

宇宙太陽発電システム（SSPS）の高度化に資する
傾斜機能材料の適応性調査

高度ミッション研究センター
木皿且人，新野正之，森 雅裕

Abstract

To raise the economics of Space Solar Power System (SSPS) that is to supply large energy from space to the ground and is expected for practical application in 20-30 years, weight reduction and improvement of the life-span need to be sought to reduce transportation costs and life cycle costs. In relation to the SSPS research that has been conducted by JAXA, present report suggests a new vision for material development applying the Japan-developed FGMs concept and proposes some concepts of innovative materials in which the advantages of FGMs are fully utilized.

KEYWORDS

SSPS, FGM, Energy conversion materials, energy

1 緒言

本調査は傾斜機能材料設計技術の概念を宇宙太陽発電システム(SSPS)の高度化に反映させようとするものである。調査は委員会活動でマイクロ波方式，レーザー方式の両システムに対する材料創製に関する適用性について調査した。

20年～30年後の実用化を目指して宇宙から地上へ大量のエネルギーを供給するSSPSの経済性を高めるには，宇宙輸送コストを低減するための軽量化とライフサイクルコストをさげるための長寿命化を追求する必要がある。

本報告では，JAXAが進めてきたSSPSの総合的研究に対して，我が国が創唱したFGMの概念を適用することにより，

- (1) 高機能・超軽量材料分野
- (2) 宇宙放熱の性能向上システムと高効率エネルギー変換素子分野
- (3) 宇宙レーザーによる先進的エネルギー変換システム分野

などの各分野にブレークスルーのための新たな幾つかの視点を提起し，傾斜機能材料設計技術の持つ特徴をフルに生かした，革新的な材料概念を提案した。以下3分野ごとに主要な成果を記述する。

2 SSPSからの材料への要求性能

2.1 高機能・超軽量材料分野

SSPS委員会の太陽集光WG，ロボット・構造系WG，マイクロ波系WG，レーザー系WGの各WG主査から寄せられた新材料への性能要求を取りまとめ，以下の材料別の分類に整理し検討を加えた。

2.1.1 カーボンナノチューブ，CFRP等で形成される比剛性が従来材料の約100倍の超軽量構造及び材料

要求	理由
カーボンよりも比剛性が100倍高い構造材料	太陽発電衛星の構造体にはテンセグリティ構造等の構造様式が提案されている。そこでは，強度よりも剛性が主要評定設計項目であり，重量に対する剛性が飛躍的に高い材料が望まれる。
高減衰・軽量構造材料	本材料を効果的に使用することにより，大型構造物の振動抑制を容易にする事ができる。
デブリ・放射線に強い自己修復型構造材料	30年間の運用期間に於いて宇宙環境で晒されるデブリ等の損傷に対して，自己修復できる材料

2.1.2 寿命が約10倍の長寿命構造、放熱と高効率性を兼ね備えた一体構造素子等々の電気系材料

要求	理由
現状の1/10の軽量化を目標とした軽量導電体/誘電体	現在よく用いられる誘電体はテフロンであるが、アンテナは1840t/km ² となる。想定している300t/km ² よりはるかに重い。
長寿命フィラメント	マグネトロンの寿命は地上での通常の利用法で1万時間程度、SSPSでは30年≒30万時間のSSPS寿命に対応
超軽量なDC/DCコンバータ部品	マグネトロンシステムの重量の多くは100V程度から4000V程度まで昇圧するためのDC/DCコンバータ部分であり、この軽量化が送電システムの軽量化につながる。現状では単なる変圧器であるので重い鉄心を必要としている。

2.1.3 発熱分布を制御したドーブ傾斜固体レーザー、高い熱制御性を有するホトニックファイバーレーザー材料

理由；均質材料では、太陽光の吸収により発生する熱応力のため、レーザー媒質が破壊するおそれがある。そのため、発熱の少ない、あるいは冷却効率の高い材料が必須である。

いずれの分類においてもSSPS側の過酷な要求に答えるためには傾斜機能の概念が有効に機能することを明らかにしている。

3 高機能・超軽量材料分野

3.1 構造系材料の適応性検討

先に述べたようにSSPS検討委員会WGからのSSPSシステム高度化のための材料に関する要求はかなり厳しいものである。この要求値にどの程度応えられるかを、構造系材料を6部門に分けて、それぞれの専門委員により調査を実施した。

調査部門は、① CNT系、② CFRP系、③ 耐デブリ材料系、④ 高熱伝導材系、⑤ 放熱材料系および⑥ 潤滑材系の6部門である。膜材料等今回の調査ではほとんど手をつけることが出来なかった分野もあるが、不足分野は17年度に実施する予定である。

(a)CNT系： NASAのAmes研究所、Glenn研究所等でも早い段階からナノチューブの基礎・応用研究を追求してきた。

CNTのTensile Strength：11-63GPa、Tensile Modulus：1000 GPa-1800 GPaを記録している。これは既存材料の特性の10倍以上の数値であり、SSPSの構造材料として有力な候補材料と言えそうである。しかしながら、これらの特性は原子間力顕微鏡で一本のCNTを測定した結果である。CNTの大部分がWeb状で得られる現実を考えると、高分子との複合化も含めこれをどのように利用してゆくのか、またどのような形状のCNTを製造（合成）するのか、などについては現在模索の段階である。

(b)CFRP系：比強度、比弾性率では現状の工業製品では最高水準の数値を示すCFRPを用いた比剛性が100近い宇宙展開型構造体を提案した。又地上で作成した成形体の宇宙への打ち上げ以外に、宇宙でのCFRPの成形技術について調査した。重合性モノマーをカプセルに入れ、デブリ等の外的衝撃により生じたクラックでカプセルが割れ、カプセルから流れ出たモノマーが触媒により重合し、生じたクラックを修復する、自己修復型のCFRPがあること、これらのSSPSに適用する可能性があることを示した。

(c)耐デブリ系材料：デブリが材料に衝突した際、発生する熱エネルギーと衝撃波を利用して瞬時に相変態を起こしデブリの貫通深さを抑制し、さらに高温の伝導方向および亀裂進展方向を制御するインテリジェント材料について調査した。

Nb-Al系耐デブリ材料の衝突模擬試験を実施し、本システムが耐デブリ材料として有効であり、SSPSのバンパー材として使用できる可能性があり、基礎的研究段階から早期の実用化への発展が期待される。

(d)高熱伝導材料系：SSPS検討委員会のWGの要望事項の一つである、「熱抵抗の低い構造材料（排熱材と構造材の一体化）」についての調査を、炭素材料を中心として推し進めた。3D織物等、複合化プロセスで問題になる高剛性を、複合化の最終段階の熱処理で発現させるという手法を用いた、科学技術庁

振興調整費プロジェクト³⁾の成果を検討した。また、軽量・高強度（高剛性）および高熱伝導度を有する既存の材料の調査を実施し、CNTの熱的・機械的数値が非常に魅力的な材料であること、またSSPSの材料をして使用するために解決すべき課題を抽出した。

(e) 熱放射材料：宇宙空間での冷却方式として、ドロップレット冷却並びに放射冷却（熱放射）を中心に調査した。また放熱板であるAlN/W系粒子分散傾斜材料の厚みを1mm以下とすることで、ドロップレット型の冷却方式に匹敵する放熱特性を得ることができることも示した。

(f) 潤滑剤系材料：今後は、摩擦のアクティブな制御法に対応する潤滑剤の開発が求められる。トライボコーティング法に代表される摩擦のアクティブな制御を可能にする新しい潤滑剤、潤滑法について提案した。

3.2 電気系材料の小型軽量化、長寿命化の検討

経済的な採算性を達成するためには、小型軽量化による輸送費用の低減と「耐久性」の向上による維持費用の低減が重要な課題となる。

報告書ではDC-RF変換器と送電アンテナの「小型軽量化」と「長寿命化」を目的として電気系材料に求められる性能要求全般についてまとめた。ここでは傾斜機能材料設計技術の有効なDC-RF変換器について詳述する。

3.2.1 加熱陰極

マイクロ波の発振の際の電子源である加熱陰極（フィラメント）の動作温度は1800℃以上になる。マグネトロンの寿命は加熱陰極（フィラメント）の耐久性に依存している。加熱陰極（フィラメント）の寿命は、地上の通常の利用法の場合で1万時間程度、SSPSで求められている寿命30万時間（30年）を達成するためには、長寿命フィラメントの開発が必要とされる。

具体的な長寿命化として、Fig. 1に示した金属多孔体を利用した加熱陰極が考えられる。図に示した金属多孔体を用いた加熱陰極は、金属多孔体により熱電子放出面積を増大させる。従来のバルク材料では熱電子の放出はバルク材表面（2次元）領域にとどまるのに対して、空間的に開かれた構造の金属多孔体により、熱電子の放出面は3次元的な配置が可能となる。

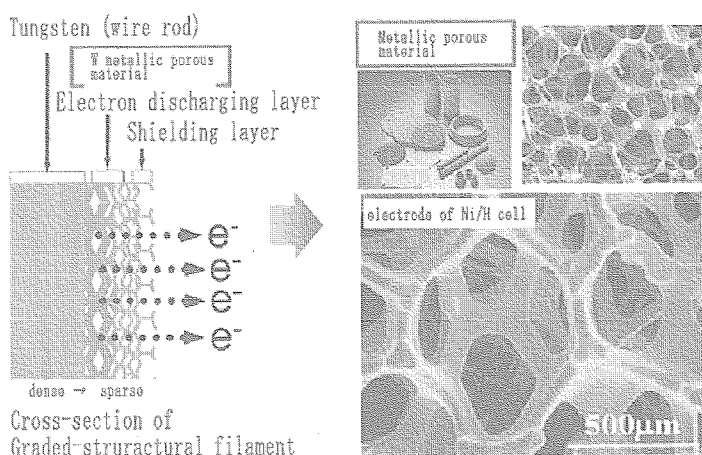


Fig.1 Heating cathode with a graded structure

3.2.2 冷陰極

加熱陰極に替わる電子源として、冷陰極が存在する。電子放出で加熱を必要としない点で電極そのものの長寿命化が期待できる。また、加熱陰極の場合、電子放出で約4000Vの電圧が必要とされるが、電子取り出しの電圧を低くできる可能性があり、電圧装置の小型・軽量化が期待できる。代表的な冷陰極は、カーボンナノチューブと微細加工によりナノメートルサイズの鋭い先端を形成したダイヤモンドやシリコンのナノエミッタが報告されている。

カーボンナノチューブを用いた素子の長寿命化で接合技術は重要であり、カーボンナノチューブと各種材料とを連続的に一体化する技術は、最優先の課題として取り組む価値がある。接合技術の有力な候補として、傾斜構造化による接合技術があげられる。

ダイヤモンドエミッタでは、表面障壁の制御やn型伝導制御技術の取り組みとして、傾斜構造を適応したナノレベルの傾斜組成制御や構造制御が期待される。

3.3 レーザー媒質への傾斜機能付加によるメリット

通常、ドーパントはレーザー媒質に対して空間的に均一である。励起光の入口部では吸収量が多くなり、奥に進むに従い少なくなる。この例の場合、励起光の吸収が先頭に偏り、高密度励起を行った場合に先端で温度上昇が大きくなり、熱レンズ効果、熱破壊が生じる。Fig. 2にはホスト材料にドーパントを指数関数的に分布させた場合についての例を示す。ドーパントをこのように分布させるのは、励起光をレーザー材料にレーザー材料長軸方向に均一に吸収させるためである。これにより温度分布がその方向に対して均一になり、励起分布に起因する熱レンズ、熱複屈折等の低減につながると考えられる。その結果、ビーム品質の向上、温度分布均一化により熱破壊限界しきい値の向上が期待され、さらなる高密度励起が可能となり、レーザーシステムの小型化が期待される。

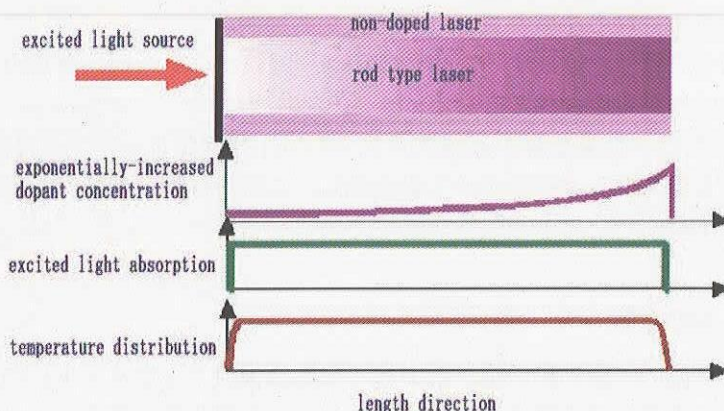


Fig.2 Graded-dopant type laser material

3.3.1 太陽光利用による高出力ファイバレーザの可能性

報告書ではフォトニック結晶ファイバー、フォトニック結晶構造のダブルクラッド型ファイバレーザについての調査結果を紹介した。ここでは結晶ファイバーについて詳述する。空孔径と空孔間距離を適切に設計すれば、シングルモードを容易に実現できる事、コア径を比較的大きくできるファイバー側面から太陽光を大量導入が可能な事などの理由で、高出力化に対応可能なこと、蓮根状の連続空孔をファイバー内に形成できれば空孔内部からのガス冷却が可能になること、からフォトニック結晶ファイバー構造は高出力レーザに有効であると考えられる。

4 宇宙放熱の性能向上システムと高効率エネルギー変換素子分野

現在SSPS委員会では、太陽エネルギーの可視域部分のみを波長分離膜で選択的に利用し、赤外域は極力廃棄する設計方針を採用している。本調査では熱制御の高度化の観点から、廃棄熱の有効利用の可能性を検討し、動力駆動源として利用が可能か、どうかを検討した。更に低温で宇宙へ廃熱するより高温で放熱した方が、ラジエーターシステムの軽量化に繋がると言う視点から、動的、静的ヒートポンプシステムの両方式について可能性を当たった。特に50℃の低温冷却剤を新たなヒートポンプ素子で200℃まで昇温可能な放熱機構については、静的システムについてヘルシンキ大学・ガシック教授に委託を行った。その中から、宇宙放熱を画期的に高めうる新たに熱電子放熱システムがクローズアップした。一方、米国のブッシュ政権下で推進される深宇宙探査計画で、宇宙のエネルギー利用の主要な部分を占める原子力利用についても調査を行った。排熱の有効利用による発電システムは科学技術振興費のFGMパート2³⁾を参照されたい。

4.1 熱電子冷却システムの可能性

熱電子冷却システムは、高温に加熱された電極から放出される電子のエネルギーで冷却を行うシステムである。低温熱源（コレクタ）と高温熱源（エミッタ）の間に導電媒体を介して対向に配置し、外部電源により両電極に電流を流すと低温側で吸熱、高温側で発熱が起こることを応用して冷却を行うシステムである。熱電子冷却はロシアを中心とした旧ソ連圏で研究が進められてきた。我が国においては熱

電子発電研究の実績があるが冷却についてはほとんど認識されていない。宇宙エネルギー利用システムの研究において、既存の冷却技術では打ち上げ重量の50%を冷却システムで占める事となり、従来の熱力学的冷却技術ではない冷却技術として熱電子冷却技術に注目できる。理論計算であるが、従来の数千倍程度の熱輸送の可能性がある。

材料の有するワークファンクションの組み合わせによる電子放出がベースとなっており、最適材料の組み合わせが高性能化をもたらすため材料の選定が大きなファクターとなる。さらに、エミッターコレクタ間の電子移動が効率に関係するので、電子放出部の形状の最適化が性能を左右する。最適化のために傾斜機能材料技術の応用が有望と考える。

5 宇宙レーザーによる先進的エネルギー変換システム分野

現在SSPS委員会では宇宙レーザーエネルギーを主に電気として利用することを検討しているが（さらに電気から水の電気分解により水素製造も検討）、遠回しの変換方式では水素の生成効率が低下するため、レーザーから直接水素製造の可能性を検討した。この課題は、既に東北大田路研究室で汚泥処理の観点から、既に研究が進んでおり、宇宙レーザーを視野に一部試作研究に着手した。また、更に長期的には、エネルギー利用以外の多目的化によりSSPSの高付加価値を採る為、レーザーによる植物の高速育成のメリットを砂漠緑化、海洋バイオ工場へと展開する可能性も検討した。

5.1 レーザー・水素変換システム

レーザーSSPSシステムに於ける宇宙レーザーの発振可能レーザー波長領域は800nm～1000nmであり、この光エネルギーで水を分解して水素発生を促す光触媒材料とシステムについて調査研究を行った。宇宙レーザーで発生する800nmから1000nmの光を利用して水の直接分解による水素製造は、困難な現状である。そこで、本調査研究では、水よりも酸化還元電位が1/4と低い硫化水素（ H_2S ）から水素を製造し、イオウ循環システムを構築することで化学量論的に水の分解をもたらすシステムを検討した。レーザーSSPS計画で得られる単位面積あたりの光密度は、単一波長でエネルギー密度が太陽光の約5倍、さらに24時間光が利用できるメリットがある。また、光の方向が変化しないため、集光系の利用も可能になり、さらに単位面積あたりのエネルギー密度の向上が期待できる。概算では、通常の太陽光に比べ、約1000倍の利用効率が見込まれる。これは、水素を製造するための光触媒の面積を1/1000にすることができ、通常の太陽光利用に比べ、水素を製造するための触媒価格やシステムコストを極端に軽減できる。また、資源の少ないRuSなどの貴金属硫化物なども十分利用可能になる。

5.2 砂漠緑化

自然界の光合成反応で最も代表的な反応はラン藻植物や高等植物の光合成である。ラン藻植物や高等植物の光合成はZスキームと呼ばれる2段階の光励起過程から成り立っている。一方人工的に照射する光の波長を段階的に、即ち傾斜的に制御し、光合成のバンドギャップを数段階に分轄し、植物の成長速度を高める事が可能な段階に来ている。既に一部の野菜では市場出荷が行われている。

砂漠緑化や砂漠化防止に向けたSSPSエネルギーの利用方法を検討し、いくつかの利用場面を提案した。SSPSで得られる莫大なエネルギーを光合成のために使っても現状の砂漠相手では大きな効果は得られない。しかし、植物の生理機能に働きかける光信号としての利用方法はかなり有効なものとする。この場合、生理機能を引

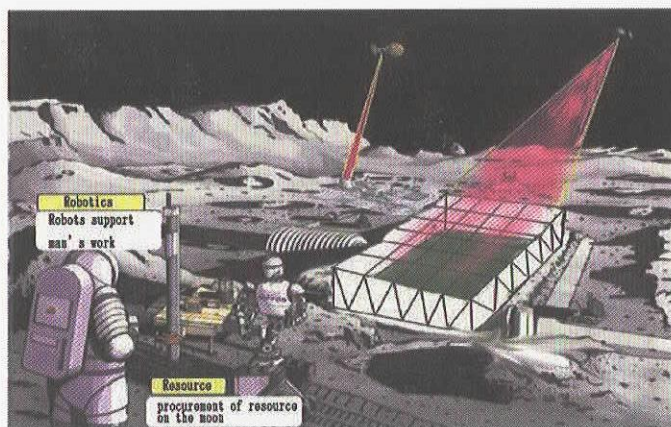


Fig.3 Image of the laser SSPS application on the moon

きおこす特定波長の光を選択的に供給できるSSPSのレーザーシステムは有効なものとなる。

5.3 月面エネルギー利用での実証計画

今年になってJAXAでは長期ヴィジョン⁴⁾を策定した。その中でSSPSは月面での有人活動にとって重要となるエネルギー供給システムとして位置づけられている。目標年次は2020年頃を想定している。月面に埋蔵する氷から水資源が活用でき、SSPSから供給されるレーザーにより水を介し、酸素と水素が得られ、燃料電源により定常的な電力が供給出来る。同時に宇宙レーザーを環境が管理された温室に供給すれば、宇宙飛行士のための十分な食料を供給することが可能となる。図のようなSSPSの活動の形態がイメージされる。月面での利用フェーズがSSPSの地上での実用フェーズの重要な検証段階になるであろう。

6 まとめ

SSPSを構成する材料／部品の高性能化と軽量化の課題に対して傾斜構造化もしくは傾斜機能化は、発熱量の制御に有効であったり、エネルギー変換効率の向上、あるいは、長寿命化に有効であることが示された。このことはSSPSの実現のための手段にとどまらず、省資源、省エネルギーといった環境重視型社会に適応されるべき技術であり、今後も継続した取り組みが求められる。

文 献

- 1) Foundation for Promotion of Japanese Aerospace Technology: Ucyu taiyo-kou hatsuden system (SSPS) no koudo-ka ni taisuru FGM no tekiousai cyousa kenkyu seika houkoku-syo, Functionally Graded Material Forum, (2005).
- 2) Mori, et al., "Meeting of FGM with Solar Energy and Laser Power", Proc. of FGM 2002, Hideo Awaji, Nagoya, 2002, Society of Non-Traditional Technology, FGM Forum (2002), pp.152-170.
- 3) Special Coordination Funds for Promoting Science and Technology: "The research on the generic technology of FGM development for thermal stress relaxation," Achievement Report for the FGM Part II, February 1992, Research and Development Bureau of the Science and Technology Agency.
- 4) Japan Aerospace Exploration Agency (JAXA): "JAXA long-term vision for FY2005", JAXA, (2005) 3, 12, 17, 19, 34, 36, 66-67.