

経済産業省 御中

令和 5 年度重要技術管理体制強化事業(宇宙分野に
おける重要技術の実態調査及び情報収集)
調査報告書

目次

1. はじめに.....	1
1.1 背景・目的.....	1
1.2 調査の概要.....	1
1.2.1 宇宙状況把握(SSA)関連技術に関する調査・検討.....	1
1.2.2 宇宙太陽光・無線エネルギー伝送技術に関する調査・検討.....	1
2. 宇宙状況把握(SSA)関連技術に関する調査・検討.....	2
2.1 SSAに関する基本的な情報の整理.....	2
2.1.1 SSAの基本的なプロセス.....	2
2.1.2 SSAの主なサービス.....	3
2.1.3 SSAに利用される観測手段.....	4
2.2 各国における民間・政府によるSSAシステムの構築状況.....	5
2.2.1 民間SSAサービス事業者.....	5
2.2.2 政府機関によるSSAシステム.....	16
2.3 チョークポイント技術の特定.....	21
2.3.1 米国TraCCSにおけるサービスと技術の整理.....	21
2.3.2 SSAシステムにおける必要技術の整理.....	24
2.4 日本が目指すべきSSAシステムの方針検討.....	28
2.4.1 日本の現状保有技術の整理.....	28
2.4.2 将来の日本が目指すべきSSAシステムの方向性.....	38
2.5 日本として必要な取組み.....	39
3. 宇宙太陽光・無線エネルギー伝送技術に関する調査・検討.....	40
3.1 各国の宇宙太陽光発電システム(SSPS)に関する調査.....	40
3.1.1 米国.....	40
3.1.2 欧州.....	51
3.1.3 英国.....	71
3.1.4 中国.....	77
3.1.5 その他.....	83
3.1.6 まとめ.....	86
3.2 近年の各国の無線給電技術(WPT)に関する調査.....	88
3.2.1 パワービーミングWPTの開発動向.....	88
3.2.2 空間伝送型WPTの実用化動向.....	104
3.3 SSPSの経済性評価.....	107
3.3.1 SSPS宇宙部の重量およびコスト算出ツールの作成.....	108

3.3.2	宇宙太陽光発電を導入するためのエネルギーコストの仮定	128
3.3.3	SSPS 総構築コストに対する関連パラメータの感度分析	128
3.3.4	目標コストを達成するための各パラメータ値の目標範囲の検討	131
3.3.5	まとめと課題	135
3.4	我が国の宇宙太陽光発電や要素技術に関する研究開発や産業振興における課題	137
3.4.1	SSPS 実現に向けての課題	137
3.4.2	我が国が行うべき SSPS 技術開発の方向性の検討	138
3.4.3	SSPS 要素技術の他のアプリケーションへの応用例	139
3.4.4	研究開発実施体制	140
4.	まとめと今後の課題	141

図 目次

図 2-1 SSA のプロセス.....	2
図 2-2 SSA サービスの全体像.....	3
図 2-3 米国の宇宙状況監視ネットワーク.....	16
図 2-4 TraCCS の構成.....	17
図 2-5 TraCSS におけるデータの流れと民間事業者の役割(緑色の四角部分).....	17
図 2-6 EU-SST によるセンサーネットワーク.....	18
図 2-7 ISON の観測ネットワーク.....	20
図 2-8 チョークポイント技術の特定・整理フロー.....	21
図 2-9 SSA の基本的なプロセスに基づく分類.....	24
図 2-10 SSA サービスに必要となる主な分析サービスの整理.....	27
図 2-11 SSA プロセスにおける各技術の位置づけ.....	29
図 3-1 NASA スタディにおける SBSP のリファレンスデザイン(左:RD1、右:RD2).....	44
図 3-2 ベースライン分析と複数の変数の感度分析のための主要入力パラメータ.....	45
図 3-3 SBSP システムのライフサイクルコストと温暖化ガス排出削減効果の感度分析結果.....	46
図 3-4 NRL の PRAM-FX 装置.....	47
図 3-5 NRL の SWELL 装置.....	47
図 3-6 軌道上での Arachne の実験イメージ(Credit : AFRL).....	48
図 3-7 SSPD 実証機と構成要素(左)／DOLCE の展開実験イメージ(右上)／MAPLE のマイクロ波送電アレイのアンテナシート(右中央)／SSPD を VIGORIDE に結合する様子(右下)(Credit : Caltech).....	50
図 3-8 MAPLE の内部の写真。右側:送信アレイ、左側:受信機(Credit : Caltech SSPP).....	50
図 3-9 欧州 SBSP の想定ロードマップ.....	54
図 3-10 ESA SOLARIS の Youtube 紹介ページ(Credit : ESA).....	55
図 3-11 SOLARIS プログラムで想定されている活動.....	55
図 3-12 ESA SOLARIS の技術開発目標.....	57
図 3-13 2023-2025 年の間に提案されている活動内容.....	58
図 3-14 SOLARIS で提案されている Technology Development Activities.....	59
図 3-15 Arthur D Little 社の DIRECT-SUN-REFLECTION (DSR)コンセプト.....	61
図 3-16 Arthur D Little 社が提案する 2 種類のアーキテクチャ.....	61
図 3-17 DSR アーキテクチャの説明.....	62
図 3-18 SCL アーキテクチャの説明.....	62
図 3-19 Thales Alenia Space スタディのリファレンスシステム(宇宙部).....	63
図 3-20 Thales Alenia Space スタディのリファレンスシステム(地上部).....	64
図 3-21 Thales Alenia Space スタディのリファレンスシステムのエネルギーの流れ.....	64
図 3-22 Thales Alenia Space スタディのリファレンスシステム初号機のコスト計算結果.....	65
図 3-23 Thales Alenia Space スタディのリファレンスシステムの発電単価計算結果.....	65

図 3-24	資金提供が決定した 13 のプロジェクト(Credit:ESA)	67
図 3-25	Astrostrom 社による「Greater Earth Lunar Power Station(GE [®] -LPS)」	68
図 3-26	「16U4SBSP」ミッションのイメージ	69
図 3-27	「ESPI2040:Space for Prosperity, Peace and Future Generations」の最終ページ	70
図 3-28	英国における SBSP 活動の内訳	71
図 3-29	英国の SBSP システム案「CASSIOPeiA」(Credit:Space Energy Initiative)	72
図 3-30	英国の SBSP 開発計画(Credit:BEIS)	72
図 3-31	SEI の参加機関	75
図 3-32	SEI の組織構造	75
図 3-33	CAST による SSPS ロードマップ	78
図 3-34	SSPS 開発のフェーズごとのミッション	78
図 3-35	中国が提案する SSPS システムコンセプト	79
図 3-36	中国が提案する技術実証衛星案	80
図 3-37	中国が提案する月面軌道上での LPT ミッション	81
図 3-38	西安電子科技大学の実証実験施設	82
図 3-39	ブロッサムポイントで実施されたマイクロ波送電実験の送電アンテナ(左上)とレクテナ(右上と下)(Credit : NRL)	89
図 3-40	MIT の HUSIR 送信機を用いて実施されたマイクロ波送電による LED 点灯実験(Credit : NRL)	89
図 3-41	POWER プログラムの開発内容(Credit : DARPA)	91
図 3-42	WPT 実験に用いられた送信アンテナのプロトタイプ	92
図 3-43	Virtus Solis 社の SBSP コンセプト	93
図 3-44	アラバマ州にある Above: Space Development 社の施設において行われたラボ・ベンチテスト	94
図 3-45	Whisper Beam トランスミッタ(下部の金属リング)から上空 3m の照明への無線電力伝送実証	95
図 3-46	Airbus Innovation Facilities において行われた無線電力伝送実証	96
図 3-47	屋内試験のプロトタイプアンテナ(左)／フィールド試験の建屋(右)(Credit:Emrod)	98
図 3-48	Airbus' Munich Area Site での実証実験システム(Credit:Emrod)	98
図 3-49	KERI における拡張可能なアレイ型レクテナの屋外実験	99
図 3-50	KERI における研究開発目標と内容	100
図 3-51	KARI/KERI におけるエアロスタットへの無線電力伝送実験(1.81km)	100
図 3-52	中国西北工業大学が開発した ODD (Optics-driven Drone)と飛行試験の様子	103
図 3-53	近い将来のアプリケーションと SBSP に向けたパワービーミングのロードマップ	104
図 3-54	東芝の受電アンテナの向きに依存せず高効率な受電を行う受電機の実証	107
図 3-55	JSS(旧 USEF)マルチテザー型 SSPS の宇宙部	109
図 3-56	JSS コストモデルの宇宙部重量およびコストの入力パラメータ	110
図 3-57	SSPS-23B モデル宇宙部の各部重量内訳	117
図 3-58	ふろしき型 SSPS コストモデルの宇宙部重量およびコストの入力パラメータ	123

図 3-59 ふろしき型 SSPS の宇宙部重量推算	123
図 3-60 SSPS-23B モデルにおける宇宙部重量と SSPS 総構築コストの関係.....	129
図 3-61 SSPS-23B モデルにおける宇宙部コストと SSPS 総構築コストの関係.....	129
図 3-62 SSPS-23B モデルにおける宇宙部重量および宇宙部コストと SSPS 総構築コストの関係.....	130
図 3-63 SSPS-23D モデルにおける各入力パラメータと SSPS 総構築コストの関係.....	131
図 3-64 ふろしき型衛星で太陽電池単価と輸送単価を変更したものを基準としたケースでの感度分析.....	131

表 目次

表 2-1 SSA サービスの定義	3
表 2-2 SSA の観測手段の概要	4
表 2-3 SSA サービス事業者のサービス展開状況	6
表 2-4 COMSPOC 社の SSA システムおよびサービスの概要	7
表 2-5 L3Harris 社の SSA システムおよびサービスの概要	7
表 2-6 Lockheed Martin 社の SSA システムおよびサービスの概要	8
表 2-7 LeoLabs 社の SSA システムおよびサービスの概要	8
表 2-8 Slingshot Aerospace 社の SSA システムおよびサービスの概要	9
表 2-9 ExoAnalytic Solutions 社の SSA システムおよびサービスの概要	9
表 2-10 Kratos 社の SSA システムおよびサービスの概要	10
表 2-11 NorthStar 社の SSA システムおよびサービスの概要	10
表 2-12 Scout 社の SSA システムおよびサービスの概要	11
表 2-13 Maxar 社の SSA システムおよびサービスの概要	11
表 2-14 GMV 社の SSA システムおよびサービスの概要	12
表 2-15 Globvision社の SSA システムおよびサービスの概要	12
表 2-16 SpaceNav社の SSA システムおよびサービスの概要	13
表 2-17 Kayhan Space 社の SSA システムおよびサービスの概要	13
表 2-18 Telespazio 社の SSA システムおよびサービスの概要	14
表 2-19 KBR 社の SSA システムおよびサービスの概要	14
表 2-20 SSA プロセスにおける各社の強み	15
表 2-21 TraCCS におけるサービス案(Basic サービス)	22
表 2-22 TraCCS におけるサービス案(Advanced サービス)	22
表 2-23 TraCCS をベースとした必要技術の整理(Basic サービス)	23
表 2-24 TraCCS をベースとした必要技術の整理(Advanced サービス)	24
表 2-25 観測における必要技術	25
表 2-26 データ処理・提供における必要技術	26
表 2-27 政府向けサービスにおける必要技術の分析	27
表 2-28 衛星運用事業者向けサービスにおける必要技術の分析	28
表 2-29 打上げ事業者向けサービスにおける必要技術の分析	28
表 2-30 軌道上サービス事業者向けサービスにおける必要技術の分析	28
表 2-31 SSA 関連事業者・研究者ヒアリングの一覧	29
表 2-32 観測技術に関する海外との技術差、必要技術の評価結果	30
表 2-33 観測技術の海外との技術差に関する主な意見	31
表 2-34 分析技術に関する海外との技術差、必要技術の評価結果	33
表 2-35 分析技術の海外との技術差に関する主な意見	33
表 2-36 分析技術の必要性の理由に基づく分類	34

表 2-37	TraCCS Basic サービスと評価結果の比較.....	37
表 2-38	TraCCS Advanced サービスと評価結果の比較.....	37
表 2-39	将来の SSA システムについてのヒアリングでの意見	38
表 3-1	Space Based Solar Power Innovation Competition で実施されているプロジェクト	74
表 3-2	各国の SSPS に関するロードマップの比較.....	87
表 3-3	JSS コストモデルの入力パラメータ値の見直し	111
表 3-4	SSPS-23A モデルの宇宙部の重量計算結果	112
表 3-5	SSPS-23A モデルの宇宙部のコスト計算結果	113
表 3-6	SSPS-23A モデルの総構築コスト	114
表 3-7	SSPS-23B モデルの宇宙部の重量計算結果	116
表 3-8	SSPS-23B モデルの宇宙部の総構築コスト.....	117
表 3-9	SSPS-23C モデルの宇宙部の重量計算結果.....	119
表 3-10	SSPS-23B モデルの宇宙部のコスト計算結果.....	120
表 3-11	SSPS-23C モデルの宇宙部の総構築コスト.....	121
表 3-12	SSPS-23D モデルの宇宙部の重量計算結果.....	124
表 3-13	SSPS-23D モデルの宇宙部のコスト計算結果.....	125
表 3-14	SSPS-23D モデルの総構築コスト.....	126
表 3-15	SSPS 宇宙部の重量およびコスト算出ツールにより計算した各モデルのコスト試算例	127
表 3-16	SSPS-23B / 23C モデルにおける SSPS 宇宙部コストの上限値	132
表 3-17	SSPS-23B モデルにおける SSPS 宇宙部コストの上限値(輸送単価=0.054 億円/ton の場合)	134
表 3-18	SSPS-23B モデルにおける SSPS 宇宙部コストの上限値(輸送単価=0.284 億円/ton の場合)	134
表 3-19	SSPS-23B モデルにおける SSPS 宇宙部コストの上限値(輸送単価=0.284 億円/ton の場合)	135

1. はじめに

1.1 背景・目的

宇宙空間は、既に多種多様な人工衛星群等からなる宇宙システムが、地上システムと一体となって、地上の様々な課題解決等に貢献し、より豊かな経済・社会活動を実現するようになってきている。今後も安全かつ安定した宇宙空間の利用等を確保するため、我が国における宇宙分野の経済安全保障の強化は、より重要性を増している。こうした状況を踏まえて、我が国の優位性や不可欠性を有する技術、自律性を確保すべき技術が何かを把握することを目的として調査を実施した。

1.2 調査の概要

本調査では、宇宙状況把握関連技術と宇宙太陽光・無線エネルギー伝送技術の2つの事項について調査・検討した。具体的には、我が国におけるキーポイント技術や主要プレイヤー、他国との技術差分析などを行い、我が国で必要となる取組みについての検討を行った。

1.2.1 宇宙状況把握(SSA)関連技術に関する調査・検討

SSA に関する各国の直近の提供状況、利用状況、技術状況等について調査した。また、チョークポイント技術の特定、主要プレイヤーの分析、我が国と他国の技術差分析を行い、それらの結果を踏まえ、今後、必要となる取組みについて検討した。

1.2.2 宇宙太陽光・無線エネルギー伝送技術に関する調査・検討

宇宙太陽光発電に関する各国の直近の開発状況、マイクロ波からミリ波を中心とした無線給電技術に関する市場動向、技術動向、政策動向等について調査するとともに、宇宙太陽光発電の経済性について評価を行った。これらを踏まえ、我が国の宇宙太陽光発電や無線給電技術に関する研究開発における課題や必要な取組みについて検討を行った。なお、本パートの動向調査部分は「令和4年度重要技術管理体制強化事業(宇宙分野における重要技術の実態調査及び情報収集)」の更新となる部分も多いことから、当該箇所については同調査の報告書に加筆する形とした。

2. 宇宙状況把握(SSA)関連技術に関する調査・検討

SSA に関する各国の直近の提供状況、利用状況、技術状況等について調査した。また、チョークポイント技術の特定、主要プレイヤーの分析、我が国と他国の技術差分析を行い、それらの結果を踏まえ、将来的に我が国が必要とする SSA システムの在り方や、それに向けて必要となる研究開発、産業振興等の取組について検討した。

2.1 SSA に関する基本的な情報の整理

2.1.1 SSA の基本的なプロセス

SSA のプロセスは、図 2-1 に示すように、観測計画、データ収集、キュレーション、分析、プロダクト・サービス及びデータ・プロセス管理に分類される。各プロセスの概要は以下の通りである。

- 観測計画: 観測対象の選定、観測計画の策定
- データ収集: 保有センサーからのデータ収集、提供データの収集
- キュレーション: 観測データの妥当性確認、キャリブレーション、画像処理
- 分析: 軌道・位置決定、挙動分析、その他データ分析
- プロダクト・サービス: 各種データ・サービス提供、ユーザーインターフェースの展開
- データ・プロセス管理: 各種データ管理、データ処理プロセスの実施

最初に各種観測装置を用いた軌道上衛星・物体の観測計画が策定され、計画に基づき観測・データ収集が実施される。収集されたデータについては、外部からの提供データも合わせて妥当性確認やキャリブレーションが行われ、光学観測結果等については画像処理が行われる。その後、収集・整理されたデータを用いて、衛星・軌道上物体の軌道・位置決定や接近解析などの各種分析が行われたのち、プロダクトやサービスがユーザーに提供される。一連のプロセスにおいては、多くの観測データを自動でキャリブレーション・分析していくための、データ・プロセス管理が必要となる。



図 2-1 SSA のプロセス

出所)各種情報を基に三菱総合研究所作成

2.1.2 SSAの主なサービス

SSAの主なサービスは、衛星・デブリの位置情報や衛星の外観などの観測一次情報を提供するサービスと、位置情報などを基に衛星運用に必要となる各種データを解析・提供し、運用を支援するサービスに分類することができる。前者は、衛星やデブリなどの軌道上物体の位置情報を取得・提供するサービスや、衛星の外観観測結果や宇宙天気の情報などが該当する。後者は、対象となる衛星運用プロセスにより、①衛星の打上げ時を対象としたサービス、②衛星の定常運用時を対象としたサービス、③衛星の廃棄時を対象としたサービスの3つに分類される。SSAにより提供されるサービスの全体像について図2-2、各サービスの概要と対象とする軌道について表2-1に示す。

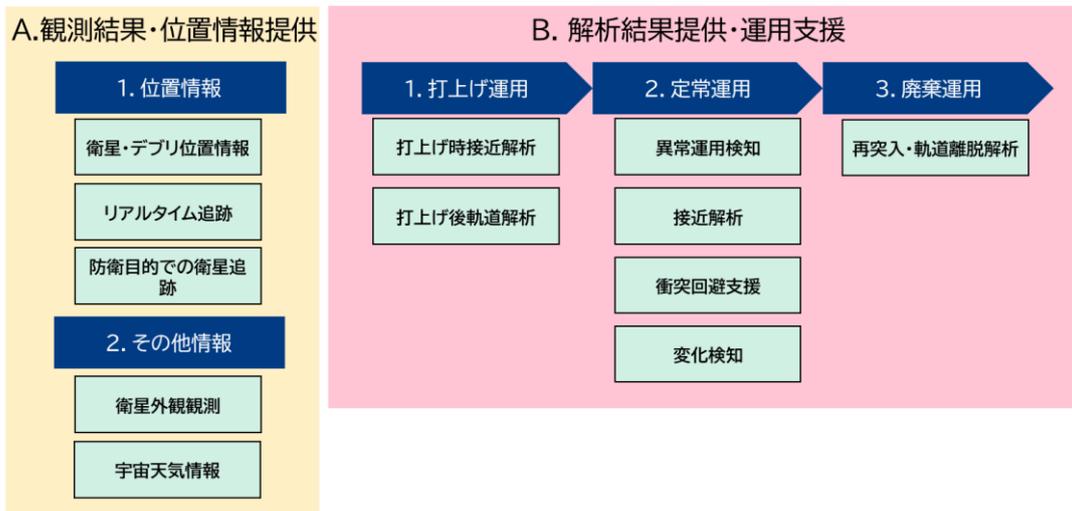


図 2-2 SSA サービスの全体像

出所)各種情報を基に三菱総合研究所作成

表 2-1 SSA サービスの定義

分類	小分類	サービス	概要	対象軌道
A: 観測結果・位置情報提供	1. 位置情報	衛星・デブリ位置情報	対象物体の軌道上での該当時刻における位置情報を提供する。	LEO, MEO, GEO
		リアルタイム追跡	対象物体の軌道上での位置情報をリアルタイムで提供する。	LEO, MEO, GEO
		防衛目的での衛星追跡	防衛・安全保障上懸念がある対象衛星の位置情報を提供する。	LEO, MEO, GEO
	2. その他情報	衛星外観観測	衛星の故障状況の把握などに資する光学望遠鏡により観測された衛星の外観や光学的情報を提供する。	GEO
宇宙天気情報		衛星異常時や測位精度劣化時に電離層攪乱状況を把握する際に必要となる宇宙天気情報を提供する。	主にGEO	
B: 解析結果提供・運用支援	1. 打上げ運用	打上げ時接近解析	打上げ計画に基づいて打ち上げ日時を解析するとともに、打上げ直後の適時性を持った接近解析を行う。	LEO
		打上げ後軌道解析	打上げ後の初期軌道情報を解析する。	LEO
	2. 定常運用	異常運用検知	対象物体の外観情報、軌道情報の変化などの情報を基に、定常運用からの逸脱を検知、情報として提供する。	LEO, MEO, GEO
		接近解析	対象物体が他の物体と衝突するかについて、軌道情報から接近評価を行い、接近データ・警報として提供する。	LEO, MEO, GEO
		衝突回避支援	対象物体の他物体との衝突リスクを基に、マヌーバの必要性の評価、マヌーバ後の接近解析を行う。	LEO, MEO, GEO
		軌道変化検知	軌道上物体の予期されていないマヌーバや軌道遷移を検知し、情報として提供する。	LEO, MEO, GEO
	3. 廃棄運用	再突入・軌道離脱運用支援	運用が終了した衛星を廃棄するため、軌道離脱・再突入時の軌道・時間を解析する。	LEO(再突入) GEO(廃棄軌道遷移)

出所)各種情報を基に三菱総合研究所作成

2.1.3 SSA に利用される観測手段

SSA の観測手段としては主に、光学センサー、レーダー、RF センサー、衛星観測の4つが使用されている。

光学センサーによる観測では、地上に設置された光学機器により、軌道上物体の位置を計測する。運用コストが安価という特徴があり、様々な民間 SSA 事業者でも使用されている。また、低軌道(LEO)だけでなく、中軌道(MEO)、静止軌道(GEO)までの観測が可能である。一方で、可視光による観測であることから、天候や日光による影響を大きく受ける。

レーダーによる観測では、地上から電波を照射し、軌道上物体からの反射を観測することにより、対象物体までの距離、方向を計測する。解像度が高い、移動物体の捕捉性能が高いといった特徴から、LEO における小型物体の観測も可能である。また天候・日光による影響を受けず、雨天時や昼間の観測も可能である。一方で、運用コストが高価であることから、運用可能な企業は限られてしまう。また、出力レベルを上げることにより対応することが不可能ではないが、基本的には MEO や GEO における観測は困難である。

RF センサーによる観測では、対象衛星が発する電波の時間変化、周波数変化から対象との距離を計測する。光学センサーやレーダーと異なり、衛星自体が発する電波を観測することから、観測対象同士が近接している場合でも識別・観測が可能である。ただし、電波を発している衛星しか観測ができないため、宇宙デブリや運用終了後の衛星などについては観測対象外となる。

衛星観測では、軌道上に打ち上げた衛星を用いて、他衛星や軌道上物体の光学的な観測を実施し、衛星の外観観測や位置特定を行う。最も大きなメリットとして、地上とは異なり天候による影響を一切受けずに観測可能な点が挙げられる。一方で、設置・運用コストが非常に高く、そもそも観測自体を開始するハードルが非常に高い。

ここまで述べてきた SSA に主に利用される観測手段を表 2-2 に整理する。

表 2-2 SSA の観測手段の概要

観測手段	概要	観測手段を保有する主な企業	主な対象軌道	メリット	デメリット
光学センサー	✓ 光学的な観測から対象物体の方位角、仰角情報を取得	✓ AGI ✓ L3Harris ✓ Lockheed Martin ✓ Slingshot ✓ ExoAnalytic	LEO, MEO, GEO	✓ GEOまでの観測が可能 ✓ 運用コストが安価	✓ 天候・日光による影響大 ✓ 近接物体の識別が困難 ✓ LEOにおける移動物体の補足が困難
レーダー	✓ 照射した電波による観測から対象物体までの距離、方位角、仰角情報を取得	✓ AGI ✓ Leolabs	LEO(出力レベルによってはMEO, GEOも可能)	✓ LEOにおける移動物体補足性能が高い ✓ 小型物体(LEOでのcmオーダー)の補足が可能 ✓ 天候・日光による影響なし	✓ 運用コストが高価 ✓ GEOの観測が困難 ✓ 近接物体の識別が困難
RFセンサー	✓ 対象衛星が発する電波の時間変化・周波数変化から対象との距離情報を取得	✓ AGI ✓ Kratos	LEO, MEO, GEO	✓ GEOまでの観測が可能 ✓ 近接物体の識別が可能	✓ 電波を発していない物体(運用後衛星、デブリなど)の観測不可
衛星観測	✓ 宇宙空間に設置された衛星による光学的な観測により情報を取得	✓ NorthStar ✓ Scout ✓ Maxar	主にGEO	✓ 衛星の外観情報の取得などが可能 ✓ 天候・日光による影響なし	✓ システム構築コストが高価 ✓ 日蝕範囲での観測不可

出所)各種情報を基に三菱総合研究所作成

2.2 各国における民間・政府による SSA システムの構築状況

2.2.1 民間 SSA サービス事業者

(1) 海外における主要な民間 SSA サービス事業者

民間による SSA システムの構築状況およびサービス提供状況の調査を行った。調査対象は以下の通りである。

- COMSPOC
- L3Harris
- Lockheed Martin
- LeoLabs
- Slingshot Aerospace
- ExoAnalytic
- Kratos
- NorthStar
- Scout
- Maxar
- GMV
- Globvision
- SpaceNav
- Kayhan Space
- Telespazio
- KBR

これら SSA 事業者の現在の状況を整理すると、表 2-3 のようになる。全体として、光学望遠鏡やレーダーといった地上の観測アセットを持ちサービスの提供を行う企業、軌道上で観測を行う SSA 衛星（地球観測衛星のセンサーを活用するものを含む）を保有する/保有予定である企業、観測アセットを保有せずに解析サービスを提供する企業の、大きく3つに分けることができる。観測アセットを保有する企業は、自身のアセットをもとに衛星・デブリの位置情報や追跡サービスを提供することに加えて、多くが接近解析サービスも提供していることから、全体として衛星運用時における接近解析や衝突回避支援のサービスを提供する企業が多くなっている。また一部、打上げ時・打上げ後の接近解析を提供する企業も存在する。

以降で各企業の詳細を順次述べる。

表 2-3 SSA サービス事業者のサービス展開状況

企業名	従業員数	観測システム所有	観測・位置情報提供				解析結果提供・運用支援						
			位置情報		その他情報		打上げ運用		定常運用			廃棄運用	
			衛星・デブリ位置情報	リアルタイム追跡	衛星外観観測	宇宙天気情報	打上げ時接近解析	打上げ後軌道解析	異常運用検知	接近解析	衝突回避支援	変化検知	再突入・軌道離脱運用支援
COMSPOC	251-500	○	○				○	○		○	○	○	○
L3Harris	46,000	○	○		○				○	○		○	
Lockheed Martin	116,000	○	○				○		○	○	○	○	○
LeoLabs	51-100	○	○				○	○		○	○		○
Slingshot	101-250	○	○	○						○	○		
Exo Analytic	101-250	○	○	○					○	○			
Kratos	1,001-5,000	○	○	○					○				
NorthStar	1-50	○	○	○			○			○	○	○	○
Scout	11-50	(打上げ予定)	○							○	○	○	
Maxar	4,600	○			○				○	○	○		○
GMV	5,001-10,000									○	○		
Globvision	11-50					○				○	○		○
SpaceNav	11-50		○	○			○			○	○		○
Kayhan Space	11-50									○	○		
Telespazio (SSA事業詳細不明)	1,001-5,000												
KBR (SSA事業詳細不明)	10,000-												

出所)各種情報をもとに三菱総合研究所作成

1) COMSPOC

COMSPOC 社は、防衛・宇宙システム向けの開発キットを提供する企業である AGI 社から、2020 年に商業宇宙運用センターを独立させて設立した米国企業である。従業員数は約 50 人である。同社の SSA システムおよびサービスの概要を表 2-4 に示す。

表 2-4 COMSPOC 社の SSA システムおよびサービスの概要

SSAに関する所有システム・連携状況		
データ収集に係る保有システム	レーダー、光学望遠鏡、RFアンテナ	
観測システム能力	対象軌道	LEO(レーダー、光学望遠鏡)、GEO(レーダー、RFアンテナ)
	観測可能な大きさ	不明
保有システム以外からのデータ提供、データ連携	SSN、SBSSなどのセンサーネットワークからデータ提供	
展開サービス		
観測・位置情報提供	衛星・デブリ位置情報:対象衛星の位置情報	
解析結果提供・運用支援	打上げ時接近解析:打上げ・軌道投入時の衝突リスク分析	
	打上げ後軌道解析:打上げ後の初期運用段階での軌道確認、軌道投入異常検出	
	接近解析:近隣衛星・デブリの監視、接近情報の通知	
	衝突回避支援:対象衛星の衝突リスク・時期を解析、回避操作計画の支援	
	変化検知:対象衛星のマヌーバや軌道変化の検出	
	再突入・軌道離脱運用支援:対象衛星の再突入時間・位置情報を提供	

出所)各種情報をもとに三菱総合研究所作成

2) L3Harris

L3Harris 社は、Harris 社と L3 Technologies 社の合併により、2019 年に設立された米国の航空・防衛企業である。従業員数は約 46,000 人である。同社の SSA システムおよびサービスの概要を表 2-5 に示す。

表 2-5 L3Harris 社の SSA システムおよびサービスの概要

SSAに関する所有システム・連携状況		
データ収集に係る保有システム	光学センサー	
観測システム能力	対象軌道	GEO
	観測可能な大きさ	不明(14等級の明るさの静止物体の観測が可能)
保有システム以外からのデータ提供、データ連携	なし	
展開サービス		
観測・位置情報提供	衛星・デブリ位置情報:特定時刻のRA/DECデータ 衛星外観観測:衛星のRGBライトカーブ分析	
解析結果提供・運用支援	異常運用検知:衛星挙動の長期特性評価	
	接近解析:対象衛星の軌道推定、衛星同士の相対位置及び衝突確率	
	変化検知:マヌーバの検出、特性評価	

出所)各種情報をもとに三菱総合研究所作成

3) Lockheed Martin

Lockheed Martin 社は、Lockheed 社と Martin Marietta 社の合併により、1995 年に設立された米国の航空・防衛企業である。大企業であり従業員数は 116,000 人である。同社の SSA システムおよびサービスの概要を表 2-6 に示す。

表 2-6 Lockheed Martin 社の SSA システムおよびサービスの概要

SSAに関する所有システム・連携状況		
データ収集に係る保有システム		光学センサー(FireOPAL)
観測システム能力	対象軌道	LEO、MEO、GEO
	観測可能な大きさ	不明
保有システム以外からのデータ提供、データ連携		ExoAnalytic社、Kratos社、Numerica社、Leolabs社とデータ連携 米空軍のレーダー施設Space Fenceからデータ提供 TIRA(ドイツの宇宙観測レーダー)、GRAVES(フランスのレーダーシステム)、BIRALES(イタリアの宇宙観測レーダー)からデータ取得
展開サービス		
観測・位置情報提供		衛星・デブリ位置情報:
解析結果提供・運用支援		打上げ時接近解析:打上げ時脅威分析 異常運用検知:自動での運用パターン変化警報 接近解析:すべての物体に対する自動接近解析 衝突回避支援:対象衛星の衝突リスク・時期を解析 変化検知:マヌーバ、衝突、衛星破壊などのイベントを検知 再突入・軌道離脱運用支援:再突入支援、脅威分析

出所)各種情報をもとに三菱総合研究所作成

4) LeoLabs

LeoLabs 社は、同社が保有する地上レーダーのネットワークをもとに SSA サービスを提供する米国企業である。従業員数は 100 人未満である。シードラウンド 400 万ドル(2016-2017 年)、シリーズ A 1300 万ドル(2020 年)、シリーズ B 6500万ドル(2022 年)などの調達に成功しており、さらに最近では 2024 年2月に 2900 万ドルを調達し、資金調達額の総計が1億 2000 万ドルを超えた¹。同社の SSA システムおよびサービスの概要を表 2-7 に示す。

表 2-7 LeoLabs 社の SSA システムおよびサービスの概要

SSAに関する所有システム・連携状況		
データ収集に係る保有システム		レーダ
観測システム能力	対象軌道	LEO
	観測可能な大きさ	2cm
保有システム以外からのデータ提供、データ連携		International Laser Ranging Service (ILRS) Planet's on-board GPS instrumentation
展開サービス		
観測・位置情報提供		衛星・デブリ位置情報 防衛目的での衛星追跡:外国の打上げ物体の追跡、予期しない動作へのアラート等
解析結果提供・運用支援		打上げ時接近解析:ローンチウィンドウの最適化支援 打上げ後軌道解析:打上げ後数時間以内に初期TLEを提供 接近解析:オンデマンドでのスクリーニングも提供 衝突回避支援 再突入・軌道離脱解析

出所)各種情報をもとに三菱総合研究所作成

¹ <https://spacenews.com/leolabs-raises-29-million/>(最終閲覧 2024 年 3 月 7 日)

5) Slingshot Aerospace

Slingshot Aerospace 社は、SSA サービスや訓練向けのシミュレーション環境を提供する米国のスタートアップ企業である。従業員数は 250 人未満である。2022 年に、Numerica 社の SSA 事業および Seradata 社を買収している。政府資金として、米 AFLCMC (空軍ライフサイクル管理センター) より 150 万ドル (2020 年)、米空軍より 2520 万ドル (2022 年) を獲得している。また民間投資として、シードラウンド 650 万ドル (2019-2020 年)、シリーズ A 7390 万ドル (2020-2022 年)、Debt Financing 840 万ドル (2022 年) の調達に成功している。同社の SSA システムおよびサービスの概要を表 2-8 に示す。

表 2-8 Slingshot Aerospace 社の SSA システムおよびサービスの概要

SSAに関する所有システム・連携状況		
データ収集に係る保有システム		光学望遠鏡
観測システム能力	対象軌道	LEO
	観測可能な大きさ	10cm
保有システム以外からのデータ提供、データ連携		なし
展開サービス		
観測・位置情報提供		衛星・デブリ位置情報 リアルタイム追跡
解析結果提供・運用支援		接近解析 衝突回避支援

出所) 各種情報をもとに三菱総合研究所作成

6) ExoAnalytic Solutions

ExoAnalytic Solutions 社は、軍事用宇宙システムの開発や宇宙物体追跡等のデータサブスクリプションおよびソフトウェアの販売を行う米国企業である。従業員数は 250 人未満である。同社の SSA システムおよびサービスの概要を表 2-9 に示す。

表 2-9 ExoAnalytic Solutions 社の SSA システムおよびサービスの概要

SSAに関する所有システム・連携状況		
データ収集に係る保有システム		光学望遠鏡 (約30地点、350基以上)
観測システム能力	対象軌道	GEO、HEO、MEO
	観測可能な大きさ	10cm(GEO)
保有システム以外からのデータ提供、データ連携		2019年:NorthStar社とパートナーシップを締結(観測データ統合)
展開サービス		
観測・位置情報提供		衛星・デブリ位置情報 リアルタイム追跡
解析結果提供・運用支援		異常運用検知:軌道上の異常や意図しないマヌーバの検知
その他サービス		マヌーバ・ドッキング支援(軌道上サービス支援)

出所) 各種情報をもとに三菱総合研究所作成

7) Kratos

Kratos 社は、米国および同盟国の国家安全保障向けに様々な技術・製品・ソリューションを提供する米国企業である。従業員数は 5000 人未満である。同社の SSA システムおよびサービスの概要を表 2-10 に示す。

表 2-10 Kratos 社の SSA システムおよびサービスの概要

SSAに関する所有システム・連携状況		
データ収集に係る保有システム	RFアンテナ(20地点以上、140基以上)	
観測システム能力	対象軌道	GEO、MEO、HEO、GTO、LEO
	観測可能な大きさ	10cm
保有システム以外からのデータ提供、データ連携	なし	
展開サービス		
観測・位置情報提供	衛星・デブリ位置情報 リアルタイム追跡	
解析結果提供・運用支援	異常運用検知:軌道上の異常や意図しないマヌーバの検知	
その他サービス	マヌーバ・ドッキング支援(軌道上サービス支援)	

出所)各種情報をもとに三菱総合研究所作成

8) NorthStar

NorthStar 社は、全球情報システムを運用するとともに宇宙物体追跡サービスを提供するカナダの宇宙企業である。従業員数は 50 人未満である。政府資金として、ルクセンブルク・フューチャー・ファンド(LFF)から 1000 万ユーロ(2021 年)を獲得している。また民間投資として、ベンチャーラウンド 9700万ドル(2018-2021年)、シリーズC 4700万ドル(2023 年)の調達に成功している。同社の SSA システムおよびサービスの概要を表 2-11 に示す。

表 2-11 NorthStar 社の SSA システムおよびサービスの概要

データ収集に係る保有システム	SSA衛星(4機打上げ済、計12機体制を計画)	
観測システム能力	対象軌道	近地球軌道
	観測可能な大きさ	不明
保有システム以外からのデータ提供、データ連携	2019年:ExoAnalytic社とパートナーシップを締結(観測データ統合) 2023年1月:アクセルスペース社のGRUS衛星によるNorthStar社への軌道観測データ提供を発表	
観測・位置情報提供	衛星・デブリ位置情報 リアルタイム追跡	
解析結果提供・運用支援	打上げ時接近解析 接近解析 衝突回避支援 変化検知 再突入・軌道離脱解析	

出所)各種情報をもとに三菱総合研究所作成

9) Scout

Scout 社は、SSA 衛星によるサービス提供を目指す 2019 年設立の米国企業である。従業員数は 50 人未満である。民間投資として、プレシードラウンド 2500 万ドル(2020-2021年)、シードラウンド(金額不明、2023 年)を獲得している。同社の SSA システムおよびサービスの概要を表 2-12 に示す。

表 2-12 Scout 社の SSA システムおよびサービスの概要

SSAに関する所有システム・連携状況		
データ収集に係る保有システム	SSA衛星(未打上げ)	
観測システム能力	対象軌道	不明
	観測可能な大きさ	不明
保有システム以外からのデータ提供、データ連携	なし	
展開サービス		
観測・位置情報提供	衛星・デブリ位置情報	
解析結果提供・運用支援	接近解析 衝突回避支援 変化検知:脅威の検出	
その他サービス	マヌーバ・ドッキング支援(軌道上サービス支援)	

出所)各種情報をもとに三菱総合研究所作成

10) Maxar

Maxar 社は、地球観測等の衛星関連サービスを展開する企業である。従業員数は 4600 人である。2022 年、同社が運用する地球観測衛星を用いて、宇宙状況把握サービスを開始することを発表している。同社の SSA システムおよびサービスの概要を表 2-13 に示す。

表 2-13 Maxar 社の SSA システムおよびサービスの概要

SSAに関する所有システム・連携状況		
データ収集に係る保有システム	軌道上衛星(4基)、2023年に新たに6基を打ち上げ予定 地上観測がメインだが、2022年より宇宙物体監視、データ販売の許可を取得	
観測システム能力	対象軌道	不明(観測衛星は太陽同期軌道に存在)
	観測可能な大きさ	不明(地上観測の解像度は最高30cm)
保有システム以外からのデータ提供、データ連携	なし	
展開サービス		
観測・位置情報提供	衛星外観観測:宇宙物体の識別・特性評価	
解析結果提供・運用支援	異常運用検知:衛星の健全性評価 接近解析:衝突リスク評価 衝突回避支援:マヌーバ計画支援	
	再突入・軌道離脱運用支援:廃止衛星の監視	

出所)各種情報をもとに三菱総合研究所作成

11) GMV

GMV社は、宇宙・防衛、モビリティ、金融、サイバーセキュリティなど様々な分野においてICTソリューションサービスを中心に展開するスペイン企業である。従業員数は10000人未満である。同社の SSA システムおよびサービスの概要を表 2-14 に示す。

表 2-14 GMV 社の SSA システムおよびサービスの概要

SSAに関する所有システム・連携状況		
データ収集に係る保有システム	なし	
観測システム能力	対象軌道	—
	観測可能な大きさ	—
保有システム以外からのデータ提供、データ連携	JSpOC、その他レーダー、光学センサーデータ	
展開サービス		
観測・位置情報提供	なし	
解析結果提供・運用支援	接近解析：GEOでは15日前、LEOでは7日前に接近予測結果を出力 衝突回避支援	

出所)各種情報をもとに三菱総合研究所作成

12) Globvision

Globvision社は、宇宙・航空・防衛産業向けのエンジニアリングサービスを展開するカナダのソフトウェア開発企業である。従業員数は50人未満である。同社の SSA システムおよびサービスの概要を表 2-14 に示す。

表 2-15 Globvision社の SSA システムおよびサービスの概要

SSAに関する所有システム・連携状況		
データ収集に係る保有システム	なし	
観測システム能力	対象軌道	—
	観測可能な大きさ	—
保有システム以外からのデータ提供、データ連携	不明	
展開サービス		
観測・位置情報提供	宇宙天気情報	
解析結果提供・運用支援	接近解析 衝突回避支援：衝突確率解析、衝突回避計画支援 再突入・軌道離脱解析：再突入予測	

出所)各種情報をもとに三菱総合研究所作成

13) SpaceNav

SpaceNav社は、SSAサービスを展開する2009年設立の米国企業である。従業員数は50人未満である。同社の SSA システムおよびサービスの概要を表 2-16 に示す。

表 2-16 SpaceNav社の SSA システムおよびサービスの概要

SSAに関する所有システム・連携状況		
データ収集に係る保有システム	なし	
観測システム能力	対象軌道	—
	観測可能な大きさ	—
保有システム以外からのデータ提供、データ連携	不明	
展開サービス		
観測・位置情報提供	衛星・デブリ位置情報 リアルタイム追跡	
解析結果提供・運用支援	打上げ時接近解析 接近解析 衝突回避支援 再突入・軌道離脱解析	

出所)各種情報をもとに三菱総合研究所作成

14) Kayhan Space

Kayhan Space 社は、宇宙状況把握、衛星の追跡・運用等に関するサービスを提供する 2019 年設立の米国企業である。従業員数は50人未満である。民間資金として、プレシードラウンド 57万ドル(2020年)、シードラウンド 1070万ドル(2021-2023年)を獲得している。同社の SSA システムおよびサービスの概要を表 2-17 に示す。

表 2-17 Kayhan Space 社の SSA システムおよびサービスの概要

SSAに関する所有システム・連携状況		
データ収集に係る保有システム	なし	
観測システム能力	対象軌道	—
	観測可能な大きさ	—
保有システム以外からのデータ提供、データ連携	CSpOCによるCDMを取り込んでいる。	
展開サービス		
観測・位置情報提供	—	
解析結果提供・運用支援	接近評価:高リスクイベントを通知、CSpOCによるCDMの取り込み 衝突回避支援:マヌーバオプションを自動的に生成して提案	

出所)各種情報をもとに三菱総合研究所作成

15) Telespazio

Telespazio 社は、Leonardo 社と Thales 社によるイタリアの合弁会社である。従業員数は5000人未満である。地球観測、通信、衛星航法等幅広い事業領域を有しており、その一つとして SSA 事業も展開している。同社の SSA システムおよびサービスの概要を表 2-18 に示す。

表 2-18 Telespazio 社の SSA システムおよびサービスの概要

SSAに関する所有システム・連携状況		
データ収集に係る保有システム	なし	
観測システム能力	対象軌道	—
	観測可能な大きさ	—
保有システム以外からのデータ提供、データ連携	NorthStar社のデータを利用して(同社に投資も実施)、付加価値ソリューションを提供する。	
展開サービス		
観測・位置情報提供	不明	
解析結果提供・運用支援	不明	

出所)各種情報をもとに三菱総合研究所作成

16) KBR

KBR 社は、防衛、航空、宇宙分野で幅広くサービスを提供している米国企業である。従業員数は1000人以上である。旧 Kellogg Brown & Root 社から社名を変えて、2006年に新しく設立された経緯がある。2020年に、宇宙センサーや衛星追跡を扱う企業である Centauri 社を 8 億ドルで買収した。同社の SSA システムおよびサービスの概要を表 2-19 に示す。

表 2-19 KBR 社の SSA システムおよびサービスの概要

SSAに関する所有システム・連携状況		
データ収集に係る保有システム	なし	
観測システム能力	対象軌道	—
	観測可能な大きさ	—
保有システム以外からのデータ提供、データ連携	不明	
展開サービス		
観測・位置情報提供	不明	
解析結果提供・運用支援	不明	
その他	国防総省向けにセンサーサイトの運用・維持、宇宙物体の追跡、宇宙アセットへの脅威の影響分析等のサービスを提供。 (自社でアセットやデータベースを保有するのではなく、主に米国防総省に対して SSA業務の支援を行っていると思われる。)	

出所)各種情報をもとに三菱総合研究所作成

17) 調査まとめ

以上の調査結果を基に、SSA に関する民間企業の動向をまとめる。

カタログ関連では、主に以下の傾向が確認された。

- Lockheed Martin 社 COMSPOC 社 (AGI 社から SSA 部門が独立) といった大手企業系

は、政府系の観測ネットワークによる情報を取り込んだ SSA サービスの提供を行っている。

- LeoLabs 社は International Laser Ranging Service (レーザー測距情報)、ExoAnalytic 社は NorthStar 社による SSA 情報など、他機関・企業の情報を取り込んでカタログを強化する企業も存在する。
- Slingshot 社は、Numerica 社の SSA 事業や Seradata 社など、買収を通してカタログの強化に取り組んでいる。

サービス関連では、主に以下の傾向が確認された。

- 自社で観測アセットを保有して観測情報を提供する企業も多く、顧客に観測情報を提供するとともに、運用中の衛星に対する接近解析や衝突回避支援を提供する企業が多い。
- 上記に加えて、打上げ時(ローンチウィンドウ支援)や再突入・軌道離脱時の支援サービスを提供する企業が複数存在する。
- 防衛ユーザー向けのサービスも展開されており、スタートアップの LeoLabs 社についても、外国の打上げ物体の監視サービス等を提供している。
- SSA 衛星によるサービスを計画する企業については、顧客に軌道上サービス事業者を想定して、マヌーバやドッキング時の SSA 情報提供サービスを提供予定である。

(2) 民間 SSA サービス事業者により展開されているサービスの整理

前項で整理した海外事業者による SSA サービスを対象として、SSA の一連のプロセスの中でどの部分に強みを有するのかについて、表 2-20 のとおり整理を実施した。整理にあたっては、各社のウェブサイトや製品やサービスの特徴/特長として記載されている事項を参考にした。結果、データ収集(複数の観測手段およびデータ)およびデータ処理(接近アラートの統合やフィルタリング)において、強みとなる技術を有する企業が多いことが判明した。

表 2-20 SSA プロセスにおける各社の強み

プロセス	ハードウェア	ソフトウェア
データ・プロセス管理		
観測計画		
データ収集	<ul style="list-style-type: none"> ● AGI:複数観測手段による観測 ● Lockheed Martin:複数のソースからのデータ収集 ● Slingshot:光学望遠鏡による昼間観測 	
キュレーション		<ul style="list-style-type: none"> ● ExoAnalytics:リアルタイムの画像処理
分析		<ul style="list-style-type: none"> ● Leolabs:リアルタイムの接近アラート、外部のCDM統合・マッチング、正確なリスク計算 ● Slingshot:不要なCDMのフィルタリング
サービス・プロダクト		<ul style="list-style-type: none"> ● GMV:オンデマンド対応 ● SpaceNav:オンデマンド対応 ● Lockheed Martin:直感的なユーザーディスプレイによる提供 ● Leolabs:オンデマンドのスクリーニング、2D/3Dの視覚化情報にアクセス可能なWebダッシュボード

出所)各種情報をもとに三菱総合研究所整理

2.2.2 政府機関による SSA システム

(1) 米国

米国では、国防総省の CSpOC が民生・商用向けの SSA サービスを提供している。観測システムとして、世界各地に観測地点を有する宇宙監視ネットワーク(Space Surveillance Network; SSN)を運用している(図 2-3)。

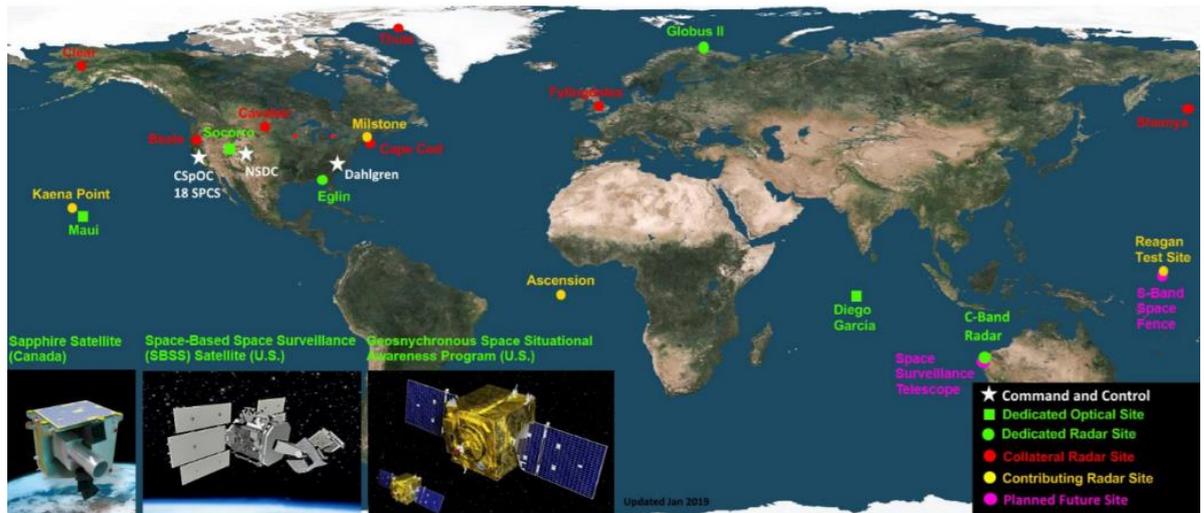


図 2-3 米国の宇宙状況監視ネットワーク

出所) <https://swfound.org/media/206348/weeden-us-policy-and-capabilities-for-ssa.pdf> (2024 年 3 月 1 日最終閲覧)

提供サービスは、Basic サービス、緊急サービス、Advanced サービスに分かれている²。Basic サービスでは、基本的な SSA 情報の提供を行っている。緊急サービスでは、異常解決、緊急時の基本的な接近評価および衝突回避の提供を行っている。Advanced サービスでは、打上げ時の接近評価および早期軌道決定、早期の軌道上接近評価、高度な接近評価および衝突回避、廃棄・終了措置支援、軌道離脱・再突入支援の提供を行っている。

また、2018 年に発表された大統領による SPD-3(宇宙政策指令-3)を受けて、民生・商用向けの SSA サービスについて、国防総省から商務省への移管が進められている。その一環として、商務省を中心に宇宙交通調整システム(Traffic Coordination System for Space; TraCCS)の開発が進められている。TraCCS の保有機能は、OASIS(データリポジトリ)、SKYLINE(SSA アプリケーションサービス)、HORIZON(R&D 環境および試験・統合環境)の、3つとなっている³(図 2-4 参照)。民間 SSA 事業者を取り込んだものとするのが計画されており、民間事業者には商用データの提供および SSA サービスの提供が期待されている(図 2-5 参照)。SSA サービスについては、データ統合モニタリング、改善されたエフェメリスの生成、SSA 衝突回避スクリーニング、SSA のミッションプランニングおよびデータ要求を提供することが期待されている。商用 SSA サービスプロバイダによるサービス提

² <https://www.space-track.org/documentation#/odr> (2024 年 2 月 26 日最終閲覧)

³ <https://www.space.commerce.gov/wp-content/uploads/2023-04-12-SSA-RFI-update.pdf> (2024 年 3 月 1 日最終閲覧)

供については、RFI への回答の多くが、米国政府が購入して TraCCS ユーザーに再配布することを提案している状況であるが、具体的な運用は明らかになっていない。

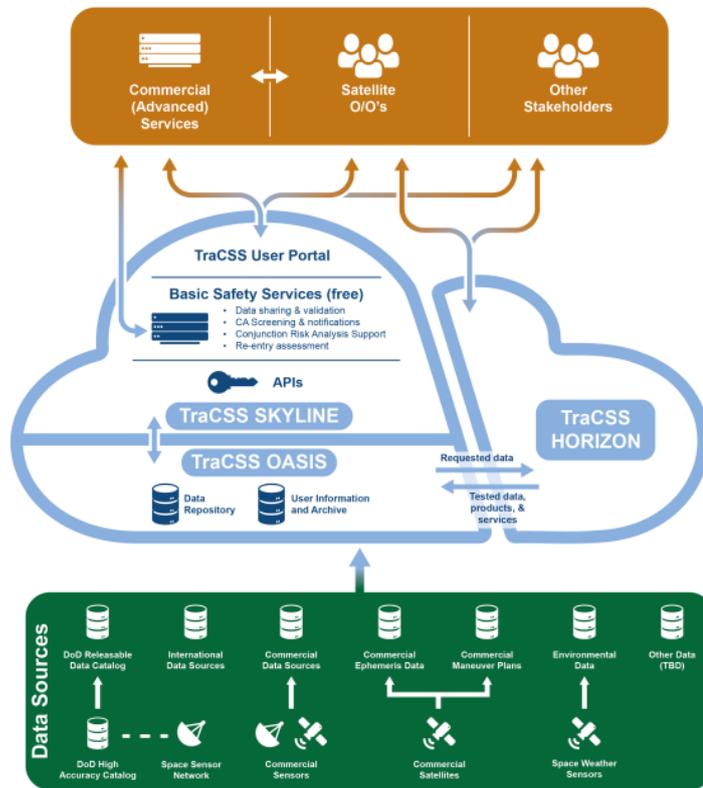


図 2-4 TraCCS の構成

出所) <https://www.space.commerce.gov/wp-content/uploads/2023-04-12-SSA-RFI-update.pdf>

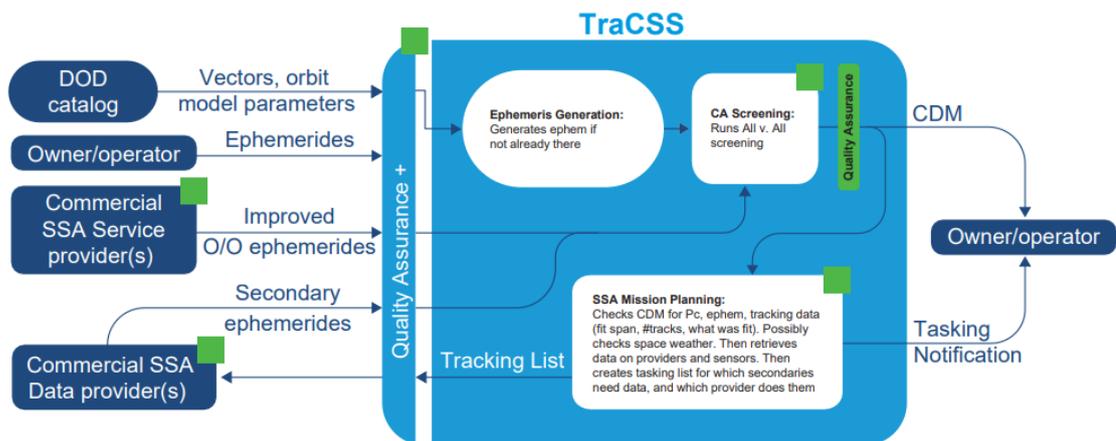


図 2-5 TraCCS におけるデータの流れと民間事業者の役割(緑色の四角部分)

出所) <https://www.space.commerce.gov/wp-content/uploads/February-2024-OSC-TraCCS-Listening-Session-Considerations-for-DoD-DOC-Space-Traffic-Coordination-STC-Operations-Transition-1.pdf> (2024 年 3 月 1 日最終閲覧)

(2) EU

EU では、主に EU ユーザー向けの SSA サービスとして、EU-SST(EU Space Surveillance and Tracking)が提供されている。EU-SST のフロントデスク業務は、EUSPA のガリレオセキュリティ監視センター(GSMC)が所掌している(2023 年に欧州連合衛星センターから移管)⁴。

観測システムとして、EU メンバ国による 40 以上のセンサーを保有している(図 2-6 参照)⁵。2023 年には、1日あたり 44 万 4000 件以上の宇宙物体の測定値を収集している⁶。これらのデータはデータベースを通して共有され、オペレーションセンターによって分析および処理されたのち、EU-SST のサービスとして提供されている。

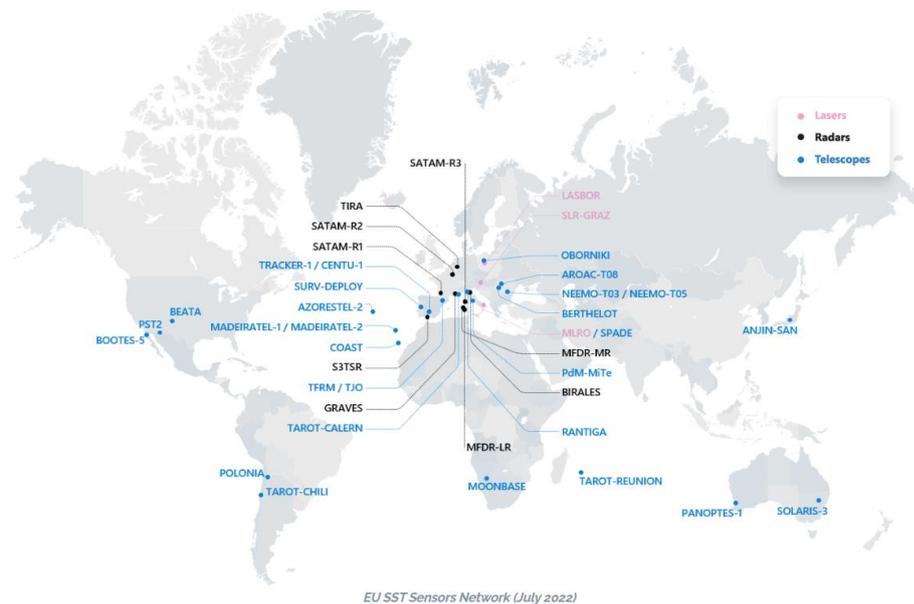


図 2-6 EU-SST によるセンサーネットワーク

出所)<https://www.eusst.eu/about-us/>(2024 年 3 月 1 日最終閲覧)

提供サービスは、衝突回避、再突入解析、フラグメンテーション解析の3つである。衝突回避サービスには 57 の組織が登録しており、402 の宇宙機について監視している(2023 年 11 月時点。以下で述べる他のサービスも同様)。再突入解析サービスには 150 の組織が登録しており、2022 年には 94 の再突入の監視を行っている。フラグメンテーション解析サービスには 147 の組織が登録しており、2022 年には 6 つのイベントについてレポートを行っている。

2023 年より、衝突回避サービスについては非 EU のユーザーに対しても提供されるようになった。現在 EU-SST がサービスを提供している約 400 機の衛星のうち、およそ 100 機は米国、ノルウェー、スイスといった非 EU のオペレーターによるものである。また、2023年から 2025 年にかけての優先事項

⁴ <https://www.euspa.europa.eu/european-space/space-situational-awareness>(2024 年 2 月 26 日最終閲覧)

⁵ https://www.eusst.eu/wp-content/uploads/2023/11/EUSST_Factsheet_2023.pdf(2024 年 2 月 26 日最終閲覧)

⁶ <https://www.euspa.europa.eu/newsroom/news/space-surveillance-and-tracking-global-challenge>(2024 年 2 月 26 日最終閲覧)

の一つとして、「SSTのコアサービスの性能向上および追加サービスの開発」が掲げられている⁷。今後、現状の3つのサービスの性能向上に加えて、それ以外のサービスも開始される可能性がある。

(3) 英国

英国では、自国による SSA システムを構築するための検討が進められている。SSA サービスの提供組織として、2024 年 4 月に National Space Operation Centre (NSpOC) の立ち上げが予定されている⁸。英国王立空軍の第 1 宇宙作戦飛行隊 (No 1 Space Operations Squadron) と英国宇宙庁 (UKSA) が協力して、衛星の衝突可能性、宇宙天気、宇宙物体の再突入等の軌道上のイベントの追跡を行うこととなっている。

観測システムについて、UKSA が行った SDA 調査においては、センサー能力向上のための R&D 実施が提言されている⁹。

具体的な提供サービスは不明であるが、2023 年 7 月に英国防省と UKSA の共同で、宇宙領域把握の要求を公表している¹⁰。民生用だけでなく軍事用の要件も含まれたものになっているが、ユーザー要求として以下のものが挙げられており¹¹、提供が検討されているサービスを伺うことができる。

- 英国の宇宙機のライセンスング
- 接近評価
- 軌道所のイベントの評価
- 宇宙環境の持続可能性
- リスク評価
- デュアルユースのアプリケーション
- 連携の方針
- 独立した UK SST のデータおよび保証の能力
- 独立した UK SST の国家の能力およびスキル
- 保護および防衛
- 運用上の宇宙画像
- ペイロードの配備 (英国の打上げ)
- ランデブ・接近運用 (RPO)

⁷ https://www.eusst.eu/wp-content/uploads/2023/11/EUSST_Factsheet_2023.pdf (2024 年 2 月 26 日最終閲覧)

⁸ <https://www.raf.mod.uk/our-organisation/squadrons/1-space-operations-squadron/> (2024 年 2 月 26 日最終閲覧)

⁹ <https://www.ukspace.org/new-space-domain-awareness-study-published/> (2024 年 2 月 26 日最終閲覧)

¹⁰ <http://www.govwire.co.uk/news/ministry-of-defence/guidance-space-domain-awareness--requirements-57317> (2024 年 2 月 26 日最終閲覧)

¹¹

https://assets.publishing.service.gov.uk/government/uploads/system/uploads/attachment_data/file/1172896/Space_Domain_Awareness_-_requirements.pdf (2024 年 2 月 26 日最終閲覧)

(4) ロシア

ロシアでは、ロスコスモスとの契約のもと、民生 SSA モニタリングセンターである Automated Warning System on Hazardous Situations in Outer Space(ASPOS OKP)が、民生向けの SSA サービスを提供している¹²。

観測システムとして、Space Surveillance System(SKKP)を運用しており、光学望遠鏡およびフェーズドアレイレーダーによる観測を行っている。旧ソ連諸国に設置されているセンサーについては、二国間協定に基づいてロシアが運用している。また、国際宇宙観測プロジェクトとして、ISON (International Scientific Optical Network)を有している(図 2-7 参照)¹³。17 カ国に配備されている計 100 程度の光学望遠鏡により、デブリ、小惑星、ガンマ線バーストの残光などを観測しており、天文観測の目的を併せ持つプロジェクトである。

提供サービスは、接近、断片化、再突入、ミッション後の廃棄を含む、一連の SSA サービスとなっている。

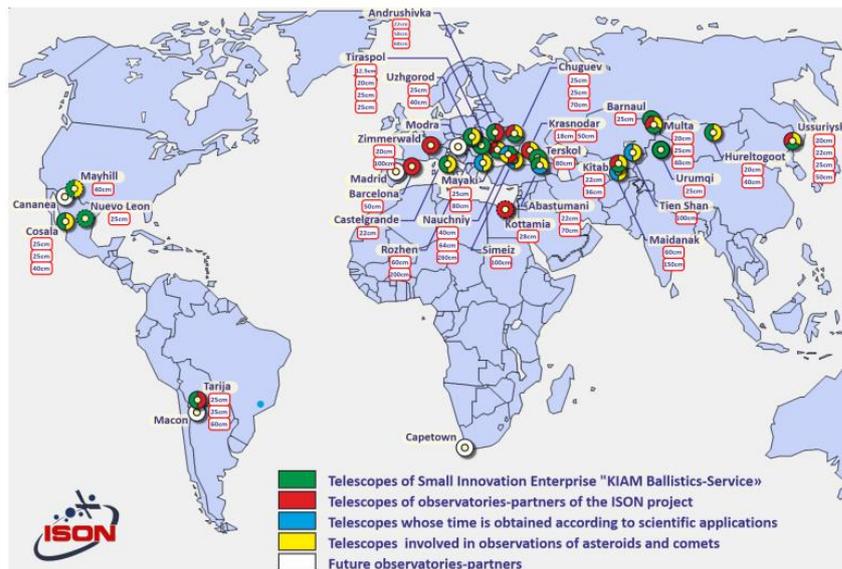


図 2-7 ISON の観測ネットワーク

出所)<https://www.unoosa.org/documents/pdf/copuos/stsc/2020/tech-63E.pdf>(2024 年 3 月 1 日最終閲覧)

¹² https://swfound.org/media/207567/swf_global_counterspace_capabilities_2023_v2.pdf(2024 年 2 月 26 日最終閲覧)

¹³ <https://www.unoosa.org/documents/pdf/copuos/stsc/2020/tech-63E.pdf>(2024 年 2 月 26 日最終閲覧)

2.3 チョークポイント技術の特定

日本が目指すべき SSA システムの方針の分析に向けて、チョークポイント技術の特定・整理を実施した。チョークポイント技術の特定に際しては、まずは SSA において利用されている技術を整理するために、米国の TraCCS で提供が予定されているサービスの調査、及びそのサービスにおいて想定されている機能・技術の整理を実施した。合わせて、SSA におけるサービスを網羅的に整理するため、海外の民生 SSA における提供サービスの調査結果を基に、SSA における主な分析・解析サービスについて提供対象、用途の整理を行った。その後、用途別に整理を行ったサービスについて、TraCCS ベースで整理を行った技術項目との照らし合わせを行い、SSA システムにおける必要技術について用途別に整理を行った。整理の全体像を図 2-8 に示す。



図 2-8 チョークポイント技術の特定・整理フロー

出所)三菱総合研究所作成

2.3.1 米国 TraCCS におけるサービスと技術の整理

米国商務省は2023年1月に、TraCCSにて提供予定のサービスに関するRFIを行った¹⁴。このRFIにおいて、TraCCSにおいて想定されているサービスの具体的な内容案が示されている。提案サービス及びその概要について、表 2-21、表 2-22 に示す。

¹⁴ <https://www.federalregister.gov/documents/2023/01/26/2023-01556/request-for-information-on-scope-of-civil-space-situational-awareness-services>(2024年3月9日最終閲覧)

表 2-21 TraCCS におけるサービス案(Basic サービス)

サービス ID	提案サービス	サービス内容
1	衛星の属性、能力、ステータス、連絡先	基本的な衛星情報(サイズ・質量)、衛星のマナーバ機能、現在のステータス等のデータベースを提供
2	所有者・運用者のエフェメリス予測の受領・共有	衝突評価のスクリーニング、リスク評価等に利用
3	日常的な衝突評価スクリーニングとCDMの生成	日常のおよびオンデマンドでの衝突評価を実施
4	特別な衝突評価スクリーニングとCDMの生成	提出されたエフェメリスのスクリーニングを実施(マナーバ計画立案のための利用を想定)
5	データの品質評価	軌道決定および物体の状態評価・共分散の伝播の一次評価(リスク評価に十分な品質が評価)
6	打上げ接近評価スクリーニング	衝突リスクが高いローンチウィンドウを特定
7	所有者・運用者のエフェメリスの生成および共分散とのキュレーション	テレメトリ、オンボードのGNSS情報、その他商用の追跡情報を利用して、信頼性の高いエフェメリスを生成
8	再突入の管理・評価	再突入予測等の提供
9	精密な衝突確率の計算	CDMにより高度な手法を適用して、特定のダイナミクスに適した計算手法を採用した衝突確率計算を実施
10	衝突の影響やデブリ発生のパテンシャル評価	特定の接近事例について、衝突に至った場合の追跡可能なデブリの数を評価
11	追加の追跡による接近物体ソリューションの改善	追加での物体追跡による正確性の高い接近リスク評価の提供
12	期待される追跡の測定	追加で商用の追跡サービスを利用するためのパススケジュールおよび検出確率を生成
13	リスク評価の時間履歴プロット	関心のある接近リスク評価パラメータの時間履歴プロットを生成して、接近イベントのフェージングや安定性の評価を支援
14	宇宙天気情報提供	宇宙天気に関する警告を提供し、大気密度の不確実性が接近リスク評価パラメータに与える影響を評価

出所)

<https://www.federalregister.gov/documents/2023/01/26/2023-01556/request-for-information-on-scope-of-civil-space-situational-awareness-services> (2024年2月14日最終閲覧)を基に三菱総合研究所作成

表 2-22 TraCCS におけるサービス案(Advanced サービス)

サービス ID	提案サービス	サービス内容
15	衝突評価製品の融合	複数のプロバイダのCDMや予測エフェメリス等のCA製品を一つの高信頼度な製品に融合
16	PCの変動性	リスク評価者がより保守的な「最高水準点」のPC値を割り当てられるよう、可能なPC値のマトリックスを生成
17	追加のコンシェルジュサービス	衝突評価の専門家による電話サポートを提供
18	異常解決	異常解決のために光学画像やレーダ等によるプロダクトを提供
19	衝突回避改善のための設計時における支援	衛星の製造およびミッション設計段階における支援
20	マナーバのトレードスペース	衝突リスク低減のためのマナーバの時間や程度の立案における視覚的な支援
21	最適なマナーバの推奨	20におけるパラメータに加えて、衛星のマナーバ制限や所有者・運用者の選好等を考慮
22	衛星の破碎の検出・追跡・カタログ化	衛星の故障を検出するための定期的な監視追跡を実施
23	マナーバの検出・処理	機動性のある物体に対する監視追跡の強化

出所)

<https://www.federalregister.gov/documents/2023/01/26/2023-01556/request-for-information-on-scope-of-civil-space-situational-awareness-services> (2024年2月14日最終閲覧)を基に三菱総合研究所作成

上記の TraCCS で想定されているサービスをベースに、SSA システムに必要な技術を整理するため、これらサービスを提供するために必要な機能及びその機能を実現するために必要な技術について整理を行った。Basic 及び Advanced における各サービスについて、想定される機能及び技術を整理したものを表 2-23、表 2-24 に示す。なお、各サービスのうち、データ保存・提供やコンサルティングなどの非技術的なものについては、技術整理の対象外としている。

表 2-23 TraCCS をベースとした必要技術の整理(Basic サービス)

サービス ID	サービス	想定される機能	想定される技術
1	衛星の属性、能力、ステータス、連絡先	✓ データ収集・データベース化	※データ管理関連
2	所有者・運用者のエフェメリス予測の受領・共有	✓ データ収集・データベース化	※データ管理関連
3	日常的な衝突評価スクリーニングとCDMの生成	✓ 接近解析 ✓ 不要なCDMのスクリーニング解析 ✓ 接近アラート発出	✓ 軌道予測技術(数値分析、機械学習) ✓ 接近解析技術 ✓ 不要アラート削減のための意図認識(ニューラルネットワーク等)
4	特別な衝突評価スクリーニングとCDMの生成	✓ 接近解析 ✓ 不要なCDMのスクリーニング解析 ✓ 接近アラート発出	✓ 軌道予測技術(数値分析、機械学習) ✓ 接近解析技術 ✓ 不要アラート削減のための意図認識(ニューラルネットワーク等)
5	データの品質評価	✓ 誤差分析	✓ 誤差評価技術(カルマンフィルタ等の誤差伝播手法)
6	打上げ接近評価スクリーニング	✓ 接近解析 ✓ スクリーニング解析	✓ 軌道予測技術(数値分析、機械学習) ✓ 接近解析技術
7	所有者・運用者のエフェメリスの生成及び共分散とのキュレーション	✓ 衛星・デブリの位置・軌道情報取得	✓ 軌道・姿勢パラメータ最適推定技術(カルマンフィルタ等)
8	再突入の管理・評価	✓ 軌道離脱時間予測 ✓ 再突入時間・位置・軌道予測	✓ 再突入分析技術(摂動モデルなど)
9	精密な衝突確率の計算	✓ 衝突確率計算	✓ 衝突確率計算技術、衝突リスク評価技術
10	衝突の影響やデブリ発生のポテンシャル評価	✓ 破砕評価	✓ 衝突・破砕シミュレーション技術
11	追加の追跡による接近物体ソリューションの向上	✓ 追加追跡・観測	※追加的な観測
12	予測される追跡の決定	✓ 追加追跡・観測	※追加的な観測のための情報提供
13	リスク評価の時間履歴プロット	✓ 時間履歴プロット作成	※視覚的な情報提供支援
14	宇宙天気情報提供	✓ 定常的な宇宙天気情報の取得 ✓ 通信・制御異常発生時の宇宙天気評価	✓ 太陽活動観測、分析技術(太陽電波、太陽風観測等) ✓ 電離圏観測、分析技術(電波測定等)

出所)各種情報を基に三菱総合研究所作成

表 2-24 TraCCS をベースとした必要技術の整理(Advanced サービス)

サービス ID	サービス	想定される機能	想定される技術
15	衝突評価製品の融合	✓ 複数の予測結果の融合	※評価結果の融合による高信頼化
16	衝突確率の変動性	✓ 衝突確率の変動評価	✓ 共分散評価技術
17	追加のコンシェルジュサービス	—	※コンサルティング支援
18	異常解決	✓ 外観情報の取得	✓ 測光観測技術 ✓ ライトカーブ分析技術
19	衝突回避改善のための設計時における支援	—	※設計・運用支援
20	マナーバのトレードスペース	✓ マナーバトレードスペースプロットの作成	※視覚的な情報提供支援
21	最適なマナーバの推奨	✓ マナーバ評価	✓ 衝突回避計画技術(シミュレーションソフトウェアなど) ✓ 軌道・姿勢パラメータ最適推定技術(カルマンフィルタ等)
22	衛星の破碎の検出・追跡・カタログ化	✓ 衛星の破碎検出 ✓ 衛星・デブリの位置・軌道情報取得	✓ 異常検出技術(数値分析、行動分析)
23	マナーバの検出・処理	✓ 想定外の軌道変化・異常挙動検知	✓ 異常検出技術(数値分析、行動分析) ✓ 非協力物体の動きに対する意図認識技術(ニューラルネットワーク等)

出所)各種情報を基に三菱総合研究所作成

2.3.2 SSA システムにおける必要技術の整理

SSA サービスにおける必要技術を整理するために、図 2-1 に示した6つの SSA のプロセス(観測計画、データ収集、キュレーション、分析、プロダクト・サービス、データ・プロセス管理)について、図 2-9 のように「A:観測」、「B:データ処理・提供」、「C:分析」の3つに再分類した。

- A 観測:各種センサーによる観測、及び観測データの収集・データ加工などを行うプロセス
- B データ処理・提供:収集したデータをサーバー、クラウド上で統合・管理・処理するプロセス、及びユーザーインターフェースなどによる利用者へのデータ提供のプロセス
- C 分析:観測データを基に軌道・接近情報などの解析、衛星運用に資する衝突回避予測などの分析を行うプロセス

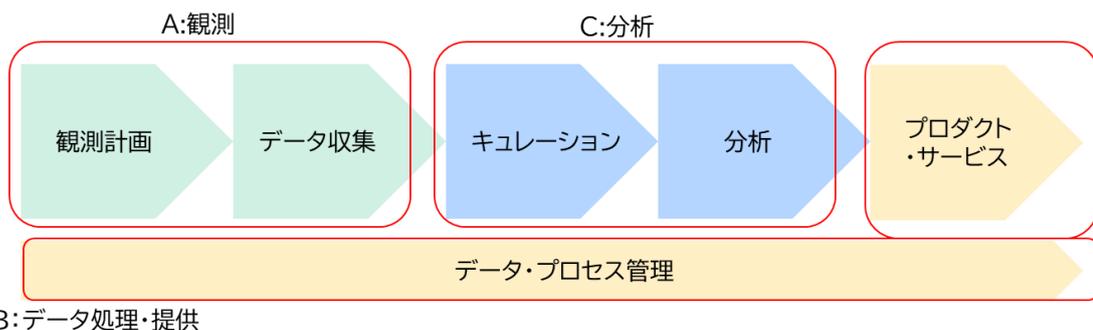


図 2-9 SSA の基本的なプロセスに基づく分類

出所)三菱総合研究所作成

(1) 観測における必要技術

観測技術について、2.1.3 項に整理した光学センサー、レーダー、RF センサー、衛星観測以外に、今後 SSA に利用されうる、もしくは利用に向けて研究開発が進められている技術として以下が挙げられる。

- 天文望遠鏡：天体や天文現象を観測するために用いられている天文望遠鏡を用いて、衛星の光学観測を行う方法。
- スタートラッカー：衛星に搭載されているスタートラッカー（恒星の位置を測定して自身の向き・姿勢を判別するための光学デバイス）を用いて、軌道上の衛星・物体を観測する方法
- レーザー：レーザー測距技術を用いて、軌道上衛星・物体に照射したレーザーの反射を観測することにより、衛星・物体の位置・軌道を計測する方法
- ダストセンサー：宇宙空間で膜状の観測装置を使用して、膜に衝突した宇宙デブリを観測、分布の計測などを行う方法

これらの新たな観測手段も含め、観測手段ごとに必要技術を表 2-25 のとおり整理した。

表 2-25 観測における必要技術

観測方法	観測機器	観測場所	技術
可視光	光学センサー	地上	<ul style="list-style-type: none"> ✓ 画像処理・ターゲット認識 ✓ 高度な物体検知技術（マシンビジョン技術、ニューラルネットワーク、重ね合わせ法等） ✓ 追跡のための駆動架台（LEO短波赤外線センサー、高度な画像処理アルゴリズムによる日中観測のみ）
		衛星	<ul style="list-style-type: none"> ✓ 画像処理・ターゲット認識 ✓ 搭載衛星自身の軌道、姿勢決定 ✓ データの衛星上での保存、ダウンリンク
	天文望遠鏡	地上	<ul style="list-style-type: none"> ✓ 画像処理・ターゲット認識 ✓ 多地点観測のための連携自動観測ソフトウェア ✓ 追跡のための駆動架台（LEOのみ）
	スタートラッカー	衛星	<ul style="list-style-type: none"> ✓ 観測データと既知天体情報に基づくデブリ検出技術
	レーザー	地上	<ul style="list-style-type: none"> ✓ 高出力レーザー技術 ✓ レーザーのターゲット照射技術
電波・マイクロ波	フェイズドアレイレーダー	地上	<ul style="list-style-type: none"> ✓ エコー分析、特徴抽出 ✓ 逆合成開口レーダー（ISAR）技術（レーダーによる画像化技術） ✓ デジタルビームフォーミング
	RFセンサー	地上	<ul style="list-style-type: none"> ✓ 対象衛星からのRF信号センシング技術 ✓ RF信号パターン分析（機械学習、パターン認識アルゴリズム）
その他	ダストセンサー	衛星	<ul style="list-style-type: none"> ✓ 膜型検出装置による検出技術

出所)各種情報を基に三菱総合研究所作成

(2) データ処理・提供における必要技術

データ処理・提供プロセスにおいては、主に以下の機能が挙げられる。

- データ処理：観測装置から収集したデータ、もしくは外部ソースから入手したデータなどを統合・自動処理する機能
- 画像処理：取得した光学的な観測データを基に、軌道上の衛星・物体を識別・検出する機能
- データ提供：リアルタイムでのデータ提供機能やユーザーインターフェースなど、ユーザーへのデータ提供のための機能

以上を基に、データ処理・提供段階において、SSA サービスに必要となる技術を表 2-26 のとおり整理した。

表 2-26 データ処理・提供における必要技術

機能	技術
データ処理	<ul style="list-style-type: none"> ✓ 高速処理技術(クラウド技術、エッジ処理技術、不要データのフィルタリング技術) ✓ 複数ソースのデータ融合技術、統一フォーマット化 ✓ データ融合による3Dイメージング
画像処理	<ul style="list-style-type: none"> ✓ ターゲット検出技術 ✓ 高度なターゲット検出技術(特徴抽出、重ね合わせ法など)
データ提供	<ul style="list-style-type: none"> ✓ オンデマンド対応に向けた処理の自動化 ✓ ユーザーインターフェースでの視覚化技術、3Dイメージング

出所)各種情報を基に三菱総合研究所作成

(3) 分析における必要技術

分析技術については、対象とするユーザー、用途により必要技術が異なることから、図 2-10 に示すように対象顧客、用途ごとに該当するサービスを整理した。ユーザーとしては政府向けと民間事業者向けに分けることができ、政府向けでは主に安全保障や宇宙状況の監視を目的としたサービスが該当する。

SSA サービスのユーザーとなる、もしくはなりうる民間事業者としては、打上げ事業者、衛星運用事業者、軌道上サービス事業者が挙げられる。打上げ事業者に対しては、主にロケット打上げ時の打上げウィンドウ確保や軌道上物体との衝突回避を目的としたサービスが該当する。衛星運用事業者に対しては、衛星の寿命を可能な限り伸ばすため、衛星自身もしくは周辺の状態を把握するためのサービス、他物体との衝突リスクの分析及びそれに基づく衝突回避など対処を行うためのサービス、衛星廃棄時の支援に関するサービスなどが該当する。軌道上サービス事業者については、今後展開されると想定される軌道上における衛星製造・補修・燃料供給サービスやデブリ除去サービスなどの事業者に対して、衛星・デブリの位置情報を分析・提供するサービスが該当する。

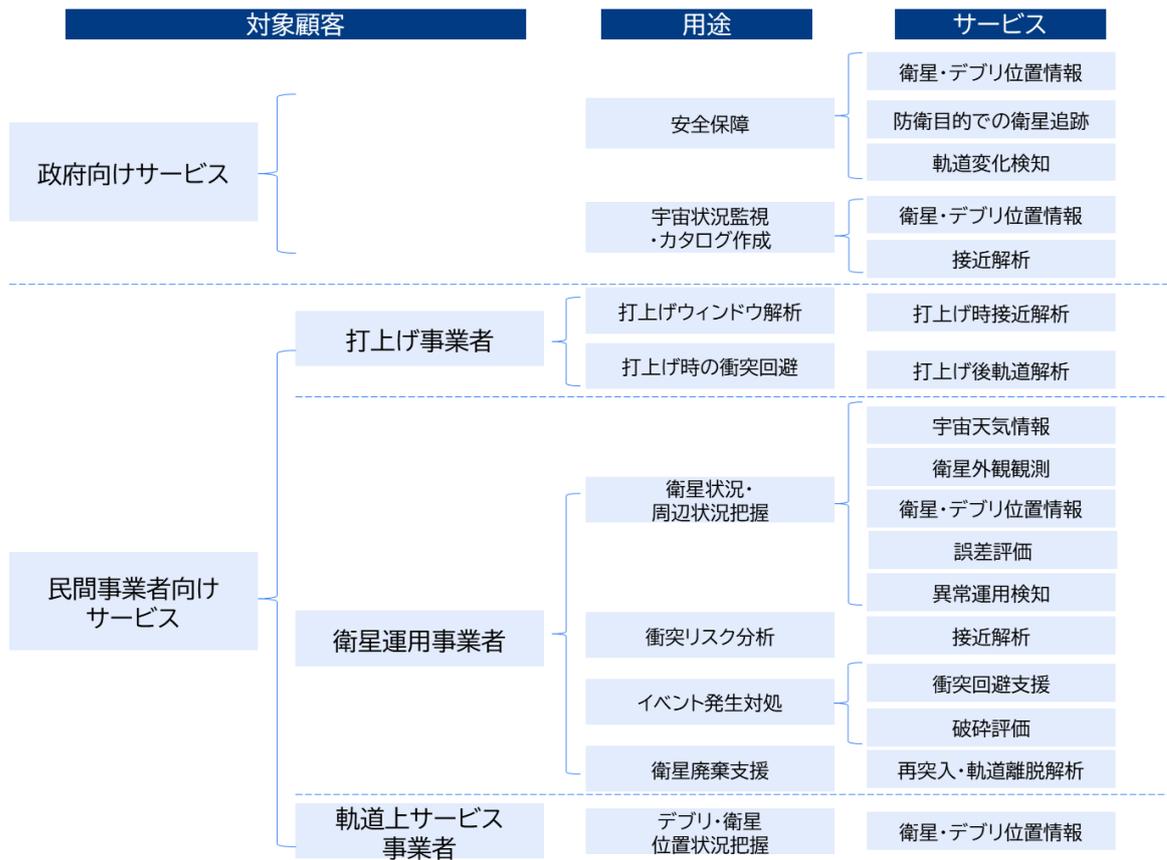


図 2-10 SSA サービスに必要となる主な分析サービスの整理

出所)各種情報を基に三菱総合研究所作成

上記にて整理したサービスを基に、各サービスを展開するにあたって必要となる機能、及びその機能を実現するために必要な技術を分析・整理した。対象ユーザー別に整理した結果を表 2-27、表 2-28、表 2-29、表 2-30 に示す。なお、サービスごとの必要技術の整理にあたっては、海外 SSA 事業者におけるサービス・技術の調査結果、後述のヒアリング結果に加え、SSA の必要技術について整理した資料¹⁵をベースとして行った。

表 2-27 政府向けサービスにおける必要技術の分析

用途	サービス	必要な機能	技術
安全保障	衛星・デブリ位置情報	✓ 自国保有衛星の位置・軌道情報	✓ 軌道・姿勢パラメータ最適推定技術(カルマンフィルタ等)
	防衛目的での衛星追跡	✓ リアルタイムでの対象衛星の追跡	✓ 軌道・姿勢パラメータ最適推定技術(カルマンフィルタ等)
	軌道変化検知	✓ マヌーバ検出 ✓ 破砕・破壊措置検出	✓ 衝突確率計算技術、衝突リスク評価技術 ✓ 衝突回避計画技術(シミュレーションソフトウェアなど) ✓ マヌーバ検出・評価技術(パラメータ特性評価、RF評価等) ✓ 異常検出技術(数値分析、行動分析)
宇宙状況把握・カタログ作成	衛星・デブリ位置情報	✓ 衛星・デブリの網羅的な位置・軌道情報把握	✓ 軌道・姿勢パラメータ最適推定技術(カルマンフィルタ等)
	接近解析	✓ 接近解析 ✓ スクリーニング解析	✓ 軌道予測技術(数値分析、機械学習) ✓ 接近解析技術

出所)各種情報を基に三菱総合研究所作成

¹⁵ Beichao Wang et.al “Research Advancements in Key Technologies for Space-Based Situational Awareness”, 2022, (<https://spj.science.org/doi/10.34133/2022/9802793>)

表 2-28 衛星運用事業者向けサービスにおける必要技術の分析

用途	サービス	機能	技術
衛星状況・ 周辺状況把握	宇宙天気情報	<ul style="list-style-type: none"> ✓ 定期的な宇宙天気情報の取得 ✓ 通信・制御異常発生時の宇宙天気評価 	<ul style="list-style-type: none"> ✓ 太陽活動観測、分析技術(太陽電波、太陽風観測等) ✓ 電離圏観測、分析技術(電波測定等)
	衛星外観観測	<ul style="list-style-type: none"> ✓ 光学的な外観情報の取得 	<ul style="list-style-type: none"> ✓ 測光技術 ✓ ライトカーブ分析技術
	衛星・デブリ位置情報	<ul style="list-style-type: none"> ✓ 衛星・デブリの位置・軌道情報取得 	<ul style="list-style-type: none"> ✓ 軌道・姿勢パラメータ最適推定技術(カルマンフィルタ等)
	誤差評価	<ul style="list-style-type: none"> ✓ 位置情報・軌道情報の誤差評価 	<ul style="list-style-type: none"> ✓ 誤差評価技術(カルマンフィルタ等の誤差伝播手法)
	異常運用検知	<ul style="list-style-type: none"> ✓ 想定外の軌道変化・異常挙動検知 	<ul style="list-style-type: none"> ✓ 異常検出技術(数値分析、行動分析) ✓ 非協力物体の動きに対する意図認識技術(ニューラルネットワーク等)
衝突リスク分析	接近解析	<ul style="list-style-type: none"> ✓ 接近解析 ✓ 接近アラート発出 ✓ 不要なCDMのスクリーニング解析 	<ul style="list-style-type: none"> ✓ 軌道予測技術(数値分析、機械学習) ✓ 接近解析技術 ✓ 不要アラート削減のための意図認識(ニューラルネットワーク等) ✓ スクリーニング解析技術
イベント発生対処	衝突回避支援	<ul style="list-style-type: none"> ✓ 接近回避計画の立案支援 ✓ マヌーバ評価 ✓ マヌーバ後軌道情報取得 	<ul style="list-style-type: none"> ✓ 衝突確率計算技術、衝突リスク評価技術 ✓ 衝突回避計画技術(シミュレーションソフトウェアなど) ✓ マヌーバ検出・評価技術(パラメータ特性評価、RF評価等)
	破砕評価	<ul style="list-style-type: none"> ✓ 衝突発生時の破砕 	<ul style="list-style-type: none"> ✓ 衝突・破砕シミュレーション技術
衛星廃棄支援	再突入・軌道離脱解析	<ul style="list-style-type: none"> ✓ 軌道離脱時間予測 ✓ 再突入時間・位置・軌道予測 	<ul style="list-style-type: none"> ✓ 再突入分析技術(摂動モデルなど)

出所)各種情報を基に三菱総合研究所作成

表 2-29 打上げ事業者向けサービスにおける必要技術の分析

用途	サービス	必要な機能	技術
打ち上げウィンドウ解析	打上げ時接近解析	<ul style="list-style-type: none"> ✓ 接近解析 ✓ スクリーニング解析 	<ul style="list-style-type: none"> ✓ 軌道予測技術(数値分析、機械学習) ✓ 接近解析技術
打上げ時の衝突回避	打上げ後軌道解析	<ul style="list-style-type: none"> ✓ 打上げロケットの位置・軌道情報 	<ul style="list-style-type: none"> ✓ 軌道予測技術(数値分析、機械学習) ✓ 接近解析技術

出所)各種情報を基に三菱総合研究所作成

表 2-30 軌道上サービス事業者向けサービスにおける必要技術の分析

用途	サービス	必要な機能	技術
デブリ・衛星位置状況把握	衛星・デブリ位置情報	<ul style="list-style-type: none"> ✓ 衛星・デブリの位置・軌道情報取得 	<ul style="list-style-type: none"> ✓ 軌道・姿勢パラメータ最適推定技術(カルマンフィルタ等) ✓ 軌道予測技術(数値分析、機械学習) ✓ 接近解析技術

出所)各種情報を基に三菱総合研究所作成

2.4 日本が目指すべき SSA システムの方針検討

2.4.1 日本の現状保有技術の整理

(1) SSA 関連技術もしくは SSA に適用可能な技術

日本の現状保有技術の整理として、SSA 関連技術もしくは SSA に適用可能な技術を有している企業・研究者へのヒアリングを実施した。ヒアリング実施先を表 2-31 に示す。またヒアリングを通じて把握した各技術の特徴に基づき、SSA システムにおける位置づけを図 2-11 に整理した。

今回の調査により観測技術について SSA に適用しうる技術が国内に複数存在すること、そして既に SSA への活用のための研究開発が進められている技術も存在することが判明した。

表 2-31 SSA 関連事業者・研究者ヒアリングの一覧

ヒアリング先	概要
Star Signal Solutions	✓ 宇宙物体観測サービス、観測データ解析サービス、人工衛星衝突回避ナビサービス等を提供しているJAXAベンチャー企業 ✓ スタートラッカーを用いた観測技術の開発を実施している
Space Weather Company	✓ 宇宙天気情報に基づく軌道予測の精度向上に向けた研究開発を実施
Ex-Fusion	✓ レーザー核融合商用炉実用化に向けた研究開発を実施 ✓ ハイパワーレーザー技術を用いた宇宙デブリの追跡・除去に向けて、オーストラリアのEOS Space社と連携

出所)各種情報を基に三菱総合研究所作成

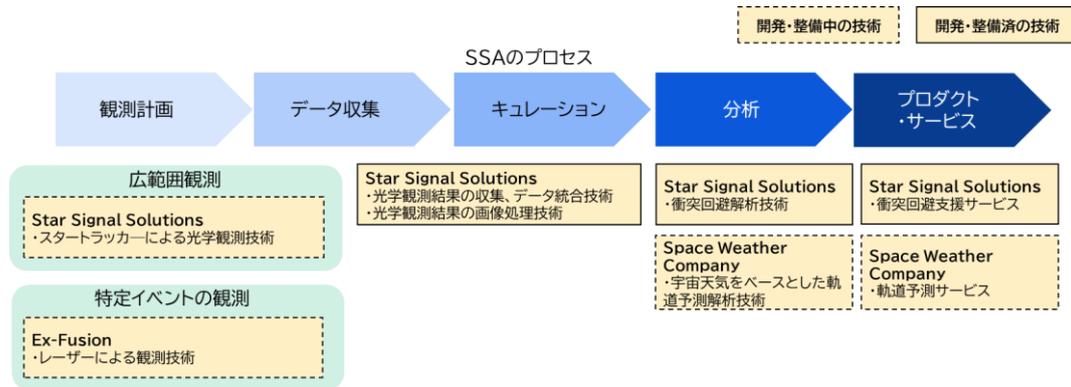


図 2-11 SSA プロセスにおける各技術の位置づけ

出所)各種情報を基に三菱総合研究所作成

(2) 海外との技術差、必要技術の評価

現状の SSA に関する技術の海外との技術差、及び SSA システムを構築するうえで必要な技術を把握するため、国内において SSA に関する技術を有する 3 社へのアンケートおよびヒアリング調査を実施した。

1) アンケート・ヒアリングの概要

データ処理・提供に関わる技術は種類が限定的であり、技術差や必要性についての評価が困難なことが想定されたことから、アンケート調査では、観測技術、分析技術を対象とした。具体的には、以下の評価項目を設定した。

- 海外との技術差
 - 該当技術について、日本と海外との技術差について以下の項目により評価
 - A) 海外と同程度もしくはそれ以上の技術を有している
 - B) 海外より遅れているが、研究開発により追いつくことが可能である
 - C) 海外より遅れており、研究開発によっても追いつくことが困難である
- 日本として最低限保有しておくべき技術
 - 該当技術について、安全保障、国際連携、民間事業者向けサービス構築等の理由により、日本として最低限保有しておくべきかについて評価

ヒアリング調査では、アンケート調査での各技術の評価結果に基づき「日本として強みとなりうる技術、必要となる技術」に関する質問項目を設定するとともに、「今後の日本の SSA 体制の在り方」に関する質問項目を設定した。

2) アンケートとヒアリング結果の整理

a. 観測技術に関する海外との技術差及び必要技術の評価

アンケート結果を基にした観測技術に対する海外との技術差、及び必要技術の評価結果について表 2-32 に示す。なお 3 社のアンケート結果を踏まえた海外との技術差、必要性については、以下のように評価した。

- 海外と同程度の技術: 「B: 海外より遅れているが、研究開発により追いつくことが可能」、もしくは「C: 海外より遅れており、研究開発によっても追いつくことが可能」と回答した企業が一つもない技術を「海外と同程度の技術」とした。
- 海外よりも遅れている技術: 「A: 海外と同程度もしくはそれ以上の技術を有している」と回答した企業が一つもない技術を「海外より遅れている技術」とした。
- 必要性の高い技術: すべての企業が「○: 日本として最低限保有しておくべき」と回答した技術（ただし評価が困難と回答された部分は除く）を「必要性の高い技術」とした。

また海外との技術差について、ヒアリングにて得られた主な意見を表 2-33 に示す。

表 2-32 観測技術に関する海外との技術差、必要技術の評価結果

観測方法	観測機器	観測場所	技術	① 海外との技術差					② 日本として最低限保有しておくべき技術				
				α社	β社	γ社	海外と同程度の技術	海外よりも遅れている技術	α社	β社	γ社	必要性の高い技術	
可視光	光学センサー	地上	画像処理・ターゲット認識技術	A	B	A			○	○	○	○	
			高度な物体検知技術（マシビジョン技術、ニューラルネットワーク、重ね合わせ法等）	A	B	B			×	○	○		
			短波赤外線センサー、高度な画像処理アルゴリズムによる日中観測 追跡のための駆動架台（LEO観測のみ）	B	B	B		○	×	○	○		
		衛星	画像処理・ターゲット認識	A	B	A			○	○	○	○	
			搭載衛星自身の軌道、姿勢決定	A	A	A	○		○	○	○	○	
			データの衛星上での保存、ダウンリンク	A	A	A	○		○	○	○	○	
	天文望遠鏡	地上	画像処理・ターゲット認識	A	B	B			×	○	○		
			多地点観測のための連携自動観測ソフトウェア 追跡のための駆動架台（LEO観測のみ）		B	B		○		○	○	○	
		スタートラッカー	衛星	観測データと既知天体情報に基づくデブリ検出技術		B	B		○		○	○	○
				高出力レーザー技術		B	B		○		○	×	
電波・マイクロ波	フェイズドアレイレーダー	地上	レーザーのターゲット照射技術		B	B		○		○	○	○	
			エコー分析、特徴抽出		B	B		○		○	○	○	
			逆合成開口レーダー（ISAR）技術（レーダーによる画像化技術）		B	B		○		○	○	○	
	RFセンサー	地上	デジタルビームフォーミング		A	B				○	○	○	
			対象衛星からのRF信号センシング技術		B	B		○		○	○	○	
			RF信号パターン分析（機械学習、パターン認識アルゴリズム）		B	A				○	○	○	
その他	ダストセンサー	衛星	膜型検出装置による検出技術		A	B				○	×		

※海外との技術差の評価軸
A: 海外と同程度もしくはそれ以上の技術を有している
B: 海外より遅れているが、研究開発により追いつくことが可能
C: 海外より遅れており、研究開発によっても追いつくことが困難

※灰色箇所は「評価が困難」と回答されたもの

出所)三菱総合研究所作成

表 2-33 観測技術の海外との技術差に関する主な意見

観測方法	観測機器	α社	β社	γ社
可視光	光学センサー(地上)	✓ 日中観測について、国内事例はないが、技術的に対応可能な領域	✓ AIを用いたターゲット検知技術については、海外より遅れているが、研究開発により追いつくことが可能 ✓ 画像処理AIについて、日本では市場がないためSSA分野への応用に遅れ	✓ センサー画像から抽出する技術はあるが、更なる検出能力向上が必要 ✓ パターン解析などを活用した検知技術の実績は欧米が先行 ✓ 日中観測の技術は欧米が先行
	光学センサー(衛星)	✓ 日本として実績がない。技術自体は保有しているが運用まで至っていない。今後、衛星の打ち上げを予定しており、実績の積み上げが必要	✓ 衛星を使った画像取得について、画像処理・ターゲット認識は日本で実績がない ✓ 衛星観測について、個々の技術要素に課題はないが、システムとして統合する部分が今後の課題	✓ 海外が先行、ただし日本でも実績があり、実用化は可能
	天文望遠鏡		✓ 日中観測や物体検知・ターゲット認識技術は重要な技術になる。現状は海外より遅れているが、追いつくことは可能 ✓ 日本において天文望遠鏡の多地点観測を行っているところは少なく、遅れていると認識	✓ 欧米が先行、ただし国内でも画像処理、海外と連携した多地点観測などの実証研究が進められている
	スタートラッカー		✓ 一部企業で利活用の構想はあるが、現状実績はない	✓ 米国ではSSA用カメラを軌道以上に上げており、実績が先行
	レーザー		✓ レーザーについて、海外ではメーカーが多く存在するが、国内で実施例はないと推測。 ✓ 未知物体に対するSLRについて海外では実績あり	✓ MEO、GEO物体への対応、高機動物体への対応の実績について欧米が先行
電波・マイクロ波	フェイズドアレイレーダー		✓ 海外より遅れていると認識、一方でデジタルビームフォーミングは他の通信でも使用される技術であり技術差はない	✓ 日本は10cm級の低軌道デブリ観測が可能だが、米国は10cm以下の観測性能を有する ✓ 未カタログ物体について、ブレイクアップなど多数の新規物体発生イベントへの対応で海外より遅れ
	RFセンサー		✓ システムとして国内の実績はない	✓ 衛星からのダウンリンク信号のセンシング技術の実績はあり、ただし海外のほうが先行 ✓ ダウンリンク信号の自動識別技術は海外が先行しているが、国内でも研究開発が進行
その他	ダストセンサー			✓ 大学などでの実証研究が進んでおり、実用化は可能

出所)三菱総合研究所作成

ア) 海外との技術差

アンケート・ヒアリングにて得られた結果では、観測技術については海外よりも致命的に遅れていると評価された技術はなく、いずれの技術についても海外と同程度もしくは遅れているが研究開発により追いつくことが可能と評価された。

光学センサーの観測技術については、ほぼすべての技術について海外よりも遅れているとは評価されておらず、概ね同程度もしくは多少遅れている程度と評価されている。特に衛星での光学観測に関連して、これまでの衛星運用で実績のある技術、具体的には衛星の軌道・姿勢決定技術、データの衛星上での保存・ダウンリンク技術については、海外との技術差がないと評価されている。

一方で、光学センサーの観測技術の中で、日中観測のための技術や AI を用いた画像・ターゲット検出技術については、欧米に比べると開発が遅れていると評価されている。

光学センサー以外の観測技術である天文望遠鏡、スタートラッカー、レーザー、フェーズドアレイレーダー、RF センサーについては、主に欧米に比べると実績がないという理由により、技術的に遅れていると評価された。ただし、国内での技術開発・実証研究は既に進められており、いずれの技術も研究開発により追いつくことが可能と評価された。

イ) 保有しておくべき技術

光学センサーにおける画像処理・ターゲット認識技術、衛星観測に関連する技術について必要性が高いと評価された。特に衛星観測に関連する技術については、SSA 用途以外にも衛星運用、デブリ検知、深宇宙探査などで必要不可欠である、将来的には月周回軌道上での他衛星・物体の観測においても必要となりうる、といった意見が挙げられた。

その他の観測技術として、天文望遠鏡、スタートラッカー、レーザー、フェーズドアレイレーダー、RF センサーについても、各観測手法の基礎的な技術について必要性が高いと評価された。

b. 分析技術に関する海外との技術差及び必要技術の評価

アンケート結果を基にした分析技術に対する海外との技術差、及び必要技術の評価結果について表 2-34 に示す。なお 3 社のアンケート結果を踏まえた海外との技術差、必要性については、先述の観測技術と同様に以下のように評価を実施した。

- 海外と同程度の技術:「B:海外より遅れているが、研究開発により追いつくことが可能」、もしくは「C:海外より遅れており、研究開発によっても追いつくことが可能」と回答した企業が一つもない技術を「海外と同程度の技術」とした。
- 海外よりも遅れている技術:「A:海外と同程度もしくはそれ以上の技術を有している」と回答した企業が一つもない技術を「海外よりも遅れている技術」とした。
- 必要性の高い技術:すべての企業が「○:日本として最低限保有しておくべき」と回答した技術(ただし評価が困難と回答された部分は除く)を「必要性の高い技術」とした。

海外との技術差について、ヒアリングにて得られた主な意見を表 2-35 に示す。また、アンケート・ヒアリングにおいて得られた意見を基に、各分析技術の必要性について以下の 3 つの理由に分類を行った。分類結果について表 2-35 に示す。

- 安全保障: 自国衛星の保護、不審衛星・物体の検出・監視
- 海外連携: 海外とのデータ共有・連携
- 衛星運用・打上げ支援: 民間衛星運用事業者や打上げ・輸送事業者の運用に資する情報提供

表 2-34 分析技術に関する海外との技術差、必要技術の評価結果

用途	サービス	機能	技術	① 海外との技術差			海外よりも選れている技術	② 日本として最低確保しておくべき技術※			
				α社	β社	γ社		α社	β社	γ社	必要性の高い技術
衛星状況・周辺状況把握	宇宙天気情報	・定期的な宇宙天気情報の取得 ・通信・制御異常発生時の宇宙天気評	太陽活動観測、分析技術（太陽電波、太陽風観測等）	A			○	○			○
			電離圏観測、分析技術（電波測定等）	A			○	○			○
	衛星外観観測	・光学的な外観情報の取得	測光技術		A		○		○		○
			ライトカーブ分析技術		B	A				○	○
	衛星・デブリ位置情報	・衛星・デブリの位置・軌道情報取得 ・データの品質評価	軌道・姿勢パラメータ最適推定技術（カルマンフィルタ等）	A	A	A	○	○	○	○	○
			共分散評価技術	A	A	A	○	○	○	○	○
異常運用検知	・想定外の軌道変化・異常挙動検知	異常検出技術（数値分析、行動分析）	A	B	A		○	○	○	○	
		非協力物体の動きに対する意図認識技術（ニューラルネットワーク等）	B	B	B		○	○	○	○	
衝突リスク分析	接近解析	・接近解析 ・接近アラート発出 ・不要なCDMのスクリーニング解析	軌道予測技術（数値分析、機械学習）	A	A	A	○	○	○	○	○
			接近解析技術	A	A	A	○	○	○	○	○
			不要アラート削減のための意図認識（ニューラルネットワーク等）		A		○	○	○	○	○
			スクリーニング解析技術		A	B		○	○	○	○
イベント発生対処	衝突回避支援	・接近回避計画の立案支援 ・マヌーバ評価 ・マヌーバ後軌道情報取得	衝突確率計算技術、衝突リスク評価技術	A	A	A	○	○	○	○	
			衝突回避計画技術（シミュレーションソフトウェアなど）	A	A	A	○	○	○	○	
			マヌーバ検出・評価技術（パラメータ特性評価、RF評価等）	A	A	A	○	○	○	×	
打上げ支援	打上げ時接近解析	・接近解析 ・スクリーニング解析	軌道予測技術（数値分析、機械学習）	A	A	B		○	○	×	
			接近解析技術	A	A	B		○	○	×	
			軌道予測技術（数値分析、機械学習）	A	A	A	○	○	○	×	
衛星廃棄支援	再突入・軌道離脱解析	・軌道離脱時間予測 ・再突入時間・位置・軌道予測	接近解析技術	A	A	A	○	○	○	×	
			再突入分析技術（振動モデルなど）	A	A	A	○	○	○	○	

※海外との技術差の評価軸
 A: 海外と同程度もしくはそれ以上の技術を有している
 B: 海外より遅れているが、研究開発により追いつくことが可能
 C: 海外より遅れており、研究開発によっても追いつくことが困難
 ※灰色箇所は「評価が困難」と回答されたもの

出所)三菱総合研究所作成

表 2-35 分析技術の海外との技術差に関する主な意見

サービス	機能	α社	β社	γ社
衛星状況・周辺状況把握	宇宙天気情報	✓ 太陽活動観測は同程度の技術を有しているが、太陽高エネルギー粒子観測については米国しか観測技術を有しておらず米国からの情報に依存 ✓ 制御異常の観点では太陽高エネルギー粒子を含めた宇宙天気観測が重要		
	衛星外観観測		✓ ライトカーブ分析について、スペースガードセンターが少し行っているが、スイスなどに比べると遅れている	
	衛星・デブリ位置情報			
	データの品質評価			
	異常運用検知	✓ 軌道状態変化検出はSSAなどで実績があるが、非協力物体の意図認識は研究段階	✓ 軌道の変化結果から意図を認識する技術については、欧米に比べると遅れている ✓ 技術の蓄積、データの蓄積が必要	✓ 意図認識については開発中、実運用にはより多くの教師データが必要
衝突リスク分析	接近解析			
イベント発生対処	衝突回避支援			
	破碎評価	✓ 国内では実用化されていない		
打上げ支援	打上げ時接近解析			
	打上げ後軌道解析			
衛星廃棄支援	再突入・軌道離脱解析	✓ 大気密度とそれによる衛星が受ける抵抗の予測モデルについて、技術はあるが、データ数が少なく実用化ができていない		

出所)三菱総合研究所作成

表 2-36 分析技術の必要性の理由に基づく分類

用途	サービス	機能	技術	必要性の理由		
				安全保障	海外連携	衛星運用・ 打上げ支援
衛星状況・ 周辺状況把握	宇宙天気情報	・定期的な宇宙天気情報の取得 ・通信・制御異常発生時の宇宙天気評	太陽活動観測、分析技術（太陽電波、太陽風観測等） 電離圏観測、分析技術（電波測定等）		○	
	衛星外観観測	・光学的な外観情報の取得	測光技術		○	
	衛星・デブリ位置情報	・衛星・デブリの位置・軌道情報取得	ライトカーブ分析技術	○		
	データの品質評価	・誤差評価	軌道・姿勢パラメータ最適推定技術（カルマンフィルタ等）	○	○	
	異常運用検知	・想定外の軌道変化・異常挙動検知	共分散評価技術		○	
衝突リスク 分析	接近解析	・接近解析 ・接近アラート発出 ・不要なCDMのスクリーニング解析	異常検出技術（数値分析、行動分析）	○	○	
			軌道予測技術（数値分析、機械学習）	○	○	
			非協力物体の動きに対する意図認識技術（ニューラルネットワーク等）	○	○	
			不要アラート削減のための意図認識（ニューラルネットワーク等）	○	○	○
イベント発 生対処	衝突回避支援	・接近回避計画の立案支援 ・マヌーバ評価 ・マヌーバ後軌道情報取得	スクリーニング解析技術	○	○	○
			衝突確率計算技術、衝突リスク評価技術	○	○	
打上げ支援	破砕評価	・衝突発生時の破砕評価	衝突回避計画技術（シミュレーションソフトウェアなど）	○	○	
			マヌーバ検出・評価技術（パラメータ特性評価、RF評価等）	○	○	
			衝突・破砕シミュレーション技術	○		
打上げ後軌道解析	打上げ後軌道解析	・打上げロケットの位置・軌道情報	軌道予測技術（数値分析、機械学習）			○
			接近解析技術			○
衛星廃棄支 援	再突入・軌道離脱解析	・軌道離脱時間予測 ・再突入時間・位置・軌道予測	軌道予測技術（数値分析、機械学習） 接近解析技術			○
衛星廃棄支 援	再突入・軌道離脱解析	・軌道離脱時間予測 ・再突入時間・位置・軌道予測	再突入分析技術（摂動モデルなど）		○	○

出所)三菱総合研究所作成

ア) 海外との技術差

以下に挙げる基本的な SSA の分析技術については、海外と同程度の技術を有していると評価された。また、各種解析技術については、実際に海外における合同演習などでも十分な技術を保有していると評価されているとのことであった。

- 宇宙天気情報に関する技術
- 衛星・デブリ位置情報把握のための技術
- データ品質評価のための技術
- 接近解析のための技術
- 衝突回避支援のための技術
- 打上げ後軌道解析のための技術
- 再突入・軌道離脱解析のための技術

一方で、観測結果や軌道予測結果からその行動の意図を認識する技術については、研究開発途上であり、欧米に比べると技術が遅れていると評価された。特に遅れている要因の一つとして、意図認識の精度を上げるためには一定量の学習用データが必要なのに対して、現状はデータの蓄積が十分でないといったことが意見として挙げられた。

イ) 保有しておくべき技術

衛星状況・周辺状況把握のための技術、衝突リスク分析のための技術、衝突回避のための技術、衛星廃棄支援のための技術について、特に必要性が高いと評価された。

また保有の必要性の理由については、安全保障、海外連携、衛星運用・打上げ支援のそれぞれにおいて以下のような技術が該当している。

- 安全保障目的で必要な技術

衛星・デブリ位置情報、接近解析、衝突回避支援に関する技術の他に、ライトカーブ分析や非協力物体の動きに対する意図分析、衝突時の破砕評価など、他国の衛星等による異常運用監視・発見につながる技術

- 海外連携目的に必要な技術

衛星・デブリ位置情報、接近解析、衝突回避支援に関する技術の他に、国際連携での観測が進められている宇宙天気情報、海外とのデータ連携の観点で必要なデータ品質評価、国際的な責任を果たすために必要な再突入・軌道離脱解析のための技術

- 衛星運用・打上げ支援目的に必要な技術

衛星の運用開始・廃棄のために必要な打上げ時接近解析、打上げ後軌道解析、再突入・軌道離脱解析技術、及び不必要な回避行動を削減し衛星寿命延長につなげることができる不要アラート削減のための意図認識技術、スクリーニング解析技術

c. 今後研究開発が必要と想定される技術

主に海外との技術差が存在する、かつ必要性が高いと評価された技術を中心に、今後研究開発が必要と想定される技術について、観測技術・分析技術それぞれで整理した。

ア) 観測技術における研究開発が必要と想定される技術

① 光学観測技術

光学センサーにおける画像処理・ターゲット認識技術について、基本的な技術については海外との技術差がないと評価される一方で、検出能力のさらなる向上が必要である。また、画像処理 AI など高度な分析技術の研究開発が遅れているといった意見も挙げられており、今後求められる精度のニーズに基づき追加的な研究開発が必要になると想定される。

光学センサーによる日中観測技術については、現状では欧米よりも技術面・実績面で遅れがあり、研究開発の必要性があるとされた。

衛星による光学観測技術について、観測技術や衛星制御技術など個別技術の研究開発は進んでおり、海外と同程度の技術を有していると評価されている。また、Axelspace による Northstar への観測データの提供もある。さらに SDA 衛星の開発計画も進んでおり、研究開発という観点での課題は少ないと想定される。

② 光学観測以外の観測技術

フェーズドアレイレーダー、RF センサー、レーザー、スタートラッカー等の光学センサー以外の観測技術について、海外よりも技術面・実績面で遅れているが、いずれも国内での研究開発がある程度進展しており、追いつくことが十分に可能であると評価されている。一方で、これらの観測技術のいずれに注力すべきかについては、防衛省や政府機関、民間衛星・打上げ事業者のニーズを踏まえて分析・検討される必要がある。

イ) 分析技術における研究開発が必要と想定される技術

① 国家安全保障のために研究開発が必要と想定される技術

非協力物体の挙動の意図を認識・判断する技術については、安全保障の観点で必要性が高

いと評価された一方で、現状は欧米に比べると技術が遅れていると評価されている。研究開発が遅れている理由として、市場がないためにインテリジェンス領域の研究開発が進んでいない、教師データとなる観測・分析結果が少ない、実績がないといった理由が挙げられている。

② 国際競争力向上のために研究開発が必要と想定される技術

軌道予測、接近解析、再突入予測などに影響を及ぼす大気密度の予測モデルについて、衛星搭載の GPS 情報を活用する方法が提唱され、これまでの研究開発により技術的な実現性の確認までは行われている。一方で、衛星の GPS 情報を基に解析を行うことから、以前はデータを入手可能な衛星の少なさにより実用化に至っていなかった。現在は衛星数が増加していることもあり、衛星の情報を入手しやすいスキームが整備されれば、当該技術の実用化につながり、軌道予測、接近解析、再突入予測など各種衛星挙動に関する解析精度向上につながると想定される。

3) TraCCS におけるサービスと技術評価結果の比較

前述のように、米国の TraCCS では、政府機関向け・民間事業者向けに網羅的にサービスの提供が検討されている。そのため、将来の日本の SSA システムにおけるサービスを検討するうえでのベンチマークとして、TraCCS の Basic サービス、Advanced サービスをベースに技術評価結果との比較を行った。

TraCCS の Basic サービス、Advanced サービスにおいて、各サービスを構築するうえで必要と想定される技術と、各技術のアンケート・ヒアリングに基づく評価結果とを対比させた結果をそれぞれ表 2-37、表 2-38 に示す。Basic サービスを展開するうえで必要と想定される技術については、アンケート・ヒアリングにおいて海外よりも日本が遅れていると評価された技術は含まれておらず、仮に TraCCS の Basic サービスを我が国でも提供する場合、技術的な研究開発要素は少ないと想定される。一方、Advanced サービスを展開するうえで必要と想定される技術については、異常挙動検知のための意図認識技術が海外よりも遅れていると評価されており、該当する「マヌーバ検出・処理」のサービスを構築するためには、追加の研究開発が必要と想定される。

また、必要性の高い技術についての比較結果より、TraCCS サービスで必要となる技術は、ごく一部（打上げ接近評価、破碎評価）を除き必要性が高いと評価されている。このことから、必要性が高い技術については、日米での認識のずれはあまりないと考えられる。

表 2-37 TraCCS Basic サービスと評価結果の比較

サービス	機能	技術	アンケート・ヒアリングでの評価結果		
			海外と同程度の技術	海外よりも遅れている技術	必要性の高い技術
衛星の属性、能力、ステータス、連絡先	✓ データ収集・データベース化	—			
所有者・運用者のエフェメリス予測の受領・共有	✓ データ収集・データベース化	—			
日常的な衝突評価スクリーニングとCDMの生成	✓ 接近解析 ✓ 不要なCDMのスクリーニング解析 ✓ 接近アラート発出(衝突リスク分析)	✓ 軌道予測技術(数値分析、機械学習)	○		○
		✓ 接近解析技術	○		○
		✓ 不要アラート削減のための意図認識(ニューラルネットワーク等) ✓ スクリーニング解析技術	○		○
特別な衝突評価スクリーニングとCDMの生成	✓ 接近解析 ✓ 不要なCDMのスクリーニング解析 ✓ 接近アラート発出	✓ 軌道予測技術(数値分析、機械学習)	○		○
		✓ 接近解析技術	○		○
		✓ 不要アラート削減のための意図認識(ニューラルネットワーク等) ✓ スクリーニング解析技術	○		○
データの品質評価	✓ 誤差分析	✓ 共分散評価技術	○		○
打上げ接近評価スクリーニング	✓ 接近解析 ✓ スクリーニング解析	✓ 軌道予測技術(数値分析、機械学習)	○		
		✓ 接近解析技術	○		
所有者・運用者のエフェメリスの生成及び共分散とのキュレーション	✓ 衛星・デブリの位置・軌道情報取得	✓ 軌道・姿勢パラメータ最適推定技術(カルマンフィルタ等)	○		○
再突入の管理・評価	✓ 軌道離脱時間予測 ✓ 再突入時間・位置・軌道予測	✓ 再突入分析技術(摂動モデルなど)	○		○
精密な衝突確率の計算	✓ 衝突確率計算	✓ 衝突確率計算技術、衝突リスク評価技術	○		○
衝突の影響やデブリ発生のパテンシャル評価	✓ 破砕評価	✓ 衝突・破砕シミュレーション技術			
追加の追跡による接近物体ソリューションの向上	✓ 追加追跡・観測	※追加的な観測			
予測される追跡の決定	✓ 追加追跡・観測	※追加的な観測のための情報提供			
リスク評価の時間履歴プロット	✓ 時間履歴プロット作成	※視覚的な情報提供支援			
宇宙天気情報提供	✓ 定常的な宇宙天気情報の取得 ✓ 通信・制御異常発生時の宇宙天気評価	✓ 太陽活動観測、分析技術(太陽電波、太陽風観測等)	○		○
		✓ 電離圏観測、分析技術(電波測定等)	○		○

出所)三菱総合研究所作成

表 2-38 TraCCS Advanced サービスと評価結果の比較

サービス	機能	技術	ヒアリングでの評価結果		
			海外と同程度の技術	海外よりも遅れている技術	必要性の高い技術
衝突評価製品の融合	✓ 複数の予測結果の融合	※評価結果の融合による高信頼化			
衝突確率の変動性	✓ 衝突確率の変動評価	✓ 共分散評価技術	○		○
追加のコンシェルジュサービス	—	※コンサルティング支援			
異常解決	✓ 外観情報の取得	✓ 測光観測技術	○		○
		✓ ライトカーブ分析技術			○
衝突回避改善のための設計時における支援	—	※設計・運用支援			
マナーバのトレードスペース	✓ マナーバトレードスペースプロットの作成	※視覚的な情報提供支援			
最適なマナーバの推奨	✓ マナーバ評価	✓ 衝突回避計画技術(シミュレーションソフトウェアなど)	○		○
		✓ 軌道・姿勢パラメータ最適推定技術(カルマンフィルタ等)	○		○
衛星の破砕の検出・追跡・カタログ化	✓ 衛星の破砕検出 ✓ 衛星・デブリの位置・軌道情報取得	✓ 異常検出技術(数値分析、行動分析)			○
マナーバの検出・処理	✓ 想定外の軌道変化・異常挙動検知	✓ 異常検出技術(数値分析、行動分析)			○
		✓ 非協力物体の動きに対する意図認識技術(ニューラルネットワーク等)		○	○

出所)三菱総合研究所作成

2.4.2 将来の日本が目指すべき SSA システムの方向性

ヒアリングでは、将来の SSA システムの方向性についても意見を聴取した。ヒアリングで得られた SSA システムに対する意見を、官民連携の在り方、民間 SSA サービスの在り方、政府からの支援の 3 つの項目で整理した結果を表 2-39 に示す。

表 2-39 将来の SSA システムについてのヒアリングでの意見

	α社	β社	γ社
官民連携の在り方	<ul style="list-style-type: none"> ✓ 安全保障に関連する部分をすべて民間で行うのは困難。SDAの機能は防衛省が担い、民間向けに行っているサービスは今後民間事業者が行っていく形もあるのではないかと。 	<ul style="list-style-type: none"> ✓ 政府機関が無償サービスを提供し続け、付加的なサービスについて有償で民間から提供される形になるのではないかと。 ✓ 米国と同様に、ユニークなサービスについては、政府機関による民間サービスの購入も想定される。 	<ul style="list-style-type: none"> ✓ 官民連携でSSAインフラを整備する形が望ましい。 ✓ データのバリエーションは精度を高めるために必要。国が保有しているデータを共有し、民間データとの組み合わせを可能とすることは民間衛星事業者にとってプラスとなる。衛星の回避行動を減らし衛星寿命を延ばすためにも精度向上は重要。
民間SSAサービスの在り方	<ul style="list-style-type: none"> ✓ 米国の先行している民間事業者を超えるのは簡単ではない。政府機関向けのサービスも必要である。 ✓ 米国からの無償のデータがあれば国内民間事業者からのデータは不要という意見もある。短期間での民間の自立したサービス形成は困難ではないかと。 ✓ 国内外の観測データを購入・統合し、カタログサービスを展開することも考えられる。 	<ul style="list-style-type: none"> ✓ 政府機関が必要とする高度なサービスを提供できる事業者については、政府機関への有償サービスを提供する可能性があるのではないかと。 	<ul style="list-style-type: none"> ✓ 単独で自立したSSA事業者の出現には時間を要するのではないかと。
政府からの支援	<ul style="list-style-type: none"> ✓ アンカーテナンシーとしての役割が必要。 ✓ 国が保有するデータを提供してもらうスキームがあることが望ましい。 		<ul style="list-style-type: none"> ✓ 民間事業者のビジネスを成立させるためにアンカーテナンシーが重要。

出所)三菱総合研究所作成

ヒアリングにて得られた意見を基に、政府機関、国内 SSA 事業者それぞれの役割、及び官民連携の在り方について、以下に整理する。

- 政府機関
 - 安全保障に関する部分については、将来的にも防衛省の SSA システムが担い続けると想定される。
 - 民間の衛星・打上げ事業者への情報提供については防衛省が無償提供を継続する、もしくは民間事業者向けサービスは切り分けて国内 SSA 事業者が行う、の 2 つのパターンが想定される。
- 国内 SSA 事業者
 - 政府機関が担うことができない、あるいは担うことが難しい民間事業者のニーズへのきめ細かな対応や高度なサービスを提供する立場が想定される。
 - 米国の無償データや先行する海外 SSA 事業者のサービスがある中で、民間事業者向けだけに絞ったサービスを展開することは難しい。政府機関向けの有償サービス提供も考慮すべきである。
- 官民連携の在り方
 - 現状、国内 SSA 事業者が単独でサービスを展開することは市場・マネタイズの観点から難しく、政府によるアンカーテナンシーが必要である。
 - 国内衛星事業者向けのデータの精度向上を目的として、政府機関が保有するデータを共有し、民間データとの統合を可能とすることが期待される。

2.5 日本として必要な取組み

チョークポイント技術の整理結果等を踏まえ、今後必要になると想定される取組みについて、以下に整理する。

研究開発を推進すべき技術として、大きく以下の2つの観点が挙げられる。

- 現時点で海外より技術的に優位であり、国際競争力の源泉となりえる技術
- 海外よりも遅れているが、必要性の高い技術

チョークポイント技術整理及びヒアリングの結果から、SSA システムに必要となる基盤的な技術については、いずれの技術についても海外と同程度もしくは研究開発により海外に追いつくことが可能なレベルであると評価された。そのため、今後特に国内における研究開発に取り組むべき技術としては、国内の SSA システムを構築するうえで必要性が高い、かつ海外よりも遅れているが研究開発により追いつくことが可能な技術が対象と考えられる。

安全保障の観点で必要性が高い、かつ海外よりも研究開発が遅れていると評価された技術としては非協力物体の挙動の意図の認識・判断する技術が挙げられた。特に AI 等を活用したインテリジェンス領域での研究開発への遅れについてヒアリングで指摘されており、市場がなく民間主体での研究開発に限界がある現状においては、国による研究開発の支援が必要と想定される。

海外との連携を強化するためには、日本による観測データの拡充が重要と想定される。観測データ量を増やす観点においては、既存の観測網を強化する方法として、光学センサーにおける日中観測のための画像処理技術の研究開発などが想定される。新規の観測手段を獲得する方法としては、天文望遠鏡の活用や、スタートラッカー、衛星による観測、レーザー、RF センサーといった新たな観測技術の研究開発が挙げられる。これら技術については、海外との連携において欧米などからのニーズが高い、日本及び同経度上空の物体観測精度向上につながると期待できる。

衛星運用・打上げの支援の観点では、衛星搭載 GPS の活用による大気密度モデルの高度化・精緻化技術が挙げられる。GPS 搭載衛星が軌道上に増加している状況もあり、当該データを共有できる仕組みを構築できれば、そのデータ群を解析することで軌道上物体についての高精度な位置決定を行うことが可能となる。本技術は発展すると国際競争力の源泉になることも期待できる技術である。

3. 宇宙太陽光・無線エネルギー伝送技術に関する調査・検討

宇宙太陽光発電に関する各国の直近の開発状況、マイクロ波からミリ波を中心とした無線給電技術に関する市場動向、技術動向、政策動向等について調査するとともに、宇宙太陽光発電の経済性について評価を行った。これらを踏まえ、我が国の宇宙太陽光発電や無線給電技術に関する研究開発や産業振興における課題や必要な取組について検討を行った。

3.1 各国の宇宙太陽光発電システム(SSPS)に関する調査

本節では、米国、欧州、中国、その他を対象地域として、近年の宇宙太陽光発電システムの実現に向けた研究開発や FS (Feasibility Study) について調査を行った。以下では諸外国における近年の SSPS の実現に向けた研究開発動向について国ごとに整理している。

なお、宇宙太陽光発電システム(SSPS:Space Solar Power Systems)の呼称については、研究実施機関ごとにシステムの呼称が異なっているものの、ここ数年は欧米の多くの機関で SBSP (Space-Based Solar Power)の略称が用いられてきている。本報告書では、実施機関ごとに通常用いられている略称を使用することとするが、特に定まっていない一般的な宇宙太陽光発電システムを指す場合は SSPS という略称を用いることとする。

3.1.1 米国

米国では、現在の SBSP 研究開発の主流は米空軍研究所(AFRL)と米海軍研究所(NRL)であるが、教育機関としてはカリフォルニア工科大学(Caltech)も多額の寄付を受けて、個別にプロジェクトを実施中である。また、近年は 20 年近くにわたりスタディを中断していた NASA による再評価検討も行われている。以下に、米国の各機関の近年の SBSP 関連動向を示す。

(1) NASA のフィージビリティスタディ

米国では、1970 年代の終わりに実施された米国エネルギー省(DOE:Department of Energy) / NASA との共同研究である「SATELLITE POWER SYSTEM(SPS) CONCEPT DEVELOPMENT AND EVALUATION PROGRAM PLAN」から 20 年ほどの休止期間の後、1995 年に実施された NASA の「Fresh Look Study」により SSPS の検討が復活した。その後「SSP Concept Definition Study」、「SSP Exploratory Research & Technology Program」、「SSP Concept & Technology Maturation Program」が実施されたが、2003 年頃からは明確な SSPS 関連予算の拠出は見られず¹⁶、2022 年に至るまで NASA における SSPS 研究は事実上ストップした状況になっていた。

その後 2022 年から、NASA の技術・政策・戦略室(OTPS:NASA's Office of Technology, Policy and Strategy)は、政策アナリストである Nikolai Joseph 氏が中心となり

¹⁶ 2011-12 年に John Mankins 氏(NASA で SSPS 研究の指揮を執っていたが、民間企業に移籍)の SPS-ALPHA のコンセプト研究が NASA の NIAC 研究(NASA Innovative Advanced Concepts)のテーマの一つに採択されている。

“EVALUATING PROSPECTS FOR SPACE-BASED SOLAR POWER” というタイトルのスタディを開始した¹⁷。温室効果ガス排出 Net Zero を達成するための SBSP の費用便益分析を行うこと、および便益がコストを上回ると評価された場合は、NASA がどの程度 SBSP の開発を支援すべきかについて検討を行うことがスタディの目的とされた。SBSP の新しいアーキテクチャを検討するのではなく、打上げコストの低減、技術(熱システム、エレクトロニクス、材料、太陽電池パネルなどの分野)の進歩、クリーンなエネルギー源への関心の高まりを背景として、宇宙で太陽エネルギーを収集し、それを電気からマイクロ波に変換し、地上に送信するための過去の概念を再検討することで、最新のシステムについて、地上の発電システムとの比較を行い、それらが直面する政策や実施上の課題を評価する予定でスタディは行われたが、Joseph 氏は、仮に SBSP が実現不可能であると結論づけたとしても、本スタディは有意義なものになる可能性があるということにも言及していた。

スタディ結果の報告は、当初の計画より遅延し、2024 年 1 月に”Space-Based Solar Power ” という題名の報告書として公表された¹⁸。本報告書の要点を以下に示す。

報告書では、2050 年に運用開始が可能である 2 つの SBSP アーキテクチャ(RD1:革新的なヘリオスタット群型、RD2:技術的に成熟した平面アレイ型)について(図 3-1 参照)、以下のシナリオに基づいてそれぞれライフサイクルコストと温室効果ガス排出削減の可能性が検討されている。

<SBSP のライフサイクルシナリオ>

- ・ SBSP システムは、2030 年代に地上で開発され、2040 年代に GEO で組立てられる。
- ・ SBSP システムは GEO で運用される。地上の 1 つまたは複数のステーションにエネルギーを送信する。
- ・ 新しい宇宙機モジュールの開発、打上げ、組立てを伴うメンテナンスは 2060 年から 2080 年にかけて行われる。
- ・ SBSP システム廃棄作業は、デブリ除去宇宙機の開発、それらの GEO への打上げ、宇宙機モジュールの墓場軌道への移動を行う作業であるが、2060 年から 2085 年の間に行われる。

以上のシナリオに基づき、2050 年から 2GW の電力を電力グリッドに供給する SBSP システムについて、NASA では SBSP の開発、組立、運用、保守および廃棄の全ライフサイクルにわたるすべてのコストと温室効果ガス排出量を計算するモデルを開発した。計算の結果、ライフサイクルコストについては以下の値が示された。計算に用いた主要入力パラメータ値は図 3-2 に示す。

<ライフサイクルコスト分析の結果>

- ・ ベースライン分析では、RD1 のライフサイクルコストは 0.61\$/kWh、RD2 は 1.59\$/kWh となった。

¹⁷ <https://www.ag2link.com/wp-content/uploads/2023/05/annual-report.pdf> (2023 年 9 月 11 日最終閲覧)

¹⁸ <https://www.nasa.gov/organizations/otps/space-based-solar-power-report/> (2024 年 1 月 19 日最終閲覧)

- 打上げ費用が最大のコスト要因となっている(RD1 の 71%、RD2 の 77%)。これらの打上げの大部分は、GEO に移送するために LEO にあるペイロードに燃料を補給するためのものである。
- 製造は 2 番目に大きなコスト要因であり(RD1 で 22%、RD2 で 18%)、初期の宇宙機ハードウェア開発と製造が含まれる。ラーニングカーブにより RD1 では 150 万個、RD2 では 200 万個の宇宙機モジュールを製造することでコストは減少する。
- 2050 年の地上の他の持続可能な解決策(再生可能エネルギー発電システム)の発電コストの予測値は 0.02~0.05\$/kWh 程度であるため、それらと比べると RD1 均等化発電原価(LCOE:Levelised Cost of Electricity)と RD2 LCOE は、それぞれ 12~31 倍、32~80 倍高い結果となっている。
- ・ 感度分析により、入力パラメータを変化させ、RD1 と RD2 がどのような条件でコスト競争力を持つかの評価を行った。具体的には、打上げコスト、初号機製造コスト、ラーニングカーブ、ハードウェア寿命、太陽電池効率、軌道移送方法のパラメータを 1 つずつ変化させ、コストに与える影響の把握を行った。
 - 打上げコストの低減あるいは LEO から GEO への軌道移送に電気推進を使用することで LCOE はそれぞれ最も大幅に低下した。RD1 では約 0.20\$/kWh、RD2 では約 0.50\$/kWh となった。コスト競争力という点では、まだ不十分である。
 - 複数のパラメータを同時に変化させることで、コスト競争力を持たせることができる。この有利な組み合わせにより、LCOE は RD1 で 0.03\$/kWh、RD2 で 0.08\$/kWh となる。この数値は、地上の他の代替エネルギーと競合可能な数値である。

<ライフサイクル温室効果ガス排出原単位の分析結果>

- ・ RD1 のライフサイクル温室効果ガス排出原単位は 26gCO₂eq./kWh、RD2 は 40gCO₂eq./kWh となった。
 - これらは地上の再生可能エネルギー発電技術の排出原単位の範囲内(13~43g CO₂eq./kWh)の数値となっている。
- ・ 上述の複数のパラメータを同時に変化させ、コスト競争力を持たせた前提条件における温室効果ガス排出原単位は、RD1 では 3.78gCO₂eq./kWh、RD2 では 4.33gCO₂eq./kWh)となり、原子力や風力発電を下回る。

以上より、以下の条件が達成できるのであれば、温室効果ガス排出量が少なく、コスト競争力のある SBSP ソリューションが得られることが分かった。

<温室効果ガス排出量が少なく、コスト競争力のある SBSP の条件>

- 打上げコストの低減:1 回当たり 5,000 万ドル、または 1kg 当たり 500 ドル
- 電気推進による LEO から GEO への軌道移動

- ハードウェア寿命の延長:15 年
- より安価なサービサーとデブリ除去機: それぞれ 1 億ドルと 5,000 万ドル
- 規模に応じた効率的な製造:85%以下のラーニングカーブ

本スタディでは、SBSP を可能にする技術は、月面での電力供給、科学や有人探査のための自律的な運用、軽量材料など、将来の NASA ミッションのニーズに幅広く適用可能であることも示している。NASAは現在、これらの各分野の研究開発活動に資金を提供しており、宇宙でのサービス、組立、製造には2022 年度に 2 億 8,000 万ドル、自律性には 2022 年度に 2 億 4,400 万ドルの資金が投入されている。一方、無線電力伝送への資金提供は現在、コンセプト・スタディ(100 万ドル未満)に限られている。

NASA の今後の選択肢としては、以下の 2 種類が考えられる。一つは、NASA は現行 SBSP のほぼすべての基礎技術に取り組んでいるため、今後 SBSP を予算の別項目として出さずに、NASA の現行あるいは計画されているミッションのニーズのみに焦点を当てていくことで開発していくことである。もう一つは、SBSP を推進するためのパートナーシップの機会を追求することである。自律運用から無線電力伝送に至るまで、SBSP に必要な技術は NASA のミッション以外にも多くのユースケースを有しており、多くの用途について官民によって追求されている。そのため、外部(米国および国際的なパートナー)の SBSP 開発との協調を強化することで、相互に有益な見返りを期待することが可能である。

また NASA が今後どのような選択肢をとろうとも、厳密なライフサイクルコストと温暖化ガス排出量評価を行い、最先端の SBSP システムを研究すること、および NASA のミッションアプリケーション、特に月面エネルギーインフラなどのための SBSP 技術の技術的な設計トレード評価を実施することの必要性が示されている。さらに今後も NASA は世界の SBSP 開発の定期的なレビューを行い、NASA の基幹ミッションの実現をする可能性のある SBSP 設計の重点的な分析を行っていくことが推奨されている。

なお、John Mankins 氏を始めとする SSPS の研究者や全米宇宙協会(NSS:National Space Society)は、本報告書のコスト評価に使用された仮定について批判をしている。特に、ベースライン分析の打上げコストとして想定された「1,000 ドル/kg、さらに 15%のブロック買い割引」と GEO までの SBSP の輸送の方法について懐疑的であり、SBSP 技術に関する最近の研究があまり取り入れられていないとの主張をしている¹⁹。

¹⁹ <https://spacenews.com/nasa-report-offers-pessimistic-take-on-space-based-solar-power/> (2024 年 2 月 2 日最終閲覧)

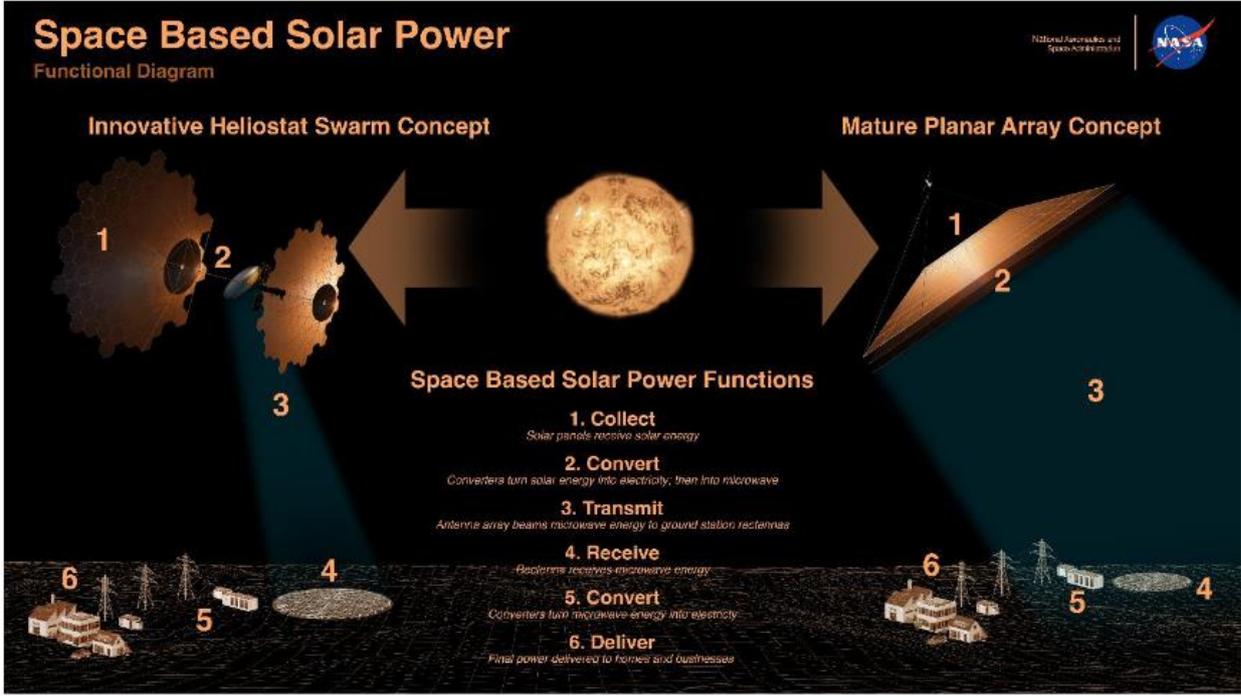


図 3-1 NASA スタディにおける SBSP のリファレンスデザイン(左:RD1、右:RD2)
出所)“ Space-Based Solar Power”, NASA OTPS, Report ID 20230018600, Jan 2024

	Baseline	Multi-Variable Sensitivity
Launch Cost (+15% block buy discount)	 \$1,000/kg (\$850/kg)	 \$500/kg (\$425/kg)
Orbital Transfer Method	 12 refuel launches	 Electric Propulsion (+17.2% mass, mfg cost)
Reuses of each launch vehicle	 100	 100
Solar Cell Efficiency	 35%	 50%
Operations Costs	 1.2M / month	 1.2M / month
Hardware Lifetime	 10 years	 15 years
Initial Hardware Costs (Module, Servicer, Debris)	 1 M  1 B  500 M	 1M, 100M, 50M
Manufacturing Learning Curves (Module, Servicer, Debris)	 75%  85%  90%	 70%, 80%,  85%
Results		
LCOE \$/kWh Renewables studied: .02 - .05	0.61 and 1.59	0.04 and 0.08
Emissions (gCO ₂ eq./kWh) Renewables studied: 8 - 43	26 and 40	3 and 4

※上向き緑の三角形は、現在までに達成された以上の性能を想定したもの

黄色のバーは現在達成可能なもの、

下向き赤い三角形は、現在の能力を下回るものである(これらは、SBSP システムの研究が世界初であることを考慮した仮定である)

図 3-2 ベースライン分析と複数の変数の感度分析のための主要入力パラメータ
出所) “Space-Based Solar Power”, NASA OTPS, Report ID 20230018600, Jan 2024

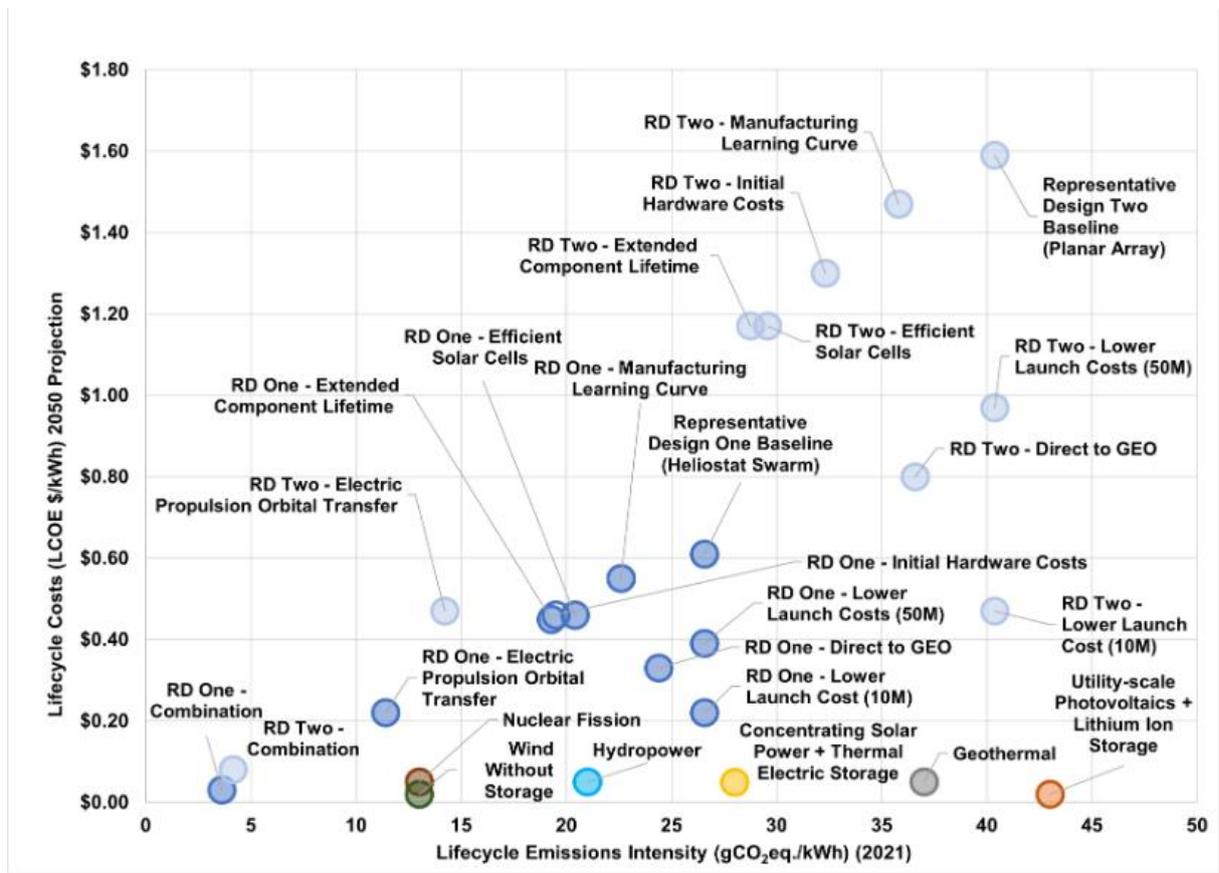


図 3-3 SBSP システムのライフサイクルコストと温暖化ガス排出削減効果の感度分析結果
出所) “Space-Based Solar Power”, NASA OTPS, Report ID 20230018600, Jan 2024

(2) 米海軍研究所(NRL)の X-37B および ISS 上による軌道上実証

NASA による SSPS 研究開発が 2000 年代前半以降に停滞し、近年の米国の SSPS 研究開発の中心は米空軍研究所(AFRL:USAF Air Force Research Laboratory)と米海軍研究所(NRL: U.S. Naval Research Laboratory)となっている。2007 年 10 月、国家宇宙安全保障局(NSSO: National Security Space Office)が SBSP フィージビリティスタディの中間評価レポート「Space-Based Solar Power As an Opportunity for Strategic Security」を公表して以降、Paul Jaffe 氏を代表とする NRL の研究者たちが本分野の調査や無線電力伝送に関わる要素試作試験等を実施してきている。

2020 年 5 月、NRL は PRAM-FX(Photovoltaic Radio-frequency Antenna Module Flight Experiment)(図 3-4)と呼ばれる約 30cm 四方のモジュールを試作し、空軍の X-37B 軌道試験機(OTV)に搭載して打上げ、軌道上実証試験を実施、軌道上飛行試験のデータを取得した。ただし本実験においては、モジュールのエネルギー生成効率と温度特性のデータ取得が目的であるため、マイクロ波送電実験は行っていない。なお同ミッションは X-37B の 6 度目のミッション(OTV-6)であり、PRAM-FX を搭載した X-37B は、2022 年 11 月に 908 日間の飛行を終えてケネディ宇宙センターに帰還している²⁰。

²⁰ <https://www.spaceforce.mil/News/Article/3217077/x-37b-orbital-test-vehicle-concludes-sixth-successful-mission/> (2022 年 12 月 9 日閲覧)

NRL はまた、DoD の STP (Space Test Program) の H9 ミッションの一環として、2023 年 3 月に SWELL (Space Wireless Energy Laser Link) と呼ばれるレーザー電力ビーム実験ペイロード(図 3-5)を ISS に打上げた。SWELL は、2023 年 6 月 29 日時点で 100 日間の稼働記録を達成しているが、NRL は本実験を「宇宙でのレーザー電力ビーム実験の初の成功例」としている。SWELL は、1.45m の距離のレーザー電力伝送を行い、レーザー受信機より約 1.5W の出力を得ることに成功している。レーザー電力伝送のエンドツーエンドの効率としては、約 11% を達成し、当初の効率目標を 10 倍以上上回ったとしている。SWELL のプロジェクトマネージャーは Chris DePuma 氏であるが、上述の Paul Jeff 氏も本研究を主導する立場となっている。本実験は 1 年間の継続が予定されており、調達および維持担当国防次官室(OUSD (A&S): Office of the Under Secretary of Defense for Acquisition and Sustainment)が資金を提供し、運用エネルギー性能向上基金(OECIF: Operational Energy Capability Improvement Fund)が支援を行っている²¹。

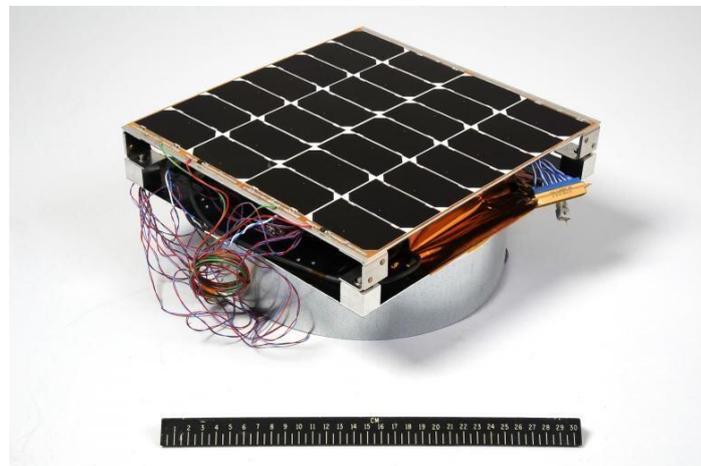


図 3-4 NRL の PRAM-FX 装置

出所) <https://www.cbc.ca/radio/quirks/a-secret-military-space-plane-is-carrying-an-experiment-to-harvest-power-from-space-1.5590837> (2024 年 2 月 2 日最終閲覧)



図 3-5 NRL の SWELL 装置

出所) <https://www.nrl.navy.mil/Media/News/Article/3328656/nrl-to-launch-first-in-space-laser-power-beaming-experiment/> (2023 年 9 月 14 日最終閲覧)

²¹ <https://www.navy.mil/Press-Office/News-Stories/Article/3457305/first-in-space-laser-power-beaming-experiment-surpasses-100-days-of-successful/> (2023 年 9 月 14 日最終閲覧)

(3) 米空軍研究所(AFRL)の SSPIDR

2019 年夏に、AFRL の Space Vehicles Directorate において SSPIDR(Space Solar Power Incremental Demonstrations and Research)プロジェクトが始動した。世界中の遠征部隊に低コストおよび低リスクで常に安定したロジスティックに優れた電力を供給するために、革新的な SSPS 技術とハードウェアを開発することを目的とする。本プロジェクトは SSPS のプロトタイプに必要な要素技術を段階的に開発するプロジェクトであり、現在、地上実験を含む 3 つの実験を計画し一部遂行中である。中でも図 3-6 に示す「Arachne」と呼ばれる軌道上実証実験は革新的なサンドイッチ・タイルを使用して、太陽エネルギーを高周波(RF)電力に変換する新たな技術を実証するとともに、そのエネルギーを地上に伝送して使用可能な電力に変換する可能性を示すもので、2025 年に打上げ予定となっている。バスとなる Helios ESPA リングとペイロードとなる SSPRITE(Space Solar Power RF Integrated Tile Experiment)を Northrop Grumman 社が製造しており、その契約金額は 1 億ドル以上となっている。2021 年 12 月には、AFRL と Northrop Grumman 社とで、サンドイッチ・タイルによる太陽光(ソーラーシミュレータ)から RF エネルギー変換を行う地上実験に成功している。

これらの米軍関係の機関で取組まれている SSPS は、軍のロジスティクスの課題に対応することが主目的となっており、電力インフラがない(もしくは破壊された)戦場の部隊に対して必要なときにいつでも電力を供給することを想定している。一方で商業的に非常に価値のある資産となる可能性や気候変動に対処するための新たな解決策になる可能性についても言及されており、さらにはシスルナ空間を移動する衛星への電力供給や、要素技術の民生への展開も視野に入れるところとなっている。



図 3-6 軌道上での Arachne の実験イメージ(Credit : AFRL)

出所)<https://afresearchlab.com/technology/arachne/> (2024年1月16日最終閲覧)

(4) カリフォルニア工科大学(Caltech)の実証衛星打上げ

カリフォルニア工科大学(Caltech: California Institute of Technology)は 2013 年に Donarld Bren 氏による 1 億ドルの寄付を受けて SSPS 関連の研究開発を本格的に開始した(寄付の内容(人名、金額)は当初は秘匿されていた。)。2015 年には Northrop Grumman 社から 3 年間で 1750 万ドルの受託研究契約を締結し、50 名以上のチームを組み、両機関による Space Solar Power Initiative(SSPI)を開始した。

2017 年からは超軽量・高効率の太陽電池と RF 送信機を統合させたモジュールや折り畳み可能な

柔軟超軽量構造体のプロトタイプを試作試験を行い、軌道上実証機 SSPD(Space-based Solar Power Demonstrator)の開発を行ってきた。約 35 名のチームによって構想から設計、製造、テストまでが実施されている。研究代表者は 3 名の教授(Professor Harry Atwater, Professor Ali Hajimiri, Professor Sergio Pellegrino)が務めている。

当初は SSPD-1 は VIGORIDE 軌道上サービス機(Momentus 社製)に結合され、2021 年 12 月に上げられる予定となっていたが、VIGORIDE の製造の遅延等によりスケジュールが遅れ、実際には 2023 年 1 月、Falcon 9 による打上げ(Transporter-6)で軌道に投入されている²²。

具体的には、SSPD-1 は 3 つの主要な重要要素技術の試験(DOLCE、ALBA、MAPLE)を行うことを目的とする質量 42.5kg の実証機である。(図 3-7 参照)VIGORIDE に結合され、所定の軌道まで輸送されたが、3 つの構成要素の概要は以下のようになっている。

<SSPD の 3 つの主要な構成要素>

- DOLCE (Deployable on-Orbit ultraLight Composite Experiment):1720mm×1720mm×34mm、質量 300g の構造体。モジュール式宇宙機のアーキテクチャ、収納方式、展開機構等の実証を行う。
- ALBA:宇宙という過酷な環境下においての最適な効率と耐久性の高い太陽電池の種類を評価できるように 32 種類の異なる太陽電池(PV)セルを集めたもの。初期の機能検証から異なる環境下での性能の経時的評価まで一連の実験が行われる。最長 6 カ月の実験が計画されている。
- MAPLE (Microwave Array for Power-transfer Low-orbit Experiment):マイクロ波送信を行う柔軟軽量アレイ。精密なタイミング制御により、2 つの異なる受信機に選択的に電力を集中させ、宇宙空間における無線電力伝送を実証する。

上述したように、SSPD 実証機の打上げは 2023 年 1 月であったが、同年 6 月には実験の成果が公表された。実験では、上記の MAPLE で、マイクロ波送信アレイから約 1 フィート(約 30cm)の距離にある 2 つの独立した受信アレイでエネルギーを受信し、直流(DC)電力に変換して、それを使って 1 対の LED を点灯させた(図 3-8 参照)。さらに MAPLE では、地上に向けてマイクロ波信号を送信する実験も行われ、カリフォルニア工科大学のパサデナ・キャンパス内の建物の屋上にある受信機でその信号の受信にも成功した。なお MAPLE の装置は密閉環境にはないため、今回の実験により、極端な温度変化やその他の厳しい宇宙環境下でも、マイクロ波による無線送電が可能であることの実証もなされたことが示されている。

²² <https://www.caltech.edu/about/news/caltech-to-launch-space-solar-power-technology-demo-into-orbit-in-january> (2024年1月16日最終閲覧)

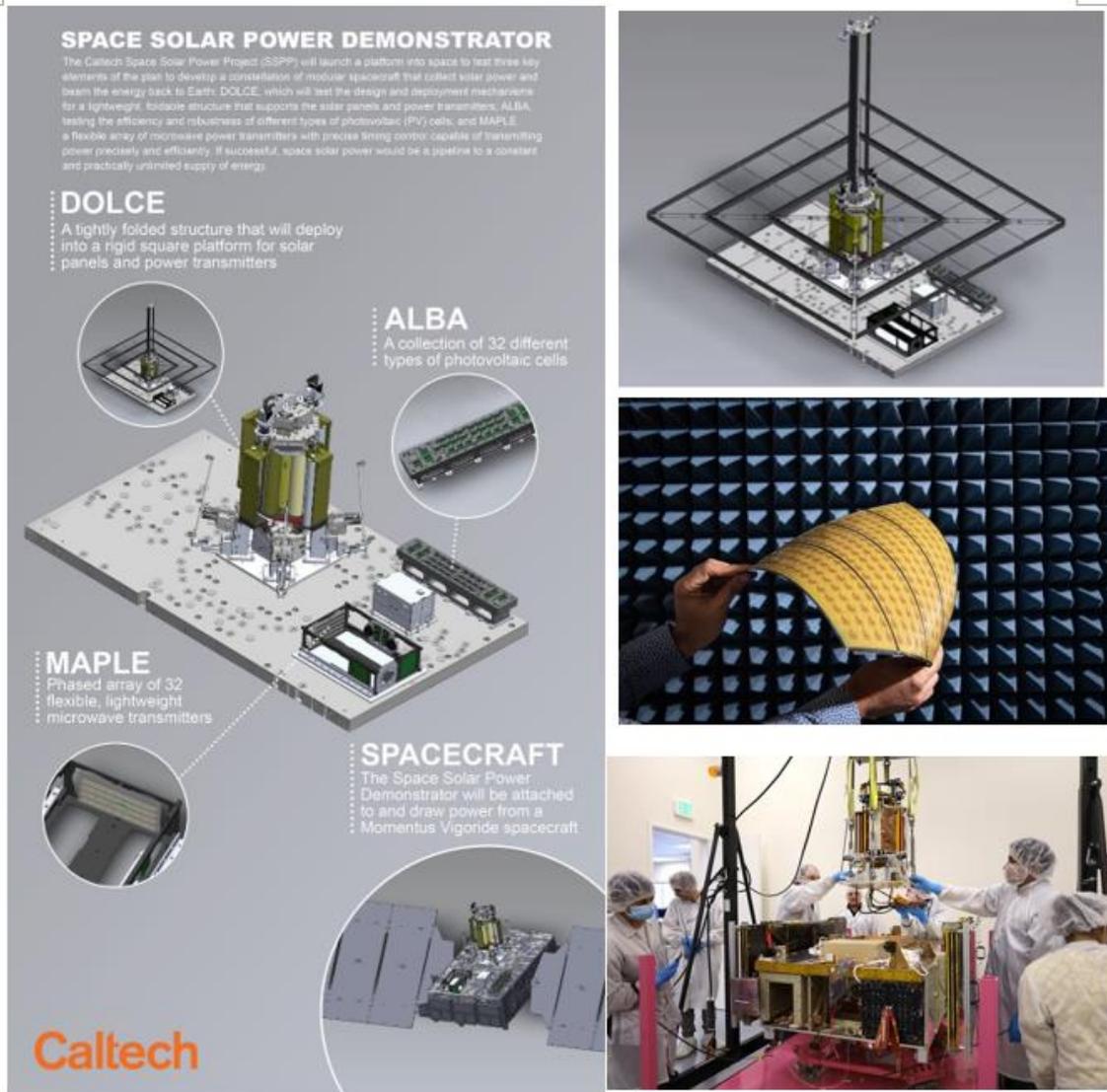


図 3-7 SSPD 実証機と構成要素(左)／DOLCE の展開実験イメージ(右上)／MAPLE のマイクロ波送電アレイのアンテナシート(右中央)／SSPD を VIGORIDE に結合する様子(右下)(Credit : Caltech)

出所) <https://www.caltech.edu/about/news/caltech-to-launch-space-solar-power-technology-demo-into-orbit-in-january> (2024 年 1 月 16 日最終閲覧)



図 3-8 MAPLE の内部の写真。右側:送信アレイ、左側:受信機(Credit : Caltech SSPP)

出所) <https://www.caltech.edu/about/news/in-a-first-caltechs-space-solar-power-demonstrator-wirelessly-transmits-power-in-space> (2023 年 9 月 14 日最終閲覧)

(5) 米国における近年のその他の動き

1) IEEE による提言

2023 年 4 月、米国電気電子技術者協会(IEEE: Institute of Electrical and Electronics Engineers)は SBSP に関する提言を発表した²³。本提言では、この構想への賛否両方の意見を整理している。推進派は、実用化にはまだ数十年かかるかもしれないが、いくつかのメリットがあると主張し、地上では不可能な夜間や曇りの日でも太陽光発電が利用できるほか、宇宙空間の太陽光は無尽蔵のため地上とは比較にならない規模の発電が可能としている。一方、反対派は克服しなければならない膨大な数の技術的障害があると指摘する。例えば、宇宙で太陽光パネルアレイを組み立てる技術や、地球にエネルギーを送電する技術、費用対効果とエネルギー効率の良い方法で資材を軌道に打ち上げる技術などの困難さを挙げている。2023 年の IEEE 会長で終身フェローの Thomas Coughlin 博士は、「SBSP は技術的な課題はあるものの、将来人類にとって重要なエネルギー源になる」「宇宙空間での資源開発や産業発展を支える電力として利用されることになる」と確信している」と述べている。

2) 米下院における SBSP に関する法案の可決

2023 年 6 月、Kevin Mullin 下院議員(民主党、カリフォルニア州選出)が H.R.2988 に対する修正案を提出し、修正案は、超党派の委員会投票により圧倒的多数で可決された。H.R.2988 法案は、NASA と米エネルギー省に対し、推進力、人工知能、天体物理学、地球科学、量子コンピューティングなどの主要な研究開発分野で協力するよう指示するものであったが、本修正案²⁴では、そのリストに宇宙を利用した太陽光発電を加えたものとなっている。

(修正案原文: ground- and space-based technology necessary for the transmission to the Earth's surface of solar energy collected in space;)

本法案は、直ちに予算が提供されることを約束するものではないが、米議会が SBSP の可能性を探ることに関心を持っていることを示すものであるとして、SBSP のコミュニティからは大きな支持を得られている²⁵。

3.1.2 欧州

近年では、SpaceX 社の Starship のような輸送機によって可能になる打上げコストの大幅な削減の見通しと、温室効果ガス排出 Net Zero の目標を達成するためのクリーンエネルギー源の需要の増加が、欧州の SBSP に対する新たな関心呼び起こしている。2020 年には ESA が SBSP への取り組みに関するアイデアを公募し、その後 2022 年 11 月からは、SOLARIS と呼ばれる SBSP 準備プログラムを開始している。SOLARIS では、SBSP の技術・経済的な側面からの実現可能性や安全性、環

²³ <https://transmitter.ieee.org/space-based-solar-power-a-future-source-of-energy/> (2024 年 1 月 22 日最終閲覧)

²⁴ <https://www.govinfo.gov/content/pkg/BILLS-117hr2988rh/pdf/BILLS-117hr2988rh.pdf> (2023 年 9 月 22 日最終閲覧)

²⁵ <https://www.theweek.in/news/sci-tech/2023/06/16/space-based-solar-power-a-promising-source-of-clean-energy.html> (2023 年 9 月 22 日最終閲覧)

境性への影響などの評価を 2025 年末までに実施する予定となっている。以下では、それらの取組みの具体的な内容について示す。

(1) ESA SOLARIS プログラム

1) 背景とプログラムの概要

2002 年頃、ESA では SSPS 研究に関する欧州ネットワークを設立し、Advanced Concept Team を結成して、Leopold Summerer 氏を中心とした欧州 SSPS プログラムを進めてきた。2003 年には、総合研究プログラム (General Studies Programme) の中の事例検討フェーズで、2020/30 年を想定して地上でのソリューションとの比較検討を行ったが、この段階で SSPS は技術的には可能であるが、数十 GW を超えない限り地上プラントより優位には立てないとの結論に至り、その後は予算がつくような SSPS 研究は行われてこなかった。

しかし、長期間の活動休止の後、ESA は 2020 年 9 月に Discovery and Preparation 部門の OSIP (Open Space Innovation Platform) を利用して SBSP (Space-based solar power) の技術やコンセプトに関するアイデア・コンセプト募集のオンライン・キャンペーンを開始した。(3.1.2(2) で詳述)

また 2021 年 3 月 31 日に発行された「ESA Agenda 2025 Make Space for Europe」の中で、5 つの緊急的な優先事項の中の 1 つである「BOOSTING COMMERCIALISATION FOR A GREEN AND DIGITAL EUROPE」において、エネルギー転換をサポートする宇宙ベースのサービス space-based solar power generation の可能性について、調査を進める必要があると言及された。

このように ESA では 2020 年頃から SSPS に関する取組みが再開されたが、2022 年 8 月中旬、ESA の Josef Aschbacher 事務局長は SBSP は欧州のカーボンニュートラル²⁶とエネルギー自立を達成する上での重要な一歩となるとした上で、SOLARIS と呼ばれる欧州向け SBSP 準備プログラムを立ち上げるべく、2022 年 11 月に開催予定の閣僚級理事会²⁷において各国に資金提供を要請すると発表した²⁸。

実際に 2022 年 11 月 22 日～23 日に行われた ESA 閣僚級会議では、ESA 予算を 2019 年の前回の閣僚級会議時と比較して 17%増、すなわち今後 5 年間で合計 169 億€増額することが決定されている。このうち 2 億 4400 万€は、SOLARIS プログラムが該当する ESA の一般支援技術プログラム (GSTP: General Support Technology Programme) のために確保されたとのことであるが、具体的な SOLARIS への予算額については本会議時には決定されておらず、12 月初旬にメンバで議

²⁶ 欧州は「2050 年までの気候中立」の達成を、EU 域内で拘束力のある目標として法制化している。

²⁷ 2～3 年に 1 度開催される。今回は 2019 年 11 月に開催されている。

²⁸ Josef Aschbacher の公式 Twitter: 2022 年 8 月 16 日版、

<https://twitter.com/AschbacherJosef/status/1559553713466970119>

<https://spacenews.com/esa-to-request-funding-for-space-based-solar-power-study/> (2023年10月5日最終閲覧)

論する予定とされていた²⁹。

このような動きとなった背景には、2022年2月～7月に行ったESAから並行して発注された³⁰2つの独立した費用便益分析研究(Frazer-Nash Consultancy社およびRoland Berger社)の研究結果がある。両レポートは欧州におけるSBSPのビジネスケースを評価したものであり、分析の結果、拡大するエネルギー危機に対処するために必要なSBSP技術を発展させるための投資を強く推奨しているものとなっている。

SOLARISはSBSPに関連する技術的な問題を解決するための3年間の研究であり、そのスタディ結果は、2025年の次の閣僚会議において本格的なSBSP開発の推進を決定するための検討材料とされる。2040年に商用スケールのプラントを構築することを目標にロードマップを描き、ロードマップの最初のステップとしてサブスケールの軌道上実証機を想定しているが、その計画については2023年から2025年にかけての準備プログラムの結果を受けて、2025年に決定する予定となっている(図3-9参照)。プロジェクトマネージャーはS.Vijendran氏が務めている。研究予算は100億円程度とみられている³¹。

なおESAが発表したSOLARISのYouTube(https://www.esa.int/Enabling_Support/Space_Engineering_Technology/SOLARIS/SOLARIS2、2022年8月16日公開)(図3-10参照)においては、この取り組みは将来のクリーンなエネルギー源を見つけるための欧州の動きの一部であると説明されている。

今後SOLARISでは技術的、政治的、プログラムの基礎を確立するために必要な主要な開発領域を中心に上げ、技術的実現可能性を成熟させ、SBSPの利点、実施オプション、商業的機会、コスト、リスクを評価するために、欧州産業界と協力してシステムレベルの研究および技術開発に取り組むことが想定されている。また潜在的な環境・健康・安全問題、規制、国際宇宙政策の調整に関連する課題についても検討を行う。さらにSBSPが経済的、技術的、その他の面で実現できないと判明した場合に備えて、SBSPに必要とされるかもしれないが、他の用途(軌道上での製造/サービスなど)にも有用な技術を調査・開発することにも焦点を当てる、とされている³²。SBSPの実現に必要な技術分野(宇宙製造・組立、宇宙ロボット、再使用ロケット、高効率太陽光発電、ISRU、マイクロ波電力ビームなど)はすべて、他の複数の宇宙アプリケーションに応用され、利益をもたらすため、後にSBSPを続行しないことが決定されたとしても、研究開発技術の開発から得られる利益は、欧州の宇宙分野にとって貴重なものとなる、ことも示されている³³。

以下にSOLARISプログラムの具体的な目的を示す。

²⁹ <https://buildindigital.com/space-based-solar-farms-could-power-up-within-a-decade/> (2023年12月14日最終閲覧)

³⁰ https://www.esa.int/Enabling_Support/Preparing_for_the_Future/Discovery_and_Preparation/ESA_reignites_space-based_solar_power_research (2023年12月14日最終閲覧)

³¹ <https://xtech.nikkei.com/atcl/nxt/column/18/02438/122200034/>(2024年1月15日最終閲覧)

³² <https://twitter.com/AschbacherJosef/status/1561730075938246658> (2023年12月14日最終閲覧)

³³ <https://spacewatch.global/2022/08/solaris-a-step-toward-making-space-based-solar-power-a-european-reality/> (2023年12月14日最終閲覧)

<SOLARIS プログラムの目的>

1. 2050 年までの欧州の温室効果ガス排出 Net Zero に貢献するクリーンエネルギーとして、SBSP の利点、技術的実現可能性、コスト、リスクを見極める。
2. SBSP の技術とシステムの開発および商業化において、欧州を国際協力に前向きなプレイヤーとして位置づける。
3. 欧州のエネルギー供給者、各国政府、欧州委員会の間で、SBSP がクリーンエネルギーの解決策となり得るという認識を高める。
4. 他国との国際協力の機会を確立する。
5. CM(Council Meeting)25 での決定を目指し、欧州の SBSP 開発プログラムに関する提案の技術的およびプログラムの基礎を準備する。

SOLARIS の本格始動に先駆けて、2022 年 7 月には、ESA は SBSP のための最先端技術と課題に関する RFI(Request For Information)を発出した。本 RFI はまた、ESA 加盟国全体の大・中・小の企業や団体が、SBSP に関連する将来の技術開発活動やシステム研究に参加することにどの程度関心があるかを調査することも目的としている。(本 RFI の締め切りは 2022 年 9 月であった)また RFI 発出と同時に SOLARIS プログラムで想定されている活動についても示された(図 3-11 参照)。

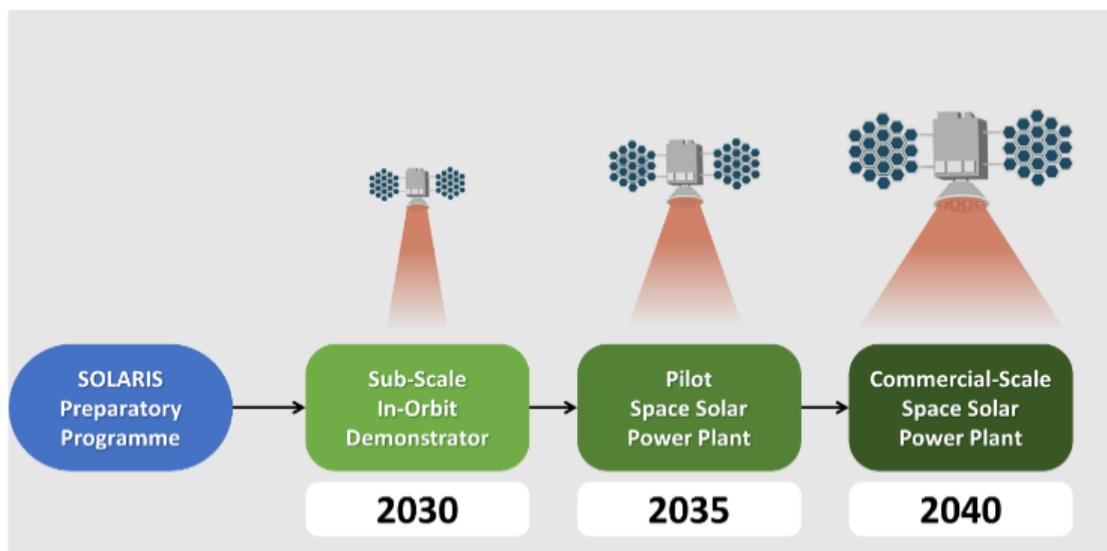


図 3-9 欧州 SBSP の想定ロードマップ

出所“SOLARIS Activity Plan 2023-2025”, ESA (Dec 2022) (2024 年 1 月 15 日最終閲覧)

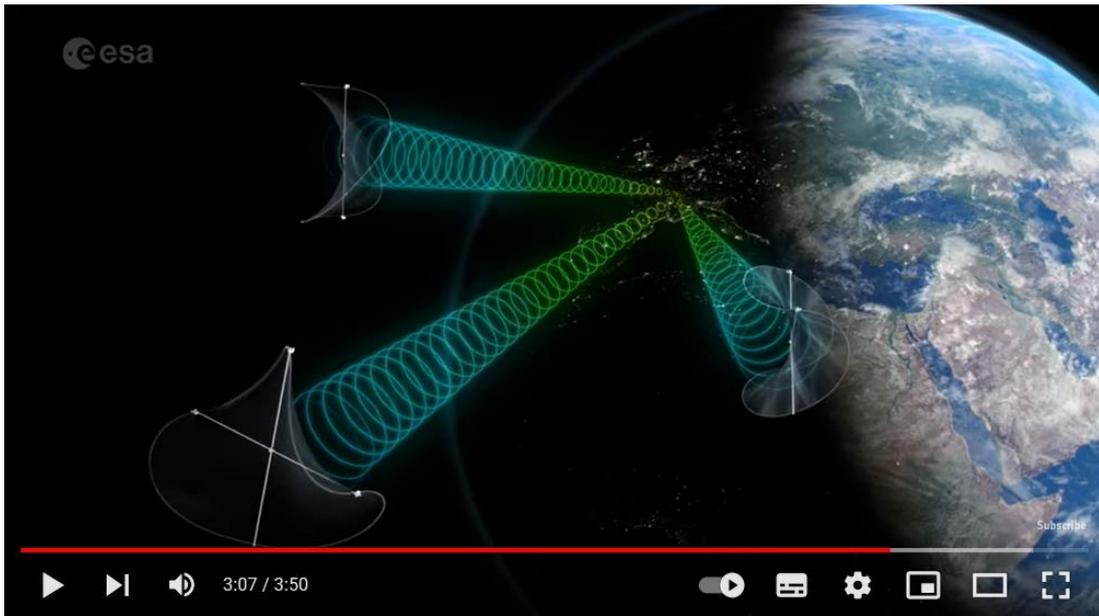


図 3-10 ESA SOLARIS の Youtube 紹介ページ (Credit : ESA)

出所) <https://www.youtube.com/watch?v=8ScTbb-43A4> (2023年10月5日最終閲覧)

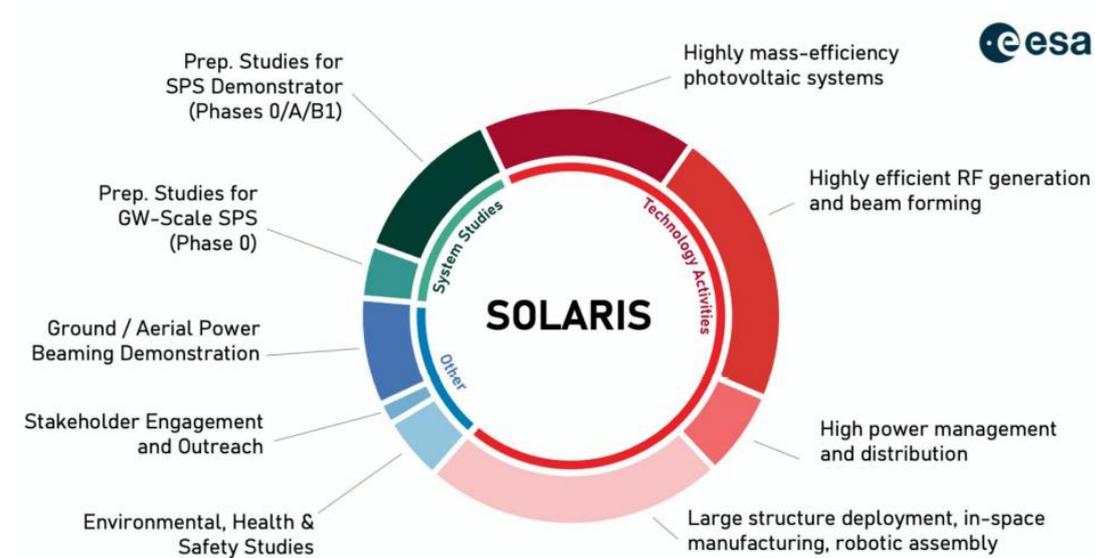


図 3-11 SOLARIS プログラムで想定されている活動

出所) “Space-Based Solar Power Technology Challenges and Development Needs”, ESA The SOLARIS Team

2) SOLARIS の技術開発目標

2022年10月18日、ESAは“SOLARIS Industry Day”を開催した。オランダのESTEC (European Space Research and Technology Centre)によりバーチャル形式で、午前中はSOLARISプログラムの概要に関するESAのプレゼンテーションと関連企業等(Airbus、Thales Alenia Space、OHB、Dassault Aviation、Equinor)によるシステムレベルのビジョン、午後はESAと参加企業との二者面談が行われた。当日は、宇宙およびエネルギーの両分野から30社を含む

150名以上が参加した³⁴。ESAのプレゼンテーション“Space-Based Solar Power Technology Challenges and Development Needs”の中では、SOLARISプログラムの具体的な技術課題と図3-12に示す技術開発目標が示された。

<SOLARISプログラムにおける技術課題>

- 高効率・軽量・低コストの太陽光発電システム
- 高効率DC-RF変換
- 高電圧電源管理・分配
- 高精度なビーム形成
- 大規模構造物展開、軌道上製造、ロボットによる組立、メンテナンス
- 大型構造物のAOCS(Attitude and Orbit Control Systems)／GNC(Guidance, Navigation and Control)
- 高エネルギー熱管理
- 軌道上組立構造物のための宇宙機AIT(Assembly, Integration and Test)
- 軌道上デブリの軽減
- システム寿命後の管理

なお、SOLARISの技術活動と他の宇宙分野とのシナジーについては、以下のように示されている。

<SOLARISの技術と他の宇宙分野とのシナジー>

- 宇宙用太陽光発電システムの高効率・軽量・低コスト化⇒あらゆる宇宙用途でメリットあり
- 高電圧電源管理アーキテクチャとコンポーネント⇒通信衛星と探査機へ直接応用が可能
- 最先端大型アンテナ⇒通信衛星へ直接応用が可能
- 大型構造物の軌道上での組立て、製造、モデリング⇒大型宇宙構造物(太陽電池アレイ、アンテナ構造、ラジエータ、望遠鏡、干渉計など)への適用可能

³⁴ https://www.esa.int/Enabling_Support/Space_Engineering_Technology/SOLARIS/Presentations_from_SOLARIS_Industry_Day (2023年12月14日最終閲覧)

Solar power conversion	Minimum	Goal
End-of-Life Cell efficiency @ RT	36%	40%
Cells cost	1 €/W	0.5 €/W
Cells + 100 um cover glass areal density	0.6 kg/m ²	0.5 kg/m ²
Cell production capacity by 2035	2 km ² /year	5 km ² /year
Power management & distribution		
Transmission voltage	300 V	1000+ V
DC-RF conversion		
Conversion efficiency	75%	90%
Wireless power transmission		
Phased-array efficiency	90%	95%
Total antenna size (modular)	1 km	2 km
Total antenna size (monolithic)	50 m	100 m
Robotic in-orbit assembly and manufacturing		
Dimension of on-orbit manufactured/assembled structure	1 km	2 km

図 3-12 ESA SOLARIS の技術開発目標

出所) “Space-Based Solar Power Technology Challenges and Development Needs”, ESA The SOLARIS Team, 18/10/2022

3) SOLARIS Activity Plan

2022 年 12 月、“SOLARIS Activity Plan 2023-2025”が公表された³⁵。本計画では SOLARIS の目標を達成するために、2023-2025 年の期間に実施すべき活動の概要を示している。本計画の内容は、2021 年から 2022 年の間に ESA が実施した準備活動の成果に基づいており、ESA の専門家との協議のもと、SBSP に関する近年の ESA および国際的な研究からのインプットを利用し、特に ESA の宇宙輸送システム局(D/STS: Directorate of Space Transportation Systems)など他の局で計画中の活動とも連携しながら策定されたものとなっている。図 3-13 に SOLARIS Activity Plan における主要活動分野を示す。

本計画ではまた、ESA はエネルギー分野の主要なステークホルダーと積極的に関わり、要件、ニーズ、エネルギー分野の境界条件をすべての開発の中心に据えることを目指していることが示されている。

³⁵ https://www.esa.int/Enabling_Support/Space_Engineering_Technology/SOLARIS/SOLARIS_activity_plan (2024年1月19日最終閲覧)

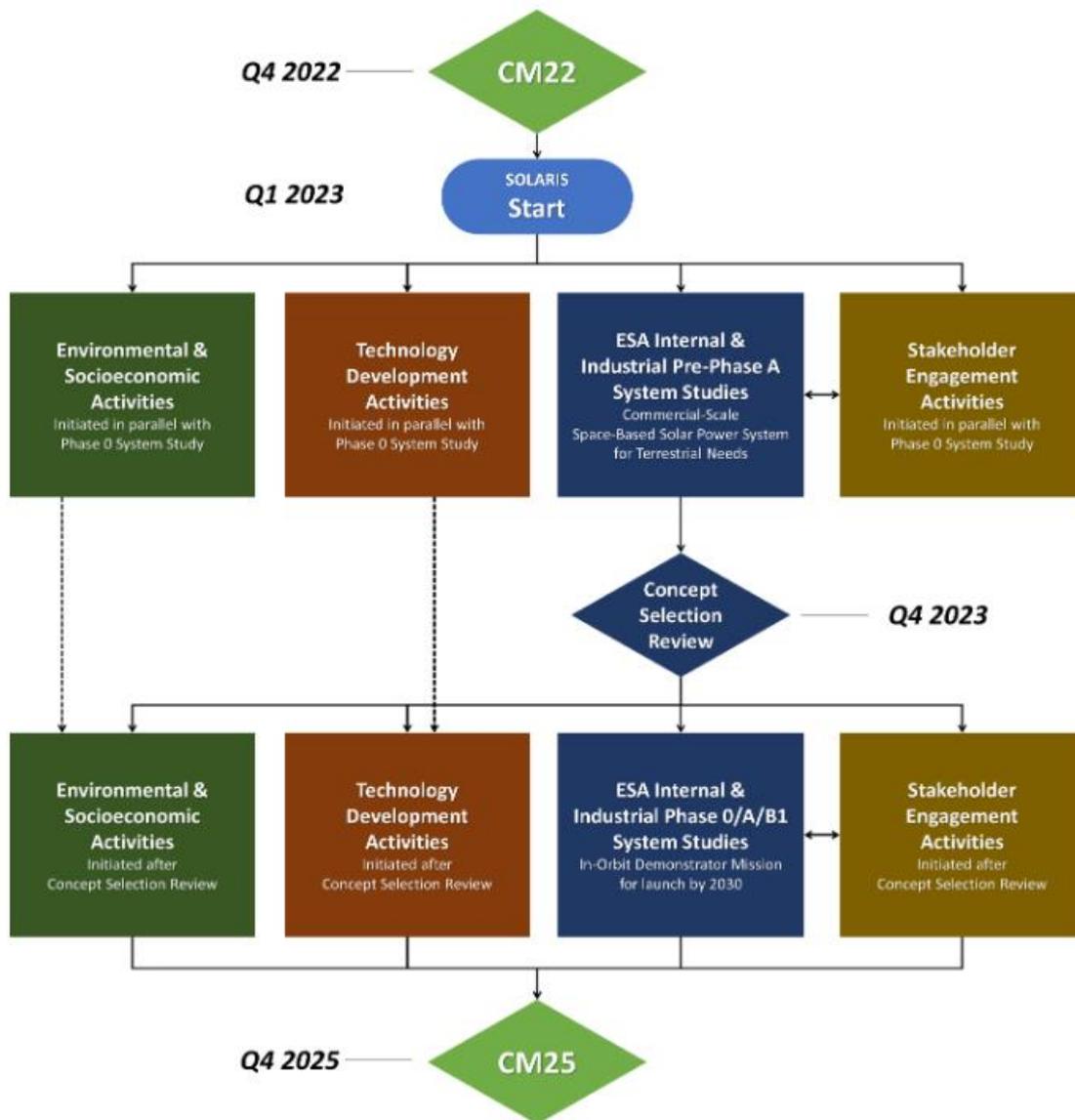


図 3-13 2023-2025 年間に提案されている活動内容
出所)“SOLARIS Activity Plan 2023-2025”, ESA (Dec 2022)

a. Environmental & Socioeconomic Activities の内容

「Environmental & Socioeconomic Activities」に関する検討項目として、以下が示された。

1) Infrastructure and Interference

- SBSP システムの高周波干渉リスク評価と軽減(10 万€、30 万€)
- SBSP システムの外部干渉に対する感受性と、レジリエンス力向上のためのメカニズムの特定(20 万€)

2) Environment and Deployment

- SBSP を展開することによる環境影響評価(30 万€)

3) Human Health

- 人体への曝露データのレビューおよび様々なビーム特性に適用可能なリスク因子の評価(10万€)
- SBSP 地上局に関連する公共および職業的な露出制限のモデルベースと実験による評価(50万€)

4) Impact on the Terrestrial Ecosystem

- 高リスク種の特特定と SBSP システムの特性に依存した影響評価(15万€)
- SBSP が関連する動物に与える影響の実験的評価(40万€)
- SBSP の二重土地利用を対象とした実験的評価(30万€)

5) Impact on the Atmosphere

- SBSP の大気と電離層の相互作用の同定とモデリング(20万€)
- SBSP の大気と電離層の相互作用の可能性をターゲットとした実験的研究(40万€)

b. Technology Development Activities の内容

「Technology Development Activities」については、「Solar Generation」「Power Management and Distribution, and RF Generation and Accurate Beam Forming」「In-orbit Robotic Assembly, Manufacturing and Maintenance」のタイトルごとに提案されている研究内容が示された。

Activity Title	Budget (k€)
Solar Generation	
Development of low cost, high efficiency multi-junction space solar cells	2,500
Development of large scale, lightweight, compact, efficient, cost effective, space compatible solar generators	1,000
Preliminary development of very large (square kilometre scale) modular solar arrays with solar concentrators	500
Adaptation of terrestrial-based cell technologies for use in SBSP applications	500
Study of strategies to develop multiple scalable sources of solar cells and solar arrays	250
To be updated further Novel Architecture and components for high-voltage, high power management and distribution for Space-Based Solar Power satellites	4,000
Total	8,750

Correction

Activity Title	Budget (k€)
RF generation and accurate beam forming	
Antenna for MW demonstrator of Wireless Power Transmission	15,000
To be updated further Antenna for GW Wireless Power Transmission	10,000
To be updated further High efficiency Solid State DC to microwave converting device demonstrator	2,500
To be updated further Vacuum technology-based DC to microwave converting device demonstrator	2,500
Total	30,000

POTENTIAL ACTIVITIES FOR THE SPACE BASED SOLAR POWER SPECIFIC AREA IN GSPST ELEMENT 1, ESA-TECSF-LI-2022-004007, 19 Dec 2022

For ESA Official Use Only – ESA Unclassified

Activity Title	Budget (k€)
In-orbit Robotic Assembly, Manufacturing & Maintenance of Very Large Structures	
Robotics Interfaces and tooling for SBSP Engineering (RISE)	4,000
End to End Humanoid for Automation Non Compliances and Exceptions in SBSP (ENHANCES)	6,000
Classes of Robotics Expert Workers for SBSP (CREWS)	5,000
Total	15,000

Activity Title	Budget (k€)
In-orbit Robotic Assembly, Manufacturing & Maintenance of Very Large Structures	
To be updated further Development of on-orbit manufacturing technologies for very large SBSP spacecraft structures	7,000
To be updated further Development of process verification and part validation approaches for on-orbit manufactured parts in very large SBSP spacecraft structures	3,000
To be updated further Development of enabling technologies for on-orbit servicing of solar power satellites	5,000
To be updated further Simulation software for modelling structure/AOCS coupling	300
To be updated further Structural modelling of very large space structures	500
To be updated further High load capacity coupling mechanisms	1,500
Total	17,300

図 3-14 SOLARIS で提案されている Technology Development Activities

出所)“SOLARIS Technology Plan”, ESA, SOLARIS Research & Technology Day

4) SOLARIS Technology and Research Day

2023年3月、1)項で示した SOLARIS の RFI の結果を示し、SBSP に関連する主要な研究の優先事項や課題について議論する場として、“SOLARIS Technology and Research Day”が開催された。学术界や産業界から 110 名を超える参加者があり、その中には国の宇宙機関からの参加者も含まれていた。

5) 2件のコンセプト・スタディ契約

2023年4月、ESA は商用規模の SBSP に関する 2 件のコンセプト・スタディの契約を締結した³⁶。タイトルは“Pre-Phase A System Study of a Commercial-Scale Space-Based Solar Power (SBSP) System for Terrestrial Needs”で、契約先は Arthur D Little (Belgium) 社と Thales Alenia Space Italy 社となっている。2023 年末までに 2 件のスタディが並行して行われた。

a. Arthur D Little 社の DIRECT-SUN-REFLECTION (DSR)スタディ

本スタディ³⁷は、既存の太陽光発電インフラの利用を最適化し、その収益を最大化することを目的として、宇宙での太陽エネルギーを活用しグリーンエネルギーを生産する革新的なソリューションを検討するものである。2050 年までに温室効果ガス排出 Net Zero を達成するという欧州の公約の達成に貢献するものとして、グリーンエネルギーを最も早く市場に投入し、最も競争力のあるコストで生産することを目指す。具体的には、宇宙での太陽光を地上ステーションに直接反射するパッシブなフレクタのコンステレーションを提案するもので、地上ではグリッド上で発電したり、水素を生成したりすることを想定している。年間エネルギー生産目標は 750TWh または 10 億トンとしている。図 3-15 に本システムのコンセプト図を示す。

本スタディでは上記のコンセプトをベースとして、コンセプト自体の SWOT 分析、システムのアーキテクチャ、システムの詳細、経済性および環境パフォーマンス、開発ロードマップ、主なりスクの評価等を行っている。

具体的なアーキテクチャとしては、図 3-16 に示すように 2 種類(DSR:DIRECT-SUN-REFLECTION および SCL:Space Coherent Light)のものを有望であるとして提案している。DSR(図 3-17 参照)は地上の太陽光発電インフラに向けて直接太陽光を反射させるものであり、SCLは集光された太陽光から直接コヒーレントな光を発生させ、その後望遠鏡を設置し、パワーを拡散させるシステムとなっている。(図 3-18 参照)バックアップソリューションとして、GEO 上での SCL システムが提案されている。

³⁶ https://www.esa.int/Enabling_Support/Space_Engineering_Technology/SOLARIS/ESA_developing_Space-Based_Solar_Power_plant_plans (2023年9月19日最終閲覧)

³⁷ <https://nebula.esa.int/content/pre-phase-system-study-commercial-scale-space-based-solar-power-sbsp-system-terrestrial> (2024年1月5日最終閲覧)

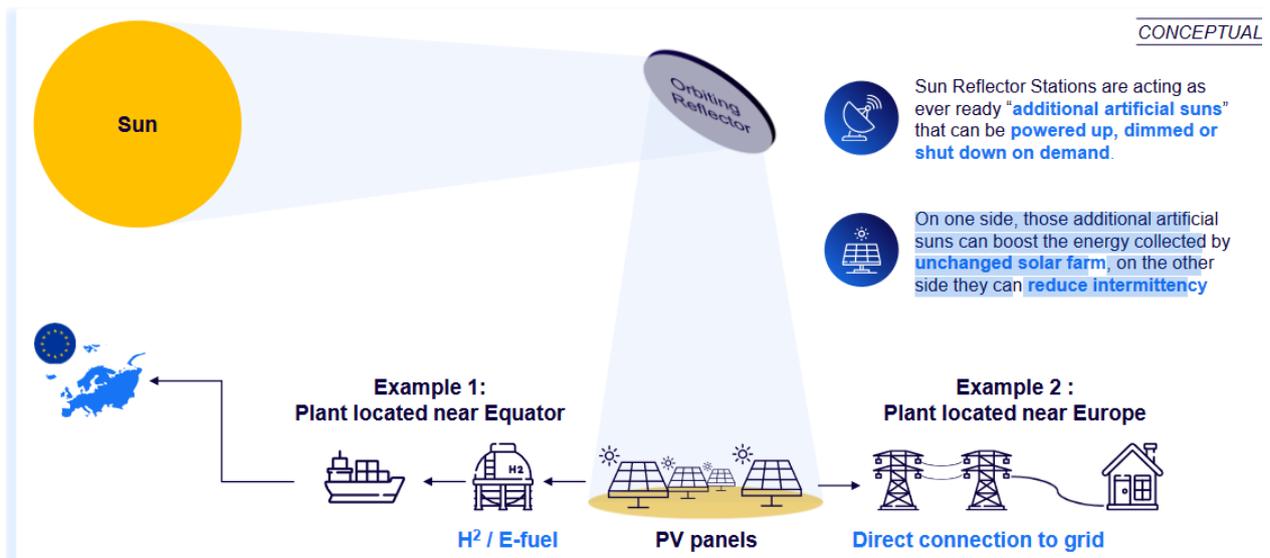


図 3-15 Arthur D Little 社の DIRECT-SUN-REFLECTION (DSR)コンセプト
出所)“DIRECT-SUN-REFLECTION (DSR) PRE STUDY”, Arther D Little, Dec 13th 2023

Parameter	Architecture DSR	Architecture SCL
Orbit altitude	890 km (LEO)	36 000km (GEO)
Orbit inclination	1°	0°
Payload technology	Direct Sun Reflecting with Multi Large mirrors	Space Coherent Light with multiple payloads
Final Output	Solar Molecules and / or PV in Europe (tbd)	Electricity mainly but could be deployed for solar molecules
Location of the GPS plant	Near the equator in desert or off shore Europe + outside Europe	Mainly Europe but possible elsewhere
Power range / GPS	5GW ideally and no more than 1GW on-grid	< 1GW ideally for electricity
Illumination period	Extended day (depending on the LCOE and the environmental impact)	24/7

図 3-16 Arthur D Little 社が提案する 2 種類のアーキテクチャ
出所)“DIRECT-SUN-REFLECTION (DSR) PRE STUDY”, Arther D Little, Dec 13th 2023

Scenario variables	
	Hypothesis
Orbit	SSO ² at 890km
Number of reflectors	3,987 (parabolic)
Diameter of reflectors	1km
Reflectors in visibility¹	252
Spot on Earth diameter	8.3km
Irradiance on Earth	1,000W/m ²

System and hypothesis explanations

- For ground stations, **satellites go over twice a day for 2 hours**
- 890km SSO² orbit allows for same local solar time and **orbital period multiple of 12 hours**
- Located **above 800km** to avoid drag force
- Higher orbit would imply larger spot size on Earth (proportional)

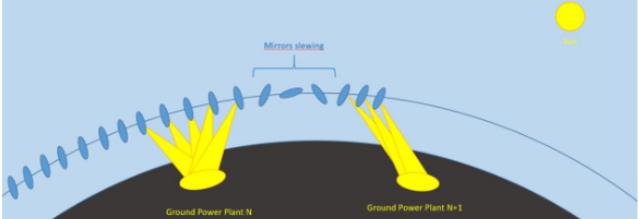


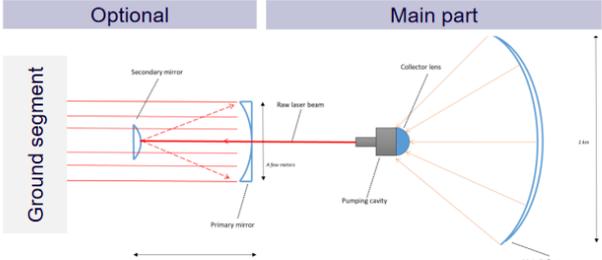
図 3-17 DSR アーキテクチャの説明

出所)“DIRECT-SUN-REFLECTION (DSR) PRE STUDY”, Arther D Little, Dec 13th 2023

Scenario variables	
	Hypothesis
Orbit	GEO ² at 36,000km
Number of reflectors¹	16,982 ¹
Diameter of reflectors	750m
Spot on Earth diameter	163m
Irradiance	1,000 to 2,400W/m ² @1064nm

System and hypothesis explanations

- SCL units generate a light beam directly from concentrated Sun light
- Very narrow divergence angle: SCL units high in GEO have a **permanent (24/7) view on the ground power plant (wavelength non in the visible spectrum)**
- After the coherent light generation, a **telescope** is placed to diffuse power: allows for **lower irradiance although enlarging the spot size to fit with the ground size**



Note: (1): for a conversion efficiency of 10% (2): Satellites in geostationary orbit (GEO) circle Earth above the equator from west to east following Earth's rotation. It means they stay above the same spot on earth constantly
Source: TAS, Arthur D. Little

図 3-18 SCL アーキテクチャの説明

出所)“DIRECT-SUN-REFLECTION (DSR) PRE STUDY”, Arther D Little, Dec 13th 2023

b. Thales Alenia Space Italy 社のスタディ

本スタディ³⁸では、SBSP の利点は風力や地上の太陽エネルギーと比較した場合、一年中、昼夜を問わず、天候に左右されずにエネルギーを供給できることであると、SBSP リファレンスシステムとして最大 1GW±TBD%の 24 時間 365 日利用可能な定常ベースロード電力を供給可能であるものを想定し、GEO 上の SPS(Solar Power Satellite)からスペインにある地上ステーション(GPS:Ground Power Station)にエネルギー供給するシステムを想定した。

³⁸ <https://nebula.esa.int/content/pre-phase-system-study-commercial-scale-space-based-solar-power-sbsp-system-terrestrial-0> (2024 年 1 月 5 日最終閲覧)

図 3-19～図 3-20 に本スタディにおけるリファレンスシステムの形状と寸法等を示す。周波数としては 5.8GHz、太陽電池はペロブスカイトを使用することが想定されている。また輸送シナリオとしては、一度 LEO まで SPS カーゴを輸送してから Orbital Tugs により SPS を GEO まで輸送し、GEO でロボットによる組立を行うシナリオを選択している。組立て期間は 2 年間で想定しているが、組立てが完了する前のミッションの初期段階や軌道上での軌道上試験においても、電力を抑えたモードで作動させることができる、としている。システムの各部で想定されているエネルギーの流れ(変換効率)を図 3-21 に示す。

スタディでは、上記のリファレンスシステムに対して CO2 排出量およびコスト計算も行っている。コスト計算においては、1) SPS コスト、2) 打上げ及び軌道間輸送コスト、3) 地上セグメントコスト、4) その他(運用コスト、開発コスト、保険等)の 4 つに分けてコスト算出を行っている。図 3-22 に SPS 初号機のコストと運用コストを含む総ミッションコストを示す。また図 3-23 に、30 年間運用を想定したときの発電コスト(初号機:0.158 \$ /kwh、10 機目:0.143 \$ /kwh)を示す。

最後に、本スタディの結論として、技術的、経済的、プログラムの側面から総合的に判断すると SBSP は持続可能な変革の可能性を秘めたエネルギーソリューションとして有望であると、今後はさらなる研究開発と国際協力が鍵となる、としている。

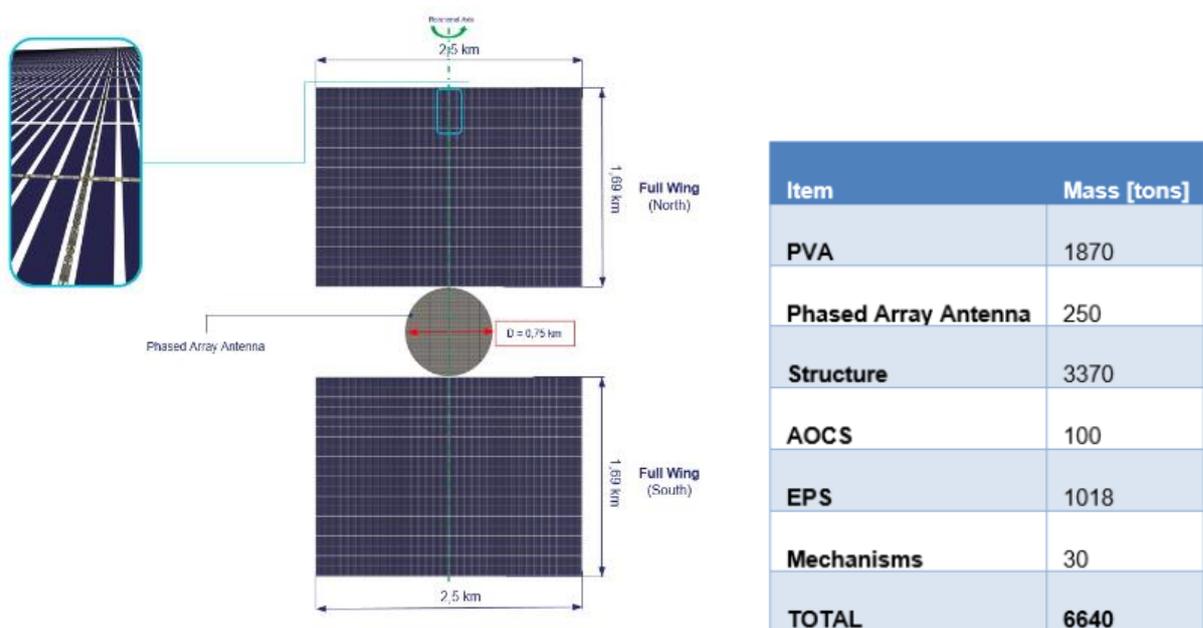


図 3-19 Thales Alenia Space スタディのリファレンスシステム(宇宙部)

出所)“Space-Based Solar Power Delivers solar energy from space to Earth”, Thales Alenia Space, Dec 13th 2023

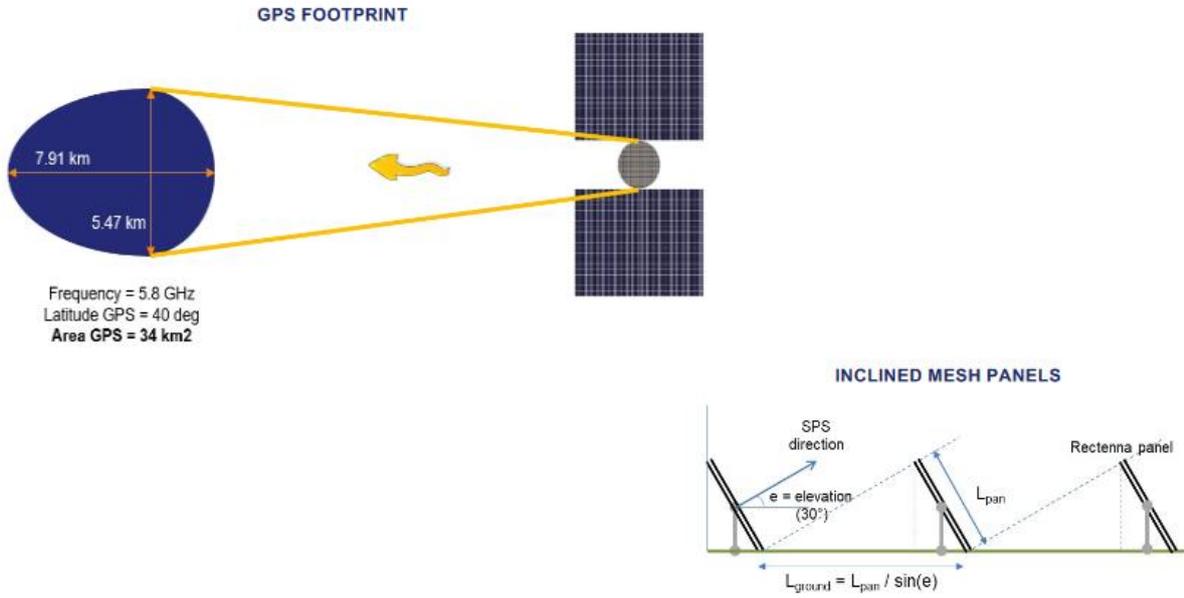


図 3-20 Thales Alenia Space スタディのリファレンスシステム(地上部)

出所)“Space-Based Solar Power Delivers solar energy from space to Earth”, Thales Alenia Space, Dec 13th 2023

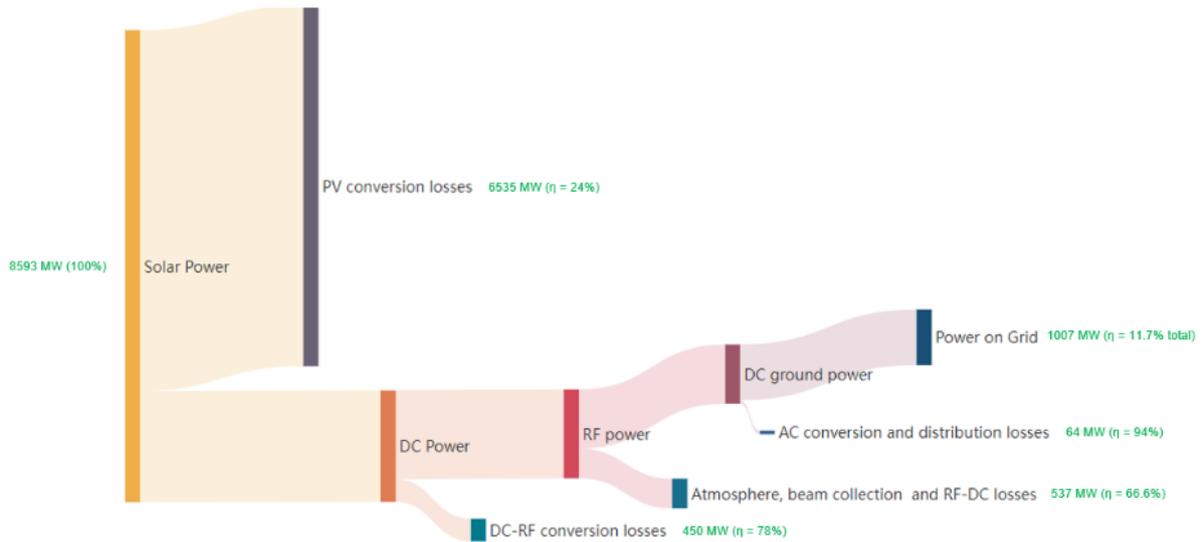


図 3-21 Thales Alenia Space スタディのリファレンスシステムのエネルギーの流れ

出所)“Space-Based Solar Power Delivers solar energy from space to Earth”, Thales Alenia Space, Dec 13th 2023

Parameter		Composition and value		
CAPEX	SPS costs	Truss module costs	0.01 B\$	7.71 B\$
		Roll-out modules (with PVA) costs	0.18 B\$	
		Node modules costs	0.002 B\$	
		WPT system costs	0.50 B\$	
	Launch and in-orbit transportation/assembly costs	AOCS costs	1.43 B\$	
		Launch costs	3.31 B\$	
		In-orbit transportation costs	1.65 B\$	
	GPS costs	Robotic hardware costs for assembly	0.004 B\$	
		Land occupation costs	0.06 B\$	
		Rectenna mesh costs	0.17 B\$	
OPEX	GPS power control costs		0.36 B\$	3.88 B\$
	Insurance costs		1.7 B\$	
	OM costs		1.6 B\$	
AOCs thrusters refueling costs		0.36 B\$		
TOTAL SBSP MISSION COST		11.4 B\$		

図 3-22 Thales Alenia Space スタディのリファレンスシステム初号機のコスト計算結果
出所)“Space-Based Solar Power Delivers solar energy from space to Earth”, Thales Alenia Space, Dec 13th 2023

Parameter	Value	
Expected energy generated over the system lifetime	Lifetime = 30 years	223.4 TWh
	1 %/year degradation rate	
	1 GW 24h 365 days BOL	
LCOE	158 \$/MWh (≈ 15.8 €/kWh)	
LCOE for the 10th of a kind SBSP system	143 \$/MWh (≈ 14.3 €/kWh)	

図 3-23 Thales Alenia Space スタディのリファレンスシステムの発電単価計算結果
出所)“Space-Based Solar Power Delivers solar energy from space to Earth”, Thales Alenia Space, Dec 13th 2023

(2) ESA の OSIP キャンペーン

1) SOLARIS プログラムに先立つキャンペーン

2020 年 9 月～2021 年 1 月の間、ESA は Discovery and Preparation 部門の OSIP(Open Space Innovation Platform)を通じて、宇宙で SBSP を実現するためのソリューションに関する幅

広いアイデアの募集を行った³⁹。募集に当たっては、特に以下のカテゴリに関する新しいアイデアを期待する、ことが示された。

<ESA の SBSP 実現のためのアイデア募集に当たり示された重点カテゴリ>

- 地球、月、火星での使用を目的とした、SBSP の新しいシステムコンセプト
- SBSP の技術的・経済的な実現性を大幅に向上させる可能性のある新規のサブシステム・コンセプトや技術
- SBSP をスケールアップし、エネルギーグリッドに統合するための新しい方法
- 宇宙建設の機会を利用した斬新なアイデア(宇宙資源の利用、質量・サイズ・構造要件・体積などの打上げ制約の解消など)
- 先行的な宇宙実証のための新しいコンセプト

本キャンペーンにおいて、大学、ベンチャー、民間企業、宇宙機関等から 85 の提案がなされ、うち 16 件が新規性を評価され、フォローアップステップに進んだ。16 件の内訳は、システム研究 7 件、初期技術開発 5 件、共同研究提案 4 件であった。

2022 年以降は、以下に示す 13 件(図 3-24 参照)が資金提供の対象として選ばれ、現在も研究開発が進められている⁴⁰。ただし、その後の進捗状況に関する情報は限定的に公開されている。

<OSIP キャンペーンで実施されたプロジェクト一覧> ()内は主実施機関

- ①. SPS Station Keeping Using Solar Radiation Pressure for Propulsion (Emerald Telecommunications)
- ②. The interaction of structural dynamics with the orbital mechanics of Solar Power Satellites (Frazer Nash)
- ③. GE[®] Lunar Power Station (Astrostrom)
- ④. An End-of-Life Strategy for Solar Power Satellites (Frazer Nash)
- ⑤. Skybeam: Assembly of a Space Solar Power system with European Technologies (Space Applications Services)
- ⑥. Receiv'Air – Bypassing of atmospheric attenuation for SPS with airborne receiver (Thales Alenia Space)
- ⑦. Tiled Energy Focus with Solar Concentrators (Instituto de Telecomunicacoes – University of Aveiro)

³⁹ <https://ideas.esa.int/servlet/hype/IMT?documentTableId=45087127246233263&userAction=Browse&templateName=&documentId=514a8db636ea637f6e27069183966350> (2024年1月19日最終閲覧)

⁴⁰ https://www.esa.int/Enabling_Support/Preparing_for_the_Future/Discovery_and_Preparation/The_Discovery_Campaign_on_Solar_Power_from_Space (2024年1月19日閲覧)

- ⑧. Development of Millimetre Waves Wireless Power Transfer (WPT) System for Lunar Rover Explorations (Sirin Orbital Systems)
- ⑨. Disruptive PV power array technology to enable economic viability of SPS (CSEM)
- ⑩. Photo-irradiation annealing of radiation-induced degradation of multijunction solar cells for space-based power plants (Photonicity)
- ⑪. In-Space manufacturing of large structures by direct extrusion of UV-curing polymer (Munich University of Applied Sciences)
- ⑫. CORES – COLlaborative Recycling of End-of-life Sps (University of Strathclyde)
- ⑬. Solar Array to High Voltage Power Bus: Power Conversion Techniques (University of Elche)

上記の⑧に関しては、スイスの Sirin Orbital Systems 社は京都大学生存圏研究所の篠原教授とも協力関係を築き、研究を進めている。2022年11月および2023年11月には、京都大学東京事務所において研究関連者による“Japan-Switzerland SBSP/WPT Workshop”が開催されている⁴¹。

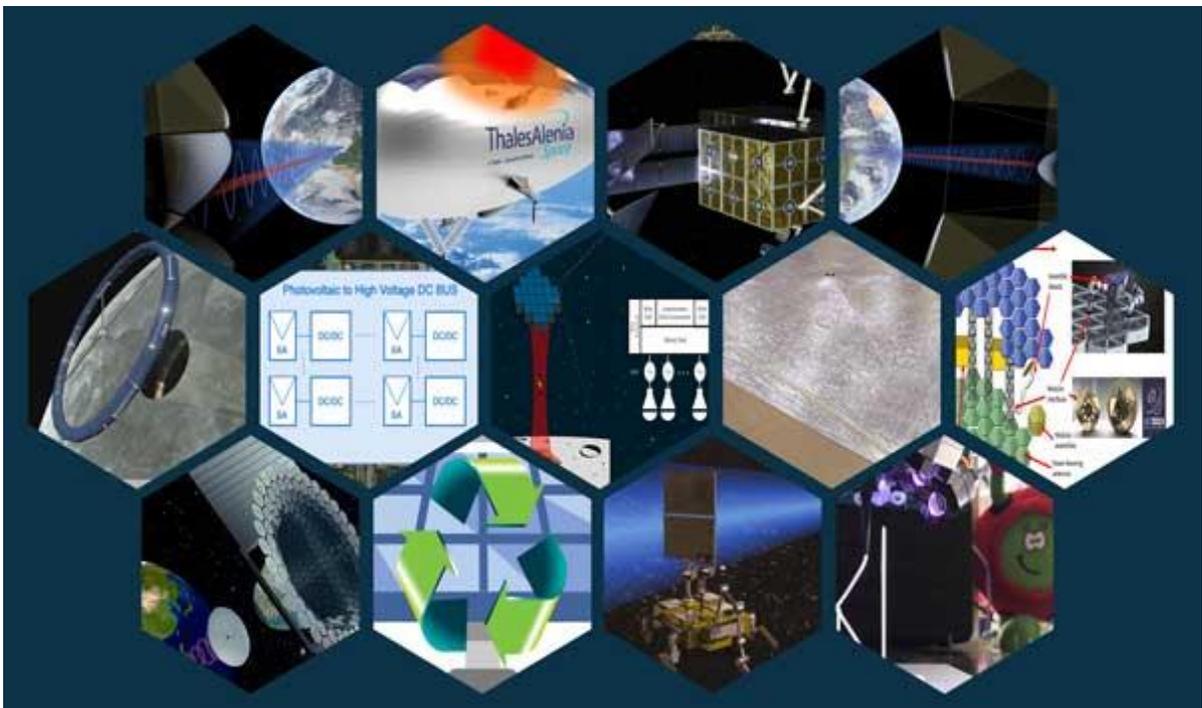


図 3-24 資金提供が決定した 13 のプロジェクト (Credit:ESA)

出所) <https://parabolicarc.com/2022/01/10/esa-reignites-space-based-solar-power-research/> (2024年1月19日最終閲覧)

⁴¹ <https://swissnex.org/news/a-japanese%E2%80%92swiss-workshop-to-shape-the-future-of-clean-energy-from-space> (2023年12月17日最終閲覧)

2) 「Greater Earth Lunar Power Station(GE[⊕]-LPS)」概念設計

2023年7月、ESAは上項のOSIPキャンペーンで実施されたプロジェクトの一つとして実施されている、スイスのAstrostrom社による「Greater Earth Lunar Power Station(GE[⊕]-LPS)」の概念設計について、最初の研究結果を発表した。

本研究は、主に月の資源を用いて建造され、地球と月のラグランジュ点に展開されるSSPSが、メガワットのマイクロ波電力を月面の受信機に供給し、将来の有人基地を含む月面活動のニーズに応えることを想定している。V字型の太陽パネルと一体型のアンテナを備え、端から端まで1km²以上にわたるヘリックス構造で展開される。月で生産される黄鉄鉱(パイライト)の単粒子層太陽電池で構成されるソーラーパネルは、連続で23MWのエネルギーを生成する。

このコンセプトの実現可能性を技術面および経済面から調査した結果、月面での採掘、選鉱、製造作業の中核技術のほとんどは、地球上ですでに使用されているか開発中であり、技術のブレークスルーがなくてもGE[⊕]-LPSを実現できることがわかった。それらの技術を月の環境に適応させてモジュール形式で提供し、月面で遠隔操作型ロボットを通して管理できるとしている。さらに、月で製造されるSSPSは、地球で開発される同等のSSPSよりも安価であることも検討結果として出されている。



図 3-25 Astrostrom 社による「Greater Earth Lunar Power Station(GE[⊕]-LPS)」

出所)<https://nebula.esa.int/content/ge%E2%8A%95-lunar-power-station> (2023年9月25日最終閲覧)

3) 「16U4SBSP」

「16U4SBSP」は、16U キューブサット群を SBSP の実現に利用するための実証ミッションである。本ミッションコンセプトでは、16U キューブサット群が飛行し、宇宙空間で kW 級の太陽エネルギーを集め、それを地球上のクライアントや宇宙空間の他の衛星にワイヤレスで伝送する。これは、(GW 規模の) SBSP の実現に向けた基本的な技術実証のステップとなっている。

本件は 2023 年初め、キューブサット群によって可能になる新しいミッションコンセプトの革新的なア

アイデアを OSIP キャンペーン”Innovative Mission Concepts Enabled by Swarms of CubeSats ”により公募していたもので、74 件の応募の中から選ばれた 7 件のうちの 1 つである。プライム契約者はスイスの Sirin Orbital Systems 社で、2023 年 10 月から 2024 年 4 月に ESA から 10 万ユーロの資金を受けて実施される。本提案は、同社と Delft 工科大学と Strathclyde 大学との共同提案で、Zürich 大学からの技術支援も受けている。



図 3-26 「16U4SBSP」ミッションのイメージ

出 所) https://www.esa.int/ESA_Multimedia/Images/2023/10/A_CubeSat_swarm_beaming_down_solar_power
(2023 年 10 月 20 日最終閲覧)

4) SOLARIS Research Activities に関するキャンペーン

他の SOLARIS 活動と並行して、図 3-13 に示す「Environmental & Socioeconomic Activities」に関する研究活動に関する OSIP キャンペーンが 2023 年 9 月 25 日まで実施された。SBSP の安全性に関する情報に基づいた意思決定には、リスクと軽減オプションの適切な評価が必要であり、公共安全、動植物を含む生態系への潜在的影響、電離層を含む大気層との相互作用による影響、他の宇宙または地上アプリケーションとの潜在的干渉、システムのレジリエンスリスク、全ライフサイクル環境影響に対処する必要があるとして、SBSP の安全性等に関する研究活動の共同実施(Co-Sponsored)研究活動へのアイデアが募集された。

現在、12 のアイデアが受理され評価中であるが、選定されたアイデアに関しては 2024 年の初めから本格的な活動が開始される計画となっている。

なお、ESA から提供される共同実施研究活動の資金は、プロジェクトのコストの最大 50%をカバーし、最大で 9 万€までとなっている。

(3) 欧州宇宙政策ビジョン ESPI2040

2023年9月、欧州宇宙政策研究所(ESPI:European Space Policy Institute)は、今後数十年間の欧州の宇宙における政策ビジョン「ESPI2040:Space for Prosperity, Peace and Future Generations」を公開した⁴²。

ESPI2040は、欧州と世界が直面している前例のない課題に取り組むために、宇宙利用がどのように解決策を提示できるかについて概説しており、欧州の2040年に向けた目標を「宇宙が経済全体にもたらすと推定される全世界的価値の25%を獲得する」「未来を形作るイノベーション、インフラ、政策、戦略と宇宙を連携する」としている。

本ビジョンの中で、ESPIが“Green and Sustainable Societies”アジェンダの一部として促進する項目の一つとして、「温室効果ガス排出Net Zero目標の達成を加速できるような破壊的な未来技術やインフラの開発」が掲げられており、その例としてSBSPが示されている。さらに最終ページ「Beyond 2040」にも、経済や社会全体に新たな変革をもたらすものとしてSBSPが紹介されている。



図 3-27 「ESPI2040:Space for Prosperity, Peace and Future Generations」の最終ページ

出所) https://www.espi.or.at/wp-content/uploads/2023/09/ESPI2040_FINAL-Copy.pdf (2023年9月29日最終閲覧)

(4) COP28 におけるパネルディスカッション

2023年11月～12月にかけて、アラブ首長国連邦(UAE)のドバイで開催された第28回国連気候変動枠組み条約締約国会議(COP28)において、UAE宇宙庁は”Space for Sustainability”パビリオンで”Space Solar Power: Lighting a Path to Net Zero”と題するパネルディスカッションを開催した。本パネルディスカッションにおいては、ESAがAvance Labs、Space Solarおよび

⁴² <https://www.espi.or.at/espi-2040/> (2023年9月29日最終閲覧)

OneWeb NEOM JVと共に登壇した。

3.1.3 英国

英国における SBSP 活動は、ESA による取組みに先んじて政府レベルでの取組みが始まったが、ESA の SOLARIS プログラムが始動してからは、SOLARIS への参加を並行して進める形となっている。英国における SBSP 活動は図 3-28 のように示すことができる。以下では、それらの取組みの具体的な内容について示す。



図 3-28 英国における SBSP 活動の内訳

出所)“UKSA Introduction”, C.Brown, UKSA, International (On-line) Conference on Energy from Space, Oct 2023

(1) BEIS の Space Based Solar Power Innovation プログラム

1) 背景とプログラムの概要

英国では、ここ数年で SBSP に関する取組みが大きく進展した。英国宇宙庁(UKSA:UK Space Agency)とビジネス・エネルギー・産業戦略省(BEIS:Department for Business, Energy & Industrial Strategy)が2020年9月から1年間をかけてSBSP(Space-Based Solar Power)の実現可能性と経済性の調査検討を実施した。具体的な調査内容としては、1) 米国(SPS-ALPHA)、英国(CASSIOPeiA)、中国(MR-SPS)の3つのコンセプト調査、2) 脱炭素経済に向けてSBSPの実用化と低価格化の実現性、3) 2050年までに国際的なパートナーと協力してSBSP運用を開始するためのエンジニアリングプランの策定、4) 将来のクリーンエネルギー技術の組合せの中でSBSPが果たす役割、等であり、Frazer-Nash Consultancy社に委託して調査を行った。調査結果では、SBSPは英国の2050年までの温室効果ガス排出 Net Zeroの目標達成を可能にすること、開発に

当たっては段階的な技術開発と実証プログラムを実施し、国際的なパートナーと検討を重ねることが推奨されること、等を示した。BEIS は、本報告書の内容を受けて、SBSP に関連する技術開発を目的とする SBSP イノベーション・プログラム(Space Based Solar Power Innovation Programme)をスタートさせている。

なお、英国では International Electric Company (IECL)社の Ian Cash氏が提案している SBSP システムである「CASSIOPeiA」(図 3-29 参照)が実行可能なコンセプトとして認められており、2040 年までに運用可能な GW 級の SBSP を建設することを目指す、としている。英国が描いている SBSP の開発計画を図 3-30 に示す。

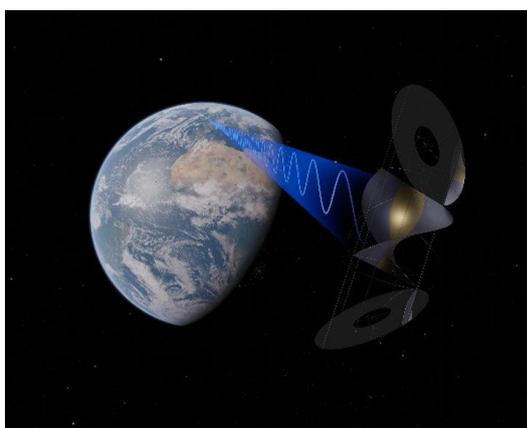


図 3-29 英国の SBSP システム案「CASSIOPeiA」(Credit:Space Energy Initiative)

出所)https://www.internationalelectric.com/ (2024年1月19日最終閲覧)

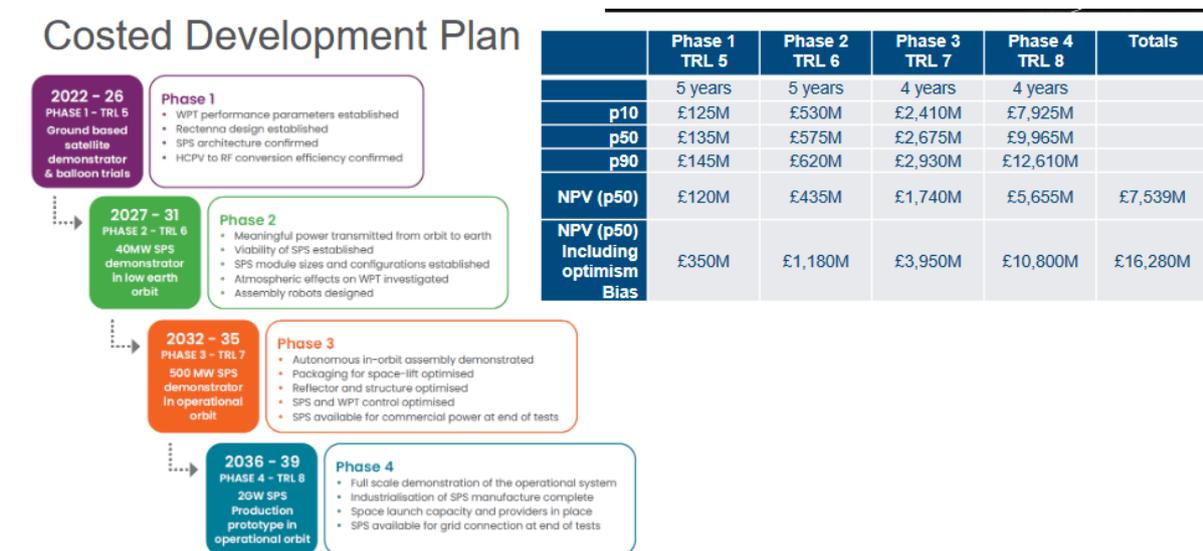


図 3-30 英国の SBSP 開発計画(Credit:BEIS)

出所)“Space Based Solar Power(SBSP) Innovation Programme”, Stakeholder Engagement, BEIS (Mar 2022)

2) Space Based Solar Power Innovation Competition

上記の SBSP イノベーション・プログラムの一環として、2022 年 7 月、BEIS は、最大 600 万ポンド(約 9 億 8 千万円)相当の助成金コンペティションである「Space Based Solar Power Innovation Competition」のガイダンス文書を発表した⁴³。

SBSPに必要な技術、エネルギーシステム、ミッションアーキテクチャを開発するプロジェクトに助成金(300 万ポンド(約 4 億 9 千万円)~さらに最大 300 万ポンドまで)を提供するというものとなっている。プロジェクト開始時点で技術成熟度(TRL)レベル 1~6 の技術を支援するとし、プロジェクトは以下の 4 つの分野に分けて募集されている。

- ワイヤレス電力伝送(nominally £1.25m budget)
- 高集光太陽光発電(nominally £1.25m budget)
- SBSP エネルギーシステムエンジニアリング(nominally £500k budget)
- SBSP 宇宙ミッションアーキテクチャのフェージビリティスタディ(up to £3m budget)

本コンペティションは BEIS Net Zero Innovation Portfolio (NZIP)の Energy Research および Disruptive Technologies テーマと英国宇宙庁(UKSA)の共同出資により行われている。なお募集期間は 2022 年 9 月 27 日までであり、その後、以下に示す 8 つのプロジェクトが総計 430 万ポンド(7 億 90 万円、1 ポンド=163 円で換算)の資金提供を受け、研究を進めている。

⁴³ <https://www.gov.uk/government/publications/space-based-solar-power-innovation-competition>
(2024年1月25日最終閲覧)

表 3-1 Space Based Solar Power Innovation Competition で実施されているプロジェクト

機関	タイトル	金額
Queen Mary University of London	A high-efficient wireless power transmission system using vector phased array transmitter and reflector array rectenna	£960,607
University of Bristol	SCOPES: SCalable OPen Electromagnetics for Solar power	£353,398
Satellite Applications Catapult Ltd	CASSIOPeiA Antenna with Steering Scaled Indoor Experiment (CASSIE)	£999,513
University of Cambridge	Concentrator solar cells to deliver space based solar power	£770,666
MicroLink Devices UK Ltd	Novel concentrator PV for SBSP	£449,955
Imperial College London	Whole-Energy System Integration of Space-Based Solar Power in the UK	£295,194
EDF Energy R&D UK Centre Ltd	Space Based Energy Application Management (Space BEAM)	£25,855
Satellite Applications Catapult Ltd	CASSIOPeiA Commercial and Concept Phase 0/A (C3P0/A)	£424,989

出所) <https://www.gov.uk/government/news/uk-shoots-for-the-stars-as-space-based-solar-power-prepares-for-lift-off> (2023年9月27日最終閲覧)

(2) Space Energy Initiative(SEI)

上記の Frazer-Nash Consultancy の検討結果を受けて、2021年8月、2040年までに運用可能な SBSP システムの開発を支援する目的で、Space Energy Initiative(SEI)と呼ばれる英国の政府機関、大学、企業による非公式な連合体が組織された。SEI の目的としては、以下に示す項目が掲げられている。

- SBSP 開発のための国際的なパートナーシップの構築
- 技術的、倫理的、商業的、政策的な指導と助言のための学際的な諮問委員会の設立
- 研究、開発および活動プログラムを提供するための資金の確保
- SBSP に関する意識向上と能力開発の推進
- SBSP の実現可能性とシステム設計に関する研究の拡大と優先順位付け
- 2030年までに行う最初の SBSP システムの設計・開発・運用

SEIのメンバは2022年9月現在、65以上の機関に及んでいる。多くの分野を扱う作業部会(WG)が組織されており、定期的に活動内容を報告するようになっている。



図 3-31 SEI の参加機関

出所) “The Space Energy Initiative The UK approach to developing Space Based Solar Power”, David A. Homfray, ISDC 2022

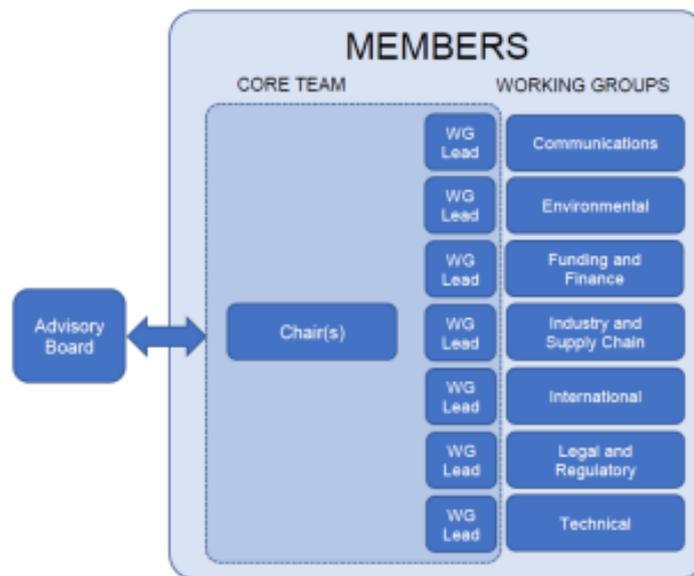


図 3-32 SEI の組織構造

出所) “The UK Space Energy Initiative – Towards a Practical Space Based Power System for the Net Zero Era”, Martin Soltau et.al, IAC-22-C3.1.3, Sept. 2022

(3) Catapult(SAC)による SBSP 研究開発プロジェクトの開始

2023 年 1 月、衛星利用推進センター(SAC:Satellite Applications Catapult)は、英国宇宙庁(UKSA)から資金を獲得し、将来の SBSP システムの研究開発プロジェクトを開始したと発表した⁴⁴。プロジェクトの総額は 62 万ポンドで、UKSA からの 46 万 5000 ポンドの助成金と、SAC の 15 万 5000 ポンドの資金により実施される。本プロジェクトでは、2023 年 3 月までに以下の 3 つの作業を実施した。

- 宇宙からの無線電力伝送を高高度でデモンストレーションする方法を調査し、衛星や航空機に対する SBSP の電力密度効果をシミュレートする。
- 軌道上でのサービスや組立に必要な標準治具インターフェースを開発するため、モジュール構造の取扱い・サービス・組み立てに必要なツールを研究し、標準化に向けたプロトタイプを作成する。
- 複雑なエネルギープログラムのための最適な技術計画を検討し、SBSP 関連技術の現在の基準と課題を特定し、技術の規制ロードマップを作成する。

なお、2022 年 4 月、SAC からのスピナウト組織として Space Solar 社が結成されている。

(4) Space Solar 社

2022 年 4 月、上記の SAC からスピナウトする形で Space Solar Ltd 社が設立された。SBSP の開発プログラムを所有し、提供するための商業組織という位置づけであり、Space Energy Initiative のメンバにより構成されている。

同社は現在、最初の無線電力実証機の完成を含め、2029 年までに宇宙から MW 規模の電力を送電する大規模な実証実験も計画している。また、2023 年 10 月には Thales Alenia Space(TAS)社と最初の商業 SBSP システムに関して協力するパートナーシップを締結した。

さらに 2024 年 2 月には、Frazer-Nash Consultancy 社との提携により、CASSIOPEIA コンセプトの性能特性を確認する詳細なエンジニアリング設計および解析研究の結果を発表した。この研究により構造、熱管理、姿勢・軌道制御、太陽光発電、光路の重要な分野における基本設計が確立され、性能と質量の目標が達成され、次の段階での開発の優先領域が確定した、としている⁴⁵。

(5) サウジアラビア王国との協力関係の構築に関する協議

2023 年 1 月、英国の Grant Shapps 商務長官とサウジ宇宙委員会会長兼通信・情報技術大臣 Abdullah Al-Swaha 氏が会談し、SBSP への共同投資の可能性を含む、宇宙における英国とサウジアラビアの協力関係について議論を行った⁴⁶。サウジアラビアのタブーク州に建設中の新都市 NEOM

⁴⁴ <https://sa.catapult.org.uk/news/uk-space-based-solar-power-project-secures-government-funding/> (2024 年 1 月 23 日最終閲覧)

⁴⁵ <https://www.spacesolar.co.uk/space-solar-takes-major-step-forward-with-its-cassiopeia-concept/> (2024 年 2 月 9 日最終閲覧)

⁴⁶ 英国とサウジアラビアは、貿易、投資、防衛、安全保障、エネルギーに基づく長年の二国間関係を構築している。

(スマートシティ・イノベーション、世界レベルの技術、データインテリジェンスを取り入れた都市)と英国の Catapult からスピンアウトした組織である Space Solar Ltd との連携により、今後数年間、各国が宇宙太陽光発電(SBSP)の開発に多額の投資を行うことが期待される、としている⁴⁷。

3.1.4 中国

中国は、2045 年までに世界の宇宙開発をリードする「宇宙強国」になり、2049 年までに世界をリードする大国となり、2060 年までにカーボンニュートラルを達成するという戦略を掲げている⁴⁸。化石燃料への依存を減らし、カーボンニュートラルを達成し、中国国民と軍にエネルギー安全保障を提供し、他国への影響力を高め、世界経済と軍事的支配という国家の長期的・戦略的目標を支えるために、長期的な SSPS プログラムを実行している。

(1) CAST が示す新しいロードマップ

1) 全体ロードマップ

中国では宇宙技術研究院(CAST:Chinese Academy of Space Technology)が中心となって SSPS 研究を進めている。2000 年代になって、CAST が中国政府に”Necessity and Feasibility Study Report of SPS”と題したレポートを提出し、これをきっかけに研究が本格的に始まったとされている。CAST の Qian Xuesen Laboratory の Xinbin HOU 氏と Ming Li 氏が中国における SSPS 技術のリーダーとなり、SSPS 研究プロジェクトを主導しているが、マルチロータリージョイント SPS(MR-SPS)等のコンセプトの提案等を行っている。さらに 2015 年には 2050 年までのロードマップを示し、2050 年には商用システムの運用を開始とする目標を掲げている。その後の 2022 年 6 月には、SPS の必須技術である無線電力伝送の技術実証を当初の計画より 2 年前倒しし、2028 年に LEO で行い(高度 400km の軌道上で 10kW 級の規模の実証)、早ければ 2030 年に GEO で 100kW 級の実験衛星による実証を行うと発表した⁴⁹。これらの実験は、2050 年に GEO 上で 2GW 級のエネルギーを生成するシステムを実現するための長期的な取り組みの一部と位置付けられている。2035 年には、マイクロ波送信アンテナを約 100m に拡大し、さらに 10MW の発電を行う予定となっている。(図 3-33～図 3-34 参照)

なお CAST が提唱する SSPS システムはロードマップ中に示されるように複数の回転ジョイントを持つリニア太陽電池アレイを多数搭載したマルチロータリー型(MR-SPS)となっている。この他、後述する西安電子科技大学は SSPS-OMEGA と呼ぶシステムを提案している(図 3-35 参照)。

この他の動きとしては、2022 年 11 月に開催された中国宇宙会議においては、完成したばかりの天宮宇宙ステーションを利用して SBSP に必要な主要技術を試験する予定があることが発表され、天宮の外側ですでに稼働しているロボットアームが SBSP のモジュールの軌道上での組立てテストに使用さ

⁴⁷ <https://www.gov.uk/government/news/business-secretary-in-talks-with-saudi-arabia-to-advance-commercial-collaboration-in-uk-space-based-solar> (2024年1月20日最終閲覧)

⁴⁸ <https://www.wri.org/news/statement-chinas-14th-five-year-plan-sets-foundation-climate-action-important-details-are> (2024年1月20日最終閲覧)

⁴⁹ ”Retro-directive microwave power beam steering technology of space solar power station,” the journal China Space Science and Technology (June 2, 2022)

れると述べられた。この試験システムは、その後独立して軌道上で、太陽電池アレイやその他のシステムを展開し、発電、変換、送電などの機能を実証する計画となっている⁵⁰。

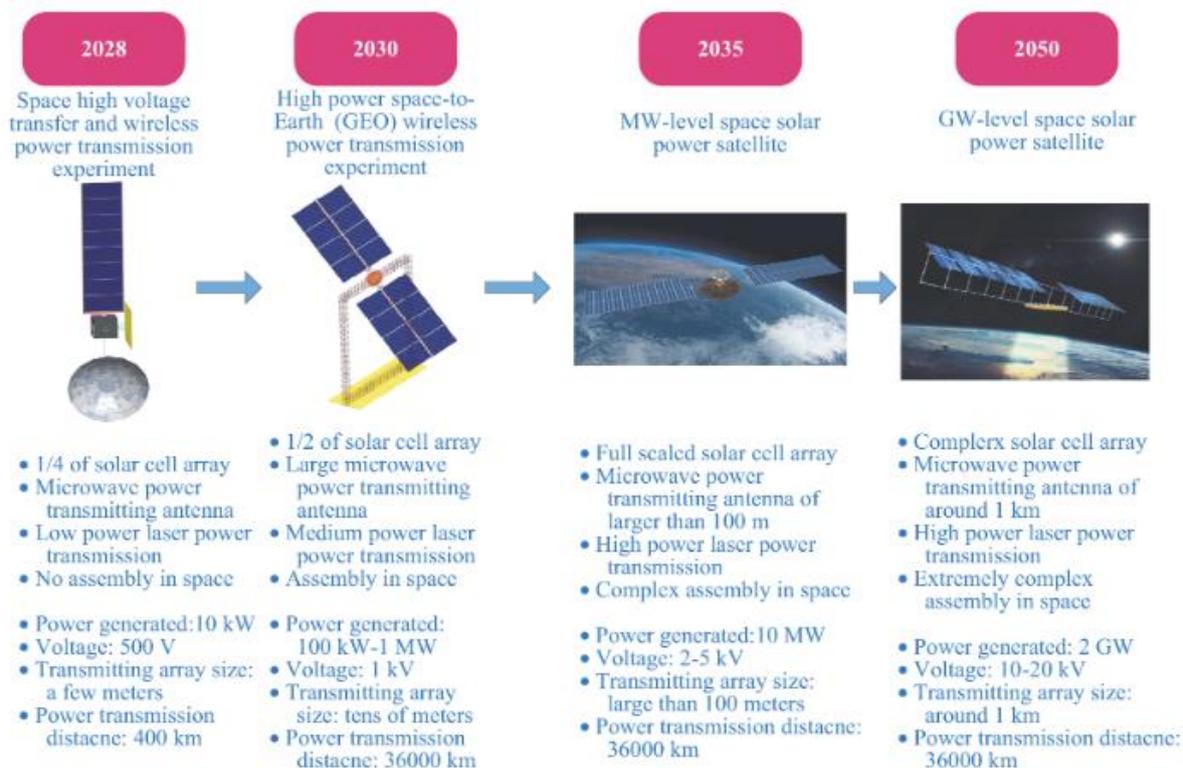


図 3-33 CAST による SSPS ロードマップ

出所)“Retro-directive microwave power beam steering technology for space solar power station”, HOU Xinbin, WANG Xi (CAST), Chinese Space Science and Technology, (Oct.25 2022 Vol.42 No.5 91-102)

Item	Phase 1	Phase 2	Phase 3	Phase 4
Transmitting distance	400 km	36 000 km	36 000 km	36 000 km
Operating frequency	5.8 GHz	5.8 GHz	5.8 GHz	5.8 GHz
Transmitting array dimension	2 m×2 m	10 m×30 m	Φ150 m	Φ1 000 m
Structural module dimension	0.5 m×0.5 m	5 m×5 m	5 m×5 m	5 m×5 m
Transmitting array architecture	4×4	2×6	30×30	200×30
Transmitted power	5 kW	250 kW	14.5 MW	1.6 GW
Beam steering accuracy	Better than 0.1°	Better than 0.03°	Better than 0.0036°	Better than 0.0005°
Rectifying array dimension	≥10 m×10 m	≥10 m×10 m	4.5 km×6.5 km	4.5 km×6.5 km
Power density at the center of rectifying array	~30 μW/m ²	~40 μW/m ²	~70 mW/m ²	~230 W/m ²

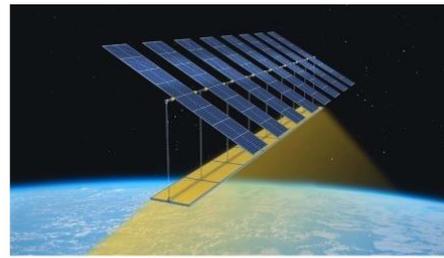
図 3-34 SSPS 開発のフェーズごとのミッション

出所)“Retro-directive microwave power beam steering technology for space solar power station”, HOU Xinbin, WANG Xi (CAST), Chinese Space Science and Technology, (Oct.25 2022 Vol.42 No.5 91-102)

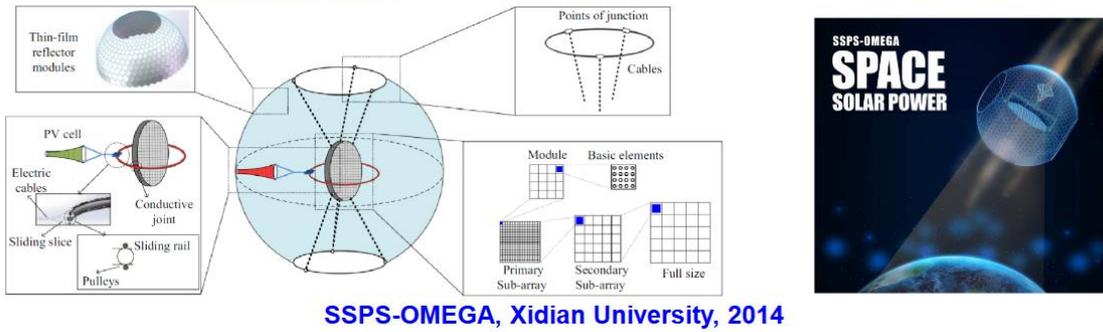
⁵⁰ <https://spacenews.com/china-to-use-space-station-to-test-space-based-solar-power/> (2023年12月20日最終閲覧)



MR-SPS, CAST, 2014



MMR-SPS, CAST, 2021



SSPS-OMEGA, Xidian University, 2014

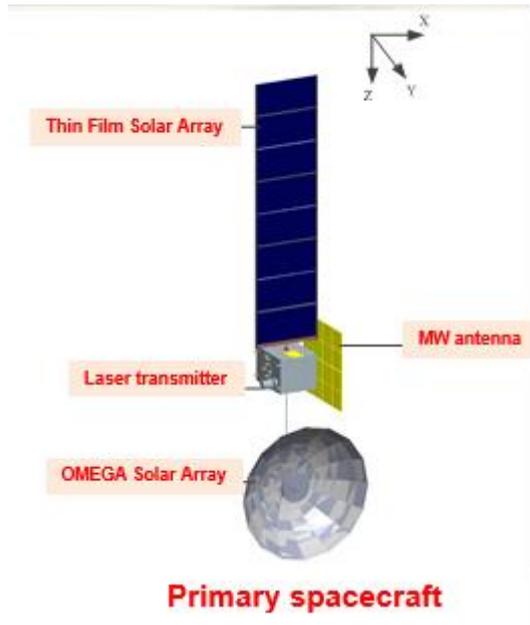
図 3-35 中国が提案する SSPS システムコンセプト

出所)“Development Status of SPS in China”, Xinbin Hou (CAST), Space Solar Power Session , ISDC 2022

2) 技術実証衛星案

a. LEO における技術実証

ロードマップの第一段階となる技術実証ミッションとして、LEO における 2 機の宇宙機と地上の受電システムを用いた高出力発電(10kW 級)と WPT 技術実証が提案されている。理論的なエネルギーチェーンと長距離ビーム制御精度を検証することを主目的とし、2 機の宇宙機間(Primary spacecraft/Receiving Spacecraft)でレーザーの送受電実証を行い、1 機の宇宙機と地上受電システム間(Primary spacecraft/Receiver on ground)でマイクロ波およびレーザーの送受電実証を行う計画となっている。図 3-36 に実証衛星のイメージ図と仕様を示す。



■ Mission specifications(draft)

1) Primary spacecraft

- MPT system
 - Frequency: 5.8GHz
 - RF Power: 4kW
 - Efficiency: 50%
 - Beam precision: 0.2°
- LPT system
 - Wavelength: 1064nm
 - Laser Power: 1kW
 - Efficiency : 35%
 - Beam precision : 5urad
- Thin film solar array
 - Output DC power: 10kW
 - Voltage: 500V
- Concentrator solar array
 - Output DC power: 10kW
 - Concentration ratio: 4

2) Receiving spacecraft

- Laser receiving
 - Distance: 10km-50km
 - Laser density: 1-3 sunlight
 - Laser cell efficiency (high) : 35%
- 3) Receiver on ground
 - MPT receiving
 - Distance : 400km
 - Microwave density : 30μW/m²
 - Rectenna efficiency : 6%
 - LPT receiving
 - Distance : 400km
 - Laser cell efficiency (low) : 20%

図 3-36 中国が提案する技術実証衛星案

出所)“Status of the Activities in China and Several Considerations on SPS Development”, Xinbin Hou, CAST, International (On-line) Conference on Energy from Space, Oct 2023

b. 月面軌道での LPT ミッション

上記の実証ミッションの他に、月面極軌道上でレーザー無線電力伝送プラットフォームを搭載した月周回機を運用し、月の極域にいる月表面探査ミッション用に非連続的に電力を供給するミッションも提案されている。図 3-36 に衛星の仕様を示す。

> Specifications:

■ Lunar Orbiter:

- Orbital Altitude : 500km;
- Output Power of Solar Array: 5kW
- Input Power of Laser: 12kW;
- Laser Wavelength: 1064nm;
- DC-Laser Efficiency: 38%;
- Laser Power: 4.4kW;
- Diameter of Emitter: 0.5m.

■ Lunar Surface Explorer:

- Laser PV: InGaAs;
- Laser-DC Efficiency : 38%;
- Diameter of receiver : 2.8m;
- Output Power: 1.2kW;
- Average Power: 200W.

図 3-37 中国が提案する月面軌道上での LPT ミッション

出所)“Status of the Activities in China and Several Considerations on SPS Development”, Xinbin Hou, CAST, International (On-line) Conference on Energy from Space, Oct 2023

(2) 重慶大学の研究施設の建設

近年の CAST の大きな動きとしては、2018 年 12 月から行っている重慶(碧山区和平村)での高出力無線エネルギー伝送研究施設の建設が挙げられる。重慶市璧山区人民政府、重慶大学と共同で実施しているものであり、一時は建設中断等の状況にも陥ったが、現在は完成に向けて建設が進められている。コア実験建設エリアがあり、その他、実験科学総合ビルと実験プラットフォームが建設される。コア実験エリアにはリフトオフテストサイト、気球プラットフォームデバッグホール、その他の施設が含まれる。基地建設費用として 1 億元(約 1500 万ドル)の初期投資が行われている。

完成時期は発表のたびに遅延している⁵¹が、さらなる実験設備の新設の検討も行われている。

中国政府は 2060 年までのカーボンニュートラル目標を掲げており、本研究はエネルギー部門からの強い支持を得られているとのことである。

(3) 西安電子科技大学の SBSP 実証実験

西安電子科技大学 (Xidian University)では SSPS OMEGA (Orb-Shape Membrane Energy Gathering Array)コンセプトの検討を行うと共に、2018 年から SSPS (Space Solar Power Station)デモンストレーション・実証実験システムの建設に着手している。大学のキャンパス内に、75m の試験塔を設置し、塔の中央には、地上から 55m の高さに、直径約 6.7m の半球状の集光器が 4 つ設置されている。球状の反射面に太陽光が当たると、一定の集光部に収束し、太陽電池で直流を発生させた後、マイクロ波に変換して送信アンテナから地上に送信するというシステムである。

⁵¹ 2023 年 10 月に開催された International (On-line) Conference on Energy from Space における CAST の発表では、2023 年に完了予定となっている。

2022年6月には、上記のSBSPデモンストレーション・実証実験施設を完成させた⁵²。本施設は世界初となるfull-link and full-systemであり、「OMEGA-SSPS地上試験検証システム」とも呼ばれている。試験システムは75mの鉄骨構造であり、太陽エネルギーを集め、直流電気に変換するように設計されている。本システムでは、集光レンズの中心に送信アンテナと連動した太陽電池アレイが設置されており、太陽エネルギーを集め、直流電気に変換、さらにマイクロ波に変換した後アンテナから55m離れた場所に送信する。(RF出力:2kW、DC-DC伝送効率:15%)集光・光電変換、マイクロ波へのエネルギー変換、マイクロ波伝送・波形最適化、マイクロ波ビーム照準計測・制御、マイクロ波受信・整流などの技術が実証可能なシステムとなっている(図3-38参照)。



図 3-38 西安電子科技大学の実証実験施設

出所) <https://news.cgtn.com/news/2022-06-22/China-aims-to-construct-first-Space-Solar-Power-Station-in-2028-1b49ktMx5W8/index.html> (2023年10月11日最終閲覧)

⁵² <https://spacenews.com/chinese-university-completes-space-based-solar-power-ground-test-facility/> (2023年10月7日最終閲覧)

(4) 中国宇宙航行学会のSSP 委員会の設立

2020年9月、中国宇宙航行学会(Chinese Society of Astronautics)がSSP委員会の設立を承認したことを発表し、2021年3月にSSP委員会設立式(CSSP-CSA:Committee of Space Solar Power, Chinese Society of Astronautics)が北京にて開催された。SSPSの分野における学術交流と技術協力を強化し、学術的なアイデアの発展、SSPSのための高度な人材育成、SSPSの分野における新技術、アイデア、成果の交換、SSPSキーテクノロジーの開発、キーマテリアルやデバイスのブレークスルー、重要な科学的課題の研究の促進を目的としている。7名の学識経験者を顧問として招聘し、68名の委員を選出している。

2022年8月にも重慶にて委員会(中国航天科技院宇宙太陽発電所専門委員会学術交流会、第4回全国宇宙太陽発電所技術開発セミナー、第3回中国宇宙太陽発電所推進委員会会議)を開催している。専門委員会のメンバ20数名、30余りの大学、研究機関、企業から160余りの専門家が出席した模様である⁵³。

さらに2023年にもオンライン公開講座を開催したり(参加者は15,000名以上)、中国SSP青少年大会を開催したり(40チーム以上が参加)等の活動も行っている。

3.1.5 その他

上項で取り上げた国以外でも、海外でSSPSの研究開発に取り組んでいる国としてはロシア、インド、韓国、オーストラリア等が挙げられる。ここ数年の動きに関する情報がない国もあるが、以下にこれらの国の取組みを簡潔に整理する。さらに、国際的なグループとして2021~2022年に立ち上がったIAA(International Academy of Astronautics)のPermanent Committee on SSPについても示す。

(1) ロシア

2022年1月、ロシア宇宙庁(Roscosmos)は、従来のエネルギー源への依存を減らす目的で、宇宙空間に設置するSSPSのアイデアを提案した。その際に、Roscosmosの一部であるRussian Space Systems Holding(RKS)が、地球の遠隔地で電力の無停電供給を行うための太陽宇宙発電所(SKES)プロジェクトに関する作業を完了したことを述べた⁵⁴。

RKSは、solar space power plant(SCES)の開発を2012年より行っている。島嶼部、山岳部、北方部といった到達困難な地域への電力供給や、宇宙船の定時・緊急充電のために設計されているものである。SCESは2つのセグメントから構成されている。1つ目の送信モジュールは、面積70m²の無人宇宙システムで、太陽エネルギーを蓄積し地上に送信する。2つ目の受信モジュールは、バッテリーを備えた地上のレクテナ(移動式アンテナ)システムで、宇宙システムからの太陽エネルギーをレーザーで受光し、電力に変換して消費者に配給する。送信モジュールは軌道上充電ステーションとしても機能

⁵³ <http://www.csa.spacechina.com/n2489262/n2489292/c3593576/content.html> (2024年1月20日最終閲覧)

⁵⁴ <https://www.republicworld.com/science/space/roscosmos-pitches-solar-space-power-plant-idea-for-electricity-supply-to-earth-articleshow.html> (2024年1月23日最終閲覧)

し、蓄積されたエネルギーを軌道上の衛星に伝送して充電を行うことができる、というコンセプトになっている⁵⁵。

宇宙システムは傾斜角 82°、90°、98°の太陽同期軌道で運用されるが、地上の移動式レクテナに正確に当てるには、同期を取るソフトウェアが必要である。

SCES は火力発電所、水力発電所、原子力発電所といった従来のエネルギー生成方法と競合することは困難であるとされ、小規模なシステムで長期間に渡り宇宙空間で充電を行って運用されることが想定されている(600MW の充電に1カ月半を要する)。

(2) インド

インドでは、過去に Abdul Kalam 元大統領(第11代。任期2002年~2007年)が SSPS 研究に熱心であり、米国宇宙協会 NSS(National Space Society)との関係を強化し、2010年には Kalam-NSS Energy Initiative を発表するなどの活動を行っていたが、2015年に死去し、その後のインドの動きについての情報はなかった。その後2018年頃から ISRO(Indian Space Research Organisation)の Chariman の Sivan 氏が、国のエネルギー資源の枯渇問題に対応するために SSPS の構築の必要性を説き始めている。その流れを受けて、2021年11月に開催された ISRO DTDI(Directorate of Technology Development and Innovation)部門の宇宙分野の潜在的な技術を開放する破壊的な将来技術(Disruptive Future Tech)サミット「DTDI-Technology-Conclave-2021」では、未来型技術開発プロジェクトの策定に着手していることが言及され、その破壊的な将来技術の一つとして Space-Based-Solar-Power が含まれており、今後の関連技術開発の促進が期待されることとなっている。

(3) 韓国

韓国も2050年までの温室効果ガス排出 Net Zero を国家ビジョンとして掲げ、実行シナリオを発表している。もともと国土が狭く、再生可能エネルギーでの発電には不向きな国であるため、SBSP による再生エネルギーの確保が目標を達成するためのブレークスルーになり得る、として SBSP 開発に向けて動き始めている。

韓国では、KARI(Korea Aerospace Research Institute)が2017年11月および2019年2月の2回、韓国内閣府内で国会議員を招きワークショップ(International Workshop for Space Based Solar Power)を開催している。SSPS 検討のために KARI を中心として7組織20名程度の組織が立ち上がったとの報告がなされた、その後、K-SSPS 等のコンセプト検討が実施されており、IAC2019 で韓国 SBSP の概念設計を発表し、その後は継続的に「SSPS の廃棄方法」「韓国初の SSPS パイロットシステム」「LEO 宇宙太陽発電システム」等の発表を行っている。

2021年頃からは、予算と国内の技術的な準備状況を考慮し、KARI と KERI(Korea Electrotechnology Research Institute)の2機関が共同で、宇宙での電力伝送を実証するための宇宙実験プラットフォームとして2機の小型衛星(質量約120kg)システムを提案している。1機は送

⁵⁵ <http://www.parabolicarc.com/2022/02/02/russian-space-systems-developing-space-based-solar-power-satellite/> (2024年1月23日最終閲覧)

電衛星、もう1機は受電衛星であるが、地上 WPT モジュールの宇宙用モジュールにアップグレードするために、軽量設計、展開型アンテナ設計、性能向上手法の実装等を行っている⁵⁶。ただし太陽電池パネルの大きさには限界があるため、太陽エネルギーを送電衛星の電池に蓄電した後、受電衛星に送電するというシステムになっている。本システムの検討結果は、将来的に 2020 年代にパイロットシステムが実現する際に、設計や運用のガイドラインとして活用されることが期待されている。

なお、KERI による WPT の取組については3. 2項でも示している。

(4) オーストラリア

2021 年 12 月に発表されたオーストラリア下院産業・イノベーション・科学・資源常任委員会の宇宙産業報告書「The now frontier: developing Australia's space industry」では、SSPS 技術のような革新的な宇宙に関する提案を特定し、開発メカニズムを検討するよう提言した。

また、最近ではビクトリア州に Space Solar Technologies 社というベンチャー企業が設立されている⁵⁷。SSPS を開発・展開し、最終的にはオーストラリアの電力市場およびオーストラリアから他国へのエネルギー輸出のために、少なくとも合計 18GW の発電容量のシステムを開発する計画である。米国の John C. Mankins 氏とも協力関係を築いている。

(5) IAA Permanent Committee on SSP

2021年12月、IAA(International Academy of Astronautics)は、主に SSP (Space Solar Power)に取組む国際的な活動の枠組みを構築し、調整することを目的として、新たな常任委員会を設置することを決定した。⁵⁸(主査:Mankins 氏、副主査:田中孝治准教授)1) IAA 会員に年次報告書を提出する、2) このテーマに関する定期的なワークショップを実施する、3) SSP の分野における技術的研究(‘cosmic study’を含む)に参加し(適切な場合には)主導を行う、4) 適宜、委員会の活動を遂行するための小委員会を組織する、等を活動の目標として掲げている。現在、以下の小委員会の設置が検討されている。

<SSP Permanent Committee 下に設置される Sub-Committee>

- Sub-Committee 1: Oversight and Integration
- Sub-Committee 2: Implementation Coordination & Cooperation
- Sub-Committee 3: Legal & Regulatory Considerations
- Sub-Committee 4: Wireless Power Transmission
- Sub-Committee 5: SPS Systems & Technologies (Identification and Assessment)

⁵⁶ <https://iafastro.directory/iac/paper/id/69960/abstract-pdf/IAC-22,C3,1,5,x69960.brief.pdf> (2023年11月17日最終閲覧)

⁵⁷ <https://www.solarspacetechnologies.com.au/> (2024年2月9日最終閲覧)

⁵⁸ <https://iaaspace.org/about/permanent-committees/#1658152483135-da4f166b-7716> (2023年12月14日閲覧)

- Sub-Committee 6: Concept of Operations (CONOPS) for SSP
- Sub-Committee 7: Markets and Financials
- Sub-Committee 8: Education and Outreach for SSP

3.1.6 まとめ

近年、米国、欧州、中国等を中心として、世界の各国における SSPS 実現へ向けた検討や開発への取り組みが積極的に行われている。主な背景としては、①軌道上への輸送コストが大幅に低減したこと、②環境目標として掲げる温室効果ガス排出 Net Zero に向けて、世界の多くの国・地域が積極的な取り組みを始めていること、③月面や宇宙空間へのエネルギー供給など技術の派生展開(スピンオフ)のニーズが顕在化してきていること、等が挙げられる。

米国では、現在の SSPS 研究開発の主流は米空軍研究所(AFRL)と米海軍研究所(NRL)であり、それぞれ要素技術の軌道上実証を進めている。NRL は 2019～2020 年にかけて地上、ISS 内、X-37B による軌道上で関連実験を行っている(X-37B は 2022 年 11 月に帰還)。また AFRL は 2025 年に「Arachne」と呼ばれる軌道上実証実験を計画しており、1 億ドル以上の予算を確保し開発を進めている。なお米国はこれとは別にカリフォルニア工科大学(Caltech)が 1 億ドル以上の寄付を得て Space Solar Power Initiative(SSPI)と呼ばれるプロジェクトを開始しており、軌道上実証機 SSPD(Space-based Solar Power Demonstrator)を 2023 年 1 月に打上げ、主要な重要要素技術の軌道上試験に成功している。AFRL および Caltech ともに Northrop Grumman 社が共同で開発を行っている。さらに、2022 年からは NASA の技術・政策・戦略室(OTPS)による SSPS に関する再評価が実施され、2024 年 1 月に報告書が公開された。

欧州では、ESA が欧州の温室効果ガス排出 Net Zero とエネルギー自給を達成することを目的に、2022 年 12 月、SOLARIS と呼ばれる欧州向け SBSP 準備プログラムを正式に開始した。SOLARIS は SBSP に関連する技術的な問題を解決するための 3 年間の研究であり、欧州産業界の協力の下、技術的妥当性、メリット、導入オプション、商用利用の可能性、新興技術としてのリスク評価を行うとしている。またスタディ結果は 2025 年の次の閣僚会議において本格的な SBSP 開発の推進を決定するための検討材料とされる予定となっている。欧州における SBSP 導入の最終的な目標は、欧州が 2050 年までに温室効果ガス排出 Net Zero の目標を達成することの支援であるとし、2040 年に商用スケールの実用プラントを構築することを目標にロードマップを描いている。他のエネルギー源との関係については、SBSP は再生可能エネルギーでありながらベースロード電力となるという特性を有しているため、地上太陽光や風力などの断続的な供給源と競合するものではないとし、SBSP は今後数十年の間に欧州のエネルギー部門の脱炭素化に大きく貢献することができるものであることを示している。また、そのためプログラムの遂行に当たっては、ESA はエネルギー分野の主要なステークホルダーと積極的に関わることを重視している。ESA ではまた、SBSP 開発において達成されるブレークスルー技術の進歩は非常に貴重であり、他の多くの宇宙活動の取り組みに適用できることも主張している。

英国では、2050 年までに温室効果ガス排出 Net Zero を達成することを目標としており、クリーンで安価、安全で信頼性の高いエネルギー源としての SBSP の可能性について注目を始め、2020 年より UKSA および BEIS による本格的な実現可能性についてのスタディを開始した。スタディの結果、SBSP は技術的に実現可能であり温室効果ガス排出 Net Zero を実現する新しい選択肢の一つとな

り得ることが分かり、英国政府の優先順位に沿った開発であること、先進的なコンセプトではコスト的にも競争力があり、英国に広範な経済的利益をもたらすものであることが示されている。また、これらの検討結果を受けて、BEIS は 2020 年 7 月には最大 600 万ポンド相当の助成金コンペティションである「Space Based Solar Power Innovation Competition」をスタートさせている。また 2023 年 1 月には衛星利用推進センター(SAC:Satellite Applications Catapult)も、UKSA から資金を獲得し、将来の SBSP システムの研究開発プロジェクトを開始している。さらに英国は SBSP への共同投資の可能性を含む、宇宙における英国とサウジアラビアの協力関係について協議も始めている。英国では 2040 年までに運用可能な GW 級の SBSP を設立することを目指す、としている。現在は、ESA の SOLARIS プログラムへの参加を並行して進めながら、SBSP の開発への取組みを行う形となっている。

中国における SSPS 研究は 2010 年より前から CAST を中心に行われてきていたが、2018 年頃から重慶市璧山区や西安電子科技大学に大規模な地上実験設備を建設するなどの動きが出てきており活発化している。2022 年 6 月には、西安電子科技大学のキャンパス内の「OMEGA-SSPS 地上試験検証システム」と呼ばれる地上実験施設が完成している。本施設は世界初となる full-link and full-system であり、75m の鉄骨構造の大規模な施設となっている。中国における SSPS への取組み活動は、2020 年 9 月には、中国政府が 2060 年までのカーボンニュートラル達成の目標を掲げたことも追い風となり、軍事用と民生用のデュアルユース戦略で中国は SSPS の世界的なリーダーになることを意図して、研究開発を加速させている。2028 年に LEO で 10kW 級の規模の実証を行い、早ければ 2030 年に GEO で実験衛星による実証を行うというロードマップも公表しており、これらの実証実験は、2050 年に GEO 上で 2GW 級のエネルギーを生成するシステムを実現するための長期的な取り組みの一部と位置付けられている。なお、中国の SSPS 開発に関する進捗状況が積極的に公表されていたのは 1 年ほど前までで、2023 年以降の進捗状況はあまり明らかにされていない。

表 3-2 に日本を含む各国のロードマップの比較を示す。

表 3-2 各国の SSPS に関するロードマップの比較

	地上実証	軌道上実証	軌道上電力伝送実証			
			～100kW級	～1MW級	100MW級	GW級
米国	Active	Active	2025	—	—	—
欧州	—	—	—	2030	2035	2040
英国	～2026	2027～31	2027～31	2027～31	2032～35	2036～39
中国	Active	— (*1)	2028	2030 GEO	2035	2050
日本	Active	— (*2)	FY2025	2030s	2030s	2040s
*1 天宮宇宙ステーションを利用した計画はあり						
*2 HTV-X1号機による実証計画あり						

出所)“ Space Policy Review The Promise of Space-Based Solar Power”, American Foreign Policy Council (Sept 2022)等の各種資料を基に作成

3.2 近年の各国の無線給電技術(WPT)に関する調査

米国、欧州、中国、その他アジア等を対象地域として、ここ数年内に実施されている空間伝送型電波(主にマイクロ波)方式 WPT およびレーザー方式 WPT の実現を目指した研究開発または実用化に向けた動きに関する調査を行った。

3.2.1 パワービーミング WPT の開発動向

本項では近年(2020 年頃以降)に行われた主に高強度長距離(数十 m 程度以上)の伝送距離を対象とするパワービーミング WPT(Wireless Power Transfer)の開発動向を示す。

(1) 電波方式 WPT(パワービーミング)の開発動向

1) 米国

a. 米海軍研究所(NRL)の SCOPE-M プロジェクト

SCOPE-M(Safe and COntinuous Power bEaming - Microwave)プロジェクトは 1kW の電力を 1km 伝送するマイクロ波送電研究プロジェクトであり、国防総省研究技術担当次官室(Office of the Under Secretary of Defense for Research and Engineering)の運用エネルギー性能向上基金(OECIF:Operational Energy Capability Improvement Fund)から資金提供を受け、NRLの Christopher Rodenbeck 博士の主導の下で進められている。SSPS 研究のキーパーソンである NRL の Paul Jaffe 氏も関与している。

2022 年にメリーランド州ブロッサムポイントの米国陸軍研究施設において、直径 5.4m の X バンド送信機から 1046m のスタンドオフ距離で 1.6kW の電力を供給するデモンストレーションを実施した(図 3-39 参照)。また、マサチューセッツ州ウェストフォードの MIT ヘイスタック天文台にある HUSIR (Haystack Ultrawideband Satellite Imaging Radar)を用いて、ブロッサムポイントでのレクテナを HUSIR 用に設計変更して、HUSIR 送信機から 1141m の距離となる 70.6m の高さの場所にレクテナを、その下部に LED ディスプレイを設置し、そこに 1.2kW の電力を送信し、LED ライトを点灯させた(図 3-40 参照)。ブロッサムポイントでは目標の 60%を上回る効率を達成し、MIT では同じピークパワーはブロッサムポイントより小さかったものの、平均パワーレベルが高く、より多くのエネルギーが供給された。

10GHz の X 帯を使用した理由としては安価で成熟した技術であることと、大雨等による電力損失が 5%未満であることが挙げられている。Paul Jaffe 氏は「今回の実証実験により、地上、宇宙、そして宇宙から地球への電力伝送において、国際標準化団体が定めた安全基準値内の電力密度を実現する道が開かれた」と述べている。

SCOPE-M プロジェクトの電子技術者である Brian Tierney 博士によると、米国防総省は、攻撃を受けやすい状態になる可能性がある部隊の燃料供給への依存を低減できるようになるため、宇宙からの無線電力ビーム転送の実現性に関心を寄せているという。

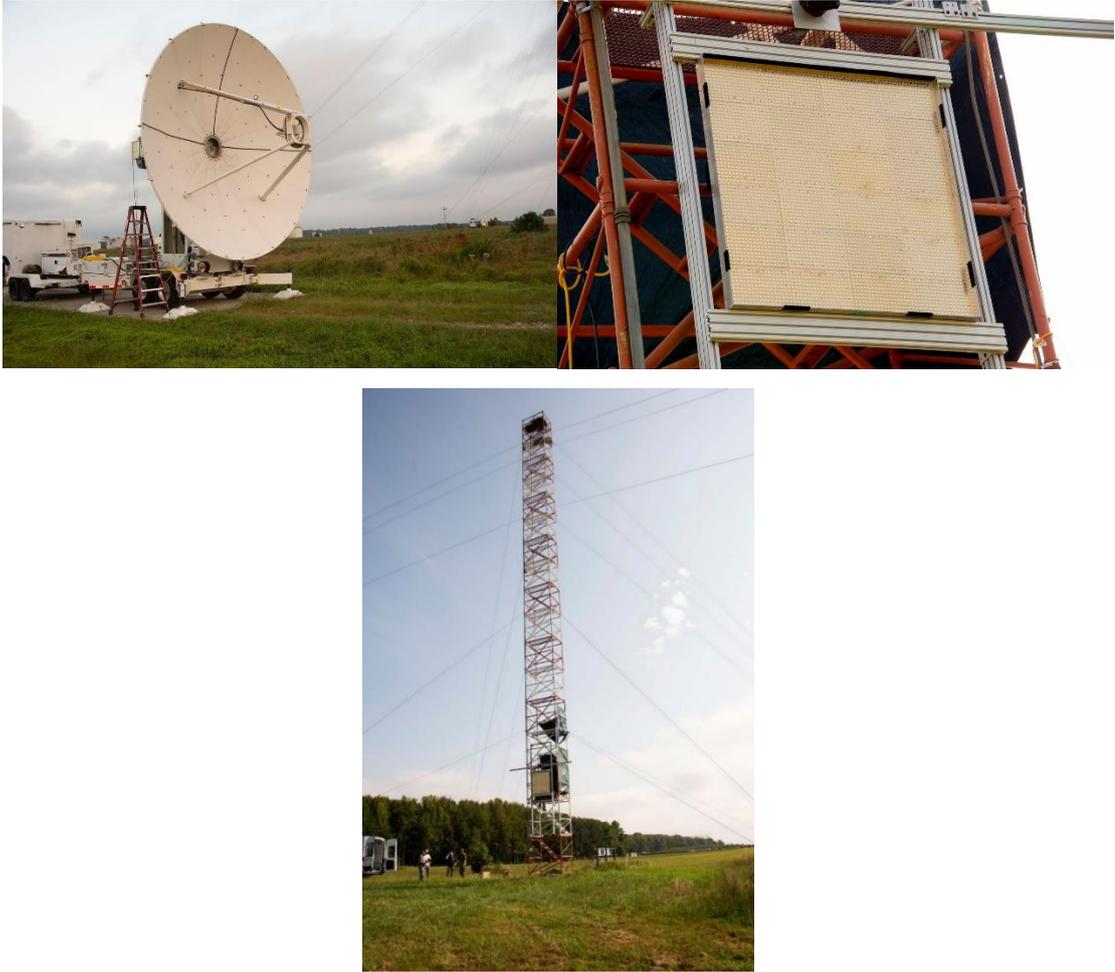


図 3-39 ブロッサムポイントで実施されたマイクロ波送電実験の送電アンテナ(左上)とレクテナ(右上と下)
(Credit : NRL)

出所) <https://www.nrl.navy.mil/Media/News/Article/3004608/nrl-conducts-successful-terrestrial-microwave-power-beaming-demonstration/>、(2023年12月26日最終閲覧)



図 3-40 MIT の HUSIR 送信機を用いて実施されたマイクロ波送電による LED 点灯実験(Credit : NRL)

出所) <https://dsiac.org/articles/nrl-conducts-successful-terrestrial-microwave-power-beaming-demonstration-2/>、(2023年12月26日最終閲覧)

b. 米国防高等研究計画局(DARPA)の POWER プログラム

米国防高等研究計画局(DARPA:Defense Advanced Research Projects Agency)の戦術技術局(TTO:Tactical Technology Office)は 2022 年 10 月より POWER(Persistent Optical Wireless Energy Relay)プログラムを実施している。POWER プログラムは、「無線電力ビームを活用して、動的で適応性のある光速の無線エネルギー網を構築することにより⁵⁹」、革新的なエアボーン・エネルギー分配プラットフォームを開発することを目的としている。プログラムのマネージャーである Paul Calhoun 大佐によると、軍隊は、特に深刻なエネルギー問題に直面しており、それがこの技術革新の原動力となっている。

POWER プログラムでは、主に光エネルギーリレー技術の開発を行い、空中での光エネルギーリレーシステムを設計・実証し、地上のレーザーと高高度長距離伝送技術を結び付けることを目指している。光エネルギーを転送しながら、途中の各ポイントでビーム品質を最大化し、必要に応じてエネルギーを選択的に収集する効率的なパワーリレーを開発することが重要となる。2023 年 9 月、DARPA は POWER プログラムの第一フェーズを開始することを明らかにしているが、本研究の内容については(2)項に示す。

マイクロ波送電に関しては、2022 年 12 月、POWER プログラムの一部として、DARPA TTO は小型無人航空機システムにおける RF 電力ビームとリレーの機能を検討するための RFI(Request For Information)を発行した⁶⁰。特定の環境とシナリオでは、RF 電力ビームは光電力ビームの伝送方式よりも大きな利点を提供するとし、無線 RF 電力伝送の実現により、小型無人航空機システム(SUAS: small unmanned aerial systems)は搭載するエネルギー貯蔵装置の重量を減らし、ペイロードの電力密度を高め、航続距離、性能、運用を拡大し、従来は大型の有人システムを必要としていた任務を代替できるようになる、ことを示している。さらに SUAS に RF 電力のリレー機能を持たせれば、ネットワーク範囲内のセンサ、デバイス、車両にエネルギーを供給することが可能となる、としている。

そのため DARPA は、複数の移動地上ノードから直径 1m までの開口を持つ複数の SUAS への RF 電力ビームを可能にする技術の特定に関心を持っているが、より小型の送信機で遠距離に電力を供給するための 1 つの解決策として、分散型コヒーレント送信機の検討を試みている。1 台または多数の飛行体に対するコヒーレントビーム形成の重要な要素技術である送信アパーチャと受信アパーチャの相対位置を動的に追跡する技術を開発し、さらに RF を有用な電気エネルギーに変換する技術の向上も目指す。さらに効果的で選択的な RF 電力リレーをサポートする技術の開発にも取り組む。本 RFI は、そのために必要な 100m から 1km の距離で RF 電力を照射するための技術や革新的なソリューションに関する情報を求めるものであり、そのためには、モバイル分散アパーチャによるコヒーレントビームフォーミング、RF 電力リレー、送受信機間の協調的追跡、自律リソースとミッション管理、RF から電気エネルギー変換の向上等の技術が含まれる、としている。

⁵⁹ 原文は“by leveraging wireless power beaming to create a dynamic, adaptive, speed of light wireless energy web.”

⁶⁰ Tactical Wireless Power Beaming Technologies for Energy Web Dominance Request for Information (Notice ID:DARPA-SN-23-22)

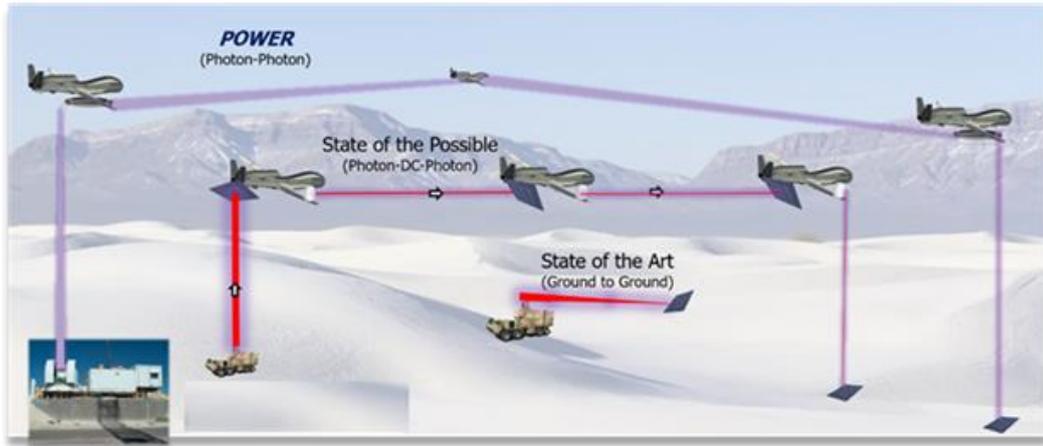


図 3-41 POWER プログラムの開発内容 (Credit : DARPA)

出所) <https://www.darpa.mil/news-events/2022-10-05b> (2024 年 1 月 16 日最終閲覧)

c. スタートアップの動向

ア) Virtus Solis 社

Virtus Solis Technologies 社は、2018 年に米国のミシガン州トロイに設立されたスタートアップ企業であり、SSPS と WPT に関する技術の開発を行っている。

同社は、NASA の宇宙技術ミッション局 (STMD) が主催する賞金付きコンテスト「Centennial Challenges⁶¹」の一つである「Watts on the Moon Challenge⁶²」に参加した実績を持つ⁶³。本コンテストは二つのフェーズから構成され、うち第二フェーズは実証が含まれる、より実践的なフェーズであり、3 段階のゲートを設け事業者の成果を評価することとなっている。2022 年 8 月に同社は第二フェーズのレベル 1 の優勝 7 事業者の 1 事業者として 20 万ドルを獲得している。なお本チャレンジは、既存の電源から電力を取り出し、月面環境下で 3km にわたってエネルギーを供給するコンセプトを提出するというものであった。

また 2023 年 3 月には、インディアナ州ウェストフィールドのグランドパークにて、投資家や関係者の前で WPT 電力伝送に関するシステム実証を行った。アンテナ素子 6,400 個からなる送電アンテナよりアンテナ素子 1,944 個からなる 1.32m×1.62m の受信アンテナ (レクテナ) を用いて、送信機の向きを固定して、複数のターゲットにワイヤレス・パワー・ビーム・ステアリングを行い、100m の距離に渡って

⁶¹ NASA の STMD 内のチャレンジ・プログラムの一つであり、宇宙開発に応用できる基礎研究、応用研究、技術開発等におけるイノベーション促進のため開催される賞金付きコンテスト。民間企業が政府資金に頼らず技術開発を推進し、達成された場合のみ賞金が授与される。2005 年から開催。

⁶² NASA の技術ギャップに対応し、宇宙飛行や将来の月面での運用に向けてさらに開発する必要があるエネルギー分配・管理・貯蔵のためのソリューションを求めるコンテストである。2020 年 9 月から開始され、NASA の Glenn Research Center と Marshall Space Flight Center にある Centennial Challenges の一部により運営されている。本コンテストで発見された斬新なソリューションは、月や宇宙の探査に変化をもたらすだけでなく、地球上での新しい電力供給手段を促進するのに役立つ可能性がある、としている。第一フェーズおよび第二フェーズより構成されるが、2021 年 5 月からの第一フェーズでは総額 500 万ドルの資金を提供している。

⁶³ <https://www.nasa.gov/centers-and-facilities/glenn/seven-teams-advance-in-nasas-5m-watts-on-the-moon-challenge/> (2023 年 10 月 4 日最終閲覧)

68W の電力の送信を行った(図 3-42 参照)。

また 2023 年 6 月には、Orbital Composites 社と商用の世界初となる MW 級規模の SBSP を建造するための提携 MOU を締結している⁶⁴。さらに 2024 年 2 月に、両社は SBSP の実証実験を 2027 年に行うことを発表した⁶⁵。中軌道(MEO)において、太陽光パネルを宇宙空間で組み立てて、1kW 以上の地球への送電などの実証を行う計画となっている。両社は本ミッションを「MW 級の大規模な商用太陽光発電設備を宇宙に設置するための先駆け」と位置づけている。

なお、同社の SBSP コンセプトはモルニア楕円軌道にコンステレーションを展開するというもので、2 基の衛星アレイコンステレーションにより、ある地点で 90%の電力を供給することができ、3 つあれば 100%の電力を冗長的に供給することができるとしている。16 基の衛星アレイからなるコンステレーションがあれば、地球上のどこでも 24 時間 365 日の電力を供給することができる。衛星アレイは 100MW から 20GW まで拡張可能であり、フェーズドアレイアンテナを使用することで、複数の地上局が同時に電力を受け取ることができる。必要に応じてコンステレーションにアレイを追加し、システム容量を年間ギガワット単位で拡張できる。衛星アレイを構成するタイルは 1.65m の六角形で、片面が太陽電池、片面が送電アンテナとなっている可動部のない一体型構造となっている。また六角形の各面には、他のタイルとの相互接続を可能にする機能がある(図 3-43 参照)。



図 3-42 WPT 実験に用いられた送信アンテナのプロトタイプ

出所) <https://virtussolis.space/blog/virtus-solis-space-based-solar-and-power-beaming-white-paper-2023>
(2023 年 10 月 5 日最終閲覧)

⁶⁴ <https://virtussolis.space/blog/virtus-solis-enters-into-manufacturing-agreement-with-orbital-composites> (2023 年 10 月 5 日最終閲覧)

⁶⁵ <https://spacenews.com/orbital-composites-and-virtus-solis-announce-space-based-solar-power-demonstration/> (2024 年 2 月 9 日最終閲覧)

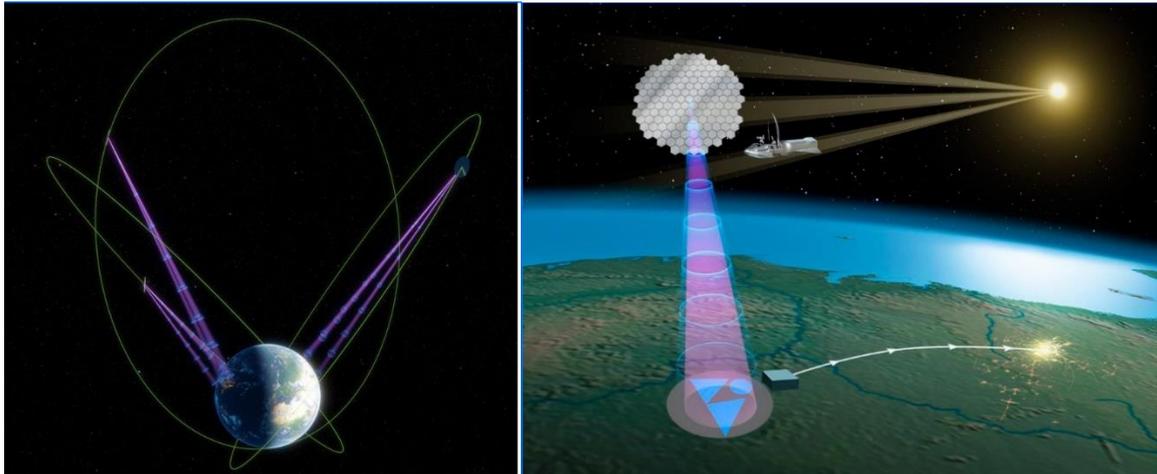


図 3-43 Virtus Solis 社の SBSP コンセプト

出所) <https://virtussolis.space/blog/virtus-solis-space-based-solar-and-power-beaming-white-paper-2023>
(2023 年 10 月 5 日最終閲覧)

イ) Orbital Composites 社

Orbital Composites 社は、2014 年に設立された米国カリフォルニア州のスタートアップである。多様な素材を扱える積層造形技術と積層造形向けのロボティクス技術に強みを有しており SBIR(Small Business Innovation Research)契約により、宇宙でのサービス、組立て、製造開発技術の開発を行っている⁶⁶。

2023 年 7 月には米国宇宙軍(USSF)と軌道上で 3D プリンターによるブロードバンド通信用アンテナ製造実験に関する契約を締結した⁶⁶。最終的には、この 10 年後に Axiom Space 社の民間宇宙ステーションの外にサービス、組立、製造研究所を設立することが目標となっている。

上述したように Virtus Solis 社と協力して SBSP 関連の技術開発にも取り組んでおり、2027 年に SBSP の実証実験を行うとしている。

ウ) Above:Space Development 社

Above:Space Development 社(旧 Orbital AssemblyDevelopment Corp.)は、米カリフォルニア州に拠点を置く Gateway Spaceport LLC が 2018 年に設立したスタートアップである。民間の旅行者が宿泊できる 2 つの宇宙ホテル「Voyager Station」「Pioneer Station」の建設を計画している。2023 年 3 月には、米国宇宙軍(USSF)から軌道上サービス市場を活性化する商用技術開発資金提供プログラム「Orbital Prime」を通じて、軌道上でのサービス提供や製造に必要な、迅速に展開できる構造技術を実証する SBIR(Small Business Innovation Research)プログラムの第 2 フェーズ契約(契約金額は 170 万ドル)を受注している。また 3.1.1(3)項で示した AFRL の SSPIDR プログラムにおいてもエネルギービーム受信機のプロトタイプ的设计・開発を行っている⁶⁷。

2023 年 11 月には、米 Electric Sky 社と協力して、軌道上プラットフォーム「Archimedes」への

⁶⁶ <https://www.orbitalcomposites.com/blog/orbital-composites-secures-sbir-grant-from-us-space-force-to-develop-quantum-antennas-for-secure-communications>(2024 年 1 月 25 日最終閲覧)

⁶⁷ <https://spacenews.com/above-orbital-develops-energy-for-spacecraft-under-recent-awards/>(2024 年 1 月 25 日最終閲覧)

無線電力伝送技術を開発しており、その実証となる地上試験に成功したと発表した⁶⁸。既存の技術を応用することで、ある場所から別の場所へ電気エネルギーをレーザーにより伝送できることが示されたという(図 3-44 参照)。本プロジェクトは USSF から一部資金援助を受けている。「Archimedes」とは、同社が開発中の軌道上で迅速に展開可能なプラットフォームであり、太陽電池パネル、ビーム電力、通信・監視用の電子制御式アンテナアレイ等の宇宙インフラとして機能する軌道上システムとして設計されている。軌道上製造、高データレート通信、高精度の宇宙状況認識、軌道上アセットの軌道離脱・無効化、敵対者のアクセス阻止等に資することが想定されている。



図 3-44 アラバマ州にある Above: Space Development 社の施設において行われたラボ・ベンチテスト
出所) <https://news.abovespace.com/2023/archimedes-orbital-system-showcases-successful-applications-of-directed-energy/>(2024 年 1 月 25 日最終閲覧)

工) Electric Sky 社

米国シアトルに拠点を置く Electric Sky 社は、地上の送信機から電波を高度 20km 程度まで送信し、受信機で電波を電気に変換する Whisper Beam 技術の開発を行っている。Whisper Beam 技術は弱電波で発信しても、電波は受信機側で自己集束し、受信機に近づけば電波強度が高くなるという技術であり、UAV への給電等に利用すれば、UAV は天候に関わらず kW レベルの電力を得られるという。DARPA の SBIR プログラムにより開発を行っており(契約金額は 22 万 5 千ドル)、2021 年 12 月には、同技術を搭載した送信機の製造を開始している。

将来的には、地上の送信機から低電力で低層大気中を電力伝送し、高高度で電波を自己収束させて高電力を宇宙プラットフォームに供給するというもので、上項で示した Archimedes との組み合わせで、大電力電気推進、アクティブセンサー、エッジコンピューティング、指向性エネルギー、宇宙空間への電力中継、宇宙空間での建設、その他の用途に MW 級の電力が利用可能になることを目指している。

⁶⁸ <https://news.abovespace.com/2023/archimedes-orbital-system-showcases-successful-applications-of-directed-energy/>(2024 年 1 月 25 日最終閲覧)

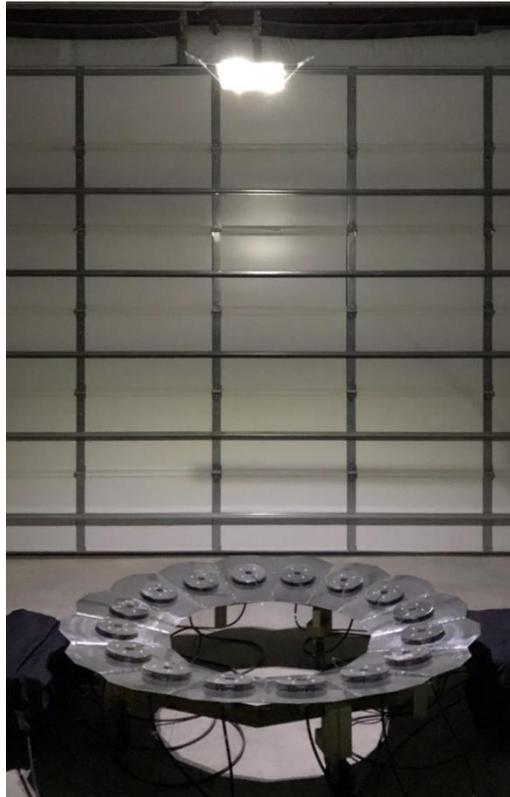


図 3-45 Whisper Beamトランスミッタ(下部の金属リング)から上空 3m の照明への無線電力伝送実証

出所) <https://www.uasvision.com/2023/02/02/electric-skys-wireless-power-transmitter-completes-initial-tests/> (2024 年 2 月 14 日最終閲覧)

2) 欧州

欧州では 2014 年にコンソーシアム WIPE(Wireless Power Transmission for Sustainable Electronics)(<http://www.cost-ic1301.org/>)が設立されているが、ハーベスティングと RF-ID の研究が多く、放射型 WPT に関する研究開発は少なくなっている。

a. ESA、Airbus および Emrod 社との共同研究による無線電力伝送実験

2022 年 9 月、ニュージーランドの Emrod 社は ESA、Airbus 社、TechnoCarbon 社(仏)との共同研究により、SBSP 用途の技術である電力伝送の実証に成功したと発表した。Airbus 社の Munich Area Site(Airbus Innovation Facilities)で行われた Emrod 社の屋内デモンストレーションでは、直径 1.92m の正方形のフェーズドアレイ送信アンテナと同サイズの受信アンテナを用いて、周波数 5.8GHz で 36m の距離を無線電力伝送した(図 3-46 参照)。Emrod 社の本技術は ESA が必要とする無線電力伝送(WPT)変換効率の達成に貢献する可能性があるものであり、本実験は欧州初の SBSP 用長距離無線エネルギー伝送の実証実験として、3.1.2(1)に示した SOLARIS プログラムを支えるものとなっている。なお本実験に際しては、Emrod 社は Airbus Defence and Space 社より資金提供を受けている。



図 3-46 Airbus Innovation Facilities において行われた無線電力伝送実証

出所) <https://www.bbc.com/news/science-environment-62982113/> (2023年12月14日最終閲覧)

3) 中国

中国では SSPS の研究開発を主導している宇宙技術研究院(CAST)の National Key Lab. of Science and Technology on Space Microwave が SSPS 実証用のマイクロ波 WPT 技術の研究開発を行っている。大学としては、同じく SSPS 研究を主導している重慶大学、四川大学、西安電子科技大学等がマイクロ波送電実証実験を行っている。また、レーザーWPT技術の研究開発も CAST、北京工科大学等で行われている。整流効率は5.8GHz RFで90%以上、レーザーDC効率は808nmレーザーで70%以上の結果を出している。

2021年8月には、CASTの協力のもと、China's Aerospace Info Research Institute が東シナ海において、高高度気球を浮遊プラットフォームとした研究船による高度300mのマイクロ波伝送実験を行った。実験は、緊急通信実験ネットワークプロジェクト「スマートオーシャン」の一環として行われたものであり、30kgのペイロードを搭載して、搭載されたAISデータ受信、SOSデータ受信、LTE信号のカバー率、マイクロ波伝送の機能と性能指標のテストを行った。

CASTでは、その他電波暗室内において送信アンテナ1.2m×1.2m、レクテナアレイ2m×2m、伝送距離30mにおいて、送信出力900W、ビーム制御精度0.44°以上、MW-DC変換効率49%以上を達成した。また重慶大学では2020年、屋外において5.8GHz、448Wマイクロ波の60mの距離の伝送実験を実施した。

4) ニュージーランド

2019年に設立されたニュージーランドのEmrod社は、同国第2位の電力会社Powercoの資金提供を受けて、ワイヤレスかつ長距離のエネルギー伝送を効率的に行う技術の試験を開始している。

同社はもともとニュージーランド政府やニュージーランドのイノベーション支援団体 Callaghan Innovation の助成金により、マイクロ波を効率的に電力に変換するメタマテリアルを用いたプロトタイプの開発を行っていたが、2020年より第2のプロトタイプを開発し、Powercoの資金提供を受けて、無線長距離エネルギー伝送を効率的に行う技術の試験に着手した。

2021年5月には、最初の屋内での送電試験に成功した。検査・検証・試験・認証の大手企業であるSGSが機器の試験に独立した第三者機関として立ち会い、規定の目標に対する性能を検証した。(図3-47左参照)ただしISMバンドを利用していることは示されているものの、出力や効率等の結果については発表されていない。

その後は屋外でのフィールドテストを計画し、2022年4月から6月にかけて、ニュージーランドのタラナキでパワービームプロトタイプシステムによる実験を行った(図3-47右参照)。200mの距離に渡る伝送を行い、ビーム整形、ビームステアリング技術、電力密度レベル、安全システム、アンテナ性能の測定と試験に利用する技術の主要コンポーネントの試験を行った。本試験はニュージーランドの国立新エネルギー開発センターAra AkeとPowercoの協力の下、行われた。

また2022年9月には、前項で示したように、ESA、Airbus社、TechnoCarbon社(仏)とのパートナーシップを締結し、Airbus社のMunich Area Site(Airbus Innovation Facilities)屋内デモンストレーションを実施した(図3-48参照)。これらの動きを受けて、2022年12月には、ESAのビジネスインキュベーションプログラムであるESA BICに採択された。同社はESA BIC Bavaria⁶⁹に参加し、ドイツ・ミュンヘンのAZO HQにオフィスを構える準備を行う、としている。

さらに2023年10月には、ESAとAirbus社等とのMunich Area Siteでのデモンストレーションと同様のライブ・デモンストレーションを、オークランドの自社施設内においてブラジルや南アフリカなどの政府関係者や業界リーダーに披露している⁷⁰。

なお同社は、2024年と2025年の大規模パイロット・プロジェクトを計画している。

⁶⁹ 宇宙イノベーションの世界的リーダーであるAZOが運営しており、資金、技術、専門家、施設の利用を含む2年間のプログラムを提供している。

⁷⁰ <https://emrod.energy/blog/international-delegation-witness-emrod-wireless-power-beaming-technology/>(2024年1月25日最終閲覧)



図 3-47 屋内試験のプロトタイプアンテナ(左)/フィールド試験の建屋(右)(Credit:Emrod)

出所) <https://emrod.energy/emrod-successfully-demonstrates-indoor-prototype-to-powerco/> / <https://emrod.energy/emrod-taranaki-power-beaming-taranaki-field-deployment-update-video/> (2024年1月20日最終閲覧)



図 3-48 Airbus' Munich Area Site での実証実験システム(Credit:Emrod)

出所) <https://emrod.energy/press-release-emrod-successfully-demonstrates-power-beaming-technology-to-unlock-space-based-solar-power/> (2024年1月20日最終閲覧)

5) 韓国

韓国では仁荷大学校(Inha University)は、2018-2019年頃に X バンドの無線伝送により駆動する、ヘリウムを充填したマイクロ波駆動の飛行船(microwave-powered airship drone)実験機の開発と実証を行った。

また KERI(Korea Electrotechnology Research Institute)が国家科学技術会議(NST)の BIG Issue Group プロジェクトとして 2019 年から 2025 年までの長期研究を実施している。宇宙での中距離、大電力伝送システムを実現することを最終的な目標に掲げ、地上での要素技術研究や無線電力伝送実験に取り組んでいる。2021 年には、DC-DC コンバータと組み合わせたショットキーダイオードを DC 出力ポートに設置することで、DC 電力合成レベルを向上させた拡張可能なアレイ型レクテナを開発し、屋外実験も行った。また、1284×8 のレクテナに基づく大型のレクテナアレイを用いて、送受信機間の距離が長くなると、地上からの反射が大きくなるため、距離を 50m に設定し、屋外実験を行った

(図 3-49 参照)。KERI における 2025 年までの研究開発ゴールを図 3-50 に示す。

2024 年 1 月には、KARI と KERI が共同で、1.81km にわたる距離のワイヤレス電力伝送試験に成功した。エアロスタット(Aerostat)と呼ばれる浮力ガスを動力源とする空気より軽い航空機の機体にアンテナと受電用の発光ダイオード(LED)を装備し、韓国深宇宙アンテナ(KDSA)から 2kW の電力を伝送した。実験では、エアロスタット上のアンテナは信号を直流に変換し、LED が点灯して発電したことを示した。1975 年に NASA が 1.5km の距離で 34kW の電気エネルギーの伝送に成功した長距離ワイヤレス電力伝送のデモンストレーション以来、最長距離の記録を更新したという。(図 3-51 参照)

この他、韓国では Korean Wireless Power Forum が組織され、産業界や大学によりマイクロ波 WPT 実験等への取組みが行われている。



図 3-49 KERI における拡張可能なアレイ型レクテナの屋外実験

出所)J.M. Woo, et al., "Extendable Array Rectenna for a Microwave Wireless Power Transfer System," in IEEE Access, Vol. 9, 2021, pp. 98348-98360

Research Goal and Contents (KERI)

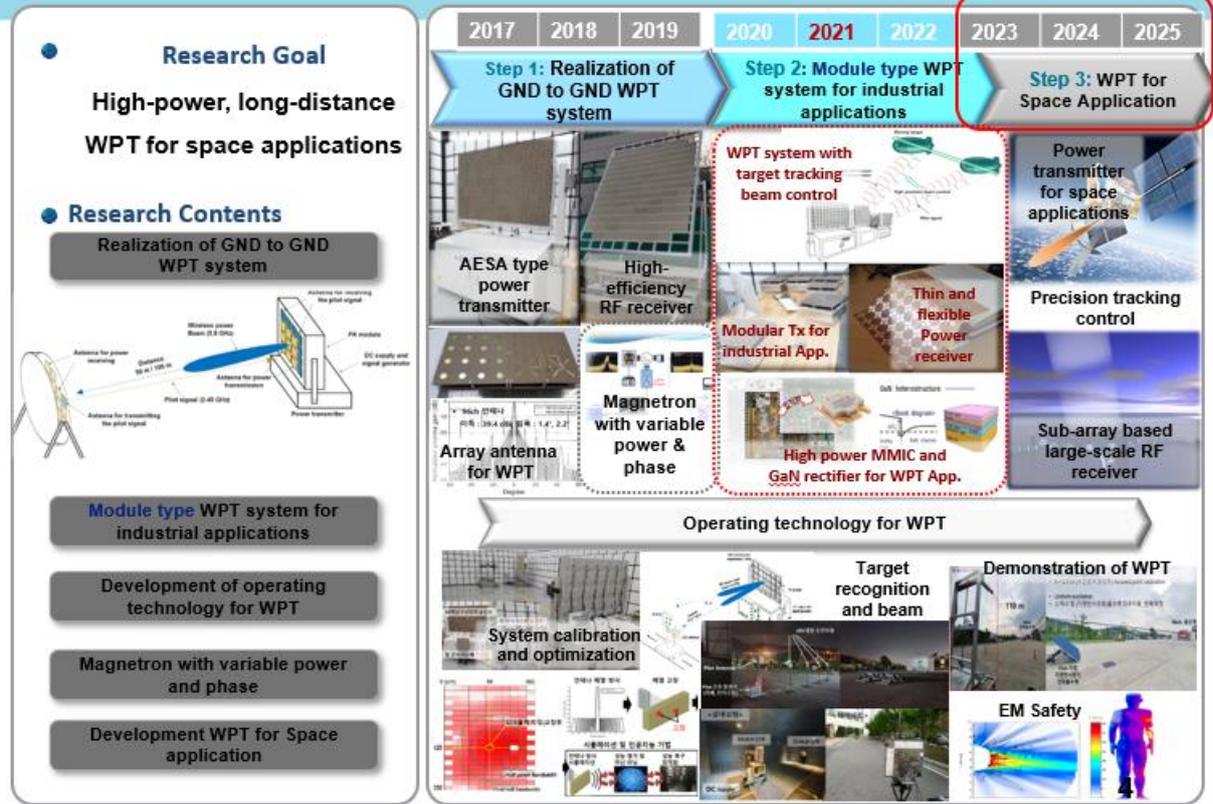


図 3-50 KERI における研究開発目標と内容

出所)“Introduction of Research on Space Solar Power in Korea”, Dr. Joon-Min Choi, KARI, International (Online) Conference on Energy from Space, Oct 2023



図 3-51 KARI/KERI におけるエアロスタットへの無線電力伝送実験(1.81km)

出所) <https://pulsenews.co.kr/view.php?year=2024&no=57487> (2024年2月9日最終閲覧)

(2) レーザー方式 WPT(パワービーミング)の開発動向

1) 米国における取組み

a. NRL / DARPA / NASA

レーザー方式 WPT の実用化は、マイクロ波 WPT より遅れて進んできているが、近年では NRL や DARPA が長距離伝送の可能性に注目しており、取組みが進められている。NASA でも月面探査におけるレーザーエネルギー伝送に関する研究開発等が行われている。

NRL では SSPS 研究の中心人物である Paul Jaffe 氏が 2019 年 5 月、メリーランド州にある U.S. Naval Surface Warfare Center において長距離空間パワービーミングの初のデモンストレーションを行い、325m の距離にわたって 400W(受光部)のレーザー伝送を成功させた。

DARPA では、2021 年 10 月、「Breakthrough Technologies for Energy Web Dominance」プロジェクトのための SBIR(Small Business Innovation Research)/STTR (Small Business Technology Transfer) Opportunity (SBO)を発出し、革新的コンセプトの提案を受付けた。Energy Web ネットワークとは、地上のレーザー光源から空中のノードに電力を供給し、ノードはその電力を変換して自船の要求に応じて使用し、変換せずに残った電力を他の Energy Web ノードに中継するというものである。本プロジェクトは 3.2.1(1)1)b でも示した通り、2022 年 10 月より POWER(Persistent Optical Wireless Energy Relay)プログラムとして継続実施されている。2023 年 9 月、DARPA は POWER プログラムの第一フェーズを開始することを明らかにしており、RTX Corporation、Draper、BEAM Co.が率いる 3 チームが無線光電力リレーシステムの設計・開発を行う、としている⁷¹。プログラムの目標には、弾力性のある光速エネルギーネットワークに必要な主要コンポーネントの実証が含まれる。例えば、Draper はエネルギー伝送の精度と安定性を高めるための先進的な制御システムを、BEAM Co.は小型で高効率なエネルギー収集装置の開発を行っている。第 1 フェーズは、20 ヶ月で重要技術のベンチトップ実証を行う計画となっている。第 2 フェーズでは、2025 年初頭に公募が行われ、低電力で空中実証を行うための既存プラットフォームへのリレー技術の統合に重点がおかれ、既存の航空機に搭載されるポッドで実証される予定となっている。プログラムの最終段階である第 3 フェーズでは、10kW の光エネルギーを地上レーザー光源から 200km 離れた地上レシーバーに供給することを目的とした空中光路を通して、リレーの実証が行われる。さらに POWER プログラムに関連して、2023 年 12 月、Raytheon Technologies 社が DARPA より紛争環境にエネルギーを供給する無線空中中継システムの設計開発として、2 年間で 1,000 万ドルの契約を受注している⁷²。

DARPA では他にも、2023 年より月面および月周辺の経済活動を促進するための「10-Year Lunar Architecture(LunA-10)」計画を進めている。例えば、月面での通信やエネルギー供給の最適化を目指し、無線での電力供給と同時に通信やナビゲーションのサポートを行う電源ステーションの構築等が考えられている。

⁷¹ <https://www.darpa.mil/news-events/2023-09-07a/>(2024 年 1 月 25 日最終閲覧)

⁷² <https://raytheon.mediaroom.com/2023-12-12-RTX-to-create-network-of-energy-webs-for-DARPA>(2024 年 1 月 25 日最終閲覧)

NASA においてはアルテミス計画に関連して月面での永久影領域における電力の確保が重要課題となっており、その解決策として月面探査におけるレーザーエネルギー伝送の可能性についての取組みがみられるところとなっている。月探査機への電力供給が可能なレベルのレーザー電力ビーム伝送技術のフライト実証システムについての概念設計や近赤外領域(808nm)でのレーザーパワー伝送を行い、GaAsとInGaAs LPC(laser power converters)の性能評価試験等を行っている。さらに賞金付きコンテスト等により、産官学より様々なアイデアを募る取組みも行っている。

b. 民間企業

民間企業としては米国の PowerLight Technologies 社がレーザーを使ったワイヤレス給電技術の開発を行っている。同社の前身である LaserMotive 社が 2009 年の NASA Centennial Challenges の Power Beaming Challenge で 1 位を獲得しているが、2019 年には上述の NRL の地上実証試験に参加している。さらに 2021 年 10 月には Ericsson の 5G 基地局「Streetmacro 6701」(最大消費電力 300W)に対し、同社のレーザー送電システムを使って、数百メートル離れた距離から数百ワットの電力を伝送する実証実験に成功しており、2~3 年以内に製品化できる見込みとなっている。さらに、2024 年 1 月には DARPA の LunA-10 プログラムに Blue Origin 社が率いるチームに参加し、月面で製造された太陽電池を使用して月面で発電し、その電力をレーザー光で遠隔地に伝送するシステムの設計を行っている⁷³。

また軍事領域での開発としては、2022 年 8 月に Lockheed Martin 社が米海軍に 60kW 超級のレーザー兵器システム HELIOS(high energy laser with integrated optical-dazzler and surveillance)を納入した⁷⁴。レーザー兵器に関しては Northrop Grumman 社も開発を進めており、2021 年 12 月にはアデン湾において 100-150kW の高エネルギーレーザー兵器システムの試験を行っている。

この他、工業用青色レーザーの開発および製造業者である NUBURU,Inc. も、同社独自のブルーレーザー技術を使用した宇宙でのパワービームの実現可能性を実証するために、2023 年 8 月に NASA より SBIR(Small Business Innovation Research)資金を獲得している⁷⁵。

2) 米国以外の国における取組み

米国以外では、2022 年 1 月、英国でサリー大学とスタートアップ企業である Space Power 社が国家プロジェクト「SPRINT(Space Research and Innovation Network for Technology)」の一部として、LEO 小型衛星へのレーザーによる無線電力伝送技術の開発を開始すると発表している。Space Power 社は 2023 年までに軌道上実証機を開発し、2025 年までに完全に商業化するという計画を立てている。昼間の屋内および屋外、夜間屋外の 3 つの状況でフィールドテストを実施し、長距離でもビームを照射する強度と密度を維持すべく、自律的にそれらを調整する「適応型ビーム整形技術」

⁷³ <https://www.geekwire.com/2024/powerlight-blue-origin-power-beaming-moon/>(2024 年 1 月 31 日最終閲覧)

⁷⁴ <https://news.lockheedmartin.com/2022-08-18-Lockheed-Martin-Delivers-Integrated-Multi-Mission-Laser-Weapon-System-to-the-Navy> (2024 年 1 月 26 日最終閲覧)

⁷⁵ <https://ir.nuburu.net/news/news-details/2023/NUBURU-Announces-Contract-With-NASA-for-Next-generation-Blue-Laser-Space-Technology/default.aspx> (2024 年 1 月 31 日最終閲覧)

を使用している。しかし、2023 年以降の進捗状況に関する報道はなされていない。

2023 年 1 月には、中国の西北工業大学(NPU:Northwestern Polytechnical University)が光学駆動型ドローン(ODD:Optics-driven Drone)を開発したと報じられた。下面に受光モジュールを搭載しており、その部分に受けた高エネルギーのレーザー光を電力に変換して、恒久的に飛び続けることが可能であることが示されている(図 3-52 参照)。NPU は、ドローンを追跡しビームを意図した目的地に向け続けるために、インテリジェントな視覚追跡アルゴリズムと、無線伝送の距離を伸ばすためにビームの強度を自律的に調整する適応ビーム整形システムを開発している。また障害物を識別し、レーザービームのパワーを安全なレベルに迅速に調整する保護アルゴリズムも設計した。フィールドテストは、夜間と昼間の両方、屋内 1 回、屋外 2 回行われ、成功している⁷⁶。



図 3-52 中国西北工業大学が開発した ODD (Optics-driven Drone)と飛行試験の様子

出所)<https://shx.chinadaily.com.cn/a/202212/30/WS63ae4443a3102ada8b22907e.html>,
<https://asiatimes.com/2023/01/china-claims-to-have-mastered-laser-powered-drones> (2024年1月26日最終閲覧)

(3) まとめ

高強度のエネルギーを長距離にわたって伝送させるパワービーミング WPT については、近年、研究開発が積極的に取組まれるところとなっている。米国では NRL、DARPA、NASA 等が開発を進めており、DARPA では POWER プログラムへの取組みが本格化しつつある。また NASA も月面でのエネルギー供給に適用できるレーザーWPT 技術の開発も行っており、これらの関連プログラムからいくつかのスタートアップ企業がマイクロ波やレーザーを長距離伝送する WPT への取組みをみせている。中国や韓国でも、宇宙機関や研究機関、大学等が連携して関連技術開発を進めている。技術的には、いまだ研究開発の領域であり実用化には至っていないものの、kW および km レベルの WPT に向かって

⁷⁶ <https://blog.euroavia.eu/2024/01/15/is-laser-power-beaming-the-future-of-the-drone-industry/> (2024 年 1 月 31 日最終閲覧)

の取組みも進められており、今後の SSPS の実現に向けて不可欠な技術の開発が期待される。

図 3-53 に過去に世界で行われたパワービーミングに関する技術実証と、今後の無線電力伝送のアプリケーションとして目指すべき電力の大きさと伝送距離が整理された図を示す。

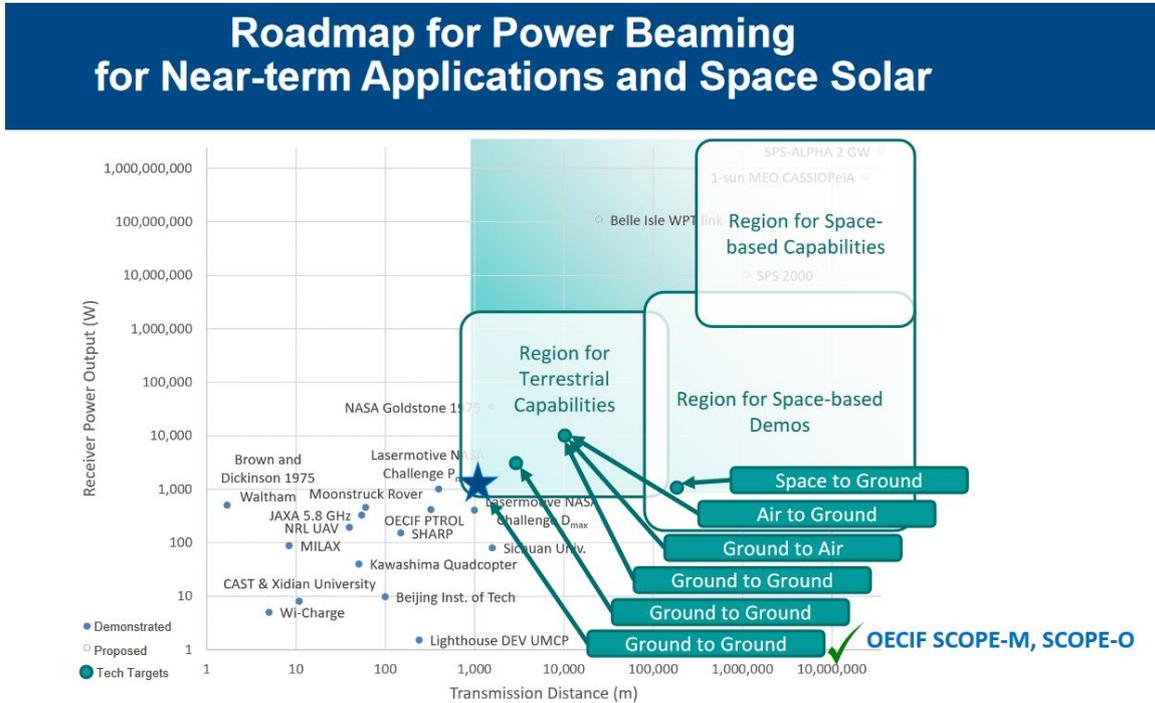


図 3-53 近い将来のアプリケーションと SBSP に向けたパワービーミングのロードマップ

出所)“Results from the First Test of a Conversion Module for Space Solar in Orbit” Pail Jaffe, NRL, IAC-23,C3,2,1,x78339, Oct 2023

3.2.2 空間伝送型 WPT の実用化動向

WPT 技術は、非放射型 WPT 技術の実用化が先行して進んだが、放射型 WPT についても近年ではマイクロ波方式 WPT を中心に、様々な実用化の検討が始まり、米国や日本、中国、イスラエルなどのベンチャー企業を中心に商品化の動きも進んできている。まずは屋内・近距離での無線電力伝送について製品化を想定した機器の研究開発・実用化活動が活発に行われている。オフィスや物流、家庭、商業施設、工場、医療など様々な利用シーンでの IoT 機器やスマートフォンなどへの給電を目標とし、その先として屋外での利用が提案されている。

本項では、高強度長距離の伝送距離を対象とする WPT(パワービーミング)までは達しないレベルの、低強度短距離の無線電力伝送となる空間伝送型 WPT の実用化動向について示す。

(1) 電波方式 WPT の実用化取組み事例

1) 海外の事例

米国では、屋内・近距離・小電力システムについては、すでに一部製品化が行われており、915MHz、2.4GHz、5.8GHz のシステムが実用化されている。また、24GHz やミリ波のものも商品化に向けて開発が行われている。

米国の Energos 社では「WattUp[®]」Near Field 充電技術の製品化を行い、913MHz/2.4GHz 帯/5.8GHz 帯を用いた製品販売を行っている。送信機の出力は約 10W と大きいのも特徴となっている。すでに米国、欧州、中国、インド、カナダ、オーストラリア、ニュージーランドおよび韓国等で認可を取得し、世界的な販売体制を築いている。中～遠距離充電製品については技術開発中であるが、2022 年 8 月には新しい高出力 WattUp PowerBridge トランスミッタ(15W)が FCC Part 18 の認可を受けている。

カリフォルニア工科大学(CALTECH)からのスピンオフとして設立された米国の GuRu 社は、ミリ波(24GHz 帯)による中距離充電技術(GuRu RF Lensing 技術)によるワイヤレス OTA(Over The Air)電力伝送向けシステム開発を行っており、現在は試作段階であるが、2021 年 5 月に Motorola 社との提携を発表している。

米国の Ossia 社は 2.4GHz 帯や 5.8GHz 帯の電波を使用した「Cota[®]」の技術開発およびライセンス提供を行っている。製品販売は行わないが、多くの企業が Cota 技術のライセンスを受け、出資、製品開発、製品販売、ブランド提携を含む様々な役割を担っている。ビームフォーミングを応用して、室内に置かれた 1～2m 先の電子機器に約 1W の給電ができる。2022 年 3 月には、同技術は FCC から伝送距離の制限を設けることなく米国で利用できる認可を受けている⁷⁷。これにより欧州を含む 45 か国以上および米国 50 州全てにおいて距離の制限なく使用することができる技術を製品に組み込むことが可能となっている。

米国の Powercast 社は 915MHz 帯域を利用した「Powercast[®]」、「Powerharvester[®]」等の製品販売を米国内で行っており、2023 年現在、世界中に 100 社以上の顧客とパートナー企業を有し、1000 万個以上の製品の出荷を実現している⁷⁸。

さらに開発途上であるが、米国のベンチャー企業である Reach Labs 社は 5.8GHz で数百 W の電力を数十mにわたって伝送、ポイント・トゥ・マルチポイントで接続する商品の開発を行っている。同社は 2022 年 12 月には、3000 万ドル(累計 3900 万ドル)の資金調達を行っている⁷⁹。

この他、2021 年 1 月には、中国の Xiaomi Corporation がミリ波を用いた近距離無線充電技術「Mi Air Charge Technology」の開発を行うことを発表している。

⁷⁷ <https://blog.ossia.com/news/fcc-issues-first-approval-of-wireless-power-transfer-with-no-distance-limits-to-ossias-cota-technology> (2024年1月27日最終閲覧)

⁷⁸ <https://newscast.jp/news/0552587> (2024年2月9日最終閲覧)

⁷⁹ <https://reachpower.com/reach-to-deliver-the-first-industrial-scale-wireless-power-solution/> (2024年1月27日最終閲覧)

2) 国内の事例

国内では 2022 年 5 月、マイクロ波給電の規制緩和第一ステップとして、総務省より「電波法施行規則等の一部を改正する省令」が公布され、920MHz 帯、2.4GHz 帯、5.7GHz 帯において WPT 用周波数割り当てが行われ、無線電力伝送用構内無線局が開設された。これにより、国内の要件を満たす工場や倉庫などの屋内で空間伝送型ワイヤレス電力伝送システムを用いた無線給電が可能となっている。

米国スタンフォード大学発のベンチャーであるエイターリンク株式会社は、2020 年には竹中工務店と実証実験を実施し、15m 先の空調機に数 mW 給電できる結果を発表している⁸⁰。さらに 2022 年 5 月には、上記省令の交付を受けて、同社は WPT 機器「AirPlug®」の販売開始の決定を発表した。さらに 2022 年 9 月には、竹中工務店の静岡営業所で国内初となる「無線電力伝送用構内無線局」としての運用を開始し、床下数カ所に、数 m 離れた距離から無線給電できる機器を導入した。その他、2019 年創業の Space Power Technologies 社も最大伝送距離 10m 程度のユースケースを想定し、マイクロ波方式による WPT 市場への参入を目指している。

パナソニックは京都大学と共同で、920MHz 帯の電波を活用した送電機と受電機からなるマイクロ波電力伝送システム「Enesphere」を開発し(図 3-54 参照)、2022 年 3 月よりサンプル提供を開始するとともに、様々な用途・シーンでの試験的活用を進めている。Enesphere は 920MHz 1W を出力する送電機と、送電機から発射された電力をエネルギー源として動作する受電端末で構成されている。

京セラは電波(マイクロ波)の放射を集中させるビームフォーミング技術と、電波の伝搬環境に応じてリアルタイムに電波放射を追従制御する技術(アダプティブアレー技術)を融合し、5.7GHz 帯における「空間伝送型ワイヤレス電力伝送システム」を実現する基礎技術を開発している。通信基地局事業で長年培ってきた電波の制御技術を活用し、高速追従する電波制御と高精度な電波制御を同時に両立させて電波をコントロールすることが特長となっている。本技術の適用によりスマートフォンやドローンなどの移動体にも安定した電力を伝送することを目指している⁸¹。

日本ガイシは上項で示した米国の Energous 社と超低消費電力の電源 IC 技術を持つベルギーの e-peas 社と、空間伝送型 WPT システムの普及に向けた協業を開始した。日本ガイシのリチウムイオン二次電池「EnerCera(エナセラ)」と Energous、e-peas の技術を組合わせた IoT デバイスの開発や提供を通じて、WPT システムに取り組むデバイスメーカーなどの開発を支援する計画である。WPT 駆動の温湿度センサーデバイスを開発しており、ほかにも物流などで使用される位置トラッキングデバイスや、電子棚札などの各種 IoT デバイスの WPT 化に向けて、WPT システムの提案を行う⁸²。なお日本ガイシは Ossia 社とも 5.8GHz 帯 WPT の普及に向け協業している。

東芝ではマイクロ波遠隔給電システムにおいて、世界で初めて、周辺の無線 LAN(Wi-Fi)通信に干渉することなく、干渉回避機能を搭載した給電技術と、受電アンテナの向きにかかわらず高効率に電力を受け取ることができる受電技術の開発を行っている。開発した一体型給電機で、検出が難しい無線 LAN 信号を広い周波数帯(5.5GHz から 5.72GHz)で検出したり、受電アンテナの向きに依存せず

⁸⁰ <https://prtimes.jp/main/html/rd/p/000000003.000071264.html> (2024年1月27日最終閲覧)

⁸¹ <https://www.kyocera.co.jp/newsroom/news/2023/002277.html> (2024年2月9日最終閲覧)

⁸² https://www.ngk.co.jp/news/20230309_1.html (2024年2月9日最終閲覧)

高効率な受電を行う受電機の実証を行ったりした(図 3-54 参照)。今後は工場、倉庫など実際の現場での実証を進める、整備の動向も踏まえながら 2025 年以降の事業化を目指すとしている⁸³。

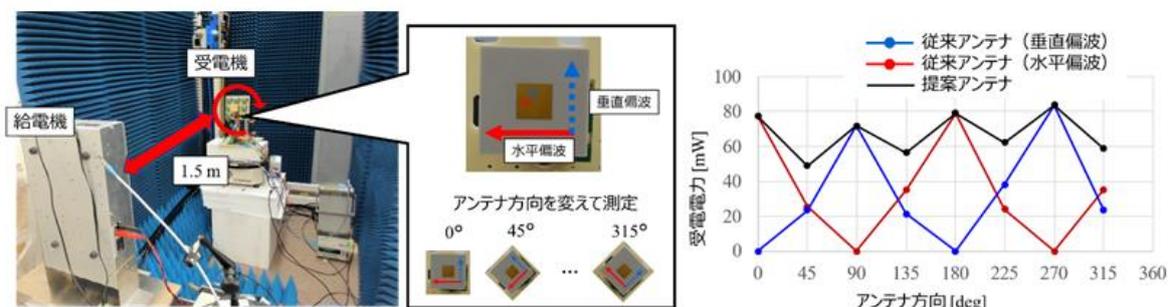


図 3-54 東芝の受電アンテナの向きに依存せず高効率な受電を行う受電機の実証

出所) <https://www.global.toshiba.jp/technology/corporate/rdc/rd/topics/23/2312-01.html> (2024 年 2 月 9 日最終閲覧)

(2) レーザー方式 WPT の実用化取組み事例

レーザー方式の WPT としては、イスラエルの Wi-Charge 社が赤外線レーザーによるワイヤレス給電技術 (AirCord™) の製品開発を行っている。2023 年 9 月には、日本の産業機器メーカーである東朋テクノロジー社と提携し、Wi-Charge の製品を国内の顧客工場で機器の稼働を実証したうえで納入することを発表した。送電機と受電機が最大 10 メートル離れていても電力効率を落とさずに、最大 300mW の電力を無線給電できる。指定の範囲内にあれば複数の受電機に順番に給電できる。価格は 1 セットあたり 20 万～30 万円程度とされている⁸⁴。

また米国の PHION Technologies 社も同様に赤外線を用いたワイヤレス給電技術の開発を行っており、2022 年 1 月に三菱地所株式会社が出資を行っている⁸⁵。第 1 世代のモデルは、モバイル端末に 5W の電力を供給する予定で、将来的には 10m を超える距離において 20W で PC を充電することができ、送信機を天井に設置することにより、45～200 m² をカバーすることが想定されている。

3.3 SSPS の経済性評価

昨年の調査結果である重要要素技術のうち主に発電技術、送電技術および受電技術に関する要素技術開発項目について、新たな情報があれば昨年度の調査結果について見直しを行う。

また、調査した重要要素技術のうち、一般財団法人宇宙システム開発利用推進機構 (JSS: Japan Space Systems) 殿のコストモデルに使用されているパラメータの入力値につながるものを整理し、入力パラメータ値の修正案等を提示する。この修正案等を使用し、JSS コストモデルによる感度分析を実

⁸³ <https://www.global.toshiba.jp/technology/corporate/rdc/rd/topics/23/2312-01.html> (2024 年 2 月 9 日最終閲覧)

⁸⁴ <https://www.toho-tec.co.jp/news/20230908-01/> (2024 年 2 月 9 日最終閲覧)

⁸⁵ <https://www.presscube.jp/press-release/detail/53b170f2-5149-4e39-9a48-8a0407970942> (2023 年 1 月 27 日最終閲覧)

2022 年春には同社の無線給電システムを設置し、携帯電話等のモバイルデバイスに給電を行う実証実験を実施する予定とされていた。

施し、コストに影響を与える主要な要因となるパラメータを定量的に把握する。さらに、目標コストを達成するための各パラメータ値の目標範囲の検討を行う。

3.3.1 SSPS 宇宙部の重量およびコスト算出ツールの作成

(1) 目的／背景／前提条件

SSPS の検討においては、想定された複数のコンセプトに対して、そのライフサイクルコスト等を算出し、システムの経済性の評価を行うことが重要である。すでに提案されているマルチテザー(マルチバス)型モデル⁸⁶に関しては、SSPS 発電コスト試算が行えるようなコストモデル(以下 JSS コストモデル)が作成されているところではあるが、本項ではそのモデルや考え方等を最大限に活用しつつ、他のシステム形状のものも並列で検討できるように拡張を行った。これにより、システムコンセプトが異なっても共通である要素について条件を揃えることが容易となり、また異なる要素についての比較が容易になると考えられる。

なお JSS コストモデルは、SSPS(宇宙部・地上部)の建設費、宇宙機システム部分の静止軌道への打上げ・輸送費、軌道間輸送機の製造費、メンテナンスコスト(宇宙部・地上部)を含めて、ライフサイクルコストを算出し、そこから発電コストを求められるようになっている。しかし、地上部コスト算出分および輸送部コスト算出分に関しては、今回は手を加えずに過去のものそのまま流用している。また、メンテナンスコストと運用に関するパラメータから発電コストを求める部分に関しては後で述べるため、ここでは SSPS 宇宙部の重量およびコストを算出できるツールのみの検討にとどめている。

(2) JSS コストモデル宇宙部の重量およびコストの算出

JSS コストモデルは 2007 年に検討を始めた発電コスト試算用のツールとして整備されたものである。当時 JSS(旧 USEF)で検討されていたマルチテザー(マルチバス)型 SSPS をリファレンスとして、SSPS(宇宙部)の建設費、宇宙部の低軌道への打上げ費と静止軌道までの軌道間輸送費(軌道間輸送機の製造を含む)、地上部の建設費およびメンテナンス(宇宙部、地上部)のコストを求め、そこから商用稼働期間の平均値として発電コストを計算するコストモデルとなっている。

1) マルチテザー(マルチバス)型 SSPS の概要

マルチテザー(マルチバス)型 SSPS の詳細については本報告書では省略するが、概要は以下のようになっている。

SSPS はモジュール構造を持ち(図 3-55 参照)、1 モジュールは 0.5m×0.5m の発電電部モジュールとなっている。さらに、200×190 個のモジュールで 1 グループを形成し、1 グループごとにバスシステムと発電電部パネルがテザーによって結ばれている。1 グループの寸法は 100m×95m、厚さ 20mm、テザーの長さは 5km 程度(2~10km)が想定されている。さらに、グループが 25×25(=625)個で SSPS 1 機が構築される。SSPS 1 機のパネルの大きさは 2.5km×2.375km、総モジュール数は $200 \times 190 \times 625 = 23,750,000$ 個となる。なお、地上での発電パターンを平滑化するために本体に

⁸⁶ 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」(平成 20 年 3 月)

蓄電池が搭載されている。

地上部については、送受電マイクロ波の周波数は 5.8GHz、レクテナ直径が 3.5km、レクテナでの最終出力(DC)が 1GW(出力一定型)となっている。

建設シナリオとしては、1ユニット(約45トン)を単位として、折り畳んだ貨物を再使用型輸送機(RLV)を用いて高度約 500km の LEO へ輸送し、そこで軌道間輸送機(OTV)に積み替えて GEO まで輸送する。GEO にて展開および最終組み立てが行われる。

マルチテザー型 SSPS の宇宙部

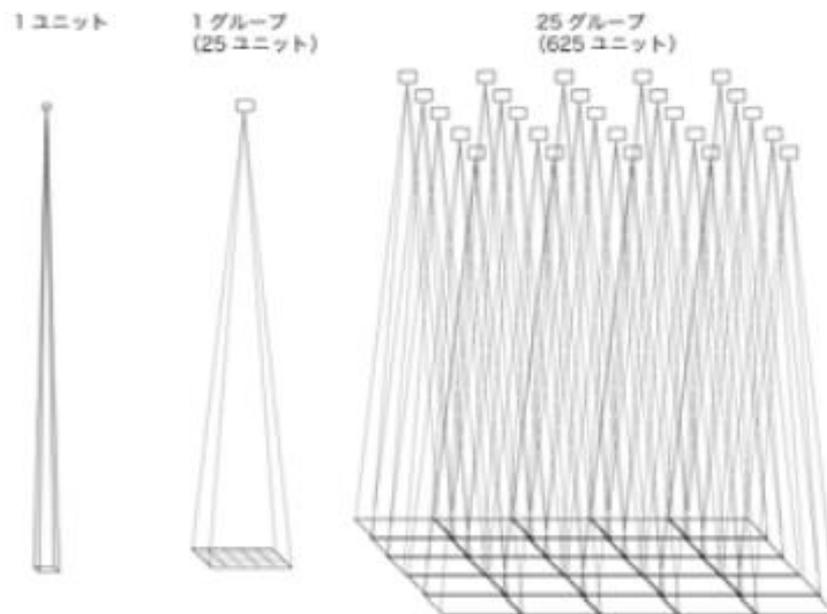


図 3-55 JSS(旧 USEF)マルチテザー型 SSPS の宇宙部

出所)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」(平成 20 年 3 月)

2) JSS コストモデルの入力パラメータ値の見直し

JSS コストモデルでは、コアとなる発電部については、1 モジュールの重量およびコストを算出し、それにモジュール数を乗じることで全体の重量およびコストを算出している。重量の主な入力パラメータとしては図 3-56 に示すように発電部の単位重量として、①太陽電池(g/W)、②マイクロ波回路(g/W)、③構造部(g/cm³)、④蓄電部(g/Wh)、その他(テザーおよびバス)の単位重量として、⑤テザー線密度(kg/m)、⑥テザー進展装置(kg/個)、⑦バス(kg/式)が設定されている。同様に発電部の単価として、①太陽電池(円/W)、②マイクロ波回路(円/W)、③構造部(円/kg)、④蓄電部(円/Wh)、その他の単価として、⑤テザー(円/本)、⑥テザー進展装置(円/個)、⑦バス(円/ton)が設定されている。発電部を構成する各部(太陽電池、マイクロ波送電部など)の効率はシステムの仕様に反映される形とはなっていないため、効率をパラメータとしたコスト算出は現状では行えない。なお発電部およびその他の部分の重量/コストの和を求めることで、最終的な SSPS 宇宙部の総重量/総コストが求められることとなる。

2007 年の JSS コストモデルでの計算に使用した重量／コスト単価等の設定値は、将来(2030 年頃)の値を仮定していた。その中でも当時の JAXA での設定値に極力合わせた「共通ケース」とさらに低コストとなる「目標ケース」を設定した複数のパターンで計算を行っていた。

本項では、昨年度の欧米でのSBSP検討結果および IEEJ 殿の検討結果を基に、入力パラメータ値の見直しを行い、それを SSPS1:2023 年 CSP 見直し型とした。これらの見直したパラメータ値を表 3-3 に示す。

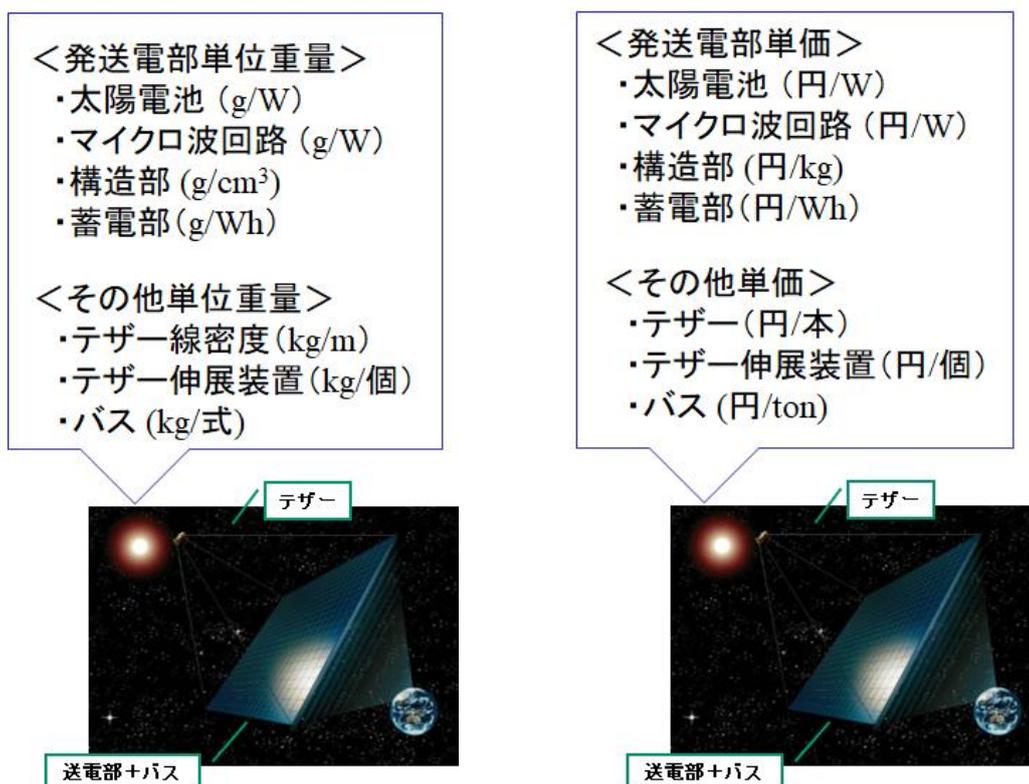


図 3-56 JSS コストモデルの宇宙部重量およびコストの入力パラメータ

出所)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」(平成 20 年 3 月)より三菱総合研究所作成

表 3-3 JSS コストモデルの入力パラメータ値の見直し

項目	JSS2007年 目標ケース	SSPS-23A	単位	備考
宇宙部重量				
太陽電池	0.5	0.15	g/W	Caltechの「SSPP Solar PV Innovation」での設定値 = 6.6kW/kg
マイクロ波回路	10	10	g/W	
構造部	0.028	0.028	g/cm ³	
蓄電部	0.667	0.667	g/Wh	
宇宙部単価				
太陽電池	30	66	円/W	IEEJ検討（第5回基本政策分科 会発表資料に準じる） ※ESAでは0.5～1€/W
マイクロ波回路	180	180	円/W	
構造部	5000	5000	円/kg	
蓄電部	10	13	円/Wh	IEEJ検討（第5回基本政策分科 会発表資料に準じる）
輸送部				
RLV打上げ単価	0.054	0.071	億円/ton	50\$/kg, 1\$ = 142円で換算 ※Roland Bergerは50～ 100\$/kg
OTV製造単価	0.35	0.35	億円/ton	
OTV太陽電池単価	30	66	円/W	IEEJ検討（第5回基本政策分科 会発表資料に準じる）
OTV推進剤燃料単価	400	400	円/kg	

出所)三菱総合研究所作成

3) 宇宙機システムの重量/コスト算出(SSPS-23A モデル)

前項の入力パラメータを用いて、改めてマルチテザー型 SSPS の宇宙部の重量および宇宙部のコストを算出した。結果を表 3-4～表 3-5 に示す。(これを本報告書では「SSPS-23A モデル」とする。)

表 3-4 SSPS-23A モデルの宇宙部の重量計算結果

◎重量			
	JSS	単位	備考
1モジュール	0.5m×0.5m		
1グループ (100m×95m)	38000モジュール		200×190
SSPSサイズ	2.5km×2.375km		
SSPS総モジュール数	23,750,000	個	100m×100m換算：593.75
< 発送電部 >			
単位重量			
①太陽電池	0.150	g/W	
②マイクロ波回路	10	g/W	
③構造部	0.028	g/cm ³	
④蓄電部	0.667	g/Wh	
1モジュール重量			
①太陽電池	35	g	118.1W、両面
②マイクロ波回路	555	g	55.5W
③構造部	140	g	5000cm ³ 、厚さ2cm
④蓄電部	250	g	375Wh
合計 (①～④)	0.981	kg	
(A) 発送電部総重量	23,288	ton	
< その他 >			
単位重量			
①テザー線密度	0.013	kg/m	
②テザー進展装置	4	kg/個	
③バス	1,400,000	kg/式	制御部：280ton、ダミー：1120ton
総重量			
①②テザー	6,900	kg	テザー：5km×100本、進展装置：100個
③バス	1,400,000	kg	
(B) その他総重量	1,407	ton	
SSPS総重量(A)+(B)	24,695	ton	

出所)三菱総合研究所作成

表 3-5 SSPS-23A モデルの宇宙部のコスト計算結果

◎コスト			
	JSS	単位	備考
1モジュール	0.5m×0.5m		
1グループ (100m×95m)	38000モジュール		200×190
SSPSサイズ	2.5km×2.375km		
SSPS総モジュール数	23,750,000	個	100m×100m換算：593.75
<発送電部分>			
単価			
①太陽電池	66	円/W	
②マイクロ波回路	180	円/W	
③構造部	5000	円/kg	
④蓄電部	13	円/Wh	
1モジュール価格			
①太陽電池	15,589	円	118.1W、両面
②マイクロ波回路	9,990	円	55.5W
③構造部	700	円	0.14kg
④蓄電部	4,875	円	375Wh
合計 (①～④)	31,154	円	
(A)発送電部分総価格	7,399	億円	
<その他>			
単価			
①テザー	150,000	円/本	30円/m、1本5km
②テザー進展装置	4,700,000	円/個	
③バス	200,000,000	円/ton	制御部：2億円/ton、ダミー部：0.005億円/ton
総価格			
①②テザー	485,000,000	円	100本
③バス	56,560,000,000	円	制御部：280ton、ダミー部：1,120ton
(B) その他総価格	570	億円	
SSPS総価格(A)+(B)	7,970	億円	

出所)三菱総合研究所作成

4) SSPS-23A モデルの総構築コスト

3.3.1(1)項で示したように、本コスト算出ルールでは JSS コストモデルや考え方等を最大限に活用していることから、地上部コスト算出分および輸送部コスト算出分に関しては、今回は手を加えずに過去のものそのまま流用している。ただし輸送部分に関する入力パラメータ値については表 3-3 に示したように見直しを行った。他の地上部分に関しては 2007 年の値をそのまま用いている。

0 項および JSS コストモデルの輸送系コスト計算部および地上システムコスト計算部を用いて算出した SSPS-23A モデルの総構築コストを表 3-6 に示す。

表 3-6 SSPS-23A モデルの総構築コスト

◎輸送 (SSPS2号機目以降)		
	SSPS-23A	単位
SSPS重量	24,695	ton
LEOまでの打上げ単価	0.071	億円/ton
LEOまでの打上げコスト	3,342	億円
LEO～GEOまでの打上げ	622	億円
総輸送コスト	3,964	億円
◎地上部		
	SSPS-23A	単位
<レクテナ面積>	3.5km×3.5km	
レクテナ面積	9.62	km ²
緩衝地帯	9.62	km ²
総地上部分コスト	2,286	億円
◎総構築コスト		
	SSPS-23A	単位
宇宙セグメント部コスト	7,970	億円
輸送コスト	3,964	億円
地上部コスト	2,286	億円
総構築コスト	14,220	億円

出所)三菱総合研究所作成

(3) パラメータスタディ例(その1)

1) 発送電部の超軽量化を図ったケース(SSPS-23B)

SSPS-23A モデルでは、表 3-4 に示すように宇宙部の重量が 20,000ton を超えているが、近年の欧州が行っているスタディの検討結果と比較して重量が非常に多くなっている。

<欧州の近年の SBSP システム検討における宇宙部の重量>

- CASSIOPeiA モデル(地上で 1.44GW):2,064ton (Frazer-Nash Consultancy 検討⁸⁷⁾)

⁸⁷ Study on Cost-Benefit Analysis of Space-Based Solar Power (SBSP) Generation for Terrestrial Energy Needs / TN3 - System Breakdown, Costs and Technical Feasibility, Frazer-Nash Consultancy

- SPS-ALPHA モデル(地上で 2GW):6,097ton(Optimistic)~16,507ton (Pessimistic)(Roland Berger 検討⁸⁸)
- Thales Alenia Space モデル(地上で 1GW):6,640ton(図 3-19 参照)

そこで前項で作成した SSPS 宇宙部の重量およびコスト算出ツールを用いたパラメータスタディの一例として、発送電部の軽量化を図ったケースについて試算を行った。具体的には、発送電部パネルの太陽電池の単位重量およびマイクロ波回路の単位重量を表 3-7 のように見直して再計算を行った(これを本報告書では「SSPS-23B モデル」とする。)。なお、太陽電池の単位重量は薄膜太陽電池を想定しており、マイクロ波回路の数字については、上記の Roland Berger の SPS-ALPHA モデルの重量の推算(Optimistic)に用いている数字 0.5kg/m^2 (Caltech Mass)を参考としている。重量の各部分ごとの内訳も図 3-57 に示す。

本 SSPS-23B モデルにおいても、宇宙部および地上部のコストについては SSPS-23A モデルと変わらないが、JSS コストモデルの輸送系コスト計算部を用いて算出した SSPS-23B モデルの総構築コストを表 3-8 に示す。

⁸⁸ Study on Cost-Benefit Analysis of Space-Based Solar Power (SBSP) Generation for Terrestrial Energy Needs / TN3 - System Breakdown, Costs and Technical Feasibility of a SPS, OHB

表 3-7 SSPS-23B モデルの宇宙部の重量計算結果

◎重量			
	JSS	単位	備考
1モジュール	0.5m×0.5m		
1グループ (100m×95m)	38000モジュール		200×190
SSPSサイズ	2.5km×2.375km		
SSPS総モジュール数	23,750,000	個	
< 発送電部 >			
単位重量			
①太陽電池	0.258	g/W	薄膜太陽電池を想定
②マイクロ波回路	2.2	g/W	0.5kg/m ² 程度(Caltech)を想定
③構造部	0.028	g/cm ³	
④蓄電部	0.667	g/Wh	
1モジュール重量			
①太陽電池	61	g	118.1W、両面
②マイクロ波回路	122	g	55.5W
③構造部	140	g	5000cm ³ 、厚さ2cm
④蓄電部	250	g	375Wh
合計 (①～④)	0.573	kg	
(A) 発送電部総重量	13,614	ton	
< その他 >			
単位重量			
①テザー線密度	0.013	kg/m	
②テザー進展装置	4	kg/個	
③バス	1,400,000	kg/式	制御部：280ton、ダミー：1120ton
総重量			
①②テザー	6,900	kg	テザー：5km×100本、進展装置：100個
③バス	1,400,000	kg	
(B) その他総重量	1,407	ton	
SSPS総重量(A)+(B)	15,021	ton	

出所)三菱総合研究所作成

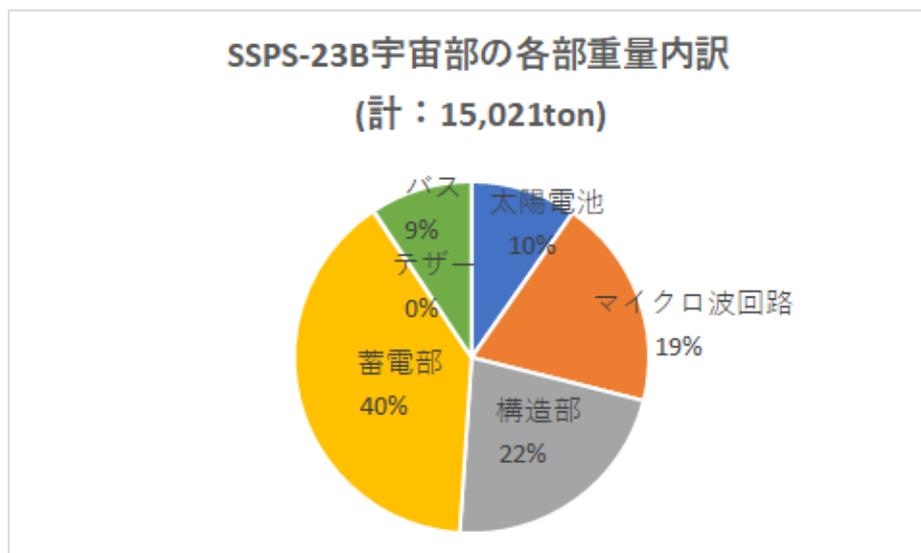


図 3-57 SSPS-23B モデル宇宙部の各部重量内訳

出所)三菱総合研究所作成

表 3-8 SSPS-23B モデルの宇宙部の総構築コスト

◎輸送 (SSPS2号機目以降)		
	SSPS-23B	単位
SSPS重量	15,021	ton
LEOまでの打上げ単価	0.071	億円/ton
LEOまでの打上げコスト	1,654	億円
LEO～GEOまでの打上げ	379	億円
総輸送コスト	2,033	億円
◎地上部		
	SSPS-23B	単位
<レクテナ面積>	3.5km × 3.5km	
レクテナ面積	9.62	km ²
緩衝地帯	9.62	km ²
総地上部分コスト	2,286	億円
◎総構築コスト		
	SSPS-23B	単位
宇宙セグメント部コスト	7,970	億円
輸送コスト	2,033	億円
地上部コスト	2,286	億円
総構築コスト	12,289	億円

出所)三菱総合研究所作成

2) 本コストモデルの課題

上述したように、入力パラメータ値を変更することで、SSPS 宇宙部の重量およびコスト、さらには JSS コストモデルの輸送系コスト計算部と連動させることで、SSPS の各モデル構築にかかる総コストを試算することができるが、現状では入力パラメータ同士は完全に独立して入力する形になっているという問題点がある。本来、各入力パラメータ同士は独立しているわけではなく、項目同士で影響し合い相関性があるが、現在ではそこまでのシステム検討が行われていないため、それらを反映したコストモデルを作成することができない。

例えば、SSPS-23B モデルでは発送電部が軽量化されているため、本来は構造体もバス部等も軽量化できることが考えられるが、現状はそれらの相関式までの検討がなされていない状態である。そのため、技術的に成立し得ない条件になっている可能性も排除できない。パラメータスタディを行う際には、これらの限界や課題も考慮に入れて検討を行う必要がある。

(4) パラメータスタディ例(その2)

上記の発送電部の重量を軽量化したケースである SSPS-23B モデルでも、地上での出力が同規模(=1GW)である Thales Alenia Space モデル(=6,640ton)と比較すると、まだ重量の値が大きくなっている。重量の内訳(図 3-57)をみると、蓄電部の重量が大きいため、さらなる軽量化を図るためには、蓄電部の軽量化を図る、あるいは蓄電池を搭載しないモデルについても検討する必要がある可能性が高い。

そこで、本項では SSPS-23C モデルとして、蓄電池を搭載しないタイプのシステムの重量およびコストの見積を行った。なお蓄電池がないことから、構造部の厚みを蓄電部ありのモデル半分(=1cm)とし、バスのダミー分の重量も発送電部の重量減に合わせて減少させた。SSPS-23C モデルの宇宙部の重量計算の入力パラメータと結果を表 3-9 に、宇宙部のコストを表 3-10 に、JSS コストモデルの輸送系コスト計算部を用いて算出した SSPS-23C モデルの総構築コストを表 3-11 に示す。

表 3-9 SSPS-23C モデルの宇宙部の重量計算結果

◎重量			
	JSS	単位	備考
1モジュール	0.5m × 0.5m		
1グループ (100m × 95m)	38000モジュール		200 × 190
SSPSサイズ	2.5km × 2.375km		
SSPS総モジュール数	23,750,000	個	
<発送電部>			
単位重量			
①太陽電池	0.258	g/W	薄膜太陽電池を想定
②マイクロ波回路	2.2	g/W	0.5kg/m ² 程度(Caltech)を想定
③構造部	0.028	g/cm ³	
④蓄電部	0	g/Wh	
1モジュール重量			
①太陽電池	61	g	118.1W、両面
②マイクロ波回路	122	g	55.5W
③構造部	70	g	2500cm ³ 、厚さ1cm
④蓄電部	0	g	375Wh
合計 (①~④)	0.253	kg	
(A)発送電部総重量	6,011	ton	
<その他>			
単位重量			
①テザー線密度	0.013	kg/m	
②テザー進展装置	4	kg/個	
③バス	613,640	kg/式	制御部：280ton、ダミー：333.64ton
総重量			
①②テザー	6,900	kg	テザー：5km × 100本、進展装置：100個
③バス	613,640	kg	
(B) その他総重量	621	ton	
SSPS総重量(A)+(B)			
	6,632	ton	

出所)三菱総合研究所作成

表 3-10 SSPS-23B モデルの宇宙部のコスト計算結果

◎コスト			
	JSS	単位	備考
1モジュール	0.5m × 0.5m		
1グループ (100m × 95m)	38000モジュール		200 × 190
SSPSサイズ	2.5km × 2.375km		
SSPS総モジュール数	23,750,000	個	
< 発送電部分 >			
単価			
①太陽電池	66	円/W	
②マイクロ波回路	180	円/W	
③構造部	5000	円/kg	
④蓄電部	0	円/Wh	
1モジュール価格			
①太陽電池	15,589	円	118.1W、両面
②マイクロ波回路	9,990	円	55.5W
③構造部	350	円	0.14kg→0.07kg
④蓄電部	0	円	375Wh
合計 (①～④)	25,929	円	
(A) 発送電部分総価格	6,158	億円	
< その他 >			
単価			
①テザー	150,000	円/本	30円/m、1本5km
②テザー進展装置	4,700,000	円/個	
③バス	200,000,000	円/ton	制御部：2億円/ton、ダ ミー部：0.005億円/ton
総価格			
①②テザー	485,000,000	円	100本
③バス	56,166,820,000	円	制御部：280ton、ダミー 部：333.64ton
(B) その他総価格	567	億円	
SSPS総価格(A)+(B)	6,725	億円	

出所)三菱総合研究所作成

表 3-11 SSPS-23C モデルの宇宙部の総構築コスト

◎輸送 (SSPS2号機目以降)		
	SSPS-23C	単位
SSPS重量	6,632	ton
LEOまでの打上げ単価	0.071	億円/ton
LEOまでの打上げコスト	731	億円
LEO～GEOまでの打上げ	167	億円
総輸送コスト	898	億円
◎地上部		
	SSPS-23C	単位
<レクテナ面積>	3.5km × 3.5km	
レクテナ面積	9.62	km ²
緩衝地帯	9.62	km ²
総地上部分コスト	2,286	億円
◎総構築コスト		
	SSPS-23C	単位
宇宙セグメント部コスト	6,725	億円
輸送コスト	898	億円
地上部コスト	2,286	億円
総構築コスト	9,909	億円

出所)三菱総合研究所作成

(5) ふろしき型 SSPS のコスト試算例

本項では、マルチテザー型モデルとは異なる「ふろしき型太陽発電衛星」(以下「ふろしき型 SSPS」)について、上記で作成した SSPS 宇宙部の重量およびコスト算出ツールを用いて算出を行った宇宙部の重量、コストおよび全体の総構築コスト試算例を示す。

1) ふろしき型 SSPS の概要

ふろしき型 SSPS の詳細については本報告書では省略するが、概要は以下のようになっている。

ふろしき型 SSPS は「膜状構造の 4 隅を衛星が担い、衛星がフォーメーションフライトすることで膜状構造を展開する」という「ふろしき衛星」の概念を応用し、100m 四方を 4 つの衛星で担う構造を 1 モジュールとして打上げ、軌道上で展開したのち、衛星がランデブードッキングして結合することにより、2.5km×2.5km の SSPS を構成するというものである。ふろしき膜(太陽電池を片面に、アンテナ素子を両面に配置する方式)だけでトラスなどの硬い構造を持たないので、圧倒的な軽量化を実現できる可

能性がある。SSPS 全体は太陽電池セルのついた面を常に太陽に向けて回転させるため、アンテナ素子を両面に配置しても、1 日のうちで送電できない時間帯(6 時および 18 時付近)も生じ、1 日内で送電パターンが変化することになる。

2) ふろしき型 SSPS の入力パラメータ値の検討

JSS コストモデルを参考に、ふろしき型 SSPS についてもコアとなる発送電部については、1 モジュールの重量およびコストを算出し、それにモジュール数を乗じることで全体の重量およびコストを算出するようにした。重量の主な入力パラメータとしては図 3-58 に示すように発送電部の単位重量として、①太陽電池膜(g/cm^2)、②その他(太陽電池膜の N 倍)、その他(衛星)の単位重量として、③衛星本体(ドライ)($\text{kg}/\text{機}$)、④燃料(面維持+軌道上昇分)($\text{kg}/\text{機}$)を設定した。同様に発送電部の単価として、①太陽電池($\text{円}/\text{W}$)、②マイクロ波回路($\text{円}/\text{W}$)、その他の単価として、③衛星本体(ドライ)($\text{円}/\text{機}$)、④燃料($\text{円}/\text{kg}$)を設定した。JSS コストモデルと同様、発送電部を構成する各部(太陽電池、マイクロ波送電部など)の効率はシステムの仕様に反映される形とはなっていないため、効率をパラメータとしたコスト算出は現状では行えない。なお、発送電部およびその他の部分の重量/コストの和を求めることで、最終的な SSPS 宇宙部の総重量/総コストが求められることとなる。

具体的な入力パラメータ値については、ふろしき型 SSPS については「ふろしき型太陽発電衛星に関するフェージビリティスタディ ver5」(中須賀, 2022.11 月)において技術的および経済的フェージビリティが成立する条件が検討されており、それらを考慮に入れた打上げに必要な総重量は図 3-59 のように示されている。また、太陽発電電力(DC)からレクテナで受け取れる電力までの総効率は 40% (2040 年目標)、衛星 1 機当たりの電気推進機のコストが 4000 万円程度(電気推進の 1 台当たりのコストが 500~1000 万円で衛星 1 機当たり 4 台の電気推進機を搭載と想定)という数字も示されている。

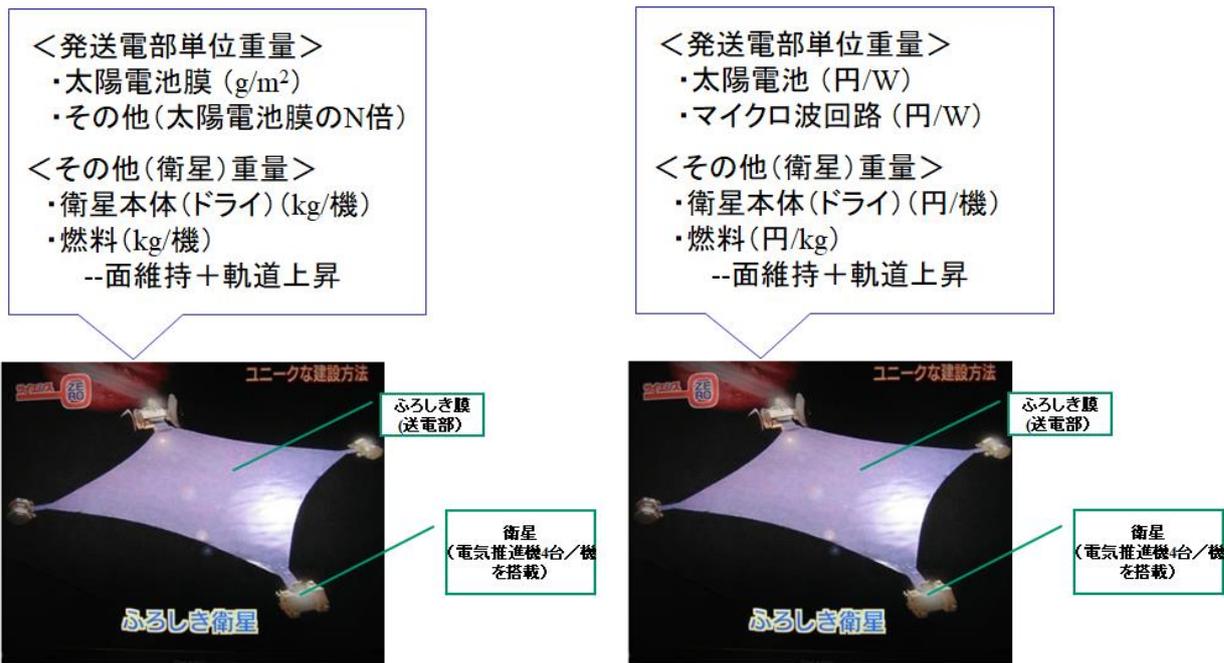


図 3-58 ふろしき型 SSPS コストモデルの宇宙部重量およびコストの入力パラメータ
出所)「ふろしき型太陽発電衛星に関するフィージビリティスタディ ver5」(中須賀, 2022.11 月)より三菱総合研究所作成

衛星 (4 隅のうちの 1 つの衛星あたり)		ふろしき膜 (100m 四方)	
ドライ重量	300 kg	太陽電池部分	1220kg
40 年間の軌道制御燃料	200 kg	それ以外 (RF 変換素子、アンテナ素子、裏地、ヒンジなど含む)	4880 kg
高度 500 km から静止軌道への移行時の燃料	641 kg		
計	1141 kg	計	6100 kg

○すべての重量の積算

1 モジュール (4 衛星 + 100m 四方のふろしき膜)	10664 kg (10.7 トン)
SSPS 全体 (2.5 km 四方) でのモジュール数	25 x 25 = 625 個
約 10 トンを高度 500 km へ打ち上げる回数	625 回
SSPS 総重量	6.67 x 10 ⁶ kg (6670 トン)

※DC-RF 変換、アンテナ素子、ヒンジなどすべてを含んでふろしき膜を太陽電池質量の 5 倍以下の質量に収められる条件が前提

図 3-59 ふろしき型 SSPS の宇宙部重量推算

出所)「ふろしき型太陽発電衛星に関するフィージビリティスタディ ver5」(中須賀, 2022.11 月)

地上での出力が同規模 (=1GW) である Thales Alenia Space モデル (=6,640ton) と比較しても、ほぼ同じ規模の重量となっている。また、太陽発電電力 (DC) からレクテナで受け取れる電力までの総効率として 40% 以上を想定しているが、3.1.2(1)5)b 項で示したように、Thales Alenia Space モデルの検討では発電電力が 2,058MW で送電電力が 1,608MW (78%)、さらに電力網接続電力が 1,007MW となっており、太陽発電電力 (DC) からの効率が 49% となっている。

以上より、ふろしき型 SSPS で推算されている重量や効率については、Thales Alenia Space モデルと同等な値となっていることが分かる。

3) 宇宙機システムの重量/コスト算出(SSPS-23D モデル)

表 3-3 および図 3-59 の入力パラメータを用いて、ふろしき型 SSPS の宇宙部の重量および宇宙部のコストを算出した。結果を表 3-12～表 3-13 に示す(これを本報告書では「SSPS-23D モデル」とする。)

表 3-12 SSPS-23D モデルの宇宙部の重量計算結果

◎重量			
	ふろしき	単位	備考
1モジュール	100m×100m		
100m×100m	1モジュール		
SSPSサイズ	2.5km×2.5km		
SSPS総モジュール数	625	個	
< 発送電部分 >			
単位重量			
①太陽電池	—		
②マイクロ波回路	—		
③構造部	—		
④蓄電部	—		
⑤太陽電池膜	122	g/m ²	JAXA新規
⑥その他 (=⑤のN倍)	4	倍	全部で(N+1)倍
1モジュール重量			
①太陽電池	—		
②マイクロ波回路	—		
③構造部	—		
④蓄電部	—		
合計 (①～④)	—		
100m×100mの重量	6,100	kg	
(A) 発送電部総重量	3,813	ton	
< その他 >			
単位重量			
①テザー線密度	—		
②テザー進展装置	—		
③バス	—		
④衛星本体 (ドライ)	300	kg/機	電気推進4台搭載
⑤燃料	841	kg/機	面維持200kg、軌道上昇641kg
総重量			
①②テザー	—		
③バス	—		
④電気推進衛星本体	750,000	kg	
⑤燃料	2,102,500	kg	
(B) その他総重量	2,853	ton	
SSPS総重量(A)+(B)	6,665	ton	

出所)三菱総合研究所作成

表 3-13 SSPS-23D モデルの宇宙部のコスト計算結果

◎コスト			
	ふろしき	単位	備考
1モジュール	100m×100m		
100m×100m	1モジュール		
SSPSサイズ	2.5km×2.5km		
SSPS総モジュール数	625	個	
< 発送電部分 >			
単位重量			
①太陽電池	66	円/W	
②マイクロ波回路	180	円/W	
③構造部	—		
④蓄電部	—		
⑤太陽電池膜			
⑥その他 (=⑤のN倍)			
1モジュール重量			
①太陽電池	—		
②マイクロ波回路	—		
③構造部	—		
④蓄電部	—		
合計 (①~④)	—		
100m×100mの価格	1,023,168,000	円	
(A) 共通部分総価格	6,395	億円	
< その他 >			
単価			
①テザー	—		
②テザー進展装置	—		
③バス	—		
④衛星本体	40,000,000	円/機	電気推進4台分
⑤燃料	400	円/kg	
総価格			
①②テザー	—		
③バス	—		
④電気推進衛星本体	100,000,000,000	円	
⑤燃料	841,000,000	円	
(B) その他総価格	1,008	億円	
SSPS総価格(A)+(B)	7,403	億円	

出所)三菱総合研究所作成

4) SSPS-23D モデルの総構築コスト

ふろしき型 SSPS についても、地上部コスト算出分および輸送部コスト算出分に関しては、今回は手を加えずに過去の JSS コストモデルのものをそのまま流用し、輸送部分に関する入力パラメータ値については表 3-3 に示したように見直しを行い、他の地上部分に関しては 2007 年の値をそのまま用いている。ただし、ふろしき型 SSPS では、膜を維持しているふろしき衛星が電気推進機 4 台を搭載し、それにより LEO から GEO まで輸送するシナリオが想定されており、その分の燃料の重量およびコストがすでに見積もられているので、輸送コスト計算部での LEO～GEO までの打上げについては 0 円としている。

3.3.1(5)2)項および JSS コストモデルの輸送系コスト計算部および地上システムコスト計算部を用いて算出した SSPS-23D モデルの総構築コストを表 3-14 に示す。

表 3-14 SSPS-23D モデルの総構築コスト

◎輸送 (SSPS2号機目以降)		
	SSPS-23D	単位
SSPS重量	6,665	ton
LEOまでの打上げ単価	0.071	億円/ton
LEOまでの打上げコスト	735	億円
LEO～GEOまでの打上げ	0	億円
総輸送コスト	735	億円
◎地上部		
	ふろしき	単位
<レクテナ面積>		
レクテナ面積	9.62	km ²
緩衝地帯	9.62	km ²
総地上部分コスト	2,286	億円
◎総構築コスト		
	ふろしき	単位
宇宙セグメント部コスト	7,403	億円
輸送コスト	735	億円
地上部コスト	2,286	億円
総構築コスト	10,424	億円

出所)三菱総合研究所作成

(6) まとめ

JSS コストモデルをその入力パラメータ値等と合わせて見直し・拡張し、マルチテザー型 SSPS の複数モデルとふろしき型 SSPS モデルについて、宇宙部の重量、コスト、輸送部、地上部のコスト試算を行った。ここまでで検討を行った SSPS モデルとコストモデルによる試算結果の一覧を表 3-15 に示す。

欧米での近年のフィージビリティスタディの結果を参考に、マルチテザー型 SSPS もふろしき型 SSPS(-23D)モデルと同様に発送電部の軽量化を図ったが(-23B)、蓄電池の重量が占める割合が大きく、重量の観点からはマルチテザー型の蓄電なしモデルの検討の必要性が高まったため、蓄電池なしのモデル(-23C)についてもコスト算出を行った。

その結果、-23C と-23D を比較すると、宇宙部の重量およびコストはほぼ同程度になることが見込まれた。ただし、ふろしき型 SSPS は構造体の重量およびコストが必要なく、軌道間輸送コストも宇宙部コストに含まれているため、その分のコスト削減効果が生じている。一方でふろしき型 SSPS は、ふろしき膜を支える電気推進衛星本体の重量およびコストが、マルチテザー型 SSPS のバスやテザーに比べて大きくなりコスト増加分となってくるため、マルチテザー型 SSPS とふろしき型 SSPS との比較の際には、それらのトレードオフが重要となってくる。

表 3-15 SSPS 宇宙部の重量およびコスト算出ツールにより計算した各モデルのコスト試算例

	SSPS-23A	SSPS-23B	SSPS-23C	SSPS-23D	単位
	マルチテザー 蓄電池あり型	23Aモデルの 発送電部軽量型	23Bモデルの 蓄電池なし型	ふろしき型	
◎宇宙部（重量／コスト）					
SSPS発送電部	23,288	13,614	6,011	3,813	ton
SSPSその他	1,407	1,407	621	2,853	ton
SSPS総重量	24,695	15,021	6,632	6,665	ton
SSPS発送電部コスト	7,399	7,399	6,158	6,395	億円
SSPSその他コスト	570	570	567	1,008	億円
SSPS総コスト	7,970	7,970	6,725	7,403	億円
◎輸送（SSPS2号機目以降）					
LEOまでの打上げコスト	3,342	1,654	731	735	億円
LEO～GEOまでの打上げ	622	379	167	0	億円
総輸送コスト	3,964	2,033	898	735	億円
◎地上部					
総地上部分コスト	2,286	2,286	2,286	2,286	億円
総構築コスト	14,220	12,289	9,909	10,424	億円

出所)三菱総合研究所作成

3.3.2 宇宙太陽光発電を導入するためのエネルギーコストの仮定

コストモデルによって得られた地上太陽光発電コストの諸元や出力変動曲線などを前提条件とし、エネルギーシステムモデルを用いることにより、2050年の日本のエネルギーコストを推定したところ、宇宙太陽光発電システム(SSPS)の導入は、SSPSの総構築コストが少なくとも12,500億円を下回らないと導入が開始されないと判明した。

また、3.1.2(1)5)b項で示したThales Alenia Space Italy社が検討した1GW級システム(初号機)での総構築コストが7.71B\$であることから(図3-21参照)、我が国のSSPSが競争力を有するためには、同等もしくはそれ以下のコストを実現する必要がある。

以上のことから、以降では、SSPSの総コストが10,000億円を下回ることがSSPSを導入するための条件となると仮定し、次項以降でこれを実現するための課題を整理することとする。

3.3.3 SSPS 総構築コストに対する関連パラメータの感度分析

(1) マルチテザー(マルチバス)型 SSPS の宇宙部の総重量およびコストの感度分析

SSPS 総構築コストに対する感度分析とは、総構築コストの予測において、それに関係する一つの変数が変動したとき、結果がどれだけ変化するかを分析することである。

前項で各モデルのコスト試算例を示したが、本項ではマルチテザー型 SSPS について、宇宙部の総重量およびコストが SSPS 総構築コストに及ぼす影響について感度分析を行う。具体的には、JSS コストモデルを用いて、発送電部軽量型かつ蓄電ありの SSPS-23B モデルを基準として、SSPS 宇宙部の重量およびコストを変化させ、出力値である SSPS 総構築コストの変化を評価する。

図3-60に宇宙部重量と総構築コストの関係、図3-61に宇宙部のコストと総構築コストの関係を示す。また SSPS-23B を基準として、宇宙部重量と宇宙部コストの基準値との比率を横軸として総構築コストに及ぼす影響を評価したグラフを図3-62に示す。本モデルでは、すでに宇宙部の十分な軽量化を図ったモデルを基準としていることから、宇宙部の重量より宇宙部のコストが全体の SSPS 総構築コストに及ぼす影響が大きくなっていることが分かる。

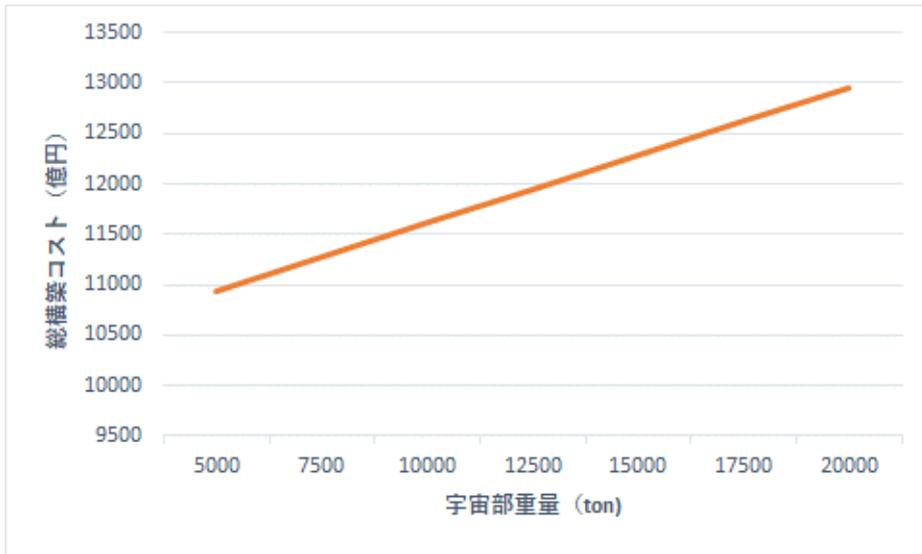


図 3-60 SSPS-23B モデルにおける宇宙部重量と SSPS 総構築コストの関係
出所)三菱総合研究所作成

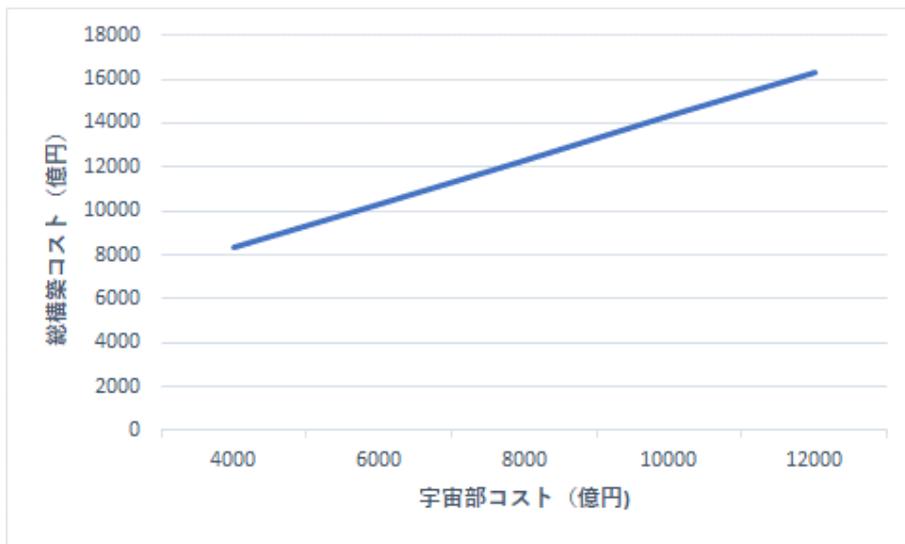


図 3-61 SSPS-23B モデルにおける宇宙部コストと SSPS 総構築コストの関係
出所)三菱総合研究所作成

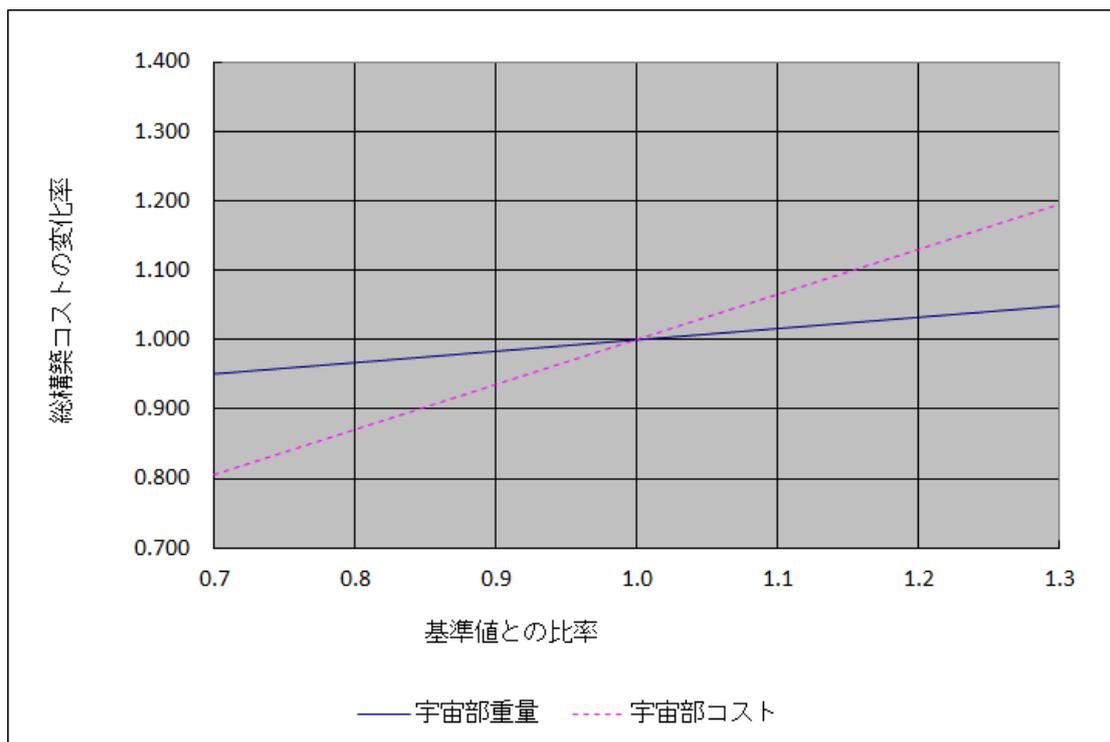


図 3-62 SSPS-23B モデルにおける宇宙部重量および宇宙部コストと SSPS 総構築コストの関係
出所)三菱総合研究所作成

(2) ふろしき型 SSPS の総構築コストに対するパラメータ感度分析

同様に、ふろしき型 SSPS である SSPS-23D モデルを基準として、SSPS の各入力パラメータ(発電部重量、その他重量、発電部コスト、その他コスト、輸送単価)を変化させ、出力値である総構築コストの変化への影響を見る。

図 3-63 に各入力パラメータ値の基準値との比率を横軸、総構築コストの変化を縦軸として、各入力パラメータが総構築コストに及ぼす影響を評価したグラフを示す。本モデルでも基準としている SSPS-23D モデルはすでに十分な軽量化を行い、かつ輸送コストの低減を想定しているモデルであるため、各部(発電部およびその他)の重量および輸送単価より各部(発電部およびその他)のコストが全体の総構築コストに及ぼす影響が大きくなっていることが分かる。

感度分析は、基準としている設定しているモデルケース(ここでは SSPS-23D モデル)に用いている入力パラメータ値により、各要素の感度は大きく影響を受ける。一例として、ふろしき型 SSPS の入力パラメータ値を「太陽電池単価:66 円/W→15 円/W」かつ「輸送単価:0.71 億円/ton→0.284 億円/ton」に変更したものを基準とするケースとして、同様の感度分析を行ったものを図 3-64 に示す。この場合、SSPS-23D モデルと宇宙部の重量は変わらないものの、総構築コストは 9,616 億円となり、SSPS-23D モデルと比較して SSPS 宇宙部の発電部のコストが低下し、輸送コストが大きくなる。そのため感度分析結果も発電部コストの影響が低下し、輸送単価の影響が増加するという結果になっている。

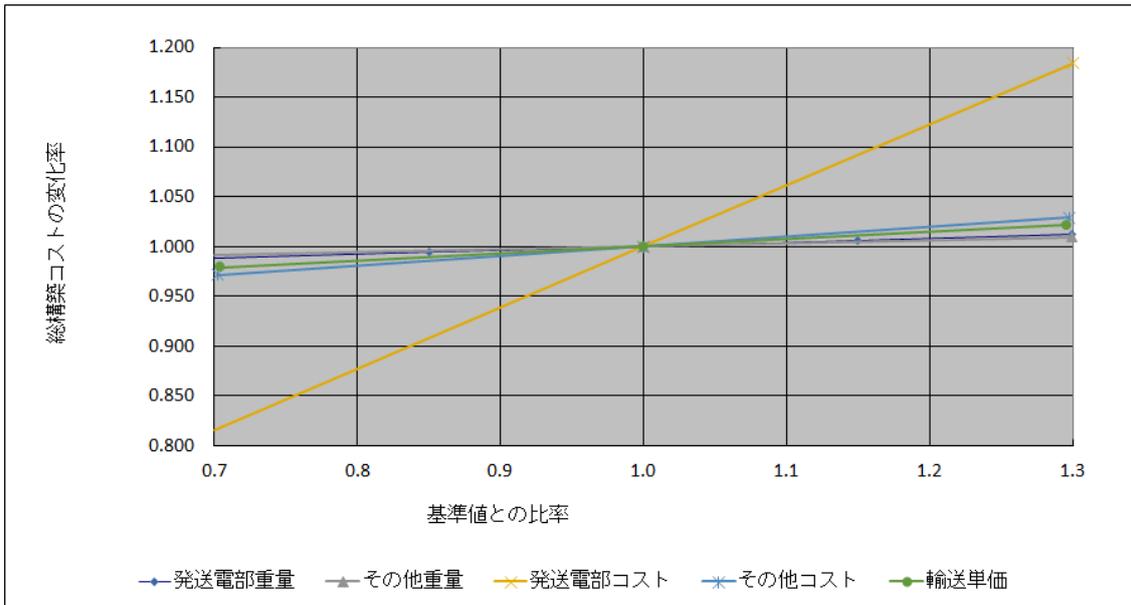


図 3-63 SSPS-23D モデルにおける各入力パラメータと SSPS 総構築コストの関係
出所)三菱総合研究所作成

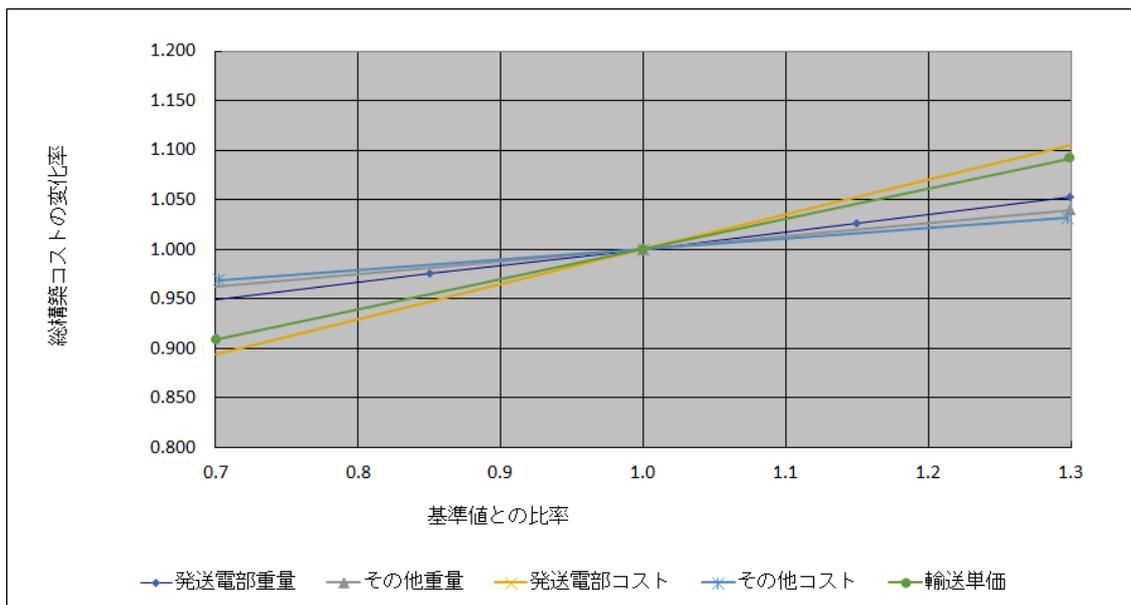


図 3-64 ふろしき型衛星で太陽電池単価と輸送単価を変更したものを基準としたケースでの感度分析
出所)三菱総合研究所作成

3.3.4 目標コストを達成するための各パラメータ値の目標範囲の検討

感度分析とは、ある出力値(目的関数)が入力値のどの程度の変化に対してどの程度の変化を示すかということ进行分析するものであり、重要な因子の特定やリスクの程度の把握等に有用なものである。しかし上項で示した通り、感度分析の結果はモデル自体や基準値として使用している入力パラメータ値の妥当性に依存するため、必ずしも正確な結果になっているとは限らず、分析結果に影響を与えている要因等を適切に見極める必要がある、といった点も考慮することが重要となっている。

一方で、このように感度分析について限界はあるものの、変動可能性の高い複数の入力パラメータを

ある程度の幅を持たせて変動させ、その際の実出力値を見ることで各パラメータ値の目標とすべき値の検討に資する情報を得ることは可能であると考えられる。そこで本項ではマルチテザー型 SSPS を対象として、3.3.1 項で設定したモデルについて、いくつかの入力パラメータ値に注目して、SSPS がコスト競争力を持つために必要となる条件について検討を行った。

(1) 目標範囲の設定

3.3.2 の通り、最初に SSPS 総構築コストの上限値を 1 兆円と仮定して、SSPS-23B と SSPS-23C モデルの輸送単価を 0.054 億円/ton～0.284 億円/ton まで変化させて、各モデルの SSPS 宇宙部のコストの上限値を計算した。なお、変動させた輸送単価の最小値「0.054 億円/ton」は JSS2007 年目標ケース(表 3-3 参照)、最大値「0.284 億円/ton」は上記の Thales Alenia Space Italy での検討値(=200 \$/kg)(図 3-22 参照)である。また、もともとの SSPS-2B / -2C で用いた基準値は「0.071 億円/ton」である。

<RLV 輸送単価として設定したパラメータ値>

- 最小値:0.054 億円/ton
 - JSS2007 年目標ケースで使用した値
- 最大値:0.284 億円/ton
 - Thales Alenia Space Italy 社の 2023 年のスタディでの検討値(=200 \$/kg)を換算
- 基準値:0.071 億円/ton

結果を表 3-16 に示す。表より、SSPS 総構築コストを 1 兆円以下に抑えるためには SSPS-23B モデルでは、宇宙部コストは 722 億円～6,081 億円の範囲、SSPS-23C モデルでは 4,625 億円～6,081 億円の範囲に収める必要があることが分かる。

表 3-16 SSPS-23B / 23C モデルにおける SSPS 宇宙部コストの上限値

	SSPS宇宙部質量 (ton)	RLV輸送単価 (億円/ton)	輸送総コスト (億円)	地上部 (億円)	SSPS宇宙部コスト の上限値 (億円)	総構築コストの上 限值 (億円)
SSPS-23B (バッテリー あり)	15,021	0.054	1,637	2,282	6,081	10,000
	15,021	0.071	2,033	2,282	5,685	10,000
	15,021	0.142	3,687	2,282	4,031	10,000
	15,021	0.284	6,996	2,282	722	10,000
SSPS-23C (バッテリー なし)	6,632	0.054	724	2,282	6,994	10,000
	6,632	0.071	898	2,282	6,820	10,000
	6,632	0.142	1,630	2,282	6,088	10,000
	6,632	0.284	3,093	2,282	4,625	10,000

出所)三菱総合研究所作成

(2) 蓄電池あり(SSPS-23B)モデルの場合の検討

SSPS-23B モデルにおいて、輸送単価が最小値(=0.054 億円/ton)の場合に、太陽電池単価が15 円/W、30 円/W および 66 円/W のとき、SSPS 蓄電部コストの上限値がいくつになるかの計算を行った。ここで、SSPS 蓄電部コストは

$$(SSPS \text{ 蓄電部コスト}) = (SSPS \text{ 宇宙部コスト}) - \{(SSPS \text{ その他コスト}) + (\text{発送電部太陽電池コスト}) + (\text{発送電部マイクロ波回路コスト}) + (\text{発送電部構造部コスト})\}$$

で計算される(「SSPS その他」とはバスとテザー)。

なお、変動させた太陽電池単価の最小値「15 円/W」はペロブスカイト太陽電池を想定し、新エネルギー・産業技術総合開発機構(NEDO)のプロジェクトの目標値を採用している。また「30 円/W」はJSS2007 年目標ケースで使用した値、最大値の「66 円/W」はももとの SSPS-2B / -2C で用いた基準値となっている(表 3-3 参照)。

<太陽電池単価として設定したパラメータ値>

- 最小値:15 円/W
 - ペロブスカイト太陽電池を想定。NEDO のプロジェクトの目標値
- 33 円/W
 - JSS2007 年目標ケースで使用した値
- 最大値:66 円/W
 - 基準値として使用した値

結果を表 3-17 に示す。表より、輸送単価が最小値(=0.054 億円/ton)の場合でも、太陽電池単価が基準値(=66 円/W)の場合、蓄電池以外のコストだけですでに上限値を超えてしまうため、本モデルでは総構築コストを1兆円以下に抑えることができないことが分かる。一方で、太陽電池単価を15 円/W まで下げることができれば、蓄電部のコストを2,701 億円以下にできれば、総構築コストを1兆円以下に抑えることが可能である。

次に、輸送単価が最大値(=0.284 億円/ton)の場合に太陽電池単価が15 円/W、30 円/W および 66 円/W のとき SSPS 蓄電部コストの上限値がいくつになるかを計算した結果を表 3-18 に示す。この場合、太陽電池の単価が全てのケースにおいて蓄電池以外のコストだけですでに上限値を超えてしまうため、本モデルでは総構築コストを1兆円以下に抑えることができないことが分かる。

この他、蓄電池単価を現状の基準値の1/2にしたケース(0.667g/Wh→0.333g/Wh)についても同様に計算を行うなどしたが、蓄電池ありのモデルについては、総じて以下のことが明らかになった。

<「マルチテザー(マルチバス)型 SSPS—蓄電池あり」のモデルが経済的に成立し得る条件>

※ただし、宇宙部の重量を15,000ton 程度にまで低減させることが前提

- 「輸送単価が0.284 億円/ton」あるいは「太陽電池単価が66 円/W」の条件では成立しない。

(=SSPS 総構築コストを 1 兆円以下に抑えることができない)

- 蓄電池ありのモデルを経済的に成立させるためには、少なくとも「輸送単価が 0.142 億円/ton」以下、かつ「太陽電池単価が 30 円/W」以下の条件が必要である。さらにその場合でも、蓄電池の軽量化および低コスト化を合わせて進める必要がある。
- 太陽電池単価がペロブスカイトの目標値「15 円/W」にまで低価格が進めば、蓄電池ありモデルが経済的に成立する可能性は高くなる。

表 3-17 SSPS-23B モデルにおける SSPS 宇宙部コストの上限値(輸送単価=0.054 億円/ton の場合)

◎バッテリーあり (=15,021ton)						
輸送単価：0.054億円/ton						
太陽電池単価	SSPSその他 (億円)	発送電部 太陽電池 (億円)	発送電部 マイクロ波回路 (億 円)	発送電部 構造部 (億円)	SSPS蓄電部コスト の上限値 (億円)	上限値
15円/W	570	841	2,373	166	2,701	6,081
30円/W	570	1683	2,373	166	1,859	6,081
66円/W	570	3702	2,373	166	(160)	6,081

出所)三菱総合研究所作成

表 3-18 SSPS-23B モデルにおける SSPS 宇宙部コストの上限値(輸送単価=0.284 億円/ton の場合)

◎バッテリーあり (=15,021ton)						
輸送単価：0.284億円/ton						
太陽電池単価	SSPSその他 (億円)	発送電部 太陽電池 (億円)	発送電部 マイクロ波回路 (億 円)	発送電部 構造部 (億円)	SSPS蓄電部コスト の上限値 (億円)	上限値
15円/W	570	841	2,373	166	(2,658)	722
30円/W	570	1683	2,373	166	(3,500)	722
66円/W	570	3702	2,373	166	(5,519)	722

出所)三菱総合研究所作成

(3) 蓄電池なし(SSPS-23C)モデルの場合の検討

同様に SSPS-23C モデルにおいて、輸送単価が最大値(=0.284 億円/ton)の場合に、太陽電池単価が 15 円/W、30 円/W および 66 円/W のとき SSPS 蓄電部コストの上限値がいくつになるかを計算した。

結果を表 3-19 に示す。表より、輸送単価が最大値(=0.284 億円/ton)の場合、太陽電池単価が基準値(=66 円/W)の場合、蓄電池コストはゼロであるが、総構築コストを 1 兆円以下に抑えるためには発送電部のマイクロ波回路上限値を 840 億円以下に抑えなければならず(SSPS-23C モデルケースでは 2,373 億円)現実的ではないことが分かる。一方で、輸送単価を 0.284 億円/ton 以下に下げることができれば、他のパラメータ値が現状の SSPS-23C モデルの条件であれば、太陽電池単価やマイクロ波回路のコストを下げなくても経済的に成立する。

以上から、蓄電池なしのモデルについては、総じて以下のことが明らかになった。

<「マルチテザー(マルチバス)型 SSPS—蓄電池なし」のモデルが経済的に成立し得る条件>

※ただし、宇宙部の重量を 6,600ton 程度にまで低減させることが前提

- 「輸送単価が 0.284 億円/ton」かつ「太陽電池単価が 66 円/W」の条件では成立しない。「太陽電池単価が 30 円/W」に下がれば成立する。
- 輸送単価が(100\$/kg=0.142 億円/ton)以下の場合、「太陽電池単価が 66 円/W」でも経済的に成立する。

表 3-19 SSPS-23B モデルにおける SSPS 宇宙部コストの上限値(輸送単価=0.284 億円/ton の場合)

◎バッテリーなし						
輸送単価：0.284億円/ton						
太陽電池単価	SSPSその他 (億円)	発電電部 太陽電池 (億円)	発電電部 マイクロ波回路上限 値 (億円)	発電電部 構造部 (億円)	SSPS蓄電部コスト (億円)	上限値
15円/W	567	841	3,701	83	0	4,625
30円/W	567	1683	2,859	83	0	4,625
66円/W	567	3702	840	83	0	4,625

出所)三菱総合研究所作成

3.3.5 まとめと課題

3.3.1 項では JSS コストモデルをベースとして、いくつかのモデル形状について SSPS 総構築コストの試算を行った。入力パラメータ値を変更することで、各モデルについて SSPS 宇宙部の重量およびコスト、さらには SSPS 構築にかかる総コストの計算を行った。しかし、現状では入力パラメータ同士は完全に独立して入力する形になっており、それぞれの相関が考慮されていないこと、各部(太陽電池、マイクロ波送電部、レクテナ等)の効率を直接入力する形になっていないこと等の問題があり、技術的には成立し得ない条件になっていたとしても計算上の数値が求められる可能性があるものとなっている。そのため、本試算で出てきた計算結果を扱う際には、これらの限界や課題を考慮しつつ、あくまで試算の一例としての参考に留める程度にする必要がある。

3.3.2 項では宇宙太陽光発電システム(SSPS)が 2050 年以降導入されるためには、総構築コストが少なくとも 12,500 億円を下回らないと導入が開始されないと判明した。

3.3.3 項および 3.3.4 項では感度分析やパラメータスタディを行った。これらについては、コスト算出方法の妥当性や、基準として用いている入力パラメータ値の精度について、十分な検討がなされている状況ではないため、分析結果については定性的な傾向を把握するものとしての活用に留める程度が望ましい。

このような今回用いた方法の限界と問題点とに留意した上で、ここまでの検討により明らかになったことを以下に整理する。

<SSPS の経済的実現性を高めるための要件>

- 輸送コストは近年急激に低下し、今後もさらに低減する見通しも高くなっているが、SSPS の経経済的成立性を確保するためには、さらなる軽量化および省スペース化を進めることが必要不可欠である。宇宙部のコアとなる発送電部を構成する太陽電池、マイクロ波送電器ともに軽量化を進める必要があると共に、それらを支えるその他の部分となる構造物の軽量化も図る必要がある。
 - 次世代の薄膜太陽電池、パワー半導体などの使用による発送電部の軽量化が期待される。
 - 宇宙からの送電電力を平滑化するための蓄電池等の必要性については、蓄電池搭載による重量およびコスト増の負担等を十分に考慮し検討する必要がある。
- 上記の軽量化を十分に図った上でなお、輸送コストの低減が必要である。輸送単価を 50～100\$/kg まで下げた輸送システムの実現が必要である。
 - Falcon Heavy の輸送コストより、さらに 1/20 以下に低減する必要がある。
- 軽量化、輸送コストの低減化を前提として、さらに SSPS 各部の低コスト化が重要となる。省スペース化、軽量化のために次世代太陽電池、パワー半導体等の利用が期待されるが、いかに低コストで実用化ができるかが鍵となる。軽量化および低コスト化につなげるために高効率化に向けた開発も重要となる。
- SSPS には様々なシステム形状のものが提案されているが、太陽電池やマイクロ波送電部といった発送電部については、いずれにも共通な要素である。それぞれの比較を行う上では、発送電部以外の要素(姿勢維持・形状維持のための構造体等)も重要な要素となる。そのため、構造体等の SSPS を構成する発送電部以外の要素の軽量化や低コスト化も合わせて検討していく必要がある。

なお、SSPS 宇宙部の重量およびコスト算出の限界と問題点等については上述した通りであるが、今後はコスト算出モデルの改善および入力パラメータ値として用いている各要素の将来値の精度の向上を行っていく必要がある。

また運用や地上部を含めた SSPS システム全体の構築コストや発電単価を求めていく際には、さらに SSPS1 機の規模や地上での出力パターン等も大きく影響を受けるため、それらを総合的に見直して結果の精度を高めていくことが求められる。

上記の通り本分析においては考慮されていない事象も多く存在し、これらをより正確に評価することは今後の大きな課題であると考えられる。

3.4 我が国の宇宙太陽光発電や要素技術に関する研究開発や産業振興における課題

本節では、3.1～3.3 項までの検討結果を受けて、宇宙太陽光発電に関する技術課題等を抽出し、行うべき技術開発の方向性を検討する。

3.4.1 SSPS 実現に向けての課題

SSPS の実現に必要となる発電および送電に関する基本的な技術はすでに実証済みのものばかりであり、今後は各技術の大規模システムへの応用を進め、経済的な成立性を高めていくことが大きな課題となっている。経済的な成立性を高めるための課題は 3.3.5 項で示した通りであるが、それらの課題を解決していくと同時に、合わせて宇宙空間や地球の大気圏を通過する長距離送電が安全で実用的であるかどうかを検証していくことが重要である。その他、組立てに必要な作業量の低減、継続的な運用・保守コストの低減、環境影響の緩和なども課題として挙げられる。特に、近年行われているシステム研究では運用軌道上での環境影響等への問題が大きく取り上げられてきている。さらに継続的な保守とアップグレードの重要性とコスト削減の観点から、柔軟性を高める完全なモジュール構造のシステムの検討が進められている。

なお近年では、宇宙分野内外において、以下に示すような SSPS コンセプトの実現に向けて有利な方向の技術進歩がみられている。

<SSPS を取り巻く近年の技術進歩>

- 打上げ機会の増大と打上げコストの低減
- 太陽電池効率の大幅な向上、低コスト化
- モジュール式宇宙機部品(インターフェースや相互運用性の標準化を伴うもの)の大量生産の実現性の高まり。
- ロボットによる宇宙での無人組立作業の信頼性向上
- 月面の資源利用の検討が進み、SSPS の構成部品を宇宙空間での現地資源により調達できる可能性の増大
- 地上や(SSPS 以外での)宇宙空間での無線電力伝送に対する需要の高まりと技術開発の進展

打上げに関しては、ペイロード 1kg あたりの打上げ単価は近年急激に低下している。Titan、Atlas、スペースシャトル等の米国の初期の計画と比較しても、SpaceX 社のような再使用型ロケットは大幅な低コスト化を実現している。他にも再使用型ロケットを開発している国や企業は多くあり、打上げ市場全体において打上げコストを削減し、宇宙インフラの輸送の経済性を向上させることが期待されているところである。ただし SSPS の経済的成立性を高めるためには、さらなる輸送単価の低減が必要となっている。また SSPS は超大規模であり、かつ静止軌道への投入が必要であるため、SpaceX 社の StarShip のような超重量級ロケットによる低コストの打上げ手段が必要であり、さらに地球低軌道までの打上げと比較しても輸送コストが大幅に増加するという課題も抱えている。今後の再使用型および超重量級ロケットの開発は、SSPS プログラムの将来にも影響を及ぼすものとなっている。

また、SSPS は大規模な衛星製造と高度な宇宙建設技術等が必要とされるが、近年の技術進歩によりそのような技術にも目途が立ち始めている。例えば、SpaceX 社は大量の Starlink 衛星を製造することで、大規模な衛星製造の能力を実証しているが、同じ衛星を大量にかつ低コストに継続して製造することが可能となってきた。宇宙でのロボットによる建設技術に関しても、米国を中心に宇宙インフラ用ロボットやロボットアーム付きの宇宙機などの開発が進められている。また月等の利用に向けたプログラムも多く進めており、月資源を利用した宇宙インフラの建設の可能性があることが示されている。これらが可能となれば、SSPS の建設に必要な資源、および衛星を軌道に乗せるための打上げ用ロケットと燃料の両方を提供することになり、SSPS の展開をより低コストで迅速に拡大できる可能性もある。

無線電力伝送に関しては、近年では小電力近距離の放射型(空間伝送型)WPT のみならず、大電力長距離パワービーミング WPT として、遠隔地への大電力送電や飛行するドローンへの充電・給電などの発展も考えられている。現在、kW および km レベルの無線送電技術については実験レベルの段階にあるが、今後 SSPS 技術のスピノフとしても、このようなレベルの屋外無線電力伝送技術が進展することが期待される。技術開発上の課題としては、1) 送電ビームの制御技術、2) 長距離電力伝送におけるビーム捕集効率の向上、3) 受電部の大電力化(高耐電力)と軽量化および高性能化、等が挙げられている。

この他、SSPS の実現に関する課題としては、安全性と環境の問題も挙げられる。低レベルのマイクロ波は通信インフラにより現代社会に常に存在しているが、高出力密度のマイクロ波ビームは環境、動物、人間、航空運航に深刻な被害を与える可能性がある。SSPS の運用者は、安全、環境、健康、干渉防止に関するすべての慣行、法律、規制を遵守する責任を負うことになるため、今後は安全性と環境の問題に関する検討も非常に重要となってくる。

3.4.2 我が国が行うべき SSPS 技術開発の方向性の検討

実用化 SSPS は超大規模なシステムであるため、サブシステムレベルで必要な技術開発を行うと共に、システムとしての性能を確認し、それがどのようにフルサイズに拡張されるかを検証するために、システム全体の規模を拡大しながら段階的に実証を行っていくというロードマップは全てのロードマップに共通したシナリオである。システム全体の規模を拡大しつつ、かつ最終軌道により近い環境条件でパイロットプラントを構築していくことによって、SSPS の全体的なシステムとしての TRL(技術成熟度)を向上させるようなマイルストーンを設定することが重要となっている。

一方、それらのパイロットプラント実証と合わせて、サブシステムレベルでの小規模な地上試験および軌道上試験も行っていく必要がある。パイロットプラントでは実用 SSPS コンセプトモデルの体系的な検証を行うため、ゴールである SSPS コンセプトモデルからバックキャスト式に実証ミッションを検討する必要があるが、その手前である小規模な地上試験および軌道上試験については、コンセプトモデルに依存しない要素技術開発を行うことも求められる。現段階では SSPS のコンセプトモデルは多様なものが提案されているが、現時点の既存の保有技術、アイデアをもとにシステムの検討を行っており、実現する 20~30 年後の技術革新を必ずしも考慮したものはなっていない。そのため、初期の技術実証の段階では、ゴールであるコンセプトモデルに囚われない、基本的な要素技術の宇宙実証を迅速に(他国に先駆けて)行っていくという考え方も必要となろう。

このような技術実証例として考えられるのは、長距離にわたる高出力レベルのマイクロ波/レーザー

ビーム、地上受信機の設計と運用、軌道上でのロボットによる組立てとメンテナンス、大規模建造物の構築と運用、大量部品製造などの重要技術で、これらの宇宙と地上の多くの技術要素について実際の運用環境で試験や実証を行う必要がある。

ただし SSPS 実現の課題の一つである打上げコストの削減、ロボットによる大型宇宙建造物組立てとメンテナンス、モジュラー・コンポーネントの大量生産、月や小惑星の現地資源利用技術開発などの課題は、SSPS 以外の他のミッション達成のためにも必要な技術であるため、宇宙を利用する国や企業がこれらの技術開発を行い、その成果を SSPS 開発に活用していくような流れも考えられる。そのため SSPS 開発では、SSPS 特有の技術開発に優先的に取り組んでいくことが効率的であると考えられる。SSPS 特有の技術開発課題とは、例えば WPT 技術として高出力デバイスの開発、高精度ビームフォーミング／制御技術等が挙げられる。特に静止軌道から地上の受電施設にマイクロ波電力を送電するためにはレトロディレクティブ制御方式により、極めて集束したビームを形成し、受電施設に正確に指向させる必要があり、これは SSPS 技術の中でも最もチャレンジングな技術の一つとなっているが、精密なマイクロ波ビーム方向制御の技術は軍事など一部の分野で主に利用されているのみで、商用技術としての革新的な進歩が期待されるものとはなっていない。ただし、SSPS で必要となる宇宙における無線電力伝送技術は、高効率化、低コスト化等、地上の WPT 技術の進展が波及するものも多くあり、地上 WPT 技術開発の成果を生かして SSPS の無線電力伝送技術開発を促進させていくことも期待される。特にミリ波やサブミリ波などの高い周波数の無線電力伝送技術は、地上へエネルギーを送る SSPS では応用が難しいが、SSPS の月面でのエネルギー伝送等のアプリケーションには大きく活かされる可能性が高い。また地上 WPT の分野で行われる送受信に関わるデバイスの開発が SSPS にも波及することは確実であり、SSPS の開発では、それらの宇宙環境における動作等の実証を行っていくことが求められる。

さらに、宇宙建造物の建設および運用に関わる技術としては、SSPS は過去に例がない規模の建造物であるため、それに起因する課題についての開発については SSPS 独自で取り組んでいく必要がある。SSPS の構築のためには、軌道上での自動展開、組立て技術が必須であり、また軌道上での製造技術も必要とされる。近年の SSPS の検討ではモジュール建造物から全体構造を構成する構造様式が多くなっているが、モジュール建造物の配置・結合における結合機構の検討も重要となる。また展開後の運用時に関しては、超大型パネルの形態維持、姿勢・軌道制御技術の開発が必須となる。

その他、技術開発のみならず産業振興につながる方策も重要である。例えば、発電技術等でも、民生・地上用太陽電池技術を宇宙用に波及させ、大量、低コスト、軽量の太陽光発電システムを開発、実用化して、世界をリードすること等が期待される。

3.4.3 SSPS 要素技術の他のアプリケーションへの応用例

SSPS プログラムでは、研究開発の課題設定時から研究成果の宇宙や他の分野への波及効果についても十分に考慮することが重要となる。SSPS 要素技術の他のアプリケーションの応用例として、最も有望であるものは宇宙インフラ(例:人工衛星、宇宙ステーション、月面基地など)へのエネルギー供給である。無線ビーム電力伝送が実現すると、衛星やスルナ空間の施設が最初のユーザーとなる可能性がある。現在、衛星や ISS に搭載されている電力システムは高価であり、システム全体の重量増にもつながっている。今後、宇宙活動が活発化するに伴い、電力需要も増加し、これまで宇宙で展開されて

きた電力システムよりも大容量の電力が必要とされる可能性も高い。SSPS はこのような需要に対応するソリューションの一つになり得る。また宇宙空間での無線電力伝送は、NASA やその他の国家宇宙機関、そして現在月の採掘、特に月の南極にある氷の採取を調査している企業のニーズに応えることができる。

さらに地上でのスピノフ技術としては、SSPS 実用化の要でもある WPT 技術が最も応用範囲が広いものとして考えられてきており、これまでも様々な地上での応用や民生機器への適用が検討され、一部実験も行われてきている。無人航空機(UAVs:Unmanned Aerial Vehicles)へのマイクロ波あるいはレーザーによる無線電力伝送や IoT 端末、電気自動車の充電ステーション、自動車の補助電源、移動体通信の端末等への充電等のアプリケーションが考えられている。さらに災害地や危険地域への一時的な電力供給システムとしても応用が期待されるところとなっている。

3.4.4 研究開発実施体制

各国が示す代表的な SSPS システムコンセプトは超大型(1GW~2GW 級)のシステムとなっており、一国で取組むには資金的にも難しく、国際的な連携の下で開発していくというシナリオが最も実現性が高い。日本は現在、宇宙での無線電力伝送という点に関しては技術的優位の状態にあるが、今後、米国や中国が巨額の資金を投入して開発を加速させる可能性は高い。欧州も 2025 年以降、本格的な開発に移行する可能性が高く、現段階から着々と準備を進めている状況である。日本が、現在の技術的優位性を保っている間に早急に国際協力の体制構築に向けて準備を進めておく必要がある。

このような状況の中で、日本がどのような国際連携の体制をとるかについては、今後十分に検討する必要がある。米国は軍が主導する体制をとっており、以前の NASA が進めていた時とは事情が異なっている。また英国や欧州は、環境問題の解決策の一つとして SSPS の導入を進める方向であり、開発目的でいえば協力関係を築きやすい立場にあるが、技術的には日本の方が先行している状態である。いずれにしろ SSPS の目標の一つを、世界的な温暖化対策としての CO2 削減等の達成とするならば、SSPS の実現へ向けた取組みを、国際社会に訴求していく必要があると考えられる。そのうえで、日本を取り巻く各国の状況を鑑みながら、今後どのような国際連携を行うべきか、十分な議論を行っていく必要があるだろう。

4. まとめと今後の課題

本調査では、「宇宙状況把握(SSA)に関する調査・検討」と「宇宙太陽光・無線エネルギー伝送技術に関する調査・検討」の2つのテーマについての調査・分析を行った。調査は、文献・Webサイト調査とアンケート・ヒアリング調査による情報収集を組み合わせで行った。

2章で述べた SSA に関する調査・検討では、海外の政府機関および民間企業の SSA システムの構築状況について調査・整理を行い、最新の状況を把握した。次に SSA サービスに必要な技術を整理し、米国 TraCCS との対比等も行いつつ、我が国の SSA に関わる技術のレベルについて分析した。その結果、宇宙での実績がない一部の技術を除けば、多くの技術が海外と同等のレベルにあると評価された。Starlink に代表されるラージコンステレーションにより軌道上の物体が急速に増加しつつある状況の中、SSA の重要性は増している。スタートアップ企業も出現しており、今後も動向の注視を続けるとともに我が国の戦略の検討が必要と考えられる。

3章で述べた宇宙太陽光・無線エネルギー伝送技術に関する調査・検討では、米欧英中を中心とした各国の宇宙太陽光発電システムおよび無線エネルギー伝送技術の動向を調査し、諸外国において宇宙太陽光発電システム関連の活動が活発化していることを示した。また、既存の SSPS のモデルを拡張したコスト算出ルールを作成するとともに、エネルギーシステムモデルを用いて宇宙太陽光発電の経済性の評価を行った。最後に、我が国における宇宙太陽光発電や要素技術に関する研究開発や産業振興における課題をまとめるとともに、我が国が行うべき技術開発の方向性を提案した。宇宙太陽光発電は長期にわたるプロジェクトとなることは間違いなく、今後も各国の動向を正確に把握しつつ、我が国が進むべき方向性を検討していくことが不可欠である。

本調査結果が今後の関連施策の検討に活かされることを祈念する。

令和5年度重要技術管理体制強化事業(宇宙分野における重要技術の実態調査及び情報収集)報告書

2024年3月

株式会社三菱総合研究所
先進技術・セキュリティ事業本部
TEL (03)6705-6039

二次利用未承諾リスト

調査報告書

令和5年度重要技術管理体制強化事業
 (宇宙分野における重要技術の実態調査及び情報収集)

株式会社三菱総合研究所

頁	図表番号	タイトル
16	図2-3	米国の宇宙状況監視ネットワーク
17	図2-4	TraCCSの構成
17	図2-5	TraCCSにおけるデータの流れと民間事業者の役割
18	図2-6	EU-SSTによるセンサーネットワーク
20	図2-7	ISONの観測ネットワーク
44	図3-1	NASAスタディにおけるSBSPのリファレンスデザイン (左: RD1、右: RD2)
45	図3-2	ベースライン分析と複数の変数の感度分析のための主要入力パラメータ
46	図3-3	SBSPシステムのライフサイクルコストと温暖化ガス排出削減効果の感度分析結果
47	図3-4	NRLのPRAM-FX装置
47	図3-5	NRLのSWLL装置
48	図3-6	軌道上でのArachneの実験イメージ (Credit:AFRL)
50	図3-7	SSPD 実証機と構成要素 (左) / DOLCE の展開実験イメージ (右上) / MAPLE のマイクロ波送電アレイのアンテナシート (右中央) / SSPD を VIGORIDE に結合する様子 (右下) (Credit: Caltech)
50	図3-8	MAPLE の内部の写真。右側: 送信アレイ、左側: 受信機 (Credit: Caltech SSPP)
54	図3-9	欧州SBSPの想定ロードマップ
55	図3-10	ESA SOLARISのYoutube 紹介ページ (Credit: ESA)
55	図3-11	SOLARISプログラムで想定されている活動
57	図3-12	ESA SOLARISの技術開発目標
58	図3-13	2023-2025年の間に提案されている活動内容
59	図3-14	SOLARIS で提案されているTechnology Development Activities
61	図3-15	Arthur D Little 社のDIRECT-SUN-REFLECTION (DSR)
61	図3-16	Arthur D Little 社が提案する2 種類のアーキテクチャ
62	図3-17	DSR アーキテクチャの説明
62	図3-18	SCL アーキテクチャの説明

(様式2)

63	図3-19	Thales Alenia Space スタディのリファレンスシステム (宇宙部)
64	図3-20	Thales Alenia Space スタディのリファレンスシステム (地上部)
64	図3-21	Thales Alenia Space スタディのリファレンスシステムのエネルギーの流れ
65	図3-22	Thales Alenia Space スタディのリファレンスシステム初号機のコスト計算結果
65	図3-23	Thales Alenia Space スタディのリファレンスシステムの発電単価計算結果
67	図3-24	資金提供が決定した13 のプロジェクト (Credit:ESA)
68	図3-25	Astrostrom 社による「Greater Earth Lunar Power Station (GE [®] -LPS)」
69	図3-26	「16U4SBSP」 ミッションのイメージ
70	図3-27	「ESPI2040 : Space for Prosperity, Peace and Future Generations」の最終ページ
71	図3-28	英国におけるSBSP 活動の内訳
72	図3-29	英国のSBSP システム案「CASSIOPeiA」 (Credit:Space Energy Initiative)
72	図3-30	英国のSBSP 開発計画 (Credit:BEIS)
74	表3-1	Space Based Solar Power Innovation Competition で実施されているプロジェクト
75	図3-31	SEI の参加機関
75	図3-32	SEI の組織構造
78	図3-33	CAST によるSSPS ロードマップ
78	図3-34	SSPS 開発のフェーズごとのミッション
79	図3-35	中国が提案するSSPS システムコンセプト
80	図3-36	中国が提案する技術実証衛星案
81	図3-37	中国が提案する月面軌道上でのLPT ミッション
82	図3-38	西安電子科技大学の実証実験施設
87	表3-2	各国のSSPS に関するロードマップの比較
89	図3-39	ブロッサムポイントで実施されたマイクロ波送電実験の送電アンテナ (左上) とレクテナ (右上と下) (Credit : NRL)
89	図3-40	MIT のHUSIR 送信機を用いて実施されたマイクロ波送電によるLED 点灯実験 (Credit : NRL)
91	図3-41	POWER プログラムの開発内容 (Credit : DARPA)
92	図3-42	WPT 実験に用いられた送信アンテナのプロトタイプ
93	図3-43	Virtus Solis 社のSBSP コンセプト
94	図3-44	アラバマ州にあるAbove: Space Development 社の施設において行われたラボ・ベンチテスト
95	図3-45	Whisper Beam トランスミッタ (下部の金属リング) から上空3m の照明への無線電力伝送実証
96	図3-46	Airbus Innovation Facilities において行われた無線電力伝送実証

(様式2)

98	図3-47	屋内試験のプロトタイプアンテナ (左) / フィールド試験の建屋 (右) (Credit:Emrod)
98	図3-48	Airbus' Munich Area Site での実証実験システム (Credit:Emrod)
99	図3-49	KERI における拡張可能なアレイ型レクテナの屋外実験
100	図3-50	KERI における研究開発目標と内容
100	図3-51	KARI/KERI におけるエアロスタットへの無線電力伝送実験 (1.81km)
103	図3-52	中国西北工業大学が開発したODD (Optics-driven Drone) と飛行試験の様子
104	図3-53	近い将来のアプリケーションとSBSP に向けたパワービーミングのロードマップ
107	図3-54	東芝の受電アンテナの向きに依存せず高効率な受電を行う受電機の実証
109	図3-55	JSS (旧USEF) マルチテザー型SSPS の宇宙部
110	図3-56	JSS コストモデルの宇宙部重量およびコストの入力パラメータ
123	図3-58	ふろしき型SSPS コストモデルの宇宙部重量およびコストの入力パラメータ
123	図3-59	ふろしき型SSPS の宇宙部重量推算