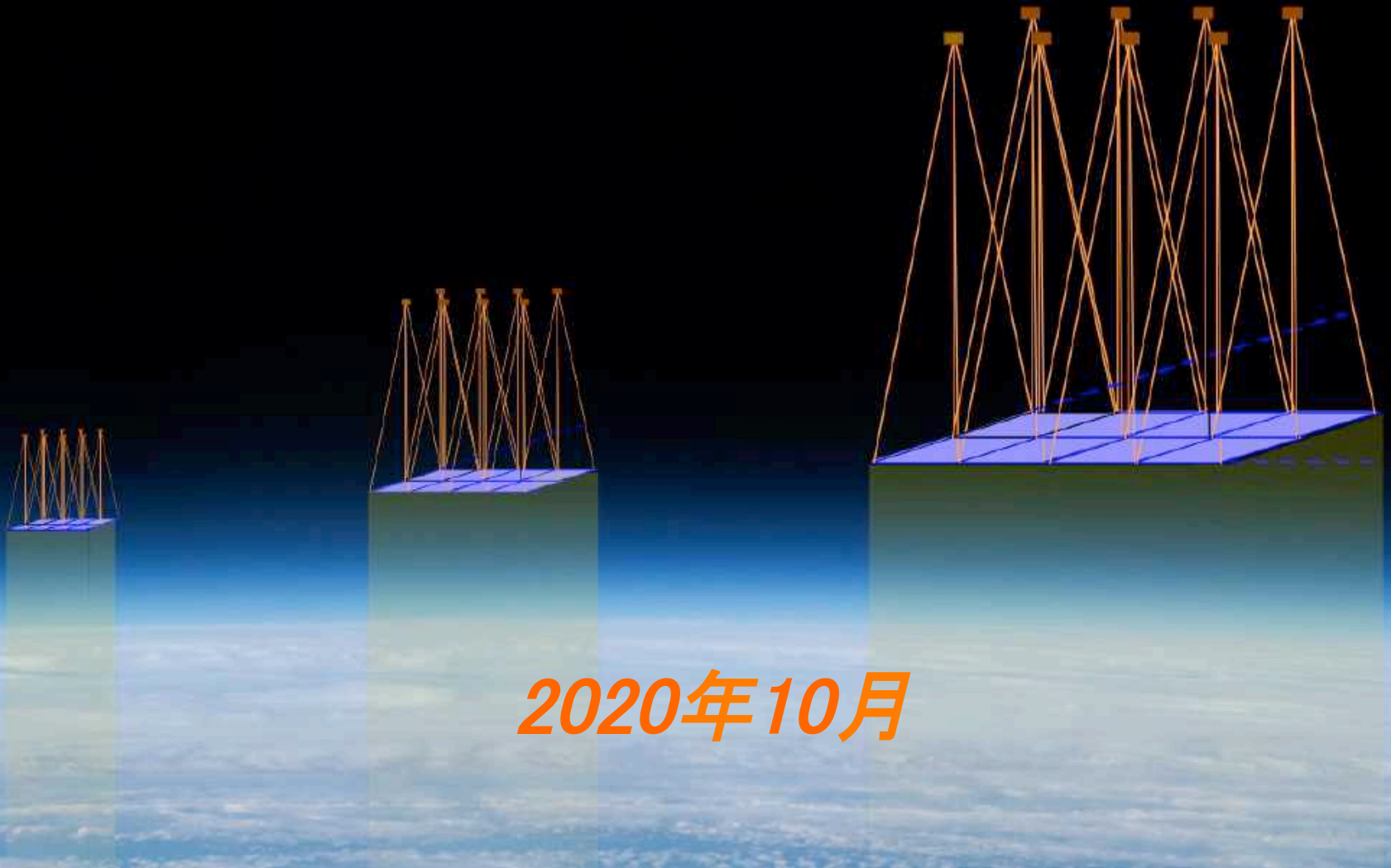



宇宙太陽光発電所 (SPS: Solar Power Satellite)



2020年10月

内容

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
6. 安全性・環境への影響と法的取り扱い
7. 現状の研究開発状況と今後の実現へのロードマップ
8. 終わりに

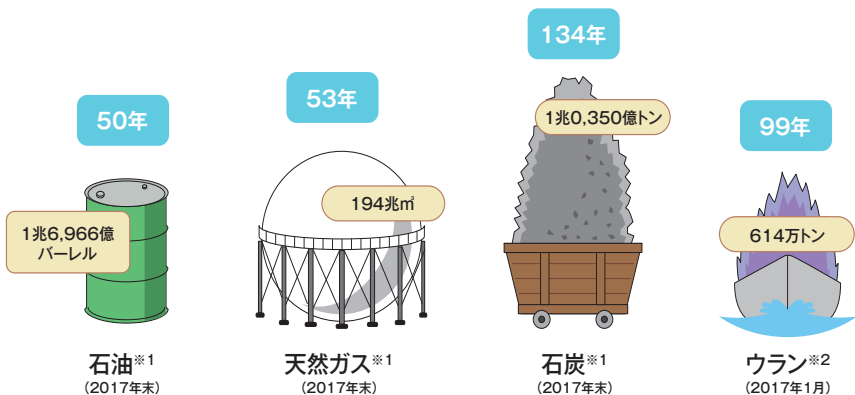


1. エネルギー問題と 地球環境問題

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

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

1-1-6

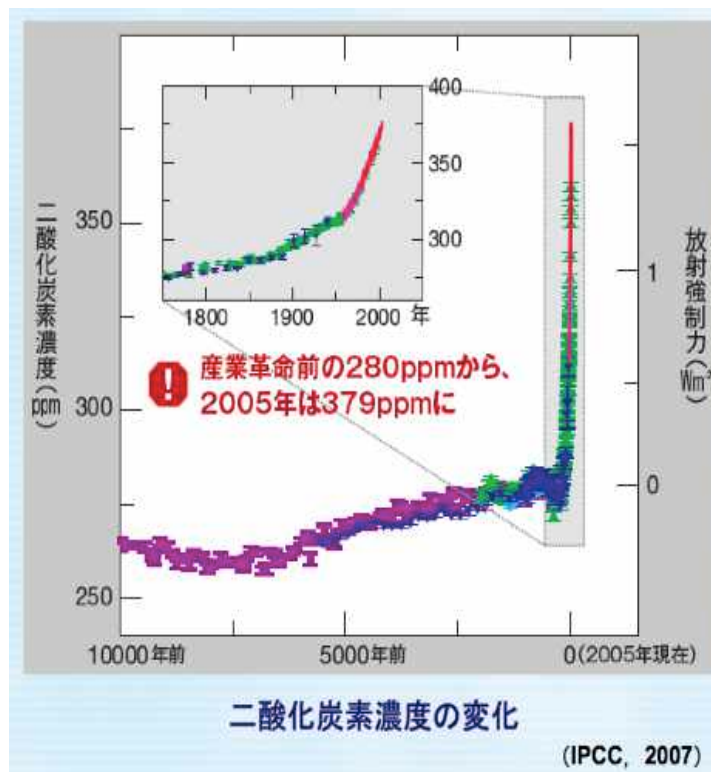
原子力・エネルギー図面集

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



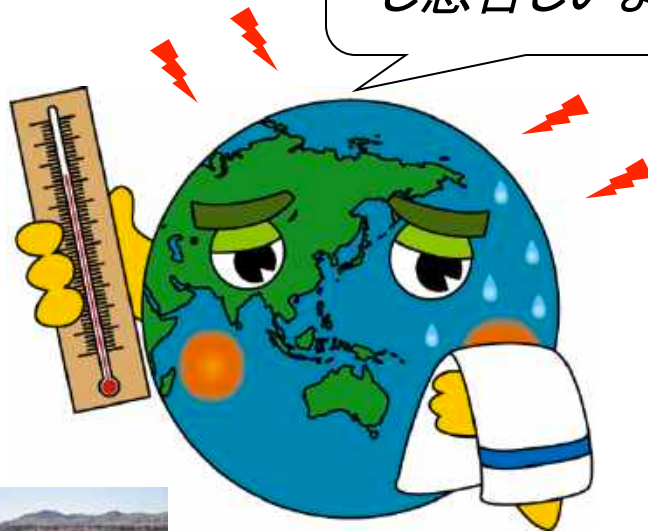
出典: 地球温暖化の影響・適応情報資料集
2009年2月 環境省地球環境局

▶ 私たちにはクリーンで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



まいったな。熱いし息苦しいよ。



砂漠化

地球



大丈夫。もっと熱が出ればウイルス(人類)はいなくなるさ。

他の惑星

▶ このようなことにならないために・・・

地球規模の問題は、地球閉鎖系の中で解決しようとしても 困難、地球の外即ち宇宙空間に解決の道をさぐるべき。

- ・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 (SPS: Solar Power Satellite) 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。
- ・現代社会を支えるエネルギーが、人類の叡智により必要十分なだけ得られ、かつそのエネルギー取得が環境にも優しいものであれば、現代社会の前に立ちはだかる深刻な問題は解決され、人類はさらに新しい発展の一步を踏み出すことができる。
- ・現段階で宇宙太陽光発電が将来の人類のエネルギーシステムとして最善の選択肢であることが示されている訳ではないが、技術的な原理の検証が完了しており、有力な選択肢である。
- ・宇宙太陽光発電は広く希薄な自然エネルギーを効率的に集めて発電するという特性から、空間的に限られた領域で人為的に大量のエネルギーを発生して発電する方式に比べ、事故時の安全性 (fail safe) の観点から本質的な優位点を持っている。
- ・宇宙太陽光発電実現のための基礎研究は近年急速に進展し、現段階で既に、その技術レベルは本格的な宇宙太陽光発電の実験に着手し、エネルギーシステムとしての評価を確かめることができるレベルまで達している。

▶ 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、その実証実験システムによる本格的な宇宙実験に着手すべき段階に来ている。

2. 概念と特長

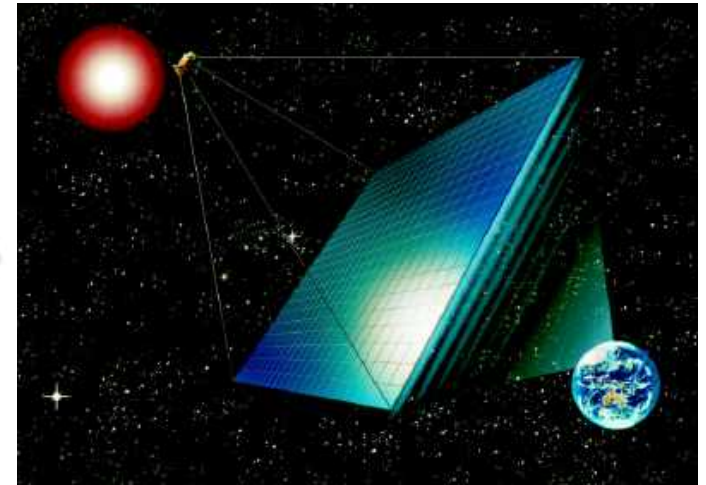


宇宙の太陽光発電所とはどのような構想か？

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：
 - ・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)。

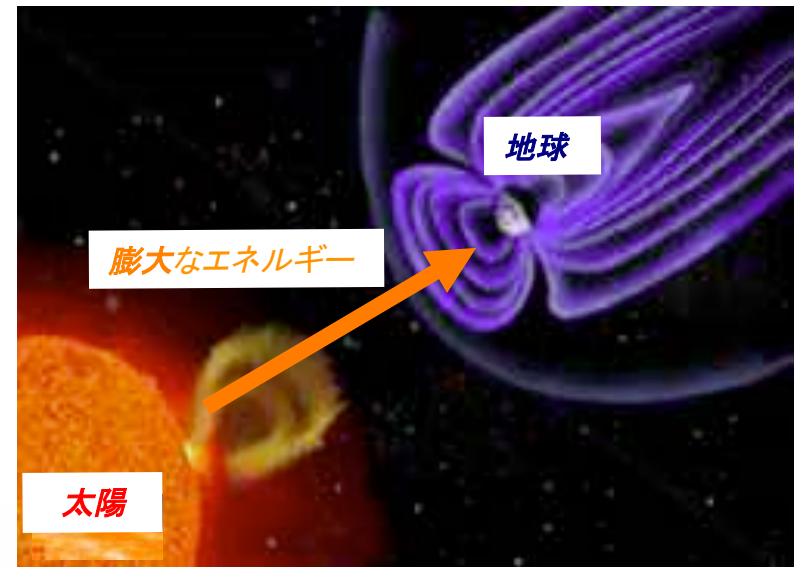
何故宇宙か？

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

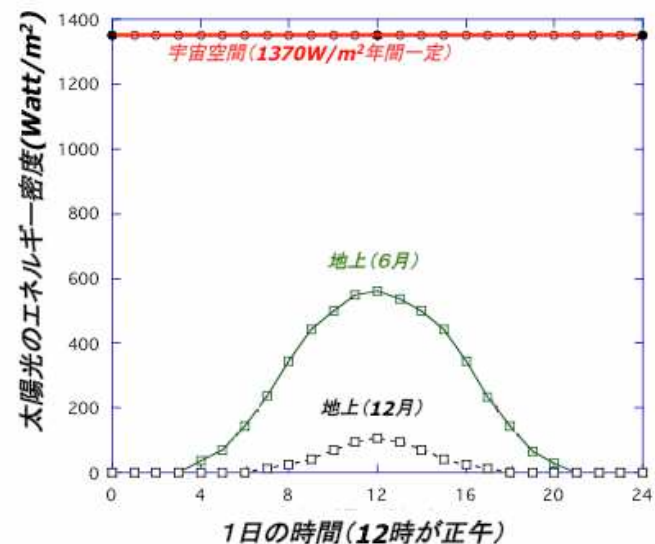
地上での太陽光の年間平均エネルギー密度は $100 \sim 200 \text{W}/\text{m}^2$

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。

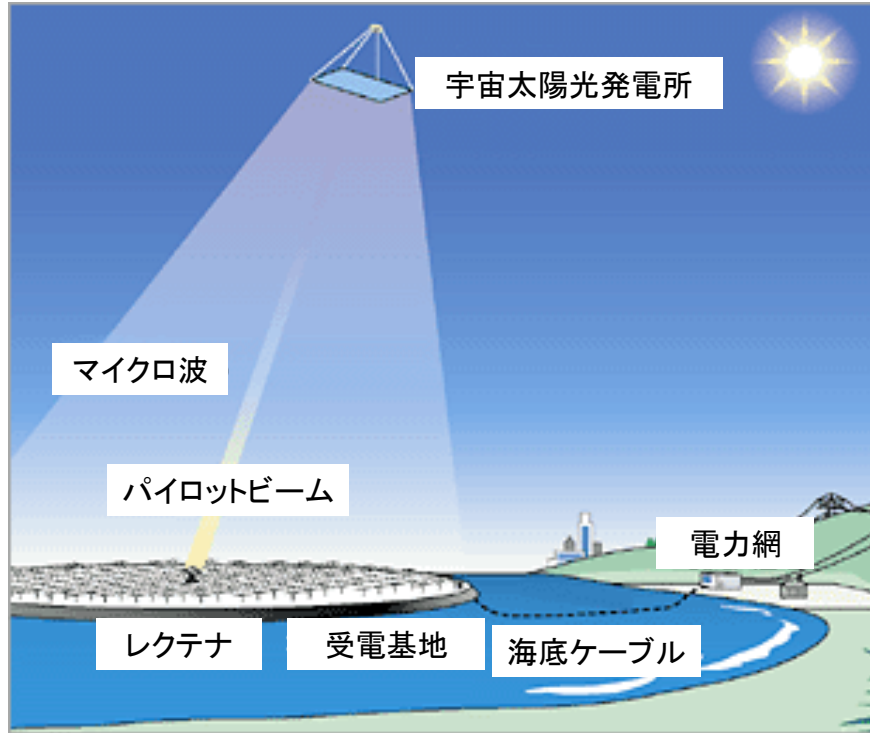


毎秒6億トンの水素が燃焼(核融合)



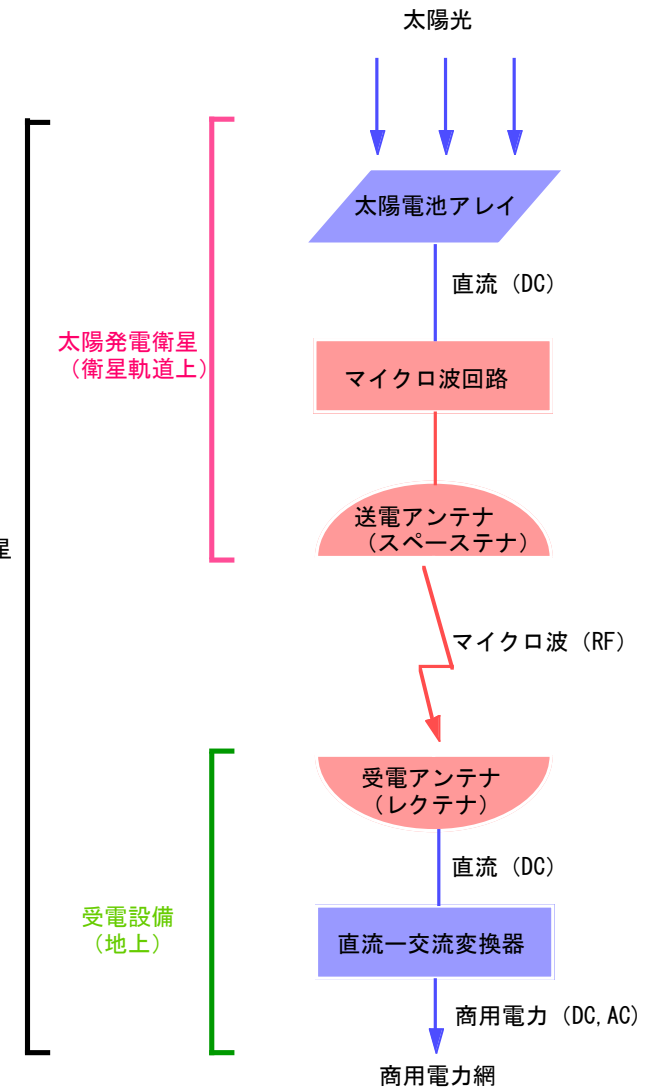
宇宙と地上の太陽光強度

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。

太陽発電衛星システム



宇宙の太陽光発電所の利点

地上の太陽光発電所



雨や曇りの日がある。



夜がある

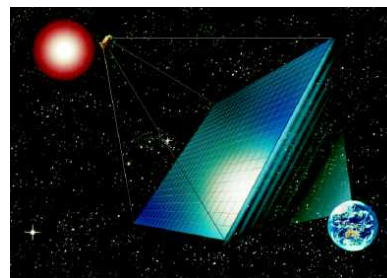


広い土地を探
すのが大変

宇宙の太陽光発電所



雨が降ったり曇ったりしない。



夜がない



宇宙は広い



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
集電効率 (Rotary Joint)	99.95	(裏パネルの太陽電池充填率	使用されているが、
集電効率 (アンテナでの配電)	96.3	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%	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)
蓄電効率	-	を仮定	-
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

▶ 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負荷が数十分の一以下であると解析されている。

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—

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]	7.88	7.88	1.23
一次エネルギー換算 [10 ⁹ MJ/年] (B)	76.7	76.7	12.0
EPT [年] (=A/B)	0.69	0.35	0.68

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、何年かかって回収できるかの指標。

▶ 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年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	-
NASDA1998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1/50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事が解析で示されている。

地上太陽光発電と宇宙太陽光発電との比較

	比較の事項	地上太陽光発電所	太陽発電衛星システム (SPS)
原理的な比較	太陽光エネルギー密度 (時間平均)	140W/m ² (東京の例)	1370W/m ² (太陽指向) 880W/m ² (太陽非指向、両面発電)
	システム構成	太陽電池—電力収集・変換	太陽電池—電力収集・変換 (宇宙) —無線送受電—電力収集・変換 (地上)
	発電効率 (単位面積当たり) の比 (太陽エネルギー密度) x (システム効率)	1	6~2 (必要な太陽電池の量 1/6~1/2) (地上方式と比べ無線送電損失 40%を仮定)
	寿命	30年 (耐候性)	30-40年 (宇宙放射線劣化、デブリ衝突)
	運用性	電力システム運用	電力システム運用及び宇宙システム運用
	土地利用効率	1	2 (テザーSPS) 7 (JAXA M-SPS)
		太陽電池は太陽光遮断	受電アンテナは太陽光透過 (60-80%程度)
	広域送電の自在性	送電網を必要とする	サービス地域を短時間に切り替え (無線送電)
	恒常性	天候、昼夜の影響有り	天候の影響なし。太陽非指向型で非蓄電方式の場合は、太陽方向変化による時間変動有り。
	規模制約	土地利用制約	実質的になし
将来社会との関連	現技術社会の延長上	パラダイムシフト (宇宙への進出という新たな発展を先導)	
具体的な数値 (可能性)	EPT	1-3年 (産総研) ¹²⁾	0.69~5年 (表1-4 および文献 ¹¹⁾ による)
	CO ₂ 負荷	53g/kWh ⁸⁾	20g/kWh ⁷⁾
	電力コスト	14円/kWh (2017), 7円/kWh (2025) (NEDO 目標) ²⁰⁾	4~23円/kWh

網かけは宇宙太陽光発電所が勝っていると考えられる点

▶ 宇宙太陽光発電は、地上の太陽光発電より、多くの点 (特に、恒常性、広域送電の自在性、規模の制約がない、という点) で優っている。

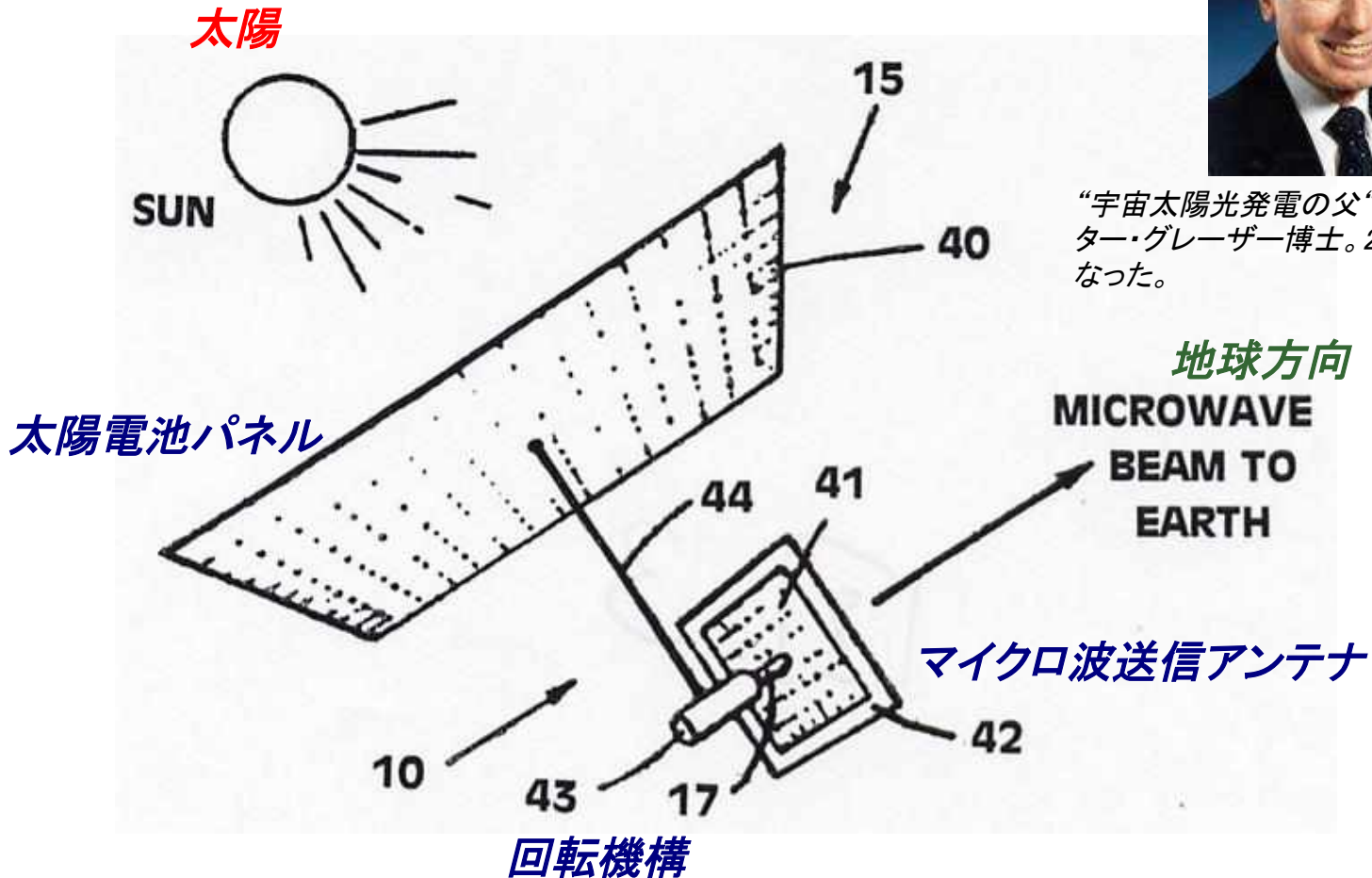
3. 研究の歴史



宇宙の太陽光発電所の発案者

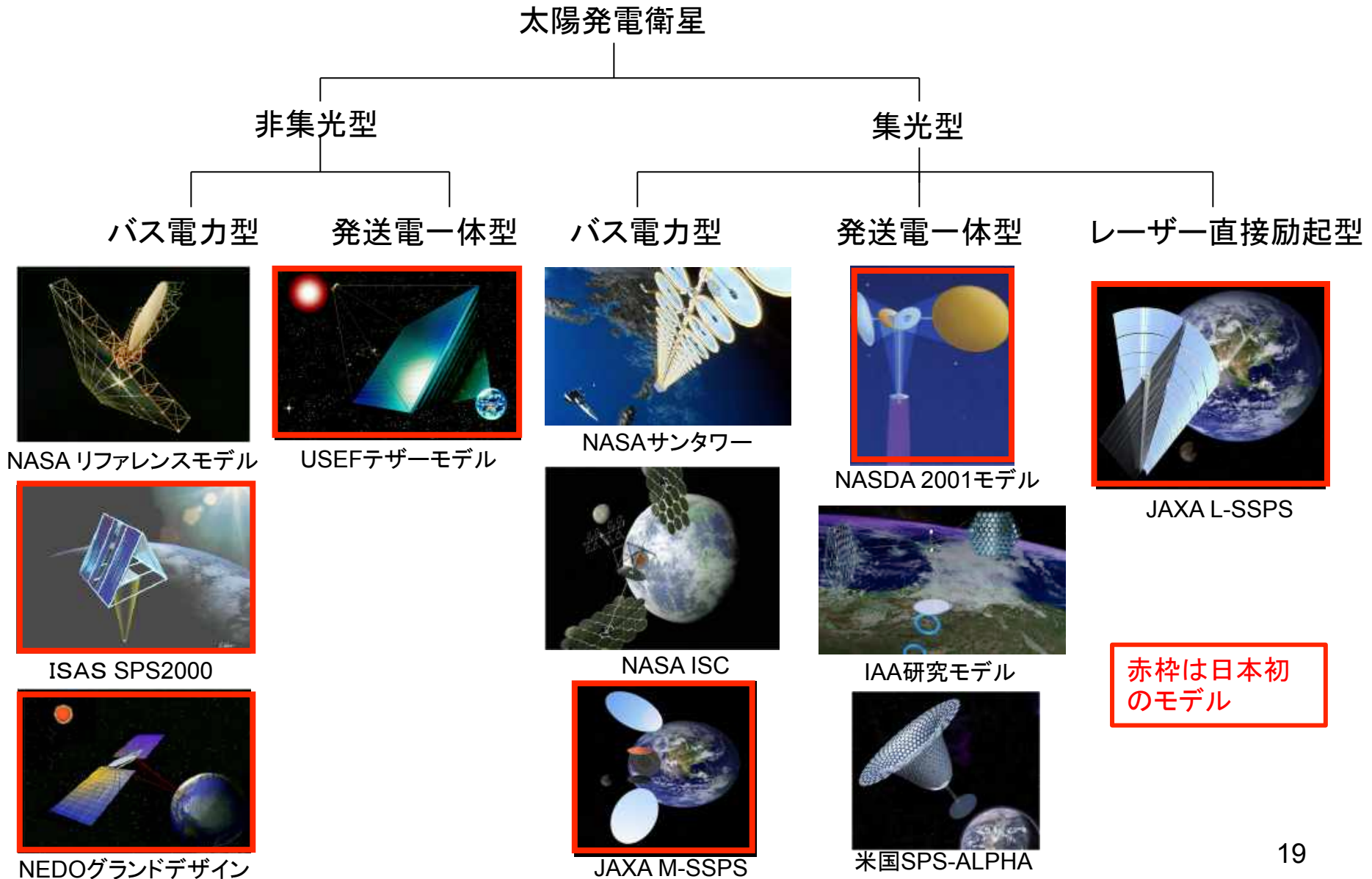


“宇宙太陽光発電の父”と呼ばれたピーター・グレーザー博士。2014年5月末亡くなった。



発案者ピーター・グレーザーの特許公告(1973年)

これまで提案された宇宙太陽光発電所（太陽発電衛星）の種類と代表的なモデル



宇宙太陽光発電所からの電力送電の方法としてマイクロ波が良いか、レーザーが良いか？

無線送電方法	マイクロ波	レーザー
周波数／波長	～数 GHz(周波数)	～1 μm(波長)
電力変換	太陽光-DC-マイクロ波・・・DC	太陽光-DC-レーザー(間接励起)・・・DC 又は太陽光-レーザー(直接励起)・・・DC
電力変換効率	高	低
送受電システムの大きさ	大	小
ビームのエネルギー密度(同一径のアンテナ/光学系での比較)	小(安全面の観点)	大(安全面の観点)
既存インフラとの電磁適合性	低	高
送電の天候依存性	小	大
技術の成熟性	大	小
ふさわしい適用形態 主(従)	宇宙-地上間(宇宙-宇宙間)	宇宙-宇宙間(宇宙-地上間)

▶ 宇宙空間から地上への送電方法としては、現段階ではレーザーよりもマイクロ波が有利と考えられている。ただしレーザー方式についても研究が行われている。

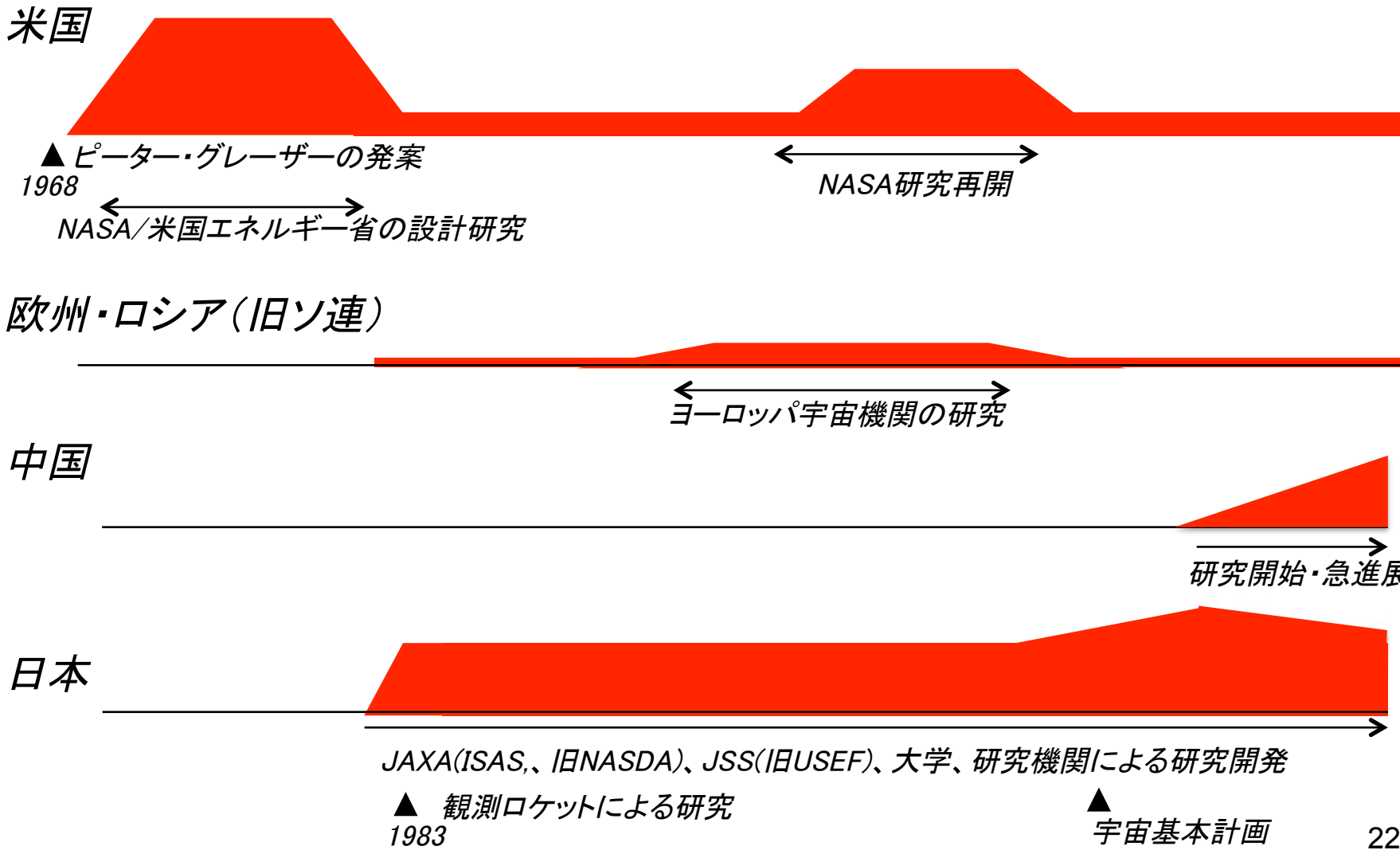
代表的な宇宙太陽光発電所のモデルの総重量と出力比重量の比較

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	Sun Tower(GEO)	1.2 GW	22300 トン	19 g/W
実用	Integrated Symmetrical Concentrator	1.2 GW	18000~31500トン	15g/W~26g/W
実用	European Sail Tower	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)。

宇宙の太陽光発電所の研究 世界の状況

1970 1980 1990 2000 2010 2020



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”
の概念、特許化 (1973年)
- 1973年 第一次オイルショック
- 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
- 1979年 第二次オイルショック
- 1980年 米国でのシステムの研究は中断
- 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、エネルギーオプション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システムグランドデザイン
- 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

米国での研究経緯と現状

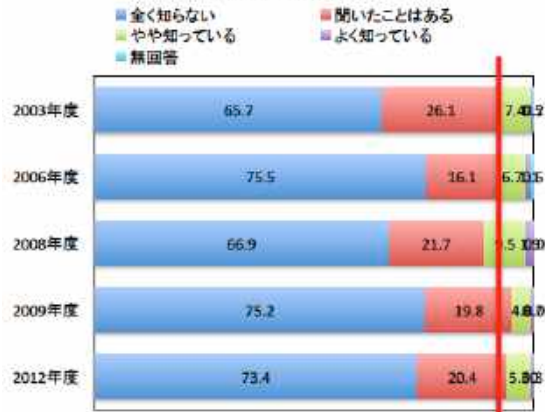
- 1970年代 NASA/DOE(US Department of Energy)の共同研究によるリファレンスシステムの設計と評価
1977-1980 NASA 約2000万ドルを投じ概念設計
1978 DOEのSPS Concept Development and Evaluation Program(CDEP)
- 1980年 技術的に致命的な問題はないが建設コストと発電価格が高い点が問題とされた。NAS(米国科学アカデミー)の評価
(SPS研究開発投資の凍結)及びレーガン政権の財政緊縮方針で、米国でのシステム的研究は中断。
- 1995年 NASA研究再開
1995-1997 Fresh Look Study (30 SSP systems concept)
1998 SSP Concept Definition Study (200万ドルの予算)
1999-2000 SSP Exploratory Research and Technology (SERT) program(2200万ドルの予算)
2001 US National Research Council(NRC)がNASAのSSP Strategic research and technology road mapに対するレビュー結果を報告
2001-2002 SSP Concept and Technology Maturation (SCTM) program (300万ドルの予算)
2001からはSPSに対する直接的な予算は縮小
—2004Joint investment in SSPS technology research and studies by NASA and NSF(National Science Foundation)
- 2004年 ブッシュ大統領の「米国新宇宙探査計画」
SPSについては触れられていないが、SPS関連技術開発は先端技術の一環として研究開発の中に取り込まれた。
- 2005-08年 NASAのSPS関連研究は非常に低いレベルで推移
- 2006年 NASAはadvanced space technology R&Dへの予算をキャンセル、100名程度の関係職員を配置換えし、先進宇宙技術の研究は弱体となった。小規模なR&Dは継続、DODやDOEからの関連技術への投資(但しDOEは宇宙に関与せず)
Space Commerce Roundtable(July),Exploration Global Strategy(August)ではSPSや月面エネルギーシステムが重要との一定の認識が示されたが、human exploration systems(CEVなど)の開発経費負担が大きく、当面は予算的に浮上しないと予想された。
- 2007年 ペンタゴン(米宇宙安全保障局National Security Space Office)が戦闘部隊や災害地域での電力確保の観点からSpace Solar Powerを検討(M.Smith(NSSO), J.Mankins, D.Prebleら)
- 2008年 ハワイでのレトロディレクティブ機能を用いた史上最長マイクロ波送電実験(160km)。米国チームの企画のもと、神戸大が送電技術を担当した。Discovery Cannelで放映された。
ISSでのWPTのデモンストレーションが検討された。NASA JSCがリーダー、DODや大学が参加したが、9ヶ月で研究は終了した。
- 2010年 オバマ政権で先進技術開発を重視した予算が提案された。
- 2011年 NIAC(NASA Innovative Advanced Concepts)の研究テーマの一つとしてSPSが選ばれた。ただし次年次以降の予算はつかずプロジェクト化には至らなかった。
- 2015年 Northrop Grumman CorporationがスポンサーとなってCalifornia Institute of Technology Caltech)とSPSの研究契約締結
- 2019年 米国海軍研究所でのレーザー電力伝送実験(2kW,325m)

日本での研究経緯と現状

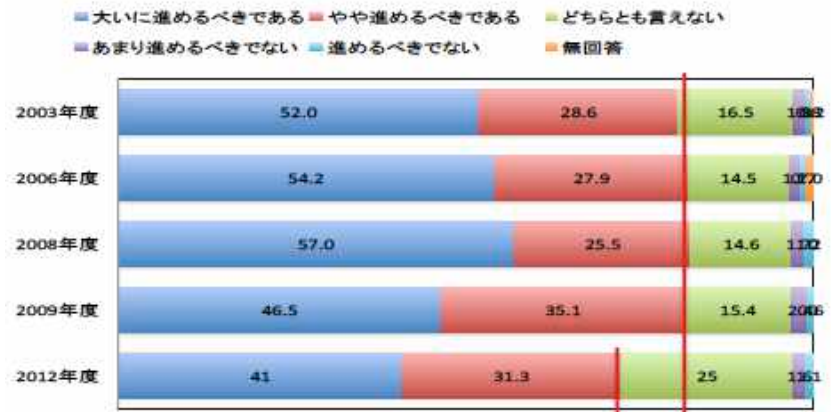
- 1979 調査研究 未来工研(STA) 宇宙空間における太陽発電に関する基礎調査
- 1980 調査研究 SJAC 衛星発電システム概念開発評価プログラム報告書
- 1982 調査研究 未来工研(NASDA) 太陽発電衛星の経済性に関する調査
- 1983 調査研究 電力中央研究所 宇宙衛星発電方式の受電設備 洋上立地と発電可能電力の検討
- 1983 MINIX実験(観測ロケットによる電離層とマイクロ波の相互作用研究)
- 1987 宇宙科学研究所で太陽発電衛星ワーキンググループ設立
リファレンスシステムより現実的なストローマン(藁人形)設計
- 1988~9 調査研究 エネルギー総合研究所(日機連)宇宙エネルギー技術研究調査
- 1990 ヒューストンサミットで海部首相が地球再生計画の中でSPSについて言及
- 1991 宇宙科学研究所 太陽発電衛星ワーキンググループで4つの研究プロジェクト設定
- ・SFUを用いたエネルギーミッション計画
 - ・太陽発電衛星ストローマン設計研究 SPS-2000計画
 - ・ISY/METSロケット実験計画
 - ・マイクロウェーブガーデン
- 1992~4 調査研究 MRI(NEDO) 宇宙発電システムに関する調査研究
1GWシステムグランドデザイン
- 1992 MILAX飛行機実験(小型模型飛行機への送電飛翔実験)
- 1993 ISY-METS実験(観測ロケットによるマイクロ波送電実験)
- 1994 山崎マイクロ波送電実験(5kW)
- 1994~ マイクロ波長期曝露研究施設(電総研、現産総研)
- 1995 ETHER実験(飛行船への送電実験)
- 1997 太陽発電衛星研究会発足
- 1997~8 調査研究 MRI(STA, NASDA) LE-NET構想
- 1998~ 調査研究 MRI(NASDA、現JAXA)宇宙太陽発電システムの調査・検討
- 2000~ 調査研究 USEF宇宙太陽発電システム実用化検討委員会
- 2006 観測ロケットを用いたアレイアンテナの展開とアクティブフェーズドアレイ実験(神戸大、東大)
- 2008 環境エネルギー技術革新計画(総合科学技術会議)“SSPSの技術開発に長期的観点から取り組む”
飛行船(高度30m)から地上への無線電力伝送実験(110W)(京大)
- 2009 宇宙基本計画に宇宙太陽光発電の研究開発を明記
- 2010 kW級高精度マイクロ波送電の地上実証プロジェクトスタート(USEF/JAXA)
- 2013 宇宙基本計画改訂(宇宙太陽光発電の研究開発を着実に進めること)
- 2014 宇宙太陽発電学会発足(太陽発電衛星研究会が発展的に改組された)
- 2015 1.8kWマイクロ波送電実験(55m、JSS/JAXA)、10kWマイクロ波送電実験(500m、JSS)
新宇宙基本計画(宇宙太陽光発電の研究等を推進する)
- 2016 上下方向レーザー伝送実験(JAXA)
- 2019 ドローンへのマイクロ波送電実験(JSS/JAXA)
- 2020 宇宙基本計画改定(実用化に向け、宇宙実証実験フェーズへの移行の検討も含め、着実に取組を進める)

宇宙太陽光発電所の認知度と実現性

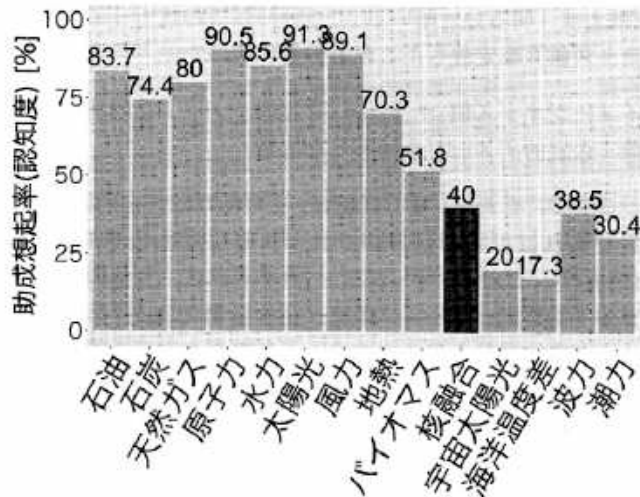
宇宙太陽光発電システム(SSPS)についてあなたは知っていましたか



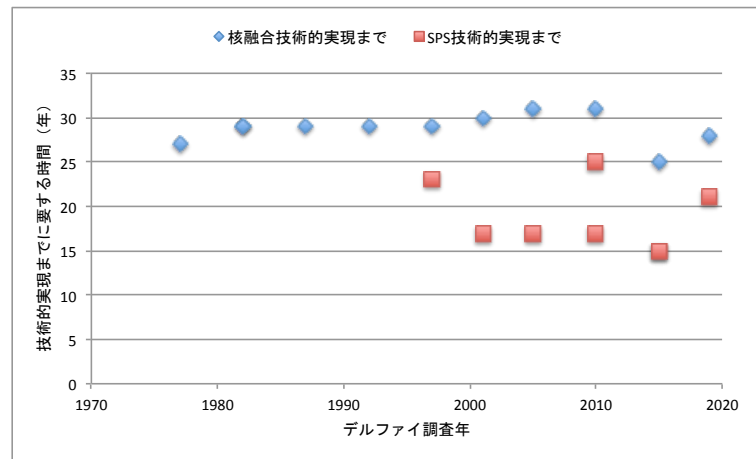
宇宙太陽光発電システム(SSPS)の研究開発を進めていくべきだと思いますか



▶ 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。一般の人にはほと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。



▶ 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。科学研究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

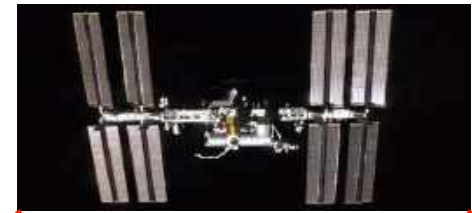


宇宙の太陽光発電所実現のために必要な主な技術 (目標と現在の實力)

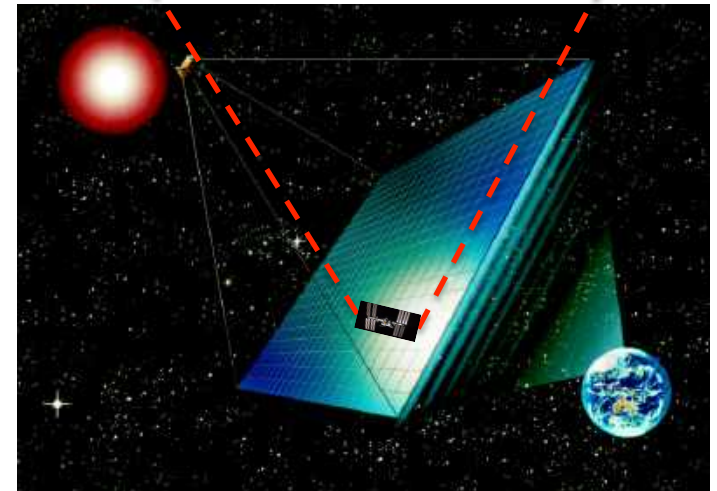
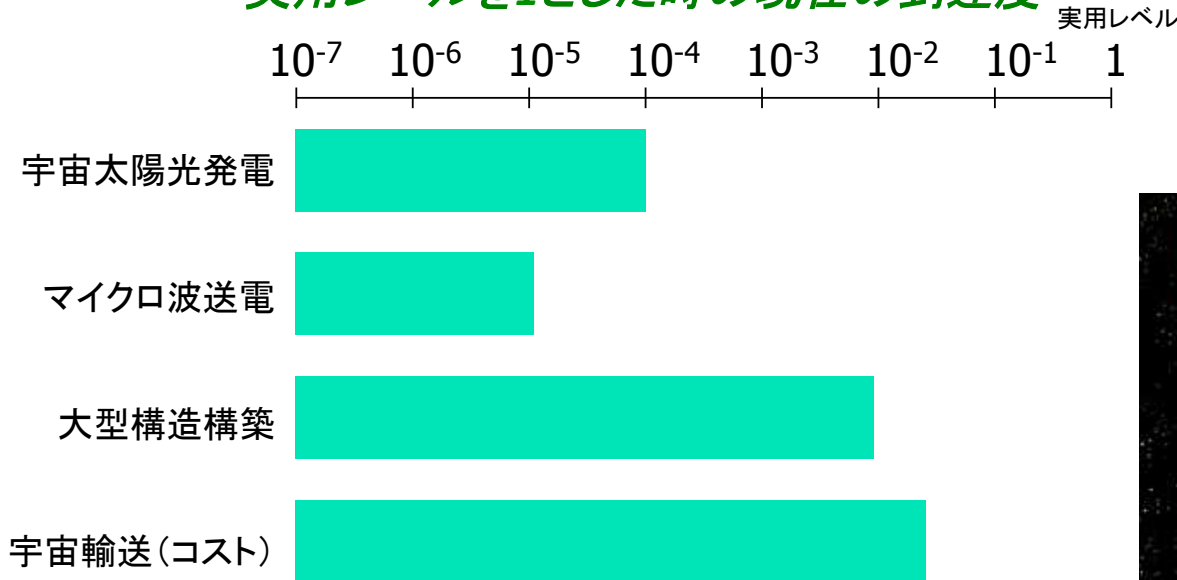
1GW=30~50万世帯分

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	~100万円/kg	2万円/kg	1/50

国際宇宙ステーション 100m サイズ



実用レベルを1とした時の現在の到達度



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。

宇宙の太陽光発電所用の太陽電池

宇宙の発電所の太陽電池には、軽量、高効率（重量当たりの電力）、高い耐放射線性、資源的制約が少ないことが求められる。

太陽電池のタイプ

型	種類	特徴	SPS用としての評価
バルク型 (厚いタイプ)	Si (単結晶、多結晶)	現在の生産の主流	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	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	当面有力
	CdTe	構造が簡単で安定性が高い 低コストの可能性	資源的制約 (Cd, Te)
	CIS	高効率、長寿命、耐放射線性に優れる	資源的制約 (In) 将来有望
	多結晶シリコン	ハイブリット型での組み合わせ	
	化合物	高効率 (25%)	新規、今後の展開待ち



現在の衛星で使われている宇宙用太陽電池のパネル（ガラスが用いられ堅く重い）



宇宙の発電所にはフィルム状のものが望ましい

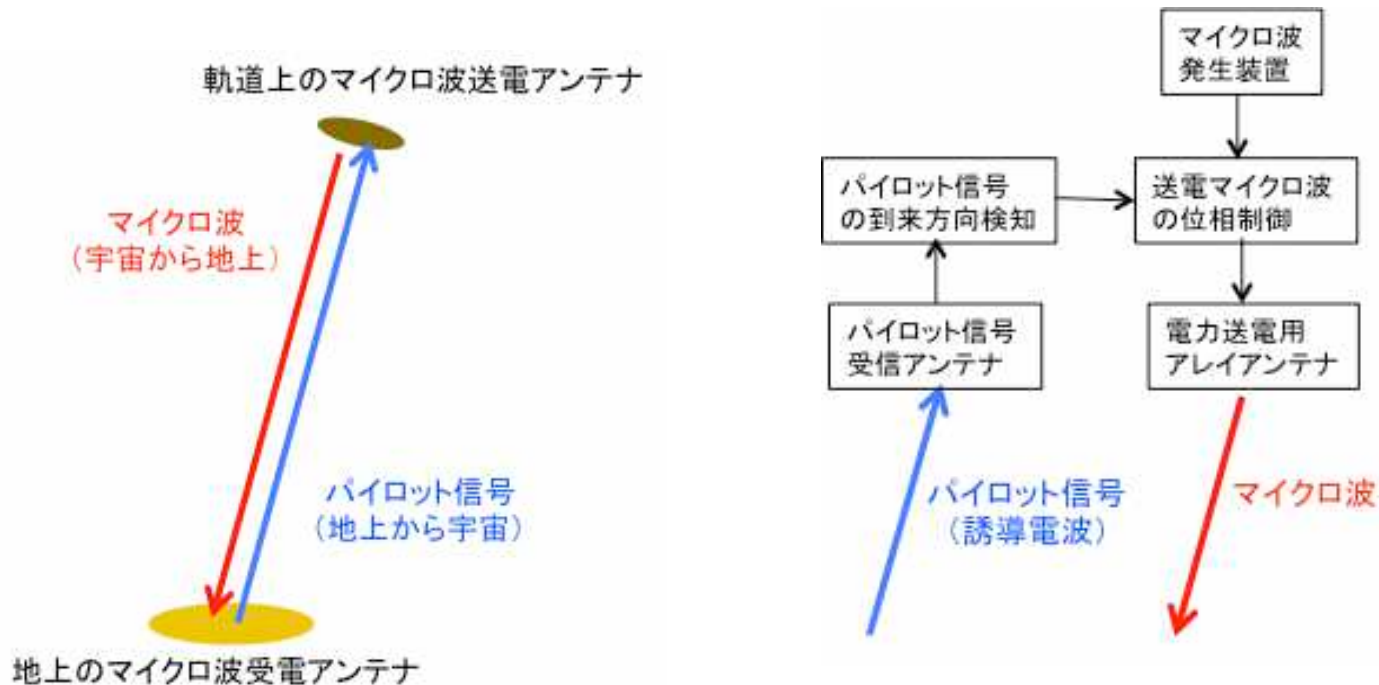


薄膜、柔らかく軽い

▶ 薄膜型が有望と考えられている。

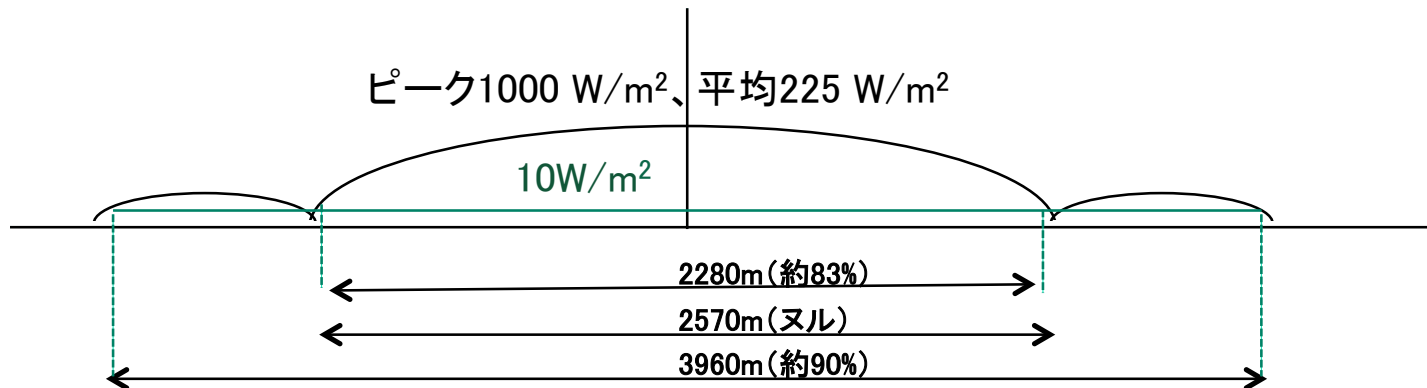
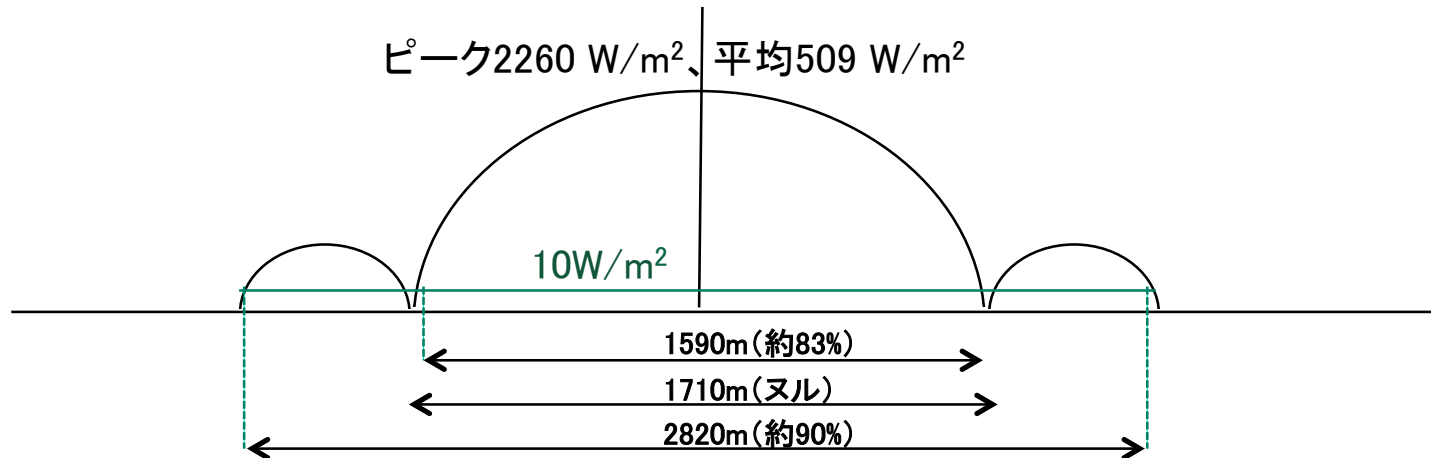
マイクロ波送電技術

宇宙太陽光発電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必要がある(1km離れて10cmの的に1cmの精度で指向する必要)。レトロディレクティブ制御と呼ばれる。



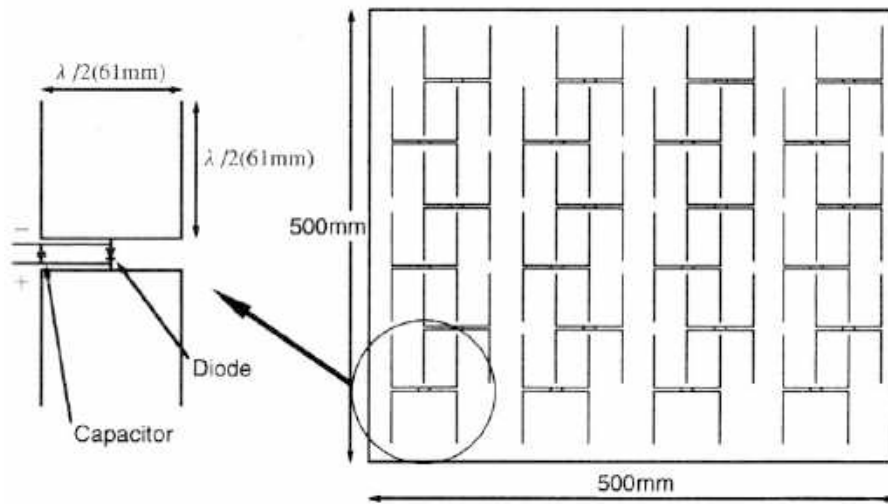
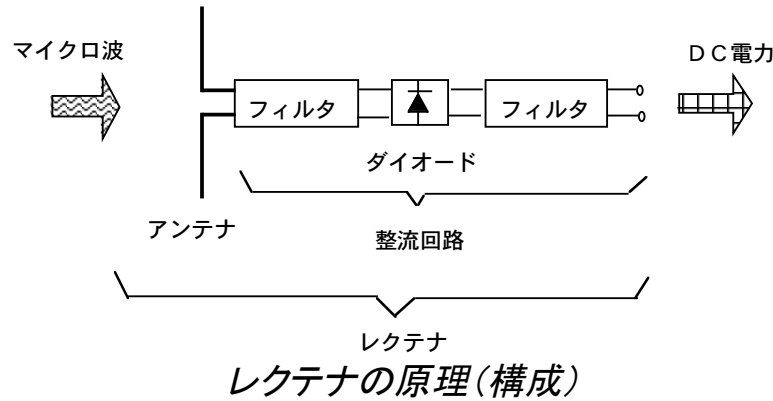
宇宙からのマイクロ波の制御方法

地上でのマイクロ波強度の例(モデルにより異なる)



テザーSPSの場合の地上の電力密度。2.5km x 2.375kmアンテナを円近似、1.4GW送電、距離37,333km(静止衛星軌道から東京)。上パネル:ピーク強度を2,260W/m²(全アンテナ素子が同一位相)の場合、下パネル:ピーク強度を1,000W/m²(ピーク強度が1,000W/m²になるよう全アンテナ素子の位相をビームが拡散する方向に制御)の場合

レクテナ(マイクロ波受電回路)技術



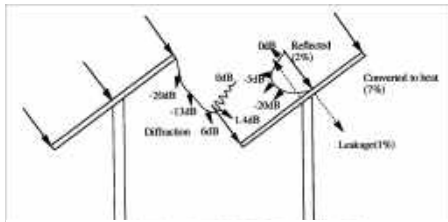
実験室で試作したレクテナ



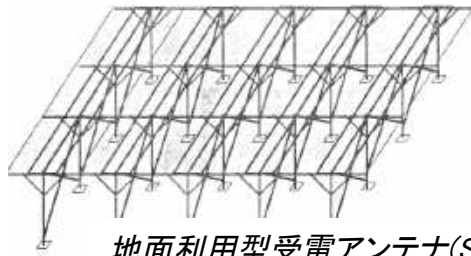
実験室で試作したレクテナ。太陽発電衛星SPS2000を模擬した模型からのマイクロ波(2.45GHz)を、地上受電所を模擬したレクテナで受電し、モーターや発光体を動作させた。

▶ 小型の受電アンテナについては、既に多くの試作がなされており、単体では整流効率80%程度のものが製作されている。

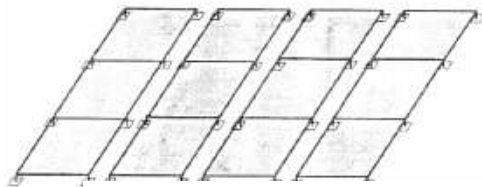
マイクロ波受電アンテナの検討例



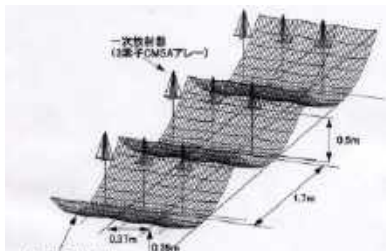
NASA リファレンスシステム設計例



地面利用型受電アンテナ(SPS 2000)



地面設置型受電アンテナ(SPS 2000)



低電力密度用パラボラ型受電アンテナ(USEF)



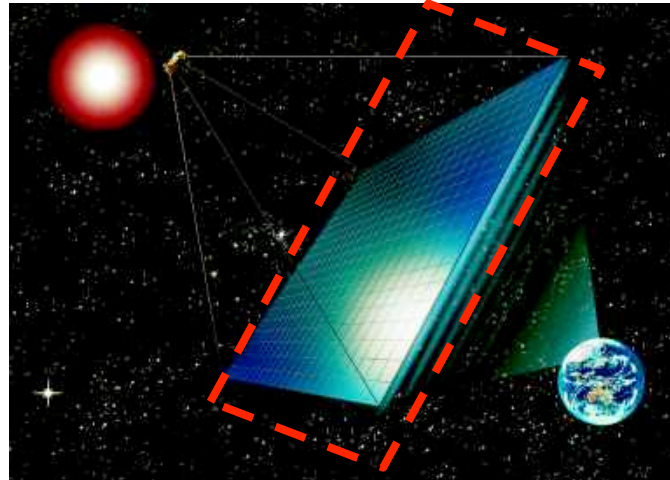
NASAリファレンスシステムの受電所メーヅ



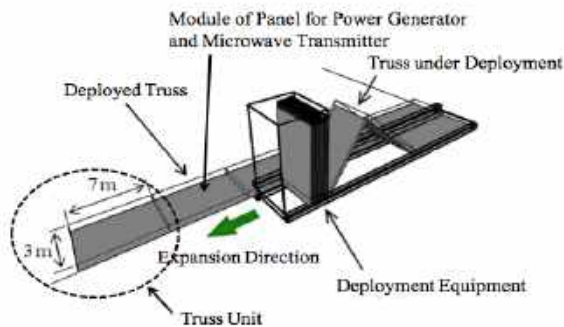
海洋受電所のイメージ(JAXA)

宇宙に大型の構造物を構築する技術

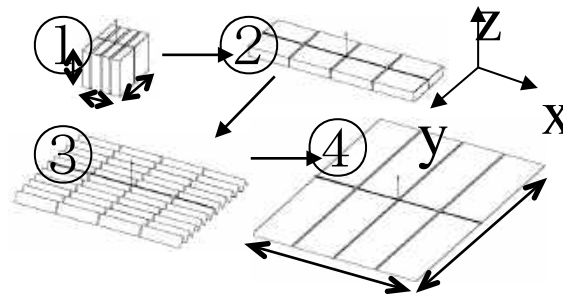
宇宙の発電所の太陽電池には、km級の大きさの構造物が必要。



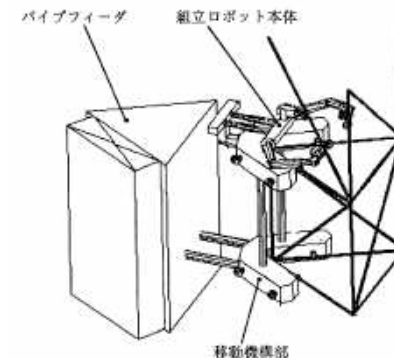
厚みのある大型パネルが基本的構造。その宇宙空間での建築方法の案が検討・試作されている。



▶ パネルを組み立てながら展出する展開方式

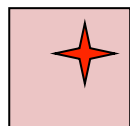
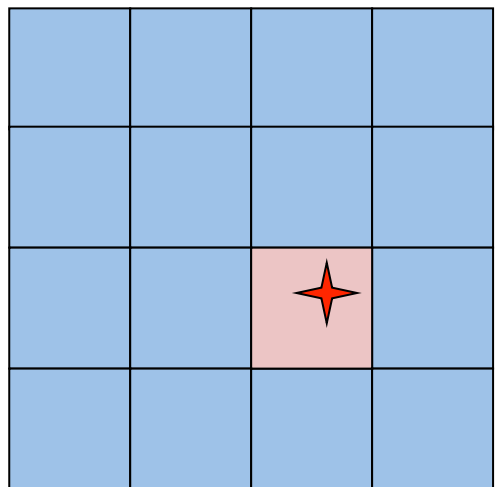


▶ 自動で自己展開する展開方式



▶ ロボットによる建設方式

宇宙塵や宇宙ゴミの衝突は問題にならないか？ —衝突は不可避なので設計で対応する—



超高速衝突で破壊されたモジュール



健全なモジュール

静止衛星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

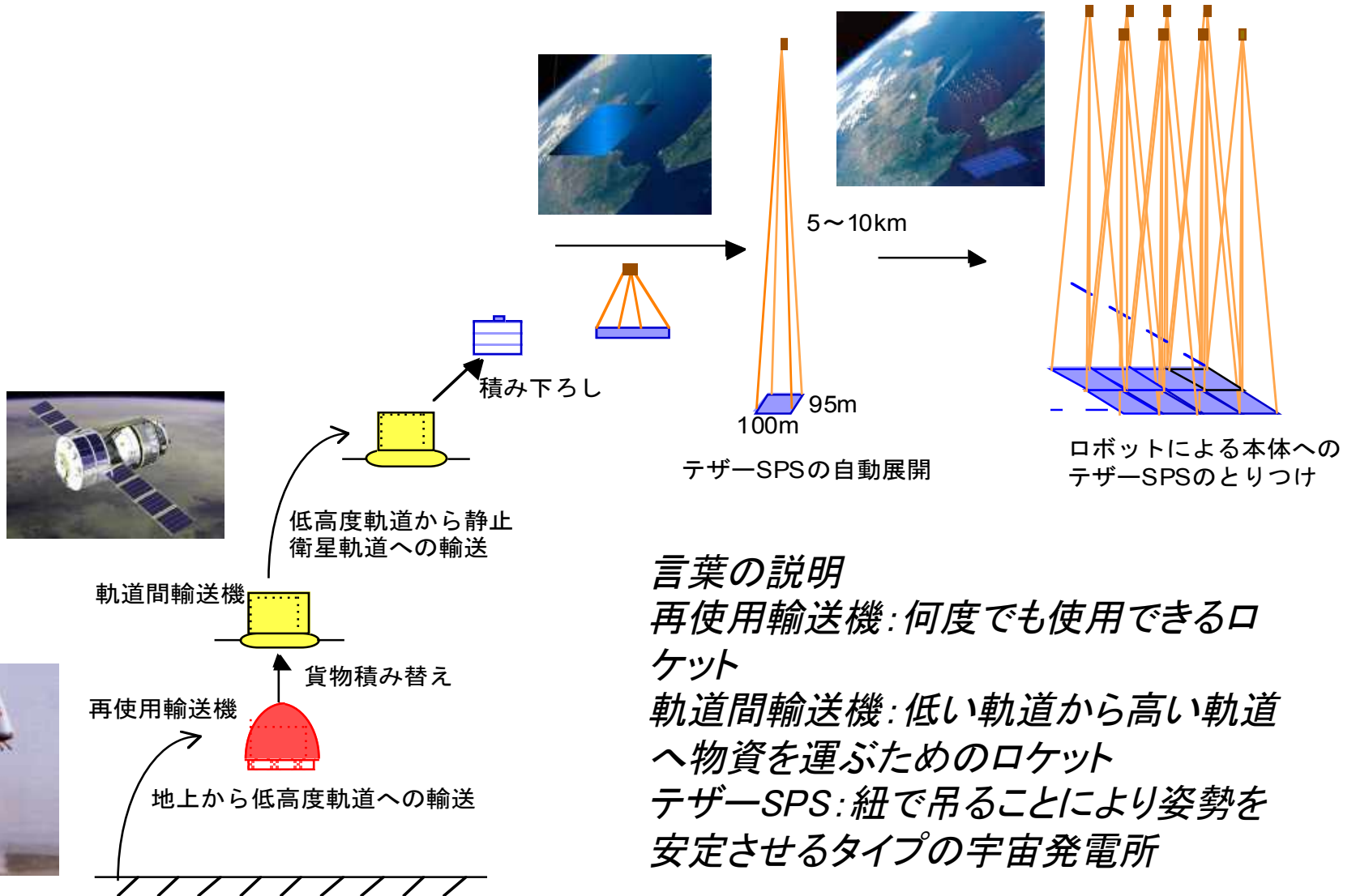
▶ モジュール化設計:

太陽電池のモジュールサイズを $0.5\text{m} \times 0.5\text{m}$ とし、モジュールの破壊は 1mm 以上のサイズの高速度の衝突で生じるとした場合、破壊が1モジュール内にとどまるように設計すれば、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。

5. 必要な宇宙輸送



宇宙の太陽光発電所の建設シナリオ —テザー型SPSの例—



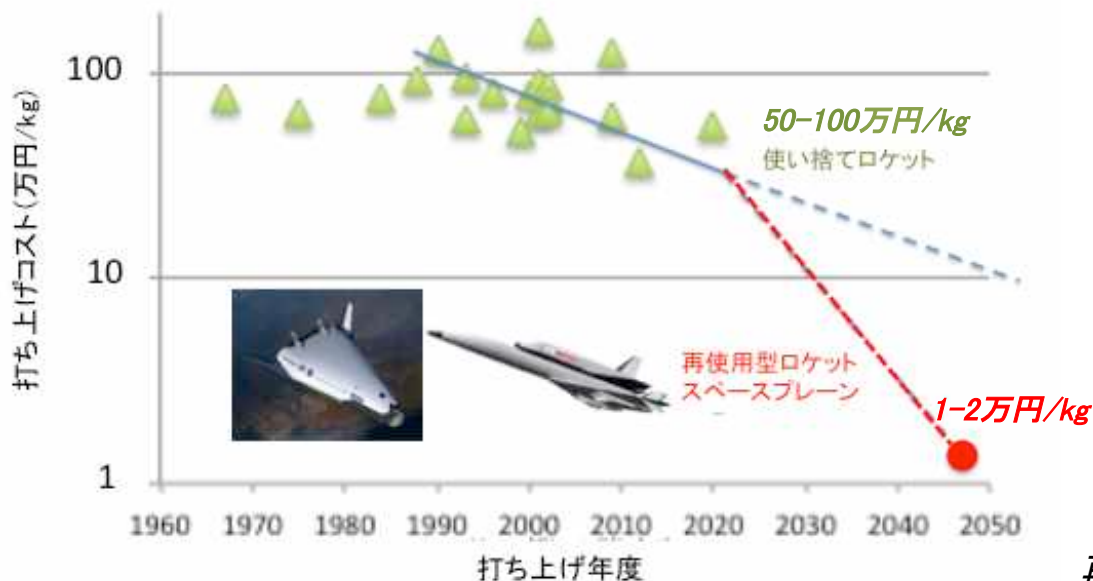
言葉の説明

再使用輸送機: 何度でも使用できるロケット

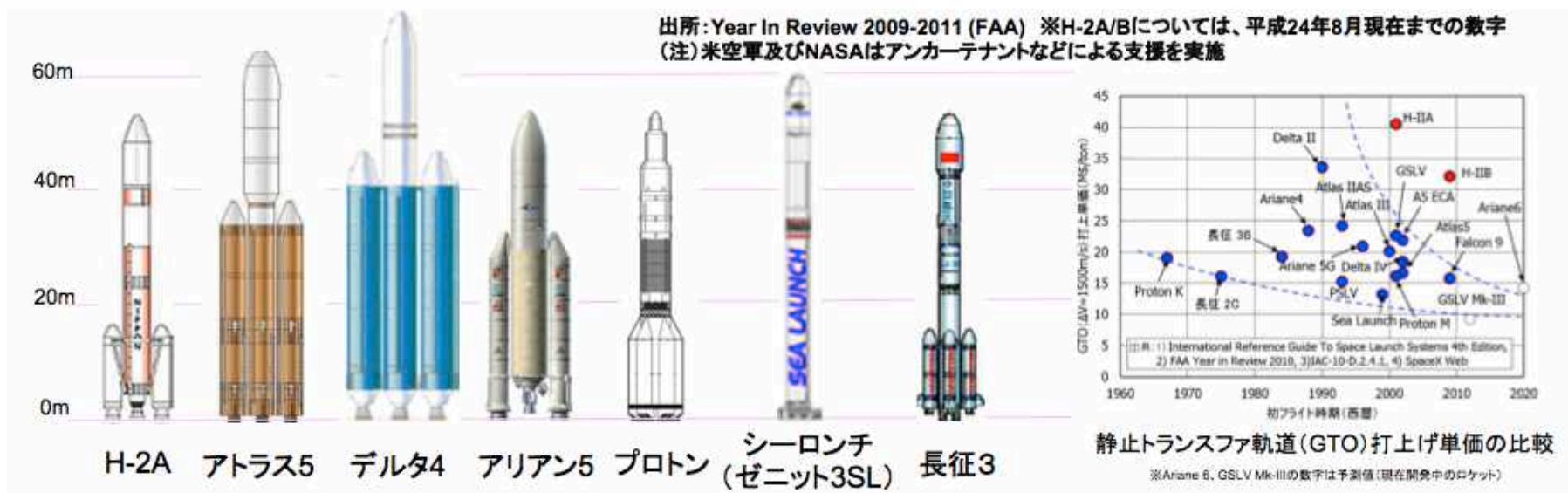
軌道間輸送機: 低い軌道から高い軌道へ物資を運ぶためのロケット

テザーSPS: 紐で吊ることにより姿勢を安定させるタイプの宇宙発電所

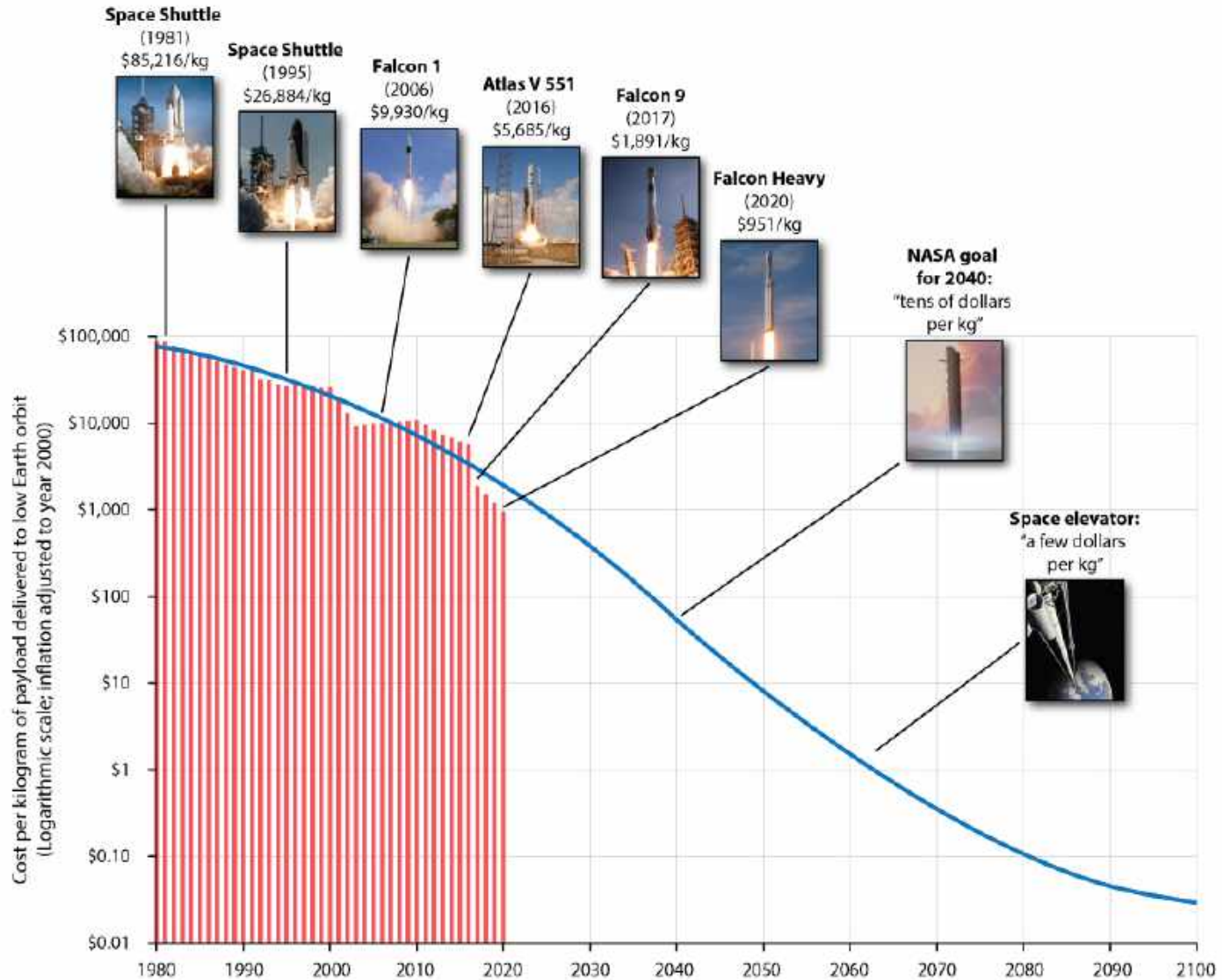
ロケット打ち上げのコストの現状と将来



再使用ロケット実験機 重量:500kg、全長3.5m



宇宙輸送コストの長期予測



Future Timeline Netによる予測



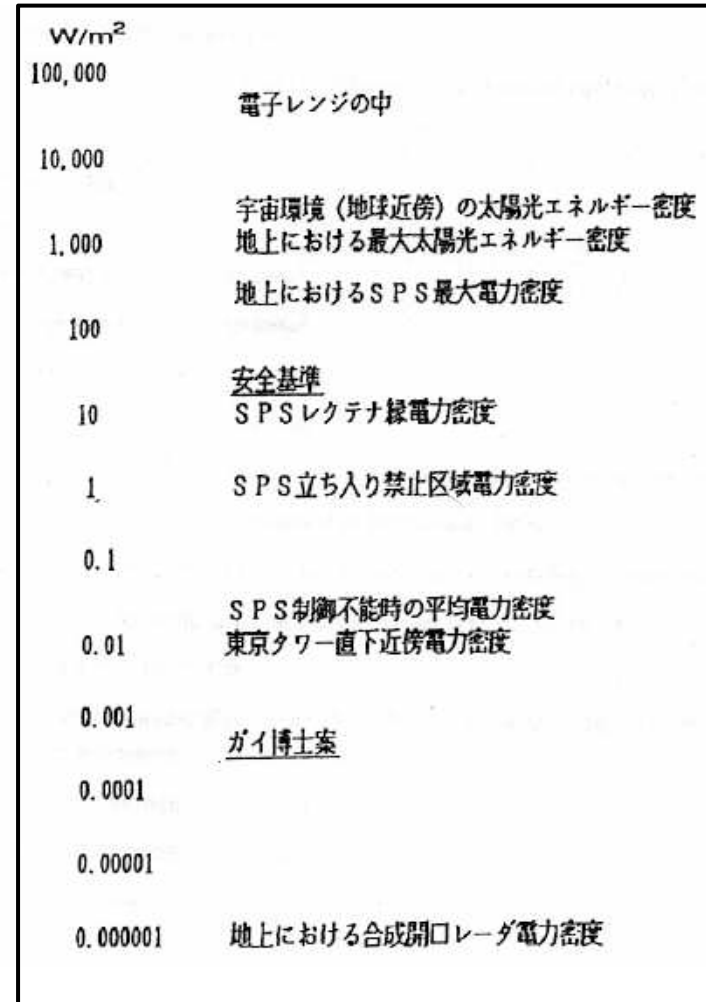
6. 安全性・環境への影響と法的取り扱い

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っ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。

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ふ必要がある。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、 $1\text{mW}/\text{cm}^2$ 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、上述のように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)に支障がで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($100\text{mW}/\text{cm}^2$)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。

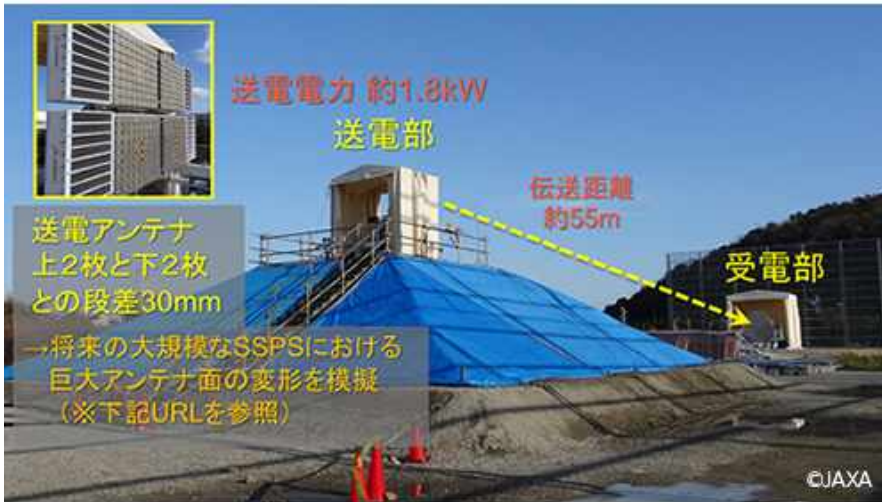
宇宙太陽光利用に伴う活動原則として考慮すべき事項 (小菅敏夫氏による)

1. 宇宙太陽光利用(太陽エネルギーという天然資源の利用)は第1条で認められている宇宙の利用の自由であり、宇宙法、国際憲章を含む一般国際法に従う限り認められている。ただし、全ての国の利益のために行われる活動であること及び途上国に対する配慮をすることが必要。
2. 月その他の天体を含む宇宙空間は利用、使用、選挙その他いかなる手段によっても国家の取得の対象とはならない(宇宙条約2条、月協定11条)。
3. 条約当事国は政府機関であれ非政府団体によるものであれ、宇宙活動に対し国際的責任を有する(宇宙条約6条)。
4. 宇宙活動による損害については、当事国は損害賠償責任を負うとともに、地上及び空中における損害を与えた場合においては無過失責任主義による責任を負い、最終的に国家が責任を有する(宇宙条約7条、宇宙損害責任条約)
5. 宇宙及び地球の環境保護及び他の当事国などの宇宙活動に対して有害な干渉を及ぼさない(宇宙条約9条、月協定、ITU憲章等)。

7. 現状の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))

送電ユニット

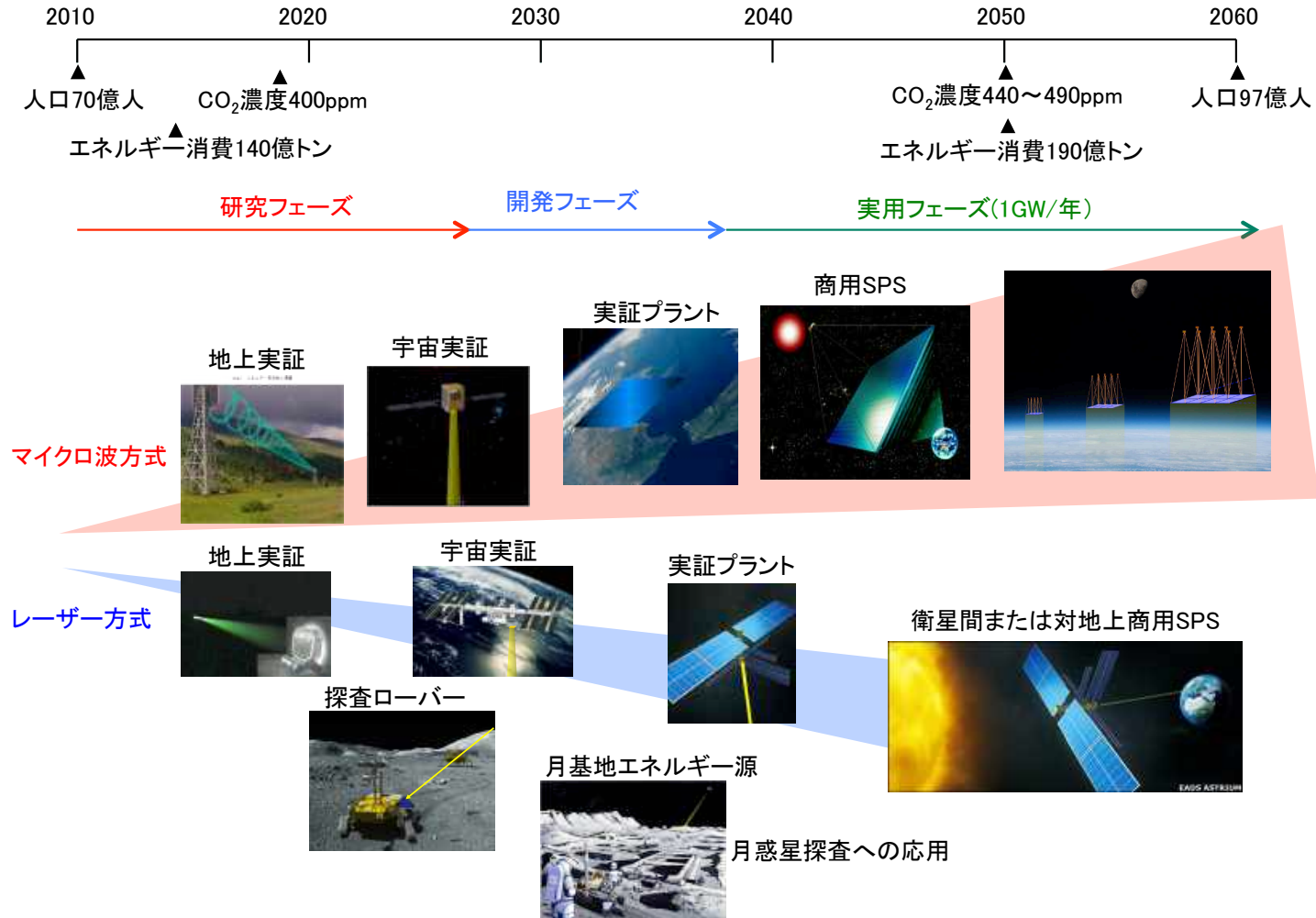


計測ユニット



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

研究開発の考え方



▶ レーザー方式は、天候の影響を強く受けることから、地上への送電よりも宇宙機間あるいは月惑星探査で利用される可能性が高い。

具体的な研究開発の案

研究フェーズ



地上実証



小型の軌道上実証



100kW 級軌道上実証



開発フェーズ



2MW級の軌道上実証



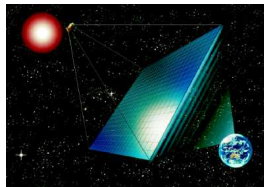
200MW級のプラント実証



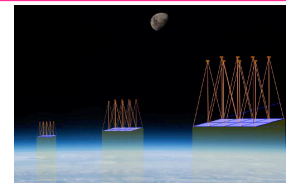
実用フェーズ



1GW級商用SPS 1号機



商用SPS本格的建設・運用 (1SPS/年)



▶ ここ数年中に小型の宇宙実証に着手できれば、2040年代には実用のフェーズに入ることができる。

宇宙太陽光発電所のロードマップの前提となる 宇宙輸送系のロードマップ

フェーズ	小型実証	大型実証	小型プラント実証	大型プラント実証	商用初号機	商用
実施時期	2024年頃	2028年頃	2033年頃	2038年頃	2043年頃	2043年以降
軌道	低軌道	低軌道	1000km	静止衛星軌道	静止衛星軌道	静止衛星軌道
電力規模	数kW	100kW	2MW	200MW	1GW	1GW
実証項目	400kmビーム制御 大気・電離層通貨実証	End-End実証(地上受電)	MW級プラント実証(地上配電)	100MW級プラント実証	1号機フルスケール実証	—
総重量	500kg	15トン	42.5トン	5313トン	26563トン	26563トン
建設期間	NA	NA	6ヶ月	3年	5年	1年
ペイロード重量	500kg	15トン	10トン	50トン	50トン	50トン
地上から低軌道の輸送系	小型ロケット(ELV) 500kg、低高度	大型ロケット(ELV) 15トン、低高度	再使用型(RLV) 10トン、1000km 1機5回往還 1ヶ月に1回打上	再使用型(RLV) 50トン、500km 1機207回往還 5日に1回打上	再使用型(RLV) 50トン、500km 3機各345回往還 2日に1回打上	再使用型(RLV) 50トン、500km 15機各69回往還 毎日2.8回打上
軌道間輸送機(OTV)	NA	NA	NA	45トン(燃料38トン) 往復4ヶ月 16機各8回往還	45トン(燃料38トン) 往復4ヶ月 46機各14回往還	45トン(燃料38トン) 往復4ヶ月 226機各3回往還



イプシロンロケット



H3 ロケット

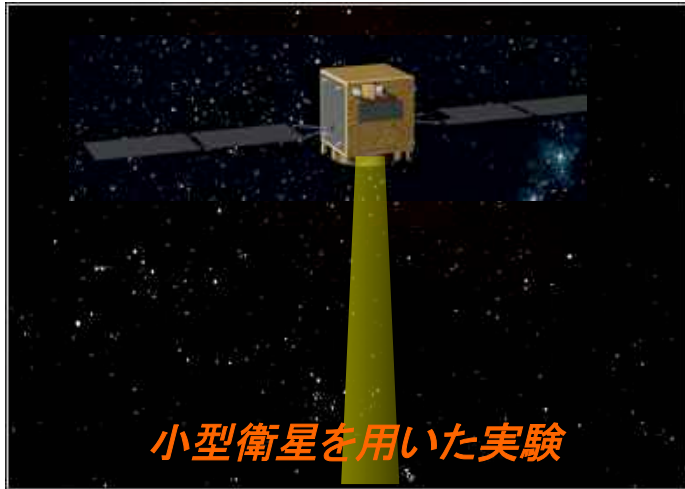


再使用輸送機

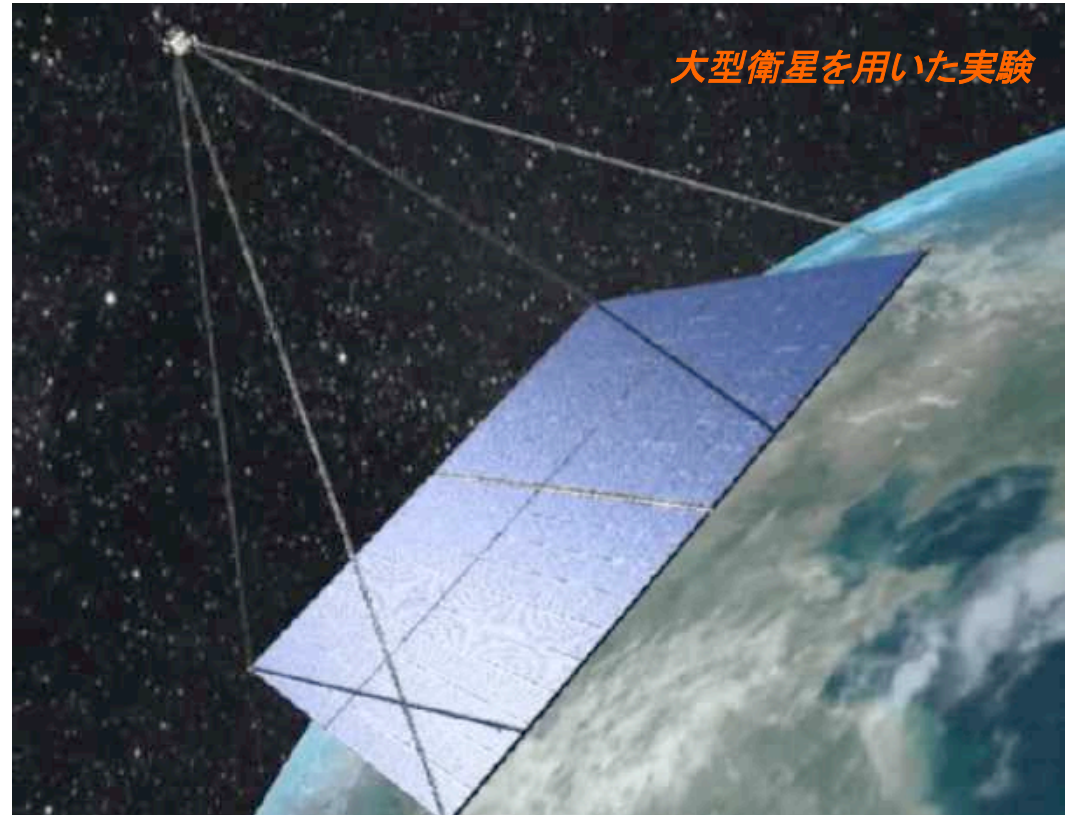


軌道間輸送機(イメージ図)

早期に実施すべき無線送電技術実証のための宇宙実験










高度:400km程度、電力レベル:1-5kW程度。送電ビームの精密方向制御技術の実証と電離層の通過実証を行う。



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・宇宙開発への応用の可能性)

利用家	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(他の応用提案多数)		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)
車両等のバッテリーへの電力供給	自動車バッテリーの充電(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(コロラド大)		送電技術(大電力) 受電技術 ビーム方向制御技術(精)

8. 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……