

宇宙エネルギーシステム： 宇宙太陽光発電所(*SPS*)



自己紹介(佐々木 進)

1975年に宇宙航空研究所(現在の宇宙科学研究所)に入所、10年前にJAXA退職
在職中は以下の研究に従事

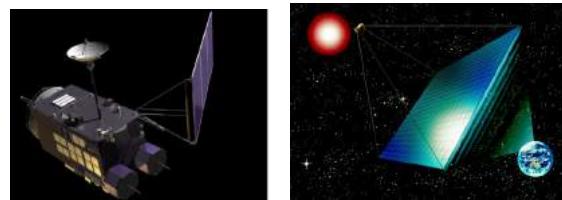
観測口ケット、スペースシャトルでの
オーロラ生成実験(SEPAC)



宇宙実験プラットフォームSFU等での
飛翔体宇宙環境研究



宇宙太陽光発電所の研究
月探査ミッション“かぐや”に参加



現在は(公財)宇宙科学振興会(若手
研究者支援)に非常勤勤務



宇宙太陽光発電所(SPS)の紹介

1. エネルギー問題と地球環境問題
2. 概念と特長
3. 研究の歴史
4. 必要な技術
5. 必要な宇宙輸送系
6. 安全性・環境への影響
7. 研究開発状況と実現へのロードマップ



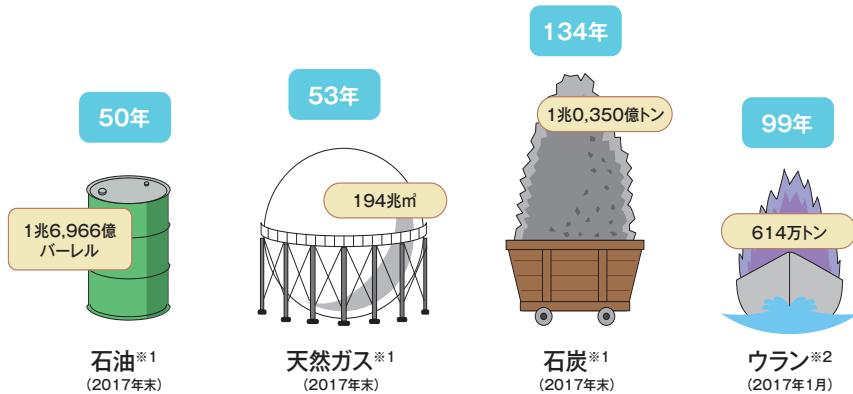


1. エネルギー問題と 地球環境問題

私たちが直面するエネルギー問題と地球環境問題

現在のエネルギー資源には限りがある

世界のエネルギー資源確認埋蔵量



(注)可採年数=確認可採埋蔵量/年間生産量
ウランの確認可採埋蔵量は費用130ドル/kgU未満

1-1-6

出典: (※1) BP統計2018. (※2) OECD-IAEA「Uranium 2018」より作成

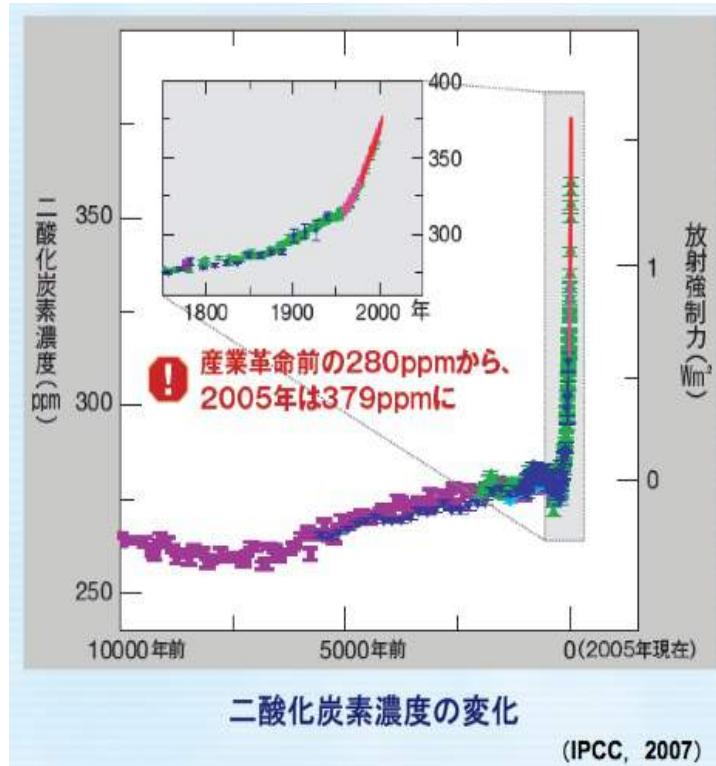
原子力・エネルギー図面集

出典: 日本原子力文化財団

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100~150年で使い切ろうとしている。

石油、石炭、天然ガスなどの燃焼によるエネルギー獲得は地球環境の悪化をもたらす

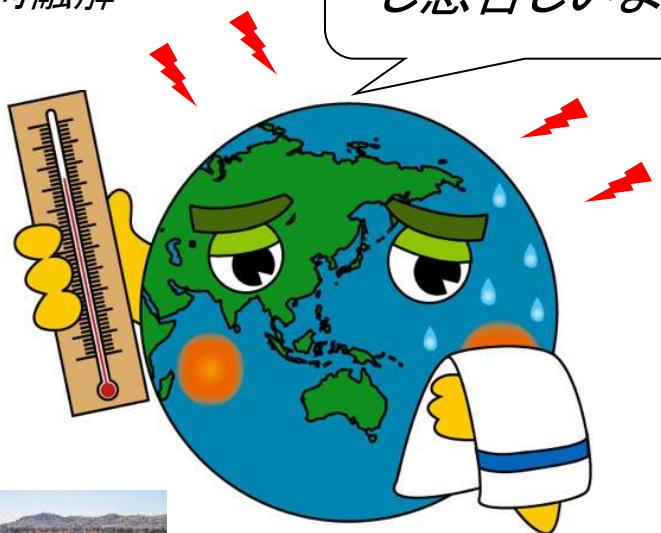


▶ 私たちには持続的でクリーンな新しいエネルギー・システムが必要である

地球環境問題: 人類は地球にとってウイルス?



氷河融解



地球



砂漠化



他の惑星

► 地球にとってはこれで良いとしても、人類にとってこのようなことにならないために…

2. 概念と特長

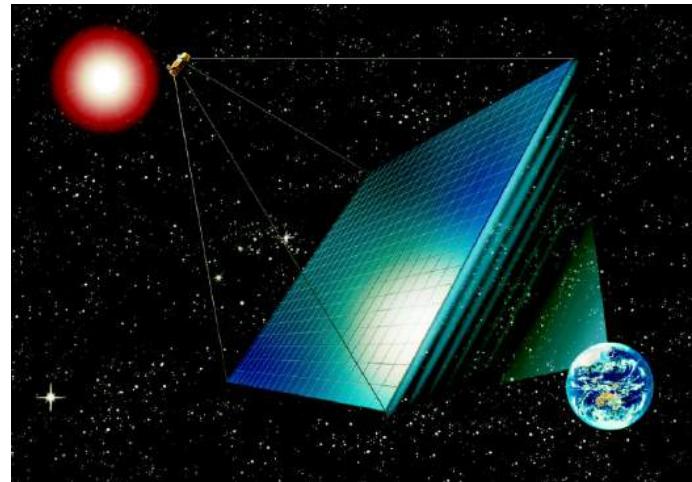


宇宙の太陽光発電所とはどのような構想か？

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

- ▶ 非常に単純なコンセプト:
 - ・太陽電池パネルを小さく折りたたんで
宇宙に運ぶ。
 - ・宇宙で組み立てる。
 - ・発生した電気は電磁波で地上に送る。

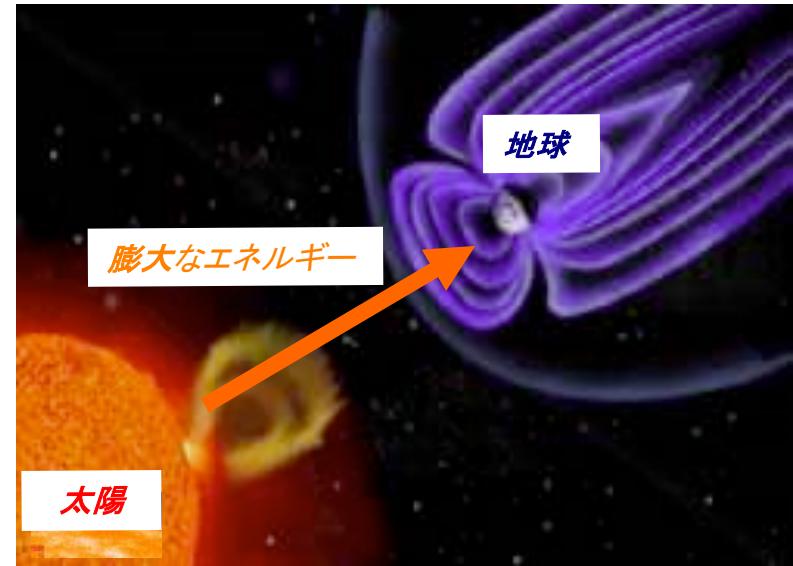
なぜ、宇宙の太陽光発電所を考えるのか？

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)。



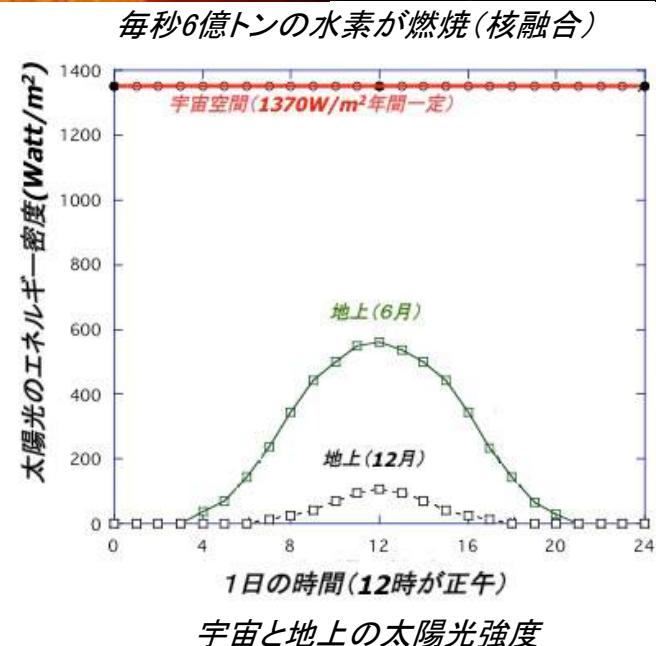
何故宇宙か？

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

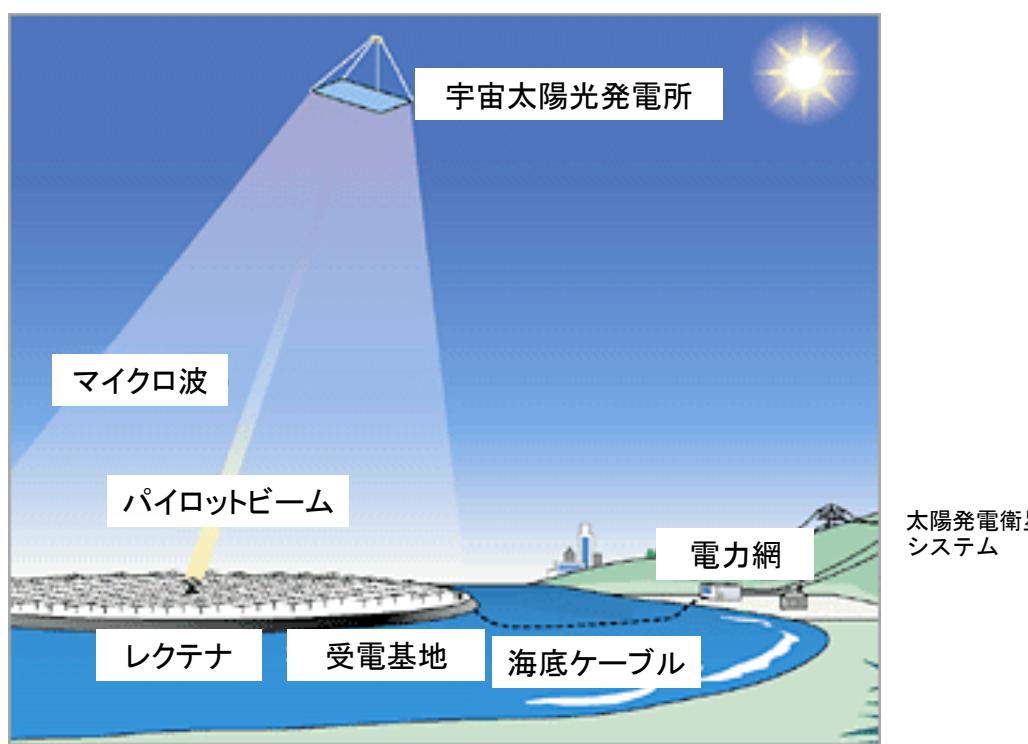
地上での太陽光の年間平均エネルギー密度は $100 \sim 200 \text{ W/m}^2$

理由: 夜の存在、曇天・雨天の存在、大気による減衰

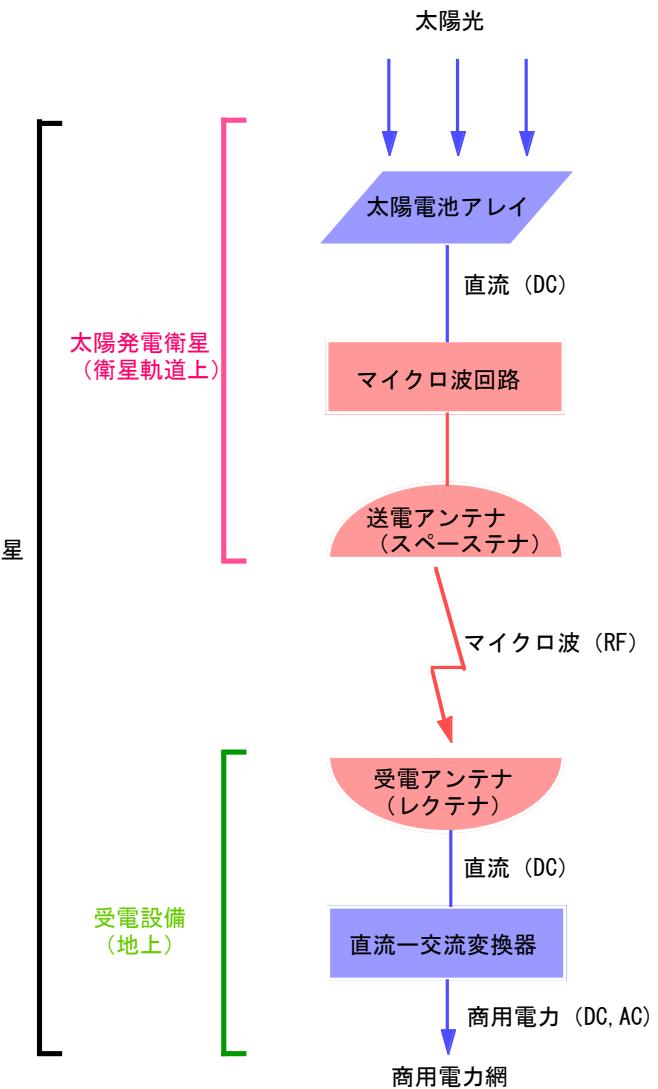
▶ 宇宙空間から地上への効率の良い電力伝送が可能であれば、宇宙空間を太陽エネルギー取得の場として利用することが有利。



宇宙の太陽光発電所の構成



►衛星軌道上で太陽エネルギーを電力に変換し、その電気エネルギーを無線(マイクロ波やレーザー)で地上に送電する。地上では、無線送電された電力を受電し、商用電力に変換して既存の電力網を通じて家庭や工場などの利用者へ配電する。



宇宙太陽光発電所で十分なエネルギーが得られるのか？

—エネルギーフローの検討例—

事項	NASA リファレンス システム ³⁾	USEF マルチテザーモデル (蓄電タイプ) ⁴⁾	JAXA 2004 年度 検討モデル ⁵⁾
集光効率	—	—	90
発電効率	17.3 (Si)	35	17.3
集電効率 (太陽電池での収集)	93.7	57	93(文献 ⁵⁾ では 93%が (裏パネルの太陽電池充填率 0.9、ピークの 1/4 までの発電は 保温に使用し送電に寄与しな い、充放電効率は 0.9 を仮定) 参考文献 ⁴⁾ では、この項 55.5% を仮定
集電効率 (Rotary Joint)	99.95	0.94(ケーブル集電効 率) x 0.95 (DC/DC コン バーター効率) = 89%が 正しいと思われる)	
集電効率(アンテナでの配電)	96.3		
蓄電効率	—	—	—
DC-マイクロ波変換効率	85.00	85	75
アンテナ系効率	96.53		
大気透過率	98.00	97	98
レクテナのエネルギー収集	88.00	90	76
マイクロ波-DC 変換効率	89.00	85	
商用電源網への接続効率	97.00	95	
総合効率	9.53	12.6	7.7

- ▶ 宇宙での太陽光エネルギーの平均強度は、地上の5~10倍であることを考慮すれば、宇宙太陽光発電の総合効率は地上発電よりも高くなる。

宇宙太陽光発電所は十分なエネルギーを生み出すのか？ —エネルギーペイバックタイムの試算例—

エネルギーペイバックタイムとは、エネルギーシステムの建設に要したエネルギーを、何年かかるか回収できるかの指標。

システム	SPS	SPS	地上システム
モジュールの製造場所	地球上	月面	地上
投入エネルギー [10^9 MJ] (A)	5 3	3 7	8. 2
モジュール製造 [10^9 MJ]	2 2	2 2	8. 2
モジュール輸送 [10^9 MJ]	3 1	5. 1	-
年間発電量 [10^9 Wh/年]	7. 8 8	7. 8 8	1. 2 3
一次エネルギー換算 [10^9 MJ/年] (B)	7 6. 7	7 6. 7	1 2. 0
EPT [年] (=A/B)	0. 6 9	0. 3 5	0. 6 8

山田興一、加藤和彦、第1回SPSシンポジウム、第1回宇宙太陽発電システム(SPS)シンポジウムプロシーディングス、頁39-48

► 宇宙太陽光発電のエネルギーペイバックタイムは1年以下と解析されており、40程度とされる宇宙太陽光発電システムの寿命と比較し十分小さい。

宇宙太陽光発電所はクリーンなのか？

—各種電力システムのCO₂発生量の比較—

(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

吉岡完治、菅幹雄、野村浩二、朝倉啓一郎、SPSのCO₂負荷計算-NASA/DOEリファレンスシステムに基づいて-
第1回宇宙太陽発電システム(SPS)シンポジウムプロシーディングス、頁29-38

- ▶ 宇宙太陽光発電は、化石燃料を用いた発電に比較した場合、CO₂負荷が數十分の一以下であると解析されている。

宇宙太陽発電所は経済的に成立するのか？

—主なSPSモデルの電力コストの試算例—

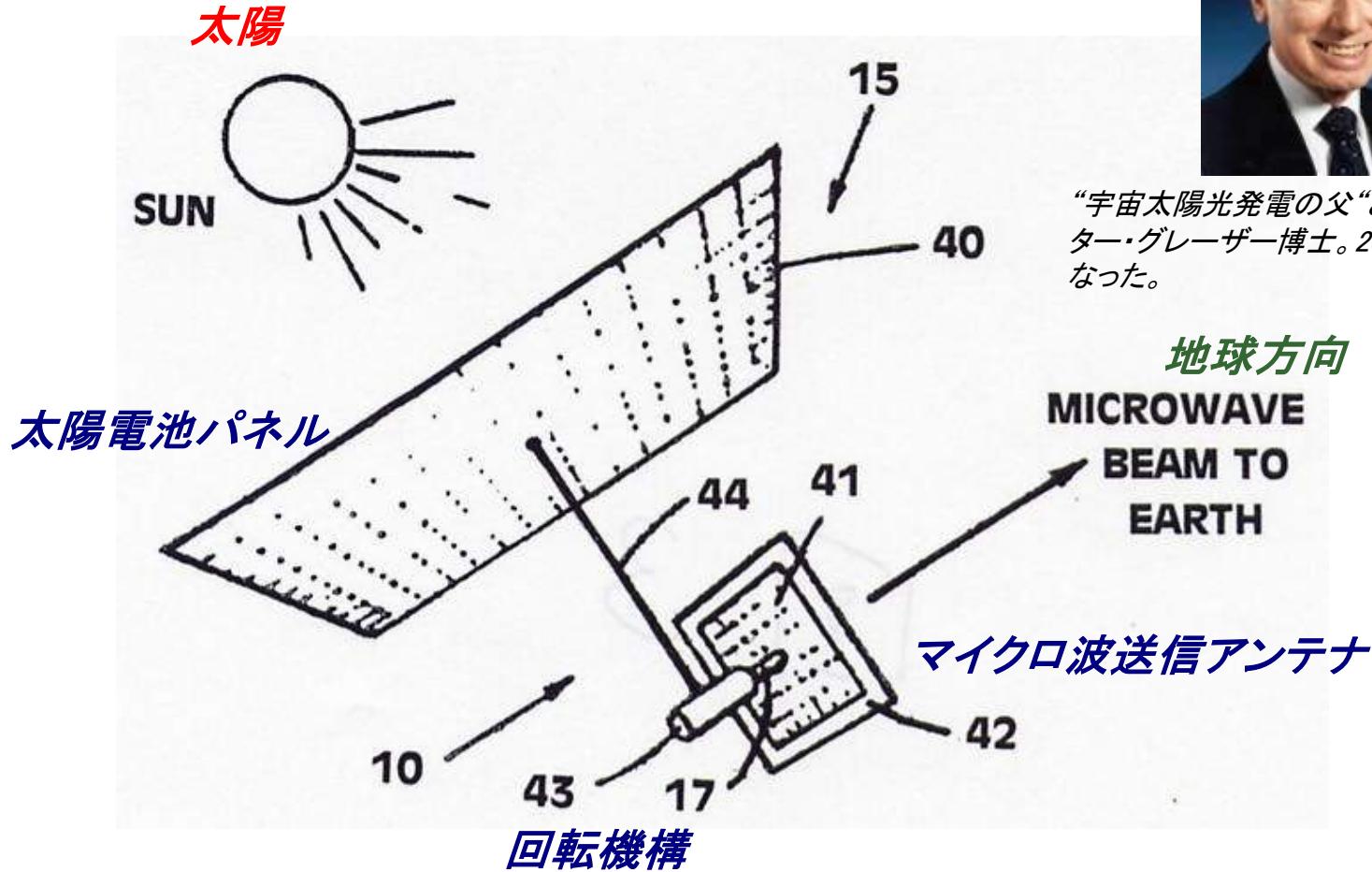
モデル名	報告	寿命	総額	電力コスト	EPT
NASA リファレンスシステム	1980	30 年	12B \$(1977 年 \$ ベース)	4¢/kwh	-
NEDO グランドデザイン	1994	30 年	2 兆 4 千万円	23 円/kwh	2 年
NASA Fresh Look Study (Sun Tower: ST, Solar Disc; SD)	1997	40 年	ST:35~40B \$(3.5~ 4GW) SD:150B \$(30GW)	ST:4¢/kwh SD:2¢/kwh	-
NASDA 1998 年度検討モデル	1999	30 年	2 兆 7 千億円	23.2 円/kwh	5 年
JAXA 2004 年度検討モデル	2005	40 年	1 兆 2657 億円	8.6 円/kwh	1.23 年
USEF マルチテザーモデル	2008	40 年	1.3~2.1 兆円	9.3~15.9 円/kwh	-
SPS-ALPHA(DRM-4)	2012	>30 年	12.2B \$	15¢/kwh	-

► 宇宙太陽光発電の電力コストは、部品として民生品を使用し、宇宙輸送コストを現在の $1/(20 \sim 30)$ 程度にすることにより、他の地上の発電システムの電力コストに近い値になりうることが解析で示されている。

3. 研究の歴史



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・グレーザー博士。2014年5月末亡くなつた。

発案者ピーター・グレーザーの特許公告（1973年）

宇宙太陽光発電所の研究の歴史的な流れ

1968年

米国ピーター・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力プラント”

1975～76年

米国ビル・ブラウンらによるマイクロ波送電のデモンストレーション

1977～80年

NASA/DOE(US Department of Energy) リファレンスシステム設計と評価研究

1980年

米国でのシステム的研究は中止

1983年

日本の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)

1986年

最初のSPS国際シンポジウム(パリ)

1990年代

環境問題のたかまり、エネルギー資源の必要性から世界的に再注目

1990年～2000年

日本の宇宙科学研究所(現JAXA)による太陽発電衛星SPS2000設計研究

1992年～1994年

日本のMRI(NEDO)による宇宙発電システムに関する調査研究1GWデザイン

1993年

日本のISY-METS実験(観測ロケットによるマイクロ波送電実験)

1994年～2011年

日本のマイクロ波長期曝露研究施設による研究(電総研、現産総研)

1995年～2004年

NASA研究再開

1998年～

日本のNASDA(文科省系、現JAXA)調査研究開始

2000年～

日本のUSEF(経産省系、現Japan Space Systems)

調査研究開始

2002年～2004年 ESA SPS調査研究

2007年

URSI(国際電波科学連合)によるSPS白書

2009年

日本政府の宇宙基本計画に宇宙太陽光発電の研究開発を明記

2010年頃～

中国でのSPS研究が本格的にスタート

2011年

IAA(国際宇宙航行連盟)によるSPSの評価報告書

2019年～

米国での小規模実証実験が始まる

ヨーロッパ(英国など)での研究検討再開

2022年～

日本での小型衛星によるSPS実証実験計画スタート

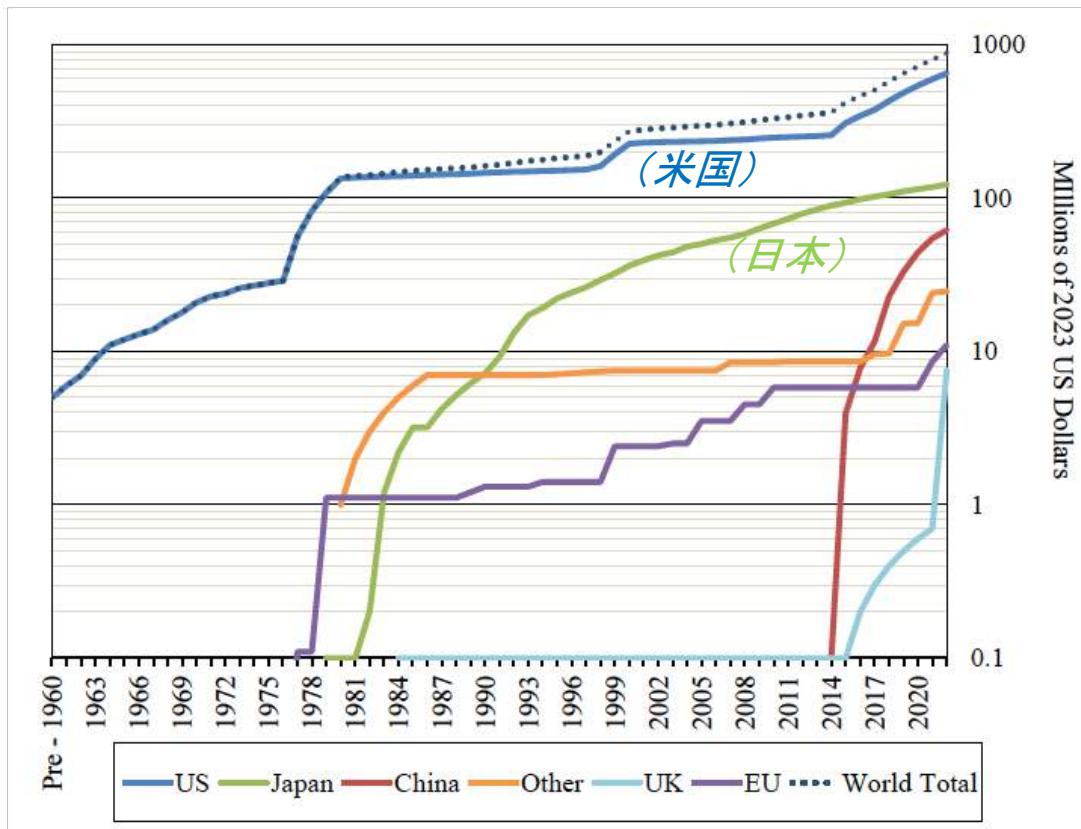
我が国のSPSの研究を立ち上げたお二人



東の長友信人

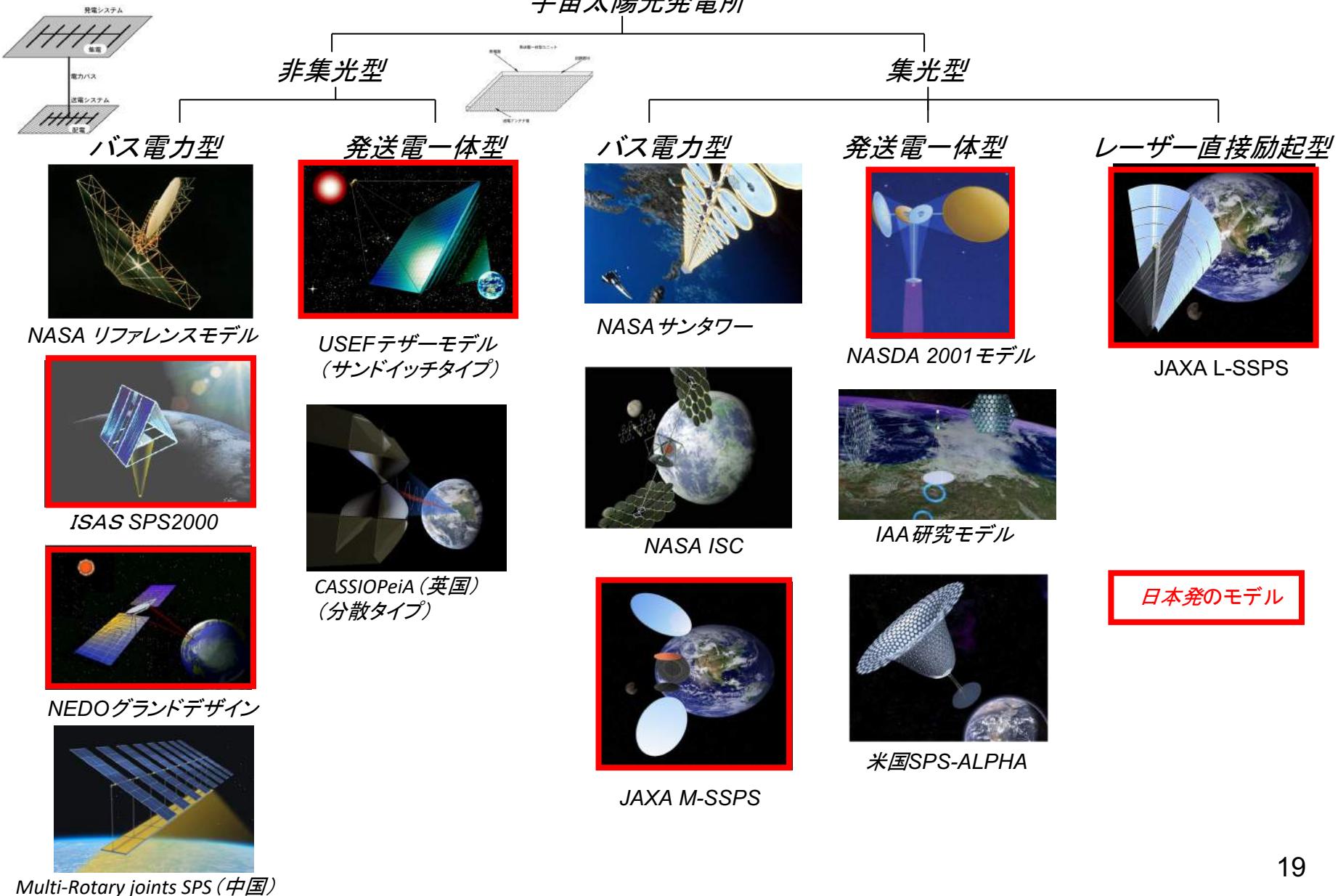
西の松本紘

世界各国(地域)の2022年までのSPS研究投資総額



最近の国際会議での報告 (Kevin Barry, *State of the Industry Report on Investment and Development of Space Solar Power, IAC-23-C3.1, 74th IAC, Baku Azerbaijan, October, 2023*) によれば、これまでのSPSへの研究資金は主要国の総額で約880億円。そのうち米国(青色)が75%。我が国(緑色)は第2位(100億円をやや超えている)ではあるが、研究資金の起伏が大きく継続性という点では单発的であった米国に対し、継続的な研究開発資金により研究開発を途切れなく行なってきた我が国のSPSの技術力は、現在では世界をリードするレベルとなっている。

SPSの種類(一定のシステム検討がなされたモデル)



代表的な宇宙太陽光発電所のモデルの総重量と出力比重 量の比較

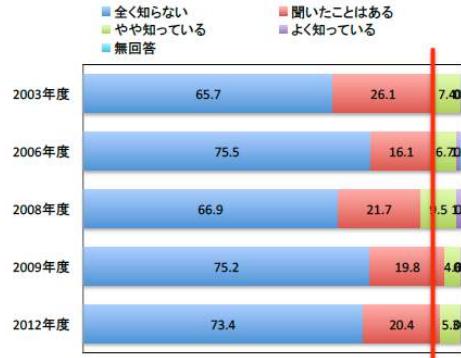
フェーズ	モデル	軌道上出力	重量	比重量
実用	NASA リファレンスシステム	6.5 GW	50000 トン	7.7 g/W
実用	NEDO グランドデザイン	1.3 GW	20,000 トン	15.3 g/W
実用	JAXA M-SSPS モデル	1.34 GW	9907 トン	7.4 g/W
実用	USEF テザー-SPS	1.32 GW	26500 トン	20 g/W
実用	SPS-ALPHA	500 MW (地上出力)	11800 トン	23.6 g/W (対地上出力)
実用	<i>Sun Tower(GEO)</i>	1.2 GW	22300 トン	19 g/W
実用	<i>Integrated Symmetrical Concentrator</i>	1.2 GW	18000～31500 トン	15g/W～26g/W
実用	<i>European Sail Tower</i>	275 MW	2140 トン	7.8 g/W
実証	SPS2000 ⁴⁾	10 MW	240 トン	24 g/W
実験	テザー-SPS 軌道上実証実験モデル	420kW	18.1 トン	43g/W
実験	小型衛星マイクロ波送電実験モデル	3.8kW	500kg	132g/W

▶ 将来の実用モデルについては、概ね10 g/W～20 g/W の設計値となっている。近未来の実験モデルは小型のため比重量が大きい(同じ出力に対し必要な衛星重量が大きい)。

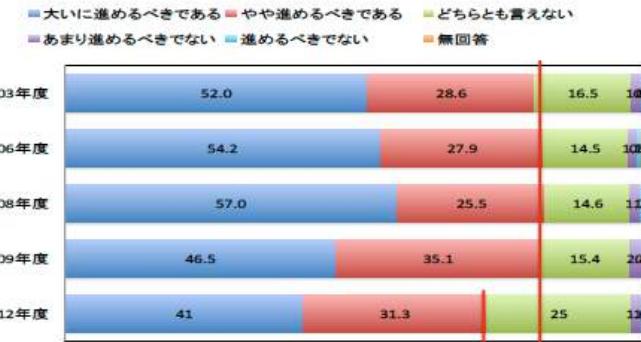
宇宙太陽光発電所の認知度と実現性

▶ 2003年から2012年まで5回にわたりJAXAで行われた宇宙太陽光発電所の認知度と必要性についてのアンケート結果。一般の人にほどんど知られていない(65-75%の人が知らない)が、その概念については好意的である(70-80%)。

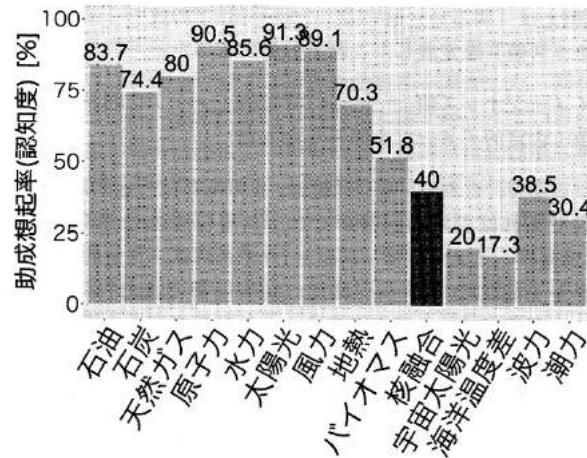
宇宙太陽光発電システム(SSPS)についてあなたは知っていますか



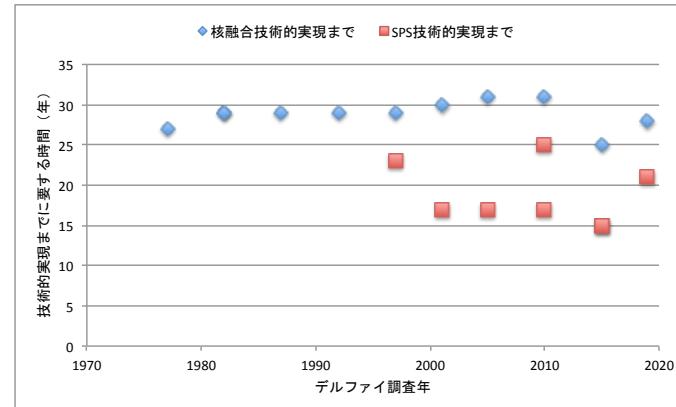
宇宙太陽光発電システム(SSPS)の研究開発を進めていくべきだと考えますか



▶ 科学技術関係者アンケート調査(デルファイ調査、2005～2019)では、宇宙区分の他の課題と比較して、重要度が低く実現しないと判断した人が多い。



▶ 核融合研究者が実施したアンケートでの各種エネルギー源の認知度。核融合と比べ宇宙太陽光発電所の認知度は低い。



▶ デルファイ調査における宇宙太陽光発電所と核融合(慣性核融合は除く)の実現までに要する時間の比較。科学技術の専門家は宇宙太陽光発電所の方が早く実現すると考えている。

4. 必要な技術

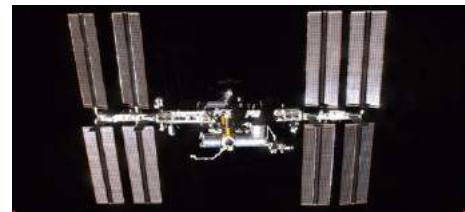
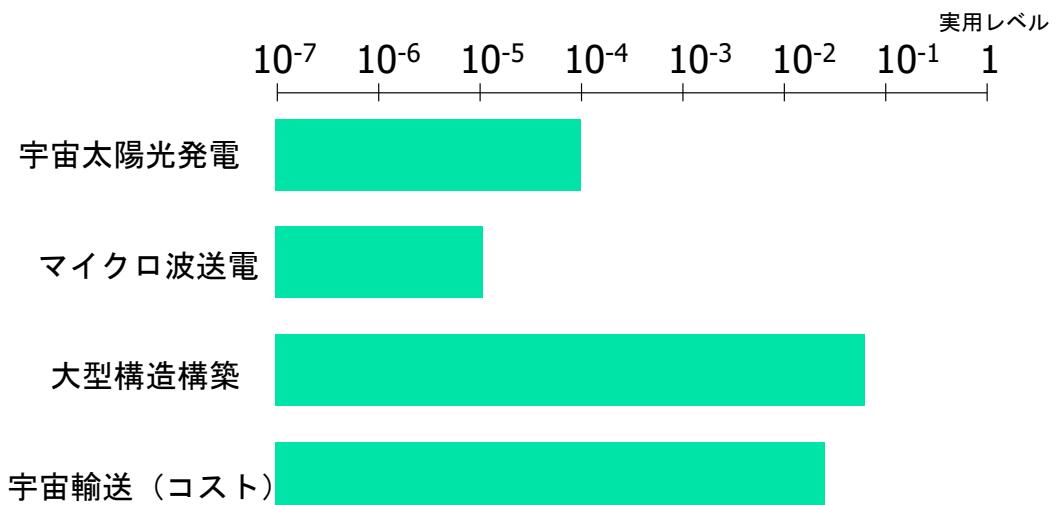


宇宙の太陽光発電所実現のために必要な主な技術 (目標と現在の到達点)

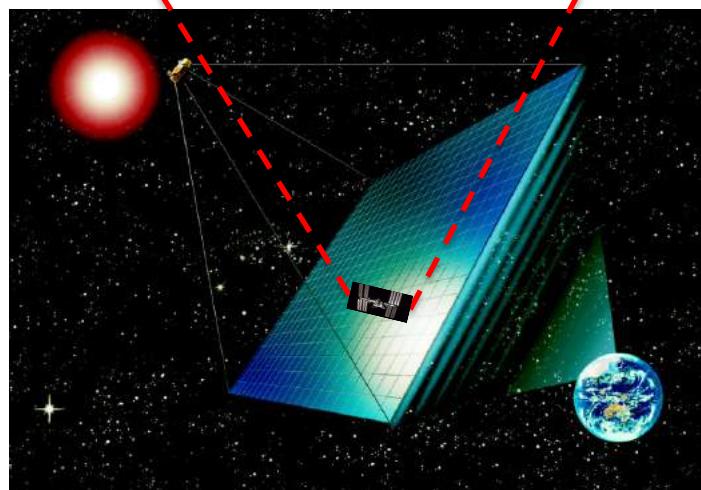
1GW=30～50万世帯分

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	～50万円/kg	2万円/kg	1/25

実用レベルを1とした時の現在の到達度(規模・コスト)



国際宇宙ステーション 100m サイズ

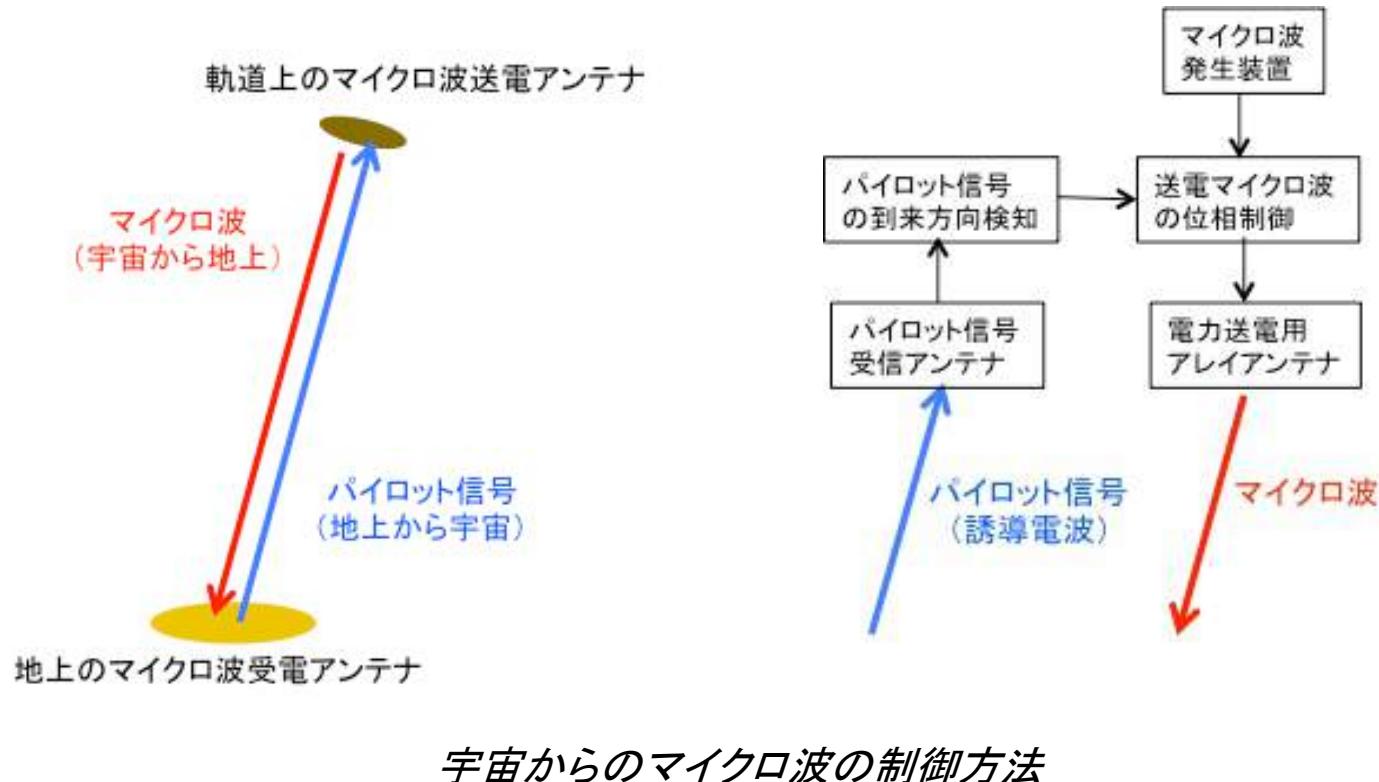


100万kW級太陽発電衛星 1-2 km サイズ

▶ 必要な技術の原理的な検証はすでに終わっている。大型化と低コスト化が課題。

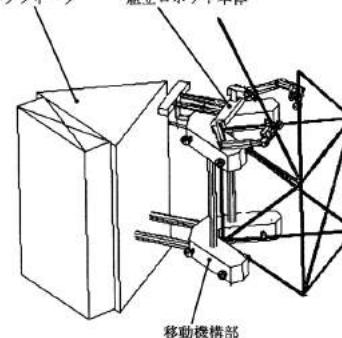
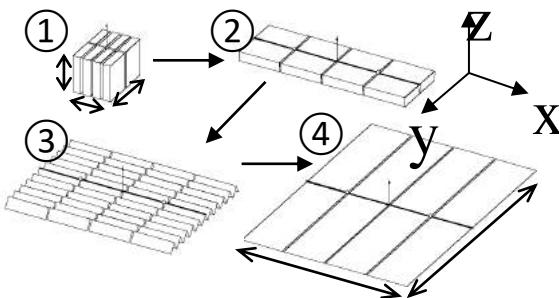
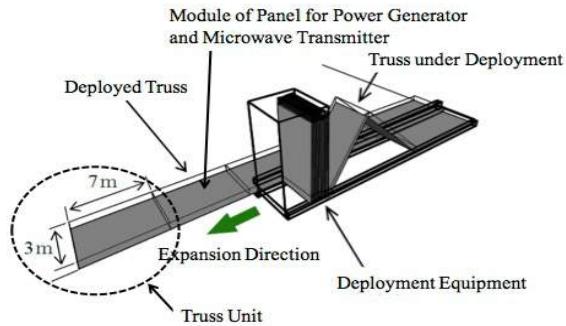
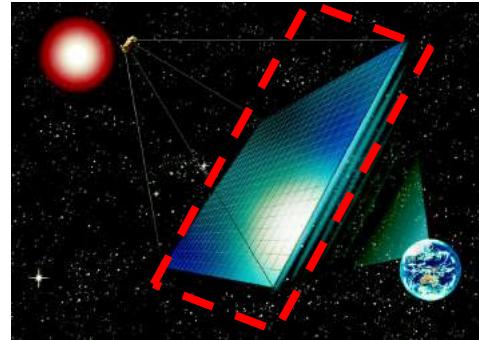
マイクロ波送電技術

宇宙太陽光発電所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(レトロディレクティブ制御)。1km離れて10cmのために1cmの精度で指向することに相当。

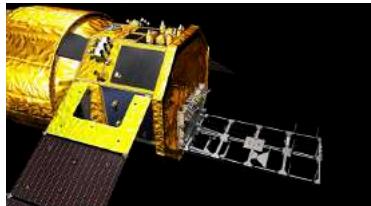


宇宙に大型の構造物を構築する技術

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。厚みのある大型パネルが基本的構造。このための、SPS用の宇宙空間での建築方法の案が試作・試験されている。

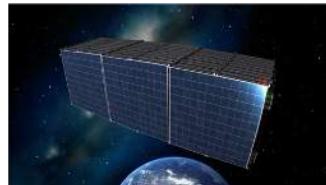


▶ パネルを組み立てながら展出する展開方式



SPS用展開型軽量平面アンテナの軌道上実証DELIGHT(JAXA 研究開発部門)

▶ 自動で自己展開する展開方式



SPS用自己展開方式(JAXA ISAS)

形状記憶素子を用いた展開駆動



▶ ロボットによる建設方式



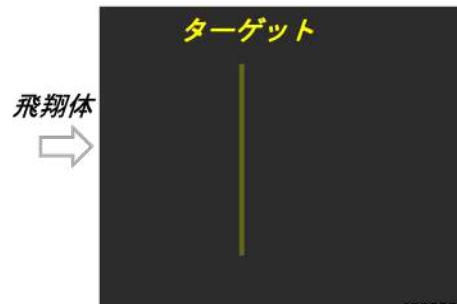
自動組立装置(ビームビルダー)

宇宙塵や宇宙ゴミの超高速衝突への対処

一衝突は不可避なので衝突破壊の規模を調べ設計で対応する

静止衛星軌道でのパネル状構造物への衝突頻度は、 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

超高速衝突では爆発的破壊を生じ、衝突体のサイズよりはるかに大きな損傷を生じる。

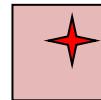
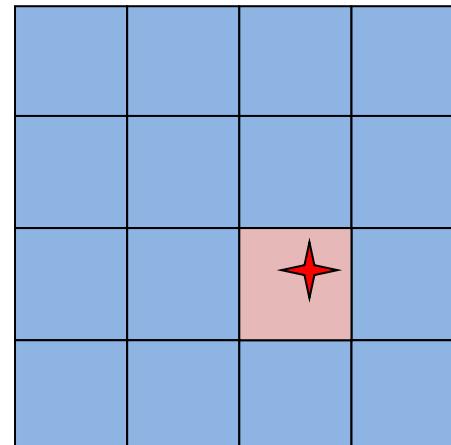


超高速衝突実験



薄板の衝突破壊の例

► モジュール化設計例:
太陽電池のモジュールサイズを
0.5m x 0.5m とし、1mm 以上のサイズの高
速体が衝突した場合、機能障害は生じ
るが破壊は1モジュール内にとどまるよう
に設計した場合、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。



超高速衝突で破壊
されたモジュール

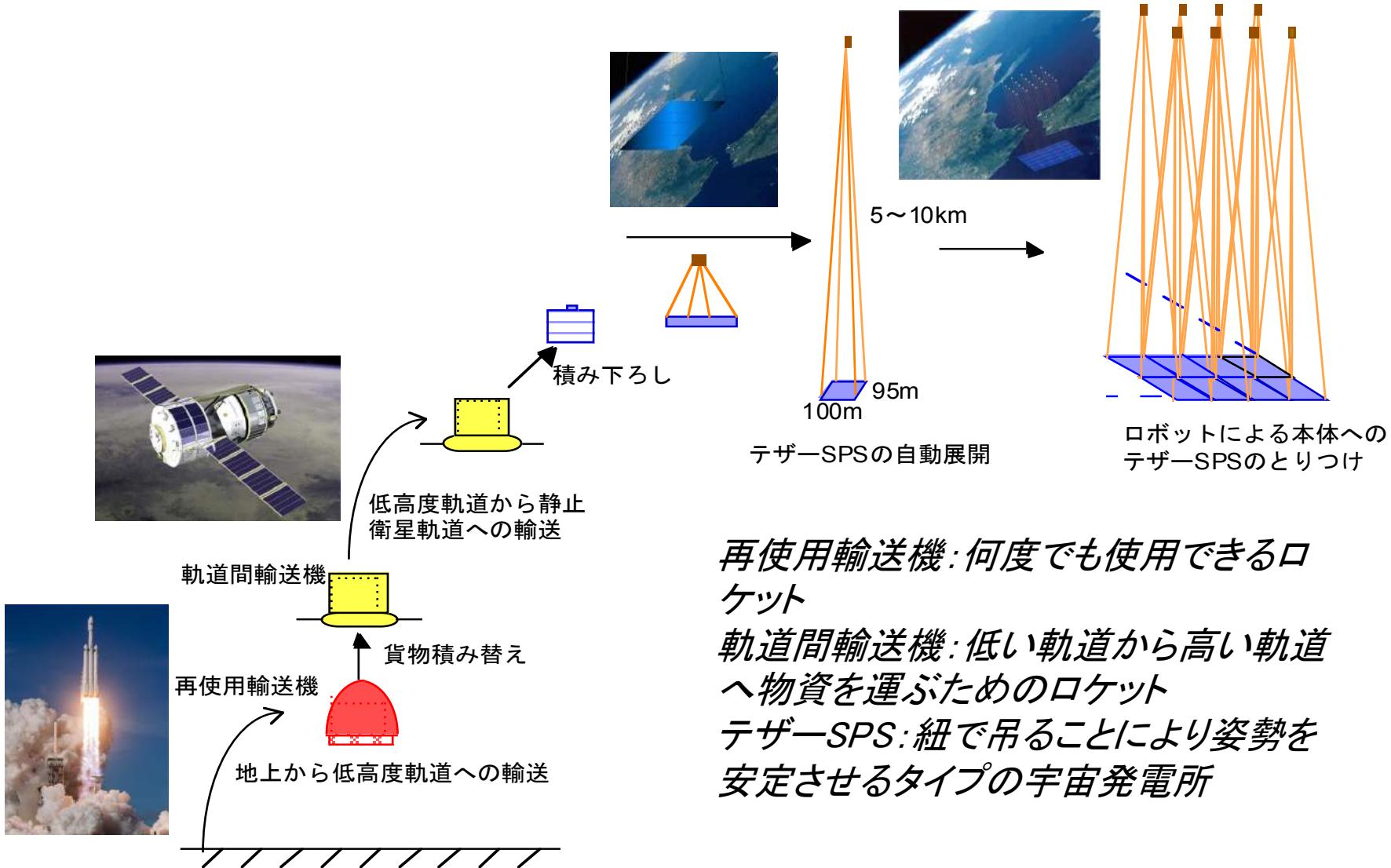


健全なモジュール

5. 必要な宇宙輸送系

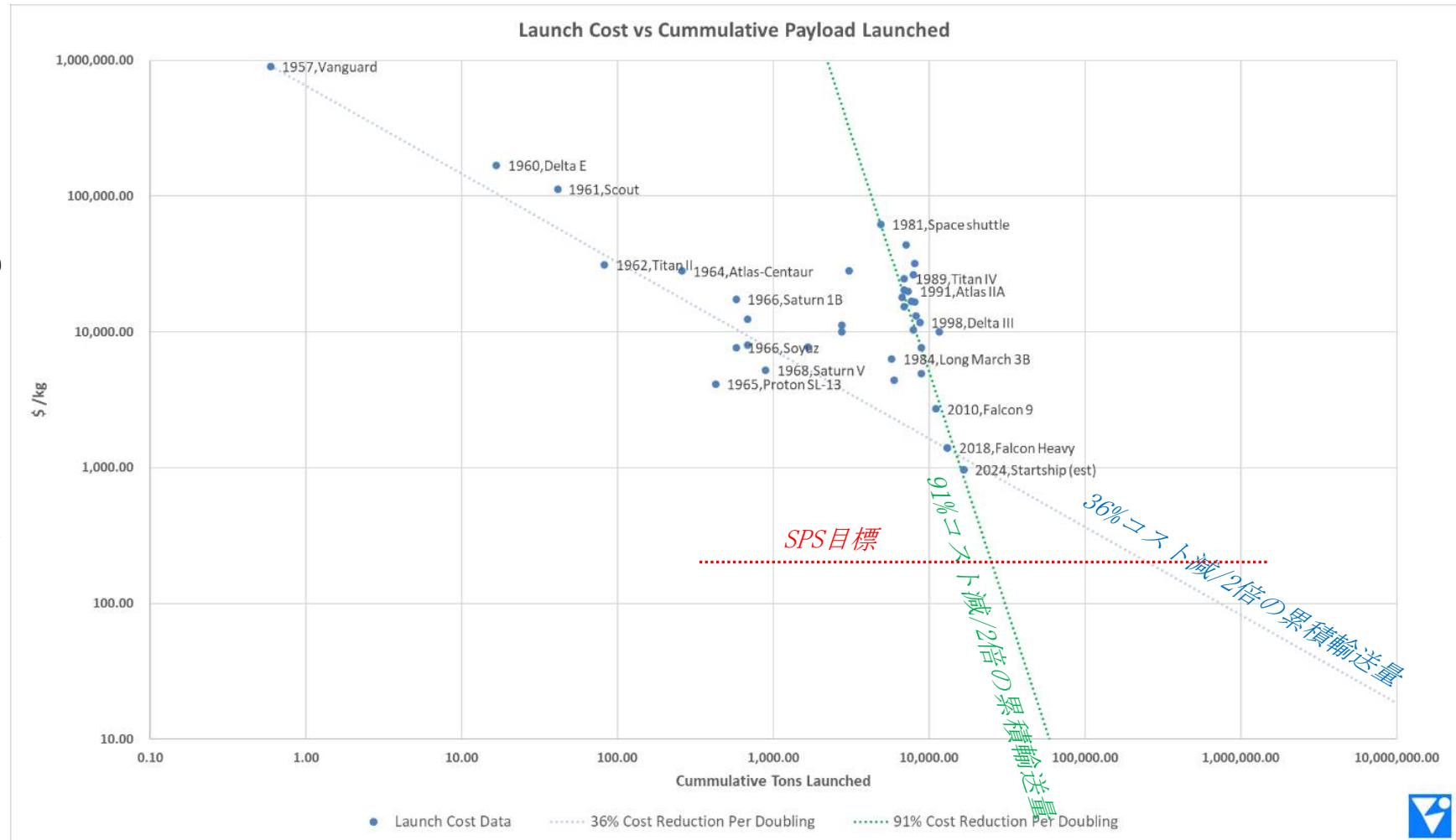


宇宙の太陽光発電所の建設シナリオ —テザー型SPSの例—



ロケット打ち上げのコストの現状と将来

輸送コスト \$/kg



累積輸送量 (トン)



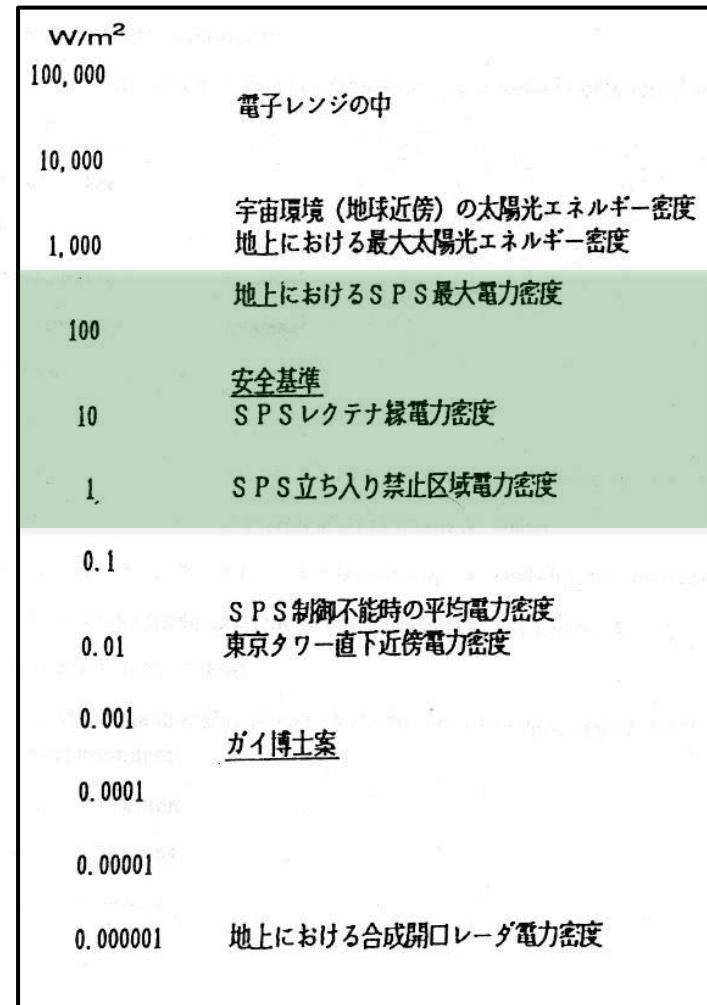
6. 安全性・環境への 影響

マイクロ波の安全性

- 我が国及び国際的な安全基準にしたがって、基準以上の強度領域は立ち入り禁止区域とし、さらに安全をみて基準の1/10までの領域を原則立ち入り禁止区域とすることが考えられている。立ち入り禁止区域外の電波強度は携帯電話とほぼ同じかさらに小さい。
- 立ち入り禁止区域内でも最大の電力強度は太陽の光強度程度なので、一時的に侵入する鳥などへの影響はないと考えられる。
- 何らかの故障でマイクロ波が受電所を外れそうになつた場合は直ちにマイクロ波の送電を停止する制御が可能である(誘導電波制御はfail-safe)。

国・機関名	一般公衆への曝露		職業者への曝露	
	電界強度 (V/m)	電力密度 (mW/cm ²)	電界強度 (V/m)	電力密度 (mW/cm ²)
郵政省電気通信技術審議会 [日本] 1990、1997	61.4	1 (一般環境)	137	5 (管理環境)
ANSI／IEEE [米] C95.1-1999	—	3.87 (非管理環境)	—	10 (管理環境)
ICNIRP 1998	61	1 (公衆曝露)	137	5 (職業曝露)

マイクロ波の防護指針値(5.8GHzの例)。日本及びICNIRPの指針値は2.45GHzでも同じ。



マイクロ波の人体及び社会インフラ・生態への影響に対する基本的な考え方

マイクロ波の電力伝送としての利用には、ITU(国際電気通信連合)から電力伝送の業務として使用する周波数を新たに割り当ててもらう必要がある。マイクロ波の生体及び社会インフラ・生態への影響に対する基本的な考え方は以下のようにまとめることができる。

(1) 人体への影響

国際的な防護指針に従い、1mW/cm²以上の領域を立ち入り禁止の管理区域とする。

(2) 通信インフラへの影響

同一周波数の通信インフラとは共存が困難なので、ITUから電力伝送用として専用の周波数の割り当てを受ける必要がある。高調波については、その位相が揃わないような送電システムとし、高調波での干渉を回避する。

(3) 既存の社会インフラへの影響

航空機、衛星については、ビーム内飛行(短時間)に支障がないようフィルターの挿入などの措置をとる。地上で使用する電子機器については原則として措置不要。ただし、医療施設などで考慮が必要な場合があれば、受電施設との距離をとることで対処。

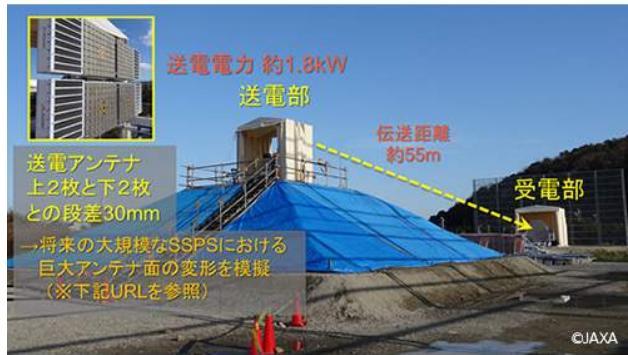
(4) 生態への影響

ビーム内での生態への影響は(植物及び移動の少ない地表動物については長期曝露、鳥や昆虫など移動の多い動物については短期曝露)については、太陽光レベル(100mW/cm²)程度では問題ないと現状では考えられている。レクテナ下への生態への影響については、受電効率(80%以上)を考えればマイクロ波の影響は小さい。むしろレクテナの直下で太陽光が遮光される影響が重要と思われるが、レクテナの太陽光透過率60%以上を実現すれば一定の生態系を維持できると考えられる。



7. 研究開発状況と今後の実現 へのロードマップ

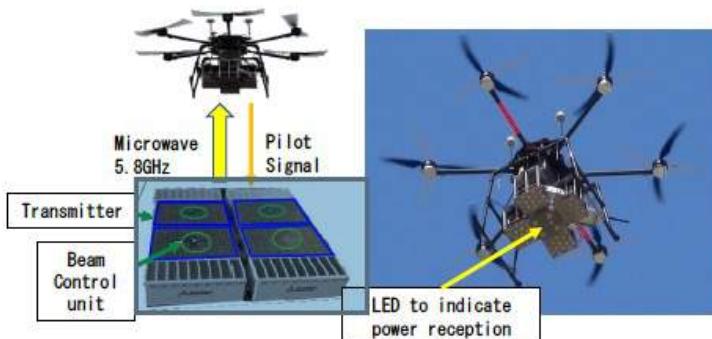
最近のマイクロ波送電地上実証実験



2015年に行われたマイクロ波の水平送電実験(距離54m)、5.8GHz マイクロ波出力1.8kW、受電出力340W(JSS/JAXA)

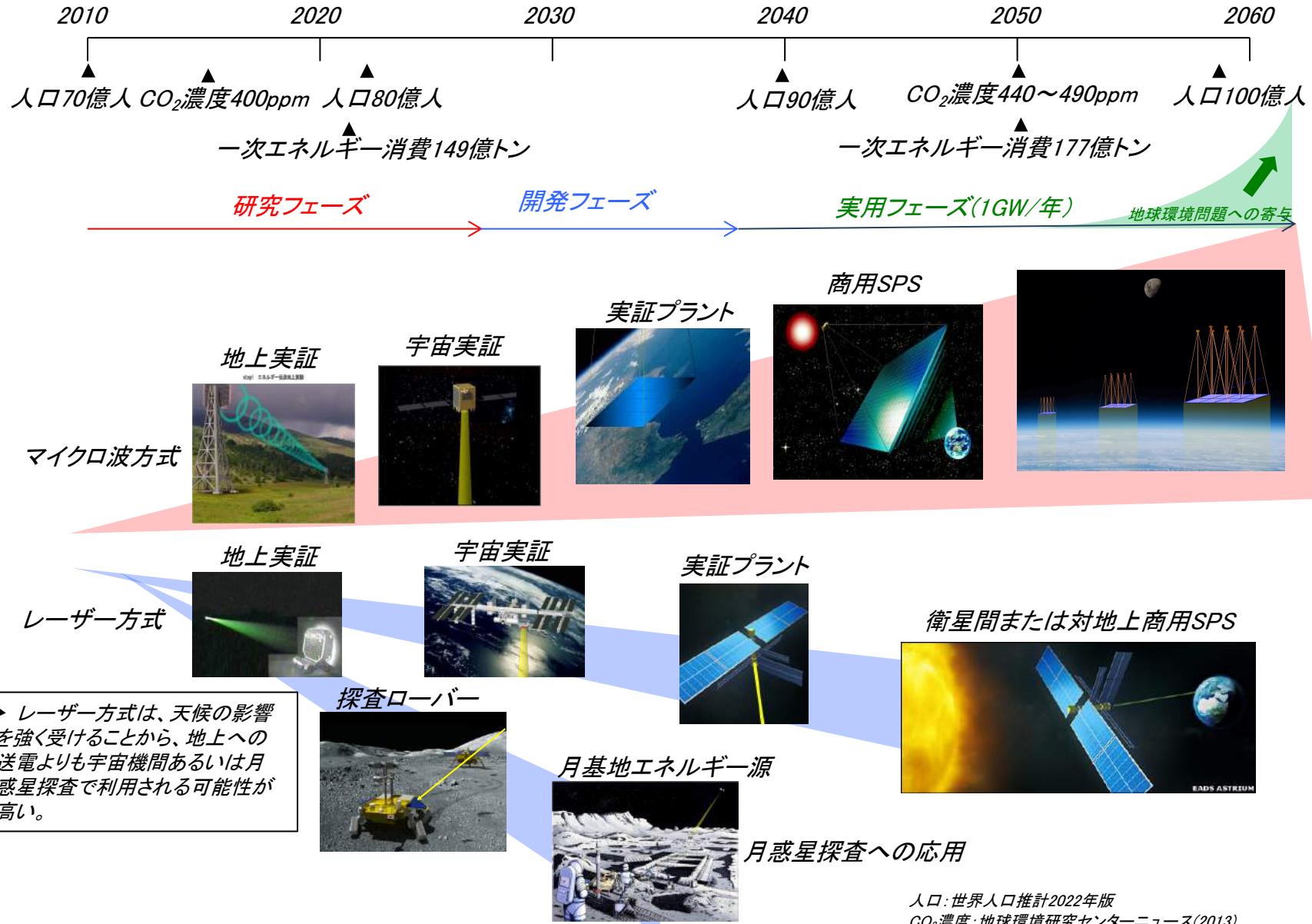


2015年に行われたマイクロ波の水平送電実験(距離500m)、2.45GHz マイクロ波出力10kW、受電出力32W(JSS)



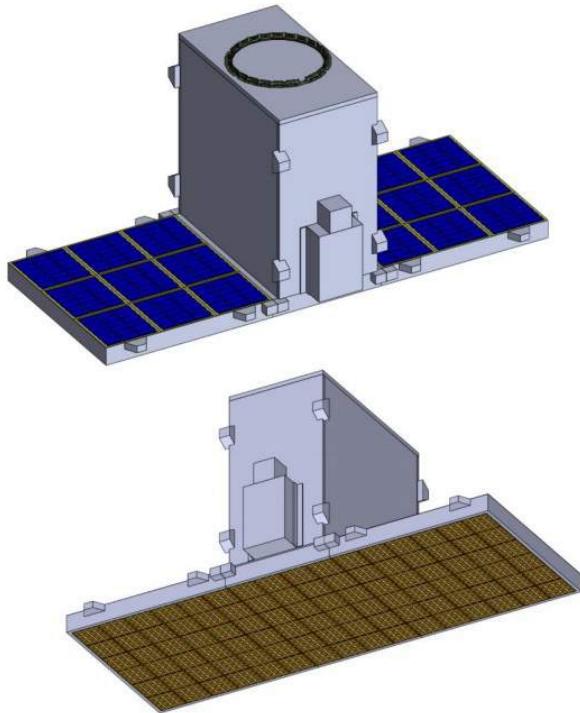
2019年に行われたマイクロ波の垂直送電実験(距離30m)、5.8GHz マイクロ波出力1.8kW、受電出力40W(JSS)

研究開発の考え方



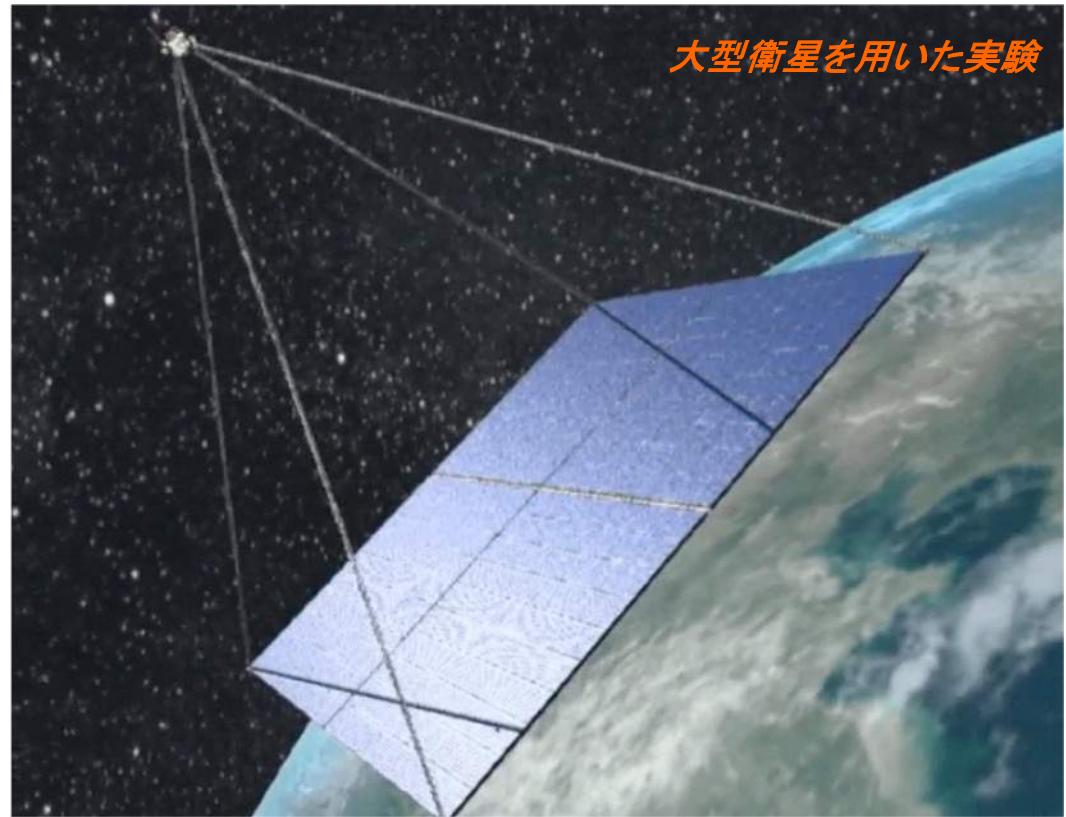
早期に実施すべき無線送電技術実証のための宇宙実験

小型衛星を用いた実験(2025年目標)



高度:450km程度、電力レベル:kW程度。送電ビームの精密方向制御技術の実証を行う。

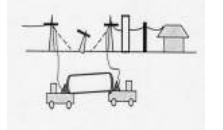
大型衛星を用いた実験



高度:400km程度、電力レベル:100-400kW程度の電力送電の実証。

無線送電技術のスピノフ(産業・宇宙探査への応用の可能性)

実用は数十年先なので、近未来の産業応用も考慮して研究開発を進めるべし(経産省)

利用案	具体例	イラスト、写真	必要なマイクロ波技術
電力線敷設の困難な状況での保守・点検・診断装置への電力供給	森林環境調査センサーネットワークへの電力供給(他にトンネル内歪センサー等応用提案多数)		送電技術 受電技術(低電力高効率) ビーム方向制御技術(粗)
災害時用小型電力供給(バルーン等からの微弱電力提供など)	飛行船からのマイクロ波電力と情報の伝送(京大、2009年)		送電技術 受電技術(低電力高効率) ビーム方向制御技術(粗)
中型電力伝送(災害、一時的用途)	切断した送電線の無線による接続(高野、2011年)		送電技術(大電力) 受電技術 ビーム方向制御技術(精)
電子機器への電力供給を目指したマイクロ波電力空間	無線電力空間(京大) スマートフォンへの無線充電装置(Ossia社デモ、2013)		送電技術 受電技術(低電力高効率) ビーム方向制御技術(粗)
車両等のバッテリへの電力供給	自動車バッテリの充電(三菱重工、京大)		送電技術 受電技術
飛翔体への動力エネルギー供給	飛行船、小型飛行機、小型ヘリコプターへの送電(デモの例多数)		送電技術 受電技術 ビーム方向制御技術(精)
月・惑星探査用無線電力供給システム	月面マイクロ波送電(コロナド大)		送電技術(大電力) 受電技術 ビーム方向制御技術(精)

おわりに

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……



ご静聴ありがとうございました。

絵: 満月祭宴(木村圭吾、1992)