特集Ⅰ

宇宙太陽光発電システムの開発動向

JAXAにおける宇宙太陽光発電システムの研究開発 ～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～

Research and Development of Space Solar Power Systems in JAXA

牧野克省 *

1．はじめに

化石燃料（地下資源）の枯渇，CO_2等の温室効果ガスによる地球温暖化等の問題がより深刻なものとなりつつあり，地球規模のこれら喫緊の課題を解決する手段の一つとして，その可能性を秘めた宇宙太陽光発電システム（Space Solar Power Systems：SSPS）が注目されている（図1）．宇宙基本計画（平成27年1月9日宇宙開発戦略本部決定)においても，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，…研究を推進する」とある．SSPSは，宇宙空間において太陽光発電を行い，発電した電力（電気エネルギー）をマイクロ波またはレーザーに変換して無線にて地上に伝送するシステムである．

高度36,000kmの静止軌道上にSSPSを構築することにより，昼夜問わず安定して発電することが可能となり，また，地上の約1.4倍の強度の太陽光エネルギーを利用することができる．無線エネルギー伝送にマイクロ波を用いることで，天候に左右されることなく（雲や降雨にエネルギーが吸収されない），宇宙で発電した電力エネルギーを地上に送り続けるベース電源としての役割が期待される．また，地上送電網への依存度が低く，電力を必要とする地域へ無線により柔軟に送電できる（エネルギーの伝送先を素早く切り替えられる）．さらに，地上の自然災害の影響を受けにくいことや，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が少ないという多くの長所を持つ．

その一方で，SSPSの実現には，高効率で安全な発電・送電・受電，大規模宇宙構造物の構築，軌道上での長期間の運用・維持・補修，宇宙空間への大量輸送等，技術面・安全面・経済面での課題を解決する必要がある．宇宙航空研究開発機構（JAXA）では，これらの課題の解決に向け，マイクロ波やレーザー光による無線エネルギー伝送技術，宇宙空間における大型構造物の構築技術等に関する研究を実施するとともに，長期にわたる研究開発の進め方の検討を含めた総合的なシステム検討を行っている．

本稿では，SSPS研究開発の最近の主な成果として，昨年度実施した「マイクロ波無線電力伝送地上実証試験」の結果（成功裏に終了）について述べるとともに，今後のSSPS研究開発の新たなロードマップ策定に向けた取り組みを紹介する．

2．宇宙太陽光発電システム（SSPS）の実現に向けて

マイクロ波方式SSPSには複数のシステム構想があるが，その中でも，発電所として比較的ロバストな設計となるのが，太陽電池と送電用アンテナを一体化させた「発送電一体型パネルモジュール」を無数に並べ（アンテナの素子数にして数十億オーダー），約2.5km四方の巨大パネルとして組立てるシステムである（図1）．発送電一体型パネルモジュールは，各々が独立（自立）して発電し，その電力をマイクロ波に変換する．各モジュールからマイクロ波を放射する際，そのタイミング等（位相や振幅）をシステム全体として統制をとってコントロールすることにより，無線送電のためのマイクロ

* 国立研究開発法人宇宙航空研究開発機構
宇宙太陽光発電システム研究チーム主任研究員

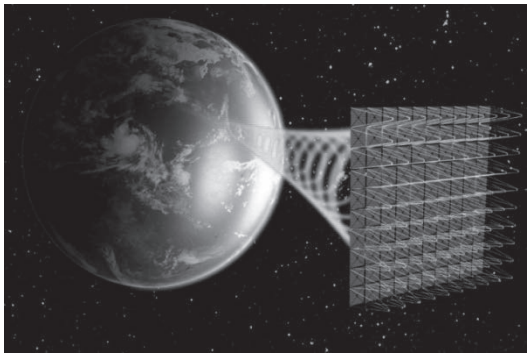


図 1　マイクロ波方式 SSPS の概念図（例）

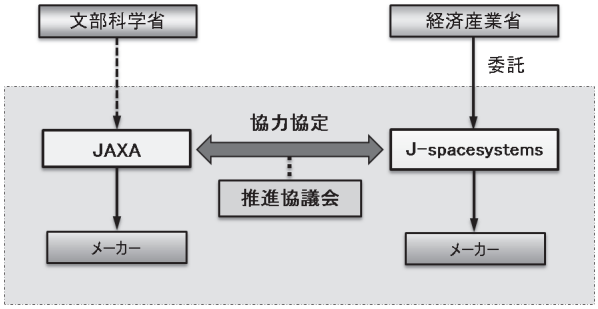


図 2　マイクロ波無線電力伝送地上実証試験の実施体制

波ビームを形成する．発電も送電も行える，同じ機能を持つパネルモジュールを無数に並べ，シンプルで組み立て易く，多少の宇宙ゴミが衝突したとしても発電所としての機能が簡単に損なわれることのないシステムコンセプトとなっている．

SSPS の実現にはマイクロ波による無線電力伝送技術が必須であり，その中枢となる技術が「高精度マイクロ波ビーム方向制御技術」である．SSPS においては，静止軌道から直径約 2 ～ 3km の地上の受電サイトに向けて極めて正確にマイクロ波ビームを指向させる技術が要求される．その精度は，受電サイトの外周約 1km の保安区域以内にマイクロ波ビームを収めるとして，0.001 度である．

「高精度マイクロ波ビーム方向制御技術」の着実な獲得に向けて，JAXA は，経済産業省から委託を受けた一般財団法人宇宙システム開発利用推進機構（以下，「J-spacesystems」）との連携協力の下，「マイクロ波無線電力伝送地上実証試験」を平成 26 年度に実施した（図 2）．JAXA は，マイクロ波無線電力伝送地上試験システムのうち，ビーム方向制御部の開発を担当し，J-spacesystems は送電部及び受電部の開発を担当した．この地上実証試験の目標は，「伝送距離 10m 以上でビーム方向制御精度 0.5 度 rms 以下を達成すること」である．

3．マイクロ波ビーム方向制御方式

マイクロ波方式 SSPS の送電用アンテナパネルは，先述のとおりサイズにして km 級となる．これ程の巨大なアンテナ構造面は，太陽熱による歪みや重力傾斜トルクにより，必要なアンテナ面精度を維持することは難しく，変形は避けられない．そのため，送電アンテナから放射されるマイクロ波ビームの方向を極めて正確に地上の受電サイトへ向けるよう制御する際には，各送電アンテナモジュール間の構造的な位置ずれや角度ずれを電子的に補正する必要がある．そこで，これらを考慮したマイクロ波ビームの方向制御方式として，パイロット信号の到来方向検知に「振幅モノパルス法」，複数の送電アンテナモジュール間における位置ずれ及び角度ずれを補正する手段として「素子電界ベクトル回転法（Rotaing-element Electric-field Vector Method：REV 法 ）」を用い，これらを組み合わせた独自の制御方式を開

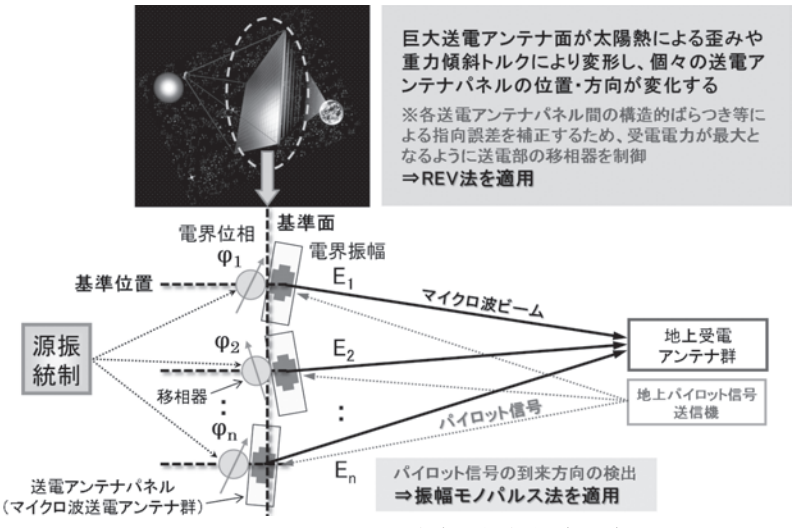


図 3　マイクロ波ビーム方向制御方式（概略）

発した[1]（図 3）．REV 法は，本来はアンテナ素子や給電回路の特性のばらつきを補正する際に用いられる手法であり，フェーズドアレーアンテナの各素子に接続された可変移相器に着目し，アレー動作状態で一つの素子の位相を 0 度から 360 度まで変化させた時のアレーアンテナ合成電界の振幅変化を測定して，その素子の振幅と位相を求めるものである[2]．ここでは，各送電パネルの電界が余弦的に変化することを利用して，送電パネル間の相対的位置関係を位相差として検知し，その位相差が零となるような位相指令を送電部内の初段高出力増幅器の前段にある移相器に設定することで，構造的位置ずれや角度ずれを電子的に補正する．

4．マイクロ波ビーム方向制御装置の開発

J-spacesystems との連携協力の下で開発したマイクロ波無線電力伝送地上試験システムは，送電部，受電部及びビーム制御部（ビーム方向制御装置）から構成される（図 4）．送電部側は SSPS の宇宙セグメントに相当し，受電部側は地上セグメントに相当する．送電部は 4 枚の送電パネルから構成され，送電パネル 1 枚あたりのサイズは 0.6m × 0.6m，アンテナ素子数は 304 素子（76 サブアレイ）である．ビーム方向制御装置は，送電部側装置（BSC-TX）及び受電部側装置（BSC-RX）から構成され，①受電部から送電部に向けて，高出力マイクロ波のビーム方向を指示するパイロット信号（2.45GHz 帯）を送り，②振幅モノパルス方式により，パイロット信号到来方向をパイロット信号受信アンテナにて検出，③当該方向に高出力マイクロ波（5.8GHz 帯）をビームとして打ち返すよう各送電アンテナの位相器に正確な指示を出す．また，送電部における 4 枚の送電アンテナパネルは軌道上の SSPS における巨大な送電アンテナ面の変形を模擬する機能を有しており，面と面の段差（± 20mm）や角度ずれ（± 5 度）の変形設定が可能である．このような送電アンテナ面の変形状態においても，REV 制御により，受電電力が最大になるよう，受電部からの受電電力情報及び BSC-RX に搭載されているモニタアンテナからの受電電力情報を基に各送電パネル単位での位相制御を行う機能を有している．REV 制御の際の送電部への位相制御情報は，BSC-RX のパイロット信号送信アンテナから BSC-TX のパイロット信号受信アンテナに向けて，パイロット信号の変調により送られる．

5．ビーム制御精度評価試験（屋内試験）

ビーム方向制御の精度評価を行う試験のコンフィギュレーションを図 5 に示す．試験実施場所は，国

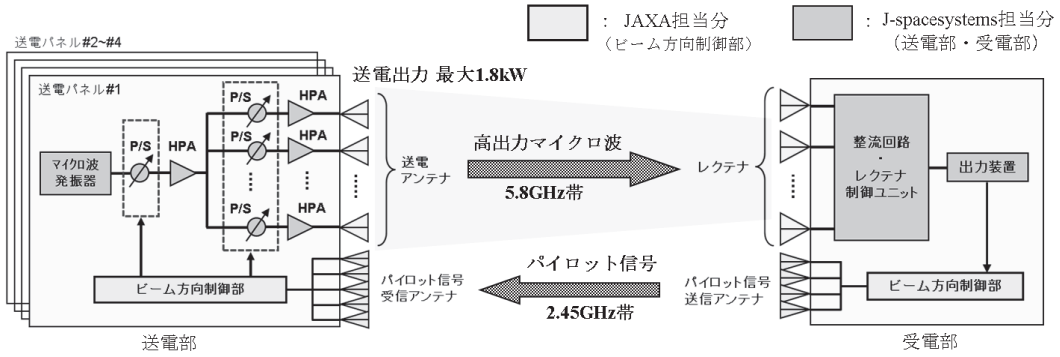


図 4　マイクロ波無線電力伝送地上試験システムの概略図

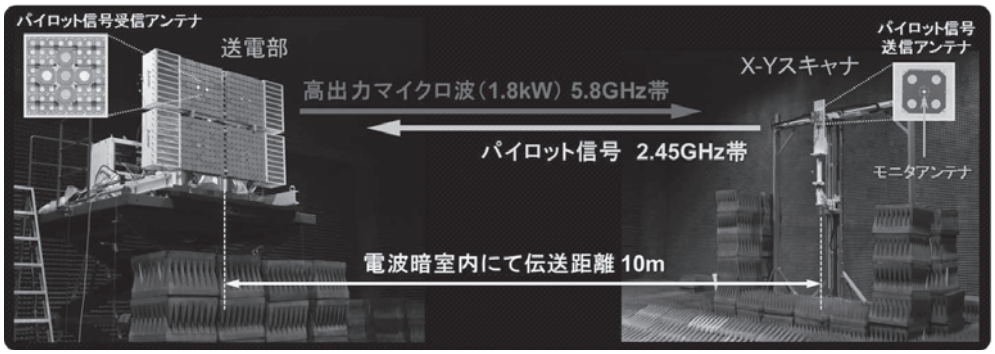


図 5　ビーム制御精度評価試験（屋内試験）のコンフィギュレーション

内で唯一，大電力マイクロ波を用いた応用実験が実施可能な京都大学宇治キャンパスにある電波暗室（A-METLAB）内である．電波暗室の床面からの高さ 3.65m の位置においてマイクロ波ビームを水平方向に放射できるような装置配置とし，伝送距離 10m の試験系を構築した．

受電側に受電部の代りに 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装着している．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し，ビーム中心位置を割出す．

大規模 SSPS における送電アンテナ面の構造上の変形量に関するシステム要求として，40mm の段差や± 5 度の傾きが最大許容値として示されている [3,4]．送電部にてこれらの変形を模擬し（図 6），この状態でビーム方向制御装置の REV 制御機能により要求されるビーム方向精度が確保できるか検証したところ，ビーム方向制御精度として，rms 値で 0.15 度の結果を得て目標を達成した [1]．また，REV 制御の有無によるビーム形状の補正効果の一例を図 7 に示す．REV 制御により各送電パネルの励振位相を補正し，結果としてビームポインティングが正しく行われていることが確認できる．数十億オーダーのアンテナ素子から成る km サイズの SSPS においては 0.001 度のビーム方向制御精度が要求されるが，アレーアンテナにおけるビーム指向誤差は，アンテナ素子数の 1.5 乗に反比例する [5] ことから，今回の試験システム規模で 0.15 度を達成したことで，本ビーム制御方式が SSPS に適用できる可能性があることを技術的に実証した．

6. 屋外でのマイクロ波による無線電力伝送

屋内（電波暗室）でのビーム方向制御精度評価試験において目標精度を達成したことから，伝送距離 50m 以上の屋外での無線電力伝送を試みた．実施場所は，三菱電機（株）の兵庫県内の屋外試験場である．ガイドビームであるパイロット信号のマルチパス対策を講じたものの，その影響が大きく，振幅モノパルス法によるパイロット信号到来方向検知は見送り，送電パネルと受電パネルを正対させた上で，送電パネル上 2 枚と下 2 枚で段差を与え（図 8），このような送電アンテナ面の変形状態で，無線送電を行った．REV 制御により送電アンテナ面の変形

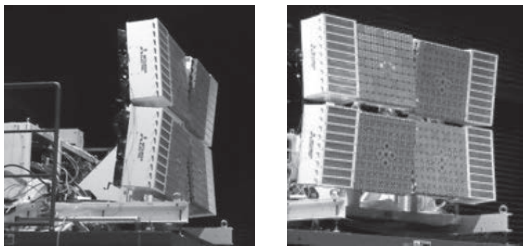
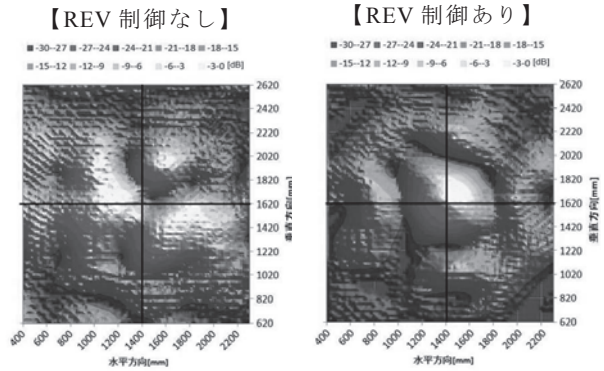


図 6　送電パネルの変形設定（例）



測定項目	測定値	
	水平方向	垂直方向
ビーク位置（ビーム中心のズレ）[mm]	-367.9	-34.9
ビーム方向（角度）誤差[deg]	2.094	-0.199
最大受電レベル[dB]	-6.6dB（対標準状態）	

測定項目	測定値	
	水平方向	垂直方向
ビーク位置（ビーム中心のズレ）[mm]	2.04	4.01
ビーム方向（角度）誤差[deg]	0.012	0.023
最大受電レベル[dB]	-0.5dB（対標準状態）	

図 7　REV 制御によるビームの補正効果（一例）

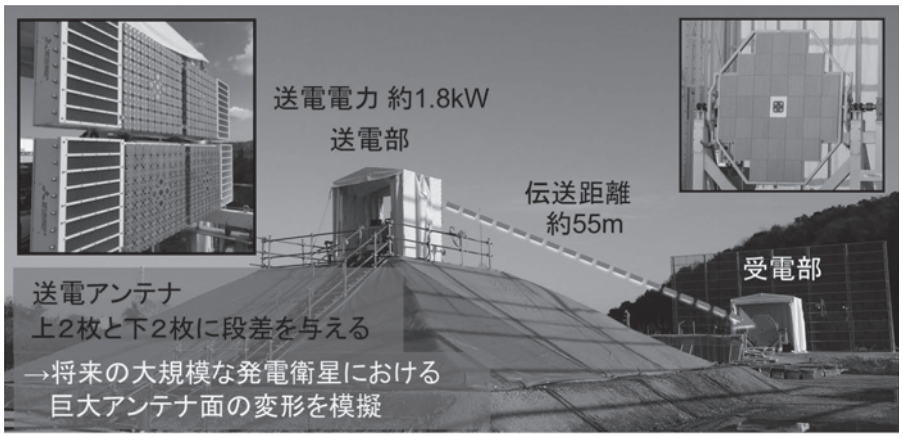


図 8　マイクロ波による無線電力伝送試験（屋外試験）のコンフィギュレーション

表 1　REV 制御による受電電力の改善

No.	送電アンテナの変形設定	REV制御	受電電力（総和）	モニタアンテナの受信レベル	備考
1	なし(基準状態)	ON	**341 W**	**0.0 dB**	―
2-1	上下段差（20mm）	OFF	**152 W**	**- 5.9 dB**	下側2枚の送電アンテナを基準位置より +20mm
2-2		ON	332 W	**0.0 dB**	
3-1	上下段差（40mm）	OFF	**211 W**	**- 2.7 dB**	・上側2枚の送電アンテナを基準位置より -20mm ・下側2枚の送電アンテナを基準位置より +20mm
3-2		ON	339 W	**0.0 dB**	

※受電電力(総和)：受電部のレクテナモジュール(全 36 枚)の出力電力の総和
※モニタアンテナ：受電部中央に設置された 5.8GHz 帯送電ビームの強度を測定するアンテナ

の無い基準状態と同様，受電部にて約 330 ～ 340W の電力が取り出せることを確認し，REV 制御の有効性を実証した（表 1）．

7. 無線電力伝送の実用化に向けた技術実証(デモ)

「無線電力伝送の実用化」に向けた技術実証の公開試験（デモンストレーション）として，平成 27 年 3 月 8 日（日），J-spacesystems 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てアマチュア無線局の運用を実施した．無線送電した電力を実負荷（ユーザ）に実際に供給した伝送試験は日本初である．送電側装置から約 55m 離れた受電側装置に向けて約 1.8kW の高出力マイクロ波を放射，それを受電側装置において約 320 ～ 340W の電力に変換し，アマチュア無線の交信に電源供給した（図 9，図 10，図 11）．

無線送電時間（継続時間）は，技術的には制約はないが，スケジュール上，最大約 1 時間とした．公開試験時の受電部から取り出した電力は，約 320 ～ 340W であり．送電アンテナ面の段差 30mm（半波長の 26mm に近い段差）の状態での値である．なお，段差補正なしの場合は 85 ～ 95W 程度であった．アマチュア無線局は 1 局を運用し，交信局数(7MHz 帯)はリハーサル時を含め 283 局に及び，今回の無線送電デモについては効果的にアピールができたといえる．

8. 新たなロードマップ策定に向けた取り組み

JAXA は，SSPS 実現に向けた新たな研究開発シ

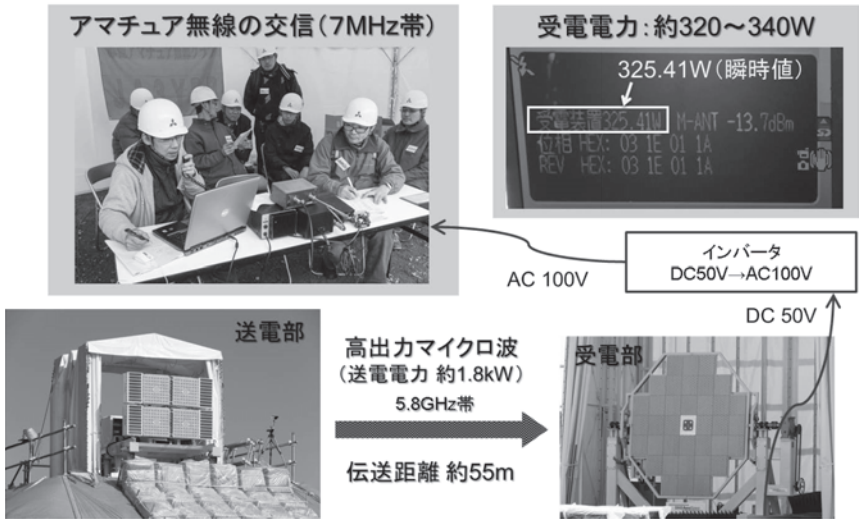


図 9　公開試験（デモンストレーション）の様子

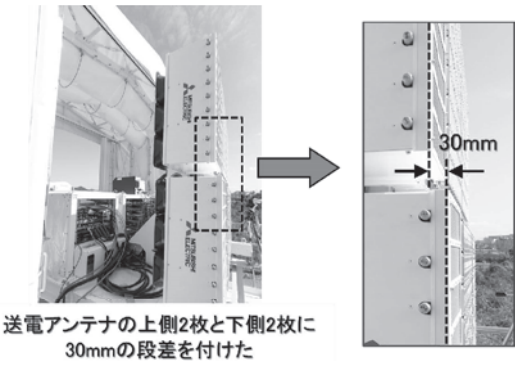


図 10　送電アンテナ面の変形（段差）設定

図 11　実用化実証試験の関係者一同

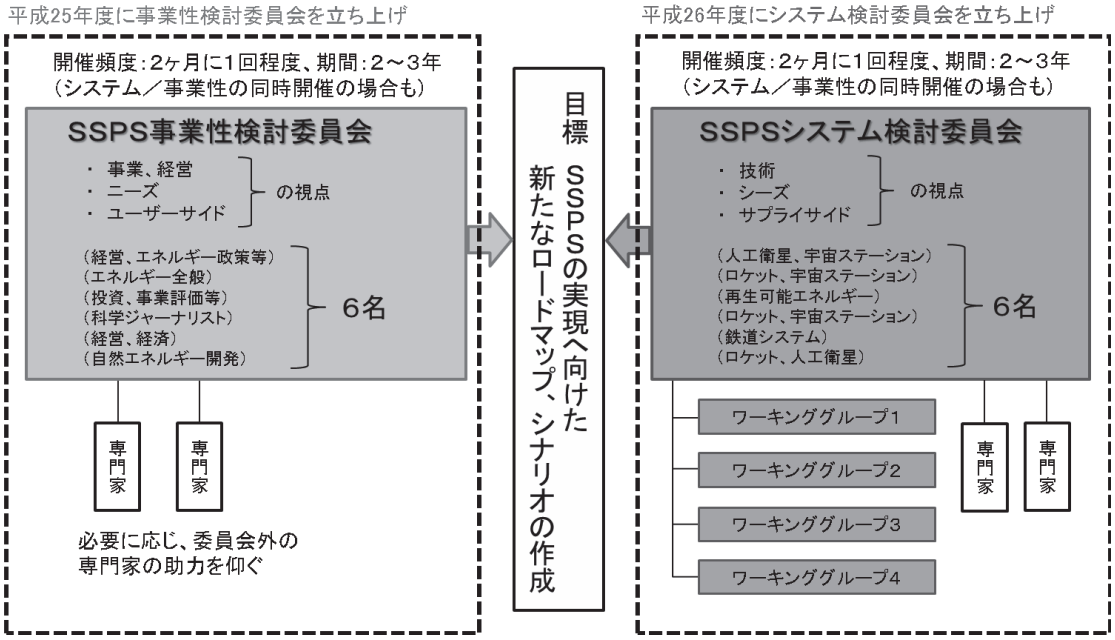


図 12　新たなロードマップ策定に向けた外部有識者による二委員会体制

ナリオ／ロードマップを策定するため，平成 25 年度から SSPS 事業性検討委員会，加えて平成 26 年度からは SSPS システム検討委員会という外部有識者による二委員会体制を構築して検討を進めている（図 12）.

SSPS の研究開発は長期にわたり（数十年を越える），数十億円～数千億円規模の軌道上実証（宇宙から地上への無線電力伝送技術の実証）を経て，目的とするエネルギー問題や地球環境問題への貢献に至るまでには，巨額の研究開発費（国費）を投入する必要があり，国民の理解を得続けることが難しいことが想定される．SSPS が実現するまでの間，SSPS 関連の研究開発成果を様々な社会課題の解決に貢献するかたちで還元（途中段階で SSPS 要素技術を社会実装）していくことが肝要と考える．現在，SSPS システム検討委員会の下に，このような社会実装の行うための 4 つのワーキンググループを設け，具体的な検討を行っている．大規模 SSPS 実現に必要な技術課題の解決はもとより，SSPS 要素技術の社会実装を途中段階で行っていくことで，長期にわたる SSPS 研究開発を社会的に理解し続けてもらう必要があると認識している．

9. まとめ

JAXA における SSPS 研究開発の最近の主な成果として，昨年度実施したマイクロ波無線電力伝送地上実証試験により以下の実績を得た．

・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，振幅モノパルス法及び REV 法を適用した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（0.15 度 rms）で指向制御できることを実証した．

・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，無線電力伝送における REV 制御の有効性を実証した．

・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，日本で初めて無線送電によるユーザへの電力供給を実際に行った．

また，SSPS 実現の新たなロードマップ策定に向けて，「研究開発成果を途中段階で社会に見える形で還元（社会実装）し，SSPS 研究開発を長期的に進めていくことの社会的合意を得やすくすること」を念頭に，外部有識者による二委員会体制，及びその分科会としてのワーキンググループによる活動を通して検討を進めている．

文献

1）牧野克省，上土井大助，中台光洋，谷島正信，大橋一夫，高橋智宏，佐々木拓郎，本間幸洋，“SSPS の実現に向けた高精度マイクロ波ビーム方向制御装置の開発とその技術実証試験”，電子情報通信学会技報，SANE 2015-22，pp.37-42，June 2015.

2）真野清司，片木孝至，“フェイズドアレーアンテナの素子振幅位相測定法－素子電界ベクトル回転法－”，電子通信学会論文誌，vol.J65-B, no.5，pp.555-560，March 1982.
3）財団法人無人宇宙実験システム研究開発機構，“平成 18 年度 太陽光発電利用促進技術調査 成果報告書 別冊 システム専門委員会報告書”，p.22，2007.
4）財団法人無人宇宙実験システム研究開発機構，“平成 19 年度 太陽光発電利用促進技術調査 成果報告書 別冊 発送電技術専門委員会報告書”，P.3，2008.
5）大塚昌孝，千葉勇，片木孝至，鈴木龍彦，“フェーズドアレーアンテナにおけるモノパルス差パターンのビーム方向に関する検討”，電子情報通信学会論文誌，Vol. J82-B，No. 3，pp.427-434，March 1999.

著者略歴

牧野 克省
国立研究開発法人宇宙航空研究開発機構（JAXA）研究開発部門 宇宙太陽光発電システム研究チーム主任研究員．2002 年 1 月，旧文部科学省宇宙科学研究所入所．JAXA 施設設備部，経営企画部，宇宙科学プログラム・システムズエンジニアリング室を経て，2012 年 4 月より現職．