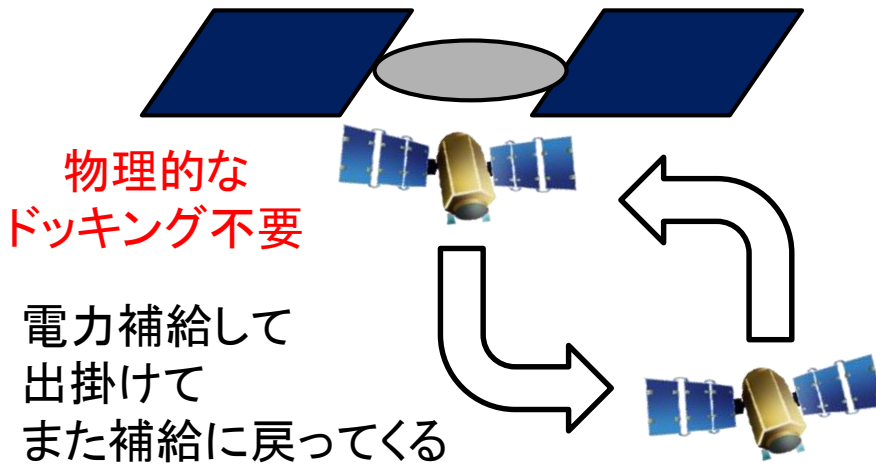
- ・送電側衛星の送電電力: 1 kW
- ・アンテナ直径: 2m
- ・周波数: 5.8GHz

この条件において、  
**伝送効率20 %以上**を満たせば良い。  
 このとき、仕様を満たす  
**送受電間距離は6 m以内**

送電アンテナ直径: 2m、周波数5.8GHzで固定  
 $D_r$ : 受電アンテナ直径



(例) 衛星への電力補給



- ・マイクロ波送電に拘る必要はなく電磁誘導、電磁界共振結合、レーザーもあり得る。特に遠くへ送りたい場合はレーザー
- ・将来的には宇宙での電力プラットフォームも考えられる  
(電波天文観測機への電力供給、宇宙ホテルへの電力供給 etc.)

- ・いずれのミッションも1GW級は不要
- ・宇宙太陽発電衛星としての機能は十分

ただ、地球に送電していないだけのこと

他、月面でのローバへの送電、火星探査飛行機への送電 etc.

## 火星探査飛行機



- 航行距離: ~ 100 km
- 航行時間: ~ 30 min.
- 重量: ~ 5 kg
- 主翼幅: ~ 2.5 m

火星飛行の困難さ = 大気が薄い

	Mars	Earth
重力加速度	3.66 m/s <sup>2</sup>	9.8 m/s <sup>2</sup>
大気圧	~ 10 <sup>3</sup> Pa	~ 10 <sup>5</sup> Pa
大気密度	1.67 x 10 <sup>-2</sup> kg/m <sup>3</sup>	1.23 kg/m <sup>3</sup>

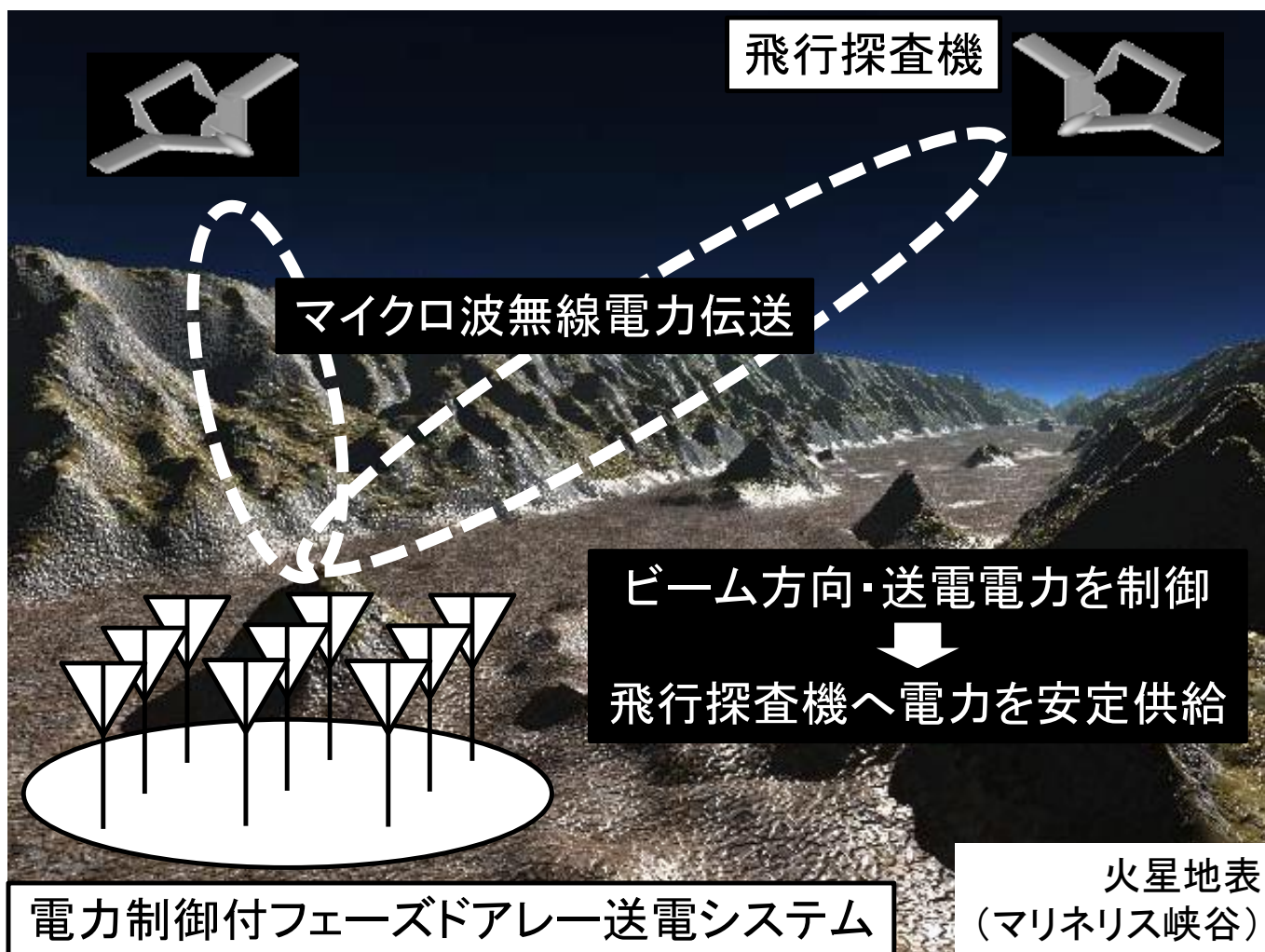
$$[\text{浮力}] = 1/2 \times [\text{浮力係数}] \times [\text{速度}]^2 \times [\text{大気密度}] \times [\text{翼面積}]$$

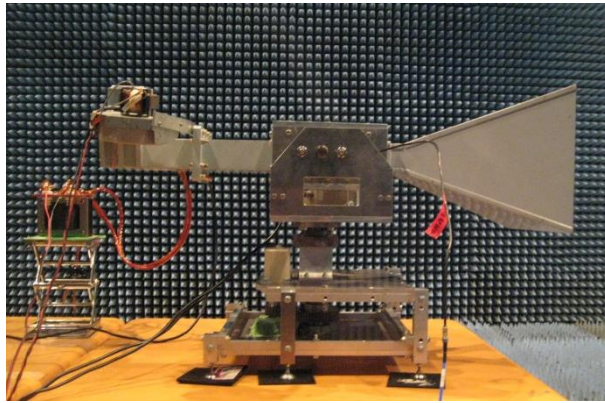
地球との比較において、火星で飛行するには

- 翼面積を33倍
  - 重量を1/33
  - 速度を6倍
- にする必要がある

機体の軽量化が重要 → 無線電力伝送による無燃料化の可能性検討

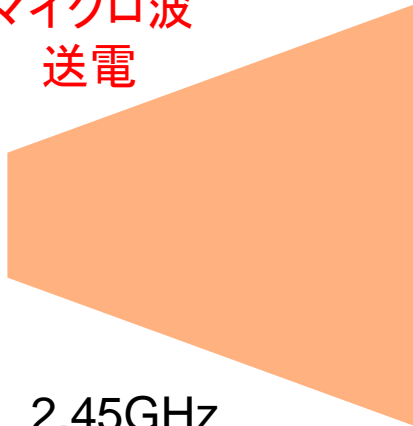
(九州工業大との共同研究)



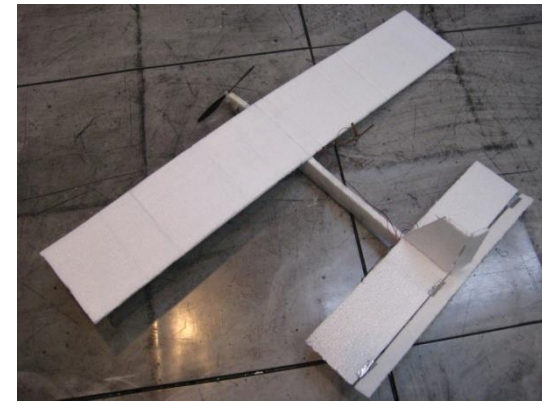


送電アンテナ

マイクロ波  
送電



2.45GHz

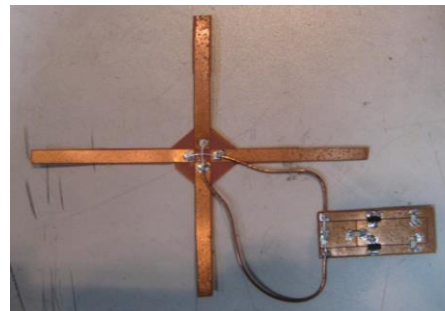


模型飛行機

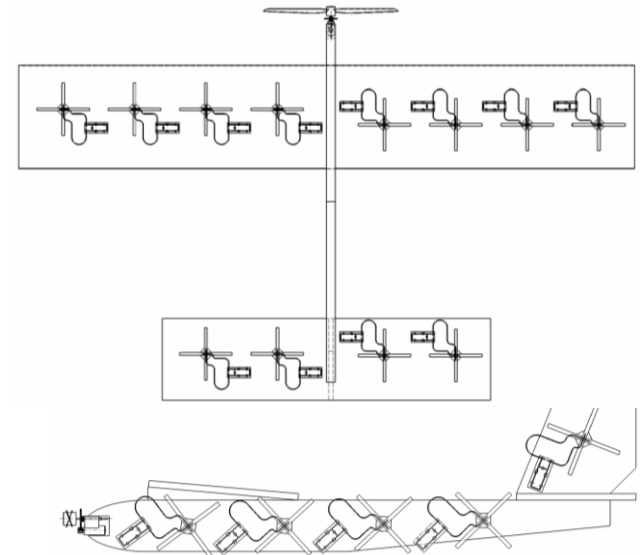
将来的には、送電アンテナはフェーズドアレー化による電氣的なビーム方向制御を目指す

模型飛行機には薄型・軽量のレクテナを配置し、マイクロ波受電電力でプロペラを回す

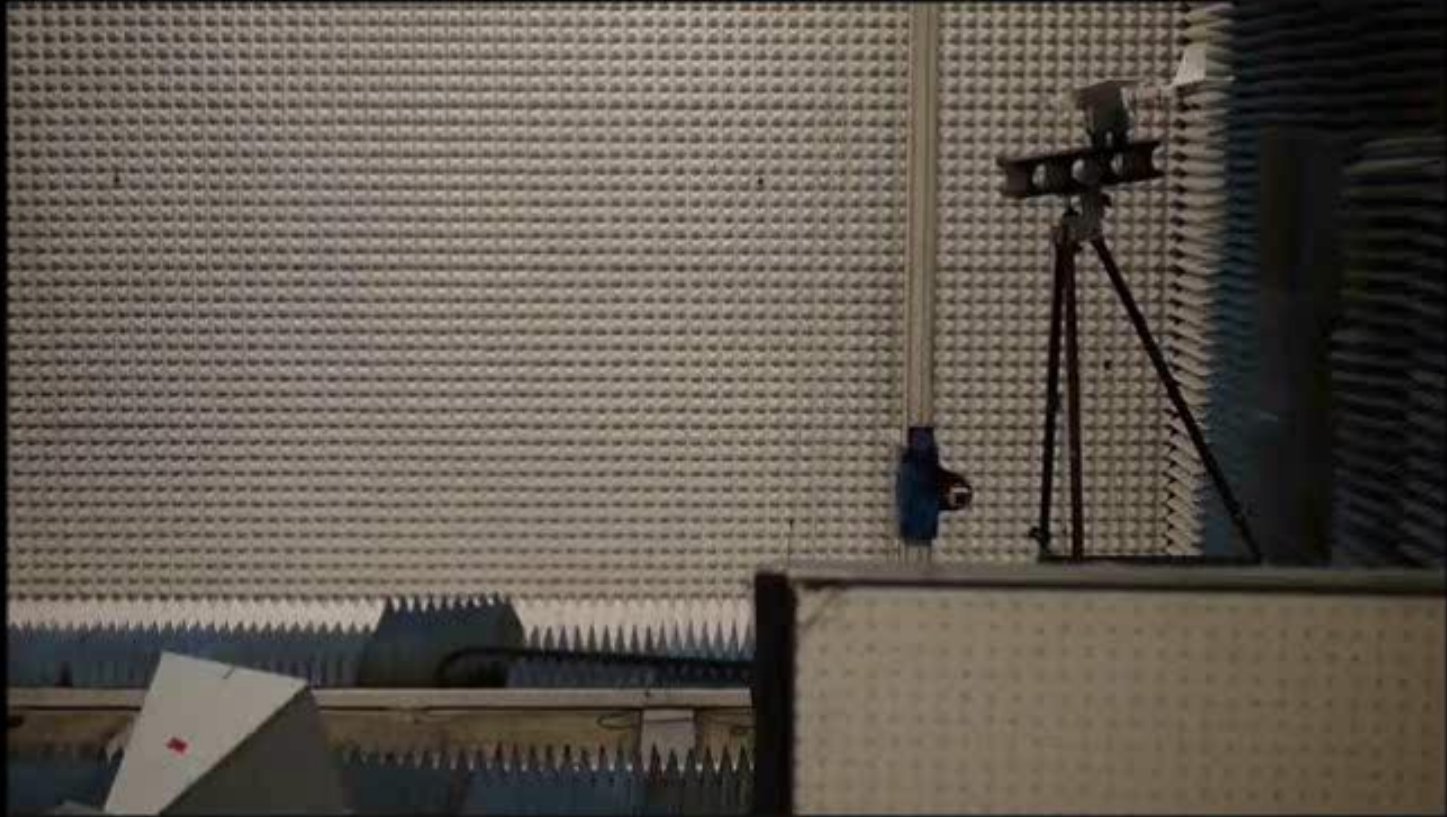
レクテナ



単体の最大変換効率  
: 約65%



平岡、他: 10回無線電力伝送時限研究専門委員会、WPT2011-33、2012





## ・「人間」とは？

- 魚が海(水)から飛び出したら、「魚？」(c.f. 両生類)
- 地球上の人間が持っていない機能を獲得した生物は「人間？」  
(二酸化炭素をエネルギー源にできるとか)

人間が住める環境を作る？ or 環境に人間を適応させる？

## ・「住む」とは？

- 国際宇宙ステーションにいる宇宙飛行士は「住んでいる？」

自給自足が想像できるかどうか？

## ・「日」とは？

- 何千億年後かには、十分ありえる話
- 例えば、「10年後/100年後までに住まざるを得ないリスク」とは？

積極的に住むのか？ or 住まざるを得なくなるのか？

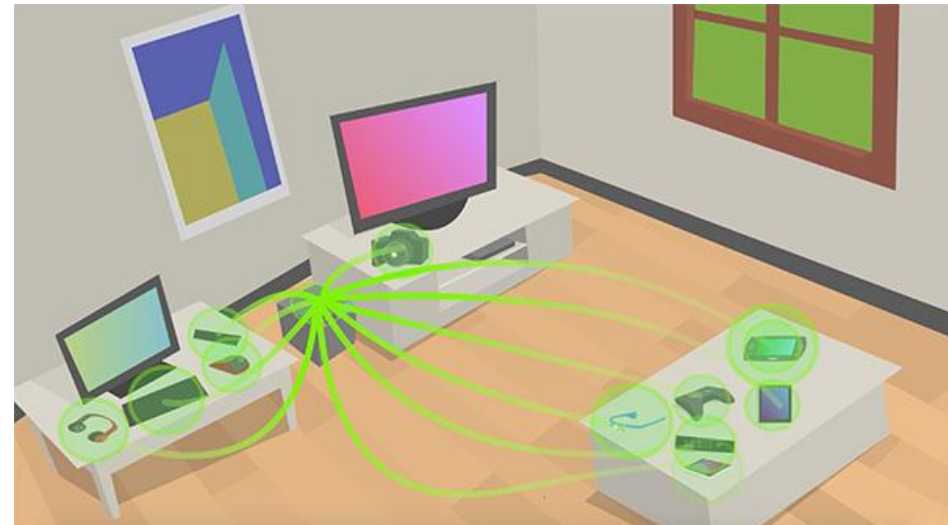
宇宙太陽発電が潜在的にもつ様々な可能性

- ・宇宙での電力プラットフォーム、宇宙ホテル etc.
- ・完全自律分散電源(=今の人工衛星)でどこまで対応できるのか？



米国 Ossia社 ワイヤレス給電技術 “Cota”

<http://www.ossia.com/>



2.45GHz帯のマイクロ波を用いて、半径10m範囲の機器を無線充電

KDDI Open Innovation Fundからの出資もあり、KDDIと共同開発中

## 【技術的課題】

### 通信と無線電力供給との共存性

- ・通信干渉とならない送電技術の必要性

### 電力伝送効率

- ・送電損失(約30%)と受電損失(約20~30%)が存在

### 最大送電電力

- ・一般生活環境下では大電力送電が困難(電波防護指針との兼ね合い)

## 【法的整備問題】

### 国際的周波数割り当て、電波法など

- ・無線電力伝送に対する周波数割り当てが現時点で存在しない

### 電磁波の人体への影響

- ・電力密度 $1\text{mW}/\text{cm}^2$ 以下(電波防護指針:一般環境下)
- ・パブリックアクセプタンスの重要性