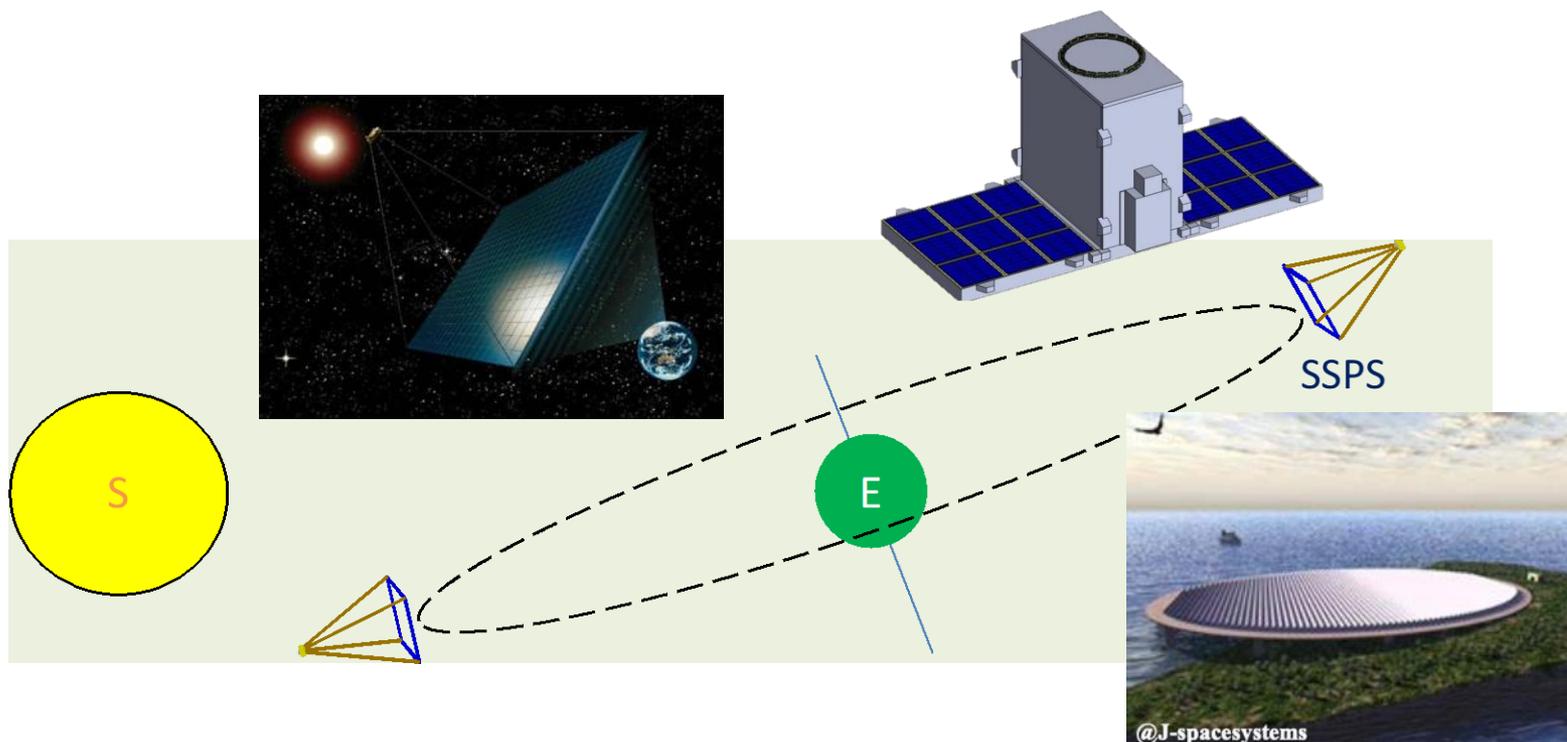


# 宇宙太陽光発電システム（SSPS）の実現に向けた 研究開発の現状



2023年6月  
宇宙システム開発利用推進機構（J-Spacesystems）

# 目次

---

1. はじめに：SSPSとは
2. SSPSの研究動向
3. SSPS研究開発ロードマップ
4. 2022年度までの実績と今後の取り組み
5. 実証衛星プロジェクト
6. まとめ

# 1. はじめに： 宇宙太陽光発電システム(SSPS)とは

## Space Solar Power System(SSPS)

### 宇宙太陽光発電システムとは

・宇宙空間に打ち上げた衛星が、太陽エネルギーを使って発電し電波で地上に送電し、地上で電力を利用する仕組み

### 主な特長

- ①運用時に二酸化炭素を全く排出することがないため、地球環境、温暖化対策としても有効である。
- ②地上の太陽光発電と比べて、昼夜や天候に左右されない安定な電力供給が可能である。(太陽光利用効率 は 地上の約10倍)

### 意義

- ①エネルギー資源の多様化
- ②エネルギー輸出国への転換
- ③エネルギー安全保障への貢献

### 技術課題

- ①宇宙発電・送電部の薄型軽量化技術
- ②高効率な発電・送電・受電技術
- ③高効率と安全な運用を実現するエネルギー伝送ビーム制御技術
- ④大型構造物を宇宙空間に輸送し、組み立て、運用・維持する技術

## 宇宙太陽光発電システムのイメージ(100万kW) 宇宙太陽光発電衛星 (地上36000km上空)

@約2km四方の  
太陽電池/送電パネル

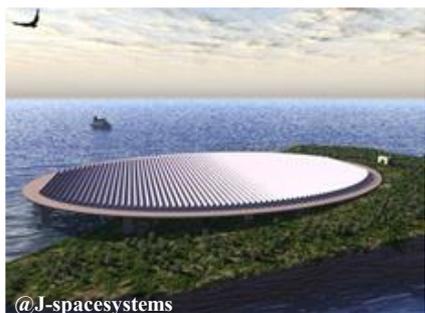
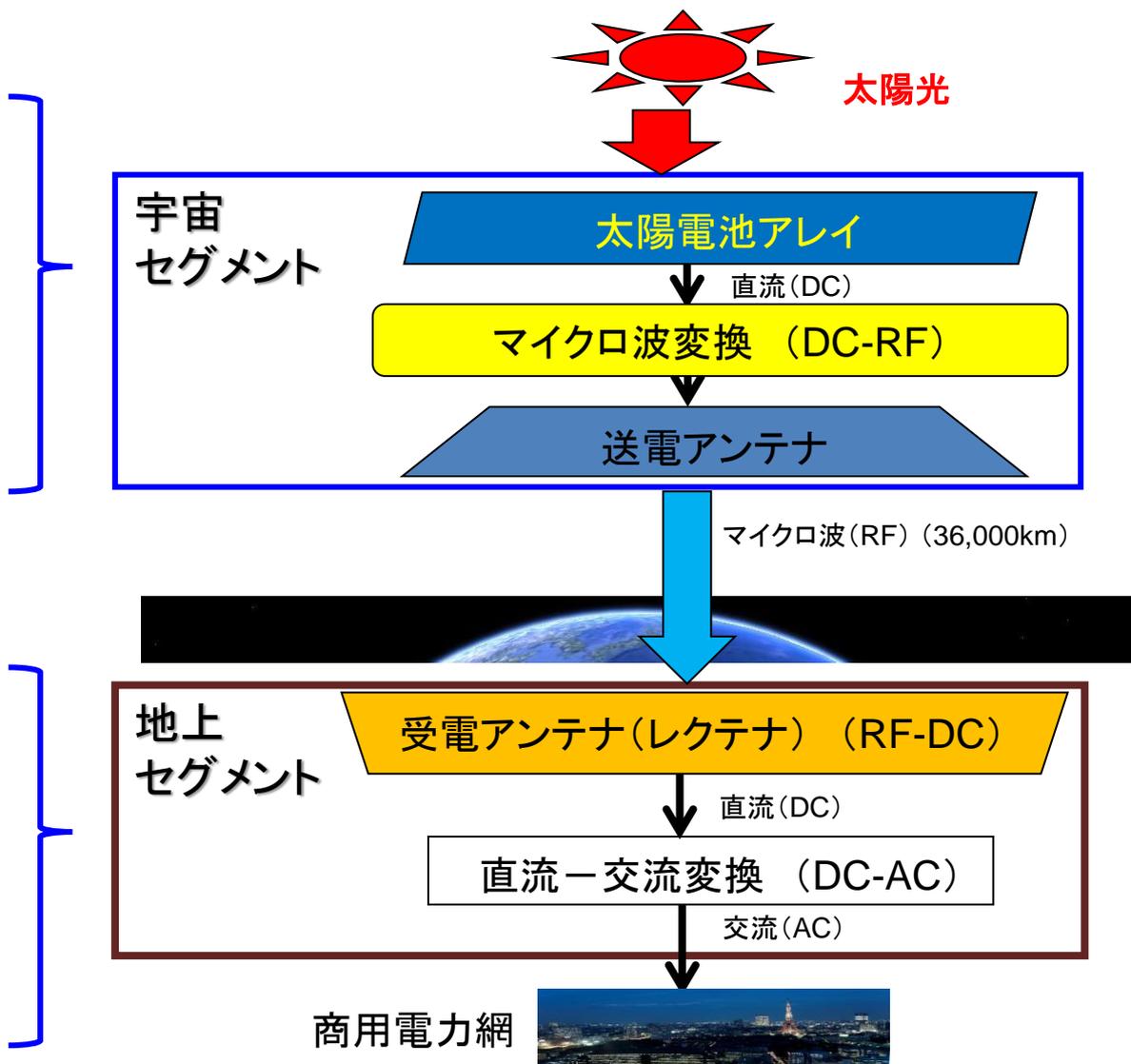
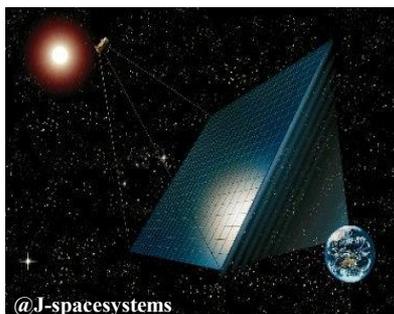
@重力傾斜姿勢安定  
(月がおもての面を常に  
地球に向ける原理)

太陽エネルギー  
⇒電気エネルギー  
⇒マイクロ波エネルギー

パイロット信号を発する地上  
受電システムのみマイクロ  
波エネルギーを送る。



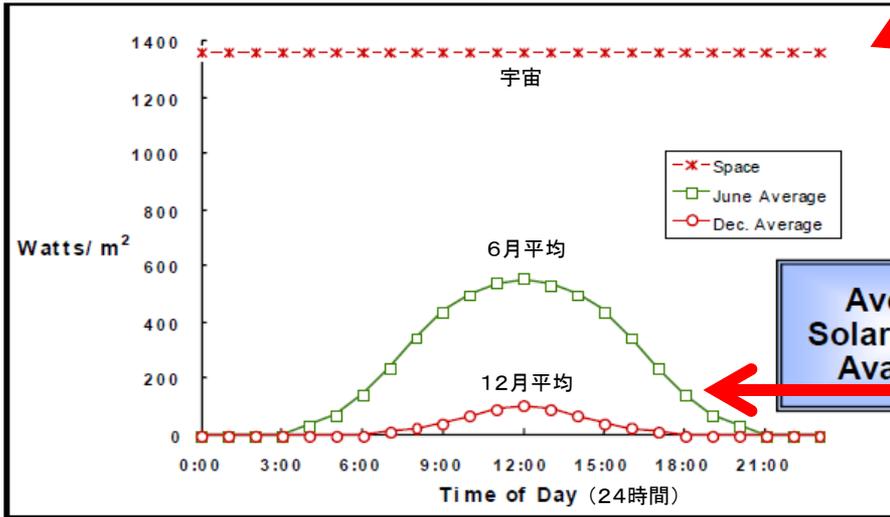
# 1. 宇宙太陽光発電システム (SSPS) とは



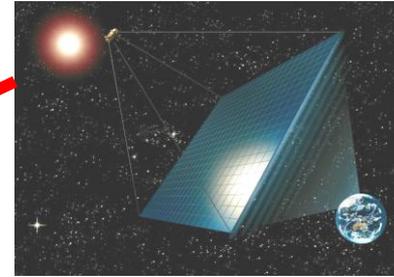
Rectenna : (rectifying antenna)

# 1. 宇宙太陽光発電システム (SSPS) とは

1日の日射量(英国の例)

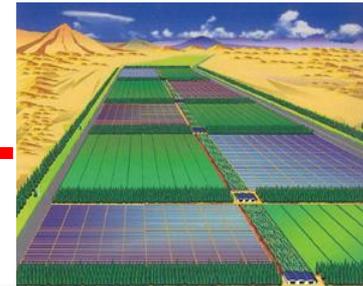


Average Solar Energy Available



宇宙

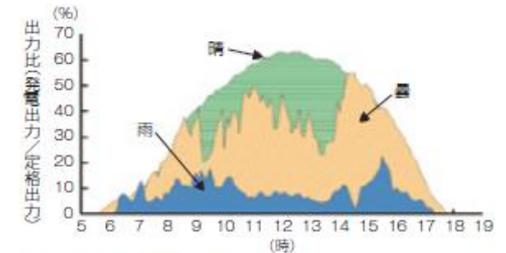
日射量: 大  
年間を通じて安定  
ベースロード



地上

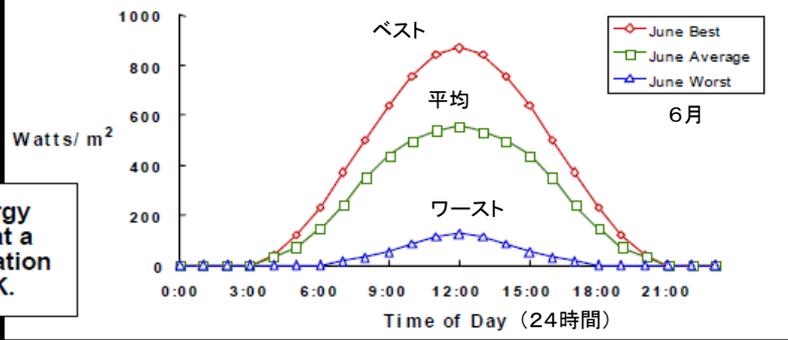
日射量: 昼間のみ  
季節や天候により変動  
蓄電設備要

太陽光発電の天候別発電電力量推移



(出所) 資源エネルギー庁調べ

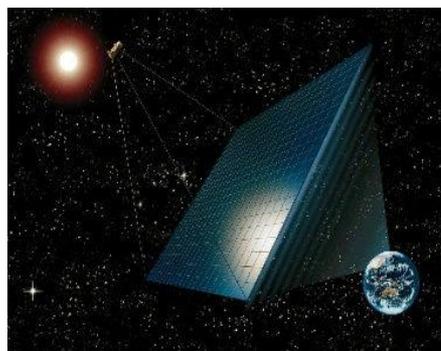
Solar Energy Available at a Typical Location in the U.K.



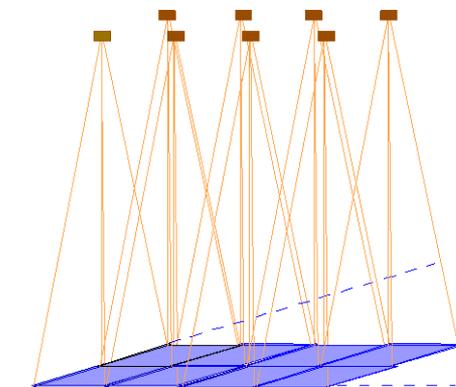
# 1. 宇宙太陽光発電システム(SSPS)とは

## ■方式の違い

送電方式	特徴
マイクロ波送電	○大気(雨や雲を含む)の影響を受けない <b>全天候型</b> 。 ○ビーム方向制御は <b>電子方向制御</b> が可能。 ○レーザーに比べエネルギー密度は低く <b>安全な運用</b> が可能。 △宇宙と地上に大きなアンテナが必要となる。
レーザー送電	○エネルギー密度が高くシステムを <b>コンパクト</b> にできる。 △大気による吸収や雲による散乱影響を受ける。 △エネルギー密度が高く安全性への十分な配慮が必要。 △レーザービーム方向の機械的精密制御が不可欠。

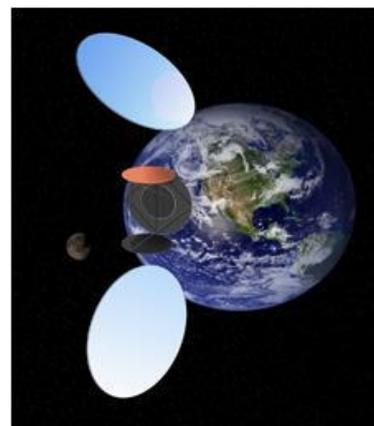


USEF2002モデル(シングルバス・タイプ)



USEF2006モデル(マルチバス・タイプ)

マイクロ波送電タイプのSSPS(ベーシックモデル): USEF



マイクロ波送電タイプのSSPS  
出展: JAXA



レーザー送電タイプのSSPS  
出展: JAXA

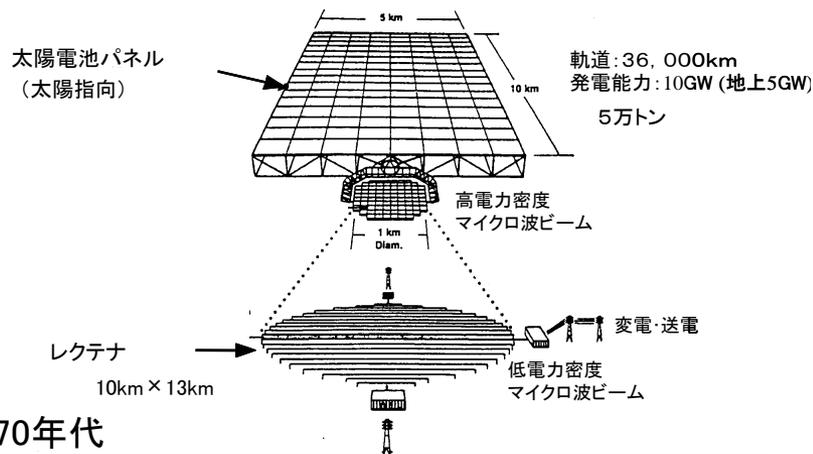
## 2. SSPSの研究動向(米国)

米国 (1960年代、1970年代の研究はアメリカが中心)	
1964年	模型ヘリコプタへの送電実験 (ブラウン:米)
1968年	ピーター・グレーザー博士(米国)が <b>太陽発電衛星(SPS)を提唱</b> 。1973年特許取得。
1975年	屋外で1.6km先への送電 (ブラウン:米)
1970年代初頭	アメリカでSPSに関する技術的適合性の検討開始
1978年	<b>NASA/DoEが概念設計(CDEP) (レファレンスシステム)</b> (CDEP: SPS Concept Development and Evaluation Program)
1980年	<b>研究凍結</b> (高い建設コストと発電価格が問題、経済的な実現性に向けた研究を継続し、10年ごとに報告することを義務づけ)。 アメリカ大統領財政緊縮政策。
1995年~97年	・NASA、概念検討(Fresh Look Study)を実施(技術進展の確認)。
1998年	・Fresh Look Studyの成果の見極めとしてSPS Concept Definition Studyを実施。
1999年~2000年	・NASA、先行的研究及び技術開発プログラム(SERT)を実施。 (政府ミッション及び商業市場におけるMWクラス送電の研究) (全米研究評議会NRC: 潜在的価値はあるが低コスト化が必要)
2001年	・NASA、軌道上実証計画の検討。
2002年~04年	・NASAは全米科学財団(NSF)、米国電力研究所(EPRI)と共同で技術的成熟度合(SCTM: SSP Concept Technology Maturation) の概念検討。
2007年	・米国防総省国家宇宙安全保障局(NSSO)によるSBSP(Space-Based Solar Power) スタディの実施。(石油枯渇への不安)

NASA: アメリカ航空宇宙局(National Aeronautics and Space Administration)

DoE: アメリカ合衆国エネルギー省(United States Department of Energy)

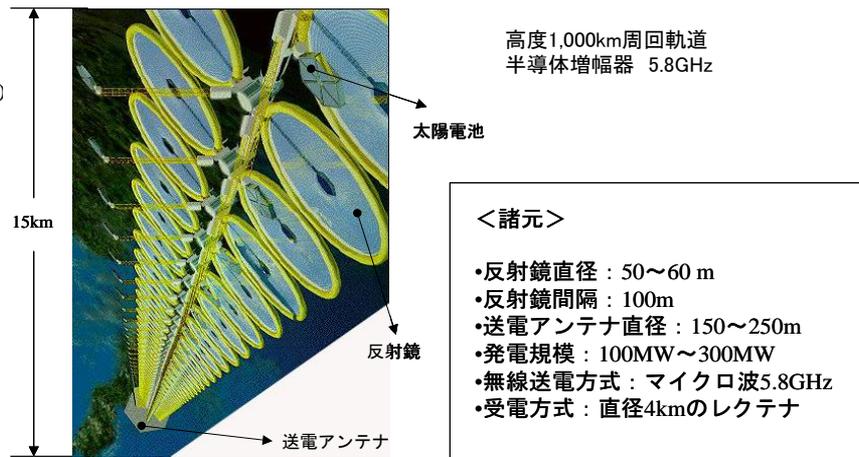
# 2. SSPSの研究動向(米国NASAのSSPS研究例)



1970年代

NASA/DoEの概念設計(レファレンスシステム)  
CDEP

CDEP: 概念設計評価プログラム (SPS Concept Development and Evaluation Program)  
SERT: 先行的研究及び技術開発プログラム (SSP Exploratory Research and Technology)



1995  
~1997年

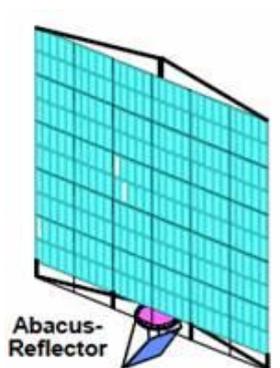
NASAによる概念検討: Fresh Look Study  
(サンタワー型)

<諸元>

- 反射鏡直径: 50~60 m
- 反射鏡間隔: 100m
- 送電アンテナ直径: 150~250m
- 発電規模: 100MW~300MW
- 無線送電方式: マイクロ波5.8GHz
- 受電方式: 直径4kmのレクテナ

1999

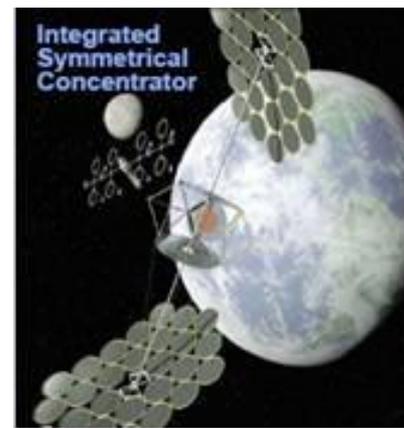
~2000年



先行的研究及び技術開発プログラム: SERT  
(SSP Exploratory Research and Technology)  
アバカス型

2002

~2004年



NSF(全米科学財団)、EPRI(米国電力研究所)と共同検討。  
SCTM (SSP Concept Technology Maturation)  
Integrated Symmetrical Concentrator型

- 実用性の研究
- 軌道上技術実証計画の検討

## 2. SSPSの研究動向(米国、欧州)

国名	関連機関	調査結果の概要
米国	海軍研究所	国防省、商務省へのSSPSの重要性(燃料輸送・自然災害緊急対策等)の提案が、7つの賞のうち4つを受賞(2016年3月)。 <b>ISSでのマイクロ波送電デモ実施(2020年)、X-37Bによる宇宙太陽光発電の実験(2020年)</b>
	民間企業	電力会社Pacific Gas & Electric (PG&E)が中小企業のSolaren社とSSPSによる電力を供給する買電契約を結んだ、契約容量は20万kWとの報道(2009年)。Northrop Grumman社がCaltechに3年総額\$17.5 millionをSPS研究費として払う契約と報道(2015年4月)。 (2016年9月。CALTECHの教授が来日。METI、京大、JAXA、企業、J-spacesystemsと意見交換。太陽電池、構造物、フェーズドアレイを研究中。個人寄付でSpace Solar Power Project(SSPP)も始まっている。政府予算獲得に期待。)
欧州	ESA	SSPSは、2003~05の総合研究プログラムの一つとして採用され、第1フェーズの地上プラントとSSPSとの比較等の研究を行ったが、それ以来目立った活動は見られない。 ESA ESOCのLeopold SummererがSSPSのアイデア募集を行ってESAとしての次の活動を模索して(2020年秋頃) Pinolet氏(フランス)がLe Union島でのマイクロ波電力伝送実験を提案
	民間企業	SSPS研究を行っているEADS社では、1.5 $\mu$ 帯の赤外線レーザーを用いる方がマイクロ波より効率が良いとしている。EADS Astriumは2020年までに20-25kWのレーザーを使ったネットワークが運用可能と考え、また5年以内には国際宇宙ステーションを利用したレーザー方式による10-20kWの軌道上実証を行うことも検討していた(2011年)。Ian CashとSICA DesignがCASSIOPeiAを提案(2016年) <b>英国政府がFrazer-NashとOxfordEconomicsに宇宙太陽光発電(SBSP)に関する調査を委託(2020年)</b>

NIAC\* : NASA Innovative Advanced Concepts)

Caltech: カリフォルニア工科大学(California Institute of Technology)

## 2. SSPSの研究動向(中国、UAE)

国名	関連機関	調査結果の概要
中国	全般	近年、SSPSおよび関連研究開発活動が数多く存在し、重点的なSSPS研究開発の取り組みや、国際的アウトリーチ活動も含まれる。米国・欧州・日本の研究成果についても多くの調査を進めている。 <b>宇宙太陽光発電実験基地建設プロジェクトが重慶市で開始(2018年)</b>
	CAST	中国SSPS研究開発の中心は、中国空間技術研究院(China Academy of Space Technology: CAST)で、SSPS商業化を達成するための5つのステップを提示している。①2010年までに、Chinese Reference Systemの設計を完了。②2020年までに、軌道上構築およびWPT技術の産業レベル試験を完了。③2025年までに、低軌道での最初の100kW SSPSの実証を完了。④2035年までに、100 MW SSPSの試験機で電力供給を実証する。最後に、⑤2050年までに、静止軌道(GEO)システム上で、最初の商用SSPSを運用。
	国際活動	2010年春、四川国際クリーンエネルギーサミット(SICES 2010)を開催。米国、欧州および中国から専門家が多数参加し、特にSSPSを含む先端技術の商業化アプローチが議論された。2012年のITU-Rで無線電力伝送に関して中国から積極的なコメント。北京IAC2013でSSPS関連発表あり。国際宇宙開発会議(ISDC2015)で概念設計を発表。EnMC 45 <sup>th</sup> で、地上デモシステム構想を発表。2年以内に実施検討(2015)。
UAE	万博準備委員会	UAEで、2020年に開催予定の万国博覧会に向けて、万博準備委員会が宇宙太陽光発電の実現可能性を検討している。2016年3月に各国の有識者を集めてワークショップを開催した。今後、半年をかけてフィージビリティスタディを予定。企画:Falcon社、米国研究者。 スタディとりまとめ:英国QinetiQ社。 参加者:Expo運営委員会、Falcon社、英国QinetiQ社、米国米海軍研究所、レイセオン社、ボーイング社、テキサスA&M大学、中国CAST4名、財団法人宇宙カナダ、欧州から数名(太陽電池関係)、英国ベンチャー企業(推進装置)電話参加、日本から数名出席。2016年6月にUAEコンサルメンバー来日。

# 近年における海外での宇宙太陽光発電の研究開発進展

- 1960年代、1970年代までは米国が宇宙太陽光発電の研究の中心であったが、1980年代以降、京都大学などを中心に、日本が宇宙太陽光発電の研究を牽引。
- 近年になって、米国での宇宙太陽光発電の再評価やCaltechによる軌道上実証機の打上げ、中国における積極的な開発推進、欧州のSOLARIS計画が承認されるなど、複数の巨額事業が立ち上がっている。

国・地域	研究開発の動向
米国	<ul style="list-style-type: none"><li>・ 2020年、国際宇宙ステーションでのマイクロ波送電デモ、無人宇宙往還機X-37Bでのモジュール実験</li><li>・ 2021年、空軍研究所(AFRL)が軌道上実証試験を2023年～2024年に計画（SSPIDR）</li><li>・ <b>2022年、NASAの技術・政策・戦略室(OTPS) によるSSPS再評価の検討が開始</b></li><li>・ <b>2023年、カリフォルニア工科大学 Caltech が 1 億ドル以上の寄付を受けSSPI(Space Solar Power Initiative)プロジェクトを実施しており、1月に軌道上実証機の軌道投入に成功</b></li></ul>
欧州	<ul style="list-style-type: none"><li>・ 2020年、欧州宇宙機関(ESA)が地上及び月面における宇宙太陽光発電への取組に関する新アイデア公募</li><li>・ 2020年、英国宇宙局(UKSA)がFrazer-NashとOxford Economicsに宇宙太陽光発電 F S 調査委託</li><li>・ <b>2022年、ESAがSOLARISと呼ばれる欧州向けSBSP(Space Based Solar Power)準備プログラムを正式に開始（参考1）</b></li><li>・ 2023年、英国衛星利用推進センターがUKSA資金を受けSBSPシステムの研究開発プロジェクトを開始</li><li>・ <b>2023年、SBSPへの共同投資の可能性を含む、宇宙における英国とサウジアラビアの協力関係について協議を開始</b></li></ul>
中国	<ul style="list-style-type: none"><li>・ 2014年、中国国家航天局が宇宙太陽光の専門家チームを立ち上げ、研究開発を継続中</li><li>・ <b>2018年、宇宙太陽光発電実験基地を重慶市で建設開始、西安大学が宇宙太陽光発電プロジェクトを開始</b></li><li>・ <b>2022年、西安電子科学大学キャンパス内に大規模な地上実験施設が完成（参考2）</b></li></ul>

# 欧州 ESAによるSOLARIS計画

**SOLARIS: ESA R&D into Space-Based Solar Power**

**SOLARIS Industry Day, ESTEC 18 Oct 2022**

THE EUROPEAN SPACE AGENCY

## ENGINEERING AND DEVELOPMENT CHALLENGES

System element	Description	Time to development (indicative)
Reflector system	Array of reflector units mechanically connected with associated sub-elements such as pointing mechanisms and wireless communication systems	2-5 YEARS
Connecting boom	Structural connection between the reflector system and energy conversion system	5-10 YEARS
Energy conversion system	Converts sunlight to radio frequency - includes sub-elements such as antennas and associated thermal management systems	10-20 YEARS
Attitude control system	Controls the attitude and position of SBSP thanks to onboard hardware and software	5-10 YEARS
Backbone data-handling network	Hardware architecture for very large wireless networks with core processing units and wireless terminals for 2,000,000+ clients	5-10 YEARS
Network control software	Software architecture for very large wireless networks for 2,000,000+ clients	5-10 YEARS
Communication to the ground	Telemetry, tracking and control (TT&C) systems onboard the space platform	READY AND AVAILABLE
On-orbit assembly and maintenance	Robotic arms to enable robotic operations and associated sub-elements such as batteries, charging stations and storage units	10-20 YEARS
Space-debris mitigation system	In-orbit space situational awareness (SSA) systems with collision-avoidance capabilities to prevent impacts with human-made or natural debris	5-10 YEARS

Subsystem element	TRL	Development Degree of Difficulty
<b>Core Power Systems</b>		
Satellite		
Satellite collect	5	High
Satellite convert	2	High
Satellite transmit	4	Very High
Satellite structure	3	Very High
Satellite thermal management	3	High
Satellite control system	4	Medium
Satellite station keeping	3	High
Satellite communications	6	Low
Ground Station		
Ground receive	4	High
Ground antenna	7	Low
Ground distribute	7	Low
Ground grid connection	8	Very Low
Ground structure	7	Low
Ground control system	6	Medium
Ground operations: Power Control Interface	8	Low
Satellite operation: Mission Control Interface	4	High
Ground communications	4	Medium
<b>Enabling Systems</b>		
Satellite		
Spaceflight	7	High
Satellite manufacture (ground)	6	Low
In-orbit assembly	3	Very High
In-orbit maintenance	3	Very High
Decommission satellite	2	Very High
Ground Stations		
Receivem manufacture	4	Medium
Power station construction	8	Very Low
Operation station construction	8	Very Low
Maintenance of ground stations	7	Very Low
Decommission ground stations	8	Very Low



## ESA CAMPAIGN

October 2020

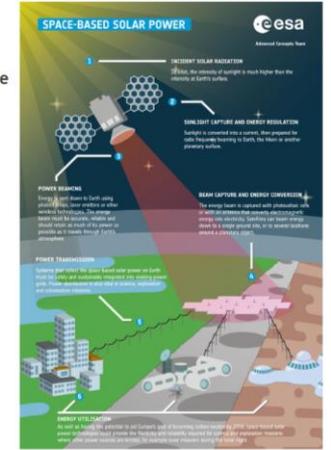
### Clean Energy - New Ideas for Solar Power from Space

New ideas to increase the feasibility of space-based solar power and support the development of clean energy.

#### Why are solar power satellites not yet a reality?

Solar power satellites are by design relatively large structures and require advances in a number of key technical areas that push the boundaries of what is currently feasible in space. Some of these current technological bottlenecks include, but are not limited to:

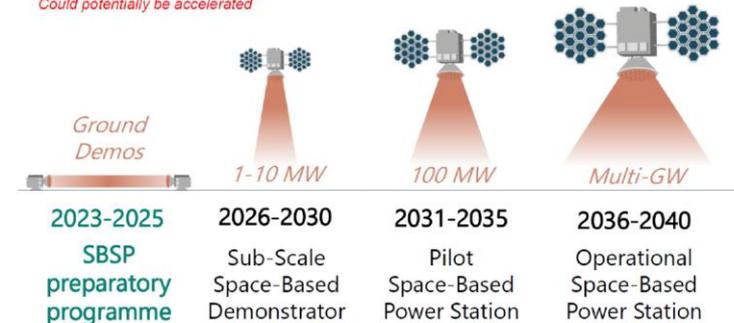
- Very large structures (manufacturing, deployment)
- Construction (materials, modularity, in-orbit manufacturing, robotics...)
- Power generation and onboard energy conversion (high voltages, efficient solar to electric and electric to microwave/laser conversions)
- Thermal systems (efficient large radiators and distributed thermal subsystems)
- Wireless power transmission systems (laser/microwave generation, control, focusing, pointing...)
- Microwave/laser to electric conversion at receiving sites)
- Operations (station keeping, autonomy, safety, resilience and redundancy, maintenance and servicing, re-fuelling including with in-space resources)
- Control (structures, formations, wireless power transmission beams)



## SOLARIS: Preparing for Space-Based Solar Power

When could commercial SBSP be ready?

*Could potentially be accelerated*

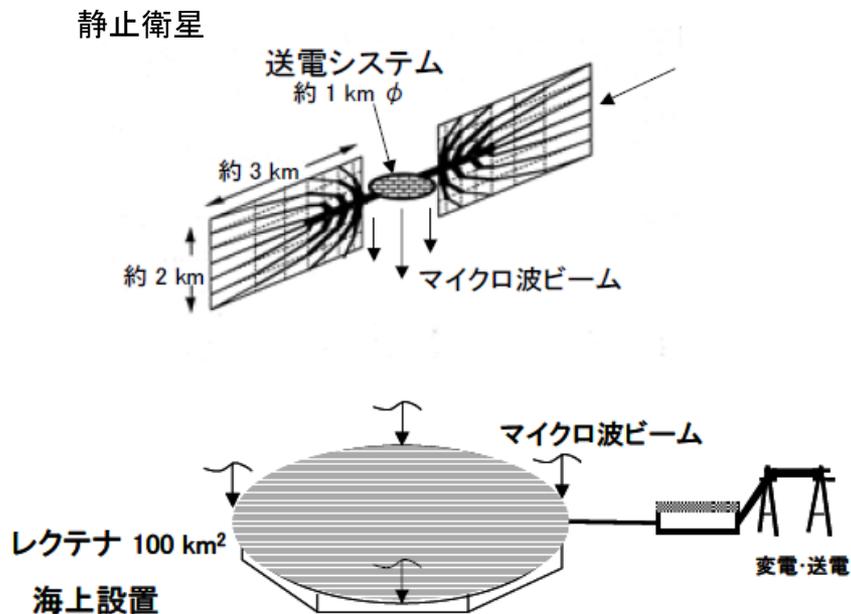


# 2. SSPSの研究動向(日本)

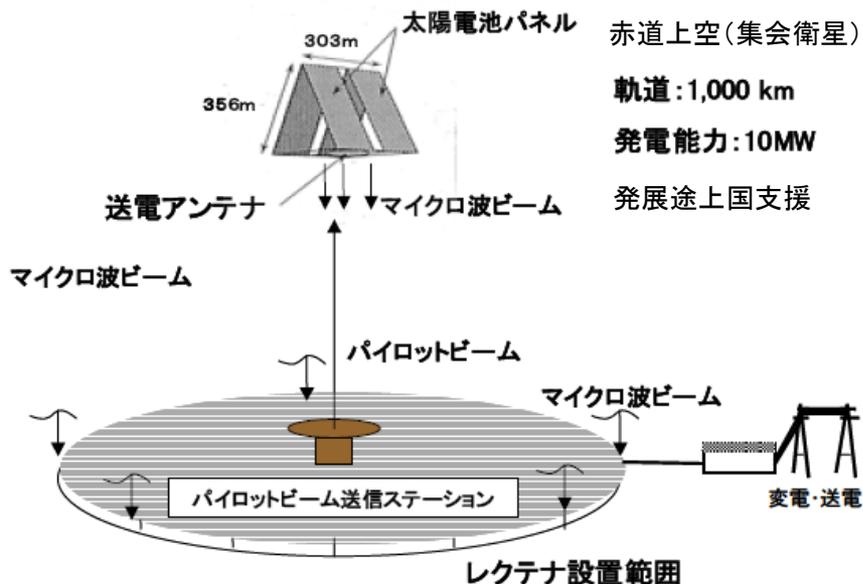
1983年 京都大学、宇宙研、他の合同研究Gが、宇宙でのロケットによるマイクロ波送電に成功(世界初)。  
以後、日本の研究がSSPSを牽引してきた、と言われる。

年度	1980~	1991 (H03)	1992 (H04)	1993 (H05)	1994 (H06)	1995 (H07)	1996 (H08)	1997 (H09)	1998 (H10)	1999 (H11)	2000 (H12)	2001 (H13)	2002 (H14)	2003 (H15)	2004-2007 (H16-H19)
我が国の調査 検討状況	SIAC SPS計画	NEDO 宇宙発電システムに関する調査検討						SIAC 宇宙発電衛星に関する調査研究	NASDA 宇宙太陽発電システム の調査・検討	NASDA/JAXA 宇宙太陽発電システムの研究					
		ISAS SPS2000概念検討			ISAS 太陽発電衛星SPS2000の研究										
	1983/MINIXロケット実験(京大・神戸大・ISAS) 	1992/MILAX飛行機実験(京大・神戸大・NICT) 		1995/山崎実験(京大・神戸大・関電) 						2000/SPRITZ小型SPSシミュレータ(京大) 			ふるしき衛星実験(神戸大・東大)/2006 		飛行船実験(京大・東工大)/2008 
USEFにおける 調査検討		NEDO検討に対する参加						SIAC 検討 に対する 参加			USEF (日機連) 宇宙太陽発電 システムに関 する調査研究	USEF (METI) 宇宙太陽発電システム 実用化技術調査研究	USEF 宇宙太陽発 電システム 構造システ ムの検討	USEF (METI) 太陽光発電利用 促進技術調査	
											・全体検討 ・フィージビリティ 検討	・システム 概要 ・評価手法 ・要素試作	・システム 概念検討 ・経済面、 環境面から の評価 ・要素試作	・構造システ ムの検討	・地上/宇宙無 線送電システ ムの検討 ・無線送電システ ムの安全・環境 影響

## 2. SSPSの研究動向(日本のSSPS検討例)



NEDO「宇宙太陽発電システムに関する調査研究」  
グランドデザイン(1993)



宇宙科学研究所SPS2000 システム(1991)

NEDO: 国立研究開発法人新エネルギー・産業技術総合開発機構  
ISAS: JAXA宇宙科学研究所

# 2. SSPSの研究動向 (J-Spacesystems)

宇宙基本計画 平成21年6月(宇宙開発戦略本部) 最新: 令和2年6月閣議決定

宇宙基本法 平成二十年法律第四十三号(平成二十七年 法律第六十六号による改正)

エネルギー基本計画 平成15年10月(閣議決定) 最新: 平成30年7月閣議決定

上記制定を受けて平成21年度から事業開始

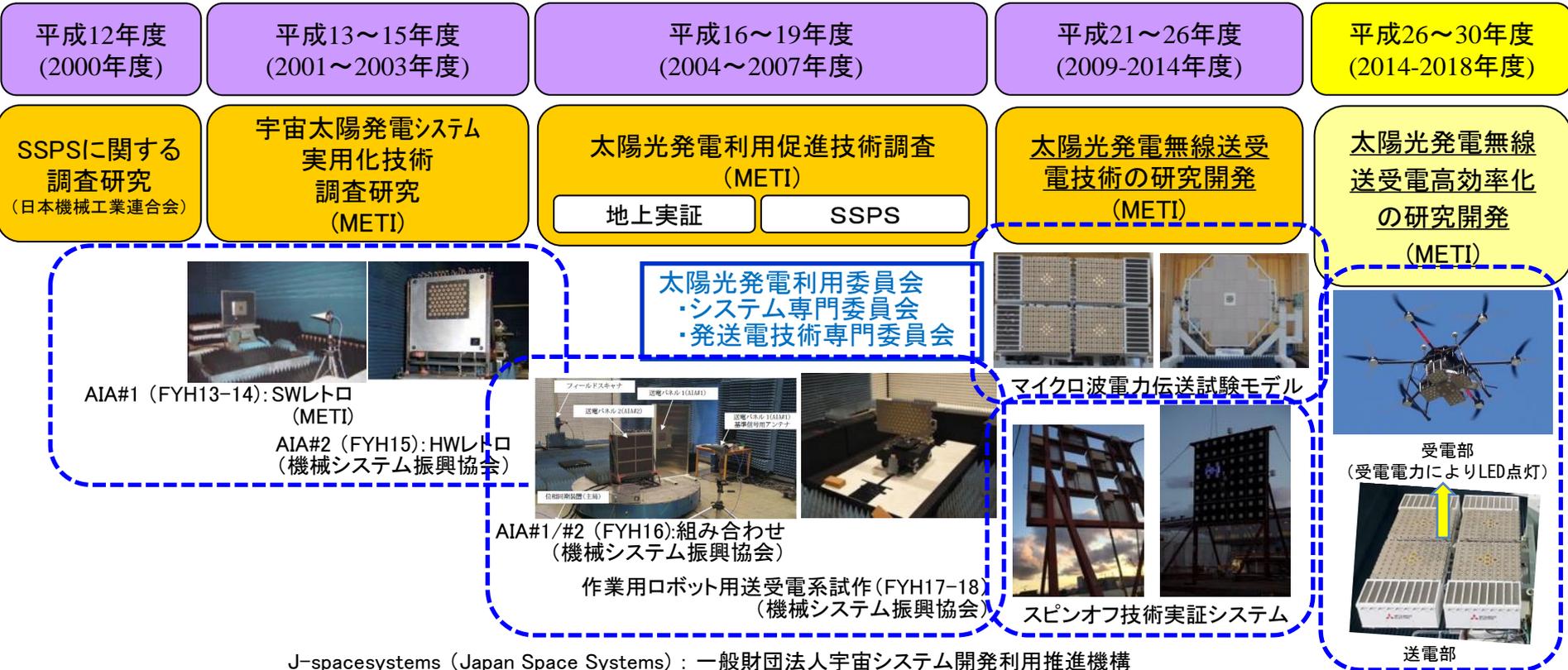
環境エネルギー技術革新計画(平成25年9月総合科学技術会議決定)

未来投資戦略2018(平成30年6月閣議決定)

エネルギー・環境イノベーション戦略(平成28年4月総合科学技術・イノベーション会議決定)

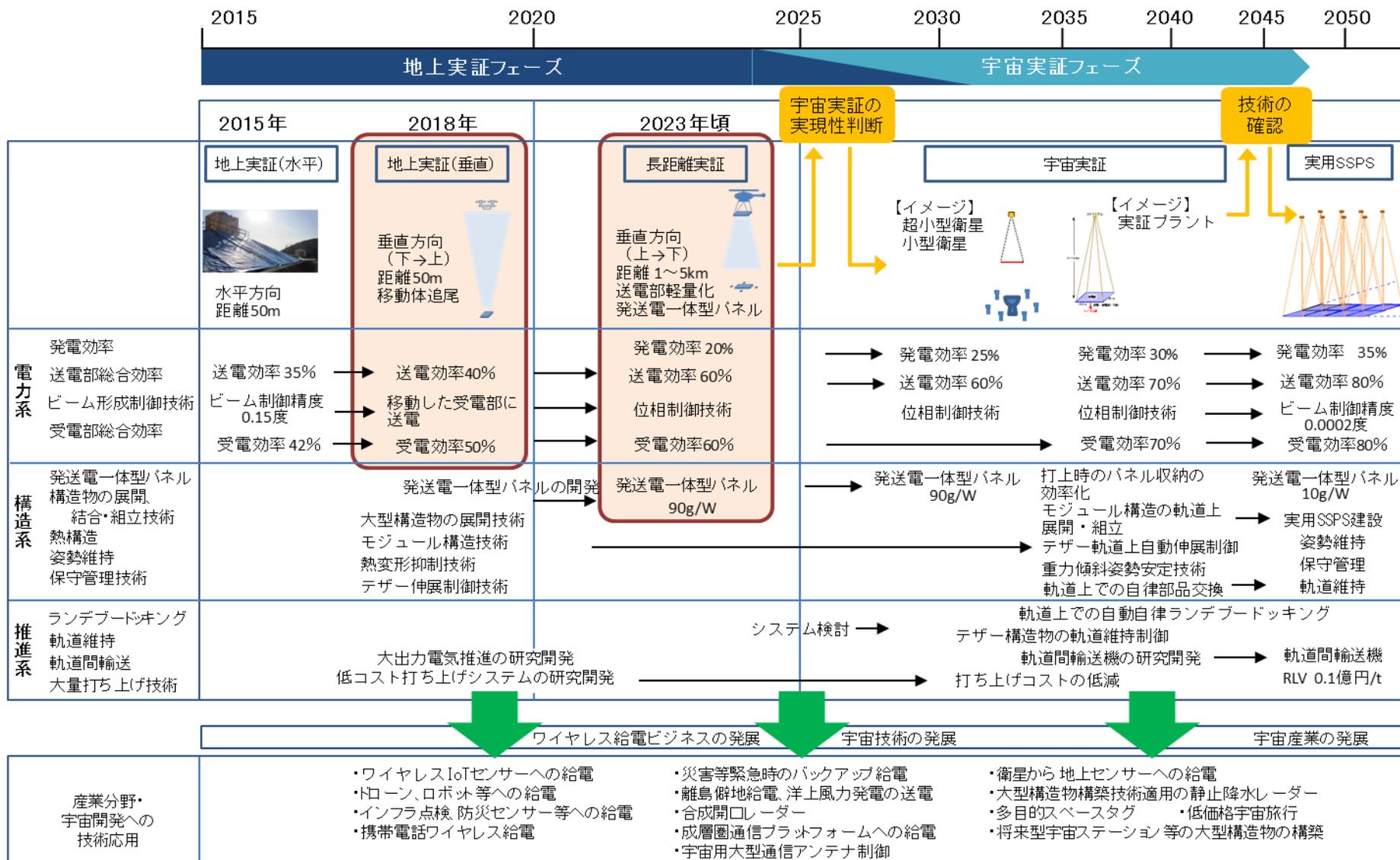
宇宙産業ビジョン2030(平成29年5月宇宙政策委員会決定)

▲ 2007年度ロードマップの設定 → 2016年度改訂



J-spacesystems (Japan Space Systems) : 一般財団法人宇宙システム開発利用推進機構

# 3. SSPS研究開発ロードマップ



# 3. SSPS研究開発のコンセプトモデル

## Space Solar Power System (SSPS)

### 宇宙太陽光発電システムとは

・宇宙空間に打ち上げた衛星が、太陽エネルギーを使って発電し電波で地上に送電し、地上で電力を利用する仕組み

### 主な特長

- ①運用時に二酸化炭素を全く排出することがないため、地球環境、温暖化対策としても有効である。
- ②地上の太陽光発電と比べて、昼夜や天候に左右されない安定な電力供給が可能である。(太陽光利用効率 は 地上の約10倍)

### 意義

- ①エネルギー資源の多様化
- ②エネルギー輸出国への転換
- ③エネルギー安全保障への貢献

### 技術課題

- ①宇宙発電・送電部の薄型軽量化技術
- ②高効率な発電・送電・受電技術
- ③高効率と安全な運用を実現するエネルギー伝送ビーム制御技術
- ④大型構造物を宇宙空間に輸送し、組み立て、運用・維持する技術

## 宇宙太陽光発電システムのイメージ(100万kW) 宇宙太陽光発電衛星 (地上36000km上空)

@約2km四方の  
太陽電池/送電パネル

@重力傾斜姿勢安定  
(月がおもての面を常に  
地球に向ける原理)

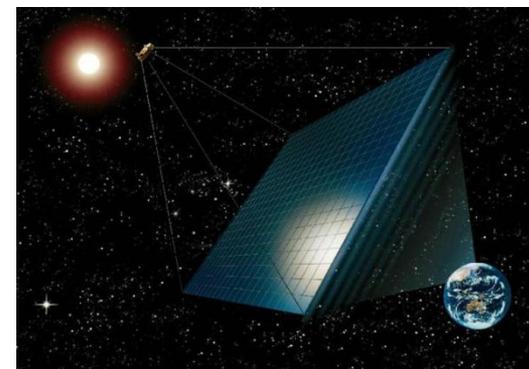
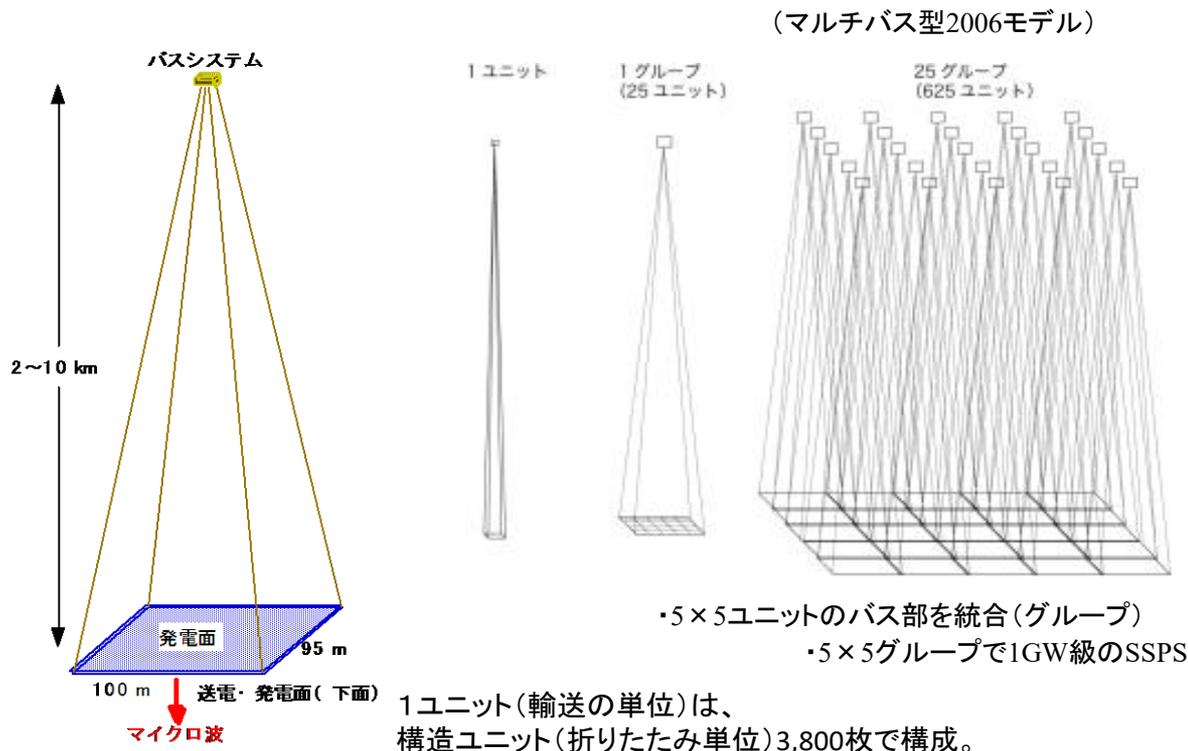
太陽エネルギー  
⇒電気エネルギー  
⇒マイクロ波エネルギー

パイロット信号を発する地上  
受電システムのみマイクロ  
波エネルギーを送る。



# 3. SSPS研究開発のコンセプトモデル

- ・発電電一体型パネルは、両面の太陽電池で発電した直流電力をマイクロ波に変換して下面から放射する。
- ・1ユニットの発電電一体型パネルの4隅をテザーで吊る。(広さ100m×95m, 厚さ20mm, 重量40t, 2MW送電)
- ・1システムは 25×25=625ユニットで構成。地上で1GW取出し。
- ・バス部でマイクロ波の基準信号を発生し、各モジュールへ原振の周波数と位相同期を無線により提供するため、モジュール間の有線のインターフェイスを持たない。



将来のSSPSイメージ  
(シングルバス型2002モデル)

- ・システムの大きさ: 2.5km×2.375km
- ・システムの重さ: 26,600トン
- ・発電衛星の送電出力: 1.3GW
- ・運用年数: 40年

平成19年度 太陽光発電利用促進技術調査 成果報告書

# 3. マイクロ波電力伝送地上実験(2014年度)

## 屋外試験:

伝送距離約54mで、平均約340Wの利用可能電力の取出しを確認。

・期間:平成27年2月~3月    ・場所:兵庫県内の屋外試験場

5.8GHz帯で半導体増幅器を使用したフェーズドアレーアンテナを用いて、複数モジュールの協調動作によって、キロワット級マイクロ波のビーム制御を行うシステムの屋外無線送電としては、世界的に例を見ない試験に成功。



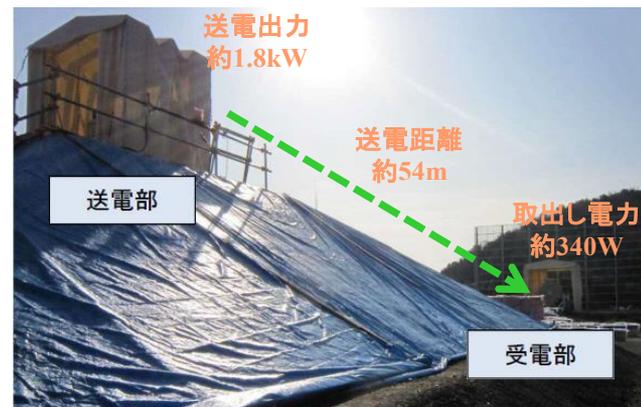
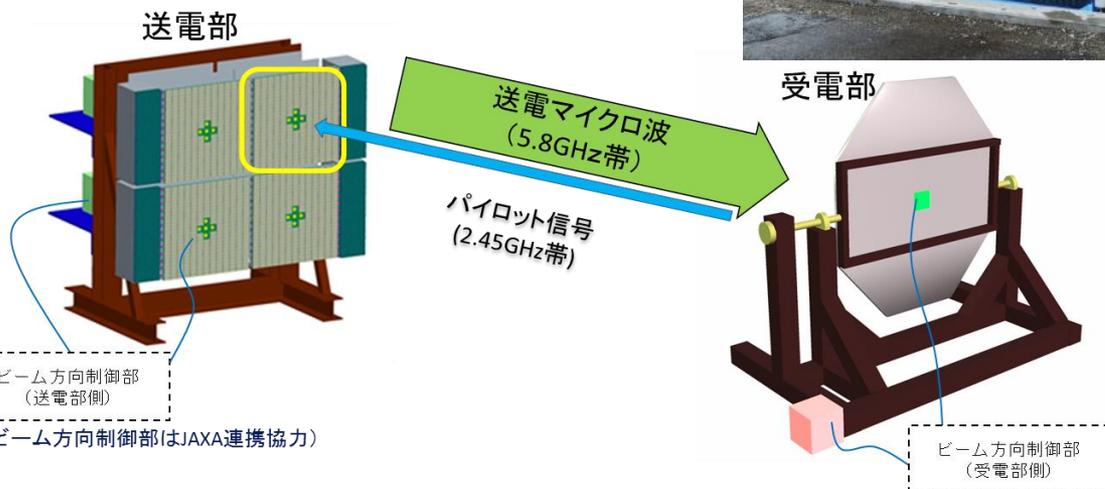
約0.6m×0.6m×0.025m  
×4モジュール

三菱電機(株)



約2.6m×2.3m  
×1モジュール

(株)IHIエアロスペース



# 3. マイクロ波電力伝送地上実験(2014年度)

既存技術を活用して、産業応用を目指した低コストな実証システムの試作評価。

・期間:平成27年2月    ・場所:三菱重工業(株) 神戸

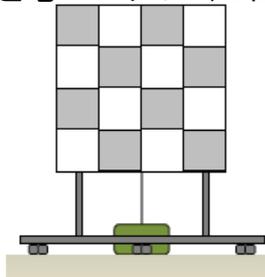
2.45GHz帯で距離約500mにおいて、約10kWの送電出力実験を行い、制御された条件下での動作を確認した。国内では最長、最大級電力の屋外無線送電実験に成功。



2.45GHz帯  
位相制御マグネトロン使用



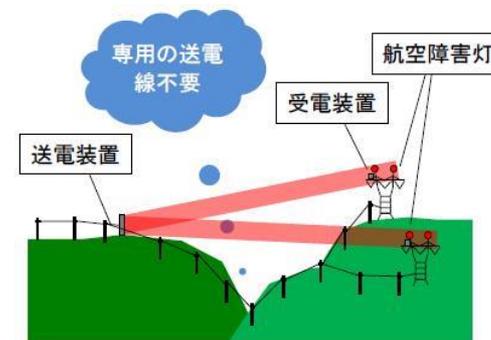
送電ユニット (正面)



- ・見かけの開口面積大 ⇒長距離送電
- ・建設初期の配置

応用例

- ・航空障害灯への送電
- ・離島への送電
- ・洋上風力発電所から送電



(出典) 三菱重工業株式会社

# 3. マイクロ波電力伝送地上実験(2019年度)

## ◆無線送受電システムの高効率化

- ・送電系：送電部総合効率40%（現状35%）を目標とし、44.8%を達成。
- ・受電系：受電部総合効率50%（現状42%）を目標とし、54.9%を達成。

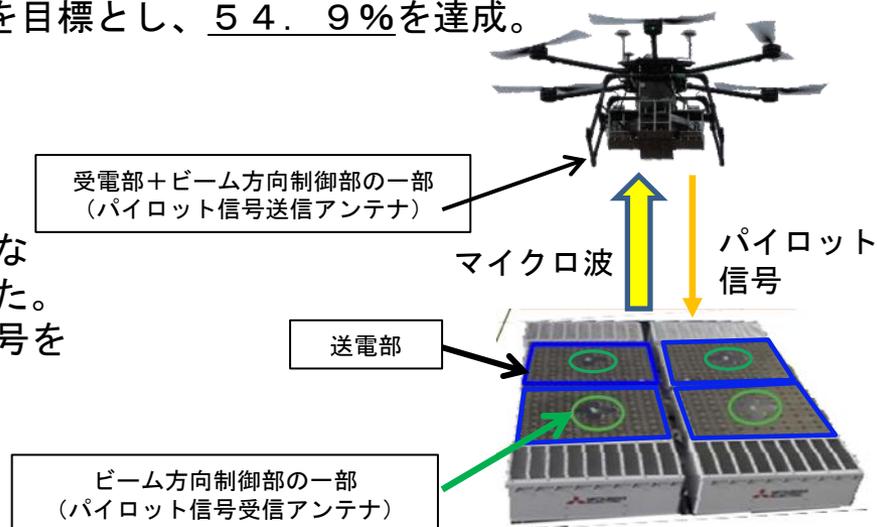
## ◆垂直方向マイクロ波無線送受電技術実証

### ・垂直送受電技術実証：

屋外の地面反射の影響のない環境での垂直方向（下から上方向）でのマイクロ波送電における適切なビーム形成技術を、マルチコプタを使用して実証した。また、マルチコプタを移動させた後、パイロット信号を受けて移動後の位置を特定し、その方向に送電するビーム方向制御技術を実証した。

### ・マルチコプタ等への給電技術実証：

受電部を搭載したマルチコプタへのマイクロ波による無線送電を実施し、電力として取り出せることを確認した。

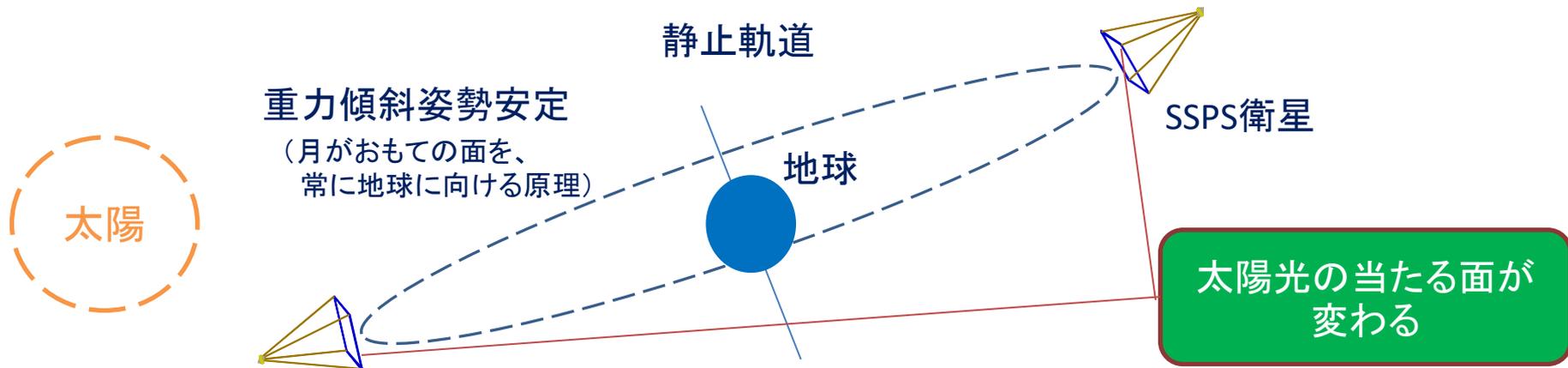


飛行ケース		取り出し電力	
No.	飛行内容	実測値 (Max)	計算値
1	送電部天頂19mをホバリング後、ラスタスキャン飛行	105.4W	123.1W
2	送電部天頂30mをホバリング後、ラスタスキャン飛行	42.5W	39.7W
3	送電部天頂30mをホバリング後、西7度でホバリング	39.3W	39.7W
4	送電部天頂30mをホバリング後、八の字飛行	36.9W	39.7W

# 4. 2022年度までの実績と今後の取り組み

## ① 発電一体型パネルの開発

- ・パネルの上面は太陽電池セル、下面は太陽電池セルと送電アンテナ（5.8GHz帯）を同一面に配置する発電一体型パネル（50cm×50cm程度）を開発する。



## ② 送電部の高効率化

- ・5.8GHz帯でのマイクロ波無線送受電技術に関し、送電部の高効率化のための方式及び機能性能配分の検討や試作を行い、送電部の供給電力（DC）と送電出力電力（RF）の比である総合効率60%を目指す。

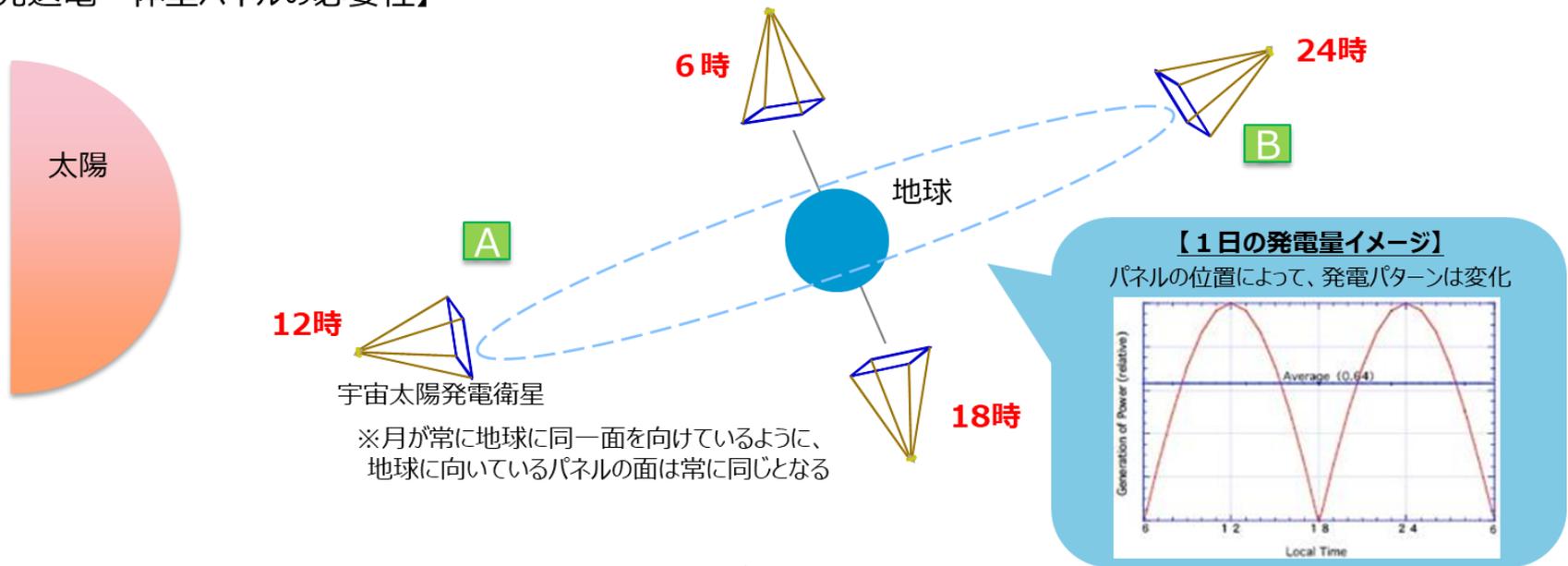
## ③ 長距離送電の実証

- ・供給電力は商用電源を使用し、長距離（1~5km）、垂直方向のマイクロ波電力伝送により、大規模無線送電システムに資する多素子の位相同期による無線送電技術及びビーム形成技術を多数枚パネル（全体で2m×2m程度）で実証する。なお、実証では、ビームパターンの測定を実施する。

# 4.1 発電電一体型パネルの開発

- 令和元年度から、研究開発ロードマップに基づき、宇宙太陽光発電システムの実現に必要な**発電と送電**を一つのパネルで行う**発電電一体型パネルの開発**等に着手。
- 発電電一体型パネルの開発により、宇宙空間において**より安定的に発電が可能**。

【発電電一体型パネルの必要性】



12時

宇宙太陽発電衛星

※月が常に地球に同一面を向けているように、地球に向いているパネルの面は常に同じとなる

6時

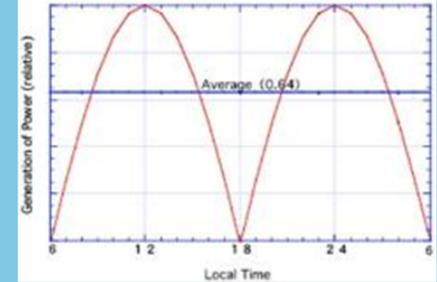
地球

18時

24時

【1日の発電量イメージ】

パネルの位置によって、発電パターンは変化



宇宙太陽光発電衛星が、「A」の位置にあるときは、上面（太陽側）に発電機能、下面（地球側）に送電機能があれば足りるが、「B」の位置にあるとき、下面（地球側）に発電機能がないと宇宙太陽発電衛星の発電量は大きく低下する。

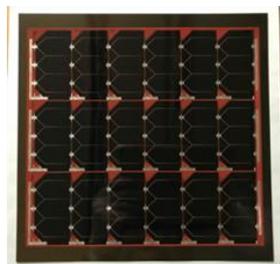
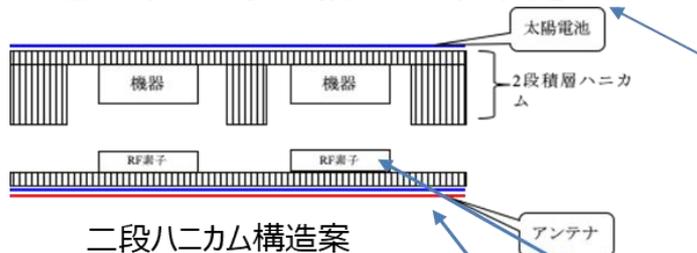
⇒ 片面にしか発電機能がない場合、両面に発電機能がある場合の約半分の発電量となる。また、日本が夜間の時間帯の発電ができないため、夜間供給電源としての役割を果たすことができなくなる。

【発電電一体型パネルの主な技術課題】

- ①最適な送電アンテナの選択
- ②発電セルとアンテナの最適な配置方法

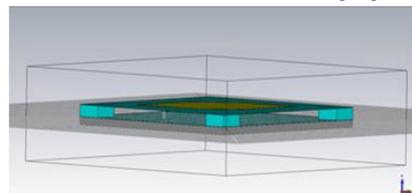
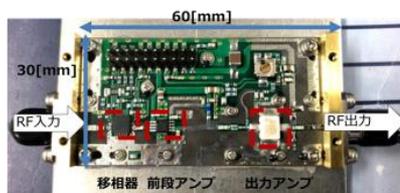
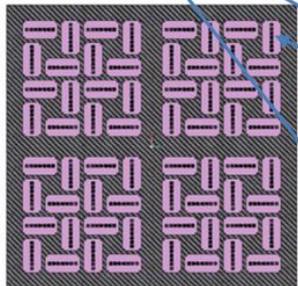
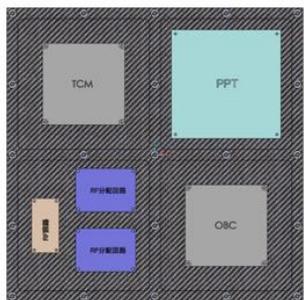
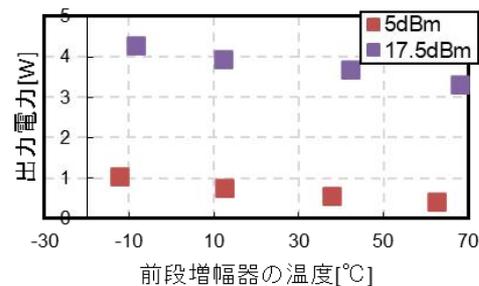
# 4.1 発電電一体型パネルの開発

## 【発電電一体パネル構造の検討】



搭載機器の構成を検討し、各搭載機器の特性評価を実施

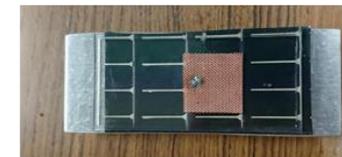
位相制御増幅器の特性評価



アンテナ混載太陽電池の解析モデル

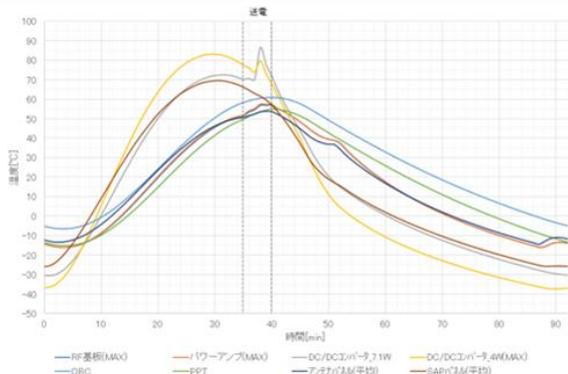
ボックス構造側機器配置案

位相制御増幅器の配置

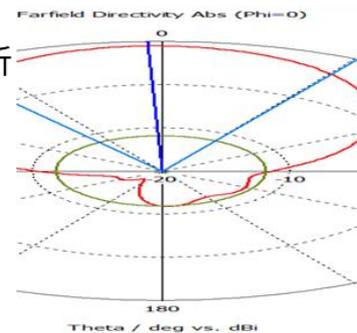


アンテナ混載太陽電池

構造検討/搭載検討/  
低軌道条件で熱検討を  
実施。  
主要部品の耐宇宙環境  
性評価を実施

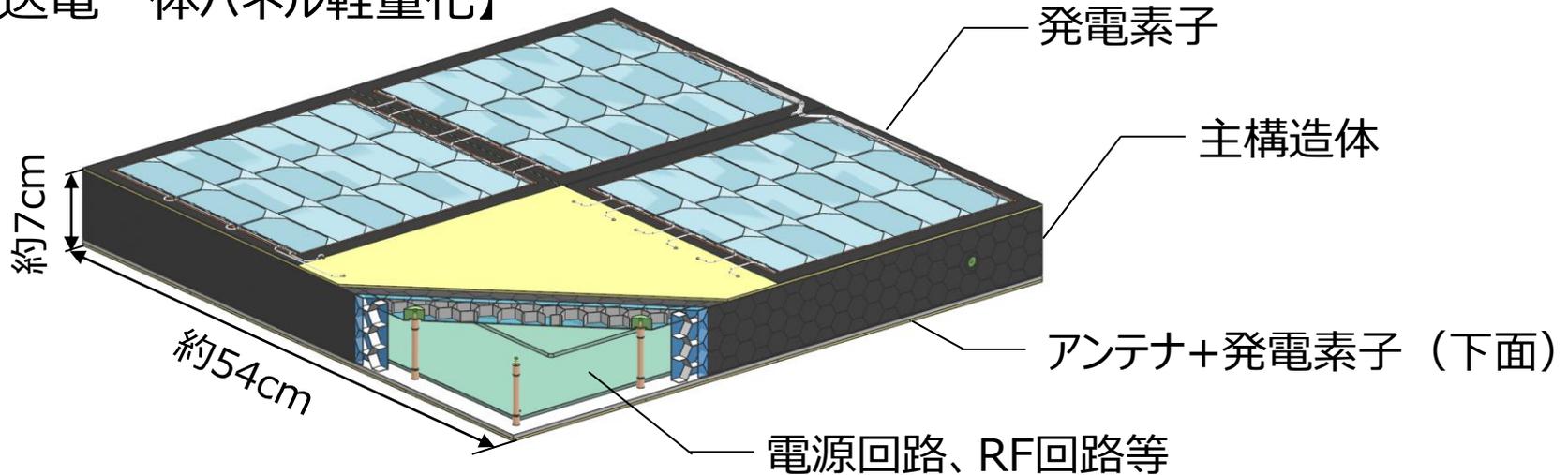


遠方界解析



# 4.1 発電電一体型パネルの開発

## 【発電電一体パネル軽量化】



【発電電一体型パネル概略構成図】

発電電一体型パネル地上評価モデルの設計を計画通り実施中。ハニカム構造体の採用や発電電機能構成要素のサンドウィッチ構造化によって薄型化を進め、目標の質量比  $36\text{kg/m}^2$  に対して、 $34.4\text{kg/m}^2$  (※1) となる見込みである。

	設計配分値
構造部材質量	5.0kg
電子回路質量	3.5kg
発電電面質量(※2)	1.5kg
合計質量	10.0kg

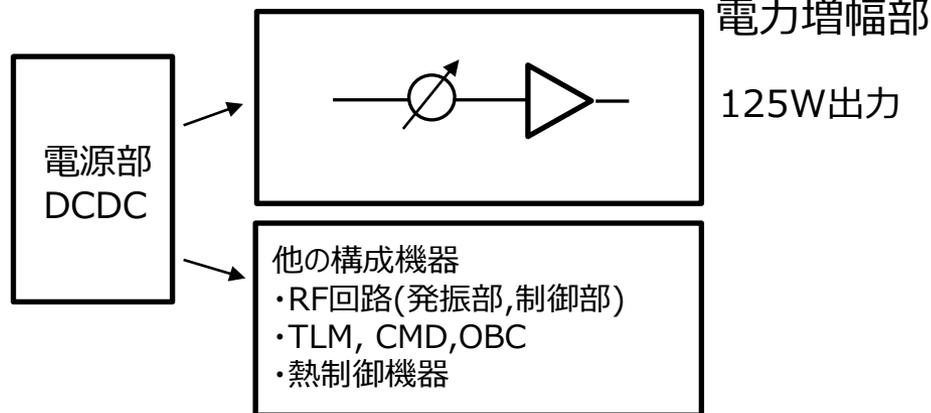
※1 参考：質量比  $34.3\text{kg/m}^2 \div$  合計質量 [10.0kg] / 面積 [0.54m × 0.54m]

※2 発電電面はアンテナと発電素子で構成

## 4.2 送電部の高効率化

<送電部の総合効率目標60%：2018時点44.8%>

発送電一体型パネルの構成



構成機器の電力損失と効率

構成機器	電力損失	参考:効率
電源部	20.9 W	0.9
電力増幅部	53.6 W	0.7
TLM/CMD/OBC	2.6 W	
RF(源振/制御部)	7.0 W	
合計	84.1 W	

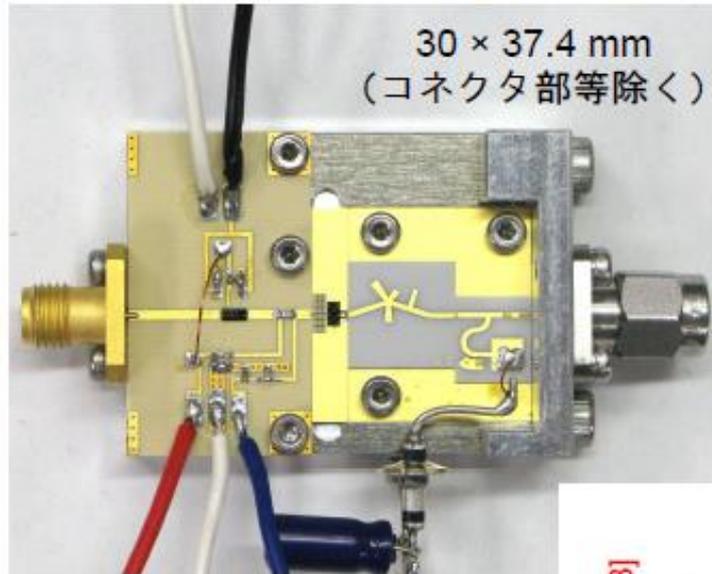
供給電力	209.1 W
出力	125.0 W
総合効率(%)	59.8

### 開発状況

- 発送電一体型パネルの構成要素を検討し、主要構成要素の効率と消費電力の目標設定を行った。
- 上記構成検討の結果、DCDCコンバータの効率と電力増幅部の効率が、総合効率に与える影響が大きいことが明らかとなった。
- 総合効率の改善については、まずは電力増幅部の効率改善にフォーカスすることとした。また、電力増幅部の最終段増幅器については、過去に効率改善を行っていることから、今回はドライバ段増幅器にフォーカスして総合効率の改善を狙うこととした。
- 現時点で、最終段増幅器に最適化したドライバ段増幅器を開発することで、電力増幅部の効率は約70%（非パッケージ試作品によるチャンピオンデータ）を達成している。この結果、各構成要素の消費電力評価と合わせて、総合効率は60%に若干に届かない程度となっている。
- 今後、電力増幅部のパッケージ化、小型化および効率の底上げ（チャンピオン以外でも十分な効率を実現）を行うとともに、DCDCコンバータの効率検討、RF制御部等他の構成要素の低消費電力化を進める。

## 4.2 送電部の高効率化

### 2022年度成果：一体型増幅器(小型化最終段・ドライバMMIC接続)

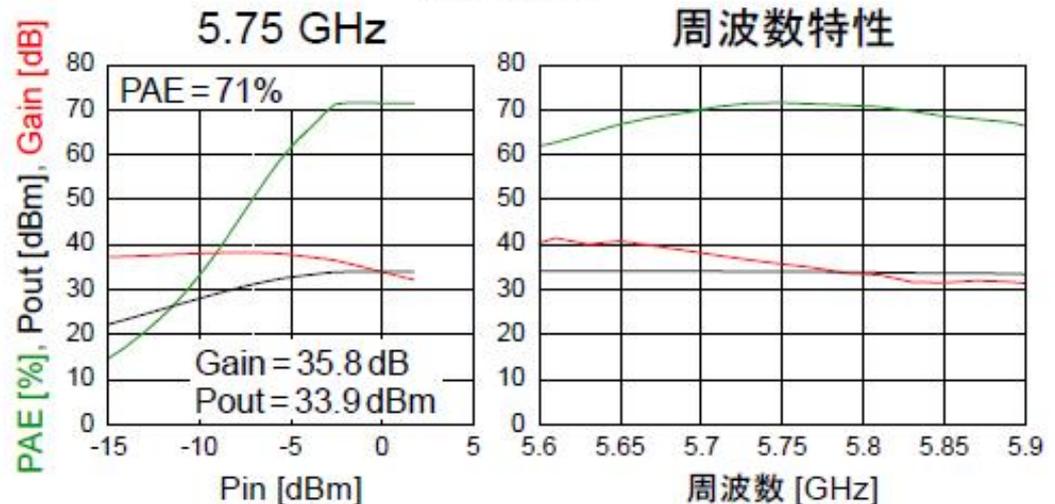


最終段：MMIC入力回路で小型化  
ドライバ段：全MMIC化で小型化  
(バイアス回路除く：  
まだ小型化の余地あり)

PAE 71%を達成  
利得 35 dB, 出力  $\geq 2$  W

最終： $V_D = 28$  V,  $V_G = -4.6$  V  
ドライバ：  
 $V_{D1\&2} = 4.0$  V,  $V_{G1\&2} = -0.8$  V

#### 測定結果



## 4.3 長距離送電の実証

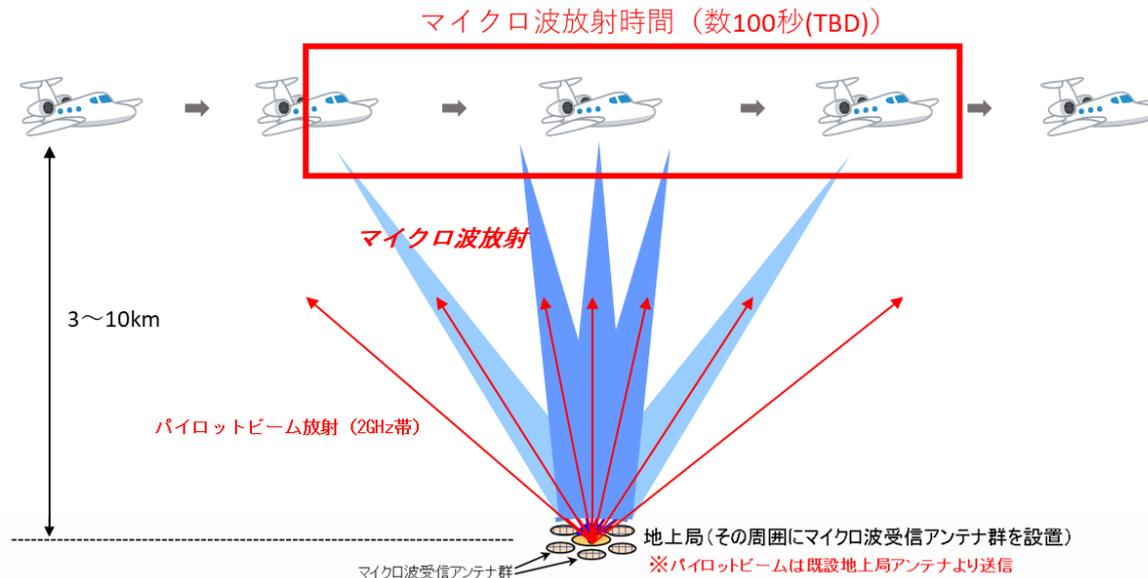
### 【試験の目的】

軌道上実証の事前検討として、地上試験(飛行試験)を行い、以下を検証する。

- ・送電装置(衛星搭載用)と地上機器、観測装置との同期・機能確認
- ・マイクロ波ビームの評価手法の確立

### 【試験の概要】

- ・衛星用の実大送電アンテナパネルを航空機に搭載し、地上局から発信するパイロットビームに合わせて送電地点(地上)へ向けてマイクロ波を照射する。
- ・使用周波数: 5.8GHz帯(送電用マイクロ波)、2GHz帯(パイロットビーム)
- ・供試体設計 および 試験詳細(試験条件、搭載機材、試験場所など)は検討中。
- ・実施時期: 2024年第3四半期(10~12月)を想定。(フライト1日、予備1日)



# 5 無線送電実証衛星プロジェクト

無線送電実証衛星プロジェクトを “OHISAMA” と命名  
(プロジェクト名、人工衛星名)

On-orbit experiment of **H**igh-precision beam control using small **S**atellite for **M**icrow**A**ve power transmission, **OHISAMA**

宇宙基本計画工程表 (2022年12月23日改定)

(5) 産業・科学技術基盤を始めとする宇宙活動を支える総合的な基盤の強化

年度	令和2年度 (2020年度)	令和3年度 (2021年度)	令和4年度 (2022年度)	令和5年度 (2023年度)	令和6年度 (2024年度)	令和7年度 (2025年度)	令和8年度 (2026年度)	令和9年度 (2027年度)	令和10年度 (2028年度)	令和11年度 (2029年度)	令和12年度以降	
宇宙活動を支える総合的な基盤の強化①	24. 有人宇宙活動の在り方の検討 [内閣府、文部科学省]											
	(参考)国際宇宙探査への参画とISSを含む地球低軌道活動 [内閣府、文部科学省等]											
	(参考)月探査活動への民間企業等の参画促進 [文部科学省等]											
	(参考)ISSを含む地球低軌道における経済活動等の促進 [文部科学省]											
	宇宙太陽光発電の研究開発 [文部科学省、経済産業省]											
	宇宙環境のモニタリング(宇宙天気) [総務省] [再掲]宇宙天気ユーザー協議会での産官学連携の強化、宇宙天気サービスの高度化、新事業の創出 [総務省]											
	(参考)宇宙状況把握に関する検討・取組 [内閣府、総務省、外務省、文部科学省、経済産業省、防衛省等]											

24. その他産業・科学技術基盤を始めとする宇宙活動を支える総合的な基盤の強化

2023年度以降の主な取組

■ 温室効果ガスの削減に貢献し得る宇宙太陽光発電システム(SSPS)の実用化に向け、**発送電一体型パネルの開発やマイクロ波無線送受電技術に関わる送電部の高効率化等**を行い、将来の長距離大電力無線送受電技術への進展を図るとともに、宇宙輸送システムの抜本的低コスト化等を含め、システム全体を視野に入れた総合的な取組を推進する。また、当該技術の他産業へのスピノフを目指し、**国際連携も視野に研究開発**に取り組む。特に、**マイクロ波方式の宇宙太陽光発電技術**について、**2025年度を目途に地球低軌道から地上へのエネルギー伝送の実証**を目指し研究開発を行う。

## 5 無線送電実証衛星プロジェクト

月周辺軌道上から月面への電力伝送を実用化するには、超長距離の無線電力伝送技術の確立が必要であり、そのため現在実現可能な手段により、その超長距離の無線電力伝送に必要な「高精度のビーム形成及其のビームの方向制御」の技術開発を実施するとともに、その技術を実証する。具体的な実験手段としては：

- ・高精度ビーム形成及び方向制御が可能なフェーズドアレイアンテナを小型の宇宙機に搭載し低高度地球軌道へ打ち上げる。
- ・そのフェーズドアレイアンテナより、地上からのパイロット信号に従って地上へ向けてビーム形成及び方向制御されたマイクロ波電力を放射し、地上においてそのマイクロ波の電力レベルの分布を複数の受信システムから構成される計測システムにより計測評価し高精度のビーム形成及其のビームの方向制御技術を実証する。このフェーズドアレイアンテナ及びアンテナと一体となっているRFアンプは、実績があり、また大気の窓である5.8GHz帯を使用するものとする。
- ・また電離層の影響を評価するために環境計測装置及び軌道上の衛星間での送電実験を実施するための放出プローブも搭載して実験を行う。

# 5 無線送電実証衛星プロジェクト

無線送電実証衛星プロジェクトの構成

## <衛星システム>

- バスシステム
- 送電パネルシステム
- 環境計測装置
- リングミュアプローブ
- 波動受信機
- インピーダンスプローブ
- 放出プローブ

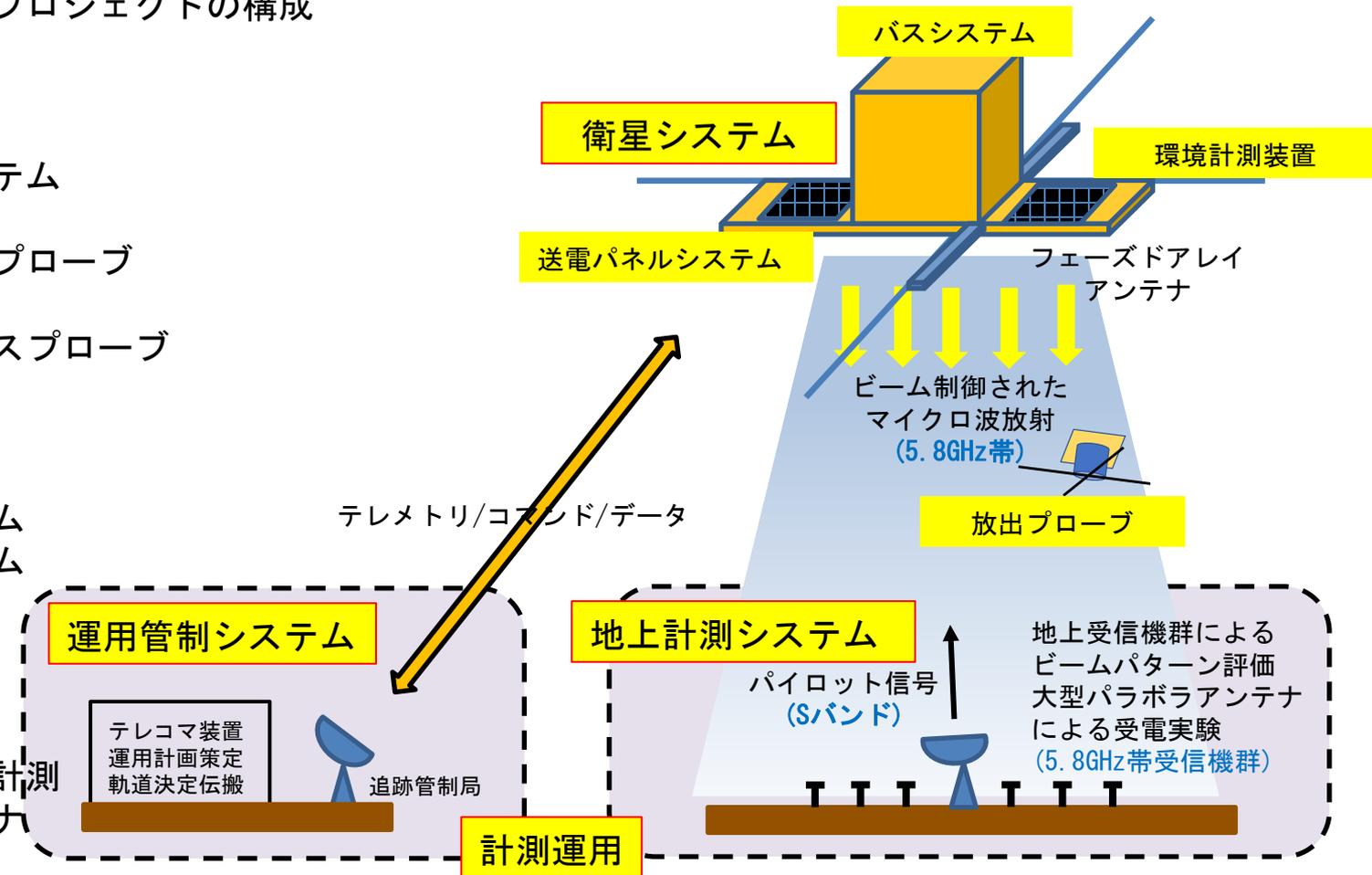
## <地上システム>

- 運用管制システム
- 地上計測システム

## <打上げ>

## <計測運用>

- 地上計測システムによる受電実験
- 地上受信機群による  
ビームパターン評価  
大型パラボラアンテナ  
による受電実験  
(5.8GHz帯受信機群)



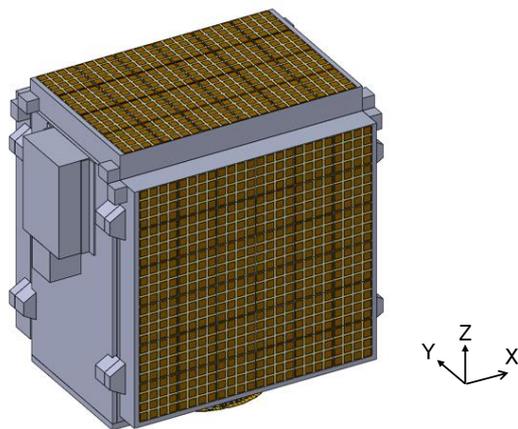
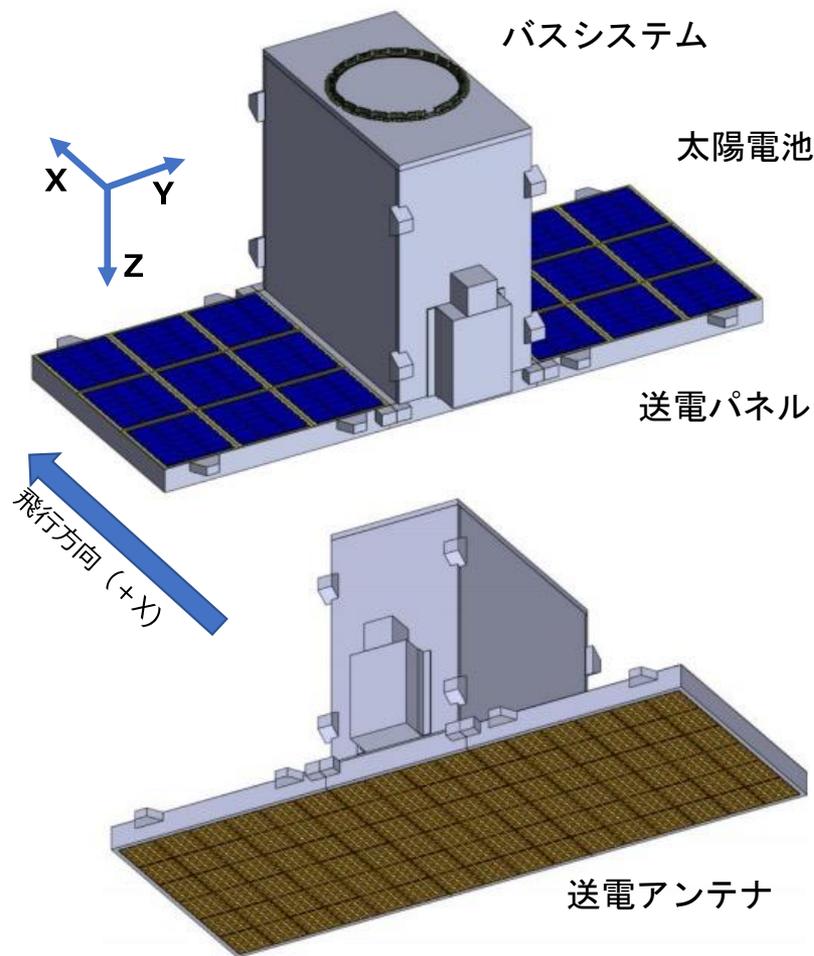
# 5 無線送電実証衛星プロジェクト

## <衛星バスシステム概要>

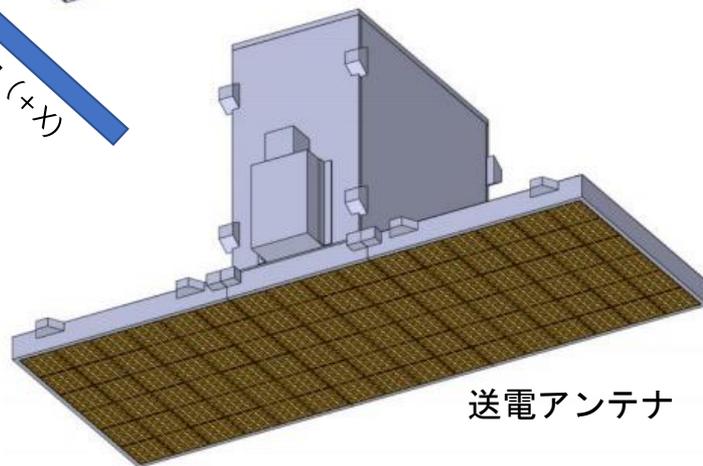
- ・衛星システム全体として150kg程度の小型衛星
- ・地上にビームを向けて実験を可能とする姿勢制御系
- ・地上設置の受信機上空にて数分間数百W程度のマイクロ波を送信するための規模の電力を供給出来る電源系
- ・軌道としては低高度準回帰軌道を基本

## <ミッションシステム概要>

- ・片面に送信アンテナを配置し、裏面には太陽電池を配置した発電機能を有するモジュラー構造の展開型パネル
- ・数分間数百W程度の位相制御されたマイクロ波ビームを送信するためのRFアンプモジュールを上記パネル内に装着
- ・宇宙環境等計測用観測プローブを搭載



打上げコンフィギュレーション



軌道上コンフィギュレーション

## 6 まとめ

---

- 2019年度から始まった現行フェイズは、2006年に設定したSSPS研究開発ロードマップにおいて、軌道上での実証に移行する前の 地上で実施する最後の取り組みに当たる重要なフェイズであり、2023年度からはその現行フェイズの締めを行って行くことになる。
- 現行フェイズにおける技術開発テーマのうち、発送電一体型パネルの開発と、送電部の高効率化は、これまでのところ、期首に設定した開発目標を達成できる見通しである。
- また、宇宙基本計画工程表に基づいて、2022年度に 無線送電実証衛星プロジェクトが立ち上がり、当機構が主幹プレイヤーとして参加することとなった。このプロジェクトでは、これまでに積み上げてきたSSPS研究開発事業の様々な成果を最大限活用すると共に、SSPS開発においても重要なステップになることを期待している。
- カーボンフリー社会の実現に向けて、当機構は今後もSSPSの実現に取り組んでいく。