

宇宙太陽光発電における無線送受電技術 の高効率化に向けた研究開発の概要 (中間評価)

平成30年10月15日

経済産業省 製造産業局 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

目次

1. 事業の概要
2. 事業アウトカム
3. 事業アウトプット
4. 当省(国)が実施することの必要性
5. 事業アウトカム達成に至るまでのロードマップ
6. 研究開発の実施・マネジメント体制等
7. 費用対効果
8. 中間評価結果

1. 事業の概要

概 要	<p>将来の新エネルギーシステムである宇宙太陽光発電システム（SSPS：Space Solar Power System）の中核的な技術であるマイクロ波による無線送受電技術の確立に向け、送受電効率の改善、低コスト化のための薄型軽量化を図り、宇宙実証・産業応用を可能とする基盤技術の研究開発を実施する。</p> <p>宇宙太陽光発電システムの実現に向けた重要な要素技術であるマイクロ波による無線送受電技術について、研究開発の中長期のロードマップに基づき、送受電部の高効率化等の研究開発等を行う。また、開発した無線送受電技術の垂直方向での実証を行う。</p>
実施期間	平成26年度～平成35年度（10年間）
実施形態	国からの直執行 （一般財団法人宇宙システム開発利用推進機構への委託事業）
予算総額	10.0億円（平成26～29年度） 平成27年度：2.5億円 平成28年度：2.5億円 平成29年度：2.5億円
実施者	一般財団法人宇宙システム開発利用推進機構

宇宙太陽光発電システムのイメージ(100万kW)



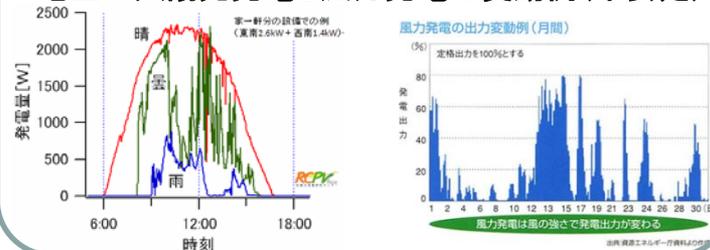
宇宙からの安定電力供給(計画発電)

Space Solar Power System(SSPS)

特徴、意義

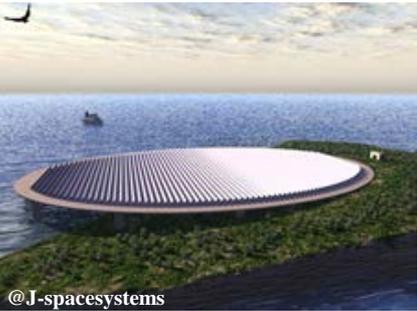
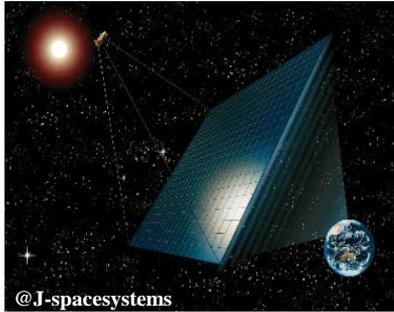
- 非化石エネルギー源、ゼロエミッション電源
 - ・太陽光利用による、将来にわたり枯渇しないエネルギー源
- 効率的な電力供給
 - ・昼夜や天候に左右されない安定的な電力供給が可能
 - ・地上に比べて約10倍の太陽エネルギーを利用可能
- 天候によらない計画可能な安定電源
 - ・ベストミックスのベース電力を担う新しい安定電源
 - ・エネルギー供給源としての位置付けや経済合理性等を総合的かつ不断に評価しつつ、技術開発を含めて必要な取組を行う(エネルギー基本計画(平成30年7月閣議決定))

地上の太陽光発電と風力発電の変動例(不安定)

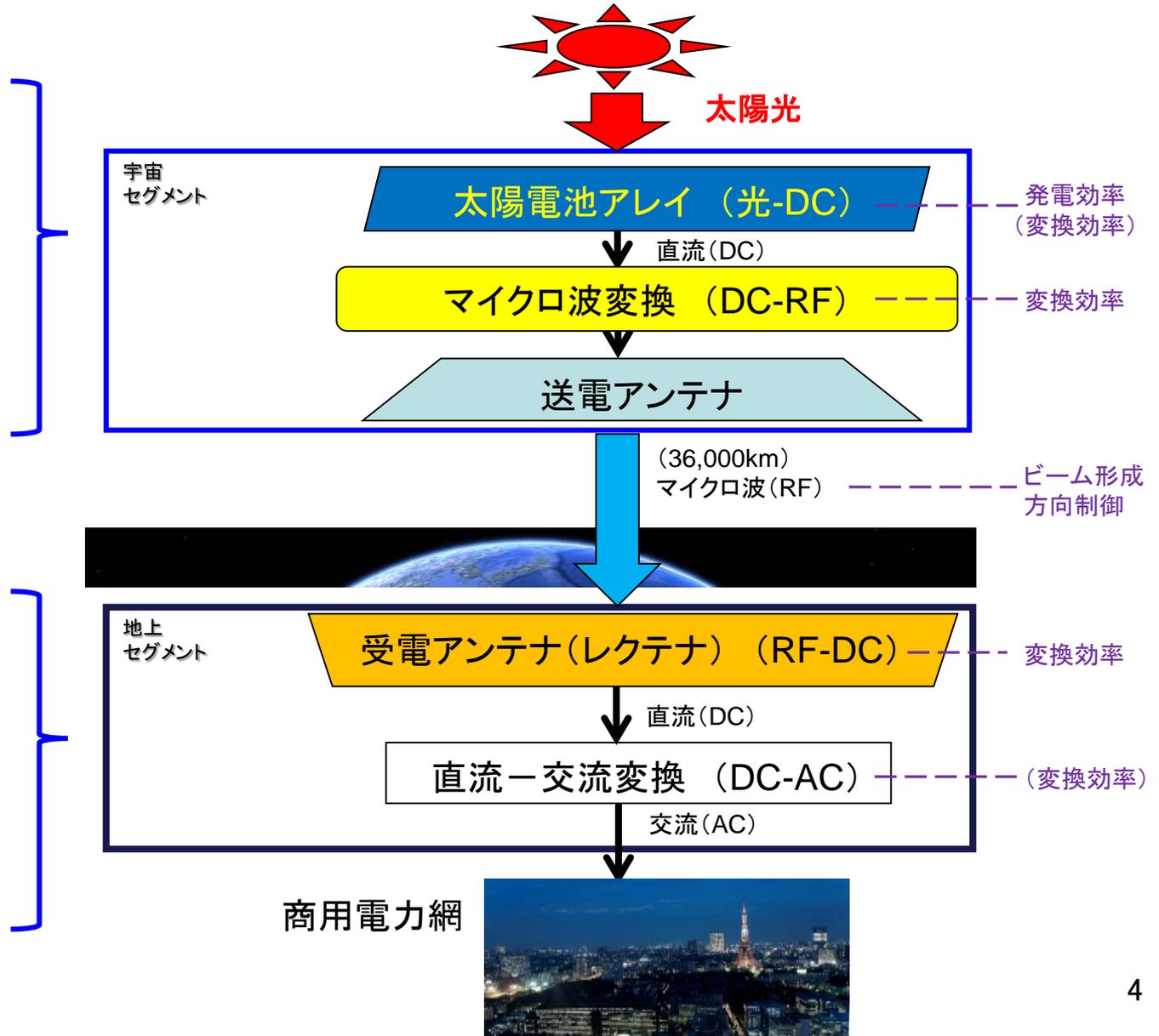


家一軒分の発電量(日中)

風力発電の変動例(月間)



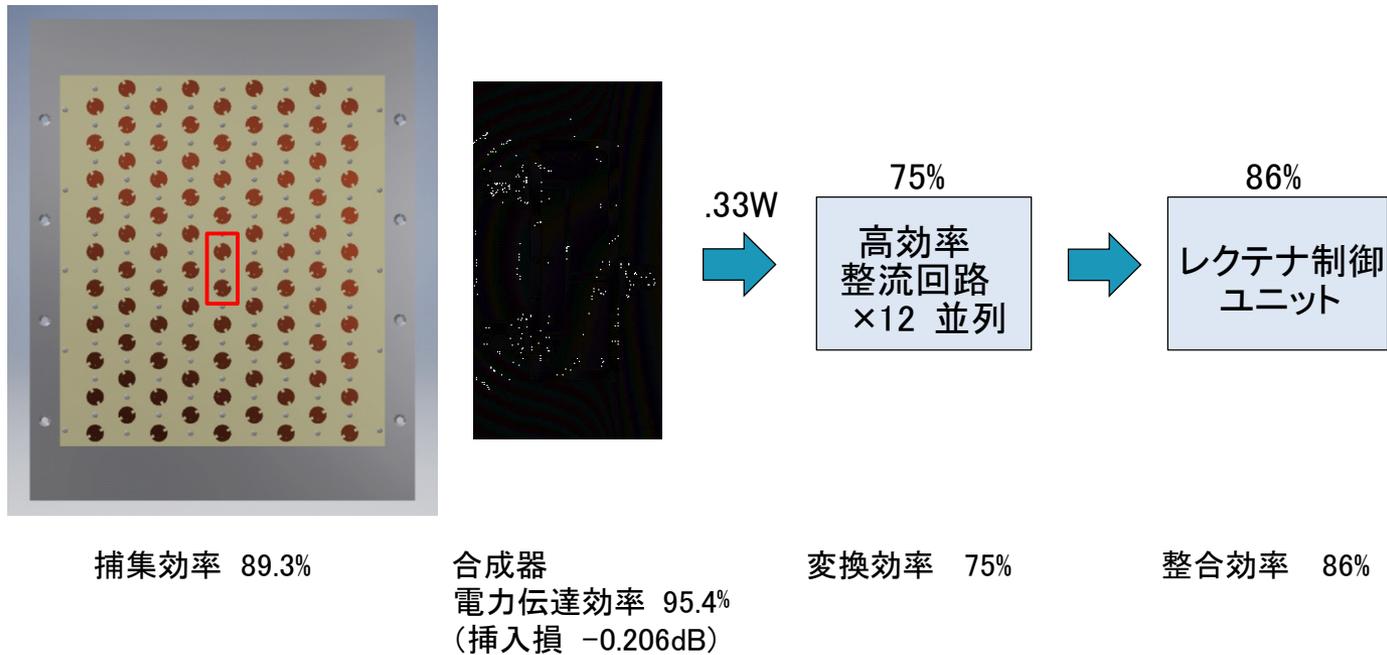
Rectenna : (rectifying antenna)



2. 事業アウトカム

事業アウトカム指標 (妥当性・設定理由・根拠等)	目標値(計画)	達成状況 (実績値・達成度)	原因分析 (未達成の場合)
【アウトカム指標】 平成30年度までに、受電部の総合効率を50%に改善。 【アウトカム指標設定の根拠】 参考2に記載の研究開発ロードマップによる。	(事業開始時:平成26年度) 50%	実績値42% 達成度84%	—
	(中間評価時:平成30年度) 50%	実績値54.9% 達成度109.8%	—
	(事業終了時:平成35年度) 60%	—	—
	(事業目的達成時: 平成57年(2045年)頃) 80%	—	—

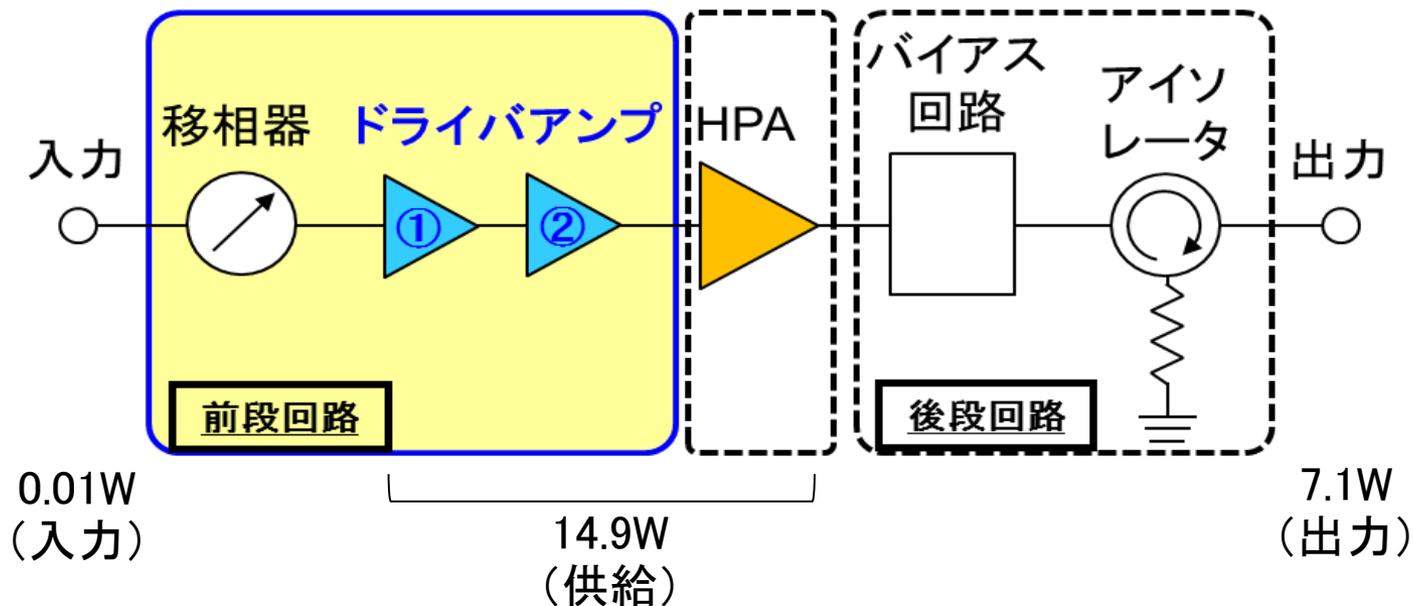
高効率な受電部の一部試作として、整流回路及びレクテナ制御ユニットを試作し、効率を確認し、受電部総合効率を算出した。



受電部総合効率 = 捕集効率 89.3% × 合成器効率 95.4% × 変換効率 75.0% × 整合効率 86.0% = 54.9%

事業アウトカム指標 (妥当性・設定理由・根拠等)	目標値(計画)	達成状況 (実績値・達成度)	原因分析 (未達成の場合)
【アウトカム指標】 平成35年度までに、周辺回路を含めた送電部の総合効率を60%に改善。	(事業開始時:平成26年度) 40%	実績値35% 達成度88%	—
	(中間評価時:平成30年度) 40%	(平成30年度中に計測)	—
【アウトカム指標設定の根拠】 参考2に記載の研究開発ロードマップによる。	(事業終了時:平成35年度) 60%	—	—
	(事業目的達成時: 平成57年(2045年)頃) 80%	—	—

平成30年度に、垂直方向マイクロ波無線送受電技術実証に用いる送電部の19サブアレイについて換装する改修を行った上で計測。総合効率40%を達成できる見込み。



【HPAモジュール概略ブロック図】

量産試作HPA(評価結果:平均PAE69.5%)を組みこんだHPAモジュールを試作。移相器やアイソレータ等での減衰及びドライバアンプでの電力消費により、HPAモジュール出力端にて、PAE47%以上の評価結果を得た。HPAモジュール以外の効率を考慮すると、送電系全体での総合効率は44%となる見込みであり、平成30年度中に計測する予定。

※参考:PAE[47%]≒(出力電力[7.1W] - 入力電力[0.01W]) / 供給電力[14.9W]

3. 事業アウトプット

事業アウトプット指標 (妥当性・設定理由・根拠等)	目標値(計画)	達成状況 (実績値・達成度)	原因分析 (未達成の場合)
宇宙太陽光発電システムの重要な要素技術であるマイクロ波無線送受電システムの基盤技術に関する研究開発事業数をアウトプット指標として設定した。 具体の研究開発項目については、研究開発ロードマップに基づき抽出。 [具体の研究開発項目] ①高効率化に資する研究開発 ②薄型軽量化に資する研究開発	(事業開始時:平成26年度) 1事業	1事業/年	—
	(中間評価時:平成30年度) 1事業	1事業/年	—
	(事業終了時:平成35年度) 1事業	—	—

宇宙太陽光発電システムの実現に向けた重要な要素技術であるマイクロ波による無線送受電技術について、研究開発の中長期のロードマップに基づき、送受電部の高効率化を実施するため必要な個別技術開発要素を抽出し、全体として1事業として実施することとした。

研究開発項目	平成26年度	平成27年度	平成28年度	平成29年度	平成30年度
マイクロ波無線送電システムの基盤技術開発					
(i) 高効率化に資する研究開発					
・電力-マイクロ波変換効率	一次試作評価▽	二次試作評価▽	HPA素子試作評価▽		
	高効率化素子開発			送電部高効率化の検討・送電部開発	
・マイクロ波-電力変換効率		要素検討	要素試作評価	受電部高効率化の検討・受電部開発	
(ii) 薄型軽量化に資する研究開発					
	半導体試験装置整備				
			レクテナアレイ試作評価▽		
	薄型軽量化試作開発				

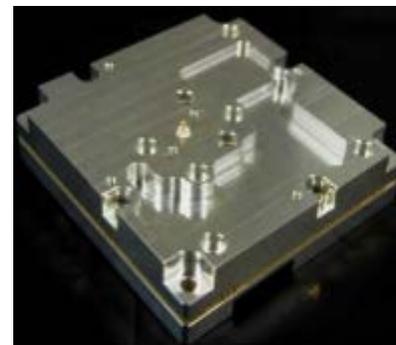
3-1. マイクロ波無線送受電システムの基盤技術開発

①高効率化に資する研究開発

個別要素技術	アウトプット指標・目標値	達成状況(実績値・達成度)	原因分析(未達成の場合)
送電系高効率化	送電部に使用するGaN HPAの電力付加効率(PAE)を70%から80%に向上させる。	HPA 2次試作のロードプル測定(最適負荷条件)において、最大PAE 81%を達成した。	—

送電系の半導体増幅器向けHPA(High Power Amplifier)高効率化素子を開発し、試作品の詳細評価を実施した。

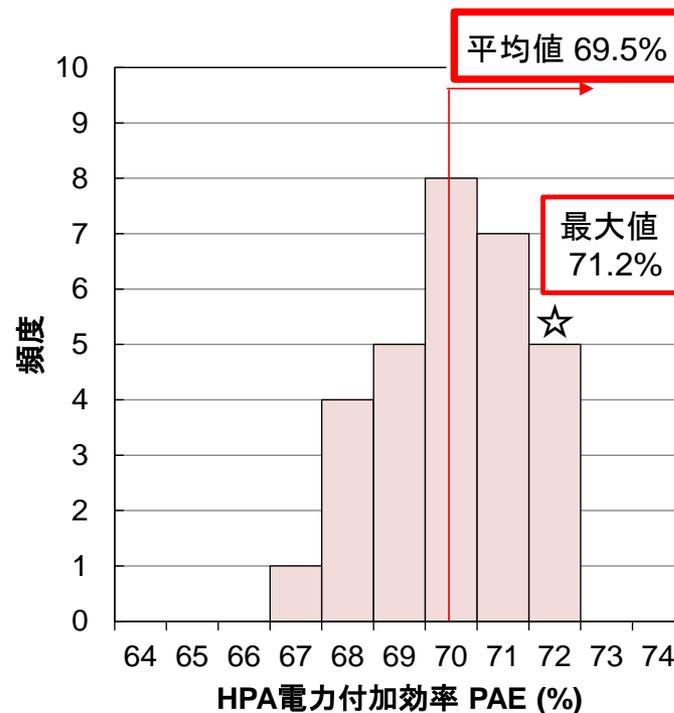
具体的には、送電系の高効率化として、マイクロ波電力伝送用の高出力増幅器(HPA)の供給直流電力と高周波出力電力の変換割合を示す電力付加効率(PAE)を向上させるために、HPA素子の構造パラメータ(ゲート長、ゲート・ドレイン間距離)の最適化検討、試作・評価を行った。



HPAモジュール試作モデル

個別要素技術	アウトプット指標・目標値	達成状況(実績値・達成度)	原因分析(未達成の場合)
送電系高効率化	量産化HPAの電力付加効率(PAE)を60%から平均68%以上に向上させる。	実績値 69.5%	—

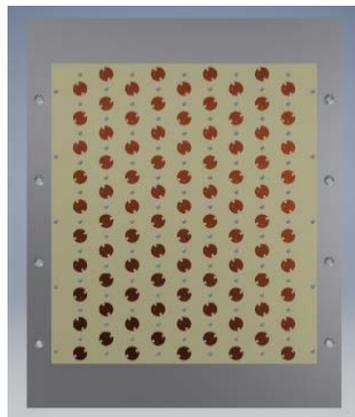
高効率化開発を行ったHPA (High Power Amplifier)を量産し、詳細評価を行った。
 量産したHPAの評価結果は、30素子を製作して、平均PAE 69.5%を達成した。



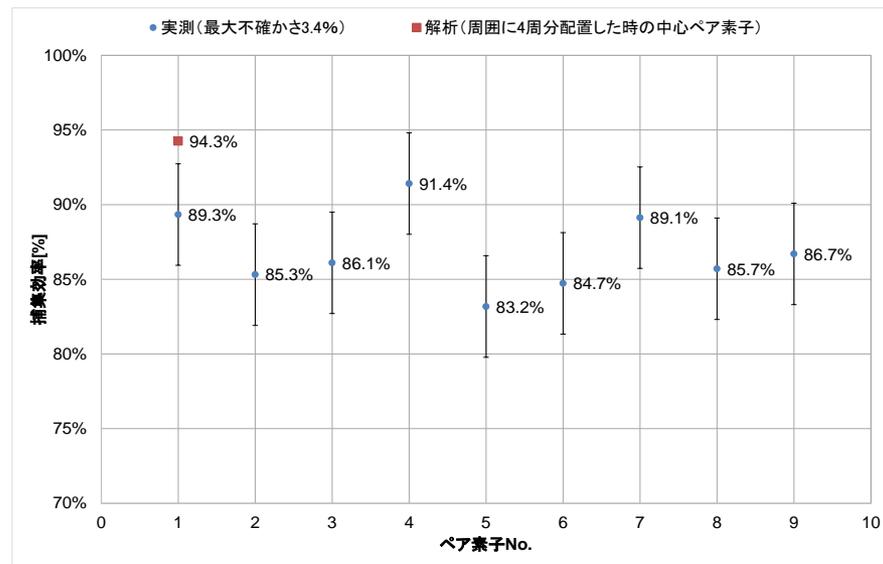
HPAのサンプルばらつき評価結果

個別要素技術	アウトプット指標・目標値	達成状況(実績値・達成度)	原因分析(未達成の場合)
受電系高効率化	捕集効率を80%から90%に向上させる。	捕集効率の実測値は81.7%から89.3%となり8ポイント程度改善することを確認	<p>捕集効率評価結果については、下表のとおり、実測値は素子位置による捕集効率変動があり、9ペア素子で83.2%～91.4%であったため、アレイ中心の値89.3%を実績値とした。</p> <p>捕集効率向上は受電部の総合効率向上に必要な開発要素の一つであり、総合効率の目標値を十分に達成できる数値を捕集効率の目標値として設定。捕集効率の実績値は90%をわずかに下回ったものの、事業アウトカムに示すとおり受電部総合効率の目標値達成には大きく貢献した。</p>

受電系の高効率化として、アンテナの捕集効率を向上させるために、アンテナアレイ配置の最適化検討、試作・評価を行った。



項目	仕様
素子間隔	0.7λ
基板厚	3.2mm
基板材質	テフロン
アレイ配列	三角配列
サブアレイ配列	ペア素子(90°)



アンテナアレイ部試作モデル

捕集効率評価結果

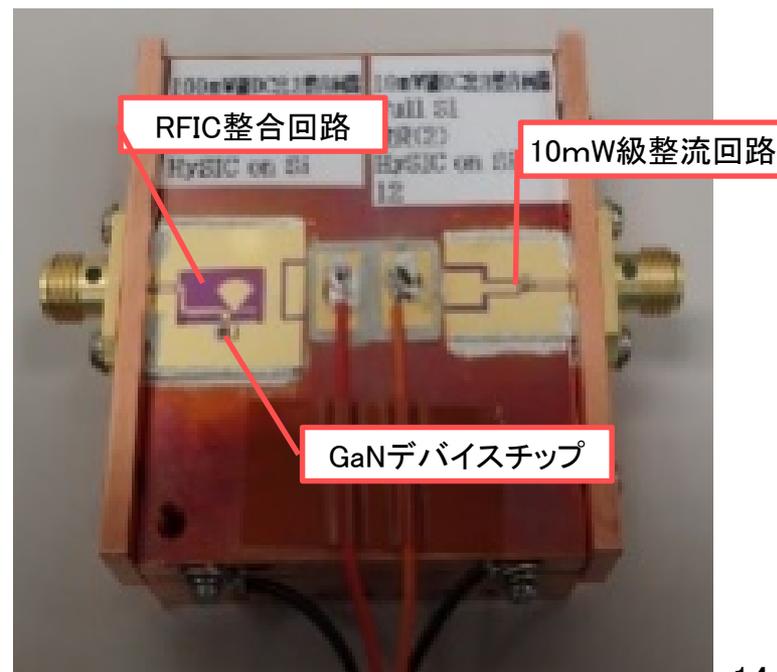
3-2. マイクロ波無線送受電システムの基盤技術開発

②薄型軽量化に資する研究開発

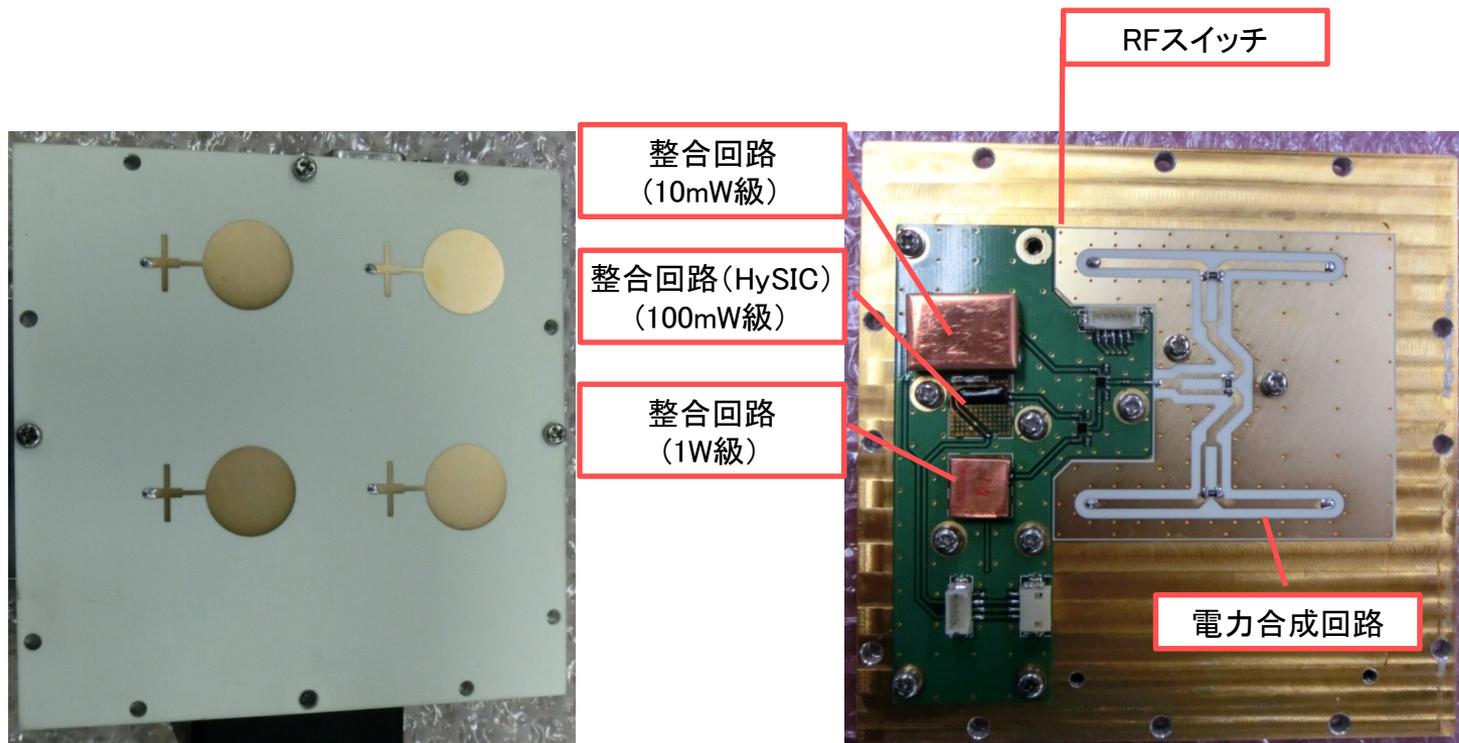
個別要素技術	アウトプット指標・目標値	達成状況(実績値・達成度)	原因分析(未達成の場合)
薄型軽量化	厚さを約25mmから10mm以下にする。	9.8mm	—

宇宙太陽光発電システム構築の低コスト化に向けて、送受電システムの更なる薄型化を図るため、世界初の異種半導体混成集積回路(HySIC: Hybrid Semiconductor Integrated Circuit)技術を適用したレクテナアレイを試作した。

一つの半導体基板の上にICを作り上げるモノリシックマイクロ波集積回路(MMIC: Monolithic Microwave Integrated Circuits)と異なり、HySICは、Si半導体基板の上に展開した、GaNデバイスチップ、Siドライバ回路、RFIC整合回路やGaAs増幅器等を半導体接合技術により一つに融合させる技術である。これにより、試作したレクテナアレイは厚さ10mm以下を達成した。



HySIC整流回路試作モデル



アンテナ面

整流回路面

レクテナアレイ試作モデル

4. 当省(国)が実施することの必要性

宇宙太陽光発電システムについては、発電時に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や天候に左右されることなく発電が可能であることから、地球環境問題等への対応やエネルギーの安定供給の確保の観点から、将来の新エネルギーシステムとなる可能性を有している。このため、エネルギー基本計画や宇宙基本計画等において、宇宙太陽光発電システムの実現に向けた研究開発の必要性が明記されている。

一方で、宇宙太陽光発電システムの実現には、先端的な半導体技術から高信頼性が求められる宇宙技術に至るまで、多岐にわたる専門技術と長期の取組が必要であり、民間企業だけで研究開発や技術実証を行うことは困難であるとともに、新規技術の研究開発であることから、開発要素及び研究におけるリスクが大きく、本技術の研究開発は国による委託事業として実施することが必要。

エネルギー基本計画(平成30年7月閣議決定)

【概要】

エネルギー政策基本法(2002年6月)に基づき、政府が策定するもの。「安全性」、「安定供給」、「経済効率性の向上」、「環境への適合」というエネルギー政策の基本方針に則り、エネルギー政策の基本的な方向性を示す。常に踏まえるべき点として「東京電力福島第一原子力発電所事故の経験、反省と教訓を肝に銘じて取り組むこと」等を原点として検討を進め、2030年、2050年に向けた方針が示されている。

【宇宙太陽光発電システムの位置づけ】

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。

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)

【概要】

国際的な低炭素社会の実現を目指して平成18年に策定した計画。革新的技術の着実な開発と普及の具体化を図るため必要な方策をまとめ、平成25年に改訂した。

【宇宙太陽光発電システムの位置づけ】

将来的な課題への対応や長期的な可能性として検討すべき技術として、核融合、宇宙太陽光発電や窒素循環の適正化等についても、長期的観点から取り組む。

未来投資戦略2018(平成30年6月閣議決定)

【宇宙太陽光発電システム(マイクロ波無線送電技術)の位置づけ】

(地産地消型エネルギーシステムの構築等)マイクロ波無線送電技術の研究開発・実証、各種産業への応用を進め、地域のエネルギーネットワークを強化する。

宇宙基本計画(平成28年4月閣議決定)

【概要】

平成20年に制定された宇宙基本法に基づき、我が国の宇宙に関する総合的戦略として、宇宙利用を総合的、計画的かつ強力に推進するために策定。その後の環境変化を踏まえ、産業界の投資の「予見可能性」を高め、産業基盤を強化するため、今後20年程度を見据えた10年間の長期整備計画として、平成28年に改訂された。

【宇宙太陽光発電システムの位置づけ】

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や、太陽活動等の観測並びにそれに起因する宇宙環境変動が我が国の人工衛星等に及ぼす影響及びその対処方策等に関する研究を推進する。(総務省、文部科学省、経済産業省、環境省等)

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)

【概要】

平成27年の地球温暖化対策推進本部及びCOP21において、総理が取りまとめる旨を表明した戦略で、研究開発を集中的に強化すべき有望な革新技术分野を特定し、そのインパクトや実用化、普及のための開発課題を整理したもの。

【宇宙太陽光発電システムの位置づけ】

本戦略が対象としている2050年頃という時期を超えて、超長期的に開発が見込まれる核融合発電や宇宙太陽光発電等については着実に推進する。

宇宙産業ビジョン2030(平成29年5月宇宙政策委員会決定)

【宇宙太陽光発電システムの位置づけ】

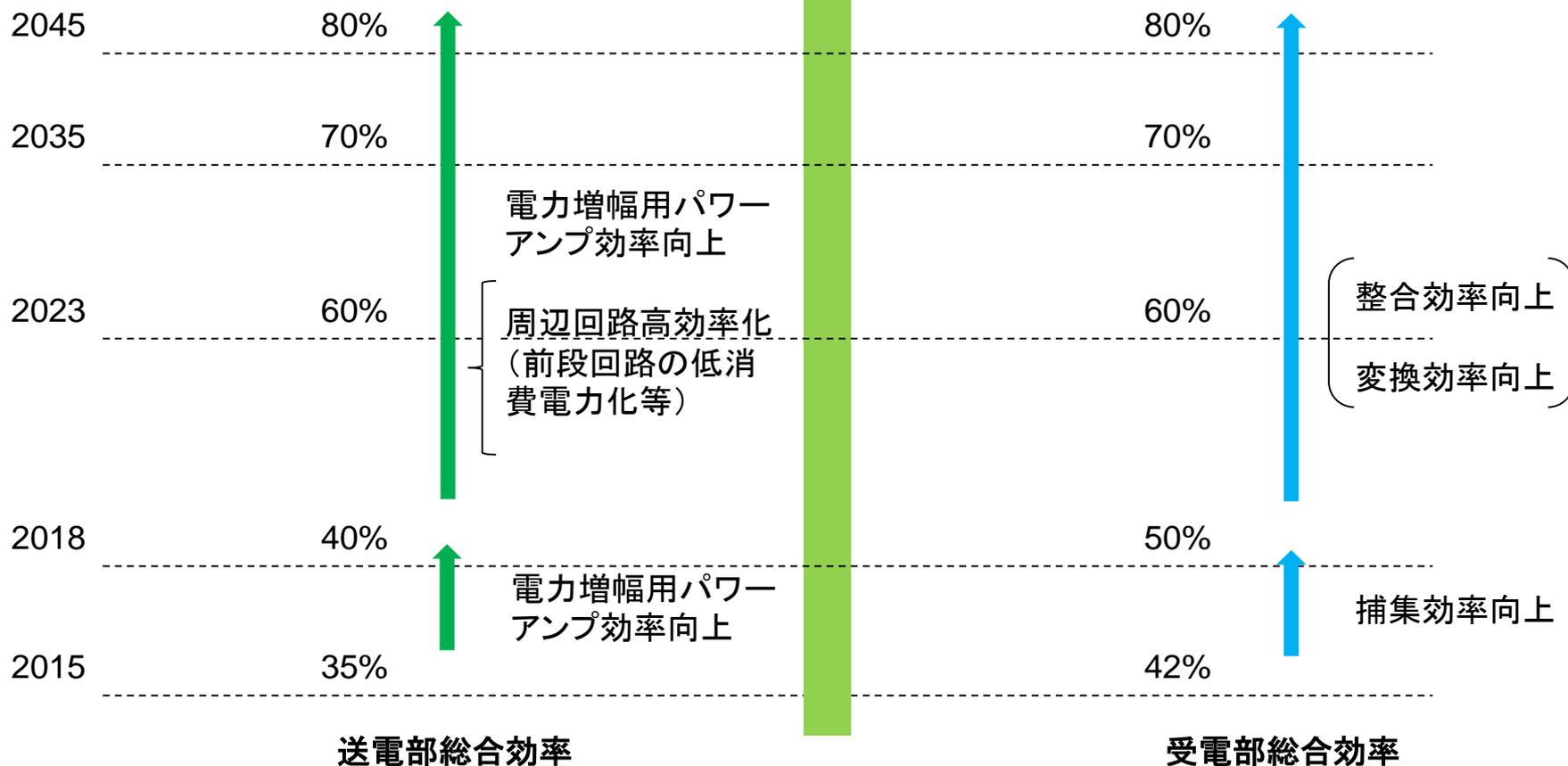
(国際競争力の確保)デブリ除去技術、小型SAR(合成開口レーダー)やテラヘルツセンサー、測位技術、衛星通信用技術、宇宙太陽光発電など、我が国の強みや重要技術を戦略的に強化していくことも重要である。

5. 事業アウトカム達成に至るまでのロードマップ

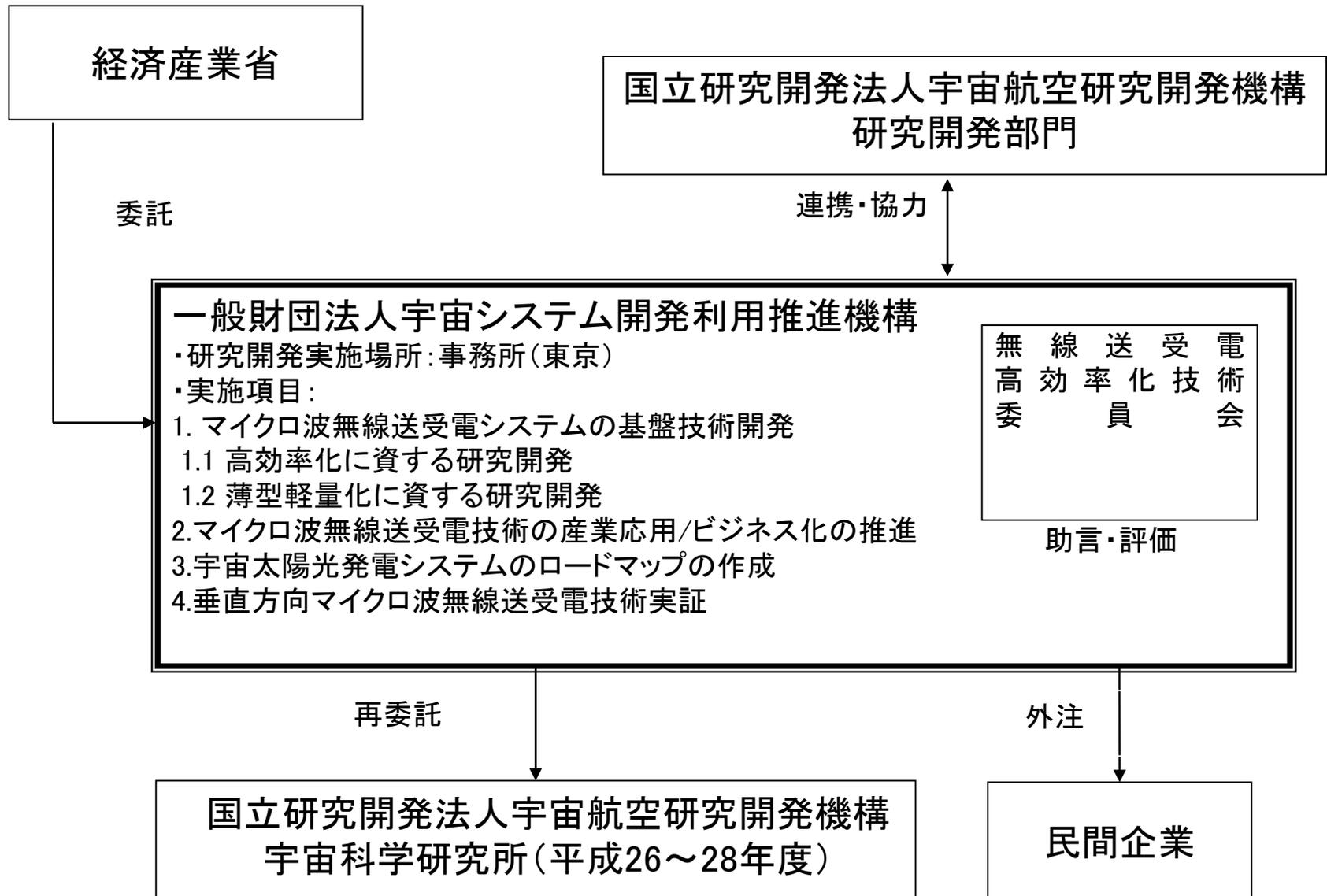
マイクロ波無線送受電技術における送電部総合効率及び受電部総合効率に係るロードマップを以下に示す。

送電部総合効率の向上には
HPAの高効率化、前段回路の低消費電力化、
後段回路の損失低減が必要

受電部総合効率の向上には
捕集効率、変換効率、整合効率
それぞれの効率向上が必要



6. 研究開発の実施・マネジメント体制等



7. 費用対効果

宇宙太陽光発電システムについては、地上太陽光発電と異なり昼夜や天候に左右されることなく発電が可能であるとともに、火力発電等とは異なり発電時に温室効果ガスを排出しないという特長がある。

このため、宇宙太陽光発電システムの実現により、我が国として、エネルギーを安定的に確保することができるとともに、石炭等火力発電から代わることにより、CO₂の発生を削減することが可能となる。

将来の宇宙太陽光発電システム稼働時のCO₂削減効果については、SSPSの発電単位当たりのCO₂排出量は31.4g-CO₂/kWh(運用中の補修含む)*¹であり、原子力発電や風力発電等の再生可能エネルギーとほぼ同等、LNG火力(複合)[474g-CO₂/kWh]、LNG火力(汽力)[599g-CO₂/kWh]や石油火力[738g-CO₂/kWh]、石炭火力[943g-CO₂/kWh]と比べてはるかに排出量は少ない。*²

*1: 出典 「宇宙太陽光発電衛星のある地球と将来 宇宙産業と未来社会についての学際的研究」(慶應義塾大学出版会)

*2: 出典 「日本における発電技術のライフサイクルCO₂排出量総合評価」(電力中央研究所報告)

本事業では、平成26年度からの5年間(計12.5億円)で、宇宙太陽光発電システムの実現に必要な受電部と送電部の総合効率改善に向けた研究開発等を実施し、受電部は目標を達成、送電部も達成を見込んでおり(今年度中に測定)、着実に成果を積み重ねている。

なお、本事業の成果である送受電系の高効率化、薄型軽量化については、ワイヤレスIoTセンサへの給電、インフラ点検・防災センサ等への給電といった活用が期待できるほか、HySIC技術については、通信機器等での活用も可能である。このため、マイクロ波無線送電に関する研究や事業化を進める関係者が一堂に会し、情報交換や交流を行うための研究会を事業の一環として開催し、宇宙太陽光発電システムの実現に必要な要素技術が地上産業での活用を促す取組も実施するなど、事業の波及効果拡大を進めている。

8. 中間評価の結果

(太陽光発電無線送受電高効率化の研究開発)

評価ワーキンググループのコメント	対処方針
<p>○ 本分野のロードマップを策定し、複数の里程碑を設けてもらいたい。各段階で成果を出していくことが重要であり、これを視野に入れて研究開発を継続されたい。</p>	<p>○ 宇宙太陽光発電は長期の取組となることから、今後の研究開発のためロードマップを検討しており、平成28年度中にロードマップを策定することとしている。この中で、実現に至る過程で複数のマイルストーンを設け、その段階ごとに必要な技術レベルを定めることを検討しており、今後はこのロードマップに基づいて研究開発を着実に進めていく。</p>

今後の研究開発の方向等に関する提言	対処方針
<p>○ 宇宙太陽光発電システム(SSPS)の技術開発については、地上の電力伝送だけに終わることがないよう、その実現に向けて、打ち上げコストも含めた検討を深めていくべきである。</p> <p>○ SSPSの実現に向けて、送受電関連だけでなく、それを支える高電圧や絶縁などの基盤技術、電波伝送経路にあたる空間における環境との相互作用、生体への影響なども含めて研究開発を進め、社会として進めていける土壌を育てていく必要がある。</p>	<p>○ 宇宙太陽光発電システムの研究開発は、長期に及ぶ取組となることから来年度に中長期の研究開発のロードマップを策定予定であり、その際、打上コストの視点も含めて検討してまいりたい。</p> <p>○ ご指摘の視点は重要な課題と認識しており、マイクロ波による動植物や大気、電子機器への影響について、過去にも検討を行ったところ。高電圧への対応技術や周囲の環境への影響等の検討は、今後の送受電技術の研究開発の進捗に応じて、適切な時期の実施を検討してまいりたい。</p>

(参考1)

マイクロ波無線送受電技術の産業応用／ビジネス化の推進

平成27年度の中間評価のコメント「本事業で開発中の無線送受電技術については、産業応用に向けた理解の増進等の取組を進めるべきである。」に対応し以下を実施した。

マイクロ波無線送受電技術が広く知られ、社会的に認知されること、マイクロ波無線送受電技術を用いたビジネス化を促進することを目的とし、各種展示会への出展を行った。また、マイクロ波無線送受電技術の早期の事業化を目的として、将来のビジネス化を目指す企業と専門家、行政機関等による研究会を開催した。

(1) 展示会等への出展

マイクロ波無線送受電技術の社会的認知の向上、ビジネス化の促進を目的として各種展示会へ出展

平成28年度： マイクロウェーブ展、CEATEC JAPAN、IoT Japan
ブース来場者数：1,155名

平成29年度： センサエキスポジャパン、CEATEC JAPAN、IoT Japan
ブース来場者数：1,299名

(2) マイクロ波無線送電技術ビジネス化研究会

マイクロ波無線送受電技術の早期の事業化を目的として、ビジネス化を目指す企業と専門家、行政機関等が集まる研究会を開催

平成28年度： 計5回 307名が参加

平成29年度： 計5回 334名が参加

開催年度	ご講演いただいた専門家・企業
平成28年度	宇部興産(株)、(株)NTTデータ経営研究所、応用地質(株)、オムロン(株)、(株)オリエントマイクロウェーブ、京都大学、(株)共和電業、(株)翔エンジニアリング、(株)東芝、(株)ドコモCS、パナソニック(株)、古野電気(株)、三菱重工業(株)、(株)三菱総合研究所、三菱電機(株)、(株)リプロ
平成29年度	大阪大学、京都大学、上智大学、太平洋セメント(株) テスラシート(株)、東京大学、豊橋技術科学大学、パナソニック(株)、(株)パナソニックシステムネットワークス開発研究所、三菱重工業(株)、早稲田大学

(参考2)

宇宙太陽光発電システムのロードマップの作成

宇宙太陽光発電システムの実用化へ向けたマイクロ波無線送受電技術等の研究開発に係るロードマップは、策定したH19年度から長期間が経過していることから現状を踏まえた改訂を実施することとした。

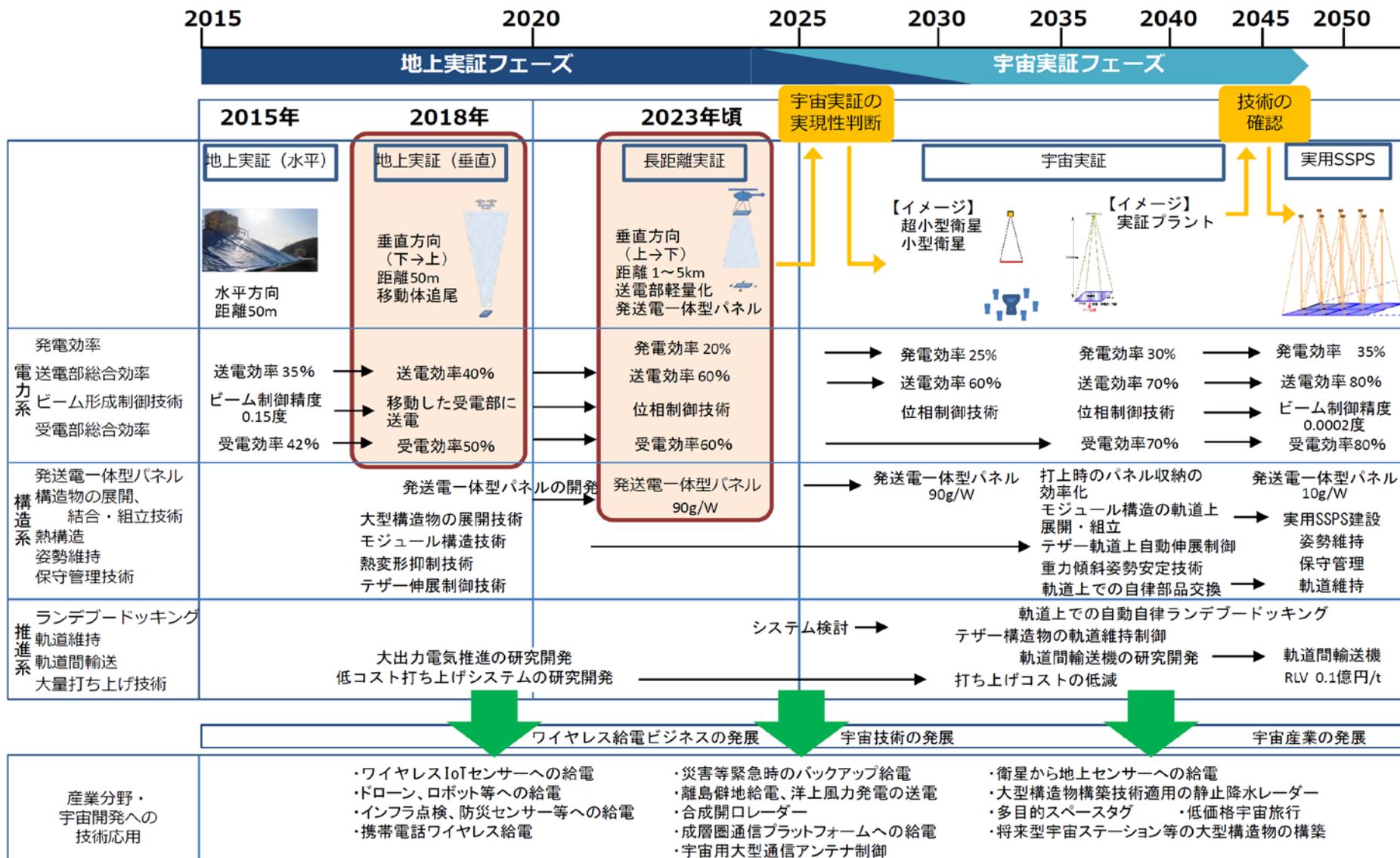
(1) マイルストーンとしての実証試験の設定

- ・ 将来にわたり着実に技術開発を進めていくため、実用システムに到達するまでの過程に段階的にマイルストーンとなる実証試験を設定し、その段階で開発目標とする技術項目や水準を検討。
- ・ 当面の開発目標となる地上での実証試験は具体的に設定。その後の宇宙実証の実施にはまだ時間があり、現時点で実証方法を絞り込むことは現実的ではないと判断し、想定されるイメージとして複数案を記載。

(2) 開発技術の産業への応用、スピンオフ

- ・ 宇宙太陽光発電システムの実現まで長期の取組となる中、研究開発の途中段階においても、研究成果を積極的に産業分野や宇宙開発へ応用していくことが開発を継続していく上で重要であることから、開発した技術のスピンオフの可能性も併せて記載。

発送電一体型宇宙太陽光発電システム2006モデル研究開発ロードマップ



(参考3) 垂直方向マイクロ波無線送受電技術実証

ロードマップに定めたマイルストーンとなる実証試験として、平成30年度中に、屋外試験地において送電部と受電部(マルチコプタ搭載)を用いた、次の2項目の試験を実施して評価する予定。

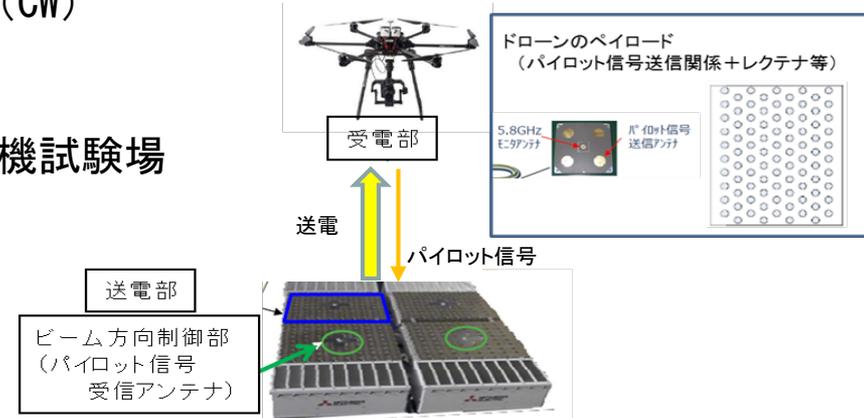
ア. 垂直方向送電ビーム計測試験

- ・距離約50~100mにおいて、垂直方向(下から上方向)に送電ビームを形成する。
計測センサ等を搭載したマルチコプタを使用して、その送電ビームを計測し評価する。

イ. マイクロ波無線電力伝送試験

- ・距離約20mにおいて、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する。

- ・送電 : 約1.9kW 5.8GHz (CW)
- ・パイロット信号 : 10mW以下 2.45GHz
- ・送電方向 : 天頂から10度以内
- ・試験場所 : 兵庫県内の三菱電機試験場



試験コンフィギュレーション案 (イメージ図)