

SSPS ロードマップの検討で考慮すべき重要なポイント[†] ～テザー型 SSPS を例として～

Important Issues to be Considered in the SSPS Road Map

～ In the Case of Tethered SSPS ～

佐々木 進^{*1‡}

Susumu SASAKI

SSPS のコミュニティが、一般大衆やステークホルダーに「何時どのようなことが実現できるか」というビジョン（社会的な公約）を示すためのロードマップについて、テザー型 SSPS を例に、考慮すべき 5 つの重要なポイントを示す。ポイントは、(1) 明確で具体的なゴール、(2) コミュニティで共通的な要素をもったターゲット、(3) 技術的な実現性の高さ、(4) ゴールは 30 年以内、(5) Go/No Go の判断ポイントの明記、である。

A road map is required to facilitate the research and development of SSPS, as a proposal from the SSPS community to the public. There are 5 important issues to be considered in the development of SSPS road map; (1) a clear and specific goal, (2) a common target in the SSPS community, (3) high technical feasibilities, (4) the goal within 30 years, and (5) go/no go decision at the major milestones based on objective evaluation.

Keywords : SSPS, ロードマップ, テザー型 SSPS

1. はじめに

ロードマップ(工程表)には、個人用、法人用、コミュニティ用、国の政策用等々様々な用途のものがあるが、ここでは、SSPS のコミュニティが、一般大衆やステークホルダーに、「何時どのようなことが実現できるか」というビジョンを示すものを対象とする。これは、SSPS のコミュニティが提示する一種の社会的な公約である。

本稿では、SSPS ロードマップの検討で考慮すべき重要な以下の 5 つのポイントについて、テザー型 SSPS を例として述べる。

1. ゴールが明確で絵に書いて示せる程度に具体的であること（特に社会一般の方に）・・・絵にできないようなもの、沢山描かれた絵はターゲットにならない。
2. 未来技術に係わる長期の研究開発であるから、ゴールの不確定性は大きく、多くのターゲットが存在しうる。できるだけ共通的な要素をもったターゲットを描くことにより、研究の進展に柔軟に対応できるもの。・・・すぐに改訂せざるを得ないロードマップは信用されない。
3. ゴールそのもの及びそこに至る道筋に、技術的な実現性が読み取れること（特に周辺分野専門家に）・・・技

術的な実現性が示せない開発に向けた予算がつかない、学術研究レベルにとどまる。

4. ゴールは長くても 30 年以内（30 年以内で目指すものをゴールとする）。長すぎると社会的なリアリティに欠ける。・・・夢は物語として楽しくても社会的な投資の対象外。

5. ロードマップは複数のフェーズに分けて、次フェーズに入ることができるレベルに達したか否かの客観的な Go/No Go 判断ポイントを設ける。・・・プロジェクトの為のプロジェクトにならないことをロードマップ上で保証。

2. 明確で具体的なゴール

このことは特に社会一般の人に対し重要である。専門の知識のない社会一般の人にロードマップの目指しているターゲットが直感的に理解できるよう示す必要がある。第 1 図にこれまでの代表的な宇宙太陽光発電システムの設計例を示す。マイクロ波型とレーザー型、非集光型と集光型、バス電力型と送電一体型（分散電力型）と非常に多くのタイプのものが設計されている。ロードマップのゴールとしてこれら全てをターゲットとして包含するようなロードマップを設定することはできない。モデルにより必要な技術と形態が大きく異なるからである。本稿では、エネルギー取得効率は他のタイプと劣るが、構成が最もシンプルで技術的な実現性が高く、SSPS 時代の初期段階での実現を目指した USEF テザーモデルをターゲットとして選択する。第 1 図に示されている USEF テザーモデルのイラストは、発電と送電の機能を担うパネルがテザー（ワイ

[†] 第 2 回宇宙太陽発電シンポジウム, 2016 年 12 月 19-20 日, 東京にて発表

[‡] Corresponding author: Susumu Sasaki.

E-mail:sasaki.s@apost.plala.or.jp

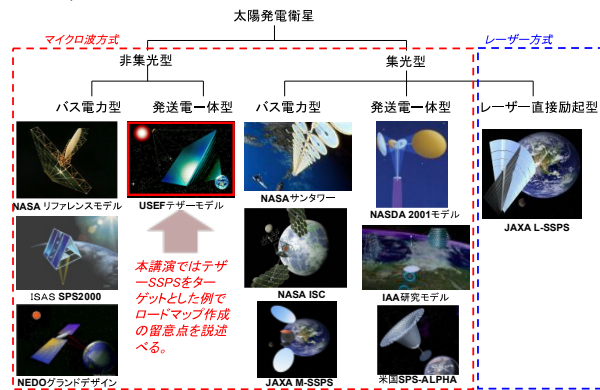
^{*1} 宇宙航空研究開発機構, 東京都市大学

〒192-0363 東京都八王子市別所 2-21-8-906,

2-21-8-906 Bessho Hachioji-shi, Tokyo 192-0363, Japan

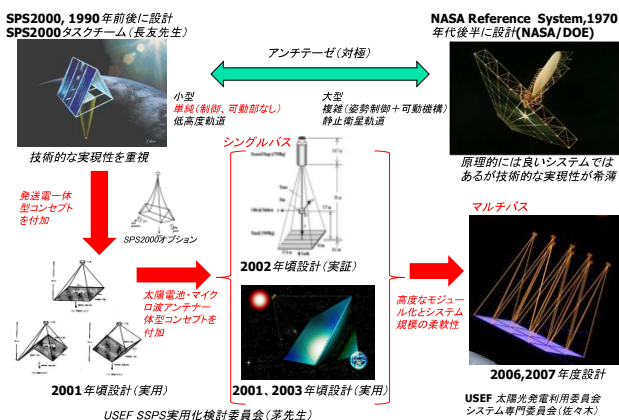
©SSPSS

ヤー) により吊られていることを表したもので、専門の知識のない社会一般の人にもこのコンセプトは比較的容易に理解できるものと考えられる。



第1図 これまで設計研究された世界の主な SSPS

このモデルは、第2図に示すように、1980年頃まで米国で設計研究された NASA Reference Model (超大型、姿勢制御及び可動機構を持つ複雑なシステム、静止衛星軌道) のアンチテーゼとして、1990年代に設計された SPS2000¹⁾ (小型、単純、低高度軌道) のモデルを源流としている。SPS2000 は実用発電所の前段としてのパイロットプラントの位置づけで設計され、早期の実現 (西暦 2000 年の実現を想定したためこの名前がある) を目指し、技術的理想よりも技術の実現性を最大限重視したモデルであった。このモデルは第1図に描かれているように、ずんぐりした三角柱形状であったが、そのオプションの一つとして細長の三角柱形状でテザーを用いてロバストな姿勢安定を実現するタイプについても検討が行われた。2001 年から行われた USEF SSPS 実用化検討委員会での SSPS の設計研究は、SPS2000 と同様、技術の実現性を最大限重視するという思想の下に行われたが、SPS2000 の発展として、送電一体型パネル及び太陽電池・マイクロ波アンテナ一体型のコンセプトを新たに取り込み、送電一体型パネルを多数のテザーで姿勢安定させる方式のテザー型 SSPS (シングルバス方式)²⁾ が設計された。その後 2006 年頃の USEF の検討委員会では、より高度なモジュール化と発電規模の柔軟性を目指したマルチバスのテザー型 SSPS³⁾ が設計されている。

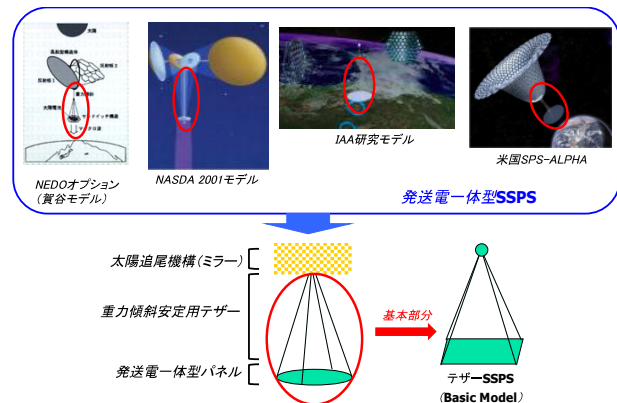


第2図 テザー型 SSPS の検討の背景と歴史

3. 共通的な要素を持ったターゲット

SSPS の研究開発は数十年にわたる長期の研究開発であるから、ゴールの不確定性は大きく、第1図に示したように現在では多くのターゲットが存在している。実際に数十年後にどのモデルが実現するかを確定することはできず、また現在想定されているモデルとは全く異なるコンセプトのものが実用化されることも大いに想定される。一方で、実現に至るロードマップとその目指すターゲットを明確な形で社会に示さなければ、大きな社会のリソースを必要とする研究開発を進めることはできない。このため、多様なモデルの中で、現段階ではできるだけ共通的で基盤的な要素で構成されるモデルをターゲットとして設定し、研究の進展にともないターゲットをより現実でより良いものに進化させていくようなアプローチのできるロードマップとすることが必要である。はじめに述べたようにロードマップは社会への一種の公約であることから、ターゲットの頻繁な改訂は望ましくない。

テザー型 SSPS は、第3図に示すように、SSPS のモデルの有力な柱の一つである太陽追尾方式送電一体型 SSPS (NEDO オプション、NASDA2001 モデル、IAA 研究モデル、米国 SPS-ALPHA 等) の基幹部分であると位置づけることができる。送電一体型パネルを吊るテザーの先端に太陽追尾ミラー機構を取り付ければ、太陽追尾方式送電一体型 SSPS に直接つながるため、太陽追尾機構の技術の見込みが立った段階で、太陽追尾方式送電一体型 SSPS にターゲットを変更してもロードマップには大きな変更はない。



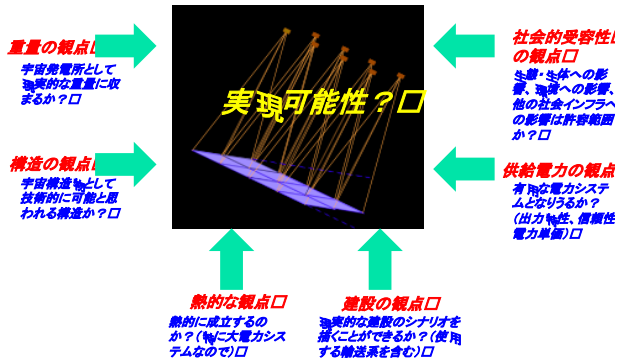
第3図 テザー型 SSPS は各種送電一体型 SSPS の基本部分に相当している。

4. 技術的な実現性の高さ

これは、SSPS 周辺の宇宙開発分野やエネルギー分野の専門家に対して特に重要である。これらの専門家に対し、ゴールとして目指すターゲットそのもの及びそこに至る道筋に、技術的な実現性が読み取れるようなロードマップである必要がある。実際問題として、一定規模の開発予算を獲得するには、このような周辺専門家のピアレビューを受けるステップが必ず途中段階で入るが、周辺専門家から一部でも技術的な実現性に深刻な疑義をはさまれると、たとえ社会一般で好意的にみられても、開発に向けた予算がつくことはない。うまくいっても学術研究レベルの研究予算にとどまる。周辺専門家からの疑問には、科学技術的に説得力のある実験データと解析結果で答えることが必須であり、それ以外に方法はない。

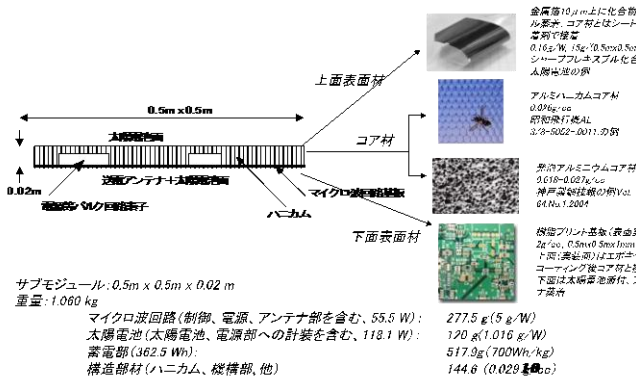
SSPS に対し周辺専門家から実現性について疑問を投げかけられる主な論点を第4図に示した。図中、重量、構造、熱、建設の観点は主に宇宙技術の専門家からの指摘であり、供給電力及び社会的受容性の観点は主にエネルギー技術の専門家からの指摘である。

これらの論点について、SSPS 側がどのようなエビデンスでどのように答えるべきか（実験や解析）について、テザー型 SSPS を例に以下に示す。ただし本稿では第4図に示した論点の中の代表的なものについてのみ記す。このような資料はロードマップの実現性を保証するものとして、ロードマップの付属資料として準備されるべきものである。



第4図 SSPS ロードマップのターゲット及び中間モデルで示すべき実現可能性。

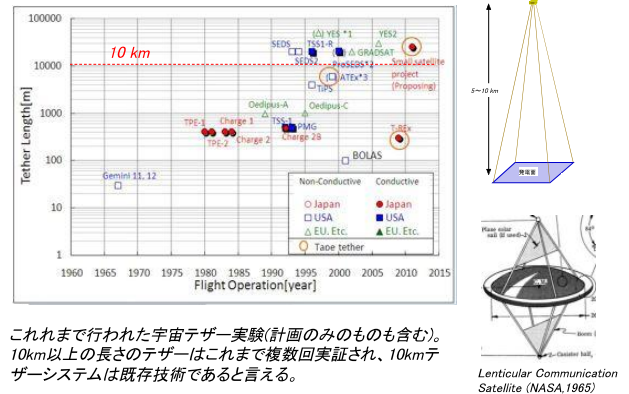
4.1 現実的な重量か？ 一般に 100 万 kW の発電所は 1 万トンから数万トン程度の重量というのが SSPS のコミュニティの検討結果である。しかし、衛星プロジェクトや ISS プロジェクトに携わった技術者からは、彼らの経験に基づき、太陽電池パドルの重量だけでももっと重いという指摘がなされる。重量については、具体的な設計と試作結果により根拠のある重量を積み上げて示す必要がある。第5図にテザー型 SSPS の場合の発電電一体型パネルの重量の解析例を示したが、少なくともこの程度までの設計と積算、及び部分試作により、具体的な数値でエビデンスを示す必要がある。



第5図 総重量は、構造設計と試作により根拠のある重量を積み上げて示す必要がある。

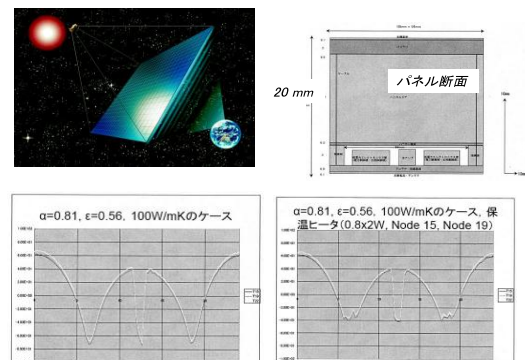
4.2 建設可能か？ 人類の経験してきた最大の宇宙構造物は立体構造で 100 m 級、線構造(テザー)で 10 km 級である。一方、100 万 kW 級の SSPS は立体構造で 1km~10km であり、スケールの点からこれまでの経験からは非常に大きなギャップが有る。SSPS の巨大構造の実現性に

ついては、構造だけでなく姿勢制御の観点からも、宇宙構造物に経験のある宇宙技術者には途方も無いものとの印象を持たれているのが現実である。テザー型 SSPS については、5-10km テザーと数 km 四方の平板パネルの組み合わせ構造という点が本質的な点である。第6図に示すようにこのような構造が実現可能であることをこれまでの実績や解析で論理的、定量的に示す必要がある。



第6図 全体構造は、設計に基づく解析や宇宙実績で技術的可能性を示す必要がある。テザーによる大型構造物の安定化そのものは右下図に示すように宇宙開発の初期から検討されている概念である。

4.3 熱的に成立するか？ 一般に宇宙機の設計で技術者が非常に苦心するのは、電力システムからの排熱である。電力効率80%でも、100万kW級であれば、20万kWに相当する熱を宇宙空間へ放射する必要がある。宇宙空間で人類が経験している最大の排熱は国際宇宙ステーション100 kW級なので、絶対値で言えば20万kWの排熱は極めて大きく、宇宙機の熱設計に経験のある宇宙技術者には途方も無い排熱量との第一印象を持たれる。しかし、SSPSの場合はその構造の大きさがkm級であり、電力が集中しないような設計を採用すれば、数十万kW相当の排熱は十分可能である。システム設計に基づき熱構造モデルを作成し、熱解析を行うことにより、現在の熱解析技術では10%程度の精度で各部の温度の予測が可能である。熱問題に対する疑問に対しては、熱解析結果をいつでも提示できるように準備しておく必要がある。第7図にテザー型 SSPS の場合のシステム設計に基づく温度の計算例を示す。

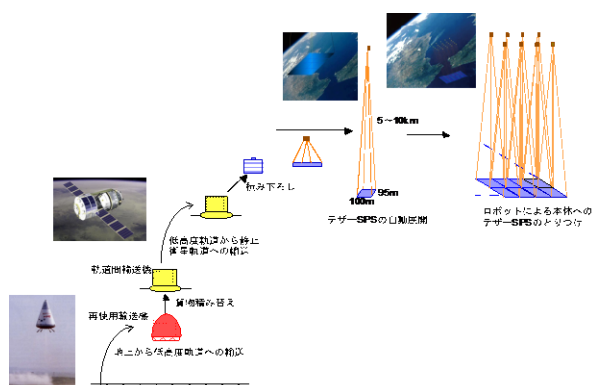


第7図 システム設計に基づき熱解析を行い、実現可能性を示す必要がある。

4.4 建設のシナリオはあるか？ 4.1 及び 4.2 にも係わ

る疑問だが、どのようにして構築するのかは、構築後のメンテナンスと運用寿命後の取扱いとともに、そのシナリオが技術的に可能と思われるような具体的なシナリオとして示す必要がある。第 1 図で示した様々な設計モデルの中でも、これらのシナリオを具体的に示したものは殆どない。SSPS が周辺分野専門家に将来エネルギーシステム構想としてシリアスに取り上げられていない大きな理由の一つはこの点にある。

第8図にテザー型 SSPS の構築のシナリオを示す。この逆プロセスで寿命のきたユニットあるいは故障したユニット（ユニットは約 45 トン、展開時のパネルサイズ 100m×95m）を地上に下ろし、メンテナンスや修理を行い再び軌道に運搬して再使用するというシナリオである。これにより軌道に廃棄物を残さず、また資源の再使用による持続性を保つことができる。



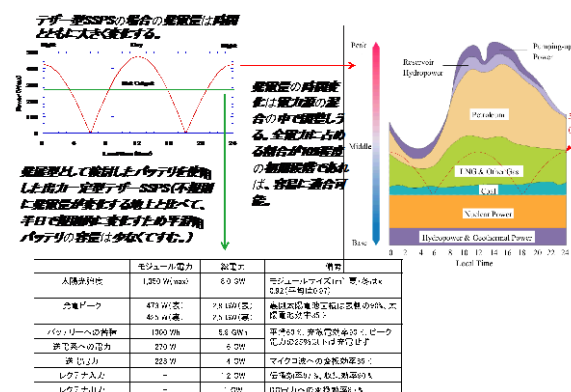
第8図 具体的な建設方法について、技術的に可能と思われる具体的なシナリオを示す必要がある。

4.5 有用な電力システムか？ SSPS の信頼性と電力

単価が電力システムとして有用であること、及び、出力特性が他の地上電力システムと組み合わせで使用できることを示す必要がある。これらは具体的な数値で示す必要があるが、未来技術にかかわる不確定さを必ず含むので、算定の前提(仮定した根拠)とセットで提示する必要がある。数値のみが一人歩きすると説得力が無くなるだけでなく、誤解を生じる可能性が高く、場合によっては計画そのものの信用を失う場合がある。

テザー型SSPSの電力単価については、その積算の前提とともに解析されている⁴⁾。ここでは、他の太陽指向型SSPSと比べてテザー型SSPSの場合に特に議論となる発電量の時間的変化について述べる。第9図はテザー型SSPSのような時間変化する出力特性でも、電力源の混合の中で化石燃料の代替システムとして十分有用な役割を果たしていることを示している。全電力に占める割合が10%程度の初期段階であれば、容易に地上電力システムとの組み合わせが可能である。しかし、SSPSからの出力が一定であれば、化石燃料発電だけでなく、原子力発電の代替システムとしての役割も果たすことができる。このため、電力変動型のテザー型SSPSの発展型として、バッテリーを使用した出力一定テザー型SSPSについても検討が行われた。天候の影響を受けて不規則に発電量が変化する地上太陽光発電の場合の平滑と比べて、テザー型SSPSの場合の平滑は半日で規則的に変動する発電量に対する対策であるため、地上の太陽光発電と比較してバッテリーの容量は大幅に少なく

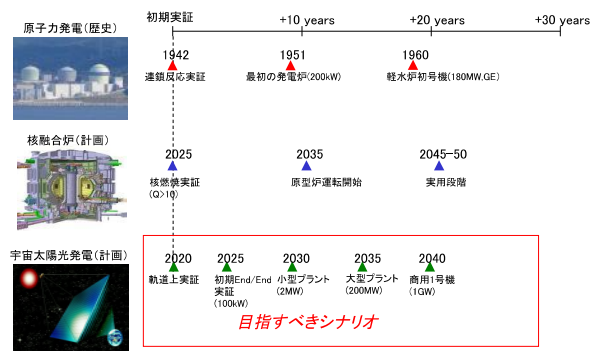
てすむ.



第9図 供給電力の特性について現実のユーティリティとの整合性を示す必要がある。ただし上記の消費電力パターン（国内）は福島原発事故前のもの。

5. ゴールの達成は30年以内

個人や社会がコミットする将来は、債券やローンなどの例から分かるように、概ね30年以内というのが一般的である。これ以上先の将来は個人にとって社会にとってもリアリティに欠ける。社会的に望ましいと感じられるものではあっても、30年を超えて実現されると考えられるようなものは夢物語の範疇に入る。社会システムにかかわるものについては、夢は本格的な投資の対象外として扱われる。従って、社会にその実現をアピールする計画のロードマップは、そのゴールは長くても30年以内に設定する必要がある。第10図に示すように、原子力発電の場合は初期実証(連鎖反応実証)から実用までは約20年である。技術的困難さが今でも指摘される核融合の場合でも初期実証(核燃焼実証)から実用までは20-25年程度と設定されている。SSPSの場合の初期実証は小型の軌道上実証に相当すると考えられるが、小型の軌道上実証を2020年頃に実現し、20年後の2040年頃の実用を目指すのがロードマップとして合理的と考えられる。実用SSPSの実現には、低コスト・大量輸送・高頻度の宇宙輸送系の整備が前提である。2013年に検討された宇宙輸送システム長期ビジョン素案では、将来輸送系の前提となる宇宙利用の姿として、2040年代までの大型構造物(SSPS等)建設と軌道感輸送がイメージされている。2040年代のSSPSの実用を目指すのは、輸送系のコミュニティの意識とも合致しており、SSPSのコミュニテ

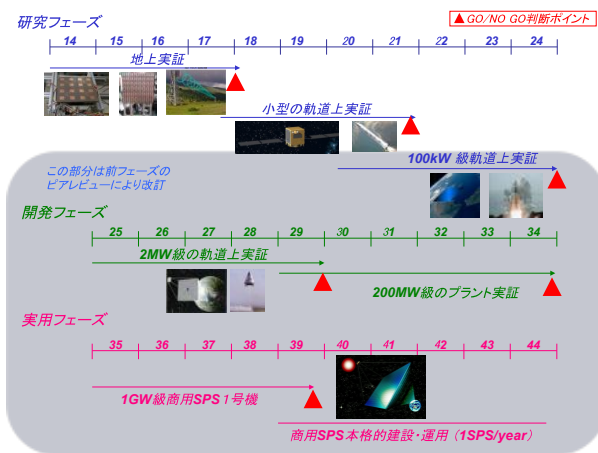


第 10 図 初期実証から実用に至る期間, SSPS と他のエネルギーシステムとの比較.

イとしてもそれに整合したロードマップを設定する必要がある。

6. GO/NO GOの判断ポイントの明示

5項に示した考え方をベースに、テザー型SSPSの実現に至るロードマップを示したものが第11図である。このロードマップでは、2020年代初頭に小型の軌道上実証を行い、それから概ね20年後に実用SSPSを完成させ、その後本格的な建設・運用フェーズに入る想定である。研究開発はひとたびスタートするとゴールの実現という目的は二次的となり、研究開発プロジェクトを継続することそのものが目的となる傾向に陥り易い。そのため、研究開発の節々で第3者によるリセット的なピアレビューを行い、GOが出た場合のみ研究開発の次のフェーズに入るという進め方が必要である。



第11図 テザー型SSPSのロードマップの中でのGO/NO GO判断時期（▲で示したタイミング）。

本ロードマップでは、小型の軌道上実証が終わって大型の軌道上実証（数百億円規模のプロジェクト）に入るタイミング、大型の軌道上実証が終わって2MW級の軌道上実証（数千億円規模のプロジェクト）に入るタイミング、2MW級の軌道上実証が終わって200MW級プラント実証（1兆円規模のプロジェクト）に入るタイミング、200MW級のプラント実証が終わって実用SSPS1号機（数兆円規模）に入るタイミングでリセット的なピアレビューを行うことを想定している。なお、ここで述べた実用SSPS1号機の想定コストは非常に高価であるが、実用フェーズに入り次々と本格的な建設が進むと一桁程度下がるものと想定されるコストである。

7. まとめ

SSPS ロードマップの検討で考慮すべき重要な5つのポイントについて、テザー型SSPSをターゲットとしたロードマップを例に述べた。目標とするターゲットや研究開発の進め方には、現段階で様々な考え方があると思われるが、本稿で述べた5項目については、どのようなロードマップの場合でも、考慮すべき事項であると考えられる。

参考文献

- 1) SPS2000 タスクチーム: SPS2000 概念計画書, 宇宙科学研究所, 太陽発電衛星ワーキンググループ, 1993年7月30日.
- 2) 小林徹: 経済産業省-USEF の委員会活動について-宇宙太陽発電システムの実用化に向けて-, 信学技報, SPS2002-01 (2002).
- 3) Sasaki, S., Tanaka, K., Higuchi, K., Okuizumi, N., Kawasaki, S., Shinohara, M. and Ishimura, K.: Engineering Research for New Tethered Solar Power Satellite, ISTS 2006-f-11 (2006).
- 4) 無人宇宙実験システム研究開発機構 (USEF): 平成19年度 太陽光発電利用促進技術調査 成果報告書, pp.145-154 (1998).

(2017.1.31 受付)