

太陽集光技術

Sunlight concentration technique

高度ミッション研究センター

Advanced Mission Research Center

木皿 且人 Katsuto Kisara

Abstract

The concept of Space Solar Power System (SSPS) is of supplying solar energy to the earth by concentrating energy into a huge sunlight concentrator placed on stationary orbit and sending it in forms of electric power or laser. Sunlight concentration technique is used to control the amount of energy coming into an energy conversion device. It is one of the most important techniques in the SSPS concept. Sunlight concentration technique complexly relates to other techniques such as energy conversion and transmission techniques and is not appropriate to and should not be studied individually.

We are planning to come to a result and put SSPS on a commercial basis in the year of 2030 or around. To do so, we determined what were to be innovative technologies required for the sunlight concentration technique. We also did investigations and researches to solve problems and achieve our goal through committee activities.

Last year, we had studied on wave length selection technique and properties capable of enduring space environments from a point of incoming energy control. From that study, we know that controlling wave length through dielectric multi layers is effective to control incoming energy.

1.はじめに

静止軌道上に広大な受光設備を建設し太陽エネルギーを電力やレーザーに変換して地上にエネルギー伝送するSSPSで、集光技術は極めて重要である。地球近傍における太陽光強度は一定であり、太陽エネルギーを高効率で変換するためにはデバイスの高性能化と集光における損失の低減が不可欠である。集光方式の最適化は変換デバイスの種類や特性、全体システムの要求から決定される。太陽電池を例にとれば、集光型か否かによって二次集光系の有無、ホモジナイジングの必要性、波長制御手法など光学システムの構成が異なるため設計に影響する。一方、デバイスの種類や特性に左右されない検討項目として、例えば、宇宙用部材という観点から求められる軽量化、耐宇宙環境（真空、宇宙線環境、無重量、デブリなど）特性などが上げられる。

SSPSは超巨大構造物であり、太陽集光鏡も数キロメートル径にも及ぶ大きさが予想されており、構築方法もさることながら、運用時の光学システムとしての鏡特性の確保、集光性、デブリ対策、保守性など検討すべき項目は少なくない。宇宙における巨大構造物として我々が経験しているものはISSが最大であり、さらにその10倍以上の規模の宇宙構造物を静止軌道で運用するために、通常の宇宙開発では意識の低い分野に対してもスケール効果により顕在化してくるファクターも検討されなければならない。

委員会では、10年後に実証する衛星を想定した項目と、30年後の商用システムを見据えた技術

に注目し、現状技術をブレークする革新技術を抽出し、どのように商用システム開発を進めるかのロードマップをチューニングする。集光技術は、伝送技術や商用運用方式などと共に SSPS に不可欠な技術であるが、核となるのはエネルギー変換技術である。当面、太陽集光技術は波長選択制御や軽量化、高集光技術など集光の要素研究に重点を置いて検討を進め、他の研究と情報を共有しながら課題をつめてゆく事になろう。

2. 研究の概要

本研究は、SSPS の集光系についてワーキンググループ活動並びに肝要な要素技術である波長選択の技術について述べる。

2.1 集光ワーキンググループによる検討

本項目では、エネルギー変換方式により検討対象が二つある。一つは太陽電池で発電しマイクロ波でエネルギー伝送する方式であり、もう一つは太陽光をレーザー光に変換し、レーザーによりエネルギー伝送する方式である。両システムとも集光系を必要とするが、要求が異なる。マイクロ波方式では、低集光倍率の太陽電池と集光比 100 倍以上の高集光太陽電池がシステム検討されており、各々に適用できる集光系について検討を加えた。レーザー方式は高集光太陽電池よりも集光比の高いシステム（集光比 1000 倍以上）について検討を加えた。

宇宙環境においては集光した太陽光を太陽電池に照射し発電するが、投入したエネルギーが全て変換されるわけではない。また太陽光励起レーザーの場合もレーザーポンピングに使えるエネルギーは、レーザー発光のバンドギャップより大きなエネルギーのみが利用されるため、太陽電池と同様に変換に寄与するスペクトルのみが必要となる。集光系では変換に寄与するエネルギーを選択的に供給する方式が求められる。

こうした太陽光のスペクトルを選択的に供給する方法はいくつかあるが、有望な方式は誘電体多層膜を利用した波長選択方式がある。レーザー光学分野では誘電体多層膜は一般的である。

太陽光スペクトルを選択的に供給する方式は、旧 NAL において我々が研究を進めてきた傾斜機能材料技術を応用した地上用の太陽光熱複合発電システムで光と熱を分離する方式にこの誘電体多層膜を利用してきた。宇宙で問題となる排熱負荷の低減には変換に寄与しない波長帯域のエネルギーを入射時に排除することが有効である。

変換されなかった残りのエネルギーは熱となり、宇宙環境ではデバイスの温度が上昇する。よって、この熱エネルギーの排熱が重要な課題となる。宇宙環境における排熱は放射による方法がほぼ唯一の排熱手段であり、宇宙の平均温度と放熱部の温度差が放熱の熱流を決める。排熱負荷を軽減するには、エネルギー変換に寄与しない波長帯のエネルギーをシャットアウトし、同時にエネルギー変換効率を高めることで放熱部の熱エネルギーの増加を軽減できる。

2.2 波長選択デバイスの基礎評価

集光技術の肝要な要素に波長選択制御が挙げられる。太陽光発電、レーザー変換ともにエネルギー変換に寄与する波長帯だけを選択的に制御する波長制御技術がシステム成立のための重要な技術と言える。これらに利用可能なデバイスについて調査し、有望なデバイスについて基礎的な耐久性評価を試みた。

波長制御方式はいくつかあるが、本システムの要求をベースに調査した結果、誘電体多層膜方式が現時点で最適な方法と判断された。それで、模擬太陽光を用い、集光比をパラメタに太陽光を波長選択膜に当て透過光と反射光の挙動を計測した。さらに、真空環境（宇宙環境）を想定した評価試験を実施した。

3. 成果の概要

3.1 太陽光集光における技術課題

- ・波長制御技術 宇宙環境では、太陽光強度が地上の 1.4 倍、気象条件や昼夜に影響さ

れないため日照時間は 24 時間連続的にエネルギー確保が出来、安定したソースとして地上の約 10 倍のポテンシャルがある。太陽電池は太陽光エネルギーの一部を電力として取り出すが、回収できない残りは熱や光となって放散される。それら発電に寄与しない波長帯（デバイス特性によるが、一般に紫外線や赤外線など）は太陽電池に不具合を生じさせる。粒子エネルギーの大きい紫外線はデバイスの劣化や損傷をもたらす、他方赤外線はデバイス温度を上昇させる結果、変換効率の低下を招く。よって、こうした問題を回避するには、変換に寄与する波長帯だけを選択的に供給し、不要な波長帯は排除する波長制御の考え方を導入することにより、太陽電池の長寿命化や性能低下の抑制が期待できる。よって、集光における課題の一つは波長制御技術であり、波長選択の手段、デバイス特性の把握、宇宙環境に対する信頼性の把握が不可欠である。

・太陽光追尾技術 太陽電池と入射光の関係は、一般にデバイスに対して光を垂直方向から入射するとき最大出力が得られる。従って、デバイスが常に最大出力状態にするには常に何らかの方法で太陽に正対させる必要がある。地上において追尾した場合と固定式の場合の発電出力の比較では後者に対して前者は 2 倍を超える発電量が得られると報告されている。宇宙太陽光発電では、一次集光系が太陽光を捕捉し、二次集光系、もしくは太陽電池デバイスに太陽光を供給する。集光における課題の別の一つは太陽光追尾技術である。

・高密度集光技術 集光における別の課題は、高密度集光技術である。近年、従来では考えられなかった高集光の太陽電池が開発、実用化されてきている。例えば米国のサンパワー社では単結晶シリコン太陽電池で、入射する太陽光の強度は 200~300 倍、そのときの変換効率が率 25% の太陽電池が製品化されている。これらはタンデム型集光太陽電池であるが、最近の研究では集光比 1000 倍、変換効率が 35% を超えるデバイスのデータも報告されており、今後が期待される。こうした高集光技術は SSPS におけるレーザーエネルギー変換技術（第 3 章）におけるエネルギー変換と共通する技術である。第 3 章で述べられるレーザー伝送による SSPS では太陽光を直接レーザー光に変換する太陽光励起レーザーを想定して研究が進められているが、ここでも集光比が 1000 倍を超える集光が必要と見られており、不要な波長帯が排除された高強度光エネルギー集光技術は双方に共通した課題である。

3.1.1 波長制御

エネルギー変換に寄与できる波長帯を選択的に供給し、不要な波長帯による障害を回避するための機能を持つデバイスを波長制御デバイスと呼ぶことにする。波長制御デバイスは集光系とエネルギー変換部の間に位置する。波長制御デバイスの候補としていくつかの光学フィルタを考慮できるが、既存の光学デバイスでは、吸収型フィルタ、誘電体多層膜フィルタ、回折格子フィルタ等がそれにあたる。検討の結果、誘電体多層膜は比較的高強度の集光した太陽光に耐えるが、吸収型フィルタや回折格子は、これらの用途には不向きといえる。SSPS では、太陽電池に波長制御だけを行い集光しない（太陽光のエネルギー密度を操作しない）光をあてる場合には、一次ミラーに波長制御のための誘電体多層膜をコートする事も想定できる。また、太陽電池デバイスの直近に配置する事も可能である。

一次光学系を想定した宇宙でのフィルムに多層膜をコートする場合についての調査検討、並びに本報告で評価した誘電体多層膜フィルタ（ホットミラー）の真空環境下での耐久性評価を把握しておくことは肝要である。SSPS 集光系に限定した場合、集光ミラーは太陽からの高エネルギー粒子を含んだ太陽光スペクトルをエネルギー変換に寄与するスペクトルとそれ以外のスペクトルに分離し、エネルギー変換部に供給する事が求められる。

集光ミラーはエネルギーを取り込む入り口であり、不要なエネルギーを排除しながら必要な太陽光の方向を変える。太陽光スペクトルの波長制御は多くの方法が考えられるが、耐久性・効果性の観点から調査するとエネルギー密度の高いレーザー等で実績のある誘電体多層膜が現時点では有効と思える。

重量の点を考慮すると、商業システムの打ち上げコストを考慮するならば集光ミラーの母材にガラスを選定する事は重量の観点から極めて困難と判断できる。現在の技術では高分子フィルムの母材に、誘電体多層膜をコートする方式が最善と考えられる。高分子フィルムを母材とし誘電体多層膜をコートした集光ミラーを採用する場合に考慮すべき項目は寿命の予測である。

高分子フィルムの寿命評価については劣化（寿命）を生じさせる要因として以下の項目を把握しておかなければならない。すなわち、

環境による損傷..... 宇宙線環境、真空環境（デブリ、放出ガスの影響）

化学的劣化...高分子の化学構造による熱劣化挙動、異種構造と不純物の影響、光劣化など

機械的・物理的現象から生じる劣化.....疲労寿命、対薬品性（姿勢制御推進剤の影響）

こうした項目について、宇宙環境に耐えうる素材としての代表例は 1964 年にデュポンで開発されたカプトンやその後の航空宇宙機器の用いられているケブラーとして知られる PEI、さらに近年著しい開発が進められている多くの複合材や高分子化合物フィルム類が候補と出来る。

SSPS の寿命設計はエネルギーペイバックタイムを考慮して決定すべきであるが、今仮に 1 システムの寿命を 20 年（地上の太陽電池システム；出力の半減（50%）を持って寿命とする）とすれば、太陽電池の劣化と集光ミラーの劣化の乗じたもので寿命が 20 年を達成しなければならず、太陽電池の劣化が仮に地上と同じレベルで進むとすれば、集光ミラーの劣化は殆ど許されない事になる。現実的に集光ミラーの宇宙空間における劣化特性の予測（加速試験）は極めて肝要なパラメタと言える。

3.1.2 集光系に関する考察

SSPS は静止軌道近傍の宇宙空間で太陽エネルギーを電力や光エネルギーに変換し、宇宙活動のインフラとして、また安定したエネルギー供給手法として地上に伝送する構想であり、構成要素である集光系は、太陽電池や太陽光励起レーザーに太陽光を供給する部位のサブシステムで、基本的に次の二つの機能を有する。

- 1) 太陽光捕捉
- 2) エネルギー供給

この二つの機能を次の 3 つの特徴がある宇宙環境で獲得し維持しなければならない。

- 1) 無重力
- 2) 宇宙線
- 3) 高真空

太陽光捕捉は、太陽から発する光がある一定の広がりを持つ光束であることをふまえて行わなければならない。至近距離なら平行光線として扱える太陽光も、反射鏡から 100メートル、200メートルと離れるにつれその広がりや影響が無視できなくなる。このことは集光ミラーとエネルギー供給部の位置関係が明確になった段階で最適手法を検討する。

エネルギー供給の観点から集光について考慮する。一般に太陽電池に入射するエネルギーは太陽電池に対して垂直方向からの光（これは太陽光強度が最も高い）の入射に対して最大出力が発生する。損失なく太陽光をエネルギー変換部に導くのは不可能であるが、できるだけ損失を押さえて太陽光を供給することはシステム上きわめて重要である。

集光型システムや太陽光励起レーザーのように二次集光系を有するシステムでは、光の漏れは大きな損失となる。CPC 等の低集光方式との組み合わせにより二次集光系での損失を低減させる手段を講じるのが効果的である。太陽電池には光の均一性も重要であり、集光した光を宇宙で均一化する手法についても検討を加えなければならない。

3.1.3 SSPS（レーザー）集光系

宇宙太陽光発電におけるレーザー変換では1000倍程度の集光を想定している。今、諸条件より一次集光鏡とレーザーに関するパラメタとしてレーザーと太陽集光鏡の距離は最大50m程度、反射鏡1ユニットのセグメント数を数百枚以下に抑える。システム構築の容易性からレーザーと一次集光鏡の距離は短いほどよい。

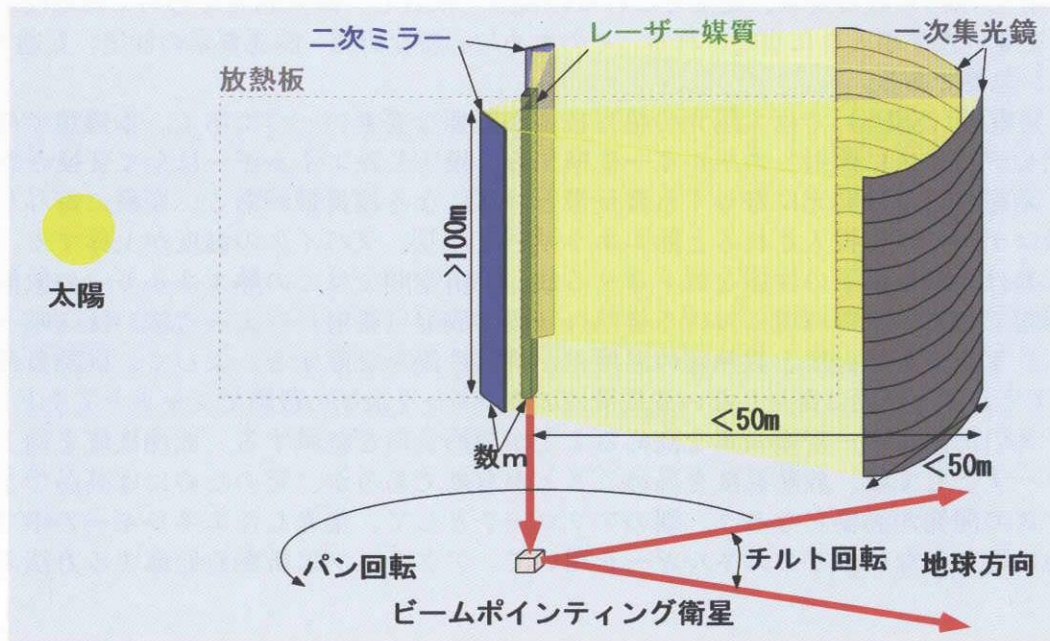


Fig.1 Concentration of SSPS (Laser Type)

図より、一次集光鏡で集められた（反射した）太陽エネルギーは高密度化されてレーザー媒質に供給される。一次集光系とレーザー媒質の間に二次ミラーが配置されているが、この部分にもう少し注目する。

一般に太陽光の集光装置には、追尾式と非追尾式（固定式）がある。追尾式は文字通り太陽の位置を検出し追尾することで高集光を達成する。集光方式により一軸型や二軸型がある。パラボラ集光鏡は二軸制御の代表的な例である。

一方、非追尾型は集光比が大きくとれないものの、追尾機構を持たない特徴がある。代表的な例は複合放物面集光系（CPC; Compound Parabolic Concentrator）である。CPCでは許容偏角が大きく2～10倍程度の弱集光では追尾を必要としない。この集光系は放物面を円弧で近似したものや非対称な面を持つものなど多くの変形がある。CPCは結像性は無視して集光効率を上げることだけを意図して設計される。

このような特徴を持つ故に、SSPSの二次集光系にこのCPCを導入し、二次集光系を構築する方法が考えられる。図1の二次ミラーの位置にこのCPCを導入しCPCでの集光比を8～10倍程度にし、CPC受光面を太陽光励起レーザー媒質上にとれば、光の漏れによる局部加熱や損失を回避でき、太陽光が元来含んでいる4 mradの広がりによる影響も吸収できる。

3.2 今後の検討課題

宇宙エネルギー利用システムの集光系について、システムを成立させるための技術的課題を把握するとともに、課題克服のための手法について検討を行い、ロードマップを見据えた技術的見通しを得る。以下の4項目について、エンジニアリング的観点から検討を行い、宇宙エネルギーシステム構築への知的資産に資する必要がある。

- 1) 光学的成立性、
- 2) 材料・構造的成立性

- 3) システム的観点での成立性
- 4) 工学的（製造技術含む）成立性

これらの技術的課題はそれぞれが独立した課題ではなく、SSPS 集光システムとしての成立性を4つの観点から検討する事を意味している。最終的に集光システム方式を決定する要因は基本的に SSPS 全体から求められる要求、提案をこれらの視点で検討し、研究開発を含めて期限内に要求を満たす手法を見いだす事ときに決定される。そのために必要な研究・開発要素の抽出、見通し、成立性の把握が急務である。

宇宙太陽光発電所（SSPS）では太陽光の集光技術が肝要な要素の一つである。本構想ではブロードな太陽光をデバイスに照射しエネルギー変換する。投入したエネルギーは全て変換されるわけではなく、発電もしくは発光に寄与する波長帯とロスになる波長帯がある。変換に寄与しないエネルギー帯はデバイスに投入されると熱エネルギーとなり、デバイスの温度が上昇する。デバイス温度の上昇は一般に素子の性能を低下させる故、宇宙空間ではこの熱エネルギーの放散が極めて重要な課題である。宇宙環境における排熱は一般に放射（輻射）による方法がほぼ唯一の排熱手段であり、宇宙の平均温度と放熱部の温度差が排熱性能を支配する。よって、排熱負荷を軽減するには、エネルギー変換に寄与しない波長帯のエネルギーを最初の段階でシャットアウトし、同時にデバイスのエネルギー変換効率を高めることが放熱負荷を軽減する。放熱性能を向上させる別のアプローチとしては、放熱温度を高めることが有効であるが、そのためには高温で十分作動するデバイスの開発が必要となろう。別のアプローチとして、集光したエネルギーの中で光エネルギー変換に寄与しない残りのエネルギーを用いて、アクティブに排熱を促進する方法も考慮できる。

4.まとめ

本研究は、30 年後を見据えた長期的展望に立脚した研究であり、ロードマップを見据えながら現状技術を順次新技術に置き換えつつシステムのチューニングを行わなければならない。そうした観点において、2003 年度にはシステム検討において集光技術を独立したワーキンググループとして活動を開始した。2003 年度は集光技術全体の把握、技術課題の抽出を行い、優先度の高い要素試験を実施した。2004 年度の集光に関する研究は、2003 年度に抽出した課題を更にチューニングし、引き続きワーキンググループによる検討を進める。2004 年は特に一次集光系の母材候補となるフィルムの耐宇宙環境特性の把握と評価、波長選択膜とのマッチング等について要素研究を含めた研究を行う。また二次集光系が必要なレーザシステムについては、CPC 等の広角捕捉技術の検討、集光太陽光の均一化（ホモジナイジング）について調査を進め、一次集光系のアライメント性能に対する余裕を与える二次集光系の可能性について評価する研究計画である。

[参考文献]

宇宙エネルギー利用システム総合研究報告書、2003 年 3 月、三菱総合研究所