

2. J 太陽光発電無線送受電技術の 研究開発の概要について (終了時評価)

製造産業局航空機武器宇宙産業課宇宙産業室
一般財団法人宇宙システム開発利用推進機構

2. J. 1. 太陽光発電無線送受電技術の研究開発の概要

概 要	宇宙太陽光発電システム(SSPS)に不可欠な精密ビーム制御技術の研究開発を行うことにより、SSPSの実現を目指すことを目的とする。本技術は、複数のフェーズドアレイアンテナ間の位相同期を行い、レトロディレクティブ技術を活用し、マイクロ波ビームを受電アンテナに向けて電力伝送するものである。研究開発の実行においては、高効率・軽量薄型・高精度を実現するための個別要素技術を獲得し、送電系・ビーム方向制御系・受電系をトータルに考えたシステム実証を行う。また、当該技術の地上での応用を図る。
実施期間	平成21年度～平成26年度（6年間）
予算総額	16.5億円(委託) (平成21年度:1.5億円、平成22年度:2.1億円、平成23年度:1.5億円 平成24年度:1.5億円、平成25年度:3.9億円、平成26年度:6億円)
実施者	<ul style="list-style-type: none">・一般財団法人宇宙システム開発利用推進機構(マイクロ波による精密ビーム制御技術の研究開発)・三菱重工株式会社(位置・角度補正法及び並列化法による電送制御技術に関する有効性検討)・株式会社三菱総合研究所(無線送受電技術研究開発支援業務)

2. J. 2.プロジェクトの目的・政策的位置付け

事業の目的

- エネルギーの安定供給の確保、地球環境問題等への対応の観点から、石油代替エネルギーの導入拡大を図ることが重要である。
- 宇宙太陽光発電システムは、発電時の温室効果ガスの排出がなく、地上太陽光発電と異なり昼夜・天候に左右されることなく発電が可能となり、ベースロードとしての活用が期待されている。
- 本事業では、将来の新エネルギーシステムとして期待される宇宙太陽光発電システムの中核技術であるマイクロ波による無線送受電技術を確立することを目的とする。

政策的位置づけ

宇宙基本計画やエネルギー基本計画において、将来の新エネルギーとして、宇宙太陽光発電システムの技術開発の必要性が位置づけられている。

○宇宙基本計画(平成27年1月宇宙開発戦略本部決定)抜粋

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、宇宙の潜在力を活用して地上の生活を豊かにし、活力ある未来の創造につながる取組に関する研究を推進する。

○エネルギー基本計画(平成26年4月閣議決定)抜粋

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。

2. J. 3. 目標

項目	目標・指標	妥当性・設定理由・根拠等
総合システム	無線送受電技術の確立に向け、送電系・ビーム方向制御系・受電系をトータルに考えた精密ビーム制御マイクロ波送受電技術の研究開発を行う。最終年度には試験モデルによるシステム実証を兼ねた伝送試験を行う。	将来SSPS用マイクロ波電力伝送技術を念頭に、地上実証課題や技術実現性を考慮して課題を抽出して研究開発を行う。また取り組むべき技術に取り残しが出ないように、システム全体としての送電実験を計画する。なお、技術成果を高める為、送電部、受電部、ビーム方向制御部は、それぞれ専門性の高い部署で担当させる。
送電部	将来の軌道上実証への応用を考慮し、小型・薄型・高効率化を志向した半導体を使用し、複数の送電モジュールによるフェーズドアレイアンテナを開発する。マイクロ波の位相同期を図りつつ、キロワット級のエネルギーを送電可能なものとする。	商用SSPSの送電部は宇宙に設置された大量のアンテナパネルを組み合わせた巨大なシステムとなるため、小型化・薄型化・高効率化が求められる。また、通信用フェーズドアレイの域から脱するためにも送電出力電力はキロワット級とする。
受電部	伝送されてくるマイクロ波を複数の受電モジュールで受け、効率よく電力として取り出す整流アンテナ(レクテナ)を開発する。あわせて変換効率の高い整流素子(ダイオード)を開発する。	伝送されるマイクロ波エネルギーを測定するだけでなく、利用可能な電力に変換して高効率でとり出す技術が求められる。また高効率化実現のための整流素子ダイオードの技術開発が必要である。
送電制御技術	精密なビーム制御技術の研究開発として、位置・角度補正法(PAC法)及び並列化法による送電制御技術に取組み、実現性や有効性を明らかにする。	超遠距離送電を行う将来のSSPSを見据えた精密なビーム制御技術が求められる。複数の技術から選択できる余地を確保しておく必要がある。JAXAの方法(REV法)とは異なる手法についても並行して検討する。
試験候補地調査	国内における屋内・外の試験候補地調査を行い選定する。また、マイクロ波電力伝送試験実施に必要な課題を抽出してその対応法を見出す。	試験作業を円滑に遂行するための周辺作業が本研究開発の成否に大きく寄与する。

2. J. 3. 目標(続き)

項目	目標・指標	妥当性・設定理由・根拠等
関連技術 動向調査	本研究開発と密接に関連する国内外の研究動向について明らかにする。	本研究開発に関連する技術情報や動向を広く収集し、必要に応じて本研究開発計画に反映する。
無線送受 電スピン オフ技術	成熟度の高い技術を活用して、産業応用を目指した低コスト実証システム（送電出力10kW程度、送電距離500m程度）を試作評価する。また、電力事業者の観点から適用可能性を検討する。	マイクロ波無線送電は他方式と比べ長距離間の送受電が可能であり、低コスト化システムを試作することで産業応用に大きく寄与する。また、電力事業者による適用可能性検討は実施意義が大きい。

2. J. 4.成果、目標の達成度

項目	目標・指標	成果	達成度
総合システム	無線送受電技術の確立に向け、送電系・ビーム方向制御系・受電系をトータルに考えた精密ビーム制御マイクロ波送受電技術の研究開発を行う。最終年度には試験モデルによるシステム実証を兼ねた伝送試験を行う。	マイクロ波電力伝送試験モデルを試作した。本試験モデルを用いて、マイクロ波電力伝送試験を実施した。5.8GHz帯でフェーズドアレイアンテナを用いてキロワット級マイクロ波ビームの制御システムの屋外無線送電としては、世界的に類を見ない実験の成功となった。	達成
送電部	将来の軌道上実証への応用を考慮し、小型・薄型・高効率化を志向した半導体を使用し、複数の送電モジュールによるフェーズドアレイアンテナを開発する。マイクロ波の位相同期を図りつつ、キロワット級のエネルギーを送電可能なものとする。	薄型・高効率のフェーズドアレイアンテナからなる送電モジュールを開発した。 送電部は4枚の送電モジュール(アンテナ数1216素子)を組み合せ、約1.8kWの電力を送電可能である。	達成
受電部	伝送されてくるマイクロ波を複数の受電モジュールで受け、効率よく電力として取り出す整流アンテナ(レクテナ)を開発する。あわせて変換効率の高い整流素子(ダイオード)を開発する。	市販のショットキーバリアダイオードを使用し、36個の受電モジュール(アンテナ数2304素子)で構成する、大規模で高効率動作する受電部を開発した。これと並行して、窒化ガリウム(GaN)を使用した高効率整流素子(ダイオード)を試作評価した。	達成
送電制御技術	精密なビーム制御技術の研究開発として、位置・角度補正法(PAC法)及び並列化法による送電制御技術に取組み、実現性や有効性を明らかにする。	両手法の伝送効率の低下量や不要波の発生レベルについて解析・試験を行い、将来のSSPSへ適用可能である見通しを得た。	達成

2. J. 4. 成果、目標の達成度(続き)

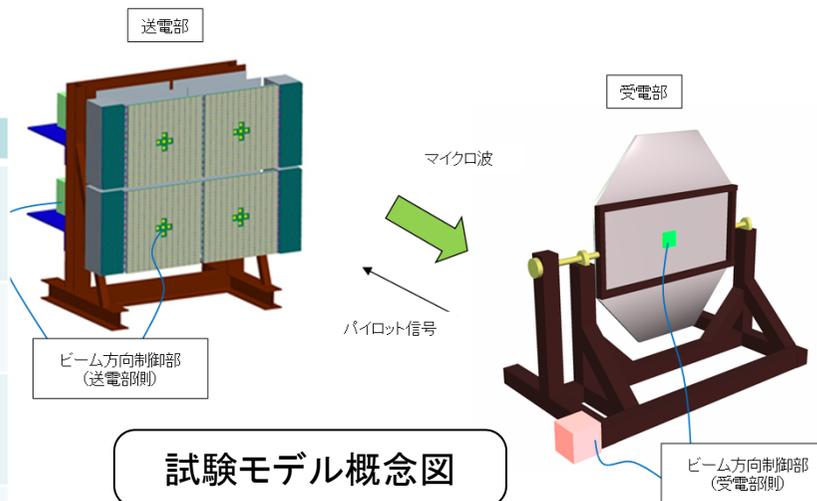
項目	目標・指標	成果	達成度
試験候補地調査	国内における屋内・外の試験候補地調査を行い選定する。また、マイクロ波電力伝送試験実施に必要な課題を抽出してその対応法を見出す。	国内における屋内・外のマイクロ波電力伝送試験候補地調査を行い、要件に適合する試験地を選定した。また、試験実施に係わる課題を抽出し、対処法を考えた。	達成
関連技術動向調査	本研究開発と密接に関連する国内外の研究動向について明らかにする。	国内外のSSPS研究開発動向を調査し、本研究開発との関連などについてまとめた。また、「マイクロ波の植物への影響」に関する研究動向について整理した。	達成
無線送受電スピノフ技術	成熟度の高い技術を活用して、産業応用を目指した低コスト実証システム(送電出力10kW程度、送電距離500m程度)を試作評価する。また、電力事業者の観点から適用可能性を検討する。	2.45GHz帯で電送距離約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した。また、電力事業者の観点から、航空障害灯等の電力インフラへの適用可能性を検討した。	達成

目的: 将来の宇宙太陽光発電の実現に向け、エネルギー伝送技術についての地上実証を進める

コンセプト: ●技術的に新しい一歩(世界で初めて)
●軌道上実証実験に技術的につながる試作

マイクロ波電力伝送試験モデルの特徴

項目	将来の発展性・利点
フェーズドアレイアンテナを使用	従来のパラボラアンテナに比べ、将来の宇宙での大型アンテナ構築につながる技術
電力伝送周波数に5.8GHzを使用	従来の2.45GHzに比べてシステムの小型化が可能となり、将来の宇宙への輸送に有利
半導体増幅器を使用	従来のマグネトロン(電子管)方式に比べて薄型化に有利。また低電圧での動作も宇宙での使用に向く
ソフトウェアレトロディレクティブ方式を使用	送受電の周波数が任意に選択可能であり、パイロット信号に変調波や鍵機能を付与することも可能



実証試験の成果

- 1) マイクロ波ビーム方向を任意に制御可能な半導体増幅器を使用したフェーズドアレイアンテナ。キロワット級電力伝送技術で、かつ受電方向からの信号に基づく精密方向制御を組み込んだ世界初の電力送電に成功。
- 2) 半導体増幅器自体にも、窒化ガリウムを基板にしてF級増幅回路技術を採用し、電力付加効率(PAE)で世界最高水準(単体最高70.5%)の素子を適用した送電用サブアレイアンテナを試作(平均PAE60%以上)。
- 3) システムの小型化を指向して送電周波数に5.8GHzを適用し、かつ回路構成を工夫した薄型送電用サブアレイアンテナ。従来実績の約1/10程度の画期的な薄さ(突起部含まず25mm)。
- 4) 窒化ガリウムを採用しRF-DC変換効率80%以上を目標とした素子(ダイオード)の試作評価。世界最高水準の効率。

総合システムの研究開発

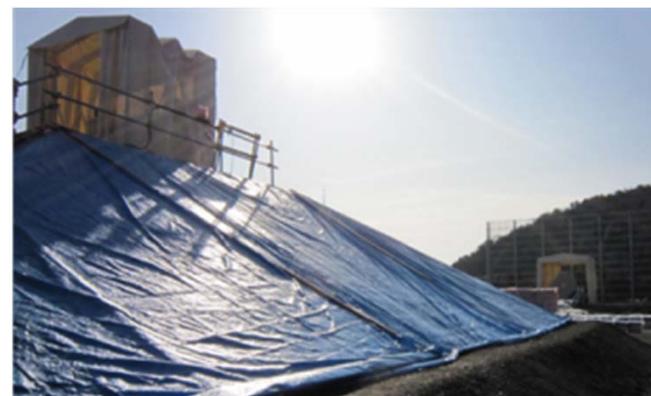
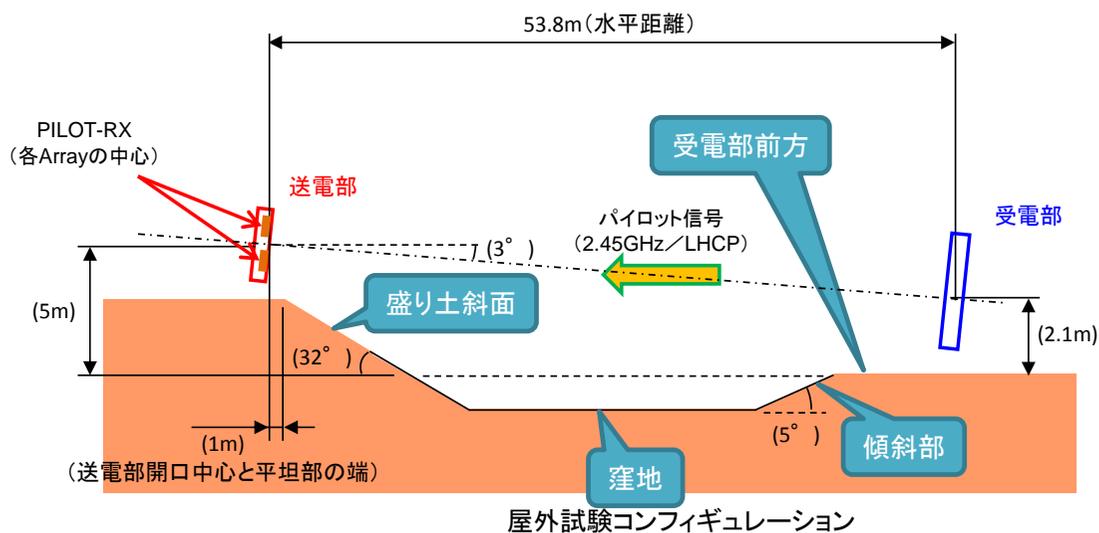
5.8GHz帯でフェーズドアレーアンテナを用いて、キロワット級マイクロ波ビーム制御システムの屋外無線送電としては、世界的に類を見ない実験の成功となった。送電部から約1.8kWを出力し、受電部から約340W平均の利用可能電力の取出しを確認した。



送電部設置状況



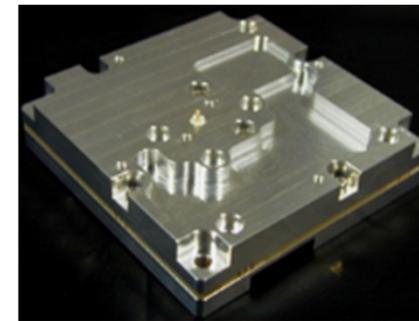
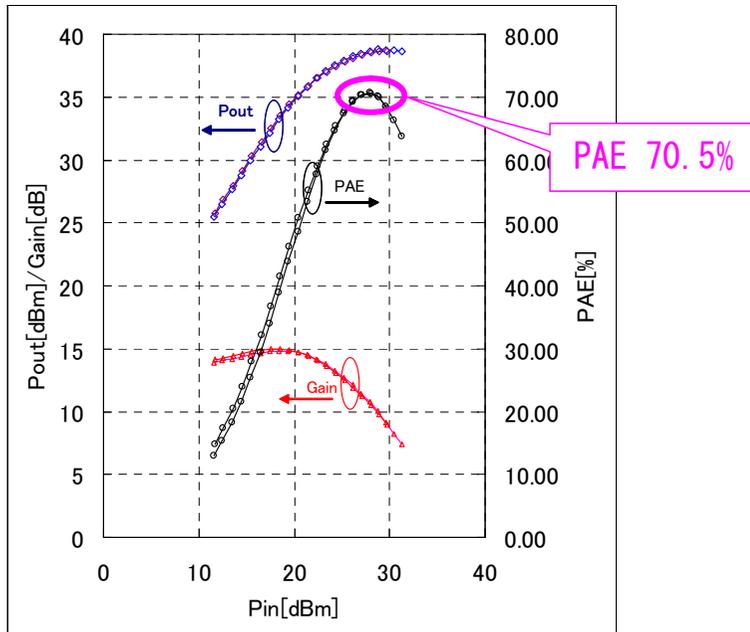
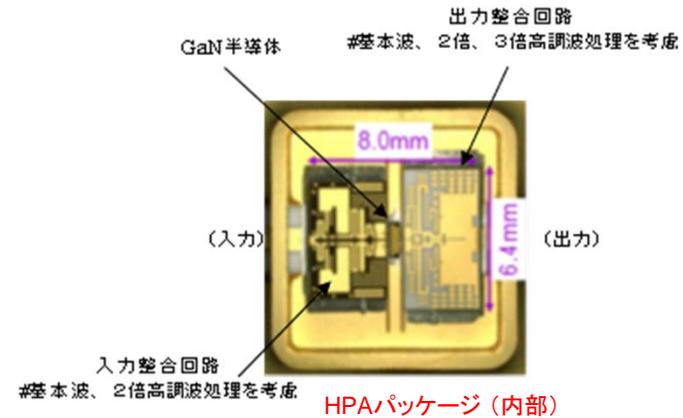
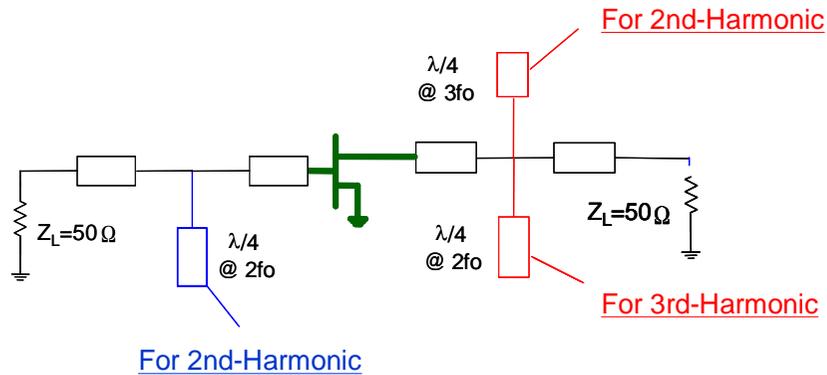
受電部状況



試験セットアップ状況

送電部の小型・軽量・高効率化に向けた研究開発 (1/2)

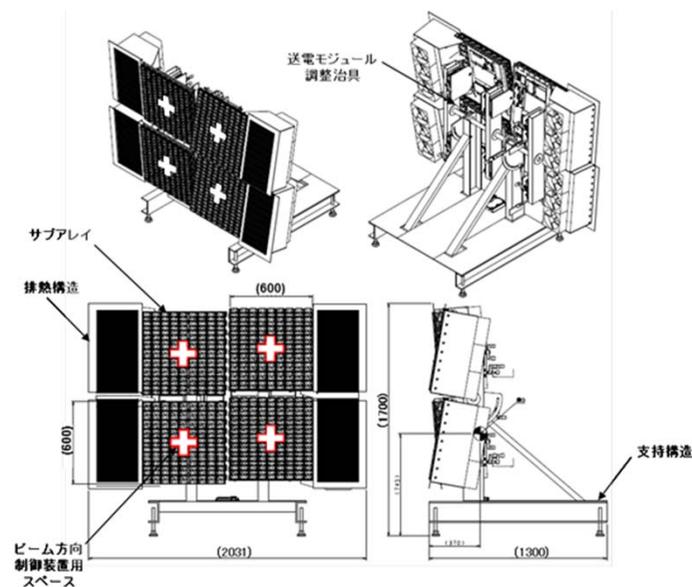
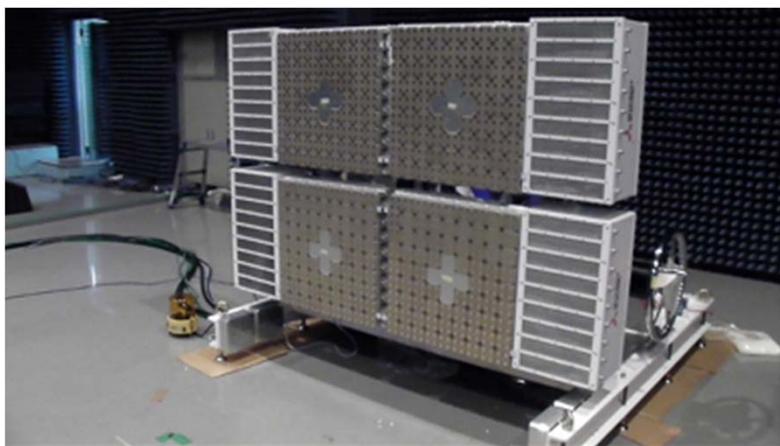
半導体増幅器自体にも、窒化ガリウムを使用してF級増幅回路技術を採用した、電力付加効率で世界最高水準の素子を適用した送電用サブアレイアンテナを開発した。



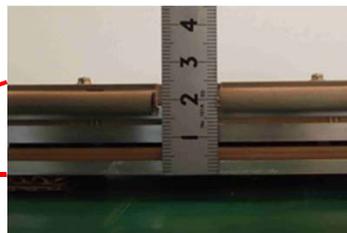
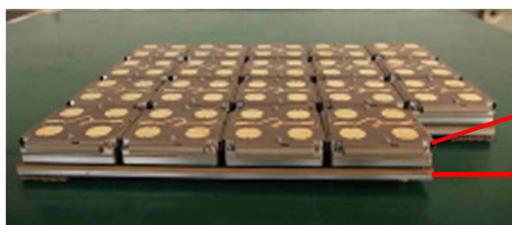
HPAモジュール (外観)

送電部の小型・軽量・高効率化に向けた研究開発 (2/2)

システムの小型化を指向して送電周波数に5.8GHzを適用し、かつ回路構成を工夫した薄型送電用サブアレイアンテナを開発し、従来実績の約1/10程度の画期的な薄さを実現した。4枚の送電モジュール(アンテナ数1216素子)で構成した。



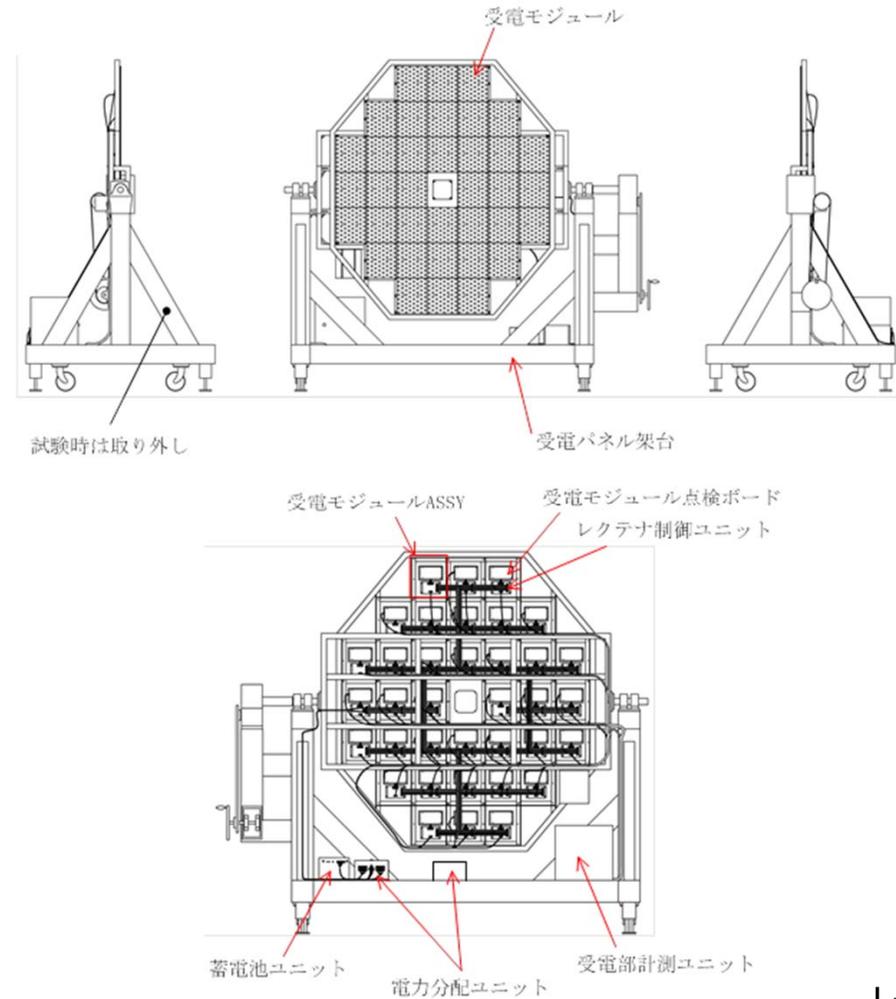
サブアレイ厚さ:25mm(突起部含まず)



4素子サブアレイアンテナ
マイクロ波増幅器、位相器
分配回路

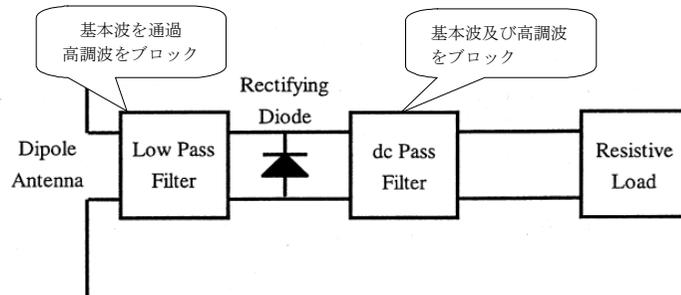
受電部の研究開発

市販のショットキーバリアダイオードを使用し、36個の受電モジュール(アンテナ数2304素子)で構成する、大規模で高効率動作する受電部を開発した。



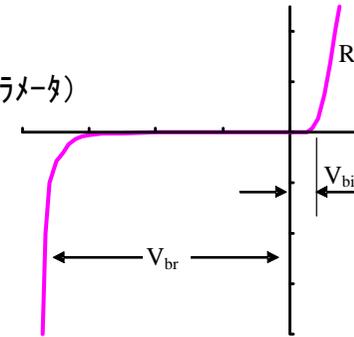
受電部の高効率整流ダイオード開発に向けた研究開発

窒化ガリウム (GaN) を使用した高効率整流素子 (ダイオード) を試作評価して変換効率 71.4% を確認した (5.8GHz 帯 GaN ダイオードで世界最高水準)。また、今後の性能向上に向けた課題および改善策を抽出した。

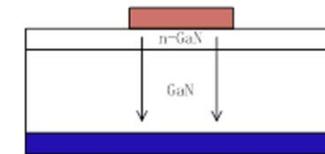


開発方針 (ダイオードパラメータ)

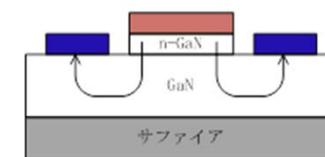
R_s : Low
 C_{jo} : Low
 V_{bi} : Low
 V_{br} : High



縦型ダイオード



横型ダイオード



■ : ショットキー電極 (アノード)

■ : オーミック電極 (カソード)

→ : 電流の流れ

更なる性能向上に向けて

目標効率 (80%) を実現するためのダイオードパラメータは、パラメータごとに実現できることを、試作を通して確認した。

これをダイオードとして実現するためには、次の研究開発が必要となる。

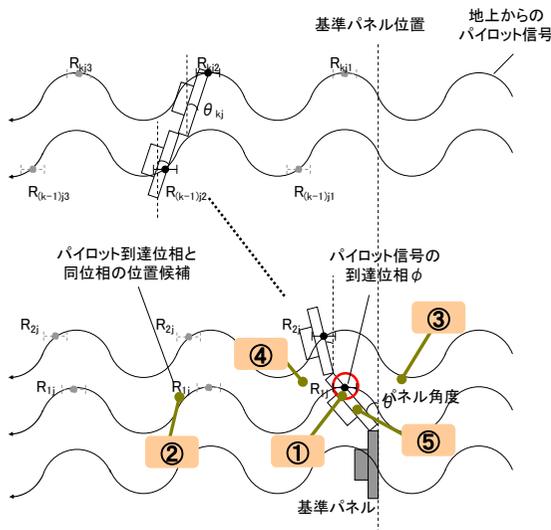
- ・立上り電圧が低いショットキー電極材料の選定と特性把握および特性安定化
- ・損失要因となる抵抗低減のために、低抵抗 GaN 層の厚みを薄くする製造技術

伝送制御技術の研究開発

将来SSPSでの有効性確認を行い、PAC法にやや課題があるものの、並列化法の有効性が明らかになった。実現性についても解析、要素試作試験、原理モデル試作試験を行い、総合的に十分な制御性能を確認した。

PAC法(位置・角度補正法)

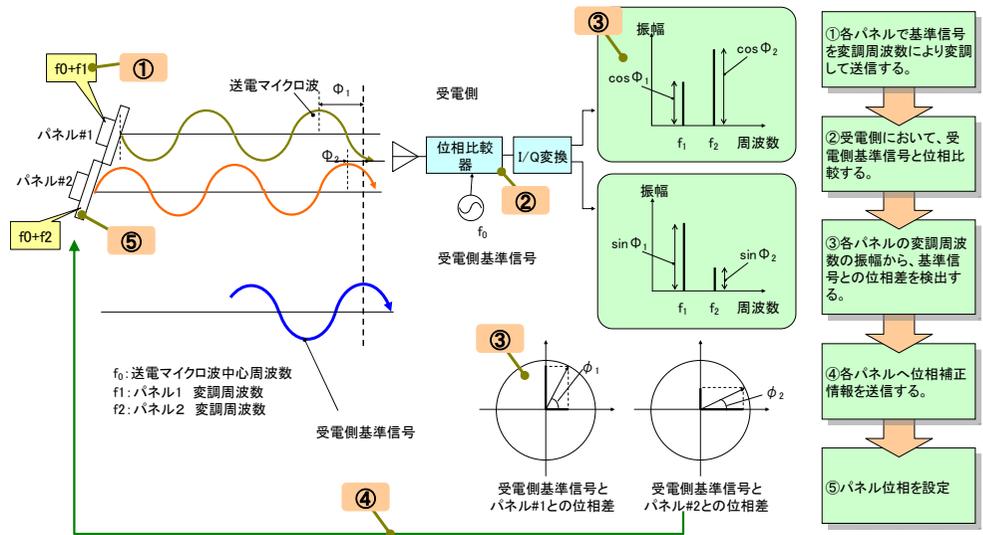
位置・角度補正法は、地上からのパイロット信号を利用して、各送電パネル部の位置ズレを推定し、ズレている分だけ各送電パネル部の基準信号の位相を予め補正する。



- ①パイロット信号到達位相を検出
パネル間位相の基準信号とパイロット信号を用いて、到達位相を検出する。
- ②パネル位置候補($R_{k1}, R_{k2}, \dots, R_{kn}$)を推定
($i=1 \sim k, j=1 \sim n$ (パネル番号))
パイロット到達位相より推定する。
- ③パネル角度 θ_{kj} を推定
($i=1 \sim k, j=1 \sim n$ (パネル番号))
パイロット信号を用いたレトロディレクティブ方式により推定する。
- ④パネル位置 R_{ij} を特定
($i=1 \sim k, j=1 \sim n$ (パネル番号))
②と③よりパネル位置 $R_{ij}(i=1 \sim k)$ を一意に特定する。
- ⑤パネル位相を設定
④よりパネル位置 R_{ij} に相当する送電マイクロ波位相を補正する。

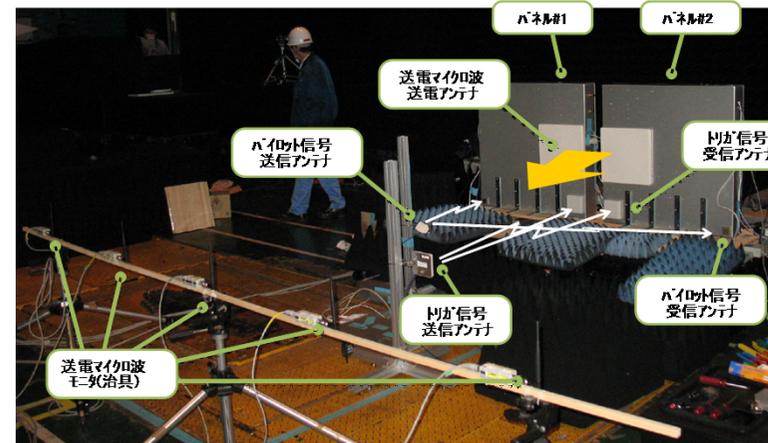
並列化法

並列化法は、送電パネル部毎に送電電波の周波数変調を行ない、受信側で基準となる周波数との重ね合わせをすると、位相の誤差分だけ変調周波数に出力が発生する原理を利用して、送電パネル部毎の位相の誤差を検知し、検知した誤差分だけ各送電パネル部の基準信号の位相を予め補正する。



有効性検討結果

	目標値	PAC法	並列化法
伝送効率	1.0%	2.5%	1.1%
低下量	以下		
不要波発生レベル	0.3W/m ² 以下	0.5W/m ²	0.3W/m ²



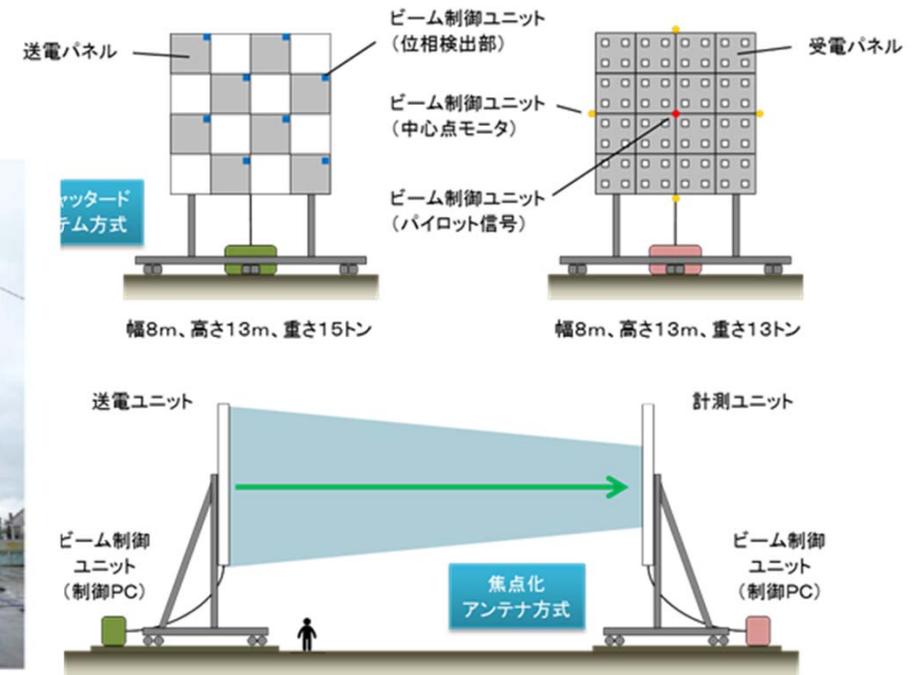
無線送受電スピノフ技術の研究開発

成熟度の高い技術を活用して、産業応用を目指した低コスト実証システムを試作評価した。2.45GHz帯で電送距離約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した。

送電ユニット

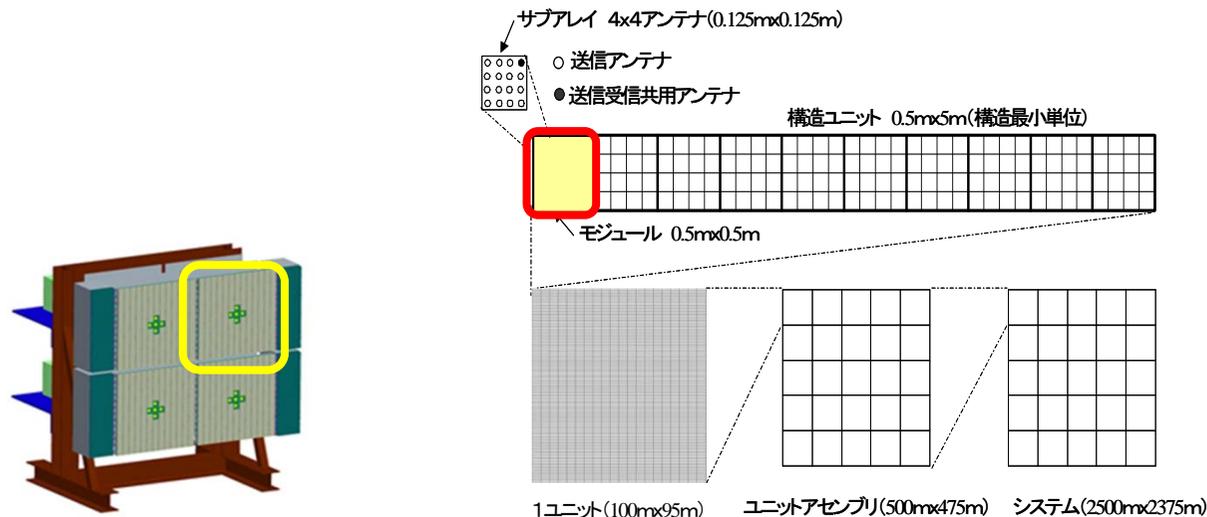


計測ユニット



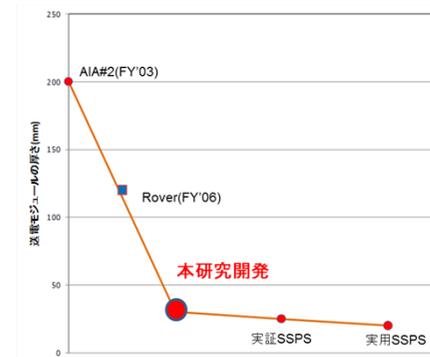
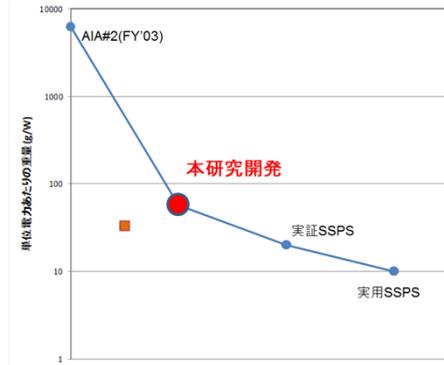
2. J. 5. 事業化、波及効果

- 宇宙太陽光発電システムの政策的な目標は石油代替エネルギーとしての導入、2050年までの温室効果ガス排出量半減などであり、事業化計画は長期的なものである。本研究開発成果が次なる宇宙実証ステップに向けての技術インプットとなり、事業化に向けての一里塚であるとの位置づけである。
- 本研究開発を通じてマイクロ波による無線送受電技術の確立を目指すにあたり、次の項目をコンセプトとした。
 - ・ 技術的に新しい一歩(世界で初めて)
 - ・ 軌道上実証実験に技術的につながる試作
- マイクロ波電力伝送試験モデル送電部のモジュールは、商用SSPS構造ユニットのモジュールを模擬した。



2. J. 5. 事業化、波及効果(続き)

○送電部は、輸送に大きく影響を与える薄型・軽量化において、商用SSPS電気的コア部分約4mmに対して25mm(サブアレイ厚さ)、同10g/Wに対して約36g/W(サブアレイのみ)である。実用化には更なる高効率化や薄型・軽量化が必要であり、「太陽光発電無線送受電高効率化の研究開発」事業において取り組んでいる。



- 本研究開発で取り組んだマイクロ波半導体増幅器などは携帯電話やマイクロ波通信で使用する増幅器と同列の技術であり、高効率化技術がこの分野に寄与する。
- 高効率受電整流ダイオードについては、電子レンジ内の無用マイクロ波の回収や、空間電波のエネルギーハーベスト機器に必須な回路素子として活用される技術である。
- それらマイクロ波無線電力伝送試験の成功は、新聞等に加えてテレビ番組でも取り上げられ注目された。今年度に入ってから、引き続き新聞取材、ラジオへの電話生出演、雑誌特集記事掲載依頼など注目が続いている。
- 実験後には、外国を含む多方面から問合せがあり、無線によるエネルギー伝送、宇宙太陽光発電に関心を集めた。

技術波及応用の可能性

(電気自動車無線給電応用)

- ❖ 電気自動車無線給電システムへの応用 (有線からの脱却)
 - 航続距離の伸張
 - 電池の軽量化

- ・ 大電力&高効率化レクテナ技術
- ・ 高効率フェーズドアレイ技術

- ❖ 電気自動車充電インフラの整備
- ❖ 建設機械への応用



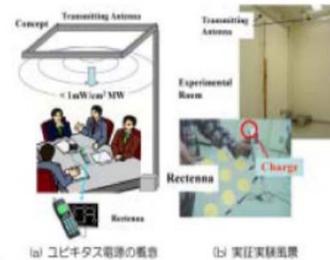
電気自動車無線充電システム [京都大]

(建物内ユビキタス電源応用)

- ❖ 建物内無線給電 (ユビキタス電源)
 - モバイル機器などの充電量を気にしない環境の創生
 - 人間の活動空間に電力を供給

- ・ ビーム制御技術
- ・ 高効率フェーズドアレイ技術
- ・ 高効率化レクテナ技術

- ❖ 但し、送電電力と安全性を見極める必要がある。



(a) ユビキタス電源の概念 (b) 実証実験風景

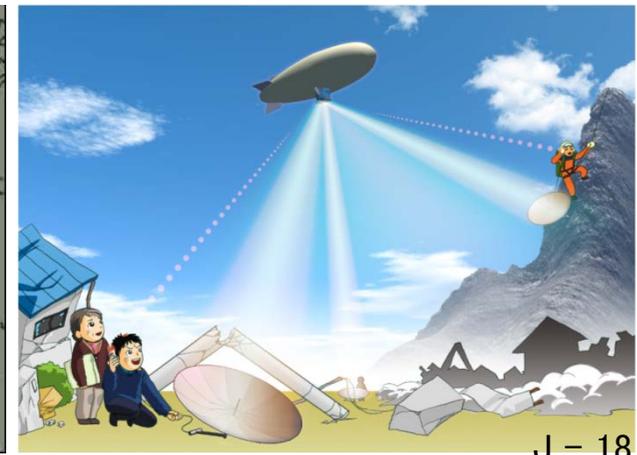
ユビキタス電源のイメージ [京都大]

SSPSからのマイクロ波を拡散させ、離散的に存在する不特定多数のレクテナ(省電力で駆動するセンサー、携行型省電力電子機器などに取付け)により必要なだけ電力を取得することができる。

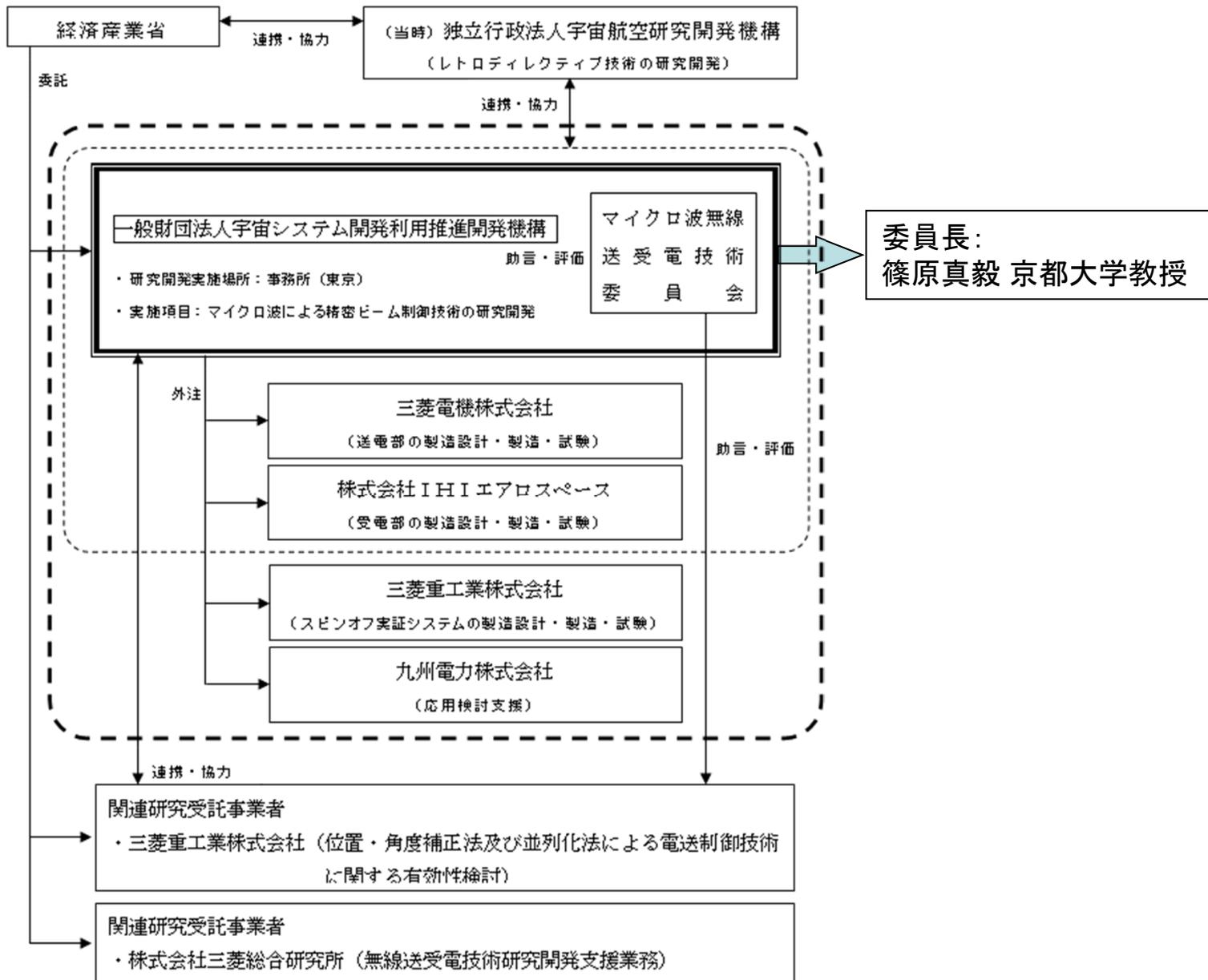
(都市部で)

(郊外で)

(災害緊急時に)



2. J. 6. 研究開発マネジメント・体制等



2. J. 7. 前回の中間評価(平成23年度)の結果

【総合評価】

- 事業(プロジェクト)によっては、既に確立されつつある技術の実用化と長期的な観点から技術レベルの向上を図るものがある。両者とも全体としての目標と、それを具体化するための個別要素技術の達成目標を立てて事業化してゆくのが望ましい。(全事業共通)
- 目標設定が必要性によって決定されることが重要であり、達成可能見込みから判断して目標設定が付けられることがないかを注視する必要がある。(全事業共通)

【対応方針】

- 各プロジェクトは、前述のとおり、全体目標とそれを達成するための個別要素技術の目標を立てて実施しており、引き続き事業化に向けて取り組んでまいりたい。なお、本事業においては、宇宙太陽光発電システムの中核技術であるマイクロ波による無線送受電技術の確立を目的として、安全性や効率性の確保に不可欠な精密ビーム制御技術の研究開発を実施している。
- 目標を設定する際には、事業者側からのみならず、利用者の視点も踏まえた目標となるよう努めているところである。なお、本事業においては、世界初となる送受電装置の薄型化、高効率化を目標として実施している。