

平成27年12月3日
一般社団法人日本太陽エネルギー学会 太陽光発電部会
第15回セミナー「宇宙太陽光発電システムの開発動向」

「宇宙太陽発電システムのための 実証実験提案」

JAXA宇宙科学研究所
田中 孝治

内容

- 背景:エネルギー/環境
- 地上太陽光発電システム
- 宇宙機及び太陽発電衛星の電源システム
- 太陽発電衛星の技術課題
- 宇宙実証
- まとめ

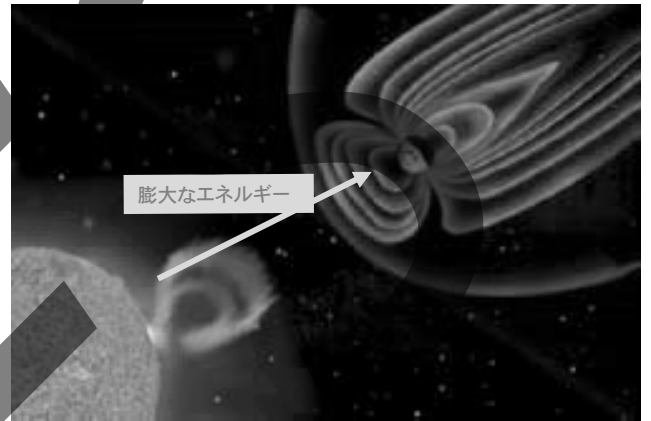
背景 太陽光の利用

- エネルギー問題
 - ✓ 埋蔵資源の枯渇
 - ✓ エネルギー消費量の増大
- 環境問題
 - ✓ 気候変動(二酸化炭素排出による地球の温暖化)

太陽の表面放射エネルギー:
 $3.8 \times 10^{23} \text{kW}$

地球の大気圏近くの太陽光のエネルギー密度:
 1.37kW/m^2 (太陽定数)

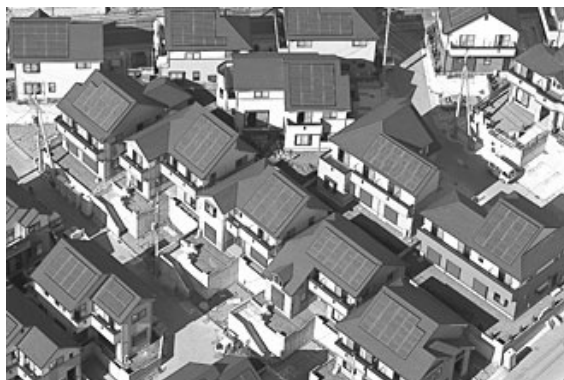
世界の年間消費エネルギーを1時間で賄える。



従来の太陽光利用の利点と欠点

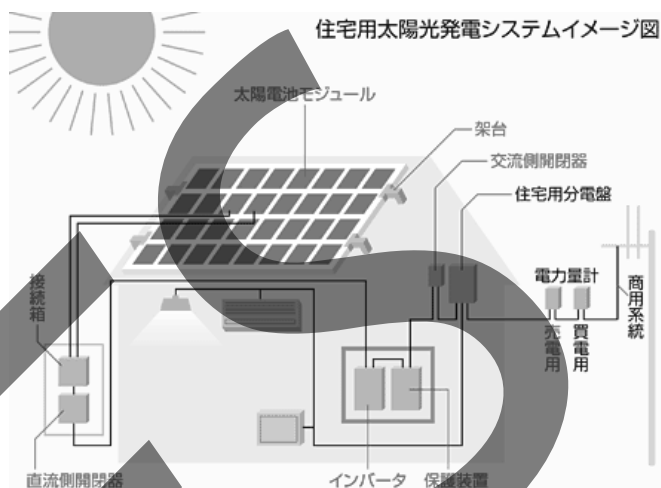
- 資源量は無尽蔵と考えられる。
- 環境負荷の少ない発電を行うことができる。
- 天候により発電量が変動し、その予測も困難。
- 夜は発電できない。

地上での太陽光発電システム



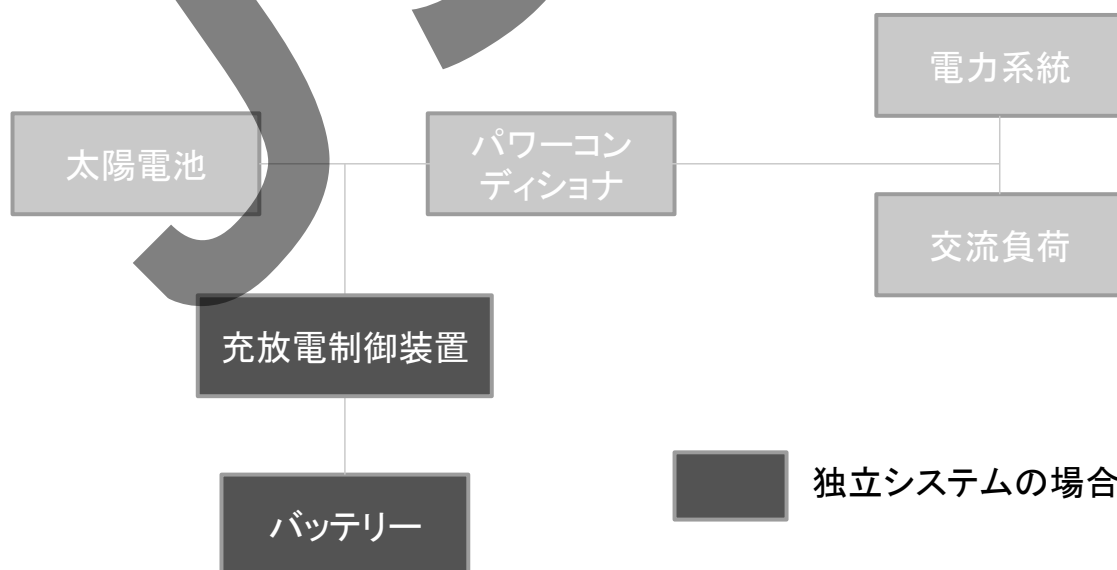
クリーンエネルギーを使った快適な暮らしを、街ぐるみで実現している千葉県松戸市ソーラータウン

出典: nikkei BP net(<http://special.nikkeibp.co.jp>)



出典: 太陽光発電普及拡大センター「住宅用太陽光発電システムのご案内」より

地上太陽光発電システム (小規模)



地上の太陽光発電所

■ 日本におけるメガソーラーの稼働状況

(参考:エレクトリカル・ジャパン)

- 発電所 1811箇所(日本国内)
- 出力 3563.1MW(日本国内)

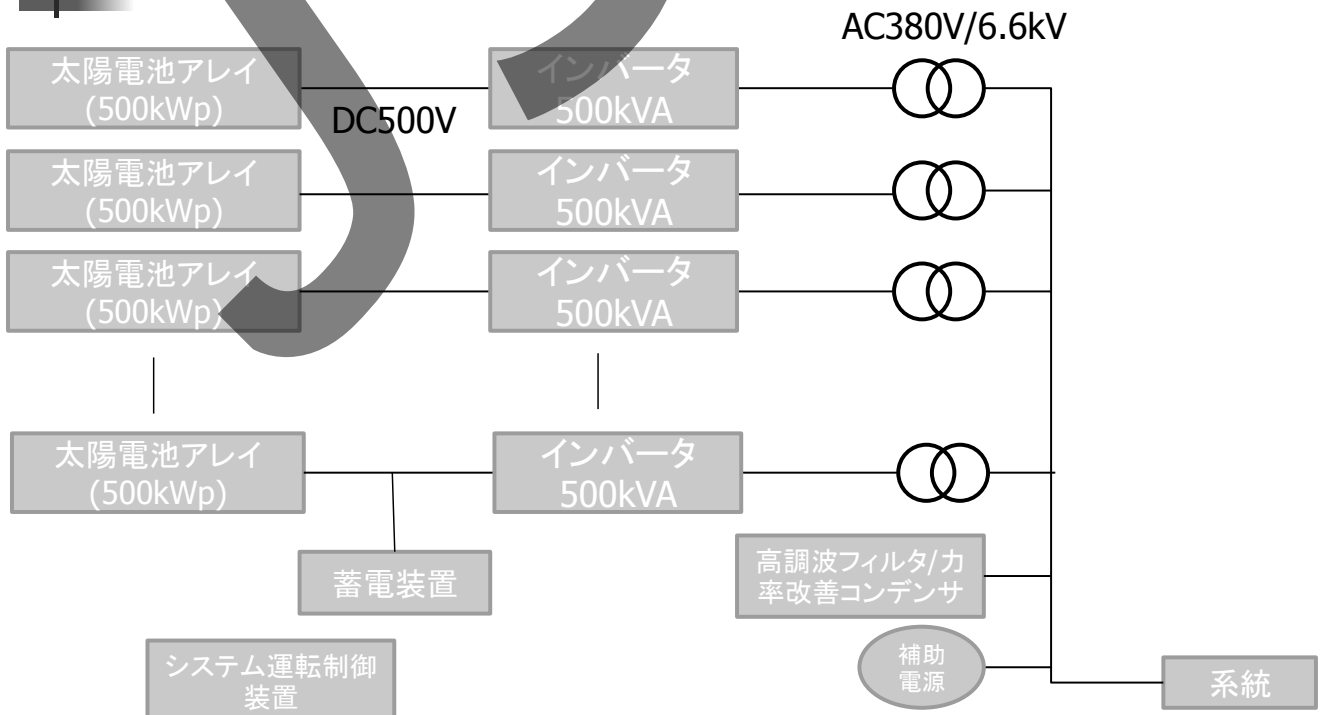


2014年4月「大分ソーラーパワー」竣工
105ha、82MW(国内最大規模)



2014年には290MW
アメリカ、アリゾナ州(Agua Caliente Solar Project)

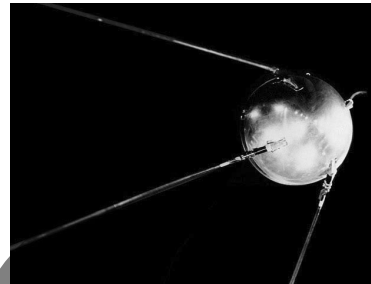
地上用集中配置型太陽光発電システム



人工衛星の電源

- Sputnik I: 1957年10月4日

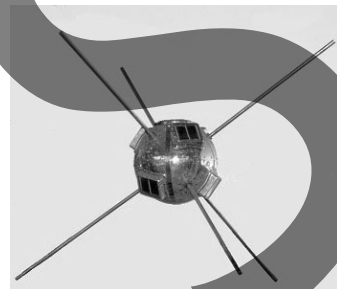
- AgZn一次電池: 1W
- 重量: 83.6kg
- 直径: 58cm
- 電離層の観測
(2台の送信機を搭載)



スプートニク1号

- 太陽電池＋二次電池

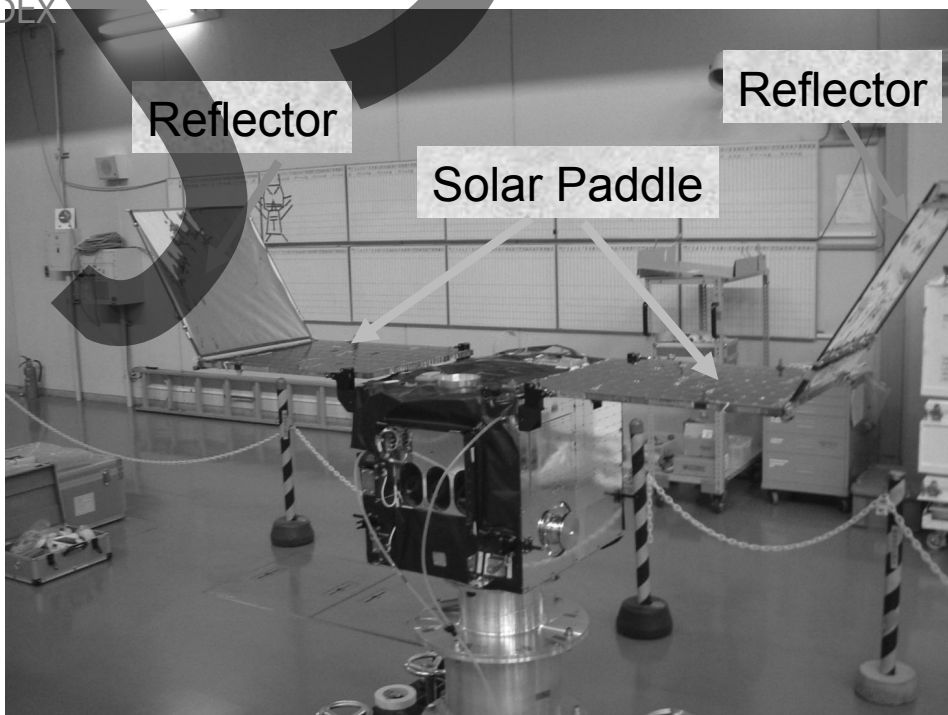
Vanguard I: 最初の太陽電池アレーを搭載した人工衛星. 1958年3月17日打ち上げ.
6枚ボディマウント型太陽電池
シリコン太陽電池セル: 変換効率 10%
アレイ出力: 1W以下



U.S. Vanguard I NASA

太陽電池パドル搭載人工衛星

INDEX

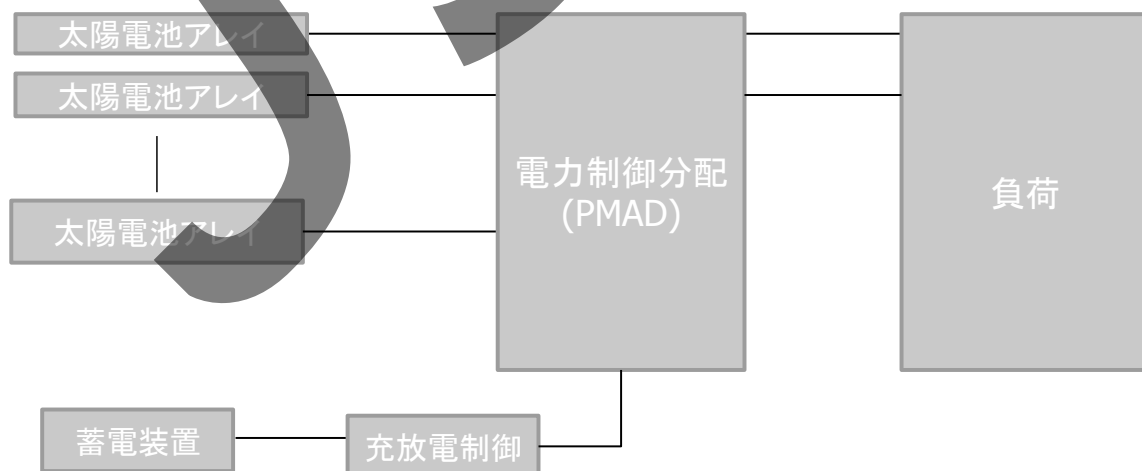


大型・高電圧宇宙機の例*

名称	国名	高度	用途	打ち上げ年	発電電力 [kW]	バス電圧 [V]
ADEOS	日本	低軌道	地球観測	1996	8.0	32~50
ETS-VI	日本	静止軌道	技術試験	1994	6.0	32~50
きずな	日本	静止軌道	通信実験	2008	6.1	50
Terra	アメリカ	低軌道	地球観測	1999	2.5	127
DS-1	アメリカ	惑星間軌道	小惑星探査	1998	2.5	100
ETS-VIII	日本	静止軌道	通信	2004	7.5	110
Boeing 702	アメリカ	静止軌道	通信・放送	2000	18	100
Muses-C	日本	惑星間軌道	小惑星探査	2003	2.0	120
国際宇宙ステーション		低軌道	宇宙観測/利用	1998-2011	約120kW	120

*2003年4月航空宇宙学会誌, 趙孟佑, 藤井治久, 第51巻, 第591号

宇宙機の電力システム

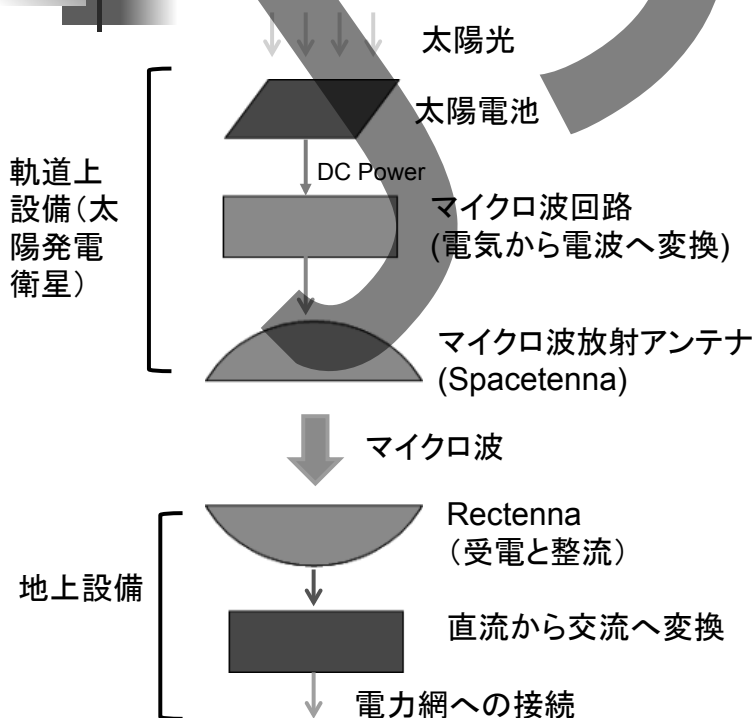


地上と宇宙との太陽光利用の比較

項目	地上システム	宇宙機システム
スケール	～MW 数kW(家庭用)	1～10kW(Typ.)、 最大約100kW
伝送	高電圧、交流、直流	直流(高電圧化には技術課題)
コスト	スケールによる 低コスト化の進展	輸送費(軌道)、高コスト要因: 信頼性、軽量化、小型化
運用	・分散システム ・大規模かつネットワーク化 ・独立運用	自動、独立運用

13

新しい太陽光利用 —宇宙太陽発電の考え方—



軌道上太陽光エネルギー密度 1395W/m²
地上平均太陽光 140W/m²

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。

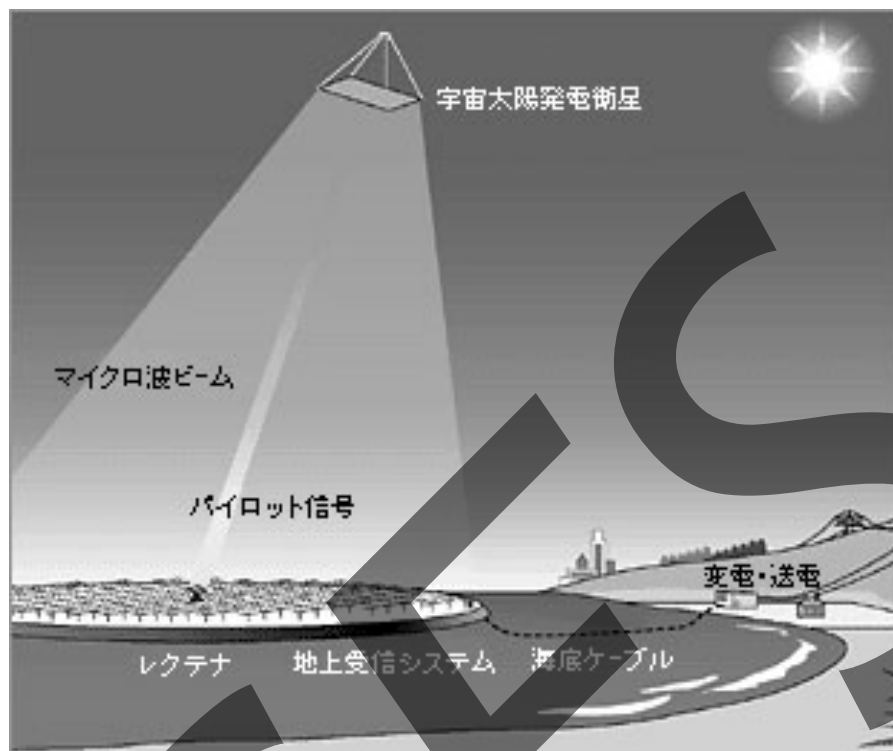
従ってこのシステムは地上の太陽光利用に比べ2.5～5倍の高い効率で電力を取得できる可能性を持っている。

地上の太陽光発電は不安定であるが、宇宙で発電した場合は安定

クリーンで大規模なエネルギーシステムの可能性
取得可能エネルギーは実質的に無制約

14

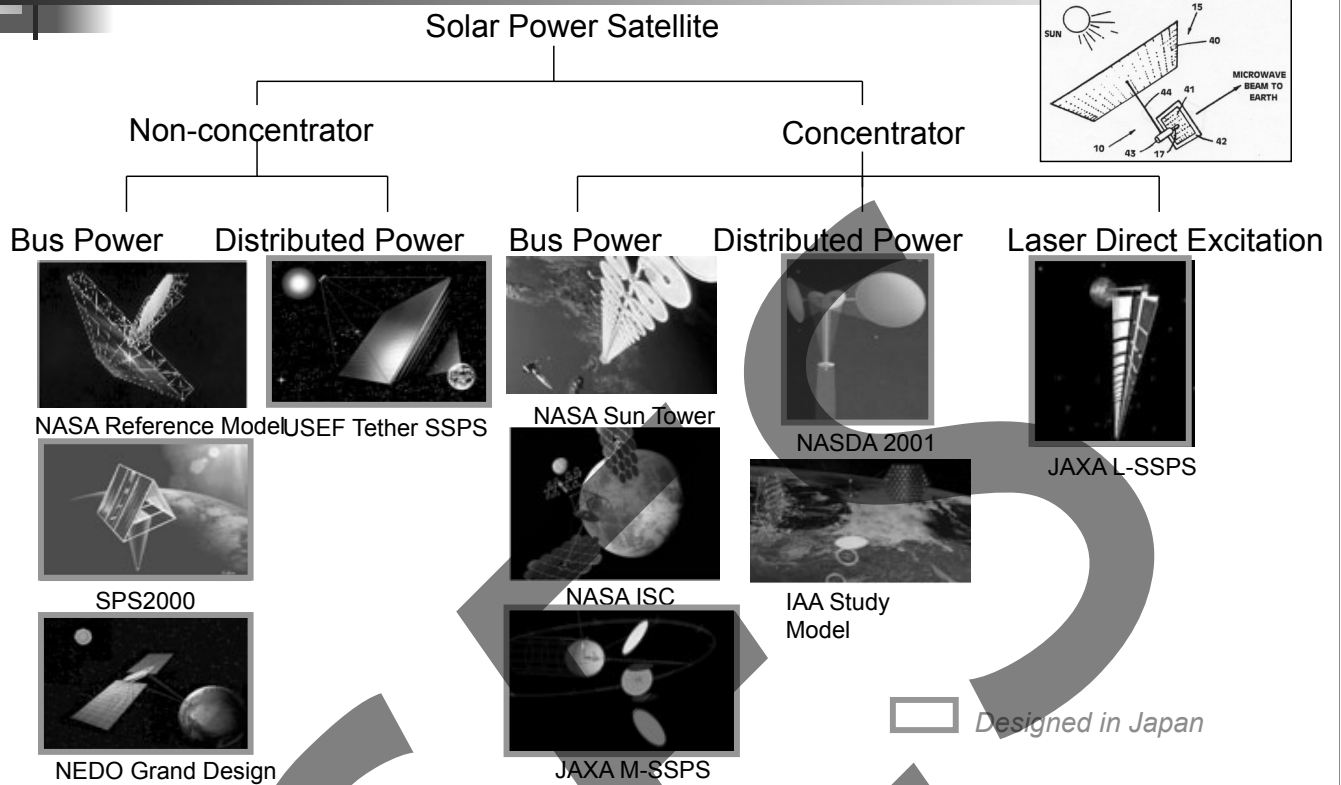
太陽発電衛星の概念



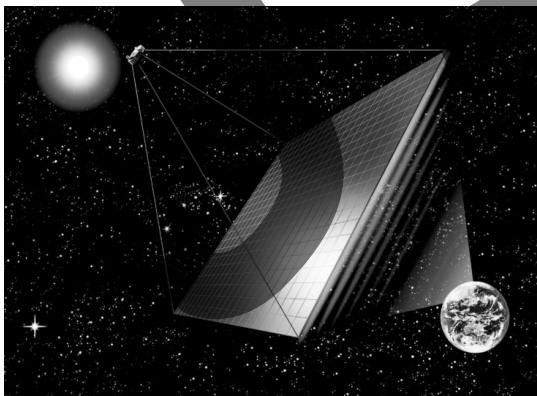
SPSに必要な技術

分野	技術
発電	高効率(比重量、比面積)、低コスト太陽電池 太陽電池の耐宇宙環境性 集光技術 オプション技術(熱発電)
電力管理	低損失集配電 ロータリジョイント電力技術 高効率電圧制御器 高効率蓄電 大容量排熱
送電	マイクロ波ビーム制御 高効率・低コストマイクロ波増幅・制御 オプション技術(光送電)
構造・建設	大型構造物建設 形状維持
輸送	低コスト・大量輸送

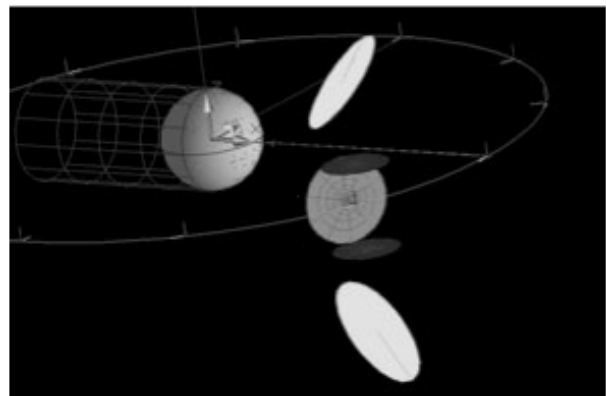
今まで検討された太陽発電衛星



現在の日本における商用太陽発電衛星 (SPS) モデル



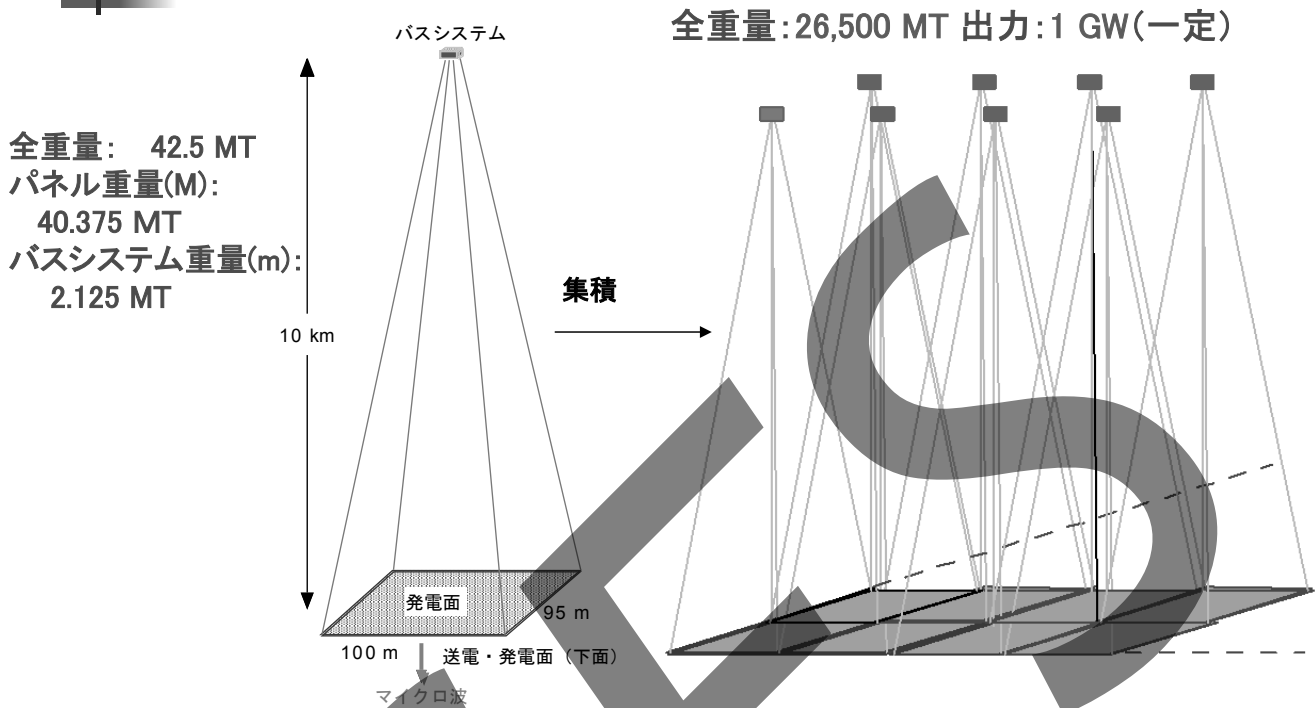
**Basic Microwave-type Model
(Jspacesystems/METI)**



**Advanced Microwave-type Model
(JAXA/MEXT)**

Jspacesystems/METI: Japan Space Systems/ Ministry of Economy, Trade and Industry
 JAXA/MEXT: Japan Aerospace Exploration Agency/ Ministry of Education, Culture, Sports, Science and Technology

テザーSPS(ベーシックモデル)のコンセプト



Jspacesystems: 平成19年度太陽光発電利用促進技術調査成果報告書

平板型テザー太陽発電衛星の主要性能 (出力一定型)

システム構成 パネル寸法 テザー長	発送電一体型パネルを2500本のテザーワイヤーで吊り下げ 2.5 km x 2.375 km x 0.02 m 約10 km
全重量 パネル重量 バス部重量	26,500 トン 25,000 トン 1,500 トン
サブパネル パネル寸法 サブパネル総数	発送電一体型パネルを4本のテザーワイヤーで吊り下げ 100 m x 95 m x 0.02 m 625(25x25)
構造パネル 構造パネル数/サブパネル	10 m x 1 m x 0.02m 950(10x95)枚
モジュール 発電 送電 寸法 モジュール数/構造パネル	発送電機能 473 W max (1,350x0.85) 222 W一定 (473x0.95x0.97x0.6x0.85) 1 m x 1 m x 0.02 m 10
マイクロ波周波数 レクテナでの最終出力(DC)	5.8 GHz 1 GW(一定出力)

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
発生電圧（バス電圧）	100～150V	1kV以上	10
マイクロ波送電	数十kW（地上）、1kW（宇宙）	GW	100,000
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	1万円/kg	1/100

宇宙太陽光の現状と課題

- ・ 太陽光発電は、宇宙機にも既に多く利用されている。
- ・ 宇宙太陽発電には耐宇宙環境性が要求される。
- ・ 宇宙太陽発電への、太陽光発電への要求は、従来の利用に比べ桁違いに大きい。
- ・ 無線送電技術は、地上の太陽光利用にはない宇宙太陽光発電固有の要求である。
- ・ 宇宙太陽光発電には、超大型宇宙構造、高頻度大量低コスト宇宙輸送が要求される。

宇宙環境の特徴

- ・ 太陽光が遮られない
- ・ 強い紫外線
- ・ 厳しい放射線
電子線、陽子線、中性子線など
- ・ 蒸発しやすい

高真空
(少ない粒子)

デブリや原子状酸素、
プラズマ、エアドラッグ

破壊、損傷

微小重力環境

重力を使わない構造、動作機構

高度と気圧、粒子数の変化

高度	気圧	粒子数	
	静止軌道: 10^{-13} Pa	数十個/cm ³	
	高度1,000km: 10^{-9} Pa	N ₂ : 10^6 個/cm ³	電離層
	高度400km: 10^{-5} Pa	N ₂ : 10^{13} 個/cm ³	
	高度100km: 0.1Pa		
	高度30km: 1,000Pa		
	エベレスト: 300hPa		
	地上: 1,013hPa	10 ¹⁹ 個/cm ³	約10t/m ²

宇宙に漂うゴミ

- 宇宙塵(デブリ)、人口的な宇宙飛翔体破片。
- これまでに衛星などの打上げは3000回以上、質量は3000トン以上にのぼるが、その内95%は現在デブリとなっている。
- 低高度衛星に対する相対速度は10km/sに達する。
- 一般的に小さなものほど多く存在し衝突確立が高い。
- 高度2,000km以下の低高度(「LEO」)に非常に多く分布し、また赤道面の静止衛星高度(「GEO」)にも多く分布している。
- 短期的な障害に加え、長期的影響も無視できない。



25

課題: 発電/電力管理

- 高効率化(比重量/比電力)、低コスト化(発電デバイスは地上用を応用)
- 実装方法(アンテナ面への発電素子の搭載)
- 蓄電デバイス
- 耐宇宙環境性→宇宙実証
- 高効率電力制御
- 高電圧技術
- ロータリージョイント
- 集光システム
- 大容量廃熱

赤字: テーザー型SPS(ベーシックモデル)での主要課題

太陽電池の種類とSPS用として有望なタイプ

型	種類	特徴	技術的課題	SSPS用としての評価
バルク型	Si (単結晶、多結晶)	現在の生産の主流	技術的に成熟に近い	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	更なる高効率化 (40%目標) 集光系との組み合わせで低コスト化。但し、集光システムの重量を考慮し、放熱を検討する必要有り。	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 μ 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	効率改善 (10%→12%) 大面積化、安定化、高速製膜、高い歩留まり、ロール化	当面有力であるが性能が低い
	CdTe	構造が簡単で安定性が高い 低コストの可能性	常圧下でのCdTe 膜の形成技術、高品質化、大面積化	資源的制約 (Cd, Te)
	CIGS	高効率、長寿命、耐放射線性に優れる	バンドギャッププロファイルの最適化、均一性	資源的制約 (In) 将来有望
	微結晶シリコン	ハイブリット型での組み合わせ	歩留まりの良い多結晶膜	
	化合物多接合	高効率 (30%)	コスト、放射線性の検証	大面積化、コスト、資源量が課題
	ペブロスカイト系	最大効率 (19.7%)	開発途上	新規、今後の展開待ち

27

課題：無線送電

- 長距離無線送電におけるマイクロ波ビーム制御技術→宇宙実証
- 低コスト/高効率マイクロ波デバイス
- 耐環境性評価 (環境影響/環境への影響)
→宇宙実証

赤字: テーザー型SPS(ベーシックモデル)での主要課題

無線送電の歴史

20世紀初頭	N.Tesla	無線送電のアイデア(無線電力送電実験に挑戦、失敗に終わる)
1964年	W.C.Brown	マイクロ波を用いたヘリコプタへの無線電力送電実験に成功 (米国)
1975年		定点間、大電力送電実験(1マイル、30kW、効率54%)(米国:JPL)
1980年代	SHARP	高高度滞空機への無線送電計画(カナダ:CRC)
1983年	MINIX実験	観測ロケットによる電離層とマイクロ波の相互作用研究 (京大/神戸大/ISAS)
1992年	MILAX実験	マイクロ波駆動小型模型飛行機実験(京大、神戸大、CRL等)
1993年	ISY-METS実験	観測ロケットによるマイクロ波送電実験 (京大/神戸大/ISAS)
1994年～		マイクロ波長期曝露研究施設(電総研、現産総研)
1995年	ETHER実験	飛行船へのマイクロ波送電実験(神戸大学、CRL他)
2006年		観測ロケットによるレトロディレクティブ実証実験(神戸大、東大)
2009年		飛行船からの無線送電(京大)
2009-2014年		無線送電の地上技術実証実験(Jspacesystems, JAXA)

無線送電技術への主な要求

- 超大型アンテナを用いた高精度ビーム制御
 - 直径 2-3km
 - ビーム制御精度 0.0005deg
- 長距離送電
 - 36,000km (電離層/大気)
- 高効率大電力送電
 - GWクラス
 - 効率 50 %以上
- 周波数 S帯あるいはC帯
- 耐宇宙環境
 - 熱構造:軽量な構造
 - 放射線、紫外線、デブリ等

無線送電技術の開発シナリオ

	Target (Commercial)	Ground	Small Satellite	Large Satellite	Plant
Phase	Practical SPS	Continuing project	Space Experiment for WPT	High Power Transmission from space to the ground	Demonstration of Operation
Osci. /Amp.	C Band/S Band	5.8 GHz	5 GHz Band	C Band/S Band	C Band/S Band
Distance	GEO	-100 m	300-1000 km	LEO	TBD
Method	Retro-directive method with pilot signal.	verifiable	verifiable	verifiable	verifiable
Accuracy	0.0005 deg	0.5-1.0	0.5-1.0	~0.01	~0.001
Loss/effi.	Power Transmitting eff.: 50 % or more Propagation Loss: less than several %	NA	NA several %	-% several %	several 10 % several %
Environment	Atmosphere/ ionosphere	Atmosphere	verifiable	verifiable	verifiable
Power	Transmitting Power: 2 GW	1.6kW	Around: 2kW	100 kW or more	MW or more
Power density	100-1000 W/m ²	NA	1000 kW/m ² (ionosphere)	verifiable	verifiable
Size	Antenna:2-3km sq. Multi-connected structure	1.2 m sq.	- m/ rigid antenna	Several 10m Multi-connected structure	Several 100 m or more

31

課題：構造・建設

- 超軽量大型宇宙構造
- 輸送回数のより少ない構造様式
- 形状維持
- 大型構造物の機能の検証→宇宙実証

赤字：テザー型SPS(ベーシックモデル)での主要課題

地上での技術開発

- デバイス開発
 - ◆ 機能性能の向上
 - ◆ 耐宇宙環境性評価と耐宇宙環境仕様化
- システム開発
- システム試験と地上応用の検討/評価
 - ◆ 無線送電の地上試験
 - ◆ 無線送電の宇宙実証の事前検証実験/応用確認試験
 - 垂直方向送電実験(クレーン、気球、小型飛翔体)
 - 高高度飛翔体への無線給電(成層圏飛翔体)

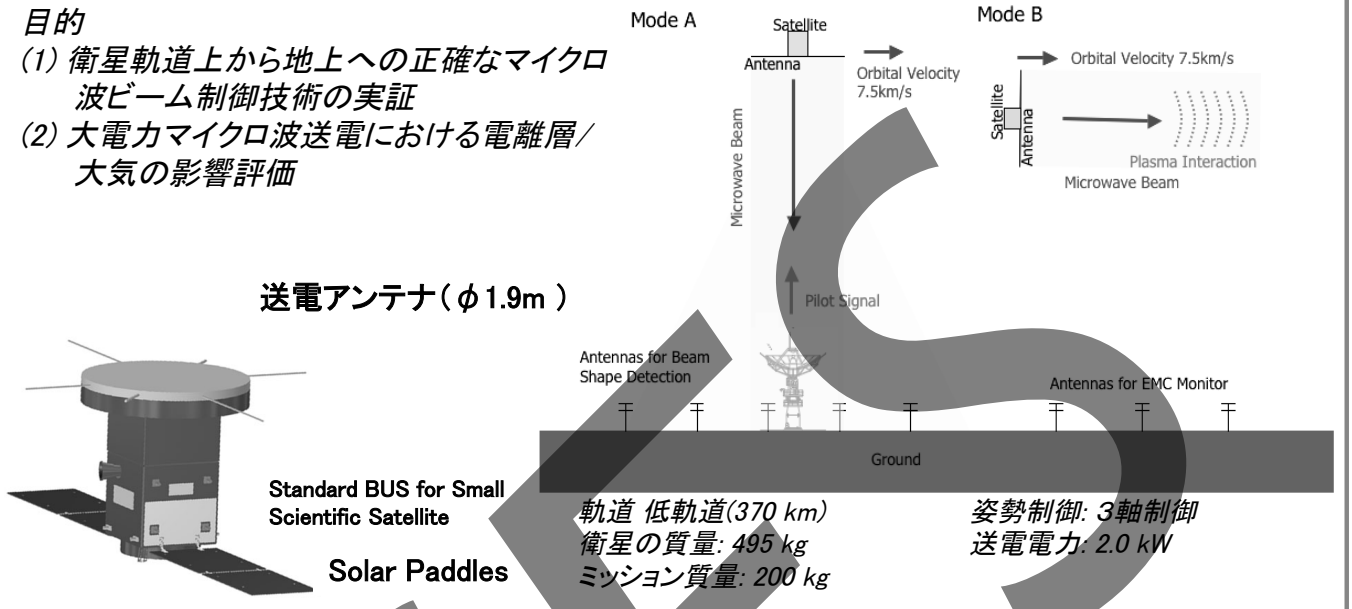
宇宙技術実証

ミッション	検証内容	事前に必要な検証技術	プラットフォーム
要素技術検証 小規模/小型	<ul style="list-style-type: none"> ・部品コンポーネントの検証 ・電離層影響評価 ・無線送電:衛星軌道-地上 ・物資の供給と建設技術、制御技術 ・軌道遷移用スラスタ ・テザー技術 ・組立メンテナンスロボット技術 	要素技術の地上実証: <ul style="list-style-type: none"> ・部品コンポーネントの耐宇宙環境試験(地上) ・無線送電 ・構造の基礎技術 ・ロボット技術 	気球 観測ロケット、 小型ロケット(小型衛星)
技術応用 ・成層圏プラットフォーム ・定点間無線送電	<ul style="list-style-type: none"> ・高高度飛翔体への電力供給 ・離島、特殊地形 		
大電力実験 大型衛星実験	<ul style="list-style-type: none"> ・大電力長距離無線送電 ・テザー姿勢制御 ・受電 	<ul style="list-style-type: none"> ・長距離無線送電 ・パネル展開 ・大型パネル構造維持(テザー技術) 	大型ロケット1機
低軌道プラント実証	<ul style="list-style-type: none"> ・システム検証 ・建設技術、シナリオ検証 	<ul style="list-style-type: none"> ・大型パネル構造構築技術 	大型ロケット数機
SPS固有の輸送系検証 プラントの軌道間遷移	軌道間輸送ユニットの結合と輸送実証	<ul style="list-style-type: none"> ・電気推進または代替技術 	大型ロケット1機
静止軌道商業衛星		<ul style="list-style-type: none"> ・低コスト輸送システム 	採算ベースの事業

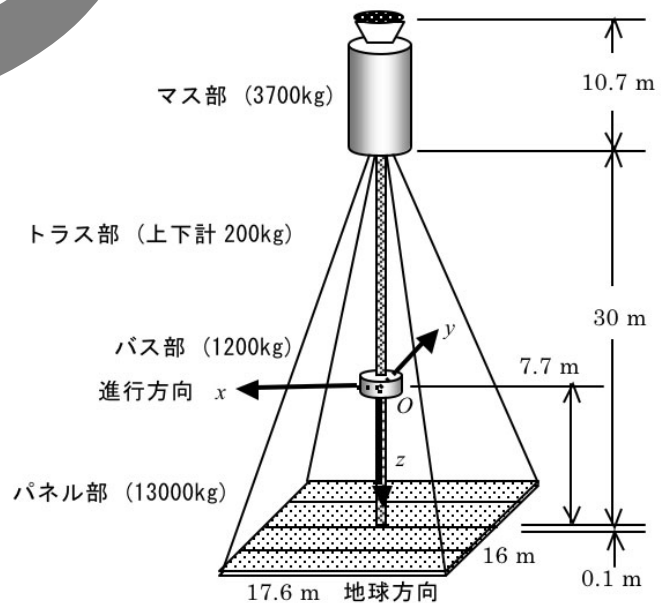
小型衛星を用いた太陽発電 衛星実証実験計画

目的

- (1) 衛星軌道上から地上への正確なマイクロ波ビーム制御技術の実証
- (2) 大電力マイクロ波送電における電離層/大気の影響評価



100kW級大型ロケットを用いた検討



まとめ

- エネルギー/環境は人類社会の大きな課題である。
 - 自然エネルギー利用が進められているが、大規模導入には課題がある。
- 地上での太陽光利用に加え、衛星軌道をエネルギー取得の場として利用できれば、より有効な太陽光利用が実現できると期待できる。
- 無線送電技術により、衛星軌道上に発電所を建設することが可能と考えられる。
 - 無線送電を用いることにより、衛星軌道上から安定したエネルギー供給が可能となる。
- 太陽発電衛星の技術課題に関する地上技術実証は数十年に渡り進められ、宇宙技術実証に着手可能な技術レベルに達していると考えられる。
 - 宇宙技術実証への着手は、太陽発電衛星実現の大きな一歩であり早急に着手すべきである。