

「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」
プロジェクト評価用資料
(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

プロジェクト名	宇宙太陽光発電における無線送電技術の高効率化に向けた研究開発
行政事業レビューとの関係	事業番号 平成 27 年度 : 0423 平成 28 年度 : 0270 平成 29 年度 : 0233
上位施策名	エネルギー基本計画（平成 30 年 7 月閣議決定）、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）、宇宙基本計画（平成 28 年 4 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）
担当課室	経済産業省製造産業局宇宙産業室

プロジェクトの目的・概要

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。

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、開発した無線送電技術の垂直方向での実証を行う。

予算額等（委託）

（単位：百万円）

開始年度	終了年度	中間評価時期	終了時評価時期	事業実施主体
平成 26 年度	平成 35 年度	平成 30 年度	平成 36 年度	（一財）宇宙システム開発利用推進機構
H27FY 執行額	H28FY 執行額	H29FY 執行額	総執行額	総予算額
248	249	249	746	1,000

※総執行額は平成 27～29 年度の執行額の合計、総予算額は平成 26～29 年度の予算額の合計

I. 研究開発課題（プロジェクト）概要

1. 事業アウトカム

事業アウトカム指標		
【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基づき設定。		
指標目標値		
事業開始時（平成 26 年度）	計画：50%	実績：42%
中間評価時（平成 30 年度）	計画：50%	実績：54.9%
終了時評価時（平成 36 年度）	計画：60%	実績：－
目標最終年度(平成 57 (2045) 年頃)	計画：80%	

事業アウトカム指標		
【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。 【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基づき設定。		
指標目標値		
事業開始時（平成 26 年度）	計画：40%	実績：35%
中間評価時（平成 30 年度）	計画：40%	実績：（平成 30 年度中に計測）
終了時評価時（平成 36 年度）	計画：60%	実績：－
目標最終年度(平成 57 (2045) 年頃)	計画：80%	

2. 研究開発内容及び事業アウトプット

(1) 研究開発内容

【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

平成 26 年度まで実施していた本事業の前身の太陽光発電無線送受電技術の研究開発事業において開発した 5.8GHz 帯でのマイクロ波無線送受電システムの効率は、将来の宇宙太陽光発電システムで想定されている効率に比べ開きが大きく、更に改善する必要があるため、本事業において、電力からマイクロ波への変換効率及びマイクロ波から電力への変換効率の向上に係る研究開発を実施した。

送電系高効率化として、送電部に使用する GaN HPA の電力付加効率（PAE）を平成 26 年度実績の 70%から 80%に向上させることを目標に開発を行った。具体的には、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度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。

また、受電系高効率化として、捕集効率を平成 26 年度実績の 80%から 90%に向上させることを目標に開発を行った。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。

送電部総合効率については、平成 30 年度に 40%（平成 26 年度実績 35%）を目標とし、これまでに開発した高効率半導体素子を用いた送電部の開発を実施する。送電部の更なる高効率化のため、周辺回路高効率化の研究を実施する。受電部総合効率については、平成 30 年度に 50%（平成 26 年度実績 42%）を目標とし、これまでの成果を反映し、捕集効率を向上した高効率な受電部を一部試作・評価した。

②薄型軽量化に資する研究開発

宇宙太陽光発電システム構築の低コスト化に当たっては送受電システムの薄型軽量化が必要不可欠である。本事業では、送受電システムの更なる薄型軽量化を図るため、厚さ 10mm 以下（平成 26 年度実績約 25mm）を目標とし研究開発を実施した。

微細加工技術を高周波電子工学に使うナノ RF エレクトロニクス技術の革新的な方法として、異種半導体混成集積回路：Hybrid Semiconductor Integrated Circuit（以下 HySIC）がある。一つの半導体基板上に IC を作り上げるモノリシックマイクロ波集積回路（Monolithic Microwave Integrated Circuits:MMIC）と異なり、HySIC は、Si 半導体基板上に展開した、ドライバ回路や整合回路と GaAs 増幅器等を半導体接合技術によりひとつに融合化を目指す技術である。高効率な送電部の半導体増幅回路を用いた HySIC 実現性検討を行った。受電部のレクテナのための高効率整流回路の MMIC を融合する HySIC 整流回路を開発した。

（2）事業アウトプット

事業アウトプット指標		
<p>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。</p> <p>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。</p> <p>〔具体の研究開発項目〕</p> <p>①高効率化に資する研究開発</p> <p>②薄型軽量化に資する研究開発</p>		
指標目標値（計画及び実績）		
事業開始時 （平成 26 年度）	計画：1 事業/年	実績：1 事業/年 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に着手。 （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
中間評価時 （平成 30 年度）	計画：1 事業/年 （1）高効率化に資する研究開発	実績：1 事業/年 マイクロ波無線送受電システムの基盤技術に関する次の研究開発を事業として実施。 （1）高効率化に資する研究開発

	<p>①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。</p> <p>②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。</p> <p>③受電系高効率化として、捕集効率を 80%から 90%に向上させる。</p> <p>(2) 薄型軽量化に資する研究開発</p> <p>④送受電システムの薄型軽量化として、厚さを約 25mm から 10mm 以下にする。</p>	<p>①実績のある製造プロセスを C 帯周波数に適用・改良した短ゲート長プロセスの適用により、HPA 素子のドレイン効率および利得の向上を行うとともに、反射特性改善による整合回路損失の低減を行った。HPA 2 次試作のロードブル測定(最適付加条件)において、最大 PAE 81%を達成した。</p> <p>②量産化にあたり信頼性・製造性を考慮してデバイス構造を決定した。量産プレ試作、量産試作、内部整合回路の調整等を行い、量産化 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。</p> <p>③アンテナ内部の低損失化および捕集効率を最大化できるアンテナの最適配置を検討した。単素子、ペア素子、合成器の試作・評価を行い、アンテナアレイに適用して問題ないことを確認した。高効率受電アンテナアレイの試作・評価を行い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した。</p> <p>(2) 薄型軽量化に資する研究開発</p> <p>④半導体デバイスは GaN と Si とし、シリコンプロセスを用いてその周りの受動回路を Si 基板上に作製し (IPD : Integrated Passive Device)、さらにこれら半導体デバイスと IPD を、Si ベース基板上に実装して HySIC 整流回路とした。世界初の HySIC 技術を適用したレクテナアレイ (アンテナ+HySIC+RF スイッチ) を試作し、厚さ 10mm 以下を達成した。</p>
<p>終了時評価時 (平成 36 年度)</p>	<p>計画 : 1 事業/年</p>	<p>実績 : -</p>

<共通指標実績>

論文数	論文の被引用度数	特許等件数 (出願を含む)	特許権の実施件数	ライセンス供与数	国際標準への寄与	プロトタイプ作成
91	>20	1	1	0	0	8

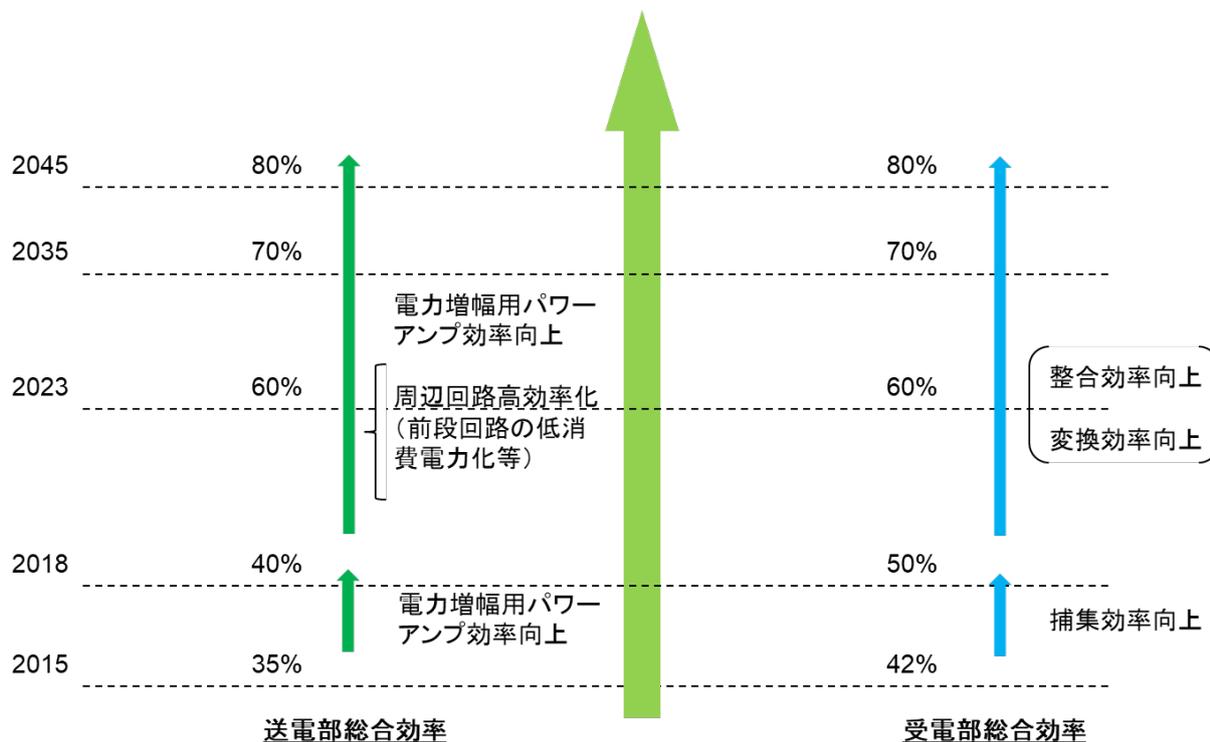
3. 当省(国)が実施することの必要性

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である。

4. 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であり、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である。



5. 研究開発の実施・マネジメント体制等

(1) 研究開発計画

研究開発計画を表 5-1 に示す。

表 5-1 研究開発計画

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
マイクロ波無線送受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 ・マイクロ波-電力変換効率	一次試作評価▽	二次試作評価▽ 高効率化素子開発	HPA素子試作評価▽	送電部高効率化の検討・送電部開発	
		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		

(2) 研究開発の実施体制

本研究開発は、公募による選定審査手続きを経て、一般財団法人宇宙システム開発利用推進機構が経済産業省からの委託を受けて実施した。また、再委託先として国立研究開発法人宇宙航空研究開発機構宇宙科学研究所が参加した。(図 5-1 参照) また、研究開発の実施に当たっては、助言・評価のため、無線送受電高効率化技術委員会を設置した。

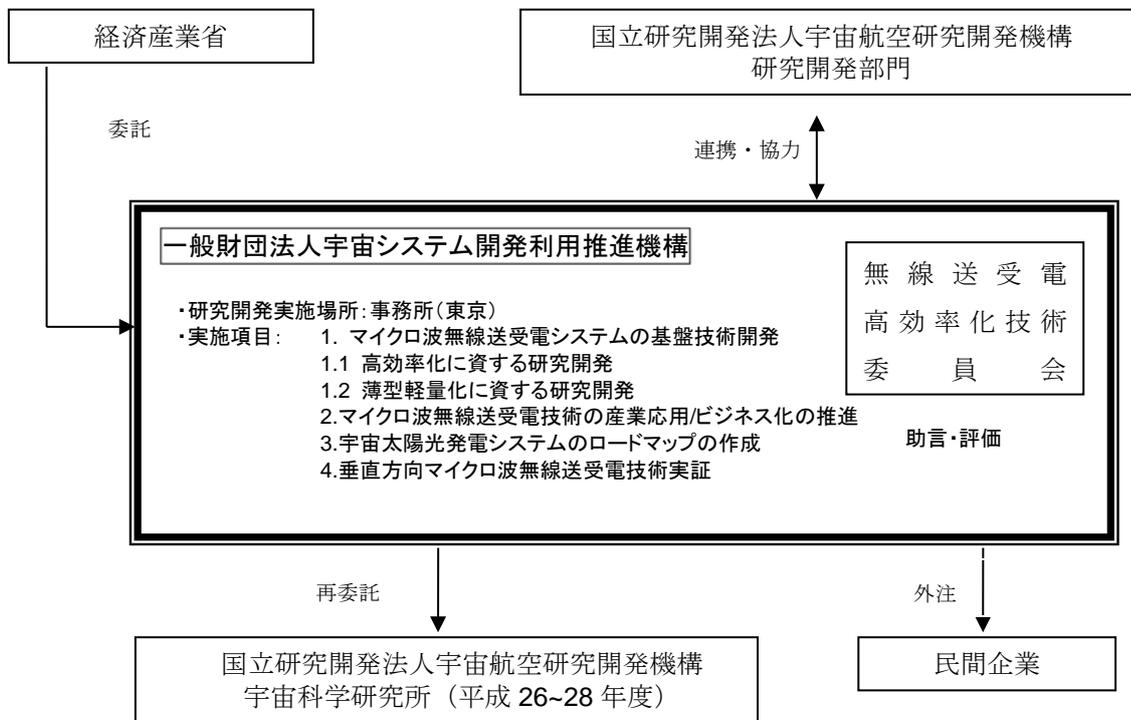


図 5-1 研究開発実施体制

(3) 国民との科学・技術対話の実施などのコミュニケーション活動

マイクロ波無線送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、マイクロ波無線送電技術の早期の事業化に向けた情報等交換・交流機会の提供を目的として、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

[平成 28 年度]

- ・ CEATEC JAPAN 2016
(日程) 平成 28 年 10 月 4 日～7 日
(会場) 幕張メッセ
(ブース来場者数) 4 日間計 428 名
- ・ IoT Japan 2016
(日程) 平成 28 年 10 月 19 日～21 日
(会場) 東京ビッグサイト
(ブース来場者数) 3 日間計 354 名
- ・ マイクロウェーブ展 (MWE 2016)
(日程) 平成 28 年 11 月 30 日～12 月 2 日
(会場) パシフィコ横浜
(ブース来場者数) 3 日間計 373 名

[平成 29 年度]

- ・ センサエキスポジャパン 2017
(日程) 平成 29 年 9 月 13 日～15 日
(会場) 東京ビッグサイト
(ブース来場者数) 382 名
- ・ CEATEC JAPAN 2017
(日程) 平成 29 年 10 月 3 日～6 日
(会場) 幕張メッセ
(ブース来場者数) 580 名
- ・ IoT Japan 2017
(日程) 平成 29 年 10 月 11 日～13 日
(会場) 東京ビッグサイト
(ブース来場者数) 337 名

②マイクロ波無線送電技術ビジネス化研究会

[平成 28 年度]

- ・ 第 1 回

(日程) 平成 28 年 8 月 25 日

(内容)

- ・マイクロ波送電の技術と課題 (京都大学)
- ・ワイヤレスシステムによる工場内配線の簡素化や断線リスクの解消 (オムロン(株))
- ・チューブ導波管による高重量・複雑な自動車内のワイヤーハーネス削減 (古野電気(株))
- ・ドローンを活用した山岳災害波救助支援システム ((株)オリエントマイクロウェーブ)
- ・マイクロ波共振器を用いた照明やテレビへ無線送電 (宇部興産(株))

(参加人数) 54 名

・第 2 回

(日程) 平成 28 年 9 月 26 日

(内容)

- ・ワイヤレス電力伝送に関する動向と I T U における検討状況 ((株)ドコモCS)
- ・エネルギーハーベスティング + 無線給電による防災モニタリング ((株)NTT データ経営研究所)
- ・マイクロ波送電技術の産業利用への取組み (三菱電機(株))
- ・ワイヤレス電力伝送による火山観測 (京都大学防災研究所火山活動研究センター)
- ・無線電力伝送による斜面の土砂災害モニタリング (応用地質(株))
- ・ワイヤレス電力伝送による斜面変位監視システム ((株)リプロ)

(参加人数) 53 名

・第 3 回

(日程) 平成 28 年 12 月 1 日

(内容)

- ・次世代交通・運輸システムを支えるワイヤレス給電技術 (京都大学)
- ・電池レスセンサーを使用した遭難者救急支援システム ((株)翔エンジニアリング)
- ・無線送電システムによる電動自転車等の充電 (三菱重工業(株))
- ・介護ロボット、バッテリーレスセンサーへの無線給電 (パナソニック(株))

(参加人数) 69 名

・第 4 回

(日程) 平成 29 年 1 月 13 日

(内容)

- ・グローバル無線フォーラムにおけるワイヤレス電力伝送に関する取組 ((株)東芝)
- ・無線センサへの無線給電によるインフラモニタリング ((株)共和電業)

(参加人数) 78 名

・第 5 回

(日程) 平成 29 年 3 月 14 日

(内容)

- ・電話利用からみたマイクロ波送電の研究課題 ((株)三菱総合研究所)
- ・電磁波と健康～国際的評価と動向～ (京都大学)

(参加人数) 53 名

[平成 29 年度]

・ 第 1 回

(日程) 平成 29 年 6 月 28 日

(内容)

- ・ パワー半導体を用いたマイクロ波加熱 (上智大学)
- ・ IoT 機器への無線電力伝送に対する取り組み紹介 (東京大学)

(参加人数) 75 名

・ 第 2 回

(日程) 平成 29 年 9 月 25 日

(内容)

- ・ 先端インフラセンシングとエネルギーハーベスティング (京都大学)
- ・ 大電力ワイヤレス給電システムの動向と課題 (早稲田大学)
- ・ テスラシート社が目指すマイクロ波送電ビジネス展開 (テスラシート(株))

(参加人数) 69 名

・ 第 3 回

(日程) 平成 29 年 11 月 2 日

(内容)

- ・ 漏洩電磁波の低減を目指したワイヤレス電力情報伝送技術の開発 (豊橋技術科学大学)
- ・ パッシブ RFID を利用したコンクリート構造物診断技術 (太平洋セメント(株))
- ・ ワイヤレス給電技術実用化に向けた取り組み ((株)UL Japan)

(参加人数) 70 名

・ 第 4 回

(日程) 平成 30 年 1 月 16 日

(内容)

- ・ エネルギーハーベスト技術とその実用化に向けた取り組み (大阪大学)
- ・ ワイヤレス給電機器からの漏えい電磁界に関する評価・解析

((株)パナソニックシステムネットワークス開発研究所)

(参加人数) 57 名

・ 第 5 回

(日程) 平成 30 年 2 月 16 日

(内容)

- ・ マイクロ波によるセンサ給電システム (パナソニック(株))
- ・ 電波干渉制御技術について (三菱重工業(株))
- ・ 自走ロボットとワイヤレス給電を用いた配送システムにおける実証実験 (テスラシート(株))

(参加人数) 63 名

(4) 資金配分

年度ごとの資金配分を表 5-2 資金配分表に示す。

表 5-2 資金配分表

(単位:百万円)

年度(平成)	27	28	29	合計
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	87	119	121	327
②薄型軽量化に資する研究開発	151	113	0	264
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	3	10	19	32
宇宙太陽光発電システムのロードマップの作成	7	7	0	14
垂直方向マイクロ波無線送受電技術実証	0	0	109	109
合計	248	249	249	746

(5) 社会経済情勢等周囲の状況変化への柔軟な対応

本事業計画当初と比較して、家電等へのワイヤレス給電に対する期待が高まっている。米国 Energous 社が開発している「WattUp」や米国 Ossia が開発している「Cota」等は、マイクロ波無線送受電技術を用いた機器であり、実用化に近づいている。一方で、わが国では実現可能性のあるビジネスモデルが構築できておらず、事業化の動きは停滞している。このため、マイクロ波無線送受電技術のビジネス化の推進を目的とし、平成 28 年度からは(3)に示したように展示会への出展及び「マイクロ波無線送電技術ビジネス化研究会」の開催を行っている。

6. 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、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、石油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。

将来の実用 SSPS 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）、着実に実績を積み重ねている。

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の地上産業における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。

(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

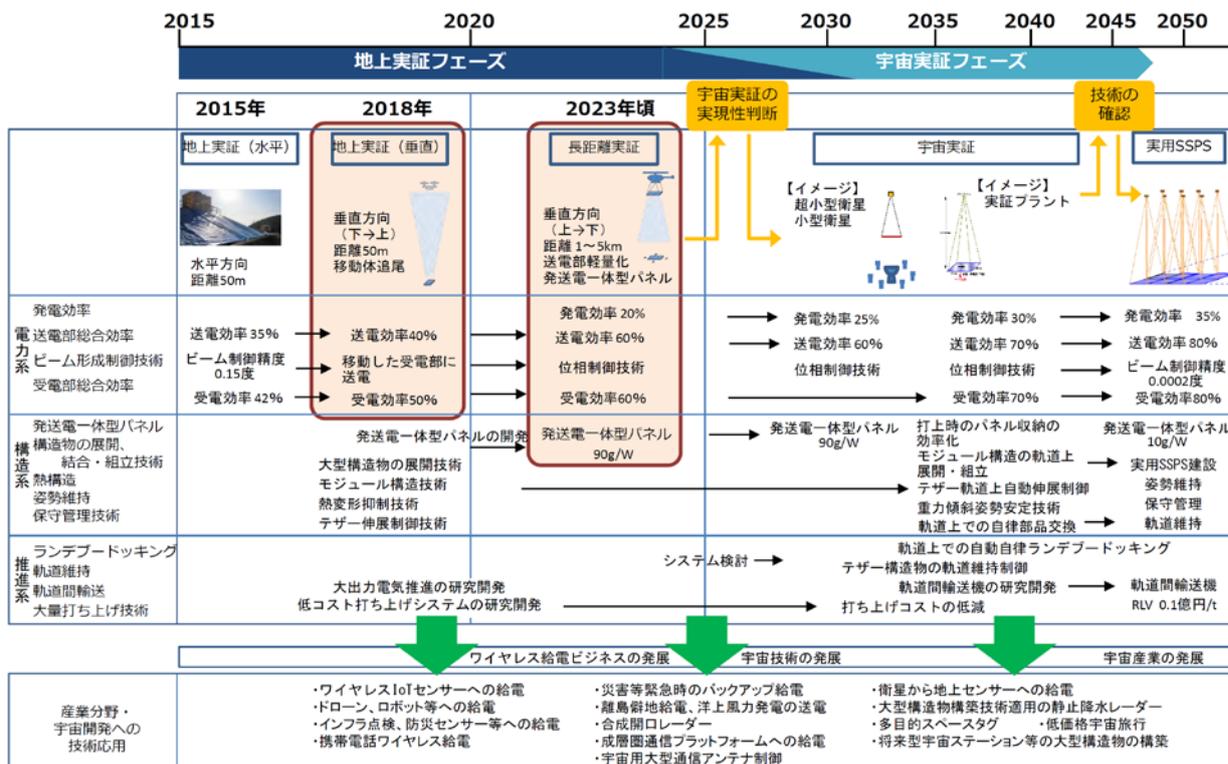
本事業で研究開発する最先端の基盤技術について、宇宙太陽光発電システム以外での応用の可能性について調査、分析及び潜在的な利用者に対する利用促進を実施した。

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、具体的なビジネスモデル構築に向けて、必要に応じて実証も行いながら、メリットを明確化し、課題の解決策について検討した。また、マイクロ波無線送受電技術のビジネス化の推進にあたり必要となる技術として、無線通信との干渉回避のための干渉制御技術について要素研究について検討し、制御装置試作を行った。

(参考2) 宇宙太陽光発電システムの研究開発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。

宇宙太陽光発電システムの実用化へ向けた効率的かつ効果的な実施計画を構築するために、マイクロ波無線送受電技術を基盤とする研究開発に係るロードマップを作成した。本ロードマップの作成を通じ、現時点での技術レベルを調査し、想定される将来の技術進展を踏まえ、今後実施すべき研究開発の内容及び目標を明確化した。ロードマップ等の策定にあたっては、無線送受電高効率化技術委員会の下に専門委員会を設けるとともに、関係分野の研究者等から広く意見を伺うなどにより、宇宙太陽光システムの実現に向けた研究開発が最も効果的に進められるよう、我が国が有する関係分野の技術の活用も含め、適切な研究開発方針の立案に努めた。



(参考3) 垂直方向マイクロ波無線送電技術実証(平成30年度)

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)でのレトロディレクティブ方式による精度の高いビーム方向制御技術、垂直方向へのマイクロ波送電における適切なビーム形成技術を、計測センサ等を搭載したマルチコプタを使用して実証する。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の実証を行う。また、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により、電力として取り出せることを確認する。平成29年度には、システム検討を行い、試験計画を策定した。