

宇宙太陽光発電研究開発の新たなシナリオ／ロードマップ† R&D Scenarios and Roadmaps of Space Solar Power Systems

後藤大亮*^{1‡}
Daisuke GOTO

宇宙太陽光発電システム (SSPS) は、Glaser による最初の着想から 50 年近く、国内の研究開発開始から 30 年が経過したが実現の目処は立っていない。また、過去に作成された研究開発ロードマップについても実態と整合しない状況となっており、広く理解と支持が得られているとは言えない状況である。JAXA は、SSPS の研究開発を適切に推進するために、新たにシナリオ／ロードマップを作成する必要があると考え、2013 年度から SSPS 事業性検討委員会、これに加えて 2014 年度から SSPS システム検討委員会という外部有識者による 2 委員会体制を構築し検討を進めてきた。本論文ではその概要について解説する。

The first SSPS idea was conceived by Dr. Peter Glaser and then almost 50 years have passed. Domestic research activities have been continuing for 30 years however, even now it is difficult to forecast when SSPS will realize. And the current SSPS R&D roadmap does not reflect the real situation, and does not widely supported by stakeholders. JAXA started the two committees with the outside member. The SSPS Economic Feasibility Committee from 2014, and SSPS Technical Committee from 2014. The discussion for the goal of building new SSPS scenario/roadmap have been continued within these committee members. The outline of the discussion is described in this paper.

1. はじめに

Dr. Peter Glaser が 1968 年に SSPS の概念を Science 誌に発表してから¹⁾、米国、欧州、それから日本国内で SSPS のシステム概念設計や研究開発が行われてきた²⁾。近年では中国においても、SSPS の研究開発が活発化しつつある³⁾。しかし、総合的に見れば、50 年以上に及ぶ様々な試みにもかかわらず、技術開発が完了し SSPS が実用化される (社会実装される) 目処は未だ立っていない。

JAXA が 2000 年代に作成したロードマップでは、2030 年代の実用化を目指し、1kWh あたり 8 円程度、地上出力 1GW (100 万 kW) 規模の SSPS の構築が掲げられていた⁴⁾。しかし、そのロードマップについては、昨今の社会状況の変化等が取り込めておらず、JAXA 内、中央省庁、エネルギー業界等から広く理解と指示を得られていないと考えている。

たとえば、エネルギー基本計画 (2014 年版) では、『宇宙太陽光発電システム (SSPS) の宇宙での実証に向けた基盤技術の開発などの将来の革新的なエネルギーに関する中長期的な技術開発については、これらのエネルギー供給源としての位置付けや経済合理性等を総合的かつ不断に評価しつつ、技術開発を含めて必要な取組を行う。』と、何重にも慎重な表現が重ねられており、国としての SSPS の推

進にいくつもの釘が刺された格好となっている。⁵⁾

また、宇宙基本計画 (2009 年版、2013 年版、2015 年版) の過去の推移を見ると、SSPS に関する記述は、版を経る毎にトーンダウンしている。2009 年版では、かなりの分量を割いて SSPS について述べられており、その中では『3 年程度を目処に・・・軌道上実証に着手』のような具体的かつ積極的な記述がされていた。しかし、2013 年版では、SSPS には技術、安全性、経済性の課題があると指摘された上で、SSPS の軌道上実証に関して、『その費用対効果も含めて実施に向けて検討』とされた。2015 年版では、軌道上実証の記述は無くなり、かつ、『エネルギー、気候変動、環境等の人類が直面する地球規模課題の解決の可能性を秘めた「宇宙太陽光発電」を始め、・・・(中略)・・・に関する研究を推進する。』という、他の研究テーマと横並びの、かつ、一文だけの控えめな表現となっている。^{6),7),8)}

JAXA では、これらの状況を鑑み、新たな SSPS のシナリオ／ロードマップを作成する必要があると考え、外部有識者による 2 つの委員会を立ち上げ、議論を重ねてきた。^{9),10),11)}

2. 外部有識者委員会

第 1 図に 2 つの委員会からなる SSPS 研究推進体制を、第 2 図に 2 つの委員会の開催状況を示す。

SSPS のシナリオ、ロードマップを検討するにあたり、①社会的・経済的な観点、②技術的な観点、の 2 つの観点からの検討が必要と考えた。

特に①の議論では、従来の SSPS 研究開発関係者及び宇宙開発関係者の視点や価値観を離れた目で SSPS の事業性

† 第 1 回宇宙太陽発電シンポジウム、2015 年 12 月 15-16 日、東京にて発表

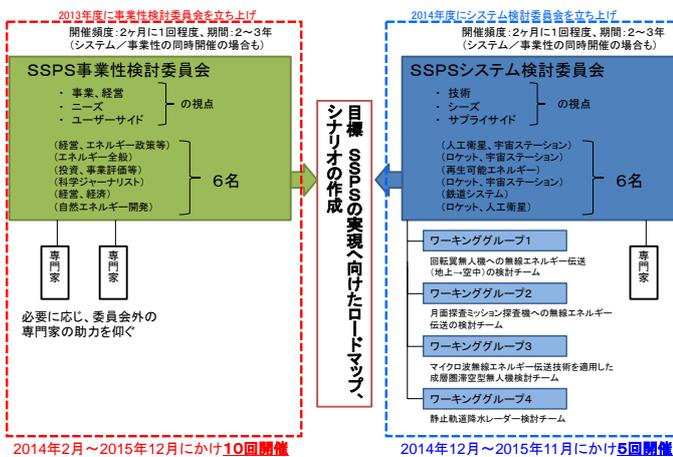
‡ Corresponding author: Daisuke Goto. E-mail: goto.daisuke@jaxa.jp

*¹⁾ 宇宙航空研究開発機構 研究開発部門 SSPS 研究チーム

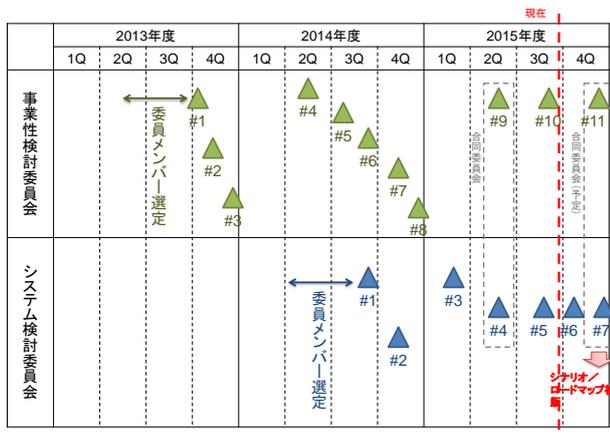
〒305-8505 茨城県つくば市千現 2-1-1 筑波宇宙センター

を客観的に検討する必要があると考え、宇宙開発利用／SSPSの技術系バックグラウンドを持たない方に参加いただき、SSPS事業性検討委員会を2013年度の後半から10回開催してきた。②の観点の議論は、幅広い技術分野にまたがるシステム開発および運用、維持、管理の経験を保有する宇宙開発利用分野、鉄道システム分野、それに加えて再生可能エネルギー分野の方に参加いただき、SSPSシステム検討委員会を2014年度の後半から5回開催してきた。それらのうち一回は合同委員会として開催し、それ以外の回でも、両委員会メンバーは、互いの委員会に相互乗り入れできる形で運営し、両委員会間でのコミュニケーションを促進している。

なお、システム検討委員会の下部組織としてワーキンググループを設置し、無線エネルギー伝送技術等の専門家と交え、より詳細な技術検討を行ってきた。



第1図 2つの委員会からなるSSPS研究推進体制



第2図 2つの委員会の開催状況（予定含）

3. SSPSの「本質的課題」に関する議論

10回のSSPS事業性検討委員会／5回のSSPSシステム検討委員会において、様々な議論を行った。委員会事務局であるJAXAからの説明資料に加え、委員自らの、あるいは委員会外の専門家による講演、そしてその後の質疑応答などを行った。

SSPSの実現までに複数の課題が存在していることは、2013年版の宇宙基本計画で、技術、安全性、経済性の観点

から以下のように示されている。⁷⁾

- ①技術（大型構造物を宇宙空間に輸送し、組み立て、運用・維持する技術、高効率で安全な発電・送電・受電技術等）
- ②安全性（健康、大気・電離層、航空機、電子機器等への影響）
- ③経済性（特に地上から宇宙への輸送費低減が大きな課題。）

委員会では、これらの課題のさらに上位概念として、以下の課題がSSPSの実現を目指すにあたり、最も本質的であると整理された。

SSPSは、その実現までに必然的に大きなリソース投入と長期間の研究開発を伴う。長期間に、社会や経済の状況が変化し、SSPSが解決しようとする社会課題が別の手段で解決しまうリスクが存在する。大きなリソースが必要なこと、およびこのリスクの存在により、広いステークホルダーからの理解と支援が得られないことが本質的な課題である。

この結論に至るまでに、社会や経済の状況変化に耐えて長期の研究開発を継続し事業化に辿り着けた／目指しつつあるものの例として、超電導リニア新幹線（鉄道総研、JR東海）のこれまでの取り組み、および、火星有人探査・そして他惑星への移住を目指すと言っているSpaceX社の取り組みを、委員会の議題として取り上げた。それらの議論の内容について述べた後、SSPSの本質的課題について再度考察を行う。

3.1 超電導リニア新幹線

超電導による磁気浮上走行方式を採用した実用の鉄道路線として世界初となるリニア中央新幹線の歴史を紐解くと、1962年に、国鉄鉄道技術研究所（当時、現在は公益財団法人鉄道技術総合研究所）において研究開発がスタートしている。その後、1972年に無人での浮上走行を、1979年には宮崎リニア実験線において最高速度517km/h（無人）を、1987年には有人で400.8km/hの走行を実現している。その後、山梨リニア実験線において、対向列車とのすれ違いや、トンネルの影響の検証などを進め、2011年にJR東海が事業計画を決定した。^{12),13)}基礎研究から50年に渡り研究開発を継続してきたこと、大きな研究開発投資を経て事業化にたどり着いたこと、等の特徴から、SSPSのシナリオ、ロードマップの検討を行うにあたり、有用なサンプルであると考えられる。

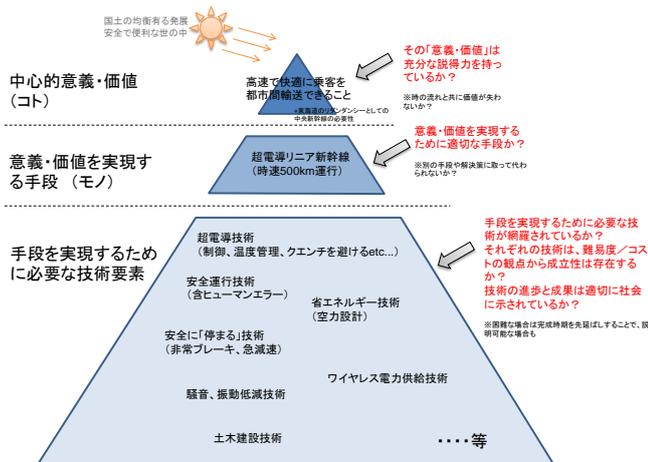
第3回SSPSシステム検討委員会の中で、リニア中央新幹線の開発担当者に講演を依頼し、直接話を聞く機会を設けた。開発担当者からは、超電導による磁気浮上走行システム、およびリニア中央新幹線の以下の特徴等について説明があった。

- 鉄路の実用上の限界速度（360km/h程度）を大きく越える500km/hでの運行が、定常的かつ安全に可能であること。
- 鉄輪と線路の粘着性（摩擦）に頼っている従来の新幹線よりも、加減速性能・登坂性能・降坂性能が大きい。そのため、高速度を最大限活かしながら、東京ー名古屋間（将来的には東京ー大阪間）を結ぶこと。
- 浮上高さが大きく、地震の際の安全性が高いこと。
- 走行原理が異なるとはいえ、総合的には新幹線システ

ム（都市間を専用軌道で結び、高速・快適・安全な移動手段を提供する）であり、新幹線で開発された各種技術（安全運行管理、非常ブレーキ等）を適用可能なこと。

- 日本の大動脈である東海道新幹線のリダンダンシーとしての高い価値があること。
- 民間会社としての JR 東海がリスクを取ることで、国費投入無しで事業化が進んでいること。
- 事業化費用のかかなりの部分を、高架、トンネル、駅整備等の土木建設費が占める見込みであること。そのため、従来の新幹線システムを同一の経路に新設する場合と比較して、そこからの費用の増分と、速度向上による輸送サービスの価値増分として見た場合、費用対効果に優れていること。

講演後に、超電導リニア新幹線のように長期に渡り大きな投資を伴う研究開発を継続し、事業化に辿り着いた背景について、委員会で議論を行った。様々な要因が考えられる。たとえば、初期の目標設定が適切であった、担当者の熱意が世代を越えて維持された、事業主体となる鉄道会社について、途中で国鉄→JR という変遷があったとは言え比較的安定していた、日本の経済成長と豊かな社会が長期に渡って維持された、航空路や高速自動車道が新幹線を完全には代替しなかった、等である。それらを総合し、メタな概念として表したのが第3図に示す「コト・モノ・技術要素」として整理した三層のピラミッド構造である。



第3図 超電導リニア新幹線のコト・モノ・技術要素

ピラミッドの頂上に位置するものとして、中心的意義・価値（＝コト）を設定する。超電導リニアの場合は「高速で快適に乗客を都市間輸送できること。」というワードを置いた。「東海道新幹線のリダンダンシー」というワードも置けるが、それはリニア中央新幹線に限ってはまる。なお、さらに上位概念として、「国土の均衡有る発展」や「安全で便利な世の中」といったものも考えられるが、それらはあまりにも抽象的な概念のため、ピラミッドの外側に置いている。

二層目に、中心的意義・価値を実現する手段として超電導リニア新幹線という「モノ」が存在する、と設定した。

なお、ここで用いている「モノ」という言葉は、リニア新幹線車両のみを指す狭い概念ではなく、線路、駅、ダイヤ、運行システム、安全管理システム、料金設定等を含み、「リニア新幹線事業」に近い概念である。

最下層に「モノ」を実現するために必要な、様々な技術要素が存在する、と設定した。

超電導リニア新幹線のように、長期に渡る、かつ大きな投資額を伴う研究開発を継続し、最終的に社会実装を実現するには、（1）頂上の「コト＝意義価値」が十分な説得力を持ち、時の流れと共にその価値が失われない。（2）二層目の「モノ」が頂上の意義価値を実現するために適切な手段であり、かつ、長い期間を経ている間に別の手段に取って代わられない。（3）最下層の技術要素が、二層目のモノを実現するために網羅され、難易度／コストの観点から成立性があり、技術の進歩と成果が途中段階において適切に社会に示される。のすべてが必要であり、かつピラミッドの頂上と二層目の組み合わせ、二層目と最下層の組み合わせのいずれも他の組み合わせに対して優位性があるという点が、社会に広くコンセンサスを有する必要がある。

重要なのは、ある時点でピラミッドが成立しているだけでなく、時間が経つ間に、社会や経済、人々の価値観の変化などが必ず発生するため、それらの外的要因に対する揺らぎに、このピラミッドが長期間耐え続ける必要があるという点である。強い外的揺らぎが発生するリスクは、長期の研究開発になるほど、あるいは投資リソースが大きくなるほど高まる。揺らぎがある閾値を越えると、投資の減速や中断等の経営判断／政策判断につながり、社会実装まで辿り着けなくなる。もし中断した場合、それまでに投入したリソースのうちかなりの部分が無駄になってしまう。

そのリスクについては、図3のようなピラミッドとして意識せずとも、感覚的に広く理解されている。このため長期かつ高投資額の研究開発であるほど、社会的な広いコンセンサスを得ることが難しい。

この観点から超電導リニア新幹線のコト・モノ・技術要素のピラミッド構造を分析する。まず、頂上の意義・価値は、この半世紀、日本においても、世界においても、都市化が進み、かつ、人の動きが活発化し続けたことから、結果として揺らぎがなかった。頂上と第二層の組み合わせ（適切な手段かどうか）については、東海道新幹線が50年以上も日本の国土を東西に繋ぐ人員輸送の大動脈として存在し続け、鉄道会社に収益をもたらした、さらなる高速化の要望が存在してきたこと。航空機や高速道路では賄いきれない高速鉄道の大きなニーズがあること、線路と鉄輪の粘着性、架線とパンダグラフの摩擦による実運用の限界（360km/h程度）が存在したこと。等から考えて（盤石であったとは言えないが）結果として維持できた。最下層の技術要素は、新幹線の技術発展によって伸長してきた部分と、リニア独自の研究開発成果が組み合わせられ、適切に社会に示されてきた。

このように、超電導リニア新幹線は、社会や経済の変化等、外部からもたらされるさまざまな揺らぎに耐え抜いた結果として、50年の時を生き抜いて事業化に辿り着けたと総括できる。それらの揺らぎのうちの一つでも閾値を越えていれば、超電導浮上方式のリニア新幹線は、今見るような形で事業化着手されるようなことは無かったであろう。

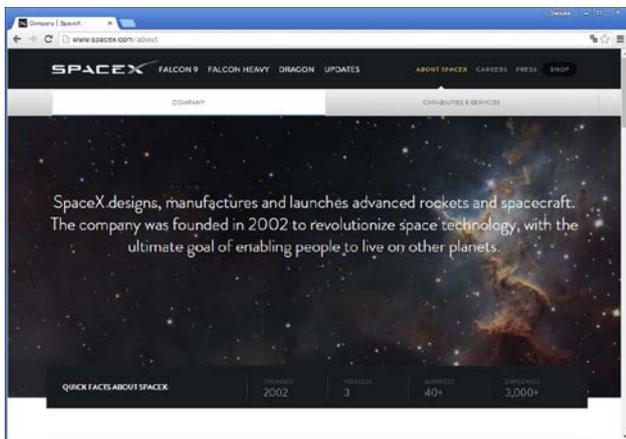
リニア中央新幹線の営業運転開始は2027年が想定されている。現在から10年以上に渡る長い期間、そして運転開始後も、超電導による磁気浮上走行システム、そしてリニア中央新幹線が社会的な意義価値を持つためには、このピラミッド構造が引き続き維持される必要がある。

3.2 SpaceX 社の火星有人探査実現への取り組み

SpaceX 社は、IT 業界で成功し巨財をなしたイーロン・マスク氏が 2002 年に米国で設立した民間宇宙開発ベンチャー企業である。SpaceX 社は、低コスト宇宙輸送技術の中核に据え、宇宙産業への参入を果たした。Falcon-1 ロケット (小型衛星打ち上げ用) の初打ち上げは 2006 年であったが失敗。その後も打ち上げ失敗を経た後、2008 年と 2009 年に打ち上げに成功し、そこで Falcon-1 の運用は終了した。併行して、SpaceX 社は米国 NASA から、ISS (国際宇宙ステーション) への民間貨物輸送契約を獲得。より大型の Falcon-9 ロケットと Dragon 無人宇宙船を開発し、2010 年に試験打ち上げを、2012 年に初の ISS 貨物輸送を成功させている。2015 年に一度の Falcon-9 の打ち上げ失敗があった以外は、NASA 契約による ISS への物資輸送を継続している。

Falcon-9 ロケットは第一段に比較的小型の液体ロケットエンジン 9 機クラスタ化し、その他の機体設計や製造工程等にも工夫を重ね、打ち上げコストの低減に成功した。これにより、Dragon 打ち上げ以外に、商業静止衛星の打ち上げ契約を次々に獲得し、Arianespace 社の ArianeV ロケットと市場を二分する商業宇宙輸送ロケットの地位を急速に確立した。さらに大型の Falcon Heavy ロケット、NASA 契約による ISS への人員輸送、ロケット第一段の再使用による打ち上げコストのさらなる低減、低い打ち上げコストを活かした大規模な衛星網による世界的な通信サービスの提供等、意欲的な宇宙開発事業に次々と取り組んでいる。¹⁴⁾ 15),16)

第 4 図に SpaceX 社の WebSite をキャプチャーしたものを示す。¹⁴⁾ CEO のイーロン・マスク氏は、SpaceX 社設立主旨として、かねてより、人類を他の惑星に移住させる (= Enabling people to live on other planets) という、遠未来の目標を掲げており、この WebSite にも示されている。イーロン・マスク氏は、惑星移住の先鞭となる、初の有人火星探査のスケジュールをまだ具体的に示していないが、早くとも 2020 年代後半～おそらく 2030 年代以降と思われる。移住までを視野に入れれば、さらに長く、数十年以上に渡る取り組みとなることは確実であり、長期に渡り、多額の投資が必要な研究開発を経て、実現を目指す観点から、こちらも SSPS のシナリオ・ロードマップの検討に有用なサンプルであると考えられる。

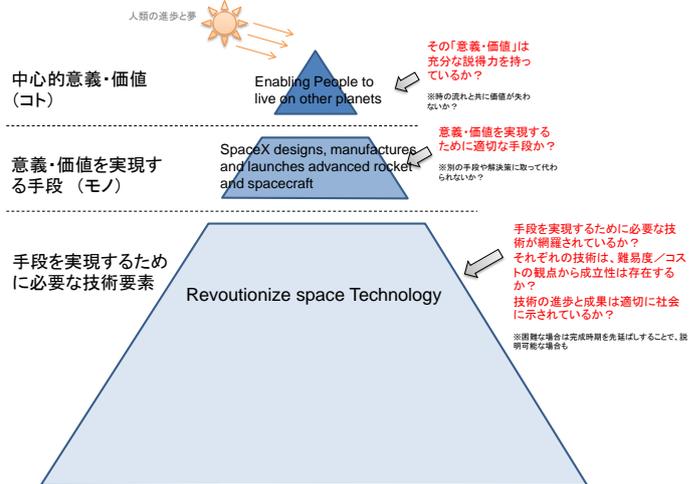


第 4 図 SpaceX 社の WebSite キャプチャー画面

第 5 図に、この WebSite の文章を、リニア新幹線と同じ形式で三層のコト・モノ・技術要素のピラミッドに整理したものを示す。

ピラミッドの頂上 (中心的意義・価値=コト) は、既に述べたように、人類を他の惑星に移住させること (= Enabling people to live on other planets) と置いた。

二層目には、より進歩したロケットと宇宙機 (= Advanced rocket and spacecraft) という言葉を、最下層には、漠然とした表現であるが、革新的な宇宙技術 (= Revolutionize space technology) という言葉を配置した。



第 5 図 SpaceX 社の取り組みのコト・モノ・技術要素

SpaceX 社のピラミッド構造を分析する。まず頂上 (コト) として設定した「人類を他惑星に移住させること」だが、最も地球に近く、移住できる可能性が高い惑星が火星であることから、当面は「火星に (初めて) 有人で到達すること」と言い換えても良い。実際にイーロン・マスク氏も「我々は火星を目指す。」と公言している。

人類の歴史的偉業とされる様々な過去の出来事 (コロンブスのアメリカ大陸到達、マゼラン一行の世界一周、アムンゼンの南極点到達、ヒラリーのエベレスト登頂、アポロ 11 号による有人月面探査等) を考慮すると、人類すべてとは言わないまでも、相当数の人間にとって、これは魅力的な目標設定である。行ったことの無い場所に行くこと、歴史的瞬間に立ち会うこと、といったことが、人間にとって本能的、本質的な価値を持っているためである。

二層目 (モノ) の「より進歩したロケットと宇宙機」は、具体的には Falcon-9 や Falcon Heavy, Dragon 有人宇宙船、およびその追跡管制システム、運用システム等が入る。ただし、イーロン・マスクはこれらのロケットや宇宙船を用いて火星を探査するとは断言しておらず、将来的にはさらに改良され、場合によっては名称の変更もあるかもしれない。いずれにせよ、頂上を達成するには不可欠なロケットと宇宙船が二層目に入る。最下層の「革新的な宇宙技術」も、現時点の宇宙技術では火星有人探査を可能とするロケット、宇宙船の製造が困難であるため、当然必要となるものである。

このような整理の上で SpaceX 社の取り組みを評価する。多くの人間にとって魅力があり、歴史的に見ても揺らぎにくい意義・価値が最終目標として頂上に据えられている。頂上と二層目、最下層との関係も本質的に強固であり、外部の社会や経済の状況変化の揺らぎに長期に渡って耐えら

れそうに思える。長期に渡り、多額の投資が必要な研究開発を経て、実現を目指すのに相応しいピラミッド構造と言える。

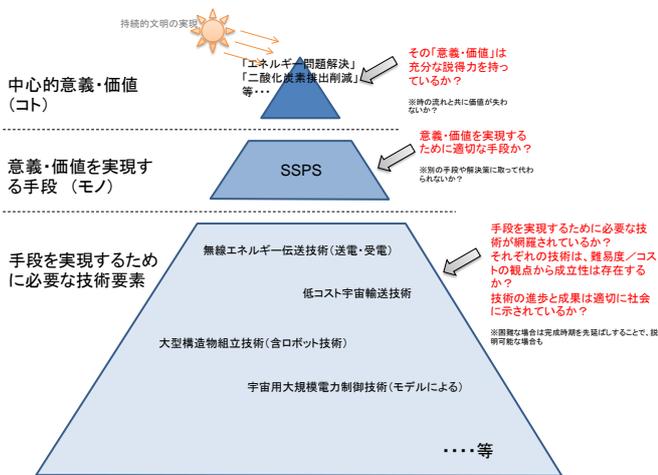
前述した超電導リニア新幹線は、新幹線収益等を原資に、長期に渡る研究開発投資を自社(国鉄、鉄道総研、JR 東海)で賄えたが、ベンチャー企業である SpaceX 社にはそのような安定した収入源は存在しなかった。また、有人火星探査は、少なくとも相当の期間、それ自体で収益を出せそうにない。NASA 等からの国費投入に頼るとしても、現時点で目処も詳細計画も立っていない遼か先の有人火星探査プロジェクトに対し、SpaceX 社が巨額の、そして継続的な国費を得るのは困難である。

従って、SpaceX 社は、究極の目標として遠い未来に有人火星探査を置きながらも、まずは低コスト宇宙輸送技術をターゲットに技術革新を起こすことを狙った。開発した低コスト宇宙輸送ロケットを、NASA からの ISS 貨物輸送契約、その次の ISS 人員輸送、商業衛星の打ち上げ受注、のように活用し、火星探査の前にいくつもの中間目標を置いた。それぞれの中間目標は技術実証のような技術の発展だけに主眼を置いた目標でなく、実際に社会実装する(商業受注する)というステップを踏んでいる。前述のリニア新幹線では、途中段階で部分的に商業利用(社会実装)するというステップは見当たらないため、リニアと比較した際の SpaceX 社の取り組みの特徴であると言える。

まとめると、SpaceX 社は、魅力ある「コト」を頂上に置いた強固なピラミッド構造を社会に提示した上で、最終目標に至る中間目標として次々と技術の社会実装を果たし、資金を調達し、宇宙産業における自社の立場を確立し、世界中の期待感を煽りかつ維持し続けるというやり方で、様々な外的な揺らぎに耐えながら、多額の投資が必要な長期の研究開発を乗り越えていこうとしている。と整理できる。

3.3 SSPS 第6図に SSPS のコト・モノ・技術要素のピラミッド構造を示す。頂上には、SSPS で達成されるべき中心的意義・価値として、人類のエネルギー問題の解決、および二酸化炭素排出削減を置いた。

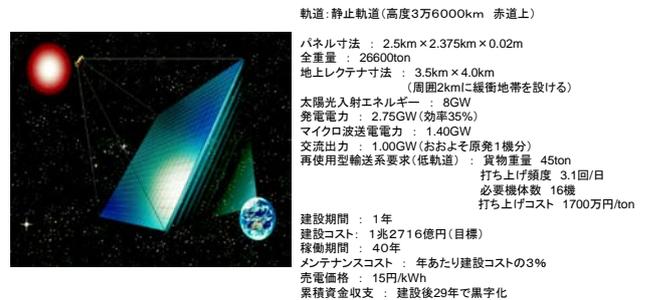
二層目は頂上を達成するための SSPS。最下層は SSPS を実現するための各種技術要素を置いた。



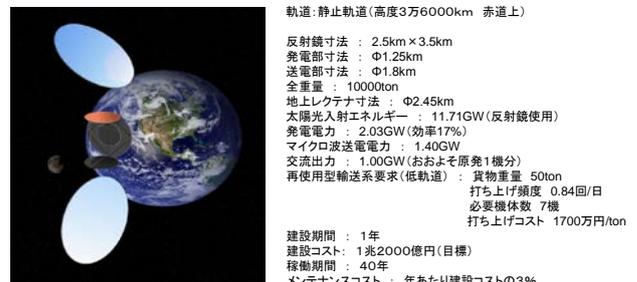
第6図 SSPS のコト・モノ・技術要素

このピラミッド構造を分析する。頂上に置いた、「エネルギー問題/二酸化炭素排出削減」は、地球環境保全に対する意識が向上し、持続的可能な発展の重要性が叫ばれるようになった現在、簡単には揺らがない意義・価値と言える。しかし、難点は、頂上と二層目の組み合わせ、すなわち SSPS こそが、その課題を解決するのに適切なエネルギー源と言えるか? という点である。

現状のマイクロ波送電型 SSPS のシステム概念構想のイメージを第7図に示す。1GW の地上の電力出力を実現するため、静止軌道上に質量 1 万 ton 以上、2km を越える巨大な宇宙機を、小分けにして宇宙へ輸送し軌道上で無人で組み立てることが想定された。1kWh あたり 8 円の発電コストを実現するには、1機あたり 1兆 2000 億円程度で建造する必要があると見積もられており、そのために、宇宙輸送システムは H2A の 1/50 程度のコストで、毎日打ち上げられる前提が置かれている。^{4), 17)} このような SSPS を可能にする宇宙技術は、数十年以上の年月の開発期間と、複数回の軌道上実証を含め、数千億円以上、おそらく数兆円に及ぶ多額の投資が必要となる。



(a) J-spacesystems (当時 USEF) による構想



(b) JAXA による構想

第7図 1GW (100 万 kW) 級マイクロ波 SSPS 構想

SSPS は再生可能エネルギーである太陽光を利用して発電を行うシステムであり、さまざまな特色・利点が存在する。しかし、SSPS 以外にも、地上太陽光、風力、水力、バイオマス等の太陽光を源とした再生可能エネルギーは複数存在し、近年、これらの再生可能エネルギーのコスト低下と導入量の増加は著しい。たとえば、2004 年、2013 年、そして 2014 年に、世界に導入済みの再生可能エネルギーの発電容量の変化を見ると 800GW→1578GW→1712GW となっている。¹⁸⁾ 多くの再生可能エネルギーについては、発電コストをさらに低減する必要があり、発電量の変動対応等の課題も存在するが、それらの研究開発も活発化している。今後、さらなる技術革新が生まれる可能性がある。

もちろん、将来、SSPS がそれらの技術革新速度を上回って実用化される可能性もある。しかし、その場合において

も、SSPSの研究開発に数十年もの期間がかかること、SSPS1機あたりの発電量、現在の導入速度から想定される数十年後に既に社会に実装済みの再生可能エネルギー量、等から、SSPSはエネルギー問題の解決や二酸化炭素排出削減に最適かつ無くてはならない存在とは言えず、将来、複数存在する再生可能エネルギー源に新たに加わる候補の1つといった存在にとどまる可能性が高い。

この状況は、図6に示したSSPSのコト・モノ・技術要素のピラミッドで説明すると、頂上と二層目の組み合わせに関して、外からの、社会状況の変化による強い揺らぎが発生しているということである。

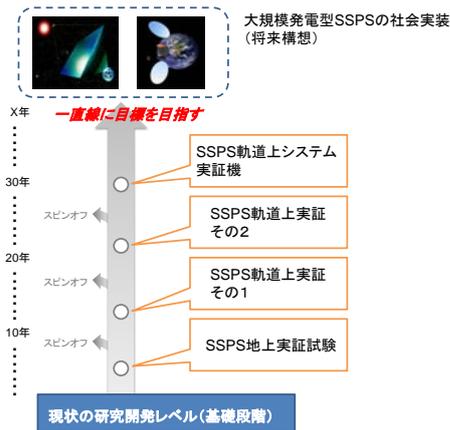
まとめると、SSPSの真の課題は、その実現までに大きなリソース投入と長期間の研究開発を継続することが必須で、そのために広いステークホルダーからのコンセンサスが必須だが、頂上（中心的意義価値）と二層目（手段）の間の安定性が不足しており、かつその状況が徐々にSSPSの立ち位置を弱める方向へ動いていることである。

そのため、SSPSが社会実装に辿り着くまでに、他の技術や手段がより進歩し、そちらが社会実装されてしまうリスクが高いと認識されてしまう。その結果、SSPS実現に必須となる多額の投資のためのコンセンサスが得られず、さらに実現時期が延び、社会状況の変化の影響をより受けやすくなるというマイナススパイラルに陥ってしまう。本論文の最初に紹介した各政府文書の状況はまさにそれを指し示していると言える。

このような状況のもとで、SSPSに関する研究開発を前へ進めるためにはどのような進め方が相応しいか、SSPS事業性検討委員会／システム検討委員会での議論を行った。その内容を紹介する。

4. SSPSの研究開発をどう進めるべきか？

SSPS実現への道のりを、典型的な宇宙開発プロジェクトを念頭に置いて描くと図8のようになる。過去に提唱されたSSPSのロードマップも、同じ考えに基づいていた。



第8図 典型的な宇宙開発プロジェクトを念頭に置いた研究開発の進め方イメージ。委員会ではこの進め方はSSPSに向かない、とされた。

第8図の進め方は、超電導リニア新幹線に近いと考えられる。リニア新幹線は、実験室、宮崎実験線、山梨実験線と徐々に本運用に近い状況へ発展させながら走行実証試験を繰り返し、技術を成熟させてきた。最終目標に向かって

一直線に技術実証を進めるやり方である。

前項で述べたSSPSの置かれた状況（コト・モノ・技術要素の三層ピラミッド）を考慮すると、第8図のような一直線型の進め方はSSPSに向かない。と委員会で議論された。それよりは、SpaceX社のように、途中段階で技術を社会実装しながら最終ゴールの実現を目指す取り組み手法が、SSPSにはより相応しいと考えられる。そのイメージを第9図に示す。

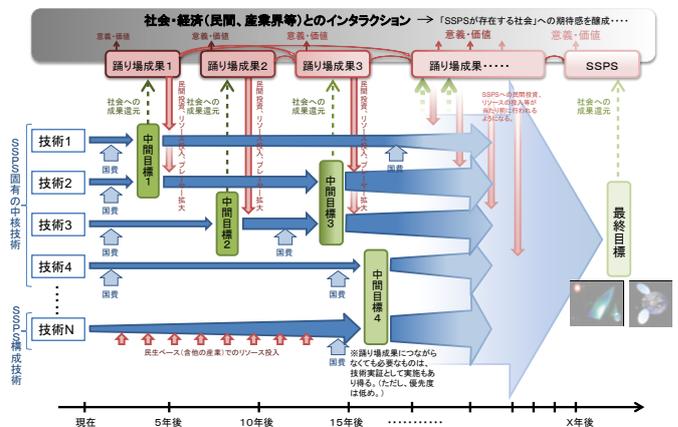
SSPSの大きなピラミッドを前面に出してそれ一本で押し通すのではなく、複数の小型のピラミッド、すなわち社会的な意義・価値の提供を目指す取り組みの集合体を作る。それぞれの取り組みが、単に技術を実証するのではなく、技術開発成果を社会に還元するように（中心的意義価値＝コトを持つように）設定する。それらの技術が集まり、SSPSの三層ピラミッドの要素技術群が構成され、将来のSSPSの実現へ寄与していく、という考え方である。

一つ一つのピラミッドがもたらす成果を、SSPS研究開発という長い階段を上っていく途中の「踊り場」になぞらえ、これを両委員会では、「踊り場成果」と呼んでいる。このように、複数の「踊り場成果」を実現させ、社会実装しながら、同時に技術開発を進めるやり方が、SSPSの研究開発でとるべき手法である、と委員会で議論された。



第9図 SSPSのピラミッドを小型のピラミッドに分割する（踊り場成果）のイメージ

JAXAでは、2つの委員会での議論に基づき、SSPSの踊り場成果のロードマップと、SSPS技術のロードマップを統合することで、SSPS研究開発シナリオを作成中である。イメージを第10図に示し、その内容を説明する。



第10図 SSPS研究開発シナリオ イメージ

①現時点で見えているSSPS固有の中核技術（例：無線エネルギー伝送技術等）を組み合わせ、長期的な研究開発

フローの途上で中間目標を設定。その際、技術の実証を最優先に目指すのでは無く、社会に成果を還元できる、社会実装されるものになる可能性が高いものを、適切な中間目標として設定する。

- ②社会実装（「踊り場成果」の獲得）が成し遂げられれば、関連技術に対し、民間企業を含めた幅広い投資やリソースの投入、プレイヤーの増大などが期待できる。そのプラスのスパイラルを、様々な技術分野において繰り返し継続することで、SSPS 関連技術の進歩とともに、社会全体としてのイノベーションの推進と価値の創出を狙う。
- ③「踊り場成果」が見込めないが SSPS に必要とされる技術については、全技術分野の成熟度合いから、いずれは適切なタイミングで純粋な技術実証として実施されることも想定する。
- ④併行して、SSPS の中核技術／構成技術の進歩や SSPS をとりまく社会の状況の変化について定期的なチェックを行い、ミッション／技術のロードマップを修正する必要があるときは修正する。
- ⑤このようにして、SSPS の要素技術の研究開発と社会実装を同時に進めることで、社会全体としての SSPS に対する期待感と受容性を向上させ、プラスのスパイラルに誘導する。

5. 「踊り場成果」候補

具体的な「踊り場成果」候補について、委員会およびワーキンググループでの議論が進んでいる。現時点で4つの「踊り場成果」候補の検討を進めている。それぞれの「踊り場成果」候補について簡単に説明する。

- ①回転翼無人機への無線エネルギー伝送（レーザー）
近年、急速に研究開発が進み、その将来性が期待される回転翼タイプの無人航空機（マルチコプター）は、揚力をプロペラだけに頼っているため、バッテリーでのフライト時間が短時間に限られるという課題がある。SSPS の中核技術である無線エネルギー伝送技術（レーザー）の研究開発を進めることで、回転翼無人機のフライト時間の制約を無くしてイノベーションにつなげることで、新産業の育成や産業競争力強化等に貢献する。
- ②月面探査ローバーへの無線エネルギー伝送（レーザー）
月面の科学探査対象として、極域に存在する永久陰内の土壌に堆積していると考えられている水やその他揮発性物質が有力視されている。採取、分析のため、ローバーによる探査が有効だが、エネルギーを確保する有効な手段が（原子力電池を除けば）無い。SSPS の中核技術である無線エネルギー伝送（レーザー）の研究開発を進めることで、日射域のランダーから永久陰域のローバーへエネルギー伝送を可能にし、このミッションの実現により宇宙科学および技術の発展に貢献する。
- ③成層圏高高度滞空型無人機への無線エネルギー伝送（マイクロ波）
成層圏滞空型の無人機を成立させるためには、電源システム（搭載太陽電池と蓄電システム等）を含んだ機体重量の軽量が重要となる。SSPS の中核技術である無線エネルギー伝送（マイクロ波）の研究開発を進めることで、地上から無人機へのエネルギー伝送により高高度無人機の電源システムの軽量化を実現し、社会実装可能なシステムとして成立させる。このミッションにより、通信・

放送、国土監視、航空産業の発展等の分野に貢献する。

④止降水レーダー

地球温暖化、気候変動等の問題により台風が巨大化したり、極端気象による災害が頻発しており、雲の分布だけでなく降水分布を直接軌道上から観測することは、気象予報精度や洪水予測精度を向上させるために有効である。SSPS の中核技術である大型宇宙構造物展開/組立技術を適用した大型フェーズドアレイアンテナの研究開発を進めることで、現在実現している低軌道周回型降水レーダー衛星の発展型として、静止軌道からの降水観測ミッションの実現を目指す。このミッションにより、宇宙技術、気象予測、防災等の分野に貢献する。

ここに示した4つの「踊り場成果」候補は、SSPS を目指す途中の中間技術目標として、かつ、研究開発成果の社会還元の見点からも相応しいと JAXA が判断し、委員会に諮って絞りこんだものであるため、宇宙航空分野に偏っている。第10図の研究開発シナリオに示す「踊り場成果」は、宇宙航空分野に限定されるものではなく、社会のあらゆる分野で広く活用されることが望ましい。我々は現状の4つの踊り場成果候補で満足しているわけではなく、SSPS の実現のためには、さらに多くの、そして良質の「踊り場成果」が必要と考えている。様々な技術、産業、学術の分野との連携を深めていく必要がある。

6. まとめ

JAXA では、新たな SSPS 研究開発ロードマップ、シナリオを構築することを目的として、外部有識者による2つの委員会を運営し、議論を重ねてきた。その結果、「踊り場成果」を獲得しながら長期にわたる研究開発の継続を目指すシナリオが、SSPS には相応しいと考える。

現在、4つの「踊り場成果」候補についてワーキンググループを設置し、検討を開始している。それらの検討結果をもとに、各々の SSPS 中核技術の研究開発を進めると共に、新たな「踊り場成果」候補の創出についても検討を進めていく。

SSPS 研究開発ロードマップの「踊り場成果」型への転換を打ち出した形でのロードマップ、シナリオ初版の策定を今年度末に予定している。来年度以降には、それらの肉付け、具体化を進めていく。

これらの作業を進めるにあたり、今後も引き続き、産・官・学の広い分野の皆様からのご協力をいただきたいと思います。

参 考 文 献

- 1) P. E. Glaser: Power from the Sun: Its Future, *Science*, Vol. 162 (1968), pp. 857-866.
- 2) JAXA Website: 宇宙太陽光発電システム (SSPS) について, <http://www.ard.jaxa.jp/research/hmission/hmi-ssps.html>, 2016年1月18日閲覧
- 3) Li Ming: Proposal on a SPS WPT Demonstration Experiment Satellite, IAC-14.C3, The International Astronautical Congress 2014.
- 4) 斎藤由佳他: JAXA SSPS コストモデルによる宇宙太陽光利用システムの経済性評価, 第49回宇宙科学技術連合講演会, 1D06, 2005.
- 5) 「エネルギー基本計画」平成26年4月11日閣議決定
- 6) 「宇宙基本計画」平成21年6月2日宇宙開発戦略本部決定

宇宙太陽光発電研究開発の新たなシナリオ／ロードマップ（後藤大亮）

- 7) 「宇宙基本計画」平成 25 年 1 月 25 日宇宙開発戦略本部決定
- 8) 「宇宙基本計画」平成 27 年 12 月 8 日宇宙開発戦略本部決定
- 9) 後藤大亮他: 宇宙太陽光発電システムの開発シナリオ, 第 57 回宇宙科学技術連合講演会, 2M01, 2013.
- 10) 後藤大亮他: SSPS (宇宙太陽光発電システム) の新たなロードマップ構築と早期実現ミッション案, 第 34 回宇宙エネルギーシンポジウム, 2015.
- 11) 後藤大亮他: 「踊り場成果」をキーワードとした新たな SSPS 研究開発ロードマップの構築, 第 59 回宇宙科学技術連合講演会, 1L17, 2015.
- 12) 長嶋 賢: 浮上式鉄道とその技術の応用に関する最近の研究開発, 第 278 回 鉄道総研月例発表会講演要旨, 2014 年 5 月 15 日
- 13) 山梨県立リニア見学センターWebsite: 「リニアの歴史」
<http://www.linear-museum.pref.yamanashi.jp/about/history.html>,
2016 年 1 月 18 日閲覧
- 14) SpaceX 社 Website, <http://www.spacex.com/>, 2016 年 1 月 18 日閲覧
- 15) Garrett Reisman: SpaceX plans for commercial human spaceflight, IAC-14,B3,2,5, x26573, The International Astronautical Congress 2014.
- 16) Gunter's Space Page Website: <http://space.skyrocket.de/>, 2016 年 1 月 18 日閲覧
- 17) 平成 19 年度太陽光発電利用促進技術調査成果報告書, 平成 19 年度経済産業省委託事業, 財団法人無人宇宙実験システム研究開発機構
- 18) “自然エネルギー世界白書 2015”,
http://www.ren21.net/wp-content/uploads/2015/07/REN12-GSR2015_Onlinebook_low1.pdf

(2016. 2. 22 受付)