

経済産業省 御中

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)
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 赤外域を含む多波長センサに関する調査・検討.....	1
1.2.2 宇宙太陽光発電・無線給電技術に関する調査・検討.....	1
2. 赤外域を含む多波長センサに関する調査・検討.....	2
2.1 多波長リモートセンシングデータビジネスを取り巻く状況.....	2
2.1.1 多波長リモートセンシング衛星・センサの動向.....	2
2.1.2 多波長リモートセンシングデータビジネスの動向.....	8
2.1.3 多波長リモートセンシングに関わる政策動向.....	19
2.1.4 多波長リモートセンシングデータビジネスを取り巻く状況まとめ.....	29
2.2 多波長リモセンデータ利用ビジネス研究会.....	30
2.3 多波長リモートセンシングデータビジネスの課題.....	32
2.3.1 多波長リモートセンシングデータビジネスの課題の特定・整理.....	32
2.3.2 各課題の詳細.....	32
2.3.3 課題解決に向けた視点・留意事項.....	34
2.4 今後の方向性.....	35
2.5 赤外域を含む多波長センサに関する調査・検討まとめ.....	38
3. 宇宙太陽光発電・無線給電技術に関する調査・検討.....	39
3.1 各国の宇宙太陽光発電システム(SSPS)に関する調査.....	39
3.1.1 米国.....	39
3.1.2 欧州.....	45
3.1.3 英国.....	53
3.1.4 中国.....	58
3.1.5 その他.....	62
3.1.6 まとめ.....	64
3.2 重要要素技術の現状と今後の見通し.....	66
3.2.1 ESAによる費用便益調査分析.....	66
3.2.2 無線エネルギー伝送技術(WPT).....	88
3.2.3 発電技術.....	103
3.2.4 まとめ.....	107
3.3 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.....	110
3.3.1 SSPS 要素技術の他のアプリケーションへの応用例.....	110

3.3.2 SSPS および WPT の実用化に向けての課題	111
3.3.3 我が国が行うべき SSPS 技術開発の方向性の検討.....	114
3.3.4 研究開発実施体制	115
4. まとめ	117
添付資料.....	118

図 目次

図 2-1 ハイパースペクトル衛星コンステレーション機数	2
図 2-2 ハイパースペクトルセンサの分光方式	3
図 2-3 ESA-NASA の共同観測体制	4
図 2-4 大型ハイパースペクトルセンサと小型ハイパースペクトルセンサコンステレーションの連携	5
図 2-5 HISUI の外観イメージ	6
図 2-6 うみつばめ衛星	7
図 2-7 軌道上分光エッジコンピューティングイメージ	8
図 2-8 モニタリング精度を向上させる地上データの可能性	9
図 2-9 ドローンを用いたインドネシア泥炭地大規模造林地におけるオルソ画像と赤外線画像	9
図 2-10 航空機ハイパースペクトルセンサによる利用実証事例(1/3)	10
図 2-11 航空機ハイパースペクトルセンサによる利用実証事例(2/3)	10
図 2-12 航空機ハイパースペクトルセンサによる利用実証事例(3/3)	11
図 2-13 経済産業省の地域実証事業の裨益イメージ	12
図 2-14 K Program における高感度小型多波長赤外線センサ技術の分光デバイスと波長イメージ ..	12
図 2-15 K Program における高感度小型多波長赤外線センサ技術の想定スケジュール	13
図 2-16 Orbital SideKick 社のパイプライン監視イメージ	14
図 2-17 HySpecIQ 社の解析イメージ	14
図 2-18 Satellogic 社の実証分野	15
図 2-19 長光衛星技術のハイパースペクトル衛星「光譜 01/02 星」が撮像した日本の鹿児島県桜島 ..	16
図 2-20 珠海欧比特宇航科技による農作物の自然災害(冠水、干ばつ、冷害)調査イメージ	17
図 2-21 Planet 社の GHG 監視例	17
図 2-22 Planet 社の GHG(メタン)監視イメージ	18
図 2-23 GHGSat 社の GHG(メタン)監視イメージ	19
図 2-24 SBIRS のイメージ	21
図 2-25 Next Gen OPIR GEO 衛星のイメージ	22
図 2-26 FOCUS の概要イメージ	26
図 2-27 OP3C 画像圧縮のイメージ	27
図 2-28 PHySIS の概要イメージ	27
図 2-29 SWIRup の概要イメージ	28
図 2-30 課題解決に向けた視点・留意事項(1)	35
図 2-31 課題解決に向けた視点・留意事項(2)	35
図 2-32 4つの施策案と課題との関係図	36
図 2-33 代表的な懸賞金やインセンティブ制度	37
図 2-34 懸賞金事業のイメージ	38
図 3-1 NRL の PRAM-FX 装置	41
図 3-2 軌道上での Arachne の実験イメージ(Credit : AFRL)	42

図 3-3 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)	44
図 3-4 欧州 SBSP の想定ロードマップ	47
図 3-5 ESA SOLARIS の YouTube 紹介ページ(Credit : ESA)	48
図 3-6 SOLARIS プログラムで想定されている活動	48
図 3-7 ESA SOLARIS の技術開発目標	50
図 3-8 2023-2025 年の間に提案されている活動内容	51
図 3-9 資金提供が決定した 13 のプロジェクト(Credit:ESA)	53
図 3-10 英国の SBSP システム案「CASSIOPeiA」(Credit:Space Energy Initiative)	54
図 3-11 英国の SBSP 開発計画(Credit:BEIS)	55
図 3-12 SEI の参加機関	56
図 3-13 SEI の組織構造	57
図 3-14 CAST による SSPS ロードマップ	59
図 3-15 中国が提案する SSPS システムコンセプト	60
図 3-16 西安電子科技大学の実証実験施設	61
図 3-17 CASSIOPeiA コンセプトのスケルトンスケッチ	68
図 3-18 SBSP システムのブレークダウン	69
図 3-19 1.44GW の SBSP システムの初号機システムの構築コストと運用コスト	74
図 3-20 SPS Alpha アーキテクチャ	78
図 3-21 Citigroup Global の 2040 年の打上げコスト予測	81
図 3-22 過去の WPT 伝送実験と代表的な SBSP システムで想定されている受電電力と伝送距離	82
図 3-23 SBSP を実現するためのシステム要素と開発に要する期間	86
図 3-24 過去に行われたレクテナ受電実験例による整流効率と入射電力密度の関係(周波数別) ...	91
図 3-25 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)	92
図 3-26 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)	93
図 3-27 POWER プログラムの開発内容(Credit : DARPA)	94
図 3-28 レクテナのセットアップ写真(左)／GaN/SiC ウェハ上に作製された GaN ナノショットキーレクテナ MMIC(2.1 mm × 0.75 mm、厚さ 50μm)(右)(Credit : Raytheon Technologies)	95
図 3-29 Airbus Innovation Facilities において行われた無線電力伝送実証	96
図 3-30 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)	97
図 3-31 Airbus' Munich Area Site での実証実験システム(Credit:Emrod)	98
図 3-32 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 3-33 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	100
図 3-34 エイターリンク社の「AirPlug®」概要	102
図 3-35 パナソニックが開発したマイクロ波電力伝送システム Enesphere	103
図 3-36 太陽電池セルの変換効率の変遷	105

図 3-37 宇宙で利用可能な太陽電池セルの BOL 効率.....	105
図 3-38 太陽電池パドルの性能比較	106

表 目次

表 2-1 CHIME 衛星の地球観測諸元.....	4
表 2-2 SBG 衛星の地球観測諸元.....	4
表 2-3 海外の多波長衛星・センサ事業者	6
表 2-4 HISUI の主要諸元.....	7
表 2-5 多波長センサのユースケース.....	8
表 2-6 海外の主な多波長関連プログラム.....	20
表 2-7 弾道ミサイル防衛システム(BMDS)の構成	20
表 2-8 米国の軍事赤外線市場の予測.....	23
表 2-9 2019 年に発注された NRO 研究契約(Study Contract)	24
表 2-10 NRO の衛星データ調達に関わる近年の RFP	24
表 2-11 Horizon Europe / Horizon 2020 の多波長関連プロジェクト	25
表 2-12 CCMsで選定されている衛星(事業者)	29
表 2-13 多波長リモートセンシングデータビジネスに関する SWOT 分析.....	30
表 2-14 多波長リモセンデータ利用ビジネス研究会メンバ.....	31
表 2-15 研究会の開催履歴と主な議題	31
表 3-1 SSPS 開発のフェーズごとのミッション	59
表 3-2 各国の SSPS に関するロードマップの比較.....	66
表 3-3 Frazer-Nash Consultancy 調査で作成されたテクニカルノートの内容と作成時期	67
表 3-4 1.44GW システムの重量ブレイクダウン	68
表 3-5 SBSP システムの各要素に関するクリティカル技術と難易度および開発要素(1/3)	70
表 3-6 SBSP システムの各要素に関するクリティカル技術と難易度および開発要素(2/3)	71
表 3-7 SBSP システムの各要素に関するクリティカル技術と難易度および開発要素(3/3)	72
表 3-8 SBSP 各サブシステム要素の効率と価格の参考値	73
表 3-9 エネルギー源別の LCOE と VALCOE(単位:2022 年価格、ユーロ/MWh)	75
表 3-10 SBSP の費用便益分析(2070 年までに 54 基導入の場合).....	76
表 3-11 Roland Berger 調査で作成されたテクニカルノートの内容と作成時期	77
表 3-12 SPS-Alpha MkIII の主要パラメータの値	79
表 3-13 OHB のレポートで想定されている打上げ機と能力.....	80
表 3-14 OHB のレポートで想定されている送電システムの発電効率等.....	82
表 3-15 OHB のレポートで想定されている代表的な各種太陽電池の効率と価格等	83
表 3-16 OHB のレポートで示されている集光部の効率と価格等.....	84
表 3-17 コストモデルで使用したリファレンスシステム各部の質量等	87
表 3-18 コストモデルによるコスト算出結果.....	87
表 3-19 2010～2020 年に行われた主な電波方式 WPT の地上実証例	90
表 3-20 SSPS の実現に必要な要素技術とその技術課題等の整理(1/2)	108
表 3-21 SSPS の実現に必要な要素技術とその技術課題等の整理(2/2)	109

1. はじめに

1.1 背景・目的

近年、安全保障分野のすそ野は経済・技術分野に急速に拡大しており、また、感染症の世界的拡大や紛争などにより、サプライチェーンの特定国への依存という脆弱性がもたらすリスクが浮き彫りになるなど、経済安全保障の重要性がこれまで以上に高まっている。特に宇宙分野においては、通信や観測（安全保障、海洋監視、防災等）など様々な用途での利用が可能な小型衛星コンステレーションの構築能力の確保が我が国の宇宙活動の自立性を維持するために重要になってきている。

こうした状況を踏まえ、本調査では、経済安全保障の強化に向け、小型衛星からの観測に使用されるセンサのうち、資源観測、防災監視、安全保障、農林水産分野、二酸化炭素濃度観測など多様な用途での使用が期待される赤外域を含む多波長センサについて市場動向の調査や市場創出のための検討を行うとともに、無線給電技術について各国の宇宙太陽光発電の研究開発状況のほか、室内利用や防衛分野なども含め、国内外における検討状況を調査した。

1.2 調査の概要

1.2.1 赤外域を含む多波長センサに関する調査・検討

国内外の赤外域を含む多波長センサに関する市場動向、技術動向、政策動向等について調査した。また、我が国の赤外域を含む多波長センサ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みの方向性について検討した。

1.2.2 宇宙太陽光発電・無線給電技術に関する調査・検討

近年の各国の宇宙太陽光発電関連研究について、技術的および経済的な評価指標として用いている要素技術項目、数値、技術・経済性分析、シナリオ、前提条件等について調査した。また、宇宙太陽光発電および無線給電技術の重要要素技術のうち、発電・送電・受電技術を対象として必要となる要素技術開発項目の達成状況、将来に向けた課題と開発の見通しを整理するとともに、スピニン／スピアウトの可能性の検討を行った。

加えて、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みの方向性について検討した。

2. 赤外域を含む多波長センサに関する調査・検討

国内外の赤外域を含む多波長センサに関する市場動向、技術動向、政策動向等について調査した。また、我が国の赤外域を含む多波長センサ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みの方向性について、研究会を設置し、研究会での議論も踏まえて検討を行った。

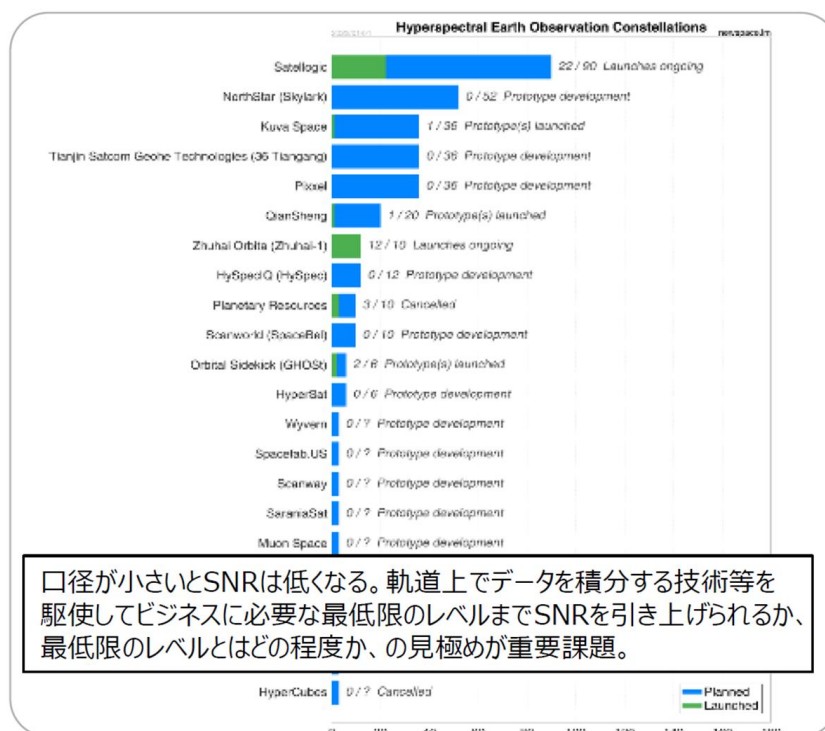
2.1 多波長リモートセンシングデータビジネスを取り巻く状況

2.1.1 多波長リモートセンシング衛星・センサの動向

(1) 多波長リモートセンシング衛星・センサの動向概観

世界的に多波長センサの開発が加速中しており、政府だけでなく民間企業も開発を行っている。また、ベンチャー企業によるリーズナブルな小型センサによるビジネスの挑戦が始まっている。図 2-1 にハイパースペクトル衛星コンステレーション機数を示す。すでに 20 機以上打上げを行っている Satellogic 社をはじめ、世界の様々なベンチャーで小型センサを用いた多波長リモートセンシングデータビジネスの挑戦が開始されている。

また、多波長リモートセンシング衛星による GHG 観測も進展中である。大型衛星(1,000kg 以下)による全球観測だけでなく、小型衛星(12U サイズ～100kg 級)による特定場所観測という 2 段階へととなりつつある傾向がある。



Erik Kulu, "Satellite Constellations - 2021 Industry Survey and Trends," 35th Annual Small Satellite Conference, Aug 10, 2021. <https://www.newspace.im/>

図 2-1 ハイパースペクトル衛星コンステレーション機数

出所)Erik Kulu, "Satellite Constellations - 2021 Industry Survey and Trends", 35th Small Satellite Conference.

こうした多波長センサには様々な分光方式があり、図 2-2 にハイパースペクトルセンサの代表的な分光方式を示す。我が国では ASTER、HISUI、うみつばめなどのプロジェクトが存在しており、世界各国のセンサと比較しても、特にチューナブル・マルチに競争優位性がある。チューナブル・マルチとは、軌道上で観測波長を任意に設定することができる技術であり、センサの小型化が可能であるため、小型衛星やドローン等への搭載も可能である。

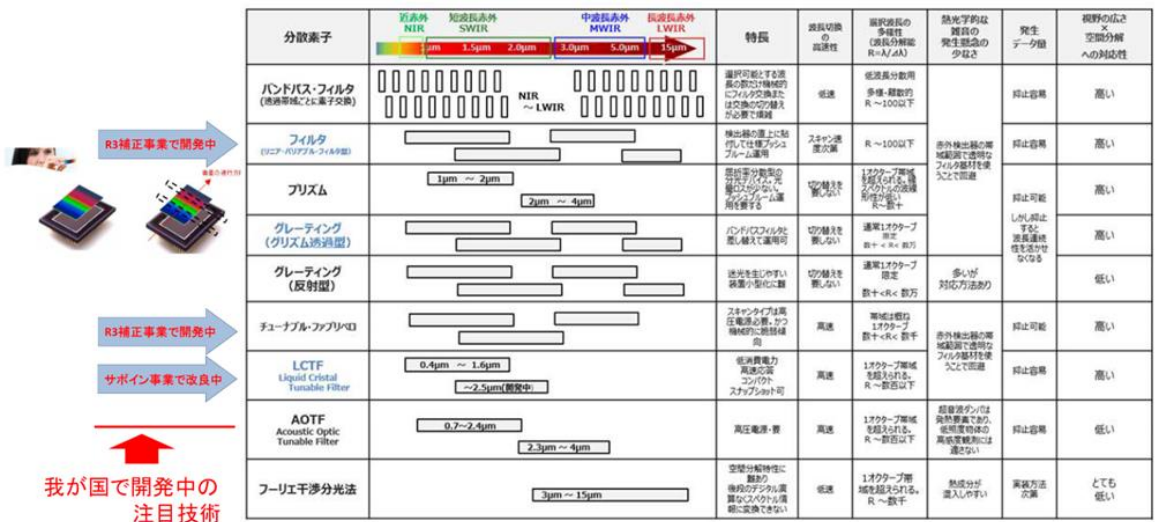


図 2-2 ハイパースペクトルセンサの分光方式

出所)ジェネシア武山委員発表資料

(2) 海外政府の多波長リモートセンシング衛星・センサの動向

1) ESA と NASA の協調

政府主導の多波長衛星・センサ開発は、特に米国と欧州で加速傾向である。代表例としては、ESA と NASA が協調し、10 年間で地球のハイパースペクトルデータを取得する計画を発表しており、図 2-3 に ESA と NASA の共同観測体制の概観図を示す。

衛星としては、ESA の CHIME (Copernicus Hyperspectral Imaging Mission for the Environment) 衛星と NASA の SBG (Surface Biology and Geometry) 衛星が用いられる予定であり、表 2-1、表 2-2 にそれぞれの地球観測諸元を示す。いずれの衛星も、可視～短波長赤外領域のバンド数 200 以上のハイパースペクトルセンサによる地球観測を行う。



図 2-3 ESA-NASA の共同観測体制

出所)JAXA 祖父江委員発表資料

表 2-1 CHIME 衛星の地球観測諸元

項目	諸元
観測波長帯	400-2,500nm
バンド数	200以上
スペクトル帯域幅	$\leq 10\text{nm}$
観測幅	130km
地上分解能	30m
地球周回周期	12.5日

出所)<https://www.eoportal.org/satellite-missions/chime-copernicus#mission-capabilities> (2023 年 3 月 7 日閲覧)

表 2-2 SBG 衛星の地球観測諸元

項目	諸元
観測波長帯	380-2,500nm
バンド数	200以上
スペクトル帯域幅	$\leq 10\text{nm}$
観測幅	92.5km
地上分解能	30m
地球周回周期	16日

出所)<https://ieeexplore.ieee.org/document/9843676> (2023 年 3 月 7 日閲覧)

2) 政府と民間の多波長リモートセンシング衛星・センサの協調

政府の衛星に搭載された大型ハイパースペクトルセンサが、小型ハイパースペクトルセンサコンステレーションによる民間ビジネスを支援する関係性が構築されており、図 2-4 にそれらの連携の概要を示す。大型ハイパースペクトルセンサは、低頻度・高精度・全波長一括観測という特徴を有するため、そのデータを基に観測すべきバンドを絞り込むことで、高頻度・ほどよし精度・波長限定観測という特徴を有する小型ハイパースペクトルセンサコンステレーションの効率的運用が実現可能となる。



図 2-4 大型ハイパースペクトルセンサと小型ハイパースペクトルセンサコンステレーションの連携
出所)J-spacesystems 安達委員発表資料

(3) 海外民間の多波長リモートセンシング衛星・センサの動向

民間企業による多波長衛星コンステレーション構築は、特に北米、欧州、中国、インドで活発化している。表 2-3 に多波長衛星コンステレーション構築を目指している企業の一覧を示す。

代表的な企業としては、数百バンドのハイパースペクトルセンサの搭載を計画している Orbital SideKick や HySpecIQ、打上げ済み機数が多い Satellologic や長光衛星技術や珠海欧比特宇航科技、GHG 監視を目的とし多波長衛星コンステレーション構築を計画している Planet や GHGSat が挙げられる。これらの企業の詳細については、2.1.2 節で記載する。その他の企業でも多波長衛星コンステレーション構築を目指す動きが活発化しており、2025 年頃までに一定数の多波長衛星コンステレーションが構築される見込みである。

表 2-3 海外の多波長衛星・センサ事業者

社名	国	現在機数	コンステ完成時機数・時期	バンド数	分解能
Orbital SideKick	米国	2機	6機(2023年)	512	5m
HySpecIQ	米国	0機	12機(不明)	220以上	5m以下
Wyvern	カナダ	0機	36機(不明)	不明	1～5m
Kuva Space	フィンランド	0機	不明	不明	25m (最終的に10m以下)
ScanWorld	ベルギー	0機	5～10機(2026年)	不明	不明
Satelloptic(HSのみ)	ウルグアイ アルゼンチン	26機	200機(2025年)	33	25m
NorthStar Earth and Space Inc.	カナダ	0機	40機(不明)	不明	不明
長光衛星技術(HSのみ)	中国	2機 (マルチ含め83機)	マルチ含め300機(2025年)	26	5m～150m
珠海欧比特宇航科技(HSのみ)	中国	8機 (マルチ含め12機)	マルチ等含め34機(不明)	32	10m
Pixxel	インド	0機	30機以上(2024年)	300	5m
Planet(HSのみ)	米国	0機	2機(2023年)	400程度	30m
GHGSat	米国	6機	12機(2023年)	不明 (SWIR帯のみ)	50m以下

出所)各種公開情報より三菱総合研究所作成

(4) 日本の多波長リモートセンシング衛星・センサの動向

日本の多波長センサの代表例としては、国際宇宙ステーション(ISS)に搭載されているハイパースペクトルセンサ「HISUI」と、今後打上げが予定されている陸海域分光ビジネス実証衛星「うみつばめ」がある。

1) HISUI

HISUI(Hyperspectral Imager SUite)とは、経済産業省が開発し、ISS に搭載されている宇宙実証用のハイパースペクトルセンサであり、図 2-5 に HISUI の外観を、表 2-4 に主要諸元を示す。可視～短波長赤外(400-2,500nm)を連続した 185 バンドで観測可能であり、資源分野、環境分野、農業分野等に用いることができる。2019 年 12 月に打ち上げられ、2020 年 9 月に初画像を取得している。HISUI のデータは、Tellus にて順次公開されている。

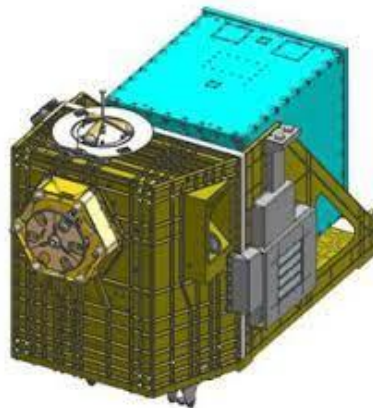


図 2-5 HISUI の外観イメージ

出所)https://www.jspacesystems.or.jp/jss/files/2019/06/HISUI%E5%88%9D%E7%94%BB%E5%83%8F%E3%83%97%E3%83%AC%E3%82%B9_1030J.pdf (2023 年 2 月 14 日閲覧)

表 2-4 HISUI の主要諸元

項目	諸元
観測波長帯	400-2,500nm
バンド数	185
観測幅	20km
地上分解能	20～31m
波長分解能	10-12.5nm

出所) <https://www.jspacesystems.or.jp/project/observation/hisui/> (2023 年 3 月 7 日閲覧)

2) うみつばめ衛星

うみつばめ衛星とは、東京工業大学等が開発を進めている陸海域分光ビジネス実証衛星であり、世界初の産学連携持ち寄りパーティ方式の衛星プロジェクトである。昼間は地球表面の分光観測を行い、夜間は天体観測を行うという運用方法を予定している。

図 2-6 にうみつばめ衛星の外観を示す。うみつばめ衛星は、チューナブル・マルチ対応の我が国独自の分光センサ LCTF(Liquid Crystal Tunable Filter)を搭載予定である。LCTF により、可視～赤外領域の波長域から 512 パターンの狭波長帯を電子的に選択することが可能となっている。観測波長を軌道上で任意に選択可能であるという特徴により、海洋・植生・鉱物など多様な観測目的に対応することができる。

また、取得したスペクトル画像の軌道上での処理(軌道上分光エッジコンピューティング)も行う予定である。図 2-7 に軌道上分光エッジコンピューティングのイメージを示す。これは軌道上でオンボードコンピュータがスペクトル画像を解析することで、LCTF 撮像コマンド等を観測対象物の分光学的特性にあわせて自動生成することができるという我が国が世界をリードする新しい技術である。



図 2-6 うみつばめ衛星

出所) https://www.kenkai.jaxa.jp/kakushin/interview/03/interview03_11.html (2023 年 2 月 14 日閲覧)

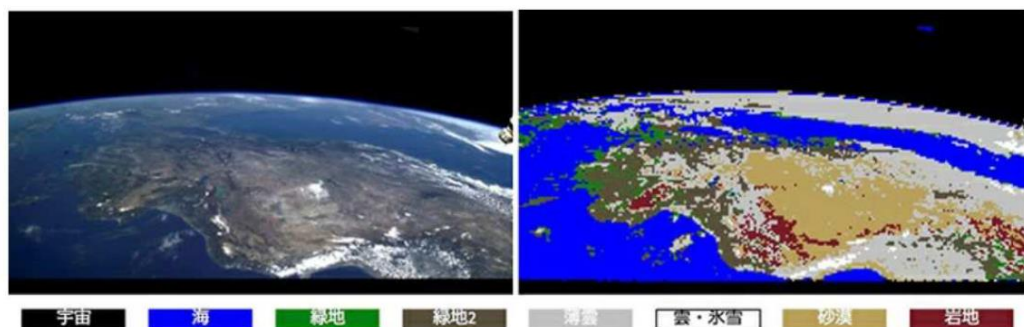


図 2-7 軌道上分光エッジコンピューティングイメージ

出所)ジェネシア武山委員発表資料

2.1.2 多波長リモートセンシングデータビジネスの動向

(1) 我が国の多波長リモートセンシングデータビジネスの現状

多波長リモートセンシングデータは、表 2-5 に示すように農業、林業・森林、漁業・沿岸、資源、環境保全、GHG など様々な分野で利用できるポテンシャルがある。ただし、これを捉えた多波長リモートセンシングデータを利用したビジネスの実証スピードは海外企業が先行している状況である。

表 2-5 多波長センサのユースケース

	農業	林業・森林	漁業・沿岸	資源	環境保全	GHG
観測波長	VNIR, SWIR	VNIR, SWIR	VNIR, SWIR	SWIR	VNIR, SWIR	MWIR
得られる知見	農作物の種別判別、育成状態	森林インベントリ（面積、樹種、育成状態）	沿岸の植生、水深、海色	地表地質、鉱山汚染	土地被覆	GHG含有量
スマート〇〇	農業の作業効率化、デジタル化	林業の作業効率化、デジタル化	沿岸漁場環境の維持・改善	鉱山モニタリング、探鉱作業の効率化	土地利用把握作業の効率化	
政府統計業務	CO2吸収量算出業務の効率化					
防災・減災		森林火災早期発見				
保険	農業保険の商品化	森林保険の商品化	漁業保険の商品化			
	損害保険の被害状況認定プロセスの効率化					
カーボン・クレジット	海外・深遠地のモニタリング作業の効率化、モニタリング頻度の確保（マネジメント対象の拡大）					
（国内）カーボン・クレジット化	農地	森林	藻場（ブルーカーボン）			企業個別CN活動効果計測
（海外）オフセットの創出・投資		森林	マングローブ、藻場（ブルーカーボン）		泥炭地	
データの信頼性	センサー性能、撮像データ解析プロセスの透明性確保→クレジット・エビデンスとしての高い信用価値→認証ビジネス					
新興国支援	高精度データまたはデータ計測手段の提供による、新興国自然保護の実現及び自然保護活動のクレジット化					
GIとのリンク	⑨スマート農業	⑨スマート農業 ⑩ネガティブエミッション（NE）モニター	⑨スマート漁業 ⑩NEモニター	⑤蓄電池端子材料（経済安全保障） ⑧CO2排出量削減	⑭NEモニター	⑭GHG観測、CO2排出削減評価

※VNIR：Visible and Near Infrared 可視近赤外、SWIR：Short Wavelength IR 短波長赤外、MWIR：Middle Wavelength IR 中波長赤外、NE：Negative Emission、GHG:Green House Gas 温室効果ガス

出所)J-spacesystems 安達委員発表資料

このような多様な用途での利用可能性により、多波長センサへ関心を持つ企業は増加している。住友林業では図 2-8 に示すような衛星を含めた観測網等により森林・泥炭地のモニタリングに向けた取り組みを行っている。また、WorldLink & Company は、図 2-9 に示すドローンを用いたインドネシア泥炭地大規模造林地における熱赤外面像解析等を行っており、ドローンの産業利用が拡大する中で、衛

星に比べて特定の地域に特化した観測が可能なドローンによる多波長リモートセンシングデータの活用可能性が示されている。

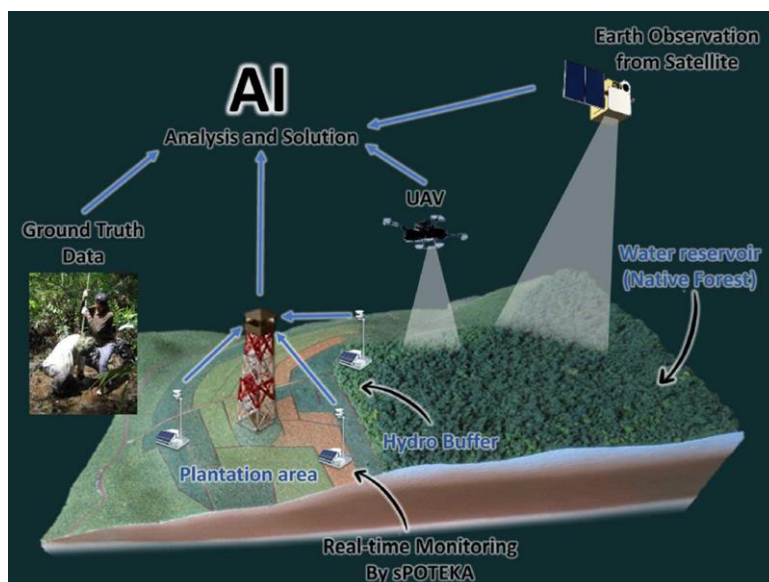


図 2-8 モニタリング精度を向上させる地上データの可能性

出所)住友林業加藤委員発表資料

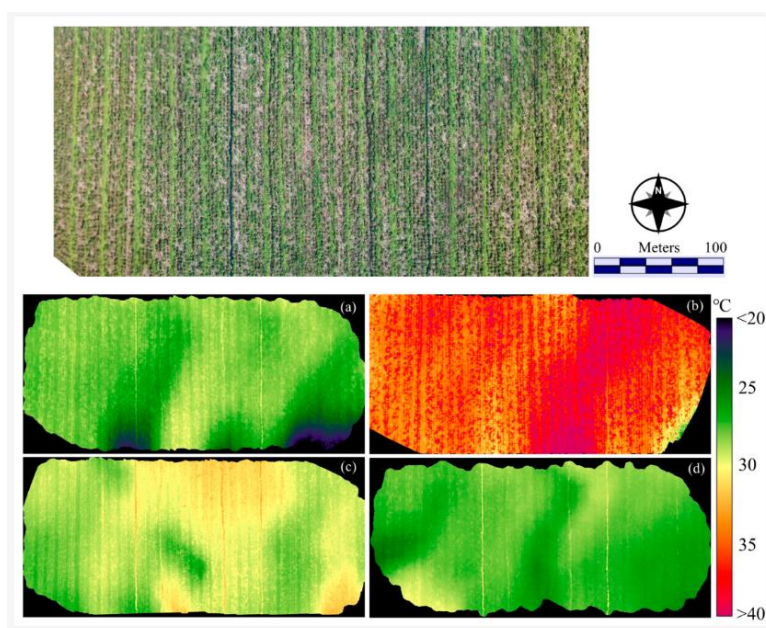


図 2-9 ドローンをを用いたインドネシア泥炭地大規模造林地におけるオルソ画像と赤外線画像

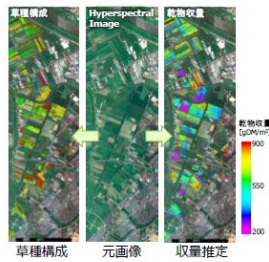
出所)<https://www.mdpi.com/2072-4292/10/9/1345/htm> (2023 年 3 月 8 日閲覧)

その他、多波長リモートセンシングデータのポテンシャルを示す事例として、農業、森林、沿岸の分野を対象に実施された航空機ハイパースペクトルセンサによる利用実証事例を図 2-10、図 2-11、図 2-12 に示す。

①牧草地の生産性評価

実施企業：アジア航測

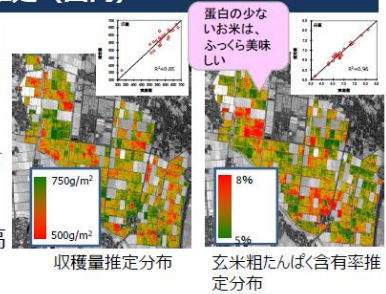
- ・マルチスペクトルデータではできない牧草草種分類、乾物収量推定が可能。
- ・今後、草種に基づく効率的な管理（雑草の除草、施肥管理など）に期待。



②水稲の収量等の推定（国内）

実施企業：バスコ

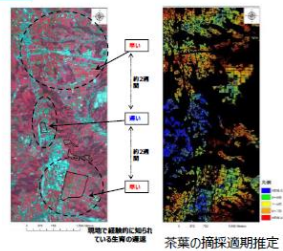
- ・収穫前3週間以内の観測によって、マルチスペクトルデータより精度良く収穫量、たんばく含有率の推定が可能。
- ・今後、さらなる実証で推定時期の早期化・高精度化に貢献。



③茶葉の生育状況把握

実施企業：国際航業

- ・マルチスペクトルデータではできない茶葉の摘採適期推定が可能。
- ・今後、市場をにらみながらの茶葉を摘む時期の決定に貢献。



④水稲の生育ステージ・作付面積推定（海外）

実施企業：三菱総合研究所

- ・異なる時期の作付けによる混在する生育ステージを、ハイパースペクトルなら1回の観測で分布把握が可能。
- ・今後、収穫量が時期別に把握でき、水稻需給（輸出入）管理に貢献。

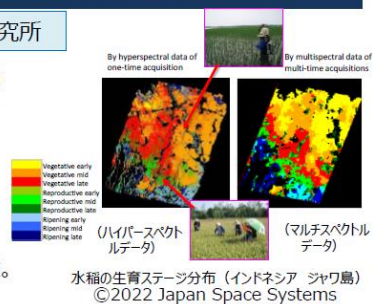


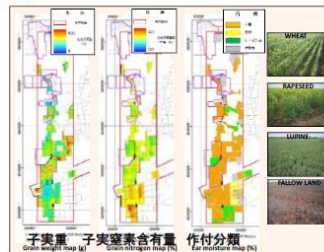
図 2-10 航空機ハイパースペクトルセンサによる利用実証事例(1/3)

出所)J-spacesystems 安達委員発表資料

⑤小麦の収量・生育・品質状況推定

実施企業：国際航業

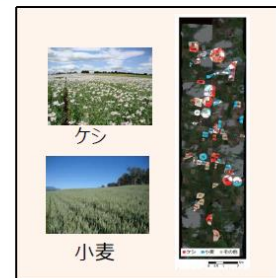
- ・マルチスペクトルデータより高精度に、小麦の収量、生育状況、品質を、収穫前に推定。
- ・今後、収穫時期や施肥管理にも貢献。



⑥ケシ等植物の不法栽培監視

実施企業：アジア航測

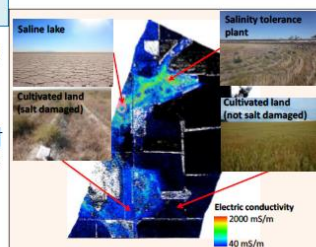
- ・ケシの不法栽培地抽出は、マルチスペクトルデータでは複数観測が必要。一方、ハイパースペクトルデータでは1回の観測で抽出が可能。
- ・今後、不法栽培作物の早期発見に貢献。



⑦農地の塩害把握

実施企業：インフォサーブ

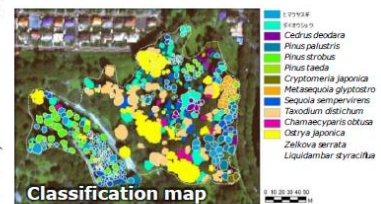
- ・マルチスペクトルデータではできない、農地塩害化状況の早期把握が可能。
- ・今後、農地改善、水源対策、塩害に強い品種の作付け等の検討に貢献。



⑧樹種・樹高・材積量等の情報抽出手法

実施企業：地球科学総合研究所

- ・マルチスペクトルデータではできなかった樹種分類が可能に。
- ・今後、SARやLiDARデータによる樹高推定、高分解能マルチスペクトルデータとの組み合わせで、カーボンクレジット量の評価に貢献。



©2022 Japan Space Systems

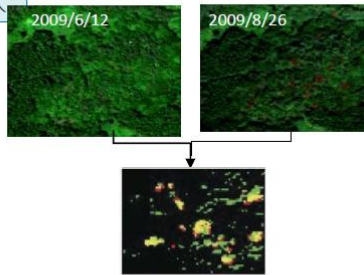
図 2-11 航空機ハイパースペクトルセンサによる利用実証事例(2/3)

出所)J-spacesystems 安達委員発表資料

⑨ナラ枯れ早期検知技術

実施企業：東京工業大

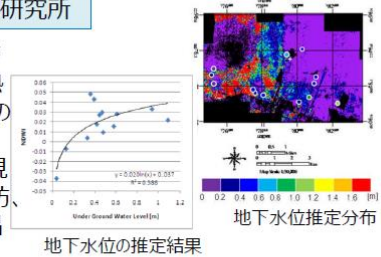
- マルチスペクトルデータではできなかった、ナラ枯れの早期検知が可能に
- 今後、早期検知・早期対策に貢献。



⑩泥炭林での地下水位推定

実施企業：三菱総合研究所

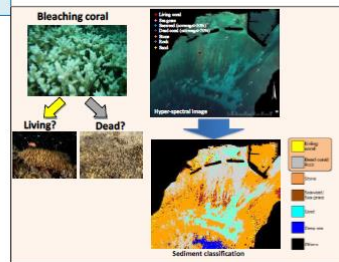
- マルチスペクトルデータではできなかった熱帯熱帯泥炭林の地下水位の推定が可能。
- 今後、地下水位の監視により、森林火災の予防、地下からのCO₂放出抑制管理に貢献。



⑪サンゴの白化および回復状況の把握

実施企業：アジア航測

- マルチスペクトルデータではできなかった、白化サンゴの回復状況の把握が可能。
- 今後、白化したサンゴが回復するかどうかの把握は、地域経済・生物多様性から重要。



⑫沿岸海域の水深測定技術開発

実施企業：アジア航測

- マルチスペクトルデータではできなかった水深分布の推定が可能。
- 今後、深浅測量の更新頻度の少ない地域などで貢献。

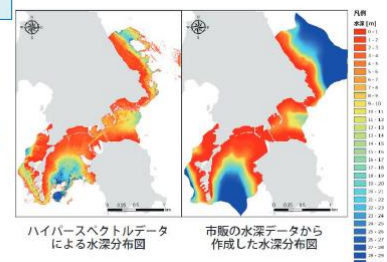


図 2-12 航空機ハイパースペクトルセンサによる利用実証事例(3/3)

出所)J-spacesystems 安達委員発表資料

また、経済産業省では、令和 4 年度「衛星データ利用環境整備・ソリューション開発支援事業」において、衛星データを活用した地域の行政・産業の課題解決のための実証事業を推進している。本事業では、地方自治体・企業・団体のニーズを踏まえて地域選定を行い、衛星データ等を活用した当該地域の課題解決のためのソリューション開発実証を集中的に実施している¹。

実証地域としては、北海道、富山県、福井県、山口県、福岡県、佐賀県、長崎県、熊本県、大分県、鹿児島県が選定されており、ソリューション開発に必要な衛星データを衛星データプラットフォーム「Tellus」上で無料で利用することができる衛星データ無料利用事業者が選定され、地域実証が進められている²。

本地域実証事業による裨益イメージを図 2-13 に示す。

¹ <https://www.meti.go.jp/press/2021/03/20220329003/20220329003.html> (2023 年 3 月 8 日閲覧)

² <https://sdu.go.jp/> (2023 年 3 月8日閲覧)

地域実証事業による鶏卵状態の解消のイメージ

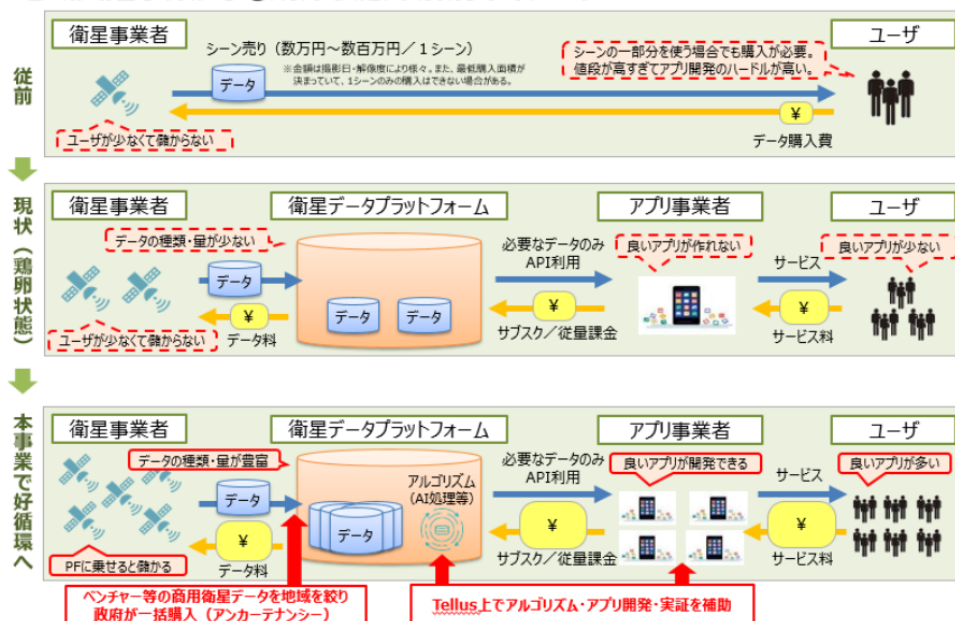


図 2-13 経済産業省の地域実証事業の裨益イメージ

出所) <https://www.meti.go.jp/press/2021/10/20211014001/20211014001.html> (2023 年 3 月 8 日閲覧)

さらに、ビジネスを支えるための技術として、小型多波長センサの開発も進められている。内閣府が主導する「経済安全保障重要技術育成プログラム(K Program)」の第一次研究開発ビジョンにおいて、「小型かつ高感度の多波長赤外線センサ技術」が支援対象に採択されている。本取組みでは、2026 年度までに重要要素技術である赤外線を検知する「赤外線検出器」、分光してスペクトル画像を得る「分光デバイス」、及び「光学系」を開発し、2027 年度までにこれら重要要素技術を組合せて多波長赤外線センサとし、新たに開発する「小型衛星」及び「ドローン」に搭載し、空間・波長分解能だけでなく時間分解能も高い、多波長画像を取得する計画となっている。

本取組みにおける分光デバイスと波長イメージを図 2-14 に、想定スケジュールを図 2-15 に示す。

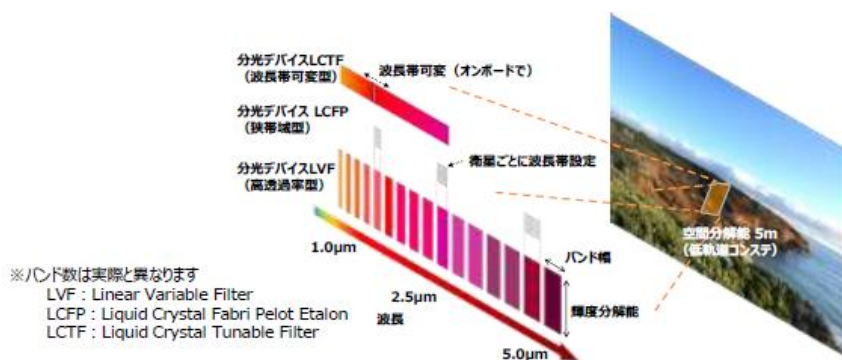


図 2-14 K Program における高感度小型多波長赤外線センサ技術の分光デバイスと波長イメージ

出所) 経済産業省資料

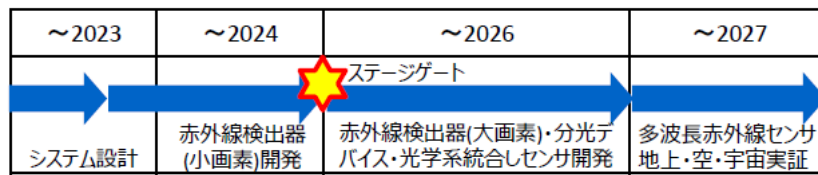


図 2-15 K Program における高感度小型多波長赤外線センサ技術の想定スケジュール
出所)経済産業省資料

このように我が国でも、政府主導での小型多波長センサの開発、利用実証プロジェクトの推進、Tellus 経由でのデータ配布などの取組みはされているが、具体的なビジネスの創出スピードでは欧米の後塵を拝す状況である。

(2) 海外における多波長センサ関連ビジネス

海外では多波長センサビジネスの具体化が進んでいる。

米国では、多波長センサのユースケースとして、自社のハイパースペクトル衛星コンステレーション構築を進める Orbital SideKick 社や Satellogic 社では、パイプライン監視等を想定している傾向がみられる。また HyspecIQ 社では NRO(米国国家偵察局)と研究契約を締結しており、安全保障ユースを意識した動きがみられる。

中国の多波長センサビジネスにおいては、ハイパースペクトル衛星を含めた光学衛星コンステレーション構築を目指す長光衛星技術や珠海欧比特宇航科技では農業・林業等を想定している傾向がみられる。特に自社の衛星コンステレーションを構築している珠海欧比特宇航科技は、中国政府と協力し、ハイパースペクトルデータを含めた処理技術の研究開発や普及促進の取組み等を行っている。

また多波長リモートセンシングデータのユースケースとしては、GHG 監視も注目されている。既に多数の光学衛星からなる光学衛星コンステレーションを構築している Planet 社では、コンステレーションにハイパースペクトル衛星を加えることを計画しており、GHG 観測による気候変動関連の組織・活動を顧客と想定している。一方、同じく GHG 観測衛星コンステレーション構築を推進している GHGSat 社では、民間企業を対象としている。このように GHG 観測・監視では、気候変動関連の組織・活動を顧客とするパターンと民間企業を顧客とするパターンの2つのパターンがある。

以下において、特徴的なビジネス展開を行っている個別企業の詳細を述べる。

1) Orbital SideKick

米国 Orbital SideKick 社は、自社のハイパースペクトル衛星コンステレーションを用いたデータ提供ビジネスを展開するスタートアップ企業である。同社は独自データプラットフォーム SIGMA を用いたサービスを想定しており、特にユースケースとして、石油・ガスパイプライン監視、メタンマッピング、クリーンエネルギー資源探査、鉱業、山火事リスク軽減を想定している。

同社は図 2-16 に示すようなパイプライン監視サービスを想定しており、2021 年より米国の石油関連企業である Phillips 66 とパイプライン監視のパイロットプロジェクトを実施しているほか、パイプライン漏れ防止・検出技術コンソーシアム iPIPE の技術パートナーに選定されている。

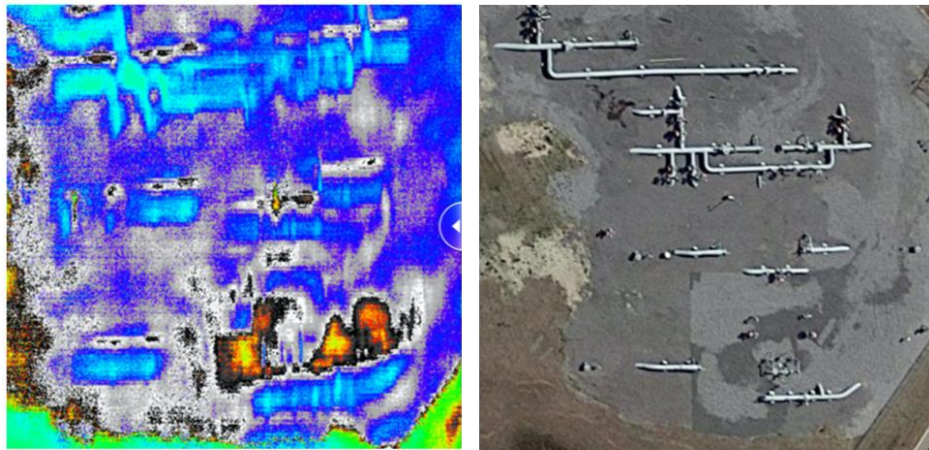


図 2-16 Orbital SideKick 社のパイプライン監視イメージ

出所)<https://www.orbitalsidekick.com/technology> (2023 年 2 月 24 日閲覧)

2) HySpecIQ

HySpecIQ 社は自社ハイパースペクトルコンステレーションを用いたデータ提供・解析ビジネスを展開する米国のスタートアップ企業である。図 2-17 は HySpecIQ 社の解析イメージであり、黄色の部分は PVC(塩化ビニル)製の屋根、青色はアスファルト製の屋根であることを示している。なお、同社に対しては、PayPal 創業者のピーター・ティール氏が 2021 年に出資を行っている。

HySpecIQ 社は2019年に NRO(米国国家偵察局)と商用ハイパースペクトル研究契約を締結しており、主要顧客として安全保障ユーザを想定しているものと推察される。同社は30の安全保障ユースケースを想定し、そのユースケースに有効となる 104 の波長帯を選定している。また即時性を意識しているとみられ、光通信企業の BridgeComm 社とも連携している。同社は今後、温室効果ガス監視サービスにも進出する予定とされている。



図 2-17 HySpecIQ 社の解析イメージ

出所)<https://www.bloomberg.com/news/articles/2021-09-15/peter-thiel-bankrolls-satellite-imaging-startup-hyspeciq>(2023 年 2 月 24 日閲覧)

3) Satellogic

ウルグアイ・アルゼンチンのスタートアップ企業である Satellogic 社は、低価格での地球観測衛星データ提供を目指している企業であり、自社での光学衛星コンステレーション構築を推進している。同社では、主なユースケースとしてパイプライン監視、精密農業、食料サプライチェーン監視等を想定している。同社は、短期の研究開発と大幅なコスト削減により、光学センサを搭載した衛星製造コストの低減を目指し、他社に比べて 100 倍以上の低価格で衛星データを提供することを目指している。

同社は図 2-18 に示す実証分野を想定しており、パイプライン監視、油田監視、精密農業・食料サプライチェーン、森林監視、インフラ監視で実証活動を実施している。

	ENERGY		AGRICULTURE	FORESTRY	INFRASTRUCTURE
APPLICATION	Oil Pipeline Monitoring	Oil Field Monitoring	Precision Farming / Food supply chain	Forestry - tree count	Infrastructure planning for renewable energy projects
OVERVIEW	- Major O&G company needed to monitor ~3,000km of pipelines - Monitoring by air biweekly at cost ~\$1,200/km	Major O&G company needed to monitor asset inventory	Large agriculture company needed to survey ~50k hectares of crops to determine growth, yield levels and time harvesting	Paper producer needed to map tree cuts and evolution of new plantings	Solar and wind producer needed to survey locations based on floor risk and quality of infrastructure
OUTCOME	Using satellites and machine learning, Satellogic demonstrated similar detection capabilities at costs of less than \$100/km	Satellogic pilot demonstrated that its machine learning technology could successfully detect changes	Satellogic pilot demonstrated high detection capacity and ability to provide additional value-added layers of insight including accurate detection of rapeseed glooms and automated estimation of crop growth with +95% precision	Satellogic demonstrated that its machine learning technologies could deliver the required insights at fraction of the cost	Satellogic's machine learning technologies in combination with its satellites demonstrated their ability to give insights on flood zones, relative water depths, flows and terrain mapping
TAM ¹	\$10bn	\$10-12bn	\$10-12bn	\$2bn	\$4bn

図 2-18 Satellogic 社の実証分野
出所) <https://investors.satellogic.com/> (2023 年 2 月 24 日閲覧)

4) 長光衛星技術

長光衛星技術(Chang Guang Satellite Technology Co., Ltd.)は、リモートセンシング衛星の研究開発、製造、データ提供までを自社の一貫通貫で担う中国企業であり、中国初の商業リモートセンシング企業でもある。同社のハイパースペクトル衛星が鹿児島県の桜島を撮像した画像の例を図 2-19 に示す。



図 2-19 長光衛星技術のハイパースペクトル衛星「光譜 01/02 星」が撮像した日本の鹿児島県桜島
出所) http://www.jll.cn/product_view.aspx?id=1354 (2023 年 2 月 24 日閲覧)

同社は現在、光学リモートセンシング衛星コンステレーション「吉林一号」の構築を進めている。同コンステレーションは 2023 年には 138 機体制、2025 年には 300 機体制となる計画であり、現在 83 機が打上げ済みである。同コンステレーションには、26 バンドで観測可能なハイパースペクトル衛星「光譜 01/02 星」が含まれている。

同社では、主なユースケースとして農業、林業、環境保護、自然資源管理等を想定しており、各ユースケースの詳細は以下の通りである。

- 農業：耕地の非農地化の監視、農業保険
- 林業：松林の変色の監視、森林火災保険に関する早期警戒や火事状況の監視
- 環境保護：裸地の土埃発生源の監視、脱穀収穫後の藁の定量化、違法なゴミの山の監視、水が黒く悪臭のある都市水域の監視、自然保護区の監視
- 自然資源管理：違法な建築や占有の監視、土地利用の変化の監視

5) 珠海欧比特宇航科技

珠海欧比特宇航科技(Zhuhai Orbita Aerospace Technology Co., Ltd)は、自社の衛星コンステレーションを有する中国の衛星事業者である。長光衛星技術と同様に、主なユースケースとして農業、林業、環境保護等を想定している。同社の衛星を用いた農業分野における利用事例を図 2-20 に示す。

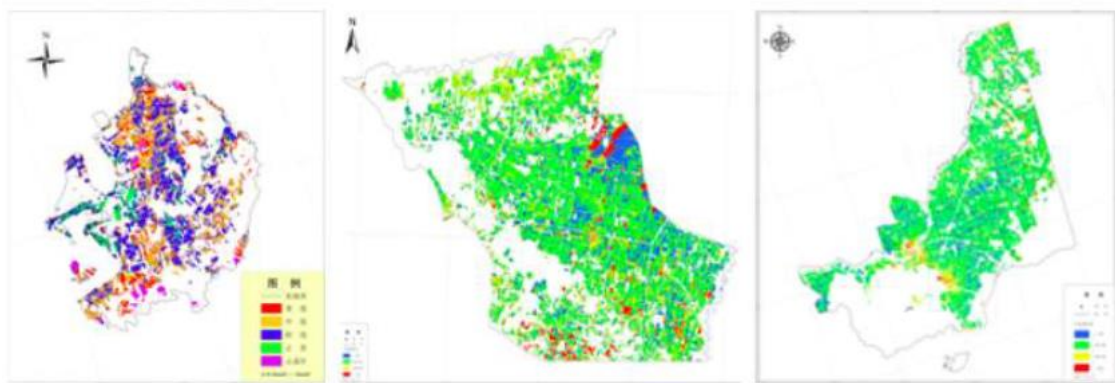


図 2-20 珠海欧比特宇航科技による農作物の自然災害(冠水、干ばつ、冷害)調査イメージ
出所) <https://www.obtdata.com/#/content/scheme/applicationDetails?id=5> (2023 年 2 月 24 日閲覧)

同社では、「珠海一号」と呼ばれる自社の衛星コンステレーションを運用している。同コンステレーションは、ハイパースペクトル衛星、赤外線衛星、ビデオ衛星、SAR 衛星から構成され、34 機体制となる予定であり、12 機が打上げ済みである。このうちハイパースペクトル衛星は、32 バンドのハイパースペクトル衛星 OHS 2/OHS 3 シリーズ 10 機であり、8 機が打上げ済みとなっている。

同社はまた、中国の政府機関である自然資源部国土衛星リモートセンシング応用センターと戦略協力を締結しており、ハイパースペクトル画像データ処理技術、標準作成、研究開発等に共同で取り組んでいる。

6) Planet

Planet 社は世界最大規模の光学コンステレーションを展開する米国のスタートアップ企業である。同社ではアプリケーションの1つとして GHG 監視に関するユースケースを想定している。Planet 社では、GHG 監視の例として、同社は図 2-21 にあるような「油およびガス流出」、「火力発電所の排出検証」、「低炭素認証」、「森林炭素管理」、「埋立地ガス回収の改善」を挙げている。また、同社の GHG 監視の例を図 2-22 に示す。図 2-22 では GHG の一つであるメタン(CH₄)の監視例で、CH₄ 濃度によって色が変わっており、濃度の高い発生源が確認出来る。

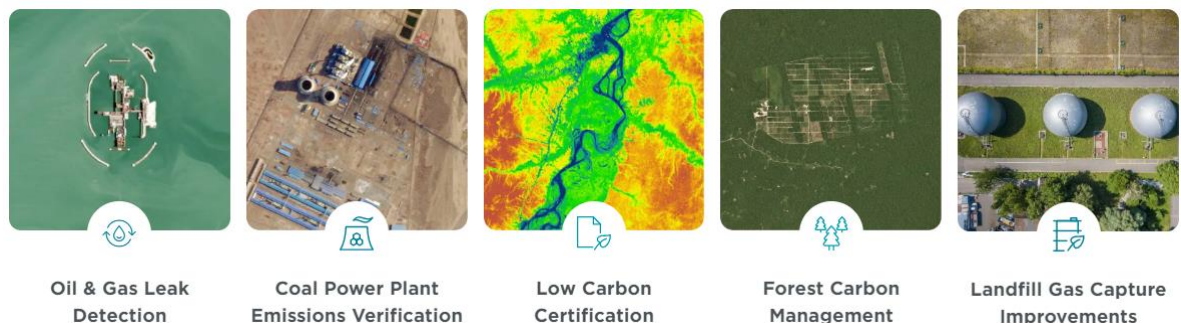


図 2-21 Planet 社の GHG 監視例

出所) <https://www.planet.com/carbon-mapper/> (2023 年 2 月 14 日閲覧)

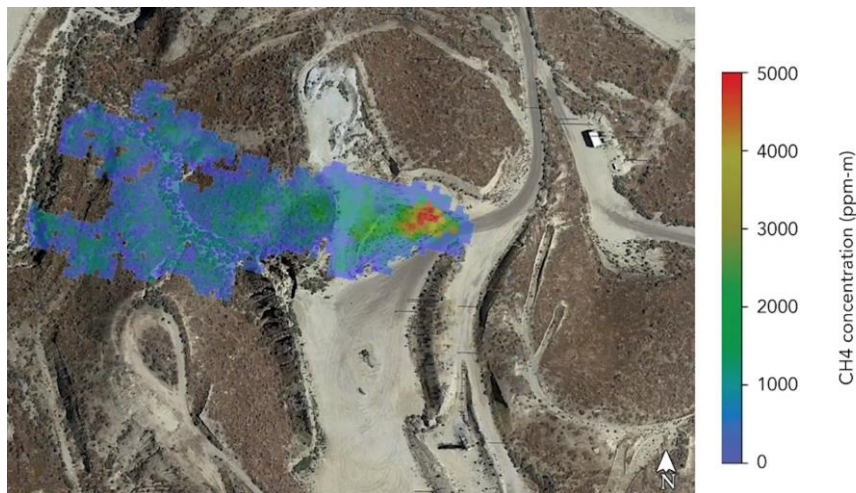


図 2-22 Planet 社の GHG(メタン)監視イメージ

出所) <https://www.planet.com/pulse/carbon-mapper-launches-satellite-program-to-pinpoint-methane-and-co2-super-emitters/> (2023 年 2 月 14 日閲覧)

これまで打ち上げてきた同社の光学衛星とは別に、ハイパースペクトル衛星コンステレーションの構築が計画されている。ハイパースペクトル衛星のコンステレーションにより、施設レベルでメタンと二酸化炭素の排出量を正確に検出し、メタン、二酸化炭素をはじめ 25 種類以上の気候変動に関するデータを取得することを想定している。

同社はまた、Carbon Mapper Inc.とカリフォルニア州が開発したオープンデータポータルを通じて取得したデータを公開予定であるとしている。なお、Carbon Mapper Inc.は NASA ジェット推進研究所(JPL)等からスポンサードされている非営利団体である。Carbon Mapper Inc.としても独自に 2 機の衛星を打ち上げる計画が進められており、これには NASA/JPL によって開発されたハイパースペクトルセンサが使用される予定である。

7) GHGSat

米国のスタートアップ企業である GHGSat 社では、主なユースケースとして民間ビジネス活動における GHG 監視を想定している。同社は、GHG 観測を目的としたコンステレーションの構築を行っている。GHGSat 社の GHG 監視のイメージ図 2-23 は、Planet 社の例と同じく GHG の一つである CH₄ を監視を行った例である。

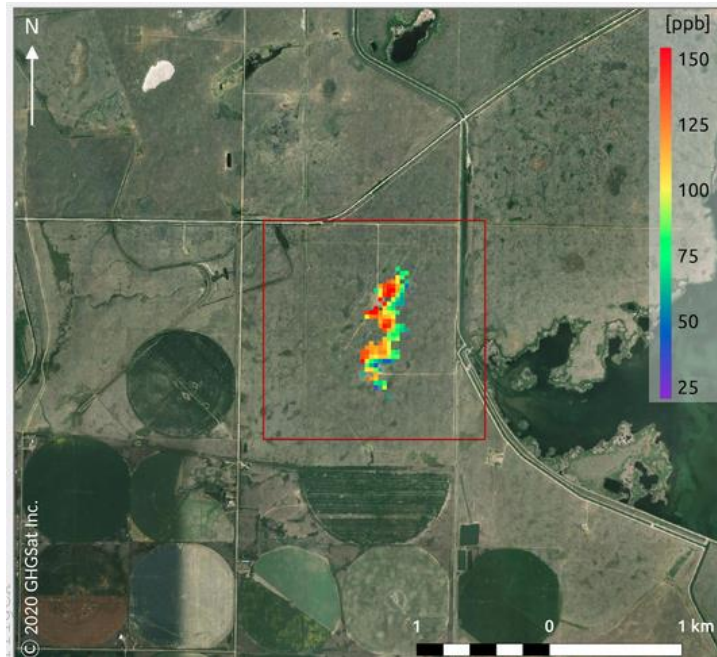


図 2-23 GHGSat 社の GHG(メタン)監視イメージ

出所) <https://spacenews.com/ghgsat-new-sensor/> (2023 年 2 月 14 日閲覧)

施設レベルでの GHG 監視として、同社はカナダの Oil Sands Innovation Alliance(COSIA)と連携しており、油砂(粘性の高い鉱物油分を含む砂岩)採掘による環境影響評価(GHG 排出源の低減)に GHGSat のデータを使用している。また、民間ビジネス活動における GHG 排出量監視にも同社の衛星が使用されており、水力発電企業である Hydro Quebec 社、Manitoba Hydro 社、石油・ガス企業である Imperial Oil 社、Shell Canada Natural Resources 社、Suncor Energy 社等のエネルギー関連の企業が顧客となっている。

GHGSat 社は、中長期では衛星製造ではなくアプリケーションに注力する方針とみられ、他社との連携を推進している。同社はトロント大学と衛星開発に関する契約を締結しているほか、AIS 等のデータ収集を行っている Spire 社とも連携している。この連携では、Spire 社が 3 機の衛星を GHGSat 社向けに開発予定で、うち 1 機は二酸化炭素センサを搭載する予定とされている。なお、Spire 社も独自で衛星コンステレーションを有するが、この連携では Spire 社のペイロードは搭載しないこととなっている。

2.1.3 多波長リモートセンシングに関わる政策動向

米国および欧州においては表 2-6 に示す多波長関連のプログラムが推進されており、大きなプログラムの中で多波長センサの研究開発を推進している。

例えば米国では弾道ミサイル防衛システム(BMDS)におけるミサイル発射の発見および追跡に衛星の赤外線センサを用いている。また欧州においては Horizon Europe において、産業競争力強化のためアプリケーションから基礎的な研究まで幅広く研究開発の支援を行っている。

表 2-6 海外の主な多波長関連プログラム

	プログラム名		組織	多波長センサ対象	概要
米国	BMDS	SBIRS	USSF	赤外線	赤外線を使用した弾道ミサイル早期警戒衛星システム
		NG OPIR	USSF	赤外線	SBIRSの後継計画の弾道ミサイル早期警戒衛星システム
	FORTRESS		AFRL	赤外線	赤外線センサに関する研究開発プログラム
	NROによる民間データの調達動向(再掲)		NRO	ハイパースペクトル等	NROの民間企業との研究契約およびRFP
欧州	Horizon Europe		EU	ハイパースペクトル, 赤外線	EUの研究開発プログラム
	Copernicusによる民間データの調達動向		EU	光学, SAR (将来:ハイパースペクトル)	Copernicusの民間衛星データを調達する枠組み

出所)各種公開情報より三菱総合研究所作成

(1) 米国の多波長関連プログラム

1) 弾道ミサイル防衛システム

米国は表 2-7 に示すような弾道ミサイル防衛システム(Ballistic Missile Defense System)の構築を推進しており、衛星システムは極超音速ミサイルの追跡センサとして位置付けられている。衛星によるミサイル検知情報はイージスシステム等に連携される。

表 2-7 弾道ミサイル防衛システム(BMDS)の構成

名称	概要
Aegis BMD	イージス艦
Standard Missile SM-3 Kinetic Warhead seeker	海上配備型弾道迎撃ミサイル
Ground-based Midcourse Segment (Ground-Based Interceptor: GBI)	地上配備型弾道迎撃ミサイル
EKV (Exoatmospheric Kill Vehicle) Seeker	赤外線シーカ
NGI (Next Generation Interceptor)	GBI後継の次世代迎撃ミサイル
HBTSS (Hypersonic and Ballistic Tracking Space Sensor)	極超音速及び弾道ミサイルを追跡するための宇宙センサ(SBIRS等)
THAAD (Terminal High Altitude Area Defense)	地上配備型移動式弾道迎撃ミサイル

出所)各種公開情報より三菱総合研究所作成

a. SBIRS

SBIRS(Space-based Infrared System)はBMDSにおける弾道ミサイル早期警戒衛星システムで、米国宇宙軍(USSF)が運用を行っている。

SBIRS は以下に示す衛星群から構成されている(図 2-24 参照)。

- 高軌道に配置された SBIRS-High:10 機
 - 静止軌道:6 機
 - 長楕円軌道(高度約 1,100km~38,000km):4 機
- 低軌道(高度約 1,350km)に配置された STSS:2 機

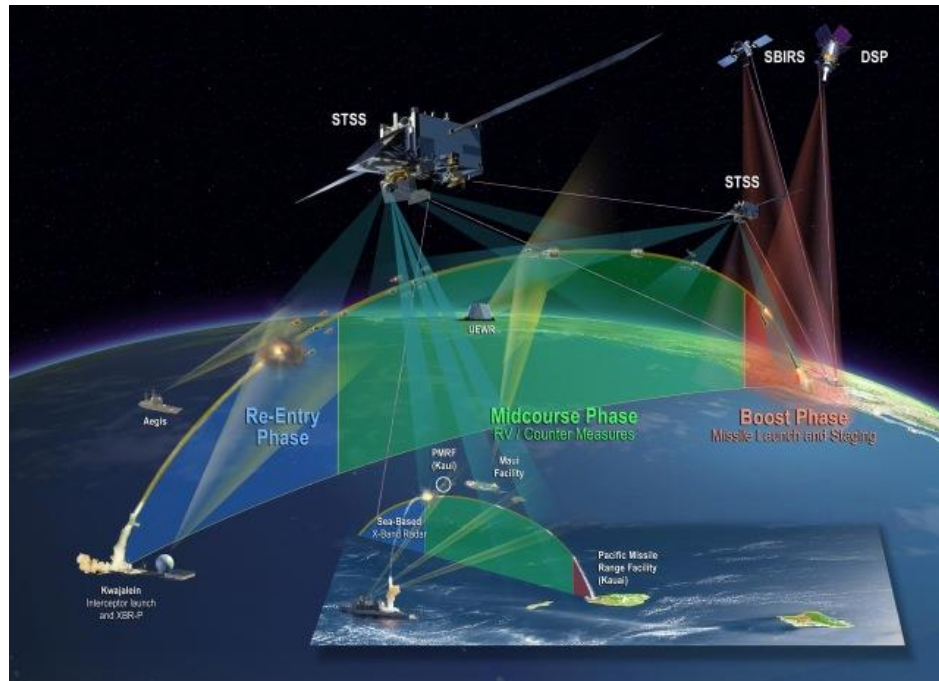


図 2-24 SBIRS のイメージ

出所) https://news.northropgrumman.com/news/releases/northrop-grumman-built-missile-tracking-satellite-s-reach-tenth-year-on-orbit?_gl=1*webatj*_ga*NTgzOTY1MDQuMTY2NTcyOTYzOQ..*_ga_7YV3CDX0R2*MTY2ODc2MTA5Ny4yLjAuMTY2ODc2MTEwNi4wLjAuMA (2023 年 3 月 1 日閲覧)

これらの衛星には 900nm~2,500nm 程度の Short Wave Infrared(SWIR)帯と 3,000nm~5,000nm 程度の Mid Wave Infrared(MWIR)帯を観測するセンサが搭載されており、ミサイルの発射等の熱源を探知する。

SBIRS は 2022 年に配備が完了しており、後継計画としては後述する NG OPIR がある。

b. NG OPIR(Next Generation Overhead Persistent Infrared)

NG OPIR(Next Generation Overhead Persistent Infrared)は SBIRS の後継計画で、SBIRS と同じく米国宇宙軍(USSF)が主導して構築を進めている。

衛星群としては以下の構成となっている。

- 静止衛星(NG OPIR GEO):3機
 - Lockheed Martin 社が衛星製造
 - 2018 年に 29 億ドルの開発契約を締結
 - 2021 年に 49 億ドルの製造契約を締結
- 長楕円軌道衛星(NG OPIR Polar):2機
 - Northrop Grumman 社が衛星製造

- 2020 年に 23.7 億ドルの開発契約を締結



図 2-25 Next Gen OPIR GEO 衛星のイメージ

出所) <https://www.ssc.spaceforce.mil/Portals/3/Documents/PRESS%20RELEASES/Next-Generation%20Overhead%20Persistent%20Infrared%20Program%20Selects%20Mission%20Payload%20Suppliers%20v4.pdf?ver=7qUXGXb35DOGSCh2uAQEGw%3D%3D#:text=%E2%80%94Space%20Systems%20Command%27s%20Next%20Generation,contested%20and%20congested%20space%20domain> (2023 年 3 月 1 日閲覧)

c. 弾道ミサイル防衛システムに関する政策動向

現状、BMDS の衛星システムは静止軌道衛星等の比較的大型な衛星で構成されているが、今後は、少数の大型、精巧、高コストな静止衛星から、多数の低～中軌道衛星へ移行する方針となっている。

2022 年 9 月には、宇宙軍の調達トップである Frank Calvelli 氏が、Next Gen OPIR GEO のコストの高さと開発期間の長さについて批判している。

このような動向を踏まえ、米宇宙軍宇宙開発局(SDA)長官の Derek Tournear 氏は、将来的には早期警戒にあたって静止衛星に依存しない方向に進むと発言しており、Next Gen OPIR GEO が、国防総省が調達する最後の早期警戒向け静止衛星となるとしている。さらに Tournear 氏は、今後は多数の低～中軌道衛星がミサイルの早期警戒・追跡を担うことを想定していると発言している。なお、既存の SBIRS 衛星は今後 20 年以上、NG OPIR GEO は 2050 年以降も運用される予定である。

また将来的に SDA では拡散型低軌道衛星コンステレーション「拡散型戦闘宇宙アーキテクチャ(PWSA)³」の一環として、ミサイル警衛星の配備を進めている。2025 年 4 月からミサイル警戒衛星を 28 機配備(L3Harris Technologies 社および Northrop Grumman 社で各社 14 機製造)する計画としていたが、2023 年 3 月に Raytheon Technologies 社と新たに 7 機の衛星の製造契約を締結している。

d. 米国の軍事赤外線市場動向

軍事向けの赤外線市場動向を調査したレポートとして、Maxtech International 社の「The World

³ 従来「国家防衛宇宙アーキテクチャ(NDSA)」と呼ばれていたが、2023 年 1 月に改称された。

Market for Military Infrared Imaging Detectors and Systems」がある。表 2-8 は同社の調査による今後 5 年間で米国の赤外線市場の予測を示している。

表 2-8 の項目は「Tactical Missiles」、「Strategic Missiles & Defense」、「Airborne」、「Naval」、「Ground Based」のカテゴリ毎に評価されており、前述の SBIRS および NG OPIR の弾道ミサイル防衛システムは「Strategic Missiles & Defense」カテゴリに含まれている。CAGR (Compound Average Growth Rate) は全体としても 8.7%、「Strategic Missiles & Defense」単独でみると 13.1%と予測されており、今後も米国の安全保障分野での赤外線市場は拡大していくものと予測されている。

表 2-8 米国の軍事赤外線市場の予測

(100 万ドル)	FY22	FY23	FY24	FY25	FY26	FY27	CAGR
Tactical Missiles	314	352	440	372	509	543	11.6%
Start Miss. & Def.	894	879	1,051	1,420	1,582	1,656	13.1%
Airbone	2,317	2,518	2,740	2,706	2,761	2,902	4.6%
Naval	296	352	418	472	549	574	14.2%
Ground Based	1,868	2,059	2,584	2,664	2,801	2,947	9.5%
Total	5,688	6,160	7,232	7,734	8,201	8,601	8.7%

出所)Maxtech International 社「The World Market for Military Infrared Imaging Detectors and Systems」

2) FORTRESS

FORTRESS (Focused Opportunity Reaching Toward Reliable Electro-Optic Strategic Sensors)は戦略的宇宙利用の為に低ノイズ赤外線センサチップアセンブリ(SCA)に関する研究開発プログラムで、米空軍の研究開発組織である空軍研究所(AFRL)が推進している。

2016 年に Raytheon 社と Teledyne 社が本プログラムに選定されている。

Raytheon 社は 2016 年 11 月、7,355,017 ドルの契約締結(遂行完了は 2019 年 7 月)し、本プログラムで超低ノイズ、高量子効率の大型 HgCdTe 赤外線焦点面アレイ検知器の設計・製造を行うとしている。なお 2018 年 11 月、19,172,016 ドルに定常監視利用向けの大型かつ高温で運用可能な中波赤外線焦点面アレイの開発のため契約変更がなされており、遂行完了は 2022 年 2 月となっている。

Teledyne 社も 2016 年に詳細不明であるものの契約を締結しており、さらに 2019 年 1 月、16,448,132 ドルに従来の HgCdTe フォトダイオードよりも高性能な中波赤外線及び長波赤外線 HgCdTe 検知器技術の研究開発のため契約変更し、遂行完了は 2022 年 3 月となっている。

3) NRO による民間衛星データの調達

NRO では近年、民間企業とのパートナーシップを強化している。米国では 2018 年に商用衛星画像の調達主体としての役割が米国家地理空間情報局(NGA)から NRO へ移管されており、2019 年、表 2-9 に示す光学、ハイパースペクトル、SAR、無線周波数(RF)といった複数種類の商用衛星データを、民間衛星事業者と契約を締結して調達している。NRO はこうした民間企業の活用は優先事項ではなく、必須事項であるとしている。

表 2-9 2019 年に発注された NRO 研究契約(Study Contract)

対象分野(受注企業の特徴)	発注締結発表	契約額	受注企業
光学	2019年6月	非公表	BlackSky社、Maxar社、Planet社
ハイパースペクトル	2019年9月	非公表	HySpecIQ社
SAR	2019年12月	非公表	Capella Space社
無線周波数(RF)	2019年12月	非公表	Hawkeye 360社

出所)各種公開情報より三菱総合研究所作成

多波長センサの一つであるハイパースペクトルについては、NRO は 2019 年 9 月に米国のハイパースペクトル衛星スタートアップ企業である HySpecIQ 社に研究契約(Study Contract)を発注している。これは NRO と民間企業とのハイパースペクトルデータに関する初の契約であり、NRO は同社のデータを評価し、次世代の民間調達に活用するとしている。なお、HySpecIQ 社は、ハイパースペクトル衛星 1 機目を 2023 年前半に打ち上げ、その後まもなく 2 機目も打ち上げる予定である。その他、光学、SAR、無線周波数(RF)でも同様の研究契約スキームでの評価が行われている。このうち、BlackSky 社については 2021 年 8 月に調達契約に移行している。

2022 年 11 月、NRO はハイパースペクトルデータの調達に関する RFP(提案要請)を発表した。RFP の内容は登録ベンダのみ閲覧可能でそれ以外には非公開であるが、NRO は特定のバンド(熱赤外画像等)ではなく多数のバンドに関心があるとしている。この RFP では、計画段階のコンステレーションに関するモデリングや評価が含まれ、運用中のコンステレーションを有する場合には実証も含まれる。なお、米国子会社を有する外国企業も入札に参加可能とされており、外国企業にも門戸が開かれている点が特徴的である。11 月 15 日に RFP 発表・申請受理を開始し、同月 29 日が申請期限に設定されていた。NRO は 2023 年早々に契約を締結予定であるとしている。またエラー! 参照元が見つかりません。に示す通り、NRO の衛星データ調達に関わる RFP はハイパースペクトルを対象としたもの以外にも発表されており、SAR や RF が対象となっている。なお、表 2-9 に示す 2019 年の契約では商用プロダクトをNROのアーキテクチャにいかに統合するかに主眼が置かれていたのに対し、表 2-10 に示す 2021 年以降の契約では各民間企業の能力を評価することが主な目的とされている。

表 2-10 NRO の衛星データ調達に関わる近年の RFP

対象分野	RFP発表	契約締結発表	契約額	受注企業
SAR	2021年10月	2022年1月	非公表	• Airbus社 • Capella Space社 • ICEYE社 • PredaSAR社 • Umbra社
無線周波数(RF)	2022年7月	2022年9月	非公表	• Aurora Insight社 • HawkEye 360社 • Kleos Space社 • PredaSAR社 • Spire Global社 • Umbra Lab社
ハイパースペクトル	2022年11月	TBD	非公表?	TBD

出所)各種公開情報より三菱総合研究所作成

また、表 2-10 に示す 3 つの対象分野の調達においては、NRO が 2021 年 10 月に発表した新たな調達フレームワーク Strategic Commercial Enhancement's Broad Agency Announcement (SCE BAA) が用いられている。SCE BAA は新たな民間の能力 (商用 SAR、ハイパースペクトル、無線周波数 (RF) 等) の活用に特化した NRO の調達フレームワークである。NRO と民間企業が迅速に契約を締結可能な仕組みであり、対象分野が年に複数回発表される。SCE BAA を用いて、これまでに SAR と RF について募集、契約が締結されており、いずれも RFP 発表から契約締結までわずか数か月であったとされている。

(2) 欧州の多波長関連プログラム

1) Horizon Europe / Horizon 2020

Horizon Europe は、EU の産業競争力の強化と社会課題解決を目的とした予算総額 955 億ユーロ (13.3 兆円) の巨大な研究推進プログラムであり、実施期間は 2021～2027 年を予定している。Horizon Europe は欧州で継続的に行われてきた大型プログラムであり、前身は Horizon 2020 (2014～2020 年) である。この Horizon Europe は今後研究開発が行われていくとみられるが、既に Horizon 2020 で実施済のものを含め、表 2-11 に示すような HS/IR に関連する様々なプロジェクトが行われており、EU がプロジェクト資金の大部分を拠出している。以下で各プロジェクトの詳細を述べる。

表 2-11 Horizon Europe / Horizon 2020 の多波長関連プロジェクト

対象	プロジェクト名	研究目的・開発内容
HS	FOCUS	Copernicus 衛星と UAV による森林運用モニタリングサービスの開発
	OP3C	HS データ量を削減するためのデバイス開発
	PhySIS	HS データキューブ (動画データ) の信号処理技術の開発
IR	SWIRup	既存の宇宙用 SWIR センサの性能向上のための開発
	NEMILIES	過去のプロジェクトで開発した室温で動作可能な高感度赤外線センサの市場投入

出所) 各種公開情報より三菱総合研究所作成

a. FOCUS

FOCUS (Forest Operational monitoring using Copernicus and UAV hyperSpectral data) は、コインブラ大学 (ポルトガル) 等が実施したプロジェクトである。図 2-26 にプロジェクトの概要イメージを示す。ポルトガルでは急速な森林病害の拡大が社会課題となっており、病害に犯されている森林を発見する手段が必要とされている。そこで、Copernicus 衛星と UAV による森林運用モニタリングサービスを開発し、病害に犯されている森林を発見することで、樹木感染マップの作成を可能とする。Horizon 2020 の枠組みにおいて 2018 年～2021 年に実施されたプロジェクトであり、プロジェクト資金 195 万ユーロのうち、178 万ユーロが EU から拠出されている。

データとしては、Sentinel-2 の衛星データおよび UAV で撮像したハイパースペクトルデータを使用している。まずは衛星により広範囲を観測することで地域分析を行い、さらに UAV の高解像度データ

を用いることにより、詳細な樹木感染マップの作成が可能となる。

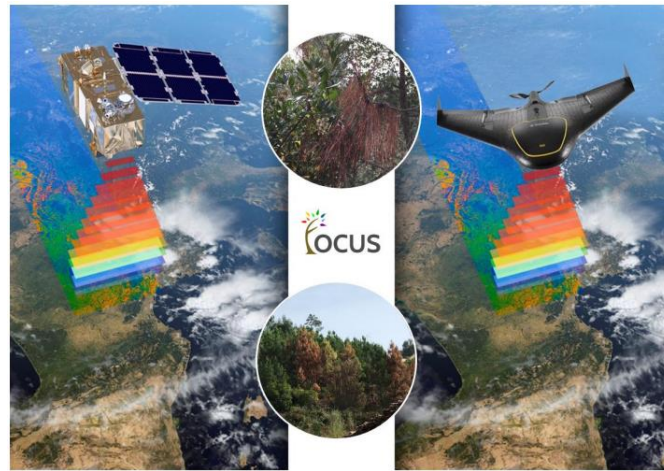


図 2-26 FOCUS の概要イメージ

出所) http://focus.uc.pt/wp-content/uploads/2018/10/FOCUS_Project_Fact_Sheet.pdf (2023 年 3 月 1 日閲覧)

b. OP3C

OP3C (On board Processing for Compression and Clouds Classification in hyperspectral data)は、Plenetek Hellas 社(ギリシャ)が実施した衛星から地上に送信するハイパースペクトル画像のデータ量を削減するためのデバイス開発プロジェクトである。ハイパースペクトル画像の膨大なデータ量による衛星のストレージ不足や、雲量の多い画像を送信することによる非効率なデータ伝送といった課題を解決するため、圧縮画像データを処理可能な FPGA(Field Programmable Gate Array)の開発を行った。図 2-27 に FPGA による画像圧縮のイメージを示す。FPGA を用いることで、画像圧縮による衛星からのハイパースペクトルデータ送信量の削減や、画像の雲量分類によるデータ伝送の最適化が可能となる。本プロジェクトでは技術検討だけでなく経済的な実行可能性も含めて調査研究を実施している。Horizon 2020 の枠組みにおいて 2015 年に実施されたプロジェクトであり、プロジェクト資金 7.1 万ユーロのうち、5 万ユーロが EU から拠出されている。

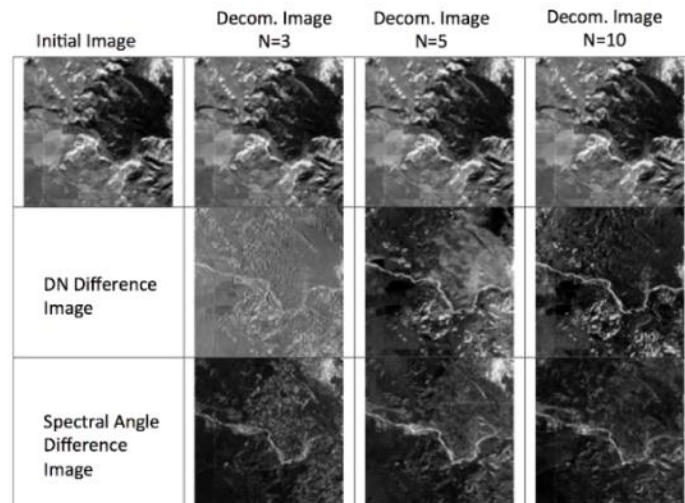


図 2-27 OP3C 画像圧縮のイメージ

出所)https://www.planetek.it/sites/default/files/spaceOP3C_Brochure.pdf#overlay-context=eng (2023 年 3 月 1 日閲覧)

c. PHySIS

PHySIS (Sparse Signal Processing Technologies for HyperSpectral Imaging Systems)は、IDRYMA TECHNOLOGIAS KAI EREVNAS(ギリシャ)が実施したハイパースペクトルデータキューブ(動画データ)の信号処理技術の開発プロジェクトであり、図 2-28 にプロジェクトの概要イメージを示す。本プロジェクトでは、ハイパースペクトルデータキューブをリアルタイムで処理するための新しい信号処理技術の開発・テスト・評価を行った。この PHySIS プロジェクトで開発された技術は、次世代の宇宙搭載リモートセンシングシステムを構築するために活用予定である。Horizon 2020 の枠組みにおいて 2015 年～2017 年に実施されたプロジェクトであり、プロジェクト資金 103 万ユーロの全額が EU から拠出されている。

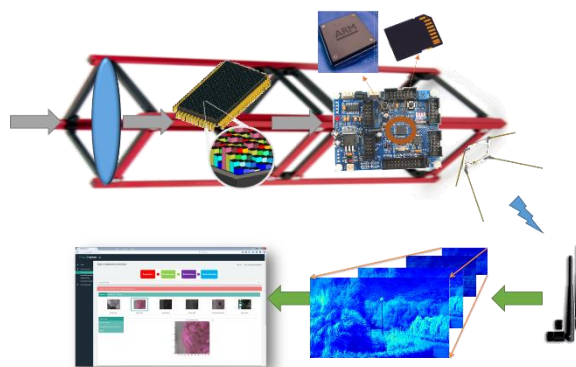


図 2-28 PHySIS の概要イメージ

出所)<https://cordis.europa.eu/project/id/640174/reporting> (2023 年 3 月 1 日閲覧)

d. SWIRup

SWIRup (HOT III-V II-VI Focal Plane Arrays for Space Applications in the Upper SWIR Band)は、Thales Alenia Space(フランス)が実施した既存の宇宙用 SWIR センサの性能

向上のための開発プロジェクトであり、図 2-29 にプロジェクトの概要イメージを示す。本プロジェクトの目的は、検出対象波長の上限を従来の $1.7\mu\text{m}$ から $2.5\mu\text{m}$ へ向上させることと、動作温度を従来の $200\sim 210\text{K}$ から $230\sim 290\text{K}$ へ向上させることによる衛星側の熱制御負荷の低減である。Horizon 2020 の枠組みにおいて 2018 年～2022 年に実施されたプロジェクトであり、プロジェクト資金 285 万ユーロの全額が EU から拠出されている。

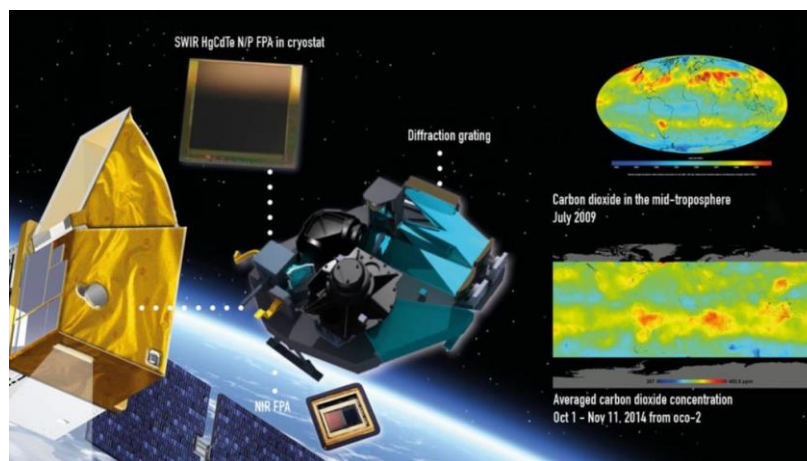


図 2-29 SWIRup の概要イメージ

出所) <https://www.sheffield.ac.uk/swirup/overview> (2023 年 3 月 1 日閲覧)

e. NEMILIES

NEMILIES (NanoElectroMechanical Infrared Light for Industrial and Environmental Sensing)は、INVISIBLE-LIGHT LABS(オーストリア)が実施している室温で動作可能な高感度赤外線センサの市場投入を目指すプロジェクトである。中間赤外域・遠赤外域を高感度に観測するには極低温技術が必要であるが、これまでの NEMILIS プロジェクトにおいて室温で動作するセンサのプロトタイプを開発してきており、このセンサプロトタイプの成熟および開発した製品の市場投入を目指している。Horizon Europe の枠組みにおいて 2022 年～2024 年での実施が予定されているプロジェクトであり、プロジェクト資金 222 万ユーロの全額が EU から拠出されている。⁴

2) Copernicus による民間データの調達動向

Copernicus では、ユーザの利便性向上を目的として、Copernicus Contributing Missions (CCMs)として民間衛星データの調達を行っている。調達した民間衛星データは Sentinel 衛星シリーズの補完データとしての位置付けとなっている。

CCMsでは認証ユーザは各ユーザの割当予算内で民間衛星データの観測要求および取得を行うことが可能となっており、Standard(アーカイブデータの取得と観測要求)と Rush(限られたユーザのみが実施できる緊急観測要求)という2つの調達方法が準備されている。

民間衛星データとしては表 2-12 の衛星(企業)が選定されている。現状では多波長センサデータは調達先として選定されていないが、公式サイトで将来的にハイパースペクトルの採用可能性について言

⁴ <https://cordis.europa.eu/project/id/101058011> (閲覧日:2023 年 3 月 8 日)

及がされている。

表 2-12 CCMsで選定されている衛星(事業者)

	衛星名	企業・組織		衛星名	企業・組織
SAR	RADARSAT-2	MDA, Canadian Space Agency(CSA)	光学	KOMPSAT-2,3	Korea Aerospace Research Institute(KARI)
	TerraSAR-X	German Aerospace Center (DLR) , Airbus		GeoEye-1	Maxar
	COSMO- SkyMed	Italian Space Agency(ASI)		WorldView-1,2,3	Airbus
	KOMPSAT-2	Korea Aerospace Research Institute (KARI)		Pléiades 1A, 1B	Indian Space Research Organisation(ISRO)
	PAZ	Airbus Hisdesat		SPOT-6,7	Planet
	ICEYE	ICEYE		ResourceSat-2	GEOSAT

出所)各種公開情報より三菱総合研究所作成

2.1.4 多波長リモートセンシングデータビジネスを取り巻く状況まとめ

2.1.3 節までに述べた多波長リモートセンシングデータビジネスをとりまく状況をふまえ、我が国の周辺環境の分析を行った。分析にあたっては表 2-13 に示すように、内部環境と外部環境、プラス要因とマイナス要因に分け、SWOT 分析を行った。

日本の強みとしては、ASTER および HISUI による軌道上実績があるほか、うみつばめ衛星によるチューナブル・マルチセンサの軌道上実証が予定されていることがある。一方、弱みとしてはビジネス実証のスピードが諸外国と比較して遅いことや、データ利用ビジネスのエコシステムが構築できていないこと等が挙げられる。外部環境としては、世界的に多波長センサを搭載した衛星打上げ数は限定的である中で GHG 観測や安全保障分野において多波長リモートセンシングデータの需要が高まりつつあることはプラス要因である。一方でマイナス要因としては、今後数年の間に多波長センサを搭載した衛星機数が増大することや、米国や欧州では政府主体の大型の多波長センサ開発を実施しており民間企業との相互補完体制を構築しているほか、一部の民間企業では具体的に PoC を推進していることが挙げられる。

表 2-13 多波長リモートセンシングデータビジネスに関する SWOT 分析

	プラス要因	マイナス要因
内部環境	強み(Strength) - ASTER、HISUIによるハイパースペクトルセンサの軌道上実績がある(バンド数は世界最先端) - うみつばめ衛星によるチューナブルマルチセンサの軌道上実証を予定しており、将来の小型化に向けた技術的優位性がある	弱み(Weakness) - ビジネス実証のスピードが諸外国と比較して遅い - ハードの強さを活かしたデータ利用ビジネスのエコシステムが構築出来ていない - リモセンの活用に関する国際ルール形成への取組みが十分ではない - 民間主体のハイパースペクトル衛星コンステレーションが存在しない
外部環境	機会(Opportunity) - 世界的に多波長センサを搭載した衛星打上げ数は未だ限定的である - アプリケーションの1つであるGHG観測の官民需要が高まりつつある - 米国では安全保障用途で民間企業が多波長データの需要が高まりつつあり、外国企業にも参入余地がある	脅威(Threat) - 海外の民間企業による多波長センサを搭載した衛星の機数が今後数年で増加する - 米国および欧州では政府主体で大型の多波長センサ開発を実施し、民間企業と相互補完体制を構築している - 一部の民間企業(Satellologic、HySpecIQ等)では具体的にユーザ企業・組織と連携し、POCを推進している

出所)三菱総合研究所作成

2.2 多波長リモセンデータ利用ビジネス研究会

衛星の小型化やコンステレーションの一般化に伴い、リモートセンシングデータビジネスは変革期を迎えている。また、ドローンや HAPS の出現により、従来からあった衛星と航空機以外に高さ方向の多様性が生じ、複数のプラットフォームで取得したデータを組み合わせた新たな利用方法も生まれつつある。

解像度、頻度だけでなく波長情報も取得可能なことはリモートセンシングデータの特徴である。世界的にも波長方向の情報を詳細に取得する多波長センサの活用が進み、温室効果ガスの排出源・吸収源を計測してビジネスにつなげるような新たなビジネスも出現している。

多波長センサは ASTER、HISUI といったプロジェクトを推進してきた我が国が強みを持つ領域である。一方で、現時点では利用のためのスペクトルデータが量・質ともに不足しており、強みを活かすための戦略・方策が求められている。

このような状況を受け、衛星・ドローン・センサメーカー、データプラットフォーム、ユーザ、金融等から幅広くメンバを集めた「多波長リモセンデータ利用ビジネス研究会」を2022年10月に立上げ、我が国の多波長リモートセンシングデータに関する現状や課題を整理・把握するとともに、今後の戦略の方向性について議論を行った。本研究会のメンバを表 2-14 に、研究会の開催履歴と主な議題を表 2-15 に示す

表 2-14 多波長リモセンデータ利用ビジネス研究会メンバ

お名前（敬称略）	ご所属	属性
安達 昌紀	一般財団法人宇宙システム開発利用推進機構（J-spacesystems）	有識者
大木 高志	日本電気株式会社	衛星事業者
加藤 剛	住友林業株式会社	ユーザー
木股 雅章	元立命館大学	有識者
三箇 智二	JX金属探開株式会社	ユーザー
柴崎 亮介（座長）	東京大学	有識者
祖父江 真一	国立研究開発法人宇宙航空研究開発機構（JAXA）	有識者
武山 芸英	株式会社ジェネシア	光学システムメーカー
長洲 郁彦	株式会社日本政策投資銀行	金融
中村 友哉	株式会社アクセルスペース	衛星事業者
橋詰 卓実	株式会社三菱UFJ銀行	金融
福代 孝良	株式会社アークエッジ・スペース	衛星事業者
南川 忠雄	豊田通商株式会社	ユーザー
山崎 秀人	さくらインターネット株式会社	衛星データプラットフォーム
渡辺 一生	株式会社WorldLink & Company	ドローン事業者

出所)三菱総合研究所作成

表 2-15 研究会の開催履歴と主な議題

#	議題
第1回:10/31	・研究会の背景(宇宙産業政策の方向性) ・研究会のスコープ、スケジュール ・委員によるプレゼン(J-spacesystems、アークエッジ・スペース、ジェネシア) ・総合討議
第2回:11/28	・前回の振返り ・多波長センサの開発動向 ・委員によるプレゼン(住友林業、三菱 UFJ 銀行) ・総合討議
第3回:12/20	・前回の振返り ・多波長センサ・データに関する国際動向 ・委員によるプレゼン(木股委員、WorldLink) ・総合討議
第4回:1/26	・前回の振返り ・多波長センサ・データに関する海外政策動向 ・委員によるプレゼン(JAXA) ・報告書骨子(案)
第5回:2/27	・前回の振返り ・検討会報告書(案)

出所)三菱総合研究所作成

次節からは、多波長リモートセンシングデータビジネスの活性化に向け、2.1で述べた調査結果と「多波長リモセンデータ利用ビジネス研究会」での議論を受けて整理・分析した結果を述べる。

2.3 多波長リモートセンシングデータビジネスの課題

2.3.1 多波長リモートセンシングデータビジネスの課題の特定・整理

前述のように、衛星・ドローン・センサメーカ、データプラットフォーム、ユーザ、金融等から幅広くメンバーを集めた「多波長リモセンデータ利用ビジネス研究会」を2022年10月に立上げ、我が国の多波長リモートセンシングデータに関する現状や課題を整理・把握するとともに、今後の戦略の方向性について議論を行った。5回の研究会を通じ、多波長リモートセンシングデータビジネスの拡大のために取り組むべき課題が指摘された。その中身は、多波長リモートセンシングデータビジネスのステークホルダー間の関係に関するもの、ビジネス展開の基盤となるルールに関わるもの、新規ビジネスの展開に必要となるPoC(Proof of Concept)に関わるものなど多岐にわたったが、以下のように整理される。

ビジネス面の課題：

- 多波長リモートセンシングデータ利用ビジネス創出のスピード欠如
- PoC を気軽にできる仕組み不足
- ビジネスに不可欠な金融の巻き込み不足

ビジネスを支える基盤面での課題

- 日本型のエコシステムの不存在
- 国際ルール形成力の弱さ
- (見えない)センシングデータの価値の普及不足

多波長リモートセンシングデータビジネスの拡大のためには、これらの課題に取り組み、解決を目指すことが不可欠である。以降において各課題の詳細を述べる。

2.3.2 各課題の詳細

(1) 多波長リモートセンシングデータ利用ビジネス創出のスピード欠如

欧米では、多波長リモートセンシングデータの可能性に着目し、既に「膨大なデータから新たな知見を導出する試み」のフェーズから「新たな知見の一つに着目し専用のコンステでニッチなビジネスを始める試み」のフェーズに移行しつつある。2.2.2節で述べたように、グローバルな社会課題である GHG 排出に対しても、多波長リモートセンシングデータを用いたサービスを開発し、ビジネス化に至っている企業も存在する。

我が国でも政府主導での K Program による小型多波長センサの開発、リモートセンシングデータを用いた利用実証プロジェクトの推進、Tellus 経由でのデータ配布など、リモートセンシングデータビジネス開発を促進するための取組みはされているものの、具体的なビジネスの創出スピードでは欧米企業

の後塵を拝す状況となっている。

(2) PoC を気軽にできる仕組み不足

多波長リモートセンシングデータは情報データの一つであり、種々のビジネスの源泉である。上述のように政府によりデータ利用実証プロジェクトなどのビジネス立上げのための PoC の機会もいくつか設定されているが、利用可能なデータや実証機会が限定的であり、関心ある企業がリモートセンシングデータビジネスの可能性等を見積ることが難しい状況となっている。

また、PoC を実施したとしても、その成果が広く知られることは稀であり、ユーザや金融に対するアピールにもつながる成果の公表は十分ではない状況となっている。

(3) ビジネスに不可欠な金融の巻き込み不足

基礎研究の成果と具体的なユースケースを結び付けることが難しい初期段階では、政府からの資金面での支援が必要であるが、ビジネス化された後の自走には金融の活用が不可欠である。

今回の研究会には金融からのメンバも参加していたが、金融側もリモートセンシングビジネスに興味・関心はあり、また投資のための様々なファイナンスの仕組みもあるが、リモートセンシングで何ができるのか、いつ頃に PoC の成果などが見られるのかなどの予見性が不足しており、具体的な支援に至っていない状況との意見が出されている。

(4) 日本型のエコシステムの不存在

海外では上流から下流までを手掛ける垂直統合型の企業が存在しており、観測衛星網の構築からサービス提供までを一気通貫に実施している。一方、日本には垂直統合型の企業は現時点では存在しておらず、各ポジションに様々なステークホルダーが存在する。しかし、表舞台であるビジネス／サービスの提供者と舞台裏である観測手段・観測プローブ(波長等)との断絶が生じている状況となっている。

関連するプレイヤーが有機的に連携し、ビジネス／サービスの実現につなげていく仕組みが求められている。

(5) 国際ルール形成力の弱さ

温室効果ガスなどの例を見ても明らかなように、欧米は国際的なルール形成をビジネスの手段として活用し、新たな市場を生み出していくメカニズムを創出しつつある。一方、日本は決められたルールの中で戦うことはできても、ルールを形成するという動きは苦手としている。多波長リモートセンシングデータビジネスの世界においても、今後は、日本が、国、国際機関、NGO 等を巻き込み、炭素監視メカニズム、安全保障とのデュアルユース、エネルギー等の多様な観点を踏まえた包括的なルール形成戦略が必要と考えられる。

(6) (見えない)センシングデータの価値の普及不足

リモートセンシングデータは様々な用途で利用可能である。一方で、リモートセンシングを知っている人以外にその価値を十分に認識してもらえていない。特に赤外線は目に見えないものであることから、

赤外線を活用するという発想に至ること自体が難しく、赤外線技術の有用性があまり認知されていない状況となっている。

センシングデータは他分野の解決に役に立つツール(ものさし)であり、現在の利用分野以外にも使える分野は様々想定される。現状は、宣伝力不足等もあり利用分野の広がりは限定的となっており、ビジネスをスケールさせていくためにも今後のより一層の普及活動が求められる。

2.3.3 課題解決に向けた視点・留意事項

前項で述べたリモートセンシングデータビジネス活性化のために解決すべき 6 つの課題について、解決策を検討する前段階として、検討にあたっての視点・留意事項をまとめる。

まず、ビジネス面の課題として挙げられている、「多波長リモートセンシングデータ利用ビジネス創出のスピード欠如」、「PoC を気軽にできる仕組み不足」、「ビジネスに不可欠な金融の巻き込み不足」については、ビジネス立上げに向けて実証プロジェクト(PoC)に“気軽に”、“数多く”取り組むことができる仕組みを作ることが最も重要である。“気軽に”、“数多く”取り組むことにより、企業は様々な Try & Error を行うことが可能となり、ビジネス創出のスピード向上にもつながる。例えば、年度に1度だけの実証プロジェクトではなく、数か月程度の短サイクルで何度か行うことを可能にすることや PoC を行うための申請や承認プロセスを可能な限り簡素化することが必要であろう。さらに、自社での準備が低減されることも“気軽に”の要件となることから、多波長リモートセンシングデータが格納されたデータベースの一定期間の利用を担保するような仕組みの準備も有効であろう。加えて、国立研究開発法人や大学との連携を容易にすることや、アジアをはじめとする海外のパートナー等との連携を容易にすることも効果的と考えられる。なお、このような PoC の実施メンバに金融機関を含めることや PoC 成果の公開の際に金融関係者を招待するなど、金融との連携を促すような仕組みを考えることも重要となろう。

次に、「日本型のエコシステムの不存在」については、現在は関係性が弱い関係するステークホルダー間の連携を促し、コミュニティ化するような仕組みが求められる。すなわち、衛星／センサ開発企業だけでなく、現地に精通した研究者、フィールドワーカー、ユーザ、政府機関等が結びついたエコシステム(人のコンステレーション)の形成が必要と考えられる。

「国際ルール形成力の弱さ」については、リモートセンシング業界あるいは宇宙業界だけでなく我が国全体として弱い部分ではあるが、政府と民間企業が一体となって積極的に取り組むべき課題である。身近なところでは PoC 成果を国際的な場で発表・広報することによって、国際的なルール形成に積極的に関与していくこと、それと並行して、ルール化に向けた働きかけとして、政府と一体となり、利害関係が一致する他国とのチーミングやロビーイング等も積極的に行っていくべきであろう。

最後に、「(見えない)センシングデータの価値の普及不足」については、リモートセンシングデータの価値の普及に向け、アプリケーション分野への宣伝をより一層、強化すべきと考えられる。これまでも行われていた活動ではあるが、宣伝方法としては宇宙業界に他業界のキーマンと呼ぶ形態が主であった。今後は、これまでリーチできていなかった層へのリーチが求められることから、宇宙業界(リモートセンシング業界)の人間が、他分野のイベントに乗り込んでいき、当該分野のキーマンと共同で価値普及を進める、エバンジェリスト的活動への転換が必要と考えられる。さらに、価値の普及と並行して、グリーンイノベーションや DX といった政府重要施策に関連した政策の検討も期待される。

以上の内容を図 2-30 および図 2-31 に示す。

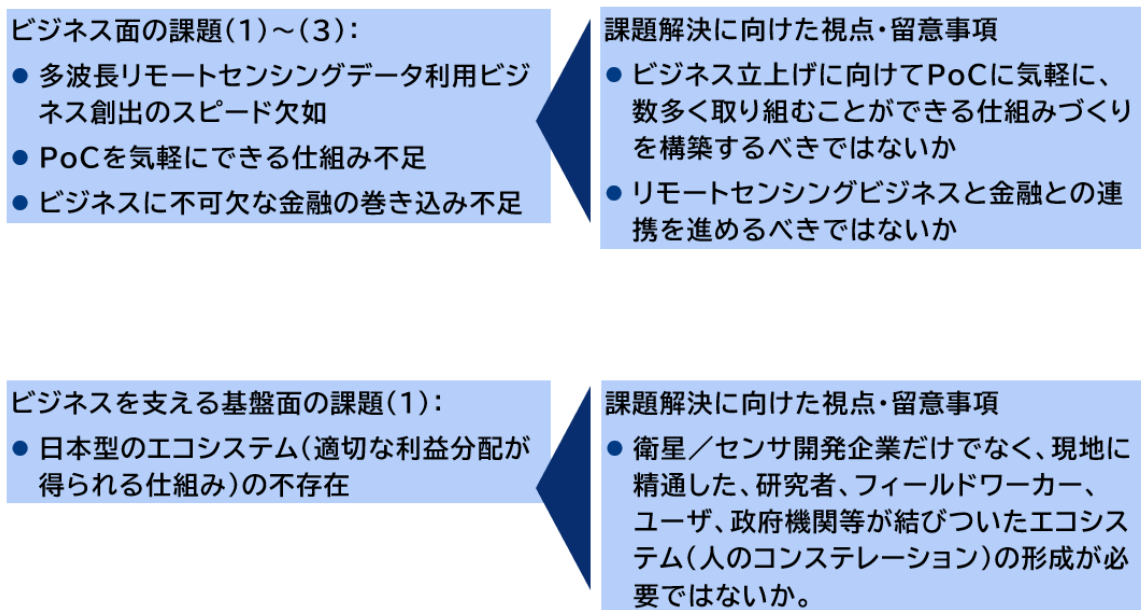


図 2-30 課題解決に向けた視点・留意事項(1)

出所)三菱総合研究所作成

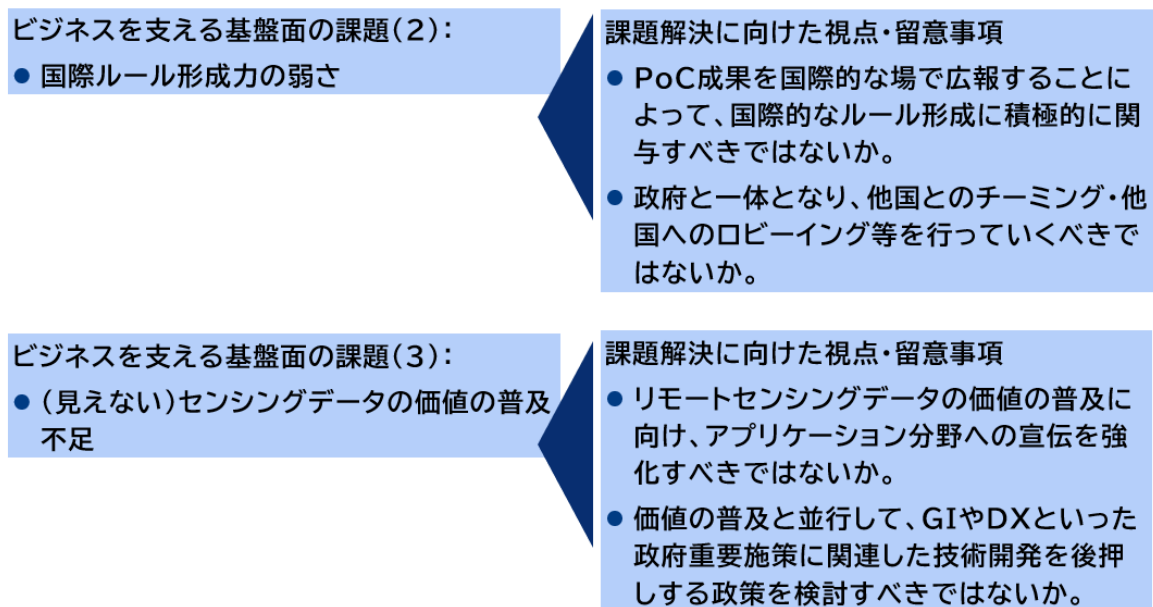


図 2-31 課題解決に向けた視点・留意事項(2)

出所)三菱総合研究所作成

2.4 今後の方向性

2.3 で述べた6つの課題および解決に向けた視点・留意事項を踏まえて解決策を検討し、4つの施策案としてとりまとめた。4つの施策は各課題に個別に対応するのではなく、パッケージとして実施することで包括的に課題の解決につながることを目指したものである。検討した施策の全体像と各課題との対応関係を図 2-32 に示す。

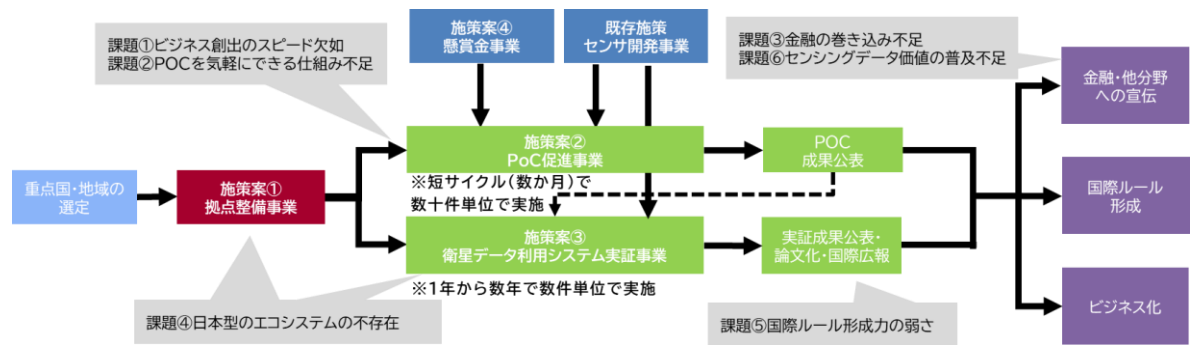


図 2-32 4つの施策案と課題との関係図

出所)経済産業省作成

また、各施策の概要は以下のとおりである。①-③の事業で海外市場を狙いつつ、並行して④の事業でアイデアの掘り起こしを行う想定である。また、「経済安全保障重要技術育成プログラム(K Program)」の一環として支援予定の「高感度小型多波長赤外線センサ技術の開発」とも連携することを想定する。

- 施策案①:拠点整備事業
日本企業の海外における事業展開をサポートするため、現地に精通した人材・組織のコミュニティ化及び支援体制の構築を図る。
- 施策案②:PoC 促進事業
ビジネスモデル等の簡易な審査により、必要な新規撮像やアーカイブの商用衛星データ、現地データ等を取得・提供し、短サイクルで PoC を回す。
- 施策案③:衛星データ利用システム実証事業
必要な商用衛星データの提供、地上システムの開発等に加えて、実証成果を普及させるための現地コミュニティ形成を支援する。
- 施策案④:懸賞金事業
炭素中立型社会、グリーン、GX など新たなテーマを設定し、アイデアの掘り起こしを行う。

施策案①から③は、国土の狭い日本よりも相対的に衛星データ利用ポテンシャルや市場性の高い重点国・地域を見定め、当該国・地域において、集中的に衛星データ利用システムの実証事業を行い、海外ビジネスにつなげることを目指した施策である。

施策案①では、政府方針や企業からのニーズに基づき、実証国・地域候補を特定し、当該候補地域でのビジネスを目指す企業団を公募する。企業団からの提案について評価し、企業団の採択をもって実証国・地域を決定する。そして、当該国・地域に、現地ニーズの把握、現地政府機関等との会議、現地に精通した人材の確保といったタスクを担う現地事務局を設置し、現地政府機関・研究機関・民間企業へのアプローチルートの確立や現地に精通した人材・組織のコミュニティ化を図る。本施策により、個社単位では難しかった現地とのコネクション構築、ニーズ把握、顧客・販路開拓、などが可能となることが期待され、オールジャパンによる継続的かつ総合的な取組みにつなげることを目指す。

一方、施策②、③では、現地のニーズを踏まえた様々なテーマにおける実証の実施を想定する。実証にあたっては、データ利用ビジネス事業者だけでなく、航空機・ドローン事業者によるデータ取得や国内

衛星事業者によるデータ・撮像権の提供、Tellus 等のデータプラットフォームからの幅広い種類のデータや開発環境の提供、そして現地地上データの取得支援等を行い、スムーズな実証が行えるように環境を整える。実証にあたっては、施策①の現地事務局により、現地作業についての許認可取得や成果の宣伝等の支援を行う。特にビジネス化の確度が上がっていない段階でこれらを企業単体で対応することは相当な負担があり、海外ビジネス展開へのハードルとなっていた。本施策パッケージによりこのハードルを下げ、関連ビジネスが活性化されることが期待される。

一方、PoC 実施の前段階として、リモートセンシングデータの活用について様々なアイデアを保有する企業・機関・個人を呼び込み、コミュニティを拡大することも重要である。施策④はそのための手段としてアワード型の支援である懸賞金制度を用いる案である。懸賞金制度は XPRIZE などが有名であるが、米国の政府機関である DARPA や DOE 等も活用している施策である。研究開発事業の参加主体のコミットメントを高め、野心的な取組みを引き出す効果があるとされており、そのための仕組みとして、プロセス(コスト)ではなく成果(価値)に対して報酬／インセンティブを支払う仕組みとなっている。代表的な懸賞金やインセンティブを与える制度の例を図 2-33 に示す。

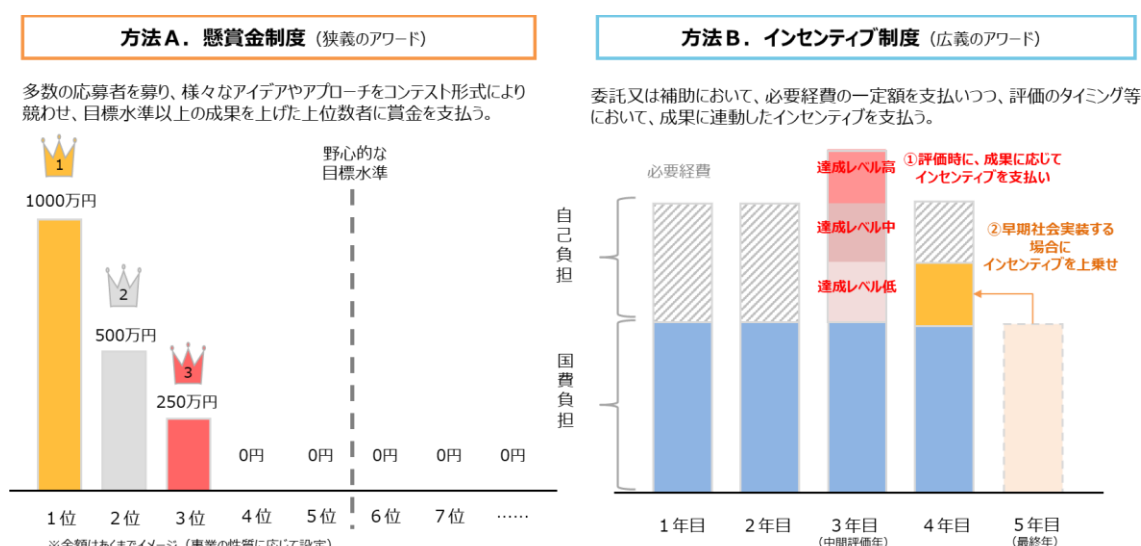


図 2-33 代表的な懸賞金やインセンティブ制度

出所)経済産業省作成

衛星データを使ったビジネスは黎明期であるため、様々なアイデアを試し、その中から優れた事例を生み出す必要がある。懸賞金制度はこうした目的に向いており、多波長リモートセンシングデータビジネスの活性化に向けたアイデアの掘り起こし策として適していると考えられる。具体的な実施方法としては、衛星データプラットフォーム「Tellus」上に搭載された衛星データや多様な地理空間情報を組み合わせ、設定されたテーマ(例えば、炭素中立型社会・グリーン・GX 等)につながる事業を目指すアイデア及びシステムを広く募り、優れた法人・個人・グループに対して懸賞金を付与する形態が想定される。「Tellus」を活用することで開発環境や衛星・地上データの利用が可能であり、参加者の負担を限定的とすることができるとともに、受賞したアイデアを用いたソリューションはマーケット機能を活用することでスムーズなビジネス展開も可能となる。懸賞金事業のイメージを図 2-34 に示す。また、宇宙業界の人間だけでなく、海外ビジネスや環境分野に精通した人物にも審査員に含める必要があると考えられる。

なお、衛星データを活用に関する懸賞金事業としては、昨年度に NEDO Supply Chain Data Challenge が実施されている。この Challenge では、衛星画像データと多様な情報を組み合わせてサプライチェーンマネジメントを高度化し、事業化を目指すアイデア及びシステムを広く募り、優れた法人・個人・グループに対して懸賞金を付与したものであり、NEDO 初の懸賞金制度適用事例であった。海外 22 件を含む、計 84 件の提案があり、20件が最終審査会へ参加するという結果であった。

【事業スキーム（イメージ）】

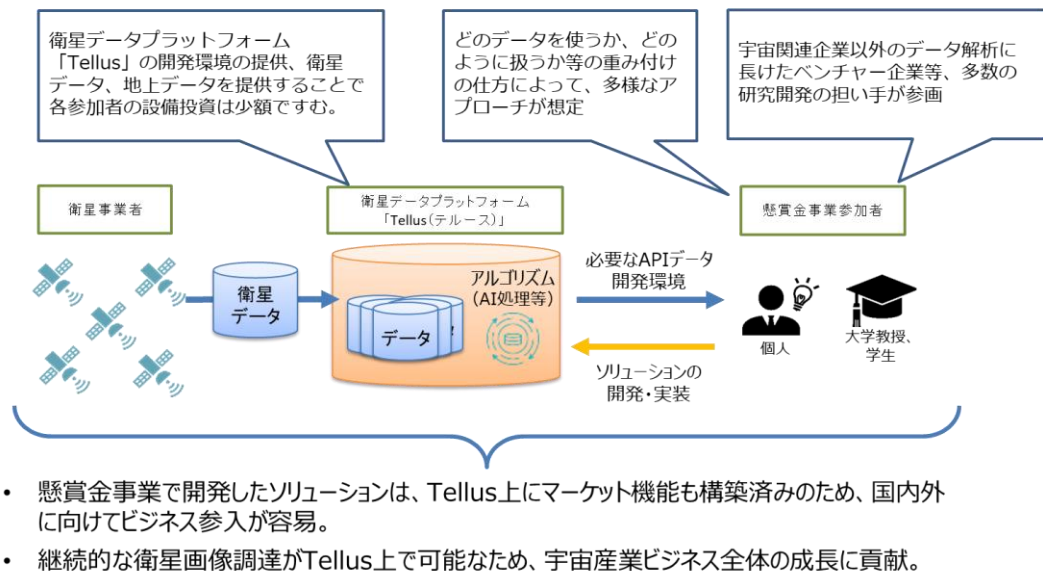


図 2-34 懸賞金事業のイメージ

出所)経済産業省作成

2.5 赤外域を含む多波長センサに関する調査・検討まとめ

衛星の小型化やコンステレーションの一般化に伴い、リモートセンシングデータビジネスは変革期を迎えている。我が国は、ASTER、HISUI といったプロジェクトを通じて多波長センサに強みを持っているが、ハードの強さを活かしたデータ利用ビジネスのエコシステムが構築出来ていない、ビジネス実証のスピードが諸外国と比較して遅い、リモートセンシングの活用に関する国際ルール形成への取組みが十分ではないといった課題も顕在化している。

解像度、頻度だけでなく波長情報も取得可能なことはリモートセンシングデータの特徴であるが、世界的にも波長方向の情報を詳細に取得する多波長センサの活用が進みは始めている。また、民間企業によるコンステレーションの整備や GHG 観測のような新たなアプリケーションの開発も行われている。

世界的に多波長センサを搭載した衛星打上げ数は未だ限定的であるが、今後、数年の後に一気に増加すると見込まれている。また、米国および欧州では政府主体で大型の多波長センサ開発を実施し、民間企業と相互補完体制を構築しつつある。

このような状況を踏まえ、多波長リモートセンシングビジネスの活性化に向けた課題を 6 つに整理するとともに、課題解決のために海外市場とアイデアの掘り起こしを狙う4つの施策を検討した。

本節の内容を踏まえ、多波長リモートセンシングビジネスに活性化につながる施策が進められ、我が国の宇宙産業の発展につながっていくことを期待する。

3. 宇宙太陽光発電・無線給電技術に関する調査・検討

近年の各国の宇宙太陽光発電関連研究について、技術的および経済的な評価指標として用いている要素技術項目、数値、技術・経済性分析、シナリオ、前提条件等について調査した。また、宇宙太陽光発電および無線給電技術の重要要素技術のうち、発電・送電・受電技術を対象として必要となる要素技術開発項目の達成状況、将来に向けた課題と開発の見通しを整理するとともに、スピニン／スピアウトの可能性の検討を行った。

加えて、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みの方向性について検討した。

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または FS(Feasibility Study)について調査を行った結果を述べる。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する。

なお、宇宙太陽光発電システムについては、研究実施機関ごとにシステムの呼称が異なっている。ここ数年は多くの機関で SBSP(Space-Based Solar Power)の略称が用いられている傾向もあるが、本報告書では過去の例に従い、一般的な宇宙太陽光発電システムを指す場合は SSPS(Space Solar Power Systems)という略称を用いることとする。ただし、実施機関において特定のモデルや実証システム等で固有の呼称を用いている場合は、そちらに準じる場合もある。

3.1.1 米国

(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)と 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」が相次いで実施されたが、2003 年頃からは明確な SSPS 関連予算の拠出は見られず⁵、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。

2022 年 5 月に開催された全米宇宙協会(NSS:National Space Society)の国際宇宙開発会議(ISDC:International Space Development Conference)において、NASA の技術・政策・戦略室(NASA's Office of Technology, Policy and Strategy)の政策アナリストである Nikolai Joseph 氏が、NASA は SBSP(space-based solar power)の見通しを評価する短期

⁵ 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。

研究を始めている、と述べた⁶。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コンセプトを再検討するという方針であり、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となっている。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、この研究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。

なお、本研究の目標は、この研究を終えて、9 月にパリで開催される IAC (International Astronautical Congress) で発表することだとの発言もあったが、実際の 9 月の IAC では NASA の発表は行われなかった。

(2) 米海軍研究所(NRL)の X-37B 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)が担っている。

2007 年 10 月、国家宇宙安全保障局(NSSO:National Security Space Office)が SBSP (Space-Based Solar Power) 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マイクロ波送電モジュールの要素試作試験等を実施してきている。

2020 年 5 月に、NRL は PRAM-FX (Photovoltaic Radio-frequency Antenna Module Flight Experiment) (図 3-1) 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)に搭載して打ち上げ、軌道上実証試験を実施し、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ったため、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⁷。

この他、NRL では 2020 年 2 月に、非常に小規模であるが、ISS 内においてレクテナ装置の実演デモを実施した。宇宙飛行士である Jessica Meir 氏が NRL の「LEctennaTM」(発光型整流アンテナ)を使用して、家庭用ネットワークと同様の無線ネットワーク信号を電力に変換する様子を実演した。

⁶ <https://spacenews.com/nasa-to-reexamine-space-based-solar-power/> (2022 年 9 月 8 日閲覧)

⁷ <https://www.spaceforce.mil/News/Article/3217077/x-37b-orbital-test-vehicle-concludes-sixth-successful-mission/> (2022 年 12 月 9 日閲覧)

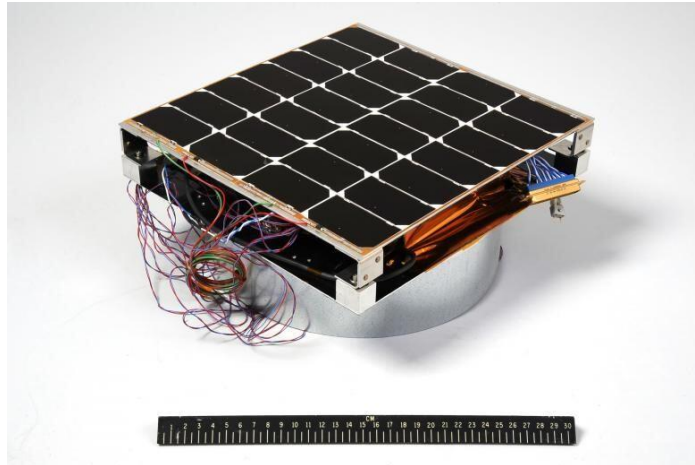


図 3-1 NRL の PRAM-FX 装置

出所) <https://www.cbc.ca/radio/quirks/a-secret-military-space-plane-is-carrying-an-experiment-to-harvest-power-from-space-1.5590837> (2022 年 2 月 2 日閲覧)

(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クス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している。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 3-2 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も成功している。

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いるが、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るところとなっている。



図 3-2 軌道上での Arachne の実験イメージ (Credit : AFRL)

出所) <https://afresearchlab.com/technology/arachne/> (2023 年 1 月 16 日閲覧)

(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 社と 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。当初は、SSPD は VIGORIDE 軌道上サービス機 (Momentum 社製) に結合され、2021 年 12 月に打ち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 月に Falcon 9 による打上げ (Transporter-6) で軌道に投入された⁸。

SSPD 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約 50kg の実証機である(図 3-3 参照)。VIGORIDE に結合され、所定の軌道まで輸送された後、打上げ後の数週間以内に実証実験が開始される予定となっている。3 つの構成要素の概要を以下に示す。

<SSPD の 3 つの主要な構成要素>

- DOLCE (Deployable on-Orbit ultraLight Composite Experiment): 6 フィート×6 フィート (1.83m×1.83m) 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。

⁸ <https://www.caltech.edu/about/news/caltech-to-launch-space-solar-power-technology-demo-into-orbit-in-january> (2023 年 1 月 16 日閲覧)

- 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。

その他、SSPDの第4の構成要素としては、VIGORIDEのコンピュータとのインターフェースとして機能し、3つの実験を制御する電子機器が挙げられる。

SSPDはCaltechのSpace Solar Power Projectにより開発および実証が行われている。SSPDの主要な3つの構成要素は、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。

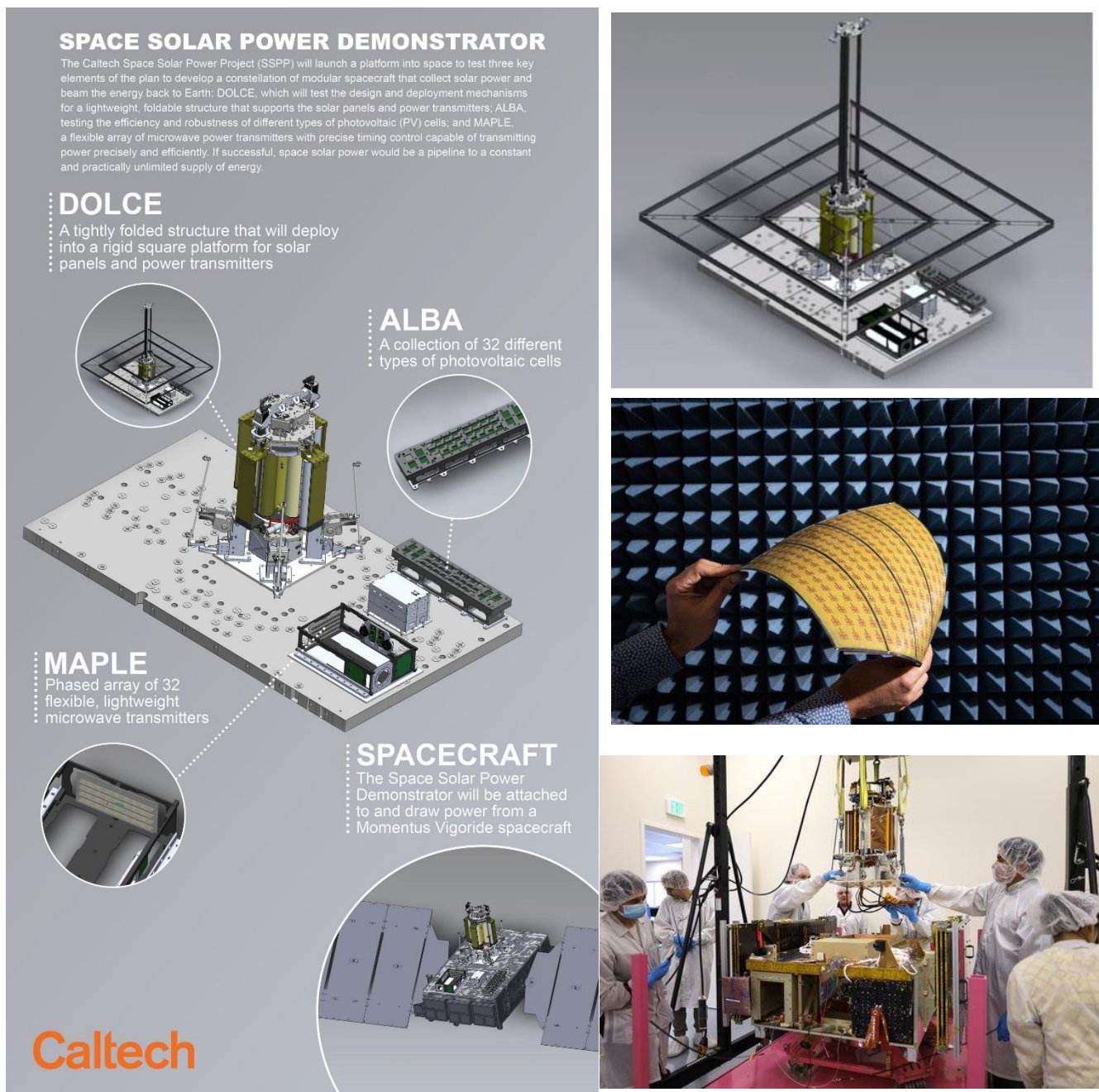


図 3-3 SSPD 実証機と構成要素(左)／DOLCE の展開実験イメージ(右上)／MAPLE のマイクロ波送電アレイのアンテナシート(右中央)／SSPD を VIGORIDE に結合する様子(右下) (Credit : Caltech)

出所) <https://www.caltech.edu/about/news/caltech-to-launch-space-solar-power-technology-demo-into-orbit-in-january> (2023 年 1 月 16 日閲覧)

3.1.2 欧州

近年では、SpaceX 社の Starship のような巨大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がでてきたことと、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を引き起こしている。

(1) ESA の 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 氏を中心として欧州版 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、その後は政府関係の予算がつくような 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、2020 年 9 月に ESA は 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ィア・コンセプト募集のオンライン・キャンペーンを開始した(0(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ている。

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(space-based solar power)は欧州のカーボンニュートラル⁹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¹⁰において各国に資金提供を要請すると発表した¹¹。

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 億ユーロ増額することが決定されている。このうち 2 億 4400 万ユーロは、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決定されておらず、12 月初旬にメンバで議論する予定

⁹ 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。

¹⁰ 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。

¹¹ 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/> (2022 年 10 月 5 日閲覧)

となっている¹²。

SOLARIS プロジェクトの背景には、2022 年 2 月～7 月に行った ESA から並行して発注された¹³ 2 つの独立した費用便益分析研究(受託者は 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。レポートの内容については後述する。

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予定である。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 SOLARIS の結果を受けて、2025 年に決定する予定となっている。(図 3-4 参照)

なお、ESA が2022年8月16日に公開した SOLARIS の YouTube¹⁴(図 3-5 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開発領域を中心に引き上げ、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予定である。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、とされている¹⁵。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¹⁶。

以下に SOLARIS の具体的な目的を示す。

<SOLARIS の目的>

1. 2050 年までの欧州のネットゼロ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。

¹² <https://buildindigital.com/space-based-solar-farms-could-power-up-within-a-decade/> (2022 年 12 月 14 日閲覧)

¹³ https://www.esa.int/Enabling_Support/Preparing_for_the_Future/Discovery_and_Preparation/ESA_reignites_space-based_solar_power_research (2022 年 12 月 14 日閲覧)

¹⁴ https://www.esa.int/Enabling_Support/Space_Engineering_Technology/SOLARIS/SOLARIS2 (2022 年 8 月 16 日閲覧)

¹⁵ <https://twitter.com/AschbacherJosef/status/1561730075938246658> (2022 年 12 月 14 日閲覧)

¹⁶ <https://spacewatch.global/2022/08/solaris-a-step-toward-making-space-based-solar-power-a-european-reality/> (2022 年 12 月 14 日閲覧)

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、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た(本 RFI の締め切りは 2022 年 9 月であった)。なお、RFI 発出と同時に SOLARIS で想定されている活動についても示された。(図 3-6 参照)

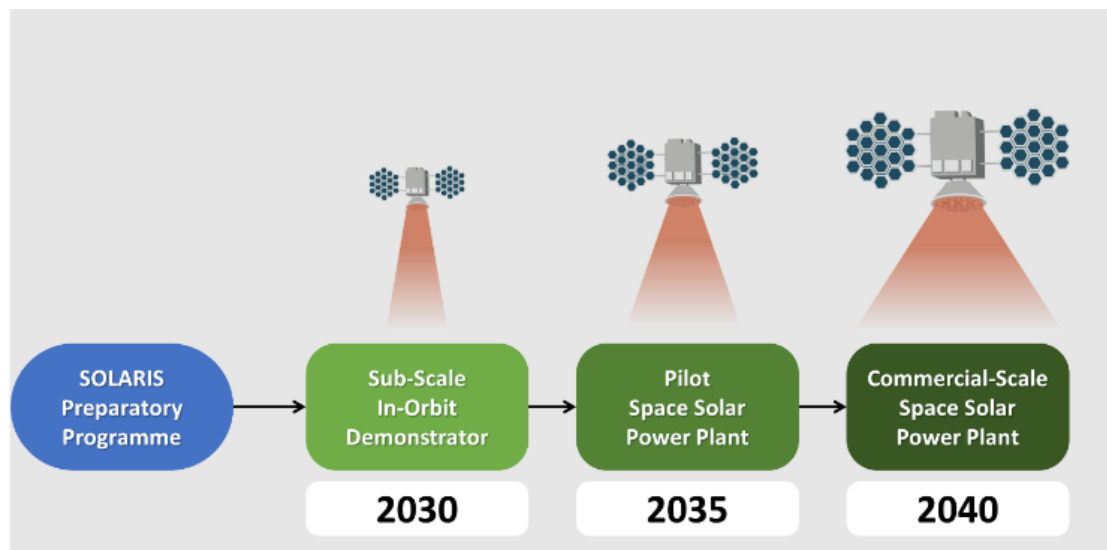


図 3-4 欧州 SBSP の想定ロードマップ

出所)“SOLARIS Activity Plan 2023-2025”, ESA

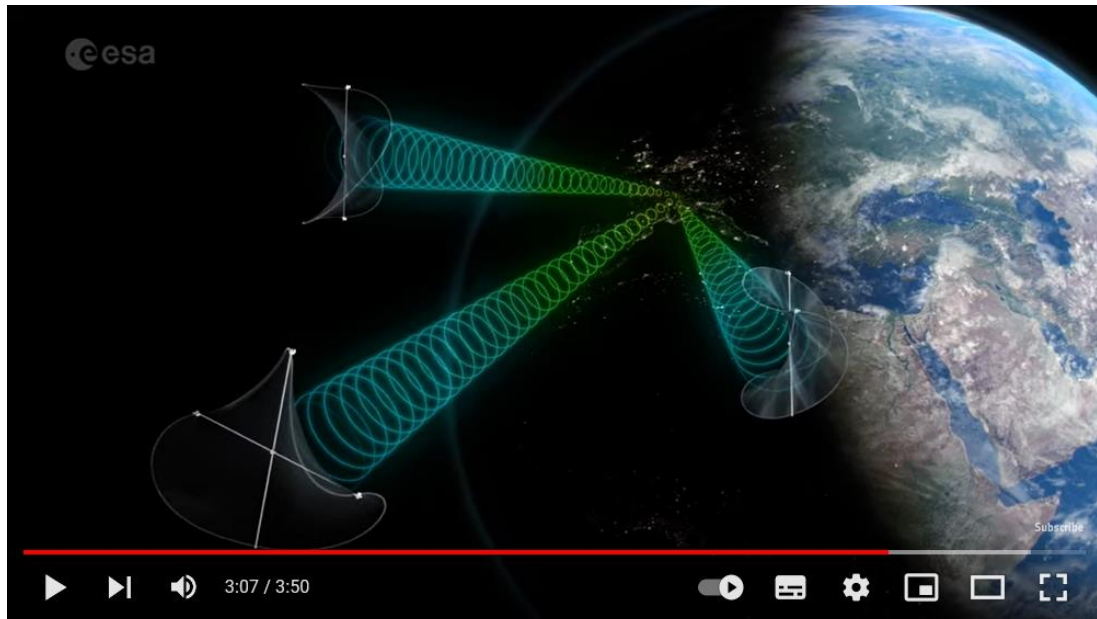


図 3-5 ESA SOLARIS の YouTube 紹介ページ (Credit : ESA)

出所) <https://www.youtube.com/watch?v=8ScTbb-43A4> (2022 年 10 月 5 日閲覧)

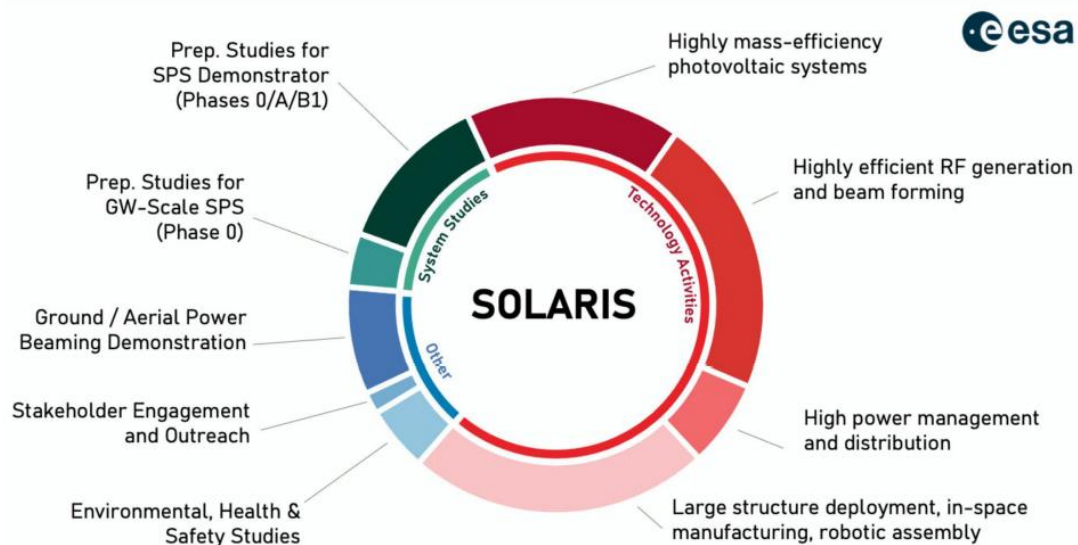


図 3-6 SOLARIS プログラムで想定されている活動

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

2) SOLARIS Industry Day の開催

2022 年 10 月 18 日、ESA は SOLARIS のために“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 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の紹介、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、

150 名以上が参加した¹⁷。ESA のプレゼンテーション“Space-Based Solar Power Technology Challenges and Development Needs”の中では、以下に示す SOLARIS の具体的な技術課題と図 3-7 に示す技術開発目標が示された。

<SOLARIS 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

¹⁷ https://www.esa.int/Enabling_Support/Space_Engineering_Technology/SOLARIS/Presentations_from_SOLARIS_Industry_Day (2022 年 12 月 14 日閲覧)

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 3-7 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 月には“SOLARIS Activity Plan 2023-2025”が公表された¹⁸。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 3-8 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。

¹⁸ https://www.esa.int/Enabling_Support/Space_Engineering_Technology/SOLARIS/SOLARIS_activity_plan (2023 年 1 月 19 日閲覧)

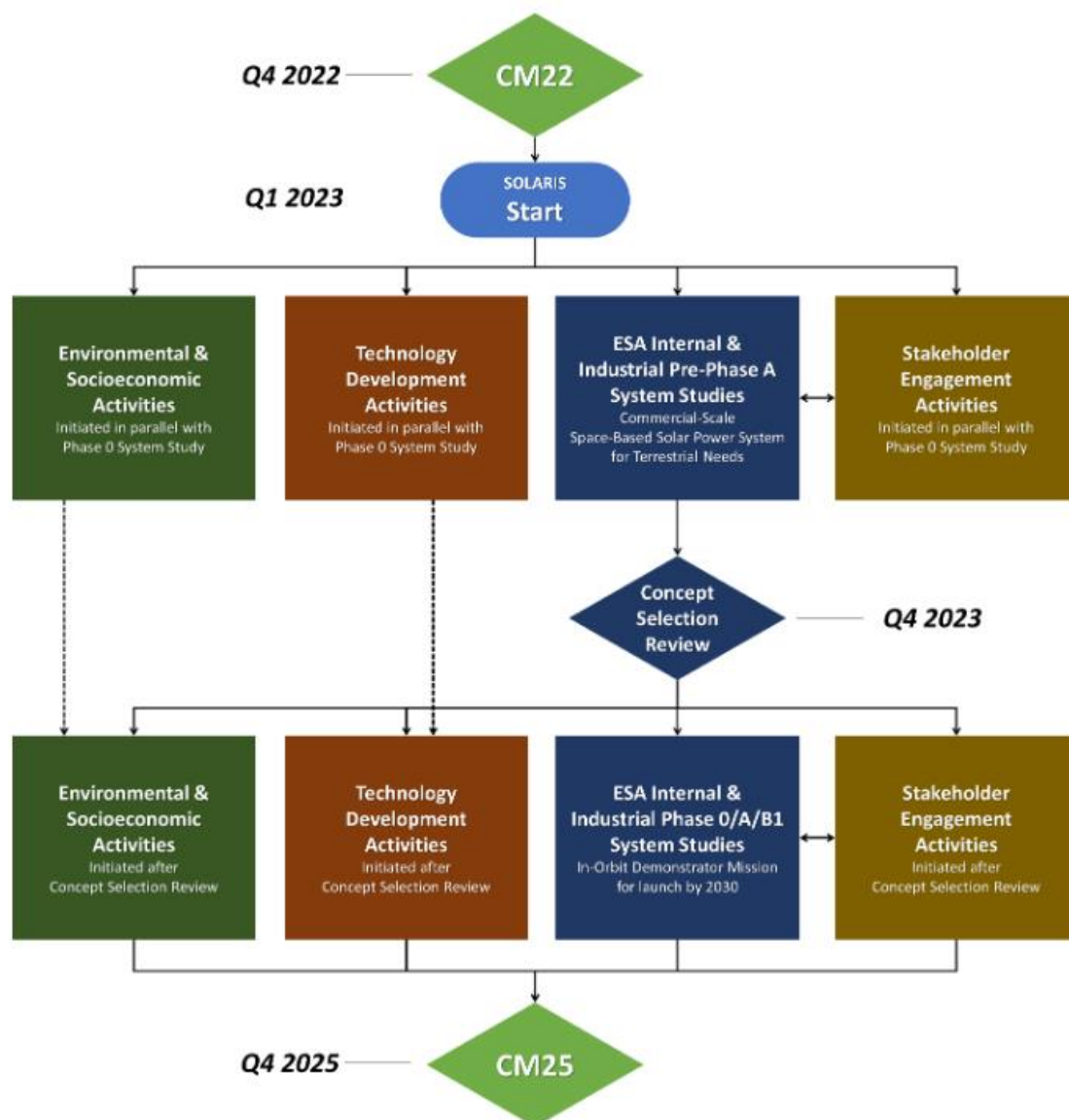


図 3-8 2023-2025 年の間に提案されている活動内容

出所)“SOLARIS Activity Plan 2023-2025”, ESA

(2) ESA の OSIP 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¹⁹。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

¹⁹ <https://ideas.esa.int/servlet/hype/IMT?documentTableId=45087127246233263&userAction=Browse&templateName=&documentId=514a8db636ea637f6e27069183966350> (2023 年 1 月 19 日閲覧)

- ・ アイディアの技術的・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ィア(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 3-9 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²⁰。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)
- 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 (Photoncity)
- 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)

²⁰ https://www.esa.int/Enabling_Support/Preparing_for_the_Future/Discovery_and_Preparation/The_Discovery_Campaign_on_Solar_Power_from_Space (2023 年 1 月 19 日閲覧)

⑬. Solar Array to High Voltage Power Bus: Power Conversion Techniques (University of Elche)

上記の⑧に参画しているスイスの 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”が開催された²¹。

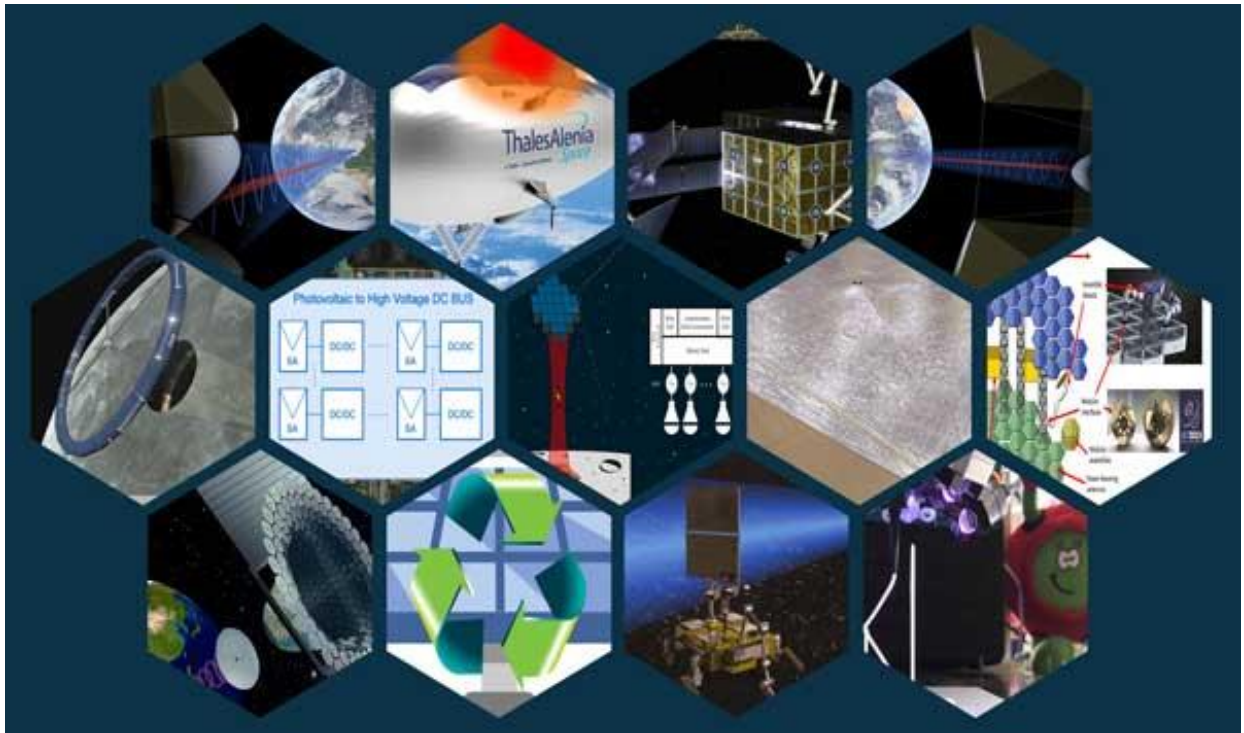


図 3-9 資金提供が決定した 13 のプロジェクト(Credit:ESA)

出所)<https://parabolicarc.com/2022/01/10/esa-reignites-space-based-solar-power-research/> (2023 年 1 月 19 日閲覧)

3.1.3 英国

(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つのコンセプトの調査、2) 脱炭素経済に向けて SBSP

²¹ <https://swissnex.org/news/a-japanese%E2%80%92swiss-workshop-to-shape-the-future-of-clean-energy-from-space> (2022 年 12 月 17 日閲覧)

の実用化と低価格化の実現性の評価、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 SSPS が果たす役割の明確化、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、等が示されている。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。

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 3-10 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 を設立することを目指す、としている。英国が描いている SBSP の開発計画を図 3-11 に示す。

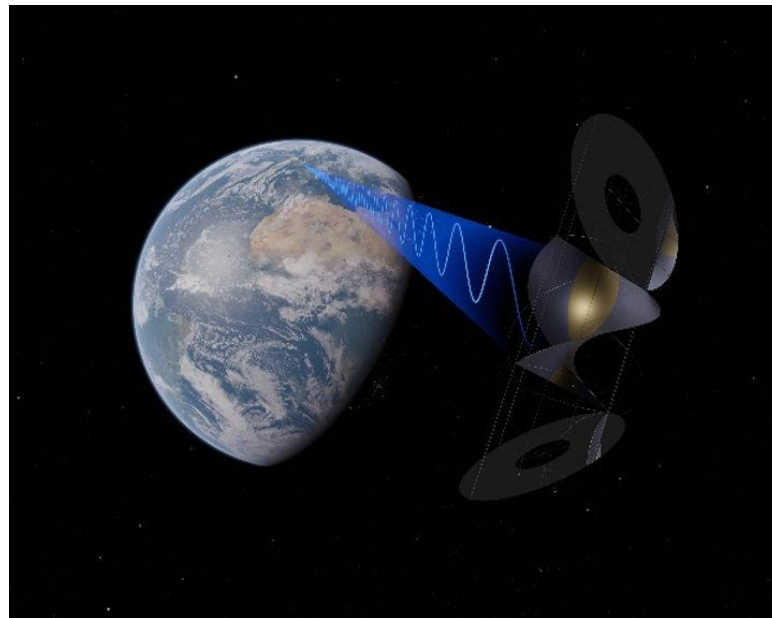


図 3-10 英国の SBSP システム案「CASSIOPeiA」(Credit:Space Energy Initiative)
出所)<https://www.internationalelectric.com/> (2023 年 1 月 19 日閲覧)

Costed Development Plan

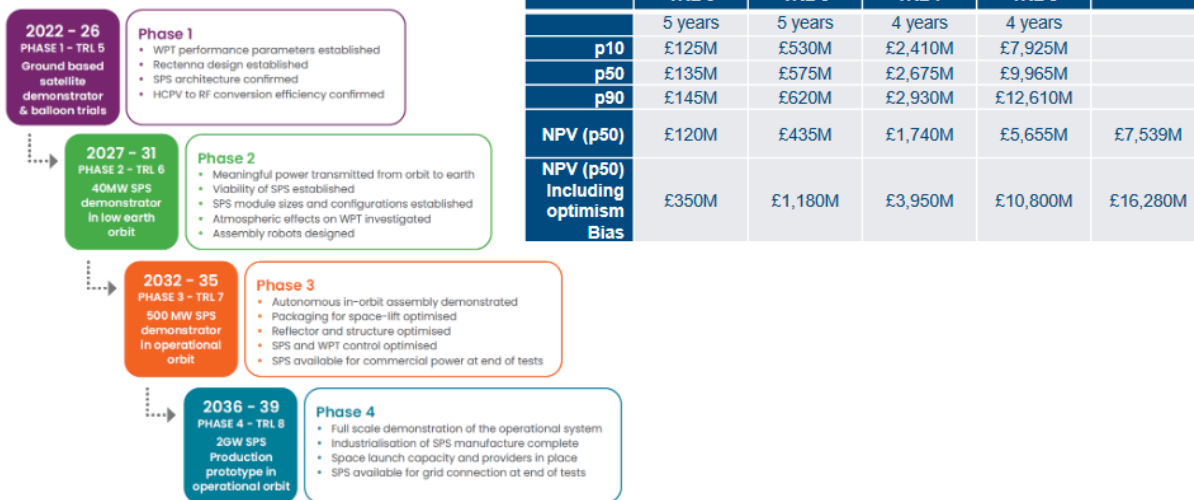


図 3-11 英国の SBSP 開発計画 (Credit:BEIS)

出所) "Space Based Solar Power (SBSP) Innovation Programme", Stakeholder Engagement, BEIS

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 月に、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²²。

同コンペティションは、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ィ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 と英国宇宙庁(UKSA)の共同出資により行われている。募集期間は 2022 年 9 月 27 日までであり、プロジェクトのキックオフは 2022 年 12 月からとなっている。

(2) Space Energy Initiative(SEI)

上記の Frazer-Nash Consultancy の検討結果を受けて、2021 年 8 月に、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

²² <https://www.gov.uk/government/publications/space-based-solar-power-innovation-competition> (2023 年 1 月 25 日閲覧)

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 3-12 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

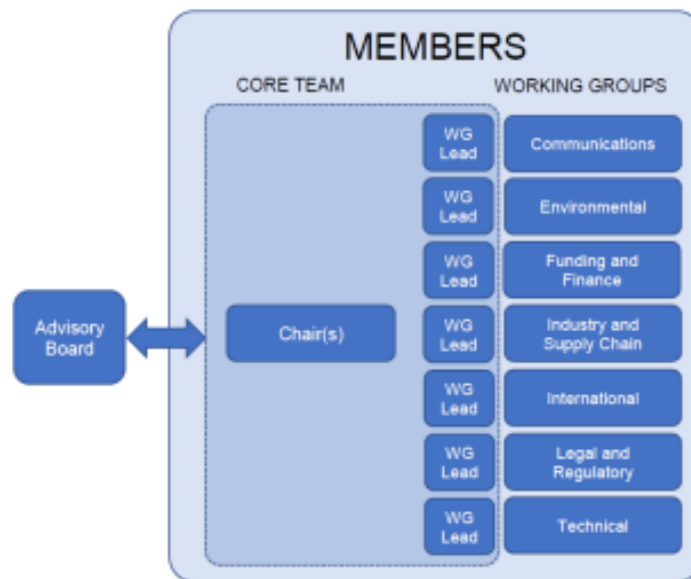


図 3-13 SEI の組織構造

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,

(3) 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、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²³。プロジェクトの予算総額は62 万ポンドであり、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 つの作業を完了することとなっている。

- 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。

(4) 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 月に、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²⁴。サウジアラビアのタブーク州に建設中の新都市 NEOM

²³ <https://sa.catapult.org.uk/news/uk-space-based-solar-power-project-secures-government-funding/> (2023 年 1 月 23 日閲覧)

²⁴ 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 Space Solar Ltd²⁵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²⁶。

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²⁷。その一環として、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

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。2015 年には、2050 年までの長期ロードマップを示し、同ロードマップにおいて 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。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(高度 400km の軌道上で 10kW 級の規模の実証)で、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²⁸。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。さらに 2035 年には、マイクロ波送信アンテナを約 100m に大型化し、さらに 10MW の発電を行う予定となっている。(図 3-14、表 3-1 参照)

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。一方、後述する西安電子科技大学は SSPS-OMEGA と呼ぶ方式の異なるシステムを提案している(図 3-15 参照)。

そ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

²⁵ 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して設立された。Space Energy Initiative のメンバにより構成されている。

²⁶ <https://www.gov.uk/government/news/business-secretary-in-talks-with-saudi-arabia-to-advance-commercial-collaboration-in-uk-space-based-solar> (2023 年 1 月 20 日閲覧)

²⁷ <https://www.wri.org/news/statement-chinas-14th-five-year-plan-sets-foundation-climate-action-important-details-are> (2023 年 1 月 20 日閲覧)

²⁸ ”Retro-directive microwave power beam steering technology of space solar power station,” the journal China Space Science and Technology (June 2, 2022)

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²⁹。

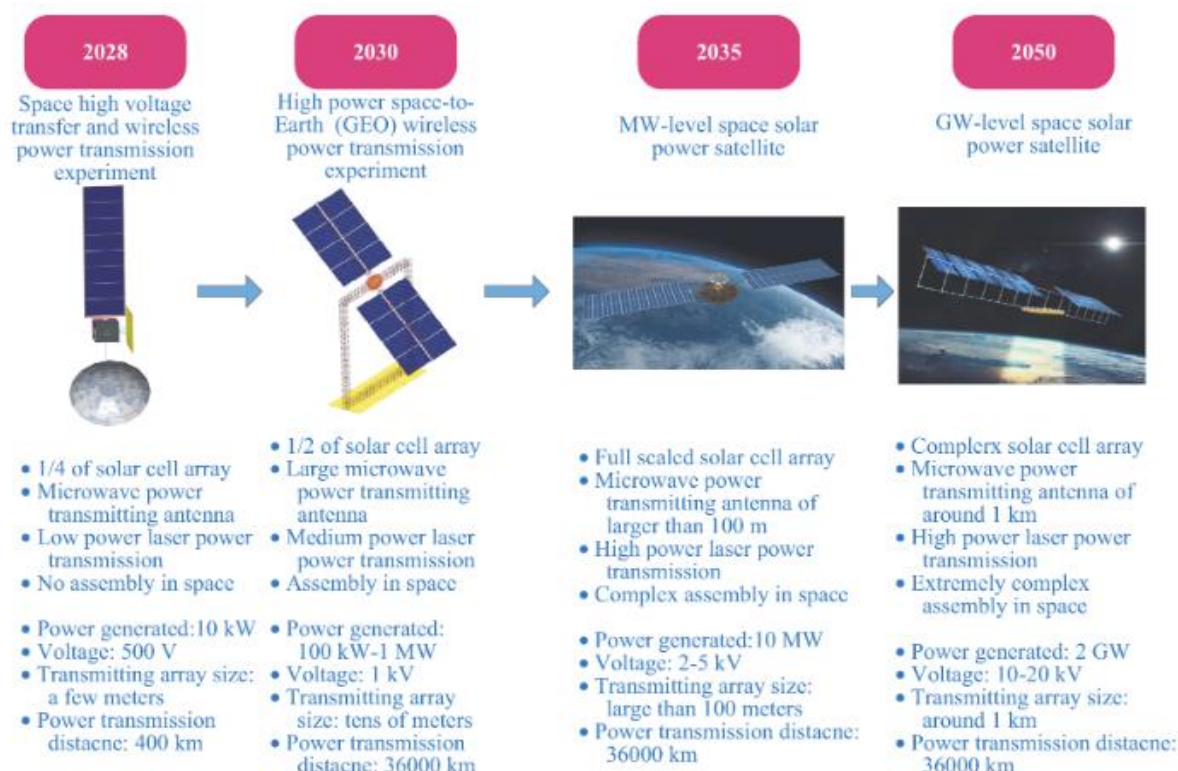


図 3-14 CASTによるSSPSロードマップ

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)

表 3-1 SSPS 開発のフェーズごとのミッション

表 1 各阶段微波能量传输系统参数演进
Table 1 Evaluation of MPT systems of each phases

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

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)

²⁹ <https://spacenews.com/china-to-use-space-station-to-test-space-based-solar-power/> (2022 年 12 月 20 日閲覧)

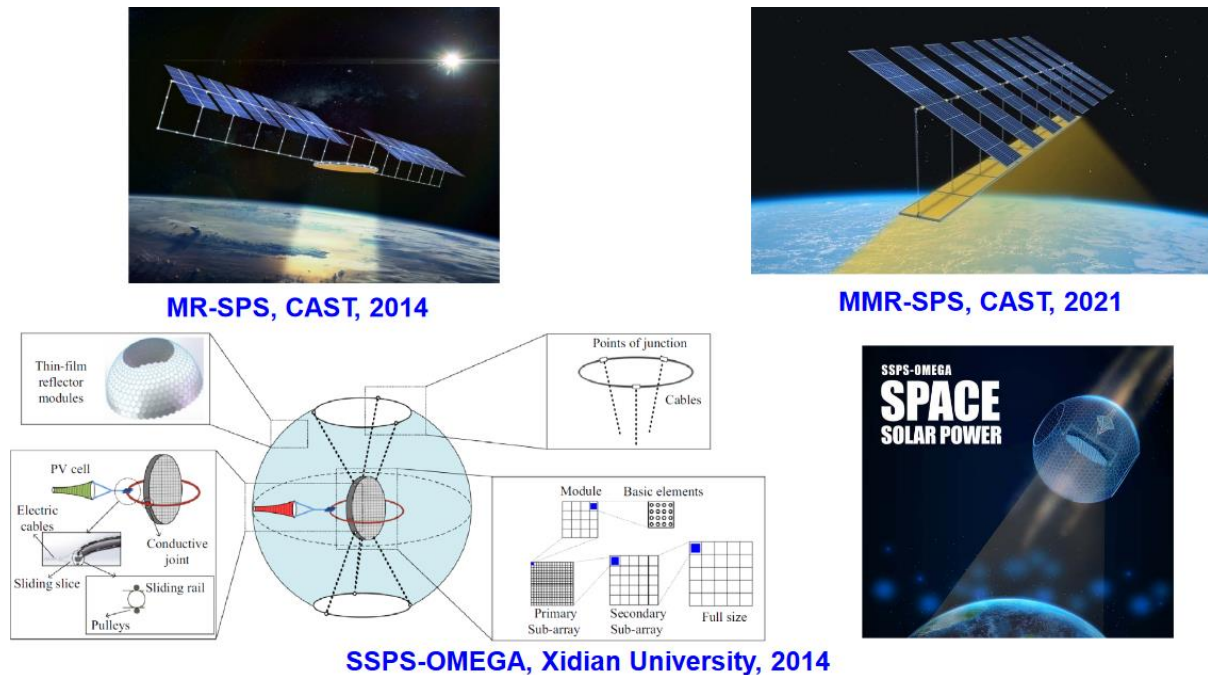


図 3-15 中国が提案する SSPS システムコンセプト

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

(2) 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、現在は再び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ている。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)の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。

2022 年 6 月には、上述の SBSP デモンストレーション・実証実験施設を完成させた³⁰。本施設は世

³⁰ <https://spacenews.com/chinese-university-completes-space-based-solar-power-ground-test-facility/> (2022 年 10 月 7 日閲覧)

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 離れた場所へ送信する。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 3-16 参照)



図 3-16 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> (2022 年 10 月 11 日閲覧)

(4) 中国宇宙航行学会の SSP 委員会の設立

2020 年 9 月に、中国宇宙航行学会 (Chinese Society of Astronautics) が SSP (Space Solar Power) 委員会の設立を承認したことを発表した。2021 年 3 月には、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。本委員会は、SSPS 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 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³¹。

3.1.5 その他

ここまで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り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 についても述べる。

(1) ロシア

2022 年 1 月に、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³²。

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、宇宙船への定時・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³³。

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。

³¹ <http://www.csa.spacechina.com/n2489262/n2489292/c3593576/content.html> (2023 年 1 月 20 日閲覧)

³² <https://www.republicworld.com/science/space/roscomos-pitches-solar-space-power-plant-idea-for-electricity-supply-to-earth-articleshow.html> (2023 年 1 月 23 日閲覧)

³³ <http://www.parabolicarc.com/2022/02/02/russian-space-systems-developing-space-based-solar-power-satellite/> (2023 年 1 月 23 日閲覧)

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 Chairman 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た。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た。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ところとなっている。

(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 で韓国版 SBSP の概念設計結果を発表した。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 機は送電衛星、もう 1 機は受電衛星であるが、地上 WPT モジュールを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³⁴。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。

³⁴ <https://iafastro.directory/iac/paper/id/69960/abstract-pdf/IAC-22,C3,1,5,x69960.brief.pdf> (2022 年 11 月 17 日閲覧)

(4) IAA Permanent Committee on SSP

2021 年 12 月、IAA(International Academy of Astronautics)は、主に SSP (Space Solar Power)に取り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³⁵(主査:Mankins 氏、副主査:田中孝治准教授)。常任委員会は、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。最初の大きな活動として、2022 年 9 月に開催された IAC 2022 において関連ワークショップを開催した。

3.1.6 まとめ

米国、欧州、中国等を対象地域として、近年の SSPS の実現に向けた研究開発や取組みの動向について調査を行った。各国の主な取組みの状況のまとめを以下に示す。

米国では、現在の SSPS 研究開発の主体は米空軍研究所(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、米国はこれ以外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)の開発を行ってきたが、2023 年 1 月に打上げが成功し軌道に投入されている。SSPD は今後 3 つの主要な重要要素技術の軌道上試験を実施予定となっている。AFRL および Caltech とともに Northrop Grumman 社が共同で開発を行っている。なお、これらの米軍の動きと並行して、2022 年には NASA の技術・政策・戦略室(OTPS)による SSPS 再評価の検討が始まっている。

欧州では、ESA が欧州のカーボンニュートラルとエネルギー自給を達成することを目的に、2022 年 12 月に、SOLARIS と呼ばれる欧州向けの 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

³⁵ <https://iaaspace.org/about/permanent-committees/#1658152483135-da4f166b-7716> (2022 年 12 月 14 日閲覧)

ることを重視している。実際に、北欧最大の総合エネルギー企業である Equinor 社(本社ノルウェー)³⁶ が SOLRAIS Industry Day で発表を行うなど、同プログラムとの関与を深めている例もみられる。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強く主張している。

英国では、2050 年までに CO2 排出量の 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し、2020 年より UKS A 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 CO2 排出量の 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(自身の予算も併せ、プロジェクトの総額は 62 万ポンド)。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。

中国における SSPS 研究は 2010 年より以前から 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 への取り組み活動は、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。ロードマップでは 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。

表 3-2 に日本を含む各国のロードマップの比較を示す。

³⁶ 石油・ガス事業を幅広く展開しているが、同事業に関わる既存のバリューチェーンの脱炭素化に向けた、CO2 の回収・利用・貯留や水素などの事業機会を開拓し、再生可能エネルギーと石油・ガスとのバリューチェーン間の相乗効果を創出を試みている。2050 年までに実質的な CO2 排出フリーを達成して気候変動(温暖化)に影響を及ぼさない企業になることを目指している。

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 重要要素技術の現状と今後の見通し

3.2.1 ESA による費用便益調査分析

0(1)項で示したように、2022年2月～8月にESAから2つの独立した費用便益調査分析に関する研究が発注された。発注先はFrazer-Nash Consultancy社およびRoland Berger社である。本調査の目的は、欧州が増大する将来のエネルギー需要に対応しつつ、2050年までの温室効果ガス排出 Net Zero の目標を達成するために、環境的に持続可能で安価なエネルギー源が必要となるが、SBSP がその解となる得るために必要な技術とプログラムの情報をESAとそのメンバ国に提供すること、である。

以下では、それぞれのレポートの内容およびレポートの中で示されているSBSPの実現性に大きく関わる要素技術およびそれらの性能に関わる数字等を整理して示す。

<2022年2～8月に行われた、ESAによる2つの費用便益調査分析>

1. Study on Cost-Benefit Analysis of Space-Based Solar Power (SBSP)
Generation for Terrestrial Energy Needs, Frazer-Nash Consultancy / London Economics, August 2022
2. Study on Cost-Benefit Analysis of Space-Based Solar Power (SBSP)
Generation for Terrestrial Energy Needs, Roland Berger / OHB Systems, July 2022

(1) Frazer-Nash Consultancy / London Economics の費用便益分析

1) 概要と構成

本スタディでは、2050年までに温室効果ガス排出 Net Zero の目標を達成するために、SBSPを

欧州のエネルギー・ミックスの一つのエネルギー源に加える際に必要な投資、関連コストとリスク、期待される戦略、環境、経済、社会的利益に関する総合的な評価を行っている。英国の International Electric Company(IECL)が設計した CASSIOPeiA のアーキテクチャを本スタディのリファレンスデザインとして想定し、SBSP のシステム構成ごとに技術成熟度と開発難易度を評価し、遅くとも 2040 年までに運用システムを導入するための課題を抽出している。また、Frazer-Nash によって作成されたコストモデルを用い、運用経費(OPEX)と設備投資(CAPEX)の見積もりを行い、均等化発電原価(LCOE)の値を算出している。表 3-3 に本調査で作成されたテクニカルノートの内容と作成時期を示す。

表 3-3 Frazer-Nash Consultancy 調査で作成されたテクニカルノートの内容と作成時期

Technical Note	内容	作成時期
TN1	Review of previous SBSP studies and identification of limitations and gaps 既存研究の文献レビュー	2022/2
TN2	Methodological approach to be used in Task 3 for the assessment of strategic, economic, environmental, and societal benefits, costs and risks TN3 で実施される費用便益分析への詳細なアプローチ	2021/12
TN3	System Breakdown, Costs and Technical Feasibility 2040 年までに欧州で最初の GW 規模の SBSP を確立するための技術的実現可能性と関連コストの評価	2022/8
TN4	Assessment of strategic, economic, environmental, and societal benefits, costs, and risks 欧州の SBSP の可能性に関する便益、コスト、リスクの評価	2022/8
TN5	Concept for a European SBSP Development Programme 2040 年までに欧州で最初の GW 規模の SBSP を開発するためのロードマップの設定	2022/8

出所)<https://www.fnc.co.uk/media/fi4pvbgv/space-based-solar-power-final-report.pdf> を基に作成

2) リファレンスシステム概要

図 3-17 に本研究のリファレンスシステムとして用いた CASSIOPeiA システムを示す。英国 IECL 社の Ian Cash 氏によって提案され、現在は欧州および英国で検討されている SBSP の代表的なリファレンスシステムとなっている。

静止軌道または楕円軌道で運用される CASSIOPeiA では、ヘリカル太陽電池コレクターと統合した新しい 3 次元フェーズドアレイアンテナを使用している。ヘリカルアレイの軸の両端には太陽指向のミラーが設置され、高集光型太陽電池に太陽光を入射させる。RF、電気、熱、光学部品がすべて基板上に組み込まれており、機械的な要素が不要であるため、システム全体の質量を小さくすることが可能となっている。

システムの中心部は61,000のレイヤーからなる直径2kmのヘリカルアレイである。図3-17にレイヤーの簡略図を示す。CASSIOPeiAのアーキテクチャは、使用する太陽電池の種類を制限するものではないが、ここではフレネル一次光学系とケーラー二次光学系を備えた三接合の高集光型太陽電池の使用を想定している。マイクロ波ビームは、ヘリカルアレイの垂直壁に設置された3対のダイポールアンテナによって生成される。これらのアンテナは2.45GHzで動作し、レクテナから受信したパイロットビームを基準として使用する。地上のレクテナの中心におけるマイクロ波ビームのピーク強度は 245W/m^2 である。地上のグリッドに供給される電力は1.44GWとなる(宇宙で収集する太陽光は8.8GW)。本システムの主要要素の典型的な質量内訳を表3-4に示す。

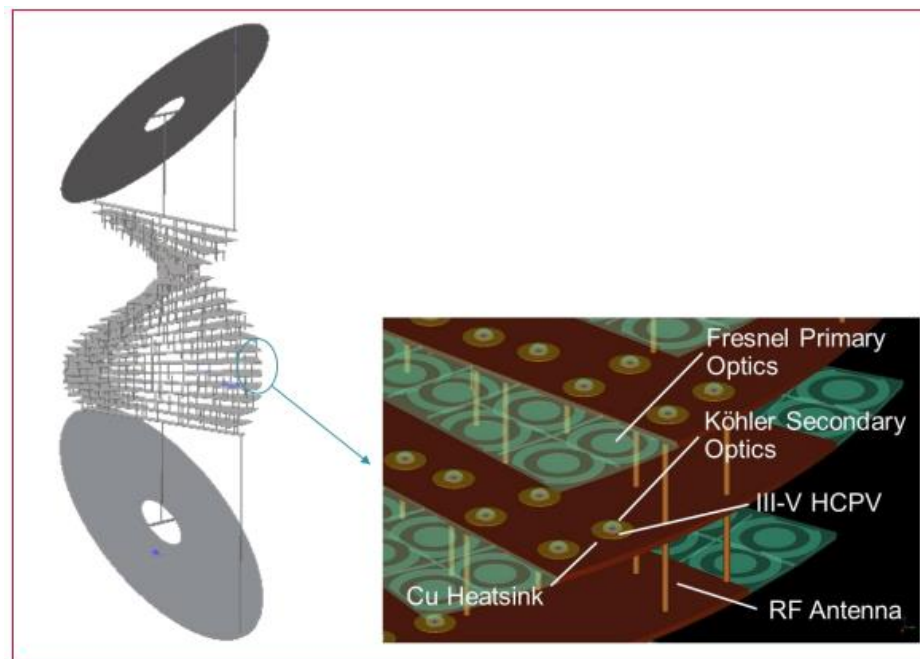


図 3-17 CASSIOPeiA コンセプトのスケルトンスケッチ

出所) 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

表 3-4 1.44GW システムの重量ブレイクダウン

Satellite Sub System	Mass (kg)
PV	1,349,200
Reflector	158,600
Wireless Power Transmission	358,400
Thrusters	2,100
Communications and Control	9,500
Structure	186,400
Total	2,064,200

出所) 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

3) 重要要素技術

SBSP のシステム構成ごとに技術成熟度と開発難易度を評価し、遅くとも 2040 年までに運用システムを導入するための課題を抽出している。技術成熟度については、「ISO 16290:2013 Space systems — Definition of the Technology Readiness Levels (TRLs) and their criteria of assessment」の定義とその評価基準を適用している。開発難易度については 5 段階で評価を行っている。

本費用便益分析レポートでは、システム構成要素を図 3-18 に示すようにブレイクダウンし、各部についてクリティカル技術と開発要素、TRL、開発の難易度を示している。表 3-5～表 3-7 にその内容を示す。

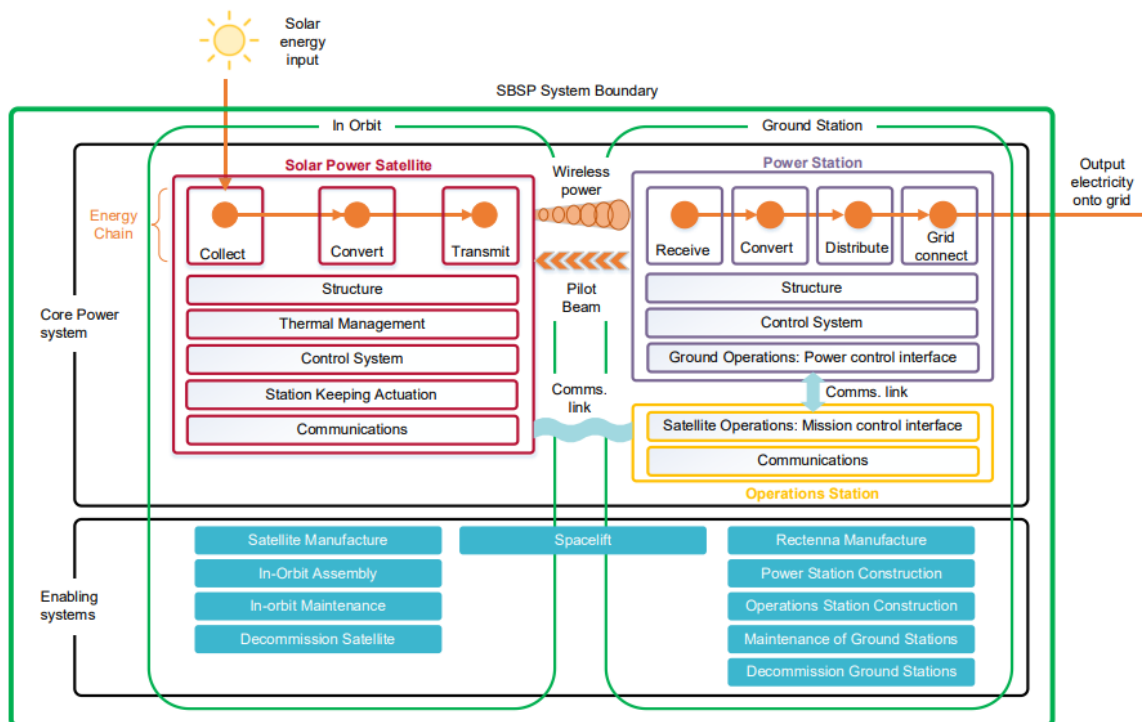


図 3-18 SBSP システムのブレイクダウン

出所) 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

表 3-5 SBSP システムの各要素に関するクリティカル技術と難易度および開発要素(1/3)

サブシステム要素			クリティカル技術	開発要素	TRL	開発の難易度
Core Power Systems						
	Satellite					
		Collect	大面積（kmスケール）軽量ミラーをロケットに搭載し、平面構造体として展開組立てを行う。 James Webb望遠鏡のサンシールドは、現在最大の宇宙構造体：20m×14m	超大型平面構造体の収納・展開・組立 超大型かつフレキシブルな構造体の形状維持に必要な剛性	5	高
		Convert	高効率な宇宙用太陽電池	運用軌道での放射線環境下において最大効率を発揮できるようなPV技術の選択とコンフィグレーションの最適化	2	高
		Transmit（DC-RF変換、ビームフォーミング、RF送電）	フェーズドアレイアンテナによる超長距離伝送とレトロディレクティブビーム制御 これまでの実績では数kmレベル	ワイヤレス電力伝送距離の拡大 （数kmから数万kmへ） 宇宙空間と大気の状態が変化する大気層における伝送 位相コヒーレントビームを生成させるためにアンテナへの位相リファレンスの提供 他のアセットとの干渉を防ぐためのプロトコルの確立	4	非常に高
		Structure	宇宙空間で高い比剛性を有する大型構造物の組立て 軌道上にある他の構造物よりもはるかに大きい構造物の設計規則の確立、質量の最適化	超大型平面構造体の収納・展開・組立 質量を最小にする一方での構造体の剛性要件の定義	3	非常に高
		Thermal Management	排熱と熱過渡現象に対応する熱設計（パッシブ／アクティブ）	衛星の熱設計は理解されているが、システム規模が課題	3	高
		Control System	センサー、処理および制御ロジックシステムの統合 制御システムは、他のサブシステムの超モジュール化の原則に則って各モジュールに分散される。	必要な安定性と性能を実現するためのモジュール間の通信と同期	4	中
		Station Keeping Actuation	軌道に乗せるために必要なデルタVをかけるものとシステムが正しい方向を向くように姿勢制御を行うものの2種類が必要。	大規模な構造体へ適用するための既存技術の拡張 推進剤の質量の最小化	3	高
		Communications	既存の技術に基づくが、重要な国家インフラを保護するために必要なレベルの暗号化が必要	長距離での暗号化キーの提供	6	低

表 3-6 SBSP システムの各要素に関するクリティカル技術と難易度および開発要素(2/3)

サブシステム要素		クリティカル技術	開発要素	TRL	開発の難易度
Ground Station					
	Receive (RF収集、RF/DC変換)	レクテナ全体にわたって収集エネルギーを最大化するレクテナ要素の構成最適化 レクテナ内外での最大許容電力レベルの確認	レトロディレクティブパイロットビームのコンセプト	4	高
	Convert	電気インバータ。 風力発電や太陽光発電施設と同じ技術	電力レベルのスケールアップ	7	低
	Distribute	変圧器、ケーブル。 風力発電や太陽光発電施設と同じ技術	電力レベルのスケールアップ	7	低
	Grid Connection	グリッドインターフェース監視とスイッチング。 従来のグリッド接続技術	特になし	8	非常に低
	Structure	従来の風力タービンの柱や電信柱のような指示構造物	特になし	7	低
	Control System	センサー、処理および制御ロジックシステムの統合 地上の太陽電池ファームと同等。	システムのロバスト性を最大化するトポロジーの最適化	6	中
	Ground Operations: Power Control Interface	地上システム制御インターフェース	特になし	8	低
	Satellite Operation: Mission Control Interface	宇宙システム制御インターフェース。 既存の衛星制御と同様の技術	サイズや規模による影響 電力需要の変動が全体システムのエネルギーチェーンに与える影響	4	高
	Communications	宇宙テレメトリーリンク。 既存の衛星通信と同様の技術。 暗号化パイロットビーム	レトロディレクティブパイロットビームの実行 セキュリティ確保のための暗号化	4	中
Enabling Systems					
Satellite					
	Spacelift	再使用型大型ロケット、軌道変換機。 大型ロケットは、SBSPのために特別に開発されるのではなく、商業サービスとして提供されることを期待	開発要素は主に経済的な課題。	7	高
	Satellite Manufacture	半自動化生産ライン。 宇宙用製品の大量生産化	開発要素は主に経済的な課題。	6	低

表 3-7 SBSP システムの各要素に関するクリティカル技術と難易度および開発要素 (3/3)

サブシステム要素		クリティカル技術	開発要素	TRL	開発の難易度
	In-orbit Assembly	遠隔操作・自動化・自律型宇宙ロボティクス 組立ロボットは宇宙システムの一部となる可能性が高い	ロボットの自律制御、ロボットと衛星モジュールと組立方式の共同開発	3	非常に高
	In-orbit Maintenance	遠隔操作・自動化・自律型宇宙ロボティクス、軌道上ランデブー 組立ロボットによるモジュール交換	自律型ロボットの開発、輸送・保管・供給戦略の策定、故障したモジュールへの対処戦略	3	非常に高
	Decommission satellite	定義づけ、新しい戦略が必要	寿命後に関する詳細な検討結果による	2	非常に高
	Ground Stations				
	Rectenna manufacture	ショットキーダイオードとサポートシステム。 レクテナおよびそのサポートシステムのモジュール化	開発要素は主に経済的な課題。	4	中
	Power station construction	電力施設の建設。従来の建設プロジェクト。	特になし。	8	非常に低
	Operation station construction	制御および通信施設の建設。従来の建設プロジェクト。	特になし。	8	非常に低
	Maintenance of ground stations	従来の施設と同様のサービス。 レクテナ設置に関してはメンテナンスが容易な設計	開発要素は主に経済的な課題。	7	非常に低
	Decommission ground stations	地上施設の廃止措置。 従来の産業用施設の廃止措置プロジェクト。	特になし。	8	非常に低

出所) <https://www.fnc.co.uk/media/fi4pvbqv/space-based-solar-power-final-report.pdf> を基に作成

4) 主要技術課題

上述の検討の結果、技術的な課題を克服し技術準備レベルを向上させるために、実質的な研究開発を必要とする重要なシステム要素が少数存在することが分かった。最も重要な課題は以下の通りである。

- Wireless power transmission (WPT): 地上では現在までに km レベルの伝送距離でしか実績がない。超長距離の電力伝送技術の実証が必要である。高高度プラットフォーム(HAPS)もしくは軌道上からの実証が必要である。
- In-orbit assembly and maintenance: 現在、軌道上サービスおよび製造(IOSM)において重要な開発が行われているが、これらは主に別の市場に焦点を当てたものであり、サービスを提供する衛星と同等の大きさで、さまざまな種類の衛星に対応することができる。SBSP の軌道上組立ロボットは、衛星システムから電力を得て、衛星システムを支持構造として使用する、衛星システムの特注品になる可能性がある。

- Structural design of satellite :SBSP は、現在軌道上にあるどの構造物よりも桁違いに大きくなる。そのため、必要な構造設計の要件が理解されていない。システムの質量を最小限に抑えつつ、主要なシステムの機能性能を維持するために十分な剛性を確保する必要がある。
- Decommissioning strategy:運用軌道上での環境影響、損傷に対する耐性、継続的な保守とアップグレードを考慮し、衛星コンポーネントの耐用年数を最大化する方法を検討する必要がある。
- Spacelift strategy:宇宙輸送戦略には、トランスファー軌道への輸送と、軌道間輸送機による軌道上昇の 2 つの要素がある。軌道変換の方法も設計に影響を与えるため、SBSP の開発者と打上げ輸送業者の間で緊密な協力が必要である。

5) 各サブシステム要素の効率と価格の見積り

本費用便益レポートでは、Frazer-Nash によって作成されたコストモデルを用い、運用費用 (OPEX) と初期費用 (CAPEX) の見積もりを行い、均等化発電原価 (LCOE: Levelised Cost of Electricity)³⁷の値を算出している。

表 3-8 では、このコストモデルを使用するために用いた各サブシステム要素の効率と価格の値を示している。宇宙部のシステムについては面質量の値も示されている。ただし、価格についてはサブシステム要素ごとに面積当たりあるいは kg 当たりの単価となっており、その根拠については明らかではない。

表 3-8 SBSP 各サブシステム要素の効率と価格の参考値

全体	効率			面質量			価格		
	上限値	平均値	下限値	上限値	平均値	下限値	上限値	平均値	下限値
集光									
リフレクタ効率	0.96		0.94	0.027kg/m ²	0.0266kg/m ²	0.0204kg/m ²	311.08€/kg		289.5€/kg
DC変換									
HCPV効率	0.36		0.27	0.25kg/m ²	0.21kg/m ²	0.17kg/m ²	292.04€/m ²	126.97€/m ²	114.28€/m ²
ハウスキーピング効率	0.97		0.95						
DC to RF (WPT)	0.87	0.85	0.78	0.15kg/m ²		0.12kg/m ²	3301.30€/kg		1269.73€/kg
大気透過率	1		0.988						
受電									
ビーム収集効率	0.84		0.84						
配電&接続									
RF to DC	0.88		0.82						
DC to AC	0.985		0.95						
AC to Grid	1		0.999						

出所) <https://www.fnc.co.uk/media/fi4pvbvgv/space-based-solar-power-final-report.pdf> を基に作成

6) システムコストの見積り

上述のように Frazer-Nash によって作成されたコストモデルを用い、運用費用 (OPEX) と初期費用 (CAPEX) の見積もりを行い、均等化発電原価 (LCOE) の値を算出している。本モデルは、SBSP システム設計コンセプトの要素間の基本的な関係を記述して、主要なパラメータに対する感度を調べることができるようにしたものである。ただし CASSIOPeiA リファレンスデザインは、コンセプトデザインの初期段階にあり、基盤技術も開発の初期段階にある側面もあるため、将来のシステムに期待される性能と

³⁷ 発電にかかる費用を総合的に評価する指標。施設建設費など初期費用、燃料費・保守管理費などのランニングコスト、解体・廃棄費用などを合計し、運用期間中に得る発電量で割って算出する。

コストにはかなりの不確実性が存在する。この不確実性を反映させるために、確率的パラメトリックコストモデルが使用されており、出力コストの確率的な分布を生成している。

その結果、図 3-19 に示すように 1.44GW の電力をグリッドに供給する SBSP システムの検討では、現在(2022 年)の価格での初号機 SBSP システムの CAPEX は 48 億ユーロ(p10)～98 億ユーロ(p90)であると試算できる³⁸。また、30 年の耐用年数における OPEX は、25 億ユーロ(p10)から 35 億ユーロ(p90)と試算できる。この結果、2022 年の価格で、欧州の SBSP 初号機システムの総コストは 73 億ユーロ(p10)～133 億ユーロ(p90)となる。LCOE 見積もり(ハードル・レート³⁹20%)では、106 ユーロ/MWh(p10)～206 ユーロ/MWh(p90)の範囲となる。

また、規模の経済性から第 10 基目の SBSP の CAPEX は 76 億ユーロに抑えることが可能であり、OPEX も 13 億ユーロに低減させることができるとしている。LCOE 見積もり(ハードル・レート 20%)では 156 ユーロ/MWh と見込まれ、すべての主要な低炭素エネルギー発電源と競争できる可能性がある数字となる。さらに、SBSP の技術的リスクが軽減されれば、投資家はベースロードの代替エネルギーと同程度のハードル・レートを設定することができ、ハードル・レートが 10%の場合、最初の SBSP システムの LCOE は 109 ユーロ/MWh となり、原子力発電所の新規建設計画と同等レベルとなる。ハードル・レートが 5%の場合では、LCOE は 69 ユーロ/MWh であり、すべての代替エネルギー源よりもコスト競争力を持つことが想定される。表 3-9 に各エネルギー源の LCOE と価格調整済み LCOE(VALCOE: Value-adjusted LCOE)⁴⁰の値を示す。

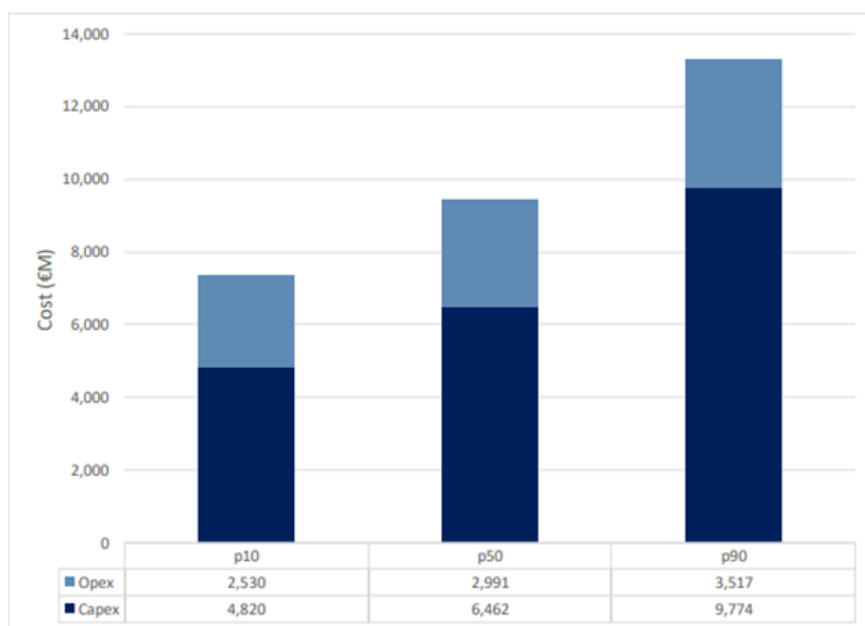


図 3-19 1.44GW の SBSP システムの初号機システムの構築コストと運用コスト

出所) Study on Cost-Benefit Analysis of Space-Based Solar Power (SBSP) Generation for Terrestrial Energy Needs Final Report, July 2022, Frazer-Nash Consultancy

³⁸ 超過確率 p(パーセンタイル)。p90 とは 90%の確率で達成可能と見込まれる数値を意味する。

³⁹ ハードル・レートとは、投資評価の基準の 1 つで、最低限必要とされる利回り。プロジェクトにおける資本コストとリスクを考慮し、機関投資家が要求するハードル・レートを想定する。

⁴⁰ 再生可能エネルギーの大量導入等に伴う電力市場の変化を経済性評価に取り入れるために IEA が考案した指標。あるエネルギーミックス内で、各電源の①電力量価値、②容量価値、及び③柔軟性価値を計測。「価値が低い電源」を「相対的にコストが高い」電源と見做し、市場の平均価値から当該電源の価値を引いた値を LCOE に加算することで、価値によるコストの補正を行う。

表 3-9 エネルギー源別の LCOE と VALCOE(単位:2022 年価格、ユーロ/MWh)

Macrogroup	Subgroup	Generation technology	LCOE	VALCOE
Fossil fuels	Oil ^[B]	Oil	365.7	339.0
		Oil with CCS	363.2	336.5
	Coal ^[I]	Coal	154.7	128.1
		Coal with CCS	152.2	125.6
	Gas ^[I]	Gas CCGT	133.2	105.5
		Gas CCGT with CCS	143.2	115.5
Nuclear ^[I]		New Nuclear	107.9	107.9
		Lifetime Extension	43.1	43.1
Renewable	Solar ^[I]	Biomass ^[F]	132.5	104.7
		Solar PV	83.9	101.9
		Solar PV + Storage	93.2	87.8
	Wind ^[I]	Wind onshore	88.3	102.5
		Wind offshore	88.3	102.5
		Wind + storage	97.6	88.3
		Hydro (reservoir) ^[T]	74.7	61.1
		Geothermal ^[T]	67.1	67.1
SBSP	NOAK	10 th of a kind, 90 th percentile	155.5	155.5

Sources: [I]: International Energy Agency (2020), *European Union 2020 Energy Policy Review*;

[F]: Fraunhofer ISE (2021), *Levelised Cost of Electricity of Renewable Energy Technologies*;

[T]: Trinomics (2020), *Final Report Cost of Energy (LCOE), EC DG Energy*

[B]: BEIS. (2020). *Electricity Generation Costs 2020*

Notes: 'CCS' = 'carbon capture and storage', 'SBSP' = Space Based Solar Power'. The value adjustments to SBSP are considered to be broadly similar to Nuclear, and therefore the total value adjustment assumed for SBSP is 0.

出所) Cost-Benefit Analysis of Space-based solar power (SBSP) for terrestrial energy needs, TN 4 , June 2022, London Economics

7) 開発プログラムとコスト

本研究では、SBSP システムに必要な技術を成熟させるための 4 段階のプログラムを導入し、大型で複雑なプロトタイプの開発を通じてシステムの設計を開発し、本格的な量産前の運用プロトタイプにつなげようとするロードマップを描いている。設定された4段階のフェーズは以下のとおりである。

- Phase1:地上の WPT 試験
- Phase2:40MW 級の実証機(極軌道)
- Phase3:500MW 級の実証機(運用軌道)
- Phase4:本格的なプロトタイプ(運用軌道)

コストについては、完全に動作するプロトタイプまで 18 年かかると仮定すると、80 億ユーロから 160 億ユーロの開発コストが見込まれる。

8) 費用便益分析

ベースケースシナリオ(パリ協定で欧州諸国が約束した法的拘束力のある Net Zero を達成するシナリオ)の場合、2022 年から 2070 年の間で 54 基の SBSP が必要となり、開発・運用に必要なコストが 4,180 億ユーロに達するが、トータル便益は 6,010 億ユーロとなると見込まれる。便益として計算されている項目は、SBSP を導入することで回避される地上エネルギー発電のコストの正味現在価値、抑制される CO₂ の社会的コスト、研究開発活動からの波及効果、土地の機会費用である。差し引きトータルの利益の現在価値は 1,830 億ユーロと推定される(表 3-10 参照)。

なお、費用便益分析では、ESA 加盟国または EU 加盟国(あるいはその両方)である 30 カ国に焦点を当て、Net Zero のケーススタディーを行っている。さらに分析期間中に最もエネルギーを消費すると予測される 5 カ国(フランス、ドイツ、イタリア、ポーランド、イギリス)を対象に、国別のシナリオ等も検討している。

表 3-10 SBSP の費用便益分析(2070 年までに 54 基導入の場合)

Table 4 NPV of SBSP benefits: Summary

Value driver	NPV (€ billions)
(1) SBSP total cost	(417.9)
CAPEX (SBSP)	(382.5)
R&D (SBSP)	(10.4)
O&M (SBSP)	(24.9)
(2) Avoided cost of terrestrial electricity generation	302.4
(3) Externalities total	298.1
CO ₂ emissions saved	233.2
R&D spillovers	64.5
Opportunity cost of land	0.3
SBSP total benefits (total of (2)+(3))	600.5
Total Net Benefits (2+3-1)	182.6

Source: London Economics analysis

出所) Study on Cost-Benefit Analysis of Space-Based Solar Power (SBSP) Generation for Terrestrial Energy Needs Final Report, July 2022, Frazer-Nash Consultancy

9) その他／結論等

本研究の結果、SBSP は欧州のエネルギー需要の拡大と欧州の 2050 年までの Net Zero 達成への対応に大きな変化をもたらす可能性があることが分かった。また、SBSP は大規模な開発を必要とするものであるが、再生可能エネルギーでありながら常時発電が可能であるという特長を有するため、石油、石炭、ガス等の発電の直接の代替エネルギーとなり得るものであり、2040 年までには、石油、石炭、ガスと比較してコスト競争力のあるシステムを構築することも可能である。

また SBSP を実現することにより欧州が受けるメリットとしては、以下に示す項目が挙げられる。

<SBSP の実現によるメリット>

- エネルギー源の多様化の促進
- 欧州のエネルギー独立と安全保障への寄与:世界的なエネルギーの純輸出国になる可能性

- 間欠的な自然エネルギーの割合が高い将来のエネルギーシステムにおいて、SBSP を系統連携させることによる安定性の向上
- 他の自然エネルギーより高い土地利用効率による、土地利用の有効性の向上
- 電力料金の安定化
- R&D スピルオーバーと技術進化の促進
- 新輸出機会の創出
- CO2 排出量およびその他の汚染物質の排出量の削減

また、打上げ能力は SBSP の展開のタイミングとスピードにとって重要な制約となるため、SBSP の打上げ需要に対応するためには打上げ能力の増強が必要である。将来のシナリオにもよるが、SBSP を実現するためには、年間数百から数千回の打上げ需要が発生するため、低コストで再利用可能な打上げロケットの商業的に持続可能な市場を欧州で支えることも可能である。欧州の宇宙港と再利用可能な大型ロケット 1 基があれば、年間約 77 回の SBSP 打上げに対応でき、1 年で SBSP1 基を追加で打ち上げることが可能である。

(2) Roland Berger／OHB Systems の費用便益分析レポート

1) 概要と構成

本スタディでは、元 NASA の John C. Mankins 氏が設計した SPS-ALPHA のアーキテクチャをリファレンスデザインとして想定し、2040 年までの GW 規模(グリッド電力:2GW)の SBSP の技術的な実現可能性の評価を行い、OHB の計算とデータシートに基づいて費用便益分析を行っている。

2040 年には、航空機のようなサービス(打上げ、着陸、燃料補給、再度の打上げ)を提供する再利用型打上げシステムが市場に出てくるとというのが宇宙専門家の共通認識となっており、これにより SBSP が実現できる可能性があるという前提に基づき、軌道上に展開する SBSP システムに必要な主要要素と開発期間の概要を検討している。表 3-11 に本調査で作成されたテクニカルノートの内容と作成時期を示す。

表 3-11 Roland Berger 調査で作成されたテクニカルノートの内容と作成時期

Technical Note	内容	作成時期
TN1	SBSP Study Review	2022/2
TN2	SBSP Methodology	2022/2
TN3	System Breakdown, Costs and Technical Feasibility	2022/7
TN4	Technical Note 4	2022/8
TN5	Concept for a European SBSP Development Programme	2022/8

出所) Study on Cost-Benefit Analysis of Space-Based Solar Power (SBSP) Generation for Terrestrial Energy Needs, OHB を基に作成

2) リファレンスシステム概要

SPS ALPHA は、モジュール化コンセプトにより設計されており、すべての要素や部品を簡単に交換することができるため、寿命はないと仮定している。同じモジュール・セグメントを 1000 個単位で大量に生産し、軌道上で組み立てるシナリオが想定されている。これは何千もの衛星を生産ラインで製造するメガコンステレーションのアプローチと同様である。大量生産によってハードウェアのコストが大幅に削減される見込みとなっている。

最終グリッド電力が 2GW のシステムについて、Mankins 氏が見積もった主要要素のキーパラメータの値を表 3-12 に示す。

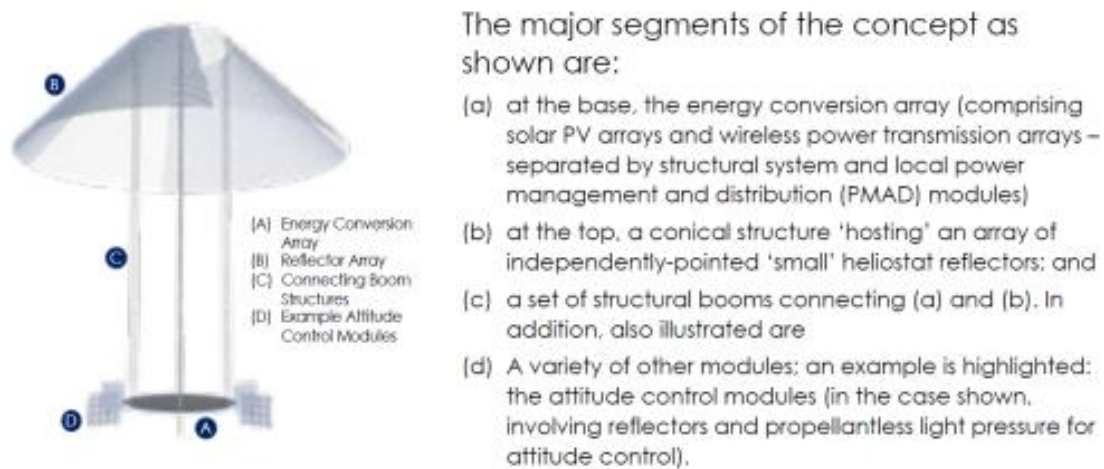


図 3-20 SPS Alpha アーキテクチャ

出所) 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 3-12 SPS-Alpha MkIII の主要パラメータの値

SEGMENT	KEY PERF. PARAMETERS	VALUE
Energy Conversion	PV	3.4 GW
	WPT Frequency	2.45 GHz
	WPT Distance	~35,800 km
	WPT Power Transmitted (RF)	2.4 GW
	WPT Xmttr Diam.	1,685 m
	Receiver Diameter	6,000 m (@ Equator)
	Rcvr Output (DC)	2 GW
Platform System Characteristics	Primary Structure	~3.3 km x ~4.5 km
	No. of Modules	~1,900,000
	SPS Mass	~7,600 MT
	Ave. Mass / Module	~4 kg / module
Cost/Financials	SPS H/W Cost	~\$5,890 M
	Deployment Cost	~\$5,930 M
	Cost of Money	~\$19,000 M
	O&M Cost	~\$12,000 M
	Econ. Lifetime	40 years
	Total Electricity	702,559,375 MWh
	Cost of Energy	~6¢ / kWh

出所) 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

3) 重要要素技術

a. 打上げシステム

SBSP を実現するための重要な要素の1つは、システムの展開に関連する打上げコストである。SBSP を GEO に運ぶには、完全再使用型ロケットシステムによる LEO への打上げが最も有望であり、LEO から GEO への輸送は、強力な電気推進力を持つ再使用可能なスペーススタグか、ロケット上段のどちらかを使用する必要がある。さらに、それらは軌道上で燃料を補給する必要がある。

LEO までの輸送に関しては、SpaceX 社が Falcon 9 ロケットを市場に導入して以来、商業打上げ価格が大幅に低下したが、再使用型ロケットが複数登場すれば、さらなるコストダウンが期待できる。

表 3-13 に本レポートで想定されている SBSP システムの打上げロケットの打上げ能力、打上げコスト等を示す。Falcon 9 および Falcon Heavy 以外は打上げ実績がなく、予定の数字となっている。

これらの数字を考慮し、2040 年の SBSP の打上げ機を以下のように仮定している。

<想定する 2040 年の LEO までの打上げ機>

- 複数の宇宙機関や企業が、最大 100t の打上げ能力を持つ再使用型打上げシステムの開発を行っており、航空機のような運用が可能な再使用型打上げシステムが複数登場している。
- SBSP が実現すれば、打上げ市場はさらに拡大し、商業ベースで競争状態となる。
- その場合、LEO までの打上げ価格は 50-100 ドル/kg の範囲となる可能性がある。同様の結論が、Citigroup Global が発表したレポート(SPACE: The Dawn of a New Age)でも

示されている。Citigroup のレポートでは、打上げ価格として bear(300 ドル/kg)、basis (100 ドル/kg)および bull(30 ドル/kg)が想定されている。

一方で、LEO から GEO まで軌道を遷移させるためには、スペースタグ／軌道間輸送機が必要となる。大規模に利用可能な推進剤を使用する電気推進システムの開発が必要である。これらの現状の技術についてコストを削減するために、スペースタグは GEO への輸送のたびに再使用する必要がある。合わせてスペースタグの推進剤を補充するための燃料補給ステーションが LEO に必要となる。

OHB のレポートでは、LEO への Starship の打上げコストを 50-100 ドル/kg とし、SBSP セグメントを 1 バッチで最大 10 回(燃料補給を含む)打ち上げると仮定すると、Starship を使った GEO への打上げコストは 500-1000 ドル/kg と見込むことができる、とされている。

表 3-13 OHB のレポートで想定されている打上げ機と能力

打上げ機	打上げ能力 (t)		想定再利用回数	打上げコスト	初打上げ
	LEO	GTO			
Falcon 9	22.8	8.3		67百万ドル／回 2,940\$/kg (LEO)	2013年
Falcon Heavy	63.8	26.7		90百万ドル／回 1,410\$/kg (LEO)	2018年
SpaceX's Starship	100	21-40	100回	10百万ドル／回 100 \$ /1kg (LEO)	2023年
Ariane 6	21.6	12		Ariane 5から半減	2023年10～12月予定
New Glenn	45	13.6			2023年
Terran R	20				2024年
Skylon	17	7.3			
Neutron	8				2024年

※初打上げの予定年はレポートの数字ではなく、独自調査
出所)“System breakdown, costs and technical feasibility of a SPS”, SBSP-OHB-TN-003, July 2022 を基に作成

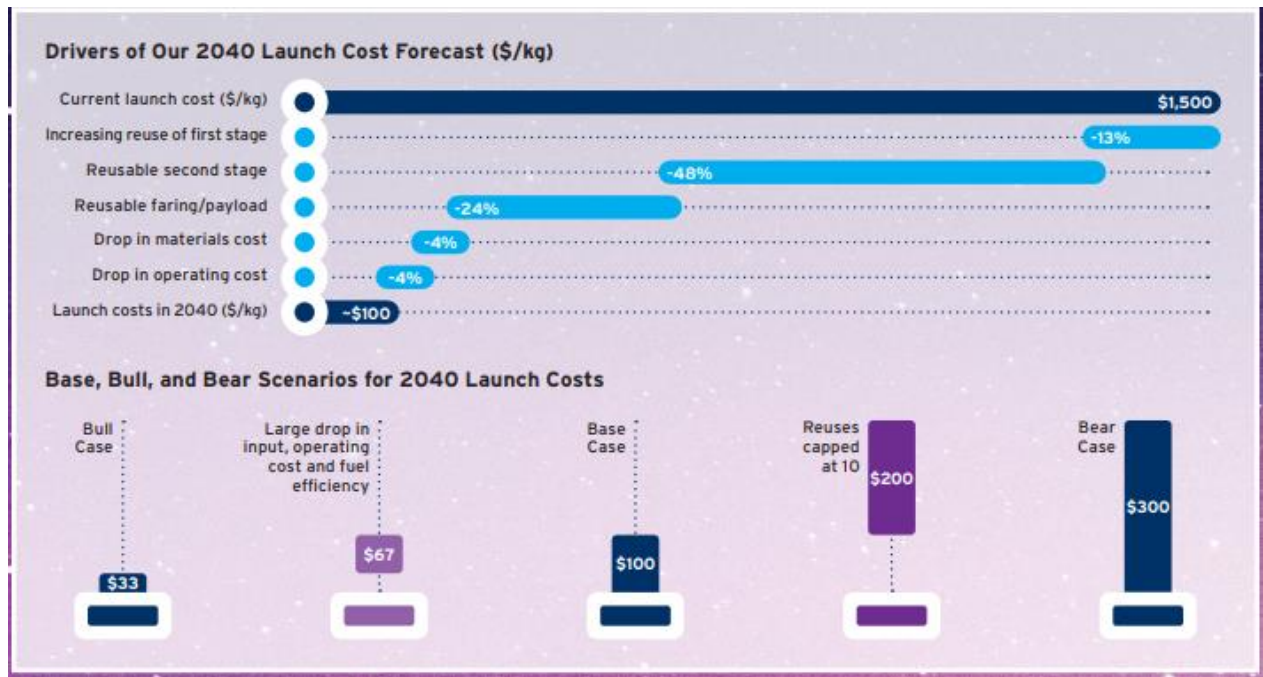


図 3-21 Citigroup Global の 2040 年の打上げコスト予測

出所)SPACE: The Dawn of a New Age, Citi GPS: Global Perspectives & Solutions, May 2022

b. 無線電力伝送システム

過去数十年の間に、複数の WPT 実験が行われているが、SBSP で想定されているような電力レベル(GW スケール)と伝送距離に対しての実証は行われていない。過去に行われた最も大規模の実験は 1975 年に NASA Goldstone で行われた 34kW、1.5km の実証実験である。図 3-22 に過去に行われた WPT 伝送実験と代表的な SBSP システムで想定されている受電電力と伝送距離を示す。

また、表 3-14 に OHB のレポートで整理された WPT に関わる各構成要素の効率を示す。

Receiver Power Output vs. Transmission Distance

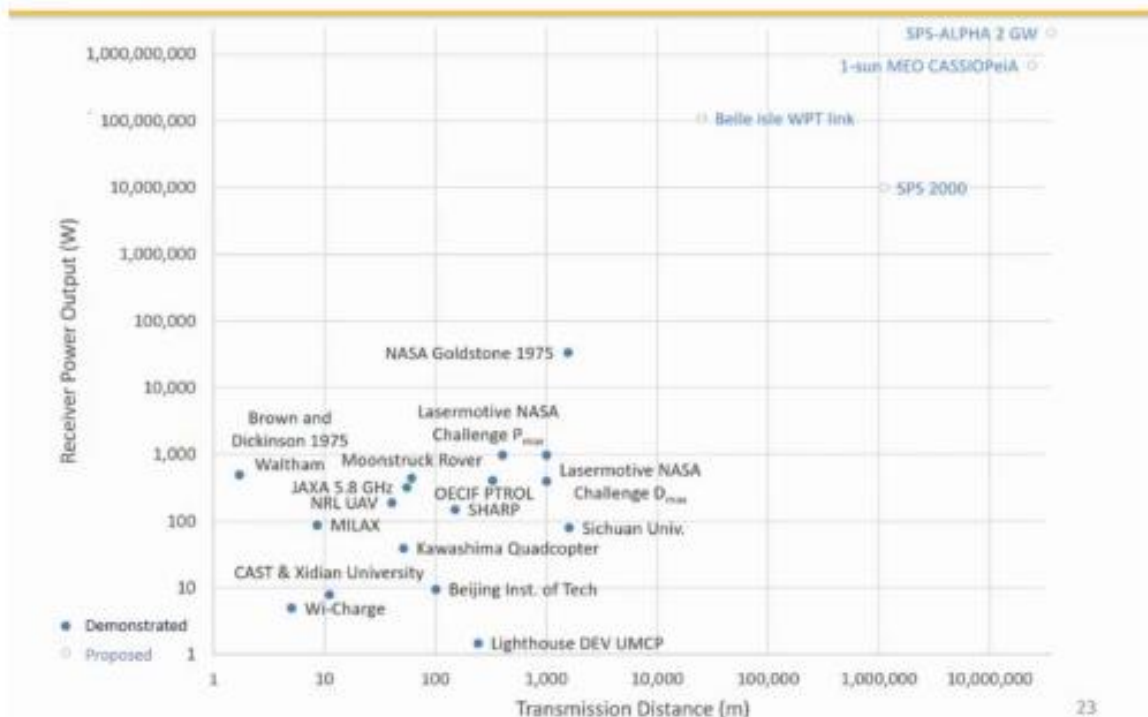


図 3-22 過去の WPT 伝送実験と代表的な SBSP システムで想定されている受電電力と伝送距離

出所) 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 3-14 OHB のレポートで想定されている送電システムの発電効率等

無線電力伝送部	効率				備考
	Optimistic	Pessimistic	目標値	現状	
DC to RF (2040)	0.9	0.75			
マグネトロン				0.8	寿命が課題
SSPA			0.85	0.6	2年以内に1SSPAあたり数十ワットの性能と85%以上の効率を達成可能
クライストロン／ ジャイロトロン			0.9	0.8	
アンテナ効率	0.95	0.95			
大気透過率	0.984	0.98			ISMバンド
ビーム収集効率	0.96	0.8			
RF to DC	0.9	0.8			W. Brownの91.4% (7W, 2.45GHz)が最高
グリッド接続効率	0.98	0.95			
End to End WP	0.71	0.42		0.54	

出所) “System breakdown, costs and technical feasibility of a SPS”, SBSP-OHB-TN-003, July 2022 を基に作成

c. 発電部

太陽電池の効率は、過去数十年の間に恒常的に向上している。世界中の研究機関が、タンデムセル/マルチジャンクションセルを用いた高効率な太陽電池の開発を行っている。

また太陽光を集光させることにより、より多くの光子が同じ場所に到達し、光電効果を高めることができる。トリプルジャンクション集光型セルにより集光倍率 250 倍で実験した結果、最大 45%の効率を達成している。ただし高効率な光電変換を行うためには、太陽電池セルを適切な温度に保つ必要があるため、合わせて熱管理技術を適用することが重要となる。さらに SBSP では EOL(End of Life)時の効率も重要なパラメータとなる。例えば、40 年後の EOL 効率 95%程度を達成するためには、セル上に 200-300 μ m のカバーガラス層を設ける必要がある。

これらの結果から、SBSP の発電部としては、集光型太陽電池を使用すれば、2040 年頃には効率 40%まで向上させることが期待できる。

表 3-15 に OHB のレポートで整理された太陽電池に関わる各構成要素の効率を示す。

表 3-15 OHB のレポートで想定されている代表的な各種太陽電池の効率と価格等

発電（太陽電池部）	効率					出力／質量比 (W/kg)	価格		Readiness
	Optimistic	Pessimistic	ラボ	モジュール BOL	EOL		現状	目標	
太陽電池(SBSP用)	0.4	0.27						1€/W以下 O:1€/W、P:4€/W	
結晶Si（単結晶） （集光なし）			0.261	0.169	0.108	715.63	大量生産されたシリコンパネルの市場価格は、0.18\$/Wから0.8\$/W		TRL 9
結晶Si（多結晶） （集光なし）			0.233	0.18					
薄膜（CIGS）			0.234	0.0715		816			
3接合 (InGaP/GaAs/Ge) （集光なし）			0.395	0.295	0.251	470.15	約200～300€/W		TRL 9
3接合 (InGaP/GaAs/Ge) （集光あり）			0.444	0.421			66-100€/W （3倍集光）		
4接合以上 （集光あり）				0.318	0.201	713.6			TRL 9
新コンセプト			0.24-0.3						

出所)“System breakdown, costs and technical feasibility of a SPS”, SBSP-OHB-TN-003, July 2022 を基に作成

d. リフレクタ

SPS-ALPHA では大型の薄膜反射鏡を使って太陽光の入射方向を変換し集光を行う。本分野では、例えば JAXA の IKAROS のソーラーセイルの実証が成功したように、過去 10 年間で大きな進展が見られている。またドイツでも HPS Systems GmbH と DLR の Institute of Composite Structures and Adaptive Systems が展開型軌道離脱システムとソーラーセイル等の開発を行っており、技術成熟度はすでに高いものとなっている。また、このようなシステムの低コスト化を達成するために、生産規模を拡大することも可能である。

表 3-16 に OHB のレポートで整理された集光部として示されたヘリオスタットの効率、面質量、価格等の数字を示す。

表 3-16 OHB のレポートで示されている集光部の効率と価格等

集光部	効率 (アライメントファクター)		面質量	価格		Readiness
	Optimistic	Pessimistic		現状	目標	
薄膜ヘリオスタット	1	0.95	0.1 g - 5g / m ²		10k€ / 1 シス テム	TRL 8 (2024)

出所) “System breakdown, costs and technical feasibility of a SPS” , SBSP-OHB-TN-003, July 2022 を基に作成

e. 電力伝送部(送信アンテナ)

軽量で高性能なフェーズドアレイアンテナの開発は、SBSP のコンセプトを実現するかしないかを左右する重要な設計ドライバーである。SPS-ALPHA は、レトロディレクティブ・フェーズドアレイアンテナを使用している。アンテナの製造に必要な主要部品の開発要素等については以下のようにまとめることができる。

- 2.45GHz または 5.8GHz の RF ジェネレータ：市販品(Wi-Fi、5G)がすでに存在するため開発不要
- ウィルキンソン分圧器：市販品がすでに存在し開発不要。量産可能。
- 移送器：市販品がすでに存在し開発不要。量産可能。
- 増幅器：市販されているが、電力伝送には効率が悪い。高効率で電力伝送に最適化したアンプの開発が必要。

以上のように電力伝送部に関しては、ほとんどの部品が市販されており、量産が可能であるが、電力伝送に適した高効率の増幅器の開発が今後は必要となる。

f. 軌道上組立

SBSP の個々のモジュールと構造体は、軌道上の自律型ロボットアームにより組立ておよびメンテナンスが行われる。SPS-Alpha では、約 5,000 本のロボットアームが必要であることが想定されている。さらに、システムの各要素やモジュールをつなぐインターコネクタも約 90 万個の数が必要とされている。

ロボットアームに関しては Canadarm 等、宇宙で長い実績があるものもあり、欧州でも ERA (European Robotic Arm)を近年開発しているが、数や規模等が全く異なっており、今後さらなる開発が必要とされている分野である。これらのシステムと地上システムをどのように適合させるかについても大きな開発課題となっている。

g. バックボーン構造体

SBSP のバックボーンとなる重要な技術としては大型モジュール構造とビーム展開技術が挙げられる。大型モジュール構造に関しては、数平方 km に及ぶ接合型モジュール構造物の建設と挙動については、地上でも宇宙でも経験がないため、今後特化した開発プログラムが必要となる。技術成熟度としては

TRL2 相当であり、今後の開発に 10 年を要するレベルであると予測される。

ビーム展開技術に関しては、宇宙での展開型構造物は実証済み(SRTM ADAM、NuStar、IKAROS、Znamya 2、FAST mas)であるものの、SBSP のビームは、数キロメートルに及ぶ巨大なバックボーン構造を接続・統合するための適切な機械的インターフェースを提供する必要があり、接続後の構造物の挙動についてもさらなる研究開発を要する。SPS-Alpha のようなシステムでは、適切なビームタイプを選択し、量産可能な標準部品とする必要もある。技術成熟度としては TRL5 相当であり、今後の開発に 5 年を要するレベルであると予測される。

h. 宇宙デブリの軽減

SBSP は超大型構造物であるため、デブリ衝突の回避操作を行うことはできないが、モジュール化構造でもあるため、デブリ衝突の影響を最小にするような運用を行うことが可能である。また、デブリにより損傷したモジュールはメンテナンス時に交換することが可能である。

一方で、このような衝突によって生じたデブリは、長期的には他の宇宙システムに脅威を与える可能性があるため、SBSP システムから放出されるデブリを軽減するための対策を講じる必要がある。一例として、自己修復材料の導入等が挙げられる。

i. 受電部

レクテナに必要な基本材料は鉄かアルミニウムであり、主な部品はダイオードである。すでに大量生産されており、非常に安価に入手可能である。技術的な開発要素は特にないが、経済性の問題が重要となり、安価に建設および運用できることが求められる。

4) システム要素の技術課題と開発期間

SBSP のシステムを実現するためには、今後の大規模な開発が必要である。

まず宇宙における大型モジュール構造物の開発と建設が大きな課題となっている。過去、宇宙空間で人間が作った最大の構造物は ISS であり、全体の面積は約 8,000m²程度であるが、SBSP の場合、全体の面積は 15km²以上になることもある。また、宇宙で複雑かつ大規模なシステムの運用に関しては、従来の有線データハーネスアーキテクチャを採用すると、システムの質量が大幅に増加し、かつ各要素間のインターフェースが複雑になるため無線ネットワークを使用することとなるが、技術的難易度は高い。センサやアクチュエーターなど、約 200 万個の部品をワイヤレスで監視・制御することとなるが、このような大規模なセンサ・アクチュエーター無線ネットワークは、現在存在していない。さらに宇宙でのロボットや自律型システムに関連する技術を開発する必要もある。軌道上で構造物を組み立て、維持するために、複数のロボット要素を利用する必要があるが、その数は膨大なものになるため、適切な人工知能とデータ処理能力による自律的な運用が必要となる。

また、電波を使った効率的なワイヤレス電力伝送(WPT)は、超長距離での実証がまだなされていない。高効率な長距離無線電力伝送を実現するためには、高効率かつ軽量化を目指した送信アンテナ技術の開発が必要である。

図 3-23 に本スタディで示された、SBSP を実現するためのシステム要素と指標となる開発に要する期間を示す。

System element	Description	Time to development (indicative)
Reflector system	Array of reflector units mechanically connected with associated sub-elements such as pointing mechanisms and wireless communication systems	2-5 YEARS
Connecting boom	Structural connection between the reflector system and energy conversion system	5-10 YEARS
Energy conversion system	Converts sunlight to radio frequency – includes sub-elements such as antennas and associated thermal management systems	10-20 YEARS
Attitude control system	Controls the attitude and position of SBSP thanks to onboard hardware and software	5-10 YEARS
Backbone data-handling network	Hardware architecture for very large wireless networks with core processing units and wireless terminals for 2,000,000+ clients	5-10 YEARS
Network control software	Software architecture for very large wireless networks for 2,000,000+ clients	5-10 YEARS
Communication to the ground	Telemetry, tracking and control (TT&C) systems onboard the space platform	READY AND AVAILABLE
On-orbit assembly and maintenance	Robotic arms to enable robotic operations and associated sub-elements such as batteries, charging stations and storage units	10-20 YEARS
Space debris mitigation system	In-orbit space situational awareness (SSA) systems with collision-avoidance capabilities to prevent impacts with human-made or natural debris	5-10 YEARS

図 3-23 SBSP を実現するためのシステム要素と開発に要する期間

出所) 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

5) コスト評価

John Mankins 氏により提案されている SPS Alpha をリファレンスモデルとして、OHB の計算とデータシートに基づいて費用便益分析を行っている。また、必要なエネルギー変換の効率に対するコンセプトとサブシステムの感度について分析を行っている。表 3-17 にリファレンスモデルの各部の質量等を示す。

SPS ALPHA は、モジュール化コンセプトにより設計されており、同じモジュール・セグメントを 1000 個単位で大量に生産し、軌道上で組み立てるというものである。これは何千もの衛星を生産ラインで製造するメガコンステレーションのアプローチと同様である。大量生産によってハードウェアのコストが大幅に削減される見込みとなっている。

コスト評価の結果、主要技術の大幅な進歩を前提として、単一の SBSP システムの建設費用は 81 億

ユーロ、そのような進歩がない悲観的なシナリオでは、同じ設計の建設に 334 億ユーロ要すると見積もられている(表 3-18 参照)。

このように楽観的なコストと悲観的なコストの間に強いオフセットがあることから、ワイヤレス電力伝送と太陽光発電の効率が大きく影響することが分かる。より精緻なコスト想定を行うためには TRL の低い技術について詳細な調査を開始する必要があるとされている。

表 3-17 コストモデルで使用したリファレンスシステム各部の質量等

Power Generation SPS BoL	Optimistic	Pessimistic	Comment
PV Mass [t]	1303	4346	Pessimistic: WPT efficiency 42% Optimistic: WPT efficiency 71%
SPS Reflector Mass [t]	54	212	Pessimistic: WPT efficiency 42% Optimistic: WPT efficiency 71%
Transmitter Mass [t]	857	6391	Optimistic: Caltec Mass 0,5 kg/m ² ; 71% WPT efficiency Pessimistic: 1,5 kg/m ² ; 42% WPT efficiency
Structure Mass [t]	3883	5557	Based on Pessimistic and Optimistic PV area
Total SPS Mass [t]	6097	16507	

出所) 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 3-18 コストモデルによるコスト算出結果

Segment	Optimistic (71 % WPT efficiency)	Pessimistic (42 % WPT efficiency)	Comment
Space Hardware Cost [Billion €]	4,73	16,51	Optimistic: 6100t Hardware @775 €/kg Pessimistic: 16500t Hardware @1000 €/kg 50% of the mass are structure elements. Those are not rare materials. This justifies the low price per kg compared to today S/C H/W prices.
Ground Segment Cost [Billion €]	0,3	0,4	Cost estimate from Section 6
Launch Segment Cost [Billion €]	3,05	16,51	Optimistic: 6100t @ 500€/kg Pessimistic: 16500t @ 1000€/kg As reference scenario the in-orbit refuelling of the launcher upper stage has been assumed to transfer from LEO to GEO
SPS Cost estimate [Billion €]	8,07	33,41	

出所) 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

6) SBSP の競争力と可能性

SBSP のコスト仮定に基づくと価値調整済み LCOE (Value-adjusted LCOE: VALCOE) は、最初のシステムで 69 ユーロ/MWh となることが想定されている。最初の 10 基の SBSP 展開では、コスト削減の効果を見込むことができ、49 ユーロ/MWh と推定されている。IEA の政策シナリオ (STEPS) によると、他の再生可能技術の VALCOE は、2040 年に 40~58EUR/MWh、2050 年に 37~58EUR/MWh の範囲になるとされている。したがって、本スタディでは、SBSP はベースロード発電能力を提供しながら、コスト競争力のある再生可能エネルギーになる可能性を有しているといえると結論付けている。

7) SBSP の貢献

欧州では今後数十年の間にグリーン電力の需要が大幅に増加すると予想されている。さまざまなシナリオに基づく、EU の年間電力需要は 2050 年に 50~100% 増加する可能性がある。SBSP は太陽光発電を再生可能なベースロード容量に変える可能性を持っているため、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。欧州各国 (フランス、ドイツ、イタリア、英国、ポーランド) は、現在の電力ミックスと再生可能エネルギーの潜在能力に基づいて、さまざまな課題に直面しており、エネルギー部門の弾力性と独立性を高めるためにも、複数の SBSP システムを早期に立ち上げ、電力網に統合することができれば、その貢献度は高くなることが見込まれる。

8) ロードマップ

SBSP の技術的・経済的な実現可能性を示すためには、まだ多くの課題を克服しなければならない状態である。これらの課題を解決するために、本スタディでは、以下の 4 つのステップで進めることを推奨している。

- Step 1: 認知度の向上 (2022-2025 年)
- Step 2: 必要な技術を成熟させるためのリソースの確保 (2022-2030 年)
- Step 3: SBSP の実現性を確認するための実証機の立ち上げ (2024-2035 年)
- Step 4: 官民パートナーとの共同による野心的で資金調達可能なプログラムの立ち上げ (2035 年以降)

3.2.2 無線エネルギー伝送技術 (WPT)

(1) 地上における無線エネルギー伝送 (WPT) 技術を取巻く動向

地上における無線エネルギー伝送技術 (WPT: Wireless Power Transfer) 技術は、送電側と受電側がワイヤレスとなること等、高い利便性が期待できる技術であり、近年では多くの方式が提案され、多様で幅広い製品分野への応用が進められてきている。

WPT は大きな分類として放射型と非放射型に分けられる。近接型の非放射型 (Non-Beam WPT) は磁気共鳴型、電界結合型、磁界結合型等、自由空間にエネルギーを放射せずに電力を伝送す

る方式であり、スマートフォンや電動歯ブラシ、電気自動車への充電等で実用化が進んでいる。伝送距離はとれないが、送電電力が大きく伝送効率が高いのが特徴となっている。一方、放射型(Beam WPT)は電波(主にマイクロ波)やレーザーなどでエネルギーを遠距離に指向性をもって伝送する方式である。10m 以上離れたデバイスにも電力伝送を行うことができ、空間伝送型の無線給電方式などとも呼ばれる。ここ数年で米国を中心とした製品化が進んでいるものの、非放射型 WPT に比べると実用事例はまだ少ない。

SSPSに関連しているのは放射型(空間伝送型)WPTであり、高効率化が課題とされているが、長距離伝送が可能であることから将来の無線給電方式としての実現性への期待は高い。また放射型(空間伝送型)WPT の中でも、特に長距離の高強度の電力伝送をポイントトゥポイントで行う方式をパワービーミングという。近距離小電力伝送とは異なり、人工衛星、宇宙インフラ、遠隔地、遠隔操作車、高高度飛行船、遠隔センサ、通信機器、産業拠点にエネルギーを供給できる可能性があり、また洋上風力発電所などの遠隔地から電力を送ることで、ケーブル配線や物理的なインフラを不要にすることも可能である。

本調査では SSPS に関連した技術として、放射型 WPT 技術、特に長距離高強度の電力を伝送できるパワービーミング技術を中心として、諸外国の研究開発状況の整理を行った結果を述べる。

1) 電波(主にマイクロ波)方式 WPT

電波方式 WPTとは、本来は遠方にまで伝搬する遠方界の電波を利用する方式のことであり、電波であるマイクロ波を用いるのが一般的である。マイクロ波の発振源は家庭用などの電子レンジ向けのマグネトロン管が大量に生産されていることから、安価にシステムを構成することができる。電波自体は原理的に真空中を伝搬する性質を持っており、どんな遠方にも到達させることができるため、航空宇宙分野での利用が可能な規模の距離、電力容量でエネルギー伝送が行える反面、電磁波のエネルギーが拡散してしまい伝送効率が上がらない、電磁波による生体への影響などの解決すべき課題がある。

現状、実用化を目指して開発が進められているものの多くは、送電電力が数 10mW から数 100W 程度と比較的小さく、伝送効率も数%程度と低いことが課題となっている。昨今ではマイクロ波の他にも、より周波数の高いミリ波、サブミリ波を利用する WPT の例も増加している。

2) レーザー方式 WPT

レーザー方式 WPT はレーザーで送信し、太陽電池セルと同じように半導体で受信し、半導体の光起電力効果を利用して光エネルギーを直接電気に変換することで電力を伝送する技術である。レーザー光は遠方界を利用することでビームを形成でき、飛散角が小さく少ない減衰で長距離にまでエネルギーを伝搬できるため、小型装置かつ小径ビームでも大電力給電が可能であるという特長を有する。未だ研究開発段階にあるが、航空宇宙分野を中心に研究が進められてきており、近年は地上や近距離でも将来の無線給電方式として実現が期待されている。

(2) 2020 年頃以前の電波方式 WPT(パワービーミング)の開発動向

2020 年の IEEE Journal of Microwaves の招待論文として掲載された “Microwave and

Millimeter Wave Power Beaming”⁴¹ (current version 7 January 2021)に示されている2010～2020年に行われた主な電波方式WPT(パワービーミング)の地上実証例を表3-19に示す。ただし次項3.2.2(3)で示すものと重複する例については省略している。

一方、受電要素であるレクテナに関しては、過去50年以上にわたって研究開発が行われてきている。図3-24に上述の論文に示されている過去に開発が行われたレクテナの周波数別の入射電力密度とRF-to-DC整流器の効率との実績値をプロットしたものを示す。一般的に、低周波のレクテナは高周波で設計されたものよりも優れた効率を持ち、ダイオードへの入力電力密度が高いほど、より高い効率となっていることが分かる。本論文執筆時点では、最も高い効率は、W. Brownによる7Wの入力電力で2.45GHzで動作する91.4%の効率のレクテナとなっているが、その後、2020年9月には金沢工業大学電気電子工学科の伊東健治教授の研究チームが、5.8GHzのマイクロ波による無線電力伝送に用いる「レクテナ」において、世界最高の電力変換効率となる92.8%を達成している⁴²(1W入力時)。

表 3-19 2010～2020年に行われた主な電波方式WPTの地上実証例

国名	年	実施主体	実験種類	周波数、送電出力、伝送距離	備考
日本	2015年	三菱重工業 京都大学	屋外	2.45GHz, 10kW, 500m	国内最大出力、最長距離 受信電力によりMHIのLEDロゴを点灯
	2015年	経産省SPS committee	屋外	5.8GHz, 1.8kW, 55m 受信電力：335W	GaN F級アンプ搭載のフェーズドアレイを使用 増幅器の平均効率：60.3%、DC-RFの総合効率：35.1%
	2019年	経産省SPS committee	地上→ホバリング中のドローン	上記のフェーズドアレイを再使用, 30m	ドローンの受信電力：42W
韓国	2019年	Inha University (仁荷大学校)	チャンバー内で飛行船に送電	200W, X帯 (10GHz)	エッチングされたフレキシブル回路膜のレクテナアレイシートを飛行船の両脇に貼り付け 時速7マイルでの操縦を可能
	2020年	RF Core社	送電部の開発	X-band, 1.5kW	GaN MMIC ベースのフェーズドアレイ
中国	2014年	Sichuan University (四川大学)	屋外	2.45GHz, 4.5m	レクテナ最大出力：7.1W, 総合効率：14.2%
	2020年	〃	屋内	5.8GHz, 10m	総合効率：18.5%
	2019年	China Ship Development and Design Center	屋外	10GHz, 100m	カスタム設計のマイクロ波管とGaNダイオードレクテナ総合効率：19.5%
	2020年	〃	不明	35GHz, 1kW, 300m	時空間 (spatiotemporal) アンテナ、GaNダイオードレクテナ 送信機入力から受信機出力までの総合効率：9.89%

※経産省SPS Committee：JSS, JAXA, 三菱電機, IHIエアロスペース

出所)“Microwave and Millimeter Wave Power Beaming”, IEEE Journal of Microwaves, Jan 2021 を基に作成

⁴¹著者:CHRISTOPHER T. RODENBECK (Senior Member, IEEE), PAUL I. JAFFE(Senior Member, IEEE),BERND H. STRASSNER II, PAUL E. HAUSGEN, JAMES O. McSPADDEN (Senior Member, IEEE),HOOMAN KAZEMI (Senior Member, IEEE), NAOKI SHINOHARA (Senior Member, IEEE),BRIAN B. TIERNEY(Member, IEEE), CHRISTOPHER B. DePUMA, AND AMANDA P. SELF

⁴² https://www.kanazawa-it.ac.jp/kitnews/2020/0923_itoh.html (2023年1月16日閲覧)

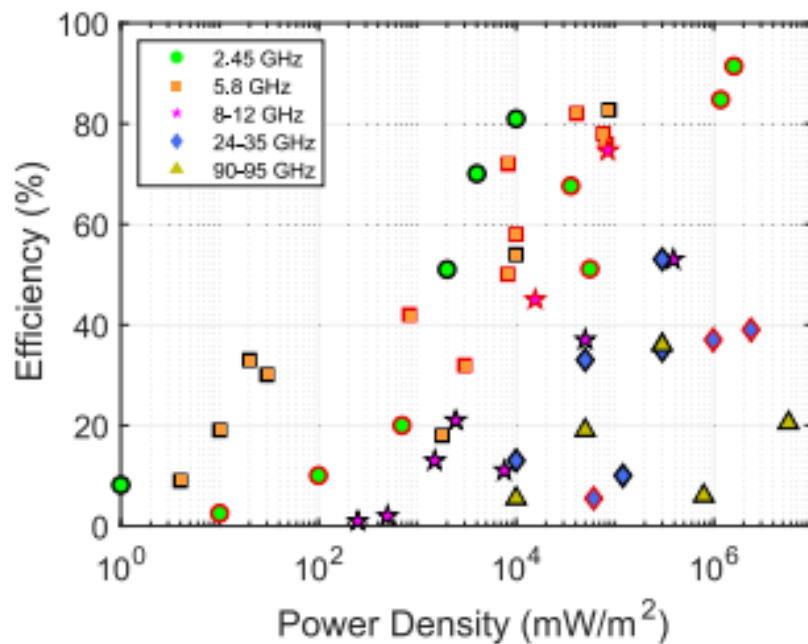


図 3-24 過去に行われたレクテナ受電実験例による整流効率と入射電力密度の関係(周波数別)
出所) “Microwave and Millimeter Wave Power Beaming”, IEEE Journal of Microwaves, Jan 2021

(3) 2020 年頃以降の電波方式 WPT(パワービーミング)の開発動向

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 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。以下に、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 WPT(パワービーミング)研究開発への取組み動向を示す。

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る。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 3-25 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 1141m の距離となる地上 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 3-26

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結果であった。

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、宇宙からのワイヤレス電力ビーム転送の実現性に関心を寄せているという。



図 3-25 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/>(2022 年 12 月 26 日閲覧)



図 3-26 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/> (2022 年 12 月 26 日閲覧)

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⁴³」、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を目指す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。

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 が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⁴⁴。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、としている。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

⁴³ 原文は“by leveraging wireless power beaming to create a dynamic, adaptive, speed of light wireless energy web.”

⁴⁴ Tactical Wireless Power Beaming Technologies for Energy Web Dominance Request for Information(Notice ID:DARPA-SN-23-22)

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も試みている。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している。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んでいる。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、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。

なお、本 RFI の締め切りは 2022 年 12 月 16 日となっていた。

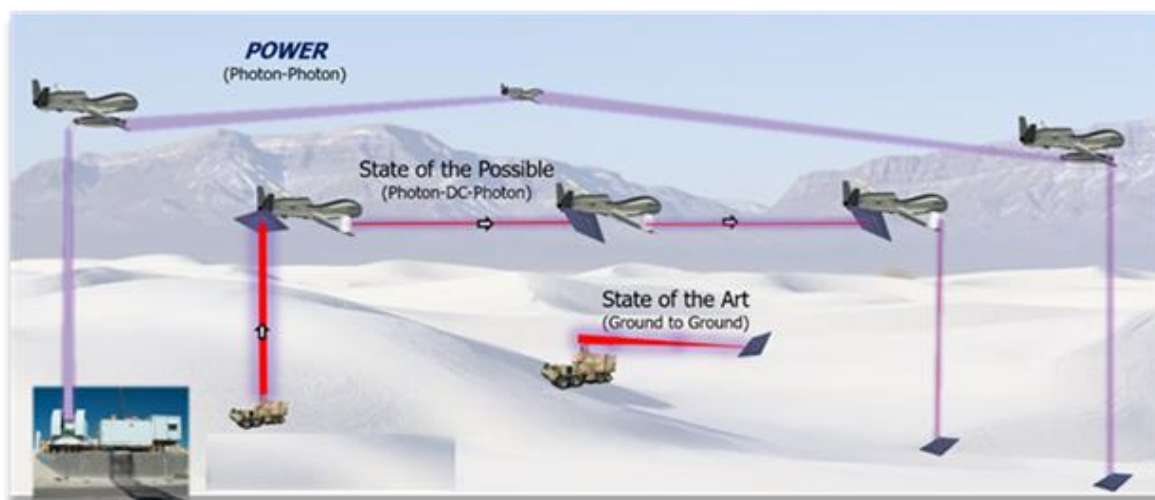


図 3-27 POWER プログラムの開発内容 (Credit : DARPA)

出所) <https://www.darpa.mil/news-events/2022-10-05b> (2023 年 1 月 16 日閲覧)

c. Raytheon 社によるミリ波用の新しい GaN Diode レクテナの実証実験

2021 年に、Raytheon Technologies 社の Intelligence and Space System Business Unit (リーダーは Hooman Kazemi 氏) は、新しい技術である GaN ナノショットキーダイオード (GaN nano-Schottky diodes (NSDs)) をモデル化し、高出力ミリ波整流器とレクテナ回路を開発し実証実験を行った⁴⁵。ミリ波を対象とした理由としては、ファーフールド無線電力伝送の実用化のためには、受電部の小型化と高電力密度がキーであり、ミリ波帯のファーフールド無線電力はマイクロ波帯と比較して経路損失を大幅に低減することができること、としている。W バンドの小信号および大信号の特性評価を行い、GaN ナノショットキーレクテナを試作し、95GHz において入力電力処理 3.6kW/m^2 で最高となる RF-DC 効率 61.5% を記録している。

⁴⁵ Hooman Kazemil, “61.5% Efficiency and 3.6 kW/m² Power Handling Rectenna Circuit Demonstration for Radiative Millimeter Wave Wireless Power Transmission”, IEEE TRANSACTIONS ON MICROWAVE THEORY AND TECHNIQUES

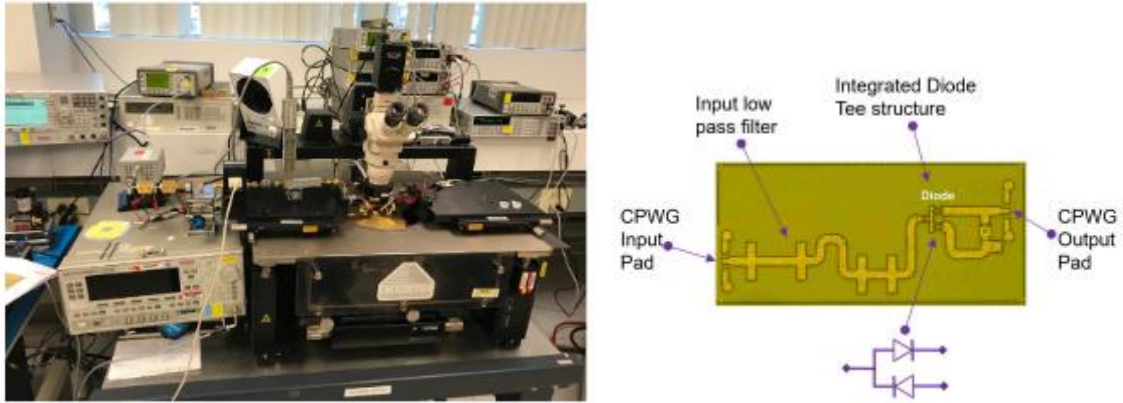


図 3-28 レクテナのセットアップ写真(左)／GaN/SiC ウェハ上に作製された GaN ナノショットキーレクテナ MMIC(2.1 mm × 0.75 mm、厚さ 50μm)(右)(Credit : Raytheon Technologies)

出所) <https://ieeexplore.ieee.org/stamp/stamp.jsp?arnumber=9540212> (2023 年 1 月 16 日閲覧)

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 に関して目立った動きは見られなかった。

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 月に、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(Space-Based Solar Power)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 の距離を無線で電力伝送した(図 3-29 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 3-29 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/> (2022 年 12 月 14 日閲覧)

3) 中国

中国では SSPS の研究開発を主導している 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。また、大学では、同じく SSPS 研究を主導している重慶大学、四川大学、西安电子科技大学等がマイクロ波送電実証実験を行っている。さらに、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。

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%以上を達成している。また、重慶大学では 2020 年に屋外において 5.8GHz、448W マイクロ波の 60m の距離の伝送実験を実施している。

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 3-30 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 3-30 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、ESA、Airbus 社、TechnoCarbon 社(仏)とのパートナーシップを締結し、前述の 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 3-31 参照)。

さらに 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 Bavaria⁴⁶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。



図 3-30 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/> (2023 年 1 月 20 日閲覧)

⁴⁶ 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。

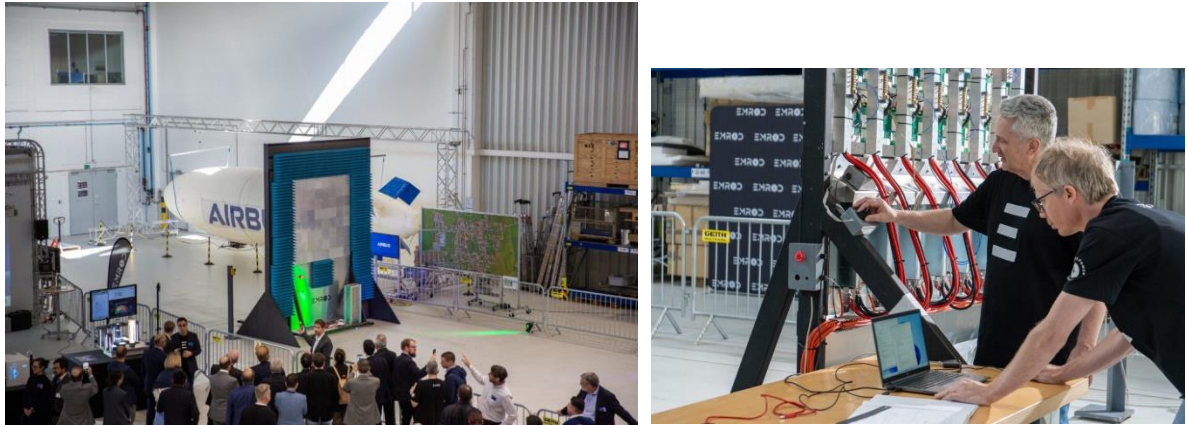


図 3-31 Airbus' Munich Area Site での実証実験システム (Credit: Emrod)

出所) <https://emrod.energy/press-release-emrod-successfully-demonstrates-power-beaming-technology-to-unlock-space-based-solar-power/> (2023 年 1 月 20 日閲覧)

5) 韓国

韓国の仁荷大学校(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ている。

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開始している。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。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、屋外実験を行っている(図 3-32 参照)。

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

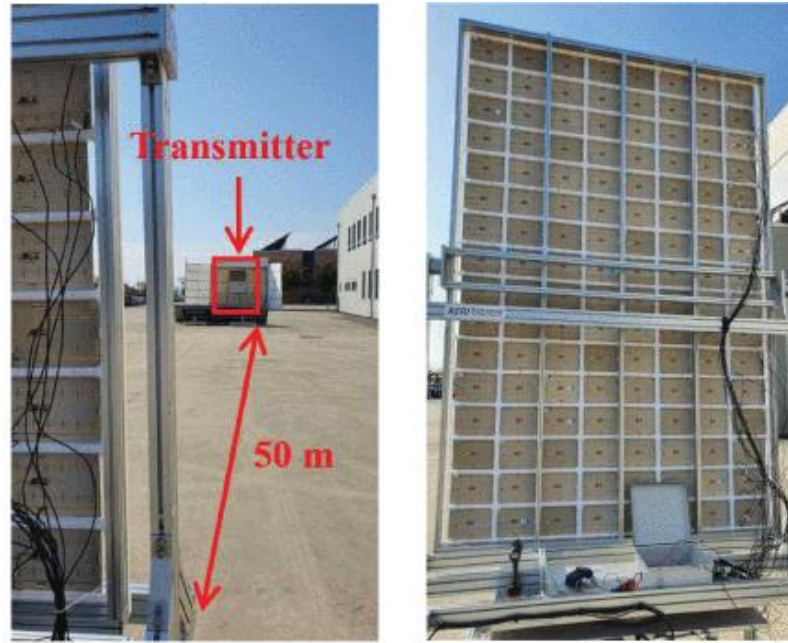


図 3-32 KERI における拡張可能なアレイ型レクテナの屋外実験

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

(4) レーザー方式 WPT(パワービーミング)の開発動向

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、取り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 月に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 の距離で 400W(受光部)のレーザー伝送を成功させた。また DARPA では、2021 年 10 月に、「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 3.2.2(3)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。

また、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り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り組みも行っている。

その他、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)を納入している⁴⁷。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兵器システムの試験を行っている。

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」を使用している。

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 3-33 参照)。



図 3-33 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> (2023 年 1 月 26 日閲覧)

(5) 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

⁴⁷ <https://news.lockheedmartin.com/2022-08-18-Lockheed-Martin-Delivers-Integrated-Multi-Mission-Laser-Weapon-System-to-the-Navy> (2023 年 1 月 26 日閲覧)

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。

Energous Corporation、GuRu Wireless, Inc.、Ossia Inc、Powercast Corporation といったベンチャー企業が空間伝送型 WPT 技術の実用化を主導し、米国を含む世界各国での周波数の認可を進め、小型電子機器(スマホ・ウェアラブル機器等)や IoT 向けセンサへの充電機器の製品化を競っている状況にある。

1) 電波方式 WPT の実用化取組み事例

屋内・近距離・小電力システムについては、実用化が目前もしくは一部製品化が行われており、900MHz、915MHz、2.4GHz 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 Energous 社では「WattUp®」Near Field 充電技術の製品化を行い、1W および 5.5W 出力の WattUp PowerBridge トランスミッタの販売を行っている。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。主に 900MHz 帯を使用している。

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いる。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⁴⁸。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、世界中に 100 社以上の顧客とパートナー企業を有している。

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⁴⁹。

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ワイヤレス充電

⁴⁸ <https://blog.ossia.com/news/fcc-issues-first-approval-of-wireless-power-transfer-with-no-distance-limits-to-ossias-cota-technology> (2023年1月27日取得)

⁴⁹ <https://reachpower.com/reach-to-deliver-the-first-industrial-scale-wireless-power-solution/> (2023年1月27日取得)

技術「Mi Air Charge Technology」の開発を行うことを発表している。

一方、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⁵⁰。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®」(図 3-34 参照)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。

またパナソニックは京都大学と共同で、920 MHz 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 3-35 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。

仕様概要

- ・ アンテナ方式：ダイポールアンテナ,パッチ・アンテナ,八木アンテナ等各種対応
- ・ 周波数帯：920MHz帯 2ch(918MHz, 919.2MHz)
- ・ 電波方式：CW(Continuous Wave)
- ・ 出力電力：1W以下
- ・ 送信間隔：4秒送信50msec以上停波
- ・ データ送信：MQTT(publisher)
- ・ 実験局申請承認

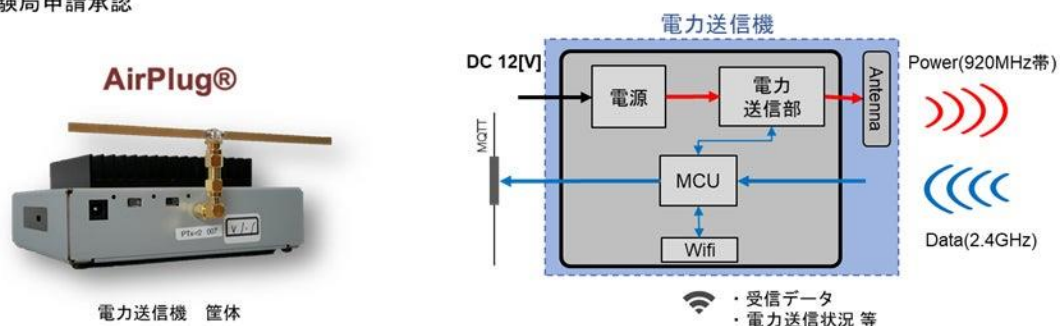


図 3-34 エイターリンク社の「AirPlug®」概要

出所)<https://prtimes.jp/main/html/rd/p/000000009.000071264.html> (2023 年 1 月 26 日閲覧)

⁵⁰ <https://prtimes.jp/main/html/rd/p/000000003.000071264.html> (2023 年 1 月 27 日閲覧)

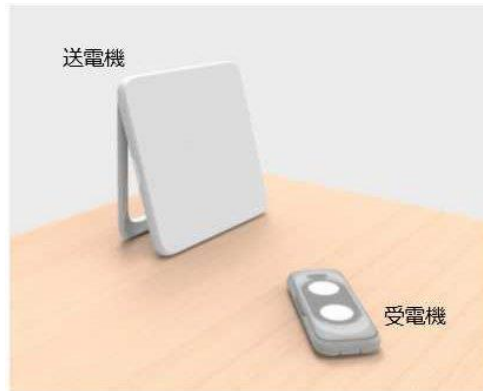


図 3-35 パナソニックが開発したマイクロ波電力伝送システム Enesphere

出所) <https://news.panasonic.com/jp/press/jn220324-3> (2023 年 1 月 26 日閲覧)

2) レーザー方式 WPT の実用化取り組み事例

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。商品化については未定であるが、NTT ドコモも協業している。

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⁵¹。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。

3.2.3 発電技術

(1) 太陽電池技術の現状

宇宙用太陽電池においては、高効率、軽量、高耐放射線性が重要視される。材料としては、地上における汎用太陽電池において主流のシリコン半導体よりも、変換効率に優れた化合物半導体が多く用いられている。また、さらに変換効率を高める素子構造として多接合太陽電池が多く採用されている。広く衛星用太陽電池として用いられているのは、GaAs などの III-V 族半導体素子を用いた 3～5 接合型の多接合型セルである。なお、集光条件下における無限接合型太陽電池の理論的な効率限界は 86.6%となっている⁵²。近年では、低コスト化が期待できる薄膜太陽電池として、CIS 系や CdTe 太陽電池の開発が進められている。

太陽電池セルの変換効率に関しては、米国の再生可能エネルギー研究所(NREL: National Renewable Energy Laboratory)が研究レベルの太陽電池の効率の推移チャートを随時更新している。図 3-36 に示す 2023 年 1 月 12 日改訂版によると、研究用セルの最高効率は、4 接合セルで

⁵¹ <https://www.presscube.jp/press-release/detail/53b170f2-5149-4e39-9a48-8a0407970942> (2023 年 1 月 27 日取得)

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。

⁵² “State-of-the-Art of Small Spacecraft Technology”, NASA, Oct 2021

47.6%を記録している。またペロブスカイト太陽電池⁵³のような新しい技術のセルの変換効率が、近年急激に向上していることが分かる。一方、宇宙用の太陽電池として利用されている代表的なものについて初期状態(BOL)性能における変換効率でプロットしたものを図 3-37に示す。多くのセルが25%～30%の変換効率を有していることが分かる。

宇宙用の太陽電池の効率に関しては、BOL 性能のみならず動作温度における寿命末期(EOL)性能も非常に重要である。太陽電池の機能を低下させる一般的な要因としては、放射線への曝露、カバーガラスや接着剤の黒ずみ、汚染、機械的・電氣的故障などが挙げられるが、SSPSにとってもEOL時の太陽電池効率はシステム全体やコストにおいても非常にクリティカルな要素となっている。また、セル単体の効率以上にモジュールとしての効率が重要であり、各国でモジュール効率を上げるための技術開発が盛んに行われている。日本では、2022年6月に、シャープが実用サイズの軽量・フレキシブルな太陽電池モジュール(太陽光パネル)で世界最高となる変換効率 32.65%を達成したと発表した。薄膜タイプの化合物 3 接合型太陽電池モジュールで、実用化に向けて十分なサイズの約 29cm×約 34cm(面積 965cm²)で、重量も約 56g(0.58kg/m²)まで軽量化している⁵⁴。

発電技術の中で、太陽電池の高効率化と並んで重要であるのは、軽量で大電力を供給できる性能である。そのため、発生電力質量比(W/kg)の向上も重要な技術開発項目となっている。現在の世界最高レベルの太陽電池パドルの発生電力質量比は150W/kg程度であり、それ以上を目指した研究開発が進められている(図 3-38 参照)。

その他、SSPS では大量の太陽電池を使用することになるため、低コスト化を図ることも極めて重要な課題となる。産業技術総合研究所では、低コストかつ高速な成膜技術を開発し、Ⅲ-V 族化合物太陽電池の低コスト化を進めているが、現行の宇宙用太陽電池のコストである 1W 当たり約 7,000 円を約 200 円まで下げることが目標にしている⁵⁵。

⁵³ 液体インクによる印刷やコーティングなどの塗布プロセス、真空蒸着により作製された材料の層で構成される薄膜デバイスで、軽量かつ柔軟、低コストというメリットがある。2009 年にハロゲン化鉛系ペロブスカイトを利用した太陽電池が桐蔭横浜大学の宮坂力教授らによって開発された。

⁵⁴ <https://corporate.jp.sharp/news/220606-a.html> (2023年1月27日閲覧)

⁵⁵ https://www.aist.go.jp/aist_j/magazine/20220914.html (2023年1月27日閲覧)

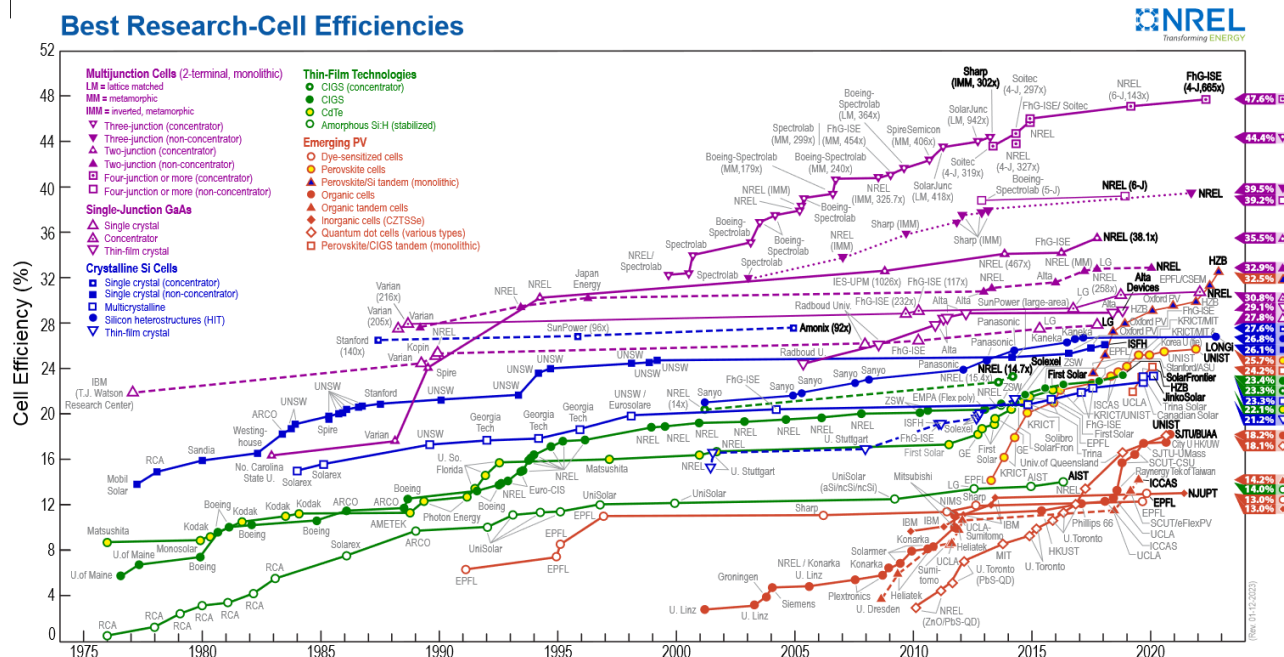


図 3-36 太陽電池セルの変換効率の変遷

出所) <https://www.nrel.gov/pv/cell-efficiency.html> (2023 年 1 月 27 日閲覧)

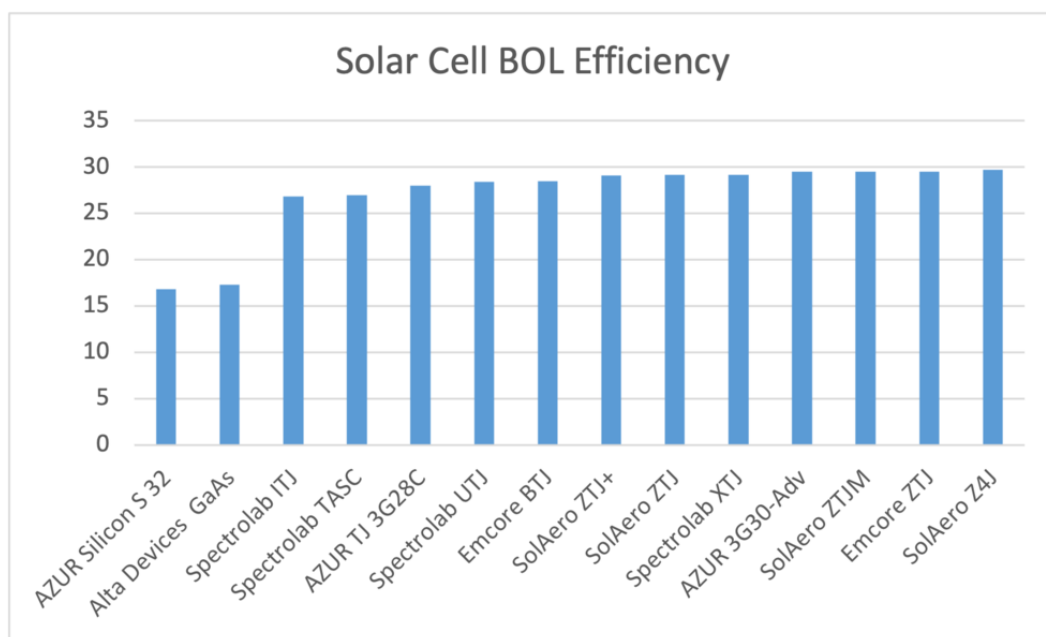


図 3-37 宇宙で利用可能な太陽電池セルの BOL 効率

出所) <https://www.nasa.gov/smallsat-institute/sst-soa/power#3.2.1> (2023 年 1 月 27 日閲覧)

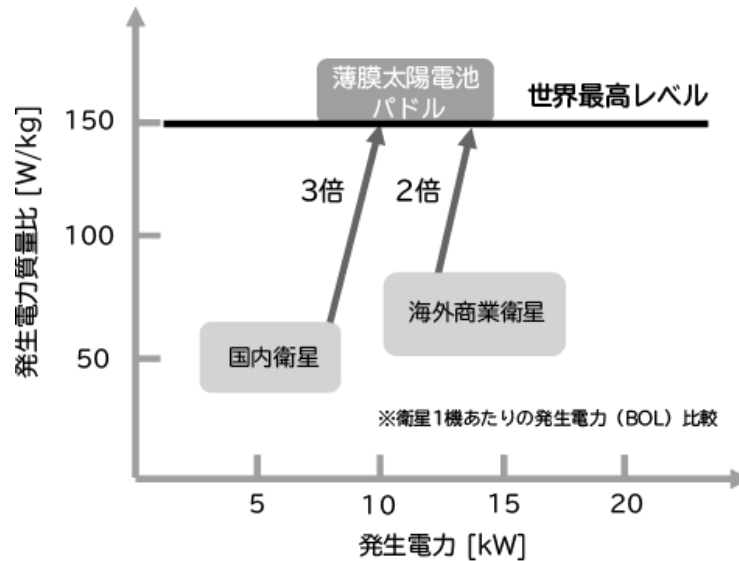


図 3-38 太陽電池パドルの性能比較

出所) <https://jpn.nec.com/techrep/journal/g21/n01/210133.html> (2023 年 1 月 26 日閲覧)

(2) SSPS 用太陽電池に求められる技術

SSPS の発電システムに用いられる太陽電池としては、1) 耐放射線性が高いこと (EOL 効率の維持)、2) 高効率かつ軽量であること (発生電力質量比が高いこと)、3) ロケットへの収納および宇宙空間での展開が容易であること、4) 資源が充分あり大量生産が可能であること、5) 低コストであること、等が求められる。このうち、1)～3) に関しては宇宙用もしくは SSPS 用特有の課題であり、地上での産業技術としてのニーズは低いことから、SSPS 独自での開発が必要となってくる課題となっている。以下に各課題の詳細を述べる。

- 1) 耐放射線性が高いことに関しては、SSPS 用の太陽電池として、EOL の効率目標が 95% 以上と高い耐環境性が求められている。また高耐放射線性に加えて、宇宙塵や宇宙デブリによる破壊の影響も考慮する必要がある。薄膜 CIGS については高い耐放射線性が確認されているが、保護カバーにより耐環境性を高くすることも可能である。
- 2) 高効率かつ軽量であることに関しては、特に宇宙機用で強く求められる性能であり、太陽電池セルが高価格であっても、変換効率の高いものが採用されてきた。しかし、近年は、より大出力化を実現するために、変換効率よりも薄膜化による単位重量あたりの性能向上が図られている。 α -Si や CIS 系太陽電池は III-V 族系多接合太陽電池と比べ変換効率では劣るが、圧倒的な軽量化を実現できるため、SSPS では有望な候補となっている。
- 3) ロケットへの収納および宇宙空間での展開が容易であることに関しては、2) 同様、薄膜太陽電池が期待されている。薄膜のため大量生産が可能で重量当たりの出力が大きく、折り畳みでの輸送と宇宙での展開が容易に行えるようになっている。
- 4) 資源が十分にあり大量生産が可能であることに関しては、III-V 族結晶化合物では、Ge や In の資源制約がある。集光系と組合せて、資源量の問題に対応する方法も考えられるが、In は CIS でも用いられるため、In の資源制約については今後も十分に検討していく必要がある。CdTe についても同様に資源制約がある。

- 5) 低コスト化に関しては、地上民生用太陽電池の活発な開発競争の下で大きな技術革新が今後期待できる。一般的に高コストであるⅢ-V 族多接合型では集光系と組合せて、低コスト化させることが考えられている。従来、宇宙用で使用されている高性能の太陽電池を、地上用の大きな需要を活用することで価格を下げるというような戦略も考えられる。

以上のような状況の中、現状、SSPS に使用される太陽電池としては CIS 系および(集光系と組合せて)Ⅲ-V 族多接合型の太陽電池が有望視されている。

また、次世代太陽電池として最近注目を浴びているペロブスカイト太陽電池は薄膜、大量生産が可能かつ低コストで、高い耐放射線性を持つことが期待されている。効率も向上してきており、日本を筆頭に実用化に向けて研究開発が大きく進んでいる。国内では積水化学工業や東芝などが 2025 年以降の事業化を目指している。SSPS 用の太陽電池として大きな可能性を有しており、今後の研究の進展が期待される。

3.2.4 まとめ

3.2.1 項で示した、ESA による 2 つの費用便益調査分析および 3.2.2 項以降で示した技術調査に基づき、SSPS の実現に必要な要素技術とその技術課題を整理し、現状の技術水準等を可能限り定量的に整理した。また、ESA の費用便益調査が技術進展を考慮してコストの算出および評価を行った際に用いた数字や技術の成熟度もまとめ、今後の開発に向けた課題や方向性等についても示した。整理・分析結果を表 3-20～表 3-21 に示す。

表 3-20 SSPS の実現に必要な要素技術とその技術課題等の整理(1/2)

技術分野／構成要素		技術課題	現状の技術水準	目標値／2040年頃の予測値	技術の成熟度	主な課題	開発の方向性
大分類	小分類						
集光部	リフレクタ 薄膜ヘリオスタット	高効率化	IKAROS等のソーラーセイルの開発・実証が行われている。	0.94～0.96(FNC) 0.95～1 (RB)	TRL 8 (RB)	フォイルはすでに工業的に大量生産されているので、今後は展開システムの生産が課題	
		軽量化		0.0204～0.027kg/m ² (FNC) 0.1g～5g/m ² (RB)			
発電部	PV (集光型／非集光型)	高効率化	・ラボ：0.23 (CIGS) ～0.44 (3接合集光あり) 4接合セルで47.6% ・モジュールBOL：0.07(CIGS) ～0.42 (3接合集光あり) ・宇宙用セルBOL：25～30%	0.27～0.36 (集光型) (FNC) 0.27～0.4 (RB) 0.36～0.4(EOL効率) (ESA)	TRL 9 (RB)	EOL効率(95%以上)	実験室レベルの効率はよいが、システムとして運用したときの効率が重要
		低コスト化	・Siパネル：0.18～0.8\$/W ・3接合：66～300€/W ・宇宙用：7000円/W	0.5～1€/W (ESA) 宇宙用：200円/W(産総研)			
		大量生産技術		2～5km ² /yr (ESA)			
		軽量化	・470 (3接合) ～816(CIGS) W/kg ・薄膜太陽電池パドル：150W/kg ・フレキシブル化合物3接合型モジュール：0.58kg/m ² (シャープ, 2022)	0.17～0.25kg/m ² (FNC) 0.5～0.6kg/m ² (100μmのカバーガラス付き) (ESA)			
電力分配／管理部		高電圧化		300～1000+ V (ESA)			
送電部	DC-RF変換	高効率化	マグネトロン：0.8 SSPA：0.6 クライストロン：0.8	0.78～0.87(FNC) 0.75～0.9(RB)(ESA) -- SSPA:0.85 -- クライストロン:0.9(RB)			
		高出力化					
		軽量化		0.12-0.15kg/m ² (FNC)			
	フェーズドアレイアンテナ	高効率化		0.9～0.95(ESA)			
		軽量化		0.5-1.5kg/m ² (RB)			
	ビーム形成技術	高精度化			TRL 4 (FNC)	レトロディレクティブビーム制御、他との干渉を防ぐプロトコルの確立	
		超長距離伝送	・1.6kW, 1km, X-band (NRL, 2022) ・36m, 5.8GHz (ESA/Emrod, 2022) ・440W, 60m, 5.8GHz (重慶大, 2020) ・200m(Emrod, 2022), 50m (KERI,2021) ・10kW, 500m, 2.45GHz (三菱重工, 2015) *34kW, 1.5km (NASA, 1975)	3万6000km			

※FNC:Frazer-Nash Consultancy のレポートの数字、RB:Roland Berger のレポートの数字、ESA:Solaris プログラムで示した ESA の目標値

表 3-21 SSPS の実現に必要な要素技術とその技術課題等の整理(2/2)

技術分野／構成要素		技術課題	現状の技術水準	目標値／2040年頃の予測値	技術の成熟度	主な課題	開発の方向性
大分類	小分類						
大型 構造体	超大型モジュール構造	大規模化	James Webb望遠鏡のサンシールド:20m×14m	重量比率:0.02～0.1	TRL 2(RB)	軌道にある他の構造物よりもはるかに大きい構造物の設計規則の確立、質量の最適化 モジュール間の通信と同期。大規模なセンサー・アクチュエーター無線ネットワーク	数平方kmに及ぶ接合型モジュール構造物の建設と挙動については、地上でも宇宙でも経験がない ⇒特化した開発プログラムが必要
		大量生産技術					
	構造物展開技術	超大型構造物の収納・展開・組立技術	James Webb望遠鏡のサンシールド:20m×14m 宇宙での展開型構造物は実証済み (SRTM ADAM、NuStar、IKAROS、Znamya 2、FAST mas):最大60m	1km～2km(ESA)	TRL 3 (FNC) TRL 5 (RB)	質量を最小にする一方での構造物の剛性要件の定義	
	熱構造	大規模化			TRL 3 (FNC)	衛星の熱設計技術は成熟しているが、システム規模が課題	
	組立ロボット	自律化	Canadaarm		TRL 3 (FNC) 個々のロボットアーム:TRL 5 (RB) アームネットワーク:TRL 2(RB)	ロボットの自律制御、ロボットと衛星モジュールと組立方式の共同開発	
受電部	ビーム収集効率	高効率化		0.84(FNC) 0.8～0.96 (RB)	TRL 4(FNC)	レトロディレクティブパイロットビームのコンセプト	
	RF to DC	高効率化	・ W. Brown:91.4% (7W, 2.45GHz) ・ 金沢工業大学:92.8%(1W, 5.8GHz)	0.82～0.88(FNC) 0.8～0.9(RB)		レクテナシステムのモジュール化	
		低コスト化					レクテナ部品はすでに大量生産されているが、建設および運用を通じての経済性が重要
	グリッド接続			0.95～0.985(FNC) 0.95～0.98 (RB)	TRL 7～8 (FNC)		
輸送部	LEOまでの輸送	低コスト化	1,410\$/kg (Falcon Heavy)	50-100 \$ /kg (RB)	TRL 7 (FNC)	主な課題は経済性	大型ロケットは、SBSPのために特別に開発されるのではなく、商業サービスとして提供される
	スペーススタグ／軌道間輸送	低コスト化	VASIMR (300kg)、RIT 2X(10kg)、Next-C (50kg) など開発、製造中				大規模に利用可能な推進剤を使用する EP システムを開発する必要
運用部	軌道維持	低コスト化			TRL 3 (FNC)	推進剤質量の最小化	既存技術の大規模構造物適用への
	メンテナンス				TRL 3 (FNC)	自律型ロボット、軌道上ランデブー、モジュール交換	
	デブリ軽減					自己修復材料の導入	
	寿命後管理				TRL 2 (FNC)		定義づけ、戦略等が必要

3.3 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

3.3.1 SSPS 要素技術の他のアプリケーションへの応用例

前項では、発電電技術を中心に、SSPS の実現に必要な重要要素技術や課題について整理し、現状と今後の見通し等を示した。今後、それらに基づき適切な目標設定を行い、研究開発・技術開発の意義、内容、達成状況、今後の方向性等について検討し、より効率的・効果的な方法により技術開発を実施していく必要がある。ESA では、今後の検討の結果、SSPS 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でも、そこまでに実施した研究開発の成果が他分野でも役立つように、他の用途にも有用な技術を調査・開発することにも焦点を当てることが明示されている。具体的には、例えば SSPS 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、利益をもたらすものであるため、後にSSPS研究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とされている。このように 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、衛星やシ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。またワイヤレス電力伝送は、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目指している企業のニーズに応えることができる。特に月の南極にある氷の採掘は、エネルギー集約型の作業であるため、月の極軌道にある SSPS システムで電力を供給することができる可能性がある。また、極点付近のクレーターの上にある太陽照射のある山頂に発電システムを設置し、その電力を永久影の領域に照射して、電力を必要な場所に供給することも可能である。

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無線エネルギー伝送技術(WPT)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。これらは、空間伝送型 WPT の適用事例と同様であるが、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。

3.3.2 SSPS および WPT の実用化に向けての課題

(1) SSPS 実用化に向けての課題

SSPS を構成するシステム要素に関する課題については 3.2 項で示した通りであるが、SSPS の実現に必要な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る。今後各技術の大規模システムへの応用と低コスト化が、SSPS 実現のための大きな課題となっている。

解決すべき技術的な問題は、システムの規模を十分に拡大できるかどうか、また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かどうかに関わるものとなっている。SSPS システムの実現に懐疑的な意見の中には、技術的・経済的な実現性に関する多くの課題を指摘するものがある。最も多いものは、SSPS システムの質量が非常に大きく、多くの打上げを必要とするため、軌道へのアクセスにかかるコストが膨大になるというものである。その他、SSPS を構成する宇宙用部品のコスト、組立てに必要な作業量、継続的な運用・保守コスト、環境影響の緩和などが課題として挙げられている。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性の重要性和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。

ただし、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的な進歩がみられている。

<SSPS を取り巻く近年の技術進歩>

- 打上げ機会の増加と打上げコストの低減
- 太陽電池効率の大幅な向上
- 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
- 複数のソースから数十億ドルの投資を受けることによる、超大型商業宇宙プロジェクトの達成可能性の向上
- 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 の構成部品を宇宙内での現地資源により調達できる可能性の増加（全ての資材を地球から打ち上げる必要がなくなる可能性）

これらの大型ロケット、先進的な宇宙ロボット、大型宇宙構造物の組立技術、月や小惑星の現地資源利用技術開発などは、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 開発の実現性は、SSPS 単独の取組みだけでなく、他の宇宙開発ミッションの取組みとも深く関わってくることとなる。

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が挙げられる。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 のオペレータは、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。これらの環境、人体への影響

を含む SSPS 実現に当たっての主な課題を以下に示す⁵⁶。

<SSPS 実現に当たっての主な課題>

- 環境への影響

SSPS のマイクロ波ビームによる大気加熱は無視できるレベルであり、また地上での発熱量に関しても、石炭、石油、天然ガス、および同程度の出力レベルを供給する原子力発電所に比べて大幅に少ないものとなっている。それ以上に、石炭、石油、および天然ガスによる粒子状物質や温室効果ガスの排出が極めて少ないことによる環境への負荷軽減の効果が非常に高くなっている。そのため SSPS に導入に当たっては、適切な法律とパワービームの保護基準等を制定し、遵守することで、他の発電システムと比べて環境への負荷を軽減することが可能となる。

- 人体への影響

一般の人々はマイクロ波放射が人体の健康に悪影響をもたらすことについて懸念している可能性がある。SSPS は Wi-Fi や携帯電話に近い、より低エネルギーのマイクロ波で運用するものであるが、さらなる安全性を確保するため、SSPS の無線電力ビームの影響に関しては追加で研究を行う必要がある。現在、米国連邦通信委員会(FCC)は、マイクロ波への人体被曝の厳格な制限を規定し、マイクロ波放射施設の環境調査を義務付け、マイクロ波放射技術を監視することによって、マイクロ波の過剰被曝の脅威に対処しているが、無線電力伝送に関しては明確な規制と方針が定められていない。今後はさらなる研究および検討を重ね、受信施設周辺の緩衝地帯、受信施設のマイクロ波吸収パネル、出力レベル、照射時間、受信施設の位置の義務付けなどの対策が求められる。

- 打上げコストと打上げ能力

ペイロード 1kg あたりの打上げコストは、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、宇宙打上げ市場全体のコストを削減し、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。一方で、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る。さらに地球低軌道までの打上げと比較しても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。

- SSPS の建設

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、Starlink 社は毎月 120 機以上の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ている。宇宙でのロボットによる建設技術に関しても、NASA や DARPA等で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を開発するプログラムが実施されている。また NASA を始め、中国でも、月等の利用に向けたプログラムを

⁵⁶ “Space Policy Review - The Promise of Space-Based Solar Power”, Cody Retherford, American Foreign Policy Council (AFPC), Sept 2022

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を示している。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 の展開をより迅速に拡大できる可能性もある。

- 衛星軌道と周波数

衛星の軌道と周波数は、国際電気通信連合(ITU)が管理する有限の資源である。ITU は 193 の加盟国に対し、国際的な周波数管理と共有に関するガイダンスを無線規則として発表しており、グローバルな電気通信と政府アプリケーションをサポートする衛星用の軌道と周波数を管理している。SSPS の構築および運用を行う国は、サービスを妨害し衛星衝突を引き起こす可能性のある電磁波や軌道の干渉を避けるために、ITU を通じて国際社会と軌道や周波数について調整する必要がある。国際協力と国際宇宙条約・原則の遵守は、合法的に資源を確保し、国際的な支援を確保するために不可欠となる。民間の運用者が行うとしても、SSPS プログラムに対する国内外からの支援が、引き続き重要となる。

(2) WPT の実用化に向けての課題

放射型(空間伝送型)WPT は、小電力で比較的近距離のシステムについては、海外ではすでに実用化が始まっている。日本でも屋内での利用を前提としたマイクロ波方式の空間伝送型無線給電の利用に向けた制度化が進み、2022 年 5 月に、総務省より「電波法施行規則等の一部を改正する省令」が公布された。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ており、社会実装に向けた動きが始まりつつあるところである。

さらに、空間伝送型無線給電の応用例として、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 技術のスピンオフとしても、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。

これらの屋外・長距離無線電力伝送技術を実用化していくためには、長距離・大電力化や高効率化、軽量化等の技術的な課題がある。屋外・長距離 WPT に関する技術開発上の課題としては以下に示すものが挙げられる。

<技術開発上の課題>

- 送電ビームの制御技術
- 長距離電力伝送におけるビーム捕集効率の向上
- 受電部の大電力化(高耐電力)と軽量化
 - 受電装置の高性能化(RF-DC 変換に用いるデバイスや整流回路の高耐電力・高効率化等)

実用化に向けては、さらに制度・政策上の課題を解決していく必要がある。具体的には、以下に示すような WPT 実用化に向けての課題が考えられる。

<制度・政策上の課題>

- 電波法などの法令整備

- 人体防護
- 既存の電波システムとの共存
- 障害物検知などの安全性対策
- 標準規格化

3.3.3 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 SSPS に取り組んでいる全ての国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 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システム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とはなっていない。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、大規模構造物の構築と運用、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などの課題は、他の宇宙ミッションによっても取組まれ、今後技術進展していく可能性も高い。SSPS 開発では、これら以外の 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、具体的には 3.2.3(2)でも述べたように、発電技術としては高耐宇宙環境性の太陽電池、高発生電力質量比の太陽電池モジュールの開発等が挙げられる。無線電力伝送(WPT)技術としては高出力デバイスの開発、高精度ビームフォーミング／制御技術が SSPS 特有のものとして挙げられる。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、極めて集束させたビームを形成し、受電施設に正確に指向させる必要がある、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。しかし、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 技術開発の成果を活かして 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。実際、日本で総務省が制度整備を行っている空間伝送型ワイヤレス電力伝送システムの検討においても、第

3 ステップでは屋外利用・大電力送電を行う発展フェーズへ移行するとしており、SSPS のアプリケーションも視野に入ってくる可能性もある。地上の WPT でのビームフォーミング技術や半導体デバイスなどは SSPS にも繋がるものもあり、WPT での技術や低コスト化などが進めば、SSPS もそれらの技術の恩恵を受ける可能性がある。また、地上空間伝送型 WPT では、ミリ波やサブミリ波などの高い周波数のシステムが検討され始めているが、これらの技術動向も、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活かされる可能性が高い。なお、マイクロ波送電の素子としては、SSPS でも半導体デバイスとして高効率である GaN が有望視されており、地上 WPT においても低コストの GaN の開発が進み SSPS での応用も期待できるところとなっている。一方で、地上では効率よりも低コスト化が重視される場合も多く、必ずしも地上 WPT と SSPS とで開発の方向性が同じになるわけではないが、いずれにしろ地上 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。

宇宙構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構造物であるため、それに起因する課題についての技術開発については 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構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、モジュール構造物の配置・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。

なお、この他、要素技術開発以外にも、初期の段階の宇宙実証の規模についても十分な検討が必要である。多くのロードマップが数十 kW～数百 kW の規模を第一段階の宇宙実証とするロードマップを描いているが、そのような規模のシステムの宇宙実証を行うことは容易ではない。そこに至るまでに、上述したような要素技術に関する小規模の軌道上実証を行ったり、広く国民の理解を得られるようなデモンストレーションを行ったりすることを検討する必要がある。例えば微小な電力であっても、宇宙からマイクロ波やレーザーで地上に電力が送れるということを、他国に先駆けて実証できれば、国民への理解増進という意味でも大きな効果を発揮すると考えられる。

さらに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が期待される。

3.3.4 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(2GW 級)のシステムとなっており、一国で取り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極めて高い。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て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、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

本調査では、「赤外域を含む多波長センサに関する調査・検討」と「宇宙太陽光発電・無線給電技術に関する調査・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、学会への参加による情報収集を組み合わせで行った。加えて、「赤外域を含む多波長センサに関する調査・検討」では、5回の研究会の開催も行った。

2章で述べた赤外域を含む多波長センサに関する調査・検討では、まず、欧米の多波長リモートセンシングを取り巻く状況を調査・分析し、現時点では、多波長センサを搭載した衛星打上げ数は未だ限定的であるが、今後、数年の後に一気に増加すると見込まれていること、そして、米国および欧州では政府主体で大型の多波長センサ開発を実施し、民間企業と相互補完体制を構築しつつあることが明らかとなった。次に、我が国のリモートセンシングデータビジネスの活性化に向けた課題について洗い出し、ハードの強さを活かしたデータ利用ビジネスのエコシステムが構築出来ていない、ビジネス実証のスピードが諸外国と比較して遅い、リモートセンシングの活用に関する国際ルール形成への取組みが十分ではないなどの6つの課題に整理した。最後に、これらの課題の解決のために海外市場とアイデアの掘り起こしを狙う4つの施策を検討した。課題の整理や施策の検討にあたっては15名の有識者による研究会を設置し、5回の研究会を通じてご助言をいただいた。

3章で述べた宇宙太陽光発電・無線給電技術に関する調査・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おり、欧州では2030年代後半から2040年代に、中国も2050年に GW 級のシステムの稼働を計画していることを示した。また、ESA において実施された2つの FS 調査の費用便益調査について分析し、コスト見積りの前提や想定している便益についてまとめた。さらに、関連する要素技術として、無線エネルギー伝送技術や発電技術についても動向を調査した。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として、高耐宇宙環境性の太陽電池、高発生電力質量比の太陽電池モジュールの開発、無線伝送用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、宇宙構造物の建設および運用等の SSPS 特有の課題に取り組むことを提案した。

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。

添付資料

- 添付資料1:多波長リモセンデータビジネス研究会報告書

多波長リモセンデータ利用ビジネス研究会 報告書

2023年3月

目次

1. はじめに

2. 多波長リモセンデータビジネスを取り巻く状況

3. 現状の課題

4. 今後の方向性

5. おわりに

参考資料

1. はじめに

背景と目的

- 衛星の小型化やコンステレーションの一般化に伴い、リモセンデータビジネスは変革期を迎えている。また、ドローンや HAPS の出現により、従来からあった衛星と航空機以外に高さ方向の多様性が生じ、複数のプラットフォームで取得したデータを組み合わせた新たな利用方法も生まれつつある。
- 解像度、頻度だけでなく波長情報も取得可能なことはリモセンデータの特徴である。世界的にも波長方向の情報を詳細に取得する多波長センサの活用が進み、温室効果ガスの排出源・吸収源を計測してビジネスにつなげるような新たなビジネスも出現している。
- 多波長センサは ASTER、HISUI といったプロジェクトを推進してきた我が国が強みを持つ領域である。一方で、現時点では利用のためのスペクトルデータが量・質ともに不足しており、強みを活かすための戦略・方策が求められている。
- このような状況を受け、衛星・ドローン・センサメーカー、データプラットフォーム、ユーザ、金融等から幅広くメンバを集めた「多波長リモセンデータ利用ビジネス研究会」を2022年10月に立上げ、我が国の多波長リモセンデータに関する現状や課題を整理・把握するとともに、今後の戦略の方向性について議論を行った。本報告書は同研究会での議論の結果をとりまとめたものである。

2. 多波長リモセンデータビジネスを取り巻く状況

衛星・センサの動向概観

-
- | Constellation | Launch Date | Status |
|--|-------------|-----------------------|
| Satellite | 22/10 | Launched |
| Norstar (Skyrio) | 9/32 | Prototype development |
| Kiwa Space | 1/36 | Prototype development |
| Tianjin Satcom Geospatial Technologies (36 Tianjing) | 9/36 | Prototype development |
| Pixel | 9/36 | Prototype development |
| Qianfeng | 1/20 | Prototype development |
| Zhuhai Orbital (Zhuhai-1) | 12/10 | Launched |
| HySpecQ (HySpec) | 2/12 | Prototype development |
| Planet Resources | 3/10 | Cancelled |
| Satellite (Satellite) | 9/12 | Prototype development |
| Orbital Sidekick (GHOS) | 2/8 | Prototype development |
| Hypersat | 9/6 | Prototype development |
| Wyvern | 9/7 | Prototype development |
| SpaceLab US | 9/7 | Prototype development |
| Satellite | 9/7 | Prototype development |
| Satellite | 9/7 | Prototype development |
| Muon Space | 9/7 | Prototype development |
| Hypercubes | 9/7 | Cancelled |

ハイパースペクトルセンサの分光方式

2. 多波長リモセンデータビジネスを取り巻く状況

衛星・センサの動向(1): 海外政府衛星・センサ

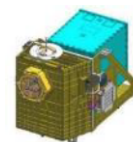
- 多波長衛星・センサ開発は米国と欧州で加速傾向。ESA-NASA(ESAのCHIME衛星とNASAのSBG衛星)協調による10年間の全球ハイパー観測を計画している。
- ESAでは Cubesatサイズ(Hypercube)、小型衛星サイズ(ELOIS)、大型サイズ(CHIME)の3種ハイパーを開発中。
- 政府向け大型センサー(低頻度、高精度、全波長一括観測)が、小型センサーコンステ(高頻度、ほどよし精度、波長限定観測)による民間ビジネスを支援する関係性。



NASA-ESAの共同観測体制

(出所) CSP-J金岡氏発表資料

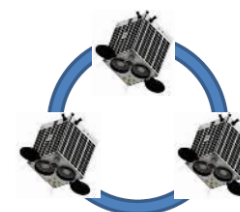
大型ハイパースペクトルセンサー



- 高精度、全方位観測、低頻度
- 広域かつ網羅的観測
- 高精度観測データによる小型センサー性能の校正
- 小型センサーデータによる差分抽出のため過去の網羅的観測データの提供
- 新たな知見の導出

観測方式：全BANDを同時に観測
→使われるかどうかかわからないデータを大量に発生させるので、データ量当たりの生産性は低い。

小型ハイパースペクトルセンサー
コンステレーション



- 目的に特化した観測項目、精度、頻度
- 限定地域の高頻度、スポット観測
- 安価な衛星・センサーを数多く上げて必要な高頻度を確保

観測方式：電氣的に切替えながら1 BANDずつ観測
→大型センサーデータにより観測すべきBANDを絞り込んでおけると、効率的運用が実現可能。

大型/小型ハイパースペクトルセンサ

(出所) 安達委員発表資料

衛星・センサの動向(2): 海外民間衛星・センサ

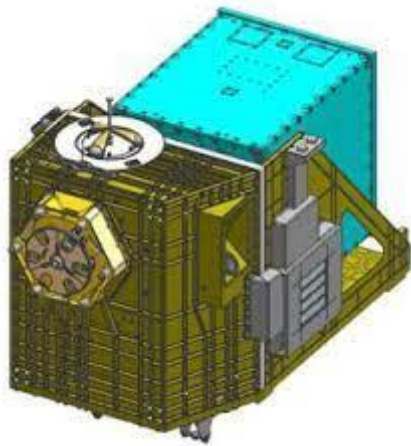
- 多波長衛星コンステレーション構築を目指す企業が北米、欧州、中国、インドで活発化。特に打上済機数が多いのはSatellogicの26機。
- 多波長衛星に搭載されているセンサのバンド数は30前後が多いが、OrbitalSidekickやHyspecIQでは数百バンドのセンサの搭載を計画している。
- GHGガス観測は、CH₄、CO₂、NO₂、SO₂の測定を目的に小型センサーの開発が進んでいる。Planet社やGHGSat社では30m程度の空間分解能で、GHG監視を対象としたコンステ構築を目指している。
- 2025年頃までに一定数の多波長コンステが構築される見込みである。

海外の多波長衛星事業者

社名	国	現在機数	コンステ完成時機数・時期	バンド数	分解能	補足
Orbital SideKick	アメリカ	2機	6機(2022年)	512	5m	
HySpecIQ	アメリカ	0機	12機(不明)	220以上	5m以下	ピーター・ティール出資
Wyvern	カナダ	0機	36機(不明)	不明	1~5m	
Kuva Space	フィンランド	0機	不明	不明	25m (最終的に10m以下)	旧Reaktor Space Lab
ScanWorld	ベルギー	0機	5~10機(2026年)	不明	不明	
Satellogic(HSのみ)	ウルグアイ アルゼンチン	26機	200機(2025年)	33	25m	低価格でデータ提供
NorthStar Earth and Space Inc.	カナダ	0機	40機(不明)	不明	不明	
長光衛星技術(HSのみ)	中国	2機 (マルチ含め83機)	マルチ含め300機(2025年)	26	5m~150m	中国初のリモセン企業
珠海欧比特宇航科技(HSのみ)	中国	8機 (マルチ含め12機)	マルチ等含め34機(不明)	32	10m	
Pixxel	インド	0機	30機以上(2024年)	300	5m	将来的に地球外の資源探査
Planet(HSのみ)	米国	0機	2機(2023年)	400程度	30m	GHG観測
GHGSat	米国	6機	12機(2023)年	不明 (SWIR帯のみ)	50m以下	GHG観測

衛星・センサの動向(3):日本の衛星・センサ

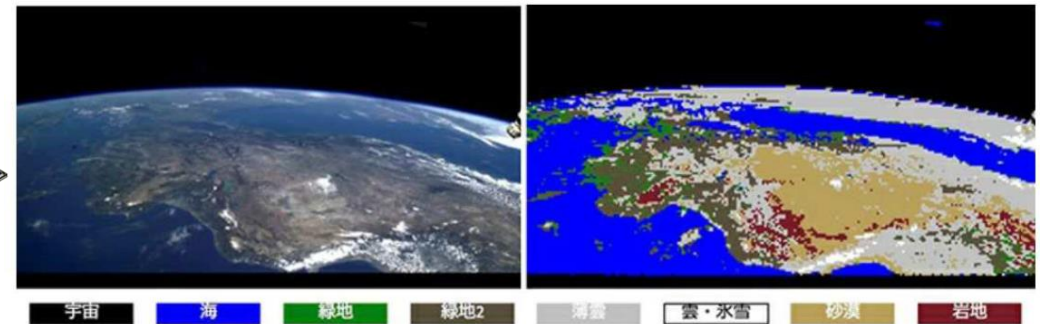
- HISUI: 経済産業省が開発し運用している宇宙実証用のHSセンサで、可視～短波長赤外まで($0.4-2.5\mu\text{m}$)を連続した185バンドで観測可能である。2019年に打上げ、ISS/JEMへ設置し、2020年9月に初画像を取得している。現在、順次Tellus上にてデータ公開中である。
- うみつばめ衛星: 東京工業大学等が開発を進めている世界初の産学連携持ち寄りパーティ方式の衛星プロジェクトである。うみつばめ衛星にはチューナブル・マルチ対応の我が国独自の分光センサLCTFを搭載している。また軌道上でのハイパー画像の処理(軌道上分光エッジコンピューティング)を予定している。



HISUI



うみつばめ衛星



軌道上分光エッジコンピューティングイメージ

(出所) 武山委員発表資料

2. 多波長リモセンデータビジネスを取り巻く状況

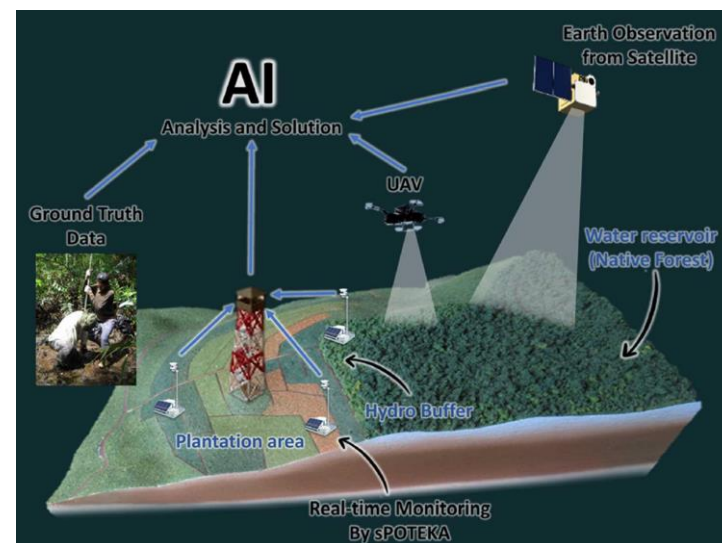
多波長リモセンデータビジネスの概観

- 多波長データは、農業、林業・森林、漁業・沿岸、資源、環境保全、GHGなど様々な分野で利用できるポテンシャルあり。
- これを捉えた多波長データを利用したビジネスの実証スピードは海外企業が先行。我が国でも政府主導での小型多波長センサの開発、利用実証PJの推進、Tellus経由でのデータ配布などの取組みはされているものの、具体的なビジネスの創出スピードでは後塵を拝す状況。

	農業	林業・森林	漁業・沿岸	資源	環境保全	GHG
観測波長	VNIR, SWIR	VNIR, SWIR	VNIR, SWIR	SWIR	VNIR, SWIR	MWIR
得られる知見	農作物の種別判別、育成状態	森林インベントリ（面積、樹種、育成状態）	沿岸の植生、水深、海色	地表地質、鉱山汚染	土地被覆	GHG含有量
スマート〇〇	農業の作業効率化、デジタル化	林業の作業効率化、デジタル化	沿岸漁場環境の維持・改善	鉱山モニタリング、探鉱作業の効率化	土地利用把握作業の効率化	
政府統計業務	CO2吸収量算出業務の効率化					
防災・減災		森林火災早期発見				
保険	農業保険の商品化	森林保険の商品化	漁業保険の商品化			
	損害保険の被害状況認定プロセスの効率化					
カーボン・クレジット	海外・深遠地のモニタリング作業の効率化、モニタリング頻度の確保（マネジメント対象の拡大）					
（国内）カーボン・クレジット化	農地	森林	藻場（ブルーカーボン）			企業個別CN活動効果計測
（海外）オフセットの創出・投資		森林	マングローブ、藻場（ブルーカーボン）		泥炭地	
データの信頼性	センサー性能、撮像データ解析プロセスの透明性確保→クレジット・エビデンスとしての高い信用価値→認証ビジネス					
新興国支援	高精度データまたはデータ計測手段の提供による、新興国自然保護の実現及び自然保護活動のクレジット化					
GIとのリンク	⑨スマート農業	⑨スマート農業 ⑩ネガティブエミッション（NE）モニター	⑨スマート漁業 ⑩NEモニター	⑤蓄電池端子材料（経済安全保障） ⑧CO2排出量削減	④NEモニター	⑩GHG観測、CO2排出削減評価

※VNIR：Visible and Near Infrared 可視近赤外、SWIR：Short Wavelength IR 短波長赤外、MWIR：Middle Wavelength IR 中波長赤外、NE：Negative Emission、GHG:Green House Gas 温室効果ガス

多波長センサのユースケース

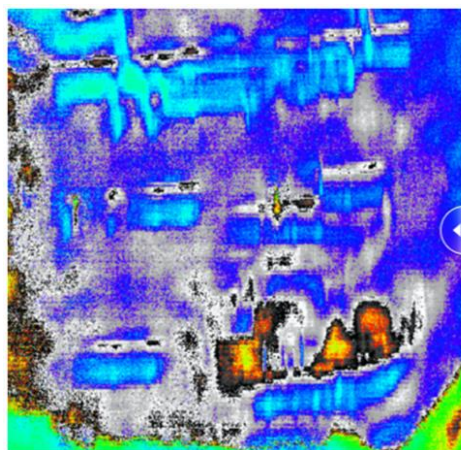


モニタリング精度を向上させる
地上データの可能性

（出所）加藤委員発表資料

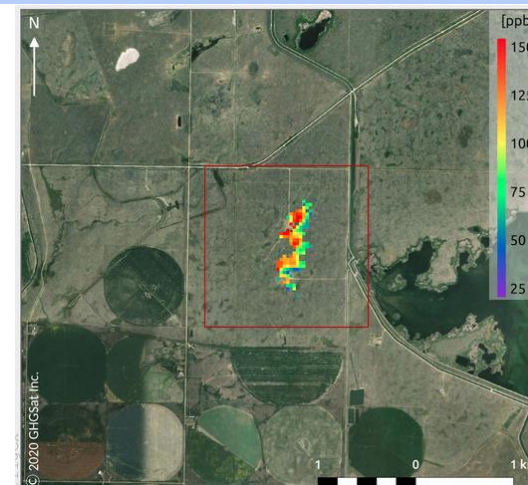
多波長リモセンデータビジネスの傾向:

- 多波長センサのユースケースとして米国企業はパイプライン監視等を想定している傾向がみられる。NROの支援を受けるHySpecIQのように安全保障に特化している企業も存在する。
- 中国企業は農業・林業等を想定している傾向がみられる。自社の衛星コンステレーションを構築している珠海欧比特宇航科技は、中国政府と協力し、HSデータを含めた処理技術の研究開発や普及促進の取組等を行っている。
- 多波長データ利用ビジネスではGHG監視も注目されている。衛星を用いたGHG監視では、Planet社等のように気候変動関連の組織・活動を顧客とするパターンと、GHGSat社のように民間企業を顧客とするパターンがある。



Orbital SideKick社のパイプライン監視イメージ

出所) <https://www.orbitalsidekick.com/technology>



GHGSatのGHG監視イメージ

出所) <https://spacenews.com/ghgsat-new-sensor/>

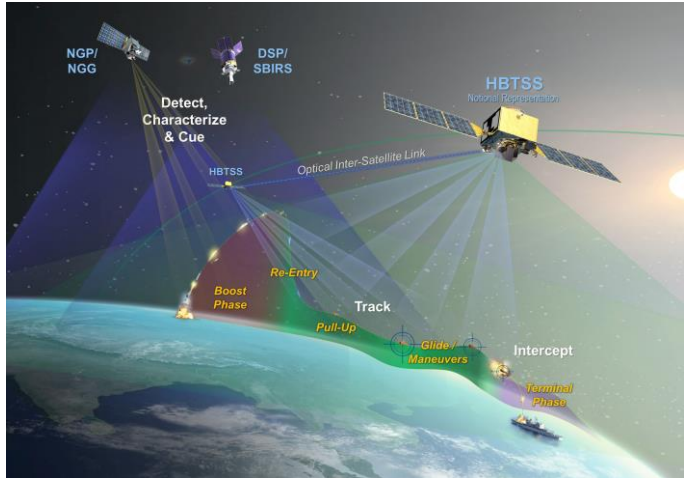
多波長リモセンに関する政策動向:

- 米・欧では大きなプログラムの中で多波長センサの研究開発を推進している。
- 米国では弾道ミサイル防衛システム(BMDS)において、ミサイル発射の発見/追跡に衛星の赤外線センサを用いる等、安全保障関係機関が赤外線センサを中心に研究開発を支援している。また、NROが今後のHSデータの調達を見据えた評価に関するRFPを発表しており、今後民間のHSデータを調達していく方向性とみられる。
- 欧州ではHorizon Europeにおいて、産業競争力強化を目的としてアプリケーションから基礎的な研究まで幅広く研究開発を支援している。また、Copernicusでは民間衛星データを調達・活用しており、将来的にHSデータを調達する可能性がある。

	プログラム名		組織	多波長センサ対象	概要
米国	BMDS	SBIRS	USSF	赤外線	赤外線を使用した弾道ミサイル早期警戒衛星システム
		NG OPIR	USSF	赤外線	SBIRSの後継計画の弾道ミサイル早期警戒衛星システム
	FORTRESS		AFRL	赤外線	赤外線センサに関する研究開発プログラム
	NROによる民間データの調達動向(再掲)		NRO	ハイパースペクトル等	NROの民間企業との研究契約およびRFP
欧州	Horizon Europe		EU	ハイパースペクトル, 赤外線	EUの研究開発プログラム
	Copernicusによる民間データの調達動向		EU	光学, SAR (将来:ハイパースペクトル)	Copernicusの民間衛星データを調達する枠組み

海外の主な多波長関連プログラム

(出所) 各種公開情報よりMRI作成



弾道ミサイル防衛システム(BMDS)イメージ

多波長リモセンデータビジネスを取り巻く状況 まとめ

	プラス要因	マイナス要因
内部環境	強み(Strength) - ASTER、HISUIによるハイパースペクトルセンサの軌道上実績がある(バンド数は世界最先端) - うみつばめ衛星によるチューナブルマルチセンサの軌道上実証を予定しており、将来の小型化に向けた技術的優位性がある	弱み(Weakness) - ビジネス実証のスピードが諸外国と比較して遅い - ハードの強さを活かしたデータ利用ビジネスのエコシステムが構築出来ていない - リモセンの活用に関する国際ルール形成への取組みが十分ではない - 民間主体のハイパースペクトル衛星コンステレーションが存在しない
外部環境	機会(Opportunity) - 世界的に多波長センサを搭載した衛星打上げ数は未だ限定的である - アプリケーションの1つであるGHG観測の官民需要が高まりつつある - 米国では安全保障用途で民間企業の多波長データの需要が高まりつつあり、外国企業にも参入余地がある	脅威(Threat) - 海外の民間企業による多波長センサを搭載した衛星の機数が今後数年で増加する - 米国および欧州では政府主体で大型の多波長センサ開発を実施し、民間企業と相互補完体制を構築している - 一部の民間企業(Satellologic、HySpecIQ等)では具体的にユーザ企業・組織と連携し、POCを推進している

3. 現状の課題

多波長リモセンデータ利用ビジネスの課題

- 多波長リモセンデータ利用ビジネスを取り巻く状況や研究会での議論を通じて特定された、我が国の多波長リモセンデータ利用ビジネスの課題を以下に整理する。

ビジネス面の課題：

1. 多波長リモセンデータ利用ビジネス創出のスピード欠如
2. POCを気軽にできる仕組み不足
3. ビジネスに不可欠な金融の巻き込み不足

ビジネスを支える基盤面での課題

1. 日本型のエコシステム(適切な利益分配が得られる仕組み)の不存在
2. 国際ルール形成力の弱さ
3. (見えない)センシングデータの価値の普及不足

ビジネス面の課題(1):ビジネス創出のスピード欠如

ビジネス面での課題(1)

- 多波長リモセンデータ利用ビジネス創出のスピード欠如

課題概要:

- 欧米では、「膨大なデータから新たな知見を導出する試み」のフェーズから「新たな知見の一つに着目し専用のコンステでニッチなビジネスを始める試み」のフェーズに移行しつつある。
- 我が国でも政府主導での小型多波長センサの開発、利用実証PJの推進、Tellus経由でのデータ配布などの取組みはされているものの、具体的なビジネスの創出スピードでは欧米企業の後塵を拝す状況。

ビジネス面の課題(2): POCを気軽にできる仕組み不足

ビジネス面での課題(2)

- POCを気軽にできる仕組み不足

課題概要:

- 多波長データは情報データの一つであり、種々のビジネスの源泉である。政府によりビジネス立上げのためのPOCの機会もいくつか設定されているが、利用可能なデータや機会が限定的であり、ビジネスの可能性等を見積ることが難しい状況。
- また、ユーザや金融に対するアピールにもつながる成果の公表も十分ではない。

ビジネス面の課題(3): 金融の巻き込み不足

ビジネス面での課題(3)

- ビジネスに不可欠な金融の巻き込み不足

課題概要:

- 基礎研究とユースケースを結び付けることが難しい初期段階では、政府からの資金面での支援が必要であるが、その後のビジネスの自走には金融の活用が不可欠。
- 金融側もリモセンビジネスに興味・関心はあり、また投資のための様々なファイナンスの仕組みもあるが、リモセンで何ができるのか、いつ頃にPOCの成果が見れるのかなどの予見性が不足しており、具体的な支援に至っていない状況。

基盤面での課題(1): 日本型エコシステムの不存在

ビジネスを支える基盤面での課題(1)

- 日本型のエコシステム(適切な利益分配が得られる仕組み)の不存在

課題概要:

- 海外は上流から下流までを手掛ける垂直統合型の企業が存在。
- 一方、日本には垂直統合型の企業は存在せず、表舞台であるビジネス／サービスと舞台裏である観測手段・観測プローブ(波長等)との断絶が生じている状況。
- 関連するプレイヤーが有機的に連携し、ビジネス／サービスの実現につなげていく仕組みが求められている。

基盤面での課題(2):国際ルール形成力の弱さ

ビジネスを支える基盤面での課題(2)

- 国際ルール形成力の弱さ

課題概要:

- 欧米は国際的なルール形成をビジネスの手段として活用し、新たな市場を生み出していくメカニズムを創出しつつある。
- 日本においても、国、国際機関、NGO等を巻き込み、炭素監視メカニズム、安全保障とのデュアルユース、エネルギー等の多様な観点を踏まえた包括的な戦略が必要。

基盤面での課題(3): センシングデータの価値の普及不足

ビジネスを支える基盤面での課題(3)

- (見えない) センシングデータの価値の普及不足

課題概要:

- 赤外線は目に見えないものであることから、赤外線を活用するという発想に至ること自体が難しく、赤外線技術の有用性があまり認知されていない。
- センシングデータは他分野の解決に役に立つツール(ものさし)であり、現在の利用分野以外にも使える分野は様々想定されるが、宣伝力の不足等もあり利用分野の広がりには限定的である。

課題解決に向けた視点・留意事項(1)

ビジネス面の課題(1)～(3):

- 多波長リモセンデータ利用ビジネス創出のスピード欠如
- POCを気軽にできる仕組み不足
- ビジネスに不可欠な金融の巻き込み不足

課題解決に向けた視点・留意事項

- ビジネス立上げに向けてPOCに気軽に、数多く取り組むことができる仕組みづくりを構築するべきではないか
- リモセンビジネスと金融との連携を進めるべきではないか

ビジネスを支える基盤面の課題(1):

- 日本型のエコシステム(適切な利益分配が得られる仕組み)の不存在

課題解決に向けた視点・留意事項

- 衛星／センサ開発企業だけでなく、現地に精通した、研究者、フィールドワーカー、ユーザ、政府機関等が結びついたエコシステム(人のコンステレーション)の形成が必要ではないか。

課題解決に向けた視点・留意事項(2)

ビジネスを支える基盤面の課題(2):

- 国際ルール形成力の弱さ

課題解決に向けた視点・留意事項

- POC成果を国際的な場で広報することによって、国際的なルール形成に積極的に関与すべきではないか。
- 政府と一体となり、他国とのチームング・他国へのロビーイング等を行っていくべきではないか。

ビジネスを支える基盤面の課題(3):

- (見えない)センシングデータの価値の普及不足

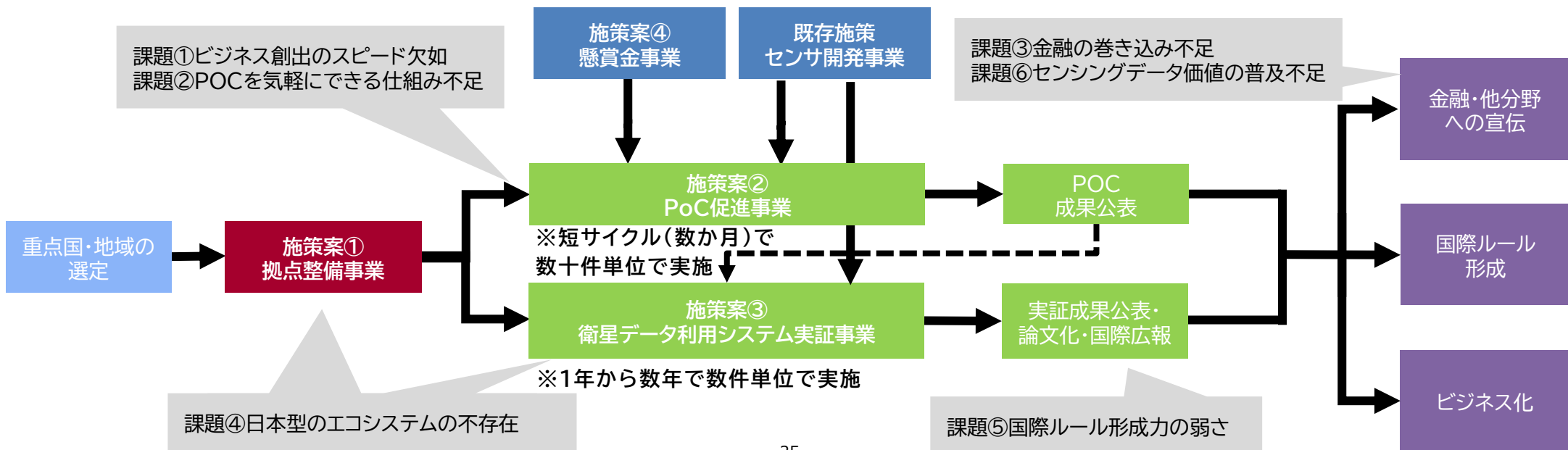
課題解決に向けた視点・留意事項

- リモセンデータの価値の普及に向け、アプリケーション分野への宣伝を強化すべきではないか。
- 価値の普及と並行して、グリーンイノベーションやDXといった政府重要施策に関連した技術開発を後押しする政策を検討すべきではないか。

4. 今後の方向性

課題と対応する施策案の全体像

- 以下の①-③の事業で海外市場を狙いつつ、並行して④の事業でアイデアの掘り起こしを行ってはどうか。
 - ① **拠点整備事業**：日本企業の海外における事業展開をサポートするため、現地に精通した人材・組織のコミュニティ化及び支援体制の構築を図る。
 - ② **PoC促進事業**：ビジネスモデル等の簡易な審査により、必要な新規撮像やアーカイブの商用衛星データ、現地データ等を取得・提供し、短サイクルでPoCを回す。
 - ③ **衛星データ利用システム実証事業**：必要な商用衛星データの提供、地上システムの開発等に加えて、実証成果を普及させるための現地コミュニティ形成を支援する。
 - ④ **懸賞金事業**：炭素中立型社会、グリーン、GXなど新たなテーマを設定し、アイデアの掘り起こしを行う。
- 「経済安全保障重要技術育成プログラム（K Program）」の一環として支援予定の「高感度小型多波長赤外線センサ技術の開発」とも連携。



5. おわりに

おわりに

- 本報告書は、5回にわたる「多波長リモートセンシングビジネス研究会」での検討内容をとりまとめたものである。
- 衛星の小型化やコンステレーションの一般化に伴い、リモセンデータビジネスは変革期を迎えている。我が国は、ASTER、HISUIといったプロジェクトを通じて多波長センサに強みを持っているが、ハードの強さを活かしたデータ利用ビジネスのエコシステムが構築出来ていない、ビジネス実証のスピードが諸外国と比較して遅い、リモセンの活用に関する国際ルール形成への取組みが十分ではないといった課題も顕在化している。
- 解像度、頻度だけでなく波長情報も取得可能なことはリモセンデータの特徴であるが、世界的にも波長方向の情報を詳細に取得する多波長センサの活用が進みはじめている。また、民間企業によるコンステレーションの整備やGHG観測のような新たなアプリケーションの開発も行われている。
- 世界的に多波長センサを搭載した衛星打上げ数は未だ限定的であるが、今後、数年の後に一気に増加すると見込まれている。また、米国および欧州では政府主体で大型の多波長センサ開発を実施し、民間企業と相互補完体制を構築しつつある。
- このような状況を踏まえ、本研究会としては、多波長リモートセンシングビジネスの活性化に向けた課題を6つに整理するとともに、課題解決のために海外市場とアイディアの掘り起こしを狙う4つの施策を検討した。
- 本報告書を踏まえ、多波長リモートセンシングビジネスに活性化につながる施策が進められ、我が国の宇宙産業の発展につながっていくことを期待する。

参考資料

研究会の開催履歴と主な議題

#	議題
第1回：10/31	・研究会の背景（宇宙産業政策の方向性） ・研究会のスコープ、スケジュール ・委員によるプレゼン（J-spacesystems、アークエッジ・スペース、ジェネシア） ・総合討議
第2回：11/28	・前回の振返り ・多波長センサの開発動向 ・委員によるプレゼン（住友林業、三菱UFJ銀行） ・総合討議
第3回：12/20	・前回の振返り ・多波長センサ・データに関する国際動向 ・委員によるプレゼン（木股委員、WorldLink） ・総合討議
第4回：1/26	・前回の振返り ・多波長センサ・データに関する海外政策動向 ・委員によるプレゼン（JAXA） ・報告書骨子（案）
第5回：2/27	・前回の振返り ・検討会報告書（案）

多波長リモセンデータ利用ビジネス研究会 構成員

お名前（敬称略）	ご所属	属性
安達 昌紀	一般財団法人宇宙システム開発利用推進機構 (J-spacesystems)	有識者
大木 高志	日本電気株式会社	衛星事業者
加藤 剛	住友林業株式会社	ユーザー
木股 雅章	元立命館大学	有識者
三箇 智二	JX金属探開株式会社	ユーザー
柴崎 亮介（座長）	東京大学	有識者
祖父江 真一	国立研究開発法人宇宙航空研究開発機構 (JAXA)	有識者
武山 芸英	株式会社ジェネシア	光学システムメーカー
長洲 郁彦	株式会社日本政策投資銀行	金融
中村 友哉	株式会社アクセルスペース	衛星事業者
橋詰 卓実	株式会社三菱UFJ銀行	金融
福代 孝良	株式会社アークエッジ・スペース	衛星事業者
南川 忠雄	豊田通商株式会社	ユーザー
山崎 秀人	さくらインターネット株式会社	衛星データプラットフォーム
渡辺 一生	株式会社WorldLink & Company	ドローン事業者

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)報告書

2023年3月

株式会社三菱総合研究所
フロンティア・テクノロジー本部
TEL (03)6705-6039

二次利用未承諾リスト

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）

株式会社三菱総合研究所

頁	図表番号	タイトル
2	図2-1	ハイパースペクトル衛星コンステレーション機数
3	図2-2	ハイパースペクトルセンサの分光方式
4	図2-3	ESA-NASAの共同観測体制
4	表2-1	CHIME衛星の地球観測諸元
4	表2-2	SBG衛星の地球観測諸元
5	図2-4	大型ハイパースペクトルセンサと小型ハイパースペクトルセンサコンステレーションの連携
6	図2-5	HISUIの外観イメージ
7	表2-4	HISUIの主要諸元
7	図2-6	うみつばめ衛星
8	図2-7	軌道上分光エッジコンピューティングイメージ
8	表2-5	多波長センサのユースケース
9	図2-8	モニタリング精度を向上させる地上データの可能性
9	図2-9	ドローンを用いたインドネシア泥炭地大規模造林地におけるオルソ画像と赤外線画像
10	図2-10	航空機ハイパースペクトルセンサによる利用実証事例(1/3)
10	図2-11	航空機ハイパースペクトルセンサによる利用実証事例(2/3)
11	図2-12	航空機ハイパースペクトルセンサによる利用実証事例(3/3)
12	図2-13	経済産業省の地域実証事業の裨益イメージ
12	図2-14	K Programにおける高感度小型多波長赤外線センサ技術の分光デバイスと波長イメージ
13	図2-15	K Programにおける高感度小型多波長赤外線センサ技術の想定スケジュール
14	図2-16	Orbital SideKick社のパイプライン監視イメージ
14	図2-17	HySpecIQ社の解析イメージ
15	図2-18	Satellogic社の実証分野
16	図2-19	長光衛星技術のハイパースペクトル衛星「光譜01/02星」が撮像した日本の鹿児島県桜島
17	図2-20	珠海欧比特宇航科技による農作物の自然災害（冠水、干ばつ、冷害）調査イメージ
17	図2-21	Planet社のGHG監視例
18	図2-22	Planet社のGHG（メタン）監視イメージ
19	図2-23	GHGSat社のGHG（メタン）監視イメージ
21	図2-24	SBIRSのイメージ
22	図2-25	Next Gen OPIR GEO衛星のイメージ

(様式2)

23	表2-8	米国の軍事赤外線市場の予測
26	図2-26	FOCUSの概要イメージ
27	図2-27	OP3C画像圧縮のイメージ
27	図2-28	PHySISの概要イメージ
28	図2-29	SWIRupの概要イメージ
36	図2-32	4つの施策案と課題との関係図
37	図2-33	拠点整備事業と実証事業との関係
38	図2-34	懸賞金事業のイメージ
41	図3-1	NRLのPRAM-FX装置
42	図3-2	軌道上でのArachneの実験イメージ (Credit : AFRL)
44	図3-3	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)
47	図3-4	欧州SBSPの想定ロードマップ
48	図3-5	ESA SOLARISのYouTube紹介ページ (Credit : ESA)
48	図3-6	SOLARISプログラムで想定されている活動
50	図3-7	ESA SOLARISの技術開発目標
51	図3-8	2023-2025年の間に提案されている活動内容
53	図3-9	資金提供が決定した13のプロジェクト (Credit:ESA)
54	図3-10	英国のSBSPシステム案「CASSIOPeiA」 (Credit:Space Energy Initiative)
55	図3-11	英国のSBSP開発計画 (Credit:BEIS)
56	図3-12	SEIの参加機関
57	図3-13	SEIの組織構造
59	図3-14	CASTによるSSPSロードマップ
59	表3-1	SSPS開発のフェーズごとのミッション
60	図3-15	中国が提案するSSPSシステムコンセプト
61	図3-16	西安電子科技大学の実証実験施設
68	図3-17	CASSIOPeiAコンセプトのスケルトンスケッチ
68	表3-4	1.44GWシステムの重量ブレイクダウン
69	図3-18	SBSPシステムのブレイクダウン
74	図3-19	1.44GWのSBSPシステムの初号機システムの構築コストと運用コスト
75	表3-9	エネルギー源別のLCOEとVALCOE (単位: 2022年価格、€/MWh)
76	表3-10	SBSPの費用便益分析 (2070年までに54基導入の場合)
78	図3-20	SPS Alphaアーキテクチャ
79	表3-12	SPS-Alpha MkIII の主要パラメータの値
81	図3-21	Citigroup Globalの2040年の打上げコスト予測
82	図3-22	過去のWPT伝送実験と代表的なSBSPシステムで想定されている受電電力と伝送距離
86	図3-23	SBSPを実現するためのシステム要素と開発に要する期間
87	表3-17	コストモデルで使用したリファレンスシステム各部の質量等
87	表3-18	コストモデルによるコスト算出結果

(様式 2)

[illegible]