

JAXAにおける宇宙太陽光発電システム (SSPS)の研究開発

最近の主な成果と
SSPS実現の新たなロードマップ策定に向けて

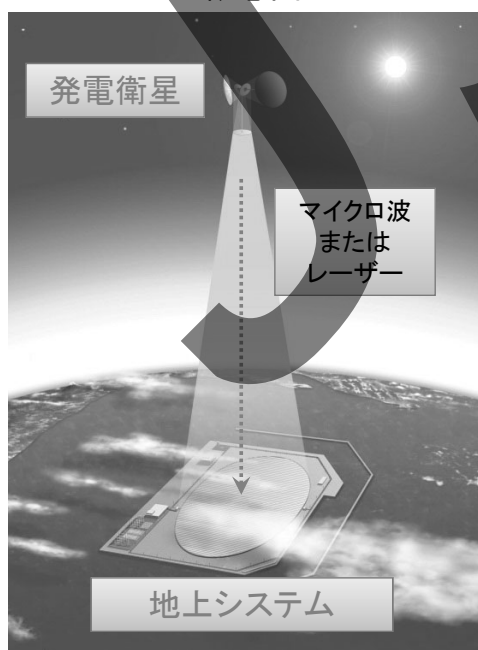
平成27年12月3日

国立研究開発法人 宇宙航空研究開発機構
牧野克省

-1-

宇宙太陽光発電システム(SSPS)について

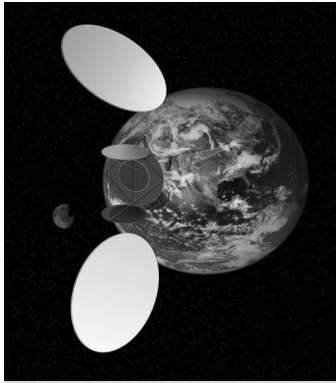
SSPS(Space Solar Power Systems)
概念図



宇宙空間において太陽光発電を行い、発電した電力をマイクロ波等に変換し、そのエネルギーを地上に向けて無線伝送するシステム。

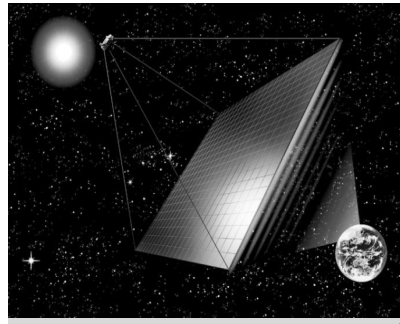
静止軌道上にてSSPSを構築することにより、昼夜問わず発電することが可能となり、地上で商用電力網と系統連系することで、再生可能エネルギーでありながら、ベース電源として期待される。

-2-



マイクロ波方式SSPS (反射鏡方式)

- ・太陽追尾型
- ・反射鏡: 2.5km × 3.5km, 1000トン × 2式、100-300g/m²
- ・反射鏡はフリーフライヤー
- ・発電部: 直径1.25km
- ・集光倍率: 4倍
- ・送電部: 直径1.8km
- ・総重量: 10,000トン以下
- ・複雑、電力取得効率が低い



マイクロ波方式SSPS (発電電一体型パネル方式)

- ・太陽非追尾型
- ・発電電一体型パネル 2.5km × 2.375km × 0.02m
- ・テザー(5km)による重力傾斜安定
- ・100m × 95mパネルのユニット構成
- ・総重量26,600トン
- ・単純、電力取得効率が低い



見直し中

レーザー方式SSPS (太陽光直接励起方式)

太陽光直接励起レーザーの高効率化は、現状、実現困難であるとの結論。

→近年、民政部品での進歩の著しい、加工用高出力ファイバーレーザーの応用をベースにシステムを再検討中。

SSPS研究開発に関する政策的背景

■ 宇宙基本計画 (平成27年1月9日宇宙開発戦略本部決定)

4. 我が国の宇宙政策に関する具体的アプローチ

(2) 具体的取組

② 個別プロジェクトを支える産業基盤・科学技術基盤の強化策

将来の宇宙利用の拡大を見据えた取組として、「エネルギー、気候変動、環境等の人類が直面する地球規模課題の解決の可能性を秘めた『宇宙太陽光発電』を始め、……(中略)……研究を推進する」と記載

■エネルギー基本計画(平成26年4月11日閣議決定)

第4章 戦略的な技術開発の推進

2. 取り組むべき技術課題

「無線送受電技術により宇宙空間から地上に電力を供給する宇宙太陽光発電システム(SSPS)の宇宙での実証に向けた基盤技術の開発などの将来の革新的なエネルギーに関する中長期的な技術開発については、これらのエネルギー供給源としての位置付けや経済合理性等を総合的かつ不断に評価しつつ、技術開発を含めて必要な取組を行う」と記載

SSPSの利点と課題

	SSPSの利点	SSPSの課題
技術	<ul style="list-style-type: none"> ・地上の再生可能エネルギーと比較して、昼夜、天候の影響を受けにくく、エネルギー源として安定している。 ・強度の高い太陽光(地上の約1.4倍)を利用できる。 ・電力を必要としている地域へ柔軟に送電できる。(地上送電網整備の負担が軽減される。) 	<ul style="list-style-type: none"> ・宇宙空間への大量輸送技術、大規模宇宙建造物の構築技術、軌道上において長期間にわたり運用・維持(補修)する技術。 ・高効率で安全な発電、送電、受電技術
安全性 ／ 環境 影響等	<ul style="list-style-type: none"> ・発電時に温室効果ガスや廃棄物が発生しない。 ・地上における自然災害(地震等)の影響を受けにくい。 	<ul style="list-style-type: none"> ・マイクロ波／レーザーが、人の健康、大気、電離層、航空機、電子機器等へ悪影響を及ぼさないよう配慮する必要がある。 ・スペースデブリ、太陽フレア等による損傷や破壊への対処 ・運用寿命を終えたSSPSの安全な廃棄、もしくは再利用
経済性	<ul style="list-style-type: none"> ・発電時に燃料費を必要としない。 ・化石燃料と異なり、紛争や需給逼迫に伴うエネルギー価格急騰の影響を受ける心配が少ない。 	<ul style="list-style-type: none"> ・宇宙への輸送費をはじめ、建設、運用・維持、廃棄に関わるコストを他のエネルギー源と競合できるまで下げる必要がある。 ・周波数(マイクロ波の場合)の確保。軌道位置、地上受電サイトの場所の確保等。

- マイクロ波により宇宙から地上まで、効率よく、かつ安全にエネルギーを送るために必要な技術
- ✓ 電力→マイクロ波→電力への高効率変換技術
- ✓ 高精度なマイクロ波ビーム方向制御技術
- ✓ 高効率かつ薄型軽量化した高機能アンテナ技術

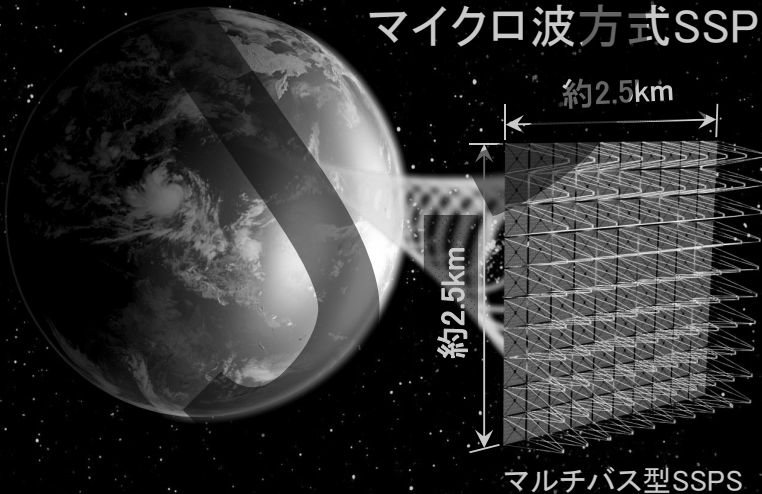
等々

➤ マイクロ波によるエネルギー伝送手段

非常に多くのアンテナ素子で構成される大規模アレーアンテナを用いる。アレーを構成する各アンテナ素子からマイクロ波を放射するタイミング等(位相と振幅)を制御し、空間で合成することで、任意のビーム形状を形成することができ、さらにビームを任意の方向に向けて放射(送電)することが可能。

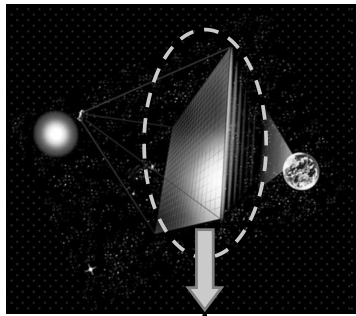
ビーム方向制御を行う際の技術課題

マイクロ波方式SSPS 概念図(例)



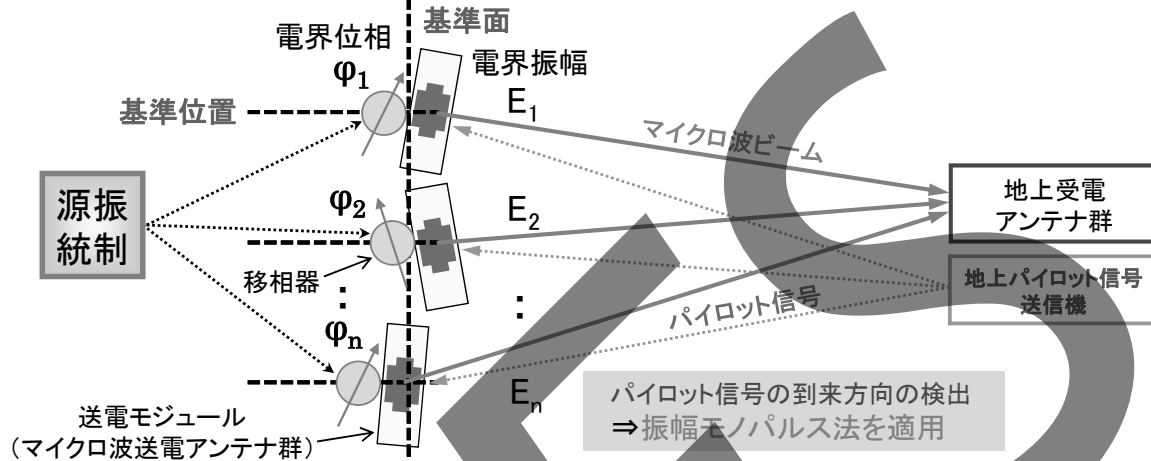
- 静止軌道から直径約2~3kmの地上の受電サイトに向けて、マイクロ波ビームを受電サイトの外周約1kmの保安区域以内に収めることを想定(要求精度0.001度)
⇒高精度な方向制御が必要

- 巨大アンテナ面に数十億オーダーの個数のアンテナ素子を配置
- 熱や重力傾斜トルクにより、アンテナ面が僅かながらも変形し、構造的に完全な平面を保てない。
- 個々のアンテナの方向(基準位置)が変動してしまう。
⇒電子的な補正制御が必要



【送電モジュール間の僅かな構造的ばらつき等による指向誤差を補正】

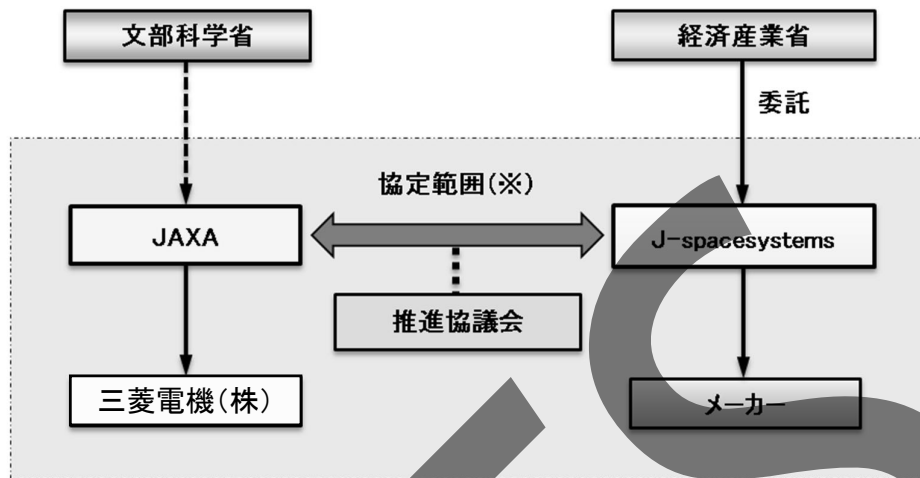
送電モジュール間の位置や方向のズレを位相差として検知。その位相差が零(受電電力が最大)となるよう送電部の移相器を制御
⇒素子電界ベクトル回転法(REV法)を適用



最近の主な成果(FY26の地上実証試験)

- 軌道上の大規模SSPSの巨大な送電アンテナ面の構造上の変形を模擬し、その状態で、独自のビーム方向制御方式により、マイクロ波送電ビームを高精度で指向制御できることを実証。
- 屋外にて伝送距離約55mのマイクロ波による無線電力伝送試験を実施。送電アンテナ面の変形のない状態と同様の電力が受電部にて取得できることを確認し、採用した制御方式の無線電力伝送における有効性を実証。
- 無線電力伝送の公開試験を行い、受電部から300Wを超える電力を得て、その実負荷としてアマチュア無線局を運用、無線電力伝送の実用化に向けた技術実証を実施。

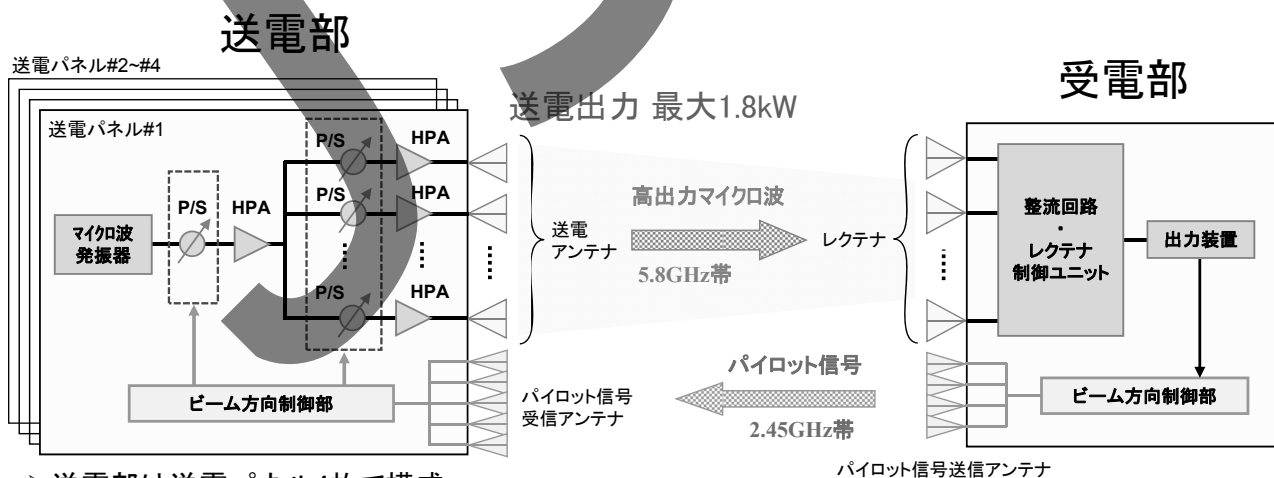
地上実証試験の実施体制



※JAXAとJ-spacesystems(一般財団法人宇宙システム開発利用推進機構)は、「宇宙太陽光発電システムに係るマイクロ波無線電力伝送地上試験の実施等に関する協定」を2010年1月より締結。

マイクロ波無線電力伝送地上試験システムの概略

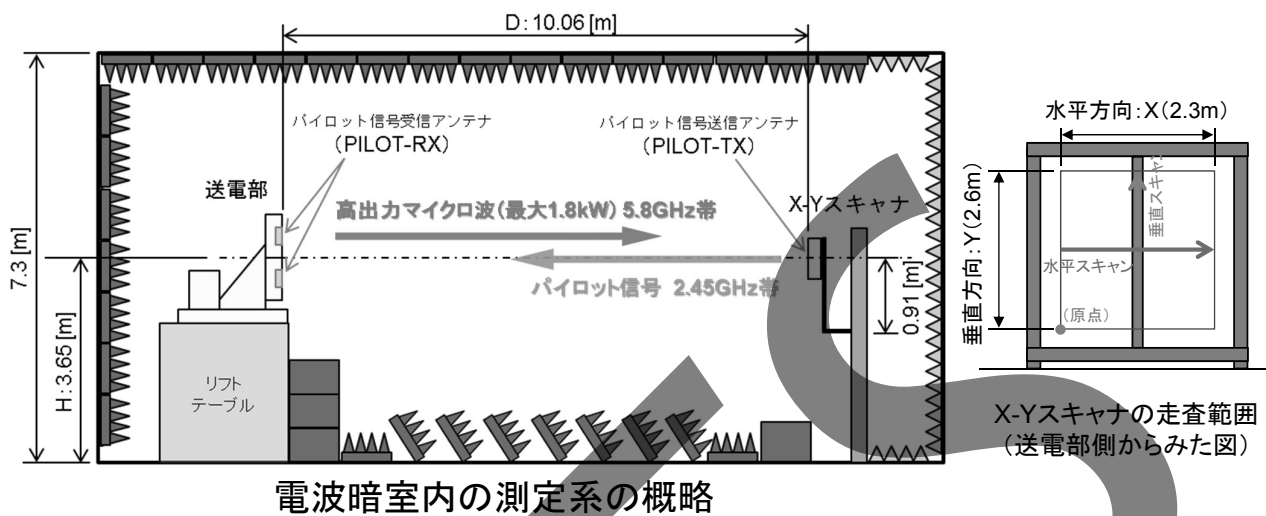
開発目標: 伝送距離10m以上でビーム方向制御精度、0.5deg(RMS)以下



- 送電部は送電パネル4枚で構成
- 送電パネル1枚あたりのサイズ
0.6m × 0.6m
- 送電パネル1枚あたりの素子数304素子
(76サブアレイ)

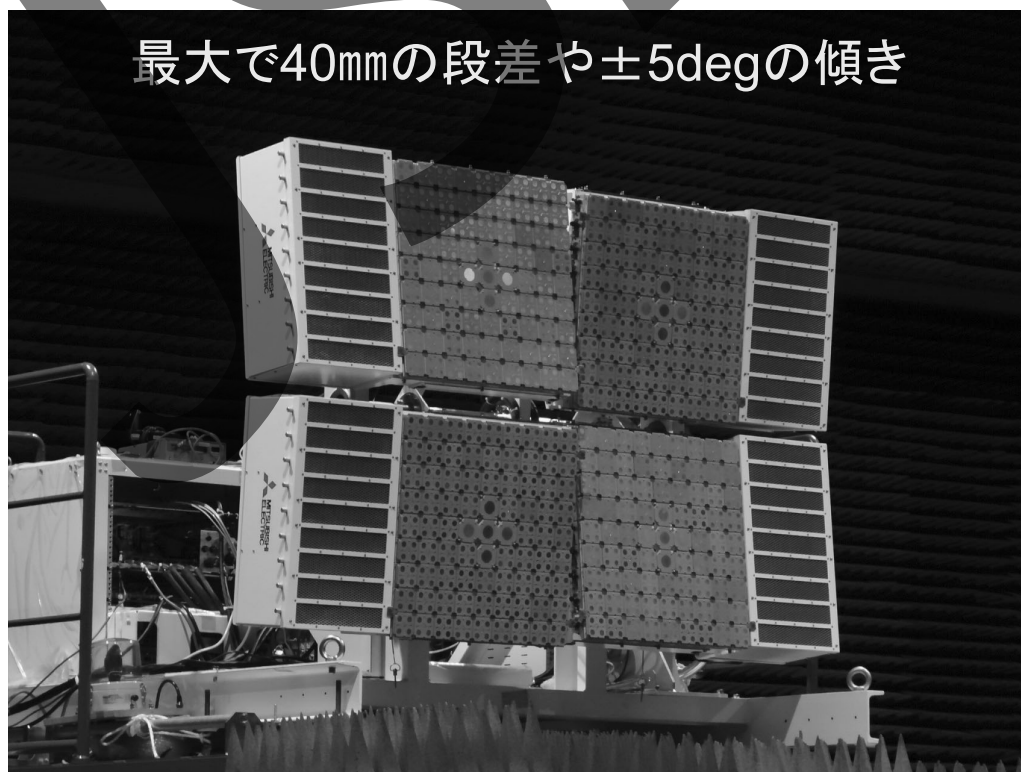
□ : JAXA担当分 (ビーム方向制御部) □ : J-spacesystems担当分 (送電部・受電部)

受電側に受電部の代わりにX-Yスキャナを設置し、X-Yスキャナには送電部から放射されたマイクロ波ビームの電界強度を測定するためのモニタアンテナを備えたPILOT-TXを装着。このX-Yスキャナを用いてマイクロ波ビームの二次元電界強度分布を測定、ビーム中心位置を割出す。



※ 試験実施場所: 京都大学宇治キャンパス(電波暗室A-METLAB)

屋内試験の状況(送電アンテナ面の変形例)

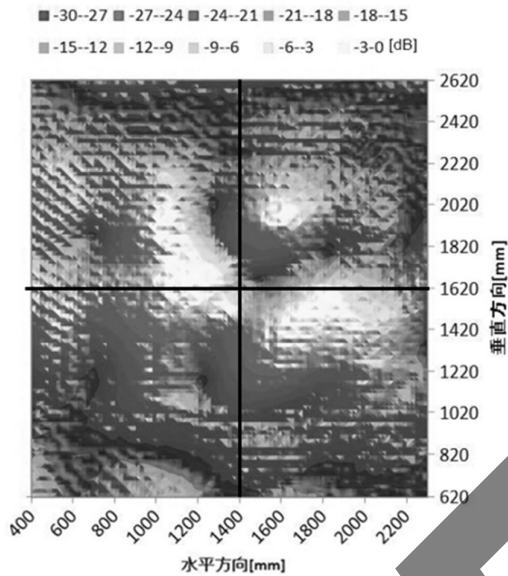


REV制御によるビーム形状の補正効果(実測)

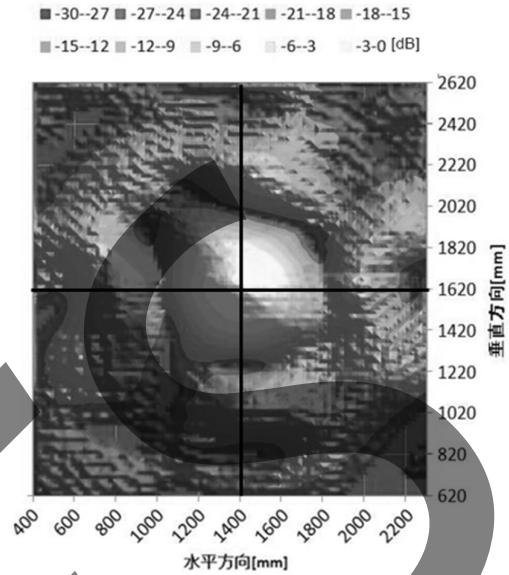


REV法(素子電界ベクトル回転法)の効果(ポインティングのためのビーム形成)を確認

➤ REV制御なし



➤ REV制御あり

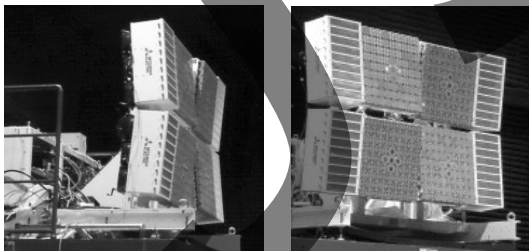


-15-

マイクロ波ビーム方向制御精度の評価結果



目標精度: 伝送距離10m以上で 0.5deg(RMS)以下



送電パネルの変形設定(例)

大規模SSPSにおける送電アンテナの構造上の変形量に関するシステム要求である「40mmの段差や±5degの傾き」で4枚の送電アンテナパネルを組み合わせた変形状態(例)

〔評価結果〕

ビーム方向制御精度(実測): 0.15deg(RMS)を達成

-16-

3月8日

三菱電機(株)兵庫県内の試験場

JAXA

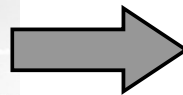


宇宙太陽光発電システムの実現に向けた
マイクロ波無線電力伝送地上実証試験(高精度ビーム方向制御技術実証試験)

-17-

実用化実証試験(送電アンテナ面の段差)

JAXA
Explore to Realize



送電アンテナの上側2枚と下側2枚に
30mmの段差を付けた

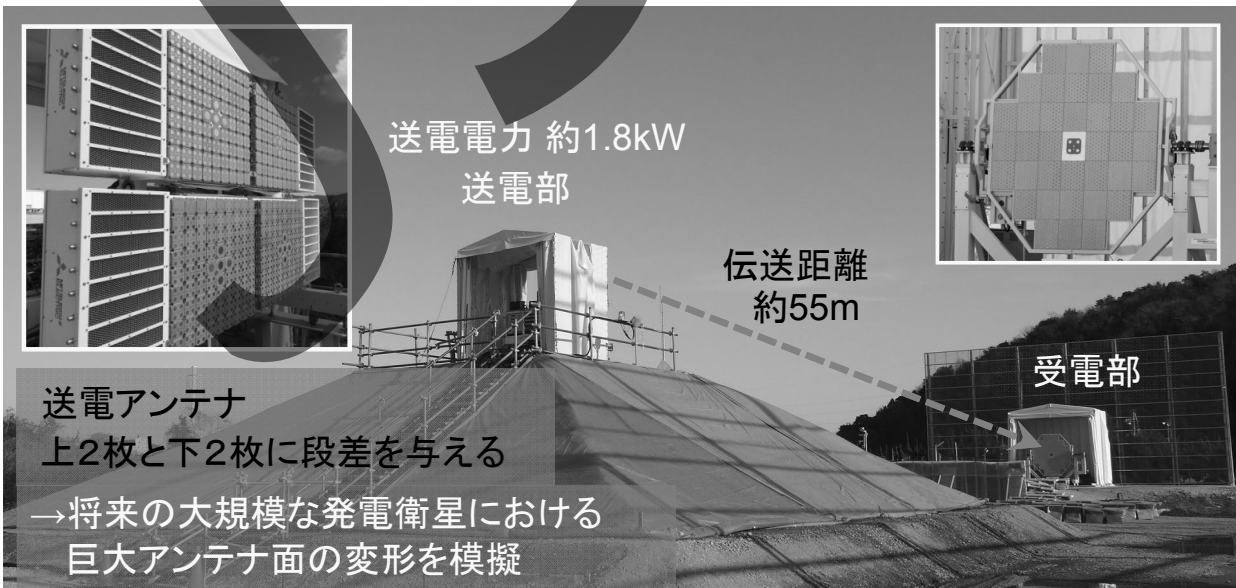
-18-

受電電力(受電部出力電力:負荷に供給した電力)



屋外でのマイクロ波無線電力伝送試験(結果)

パイロット信号の到来方向検知が正常に動作するレベルの試験環境の改善に及ばず、レトロディレクティブは行えなかったが、送電アンテナパネルの変形を電子的に補正制御するREV制御の有効性を実証した。

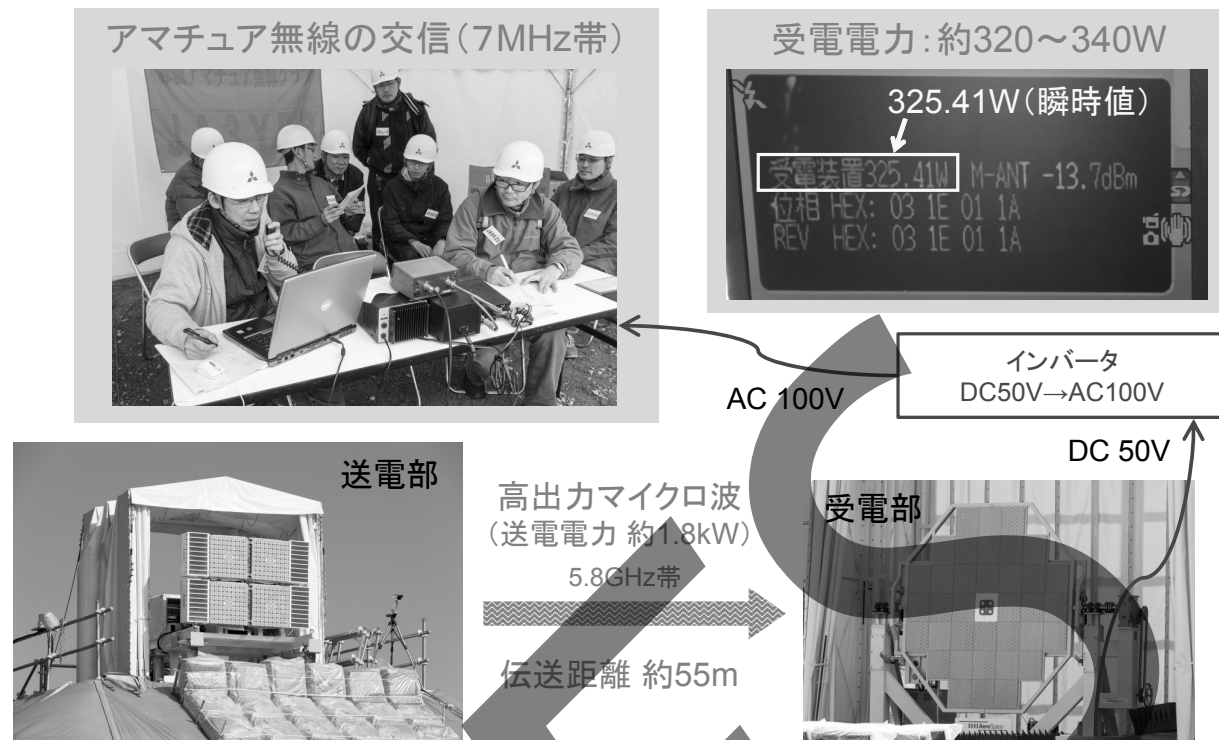


REV*制御により、段差(アンテナ面の変形)が無い場合と同じ電力を取り出すことに成功
 *素子電界ベクトル回転法(REV: Rotaing Element Electric Field Vector Method)

一般財団法人宇宙システム開発利用推進機構との連携協力の下、赤穂アマチュア無線クラブの協力を得て、無線で伝送した電力を用いたアマチュア無線局の運用を実施した。

実用化実証(デモ)実施の日時・場所

- 日時：2015年3月8日(日)
10:15～16:45(アマチュア無線局の運用時間帯)
※当初 3月1日(日)の予定であったが雨天により延期
(実験装置が防水仕様でないため)
- 場所：三菱電機(株) 兵庫県内の試験場



実用化実証(デモ)実施の実績

- 送電周波数: 5.8GHz帯
- 送電電力: 約1.8kW
- 伝送距離: 約55m
- 伝送時間(継続時間): 最大約1時間(技術的には制約なし)
- 受電部から取り出した電力: 約320~340W
送電アンテナ面の段差30mm(半波長の26mmに近い段差)の状態での値。
電子補正なしの場合は85~95W程度。
- アマチュア無線局(1局)を運用、交信局数(7MHz帯)は283局
(リハーサル時を含む)



JSSV