

月面のメガソーラー発電

月太陽発電「ルナリング」構想

金森 洋史

雲や大気の無い広大な場所を有する月面は太陽発電に適している。そこで発電した電力エネルギーを地球に送って利用するシステムを構築すれば、全世界で消費されるエネルギーをすべて賄うことも可能である。また、地球環境や資源などに関連した問題も一挙に解決できる。このような構想を実現するためには、月面上に敷設する太陽電池や月から地球へのエネルギー伝送施設などが重要な要素システムとなる。本報では、これらの要素システムを中心に構想の概要を紹介する。

キーワード：月、エネルギー、太陽電池、マイクロウェーブ、レーザー

1. はじめに

現在の地球が抱える環境とエネルギーに関する問題の解決に向け、世界各国では様々な取り組みが進められている。しかし、その対策が各国の経済政策の思惑と相反する局面を有していることから、なかなか効果的な解決の糸口が掴めない状況が続いている¹⁾。経済活性化のために使われるエネルギー量の増大は、現状の社会システムではどうしても温暖化ガスの排出量を増やし、結果的に環境に対して悪い影響を及ぼしてしまう。

このような状況に対し、地球環境に負担をかけないクリーンなエネルギーを確保する手段として、宇宙太陽光発電システム（SSPS）が期待されている。これについては、2013年1月に改定された内閣府「宇宙基本計画」においてもその開発の重要性が示されており²⁾、現在様々な機関でその実現に向けた研究が進められている³⁾。このSSPSは、地球静止軌道上に太陽電池パネルを広げ、そこで発電した電力をマイクロ波やレーザーに変換して地上に送り、地上で再び電力として利用することを基本とした計画である。月開発に関する多方面からの研究を行ってきた筆者のグループでは、月の特性を生かすことによってこの計画をさらに発展させ、全地球におけるエネルギーの確保を実現する月太陽発電「ルナリング」構想として提案した⁴⁾。

2. 月の利点

(1) 安定したプラットフォーム

軌道上のSSPSの場合、最大限の発電効率を得るた

めには可能な限り太陽電池パネルを太陽に向ける必要がある。一方、地球へのエネルギー伝送施設は、常に地上の受電施設に向けられていることが望ましい。しかし、太陽と地球および衛星の位置関係は常に変化する。SSPSはある程度の姿勢制御を常に行う必要がある。一方、月は古来より地球のまわりを安定して回っていることに加え、常に同じ面（表側）を地球に向けている。従って、月の赤道上にぐるりと一周太陽電池を設置すれば、月面上のいずれかの場所で常に発電することができる（月蝕時を除く）。また、月の表側にエネルギー伝送施設を設置すれば、安定して地上の所定位置に電力を送ることができる。このように、月は送電施設の設置に適したプラットフォームと言える。

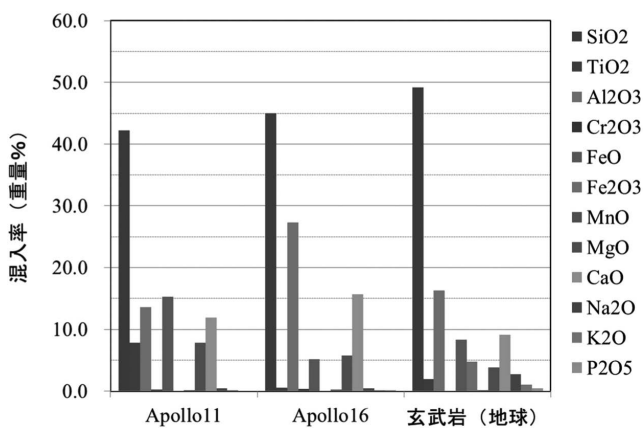
(2) 大きな発電能力

月には雲や大気がないため、地上に比べて効率の良い発電が可能となる。SSPSの場合でも、地上での発電に比べて5.5～7倍高い効率を有すると言われている⁵⁾。また月の自転軸の傾きは軌道傾斜角を考慮しても地軸の傾きの30%程度であるため、赤道付近に照射される太陽エネルギーの季節変動は地球より少ない。さらに、広大な月面の土地を使うこともできるため、容易に大電力を得ることが可能である。

(3) 豊富な資源

アポロ計画によって持ち帰られた月の土や石の分析結果から、月の鉱物は地球の鉱物とほぼ同様の成分から構成されていることが明らかになっている(図-1)⁶⁾。

鉱物の生成過程や酸化環境などが地球と異なるところもあるため、水素などの揮発性の元素が少ない、鉄の酸化程度が地球に比べて低い、アルカリ成分が少ない、水の作用で生成される鉱床や堆積岩が無いなどの特徴は見られるが、月面で作られる様々な施設の建設に必要な資材の大部分は月資源から作ることができる。



図一 月の鉱物と地球の玄武岩の化学組成 (例)

3. 月太陽発電構想の概要

(1) 全体構想

本構想では、まず月の赤道（周囲：約 11,000 km）に沿って太陽電池を敷き詰める。これにより、太陽がどの位置にあってもいずれかの領域の太陽電池は必ず陽に照らされるため、常時発電が可能となる。発電した電力は、同じく赤道上に配置された超伝導（低損失）ケーブルを介して地球へのエネルギー伝送施設に送られる。エネルギー伝送施設は月の表側の赤道沿いに複数箇所配置されており、そこで電力がマイクロ波やレーザに変換されて地球に送られる。地上の施設では、マイクロ波やレーザは電気や熱源に変換され、電力網への供給、海水の淡水化ならびに水素製造等に使われる。図一2に月からのエネルギー伝送模式図を示す。



図一2 月からのエネルギー伝送模式図

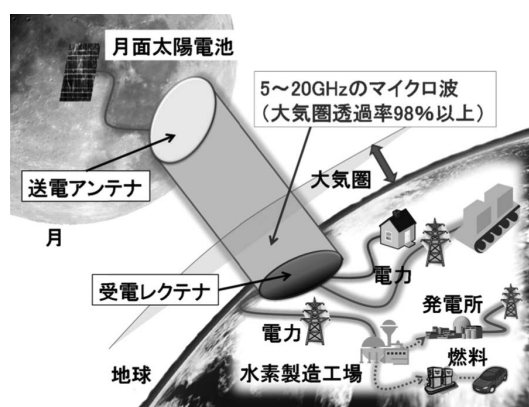
(2) マイクロ波エネルギー伝送

現在 SSPS で検討されているマイクロ波エネルギー伝送システムでは、5 GHz 帯の使用を想定している。また正確な伝送方向制御の実現を目指し、地上の受電施設からのパイロット信号を伝送施設で受信してその到来方向を推定するレトロディレクティブ技術やフェーズド・アレイによる送電技術を中心とした研究が進められている^{7)~9)}。月太陽発電においてもこれらとほぼ同様のシステムが採用される。ただし、伝送距離は SSPS（静止軌道）の場合の 3 万 6 千 km の約 10 倍の 38 万 km と長くなるため、より直線性の高い帯域（20 GHz 等）を使用する。

マイクロ波は大気中の水分の影響を比較的受けにくいいため、その受電施設（レクテナ：マイクロ波直流変換アンテナ）は緯度の高い地域まで設置が可能である。都市周辺で電力網に接続して電力供給するばかりでなく、余剰電力で水を電気分解して水素を製造する。この水素は、月が見えない時間帯にエネルギーを確保するための燃料電池のほか、化石燃料の代替燃料として使われる。

伝送エネルギー密度（電力束密度）に関してはさらなる検討を要するが、現状の構想ではレクテナ周辺部で 1 mW/cm^2 （電波法規制値）程度、中心部ではその数十倍を想定している。いずれにしても、マイクロ波を横切る鳥や飛行機等に深刻な影響を与えないレベルを想定している。

マイクロ波によるエネルギー伝送イメージを図一3に示す。



図一3 マイクロ波エネルギー伝送イメージ

(3) レーザエネルギー伝送

本構想では、固体レーザによるエネルギー伝送を想定した。我が国では、太陽光を直接レーザに変換する高効率の太陽光励起レーザの研究も進められているが、この方式は月の表側でのみ利用可能となることから、本構想では従来通り、太陽光発電後にレーザを発

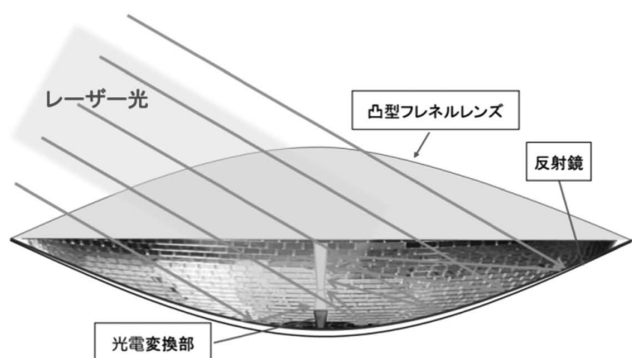
生させる方式を採用した。

レーザにはなるべく大気透過率の高い近赤外領域を使用するが、それでも雲などの影響を受けやすいため、雲の少ない地球の赤道付近の洋上にレーザ集光施設を設ける（図—4）。ここでは海水を脱塩して淡水を作るほか、それをさらに電気分解して水素を製造する。大気によるレーザの「揺らぎ」を考慮し、長径約1,000 m の楕円型集光施設とした。凹面状に設けた可動反射鏡を用い、月からのレーザを中央に設置した光電変換素子に集光させる構造となっている。レーザを効率よく集め、反射鏡の汚染を避けるために、反射鏡の上部にはフレネルレンズとハーフミラーを組み合わせた天蓋を設けた。この施設にはレーザばかりでなく、昼間の太陽光も入るため、光電変換素子は二つのエネルギー供給源をもつことになる。高温になる光電変換素子は冷却され、その過程で得られる高温の冷媒を用いて熱発電も行えるようになっている（図—5）。また、淡水化した海水は水素燃料製造ばかりでなく、そのまま水として生活や工業用、食物生産等に用いられる。これらの水素や水は、パイプラインあるいは水素駆動タンカーによって各国に供給される。

レーザの強度は、地表での太陽エネルギー強度の数倍程度を想定している。動物の皮膚等に瞬間的に熱損傷を与えるレベルでは無いが、（通常でも太陽を直視できないように）直視した場合の目への影響は避けら



図—4 洋上のレーザ集光施設

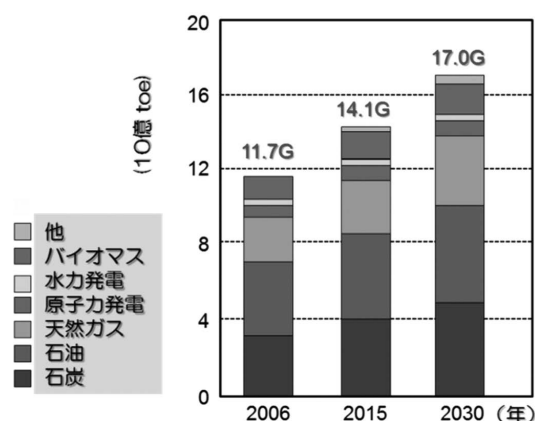


図—5 レーザ集光の仕組み

れないため正確な伝送制御を行うと共に、周辺に動植物が少ない洋上に集光施設を設けた。

4. 月発電所の規模

IEA (International Energy Agency) がまとめた World Energy Outlook 2008 によると、2030 年の全世界のエネルギー消費予測は 170 億 toe (原油換算トン) であり、その約 80% を化石燃料 (石炭、石油、天然ガス) が占めると予測している (図—6)¹⁰⁾。



図—6 全世界のエネルギー消費予測 (IEA)

本構想では、当面の目標としてこの 170 億 toe を月の発電で賄い、埋蔵資源のエネルギー利用は一切停止するとともに、再生可能エネルギーは月太陽発電のバックアップ用として維持・運用することを想定した。OECD の検討チームが提案した変換効率を考慮すると、170 億 toe を賄うためには 8.8 TW (テラワット) の出力に相当する発電所が必要となる。これは、現在の 100 万 kW 出力の原子力発電所 (稼働率 70% と想定) でおよそ 1 万 3 千基に相当する。

一方、月での発電から地上で利用するまでの伝送効率を検討すると、表—1 および表—2 のようになる。月面でも現状と同程度の技術が使えること、ならびにマイクロ波とレーザが総エネルギー量の半分ずつを供給することなどを仮定すると、総合的なエネルギー伝送効率は約 4% $(=(5.82+2.20)/2)$ となる。したがって、地上で 8.8 TW の電力を得るためには、月面の太陽電池には 220 TW のエネルギー入力が必要となる。これは、月面での太陽エネルギー密度 (太陽定数) を 1.37 kW/m^2 とした場合、400 km 四方の太陽電池で賄える量となる。太陽電池の幅を 400 km とした場合、実際には太陽光が照射する領域面積は 400 km 四方より広がるが、その分は設計マージンとして効率の算定には加えていない。

表—1 マイクロ波エネルギー伝送効率

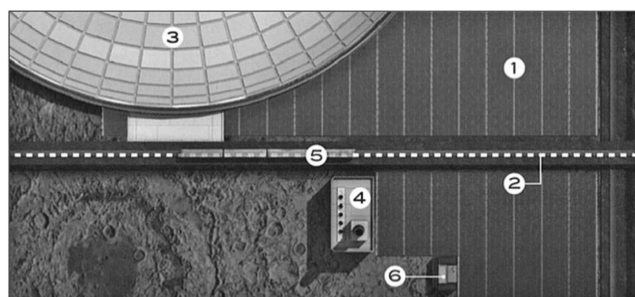
位 置	効 率 (%)	
宇宙	月蝕の影響	99.9
	太陽光集光率	95
	太陽光→電力変換効率	17
	月面電力伝送効率	85
	電力→マイクロ波変換効率	75
宇宙～地上	大気透過率	98
地上	マイクロ波→電力変換効率	76
	商用電力網への接続効率	95
全体稼働率		80
総合効率		5.82

表—2 レーザエネルギー伝送効率

位 置	効 率 (%)	
宇宙	月蝕の影響	99.9
	太陽光集光率	95
	太陽光→電力変換効率	17
	月面電力伝送効率	85
	電力→レーザ変換効率	35
宇宙～地上	大気透過率	98
地上	レーザ→電力変換効率	65
	電気分解効率	90
全体稼働率		80
総合効率		2.20

5. 月発電所の施設と建設

月面に設置される主な施設を図—7に示す。月太陽電池（ソーラーベルト）は最大幅400 km、全長11,000 km（赤道1周）の壮大な建造物となる。ベルト中央には赤道に沿って送電ケーブルと輸送ルートが設置される。また、その周辺（月の表側）には地球へのエネルギー伝送のためのマイクロ波送電アンテナとレーザ送光装置が設置される。



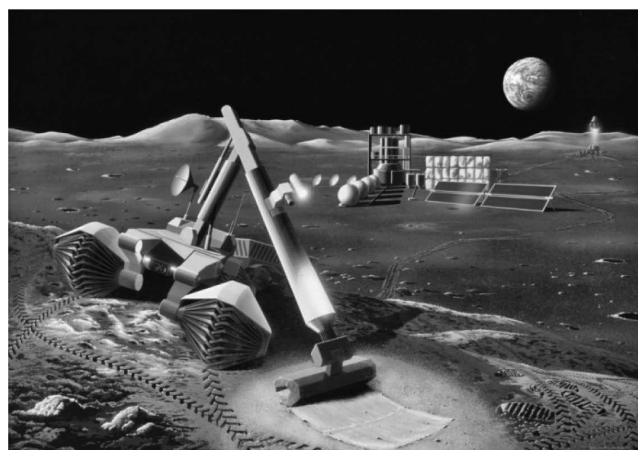
①月太陽電池 ②送電ケーブル ③マイクロ波送電アンテナ ④レーザ送光装置 ⑤ 月赤道上輸送ルート ⑥月赤道式太陽電池生産プラント

図—7 月発電所の施設構成

月面は地上に比べ起伏が大きく陸地だけの地形であるため、太陽電池の設置には平坦な場所を選び、建設の難しい起伏の激しいクレータの縁付近は避ける。

地球から月への輸送コストを削減し、維持管理を容易にするために、月発電所の建設に必要な資材の大部分は月面で調達される。特に構成要素の大部分を占める太陽電池や電力輸送用の金属材料あるいは土木建築資材などにおいて、月資源の利用が期待される。

月面での人の滞在には、生命維持のための複雑なシステムが適切な規模で必要となる。そのため月発電所の建設では、作業の安全性やコストを考慮して可能な限りロボット技術が活用される（図—8）。建設ロボットは地上で製造したものを月に輸送する。ごく少数の人間が交代で短期間の月面滞在をしながらロボットの管理と維持を行う必要もあるが、基本的には、作業の大部分は地上からの遠隔操作で行われる。地上から直視できる月の表側ではロボットと直接通信を行い、月の裏側では月軌道上の通信リレー衛星を利用する。これにより、地上の運用基地から24時間連続で工事の実施・管理が可能となる。



図—8 月資源採取ロボット

6. 構想実現に向けた技術検討

本構想の実現には、大きく分類して送電技術と月面建設技術が鍵となる。

送電技術に関しては、1968年の米国ピーター・グレイザー博士による宇宙太陽発電（Space Solar Power, SSP）の提唱以来、各国の研究者による構想提案あるいはエネルギー伝送や太陽電池に関連した技術的な検討が進められている。それらの中でも1990年代に実施された宇宙飛行体を用いたマイクロ波によるエネルギー伝送実証は、我が国が世界に誇るべき成果といえる¹⁾。近年では、宇宙航空研究開発機構（JAXA）と一般財団法人宇宙システム開発利用推進機構（旧 USEF）を中心として、基礎的な技術の確立から宇宙実証レベルまで、要素技術とシステム開発の

両面で日本全体の技術力を集結した検討が進められている³⁾。本構想の実現においては、これらの検討成果は不可欠となる。

一方月面建設技術に関連しては、筆者のグループにおいて月資源利用や月面建設さらには月面居住に必要なシステム等についての検討を1980年代後半から進めている。これらの検討は、アポロ計画によって得られた月に関する様々なデータを基盤としたものである。既に、月資源からの酸素や水あるいは建設資材の製造に関する大まかな技術見通しが得られている¹¹⁾。しかし、本構想の重要な構成要素である太陽電池に関しては、その月面での製造、発電効率、配線、維持・管理等に関連したさらなる検討が必要である。

このような状況ではあるが、2020年代には月面の有人拠点建設や宇宙からの電力伝送実験などが計画されており、その後の技術は大きく進展すると期待される。したがって、2035年には月発電所の建設着手が可能になると思われる。

7. 月太陽発電構想がもたらす未来社会

月太陽発電構想が実現すると、地球が埋蔵する化石燃料を燃焼利用することが無くなり、クリーンな電力と水素のみを利用するため、地球環境が大幅に改善される。同じくクリーンなエネルギーとして現在開発・運用されている自然再生可能エネルギーは、月からのエネルギーとの相互補完により、さらなる安定供給が実現する。また月からの潤沢なエネルギーを利用すれば、過去の廃棄物を再資源化することが可能となり、希少金属などは完全リサイクルされる。

地球は地表面積の約70%が水で覆われているにも拘らず、飲み水として利用できる量はその0.01%と言われており、世界中には安全な水が十分に得られない地域が沢山存在している。本構想によって作られた淡水は、飲料水や食料育成用としてこれらの地域に供給される。

さらに本構想の最大の特徴は、世界中のエネルギー取得機会を均等化することにある。地下資源を持たない国でも均等にエネルギーを取得できるようになり、エネルギー覇権争いなどは地上から消滅する。

8. おわりに

本報で紹介した月面のメガソーラー発電（ルナリング）は、現状ではまだ単なる構想であり、本誌に掲載されている他の報文とは大きく趣を異としている。その実現には、先に述べた技術検討に加え世界中からの了解と経済的な協力が不可欠となる。また、月の利用や月発電所の建設・運用に関する国際法的な整備も必要になる。このように山積する課題を抱えた構想ではあるが、いずれも解決できない課題では無いと信じている。冒頭に述べたような地球全体が抱えている課題を解決するというマイナスからゼロを目指すだけではなく、月からのクリーンで豊富なエネルギーを人類の更なる発展に向けプラスに活用することが、本構想の最大の目標である。地球環境、省資源、省エネルギーなどの概念は未来永劫に亘って重要であることに変わりはないが、そればかりを言われ続けてきた若い世代の人たちが、将来にもう少し明るい未来を描けるような構想を提案し、その実現に向けた努力を継続していきたい。

JICMA

【参考文献】

- 1) 松本紘：「宇宙開拓とコンピュータ」、共立出版、1996.10
- 2) 内閣府：「宇宙基本計画（平成25年1月宇宙開発本部決定）」、<http://www8.cao.go.jp/space/plan/plan.pdf>, 2013.1
- 3) 森雅裕他：「JAXAにおけるSSPS実現性検討」、第51回宇宙科学技術連合講演会講演集、2007.10
- 4) 清水建設パンフレット：クリーンエネルギーイノベーション「月太陽発電 LUNA RING」、<http://www.shimz.co.jp/theme/dream/lunaring.html>, 2009.5
- 5) 松本紘：「21世紀の新エネルギー源「宇宙太陽発電」—人類文明飛躍のために—」、京都大学Webサイト、http://www.rish.kyoto-u.ac.jp/~matsumot/opinion/sps_99.htm, 1999.11
- 6) Lunar Sourcebook : A User's Guide to the Moon, Cambridge University Press, 1991
- 7) 中村修治他：「マイクロ波電力伝送試験（地上）の概要」、第15回SPSシンポジウム講演要旨集、PP.2-7. 2012.9
- 8) 津山祥紀他：「薄型化送電モジュールの開発」、第15回SPSシンポジウム講演要旨集、PP.8-11. 2012.9
- 9) 石川峻樹他：「パネル構造をもつSPSのためのパネル位置推定を用いた位相補正技術の研究2」、第15回SPSシンポジウム講演要旨集、PP.2-7. 2012.9
- 10) International Energy Agency : World Energy Outlook 2008 Edition, 2009
- 11) 清水建設宇宙開発室：「月へ、ふたたび—月に仕事場をつくる」、オーム社、1999.10

【筆者紹介】

金森 洋史（かなもり ひろし）
清水建設
技術研究所 高度空間技術センター
宇宙・ロボットグループ
グループリーダー

