

An Engineering Roadmap for Development of Solar Power Satellite

Susumu Sasaki and Koji Tanaka
 The Institute of Space and Astronautical Science (ISAS)
 Japan Aerospace Exploration Agency (JAXA)
 3-1-1 Yoshinodai, Kanagawa 229-8510, JAPAN

Technologies necessary for the realization of the Solar Power Satellite (SPS) are classified into two categories. One is the industry or space technology which evolves independently on the SPS research. Another is the SPS-peculiar technology which cannot be developed unless the SPS researchers should proceed with the research by themselves. The former category includes the industry technology for the solar cell and microwave instruments, and the space technology for the space transportation and space structure. As for the SPS-peculiar technology, a definite development scenario on a roadmap is required for the SPS realization. There are two kinds of SPS-peculiar technology; a core technology that is commonly required for the SPS independently on the final configuration, and an optional technology which is strongly dependent on the SPS configuration. In the present state, various types of SPS configuration are still under investigation. The first priority for the SPS research should be given to the core technology. By analyzing all the technologies associated with the SPS, a roadmap for the development of the SPS as shown in Fig.1 has been generated.

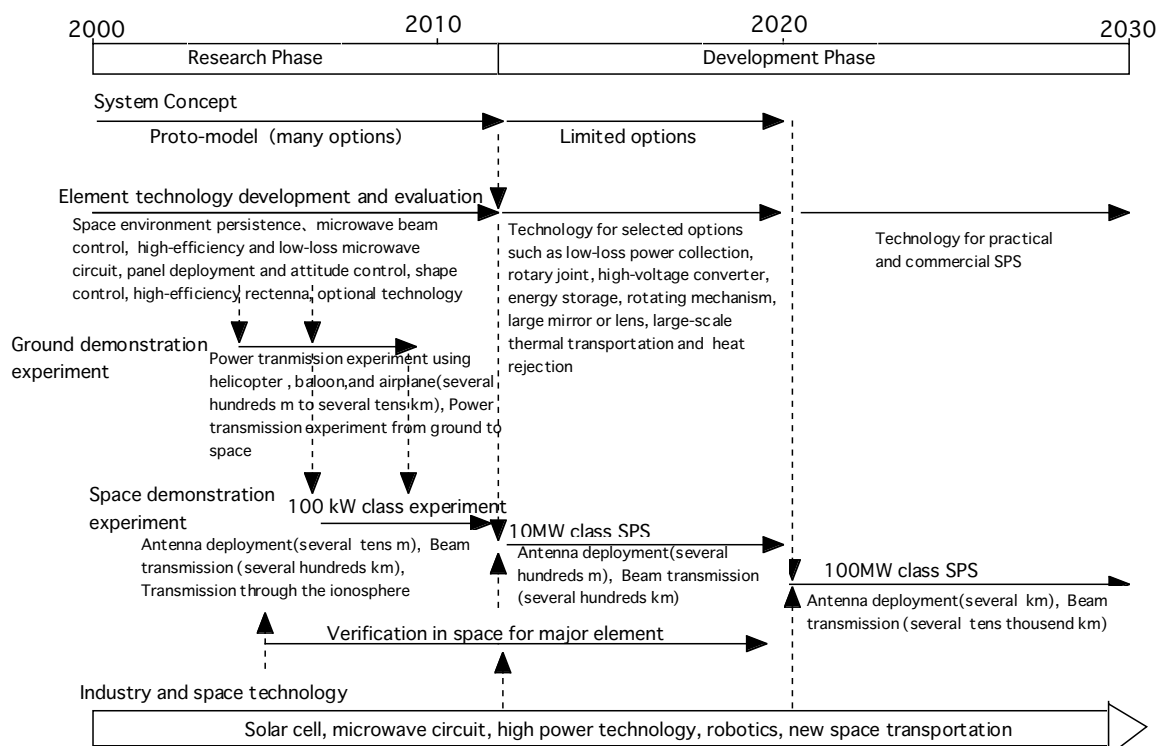


Fig.1 A technology roadmap for the development of the SPS.

SPS 実用化にいたる技術ロードマップの検討

佐々木進、田中孝治
宇宙航空研究開発機構 宇宙科学研究本部

SPS 実用化に必要な技術には、SPS とは無関係に一般の産業技術や宇宙技術として展開が期待される技術と、SPS 研究者が自ら手をく다して研究開発しない限り発展しない技術（SPS 特有技術）がある。前者には太陽電池やマイクロ波機器などの産業技術、宇宙輸送や宇宙構造物などの宇宙技術が含まれる。後者の SPS 特有技術については、SPS 実用化に至るまでのロードマップ上で特に明確な技術開発シナリオが要求される。本報告では SPS 特有技術を抽出した上で、SPS の最終コンフィギュレーションに強く依存しない SPS 共通技術とコンフィギュレーションに依存する技術とに区分し、これらに優先度をつけて技術開発ロードマップ上に展開する。SPS の研究開発に配分されるリソースは限られているが、これにより当面何を重点的に取り組むべきかを明らかにする。

1. 技術課題の洗い出しと SPS 特有技術の識別

ここでは SPS として、太陽電池による発電、マイクロ波による送電の方式をベースラインとして考える。表 1 に SPS 構築に必要な技術課題を関連分野ごとにまとめた。表の中で網掛けの技術は SPS 特有技術を示す。

表 1 SPS の技術課題

分野	技術課題
発電	高効率（比重量、比面積）・低コスト太陽電池、太陽電池の耐宇宙環境性、オプション技術（熱発電）の可能性
送電	マイクロ波送電ビーム制御、高効率・低コストマイクロ波増幅・制御、オプション技術（光送電）の可能性
宇宙電力	低損失集配電、ロータリジョイント電力技術、高効率電圧制御器、高効率蓄電
熱構造	構造物建設、形態維持、姿勢制御、回転機構、集光装置、大容量排熱
受電	高効率・低コストマイクロ波、エネルギー収集・整流回路、既存電力網との接続、大容量蓄電、オプション技術（光受電）の可能性
システム運用	衛星としての軌道運用、発電所としての運用、エネルギーシステムとしての保安・管理・維持
宇宙輸送	低コスト・大量輸送技術

2. 各分野の技術課題の分析

2.1 発電分野

発電分野の技術課題は、高効率・低コストの太陽電池の開発と太陽電池の耐宇宙環境性の確保であり、両者とも SPS の最終コンフィギュレーションに依存しない中枢技術である。太陽電池の開発はこの分野の産業技術の展開が期待できるが、耐宇宙環境性については SPS の要求は他の宇宙機の太陽電池に対する要求とかなり異なっており、SPS 特有技術として研究する必要がある。表 2 に発電分野の技術開発の内容を示した。

表 2 発電分野の技術開発（網掛けはコア技術を示す）

分野	技術課題	前提となる産業技術・宇宙技術の展開	宇宙太陽発電技術としての技術開発			
			要素技術開発・評価・実験室実験	地上実証実験	軌道上実証実験（10MW 程度以下）	パイロットプラント（100MW クラス）
発電	高効率（比重量、比面積）・低コスト太陽電池	産業用太陽電池の高効率・低コスト化	-	-	-	-
	太陽電池の耐宇宙環境性	-	放射線照射実験 対デブリ耐性評価 高電圧放電評価実験	-	耐放射線性実証 対デブリ耐性実証 宇宙高電圧発電技術実証	-

オプション技術(熱発電)の可能性	地上用熱発電技術実用化	効率、コスト、耐久性評価	-	-	-
------------------	-------------	--------------	---	---	---

2. 2 送電分野

送電分野の技術課題は、マイクロ波のビーム制御技術と高効率・低コストマイクロ波増幅・制御技術であり、両者ともSPSの最終コンフィギュレーションに依存しない中枢技術である。使用するマイクロ波素子そのものは産業技術の発展に負うところが大きい、これらをSPS用として組み合わせる技術はSPS特有技術として研究開発する必要がある。表3に送電分野の技術開発の内容を示した。

表3 送電分野の技術開発(網掛けはコア技術を示す)

分野	技術課題	前提となる産業技術・宇宙技術の展開	宇宙太陽発電技術としての技術開発			
			要素技術開発・評価・実験室実験	地上実証実験	軌道上実証実験(10MW程度以下)	パイロットプラント(100MWクラス)
送電	マイクロ波ビーム制御	レーダー技術の発展	ビーム制御技術の開発	数十m~数千kmでの送電実証	数百km、軌道条件でのビーム制御実証、電離層通過実証	数千km~数万km、軌道条件でのビーム制御実証
	高効率・低コストマイクロ波増幅・制御	携帯電話など情報通信産業がリードする高効率・低コスト・低損失マイクロ波素子の開発	システムとしての高効率・低損失回路技術の開発	-	-	-
	オプション技術(光送電)の可能性	レーザー産業技術の発展	効率、コスト、耐久性評価	-	-	-

2. 3 宇宙電力分野

宇宙電力分野の技術課題には、低損失集配電、ロータリジョイント電力技術、高効率電圧制御器、高効率蓄電が含まれるが、これらは全てSPSの最終コンフィギュレーションに依存する技術である。ロータリジョイント以外の技術は産業技術の発展に負うところが大きい、この分野の全ての技術はSPS特有技術として研究開発する必要がある。表4にこれら技術開発の内容を示した。

表4 宇宙電力分野の技術開発(全てオプション技術)

分野	技術課題	前提となる産業技術・宇宙技術の展開	宇宙太陽発電技術としての技術開発			
			要素技術開発・評価・実験室実験	地上実証実験	軌道上実証実験(10MW程度以下)	パイロットプラント(100MWクラス)
宇宙電力	低損失集配電	大規模地上太陽発電所の技術の発展 超電導技術	システムとしての高効率・低損失集配電技術の開発	-	宇宙環境下での成立性の実証(～10MW)	宇宙環境下での成立性の実証(100MWクラス)
	ロータリジョイント電力技術	-	可動部での電力伝送技術の開発 耐久性評価	-	宇宙環境下での成立性・耐久性の実証	
	高効率電圧制御器	電力産業がリードする高効率民生電圧制御器	システムとしての高効率電力制御技術の開発	-	宇宙環境下での成立性の実証(～10MW)	
	高効率蓄電	パソコン・携帯電話などの産業がリードする高効率・低コスト・軽量のバッテリーの開発	システムとしての高効率充放電技術の開発	-		

2. 4 熱構造分野

熱構造分野の技術課題には、構造物建設、形態維持・姿勢制御、回転機構、集光装置、大容量排熱の技術が含まれる。これらの中で、構造物建設技術と形態維持・姿勢制御技術はSPSのコンフィギュレーションに依らない共通の中核技術であるが、回転機構、集光装置、大容量排熱の

技術はSPSの最終コンフィギュレーションに強く依存する技術である。構造物建設の技術は一般の宇宙構造・材料技術の発展、大容量排熱は産業技術の発展に負うところが大きい、これら全ての技術はSPS特有技術として研究開発する必要がある。表5に熱構造分野の技術開発の内容を示した。

表5 熱構造分野の技術開発（網掛けはコア技術を示す）

分野	技術課題	前提となる産業技術・宇宙技術の展開	宇宙太陽発電技術としての技術開発			
			要素技術開発・評価・実験室実験	地上実証実験	軌道上実証実験（10MW程度以下）	パイロットプラント（100MWクラス）
熱構造	構造物建設	SPS以外の大型宇宙構造物技術の発展	SPSの要求を満足する自動展開方式開発、大型構造物の構築	展開模擬実験	軌道上での数十～数百m規模の構造物要素の建設実証	軌道上でのkm規模の構造物の建設実証
	形態維持、姿勢制御	-	送電アンテナの形態維持技術、姿勢制御技術開発	-	軌道上での数十～数百m規模の構造物の形態維持・姿勢制御能力実証	軌道上でのkm規模の構造物の形態維持・姿勢制御実証
	回転機構	-	回転機構開発寿命評価 ダイナミクス評価	-	宇宙環境下での耐久性実証・軌道上での姿勢擾乱データ	宇宙環境下での耐久性実証・軌道上での姿勢擾乱データ
	集光装置	-	薄膜材料開発 波長選択コーティング開発 薄膜ミラーの展開技術開発	-	軌道上での発電部への集光能力実証（数十～数百m規模） 耐宇宙環境性の実証	軌道上での発電部への集光能力実証（km規模）
	大容量排熱	パソコンなどの産業機器がリードする高効率・低コスト熱輸送技術	システムとしての熱輸送、排熱技術	-	システムとしての熱的成立性の実証（～10MW）	システムとしての熱的成立性の実証（100MWクラス）

2.5 受電分野

受電分野の技術課題には、高効率・低コストマイクロ波エネルギー収集・整流回路、既存電力網との接続、大容量蓄電の技術が含まれるが、これらの内、大容量蓄電以外の技術はSPSのコンフィギュレーションに依らない共通の中核技術である。既存電力網との接続と大容量蓄電の技術は一般の電力産業技術の発展に負うところが大きい。表6に受電分野の技術開発の内容を示した。

表6 受電分野の技術開発（網掛けはコア技術を示す）

分野	技術課題	前提となる産業技術・宇宙技術の展開	宇宙太陽発電技術としての技術開発			
			要素技術開発・評価・実験室実験	地上実証実験	軌道上実証実験（10MW程度以下）	パイロットプラント（100MWクラス）
受電	高効率・低コストマイクロ波エネルギー収集・整流回路	通信産業がリードする高効率・低コストの電力取得用のダイオードの開発	システムとしての高効率受電技術の開発 耐候性評価	送電部との組み合わせ実証実験（数十～100kW）	送電部との組み合わせ実証実験（～10MW）	-
	既存電力網との接続	電力産業がリードする大容量電力接続技術	-	-	実証（～10MW）	実証（100MWクラス）
	大容量蓄電	電力産業がリードする低コスト大容量蓄電技術	-	-	実証（～10MW）	実証（100MWクラス）
	オプション技術（光受電）の可能性	レーザー産業技術の発展	効率、コスト、耐候性評価	-	-	-

2.6 システム運用分野

システム運用分野の技術課題には、衛星としての軌道運用、発電所としての運用、エネルギーシステムとしての保安・管理・維持があるが、フォーメーションフライトに関わる技術以外は全

てSPSのコンフィギュレーションに依らない共通の中核技術である。衛星としての軌道運用の技術は一般の宇宙技術、発電所としての運用技術は地上太陽光発電所の技術がほぼそのまま適用されるが、エネルギーシステムとしての保安・管理・維持技術はSPS特有の技術として開発する必要がある。表7にシステム運用分野の技術開発の内容を示した。

表7 システム運用分野の技術開発（網掛けはコア技術を示す）

分野	技術課題	前提となる産業技術・宇宙技術の展開	宇宙太陽発電技術としての技術開発			
			要素技術開発・評価・実験室実験	地上実証実験	軌道上実証実験(10MW程度以下)	パイロットプラント(100MWクラス)
システム運用	衛星としての軌道運用	大型衛星の軌道上運用	-	-	-	-
		フォーメーションフライトに関わる宇宙技術				
	発電所としての運用	大規模地上太陽光発電所の技術	-	-	運用実証(～10MW)	運用実証(100MWクラス)
	保安、管理、維持	エネルギーシステムとしての保安、管理、維持	-	-	実証(～10MW)	実証(100MWクラス)

2.7 宇宙輸送分野

宇宙輸送分野の技術課題は低コスト・大量輸送技術であり、SPSの実現には前提となる技術である。しかしこの技術はSPSとしての研究開発ではなく、革新的宇宙輸送技術の展開、軌道間輸送技術の展開の中で研究開発されるものであり、宇宙輸送産業、宇宙産業、宇宙観光の展開が前提となる。宇宙産業にはSPSも含まれると考えられ、SPSの段階的な実現と宇宙輸送の低コスト化はリンクすることが予想される。

3. 技術ロードマップへの展開

SPS実用化に至るロードマップは研究者によりそれぞれ考え方に若干の差があるが、概ね図1のような流れが共通の認識である。ロードマップ上最大のクリティカルパスは軌道上から地上へのマイクロ波送電実証¹⁾であり、この実証により初めてSPSの技術的な実像を描くことができる。この実像に基づき経済的、社会的評価を行った上で、SPSの開発研究のフェーズに入ることが可能となる。

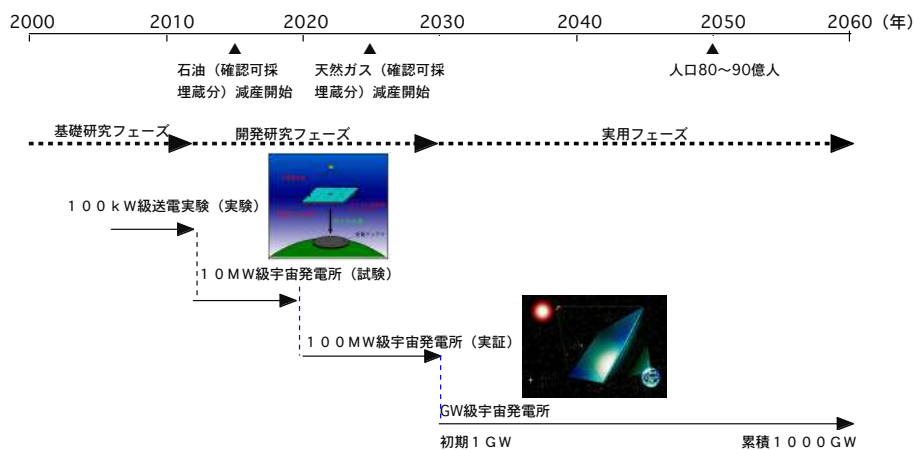


図1 SPS実用化にいたるロードマップ

前章で分析した各分野の技術開発を、その優先度に従い図1のロードマップ上に展開すると、図2のような技術開発のロードマップを作ることができる。

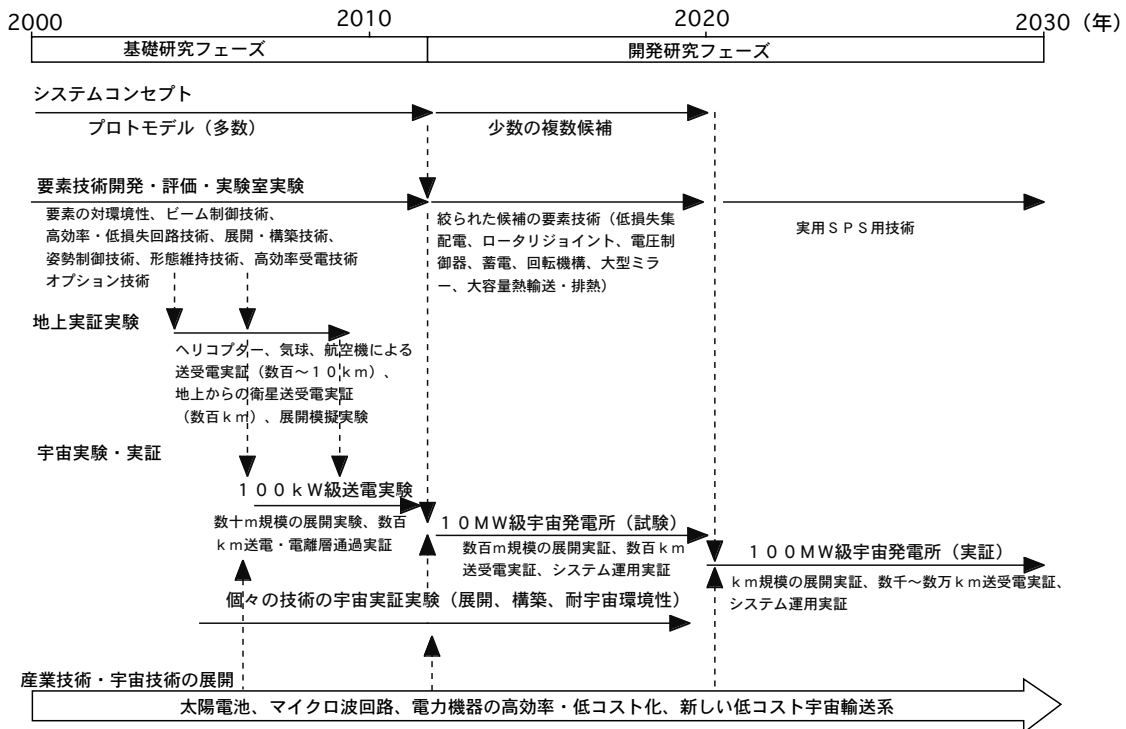


図2 SSPSの技術開発のロードマップ

4. 当面重点的に手がけるべき技術開発

図2に示したロードマップを基にすると、当面重点的に手がけるべき技術開発は以下のようまとめることができる。

(1) システムコンセプトの検討

現段階では様々なSPSのオプションがあって良い。当面は各種の案を比較検討、活発な議論を行って技術的に実現性の高いシステムをリファインすることが必要である。

(2) 要素技術開発・評価・実験室実験

共通のコア技術課題 (要素の耐環境性、位相制御技術、高効率・低損失回路技術、展開・姿勢制御、形態維持技術、高効率受電技術) の研究に開発リソースを集中する。

(3) 地上実証実験

軌道上でなくても地上で可能な実証実験 (短距離マイクロ波送電実験 (数百~数千m)、数m級アンテナ展開模擬実験) を実施に移す。

(4) 宇宙実験・実証

ロードマップ上最大のクリティカルパスである軌道上から地上へのマイクロ波電力伝送実験 (送電電力100kW級、距離数百km) を2010年頃の実施するための準備に着手する。

(5) オプション技術の研究

主力は上記(1)~(4)に注ぐが、有望な代替技術 (熱発電、レーザー等) に対しても一定のリソースを配分し技術ブレークを目指した検討も並行して進める。

参考文献

1) 佐々木進、USEF/SSPS 専門委員会：SSPS実証実験システムの技術的な研究課題、第5回SSPSシンポジウム、平成14年11月、神戸大学